

# 水梯田水土保持功能調查評估

## Investigation and Assessment of Soil and Water Conservation Function of Flooded Terraced Paddy Field

執行單位：國立台北科技大學

研究主持人：陳世楷

協（共）同主持人：高雨瑄

研究人員：陳慣楹、蔡誠斌、許朝陽、張瀚元、謝致恆、廖國任

中華民國 103 年 12 月 31 日

## 摘要

為探討山區水梯田地下水補注功能及機制，本研究於新北市貢寮區之兩處水梯田(實驗田 A 為休耕後復育田，實驗田 B 為持續耕作之老田)進行相關試驗，並應用水收支法分析水梯田入滲補注地下水之機制。現地量測包括減水深、垂直入滲、土壤成分及土壤水分分佈等相關試驗，並探討耕種歷史、田埂維護情形等因子對水梯田入滲補注之影響性及量化水梯田補注功能。相關參數亦可作為土壤沖蝕推估之基礎。

實驗田 A 與實驗田 B 田區之淺層土壤在分類上均以砂質壤土為主，實驗田 A 田埂邊坡維護前平均田區整體入滲率 113.37 mm/day，維護後為 25.24mm/day，埂間滲漏/側滲約為垂直入滲率 5~17 倍，實驗田 B 田埂維護前平均田區整體入滲率 9.02 mm/day，維護後為 9.96 mm/day，埂間滲漏/側滲約為垂直入滲率 5~24 倍。土壤水分飽和度分析結果顯示位於田埂內側交界處往下量測之飽和度幾乎皆為 100%，高於田區內量測之數據，表示田區湛水易循田區內田埂內側邊界滲漏至深層土壤。影響入滲補注之因素方面，耕作歷史較短之水梯田有較高補注率，田埂邊坡之維護對於田區整體入滲率有極高影響性，而田埂坵塊邊界長度無相關性，田埂總邊界/面積比值相關性則受田埂維護影響。實驗田 A 及實驗田 B 之地下水年補注量保守估計分別為 8,834mm 及 3,486mm，為當地年均降雨量 5,146mm 之 171.7% 及 67.7%，其補注效益皆遠較其他研究報告所指出之平地水田或坡地其他非湛水的土地利用顯著。土壤沖蝕分析顯示水梯田油站水耕作轉變為裸土狀態，實驗田 A 水梯田土壤流失量由 119.89ton/ha/year 增至 3382.09ton/ha/year；實驗田 B 水梯田土壤流失量由 194.15ton/ha/year 增至 6687.35.35ton/ha/year。推估結果顯示水梯田在休、棄耕後若無植被保護，土壤沖蝕量將大幅上昇。建議政府相關單位應規劃水梯田保育措施，使其發揮水土保持功能。

關鍵詞：水梯田、地下水補注、減水深、入滲

# ABSTRACT

Terraced paddy fields play an important role in soil and water conservation in mountainous areas. However, detailed experimental data to confirm this function is missing, as well as an identification of the most decisive factors for groundwater recharge. The aim of this study was therefore to quantify groundwater recharge in terraced paddies both experimentally and by related water balance analysis. The *in-situ* measurements including water requirement rate, vertical infiltration rate, soil textures and soil moisture distribution of different soil layers were investigated in two experimental terraced paddy fields (experimental field A(FA) was re-cultivated after fallow for over 30 years, and experimental field B(FB) was cultivated continuously for over 100 years) on Gongliao District of New Taipei City. The factors about the history of farming and maintenance conditions impact on groundwater recharge and soil erosion of the terraced paddy fields were then discussed in this study.

The average field infiltration rates in FA before/after maintenance were 113.37, and 25.24 mm/day, respectively. The under-bound percolation rate was 5-17 times as high as vertical infiltration rate. In FB, The average field infiltration rates were 9.02 and 9.96 mm/day before/after maintenance, respectively. The under-bound percolation rate was 5-24 times higher than vertical infiltration rate. Soil moisture analysis showed that the saturations were near 100% at inside edge of the bounds, higher than the measurements at block center, indicating that ponding water trend to percolate through inside edge of the bounds to deep soil layer. Relatively short history of farming in terraced paddy field resulted in a higher recharge rate. Maintenance of the bounds also could be a significant factor on field infiltration rate, while the length of the block boundary showed no significant correlation with the field infiltration rate.

The amount of groundwater recharge of FA and FB were estimated as 8,834 and 3,486mm/year, account for local average annual rainfall were 171.1% and 67.7%, respectively. Recharge benefits are far more significant than for lowland paddy fields or other land uses on slope with no ponding water recorded in other studies. Soil erosion rates calculated by the Universal Soil Loss Equation (USLE) showed that annual erosion rates for abandoned terraced paddy fields under bare-topsoil condition were significantly higher than those of the rice-planted terraced paddies. Therefore, sustainable rice planting in the terraced paddies or maintenance of the water-storage capability in abandoned arable land is necessary to increase the water and soil conservation function in watersheds. The government should formulate effective measures and maintain sustainable rice planting in the terraced paddies.

Keywords : Terraced Paddy Field, Groundwater Recharge, Water requirement, Infiltration

# 目錄

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 中文摘要.....                          | 1  |
| 英文摘要.....                          | 2  |
| 目錄 .....                           | 4  |
| 表目錄 .....                          | 6  |
| 圖目錄 .....                          | 7  |
| 第一章 緒論 .....                       | 9  |
| 1.1 前言 .....                       | 9  |
| 1.2 計畫目標 .....                     | 10 |
| 1.3 實施方法與步驟 .....                  | 11 |
| 1.4 計畫效益 .....                     | 12 |
| 第二章 文獻回顧.....                      | 13 |
| 2.1 水梯田入滲補注地下水相關文獻 .....           | 13 |
| 2.2 水梯田入滲機制相關文獻 .....              | 15 |
| 2.2.1 牛踏層形成/對入滲之影響 .....           | 15 |
| 2.2.2 埂間滲漏量化研究 .....               | 15 |
| 2.2.3 埂間滲漏機制研究 .....               | 16 |
| 2.3 蓄水及調洪機能 .....                  | 18 |
| 2.4 水田土壤沖蝕相關文獻 .....               | 20 |
| 2.5 水梯田淨化水質相關文獻 .....              | 23 |
| 第三章 材料與方法.....                     | 25 |
| 3.1 實驗田區概述 .....                   | 25 |
| 3.2 水梯田環境概述 .....                  | 28 |
| 3.2.1 水梯田構築工程 .....                | 28 |
| 3.2.2 水稻田土壤分層剖面分析 .....            | 29 |
| 3.3 水梯田水文收支理論 .....                | 31 |
| 3.3.1 水稻梯田水文收支模式 .....             | 31 |
| 3.3.2 水梯田田區內垂直入滲與田埂垂直滲漏/側滲理論 ..... | 33 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 3.3.3 水梯田地下水流動模式 .....         | 35 |
| 3.4 我國現行水稻田灌溉方式 .....          | 37 |
| 3.5 現地實驗方法與步驟 .....            | 37 |
| 3.5.1 減水深試驗 .....              | 37 |
| 3.5.2 雙環定水頭入滲試驗 .....          | 40 |
| 3.5.3 現地土壤水分含量量測 .....         | 42 |
| 3.5.4 土壤分層成份調查 .....           | 43 |
| 3.6 通用土壤流失公式 USLE .....        | 46 |
| 第四章 結果與討論 .....                | 48 |
| 4.1 貢寮地區水梯田現況調查 .....          | 48 |
| 4.2 水梯田土壤分層取樣及成分分析 .....       | 52 |
| 4.3 土壤水分飽和度分析 .....            | 53 |
| 4.4 水梯田入滲補注機制綜合分析 .....        | 60 |
| 4.4.1 田區垂直入滲及埂間滲漏/側滲比較分析 ..... | 60 |
| 4.4.2 水梯田耕作歷史對入滲補注之影響 .....    | 69 |
| 4.4.3 水梯田田埂維護情形對入滲補注之影響 .....  | 70 |
| 4.5 水梯田入滲補注地下水綜合分析 .....       | 76 |
| 4.6 水梯田土壤沖蝕防制功能分析 .....        | 79 |
| 4.6.1 USLE 參數推估 .....          | 79 |
| 4.6.2 土壤沖蝕估算 .....             | 84 |
| 第五章 結論與建議 .....                | 87 |
| 5.1 結論 .....                   | 87 |
| 5.2 建議 .....                   | 89 |
| 參考文獻 .....                     | 90 |
| 附錄 A 計畫工作集景 .....              | 94 |
| 附錄 B 土壤分層粒徑分析結果 .....          | 99 |

## 表目錄

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 表 4.1 實驗田 A 田區及田埂飽和度量測結果.....   | 55  |
| 表 4.2 實驗田 B 田區及田埂飽和度量測結果.....   | 55  |
| 表 4.4 實驗田 B 田埂水分飽和度量測結果.....    | 56  |
| 表 4.3 實驗田 A、B 邊坡飽和度結果.....      | 56  |
| 表 4.5 實驗田 A 減水深試驗結果.....        | 64  |
| 表 4.6 實驗田 B 減水深試驗結果.....        | 65  |
| 表 4.7 實驗田 A 雙環定水頭入滲試驗結果.....    | 66  |
| 表 4.8 實驗田 B 雙環定水頭入滲試驗結果.....    | 66  |
| 表 4.9 成對樣本 T 檢定結果.....          | 73  |
| 表 4.10 鄰近雨量站降雨沖蝕指數表.....        | 80  |
| 表 4.11 實驗田降雨沖蝕指數推估結果.....       | 80  |
| 表 4.12 土壤結構參數.....              | 80  |
| 表 4.13 土壤透性參數.....              | 81  |
| 表 4.14 實驗田土壤分析結果.....           | 81  |
| 表 4.15 土壤沖蝕指數計算結果.....          | 81  |
| 表 4.16 坡長因子中 m 之設定值.....        | 82  |
| 表 4.17 坡長因子(L)計算結果.....         | 82  |
| 表 4.18 覆蓋與管理因子值對照表.....         | 83  |
| 表 4.19 適用於台灣不同水土保持措施及坡度之因子..... | 84  |
| 表 4.20 實驗田區土壤沖蝕量推估.....         | 85  |
| 實驗田 A 上階坵塊粒徑分析結果.....           | 100 |
| 實驗田 A 中階坵塊粒徑分析結果.....           | 100 |
| 實驗田 A 下階坵塊粒徑分析結果.....           | 101 |
| 實驗田 B 粒徑分析結果.....               | 101 |

## 圖目錄

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 圖 3.1 實驗田地理位置圖.....                 | 26 |
| 圖 3.2 實驗田 A 實景.....                 | 27 |
| 圖 3.3 實驗田 B 實景.....                 | 27 |
| 圖 3.4 切堆土施工法.....                   | 29 |
| 圖 3.5 全切施工法.....                    | 29 |
| 圖 3.6 水田土壤分層剖面示意圖.....              | 30 |
| 圖 3.7 水田表土季節性開裂情形.....              | 31 |
| 圖 3.8 水稻梯田水收支平衡模式示意圖.....           | 32 |
| 圖 3.9 水梯田田區內垂直入滲與田埂垂直入滲/側滲示意圖 ..... | 34 |
| 圖 3.10 水田滲漏水流動模式.....               | 36 |
| 圖 3.11 水田側滲水流動模式.....               | 36 |
| 圖 3.12 田埂缺口填補.....                  | 39 |
| 圖 3.13 減水深試驗使用之浮球式水尺.....           | 39 |
| 圖 3.14 量測蒸發量之蒸發皿.....               | 40 |
| 圖 3.15 雙環定水頭入滲試驗.....               | 42 |
| 圖 3.16 土壤水分飽和度量測.....               | 43 |
| 圖 3.17 土壤分層採樣.....                  | 44 |
| 圖 3.18 土壤粒徑分析試驗.....                | 45 |
| 圖 3.19 USDA 土壤質地三角圖 .....           | 46 |
| 圖 4.1 水梯田越田漫灌實景.....                | 50 |
| 圖 4.2 水梯田棄耕後形成芒草梯田實景.....           | 50 |
| 圖 4.3 水梯田休耕轉作噴灑除草劑後之實景(無湛水功能).....  | 51 |
| 圖 4.4 水梯田休耕後田埂銷蝕及邊坡崩塌情景.....        | 51 |
| 圖 4.5 水梯田休耕後邊坡崩塌之情形.....            | 52 |
| 圖 4.6 水分分佈量測位置示意(未按比例尺).....        | 54 |
| 圖 4.7 實驗田 A 中階坵塊飽和度-深度關係 .....      | 57 |



|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 圖 4.8 實驗田 A 下階坵塊飽和度-深度關係 .....             | 57 |
| 圖 4.9 實驗田 B 上階坵塊飽和度-深度關係.....              | 58 |
| 圖 4.10 實驗田 B 中階坵塊飽和度-深度關係.....             | 58 |
| 圖 4.11 實驗田 B 下階坵塊飽和度-深度關係.....             | 59 |
| 圖 4.12 實驗田 B 田埂土壤飽和度 .....                 | 59 |
| 圖 4.13 邊坡飽和度-深度關係 .....                    | 60 |
| 圖 4.14 實驗田 A 田埂維護前田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較.... | 66 |
| 圖 4.15 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.... | 67 |
| 圖 4.16 實驗田 B 田埂維護前田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較.... | 67 |
| 圖 4.17 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.... | 68 |
| 圖 4.18 實驗田 A 田埂邊坡滲漏情形.....                 | 69 |
| 圖 4.19 實驗田 A 田埂邊坡維護前、後之田區整體入滲率比較.....      | 72 |
| 圖 4.20 實驗田 B 田埂邊坡維護前、後之田區整體入滲率比較.....      | 73 |
| 圖 4.21 實驗田 A 田埂邊坡維護前、後樣貌.....              | 74 |
| 圖 4.22 實驗田 B 田埂邊坡維護前、後樣貌.....              | 75 |
| 圖 4.23 台灣水資源運用實況.....                      | 78 |
| 圖 4.24 雨量站與實驗田位置圖.....                     | 79 |
| 附錄 A-圖 1 貢寮吉林里水梯田實景 .....                  | 94 |
| 附錄 A-圖 2 與人禾基金會踏勘實驗田區 .....                | 94 |
| 附錄 A-圖 3 水梯田實驗田 A 實景 .....                 | 95 |
| 附錄 A-圖 4 水梯田實驗田 B 實景.....                  | 95 |
| 附錄 A-圖 5 水梯田田埂邊坡土壤水分量測情形 .....             | 96 |
| 附錄 A-圖 6 水梯田減水深試驗安裝浮球式水尺情形 .....           | 96 |
| 附錄 A-圖 7 棄耕水梯田垂直入滲試驗之實景(1).....            | 97 |
| 附錄 A-圖 8 棄耕水梯田垂直入滲試驗之實景(2).....            | 97 |
| 附錄 A-圖 9 水梯田土壤滲透性實驗室分析 .....               | 98 |
| 附錄 A-圖 10 水梯田土壤分層調查及取樣情景 .....             | 98 |

# 第一章 緒論

## 1.1 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。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。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)。而水梯田之傳統耕作方式，正符合里山倡議精神之具體實踐。

我國之梯田分佈依劉振宇(2004)針對各農田水利會之調查顯示分別為宜蘭 1,072 公頃、北基 2,112 公頃、桃園 1,572 公頃、石門 10,632 公頃、新竹 1,261 公頃、苗栗 2,832 公頃、台中 19,577 公頃、南投 9,872 公頃、彰化 2,329 公頃、雲林 3,535 公頃、嘉南 478 公頃、高雄 3,134 公頃、屏東 1,124 公頃、花蓮 11,324 公頃以及台東 6,134 公頃，台中灌區擁有最多水梯田耕作面積，其次為花蓮灌區，其中北基、桃園、石門及新竹之水梯田面積分別佔總耕種面積 43%、6.03%、88.62%及 19.27%。多數梯田呈零星分佈，較著名之水梯田聚落如金山八煙聚落、雪山山脈北端貢寮雙溪坪林山區、花蓮豐濱港口部落等，皆以美麗之水梯田景觀著稱。

