

# 2016

## 森林集水區經營研討會論文集

### Proceedings of Symposium on 2016 Forest Watershed Management

#### 時間

105年5月25日(星期三)

#### 主辦機關

行政院農委會林業試驗所

#### 協辦機關

國立台灣大學  
國立中興大學  
國立師範大學  
國立屏東科技大學  
華梵大學

#### 地點

台北市南海路53號 林業試驗所  
行政大樓4樓會議廳



封面(達觀部落甜柿園 林壯沛 提供)

## 目 錄

議程表.....	i
序(農委會林業試驗所所長 黃裕星).....	iii

## 講 題

1. 不同土地利用型態之淺層土壤孔隙蓄水能力之研究-以蓮華池農村地區為例.....1 STUDY ON WATER STORAGE CAPACITY OF THE SURFACE SOIL PORE OF DIFFERENT LAND-USE TYPES:A CASE STUDY IN LIEN-HUA-CHIH RURAL AREA (曾俊偉 Tseng Chun-Wei、陳明杰 Chen Ming-Chieh、曾聰堯 Tseng Tsung-Yao、林介龍 Lin Chieh-Lung)	
2. 2015 年蘇迪勒颱風強降雨事件中源頭集水區土壤水分之時空變化.....11 SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS IN SOIL WATER DYNAMICS IN A HEADWATER CATCHMENT DURING TYPHOON SOUDELOR IN 2015 (梁偉立 Liang Wei-Li、李勝倫 Li Sheng-Lun)	
3. 溪頭孟宗竹林之竹桿年齡對蒸散量的影響.....25 EFFECT OF CULM AGE ON TRANSPIRATION IN A MOSO BAMBOO FOREST, XITOU, TAIWAN (林松駿 Lin Song-jun、久米朋宣 Tomonori Kume、羅明慧 Sophie Laplace、梁偉立 Liang Wei-li)	
4. 應用臨前降雨指數模式推估集水區暴雨流量歷線.....41 APPLICATION OF AN ANTECEDENT PRECIPITATION INDEX MODEL TO STORMFLOW HYDROGRAPH ESTIMATION OF WATERSHEDS IN TAIWAN (盧惠生 Lu Hui-sheng、林 壯沛 Lin Jaung-pey、林介龍 Lin Chieh-Lung)	
5. 以基流量推估森林集水區之水資源涵養功能.....63 ESTIMATION OF THE ABILITY OF FOREST WATERSHED FOR WATER CONSERVATION AND REGULATION BY THE BASEFLOW APPROACH (陸象豫 Lu Shiang-Yue)	
6. 太麻里研究中心生態育林效益監測.....71 EFFECTIVENESS MONITORING ON ECOLOGICAL SILVICULTURAL PRACTICES OF TAIMALI RESEARCH CENTER,TFRI (劉一新 Liu I-Hsin)	
7. 租地造林地栽植果樹對水土流失影響之研究.....85 STUDY LEASED AFFORESTATION LAND PLANTING FRUIT TREE ON INFLUENCE OF SOIL LOSSES (林壯沛 Lin Jaung-pey、王秋嫻 Wang Chiu-hsien、林介龍 Lin Chieh-Lung)	
8. 光度對咖啡生長的形態與生理影響 — 以惠蓀林場咖啡園為例.....105 EFFECTS OF DIFFERENT LIGHT ON THE MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL	

RESPONSES OF COFFEA ARABICA—A CASE STUDY IN HUI-SUN EXPERIMENTAL FOREST (陳奕宏 Chen Yi-hong、劉瓊霖 Liu Chiung-pin)

9. 淡水水源里居民對水資源的環境識覺之探討.....119  
PUBLIC ENVIRONMENTAL PERCEPTION TOWARD WATER RESOURCES IN SHUIYAN COMMUNITY IN DONSHUI (錢宛鈺 Chien Wan-Yu、廖學誠 Liaw Shyue-Cherng)
10. 知本森林遊樂區入口段利用航空攝影拼接正射影像精度之探討.....145  
USING THE TECHNOLOGY OF AERIAL PHOTOGRAPHY SPLICED TO STUDY THE ORTHO-PHOTO ACCURACY ON ENTRANCE TERRAIN OF CHIHPEN FOREST RECREATION AREA(許中立 Hsu Chung-Li、蔡翰陞 Tsai Han-Sheng、郭子銘 Kuo Jun-Ming、陳淑慈 Chen Shu-Tzu)
11. 集水區潛在深層崩塌區位之劃定.....161  
DELINEATION OF POTENTIAL DEEP SEATED LANDSLIDE IN A WATERSHED (林昭遠 Lin Chao-Yuan)
12. 試驗林集水區之崩塌潛勢評估模式應用和風險管理.....183  
AN APPLICATION OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY EVALUATING MODEL AND RISK MANAGEMENT OF EXPERIMENTAL WATERSHED (黃瓊璘 Huang Chiung-Piau、謝漢欽 Hsieh Han-Ching)
13. 水里溪上游崩塌潛勢區地質特性之研究.....203  
2016 STUDY ON POTENTIAL COLLAPSE AREA GEOLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE UPSTREAM OF SHUILI STREAM AREA (曾俊偉 Tseng Chun-Wei、黃瓊璘 Huang Chiung-Piau、王豐仁 Wang Feng-Jen)

# 「2016 森林集水區經營研討會」議程表

日期：2016 年 5 月 25 日(星期三)

地點：台北市南海路 53 號 (林業試驗所行政大樓 4 樓會議廳)

時 間	議 程		
08:30-09:00	報 到		
09:00-09:10	開 幕 致 詞 (林試所 黃裕星所長)		
時 間	講 題	主持人	
09:10-09:35	不同土地利用型態之淺層土壤孔隙蓄水能力之研究-以蓮華池農村地區為例(曾俊偉、陳明杰、曾聰堯、林介龍)	林試所 退休研究員 盧惠生	
09:35-10:00	2015 年蘇迪勒颱風強降雨事件中源頭集水區土壤水分之時空變化(梁偉立、李勝倫)		
10:00-10:25	溪頭孟宗竹林之竹桿年齡對蒸散量的影響(林松駿、久米朋宣、羅明慧、梁偉立)		
10:25-10:45	茶 敘 / 交 流		
10:45-11:10	應用臨前降雨指數模式推估集水區暴雨流量歷線(盧惠生、林壯沛、林介龍)	林試所 研究員 黃瓊瓏	
11:10-11:35	以基流量推估森林集水區之水資源涵養功能(陸象豫)		
11:35-12:00	太麻里研究中心生態育林效益監測(劉一新)		
12:00-13:00	午 餐		
13:00-13:25	租地造林地栽植果樹對水土流失影響之研究(林壯沛、王秋嫻、林介龍)	中興大學 水保系教授 林昭遠	
13:25-13:50	光度對咖啡生長的形態與生理影響 — 以惠蓀林場咖啡園為例(陳奕宏、劉瓊霏)		
13:50-14:15	淡水水源里居民對水資源的環境識覺之探討(錢宛鈺、廖學誠)		
14:15-14:40	知本森林遊樂區入口段利用航空攝影拼接正射影像精度之探討(許中立、蔡瀚陞、郭子銘、陳淑慈)		
14:40-15:00	茶 敘 / 交 流		
15:00-15:25	集水區潛在深層崩塌區位之劃定(林昭遠)	屏東科技大學 水保系主任 許中立	
15:25-15:50	試驗林集水區之崩塌潛勢評估模式應用和風險管理(黃瓊瓏、謝漢欽)		
15:50-16:15	水里溪上游崩塌潛勢區地質特性之研究(曾俊偉、黃瓊瓏、王豐仁)		
16:15-16:50	綜合座談及討論		林試所 集水區經營組 組長游漢明



# 森林集水區經營研討會論文集

## 所長序

森林集水區經營課題範疇廣大，多年來受到國內學界重視，也累積了無數研究論文及專著，對於山高坡陡、降水集中的臺灣森林經營而言，貢獻之深不言可喻。

近年來，由於國家財政困窘，林業科學研究經費逐漸緊縮，加上國內相關學者陸續退休，集水區經營相關研究議題有日漸失焦的趨勢。臺灣的森林生態系經營，在自然環境部分與集水區經營的範圍幾乎重疊；集水區經營的良窳，也直接反映出生態系經營之成敗。在晚近的案例中，莫拉克颱風曾造成全島森林集水區約3萬公頃的新生崩塌地，除了地上部的林木與地表植被、地下部的根系與土壤完全流失外，也導致林地中所有野生動植物及溪流中的生物一次性的滅絕，亦造成中下游城鎮、海岸、港口重大的生命與財產損失。

森林生態系經營特別強調生物多樣性保育，但當集水區發生重大崩塌災害時，該生育地的生物多樣性滅絕是難以在短期間內復原的；而崩塌造成的大量碳排放，也可能加劇氣候變遷的惡化，因而形成整個森林環境動態的惡性循環，最終導致森林的劣化演替。這是令人憂心的現象，但也凸顯了對相關議題實務性科研的迫切需求。

今年的研討會看到年輕世代的研究學者，在資深學者的帶領下投

入研究行列，也提出了成果報告，令人感到欣慰。自然科學的探究是無止境的，任何人終其一生都無法究明森林演替的奧秘，必須長期累積實務調查資料及科學歸納或演繹理論，才能稍窺自然法則之堂奧。期許我們的研究同仁與學者群，持續堅定信念，投注心力為我國的森林健康而努力，為臺灣創造長治久安、永續發展的穩固基石。

林業試驗所 所長

黃裕星 謹識

2016年5月25日

## 不同土地利用型態之淺層土壤孔隙蓄水能力之研究- 以蓮華池農村地區為例

曾俊偉<sup>1\*</sup> 陳明杰<sup>2</sup> 曾聰堯<sup>3</sup> 林介龍<sup>1</sup>

**【摘要】**土壤顆粒之幾何排列，形成各種大小不一的土壤孔隙，其組成會影響水分在土壤中傳導及蓄留的過程。土壤孔隙率大小可瞭解土壤疏鬆程度及水分與空氣所能利用的體積多寡。本研究目的為瞭解淺層土壤孔隙之蓄水能力，於蓮華池農村地區選擇檳榔及果樹園、坡地檳榔園、廢棄果園及果園等 4 種當地常見之土地利用型態，以土壤粗孔隙率估算每公頃蓄水體積，探討不同土地利用方式對淺層土壤水資源涵養量之影響。研究結果顯示，檳榔及果樹園試驗區為最佳，其次為廢棄果園、坡地檳榔園、果園。

**【關鍵詞】**土地利用、土壤粗孔隙率、水資源涵養

## STUDY ON WATER STORAGE CAPACITY OF THE SURFACE SOIL PORE OF DIFFERENT LAND-USE TYPES:A CASE STUDY IN LIENHUACHIH RURAL AREA

Chun-Wei Tseng<sup>1\*</sup> Ming-Chieh Chen<sup>2</sup> Tsung-Yao Tseng<sup>3</sup> Chieh-Lung Lin<sup>1</sup>

**【Abstract】** Geometric arrangement of soil particles form various sizes of soil pores, the composition will affect the processes of conduction and accumulation of water in the soil. Soil porosity value can understand the degree of loose soil , water and air take advantage of the volume of the amount. The purpose of this study in the understanding of water storage capacity of the soil pore. To select the betel nut and fruit orchards, slopes betel, abandoned orchards and orchards etc., 4 kinds of common local land-use

---

<sup>1</sup>行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組助理研究員，\*通訊作者。

Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. \*Corresponding Author. E-mail : a1211@tfri.gov.tw

<sup>2</sup>國立臺灣大學森林環境暨資源學系教授。

Professor, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University.

<sup>3</sup>行政院農業委員會林業試驗所蓮華池研究中心助理研究員。

Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

types in Lien-Hua-Chih rural areas. Calculate water volume per hectare with soil coarse porosity, explore the effects of water resources conservation capacity of different land-use type in surface soil. The results showed that the betel nut and fruit orchards test area is the best, followed by the abandoned orchards, slopes betel nut groves, fruit orchards.

**【Key words】** Land-use, soil coarse porosity, water resources conservation.

## I、前言

土壤除了為植物生長基盤之外，土壤顆粒之幾何排列，所形成各種大小不一的土壤孔隙，其組成對於水分在土壤中傳導及蓄留的過程，有極大的影響。土壤之大孔隙為土壤團粒間的空隙，其影響為水分滲透的快慢，而小孔隙則為團粒內部的毛細孔，具有保水蓄水能力（萬鑫森譯，1987）。對於土壤孔隙大小的區分，本研究係使用壓力排水系統(Pressure extractor system)分析，試驗時給予壓力鍋內的土壤試體一定之氣壓力使土壤試體排水，將土壤試體受到不同階段之氣壓力所排出的水量除以土壤試體體積，可求得相當於壓力水頭條件下之孔隙率，並將之區分為大孔隙(壓力水頭 $> -3\text{cm}$ ， $pF < 0.48$ )，中孔隙(壓力水頭介於 $-3\text{cm} \sim -100\text{cm}$ 之間， $0.48 < pF < 2.0$ 之間)，小孔隙(壓力水頭介於 $-100\text{cm} \sim -500\text{cm}$ 之間， $2.0 < pF < 2.7$ 之間)及細孔隙(壓力水頭 $< -500\text{cm}$ ， $pF > 2.7$ )（陳明杰，2013）。大孔隙之水分屬於重力水狀態，水分因重力快速向下滲透流動，故大孔隙率越高表示地表的滲透能力越佳。細孔隙中的土壤水分因毛管吸力作用或擴散作用，移動極為緩慢。中孔隙及小孔隙之土壤水分特性則介於上述兩者之間，並包含一部分重力水及毛管移動水，中孔隙及小孔隙兩者合稱為粗孔隙，其與水資源涵養有直接關係（竹下，1985），為日本林野廳現行評估森林整備工作良窳的指標（真下，1973；有光，1984）。

土壤孔隙率為瞭解土壤顆粒幾何排列的疏鬆程度，以及土壤中水分與空氣所能利用的體積多寡，為土壤構造的重要參數之一，當土壤顆粒全為團粒構造時，土壤孔隙率可達到最大值，但現實狀況並非如此。當土壤受到外力作用的干擾，土壤孔隙率會隨著外力的增加而減少（李長寶，2014）。農村地區為不同目的之農業生產而有不同的土地利用型態，陳明杰（1993）於蓮華池地區研究 8 種不同林相之土地利用型態，分析土壤孔隙分佈特性，分別採取 0~20cm、20~40cm、40~60cm 等 3 種不同深度之土壤不擾動試體，不同深度之土壤孔隙組成特性以粗孔隙率的

差別予以表示，並以土壤粗孔隙率探討林地土壤對於水資源涵養的功能，粗孔隙率值越大，表示水源涵養能力越佳。研究結果發現深度 0~20cm 的土壤有較大的粗孔隙率，亦說明該地區淺層土壤之水分涵養能力較佳。曾俊偉等（2015）於蓮華池地區針對天然林、人工林及人工草地等 3 種不同土地利用型態，研究其淺層土壤孔隙率之特性，研究結果發現不同土地利用型態會影響土壤，使其具有不同的物理特性。

本研究選取 4 種蓮華池農村地區之常見的土地利用型態，分別為檳榔及果樹園、坡地檳榔園、廢棄果園及果園等 4 種型態，在淺層 30cm 之深度內取樣蒐集及分析土壤物理環境資料，包括乾總體密度及各種孔隙率分析等，探討蓮華池農村地區不同之土地利用型態其對土壤孔隙蓄水能力之影響。

## II、材料與方法

### (I) 試驗區概況



Fig 1. Sampling Location

圖 1. 取樣位置圖

## 地質與土壤：

蓮華池地區位於南投縣魚池鄉，其試驗集水區為林業試驗所設立的 16 處試驗集水區之一，海拔高度介於 576-925m 之間，屬中低海拔高度地區，總面積 461ha。取樣位置如圖 1 所示。地質屬於新生代北部第三紀沉積岩，由暗灰色頁岩和泥質砂岩互層構成。砂岩可分為細粒及粗粒兩大類，土壤為趨向紅化作用之黃壤，表層為灰褐色砂質粘壤土，底土為棕黃色黏土並夾有岩石碎塊與團狀構造物，土壤深厚，部分地區可達 1.5 公尺以上(葛錦昭等，1978)。

## 氣候特性：

試驗區年平均降雨量約2285.0mm，月降雨量分布極不平均，乾濕季節分明，4-9月為濕季，降雨量佔全年的84.08%，10月至翌年3月降雨量佔全年的15.92%。年平均氣溫20.8℃，年溫差10.4℃，年平均相對溼度為87.1%(陸象豫等，2008)。降雨型態主要為3、4及5月份的鋒面雨和夏季對流雨與颱風帶來之暴雨（黃正良，2013）。

## 試驗區植群概述：

### 1. 檳榔及果樹園試驗區：

試驗區內之檳榔及果樹平均約 20 年生以上，以平台階段方式栽植，樹冠鬱閉度約 80%，上層木主要優勢種類為檳榔(*Areca catechu*)、橄欖(*Olea europaea*)、酪梨(*Persea americana*)及香蕉(*Musa sapientum*)；地被覆蓋度約 95%，地被植物主要為鬼針草(*Bidens pilosa*)，且多有枯枝落葉敷蓋。因已無收穫該區之產物，平時少有經營管理行為。

### 2. 坡地檳榔園試驗區：

試驗區位於新山林道內，檳榔平均約 15 年生以上，為本所設置之陡、中、緩坡檳榔試區，緩坡約 25 度、中坡約 35 度、陡坡約 45 度，檳榔樹直接栽植於斜坡面上，樹冠鬱閉度約 40~50%，上層木主要優勢種類為檳榔(*Areca catechu*)；地被覆蓋度僅 10-15%，地被植物主要為鬼針草(*Bidens pilosa*)、雙花虻蜞菊(*Wedelia biflora*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)等，多集中生長於試區下坡處。該區主要為試驗用途，平時無經營管理。

### 3. 廢棄果園試驗區：

試驗區之廢棄果園已廢棄達 20 年以上，以平台階段方式栽植，樹冠鬱閉

度約約 65-75%，上層木主要優勢種類為梅樹(*Prunus mume*)、蓮霧(*Syzygium samarangense*)及芒果(*Mangifera indica*)，胸高直徑 15-20cm；地被覆蓋度約 70-80%，地被植物主要為冷清草(*Elatostema lineolatum*)、月桃(*Alpinia zerumbet*)、大武蜘蛛抱蛋(*Aspidistra daibuensis*)及菝契(*Smilax china*)等。因該果園區域已荒廢，已無經營管理。

#### 4. 果園試驗區：

試驗區之果樹為平均為 25 年生以上，以平台階段方式栽植，樹冠鬱閉度約 60-70%，上層木主要優勢種類為桃接李(*Prunus salicina Lindl*)及水蜜桃(*Prunus persica*)；地被覆蓋度約 75-85%，地被植物主要為鬼針草(*Bidens pilosa*)和紫花霍香薊(*Ageratum houstonianum*)。平時常有人為經營管理。

註：經營管理係指施肥、除草、修枝、收貨產物等人為活動。

### (II)研究方法

本研究採用陳明杰等(2013)發表的孔隙區分標準進行實驗，使用壓力鍋測定法分析之不擾動土樣土壤孔隙率，定義大孔隙率為壓力水頭  $> -3\text{cm}$  條件下測得之孔隙率。粗孔隙率包括中孔隙率及小孔隙率，為壓力水頭  $-3$  至  $-500\text{ cm}$  條件下，所測得之孔隙率，其中壓力水頭  $-3$  至  $-100\text{ cm}$  為中孔隙率，壓力水頭  $-100$  至  $-500\text{ cm}$  為小孔隙率，而壓力水頭  $< -500\text{ cm}$  為細孔隙率。另外，由於壓力鍋測定法之最小壓力水頭相當於  $-10\text{ cm}$ ，爰將土壤含水率與壓力水頭視為線性關係，從飽和含水率及壓力水頭為  $-10\text{ cm}$  時測得之含水率，以內插法求出壓力水頭相當於  $-3\text{cm}$  的含水率，從而計算壓力水頭  $> -3\text{cm}$  的大孔隙率。

土壤以土芯採樣法採取不擾動試體，每一試驗區取 7 個樣點，每一樣點取樣深度分別為  $0-10\text{cm}$ 、 $10-20\text{cm}$ 、 $20-30\text{cm}$ ，利用採樣鋼圈(內徑  $5\text{ cm}$ 、高  $5\text{ cm}$ )分別於深度  $10$  公分之間距各取一土樣，再將土樣試體密封後攜回實驗室使用壓力鍋測定法(壓力排水系統)作以下項目的測定。

#### 1. 含水率、孔隙率、總體密度

- (1) 將採樣鋼圈取回之不擾動土樣修整後秤重為  $M_0$ ，試體體積為  $V_s$ 。
- (2) 將試體用紗布包覆，靜置於水中  $72$  小時讓試體達到飽和。取其此時的含水率為飽和含水率，取試體秤重為  $M_f$ 。
- (3) 將飽和試體放置在陶瓷板上後再放置於壓力鍋中，將其試體依照不同氣

壓力值加壓排水，壓力水頭分別為-10 cm、-100 cm、-500 cm，加壓後從壓力鍋拿出試體秤重分別為  $M_{10}$ 、 $M_{100}$ 、 $M_{500}$ 。

(4) 再將試體放入烘箱中，以 105°C 烘乾 24 hr 後，秤重為  $M_d$ 。

(5) 再將上述實驗結果各項土壤物理性質計算如下：

$$\text{總體乾密度： } \rho_b = \frac{M_d}{V_s}$$

$$\text{總孔隙率： } f = \frac{M_f - M_d}{V_s} \times 100\%$$

$$\text{現地體積含水率： } \theta = \frac{M_0 - M_d}{V_s} \times 100\%$$

假設在不同壓力水頭之間孔隙率為  $f_a$

$$f_a = \left( \frac{M_f - M_d}{V_s} - \frac{M_a - M_d}{V_s} \right) \times 100\% \quad (a = -10, -100, -500)$$

## 2. 粒徑分析

粒徑分析採用篩分析法和鮑氏比重計法(Bouyoucos hydrometer method)，求得土體中之砂粒、粉粒及粘粒所占質量比例後，以美國農業部三角座標分類法(System of US Department Agriculture, USDA)對照土壤質地三角圖進行土壤質地分級。

## 3. 比重：

- (1) 取氣乾土 50 gm 使通過 8 號篩，土樣烘乾後置於乾燥器中冷卻至室溫。
- (2) 比重瓶烘乾後自乾燥器中冷卻，取出比重瓶，秤其重量  $M_b$ 。
- (3) 瓶中裝入大約 15gm 土樣，秤其重量  $M_{bs}$ 。
- (4) 土壤重量： $M_s = M_{bs} - M_b$  表示。
- (5) 將比重瓶加水至半滿，置於酒精燈上加熱，經常搖動使其充分混合均勻並趕出所有氣泡，沸騰後 15min 即可以停止加熱。
- (6) 置室內冷卻至室溫後，加滿蒸餾水，秤其重量  $M_{sw}$ 。
- (7) 將比重瓶洗淨後填滿蒸餾水後拭乾瓶外，秤其重量  $M_w$ 。
- (8) 土壤真比重： $G_s = M_s / (M_s + M_w - M_{sw})$ 。

## III、結果與討論

### (I) 總體密度、比重、粒徑分析及土壤質地

4 個試驗區之土壤總體密度、比重及粒徑分析結果取平均值如表 1 所示。試驗區之土壤總體密度平均值大小順序為檳榔及果樹園>果園>廢棄果園>坡地檳榔園。總體密度表示土壤之密實程度，與土壤質地、結構及有機物含量等自然因子有關，人為干擾例如耕土或踐踏亦會影響(陳明杰, 2013)。總體密度越大則密實程度越高，且土壤密實程度通常會隨土壤取樣深度增加而增加。根據曾俊偉等(2015)調查蓮華池地區之天然林平均總體密度為  $1.03 \text{ g/cm}^3$ 、人工林平均總體密度為  $1.16 \text{ g/cm}^3$ ，人工草地平均總體密度為  $1.59 \text{ g/cm}^3$ 。相較於本研究之 4 個試驗區總體密度而言，其最小值為坡地檳榔園  $1.62 \text{ g/cm}^3$ ，但與天然林比較，仍至少為天然林之 1.57 倍以上，為人工林之 1.39 倍以上，甚至高於經過夯實之人工草地。研判原因為林地土壤有機質較 4 個試驗區多，土壤團粒化作用使土壤較為疏鬆的之外，人為之經營管理行為對土壤的干擾最為嚴重。

一般土砂比重約為 2.65，而有機質的比重則小於 2.65，有機質含量越多則比重越小(陳明杰等, 2013)。曾俊偉等(2015)調查蓮華池地區之天然林比重為 2.60、人工林比重為 2.67 及人工草地為 2.69，本研究之 4 個試驗區土壤比重以檳榔及果樹園試驗區與天然林較為相近，其餘坡地檳榔園、廢棄果園及果園等試驗區則與人工林或人工草地結果相近。

一般而言，森林地區因人為干擾較少，土壤上方有樹冠層、地表有植生覆蓋及枯枝落葉敷蓋等層層保護，使降雨時雨滴不易直接衝擊土壤，避免土壤分散阻塞孔隙，而地表腐質層的可促進土壤團粒構造進而增加土壤孔隙率。本研究之檳榔及果樹園試驗區因樹冠鬱閉度約 80%，為 4 個試驗區中較佳者，其地表環境類似林地，比重才會跟林地相近。

表 1. 各試驗區之土壤物理性質分析結果

Table 1. The results of physical properties of soil samples in experimental zone.

試驗區	檳榔及果樹園試驗區	坡地檳榔園試驗區	廢棄果園試驗區	果園試驗區
平均總體密度( $\text{g/cm}^3$ )	1.75	1.62	1.65	1.70
平均比重	2.61	2.64	2.69	2.66
砂粒(%)	68.97	31.60	61.86	59.68
粉粒(%)	16.64	28.82	21.99	21.77
黏粒(%)	14.39	39.58	16.15	18.55
土壤質地	砂質壤土	粘質壤土	砂質壤土	砂質粘壤土

## (II)土壤孔隙率

4 個試驗區土樣之平均孔隙率分析結果如表 2 所示，平均土壤總孔隙率大小順序為坡地檳榔園>廢棄果園>果園>檳榔及果樹園。平均土壤粗孔隙率大小順序為檳榔及果樹園>廢棄果園>坡地檳榔園>果園。比較曾俊偉等（2015）調查蓮華池天然林、人工林及人工草地平均總孔隙率及平均粗孔隙率結果如表 3 所示，本研究之 4 個試驗區之平均總孔隙率及粗孔隙率值仍小於林地，但檳榔及果樹園試驗區之平均粗孔隙率與人工林相近，其原因應與試驗區之果樹為未嫁接之果樹，與檳榔混植仍有良好的樹冠層保護效果，且深根性果樹根系亦促進粗孔隙的形成。

本研究以平均粗孔隙率計算的土壤孔隙蓄水能力，表示土壤的水源涵養能力，亦表示某地區單場降雨的水分最大貯留量。以土壤取樣深度 30cm 為計算基礎，將平均粗孔隙率乘以土壤取樣深度，計算單位面積 1 公頃的土壤粗孔隙蓄水量，評估土壤水分蓄水量的差異。計算結果如表 2，檳榔及果樹園試驗區為最佳，量體為 316.8 m<sup>3</sup>/ha，其次為廢棄果園、坡地檳榔園、果園。

表 2. 各試驗區之土壤孔隙率分析結果

Table 2. The results of physical properties of soil samples in experimental zone.

試驗區	檳榔及果樹園試驗區	坡地檳榔園試驗區	廢棄果園試驗區	果園試驗區
平均總孔隙率 (%)	35.77	45.91	38.55	36.79
平均粗孔隙率 (%)	10.56	7.53	8.61	6.65
土壤粗孔隙蓄水能力 (m <sup>3</sup> /ha)	316.8	225.9	258.3	199.5

表 3. 天然林、人工林及人工草地平均總孔隙率及平均粗孔隙率結果

Table 3. The results of the average of total porosity and coarse porosity of natural forest, plantations and artificial turf

試驗區	天然林	人工林	人工草地
平均總孔隙率 (%)	60.09	57.06	42.37
平均粗孔隙率 (%)	14.37	11.27	7.43
土壤粗孔隙蓄水能力 (m <sup>3</sup> /ha)	431.1	338.1	222.9

（引用自曾俊偉等，2015）

## IV、結論

本研究結果顯示，以檳榔及果樹園混植方式之土地利用型態為最佳，研判原因如下：

1. 檳榔及果樹園混植試驗區平時少有人為經營管理，淺層土壤在少有人為活動及平常有枯枝落葉敷蓋的情形下，土壤因被踐踏而壓實之情況鮮少。雖然檳榔根系短淺，但果樹的根系較深，仍有助於形成土壤孔隙，且鬱閉的冠層及枯枝落葉層的敷蓋，減少雨滴打擊地表，避免土壤結殼作用。其貯留的量體約為廢棄果園的 1.25 倍、坡地檳榔園的 1.40 倍及果園的 1.59 倍。
2. 廢棄果園因現況已無人為經營管理，現場調查除少數存活的果樹之外，地表多為草類覆蓋，草高達 60cm 以上，相較於檳榔及果樹園，廢棄果園內之林木數量密集度較低，故其粗孔隙率次於檳榔及果樹園。
3. 坡地檳榔園內之檳榔樹林下由於覆蓋度差，但仍有上方仍有冠層遮蔽，故粗孔隙率次於廢棄果園。
4. 果園之粗孔隙率相對其他試驗區為最少的原因，研判雖然果園內之林下有覆蓋植物，且果園內由於頻繁的人為經營管理，致使土壤已產生夯實作用，經孔隙率分析結果，促進滲透的大孔隙率亦為試驗區中最少者，在低大孔隙率及粗孔隙率的條件下，顯示果園對於貯留水分的效果相對其他試區較差。

## V、謝誌

本研究承行政院農業委員會 104 農科-13.4.2-森-G1(3)科技計畫經費補助，試驗工作承蒙林業試驗所李聖餘及蓮華池研究中心同仁協助，特別是黃紹政先生熱心提供試驗地，謹此致謝。

## VI、參考文獻

李長寶 (2014) 土壤孔隙度-李長寶的博文。科學網

<http://blog.sciencenet.cn/blog-1348133-850850.html>。

陳明杰 (1993) 蓮華池地區不同林相土壤孔隙分佈特性之研究。中華林學季刊 26(2)：63-77。

- 陳明杰、曾俊偉 (2013) 契約林地混農林業使用可行性及對水資源涵養影響之研究。  
臺大實驗林研究報告 27(3)：171-188。
- 陸象豫、黃良鑫、黃惠雪 (2008) 林業試驗所蓮華池研究中心氣象資料彙整  
(1997-2007)。行政院農業委員會林業試驗所，林業叢刊第 183 號。
- 曾俊偉、陳明杰、林介龍、曹崇銘 (2015) 農村地區不同土地利用對土壤水資源涵  
養量之初探。2015 森林集水區經營研討會論文集：81-92。
- 曾俊偉、陳明杰、林介龍、曹崇銘 (2015) 不同土地利用型態對淺層土壤孔隙率特  
性之研究。臺大實驗林研究報告 29(3)：145-159。
- 黃正良、陳明杰、曹崇銘、黃志堅、傅昭憲、吳家慈 (2013) 蓮華池試驗集水區杉  
木人工林及天然闊葉林植群之比較研究。嘉大農林學報 10(2)：16-38。
- 萬鑫森譯 (1987) 基礎土壤物理學。茂昌圖書有限公司。
- 葛錦昭、楊炳炎、林淵霖、楊楚淇、漆陞忠 (1978) 台灣森林集水區經營試驗初期  
報告。林業試驗所報告 304 號：50 頁。
- 真下育久 (1973) 森林土壤の粗孔隙量(貯水能)に關與する森林および環境要因。  
森林の公益的機能計量化基礎調查報告書：3-52。水利科學研究所。
- 竹下敬司 (1985) 森林土壤と水源かん機能。森林立地 27(2)：19 -26。
- 有光一登 (1984) 森林土壤の保水力。林業技術 509：8-16。

## 2015 年蘇迪勒颱風強降雨事件中源頭集水區 土壤水分之時空變化

梁偉立<sup>1</sup>、李勝倫<sup>2</sup>

**【摘要】**2015 年 8/6~8/8 蘇迪勒颱風伴隨的短延時強降雨事件，造成台灣北部烏來地區多數崩塌的發生。位於林試所福山研究中心粗坑溪沿岸沖蝕溝之源頭集水區樣區，記錄了此降雨事件中近地表含水率、基岩面孔隙水壓、降雨逕流反應等動態資料。近地表含水率方面，土壤含水率隨著降雨強度增減，主要受到降雨輸入、垂直滲透的影響，各測點平均含水率於降雨尖峰時達到最高，降雨過後則迅速下降。基岩面孔隙水壓的反應則較慢，除了地下水所形成的長期性飽和帶外，降雨事件中基岩面上短時性飽和帶主要來自雨水的供給。地表逕流隨著降雨強度敏銳反應，降雨強度與流量增減之間並無明顯的時間延遲。颱風所導致的強降雨事件中，源頭集水區中的表層水分、地表逕流均隨著降雨強度增減敏銳反應，水分的增減來的快、去的也快；地中的反應則較為遲緩，來的慢、去的也慢，但在降雨尖峰過後的短時間內飽和帶可以達到最大量，並觀察到地滑的跡象，此也暗示了地滑或淺層崩塌可能發生的時間點及機制。

**【關鍵字】**降雨逕流反應、地中飽和帶、基岩面、土壤含水率

### SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS IN SOIL WATER DYNAMICS IN A HEADWATER CATCHMENT DURING TYPHOON SOUDELOR IN 2015

Wei-Li Liang<sup>1</sup> Sheng-Lun Li<sup>2</sup>

**【Abstract】** Typhoon Soudelor brought a heavy rainfall event with high rainfall intensities and a short duration in 6~8 August 2015, which caused many slope failures in Wulai District. During the rainfall event, we monitored soil moisture in shallow soil

---

<sup>1</sup> 國立臺灣大學森林環境暨資源學系副教授，通訊作者。電子郵件：liangwl@ntu.edu.tw  
Associate Professor, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University. Corresponding Author. E-mail: liangwl@ntu.edu.tw

<sup>2</sup> 國立臺灣大學森林環境暨資源學系研究助理  
Research assistant, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University.

layers, pore water pressure at the soil–bedrock interface, and rainfall–runoff responses in a small headwater catchment, located upstream of an erosion gully beside Tsukeng stream at the Fushan Research Center, Forestry Research Institute. Soil moisture rapidly responded with the changes of rainfall intensity, which was mainly controlled by vertical infiltration of rainwater. The maximum value of average soil moisture at all monitoring points was recorded at the occurrence of the peak of rainfall waveform. The responses of pore water pressure at the soil–bedrock interface were slower than soil moisture. Despite the perennial saturation resulted from groundwater, ephemeral saturation at the soil–bedrock interface was caused by event rainwater. Runoff rapidly responded with rainfall intensity, and there was no obvious delay between rainfall and runoff responses. Thus, both soil moisture and runoff rapidly responded to rainfall intensity. Although the responses of pore water pressure at the soil–bedrock interface were slower, the amount of saturation could reach the maximum in a short duration after the peak of rainfall intensity, which would imply the potential timing or mechanism of landslide or shallow slope failures.

**【Key words】** Rainfall–runoff response, Subsurface saturation, Soil–bedrock interface, Soil water content

## I、前言

2015 年 8 月蘇迪勒颱風帶來短延時高強度降雨，重創新北市烏來地區，除了多處崩塌造成水、電供給中斷外，路基流失、道路中斷也使得山區部分聚落一時無法對外聯繫；上游地區暴雨造成河川水位上升並夾帶大量土砂，也使得中下游翡翠水庫的原水濁度急速上升、淨水廠無法即時處理，廣範圍影響到台北市、新北市自來水供給。根據魏倫璋等（2015）對烏來地區風災後的調查，該地區於 8 月 8 日清晨 5 點至 7 點之時雨量均超過 70 mm，平均降雨強度高達 80 mm/hr 以上，其 3、6、12 小時最大降雨量皆高於 200 年重現期，且颱風事件總累積雨量達年平均雨量之 24.6%，在此短延時強降雨下，大量雨水沖刷地表並入滲至土體中，此現象除增加土體自重外，亦造成岩土界面上之孔隙水壓驟昇，最終使得風化或崩積材料沿順向坡岩盤崩滑而致災。

近年來短延時強降雨的發生越顯頻繁，2009 年 8 月侵襲臺灣的莫拉克颱風伴隨而來的大量雨勢，除造成小林村被崩塌土砂掩埋的慘事外，根據林務局資料，

風災中合計新增之崩塌面積 39,492 公頃，產生的不穩定土砂量近 12 億立方公尺，位於集水區上游之國有林班地所佔比例高，凸顯國有林班地及森林集水區上游林地之生態環境功能有統整性調查及分析的必要。國有林班地森林集水區上游林地多位於森林集水區源頭部位，為河溪逕流來源區域，其土壤、地形、森林之環境反應過程非常敏銳，加上地中逕流來源區域的變動性相當高，相較集水區中下游區域，集水區上游林地具有複雜的水文地形條件。至今國內雖有許多研究針對水文過程之表層土壤性質、土壤水特性、水脈分布進行定性或定量分析，但皆屬於分項個別觀測，除了缺乏對地表、地中、地下水文動態的整體監測，也缺乏對地滑、崩塌、沖蝕等土砂移動狀態的全盤性掌握。特別是針對森林集水區源頭部位的詳細監測研究案例極少，此原因可歸於調查環境、樣區建立的複雜性及困難性，以致國內對於森林集水區上游林地水土資源動態還有待全面性的調查及研究。

本研究以位於林試所福山研究中心粗坑溪沿岸沖蝕溝源頭集水區之樣區監測資料，分析蘇迪勒颱風伴隨之短延時高強度降雨事件中近地表含水率、基岩面飽和帶形成、降雨逕流反應特性。

## II、材料與方法

### (I) 試驗地簡介

本研究地位於林業試驗所福山研究中心轄區（圖 1a），北起阿玉山，南至紅紫山，西鄰志良久山，東側以粗坑溪河谷為界，為雪山山脈支稜所環抱的盆地，海拔分佈 500 m 至 1400 m 之間。氣候屬溫暖潮濕型，夏季有西南氣流，暖熱潮濕；冬季因東北季風而潮濕多雨。全年均溫 18.2°C，最低月均溫為 1 月 11.7°C，最高月均溫為 7 月之 24.0°C。平均年雨量為 4240 mm，其中 25%來自颱風（林登秋，2012），一年中降雨日數達 221 日，7 月至 11 月間平均月降雨量超過 350 mm。土壤質地可略分為黃壤土，崩積土與石質土三種，黃壤土多分佈於山稜、哈盆溪平坦河岸；崩積土及石質土則分佈於溪流兩側山坡與地形崎嶇之崩崖處（林光清等，1996）。

粗坑溪沿岸有多處沖蝕溝，並有多處淺層崩塌地，可以發現其土砂移動正在進行當中。本研究樣區位於粗坑溪沿岸之一沖蝕溝源頭部之源頭集水區（圖 1b；24°45'42"N, 121°35'45"E），樣區面積為 0.15 ha，南北長 59 m，東西寬 35 m，地形走勢由西北方的稜線向東南傾斜，地形陡峭，平均坡度為 41.4°。樣區東南方的兩條沖蝕溝全年可觀察到地表逕流，兩者匯流成一條較大的主沖蝕溝；匯入粗坑溪

前，逕流時而伏流地中、時而顯現於地表。除了沖蝕溝以外，全樣區披覆喬木、灌木及草本植物，林相為樟科、殼斗科及茶科為主的常綠闊葉混合林。

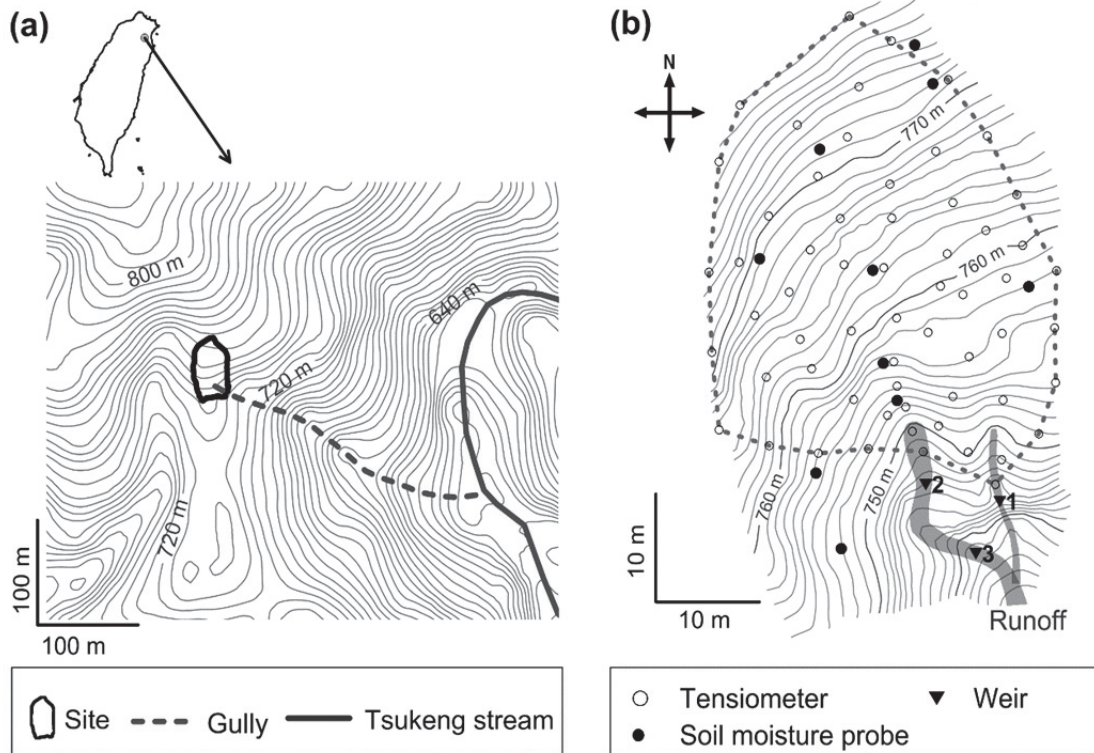


圖 1 (a)位於源頭集水區之觀測樣區位置及周遭地環境，(b)觀測樣區微地形及張力計、水分計、量水堰設置位置。圖 1b 中的虛線為張力計所監測之地中飽和帶區域。

Fig.1 (a) Map showing the study area and the observation site in a headwater catchment. (b) Surface topography, the locations of tensiometers, soil moisture probes, and weirs installed at the observation site. The dash line in Fig. 1b indicates the area of subsurface saturation measurement at the observation site.

## (II) 樣區地形調查及水文監測項目

為了獲得試驗地的地表面詳細地形起伏，以雷射測距儀 (TruPulse 360B, LASER TECHNOLOGY, INC.) 測量樣區地表面的相對座標及高程。對於地形變化急遽的隆起或下凹處，增加測點密度以表現該區域特殊的變化，結果樣區中共設置 491 測點，測點間距約 2 m，藉由高密度地形測量點位即可反映出樣區微地形的變化。在 491 個地表地形測點中，選擇其中 151 個測點進行簡易貫入試驗，測量土壤軟硬度以及土壤厚度 (詹孟浚、梁偉立，2015)，並利用地表面高程減去土壤

厚度，得到基岩面的高程，進而推估基岩面的地形。

水文自動監測項目包括降雨量、多深度土壤含水率、基岩面孔隙水壓、地表逕流，藉由以上的觀測體制，可掌握近地表土壤水分（10~50 cm 深）、基岩面飽和帶形成、降雨逕流反應等動態。首先就土壤含水率動態監測項目，於樣區選取 10 處土壤含水率監測點（圖 1b），設置多點土壤水分計（EasyAG-5p，SENTEK）。該水分計含有 5 個感應器，可監測土壤層 10–50 cm 每 10 cm 的土壤體積含水率值，因此樣區中共計 50 個不同深度的土壤含水率監測點位。就基岩面孔隙水壓監測項目，選取 60 個已貫入測點，於基岩面（土壤-岩層界面）各設置 1 支張力計，監測基岩面上孔隙水壓之變化（圖 1b）。張力計由陶瓷頭連接 PVC 管至壓力感測器（PA-750，COPAL ELECTRONICS）所組成，當該處達到飽和狀態時，孔隙水壓即大於或等於 0 cm；而當該處為不飽和狀態時，孔隙水壓即小於 0 cm。以上之含水率及孔隙水壓資料由自動資料紀錄器（CR1000，CAMPBELL）記錄，記錄時間間隔為每 10 分鐘一筆。

關於降雨逕流反應中的逕流監測項目，於樣區中兩條沖蝕溝下方經常性地表逕流的水路上，設置 3 座 V 型 30° 量水堰（圖 1b），藉由量水堰出水口水高之監測值換算流量（詹孟浚、梁偉立，2015）。量水堰的設置首先將水路中土砂清除，以砂包、水泥建立攔水土壩，並將集中的水流以 PVC 管導入量水堰中。量水堰中以壓力式水位計記錄器（DI500/Baro，SCHLUMBERGER）測量及記錄水高，記錄間隔為 10 分鐘。降雨量監測方面，於福山氣象站設置一傾斗式雨量筒（7856M，DAVIS），其當降雨量累積 0.2 mm 後傾斗即傾倒一次，並以資料記錄器（UA-003-64，HOBO）自動記錄傾倒時間點，計算 10 分鐘雨量。

### III、 結果與討論

#### (I) 樣區地表、基岩面地形特徵

由地表及基岩面地形測量資料可建立 DEM 數值模型，圖 2 即根據地表、基岩面 DEM 所繪製的立體地形圖。地表地形之坡度雖然大，但除了樣區中的登山步道、樣區下方沖蝕溝、樣區下方隆起部以外，整體而言起伏小；然而基岩面地形的起伏就相對大很多，地表面及基岩面地形明顯的差異主要來自土壤厚度空間分布的不均勻，起伏較大的部位包括如波浪起伏的遷急線（坡度反曲點之連線），以及樣區下方隆起部。基岩面地形的遷急線並未反映在地表面上，研判此基岩面地形可

能受到地質之背斜構造、早期地滑或崩塌所造成，隨著土壤化育生成等時間經過，土壤岩層交界之地中地形特徵便不易顯示於地表，特別是樣區中央右坡面之遷急線並未連接到左坡面，並且呈現明顯的低窪，且該位置下坡處顯示一平緩地及隆起地，研判該位置早期曾發生地滑或崩塌，使得原本應有坡度起伏的部分滑動到下方，造成該位置低窪而下方隆起的現狀。

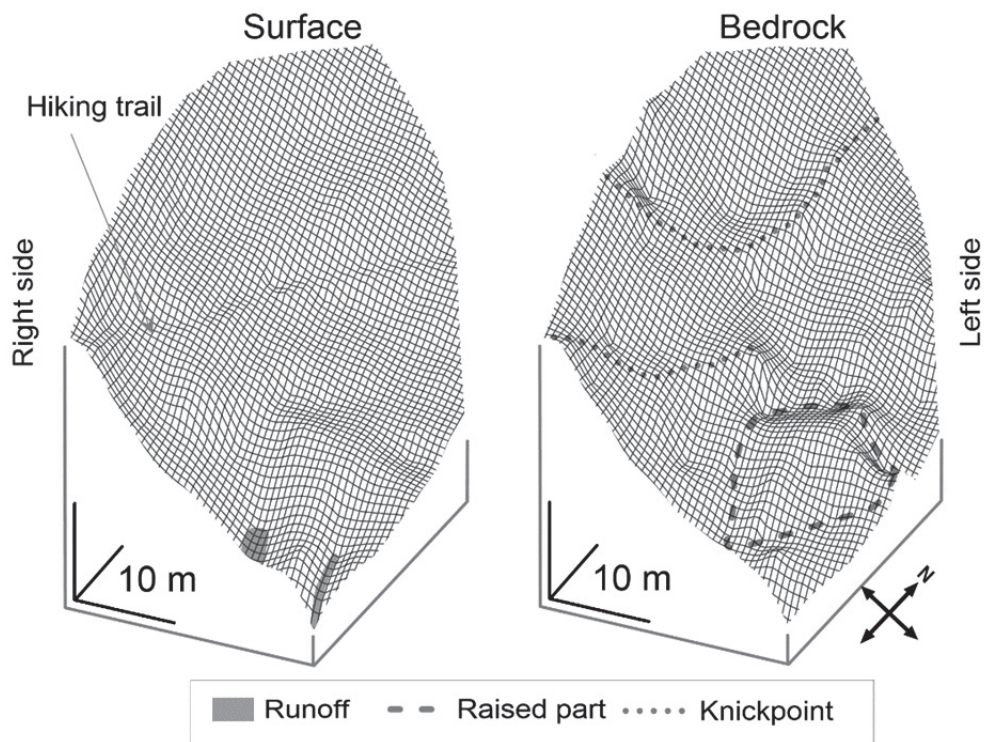


圖 2 地中飽和帶區域之地表及基岩面地形特徵。

Fig.2 Wireframes of surface and bedrock topographies in the area of subsurface saturation measurement.

## (II) 蘇迪勒颱風降雨事件期間水文反應

蘇迪勒颱風帶來大量的降雨，為一短時強降雨的降雨事件，2015 年 8/6~8/8 累積雨量為 370.4 mm，最大 10 分鐘雨量為 13.4 mm，最大時雨量為 53.2 mm（圖 3）。事件初期之 8/6 午後即有一強降雨發生，但只維持約 1 小時便停止，直到 8/7 上午才有連續性降雨；8/8 凌晨之後降雨強度急遽增加，最大降雨強度發生於 2240 分，這時期的累積雨量約佔總累積雨量的 93.6%，8/8 中午過後降雨便停止。

降雨事件開始後，近地表 10~50 cm 共 50 測點之平均土壤含水率增加量隨著降雨強度而上升（圖 3 中所示 All depths），在 8/8 降雨尖峰後（2420 分）整體含水

增加量達到最高（15.7%）。若檢視各深度平均含水率的變化，可發現含水率的增加量隨著深度而遞減，近地表的 10 cm 含水率隨著降雨強度增減，各測點平均含水率於降雨尖峰時達到最高，降雨過後則迅速下降，其增減的敏銳度也隨著深度而趨緩，顯示一典型垂直入滲的樣式。

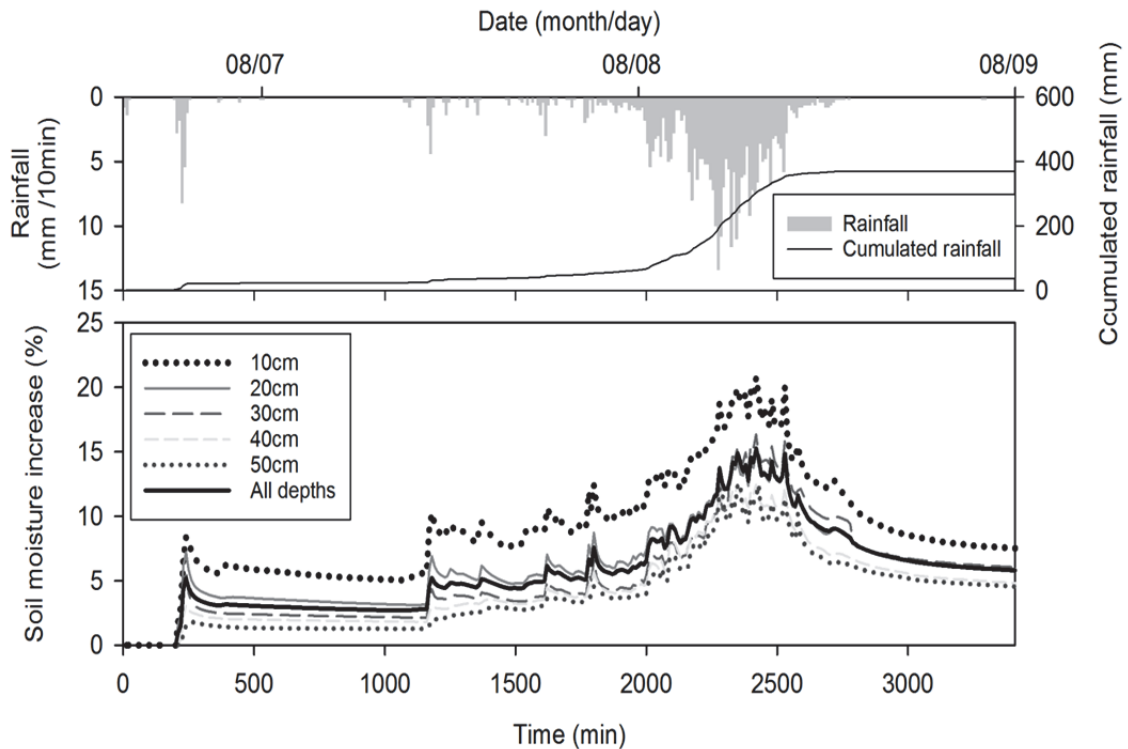


圖 3 蘇迪勒颱風事件之降雨強度及累積雨量、全監測點及各深度之平均土壤含水率增加量之時間變化。

Fig.3 Temporal variations in rainfall intensity, cumulated rainfall, and average increases of soil moisture at all monitoring points and each depth during typhoon Soudelor.

降雨開始的含水率空間分布並不一致（圖 4），但可發現地表坡度較大的地方含水率較低；整體平均含水率到達最高的 2420 分時（圖 4），深度 10~50 cm 含水率的增加量在樣區中下方之地表逕流源頭部位、側邊坡最高（約 25%），其餘的位置則約介於 9~15%之間，顯示出越靠近沖蝕溝，含水率增加量有越大的趨勢；在 3000 分依然可見到這樣的分布趨勢（圖 4），但是整體含水率增加量降低，多數點位之平均含水率僅較降雨前增加 3~6%。由圖 3、4 的結果可推論，近地表 10~50 cm 深度的土壤含水率變動主要受到降雨輸入、垂直滲透的影響，含水率隨著降雨強度增減，各測點平均含水率於降雨尖峰時達到最高，降雨過後則迅速下降；地

表逕流存在的沖蝕溝附近有較高的含水率增加量，研判是該位置樹木及植生少，植生截留影響小，因此有較多的降雨輸入。含水率分布同時受到土壤性質、植生分布及地形所影響，依李勝倫（2015）對當地非降雨時期含水率分布與土壤、植生、地形分布的分析結果，其中影響含水率大小最顯著的兩項因子為林木密度（負相關）、土壤孔隙率（正相關），其次為飽和水力傳導度（負相關）、坡度（負相關）及地形濕潤指數（正相關）。

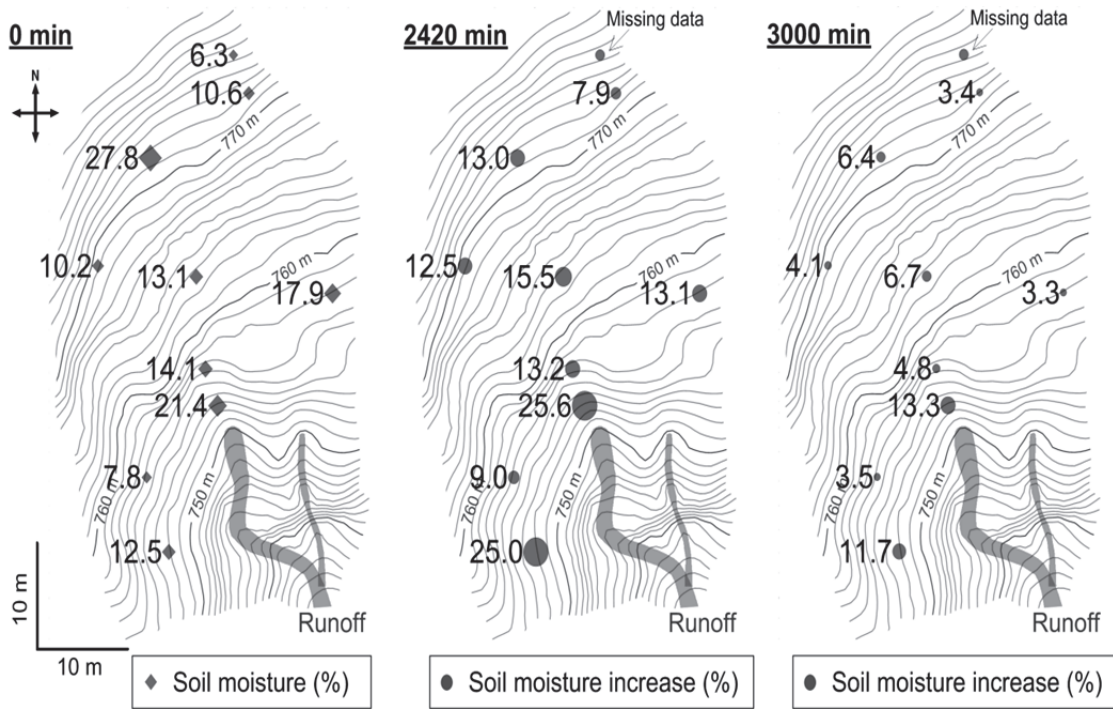


圖 4 各監測點位深度 10~50 cm 之初期平均含水率(左)，以及經過 2420 分(中)、3000 分(右)時平均含水率增加量之空間分布。圖中數字為含水率或增加量值。

Fig.4 Spatial distributions of average soil moisture at 10~50-cm depths at 0 min (left) and average soil moisture increases at 2420 (middle) and 3000 (right) min at each monitoring location during typhoon Soudelor. The numbers in figures indicate the values of average soil moisture or the increases.

基岩面孔隙水壓方面，連續性降雨發生前，平均孔隙水壓及飽和帶水量並無太大的變化（圖 5a），意指垂直滲透的濕潤前線還未到達基岩面；8/8 凌晨之後降雨強度急遽增加後，平均孔隙水壓及飽和帶水量隨即上升，降雨經過約 2000 分鐘後，平均孔隙水壓達到正值，平均孔隙水壓及飽和帶量的最大值發生在最大降雨強度發生後；當降雨強度減緩至降雨停止後的期間，可發現平均孔隙水壓及飽和

帶量並不如近地表含水率般快速下降，而是緩慢地的下降。

圖 5b 顯示降雨事件中八個時間點的基岩面孔隙水壓分布，降雨前到降雨後 1500 分時，孔隙水壓及飽和帶分布幾乎沒有變化，大部分的觀測點都為未飽和狀態（負孔隙水壓），飽和帶（正孔隙水壓）存在於沖蝕溝以及左下坡面低窪處；2000 分時，降雨強度逐漸增強，上坡處有零散的飽和帶形成，但下坡處的飽和帶並無太大變化。從 2060 分到 2100 分之間，上坡處的飽和帶開始相互連結並往下坡擴大，而下坡處的飽和帶也開始擴大。2280 分時降雨強度到達最大，上坡及下坡的飽和帶完全連結，只有部分位置未飽和，飽和帶總水量於 2360 分達到最大值。降雨事件結束後，飽和帶則由從樣區中央、上坡部位開始消逝（3000 分），到了 3410 分仍可見平均孔隙水壓為正值，飽和比例佔整體基岩面積約 65%。由以上的結果可大致歸納基岩面飽和帶的變動過程：在降雨初期飽和帶僅零星地存在於上坡處，而大量飽和帶存在於下坡處，特別是沖蝕溝以及樣區左下方低窪處有高飽和帶的存在，研判該處為地下水所造成的舊有飽和帶；隨著雨水供給的增加，飽和帶相互連結往下坡處擴大，並且在中央靠右坡面處有一特定的擴張路徑，此主要為降雨事件中雨水供給所形成的新生飽和帶，其擴張方式主要以側向流動為主，降雨結束後並未快速消逝。在疑似早期曾發生地滑或崩塌的位置（下坡之平緩地及隆起地），是較難飽和的區域，以及一旦飽和後最先消逝的區域，研判該區域的基岩面較為破碎，飽和帶易往深層滲漏。

圖 6 顯示颱風中降雨逕流反應的變化，在此須說明的是，颱風後的現場調查發現三座集水土壩均被大量沖蝕土砂所堆積、淤滿，導致地表逕流溢流出土壩、無法導入量水堰中，因此無法準確監測地表逕流量。檢視事件中降雨逕流反應監測值的變化後，推測可能淤滿的時間點均在 8/8 降雨強度迅速上升時期（圖 6 中的 missing data）。若單檢視可能淤滿時間點前的降雨逕流反應，可發現流量的大小為 Weir 3 > Weir 2 > Weir 1，三處監測量水堰水位均隨著降雨強度敏銳反應，降雨強度與流量增減之間並無明顯的時間延遲，反映出源頭集水區降雨逕流的特性。

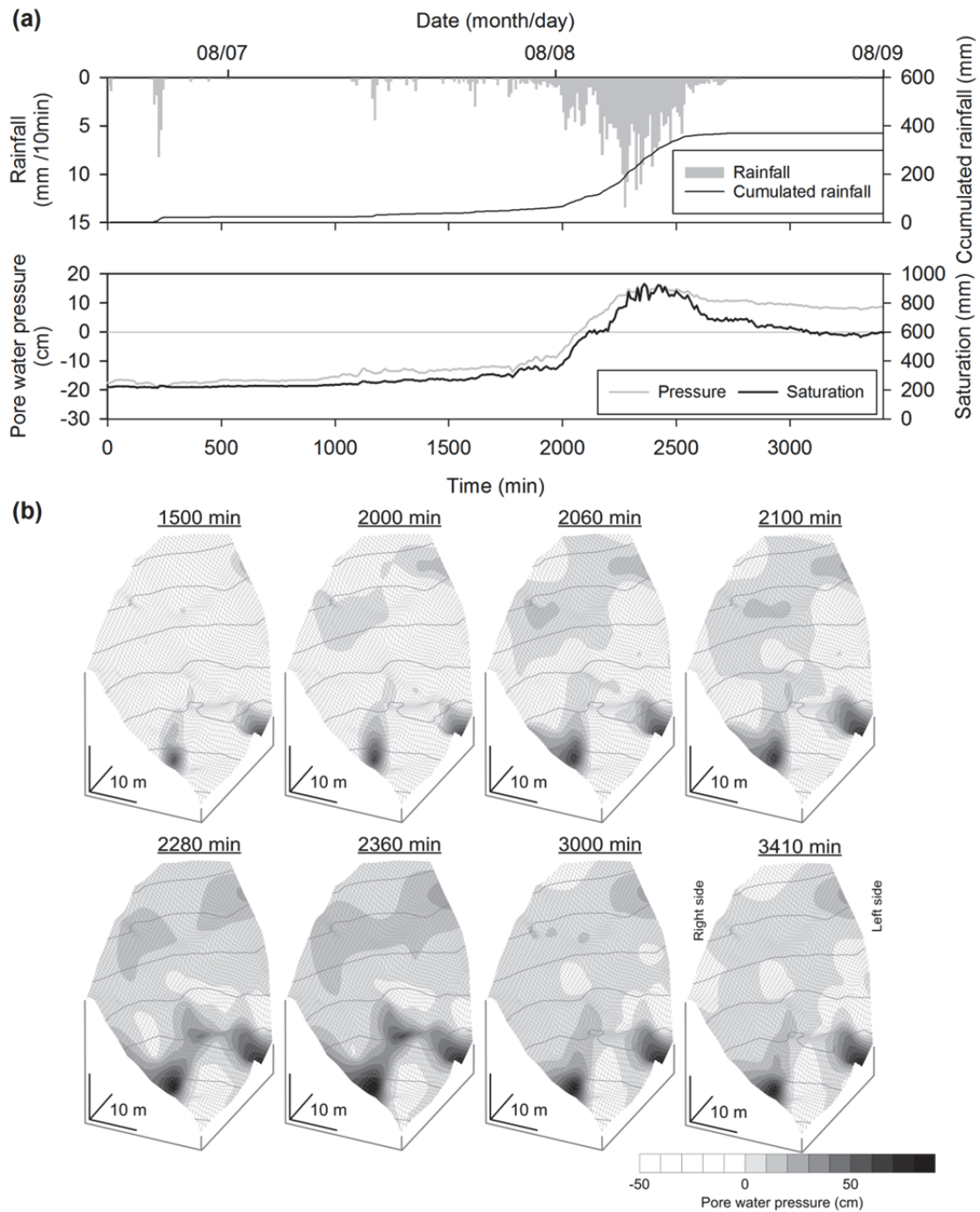


圖 5 (a) 蘇迪勒颱風事件之降雨強度及累積雨量、基岩面上全觀測點之平均孔隙水壓及地中飽和量時間變化，(b)地中飽和帶分布之時空變化。圖 5b 中的橫線為基岩面等高線。

Fig.5 (a) Temporal variations in rainfall intensity, cumulated rainfall, average pore water pressure of all monitoring points, and the amounts of subsurface saturation at the soil-bedrock interface. (b) Spatial and temporal variations in subsurface saturation at the soil-bedrock interface during typhoon Soudelor. Lateral lines in Fig. 5b indicate contour lines of the soil-bedrock interface.

