林業叢刊第182號

2008 森林集水區經營研討會論文集

Symposium on 2008 Forest Watershed Management



主辦單位：行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組
協辦單位：國立中興大學水土保持學系
國立台灣大學森林學系
國立屏東科技大學水土保持學系
華梵大學環境與防災設計學系

2008 森林集水區經營研討會論文集

Symposium on 2008 Forest Watershed Management

時間：97 年 6 月 20 日(五)

地點：台北市南海路 53 號

主辦單位：林業試驗所集水區經營組

協辦單位：國立台灣大學森林學系、國立屏東科技大學水土保持學系、國立中興大學水土保持學系、華梵大學環境與防災設計學系

行政院農業委員會林業試驗所編印

九十七年六月

「2008 森林集水區經營研討會」議程表

時　間	議　程	
09:00-09:20	報　到	
09:20-09:30	開 幕 致 詞 (林試所 黃裕星所長)	
時　間	講　題	主持人
09:30-09:55	坡地試區逕流係數統計分佈之探討 (曹舜評、曾依菻)	中興大學 水保系教授 鄭皆達
09:55-10:20	坡地檳榔園水土流失控制之探討 (林壯沛、盧惠生、黃良鑫)	
10:20-10:45	茶敘 / 交流	
10:45-11: 10	台北市山坡地集水區暴雨逕流特性之探討 (陳明杰)	林試所集水區 經營組組長 盧惠生
11:10-11:35	流量歷線之基流分離應用三種不同方法之結果比較(葉正霖、鄭皆達、黃良鑫)	
11:35-12:00	不同土地利用型態之溪流水化學 (王秋嫻、劉瓊霰)	
12:00-13:00	午　餐	
13:00-13:25	林道分級模式架構初步探討 (黃瓊彪)	台灣大學 森林學系教授 陳明杰
13:25-13:50	森林集水區生態能量及土砂能流特性分析 (蔡真珍、林昭遠)	
13:50-14:15	中寮溪森林集水區泥砂啟動空間變化推估 (盧惠生、林介龍)	
14:15-14:40	茶敘 / 交流	
14:40-15:05	台東太麻里溪集水區降雨崩塌對河道淤砂之影響(許中立、鍾斌全、戴欣怡)	林試所集水區 經營組研究員 黃瓊彪
15:05-15:30	水庫集水區植生緩衝帶配置區位及效益評估之研究(林昭遠、賴威任、莊智瑋)	
15:30-16:00	綜合座談及討論	

2008 森林集水區經營研討會

開幕致詞

農委會林業試驗所
所長 黃裕星
2008 年 6 月 20 日

各位貴賓、各位專家學者，大家早安！

首先歡迎各位蒞臨林業試驗所，參加「2008 森林集水區經營研討會」。很高興能邀請到大家；藉著這場研討會的舉辦，讓我們這些老朋友聚聚並且認識新一輩的青年學子，共同討論、交流彼此的研究現況、吸收新知，實在是美事一樁！尤其感謝學界的師長、還有水保局、林務局的同仁及業界的技師朋友等，在百忙之中撥空參加，讓本人非常感動，相信對森林集水區經營，未來的研究發展有莫大的助益。

依據民國 84 年，第三次台灣森林資源及土地利用調查資料，全島林地面積約為 210 萬公頃，佔全島總面積 58.5 %；依水保法定義的山坡地面積更將近全島面積的 75%。相較之下，58.5 %的森林面積雖然不少，但也不算多，如何讓這些森林發揮最大的功用，有賴於正確的經營管理政策。我們知道森林對淨化空氣的貢獻，另一方面森林也是生物多樣性保育的基礎，能提供昆蟲、動物的棲息地。但是如果談到「森林集水區」時，涉及的研究尺度是更廣的，從水循環開始、到坡面地表逕流的產生、啟動表土沖蝕、崩塌，以至治理層面的水土災害減輕及防治、政策面的土地利用管理探討等等，集水區經營研究的範圍真的是包羅萬象！

早期森林集水區經營著重於水質、水量方面，大多以集水區試驗及水文等研究為主。隨著時代變遷與社會環境改變，森林集水區面臨的問題及牽涉

的因素日趨複雜；現階段森林集水區經營的重點，不僅需要維護自然資源的永續利用，同時也要擔負起國土保安、坡地減災的重責大任；也因此擴展了研究範疇。時代在變、我們的研究課題也會有所不同，甚至研究人員可能會被問題追著跑，就像是灌防毒軟體一樣，時常要下載更新。我們舉辦研討會的目的也是如此，希望建立彼此交流、合作的機會，讓獨立型的研究有機會合併為整合型的研究，讓研究效率更為擴大。因此議程最後的綜合座談及討論，可以說是今天研討會的重頭戲，讓我們有充份的時間，對彼此的研究有更多討論。透過大家不同的專長及見解，不僅有機會激發出更創新的研究課題，而且也是促使森林集水區經營研究，能兼顧學理及應用面的平衡發展，使得研究成果可以被應用到實務面。

本次舉辦「2008 森林集水區經營研討會」，內容包括：坡地方面的降雨逕流及坡地檳榔園水土流失、以集水區為單元的暴雨及颱雨逕流特性，同時也探討不同土地利用型態下的水質特性，及林道分級模式的架構研究；為能瞭解泥砂的特性，也包括泥砂啟動的推估研究及從能量系統觀點的土砂能流特性研究，另有台東太麻里的實例研究，關於降雨對集水區崩塌及河道淤砂的影響；由於上游這些水土流失經常折損下游水庫的壽命，因此在減輕衝擊的對策研究，則以水庫集水區緩衝帶的區位配置及效益分析來作相關的探討。今天的議題非常多元化，希望藉著這些研究課題拋磚引玉，引起大家對森林集水區經營，有更多元的研究與討論。

再次感謝各位的共襄盛舉！也預祝會議圓滿成功！祝與會貴賓心想事成，平安快樂。謝謝！

目　錄

坡地試區逕流係數統計分佈之探討 ---------- 1
STATISTICAL DISTRIBUTION OF RUNOFF COEFFICIENT ON EXPERIMENTAL PLOTS
(曹舜評 Shun-Ping Tsao、曾依菽 Yi-Chiu Tseng)

坡地檳榔園水土流失控制之探討----------15
SOIL LOSSES CONTROL OF BETEL NUT PLANTATION ON SLOPELAND
(林壯沛 Jaung-pey Lin、盧惠生 Hui-sheng Lu、黃良鑫 Liang-shin Hwang)

台北市山坡地集水區暴雨逕流特性之探討 ----------31
CHARACTERISTICS OF STORM RUNOFF OF UPSTREAM WATERSHEDS IN TAIPEI CITY
(陳明杰 Ming-Chieh Chen)

流量歷線之基流分離應用三種不同方法之結果比較 ----------53
BASE-FLOW SEPERATION WITH THREE METHODS
(葉正霖 Jen-Lin Yeh、鄭皆達 J.D.Cheng、黃良鑫 Liang-shin Hwang)

不同土地利用型態之溪流水化學----------73
STREAM WATER CHEMISTRY ON DIFFERENT LAND USES
(王秋嫻 Chiu-hsien Wang、劉瓊霏 Chiung-pin Liu)

林道分級模式架構初步探討----------87
A PRELIMINARY STUDY ON FRAMEWORK OF FOREST ROAD CLASSIFICATION MODEL
(黃瓊彪 Chiung-piau Huang)

森林集水區生態能量及土砂能流特性分析 ---------- 101
A STUDY OF PROPERTIES OF ECOLOGICAL ENERGY AND SEDIMENTS FLOW IN FOREST WATERSHED
(蔡真珍 Chen-chen Tsai、林昭遠 Chao-yuan Lin)

中寮溪森林集水區泥砂啟動空間變化推估 ---------- 117
SPATIAL VARIATION ESTIMATION OF SEDIMENT INCIPIENT MOTION AT THE CHUNGLIAOSHI FOREST WATERSHED OF SOUTHERN TAIWAN
(盧惠生 Hui-sheng Lu、林介龍 Chieh-lung Lin)

台東太麻里溪集水區降雨崩塌對河道淤砂之影響---------- 135
THE RAINFALL LANDSLIDE INFLUENCE ON STREAM SEDIMENT DEPOSITION IN TAITUNG TAIMALICI　WATERSHED
(許中立 Chung-li Hsu、鍾斌全 Pin-chuan Chung、戴欣怡 Shin-yi Dai)

水庫集水區植生緩衝帶配置區位及效益評估之研究 ---------- 151
A STUDY OF PLACEMENT AND BENEFITS OF VEGETATED BUFFER STRIPS IN A RESERVOIR WATERSHED
(林昭遠 Chao-Yuan Lin、賴威任 Wei-Jen Lai、莊智瑋 Chin-Wei Chuang)

坡地試區逕流係數統計分佈之探討

曹舜評[1]　曾依萩[2]

【摘要】逕流係數為集水區水文現象之基本參數，本研究收集華梵大學坡地試區、鳳山園藝試驗分所、新化畜牧試驗分所及蓮華池之降雨逕流資料，利用逕流量及降雨量之比值求出逕流係數；並將逕流係數當成一隨機變數，並經由檢定找尋最佳之理論統計分佈。在本研究中以常態分佈和 Beta 分佈作為理論分佈，藉由統計分佈之分析，以了解逕流係數之特性，並試圖比較在不同覆蓋狀況下，逕流係數的變化。研究結果顯示除了鳳山試區不適合選用之統計分佈外，其餘三個地點的逕流係數均以 Beta 分佈較符合。

【關鍵詞】逕流係數、統計分析、Beta 分佈。

STATISTICAL DISTRIBUTION OF RUNOFF COEFFICIENT ON EXPERIMENTAL PLOTS

Shun-Ping Tsao[1]　Yi-Chiu Tseng[2]

【Abstract】In this study, we collect the rainfall-runoff data of experimental plots from Huafan University, Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch, Hsinhua Livestock Research Institute, and Lienhuachih. Runoff coefficient have been calculated from runoff volume and rainfall amount. Runoff coefficient was treated as stochastic variable. The normal distribution function and beta distribution was applied. The distribution of runoff coefficient can be represented by beta distribution except the experimental plots of Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch.

【Key words】Runoff coefficient, Statistical analysis, Beta distribution.

[1] 華梵大學環境與防災設計學系助理教授，通訊作者。電子郵件: sptsao@huafan.hfu.edu.tw
Assistant Professor, Department of Environmental＆Hazards-Resistant Design, Huafan University. Corresponding Author, E-mail: sptsao@huafan.hfu.edu.tw.

[2] 華梵大學環境與防災設計學系碩士班研究生。
Graduate Student, Department of Environmental＆Hazards-Resistant Design, Huafan University.

Ⅰ、前言

坡地開發、上游集水區河溪整治和水土資源保育等規劃及經營管理，需要集水區內之逕流量作為水文分析、設計之基礎。然而台灣地區之河溪因坡陡流短，流域面積小，經常缺乏實測之逕流量資料，因此需利用水文模式進行逕流量推估。在這些模式中，逕流係數的概念及應用，最為簡單易用，因經由降雨量及逕流係數，即可得相關之逕流量，故逕流係數一直被視為水文系統中的重要指標。逕流係數可分為三類（水土保持手冊，2006）：(1)洪峰逕流係數，為洪峰流量對集流時間內之平均降雨量比值。(2)一場暴雨逕流係數，為一場暴雨內之總逕流量與總降雨量的比值。(3)長時間逕流係數，係指長期（如年、季、月等）逕流係數，為長期內之總逕流量與總降雨量的比值。在本文中所探討的逕流係數為上述之第二類。應用逕係數時，在空間上，常將整個集水區的逕流係數視為一平均值；在時間上，亦將不同時期之逕流係數，考慮成固定值。但逕流係數受地形、土壤、地質、集水區面積、土地利用及覆蓋情形、降雨總量、強度及延時等因子影響，因此至今仍有學者進行相關研究。

逕流係數的研究常依尺度分為試驗小區及集水區尺度。試驗小區在本文中稱為坡地試區，因尺度小，影響水文反應之因子少，研究較為單純。集水區尺度則因為地下水及植生覆蓋等因子影響，因此研究較不易。

在試區尺度上，盧惠生（1976）收集鳳山園藝試驗分所、集集試區和新化畜牧試驗所，不同土地利用及坡面處理之降雨逕流資料，計算逕流率（即本文之逕流係數），並求得直線回歸方程式，再依逕流率分組以逕流指數替代。盧惠生等（1987）在畢祿溪及蓮華池之試驗集水區內，利用 60cm×60cm 之人工模擬降雨器，觀測人工降雨後所產生之逕流及沖蝕，並求取合理化公式之洪峰逕流係數。所得結果為畢祿溪針葉林、針闊混交林及蓮華池闊葉林最小平均值在 0.3～0.4 間，蓮華池草生地與竹林平均值在 0.45～0.5 間，蓮華池砍伐跡地與畢祿溪果園平均值在 0.55～0.6 間，蓮華池杉木林平均值為 0.65，蓮華池裸露地平均值為 0.89。

在集水區尺度上，盧惠生等（1990）以合理化公式法分析畢祿溪及蓮華池試驗集水區之洪峰逕流係數，分析結果得畢祿溪試驗集水區 No.11 與 No.12 洪峰逕流係數值分別為 0.23～0.39 及 0.19～0.31，蓮華池試驗集水區 No.4 與 No.5 分別為 0.52～0.72 及 0.52～0.69。

在統計分佈運用方面，Gottschalk and Weingartner（1998）結合利用降雨量、

逕流係數之頻率分析，並配合單位歷線，推導出洪峰逕流之分佈函數，其中以伽瑪分佈(Gamma distribution)作為降雨量之統計分佈，以 Beta 分佈(Beta distribution）作為逕流係數的統計分佈，並使用瑞士 17 個小集水區 192 場降雨逕流之資料進行驗證。Merz et al.（2006）利用 1981-2000 年期間，奧地利 337 個集水區，大約五萬個降雨事件之逕流係數資料分析其空間與時間變異，結果顯示逕流係係數的時間分佈可用 Beta 分佈表示。

本研究以華梵大學坡地試區、盧惠生（1976）及林壯沛（2002）之降雨逕流資料，利用逕流量及降雨量之比值求出逕流係數；並將逕流係數值視為隨機變數，再以 Beta 分佈及常態分佈進行分析，藉由統計分佈之分析，了解逕流係數統計之特性，並試圖比較在不同覆蓋狀況下，逕流係數的變化。

II、材料與方法

本研究收集華梵大學坡地試區 2004 及 2005 年降雨及逕流資料、盧惠生(1976）及林壯沛（2002） 文中試區之降雨及逕流資料，其中盧惠生（1976）文中所分析之降雨逕流資料，依試區及土地利用進行分析研究；在本研究則將同一試區之資料合併，視為同一組，計算得單場逕流係數值（event runoff coefficient）。華梵大學坡地試區所分析之降雨資料均大於 100 ㎜，故將盧惠生之資料區分為二，一為全部降雨所計算出的逕流係數，一為降雨量大於 100 ㎜之逕流係數。林壯沛（2002）蓮華池之資料因降雨量大於 100 ㎜之資料數過少，因此不再分組，視為一組數據進行運算。

（I）研究試區介紹

本研究收集各試區概況分述如下。

1. 華梵大學坡地試區

試區位於台北縣石碇鄉華梵大學內，土壤類型為崩積土，質地為砂質粘壤土，試區分為低矮草生、中型草生及高密草生三區。其中高密草生區為放任其自由生長之雜草，多數為五節芒族群，株高 1～1.6 公尺；中型草生區及低矮草生區則分別為自由生長之雜草，但不定期刈割至株高 0.4～1 公尺及 0～0.4 公尺間。表 1 為試區基本資料。

表 1. 華梵大學坡地試區基本資料

Table 1. Basic data of experimental plots from HuaFan University

類別	低矮草生區	中型草生區	高密草生區
記錄時間	2004～2005 颱風與豪雨	2004～2005 颱風與豪雨	2004～2005 颱風與豪雨
土壤質地	砂質粘壤土	砂質粘壤土	砂質粘壤土
試區面積(m^2)－小區	5×13	5×13	5×13
平均坡度(%)	55.4	55.4	55.4

2. 鳳山園藝試驗分所（盧惠生，1976）

鳳山園藝試驗分所位於高雄縣鳳山市，農地試區分別為鳳梨園、香蕉園、柑園和荔枝園等四個部份，各試區基本資料分列於表 2。其中鳳梨園在後文中又將其分為鳳梨園和鳳梨園（休閒期）兩組。

表 2. 鳳山園藝試驗分所試區基本資料

Table 2. Basic data of experimental plots from Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch

果園	鳳梨園	香蕉園	柑園	荔枝園
記錄時間	1957/5/24～ 1965/9/1	1965/5/21～ 1966/9/20	1967/5/21～ 1974/9/9	1967/5/24～ 1974/9/9
土壤質地(SCS土壤分類)	粘質壤土(C)	砂質壤土(A)	砂質壤土(A) 砂質粘壤土(B)	粘質壤土(C)
試區面積(m^2)－小區	3×16.67	5×15	5×15 3×16.67	3×15～3×24
平均坡度(%)	20	35	35 30	32～48

3. 新化畜牧試驗所（盧惠生，1976）

位於台南縣新化鎮新化畜牧試驗所之牧草地，試區資料分成盤固拉草牧草地和羅滋草牧草地，表 3 為試區基本資料。

4. 蓮華池（林壯沛，2002）

蓮華池位於南投縣魚池鄉，試區分為檳榔、草生及杉木三種不同覆蓋區。表 4

為試區基本資料。

表 3. 新化畜牧試驗所試區基本資料

Table 3. Basic data of experimental plots from Hsinhua Livestock Research Institute

類別	盤固拉草牧草地	羅滋草牧草地
記錄時間	1971/7/27～1974/9/8	1973/5/24～1974/9/8
土壤質地(SCS土壤分類)	壤土(B) 砂質壤土(A)	壤土(B)
試區面積(m^2)－小區	3×40	3×40
平均坡度(%)	28.6 32.5	28.6

表 4. 蓮華池試區基本資料

Table 4. Basic data of experimental plots from Lienhuachih

類別	檳榔區	草生區	杉木區
記錄時間	1992/4/2～1992/9/23	1992/4/2～1992/9/23	1992/4/2～1992/9/23
土壤質地(SCS土壤分類)	砂質粘壤土(B)	砂質粘壤土(B)	砂質粘壤土(B)
試區面積(m^2)－小區	5×10	5×10	5×10
平均坡度(%)	20	20	20

（II）資料分析

本文收集單場降雨事件之總降雨量與總逕流量，將總逕流量除以總降雨量作為事件逕流係數。在分析中先進行基本統計參數之計算，分別求出平均數（mean）、變異數（variance）及標準差（standard deviation）。

1. 平均數（mean）

平均數為資料分析中最為基本之參數，公式為

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \qquad (1)$$

其中 $\bar{x}$ 為平均數；n 為樣本數。

2. 變異數（variance）

變異數為資料值離散程度的參數，公式為

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \qquad (2)$$

其中 s^2 為變異數；$\bar{x}$ 為平均數；n 為樣本數。

3. 標準差（standard deviation）

標準差定義為變異數之正平方根，公式如下

$$s = \sqrt{s^2} \qquad (3)$$

式中 s 為標準差；s^2 為變異數。

（III）統計機率分佈

本研究以常態分佈及 Beta 分佈作為逕流係數統計特性之理論分佈，分述於下。

1. 常態分佈（Normal distribution）

常態分佈為最常見之機率分佈，形狀為左右對稱之鐘形曲線。公式如下

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \qquad -\infty \le x \le \infty \qquad (4)$$

式中 μ 為平均數；σ 為標準偏差。

2. Beta 分佈（Beta distribution）

Beta 分配的隨機變數限制在 0 到 1 之間，若描述可能值在 a 到 b 間時，要先轉換為 0 到 1 間，即可運用。其機率密度函數之公式為

$$f(X \mid \alpha,\beta) = \frac{1}{B(\alpha,\beta)} X^{\alpha-1}(1-X)^{\beta-1} \qquad (5)$$

$$B(\alpha,\beta) = \int_0^1 X^{\alpha-1}(1-X)^{\beta-1} dx = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)} \qquad (6)$$

其中 $\alpha>0$，$\beta>0$，$0<X<1$，$\Gamma(\alpha)$、$\Gamma(\beta)$及 $\Gamma(\alpha+\beta)$為伽瑪（Gamma）函數，若 $X<0$ 或 $X>1$，則 $f(X)=0$；利用動差法可估算參數 α、β 為

$$\alpha = \bar{x}\left(\frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{s^2} - 1 \right) \qquad (7)$$

$$\beta = (1-\bar{x})\left(\frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{s^2} - 1 \right) \qquad (8)$$

其中 $\bar{x}$ 為平均數，s^2 為變異數。

（IV）適合度檢定（goodness of fit）

為探討統計分佈之適用性，本文利用 K-S 檢定（Kolmogorov-Smirnov test）作為適合度之衡量指標。並利用誤差平方和（sum of squares due to error, SSE）檢視常態與 Beta 分佈，何者適用性較高。

1. 誤差平方和（SSE）

$$\mathrm{SSE} = \sum_{i=1}^{n} \left(f(x_i) - y_i \right)^2 \qquad (9)$$

其中 n 為樣本數；$f(x_i)$為估計值；y_i 為觀測值。SSE 值越小代表模式越符合。

2. K-S 檢定

K-S檢定適用於連續型機率分布，可用來檢驗變數的實際值累積機率與理論累積機率函數的密和程度。首先將樣本數n之資料由小至大排序為$x_1, x_2, x_3 \ldots\ldots x_n$，再計算其累積機率曲線：

$$S_n(x_k) = \frac{k}{n} \qquad (10)$$

其中k為滿足$x \le x_k$ 的樣本數；n 為樣本數。然後計算理論機率密度函數$F(x)$與觀測之累積機率$S_n(x_k)$之間的最大差值：

$$D_n = \max \left| F(x) - S_n(x) \right| \qquad (11)$$

K-S檢定就是在某一顯著水準α下，比較最大差值 D_n 與臨界值 D_n^{α} ：

$$P(D_n \le D_n^{\alpha}) = 1 - \alpha \qquad (12)$$

如果最大差值 D_n 小於臨界值 D_n^{α} ，則表示在顯著水準 α 下，可接受所假設的機率分布函數；反之，若最大差值 D_n 大於臨界值 D_n^{α} ，則所假設之機率分布函數不符合實測值的機率。各種不同 n 值，在不同顯著水準 α 下之臨界值 D_n^{α} ，可查表得知，本文採用顯著水準 α 為 0.05 計算，即 95%之信賴區間。

III、結果與討論

利用各試區降雨及逕流資料計算得之逕流係數值，並利用常態分佈與 Beta 分佈以描述各試區逕流係數值之頻率分析結果，分別討論於後。

（I）各試區逕流係數值之統計參數

各試區頻率分析、常態及 Beta 分佈檢定之結果列於表 5。表中可見在 K-S 檢定中，華梵大學試區、新化試區、蓮花池試區均通過檢定；鳳山試區除了鳳梨園在休閒期通過檢定外，其餘均未通過。由 SSE 可見除了華梵試區低矮草生區常態分佈較 Beta 分佈佳之外，其餘均是 Beta 分佈較適用於這些試區的逕流係數。

表 5. 各試區逕流係數頻率分析 Beta 分佈與常態分佈適合度檢定結果

Table 5. Goodness fitting of runoff coefficients to Beta distribution and normal distribution

試區地點	果園/類別	誤差平方和（SSE）		K-S 檢定 顯著水準 α=0.05 查表值	K-S 檢定 計算值 (通過○未通過╳)	
		Beta 分佈	Normal 分佈		Beta 分佈	Normal 分佈
華梵大學坡地試區	低矮草生區	0.099	0.080	0.29	0.134(○)	0.127(○)
	中型草生區	0.032	0.054	0.29	0.081(○)	0.106(○)
	高密草生區	0.056	0.120	0.29	0.111(○)	0.175(○)
鳳山農藝試驗分所	鳳梨園	0.158	0.728	0.045	0.179(╳)	0.269(╳)
	鳳梨園(休閒期)	0.080	0.353	0.212	0.148(○)	0.215(╳)
	香蕉園	0.143	0.833	0.11	0.232(╳)	0.236(╳)
	柑園	0.071	1.331	0.048	0.152(╳)	0.294(╳)
	荔枝園	0.045	0.319	0.065	0.075(╳)	0.135(╳)
新化畜牧試驗分所	盤固拉草	0.067	0.313	0.102	0.090(○)	0.177(╳)
	羅茲草	0.036	0.068	0.192	0.093(○)	0.132(○)
蓮華池	檳榔區	0.073	0.143	0.25	0.134(○)	0.176(○)
	草生區	0.023	0.045	0.25	0.079(○)	0.098(○)
	杉木區	0.044	0.034	0.25	0.097(○)	0.088(○)

表 6 為各試區統計特性之基本資料，並包含 Beta 分佈之參數。雖然目前兩種統計分佈應用於鳳山試區的逕流係數時，並未通過檢定，但本研究依舊將其統計參數列出。

在表 6 中的平均值及標準差，四個地區的試區中並未有明顯的差異。整體而言平均值皆在 0.3 以下。就平均值而言，蓮花池試區的值較小。變異數以鳳山試區較大。

由表 6 中 Beta 分佈的α與β參數來看，鳳山試區的值明顯地較其他地區小，

其α值均小於 1。

從區域來看，華梵大學的各個試區代表著植生狀況的差異，由表中逕流係數的平均值可知低矮植生區之平均值最大，高密區最小。此因高密區植生狀況愈良好，截留及入滲率高，故降雨時，其逕流產生率愈低。在蓮花池的試區，則是代表植生類別，逕流係數由大至小，依次是檳榔園、草生區及杉木區。

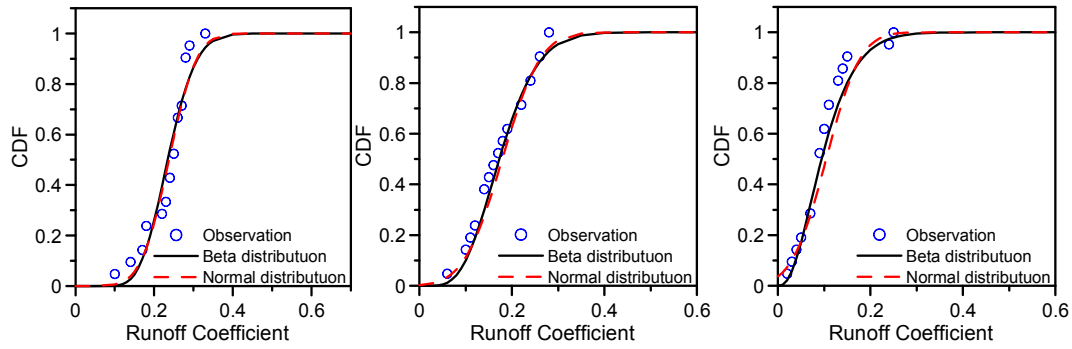
表 6. 統計基本參數

Table 6. Basic statistical parameters

試區地點	果園/類別	Beta 分佈		平均數	標準差	變異數	資料個數
		α	β				
華梵大學坡地試區	低矮草生區	13.788	44.239	0.238	0.055	0.003	21
	中型草生區	6.000	27.512	0.179	0.065	0.004	21
	高密草生區	2.781	23.890	0.104	0.058	0.003	21
鳳山農藝試驗分所	鳳梨園	0.433	4.148	0.095	0.124	0.015	912
	鳳梨園(休閒期)	0.485	1.911	0.202	0.218	0.048	39
	香蕉園	0.365	1.765	0.171	0.213	0.045	152
	柑園	0.236	1.315	0.152	0.225	0.051	811
	荔枝園	0.676	2.241	0.232	0.213	0.045	443
新化畜牧試驗分所	盤固拉草	1.203	5.298	0.185	0.142	0.020	178
	羅茲草	7.643	52.335	0.127	0.043	0.002	48
蓮華池	檳榔區	2.297	18.217	0.112	0.068	0.005	27
	草生區	2.445	29.982	0.075	0.046	0.002	27
	杉木區	8.331	548.557	0.015	0.005	0.00003	25

（II）各試區逕流係數值之統計分佈

為進一步了解實際逕流係數的累計分佈及理論累積分佈函數（CDF）的差異，本研究將實際的逕流係數以機率點繪的方式繪出，並與理論的分佈函數繪在一起，進行分析。圖 1 即華梵大學坡地試區三種植生狀況實際逕流係數與 Beta 分佈及常態累積分佈的比較圖。三種植生狀況的累積分佈函數皆為 S 型， 當α與β參數值均大時，Beta 分佈會很接近常態分佈。當α參數變小，則分佈會逐漸變為右偏之分佈函數。



(a)低矮草生區　　(b)中型草生區　　(c)高密草生區

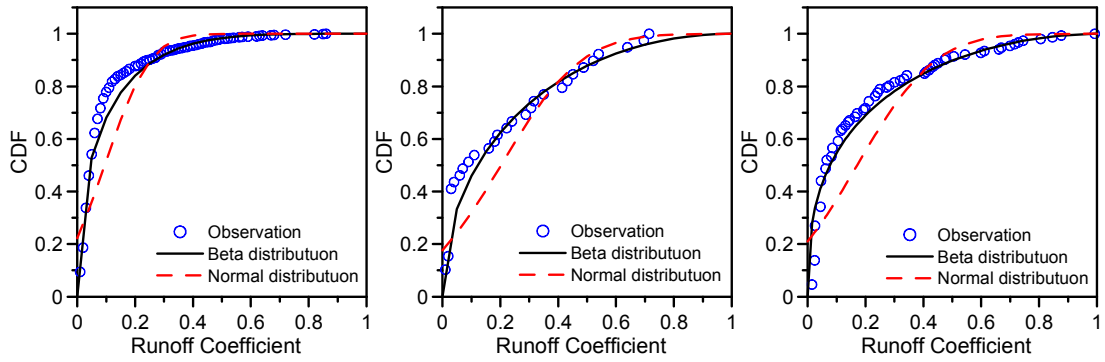
圖 1. 華梵大學坡地試區逕流係數之機率點繪圖及常態、Beta 分佈之 CDF 圖

Fig. 1. Experimental data and distribution function of runoff coefficients on experimental plots from HuaFan University

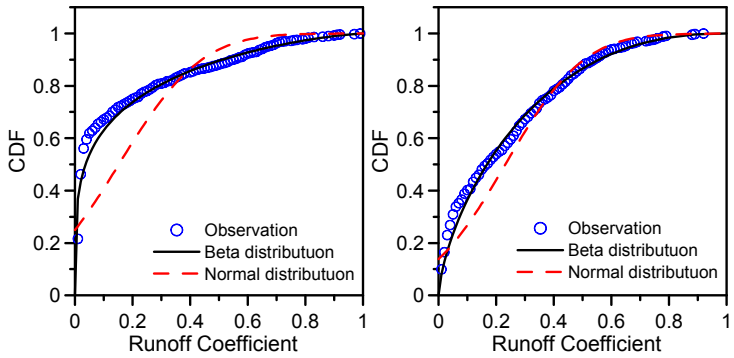
圖 2 為鳳山園藝試驗分所農地試區資料實際逕流係數與 Beta 分佈及常態累積分佈的比較圖。試區分為鳳梨園、鳳梨園休閒期、香蕉園、柑園和荔枝園等。圖中可見二種理論分佈與實測值均有偏離，尤其是常態分佈其差異更大。究其原因，可能因為本區域之試驗種類多，在本研究將其合併時，因資料所包含的環境變化增大，造成變異的原因增加，所得之逕流係數分散，故甚難找到適切的理論分佈來表示。

圖 3 為新化畜牧試驗分所實際逕流係數與 Beta 分佈及常態累積分佈的比較圖。由圖中及表 5 可知 Beta 分佈較常態分佈佳。盤固拉草的平均值及變異均較羅茲草大。羅茲草則較盤固拉草具有明顯的常態分佈特性。

圖 4 為蓮華池試區實際逕流係數與 Beta 分佈及常態累積分佈的比較圖。試區分為檳榔、草生及杉木三種不同植生覆蓋分區。分析結果，亦是 Beta 分佈與常態分佈皆能適切的表達實際的逕流係數，杉木區逕流係數小且集中，具有常態分佈優於 Beta 分佈之現象。



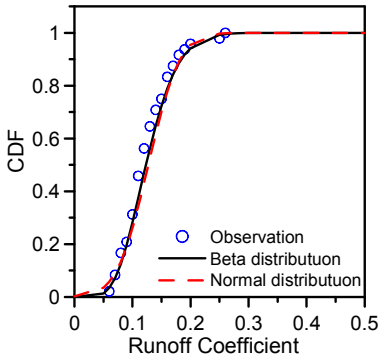
(a)鳳梨園　　(b)鳳梨園休閒期　　(c)香蕉園



(d)柑園　　(e)荔枝園

圖 2. 鳳山園藝試驗分所逕流係數之機率點繪圖及常態、Beta 分佈之 CDF 圖

Fig. 2. Experimental data and distribution function of runoff coefficients on experimental plots from Fengshan Tropical Horticultural Experiment Branch

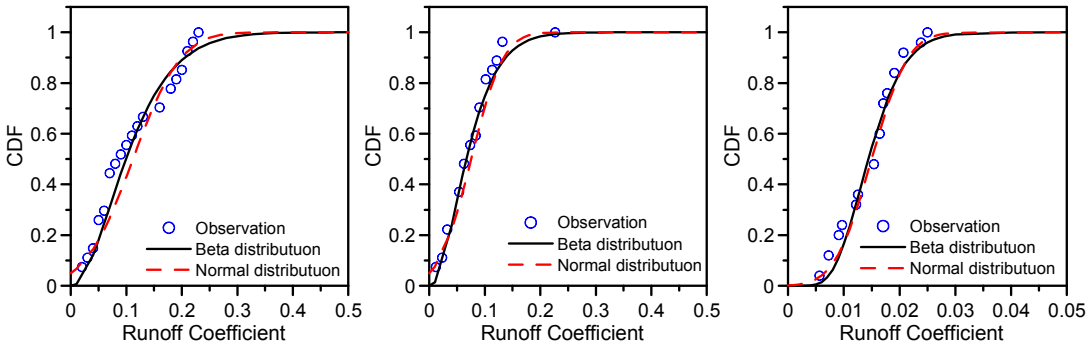


錯誤! 物件無法用編輯功能變數代碼來建立。

(a)盤固拉草牧草地　　(b)羅茲草牧草地

圖 3. 新化畜牧試驗分所逕流係數之機率點繪圖及常態、Beta 分佈之 CDF 圖

Fig. 3. Experimental data and distribution function of runoff coefficients on experimental plots from Hsinhua Livestock Research Institute



(a)檳榔區　　(b)草生區　　(c)杉木區

圖 4. 蓮華池逕流係數之機率點繪圖及常態、Beta 分佈之 CDF 圖

Fig. 4. Experimental data and distribution function of runoff coefficients on experimental plots from Lienhuachih

IV、結論

逕流係數會受地區性降雨類型、地表覆蓋、地形、土壤種類及降雨前土壤水分含量的影響，一般在進行研究時，並未能將諸多影響因子逐一列出，事實上也無法將影響的因子完全列出，是以每次降雨所得之逕流係數均會有所差異。故本研究將逕流係數視為隨機變數，並利用理論之統計分佈函數與逕流係數之累計分佈進行比較。試圖藉由統計分佈來探討植生覆蓋所造成之差異。

在本研究中分析的結果，華梵大學坡地試區 21 場降雨逕流係數的分佈，可用 Beta 分佈及常態分佈適切的表示。低矮植生區之逕流係數值較接近常態分佈，具有集中對稱的特性。高密植生區則較適合 Beta 分佈，且其分佈具有右偏之現象，即部分降雨時之逕流係數具有較小的值。

鳳山園藝試驗分所試區之逕流係數分佈，以 Beta 分佈及常態分佈表示時，多數未能通過檢定，其原因可能在鳳山之實驗種類多，其資料量甚大，所包含的環境變化亦大，造成變異的原因增加，且所得之逕流係數分散，故甚難找到適切的理論分佈來表示。但就本研究而言，Beta 分佈在此處比常態分佈適合。

新化畜牧試驗分所試區逕流係數分析結果，Beta 分佈亦較常態分佈佳。盤固拉草的平均值及變異均較大，羅茲草則較盤固拉草具有明顯的常態分佈特性。

蓮華池試區逕流係數分析結果，亦是 Beta 分佈與常態分佈皆能適切的表達實際的逕流係數，杉木區逕流係數小且集中，具有常態分佈優於 Beta 分佈之現象。

V、參考文獻

林壯沛（2002）坡地種植檳榔對台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學系博士論文。

鄭皆達、林莉莉（1992）台灣上游集水區洪峰流量的產生和計算方法之研究。中華水土保持學報 23(2):29-39。

盧惠生（1976）鳳山、集集、新化坡地果園流失小區逕流指數之估測。國立中興大學水土保持學系碩士論文。

盧惠生、林壯沛、陸象豫（1987）集水區不同土地利用逕流與沖蝕之研究。中華水土保持學報 18(2):112-121。

盧惠生、林壯沛、陸象豫、黃良鑫（1990）上游小集水區逕流係數之研究。中華水土保持學報 21(1):1-11。

Gottschalk, L., Weingartner, R. (1998) Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph. J. Hydrol. 208: 148-162.

Merz, R., Blöschl, G., Parajka, J. (2006) Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. J. Hydrol. 331: 591-604.

2008 森林集水區經營研討會論文集:15-30

坡地檳榔園水土流失控制之探討

林壯沛[1]　盧惠生[2]　黃良鑫[3]

【摘要】檳榔號稱「台灣綠金」，年產值 98 億元，占農畜產值 2.6 %，僅次於水稻，為臺灣的高經濟作物。栽植檳榔回收快，利潤大，農民意願高，栽植面積快速增加。根據農委會 2006 年臺灣電子農業年報，民國十年檳榔栽種面積 693 ha，至民國九十五年栽植面積達 50,554 ha，增加 72 倍。檳榔樹冠與一般果樹、造林木有明顯區別。山坡地栽植檳榔，衍生土壤沖蝕與水土保持問題。依據蓮華池坡地檳榔園水土流失試驗，結果顯示檳榔區逕流沖蝕最大，草生地次之，杉木區最小，三者逕流比為 10.4:5.8:1，土壤流失量比為 10.2:7.2:1。山坡地檳榔園配合百喜草與雜草全園覆蓋，能減少地表逕流量 50 %～66 %，加上山邊溝水土保持處理，地表逕流量能降低 70 %～78 %，若恢復造林則可降低地表逕流量約 84 %。

【關鍵詞】檳榔、逕流、沖蝕、坡地。

SOIL LOSSES CONTROL OF BETEL NUT PLANTATION ON SLOPELAND

Jaung-pey Lin[1]　Hui-sheng Lu[2]　Liang-shin Hwang[3]

【Abstract】The betel nut was known as “the green gold of Taiwan”. The annual income of betel nut was 9.8 billion dollars and 2.6% of agriculture products. It was Taiwan's high economic crop and next to the income of paddy rice. Planting the betel nut belonged to high and fast profit. Therefore, planting area of betel nut increased very fast with a farmer’ will. Based on annual electronic agriculture report of committee of

1 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: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
2行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組研究員。
Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author.
3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.

Agricultural, betel nut area increased 72 times from 693 ha in 1921 to 50,554 ha in 2006. The crown characteristics of betel nut were rather different from those of fruit trees and China fir. The planting betel nut on slopeland played an important role in soil erosion and conservation questions. Based on runoff and soil erosion experiments of betel nut plantation at Lienhuachih, the surface runoff ratios were 10.4 for betel nut plot, 5.8 for grass plot and 1 for China fir plot, as well as the soil erosion ratios were 10.2 for betel nut plot, 7.2 for grass plot and 1 for China fir plot. When planting betel nut on slopeland, surface runoff can be reduced 50-66% in Bahia grass and weed covering treatment, 70-78% in Bahia grass and weed covering with hillside ditches treatment, and 84% in forest restoration.

【Key words】Betel nut, Runoff, Erosion, Slopeland.

Ⅰ、 前言

檳榔是訂婚禮俗中必備的禮品，取其結果壘壘，象徵多子多孫吉祥之意。農家園地周遭和房舍前後空地，多會栽種檳榔，增加綠意或為庭園觀賞。檳榔散植於山谷溪旁、水庫周遭、圳邊、道路兩旁和田邊作為行道樹、界標、防風樹。檳榔副產物之利用頗廣，現今已有更好替代品（林壯沛，1992）。栽植檳榔純為生產檳榔提供嚼食，已成為交際應酬必備良品。

臺灣農村勞力普遍缺乏，邁向高齡化，許多繁重農事工作缺乏人手，無法勝任。檳榔栽植容易，回收成本快，利潤好；國人嚼食檳榔人口眾多，需求量大，估計臺灣嗜好嚼食檳榔的人口已超過 280 萬人（傅祖傳、黃萬傳，1991）。農民栽植檳榔意願高，栽植面積不推自廣，急速增加。根據農委會 2006 年臺灣電子農業年報，民國十年檳榔栽種面積 693 ha，民國六十年為 1,607 ha，增加 1.3 倍，至民國九十五年栽植面積達 50,554 ha，增加 72 倍。檳榔年產值 98 億元，占農畜產值 2.6%，僅次於水稻，為果品類之冠，已成為臺灣的高經濟作物，檳榔號稱「台灣綠金」。

農民盲從栽植檳榔，面積逐年增加，朝向山坡地開發利用，形成本省中南部滿山遍谷，處處檳榔。大面積土地開挖栽植檳榔，使林木植生與地被覆蓋破壞，土壤結構與性質的改變，影響土壤入滲與土壤水之儲蓄移動，在水循環過程與各

項目變化，對檳榔園的水土保持與集水區水文整體反應有相當深遠的影響（林壯沛 1995；陳信雄 1994；張文紹、吳輝龍，1997）。農民栽植檳榔著重於檳榔品質與產量之提升，而忽視水土保持之重要性。本文乃對檳榔園水循環各項目包括檳榔園降雨、截留、蒸發、蒸散、滲透、土壤水份儲蓄及移動、地下水、逕流、沖蝕等觀測資料分析，探討坡地種植檳榔的水土流失控制，供相關單位輔導檳榔園水土保持之酌參。

Ⅱ、 坡地土壤沖蝕特性

山坡地介於高山與平地之間，受地形、地質、土壤、降雨及植生等因子影響，是水土資源保育與土壤沖蝕之敏感地區，山坡地栽植檳榔取代森林，林地植生與地被改變，土壤性質與結構破壞，衍生土壤沖蝕與水土保持問題，引起各界重視。

本省雨量充沛，臺灣年平均降雨量在 2,500 mm 左右，雨量集中在 4～10 月；降雨量分佈由西部往東逐漸增加，至中央山脈達到最高，再依次遞減；向北則以東北角 5,000 mm 最大，北部平均降雨量為 2,911 mm，東部為 2,684 mm，向南以屏東地區 4,500 mm 最大，南部平均降雨量為 2,513 mm，西部平均降雨量為 2,075 mm。降雨特性如雨量強度、降雨延時及總量，對土壤沖蝕有密切關係，以降雨沖蝕指數來衡量降雨對土壤沖蝕能力；沖蝕指數越大，表示土壤沖蝕越嚴重，水土流失越大；反之則水土流失小。根據臺灣等降雨沖蝕指數圖（黃俊德，1989），臺灣西部地區之年沖蝕指數約 400，向東逐健遞增至南投附近為 800；海拔高度大的地方，降雨量大，坡度陡，降雨沖蝕指數大，土壤沖蝕越大，相對水土流失越大。

土壤抗沖蝕力是水土流失之一重要影響因素，土壤質地、土壤分散性、孔隙率、有機質含量、土壤滲透性等不同，抗沖蝕力也有所差異，抗沖蝕力高，水土流失少；反之，抗沖蝕力低，水土流失嚴重。根據本省坡地土壤之相對沖蝕性初步歸類 （王新傳，1979）如表 1，抗沖蝕力高之土壤不易分散，且因土壤構造發育良好，相對透水性快，所以土壤沖蝕低；反之抗沖蝕力低之土壤，由於粘粒含量低而坋粒含量高，土壤易分散；無良好土壤發育構造者，相對透水性慢，因降雨期間，受雨滴打擊而容易分散，超滲雨量增加後，導致大量地表逕流產生，而引起水土之流失。

表 1. 本省坡地土壤之相對沖蝕性初步歸類（王新傳，1979）

Table 1. Soil erodibility of slopeland in Taiwan

相對沖蝕性	土類	分散性	相對透水性
1.低	北部之粘板岩及安山岩土壤。	低	快
2.尚低	北部砂頁岩土壤、東部片岩及安山岩質集塊岩土壤。	尚低	快
3.中	中、南粘板岩質頁土壤，東、南部軟質頁岩土壤，及各地洪層土壤。	尚低	中
4.稍高	中、南部砂頁岩土壤，西北部軟質砂岩土壤。	中	中
5.高	南部泥岩土壤。	高	慢

Ⅲ、 檳榔植物特徵與習性

檳榔又稱「青仔欉」，為熱帶或亞熱帶園藝作物之常綠大喬木，屬棕櫚科，性喜高溫 25～30℃、潮濕多雨，年雨量 1,600～2,400 mm，終年無霜。檳榔植株為單幹型，大型之長橢圓形羽狀複葉聚生於幹頂，幹莖通直不分歧，樹冠固定而少有變化，無側枝與濃密之枝葉群，葉面積指數（LAI，Leaf area index）僅達 1.36，而蓮華池地區天然闊葉林之 LAI=9、30 年生杉木林之 LAI=8.4，相比較之下；檳榔樹與一般果樹、造林木有側枝形成多層樹冠之樹型有很明顯差異（林壯沛，1995）。檳榔幹莖為細長之圓柱，幹基稍微膨大，胸高直徑約 10～20 cm，株幹有明顯規則之環狀葉痕節間長 5～10 cm，成齡植株高 10～20 公尺，成活期長達 50 年以上，莖幹組織強韌而富於撓屈性，耐風力強，少有風折現象。

葉為羽狀複葉，葉長 1～1.5 m，樹冠直徑 2.5～3 m，小葉 40 枚呈線狀披針形，葉面光滑無毛，有摺皺或裂痕，葉鞘包圍幼幹如（圖 1），葉呈螺旋狀排列，成 4/11 互生，相鄰兩葉夾角約 130 度，成齡植株每年抽葉 7～9 片；葉片叢集聚生於頂，樹冠呈天然漏斗型。檳榔從定植到開花結果，約需五、六年時間；每年抽穗結果一次，著生 3～4 苳，多者可達 800～900 粒，少者僅 200～300 粒。檳榔結果盛產期為 12～15 年生，管理良好可繼續生產 30～50 年。檳榔果實含有多種植物鹼，（江瑞湖，1995；陳紹光，1995），咀嚼檳榔有禦寒、提振精神、助消化和去除口臭之功能，為南北奔波的卡車司機與計程車司機或是夜貓族所喜愛。

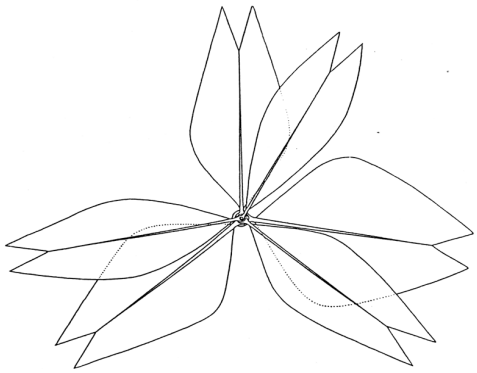


圖 1. 檳榔樹冠投影

Fig. 1. Canopy orthography of betel nut tree

檳榔產期，自每年 5 月屏東地區 3～4 分熟早花檳榔搶割上市後開始，各地檳榔才由南到北次第生產上市，然後遞減至翌年 4 月結束生產。海拔高 500 m 以上檳榔產區，每年 10 月才開始生產，一直到次年 1～5 月仍為盛產期。海拔高、溫度低，檳榔生長緩慢，果實成熟較晚，留在花穗時間較能耐久之故。有心人看準檳榔此一習性，大面積開發山坡地為檳榔園，以獲取晚期檳榔產量低時之厚利。

檳榔根系為團網型之不定鬚根，由微管束鞘分化而成，鬚根直徑約 2～3 mm，主要作用在吸收養份與水份，鬚根系以 30～40 度角向下扎入土層，大部份分佈在 50 cm 的表土內如，若土壤乾燥、立地條件不好，鬚根可向下深入 1～2 m 深，側向兩旁也能延伸長達 2 m 左右，除吸收地表水，並兼具有支撐樹體之功效，若環境濕潤或在基部培土，最下部節上會抽出大量的氣根及支持根，直徑約 0.8～1.2 cm。

IV、 檳榔栽植管理

檳榔用種子播種繁殖，容易雜交，變種極多，影響日後植株生長、結果之品質、產量與結果時間。檳榔育苗時苗床應選在陽光充足，排水良好，土壤疏鬆肥沃處，以行株距 15～20 cm 播種，經覆土、蓋草後，並作澆水及防虫工作；檳榔育苗期可長達 2～3 年，其間要經過移植一次，以促進發育，當苗高 70～80 cm 時，方進行定植。

檳榔園採全園栽植，雨季前完成定植整地，挖定植穴長寬 60 cm 見方，深 45 cm，施放基肥回填表土（陳榮明，1989）。初夏雨季以 2～3 m 行株距定植，每公

頃種植數約 1,200～3,000 株，種植太密，光照不足，影響日後產量。定植後頭三年以殘株覆蓋，蔭蔽檳榔基部，生長期以草類植生覆蓋，或間作有經濟價值的作物。除草是檳榔幼齡期之重要工作，定植後第 1 年除草 4 次，以鏟除植株周圍雜草，避免蔓藤纏繞及競爭養分，栽植後每年施用有機肥料，以雞糞、稻殼為多。

V、 檳榔園水文循環特性

降雨時，雨水藉由林木之葉、枝、樹幹表面、枯枝落葉層、土壤表面、灌木叢、土層中根群分布層（root zone）、底土（subsoil）的空間分佈貯存，再經由土壤水份之移動及地表水、中間水、地下水之流出，然後蒸發重返大氣；聯結各部分水份動態的變化，包括降雨、截留、滲透、土壤水份儲蓄及移動，此一經由水文過程聯結的連續水分移動即所謂的水文循環（hydrologic cycle）如圖 2。

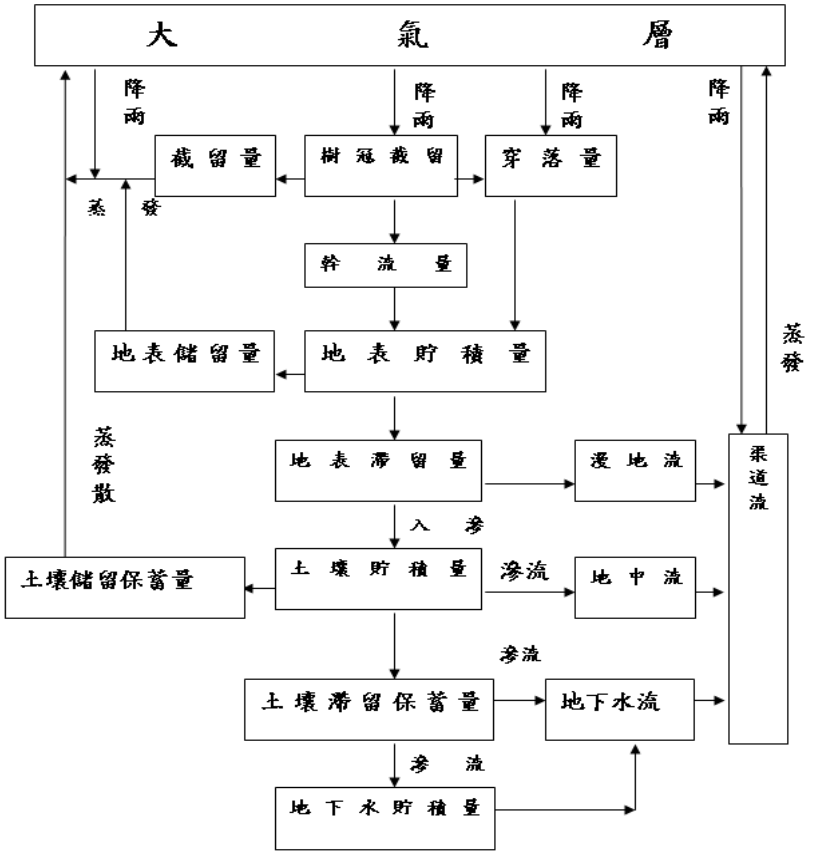


圖 2. 森林集水區的水文循環

Fig. 2. Hydrologic cycle on forest watershed

檳榔的樹冠為漏斗型、形狀固定而疏散；降雨時，穿落雨量很大，佔年雨量之 72 %；羽狀複葉具摺皺與葉面有葛質，雨滴停留在檳榔葉面上之量很少，檳榔樹冠的貯積雨量為 1.09 mm（林壯沛，2002），截留蒸發量佔年降雨量 6.3 %，森林佔 8～24 %；葉面上的雨水匯集後沿葉梢掉落地面，增加雨水對地面打擊；一部份因葉面摺皺匯集，經由葉柄沿幹莖順流而下成為幹流，檳榔幹流量相當可觀（林壯沛，1995；吳輝龍等，1997），佔 21.7 %，樹冠截留蒸發量大時，落到地面的淨雨量小，反之則淨雨量大，樹冠截留蒸發量與幹流量對淨雨量有互補關係，檳榔園淨雨量比森林大，如表 2。

表 2. 不同林份穿落量、幹流量與截留量之雨量分配

Table 2. Percentages of througfall, stemflow and interception for different vegetation covers

項　目	林　份　別								
	臺灣櫸*	闊葉林*	大葉桉*	杉木林*	肖南林*	相思樹**	馬尾松**	杉木林**	檳　榔***
穿落量%	90.87	85.92	88.96	84.80	80.86	69.11	77.33	73.38	71.99
幹流量%	1.41	1.67	3.30	0.83	9.09	14.37	7.68	3.03	21.71
截留量%	7.72	12.41	7.74	14.22	10.05	16.52	14.99	23.59	6.30
Total %	100	100	100	100	100	100	100	100	100

*潘家聲 1966、1974、1974a、1974b、1976 資料
**周　恆、江永哲（1966）
***林壯沛（2002）

土壤總體密度（bulk density）隨土壤深度增加而增加，土壤有機質含量與孔隙率比則隨土壤深度增加而減少。孔隙量越多，土壤可以滲透與貯積的水量就越多；有機質含量能夠吸收水量為其本身重量之 2～3 倍，增加土壤水滲透的機會，影響土壤水份貯積量。山坡地大面積開挖整地，栽植檳榔取代森林，擾動土壤，嚴重破壞土壤結構，致土壤質地密緻，有機質流失、土壤孔隙大量減少，影響土壤水份之貯積與移動，原有森林的的理水機能很快跟著減低。從蓮華池不同覆蓋地的土壤性質採樣分析如表 3，明顯看出森林之土壤有機質含量與孔隙率比其他覆蓋地為佳，新植檳榔園比砍伐跡地與成齡檳榔園好。新植檳榔園初期還有森林土壤的