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。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。

近年來因全球暖化、氣候變遷所導致之災害對社會及經濟造成許多影響，且我國因地狹人稠，地形之起伏變化極鉅，集水區地勢陡峭不易涵蓄水分，而河川源短流急，雨量豐沛時河川流量暴增，惟在短時間內即奔流入海，因既有蓄水設施其容量仍不足，尚無法蓄存足夠水量以因應未來需求。水梯田之蓄水調洪、補注地下水功能或許能紓緩當前之防災及水資源調度之壓力。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。

## 1.2 計畫目標

本計畫全程目標為：

透過國內外文獻收集、水梯田現地試驗和理論分析，探討水梯田所具有之水土保持功能以及休耕轉作後對水土保持造成之影響，作為水梯田復育保全政策擬定及推動上之參考。

本年度工作項目與方法為：

1. 彙整分析國內外水梯田水土保持功能量化評估相關文獻。
2. 完成實驗田區選定規畫，以及相關背景資料如水田環境特性、土壤分層及其物理性質、邊坡型式以及灌溉供水方式等調查。
3. 完成水梯田水源涵養功能調查分析，包括入滲分析試驗、田面湛水減水深試驗及土壤水分分佈量測，配合蒸發散量量測分析等，進行地下水補注量之推估。
4. 進行實驗水田區周邊休耕轉作或棄耕田區環境變遷調查，包括田埂高

度土壤表層成份及入滲率變化分析等。

本年度以上年度之成果為基礎，進行水梯田水土保持功能之深入彙整分析，年度目標為：

1. 持續彙整分析國內外水梯田水土保持功能量化評估相關文獻。
2. 持續進行前一年度水梯田試驗區之水源涵養監測，著重於耕作時期土壤因翻耕受擾動後之現地調查。
3. 分析水梯田水收支相關因子及垂直入滲 / 側滲流況，探討水梯田回歸水產生及地下水補注機制。
4. 現地調查湛水耕作之水田與休耕轉作或棄耕田區之環境變遷及土壤沖蝕變化情形，並根據相關沖蝕理論探討其受衝擊程度。
5. 彙整兩年成果，綜合分析水梯田水土保持功能。

### 1.3 實施方法與步驟

本計畫擬於全程計畫期間，透過水梯田試驗田區之現地調查分析，建立本土有關水梯田在水資源涵養、土壤侵蝕防治等公益機能研究之資料庫，並利用現地觀測試驗以及理論模式分析等方式探討水梯田在休耕轉作後，對水土保持造成之影響分析，以作為梯田保護政策推動上之參考。實施方法與步驟如下所列：

1. 國內外水梯田水土保持相關研究成果分析彙整，以及各項水土保持影響因子與理論分析工具之探討。
2. 現地踏勘選擇具代表性之陡坡水稻梯田流域以及周邊鄰近存在原為水田區，目前已休耕轉作之區域作為實驗場址，並設置相關水文氣象儀器。
3. 踏勘收集水梯田及已休耕轉作之梯田環境現況相關資料，包括田埂高、出水高及維護狀況等環境參數以及實驗室分析土壤分層，包括表土層、牛踏層及犁底層相關物理性質及水力特性。
4. 建立水梯田水收支模式，分析各項水文因子，量化推估其水資源涵養功能。

相關實驗包括減水深試驗、雙環馬力與定水頭試驗、流速量測及土壤水分分佈量測等，藉以分析水梯田及週邊休耕田區之整體滲漏率及垂直基本入滲率，評估其地下水補注能力，量測範圍包括田區中央及近田埂區域。

5. 藉由土壤沖蝕公式，分析各項影響因子，如降雨沖蝕因子、土壤沖蝕因子、坡長坡度因子、覆蓋與管理因子以及水保因子等，比較水梯田在正常耕作及休耕轉作後，其防止土壤沖蝕之能力之改變，探討水稻梯田在休耕轉作後對水土保持造成之影響。
6. 綜合彙整文獻、現地試驗及理論分析成果，量化分析水梯田水土保持功能

## 1.4 計畫效益

1. 透過其他土地利用水土保持相關資料收集，可以檢討分析現存水稻梯田水土保持功能與其之異同，以利梯田保育政策之擬定
2. 與民間相關基金會及農民共同建立實驗田區可增強其對水稻梯田之保育觀念，有利於未來保育政策之推動。
3. 以量化之數據提供水稻梯田對水土保持之相關知識，讓一般民眾能清晰瞭解水稻梯田保育之重要性，使更多國人認識水梯田對水土保持之貢獻，並加強民眾的保育觀念。

經過兩年度之執行期程，透過現地試驗及相關分析，除以更充分之分析結果修正上一年度之部分結果外，計畫之全程目標業已達成，對水梯田水土保持功能有更進一步之分析與了解，可提供政府相關單位作為水梯田復育政策擬定之參考。相關調查分過程之計畫工作集景敬請參閱附錄 A。

## 第二章 文獻回顧

水梯田為順應邊坡的地形開闢而成的階梯狀水田，相較於平地水田，水梯田具有更豐富的生態功能，而其位於集水區之地理位置，更加突顯其對蓄水調洪、涵養水源及防止土壤沖蝕等功能。日本將位於坡度 1/20 以上坡面之水田定義為水梯田(蔡玉娟，2010)，而我國雖然對於水梯田尚無明文之界定，唯山坡地保育利用條例第三條對於合於下列情形之一者劃定為坡地：

1. 標高在 100 公尺以上者
2. 標高未滿一百公尺，而平均坡度在百分之五以上者

針對上述條件，我國於滿足以上任一項條件之水田應可視為水梯田，亦為本研究探討範圍。

### 2.1 水梯田入滲補注地下水相關文獻

湛水耕作為水稻主要栽培方式，因此以往常將水田滲漏視為灌溉損失，而水田滲漏調查分析便成為規劃區域性灌溉用水管理之重要依據。我國對於水田之入滲研究源自於日據時代依據現地實驗推導之入滲經驗公式，使用上極為簡便，僅需利用田區表土土壤粘粒百分比，即可進行水田入滲率估算。此公式於政府遷台後，持續為省水利局應用於設計規範水田灌溉用水，因其考量之入滲因子較少，準確性常受到質疑(Liu et al.,2001)。爾後較為完整之研究為民國 46 年到 53 年由陳尚及李德滋(1964)於全台 433 處所做的田間試驗。依不同土類及母質將全台分成六種土壤，並推導出：(1)質地與水分當量，(2)水分當量與水田垂直入滲率之經驗公式，僅需知道該區域之砂，粘、粉粒百分比便可利用質地與水分當量之經驗式求出水分當量，再利用水分當量與水田垂直入滲之經驗式求出所需要之水田垂直入滲率。

在其他相關研究方面，陳尚(1980)、蔡明華（1993）參考日本對水田灌溉公

益效能之評價模式，將田間滲漏量視為補注地下水、伏流水、回歸水之水源涵養量。並假定 25%滲漏水垂直向下補注地下水含水層，推估我國之水田年補注地下水量。曹以松及林俊男等（1987）則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，研究結果顯示該區超灌水量無法完全補注至地下含水層，推斷為受到水田牛踏層低滲透性阻隔之影響，以致降低水田入滲效果。丁澈士等(1997)亦曾針對水稻灌溉，研究農業灌溉用水對地下水補注影響。其他田間試驗或數值模擬包括鄒禕等(1998) 及 Chen et al. (2002)等均曾探討休耕水稻田蓄水對地下水涵養補注之影響，其主要措施為增高田埂，利用豐水期將水引至休耕田區，進行超量蓄水，並藉增加入滲水頭以增加入滲通量。劉振宇(2002)以現地試驗配合入滲理論數學模式以及現有灌溉制度推估全省各水利會灌區水田之年地下水總補注量可達 17.97 億立方公尺，約為三座曾文水庫之有效容量，其效益不容忽視。

Masayuki (2006) 探討日本地下水補注功能，以 Nobi 平原為例，因為它經歷了典型的社會經濟變化。該研究使用地下水位和河川流量的長期數據，根據水平衡方程進行水田地下水補注分析。稻田滲漏補注在 1975 年大約為  $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{yr}$ ，1984 年下降到  $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{yr}$ 。水田地下水補注功能之貨幣價值以成本替代法核算，在 1975 年估計的約為  $\$5.6 \times 10^6$  元( $20 \times 10^3 \text{ ha}$  稻田)。每稻田單位面積價值為  $\$2,820$  元/ha，而日本全國之均值約為  $\$400/\text{ha}$ 。

國內針對水梯田入滲補注地下水之研究始於 Liu et al. (2004)採用三維地下水模式(FEMWATER) 模擬水梯田入滲流況，包括模擬梯田邊界側滲、梯田地下水迴歸水佔整體入滲比例及梯田垂直滲漏對地下水之補注量等； Chen et al. (2012; 2013a)於新竹縣新埔實驗水梯田現地觀測結果則顯示水梯田在休耕或種植綠肥後，基本入滲率將會大於水稻湛水耕作時期，部分田區入滲率可提高 1 個級數（order）以上。但入滲率之增加，並未反饋至地表逕流量之減少，反而導致田埂崩塌大幅增加，減少蓄水調洪功能。

## 2.2 水梯田入滲機制相關文獻

### 2.2.1 牛踏層形成/對入滲之影響

水稻栽培多以湛水耕作為主，整田過程包括反覆的耕犁、耙鬆與整平表土，導致水稻田產生一層低滲透性的犁底層結構 (plough pan 或 plow pan, 我國俗稱牛踏層)，顯著的降低滲漏速率與灌溉用水損失(Moormann and Van Breemen, 1978; Sharma and De Datta, 1985; Chen et al., 2002; Kukal and Aggarwal, 2002; Janssen and Lennartz, 2007)，Chen et al. (2002) 於彰化田中實驗田區進行張力計與雙環入滲試驗，結果顯示，位於泥濘層與未耕犁層中間，厚度約 7.5cm 之土層具有極低之滲透性，底下之未耕犁層其水力傳導係數為牛踏層 20~30 倍，由於牛踏層之存在，易使田區內湛水入滲至牛踏層發展為垂向之非飽和流動。當湛水深由 6cm 增加至 16cm 使入滲率增加 1.5 倍，牛踏層之破壞使入滲率增加 3.7 倍。其後續研究使用一維垂直入滲模式(SAWAH)及三維數值模式(FEMWATER)對實驗取得之現地條件進行模擬，模擬結果顯示稻田內水主要入滲方向為垂直向下，而牛踏層是控制入滲率之主要因素，假使沒有牛踏層存在，明顯的側滲可能只發生於旱地與水稻田之邊界。該研究結果顯示，土層滲透性、乾燥土地及水稻田土壤含水量、乾/濕邊界長度、以及水稻田總面積皆為側滲佔總入滲量比例之關鍵。

### 2.2.2 埂間滲漏量化研究

在埂間滲漏研究方面，水稻田周圍之田埂已被視為灌溉水損失之主要因素 (Tuong et al., 1994)，通過田埂的大量水損失已被使用塑料沿著田埂敷蓋，及無數蓋狀態下量測總田間入滲量的方法加以比較分析而證實 (Walker and Rushton, 1986; Tuong et al., 1994)，此外，眾多研究結果顯示入滲環入滲率與田區水平衡計算而得之整體滲漏與側滲損失之間有重大的偏差，這些偏差歸因於田埂附近及下方之水損失 (Painuli et al., 1988; Wopereis et al., 1994; Kukal and Aggarwal, 2002; Bouman et al., 2005)。

湛水經由田埂入滲可能經由埂間垂直滲漏至地下水(Huang et al., 2003;



Tsubo et al., 2007), 或進行側向滲漏 (Walker and Rushton, 1986)。此一灌溉損失, 亦可視為地下水補注(Hamada and Komae, 1998; Hafeez et al., 2007)。然而入滲水也會經由田埂而橫向流動作為回歸水補注鄰近田區 (Huang et al., 2003; Liu et al., 2004; Tsubo et al., 2007), 其中水和營養物質能夠重複使用, 因此此兩種類型之水通量有必要加以區別。

### 2.2.3 埂間滲漏機制研究

根據 Walker and Rushton (1984) 之研究指出, 大多數用水損失發生於湛水入滲至田埂後之垂直向下滲漏, 同時橫向流動流至鄰接田區之情形只會發生在兩相鄰坵塊水位差異較大之情況下。至目前為止, 模式模擬結果顯示增加湛水深及低地下水位會增加田埂總入滲 (Walker and Rushton, 1984, 1986), Huang et al. (2003) 則指出田埂下方存在牛踏層則會降低田埂入滲, 該研究利用三維地下水模式 FEMWATER 模擬水稻梯田田埂之側滲及滲漏狀況, 田內區域滲漏主要方向為垂直向下, 田內靠近田埂交界有較高之水力梯度。於稻米種植 85 天後田埂滲漏率為田區內滲漏率之 2.72 倍。田埂最終滲漏率也為牛踏層最終滲漏率之 1.82 倍, 通過田埂沿著邊坡表面向下及向上之側滲率分別為 2.01 cm/day 及 2.12 cm/day, 然而側滲流經之邊坡表面土壤並非飽和, 顯示水稻田上階坵塊側滲並不會流動到下階坵塊, 而是成為地下回歸水(暗回歸水)再次利用, 地下回歸水不太可能在邊坡發展, 大部分水梯田水入滲補注至淺層地下水層。

影響田埂滲漏損失之重要因素除了前述牛踏層是否存在於田埂下方之外, 田埂維護狀況及田埂水力特性亦為重要因子 (Wickham and Singh, 1978); Bouman et al. (2005) 研究顯示田埂上有鼠洞將會導致非常高水損失。另一方面, Odhiambo et al.(1996)探討平均坵塊面積不同的兩塊整體田區, 平均坵塊面積較小之田區垂直入滲/側滲水損失比例較低, 而坵塊面積較小即代表其田埂長度/田區面積比值較高。經湛水深度與田區入滲率之回歸分析, 及湛水深度與總入滲加上側滲率(包括田埂)之回歸分析, 顯示湛水深度對於田區垂直入滲只有少量影響, 但是對於

總灌溉用水損失有高度影響 (Tuong et al., 1994; Liang et al., 2008)。其他如田區耕犁狀態、耕作歷史及灌溉方式亦會對垂直入滲及埂間滲漏造成影響。

Kukal et al. (2002) 透過量測水稻田在不同耕犁狀態下整體田區與入滲環之入滲率。結果顯示無耕犁、中耕犁強度、高耕犁強度水稻田之入滲環入滲率分別比整體田區入滲率減少 1.8%、38.8%及 42.1%。由於入滲環只能得到垂直滲漏的水損失，由此而知當耕犁後，部分水損失係透過無耕犁狀態之田埂而流動。該研究並指出使水稻田維持淺湛水不只能減少入滲，更可以減少埂間滲漏。Janssen et al. (2009) 對 20 年與 100 年歷史之水稻梯田田埂滲漏進行研究，於田埂上下層接連處田區分別裝設隔絕設施，使下坵塊隔絕區域接收自上方隔絕區域入滲後流出之水。上區內加入示蹤劑，並於田埂多處安裝張力計。經由挖開田埂剖面顯示，百年田埂內之示蹤劑尚集中於田埂上方內側，20 年田埂內之示蹤劑則近乎均勻分布。於入滲期間，當水流通過 20 年田埂時壓力水頭瞬間明顯地上升，代表有優勢流存在，相反地在百年田埂內之壓力水頭呈緩慢上升，說明百年田埂下方已有基礎水通量存在。其原因歸究於 20 年田埂密度較低且有較多的孔隙。該研究亦顯示，田埂之高入滲率與田埂有無牛踏層無一定關係，即使田埂下方於初始時存在牛踏層，亦會因生物作用等原因產生孔隙，而導致入滲率增加。

