

水梯田水土保持功能分析—以貢寮地區為例

文 ■ 陳世楷 ■ 國立台北科技大學土木工程系副教授（通訊作者）

高雨瑄 ■ 國立台灣大學生物環境系統工程學研究所博士後研究

陳慣楹 ■ 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士

蔡誠斌 ■ 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士

許朝陽 ■ 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士生

一、前言

位於集水區上游之水梯田，除了具有生產、生活、生態之三生機能外，亦具有包括調蓄洪水、防止土壤侵蝕、地下水補注以及水質淨化等國土環境保全機能（圖 1）。目前聯合國已將世界多處水梯田列為世界文化遺產，如菲律賓科迪勒拉山梯田及中國大陸雲南省紅河哈尼梯田等。其歷史人文價值與景觀價值已遠勝其生產價值。而近年來國際間所倡導之里山倡議（Satoyama Initiative），核心概念是「社會—生態—生產的地景」，係指人類與自然長期的交互作用下，形成的生物棲地和人類土地利用的動態鑲嵌斑塊景觀，在上述的交互作用下，維持了生物多樣性，並且提供人類的生活所需（李光中，2011）。而水梯田較為傳統耕作方式，正符合里山倡議精神之具體實踐。

然而，受到水文、地形等先天條件的限制，水梯田耕作、維護較一般平地水田更為費時費工，加以數十年來我國經濟高度發展，農村人口老化、勞動力不足及政府休耕轉作政策之推展等後天條件的制約，使水梯田大面積休耕、轉作，棄耕之情況亦遠較平地水田嚴重。

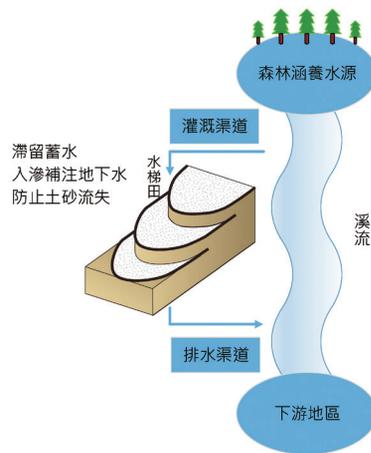


圖 1 集水區上游水梯田水土保持功能示意

由於水梯田與配合構築之灌、排水利系統係結合水源、耕作農地及河川的水利系統樞紐。因此，水梯田的棄耕易使先民所建造的一系列灌溉系統崩解。伴隨農民社群水利組織之停止運作，先是森林野溪源頭或灌溉溜池的水源設施及灌溉排水路網之荒廢，然後是稻米文化式微及自然生態系之破壞，對下游都會城鎮也會造成防災壓力，而成為嚴重的國土問題。目前有關水梯田入滲補注涵養地下水源及土壤沖蝕防制功能之基礎研究甚為缺乏，因此本研究針對水梯田水土保持功能進行基礎研究，藉此評估水梯田入滲補注地下水及防制土壤沖蝕功能。