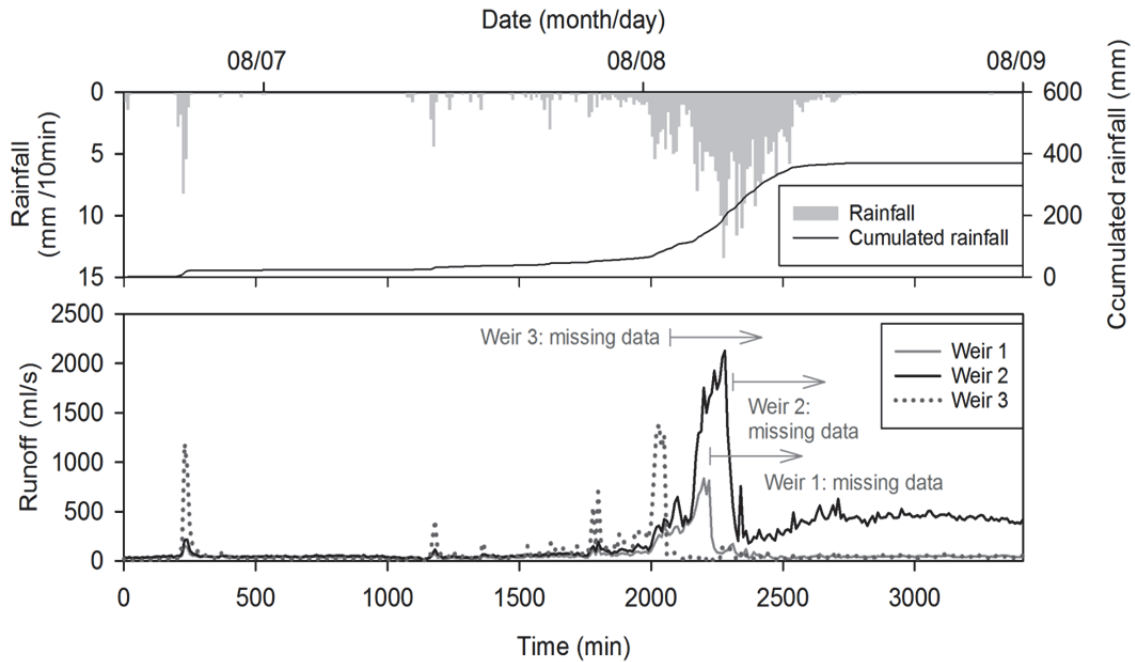


圖 6 蘇迪勒颱風事件之降雨強度及累積雨量、三處量水堰監測之地表逕流量時間變化。

Fig.6 (a) Temporal variations in rainfall intensity, cumulated rainfall, and surface runoff monitored by three weirs during typhoon Soudelor.

### (III) 蘇迪勒颱風降雨事件觀測地周遭土砂移動反應

蘇迪勒颱風除了重創烏來山區，也對鄰近的福山植物園區有嚴重的影響。首先風災後福山植物園區的聯外道路多處坍方、車道路基淘空（圖 7 左），大量土砂的沖刷堆積也改變了粗坑溪河床高、河道寬，粗坑溪旁的數條沖蝕溝也可見其側向沖蝕或是崩塌的情形。除了聯外道路、沖蝕溝的災情外，前往樣區的登山道邊坡也有多處發生淺層崩塌及地滑的跡象，如圖 7 右所示，登山道只剩雙腳的寬度，途中也觀察到許多風倒木。颱風過後數月的調查也發現，邊坡還有零星土砂滑落、崩落發生，還未穩定。此外，颱風過後樣區內也發現有 4 處設置於基岩面上張力計的陶瓷頭斷裂的現象（圖 8 左），其損毀部位斷面呈現彎曲的狀態（圖 8 右），應為側向的剪斷力所致，暗示了該處基岩面有滑動的現象，推測本樣區在強降雨下有小規模地滑發生。上坡兩處地點位於基岩面遷急線的上下，下坡處則位於疑似早期曾發生地滑或崩塌的位置，也是坡度變化大的交界點。學理上地表地形之遷急線為崩塌地滑潛勢較高的區域，基岩地形遷急線附近的不穩定性為少被證明的實例，當地表地形與基岩面地形不一致的狀況下，如何掌握基岩面地形便是一重要的課題。



圖 7 蘇迪勒颱風後聯外道路及登山步道坍方樣貌。

Fig.7 Slope failures nearby roads and hiking trails found after typhoon Soudelor.

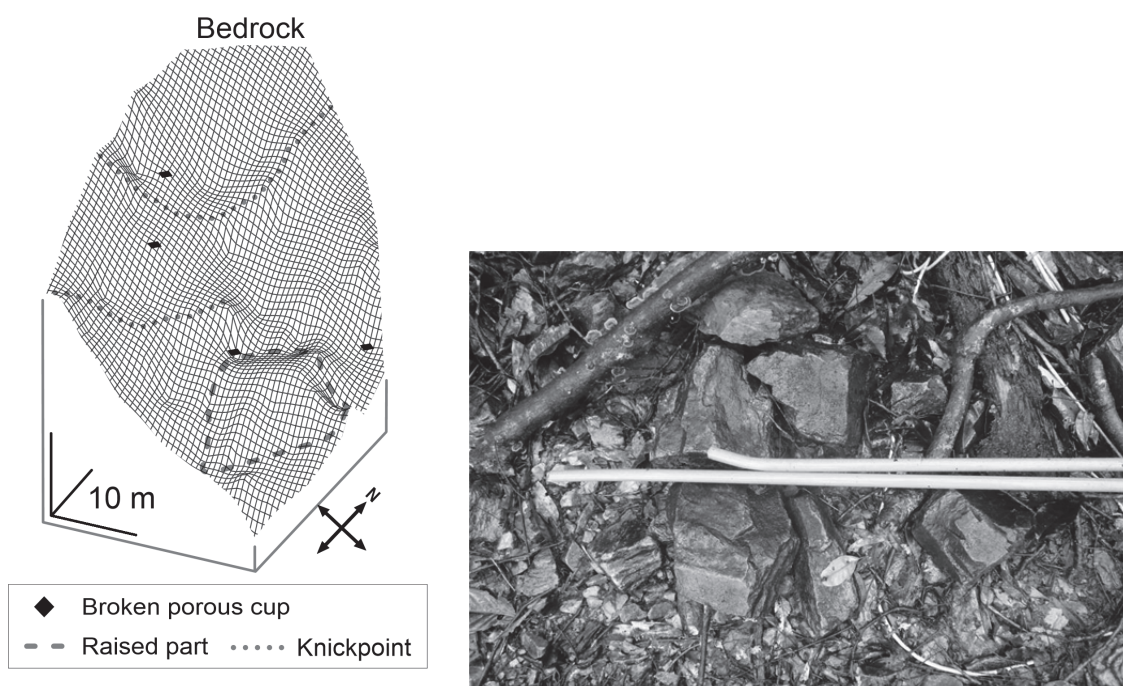


圖 8 蘇迪勒颱風後張力計陶瓷頭斷裂位置及樣貌。

Fig.8 The locations of the broken porous cups of tensiometers found after typhoon Soudelor.

#### IV、 結論

本研究於林業試驗所福山研究中心，粗坑溪沿岸之一沖蝕溝源頭集水區建立水文反應自動監測體制，並彙整 2015 年 8/6~8/8 蘇迪勒颱風帶來大量的降雨事件中，所監測的資料，分析地表下 10~50 cm 近地表含水率、基岩面飽和帶的形成、

降雨逕流反應特性，歸納如下：

1. 蘇迪勒颱風帶來大量的降雨，為一短時強降雨的降雨事件，降雨事件累積雨量為 370.4 mm，最大 10 分鐘雨量為 13.4 mm，最大時雨量為 53.2 mm。
2. 近地表 10~50 cm 深度的土壤含水率變動主要受到降雨輸入、垂直滲透的影響，含水率隨著降雨強度增減，各測點平均含水率於降雨尖峰時達到最高，降雨過後則迅速下降。
3. 除了地下水所導致的飽和帶外，降雨事件中基岩面上短時性的飽和帶主要來自雨水的供給。在降雨初期飽和帶僅零星地存在於上坡處，隨著雨水供給的增加，飽和帶相互連結往下坡處擴大，主要以側向流動為主，降雨結束後並未快速消逝。在疑似早期曾發生地滑或崩塌的位置是較難飽和的區域，以及飽和最先消逝的區域。
4. 地表逕流隨著降雨強度敏銳反應，降雨強度與流量增減之間並無明顯的時間延遲，反映出源頭集水區降雨逕流的特性。
5. 道路、基岩面遷急線以及背斜構造的不穩定性：蘇迪勒颱風所造成的災害主要為福山植物園區周遭聯外道、園區內登山步道的坍方，顯示山區道路邊坡為一崩塌高潛勢地點，而天然林內則為小規模的淺層崩塌以及倒木為主。此外根據樣區中張力計陶瓷頭損壞的地點可以推知樣區於強降雨時具有地滑發生的跡象，發生於基岩地形遷急線及早期曾發生地滑或崩塌的位置附近。

蘇迪勒颱風所導致的強降雨事件中，源頭集水區中的表層水分、地表逕流均隨著降雨強度增減敏銳反應，水分的增減來的快、去的也快，而地中的反應則較為遲緩，來的慢、去的也慢，但在降雨尖峰過後的短時間內飽和帶可以達到最大量，此也暗示了地滑或淺層崩塌可能發生的時間點及機制。

## V、 謝誌

本研究由科技部（103-2313-B-002-012-MY2）及林務局科技計畫支持(104AS-12.2.3-FB-e1)。調查期間承蒙林業試驗所福山研究中心的協助、背景資料的提供，特此致謝。

## VI、 參考文獻

李勝倫（2015）源頭集水區表層土壤平均含水率推估之研究。國立臺灣大學森林

環境暨資源學研究所碩士論文。52 頁。

林光清、洪富文、程煒兒、蔣先覺、張雲翔（1996）福山試驗林土壤調查與分類。

臺灣林業科學 11:159-174。

林登秋（2012）颱風對森林生態系的影響：福山啟示錄。林業研究專訊 19 (6):53-58。

詹孟浚、梁偉立（2015）基岩面飽和帶產生型態之比較。2015 森林集水區經營研討會論文集：69-83。

魏倫瑋、黃韋凱、黃春銘、李璟芳、林聖琪、紀宗吉（2015）蘇迪勒颱風於臺灣北部之山崩致災機制初探。中華水土保持學報 46 (4):223-232

## 溪頭孟宗竹林之竹桿年齡對蒸散量的影響

林松駿<sup>1</sup> 久米朋宣<sup>2</sup> 羅明慧<sup>3</sup> 梁偉立<sup>2</sup>

**【摘要】**本研究將竹子分為五個齡級，研究目的為呈現台灣大學溪頭實驗林孟宗竹林(*Phyllostachys pubescens*)林分結構以及胸高直徑分布的年間變化，探討竹桿年齡及樹液流的關係，推估各齡級蒸散量以及對於林分總蒸散量的貢獻，探討林分結構對於林分蒸散推估的影響。研究結果顯示，(1)孟宗竹林的林分結構每年改變，(2)較老齡級的竹桿樹液流明顯較其他年輕齡級的竹桿低，此外，在最年輕的齡級，竹子樹液流出現高峰值的時間較其他齡級來的早，(3)林分年蒸散量推估大約 300 (mm/year)，各齡級蒸散量占總林分蒸散量的比例受到樹液流速以及各齡級株數的共同影響。本研究證實竹桿老化會明顯影響竹子的樹液流流速，因此若藉由測量樹液流來推估林分規模的蒸散量時，竹林年齡結構是必須要考慮的重要項目。

**【關鍵詞】**樹液流、蒸散、竹桿年齡、孟宗竹、年齡結構。

## EFFECT OF CULM AGE ON TRANSPIRATION IN A MOSO BAMBOO FOREST, XITOU, TAIWAN

Song-jun Lin<sup>1</sup> Tomonori Kume<sup>2</sup> Sophie Laplace<sup>3</sup> Wei-li Liang<sup>2</sup>

**【Abstract】**To clarify the culm age effect on transpiration in bamboo forests, this study conducted sap flux measurements in a Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest in National Taiwan University (NTU) forest, and separated bamboos into five age classes (ie., born 2014, born 2013, born 2012, before 2012 newer, and before 2012 older). This study aimed (1) to show the variations of the age structure and DBH distribution of the Moso bamboo forest for four years, (2) to quantify relationship between culm age and individual sap flux, (3) to estimate the stand transpiration and

<sup>1</sup>國立臺灣大學森林環境暨資源學系研究助理，通訊作者。電子郵件: mashroomlin@hotmail.com  
Research Assistant, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University. Corresponding Author. E-mail: [mashroomlin@hotmail.com](mailto:mashroomlin@hotmail.com)

<sup>2</sup>國立臺灣大學森林環境暨資源學系副教授。  
Associate Professor, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University.

<sup>3</sup>國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究員。  
Senior Scientist, THE EXPERIMENTAL FOREST College of Bioresources and Agriculture, National Taiwan University.

contribution of each age class transpiration to total stand transpiration.

In this study, the distribution of DBH and age structure showed considerable year-to-year variations in the four years. As well, the results showed that culm age effected on the sap flux, that is, sap flux in older culms were significantly lower than that of younger age culms and the new culms showed earlier peak time than older culms. The annual transpiration of the study site is around 300 (mm/year) during July 2014 to June 2015, and the contribution of each age class to total stand transpiration was significantly different in accordance with sap flux and culm number in each group. These suggest transpiration estimates in bamboo forests maybe under- or over-estimated if we do not consider the age structure. Overall, this study concluded that culm aging significantly affected bamboo transpiration and that consideration of culm age structure is needed to understand stand transpiration based on sap flux measurements.

## **I 、 Introduction**

Evapotranspiration is one of important hydrological components, which account for 60% of annual precipitation (Jung *et al.*, 2010). Moreover, the variations in evapotranspiration among vegetation types can effect on water yield (Vertessy *et al.*, 2001). Evapotranspiration consist of transpiration, rainfall interception, and soil floor evaporation, and the contribution of the transpiration to total evapotranspiration is around 25% to 90% in forest ecosystem (Running and Coughlan, 1988; Gat and Matsui, 1991).

In Taiwan, the total area of bamboo forests is about 170,000 ha, which account for 7% of the total forest area in Taiwan, and Moso bamboo forests accounted for 1.9% of the total bamboo forests area (Dai *et al.*, 1973), but less of the research have investigated water use of Moso bamboos in Taiwan. Moso bamboo forests had been developed and managed in western Japan and China. However, these forests are now being abandoned, thus been expanding by replacing surrounding vegetation such as coniferous plantation forests and natural broadleaved forests (Kobayashi and Tada, 2010; Bai *et al.*, 2012).

Nowadays, still few studies investigated transpiration in bamboo forests (Kume *et*

*al.*, 2010; Komatsu *et al.*, 2010; Dierick *et al.*, 2010; Laplace, 2013). In stand scale transpiration study based on sap flux measurements, Komatsu *et al.* (2010) showed that annual transpiration of a bamboo forest was 567 mm in Japan with a distinctive seasonal variation, and that the annual stand transpiration in the bamboo forest was larger than that of other conifer forests (Komatsu *et al.*, 2010). A research conducted in a Taiwanese bamboo forest also showed some characteristics of sap flux (Laplace, 2013), in which the sap flux showed significant variations between individual culms. This study also pointed out that annual transpiration of the moso bamboo forest was 489 mm, which was nearly three times higher than that of a cedar forest near the bamboo forest. (Laplace, 2013).

Although these researchers examined some important characteristics of bamboo transpiration, such as individual-scale sap flux characteristics, and annual stand transpiration, the effect of culm age on bamboo transpiration and inter-annual variations in stand transpiration are still not documented. Note that bamboo forests produce new bamboo shoots every year (Lobovikov *et al.*, 2007), suggesting the number of new bamboo shoots fluctuated significantly among years. This phenomenon would change the age structure of bamboo forests every year (i.e., composition of different culm ages individuals). Thus, examining how individual and stand transpiration in bamboo forests can change with the culm age and stand age structure, respectively, is indispensable to understand inter-annual variations in stand-transpiration in bamboo forests.

This study aimed (1) to clarify variation of age structure and DBH distribution of the Moso bamboo forest for four years, (2) to quantify relationship between culm age and individual sap flux in terms of diurnal patterns and day-time mean values, (3) to estimate stand transpiration and contribution of each age class transpiration to total stand transpiration and (4) to examine impact of age structure on the stand-scale transpiration estimates.

## **II · Material and Method**

### **(I) Study site**

The study site is situated in Xitou Experimental Forest of National Taiwan

University, located in Lugu township of Nantou country, Taiwan (120°48'E, 23°40'N). The mean annual precipitation and temperature were 2635 mm and 17 °C, respectively, according to long-term data recorded at a meteorological station in the experimental forest. We established a 425 m<sup>2</sup> experimental plot in a Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest in 2012.

## (II) Measurements

### 1. DBH and age structure determine

First, we measured the DBH of all culms in study site in May of 2012. Then we recorded DBH of newborn culms in each year to help us to distinguish culm age. We determined the distribution of DBH and culm age structure. In this study, we separated sample culms into 5 groups by culm age which include “Born 2014”, “Born 2013”, “Born 2012”, “Before 2012 newer”, “Before 2012 older”. As there is still no good way to clearly identify the culm age from the appearance of culms, we could not identify the culm age of culms which born before 2012. In this study, we separated the culms which born before 2012 in two groups, by using the eye to determine the status of the bamboos. There are 5 to 8 culms were selected for sap flux measurement in each groups.

### 2. Sap flux measurement

We used Granier’s thermal-dissipation probes (TDP) to measure the sap flux of 34 individuals in the bamboo stand (Table 1.).

**Table 1.** The basic characteristics of age groups

	born 2014	born 2013	born 2012	before 2012 new	before 2012 older
Numbers	5	7	7	8	7
Average DBH	10.6	10.4	10.5	10.5	10.2
S.D. of DBH	1.12	0.70	0.84	0.85	0.67
Age	1	2	3	more than 3 years newer	more than 3 years older

Because of the conductive culm thickness of the stand bamboos being inferior to 1.4 cm, 1 cm long were used in this experiment (Laplace, 2013). Sensors pairs were inserted radially into the stem at breast height, vertically 10 cm apart from each other. The upper probe was continuously heated at a constant power of 0.15 Watt (James *et al.*,

2002). It contains a heating element wound around a steel needle enclosing a T-type thermocouple (copper-constantan). The lower probe functions as a reference probe which is not heated and measures the ambient temperature of the wood tissue. The two thermocouples are connected via the constantan ends to measure the temperature difference between the two probes at the end of the copper wires. All signal cables were connected to double-shielded cable wires, and each was differentially connected to a data logger (CR1000, Campbell Scientific Inc.). Measurements were taken every 30 s, and 30 min averages were recorded (Kume *et al.*, 2010, Laplace, 2013).

For a constant sap flux, and under conditions of thermal equilibrium of the system between the heater and the surroundings, it is assumed that input of heat by the Joule effect equal the quantity of heat dissipated at the wall of the probe (Granier, 1985). Sap flow ( $V$ ) can be determined by the equation:

$$V = \left[ \frac{1}{a} \times K \right]^{1/n} \quad (1)$$

$a$  and  $n$  are regression constants with  $a = 1.123$  and  $n = 1.19 \times 10^2$  and the dimensionless flow index  $\kappa = \left( \frac{E_0}{E_t} - 1 \right)$ , where  $E_0$  is the output voltage when  $V = 0$ , and  $E_t$  the output voltage at the current sap flow is moving. Moreover, we multiplied the  $V$  obtained by a correction factor of 1.35 to avoid an underestimation of  $V$  estimated by sensors compared to the actual  $V$  (cf. Kume *et al.*, 2010).

### 3. Meteorological measurement

Meteorological observations such as daily air temperature, relative humidity, precipitation and solar radiation were measured on a meteorological tower situated at approximately 400 m south of our site (23°40'N, 120°46'E). We used data recorded at 36 m above the ground, above the forest canopy.

## (III) Data analysis

### 1. Peak time frequency

To clarify diurnal variation in sap flux in each culm age class, we calculated the frequency of sap flux peak time in a day using 12 month data. This peak time can represent the diurnal variation of meteorological condition during the study period, and

can also show effect of stomatal behavior. As the meteorological conditions are assumed to be same between culm age classes, difference of the peak time suggest difference of stomatal behavior between culm age classes (Du *et al.*, 2011).

## 2. Stand-scale transpiration $E$

Sap flow measurements of the 34 culms along with estimates of culm section area per unit ground area can be used to scale-up individual measurements to the stand scale, as the following equation (Wullschleger *et al.*, 2001; Pataki and Oren, 2003; Kume *et al.*, 2010).

$$E = J_S \frac{A_{S\_stand}}{A_G} \quad (2)$$

in which

$$A_{S\_stand} = \sum_{i=1}^n A_{S\_bi} = \sum_{i=1}^n (b * DBH_i + a) \quad (3)$$

$$J_S = \frac{\sum_{i=1}^n V_i A_{S\_bi}}{\sum_{i=1}^n A_{S\_bi}} \quad (4)$$

where  $E$  is the stand-scale transpiration,  $J_S$  is the mean stand sap flux,  $A_{S\_stand}$  is the stand culm sectional area,  $A_G$  is the ground area,  $A_{S\_b}$  is the individual culm sectional area, DBH is the diameter at breast height, a and b are fitted parameters (see II. 3), and  $n$  is the number of samples.

## 3. Individual culm sectional area estimate

To estimate the stand-scale transpiration by using the above equation, we need to estimate all individual culm sectional area in the study plot. We use the regression equation of the relationship between the DBH and individual culm sectional area, which was built by using 61 bamboos in our study plot (Laplace, 2013). The following regression equation is:

$$y = 5.74x - 21.02 \quad (R^2 = 0.83, P < 0.0001) \quad (5)$$

where y: individual culm sectional area, and x: DBH.

# III · Results and Discussion

## (I) The distribution of DBH and culms age in study site

Because of the newborn culms, the number of the culms increased during the period from 2012 to 2014. The mean of DBH was 8.7 cm (n=134) in 2011, 8.4 cm (n=168) in 2012, 8.2 cm (n=245) in 2013 and 8.2 cm (n=276) in 2014. The stand density was 6494 culms per ha in month of 2014 with the mean height was 15 m.

The age distribution also changed every year. In 2013, there were 72 culms of one year old (29.39%), 39 culms of two years old (15.92%), 70 culms of more than two years old (newer) (28.57%), and 64 culms of more than two years old (older) (26.12%). In 2014, there were 31 culms of one year old (11.23%), 72 culms of two years old (26.09%), 39 culms of three years old (14.13%), 70 culms of more than three years old (newer) (25.36%) and 64 culms of more than three years old (older) (23.19%). The contribution of younger age culms (1yr + 2yr) were 45.31% and 37.32% in 2013 and 2014, respectively.

## **(II) Meteorological conditions**

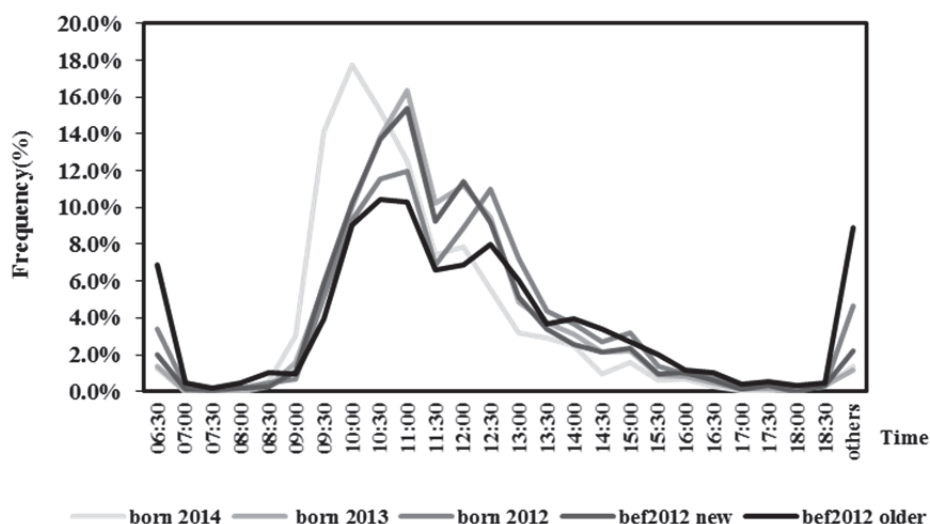
The mean temperature about 18.6°C, with a minimum of 5.1°C during February morning, and a maximum of 31.1°C during September afternoon. The mean relative humidity was 88.9 % ( $\pm 10.42$  %), with a mean daytime vapor pressure deficit (VPD) of 0.42 kPa. VPD did not showed apparent seasonal variation except VPD was higher during March 2015 to April. Mean annual daytime solar radiation was around 56 W m<sup>-2</sup>, and had no distinctive seasonal variation. The annual precipitation in the study period (July 2014 to June 2015) was 712.5 mm, which was lower than the mean annual precipitation for the area (2635 mm). The lower annual precipitation may be caused by the obvious El Niño in the study period (July 2014 to June 2015). Precipitation often occurred in the summer (June to August) and July 2014 showed higher precipitation.

## **(III) Diurnal variation and sap flux peak time in different culm age**

Sap flux data showed distinctive diurnal courses; the onset of sap flux occurred around 9 o'clock, and maximum values appeared around midday. The maximum values did not last for long time and sap flux decreased gradually throughout the afternoon and nearly zero during the night. The sap flux of all sample culms generally showed the similar diurnal variations. Previous study pointed that the vapor pressure deficit (VPD)

and solar radiation are the factors which strongly impact the diurnal variation (Dierick *et al.*, 2010), and our result also showed the same phenomenon that sap flux showed high correlation with VPD ( $R^2 = 0.797$ ) (Different correlation was showed in change-leaf season (April 2015),  $R^2 = 0.916$ .) and solar radiation ( $R^2 = 0.649$ ) (Different correlation was showed in change-leaf season (April 2015),  $R^2 = 0.786$ .) But there were still some difference in the peak time frequency to quantify these difference.

The peak time of the “Born 2014” group appeared earlier than other age groups (Fig. 1) and the peak time frequency of other groups appeared similar distribution, although the “Born 2012” group and “Before 2012 older” group showed slightly later peak time than “Born 2013” and “Before 2012 newer” group (Fig. 1).



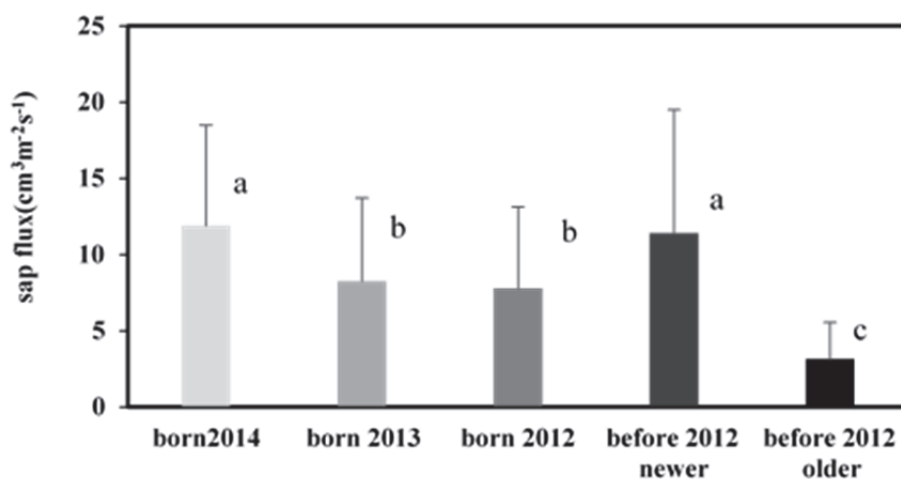
**Fig. 1** Frequency of peak time determined from diurnal variations in sap flux for each age groups (July 2014 ~ June 2015).

We assumed that this result correspond to the leaf lifespan cycle of moso bamboo, that is, a leaf of moso bamboo have a 2-year life span with exception of one-year old culms and the leaf of one-year old bamboo culms would fell after the first year (Li *et al.*, 1998). The peak time appeared earlier when the age group was in the new-leaf year (ie, Born 2014, Born2012), instead, the peak time frequency was unclear when the age group was in the old-leaf year (ie, Born 2013). According to Jarvis and McNaughton (1986), transpiration is influenced by stomatal conductance, which is mainly regulated by VPD. This result implies that the leaf stomata have a different sensitivity to VPD in different

age classes, and this result may be related to the deciduous cycle of moso bamboo.

#### (IV) Daytime mean sap flux

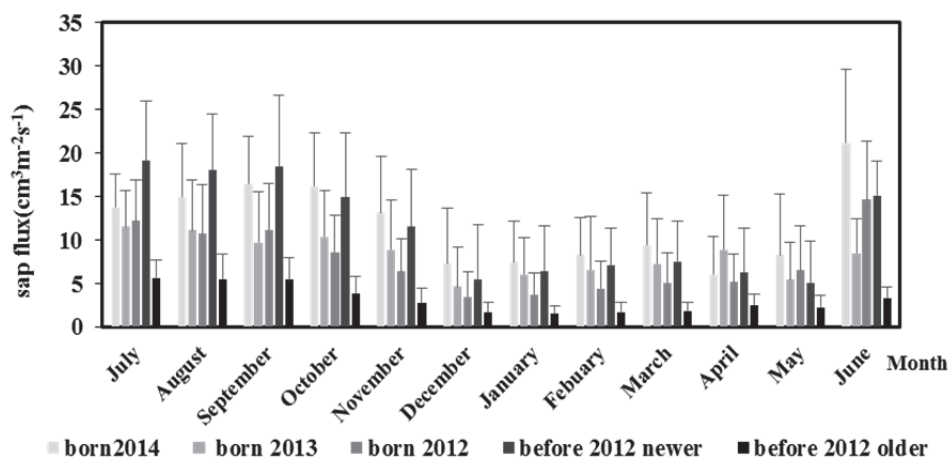
The difference of sap flux between each age was evaluated with daytime mean value in each age group. The daytime means the time period during 6:00 am to 18:00 pm in a day. The daytime mean sap flux of “Before 2012 older” group was obviously lower than that of other groups, and the “Born 2014” group and “before 2012 newer” group had faster daytime mean sap flux than those of other groups (Fig. 2).



**Fig. 2** The daytime mean sap flux averaged over during the period of July 2014 to June 2015. The difference between each groups are significant ( $p < 0.05$ ) except “born 2013” to “born 2012” and “born 2014” to “before 2012 newer”. The error bar represent the standard deviation value. The significant difference is analysis by one-way ANOVA and t-test. The a, b, c letters represent the result of t-test, that is, different letters represent that there are significant difference between groups.

We also examined the daytime mean sap flux using monthly mean data, indicating a higher rate showed in July and August and a lowest rate showed in December. Except April 2015, almost similar order of sap flux was found in monthly data as that of the whole study period average (Fig. 3). The daytime mean sap flux of “Born 2014” group and “Before 2012 newer” group was lower than “Born 2013” group in April 2015. This phenomenon may be caused by the leaf-replacement season of moso bamboos (April to June), that is, because of the 2-year leaf life span of moso bamboo (Li *et al.*, 1998), the

leaves of “Born 2014” group and “Before 2012 newer” group would fall in the leaf-replacement season (April, 2015), but the leaves of other age groups would not fall in 2015, and the numbers of leaves which stay on culms is one of the factors which can influence sap flux (Vertessy *et al.*, 2001).



**Fig. 3** The daytime sap flux average in each month (July 2014 to June 2015). The error bar represent the standard deviation value.

Sap flux can be influenced by morphological and physiological parameters, like stomatal pore size on leaves and xylem hydraulic characteristics (Philip, 1966; Nobel *et al.*, 1991). With increasing culm age, cell wall thickening of the fibers, tyloses and depositions may clog vessels and sieve tubes (Liese and Weiner, 1996; Cochard *et al.*, 1997). These phenomenon might cause the decrease of xylem hydraulic conductivity and hence stomatal conductance. Moreover, the leaf stomatal conductance decline with the increasing leaf age (Field, 1983; Vos and Oyarzun, 1987; Liese and Weiner, 1996). The numbers of leaf stomata may also decrease with the culm aging due to the decrease of nutrient transport efficiency (Liese and Weiner, 1996; Li *et al.*, 2000). Further physiological studies are need to clarify the reason for the lower daytime mean sap flux of “Before 2012 older” than that of other age groups in this site.

#### (V) Transpiration in different culm age

First, the transpiration in study site have a monthly variation with sap flux. The maximum was in July 2014 and the minimum was in in December 2014 (Fig. 4). Second, there was no significant change in the contribution proportion of transpiration

between months (Fig. 5). Third, because of the lowest sap flux in “Before 2012 older” group, the “Before 2012 older” groups get the lowest contribution of stand transpiration (5~10%) even though total number of “Before 2012 older” account for 23% of total culms (Fig. 5). While, because of the faster sap flux, the new born bamboos showed larger contribution of stand scale transpiration than oldest group even though the account of new born bamboos (11%) is far less than oldest bamboos (23~25%) in the study site. This result suggested that the contribution of stand-scale transpiration of age classes is influenced by both sap flux and numbers of culms in each age class and that the age structure could impact on stand transpiration estimates and that without consideration of age structure might cause under- or over-estimates of stand transpiration in the Moso bamboo forest.

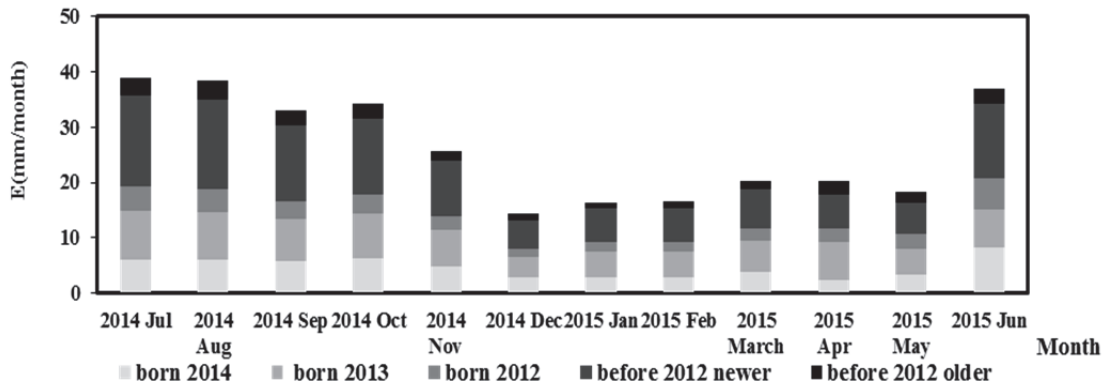


Fig. 4 The monthly transpiration in the study site (July 2014 to June 2015).

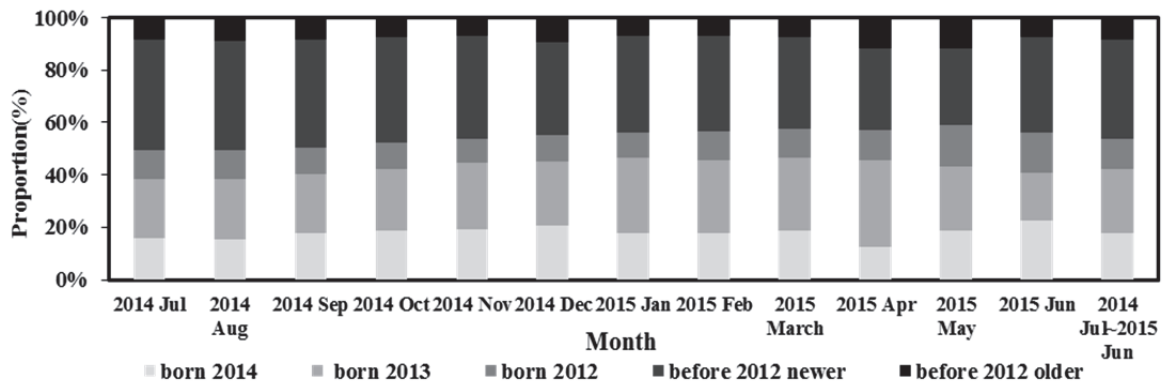


Fig. 5 The proportion (%) of transpiration from each age class in each month (July 2014 to June 2015).

## IV、Conclusion

This study was conducted to clarify change in DBH distribution with age structure in four years and impacts of culm age on individual sap flux and stand transpiration in the Moso bamboo forest in central Taiwan. This study showed considerable year-to-year variation in DBH distribution and age structure for four years. As well, this study revealed that culm age effected on the diurnal pattern of sap flux with the daytime mean sap flux. Consequently, the culm age structure of the bamboo forest affected the stand scale transpiration estimates, that is, the contribution of older age classes to total stand transpiration was considerably lower than that of younger culms due to lower sap flux in older culms. For the better understanding of stand-transpiration of bamboo forest for long term, the effect of the year-to-year variations in culm number with the age structure should be considered carefully.

## V、Acknowledgement

本研究承科技部經費補助(103-2313-B-002-009-MY3)以及國立台灣大學實驗林管理處提供氣象資料，謹此致謝。

## VI、Reference

- 白尚斌、周國模、王懿祥、余樹全、李艷華、方飛燕（2012）天目山國家級自然保護區毛竹擴散過程的林分結構變化研究。西部林業科學 41(1), 77-82.
- 戴廣耀, 楊寶霖, 沈榮江（1973）台灣竹林資源。農復會、林務局、航測隊、屏東專合作計畫。82頁
- Kobayashi, T., Tada, M. (2010) How do Moso bamboo forests change carbon sequestration and storage, and decomposition of soil organic matter in community forests? *Shinrin Kagaku* 53: 6-10 (in Japanese).
- Cochard, H., Peiffer, M., Le Gall, K., Granier, A. (1997) Developmental control of xylem hydraulic resistances and vulnerability to embolism in *Fraxinus excelsior* L: impacts on water relations. *Journal of Experimental Botany* 48(308): 655-663.
- Dierick, D., Holscher, D., Schwendenmann, L. (2010) Water use characteristics of a

- bamboo species (*Bambusa blumeana*) in the Philippines. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1568-1578.
- Du, S., Wang, Y. L., Kume, T., Zhang, J. G., Otsuki, K., Yamanaka, N., Liu, G. B. (2011) Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1-10.
- Field, C. (1983) Allocating Leaf Nitrogen for the Maximization of Carbon Gain: Leaf Age as a Control on the Allocation Program. *Oecologia (Berlin)* 56: 341-347.
- Gat, J. R., Matsui, E. (1991) Atmospheric water balance in the Amazon basin: An isotopic evapotranspiration model. *Journal of geophysical research* 96(D7) :13179-13188.
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. for.* 42(2):81-88. French.
- Jarvis, P.G., McNaughton, K.G. (1986) Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Adv. Ecol. Res.* 15, 1–49.
- James, S.A., Clearwater, M.J., Meinzer, F.C., Goldstein, G. (2002) Variable length heat dissipation sensors for the measurements of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiol.* 22: 277-283.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S. I., Sheffield, J., Goulden, M. L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., de Jeu, R., Dolman, A. J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B. E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A. D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang, K. (2010) Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467: 951-954.
- Komatsu, H., Onozawa, Y., Kume, T., Tsuruta, K., Kumagai, T., Shinohara, Y., Otsuki, K. (2010) Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: (II). Comparison with coniferous forests. *Forest Ecol. Manage.* 260: 1295-1302.
- Kume, T., Tsuruta, K., Komatsu, H., Kumagai, T., Higashi, N., Shinohara, Y., Otsuki, K. (2010a) Effects of sample size on sap flux-based stand-scale transpiration

- estimates. *Tree Physiol.* 30: 129-138.
- Kume, T., Onozawa, Y., Komatsu, H., Tsuruta, K., Shinohara, Y., Otsuki, K. (2010b) Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: (I). Applicability of the sap flux measurements. *Forest Ecol. Manage.* 260: 1287-1294.
- Laplace, S. (2013) Study on transpiration in a Taiwanese Moso bamboo forest using sap flow measurement. School of Forestry and Resource Conservation College of Bioresources and Agriculture National Taiwan University Master Thesis.
- Li, R., Werger, M. J. A., During, H. J., Zhong, Z. C. (1998) Biennial variation in production of new shoots in groves of the giant bamboo *Phyllostachys pubescens* in Sichuan, China. *Plant Ecology* 135: 103-112.
- Li, R., Werger, M. J. A., de Kroon, H., During, H. J., Zhong, Z. C. (2000) Interactions Between Shoot Age Structure, Nutrient Availability and Physiological Integration in the Giant Bamboo *Phyllostachys pubescens*. *Plant Biol.* 2: 437-446.
- Liese, W., Weiner, G. (1996) Ageing of bamboo culms. A review. *Wood Science and Technology* 30:77-89.
- Lobovikov, M., Ball, L., Guardia, M., Russo, L. (2005-2007) World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Nobel, P. S. (1991) *Physiochemical and environmental plant physiology*. 4th ed. San Diego, 635: Academic Press.
- Pataki, D.E., Oren, R. (2003) Species differences in stomatal control of water loss at the canopy scale in a mature bottomland deciduous forest. *Adv. Water Res.* 26: 1267-1278.
- Philip J.R. (1966) Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology* 17, 245-268. Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large Scale Parameters. *Mon. Weath. Rev.* 100:81-92.
- Running, S. W., Coughlan, J. C. (1988) A general model of forest ecosystem processes for regional applications: I. Hydrologic balance, canopy gas exchanged and primary production processes. *Ecological Modelling* 42: 125-154.

- Roberts, S., Vertessy, R., Grayson, R. (2001) Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management* 143:153-161.
- Vos, J., Oyarzun, P.J. (1987) Photosynthesis and stomatal conductance of potato leaves-effects of leaf age, irradiance, and leaf water potential. *Photosynthesis Research* 11: 253-264.
- Wullschlegel, S.D., Hanson, P.J., Todd, D.E. (2001) Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecol. Manage.* 143: 205-213.



## 應用臨前降雨指數模式推估集水區暴雨流量歷線

盧惠生<sup>1</sup> 林壯沛<sup>2</sup> 林介龍<sup>3</sup>

【摘要】本文採用臨前降雨指數(API)模式，來推估台灣中部淺山地區蓮華池3號試驗集水區與南部山區六龜試驗林之中寮溪集水區之暴雨流量歷線，以探討該模式對不同面積的台灣森林集水區之適用性。

蓮華池3號試驗集水區經14場推估暴雨流量歷線與觀測流量歷線之比較分析，與六龜試驗林之中寮溪集水區經13場推估暴雨流量歷線與觀測流量歷線之比較分析，証實API模式是一個結構簡易，且易於使用的水文模式，僅需知道4個參數，輸入降雨資料，即可獲得流量歷線，且推估之流量歷線可靠性，尚可接受。

蓮華池3號試驗集水區的API模式代表性參數值：K為0.8；X為0.5；暴雨量小於100 mm，I為0.140，S為0.0168；暴雨量大於100 mm，I為0.503，S為0.0297。中寮溪集水區的API模式代表性參數值：K為0.9；X為0.5；暴雨量小於100 mm，I為0.498，S為0.0055；暴雨量大於100 mm，I為0.573，S為0.0068。

蓮華池3號試驗集水區的面積小於中寮溪集水區，致蓮華池3號試驗集水區的代表性退水參數K值小於中寮溪集水區，蓮華池3號試驗集水區的代表性參數X值相等於中寮溪集水區，蓮華池3號試驗集水區的代表性參數I值小於中寮溪集水區，蓮華池3號試驗集水區的代表性參數S值大於中寮溪集水區。

【關鍵詞】臨前降雨指數模式、暴雨流量歷線、集水區

## APPLICATION OF AN ANTECEDENT PRECIPITATION INDEX MODEL TO STORMFLOW HYDROGRAPH ESTIMATION OF WATERSHEDS IN TAIWAN

Hui-sheng Lu<sup>1</sup> Jaung-pei Lin<sup>2</sup> Chieh-lung Lin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>農業委員會林業試驗所集水區經營組退休研究員，通訊作者

Retired Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture (Corresponding Author), E-mail: lusteve@tfri.gov.tw

<sup>2</sup>農業委員會林業試驗所集水區經營組副研究員

Associate Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture

<sup>3</sup>農業委員會林業試驗所集水區經營組助理研究員

Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture

**【 Abstract 】** This study estimated stormflow hydrographs using an antecedent precipitation index (API) model for understanding the adaptability of API to different size watersheds at the Lienhuachi experimental watershed no. 3 of central Taiwan and at the Chungliaohsi watershed within Liukuei experimental forest of southern Taiwan.

Based on the comparison analysis between the estimated and measured stormflow hydrographs from fourteen storm events at the Lienhuachi experimental watershed no. 3 and from thirteen storm events at the Chungliaohsi watershed of Liukuei experimental forest, the API model was shown to be a relatively simple and reliable method for simulating stormflow hydrographs. The only input data of this model were rainfall and four representative parameters.

The two representative parameters of Lienhuachi experimental watershed no. 3 were 0.8 for K value, and 0.5 for X value. I and S for the other two representative parameters of Lienhuachi experimental watershed no. 3 were 0.140 and 0.0168 for storm rainfall smaller 100 mm, and 0.503 and 0.0297 for storm rainfall larger 100 mm. The two representative parameters of Chungliaohsi watershed were 0.9 for K value, and 0.5 for X value. I and S for the other two representative parameters of Chungliaohsi watershed were 0.498 and 0.0055 for storm rainfall smaller 100 mm, and 0.573 and 0.0068 for storm rainfall larger 100 mm.

Since the area of Lienhuachi experimental watershed no. 3 was smaller than that of Chungliaohsi watershed, the representative recession parameter K of Lienhuachi experimental watershed no. 3 was less than that of Chungliaohsi watershed, and the representative parameter X of Lienhuachi experimental watershed no. 3 was equal to that of Chungliaohsi watershed, and the representative parameter I of Lienhuachi experimental watershed no. 3 was less than those of Chungliaohsi watershed, and the representative parameter S of Lienhuachi experimental watershed no. 3 was more than those of Chungliaohsi watershed.

**【 Key words 】** Antecedent precipitation index (API) model, Stormflow hydrograph, Watershed.

## I、前言

集水區水文分析為從事山坡地開發與集水區經營規劃之首要工作之一，如果水文分析完全仰賴水文觀測資料，則台灣大部份野溪集水區多半欠缺水文觀測站，導致因缺乏資料而無法進行。對於這些沒有水文觀測站的野溪集水區，即使立刻設置水文觀測站，量測水文變化，亦需要有長期紀錄水文資料，才有意義。紀錄過短的水文資料，其可靠性較低，若山坡地開發與集水區經營規劃時，方才開始設站量測水文，頗有緩不濟急之遺憾。

為彌補水文資料欠缺或過短之缺陷，採用水文模式來推估流量歷線與特性，不失為有效的集水區水文分析方法(Fleming, 1975)。然水文模式型態繁多，不論何種型態模式，它都能模擬過去與預測未來的水文事件。至於何種模式較為優越，則依該地區資料的充沛與使用人的熟練而定。結構簡單的水文模式，所需輸入資料較少，且易於了解與使用，但其功能受限。結構複雜的水文模式，所需輸入資料較多，難於了解與使用，但功能較廣。

鑑於台灣大多數的野溪集水區，各類基本資料較為欠缺，而一般林業及水土保持等集水區經營與坡地開發從業人員，對於集水區水文模式較為生疏，故結構較為簡易的水文模式，頗為適用於上游野溪集水區，而臨前降雨指數模式(API)屬於此類。該模式早期由Kohler與Linsley(1951)提出使用於推估暴雨流量，晚近Fedora與Beschta(1989)應用此模式，於美國五個集水區面積約70至10,000公頃間，推估暴雨流量歷線，效果良好。而Beschta (1990)亦應用此模式推估印度Wainganga河之水位變化歷線，效果亦佳。

雖然美國曾應用臨前降雨指數模式，於面積10,000公頃的集水區推估暴雨流量歷線，由於集水區面積愈大，地形愈複雜，水文模式的適用性更困難。台灣山區陡峭，起伏甚大，同樣面積大小集水區，其地形複雜度遠超過美國，故臨前降雨指數模式是否能適用於台灣不同面積的集水區，實有驗證的需要。本研究乃採用臨前降雨指數模式(API)，推估台灣山區不同面積之森林集水區暴雨流量歷線，以鑑明該模式在台灣特殊地形不同面積森林集水區之適用性，供上游野溪集水區規劃治理時推估逕流量之參考。

## II、材料與方法

### (I)理論分析

API 模式主要是利用暴雨流量歷線的退水曲線係數及降雨歷線，計算臨前降雨指數(antecedent precipitation index)，再由臨前降雨指數計算暴雨流量歷線。故 API 模式基本上分為三個主要部份，即退水係數計算、API 值計算、API 值推估暴雨流量歷線。

#### 1、退水係數計算

降雨歷線(rainfall hyetograph) 的時間分佈形狀與暴雨流量歷線 (stormflow hydrograph) 的時間分佈形狀非常相似，而不同之處乃在暴雨流量歷線較降雨歷線延後，洪峰流量時間較降雨最大強度發生時間稍遲，另外降雨歷線結束後，暴雨流量歷線仍繼續持續，以退水曲線的型態呈現。而退水曲線中流量遞減流出的方式，可以下式表達(Linsley *et al.*，1982)。

$$Q_t = Q_0 K^t \quad (1)$$

上式 $Q_0$ 為退水曲線中任何時間的流量( $m^3/s$ )， $Q_t$ 為 $Q_0$ 流量經過 $t$ 時間之流量遞減後的流量( $m^3/s$ )， $t$ 為時間(h)， $K$ 為退水係數(無因次)。如果假設 $t$ 為一個時間單位( $\Delta t$ )，即 $t=1$ ，而 $Q_0$ 以 $Q_{t-\Delta t}$ 表示， $Q_t$ 仍為 $Q_t$ ，則式(1)改寫為下式。

$$K = Q_t / Q_{t-\Delta t} \quad (2)$$

式(2)即為退水係數( $K$ )的計算式，而降雨停止後洪峰流量發生時刻以後之退水曲線，其各段時間的退水係數不是定值，也就是退水曲線中不同位置之退水係數是變異，它的變異趨勢大抵而言逐漸增大。故整個退水曲線之退水係數如以單一值表示，則以平均值代替。

#### 2、臨前降雨指數(API)計算

API 模式的某時刻臨前降雨指數，乃是以前一時刻的臨前降雨指數，乘以因時間的延後而造成臨前降雨指數衰減之係數，此係數以退水係數代替，再加上此時刻之降雨。如以公式表示，如下式：

$$API_t = (API_{t-\Delta t} \times K) + P_t \quad (3)$$

上式(3)中， $API_t$ 為 $t$ 時(h)之臨前降雨指數(mm)， $API_{t-\Delta t}$ 為 $t-\Delta t$ 時(h)之臨前降雨指數(mm)， $K$ 為退水係數(無因次)， $P_t$ 為 $t$ 時之降雨量(mm)。

#### 3、API推估暴雨流量歷線

API 值獲得以後，必須建立其與流量間之相關式，即 $API_t$ 與 $Q_t$ 之相關式，Fedora

與Beschta (1989)於美國的Oregon五個集水區探討 $API_t$ 與 $Q_t$ 之相關式，發現 $Q_t$ 之平方根與 $API_t$ 呈直線相關。然台灣地形與美國頗有差異，是否 $Q_t$ 之平方根與 $API_t$ 仍保持直線相關，值得商榷，故本文乃使用 $Q_t^x$ 代替 $Q_t^{0.5}$ ，以建立其與 $API_t$ 之關係，如下式：

$$Q_t^x = I + (S) (API_t) \quad (4)$$

式(4)中， $Q_t$ 為 $t$ 時間之每單位的流量深度(mm/h)， $API_t$ 為 $t$ 時間之臨前降雨指數(mm)， $I$ 與 $S$ 為係數。 $Q_t$ 之每單位的流量深度獲得後，乘以面積，再換算單位時間，即可轉換成一般之暴雨流量單位， $m^3/s$ 。

## (II)集水區概況

### 1、蓮華池3號試驗集水區概況

蓮華池3號試驗集水區位於南投縣魚池鄉林業試驗所蓮華池研究中心內，面積3.4公頃，主流長度270公尺，集水區最高標高781公尺，集水區最低標高666公尺，集水區平均坡度69%，主流河床平均坡度36%，密集度0.84，方位為東向(表1)(圖1)。年平均雨量約2,047 mm，五月至九月為雨季，佔全年雨量的82%。年平均溫度21.1℃，最冷為一月，平均溫度15.6℃，最暖為七月，平均溫度25℃，氣候屬暖濕型。

地質為新生代北部第三紀砂岩、頁岩構成。土壤為趨紅化作用之黃壤，表土為灰褐色砂質粘壤土，底土為棕黃粘質夾有岩石碎塊，團塊狀構造，質地鬆散易碎，屬大鞍系埴質黏土。集水區植生以樟科與殼斗科為主，林分鬱閉度在70%至90%間，地被植物則以厥類為主，植生型態為天然闊葉樹林(葛錦昭等，1978)。

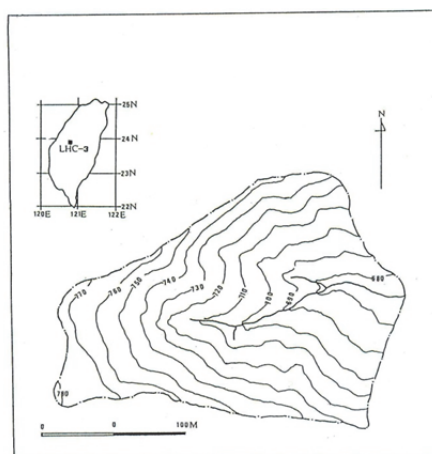


圖 1 蓮華池 3 號試驗集水區地形圖

Fig. 1. Location of the Lienhuachi experimental watershed no.3 at central Taiwan.

表 1 蓮華池 3 號試驗集水區地文特性  
 Table 1 Geomorphologic characteristics of the  
 Lienhuachi experimental watershed no.3.

地文特性	蓮華池 3 號試驗集水區
集水區面積(A, ha)	3.4
主流長度(L, m)	270
密集度( $2\sqrt{\pi A}/C$ )	0.84
平均坡度(%)	69
溪流平均坡度(%)	36
最高海拔高度(m)	781
最低海拔高度(m)	666
方位	E

## 2、中寮溪集水區概況

中寮溪集水區位於高雄縣六龜鄉林業試驗所六龜試驗林內，於中寮溪集水區主流海拔 520 m 處，設立水文觀測站，以監測暴雨量與暴雨流量。中寮溪集水區面積 721 ha，平均坡度 59.7%，溪流平均坡度 18.6%，方向朝向西南，密集度 0.65，主流最高海拔 1,800 m，主流最低海拔 520 m，主流長度 6,900 m(表 2)(圖 2)。中寮溪集水區的年平均雨量約 2,880 mm，年平均溫度約 19 °C，年平均最高溫度約 23 °C，年平均最低溫度約 11 °C，年相對濕度約 86%。

地質屬第三紀亞變質岩之新高層與廬山層，由黑色到深灰色的硬頁岩、板岩、千枚岩及深灰色的硬砂岩所組成，含有零星散布的泥灰岩團塊。較平緩的山頂或稜線，以黃棕色黃壤為主，較陡峭之山腰則以崩積石質土為主。中寮溪集水區天然植群分佈在 1,500 m 以下為楠櫨林帶，1,500 m 以上為櫟林帶。楠櫨林帶主要為小西氏楠(賽楠)－瓊楠型，可細分為紅皮－小錦－台灣栲、落葉楠－印度栲－五掌楠、山龍眼、瓊楠－山香圓、瓊楠－糊栲、楓香(人為干擾、地形造成)等亞型。櫟林帶主要為長尾柯型，可細分為長尾栲－變異木薑子型，長尾栲－菱果石櫟與紅檜亞型。

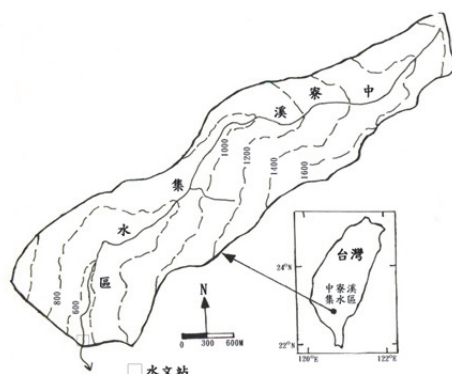


圖 2 中寮溪集水區地形圖

Fig. 2. Location of the Chungliaohsi watershed at the Liukuei experimental forest of southern Taiwan.

表 2 中寮溪集水區地文特性

Table 2 Geomorphologic characteristics of the Chungliaohsi watershed.

地文特性	中寮溪集水區
集水區面積(A, ha)	721
主流長度(L, m)	6,900
密集度( $2\sqrt{\pi A}/C$ )	0.65
平均坡度(%)	59.7
溪流平均坡度(%)	18.6
最高海拔高度(m)	1,800
最低海拔高度(m)	520
方位	SW

### (III) 水文分析程序

#### 1、水文資料收集整理

由蓮華池3號試驗集水區雨量與流量觀測資料自1976年至1980年，選取資料完整之暴雨流量歷線，共14場。又由中寮溪集水區雨量與流量觀測資料自2004年至2008年，選取資料完整之暴雨流量歷線，共13場。

#### 2、退水係數計算

將各場暴雨之流量歷線以式(2)來計算其退水係數，求平均值( $k_m$ )，並由推估流量歷線反求最佳退水係數(K)。

### 3、臨前降雨指數計算

以式(3)及最佳退水係數(K)代入，計算各場暴雨之臨前降雨指數時間變化，即值API<sub>t</sub>值。

### 4、推估暴雨流量歷線

以式(4)的方式，建立Q<sub>t</sub><sup>x</sup>與API<sub>t</sub>間之關係，並推估暴雨流量歷線。

### 5、最佳參數的檢驗

本研究的API模式共有4個參數，即式(3)的K及式(4)之X、I及S。這4個參數中的I及S為Q<sub>t</sub><sup>x</sup>與API<sub>t</sub>之間的迴歸式係數，可由統計方法之迴歸係數求解獲得，但K與X則使用網格法(grid method) (Lu, 1992)，以推估流量與觀測流量之差異為最小方式，建立目標函數(objective function) (Sorooshian and Gupta, 1983)，如下式，尋找最佳K與X值。

$$E = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_c - Q_0)^2 \right]^{1/2} = \text{Minimum} \quad (5)$$

式(5)中Q<sub>c</sub>為推估流量(mm/h)，Q<sub>0</sub>為觀測流量(mm/h)，E為平均差異值(mm/h)。將不同的K與X輸入模式中，由式(5)計算比較差異值(E)，選取E值為最小K與X，即最佳K與X值。

### 6、演算流程如圖3。

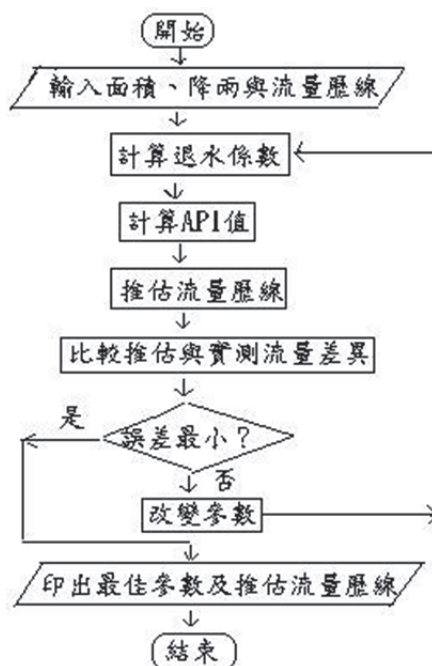


圖 3 以 API 模式推估流量歷線流程圖

Fig. 3. Flow chart for estimating stormflow hydrographs using the API model.

### III、結果與討論

#### (I) 蓮華池3號試驗集水區

##### 1、推估暴雨流量歷線與實測暴雨流量歷線之比較

將蓮華池3號試驗集水區14場暴雨流量推估歷線與觀測歷線特性列表如表3。由表3的資料顯示，排列在前面的8場暴雨(編號1-8)，其降雨量均小於100 mm，排列在後面6場暴雨(編號9-14)，其降雨量均大於100 mm。由推估流量歷線與觀測流量歷線的逕流體積而論，它們的誤差不大，在-1.25%至3.75%間，而洪峰流量的誤差則參差不齊，約在-37.16%至1.07%間，主要原因乃本文設定之目標函數式(5)，以尋找推估流量歷線的每一個流量值與觀測流量歷線的對應值均接近，並不只單一推估最佳的洪峰流量，也就是本文考量尋找最佳的推估流量歷線，而逕流體積的誤差指標，比較接近最佳推估流量歷線。

至於參數的變異性，各場暴雨流量觀測歷線計算的平均退水係數(Km) 與由推估流量歷線尋找到的最佳退水係數(K)，並不吻合，互有差異，乃因每場暴雨流量歷線在無雨退水段，可計算一系列的退水係數，這些退水係數因退水段歷線係數的不均勻退水，致不同退水段位置計算自然會不一致。大體而言，由無雨之退水段開始，退水係數由小而大，而模式中找到的最佳退水係數 (K)，乃是這些不同退水段位置之退水係數最佳代表值，自然與平均退水係數意義不同。至於為何要比較平均退水係數與模式之最佳退水係數，乃是如果平均退水係數與模式之最佳退水係數吻合或相關性甚佳，則模式的最佳退水係數可以依平均退水係數計算。另外各場暴雨間之平均退水係數與最佳退水係數亦不同，但大多在0.7至0.9間，然亦有分佈在此間距之外的特殊值。影響退水係數的因素頗多包括降雨特性、面積、地形、地質、土壤含水量等。陳明杰與李肇文(1993)分析蓮華池與畢祿溪試驗集水區的退水係數，鑑明退水係數隨集水區面積增加而增加，也就是退水趨勢隨面積增加而愈趨緩和，同時也顯示退水係數在不同月份間參差不一致。由該文的結果可以証實本文分析各場暴雨間之平均退水係數與最佳退水係數是合理的。

再則參數中的X值變化，有10個X值為0.4，4個X值為0.6，乃是本文在尋找最佳值的步驟，先以較大的值範圍搜索，然後當推估流量歷線的誤差僅稍微增加之情況下，縮小值之搜索範圍在0.4至0.6間，顯示X值固定在某一中間值時，雖略有減少推估流量精確度之慮，但仍能有效的達成其效果。而參數中之I與S，由表3各場暴雨流量歷線所得之值，變異甚大，I值多位於0.1至1.0間，而S值多位於0.01至0.04

間，由式(3)與式(4)可知API受到退水係數K值之影響， $Q^X$ 受到X之影響，故參數S與I乃隨K與X變異而改變。

另外關於推估流量歷線與觀測流量歷線形狀的吻合情形，以發生在1977年7月26日開始之暴雨流量歷線(編號10) (圖4)為例而言，其總雨量為224.5 mm，觀測總流量為92.24 mm，推估總流量92.26 m，兩者差異僅0.02%，觀測洪峰流量.057 m<sup>3</sup>/s，推估洪峰流量0.048 m<sup>3</sup>/s，兩者差異-15.97%，推估洪峰時間比觀測洪峰時間延後1小時，兩者差異7.69%，推估流量歷線與觀測流量歷線的形狀變化頗為相似，如詳細觀察兩者間之差異，推估流量歷線比較依降雨歷線(rainfall hyetograph)的升降而變化，觀測流量歷線雖然大致亦隨降雨歷線的變異而變化，但不若推測流量歷線般的細膩，乃因採用API模式推估流量歷線，主要依賴兩個物理因子，一為降雨量變化，另一為退水係數，而降雨量變化影響推估流量歷線的升降變化，退水係數則影響推估流量歷線升降的快慢程度，故推測流量歷線比較接近降雨歷線的變化。致於觀測流量歷線的變化，由觀測資料與水文現象而言，大體而言，觀測流量歷線變化的主要來源為降雨歷線變化，但觀測流量歷線形狀除受到降雨歷線的影響外，尚受到地形、地質、土壤物理性質的影響，此外觀測儀器的靈敏度與儀器的時鐘同步因素，均影響觀測流量歷線的形狀變化，也就是影響觀測流量歷線的因素過於錯綜複雜，而模式乃是簡化自然因素去推估流量歷線，API模式發展的構想，更是希望以較簡單而易於演算的方式來推估流量歷線，以簡化自然結構的模式去推估錯綜複雜因素的流量歷線，當然無法完全吻合，但至少API模式推估流量歷線的形狀變化，還不至與觀測流量歷線變化相差過於離譜。

表3 蓮華池3號試驗集水區以API模式及其最佳參數推估暴雨流量特性與觀測流量特性之差異

Table 3 Comparison of runoff characteristics for measured and estimated stormflow hydrographs using the API model and its best parameter values at the Lienhuachi experimental watershed no.3 of central Taiwan.