Lin (2013) 指出耕犁和經常性的間歇灌溉，將會改變土壤的結構並造成滲透能力隨時間產生變化。該研究評估入滲率隨時間變化的函數以計算犁底層之入滲率（垂直入滲）和稻田周圍田埂（埂間滲漏）的時間變化，經由分析入滲率的時間函數、湛水深度和入滲速率之間的關係以及稻田耕作歷史對於垂直水損失和側向水損失的影響。結論為耕作歷史僅幾十年的水田可能導致較大之灌溉水損失，維持湛水與排水階段的平衡，並且注意維護田埂可以減少灌溉水的損失。

由上述文獻回顧顯示，基於精確推算田間灌溉用水，以達成節水需求或回歸水之重複利用，以及水資源涵養等目的，國際上對水田入滲/埂間滲漏之研究極為重視，而我國在此一領域之研究則僅有少數之模式模擬研究，因此，本研究之目的為選擇完整之水梯田試驗分區，藉由水收支平衡概念配合現地雙環垂直入滲

試驗及減水深試驗，量化比較水梯田田區垂直入滲與埂間滲漏之比例，並藉由水梯田環境調查，配合前述各項試驗分析，從耕種歷史、田埂維護情形、坵塊幾何條件等因子進行分析比較，確認影響水梯田入滲補注之重要因子，藉此做為量化評估水梯田入滲補注地下水功能之基礎。

## 2.3 蓄水及調洪機能

台灣全島地形以山地居多，重山峻嶺南北縱貫。標高 1,000m 以上山區面積佔 32%，標高 100 至 1,000m 的丘陵台地面積則佔了 31%。河川短且陡急，故大多數河川之平均坡度與國外相比屬相當陡峭。因此雖然台灣年平均降雨量高達約 2,500mm，但卻無法將其有效蓄留而迅速流入大海。水梯田主要以野溪與灌溉溜池為灌溉水源，配合明渠或管路將水輸送至田區上端，再以重力越田方式供灌全區。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流失之水流加以攔截、迂迴、滯留，而使其以較長之時間停留於集水區上游區域，配合階段平台及田埂之構築，使其具有蓄水的機能且於蓄水期間，增加水流入滲之機會。

梯田在蓄水與調洪機能的關係上，前者是屬於平常時期，而後者是屬於洪水時期的。關於調洪機能，日本學者志村(1982)從宏觀的角度計算日本之水田的總蓄水容量。依據其計算，水田面積 300 萬 ha(1975 年之概算數字)，田埂高以國家之土地改良標準 30cm 計算者，水田的總蓄水容量可達 90 億  $m^3$ 。然而，由於水田處於湛水狀態，故須扣除該容量才是其實際的調洪容量。雖然湛水深在整田、插秧期、成活期較深，而分蘖期較淺等並不能將生育期的水深視為定值，但為方便起見，假設其深度平均約為 3cm。將其換算於 300 萬 ha 水田，則有 9 億  $m^3$  容量，故從 90 億  $m^3$  扣掉 9 億  $m^3$  後所得到的 81 億  $m^3$ ，就可粗估其為可能之調洪容量。根據志村(1982)估計，日本 1980 年當時將完工之 182 座以調洪為目的的水庫，其合計的調洪容量為 24 億  $m^3$ ，而水田的調洪容量相當其 3.3 倍之多。再將其應用在水梯田之上，前述之日本水梯田面積為 22.1 萬 ha，故所有水梯田

的蓄水可能容量為 6.6 億  $\text{m}^3$ ，調洪容量為 5.9 億  $\text{m}^3$ 。此為日本利根川水系 11 個水庫之調洪容量 2.2 億  $\text{m}^3$  之 2.7 倍。但是，前述的試算是基於宏觀觀點所作計算。因為農家為了怕田埂潰決，在豪雨前會將水田的排水缺口向下挖深以降低缺口高，因此，湛水將不會蓄留到與田埂同高之 30cm 的滿水狀態。因此，水田實際蓄水容量需更進一步之試驗觀察。

早瀨(1992)以日本茨城縣里美村的梯田地區為例，為了評估棄耕梯田調洪機能降低的程度，對流域的逕流量變化進行了模擬。研究結果顯示，因棄耕使 30cm 的田埂崩塌到剩下 5cm 時，100 年頻率的洪峰流量增加了 38%，原來 50 年發生一次的洪峰流量則變成 25 年會發生一次之頻率。亦即，棄耕將會提高洪水發生的頻率。由此可知，棄耕不只會喪失生產機能，更會喪失治水的機能。

我國在水田調蓄洪水之研究方面，成功大學詹錢登等(2003)評估（以民國 71 年第二期水稻田耕作面積 34.3 萬公頃為基準），調蓄洪水能力約有 5.83 億  $\text{m}^3$ ，相當於一座曾文水庫之調洪能力(曾文水庫之有效容量為 5.8 億  $\text{m}^3$ )。如果將水稻田之田埂高度維持在 30cm，相當於每公頃水田約有 2,700  $\text{m}^3$  之蓄水能力，則可調蓄洪水量增加為 9.26 億  $\text{m}^3$ ，其蓄洪能力相當於曾文水庫與翡翠水庫之有效容量。

Chen et al. (2011) 以現地水梯田降雨逕流觀測資料，應用水桶模式進行水梯田降雨逕流特性之探討。Chen et al. (2013b) 利用新竹縣新埔實驗田區現地降雨逕流觀測值配合水田水桶模式參數之優選驗證，建立梯田降雨逕流推估模式。在假設田埂高及出水口高因欠缺維修或棄耕造成高度降低或消失等條件下，模擬梯田出口逕流之變化，結果顯示田埂及出水口高度在降低 40% 以上時，下游出流量之模擬值變化極為顯著，而且降低幅度由 40%→50%→100% 之尖峰流量均呈現出倍數增加的情況。若田埂完全消失，以海棠颱風為例，其尖峰流量增加至 5 倍以上。因此，維持水稻梯田正常耕作，或使棄耕田維持湛水能力，將可舒解下游洪氾壓力。

## 2.4 水田土壤沖蝕相關文獻

目前國內外之研究探討，在水田土壤沖蝕之推估上，多採通用土壤流失公式(Universal soil loss equation, USLE)估計，歷年重要成果如下：

日本三菱綜合研究所(MRI, 1995) 指出，水稻田放棄耕作，致每公頃每年土壤流失量以 2.56ton 計之，全日本約有 93 萬 ton 土壤流失量，再以 SCM 方式，即以 1985 年以後所興建攔砂壩建設費 4,479 日元/m<sup>3</sup> 予以貨幣化(相當於當時台幣 1,280 元)，得防止土壤侵蝕經濟評價約 42 億日元(相當於 12 億元)；水稻田放棄耕作致土砂崩塌災害發生增加件數有 512 件，每件損害金額以 8,400 萬日元(相當於台幣 2,400 萬元)估計，得防止土砂崩塌貨幣價值約 430 億日元(相當於台幣 123 億元)。另日本農業總合研究所(1998) 指出，水稻田放棄耕作，土壤流失量將由 4.20ton/ha/yr 增至 14.77ton/ha/yr，與前述三菱綜合研究所之推估值相差 5.77 倍。韓國並未針對水田休耕後之土壤沖蝕量進行試驗分析，而係採用該國旱田農地每公頃 22.4ton 土壤流失為基準，以 1997 年旱地面積 761,000ha 計之，達 1,704.6 萬 ton，並以每 ton 土壤保持改善經費 7,940 韓圓(相當於 227 元)予以貨幣化，得防止土壤沖蝕評價 1,354 億韓圓(相當於 38.69 億元；MAF, 1999)。

我國對於水梯田休耕之土壤沖蝕變化研究始於林俐玲等(2004)利用 USLE 公式進行推估，水稻田處於湛水耕作與改變水稻田利用型態為休耕表土完全裸露時，平地水田（雲林縣林內鄉）每公頃土壤流失量由 4.75ton/ha/year 增至 192.5 ton/ha/year，坡地梯田（新竹縣竹東鎮）土壤流失量則由 8.25ton/ha/year 增至 2049.75ton/ha/year。譚智宏等（2004）依據前述林俐玲等(2004)之研究分析，進一步將水田防止土壤沖蝕效益予以貨幣化，應用每單位體積土壤流失量 603 元(依據台灣營建研究院(2002)以 1992~2002 年，治山防災工作如防砂壩、潛壩、擋土牆、護岸、堤防及固床工等水土保持措施，所投入經費 327.1 億元，以及台灣地區代表性 20 個集水區(如頂粗坑、太平窩等集水區計 20 個)防砂量總共 6,022,355m<sup>3</sup>，即  $327.1/9/6,022,355=603$  元/m<sup>3</sup>)、2001 年一、二期作水稻田種植面

積均值 166,092ha，可得水稻田防止土壤沖蝕機能評價 134.21 億元。

除了推估土壤流失的模式之外，對於水田的沖刷特性，日本 Machito Mihara (1996)指出水梯田的侵蝕崩塌最常見於田埂邊坡處。根據調查指出，遭受到侵蝕崩塌的地點比例以水田田埂的崩塌或溝蝕為最多，佔總數之 36%，而棄耕之水田則佔 30%居次，其餘的還有農用渠道及森林的崩塌，分析中也特別說明雖然田埂邊坡是水田的一部分，但是將其從水田中分隔出來，更能突顯出其重要性。該研究另以土壤物理特性觀點探討水田沖蝕機制，當土壤受到降雨侵蝕時，土體結構會受到水流影響而產生變化，土壤中的黏土成分因比重大易向下沉澱，同時土體頂部空出的土壤孔隙將被入滲水流所填滿，因而增加了含水量；相反的，底部的黏土成分提高了，含水量也就相對的較低。因此，當降雨持續了一段時間後，地表下因持續入滲達到飽和，地表開始產生地表逕流後，土體頂部就容易產生崩塌的侵蝕現象。Sang-Arun et al. (2006)之研究雖非針對水梯田，但其在泰國北部實地調查結果表明，土壤侵蝕的嚴重程度是根據梯田的結構和地面覆蓋條件而有所不同，紋溝侵蝕是裸露台地的主要沖蝕形式。部分紋溝會由上階往下階梯田發展成為較大的蝕溝。然而，紋溝和蝕溝卻很少發現在雜草覆蓋的階段平台上。此研究可供梯田棄耕後，土壤沖蝕行為之研究。

Pandey et al. (2009) 於 1996~2001 年監測印度某一農業集水區(41.43%面積為稻田)之土壤沖蝕量。所觀察到的沖蝕量介於 2.43 至 4.50 ton/ha/yr 之間。在這項研究中，沖蝕量係由座落在研究流域出口之流量測站收集。因為其他土地利用會影響產沙量，因此此一觀測值不能代表該區水梯田之年沖蝕量。Shen et al.(2010) 以中國大陸三峽庫區 Zhangjiachong 流域評價傳統坡地耕作及土壤保護措施效果。2004-2007 年期間量測從流域和各小區之地表逕流和土壤沖蝕量。現地調查顯示等高灌木籬是最好的土壤侵蝕控制方法，其次是疊石階段和土堤階段(以上皆為旱作)。而其利用 WEPP(Water Erosion Prediction Project model)模式模擬結果顯示該集水區中央之單位面積沖蝕量最少，該區農業耕作係以稻田為主，但因該區域為集水區之最低位置，且坡度較緩，無法與其他陡坡旱作及耕作措施

類比。

Chen et al. (2012) 利用台灣新竹新埔鎮實驗梯田現地收集之降雨逕流及 SS 觀測值推算陡坡水稻梯田在正常耕作、棄耕及休耕轉作綠肥三種土地利用狀態之年沖蝕量分別為 0.77ton/ha/yr、0.74ton/ha/yr 及 4.15ton/ha/yr，顯示水稻梯田在棄耕後，因植生恢復迅速，其階段平台仍具良好之水土保持功能。但在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 3400mg/L 以上，為水田湛水耕作時期之 500mg/L 以下之 8 倍以上，年沖蝕量則較水田耕作時期高出 5 倍以上，顯示水稻梯田湛水耕作較轉作綠肥具有更佳之防止土壤沖蝕功能。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。

Mai et al.(2013)於越南北部某集水區以多塊 2m<sup>2</sup> 小區、19.1 ha 的次集水區和 248.9 ha 的主要農業集水區進行水梯田土壤侵蝕量測及相關機制之探討。結果顯示次集水區及主集水區逕量排放量及沖蝕量均較田間小區低得多。在主要流域單位面積排放總量比在次集水區更高，因為在生長季節，稻田處於充滿湛水之狀態，因此，降雨容易形成逕流排出田區。2004 和 2005 年之年降水量分別為 1,172 和 1560 mm，分別導致主集水區 54 、332 mm 之逕流總量及 163、 1722kg/ha/yr 之土壤總沖蝕量。高逕流量發生在七月，八月，及九月。但四月，六月，九月下旬及十月，因為低植被和許多農業活動，為水梯田土壤沖蝕之敏感時期。

雖然在推估坡地土壤沖蝕研究方面，國內已有相當成果，但以水梯田為對象之研究仍極為少見，近年來由於國內水梯田逐漸減少，甚至棄耕之現象極為嚴重，保存水梯田之意識才逐漸抬頭。雖然日本相關研究較為豐富，可提供我國相關研究引為參考，但由於我國水梯田地形坡度與日本比較更為陡峭，並不能完全引用作為依據，因此應由現地收集之數據評估水梯田降雨沖蝕防制效益，以增加水梯田復育必要性之說服力。

## 2.5 水梯田淨化水質相關文獻

水稻田所形成之濕地環境對水質具有淨化作用，然而在水稻種植期間，為確保豐收，往往使用過量的化學肥料及農藥，而肥料及農藥於水田土壤中逐漸分解，在殘留時期經由土壤入滲至地下水層中，汙染地下水水質或經由田區排水、降雨逕流排放至田區外之地表水體。一般含氮(以尿素及硫酸銨為主)複合性化學肥料水解後產生之銨氮因好氧性硝化作用而產生硝酸鹽氮，其易溶性及低吸附性使可其可輕易藉由滲漏到達地下水位面或經由降雨逕流及田區排水進入周遭地表水體，成為潛在可能形成之非點源汙染源。

日本於 1970 年代開始，由茨城大學農學院成立共同研究團隊，由水質層面調查水田對周邊水體之影響，並以數年時間利用現地調查及田間試驗完成水田之氮、磷濃度與其流出入收支平衡（田淵俊雄等，1979）。以氮收支為例，除了水田型式外，施肥方法、水管理與灌溉用水的質、量均會影響水田氮收支平衡。水田可區分為「排出型水田」與「吸收型水田」，氮排出量比流入量為大時，屬於排出型水田。而使用受到營養鹽汙染水源灌溉之水田，氮流入量很大，排出量小於流入量時，則屬於吸收型水田。與使用肥料為水田數倍的蔬菜旱田與果樹園地相比，其氮排出量則明顯降低（田淵俊雄，1999）。Nakasone et al. (2003) 在檢測出有高濃度硝酸鹽氮的集水區，水田具有之除氮功能，可使河川的氮濃度降低。特別是在台地與山谷間水梯田相連的地區其效果更大。來自台地上旱田、茶園、果園及禽畜養殖場之含硝酸鹽氮排水以湧泉的型態流向低地，然後被利用在水田灌溉而進行脫硝去氮作用。