特性，隨著時間增加，土壤孔隙填塞，孔隙率減少，土壤密實，致總體密度增加，有機質含量分解快速，補充量少，減少地表水滯留量，不利於土壤入滲與水份之貯積，坡地栽植檳榔對土壤水分之貯積可說是負面的影響。

表 3. 蓮華池地區不同覆蓋地之土壤質地分析

Table 3. Soil texture characteristics of different covers

調查地區	土壤深度* (cm)	土壤性質			
		土壤質地	總體密度(g/cm^3)	有機質含量(%)	孔隙率(%)
成齡檳榔園	0	坋質壤土	1.19	3.30	55.09
	30		1.43	1.91	46.04
	60		1.50	0.96	43.40
新植檳榔園	0	坋質壤土	1.00	5.18	52.26
	30		1.22	2.16	53.96
	60		1.24	1.56	53.21
砍伐跡地	0	坋質壤土	1.16	4.22	55.92
	30		1.26	2.20	52.15
	60		1.33	1.84	50.84
天然闊葉林	0	坋質壤土	0.63	10.85	74.49
	30		1.04	2.16	60.42
	60		1.21	1.78	54.84

*土壤取樣以取樣罐打入土壤之上層蓋為起算深度

降雨時期，落到地面的淨雨量大部份滲入土壤，有多餘水量才產生地表逕流，地表逕流與土壤滲透容量有密切關係。土壤孔隙大小影響土壤滲透率，孔隙量多寡影響土壤貯積水量。初植檳榔園有森林土壤的特性，比成齡檳榔園佳，隨時間增加，孔隙填塞，土壤密實，導水性減低。根據蓮華池地區之土壤滲透試驗表 4，天然闊葉林最終入滲率為 64 cm/hr，其次為新植檳榔園、砍伐跡地之 16.8 cm/hr、14.4 cm/hr，成齡檳榔園之最終入滲率最少為 8.4 cm/hr，不利土壤入滲與水份貯積。

表 4. 檳榔園與林地之土壤入滲

Table 4. Observed infiltration capacity values of betel nut plantation and forest cover

地面覆蓋	初滲透率(cm/hr)	終滲透率(cm/hr)	何登氏推估式
新植檳榔園	84.0	16.8	$f_t=16.8+(84.0-16.8)e^{-1.73t}$
成齡檳榔園	126.0	8.4	$f_t=8.4+(126.0-8.4)e^{-2.01t}$
天然闊葉林	109.4	64.0	$f_t=64.0+(109.4-64.0)e^{-0.67t}$
砍伐跡地	38.7	14.4	$f_t=16.8+(38.7-14.4)e^{-0.81t}$

地中水移動與地下水補助為坡地檳榔園水源涵養評估的重要因子，地中水量受檳榔園土壤滲透能大小而決定，影響地下水補注。降雨時，大部分降下的水量入滲於土壤中，做為土壤儲蓄保留（retention storage）提供檳榔園蒸發與蒸散之用，一部份則滯留保蓄（detention storage）在土壤中，或滲漏入地下水位，成為溪流的基流量。事實上，這兩樣水量在土壤中不易區分，以蓮華池滲漏計對不同處理覆蓋區之降雨與流出量觀測，假設滲漏計底層流出的水量為地下補注量，這些底層流出量必須為滯留保蓄量，以降雨量扣除地表逕流量及滯留保蓄量來反推，估算土壤儲蓄保留量，有助於瞭解坡地檳榔園水循環地中水的移動與地下水的補注。

選取蓮華池土壤入滲計三場降雨事件如表 5，地表逕流高峰均發生在雨量集中之後，集流時間很短未超過 6 分鐘。地表逕流高峰過後 20 分鐘中層流出量高峰產生，此時檳榔區中層之高峰流出時間比杉木區快。地表逕流高峰過後 40～50 分鐘接著為底層流出量的高峰，底層流出量受降雨強度的影響很小，流出量的變化均較平滑，受土壤導水度、粗孔隙量、含水量等因子的物理性質影響較大。

小雨量為 14.5 mm 時，因夏日蒸發散量大，臨前降雨量少，滲漏計試區土壤乾燥，土壤入滲率大，滲漏快速，土壤尚未飽和，雨勢即停止，檳榔區、草生區及杉木區之表層流出量都很小，中底層流出量，包括中層及底層流出量，僅佔降雨量之 3.5 %、5.6 %、2.2 %，扣除地表逕流與中底層流出量，為土壤吸收的水量分別為 91.4 %、85.6 %、96 %，絕大部分水量都儲蓄在土壤層中。

中雨量為 22.5 mm 時，地表及中層流出量仍少，底層流出量增加，佔全部流出量之多數，中底層流出率增加分別為 22.3 %、21.1 %及 22.0 %，三個試區之中

底層流出量大致相當。因為中層流出量都很小，顯示土壤滲漏持續在進行。降雨量扣除全部流出量，分別有 70.8 %、56.4 %及 76.3 %之降雨量暫時貯積在土壤中，貯積的水量仍超過一半以上。杉木區因蒸發散量大，耗用水量多，能儲存的水量比檳榔區多，這種情形學者認為降雨初期，森林較能涵蓄水源，調節流量，不同於一般土地利用。可以從檳榔區之地表逕流增加，而杉木區之地表逕流未隨著增加，得到證明。

大雨量為 41.0 mm 時，表層、中層、底層流出量均增加，以底層流出量增加的幅度最大，杉木區底層之流出率比檳榔區大，表層、中層流出率則比檳榔區小。各區之中底層流出率分別為 52.5 %、73.5 %及 65.4 %，顯示杉木區及草生區的導水度與滲漏能力均大於檳榔區。全部流出量的比率，檳榔區為 59.8 %，草生區為 86.6%及杉木區為 67.1 %，剩餘留在土壤中的水量為儲留保蓄量，一般認為土壤儲留保蓄量都是提供植物吸收做為蒸發散之用，檳榔區為 40.2 %，草生區為 13.4 %及杉木區為 32.9 %。檳榔區土壤含水量逐漸飽和，滲漏速度減緩，貯積在土壤中的水量增大，中層流出量隨著增加。土壤孔隙填滿水分，無多餘空間儲存額外水量，土壤勢能降低，入滲能減少，繼續降下之雨量都以地表逕流方式流出，成為增加地表逕流量。杉木區因土壤尚未飽和，土壤勢能高，滲透能大，滲漏快，地表及中層逕流量很小，比檳榔區少，底層流出量則較大，且大於檳榔區很多，較能涵養水源，相對的檳榔區對涵養水源功能不如林地，地表逕流量大，較易產生地表沖蝕。

表 5. 土壤滲漏計不同處理區之降雨與流出量份析

Table 5. Outflows of different treatments at lysimeter study sites

雨量 (mm)	檳榔區(mm)			草生地(mm)			杉木區(mm)		
	表層	中層	底層	表層	中層	底層	表層	中層	底層
14.5	0.75	0.18	0.31	1.27	0.22	0.60	0.26	0.31	0.01
	5.1%	1.3%	2.2%	8.8%	1.5%	4.1%	1.8%	2.1%	0.1%
22.5	1.54	0.27	4.75	5.05	0.66	4.10	0.39	0.47	4.47
	6.9%	1.2%	21.1%	22.5%	2.9%	18.2%	1.7%	2.1%	19.9%
41.0	2.98	4.12	17.38	5.38	2.46	27.66	0.69	1.74	25.03
	7.3%	10.1%	42.4%	13.1%	6.0	67.5%	1.7%	4.3%	61.1%

VI、檳榔園之水土流失情形

地表逕流決定於降雨量、樹冠截留量、落至地面淨雨量及土壤入滲容量的大小，有多餘的水量才形成地表逕流，有時飽和土壤水從地中滲流出來亦會增加地表逕流量。榔檳與一般林木、果樹的差異，在榔檳樹冠疏散，葉面有葛質與摺痕，榔檳樹冠截留的水量不易貯積，樹冠截留量小，落至地面的淨雨量反而比一般林地大。坡地栽植榔檳後，榔檳園土壤性質改變，森林土壤的特性逐漸消失，土壤孔隙填塞，土壤變為密實，導水性不佳，土壤入滲率降低為 8.4 cm/hr，比同地區林地之 64 cm/hr 小很多。同樣的降雨條件，榔檳園土壤水份會比林地較快達到飽和，產生地表流量。

根據蓮華池滲漏計杉木林區、草生地、檳榔區之降雨逕流觀測，收集 1992 年 4 月～1992 年 9 月共 27 場降雨事件的降雨逕流資料，單場降雨量介於 6.5 mm～320.5 mm。以逕流量對降雨量作直線迴歸分析，r^2 係數達 0.95 以上，結果均達極相關，顯示降雨量與地表逕流量有線性關係，其關係式如圖 3 中所示。各處理區斜率檳榔區為 0.2371、草生區為 0.1236、杉木區為 0.0199。若增加 1 mm 雨量增量，地表逕流量之增量檳榔區為 0.237 mm，草生區為 0.124 mm，杉木區為 0.020 mm，顯然檳榔區產生的地表逕流量增量，比草生地、杉木區大。統計 27 場降雨之總降雨量為 1,674 mm，檳榔區就有逕流量 287.6 mm，逕流率為 17.2%，草生地為 161.6 mm 及 9.7%，杉木區最小為 27.8 mm 及 1.7 %。檳榔區的地表逕流為杉木區的 10.4 倍，草生地的 1.8 倍，三者之逕流比約為 10.4：5.8：1；顯示杉木林區、草生區、檳榔區產生的地表逕流量，檳榔區>草生地>杉木林區，主要原因是由於水循環各項水文因子與土壤性質的改變而引起，這樣的分析結果，印證前文討論的檳榔園降雨逕流特性。

土壤沖蝕為土粒脫離地表，移動到河槽的過程。由於坡面上的逕流水受重力作用沿坡面向下流動，產生推移力與摩擦阻力，若推移力大過摩擦阻力，土壤顆粒被地表水流帶走，隨地表逕流而在地面漫流，通常地表逕流都是速度緩慢，所攜帶的土壤顆粒多半為土壤結構鬆散，粒徑較細之土粒。坡地之地表逕流受重力作用，會加速沖蝕，有地被覆蓋作物會比裸露處沖蝕小。一般森林地沖蝕較少，除了樹冠與地被層保護外，地表逕流很少發生是主要原因。不同地被覆蓋地表逕流量不一樣，減緩沖蝕程度亦不同，通常認為地表逕流是影響沖蝕量的主要因素。

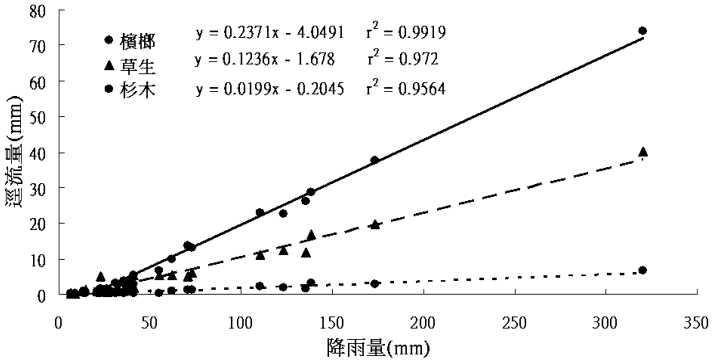


圖 3. 檳榔區、草地區及杉木區之降雨逕流關係

Fig. 3. Relationship between rainfall and runoff for betel nut plantation, grass cover and China fir plantation

根據蓮華池滲漏計杉木、草生及檳榔區之土壤流失量觀測，分析 27 場降雨事件的土壤流失量，作不同覆蓋以沖蝕量對降雨量作曲線迴歸分析，r2 係數達 0.78，有顯著相關，顯示降雨量與沖蝕量有曲線關係，曲線關係式如圖 4，得知檳榔的作物因子與降雨因子為 0.078 與 1.72，草生地為 0.11 與 57 及杉木區為 0.025 與 1.47。沖蝕量與降雨量為指數關係，降雨因子越大沖蝕增加量越大，故檳榔區產生的沖蝕量，比草生地、杉木區之沖蝕量大，降雨因子反應不同覆蓋地土壤的沖蝕特性統計 27 次降雨事件各覆蓋區的總土壤流失量，檳榔區為 4.2 kg、草生地為 3.0 kg、杉木區為 0.4 kg，換算成年平均沖蝕量分別為 1.125、0.797、0.11 ton/ha，檳榔區的土壤流失量為杉木區的 10.2 倍，草生地的 1.4 倍，三者之土壤流失量比約為 10.2：7.2：1。

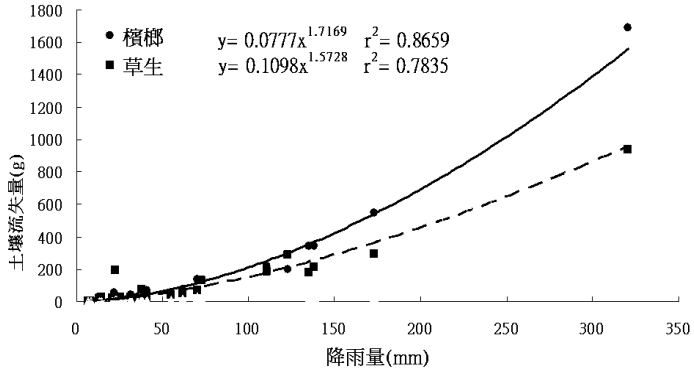


圖 4. 檳榔區、草地區及杉木區降雨與土壤流失關係

Fig. 4. Relationship between rainfall and erosion amounts for betel nut plantation, grassland and China fir plantation

VII、 檳榔園之水土控制試驗

地面之覆蓋與敷蓋，亦是影響地表逕流沖蝕的重要因素，覆蓋與敷蓋增加地表粗糙度，減緩流速，降低表面逕流產生的推移力，能防止沖蝕繼續發生。根據林俐玲等（2001）對試驗區之土壤採樣分析，植生覆蓋與敷蓋能提供大量有機質而使土壤有機質含量增高，改變土壤結構，促使土壤非毛細孔隙（non-capillary pores），也就是大孔隙（macro pores）增加，水力傳導度提高，延長地表水滯留的時間，有助於地表的入滲機會與入滲量，減少逕流與土壤沖蝕，應用在坡地檳榔園，會有很好效果。

蓮華池坡地檳榔園不同水土保持試區，2000 年 5、6 月收集到 24 次降雨逕流量資料分析，單場降雨量介於 1.5 mm～26.0 mm，總觀測雨量為 368.0 mm。以逕流量對降雨量作直線迴歸分析，r^2 係數達 0.71，結果均達相關，顯示降雨量與地表逕流量有線性關係，各處理區之降雨逕流關係式如圖 5 所示。

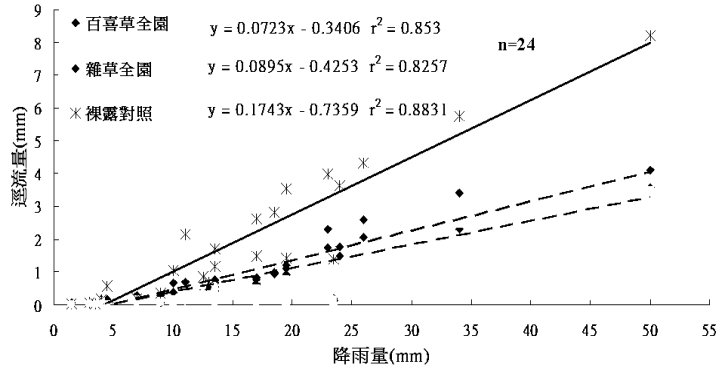


圖 5. 檳榔園不同水土保持處理之降雨逕流關係

Fig. 5. Relationship between rainfall and runoff for different soil conservation treatments

1 mm 之降雨增加量，產生的地表逕流之增加量，以杉木人工林區之 0.029 mm 增量最少，其次為百喜草山邊溝區 0.0434 mm，再依序為雜草山邊溝 0.0686 mm、百喜草全園 0.0723 mm、雜草全園 0.0895 mm，裸露對照區 0.1743 mm 增加量最大，顯示，檳榔園做水土保持處理後，百喜草全園區、百喜草山邊溝區、雜草全園區、雜草山邊溝區、杉木人工林區與裸露對照區，在相同的降雨條件下，產生地表逕流量並不相同。統計各處理區之總逕流量分別為 7.6、10.6、14.5、19.2、23.6、48.2mm，逕流量佔降雨量百分比率分別為 2.1、2.9、4.0、5.2、6.4、13.1 %，若以

裸露對照區之逕流量為準，則各處理區的逕流比率關係為 0.16：0.22：0.30：0.40：0.49：1。

綜合以上統計的分析，印證林俐玲、蔡義誌、杜德怡（2001）對陡坡地茶園六種不同水土保持處理，探討其水土流失情形和土壤之理化性質。處理區包括平台階段植生覆蓋、平台階段草生栽培、平台階段枯草敷蓋、平台階段台面淨耕、山邊溝三角栽植及裸露對照。結果顯示，平台階段植生覆蓋能有效的控制陡坡茶園之水土流失，其年平均逕流率僅 0.021，為裸露對照區之 5 %；而年平均土壤流失量為 0.263 ton/ha，僅為裸露對照之千分之五。不同的水土保持處理方法亦影響土壤之理化性質，平台階段植生覆蓋能明顯的提高土壤有機質含量、幾何平均粒徑和飽和水力傳導度。山坡地栽植檳榔而無水土保持措施，產生地表逕沖蝕量會最大，坡地檳榔園做植生覆蓋及山邊溝處理，地表逕量可減少 50 %～66 %，山坡地輔導栽植杉木林，地表逕流會減到最小 84 %。

VIII、 結論

森林具有多層的樹冠、茂密的灌叢、深厚的枯枝落葉層、錯綜複雜的根系群，空間分配不同於其他土地利用形式，加上森林土壤、微生物、動植物形成森林生態體系，相互影響。從降雨落到地面，到流出集水區，森林對截留、蒸發、幹流、土壤之儲蓄移動及地下水之補注，減少土壤沖蝕、保護水質、調節流量，都扮演重要的角色，這些機能是其他土地利用所不能比擬的。

檳榔的樹冠由巨大的羽葉組成，葉面有葛質與摺皺，雨水不易貯積，量測貯積量僅為 1.09mm，樹冠截留量約為為降雨量之 6.3%，穿落量為 72.0%，兩者皆比林地小，截留的水量大部份成為幹流量佔 21.7%，比林地大很多，降雨量扣除截留量，檳榔園的淨雨量比林地大。初植檳榔園土壤入滲率為 16.8cm/hr，還有森林土壤的特性，比成齡檳榔園佳，隨土壤孔隙填塞，土壤密實，導水性減低，土壤入滲率降為 8.4cm/hr。土壤飽和時，檳榔區的土壤滯留保蓄量為降雨量之 42.4%、草生區為 67.5%、杉木區為 61.1%，是溪流基流量的主要來源；儲蓄保蓄量檳榔區為 40.2%、草生區為 13.4%、杉木區為 32.9%，為植物吸收供蒸發散之用；地表與地中流出量檳榔區為 17.4%、草生區為 19.1%、杉木區為 6.0%，為暴雨流量的主要成份；顯示檳榔園水循環各項因子的水文特性比林地差，對水源涵養有負面影響。

蓮華池地區滲漏計觀測 27 場降雨，總量為 1674 mm，檳榔區逕流量最大為 287.6 mm，草生地次之為 161.6 mm，杉木區最小為 27.8 mm，三者逕流比為 10.4：5.8：1。年平均土壤沖蝕量分別為 1.125、0.797、0.11 ton/ha，土壤流失量比為 10.2：7.2：1，顯示檳榔區逕流量及土壤流失量均大於杉木區。坡地檳榔園不同水土保持試區之降雨逕流分析，總降雨量為 368 mm，檳榔的處理區有百喜草全園覆蓋區、百喜草覆蓋及山邊溝區、雜草覆蓋區、雜草覆蓋及山邊溝區、裸露對照區、杉木造林區，逕流量分別為 19.2、10.6、23.6、14.5、48.2、7.6 mm，以裸露對照區之逕流量為準，所有處理區的逕流比率為 0.40：0.22：0.49：0.30：1：0.16。坡地檳榔園全園植生覆蓋，會減少地表逕流量 50%，植生覆蓋加上山邊溝處理，地表逕流量可以減少 66%。

檳榔為園藝作物，不是造林樹種，林地不適合栽植，尤其是超限利用地更是絕對禁止。超限利用地宜採漸近式，避免二次災害，以混農林方式，限期完成造林。同時積極輔導宜農林地轉作，鼓勵造林，推廣水土保持，配合實務觀摩坡地檳榔園栽植百喜草、雜草覆蓋、山邊溝等水土保持處理，並參酌目前台大、中興、屏科大、台電、林試所等都有相關研究計畫執行成果，作為推行之依據。

IX、 謝誌

本文坡地檳榔園不同水土保持試驗承蒙農委會計畫經費支援，觀測資料收集獲本所蓮華池研究中心同仁傅昭憲、石敬萬、邱之偉、王德華協助，及本組盧惠生、黃良鑫、傅鶴翹等參與執行，在此表示感謝致意。

X、 參考文獻

王新傳（1979）台灣坡地土壤沖蝕性。中華農學會報。39-42 頁。

台灣電子農業年報（2006）行政院農業委員會。

江瑞湖（1995）檳榔與相關植物。科學月刊 26(9):729-730。

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。56-66 頁。

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。林業試驗所簡訊 11~13 頁。

林壯沛（1995）山坡地栽植檳榔的水土流失問題探討。科學月刊 26(9):738- 746。

林壯沛（1996）台灣環保之癌--檳榔蝕光台灣老本。申齊健康觀念雜誌 83:79-81。

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第 012 號。

林壯沛（1999）栽植檳榔衍生問題之探討。水土保持研究(6)3:130-138。

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。

林俐玲、蔡義誌、杜怡德（2001）陡坡茶園之水土流失控制之研究。水土保持學報 33(1) :15-24。

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。

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。

黃萬傳、潘添進、鍾震東（1991）台灣檳榔產業之經濟分析。屏東農專學報 32:213-229。

陳紹光（1995）檳榔的生物鹼成份。科學月刊 26(9):731-733。

陳榮明（1989）檳榔・胡椒・椰子栽培法。文笙書局。1-65 頁。

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。5-1～5-5 頁。

廖日京（1990）檳榔。台大實驗林研究報告(4):109-117。

靳應台（1995）檳榔與口腔病變。科學月刊 26(9):734-737。

傅祖傳、黃萬傳（1998）檳榔之產銷及消費分析。檳榔問題研討會。1-25 頁。

潘家聲（1966）天然闊葉樹林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。林試所試驗報告 131:20。

潘家聲(1974)大葉桉林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。林試所試驗報告 253:8。

潘家聲（1974a）肖南不同株行距林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。林試所試驗報告 256:11。

潘家聲（1974b）杉木不同疏伐度林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。林試所試驗報告 255:12。

潘家聲（1976）肖南不同修枝度林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。林試所試驗報告 274:11。

薛　玲（1991）台灣地區檳榔產銷問題之研究。農業金融論叢 25: 131-192。

2008 森林集水區經營研討會論文集:31-51

台北市山坡地集水區暴雨逕流特性

陳明杰[1]

【摘要】本研究蒐集台北市山坡地六個集水區的降雨與逕流資料，供分析單場降雨直接逕流係數、洪峰逕流係數、洪峰到達時間等水文特性。資料蒐集期間自 1998 年至 2003 年，資料分析的對象，乃小時降雨量達 15 mm 以上，或一日降雨量達 100 mm 以上之降雨事件及其產生的逕流量者。經分析結果，單場降雨直接逕流係數隨降雨量增大而增大，累積降雨量達 200～400 mm 時，直接逕流係數達到最大值。六個集水區之單場降雨直接逕流係數最大值為 0.75～1.00，其中，挹翠集水區面積小且建地與道路之面積比例高達 41%，直接逕流係數為六個集水區之最高。洪峰逕流係數與洪峰前 1 小時之平均降雨強度無顯著相關，其中，挹翠集水區的洪峰逕流係數最大值接近於 1，其他五個集水區的洪峰逕流係數最大值約為 0.60～0.85。除了地文因子之外，洪峰前 1 小時之平均降雨強度影響洪峰到達時間，隨平均降雨強度增大洪峰到達時間呈對數縮短，當平均降雨強度達 60 mm/hr 時，挹翠集水區的洪峰到達時間約為 35 min.，其他五個集水區約為 50～70 min.。上述研究結果，可供應用合理化公式於推算洪峰流量時訂定洪峰逕流係數以及集流時間之參考。

【關鍵詞】集水區、洪峰逕流係數、洪峰到達時間。

CHARACTERISTICS OF STORM RUNOFF OF UPSTREAM WATERSHEDS IN TAIPEI CITY

Ming-Chieh Chen[1]

[1] 國立臺灣大學森林環境暨資源學系教授，通訊作者。電子郵件: jackchen@ntu.edu.tw
Professor, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University. Corresponding Author. E-mail: jackchen@ntu.edu.tw

【**Abstract**】This study is to collect rainfall and runoff data of six upstream watersheds in Taipei city, that was used to analyze the hydrologic characteristics of direct runoff coefficient, peak runoff coefficient and timing of peak discharge. Data collected period was from 1998 to 2003, each single storm runoff was selected on condition that hourly rainfall depth was more 15 mm or daily rainfall depth was more 100 mm. From analyzed results, firstly, direct runoff coefficient was increasing with rainfall depth increasing that was tending to maximum on accumulated rainfall depth reaching 200-400 mm. Maximum direct runoff coefficient of single storm of six watersheds was 0.75-1.00, that of Yiitsueih watershed was larger than others because watershed area was small and developed area ratio was reaching to 41%. Secondly, Peak runoff coefficient was not related to average rainfall intensity of storm peak period. Maximum peak runoff coefficient of single storm of Yiitsueih watershed was reaching to 1 and others were to 0.60-0.85. Thirdly, except topographic factor of watershed, timing of peak discharge was influenced by average rainfall intensity of storm peak period that was logarithmic decreasing with average rainfall intensity increasing. The timing of peak discharge of Yiitsueih watershed was about 35 min. on condition that average rainfall intensity was 60 mm/hr, and others were about 50-70 min. The above results could be applied to decide peak runoff coefficient and time of concentration about rational formula to calculate peak discharge.

【**Key words**】Watershed, peak runoff coefficient, timing of peak discharge.

I、前言

台灣地區年平均降雨量為 2500 mm，約為全球陸地年平均 800 mm（UNESCO, 1978）的 3.1 倍，時間分佈極不平均，全島五月至九月的降雨量約佔全年雨量的 78%，十月至翌年四月佔全年雨量 22%，而北部地區十月至翌年四月間佔全年雨量的 38%，南部地區只佔 10%左右。在空間分佈亦極不平均，北部地區高於南部地區，山地地區年平均雨量高達 3000 mm 以上，然平地地區僅 1500 mm 左右。降雨量時間、空間分佈不平均，亦反映在河川流量上，顯現豪雨期間與枯水期間的逕流量極大的變異。

集水區的降雨量、逕流量資料分析，實務上是水土保持工程設計、防洪排水、

集水區經營等水理計算的基礎資料。國內，面積 1000 公頃以下之集水區水文觀測資料，除了試驗研究單位設置的森林試驗集水區外，目前甚為缺乏。因此，小面積集水區洪峰流量的計算，大都引用合理化公式，計算結果尚缺乏實測資料予以驗證。合理化公式雖然簡單實用，使用時往往因各個集水區的氣象、水文、地文條件的不同而極難有肯定的答案（楊德良、林國峰，1989）。究其原因，乃受洪峰逕流係數，以及決定平均降雨強度之集流時間的決定是否合理所左右。關於洪峰逕流係數，以往大都引用國外之經驗值，其值的決定又無合理的依據，以致於推算值與實測值相差甚大（王如意等，1990）。而集流時間往往無法由實測資料得到，大都引用與地文因子相關的迴歸公式，或是運動波模式之理論公式予以計算。在小面積森林集水區，應用迴歸公式計算的集流時間，遠低於實際資料水文分析的結果（鄭皆達、夏禹九，1988）。

國內關於洪峰逕流係數的研究，黃正良、陳信雄（1987）推算畢祿溪試驗集水區洪峰逕流係數為 0.60～0.75，蓮華池試驗集水區為 0.60～0.70。王如意與簡振和（1991）分析畢祿溪試驗集水區單場降雨的洪峰逕流係數在 0.5 以下。陳明杰（1995）分析蓮華池等四個試驗集水區，單場降雨的洪峰逕流係數訂為 0.5，若降雨強度大且延時長則洪峰逕流係數訂為 0.75。關於集流時間的研究，王如意等（1992）以運動波方程式分析畢祿溪試驗集水區的集流時間，結果顯示集流時間隨平均降雨強度、洪峰逕流量的增大而縮短。陳明杰（1995）分析蓮華池等四個試驗集水區的水文資料結果，建立集流時間與平均降雨強度的迴歸公式，並探討角屋、福島（1976）之洪峰到達時間公式的適用性。陳樹群、黃兆章（1998）以蓮華池試驗集水區實測水文資料配合運動波模式，初步結果顯示，當降雨量及降雨強度不大時，集流時間受層流形態的逕流所左右。

根據上述，利用實測資料分析洪峰逕流係數與集流時間，主要以林試所等單位設置的森林試驗集水區為主。台北市政府（前）建設局為了瞭解都會區山坡地集水區的水文環境特性，從 1990 年開始陸續設置六個集水區水文監測站，1996 年開始委託水文資料蒐集分析等工作。本研究蒐集 1998 年至 2003 年台北市山坡地六個集水區水文監測站的降雨與逕流資料，分析直接逕流係數、洪峰逕流係數、洪峰到達時間等水文特性。研究結果，可供應用合理化公式於推算洪峰流量之洪峰逕流係數以及集流時間等訂定之參考。

II、材料與方法

（I）集水區概述

研究對象集水區位於台北市東側之山坡地，共有六處集水區，其水文監測站分佈如圖1所示，集水區的概況分別說明如下：

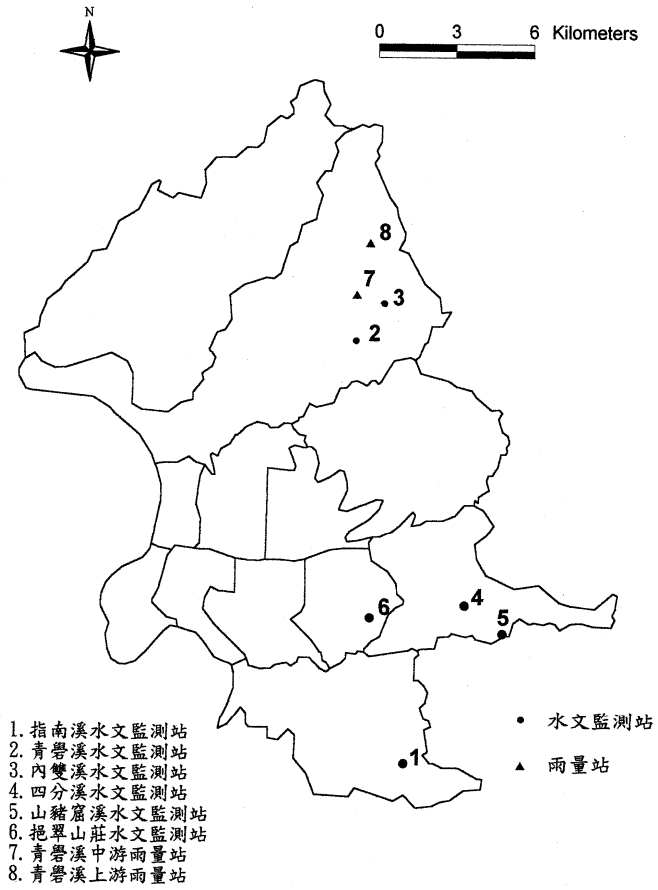


圖1. 研究對象六個集水區水文監測站概略位置

Fig.1. Location of hydrologic monitoring station of six investigated watersheds

1. 指南溪集水區：位於文山區，面積586.4 ha。水文監測站位於指南路三段58號旁之指南溪河段，距離指南國小下方約500 m。量水堰為矩形堰口，寬度11.5 m，高度3.0 m。集水區地表出露地層以大寮層為主，岩層由厚層塊狀砂岩和不同層厚的頁岩，或砂岩、頁岩互層所組成。

2. 青磐溪集水區：位於士林區，面積758.5 ha，為由北向南傾斜之長條形集水區。水文監測站位於至善路三段55號附近。量水堰為矩形堰口，寬度11.1 m，高度2.5 m。集水區地表出露地層以安山岩，凝灰角礫岩和粗粒火山碎屑岩為主，覆蓋於

不同之中新世沈積岩之上。

3. 內雙溪集水區：位於士林區，面積474.8 ha。水文監測站位於至善路三段370巷之車登腳橋的上游約50 m。量水堰為矩形堰口，寬度9.6 m，高度2.0 m。集水區屬於陽明山國公園區域，林相相當完整。地層構造與青磘溪集水區類似，地表出露地層以安山岩，凝灰角礫岩和粗粒火山碎屑岩為主，覆蓋於中新世沈積岩之上。

4. 四分溪集水區：位於南港區，面積534.7 ha。水文監測站位於研究院路三段245號中華技術學院旁之四分溪河段，量水堰為矩形堰口，寬度10.0 m，高度1.5 m。水文監測站上游處有國道3號高速公路經過。集水區地表出露地層以南港層和石底層為主，為淺灰色至白色細粒至中粒砂岩、灰黑色頁岩、以及白色粉砂岩或細砂岩與黑色頁岩所成之薄頁互層。

5. 山豬窟溪集水區：位於南港區，面積174.4 ha。為由南向北之長條形集水區。水文監測站位於舊莊街一段290巷道路轉入往垃圾掩埋場之路旁，距離山豬窟垃圾掩埋場行政中心約300 m。量水堰為矩形堰口，寬度5.9 m，高度2.0 m。集水區地表出露地層以木山層和大寮層為主，主要由厚層塊狀砂岩和不同層厚的頁岩，或砂岩、頁岩互層所組成。公館凝灰岩層出現在集水區的南側，由玄武岩碎屑岩或熔岩流和凝灰質沉積岩組成，厚度變化很大。

6. 挹翠集水區：位於信義區，面積34.7 ha。集水區是由東南向西北傾斜之矩形流域，區內約有41%的面積為建築用地，為六個集水區中開發度最高。水文監測站位於信義路五段150巷往挹翠之路旁，距離附近之聯勤兵工技術學校上游約100 m。量水堰為矩形堰口，寬度4.0 m，高度1.5 m。集水區地表出露地層以石底層為主，為淺灰色至白色細粒至中粒砂岩、灰色砂岩、灰黑色頁岩、以及白色粉砂岩或細砂岩與黑色頁岩所形成之薄頁互層。

六個集水區內的土壤廣泛分佈著灰黃色幼黃壤，質地為壤土、坋質壤土、以及黏質壤土，構造呈小至中等鈍角塊狀或屑粒狀。母岩為安山岩化育的幼黃壤主要出現在內雙溪、青磘溪兩個集水區內。母岩為砂頁岩化育的幼黃壤出現在內雙溪、四分溪、山豬窟溪、挹翠、指南溪等五個集水區。另外，在內雙溪、青磘溪集水區內，有小面積之安山岩化育的黃壤出現。在四分溪、指南溪集水區內，有

小面積之砂頁岩岩化育的黃壤出現（山地農牧局，1986）。

六個集水區之地文特性，採用農林航測所製作之1/5,000像片基本圖，應用地理資訊系統軟體ARC/INFO，將集水區之邊界、等高線、水系及道路等基本圖層加以數化，分析結果如表1所示。

表1. 研究對象六個集水區的地文特性

Table 1. Topographic characteristics of six investigated watersheds

項　目	指南溪	青磿溪	內雙溪	四分溪	山豬窟溪	挹翠
面　積 (ha)	586.41	758.53	474.80	534.73	174.39	34.72
周　長 (m)	11613	16909	10985	11055	5869	2412
主流長度(m)	4206	7566	4356	4006	1867	749
最大長度(m)	4433	6542	4779	3691	2032	823
平均寬度(m)	1394	1003	1090	1335	934	464
形狀因子	0.33	0.13	0.25	0.33	0.50	0.62
最高標高(m)	677	1108	863	374	364	275
最低標高(m)	25	100	290	25	36	18
平均高程(m)	306	524	627	176	165	148
平均坡度(%)	58	37	44	47	43	51
圓比值	0.55	0.33	0.49	0.55	0.64	0.75
細長比	0.62	0.48	0.51	0.71	0.73	0.81
密集度	0.74	0.58	0.70	0.74	0.80	0.86
方　位	西北西	南南東	南南東	東北	北	北北西

（II）集水區土地利用分析

關於集水區土地利用分類分析，使用2003年6月份的SPOT衛星影像資料，分類時參考像片基本圖，以及台北市政府（前）建設局提供之民國92年拍攝的航空數位影像圖之人工辨識的輔助，研究對象集水區土地利用判釋分類結果如表2。

表2　研究對象六個集水區的土地利用分類面積（單位：ha）

Table2　Classified land use area of six investigated watersheds (unit: ha)

地　類	指南溪	青磿溪	內雙溪	四分溪	山豬窟溪	挹翠
林　地	353.39 (60.26)	493.83 (65.10)	357.05 (75.20)	415.13 (77.63)	117.48 (67.37)	20.50 (59.10)
草　地	20.21 (3.45)	33.42 (4.41)	32.56 (6.86)	27.54 (5.15)	7.58 (4.35)	--

建地與道路	33.60 (5.73)	120.5 (15.89)	16.4 (3.45)	45.21 (8.45)	17.6 (10.09)	14.22 (40.90)
裸露地	15.42 (2.63)	27.54 (3.63)	3.56 (0.75)	6.42 (1.20)	--	--
牧草地	--	80.68 (10.64)	64.47 (13.58)	--	--	--
旱　田	--	2.56 (0.34)	0.76 (0.16)	--	1.47 (0.84)	--
茶　園	115.56 (19.71)	--	--	--	--	--
竹　林	48.23 (8.22)	--	--	17.98 (3.36)	--	--
墓　地	--	--	--	5.25 (0.98)	--	--
高速公路	--	--	--	17.21 (3.22)	--	--
掩埋場	--	--	--	--	30.26 (17.35)	--
總　計	586.41 (100.00)	758.53 (100.00)	474.80 (100.00)	534.73 (100.00)	174.39 (100.00)	34.72 (100.00)

註：表( )內的數字為面積比率，單位：%。

（III）降雨量及逕流量觀測

使用自記式水位雨量計觀測降雨量與逕流量，雨量與水位資料同時記錄於資料記錄器(Data logger)，記錄間隔時間為 10 min。利用攜帶式電腦讀取降雨量、河川水位資料，攜回後進行資料處理。逕流量則利用何智武、蘇苗彬(1995)建立之水位流量公式換算之。

III、結果與討論

（I）颱風豪雨時降雨量與洪峰流量分析

在相同期間的豪雨條件下，分析集水區比洪峰流量，可供說明地文特性、土地利用等造成集水區逕流特性的差異。通常，降雨量因空間位置有所不同，台北市之北側山坡地區域的降雨量高於南側山坡地區域，每年颱風侵襲期間往往有較高的降雨量，造成集水區的逕流量偏高。整理2000年10月31日象神颱風期間，以及2001年9月15日納莉颱風期間六個集水區水文監測站的降雨量與洪峰流量資料如表3與表4，說明颱風豪雨時集水區的水文特性。

表 3. 2000 年 10 月象神颱風期間六個集水區的水文資料

Table 3. Hydrologic data of six watersheds in Xangsane typhoon period (Oct. 2000).

	青磘溪	內雙溪	四分溪	山豬窟溪	挹翠	指南溪
10月31日降雨量(mm)	172.0	213.5	183.5	193.0	138.5	128.5
11月1日降雨量(mm)	473.5	568.0	330.0	369.0	314.0	337.0
31～1日累積雨量(mm)	645.5	781.5	513.5	562.0	452.5	465.5
洪峰時最大1小時雨量(mm)	64.0	67.0	47.0	45.0	53.0	53.0
洪峰流量(m^3/s)	39.88	51.10	68.89	13.30	6.02	42.20
集水區面積(km^2)	7.58	4.74	5.34	1.74	0.34	5.86
比洪峰流量($m^3/s/km^2$)	5.26	10.78	12.90	7.64	17.71	7.20

表 3 是象神颱風期間的觀測資料，說明在總降雨量、發生洪峰時最大 1 小時降雨量的情形下，集水區比洪峰流量的差異。內雙溪集水區發生洪峰時最大 1 小時雨量為 67.0 mm/hr，鄰近之青磘溪集水區為 64.0 mm/hr，內雙溪集水區的總降雨量稍高，然而青磘溪集水區的形狀因子、圓比值等地文因子小於內雙溪集水區，集水區形狀較為狹長，具有降低洪峰流量的效果，因此其比洪峰流量約為內雙溪集水區的一半。山豬窟溪集水區的總降雨量稍高於四分溪集水區，兩者之發生洪峰時最大 1 小時雨量相近似，然而，山豬窟溪集水區上游因垃圾掩埋場改變原來溪流流況，致呈現比洪峰流量較低的情形。挹翠集水區與指南溪集水區的總降雨量情形類似，發生洪峰時最大 1 小時雨量同為 53.0 mm/hr，而挹翠集水區為比洪峰流量 17.71 $m^3/s/km^2$，指南溪集水區為 7.20 $m^3/s/km^2$，由於挹翠集水區面積較小，且道路與建地的面積比率高達 41%，因此其比洪峰流量高出甚多。由上述可知，集水區在不同的地文因子、土地利用等條件下，各有不同的比洪峰流量，青磘溪集水區因呈狹長形，因此比洪峰流量較低，挹翠集水區面積較小且開發度較高，故比洪峰流量高於其他的集水區。

表 4. 2001 年 9 月納莉颱風期間六個集水區的水文資料

Table 4. Hydrologic data of six watersheds in Nari typhoon period (Sept. 2001).

	青磿溪	內雙溪	四分溪	山豬窟溪	挹翠	指南溪
15 日降雨量 (mm)	46.0	17.0	21.5	21.5*	42.5	57.5
16 日降雨量 (mm)	502.0	527.5	415.5	415.5*	271.5	353.5
17 日降雨量 (mm)	353.0	375.5	574.5	574.5*	481.0	426.5
18 日降雨量 (mm)	188.5	251.5	228.0	228.0*	227.0	193.0
15 日～18 日累積雨量(mm)	1089.5	1171.5	1239.5	1239.5*	1022.0	1030.5
洪峰時最大 1 小時雨量(mm)	66.0	74.0	116.5	116.5*	94.5	58.5
洪峰流量(m^3/s)	49.92	58.91	87.87	20.47	8.98	94.72
集水區面積(km^2)	7.58	4.74	5.34	1.74	0.34	5.86
比洪峰流量 ($m^3/s/km^2$)	6.59	12.43	16.46	11.76	25.86	16.16

*：山豬窟溪水文監測站因降雨量資料遺失，引用四分溪水文監測站的資料。

納莉颱風期間的累積降雨量刷新北部地區的降雨記錄(中央氣象局颱風資料庫)，造成嚴重的洪水災害。如表4的資料，納莉颱風期間之比洪峰流量仍以挹翠集水區的 25.86 $m^3/s/km^2$最大，依次是四分溪集水區的 16.46 $m^3/s/km^2$，指南溪集水區 16.16 $m^3/s/km^2$，內雙溪集水區則為 12.43 $m^3/s/km^2$，山豬窟溪集水區11.76 $m^3/s/km^2$，最小是青磿溪集水區6.59 $m^3/s/km^2$。挹翠集水區在累積降雨量達1022 mm，降雨強度94.5 mm/h，以及集水區道路與建地的面積比率高達41%條件下，產生比洪峰流量25.86 $m^3/s/km^2$之特殊的水文事件。而四分溪集水區雖累積雨量以及洪峰時最大1小時雨量都高於挹翠集水區，但其比洪峰流量仍較低。就相鄰位置之集水區的相互比較，在類似的降雨條件下的比洪峰流量，仍然以內雙溪集水區高於青磿溪集水區，以及四分溪集水區高於山豬窟溪集水區。

(II)洪峰逕流係數分析

整理資料蒐集期間每10 min.記錄一筆的水位與雨量資料，分析單場豪雨之洪峰逕流係數。資料選取的標準，乃小時降雨量達15 mm以上，或一日降雨量達100

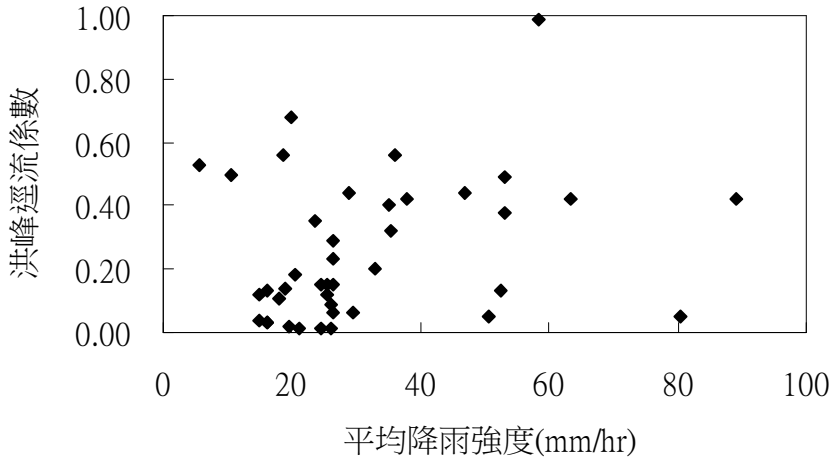
mm以上，且從降雨發生至停止期間，降雨中斷時間在6小時以內者。擷取各場豪雨的洪峰流量，以及洪峰流量發生前之1小時降雨量視為小時平均降雨強度，其中，挹翠集水區面積僅34.72 ha，則擷取洪峰流量發生前30 min.的降雨量計算小時平均降雨強度。由洪峰流量和平均降雨強度，求得各場豪雨之洪峰逕流係數。

影響洪峰逕流係數包括集水區地文特性、土地利用、降雨型態等。就土地利用而言，挹翠集水區的洪峰逕流係數值最高，該集水區面積僅為34.72 ha，且高達41%的建地與道路比率是主要因素。就集水區形狀影響洪峰逕流係數而言，青磿溪集水區形狀狹長，雖然青磿溪集水區建地與道路之比例達14.2 %，但其洪峰逕流係數較小，主要是集水區形狀狹長所造成的洪峰時間延長，洪峰流量分散所致。此外，其餘四個集水區建地與道路之比率皆不超過10 %，洪峰逕流係數偏低。由於各集水區僅有一個雨量計位於水文監測站附近，因此尚無法考慮降雨時間、空間分佈的影響。

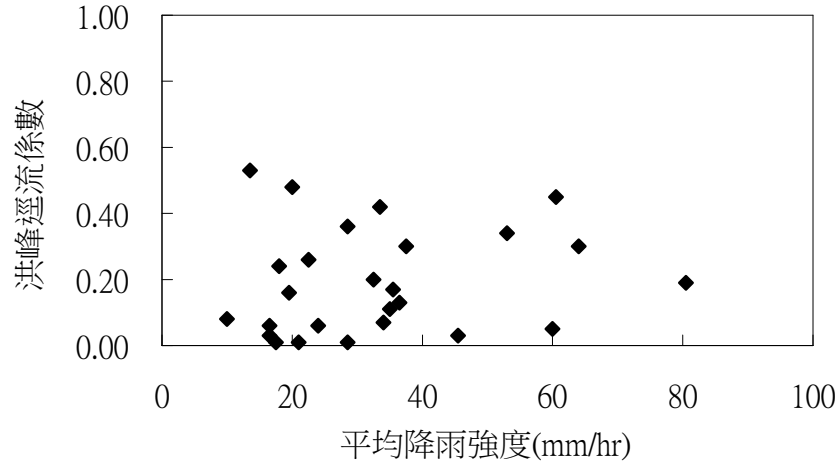
另外，整理颱風豪雨期間的資料，予以比較各個集水區的洪峰逕流係數。2000年 10 月象神颱風期間，挹翠集水區洪峰逕流係數為 0.99，山豬窟溪集水區為 0.61，內雙溪集水區為 0.58，指南溪集水區為 0.49，四分溪集水區為 0.49，青磿溪集水區為 0.30。其次，2001 年 9 月納莉颱風期間，挹翠集水區洪峰逕流係數為 1.00，指南溪集水區為 0.99，四分溪集水區為 0.81，內雙溪集水區為 0.60，青磿溪集水區為 0.45，山豬窟溪集水區為 0.44。挹翠集水區在多次颱風豪雨期間，洪峰逕流係數最大值接近於 1.00，乃由於集水面積小且開發度高，因此洪峰逕流係數高於其他五個集水區，而青磿溪集水區的形狀狹長造成洪峰分散的效果，故洪峰逕流係數偏低。不同的降雨條件下，六個集水區之洪峰逕流係數的大小次序呈現不一致的情形。

至於洪峰逕流係數與小時平均降雨強度的關係，整理如圖 2-(1)至圖 2-(6)所示，顯示六個集水區的洪峰逕流係數隨平均降雨強度的變化趨勢不明顯。

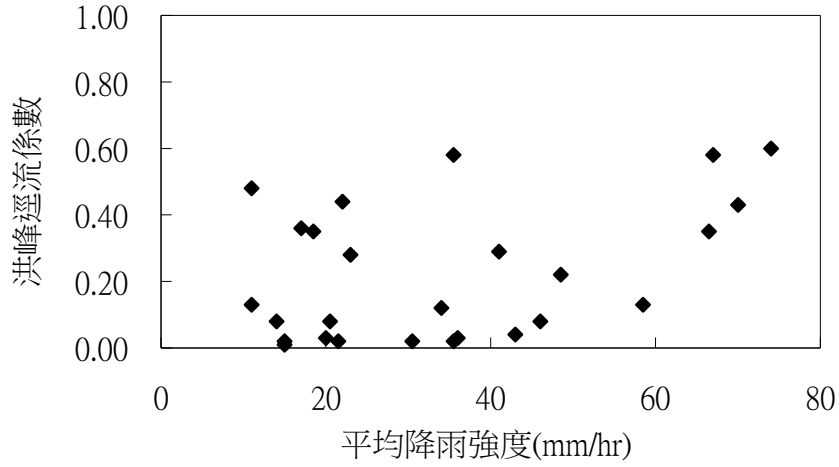
(1)指南溪集水區



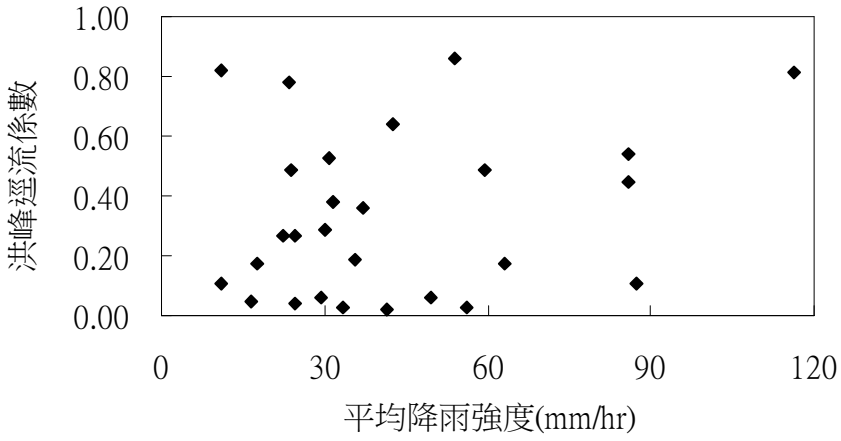
(2)青磿溪集水區



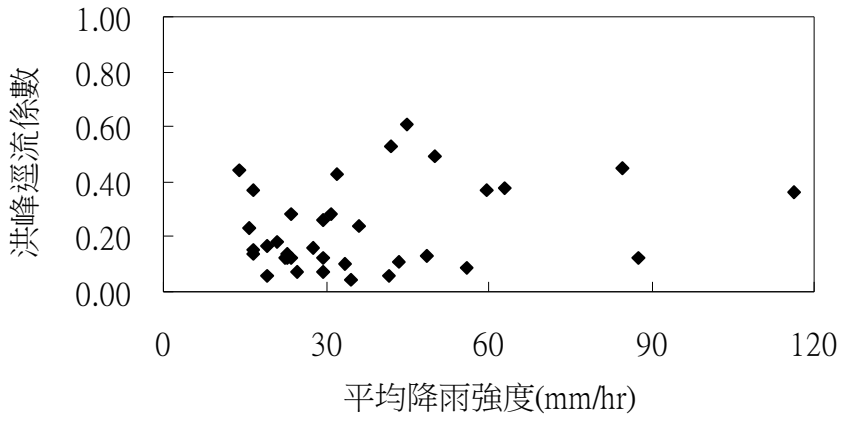
(3)內雙溪集水區



(4)四分溪集水區



(5)山豬窟溪集水區



(6)挹翠集水區

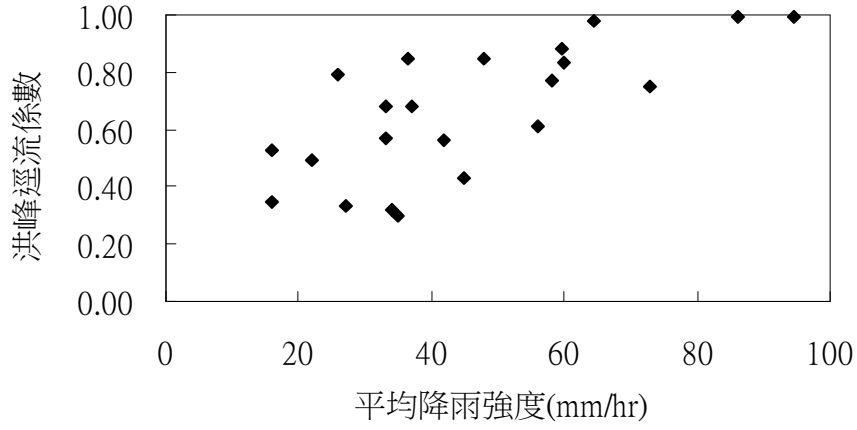


圖2. 六個集水區洪峰逕流係數與平均降雨強度的關係

Fig. 2. Relationship between peak runoff coefficient and average rainfall intensity of six watersheds.