暴雨 編號	日期	雨量 (mm)	逕流量 (mm)	Km	K	X	I	S	推估與觀測 流量間之誤差	
									逕流 體積 (%)	洪峰 流量 (%)
1	1976/06/25	28.5	1.60	0.84	0.92	0.4	0.1941	0.0140	1.96	-12.98
2	1977/07/25	55.2	3.67	0.73	0.64	0.6	0.2259	0.0214	-0.20	-7.43
3	1977/09/22	42.0	1.78	0.93	0.72	0.6	0.1382	0.0104	-0.01	-5.88
4	1977/09/24	30.2	1.49	0.85	0.50	0.4	0.3248	0.0158	-1.25	-0.20
5	1977/10/30	29.5	1.29	0.82	0.84	0.4	0.2203	0.0143	1.85	-21.79
6	1978/05/18	39.0	1.62	0.79	0.68	0.4	0.2545	0.0167	3.75	-30.17
7	1980/06/03	21.8	1.08	0.79	0.86	0.4	0.2471	0.0126	1.50	-37.16
8	1980/07/29	47.5	3.23	0.52	0.76	0.4	0.0303	0.0245	0.09	1.07
9	1976/07/02	564.4	331.05	0.97	0.79	0.4	1.0094	0.0192	0.80	-9.96
10	1977/07/26	224.5	92.24	0.98	0.75	0.6	0.7163	0.0346	0.02	-15.97
11	1977/08/22	243.0	110.68	0.88	0.80	0.4	0.7306	0.0191	-0.58	-13.76
12	1978/05/19	141.2	39.14	0.95	0.92	0.4	0.3002	0.0160	0.97	-19.69
13	1978/07/31	197.4	59.73	0.84	0.87	0.4	0.1922	0.0255	2.28	-12.13
14	1979/08/24	343.9	176.92	0.87	0.87	0.6	0.5882	0.0295	0.02	-19.50

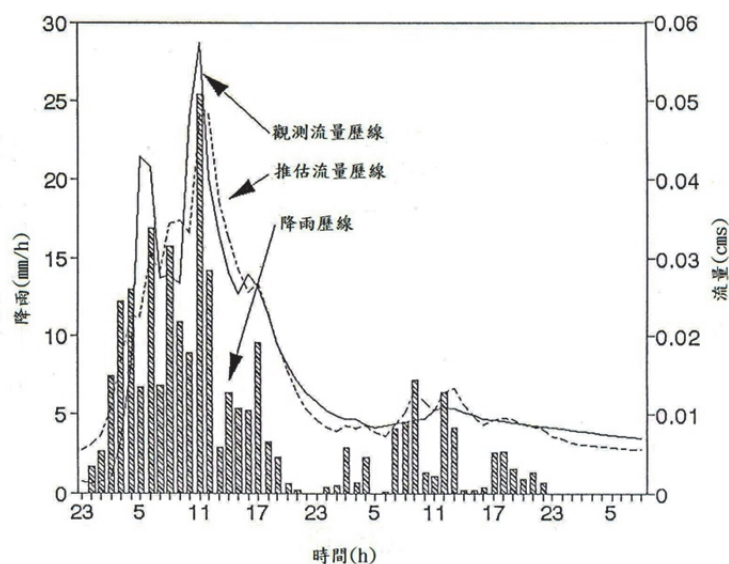


圖4 蓮華池3號試驗集水區以API模式及其最佳參數推估暴雨流量歷線與觀測流量歷線之比較(1977年7月26日，編號10)

Fig. 4. The measured and estimated hydrographs (No. 10, 1977/07/26) using the API model and its best parameters at the Lienhuachi experimental watershed no.3 of central Taiwan.

## 2、API 模式推估暴雨流量歷線的代表性參數

由表3可知蓮華池3號試驗集水區，使用模式推估暴雨流量歷線時，14場暴雨的4個最佳參數(K, X, I, S)均互有差異，但真正應用API模式去推估暴雨流量歷線時，必須先知道該集水區的API參數，再以雨量資料輸入，推估暴雨流量歷線，才有意義，也就是必須要找到代表性參數值。

由表3的參數K值，在0.7至0.9間，而X值在0.4至0.6間，基於代表性平均參數的理念，對K與X而言，選取中值，即最佳退水係數K值為0.8，而X值為0.5，至於此最佳退水係數是否合理，由於蓮華池3號試驗集水區坡度陡(69%)，土壤淺薄，且面積小(3.4 ha)，其退水趨勢應較為迅速，也就是退水係數應較小，蓮華池3號集水區K值選取0.8，如與美國Flynn Creek集水區K值為0.91 (200 ha)及BranchCreek集水區K值為0.90 (70 ha)相比(Fedora and Beschta, 1989)，蓮華池3號試驗集水區面積更小(3.4 ha)，加以坡陡土淺，其K值選取0.8，應尚為合理。至於X值取0.5，與美國不同面積及地區之集水區X值均為0.5(Fedora and Beschta, 1989; Beschta, 1990)，獲得相同的結果。

另外API模式參數中的I與S，將14場暴雨流量歷線之API與 $Q^{0.5}$ 全部數據混合，建立迴歸式，再以此迴歸式I的與S，推估各暴雨流量歷線，發現各場推估暴雨流量歷線與觀測歷線之準確性，差異過大。為改進此類的缺失，不得已將場暴雨分為二群，一群為較小的暴雨(編號1至8)，其雨量小於100 mm，另一群為較大的暴雨(編號9至14)，雨量大於100 mm，然後由此二群暴雨各挑5場暴雨，較小暴雨群挑選編號1-3及編號5-6，建立I與S之代表性參數，編號4與7及8用來驗證此代表性參數值。較大暴雨群挑選編號10-14，建立I與S之代表性參數，編號9用來驗證此代表性參數值。即將其API與 $Q^{0.5}$ 之數據分別混合，建立迴歸式，再以此二群迴歸式的I與S，分別推估其暴雨流量歷線，發現雖然並非很理想，但至少獲得改善。茲將此二群大小暴雨之API與 $Q^{0.5}$ 之關係如圖5與圖6，並列其關係式如下：

暴雨小於100 mm，API與 $Q^{0.5}$ 之關係式：

$$Q^{0.5} = 0.140 + 0.0168 \text{ API}, r^2=0.75, n=74 \quad (6)$$

暴雨大於100 mm，API與 $Q^{0.5}$ 之關係式：

$$Q^{0.5} = 0.503 + 0.0297 \text{ API}, r^2=0.78, n=208 \quad (7)$$

上兩式， $Q^{0.5}$ 單位為 $(\text{mm/hr})^{0.5}$ ，API單位為(mm)，而小暴雨之I為0.140，S為0.0168，大暴雨之I為0.503，S為0.0297。

由式(6)與式(7)之係數可知，暴雨量較小的如雷陣雨或時間較短的西南季風雨，其API模式之參數I與S均比暴雨量較大如颱風雨為小，此現象亦不難理解，乃土壤最大涵蓄水分量有一定的限度的，尤其是坡陡土淺的集水區，其土壤最大涵蓄水分量均比坡緩土深更為減少，故雨量小的暴雨，逕流量佔降雨量的比率較小，此乃土壤最大涵蓄水分的效果，而雨量較大的暴雨，逕流量佔降雨量的比率較大，此乃土壤最大涵蓄水分有一定限度的限制，故雨量小的暴雨，其 $Q^{0.5}$ 與API之間的係數要比雨量大的暴雨為小。

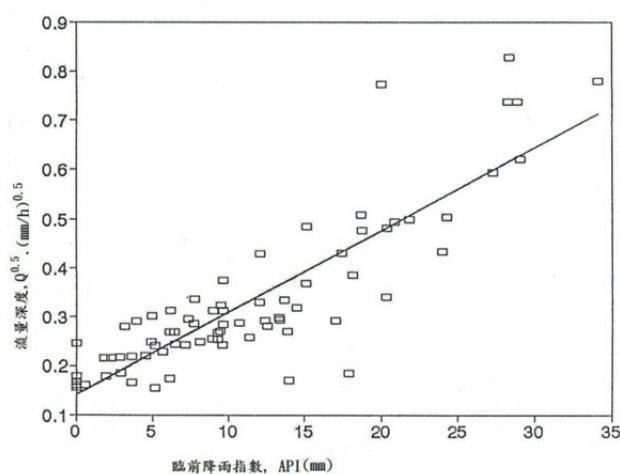


圖5 雨量小於100mm之暴雨，蓮華池3號試驗集水區API與流量間之關係  
Fig. 5. The relationship between stormflow and API at the Lienhuachi experimental watershed no.3 for rainfall less than 100 mm.

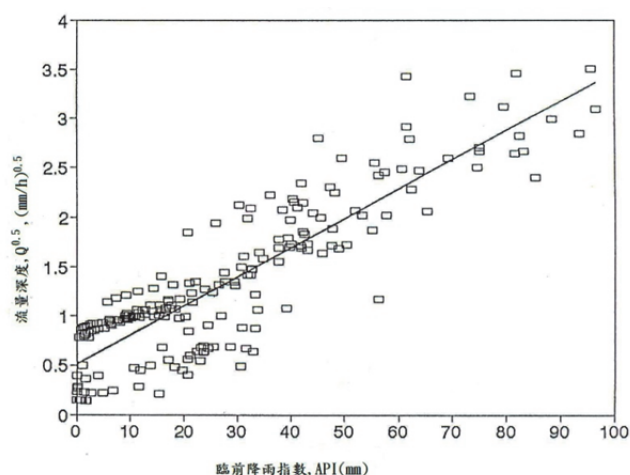


圖6 雨量大於100mm之暴雨，蓮華池3號試驗集水區API與流量間之關係  
Fig. 6. The relationship between stormflow and API at the Lienhuachi experimental watershed no.3 for rainfall greater than 100 mm.

### 3、應用API模式的代表性參數推估暴雨流量歷線

既然已經建立了代表性參數值，現將蓮華池3號試驗集水區API模式的4個代表性參數，K(0.80)、X(0.5)、I(雨量<100 mm為0.140，雨量>100 mm為0.503)、S(雨量<100 mm為0.0168，雨量>100 mm為0.0297)，應用來推估此14場暴雨流量歷線，其推估流量歷線特性如表4。

由表4之結果顯示，以代表性參數推估14場暴雨流量歷線與觀測流量歷線的逕流體積而論，它們的誤差率參差不齊在-35.45%至23.68%間，而洪峰流量的誤差率在-42.37%至31.91%間，由逕流體積與洪峰流量之誤差率而言，使用代表性參數推估流量歷線的逕流體積與洪峰流量，並不是每一場推估之暴雨流量特性均能達到精確的程度，這是幾乎所有水文模式的困境，如HEC-1、TANK等模式應用於台灣地區(黃景春，1988；鄭皆達等，1994)。雖然蓮華池3號試驗集水區使用此代表性參數推估流量歷線特性，無法達到完全令人滿意程度，但至少尚有部份的推估流量歷線特性達到勉可接受的水準。

表4 蓮華池號3號試驗集水區以API模式及其代表性參數推估暴雨流量特性與觀測流量特性之差異

Table 4 Comparison of runoff characteristics for measured and estimated stormflow hydrographs using the API model and its representative parameter values at the Lienhuachi experimental watershed no.3 of central Taiwan.

暴雨編號	日期	雨量(mm)	逕流量(mm)	推估與觀測流量間之誤差	
				逕流體積(%)	洪峰流量(%)
1	1976/06/25	28.5	1.60	-13.78	-1.33
2	1977/07/25	55.2	3.67	-26.12	-25.98
3	1977/09/22	42.0	1.78	14.60	31.91
4	1977/09/24	30.2	1.49	-5.55	-28.07
5	1977/10/30	29.5	1.29	6.69	-6.78
6	1978/05/18	39.0	1.62	23.68	-28.53
7	1980/06/03	21.8	1.08	-7.59	-27.28
8	1980/07/29	47.5	3.23	-12.65	-42.37
9	1976/07/02	546.4	331.05	-35.45	-24.77
10	1977/07/26	224.5	92.24	-10.00	-1.84
11	1977/08/22	243.0	110.68	4.42	-7.81
12	1978/05/19	141.2	39.14	21.62	-5.49
13	1978/07/31	197.4	59.73	10.92	-28.76
14	1979/08/24	343.9	176.92	-21.87	-21.51

至於使用代表性參數推估流量歷線與觀測流量歷線形狀的吻合情形，仍以發生在1977年7月26日開始之暴雨流量歷線編號10(圖7)為例而言，總雨量224.5 mm，觀

測總流量92.24 mm，推估總流量83.01 mm，兩者差異-10.00%，觀測洪峰流量0.057 m<sup>3</sup>/s，推估洪峰流量0.056 m<sup>3</sup>/s，兩者差異-1.84%，推估洪峰流量時間比觀測洪峰流量時間延後1小時，兩者差異7.69%，推估流量歷線與觀測流量歷的形狀變化頗為相似，但總體而言，代表性參數推估之暴雨流量歷線(圖7)與最佳參數推估之暴雨流量歷線(圖4)相比較，代表性參數之流量歷線與觀測歷線吻合度要比最佳參數之流量歷線稍差，但尚可接受。

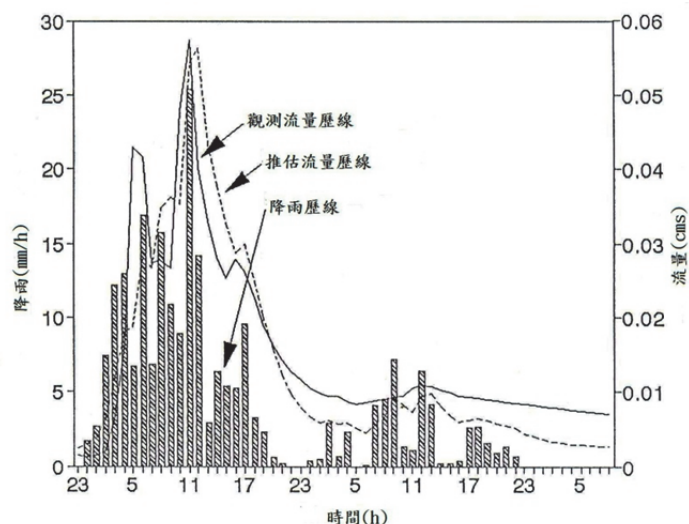


圖7 蓮華池3號試驗集水區以API模式及其代表性參數推估暴雨流量歷線與觀測流量歷線之比較(1977年7月26日，No.10)

Fig. 7. The measured and estimated hydrographs (No. 10,1977/07/26) using the API model and representative parameters at the Lienhuachi experimental watershed no.3 of central Taiwan.

## (II) 中寮溪集水區

### 1、推估暴雨流量歷線與實測暴雨流量歷線之比較

將中寮溪集水區13場暴雨流量推估歷線與觀測歷線特性列表如表5。由表5的資料顯示，排列在前面的8場暴雨(編號1-8)，其降雨量均小於100 mm，排列在後面5場暴雨(編號9-13)，其降雨量均大於100 mm。由推估流量歷線與觀測流量歷線的逕流體積而論，它們的誤差不大，在-0.27%至0.25%間，而洪峰流量的誤差則參差不齊，約在-14.61%至1.24%間，主要原因如同蓮華池3號試驗集水區，本文設定之目標函數式(5)，以尋找推估流量歷線的每一個流量值與觀測流量歷線的對應值均接近，並不只單一推估最佳的洪峰流量，也就是本文考量尋找最佳的推估流量歷

線，而逕流體積的誤差指標，比較接近最佳推估流量歷線。

至於參數的變異性，各場暴雨流量觀測歷線計算的平均退水係數( $K_m$ ) 與由推估流量歷線尋找到的最佳退水係數( $K$ )，並不吻合，互有差異，其原因如同蓮華池3號試驗集水區，每場暴雨流量歷線在無雨退水段，可計算一系列的退水係數，退水係數因退水段歷線係數的不均勻退水，致不同退水段位置計算自然會不一致。而模式中找到之最佳退水係數 ( $K$ )，乃是這些不同退水段位置之退水係數最佳代表值，自然與平均退水係數意義不同。另外各場暴雨間之平均退水係數與最佳退水係數亦不同，但大多在0.6至0.95間，其分布範圍比蓮華池3號試驗集水區略大，然亦有分佈在此間距之外的特殊值，同時也顯示退水係數在不同月份間參差不一致。

再則參數中的 $X$ 值變化，有9個 $X$ 值為0.4，4個 $X$ 為0.6。而參數中之 $I$ 與 $S$ ，由表5各場暴雨流量歷線所得之值，變異甚大， $I$ 值多位於0.3至0.9間，而 $S$ 值多位於0.002至0.016間，由式(3)與式(4)可知API受到退水係數 $K$ 值之影響， $Q^x$ 受到 $X$ 之影響，故參數 $S$ 與 $I$ 乃隨 $K$ 與 $X$ 變異而改變。

另外關於推估流量歷線與觀測流量歷線形狀的吻合情形，以發生在2004年9月10日開始之暴雨流量歷線(編號9)(圖8)為例而言，其總雨量為129.5 mm，觀測總流量為25.19 mm，推估總流量25.12 mm，兩者差異僅-0.27%，觀測洪峰流量1.792 m<sup>3</sup>/s，推估洪峰流量1.533 m<sup>3</sup>/s，兩者差異-14.44%，推估洪峰時間與觀測洪峰時間相同，兩者無差異，推估流量歷線與觀測流量歷線的形狀變化頗為相似，如詳細觀察兩者間之差異，推估流量歷線比較依降雨歷線(rainfall hyetograph)的升降而變化，觀測流量歷線雖然大致亦隨降雨歷線的變異而變化，但不若推測流量歷線般的細膩，因影響觀測流量歷線的因素過於錯綜複雜，以簡化自然結構的模式去推估錯綜複雜因素的流量歷線，當然無法完全吻合，但至少API模式推估流量歷線的形狀變化，還不至與觀測流量歷線變化相差過於離譜。

表5 中寮溪集水區以API模式及其最佳參數推估暴雨流量特性與觀測流量特性之差異

Table 5 Comparison of runoff characteristics for measured and estimated stormflow hydrographs using the API model and its best parameter values at the Chungliahsi watershed within Liukuei experimental forest of southern Taiwan.

暴雨編號	日期	雨量(mm)	逕流量(mm)	Km	K	X	I	S	推估與觀測流量間之誤差	
									逕流體積(%)	洪峰流量(%)
1	2005/02/25	25.5	4.91	0.99	0.77	0.6	0.5190	0.0023	0.00	0.18
2	2006/06/01	18.0	2.12	0.93	0.71	0.4	0.5187	0.0074	-0.03	-1.29
3	2006/06/06	47.0	6.46	0.95	0.66	0.4	0.5601	0.0040	-0.11	-2.49
4	2006/09/14	45.0	7.87	0.97	0.94	0.4	0.6023	0.0036	0.13	-2.00
5	2007/06/20	57.5	7.81	0.94	0.62	0.4	0.6817	0.0066	0.08	-3.93
6	2007/06/26	44.5	5.72	0.97	0.78	0.4	0.6714	0.0020	-0.02	1.24
7	2007/07/09	20.0	2.45	0.94	0.74	0.6	0.3908	0.0054	-0.04	-2.67
8	2007/07/31	46.0	6.68	0.88	0.77	0.6	0.3544	0.0164	-0.12	0.55
9	2004/09/10	129.5	25.19	0.99	0.95	0.6	0.4153	0.0058	-0.27	-14.44
10	2006/04/15	105.5	23.72	0.94	0.82	0.4	0.6380	0.0089	0.23	-13.22
11	2006/09/07	108.0	21.98	0.95	0.95	0.4	0.6420	0.0055	0.25	-13.63
12	2007/09/11	140.5	38.06	0.93	0.56	0.4	0.8669	0.0079	0.01	-5.20
13	2008/06/02	314.0	151.94	0.99	0.95	0.4	0.8180	0.0040	0.23	-14.61

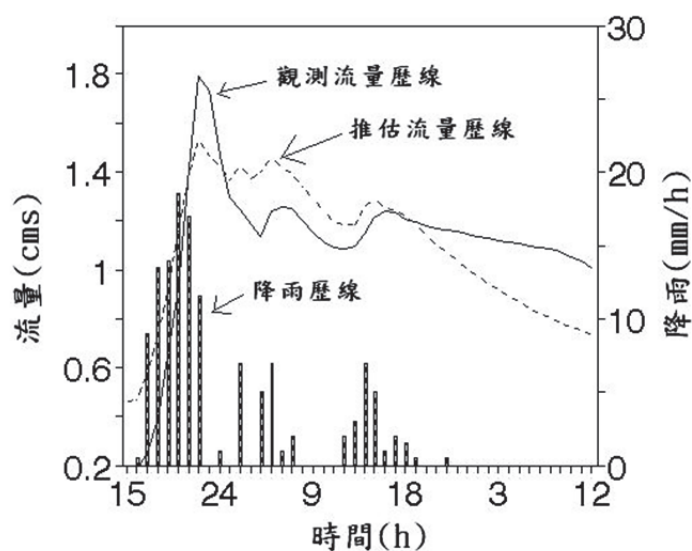


圖8 中寮溪集水區以API模式及其最佳參數推估暴雨流量歷線與觀測流量歷線之比較(2004年9月10日, No. 9)

Fig. 8. The measured and estimated hydrographs (No. 9, 2004/09/10) using the API model and its best parameters at the Chungliahsi watershed within Liukuei experimental forest of southern Taiwan.

## 2、API 模式推估暴雨流量歷線的代表性參數

由表5可知中寮溪集水區，使用模式推估暴雨流量歷線時，13場暴雨的4個最佳參數(K, X, I, S)均互有差異。

由表5的參數K值，大多在0.6至0.95間，而X值在0.4至0.6間，基於代表性平均參數的理念，對K與X而言，選取中值，即最佳退水係數K值為0.9，而X值為0.5，為K與X之代表性參數值，至於是否合理，由於中寮溪集水區坡度陡(60%)，土壤淺薄，面積大(721 ha)，其退水趨勢應較屬中等，也就是退水係數應適中，中寮溪集水區K值選取0.9，如與蓮華池3號試驗集水區K值為0.8(3.4 ha)，中寮溪集水區面積較大(721 ha)，但坡陡土淺，其K值選取0.9，應尚為合理。至於X值取0.5，與蓮華池3號試驗集水區及美國不同面積及地區之集水區值均為0.5(Fedora and Beschta, 1989; Beschta, 1990)，獲得相同的結果。

另外API模式參數中的I與S之代表性參數值，將13場暴雨流量歷線之API與 $Q^{0.5}$ 全部數據混合，建立迴歸式，再以此迴歸式的I與S為代表性參數值，推估各暴雨流量歷線，發現各場推估暴雨流量歷線與觀測歷線之準確性，差異過大。為改進此類的缺失，不得已將場暴雨分為二群，一群為較小的暴雨編號1-8，其雨量小於 100 mm，另一群為較大的暴雨編號9-13，雨量大於100 mm。然後由較小的暴雨群挑6場暴雨，編號1-6，建立I與S之代表性參數值，編號7與8用來驗證此代表性參數值。較大的暴雨群挑3場暴雨，編號9-11，建立I與S之代表性參數值，編號12與13用來驗證此代表性參數值。即將其API與 $Q^{0.5}$ 之數據分別混合，建立迴歸式，再以此二群迴歸式的I與S，分別推估其暴雨流量歷線，發現雖然並非很理想，但至少獲得改善。茲將此二群大小暴雨之API與 $Q^{0.5}$ 之關係如圖9與圖10，並列其關係式如下：

暴雨小於100 mm，API與 $Q^{0.5}$ 之關係式：

$$Q^{0.5} = 0.498 + 0.0055 \text{ API}, r^2=0.51, n=98 \quad (8)$$

暴雨大於100 mm，API與 $Q^{0.5}$ 之關係式：

$$Q^{0.5} = 0.573 + 0.0068 \text{ API}, r^2=0.58, n=116 \quad (9)$$

上兩式， $Q^{0.5}$ 單位為(mm/h)<sup>0.5</sup>，API單位為(mm)，而小暴雨代表性參數值之I為0.489，S為0.0055，大暴雨代表性參數值之I為0.573，S為0.0068。

由式(8)與式(9)之係數可知，暴雨量較小的降雨，其API模式之代表性參數值I與S均比暴雨量較大的降雨為小，此現象亦如同蓮華池3號試驗集水區，乃土壤最大涵蓄水分量有一定的限度的，尤其是坡陡土淺的集水區，其土壤最大涵蓄水分

量均比坡緩土深更為減少，故雨量小的暴雨，逕流量佔降雨量的比率較小，此乃土壤最大涵蓄水分的效果，而雨量較大的暴雨，逕流量佔降雨量的比率較大，此乃土壤最大涵蓄水分有一定限度的限制，故雨量小的暴雨，其 $Q^{0.5}$ 與API之間的係數要比雨量大的暴雨為小。

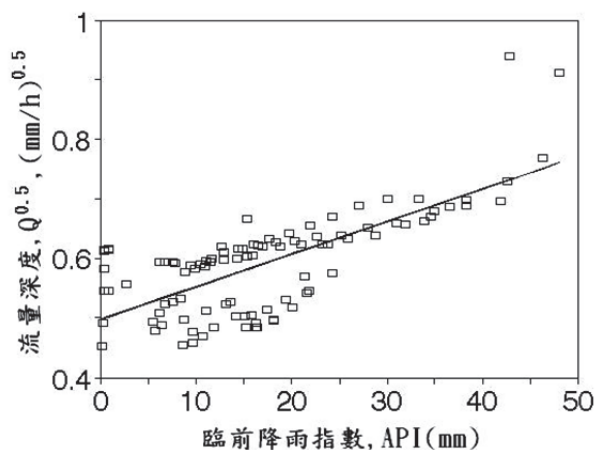


圖9 雨量小於100mm之暴雨，中寮溪集水區API與流量間之關係  
 Fig. 9. The relationship between stormflow and API at the Chungliaohsi watershed for rainfall less than 100 mm.

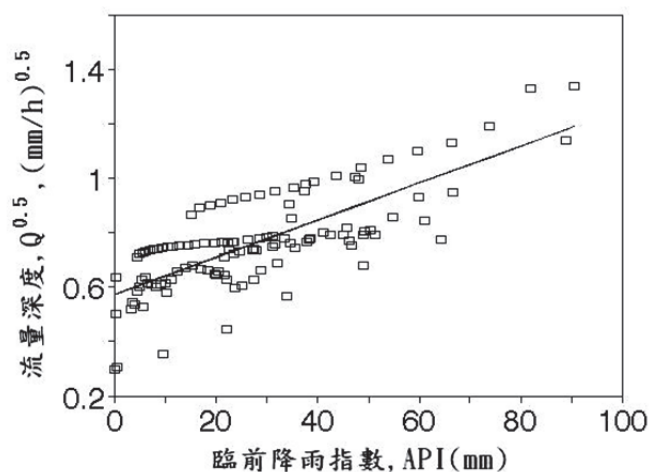


圖10 雨量大於100mm之暴雨，中寮溪集水區API與流量間之關係  
 Fig. 10. The relationship between stormflow and API at the Chungliaohsi watershed for rainfall greater than 100 mm.

### 3、應用API模式的代表性參數推估暴雨流量歷線

既然已經建立了代表性參數值，現將中寮溪集水區模式的4個代表性參數， $K(0.90)$ 、 $X(0.5)$ 、 $I$ (雨量 $<100$  mm為0.498，雨量 $>100$ mm為0.573)、 $S$ (雨量 $<100$  mm

為0.0055，雨量>100 mm為0.0068)，應用來推估此13場暴雨流量歷線，其推估流量歷線特性如表6。

由表6之結果顯示，以代表性參數推估13場暴雨流量歷線與觀測流量歷線的逕流體積而論，它們的誤差率參差不齊在-45.82%至29.03%間，而洪峰流量的誤差率在-45.22至19.86%間，由逕流體積與洪峰流量之誤差率而言，使用代表性參數推估流量歷線的逕流體積與洪峰流量，並不是每一場推估之暴雨流量特性均能達到精確的程度，雖然中寮溪集水區使用此代表性參數推估流量歷線特性，無法達到完全令人滿意程度，但至少尚有部份的推估流量歷線特性達到勉可接受的水準。

表6 中寮溪集水區以API模式及其代表性參數推估暴雨流量特性與觀測流量特性之差異

Table 6 Comparison of runoff characteristics for measured and estimated stormflow hydrographs using the API model and its representative parameter values at the Chungliachsi watershed within Liukuei experimental forest of southern Taiwan.

暴雨編號	日期	雨量(mm)	逕流量(mm)	推估與觀測流量間之誤差	
				逕流體積(%)	洪峰流量(%)
1	2005/02/25	25.5	4.91	-12.96	-6.73
2	2006/06/01	18.0	2.12	28.20	17.31
3	2006/06/06	47.0	6.46	26.79	19.86
4	2006/09/14	45.0	7.87	-8.08	-0.27
5	2007/06/20	57.5	7.81	-12.45	-34.40
6	2007/06/26	44.5	5.72	-6.63	8.84
7	2007/07/09	20.0	2.45	29.03	14.91
8	2007/07/31	46.0	6.68	3.91	-38.14
9	2004/09/10	129.5	25.19	7.77	17.43
10	2006/04/15	105.5	23.72	6.12	-17.25
11	2006/09/07	108.0	21.98	-20.66	-29.52
12	2007/09/11	140.5	38.06	-26.20	-45.22
13	2008/06/02	314.0	151.94	-45.82	-38.17

至於使用代表性參數推估流量歷線與觀測流量歷線形狀的吻合情形，仍以發生在2004年9月10日開始之暴雨流量歷線編號9(圖11)為例而言，總雨量129.5 mm，觀測總流量25.19 mm，推估總流量27.15 mm，兩者差異7.77%，觀測洪峰流量1.792 m<sup>3</sup>/s，推估洪峰流量2.104 m<sup>3</sup>/s，兩者差異17.43%，推估洪峰流量時間與觀測洪峰流量時間相同，兩者無差異，推估流量歷線與觀測流量歷的形狀變化頗為相似，但總體而言，代表性參數推估之暴雨流量歷線(圖11)與最佳參數推估之暴雨流量歷線(圖8)相比較，代表性參數之流量歷線與觀測歷線吻合度要比最佳參數之流量歷線稍差，但尚可接受。

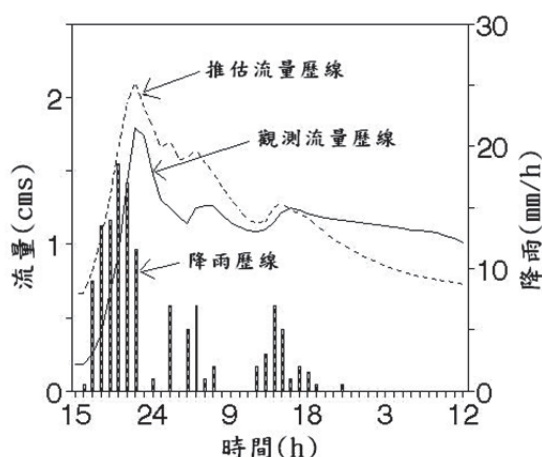


圖11 中寮溪集水區以API模式及其代表性參數推估暴雨流量歷線與觀測流量歷線之比較(2004年9月10日，編號9)

Fig. 11. The measured and estimated hydrographs (No. 9, 2004/09/10) using the API model and representative parameters at the Chungliahsi watershed within Liukuei experimental forest of southern Taiwan.

#### IV、結論

應用臨前降雨指數(API)模式推估蓮華池3號試驗集水區14場暴雨流量歷線及中寮溪集水區13場暴雨流量歷線，可獲得下列結論：

- (I) API模式是一個結構簡易而易於使用的水文模式，僅需知道4個參數：K、X、I與S。將降雨資料輸入，即可獲得流量歷線，且推估之流量歷線可靠性，尚可接受。
- (II) 蓮華池3號試驗集水區的模式代表性參數值；K為0.8；；X為0.5；暴雨量小於100 mm，I為0.140，S為0.0168；暴雨量大於100 mm，I為0.503，S為0.0297。
- (III) 中寮溪集水區的API模式代表性參數值；K為0.9；X為0.5；暴雨量小於100 mm，I為0.498，S為0.0055；暴雨量大於100 mm，I為0.573，S為0.0068。
- (IV) 蓮華池3號試驗集水區的面積小於中寮溪集水區，致蓮華池3號試驗集水區的代表性退水參數K值小於中寮溪集水區，蓮華池3號試驗集水區的代表性參數X值相等於中寮溪集水區，蓮華池3號試驗集水區的代表性參數I值小於中寮溪集水區，蓮華池3號試驗集水區的代表性參數S值大於中寮溪集水區。

#### V、謝誌

本研究承行政院農業委員會 102 農科-13.3.3-森-G3 及 102 公共建設-13.1-森-01(8)計畫經費提供，傅鶴翹、李聖餘、王德華、邱之偉先生協助，謹此致謝。

## VI、參考文獻

- 陳明杰、李肇文 (1993) 森林試驗集水區退水歷線之研究。台大實驗林研究報告(3): 27-52。
- 黃景春 (1988) 水筒模式在台灣小集水區暴雨逕流分析應用上之研究至畢祿溪集水區之水文分析。國立台灣大學森林學研究所博士論文，83p。
- 葛錦昭、楊炳炎、林淵霖、楊楚淇、漆陞忠 (1978) 台灣森林集水區經營。試驗初步報告304號，50p。
- 鄭皆達、林維侃、蘇瑞榮 (1994) 應用GIS及HEC-1水文模式探討台灣中部上游集水區降雨逕流之關係。中華水土保持學報25(3):143-150。
- Beschta, R. L. (1990) Peakflow estimation using an antecedent precipitation index (API) model in tropical environments, *In*: Research Needs and Applications to Reduce Erosion and Sedimentation in Tropical Steeplands, Proceedings of the Fiji Symposium, IAHS-Pub. No.192, p.128–137.
- Fedora, M. A. and R. L. Beschta (1989) Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model, *J.Hydrol.* 112:121-133.
- Fleming, G. (1975) *Computer Simulation Techniques in Hydrology*, American Elsevier Publishing Co., Inc., New York.
- Kohler, M. A., and R. K. Linsley (1951), Predicting the runoff from storm rainfall, U.S. Weather Bur. Res. Pap. 34.
- Linsley, R. K., M. A. Kohler, and J. L. H. Paulhus (1982) *Hydrology for Engineering*, McGraw-Hill Co., New York.
- Lu, H. S. (1992) Analysis of overland flow hydrographs from spatially variable hillslopes-effect of plot length, Ph.D. Dissertation, University of Washington, Seattle, Washington, 174 pp.
- Sorooshian S., and V. K. Gupta (1983) Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness, *Water Resour. Res.* 19(1):260-268.

## 以基流量推估森林集水區之水資源涵養功能

陸象豫<sup>1</sup>

**[摘要]** 森林集水區的水資源涵養功能日益受到重視，但此一功能定量性的分析卻始終為一爭論的課題。已有許多研究者以集水區土地滲透率、土壤孔隙率、退水曲線及水平衡方法進行推估，然而影響集水區涵養水資源功能的因素眾多，難以簡單的物理量就可得到精確的數值。基流為源自較深層的次地表逕流或源自地下水系統的流量，最能反應集水區涵養水資源的能力。本研究分析蓮華池五號集水區的降雨事件，以變動斜率法基進行基流分離，進而求得各場降雨的基流量，藉以評估森林集水區涵養水資源的能力。經分析 46 場暴雨事件，獲知該集水區平均基流量約為 1.164 mm/day (0.474 至 3.265 mm/day)，相當於公頃每天可排出 11.64 m<sup>3</sup> 的水量，每年每公頃由基流供應的水量約為 4284 公噸。由所推估的基流量，再配合降雨的強度及時間分布，當可推估森林涵養水資源的概略量。

**[關鍵詞]** 水資源涵養、基流、基流分離、蓮華池試驗集水區

### ESTIMATION OF THE ABILITY OF FOREST WATERSHED FOR WATER CONSERVATION AND REGULATION BY THE BASEFLOW APPROACH

Shiang Yue Lu<sup>1</sup>

**[Abstract]** The ability of forested watershed for water conservation and regulation receives much attention recently. Many researches tried using different approaches such as: infiltration capacity, porosity of soil layer, recession-curve-displacement analysis and water budget to estimate the water conservation ability of a watershed. However, many factors are involved the ability of water conservation, it is difficult using some physical quantity to give an accurate estimation. Baseflow is the discharge of water that drains from deeper subsurface runoff or origins from groundwater system, and it is the

---

<sup>1</sup>行政院農業委員會林業試驗所集水區經營系研究員，通訊作者。電子郵件: shiang@tfri.gov.tw  
Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: shiang@tfri.gov.tw

best and direct index to describe the ability of water. This study used the variable slope baseflow separation method to analyze rainfall events of the Lienhuachih No. 5 experimental watershed for estimating the quantiles of conserved water of the target watershed. From results of 46 rainfall event analysis, the average daily baseflow discharge is about 1.164 mm/dy (ranges from 0.474 to 3.265 mm/day), this discharge equivalent to 11.64 m<sup>3</sup> /day/ ha or 4284 ton/ha/year. Combining the estimated baseflow amount and temporal rainfall distribution can give a good estimation of the ability of water conservation of forested watershed.

**[key words]** Water conservation, Baseflow, Baseflow separation, Lienhuachih experimental watershed

## 1、前言

森林在水土資源保育上所扮演的功能為上一世紀森水文研究者主要探討的課題，由以往的研究已大致了解森林在防止沖蝕、減少洪水危害、調節微氣候、維持水質及水資源涵養等功能。然而大多數上述功能均與森林型態、地形、地質等地域性因子有關，且沒有明確的定律或方法可遵循，因此許多地區仍缺少定量的分析研究。這些森林水土資源保育功能中，最具爭議的當屬其涵養水資源的能力。水資源涵養一般是指集水區土壤層能短暫滯留土壤孔隙間的飽和或近飽和的土壤水，再漸次排入溪流，因而可增加集水區低水流量並可微量調節流量在時間上的分布。換句話說，這些蓄存於土壤孔隙間的水分，需先經過入滲進入土壤層，並儲存於土壤孔隙間或地下水系統，隨後由於重力等因素漸次進入溪流的水分，成為無降雨時溪流的主要水源。

受全球暖化影響，台灣地區降雨在時空分布越趨不平均，已證實連續不降雨的日數較以往顯著延長且發生頻率亦有所增加，在乾旱無雨期間，水資源供應亦顯困窘 (Hsu and Chen 2002, Wang et al 2004)。因此水資源涵養功能越顯重要，尤其是在原本水資源就供應不足的中南部地區。在此情況下，集水區水資源涵養功能日益受到重視，許多研究者亦試圖量化森林集水區涵養多水資源的效益，並藉此說明森林的公益功能 (陳信雄，1993；吳俊賢等 2004；林政勳 2015)。這些研究多以森林土壤的入滲速率或水收支關係來探討森林涵養水資源的多寡。然而水資源涵養量的多寡，決定於土壤的入滲容量、土壤孔隙率、土壤有機質含量、土壤森

度、坡度、母岩性質及不透水層分布等多種因素；入滲容量僅為影響水資源涵養的眾多因子之一，而集水區水收支關係系過於簡化，難以獲得令人信服的結果。此外降雨量的多寡、強度及其在時間上的分布，亦為決定水資源涵養量多寡的決定性因素，概沒有降雨的輸入，集水區當無法『涵養』水分。基於流量的多寡方為集水區所能涵養水量的直接證據，本研究以基流 (baseflow) 的多寡來推估集水區涵養水資源的功能。基流量亦稱低水位流量或無降雨時的流量，為源自較深層的次地表逕流 (subsurface flow) 或源自地下水系統的流量。因此基流量可反應有多少的水量可被集水區土壤層蓄存 (detention)，進而漸次地進入溪流，成為無降雨時溪流的主要水源。

## II、材料與方法

### (I) 試區概況

林業試驗所蓮華池研究中心五號試驗集水區降雨及其相對應的流量紀錄，為本研究用以分析基流量基本資料。五號試驗集水區為水里溪上游的一級集水區，境內以樟科及殼斗科為主的天然闊葉林幾達完全鬱閉，相關的地形特性如表 1(Lu et al., 2009；葛錦昭等，1978)。該集水區年平均溫度、降雨量、相對溼度、蒸發量及流量分別為：20.8 °C、2181.3mm、85.6%、1032.9mm 及 0.00313 cms。集水區的地質屬於新生代第三紀砂岩及頁岩互層結構，表層土壤為灰褐色砂質粘壤土，較深層土壤則為黃棕色粉質粘壤土，土壤深度介於 20 至 60 公分。表 1 蓮華池五號試驗集水區地形特性

Table 1 Physiological factors of the Lienhuachih No. 5 watershed

Area	8.40 ha
Average slope	33.5%
Maximum elevation	789 m
Minimum elevation	741 m
Main stream length	289.0 m
Mean width	291 m
Form factor	1.00
Compactness	0.57
Aspect	SE

### (II) 分析資料

該試驗集水區由 1975 年至 1995 年的日流量及其相對應的日降雨量紀錄為本研究用以分析的基本資料。所有資料均已經過離群測試 (outliers test)，以篩除觀測或人為誤差所導致的不合理紀錄 (Chow et al., 1982)，雨量紀錄的單為為釐米 (mm)，

流量紀錄則為每秒立方公尺 (cms 或  $\text{m}^3/\text{sec}$ )。該觀測期間之年平均降雨量為 2076.1，年平均流量為 0.00313 cms (3.319 mm/day)。

### (III)基流分離方法

由於沒有明確的方法或技術可區分溪流中某部分的水是源自基流或是地表逕流，因此將基流與直接逕流分離的方法均仰賴經驗法則或主觀判斷。一般常用的基流分離方法包括：直線法 (straight line method)、固定基底法 (fixed base length method) 及變動斜率法 (variable slope method)。直線法是由流量歷線上升點起繪一水平線至歷線反曲點止，此直線下方的流量被視為基流量。固定基底法係根據 Linsley 氏等 (1982) 之經驗法則，由流量歷線上升點起，繪一水平線至洪峰流量發生處，再由此平行線之終點取  $0.8 \cdot A^{0.2}$  之時段 (時段之單位為日，A 為集水區面積以平方英里計)。固定斜率法係根據 Hewlett 與 Hibbert 二位水文學者之建議，自流量歷線上升起始點起，基流量以  $0.05 \text{ cfs}/\text{mile}^2 \cdot \text{h}$  或  $0.0055 \text{ l/s} \cdot \text{ha} \cdot \text{h}$  之斜率增加，直至與流量歷線先交會點為止 (Hewlett and Hibbert, 1967)。變動斜率法係假定基流分離線上任何一點之基流量係等於前一量測時間之基流量加上一增值量，增值量為流量與時間之函數，當推算之基流量與總流量相同時，則為分離的結束點 (Bethalmy, 1982)。本研究採用變動斜率法，相關的基流分離方法亦可參考 Chow et al. (1982)，而本研究係以自行開發的電腦程式 Hygraph 進行分析 (陸象豫等，1995)。

## III、結果與討論

本研究總計挑選 46 場暴雨事件進行基流分離，並求得水文歷線分析的相關因子，此等因子之平均值、範圍及標準差列於表 2。其中總降雨量為資料分析期間之降雨總和，發生於直接逕流之降雨則屏除不計；有效降雨量 (effect rainfall) 為產生接接逕流之降雨量，亦即總降雨量扣除入滲 (infiltration)、截留 (interception)、及地表滯留 (surface detention) 後之降雨量； $\phi$  指數 ( $\phi$  index) 為當集水區降雨量等於直接逕流量時之降雨量，大於此指數之降雨即為超滲降雨 (excess rainfall)；逕流係數 (runoff coefficient) 為有效降雨量與總降雨量之比。

本研究所分析的暴雨事件 (runoff event) 其降雨量介於 38.9 至 520.2 mm 之間，分析期距介於 5 至 90 天，多屬於中等強度的連續降雨事件。此等強度與延時的降雨，當可滿足截留、土壤層的蓄留，且有足夠的時間可供入滲的土壤水進入地下

水層，並逐漸排入溪流，成為基流的主要水源。此外，基流分離起始點的流量大小，對基流量將會產生顯著的影響。較低的流量多屬於流量歷線退水枝末端的部分，此時土壤水蓄存量多已消耗殆盡（排入溪流、蒸發散至大氣，或進入深地下水系統），此時溪流水多源自深層地下水，因此基流分離所得的基流總量亦較低，而有低估的情形。若基流分離起始點的流量較大，此情況多受前期降雨影響，其水源除源自地下水系統外，亦有部份源自淺層土壤區的次地表逕流，因此基流分離所得的基流總量將有高估的情形。本研究所選取的暴雨流量分析事件，其基流分離起始點的流量介於 0.001 至 0.030 cms 之間，其平均流量為 0.0009cms，均屬非暴雨期間的流量，較能獲得合理的基流推估值。在此情況下，蓮華池五號集水區平均基流量約為 1.164 mm/day (0.474 至 3.265 mm/day)，相當於公頃每天可排出 11.64 m<sup>3</sup> 的水量，每年每公頃由基流供應的水量約為 4284 ton。

以集水區土壤的孔隙率 (porosity) 及土壤深度來推估集水區涵養水源功效為其他研究者曾經使用過的方法，此方法無法計算一段固定時間當中水在土壤孔隙中進出的次數，而難以估測集水區涵養水資源的量。因為並非所有儲存於土壤孔隙中的水均能流至溪流，降雨過後，飽和或接近飽和的土壤水將以次地表逕流形式流入溪流，常成為河川流量的主要部分；當飽和土壤水排離殆盡後，深層的土壤水可漸次進入溪流而成為基流的一部分，另一部分的土壤水將進入地下水層或以蒸發散散失於大氣中。因此以孔隙率法推估集水區涵養水資源的功能，僅能獲得集水區土壤水的儲存潛能。

水文平衡收支法亦曾被使用在水資源涵養量的計算上，該法係簡化進出集水區的水為降雨、蒸發與逕流等三個因子，並將土壤蓄水量是為水資源涵養量，而土壤蓄水量為降雨量減去逕流量及蒸發散量。然而僅考慮降雨及蒸發散量，推估的數值難以精確，且地下水補注亦可能成為集水區的土壤蓄水量的一部分。

森林集水區具有最大的水資源涵養功能已是不爭的事實，因為在相近的土壤質地情況下，森林地具有最大的人滲容量。林冠及枯枝落葉層均具有機械式的保護作用，能完全吸收雨滴的打擊能量，一則可避免雨滴的飛濺沖蝕（土壤顆粒受雨滴打擊而分離的現象），一則可減免密封作用(sealing，土壤孔隙被激起的顆粒雜質阻塞的現象)；此二種作用可使地表保持最佳的人滲狀況。而枯枝落葉層及複雜交錯的植物體，使地表之粗糙度大為提高，除增加地表窪蓄容量外，亦能減緩地表水的流速，進而增加水分的人滲量與機率。因此，森林地的人滲容量多高於非林

地，且高於大部分降雨的降雨強度；降入森林的雨水多能進入土壤層，達到涵養水源的必要條件。其次，在相同土壤深度情況下，森林土壤具有最大的容水空間。森林地的上層部分多由枯枝落葉及腐植層所組成，含有大量的有機質，能促進土壤的團粒作用，增加土壤的孔隙率（單位體積內，土壤顆粒間空隙所佔的比率）。而森林地滿佈的腐敗根系、植物體以及動物的孔穴，使森林土壤具有良好的通氣性與透水性，除大為提高加孔隙率外，並可作為水流的快速通道，使水分能很快地進入各層次的土壤中，再藉毛細作用填充於較小的孔隙間。因此降雨後，森林土壤能快速且全面性的容納入滲的雨水，並暫時儲存於大大小小的孔隙間。然而森林涵養水資源的功能並非來自林木本身，而係整個森林生態體系。森林提供一良好的環境使土壤層達到最佳之保水蓄水狀況，並藉植物的保土護土功能維持此最佳狀況。至於森林涵養水資源的多寡則決定於土壤深度、孔隙率 (porosity) 及有機質含量、土壤及岩石裂隙、不透水層分佈、地下水位及坡度等多種因素；難以簡單的物理量進行推估。

表二 流量歷線分析結果  
Table 2 Results of storm event analysis

	Average	Maximum	Minimum	STD
Event duration (day)	24.0	90.0	5.0	---
Total rainfall (mm)	225.78	520.24	38.90	129.182
Effect rainfall (mm)	95.19	373.12	4.30	81.155
$\phi$ index (mm/hour)	1.057	2.893	0.071	0.625
Peak discharge (cms)	0.0313	0.2060	0.0030	0.037
Initial discharge (cms)	0.0009	0.0030	0.0001	0.0007
End discharge (cms)	0.0013	0.0048	0.0002	0.0011
Quickflow (mm/day)	4.675	18.133	0.629	4.3495
Baseflow (mm/day)	1.164	3.265	0.474	0.8236
Runoff coefficient	0.3897	0.8766	0.0471	0.0367

## V、參考文獻

林政勳 (2015) 台灣中部地區天然闊葉林生態服務價值之評估。國立台灣大學碩士論文 77P。

- 吳俊賢、陳溢宏、鄭美如、黃正良、李國忠 (2004) 森林涵養水源貨幣價值之研究。台灣林業科學 19 (3): 187-197。
- 陳信雄 1993 不同土地利用對水資源涵養效益之調查研究。中華林學季刊 26(3)：41-61。
- 陸象豫、黃良鑫、魏新洵 (1995) 水文歷線分析及繪製電腦程式。林業試驗所研究報告季刊，10(1):51-58。
- 葛錦昭、楊炳炎、林淵霖、楊楚淇、漆陸忠 (1978) 台灣森林集水區經營試驗初步報告。林業試驗所，試驗報告第 304 號。P50。
- 鄭皆達、顏川順、葉正霖 (2001) 森林集水區低水流量與貯蓄量關係之探討。台灣林業科學 16(3)：161-173。
- Wei YT. 1983. Studying the evaluation approach for forest benefit function by Forest Bureau of Japan. Taiwan For J 9(5):10-4. [in Chinese]
- Bethalmy N. (1972) Hydrigraph analysis: A computerized separation technique. USDA Forest Service Research Paper INT-122.
- Chow V.T., Maidment D.R., and Mays L.R. (1988) Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York 572 p.
- Hewlett J.D., and Hibbert A.R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, in Int. Symp. On Forest Hydrology, ed. by Sopper W.E. and Lull H.W. Pergamon Press, Oxford pp 275-290.
- Hsu H.H., Chen C.T. (2002) Observed and projected climate change in Taiwan. Meteorology Atmosphere Physics, 79:87-104.
- Lu S.Y., Hsieh H.C., Chen C.H., and Heang LS. (2009) Physiological Factors Measured Using Digital Elevation Model Data for Experimental Watersheds of the Taiwan Forestry. Taiwan Journey Forest Science 24(3):191-197.
- Lu S.Y., Tang K.J., Ku H.Y., and Huang H.H. (2000) Climatic conditions of forested Lands of Taiwan Forestry Research Institute. Taiwan Journey Forest Science 15(3):429-440.
- Linsley R.K., Kohler M.A., and Paulus J.L. (1982) Hydrology for engineers. 3d ed. New York: McGraw-Hill, 340p.
- Wang C.H. (2004) Precipitation changes and their impacts on the water resources management in Taiwan. Proceedings of International Symposium on Hydrogeological

陸象豫—以基流量推估森林集水區之水資源涵養功能

Investigation and Remedial Technology, November 15-16, National Central University,  
Jhongli, Taiwan, ROC, p 176-90.

## 太麻里研究中心生態育林效益監測

劉一新<sup>1</sup>

**【摘要】**本研究自 2012 年 7 月至 2015 年 9 月，於林業試驗所太麻里研究中心 1998 年所建造的原生闊葉樹種混合林內，以自動監測相機對台灣水鹿之族群動態進行為期 39 個月、12 個監測季的持續監測。經辨識後篩選出 410 筆有效照片紀錄，並換算為出現指數 OI，以分析鹿群分布的區域性差異，以及族群數量的波動情形。分析結果發現：本造林地內的台灣水鹿，以雄鹿的出現次數較多，約為雌鹿的 2.7 倍。鹿群的 OI 值在各監測點間及各監測季間，均呈極顯著差異( $p < 0.001$ )，顯示鹿群在本造林地分布不均勻，且數量呈現季節性的波動。整體而言，鹿群出現於本造林地的數目，呈現穩定增加的趨勢。

**【關鍵詞】**族群動態、自動監測相機、定點計數法、出現指數。

## EFFECTIVENESS MONITORING ON ECOLOGICAL SILVICULTURAL PRACTICES OF TAIMALI RESEARCH CENTER, TFRI

I-Hsin Liu<sup>1</sup>

**【Abstract】** This study progressed in a hardwood mixed stand established in 1998 at Taimalii Research Center, TFRI. Camera traps were used to monitor the population dynamics of Formosan Sambar (*Rusa unicolor Swinhoii*) during July, 2012 to September, 2015. After 12 continuing monitoring season of 39 months, 410 effective picture records were identified and compose to OI to analyze the distribution and seasonal fluctuation of sambar's population at different monitoring points. According to the results, the effective records of male sambar was much higher than female's with a occurrence ratio of ( $\text{♀}:\text{♂}=1:2.7$ ). Extreme significant variation occurred between both monitoring points and seasons on the OI of sambar's population, showed that the distribution of sambar's population was uneven in the stand and inclined to grouped at

---

<sup>1</sup> 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組副研究員，通訊作者。電子郵件: ihsinliu@tfri.gov.tw  
Associate Researcher, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: lusteve@tfri.gov.tw

some “hot spot”. Meanwhile, the relative abundance of sambar’s population were fluctuating and growing stably during the monitoring period.