由近年來各國水田環境針對氮與磷之流失及汙染潛勢相關文獻加以分析，在水田環境中氮主要被植物所吸收，成為植物生長養分，另一部分氮揮發後排放至空氣中，僅少部分排放至環境中，汙染鄰近環境，根據 Zulu et al. (1996)及 Chung et al. (2003)研究指出灌溉水中總磷、總氮含量(濃度)比排水中總磷、總氮含量(濃度)高，因此水田環境透過作物吸收、脫硝作用與土壤吸附作用等，可以達到淨



化水質之作用。

Chen et al. (2013b) 透過水稻田試驗區之設置以及現地土壤、水質背景資料之收集及其傳輸過程之監測，初步完成有關水梯田對於周邊鄰近地區水環境之影響評估，而藉由水體監測結果，可以釐清水田耕作可能造成之農業非點源污染疑慮，該研究於 2010 年度於新竹縣新埔鎮實驗田區進行逕流水質及地下水體監測分析，探討施肥後氮素轉化之機制，結果顯示水稻期作施肥對於地表水體之影響，僅於基肥初期造成銨氮較明顯上昇，其後之追肥期間則不明顯，因此可判斷水稻田在各種物理、化學及生物氮收支平衡下，地表排出之逕流水不易造成污染。而對地下水體之影響，則在於連續追肥期間，造成銨氮濃度之升高，唯硝酸鹽氮及亞硝酸鹽氮則無明顯變化，幾與灌溉原水質相當。

## 第三章 材料與方法

### 3.1 實驗田區概述

本研究選定之水梯田試驗地位於新北市貢寮區吉林里(圖 3.1)，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 5,146mm(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，分別代表新近復耕之新田(實驗田 A，圖 3.2)及持續耕作之老田區(實驗田 B，圖 3.3)，進行入滲補注地下水相關試驗。

實驗田 A 座標為北緯 24°58'24.84"、東經 121°53'34.15"，此田區於 38 年前休耕，並於民國 100 年開始復耕。休耕期間曾於田區一側鄰近野溪蝕溝邊界處發生崩塌。此區目前共有 9 階上下相連之階段坵塊，與 1 塊位於田區最下方，甫於 102 年重新整闢之坵塊，總面積約 2,000m<sup>2</sup>，坡度約為 20°，邊坡形式屬於疊石邊坡，各階高程差在 1.5m~2.0m，現地泥濘層量測深度約 15cm (一般為 20~25cm，是否因長時期休耕導致表土流失，有待進一步調查分析)，田埂高在 102 年 10 月休耕期量測為約 10~12cm，於 103 年 3 月整田後為約 16cm。此田區兩旁皆為野溪蝕溝，灌溉水源以管路方式取此兩條野溪之上游水源引至上階田區，並以重力越田施灌全區。越田灌溉係將灌溉水導入位於最上端的水田坵塊，充滿一定的水深後(視田埂缺口高度而定)，將溢流的多餘水量流入鄰側的下游坵塊，延坡度逐一擴展其灌溉的面積。但如田埂維護不善，則部分灌溉水則會從田埂較低處溢流而出，造成所謂之灌溉損失。

實驗田 B 座標為北緯 24°59'9.54"、東經 121°53'16.72"，位於當地吉林國小之後方坡地。此處田區已持續耕種超過百年，共有 11 塊階段坵塊，田階坵塊之

形狀比起實驗田 A 更為狹長，總面積約 3,800 m<sup>2</sup>，坡度接近 30°，邊坡形式屬於土草坡及疊石邊坡之混合形式，各階高程差約 1.5m~2.0m，泥濘層深度約 20~25cm，田埂高在 102 年 11 月休耕期量測為約 12cm，於 103 年 3 月整田後為約 16cm。由最低階處面對田區，田區之左側有水泥階梯可供上下通行，右側有一部分種植蔬菜，兩側其餘部分則為次生林地。與實驗田 A 類似，灌溉水源係以管路方式取上游之野溪與湧泉引至上階田區，並以重力越田方式施灌全區。

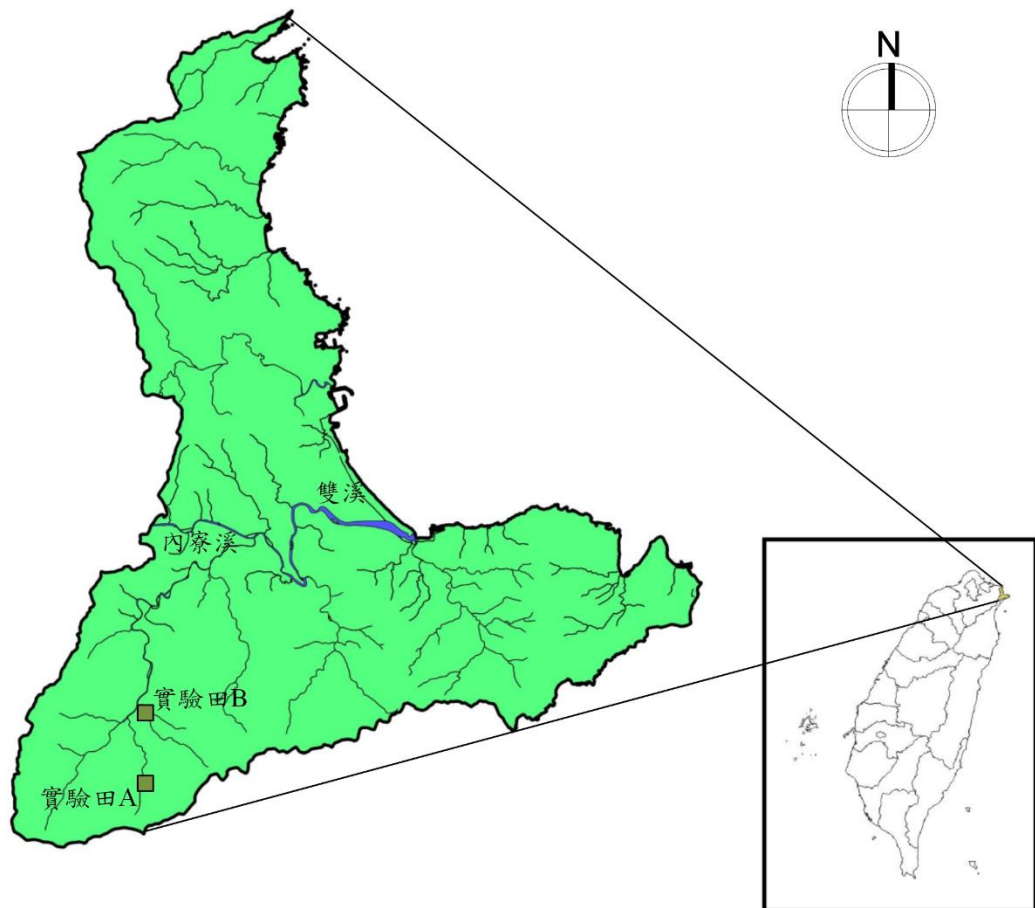


圖 3.1 實驗田地理位置圖



圖 3.2 實驗田 A 實景



圖 3.3 實驗田 B 實景

## 3.2 水梯田環境概述

本研究藉由北部地區梯田構造之現地踏勘調查，包括築田工法及邊坡型式等影響入滲側流之因素，瞭解梯田入滲之基本行為，並藉由文獻收集探討坡地水梯田地下水文流動狀況。

### 3.2.1 水梯田構築工程

水梯田從山坡地開墾構築觀點分析，具有以下之特點：

#### 一、配合現地地形修築

水梯田即使在陡坡地形，也可形成沿等高線開築之帶狀梯田，配合田埂邊坡修築維護，可以保持水梯田長時期之湛水耕種。目前台灣常見之田埂邊坡型式主要可分為土坡、砌石邊坡、土石混和邊坡及混凝土邊坡等。

#### 二、耕種面積率小

為達邊坡穩定目地，一般水梯田開挖填方之規模較小，以致縮減可耕種之面積比率，坵塊面積小，形狀多為長條帶狀。

#### 三、不利機械化耕作

由於田區面積較為狹小，且受地形限制，使其在農業經營之機械化操作方面，受到較大之限制，不利大型農機操作。

而在水梯田修築施工方法方面，大致可區分為切堆土施工法和全切施工法兩種（須藤良太郎等，1980），如圖 3.4 及圖 3.5 所示，台灣先民來台開墾時使用之工法多為前者，後者為日本及台灣以機械整頓舊田或開墾新田時使用之工法：

#### 一、切堆土施工法

在同一剖面裡，求取切堆土的平衡，也就是俗稱的半切半堆，必需從地形的上部開始施工修築。雖然所需之土木工程量很少，但必需注意到表層土壤被深埋入堆土的底部深處及防制堆土部位之滑動。

#### 二、全切施工法



此為從地形上段部分直接開挖並將其全剖面的上下層混合土壤全部堆到下段之施工方法。此種施工法不但使梯田面積全部成為切土面、同時加厚了有利於底座安定的耕作土層。

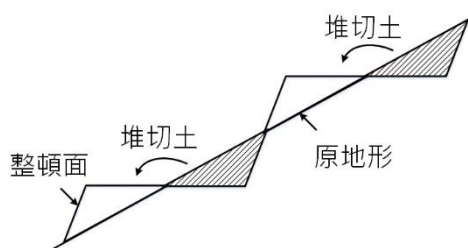


圖 3.4 切堆土施工法

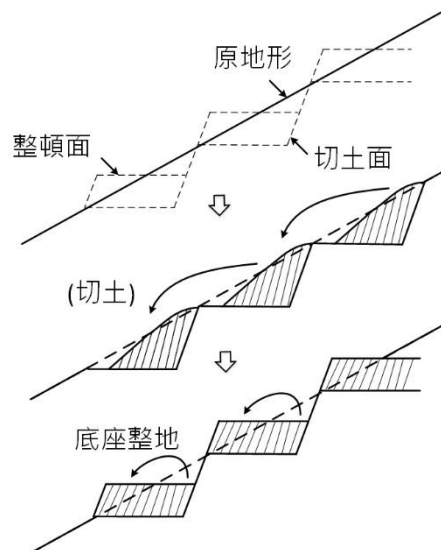


圖 3.5 全切施工法

### 3.2.2 水稻田土壤分層剖面分析

湛水耕作之水田垂直分層剖面(圖 3.6)由上往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 6~8cm；湛水之下為耕犁之後呈泥濘狀之泥濘層(muddy layer)，通常處於過飽和狀態，此為水稻根系層主要所在位置，其厚度約 15~25cm；泥濘層之下為犁底層(plow sole)，即俗稱之牛踏層，厚度約 5~10cm，對垂直水流之阻抗性極高。此層之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。

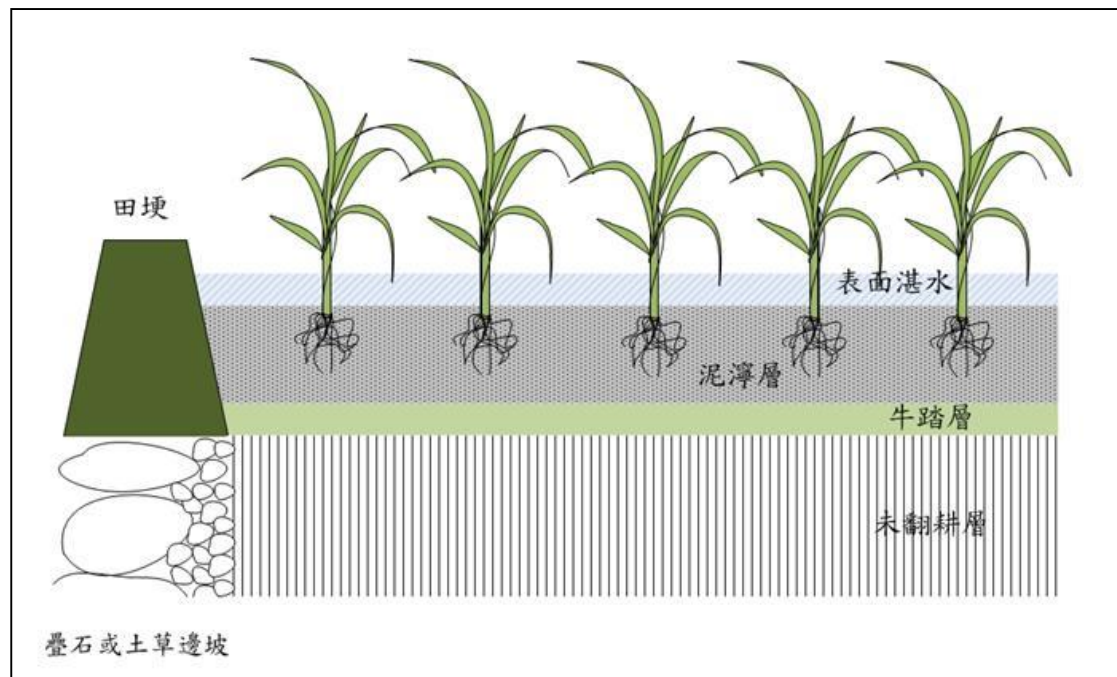


圖 3.6 水田土壤分層剖面示意圖

而一般水田在收割前之排水至下次耕作前，若經歷較長時間之曬田作業，將會導致表土水分含量逐漸降低，此一期間若未進行粗耕翻犁，且若無足夠之降雨量補充土壤水分，將會導致田面表土產生裂縫，並逐漸往土壤深層發展，此時易使降雨後產生之地表水向下滲漏速度明顯增加。Tabuchi(1968)曾描述此一機制，如圖 3.7 所示，即為其觀測水稻生長全期，黏土質水田裂縫產生及變化情形。當排水時期，無較大之天然降雨或人工灌溉，則水田表土產生開裂，甚至穿透牛踏層至底層土壤，而排水期若有較大之天然降雨或人工實施灌溉，則裂縫不易產生，或僅止於牛踏層以上之淺層表面部份。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., 2013b)。

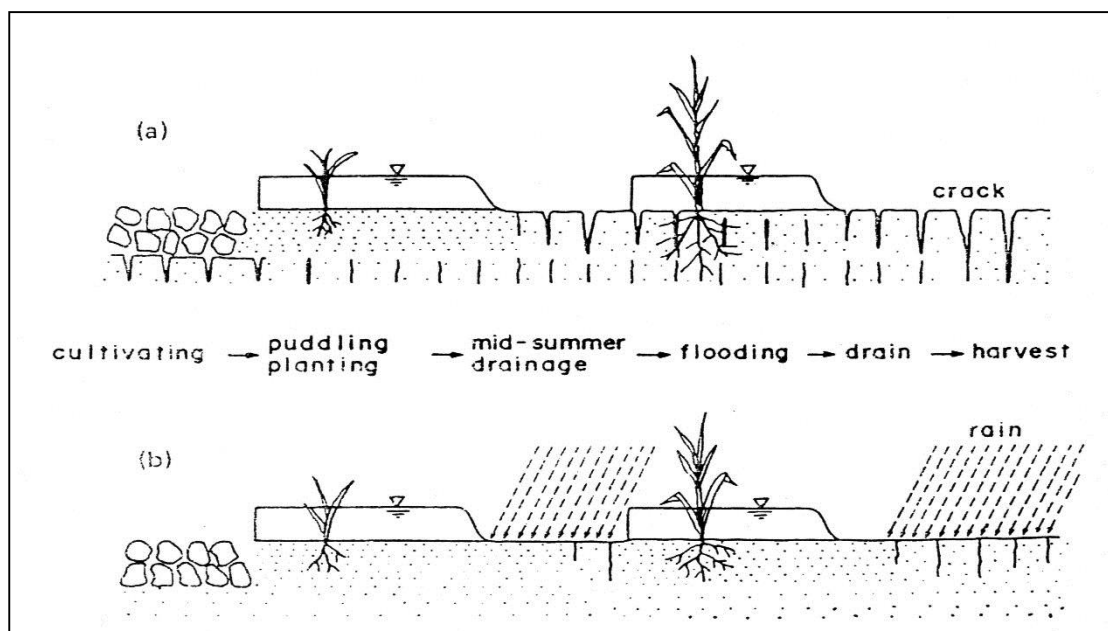


圖 3.7 水田表土季節性開裂情形 (a).排水期為非降雨期間 (b).排水期為降雨期間

### 3.3 水梯田水文收支理論

#### 3.3.1 水稻梯田水文收支模式

在水梯田環境中，因上、下階水田位於不同高程上，在梯田有明顯之側滲出現在水田湛水區與田埂交界以及下層水田湛水區與邊坡坡腳處。Liu et al.(2004)指出梯田滲流迴歸水之通量變化與田區湛水、田埂土壤質地、牛踏層之阻滯水流有極大之相關性，水田因牛踏層的存在而阻滯水分的垂直下滲，因此形成泥濘層之水分多朝水平方向往田埂滲流，在此狀態下，田埂之土壤水力傳導係數將是影響滲流迴歸水量多寡的主要因素。