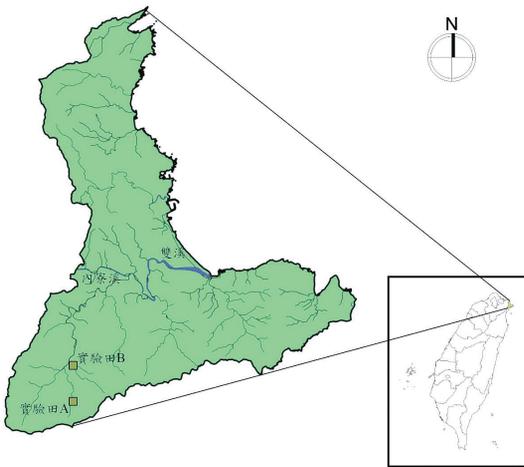


圖 2 實驗田地理位置圖

二、資料分析與方法

(一) 實驗田區概述

本研究選定之水梯田試驗區位於新北市貢寮區吉林里(圖 2)，為內寮溪集水區，屬雙溪流域，此區域年均溫約 21.7°C ，平均年雨量達 $5,146\text{mm}$ (2012 年經濟部水利署統計資料，吉林國小測站)，年均日蒸發散量約為 3mm/day (張格倫，2007)。經多次現地踏勘及與當地農民溝通，考量該區水梯田多處於休、棄耕狀態，實際耕作田區少且有持續耕作及復耕田區之區分，因此本研究選擇兩處耕作中之完整田區進行相關實驗，分別代表新近復耕田(實驗田 A，休耕 35 年後於民國 100 年復耕，共 9 階上下相連之階段坵塊，總面積約 $2,000\text{m}^2$ ，坡度約 20° ，圖 3)及持續耕作之續耕田區(實驗田 B，共有 11 階上下相連之階段坵塊，總面積約 $3,800\text{m}^2$ ，坡度接近 30° ，圖 4)，進行地下水補注相關試驗以及土壤沖蝕因子分析。實驗田區灌溉水源係以管



圖 3 實驗田 A 實景



圖 4 實驗田 B 實景

路方式自野溪引至最上階田區，然後以重力方式越田施灌全區。

(二) 水梯田環境 / 水收支

水田土壤分層剖面(圖 5)由上而下區分為土壤表面湛水(ponded water)，一般灌溉時期最高湛水深約為 $6-8\text{cm}$ ；湛水之下為耕犁之後呈泥濘狀之泥濘層(muddy layer)，通常屬於過飽和狀態，此為水稻根系層主要所在位置，其厚度約 $20-25\text{cm}$ ；泥濘層之下為犁底層(plow sole)，即俗稱之牛踏層，厚度約 $5-10\text{cm}$ ，對垂直水流之阻抗性極高。此層之

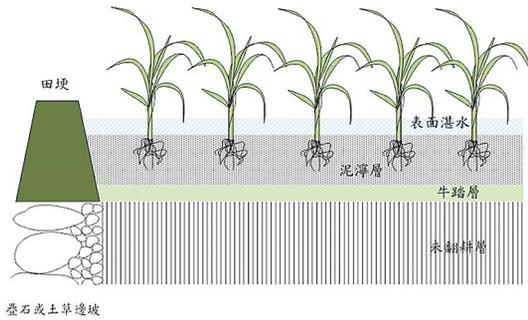


圖 5 水田土壤分層剖面示意圖

形成係因水田在長時期耕作中，反覆之耕犁、攪混及整平等過程中，犁底層土壤因獸蹄作用力或農耕機械力之重力壓密作用所導致；牛踏層以下為未擾動之非翻耕層，若無田區構築時之挖、填等工程行為，則屬於原始土壤地層。水梯田在休耕、棄耕後，田埂邊坡易產生崩塌，此與田面開裂、植生覆蓋不良（長期施用除草劑）有關（Chen *et al.*, 2013）。

長期湛水狀態下之水梯田水收支平衡可以下式表之：

$$I_r + R - ET - Inf - SP - DR = \Delta S \quad (1)$$

其中 I_r 為灌溉水量； R 為降雨量； ET 為蒸發散量； Inf 為垂直入滲量； SP 為側滲量； DR 為排水量， ΔS 為田區之湛水深變化，各項水收支示意如圖 6 所示。

灌溉水量為從進水口流入並施灌全區，屬於入流量；降雨量為降雨落至田區之量，受田區面積與降雨量大小影響，屬於入流量；蒸發散量為田區作物蒸散量與湛水表面蒸發量之總和，屬於出流量；入滲（infiltration）為地表水進入土壤的過程，當水進入土壤並繼續