**【Key words】 population dynamics, camera trap, point count, occurrence index(OI)**

## I、前言

林業試驗所太麻里研究中心於 1998 年 6 月，開始執行台灣原生闊葉樹種的生態育林計畫，選取烏心石等 3 種台灣原生闊葉樹種，進行混植處理，希望透過育林設計，使造林地在林分發育的過程中，衍生出不同型態的區塊與棲地條件，以提昇棲地的複雜度（complexity）與承載力（carrying capacity）。依據 2010 年生長調查結果顯示：造林木的成活率、胸高直徑、樹高、枝下高、冠幅等生長介量於樹種、年度、栽植區與處理間均具顯著到極顯著差異，顯示林地組成與結構上的多樣性，已逐步發展成形(劉一新 2010、2014b、2014d)，且預期將對野生動物的區域性分布與族群數量造成影響，唯此一假設仍有待長時間監測結果的證實。

台灣水鹿(Formosan sambar, *Rusa unicolor swinhoii*)是台灣中、高海拔森林內具代表性的草食獸，也是台灣重要的保育類野生動物，其族群動態的監測，在野生動物保育議題上，具有很高的學術價值，監測結果亦有助於了解其棲地選擇的特性，以評估其族群與棲地變遷的交互影響，而為森林生態系經營重要的基礎資訊(蘇秀慧等 2008)。

近年針對水鹿所進行的研究計畫甚多，研究方向涵蓋了行為(郭正彥 2005)、食性(李玲玲等 2006)、族群狀況(李玲玲等 2007；翁國精等 2010)、活動模式(王穎等 2010；裴家騏、姜博仁 2004)，分布預測與空間使用(廖昱銓、王穎 2011；顏土清、王穎 2011)，乃至遺傳分化與棲地選擇(王穎等 2012)等層面，對於台灣水鹿基本資料庫的建立具有極大的貢獻。

在草食獸的分布與植被因子相關性的研究方面，李玲玲等(2006)曾調查玉里野生動物保護區台灣水鹿的數量，及其與植被的相關性，發現水鹿的族群密度以高海拔區域箭竹草地與溫帶針葉林鑲嵌的地景類別密度最高，而中低海拔區域連續森林類別的檜木林與櫟林台灣水鹿密度很低，兩者差異顯著，不同樣區、坡度間台灣水鹿的族群密度也有顯著差異，而台灣水鹿的棲地利用在巨觀上受到棲地地理位置差異、地景結構、植被類型、平均坡度等因素的影響。

台灣水鹿的族群數量曾因棲地破碎化與狩獵壓力一度銳減，直到近年才逐漸

回昇，自 2008 年以降，林宗以(2008)、翁國精等(2009)、林良恭等(2009)，以及姜博仁等(2010)，均發現台灣水鹿族群呈現擴張的趨勢，並對海拔地區的鐵杉(*Tsuga chinensis*)與冷杉(*Abies kawakamii*)幼樹造成嚴重的危害，也改變了森林地被之覆蓋度、組成與垂直結構，並對底棲性鳥類的密度造成影響，劉一新(2013a)亦發現水鹿啃食樹皮的行為，對光蠟樹造林木造成極嚴重的危害。

歷來於人工林內所進行的中、大型草食獸族群監測研究不多，林良恭等(2011)曾於林務局南投林區管理處巒大事業區的柳杉(*Cryptomeria japonica*)人工造林地內，以紅外線自動相機監測疏伐作業前後，哺乳類動物的相對豐量度與棲地因子的相關性，發現森林撫育作業確實會對動物群聚造成影響。

以自動照相設備進行森林野生動物的調查與研究，在地形複雜且不易到達處有諸多優點，且有助於野生動物族群的長期監測(裴家騏 1998；裴家騏等 1997)。而新一代數位自動感應相機的使用，除突破傳統相機的架設限制外，亦大幅增加了資料的收集量，非常適合動物生態長期監測之用(蘇秀慧等 2008)，王穎等(2012)曾採用 Reconyx HC500 型監測相機進行太魯閣國家公園陶塞河流域及南湖山區中大型哺乳動物之調查。

裴家騏(1998)曾於 1992 年至 1993 年間，選擇奧萬大等 6 個地區，利用自動照相設備進行野生動物活動資料的蒐集，並利用出現指數(Occurrence Index, OI)計算大武山自然保留區野生動物的相對豐量度(裴家騏、姜博仁 2004)。張學文(2014)利用自動監測相機調查高雄壽山國家自然公園動物資源，並估算其族群密度，范震華等(2014)將監測相機影像紀錄導入捕捉標放模式，從而估算水鹿的封閉族群密度，劉一新(2014d)亦嘗試將影像資料轉化為利用棲地利用指數，分析台灣水鹿、山羌及長鬃山羊的族群動態與棲地利用情形。

爰此，本研究乃自 2012 年 7 月至 2015 年 9 月，利用自動監測相機針對台灣水鹿族群進行為期 39 個月的連續監測，並將影像資料轉換為出現指數 OI，用以解析台灣水鹿族群分布的區域性及季節性差異，及其族群數量變動的趨勢，以評估生態育林的效益，並供試驗林及野生動物經營管理策略卓參。

## II、材料與方法

### (I) 監測地點

本研究於林業試驗所太麻里研究中心第二林區第 18 號造林地(N:22°37.5545'；

E:120°55.586)進行。該造林地位於麻利霧溪源頭東麓一帶，海拔高 900~1,100m，造林樹種為烏心石(*Michelia formosana*)、光臘樹(*Fraxinus formosana*)、樟樹(*Cinnamomum camphora*)等三種台灣原生闊葉樹種，以兩兩相圍的方式進行塊狀混植，計分 9 種混植處理，4 個栽植區。處理樣區面積 0.16ha，於栽植區內逢機排列，各栽植區面積 1.44ha，連同栽植區間的過渡帶，造林地總面積為 7.8ha，全區於 1998 年設置完成，並持續進行每五年一次的造林木生長調查(圖 1、2)(劉一新 2010)。



圖1. 造林地五年生時的生長狀況（劉一新攝2003年）

Fig. 1 Growth condition of the plantation when 5-years-old (2003)



圖2. 造林地十年生時的生長狀況（劉一新攝2009年）

Fig 2. Growth condition of the plantation when 10-years-old (2009)

## (II) 自動監測相機架設

2012 年 7 月，於造林地內架設 4 台 Reconyx PC 800 型數位感應相機，並於 2013

年 8 月再加裝 4 台。Reconyx PC 800 型相機使用 12 顆四號鎳氫充電電池為電源，搭配 16 GB 之 SD 卡，續航拍攝能力達 6 個月，拍攝距離約 20m，快門 1/15 秒，夜間或光度不足時，即切換為紅外線拍攝模式(圖 3)。



圖3. Reconyx PC 800型數位感應相機(劉一新攝2013年)  
Fig 3. Reconyx PC 800camera trap (2013)

本研究基本上以3~5個月為期，抽換SD卡並更新電池，隨即開始下一季的監測，自2012年7月至2015年9月止，共進行為期39個月、12季的連續監測，各相機的架設期間、架設點位置等基本資料如表1所示。

表 1. 監測相機架設期間及位置

Table 1. Setting time and location of each trap camera

相機編號	架設期間	相機高度(m)	海拔高(m)	N	E
A-1	2012/7~2015/9	1.2	1,050	22°37.661'	120°55.629'
A-2	2012/7~2015/9	0.8	1,040	22°37.632'	120°55.639'
B-1	2012/7~2015/9	1.3	1,015	22°37.561'	120°55.620'
B-2	2013/8~2015/9	1.2	995	22°37.537'	120°55.609'
C-1	2012/7~2015/9	0.8	960	22°37.609'	120°55.527'
C-2	2013/8~2015/9	0.8	960	22°37.592'	120°55.513'
D-1	2013/8~2015/9	0.6	930	22°37.380'	120°55.516'
D-2	2013/8~2015/9	0.5	920	22°37.409'	120°55.494'

### (III) 影像資料判讀及建檔

影像判讀及建檔，參考裴家騏和姜博仁(2004)，以及張學文(2014)，將監測相機攝得的影像紀錄，視為一種「定點計數(point-count)」的資料，並依如下原則，定義所謂

的「有效的照片紀錄」：

1. 一小時內連拍影像，經辨識若屬同一個體，則視為 1 筆有效照片記錄，若不能確認是否為同一個體，則視為同一個體。
2. 一小時內連拍之不同個體，視為不同筆的有效記錄。
3. 一張照片內若出現 2 隻以上個體，則每隻都各視為 1 筆有效記錄。

#### (IV) 出現頻度指數計算

完成有效照片紀錄的辨識及篩選後，參考裴家騏等(1997)，以及裴家騏、孫元勳(1999)的分析方法，計算 OI (Occurrence Index)以代表動物在相機架設點的活動頻度： $OI=(\text{動物在架設點的有效照片紀錄筆數}/\text{該相機的工作時數})\times 1,000$  小時，即「該相機在每 1,000 個工作小時中，所記錄到的個體出現次數」，以此指數代表動物的相對族群數量。

### III、結果與討論

#### (I)相機工作時數與有效照片筆數

相機工作時數定義為：「相機架設完成後，自感應拍攝到第一張照片的時間，至更換記憶卡前拍攝最後一張照片的時間的間隔」(張學文 2014)，亦即每監測季第一張照片到最後一張照片之間所經過的時間(小時)，本研究各監測季的起迄時間，以及各監測相機於各監測季的工作時數示如表 2。

表2. 各監測相機於各季之工作時數(小時)

Table 2. Operating time (hr.) of each camera trap during each monitoring season

監測季	起迄時間	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2	合計
1	2012.7~9	1594	1010	1459		723				4786
2	2012.10~2013.1	1998	1968	1712		故障				5678
3	2013.1~3	2044	2025	1845		2102				8016
4	2013.3~5	2479	2447	2359		1739				9024
5	2013.6~8	1402	1647	1616		1100				5765
6	2013.9~11	1259	1608	1375	627	218	1001	1173	1598	8859
7	2013.11~2014.1	1271	1297	1360	故障	故障	1220	故障	1256	6404
8	2014.1~3	994	1653	915	1380	988	977	652	1523	9082
9	2014.4~6	故障	2005	1933	1822	1037	937	1884	2112	11730
10	2014.7~10	580	2494	2731	2303	2041	2137	2677	2338	17301
11	2014.11~2015.3	故障	3252	3440	2617	3204	3489	2600	1968	20570

12	2015.3~9	故障	3392	4734	4654	4896	4586	3327	4179	29768	
合計	39 個月		13621	24798	25479	13403	18048	14347	12313	14974	136983

影響相機工作時數的原因很多，若架設後經過很長一段時間才拍到第一張照片，或在收 SD 卡之前有很長一段時間沒有拍到照片，甚或相機運作一段時間後即發生故障，都會影響到工作時數的長短。在 8 台相機中，A-1、A-2、B-1、C-17 等 4 台相機，因較早架設，故工作時數亦較長，其中僅 A-1 因屢屢故障，工作時數反而較少，除 A-1 外，B-2、C-1、D-1 等三台相機亦曾發生故障，原因包括電池漏電、SD 卡無法存取、機身進水導致接觸不良，甚至虎頭蜂築巢將機身包住等等，可謂形形色色，這些都對相機的工作時數造成影響。另就各監測季而言，因 10、11、12 三季的監測時間較其他各季為長，因此，相機的工作時數亦較長，總計 8 台相機於 12 個監測季所累積的工作時數為 136,983 小時。

## (II) 有效照片紀錄篩選及 OI 計算

所讀取的影像資料，經逐一辨識判讀後，篩選出有效照片紀錄計：單一雄鹿 257 筆，單一雌鹿 71 筆，雌雄成對 19 筆、二雌成對 8 筆、二雄成對 6 筆，三隻成群 4 筆，以及四隻成群 1 筆，依據「一張照片內若出現 2 隻以上個體，則每隻都視為 1 筆有效記錄」的原則，整合建檔成為 410 筆有效照片紀錄(共 10,173 張照片)，包括雌鹿 112 筆、雄鹿 298 筆，雄鹿較雌鹿多出甚多，雌雄比例約為 1:2.7，分項計算雄鹿、雌鹿及整個鹿群在各監測點及監測季的 OI 如表 3、4、5。

表 3. 雄鹿於各監測點及各季的 OI

Table 3. Male sambar's OI at each monitoring point during each monitoring season

監測季	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2	合計
1	0.63		0.69						0.42
2									0.00
3	1.96	0.49							0.62
4	0.81	1.63	2.54						1.33
5	0.00	1.21	1.24		0.91				0.87
6	0.79					2.00	4.26	14.39	3.50
7						0.82		1.59	0.62
8	8.05	3.02	1.09	2.90	5.06	4.09		1.97	3.30
9		0.50	0.52	2.74	2.89	2.13	2.12	5.68	2.39
10	3.45						2.24	3.85	0.98
11		1.85	4.65	3.44	5.93	5.45	2.69	12.70	4.91

12	2.06	1.90	3.65	1.43	3.05	1.50	0.96	2.12
合計	1.32	1.05	1.41	2.61	1.99	2.93	2.19	5.21

表 4. 雌鹿於各監測點及各季的OI

Table 4. Female sambar's OI at each monitoring point during each monitoring season

監測季	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2	合計
1									0.00
2									0.00
3	0.49		4.34		0.48				1.25
4			0.42		0.00				0.11
5									0.00
6					4.59		0.85	1.88	0.56
7									0.00
8				1.45		1.02			0.33
9					1.93	2.13			0.34
10			0.37					1.28	0.23
11		1.85	2.03	1.53	2.81	2.29	0.77	4.57	2.19
12		2.65	0.42	2.79	2.04	0.44	0.30	0.72	1.34
合計	0.07	0.60	0.75	1.42	1.27	0.91	0.32	1.20	0.82

表 5. 鹿群於各監測點及各季的OI

Table 5. OI of sambar population at each monitoring point during each monitoring season

監測季	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2	合計
1	0.63		0.69						0.42
2									0.00
3	2.45	0.49	4.34		0.48				1.87
4	0.81	1.63	2.97						1.44
5		1.21	1.24		0.91				0.87
6	0.79				4.59	2.00	5.12	16.27	4.06
7						0.82		1.59	0.62
8	8.05	3.02	1.09	4.35	5.06	5.12		1.97	3.63
9		0.50	0.52	2.74	4.82	4.27	2.12	5.68	2.73
10	3.45		0.37				2.24	5.13	1.21
11		3.69	6.69	4.97	8.74	7.74	3.46	17.28	7.10
12		4.72	2.32	6.45	3.47	3.49	1.80	1.68	3.46
合計	1.39	1.65	2.16	4.03	3.27	3.83	2.52	6.41	2.99

**(III) 族群的區域性差異**

如表 3、4、5 所示：雄鹿在各監測點的 OI 值以 D-2 最高(5.21)，C-2 次之(2.93)，A-2 最低(1.05)，至於雌鹿則以 B-2 最高(2.79)，D-2 次之(1.20)，A-1 最低(0.07)，鹿群在各監測點的 OI 值以 D-2 最高(6.41)，B-2 次之(4.03)，A-1 最低(1.39)，鹿群 OI 值於各監測點差異極顯著 ( $p<0.01$ )，顯示鹿群於本造林地內的分布呈現區域性的差異，且而有集中於某些”熱點”的情形(劉一新 2014c)。雄鹿、雌鹿及鹿群在各監測點的 OI 如圖 4 所示。

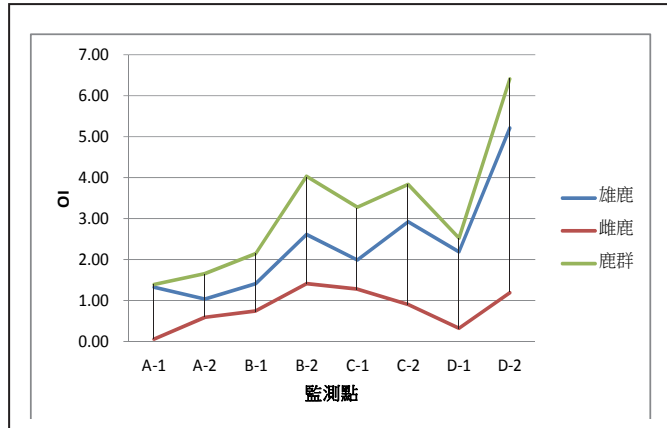


圖4. 雄鹿、雌鹿及鹿群在各監測點的OI  
Fig 4. OI of male, female and population at each monitoring point

**(IV) 族群數量的波動情形**

就各監測季而言，雄鹿 OI 的峰值出現在第 4(1.33)、6(3.50)、8(3.30)、11(4.91) 四季，雌鹿 OI 的峰值則出現在第 3(1.25)、6(0.56)、11(2.19)等三季，鹿群 OI 的峰值則出現在第 3(1.87)、6(4.06)、8(3.63)、11(7.10)四季，鹿群 OI 值於各監測季差異極顯著 ( $p<0.01$ )，顯示造林地內鹿群的數量，於監測期間呈現明顯的波動，且群數量呈現穩定增加的趨勢，雄鹿、雌鹿及鹿群在各監測季的 OI 如圖 5 所示。

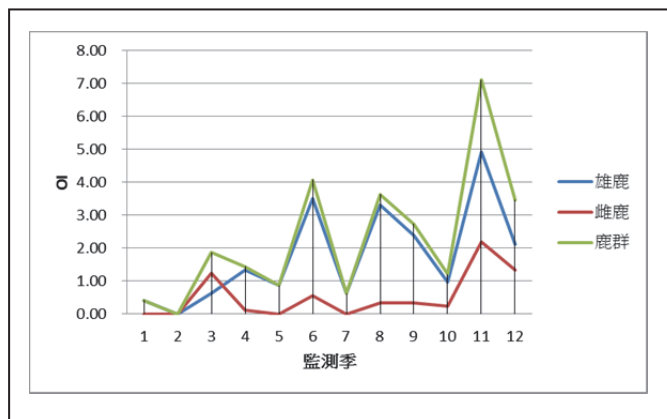


圖5. 雄鹿、雌鹿及鹿群在各監測季的OI  
Fig 5. OI of male, female and population during each monitoring season

## (V) 生態育林效益評估

諸多學者指出：林分上層木的鬱閉度與生長狀況對林下光度、溫度、濕度，乃至地被植物的組成與結構等，均會造成程度不一的影響，進而塑造出多樣化的林分區塊與野生動物棲地條件(Noss and Csuti 1994; Willson and Halupka 1995; Stouder et al. 1997; Walters 1986; Landres 1992; Landres et al. 1988)，致使野生動物在大尺度棲地內呈現區域性分布的差異。

劉一新(2013a、2013b、2014a、2014d)發現：除台灣水鹿外，山羌及長鬃山羊在本造林地內的分布，亦存有區域性差異，且各有其不同的棲地偏好，此或為三種共域草食獸之間，有效利用棲地資源的一種策略，亦可顯示本造林地當已衍生出多樣化的林分區塊與棲地型態供野生動物選擇。

此外，如圖 5 所示，鹿群的 OI 於監測其中，呈現明顯波動與穩定成長的趨勢，顯示鹿群已逐漸適應本造林地所提供的棲地條件，也暗示本造林地承載力的提昇。

## IV、結論

台灣水鹿的 OI 在本造林地內各監測點的分布不均勻，而有集中於某些熱點的情形，鹿群的 OI 於各監測季間，亦呈現明顯的波動與穩定增加的趨勢。顯示經由育林設計所建造的原生闊葉樹種混合林，在林分發育過程中，確可衍生出多樣化的林分區塊與棲地條件，而有助於野生動物多樣性及族群數量的保育。

## V、謝誌

本研究承行政院農業委員會 104 農科-13.4.1-森-G2(Z) 經費補助，謹此致謝。

## VI、參考文獻

王穎、李壽先、姚秋如、王佳琪。2004。台灣地區台灣山羌之保育遺傳分析。行政院農業委員會研究報告。28 頁。

王穎、顏士清、林子揚、陳匡洵、廖昱銓、賴冠榮。2010。奇萊山區台灣水鹿之活動模式與空間使用。太魯閣國家公園管理處委託研究報告。40 頁。

王穎、朱有田、顏士清、張郁琦、廖昱銓。2012。台灣水鹿跨域整合研究。太魯

- 閣國家公園管理處。70 頁。
- 王相華。2010。不同型式人為干擾對福山植物園山羌活動及行為之影響。林業試驗所科技計畫研究報告。11 頁。
- 李玲玲、游孟雪、李景元。2004。哺乳動物與植物之互動關係-台灣山羌。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。4 頁。
- 李玲玲、林宗以、池文傑。2007。玉山國家公園南二段地區中大型哺乳動物調查及台灣水鹿監測計畫。內政部營建署玉山國家公園管理處。70 頁。
- 李玲玲、林宗以、蔡振光。2006。台灣水鹿食性及玉里野生動物保護區水鹿族群生態研究(三)。行政院農委會林務局保育研究系列第 93-2 號。64 頁。
- 林良恭、孫義方、喬雅玲、孫歷鵬、賴伯琦、黃重期。2009。玉山國家公園郡大溪流地區生物資源勘查。內政部營建署玉山國家公園管理處。
- 林良恭、林智民、喬雅玲、孫歷鵬、賴伯琦、黃重期。2010。玉山國家公園郡大溪流地區生物資源勘查。內政部營建署玉山國家公園管理處。
- 林良恭、蔡政修、王詩婷。2011。柳杉人工林疏伐經營對生物多樣性、生態系結構與功能影響極復育過程之研究-人工林疏伐作業後鳥類與哺乳動物之棲地選擇(III) 行政院國家科學委員會專題研究成果報告。60 頁。
- 林宗以。2008。玉山國家公園南二段東埔至向陽哺乳類動物相普查。內政部營建署玉山國家公園管理處。
- 林宗以。2011。玉里野生動物保護區台灣水鹿棲地利用與密度估算。國立台灣大學生態學與演化生物學研究所碩士論文。
- 范震華、林宗以、張書德、楊書懿、翁國精。2014。台灣水鹿族群密度估算方法評估。台灣生物多樣性研究 (TW J. of Biodivers.) 16 (4): 309 – 322。
- 張學文。2014。壽山國家自然公園山羌族群現況研究。內政部營建署壽山國家自然公園 期末報告。99 頁。
- 翁國精、林宗以、張書德、范震華。2010。玉山國家公園新康山區中大型哺乳動物監測及水鹿族群生態研究。玉山國家公園管理處委託研究報告。79 頁。
- 姜博仁、蔡世超、吳禎祺、林宗億。2010。玉山與塔塔加地區中大型哺乳類動物與生物多樣性之長期監測計畫。玉山國家公園管理處。
- 郭正彥。2005。磐石山區高地草原台灣水鹿隻日間行為。國立台灣師範大學生命科學系碩士論文。72 頁。

- 裴家騏。1998。利用自動照相設備紀錄野生動物活動模式之評估。台灣林業科學 13(4):289-296。
- 裴家騏、姜博仁。2004。大武山自然保留區和周邊地區雲豹及其他中大型哺乳動物之現況與保育研究(三)。行政院農委會林務局研究系列 92-2 號。85 頁。
- 裴家騏、陳朝圳、吳守從、滕民強。1997。利用自動照相設備與地理資訊系統研究森林野生動物族群之空間分布。中華林學季刊 30(3):279-289。
- 劉一新。2010。闊葉樹育林之研究。中華林學季刊 43(4):569-579。
- 劉一新。2013a。水鹿的為害與監測。林業研究專訊 20(5):56-63。
- 劉一新。2013b。山羌生態知多少。林業研究專訊 20(6):63-68。
- 劉一新。2014a。太麻里的國寶羊。林業研究專訊 20(7):73-77。
- 劉一新。2014b。闊葉樹混合林之生態效益監測。中華林學季刊 46 (4):457-468。
- 劉一新。2014c。愛洗泥漿浴的水鹿。林業研究專訊 20(8):77-81。
- 劉一新。2014d。太麻里研究中心闊葉樹混植造林地內三種草食獸之族群監測。台灣生物多樣性研究(TW J. of Biodivers.) 16 (4): 323 – 337。
- 劉一新。2016。太麻里研究中心多元化育林作業及效益監測。林業研究專訊 23(1):58-63。
- 廖昱銓、王穎。2011。磐石山區台灣水鹿的季節性移動。太魯閣國家公園管理處。26 頁。
- 顏士清、王穎。2011。台灣水鹿之活動範圍與社會結構初探-以奇萊磐石山區為例。太魯閣國家公園管理處。29 頁。
- 蘇秀慧、裴家騏、梁又仁。2008。雪霸家公園陸域野生動物資源整合分析- 雪見地區。雪霸國家公園管理處。57 頁。
- Landres, P. B. 1992. Ecological indicators: panacea or liability? In: McKenzie., D. H., D. E. Hyatt and V. J. McDonald (eds.). Ecological indicators. Vol.2. 1295-1318p. Elsevier Applied Science, London.
- Landres, P. B., J. Verner and J. W. Thomas. 1988. Ecological use of vertebrate indicator species: a critique. Conservation Biology 2:316-328.
- Noss, R. F. and B. Csuti. 1994. Fragmentation. In: Meffe, G. K. and C. R. Carroll (eds.). Principles of conservation biology. 237-264p. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, MA.

- Power, M. E., D. Tilman, J. A. Estes, B. A. Menge, W. J. Bond, L. S. Mills, G. Daily, J. C. Castilla, J. Lubchenco and R. T. Paine. 1996. Challenges in the quest for keystones. *Bioscience* 46:609-620.
- Walters, C. 1986. Adaptive management of renewable resources. 374 p. Macmillan Publishing Company, New York.
- Willson, M. F. and K. C. Halupka. 1995. Anadromous fishes as keystone species in vertebrate communities. *Conservation Biology* 9:489-497.



## 租地造林地栽植果樹對水土流失影響之研究

林壯沛<sup>1</sup> 王秋嫻<sup>2</sup> 林介龍<sup>2</sup>

**【摘要】**為解決國有林租地造林，林農栽植果樹衍生土壤沖蝕問題，了解在不同自然條件與不同栽植樹種情形下之水土保育效益。本研究的目的是利用當前混農林相關試驗與監測，建立山坡地混農林業水土保育與永續經營相關的科學基礎資料和模式。

於國有林租地造林地之甜柿、梅子及釋迦農業區，各設置 3 種不同栽植作物之混農林水土流失觀測區。試驗區坡長 22.5m，寬 10.0m，試區面積 225 m<sup>2</sup>，監測國有林租地造林地栽植果樹的水土流失變化。土壤流失量監測結果，烏石坑造林地試區(1.089 ton/ha/yr.)大於改正造林地試區(0.321 ton/ha/yr.)，甜柿園試區(0.209 ton/ha/yr.)最少；梅嶺之造林地試區(1.318 ton/ha/yr.)大於梅園試區(0.326 ton/ha/yr.)，破布子試區(0.213 ton/ha/yr.) 最少；頂岩灣之造林地試區(1.528 ton/ha/yr.)大於釋迦林木矮化試區(0.551 ton/ha/yr.)，釋迦林木輕度矮化試區(0.507 ton/ha/yr.)最少。果園混植林木試區的水土流失量皆較造林地試區為少，主要原因為造林地試區坡度較陡及逕流率較高。果園混植林木區以集約經營維持良好地被植生覆蓋，配合平台階段與山邊溝水土保持措施，混植林木覆蓋與穩固土壤功能，故能減緩土壤流失。此監測結果與世界山坡地有完整植被覆蓋之土壤沖蝕率(1-5 ton/ha/yr.)相近，又比農業及其他活動開展農地之土壤沖蝕率(13-40 ton/ha/yr.)低。

在有經營管理的果園，合理施放有機質肥，改善土壤性質，增加地被植生覆蓋密度，可以減緩地表逕流及減少土壤沖蝕的發生，建議國有林租地造林地栽植果樹區應全年維持地表植生覆蓋度 70%以上。對於農民普遍不能接受果樹與造林木均勻混植，於坡度較陡及表土易遭沖蝕處，建議以塊狀栽植及等高橫坡帶狀混植造林木。

**【關鍵詞】**混農林業、土壤沖蝕、永續經營、果樹專區

---

<sup>1</sup> 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營系副研究員，通訊作者。電子郵件:jplin@tfri.gov.tw  
Associate Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: jplin@tfri.gov.tw

<sup>2</sup> 行政院農業委員會林業試驗所集水區經營系助理研究員。  
Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

## STUDY LEASED AFFORESTATION LAND PLANTING FRUIT TREE ON INFLUENCE OF SOIL LOSSES

Jaung-pey Lin<sup>1</sup> Chiu-hsien Wang<sup>2</sup> Chieh-lung Lin<sup>2</sup>

**【Abstract】** Solving the nation-owned leased afforestation land that farmers planted fruit trees rise to soil erosion problems, understood in different natural conditions and tree species planted situations on soil and water conservation benefit. The objective of this study is that using current agroforestry-related tests and monitoring established hillside agro-forestry on water and soil conservation and sustainable management-related scientific basis data and models.

In the nation-owned leased afforestation land sweet persimmon, plum and shakya agricultural districts set three soil erosion observation plots of different agroforestry planting crops. The experimental plots are length 22.5M, width 10.0M, and area 225 m<sup>2</sup>, to monitor planting fruit trees and woods mingle land soil erosion in the nation-owned leased afforestation. Soil loss monitoring in Wushikeng, woodland (1.089 ton/ha/yr.) greater than the correction woodland (0.321 ton/ha/yr.), and sweet persimmon orchard (0.209 ton/ha/yr.) is least. In Meilin, woodland (1.318 ton/ha/yr.) greater than plum plantation (0.326 ton/ha/yr.), and bird lime tree (0.213 ton/ha/yr.) is least. In Dinyenwan, woodland (1.528 ton/ha/yr.) greater than shakya mixed dwarfed- trees (0.551 ton/ha/yr.), and shakya mixed mild dwarfed- trees (0.507 ton/ha/yr.) is least. Due to steep slopes and high runoff rate, orchard mixed afforestation land soil loss is less than the woodlands. Orchard mixed afforestation for intensive management, maintaining good covered by vegetation, combining with platform stage and hill-side ditch soil and water conservation, mixed trees covering and firming soil functions, they can slow down soil erosion. The monitoring result was similar to worldwide hillslopes complete vegetation covered soil loss (1-5 ton/ha/yr.), and lower than agriculture and other activities soil loss (13-40 ton/ha/yr.).

Orchard management, reasonable casting organic fertilizer to improve soil properties, increasing the density of ground-cover vegetation cover can reduce surface runoff and soil erosion occurs. It is recommended that planting fruit in nation-owned

leased afforestation land should maintain vegetation coverage all year round 70%. Farmers generally cannot accept orchard mixed afforestation. On steep slopes and top soil prone to erosion, suggested clumps planted and contour mixed afforestation.

**【Key words】** Agroforestry, Soil erosion, Sustainable management, Fruit production district

## I、前言

臺灣的租地造林政策衍伸許多爭議與問題，例如租地轉作農作或其他特用作物及擴大墾殖等，既無力全面回收亦不予換約，而部分未能合理經營的區域，甚至導致水土流失的問題，成為政府機關、保育團體、農努聯盟、學術單位及各界爭論與關注的焦點。

在面對遭受破壞的山林，複雜的土地利用，恢復山坡地原有功能，透過某些防治措施，一方面要兼顧林農生計，另一方面也要增加造林面積以確保國土保安與植林減碳。例如平臺階段、植林、造林或混農林等作為，能促進土壤下滲能力、減緩地表逕流與防止土壤沖蝕的發生。在中國黃土高原的研究顯示，若地表植被的覆蓋率增加 1%，則可降低土壤沖蝕率約 4.56 ton/ha/yr. (0.3507 mm)，若地面植被覆蓋達 52%，則在該區研究區內可能無土壤沖蝕活動發生(Zhou et al. 2006)。在印度 Trivandrum 地區的種植實驗成果，一年生樹薯與常年生木本植物(Eucalytus 和 Leucaena)混作，可以提高土地的遮蔽率，並增加土地生產力，包括食物和材薪供應等，相較於單作樹薯或常年生木本植物成果均來得較佳(Ghosh et al. 1989)。在中國江西省的研究指出，在丘陵地因開發而裸露的土壤，每年因降雨而被沖蝕的土壤約 53-256 ton/ha/yr.，但重新植林後，則可將土壤沖蝕量降至 2-43 ton/ha/yr. (Zhang et al. 2004)。這些研究指出土地開發程度，與地面植被覆蓋情況是否良好，影響土壤沖蝕的發生。國內外不少文獻均指出，混農林業的模式或許是一個可提供經濟誘因的政策，同時也可提高林農之造林意願。

然而在不同環境，如降雨、土壤性質、坡度、坡長、植生覆蓋、水土保持處理等及管理模式下，山地混農林經營對水土保育影響的科學證據仍然不足，極需要收集，並累積更多相關試驗資料。本研究的目的是在建立山坡地混農林業水土保育與永續經營相關的科學基礎資料和模式，以目前已具備混農林業型態使用之地區進行相關試驗與監測，了解在不同自然條件與不同栽植樹種情形下之水土保育

效益，提供國有林地，以及公私有地、地方社區等土地擁有者認知和經營之參考。

## II、材料與方法

### (I) 試驗樣區設置

於 3 處國有林地規劃之農業專區內，依照果樹與造林木混植情形、農作物經營管理、承租人配合試驗之意願等，選擇立地條件坡度小於 55% (28.6 度)，且整體坡面平整之坡地，果園毗鄰林地可做為對照區者，選定為監測試區，並收集試區之地形包括方位、海拔高度、及坡度等資訊，做為研判土壤流失量之基礎資料。

各試驗區係依據 USLE 的標準規範，設置每個試區坡長 22.5 m，試區寬 10 m，試區面積 225 m<sup>2</sup>。觀測區四周埋設鐵片作圍籬，鐵片埋入土壤 15 cm，露出地面 15 cm，以隔離區外之逕流，避免影響觀測結果。觀測區下方設置土壤沖蝕觀測槽，土壤沖蝕觀測槽長 10 m，底寬 0.5 m 及頂寬 1.0 m，深度 1.0m 之鐵製柵欄，上面鋪上透水布，以過濾地表逕流水之沖蝕土壤。各試驗區架設簡易雨量觀測筒一個，以觀測試驗區之總雨量。每一處生產專區內，安裝一組標準自計雨量計，紀錄歷時雨量，以輔助紀錄各試驗區之雨量觀測。

### (II) 試驗區土壤採樣分析

在各個混農林試區的四角與中心共五處，以土鑽鑽孔採取土樣，每一個土壤採樣點，分別採取土壤深度為 0~15cm、30~45cm、60~75cm 等之土樣，分析其土壤組成與物理化學性質包括土壤質地、有機質含量、土壤容重、土壤孔隙率、土壤含水量、土壤滲透率、及孔隙率等項目，做為土壤沖蝕統計分析之依據。

### (III) 植被覆蓋調查分析

調查試驗區的植生覆蓋情形，包括栽植作物種類、高度、林木樹冠幅度，及地表植生雜草、灌叢之覆蓋度。每個試驗區地被植生覆蓋調查 5 處，每處以 50cm x 50 cm 為調查範圍，並每隔 10cm，沿縱軸、橫軸各劃出 5 區，調查點面積為 10cm x 10 cm，調查每一點之地被植生覆蓋度(%)。每一處調查 25 點，平均此 25 點之地被植生覆蓋度，做為該處之地被植生覆蓋度。

### (IV) 降雨沖蝕觀測

於固定時間或一場豪雨過後，量測與清理沖蝕槽內之土壤沖蝕量，並觀測雨量。收集沖蝕下來之土壤，取回烘乾稱重，記錄每次各試區所收集土壤流失量，以瞭解其降雨沖蝕變化。觀測時間避免太過長久，以免累積太多的土壤在沖蝕槽

內，造成槽內土壤滿溢，漏失資料。

#### (V) USLE 公式推算土壤沖蝕量

以 USLE 理論及公式做為土壤流失量監測的依據，推算各試區之土壤流失量。

公式為  $A_m = R_m \times K_m \times L \times S \times C \times P$

公式中  $A_m$ ：為土壤流失量(ton/ha/yr)；

$R_m$ ：為降雨沖蝕指數(Mj-mm/ha-hr-yr)；

$K_m$ ：為土壤沖蝕指數(ton-ha-hr-yr/Mj-mm-ha-yr)；

$L$ ：為坡長因子；

$S$ ：為坡度因子， $S = 65.4(\sin \theta)^2 + 4.56 \sin \theta + 0.0654$ ；

$C$ ：為覆蓋與管理因子；

$P$ ：為水土保持處理因子。

### III、結果與討論

#### (I) 試驗區設置概況

於 3 個果樹專區，設置三種不同作物經營方式的水土流失觀測試區：(1)具有農作物有經營管理，並有混植造林木之試區，(2)鄰近造林地區做為對照組，(3)農作物有混植造林木，但農作物低度經營管理或造林木遭明顯矮化處理。選定原則為：坡度陡峻或過於平緩者不宜；地形凹凸不平者不宜；有水土保持如平台階段者不宜；不屬專區內的主要栽植果樹作物者不宜。

各果樹專區之地文因子調查包括：試區之經緯度、方向角、海拔高、坡度等資訊，如表 1。影響土壤流失較大者為坡度，坡度越大受到重力場影響越大，產生地表沖蝕也越大，坡度因子為通用土壤流失公式估算的因子，坡度因子  $S = 65.4(\sin \theta)^2 + 4.56 \sin \theta + 0.0654$ ，式中  $\theta$  為坡度，可用來評估試驗區坡度對土壤沖蝕的影響。為了能比較同一果樹專區內，果樹區與造林區對坡度之影響，設定坡度因子比值為(各果樹區坡度因子)/(造林區坡度因子)。坡度因子比值大於 1 時，表示受到坡度影響比造林區大，並且比值越大土壤流失潛力越大。反之，受到坡度影響較小，土壤流失潛力小於造林區。

頂岩灣釋迦生產專區位於台東北面頂岩灣地區之內，本試驗於區內設置釋迦及截幹造林地為有管理之林木矮化區，試驗區經濟作物為釋迦樹，混植之造林木為蘭嶼羅漢松與烏心石，惟造林木都被截幹，樹高都不超過 1m，而釋迦樹則用棚

架矮化，樹高僅 2m，全園為草類覆蓋，地主定時做割草與施肥管理，本區位於東經 121°06'36"北緯 22°49'04"，屬南向偏西方位，方向角為 330°，海拔高 242m，坡度為 19.5°，坡度因子為 8.87。釋迦混植尚楠地為有管理之林木輕度矮化區，區內為釋迦混植蘭嶼羅漢松與烏心石造林木，樹高 1~2m，釋迦樹用棚架矮化，樹高僅 2m，全園為草類覆蓋，有定時割草與施肥管理，試驗區位於東經 121°06'28"北緯 22°48'56"，屬南向偏西方位，方向角為 345°，海拔高 243m，坡度為 10.5°，坡度因子為 3.07。改正尚楠造林區屬造林區，區內造林木為尚楠與陰香，樹高 5~7m，區內密植造林木，透光度不良，雜草植生不易存活，枯枝落葉敷蓋較多，試驗區位於東經 121°06'28"北緯 22°48'56"，屬南向偏西方位，方向角為 348°，海拔高 248m，坡度為 13°，坡度因子為 4.40。岩灣釋迦生產專區試驗區的坡度因子比值，釋迦林木矮化區(2.02) > 造林區(1) > 釋迦林木輕度矮化區(0.38)。

梅嶺梅子專區位於台南東邊的楠西，區內設置烏心石造林區，樹高 8~10m，區內雜草與灌叢覆蓋良好，試驗區位於東經 120°33'29"北緯 23°11'21"，海拔高 616m，坡度為 18.5°，坡度因子為 8.1；梅子樹區屬有管理區，區內經濟作物為梅樹，造林木為破布子，樹高 2~4m，全園為草類與灌叢覆蓋，試驗區位於東經 120°33'46"北緯 23°11'15"，海拔高 694m，坡度為 14°，坡度因子為 5.0；破布子區屬未管理區，區內造林木為破布子，樹高 3~4m，區內雜草與灌叢覆蓋，試驗區位於東經 120°33'35"北緯 23°11'03"，海拔高 666m，坡度為 15°，坡度因子為 5.63，梅嶺梅子專區試驗區的坡度比值，造林區(1) > 破布子區(0.69) > 梅樹區(0.62)。

烏石坑甜柿專區位於台中東勢北面的烏石坑，區內設置尚楠造林區，造林木為尚楠與欖木，造林木樹高超過 6m，介於 6~8m，全園草類與灌叢覆蓋，試驗區位於東經 120°56'27"北緯 24°18'15"，屬南向偏西方位，方向角為 328°，海拔高 1045m，坡度為 37.5°，坡度因子為 27.08；甜柿混植銀杏地為有管理區，區內經濟作物為甜柿，造林木為銀杏、楓香與尚楠，樹高 2~4m，甜柿樹用棚架矮化，樹高僅 2m，全園為草類覆蓋，地主定時做割草與施肥管理，試驗區位於東經 120°56'28"北緯 24°18'14"，屬北向偏東方位，方向角為 169.5°，海拔高 1068m，坡度為 23°，坡度因子為 11.83；改正欖木造林地為未管理區，區內造林木為尚楠與欖木，樹高 5~7m，區內雜草與灌叢植生覆蓋良好，試驗區位於東經 121°06'28"北緯 22°48'56"，屬南向偏西方位，方向角為 328°，海拔高 780m 坡度為 31.5°，坡度因子為 11.83，烏石坑甜柿專區試驗區的坡度比值，造林區(1.0) > 改正區(0.75) > 甜柿區(0.44)。

表 1 各試驗區位置資料

Table 1 experimental plot location information

調查項目	烏石坑			梅嶺			頂岩灣		
	甜柿區	改正區	造林地	梅樹區	破布子	造林地	林木矮化	林木輕矮化	造林地
經度	120°56'28"	121°06'28"	120°56'27"	120°33'46"	120°33'35"	120°33'29"	121°06'36"	121°06'28"	121°06'28"
緯度	24°18'14"	22°48'56"	24°18'15"	23°11'15"	23°11'03"	23°11'21"	22°49'04"	22°48'56"	22°48'56"
海拔高(m)	1068	780	1045	674	666	616	242	248	243
方向角(O)	169.5	328	328	314	311	222	330	345	348
坡度(°)	23	31.5	37.5	14	15	18.5	19.5	10.5	13
坡度因子(S)	11.83	20.3	27.08	5	5.63	8.1	8.87	3.07	4.4
坡度因子比值*	0.44	0.75	1	0.62	0.69	1	2.02	0.38	1

\*坡度因子比值為(各果樹區坡度因子)/(造林區坡度因子)，坡度因子比值大於 1，表示受到坡度影響比造林區大，並且比值越大土壤流失潛力越大。



a. 烏石坑甜柿區混植銀杏



b. 梅嶺梅樹區混植破布子



b. 岩灣釋迦混植區林木矮化之烏心石



d. 岩灣造林區混植陰香、尚楠

圖 1 試驗區現況照片

Fig.1 experimental plot status pictures

## (II)土壤採樣分析

降雨對土壤的打擊與破壞，產生土壤沖蝕力與抗蝕力互相消長的結果，土壤抗蝕力越大，土壤沖蝕就越小；反之，土壤抗蝕力愈弱，土壤沖蝕就愈高。土壤沖蝕的高低受內在及外在因子的影響，內在指土壤的物理及化學性質，土壤的物理性質包含土壤的質地、構造、容重、孔隙率、含水量及土壤的透水特性等，其中土壤質地、構造、滲透性為 USLE 公式中計算土壤沖蝕指數  $K_m$  之參數。而土壤的化學性質則指土壤中有機質含量及土壤團聚的能力，土壤中各項物理性質及化學性質關係密切，相互影響，如土壤孔隙率影響容重、滲透率、含水量等為評估土壤沖蝕的重要依據。

根據三處國有林農業專區土樣剖面調查圖 2，台中東勢烏石坑為粘壤土，細砂岩風化形成的弱育土，地表含石量約 10%，土壤深度超過 90 cm；台南楠西梅嶺屬粘壤土，由砂岩風化形成的弱育土，地表含石量約 5%，土壤深度超過 75 cm；臺東頂岩灣屬砂質粘壤土，為火山凝灰岩風化形成的弱育土，地表含石量約 5%。

土壤物理性質分析的結果如表 2，實測各試點之土壤容重、孔隙率、含水量及滲透率等參數後，分別計算該專區造林地參數之比值，可比較樣區間的差異，當比值大於 1，表示土壤物理性質優於造林地。土壤滲透率快與慢的評估，依據實際量測值對照表 3，參數值小表示土壤滲透快，產生地表逕流量少，對土壤沖蝕相對會較小；反之，土壤滲透慢產生地表逕流多，對土壤沖蝕相對會較大。

烏石坑三個試區土壤容重大小順序分別為改正區  $1.19 \text{ g/cm}^3$ 、造林地  $1.08 \text{ g/cm}^3$ 、舔柿區  $1.05 \text{ g/cm}^3$ ；孔隙率、含水量、土壤滲透率及有機質含量，各試區之大小順序為舔柿區 > 造林區 > 改正區。梅嶺三個試點土壤容重大小順序分別為破布子  $1.33 \text{ g/cm}^3$ 、造林地  $1.24 \text{ g/cm}^3$ 、梅樹區  $1.18 \text{ g/cm}^3$ ；孔隙率、含水量、土壤滲透率及有機質含量，各試區之大小順序為梅樹區 > 造林地 > 破布子。頂岩灣三個試點土壤容重大小順序分別為林木輕度矮化區  $1.46 \text{ g/cm}^3$ 、林木矮化區  $1.37 \text{ g/cm}^3$ 、造林地  $1.32 \text{ g/cm}^3$ ；孔隙率、含水量、土壤滲透率及有機質含量，各試區之大小順序為造林地 > 林木矮化區 > 林木輕度矮化區。



a. 烏石坑地區土壤剖面

b. 梅嶺地區土壤剖面

c. 頂岩灣地區土壤剖面

圖 2 各試驗區土壤剖面

Fig.2 experimental plot soil profiles

土壤容重為單位體積之土壤重量，包含土壤體積、空氣體積及水份體積，同樣體積的土體，水與空氣的體積越大，土壤體積與重量就越小，土壤容重相對減小。孔隙率增大，土壤水的儲積增加，影響土壤滲透性與土壤含水量，減少地表之逕流沖蝕。土壤淋洗與滲漏作用，將細顆粒土壤逐漸帶入土壤中填補孔隙，使土壤密實，故土壤中孔隙率、有機質含量都隨土壤深度增加而減少。森林地含有高腐植質土壤，則有助於減低洪峰流量及水資源保育。因為土壤有機質多為高分子量之成分，有聚結土粒的能力，形成團粒狀構造，增加土壤的粒團穩定性及有助於土壤通氣性與導水性，有利於水份的入滲與土壤之耕犁，並減少沖蝕作用。山區森林土之土壤有機質含量約為 7.0%，台地則為 3.3%，平地為 2.4%(郭鴻裕，2008)，各試驗區之土壤有機質含量為 7.9%~3.8%，與此相符。果園的經營管理，經過一段時間，就會施放有機肥，增加植生覆蓋，有助於土壤有機質的增加，對改善土壤滲透、土壤容重、孔隙率、含水量等土壤物理性，都有正面的意義，並可降低土壤流失。

表 2 試驗區土壤物理及化學性分析

Table 2 experimental plots of soil physical and chemical analysis

	烏石坑	梅嶺	頂岩灣
--	-----	----	-----

測試項目	甜柿區	改正區	造林地	梅樹區	破布子	造林地	林木矮化	林木輕矮化	造林地
土壤容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.05	1.19	1.08	1.18	1.33	1.24	1.37	1.46	1.32
(比值)	(0.97)*	(1.10)	(1.00)	(0.95)	(1.07)	(1.00)	(1.04)	(1.06)	(1.00)
孔隙率(%)	61.01	55.66	59.89	55.77	50.07	53.6	47.91	47.8	51.15
(比值)	(1.02)	(0.93)	(1.00)	(1.04)	(0.93)	(1.00)	(0.94)	(0.93)	(1.00)
含水量(%)	27.23	22.44	26.96	18.93	15	15.22	17.12	18.59	18.68
(比值)	(1.01)	(0.83)	(1.000)	(1.24)	(0.99)	(1.00)	(0.920)	(0.99)	91.00)
滲透率(mm/hr)	113.4	9.12	33.36	4.56	13.92	36.72	42.75	11.16	8.64
(比值)	(3.40)	(0.27)	(1.00)	(0.12)	(0.38)	(1.00)	(4.95)	(1.29)	(1.00)
有機質(%)	7.91	6.29	7.07	5.31	4.25	6.73	4.67	3.59	3.82
(比值)	(1.12)	(0.89)	(1.00)	(0.79)	(0.63)	(1.00)	(1.22)	(0.94)	(1.00)

\*括弧中的值為該性質參數對同處造林地參數的比值

表 3 滲透性參數

Table 3 the permeability parameters

參數值	滲透速度	(mm/hr)
6	極慢	<1.25
5	慢	1.25-5.00
4	中等慢	5.00-20.00
3	中等快	20.00-62.50
2	快	62.50-125.00
1	極快	>125.00

### (III) 試驗區植被覆蓋調查及 C-因子分析

由於降雨產生地表逕流，受到重力加速度作用，地表逕流的動能變大，特別在坡度陡峭、降雨與融雪量豐沛的地方，逕流所能沖刷和攜帶土壤的能力相當高，如果沒有良好的植被覆蓋，經常會造成嚴重的土壤沖蝕現象。植物的覆蓋程度良好，會促進土壤下滲能力、增加地面水的儲蓄積留、攔阻泥沙的運移、避免雨滴飛濺沖蝕與減少地表逕流量，減緩土壤沖蝕的發生。在無人為活動干擾的情形下，全球平均土壤沖蝕率不高，在平坦且有良好植被覆蓋的地面，土壤沖蝕率約為 0.001~2 t/ha/yr. (0.0001~0.1538 mm)，山坡地有完整植被覆蓋者土壤沖蝕率為 1~5 t/ha/yr. (0.076~0.3846 mm)，隨著農業及其他活動的開展，農地土壤沖蝕率會增加到

13~40 t/ha/yr. (1~3.076 mm)，在某些熱帶地區位於山坡地的農田，其土壤沖蝕率高達 400 t/ha/yr. (30.769 mm) (Piemental and Kounang,1998)。另外，地面植物的覆蓋程度良好者，會影響土壤下滲能力與地表逕流量，這會進一步促進或減緩土壤沖蝕的發生，例如在中國黃土高原的研究模擬成果顯示，若地表植被的覆蓋率增加 1%，則可降低土壤沖蝕量約 4.56 t/ha/yr. (0.3507 mm)，若地面植被覆蓋達 52%，則在該區研究區內可能無土壤沖蝕活動發生(Zhou et al., 2006)。這些研究結果，指出土地開發程度，與地面植被覆蓋情況是否良好，影響土壤沖蝕的發生。

由水土流失觀測區內植物生長狀況及地被植生覆蓋調查表 4，可以大致瞭解試區內土壤沖蝕的潛勢，有助於試區監測與土壤沖蝕量之估算。試區調查項目包含植生種類、高度、樹冠覆蓋度，及地表植生雜草、灌叢種類及覆蓋度等。根據萬用土壤流失公式中覆蓋與管理因子 C 值表 5，當地被植物覆蓋度小時，植被覆蓋指數 C 值大，土壤的沖蝕潛勢也越大；反之，地被植物覆蓋度變大時，植被覆蓋指數 C 值就變小，土壤的沖蝕潛勢也變小。

烏石坑甜柿專區內之甜柿區栽植甜柿 11 株，樹高 2-4m，樹冠鬱閉度達 50-70%，地被植生覆蓋度冬季與春季分別為 58.8%及 71.2%，植生覆蓋指數 C 值查表分別為 0.04 及 0.027；改正試區栽植檫木造林木 10 株，樹高 5-7m，樹冠鬱閉度達 60-80%，地被植生覆蓋度分別為 60.5%及 70.2%，植生覆蓋指數 C 值分別為 0.039 及 0.027；尚楠造林地試區樹冠鬱閉度達 70-80%，地被植生覆蓋度分別為 54.9%及 35.9%，植生覆蓋指數 C 值分別為 0.04 及 0.09，各試區之植生覆蓋指數越大，沖蝕潛力越大。烏石坑甜柿專區，植生覆蓋指數比值為造林區(1.0) > 甜柿區(1.0 及 0.3) > 改正區 (0.98 及 0.3)，若植生覆蓋指數比值大於 1，表示沖蝕潛力大於造林區。

梅嶺造林區樹冠鬱閉度達 85-95%，地被植生覆蓋度分別為 76.5%及 22.3%，植生覆蓋指數 C 值分別為 0.003 及 0.16；梅樹區樹冠鬱閉度達 50-70%，地被植生覆蓋度分別為 46.9%及 64.7%，植生覆蓋指數 C 值分別為 0.073 及 0.085；破布子區樹冠鬱閉度達 60-80%，地被植生覆蓋度分別為 70.0%及 76.2%，植生覆蓋指數 C 值分別為 0.026 及 0.029。梅嶺梅樹專區，各試區之植生覆蓋指數比值為造林區(1.0) > 梅樹區(2.43 及 0.53) > 破布子區(0.87 及 0.18)，比值小於 1，表示沖蝕潛力也小於造林區。

頂岩灣釋迦專區內之林木矮化區，區內架設棚架，試驗區樹冠鬱閉度為 50-70%，冬季時地被植生覆蓋度分別為 60.0%，植生覆蓋指數 C 值為 0.038。到了春季，地被植生覆蓋度平均增加，地被植生覆蓋度為 79.7%，植生覆蓋指數 C 值降為 0.012。

林木輕度矮化區，區內架設棚架，樹冠範圍小，鬱閉度為 60-80%，地被植生覆蓋度分別為 68.7% 及 61.4%，可能因為剛除過草的關係，植生覆蓋指數 C 值為 0.026 及 0.038；造林地試區，栽植造林地木 44 株，鬱閉度為 85-95%，地被植生覆蓋度冬季與春季分別為 42.7% 及 2.9%，可能與長期乾旱與林內光線不足有關，故植生覆蓋指數 C 值查表分別為 0.083 及 0.3。頂岩灣釋迦專區，各試區之植生覆蓋指數比值為造林區(1.0) > 林木矮化區(0.46 及 0.04) > 林木輕度矮化區(0.31 及 0.13)，比值均小於 1，表示沖蝕潛力也小於造林區。

表 4 試驗區植生覆蓋調查與 C 值分析

Table 4 vegetation cover investigation and c-value analysis

測試項目	烏石坑			梅嶺			頂岩灣		
	甜柿區	改正區	造林地	梅樹區	破布子	造林地	林木矮化	林木輕矮化	造林地
作物鬱閉度(%)	50-70	60-80	70-80	50-70	60-80	85-95	50-70	60-80	85-95
地被覆蓋度(%)	58.8	60.5	54.9	46.9*	70	76.5	60	68.7	42.7*
冬季植生覆蓋指數	0.04	0.039	0.04	0.073	0.026	0.03	0.038	0.026	0.083
覆蓋指數比值*	1	0.98	1	2.43	0.87	1	0.46	0.31	1
春季地被覆蓋度(%)	71.2	70.2	35.9	64.7	76.2	22.3	79.7	61.4	2.9
春季植生覆蓋指數	0.027	0.027	0.09	0.085	0.029	0.16	0.012	0.038	0.3
覆蓋指數比值*	0.3	0.3	1	0.53	0.18	1	0.04	0.13	1

\*植生覆蓋指數比值=(各試區植生覆蓋指數)/(造林區植生覆蓋指數)

表 5 植生覆蓋與管理因子 C 值

Table 5 vegetation cover and management factor C-value

植物生長狀況		地被植物覆蓋度(%)					
型態及樹高	樹冠鬱閉度(%)	0	20	40	60	80	95
無可看樹高	0	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
高草地或灌木 平均雨滴落下高 0m	25	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003

高草地或灌木 平均雨滴落下高 0m	50	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
高草地或灌木 平均雨滴落下高 0m	75	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
灌木或灌叢 平均雨滴落下高 2m	25	0.40	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
灌木或灌叢 平均雨滴落下高 2m	50	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
灌木或灌叢 平均雨滴落下高 2m	75	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
灌木但無短叢 平均雨滴落下高 4m	25	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
灌木但無短叢 平均雨滴落下高 4m	50	0.39	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
灌木但無短叢 平均雨滴落下高 4m	75	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003

#### (IV)降雨及水土流失觀測分析

依據 103 年 12 月到 104 年 5 月止，整理各專區觀測之月雨量如 0，每年 11 月至次年 4 月為台灣本島之旱季及梅雨季。因此，於 104 年初(1~4 月)，三個試驗專區降下之春雨雨量很少，月雨量都不超過 100 mm，每月的下雨天數約在 10 天左右，最大時雨量強度大致為 7 mm/hr。烏石坑試區地點偏北，受東北季風影響，降雨量比另二個試驗區稍微高些，時雨量強度超過 10 mm/hr，可達到 12.5 mm/hr；頂岩灣試區受太平洋高溫影響，氣候乾燥，降雨量偏少；梅嶺試區為中央山脈屏障阻擋作用，降雨量稀少。此時期三個試驗區之降雨量少，降下之雨量大都為土壤吸收，且降雨強度小，小於超滲雨量，產生地表逕流量相當少，幾乎無逕流沖蝕。隨著 5 月的梅雨到來，頂岩灣、梅嶺、烏石坑等專區降雨量增加，降雨天數、雨量強度及降雨總量均明顯增加，地表逕流沖蝕亦隨著增加，5 月份頂岩灣、梅嶺、烏石坑的降雨量分別為 119.5 mm、831.5 mm 及 788.5 mm。其中在 5 月 24 日，梅嶺試區降下最大時雨量強度為 75.0 mm/hr，單日雨量為 365.5 mm，已達超大豪雨 350mm/24hr 之標準，另外二試驗區之日雨量則沒有達 50 mm/24hr 大雨之標準，原因為梅雨鋒面過境，滯留南部地區時間較久。整體來看，區域性的降雨情況不同，三個試驗專區的觀測雨量資料亦會有些微不一樣，觀測期間之降雨狀況，累積降雨量以烏石坑試區之 1090.0 mm 為最多，其次為梅嶺試區 916.5 mm，最小為頂岩灣試區 317.5

mm；統計降雨天數以頂岩灣試區之 56 天最多，烏石坑試區之 44 天為次，梅嶺試驗區之 38 天最少。單日最大降雨強度以梅嶺地區之 75.0 mm/hr 最大，其次為烏石坑地區之 14.5 mm/hr，最小為頂岩灣地區之 8.0 mm/hr。

表 6 國有林農業專區之月雨量

Table 6 national forest agricultural districts month rainfall amounts

年 代	月 份	烏石坑			梅嶺			頂岩灣		
		降雨量 (mm)	雨天數 (day)	最大降 雨強度 (mm/hr)	降雨量 (mm)	雨天數 (day)	最大降 雨強度 (mm/hr)	降雨量 (mm)	雨天數 (day)	最大降 雨強度 (mm/hr)
2014	12	40.0	7	4	27.5	11	3.0	17.5	6	2.5
2015	1	58.0	5	2.5	13.0	1	7.5	41.0	4	5.0
2015	2	28.5	6	11.5	25.5	2	6.5	11.0	4	3.5
2015	3	83.0	9	10.5	7.0	4	2.5	60.5	11	7.0
2015	4	92.0	9	12.5	12.0	4	1.5	68.0	13	7.0
2015	5	788.5	8	14.5	831.5	16	75.0	119.5	18	8.0
2015	6	---	---	---	---	---	---	---	---	---
累積雨量		1090	44		916.5	38		317.5	56	

從 103 年 12 月下旬至 104 年 5 月止，共觀測到 5 次的降雨逕流沖蝕，如表 7，烏石坑甜柿專區標準雨量筒之累積雨量為 1,090 mm，累積土壤流失量比較：甜柿區 0.099 ton/ha<改正區 0.152 ton/ha<造林區 0.516 ton/ha。若以年雨量 2,300 mm 為估算之依據，依比率 2,300 mm/1090 mm 為 2.110，估算三者之年土壤流失量分別為，甜柿區 0.209 ton/ha/yr.、改正區 0.321 ton/ha/yr.、造林區 1.089 ton/ha/yr.。

梅嶺專區標準雨量筒之累積雨量為 916.5 mm，累積土壤流失比較：破布子區 0.085 ton/ha<梅樹區 0.130 ton/ha<造林區 0.525 ton/ha。若以年雨量 2,300 mm 為估算之依據，依比率 2,300mm/916.5 mm 為 2.510，估算三者之年土壤流失量分別為，梅樹區 0.326 ton/ha/yr.、破布子區 0.213 ton/ha/yr.、造林區 1.318 ton/ha/yr.。

頂岩灣專區標準雨量筒之累積雨量為 317.5 mm，小於林木矮化區 396 mm，林木輕度矮化區 419.5 mm 與造林區 419.5 mm 之簡易雨量筒之累積雨量。差異的原因除為地形雨的影響，另外在強降雨強度時，標準雨量筒會漏失小部份雨量。累積土壤沖蝕率之比較：林木輕度矮化區 0.070ton/ha<林木矮化區 0.076 ton/ha<造林區

0.211 ton/ha。若以年雨量 2,300 mm 為估算之依據，依比率 317.5 mm/2,300 mm 為 7.244，估算三者之年土壤沖蝕率分別為林木矮化區 0.551 ton/ha/yr.、林木輕度矮化區 0.507 ton/ha/yr.、造林區 1.528 ton/ha/yr.。

以上三處國有林地擬規劃為農業專區內 3 個試點之土壤沖蝕量，結果與世界在平坦且有良好植被覆蓋的地面，土壤沖蝕量為 0.001~2 ton/ha/yr. (0.0001~0.1538 mm)相符合，且小於山坡地有完整植被覆蓋之土壤沖蝕量 1~5 ton/ha/yr. (0.076~0.385 mm)與農業及其他活動開展農地之土壤沖蝕率 13~40 ton/ha/yr. (1~3.076 mm)，並遠小於熱帶地區位於山坡地的農田土壤沖蝕率 400 ton/ha/yr. (30.769 mm)。

表 7 國有林農業專區之降雨沖蝕分析

Table 7 analysis on the rainfall erode national forest agricultural districts

A.烏石坑						
		甜柿區		改正區		造林地
標準雨量(mm)	觀測起迄時間	土壤流失量(kg)	觀測起迄時間	土壤流失量(kg)	觀測起迄時間	土壤流失量(kg)
40	2014/12/18-2015/01/13	0.1	2014/12/18-2015/01/13	0.5	2014/12/18-2015/01/13	0.5
58	2015/01/13-2015/03/11	0.2	2015/01/13-2015/03/11	0.3	2015/01/13-2015/03/11	1
163	2015/03/11-2015/04/22	0.4	2015/03/11-2015/04/22	0.5	2015/03/11-2015/04/22	1.8
86.5	2015/04/22-2015/05/18	0.3	2015/04/22-2015/05/18	0.4	2015/04/22-2015/05/18	0.9
742.5	2015/05/19-2015/06/03	1.2	2015/05/19-2015/06/03	1.7	2015/05/19-2015/06/03	7.3
1090	累積量	2.2		3.4		11.5
	沖蝕量(ton/ha)	0.099		0.152		0.516
	年沖蝕量(ton/ha/yr.)	0.209		0.321		1.089

B.梅嶺						
		梅樹區		破布子		造林地
標準雨量(mm)	觀測起迄時間	土壤流失量(kg)	觀測起迄時間	土壤流失量(kg)	觀測起迄時間	土壤流失量(kg)
27.5	2014/11/20-2015/01/07	0.1	2014/11/20-2015/01/07	0.1	2014/11/20-2015/01/07	0.1
45	2015/01/07-2015/03/31	0.2	2015/01/07-2015/03/31	0.1	2015/01/07-2015/03/31	0.2

11.5	2015/03/31- 2015/04/21	0.2	2015/03/31- 2015/04/21	0.2	2015/03/31- 2015/04/21	0.3
15	2015/04/21- 2015/05/19	0.1	2015/04/21- 2015/05/19	0.1	2015/04/21- 2015/05/19	0.1
817.5	2015/05/19- 2015/06/03	2.3	2015/05/19- 2015/06/03	1.4	2015/05/19- 2015/06/03	11
916.5	累積量	2.9		1.9		11.7
	沖蝕量(ton/ha)	0.13		0.085		0.525
	年沖蝕量(ton/ha/yr.)	0.326		0.213		1.318

## C.頂岩灣

標準雨 量(mm)	林木矮化		林木輕度矮化		造林地	
	觀測起 迄時間	土壤流失 量(kg)	觀測起 迄時間	土壤流失 量(kg)	觀測起 迄時間	土壤流失 量(kg)
2.5	2014/12/03- 2014/12/04	0	2014/12/03- 2014/12/04	0	2014/12/03- 2014/12/04	0
129.5	2014/12/04- 2015/04/01	0.45	2014/12/04- 2015/04/01	0.4	2014/12/04- 2015/04/01	1.5
60	2015/04/01- 2015/04/22	0.3	2015/04/01- 2015/04/22	0.3	2015/04/01- 2015/04/22	1.1
23	2015/04/22- 2015/05/19	0.15	2015/04/22- 2015/05/19	0.15	2015/04/22- 2015/05/19	0.3
102.5	2015/05/19- 2015/06/03	0.8	2015/05/19- 2015/06/03	0.7	2015/05/19- 2015/06/03	1.8
317.5	累積量	1.7		1.55		4.7
	沖蝕量(ton/ha)	0.076		0.07		0.211
	年沖蝕量(ton/ha/yr.)	0.551		0.507		1.528

## (V) USLE 公式推算土壤沖蝕量

由於各試點分散在不同的區域，降雨情況、地形、土壤、坡度、地面植生覆蓋情形、及水土保持處理等條件不同，產生不同的地表逕流和土壤沖蝕特性。若根據以上現況之實測數據，忽略各農業專區試驗區立地條件不同，直接研判各試點之土壤沖蝕量，得到的結論會是，造林地比有管理的果樹區的土壤流失量大，但這樣的結論並不太正確的。因為在相同的降雨條件和同質性土壤，但不同地形狀況下，地表逕流在坡度陡的地上流動，逕流流速加速現象較坡度緩的地表逕流為快，陡坡地上受到地表逕流的剪力切割比緩坡嚴重，例如烏石坑與梅嶺的造林地試區即是坡度明顯大於其他試點，因此會有較大之土壤流失量。相同的道理，

地表植生覆蓋度愈大，土壤沖蝕的可能性就愈低，烏石坑與頂岩灣的造林地試區的地被植生覆蓋率皆較低，尤其是頂岩灣試區林下地被草類稀少，因此土壤沖蝕量也較大。

表 8 改變 USLE 公式 S 及 C 因子估算各試驗區土壤沖蝕量

Table 8 change USLE formula's s and c factors to estimate plot soil erosion amounts

項 目	烏石坑			梅嶺			頂岩灣		
	甜柿區	改正區	造林地	梅樹區	破布子	造林地	林木矮化	林木輕矮化	造林地
坡度 $\omega(^{\circ})$	23	31.5	37.5	14	15	18.5	19.5	10.5	13
坡度因子-S*	11.832	20.303	27.078	4.996	5.627	8.097	8.875	3.068	4.401
植被覆蓋指數-C	0.027	0.027	0.09	0.085	0.029	0.16	0.012	0.038	0.3
實測沖蝕量	0.209	0.321	1.089	0.326	0.213	1.318	0.551	0.507	1.528
修正 S 因子	8.875	8.875	8.875	8.875	8.875	8.875	8.875	8.875	8.875
修正 C 指數	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
修正 S 因子沖蝕量	0.157	0.14	0.357	0.579	0.336	1.445	0.551	1.466	3.082
修正 C 指數沖蝕量	0.194	0.297	0.303	0.096	0.184	0.206	1.148	0.334	0.127
修正 SC 因子沖蝕量	0.145	0.13	0.099	0.17	0.29	0.226	1.148	0.965	0.257

\*坡度因子  $S=65.4\sin\theta+4.56\sin\theta+0.0654$ ,  $\theta=\omega/180*\pi$

為了釐清立地條件不同可能造成的誤導現象，有必要修正各試點坡度因子-S 及植被覆蓋指數-C，並透過 USLE 公式的轉換，重新推算各試驗區之土壤流失量。0 為修正 S 因子及 C 指數以 USLE 公式估算各試驗區土壤沖蝕量的結果，假設各試驗區之坡度為  $19.5^{\circ}$ ，坡度百分比約為 35%，坡度介於 0%與 55%中間，由坡度因子-S 的公式計算，得到修正 S 因子為 8.875。將各試點實測沖蝕量除以原有坡度因子-S 後，再乘上修正 S 因子 8.875，即得到修正 S 因子後的土壤沖蝕量。推算的結果，造林地區土壤沖蝕量減少，有管理與未管理土壤沖蝕量則增加，證實造林地試驗區坡度較大，造成土壤沖蝕量較大。若各試點管理良好，植被覆蓋度維持在 70%以上，則修正後之 C 指數為 0.025，將各試點實測沖蝕量除以原有植被覆蓋指數-C，再乘上修正 C 指數 0.025，即得到修正 C 指數後的土壤沖蝕量。推算的結果，造林地區土壤沖蝕量也跟著減少，有管理與未管理之土壤沖蝕量也有增減，證實造林地試驗區加強管理，提高植被覆蓋度，會降低土壤沖蝕量。再將各試點實測沖蝕量除以原有坡度因子-S 及植被覆蓋指數-C，乘上修正 S 因子 8.875 及 C 指數 0.025，即得到修正 S、C 指數後的土壤沖蝕量。推算的結果，各試點造林地試

驗區之土壤沖蝕量明顯都低於有管理與未管理之土壤沖蝕量。

#### IV、結論

國有林租地造林地，中部烏石坑甜柿農業專區、南部梅嶺梅子農業專區及東部岩灣釋迦農業專區，各設置 3 種不同栽植作物混農林水土流失觀測區，進行土壤採樣，土壤物理化學性質分析，以及植生覆蓋狀況調查，探討各混農林試驗區對促進土壤水分下滲能力、地表水的儲蓄積留、攔阻泥沙的運移、避免雨滴飛濺沖蝕與減少地表逕流量，減緩土壤沖蝕發生的機制。建立混農林業相關的科學基礎資料和模式，有助於未來混農林植林的推廣與強化混農林碳吸存及碳保留功效解說之依據。

國有林租地造林地栽植果樹水土流失量的監測結果，烏石坑造林地試區之土壤流失量為(1.089 t/ha/yr.)>未管理之改正造林區(0.321 t/ha/yr.)>有管理之甜柿區(0.209 t/ha/yr.)；梅嶺之造林區(1.318 t/ha/yr.)>有管理之梅子園區(0.326 t/ha/yr.)>未管理之破布子區(0.213 t/ha/yr.)；頂岩灣之造林區(1.528 t/ha/yr.)>有管理之林木矮化區(0.551 t/ha/yr.) >有管理之林木輕度矮化區(0.507 t/ha/yr.)。果園混植林木試區的水土流失量皆較造林地試區為低，主要原因為造林地試點之坡度較陡，沖蝕率較高。果園混植林木區以集約經營維持良好地被植生覆蓋，混植的林木具有覆蓋與穩固土壤的功能，故能減緩土壤流失。此結果與世界山坡地有完整植被覆蓋之土壤沖蝕率 1-5 ton/ha/yr.相近，又比農業及其他活動開展農地之土壤沖蝕率 13-40 ton/ha/yr.為小，並遠小於熱帶地區位於山坡地的農田土壤沖蝕率 400ton/ha/yr.(30.769mm)。

各試區分散在不同的區域，降雨情況、地形、土壤、坡度、地面植生覆蓋情形、及水土保持處理等條件有所不同，產生不同的地表逕流和土壤沖蝕特性。在資料引用時，必須格外謹慎小心，不能以試驗區現況觀測數據，直接研判各農業專區試點之土壤沖蝕量，否則會誤導錯誤的結論，例如造林地比有管理的果樹區的土壤流失量大，這樣是不正確。必須根據事實，符合理論，在相同的條件下，透過模式的修正，才能得到真正的結論。

地被植生覆蓋對減少地表土壤沖刷的功能十分重要，草生栽培可有效減少地表沖蝕，被覆完密之地表草類，可阻截雨點打擊，抑制沖蝕，增加土壤有機質、改良理化性質、降低管理成本，並緩和微氣候及地溫變化，改善農地環境。因此出租造林地應避免全面除草，並禁止使用化學除草劑。雨季期間尤其應該避免中

耕及除草等破壞地表覆蓋之作業，全年地表覆蓋密度應維持 70%以上。由於農民普遍不能接受果樹與造林木均勻混植，因此國有林出租造林地違規使用之改正造林，其間植造林木建議栽植於適當區位，尤其是坡度較陡及表土易遭沖蝕處，以塊狀及等高橫坡帶狀混植造林木，應屬較可行之方式。

## V、致謝

本研究為行政院林務局委託研究計畫系列 tfbp-1030107 經費補助，林試所同仁王秋嫻、林介龍之土壤採樣分析，傅鶴翹、黃榮俊、王德華、邱之偉等野外工作協助，謹此致謝。

## VI、參考文獻

- 王新傳 (1979)。臺灣坡地土壤沖蝕性。中華農學會報，105：39-42。
- 吳輝龍、張文紹、吳嘉俊、徐森雄 (1997)。檳榔樹冠對降雨沖蝕能量之影響。中華水土保持學報 28(1)：33-46。
- 林壯沛 (1992)。山坡地栽植檳榔之水土流失問題探討。高爾夫球場與檳榔園對水土保持之衝擊專題研討會論文集，頁 56-66。
- 林壯沛 (1995)。山地栽植檳榔對水土保持之影響。臺灣水土保持，11：10-14。
- 林壯沛 (1995)。坡地栽植檳榔對水土流失之探討。臺灣省林業試驗所簡訊，頁 11-13。
- 林壯沛 (1997)。坡地栽植檳榔對水土流失之影響。臺灣省林業試驗所推廣摺頁，12。
- 林壯沛 (2002)。坡地栽植檳榔對臺灣中部山區集水區水文特性影響之研究。國立中興大學水土保持研究所博士論文。
- 郭鴻裕 (2008)。土地利用與氣候變遷。防治全球暖化宣導研習。
- 陳芬蕙、何政坤、顏士雄、梁明煌 (2011)。混農林業之相關法律、政策檢視與山坡地推行可行性探討。林業研究專訊，18(3)：38-41。
- 陳信雄 (1994)。檳榔亡國論—臺灣水資源的另一殺手。水資源研討會，頁 5-1-5-5。
- 程煒兒、洪富文、林光清 (1997)。森林土壤有效養分測定方法之比較。臺灣林業科學，12(2)：177-188。
- 黃俊德 (1989)。臺灣降雨沖蝕指數之研究。中華水土保持學報，10(1)：1-11。

- 羅紹麟、林喻東 (1993)。臺灣地區混農林業經營之研究。中興大學實驗林研究報告，15(2)：57-82。
- Current D., Brooks K., Ffolliott P., Keefe M. (2009). Moving agroforestry into the mainstream. *Agroforestry Systems*, 75(1): 1-3.
- Ghidey F. and Alberts E. (1997). Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability. *Transactions of the ASAE*, 40(1): 129-13.
- Ghosh S. P., Mohan Kumar, B., Kabeerathumma S., Nair G.M. (1989). Productivity, soil fertility and soil erosion under cassava based agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 8:67-82.
- Gyssels G., Poesen J., Bochet E., Li Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography*, 29(2): 189-217.
- Lane L.J., Shirley E.D., Singh V.P. (1988). "Modeling erosion on hillslopes." in Anderson M.G. [eds.], *Modeling Geomorphological Systems*. John Wiley, Publ., New York, pp.287-308.
- Piemental D. and Kounang N. (1998). Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1:416-426.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D. (1960). A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 7:418-425.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC, pp. 58.
- Wischmeier W.H., Johnson C.B., Cross B.V. (1971). A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26:189-193.
- Zhang B., Yang Y.S., Zepp H. (2004). Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China. *Catena*, 57:77-90.
- Zhou Z. C., Shangguan Z. P., Zhao D. (2006). Modeling vegetation coverage and soil erosion in losses plateau area of China. *Ecological Modeling*, 198:263-268.