忽略因地下水位變化造成之影響及假設土壤因長期保持湛水使泥濘層土壤維持飽和狀態，則水梯田環境之水收支平衡模式可以下式表之：

$$I_r + R - ET - I_{nf} - SP - DR = \Delta S \quad (3.1)$$

其中  $I_r$  為灌溉水量； $R$  為降雨量； $ET$  為蒸發散量； $I_{nf}$  為垂直入滲量； $SP$  為側滲量； $DR$  為排水量， $\Delta S$  為田區之湛水深變化，其各項水收支示意如圖 3.8



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，受田之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)指的是水進入土壤的過程，當水進入土壤並繼續更深層的流動則稱為滲漏(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入滲量，屬於出流量；側滲量為水田之水入滲後側向流動量，此流動有可能埂間滲漏而由高處田階補注至低處田階，並不會造成灌溉水之損失，但亦會有部分經由側滲而流出田區外，造成損失。上述之水收支平衡模式之 SP 即代表此損失量，屬於出流量。以往滲漏損失均視為灌溉損失，但從地下水補注觀點，滲漏至淺層含水層之田區滲漏損失，可以成為伏流水或淺層地下水之補充來源，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。

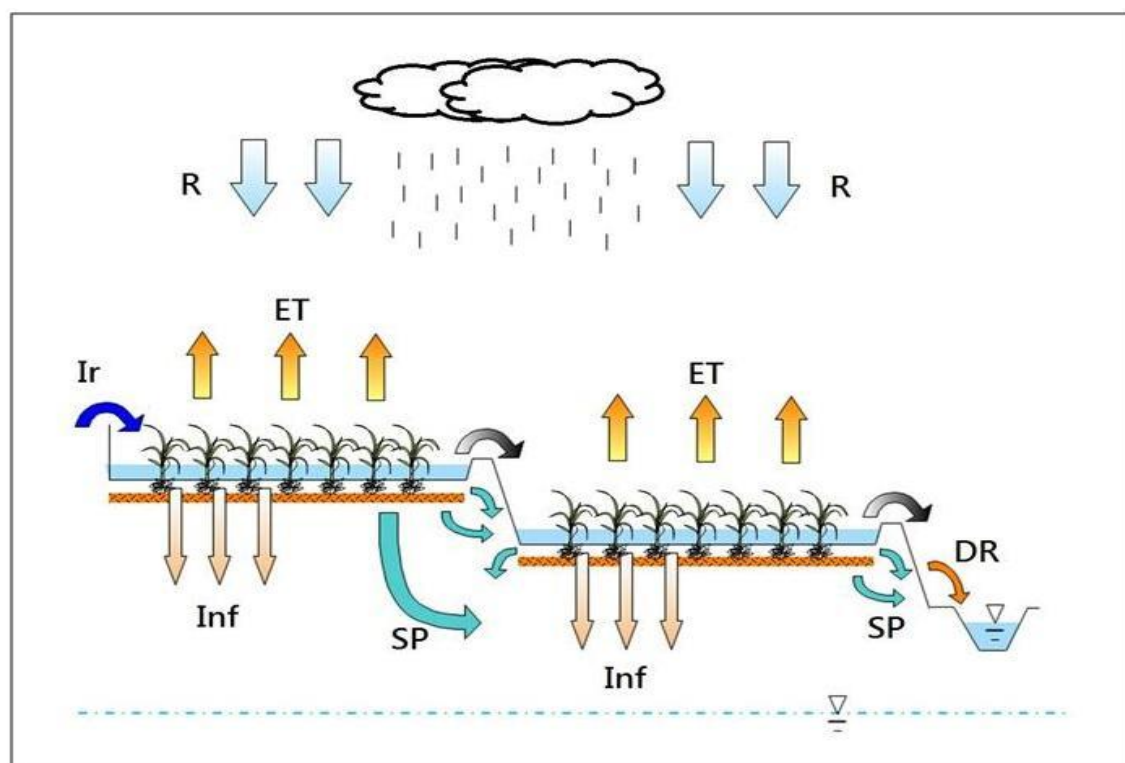


圖 3.8 水稻梯田水收支平衡模式示意圖

### 3.3.2 水梯田田區內垂直入滲與田埂垂直滲漏/側滲理論

#### 一、田區內垂直入滲理論

對於一維向下流動，可應用達西定律計算飽和土壤中之水通量 $q_z$ ，如(3.2)式所示：

$$q_z = -K \frac{dH}{dz} \quad (3.2)$$

其中， $K$ 為飽和水力傳導係數； $H$ 為總水頭。

當水通量通過厚度為 $\Delta z_L$ 之土層，(3.2)式可改寫為有限差分形式如下：

$$q_z = -K_L \left( \frac{h_B - h_T - \Delta z_L}{\Delta z_L} \right) \quad (3.3)$$

式中， $K_L$ 為土層水力傳導係數； $h_B$ 及 $h_T$ 分別為土層頂部及底部壓力水頭。

水田田區內由於低滲透性牛踏層之存在，導致其垂直入滲在通過牛踏層後，易呈現非飽和流動(Chen et al., 2002)，可以一維理查方程式描述之：

$$q_z = -K(h) \left( \frac{dh}{dz} + 1 \right) \quad (3.4)$$

式中，非飽和土壤水力傳導係數 $K$ 並非定值，為壓力水頭 $h$ 之函數。

#### 二、田埂垂直滲漏/側滲理論

根據 Tsubo et al. (2007)之研究指出，水梯田田埂水力傳導係數、田埂垂直滲漏及橫向側滲率，對水平衡模式至關重要。田埂垂直入滲為湛水經由田埂入滲後轉而向下滲漏，補注至淺層地下水層，側滲為經由田埂入滲後繼續橫向滲漏，成為伏流水或回歸水流至下層坵塊或鄰接之其他土地(圖 3.9)。為研究水梯田湛水入滲進入田埂後之機制，以及水梯田回歸水、伏流水或地下水補注量估計，基本上可應用達西定律進行田埂垂直入滲之推估，而達西定律配合 Dupuit equation 則應用於對田埂側滲之量化。

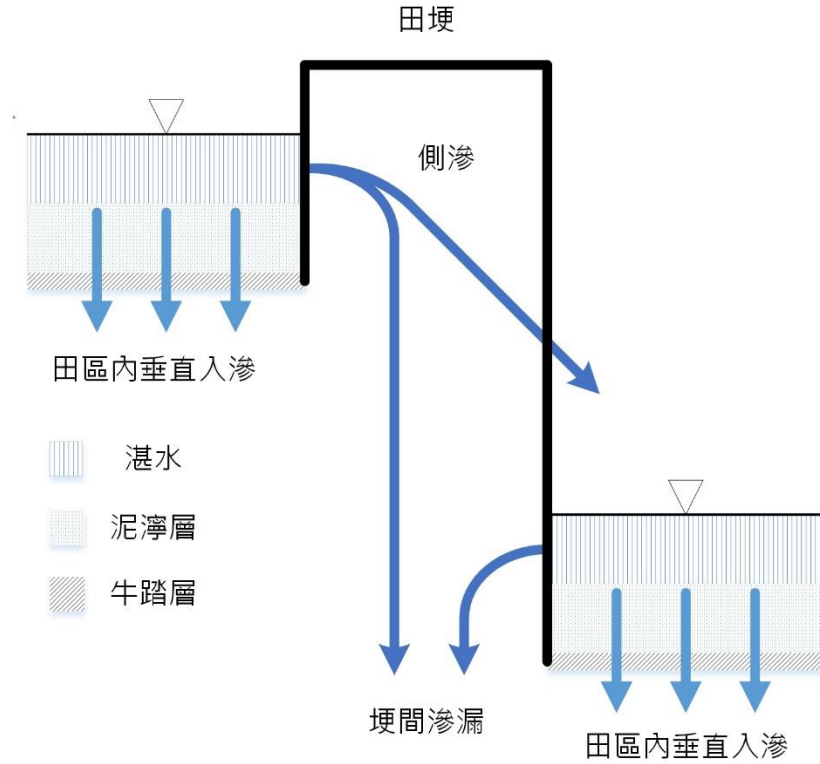


圖 3.9 水梯田田區內垂直入滲與田埂垂直入滲/側滲示意圖

(一)、埂間滲漏理論：

假設田埂下方垂直滲漏為不可壓縮之一維垂直流動，依據達西定律，田埂垂直入滲率 $q_z$ 可用式(3.2)計算，其中， $K$ 為均勻田埂之土壤飽和水力傳導係數； $H$ 為總水頭。

(二)、田埂側滲理論：

1. 達西定律

依據達西定律，側滲穿越田埂，由上階田區到達下階田區，假設水流為不可壓縮流之一維飽和水平流動，則單位長度之田埂水平側滲流量 $q_s$ 為：

$$q_s = -Kh \frac{dh}{dx} \quad (3.5)$$

式中， $h$ 為田埂兩側之水頭差； $K$ 為均勻田埂水力傳導係數。若為計算整個坵塊田區田埂水平側滲流量 $Q_s$ ，則必須乘上田區有效田埂長度 $L$ ，其計算式如下：

$$Q_s = -L \cdot Kh \frac{dh}{dx} \quad (3.6)$$

## 2. Dupuit equation

穩定非拘限流之 Dupuit equation 應用於計算二維水流問題，其 Dupuit-Forchheimer assumptions 為(Reddi, 2003)：

(1). 垂直方向沒有水力梯度

(2). 水平方向水力梯度等於自由水面或地下水位之斜率

Dupuit equation 適用於輕度傾斜土地與淺湛水深，其田埂單位長度側滲流量  $q_s$  計算方程為：

$$q_s = \frac{K}{2W} (h_1^2 - h_2^2) \quad (3.7)$$

式中， $W$  為田埂寬度； $K$  為均勻田埂水力傳導係數； $h_1$  為田埂上層坵塊水位高， $h_2$  為田埂下層坵塊水位高。若為計算整個坵塊田區之田埂側滲流量  $Q_s$ ，則必須乘上田區有效田埂長度  $L$ ，其計算式如下：

$$Q_s = \frac{KL}{2W} (h_1^2 - h_2^2) \quad (3.8)$$

根據上述公式，顯示水梯田上層坵塊湛水經由田埂側滲成為回歸水補注至下層坵塊或垂直滲漏至地下水層皆與兩坵塊之有效田埂長度  $L$  有關，即上層坵塊與下層坵塊之交界田埂長度，因此本研究將對有效田埂長度與減水深之關係進行探討。

### 3.3.3 水梯田地下水流動模式

一般而言，坡地水田之地下水流動機制極為複雜，在梯田進行築造工程時，由於土體之切堆過程易使水田深層土壤受到擾動，使得水田更易產生湧水現象。圖 3.10 為永石義隆(1988)所指出之水梯田基本地下水流型式。斜面滲漏型是指從水田田面灌溉水入滲後穿透田埂邊坡之湧水型式；淺層伏流水型是指地下水位較接近田面，透過邊坡底部到達下階田區坵塊；而深層湧水型則是從比較深層的地方湧出之地下水。

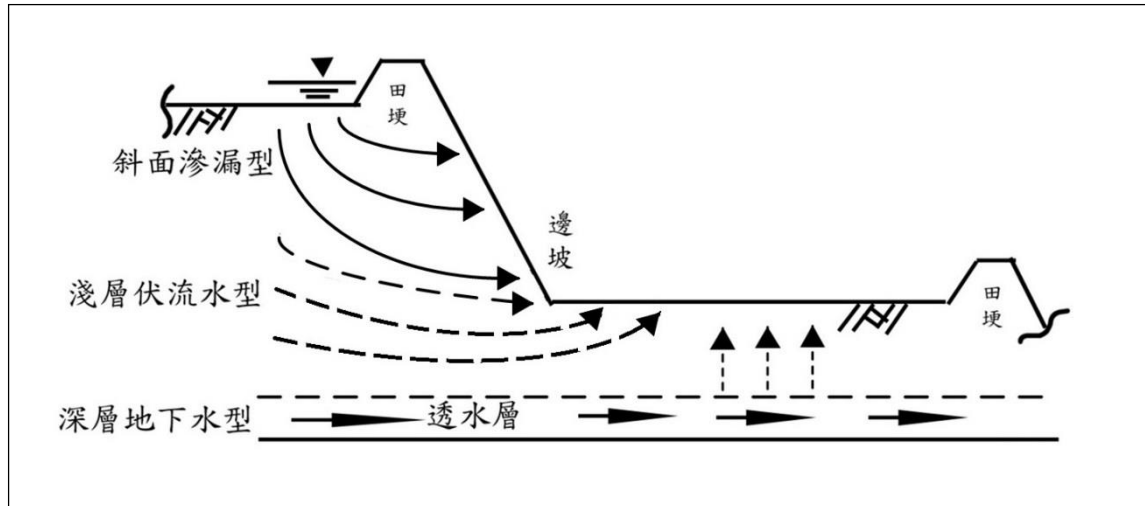


圖 3.10 水田滲漏水流動模式（永石義隆，1988）

而由水梯田實際環境觀之，田區左右側(俯視)未必為鄰接之水梯田，可能為其他土地利用(旱地)或野溪、蝕溝等，因此，側滲亦會發生於乾、濕邊界，造成此方向上之側流(圖 3.11)，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位面。

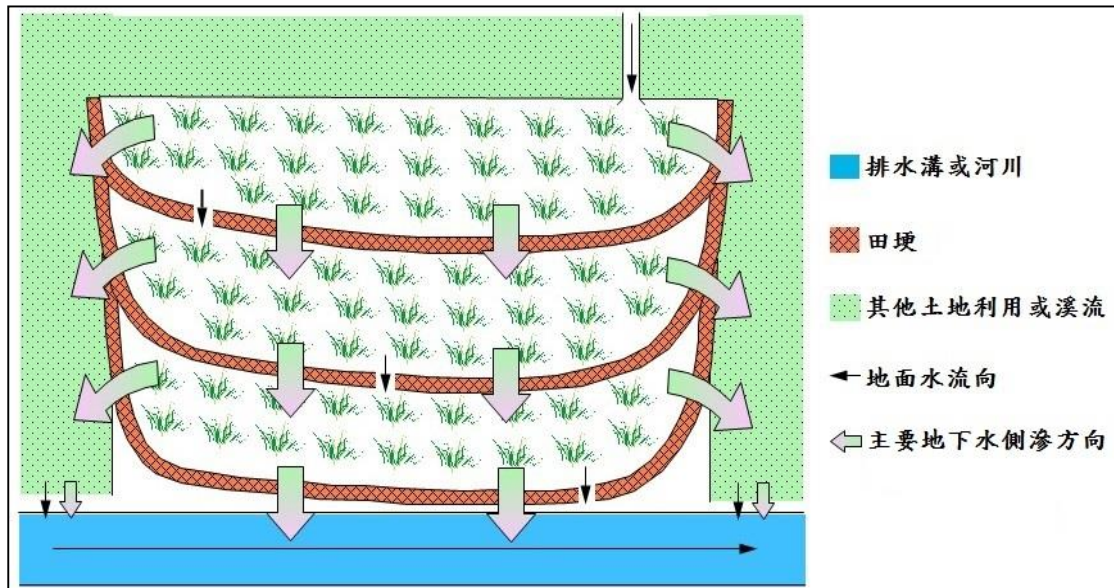


圖 3.11 水田側滲水流動模式

### 3.4 我國現行水稻田灌溉方式

台灣之氣候屬於高溫季風區，灌溉用水標的以水稻為主，灌溉用水水源包括河川引水、水庫與埤塘、地下水等，我國農業灌溉用水方式依作物及灌溉方法之差異，可分為水田及早田用水，台灣目前水田多以水稻種植為主，其灌溉方法主要為使用漫灌法(目前亦有學術單位試驗畦溝灌溉方式，以達到節水之目的)，而漫灌法可再分為繼續灌溉法、輪流灌溉法與非常灌溉法。繼續灌溉法簡稱為「續灌」，採用越田灌溉方法，灌溉用水採粗放管理方式，為一種從古以來慣用之稻作灌溉法，田間經常保有適當之湛水深狀態，採用此灌溉法時，水源供應應當充足無虞，就現況而言，多數非水利會灌區之水梯田係採用此法；輪流灌溉法簡稱為「輪灌」，為根據用水計畫在適時以適量之水依照順序供水之灌溉方法，多用於水源不充裕之水稻灌溉地區(如雲嘉南一帶)或時期(通常為一期作時期)；非常灌溉法則為一種臨時性之灌溉方法，當灌溉水源即將枯竭時，為減輕災害損失，實施減少灌溉水深，或延長灌溉輪距，或則停止部分農田配水。