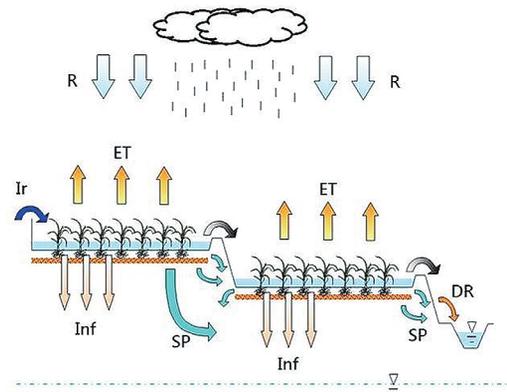


圖 6 水梯田水收支平衡模式示意圖

往深層流動則稱為滲漏（percolation），水田內水入滲至土壤後依流動方向可分為垂直滲漏（向下）與側滲（橫向），垂直入滲量即指水田之水入滲後並繼續垂直向下運動之水量，屬於出流量；側滲量為入滲後之側向流動量，此流動有可能經過田埂邊坡由高處坵塊流至低處田階，對水梯田全區而言，並不會造成灌溉水之損失，但以單一坵塊而言，仍屬於流出之損失，此外，亦可能有部分水量經由側滲直接藉由此地下滲流流出田區邊界外，而此側向流動，若因水田持續湛水供應源源不斷之水源，將可能在側向流動一段距離後，進入野溪蝕溝，或轉換為垂直滲漏至更深層之地下水水位面，造成灌溉水之損失，水收支平衡模式之 SP 即代表此損失量，屬於出流量。以往垂直入滲或側滲均視為灌溉損失，但從水源涵養或地下水補注觀點觀之，藉由此二途徑可成為伏流水或淺層地下水之補充來源，越過田埂至下階坵塊之側滲亦可視為回歸水而被循環利用；經由田區最低處坵塊出水口排出之逕流量，屬於出流量，最終將流至河川；上述各項水收

支總和即為該田區湛水深之變化。

為了探討水梯田入滲補注地下水之機制，本研究針對兩處實驗田區全部田區坵塊進行減水深試驗並選擇代表性田區坵塊進行雙環定水頭入滲試驗，此外，亦量測蒸發量、土壤飽和度、土壤粒徑分析等影響水梯田水收支之各項參數。

1. 減水深試驗

減水深試驗為各坵塊於穩定充滿湛水後暫停灌溉，其益處為無需設置量水設施（如流量計、量水堰等），不僅可節省經費，亦可減少水量量測誤差所產生之不確定性。實驗時之水深控制在 $6 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ 左右，然後儘速堵住各田區坵塊之田埂缺口，再安置浮球式水尺量測基準水位（圖 7），浮尺的讀數將隨著水位的變化而改變。每次之試驗時程最多以 1 日為限（視田區實際減水狀況調整），於第二日同一時間量測各區水位，藉以瞭解實驗田區各坵塊湛水深變化情形。若試驗時段內無任何降雨，則減少之湛水深度代表入滲、側滲及蒸發散量所損失之灌溉水量，扣除蒸發散量之後，即為該階坵塊田區之整體入滲率。

2. 雙環定水頭入滲試驗

雙環定水頭入滲試驗係以金屬製雙環筒（內筒直徑 30 cm，外筒直徑 50 cm），捶打入土層約 25-30 cm 深度，配合內外筒各放置定水頭馬力奧量筒供水（圖 8），使內外筒的水在入滲時能藉由馬力奧量筒供水而保持湛水深不變，最後在上方覆蓋一塊不透光的壓克力板，以隔絕蒸發的影響。使用雙環之用意在於



圖 7 減水深試驗使用之浮球式水尺



圖 8 雙環定水頭入滲試驗

水入滲至土壤中後之流向可分為向下與側向，內外筒夾層中的水入滲至下方土層中會產生側向與向下流動，使內筒中的水向下滲漏時不受側向流動的影響，最後依馬力奧量筒中水位的變化，乘上馬力奧量筒截面積與內筒截面積的比值，可得該地點之垂直入滲速率。本研究中於兩處實驗田，均取其上、中、下階各一坵塊為代表，同時進行六組試驗量測該坵塊田區內與鄰近田埂交界之垂直入滲率。