## 光度對咖啡 (*Coffea arabica*) 生長的形態與生理影響— 以惠蓀林場咖啡園為例

陳奕弘<sup>1</sup> 劉瓊霖<sup>2</sup>

**【摘要】**咖啡是一國際重要農產品，是許多國家重要經濟來源。但咖啡在種植方法上一直有不同觀點，現代化農場多以全光種植咖啡，而傳統咖啡種植卻是模擬原生咖啡生長於林下的環境，為了瞭解咖啡在不同光強度下生長優劣，本研究以台灣本土咖啡產地之一的惠蓀林場作為試驗樣區，探討在不同光照環境下，咖啡的外觀形態與生理表現變化。在外觀形態上，咖啡的比葉面積並不會隨著光度變化而有顯著差異，但同一光照程度下咖啡樹上層比葉面積略小於下層，顯現如不經過修枝，單株咖啡樹下層樹葉可能會因遮蔽而形成陰葉。生理表現方面，葉綠素 a、葉綠素 b 含量沒有因光度變化而有顯著差異，咖啡光合潛能因此也受到限制，但葉綠素 a/b 比值可以在同一光度上下層中發現差異，此現象呼應比葉面積的結果，單一株咖啡樹中，會因自我遮陰而影響葉片形態與生理。在最大光合作用效率中 ( $F_v / F_m$ )，咖啡在光度 50 % 有最大值，推測咖啡適合中等程度遮陰，但在其它光度中無明顯變化趨勢。電子傳遞鏈速率 (Electron Transport Rate, ETR)、PSII 光量子效率 (Yield)、光學消散 (photochemical quenching,  $q_P$ ) 皆隨著光度增加而有顯著差異，Yield 最大值在 80% 上層，顯示咖啡單一葉片在照光較多的地方，細胞光合作用速率能較快速，但整體光合作用效能仍無法提升。而非光學消散 (nonphotochemical quenching, NPQ) 在光度差異較大時有顯著不同，代表咖啡能夠利用非光學消散排除過多光能。綜合上述，建議咖啡種植時，可以中度遮陰 (50%) 為主，在較大的光度下，咖啡光合作用能力雖不受抑制，但其光合潛能也無法明顯提升，因此可將全光地區作為其他用途，另外需注意咖啡樹修枝，以控制咖啡樹葉部形態變化，使將來果實能夠有良好空間可以發育。

**【關鍵詞】**咖啡、光度、比葉面積、葉綠素、葉綠素螢光。

---

<sup>1</sup> 國立中興大學森林系大學部學生

Undergraduate student, Department of Forestry, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan

<sup>2</sup> 國立中興大學森林系教授，台中市國光路250號，通訊作者。

Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, Corresponding Author.  
Tel.: +886- 4- 22850134; E-mail: [cpliu@nchu.edu.tw](mailto:cpliu@nchu.edu.tw)

## **EFFECTS OF DIFFERENT LIGHT ON THE MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF *COFFEA ARABICA*—A CASE STUDY IN HUI-SUN EXPERIMENTAL FOREST**

Yi-hong Chen<sup>1</sup> Chiung-pin Liu<sup>2</sup>

**【Abstract】** Coffee is a common agricultural crop all over the world and its economic value is important for many countries. However, the best environment to cultivate coffee is still in debate. In tradition, coffee trees are planted understory where it is similar to its original habitat. But with recent research, many modern farms plant coffee trees under full light. In order to know what is the optimal environment for coffee trees, this research is going to set up an experiment to find out the relations between light and coffee tree growth. The experiment field set up in Hui-Sun experimental forest. Results of experiment showed that coffee leaves had not a significant difference with different light gradient on specific leaf area (SLA) but the lower leaves had a larger value of SLA than upper leaves. This indicated that upper leaves of coffee trees shaded the lower leaves and made them become shade leaves if the coffee trees had no pruning. In terms of physiology, the total amount of chlorophyll a and chlorophyll b had no difference under the light treatment and resulted in the limitation of the potential capability of photosynthesis. Despite this, chlorophyll a/b had difference between upper leaves and lower leaves, lower leaves having larger ratio of chlorophyll a/b, and this was correspond to the result of SLA that upper leaves shade the lower leaves. In terms of chlorophyll fluorescence, the maximum photosynthesis efficiency ( $F_v / F_m$ ) has a maximum under the 50% shade, indicating that the intermediate shade is the best sunlight environment for coffee trees. Electron Transport Rate (ETR)、Yield、photochemical quenching (qP) had larger value with the increase of the sunlight. However, this is only in single leaf level, the potential of photosynthesis is still limited. NPQ has a significant difference between 80% light and 30% light which means coffee could utilize NPQ to eliminate excess light energy. Above all had mentioned, intermediate shade was the optimal for coffee trees. When under full sunlight, coffee do

not have light inhibition but hard to utilize excess light. Hence, coffee trees are recommended to plant understory in mountainous area for better land use arrangement. Also, coffee tress should be pruned to control the morphological characteristics.

**【Key words】** Coffee、Light、SLA、Chlorophyll、Chlorophyll fluorescence.

## I、前言

咖啡是國際農產品交易大宗，主要產地在拉丁美洲、非洲、亞州，其生產收入是許多國家重要經濟來源 (Damatta, 2004)，根據聯合國農糧署產值統計，咖啡生豆是國際五十大農產品之一，其中大約有五億人參與生產到消費的過程 (Araújo *et al.*, 2008)。阿拉比卡咖啡 (*Coffea arabica*) 是世界上咖啡主要品種，終年常綠，原生於非洲林下，因此被認為是需要遮陰的作物，而早期咖啡栽培便是種植於林下，用以模擬原生地自然環境。但近年來許多研究指出，在全光下種植的咖啡其產量與生長比受到遮陰時更好，使得許多現代農場不繼續使用傳統的遮陰種植，而是施行全光集約的管理 (Damatta, 2004)。咖啡樹是否適合在遮陰下種植，此問題備受關注，涉及層面廣泛，在咖啡照光程度的單一操縱因子下，有針對單株苗木形態與光合作用生理的研究 (陳書憲等，2015)，亦有以現行產地試驗以瞭解產量變化 (Muschler *et al.*, 1977; Matiello *et al.*, 1989; Lorena *et al.*, 2000)。

光是植物生長的必要元素，光照程度的不同會讓植物生長形態有所差異，低光照環境下，植物的比葉重 (Leaf Mass per Area, LMA)、比葉面積 (Specific Leaf Area, SLA) 會提高，上述形態值提高代表葉面積擴展，葉片整體變薄，以利獲取更多光能 (王經文等，2008；張安邦等，2000)。而光照對植物生理的影響，常能從葉綠素含量、葉綠素 a/b 比值、植物光合作特性等得知，低光照環境下，植物葉綠素含量會提升，也會有較低的葉綠素 a/b 比值，因葉綠素 b 是捕獲光能複合體，其含量提高將有助於植物在低光環境下捕捉光能 (廖天賜，2002；黃秀鳳，2004)。在光合特性上，低光環境中的植物會有較低的光補償點 (LSP)、光合作用最大速率 ( $A_{max}$ ) 且對光抑制作用較為敏感，而光照充足環境中，植物光合作用效率通常較佳，雖然有較高之光補償點，但較高的最大光合作用速率與適應強光的特性，能讓植物在全光下穩定進行光合作用。另外，葉綠素螢光測定能得知植物在不同光照下，光合作用利用率的改變，在光照過強的逆境環境中，植物對光子的利用率降低，過多的光能將由非光學消散 (NPQ)、葉綠素螢光 (fluorescence) 排除，

通常這兩者比例會隨光照增加而有提升，一般而言，光能消散光化學過程約佔 80%，非光學消散約佔 20%，螢光約為 0.2%~2%。而近年科學發展，葉綠素螢光測定是一重要光合生理指標，其測定可藉由儀器再不用破壞性取樣的情況下，測得植體生體 (vivo) 葉綠素螢光反應 (范貴珠等, 2002)。

台灣現在已有許多咖啡品牌，如古坑咖啡、惠蓀咖啡等，其在市場上販售流通，顯現台灣自產咖啡已具產業規模。而相較於其他咖啡生產大國，針對台灣咖啡產地適合遮陰程度的研究較少，且如同之前所述，各地種植環境與遮陰程度皆有差異，因此，本試驗主要探討咖啡在惠蓀林場不同程度光照環境下，生理與形態的差異。本實驗目的有三，包含 1. 觀察咖啡形態生長在不同光照環境下之差異；2. 測定咖啡在光照環境不同下，生理表現之變化；3. 推測適合台灣咖啡種植的遮陰程度。

## II、前人研究

### (I) 不同光度下咖啡生長外觀形態變化

在咖啡苗木光度試驗中，咖啡整體生物量與其本身所能接受的光照量呈現高度相關，以Rodríguez-López等 (2014)的試驗為例，儘管在種植地區早上與下午

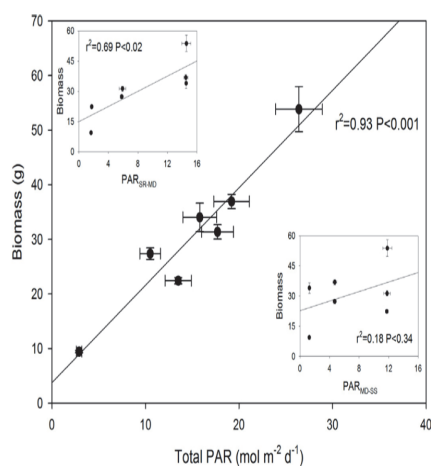


圖 1 光合活化輻射能與生物量線性迴歸 (Rodríguez-López *et al.*, 2014)。

註: ss=sunset md=midday, sr=sunrise

Fig. 1 Photosynthetically active radiation (PAR) and biomass linear regression.

二段日光照射產生的效率不同 (早上  $r^2=0.69$ 、下午  $r^2=0.18$ )(圖1)，全天所接受的光照越多，越能提升生物量生長。此結果可視為充足的光照對咖啡形態生長較為

有利。除了生物量外，比葉面積 (SLA, specific leaf area)(葉片面積/葉片重量)在不同光度下也有顯著的改變，同一試驗中，全光處理比10% 與40% 減少許多 (圖2)，意即在全光下葉片面積小、葉片厚、單位面積中生物量較大。咖啡葉子的增厚主要來自葉肉柵狀組織，而柵狀組織增厚是植物適應陽光後葉片的特徵 (Matos *et al.*, 2009)。另一方面，SLA較大則葉片較薄，能將資源著重在光合作用相關細胞上，同時也代表葉片面積較大，以利獲取更多光能 (Lusk *et al.*, 2008)。在生長比例上，咖啡接受全光照射，相比10%的照光處理，產生較多的斜交枝條，能有效避開光照直射，並利用充足的光照，產生更多葉片，將獲得的資源反映在生物量上。在光照10%的處理中則是垂直枝條比例較高，用於獲得較大的光照面積。綜合上述，咖啡形態的變化能表現出對高光照的適應，也有類似於陽性葉片的特徵，整體來說，全光種植對咖啡形態生長確實較佳。

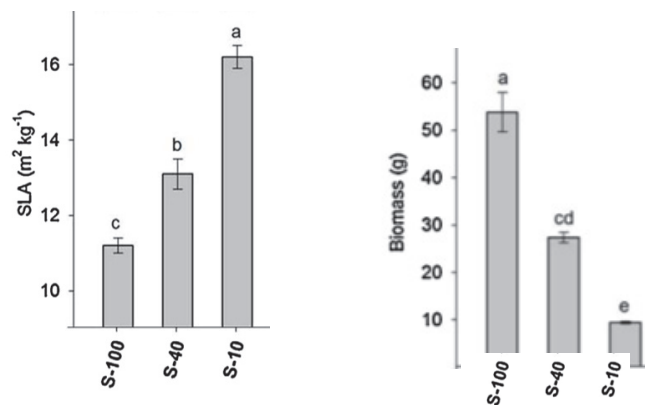


圖 2 不同光照下比葉面積與生物量 (Rodríguez-López *et al.*, 2014)。  
s-100 為全光照、s-40 為 40%光照、s-10 為 10%光照

Fig. 2 SLA and biomass of coffee leaves subjected to three light treatments.

## (II) 不同光度下咖啡生長生理表現

儘管咖啡在形態變化上能適應全光照射的環境，但生理表現在不同光度下並不全然與形態變化相同。根據前人研究，咖啡的最大光合作用速率 ( $A_{max}$ ) 明顯小於其它熱帶樹種。Rodríguez-López 等(2014) 的試驗中，全光照射、40%、10% 其最大光合作用速率分別約 6、5、3  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，可以發現僅在差距較大二處理有顯著變化，且三者數值皆小於 10  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。與台灣常見原生闊葉樹相比，30 樹種在 6 月雨季初期測得的光飽和光合作用率在 5.5 ~ 25.7  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  範圍，有 10 種非耐陰先驅樹種可達 19.5  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (郭耀綸等， 2004)。此結果充分顯現咖啡無法利用過多光能，即便在全光環境下有較好的生物量，光合

作用速率並無法有效提升。另一類似試驗，是藉由實際測量現行產地的咖啡光合作用速率，探討不同樹冠位置葉片的光合作用變化。試驗中，儘管上層樹冠與下層樹冠在多數時間的光照強度有顯著差異，光合作用速率並無法完全展現光照程度的不同，且不管上層或下層葉片，光合作用速率仍遠小於一般熱帶性樹種 (Araújo *et al.*, 2008)。若咖啡無法使用過多光能，消散過多光能的能力便極為重要，光能在植物的消散大致上有三個途徑，光學消散、非光學消散與葉綠素螢光。光學消散是藉由光合作用相關物質的降解與破壞來排除過多光能，而在單一咖啡葉子的試驗中，許多結果顯示，即便超過光飽和點的光照量，咖啡葉子並不會有明顯的光抑制作用，過多光能可能是藉由非光學消散與葉綠素螢光排除 (Ramalho *et al.*, 2000)。

### (III) 不同光度下咖啡產量

咖啡產量多寡在種植咖啡時是一重要議題，而遮陰程度與產量之間的關係也有許多研究。在適合種植咖啡的環境中，有遮陰的咖啡樹會使咖啡果實產量減少，因為遮陰會降低全株固碳能力、不利花苞產生、且使得單一枝條節點與花苞減少 (Montoya *et al.*, 1961)。上述現象的發現，使不少農場以全光環境種植咖啡，但儘管全光照可以獲得較高產量，咖啡的結實年度卻會因此改變。當咖啡在全光照下，能藉由固碳速率的上升，獲取更多碳水化合物，藉此補足自身生長與結實所需，但因過多的結實，咖啡生產與葉片生理作用能力在結實採收後下降，使來年作物收成欠佳。這也造成全光下的咖啡兩年一期且不規律的結實週期。常見的解決辦法有利用部分遮陰的咖啡園補償不規律的全光結實週期，遮陰下的咖啡樹產量較少，但因能量與養分來源與匯聚穩定，能有規律的產出，以補足全光結實的空窗 (Damatta, 2004)。而遮陰對咖啡產量到底有沒有正面效益呢？就如上述，遮陰僅能調節全光下不規律的收成，單株並不能提高產量，也因此遮陰並無法提高產量，二者會呈現負相關。但有些研究指出，遮陰與產量的負相關只存在最適合咖啡生長的環境中，意即在環境因子較不佳甚至產生逆境的情況中，遮陰是可以提高產量的。Muschler 等 (1977) 的試驗為例，試驗在哥斯大黎加進行，以地點海拔與產量進行分析，發現除了在前人文獻中認定咖啡最適種植海拔外，遮陰能有效提高產量。過高海拔的低溫與過低海拔的高溫皆會造成咖啡生長逆境，全光無遮陰的環境將使產量降低。而透過遮陰樹種，能有效緩衝當地較極端的微型氣候，進而提升產量。另一相似的試驗也呈現了類似的結果，在巴西北部進行的咖啡產量試

驗中，在四種遮陰樹比例下進行缺水試驗 (0%為樣區皆伐，100%則維持原樣)，發現在 50%與 70%的遮陰樹覆蓋下，咖啡產量相比全光可以增加 170%，25%，100%遮陰則有 100%的增加。由此試驗可知咖啡樹在較不適當的生育地中，能藉由遮陰樹減緩逆境並提高生產量 (Matiello *et al.*, 1989)。雖然許多試驗在遮陰與產量的探討上能得出一個最佳的遮陰模式或比例，但要完全瞭解遮陰與產量的關係是非常困難的。通常一個試驗難以顧及全部的環境與生態因子，但這些因子確實仍會對產量產生影響，例如：密度、樹齡、溫度、濕度、養分、樹冠結構、光質、光量等，而試驗結果通常以短期收集資料為主，即便結果顯示遮陰能有較高產量，在未來的樹冠與養分競爭下，仍然可能呈現不同結果 (Damatta, 2004)。以 Lorena 等 (2000)在墨西哥北部試驗為例，雖然以實際調查與產量公式 (圖 3) 模擬做迴歸分析，得出墨西哥北部咖啡田在 40%遮陰會有較高產量，因此以咖啡產量來判斷最佳遮陰程度，確實能提供地區性現階段最值得參考的遮陰比例。

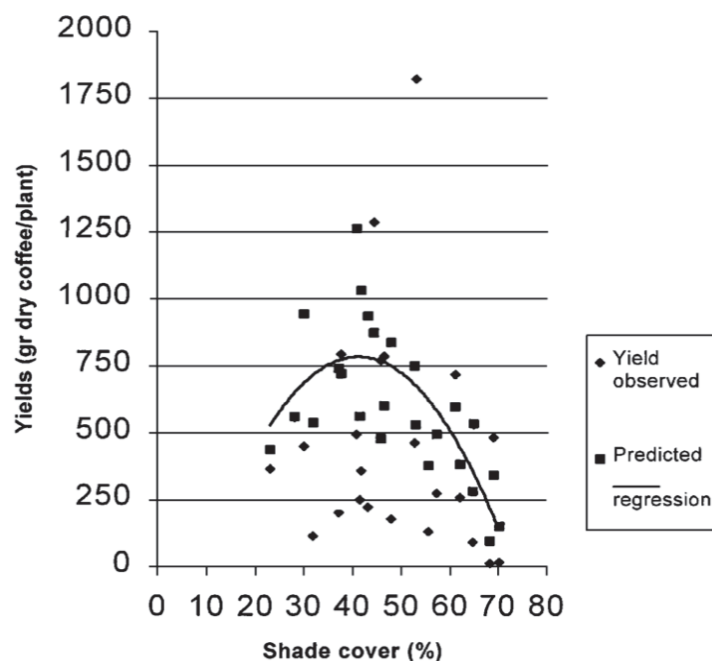


圖 3. 咖啡產量和遮陰關係迴歸 (Lorena *et al.*, 2000)。\*Y= 產量對數，產量為每株生產之咖啡果實重量；shade cover 遮陰程度；coffee density 咖啡樹密度，為每公頃咖啡樹數量，黑色菱形為實際值，黑色方形為公式值，此圖將咖啡樹密度維持常數，探討遮陰與產量關係

Fig 3. Coffee yield and shade cover percentage regression plot.

### III、材料與方法

**(I) 試驗地點與取樣時間**

試驗地點在國立中興大學惠蓀林場，林場內有咖啡園，咖啡樹上方多有相思樹遮陰，但照光程度隨地點而有差異，位置海拔約為 600 m，試驗期間為2015年10月至12月，進行咖啡樹的外觀形態與生理表現測定，而葉片取樣時，相同光度樣區分上下層取樣，樹高中間以下為下層，以上為上層。

**(II) 樣區設置與照光程度**

惠蓀林場咖啡園多是天然遮陰，照光程度隨地點、坡向、陽光角度有所不同，本試驗於晴空無雲的早晨，進行照光程度測定，利用光度計 (TES-1332A) 測量林下、林外光度，推算出遮陰比例，據以為樣區設置，設置照光程度分別為 30 %、50 %、80 % 三個樣區，大小分別為 10m x 10 m 正方形樣區，樣區詳細資料列於表1。

**表1 惠蓀林場咖啡樣區基本資料****Table 1 Basic datas of coffee sampling plots in Hui-Sun experimental forest**

樣區照光程度	30%	50%	80%
植栽密度 (株 /公頃 )	1700	2600	1300
平均樹高 (公尺)	3.2	2.9	2.5

**(III) 外觀形態測定**

## 1. 葉面積計算

葉片取樣後，立刻以掃描器建立葉片照片，之後以Image J (<http://imagej.nih.gov/ij/>) 軟體計算葉面積

## 2. 比葉面積計算

秤取採樣葉片重量後，帶入公式計算可得比葉面積比葉面積 (specific leaf area, SLA)

$$SLA = \text{葉面積} \div \text{葉部乾重}$$

**(IV) 生理表現測定**

## 1. 葉綠素含量

在各照光處理中，分上下層取樣後，秤取新鮮葉片0.2g，置入研钵中以液態氮進行研磨，樣品確實磨碎，隨後加入DMSO (dimethyl sulfoxide) 萃取液 10ml，再以二層濾膜將萃取後的殘渣去除，留下濾液。在波長 648.2 nm 與 664.9 nm 進行吸光

值的測定 (Barnes et al., 1992)。測定的吸光值，依下列公式計算出葉綠素 a (Chl. a) 與葉綠素 b (Chl. b) 含量。

$$\text{chl. a} = (14.84 \times A_{664.9} - 5.14 \times A_{648.2}) \times (V / 1000 \times W)$$

$$\text{chl. b} = (25.48 \times A_{648.2} - 7.36 \times A_{664.9}) \times (V / 1000 \times W)$$

$$\text{chl. a/b} = \text{chl. a} \div \text{chl. b}$$

V 為萃取的體積(ml)、W 為葉片秤取鮮重(g)、葉綠素含量單位為  $\text{mg g}^{-1}$

## 2. 葉綠素螢光測定

葉綠素螢光測定是以攜帶式葉綠素螢光分析儀 (Portable Chlorophyll Fluorometer, PAM-2000, WALZ, Germany) 進行。測定天氣同樣為晴朗無雲的晴天，選取樣區內咖啡樹，並將取樣分為上下兩層，葉片選取生長正常的成熟葉 2-3 以鋁製夾葉器夾住葉片，進行 30 分鐘的暗適應後，以攜帶式葉綠素螢光分析儀進行分析測定各項螢光參數，計算出 PSII 最大光化學效率 (Fv/Fm)、非光化學消散 (qN)、光化學消散 (qP)、PSII 光量子效率 (Yield)、電子傳遞鏈速率 (ETR)。

### (v) 統計分析

以 SPSS 統計軟體進行最小顯著差異法分析，並在分析前進行同質性檢驗，以決定最小顯著差異法適用與否。

## IV、結果與討論

### (I) 不同光度對咖啡葉片形態影響

表 2 顯示，以相對光度 80 % 下層的比葉面積為最大 ( $207.81 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ )，相對光度 50 % 上層為最小 ( $147.85 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ )，但在統計分析中所有結果皆不顯著，比葉面積也無明顯變化趨勢。一般而言，在低光度環境下比葉面積會較大，將使葉片較薄，葉片面積增大，資源著重在光合作用相關細胞上，以利獲取更多光能 (Lusk et al., 2008)。而能獲得充足光照的葉片，葉肉柵狀組織增厚，整體葉面積小，此種形態的改變是葉子是應陽光照射的特徵，通常稱為陽葉 (sun leave) (Matos et al., 2009)。此次試驗中，咖啡葉部形態變化並沒有像其他試驗一樣因照光程度不同，而有顯著的差異，顯示惠蓀林場咖啡林地各樣區光照程度的差異未能引發葉片形態的變化，推測與山地天氣變化較多且林下散射陽光角度變化大的情形有關，使各樣區間相對光度較易改變，此情形常被視實際產地進行光度試驗時的誤差 (Rodríguez-López et al., 2014)。另外，修枝與否將影響單株植物陽葉與陰葉多寡，上

層枝葉若是過於茂密將會遮蔽下層葉片，造成上下兩層比葉面積的不同，惠蓀林場咖啡樹並無固定進行修枝，因此本試驗中每一個光度處理，下層比葉面積略大於上層。若能適度修枝，咖啡葉片和枝條會有較大的空間讓果實發育，進而提升產量 (Montoya et al., 1961)。

表 2 不同光照下咖啡之比葉面積

Table 2 Specific leaf area (SLA) of coffee leaves under different light

	80bot	80up	50bot	50up	30bot	30up
比葉面積, $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$	207.81	150.65	200.17	147.85	189.02	174.15
標準差	57.32	56.31	77.08	12.15	85.34	59.53

\*bot 為下層，up 為上層，80、50、30 為相對照光程度 (百分比)，以 80 % 為最大照光，以下同。

### (III) 不同光度對咖啡葉片葉綠素含量影響

本試驗有關葉綠素的測定項目有葉綠素a含量、葉綠素b含量、葉綠素 a/b 比值，藉由試驗獲得葉綠素含量，可以瞭解植物在不同光度下是否有調整捕獲光子的能力，通常低光照情況下，葉綠素總含量會上升，而葉綠素 a/b 則會下降，其原因便是葉綠素 b 含量提高，其目的在於增加植物體內補光複合體，以捕捉並傳遞光能，一般來說，陰性植物葉綠素 a/b 常在 3 以下 (廖天賜, 2002; 黃秀鳳, 2004)。圖4為咖啡葉片葉綠素a、葉綠素b含量，二者在本試驗中並無明顯變化，此結果與 Matos (2009) 試驗結果類似，葉綠素總量在其不同光度試驗中變化量亦小，顯示咖啡在不同光度的生長環境中體內葉綠素含量改變較小，光合作用潛能並不會因光度有顯著的變化。儘管葉綠素含量在各光照程度下無明顯變化趨勢，同光度處理之上下層葉片葉綠素 a/b 比值有顯著差異 (表3)，其中以相對光度50 % 最為顯著，此結果與相同光度下比葉面積上下層不同表現一致。因咖啡樹自身的遮陰，下層葉片易形成陰葉，而有較低的葉綠素 a/b 比值。咖啡在三個光度處理中，葉綠素a/b 比值皆小於 3，應屬於陰性植物。

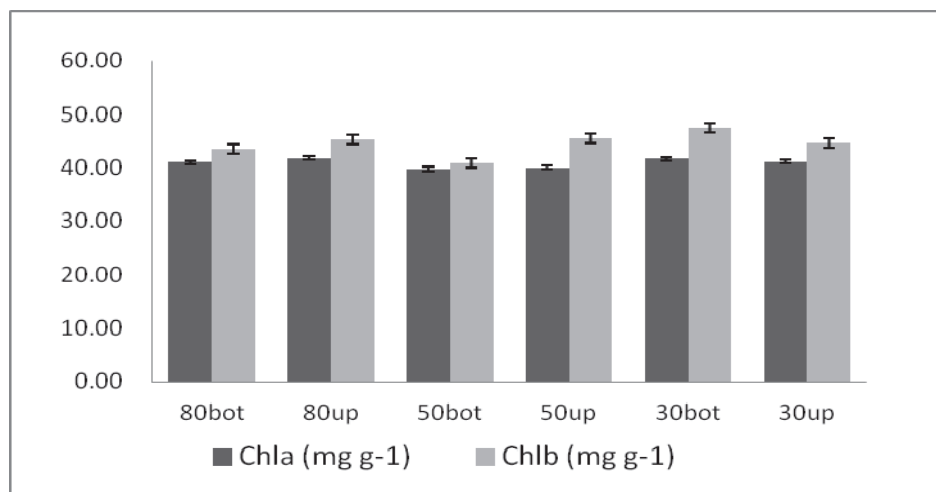


圖 4. 不同光度下咖啡葉片葉綠素含量。

\*bot 為下層，up 為上層，80、50、30 為相對照光程度 (百分比)，以 80 % 為最大照光。

Fig.4 Chlorophyll concentration of coffee leaves under different light.

表3 不同光照下咖啡葉綠素 a/b值

Table 3 Chlorophyll a / b ratio of coffee leaves under different light treatments

	80bot	80up	50bot	50up	30bot	30up
葉綠素 a/b	0.96 <sup>a</sup>	0.93 <sup>ab</sup>	0.98 <sup>a</sup>	0.88 <sup>b</sup>	0.88 <sup>b</sup>	0.93 <sup>ab</sup>
標準差	0.14	0.09	0.11	0.08	0.10	0.05

\*英文字母為最小顯著差異 (least significant difference, LSD) 之表示，不同英文字母 (a, b) 表示不同處理之差異達顯著 ( $p < 0.05$ )。

#### (IV) 不同光度對咖啡葉片葉綠素螢光影響

植物利用光能驅動反應，以提供能量合成碳水化合物，過程中光能在植物的消散大致上有三個途徑，光學消散、非光學消散與葉綠素螢光，以光學消散所佔比例最多，可達80%，但隨光照環境不同，消散能量分配也會有所不同，可以藉此觀察植物在不同光照下之光合作用效率。葉綠素螢光測值，包含 PSII 最大光化學效率 (Fv/Fm)、ETR 為電子傳遞鏈速率、Yield 為 PSII 光量子效率、qP 為光化學消散、qN 為非光化學消散。試驗結果呈現於表4，PSII 最大光化學效率 (Fv/Fm) 在光度50%下最大，推測咖啡在中等照光下，有較大的光合潛能，但其他光度下並無顯著差異，即便是差距最大的對光度 30% 與 相對光度 80%。表示咖啡光合作用潛能在不同光度下仍維持相同，此結果與先前葉綠素含量相同，咖啡光和作用潛能，隨光度變化幅度小，此情形與許多前人試驗相同 (陳書憲，2015 ; Araújo *et al.*, 2008)。而 ETR、Yield、qP 皆隨著光度增加而有顯著差異，其中 Yield、qP 最

大值皆出現在 80% 上層，顯示咖啡葉子在照光較多的地方，細胞光合作用速率能較快速，但以咖啡整體來說，若PSII 最大光化學效率沒有顯著差異，整體光合作用潛能並不會因此提升。另外 qN 光學消散，則是能隨光照增加而增加，以 30 % 下層最低，80 % 上層最高，代表照光程度增加，咖啡雖不能提升光合作用率，但能有效以光學消散排除剩餘光能 (Matos *et al.*, 2008)。

表 4 不同光照下咖啡葉片葉綠素螢光測值

Table 4 Chlorophyll fluorescence measurement under different light treatments

	80bot	80up	50bot	50up	30bot	30up
Fv/Fm	0.78 <sup>b</sup> (0.02)	0.77 <sup>b</sup> (0.02)	0.78 <sup>ab</sup> (0.02)	0.80 <sup>a</sup> (0.05)	0.77 <sup>b</sup> (0.02)	0.78 <sup>ab</sup> (0.02)
ETR	79.59 <sup>a</sup> (8.77)	86.82 <sup>b</sup> (13.52)	73.68 <sup>c</sup> (13.54)	67.63 <sup>c</sup> (18.18)	41.96 <sup>d</sup> (18.48)	46.53 <sup>d</sup> (13.84)
Yield	0.32 <sup>b</sup> (0.03)	0.34 <sup>a</sup> (0.05)	0.29 <sup>c</sup> (0.05)	0.26 <sup>d</sup> (0.08)	0.16 <sup>e</sup> (0.07)	0.18 <sup>f</sup> (0.06)
qP	0.56 <sup>b</sup> (0.06)	0.62 <sup>a</sup> (0.07)	0.51 <sup>c</sup> (0.10)	0.45 <sup>d</sup> (0.13)	0.28 <sup>f</sup> (0.12)	0.32 <sup>e</sup> (0.10)
qN	0.75 <sup>a</sup> (0.03)	0.76 <sup>a</sup> (0.05)	0.76 <sup>a</sup> (0.03)	0.74 <sup>b</sup> (0.13)	0.66 <sup>c</sup> (0.10)	0.73 <sup>b</sup> (0.06)

\* : Fv/Fm 為PSII最大光化學效率，ETR為電子傳遞鏈速率，Yield為PSII光量子效率，qP為光化學消散，qN為非光化學消散

\*\*括號表示標準差。

## V、結論

咖啡在惠蓀林場的產地中，葉片形態並無因照光強度不同而有明顯變化，此可能與山區不固定的照光亮，導致各樣區彼此照光差異量不夠引起葉片形態改變。葉綠素含量一樣無明顯差異，此現象會限制咖啡光合作用能力的提升。但在相同光度的上下層葉片的葉綠素 a/b 值有顯著差異，原因推測是咖啡本身遮陰導致，樣區內咖啡並無定期修枝，下層樹葉較容易發展成陰葉，而有較低的葉綠素 a/b 值。葉綠素螢光中，PSII 最大光化學效率在相對光照 50% 中最大，且與其它樣區有顯著差異，表示咖啡可能適合生長在中度的遮陰，在其餘光度處理中，30 % 與 80 % 相對光照的PSII 最大光化學效率並無差別，顯現咖啡光合作用除了最適環境有較佳光合效率外，在其它光度中較不易變化，可塑性低。另外咖啡能有效利用非光學消散，以熱量方式排出光能，雖不能提升本身光合作用能力，但可以有效避免強光傷害。經由本次試驗，咖啡種植建議可以中度的遮陰為佳，

全光下雖不影響咖啡生理表現，但在土地資源珍貴的山區坡地中，可將林木和咖啡混植，如種植固氮樹種（如相思樹），即可施肥、遮陰，又可以有效利用土地。另外，咖啡自身遮陰也可能引起外觀形態與生理表現上的改變，種植時應注意，避免影響咖啡成長與之後產量收成。

## VI、參考文獻

- 張安邦、廖天賜、方榮坤、翁仁憲、李丁松 (2000) 光度對大葉楠與香楠形質生長的影響。林業研究季刊 22(1): 11-20。
- 郭耀綸、范開翔、黃慈薇、李彥屏、吳惠綸、蔡瑞芬 (2004) 台灣三十種闊葉樹陽葉氣體交換潛力之研究。台灣林業科學19(4): 375-386。
- 陳書憲、郭進益、陳奕宏、劉瓊霏 (2015) 不同光度處理對咖啡苗木形質與生理反應的影響。林業研究季刊 37(3): 195-208。
- 黃秀鳳、黃文達、許明晃、楊志維、趙璧玉、張新軒、蔡養正、楊棋明 (2004) 三種不同顏色甘藷葉片葉綠素合成能力之分析。作物、環境與生物資訊 1: 47-54。
- 廖天賜、張安邦、翁仁憲 (2002) 遮陰對大葉楠與香楠苗木光合作用及生理之影響。林業研究季刊 24(1): 1-10。
- Araújo, W.L., P.C Dias., G.A.B.K. Moraes, E.F. Celin, R.L. Cunha, R.S. Barros, and F.M. DaMatta (2008) Limitations to Photosynthesis in Coffee Leaves from Different Canopy Positions. *Plant Physiology and Biochemistry* 46:884–890.
- DaMatta, F.M (2004) Ecophysiological Constraints on the Production of Shaded and Unshaded Coffee: A Review. *Field Crops Research* 86:99–114.
- Gopal, N.H. and P.K. Ramaiah (1968) Some Biochemical Constituents in the New Foliage of the Affected and Healthy Plants and Observations on the “After Effects” of New malady. *Café* 9: 20–27.
- Jong, B.H., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, M.L. Soto-Pinto, J. Taylor and R. Tipper (1995) Community Forest Management and Carbon Sequestration: A Feasibility Study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20 (6):409–416.
- Jong, B.H., M.L. Soto-Pinto, G. Montoya-Gómez, K. Nelson, J. Taylor and R. Tipper (1997) Forestry and Agroforestry Land-use Systems for Carbon Mitigation: an Analysis in Chiapas, Mexico. In: Adger, W.N., D. Pettenella, M. Whitby (Eds.),

- Climate-Change Mitigation and European Land-Use Policies. CAB International, p 269–246.
- Lorena, S.P., I. Perfecto, J. Castillo-Hernandez and J. Caballero-Nieto (2000) Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80: 61–69.
- Lusk, C., P.B. Reich, R.A. Montgomery, D.D. Ackerly and J. Cavender-Bares (2008) Why are evergreen leaves so contrary about shade? *Trends Ecology & Evolution* 23: 299–303.
- Matiello, J.B. and D.R. Fernandes (1989) Observações sobre arborização de cafezais em regiões de Chapada, na Bahia. In: *Anais do XV Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, Maringá* (eds). Instituto Brasileiro do Café, Rio de Janeiro: 238–240.
- Matos F. S., R. Wolfgramm, V. G. Fábio, A. C. Paulo, M. C. Cavatte-Ventrella and D. M. Fábio (2009) Phenotypic Plasticity in Response to Light in the Coffee Tree. *Environmental and Experimental Botany* 67: 421–427.
- Maxwell, K. and G.N. Johnson (2000) Chlorophyll Fluorescence – A Practical Guide. *Journal of Experimental Botany* 51: 659–668.
- Montoya, L.A., P.G. Sylvain and R. Umanã (1961) Effect of Light Intensity and Nitrogen Fertilization upon Growth Differentiation Balance in *Coffea arabica* L. *Coffee* 3: 97–104.
- Muschler, R. (1997) Shade or Sun for Ecologically Sustainable Coffee Production: A Summary of Key Environmental Factors. III. *Semana Científica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) CATIE, Turrialba, Costa Rica*, pp. 109–112.
- Rodríguez-López, N. F., S. C.V. Martins, P. C. Cavatte, P. E. M. Silva, L. E. Morais, L. F. Pereira, J. V. Reis, R. T. Ávila, A. G. Godoy, A. O. Lavinski and F. M. DaMatta (2014) Morphological and Physiological Acclimations of Coffee Seedlings to Growth over a Range of Fixed or Changing Light Supplies. *Environmental and Experimental Botany* 102: 1-10.

## 淡水水源里居民對水資源的環境識覺之探討

錢宛鈺<sup>1</sup> 廖學誠<sup>2</sup>

**【摘要】**位於陽明山國家公園大屯火山群西北麓的淡水區水源里，為一典型的山區聚落，當地湧泉資源充沛，源自大屯山脈，注入公司田溪，聚落依此而生。早期居民的日常生活與農業生產都仰賴當地豐富的水資源，但隨著人口日增、耕地漸多處境下，湧泉資源益感不足。在水源有限的情況下，如何分配泉水、灌溉農田，遂成為當地早期發展的重要議題；另外，透過水資源的分配網絡及永續利用，也成為凝聚居民地方意識的關鍵力量。水源里居民如何透過水源的獲取與使用，建構出此地的人文生態，形塑出地方感，實乃本研究的問題意識。本文透過文獻探討及 408 份問卷調查，多元收集資料，探討當地居民對水資源的環境識覺。研究結果顯示，居民與當地水資源關係密切，最喜歡的水資源景觀依序為湧泉(69.4%)、溪流(40.0%)、水圳(29.4%)及水梯田(21.3%)，使用的方式主要為取水飲用(66.9%)、民生洗滌(51.2%)、農業灌溉(41.2%)、休閒遊憩(32.4%)。經由因素分析，15 個環境識覺問項可歸納成三大因素組，分別為效益認知、環境態度、景觀認知。此外，民眾的環境識覺與社區參與意願呈現顯著正相關。

**【關鍵詞】**環境識覺、水資源、湧泉、農業灌溉

## PUBLIC ENVIRONMENTAL PERCEPTION TOWARD WATER RESOURCES IN SHUIYUAN COMMUNITY IN DONSHUI

Wan-Yu Chien<sup>1</sup> Shyue-Cherng Liaw<sup>2</sup>

**【Abstract】** The Shuiyuan Village is a mountainous town located at the foot of the northwest side of Datun Volcanic Mt. Range. Communities came to exist due to

---

<sup>1</sup> 國立臺灣師範大學地理學系碩士。台北市和平東路一段 162 號。

Master Degree, Department of Geography, National Taiwan Normal University. No. 162, Ho-Ping East Road, Section 1, Taipei, Taiwan.

<sup>2</sup> 國立臺灣師範大學地理學系教授。台北市和平東路一段 162 號。通訊作者。

Professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University. No. 162, Ho-Ping East Road, Section 1, Taipei, Taiwan. Corresponding Author. E-mail: liaw@ntnu.edu.tw

residents' use of spring water which gushed from the foot of Datun Mt. and purred into Gung Sz Tian River. In the past, owing to the limited amount of water, the issue of how to share spring water for irrigation was important. Through the allocated networks of water resource for sustainable development, it became a fundamental factor to unite the villagers' consensus. The present study deals with how villagers of Shuiyuan Village form the communities and sense of place through the obtainment and use of water. In this study, we apply the methods of literature review and questionnaire (n=408) to collect important information and to study public environmental perception toward water resources. Results show that there is a close relationship between residents and water resources. Residents prefer the landscape of spring water (69.4%), following by stream (40.0%), irrigation ditch (29.4%) and terraces (21.3%). Residents depend on the water resources for drinking (66.9%), washing (51.2%), agricultural irrigation (41.2%) and recreation (32.4%). Based on the factor analysis, 15 items of environmental perception could be summarized into three factors, including beneficial cognition, environmental attitude and landscape cognition. Moreover, residents' environmental perception has a significant positive relationship with the behavior intention of community involvement.

**【Key words】** Environmental perception, Water resources, Spring water, Agricultural irrigation

## I、前言

在自然環境下，水資源的充沛與否會影響到地表的自然景觀，包括森林、草原、沙漠、河谷、丘陵、台地及平原等，例如 Chen *et al.* (2004)研究中國內蒙沙漠區的沙丘分佈，發現水資源特性會間接反映出當地的自然景觀，地下水源的分佈與多寡會形塑地上沙丘的位置與型態，顯示地下水資源與地表沙丘景觀兩者之間息息相關。Parsons and Thoms (2013)在澳洲的研究也發現，水資源的多寡會影響到地表植生景觀的分佈狀況，乾旱時植生綠度指標最低，洪汛期時則達到最高，水資源明顯支配著地表的自然景觀。另一方面，地表景觀的人為干擾與變動也會影響到水資源的質量特性。Turner and Rabalais (2003)探討美國密西西比河流域兩百年來的土地利用對水質之影響，發現人為集約的土地利用明顯改變流域內的自然

景觀，且更進一步地影響到河川湖泊的水質，包括泥沙及營養鹽均急遽增加。Kedziora *et al.* (2011)分析歐洲的農業景觀與水資源之關係，發現人口增加及科技發展，導致自然地景產生巨大變化，水資源不論是在質量上均有顯著的惡化現象，並反向衝擊人類社會。顯然地，水資源與地表景觀的互動關係甚為密切，水資源多寡影響到自然景觀，進而影響到人類的相關活動，而人類社會的開墾發展及密集的土地利用也影響到自然景觀的變遷，進而衝擊到水資源的品質與含量，這種人地關係是非常值得深入探討，尤其要進一步瞭解人類是如何看待水資源及其所形塑出來的地表景觀。

過去人類看待水資源問題大都從水利工程角度切入，往往忽略社會大眾對環境議題的觀點與意見，其實若能參酌居民的問卷調查結果，應更能確實掌握水資源環境問題的關鍵所在(Kuo *et al.*, 2013)。Kiriscioglu *et al.* (2013)分析美國內華達州水資源環境的生態風險時也提出，瞭解權益關係人對水資源問題各個面向的不同觀點，將有助於我們進行環境生態的風險管理與溝通，並能制定確實有效的決策與規劃。此外，Dolnicar and Schäfer (2009)亦指出，解決水資源問題除了工程手段外，更應考慮到社會大眾的接受度與適應力。因此，瞭解民眾對水資源的認知與態度就至為重要，不論是在生態保育、經濟發展或社會文化向上，如此才能達成水資源的永續發展。

本研究乃針對新北市淡水區水源里居民，以問卷調查方式進行資料收集，探討當地居民對於水資源的認知與態度，分析民眾與水資源的互動狀況、使用方式、參與頻率及停留時間等，期能提供未來當地進行水資源經營規劃時之參考。

## II、研究方法

### (I)研究區域

本研究區域位於新北市淡水區水源里(圖 1)，在陽明山國家公園的西北方，是為北投區、三芝區及淡水區交界地區，屬大屯山系西北山麓地帶，地形崎嶇不平，境內面天山 977 公尺為最高峰，面積為 9.7 平方公里。地質上係屬第四季沖積層，為火山岩流與凝灰角礫岩為主，屬鬆散火山碎屑物冷凝而成，具有沉積岩的特性，故土壤母岩以安山岩為主，早期居民會以安山岩就地取材建屋。高溫多雨的氣候，多使土壤化育成紅或黃壤。

水文上多為河流湍急、河床低淺，主要源自於大屯山山脈，溪流走向為東西

向，隨東高西低地勢流入台灣海峽，其中公司田溪是淡水區最大河流，流入台灣海峽。位於水源里支流有二，其一發源於水梘頭天元宮附近（俗稱半邊橋），另一支流發源於水梘頭、瓦瑤坑。溪流長度短，雖無航運功能，但對當地農耕灌溉甚為重要。水源里是河流源地湧泉地帶，水質佳水量多，居民架設竹管為水梘，取水引流灌溉故名水梘頭。當地氣候為副熱帶季風氣候，七月月均溫 28.8°C，一月 15.2°C，年均溫 22.2°C，七月降水量 149.2 mm，一月降水量 103.9 mm，年降水量 2155.4 mm，乾濕季不明顯。



圖 1 研究區域圖

## (II)問卷調查

本研究以問卷調查方式收集資料，問卷內容主要分為三部分：(1)居民與水資源的互動關係，包括當地具有何種水資源景觀、如何使用當地自來水以外的天然水資源(湧泉、溪水)、到社區附近水源的到訪頻率、平均每次在社區附近水源的停留時間，共計 4 問項；(2)居民對水資源的環境識覺，共計 15 問項；(3)受訪者個人的基本資料，共計 4 問項。本研究為了資料處理的便利性，有關環境識覺部份為封閉式問卷，並採用李克特五等級尺度量表法(Likert scale)，點數較高表示非常同

意，反之點數較低時則表示非常不同意，其餘問卷部份則採半開放式。

在樣本數選定方面，本研究希望能在 95%信賴水準之內，且抽樣誤差不超過 5%，透過 Z 分配方式，其所需樣本數以下列公式計算(林惠玲、陳正倉，2011)：

$$n \geq \frac{Z_{\alpha/2}^2(0.25)}{d^2} \quad (1)$$

式中  $n$  為樣本數； $\alpha=0.05$ ； $d=0.05$  為容許的抽樣誤差。

經由查表計算後得知，本研究所需樣本數至少為 384 人。由於顧及無效問卷的發生，所以本研究設定問卷 450 份。本研究於 2012 年 11 月至 12 月間針對淡水區水源里居民進行問卷調查，以現場非隨機抽樣(non-random sampling)中之方便抽樣法(convenient sampling)(林惠玲、陳正倉，2011)，採挨家挨戶的訪察方式選取當地居民進行問卷，訪員親自逐一訪談取得樣本資料。扣除拒訪及無人在家外，本研究共計問卷 450 份，有效問卷 408 份，有效問卷率為 90.7%。透過 Z 分配方式，以估計母體比例時的樣本數保守估計公式計算(林惠玲、陳正倉，2011)，在 95%的信賴水準下，本研究的抽樣誤差為 4.85%，在統計上是可接受的。

### (III)統計分析

在資料處理上，本研究採用 SPSS 統計軟體進行分析，包括描述性統計及單因子變異數分析(ANOVA)等，並以信度係數 Cronbach's  $\alpha$  作為信度檢驗(reliability test)。此外，為進一步歸納並簡化眾多問項，本研究採用因素分析法，利用主成分分析計算出所有問項共同解釋的變異量，並透過球形檢定(Bartlett's Test of Sphericity, BTS)及取樣適切性係數(Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy, KMO)進行檢定(邱皓政，2011)。在因素分析中，本研究設定粹取初始特徵值(eigen value)大於 1 之因素項，同時利用最大直交轉軸(varimax method)進行因素旋轉，使因素之間具有較為清楚的區隔。為瞭解受訪者的基本屬性與互動情況對水資源的認知與態度，本研究進一步進行交叉分析。由於性別部份只有兩個類別變項，本研究乃採用 t 檢定，至於其他的基本屬性均超過三個類別變項以上，因此，本研究則以變異數分析中之 Scheffe 法進行檢定。

## III、結果與討論

### (I)受訪居民基本屬性

#### 1. 基本屬性

本研究調查的居民基本屬性資料包含性別、年齡、教育程度與職業類別，結果如表 1 所示。在性別方面，受訪居民以女性 51.7% 比例略大於男性 48.3%；年齡方面，以 41-50 歲占 28.4% 最多；教育程度方面，以大學以上占 31.1% 為多；職業類型部分，以家管最高，高達 21.3% 的比例，商業次之，占 20.1%，農業與工業比例差不多，都在 15% 以上。由職業類別觀之，家管以女性為多，說明訪員進行調查時女性在家比例偏高，使問卷性別比例出現女性多於男性的情況；年齡結構中 50 歲以下比例占了全部的 67.9%，因此教育程度高中職以上比例也高於五成，從問卷統計結果說明了年事較高者，學歷相對較低。

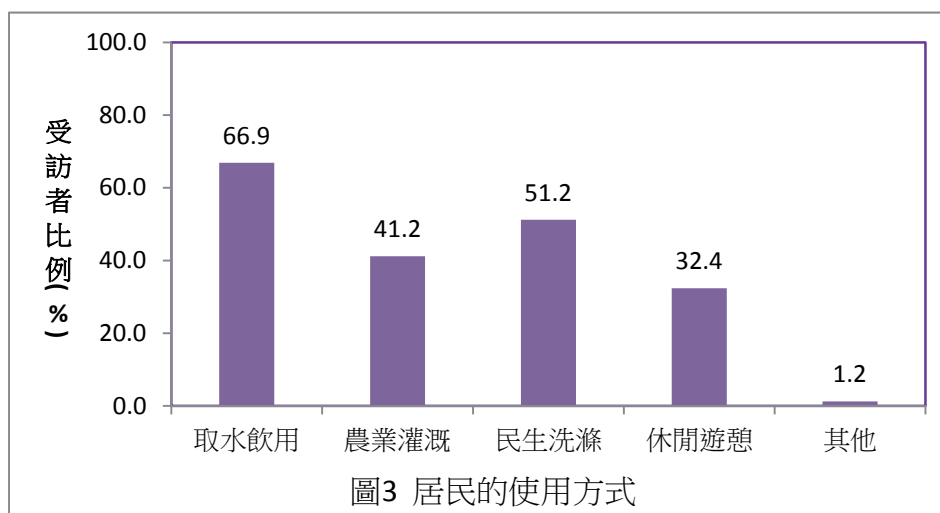
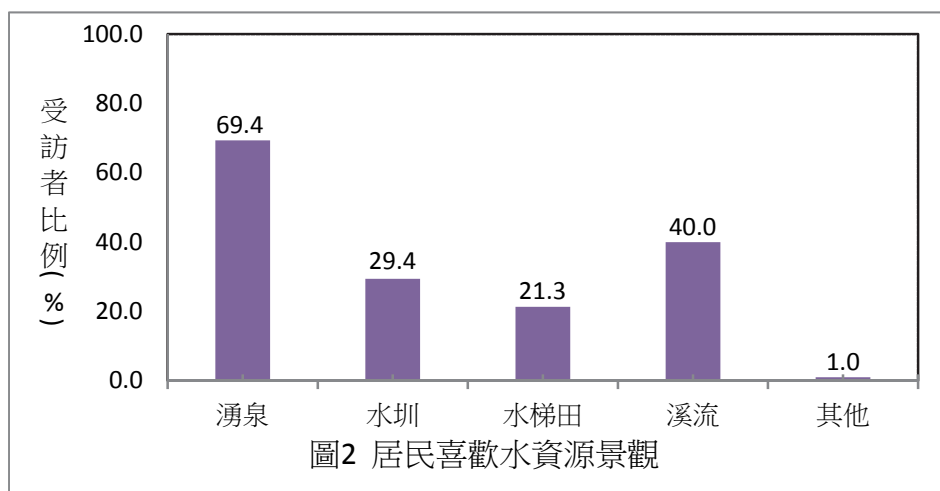
表1 受訪居民基本屬性資料

		人數	(%)			人數	(%)	
性別				年齡				
男	197	48.3	18-30 歲	61	15.0			
女	211	51.7	31-40 歲	100	24.5			
職業類別				41-50 歲	116	28.4		
農	69	16.9	51-60 歲	71	17.4			
工	64	15.7	61 歲以上	60	14.7			
商	82	20.1	教育程度					
軍公教	39	9.6	國小	91	22.3			
自由業	13	3.2	國中	80	19.6			
學生	28	6.9	高中職	110	27.0			
家管	87	21.3	大專以上	127	31.1			
其他	26	6.4						

## 2. 居民與水資源的互動關係

為了瞭解當地居民與水資源互動情形，本研究以居民喜歡與使用何種水資源為基礎，詢問參與頻率與造訪時間作為分析的依據。在喜歡水資源景觀上分成湧泉、水圳、水梯田、溪流及其他，經統計分析後以圖 2 表示，受訪居民以喜歡湧泉為主要水資源，占了 69.4%，溪流排名第二占整體 40.0%，水圳與水梯田分居第三、四位，也有受訪者表示喜歡其他如雨水等。

使用的方式有取水飲用、農業灌溉、民生洗滌、休閒遊憩及其他，以長條圖表示統計分析的結果如圖 3 所示，以取水飲用 66.9%與民生洗滌 51.2%為最主要的用途，農業灌溉為 41.2%、休閒遊憩 32.4%，說明水資源使用以民生用途為主，因湧泉水乾淨、免費的特性，使用者得以取水飲用、洗滌、灌溉為主要的使用方式，休閒娛樂功能相對較少。



到社區附近水源的參與頻率分成每天、2-3天、一星期、一個月、三個月、半年以上等六種類型，停留時間則分成四類，分別是 30 分鐘以內、一小時、兩小時、三小時以上等(表 2)。由參與頻率可得知每天到社區水源處為最多，占 37.5%，2-3天一次占 18.4%、一星期一次占 17.9%，將這些頻度加總發現占全體 73.8%，說明受訪居民對於使用當地水資源的頻率是相當高，於是在停留時間方面顯示不會

太久，有一半以上的比率短暫停留 30 分鐘(50.7%)，一小時內占了 28.9%便會離開。

從受訪者居民與水資源互動的關係看來，居民常使用水源如湧泉水、溪流作為民生用途飲用、洗滌、灌溉方式，在參與頻率呈現出經常使用的結果，因此在停留時間上不會太久，大部分都在一小時以內，闡釋水資源的使用是容易的、便利的，形成當地居民的日常生活習慣。

表2 受訪居民參與頻率與停留時間

		人數	(%)			人數	(%)
參與頻率				停留時間			
每天	153	37.5	30 分鐘以內	207	50.7		
2-3 天	75	18.4	一小時	118	28.9		
一星期	73	17.9	兩小時	48	11.8		
一個月	29	7.1	三小時以上	35	8.6		
三個月	17	4.2					
半年	61	15.0					

### 3. 交叉分析

本研究利用 SPSS 的交叉分析進一步探討性別、年齡、教育程度與職業類別對於社區水資源的參與頻率與停留時間的影響，下列分項說明之。

#### (1)性別

從表3得知，受訪的女性居民在每天參與的比例 37.9%，明顯高於男性 37.1%，若以每天、2-3 天與一星期一次頻度加總，可以發現男性參與頻率 80.2%遠高於女性的 67.8%，所以半年一次的參與頻率則以女性 19.0%大於 10.7%。

性別影響著停留時間，從表 4 居民的性別與停留時間的交叉分析看出女性的停留時間明顯的比男性停留時間短，女性停留在 30 分鐘內的占 52.1%，男性則占 49.2%，一小時以內女性占 30.8%，男性則占 26.9%，發現女性停留時間大多不超過一小時，從使用水資源方式跟實際觀察發現，女性居民使用水資源大多以民生洗滌為主，男性身兼取水飲用與農田灌溉功能為主，所以在參與頻率上，女性會比男性更加頻繁，但因女性民生洗滌所需要時間較少因此停留時間會比男性居民以農田灌溉較短。

表 3 受訪居民的性別與參與頻率的交叉分析

%	每天	2-3 天	一星期	一個月	三個月	半年以上	總和
男	37.1	23.4	19.8	5.6	3.6	10.7	100.0
女	37.9	13.7	16.1	8.5	4.7	19.0	100.0

表 4 受訪居民的性別與停留時間的交叉分析

%	30 分鐘	一小時	二小時	三小時以上	總和
男	49.2	26.9	14.2	9.6	100.0
女	52.1	30.8	9.5	7.6	100.0

## (2)年齡

從表 5 每天一次參與頻率明顯的呈現出 41-50 歲占 35.3%、51-60 歲占 46.5% 與 61 歲以上的居民占 65%，發現年齡愈高，則參與頻率愈高；反之，由參與頻率半年以上一次觀之，41-50 歲占 13.8%、31-40 歲占 20.0%以及 18-30 歲的居民占 29.5%比例中呈現出年齡愈輕，參與頻率愈低的趨勢。

從表 5 得知年齡愈高對社區水資源的參與頻率也愈高，但從表 6 發現受訪者年齡與停留時間截然不同的結果。以停留時間 30 分鐘以內來看，18-30 歲高達 63.9%，61 歲以上卻只有 36.7%，但在停留時間三小時以上 18-30 歲達 8.2%，61 歲以上卻有 16.7%的比例，所以表 6 呈現出年齡愈小者停留時間愈短，年齡愈大者停留時間就愈長的情況。

表 5 與表 6 受訪居民的年齡很明顯會影響造訪社區水資源參與頻率與停留時間，年齡較輕者要外出求學或工作，年齡較大者可能退休或在附近從事農業等，年齡越大者對於水資源的參與頻率與停留時間都比年紀者來的更多更久。

表 5 受訪居民的年齡與參與頻率的交叉分析

%	每天	2-3 天	一星期	一個月	三個月	半年以上	總和
18-30 歲	32.8	13.1	16.4	4.9	3.3	29.5	100.0
31-40 歲	20.0	20.0	24.0	9.0	7.0	20.0	100.0
41-50 歲	35.3	19.8	19.8	6.9	4.3	13.8	100.0
51-60 歲	46.5	19.7	14.1	11.3	4.2	4.2	100.0
61 歲以上	65.0	16.7	10.0	1.7	0.0	6.7	100.0

表 6 受訪居民的年齡與停留時間的交叉分析

%	30 分鐘	一小時	二小時	三小時以上	總和
18-30 歲	63.9	21.3	6.6	8.2	100.0
31-40 歲	57.0	29.0	6.0	8.0	100.0
41-50 歲	50.0	32.8	12.9	4.3	100.0
51-60 歲	43.7	28.2	18.3	9.9	100.0
61 歲以上	36.7	30.0	16.7	16.7	100.0

### (3)教育程度

受訪者的教育程度會影響造訪社區水資源的頻率，表 7 說明國小程度每天造訪的比例是 62.6%、國中是 41.3%與高中占 28.2%都高於大學以上的 25.2%，而半年以上造訪一次的比例以大學以上居多占 22.0%，遠高於國小教育程度者的 6.6%。學歷高低會影響參與頻率，學歷愈高則對於社區水資源參與頻率就相對較低。

表 8 呈現國小學歷的居民在社區水資源停留時間分別是 30 分鐘占 36.3%、一小時 35.2%、二小時 18.7%及三小時以上 9.9%，與學歷高的大專以上受訪居民比較 30 分鐘占 53.5%、一小時 29.9%、二小時 7.9%及三小時以上 8.7%，相較之下，國小組的居民顯得比大專以上組的居民停留時間長，但主要停留時間都以一小時以內為最主要停留時間。

表 7 受訪居民教育程度與參與頻率的交叉分析

%	每天	2-3 天	一星期	一個月	三個月	半年以上	總和
國小	62.6	16.5	9.9	3.3	1.1	6.6	100.0
國中	41.3	20.0	17.5	5.0	2.5	13.8	100.0
高中職	28.2	19.1	20.0	10.0	8.2	14.5	100.0
大專以上	25.2	18.1	22.0	8.7	3.9	22.0	100.0

表 8 受訪居民的教育程度與停留時間的交叉分析

%	30 分鐘	一小時	二小時	三小時以上	總和
國小	36.3	35.2	18.7	9.9	100.0
國中	<b>56.3</b>	26.3	8.8	8.8	100.0
高中職	55.5	24.5	12.7	7.3	100.0
大專以上	53.5	29.9	7.9	8.7	100.0