### 3.5 現地實驗方法與步驟

水梯田之主要水收支項目有灌溉進水、降雨、蒸發散、入滲與地表排水，為了探討水梯田入滲補注地下水之機制，本研究在實驗田區之選擇上，以完整上下毗連之田區及可控制灌排過程之田區為主，並針對全部田區坵塊進行減水深試驗、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、土壤飽和度量測與土壤粒徑分析等對於影響水梯田水收支各項因子進行現地量測或實驗室分析。

#### 3.5.1 減水深試驗

本研究之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，應用之減水深試驗為各坵塊於

穩定充滿湛水後暫停灌溉，再儘速(5 分鐘以內)堵住各田區坵塊之田埂缺口(圖 3.12)，使水流停止，呈靜水狀態，其優點為無需設置量水設施(如流量計、量水堰等)，不僅可避免影響田區耕作，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，於靜水狀態下安置浮球式水尺量測基準水位(圖 3.13)，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總入滲量(含垂直滲漏及側向滲漏)及蒸發散量所損失之灌溉水量。本試驗另配合蒸發皿(A 型陸皿)之設置(圖 3.14)，於同時段內量測蒸發皿水位變化，乘上該蒸發皿之皿蒸係數後，可得該區之蒸發量，由於實驗期間為非耕作期，因此無須藉由作物係數推求該時間段之蒸發散量。實際量測前，先針對兩處田區進行先期測試，由於實驗田 A 整體入滲率較高，試驗時間過久將導致湛水趨近於零，影響量測之正確性及精準度，故正式量測時，選擇之試驗時間為四小時，實驗田 B 因整體入滲率較低，試驗時間定為二十四小時。





圖 3.12 田埂缺口填補



圖 3.13 減水深試驗使用之浮球式水尺





圖 3.14 量測蒸發量之蒸發皿

### 3.5.2 雙環定水頭入滲試驗

雙環定水頭入滲試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，雙環定水頭入滲試驗係以金屬製雙環筒(內筒直徑 30cm，外筒直徑 50cm，筒高 45cm)，捶打入土層約 25~30cm 深度，配合內外筒各放置定水頭馬力奧量筒供水，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垂向流動，使內筒中的水向下滲漏時不會產生側向流動。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率(圖 3.15a)。本研究於兩處實驗田，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。

而針對棄耕後之梯田入滲改變情形，本計畫則選擇實驗田區周邊兩處棄耕

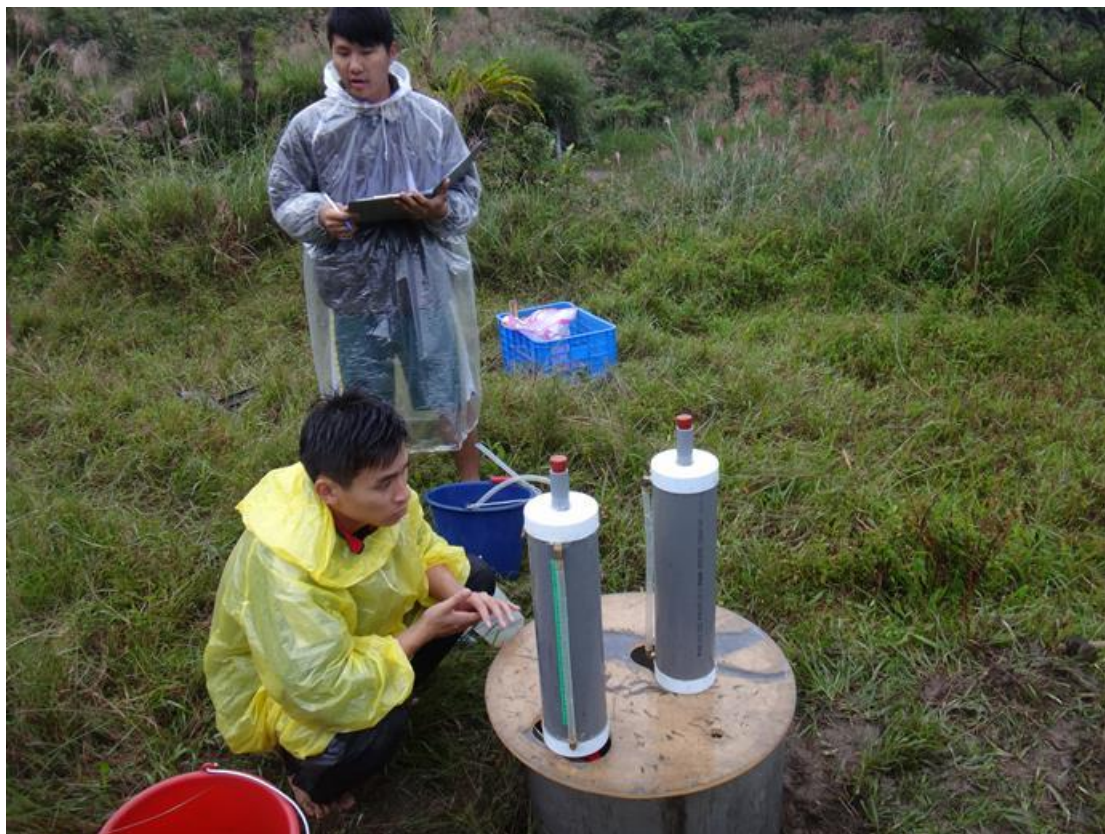
田進行現地量測(圖 3.15b)，除可比較水田湛水耕作與休、棄耕後之入滲率變化外，亦可提供 USLE 公式推估土壤沖蝕量時，作為計算土壤沖蝕因子  $K_m$  之依據。

一般而言，減水深試驗分析可量測整體進入田區之地表水源減損量，在扣除蒸發(或)蒸發散量後，即為田區整體之入滲率，亦可視為湛水田區土壤涵養之水量。惟此水量又可區分為垂直滲漏與側向滲漏，前者可持續進入較深層之地下含水層，後者可能成為側向流向下階田區或鄰近野溪、旱地之水量，亦可能側向流動後再垂向進入含水層，土壤水分移動之機制極為複雜。本研究以雙環入滲實驗量測不同區位之垂向入滲率，而由減水深試驗所得之土壤涵養水量扣除此垂向入滲量後，可得側向滲漏之速率及水量。



(a) 湛水田區





(b) 棄耕田區

圖 3.15 雙環定水頭入滲試驗

### 3.5.3 現地土壤水分含量量測

本研究於民國 102 年 10 月中於實驗田 A 及民國 102 年 11 月中於實驗田 B 進行水分飽和度量測，水分飽和度測定可以輔助分析地下水流狀況，飽和度即土壤中孔隙含水百分比，飽和度等於 100%，即代表該土壤中的孔隙皆充滿水。量測位置包括水田田區內、田埂中央及田埂邊坡區域，可以比較不同區位及深度水分變化情形，其中水分含量係以型號 AquaterrTemperature and Soil Moisture Meter T-350 之美製手持式 Capacitance 水分探測器測定之(圖 3.16)，其原理係以探測位置之雙介電常數 (Dielectric constant) 決定體積水分含量百分比。水田田區內測定時係以雙環入滲筒之外筒打入土層，以圍堰方式隔離水流進入後，移除內部泥濘層後進行，量測係使用手持水分探測器自牛踏層頂端開始，以每次 5cm 向下

量測，田區內量測位置包括田區中央及與田埂內側交界處。田埂中央處飽和度量測從田埂頂部以下 10cm 開始，以每次 5cm 向下量測。田埂邊坡飽和度量測係從邊坡底端算起邊坡 40cm 高度處量測，以每次 10cm 橫向水平向內量測。可得土壤飽和度-深度曲線變化圖。



圖 3.16 土壤水分飽和度量測

### 3.5.4 土壤分層成份調查

為瞭解實驗田區之土壤類型，本研究於民國 102 年 9 月初於實驗田 A 及民國 102 年 11 月中於實驗田 B 取其上、中、下階各一坵塊為代表，並對該坵塊之田區內、田埂交界處之泥濘層、牛踏層、未翻耕層與田埂進行土壤分層採樣(圖 3.17)。採樣時先於欲採樣的地點打入鐵環，並將鐵環內上方的湛水移除，接著使用採樣器對環內進行分層採樣。採完之土樣帶回研究室做土壤粒徑分析，首先進行篩分析，將土樣放置烤盤中，接著放入烘箱以 100°C 烘乾 24 小時，將烤乾的土樣研磨後置於篩網組(圖 3.18a)上，篩網之網眼大小由上而下為由大至小，並將裝好土樣之篩網組經由搖篩機震動過篩，可得留存於各不同篩網上之停留百分比，篩分析能分析大於最小篩網 200 號篩以上之粒徑分布，小於 200 號篩粒徑之



土樣則進行比重計試驗(圖 3.18b)，取足量過 200 號篩之土樣，泡分散劑 24 小時，接著倒入攪拌杯中加蒸餾水至八分滿後以攪拌器攪拌，攪拌後之攪拌液倒入 1,000cc 量筒中，並加水至 1,000cc，以手掌緊壓瓶口小心地旋轉翻動，接著放置於桌上以比重計讀取不同時間後之比重變化，另於旁設裝有蒸餾水之量筒，每次讀取土樣數據時亦需讀比重計於蒸餾水中之讀數，讀每筆數據時之溫度亦需量測。結合篩分析與比重計分析可得該土樣之完整粒徑分布及分析出其黏粒、粉粒、砂粒之比例，使用美國 USDA 三角座標分類法(圖 3.19)判定土壤種類。



圖 3.17 土壤分層採樣



(a) 土壤篩分析試驗



(b) 土壤比重計試驗

圖 3.18 土壤粒徑分析試驗

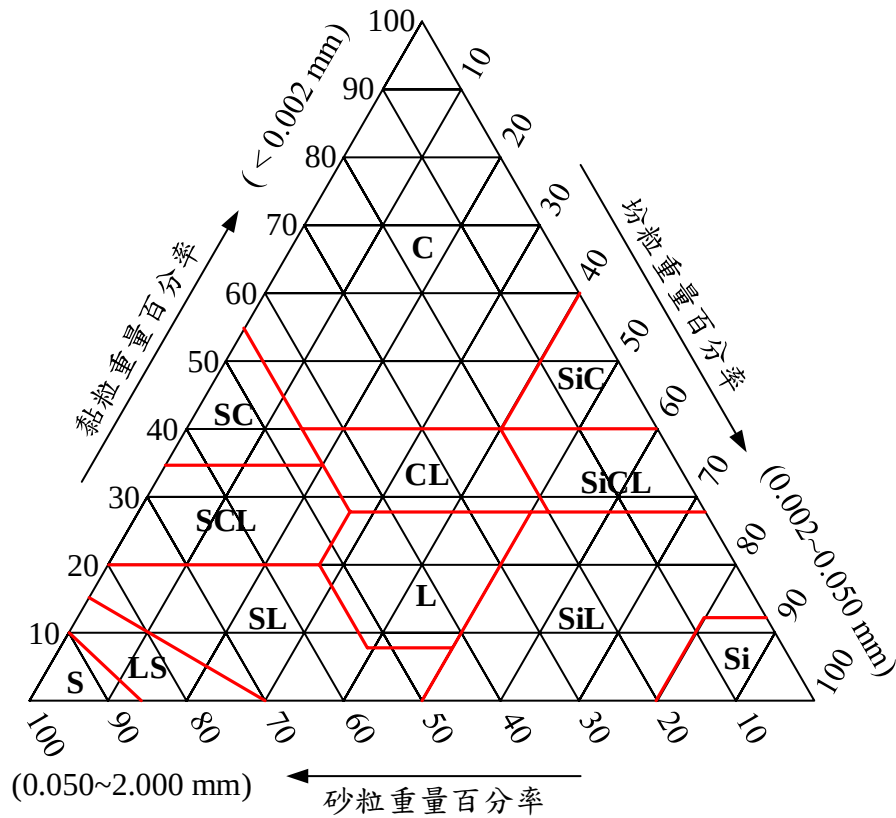


圖 3.19 USDA 土壤質地三角圖

### 3.6 通用土壤流失公式 USLE

通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)為國際上推估土壤沖蝕量常用之方法，而我國水土保持技術規範第三十五條中也說明台灣山坡地土壤流失量的估算得採用通用土壤流失公式，因此本研究利用通用土壤流失公式進行推估，其公式如下：

$$A = Rm \times Km \times L \times S \times C \times P \quad (3.9)$$

式中，A 為土壤流失量(ton/ha/year)；Rm 為雨沖蝕指數(Mj·mm/ha·hr·year)；Km:為土壤沖蝕指數(t·ha·year/ha·Mj·mm)；L 為坡長因子；S 為坡度因子；C 為覆蓋與管理因子；P 為水土保持措施因子。

USLE 的各因子是由標準田間單位，即包括水平坡長 72.6 呎、9 %的均一坡度、犁溝為上下坡方式、每兩年至少翻耕一次，及由單一土壤組成等條件估算之。

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。



## 第四章 結果與討論

### 4.1 貢寮地區水梯田現況調查

依據我國政府統計資料 2012 年貢寮地區耕地總面積為 1,652.06 公頃，水田共 1,223.1 公頃，旱田面積為 428.35 公頃，其中兩期作水田 575.12 公頃，單期作且為第一期作水田 648.59 公頃，該區並無單期作且為第二期作水田，(中華民國統計資訊網，新北市統計年報資料，2012)。本研究對象為貢寮區吉林里之陡坡水梯田，原有約 70 餘公頃之水梯田，目前尚在耕作者不足 10 公頃，餘皆處於休耕狀態。現地踏勘及農民訪談顯示該里水梯田灌溉方式係使用粗放之繼續灌溉法，灌溉水來源為使用當地野溪引水越田灌溉(圖 4.1)，由於當地特殊之氣候條件，實際耕作多為一期作，二期作期間因日照數少，產量不佳，因此傳統上採取休耕但持續引水保持田區湛水。訪談當地農民表示，使水梯田持續保持田區湛水，主要係該區水梯田多為陡坡梯田，田階高程相差甚大，保持湛水可使田區表土不易產生龜裂，豪大雨時不易造成田埂邊坡崩塌，隔年種植水稻時之田面土壤亦較容易進行翻犁整田作業；其次，當地農民認為保持湛水對於水稻梯田之肥分有涵養不易流失之功能，且生產之稻米品質較二期作休耕期間未湛水者佳。此雖為當地農民經驗之談，未來相關研究單位亦可針對此進行科學化之探討。