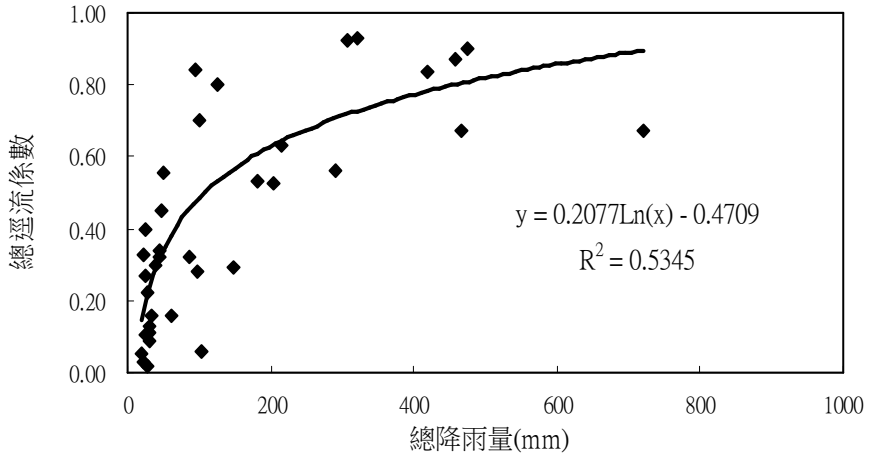
（III）直接逕流係數分析

整理六個水文監測站各場豪雨之總降雨量以及總逕流量。直接逕流量以深度表示，即經過基流分離的直接逕流量除以集水區面積求出，而基流量（Base flow）則以該場降雨之流量歷線上漲前的流量視之，基流量的分離採用直線法（Straight line method）。將直接逕流量除以總降雨量求得直接逕流係數。

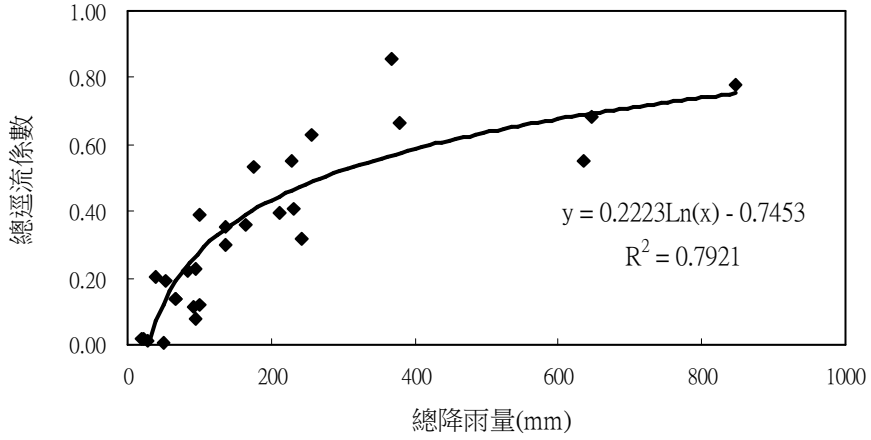
經由資料分析結果顯示，通常單場豪雨之累積降雨量較高時，直接逕流係數值較大，影響因子除了集水區地文條件、臨前濕潤條件、土壤結構、土地利用等之外，降雨延時、降雨強度亦是影響因子。就集水區的特性而言，挹翠集水區的面積小，造成逕流容易集中，且建地與道路之不透水面積比率佔 41 %，故單場豪雨直接逕流係數為六個集水區之冠。其次，指南溪集水區的平均坡度為 58 %，造成坡面逕流流速較快，減少雨水入滲的機會，故單場豪雨直接逕流係數亦高。青磿溪集水區與內雙溪集水區緊鄰，且土壤性質類似，青磿溪集水區的建地與道路之不透水面積比率（佔 14.2 %）比內雙溪集水區（佔 3.5 %）高，顯示青磿溪集水區單場豪雨直接逕流係數較高。

將直接逕流係數對總降雨量的關係整理如圖 3-(1)至圖 3-(6)所示，基本上，隨總降雨量增大，則直接逕流係數亦隨著增大的趨勢，亦即總降雨量在某一定值以上則逕流係數趨於最大值。黃正良、陳信雄（1987）分析蓮華池試驗集水區結果，單場降雨量達到 260～300 mm 左右，則總逕流率達到最大值。其次，除了挹翠監測站之外的五個集水區，總降雨量達 600 mm 以上，但是直接逕流係數並非達到最大值，此為 2001 年的納莉颱風所發生的降雨事件，該場次降雨的延時達 5 日以上，其中，發生間隔時間超過 6 小時以上未降雨的情形，故計算時將該場降雨分成兩段的降雨事件，前段的降雨延時長，雖總降雨量達 600 mm 以上，但直接逕流係數低。而後段的降雨量雖然較低，但是降雨延時短降雨量集中，且在前段降雨使集水區水分含量相當高的情形下，產生直接逕流係數高的情形。

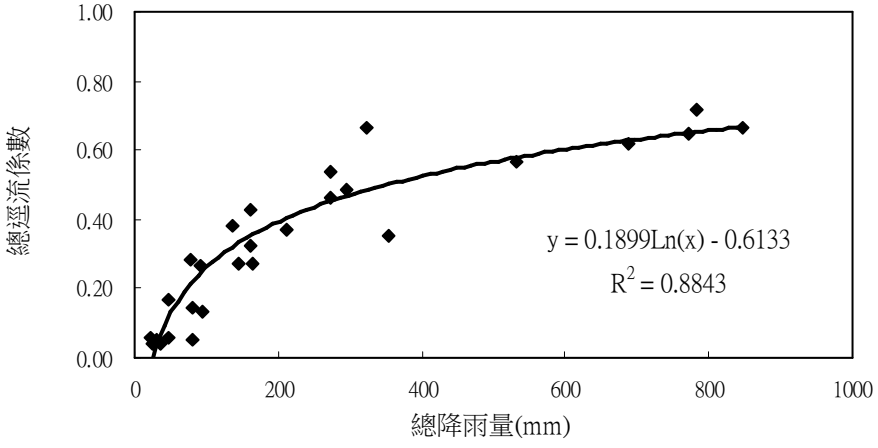
(1)指南溪集水區



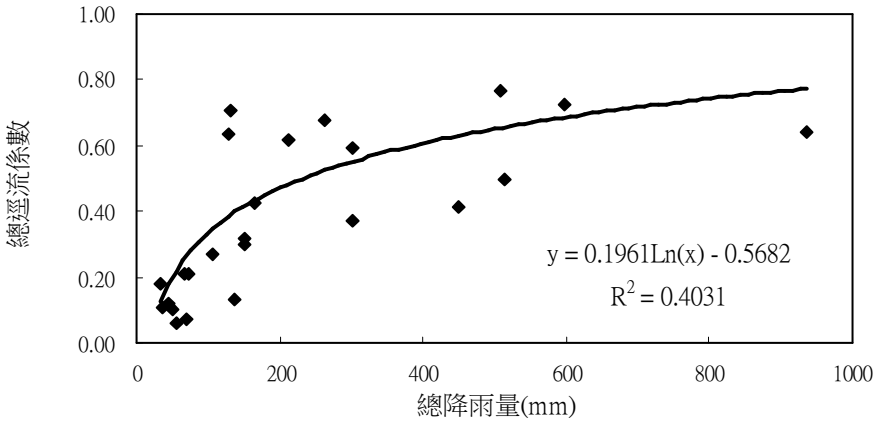
(2)青磘溪集水區



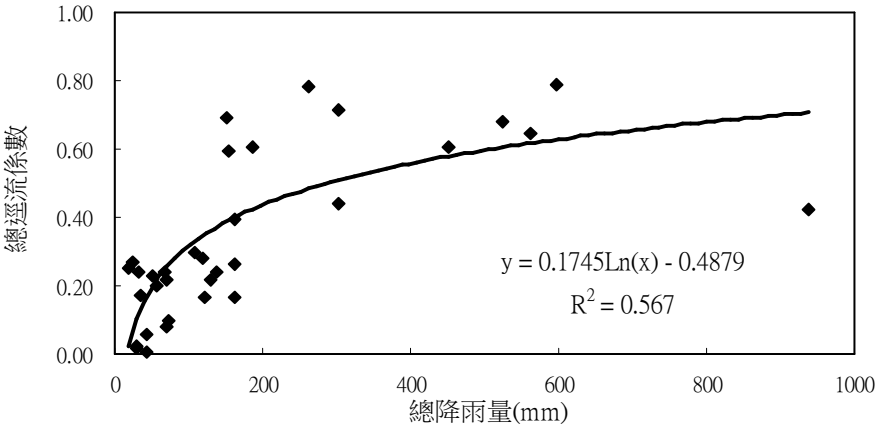
(3)內雙溪集水區



(4)四分溪集水區



(5)山豬窟溪集水區



(6)挹翠集水區

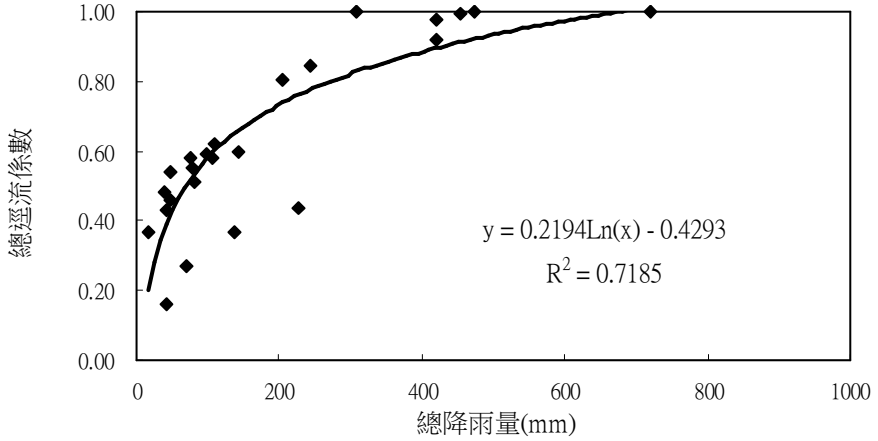


圖3. 六個集水區單場豪雨總降雨量與直接逕流係數之關係

Fig. 3. Relationship between direct runoff coefficient and total depth of one rainfall event of six watersheds.

（IV）洪峰到達時間分析

關於集流時間（Time of concentration）的定義，為集水區發生均勻降雨時，雨滴從集水區最遠端流動至下游出水口所需的時間，而角屋（1988）、永井（1988）將上述之集流時間的定義又稱之為洪峰到達時間。另外，在逕流歷線圖中，集流時間相當於有效降雨結束至直接逕流歷線退水段反曲點的時間間距（楊德良、林國峰，1989）。當降雨延時等於或大於集流時間時，集水區出現洪峰流量（Chow et al., 1988）。集流時間為集水區的水文特性之一，亦是應用合理化公式時決定平均降雨強度的依據。然而，影響集流時間的因子包括集水區坡面及河道的坡度、長度、粗糙度，以及降雨的時空分佈等，不容易從逕流歷線觀測得到，通常使用運動波逕流模式之理論公式，或是與地文因子相關的迴歸公式求得。目前，水土保持手冊使用坡面逕流與河道逕流時間的和供估算集流時間。河道逕流時間，則採用 Rziha 公式、Kraven 公式、加州公式等公式估算，這些公式主要考慮集水區的坡度、坡長、粗糙係數等條件，適用於小面積集水區，公式簡單但無考慮不同降雨條件下對逕流的影響。

而降雨發生時，在單峰降雨事件且降雨組體圖單純的情況下，從降雨逕流歷線可求得歷線開始上升的時間至洪峰的時間差，訂為洪峰到達時間（Timing of peak discharge）。陳明杰、陳信雄（1987）對於蓮華池試驗集水區的研究結果，應用運動波逕流模式計算集水區的集流時間，與實測洪峰到達時間的相對誤差平均為12.5%，將洪峰到達時間視為集流時間。

為瞭解集水區的洪峰到達時間，及其與平均降雨強度的關係，就研究期間蒐集的資料，選取單場豪雨事件，乃該單場豪雨前六小時以上無降雨事件足以發生影響者，且明顯的雨峰發生時相對的發生洪峰的事件為分析對象。將洪峰到達時間內的總降雨量除以洪峰到達時間，表示為平均降雨強度。根據 10 min.記錄一次的水位與雨量資料，分別統計各集水區豪雨時之洪峰到達時間與平均降雨強度。

由六個集水區分別選取 20 場次左右之降雨、逕流資料分析結果，建立洪峰到達時間對平均降雨強度的關係式如表 5 所示。集水區坡面及河道之坡度、長度、粗糙度，降雨強度等影響逕流的流速，進而影響洪峰到達時間，而在單一個集水區的條件下，其物理因子可視為定值，因此影響洪峰到達時間主要是降雨強度，呈現降雨強度值愈大則洪峰到達時間愈短的情形。

表 5. 六個集水區洪峰到達時間（Tp）對平均降雨強度（Re）之迴歸式

Table 5. Timing of peak discharge (Tp) estimated regression equation by average rainfall intensity (Re) of six watersheds

集水區	迴　歸　式	判定係數	樣本數
指南溪	$Tp=447.62 \cdot Re^{-0.5505}$	$R^2= 0.6924$	n =22
青礐溪	$Tp=625.26 \cdot Re^{-0.5868}$	$R^2= 0.6469$	n =21
內雙溪	$Tp=393.96 \cdot Re^{-0.4311}$	$R^2= 0.6729$	n =19
四分溪	$Tp=378.57 \cdot Re^{-0.4609}$	$R^2= 0.5515$	n =18
山豬窟溪	$Tp=261.00 \cdot Re^{-0.4116}$	$R^2= 0.7929$	n= 26
挹翠	$Tp=320.84 \cdot Re^{-0.5394}$	$R^2= 0.5867$	n= 24

集水區內降雨的空間、時間變異相當大，每一場降雨過程的時間變動，甚至集水區內降雨的空間變動將影響洪峰到達時間（角屋、福島，1976）。通常降雨之時間分佈不均勻的情況下，降雨延時愈長，從逕流開始上升點至產生洪峰的時間亦將隨之延長。參考陳明杰（1995）對於蓮華池等試驗集水區的研究結果，若降雨延時長且降雨強度大，則實測之逕流歷線的洪峰到達時間，將比常用的迴歸公式推算的結果大得很多，可研判洪峰到達時間比實際的集流時間長，因而在逕流歷線上分析的洪峰到達時間，並不一定等於集水區的集流時間。因此，選取的豪雨事件其降雨形態為降雨延時短，降雨強度大，產生之流量歷線多為明顯的單峰形狀。然而，若選取的降雨事件的降雨延時在 3 小時以內，對於青礐溪、內雙溪、四分溪、指南溪等較大面積之集水區而言，其降雨延時可能不足。尤其是對流性降雨型態發生局部區域降雨的情形，洪峰到達時間的分析時，無法滿足於全部集水區範圍內降雨的假設，因此，洪峰到達時間分析結果將呈現偏低或是偏高的情形。

就表 5 所建立之洪峰到達時間對降雨強度之迴歸式，假設平均降雨強度為 20 mm/hr、40 mm/hr、60 mm/hr、80 mm/hr、100 mm/hr、120 mm/hr 條件下，分別計算六個集水區之洪峰到達時間如表 6 所示。由表 6 就各個集水區之間相互比較，基本上，集水面積大的集水區其洪峰到達時間較長，挹翠集水區面積僅 34.7 ha，且建地與道路的面積率最高，其洪峰到達時間為六個集水區之最短。

表 6. 不同降雨強度條件下六個集水區之洪峰到達時間（Tp）計算值

Table 6. Calculated Timing of peak discharge (Tp) by estimated regression equation with different rainfall intensity of six watersheds.

降雨強度 (mm/hr)	洪峰到達時間 (Tp, min)					
	指南溪	青磿溪	內雙溪	四分溪	山豬窟溪	挹翠
20	86.0	107.8	108.3	95.2	76.1	63.8
40	58.7	71.8	80.3	69.1	57.2	43.9
60	47.0	56.6	67.4	57.4	48.4	35.2
80	40.1	47.8	59.6	50.2	43.0	30.2
100	35.5	41.9	54.1	45.3	39.2	26.8
120	32.1	37.7	50.0	41.7	36.4	24.3

關於洪峰到達時間與集水區坡度、坡長、粗糙係數，及平均降雨強度迴歸公式的建立，角屋、福島（1976）以山地集水區為對象，假設坡面漫地流符合曼寧法則，以運動波模式為基礎，推導出山地集水區洪峰到達時間的迴歸公式如下：

$$T_p = C_1 A^{0.22} Re^{-0.35} \quad (1)$$

T_p：洪峰到達時間 (min)

C_1：與地表條件有關的係數，如表 7 所示

A：集水面積 (km^2)

Re：有效平均降雨強度 (mm/hr)，為洪峰逕流係數乘以平均降雨強度

表 7. 不同地表條件之係數 C_1 值（角屋、福島，1976）

Table 7. Coefficient C_1 of Kadoya and Fukushima equation(1976) related to different land use.

地 表 條 件	C_1 值
山地森林	250 ～ 350
放牧地	140 ～ 200
高爾夫球場	120 ～ 150
粗整地宅地、農地	80 ～ 120
運動場	70 ～ 90
市街地	60 ～ 80

(1)式中係數值 C_1 隱含不同地表條件的粗糙係數、集水區坡度、坡長、面積等影響洪峰到達時間的意義，除此之外，將平均降雨強度納入洪峰到達時間的影響因子為此公式的主要特色。本研究之六個集水區當中，由於山豬窟溪有垃圾掩埋場所建之排水系統，改變了天然河道，與天然的集水區不同；而挹翠由於高度開發，也與其他四個以森林覆蓋為主的集水區形態迥異，故摒除山豬窟溪集水區、挹翠集水區，將其他四個集水區的洪峰到達時間與平均降雨強度的關係作成圖 4。並且，依照(1)式的形式，假設洪峰逕流係數等於 1 的情況下，分析洪峰到達時間迴歸公式得到下列結果：

$$T_p = 335.37A^{0.223}Re^{-0.549} \qquad R^2 = 0.709^* \quad n = 80 \tag{2}$$

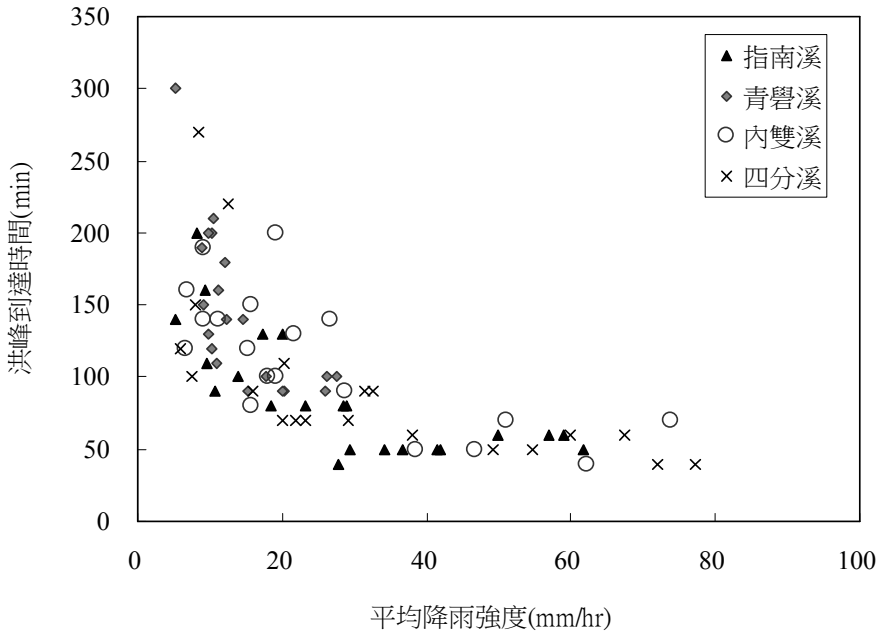


圖 4. 四個集水區洪峰到達時間與平均降雨強度的關係

Fig. 4. Relationship between Timing of peak discharge and average rainfall intensity of four investigated watersheds.

四個集水區的森林面積比例達 85%以上，基本上可以視為表 7 之山地森林的條件，(2)式迴歸分析的結果顯示，係數值 C_1 在角屋公式建議的範圍之內。與(1)式比較，由於研究區域的平均降雨強度高於(1)式的研究資料，顯示研究區域集水區的洪峰到達時間受平均降雨強度的影響較為明顯，在相同的降雨強度與集水區

面積的條件下，(1)式計算的洪峰到達時間值約為(2)式的 2 倍左右。

IV、結論

本研究蒐集分析台北市山坡地六個集水區 1998 年至 2003 年的降雨與逕流實測資料。以象神颱風等的極端降雨事件為例，六個集水區因為地文因子、土地利用等的差異，顯現出不同的比洪峰流量，青磘溪集水區呈狹長形，因此比洪峰流量較低，挹翠集水區面積較小且開發度較高，比洪峰流量高於其他的集水區。在不同的降雨情況下，集水區的洪峰逕流係數與發生洪峰時的平均降雨強度無顯著相關，挹翠集水區的洪峰逕流係數最大值接近於 1，其他五個集水區的最大值約為 0.60～0.85。然而，單場降雨直接逕流係數隨總降雨量增加而增大，累積降雨量達 200～400 mm 時，直接逕流係數達到最大值。

集水區洪峰到達時間受到集水區坡面及河道之坡度、長度、粗糙度，降雨強度等因子的影響，單一對象集水區，其物理因子可視為定值，因此影響洪峰到達時間主要是洪峰前平均降雨強度，六個集水區分析結果，隨降雨強度增大則洪峰到達時間呈對數縮短的情形。另外，本研究依據四個集水區實測資料建立的洪峰到達時間迴歸公式，顯示降雨強度對於洪峰到達時間的影響程度大於比角屋、福島（1976）建立之迴歸公式。

未來，山坡地集水區應用合理化公式推算洪峰逕流量時，洪峰逕流係數以及集流時間的決定，可以參考本研究依據實測資料分析的結果。

V、謝誌

本研究承台北市政府（前）建設局以及台北市瑠公農田水利會經費補助，研究助理吳祐德、林彥文，研究生林佳鋒、陳家民、詹佳彬、周明德、曾俊偉、石豐銘、謝宜芸等協助資料蒐集整理，謹此致謝。

VI、參考文獻

山地農牧局編（1986）山坡地土壤調查報告—台北縣、基隆市暨台北市。158 頁。

王如意、楊德良、房文傑（1990）小集水區設計逕流量推估方法之研究（一）。農委會林業特刊第 26 號。157-172 頁。

王如意、簡振和（1991）小集水區設計逕流量推估方法之研究（二）。農委會林業特刊第 32 號。129-152 頁。

王如意、簡振和、謝平城（1992）以運動波方程式探討應用合理公式之合適性研究（一）試驗集水區。農委會林業特刊第 40 號。171-190 頁。

何智武、蘇苗彬（1995）台北市山坡地水文環境監測站設置計畫(總結報告)。台北市政府建設局。102 頁。

陳明杰、陳信雄（1987）臺灣中部森林集水區水文歷線演算方法之研究。臺大實驗林研究報告 1(4) :55-83。

陳明杰（1995）森林試驗集水區集流時間之研究。臺大實驗林研究報告 9(1) :1-17。

陳明杰（1995）合理化公式推算洪峰流量相關條件之研究。臺大實驗林研究報告 9(4) :25-39。

陳樹群、黃兆章（1998）運動波理論建立台灣森林集水區集流時間之研究。中華水土保持學報 29(1) :11-22。

陳樹群(1999)高強度降雨之坡地集流時間公式。中華水土保持學報 30(2)：103-115。

黃正良、陳信雄（1987）臺灣森林試驗集水區最大逕流量推算之初步研究。中華水土保持學報 18(1) :36-48。

楊德良、林國峰（1989）合理化公式之檢討與應用。德基水庫集水區治理規劃研究報告第二冊。臺灣大學水工試驗所研究報告第 99 號。123 頁。

經濟部（1975）台灣地質概論。46-74 頁。

鄭皆達、夏禹九（1988）上游森林集水區暴雨流出的產生與其在集水區經營、工程設計上的應用。生態原則下的森林經營研討會論文集。231-244 頁。

角屋睦、福島晟（1976）中小河川の洪水到達時間。京都大學防災研究所年報 19B:143-152。

角屋　睦（1988）土地利用變化に伴う流出特性の變化。農業土木學會誌 56(11) :5-9。

永井明博（1988）土地利用の變化と洪水流出モテル。農業土木學會誌 56(11) :11-16。

Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. May, 1988, Applied Hydrology, International ed., McGraw-Hill Book Co., U.S.A.

UNESCO (1978) World water balance and water resources of the earth. UNESCO press, Paris.

2008 森林集水區經營研討會論文集:53-72

流量歷線之基流分離應用三種不同方法之結果比較

葉正霖[1]　鄭皆達[2]　黃良鑫[3]

【摘要】流量歷線表示流量在時間上變化之曲線，其總量為直接逕流（direct runoff）及基流（base flow）兩部分之總和。直接逕流大部分由超滲降雨（rainfall excess）行程，為造成洪水之主因；基流為河川枯水時期流量，屬於地下水所供應，與某次之降雨量無關，因此在歷線分析上需將基流由歷線分離，以確知流域之暴雨逕流總量。

本研究中應用最小二乘法擬合各段逕流歷線之基流分離，並與 R-K 法的基流分離法及 Barnes 的基流分離法做比較，在上昇段及直線段本擬合法與 R-K 法的基流分離法幾乎一樣，但在退水段 R-K 方法則有高估的現象，以致於產生入滲量大於溪流量的不合理現象，而在本研究中，直接取點做擬合，利用電腦裡的現成指數方程式，較為簡單、方便又迅速，且所得的結果也較接近歷線，尤其是在退水段的曲線部分，幾乎與逕流歷線一致。此外，本研究並以 Barnes 法進行溪流量包括基流量、中間流及地表逕流等各組成因子的分離。

綜觀以上三種基流分離方法，在總降雨量為 338.5（mm），總溪流量為 256.37（mm）的桃芝颱風期間，R-K 法所得之基流量為 91.27 (mm)；本文所用擬合方法為 67.17 (mm)，Barnes 法為 63.15 (mm)，R-K 法在退水期基流的高估，造成基流量大於溪流量的情況，此種情況發生在基流量無法繼續對溪流量補注，而反過來由溪流量對基流量進行補注，這樣的情況並非不可能，而是應該發生在乾旱時期，或地下水位很低的時候，因此並不建議使用 R-K 法；至於本研究修正 R-K 法所計算之結果，雖然在溪流上昇段與退水段幾乎重疊，然而在基流分離的過程中必須計算的時間分離點仍嫌太多，建議以 Barnes 法所衍生的方法較佳，雖然只用洪峰發生時間作為時間上的分離點，但同樣的步驟卻可分離出各項因子。

【關鍵詞】基流分離、桃芝颱風、小二乘法擬合。

---

[1] 國立台東大學博士後研究，通訊作者。電子郵件:jlyeh@nttu.edu.tw
Postdoctoral Researcher, National Taitung University.
[2] 國立中興大學水土保持學系教授
Profesor of Water & Soil Conservation Department, National Chung-Shing University.
[3] 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.

BASE-FLOW SEPERATION WITH THREE METHODS

Jen-Lin Yeh[1]　J.D.Cheng[2]　Liang-shin Hwang[3]

【**Abstract**】Hydrographs are the records of streamflow v.s. time and are indicators of responses of streams to rainfall inputs in the watersheds. Streamflow hydrographs are normally can be partitioned into two or three components in terms of direct runoff (streamflow) and baseflow by appropriate separation methods. This study compared the results of application of three separation methods, ① Barnes, ② Roman-Krzysztofwicz(R-K) and ③ least square fitting for streamflow hydrographs of Lien-hua-chi#3 experimental watershed during Typhoon Toraji in 2001.

The baseflow amounts calculated are 63.15mm, 91.27mm, and 67.17mm respectively for the Barnes, R-K and least square fitting methods respectively. The results also suggested that the Barnes method appeared to be most practical and useful method in term of usefulness and practicality related to calculation time and consistency.

【**Key words**】Base-flow Seperation, Toraji Typhoon, The Least Square Fitting Method.

Ⅰ、前言

台灣為一海島型國家，水資源全仰賴上天的降雨，雖然有豐富的降雨，年平均降雨量為 2500mm，然而降雨分佈極端不均，大部分都集中在夏秋季颱風季節，而其餘季節則經常缺水；因此在豐水季時用水不虞匱乏，而在枯水季常有水資源不夠用的窘境發生，加上近年來工商業發達、人口成長等因素，用水需求年年增大；因此，水文計算必須更加精細，以因應台灣的水資源現況，尤其是在水資源的儲蓄量的計算上，牽動全台用水的分配，應盡量精確，以避免不必要的浪費，有鑑於此，在本研究中特針對流量歷線的分離方式作一討論，除了要更精細的計算水資源涵養外，配合資訊時代的來臨，盡量使用電腦計算，以省卻人力及人為的誤差發生。

Ⅱ、前人研究

降於地面的雨水，部分經由蒸發返回大氣，其餘變為地表逕流經地表流入河川，或入滲於地表下成為中間流或為地表下逕流，最後仍流入河川或海洋。地表逕流係在降雨後，短其間直接流入河道，易造成和水急驟增加，但入滲後之雨水

需要較長時間才變為地下水，故能抑制河水之驟增且可供給枯水期之水量，有調節雨水自然之逕流作用，如圖 1 所示。

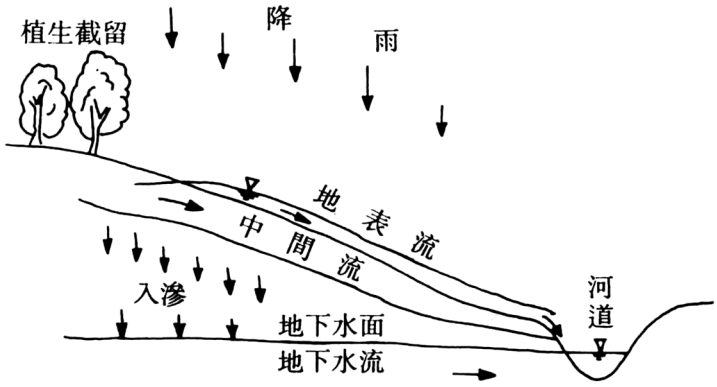


圖 1. 逕流過程簡意圖（徐，2003）

Fig. 1. Process of hydrograph. (Shu, 2003)

流量歷線表示流量在時間上變化之曲線，其總量為直接逕流（direct runoff）及基流（base flow）兩部分之總和。直接逕流大部分由超滲降雨（rainfall excess）行程，為造成洪水之主因；基流為河川枯水時期流量，屬於地下水所供應，與某次之降雨量無關，因此在歷線分析上需將基流由歷線分離，以確知流域之暴雨逕流總量（王，1989）。

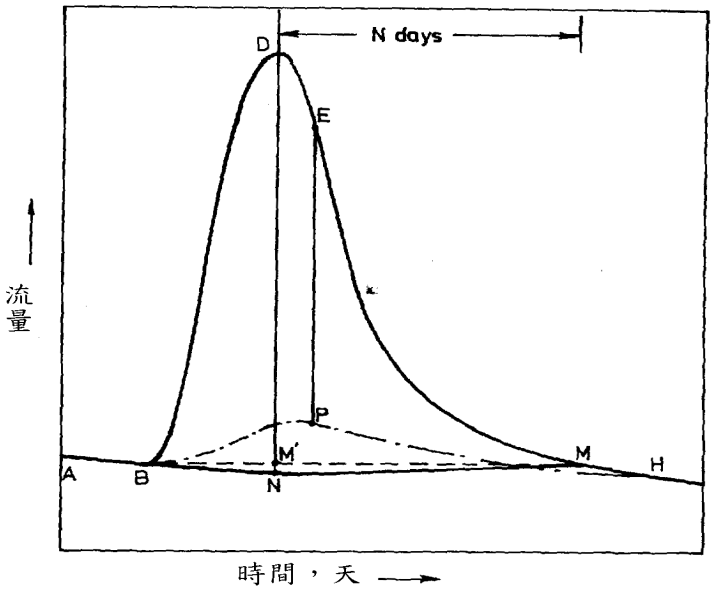


圖 2. 基流分離法（王如意，1989）

Figure 2. Base flow separation methods. (Wang, 1989)

直接逕流分離法有下列幾種（徐，2003）：

(I)　Barnes 法

將觀測流量歷線之流量描繪餘半對數座標上，其退水曲線部分之末端部分大致成為直線，如圖 3 延長 BG 畫出 BGG'線與歷線之洪峰點 P 直下方之線交'，在連接'，則 AGG 與歷線為成之上部為直接經流成分，下方部分為基流。

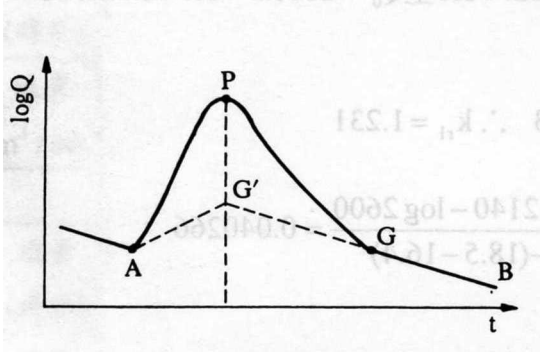


圖 3. Barnes 法（徐，2003）

Fig 3. Barnes method. (Shu, 2003)

(II)　水平分離法

如下圖 4 之流量歷線由上昇點 A 劃一條水平線與退水曲線相交之點當作 A，則 AA'部分以上是為直接逕流，以下視為基流。

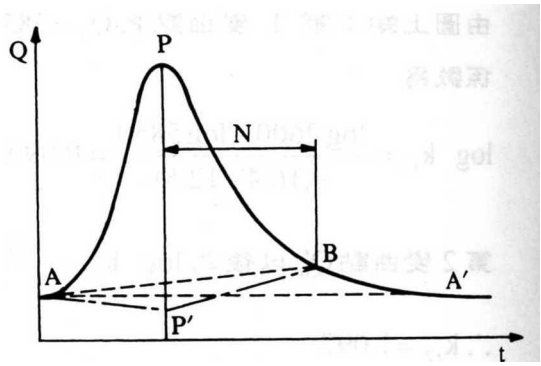


圖 4. 其他各法（徐，2003）

Fig 4. Other methods. (Shu, 2003)

(III) 以中間流終了時刻為基準之方法

本法可分為下列三法：

1. 坡降變點法（variable slope methos）

如圖所示，時間為橫軸，流量為縱軸，將退水歷線部分之各時刻的(,)值繪於半對數紙上，通常會有不連續點（即不同直線相交點），設此點為 B 點（此點亦視為中間流終了之點），連接、B 點，其上部份視為直接逕流，其下部分視為基流。

2. B.Linsley 法

如圖所示，洪峰點 P 退水曲線之點 B（此點亦視為中間流終了之點）間之時段設為 N 日。連接、B 點所成 AB 直線上方視為直接逕流，其下部分為基流。隨流域面積而定，美國河川之 N 參考值採用 $N=A^{0.2}$（day-mile 單位），或 $N=0.827A^{0.2}$（day-km 單位）。

3. 前期退水曲線延長法

如圖所示，將前期降雨之退水曲線延長為 AP，與洪峰點 P 之直下方線交於 P’點，再與上述 1 或法所決定之 B 點相連接，則 APB 之上方部分視為直接逕流，下方部分為基流。

Ⅲ、研究材料與方法

(I) 研究材料

2001 年桃芝颱風在呂宋島東方海面生成後以西北轉北北西的方向移動，朝台灣東部陸地接近，於 7 月 30 日 0 時 10 分左右登陸花蓮秀姑巒溪口，並於當日 10 時 20 分左右由新竹附近離開台灣(圖 5)。桃芝颱風不止為台灣帶來了大量的降雨，同時也帶來大規模的創傷，降雨強度超高的豪雨造成台灣中西部包括苗栗縣、台中市、縣、南投縣、彰化縣、雲林縣及嘉義縣及東部地區的花蓮縣鳳林鎮、光復鄉、壽豐鄉及萬榮鄉等發生嚴重的土石流災害，土石流掩埋了數個村落，造成極為慘重的災情。

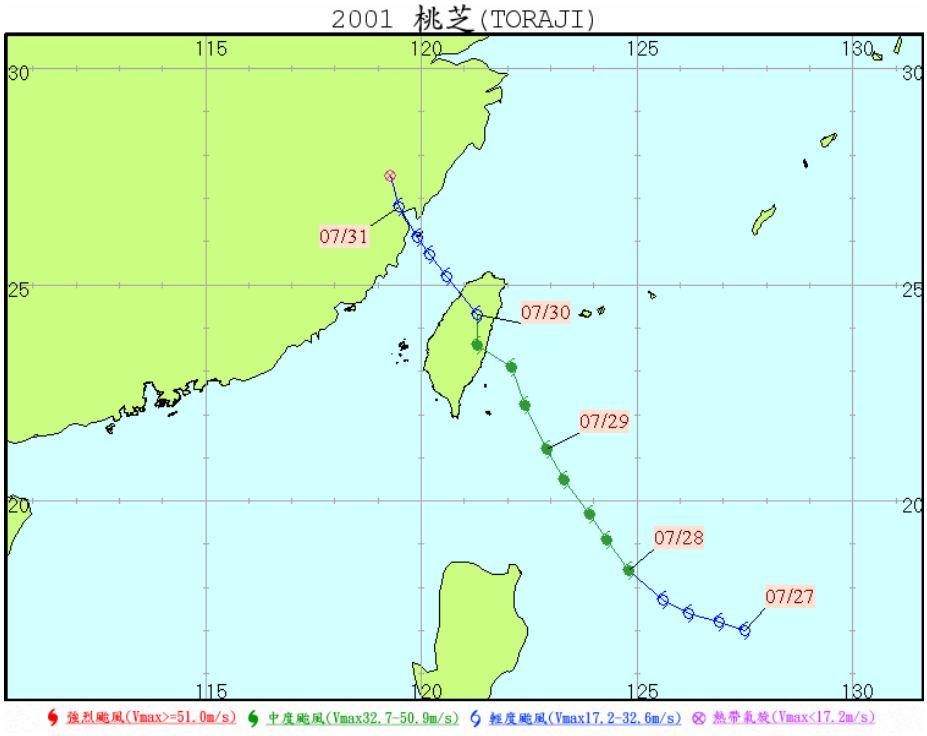


圖 5. 桃芝颱風路徑圖（資料來源，中央氣象局全球資訊網）

Fig 5. Moving path of typhoon Toraji (adapted from the central of weather burean).

本文採用 2001 年桃芝颱風的降雨，在林業試驗所蓮華池分所第 3 號集水區所形成的逕流歷線進行分析；桃芝颱風來襲造成台灣中部 921 重建區包括苗栗縣、台中市、台中縣、南投縣、彰化縣、雲林縣及嘉義縣及花蓮縣鳳林鎮、光復鄉、壽豐鄉及萬榮鄉等以及其他縣市發生嚴重土石流災害，而造成之土石流危險溪流可能已超過 1500 條（水保局）；桃芝颱風在短期間降下高強度的雨量，因而對台灣造成嚴重的災害屬於集中暴雨所形成的單峰歷線，適合本研究中的分析狀況，其降雨及流量如圖 6 所示；

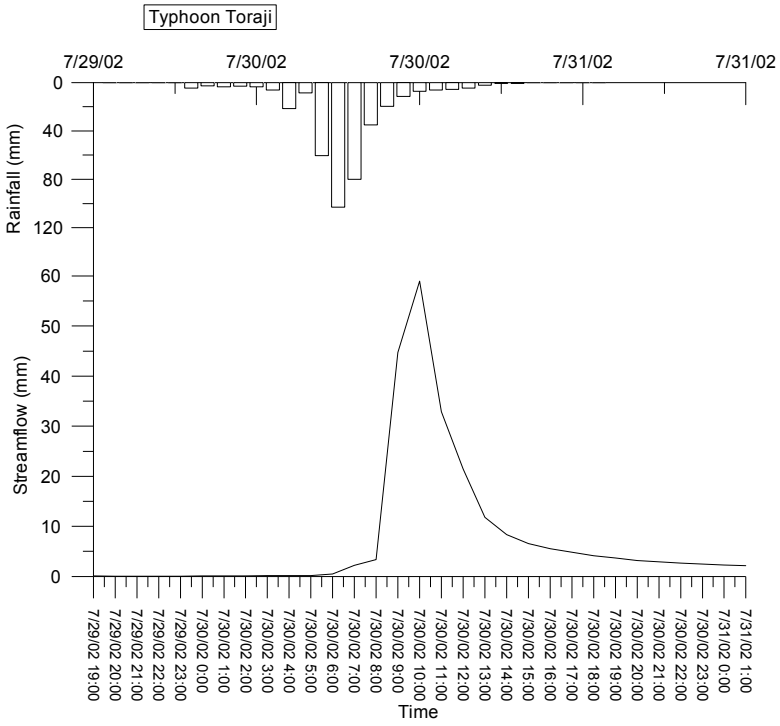


圖 6. 桃芝颱風期間蓮華池 3 號集水區之雨量、流量及土壤水分

Fig 6. Rainfall, discharge and soil water of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji.

(II) 研究方法

不同暴雨降落於集水區中，所能影響逕流之因子頗多，無法由一次暴雨求得令人滿意之降水與逕流關係。一般方式為求取某些影響兩者之參數，諸如暴雨頻率、初期土壤水分條件、暴雨延時及降水時期等而加以研究（王如意，1989）。Roman Krzysztofwicz 及 Mordechai H. Diskin 於 1978 年利用 Moisture-Accounting Watershed model 對單峰降雨事件進行研究，結果發現只要將集水區細分後，計算每一區域之降雨變化，再相加即可得到該集水區的降雨量，而總降雨量細分出來的各部分可經由上層土壤入滲的水分累計而得。

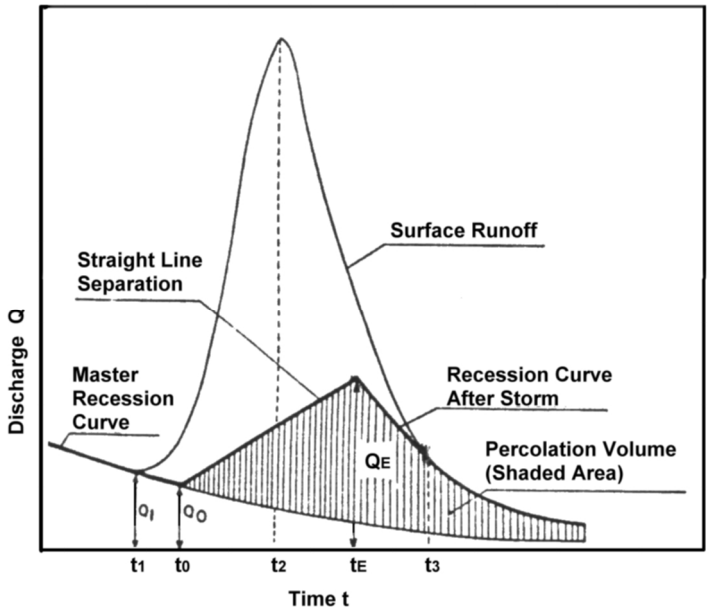


圖 7. 基流分離方法（Roman Krzysztofowicz, 1978）

Fig 7. Base flow separation method. (Roman Krzysztofowicz, 1978)

1. Krzysztofwicz and Mordechai 水文歷線分離

Dooge於1973年所提出之單峰歷線基流分離方法為最常被採用的基流分離模式之一（圖 7）；t_1 為地表逕流開始時間，t_2 為洪峰抵達時間，t_3 為地表逕流結束時間，直線部分由（t_o, Q_o）到（t_E, Q_E），計算如下：

當 $t_0=t_1+\frac{1}{3}(t_2-t_1)$, $t_E=t_3-\frac{1}{2}(t_3-t_2)$，可得

$Q_0=Q_1\exp[-(t_0-t_1)/KB]$

觀察歷線可得常態退水底點 Q_1 及 t_1，同時 t_2, t_3 亦可由歷線中求得，假設暴雨期間總入滲量 VB 為歷線上升段積分＋中間 t_0 到 t_E 面積＋退水段積分，可表示為：

$$VB = 0.5(Q_0 + Q_E)(t_E - t_0) + \int_{t_E}^{\infty} Q_E \exp[-(t - t_E)/KB]dt - \int_{t_0}^{\infty} Q_0 \exp[-(t - t_0)/KB]dt$$

式中：

VB：總入滲量（L^3）

KB：貯存係數（Storage constant）

積分部分如下：

$$\int_{t_E}^{\infty} Q_E \exp[-(t - t_E)/KB]dt = Q_E \exp(t_E/KB)[-KB\exp(-t/KB)]\Big|_{t_E}^{\infty} = KB \cdot Q_E$$

同理可得 $\int_{t_0}^{\infty} Q_0 \exp[-(t-t_0)/KB]dt = KB \cdot Q_0$

因此 $VB = 0.5(Q_0 + Q_E)(t_E - t_0) + KB \cdot Q_E - KB \cdot Q_0$

重新整理上式，可得直接地表逕流 Q_E 公式如下：

$$Q_E = \frac{VB - Q_0[0.5(t_E - t_0) - KB]}{0.5(t_E - t_0) + KB}$$

利用以上推導，可得歷線各段公式

$Q_B(t)=Q_1\exp[-(t_0-t)/KB]$, $t<t_0$

$Q_B(t)=Q_0+(Q_E-Q_0)/(t_E-t_0)*(t-t_0)$, $t_0<t<t_E$

$Q_B(t)=Q_E\exp[-(t-t_E)/KB]$, $t_E<t$

2. 潘斯法退水曲線分析

假設集水區之貯蓄量與溪流量的關係式為線性

S=kQ

其中：

S：貯蓄量（L^3/T）

Q：溪流量（L^3/T）

k：與時間因子有關的常數

溪流量又可表為貯蓄量隨時間的變化，$\frac{dS}{dt} = -Q$，由此二式可解出 Q 的函數如下：

$$Q = Q_0 e^{-(t-t_o)/k}$$

Q_0：退水開始之逕流量（L^3/T），亦可視為洪峰流量

t_0：退水開始時間（T），亦可視為洪峰到達時間

假設 Q 為逐漸趨近於退水時直接逕流與基流之漸近線，即當時間趨近於無窮大時，Q 趨近於 0。如此就可在半退數座標上以直線關係求出 k 及 Q_0。

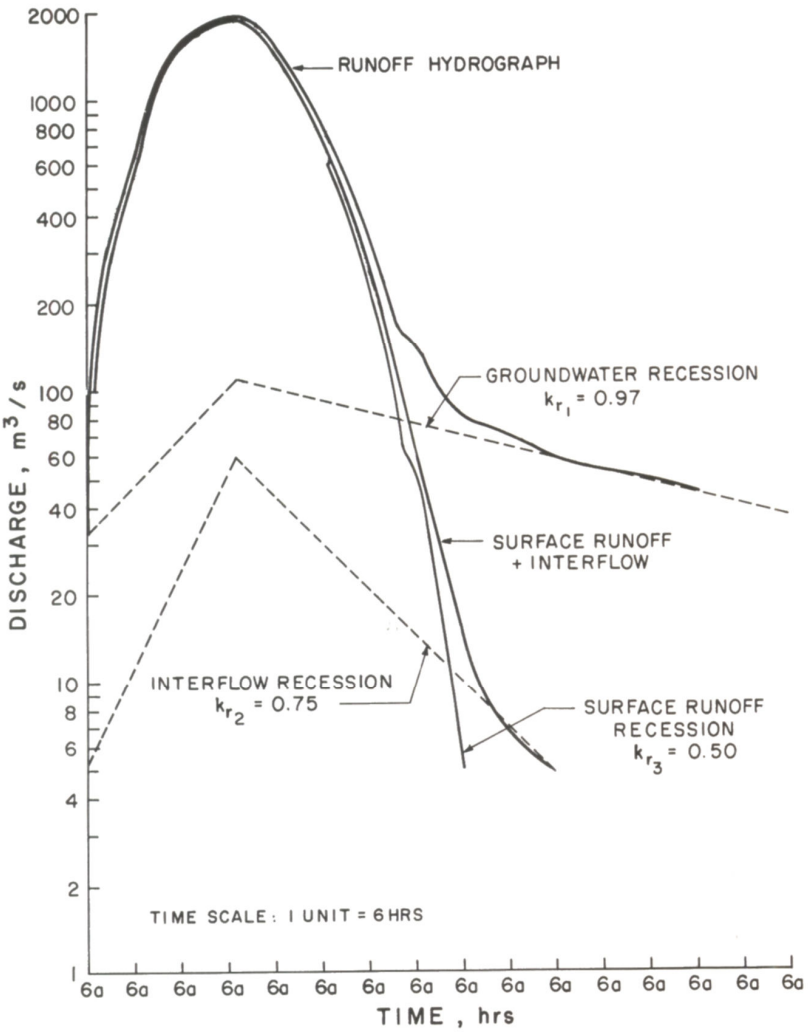


圖 8. 溪流量分離法（Singh, 1988）

Fig 8. Streamflow hydrograph separation method. (Singh, 1988)

假設溪流量為地表逕流、中間流及地下水的總和，則可表示為：

$$Q = Q_1 e^{-t/k_1} + Q_2 e^{-t/k_2} + Q_3 e^{-t/k_3}$$

上式共有 6 個未知數（Q_1, Q_2, Q_3, k_1, k_2, k_3），理論上只需 6 組流量數據即可解出 6 個未知數，然而若只取 6 組數據，雖然可解出未知數，但相較於其他數據則會有些許的誤差，即使未知數只有一些誤差，由於流量與參數為指數關係，對隨後計算的地表逕流、中間流或基流量都會產生很大的影響。潘斯（Barnes, 1940）建議以直線擬合半對數座標上之退水曲線，藉以分離出基流（地下水），將溪流量減去基流量可得中間流與地表逕流的和，重複以上方法可將中間流分離出，在將分離出的中間流減去則可得地表逕流（圖 8）。至於溪流歷線之上昇段部分，則以

退水開始時間為分界，取其切線作為歷線分離。

3. Hewlett 水文歷線固定斜率分離法

Hewlett 的固定斜率分離法是以歷線上昇處為起點，以 0.05cfs/mi^2/hr 為斜率分離基流與直接逕流，直到歷線相交為止。公制之斜率為 0.0055 l/s/ha/hr，且其斜率可隨各地區而修正，根據鄭皆達等（1992）以此方法在蓮華池 4，5 號試驗集水區的研究中發現，原 Hewlett 之值應提高為 0.01 l/s/ha/hr 的斜率方能分離所有歷線，並且不論用什麼方法分離歷線，只要能在歷線下降時將基流於暴雨流出量合理的分離即可。本研究採用鄭皆達等人所建議之斜率，並將單位換算成 mm 為 1*10^{-6}/3.4mm/s/ha/hr。

Ⅳ、結果與討論

本研究採用三種單峰歷線基流分離，分別是 Roman，小二乘法擬合及潘斯法，並對結果作比較，茲分述如下：

1. **Roman 法**

桃芝颱風逕流歷線之基流分離計算如下

令：t_1=41, t_0=42.333, t_2=45, t_E=52, t_3=59

可得：Q_0=6.407485389*10^{-4}

Q_1=6.454805951*10^{-4}

Q_E=2.811861653*10^{-2}

KB=181.1618085，將各參數帶入上式可求出歷線各段方程式，

Q=0.0006454805951*EXP (-(t-42.333)/181.1618085)

Q=(0.0006407485389+(0.02811861653-0.0006407485389)/(52-42.333)*(t-42.333)

Q=(0.02811861653*EXP (-(t-52)/181.1618085))

VB=0.1391600669(CMS)

=500.9762408(m^3)

2. 最小二乘法擬合

本研究用最小二乘法擬合各段歷線，所得結果如下：

Q = EXP (-0.00699319734 * t - 7.05683045), 擬合時段 t=2 to 34

Q=-0.1196881939+2.842438344e-3*t, t=42.333 to 56

Q = EXP (-0.03894072273 * t - 1.546405823), 擬合時段 t=56 to 79

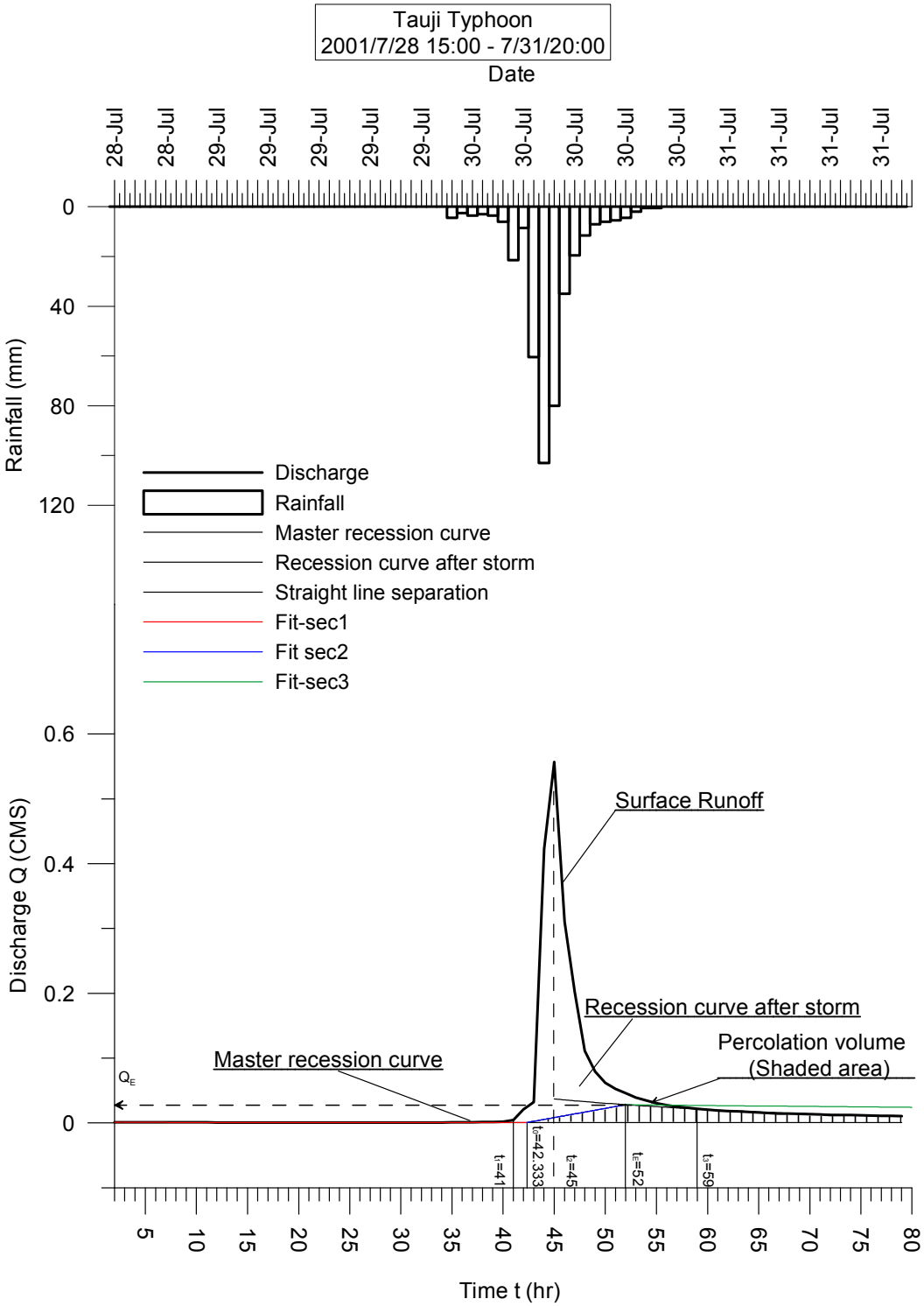


圖 9. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之雨量及流量分離方法

Fig 9. Rainfall and discharge separation method of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji, July 29, 2001.