### (4)職業類別

職業類別中表 9 發現，每天一次到社區附近水資源者以從事農業 63.8%最高，其次是家管 50.6%，自由業者也有 46.2%的比例，需要外出工作的職業類型工業(28.1%)、商業(22.0%)與軍公教(15.4%)造訪的頻率相對較低。

從表 10 發現居民的職業類別與停留時間關係，三小時以上農業占 18.8%、軍公教 15.4%以及自由業者 23.1%整體停留於社區附近水資源的時間是比較長的，結果與使用水資源方式有關從事農業者會灌溉農田，軍公教者與自由業者以休閒遊憩方式使用，則停留時間相對較長。在家管的部分，以民生洗滌為主，因此停留時間會短於一小時(30 分鐘占 48.3%；一小時占 32.2%)。

表 9 受訪居民的職業類別與參與頻率的交叉分析

%	每天	2-3 天	一星期	一個月	三個月	半年以上	總和
農	63.8	17.4	8.7	2.9	0.0	7.2	100.0
工	28.1	21.9	23.4	9.4	4.7	12.5	100.0
商	22.0	23.2	24.4	11.0	6.1	13.4	100.0
軍公教	15.4	15.4	25.6	10.3	5.1	28.2	100.0
自由業	46.2	7.7	23.1	7.7	0.0	15.4	100.0
學生	39.3	17.9	10.7	3.6	0.0	28.6	100.0
家管	50.6	13.8	12.6	5.7	8.0	9.2	100.0
其他	23.1	23.1	19.2	3.8	0.0	30.8	100.0

表 10 受訪居民的職業類別與停留時間的交叉分析

%	30 分鐘	一小時	二小時	三小時以上	總和
農	31.9	29.0	20.3	18.8	100.0
工	54.7	28.1	14.1	3.1	100.0
商	59.8	30.5	7.3	2.4	100.0
軍公教	46.2	25.6	12.8	15.4	100.0
自由業	53.8	15.4	7.7	23.1	100.0
學生	60.7	35.7	0.0	3.6	100.0
家管	48.3	32.2	14.9	4.6	100.0
其他	65.4	19.2	0.0	15.4	100.0

#### 4. 卡方檢定

本研究將受訪居民的基本屬性對參與頻率及停留時間做卡方檢定，結果如表 11 所示。由表 11 可得知，性別、年齡、教育程度與職業類別會顯著影響參與頻率，

年齡與職業類別會影響停留時間。

首先在性別方面，女性的參與頻率明顯高於男性，女性職業類型為家管有關，會到社區附近的水資源從事民生洗滌，如洗菜、洗衣服等家事，但停留時間部分較看不出性別的影響。在年齡方面，年事愈高者每天一次參與頻率是 65.0% 比 18-30 歲的 32.8% 高上一倍以上(表 5)，所以在卡方檢定中呈現非常顯著的結果，這現象也呈現在停留時間上，顯示出年齡在 61 歲以上的受訪居民整體停留時間也比 18-30 歲年輕人久(表 6)。在教育程度上，居民參與頻率以國小組每天一次的比例最高 62.6%，國中組的 41.3% 也遠高於高中職 28.2% 與大專以上 25.2%(表 7)，說明了學歷比較低者使用社區水資源較頻繁，學歷又會影響職業類別。受訪居民從事職業類型會深深影響對於社區附近水資源的參與頻率及停留時間，其中以農業最為明顯，從事農業者必須灌溉農田，因而造訪的頻率每天一次 63.8% 與停留時間一小時以內合計 60.9% 都其他職業類型顯著(表 9、表 10)。

最後可以發現水源里的訪問後的居民結構，女性略多於男性，職業以家管為多，所以使用社區水資源明顯頻繁，但使用時間並不長，所以停留時間較短；男性以中老年人為主，學歷約國中小程度，職業類別以農業為主者，在社區水資源的參與頻率也較常使用，其停留時間部分也比女性家管久，顯示出是用於灌溉部分，反映出目前台灣農村人口基本屬性及水資源使用的情況。

表 11 受訪居民的基本屬性與參與頻率及停留時間之卡方檢定

	性別	年齡	教育程度	職業類別
參與頻率	0.032*	0.000**	0.000**	0.000**
停留時間	0.369	0.026*	0.139	0.001**

(\* :  $\alpha < 0.05$  ; \*\* :  $\alpha < 0.01$ )

## (II) 居民對水資源的環境識覺

在受訪居對社區水資源的環境識覺方面，本研究透過信度係數 Cronbach's  $\alpha$  進行分析可以得到居民對水源里環境識覺看法的信度係數 Cronbach's  $\alpha = 0.885$ ，當信度分析 Cronbach's  $\alpha$  大於 0.7 以上，顯示居民對水源里受訪居民環境識覺都具有相當高的內部一致性及可靠性，適合進行下一個階段的分析檢驗。

### 1. 整體分析

針對受訪居民對社區附近水資源環境識覺看法方面，結果如表 12 所示。整體

而言，在問項 2 我覺得社區附近的水資源水質乾淨 (4.02)、4 我覺得社區附近的水資源環境非常適合居住(4.02)、5 我覺得社區附近的森林有助於水源涵養(4.11)、6 水資源具有農業生產的效益 (4.21)、8 水資源具有民生用水的效益 (4.26)、9 水資源具有生態保育的效益 (4.16)、10 水資源具有延續社會文化的效益 (4.07)、11 破壞水資源是一件令人痛心難過的事 (4.61)、12 保護水資源環境比人類的經濟發展重要 (4.43)、13 水資源的經營管理應優先考慮附近社區的需求 (4.19)、14 保護水資源是一件非常迫切重要的事情 (4.49)、15 我願意付出最大的努力避免水資源遭受破壞 (4.27) 等，這些問項的平均值皆高於 4.0 以上，呈現出正面且非常同意的趨勢，顯示居民非常認同這些問項，普遍認為社區的水資源是重要的資產，在經濟、生態部分尤為重視，水源里居民選擇住所時水資源乾淨程度是重要的考量，因此環境識覺問項中生態功能特別看重，對於水資源保護防止被破壞呈現較高的認同度，甚至有凌駕於經濟生產功能之上的情況。

另外，平均值較低的前三名別是問項 3 我覺得社區附近的水資源景觀非常美麗 (3.89)、1 我覺得社區附近的水資源水量充沛 (3.93)、7 水資源具有休閒遊憩的效益 (3.97) 等，這些問項分數介於 3.5 至 4.0 之間，其平均值略低，也顯示居民認同度在於休閒遊憩方面比起水資源的經濟與生態部分略低一些，本研究顯示居民務實一面，重視水資源對於社區的環境生態重要性大於休閒遊憩的功能，呈現出居民對於社區水資源環境識覺高度認同的結果。

## 2. 因素分析

為進一步瞭解居民對社區水資源的環境識覺，本研究採用因素分析法，將 15 個環境識覺問項精簡，經由球形檢定 (BTS) 及取樣適切性係數 (KMO) 檢定後得知， $BTS=2509.323$ ， $KMO=0.889 > 0.8$ ，根據 Kaiser(1974)指出當 KMO 值愈大時，表示變項間的共同因素愈多，愈適合進行因素分析，能有良好的因素分析結果，檢測結果達到顯著水準 ( $p=0.000$ )。在因素分析中，本研究設定萃取初始特徵值(eigen value)大於 1 之因素項為基礎，所以為了便於辨別特徵值大小，Cattell(1996)提出陡坡圖 (Scree test) 將數值轉換成圖形，繪出圖 4 環境識覺問項陡坡圖作為篩選因素分析分組的工具，由於圖中可以看出在第四軸之前大於 1，其餘值逐漸小於一且趨於平坦，因而將環境識覺分成三組，同時利用最大變異轉軸法(varimax method)進行因素旋轉，使因素之間具有較為清楚的區隔，表示這些問卷資料可以作為因素分析萃取之用(吳明隆，2007)。

表 12 受訪居民的環境識覺

環境識覺問項	非常 同意	同意	普通	不同 意	非常 不同 意	平均
	5	4	3	2	1	
	%					
1. 我覺得社區附近的水資源水量充沛	25.2	46.3	25.2	2.9	0.2	3.93
2. 我覺得社區附近的水資源水質乾淨	29.9	46.3	19.6	3.9	0.2	4.02
3. 我覺得社區附近的水資源景觀非常美麗	27.5	40.7	25.7	5.9	0.2	3.89
4. 我覺得社區附近的水資源環境非常適合居住	28.2	48.8	20.6	2.0	0.5	4.02
5. 我覺得社區附近的森林有助於水源涵養	32.4	48.8	16.9	1.5	0.5	4.11
6. 水資源具有農業生產的效益	35.3	51.7	12.3	0.5	0.2	4.21
7. 水資源具有休閒遊憩的效益	26.5	48.5	20.8	3.9	0.2	3.97
8. 水資源具有民生用水的效益	36.5	53.4	9.6	0.5	0.0	4.26
9. 水資源具有生態保育的效益	32.6	52.7	13.0	1.7	0.0	4.16
10. 水資源具有延續社會文化的效益	30.6	47.8	19.9	1.7	0.0	4.07
11. 破壞水資源是一件令人痛心難過的事	65.9	29.7	3.4	1.0	0.0	4.61
12. 保護水資源環境比人類的經濟發展重要	52.7	38.5	8.3	0.2	0.2	4.43
13. 水資源的經營管理應優先考慮附近社區的需求	40.4	41.4	15.0	2.7	0.5	4.19
14. 保護水資源是一件非常迫切重要的事情	54.2	40.4	5.1	0.2	0.0	4.49
15. 我願意付出最大的努力避免水資源遭受破壞	44.9	40.4	12.5	1.7	0.5	4.27

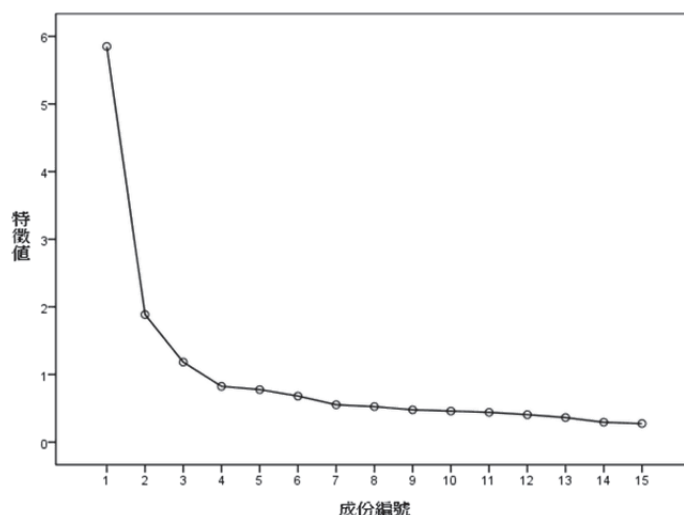


圖4 環境識覺陡坡圖

圖5為環境識覺轉軸後空間中的成份圖，明顯呈現出將環境識覺問項分成三組成份，每一個層面的題數都大於三題以上，能測出其代表層面的特質，內容效度足以代表水源里受訪居民所要表達對社區水資源的環境識覺的心理特質（吳明隆，2007）。經因素分析後，15個環境識覺問項可歸納成三大因素組，分別為效益認知、態度認知、景觀認知，三個因素組總共可解釋整體變異量59.467%，結果如表13所示。

在效益認知因素組方面，主要包括農業生產、生態保育、民生用水、休閒遊憩、延續社會文化、森林有助於水源涵養等部分，居民的認知中農業生產的比例最高，說明水源里是個農業為重的地區，水資源的生態保育也格外重要，因為會影響農業產出的食品安全性。另外，在環境態度方面，保護水資源是一件非常迫切重要的事情、水資源環境比人類的經濟發展重要、願意付出最大的努力避免水資源遭受破壞、破壞水資源是一件令人痛心難過的事、水資源的經營管理應優先考慮附近社區的需求，這些問項可以看出居民對水資源的看重程度，因此居民也會自發性的維護社區水資源周遭環境清潔與避免污染水源，以確保水質的不受污染。最後，在景觀認知的方面，主要包括社區附近的水資源水質乾淨、景觀非常美麗、水量充沛及社區附近水資源非常適合居住等。整體而言，在因素分組中，效益認知因素組中對於水資源的生態保育效益、態度認知因素組中破壞水資源是件令人痛心難過的事以及景觀認知因素組中水資源水之乾淨的分項，從這些分項可以看出社區居民對水資源的水質重視程度相當高。

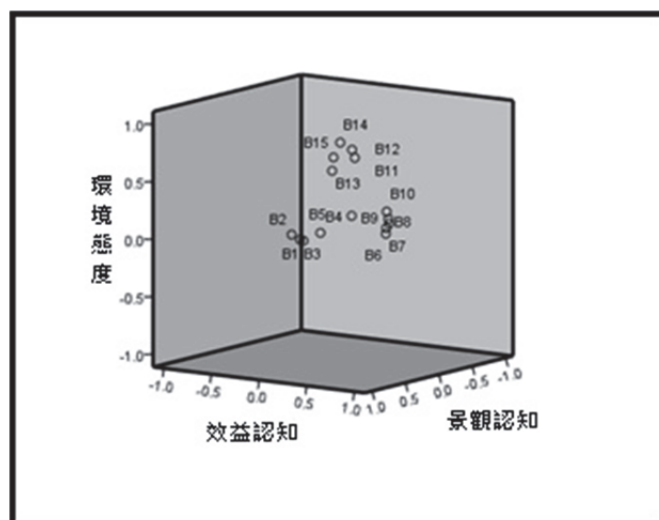


圖5 環境識覺轉軸後空間中的成份圖

表13 受訪居民對社區水資源環境識覺的因素分析

社區水資源環境識覺問項	效益 認知	環境 態度	景觀 認知
6.水資源具有農業生產的效益	0.738		
9. 水資源具有生態保育的效益	0.735		
8. 水資源具有民生用水的效益	0.725		
7. 水資源具有休閒遊憩的效益	0.701		
10.水資源具有延續社會文化的效益	0.627		
5. 我覺得社區附近的森林有助於水源涵養	0.509		
14.保護水資源是一件非常迫切重要的事情		0.822	
12.保護水資源環境比人類的經濟發展重要		0.758	
15.我願意付出最大的努力避免水資源遭受破壞		0.707	
11.破壞水資源是一件令人痛心難過的事		0.673	
13.水資源的經營管理應優先考慮附近社區的需求		0.603	
2. 我覺得社區附近的水資源水質乾淨			0.820
3. 我覺得社區附近的水資源景觀非常美麗			0.765
1. 我覺得社區附近的水資源水量充沛			0.750
4. 我覺得社區附近的水資源環境非常適合居住			0.721
變異量(%)	21.045	19.273	19.149
累積變異量(%)	21.045	40.318	59.467

### 3. 交叉分析

為進一步瞭解受訪居民基本屬性與使用情況對於水源里社區水資源環境識覺

的關係，本研究使用的問卷調查，是將環境識覺與同意度的評量採用李克特五等尺度量表，將環境識覺問項分成五等，由高至低依序排列，5 代表「非常同意」，1 則代表「非常不同意」；環境識覺問項透過因素分析分成三個層面，分別為效益認知、態度認知及景觀認知因素組，用 EXCEL 分別計算出分組人數、五等尺度量表的平均數及標準差，再與性別、年齡、教育程度、職業類別、參與頻率及停留時間進行交叉分析。性別方面因只含男、女兩個變項，進行 SPSS 獨立樣本 T 檢定，其他因變項超過三個以上，所以使用變異數分析（ANOVA）中的 Scheffe 法進行檢定，下列分項說明之。

#### (1)性別

表 14 顯示女性分組平均數比男性高，但除了景觀認知男性平均數 3.970 略低於 4 分以外，其他都高於 4 分，代表無論男女環境識覺認同度都高，無關性別；在標準差部分，女性分占各組 0.711、0.686、0.795 比男性的 0.768、0.709、0.826 略低，顯示女性比男性的環境識覺強，因此 T 值呈現負值情況，分別為效益認知因素組-0.556、環境態度因素組-1.215 及景觀認知因素組-0.280。整體而言，雖然結果顯示 T 值很小，代表不同性別對於不同的識覺因素組沒有顯著差異，但這與女性職業為家管，常利用社區水資源處理家務有關，而男性工作地點不在社區裡，導致環境識覺因素組女性的認同度高與意見分歧度都比男性小。

表 14 性別與識覺因素組的 T 檢定

識覺因素組	性別	人數	平均數	標準差	T 檢定	結果
效益認知	男	197	4.087	0.768	-0.556	女>男
	女	211	4.135	0.711		
環境態度	男	197	4.360	0.709	-1.215	女>男
	女	211	4.432	0.686		
景觀認知	男	197	3.970	0.826	-0.280	女>男
	女	211	4.018	0.795		

#### (2)年齡

年齡與環境識覺因素組間的 F 檢定如表 15 所示，結果顯示效益認知因素組 F 值 0.735、環境態度因素組 F 值 0.938 和景觀認知因素組 F 值 0.305，沒有顯著的差異。但從細項中可以發現李克特五等尺度量表大約都在 4 分以上，意指同意至非常同意之間，但可觀察出的環境態度因素組分數在不同的年齡組中最高，以年齡

分層 41-50 歲 4.472 分為最高、其次為效益認知因素組，最低則為出現在景觀認知因素組年齡 61 歲以上的 3.968 分，最大值與最小值相差無幾為 0.504 分。另外，41-50 歲此年齡層是人數最多的，高達 116 人，分占各組分數最高（效益認知因素組 4.210、環境態度因素組 4.472、景觀認知因素組 4.064），標準差大多比其他年齡層小；相對之下，61 歲以上的老年人的 60 人最少，對於效益認知因素組的平均數為 4.068 與景觀認知因素組的平均數為 3.968 是該因素組裡最低的，環境態度因素組的 4.328 是該分組中第二低，只比 18-30 歲的 4.306 多 0.022 分。總體說來，不同年齡分層對於不同環境識覺因素組的看法與認同感都相當高，分歧也很小，但在不同的年齡層中可以看出些微的差異，各識覺因素組在年齡組別 41-50 歲壯年人比 61 歲以上的老年人對於社區水資源的環境識覺高。

表 15 年齡與識覺因素組的 F 檢定

識覺因素組	年齡	人數	平均數	標準差	F 檢定
效益認知	18-30 歲	61	4.082	0.799	0.735
	31-40 歲	100	4.136	0.728	
	41-50 歲	116	4.210	0.657	
	51-60 歲	71	4.118	0.716	
	61 歲以上	60	4.068	0.720	
環境態度	18-30 歲	61	4.306	0.789	0.938
	31-40 歲	100	4.406	0.718	
	41-50 歲	116	4.472	0.616	
	51-60 歲	71	4.398	0.696	
	61 歲以上	60	4.328	0.702	
景觀認知	18-30 歲	61	3.986	0.843	0.305
	31-40 歲	100	3.944	0.826	
	41-50 歲	116	4.064	0.777	
	51-60 歲	71	3.984	0.772	
	61 歲以上	60	3.968	0.847	

### (3)教育程度

表 16 說明教育程度與識覺因素組的 F 檢定結果，在效益認知因素組與環境態度因素組的分數較高，不論何種教育程度平均數都有 4 分以上，標準差在 0.724 以下，但在景觀認知因素組中，平均數國小組 3.974 分與大專組 3.916 分，標準差在

國小組、國中組與大專以上組皆超過 0.8 以上，但 F 值沒有顯示出教育程度會影響各識覺因素組而造成差異。侯錦雄（2000）曾指出教育程度愈高的民眾對社會環境較有責任感，但在此卻發現居民對於水資源環境識覺較受表 7 參與頻率、與表 8 停留時間影響，其程度大於教育高低的影響，所以反而呈現出國中組與高中組居民對社區水資源的環境識覺認知部分影響較高，但在水資源景觀認知上國小組與大專以上有別他組降低了一點點的認同度。

表 16 教育程度與識覺因素組的 F 檢定

識覺因素組	教育程度	人數	平均數	標準差	F 檢定
效益認知	國小	91	4.084	0.722	0.846
	國中	80	4.220	0.724	
	高中職	110	4.146	0.713	
	大專以上	127	4.112	0.719	
環境態度	國小	91	4.348	0.700	0.493
	國中	80	4.414	0.714	
	高中職	110	4.436	0.665	
	大專以上	127	4.390	0.718	
景觀認知	國小	91	3.974	0.827	1.502
	國中	80	4.110	0.808	
	高中職	110	4.018	0.785	
	大專以上	127	3.916	0.810	

#### (4)職業類別

職業類別於社區水資源在於不同環境識覺因素組關係如表 17，在表中呈現的效益認知因素組 F 檢定值 1.142、環境態度因素組 F 檢定值 0.849 與景觀認知 F 檢定值 0.453，差異不大，沒有顯著的結果。各種職業類別的各因素組平均數大多在 4 分以上，說明對環境識覺高度認同感，但若由不同職業類別分析，發現各組中的學生組在效益認知（3.930）、環境態度（4.298）及景觀認知（3.908）因素組中平均數最低，水源里學區中只有國小，國中之後就要到市區或其他地方求學，通勤時間加上在校時間可能周一至周五超過十小時以上，使得他們對於在地的認同感較低。另外，自由業則是在各因素組中，呈現出平均數偏高與標準差較小的情況，顯示各種職業類別中以自由業的環境識覺同意度最高。其中，在其他職業中對於社區水資源有較多接觸的農業與家管類群，也呈現平均數偏高的趨勢。

表 17 職業類別與識覺因素組的 F 檢定

識覺因素組	職業類別	人數	平均數	標準差	F 檢定
效益認知	農	69	4.208	0.700	1.142
	工	64	4.148	0.706	
	商	82	4.120	0.705	
	軍公教	39	4.136	0.661	
	自由業	13	4.338	0.591	
	學生	28	3.930	0.826	
	家管	87	4.146	0.751	
	其他	26	4.052	0.699	
環境態度	農	69	4.354	0.682	0.849
	工	64	4.378	0.740	
	商	82	4.428	0.665	
	軍公教	39	4.504	0.570	
	自由業	13	4.338	0.521	
	學生	28	4.298	0.829	
	家管	87	4.434	0.707	
	其他	26	4.298	0.756	
景觀認知	農	69	4.050	0.832	0.453
	工	64	3.920	0.788	
	商	82	4.040	0.775	
	軍公教	39	4.036	0.753	
	自由業	13	4.200	0.695	
	學生	28	3.908	0.932	
	家管	87	3.994	0.805	
	其他	26	3.838	0.879	

## (5)參與頻率

表 18 呈現出參與頻率與環境識覺因素組的 F 檢定結果，發現參與頻率在景觀認知因素組 F 值 4.86 與效益認知因素組 F 值 1.431 和環境態度認知因素組 F 值 1.631 相較，達到明顯顯著差異。在 F 值最高的景觀認知因素組中每天去的人平均 4.134 分、2-3 天一次 4.032 分、一星期一次 3.962 分、一個月一次 3.702 分、三個月一次 3.682 分、半年一次 3.862 分，大致呈現出參與頻率愈高者其景觀認知愈強，再將每天去的人平均數 4.134 相比一個月一次的平均數 3.702 約 0.432，呈現參與頻率

每天比一個月去一次的組別景觀認知更強，說明對社區水資源景觀認同度高的人愈喜歡親近造訪水資源。但在效益認知因素組的 F 值 1.431 與環境態度因素組 F 值 1.632 呈現差距不大的趨勢，不似景觀認知因素組一樣有達到顯著差異的標準，說明經常去社區附近水資源的人與久久去一次的人對於水資源的效益認知與環境態度上無太大的差別，其各因素組同意度依然高達 4 分以上，標準差差別不大的情況。

表 18 參與頻率與識覺因素組的 F 檢定

識覺因素組	參與頻率	人數	平均數	標準差	F 檢定
效益認知	每天	153	4.162	0.720	1.431
	2-3 天	75	4.204	0.718	
	一星期	73	4.104	0.731	
	一個月	29	4.090	0.666	
	三個月	17	3.870	0.740	
	半年以上	61	4.126	0.711	
環境態度	每天	153	4.460	0.673	1.632
	2-3 天	75	4.378	0.676	
	一星期	73	4.424	0.689	
	一個月	29	4.328	0.657	
	三個月	17	4.434	0.622	
	半年以上	61	4.252	0.806	
景觀認知	每天	153	4.134	0.811	4.861
	2-3 天	75	4.032	0.771	
	一星期	73	3.962	0.827	
	一個月	29	3.702	0.673	
	三個月	17	3.682	0.741	
	半年以上	61	3.862	0.834	

#### (6)停留時間

停留時間與識覺因素組的 F 檢定結果如表 19，在效益認知因素組（1.913）與景觀認知組（2.022）的 F 值趨小，表示停留時間對於水資源效益認知與景觀認知的同意度高，看法大致相同。另一方面，在環境態度上停留時間長短會影響對於水資源保護的心理層面，這識覺因素組 F 值達到 4.370，有顯著結果，從表 2-19 觀之，平均數在 30 分鐘 4.354 分、一小時 4.400 分、兩小時 4.476 分與三小時以上

4.520 分，呈現停留時間越久對於水資源的破壞與保護愈關心，其認同度也愈高。

表 19 停留時間與識覺因素組的 F 檢定

識覺因素組	停留時間	人數	平均數	標準差	F 檢定
效益認知	30 分鐘	207	4.058	0.724	1.913
	一小時	118	4.186	0.715	
	二小時	48	4.208	0.703	
	三小時以上	35	4.320	0.673	
環境態度	30 分鐘	207	4.354	0.723	4.370
	一小時	118	4.400	0.681	
	二小時	48	4.476	0.618	
	三小時以上	35	4.520	0.687	
景觀認知	30 分鐘	207	3.948	0.817	2.022
	一小時	118	4.024	0.789	
	二小時	48	3.946	0.888	
	三小時以上	35	4.250	0.686	

#### 4. 檢定分析

為進一步瞭解水源里社區居民基本屬性的性別、年齡、教育程度與職業類別及造訪的參與頻率與停留時間對水資源的環境識覺影響，性別部分採 T 檢定，其他採用變異數分析的 Scheffe 法進行檢定，檢定後的顯著性結果如表 20 所示。

首先，在效益認知因素組方面，不同的性別、年齡、教育程度、職業類別與停留時間沒有顯著差異，代表不論如何分組針對水資源的效益認知，如社區附近的森林有助於水源涵養、具有農業生產的效益、具有休閒遊憩的效益、具有民生用水的效益、具有生態保育的效益及具有延續社會文化的效益這些看法都具有高度的認同，分歧度偏小。

其次，環境態度因素組方面，大部分結果並不顯著，不同性別、年齡、教育程度以參與頻率跟保護水資源是一件非常迫切重要的事情、水資源環境比人類的經濟發展重要、願意付出最大的努力避免水資源遭受破壞、破壞水資源是一件令人痛心難過的事、水資源的經營管理應優先考慮附近社區的需求等環境態度沒有顯著的關係，但在停留時間卻呈現顯著的結果，代表停留時間愈短受訪居民對環境態度持正面想法者愈高。

最後，在景觀認知上，表 20 參與頻率出現非常顯著的結果，顯示參與程度愈

高則景觀認知就愈強，景觀認知主要是在社區附近的水資源水質乾淨、景觀非常美麗、水量充沛及社區附近水資源非常適合居住等部分。因此造訪社區水資源頻繁程度會影響到景觀認知的部分，美景令人流連忘返，想一再拜訪。另一方面，停留時間的長短會影響居民對環境保護的概念，而非受到性別、年齡、教育程度與職業類別影響，顯示出居民若參與程度愈高，即使停留時間不長，但這些居民對本社區的環境識覺是比較高的。

表 20 受訪者基本屬性及參與情況與識覺因素組之交叉分析

	性別	年齡	教育程度	職業類別	參與頻率	停留時間
效益認知	0.579	0.569	0.469	0.335	0.212	0.127
環境態度	0.225	0.442	0.688	0.547	0.150	0.005*
景觀認知	0.780	0.874	0.213	0.868	0.000**	0.110

(\* :  $P < 0.05$  ; \*\* :  $P < 0.01$ )

## 5. 相關分析

環境識覺是指居民對環境的知覺、偏好、態度及行為來作為瞭解空間形成的過程及人地互動的關係，進而強調人對環境關懷的一種行為 (林裕彬、林怡君，2000)。透過問卷的調查了解居民「效益認知」、「環境態度」及「景觀認知」與居民基本屬性交叉分析之後，發現居民參與社區水資源的頻率與停留時間愈久，其環境識覺愈強。問卷中問項有關社區參與度意願為「我願意盡我所能來改善這個社區」居民受訪結果如表 21，同意即非常同意者高達 73.3% 占受訪全體三分之二以上。

為進一步探討環境識覺中「效益認知」、「環境態度」及「景觀認知」三因素組與社區參與意願間的關連性，本研究以 Pearson 積差相關係數來計算兩者之間的相關性(表 22、圖 6)。經相關檢定分析後發現，各因素間的相關係數介於 0.213 至 0.305 之間，且均達顯著相關( $P < 0.01$ )。說明願意參與社區活動者，具有對社區水資源維護更具有環境保護概念，認為維護社區水資源潔淨度、功能與保護不受破壞是重要的事情。

表 21 受訪居民的社區參與意願

社區參與意願問項	非常同意	同意	普通	不同意	非常不同意	平均
	5	4	3	2	1	
	%					
我願意盡我所能來改善這個社區	22.3	51.0	24.8	1.7	0.2	3.93

表 22 受訪者社區參與意願與識覺因素組之相關分析

	效益認知	環境態度	景觀認知
我願意盡我所能來改善這個社區	0.261**	0.305**	0.213**

(\* :  $P < 0.05$  ; \*\* :  $P < 0.01$ )

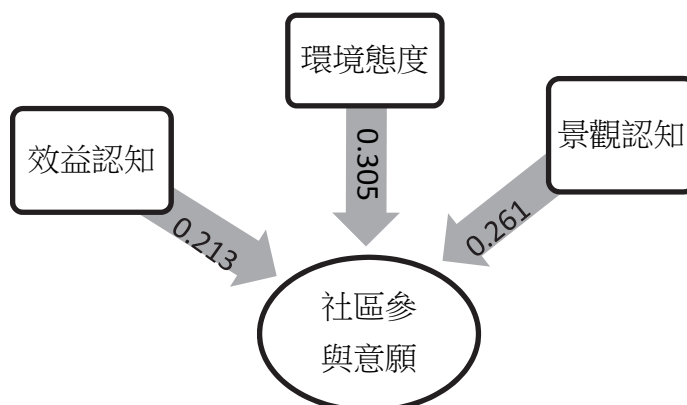


圖 6 受訪者社區參與意願與識覺因素組分析圖

#### IV、結論

環境識覺是行為地理學本質一部份，探討人類行為和環境互動之關係，彼此密不可分。新北市淡水區水源里擁有水質良好的陽明山湧泉，自古以來，當地居民使用乾淨的水源從事取水飲用、農業灌溉、民生洗滌的功能，與當地居民生活息息相關。本研究乃針對淡水區水源里居民，以問卷調查的方式進行資料收集，探討當地居民對於水資源的環境識覺，問卷設計以李克特五等尺度量表為基準，輔以實地調查以了解居民對當地水資源看法、使用方式及水資源利用的變遷。結

果顯示，當地居民參與社區水資源程度可分為效益認知、景觀認知及環境態度三組因子來探討。發現女性對環境識覺認知會高於男性，不分年齡對社區水資源都同樣關心，教育程度差別不會影響對環境識覺的差異，但職業類別和造訪水資源頻率、停留時間出現較明顯差異。從事農業者由於灌溉需求，因此參與社區水資源頻率較高，停留時間也較長，其他職業類型如從商者、家管、和從事自由業者由於時間相對能自由運用，參與社區水資源機會較多，在環境識覺上呈現較強的結果，認為環境優美能達到放鬆效果，保護水資源免於受破壞。

## V、參考文獻

1. 邱皓政 (2011) 量化研究與統計分析。臺北，五南圖書公司。
2. 吳明隆 (2007) SPSS 操作與應用：問卷統計分析實務。臺北，五南圖書公司。
3. 林惠玲、陳正倉 (2011) 統計學(上)(下)。臺北雙葉書廊公司。
4. 林裕彬、林怡君(2000) 蘆竹鄉埤塘之環境識覺探討，環境教育季刊，42：67-76。
5. 侯錦雄 2000 公園使用滿意度與其維護管理意願－以台北市、台中市、彰化市居民為例，中國園藝，45(4)：103-118。
6. Chen, J.S., L. Li, J.Y. Wang, D.A. Barry, X.F. Sheng, W.Z. Gu, X. Zhao and L. Chen (2004) Water resources: groundwater maintains dune landscape. *Nature* 432: 459-460.
7. Dolnicar, S. and A.I. Schäfer (2009) Desalinated versus recycled water: public perceptions and profiles of the accepters. *Journal of Environmental Management* 90: 888-900.
8. Kedziora, A., Y.Z. Negussie, M.T. Asres and M. Zalewski (2011) Shaping of an agricultural landscape to increase water and nutrient retention. *Ecohydrology & Hydrobiology* 11(3-4): 205-222.
9. Kiriscioglu, T., D.M. Hassenzahl and B. Turan (2013) Urban and rural perceptions of ecological risks to water environments in southern and eastern Nevada. *Journal of Environmental Psychology* 33: 86-95.
10. Kuo, C.C., C.Y. Tsang and L.S. Chang (2013) Residents' perceptions of water-related problems in the Mailiao area, Taiwan. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 85: 206-216.

11. Parsons, M. and M.C. Thoms (2013) Patterns of vegetation greenness during flood, rain and dry resource states in a large, unconfined floodplain landscape. *Journal of Arid Environments* 88: 24-38.
12. Turner, R.E. and N.N. Rabalais (2003) Linking landscape and water quality in the Mississippi River Basin for 200 years. *BioScience* 53(6): 563-572.

## 知本森林遊樂區入口段利用航空攝影拼接 正射影像精度之探討

許中立<sup>1</sup> 蔡瀚陞<sup>2</sup> 郭子銘<sup>3</sup> 陳淑慈<sup>3</sup>

**【摘要】**近年來隨著空載傳輸與飛控科技之進步，無人航空系統與無人飛行載具技術快速發展，無人飛行載具的飛行穩定度比起以往已有大幅提升。而使用無人飛行載具進行航空攝影測量，可快速地取得災害事故現場第一時間的受災影像與周邊環境資訊，並快速製作災區正射影像圖資供後續救災決策及緊急處理參考與應用。正射影像圖資是將航拍影像上的像點高差和影像傾斜位移移除，可提供正確的幾何與相對輻射資訊作地理資訊系統的底圖，或套疊數值高程模型作為三維地形模擬供相關研究之用。本研究以市面上常用的三種影像拼接軟體進行知本森林遊樂區入口段之正射影像拼接，比較各軟體正射影像拼接成果之品質與均方根誤差，供後續相關研究參考。

**【關鍵詞】**無人飛行載具、攝影測量、正射影像、拼接。

## USING THE TECHNOLOGY OF AERIAL PHOTOGRAPHY SPLICED TO STUDY THE ORTHO-PHOTO ACCURACY ON ENTRANCE TERRAIN OF CHIHPEN FOREST RECREATION AREA

Chung-Li Hsu<sup>1</sup> Han-Sheng Tsai<sup>2</sup> Jun-Ming Kuo<sup>3</sup> Shu-Tzu Chen<sup>3</sup>

**【Abstract】** Recently, with advances in the technology of air carrier transmission and flight control, the unmanned aircraft system and unmanned aerial vehicle technology had been rapidly developed, significantly improved flight stability of unmanned aerial

---

<sup>1</sup> 國立屏東科技大學水土保持系教授，通訊作者。電子郵件: clhsu@mail.npust.edu.tw  
Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology.  
Corresponding Author. clhsu@mail.npust.edu.tw

<sup>2</sup> 國立屏東科技大學水土保持系研究生。  
Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology.

<sup>3</sup> 國立屏東科技大學水土保持系助理。  
Assistant, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology.

vehicle than ever before. Using unmanned aerial vehicle to get aerial photography can quickly obtain disaster scene of the accident first time images of disaster information and rapid production of the affected areas ortho-photo and emergency relief funding for subsequent processing and application of reference. Ortho-photo data is the dot height and tilt of an image displacement aerial image on removal, which provides the correct geometry and radiation information as base map of geographic information, or nested numerical simulation of three-dimensional terrain and elevation model as for related research purposes. This study was performed ortho-photo mosaic Chihpen Forest Recreation Area through the three image stitching software, compare the quality of the outcome of the ortho-photo and root mean square error, a reference for subsequent research.

**【Key words】** Unmanned aerial vehicle, photography, Ortho-photo, Spliced.

## I、前言

無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)為屬機動性強、成本低、可即時回傳感測資訊且可於高風險之惡地形區進行航空拍攝，廣泛被運用於農業(David et al., 2007)、災區監控(Afzal Ahmed et al., 2008)、建築(Fei Dai et al., 2010)、考古(Yang Liu et al., 2014)等多方面。UAV 可自由控制其飛行高度且可搭載高解析度相機或測量設備進行特定任務，應用於高解析度之正射影像(Ortho-Photo)與高精度之地形數值模型(Digital Terrain Model)的製作。

正射影像的製作需拍攝像片達一定重複率(Repeat Coverage Ratio)方能拼接(Spliced)與解算(Solver)較為完整之正射影像，一般而言，其前後影像重複率至少需達前後重複率 60%以上，左右重複率 30%以上，方能拼接與解算出較為完整之正射影像。

UAV 種類大致上可分類為兩種：定翼型(Fixed Wing Type)與旋翼型(Rotor type)，定翼型飛行較為穩定，速度快適合進行大範圍之空拍監測，但其起降時需要跑道，故較易受到地形上的限制；而旋翼型雖飛行範圍不大，但其具垂直起降之功能而不用跑道，且可在飛行中直角轉彎，自由度極高，不易受到地形上的限制(Eisenbeiss, 2009)，且近年來旋翼型的市場熱絡因此技術發展快速，飛控距離已有達 5 公里以上者。兩者比較如下表 1。

表 1 定翼型與旋翼型 UAV 比較表

Table1 Comparison chart on fixed Wing Type and Rotor type of UAV

比較項目	定翼型	旋翼型
圖片		
飛行範圍	範圍較廣	範圍較小
續航力	時間較長	時間較短
自由度	較低，需轉彎半徑	較高，可垂直轉彎
起降方式	需要跑道	可垂直起降
適用地區	空曠區域	地勢起伏較大之區域

應用 UAV 影像製作正射影像與地形三維模型，國內近期研究有楊宗岳等(2009)提出應用無人飛機於公路防與救災之可行性；簡榮興等(2010)以 UAV 進行六龜大智瀑布八八風災的探查；李治逸、王韻皓(2012)提出航空攝影技術應用於農業資訊調查上；鍾文貴等(2014)利用無人載具評估植草覆蓋的成果；邱式鴻(2015)以旋翼型 UAV 於航高 200 公尺搭載非量測型相機航拍取得影像，並以影像解算軟體 Pix4Dmapper 執行影像解算，得正射影像精度達 0.2 公尺；楊明德等(2015)藉由 UAV 對堰塞湖土石壩體進行三維模型重構，其單尺度轉換之誤差小於 1.5 公尺、雙尺度轉換之三維誤差量皆小於 1 公尺；徐金煌等(2015)使用 Pix4Dmapper 軟體處理 UAV 拍攝之影像，於 7 小時內產製地面解析度 7.6 公分之正射影像與 DSM，且正射影像之平面精度可達到 15 公分；國外相關研究有 Chris H. Hugenholtz 等人(2014)透過 UAV 航拍影像進行 DTM 的建置，應用 DTM 估算土方量，供工程單位參考；Z. Lari 等人(2015)透過 UAV 航拍影像運用 SGM 技術將影像分析匹配建置三維模型。




由於上述之測量對象多係應用在平地或低山地區，因其有較多資源可供比對或有較便利交通關係可以多次檢測。但若遇山區峽谷狀地區地形變化較大又溫度較低情況時，UAV 電池續航力亦是問題，需多次起降徒增系統誤差與操控時間，一直以來是應用 UAV 的障礙。此外應用軟體的不同其拼接與解析的成果亦有差異，故本文就以知本森林遊樂區周邊之溪谷地形為例，探討 UAV 的航拍而以不同軟體解析之效果，做為爾後相關調查評估工作使用參考。

## II、材料與方法

### (I)研究材料

知本森林遊樂區位於臺東縣卑南鄉溫泉村，佔地面積約 110.8 公頃，試驗區為熱帶海洋性氣候區，因受黑潮流經之影響，平均溫度及濕度都較臺灣西部為高，颱風期間易降豪雨，導致土砂災害發生，2009 年 8 月 8 日，因莫拉克颱風的影響受到嚴重的重創，飯店因此受到沖毀，附近十多家商店亦遭洪水吞噬。知本森林遊樂區地理位置及衛星影像圖則詳圖如圖 1 與 2 所示。知本河流域主要由山地地形與河谷沖積地形所構成，其分水嶺山稜線的高程皆於 1000 至 2000 公尺之間，溪流上游坡度較大，中、下游坡度稍緩，地形與河川發育屬幼年期至壯年期地形。水系形狀受岩性及構造活動控制，河川沿地層軟弱面或劈理面發育，屬長方形樹枝狀水系。本研究之檢測區為知本森林遊樂區，並選定入口段的樂林橋上、下游段為檢測比較區域。

本研究以此知本流域中之知本森林遊樂區入口段樂林橋附近（主要原因亦士該段有明顯的構造與地行可以作為研判分析比較參考），進行無人載具航空數位攝影(航拍)，如圖 3 之紅線之 UAV 飛行路徑圖所示區域，取得數位影像以進行正射影像拼接，再分析比較不同的影像拼接軟體之解析影像輸出效果，供後續調查評估工作參考之用。

		
<p>圖 1 地理位置圖 Fig.1 Location map of test area</p>	<p>圖 2 衛星影像圖 Fig.2 Satellite image of test area</p>	<p>圖 3 飛行路徑圖 Fig.3 Flight path map of test area</p>

## (II)研究方法

本研究則是運用 UAV 進行規劃路徑與航拍，再以市面上較常見的 Pix4D、Image Composite Editor 以及 Hugin 等三種影像處理軟體進行正射影像拼接，以其拼接之

正射影像成果進行分析。

### 1.無人載具(UAV)

UAV 即為人們俗稱之遙控飛機(Remote Control Aircraft), 透過遙控之方式控制其飛行, 亦可由電腦進行航線規劃設置其飛行路徑, 藉此拍攝所需區域之影像圖資, 再進行內業處理產出監測區域之相關資訊。

本研究使用自組式六旋翼無人載具進行攝影測量, 由於其搭載六組機翼飛行時較為穩定, 且旋翼機具有垂直起降與轉彎之優勢, 可進行滯空定點拍攝, 非常適合於本研究之河谷地形進行拍攝任務, 載具上配有 GPS、圖傳裝置、2200mh 鋰聚電池、陀螺儀、飛控面板等儀器進行航空攝影, 上述設備皆可降低航空攝影之飛行風險; 地面站的部分有筆記型電腦、圖傳接收站以及 Futaba 遙控把手藉此控制 UAV 的行動, 如下圖 4 所示。

### 2.相機

標準的攝影測量相機是由兩台固定在同一個基座上的量測性相機所組成, 量測性相機具有良好的光學校正並且使用較大尺寸的底片(例如航空照片底片 230x230mm), 但近年來數位相機逐漸普及, 且數位相機與量測性相機的量測精度差在可接受範圍之內, 因此數位相機憑藉其經濟性和使用上的便利性逐漸在各方面廣泛的被應用;  $\alpha$  6000 為 Sony 公司推出的一款微單眼相機, 如圖 5 所示, 其優勢是體積較單眼相機輕巧且操作上與類單眼相機一樣簡單方便, 攝影出來的影像品質較接近單眼相機的品質, 故本研究使用 Sony- $\alpha$  6000 為攝影測量之相機, 其主要規格如表 2 所示。

	
<p><b>圖 4 使用之 UAV 示意圖</b> Fig.4 A schematic diagram of used UAV in this research</p>	<p><b>圖 5 所搭配之 Sony-<math>\alpha</math> 6000 相機示意圖</b> Fig.5 A schematic diagram of camera Sony-<math>\alpha</math>6000 in this research</p>

表 2 所搭配之 Sony- $\alpha$  6000 相機規格表  
Table 2 A specification table of camera Sony- $\alpha$ 6000

項目	規格
有效像素	2430 萬像素
感光元件	23.5x15.6mm Exmor APS HD CMOS
最小光圈	F/22
ISO 感光值	於 100 至 25600 範圍

### 3.電腦軟硬體配備

影像拼接演算需要較優質的電腦硬體配備，且運算時會消耗大量電腦記憶體。為使圖像匹配能夠順利進行，本研究使用之電腦為 CJSKOPE 的 QX-350，硬體配備如下：

CPU：Intel(R) Core(TM) i7-4710MQ CPU @ 2.50GHz

RAM：8.00GB

GPU：GeForce GTX850M

System：Microsoft Windows 10

大量的航拍影像要進行分析除了各別影像隨時間不同的比對外，使用影像拼接與解析產製三維地形是另一項重要的工作，而本研究所蒐集專業軟體為市面上較常見的三種軟體：

#### (1) Pix4DMapper

Pix4DMapper 為瑞士 Pix4D 公司所開發之影像分析軟體，如圖 6 所示，其功能包括地面拍攝、UAV 拍攝或一般航空攝影拍攝之影像處理，可同時處理多相機影像、影像拍攝時歪斜之情形，並且可運用影像之地理位置輸入控制點位做精確之地理定位，透過影像點雲化產製數值模型，並提高成果質量與精度，鑲嵌編輯影像產製正射影像，可應用於土木工程、大地工程、防災救災、地質應用等方面，且其介面已全面中文化，相當便於操作。

#### (2) Image Composite Editor(Microsoft ICE)

Image Composite Editor 為 Microsoft Research 開發之免費影像拼接軟體，如圖 7 所示，給定一系列之重疊影像（即達到一定之影像重複率），即可進行影像拼接，然則拼接原理 Microsoft 官方卻無具體文件說明其採用何種方法來拼接影像，研判採用最大概似法的可能性相當高，其目前仍是採英文介面。



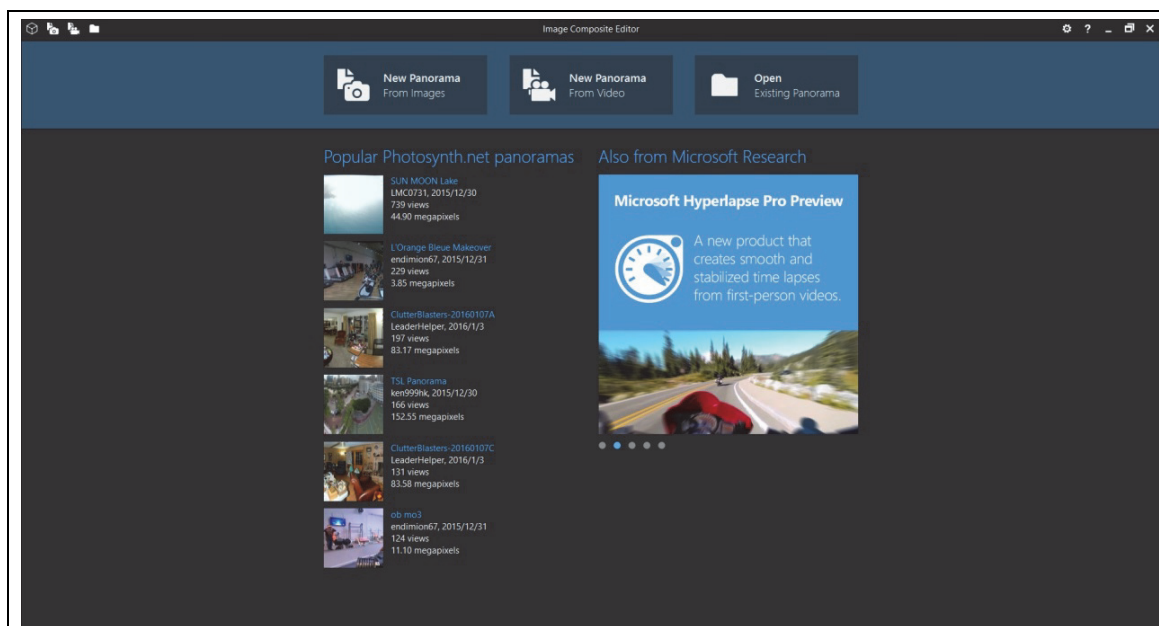


圖 7 Image Composite Editor 使用介面

Fig.7 Used interface of Image Composite Editor softwood

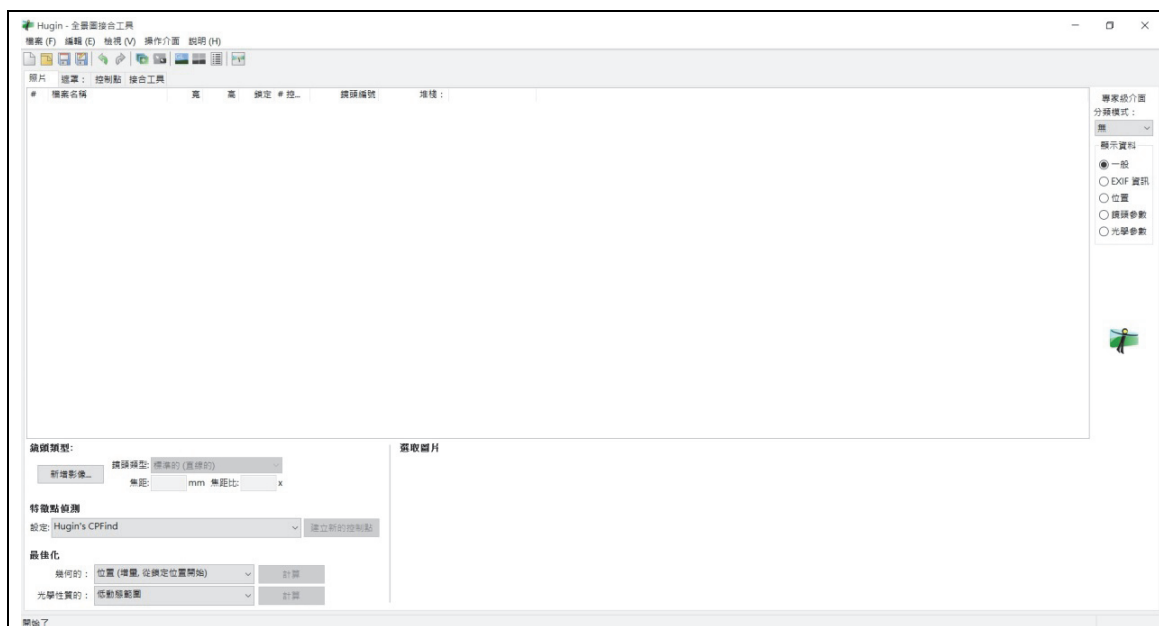


圖 8 Hugin 使用介面

Fig.8 Used interface of Hugin softwood

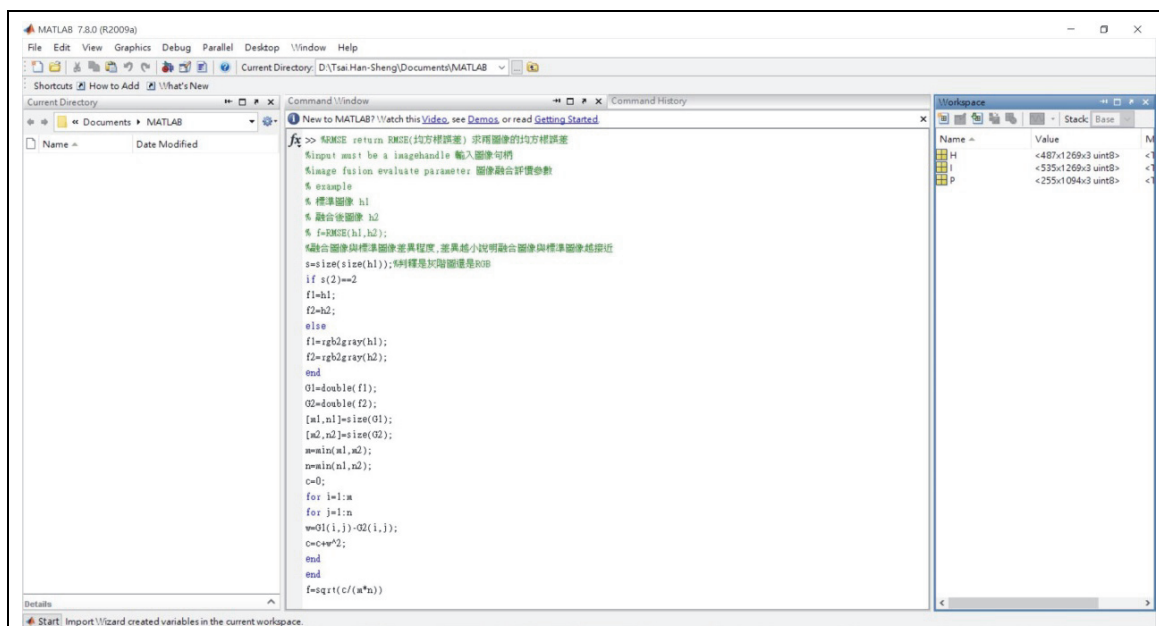


圖 9 MATLAB 使用介面

Fig.9 Used interface of MATLAB software

### III、結果與討論

#### (I) Pix4D 成果分析

圖 10 為 Pix4D 之正射影像拼接成果，其影像解析度為 255x1094 像素，如圖 11 所示之樂林橋段，在分析成果中相對於其他二種軟體，雖耗費較長時間進行分析，但提供之物件判釋能力較差，惟其結果精度為三者中最高的。

從成果影像中可以很容易得知研究檢測區實際空間分布情況，且此軟體可產製 DSM(Digital Surface Model)進行三維分析。



圖 10 Pix4D 正射影像

Fig.10 Ortho-photo by Pix4D software





圖 10 解析度顯示結果較差

Fig.10 Resolution display results so poor

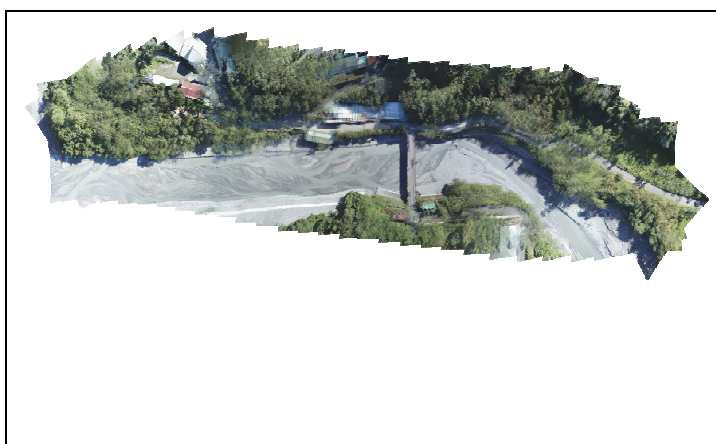
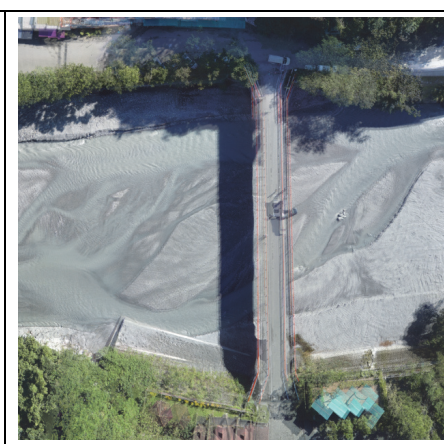
## (II) Image Composite Editor 成果分析

圖 11 為 Microsoft ICE 之正射影像拼接成果，其影像解析度為 38733x16325 像素，如圖 12 所示，在拼接過程中為解算速度最快，且其影像解析度亦為最高，對於物件分辨具有較良好的特性，但其圖形畸變量大，在地形判釋上誤差較大，不建議使用於空間分布判釋與分析。

	
<p>圖 11 Image Composite Editor 正射影像 Fig.11 Ortho-photo by Image Composite Editor software</p>	<p>圖 12 解析度顯示結果較佳 Fig.12 Resolution display results so preferable</p>

## (III) Hugin 成果分析

圖 13 為 Hugin 之正射影像拼接成果，其影像解析度為 27104x10414 像素，如圖 14 所示，拼接使用時間長，雖然其拼接成果解析度高，但接合控制點多分布於河道，故河道部分相對較為清晰明顯，但其他則模糊地帶較多，故較不適合做物件判釋。

	
<p>圖 13 Hugin 正射影像 Fig.13 Ortho-photo by Hugin software</p>	<p>圖 14 解析度顯示結果模糊 Fig.14 Resolution display results so blurred</p>

#### (IV)綜合分析

根據上述三種影像拼接軟體之成果比較，分析整理如表 3 所示。在影像判釋方面，以像素解析度最高之 Microsoft ICE 所拼接之正射影像判釋度最佳，其可清楚判釋出細微物件，且所耗費之拼接時間較短，通常幾十分鐘的時間就可完成初步的拼接校正，因此較適合運用在災後的搶救工作上，可提供當前災區狀況說明之育，供救災人員進行第一時間的搶救工作決策參考。

Pix4D 雖然需要耗費較長的解算時間，通常幾小時的時間才可完成初步的拼接校正，但其解算成果較符合實際地文情況，且可產製較可信的數值模型供土方演算與災後復建規模評估，故較適合用於災害中、後期評估、災損調查、重建之土方估算或規劃等方面。

Hugin 通常可在 1 小時的時間完成初步的拼接校正，雖然其像素解析度較 Microsoft ICE 高，但其物件判釋度卻是所有成果中最差的，主要原因是 Hugin 的演算法輸出之影像為多頻段混合所描繪出來的成果，故 Hugin 的成果影像中才會有許多模糊的重疊影像出現。

另各軟體分析成果之均方根誤差(RMSE)呈現落差極大，而主要因素為 Microsoft ICE 與 Hugin 這二個軟體無法輸入相片座標，此二種軟體皆單純進行影像匹配，卻無座標匹配，故其誤差值才會大於 60 公尺以上；而 Pix4D 在演算上有加入座標點位，故其誤差值小於 3 公尺，若再增加加入地面控制點座標，則其將能使誤差值更加降低，根據文獻有可能降低至幾公分的程度（施錦揮等，2010；蕭震洋等，2011；申承翰，2012；Wu et al., 2013；蘇柏軒等，2013；許中立等，2015），因此是可以實際將其運用於工程測繪上，加快作業的流程與全面地形的掌握。

表 3 成果比較表

Table3 Main specifications table of GPT-3100N

	Pix4D	Microsoft ICE	Hugin
像素	255×1094	38733×16325	27104×10414
物件判釋度	普通	高	模糊
時間	約 6hr	約 20min	約 1hr
精度	最高	最低	低
產製數值模型	有	無	無
RMSE[m]	2.22	69.85	68.25

根據上述分析結果，Microsoft ICE 軟體較適合應用於災害剛發生需要即時提供較多資訊供救災決策參考時應用。若要進行規劃設計則應採用 Pix4D 軟體，座標控制產出 DSM 進行估算之誤差較小。本研究利用 Pix4D 軟體技術在檢測所產製 DSM 如圖 15 所示，其與農林航空測量所航拍影像及現地狀況檢討頗為吻合，建議未來這項分析技術能多為推廣應用。

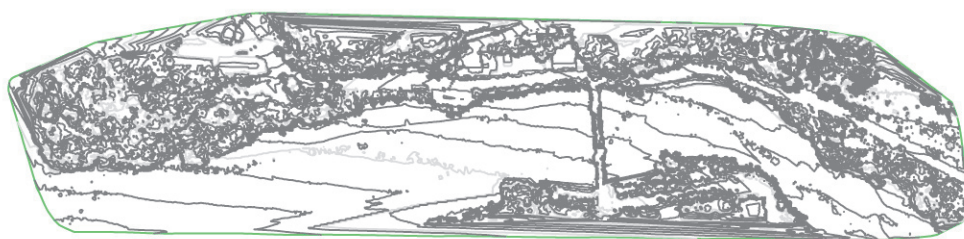


圖 15 Pix4D 所產製透過等高線展示之 DSM  
Fig.15 Brick measurement test area

#### IV、結論

影像拼接需要硬體要求較高且非常耗時，但相較一般傳統的地面測量來說卻能夠較為迅速地提供地理相關資訊以供相關人員後續運用參考。利用 UAV 之成本耗費上比起一般航空攝影與衛星影像等為低，惟運用不同拼接軟體進行演算的成果是有一定的差異，以下結論供參考：

- 1.以拼接正射影像之速度而言是以 Microsoft ICE 的速度最佳，且圖像清晰，適合進行災害第一時間的操作，製作正射影像供後續增援救災人員參考，並把握黃金救援時間。
- 2.雖然 Hugin 的拼接成果解析度要較 Pix4D 高出許多，但由於拼接方式有所不同，Pix4D 全景圖像反而有較優質的辨識度。
- 3.Pix4D 的正射影像雖然解析像素不高，但可產製 DSM 三維模型，可做為高程判

釋以及土方估算使用，故其未來的發展性仍是被肯定的。

- 4.理論上 RMSE 值越小即差異性越小，代表拼接成果越佳，但此成果並不表示成果精度之提昇，而是表示圖點匹配密合之情形。換言之，RMSE 值越小即差異性越小表示匹配的密合情形越佳。
- 5.拼接與解算正射影像較耗費電腦的記憶體，進行大面積的拼接時，時常發生記憶體不足的情形，建議解決方式應從再次進行影像的篩選，減少記憶體的佔用量，且隨著電腦配備的提升、固態硬碟與記憶體降價，尤其是記憶體若能配備至少 16G 以上則匹配拼接大範圍的影像會較為適宜。

## V、參考文獻

- 5 申承翰（2012）無人飛行載具影像數值地形模型建置及精度評估。國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士論文。76 頁。
- 7 李治逸、王韻皓（2012）航空攝影技術應用於農業資訊調查之介紹。農政與農情。247:79-82。
- 8 邱式鴻（2015）旋翼 UAS 影像製作飛航事故現場正射影像之精度探討。航空安全及管理季刊。2(4):400-417。
- 9 施錦揮、鄒慶敏、蔡季欣、林志清、林燕山（2010）無人飛行載具應用於防救災圖資供應之研究-以北二高崩塌地為例。地籍測量：中華民國地籍測量學會會刊。29(3):17-36。
- 10 徐金煌、張國楨（2015）以 Pix4Dmapper 進行 UAV 影像之空間資料產製。中國土木水利工程學刊。27(3):241-246。
- 11 許中立、蔡瀚陞、郭子銘、邱柏瀚、林長慶、何宗諺（2015）近景攝影測量技術應用於崩塌坡面地形探討。2015 森林集水區經營研討會論文集。pp.167-185。
- 14 楊宗岳、羅國峯、林永仁、黃勤財（2009）應用無人飛機於公路防、救災之可行性探討。臺灣公路工程。35(12):2-9。
- 14 楊明德、陳韋廷、黃凱翔（2015）應用 UAV 影像建置現地堰塞壩三維模型。中華水土保持學報。46(2):88-95。
- 17 鍾文貴、蔡俊緯、王裕民、楊樹榮（2014）應用無人飛行載具測估植草覆蓋面積。2014 年中華水土保持學會年會及學術研討會論文集。pp.3-1-1-3-1-11。
- 18 蕭震洋、謝寶珊、冀樹勇（2011）應用非常規攝影量測評估國道 3 號 3.1 公里

- 崩塌事件之土方量。中華水土保持學報。42(2):120-130。
- 19 蘇柏軒、蕭宇伸、王傑民、陳樹群（2013）無人載具系統(UAS)航拍應於高精度製圖的可行性研究。2013 年中華水土保持學會年會及學術研討會論文集。pp.5-6-1-5-6-12。
- 20 簡榮興、王天佑、曹鼎志、辜炳寰、簡志凱（2010）應用無人飛行載具 UAV 技術進行土石災區之調查-以 88 水災後之六龜鄉大智瀑布為例。2010 岩盤工程研討會論文集。pp.947-956。
- Ahmed, A., N. Masahiko, T. Chen, and S. Ryosuke(2008) UAV Based Monitoring System and Object Detection Technique Development for a Disaster Area. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 37:373-377.
- Chai, T. and R.R. Draxler(2014) Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? – Arguments Against Avoiding RMSE in the Literature. Geoscientific Model Develop. 7:1247-1250.
- Chris, H., J.K. Hugenholtz, B. Owen and M. Steve(2015) Earthwork Volumetrics with an Unmanned Aerial Vehicle and Softcopy Photogrammetry. Journal of Surveying Engineering. 141(1): 1-5.
- David, G.S., R.D. Benjamin and R. Charles(2007) Development and Application of an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle for Precise Aerobiological Sampling above Agricultural Fields. Journal of Field Robotics. 25(3): 133-147.
- Dai, F. and M. Lu(2010) Assessing the Accuracy of Applying Photogrammetry to Take Geometric Measurements on Building Products. Journal of Construction Engineering and Management. 136:242-250.
- Eisenbeiss, H.(2009) UAV Photogrammetry. Unpublished Doctoral Dissertation, Dipl.-Ing., University of Technology Dresden, Dresden.
- Liu, Y. and J. Kang(2014) Application of Photogrammetry: 3D Modeling of a Historic Building. Construction Research Congress 2014. pp.219-228.
- Lari, Z., A. Al-Rawabdeh, F. He, A. Habib and N. El-Sheimy(2015) Region-Based 3D Surface Reconstruction Using Images Acquired by Low-Cost Unmanned Aerial Systems. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Vol.