在政府實施「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(參閱圖 4.2)。此外，部分休耕或轉作之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(參閱圖 4.3)。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，造

成之不良影響包括：

- 一、田埂消失：無法蓄存超滲降雨，導致逕流量增加。
- 二、邊坡崩塌：田面產生裂縫或因噴灑除草劑而無植生保護之陡峭邊坡，易受雨水沖蝕，或逕流水匯集產生蝕溝或崩塌現象。
- 三、階段平台逐漸消失：伴隨沖蝕土砂或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(圖 4.4 顯示此區部分休耕梯田田埂已逐漸消蝕，但階段平台仍存在)，若無植生保護下，將導致沖蝕加劇。

本研究現勘時，發現於吉林里內寮街一戶民宅後方發生休耕僅一年之水梯田發生崩塌情形，田區邊界之田埂邊坡產生圓弧滑動(圖 4.5)，此種破壞型式一般多發生於均質的土體或是相當破碎的岩體中，滑動面呈弧形狀。因為鬆軟的土壤或破碎的岩體可能會受到雨水及地下水所形成之水壓力以及其他外力侵蝕作用，以致弱化其力學強度，使其基礎無法承受上方巨大重量，而產生沈陷變形。綜合判斷因水梯田休耕，逢夏季(民國 102 年)前半期缺雨，導致田面開裂，爾後遇颱風豪大雨事件，大量雨水循裂縫進入邊坡土體，加上該處為鬆軟的地質材料且座落在極為陡峭之山坡地上，因此導致圓弧型地層滑動，此為山崩中最常見到之滑動類型。圖 4.4 亦顯示此區部分休耕梯田除田埂逐漸消蝕外，亦發現多處圓弧型地層滑動情形。



圖 4.1 水梯田越田漫灌實景



圖 4.2 水梯田棄耕後形成芒草梯田實景





圖 4.3 水梯田休耕轉作噴灑除草劑後之實景(無湛水功能)



圖 4.4 水梯田休耕後田埂銷蝕及邊坡崩塌情景



圖 4.5 水梯田休耕後邊坡崩塌之情形

## 4.2 水梯田土壤分層取樣及成分分析

實驗田區土層鑽探結果顯示，實驗田 A 之泥濘層厚約 15cm，呈灰黑色，牛踏層連接非翻耕層處並無明顯顏色分層，非翻耕層土體呈黃棕色且夾雜大量礫石。實驗田 B 之泥濘層厚約 25cm，呈灰黑色；牛踏層約 5cm，亦呈灰黑色，非翻耕層土體則為黃棕色，深度 60cm 內無礫石存在。

現場採集之土樣經攜回實驗室進行篩分析及比重計試驗，土壤成分分析結果如附錄所示。吉林里兩處實驗田區之淺層土壤在分類上均以砂質壤土為主，僅極



少部分屬於壤土(實驗田 B 下階坵塊之泥濘層土壤)，根系層所在之泥濘層以砂粒為主，所佔比例約 50%~70%左右，土壤粉粒次之，為 24.7%~40.6%，黏粒均在 10%以下。田埂因多取自田區表面土壤，成分與泥濘層相仿。犁底層之黏粒比例則略低於泥濘層(詳細資料參考附錄 B)。

### 4.3 土壤水分飽和度分析

土壤水分飽和度量測係應用手持式水分探測器於現地進行量測，田區坵塊內主要量測田區中央以及與田埂內側交界處泥濘層以下垂向底層土壤水分飽和度，以每次下探 5cm 之方式進行現地量測泥濘層以下淺底層土壤水分飽和度；田埂中央處量測為自田埂頂部以下 10cm 處，以每次下探 5cm 之方式進行現地量測，田埂邊坡飽和度量測係從邊坡底端算起邊坡 40cm 高度處量測，以每次 10cm 水平衡向往內量測，量測點位置如圖 4.6 所示。

實驗田 A、B 不同區位、深度及田埂邊坡之土壤飽和度如表 4.1~表 4.4 所示(田埂深度及田埂邊坡深度分別係從田埂頂部及邊坡表面為基準，田區內及田埂內側交界則以牛踏層頂部為深度計算起點)，並圖示於圖 4.7~圖 4.13。其中，實驗田 A 之田埂多為疊石組成，上階水田非翻耕層夾雜礫石分佈，手持式水分探測器無法深入土層，故該區位無量測資料。田埂邊坡飽和度方面，分別選取實驗田 A 第八坵塊與第九坵塊之交界邊坡及實驗田 B 第一坵塊與二坵塊之交界邊坡進行實測。結果顯示田區內土壤水分變化在深度 5cm 以下即多屬非飽和狀態，惟飽和度相當高，多數在 90%以上，深度 10cm 以下之土壤飽和度變化並不大，而對水分飽和度趨於定值之土層而言，相同之水分含量將具有相同之負壓水頭，根據 Takagi(1960)及 Zaslavsky (1964)之理論，對雙層土壤而言，當下層土壤之滲透性較上層土壤為佳時，在穩定之垂向水流狀態下，負壓水頭將在兩層土壤交界處發展，並在下層土壤維持一定值至相當深度，因此對以上水分量測結果分析可判斷在泥濘層底下存在兩層水力特性迥異之土層，即低滲透性之牛踏層及滲透性

較大之非翻耕層。

而由實驗田 B 中階及下階坵塊飽和度-深度關係圖(圖 4.10 及圖 4.11)可以發現由田埂內側交界處往下量測之飽和度幾乎皆為 100%，顯示田區湛水亦會循田區內田埂交界滲漏至深層土壤。進而由田埂中央處之垂向水分分佈觀之，均屬非飽和分佈，且飽和度大多低於田區與田埂交界處。從田埂邊坡飽和度量測結果可得知，實驗田 A 及實驗田 B 邊坡表層土壤水分均為非飽和狀態，尤其實驗田 A 邊坡水平距離 20cm 處之飽和度甚至只有 48%。以上量測結果顯示埂間滲漏多循田區與田埂內側交界處垂向進行，並未經由田埂邊坡側滲至下階田區。

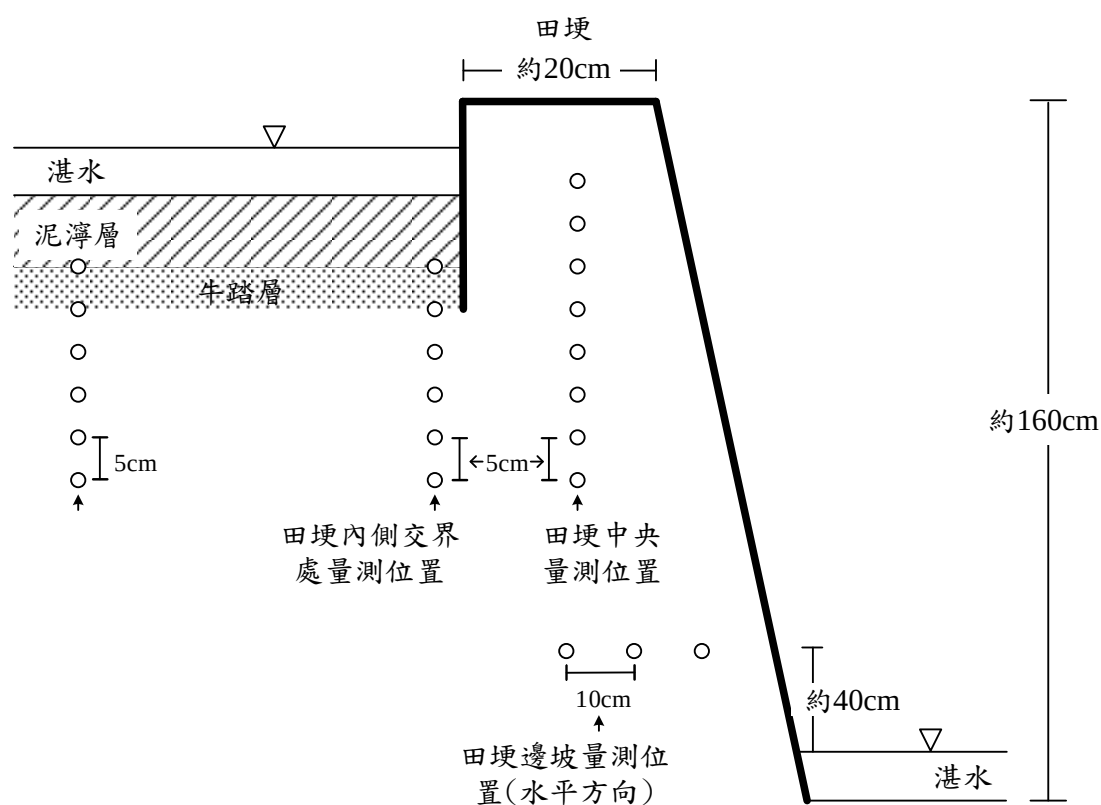


圖 4.6 水分分佈量測位置示意(未按比例尺)



表 4.1 實驗田 A 田區及田埂飽和度量測結果

| 深度(cm)<br>位置 |      | 0   | 5  | 10 | 15 | 20 |
|--------------|------|-----|----|----|----|----|
| 中階坵塊         | 田區內  | 100 | 99 | 98 | 97 | 96 |
|              | 田埂交界 | 100 | 98 | 98 | 85 | 83 |
| 下階坵塊         | 田區內  | 100 | 98 | 98 | 98 | -- |
|              | 田埂交界 | 100 | 98 | 87 | 84 | 85 |

註：--表示無量測資料

表 4.2 實驗田 B 田區及田埂飽和度量測結果

| 深度(cm)<br>位置 |      | 0   | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40 | 45 |
|--------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| 上階坵塊         | 田區內  | 100 | 97  | 96  | 87  | 94  | 93  | 94  | 94  | 95 | -- |
|              | 田埂交界 | 100 | 98  | 98  | 98  | 99  | 98  | 98  | 98  | -- | -- |
| 中階坵塊         | 田區內  | 100 | 98  | 98  | 99  | 99  | 98  | 97  | --  | -- | -- |
|              | 田埂交界 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99 | 96 |
| 下階坵塊         | 田區內  | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | --  | --  | --  | -- | -- |
|              | 田埂交界 | 100 | 100 | 98  | 100 | 100 | 99  | --  | --  | -- | -- |

註：--表示無量測資料

表 4.4 實驗田 B 田埂水分飽和度量測結果

| 深度<br>位置 | 0  | 5  | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 上階坵塊     | -- | -- | 94 | 95 | 95 | 96 | 96 | 96 | 96 | -- |
| 中階坵塊     | -- | -- | 94 | 91 | 90 | 92 | 94 | 95 | 96 | 88 |
| 下階坵塊     | -- | -- | 92 | 92 | 94 | 86 | 92 | 95 | 96 | 97 |
|          |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

註：--表示無量測資料

表 4.3 實驗田 A、B 邊坡飽和度結果

| 距邊坡水平<br>距離(cm)<br>位置    | 10 | 20 | 30  |
|--------------------------|----|----|-----|
| 實驗田 A 第八坵塊與<br>第九坵塊之交界邊坡 | 55 | 48 | 100 |
| 實驗田 B 第一坵塊與<br>第二坵塊之交界邊坡 | 86 | 84 | --  |