（三）水梯田土壤沖蝕防制功能分析

土壤沖蝕模式大致可分為經驗模式與理論模式，而目前應用最廣的模式是 Wischmeier and Smith (1958) 年提出的通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, 簡稱 USLE)，此經驗公式為針對土壤沖蝕之過程經由一系列因子量化和概算，為水土保持工作者最為廣泛應用於估測土壤流失之方法。

$$A_m = R_m \cdot K_m \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中 A_m ：單位面積土壤流失量 (ton/ha/year)

R_m ：降雨沖蝕指數 (Mj·mm/ha·hr·year)

K_m ：土壤可蝕性指數 (ton·ha·hr/ha·Mj·mm)

L：坡長因子

S：坡度因子

C：覆蓋與管理因子

P：水土保持措施因子

USLE 之各項因子是由標準田間單位，包括水平坡長 72.6 呎、9 % 均一坡度、放為採上下耕犁方式、每兩年至少翻耕一次，及由單一土壤組成等條件估算之。目前國內外在水田土壤沖蝕之推估上，廣泛採通用土壤流失公式估計，歷年重要成果包括日本三菱綜合研究所 (MRI, 1995) 指出水稻田 (含陡坡、緩坡及平地水田) 放棄耕作，致每公頃每年土壤流失量 2.56 ton，另日本農業綜合研究所 (1998) 則估算水稻田放棄耕作，土壤流失量由 4.20 ton/ha/yr 增至 14.77 ton/ha/yr，與前述推估值相差 5.77 倍。針對坡地水梯田研究方面，林俐玲及林文英 (2004) 指出水

稻田在湛水耕作情況與改變水稻田利用型態為完全裸露時，水梯田 (以新竹縣竹東鎮之水梯田為例) 土壤流失量由 8.25 ton/ha/year 增至 2049.75 ton/ha/year。本研究先針對田區降雨特性、土壤沖蝕性指數之各項因子 (包括土壤粉粒及細砂含量、土壤粗砂含量、土壤有機質含量及通透性等) 以及地形因子進行調查分析，配合國內已完成之降雨沖蝕指數各項研究，進行陡坡水梯田沖蝕量之推估。

四、結果與討論

為明瞭水梯田田區入滲補注機制及量化其地下水源涵養功能，本研究於民國 102 至民國 103 年二期作休耕期進行兩處實驗田區之減水深及入滲試驗。其中，減水深試驗針對所有田區坵塊進行量測 (各階坵塊之編號由上而下依序為田 1、田 2、田 3... 依此類推)。雙環入滲試驗則選取上、中、下階層各一梯田坵塊量測。

（一）減水深試驗 / 田區整體入滲率估算

減水深實驗分別於田埂維護前之民國 102 年 10 月至 12 月初與維護後民國 103 年 3 月於實驗田 A 及實驗田 B 進行，分析結果如圖 9-10 所示。實驗田 A 田埂維護前減水深扣除蒸發量後之田區整體入滲率介於 53.4 mm/day 至 249.4 mm/day 之間，將各坵塊依面積加權後除以該田區各坵塊總合面積之平均整體入滲率為 113.37 mm/day；田埂維護後減水深扣除蒸發量後之田區整體入滲率介於 8.0 mm/