XL-1/W4. pp.167-173.

Wu, C. T., C.Y, Hsiao and P.S. Hsieh(2013) Using UAV and VBS-RTK for Rapid Reconstruction of Environmental 3D Elevation Data of the Typhoon Morakot Disaster Area and Disaster Scale Assessment. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*. 44(1):23-33.

許中立、蔡瀚陞、郭子銘、陳淑慈—  
知本森林遊樂區入口段利用航空攝影拼接正射影像精度之探討

## 集水區潛在深層崩塌區位之劃定

林昭遠<sup>1</sup>

**【摘要】**植生對邊坡穩定應有經濟學之報酬遞減效應考量，在植物能順利入侵生長之區位，演替初期，植生對邊坡穩定是有正面貢獻，惟當坡面植生茂密，尤其是順向坡區位，生長高大茂密之林木，亦可能因颱風之強烈搖動以及暴雨根圈入滲蓄水，土體荷重增加而不利邊坡穩定。另外於野溪源頭區位之天然林，因根系固土能力強，平時坡面鮮少土砂運移，若遭逢極端降雨，野溪可能因土砂補充不易，向源侵蝕造成河道刷深，致坡面不穩定產生大面積崩塌。莫拉克颱風造成台灣中南部國有林班地約三萬公頃崩塌，於河道產生約 10 餘億立方公尺之土砂量可為殷鑑。為建置集水區大規模崩塌劃定及管理模式，本研究先藉由水文資料、遙測影像及數值高程模型，進行集水區仿真模擬並建置環境資訊，藉此分析集水分區之危害度、脆弱度以及暴露度，評估集水區崩塌潛勢之風險；另由集水區潛在崩塌規模之概念模式，驗證莫拉克颱風集水區深層崩塌發生之區位，本研究可動態分析集水區潛在崩塌風險度及深層崩塌區位，能有效提供後續管理之參考。

**【關鍵字】**：集水區、深層崩塌、風險分析

### **Delineation of potential deep seated landslide in a watershed**

Chao-Yuan Lin<sup>1</sup>

**【Abstract】**The principles of diminishing returns used in the field of economics should be considered for understanding the functionality of plants in slope stability. Generally, vegetation is beneficial at the initial succession; while accompanying the plant growth, the huge biomass increasing loads could result in slope failure at certain sites especially

---

<sup>1</sup>國立中興大學水土保持學系教授，通訊作者。電子郵件: [cylin@water.nchu.edu.tw](mailto:cylin@water.nchu.edu.tw)

Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University. Corresponding Author. E-mail: [cylin@water.nchu.edu.tw](mailto:cylin@water.nchu.edu.tw)

occurred at the dip slope due to effects of strong wind and high infiltration during typhoon event. Besides, the well growth natural forest located at the headwater areas with low soil erosion will ordinarily trap sediments at the slopeland and increase the potential of headward erosion. Since the sites with such characteristics are vulnerable to slope instability and will yield large-scale landslide under the occurrence of high return period event, a catastrophic disaster of thirty thousand hectare landslide and one billion cubic meters of sediment occurred at forestry compartment in southern Taiwan during Typhoon Morakot can be an unforgettable experience. In order to establish the models for delineating the potential large-scale landslide in a watershed, the rainfall data, satellite image, and digital elevation model will be used to emulate the study watershed and extract the related environmental information. The risk map of deep seated landslide potential could be easily derived by multiplication the spatial distribution of hazard degree, vulnerability degree and exposure degree; and the established model will be verified using the event of Typhoon Morakot in this study. A system with functions of dynamic analysis for locating watershed potential deep seated landslides is going to be developed and can then be as effective references of management in disaster mitigation.

**【Keywords】** Watershed, Deep seated landslide, Risk analysis

## I、前言

近年由於全球氣候暖化，使得降雨延時與空間分布改變(柳中明，2008)，長延時高強度之極端降雨頻率增加(Kysely and Beranová, 2009; Liu et al., 2005)，遂以豪雨為主要災害類型(表 1)。極端天氣極易因氣候異常而產生集水區土砂災害，不僅危及山地社區居民安全，更可能導致下游都市環境災害。為了解氣候變遷之極端降雨事件對廣域坡地災害所可能之影響，同時整合坡地防災資訊技術，故進行氣候變遷下極端降雨事件引致廣域坡地災害評估技術之研究工作。

表 1 近年全球重大土砂及淹水災害案例

Table 1 Word' s most devastating debris/flood disasters in recent years

發生年份	發生地區	災因	災情
2010	巴基斯坦	洪水	兩千多人死亡
2010	中國	水災和土石流	3,100 人死亡
2010	巴西	水災	數百人死亡
2010	波蘭	水災	--
2011	泰國南部	持續性豪雨造成水災	超過 500 人罹難
2011	美國	連日豪雨及春雪融化造成水患	多處道路中斷
2011	菲律賓	暴雨造成水災及土石流	上百人死亡
2012	中國北京	暴雨造成淹水與山洪暴發	79 人罹難
2014	日本廣島	鋒面雨造成山洪暴發	74 人罹難

降雨引致山崩為坡地集水區土砂災害之主因，崩塌係指坡面之一部分因降雨之雨水滲透、地震之作用、坡面上方之荷重增加、坡腳之淘刷等外力作用，致使坡面失去平衡，而使土塊破碎急速崩解掉落之現象。過去研究中多利用不同方法來評估影響崩塌潛在因子，藉由歷史資料、現地調查、衛星影像等技術方法，進行崩塌潛勢分析(黃士昌，1998；張郁嘉，2012)，另根據災害發生前的條件資料，探討因子與災害發生之間的關係，整合崩塌潛感之相關研究(Dai et al., 2002; 高嘉隆，2003; Kelaresta-ghi, 2003; 陳昆廷，2008)。本研究針對集水區之「崩塌風險」與「崩塌規模」兩大主題進行分析，崩塌風險為脆弱度與危害度之乘積，脆弱度包含反極端降雨、道路開發及植生綠劣等指標，危害度則為莫拉克颱風事件之降雨重現期距，崩塌規模潛勢則採用土壤深度、河道向源侵蝕、凹岸攻擊指標及順向坡區位推估，據此篩選出潛在大規模崩塌之集水區，最後以莫拉克颱風之崩塌區位作為驗證，據此作為相關單位崩塌風險管理之參考。

## II、材料與方法

### 1. 研究樣區降雨特性

台灣位於亞洲東部、太平洋西北側的島嶼，地處琉球群島與菲律賓群島之間，總面積約為 3.6 萬平方公里，受到氣候與地理環境的影響，降雨在空間或時間上之分配極為不均。就空間而言，台灣地區之年平均降雨量高達約 2,500 公厘，相當於世界平均降雨量 973 公厘之 2.6 倍，尤其山區之年平均降雨量高達 6,000 至 7,000 公厘，但西部沿海有些地區降雨量卻小於 1,200 公厘；就時間而言，台灣地區約有 79% 之年雨量集中於 5 至 10 月，因此豐、枯水期差距相當懸殊(鍾侑達，2009)。台灣在 2008 年辛樂克、卡玫基颱風，出現單日近 1000 毫米、3 日近 2000 毫米的降雨量；2009 年莫拉克颱風，在屏東縣更發生單日超過 1400 毫米的降雨量(表 2)。

表 2 歷年颱風事件最大一日雨量排行

Table 2 Ranking of top maximum daily rainfall according to historical typhoon events

排名	颱風	時間	雨量站	單日暴雨 (mm)	排名	颱風	時間	雨量站	單日暴雨 (mm)
1	莫拉克	2009	屏東尾寮山	1403	6	莫拉克	2009	嘉義馬頭山	1212
2	莫拉克	2009	高雄溪南	1301	7	莫拉克	2009	高雄新發	1190
3	莫拉克	2009	高雄御油山	1283	8	莫拉克	2009	嘉義奮起湖	1185
4	莫拉克	2009	嘉義阿里山	1235	9	莫拉克	2009	屏東瑪家	1181
5	莫拉克	2009	花蓮布洛灣	1223	10	莫拉克	2009	嘉義石磐龍	1181

資料來源：中央氣象局

## 2. 研究材料

蒐集水利署 134 個具 25 年以上完整日雨量資料之雨量站(圖 1)，計算降雨重現期距。衛星影像則下載自美國地質調查中心網站(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)，以 2006~2008 年乾、濕兩季之衛星影像，萃取常態化差異植生指標及崩塌區位；數值高程模型由內政部地政司提供，包含平面位置 X、Y 座標以及高程屬性，解析度為 5m×5m，用於地形分析及集水區劃定；水系圖資來自交通部運輸研究所，用來進行河道萃取；道路圖資來自於林務局及交通部運輸研究所，可作道路密度之分析，相關圖資之來源、用途如(表 3)。

表 3 使用圖資之來源與用途

Table 3 Sources and usages of the employed maps

資料名稱	年分	解析度	來源	用途
------	----	-----	----	----

衛星影像	2006~2008	30m x 30m	美國地質調查所	環境指標萃取
數值高程模型	2004	5m x 5m	內政部地政司	地形分析
降雨資料	1989~2009	日資料	經濟部水利署	頻率年分析
水系圖資	2008	1/5000	交通部運輸研究所	河道萃取
道路圖資	2008	1/5000	交通部運輸研究所	道路密度萃取
莫拉克颱風 新增崩塌地	2009	10m x 10m	農委會林務局 中央大學太空及遙測中心	模式驗證

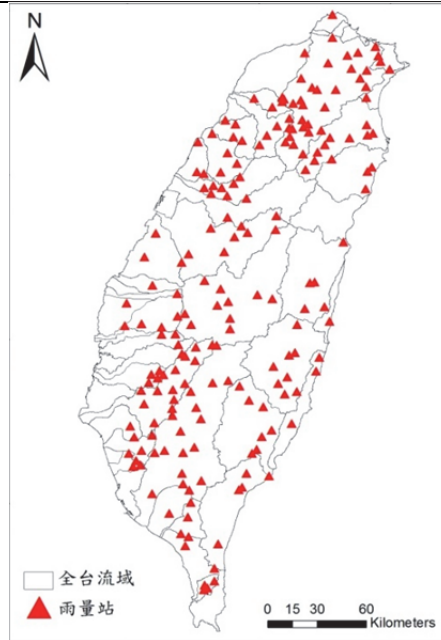


圖 1 雨量站之空間分布  
Fig. 1 Spatial distribution of the rainfall stations

### 3. 研究流程

蒐集全台 134 個具 25 年以上完整日雨量資料之雨量站，計算 200 年重現期距之最大一日降雨量，作為極端值降雨指標(Extreme Rainfall Index, ERI)，並以地理統計分析全台極端降雨指標之空間分布，經線性反向配置可得反極端降雨指標(inverted Extreme Rainfall Index, iERI)；接著利用道路圖資求得密度並利用空間離散度來修正道路密度之暴露度，進而求得道路開發指標(Road Development Index, RDI)；再選用近期乾濕兩季之全台衛星影像，進行輻射校正後萃取常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)，計算兩季 NDVI 之平均值，經正規化取得植生覆蓋指標(modify Normalized Difference Vegetation Index, mNDVI)，將其反

向配置即得植生綠劣指標(inverted Normalized Difference Vegetation Index, iNDVI)，利用上述三項環境指標套疊後可作脆弱度，並以莫拉克颱風之降雨重現期距作為危害度，脆弱度與危害度相乘即得風險度。

崩塌規模分析則使用上述之植生覆蓋指數，再利用數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)萃取地形濕度指標(Topographic Wetness Index, TWI)，將兩項指標相乘可得土壤深度指標(Soil Depth Index, SDI)，利用河川級序及河道曲率可求得河道向源侵蝕(Headward Erosion Index, HEI)與河道凹岸攻擊指標(River Concave Index, RCI)，另考量地質之順向坡(Dip Slope)區位，經四項指標套相加後可得崩塌規模潛勢，最後以 2009 年莫拉克颱風事件進行驗證，找出集水區潛在深層崩塌區位，俾供相關單位崩塌風險管理之參考(圖 2)。

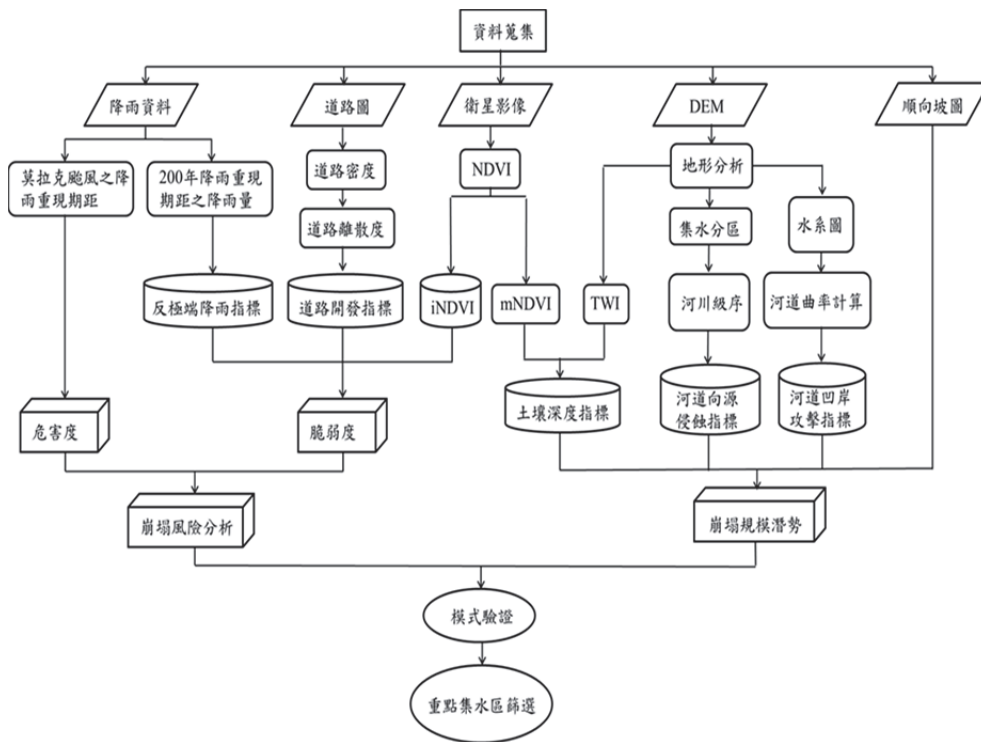


圖 2 研究流程

Fig. 2 Flow chart of the study

(1)崩塌風險分析

UNDRO(1979)針對災害風險提出一定量之計算模式，本研究亦採此計算模式，算式如下：

風險度(Risk) = 脆弱度(Vulnerability) × 危害度(Hazard)

脆弱度(Vulnerability)以反極端降雨指標、植生綠劣指標以及道路開發指標等三項指標正規化後相加而得，藉此探討崩塌「弱面」的部分，而危害度(Hazard)係指造成集水區崩塌之外力強度，以集水區降雨重現期距為指標，即降雨重現期距對於集水區崩塌之影響，將其兩者相乘後可得崩塌風險度。

#### A. 反極端降雨指標

易發生高強度降雨的地區，因坡面常受雨水沖蝕，因此對強降雨的忍受度較高，相較低忍受度之區域則發生崩塌機率較高，在降雨量相同情況下，高忍受度之區域降雨重現期距較低，本研究即利用此特性以歷年降雨資料推估 200 年重現期距之最大一日雨量，據此經線性反向配置為反極端降雨指標，代表最易達到極端降雨之潛勢。

#### (A)降雨紀錄補遺

降雨紀錄易因人為或機器故障而有缺漏，為填補雨量站中遺漏之雨量資料，採四象限法(four quadrants method)進行資料補遺，由氣象與地形特性可知，相鄰地區的降雨量應較為接近，因此四象限法即假設紀錄遺失之雨量值與已知紀錄之測站的距離平方成反比(圖 3)，其計算方式可表示如下(李光敦，2009)：

$$P_A = \sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i}{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2} \right) / \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2} \right)$$

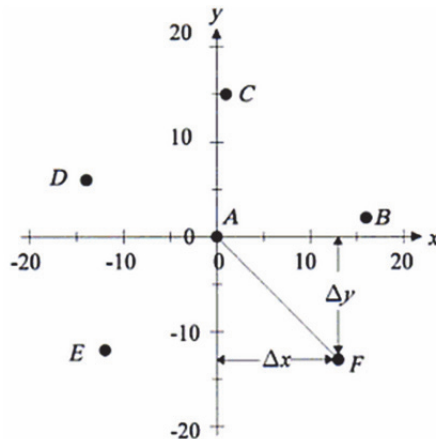


圖 3 四象限法  
Fig. 3 Four quadrants method

### (B)降雨重現期距推估

極端值第一類分布法為利用其分布之特性以分析某種水文量重現期距或發生機率之大小。將某一水文統計量假設為一適當分布函數，再由此函數分布及參數之平均值、標準差、差異量以及偏度等關係，推出某種大小水文量可能發生之頻率。極端值第一類分布，甘保氏自 1941 年以來常用為洪水、暴雨頻率分析，結果頗佳，故亦稱為甘保氏分布，其計算式如下(王如意等, 1979)：

$$R_T = \mu + K_T \sigma$$

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[ 0.5772 + \ln \left( \ln \frac{T}{T-1} \right) \right]$$

### (C)克利金法(Kriging)

克利金乃用於空間內插之地理統計學方法，是由區域化變數理論發展而成，將雨量視為空間的變數，具有最佳線性無偏推估之特性 (Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)；降雨在空間上具有不連續性的特性，而克利金的基本假設就是變數為任一位置之隨機變數 (許敏楓，1993)，故採用克利金法 (Kriging) 來推估降雨量。

### (D)指標正規化

以正規化方式求得各項萃取因子，當因子藉由正規化後，可將欲求指標之嚴重性或大小之趨勢由 0~1 表示，再依顏色漸層呈現於圖上，便可清楚顯示該指標之大小趨勢，其優點在於可將不同指標於正規化後，於同一標準上做分析比對，亦可將數個經正規化萃取後之趨勢圖加以套疊或運算，其計算式為：

$$\text{正規化} = \frac{(x - \text{最小值})}{(\text{最大值} - \text{最小值})}$$

## B. 植生綠劣指標

當 NDVI 值越低時表示植生覆蓋於率低，則該區域之裸露範圍亦較大，當降雨時逕流量亦隨之增加，坡面便易遭沖蝕而造成崩塌，且此區域經常受到降雨沖蝕，所以植生較難恢復，恐有擴大侵蝕面積及二次崩塌之趨勢。為利指標套疊方便，先將 NDVI 之正規化公式轉換為植生覆蓋指標(mNDVI)，再將 mNDVI 進行圖面變形校正後，再進行線性反向配置，即得植生綠劣指標(iNDVI)，其計算式為(林家弘，2015)：

$$iNDVI = 1 - mNDVI$$

### C. 道路開發指標

邊坡道路開發時，促使邊坡坡址不穩定而影響上方土體的穩定性，原為漫地流之地表逕流，受道路截斷而集中為渠道流，當極端降雨事件發生時，大量水流集中在重力加速度作用下，無法隨道路邊溝轉向，容易在道路的轉彎處溢出，並沖刷道路下邊坡，增加坡面發生崩塌之潛勢，因此本研究將道路密度作為脆弱度指標因子之一，其計算式為：

$$\text{道路密度} = \frac{\text{道路長度(m)}}{\text{集水區面積(m}^2\text{)}}$$

因道路開發若分散於整個集水分區則發生崩塌潛勢將會擴大分布；反之若集中於集水分區某區域，其將僅發生崩塌之潛勢僅局部區位，因此透過集水分區之道路空間離散度(Spatial Dispersion Index, SDI)來修正道路密度之暴露度，再利用道路坡度給予權重，三者相乘可得道路開發指標。

#### (2)危害度

危害度是指外力對環境造成災害之影響力，為驗證莫拉克颱風事件對台灣所造成的崩塌，選取其事件期間降雨量推估降雨重現期距，作為崩塌危害度分布。

#### (3)崩塌規模潛勢分析

崩塌規模大小決定於邊坡之土砂量，坡度越平緩，土壤深度越容易累積，崩塌量體較大；植生覆蓋越好的區域，雖具有保土蓄水功能，不易發生土壤沖蝕及

崩塌，但亦表示土層厚度越深，長年累積之土砂一旦發生崩塌，則易產生零存整付現象(林昭遠等，2006)，因此以土壤深度指標推估土砂量體的多寡。另因河道向源侵蝕、凹岸淘刷以及順向坡區位的特性，為自然環境條件影響崩塌規模的重要因素，故將其納入分析考量。

### A. 土壤深度指標

崩塌可視為能量釋放之現象，植生生育良好之邊坡，若長期未發生崩壞，通常土壤發育較深，一旦邊坡遭受破壞，將可能造成大規模之崩塌，因此本研究利用此概念萃取 NDVI 乾濕兩季之平均值較大之區位，另外，地形濕度指數越大之區位水流容易匯集，而土砂也越易累積，因此可結合植生指標間接推估出坡地土層深厚之區位(圖 4)，為崩塌規模潛勢之指標。

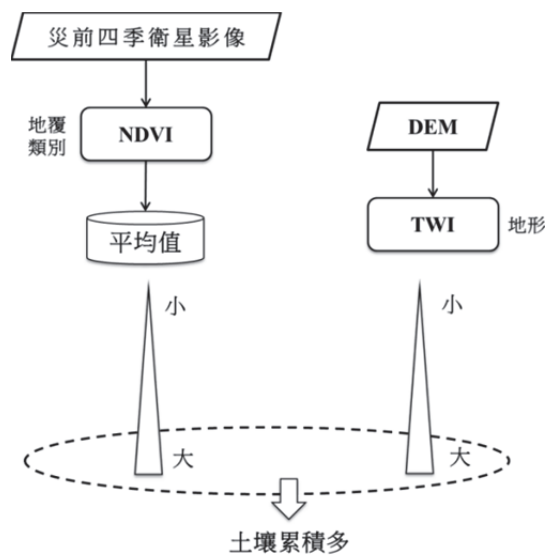


圖 4 土壤深度指標之概念示意圖  
Fig. 4 A conceptual diagram of soil depth index

#### (A)常態化差異植生指標

Rouse et al. (1973)首次提出 NDVI 的概念，植被分佈之區位具有較高的近紅外光段反射與較低的紅光段反射，Elvidge and Chen (1995)定義 NDVI 為近紅外光波段與紅光段的差值除以兩者之和，NDVI 之數值分佈於-1 至 1 之間，Deering (1978)指出當 NDVI 數值愈大，即愈趨近於 1 時，表示該區域植生覆蓋情形愈為良好，式

中 NIR 為近紅外光段，R 為紅光段，其計算式為：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

### (B)地形濕度指標

又稱為濕度指數(wetness index)、地形指數(topographic index)。此指數表示地形對土壤濕度的控制，其概念為坡度陡則水迅速向下流動，因此入滲量會較低，土壤中的含水量亦可能較低；而於低平的地方，由於坡度平緩，水留在地表面較長時間而逐漸入滲，因此土壤中的含水量可能會較高(穆婧等，2013)，式中  $A_s$  為特定集水區面積，本研究以各網格上游匯集面積表示， $\theta$  為坡度，公式如下(Wilson and Gallant, 2000)：

$$\omega = \ln \left[ \frac{A_s}{\tan \theta} \right]$$

### B. 河道向源侵蝕指標

Strahler (1952)將由河川源頭起源之河川視為 1 級序河川，二條 1 級序河川相交成為 2 級序河川，而  $i$  級序河川與  $j$  級序河川相匯時，若  $i$  等於  $j$  則河川級序數為  $i+1$ ，若  $i$  小於  $j$ ，則河川級序數為  $j$  (圖 5)。河道因地形變化使侵蝕作用的基準面下降，而河川下切作用，使河道逐漸向上游延伸，即為向源侵蝕，當侵蝕作用對源頭坡腳淘刷過大，坡面亦將產生向源侵蝕，依據水土保持技術規範第六十四條 (水土保持局，2012) 野溪係指河川中、上游集水區面積五千公頃以下自然溪谷，將集水區分析單元門檻值設定為 1000 公頃，作為野溪集水區之管理分區(圖 6)。

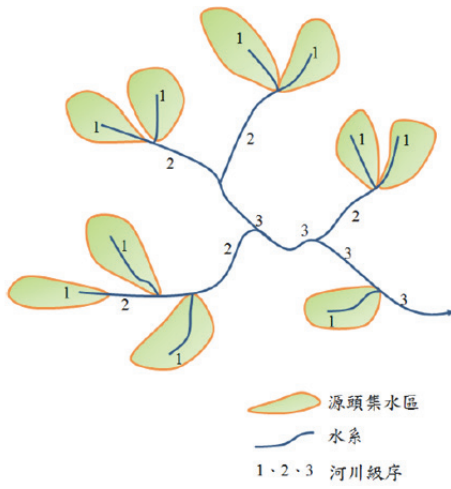


圖 5 源頭集水區劃定之示意圖  
Fig. 5 Illustration of headwater watershed delineation

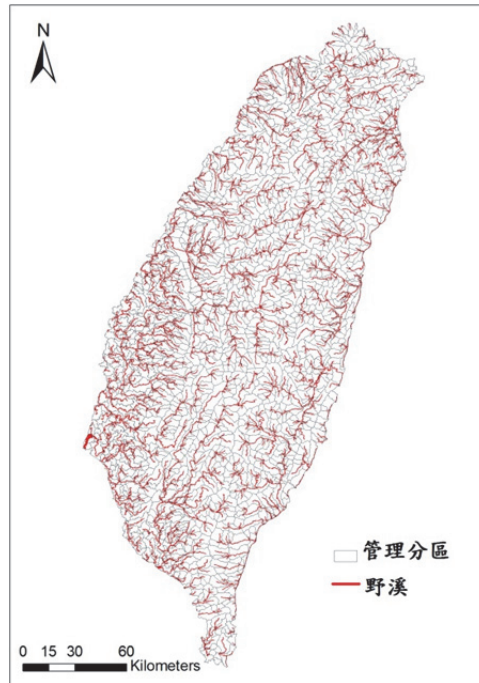


圖 6 野溪管理分區之空間分布  
Fig. 6 Spatial distribution of creek management units

### C. 河道凹岸攻擊指標

河道轉彎處常受水流直接衝擊，因離心力及重力的加乘作用，形成橫向環流，其與河道縱向主流運動的加疊後，於河道轉彎岸外側產生螺旋流狀態，使水流速度變大，加劇泥砂的運移，易對河岸造成沖刷及基腳淘刷。河道凹岸攻擊指標計算方式為利用河道沿線控制點之切線角度變化  $\theta$  (圖 7)，作為河道凹岸攻擊指標，凹岸彎曲的角度越大，代表河道對基腳沖蝕也較劇烈，故  $\theta$  角為河道凹岸攻擊強弱之關鍵指標，愈大則表示凹岸攻擊力量越強；反之則越弱， $\theta$  計算公式如下：

$$\theta = \frac{\vec{T}_1 \cdot \vec{T}_2}{|\vec{T}_1| |\vec{T}_2|}$$

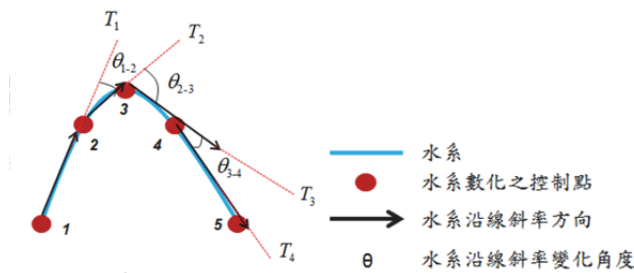


圖 7 河道凹岸指標計算示意圖

Fig. 7 Illustration of river concave index extracted

#### D. 順向坡指標

順向坡指坡面與層面之走向大致平行（或兩面走向之交角在二十度以內），且坡面傾向與層面傾向一致者。因為開發坡角時，岩層失去支撐，破壞了平衡，使坡度加大，地層內若有頁岩或泥岩層，容易因水滲入而使地層沿頁岩層滑動，加上如有降雨、颱風、地震等過後，使兩個地層之間的磨擦力產生變化，導致原本並不會滑動的地層有機會產生滑動，就容易形成崩塌等災害。

### III、結果與討論

#### 1. 崩塌風險分析結果

##### (1) 反極端降雨指標

以分析推估兩百年重現期距之一日累積降雨量資料(圖 8)作為反極端降雨指標分析，將降雨量資料分布於集水區範圍內再經正規化後之圖資顯示如圖 9，集水區反極端降雨分布由山區往平地有遞增的情形。其指標值越大，表示對於極端降雨事件的忍受力較低，有較高潛勢發生崩塌。

##### (2) 植生綠劣指標

植生覆蓋指標經反向配置得植生綠劣指標，其值越大表示植生覆蓋率越低，坡面無植生保護所以脆弱度亦越大，結果顯示除主河道常流水段及平原地區植生較差外，其餘屬林班地範圍之植生覆蓋較為平均(圖 10)。

##### (3) 道路開發指標

因道路密度屬人為開發，需考慮暴露度問題，應與空間離散度相乘進行修正，所得道路開發指標，其指標越大，崩塌脆弱度亦越大，反之則越小，結果顯示與空間離散度較為相關(圖 11)。

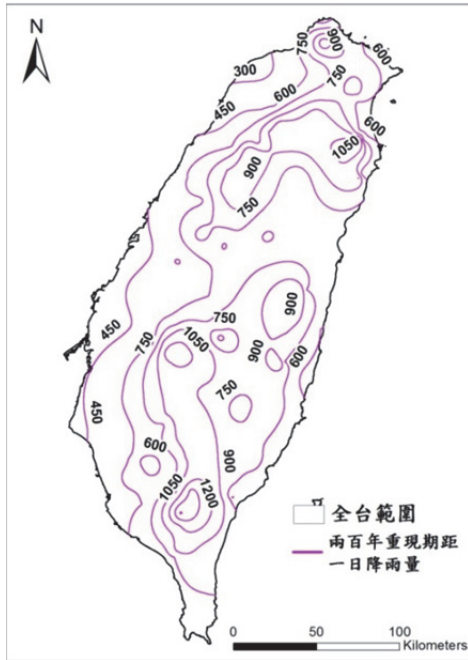


圖 8 .200 年重現期距之最大日  
雨量空間分布  
Fig.8 Spatial distribution of maximum  
daily rainfall equivalent to 200-year  
return period

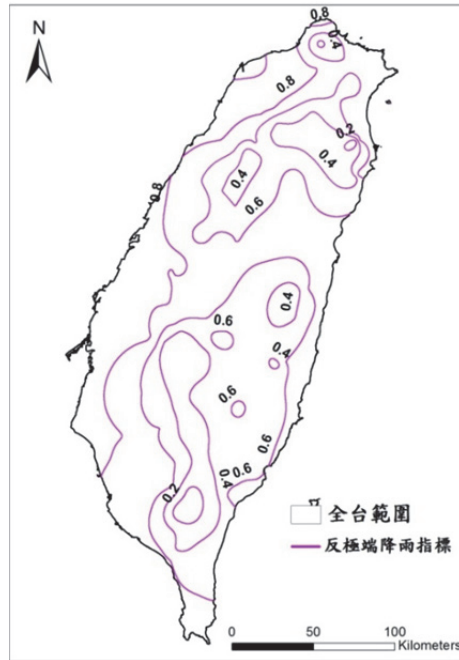


圖 9 反極端降雨指標之空間分布  
Fig.9 Spatial distribution of inverted  
extreme rainfall index

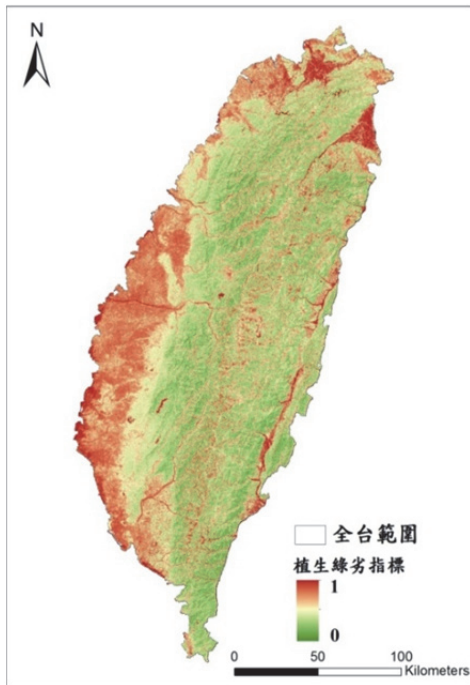


圖 10 植生綠劣指標之空間分布  
Fig. 10 Spatial distribution of  
inverted normalized difference  
vegetation index



圖 11 道路開發指標之空間分布  
Fig. 11 Spatial distribution of road  
development index

#### (4)危害度分析結果

將重現期距分布資料正規化後來呈現危害度的空間分布(圖 12)，結果顯示莫拉克颱風事件的影響以台南、高屏山區為大，因此其危害度較大，該地區越容易受外力而發生崩塌。

將反極端降雨指標、植生綠劣指標及道路開發指標相加套疊得到崩塌的脆弱度，全台之崩塌脆弱度空間分布如(圖 13)，其值越高表示抵抗外力之能力越低，以反極端降雨指標影響最甚，其次為 iNDVI，以平原及沿海地區，最為脆弱。

由崩塌風險度分析結果(圖 14)，以嘉南山區、大高雄山區及屏東旭海、滿州地區風險度較為大，表示當莫拉克颱風事件時發生崩塌地機率越大，且結果與莫拉克颱風事件新增之崩塌地相符(圖 15)，亦多集中在上述區位。

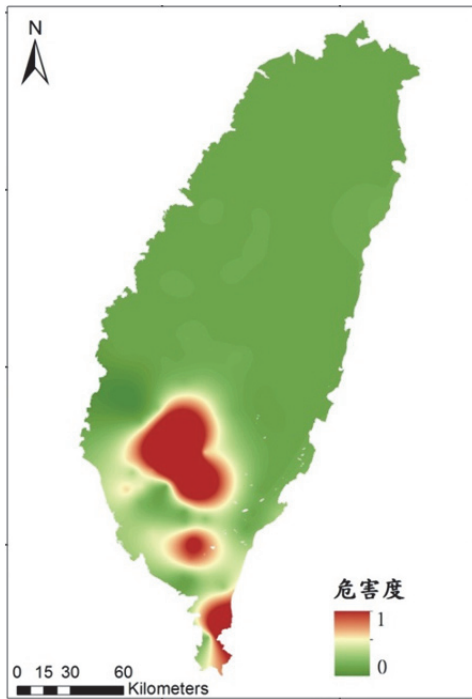


圖 12 莫拉克颱風之危害度分布  
Fig. 12 Hazard degree distribution  
during Typhoon Morakot



圖 13 莫拉克災前之脆弱度分布  
Fig. 13 Pre-disaster vulnerability of  
Typhoon Morakot

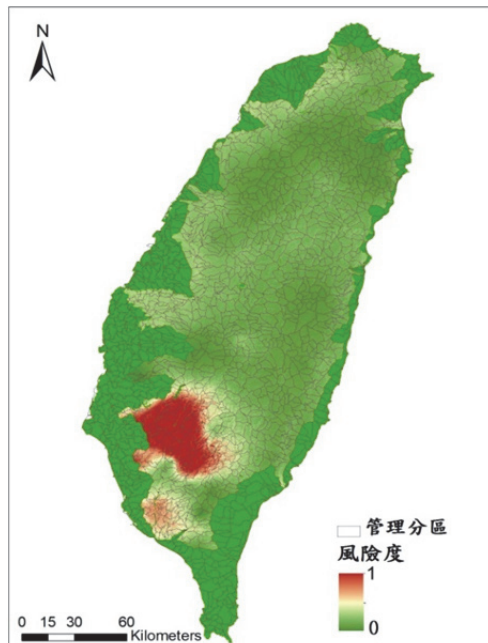


圖 14 莫拉克颱風致崩塌之風險度  
Fig. 14 Risk of landslide induced by Typhoon Morakot

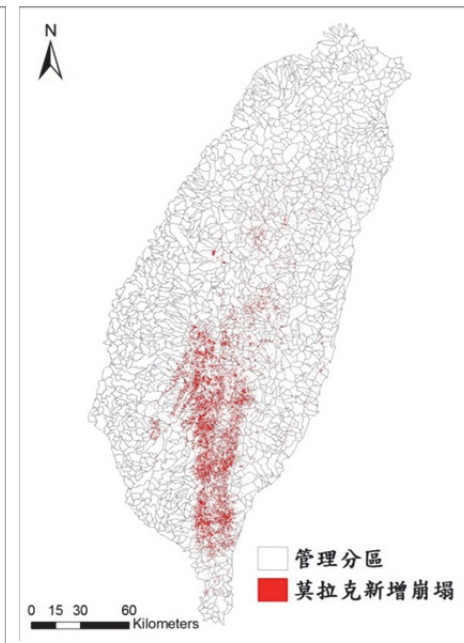


圖 15 莫拉克颱風新增崩塌地之分布  
Fig. 15 Newborn landslides of Typhoon Morakot

## 2. 崩塌規模潛勢分析結果

### (1) 土壤深度指標

mNDVI 顯示平原地區值較低，推測可能與都市開發建地有關，使不透水面增加(圖 16)，TWI 顯示平原地區值較高，係網格之集水區較大且坡度平緩所致，主要是沖積層之區位(圖 17)，以 mNDVI 修正 TWI 可扣除非植生地之影響，能動態萃取會造成深層崩塌之潛在區位(圖 18)。

### (2) 向源侵蝕指標

集水區經萃取後之河川級序最大為 4 級，由向源侵蝕指標分布可知，主河道主要為 2、3 級河川級序，河道向源侵蝕能力較低；而紅色區域即為河川級序 1 之集水區源頭區位，為向源侵蝕主要分布區位(圖 19)，此區之土壤平時因邊坡植生覆蓋良好而不易流失，野溪向源侵蝕會導致大規模崩塌。

### (3) 河道凹岸攻擊指標

集水區河道凹岸指標分布經正規化後如圖 20，切線斜率越大處代表凹岸攻擊愈嚴強，若河道越蜿蜒，凹岸彎曲角度越大、分布密集、數量多，攻擊能力亦較

強；反之河道平緩、分布鬆散、數量較少、河道切線角度變化較小，凹岸沖蝕邊坡基腳能力較弱。

#### (4)順向坡指標

順向坡常為砂、頁岩互層易造成差異入滲，其空間分布如圖 21，順向坡區位若坡腳被剪斷，易造成大規模土砂災害。

將上述影響邊坡崩塌規模之指標相加正規化後可得崩塌規模潛勢之空間分布(圖 22)，集水區崩塌規模潛勢愈高之區位，若發生崩塌其產生之土方量甚鉅，宜有適當之防減災管理與維護。

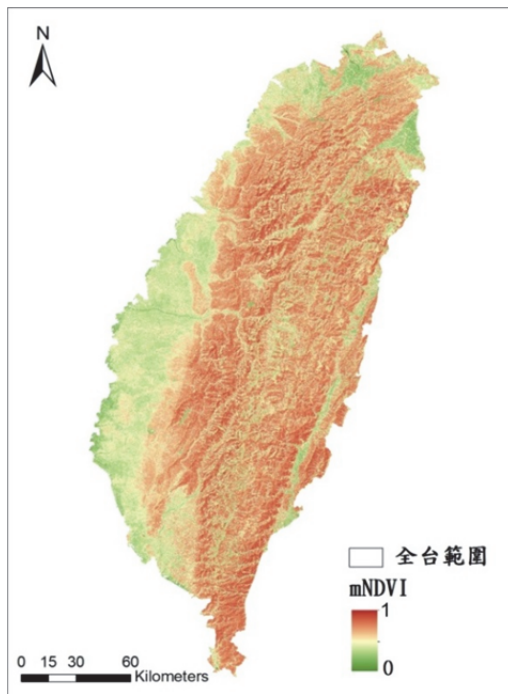


圖 16 mNDVI 之空間分布  
Fig. 16 Spatial distribution of mNDVI

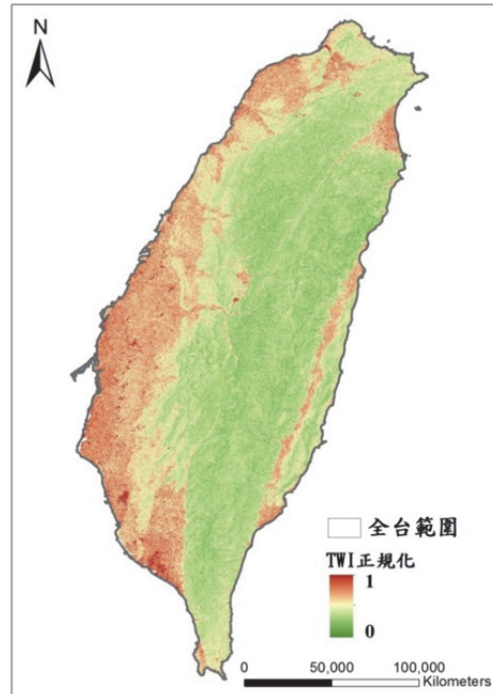


圖 17 地形濕度指標之空間分布  
Fig. 17 Spatial distribution of TWI

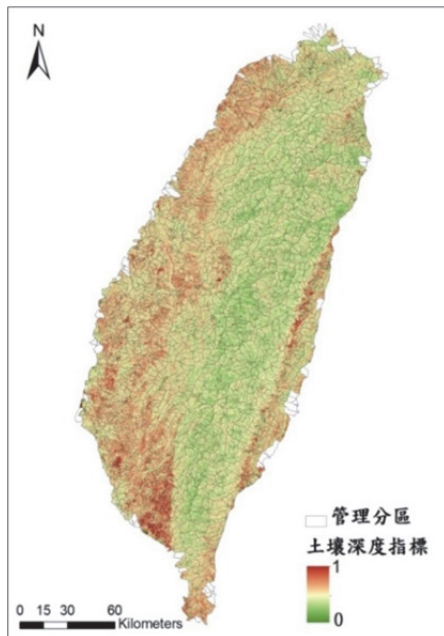


圖 18 土壤深度指標之空間分布  
Fig. 18 Spatial distribution of soil depth index

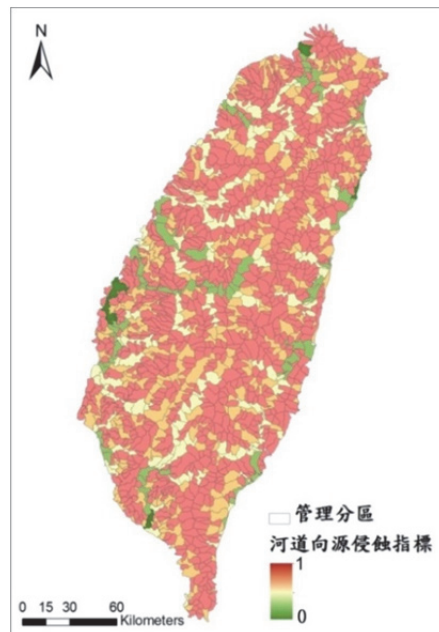


圖 19 向源侵蝕指標之空間分布  
Fig. 19 Spatial distribution of HEI



圖 20 河道凹岸攻擊指標之空間分布  
Fig. 20 Spatial distribution of RCI

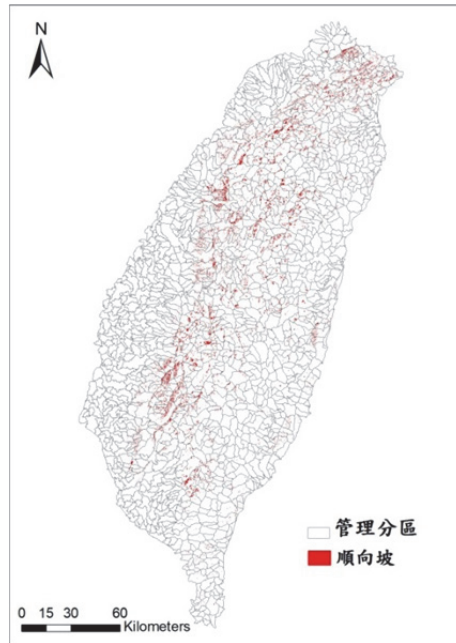


圖 21 順向坡之空間分布  
Fig. 21 Spatial distribution of dip slope



圖 22 崩塌規模潛勢之空間分布

Fig. 22 Spatial distribution of landslide scale potential

### 3. 潛在深層崩塌重點集水區之篩選

以水土保持局提供之子集水區為分析單元，計算集水區風險度及崩塌規模潛勢，據此篩選易發生深層崩塌之重點集水區，表 4 顯示風險度及崩塌規模潛勢皆高者為南化水庫子集水區，為極端事件發生深層崩塌之重點區位，此區若發生深層崩塌易影響水庫水質並造成嚴重淤積，宜加以注意。

表 4 風險及崩塌規模前五高之子集水區

Table 4 Ranking of top 5 landslide risk and scale sub-watersheds

子集水區	風險排序	子集水區	崩塌規模排序
鏡面水庫	1	南化水庫	1
南化水庫	2	基隆河	2
九棚沿海	3	鯉魚潭水庫	3
曾文溪	4	基隆河北岸	4
牡丹水庫	5	雙溪	5

## IV、結論

本研究以風險概念整合植生、地形、地質、道路及降雨等環境指標，建置集水區崩塌風險及規模潛勢評估系統。系統特色為善用既有之大數據資料，以極端降雨事件，就能簡易經濟的篩選出具高風險之潛在深層崩塌區位，能提供集水區崩塌相關治理或管理機關參考，俾降低極端事件對保全對象的災害。

## V、參考文獻

- [1] 水土保持局(2012)，「水土保持技術規範」，行政院農業委員會水土保持局，台灣，第 64 條。
- [2] 王如意、易任(1979)「應用水文學」，茂昌圖書有限公司，台灣，349。
- [3] 李光敦(2002)，「水文學」，五南圖書出版有限公司，台灣，59-60。
- [4] 林昭遠、林家榮、鄭旭涵、劉昌文(2006)，「石門水庫集水區艾利颱風土砂災因之探討」，中華水土保持學報，37(4)，327-336。
- [5] 林家弘(2015)，「集水區崩塌規模推估模式建置之研究」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- [6] 柳中明(2008)，「全球氣候變遷之衝擊與調適策略探討」，科技發展政策報導，4，1-18。
- [7] 高嘉隆(2003)，「台十四省道 31~75K 沿線邊坡山崩潛感分析」，朝陽科技大學營建工程研究所碩士論文。
- [8] 張郁嘉(2012)，「山崩潛勢分析-以荖濃溪集水區為例」，逢甲大學都是計畫與空間資訊學系碩士論文。
- [9] 許敏楓(1993)，「雨量空間變異及站網設計之研究」，國立臺灣大學農業工程研究所碩士論文。
- [10] 陳昆廷、蔡光榮、王宣惠、林欽川(2008)，多變量不安定指數分析法應用於屏東山區道路邊坡崩塌潛感評估模式之建置研究，中興工程季刊，100，65-72。
- [11] 游繁結(2007)，「水土保持名詞詞彙」，行政院農業委員會水土保持局，台灣，69。
- [12] 黃士昌(1998)，「高雄旗山與楠梓地區公路邊坡之特性調查與崩塌破壞潛感分析」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。

- [13] 穆婧、林昭遠(2013)，「集水區崩塌地環境指標分析與崩塌潛感推估」，中華水土保持學報，44(2)，121-130。
- [14] 鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲(2009)，「台灣區域降雨趨勢分析」，農業工程學報，55(4)，1-18。
- [15] Dai, F.C. and C.F. Lee (2002), "Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS", *Journal of Geomorphology*, Vol.42, pp.213-228.
- [16] Deering, D.W. (1978). Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors, Ph. D. Dissertation, Texas A & M University, College Station, TX, 338
- [17] Elvidge, C.D. and Chen Z. (1995). "Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices", *Remote sensing of environment*, 54, 38-48.
- [18] Kelarestaghi, A. (2003), "Investigation of Effective Factors on Landslides Occurrence and Landslide Hazard Zonation", *Conference of Map Asia 2003*.
- [19] Kyselý and Beranová (2009). "Climate-change effects on extreme precipitation in central Europe: uncertainties of scenarios based on regional climate model" *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 361-374.
- [20] Li, Y., W. Cai, and E. P. Cambell (2005). "Statistical modeling of extreme rainfall in southwest western Australia." *J. Climate*, 18, 852-863.
- [21] Rouse, J.W., Jr. R.H. Haas, J.A. Schell and .W. Deering. (1973) "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep." RSC 1978-1. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station.
- [22] Strahler, A. N. (1952). "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography." *Geol. Soc. America Bull.* 63, 1117-1142.
- [23] United Nations Disaster Relief Organization (1979). "Disaster prevention and mitigation," *Economic aspects*. New York, United Nations.
- [24] Wilson, J. P., and J. C. Gallant. (2000). "Terrain Analysis, Principles and Applications." JohnWiley & Sons. Inc. 479.

## 試驗林集水區之崩塌潛勢評估模式應用和風險管理

黃瓊琤<sup>1</sup>、謝漢欽<sup>2</sup>

**【摘要】**本研究計畫的目的，在試驗林集水區坡面，應用前人之崩塌潛勢評估模式，擬訂崩塌潛勢危險度分類或分級，給予適當之數值指標，做為衡量潛在危險性之基準。之後再根據研究區域降雨特性和地震致災程度，以不同降雨強度和地震等級模擬崩塌潛勢之變異，配合航遙測影像和相關資訊，進行崩塌動態追蹤，提出風險管理策略。經第一年之模式建立和第二年上半年之影響因子及權重演算，發現以林道沿線較小區域和地形判釋法之配合運作，無法精確呈現當地崩塌潛勢現狀和趨勢，證明最便利和基本的專家分級評分法，已不能和更精密和大數據量的電腦模式相比較。因此於下半年改以不安定指數法進分析方法準確率的比較，選取的因子經由電腦計算的權重結果，分別為坡度(0.174)、高程(0.173)、坡向(0.138)、NDVI(0.240)、水系距(0.150)、道路距(0.125)等六項潛感因子，利用莫拉克風災前後地崩塌地做一比較，統計分析給予因子評分的方式，結合地理資訊系統，將問題概念化後，得到class1的準確率為96.83%，class2的準確率為37.99%。其第二級精準度較差的原因，主要是研究區域太小，導致地質因子無法成為影響因素。此外風險管理策略之擬訂，由於921地震和莫拉克災害衝擊力甚巨，導致研究期間內所觀測之地震和降雨災害資料，無法形成明確之致災條件，因此其實際降雨和地震級距之風險管理策略，並不具實用之義意，僅作若干定性之描述。

**【關鍵詞】**崩塌潛勢、不安定指數法、風險管理。

### AN APPLICATION OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY EVALUATING MODEL AND RISK MANAGEMENT OF EXPERIMENTAL WATERSHED

Chiung-Piau Huang<sup>1</sup>、Han-Ching Hsieh<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組研究員，通訊作者。電子郵件: tfrihpc@serv.tfri.gov.tw  
Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of  
Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: tfrihpc@serv.tfri.gov.tw

<sup>2</sup>行政院農業委員會林業試驗所森林經營組研究員。

Senior Scientist, Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of  
Agriculture, Executive Yuan.

**【Abstract】** The purpose of this study is trying to apply evaluating model of landslide susceptibility for predicting the trend of sliding possibility in a slopeland of experimental watershed. And then a solid treatment of risk management should be proposed to fit the needs for the public by accompanying with rainfall and earthquake calculation. Through the processes of investigating the landslides basic data and analyzing several evaluating models. Some useful criteria and its weights collected from concerning research literatures were to be reassessed comparing with the real situations of study area, and a new set of parameters and weighting factors would be established for using in this specific region. If there is a very closed relationship between simulating model results and real field conditions, we could apply the model as a tool of predicting landslide potential and suggest a series of risk management proposals for practice uses. Due to the results by applying Geomorphologic Interpretation and Experts Grading method, we find that methodology cannot be used in a small region. The additional alternative of this research is to use the technology of the geographical information system (GIS) and instability index method to set up one quantitative method to estimate hillside fields. Satellite images and the Digital Elevation Model (DEM) can extract six major factors, such as elevation, slope, aspect, NDVI, distance to rivers and distance to roads. A model is proposed to calculate landslide susceptibility, which expresses as:  $D_{total}=D1^{0.174} \times D2^{0.138} \times D3^{0.240} \times D4^{0.173} \times D5^{0.125} \times D6^{0.150}$ . Accuracy of class 1 is 96.83% , and class 2 is 37.99%. This has shown that the factor of geology has played a very important role in evaluating susceptibility. Due to the insufficiency of data of rainfall and earthquake during the whole research period, the tragedies for risk management are only focusing on qualitative statements to fit the needs of practical situation in Shan-Ping forest road.