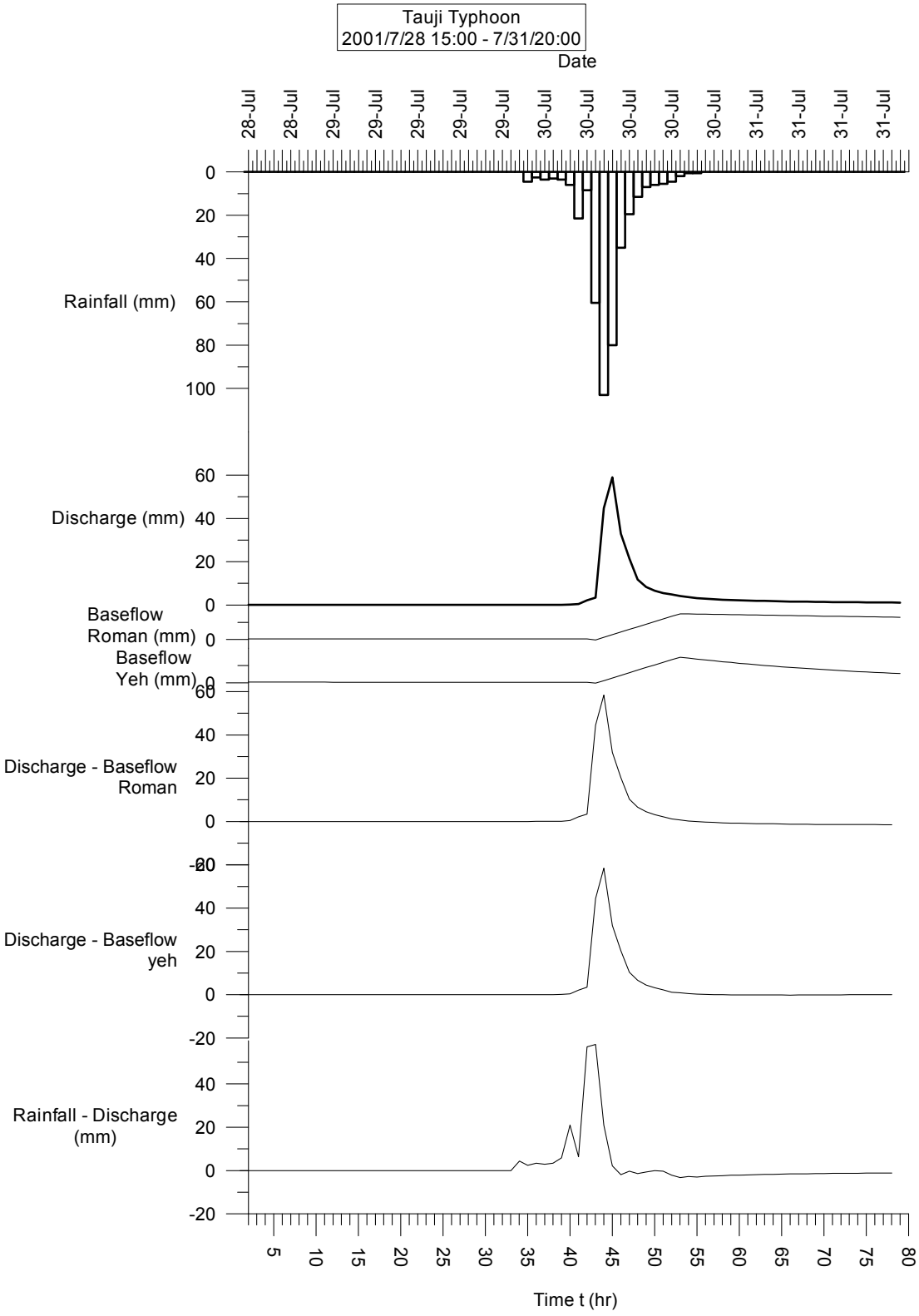


圖 10. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之雨量及流量分離

Fig 10. Rainfall and discharge separation results of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji, July 29, 2001.

比較二種方法所做的基流分離（圖 9），在上昇段及直線段二種方法幾乎一樣，但在退水段 Roman 的方法則有高估的現象（Fit-sec 3），以致於產生入滲量大於溪流量的不合理現象，反觀本研究的方法，直接取點做擬合，利用電腦裡的現成指數方程式，既簡單、方便又迅速，且所得的結果也較接近歷線，尤其是在退水段的曲線部分，幾乎與逕流歷線一致。

基流分離結果，Roman 法所得之基流量為 91.27 mm；本文所用方法為 67.17 mm，總降雨量為 338.5 mm，總溪流量為 256.37 mm（圖 10）。

3. 潘斯法

為了更進一步將其他水文特性分離出來，乃根據 Barnes（1940）的假設，將退水段的流量視為指數型態，因此可將溪流量繪於半對數座標上，並分為三個直線部分：$Q = Q_1 k_{r1}^t + Q_2 k_{r2}^t + Q_3 k_{r3}^t$，此三個半對數座標上的直線部分分別代表地表逕流、中間流及基流量（地下水）。

以洪峰流量發生的時間為分界點，對退水段做最小二乘法之直線擬合，可得一直線，此直線往前延伸至分界點，求得此點與上昇段之切線，連接切線與擬合出的直線即可將基流分離出來，此基流部分代表集水區入滲至地下含水層的量。

將溪流量減去基流量後，可分離出中間流與地表逕流的和，利用相同的方法，在半對數座標上，對分離出的曲線之退水段做最小二乘法直線擬合，延伸此直線至分界點，並求出此點與上昇段之切線，連接切線與擬合出的直線即可分離出中間流，將先前分離出的曲線減去中間流即可得地表逕流。

利用上述原理，將桃芝颱風之溪流量做更細部的分離，如圖 11 所示，將溪流量分為地表逕流、中間流及地下水等三部分。桃芝颱風期間之溪流量每 1hr 紀錄 1 筆資料，全部紀錄時間共有 79hr（圖 12），洪峰流量發生在第 45 筆資料（7 月 30 日 10:00），以此為分界點；對 72-79 小時的資料進行最小二乘法之擬合，得到方程式：流量(Y) = exp(-0.02240321304 * 時間(X) * 0.06280147387，將直線往前延伸至分界點，經過此分界點向下求得經過起始點之切線方程式：流量(Y) = exp(0.5118321858*時間(x)-26.80836968)，利用此二條直線將溪流量之基流（即地下水）分離出來（圖 13）；溪流量減去分離出來的基流（地下水）後，所剩者為地表逕流與中間流之和的曲線，對此曲線取 67-79hr 的資料進行最小二乘法之擬合，得到方程式：流量(Y) = exp(-0.1241565651 * 時間(X) * 1.956430919，同樣將直線往前延伸至分界點，並經過此分界點向下求得經過起始點之切線方程式：流量(Y) =

exp(0.2838317352*時間(x)-17.68835166)，利用此二條直線將中間流分離出來（圖14），地表逕流與中間流之和的曲線減去中間流即可得出地表逕流量（圖 15）。

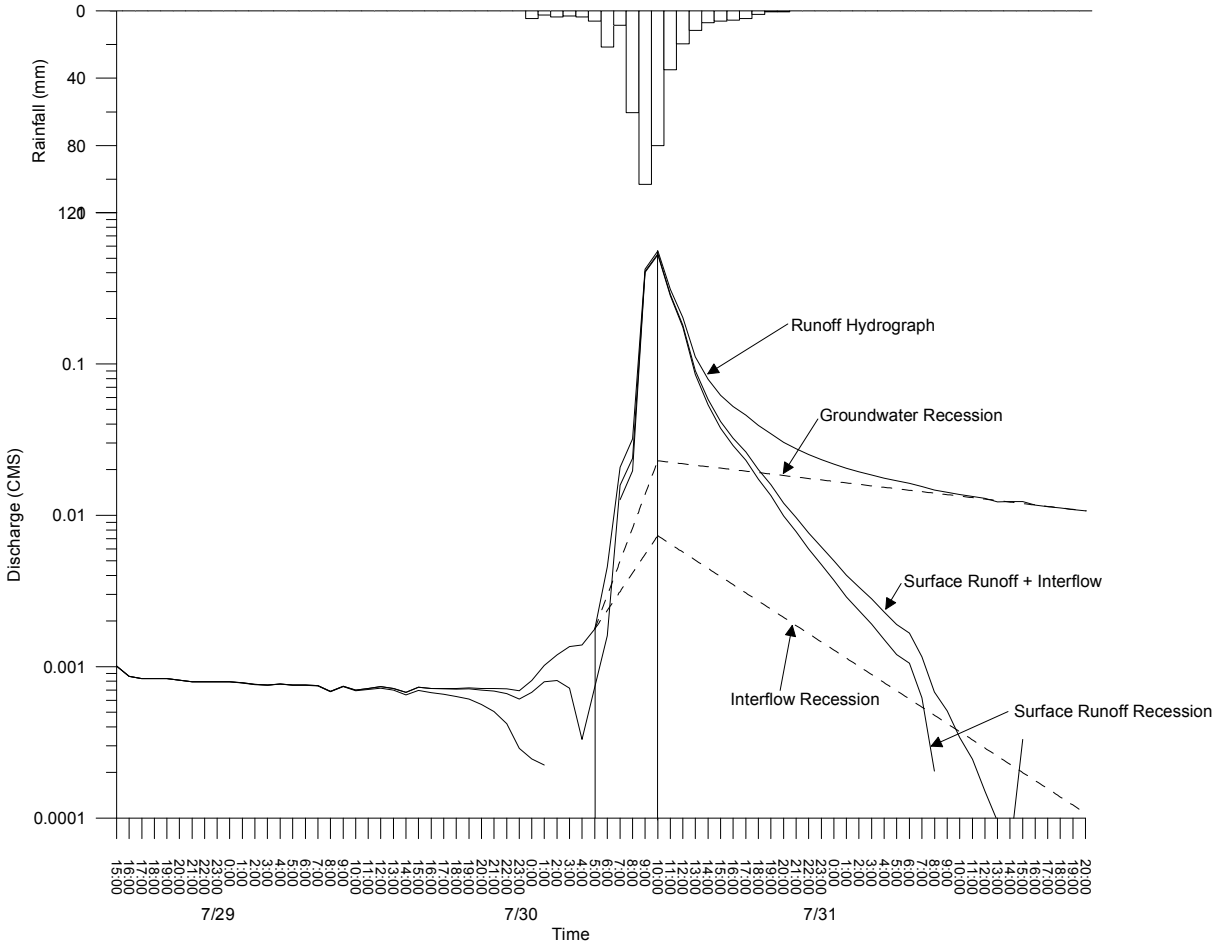


圖 11. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之溪流量分離(潘斯法)

Fig 11. Discharge separation of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji in July 29, 2001.(Barnes' method)

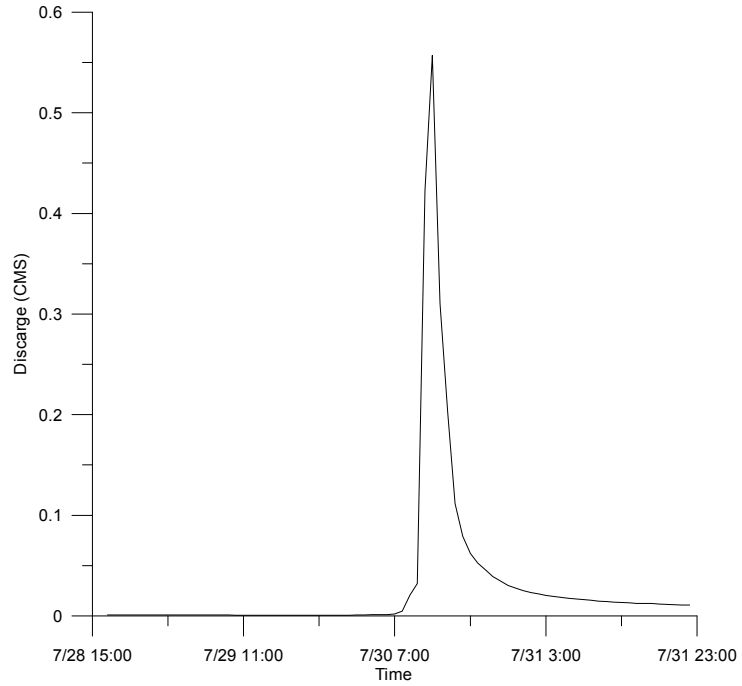


圖 12. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之溪流量

Fig 12. Discharge of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji in July 29, 2001.

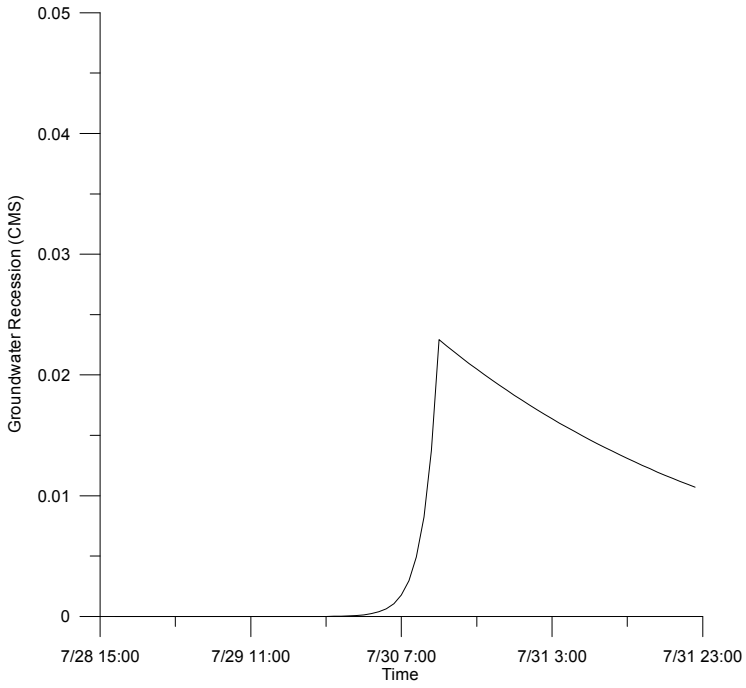


圖 13. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之基流量（地下水）

Fig 13. Baseflow (groundwater) of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji in July 29, 2001.

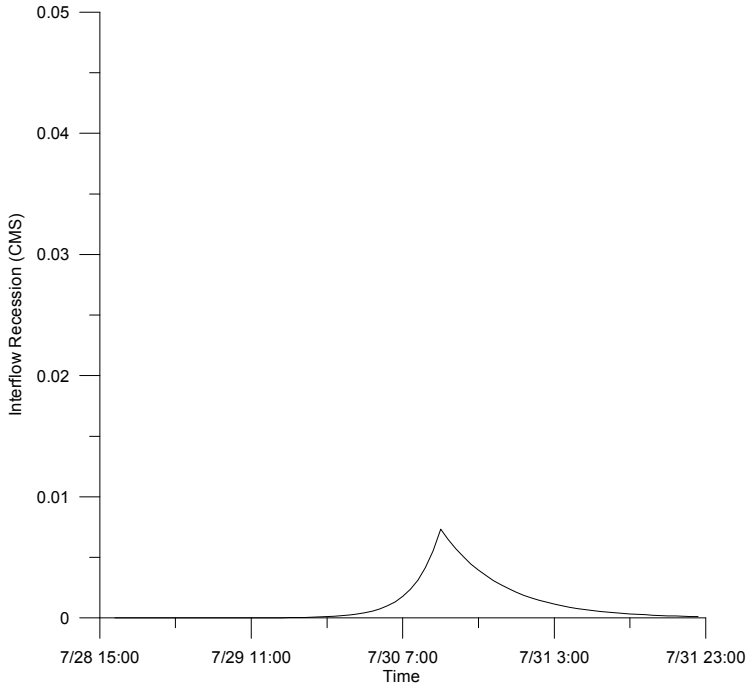


圖 14. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之中間流

Fig 14. Interflow of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji in July 29, 2001.

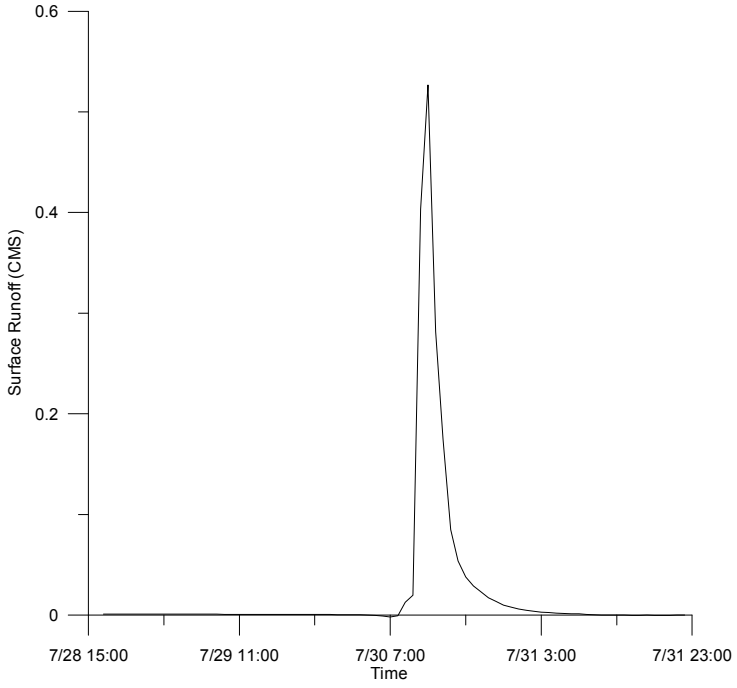


圖 15. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之地表逕流

Fig 15. Surface runoff of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon Toraji in July 29, 2001.

詳細數據及計算如表 1 所示，計算公式如下：

A（溪流量）-B（基流分離量）=C（地表逕流+中間流）

C（地表逕流+中間流）-D（中間流）=E（地表逕流）

其中地表逕流之計算結果，在洪峰流量過後 1 日，即 7 月 31 日 10:00 由正轉負。顯示地表逕流在此時消失，而中間流則持續對地下水及溪流量進行補注。

圖 16 為三種基流分離之計算方法結果之比較，Roman 法在退水段明顯高於其他二種，而潘斯法在退水時間上，由於採用洪峰發生時間為分界，因此較其他二種方法提早，本研究所使用的方法則是介於二者之間。總基流量方面，Roman 法所得之基流量為 0.86CMS （91.27mm）；本研究所用方法為 0.63 CMS （67.17 mm） ，潘斯法所得之基流量為 0.59 CMS （63.15mm）。與總雨量 388.50mm 相較之下，Roman 法為 23.49%，本研究為 17.29%，而潘斯法為 16.26%。與年平均相比，鄭皆達等於 2002 年對台灣上游集水區之水文循環的估算值中，年平均雨量 2500mm 與年平均基流量 600mm 的比值為 24%。

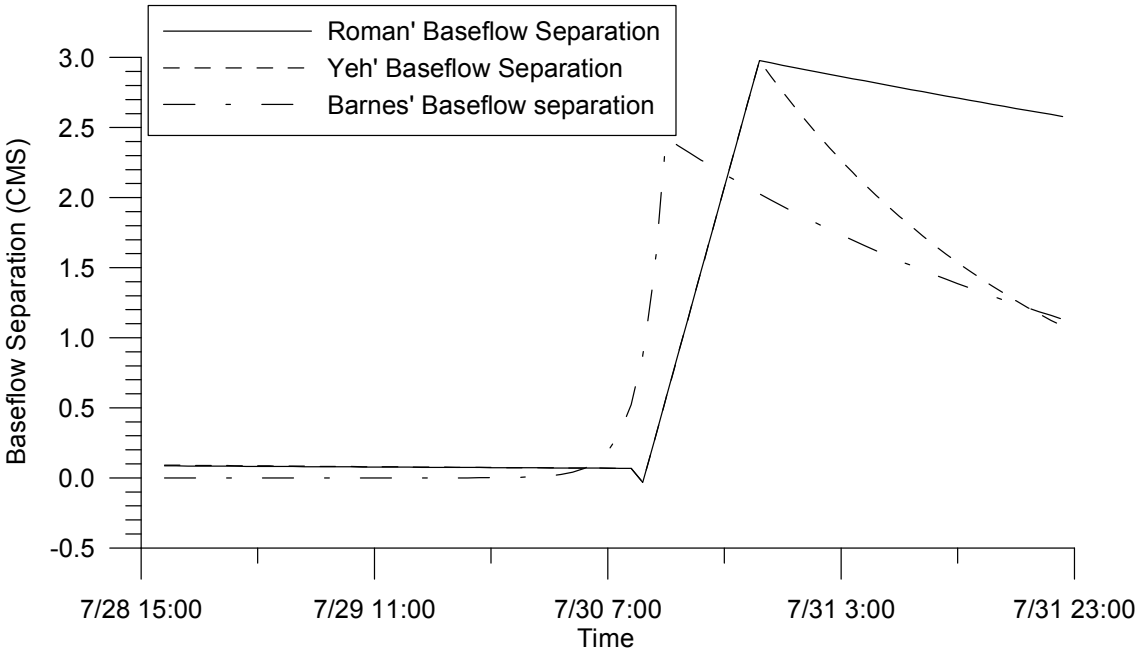


圖 16. 2001 年 7 月 29 日桃芝颱風期間在蓮華池 3 號集水區之三種基流分離比較

Fig 16. Comparison of three base separation methods of Lien-hua-chi experimental watershed No.3 during typhoon in July 29, 2001.

潘斯法除計算基流量之外，還可進一步將地表水分離為中間流與地表逕流，根據此法將桃芝颱風期間的溪流分離為地表逕流、中間流及基流，分別為地表逕流 1.74CMS(184.29mm)，中間流 0.08CMS(8.92mm)及基流量 0.59CMS（63.15mm）（圖 13-15）分別佔總溪流量的 71.88%, 3.48%及 24.63%；暴雨流出量則佔總溪流量的 76.37%。

將以上三中基流分離方法在桃芝颱風期間所計算出的暴雨流出量，與其他上游森林小集水區 14 場暴雨及台灣年平均值相比，與其他集水區不同的暴雨狀況相較之下，蓮華池研究中心 3 號集水區之暴雨流出量與降雨量的比值（SF/P）偏低，3 種分離方法所計算出的值都在 50%以下，顯示蓮華池 3 號集水區對水資源涵養功能很好，降雨量大多能涵養在集水區內，相對的在颱風期間的暴雨流出量比率就比其他集水區低，而降下的雨量也較能以基流量的型態貯蓄在集水區內。

在降雨與.流出量的基流分離結果方面，本研究比較 Roman 的方法及直接取點做擬合後，發現二種方法所做的基流分離，在上昇段及直線段二種方法幾乎一樣，但在退水段 Roman 的方法則有高估的現象，以致於產生入滲量大於溪流量的現象，反觀本研究使用直接取點做擬合的方法，利用電腦裡的現成指數方程式，既簡單、方便又迅速，且所得的結果也較接近歷線，尤其是在退水段的曲線部分，幾乎與逕流歷線一致。此外，本研究並以 Barnes 法進行溪流量包括基流量、中間流及地表逕流等各組成因子的分離。

將以上三中基流分離方法在桃芝颱風期間所計算出的暴雨流出量，與其他集水區不同的暴雨狀況相較之下，蓮華池研究中心 3 號集水區之暴雨流出量與降雨量的比值（SF/P）偏低，3 種分離方法所計算出的值都在 50%以下，顯示蓮華池 3 號集水區對水資源涵養功能很好，降雨量大多能涵養在集水區內，相對的在颱風期間的暴雨流出量比率就比其他集水區低，而降下的雨量也較能以基流量的型態貯蓄在集水區內。

Ⅴ、結論

綜觀以上三種基流分離方法，在總降雨量為 338.5（mm），總溪流量為 256.37（mm）的桃芝颱風期間，Roman 法所得之基流量為 91.27 (mm)；本文所用方法為 67.17 (mm)，Barnes 法為 63.15 (mm)，Roman 法在退水期基流的高估，造成基流量大於溪流量的情況，此種情況發生在基流量無法繼續對溪流量補注，而反過來由

溪流量對基流量進行補注，這樣的情況並非不可能，而是應該發生在乾旱時期，或地下水位很低的時候，因此並不建議使用 Roman 法；至於本研究修正 Roman 法所計算之結果，雖然在溪流上昇段與退水段幾乎重疊，然而在基流分離的過程中必須計算的時間分離點仍嫌太多，至於 Barnes 法雖然可分離出地表逕流、中間流及基流量，但用洪峰發生時間作為時間上的分離點，與實際入滲時間點有誤差。

Ⅵ、參考文獻

中央氣象局全球資訊網。
http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php?num=2001080727&year=2001&c_name=桃芝&e_name=TORAJI。

王如意（1989）應用水文學。中國土木水利工程學會。183-184 頁。

行政院農業委員會水土保持局全球資訊網。
http://www.swcb.gov.tw/swcb.asp?ptype=swcb03/main&onclick_menu=5。

徐義人（2003）應用水文學。國立編譯館。317-321 頁。

Barnes, B. S. (1940) Discussion of analysis of runoff characteristics. Transactions of the Ajmerican Society of Civil Engineers, 105-106.

Cheng, J.D. (1994) A comparative study of hydrologic characteristics of headwater watersheds in Taiwan. Proceedings of the international symposium of forest hydrology, Tokyo, Japan, 331-338.

Cheng, J.D., L.L. Lin, H.S. Lu (2002) Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. Forest Ecology and Management, 165: 11-28.

Dooge, J.C.I. (1973) Linear theory of hydrologic systems. Agric. Res. Serv., U.S. Dep. Agric., Tech. Bull. No. 1468, 79-84; 89-93; 190-200.

Krzystofowicz R. and Diskin M.H. (1978). A moisture-accounting watershed model for single-storm events based on time-area concept. J. Hydrol. 37, 261 – 294.

Singh Vijay P. (1988) Hydrologic systems Rainfall-runoff modeling volume 1. Prentice Hall: A division of Simon & Schuster Englewood Cliffs, New Jersey, 86-104.

2008 森林集水區經營研討會論文集:73-85

不同土地利用型態之溪流水化學

王秋嫻[1]　劉瓊霖[2]

【摘要】本試驗收集分析坪林鄉北勢溪上游兩不同土地利用型態之溪流水，以探討農地集水區及林地集水區各月份之溪流水化學差異。試驗期間從 1986～2006 年，定期（每隔半月）取水，分析測定其電導度、pH 值、懸浮值、總氮（TN）、陽離子（Na, NH_4, K, Mg, Ca）及陰離子（F, Cl, NO_3, PO_4, SO_4, HCO_3）濃度，結果顯示大部份之月份農地溪流水之總陽離子及總陰離子濃度皆明顯大於林地溪流水，尤其以電導度、Mg、NO_3 及 SO_4 於全年各月份均明顯較高。此外，H、Na、K、Cl 在農地溪流水各月份之平均濃度皆大於林地溪流水（HCO_3 則是林地大於農地），但僅部分月份達到顯著性。其餘 NH_4、Ca、F、PO_4 於兩地溪流水則無明顯差異。探討各離子濃度之月變化發現，大部份之離子（如 K, Mg, Ca, HCO_3） 濃度在兩地之溪流水皆以夏季（5～8 月）較高，冬季（12～2 月）最低。探討溪流水化學與降雨量之關係顯示，僅部分離子（如 K、Cl、SO_4）之濃度與雨量有高度相關，且因不同土地利用型態而異。

【關鍵詞】溪流水化學、土地利用、離子濃度。

STREAM WATER CHEMISTRY ON DIFFERENT LAND USES

Chiu-hsien Wang[1]　Chiung-pin Liu[2]

【Abstract】To evaluate stream water chemistry within two different land use watershed (forest and agriculture), samples were taken in the stream during 1986 and 2006. We analysis conductivity, pH, suspended solid, total nitrogen (TN), cation (Na, K, Ca, Mg, NH_4) and anion (F, Cl, NO_3, SO_4, HCO_3). The concentration of most chemical constituents in the agriculture watershed was higher than in the forest

[1]行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組技佐，通訊作者。電子郵件: wangch@tfri.gov.tw
Junior technical specialist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail:wangch @tfri.gov.tw
[2]國立中興大學森林系副教授。
Associate professor, Department of Forestry, National Chung Hsin University.

watershed, especially conductivity, Mg, NO_3, and SO_4. Besides, the monthly average concentration of H, Na, K, and Cl was higher significantly in the agriculture watershed than in the forest watershed. On the contrary, the concentration of HCO_3 was higher in the forest watershed than in the agriculture watershed. There was no significant difference between the two watersheds in the concentration of NH_4, Ca, F, and PO_4. Most ions (i.e. K, Mg, Ca, HCO_3) were the highest in summer and the lowest in winter. To evaluate the relationship among between water chemistry and rainfall, only some ion concentration(i.e. K、Cl、SO_4) had higher relationship to rainfall, which was different depend on different land uses.

【Key words】Stream water chemistry, Land use, Ion concentration.

Ⅰ、前言

台北縣坪林鄉多屬山地，溫暖潮濕雲霧多，境內茶園綿延起伏，為著名茶葉之產地，又因其位於北勢溪上游，對翡翠水庫水質之影響不容忽視。河川或湖泊水體的各項水質指標會受到季節變化、流量、降雨量等影響，在有農業開發的集水區中，更會受到施肥季節的影響（張尊國等，1994；李國忠、盧英秀，1998），此外，不同的土壤性質、植被類型、生物作用及人為擾動（如森林火燒、皆伐及市鎮、土地利用型態等）亦是影響溪流水化學之因子 （夏禹九等，1994；鍾欣芸等，2006；Feger *et al.*,1990；Hill, 1980；Honisch *et al.*, 2002；Hornbeck *et al.*, 1997；Phillips and Stewart, 1990；Thornton and Dise , 1998）。本試驗以長期（20 年）收集之溪水，探討農地開發利用（主要為茶園和果園）對溪流水化學之影響。

Ⅱ、材料與方法

（Ⅰ）試驗地概述及水樣取樣點

本試驗集水區位於北勢溪上游，依土地利用型態分為農地集水區及林地集水區，農地集水區之地理位置為北緯 24°56’5”，東經 121°42’40”，面積為 24.818 公頃；林地集水區之地理位置為北緯 24°54’10” ，東經 121°43’52”，面積為 48.712 公頃，兩者行政區劃均屬於台北縣坪林鄉，本試驗乃在兩地集水區出口處採取溪水（如圖 1 所示）。農地集水區地形略呈修長，最高標高 566 公尺，最低標高 197 公尺，平均海拔高 356.5 公尺；林地集水區地形近似橢圓，最高標高 765 公尺，最低標高 308 公尺，平均海拔高 551.73 公尺。農地集水區已開發區域種植茶葉與柑

橘，未開發地區域散生稀疏雜木或雜草叢草生，林地集水區除極小部份屬於濫墾地外，餘均為茂密人工林或雜木林所覆蓋，其中人工林之主要樹種為柳杉、琉球松及樟樹（林務局，2004）。

本集水區之土壤淺薄，質地粘重且呈強酸性。農地集水區表土 A 層厚約 15 公分，呈暗褐色為坋質壤土（Silty loam）結持度脆，pH 值為 4.39；B 層厚約 30 公分，為褐色或淡黃褐色之粘質壤土（Clay loam），pH 值為 4.54 為強酸性。林地集水區表土 A 層厚約 30～40 公分，為暗褐色或黃褐色屬坋質壤土（Silty loam），pH 值為 4.44；B 層厚約 30 公分，為深褐色或黃褐色之微砂質粘土（Silty clay） 結持度堅，pH 值為 4.88 亦為強酸性（林務局，2004）。



1：農地集水區溪流水取樣點；2：林地集水區溪流水取樣點

圖 1. 台北縣坪林鄉溪流水取樣位置圖

Fig. 1. Water sampling sites from stream water in the Pinglin township, Taipei county.

（II）水樣分析方法

於 1986～2006 年間，每半個月前往兩樣點取水一次，利用瓢掬法取水樣 500ml，儘速送至實驗室進行化學物質分析，運送過程不超過 6 小時。水樣抵達實驗室後，馬上測定電導度（WTW LF 340, Germany）及 pH 值（Metrohm 691, Switzerland），其餘水樣經 0.45 μm 濾膜（Gelmanscience GN-6 grid 0.45-μm sterilized filter paper, Germany）過濾後，濾紙以 105℃烘乾後稱重以定量懸浮質濃度。濾液

則置於恆溫箱（4℃）以備測定陰離子（F, Cl, NO_3, SO_4, HCO_3）、陽離子（Na, K, Ca, Mg 及 NH_4）、及總氮（TN）等。其中陰、陽離子除 HCO_3 是以 0.005 N H_2SO_4 滴定到 pH 4.52 定量外（APHA , 1995），其他則以離子層析儀（DX-120,USA）測定。TN 則以總有機碳、氮分析儀（high TOC, Germany）測定。

Ⅲ、結果與討論

（Ⅰ）各月份比較

由表 1 結果顯示農地溪流水中 Ca、Mg、Na 之月平均濃度分別占全部陽離子的 35%、32%、29%；林地則分別占 37%、28%、31%，其餘 K 和 NH_4 在兩地溪流水皆僅占 2%。陰離子的部份，農地及林地溪流水中的 HCO_3、SO_4、Cl、NO_3 濃度則分別占 40%、31%、18%、11%及 54%、24%、19%、3%，其餘 F 和 PO_4 皆僅占 1%以下。此結果顯示溪流水的主要輸出無機養分離子為 Ca、Mg、Na、HCO_3 及 SO_4，與雨水以 H 為主要之輸入養分不同（劉瓊霰、許博行，1998）。又農地溪流水的月平均離子輸出濃度為林地溪流水的 1.2 倍。

比較兩地溪流水之懸浮值並無顯著差異（如表 2），表農地集水區之冲蝕現象尚不顯著，另外林地溪流水 pH 值在各月份均較農地溪流水高，除了 1、2 及 7 月未達顯著外，大部份月份均明顯較高。此外，一年中大部份之月份農地溪流水之總陽離子及總陰離子濃度皆明顯大於林地溪流水，尤其以 Mg、NO_3 及 SO_4 於全年各月份均以農地溪流水之濃度明顯較高，故農地溪流水之電導度亦明顯高於林地溪流水。此外，H、Na、K、Cl 在農地溪流水各月份之平均濃度皆大於林地溪流水（HCO_3 則是林地大於農地），但僅部分月份達到顯著性。其餘 NH_4、Ca、F、PO_4 於兩土地利用型態之溪流水則無明顯差異。至於 TN 含量，大部份月份則以林地溪流水高於農地溪流水，僅 1、2 及 9 月未準達顯著性差異。

由上述林地溪流水的 pH 值平均較高之結果顯示，森林對酸雨的緩衝效能較佳（依據中央氣象局資料台北測站（1972～2007 年）雨水 pH 值平均為 4.3 屬酸雨）。另外，由金恆鑣等（2003）及劉瓊霰和許博行（1998）試驗結果皆顯示森林生態系對無機氮（含 NH_4-N 及 NO_3-N）有截留作用，為沈積者的角色（sink），與本試驗農地溪流水 NO_3 濃度皆大於林地溪流水吻合，再加上農地施肥的作用，皆會導致農地溪流水 NO_3 濃度增加，惟 NH_4 離子在兩地無明顯差異，是否因 NH_4 極易經硝化作用轉換為 NO_3 有關，尚待進一步釐清。此外，SO_4 於農地溪流水之濃度較

高，推測與農地施肥有關。農地溪流水之總陽離子及總陰離子濃度皆明顯大於林地溪流水，除了與農地的總輸入較多（主要為施肥）外，是否亦表示農地對養分的保留較差，養分長久流失後易造土地貧瘠呢？另外，TN 含量以林地溪流水較高，推測乃因森林生態系含有較厚之枯枝落葉層及豐富之生物相，所累積之有機物較多，輸出亦較多之緣故。

（II）月變化及與雨量之關係

同一土地利用型態溪流水化學之月變化趨勢如圖 2、3、4 所示，農地溪流水的總陽離子及總陰離子皆以 8 月份最高，12 及 2 月份最低；林地溪流水則以 5、8 月最高，2 月最低。其中的電導度、K、Mg、Ca、HCO_3 在農地及林地的月變化趨勢大致相同，皆以 5～8 月最高，12～2 月最低。NH_4 在兩地溪流水則以 7 月最高、1 和 5 月最低，SO_4 在兩地溪流水則以 3、4 月較高，9～12 月較低。此外，F、NO_3、TN 在農地和林地之月變化則不盡相同，林地溪流水 F、TN 在各月份無明顯差異；農地的 F 於 7 月明顯高於 3 月和 8 月，農地的 TN 於 6 月則明顯高於 1、2 月。NO_3 在農地溪流水的高峰約在 7～9 月，5 月最低；林地溪流水的高峰在 8 月，9 月則最低，其餘 pH 值、懸浮值、Na、Cl 及 PO_4 在兩地溪流水則無明顯月變化。

根據 Salmon *et al.*（2001）指出溪流水的來源有三種，分別為直接降水、表層土壤水及深層土壤水，豐水期時，溪水主要來自直接降水和表層土壤水，因表層土壤水之電導度、Ca、Mg、SO_4 及 HCO_3 離子濃度較低，加上雨水流入溪流後產生稀釋作用，使上述離子濃度更為下降；枯水期時，河川流量主要來自深層土壤水，此土壤水含有高濃度 Na、Ca、Mg、SO_4 及 HCO_3 等離子，故枯水期時上述離子濃度升高 （廖學誠等，2002）。引用經濟部水利署坪林測站 1977～2005 年之月平均雨量 （如圖 5）顯示，坪林地區之月平均雨量以 9 月最高達 649 mm；1 月最低僅 126 mm，以此雨量資料和兩地溪流水化學之濃度分別進行相關性分析，其結果如表 3 所示，農地和林地溪流水中的 K 濃度及林地溪流水中的 Cl 濃度和雨量成正相關，相關係數分別為 0.63、0.68 及 0.62，即隨著雨量的增加而增加；僅林地溪流水中的 SO_4 濃度與雨量成負相關（相關係數-0.58），即隨著雨量的增加而減少。其餘電導度、懸浮值、TN、H、Na、NH_4、Mg、F、PO_4 及 HCO_3 在兩地溪流水與雨量之關係不大，顯示其不受雨量之影響。

王立志等（1998）研究 1996 年葛樂禮颱風期間福山試驗林溪流水化學變化發現，電導度、Ca、Mg、SO_4 及 HCO_3 等離子濃度隨著流量升高而下降，懸浮值、K、

NH_4、NO_3 及 Cl 隨著流量上升而升高；廖學誠和黃正良（2001）研究六龜溪流水結果顯示，電導度、pH、Na、Ca、Mg、SO_4 及 HCO_3 等離子濃度隨著流量增加而減少，懸浮值及全氮量則隨著流量增加而增加；廖學誠等（2002）研究結果則顯示 H 濃度隨著流量增加而增加。然而由本試驗結果僅顯示林地溪流水的 Cl 與雨量成正相關，推測雨水中的 Cl 未被森林截留或交換即輸出的量較大，此外農地及林地溪流水的 K 與雨量成正相關，顯示雨水對植物冠層的淋洗作用帶出大量的 K，此與金恆鑣和楊炳炎（1984）研究結果相同。本試驗結果林地溪流水中的 SO_4 濃度與雨量成負相關，推測林地的 SO_4 於深層土壤水的濃度較高。

表 1. 不同土地利用型態溪流水各離子濃度及比例

Table 1. The ion ratio and concentration of stream water on different land uses.

項　目	H	Na	NH_4	K	Mg	Ca	Cation	F	Cl	NO_3	SO_4	PO_4	HCO_3	Anion
農地月平均濃度(μeq/L)	0.1	285.8	22.8	23.8	313.8	325.5	971.4	3.8	186.0	110.3	316.8	2.6	400.9	1021.4
占總陰(陽)離子比例%	0.0	29.4	2.3	2.5	32.3	33.51	100.0	0.4	18.2	10.8	31.0	0.3	39.3	100.0
林地月平均濃度(μeq/L)	0.1	253.2	19.8	16.3	227.8	306.0	823.1	3.7	162.7	22.3	204.9	1.5	442.7	838.5
占總陰(陽)離子比例%	0.0	30.8	2.4	2.0	27.7	37.2	100.0	0.5	19.4	2.7	24.4	0.2	52.8	100.0

表 2. 不同土地利用型態溪流水化學各月份（1986～2006 年）T 檢定結果（p 值）

Table 2. The results of T-test (p value) during different months (1986-2006) in stream water chemistry of different land uses.

	JAN		FEB		MAR		APR		MAY		JUN	
Conductivity (μS/cm)	0.000	*	0.002	*	0.016	*	0.010	*	0.008	*	0.000	*
Solid (mg/L)	0.470		0.855		0.627		0.162		0.683		0.274	
pH	0.256		0.137		0.017	*	0.006	*	0.003	*	0.004	*
TN (mg/L)	0.035	*	0.032	*	0.371		0.398		0.843		0.999	
Cation (μeq/L)	0.000	*	0.003	*	0.010	*	0.017	*	0.058		0.018	*
Anion (μeq/L)	0.000	*	0.014	*	0.000	*	0.002	*	0.065		0.001	*
H (μeq/L)	0.114		0.059		0.052		0.020	*	0.013	*	0.001	*
Na (μeq/L)	0.175		0.001	*	0.105		0.074		0.164		0.235	

	JAN		FEB		MAR		APR		MAY		JUN	
NH_4 (μeq/L)	0.901		0.489		0.728		0.595		0.620		0.690	
K (μeq/L)	0.000	*	0.001	*	0.002	*	0.003	*	0.108		0.304	
Mg (μeq/L)	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*
Ca (μeq/L)	0.110		0.435		0.682		0.513		0.739		0.446	
F (μeq/L)	0.925		0.696		0.151		0.557		0.776		0.147	
Cl (μeq/L)	0.083		0.165		0.009	*	0.014	*	0.181		0.022	*
NO_3 (μeq/L)	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*
PO_4 (μeq/L)	0.314		0.377		0.330		0.736		0.651		0.142	
SO_4 (μeq/L)	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.001	*
HCO_3 (μeq/L)	0.173		0.269		0.070		0.312		0.460		0.187	
	JUL		AUG		SEP		OCT		NOV		DEC	
Conductivity (μS/cm)	0.001	*	0.001	*	0.005	*	0.000	*	0.000	*	0.021	*
Solid (mg/L)	0.037	*	0.149		0.675		0.673		0.551		0.905	
pH	0.172		0.013	*	0.011	*	0.002	*	0.010	*	0.013	*
TN (mg/L)	0.115		0.715		0.047	*	0.680		0.486		0.816	
Cation (μeq/L)	0.031	*	0.031	*	0.111		0.008	*	0.058		0.001	*
Anion (μeq/L)	0.000	*	0.000	*	0.029	*	0.014	*	0.032	*	0.001	*
H (μeq/L)	0.062		0.067		0.025	*	0.027	*	0.247		0.232	
Na (μeq/L)	0.117		0.111		0.059		0.023	*	0.021	*	0.098	
NH_4 (μeq/L)	0.823		0.920		0.701		0.570		0.708		0.715	
K (μeq/L)	0.004	*	0.304		0.183		0.000	*	0.000	*	0.000	*
Mg (μeq/L)	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*
Ca (μeq/L)	0.711		0.674		0.939		0.686		0.791		0.222	
F (μeq/L)	0.197		0.423		0.844		0.335		0.122		0.302	
Cl (μeq/L)	0.240		0.197		0.559		0.444		0.048	*	0.004	*
NO_3 (μeq/L)	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*
PO_4 (μeq/L)	0.736		0.326		0.792		0.801		0.812		0.626	
SO_4 (μeq/L)	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*	0.000	*
HCO_3 (μeq/L)	0.134		0.635		0.132		0.347		0.158		0.015	*

註：* 表 T 檢定(雙尾檢定)結果達顯著水準 ($p < 0.05$)。

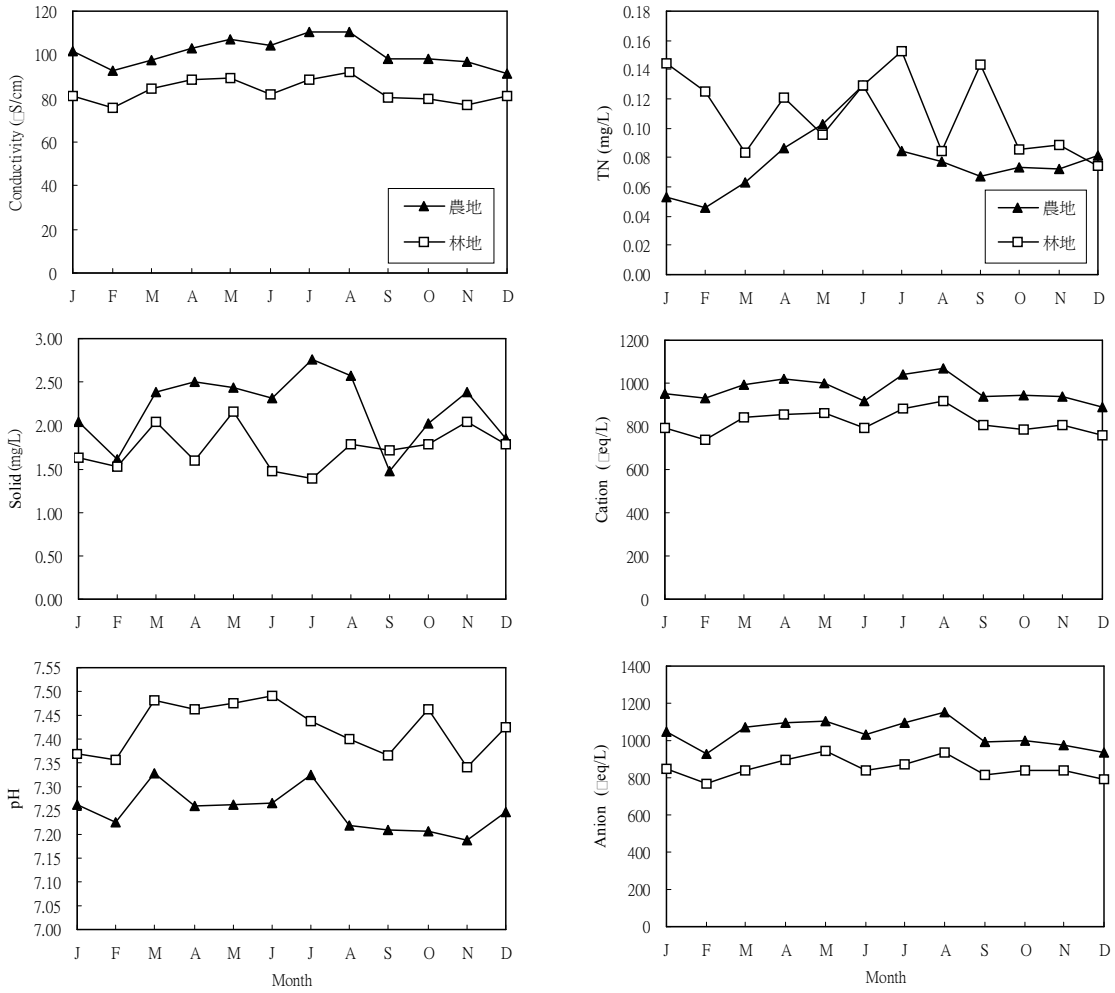


圖 2. 不同土地利用型態溪流水化學（**1986～2006** 年）月變化圖

Fig. 2. The monthly change (1986-2006) of stream water chemistry on different land uses.

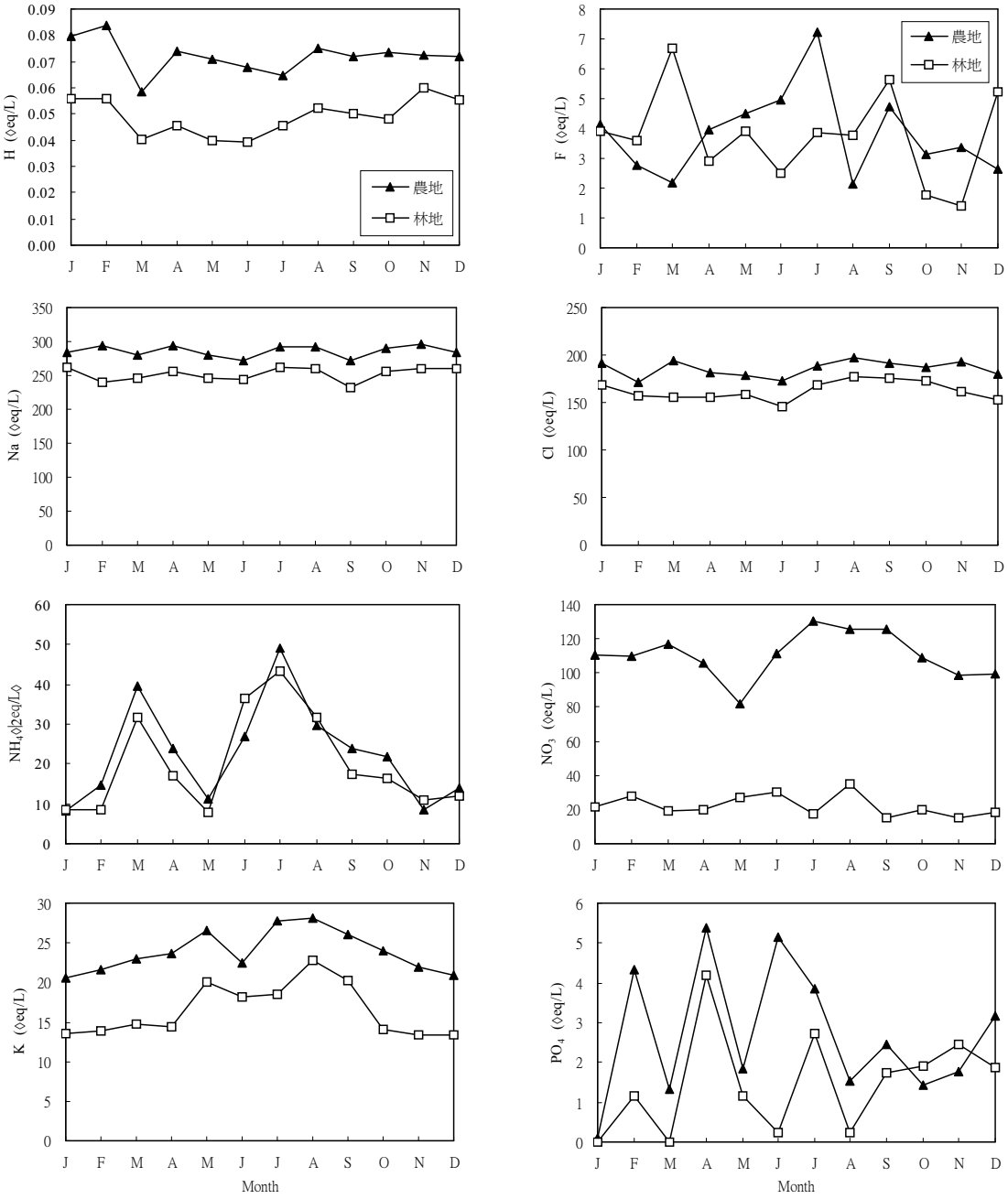


圖 3. 不同土地利用型態溪流水化學（1986～2006 年）月變化圖（續圖 2）

Fig. 3. The monthly change (1986-2006) of stream water chemistry on different land uses.

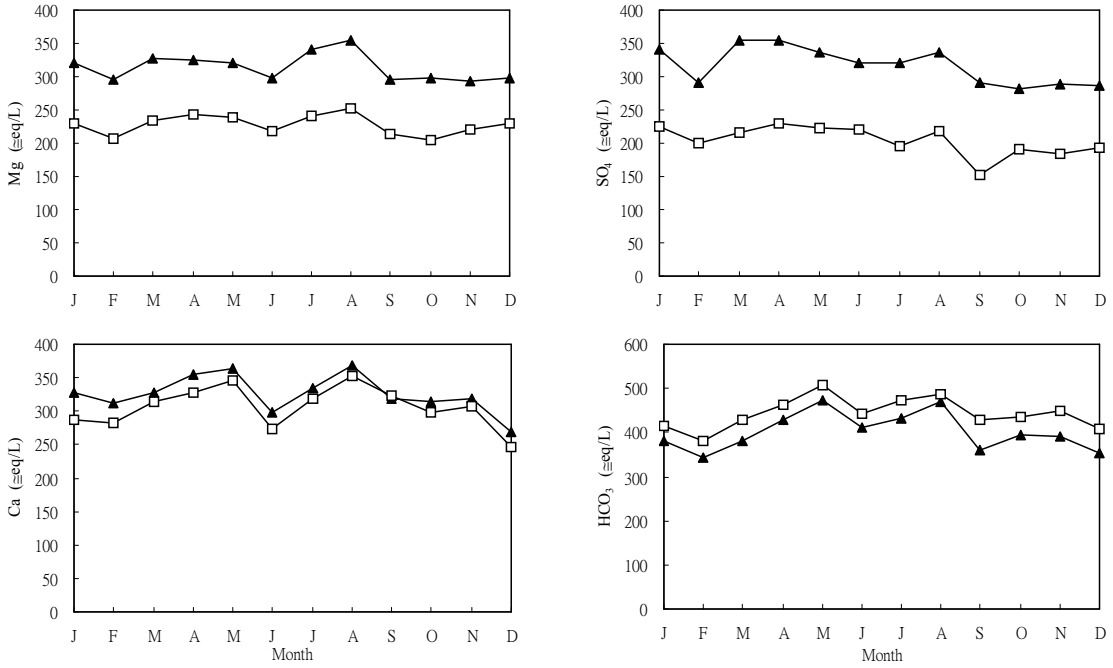
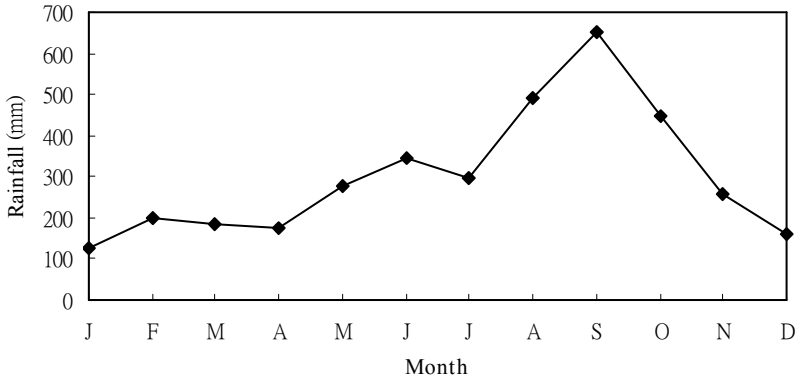


圖 4. 不同土地利用型態溪流水化學（1986～2006 年）月變化圖（續圖 3）

Fig. 4 The monthly change (1986-2006) of stream water chemistry on different land uses.