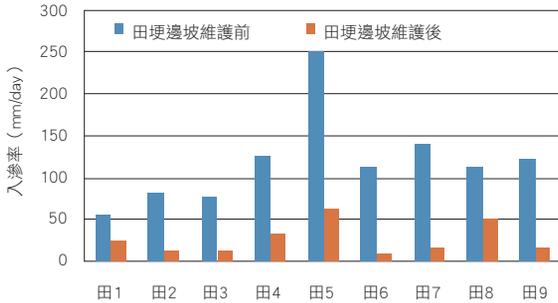


圖 9 實驗田 A 田埂邊坡維護前、後之田區整體入滲率比較

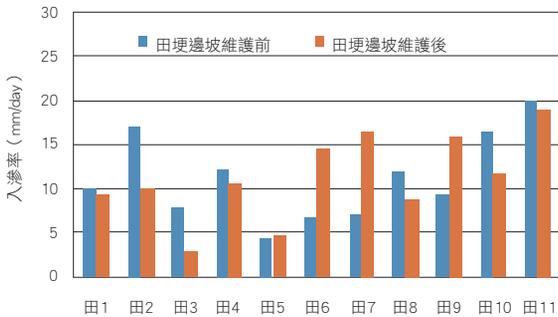


圖 10 實驗田 B 田埂邊坡維護前、後之田區整體入滲率比較

day 至 62.5 mm/day 之間，平均整體入滲率為 25.24 mm/day。實驗田 B 田埂維護前減水深扣除蒸發量後之田區整體入滲率介於 4.4 mm/day 至 19.9 mm/day 之間，平均整體入滲率為 9.02 mm/day；田埂維護後減水深扣除蒸發量後之田區整體入滲率介於 3.0 mm/day 至 19.0 mm/day 之間，平均整體入滲率為 9.96 mm/day。其中實驗田 A 量測之日蒸發量（皿蒸發量乘以皿蒸係數）分別為 4.2 mm/day（田埂邊坡維護前）及 1.9 mm/day（田埂邊坡維護後），實驗田 B 量測之日蒸發量為 2.1 mm/day（田埂邊坡維護前）及 1.6 mm/day（田埂邊坡維護後）。

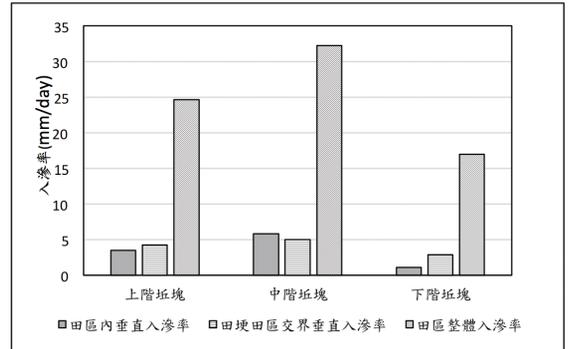


圖 11 實驗田 A 田埂維護後田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較

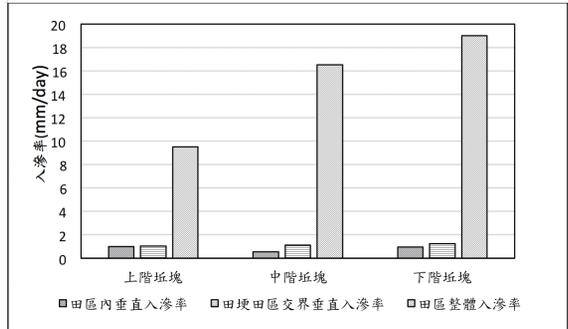


圖 12 實驗田 B 田埂維護後田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較

(二) 雙環定水頭入滲試驗 / 與田區整體入滲率之比較

復耕後之實驗田 A 整田前、後垂直入滲率差異甚多，持續耕種百年之實驗田 B 整田前、後垂直入滲率變化較小，且實驗田 A 入滲率遠大於實驗田 B，顯示水田長年反覆耕犁會導致牛踏層滲透性降低，而多年休耕，會導致牛踏層破壞，使田區垂直入滲率增加。鄰接田埂邊之垂直入滲率多高於田區中央之垂直入滲率，實驗田 A 田埂維護後田區內及田埂交界入滲率皆比田埂維護前要低，應為田埂維護期內農民經由田區翻犁、田埂填補等方式導致湛水區內孔隙被填補，而垂直入滲率亦因

表 1 USLE 土壤沖蝕量推估

田區	面積 (ha)	R _m	K _m	L	S	C	P	田區年沖蝕量 (ton/year)	單位面積 年沖蝕量 (ton/ha-year)
湛水耕作狀態									
實驗田A	0.20	22,261	0.04	1.69	9.27	0.10	0.09	23.98	119.89
實驗田B	0.38	22,287	0.04	1.26	18.68	0.10	0.09	73.78	194.15
休耕裸土狀態									
實驗田A	0.20	22,261	0.03	1.69	9.27	1.00	0.31	676.42	3,382.09
實驗田B	0.38	22,287	0.04	1.26	18.68	1.00	0.31	2541.19	6,687.35