**【Key words】** susceptibility、instability index method、risk management.

## I、前言

近年來國際間對降雨引致坡地災害之關注與日俱增，政府相關單位亦積極投入進行許多研究，對於在一地形單元發生崩塌事件和程度，以及崩塌可能發生的地點和機率，都投以相當的關注和研究。前者是有關於崩塌發生事件(landslide

incidence)的問題，牽涉到的是災害復建工程對策及預算編列、成本效益的考量；後者則是有關崩塌潛勢(landslide susceptibility，崩塌潛感)的問題，牽涉到的是評估崩塌潛勢方法應用和精確性，土地使用規劃，防災策略和避險措施擬定的通盤檢討，而且此一項目乃是採取預先防範的做法，事前避開可能產生危害的狀況和地區，達到預警效果，因此更是值得深入探討。為能在所管轄小範圍內和短期間內獲致期合用的崩塌潛勢評估模式，應用於特定的研究區域。針對區域特性和已發生崩塌的參數，選擇並修正適宜的評估模式加以適當修正。配合後續航遙測影像監測，及早進行風險管理，達到降低天然災害造成之損失風險，具體達到防災、救災、減災與預警之目的。

## II、研究材料和方法

### (I)研究區域--扇平林道概況

扇平林道是林業試驗所六龜研究中心最重要的道路之一，總長約 8.0 公里，寬度 6 公尺，全線柏油鋪面，為連絡外界至扇平工作站之幹道。曾經於 2005 年 7 月 19 日至 20 日海棠颱風侵襲台灣，為本區域帶來超過 1600mm 的雨量，導致溪水暴漲、邊坡土石崩落、路基流失，且於 2K+684 處產生大崩塌。2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風來襲，本所六龜研究中心試驗林位處重災區，林地裡大小崩塌不計其數，林道路基柔腸寸斷。扇平林道邊坡調查包括衛星照片動態地形監測、植生調查崩塌地處理對策和復育工法之研擬。經基本調查，林道沿線崩塌集中於溪流右岸，除了 2.8K 和 5.5K 兩處大型崩落類型外，判釋上至少有 5 處有潛在滑動趨勢，若遇豪大雨，滑落機率相當高；至 2011 年 11 月的現況，林道相對穩定，主要是若干復建工程陸續完成，且汛期間未遭遇強颱侵襲，未有新災情發生，在舊有崩塌地和沖蝕溝表面，植生緩慢恢復中。整體而言，扇平林道仍處於極為不穩定，尤其是坡面上堆置的鬆土方，以及破碎的地層構造，都隱藏著潛在的危險。

本區的雨量非常充沛，年平均雨量估計在 3,950mm 之間，最大年雨量超過 6,000mm。季節性的分布非常明顯，雨季(5 月至 10 月)的雨量約佔年雨量的 80%，溪流量的分布更為明顯，豐水季節(5 月至 10 月)的溪流量佔年流量的 90%。此一條件再加上地質鬆軟，土層淺薄，地勢陡峻，所以自然沖蝕劇烈。試驗林之岩層地質乃屬第三紀亞變質岩之新高層與廬山層。廬山層自北邊的桃源鄉之復興及梅蘭等地區，順著濃溪東岸的山地，南延伸至茂林鄉之烏山及歡喜山等山地。本層大

部分以黑色到深灰色的硬頁岩、板岩及千枚岩和深灰色的硬砂岩所組成，雖本層含有零星散布的泥灰岩團塊；然在本區內則未有泥灰岩的發現。其土壤組成以較低海拔的林地而言，在較平緩的山頂，稜線以黃棕色黃壤為主，土層 40 公分左右；而在較陡峭之山腰或山腹則以崩積作用化育而成的崩積土為主，土層厚約 50 公分（林試所 1992）。因此，山腰或山腹常因地勢陡峭，加上不良土壤結構，經常發生嚴重的沖蝕作用及崩塌情形。研究的圖幅面積為 1446 公頃，網格大小為 5m\*5m。

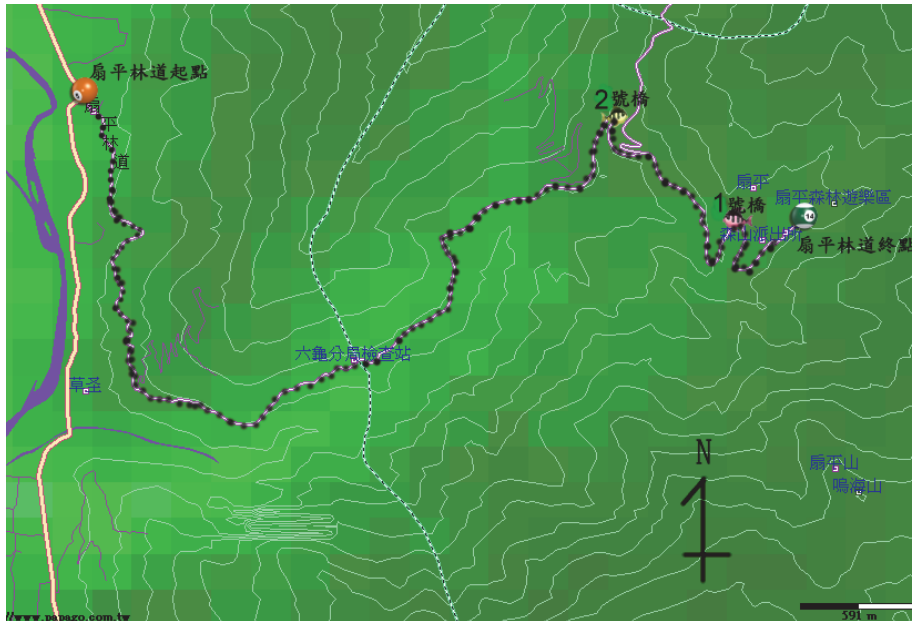
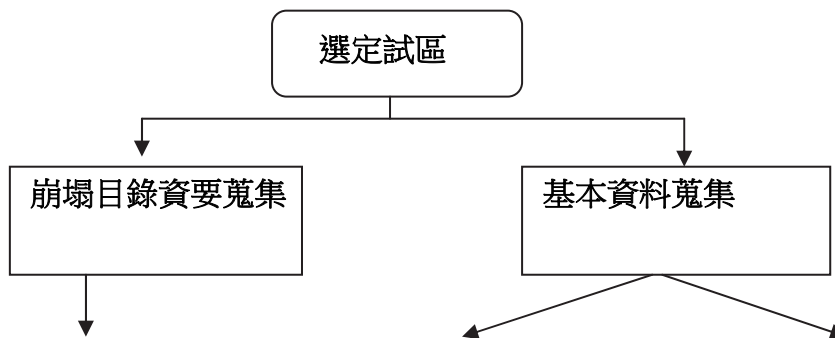


圖 1 扇平林道之路線

Fig. 1 Path location of Shan-ping forest road

## (II)研究工作項目和流程



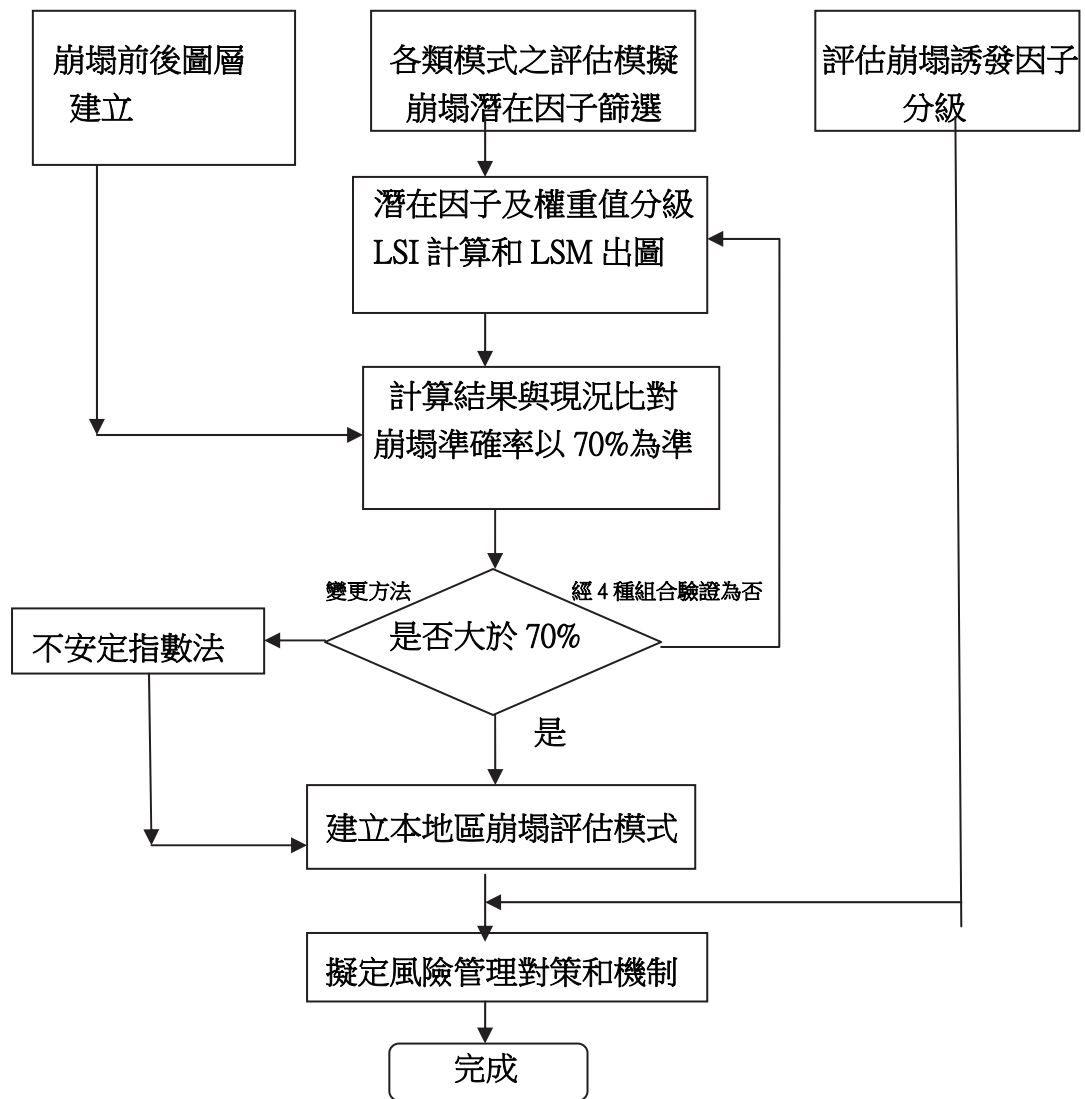


圖 2 研究流程  
Fig.2 Study flow chart

### (III) 土砂潛勢災害因子及其權重估算

經過廣泛參考國內外學者常用之崩塌潛勢災害因子和評估模式，以及對扇平林道崩塌現狀之多年調查，據以決定本地區影響崩塌潛勢有效潛在因子包含坡度、坡向、NDVI、高程、道路距離、河系距離等六項因子；有效誘發因子包含降雨量和地震二項因子。其各項因子之分級標準初步分別敘述如下：

1. 坡度因子：依據水土保持手冊(2006) 所訂定之坡度分級，將區域內之坡度分析後劃分為；一級坡( ≤ 5%)、二級坡(6~15%)、三級坡(16~30%) 及四級坡以上( > 30%) 等 4 級，作為土砂潛勢災害風險評估模式之考量因子。

2. 平均坡向因子：水土保持技術規範(2003) 將 DEM 所計算出之坡向  $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ，轉換成八方位角(6)，分別為北向(N)、東北向(NE)、東向(E)、東南向(SE)、南向(S)、西南向(SW)、西向(W) 及西北向(NW) 等方位。
3. NDVI 因子：標準化植生指數(NDVI) 為最早根據波段比所發展出之植生指數，其使用層面較廣泛，且較易被一般使用者所接受，本研究將利用植生參數之標準化植生指數進行萃取，一班 NDVI 值分佈介於-1~+1 間，並依組內區別效力程度作為分析考量。
4. 高程因子：經由區域內之數位高程資料(40 x 40m)自 350—700 公尺，初步大概區別分級，為四個分級； $350 < El \leq 450m$ 、 $450 < El \leq 550m$ 、 $550 < El \leq 650m$  及  $El > 650m$  等分析之。
5. 道路距離：以道路兩旁之水平距離為 0--20、20--40、40--60、>60 公尺等四個等級劃分之。
6. 河系距離：以長年河系之等級，距離河岸水平距離 0--20、20--50、>50 公尺等三個等級劃分之。
7. 降雨量因子、地震因子屬後續誘發因子，經試算和蒐集進一步資料後再行分級。

本研究所採用的建立評估模式方法，應屬於最基礎的地形判釋法結合專家評分法，因為是在小範圍和小面積的條件下，若能不必考慮太多的因子和進行太繁複的資料調查，若能在最短的時間內獲致一定可信賴的精確度，使得後續救災復建工作快速達成，乃是最主要的目標。各致災因子的級值和權種值之決定，乃是參酌國內外相關研究已經得到的數據，擷取其相近的眾數各兩組，搭配成四組參數值，輸入電腦的套疊模式中，計算結果之 LSI 值用以區分成不同之崩塌潛感等級。模式中計算 LSI 的公式如下列計算式：

$$LSI = (P_{slo})^{w1} (P_{asp})^{w2} (P_{riv})^{w3} (P_{rod})^{w4} (P_{elv})^{w5} (P_{ndvi})^{w6}$$

LSI：崩塌潛勢指數

$P_{slo}$ ：坡度因子級值     $W1$ ：權重值     $P_{asp}$ ：坡向因子級值     $W2$ ：權重值

$P_{riv}$ ：河系距離級值     $W3$ ：權重值     $P_{rod}$ ：道路距離級值     $W4$ ：權重值

$P_{elv}$ ：高程因子級值     $W5$ ：權重值     $P_{ndvi}$ ：NDVI 因子級值     $W6$ ：權重值

#### (IV) 不安定指數法之延續

為避免傳統上是由專家依經驗來判斷，所造成大量的人力和物力需求，且以人為方式給予權重或評分則較為主觀，而且其結果恐怕不夠精確。應用地理資訊系統(GIS)之技術，配合不安定指數法之概念，建立一套評估區域性坡地安定之計量分析方法。透過GIS 進行危險潛感地圖製作，針對已發生災害事件的空間特徵，利用不安定指數法推論以往造成崩塌災害發生的環境變數之關鍵因子進行分析。對崩塌範圍進行統計分析及權重計算前，深入探討崩塌地崩壞之主因，找出造成各類崩塌之主要崩塌類型。再針對主要崩塌類型，根據前後期整體研究之結果，驗證崩塌因子權重與主要崩塌類型相關性，以少數關鍵崩塌影響因子，評定出崩塌潛感區之等級及空間分佈情況。配合數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，採用5mX5m之網格圖，利用地理資訊系統(GIS)將各因子資料正歸化並相互套疊，以ArcGIS 10.0版路網分析模組進行分析討論。選取的因子分別為坡度、高程、坡向、NDVI、河系距離、道路距離等六項潛感因子，利用統計分析給予因子評分的方式，結合地理資訊系統，將問題概念化後，針對不同的情況，建置適宜的製圖模式。

### III、結果與討論

(I)經過廣泛參考國內外學者常用之崩塌潛勢災害因子和評估模式，以及對扇平林道崩塌現狀之多年調查，據以決定本地區影響崩塌潛勢有效潛在因子包含坡度、坡向、NDVI、高程、道路距離、河系距離等六項因子；有效誘發因子包含降雨量和地震二項因子。參考的成果文獻列舉數端如下：

- 1.林芬玲、林家榮、林昭遠(2008)以南投水里溪為研究區域。
- 2.穆婧、林昭遠(2013)選用海拔、坡度、坡向，地形濕潤指數、地形粗糙度、坡度粗糙度、平均高程差值、平均高程離差5 項地形指標和NDVI、SAVI 和MSAVI 植生指標，共計11項環境指標用於主成份分析。
- 3.根據Ranjan Kumar Dahal(2009)以羅吉斯回歸(logistic regression)篩選出11項種成分因素，包括(1)坡度(2)坡向(3)與水系距離(4)濕潤指數(5)輸砂指數(6)起伏量(7)與道路距離(8)坡型(9)地質(10)植生覆蓋(11)年平均雨量，作為評估準據。
- 4.何明錦等(2007)以共變異矩陣分析，再依循混亂矩陣理論之區別函數法則，先將所列之24小時累積雨量及地震加速度等9個多變量因子。

- 5.吳俊鉉、陳樹群(2005)以專家評分法配合Satty(1970)多評準決策層級分析法，採用桃芝颱風於嚴重影響區域內之9149處崩塌案例為依據。
- 6.陳凱榮(2000)各項山崩潛感因子之變異係數為權重比較值，以不安定指數法求出災前後各因子之權重。
- 7.陳怡睿等(2010)以類神經網路和不安定指數分析法，對六龜寶來地區之崩塌潛勢等 級研究，獲致評估模式。

整合成本研究各致災因子之分級標準初步如表二之項目：1. 坡度因子。 2. 平均坡向因子。3. NDVI因子。4.高程因子。5.道路距離。6.河系距離。7.降雨量因子、地震因子和崩塌因子屬後續誘發因子，經蒐集近一步資料後再行分級。

(II)經蒐集國內外文獻，並整理出山崩潛感因子之分級和權重值：

表1 山崩潛感因子之分級和權重值

Table 1 The values of different classes and weights of landslide factors

崩塌潛勢因子	分級	影響序分 A	影響序分 B
坡度	一級坡( ≤ 5%)	1	1
	二級坡(6~15%)	2	2
	三級坡(16~30%)	5	3
	四、五級坡(30%~55%)	6	5
	六級坡以上(>55%)	8	7
	超陡坡(>100%)	10	10
坡向	北	1	1
	東北	4	4
	東	7	6
	東南	10	8
	南	8	10
	西南	6	8
	西	1	2
	西北	1	1
NDVI	>0.6	2	3
	0.6~0.5	8	10
	0.5~0.4	10	6
	0.4~0.2	5	4
	<0.2	1	1
	350 < El ≤ 450m	4	3

高程	450 < El ≤ 550m	6	5
	550 < El ≤ 650m	8	7
	El > 650m	10	10
道路距離	0—20 M	10	10
	20—40M	7	8
	40—60M	5	4
	> 60M	1	1
河系距離	0—20M	10	10
	20—50M	7	2
	> 50M	3	1

共計四組之結果：AWe1、AWe2、BWe1、BWe2，並將LSI值與崩塌潛感之分級如下：

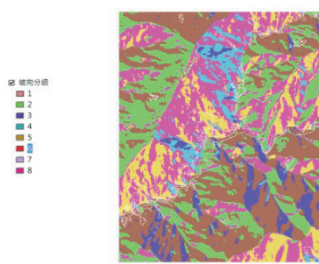
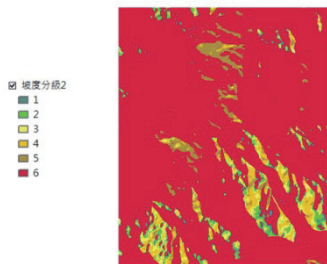
- 穩定 <2.0.....綠色
- 低潛感 2.00—3.99.....黃色
- 中潛感 4.00—4.99.....棕色
- 高潛感 >5.0.....紅色

(III)經電腦程式運算結果，六種因子之分級圖：包括D1(坡度)D2(坡向)D3(NDVI)

權重組別	D1 (坡度)	D2 (坡向)	D3 (NDVI)	D4 (高程)	D5 (路距)	D6 (河距)	Total
We1	0.25	0.20	0.15	0.02	0.10	0.28	1.00
We2	0.28	0.22	0.18	0.02	0.10	0.20	1.00

D4(高程)D5(路距)D6(河距)。

距)D6(河距)。



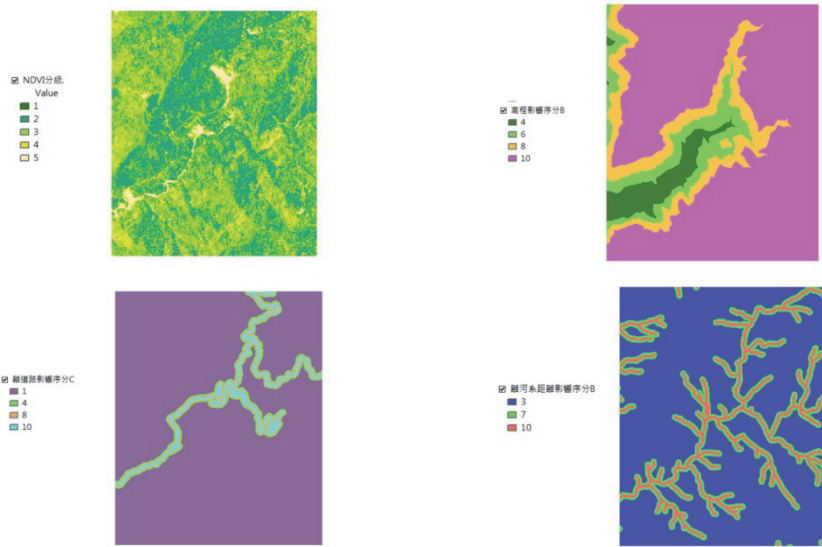


圖3 潛勢因子之分級圖：坡度、坡向、NDVI、高程、路距、河距  
Fig.3 Classes map of landslide factors in slope, aspect, elevation, NDVI, distance to road and distance to river.

(IV)經選定之影響因子分級和權重值共四組，分別以點腦疊層計算後，得到崩塌潛感之分級圖如下：

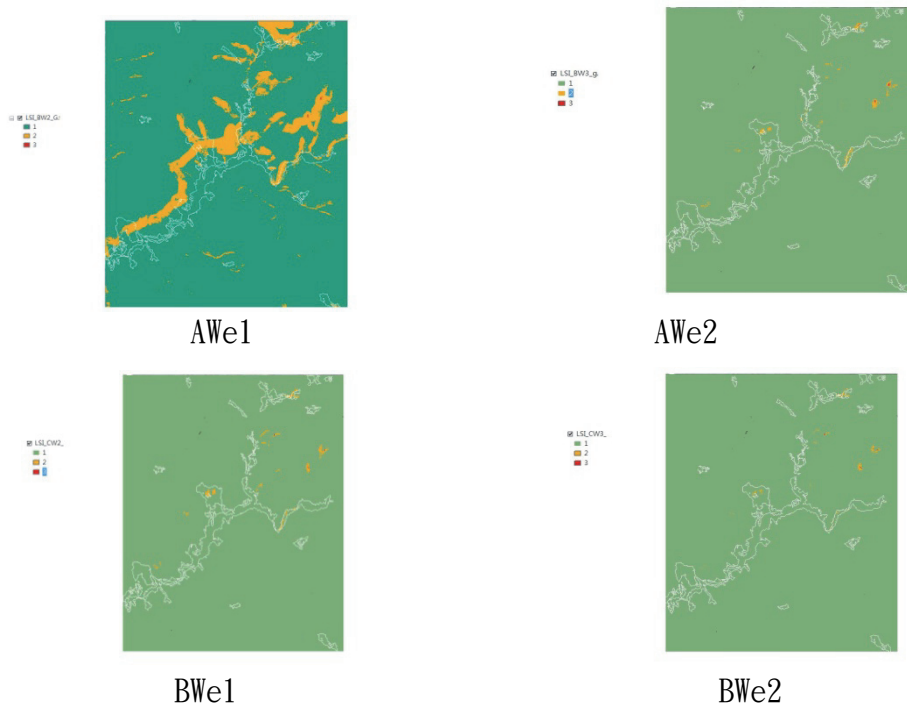


圖4. 四組崩塌潛感分級圖  
Fig.4 Maps of susceptibility of four compositions

經檢視，四種較為符合前人研究的數值組合，均未能得到預期的產出結果。其中「AWe1」之組合似乎較為凸顯，但是和實際崩塌範圍之比對(如下圖)，亦有明顯的差異。



圖5 莫拉克風災扇平林道崩塌變動範圍

Fig.5 The variance of landslide area priors and after Typhoon Morak

(V)經過現場踏看和討論結果，本研究採取以地形判釋法為基礎，加上專家分級評分法，原為借重其簡單快速之評估流程，以便能在小區域之地形單元做即時處理。但受限於小面積之評估往往忽略了地質條件和植生、降雨等條件之不具差異性，因而導致計算結果不顯著。也因此再度印證近年來GIS的相關發展，幾乎已放棄專家分級評分法，而改採統計分析和其他較符合電腦運算的先進方法。

(VI)有關六龜試驗林扇平林道崩塌88風災後崩塌潛勢分析，迄104年期中採用專家分級評分法進行分析製圖，結果顯示預測效果不佳。擴大試區範圍至整個六龜試驗林地，將以大尺度空間取樣分析之統計分析模式建立方式進行改善，預定進行的崩塌潛勢分析方法包括不安定指數法，並進分析方法準確率的比較。坡地評估之不安定指數法是基於以計量之方式來評估該坡地安定程度，定義以不安定指數(D)以代表坡地不安定之程度，其可描述單一因子的影響程度，亦可是因子綜合計算後對坡地評估的指標數值，其數學關係如下：

$$D_{total} = D_1^{W_1} \times D_2^{W_2} \times D_3^{W_3} \cdots \times D_n^{W_n}$$

其中  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $\cdots$ 、 $D_n$  代表各評估因子之不安定指數值，如坡度因子、岩性因子....等， $W_1$ 、 $W_2$ 、 $\cdots$ 、 $W_n$  則代表因子之權重值，而  $D_{total}$  則為該區域各項因子綜合表現之山崩潛感值。依相對量化分級之概念，式中之山崩潛感值( $D_{total}$ ) 與各因子值 ( $D_1$ 、 $D_2$ 、 $\cdots$ 、 $D_n$ ) 的內容以相對等級數值來代表，其數值以 1~10 為計量範圍，數值大小所代表的意義為：當數值等於 10 時，表示為所有資料中對坡地發生崩壞的可能機率為最大

者;數值等於 1 時，則表示所有資料中對坡地發生崩壞可能機率為最小者，資料均介於 1~10 之間，故值愈大者表其坡地不安定的程度愈高。而權重值( $W_1、W_2、\dots、W_n$ )則為因子間對坡地安定之影響程度指標值，其範圍介於 0~1 之間，且和為 1，即:

$$W_1+W_2+W_3+\dots+W_n=1$$

而整個分析步驟包括因子的分級、因子評分、因子彼此之間的權重、以及不安定指數值的疊加，其統計方法在此不擬贅敘，僅列出分析結果如下(個別分級之崩塌潛感因子評分表)表:

崩塌潛勢因子	i	分級	Qi	Zi	Di
坡度	1	一級坡( ≤ 5%)	0.147	0.431	10.000
	2	二級坡(6~15%)	0.132	0.387	9.034
	3	三級坡(16~30%)	0.025	0.073	2.141
	4	四、五級坡(30%~55%)	0.007	0.021	1.000
	5	六級坡以上(>55%)	0.012	0.035	1.307
	6	超陡坡(>100%)	0.018	0.053	1.702
坡向	1	北	0.003	0.025	1.550
	2	東北	0.001	0.008	1.000
	3	東	0.034	0.286	10.000
	4	東南	0.027	0.227	8.090
	5	南	0.031	0.261	9.191
	6	西南	0.008	0.067	2.910
	7	西	0.008	0.067	2.910
	8	西北	0.007	0.059	2.651
NDVI	1	>0.6	0	0	0
	2	0.6~0.5	0	0	0
	3	0.5~0.4	0	0	0
	4	0.4~0.2	0.007	0.012	1.000
	5	<0.2	0.562	0.988	10.000
高程	1	350 < El ≤ 450m	0.121	0.725	10.000
	2	450 < El ≤ 550m	0.030	0.180	3.062
	3	550 < El ≤ 650m	0.013	0.078	1.764
	4	El > 650m	0.003	0.018	1.000
道路距離	1	0—20 M	0.014	0.292	10.000
	2	20—40M	0.010	0.208	1.000
	3	40—60M	0.011	0.229	3.250

	4	> 60M	0.013	0.271	7.750
河系距離	1	0—20M	0.066	0.659	10.000
	2	20—50M	0.023	0.242	3.549
	3	> 50M	0.006	0.003	1.000

Qi：因子個別分級崩壞比

Zi：個別分級佔整個因子崩壞比

Di：個別分級之崩塌潛感因子評分(常態化 1~10)

i：代表各因子之分級

隨之，再計算『因子之崩塌潛感指數權重』，計算結果如下：

崩塌潛勢因子	i	分級	Di <sup>w</sup>	V(%)	W
坡度	1	一級坡( ≤ 5%)	1.493	90.25	0.174
	2	二級坡(6~15%)	1.467		
	3	三級坡(16~30%)	1.142		
	4	四、五級坡(30%~55%)	1.000		
	5	六級坡以上(>55%)	1.048		
	6	超陡坡(>100%)	1.097		
坡向	1	北	1.062	71.55	0.138
	2	東北	1.000		
	3	東	1.374		
	4	東南	1.334		
	5	南	1.358		
	6	西南	1.159		
	7	西	1.159		
	8	西北	1.144		
NDVI	1	>0.6	0	124.37	0.240
	2	0.6~0.5	0		
	3	0.5~0.4	0		
	4	0.4~0.2	1.000		
	5	<0.2	1.738		
高程	1	350 < El ≤ 450m	1.489	90.14	0.173
	2	450 < El ≤ 550m	1.214		
	3	550 < El ≤ 650m	1.103		
	4	El > 650m	1.000		
道路距離	1	0—20 M	1.334	64.68	0.125
	2	20—40M	1.000		
	3	40—60M	1.159		

	4	> 60M	1.292		
河系距離	1	0—20M	1.413	78.10	0.150
	2	20—50M	1.209		
	3	> 50M	1.000		

$D_i^w$ ：因子各級之指數加權評分

V：因子各級評分之變異係數

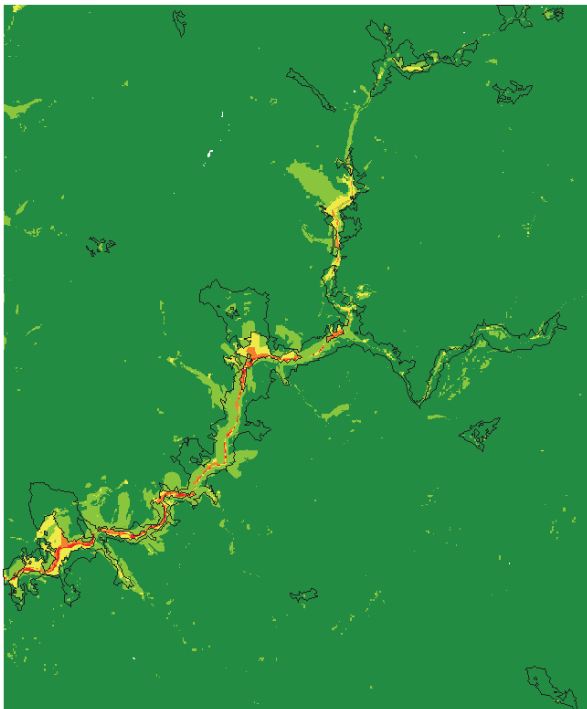
W：因子之崩塌潛感指數權重

(V)本研究是以扇平林道沿線，經歷2009年莫拉克風災前後崩塌地增減之比對，配合不安定指數法，整合出最適崩塌潛感計算模式如下。

$$D_{total} = D_1^{0.174} \times D_2^{0.138} \times D_3^{0.240} \times D_4^{0.173} \times D_5^{0.125} \times D_6^{0.150}$$

其中  $D_1$ : 坡度、 $D_2$ : 坡向、 $D_3$ : NDVI、 $D_4$ : 高程、 $D_5$ : 道路距離、 $D_6$ : 河系距離

經由此模式和各因子之間分級崩塌潛感因子評分，計算出莫拉克風災後研究區域各網格點的崩塌潛感值。根據實際電腦算出最小和最大數值，而定出1.03至9.69之間五個等級的區分並以不同顏色代表之(圖4)；其次以現況崩塌範圍之劃定條件，定出崩塌門檻值為2.628。最後將莫拉克風災前後崩塌地面積套圖比對其結果，其中設定Class1是代表實際不崩塌和預測不崩塌的網格；Class2是代表實際崩塌和預測崩塌的網格，交叉比對結果如表和圖5所示。



☑ 6因子不安定指數影像.tif

<VALUE>

- 1.032264 - 2.764132113
- 2.764132114 - 4.496000226
- 4.496000227 - 6.227868339
- 6.22786834 - 7.959736452
- 7.959736453 - 9.691604565

Confusion Matrix: D:\ENVI\正不安定指數

Overall Accuracy = (564801/604210) 93.4776%  
 Kappa Coefficient = 0.3643

		Ground Truth (Pixels)		Total
Class		Class 1	Class 2	
	Class 1	551735	21329	573064
	Class 2	18080	13066	31146
	Total	569815	34395	604210

88增加崩場地

		Ground Truth (Percent)		Total
Class		Class 1	Class 2	
不安定指數預測	Class 1	96.83	62.01	94.85
	Class 2	3.17	37.99	5.15
	Total	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Class 1	3.72	3.17	21329/573064	18080/569815
Class 2	58.05	62.01	18080/31146	21329/34395

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Class 1	96.83	96.28	551735/569815	551735/573064
Class 2	37.99	41.95	13066/34395	13066/31146

圖6 分類準確度誤差矩陣分析表

Fig. 6 The analysis matrix for error of classification accuracy

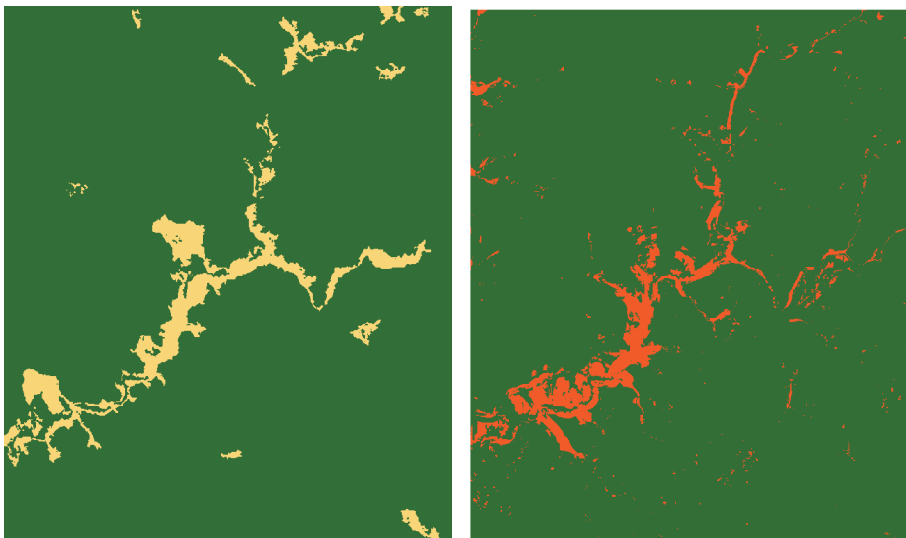




圖7 實際崩塌和預測崩塌比對圖

Fig. 7 The comparison of landslide area between reality and prediction

(VI)災害風險管理: 降雨因子引致邊坡坡壞之評估方法分為三等級: 第一級乃利用地形學方法判斷豪雨可能發生崩塌之區域, 第二級則先篩選引發崩塌之因子, 並以區域評分方式判定可能發生崩塌之區域, 第三級則在該地區進行詳盡之細部調查, 如地形測量、地質分析、鑽孔及岩石力學試驗、震波探測、地下水量測及航空照片判釋等, 方進行邊坡穩定分析。地震因子引致邊坡坡壞之評估方法分為三等級: 第一級乃利用地震規模與崩塌發生距離為主分析機制; 第二級為乃將地震因子列為崩塌觸發因子, 並以地震等級為評分標準, 以篩選因子並進行區域評分方式評估崩塌發生地區; 第三級則依據第二級方法, 並加入邊坡穩定分析及充分細部的區域調查等。依執行計畫期間之自然條件下, 觀測到四個獨立事件之狀況:

1. 2014.02.16—六龜地區震度 4.1 級深度 17.7 公里。幾乎無落石。
2. 2014.05.20-- 扇平地區日降雨量約 120mm, 落石輕微, 但須注意。
3. 2014.07.23—MATMO(麥德姆)颱風, 單日最大降雨量約 570mm, 中量落石約 3 立方公尺, 稍微妨礙車輛通行, 可迅速移除。
4. 2015/08/07 00:00 -- 2015/08/09 20:30蘇迪勒颱風來襲, 鳳崗山苗圃降雨量是810.5 mm, 少量落石及樹木傾倒, 無災情。

依此現況而言, 在扇平林道的風險管理, 降雨條件必須單日最大降雨量大於 600 mm以上, 或是地震之震度在4.5以上, 或許會出現較明顯的災情, 否則低於該標準的風險管理並無太大意義; 反之, 高於單日最大降雨量600mm之天候狀況, 應屬於中度或強烈颱風侵襲, 本就需要及早做好管制措施。至於4.5級以上的地震之預測, 以目前科技水準, 恐怕力有未逮。因此, 扇平林道交通上的風險管理, 根據台灣降雨條件的乾、濕季狀況來區分, 應該是較為合理而且也實際可行的方式; 換言之, 每年五月到九月的防汛期間, 應予限制進出; 十月至翌年四月則可適度開放, 並訂定應遵守之要項, 如此應可兼顧防災避險和民眾森林遊樂之需求, 因此林業試驗所六龜研究中心已經根據現實狀況, 重新修訂入園申請辦法(如附表 1), 以因應目前扇平林道仍有大崩塌地坡面仍未完整處理, 下大雨時仍有落石危

機，調整開放對象，及園區開放時間。除兼顧民眾生態教育之需求，也避免發生天然災害傷及人民生命安全，作為本路段災害風險管理的具體做法和對應措施。

#### IV、結論

- (I)利用不安定指數法，對崩塌地之潛感分析，可比較不同崩塌影響因子其分級的差異顯著性，並能有效客觀量化各因子間之權重，進而求得崩塌地之潛感值。原先所採用的專家分級評分法，已不能和更精密和大數據量的電腦模式相比較。
- (II)不安定指數法進分析方法準確率的比較，選取的因子經由電腦計算的權重結果，分別為坡度(0.174)、高程(0.173)、坡向(0.138)、NDVI(0.240)、水系距(0.150)、道路距(0.125)等六項潛感因子，利用莫拉克風災前後地崩塌地做一比較，統計分析給予因子評分的方式，結合地理資訊系統，將問題概念化後，得到class1的準確率為96.83%，class2的準確率為37.99%。其第二級精準度較差的原因，主要是研究區域太小，導致地質因子無法成為影響因素。
- (III)坡地土石流災害潛勢與上游崩塌災害潛勢有關，土砂材料來源可能性必須考慮入土石流堆積模擬中。各類型坡地災害之發生機制仍有多處為當代科技無法解答之處，如雨量、地質、地形等可能引發坡地破壞之因子間，其相互關係為何，仍需藉由GIS 圖層資訊的解析度與完整性升，以統計方式繼續釐清其機制，以利進行定量風險分析。
- (IV)本計畫所研究的區域面積不大，導致影響崩塌潛勢最重要的地質因子，被排除在評估項目內，因之反映出崩塌的準確率不高。應用崩塌模式計算崩塌潛勢技術之準確率，仍有相當大進步的空間，主要是必須以歷史資料的印證來提高精度，但是又同時面臨地域性的問題需要解決。

#### V、參考文獻

- 1.李錫堤 (2009) 山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望 台灣公共工程學刊 第五卷第一期。

- 2.李錫堤、潘國樑、林銘郎 (2005) 山崩調查與危險度評估-山崩潛感分析之研究 (3/3)。經濟部中央地質調查所報告，第94-18 號，共268 頁。
- 3.何明錦、陳昆廷、林欽川、王弘祐、蔡光榮 (2007) GPS/GIS/RS科技整合應用於南投縣坡地社區環境潛勢災害分析模式之研究 建築學報No.62\_S。
- 4.吳俊鎡、陳樹群 (2005) 明德水庫集水區崩塌潛勢評估模式之研究 水土保持學報 37(2)：155-168。
- 5.林芬玲、林家榮、林昭遠 (2008) 集水區崩塌潛勢劃定之研究 水土保持學報第四十卷第四期。
- 6.張石角 (1980) 都市山坡地利用潛力調查與製圖—方法論與實例 中華水土保持學報第11卷第1期，13~24。
- 7.張舜孔、吳建宏、謝正倫、李德河、邱禎龍 (2008) 應用類神經網路推估邊坡崩塌深度之初步研究 Taiwan Rock Engineering Symposium 2008，Taipei,Taiwan。
- 8.黃瓊璘、郭耀章、林照松 (2008) RC 自由型框和淺層錨釘應用於林道邊坡之穩定。全國災害危機處理研討會。長榮大學 pp：A2-22/33。
- 9.黃瓊璘、林照松 (2009) 淺層錨釘應用於林道維護工程之探討 森林集水區經營研討會論文集。
- 10.陳怡睿、林洧全、謝舜傑 (2010) 坡地利用影響山崩潛勢之評估模式建置 中華水保學會年會論文集
- 11.鄧亞恬 (2013) 旗山溪集水區道路沿線崩塌潛勢之研究 國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 12.穆婧、林昭遠 (2013) 集水區崩塌地環境指標分析與崩塌潛感推估 中華水土保持學報, 44(2): 121-130 (2013)
- 13.蔡光榮、陳昆廷、王宣惠、林岱本、謝正倫 (2013) 花蓮地區集水區土砂潛勢災害風險評估分析之研究 全國災害危機處理研討會。長榮大學2013，曠冶 57-1。
- 14.F.C. Dai , C.F. Lee , Y.Y. Ngai (2002) Landslide risk assessment and management an overview Engineering Geology 64 65–87 D. P.
- 15.Kanungo,M.K.Arora,S.Sarkarand R.P.Gupta(2009)LandslideSusceptibility Zonation (LSZ)Mapping A ReviewJournal of South AsiaDisaster StudiesVol. 2 No. 1 June
- 16.Ranjan Kumar Dahal (2009) A replication of landslide hazard mappingin catchment scale. Geomatics, Natural Hazards and Risk,First version DOI:10.1018 .

(附表一)

行政院農業委員會林業試驗所六龜研究中心  
扇平森林生態科學園入園管理及解說服務要點  
修正規定

中華民國 92 年 2 月 27 日農林試推字第 0920001172 號令訂頒

中華民國 103 年 4 月 日農林試技字第 103104 號函修訂

- 一、行政院農業委員會林業試驗所(以下簡稱本所)為提倡研究、教育、保育、及永續利用森林資源，推展自然教育，開放本所六龜研究中心(以下簡稱六龜研究中心)管轄之扇平森林生態科學園(以下簡稱本園區)供各界人士入園，為利管理，特訂定本要點。
- 二、開放對象及開放時間：
  - (一) 因目前扇平林道仍有大崩場地坡面未完整處理，開放對象暫以政府相關機關、非營利社團或機構、學校團體辦理森林生態或自然教育之相關研習或實習活動為主，並以十五人以上之團體為限，申請單位有告知實際入園人數之義務。
  - (二) 本園區開放入園時間為上午八時至下午四時止。
  - (三) 每週一、春節假期及五月至十月份(豪雨及颱風季節)，為休園期間。
  - (四) 申請單位應以公函檢附活動計畫書、活動課程表及專案入園申請表(附件一)於入園前十四日向六龜研究中心提出申請，申請入園團體總人數上限為每日三百五十人。
- 三、解說服務申請須知：
  - (一)以機關、學校團體為服務對象，十五人以上團體即可申請。
  - (二)假日申請解說服務之團體總人數以一百人為限，依申請先後次序排定。
  - (三)解說服務時間：週二至週六為上午九時三十分至中午十二時，下午為一時至三時三十分，週日為上午八時三十分至中午十二時。
  - (四)基於安全考量，解說服務時間一次以二小時為限，夜間不提供解說服務。
  - (五)請於獲准入園許可後，於預定入園日之五日前，將公文、申請表(附件二)以郵寄、傳真或電子郵件向六龜研究中心提出申請，資料不齊全者不予接受。
  - (六)六龜研究中心於接獲申請函後，將於五日內以公文郵寄或電子郵件方式回復申請單位，遇特殊情形時，將另以電話與連絡人連繫。
  - (七)已申請解說服務之團體，若因颱風、聯外道路中斷等不可抗力之因素，將由六龜研究中心另予通知改期入園，並依調度情形安排解說服務。申請解說服務之團體若當日無法入園或行程更改時，應於三日前以電話告知，未告知者一年內不得再次申請。
  - (八)已申請解說服務之團體請準時到達，若遲到一小時以上即取消解說服務。
  - (九)解說服務之相關資料，請至本所全球資訊網下載。
- 四、注意事項：
  - (一)本園區屬山地管制區，請在六龜研究中心同意專案入園申請後，於入山時備妥人員名冊及相關身分證件向森山檢查所辦理入山許可證，始可入園。

- (二)本園區林道屬丙種林道，路面狹窄，禁行大型車輛，限九人座以下小型車輛始得進入，會車時請放慢速度，注意安全。
- (三)於開放期間，雖非屬汛期，惟道路邊坡仍有可能因地震、岩石風化、動物活動等因素，發生崩塌或落石。為維護安全，請訪客勿在道路及其相鄰地帶，或有潛在危險之地區逗留。
- (四)本園區為專供試驗研究及森林環境教育之場所，嚴禁生火、炊煮、烤肉、露營、喧嘩、嬉戲及為各種球類、團康活動。
- (五)非公務用之汽車請停放於停車場，禁止進入辦公室週邊園區。
- (六)禁止攜帶釣具、炊具、獵具及其他未經核准之違禁品進入本園區。
- (七)禁止破壞本園區內任何設施，園區內各項動植物未經核准不得攜出。
- (八)垃圾請自行攜出，不得任意丟棄，以維護環境整潔。
- (九)本園區因天災因素，步道系統破損嚴重，部份步道系統及區域仍暫停對外開放，於整修完成後，始對外開放。

## 水里溪上游崩塌潛勢區地質特性之研究

曾俊偉<sup>1</sup> 黃瓊璘<sup>2</sup> 王豐仁<sup>3\*</sup>

**【摘要】**為因應近年來極端氣候情況之影響，集水區潛在崩坍地之發生機制、後續影響、處理對策等均值得進一步探究。本研究根據相關環境地質資料與文獻，選定蓮華池試驗林地具有深層崩塌潛勢之可能熱點進行地質鑽探及相關力學試驗。研究區內總計進行地質鑽探 5 孔，深度為 20~25 公尺，以獲取岩芯進行分析。同時進行標準貫入試驗、土壤單軸試驗、土壤直接剪力試驗、岩石單壓試驗、岩石弱面直剪試驗以獲取地層力學特性。

研究結果顯示，研究區地層為始新世至漸新世的白冷層，岩性以石英質砂岩、粉砂岩為主，節理發育密集，並有局部剪裂現象呈破碎夾泥狀態。由地表地質調查顯示，研究區地表多為林木草地等覆蓋，地層以表土層與崩積層為主，岩層露頭稀少，加以層面傾角高陡，高於或接近邊坡坡面，研判若無開挖坡址導致岩層出露之情形下，沿層面順向滑動之潛勢較小；同時配合鑽探岩芯判釋，研究區地表下岩層有明顯局部剪裂現象，局部呈破碎夾泥狀態，且深度達鑽探調查深度(25m)，故潛在破壞機制可能以表層岩屑崩滑破壞與砂土層(軟弱材料)圓弧型滑動為主。

**【關鍵詞】**崩塌潛勢區、地質特性、破壞機制

## 2016 STUDY ON POTENTIAL COLLAPSE AREA GEOLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE UPSTREAM OF SHUILI STREAM AREA

Chun-Wei Tseng<sup>1</sup> Chiung-Piau Huang<sup>2</sup> Feng-Jen Wang<sup>3\*</sup>

---

<sup>1</sup>行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組助理研究員。

Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

<sup>2</sup>行政院農業委員會林業試驗所研究員。

Senior Scientist, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

<sup>3</sup>台北市應用地質技師公會理事長，\*通訊作者。

Director, Taipei Association of Professional Applied Geologists. \*Corresponding Author. E-mail : geodennis99@gmail.com

**【Abstract】** In response to the impact of recent extreme weather conditions, the mechanism of landslides, the the follow-up impact, and the Countermeasures worth further exploration, as a demonstration model job-related cases. Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan promote the Research project: " Investigation catchment environmental resources and land use and change of status " Use geological drilling and related monitoring, In order to prove hot sentence of Buddhism is correct. The study includes geological drilling, mechanical testing, and observation tube inclined.

Geological survey show the project located in the sandstone and siltstone of Bai-Ren formation, with joints and fractures, and shear zone with mud . The surface of the study area mostly covered with forest grassland, formation to topsoil and colluvium mainly scarce outcrops, bedding dip angle is high above or close to the slope surface, the potential of sliding is low if absent slope excavation. According to core drilling, there is shear zone with mud, and the depth till to 25m, it is possible the failure mechanism is debris slide and circular slide (soft material).

**【Key words】** Potential collapse area, Geological feature, Failure mechanism.

## I、前言

極端氣候議題已經是近年的重大課題，在極端氣候變遷的情況下，對於集水區的潛在崩塌區域的影響，尤其是潛在崩坍地之發生機制、後續影響、處理對策等，均值得進一步探究，若能獲得一較合理之影響邏輯，則可作為相關案例之作業示範模式。

本研究即根據相關環境地質資料與文獻，選定於水里溪上游之蓮華池研究中心試驗林地內，針對具有深層崩塌潛勢之可能熱點進行地質鑽探及相關力學試驗，期能印證熱點判釋之正確性，並對集水區地質特性與崩塌破壞機制間之關係有一初步之了解。

## II、研究區域地質特性

### (I)研究區概況

研究區位於水里溪上游區域，位置在農業委員會林業試驗所蓮華池試驗林區域內，由埔里地區經台 21 線南下經桃米社區轉投 66 縣道可抵達，基地位置如圖 1 所示。

1. 地形：蓮華池試驗集水區為林業試驗所設立的 16 處試驗集水區之一，海拔高度介於 576~925m 之間，屬中低海拔高度地區，總面積 461ha。
2. 地層：研究區為始新世至漸新世的白冷層(如圖 2)，白冷層主要岩性為為厚層至塊狀粗粒至礫質長石砂岩與石英砂岩，夾厚度不一的頁岩。
3. 地質構造：研究區鄰近之地質構造為東北側之桃米坑向斜、與南側之車埕斷層(如圖 2)。桃米坑向斜呈北北東方向延伸，向斜兩翼均由白冷層構成。此向斜北段之西翼接外盤安背斜之東翼，岩層之位態各地變化頗大，其距離研究區約 1.5 公里遠；車埕斷層為水里坑斷層之一分支，從水里東北方自水里坑斷層分出，大體沿著水里溪以北北東方向延展，推測本斷層為一東側相對上昇之逆斷層，斷距或層位落差不大，其距離研究區約 1 公里遠。
4. 土壤：為趨向紅化作用之黃壤，土壤可分為正淡瘠弱育土(Typic Dystrochrept)及正簡極育土(Typic Hapludult)兩類，前者化育自頁岩，含 36 %至 46 %的粘粒。表土 pH 值 4.2，到深度 1.2 m 處增至 5.0。鹽基飽和度不超過 10 %。粘粒主要成分為間層水雲母-蛭石，幾乎無石英存在。表土粉粒的粘土礦物種類與粘粒相同，惟尚有少量的長石類或綠泥石，但是心土的粉粒含蛭石量並不顯著。後者化育自砂岩，其含砂粒量皆超過 60 %。表土 pH 值為 4.4，到深度 1 m 處增至 4.8。鹽基飽和度亦不到 10 %。粘粒成分的粘土礦物種類與前者相同，為所含之間層水雲母-蛭石量較少。粉粒主含石英及少量的水雲母 (黃正良等，2002)。
5. 氣候特性：試驗區年平均降雨量約 2285.0mm，較臺灣年平均降雨量 2510mm 略少，月降雨量分布極不平均，乾濕季節分明，4~9 月為濕季，降雨量佔全年的 84.08%，10 月至翌年 3 月降雨量佔全年的 15.92%，其中 11 月份降雨量最少。年平均氣溫 20.8℃，年溫差 10.4℃，年平均蒸發量約為 939.1mm，年平均相對溼度為 87.1%(陸象豫等，2008)。降雨型態主要為 3、4 及 5 月份的鋒面雨和夏季對流雨與颱風帶來之暴雨。每年 6 月為降雨量最高峰，平均為 510.3mm，佔全年總降雨量的 22.33%，11 月降雨量最少，僅 24.4mm (黃正良，2013)。蓮華池集水區氣候因子如表 1 所示。



Fig 1. Study Location

圖 1. 研究區位置圖

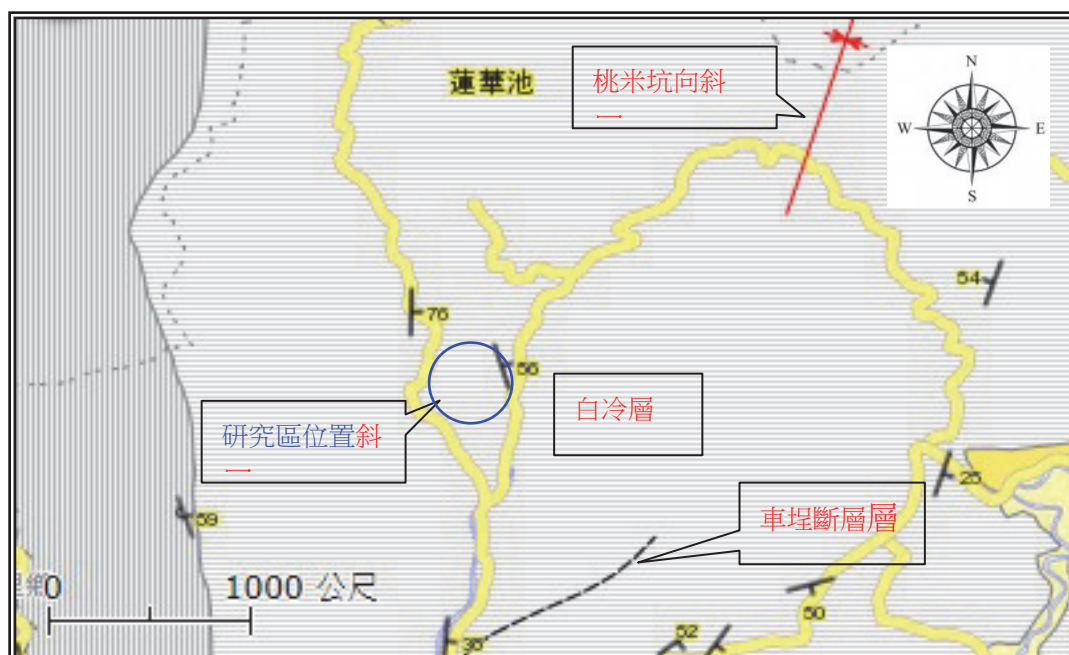


Fig 2. Regional Geological Map

圖2. 區域地質圖(套彙自中央地質調查所地質圖幅-埔里圖幅,2000年)

表1. 蓮華池集水區氣象因子

Table 1. Meteorological Factors in Lien-Hua-Chi watersheds.

	Avg. Rainfall (mm)	Avg. Daily Temp. (°C)	Avg. Relative Humidity (%)	Avg. ET. (mm)
Jan.	47.7	14.8	85.8	55.7
Feb.	86.1	16.1	87.1	56.7
Mar.	103.6	18.3	87.0	75.5
Apr.	138.2	21.1	87.2	83.5
May	322.4	23.2	88.4	84.5
Jun.	510.3	24.4	88.4	86.5
Jul.	373.1	25.2	86.3	108.2
Aug.	404.2	24.8	88.0	97.2
Sept.	196.0	24.1	88.0	89.9
Oct.	45.8	22.4	86.8	83.4
Nov.	24.4	19.5	86.5	65.6
Dec.	33.3	16.1	85.4	52.4
Avg.		20.8	87.1	
Total	2285.0			939.1

(陸象豫等，2008)

試驗區植群概述：

- (1)天然林試驗區：屬天然闊葉林，位於蓮華池五號試驗集水區內，為次亞熱帶常綠林，喬木種類約 53 種，主要由樟科與殼斗科植物所構成之樟櫛林 (lauro-fagaceae forest)。另有稀有及保育樹種，包括桃實百日青 (*Podocarpus nakaii*)、台灣紅豆樹 (*Ormosia formosana*)、柳葉山茶 (*Camellia salicifolia*)、垢果山茶 (*Camellia furfuracea*)。(黃正良，2010、黃正良等，2013)
- (2)人工林試驗區：主要為杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林，林下小樹極多，且具有較多陽性樹種，位於蓮華池四號試驗集水區內，周圍人工林樹種包括台灣肖楠 (*Calocedrus formosana*)、相思樹 (*Acacia confusa*)、楓香 (*Liquidambar formosana*)、桉樹 (*Eucalyptus citriodora*) 及臺灣檫 (*Zelkova formosana*) 等，其餘林地主要為亞熱帶天然闊葉林，是臺灣中部典型之森林生態系。目前已登錄的維管束植物有 177 科 879 種。另有稀有及保育樹種，

包括桃實百日青 (*Podocarpus nakaii*)、台灣紅豆樹 (*Ormosia formosana*)、垢果山茶 (*Camellia furfuracea*)。(黃正良, 2010、黃正良等, 2013)

- (3)人工草地試驗區：位於蓮華池二號試驗集水區內，取樣地點主要在尚楠木屋教室周圍分布之人工草地，栽植草類以水土保持草類之假儉草 (*Eremochloa ophiuroides*) 為主。

## (II)研究方法

本研究之內容包括地質鑽探、物理探測及力學試驗等工作。在選定的崩塌地範圍適當地點，進行地層鑽探。同時採取岩芯直接判釋，並取岩芯樣本於實驗室進行物理和力學試驗，裝置傾斜管定期監測其變動量。同時依據鑽探岩芯判釋、與力學試驗資料分析崩塌地結構、地層特性、傾斜變動量，以便進行坡面之力學安定分析，及長期監測之工作，提供對策設計及施工時之參據。鑽探與試驗工作包括：

- 1.鑽探位置及放樣：鑽探孔位五處(BH-1-BH-5)，鑽孔位置如圖 3 所示，各鑽孔深度在 20-25 公尺之間，總深度 120 公尺。鑽探作業施作：包括現場鑽探移機及搬運、給水設備、標準貫入試驗、劈管取樣、岩芯箱及彩色照片、薄管取樣等項目。
- 2.室內各項試驗：包括土壤一般物理試驗、土壤單軸試驗、土壤直接剪力試驗、岩石單壓試驗、岩石弱面直剪試驗等。
- 3.傾斜管埋設及監測：傾斜管埋設裝置完成後，俟其狀態穩定時作其基準值量測；爾後每隔約 30 天量測一次。



Fig 3. Drilling Hole Location

圖 3. 鑽孔位置圖

表 2. 現場鑽探取樣工作數量統計表

Table 2. number of Drilling Hole And Test

鑽孔編號	鑽孔深度	標準貫入試驗	劈管取樣	3吋薄管取樣	土壤一般物理試驗	土壤單軸試驗	土壤直接剪力試驗	岩石單壓試驗	岩石弱面直剪試驗	傾斜管安裝
	(m)	(次)	(次)	(支)	(組)	(組)	(組)	(組)	(組)	(m)
BH-1	20	2	2		2			1		20
BH-2	25	2	2		2			1	1	25
BH-3	25	2	2	1	2	1		1	1	25
BH-4	25	2	2		2			1		25
BH-5	25	2	2		2		1	1	1	25
合計	120	10	10	1	10	1	1	5	3	120

### III、結果與討論

#### (I)鑽孔岩芯判釋與試驗成果

經由岩芯判釋成果，將研究區鑽探岩芯綜整說明如下：

- 1.BH-1 孔：0~3m：表土層；3~20m：崩積層；20~25m：砂岩，粗粒，黃棕色至淺灰色，有風化與破碎現象。
- 2.BH-2 孔：0~1.1m：風化岩屑；1.1~15.7m：細砂岩至頁岩；15.7~25m：粉砂岩。其中多處位置有破碎夾泥現象。
- 3.BH-3 孔：0~4.95m：表土層；4.95~20m：粉砂岩至頁岩，灰黑色。
- 4.BH-4 孔：0~2m：表土層；2~25m：粉砂岩至中粒砂岩，灰至淺灰色，其中多處位置有破碎夾泥現象。
- 5.BH-5 孔：0~3m：表土層；3~25m：粉砂岩，灰至灰黑色；其中局部位置有破碎夾泥現象。

彙整岩芯之岩石力學試驗結果，研究區域之粗粒砂岩單壓強度約為 21.42kg/cm<sup>2</sup>；粉砂岩單壓強度約在 44.71~133.80 kg/cm<sup>2</sup>，岩石弱面直剪試驗 C<sub>p</sub> 約在 0.89~1.49 kg/cm<sup>2</sup>， $\phi_p$  約在 33.1°~34.2°，C<sub>r</sub> 約在 0.41~0.67 kg/cm<sup>2</sup>， $\phi_r$  約在 20.7°~27.3°。各鑽孔試驗資料如表 3 所示。

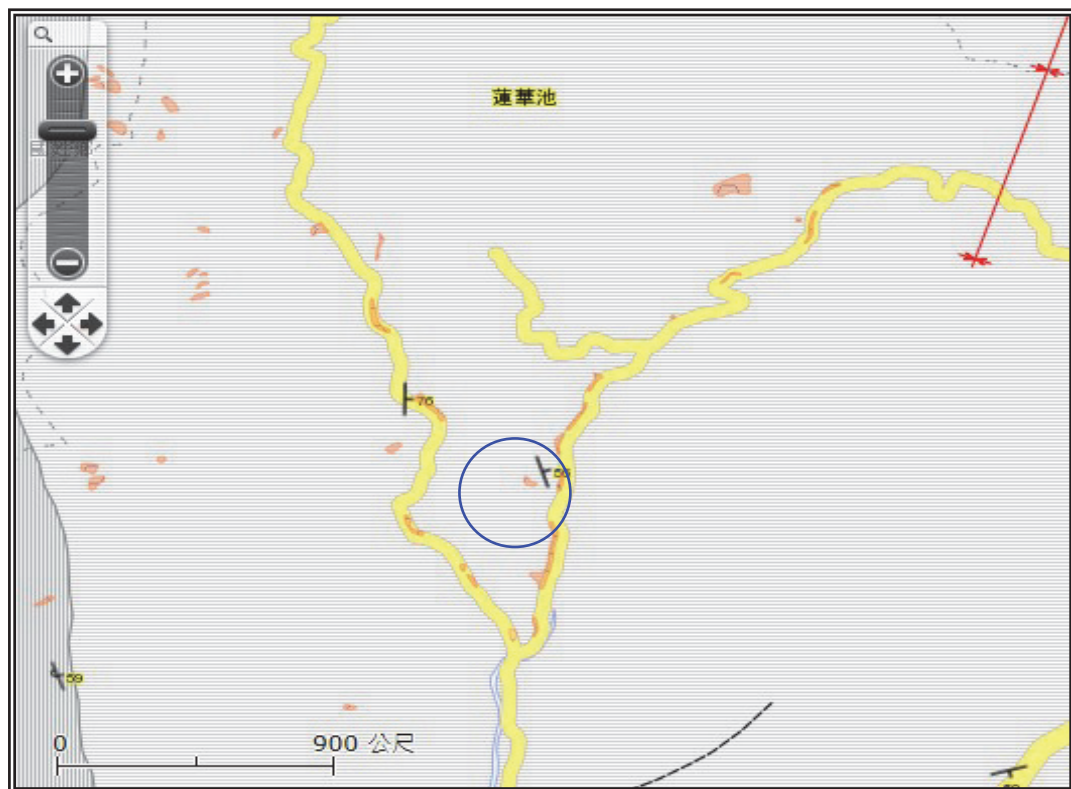
表 3. 各鑽孔岩芯試驗結果

Table 3. The results of Test of Rock

孔號 Hole No.	樣號 Sample No.	深度 Depth m	單軸	岩心弱面剪力試驗				岩心剪力試驗			
			qu kg/cm <sup>2</sup>	C <sub>p</sub> kg/cm <sup>2</sup>	$\phi_p$ 度	C <sub>r</sub> kg/cm <sup>2</sup>	$\phi_r$ 度	C <sub>p</sub> kg/cm <sup>2</sup>	$\phi_p$ 度	C <sub>r</sub> kg/cm <sup>2</sup>	$\phi_r$ 度
BH-1	-	23.25~23.50	21.42								
BH-2	-	17.00~17.20		1.42	33.1	0.42	20.7				
BH-2	-	18.20~18.50	112.54								
BH-3	-	12.75~13.00		1.49	34.2	0.41	27.3				
BH-3	-	15.20~15.50	133.80								
BH-4	-	24.10~24.50	80.22								
BH-5	-	18.00~18.25		0.89	31.9	0.67	25.6				
BH-5	-	22.05~22.30	44.71								

#### (II)崩塌潛勢區環境地質特性

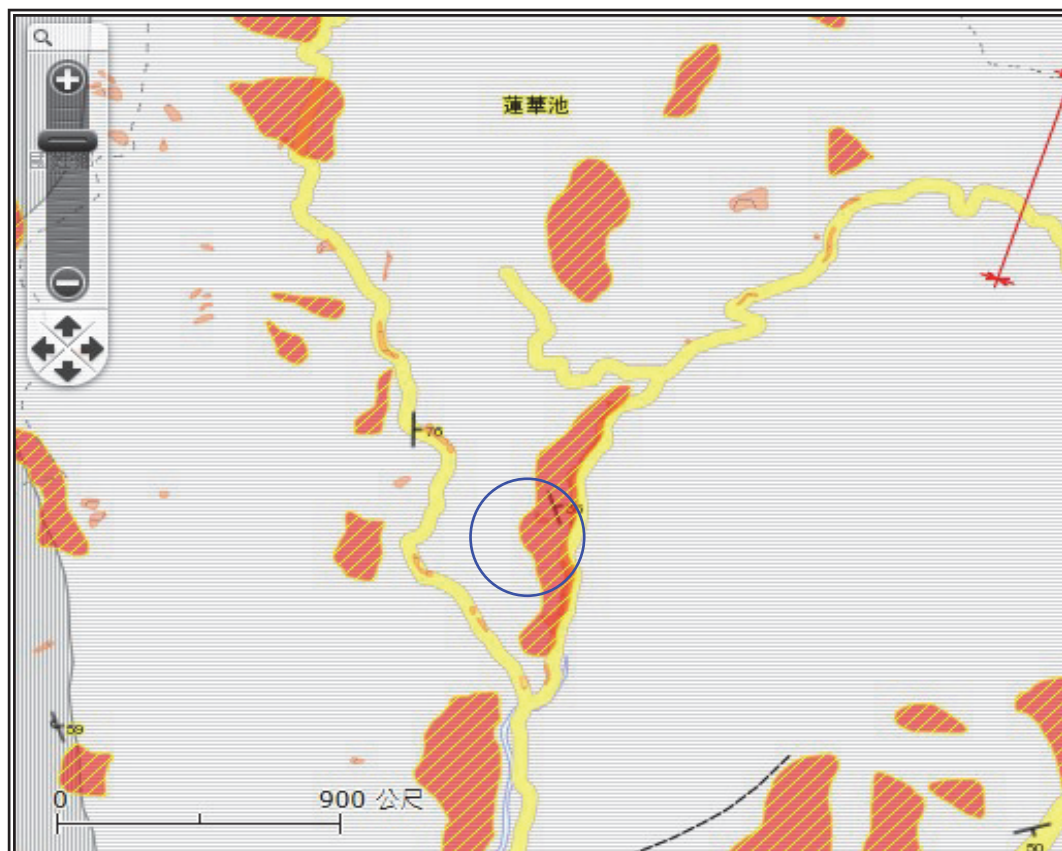
經由套繪研究區位置之環境地質資料(中央地質調查所「地質資料整合查詢系統/環境地質圖」)，崩坍潛勢區及鄰近區域具有岩屑崩滑與順向坡之潛勢可能(如圖4、圖5)。將環境地質圖資與現地情況調查對比顯示，數處岩屑崩滑潛勢面積皆小，皆沿著道路上邊坡發育，研判應與道路開挖擾動有關，且目前多已由道路護坡工程噴漿保護，噴漿保護區域再次滑動的可能較小，但因為研究區地表表土層夾有岩屑並有崩積層存在，並不排除研究區域內無工程保護位置仍有發生岩屑崩滑之可能。順向坡潛勢範圍面積稍大，同時由現地地表勘查顯示，研究區域地表多為林木草地等覆蓋，地層以表土層與崩積層為主，岩層露頭稀少，量測之層面位態為  $N10^{\circ}W\sim 20^{\circ}E/60^{\circ}\sim 72^{\circ}E$ ，層面傾角高陡，高於或接近邊坡坡面，研判沿層面順向滑動之潛勢較小，若無開挖坡址導致岩層出露之情形下，較無形成順向滑動之潛勢。



(淺紅色為岩屑崩滑區範圍)

Fig 4. Environment geological Map1

圖 4. 環境地質圖 1



(橘色為順向坡區範圍)

Fig5. Environment geological Map2

圖 5. 環境地質圖 2

#### IV、 結論

研究結果顯示，崩塌潛勢區地表主要為表土層與崩積層，其下地層為始新世至漸新世的白冷層，鑽探成果顯示岩性以石英質砂岩、粉砂岩為主，節理發育密集，並有局部剪裂現象呈破碎夾泥狀態。經由套繪環境地質資料(中央地質調查所「地質資料整合查詢系統/環境地質圖」)，研究區及鄰近區域具有岩屑崩滑與順向坡之潛勢可能；數處岩屑崩滑潛勢面積皆小，皆沿著道路上邊坡發育，研判應與道路開挖擾動有關，且目前多已由道路護坡工程噴漿保護，噴漿保護區域再次滑動的可能較小，但因研究區地表表土層局部夾有岩屑並有崩積層存在，並不排除研究區域內無工程保護位置仍有發生岩屑崩滑之可能。研究區域地表多為林木草地等覆蓋，地層以表土層與崩積層為主，岩層露頭稀少，層面傾角高陡，高於或接近邊坡坡面，研判沿層面順向滑動之潛勢較小，若無開挖坡址導致岩層出露之

情形下，較無形成順向滑動之潛勢；同時配合鑽探岩芯判釋，研究區地表下岩層有局部剪裂現象，局部呈破碎夾泥狀態，且深度達鑽探調查深度(25m)，研判潛在破壞機制可能以表層岩屑崩滑破壞與砂土層(軟弱材料)圓弧型滑動為主。

## V、誌謝

本研究承行政院農業委員會 105 農科-17.1.2-森-G1 計畫經費補助，試驗工作承蒙蓮華池研究中心同仁及展鴻工程公司協助，謹此致謝。

## VI、參考文獻

地質資料整合查詢系統 經濟部中央地質調查所。

<http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm>

何春蓀 (2006) 臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所。

洪如江 (1991) 初等工程地質學大綱。財團法人地工技術研究發展基金會。

陳培源 (2006) 台灣地質。科技圖書股份有限公司。

陳明杰、曾俊偉 (2013) 契約林地混農林業使用可行性及對水資源涵養影響之研究。臺大實驗林研究報告 27(3)：171-188。

陸象豫、黃良鑫、黃惠雪 (2008) 林業試驗所蓮華池研究中心氣象資料彙整 (1997-2007)。行政院農業委員會林業試驗所，林業叢刊第 183 號。

曾俊偉 (2004) 九份二山崩塌地穩定性觀測及地下水流動特性之研究。國立台灣大學森林環境計資源學研究所碩士論文。

曾俊偉、陳明杰、林介龍、曹崇銘 (2015) 農村地區不同土地利用對土壤水資源涵養量之初探。2015 森林集水區經營研討會輪文集：85-96。

黃正良 (2010) 蓮華池天然闊葉林及杉木人工林試驗集水區水文與水質特性之探討。國立台灣大學森林環境暨資源學系博士論文。

黃正良、陳明杰、曹崇銘、黃志堅、傅昭憲、吳家慈 (2013) 蓮華池試驗集水區杉木人工林及天然闊葉林植群之比較研究。嘉大農林學報 10(2)：16-38。



## 國家圖書館出版品預行編目資料

森林集水區經營研討會論文集 2016 / 林壯沛 主編.

-- 初版 -- 臺北市:農委會林試所, 民105.05

212面; 21×29.7公分

ISBN: 978-986-04-8761-9 (平裝)

1. 林業管理 2. 集水區 3. 文集

436.12407

105008501

## 2016森林集水區經營研討會論文集

發行人 黃裕星

策劃 游漢明

主編 林壯沛

執行編輯 王秋嫻

美術編輯 許明峰

出版單位 行政院農業委員會林業試驗所  
10066 臺北市中正區南海路53號

電話: 02-2303-9978

傳真: 02-2314-2234

網址: <http://www.tfri.gov.tw>

印刷 麥克馬林有限公司

電話: (02)8287-5310

展售處 國家書店

10455 台北市松江路209號1樓 02-2518-0207

五南文化廣場: 台中總店

40042 台中市區中山路6號3樓 04-2226-0330

出版日期 中華民國一〇五年五月 初版

定價 新台幣200元整

ISBN 978-986-04-8761-9

GPN 1010500782

圖文有著作權 未經同意請勿使用