資料來源：經濟部水利署

圖 5. 坪林測站平均雨量（1977～2005 年）

Fig. 5. The average rainfall(1977-2005) of Pinglin monitor station.

表 3. 不同土地利用型態溪流水化學濃度與雨量之相關係數

Table 3. Correlation coefficient between stream chemistry concentrations of different land uses and rainfall.

	Conductivity (μS/cm)	Solid (mg/L)	pH	TN (mg/L)	Cation (μeq/L)	Anion (μeq/L)
農地	0.27	-0.20	-0.44	0.13	0.12	0.10
林地	0.10	-0.02	-0.11	0.09	0.24	0.13
	H (μeq/L)	Na (μeq/L)	NH4 (μeq/L)	K (μeq/L)	Mg (μeq/L)	Ca (μeq/L)
農地	-0.04	-0.29	0.23	0.63	-0.03	0.16
林地	-0.08	-0.41	0.25	0.68	-0.21	0.40
	F (μeq/L)	Cl (μeq/L)	NO3 (μeq/L)	PO4 (μeq/L)	SO4 (μeq/L)	HCO3 (μeq/L)
農地	0.13	0.27	0.45	-0.10	-0.33	0.17
林地	-0.02	0.62	0.07	-0.05	-0.58	0.26

IV、結論

綜合上述試驗結果顯示，農地的開發利用，會影響溪流水化學的性質，養分的輸出濃度明顯高於林地集水區（尤其以 Mg、NO_3 及 SO_4），此外，不同土地利用型態溪流水化學之月變化亦不盡相同，然而由此長期分析資料顯示，僅部分離子（如 K、Cl、SO_4）之濃度變化與雨量有高度相關，且因不同土地利用型態而異。

V、謝誌

本研究感謝林務局羅東林區管理處台北工作站江國樑先生協助採取水樣，本所集水區經營組蘇怡靜小姐、賴鏡惠小姐協助試驗分析，謹此致謝。

VI、參考文獻

王立志、鄧子菁、夏禹九、金恆鑣、劉瓊霰（1998）1996 年葛樂禮颱風期間福山試驗林溪流水化學變化之研究。台大實驗林研究報告 12(3) :189-201。

金恆鑣、楊炳炎（1984）畢祿溪試驗集水區的降水及溪水化學。林試所試驗報告第 427 號。32 頁。

金恆鑣、劉瓊霰、夏禹九、黃正良（2003）福山天然闊葉林生態系對降水水化學

的交互作用。台灣林業科學 18(4) :363-373。

李國忠、盧英秀 （1998） 集水區坡地經營改變之水質污染效益評估。中華林學季刊 31(1) :65-77。

林務局（2004） 文山事業區檢定調查報告書。林務局羅東林區管理處 93 年編印。161 頁。

夏禹九、金恆鑣、洪富文、黃正良、王立志、劉瓊霰（1994） 植生型與施肥作業對濱岸帶土壤水化學性質的影響。林業試驗所研究報告季刊 9(1) :39-50。

張尊國、鄭克聲、魏敏裕（1994）石門水庫集水區人為開發對水質之影響。第三屆水源水質水量保護區環境管理研討會論文集。243-260 頁。

廖學誠、黃正良（2001）森林集水區溪流水離子濃度季節性變化之研究。國立台北師範學院學報 14 :441-458。

廖學誠、金恆鑣、黃正良、劉瓊霰（2002）1999-2000 年台灣南部六龜森林集水區溪流水離子濃度與流量關係之研究。國立臺灣師範大學地理研究報告 37 :95-112。

劉瓊霰、許博行（1998）關刀溪森林集水區降水及溪水水化學。中興大學實驗林研究彙刊 20(2): 71-78。

鍾欣芸、劉瓊霰、王秋嫻（2006）中華林學會 95 年度學術論文集。229-240 頁。

APHA (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. A.D. Eaton, L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg, eds. 19th edition. United Book Press, Baltimore, MD.

Feger K. H., Brahmer G., Zottl H. W. (1990) Element budgets of two contrasting catchments in the Black Forest (Federal Republic of Germany). Jour. Hydrol 116:85-99.

Hill A. R. (1980) Stream cation concentrations and losses from drainage basins with contrasting land uses in southern Ontario. Water Res. 14:1295-1305.

Honisch, M., Hellmeier C., and Weiss K. (2002) Response of surface and subsurface water quality to land use changes. Geoderma 105: 277-298.

Hornbeck , J. W., Bailey, S. W., Buso, D. C. and Shanley, J. B. (1997) Stream chemistry and nutrient budgets for forested watershed in New England : variability and management implications. For. Ecol. Manage. 93:73-89.

Phillips R. and Stewart K. M. (1990) Longitudinal and seasonal water chemistry variations in a northern Appalachian stream. Water Resour. Bull 26:489-498.

Salmon, C. D., M.T. Walter, L.O. Hedin and Brown M.G. (2001) Hydrological controls on chemical export from an undisturbed old-growth Chilean forest. Journal of Hydrology 253: 69-80.

Thornton, G. and Dise, N. (1998) The influence of catchment characteristics, agricultural activities and atmospheric deposition on the chemistry of small streams in the English Lake District. Sci. Total Environ. 216:63-75

2008 森林集水區經營研討會論文集:87-100

林道分級模式架構初步探討

黃瓊彪[1]

【摘要】基於永續經營森林資源並促進森林生態系多元發展，林道的存在仍有其必要性，但在近年來不利的客觀條件下，要將有限的經費做最有效率的使用，首先就必須將林道分級，區分重要和不重要的路段。層級分析法（AHP）是一門相當成熟的管理學科領域之統計軟體，應用於林道分級時，可以將不同的發展方向準則（傳統森林經營 vs. 環境生態保育）和其研判指標作有效的整合，經「Expert Choice 2000」電腦程式統計分析，四項指標最終之權重計算結果為：綜合受災程度：0.515；林道之重要性：0.210；行車安全條件：0.152；最後是路基平均寬度：0.123。並以六龜研究中心所轄 64 公里林道演算此一評估模式，其分級結果與現況極為吻合，顯示出所建立的模式架構基本上符合本所試驗林地之需求。

【關鍵詞】林道分級、層級分析法。

A PRELIMINARY STUDY ON FRAMEWORK OF FOREST ROAD CLASSIFICATION MODEL

Chiung-piau Huang[1]

【Abstract】Based on sustainable management and diversity development of forest resources, to maintain forest roads is necessary to achieve the goals .Owing to the shortage of budget in recent years, forest road classification had to be seriously considered in order to distribute the limited budget effectively. Analytic Hierarchy Process had been developed as a useful and powerful tool in combining several criteria and their index toward one single main goal to calculate the weighting value between them. By using 「Expert Choice 2000」computer program, four index, named `road width`, `driving safety`, `important factor` and `disaster ratio`, had shown their weighting values as: 0.123, 0.152, 0.210 and 0.510. This result had been applied on

[1] 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: tfrihcp@tfri.gov.tw
Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Corresponding Author. E-mail: tfrihcp@tfri.gov.tw

evaluating Liu-kwei forest road, and some of satisfied conclusions had met the real situation in this experimental forest.

【**Key words**】Forest road classification, Analytic Hierarchy Process（AHP）

I、前言

台灣對道路功能的評估常過度樂觀，有些甚至會與地方的發展趨勢相互牴觸，許多交通建設不但未能刺激地方發展，有時反而造成了這些地方更為蕭條，尤其以遊憩觀光為主要目的之道路建設，最為常見。許多以吸引遊憩活動為主的遊憩區，常以更便捷的交通為由要求新設或拓寬道路，然而道路拓建後，便捷的交通卻未能刺激遊憩區的發展，反而造成了遊憩區的沒落、污染等負面影響。以日月潭為例，每年舉辦的橫渡日月潭活動，吸引上萬旅遊人次抵達日月潭，然而這些遊客在活動結束後又匆匆離去，當地觀光產業在短時間內無法消化如此龐大的遊憩需求量，如此一來，未能有效提升地方經濟收入，更因為大量人潮進入，帶進了遍地的垃圾。道路的開發像是雙面刃，未仔細思考就進行開發工程，很可能會得到相反的結果。因此，國內外許多抗議道路建設的民間團體所擔憂的，不僅是道路對當地環境生態的衝擊，他們更在乎當地產業活動與消費環境的轉型、變遷與劣化，這些相關的負面影響因子，均須列為道路建設應考量與評估的要項之一。因此加以適當的分級和管理，不惟可獲致事半功倍之效果，亦能將有限的資源花費在刀口上。

森林生態系經營計畫的推動，將是未來試驗林經營工作的重點，而保持林道的暢通，實為執行相關現場工作所必須，且由於良好的維護，亦可減少泥沙的產生，進而提升整體經營的績效。林道之開築，除使路面邊坡易受雨水沖蝕外、由於自山坡挖除一部份土方之結果，易使路面上方之山坡面，失去原有之支持而崩坍。如地質情形缺佳，或有地下水配合作用時，此種崩坍更有繼續惡化之傾向而往往發展成為不可收拾之大崩塌地。因此，設法避免林道之沖蝕，係在安定交通路線上，也在集水區治理上，極需解決之問題。故在規劃林道時，應安予研討開路對坡地安定之影響，並應預先策劃護坡工作，以作未雨綢繆之策。所謂林道，包括所有開闢在林地中之大小交通路線，專為配合林業經營為目的所修築之卡車及林務用車之林道為主要說明對象。

II、道路之分級

（I）公路系統之分級

各國之公路系統因地理環境、提供服務之功能及等級、設計標準等之差異，致諸如路線系統之制定、路權歸屬之判定、主管機關之認定及經費負擔之原則等公路行政管理事務，均有所不同，故公路系統必須予以分類，俾便於公路之管理。國內公路分類依我國依公路法第二條所定公路之分類有四級，即國道、省道、縣道、鄉道，茲分述之:

國道：指聯絡兩省（市）以上，及重要港口、機場、邊防重鎮、國際交通與　重要政治、經濟中心之主要道路。

省道：指聯絡重要縣（市）及省際交通之道路。

縣道：指聯絡縣（市）及縣（市）與重要鄉（鎮、市）間之道路。

鄉道：指聯絡鄉（鎮、市）及鄉（鎮、市）與村里間之道路。

另有依所謂設計標準分類，係指依公路路線設計規範所定之設計要件而作之分類，依部頒規範分類如下表 1。

表 1. 公路設計等級分類標準

Table 1. Classification standard for highway design

公路等級	地區分類	最高設計速率（公里/小時）	功能系統	行政系統
一級路	平原區	120	高速公路	國道 省道
	丘陵區	100		
	山嶺區	80		
	都市計劃區	80		
二級路	平原區	100	高速公路 快速公路	國道 省道 縣道
	丘陵區	80		
	山嶺區	60		
	都市計劃區	60		
三級路	平原區	80	快速公路 主要幹道	國道 省道 縣道
	丘陵區	60		
	山嶺區	50		
	都市計劃區	50		
四級路	平原區	60	主要幹道 次要幹道	省道 縣道 鄉道
	丘陵區	50		
	山嶺區	40		
	都市計劃區	50		
五級路	平原區	50	主要幹道 次要幹道 集匯公路	省道 縣道 鄉道 專用公路
	丘陵區	40		
	山嶺區	30		
	都市計劃區	40		

六級路	平原區	40	集匯公路 地區公路	縣道 鄉道 專用公路
	丘陵區	30		
	山嶺區	30		

※ 五、六級路在特殊地形之山嶺區，其最低設計速率得採用２５公里/小時公路沿革

（II）農路系統之分級

農路是通往農業生產最前端之主要交通系統，其前端銜接國、省、縣、鄉道及林道等各類型交通系統；早期之農路多由農民自行舖設、修建，其寬度多在 1 至 3 公尺之間，規格不一，其道路等級即所謂之「大道」。

依據農委會八九農水保字第八九一八二０００三號公告「行政院農業委員會農路養護管理要點」第二條所述「本要點所稱農路係指農產及資材運輸，路寬在 6 公尺以下、3 公尺以上（山坡地得視需要降低至 2.5 尺）、未依公路法管理，且由本會輔導或改善之農用道路」（表 2）。同時依據水土保持技術規範第一七八條第三項規定訂定之「農路設計規範」第十二條規定：「既有農路之改善及維護係指路寬 2.5 公尺以上、6 公尺以下未依公路法管理之既成農用道路改善及維護，包括產業道路、農路、支線農路等」。

表 2. 依農路設計規範訂定之農路分級表

Table 2. Agricultural road classification by design practice

等級	第一級	第二級	第三級	第四級
寬度	6m	5m	4m	2.5m 以上未滿 4m

註: 若第四級農路位於山坡地，則路基寬度可減至 2.5m

又依上述規範之

「第十一條　農路等級分類如下：

農路一級：設計行車速度每小時 25km，路基寬度 6m，最小曲率半徑 20m，最大縱坡度為 12%之農用道路；其設計規範如附。

農路二級：設計行車速度每小時 20km，路基寬度 5m，最小曲率半徑 15m，最大縱坡度為 12%之農用道路；其設計規範如附。

農路三級：設計行車速度每小時 15km，路基寬度 4m，最小曲率半徑 10m， 最大縱坡度為 15%之農用道路；其設計規範如附。

農路四級：設計行車速度每小時 15km，路基寬度 2.5m 以上未滿 4m，最大縱坡度 20%之支線農用道路；其設計規範如附。

（III）林道系統之分級

所謂林道，包括所有開闢在林地中之大小交通路線，專為配合林業經營為目的所修築之卡車及林務用車之林道為主要說明對象。

依林務局之林道構築標準，其路面寬度在 3.5 公尺以上為甲種林道；3.5—3.0 公尺為乙種林道；2.8—3.0 公尺為丙種林道。若依業務重要性則區分為：優先林道、次優先林道、一般林道三種。如果以目前道路需求標準而言，其規格似有過低之嫌。

III、研究材料級方法

（I）研究對象概述

本所（林業試驗所）現有的重要林道全長共計 106 公里，分屬於福山、蓮華池、中埔、六龜及太麻里。另有若干廢棄林道、機車道和步 道，未納入討論範圍內。所列林道在過去數十年來，擔負著森林經營、林產物運輸、人員進出、防災防火、水土資源保育和森林遊樂等工作。近十多年來因林業經營轉型，林道的重要性或許不及以往，但是正常的育林經營撫育工作還是得繼續進行。自 921 大地震之後，台灣由北到南山坡地的地層結構受到劇烈衝擊，並導致破脆化。原已穩定的地表水和地下水流動路徑，亦遭擾動失衡。加之近五年來水文條件變動大，一場颱風豪雨屢屢超過 1500mm 的降雨量，山區道路路基流失、邊坡崩塌、河床淘刷，土石流現象可謂屢見不鮮；尤以六龜試驗林歷經杜鵑、敏都利、海棠諸颱風之肆虐，在許多路段發生嚴重的崩塌，甚至已到無法修復的地步。再加上國家財政每況愈下，本所年度林道維護費逐年減少，而災害復建經費短絀乃至欠缺，想要維持完整的暢通的林道網，困難度頗高。

（II）林道分級模式架構

在這種不利的客觀條件下，要將有限的經費做最有效率的使用，首先就必須將林道分級，區分重要和不重要的路段，甚至若判定無法繼續維護，則將其列為廢棄林道，以免繼續投資而無效益的回收。由於精準而客觀的分級評估模式，缺乏前人之研究加以引用，僅能基於對本所林道之路型路況及歷年維護之經驗，將總目標定為「林道分級」，適用之林道分級標準（classes）有三級。並以二項評估準則（criteria）、四項指標及序分（index and points），以及各準則之間的權

重（weighting），據以為計算各路段之積分，並研判其所屬的等級。茲將各項內容說明如下：

1.分級標準

I級 ： 最重要之主線道，應維持全年暢通率 90%以上；如因災害中斷，不計成本列為第一優先處理對象；每年編列固定維護經費。

II級 ： 次重要之主線及支線，平時以能通行為原則，若發生災害，則視經費之有無，排定修復順序，或予以緩辦。

III級： 因時空變遷已喪失原有功能；或因路況及其他客觀條件困難而維護不易；或因天然災害而導致無法回復之損害，必須予以廢棄。

2.評估準則：分為「傳統森林經營」、「環境生態保育」兩方面。

3.指標及序分：共計四項（參閱表 3）。

路基平均寬度：以實際路面設計寬度為準，不包含路肩和邊溝。共分五級：

6m 以上（8）；6—5m（6）；5—4m（4）；4—3m（2）；3m 以下（0）。

行車安全條件：包含使用率、舖面、路基和上下邊坡穩定性、排水、危險因子等。優（8）；良（6）；普通（4）；差（2）；劣（0）。

道路之重要性：考慮該林道或路段在試驗林整體經營及未來發展的重要程度。

極重要（8）；重要（6）；普通（4）；不重要（2）；可放棄（0）。

綜合受災程度：歷年來受到地震、颱風、豪雨等災害之毀損程度。

輕微（8）；小損害（6）；普通（4）；嚴重（2）；極嚴重（0）。

4.各評估準則和指標間之相對權重---層級分析法

二項準則與四項指標對林道級數的影響必然有程度上的差異性，若要精準的計算出其相對之權重，理論上需佐以相當強而有利的研究數據；或是以問卷調查的方法，徵詢專家學者和實務工作人員的觀點，經由科學模式的統計分析研判，據以得到可信賴的結果。層級分析法是於1980年，由任職於 California University 的教授 Saaty 教授提出，主要是用於不確定（Uncertainty）情況及具有多個評估準則之決策問題。最大的特色為利用層級結構，將影響因素間的複雜關係有系統地連結，且兩兩因素間成對比較方式，可以減輕決策者負擔，使決策者意向能更清楚地被反應，再則其集體決策特性可以將個別學者意見，進行層次分明的層級系統整合分析，增加評估的有效性與可靠性，且結果以數值單位產出，除易於了

解因素間的相對重要性排序外，還可以建立權重體系將之應用於資源分配、投資組合及預測等方面，成效卓著。

基於對林道多年實務經驗和了解，據以設計專用之問卷一份（如附錄一），並於本所舉辦之「林道監造講習班」供學員填寫。計回收 21 份有效問卷，隨即以專業用之 AHP 統計軟體程式「Expert Choice 2000」加以分析統計，即可獲致不同準則之間的相對權重，以及各指標在總目標下之相對權重。

5.林道等級歸類

各段林道分別依上述之評估準則和權重予以計分，其得分範圍當介於 0.00 至 8.00 之間。並依下列標準歸類於不同的等級：

I 級 ：8.0—5.0 ， 圖面顏色以黑色代表。

II 級 ：5.0（含）—3.0（含），圖面顏色以褐色代表。

III 級：3.0—0.0 ，圖面顏色以紅色代表。

【範例】扇平林道路基平均寬度 6 公尺以上；路況良好；重要性屬於極重要；受災狀況普通。其計分＝$8\times W_w+6\times S_w+8\times I_w+4\times D_w=6.2$ 。屬 I 級道路，餘類推。

表 3. 準則權重和指標及序分相關性

Table 3. The co-relations between criteria and index

準則（權重）	指標及序分				
路基平均寬度（W_w）	6m 以上	6—5m	5—4m	4—3m	3m 以下
	（W_p）8	6	4	2	0
行車安全條件（S_w）	優	良	普通	差	劣
	（S_p）8	6	4	2	0
道路之重要性（Iw）	極重要	重要	普通	不重要	可放棄
	（I_p）8	6	4	2	0
綜合受災程度（D_w）	輕微	小損害	普通	嚴重	極嚴重
	（D_p）8	6	4	2	0

註：若有必要，指標可介於兩等級之間，序分亦介於其中間。

IV、結果及討論

（I）經以「Expert Choice 2000」程式輸入相關資料，得到結果如下：

層級結構

目標----------準則----------指標

Goal: 林道分級--傳統森林經營 （L: .337） 路基平均寬度：0.123（W_w）

環境生態保育 （L: .663） 行車安全條件：0.152（S_w）

林道之重要性：0.210（I_w）

綜合受災程度：0.515（D_w）

合計： 1.000

上列四項指標所顯示的相對權重，是以「林道分級」為總目標計算得到的最後結果的數字。若是分開以兩項準則來計算指標的相對重要性，其結果如下表 4 所示；同時以柱狀圖（圖 1）顯示其整體趨勢及相對性。

表 4. 不同準則之各項指標相對值

Table 4. The relative values of alternative index in different criteria

Data Grid

AID	Alternative	Pairwise 傳統森林經營 (L: .337)	Pairwise 環境生態保育 (L: .663)
A1	✔路基平均寬度	.195	.262
A2	✔行車安全條件	.319	.282
A3	✔林道之重要性	.617	.301
A4	✔綜合受災程度	1.000	1.000

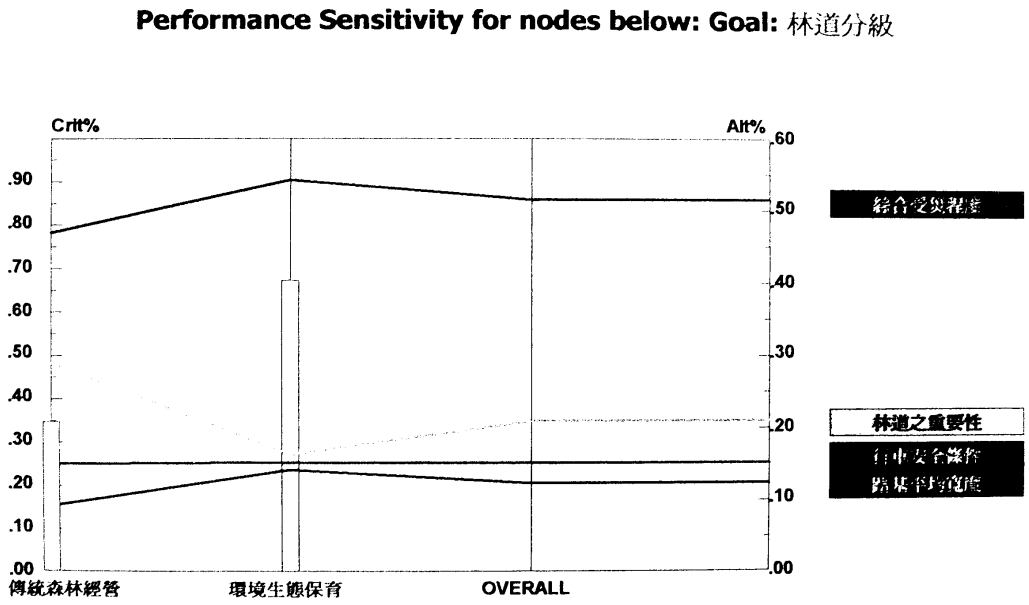


圖 1. 準則和指標之對應關係

Fig. 1. An illustration of relation between criteria and index

（II）既然得到各指標之權重值，依照前述之方法，各路段等級積分之計算：

（路基平均寬度：0.123，W_w）×（路段現況所得序分 W_p）

＋（行車安全條件：0.152，S_w）×（路段現況所得序分 S_p）

＋（林道之重要性：0.210，I_w）×（路段現況所得序分 Ip）

＋（綜合受災程度：0.515，D_w）×（路段現況所得序分 D_p）

合計……（總積分，T_p）

分級…….（I、II、III）

茲以本所六龜研究中心所轄林道為例，將林道相關資料備妥，依其所在位置、屬性、條件、路況和受災狀況調查完成，六龜試驗林因地形的關係，大概分為南北兩半部，經過前期經營之後，亦完成南北兩半部的各自林道系統。北半部為六龜的 185 線公路至尾庄，即接扇平林道，直通扇平工作站，並於 7 公里處左叉一通往鳳崗山苗圃的鳳崗林道，到達 12 林班後，另一右叉之南鳳林道，經 10、9、4、2 林班，與鳳崗林道相銜接，形成環狀之林道網。

另外則由大津經茂林、萬山至多納村，右叉多納林道直通南半部之西側，並於 20 林班左叉一蜿蜒 5 公里的支線，隔著吊橋與東側之 19、21 林班相通，此亦

自成一林道系統。舉凡試驗研究、森林經營及林政等工作之執行，皆仰賴此林道網，因此，維護林道網的暢通，則為當務之急。其分析計算結果如表 5 所示。

表 5. 林業試驗所六龜研究中心林道資料和分析結果

Table 5. Analytic result of Liu-kwei forest road by applying the model

林道名稱	長 度 (公里)	級 數	現　況
扇平林道	1-9 K	I	現況良好，全線加舖柏油路面；崩塌地亦經修護；寬度至少 6 公尺，設多處避車道；為聯絡六龜和扇平科學園區重要道路。 8×0.123＋6×0.152＋8×0.210＋6×0.515＝6.66
南鳳林道	1-8 K	II	森山測候站 8K 前段尚可，路基 4-6 公尺，大部分為水泥路面，多處邊坡不穩定，沿路設有景觀點及試驗地；若干崩塌尚待修復。 6×0.123＋4×0.125＋4×0.210＋4×0.515＝4.04
	8—13K	III	路基 4-5 公尺，大部分為水泥路面，多處邊坡不穩定，9K 之崩塌經修復尚可，但在 10.5K 之大崩塌甚難復舊。沿途若干試驗地零星散佈。 4×0.123＋2×0.125＋4×0.210＋2×0.515＝2.58
鳳崗林道	15 K	II	鳳崗山苗圃前段良好，至 12 林班段尚可，路基 4-6 公尺，大部分為水泥路面，12k 之崩塌地以搶通但不穩定，現正監測中。本路段設置甚多試驗地，為試驗林經營所必須。 6×0.123＋4×0.125＋6×0.210＋4×0.515＝4.56
多納林道	1-13 K	II	多納苗圃前段(8K)良好，8K-13 K 段尚可，路基 4-6 公尺，大部分為水泥路面，路段中有 4-5 處較為脆弱，需經常維護搶修。 4×0.123＋4×0.125＋4×0.210＋4×0.515＝3.79
	13-22K	III	13 K 以後崩坍多處，路況不佳，擬以維持摩托車通行即可。 4×0.123＋2×0.125＋2×0.210＋2×0.515＝2.18
多納林道支線	5 K	III	本路段嚴重地滑，路基毀損，甚難恢復，且行車安全頗有疑慮，擬全線放棄。 4×0.123＋2×0.125＋2×0.210＋0×0.515＝1.15
小 計	64 K		

（III）根據 AHP 軟體運算結果，本研究之重要性排序權值為：綜合受災程度：0.515（D_w）居首位，其次為林道之重要性：0.210（I_w），之後則為行車安全條件：0.152（S_w），最後是路基平均寬度：0.123（W_w）。可見得 921 地震災害之後，山體內部受傷嚴重，加之近年極端雨量之肆虐，使得林道天然災害的嚴重性為大家所認同。其次，林道在現今已不只作為林產物的輸送途徑，它在森林遊樂、環境保護及宣導教育扮演了較重要的角色，因此林道重要性的權重列為第二位。上述運算結果之一致性判斷指標 C.R.值（consistency ratio）為 0.06。

準則中環境生態保育 (L: .663) 明顯比傳統森林經營 （L: .337）來得佔優勢，這也表示近年來世界潮流環保的大趨勢已深植人心。而且在不同的準則下，四項指標有不同的對重要值（表 4），其中最大的差異性，是在生態環境保育的考量時，林道重要性的比重明現下降，顯示大眾對於林道將危害到生態保育，具有一定的隱憂。上述運算結果之一致性判斷指標 C.R.值（consistency ratio）為 0.01 和 0.02。兩者皆符合 AHP 模式應用之一致性標準要求（C.R.值須小於 0.1），故本問卷成果可稱良好。

（IV）在本模式架構中，有關準則和指標的訂定、序分的級距範圍，都是作者主觀的認定，其中不無思慮不周或檢定失衡之處。如何獲致更精準的參數評估架構和數值，確為進一步強化模式應用性必須思考的問題。是可以借重群體腦力激盪以及開放討論廣徵建議的方式，求得最佳的架構體質；此外在問卷調查方面，以可善用網路的便利性多方蒐集，但也要考慮資料的有用性，或是過多的資料反而造成處理的困擾和結果的分歧，這些議題都是後續研究可以深入討論的。

V、結論

（I） 基於永續經營森林資源並促進森林生態系多元發展，林道的存在仍有其必要性，但是需配合適當的維護以及有效的管理。以往林道的闢建大多是為了林產物的伐採和運輸所需，其設計施工規範未盡周延，也造成崩塌、污染、盜採盜獵等候遺症。時至今日，為因應保育風潮盛行、森林經營轉

型、天然災害加劇和治理經費短絀，林道之管理必須去蕪存菁，以有限的資源獲致最大的績效，故其分級制度確有需要積極建立。

（Ⅱ）層級分析法（AHP）是一門相當成熟的管理學科領域之統計軟體，應用於林道分級時，可以將不同的發展方向準則（傳統森林經營 vs. 環境生態保育）和其研判指標（路基平均寬度、行車安全條件、林道之重要性、綜合受災程度）作有效的整合，提供做為計算分級級距積分的基礎。

（Ⅲ）以「林道分級」為目標，收集二十一份有效問卷，經「Expert Choice 2000」電腦程式統計分析，四項指標最終之權重計算結果為：綜合受災程度：0.515；林道之重要性：0.210；行車安全條件：0.152；最後是路基平均寬度：0.123。並以六龜研究中心所轄 64 公里林道演算此一評估模式，其分級結果與現況極為吻合，顯示出所建立的模式架構基本上符合本所試驗林地之需求。

（Ⅳ）此一模式架構尚屬初步研擬，有相當改進的空間，其中有關準則的增減，或是指標及其序分的訂定，問卷的設計，取樣的方法和數量等問題，均有待後續之探討。

VI、參考文獻

水土保持局（1992）水土保持手冊。

林慶信（2004）林道改善與維護管理對策之研究－以藤枝林道為例。國立高雄第一科技大學營建工程所。

陳信雄（2004）水土保持工程學，臺北市：科技圖書。

黃開明（2003）應用層級分析法評選山區道路整治工法之研究。中華大學土木工程系論文。

黃瓊彪（2002）林道植生工程技術。林業叢刊第 147 號。

黃瓊彪、林照松、王炳宗（2004）敏督利颱風對六龜試驗林林道之影響及復建對策。林業研究專訊 11(04)。

管立豪（2003）國有林地分區及經營規範建立。農政與農情 92年9月。第135期。

鄧振源、曾國雄（1999）層級分析法（AHP）的內涵特性與應用。中國統計學報 27 (6): 5-20。

Saaty, T.L.（1980） The Analytic Hierarchy Process. New York, McGraw-Hill.

【附錄一】

道路分級之層級分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）問卷

一、請評估兩項準則之相對重要性

9 8 7 6 5 4 3 2 1 2 3 4 5 6 7 8 9

傳統森林經營 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **環境生態保育**

二、以**傳統森林經營**為準則，請評估各指標間之相對重要性

9 8 7 6 5 4 3 2 1 2 3 4 5 6 7 8 9

路基平均寬度 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **行車安全條件**

路基平均寬度 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **道路之重要性**

路基平均寬度 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **綜合受災程度**

行車安全條件 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **道路之重要性**

行車安全條件 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **綜合受災程度**

道路之重要性 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **綜合受災程度**

三、以**環境生態保育**為準則，請評估各指標間之相對重要性

9 8 7 6 5 4 3 2 1 2 3 4 5 6 7 8 9

路基平均寬度 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **行車安全條件**

路基平均寬度 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **道路之重要性**

路基平均寬度 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **綜合受災程度**

行車安全條件 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **道路之重要性**

行車安全條件 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **綜合受災程度**

道路之重要性 ＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋＋ **綜合受災程度**

個人基本資料： 1.性別：□男 □女　2.年齡：□20 □30 □40 □50 □60

3.教育程度：□國中 □高中職 □大專 □研究所

2008 森林集水區經營研討會論文集:101-115

森林集水區生態能量及土砂能流特性分析

蔡真珍[1]　林昭遠[2]

【**摘要**】森林集水區有如海綿體可大量吸收外界投入的能量，超過其負荷時隨即釋出；其能量收支平衡機制隨著整體集水區之能流特性改變而有所變化。本研究以 H.T. Odum 發展之生態能量分析方法，以福山 1 號試驗區為例，應用能量系統語言圖例，繪製集水區能量系統圖並建立系統生態模型，加以分析其生態能量及土砂能流特性間之關係。另模擬集水區受不同強度之颱風豪雨外力後，由系統所產生之振盪現象，探討系統長期之演替趨勢。經分析模擬結果可知，集水區之土砂釋出規模與集水區整體含能量狀態成正比，自我復育力與外部投入的能量特性有關。因此集水區之土砂防治工作若能考量生態層面之長期影響，維持系統自我組織作用，應能促使集水區有較佳之彈性與抗性以面對未來之災難事件。

【**關鍵詞**】生態能量、能量系統、系統模擬。

A STUDY OF PROPERTIES OF ECOLOGICAL ENERGY AND SEDIMENTS FLOW IN FOREST WATERSHED

Chen-chen Tsai[1]　Chao-yuan Lin[2]

【**Abstract**】A forest watershed can absorb large energy from external input as a sponge, and releases energy when overloaded, adjusting its mechanism of energy balance with variation flow of the whole watershed. This study adopts the method of ecological energy analysis by H.T. Odum. Using #1 Fushan watershed as an example, we illustrated the energy system diagram of watershed with ecological energy language legend and established an eco-model to analyze the relationship between ecological energy and sediments flow. To further probe into the success trends of the system, simulations of system oscillations driven by inputs of varied intensity torrential rain into watershed were also conducted. The analysis of the simulation results suggests that the

[1]行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組，通訊作者。電子郵件: tsai1021@tfri.gov.tw
Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: tsai1021@tfri.gov.tw
[2]國立中興大學水土保持學系教授。
Department of Soil and Water Conservation, National Chunghsing University, Taichung City 402, Taiwan, ROC.

scale of released sediments was proportioned to the energy of whole watershed, and its self-recovery is related to the properties of external flows. Therefore, the watershed sediment disaster prevention project should take long-term ecological impact into account, and maintain the system its function of self-organization, which will likely strengthen watershed's resilience and resistance in future disasters.

【Key words】Ecological energy, Energy system, System simulation.

I、前言

集水區整治工作最棘手的莫過於抵禦「水」及「土」的自然災害，尤其以土砂生產量之控制或處理最為困難。僅管生態工程之理念近年來被強調應用於集水區之災害整治或河溪復育工作，惟現階段較酌墨於河溪構造物之改良，偏向以工程技術直接處理土砂問題，集水區生態系統之特性相對探討較少。

生態學者認為自然災害，即為自然脈衝能量（natures pulse），中等振幅之脈衝能量對自然生態環境有正面之功效，謂為能量津貼（Odum et al, 1995），環境系統接受外界之脈衝能量後，透過自我組織作用，經重組、調節、回復為穩態，對自然資源之永續生產有一定之助益。適度之人為介入、參與自然環境之復育工作，可縮短復育、演替時期。因此集水區之治災、整災工作若能考量其生態層面之影響，應能提供集水區較佳之演替方向。

本研究係採用 Odum H.T.所提出之生態能量分析方法，由生態能量觀點探討集水區生態系統受颱風豪雨等自然外力干擾後所產生之振盪現象並模擬長期之系統演替變化；可知系統具有一定之彈性與抗性可對抗外界之干擾，災後亦能發揮自我組織作用進行自我修復。在集水區土砂治理計畫中，若能瞭解集水區生態系統之能量流動性、各組成份及能流間之交互作用影響，即可在規劃其治理目標及整治措施有一系統性之考量。

II、材料與方法

（I）試區概述

本研究之樣區為福山試驗林境山之 1 號集水區，面積約 38 公頃，海拔高在 700～1000 公尺之間（地理位置參圖 1）。其位於臺北縣烏來鄉與宜蘭縣員山鄉交界，隸屬林業試驗所福山分所管轄，總面積約 1100 公頃，涵蓋蘭陽溪支流粗坑溪與南

勢溪上游哈盆溪之集水區，海拔高 400～1,400 公尺，為雪山山脈北段支稜，山地坡度陡峭。境內主要林相為亞熱帶混生常綠落葉林(樟楮林)。根據福山氣象站 1993 年至 2006 年之統計資料顯示，因受到東北季風的影響，氣溫較低，年平均溫度約為 18.2 ℃，年平均日射量達 3650 MJ/m^2，月平均最大風速可達 36.8 m/s；夏季受到西南氣流的緣故，暖熱潮濕，常有對流雨發生，平均每年受到 1.1 個颱風侵襲。由於冬、夏季雨量皆高，年雨量約為 3660 mm，屬於溫暖重濕的夏熱型氣候。

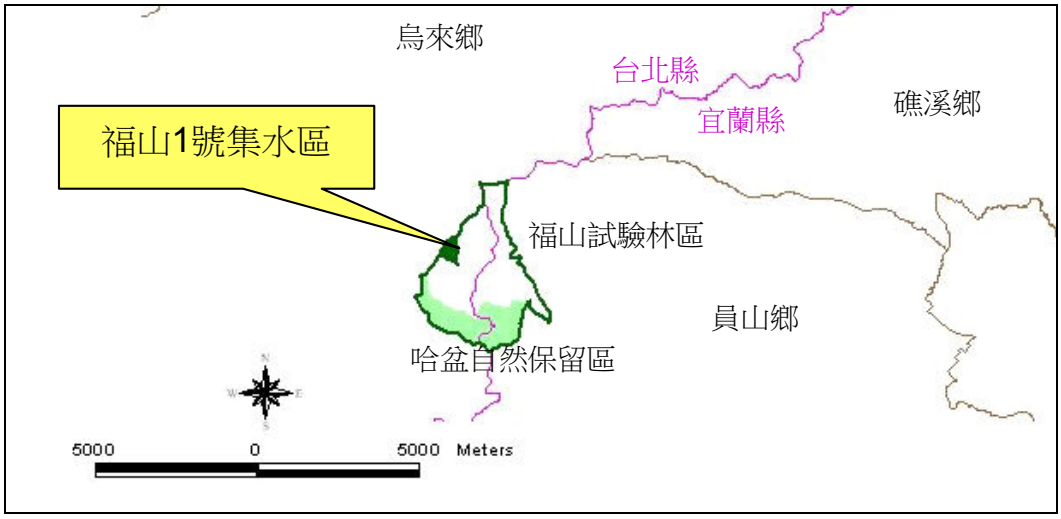


圖 1. 福山 1 號試驗集水區位置圖

Fig. 1 Locations of #1 Fushan Experimental Watershed.

（II）分析方法

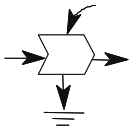
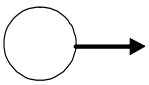
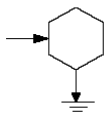
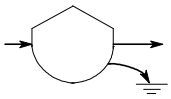
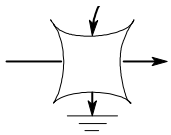
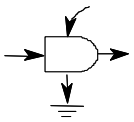
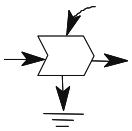
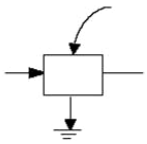
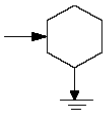
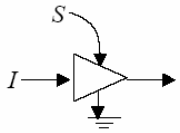
集水區常見之土砂災害，通常為土砂能量在短時間集中輸出之現象，如崩塌、土石流等，皆為土砂脈衝現象，本研究乃應用系統生態學之能量系統分析方法配合系統生態模型之建立，經集水區生態能量系統土砂能流之特性分析，建置土砂脈衝能量系統生態模型，模擬自然外力所引起之土石脈衝效應，探討脈衝型態及其相關特性。主要研究分析方法說明如下。

1. 能量系統分析方法

本研究係應用 H. T. Odum 以系統及生態能量理論為基礎所發展之系統生態學，透過其所創之能量系統語言圖例（表 1），可直接轉換為微分方程式，進一步分析儲存（Q）之改變率，能量系統語言圖例所代表之數學意義示如圖 2。

表 1. 能量系統語言圖例

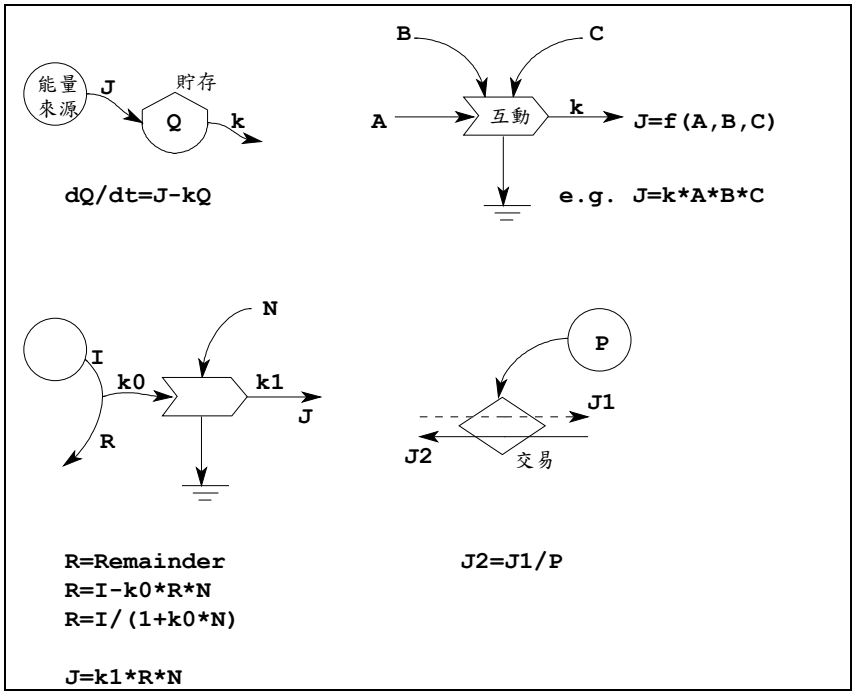
Table 1. Symbols of the energy systems language

圖例		圖例	
	能量迴路 Energy circuit		交互作用 Interaction
	來源 Source		消費者 Consumer
	能量儲存 Tank		控制開關 Switching action
	熱流失 Heat sink		生產者 Producer
	交互作用 Interaction		匣子 Box
	消費者 Consumer		流量控制 Constant-gain amplifier

資料來源：Odum, 1983

2. 系統生態模型之原理

系統生態模型之發展則以 H. T. Odum 為首，主要觀念係透過宏觀之簡易模型，配合一組能量循迴圖例（energy circuit diagram），加以描繪一系統能量流動之動態變化行為，分析系統模擬結果可應用於政策衝擊評估。系統生態模型之特色乃是以能量觀點為基礎，從較宏觀的角度簡化系統模型、分析系統行為，改善了系統動態模型其構件間實質流動所不能表達具涵能量（embodied energy）、缺少熱消散（heat sinks）、以及外部資源流入以乘數控制缺少資源本質特性與貢獻之意義等缺失。此外，由於系統生態模型之建構屬自我催化性（autocatalytic），系統內之組成會透過自我組織作用彼此調適，故參數之校估係以系統趨於穩定之觀點，各組成流入等於流出之穩定狀態（steady state）下估算參數值。



資料來源：修改自黃書禮，2002

圖 2. 能量圖例與數學意義

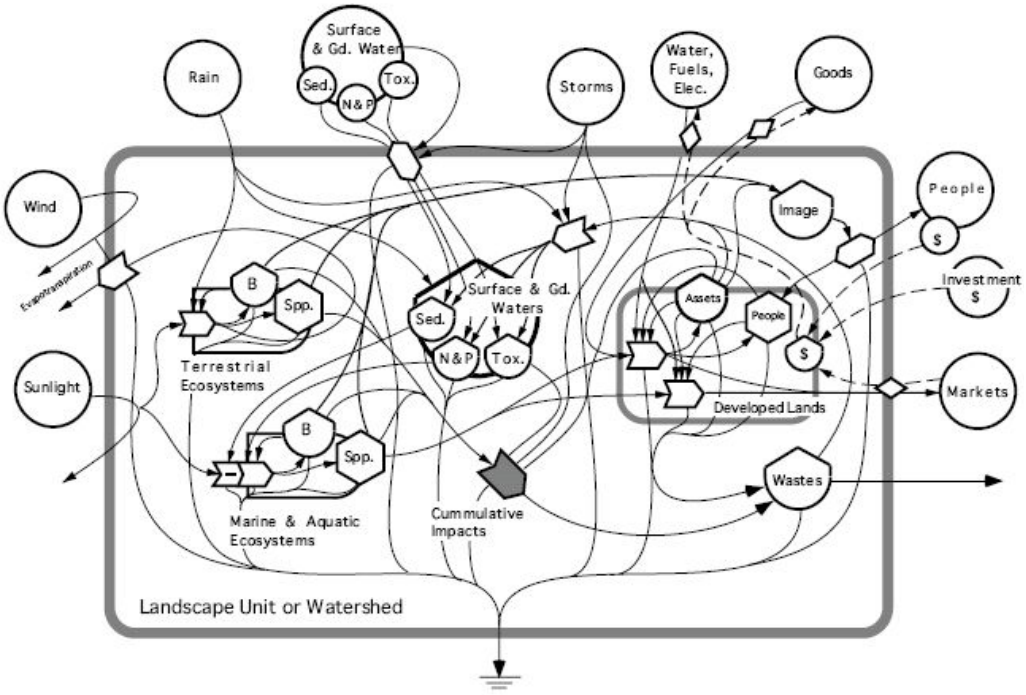
Fig. 2. Energy legend and mathematical significance.

經電腦程式之設計，並配合相關參數值之輸入，即可進行系統模型之基本分析測試。相關電腦程式設計軟體包括 MS EXCEL、BASIC、DYNAMO、STELLA、FORTRAN、CSMP、POWERSIM、SIMSCRIPT 或 VENSIM 等；本研究採用 STELLA 5.0 軟體進行程式編撰，進一步建置為系統生態模型，即可動態分析模擬集水區土砂脈衝能量之特性。

3. 集水區生態能量系統分析基礎

欲探討集水區生態系統之能量流動特性，可利用 Odum 之能量語言圖例，依組成份在系統內之能量生產、儲存或消耗等屬性，進一步繪製集水區生態能量系統圖（詳圖 3，Brown, 2003）；一般而言，自集水區外部投入系統之自然可再生能源包括陽光、風、雨、颱風等，系統主要組成份則包括自營者之陸域、水域生態系統及異營者之人為開發土地系統；自營者可利用自然可再生能源生產、維持本身所需之能量，並提供能量供系統使用，為生產者角色；人為開發之土地系統則需仰賴自營者生產之資源外，需透過投資（Investment）及市場交易（Maketing）等行為進行土地管理，包括貨物（Goods）及水力（Water）、電力（Elec.）、化石

燃料（Fuels）等能流、物質之投入；過程中生產之廢棄物（Wastes）無法供系統利用，則循環至地表水儲存，部分排出系統外。



資料來源：Brown, 2003

圖 3. 一般集水區或地景單元之能量系統圖

Fig. 3. Energy system diagram of general watersheds or landscape unit.

Brown 所分析之集水區能量系統圖，考慮了人為之土地開發行為，因此除了泥砂（Sed.）與養份（N, P）之運移外，有害物質（Toxin）亦形成物質流動的一部分，並導致累積性的影響（Cummulative Impacts）效應，另由於集水區生態系統特性受所考慮之組成份之能量流動、儲存、轉換等作用所影響，建置能量系統圖時，須由研究目的選擇系統之觀察尺度及能代表系統狀態之組成份；又因本研究旨在探討森林集水區整體能流特性與土砂能流間之關係，爰排除人為活動及其相關干擾因子，僅考慮圖 3 左半部自然可再生能源與陸域、水域生態系統等組成份。

III、結果與討論

（I）集水區生態能量系統及能流分析

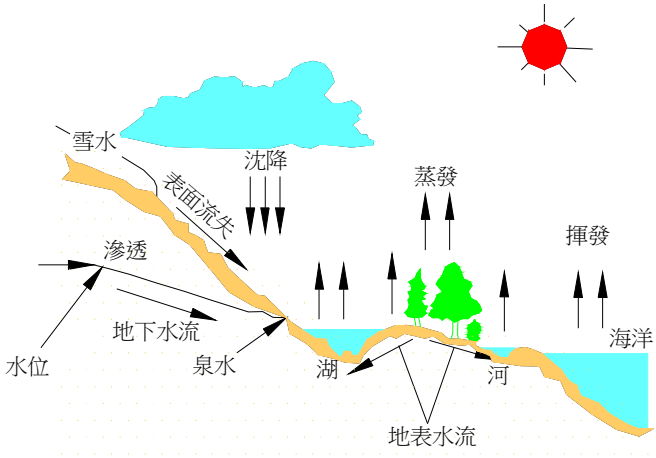
1. 集水區生態能量系統

集水區為水文之基本地形單元，以山嶺線為範圍，匯流地表逕流水至集水區

出口，區外之地表水或地下水皆不會流入該區域內，可視為一封閉區域(Chow et al., 1988; Nemec1964, Anderson and Burt1985）；因此假設主要之能量或物質流動皆在此範圍內循環；集水區主要之能量來源係由太陽能為基礎，始產生水文循環現象（圖 4），另因水文與地形之作用，以致於驅動土砂移動，產生物質流動。

2. 集水區之能流分析

本研究將集水區視為一封閉系統，能量流動、傳輸行為僅在集水區之系統內。流入集水區之自然可再生能量為太陽、風、雨等，在集水區產生降雨、蒸發散及逕流等水文現象，與植被生物、營養物質、可用土壤及土壤內之水份等組成份交互作用，除了生物生長外，亦有土壤流失等現象，在颱風之能量集中流入系統後，更有土石崩落產生等能量傳輸現象，其能量來源及耗損說明如表 2；應用能量系統語言圖例繪製如圖 5 集水區之基本能量系統圖。颱風及降雨之水份由 k31 進入土體，另一部份經 k32 流路成為直接逕流，由於植被生物量能減緩地表逕流，因此其交互作用為相除效應，產生實際地表逕流量，亦為土壤沖蝕之外營力。颱風之能量在短時間集中流入系統，經常有土石崩落產生等能量傳導現象；尤其在植被覆蓋良好之坡地系統，如海棉體般大量吸收外界投入之能量，一旦超過土體之平衡穩定，遂產生大規模之崩塌，因此紅色之「控制開關」符號表示颱風投入能量至集水區系統，當能量積蓄至 G1 時發生崩塌，G2 為脈衝發生後之平衡能量。



資料來源：重繪自 Todd,1959

圖 4. 集水區水文循環圖

Fig. 4. Hydrological cycle in a watershed.

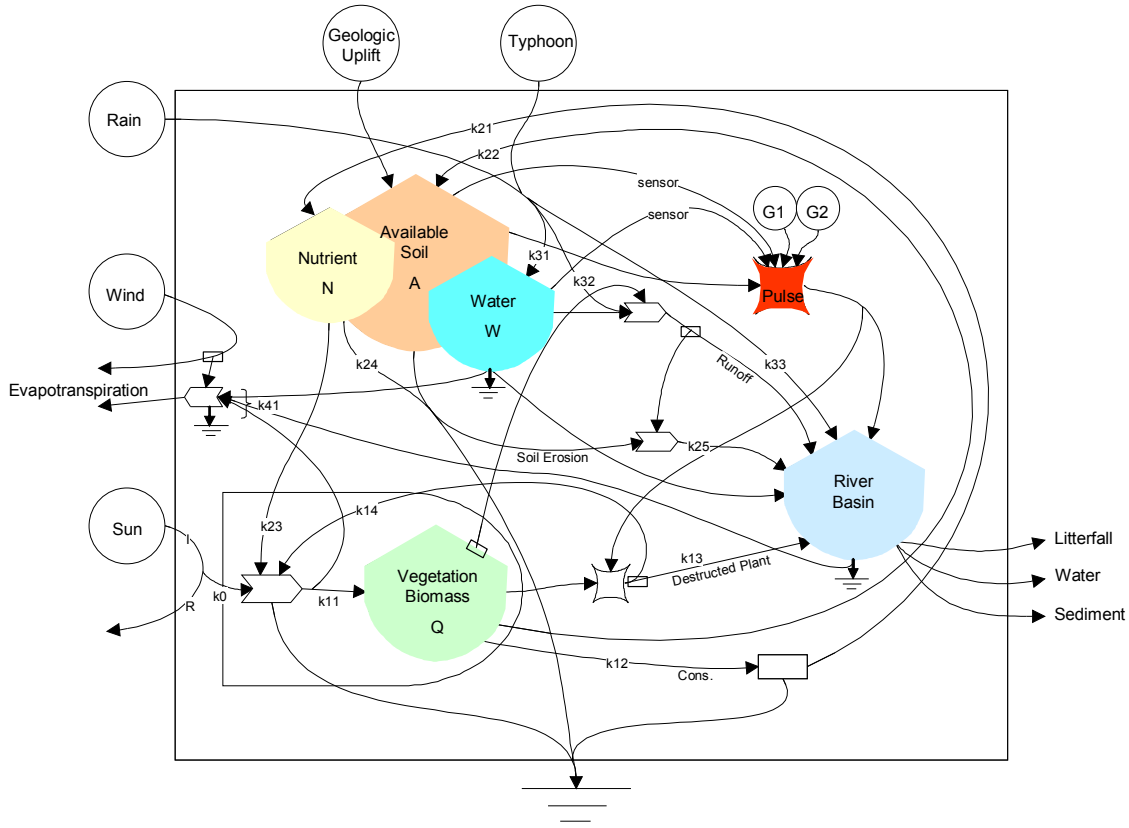


圖 5. 森林集水區能量系統圖

Fig. 5. Energy system diagram of forest watershed.