而下降。此外，由於田區整體入滲率遠大於田區內垂直入滲率及田埂交界垂直入滲率，顯示水梯田埂間滲漏或側滲現象十分明顯（圖 11-12）。

（三）土壤沖蝕估算

本研究根據現地各項土壤沖蝕因子調查結果，以及林俐玲及林文英（2004）對 C、P 之設定，比較水梯田在湛水耕作情況下，與改變水梯田利用型態為表土完全裸露（如噴灑除草劑）時之土壤沖蝕量（表 1）。其中，實驗田 A 水梯田土壤流失量由 119.89 ton/ha/year 增至 3,382.09 ton/ha/year；實驗田 B 水梯田土壤流失量由 194.15 ton/ha/year 增至 6,687.35 ton/ha/year。

由於 USLE 公式中之 C、P 值具有較高之不確定性（吳嘉俊，2010；Chen *et al.*, 2013），因此上表所推估之沖蝕量僅供參考。但是因貢寮地區年雨量極為豐沛，在降雨沖蝕指數（R_m）值極高之情況下，理論之坡地土壤沖蝕風險亦隨之提高。而水梯田休耕後，若呈裸土狀態亦會導致 C 值大幅上升。Chen *et al.*, (2013) 之實驗結果指出，湛水耕作之水梯田，因有較大面積之土地處於湛水狀態，若以水體視之，其 C 值應趨近於零，方便估算之水梯田土壤沖蝕量接近於實測值。Mihara (1996) 則指出日本水梯田的土壤流失以田埂邊坡之侵蝕崩塌為主。Chen *et al.*, (2013) 利用現地收集之降雨逕流及 SS 觀測值推算陡坡水稻梯田正常耕作之年沖蝕量為 0.77 ton/ha/year，水稻梯田休耕轉作綠

肥後，除田埂崩塌大幅增加外，也導致降雨逕流之 SS 值大幅上揚，觀測紀錄最高可達 3,400 mg/L 以上，為水田湛水耕作時期最高值之 8 倍以上，年沖蝕量則較水田耕作時期高出 5 倍以上。若將陡坡水稻梯田與其他土地利用土壤侵蝕量作一比較，則遠較陡坡果園、檳榔園或平台階段台面淨耕茶園為低，其防止土壤侵蝕功能極為顯著。由於水梯田較平地水田具有更複雜之水文、地文條件，有賴更進一步之整合性試驗研究，方可更精準的預測其沖蝕特性。

(四) 水梯田入滲補注地下水 / 防制土壤沖蝕綜合分析

湛水耕作之水梯田，雖然因牛踏層之阻滯，使其坵塊內之垂直入滲率偏低，但藉由田埂邊坡側滲等機制，使田區整體入滲率增加。但相較於坡地其他土地利用，以林壯沛、盧惠生（1995）於林試所蓮華池地區量測闊葉林地、砍伐跡地、成齡檳榔區、新植檳榔區等之土壤入滲率為例，分別為 640 mm/hr、144 mm/hr、84 mm/hr 及 168 mm/hr，均遠高於本研究雙環垂直入滲率試驗及整體入滲率估算結果。但水梯田在長期保持湛水之情況下，產生不可忽視之累積入滲水量。以本研究為例，實驗田 A 及實驗田 B 年累積補注量以最保守之日平均補注量（即田埂經維護後之減水深扣除蒸發量，不考慮豪大雨期間導致之湛水深增加或其他湛水深變化造成之差異）乘以湛水 350 天（因當地耕作方式為常年湛水，以 365 天扣除如收割等少數幾日排水情形）作一簡單估算，補注量分別為實驗田 A 之 8,834 mm 及

實驗田 B 之 3,486 mm，為當地年均降雨量 5,146 mm 之 171.7% 及 67.7%。上述估算之比例，並非指降雨期間入滲之水量，而是長期藉由攔蓄上游水源引至田區入滲之結果。

根據經濟部水利署 101 年水利統計中，台灣年降雨量 1,130.04 億立方公尺，其中年逕流量高達 74.95%，年蒸發量佔 20.58%，年滲透量僅佔 4.47%。對照森林集水區其他非湛水型之土地利用，以前述之蓮華池地區為例，其年均雨量為 2,343 mm，雖然各種土地利用具有較高之入滲率，但以水收支平衡觀點，扣除蒸發散、逕流（施鈞程（2003）整理之蓮華池 3 號、4 號、5 號森林集水區之年降雨量各有 43.7%、55.3% 與 41.7% 成為河川流量，而其 1987-1996 之年蒸發散量以水平衡法估計為 1,182 mm；以 Thornthwaite 法估算為 1,004.7 mm；以 Hamon 法估算為 983.9 mm）後將無法達到如本研究實驗田 A、B 在最保守之情況下所得之年累積地下水補注率。

對比平地水田，Chen *et al.*, (2002) 量測彰化田中鎮之實驗田，地下水補注率約在 5 mm/day 左右；簡傳彬（2003）於桃園農田水利會桃園大圳二支線灌區田區實測之地下水補注率為 3.8 mm/day；曹以松及林俊男等（1987）於集集共同引水計畫中探討以水田超量灌溉方式作為人工補注地下水源之措施，除於雲林麻園地區實施超量灌溉之現地水收支平衡試驗外，並以灌溉水質數學模式進行模擬，結果顯示該區超灌入滲量約為 5.5 mm/day。而本研究實驗田 A 田埂邊坡維護前平均減水深 113.37 mm/day，維護後平均減水深 25.24 mm/

day，實驗田 B 田埂維護前平均減水深 9.02 mm/day，維護後平均減水深 9.96 mm/day，地下水補注效益遠高於前述所列之平地水田。劉振宇（2003）針對上游地區水稻梯田對地下水補注效益進行評估，各農田水利會之水稻梯田對地下水補注總量可達 3.25 億立方公尺，約為 0.56 座曾文水庫之有效容量，部分地區如新竹水利會之補注效益可達灌溉水量之 27.1%，顯示出水稻梯田對地下水之涵養補注有明顯之效益。

在防制土壤沖蝕方面，自政府實施「水旱田利用調整計畫」，獎勵水稻田休耕轉作後，部分田區以翻耕或種植綠肥之方式進行休耕，或轉作雜糧旱作、蔬菜、茶園及果園等。部分水梯田因農村人口老化、勞動力不足導致農作傳承中斷或因崩坍等災害導致棄耕而雜草叢生，易形成所謂之芒草梯田。此外，部分休耕水梯田因為噴灑除草劑抑制雜草生長，反而造成土壤污染及生態之破壞。休耕及部分耕作中之水梯田，也因為維修人力缺乏，常使田埂邊坡處於田埂高度降低及邊坡塌損狀態，以上所述各種狀況均會改變水梯田水收支情形，根據本研究於貢寮吉林里現地踏勘結果顯示，水梯田休耕造成之不良影響包括（圖 13）：

1. 田埂消失：無法蓄存超滲降雨，導致逕流量增加。
2. 邊坡崩塌：田區土壤表面於土壤水分含量減少時產生裂縫，近外圍邊坡處受雨水入滲裂縫易產生崩塌，此現象在田區噴灑除草劑而無植生保護之情況下更易發生。
3. 階段平台逐漸消失：伴隨沖蝕土砂或