表 2. 集水區組成份之能量來源與損失

Table 2. Energy source and loss in watershed

主要之組成份	能量來源（流入之能量）	能量損失（流出之能量）
植被生物量	初級生長量係由陽光、雨水與營養物質之交互作用後所產生。崩塌產生之孔隙作用使植物生物量增加。	植物之枯枝落葉。土石崩塌所引起之植物毀損。
營養物質	枯枝落葉經微生物分解後所形成之養份。	因土壤沖蝕，造成養份流失。
可用土壤量	地殼抬昇作用，促進土壤風化。植被作用，促進土壤之化育。	降雨產生之地表水逕流造成土壤流失。土石崩塌使可用土壤量減低。
土壤水份	降雨。	蒸發作用。可用土壤量減低，則土壤水份亦隨之降低。

流域	降雨輸入之水量。植物毀損之殘株。土砂運移之土砂量。	蒸發作用。透過水體流動將植物殘株及土砂運移至系統外。

（II）福山案例測試

1. 福山森林集水區系統模型建置與分析

為瞭解集水區基本之能量流動特性，本文以福山森林集水區為例，以圖 5 為分析基礎，經蒐集現地調查數據，進行相關參數校估（表 3、表 4）建系統生態模型，分析長期之系統演替趨勢。相關調查報告指出，福山森林試驗區並無明顯之崩塌現象，主要之土砂生產來源其泥砂來源包括坡面沖蝕、河道之崩塌、沖蝕等；為簡化系統之複雜性，本文僅針對坡面之土壤沖蝕現象進行模擬，由於沒有大規模崩塌之現象，因此不考慮 G1,G2 等能量累積之特性及水文、地文條件隨著時間變動而影響系統之土砂生產特性，並以艾利風災為自然脈衝事件，據此分別模擬 500 年期間系統在無自然脈衝事件及颱風脈衝事件下之生物量、土壤量、營養鹽等系統變量之發展趨勢，並比較不同脈衝週期、強度之變化。在此假設艾利風災之脈衝強度為一單位的能量，且其發生週期與其能量成倍數關係，即若每隔 5 年發生一次風災，則其脈衝強度為五個單位能量；另於系統模擬時輸入之參數表示為 pulse（x，y，z），意即 pulse（脈衝單位能量，脈衝初次發生年，脈衝發生週期）。

分析結果顯示，福山森林集水區系統在沒有自然脈衝力外之影響下，生物量（Q）、土壤（M）、營養鹽（N）在系統發展初期迅速增加，但生物量在 250 年後則趨於平穩，符合一般生態系統理論之現象。若考慮地殼抬昇對土壤之累積效應，土壤量明顯隨著時間增加而持續上升，但林木成長至成熟期，養份吸收趨於平衡，能量僅使用於生物量之維持；如圖 6 所呈現，生物量（Q）、土壤（M）、營養鹽（N）之總量（縱座標）隨著時間（橫座標）呈現收支平衡之穩態。若系統每 1 年發生 1 次碧利斯颱風的強度，則生物量（Q）、土壤（M）、營養鹽（N）皆降低（圖 7），另颱風時之土壤流失，導致 M,N 之斜率則較緩；Q 的斜率與未發生颱風時相近，係由於颱風損壞之枝條落葉產生營養鹽提供植物額外之養分補充，因此颱風雖造成生物量降低，但對其成長速率影響不大。若模擬每 5 年發生一次颱風脈衝，並假設碧利斯颱風之雨量為脈衝之單位能量強度，且颱風雨量強度隨著發生期距之加，形成倍數之成長（圖 8）。

另比較在 0、1、5、10、50 等五種脈衝發生期距下，系統生物量 Q 之成長趨

勢（圖 9），可知 50 年週期之脈衝事件，對系統之衝擊甚大，生物量在脈衝發生前之累積量高於其他脈衝事件；雖然 50 年週期之脈衝事件造成系統大幅度之振盪，但系統之自我組織及養分回饋作用，使之能在下一波脈衝事件前恢復生產力，能有足夠之自我復育力且提供足夠之料源永續振盪，不致破壞系統之整體功能結構。

表 3. 能量流動分析

Table 3. Analysis of energy flow in study area

系統輸入	代號	數值	單位
自然可再生能源			
1 太陽能源	I	1.64E+09	Mj
2 未使用能量（unused）	R	1.64E+08	Mj
3 風	D	16	m/s
4 雨	P	400	cm
碧利絲颱風雨量	T	51.2	cm
5 地殼抬昇量	G	4.21 E9	g
系統儲存及變量			
總面積	A	379800	m2
6 森林生物量	Q	1.10E+10	g
7 土壤（深度 1m）	M	4.18E+11	g
8 土壤養份	N	4.53E+08	g
9 土壤水	W	7.60E+10	g

表 4. 系統流量與參數值校估

Table 4. Calibration of the pathway coefficients for the computer simulation

流量	估算式	數值	單位	參數值	
10 輸入太陽能源	K0*R*N=	1.48E+09	Mj	k0=	1.99E-08
11 初級生產量	k11*R*N=	5.47E+08	g	k11=	7.35E-09
12 蒸發散量	k41*R*N*D*W=	3.15E+11	g	k41=	3.49E-18
13 枯枝落葉	k12*Q=	1.44E+08	g	k12=	1.31E-02
14 颱風毀損之枝條落葉	k13*Q=	5.24E+07	g	k13=	4.77E-03
15 土壤沖蝕量	k25*Pr=	2.25E+05	g	k25=	7.39E-07
16 颱風造成之土壤流失	M*f=	1.73E+07	g	f=	4.15E-05
17 枯枝落葉分解成營養鹽	k21*Q=	4.92E+06	g	k21=	4.47E-04
18 土壤沖蝕所流失之養份	k24*M=	6.74E+03	g	k24=	3%
19 林地土壤生成量	k22*Q=	1.18E+07	g	k22=	1.08E-03
20 營養鹽輸出至生物量	k23*Q=	4.92E+06	g	k23=	6.62E-11

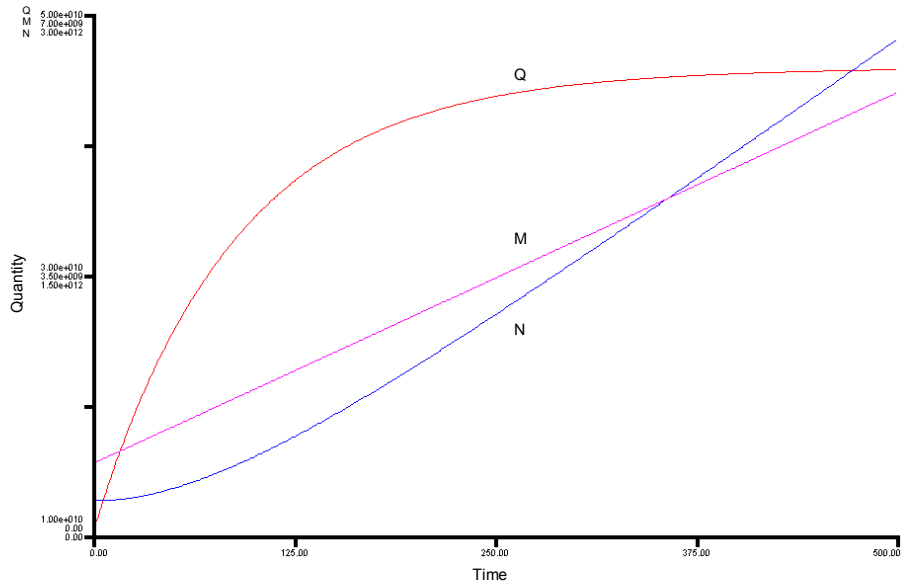


圖 6. 系統成長趨勢模擬─無自然脈衝事件

Fig 6. Simulation result of pulsing model in Fig.5. (without pulsing)

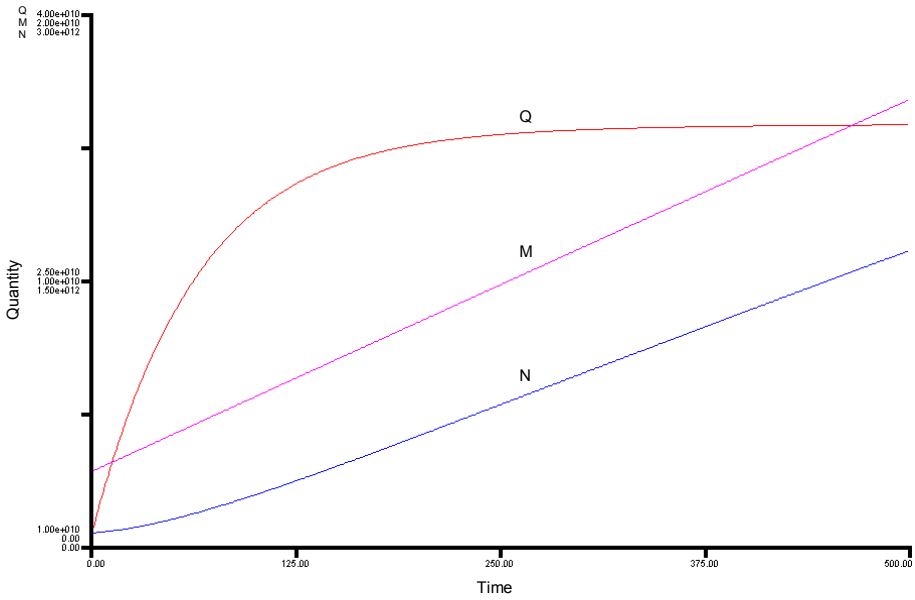


圖 7. 系統成長趨勢模擬─1 年週期之颱風脈衝

Fig. 7 Simulation result of pulsing model in Fig.5. (pulse frequency 1- year)

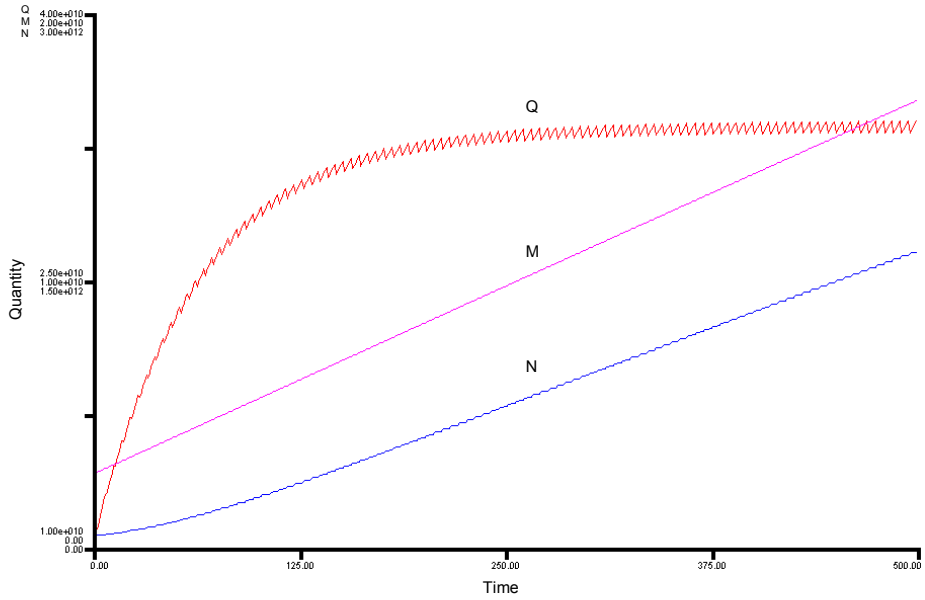


圖 8. 系統成長趨勢模擬─5 年週期之颱風脈衝

Fig. 8. Simulation result of pulsing model in Fig.5. (pulse frequency 5- year)

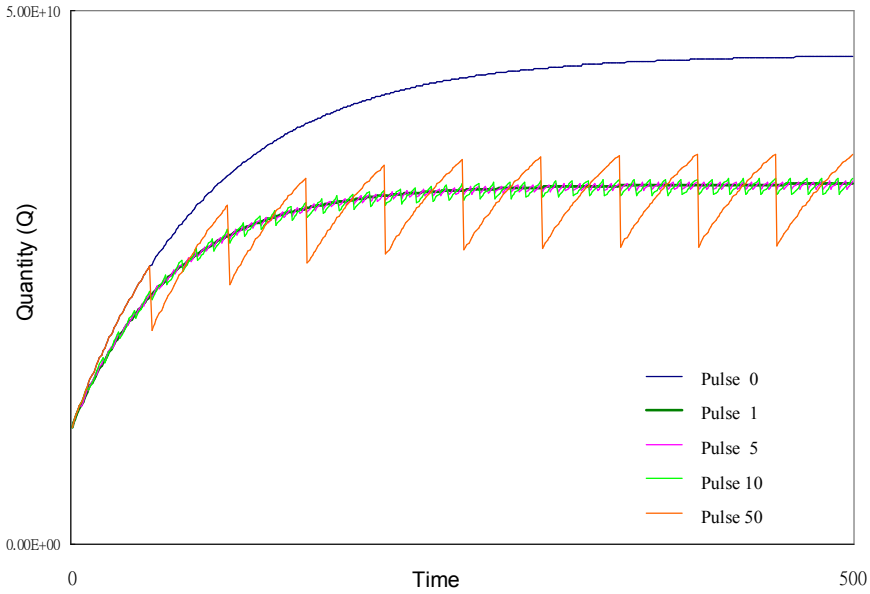


圖 9. 系統成長趨勢模擬─比較不同颱風脈衝週期

Fig. 9. Pulsing patterns in the simulation results of different pulse frequency.

2. 脈衝實例分析與討論

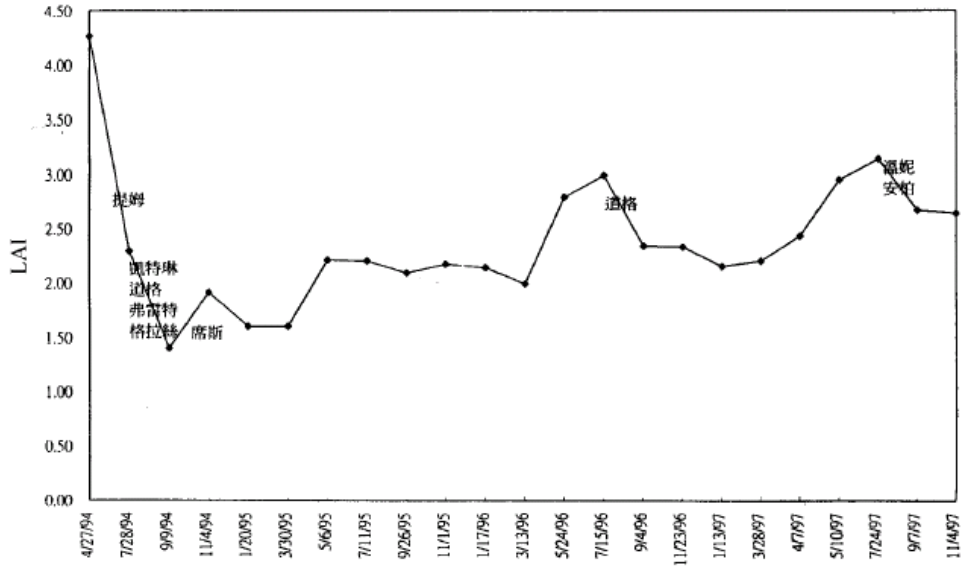
有關颱風對森林生態系之干擾影響，在生物量、土壤量方面，缺乏長期且連續之監測資料，因此初步以林冠葉面積指數作為森林反應颱風之干擾影響。林登秋等（1999）統計 1994 年～1997 年期間之颱風對福山集水區之林冠干擾，研究指

出，1994 年的提姆颱風造成東側稜線林冠葉面積指數（LAI）由 4.26 降至 2.75，損失超過 1/3。之後連續四個颱風使得葉面積指數進一步下降至 1.4（圖 10），累積損失達 2/3。雖然在 10 月 8 日復有席斯颱風侵台，葉面積指數並未進一步下降；推論大部分的葉子已經掉落，林木不再葉多招風，故剩餘之葉子不易再被吹落。因此可知產生破壞的條件除了驅動破壞之能量外，尚需由物料提供破壞能量。相關研究論述風災對森林生態系之干擾，其現象包括：

a 連續重大風災干擾後又逢風災，林木不再出現重大枝葉掉落的情形（Boose et al., 1994）。

b 許多森林在風災後能快速而廣泛的回復（Applegate and Bragg, 1992），在幾個月內長出大量新葉（Bates, 1930; Craighead and Gilbert, 1962; Yih et al., 1991; Bellingham, 1991）。尤其是對溫帶落葉樹林而言，風災所引起的落葉並不比每年冬季的落葉情形來的嚴重，故多能在隔年生長季大規模的回復。

c 雖然颱風確實對林冠產生重大傷害，卻未嚴重的影響森林樹種的組成。這種干擾與回復的過程可能相當程度的維持了森林集水區目前的群落狀態，直到有特別巨大的颱風或其它自然或人為的干擾。就此而言，颱風雖然是一種干擾，卻也可算是一種穩定力量（林登秋等，1999；林登秋，2006）。



資料來源：林登秋等，1999

圖 10. 福山 1 號集水區東側稜線上之林冠葉面積指數變化

Fig. 10. Changes in leaf area index (LAI) at the east ridge of #1 Fushan Experimental Watershed

可知系統受颱風干擾後，系統雖產生一定程度之振盪與受損，由於系統之自我組織作用能自我修復，颱風之發生期距及規模若固定，不考慮其他外力影響，系統應有相似之振盪，此現象與本研究所模擬之脈衝動力行為相符。

IV、結論

真實自然有如極度複雜之開放性系統，瞬息萬變且牽一髮而動全身，無法由現代科技全盤掌握，遂由各學科分門別類探究次系統之屬性，深入研究內部關聯性課題。然而自然環境問題，往往是由較大尺度之系統，受到外界因子干擾所引起系統內部元素之變化，通常為一失衡現象所衍生之問題，因此須由整體觀點一窺系統全貌與系統之因果反應關係，方能對問題之處理有較佳之因應措施。

本研究以能量觀點探討土砂脈衝現象，透過能量系統圖之建構，瞭解集水區系統之整體屬性。可知系統受到自然外力之脈衝能量愈大，瞬時產生之振盪愈大，另因系統本身自我組織作用，亦能在短時間回復原本之生產力；當脈衝能量愈大，恢復時間相對較長；雖其破壞能量較大，但只要確保系統之能量回饋機制，在系統之自催化作用下，在破壞能量中獲得可用能量，成為修復能力、自我組織，使系統能有較高之生產力。颱風、豪雨等自然外力造成集水區泥砂生產量過高，形成土砂脈衝動力現象，雖可能對下游造成危害，但亦是一種形式之能量津貼，如同草皮經過修剪，則能使草皮欣欣向榮；修剪之動作，對於草皮則是一種脈衝力。

系統有一定之彈性與抗性，在脈衝事件中自我修復、更新，然而當脈衝能量超過系統所能承受，則系統之生產力將長期衰退，無法修復自原始狀態。不同頻率之脈衝，系統之振盪幅度不同，瞬時破壞能量亦不同，對系統長期之生產量影響不大，但系統振盪大時，對人類社會之影響較大，因此，高頻率、低脈衝能量較能受人為手段所抵禦。在集水區土砂治理計畫中宜考量土砂能量可分次釋放之整治措施，除了可避免土砂零存整付之現象，另可使集水區生態系統維持自我組織之能力，面對下次外部脈衝事件有較佳之彈性與抗性。

V、參考文獻

林登秋(2006)颱風與福山森林生態系結構及功能之變動。林業研究專訊 13(5): 6-9。

林登秋、林則桐、江智民、夏禹九、金恆鑣（1999）颱風對台灣東北部天然闊樹林林冠干擾之研究。中華林學季刊 32(1): 67-78。

黃書禮（2002）生態系統理論在區域研究之應用。都市與計劃 29(2): 187-215。

Anderson, M.G. and T.P. Burt (1985) Hydrological Forecasting, John Wiley & Sons. pp312.

Applegate, G.B., and A.L. Bragg (1992) Recovery of coastal lowland rainforest damaged by cyclone "Winfired"-A photographic record. Queensland Forest Service, Technical Paper No. 51. Queensland.

Bates, C.G. (1930) Hurricane damage to Porto Rican forests. Forestry 19:632-637.

Bellingham, P.J. (1991) Landforms influence patterns of hurricane damage: Evidence from Jamaican montane forests. Biotropica 23:427-433.

Boose, E.R., D.R. Foster and M. Fluet (1994) Hurricanes and landscape-level disturbance in tropical and temperate forests. Ecological Monograph 64: 369-400.

Brown, M.T. (2003) Spatial modeling of empower and environmental loading, in M.T. Brown (ed.), Emergy Synthesis 2: Proceeding of the conference on emergy analysis, Gainesville FL, September 2001, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.

Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays (1988) Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York. pp7.

Craighead, F.C., and V.C. Gilbert (1962) The effects of Hurricane Donna on the vegetation of southern Florida. The Quarterly Journal of Florida Academica Scinica 25:1-28.

Namec, J. (1964) Engineering Hydrology, McGraw-Hill London. pp16.

Odum, H.T. and R.C. Pinkerton (1955) Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. Am. Scientist 43(2):331-343.

Odum, H.T. (1983) Systems Ecology. Wiley, New York. 644pp.

Todd, D.K. (1959) Ground Water Hydrology. Wiley and Sons, Inc. New York. 335pp.

Yih, K., D.H. Boucher, J.H. Vandermeer and N. Zamora (1991) Recovery of the rain forest of southeastern Nicaragua after destruction by Hurricane Joan. Biotropica 23:106-113.

2008 森林集水區經營研討會論文集:117-134

中寮溪森林集水區泥砂啟動空間變化推估

盧惠生[1]　林介龍[2]

【摘要】本文以降雨-延時-頻率及設計雨型歷線推估式，採用逕流曲線指數法暴雨流量推估模式，推估中寮溪森林集水區不同頻率年洪峰流量，再以 Shields、Mavis & Laushey、Neill 及 Yang 等 4 種現有不同河床質泥砂啟動推估式，推算中寮溪 8 個斷面不同頻率年洪峰流量，可能移動之最大泥砂粒徑空間變化。各斷面的泥砂啟動推估，Shields 臨界推移力法、Mavis & Laushey 溪床底部臨界流速法、Neill 平均臨界流速法及 Yang 平均臨界流速法等 4 種方法，最大泥砂啟動粒徑推算頗為接近，方法間差異僅約-16.5%至 26.5%間。但斷面與斷面間的泥砂啟動推估空間變化，相異極大，達 5-7 倍。至於泥砂啟動粒徑的空間變化特性，主要受到溪床坡度與平均水深的影響，泥砂啟動粒徑與溪床坡度及平均水深成正比關係。

【關鍵詞】泥砂啟動、空間變化、中寮溪森林集水區。

SPATIAL VARIATION ESTIMATION OF SEDIMENT INCIPIENT MOTION AT THE CHUNGLIAOSHI FOREST WATERSHED OF SOUTHERN TAIWAN

Hui-sheng Lu[1]　Chieh-lung Lin[2]

【Abstract】Estimating peak flows of different recurrence years at Chungliaoshi forest watershed of southern Taiwan was carried out with rainfall depth-duration-frequency and design hyetograph estimated equations as well as SCS curve number storm flow model. Spatial variation of sediment incipient motion at eight cross sections of main stream within the Chungliaoshi forest watershed was estimated with four kinds of current incipient motion methods. Based on the fixed cross sections of the main stream, the estimated particle size differences of sediment incipient motion among Shields,

[1]農業委員會林業試驗所集水區經營組研究員兼組長，通訊作者
Senior Scientist & Head, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture (Corresponding Author), E-mail:lusteve@tfri.gov.tw
[2]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

Mavis & Laushey, Neill and Yang methods were rather small and only from -16.5% to 26.5%. The estimated particle size differences of spatial variation within eight cross sections of the main stream by Shields, Mavis & Laushey, Neill and Yang methods were very large and about from five to seven times. Spatial variations of sediment incipient motion in the main stream were affected by slopes and water depths at different cross sections. Particle sizes of sediment incipient motion at different cross sections increased as slopes and water depths increased at those locations.

【**Key words**】Incipient motion of sediment, Spatial variation, Chungliaoshi forest watershed.

Ⅰ、前言

台灣上游森林集水區溪流比降大，多屬急流河溪，上游溪床散佈著卵石，河床質泥砂夾雜石礫級粒徑。颱風豪雨季節時，洪水推移停置與埋藏溪床石礫，改變溪床與溪流兩岸地形，破壞水生動植物的棲息地。同時上游集水區溪流，不同地點的溪床縱斷面，坡度變異甚大，橫斷面的寬窄亦有相當程度變化，較陡且窄之溪床斷面，流速較急，洪水可移動較大之石礫級河床質泥砂，較緩且寬之溪床斷面，流速較緩，洪水僅可移動較小之石礫級河床質泥砂。

溪床的河床質泥砂啟動推估起源頗早，以推移力來考量水流對泥砂顆粒的推移力，稱臨界推移力法，如 Shields（Vanoni, 1964; Vanoni,1975）泥砂顆粒啟動推估的臨界推移力公式；以流速來考量水流對泥砂顆粒的衝擊力，稱臨界流速法，如 Mavis & Laushey（1948）泥砂顆粒啟動推估的溪床底部臨界流速公式，或 Neill（1967）與 Yang（1973）泥砂顆粒啟動推估的溪流平均臨界流速公式。

由於上游森林集水區溪流坡度變化迅速，溪床橫斷面寬窄變化多端，溪流流速隨之多變，沿著溪床移動與滾動的石礫級河床質泥砂粒徑，變異甚大。本文乃以降雨-延時-頻率與設計雨型歷線推估式，採用美國土壤保育局之逕流曲線指數法暴雨流量推估模式，推估中寮溪森林集水區之不同頻率年洪峰流量，再以現有4種不同河床質泥砂啟動推估式，推估中寮溪森林集水區主流溪床，不同斷面之可能移動最大河床質泥砂粒徑，以探討中寮溪森林集水區主流溪床泥砂啟動的空間變化，供上游集水區溪流規劃治理之參考。

Ⅱ、材料與方法

（Ⅰ）中寮溪森林集水區概況

中寮溪森林集水區位於高雄縣六龜鄉林業試驗所六龜試驗林內，中寮溪森林集水區主流海拔 520 m 處，設有水文觀測站，以監測暴雨量與暴雨流量。中寮溪森林集水區，面積 721 ha，平均坡度 59.7%，主流最高海拔 1800 m，主流最低海拔 520 m，主流長度 6.9 km（圖 1）。

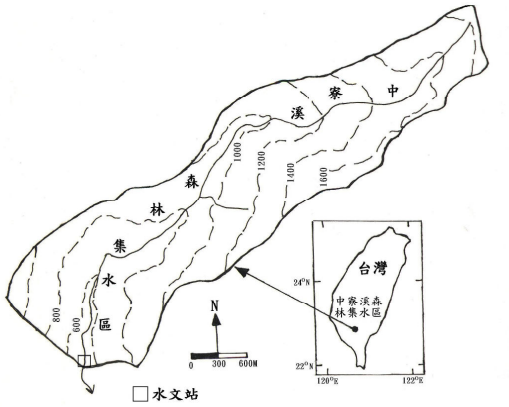


圖 1. 中寮溪森林集水區地形圖

Fig.1. Topography of Chungliaoshi forest watershed.

中寮溪森林集水區的年平均雨量約 2880 mm，年平均溫度約 19 ℃，年平均最高溫度約 23 ℃，年平均最低溫度約 11 ℃，年相對濕度約 86%。地質為中新世廬山層，岩石由硬頁岩、板岩及硬砂岩組成，土壤質地為壤土與黏質壤土，土地利用為天然闊葉林與人工林（盧惠生等，2006）。

（Ⅱ）逕流曲線指數法（SCS runoff curve number）暴雨流量歷線推估

採取美國農部土壤保育局提出的逕流曲線指數法暴雨流量推估模式（Steenhuis et al., 1995; Ponce and Hawkins, 1996）：

$$Q = \frac{(P - 0.2\,SM)^2}{P + 0.8\,SM},\ P > 0.2\,SM \tag{1}$$

$$Q = 0,\ P \le 0.2\,SM \tag{2}$$

$$SM = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{3}$$

式(1)、(2)及(3)中，Q 為暴雨流量（mm），P 為暴雨量（mm），SM 為土壤最大涵蓄水量（mm），CN 為逕流曲線指數，無因次。

由式(1)-(3)之逕流曲線指數法可計算降雨發生後，其降雨歷線所產生的累積暴雨流量（Q），由累積暴雨流量之Q_{i+1}（第i+1時刻之累積暴雨流量） 減去Q_i （第i時刻之累積暴雨流量），可得第i與i+1時間間隔的暴雨流量（△Q），故同樣的程序，可以計算由降雨開始至降雨結束間，任意單位時段內之暴雨流量，即$\triangle Q_1$、$\triangle Q_2$ ・・・$\triangle Q_{i+1}$・・・等，事實上單位時段內之暴雨流量$\triangle Q_i$ ，它與單位時段的超滲雨量$\triangle RE_i$同意義。超滲雨量乃是降雨至地面後，可形成暴雨流量的雨量。超滲雨量產生後，採用三角形單位歷線計算暴雨流量歷線，因而獲得洪峰流量。

（Ⅲ）泥砂啟動推估

溪床的河床質泥砂啟動推估方法（Graf, 1984; Yang, 1996）頗多，大致而言，可分稱臨界推移力法與臨界流速法兩大類。本文採用 Shields （Vanoni, 1964; Vanoni,1975） 的臨界推移力法、Mavis & Laushey （1948）、Neill（1967）與 Yang（1973）的臨界流速法。

1、Shields臨界推移力法（Vanoni, 1964; Vanoni,1975）

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = 0.06 \quad , \quad \mathrm{Re}_* = \frac{U_* d}{\nu} > 500 \tag{4}$$

τ_{cr}：溪床底部單位面積的臨界推移力（N/m^2）。

γ_s：為河床質泥砂顆粒的單位體積重量（2.65x9778 N/m^3）。

γ：為水的單位體積重量（25℃時為 9778 N/m^3，62.24 lb/ft^3）。

d：為河床質泥砂粒徑（m）。

Re_*：為剪力雷諾係數（shear Reynolds number），無因次。

U_*：為剪力速度（shear velocity） （m/s），$U_* = \sqrt{\tau/\rho}$ ，$\tau = \gamma R_h S \cong \gamma D S$ 。

R_h：水力半徑（m）

S：坡度，無因次。

D：平均水深（m）。

ρ ：水的密度（25℃時為 997.1 kg/m^3，1.9346 $slugs/ft^3$）。

ρ_s：河床質泥砂的密度（25℃時為 2.65x997.1 kg/m^3，2.65x1.9346 $slugs/ft^3$）。

ν：為水的運動黏滯性(kinematic viscosity)（m^2/s），25℃時為 0.000000897 m^2/s，0.0000096875 ft^2/s。

g：重力加速度（9.8064 m/s^2，32.172 ft/s^2）

2、Mavis & Laushey （1948）溪床底部臨界流速法

$$(V_b)_{cr} = 0.155 d^{1/2} \quad (5)$$

$(V_b)_{cr}$：溪床底部臨界流速（m/s），$(V_b)_{cr}=0.7\,V_{cr}$。

V_{cr}：溪流平均臨界流速（m/s）。

d：為河床質泥砂粒徑（mm）。

3、Neill（1967）平均臨界流速法

$$\frac{(V_{cr})^2}{\left(\rho_s/\rho - 1\right) g d} = 2.50 \left(\frac{d}{D}\right)^{-0.20} \quad (6)$$

V_{cr}：溪流平均臨界流速（m/s）。

D：平均水深（m）。

d：為河床質泥砂粒徑（m）。

4、Yang（1973）平均臨界流速法

$$\frac{V_{cr}}{\omega} = \frac{2.5}{\log(U_* d/\nu) - 0.06} + 0.66, \quad 1.2 < \frac{U_* d}{\nu} < 70 \quad (7a)$$

$$\frac{V_{cr}}{\omega} = 2.05, \quad 70 \le \frac{U_* d}{\nu} \quad (7b)$$

$$\omega = 6.01 d^{1/2} \quad （英制） \quad (8c)$$

$$\omega = 3.32 d^{1/2} \quad （公制） \quad (8d)$$

V_{cr}：溪流平均臨界流速（ft/s，m/s）。

Re_*：為剪力雷諾係數（shear Reynolds number），無因次。

U_*：為剪力速度（shear velocity），$U_* = \sqrt{\tau/\rho}$，$\tau = \gamma R_h S \cong \gamma D S$。

R_h：水力半徑（ft, m）

S：坡度，無因次。

D：平均水深（ft, m）。

ρ：水的密度（25℃時為 1.9346 slugs/ft^3，997.1 kg/m^3）

ν：為水的運動黏滯性（kinematic viscosity）（m^2/s），25℃時為 0.0000096875 ft^2/s，0.000000897 m^2/s。

d：為河床質泥砂粒徑（ft，m）。

ω：河床質泥砂在水中的沉降速度，（式 8c 時 ω 為 ft/s，d 為 ft；式 8d 時 ω 為 m/s，d 為 m）

Ⅲ、結果與討論

（Ⅰ）暴雨流量特性推估

本文以降雨-延時-頻率與 24 小時設計雨型歷線推估公式，採用美國土壤保育局之逕流曲線指數法暴雨流量推估模式，推估中寮溪森林集水區不同頻率年之 24 小時暴雨流量特性，所需輸入資料如下：

1、面積：721公頃。

2、主流長度：6900公尺。

3、集水區主流最高海拔：1800公尺。

4、集水區主流最低海拔：520公尺。

5、坡面逕流流速：2.4 cm/sec，參考盧惠生等（2006）。

6、逕流曲線指數：CN=70，盧惠生等（2006）建立之中寮溪集水區CN值。

7、暴雨量：

引用盧等（2004）於六龜試驗林建立之降雨-延時-頻率推估式，如下式；

$$P_t^T = 69t_r^{0.47} T^{0.19} \quad (9)$$

式(9)的 P_t^T 為T頻率年t_r降雨延時之降雨量（mm），t_r為降雨延時（h），T為頻率年（y）。由式(9)計算所得，24小時降雨延時之降雨量：100年頻率年為737.1 mm，50年頻率年為646.2 mm，25年頻率年為566.4 mm，20年頻率年為542.9 mm，10年頻率年為475.9 mm，5年頻率年為417.2 mm，2.33年頻率年為360.9 mm，1年頻率年為307.3 mm。

8、設計雨型歷線：

引用盧等（2004） 於六龜試驗林建立之24小時降雨延時設計雨型歷線推估式，如下式；

峰前段（上升曲線）：$t \le 18$ ： $I_b = 0.84035\, e^{0.1468\, t}$ (10)

峰後段（下降曲線）：$t \ge 18$ ： $I_a = 34285\ e^{-0.443\ t}$ (11)

式(10)-(11)中I_b為峰前段設計雨型歷線降雨強度百分比推估值（%），I_a為峰後段設計雨型歷線降雨強度百分比推估值（%），t 為時間（h）。

將不同頻率年24小時降雨延時推估之暴雨流量歷線特性列表如表1，由表1可知暴雨流量：100年頻率年為10年頻率年的1.7倍，10年頻率年為1年頻率年的1.8倍；洪峰流量：100年頻率年為10年頻率年的1.6倍，10年頻率年為1年頻率年的1.7

倍。致不同頻率年暴雨流量的差異與洪峰流量的差異相似，此係洪峰流量由超滲雨量乘以三角單位歷線計算而來，而超滲雨量的內涵，為暴雨流量。然而表1的暴雨流量佔暴雨量百分比率，隨暴雨量而增加，乃暴雨流量係由逕流曲線指數模式推算而來，逕流曲線指數法的基本精神，係暴雨量愈大，暴雨流量增加速度非直線式，呈曲線式，故暴雨量愈大，暴雨流量率愈大。

表 1. 中寮溪森林集水區不同頻率年 24 小時暴雨量推估之暴雨流量歷線特性

Table 1. The characteristics of estimated stormflow hydrographs under 24-hour rainfall of different recurrence years at Chungliaoshi forest watershed

頻率年(年)	1	2.33	5	10	20	25	50	100
暴雨量(mm)	307.3	360.9	417.2	475.9	542.9	566.4	646.2	737.1
推估暴雨流量(mm)	206.7	256.7	310.1	366.3	431.8	453.9	531.7	620.9
推估暴雨流量率(%)	67.3	71.1	74.3	77.0	79.4	80.1	82.3	84.2
推估洪峰流量(cms)	41.4	49.5	60.1	70.1	81.4	85.4	98.8	114.0
推估洪峰比流量(cms/km^2)	5.7	7.0	8.3	9.7	11.3	11.8	13.7	15.8

（Ⅱ）泥砂啟動推估

1　溪床坡度與溪流橫斷面水力特性

使用水準儀將中寮溪水文站 200 m 縱長的溪床比降與 8 個橫斷面位置關係如圖 2，可知上游集水區，即使僅約 200 公尺縱長的溪床比降，變化甚大，在 0.0247-0.1986 間，如表 2，此 8 個橫斷面形狀如圖 3。

表 2. 中寮溪主流不同溪床斷面距水文站距離與坡度比降

Table 2. Slope gradients and distances of eight cross sections from hydrologic station of Chungliaoshi main stream

橫斷面編號	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
距離水文站,m	19.6	42.3	62.8	97.8	115.8	160.8	182.8	190.8
坡度比降	0.0383	0.0247	0.0415	0.0451	0.0567	0.0864	0.1986	0.1737

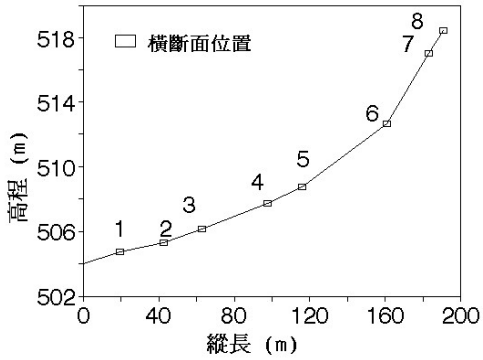


圖 2. 中寮溪主流 8 個橫斷面位置及縱斷面變化

Fig.2. Locations of eight cross sections at longitudinal profile of Chungliaoshi main stream.

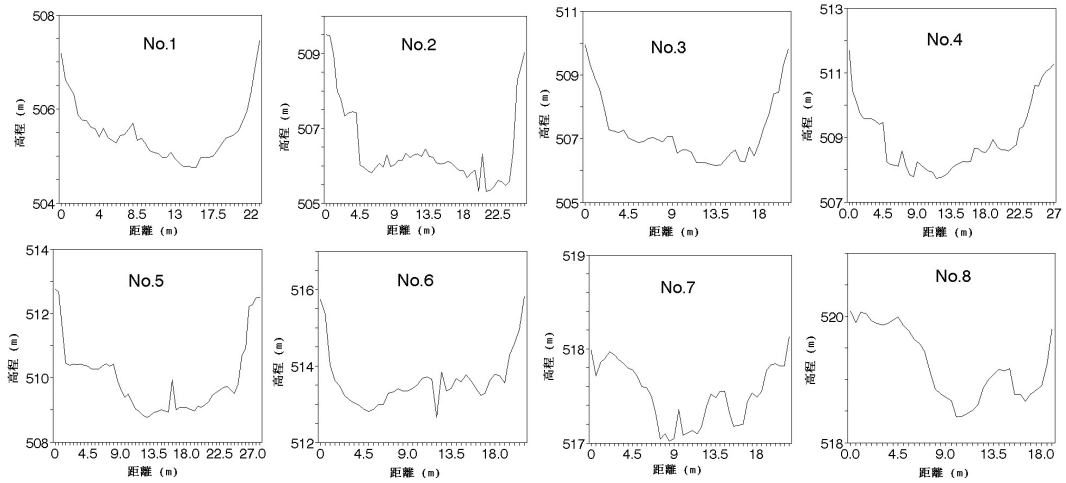


圖 3. 中寮溪主流 8 個橫斷面形狀

Fig. 3. Eight cross section profiles of Chungliaoshi main stream.

同時 8 個橫斷面分別的最深水深（H）為自變數，水流面積（A）、水面寬（W），平均水深（D）（水流面積除以水面寬）為應變數，進行迴歸分析，其迴歸關係式如表 3。

表 3. 中寮溪主流 8 個橫斷面之水流面積（A）、水面寬（W）、平均水深（D）與最深水深（H）間迴歸關係式

Table 3. Nonlinear regression equations of cross section area (A), width (W), average depth (D) on maximum water depth (H) for eight cross sections of Chungliaoshi main stream

橫斷面編號	迴歸關係式	r^2	n
No.1	12. $A = 9.8 H^{1.68}$	0.99	20
No.2	13. $A = 8.04 H^{1.78}$	0.99	23
No.3	14. $A = 7.78 H^{1.62}$	0.99	23
No.4	15. $A = 8.47 H^{1.67}$	0.99	23
No.5	16. $A = 8.67 H^{1.70}$	0.99	23
No.6	17. $A = 6.17 H^{1.92}$	0.99	23
No.7	18. $A = 10.69 H^{1.78}$	0.99	15
No.8	19. $A = 6.60 H^{1.76}$	0.99	18
No.1	20. $W = 16.12 H^{0.62}$	0.94	20
No.2	21 $W = 14.36 H^{0.66}$	0.87	23
No.3	22. $W = 12.66 H^{0.54}$	0.93	23
No.4	23. $W = 14.14 H^{0.63}$	0.97	23
No.5	24. $W = 14.88 H^{0.68}$	0.97	23
No.6	25. $W = 12.17 H^{0.75}$	0.89	23
No.7	26. $W = 18.26 H^{0.69}$	0.94	15
No.8	27. $W = 11.73 H^{0.80}$	0.97	18
No.1	28. $D = 0.57 H^{1.26}$	0.99	20
No.2	29. $D = 0.48 H^{1.42}$	0.99	23
No.3	30. $D = 0.565 H^{1.26}$	0.99	23
No.4	31. $D = 0.57 H^{1.14}$	0.99	23
No.5	32. $D = 0.58 H^{1.05}$	0.98	23
No.6	33. $D = 0.42 H^{1.54}$	0.99	23
No.7	34. $D = 0.58 H^{1.22}$	0.98	15
No.8	35. $D = 0.56 H^{0.98}$	0.98	18

表 3 中之式(12)-(19)為水流面積（A）與最深水深（H）之迴歸關係式，式(20)-(27)為水面寬（W）與最深水深（H）之迴歸關係式，式(28)-(35)為平均水深（D）與

最深水深（H）之迴歸關係式，上述迴歸關係式中的 H 為橫斷面的最深水深（m），A 為橫斷面的水流面積（m^2），W 為橫斷面的水面寬（m），D 為平均水深（m）。此 24 個迴歸式 r^2 在 0.87 以上，相關性極高。

2　不同公式推算泥砂啟動粒徑特性

根據式(4)~(8)可知計算泥砂啟動粒徑，必須有溪床平均流速、坡度、平均水深等資料，溪床坡度可由圖 2 獲得，平均水深可由式(28)-(35) 獲得，平均流速由 Manning 公氏如下式(36)獲得，但必須知道最深水深（H）的資料，才能計算。由逕流曲線指數法暴雨流量推估模式，獲得不同頻率年 24 小時暴雨之洪峰流量，故可由洪峰流量（Q_p）等於 Manning 流速公式（V）與水流面積（A）相乘，如式(37)，反算最深水深（H）。

$$V = D^{2/3} S^{1/2} / n \qquad (36)$$

$$Q_p = AD^{2/3} S^{1/2} / n \qquad (37)$$

式(36)-式(37)中 V 為平均流速（m/s），Q_p 為洪峰流量（cms），D 為平均水深（m），S 為坡度比降（無因次），n 為 Manning 公氏粗糙係數（無因次）。

將式(12)-(35)代入式(37)中，同時 Manning 公氏粗糙係數參考 Chow（1959），採用 n=0.045，可獲得由洪峰流量（Q_p）（cms）與坡度比降（S）（無因次）來計算最深水深（H）（m）之關係式，如表 4。

表 4. 中寮溪 8 個橫斷面之最深水深（H）與洪峰流量及溪床比降間關係式

Table 4. Equations of maximum water depth (H) on peak flow (Qp) and slope gradient (S) for eight cross sections of Chungliaoshi main stream

橫斷面編號	關係式
No.1	44. $H = 0.1376 Q_p^{0.39617} S^{-0.19808}$
No.2	45. $H = 0.1793 Q_p^{0.36611} S^{-0.18306}$
No.3	46. $H = 0.1443 Q_p^{0.4058} S^{-0.20291}$
No.4	47. $H = 0.1357 Q_p^{0.4109} S^{-0.20544}$
No.5	48. $H = 0.1304 Q_p^{0.4161} S^{-0.20803}$
No.6	49. $H = 0.2299 Q_p^{0.3388} S^{-0.1694}$

No.7 50. $H = 0.1401 Q_p^{0.3850} S^{-0.1925}$

No.8 51. $H = 0.1491 Q_p^{0.4138} S^{-0.2069}$

茲將距離水文站最近的縱距離，19.6m 處之橫斷面編號 1，坡度比降為 0.0383，不同頻率年 24 小時暴雨之洪峰流量與 4 種泥砂啟動公式推算之最大泥砂啟動粒徑，如表 5。由表 5 之數據可知，Shields 臨界推移力法、Mavis & Laushey 溪床底部臨界流速法、Neill 平均臨界流速法及 Yang 平均臨界流速法等 4 種方法，推算最大泥砂啟動粒徑頗為接近。

表 5. 中寮溪橫斷面 1 處，不同頻率年之洪峰流量與各方法推算之最大泥砂啟動粒徑

Table 5. Maximum potential particle sizes of incipient motion with different estimated methods and peak flows for different recurrence years at cross section no.1 of Chungliaoshi main stream

頻率年(y)	洪峰流量(cms)	Shields 計算粒徑 d (cm)	Mavis[(1)]計算粒徑 d(cm)	Neill 計算粒徑 d(cm)	Yang 計算粒徑 d (cm)	4 種方法[(2)]之平均粒徑 d (cm)
1	41.4	26.2	22.9	22.2	24.3	23.9
2.33	49.5	28.7	25.8	25.2	27.3	26.8
5	60.1	31.6	29.4	29.0	31.1	30.3
10	70.1	34.1	32.6	32.3	34.5	33.4
20	81.4	36.8	36.0	36.0	38.1	36.7
25	85.4	37.7	37.2	37.2	39.4	37.9
50	98.8	40.5	41.0	41.3	43.4	41.5
100	114	43.5	45.1	45.7	47.8	45.5

(1) Mavis為Mavis & Laushey的縮寫。

(2) 4種方法為Shields, Mavis & Laushey , Neill, Yang等4方法。

2005 年 7 月 18 日海棠颱風挾帶雨量超過 700 mm 以上，約為 100 年頻率年暴雨量，颱風後水文站靜水池淤積的殘留泥砂粒徑，最大泥砂粒徑約 45 cm。由表 5 數據顯示 100 年頻率年洪峰流量時，距離最接近水文站的橫斷面編號 1 處，4 種方法推算的最大泥砂啟動粒徑在 43.5-47.8 cm 間，證實 4 種方法頗為適用於中寮溪。

由式(4)~(8)的公式來看，Shields 認為最大泥砂啟動粒徑與溪床底部單位面積的

臨界推移力有關，但計算推移力(τ)的方法而言，$\tau \cong \gamma DS$，實際上最大泥砂啟動粒徑（d）係與平均水深（D）及溪床坡度（S）相乘有關；Mavis & Laushey、Neill、Yang等認為最大泥砂啟動粒徑與溪床底部臨界流速或平均流速有關，由流速採用Manning 公式（V）計算，$V = D^{2/3}S^{1/2}/n$，實際上最大泥砂啟動粒徑（d）亦係與平均水深（D）及溪床坡度（S）相乘有關。因此，將 Manning 公式代入式(4)~(8)中，可獲得表 6 之關係式。由此觀之實際計算式，此 4 種泥砂啟動公式為相似的關係式，即最大泥砂啟動粒徑（d）係與平均水深（D）及溪床坡度（S）相乘的關係式，只不過它們的係數與常數不同。

表 6. 各種泥砂啟動公式的粒徑與水深及坡度關係

Table 6. The relations among particle sizes of incipient motion, water depths and slope gradients for different estimated methods

泥砂啟動推估法	關係式(2)
Shields	$d = 10.1DS$
Mavis(1)	$d = 10.07D^{1.34}S$
Neill	$d = 22.82D^{1.425}S^{1.25}$
Yang	$d = 10.66D^{1.34}S$

(1) Mavis為Mavis & Laushey的縮寫。

(2) d為泥砂粒徑（m），D為平均水深（m），S為溪床比降（無因次）

3　不同公式推算不同橫斷面的泥砂啟動粒徑空間變化特性

由表6公式推算最大泥砂啟動粒徑，可知最大泥砂啟動粒徑受到溪床坡度與平均水深之影響；而表3公式可知，平均水深與最深水深成正比；又表4公式可知，最深水深與洪峰流量及坡度成正比；故最大泥砂啟動粒徑受到溪床坡度與洪峰流量之影響。現以中寮溪森林集水區推算1年與100年頻率年的洪峰流量，於8個不同橫斷面處，4種泥砂啟動公式，推算最大泥砂啟動粒徑變化，如表7。

表 7. 1 年及 100 年頻率年洪峰流量不同溪床斷面時各方法推算最大泥砂啟動粒徑

Table 7. Maximum potential particle sizes of incipient motion with different estimated methods on different cross sections for peak flows of 1 and 100 recurrence years

橫斷面編號	坡度 %	最大泥砂啟動粒徑 (cm) 1 年頻率年						100 年頻率年					
		D(m)[1]	Shields	Mavis[2]	Neill	Yang	Ave.[3]	D(m)[1]	Shields	Mavis[2]	Neill	Yang	Ave.[3]
No.1	3.83	0.68	26.2	22.9	22.2	24.3	23.9	1.12	43.5	45.1	45.7	47.8	45.5
No.2	2.47	0.76	18.9	17.2	15.1	18.2	17.3	1.28	32.0	34.8	31.9	36.8	33.9
No.3	4.15	0.75	31.3	28.2	28.2	29.9	29.4	1.25	52.5	56.5	58.9	59.8	56.9
No.4	4.51	0.69	31.5	27.7	28.0	29.3	29.1	1.11	50.6	52.3	55.1	55.4	53.3
No.5	5.67	0.65	37.3	32.1	34.2	34.0	34.4	1.01	58.0	58.1	64.3	61.5	60.4
No.6	8.64	0.58	50.4	41.6	48.8	44.1	46.2	0.98	85.4	84.5	103.7	89.5	90.8
No.7	19.86	0.44	88.9	67.2	94.8	71.1	80.5	0.71	143.0	127.1	186.8	134.6	147.9
No.8	17.37	0.56	98.2	80.4	112.0	85.1	93.9	0.84	148.1	139.4	201.0	147.6	159.0

(1) D（m）為平均水深（m）。

(2) Mavis為Mavis & Laushey的縮寫。

(3) Ave.為Shields, Mavis & Laushey , Neill, Yang4種方法最大泥砂啟動粒徑平均值。

由表7資料顯示，8個不同橫斷面坡度差異甚大，1年與100年頻率年的洪峰流量，產生的平均水深亦各自不同。最大泥砂啟動粒徑與坡度均成正比，亦與平均水深均成正比。唯1年與100年頻率年的洪峰流量造成最大泥砂啟動粒徑，4種方法間之差異程度，如與不同橫斷面間的差異程度相比，方法間之差異程度甚小，而不同橫斷面間的差異程度甚大，換言之，不同橫斷面間泥砂啟動粒徑的空間變化極大。至於泥砂啟動粒徑的空間變化特性，主要受到溪床坡度與平均水深的影響，泥砂啟動粒徑與溪床坡度及平均水深成正比關係。

另外，以 4 種方法最大泥砂啟動粒徑推算平均值為基準，定為 100%，1 年及 100 年頻率年洪峰流量，將不同溪床斷面時各種方法推算之最大泥砂啟動粒徑%，列表於表 8。可知 1 年與 100 年頻率年洪峰流量時，不同溪床斷面時各種方法推算之最大泥砂啟動粒徑，與 4 種方法最大泥砂啟動粒徑推算平均值相比，差異約

-16.5%至 26.5%間。且以 Shields 與 Yang 表現較佳，差異約-10%至 10%間。

再者，以溪床斷面編號 2 最大泥砂啟動粒徑推算值為基準，定為 100%，1 年及 100 年頻率年洪峰流量，將不同溪床斷面時各種方法推算之最大泥砂啟動粒徑%，列表於表 9。可知不同溪床斷面各種方法推算之最大泥砂啟動粒徑相比，斷面與斷面間差異頗大，約 4 倍至 7 倍間，且以 Neill 差異最大，約 6 倍至 7 倍間。

表 8. 以平均最大泥砂啟動粒徑推算為基準，1 年及 100 年頻率年洪峰流量於不同溪床斷面時各種方法推算之最大泥砂啟動粒徑%

Table 8. Based on maximum potential particle size of average estimated methods, maximum potential particle sizes (%) of incipient motion with different estimated methods on different cross sections for peak flows of 1 and 100 recurrence years

橫斷面編號	坡度 %	最大泥砂啟動粒徑 (%)(1)											
		1 年頻率年						100 年頻率年					
		D(m)(2)	Shields	Mavis(3)	Neill	Yang	Ave.(4)	D(m)(2)	Shield	Mavis(3)	Neill	Yang	Ave.(4)
No.1	3.83	0.68	109.7	95.9	93.0	101.5	100.0	1.12	95.5	99.1	100.4	104.9	100.0
No.2	2.47	0.76	109.2	99.1	86.9	104.9	100.0	1.28	94.6	102.6	94.2	108.6	100.0
No.3	4.15	0.75	106.4	96.1	95.8	101.7	100.0	1.25	92.2	99.3	103.5	105.1	100.0
No.4	4.51	0.69	108.1	95.1	96.2	100.6	100.0	1.11	94.9	98.0	103.3	103.8	100.0
No.5	5.67	0.65	108.4	93.3	99.5	98.8	100.0	1.01	95.9	96.1	106.3	101.7	100.0
No.6	8.64	0.58	108.9	90.1	105.6	95.4	100.0	0.98	94.1	93.1	114.2	98.6	100.0
No.7	19.86	0.44	110.4	83.5	117.8	88.3	100.0	0.71	96.7	86.0	126.3	91.0	100.0
No.8	17.37	0.56	104.6	85.6	119.2	90.6	100.0	0.84	93.1	87.7	126.4	92.8	100.0

(1) 最大泥砂啟動粒徑（%）：將各種方法的最大泥砂啟動粒徑，除以4種方法最大泥砂啟動粒徑的平均值，再乘以100%。

(2) D（m）為平均水深（m）。

(3) Mavis為Mavis & Laushey的縮寫。

(4) Ave.為Shields, Mavis & Laushey , Neill, Yang4種方法最大泥砂啟動粒徑平均值。

表 9. 以溪床斷面 2 號的最大泥砂啟動粒徑推算為基準，1 年及 100 年頻率年洪峰流量於不同溪床斷面時各種方法推算之最大泥砂啟動粒徑%

Table 9. Based on maximum potential particle size of cross section no.2, maximum potential particle sizes (%) of incipient motion with different estimated methods on different cross sections for peak flows of 1 and 100 recurrence years

橫斷面編號	坡度 %	最大泥砂啟動粒徑 (%)[1]											
		1 年頻率年						100 年頻率年					
		D(m)[2]	Shields	Mavis[3]	Neill	Yang	Ave.[4]	D(m)[2]	Shields	Mavis[3]	Neill	Yang	Ave.[4]
No.1	3.83	0.68	138.7	133.5	147.6	133.5	138.0	1.12	135.8	129.8	143.2	129.8	134.4
No.2	2.47	0.76	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	1.28	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
No.3	4.15	0.75	165.3	164.4	187.0	164.4	169.6	1.25	163.9	162.5	184.7	162.5	168.1
No.4	4.51	0.69	166.5	161.3	186.1	161.3	168.1	1.11	158.0	150.4	172.8	150.4	157.5
No.5	5.67	0.65	196.9	186.9	227.1	186.9	198.4	1.01	181.1	167.0	201.5	167.0	178.4
No.6	8.64	0.58	266.2	242.6	324.1	242.6	266.7	0.98	266.7	243.2	325.0	243.2	268.0
No.7	19.86	0.44	469.9	391.4	629.7	391.4	464.6	0.71	446.6	365.6	585.7	365.6	436.6
No.8	17.37	0.56	519.3	468.4	743.4	468.4	542.0	0.84	462.5	401.1	630.2	401.1	469.5

(1)最大泥砂啟動粒徑（%）：將各種方法及各橫斷面編號的最大泥砂啟動粒徑，除以橫斷面編號2的最大泥砂啟動粒徑，再乘以100%。

(2) D（m）為平均水深（m）。

(3) Mavis為Mavis & Laushey的縮寫。

(4) Ave.為Shields, Mavis & Laushey , Neill, Yang等4種方法的平均值。

4、中寮溪推算泥砂啟動粒徑的空間變化

將中寮溪 8 個橫斷面，不同頻率年 24 小時暴雨之洪峰流量與 4 種泥砂啟動公式推算之最大泥砂啟動粒徑，如表 10。由表 10 數據可知，Shields 臨界推移力法、Mavis & Laushey 溪床底部臨界流速法、Neill 平均臨界流速法及 Yang 平均臨界流速法等 4 種方法，方法與方法間，推算最大泥砂啟動粒徑頗為接近，但斷面與斷面間，推算最大泥砂啟動粒徑空間變化頗大。

表 10. 中寮溪 8 個橫斷面，不同頻率年之洪峰流量與各種方法推算之最大泥砂啟動粒徑空間變化範圍

Table 10. Spatial variation ranges of maximum potential particle sizes of incipient motion with different estimated methods and peak flows for different recurrence years at eight cross sections of Chungliaoshi main stream

頻率年(y)	洪峰流量(cms)	Shields計算粒徑d(cm)	Mavis[2]計算粒徑d(cm)	Neill計算粒徑d(cm)	Yang計算粒徑d(cm)	4種方法[3]之平均粒徑d(cm)
1	41.4	18.9-98.2	17.2-80.4	15.1-112.0	18.2-85.1	17.3-93.9
2.33	49.5	20.8-105.6	19.4-88.6	17.2-124.1	20.6-93.8	19.5-103.0
5	60.1	23.0-114.3	22.3-98.5	19.9-138.9	23.6-104.2	22.2-114.0
10	70.1	24.9-121.6	24.8-107.1	22.2-151.8	26.2-113.3	24.5-123.4
20	81.4	26.9-129.2	27.5-116.1	24.9-165.5	29.1-122.9	27.1-133.4
25	85.4	27.6-131.8	28.4-119.2	25.8-170.1	30.1-126.1	28.0-136.8
50	98.8	29.7-139.8	31.5-129.0	28.7-185.1	33.3-136.5	30.8-147.6
100	114	32.0-148.1	34.8-139.4	31.9-201.0	36.8-147.6	33.9-159.0

(1) 表中各粒徑值為8個橫斷面的空間變化範圍。

(2) Mavis為Mavis & Laushey的縮寫。

(3) Ave 為 Shields, Mavis & Laushey , Neill, Yang 等 4 種方法的平均值

Ⅳ、結論

以4種現有不同河床質泥砂啟動推估式，推算中寮溪不同頻率年洪峰流量可能移動之最大泥砂粒徑空間變化。各斷面的泥砂啟動推估，Shields臨界推移力法、Mavis & Laushey溪床底部臨界流速法、Neill平均臨界流速法及Yang平均臨界流速法等4種推算最大泥砂啟動粒徑，頗為接近，方法間差異僅約-16.5%至26.5%間。但斷面與斷面間的泥砂啟動推估空間變化，相異達5-7倍。至於泥砂啟動粒徑的空間變化特性，主要受到溪床坡度與平均水深的影響，泥砂啟動粒徑與溪床坡度及平均水深成正比關係。

Shields、Mavis & Laushey、Neill、Yang等4種方法計算平均最大泥砂啟動粒徑，中寮溪森林集水區頻率年：1、2.33、5、10、20、25、50、100年；洪峰流量：

41.4 cms、49.5 cms、60.1 cms、70.1 cms、81.4 cms、85.4 cms、98.8 cms、114.0 cms；8個斷面最大泥砂啟動粒徑空間變化範圍：17.3-93.9 cm、19.5-103.0 cm、22.2-114.0 cm、24.5-123.4 cm、27.1-133.4 cm、28.0-136.8 cm、30.8-147.6 cm、33.9-159.0 cm。

Ⅴ、謝誌

本研究承行政院農業委員會 97 農科-7.3.1-森-G1 計畫經費提供，傅鶴翹、黃榮俊、王德華、邱之偉先生協助，謹此致謝。

Ⅵ、參考文獻

盧惠生、周玉奇、黃良鑫、林壯沛、林介龍（2004）扇平地區不同降雨延時之設計雨型歷線。坡地防災學報 3(1) : 39-58。

盧惠生、林壯沛、黃良鑫、林介龍（2006）應用設計雨型歷線推估中寮溪集水區暴雨流量歷線。坡地防災學報 5(1) : 1-14。

Chow, V. T. (1959) Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York. pp.109-113.