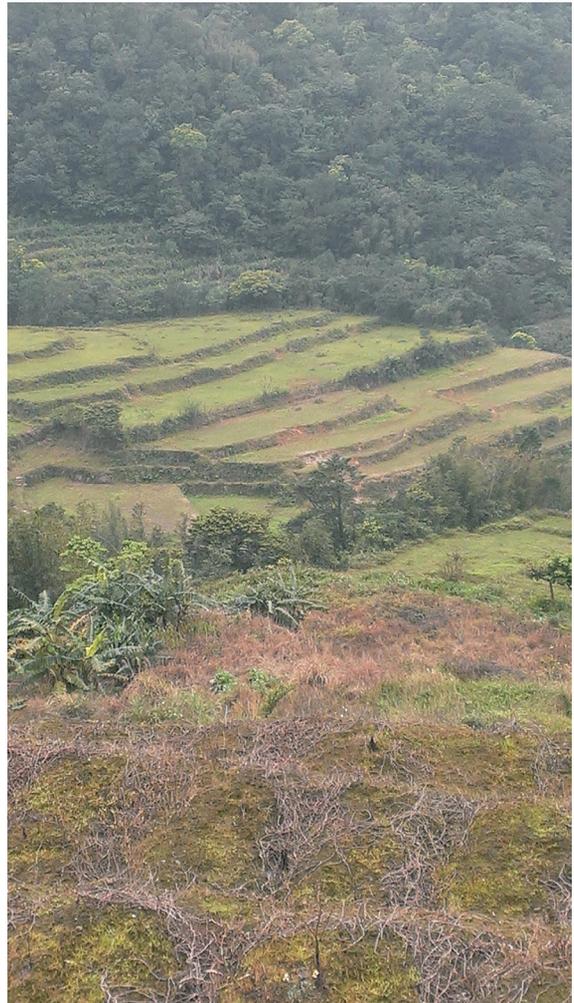


圖 13 水梯田休耕後情景，左上為芒草梯田，中間顯示田埂逐漸銷蝕、邊坡多處崩塌，近景則為水梯田休耕噴灑除草劑、表土裸露情形。

邊坡崩塌土砂堆積於田區平台坵塊，田區將逐漸恢復連續坡面狀態，若無植生保護下，將導致沖蝕加劇。

經以上綜合分析顯示貢寮區吉林里實驗梯田具有極佳之地下水涵養功能。由於位於上游地帶之水稻梯田對蓄洪、消洪、防止土壤侵蝕等與災害防治有關之效益較平地水田更為

顯著，如何加強水梯田保育已成為當前水土資源保育與防災重要課題之一。

五、結語

溪流－渠道－水梯田灌溉系統形成一連續水域網絡，灌溉引水過程所經歷之水路、田區使原本將由天然河道迅速向下游入海流失之水流加以攔蓄滯留，使其以較長之時間停留於集水區上游區域，且於蓄水期間增加入滲補注地下水源之機會，可間接產生穩定河溪流量之功能。以田埂邊坡圍築而成之平台階段，大面積之湛水範圍，具有防制土砂沖蝕流失之功能。本研究結果顯示水梯田雖然因牛踏層之存在，導致入滲率偏低，但在長期引水保持田區湛水之情況下，產生不可忽視之累積入滲水量。貢寮吉林里年均降雨量 5,146 mm，約為台灣年均降雨量之 2 倍，在此雨量極為豐沛之地區，若能經水梯田予以涵養（即使無法大規模復育，亦應使現有休耕田保持可蓄水狀態），其水土保持功能之水源涵養效益將較其他地區水梯田更為彰顯。台灣地區因為經濟高度發展，農村勞力缺乏以致集水區上游尚在耕作中之水梯田面積日益縮減，建議未來可結合政府、學術界、農民及都市居民共同參與復育及維護水梯田。但若進行大規模之水梯田復耕時，因田區新復育易造成田區入滲大幅上揚，相關灌排系統及水量調配應配合加以規劃。♻️

參考文獻（請逕洽作者）

謝誌：本研究取材自第一作者完成之林務局林業發展計畫102林發-07.2-保-23、103林發-07.2-保-17《水梯田水土保持功能調查評估之歷年研究成果彙編》，特藉此向林務局致上感謝。



（圖片／高遠文化）