Graf, W. H. (1984) Hydraulics of sediment transport. Water Resources Publications, Book Crafters, Inc., Chelsea, Michigan. pp.83-122.

Mavis, F. T., and L. M. Laushey (1948) A reappraisal of the beginning of bed movement-competent velocity. Intern. Assoc. Res., 2d Meeting, Stockholm.

Neill, C. R. (1967) Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed-material. Intern. Assoc. Hydr. Res. 12th Congress, Fort Collins.

Ponce V. M. and R. H. Hawkins (1996) Runoff curve number: has it reached maturity? Journal of Hydrology Engineering 1(1):11-19.

Steenhuis T. S., M. Winchell, J. Rossing, J. A. Zollweg and M. F. Walter (1995) SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 121(3):234-38.

Vanoni, V. A. (1964) Measurements of critical shear stress. Calif. Inst. Tech., Rep. No. KH-R-7.

Vanoni, V. A. (1975) Sedimentation Engineering. ASCE Task Committee for the Preparation of the Manual on the Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division.

Yang, C. T. (1973) Incipient motion and sediment transport. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol.99, no. HY10, Proceedings Paper 10067, pp.1679-1704.

Yang, C. T. (1996) Sediment transport: theory and practices. McGraw-Hill, New York. pp.19-50.

2008 森林集水區經營研討會論文集:135-149

台東太麻里溪集水區降雨崩塌對河道淤砂之影響

許中立[1]　鍾斌全[2]　戴欣怡[3]

【摘要】台東太麻里溪集水區之中上游地區地質脆弱，受豪大雨影響易造成集水區內大量的邊坡崩塌發生，而崩塌之土砂受洪流挾帶堆積於河道下游底床，抬高溪床、縮小通水斷面致洪流溢岸，並改變主流流向沖擊凹岸堤防而使其基礎淘刷破壞，皆是肇使土地與房舍流失災害的原因。集水區邊坡崩塌的產砂量及河道淤砂量皆與降雨量有密切的關係，因此本文利用航測圖資、影像及實地測量資料，並修正過去常用的經驗公式，可有效推求降雨與崩塌地產砂量及河道淤砂量之關係。又根據分析結果本集水區年淤砂高度為 32 公分，約 9 萬立方公尺，這些數據可作為未來河川治理與管理方案決策之參考。

【關鍵詞】降雨、洪水、崩塌、輸砂量。

THE RAINFALL LANDSLIDE INFLUENCE ON STREAM SEDIMENT DEPOSITION IN TAITUNG TAIMALICI WATERSHED

Chung-li Hsu[1]　Pin-chuan Chung[2]　Shin-yi Dai[3]

【Abstract】 The weak and broken geology environment in the middle and upper stream of Taimalici watershed in Taitung County, caused many landslides accused and sediment transport with the stream flow deposit on the stream bed. The elevation of stream bed rose after the rainfall and landslide sediment deposit. Thus, shrinking the runoff section caused the problem of peak runoff overflow, will change mainstream flows to the impact concave shore embankment to send the foundation to wash and

1 屏東科技大學水土保持系副教授，通訊作者。電子郵件: clhsu@mail.npust.edu.tw
Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology. Corresponding Author. E-mail: clhsu@mail.npust.edu.tw
2 屏東科技大學森林系碩專生。
Graduate Student, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology.
3 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.

brush the destruction. The amount of landslides sediment transport and deposit on the stream bed was closely related to the rainfall. In this research, using photography image and field survey data can effectively estate the amount related equation of rainfall, landslides sediment and deposit. According to the analysis result, this watershed annual deposit high was 32cm and about 90000m^3 sediment deposit on stream bed, the watershed sediment produce still on the controllable range at present, so propose that adopting the treatment of built the control work to block all sediment can get the greatest benefit.

【Key words】Rainfall, Flood, Landslide, Sediment deposition.

I、前言

山坡地的洪水與泥砂災害防治一直是政府施政的重點工作之一，然而針對綜合降雨、崩塌（或地滑）、泥砂生產與河道淤積的討論確較少被提出。台灣位於副熱帶季風區，地處颱風路徑之要衝，降雨強度大、雨量多，年平均降雨量達 2500 ㎜，約為世界平均值的四倍，但在時間及空間分佈上卻極不均勻，約有 78% 降雨集中在每年的 4 至 10 月間。又台灣的集水區坡陡山高、河短流急、河寬窄小、地質脆弱，遭逢颱風豪雨常引發山洪暴發、水位暴漲淹沒河岸而釀災，對國計民生、公共建設與交通水利投資造成嚴重影響。

台東縣太麻里溪集水區之中上游地區地質軟弱，岩層構造以粉砂岩、硬頁岩與粘板岩為主，同時有溫泉滲流水的浸潤作用，造成坡度陡峻與岩層易破碎等特性，故山區河道容易發生山崩及地滑，並產生大量泥砂堆積溪谷河床情形，又若遭逢豪雨，鬆散的泥砂即隨河水急瀉而下，淤塞河道。如 2005 年 7 月 18 日海棠颱風之超大豪雨，造成集水區上游非常嚴重的山崩地滑，在下游左岸的金峰鄉嘉蘭社區附近由於地形的因素，流下的泥砂堆高河床，洪水直接攻擊溪岸沖毀堤防，進而引發共 16 間房舍、土地及相關公共設施流失之慘重災情，而降雨集中與洪水量大雖是造成災害的原因之一。為探究降雨、崩塌與河道淤砂的關係，本研究乃利用歷年航照及衛星影像圖資，判釋集水區內不同時間之崩塌面積數量，依崩塌形成之潛因與誘因加以研判分析。由於降雨量是引起山崩地滑的重要因素，故乃嘗試推求上游崩塌產砂量，年平均產砂量、下游研究河段淤砂量及年平均淤砂量，逕流量及土砂量是河川治理的主要對象，希有助於未來治理方案研擬之參考。

Ⅱ、材料與方法

（Ⅰ）試區概況（中興工程顧問股份有限公司，2006）

地理位置與地形：本試驗之集水區位於台東縣南側太麻里溪流域，行政區屬太麻里鄉、金峰鄉管轄，發源於中央山脈之北大武山附近，其海拔約 3091 公尺，主流沿山谷向東流，至金峰鄉嘉蘭村下匯合左支流庫拉濃溪之後，進入金峰鄉新富社區、正興社區，於台東縣太麻里鄉泰和村注入太平洋，地理位置如圖 1。太麻里溪發源於北大武山（EL 3091.9M），主流長度為 18.5 公里，集水面積 221.49 平方公里，平均坡度為 S=0.0192，屬陡坡河川。

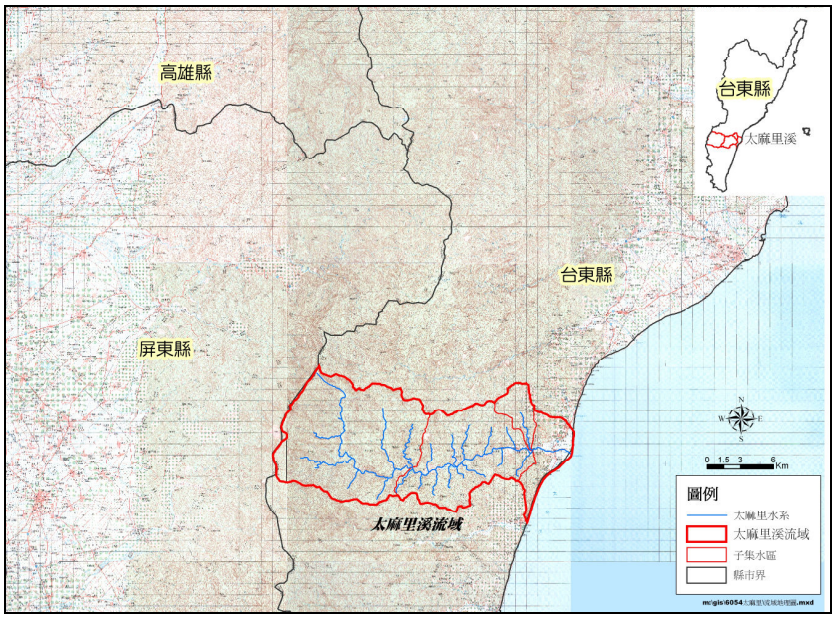


圖 1. 試驗地位置圖

Fig.1. Location of this experimental site

地質與土壤：本試驗地係位於中央山脈西翼地質區脊樑山脈亞區之東南段，脊樑山脈亞區又稱上衝板岩帶，上衝板岩帶由漸新世之畢祿山層及中新世之廬山層所組成，大部分為厚層第三紀海相泥質岩層。本區域地體構造複雜，然主要構造型式以褶皺為主及其所伴生之小規模之錯移為主，而地層卻甚為單調，主要由畢祿山層及廬山層所組成，其中有少部分大南澳片岩之出露。土壤分布除庫濃溪匯流口以下為沖積土及庫濃溪上游之金針山一帶有部分淺色崩積土外，主要是以石質土為主。崩積土主要分布於庫濃溪上游之金針山一帶，係由板岩風化而崩積化育形成灰色之崩積土，多呈角礫狀夾砂土，堆積疏鬆，透水性佳，而穩定性差。因一般多位於不安定之山坡地上，故土壤難有良好的發育，石礫含量較多，呈強

酸性反應。石質土主要分布在除庫濃溪匯流口以外之流域內，係由板岩經風化而形成淺層之石質土層，一般尚保有母岩特性，土色與母岩接近，部分並含有母岩之塊石，而部分地區母岩則直接裸露，土壤深度多小於 10 公分。

（II）調查分析區段（名碁工程顧問有限公司，2006）

本研究針對海棠颱風期間受創最為嚴重的金峰鄉嘉蘭村旁河段為研究區域，依台東縣政府 2007 年 1 月「太麻里溪整體規劃工作」內容，本區域位於河口上溯 4.7 公里為起點，為斷 14 至斷 18（拉灣橋下游至嘉蘭橋），長度約 1790 公尺，研究區域詳圖 2 所示。

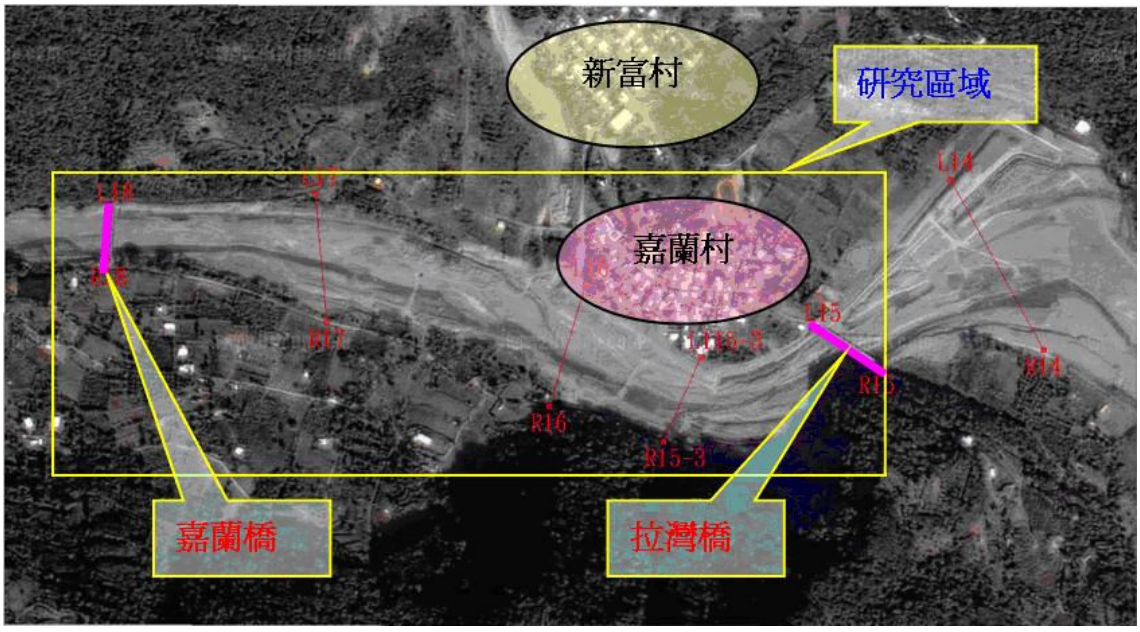


圖 2. 調查分析區段位置圖

Fig. 2. Location of investigation and analysis section

（Ⅲ）分析方法（林國峰、高士傑，2001；余濬，2004）

本研究針對 2005 年海棠颱風期間受創最嚴重的台東縣金峰鄉嘉蘭村旁河段為研究區域，利用實際的降雨資料統計分析探討崩塌地的發生、產砂以及對下游地區河床淤積所造成的影響。所使用之分析方法在集水區降雨量上係採徐昇式法，在暴雨頻率分析上係採常態分佈、二參數對數常態、皮爾遜三型分佈、對數皮爾遜三型與極端值一型分佈等方法比較選取，各重現期距之暴雨量及降雨分配型態係利用三角形單位歷線法、瞬時單位歷線法、頻率分析法及無因次單位歷線法等分別演算並比較之。

由於早期太麻里溪集水區崩塌地調查資料相當缺乏，故乃利用林務局農林航測所 2002～2003 年之 1/5000 航拍正射影像資料，以及 2005 年 5 月與 7 月（亦即造成此災害的海棠颱風前、後）之福衛二號衛星影像資料，分析太麻里溪崩塌地變化及產砂情形，並應用日本砂防學會所推出之打荻氏公式進行推算產砂量，同時再以實際河道測量淤積量的變化加以比較探討其合理性。

Ⅲ、結果與討論

（I）水文分析結果

本研究流域內既有雨量站為農委會林業試驗所的太麻里分所雨量站及中央氣象局的太麻里雨量站。雨量站概況如表 1 所示。為考量山區降雨與平地差異，擬增加上游鄰近之泰武（1）雨量站為水文分析基準站。在雨量站之降雨記錄中太麻里分所雨量站記錄年限為 1934～2002 年，其中 1988～1990 年無觀測資料。太麻里雨量站始於 1996 年至今。而泰武(1)雨量站自 1955 年起開始觀測，但其中 1976～1977 年無觀測資料。本研究之降雨量分析採 1955 年以後之雨量資料，各雨量站經徐昇氏法分析後所採用之權重及基本資料選用結果詳圖 3 所示。

表 1. 太麻里溪流域雨量站概況

Table 1. The rainfall investigation station conduction in Taimalici watershed

流域名稱	站名	經辦單位	站別	觀測期間		備註
				設站年	終止年	
林邊溪	泰武（1）	水利署	自記	1955	繼續	
太麻里溪	太麻里分所	農委會林試所	普通	1935	2002	
太麻里溪	太麻里	中央氣象局	自記	1996	繼續	

經篩選各雨量站 1955～2007 年間之資料，再扣除無觀測資料之觀測年份後，其頻率分析乃採用各年之最大一日暴雨量資料加以計算，結果如表 2 與表 3 所示。

表 2. 最大一日暴雨量統計成果表

Table 2. Greatest one day accumulated storm rainfall value statistic result

年度	泰武（1）	太麻里分所	暴雨量	日期	年度	泰武（1）	太麻里分所	暴雨量	日期	年度	泰武(1)	太麻里分所	暴雨量	日期
1955	399.2	24.0	170.3	8/28	1973	346.0	358.0	353.3	10/9	1991	436.0	101	231.7	7/19
1956	283.0	402.5	355.9	9/22	1974	272.5	315.2	298.6	10/17	1992	659.0	82	307.0	9/4
1957	632.0	450.0	521.0	9/13	1975	-	-	-	-	1993	283.0	6.7	114.5	5/27
1958	156.0	224.3	197.7	7/16	1976	-	-	-	-	1994	420.0	138	248.0	8/3

1959	382.2	68.0	190.5	8/30	1977	-	-	-	-	1995	474.0	108.2	250.9	8/30
1960	734.0	15.8	295.9	8/23	1978	437.5	10.5	177.0	8/1	1996	816.0	165.2	419.0	7/26
1961	400.0	260.0	314.6	7/13	1979	810.5	128.0	394.2	8/1	1997	262.0	30.5	120.8	9/5
1962	788.0	425.0	566.6	7/22	1980	170.0	106.0	131.0	9/17	1998	249.0	325	295.4	10/16
1963	453.5	64.6	216.3	7/16	1981	762.5	198.0	418.2	9/20	1999	482.0	14.2	196.6	6/6
1964	234.0	200.5	213.6	8/7	1982	824.0	207.7	448.1	7/29	2000	515.0	348.2	413.3	10/31
1965	208.0	224.0	217.8	6/18	1983	154.2	158.0	156.5	5/22	2001	219.0	332.5	288.2	9/26
1966	396.5	164.4	254.9	5/30	1984	230.8	112.3	158.5	6/23	2002	164.0	112.5	132.6	8/4
1967	304.5	111.7	186.9	10/17	1985	375.8	113.6	215.9	6/22	2003	496.0	84.5	261.4	6/7
1968	789.0	320.0	502.9	9/29	1986	72.3	181.5	138.9	5/17	2004	707.0	156.5	393.2	7/2
1969	596.5	90.0	287.5	7/27	1987	966.5	294.0	556.3	9/9	2005	1096.0	34	490.7	7/18
1970	140.5	187.0	168.9	10/15	1988	-	-	-	-	2006	785	117	404.2	7/14
1971	406.0	171.0	262.7	7/20	1989	740.1	12	296.0	9/12	2007	969	158	506.7	8/13
1972	564.0	96.2	278.6	6/12	1990	-	-	-	-					

表 3. 暴雨量統計成果表

Table 3. Storm rainfall value statistic result

分析方法	重現期距									備註
	1.11	2	5	10	20	25	50	100	S.E.	
常態分佈	150	285.0	387.5	441.1	485.4	498.3	535.2	568.4	27.25	
二參數對數常態	158	262.0	369.9	443.0	514.1	536.9	607.9	679.8	20.28	
皮爾遜三型分佈	145	267.4	378.5	447.6	510.7	530.1	588.6	644.8	17.41	
對數皮爾遜三型	153	261.2	374.3	451.4	526.7	550.8	626.2	702.6	18.05	
極端值一型分佈	139	265.9	385.6	464.9	540.9	565.0	639.3	713.0	15.99	採用值

註：資料年數 48；最大值 556.3；最小值 114.5；平均值 284.9；標準偏差 121.83；偏歪係數 0.72； 對數平均值 5.56；對數標準偏差 0.42；對數偏歪係數 -0.02

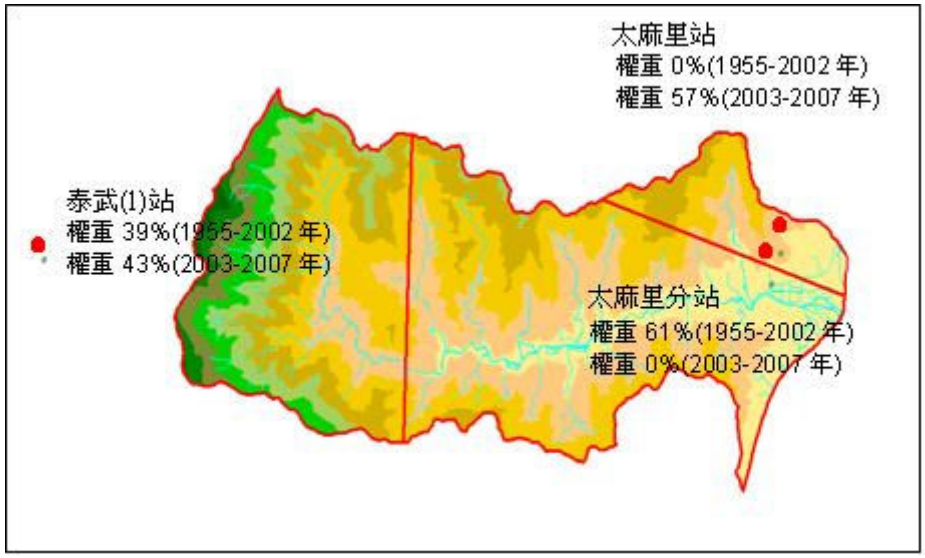


圖 3. 徐昇氏法計算之各雨量站權重值

Fig. 3. Weighting value of different rainfall investigation station by Thiessen polygons method calculation

又本研究降雨分配型態分析係採泰武（1）雨量站之時雨量記錄，以其數場暴雨之資料分析設計。經採連續降雨 24 小時較具代表性之數場暴雨，推求各時間雨量佔總暴雨量之百分比，再用同位序平均法將各位序百分數重新排列，求得一日降雨時間分配型態，其結果詳見表 4 與圖 4 所示。

表 4. 一日暴雨型態分析成果

Table 4. One day storm rainfall type analyze result

位	暴雨事件(mm)						平均百分	採用	暴雨型態	
序	溫妮	娜拉	傑魯得	象神	南瑪都	海棠	比%	位序	時序	分配率%
1	9.52	9.97	11.06	9.71	12.32	7.57	10.03	12	1	0.14
2	7.94	9.06	10.42	9.51	8.60	6.66	8.70	13	2	0.35
3	7.14	7.85	9.99	8.54	7.74	6.57	7.97	11	3	0.78
4	6.35	7.70	8.27	8.16	7.74	6.39	7.43	14	4	1.85
5	6.35	7.25	7.73	6.80	7.45	6.11	6.95	10	5	2.43
6	6.35	6.04	6.98	6.41	7.45	5.66	6.48	15	6	3.23
7	5.56	5.14	6.98	6.02	5.44	5.47	5.77	9	7	3.72
8	5.56	4.38	6.77	5.24	5.44	5.38	5.46	16	8	4.32
9	5.56	4.38	5.69	5.05	4.58	5.20	5.08	8	9	5.08
10	4.76	4.23	4.83	4.47	4.30	5.02	4.60	17	10	5.77
11	3.97	4.23	4.51	4.27	4.01	4.93	4.32	7	11	6.95
12	3.57	3.93	4.51	3.88	3.72	4.84	4.08	18	12	7.97
13	3.17	3.32	3.54	3.69	3.72	4.84	3.72	6	13	10.03
14	3.17	3.32	3.01	3.50	3.72	4.47	3.53	19	14	8.7
15	3.17	3.32	1.50	3.30	3.72	4.38	3.23	5	15	7.43
16	3.17	3.17	1.29	2.91	3.44	3.74	2.95	20	16	6.48
17	3.17	3.02	0.86	2.14	2.01	3.38	2.43	4	17	5.46
18	2.38	3.02	0.86	2.14	1.72	2.92	2.17	21	18	4.6
19	2.38	2.42	0.64	1.55	1.43	2.65	1.85	3	19	4.08
20	1.98	1.44	0.43	1.55	0.86	2.28	1.42	22	20	3.53
21	1.59	1.21	0.11	0.58	0.29	0.91	0.78	2	21	2.95
22	1.59	0.83	0.00	0.19	0.29	0.46	0.56	23	22	2.17
23	1.19	0.60	0.00	0.19	0.00	0.09	0.35	1	23	1.42
24	0.40	0.15	0.00	0.19	0.00	0.09	0.14	24	24	0.56

本研究河段位於嘉蘭橋至拉灣橋之間，故選擇流量控制站為嘉蘭橋，控制點之流域特性如表 5 所示。又利用金蘭水位流量站之流量資料以及各重現期距之暴雨量及降雨分配型態，利用三角形單位歷線法、瞬時單位歷線法、頻率分析法及無因次單位歷線法等分別演算並比較之，如表 6 所示。其中方法一為由三角形單位歷線法所推估之結果；方法二為由瞬時單位歷線法所推估之結果；方法三為由頻率分析法推估之結果；方法四為由無因次單位歷線法所推估之結果。

由表 6 四種方式推算洪峰流量成果顯示，各方法所演算出的洪峰流量以三角形單位歷線法≒無因次單位歷線法＞瞬時單位歷線法＞頻率分析法。而瞬時單位

歷線法結果較低其原因在於模式係數 N 值與 K 值的推估誤差所造成。又頻率分析法的結果較低其原因在於樣本個數不足，不易觀測到實際尖峰流量導致推估值的誤差。本研究計畫洪水量則採用三角形單位歷線法所推估之結果，洪水量擬採用 50 年重現期距之洪峰流量為 2817c.m.s。

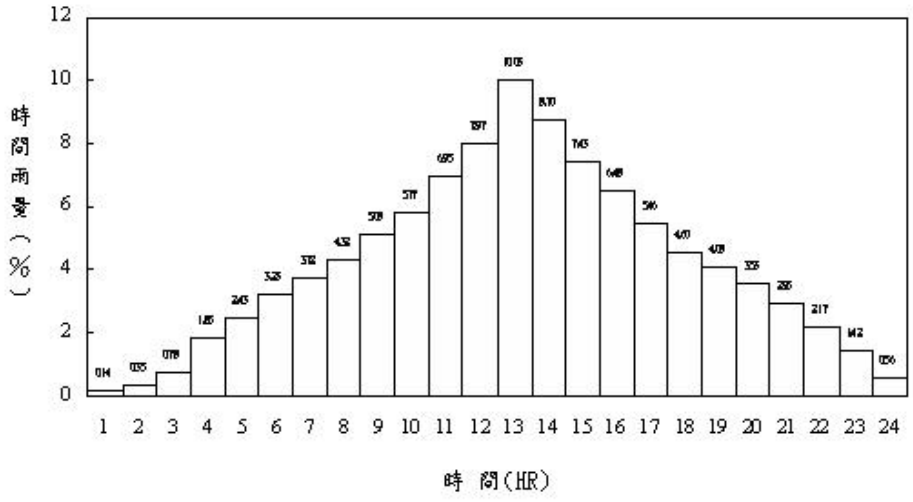


圖 4. 一日暴雨時間雨量分配計算結果

Fig. 4. One day storm time and rainfall distribution calculated result

表 5. 控制點之地文特性

Table 4. Geomorphy Characteristic of control stream section

控制點	集水面積 A(km^2)	流路長 L(km)	高差 H(m)	流下時間 Rziha 公式(hr)	流入時間(hr)	集流時間 Tc (hr)
嘉蘭橋	185.64	29.027	2,198	1.98	0.183	2.163

表 6. 控制點洪峰流量演算成果比較

Table 6. Storm flow calculation result compare in control stream section

重現期距 / 推估方法	2	10	25	50	100
方法一	1088	2008	2474	2817	3157
方法二	794	1492	1845	2105	2364
方法三	798	1143	1403	1638	1913
方法四	1082	1999	2462	2803	3143

註：控制點(嘉蘭橋)A=185.64KM^2。

（II）崩塌地資料分析（陳文福等，2004）

各不同時期的崩塌地分佈情形概述如下：2003 年，集水區總崩塌地數量計 171 筆，崩塌面積 236.9 公頃，崩塌土砂體積約 1303 萬立方公尺，其中崩塌面積較大之子集水區依次為麻利都部溪（黑河）、斗里斗里溪（大武事業區第 4、10 林班地）、太麻里溪上游（大武事業區第 5、6、7 林班地）、馬奴爾溪（白河），崩塌面積分別為 75.4、49.2、45.2、19.4 公頃，其崩塌比為 14.67 %、1.94 %、1.07 %、2.18 %。2005 年 5 月海棠颱風前的分析結果，集水區之總崩塌面積增為 417.8 公頃，崩塌土砂體積約 2298 萬立方公尺，其中崩塌面積較大之子集水區依次為太麻里溪上游（大武事業區第 5、6、7 林班地）、斗里斗里溪（大武事業區第 4、10 林班地）、麻利都部溪（黑河）、補拉米溪，崩塌面積分別為 109.7、86.3、85.4、28.9 公頃，崩塌比則為 2.58 %、3.40 %、16.63 %、9.43 %。2005 年 7 月海棠颱風後集水區之崩塌總面積則增大為 930.3 公頃，崩塌土砂體積約 5117 萬立方公尺，其中崩塌面積較大之子集水區仍依次為太麻里溪上游（大武事業區第 5、6、7 林班地）、斗里斗里溪（大武事業區第 4、10 林班地）、麻利都部溪（黑河，大武事業區第 2 林班地）、補拉米溪，崩塌面積分別為 368.2、172.9、91.0、59.5 公頃，崩塌比則為 8.67%、6.81 %、17.7 %、19.43 %。

鑑於崩塌地形成的因素非常複雜，必須綜合考量區域的地形、地質、水文、人為活動等特性，並可將崩塌地的形成原因歸納成「潛因」與「誘因」兩部分。其中「潛因」泛指山坡本身的內在因數，包括：地形因數（坡度、地表沖蝕程度等）、地質因數（岩質軟硬度、坡面地質構造、土壤厚度等）而言，至於「誘因」則指的是引發崩塌的營力，包括降雨、地震、人為土地利用等因數。而就同一集水區而言，「潛因」之中除地震的影響外其餘應較不致於有太大的變化，而剩下之「誘因」中最常被提出的即為降雨影響因素。分析降雨與崩塌地的關係可從降雨強度與年降雨量兩者著眼，其中降雨強度愈大其降雨動能愈大，地表沖蝕能量愈大。參考 Zaruba（1986）所著 Landslides and Their Control 一書以及以往山地農牧局崩塌地調查文獻資料，本研究將年降雨量與崩塌地發生區位進行套疊，比較年降雨量區間與崩塌發生之關係，發現太麻里溪流域之崩塌地多發生於年降雨量 3000 mm 以上區位，如圖 5 所示。又廬山層之地區於年雨量 2500 mm 以上即有崩塌發生，而畢祿山層地區則要到年雨量 3200 mm 以上才開始有崩塌地發生。

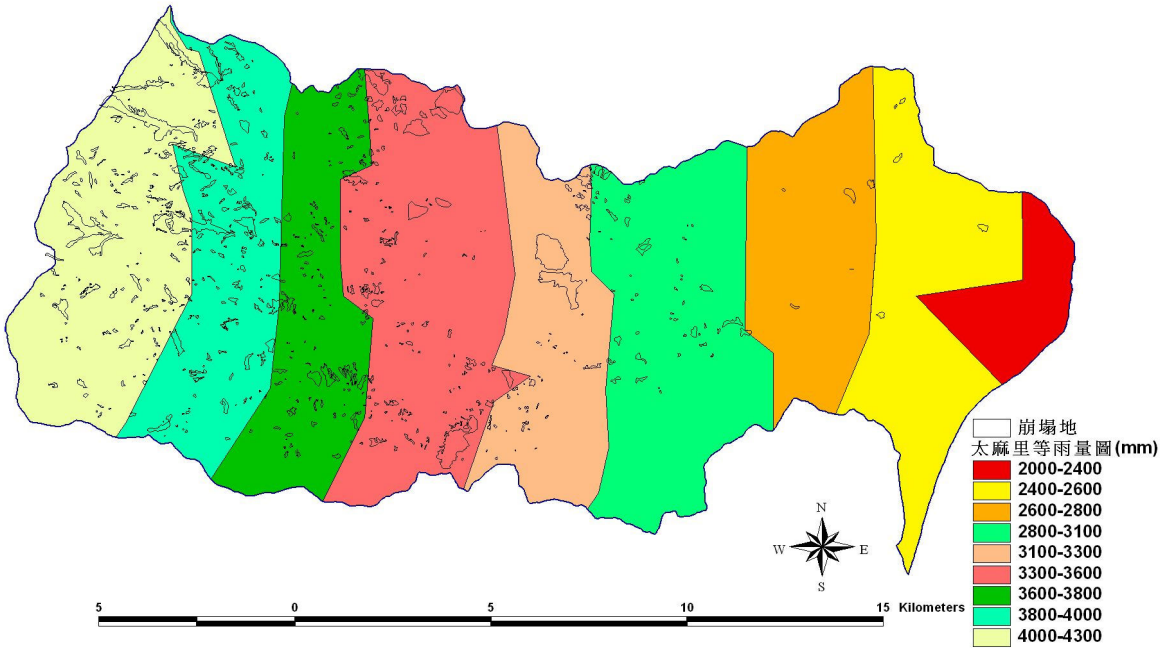


圖 5. 等雨量線與崩塌地位置圖

Fig. 5. Rainfall contour and landslide position

綜合分析地震為崩塌的外在觸發因素之一，地震誘發之崩塌多在山脊區位，其主因乃地震水平加速度隨高度呈比例漸增，根據相關學者研究可知地震規模 5.5 可作誘發崩塌的指標。而台東太麻里流域近十年來並無發生大於地震規模 5.5 之地震，以及集水區崩塌地之區位多集中在山腹區位，故可研判太麻里溪集水區之降雨為構成崩塌之主因。而地形上太麻里溪集水區崩塌發生區位以五級坡與六級坡之林班地為主，佔整體崩埋面積之 90 %以上。在地質上太麻里溪集水區崩塌發生區位為全面性的，其主要位於畢祿山層與廬山層之變質岩區。在降雨上由年降雨量與崩塌地之套疊可知，年降雨量大於 3000 mm 之地區，發生崩塌的比例最高。而近年來豪大雨量，確是造成太麻里溪上游崩塌地產生之最明顯效應。

降雨既然為誘發崩塌最主要因素，依日本學者田中茂（1975）對崩塌地調查分析結果，認為 48 小時累積雨量超過 250 mm 以上，或大於 30 mm/hr 延時達一定時間以上，即有可能誘發重大土砂災害的條件。據此本研究分析 1998～2005 年間符合前述降雨條件之暴雨資料，詳如表 7 所示。

又由 2003 年農林航測所航拍正射影像分析，崩塌地上約 50%之崩塌地植生不良，推估崩塌地應在五年內發生之行為，而 1998～2005 年間符合誘發崩塌之暴雨

僅有 2000 年 10 月 31 日之象神颱風，其日雨量為 515 mm。而 2005 年 5 月前之崩塌情形推測係由於 2004 年 7 月 2 日之豪雨所造成，其日雨量為 707 mm。至 2005 年海棠颱風期間其日雨量為 1096 mm，方造成大量的崩塌泥砂下移災害。分析之暴雨資料及誘發崩塌地關係如圖 6 所示。

表 7. 誘發崩塌可能降雨資料

Table 7. Precipitation data of bring out probably landslide

日期	颱風名稱	降雨 20mm/hr 以上最長連續小時	降雨 30mm/hr 以上最長連續小時	降雨 40mm/hr 以上最長連續小時	降雨 50mm/hr 以上最長連續小時	降雨 24 小時最大累積雨量	降雨 48 小時最大累積雨量	採用值
1998/10/15	瑞伯	6	5	1	0	249.0	628.5	
1999/06/06	瑪姬	8	7	4	1	482.0	601.5	
2000/10/31	象神	7	2	2	2	515.0	652.0	◎
2001/09/26	利奇馬	3	0	0	0	219.0	524.5	
2002/08/04	暴雨	1	0	0	0	164.0	201.5	
2003/08/04	莫拉克	8	7	3	3	496.0	590.5	
2004/13/03	暴雨	4	1	1	0	707.0	883.5	◎
2005/07/18	海棠	18	10	1	1	1096.0	1159.0	◎

註：”◎”號者為採用值。

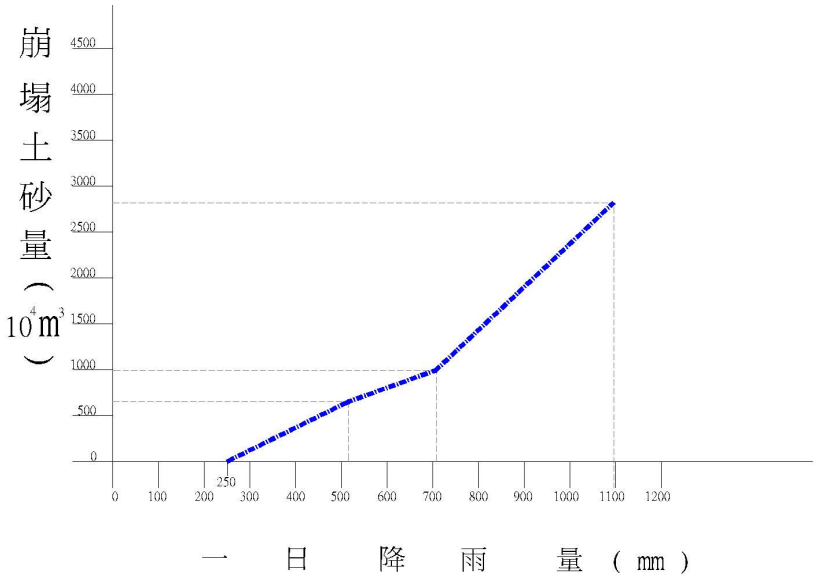


圖 6. 一日降雨與崩塌土砂關係

Fig.6. Relationship between one day rainfall and landslide sediment yield.

（Ⅲ）集水區產砂分析

針對太麻里溪集水區崩塌地產砂量之推估，依 2006 年 10 月農委會水土保持局「台東縣太麻里溪全流域整體治理調查規劃」報告書內容，引用目前日本砂防學會在集水區治理規劃方面對於暴雨造成之新增崩塌面積計算方法，採用打荻氏公式進行估算，其經驗公式如下：

$$Y = Ca/a = K\times10^{-6}\times(R-r)^2$$

其中 Y 為新增崩塌率、Ca 為新增崩塌面積、a 為集水區面積、K 為係數、R 為累積雨量、r 為發生崩塌臨界雨量。於報告書中參酌歷年颱風致災雨量而訂出太麻里溪集水區之發生崩塌臨界雨量 r 為 250 mm，並求得太麻里溪集水區的打荻氏公式如下所示：

$$Y = -0.00003424+4\times10^{-7}\times(R-250)^2$$

由「一日暴雨量推估崩塌地產砂量」與「打荻式公式推估之頻率年崩塌地產砂量」所得之推估差異頗大，分析可能的原因為：(1)在「一日暴雨量與崩塌地產砂量」中是以調查期間內最大之一日暴雨為全部崩塌主因，忽略其他期間降雨之影響。(2)在「打荻氏公式推估之頻率年崩塌地產砂量」中之頻率年雨量分配係採用徐昇式法，其中代表泰武（一）之山區雨量權重偏低，未能反應真實降雨量。(3)崩塌地之崩積厚度採 5.5 公尺估算較現場勘查結果為小，推估產砂量值偏低。綜上所述乃建議修正該地區之上游崩塌地產砂量降雨量之關係，乃利用線性迴歸修正線型，推求崩塌地產砂量與降雨量的關係，經驗公式如下：

$$Go = Ao*5.5 = 6.10813\times10^{4}\times(R-250)$$

式中：Go 為崩塌地產砂量（m^3）、R 為一日降雨量（mm）、Ao 為崩塌面積（m^2）。修正後之經驗公式可用於每場暴雨後崩塌地面積及產砂量之推估，若依「水土保持技術規範」規定，採 50 年洪水頻率為河川治理依據，其對應之產砂量為 2377.9 萬立方公尺，崩塌地面積為 432.35 公頃。而依不同期距之新增崩塌面積與產砂量，

可按降雨發生之大小加權推估集水區平均每年新增崩塌面積約為 76.34 公頃，而年平均崩塌產砂量約為 419.81 萬立方公尺。詳表 8 所示。

表 8. 年降雨量與崩塌產砂量關係

Table 9. Relationship between annual rainfall and landslide sediment yield

重現期距	概率加權	修正後產砂量 (10^4m3)	分配後產砂量 (10^4m3)	修正後崩塌面積(ha)	分配後崩塌面積(ha)
1.11	0.3	0	0	0	0
2	0.35	9.71	3.40	1.76	0.62
5	0.2	828.3	165.66	150.6	30.12
10	0.075	1312.6	98.45	238.65	17.90
20	0.0375	1776.9	66.63	323.07	12.12
25	0.015	1924.1	28.86	349.84	5.25
50	0.015	2377.9	35.67	432.35	6.49
100	0.0075	2818.9	21.14	512.53	3.84
			419.81		76.34

（Ⅳ）河道土砂測量推估

本研究依據所蒐集之歷年相片基本圖、航空照片、衛星照片及本河段（量測範圍由斷面 1 之河口至斷面 11 之庫濃溪匯流口）測量成果加以分析，可知歷年研究河段之河道坡降變化由 1980 年約 1/105 演變緩為 2007 年約 1/86，河段坡降逐漸變陡、河床抬高，如表 9 所示。

表 9. 歷年河道沖淤高度變化

Table 10. Wash and deposit high change in the stream over the years

斷面編號	河道河心距	河床平均高程(m)					平均河床高程差(m)				備註
		2007 年 (A)	2006 年 (B)	2004 年 (C)	2000 年 (D)	1980 年 (E)	A-B	B-C	C-D	D-E	
14	4709	62.05	61.66	59.57	59.60	59.00	0.39	2.09	-0.03	0.60	
15-1	5017	65.65	66.39	62.66	62.00	61.80	-0.74	3.73	0.66	0.20	拉灣橋
15-3	5358	69.88	71.00	66.52	65.80	65.00	-1.12	4.48	0.72	0.80	
16	5604	73.52	73.71	69.30	68.00	66.50	-0.19	4.41	1.30	1.50	
17	6013	76.95	78.87	73.83	72.00	70.00	-1.92	5.04	1.83	2.00	
18-1	6501	82.21	82.08	78.82	77.20	76.00	0.13	3.26	1.62	1.20	嘉蘭橋

由各時期河道縱斷面及現地勘查研判，因太麻里溪河道少有人為開發活動影響，故主要的改變係為自然災害造成。而自 1980 年迄今，中上游河道及邊坡地形地貌改變甚鉅，顯示本集水區之崩塌頻仍。依據太麻里溪河道沖淤高度估算各斷面間河道累積沖淤量詳表 10 所示。本河段 2006 至 2007 年日沖刷 21.1 萬立方公尺，惟台東縣政府辦理「海棠颱風」災後復建工程及河道疏浚工程，挖除土方量逾 20 萬立方公尺以上與此土砂量約略相符，故沖淤量無法判斷。2004 至 2006 年淤積 113 萬立方公尺，平均淤積高度 4.07 公尺；2000 至 2004 年淤積 31.3 萬立方公尺，平均淤積高度 1.13 公尺；2000 至 2007 年淤積 123.2 萬立方公尺，平均淤積高度 4.44 公尺。1980 至 2000 年因無詳細河川斷面資料，僅就航測圖標示高程判釋此河段之沖淤並不明顯，淤積量為 32.1 萬立方公尺，平均淤積高度 1.16 公尺。河道淤砂主要係源於集水區上游崩塌地之產砂，經由河水遞移運送至河道內，由表 11 可知河道淤砂量與崩塌地產砂量成正比，而降雨量逾大，泥砂的下移量也逾大。（游繁結等，1999；蔡長泰、蔡智恆，2001）

表 10. 累計沖淤量及平均高度變化

Table 11. Accumulate wash and deposit amount and high change

計算年期	2006-2007	2004-2006	2000-2004	1980-2000
沖淤量(10^4m^3)	-21.1	113	31.3	32.1
平均沖淤高度(m)	-0.76	4.07	1.13	1.16

表 11. 降雨量與產砂移動率關係

Table 12. Relationship between rainfall amount and sediment movement ratio

年份	最大一日代表降雨量(mm)	崩塌地產砂量(10^4m^3)	河道淤砂量(10^4m^3)	產砂移動率(%)	備註
2003	515	16.05	651.38	2.46%	
2004	707	31.3	995.05	3.15%	
2005	1096	113	2818.93	4.01%	海棠颱風

由於河道淤砂量隨降雨量增大而增加，假設其河床淤砂之啟動條件與上游崩塌地產砂量的條件相同，而降雨量大於 250 mm 以上時可產生大量的土砂下移，故可建立一修正河道淤砂量與降雨量的公式如下：

$$So=0.1221626\times10^4\times(R-250)$$

式中：*So* 為河道淤砂量（m^3）、*R* 為一日降雨量（mm）。另依各頻率年之降雨量計算河道淤砂量，再按降雨發生之加權概率推估，可求得本河段年平均淤砂量為 8.9 萬立方公尺，河段平均淤高 32 公分。

IV、結論

1. 太麻里集水區受地形、地質及降雨影響經長會發生崩塌與大量土砂流出現象，其中又以降雨為崩塌的主因。
2. 徐昇式法分配降雨權重係採用距離加權，忽略山區地形條件之降雨特性，致雨量值有偏低之可能。
3. 本研究修正打荻氏公式，求得降雨與崩塌地產砂量之經驗公式，估算全流域年平均新增崩塌面積約為 76.34 公頃，年平均崩塌生產量約為 419.81 萬立方公尺。
4. 依據降雨量及河道淤積量可推求不同降雨量之淤砂量之之經驗公式，並估算河段內全年淤砂量為 8.9 萬立方公尺，平均淤高約 32 公分，可作為未來治理工程之參考。

V、參考文獻

中興工程顧問股份有限公司（2006）台東太麻里溪全流域整體治理調查規劃。行政院農業委員會水土保持局第五工程所委託計畫報告。

名碁工程顧問有限公司（2006）太麻里溪整體規劃工作。台東縣政府委託計畫報告。

林國峰、高士傑（2001）台灣地區區域性設計雨型之建立。第十二屆水利工程研討會論文集。C180-D187 頁。

余濬（2004）降雨強度之推算。科技圖書。

陳文福、王俊哲、蔡喬文（2004）九二一集集大地震前後集水區泥砂量推估之探討─以濁水溪之支流清水溪為例。2004 農業工程研討會論文集。132-133 頁。

游繁結、周天穎、葉昭憲、賴如慧（1999）集水區整治率評估模式之探討。中華水土保持學報 30(2) : 137-147。

蔡長泰、蔡智恆（2001）洪水河床演變之模擬。第十二屆水利工程研討會論文集。D209-D216 頁。

2008 森林集水區經營研討會論文集:151-177

水庫集水區植生緩衝帶配置區位及效益評估之研究

林昭遠[1]　賴威任[2]　莊智瑋[3]

【摘要】水庫為各類用水之重要來源之一，根據水庫管理局資料顯示，台灣多數水庫優養化及淤積問題極為嚴重，導致蓄水量不足或水質不佳，如何有效解決水庫淤砂及優養化問題，為目前水庫集水區經營管理之重大課題。本研究以分布於泥岩區位之阿公店水庫集水區，利用倒傳遞類神經網路進行影像判釋，量化分析水庫優養化狀況，並以 DEM 資料萃取集水區植生緩衝帶之最佳配置區位，另搭配農業非點源污染模式（AGNPS）進行配置效益模擬，探討緩衝帶配置對阿公店水庫之水質改善效益。依流向計算兩相鄰網格之坡度差值大於 20%以上之區位配置植生緩衝帶，並以皮爾遜 10 年暴雨頻率年日降雨量 374.57mm 進行模擬，模擬結果顯示，在土地利用以農業為主之 1 號集水區內，以總氮、總磷濃度之減量分別為 4.53%與 4.04%為最高，其單位配置面積之減量率每公頃 0.16%與 0.14%，惟集水區之逕流與泥砂減量率並不明顯。土地利用以泥岩裸地為主之 2 號集水區，以泥砂之減量率為 10.89%最高，其單位配置面積之減量率每公頃達 0.26%；而總氮之減量率約為 6.94%，總磷之減量率約為 5.96%，其單位配置面積減量率每公頃分別為 0.17%、0.14%，緩衝帶配置對 2 號集水區逕流量之改善率亦不明顯。

【關鍵詞】植生緩衝帶、水庫優養化、農業非點源污染模式。

A STUDY OF PLACEMENT AND BENEFITS OF VEGETATED BUFFER STRIPS IN A RESERVOIR WATERSHED

[1]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
Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C. Corresponding Author. E-mail: cylin@water.nchu.edu.tw
2國立中興大學水土保持學系研究生。
Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University.
3國立中興大學水土保持學系博士生。
Ph.D student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University.

Chao-Yuan Lin[1] Wei-Jen Lai[2] Chin-Wei Chuang[3]

【**Abstract**】Water resources operated by the reservoirs are key sources for a variety of water utilization. According to data published from reservoir administration, most of reservoirs in Taiwan have suffered serious eutrophication and/or sedimentation, which led to shortage of water storage and worse water quality. Hence, how to solve the problems has become an important task in reservoir management. In this study, A-kung-ten reservoir watershed located at the mud-stone area was chosen as the research site for exploring the placement and benefits of vegetated buffer strips (VBSs), and with the process of image interpretation using back propagation Neural Network to classify the watershed land use for quantifying the reservoir’s trophic status, the places where gradient difference greater than 20% calculated with receive drainage cells were designed for the placement of VBSs, finally the scenario’s benefits were fully discussed by using daily precipitation with the occurrence of 10-year period simulated in AGNPS. Results show that there is a principal decreases in both the concentration of total nitrogen (4.53%) and total phosphorus (4.04%), some 0.16% and 0.14% decreasing rate for placement efficient of VBSs per unit hectare, respectively; however, there is no significant difference in runoff and sediment yield at No1 watershed which having a dominant land use in agriculture. No2 watershed with plenty of mud-stone bare land shows that there is a major decrease in sediment yield (10.89%), about 0.26% decreasing rate for placement efficient of VBSs per unit hectare. The decreasing rates in total nitrogen and total phosphorus are 6.94% and 5.96%, and the decreasing rates for placement efficient of VBSs per unit hectare are 0.17% and 0.14%, respectively; also with no significant difference in runoff for the scenario of VBSs placement.

【**Key words**】Vegetated buffer strips, Reservoir eutrophication, AGNPS.

I、前言

台灣地形山高峻陡，雖年平均降雨量高達 2500 公釐，但因受地形關係，可供使用之水資源有限，因此需構築水庫貯留水資源供飲用水、農業灌溉、工業用水等使用。目前台灣本島共有 20 座主要供水水庫，離島地區則有 23 座水庫，因受

水庫上游常有點源、非點源污染及豪雨所造成之崩塌，導致水庫優養化與泥砂淤積等問題頻傳，現今本島主要供水水庫，約有一半以上具有優養化及淤砂問題，其中更超過半數以上之水庫，優養化狀態長達半年，而離島之 23 座水庫更幾乎全年皆為優養化狀態，顯示水庫之優養化問題已不容忽視，因此，如何有效快速解決這些問題，乃是目前水庫集水區治理當務之急。

阿公店水庫集水區主要分布於泥岩層，泥岩地質年輕，岩石膠結不良，表層遇水易軟化、崩解，且乾燥時堅硬如石，並極易龜裂崩落，再加上泥岩地質土層淺薄，使得泥岩邊坡不利植物生長，易成寸草不生之荒地，加上區內農事耕作，表土殘留營養鹽類因入滲不易，每逢暴雨易將泥砂及營養鹽類沖入河道，導致水庫嚴重淤積及優養化。

植生緩衝帶係指位於潛在污染源與地表水體間之人工栽植或天然植被。其具有緩衝污染物、安定河岸等多項功能，且對於河川之生態保育助益良多，不僅能有效控制非點源污染，增加水資源之使用，更可攔阻及過濾泥砂，減緩漫地流，使泥砂、養分及殺蟲劑與逕流分離，降低水處理成本，加強景觀保存及生態價值，改善野生動物棲息地，增進生物歧異度及娛樂價值等，而如何建置植生緩衝帶最佳配置區位並量化評估其配置效益，為本研究之重點。

II、材料與方法

（I）試區概述

阿公店水庫集水區位於高雄境內，集水區跨越燕巢鄉、田寮鄉及岡山鎮，面積約 31 平方公里，東臨烏山西接小崗山，南是崎嶇之山脈，北以大岡山為界(圖 1)。水庫之蓄水量約為 20.5 百萬立方公尺，民國 92 年未進行整治工程前，淤砂量最高可達百分之七十，水庫蓄水量頓時剩為為 5.95 百萬立方公尺，淤砂量居全台水庫之冠。阿公店水庫優養化嚴重，造成溶氧量甚低、藻類與布袋蓮大量繁殖、水庫淤積嚴重，亦是全國第一座因為優養化宣告死亡而停擺的水庫。民國 88 年開始進行整治工程，除進行大規模庫底疏濬外，並興建越域引水路引旗山溪水以擴大水庫給水量及實施集水區養豬廢養，於民國 94 年 10 月完工。完工後之阿公店水庫，淤積及優養化現象雖可改善，惟長遠之計，水庫上游集水區農業非點源污

染之防制方可達永續經營的目的。

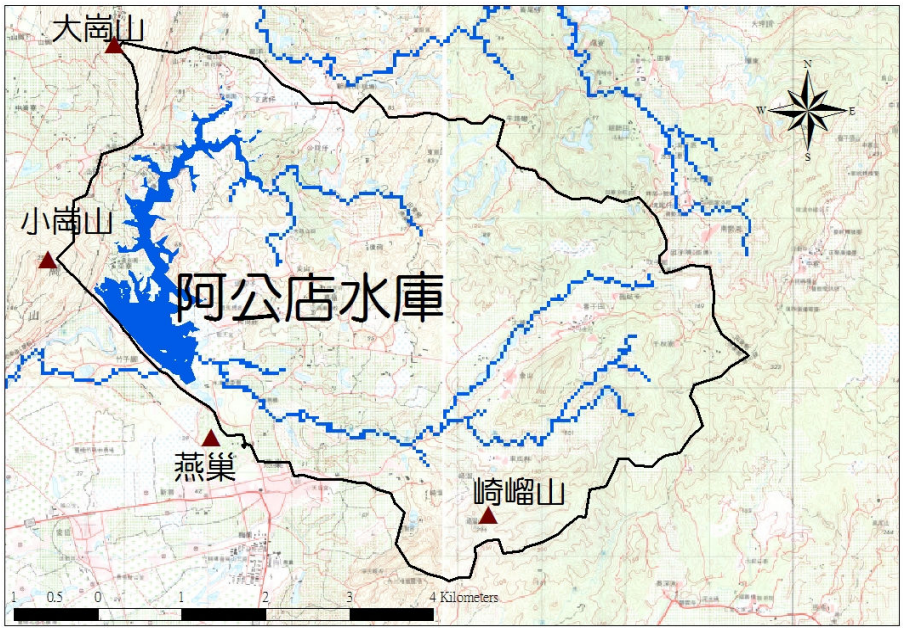


圖 1. 研究試區

Fig. 1. Site of the study area

（II）材料

1、數值高程模型(DEM)

採用農航所測製之 40 公尺 X 40 公尺之數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM）進行地形分析、集水區劃分、水系網萃取及緩衝帶最佳配置區位劃定。

2、土壤及土地利用圖資

採用台灣省農林廳山地農牧局編印之土壤圖及水土保持局 90 年所建立之土地利用圖資萃取試區內土壤及土地利用等資料供 AGNPS 模式參數建置之用（圖 2 及圖 3）。

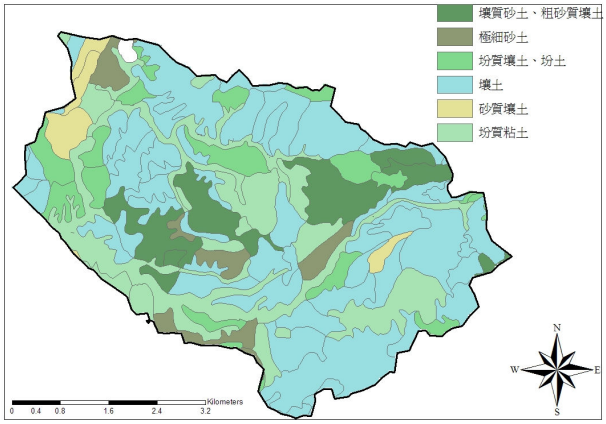


圖 2. 土壤圖

Fig. 2. Soil distribution of study area

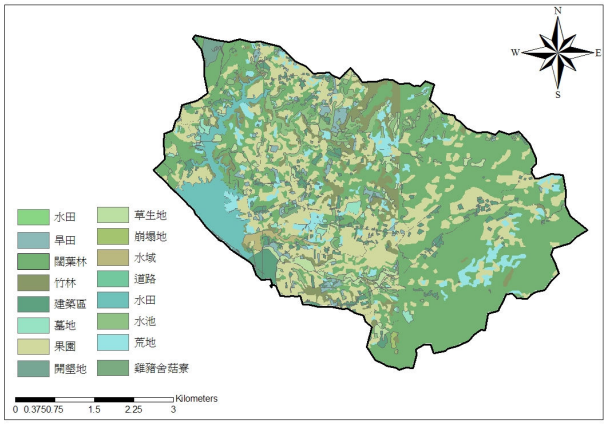


圖 3. 土地利用圖

Fig. 3. Land use of study area

3、 衛星影像

採用民國 90 年 1 月 8 日之 SPOT 衛星影像進行影像判釋，分為水域、裸地、植生與水域植生等四類，以瞭解阿公店水庫內土地利用分類之空間分布，進行子集水區劃定，供 AGNPS 模式模擬；另由水域植生面積佔水庫水域面積之比例，藉以量化分析水庫優養狀況。

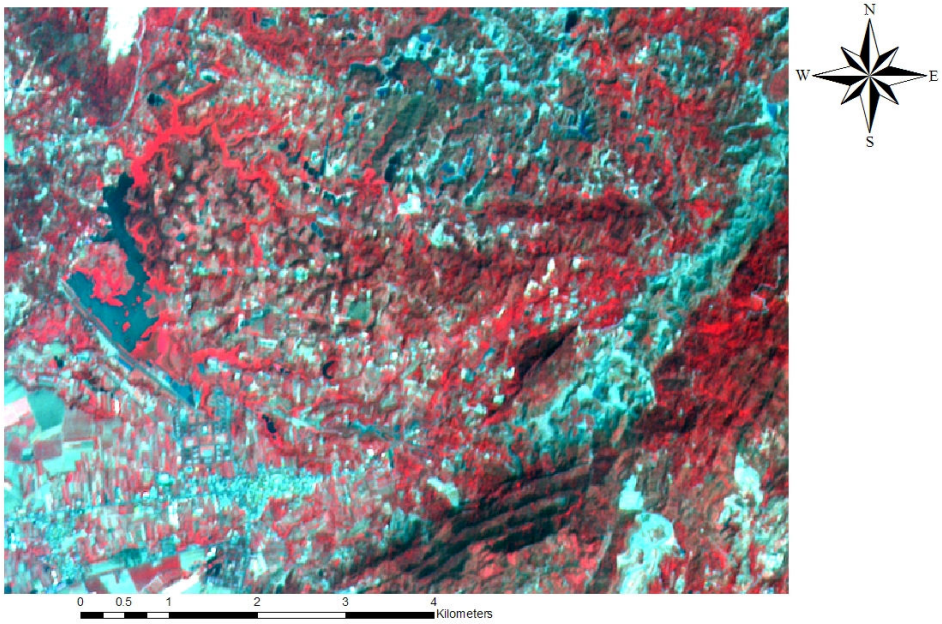


圖 4. 衛星影像

Fig. 4. SPOT image of study area

（III）研究流程

利用衛星影像進行影像判釋，瞭解水庫集水區土地利用狀況及量化分析水庫水質優養情形；並以 DEM 資料進行集水區緩衝帶最佳配置區位優選，最後以 AGNPS 模式進行緩衝帶配置模擬，探討植生緩衝帶配置前後對水庫水質優養及泥砂減量之改善效益。研究流程如圖 5 所示。

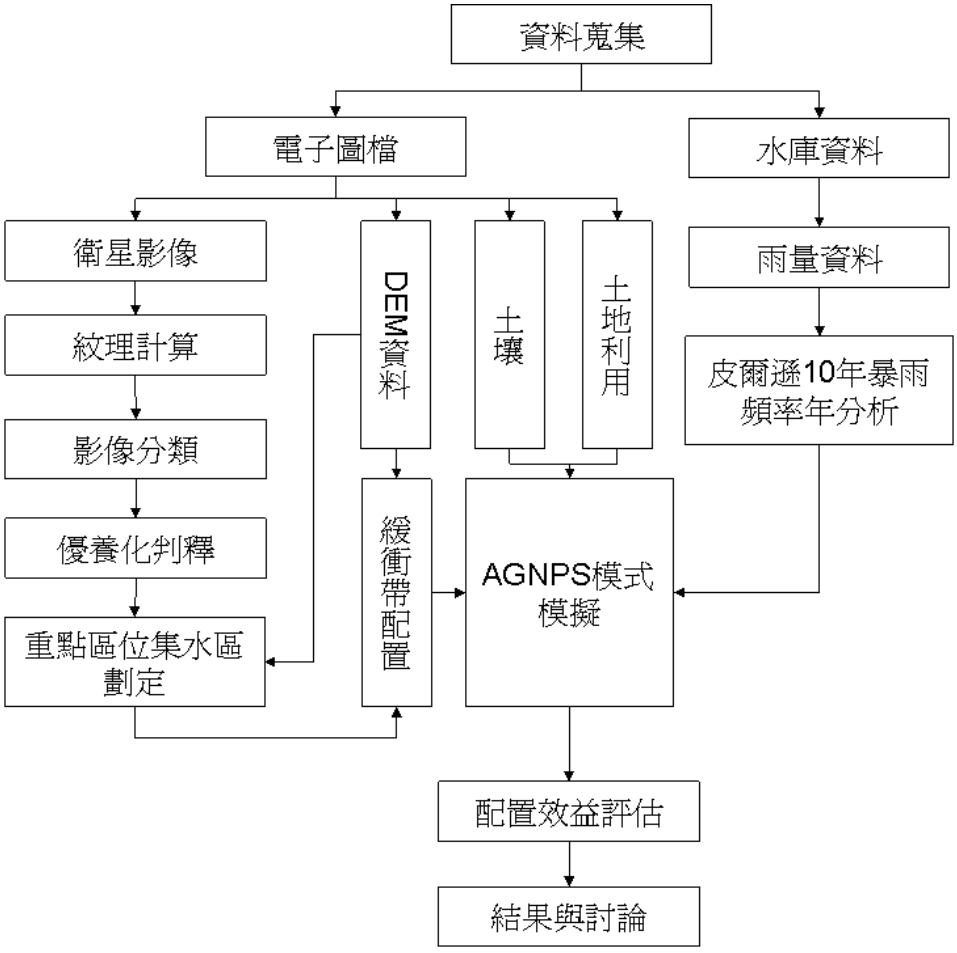


圖 5. 研究流程圖

Fig. 5. Flow chart of the study

（IV）研究方法

1、倒傳遞類神經網路（Back Propagation Neural Network, BPNN）

類神經網路最早於 1974 年由 P.Werbos 之論文中所提出，而在 1986 年 D.Rumelhart、G.E.Hinton 等推廣後才廣為人知，之後便廣泛應用於各實務面上。由於類神經網路可用來解決複雜或是難以使用數學方式完整模式化之相關問題，常用於影像判釋上。

倒傳遞類神經網路架構分為三層（圖 6），分別為輸入層（input layer）、隱藏層（hidden layer）、輸出層（output layer）。其中輸入層用以表示網路的輸入變數，數量可依問題而定。隱藏層用以表現輸入處理單元間之交互影響，其處理單元數並無標準方法可以決定，一般以問題之複雜性來加以決定，若問題複雜性不高，

通常以一層進行分析，而輸出層係用來表現網路之輸出變數及其個數。其運作流程如下。

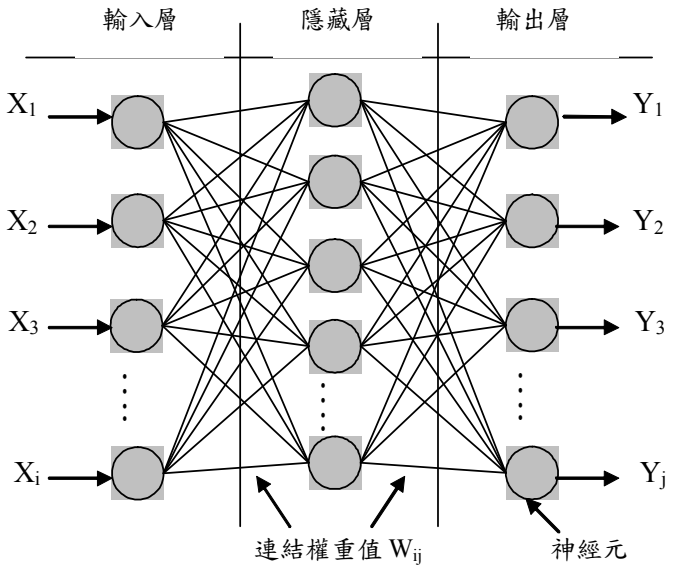


圖 6. 倒傳遞類神經網路架構

Fig. 6. Frame diagram of back propagation networks

（1）、學習階段：

a.計算輸出變數

$$\text{net} = \sum \text{W} * \text{X} - \theta ,$$

$$Y = f(net) = \frac{1}{1+\exp^{-net}},$$

式中，W 是各節點間權重值，X 是輸入值，θ 是閥值，net 是淨值，f 是轉換函數，Y 是輸出值。

b.誤差函數值

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{k}(T_k - Y_k)^2$$

式中，E 為誤差函數值，T 是第 k 個神經元目標值，Y 為第 k 個神經元之網路輸出值。

c.計算權重值修正量

$$W^{n+1} = W^n + \alpha * \Delta W ,$$

$$\theta^{n+1} = \theta^n + \alpha * \Delta \theta ,$$

式中，W 是網路權重值，α 是學習數率，θ 是閥值，n 是網路層數目。

d.重複步驟 a～c 直到符合下列之一項條件。

（a）誤差函數值 E 收斂。

（b）達到設定目標值。

（c）重複執行直至學習循環到達一定次數。

（2）、回想階段：

a.輸入全區資料，

b.計算並輸出各點回想值。

2、緩衝帶配置區位之萃取

集水區潛在植生復育愈困難之處，雖是需加強保育之地區，但並非一定是植生復育之理想配置區位。由於泥岩地區植生復育處理初期之養護工作極為重要，位於農地或交通方便等易於管理維護之處方可養護；而位於交通不便之山區或陡坡崩塌地的處理一般是無法給予養護。植生復育極端困難且無法養護之地區，不可逆勢而為，否則將事倍功半，徒勞傷財終將失敗。因此集水區植生復育最佳配置地點之篩選為泥岩地區植生復育的必要工作，所謂植生復育最佳配置地點係針對集水區之地形做一全面性之探討與分析，找出合理可行之植生復育配置區位供植生復育規劃之用。陡坡泥岩裸地之植生方法可採用圍堵策略，雖然坡面愈陡植物不易入侵生長，但是陡坡面之承雨面積較小，除了迎風面外，土壤受打擊沖失之機率也小，此時可在裸露坡面之坡腳平緩處配置植生緩衝帶，將坡面沖蝕下來的泥砂阻攔於坡腳(圖 7)，避免沖刷泥砂危及中、下 游河道及水庫，所以陡坡面坡度劇烈變化點即為植生復育之最佳配置地點，可藉由地形分析予以標定(圖 8)。坡度差係指於相同坡面上，依流向計算兩相鄰網格之坡度差值，差值愈大係表示陡坡面有較緩之位置供植生復育之用，為陡坡地植生復育之最佳配置區(圖 9)。



圖 7. 泥岩邊坡緩衝帶配置圖

Fig. 7. Suitable sites (base of steep slopeland) for the placement of VBSs

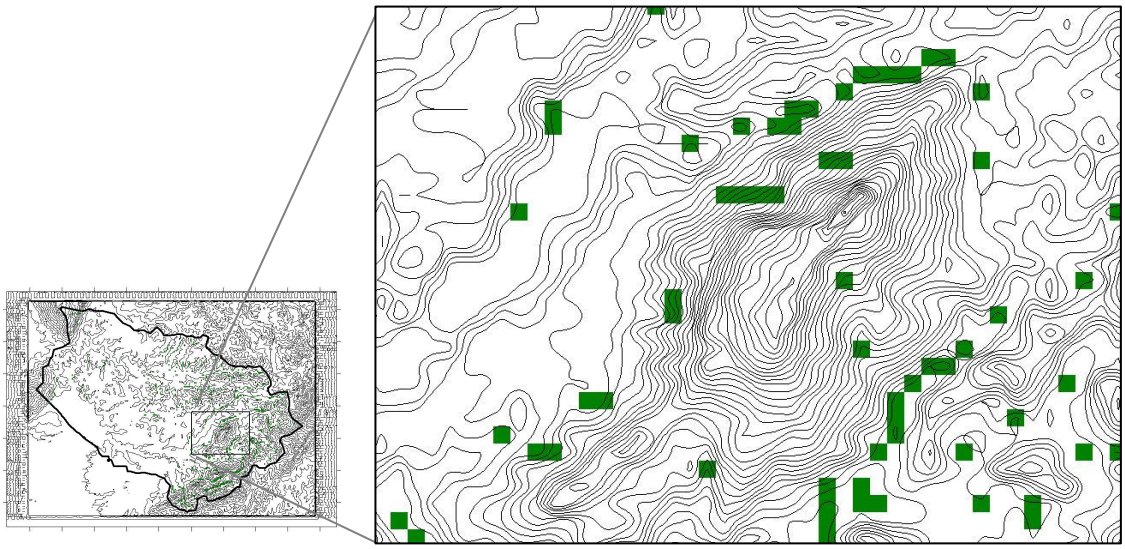


圖 8. 緩衝帶配置區位圖

Fig. 8. Places (marked cells) of urgent treatment of VBSs derived from DEM calculation

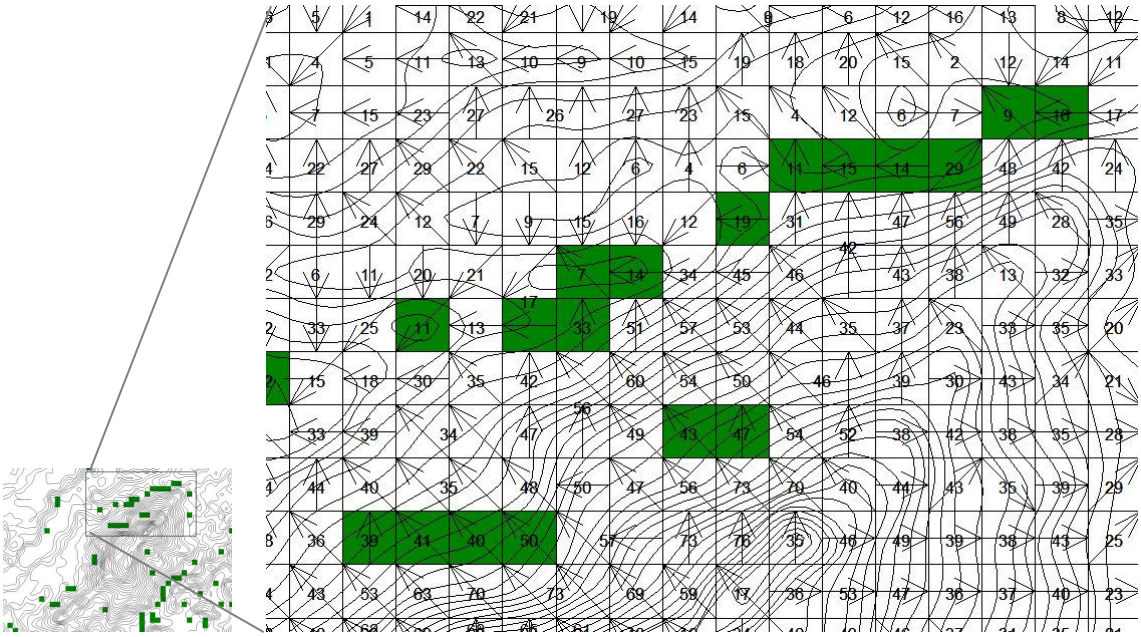


圖 9. 排水流向與網格坡度圖

Fig. 9. Marked cell where gradient difference greater than 20% calculated from the receive drainage cells

3、效益評估

以改善率及單位面積改善率進行集水區植生緩衝帶配置效益的比較，其公式如下：

$$\text{改善率}(\%) = \frac{\text{集水區現況} - \text{緩衝帶配置結果}}{\text{集水區現況}} \times 100\%$$

$$\text{單位面積改善率}(\%) = \frac{\text{改善率}(\%)}{\text{緩衝帶配置面積}\ (\text{ha})}$$

式中：

集水區現況：模式模擬未配置緩衝帶前之集水區沖蝕深度、逕流洪峰量、泥砂產量、總氮、總磷情況。

緩衝帶配置結果：模式模擬緩衝帶配置後之集水區沖蝕深度、逕流洪峰量、泥砂產量、總氮、總磷情況。

（V）AGNPS 模式介紹

AGNPS 為 1987 年由美國明尼蘇達州的汙染控制局（MPCA）、水土保持局及

美國農部（USDA）土壤保育中心（SCS），為分析集水區水質和逕流而發展出來（Young et al 1989）。AGNPS 模式屬分布型參數模式，基本上由水文、沖蝕、泥沙和營養物質運送三部份構成。

水文模式主要利用美國水土保持局（Soil Conservation Service, SCS）發展之地表逕流-逕流曲線（Curve Number, CN）法計算逕流量及洪峰流量。沖蝕模式利用修正型通用土壤流失公式（MUSLE）加入坡型修正因子（SSF）估算土壤流失量。營養物質運送則是利用 CREAM 模式得出氮（N）、磷（P）及化學需氧量（COD）的模擬結果。彙整 AGNPS 模式使用的原理，如表 1 所示：

表 1. AGNPS 模式原理

Table.1. Model concepts of AGNPS

AGNPS 演算方法	參考
地表逕流-逕流曲線法(CN)	USDA-SCS (1972)
尖峰流量	Smith *et al*. (1980)
逕流流速	Manning's equation
土壤流失–修正後 USLE	Wischmeier *et al*. (1978)
泥砂傳輸能力-溪流動力方程式	Bagnold (1966)
泥砂傳輸 - stationary 連續方程式	Foster *et al*. (1981)和 Lane (1982)
營養傳輸(N,P)	Frere *et al*. (1980)

資料來源：http://grunwald.ifas.ufl.edu/Projects/AGNPS/agnps.htm

1.土壤沖蝕部份

分別計算上游地表(Upland)單位面積沖蝕量、渠道(Channel)單位面積沖蝕量，並將沖蝕土壤分成五種顆粒大小等級(粘粒、坋粒、小團粒、大團粒、砂粒)。估測單場暴雨的土壤流失量係採用修正之通用土壤流失方程式(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)：

$$E = EI \times K \times L \times S \times C \times P \times SSF$$

E：土壤沖蝕量(tons/acre)

EI：降雨能量強度(100-ft-ton in/acre hr)

K：土壤沖蝕性指數 (ton-acre hr/100-acre ft-ton in)

L：坡長因子

S：坡度因子

C：覆蓋因子

P：水土保持措施因子

SSF：坡型修正因子

SSF 之修正值如表 2 所示，凸坡易沖刷，凹坡易淤積，故乘上一修正值加以修正(Wischmeier and Smith，1978)。

表 2. 坡型修正因子(SSF)

Table.2. The slope shape factors.

坡　型	SSF
均　坡	1.00
凸　坡	1.30
凹　坡	0.88

2.泥沙運移部分

係針對單一網格做分析(如圖 10)，考慮由上游及四周流入之泥砂量，扣除網格內自 O 點至 X 點之泥砂沉積量，即為該網格之模擬泥砂輸出量。

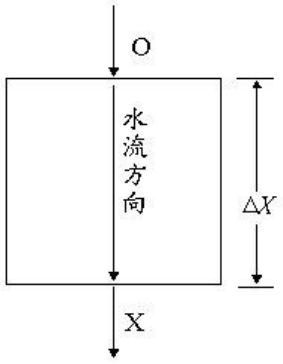


圖 10. 單一網格分析示意圖

Fig. 10. Illustration of sediment transportation in a given cell

泥砂運移量主要分成二部分進行估算，第一部分為上游之泥砂進入渠道，第二部分為河道中泥砂之輸送；並將之分為五級(粘粒、坋粒、砂粒、大團粒、小團粒)加以演算。

（1）泥沙輸出

模式中有關泥砂運移和沉積之方程式是採用 Foster et al.(1981)與 Lane(1982)之公式：

$$Q_s(X) = Q_s(O) + Q_{s1}\frac{\Delta X}{L_r} - \int_o^x D(X)W dX \quad (1)$$

$Q_S(X)$：X 點泥砂之輸出量(lb/sec)

$Q_S(O)$：O 點泥砂之輸入量(lb/sec)

Qsl：側流泥砂流入量(lb/sec)

ΔX：上游至 X 點之距離(ft)

Lr：側流之距離(ft)

D(X)：X 點泥砂沉積率(lb/sec^2-ft)

W：渠道寬(ft)

（2）各顆粒大小之泥沙輸出

$$Q_{si}(X) = \left[\frac{2q(X)}{2q(X)+\Delta X V_{ssi}}\right] \times \left\{Q_{si}(O) + Q_{sli} - \frac{\overline{W}\times\Delta X}{2} \times \left[\frac{V_{ssi}}{q(O)} \times \left(q_{si}(O) - g_{si}(O)\right) - \frac{V_{ssi}}{q(X)\times g_{si}(X)}\right]\right\} \quad (2)$$

Qsi(X)：土粒流出率(lb/sec)

q(X)：流出單位寬度網格之流量(ft3/sec-ft)

ΔX：渠道長之改變(ft)

Qsi(O)：土粒流入率(lb/sec)

$\overline{W}$：平均渠道寬(ft)

q(O)：流入單位寬度網格之流量(ft3/sec-ft)

$q_{si}(O)$：單位寬度網格泥砂流入率(lb/sec-ft)

$g_{si}(O)$：土粒輸入網格之能力(lb/sec-ft)

$g_{si}(X)$：土粒輸出網格之能力(lb/sec-ft)

Qsli：側流量流入速率(lb/sec)

Vssi：土粒沉降速度(ft/sec)

（3）洪峰流量

計算洪峰流量之公式係採用 Smith and Williams (1980)用於 CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System)的公式：

$$Q_p = 8.48A^{0.7}S_c^{0.159}RF^{(0.824A^{0.0166})}(L_c^2/(A \times 43560))^{-0.187} \quad (3)$$

Qp：洪峰流量(cfs)

A：排水面積(acre)

Sc：渠道坡度(ft/ft)

RF：逕流體積(in)

LC：渠道長度(ft)

3.養分流失部分

採用 CREAM 模式對氮（N）、磷（P）、化學需氧量（COD）的運移進行推估，計算過程分為泥砂吸附部分和可溶性部分進行計算。泥砂吸附部分採用單位的總泥砂量計算。

$$Nut_{sed} = (Nut_f)Q_s(x)E_R$$

Nutsed：泥砂輸送的氮或磷

Qs：泥砂產量

E_R：富集比，

$$E_R = 7.4Q_s(x)^{-0.2}T_f$$

其中 T_f 為土壤質地的校正係數。

可溶性營養鹽的估算考慮了降雨、施肥和淋溶對營養鹽的影響。逕流中可溶性營養鹽由下式估算:

$$Nut_{sol} = C_{nut}\ Nut_{ext}\ Q$$

Nutsol：逕流中氮、磷的濃度

Cnut：逕流流經的土壤表面氮、磷的平均濃度

Nutext：氮、磷進入逕流的提取係數（extraction coefficient）

Q：逕流總量

模型假設 COD 是可溶性的。對逕流中的 COD 根據計算逕流量和逕流中 COD 的平均濃度進行估算。模型假設 COD 不損失累積。

4.AGNPS 模式參數輸入

（1）集水區參數

（a）集水區識別：集水區之識別名

（b）小區面積：每一網格之面積，本研究所用之網格為 40m x 40m

（c）小區總數：為分析網格之總數

（d）降雨量：採用鄰近之經濟部水利署測站金山雨量站之資料，依皮爾遜極端值分布，求出 10 年頻率之最大日雨量為 374.6 ㎜。

（e）暴雨能量強度：由 AGNPS 模式依據所輸入之降雨延時(24hr)與降雨型態自動計算而得。

（2）小區參數

（a）小區編號：每一網格之編號

（b）排水流向的小區編號：為各網格中逕流水排向之小區編號，集水區排水口所在之小區其排水流向編號必須比其它小區之編號要大。

（c）坡向：每一網格之坡向，由 WinGrid 之地形分析而得。

（d）逕流曲線值：推求直接逕流量所需之水文參數，為土壤之水文特性及土地使用種類之組合（表 3～表 5）。

（e）平均坡度：計算各網格之平均坡度(θ)，再以 Wischmeier and Smith (1978)所提出之坡度因子公式：$S=65.4\sin^2\theta+4.56\sin\theta+0.0654$ 求算而得。

（f）坡型因子：有三種參數值，即凸型坡、均勻坡及凹型坡，本研究所切取之網格面積不大，以均勻坡來計算。

（g）坡長因子(漫地流之流路長度)：由於受到自然或人為之地面窪蓄、入滲等作用以及山溝、道路排水側溝等之截流，地表漫地流之流長甚少超過 100m。本計劃之網格大小為 40m×40m，若以地表水流向為指標，累計流長在兩個網格大小以下者可視為漫地流，以此來估算集水區之坡長分佈。

（h）曼寧粗糙係數：曼寧公式之 n 值，係依植生密度及種類有所不同(表 6)。

（i）土壤沖蝕性因子：為土壤內在特性所反應抗蝕能力之定量值，亦稱為土壤沖蝕率指數。採用萬鑫森、黃俊義(1981、1989)所調查之台灣坡地土壤沖蝕指數值，利用地理統計可求算台灣地區土壤沖蝕指數等值圖，本區之土壤沖蝕指數值以克利金法(Kriging)內插計算求得。

（j）地表植物覆蓋因子：利用植生指標之方法來考慮地表植物覆蓋因子，本研究以遙測衛星影像之常態化差異植生指標(NDVI)推孤地表植物覆蓋因子 NDVI

為一標準常態化之指標，其計算方法如下所示：

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

式中，NIR 為近紅外光波段；R 為紅光波段

由於 NDVI 之值域介於-1 至 1 之間，將 NDVI 線性反向配置為地表植物覆蓋因子(C)，其公式為：

$$C = (1 - NDVI)/2$$

AGNPS 模式模擬緩衝帶配置時，把緩衝帶配置區位之 C 值變更成草生地之 C 值（C=0.1），如圖 11 所示。

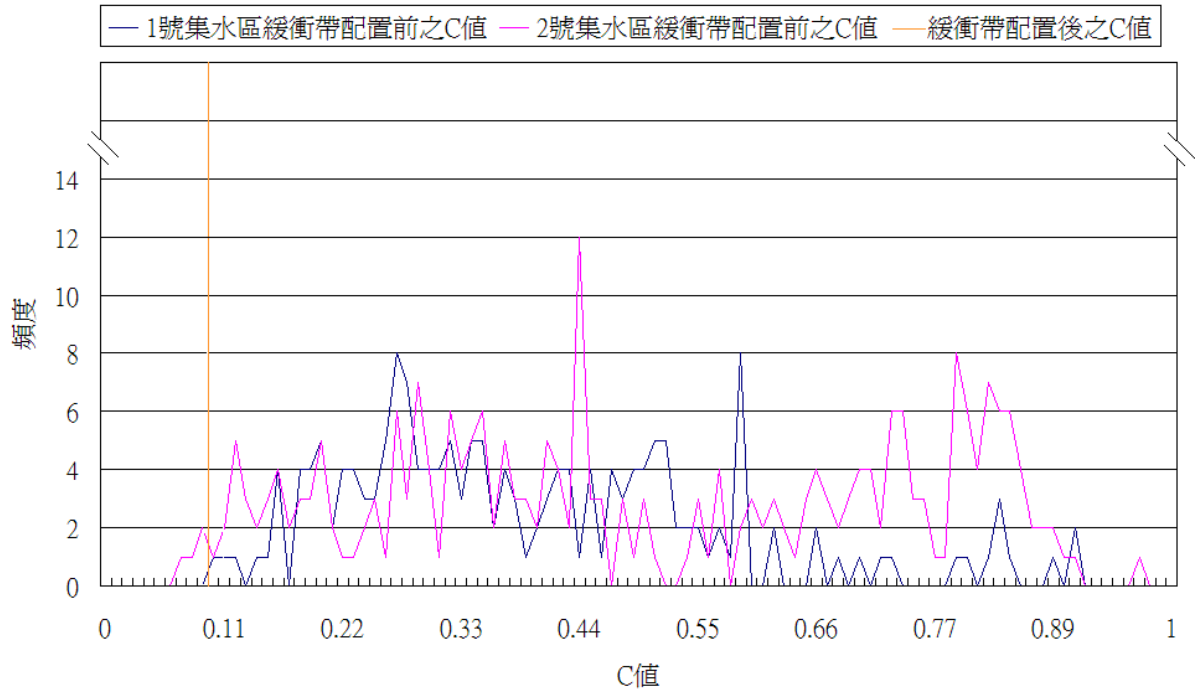


圖 11. 緩衝帶配置區位 C 值之頻度分析

Fig. 11. Histogram of C value at the sites before and/or after the placement of VBSs

表 3. 水土保持局土壤質地分類

Table 3. Soil classification recommended by the Soil and Water Conservation Bureau

分類	土壤質地
0	粗砂土、砂土
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土
2	壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土
4	坋質壤土、坋土
5	壤土
6	砂質黏壤土
7	黏質壤土、坋質黏壤土
8	坋質黏土、砂質黏土
9	黏土

表 4. 水土保持局土壤分類對應之 SCS 土壤分類

Table 4. Soil classification recommended by the Soil and Water Conservation Bureau versus SCS soil classification

台灣水土保持局	SCS
0、1、2、3	A
4、5	B
6	C
7、8、9	D

表 5. 逕流曲線數

Table 5. Curve Number (CN) values for runoff simulation

土地利用 \ 土壤水文特性	A	B	C	D
建地	74	84	90	92
針葉林	25	55	70	77
地表水	94	93	95	96
旱田	62	71	78	81
公園、墓地	39	61	74	80
保安林	25	55	70	77
荒地	77	86	91	94
濕地	92	93	94	95
闊葉林	36	60	73	79
水田	70	79	84	88
果園	45	66	77	83
其他林地	38	62	74	80

註：土壤水文特性為土壤排水性及土壤質地之組合

資料來源：Dunne and Leopold, 1978

表 6. 土地利用相關之參數參考表

Table 6. Land use pattern and Manning's roughness coefficient

土地利用種類	森林	草地	果園	茶園	檳榔園	裸露地	水體	農地	建築用地
曼寧粗糙係數	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.02	0.99	0.06	0.03

資料來源：夏禹九、陳萱蓉，2000

（k）水土保持措施因子：水土保持因子 P 值係指現有田間之耕作方式、措施或水土保持方法下與標準試區之土壤流失量之比值，本研究以最差之狀況（P=1）來評估。

（l）地表狀況常數：表示地表之另一參數，參考 AGNPS 使用手冊（Young, 1994），將森林定為 0.59，果園定為 0.29，水域為 0。

（m）土壤質地：依土壤顆粒大小而概分為四類，即砂粒、坋粒、黏粒及自定。

（n）施肥程度：依照農地施肥程度概分四級，分別為低，中，高及自定，本研究

將森林之施肥量定為低，果園定為高等級。

（o）肥料有效因子：肥料留存在表土之百分比。

（p）點源污染指標：區內是否有點源污染，以 0（無）與 1（有）表示，本研究區域為 0。

（q）蝕溝源程度：區內是否有蝕溝，以 0（無）與 1（有）表示。

（r）化學需氧量因子：依照區內土地利用狀況而分，森林之 COD 值以中等值 65 代入，果園以 170 代入，水域則為 0。

（s）積水地指標：區內是否有積水地，以 0（無）與 1（有）表示。

（t）渠道指標：區內是否有渠道，以 0（無）與 1（有）表示。

在輸入 AGNPS 模式之參數時，當集水區之土地利用過於複雜，則需每個網格各別作變更，使輸入參數之手續變得繁雜。當網格數多，此情形將更為嚴重；因此，本研究將 AGNPS 模式結合 WinGrid（林昭遠、林文賜，2001），藉以改善此問題。

V、結果與討論

（I）影像判釋成果

將衛星影像進行 GLCM 紋理因子計算，計算 6 個紋理因子，並將所得 18 個波段與 3 個原始波段進行合併，帶入倒傳遞類神經網路進行影像判釋。圖 12 為影像判釋成果；表 7 則為衛星影像判釋之誤差矩陣，判釋之整體精確度高達 89.67%。衛星影像判釋顯示水庫庫區水域優養化嚴重，水域植生約占水庫水域面積 61.6%，另泥岩裸露區位，主要集中於水庫集水區之東側，注入庫區兩大河系集水區之土地利用類別迥異，再將水庫集水區細分為一號集水區及二號集水區（圖 16）。其中一號集水區集水面積約為 1350.72ha，主要汙染源為農業用地所帶來之非點源污染，二號集水區集水面積約為 722.14ha，主要污染為裸露泥岩所產生之泥砂問題。

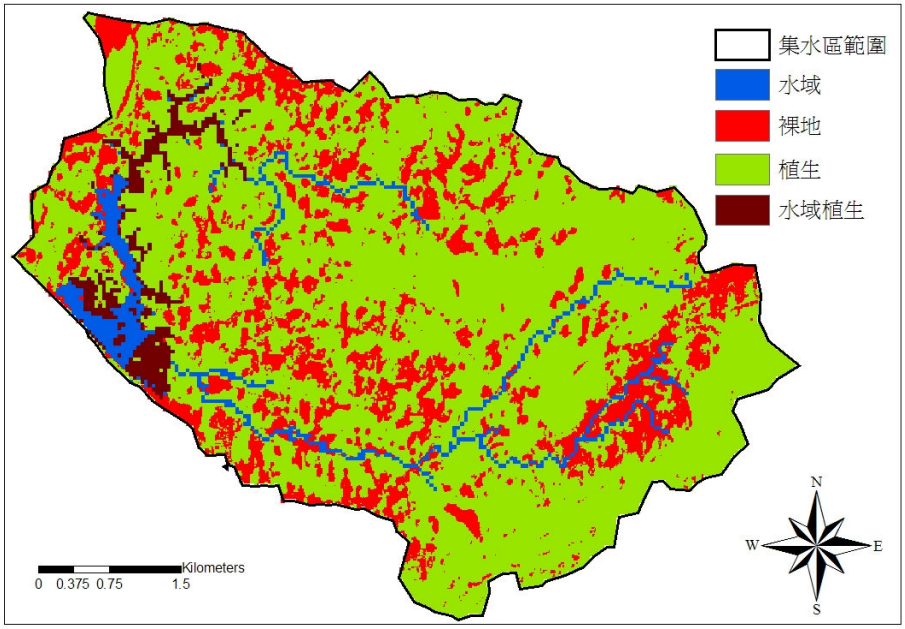


圖 12. 影像判釋成果

Fig. 12. Results of image interpretation

表 7. 影像判釋之誤差矩陣

Table 7. Error matrix of image interpretation

類別	裸地	水域	植生	水生植物	使用者精度
裸地	75	0	0	0	100.00%
水域	3	72	0	0	96.00%
植生	0	0	66	9	88.00%
水生植物	0	0	19	56	74.67%
生產者精度	96.51%	100%	77.65%	86.15%	
Overall Accuracy = 89.67%　Kappa Coefficient = 86.22%					

（II）集水區緩衝帶配置區位優選

依流向計算兩相鄰網格之坡度差值，差值愈大係表示陡坡面有較緩之位置供

植生復育之用，為泥岩地區陡坡地植生復育之最佳配置區位。兩分析集水區網格坡度差頻度分析結果顯示（圖 13、圖 14），1 號集水區多屬農地，地勢較緩，網格坡度差達 20%以上僅占集水區面積的 2.1%；2 號集水區，網格坡度差 20%以上之區位，約占集水區面積 5.7%。為了方便比較，兩集水區皆選用網格坡度差達 20%以上之區位作為緩衝帶配置門檻（圖 15）。若限於人力物力，2 號集水區緩衝帶之配置門檻可酌予調高至網格坡度差達 30%以上，即可縮小植生緩衝帶之配置面積。

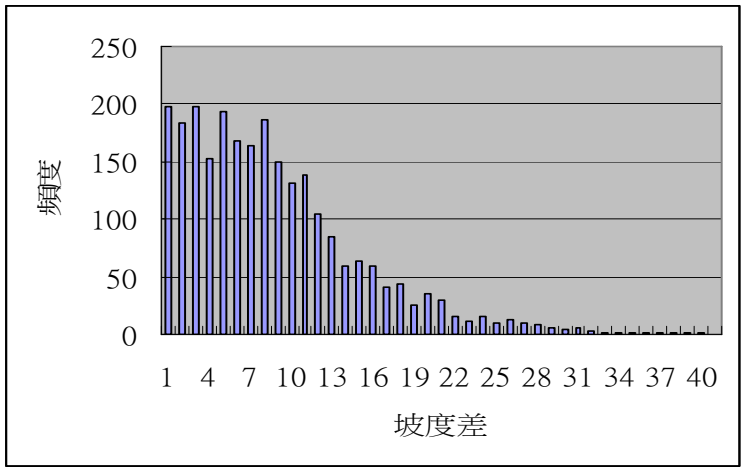


圖 13. 一號集水區網格坡度差之頻度

Fig. 13. Histogram of cell's gradient difference at No 1 watershed

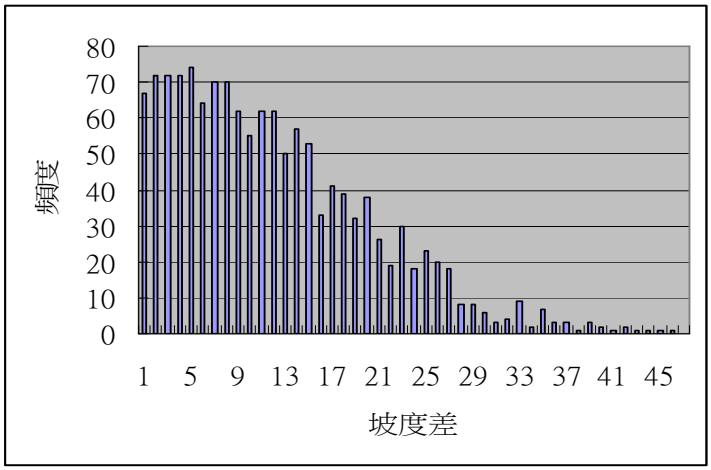


圖 14. 二號集水區網格坡度差之頻度

Fig. 14. Histogram of cell's gradient difference at No 2 watershed

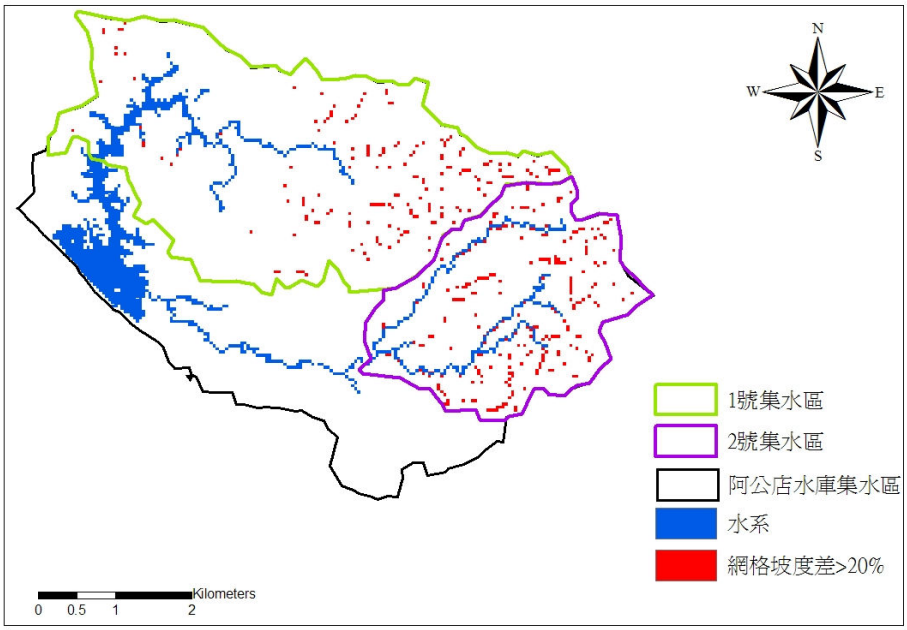


圖 15. 集水區緩衝帶配置區位

Fig. 15. Sites of placement for VBSs at the watersheds

（III）集水區現況模擬

表 8 顯示一號集水區土地利用以闊葉林為主，約占總土地利用之 39.77 %，其次為果園及農業用地約佔 30.42 %，且大部分位於水庫上游河道週遭，研判 1 號集水區內營養鹽之產量為此區域之主要汙染源；2 號集水區內亦以闊葉林為主，約為 48.60 %，其次為裸露地 26.56 %，而果園則涵蓋約 20.49%，顯示 2 號集水區主要污染源為泥砂量及營養鹽。以 AGNPS 進行兩集水區之現況模擬，表 9 顯示 1 號集水區內其總氮、總磷產量為最高，約為 86.03kg 與 43.02kg，其單位面積產量分別為每公頃 0.06 kg 與 0.03 kg，1 號集水區裸地較少，模擬結果泥砂產量不高；2 號集水區以泥砂產量與沖蝕深度較為嚴重，泥砂產量高達 145355.40 噸，集水區單位面積泥砂產量約每公頃 201.48 噸，平均沖蝕深度為 1.4 cm，顯示 2 號集水區泥砂問題較為嚴重，而此區之總氮、總磷產量亦不低，分別為 39.9kg 與 19.95 kg，單位面積總氮、總磷產量分別為每公頃 0.05 kg 與 0.03 kg。

表 8. 集水區土地利用類別面積統計

Table 8. Statistics of area for each landuse classification

土地利用類別	面積（%）	
	1 號集水區	2 號集水區
水田	0.08	0
旱田	2.73	0.13
闊葉林	39.77	48.60
竹林	8.96	0.86
建築用地	3.67	2.33
墓地	0.96	0.04
果園	25.47	20.49
草生地	2.00	0.24
道路	1.29	0.60
水田	2.13	0
水池	5.99	0.13
裸露地	5.59	26.56
開墾地	1.05	0
雞豬舍菇寮	0.30	0

表 9. 集水區現況模擬

Table 9. Simulation for watersheds before placement of VBSs

項　目	1 號集水區		2 號集水區	
	產量	單位面積產量（ha^{-1}）	產量	單位面積產量（ha^{-1}）
沖蝕深度(cm)	0.49	-	1.40	-
逕流洪峰量(cms)	239.41	0.18	169.47	0.23
泥砂產量(ton)	94039.75	69.60	145355.40	201.48
總氮(kg)	86.03	0.06	39.90	0.05
總磷(kg)	43.02	0.03	19.95	0.03

(VI)、緩衝帶配置後模擬

兩集水區依網格坡度差 20%以上之區位配置植生緩衝帶，模擬顯示 1 號集水

區以總氮、總磷之改善率較高，分別為 4.53 %與 4.04 %，其餘之改善不顯著（表 10）。2 號集水區以泥砂產量與沖蝕深度之改善率較大，分別為 10.89 %與 8.57 %，其次為總氮 6.94 %、總磷 5.9 6%，以逕流洪峰量 1.92 %之改善率最低（表 11）。在單位面積改善率部分，1 號集水區之單位面積改善率以總氮、總磷較高，分別為 0.16 %與 0.14 %；土地利用以泥岩裸地為主之 2 號集水區，以泥砂之減量率為 10.89 %最高，其單位配置面積之減量率每公頃達 0.26 %；而總氮之減量率約為 6.94 %，總磷之減量率約為 5.96%，其單位配置面積減量率每公頃分別為 0.17 %、0.14 %，緩衝帶配置對 2 號集水區逕流量之改善率亦不明顯。

表 10. 一號集水區緩衝帶配置後模擬結果

Table 10. Simulation for No1 watershed after placement of VBSs

1 號集水區	緩衝帶配置		
	產量	改善率（%）	單位面積改善率（%）
沖蝕深度(cm)	0.49	0.00	0.000
逕流洪峰量(cms)	239.12	0.12	0.004
泥砂產量(ton)	93372.51	0.71	0.025
總氮(kg)	82.13	4.53	0.160
總磷(kg)	41.28	4.04	0.140

表 11. 二號集水區緩衝帶配置後模擬結果

Table 11. Simulation for No2 watershed after placement of VBSs

2 號集水區	緩衝帶配置		
	產量	改善率（%）	單位面積改善率（%）
沖蝕深度(cm)	1.28	8.57	0.21
逕流洪峰量(cms)	166.22	1.92	0.04
泥砂產量(ton)	129523.45	10.89	0.26
總氮(kg)	37.13	6.94	0.17
總磷(kg)	18.76	5.96	0.14

VI、結論

泥岩地區水土保持與植生綠化工作，宜以集水區為整體考量，若限於經費，可由極需處理之點切入進而面的配置；分期分區進行，方可達到預期的治理效果。整個保育治理流程，宜由衛星影像資料配合地理資訊系統的分析，篩選集水區植

生復育之最佳區位，導入植生緩衝帶，再利用農業非點源污染模式評估整治前後之保育效果。除了植生緩衝帶之配置外，集水區主要潛在污染源之農作區內，應落實草生栽培、草溝、及農塘之設計。雖是自掃門前雪，若能將泥砂、營養鹽等農業非點源污染源留在自己的農地，此即永續農業的精神，「源頭防治重於下游防堵」為泥岩地區植生復育所應有的理念。

VII、謝誌

本研究承蒙國家科學委員會研究計畫 NSC96-2313-B-005-047-MY3 之資助，特此致謝。

VIII、參考文獻

林昭遠、林文賜（2001）集水區資訊系統(Wingrid)入門。暐帥股份有限公司。

夏禹九、陳萱蓉（2000）農業非點源汙染模式應用於河川保護帶配置之探討。中華水土保持學報 30(1):1-12。

萬鑫森、黃俊義（1981）台灣西北部土壤沖蝕及流失量之估算。中華水土保持學報 12(1):57-67。

萬鑫森、黃俊義（1989）台灣坡地土壤沖蝕。中華水土保持學報 20(1):17-45。

Bagnold, R. A. (1966) An approach to the sediment transport problem from general physics. Prof. Paper 422-J. U. S. Geological Survey, Reston,VA.

Dunne, T. and L.B. Leopold (1978) Water in environmental planning. New York: W. H. Freeman.

D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams (1986) Learning representations by back-propagating errors. Nature, vol. 323, pp. 533 -536,.

Foster, G. R., L. J. Lane, J. D. Nowlin, J. M. Laflen, and R. A. Young (1981) Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. Trans. of the ASAE, 24(5):1253-1262.

Frere M. H., J. D. Ross, and L. J. Lane (1980) The Nutrient Submodel. In CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural

Management Systems. Conservation Research Report 26, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, pp. 65-85.

Lane, L. J. (1982) Development of a procedure to estimate runoff and sediment transport in ephemeral streams. In recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield. pp.275-282. Proc. Exeter Symp. IAHS Publ. 137.

P. Werbos (1974) Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Ph.D. Thesis, Harvard University.

Smith R.E., and J.R. Williams (1980) Simuation of the surface water hydrology. In: Knisel W.G. (ed.): CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA, Conservation Research Report, 26: 13-35.

USDA-SCS. (1972) Hydrology In National Engineering Handbook. U. S. Department of Agriculture-Soil Conservation Services. Washington, D. C.

Young, R. A., C. A. Onstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson (1989) AGNPS:A nonpoint-soruce pollution model for evaluating agricultural watersheds. Journal of Soil and Water Conservation. 44(2):168-173.

Young RA. (1994) Agricultural Non-point Source Pollution Model, Version 5.00 AGNPS User's Guide. USDA-Agricultural Research Service1-5.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith (1978) Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook 537, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture

http://grunwald.ifas.ufl.edu/Projects/AGNPS/agnps.htm

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
Symposium on 2008 Forest Watershed Management / 林壯沛主編
--臺北市：農委會林試所，民 97.06

ISBN 978-986-01-4607-3（平裝）
1.林業管理　2.集水區　3.文集

436.12407　　97011539

2008 森林集水區經營研討會論文集

發　　行　　人：黃裕星
策　　劃：盧惠生
主　　編：林壯沛
編　　輯：蔡真珍
美　　編：許明峰
出　版　單　位：行政院農業委員會林業試驗所
電話：台北市南海路 53 號
傳真：02-23039978
網址：http://www.tfri.gov.tw
印　　刷：震大打字印刷有限公司
出　版　年　月：九十七年六月
工　　本　　費：每冊新台幣 200 元

GPN：1009701592
ISBN：978-986-01-4607-3