註：--表示無量測資料

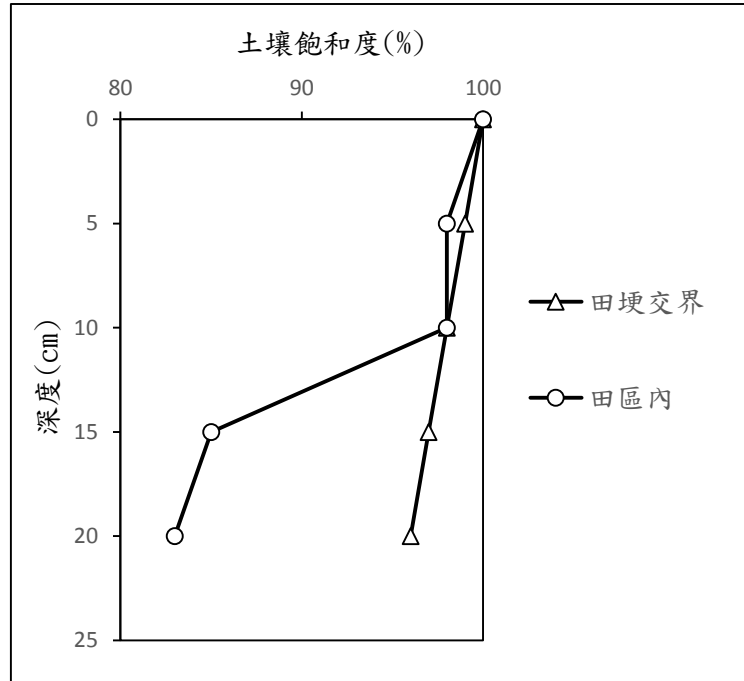


圖 4.7 實驗田 A 中階坵塊飽和度-深度關係

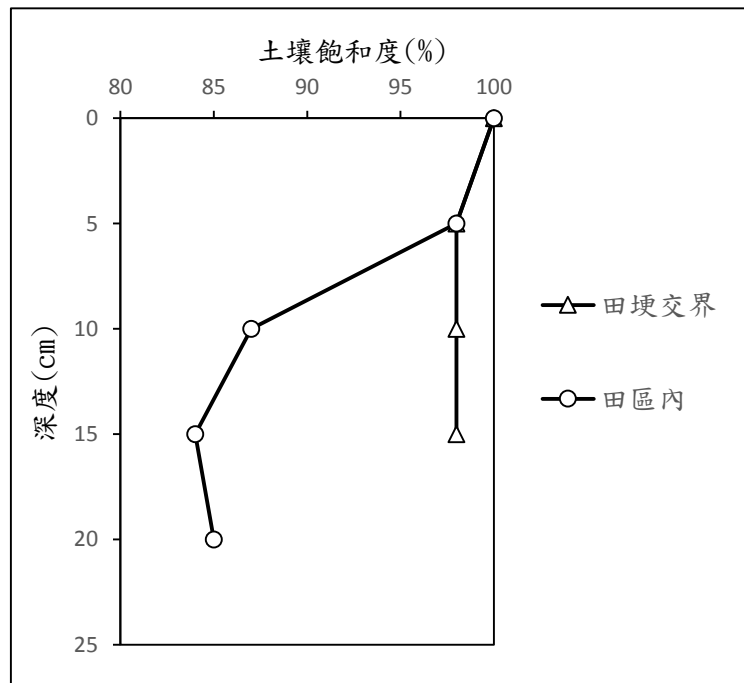


圖 4.8 實驗田 A 下階坵塊飽和度-深度關係

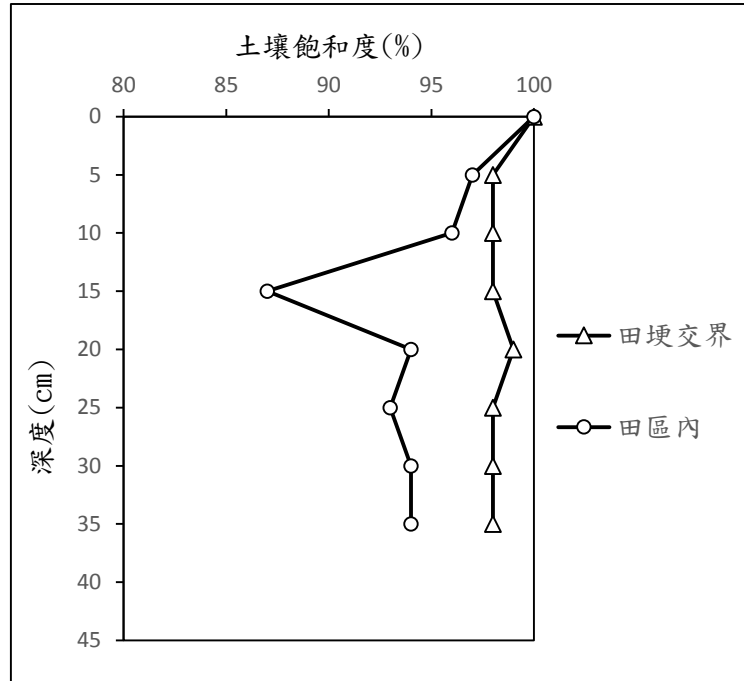


圖 4.9 實驗田 B 上階坵塊飽和度-深度關係

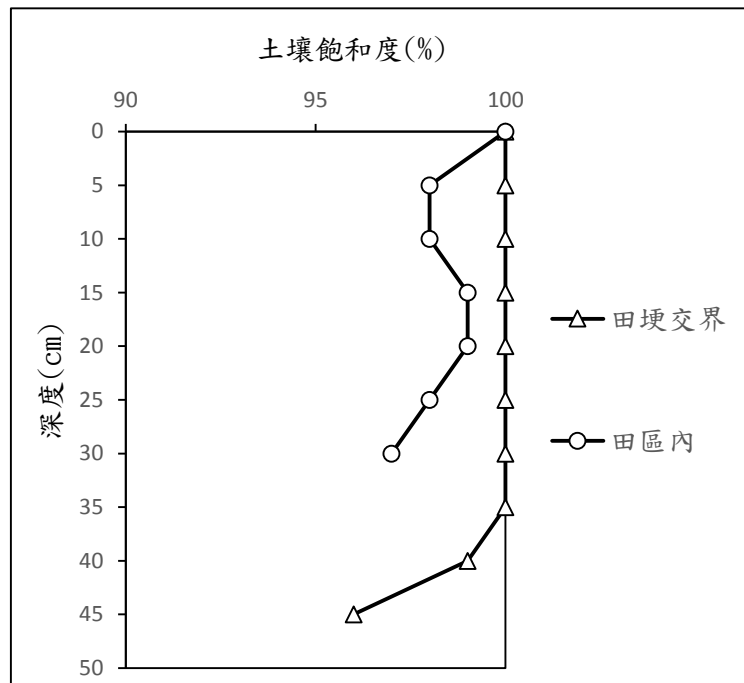


圖 4.10 實驗田 B 中階坵塊飽和度-深度關係

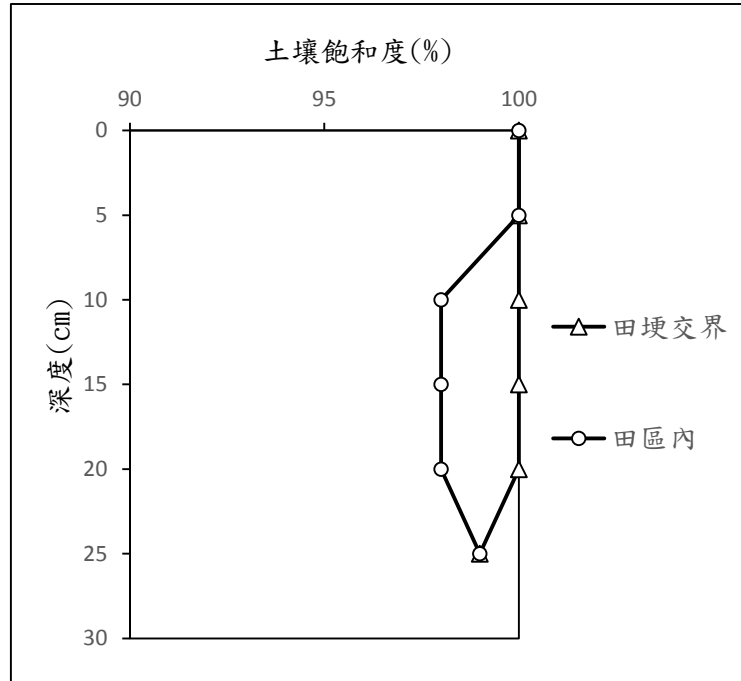


圖 4.11 實驗田 B 下階坵塊飽和度-深度關係

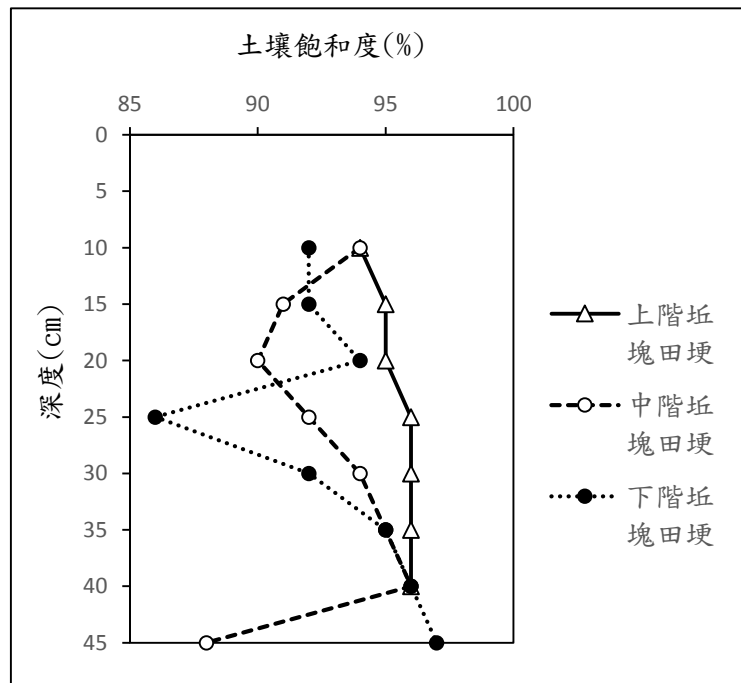


圖 4.12 實驗田 B 田埂土壤飽和度

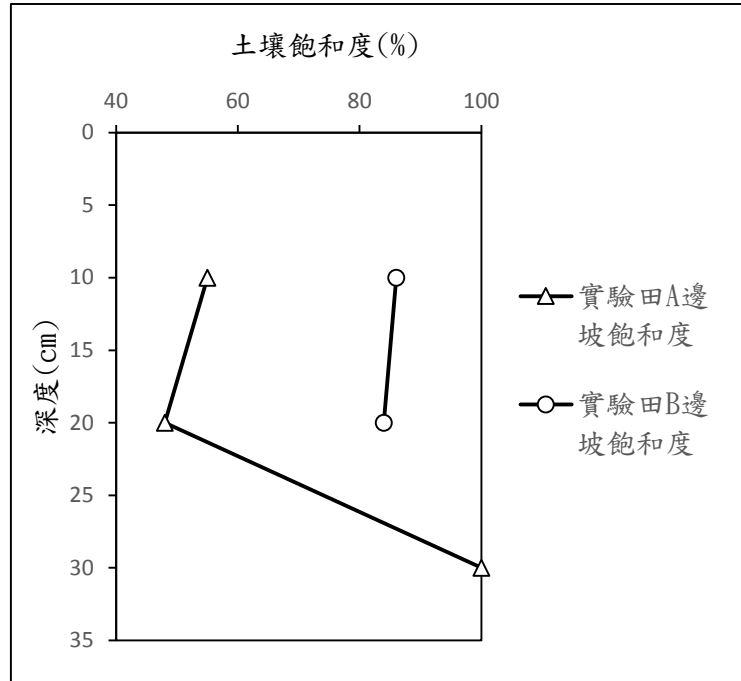


圖 4.13 邊坡飽和度-深度關係

## 4.4 水梯田入滲補注機制綜合分析

本研究選擇完整之水梯田試驗區，藉由水收支平衡概念，配合現地雙環垂直入滲試驗及減水深試驗，量化比較水梯田田區垂直入滲與埂間滲漏/側滲比例，並藉由耕種歷史、田埂維護情形、坵塊邊界長度等，確認影響水梯田入滲補注之重要因子，藉此做為量化評估水梯田入滲補注地下水功能之基礎。

### 4.4.1 田區垂直入滲及埂間滲漏/側滲比較分析

為量化比較水梯田田區垂直入滲與埂間滲漏/側滲，以瞭解實驗田區地表湛水入滲後之滲漏情形，本研究於民國 102 至民國 103 年二期作休耕期規劃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(實驗田 A 共有九階坵塊，實驗田 B 有十一階坵塊，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垂直入滲率。



## 一. 減水深試驗

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，量測結果及各坵塊之面積如表 4.5 及表 4.6 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 53.4mm/day 至 249.4mm/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 113.37mm/day，最高值為最低值之 4.67 倍；田埂維護後減水深扣除蒸發量後之田區整體入滲率介於 8.0mm/day 至 62.5mm/day 之間，平均整體入滲率為 25.24mm/day，最高值為最低值之 7.81 倍。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 4.4mm/day 至 19.9mm/day 之間，平均整體入滲率為 9.02mm/day，最高值為最低值之 4.52 倍；田埂維護後減水深扣除蒸發量後之田區整體入滲率介於 3.0mm/day 至 19.0mm/day 之間，平均整體入滲率為 9.96mm/day，最高值為最低值之 6.3 倍。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)。相關深入分析於後續章節探討。

## 二. 雙環定水頭入滲試驗

根據雙環入滲試驗結果(見表 4.7 及表 4.8)，實驗田 A 方面，田埂維護前田區內垂直入滲率介於 3.90mm/day 至 29.60mm/day 之間，平均值為 12.50mm/day，最高值為最低值之 7.59 倍，田埂交界垂直入滲率介於 9.90mm/day 至 54.80mm/day 之間，平均值為 26.97mm/day，最高值為最低值之 5.54 倍，田埂維護前田區內垂直入滲率平均值為田埂交界垂直入滲率平均值 0.46 倍。田埂維護後田區內垂直入滲率介於 1.09mm/day 至 5.82mm/day 之間，平均值為 3.47mm/day，最高值為最低值之 5.34 倍，田埂交界垂直入滲率介於 2.85mm/day 至 4.99mm/day 之間，平均值為 4.02mm/day，最高值為最低值之 1.75 倍。田埂維護後田區內垂直入滲率平均值為田埂交界垂直入滲率平均值 0.86 倍。田區內垂直入滲率平均值於田埂維護前為田埂維護後之 3.6 倍，田埂交界垂直入滲率平均值於田埂維護前為田

埂維護後之 6.71 倍；實驗田 B 方面，田埂維護前田區內垂直入滲率介於 0.65mm/day 至 1.5mm/day 之間，平均值為 0.94mm/day，最高值為最低值之 2.31 倍，田埂交界垂直入滲率介於 0.52mm/day 至 0.99mm/day 之間，平均值為 0.83mm/day，最高值為最低值之 1.9 倍，田埂維護前田區內垂直入滲率平均值為田埂交界垂直入滲率平均值 1.13 倍。田埂維護後田區內垂直入滲率介於 0.55mm/day 至 0.98mm/day 之間，平均值為 0.82mm/day，最高值為最低值之 1.78 倍，田埂交界垂直入滲率介於 1.05mm/day 至 1.25mm/day 之間，平均值為 1.14mm/day，最高值為最低值之 1.19 倍。田埂維護後田區內垂直入滲率平均值為田埂交界垂直入滲率平均值 0.72 倍，田區內垂直入滲率平均值於田埂維護前為田埂維護後之 1.15 倍，田埂交界垂直入滲率平均值於田埂維護前為田埂維護後之 0.73 倍。

從實驗結果分析，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 田埂維護前上階、中階、下階坵塊田埂交界入滲率比田區內入滲率分別高 12.19 mm/day、25.2 mm/day、6 mm/day，然而實驗田 A 田埂維護後與實驗田 B 田埂維護前後之田埂交界入滲率與田區內入滲率相差至多不大於 2 mm/day，研判應是實驗田 A 於田埂維護後導致田埂間滲漏或滲側之水損失減少。而實驗田 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，而垂直入滲率亦因而下降。

### 三. 田區垂直入滲及埂間滲漏/側滲分析

將減水深扣除蒸發量所得之田區坵塊整體入滲率與雙環試驗垂直入滲率數據加以比較(見圖 4.14~4.17)，實驗田 A 田埂維護前上階坵塊田區內垂直入滲率、田埂交界垂直入滲率、以減水深扣除蒸發量計算之整體入滲率比為 1：4：13.3，

中階坵塊為 1:1.9:8.4，下階坵塊為 1:2.5:30.5；維護後上階坵塊比為 1:1.2:7，中階坵塊比為 1.2:1:6.5，下階坵塊為 1:2.6:15.6。實驗田 B 田埂維護前上階坵塊田區內垂直入滲率、田埂交界垂直入滲率、以減水深扣除蒸發量計算之整體入滲率比為 2.9:1:19，中階坵塊為 1:1.5:6.6，下階坵塊為 1:1.5:30.6，維護後上階坵塊比為 1:1.1:9.7，中階坵塊比為 1:2:30，下階坵塊為 1:1.3:20.2。取田區內垂直入滲率與田埂交界垂直入滲率平均值，做為該坵塊整體垂直入滲率之粗估值，則實驗田 A 田埂維護前上階坵塊整體垂直入滲率與埂間滲漏/側滲比為 1:5.28，中階坵塊比為 1:5.91，下階坵塊比為 1:17.46；維護後上階坵塊比為 1:6.36，中階坵塊比為 1:5.96，下階坵塊為 1:8.63。實驗田 B 田埂維護前上階坵塊整體垂直入滲率與埂間滲漏/側滲比為 1:9.8，中階坵塊比為 1:5.33，下階坵塊比為 1:24.27；維護後上階坵塊比為 1:9.36，中階坵塊比為 1:19.76，下階坵塊比為 1:17.35。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。

Kukul et al. (2002)之研究結果亦顯示，無耕犁、中耕犁強度、高耕犁強度水稻田之入滲環入滲率分別比整體田區入滲率減少 1.8%、38.8%及 42.1%，由於入滲環只能得到垂直滲漏的水損失，由此而知當耕犁後，部分水損失係透過無耕犁狀態之田埂而流動。對照以本研究實驗田 A 第五坵塊(編號田 5)於田埂維護前為例，其減水深高達 249.4 mm/day，而其垂直入滲率田區內為 29.6 mm/day，鄰近田埂處為 54.8 mm/day，分別為前者之 12%及 22%。現勘顯示該坵塊之疊石邊坡滲漏極為嚴重(圖 4.18)，滲漏點以點狀分佈為主，滲流主要於疊石縫流出且滲漏位置以邊坡中、高位置為主。肉眼可見之滲漏處高達 9 處，可以推論該坵塊有大量湛水循田埂與田區內之交界處以優勢流(Preferential flow)之方式側滲至下階田區，其餘中階及下階田區亦可發現多處田埂邊坡之滲漏，惟在田埂邊坡維護後，此現象大幅減少，而屬於老田區之實驗田 B 在田埂維護前後，均未發現其田埂邊坡有明顯滲流狀況。

表 4.5 實驗田 A 減水深試驗結果(單位:mm/day)

| 階段坵塊編號 | 田區整體入滲率(減水深-蒸發量) |       | 坵塊面積(m <sup>2</sup> ) |
|--------|------------------|-------|-----------------------|
|        | 田埂維護前            | 田埂維護後 |                       |
| 田 1    | 53.4             | 24.6  | 274.0                 |
| 田 2    | 80.3             | 13.3  | 86.2                  |
| 田 3    | 77.2             | 11.7  | 178.9                 |
| 田 4    | 127.3            | 32.2  | 125.3                 |
| 田 5    | 249.4            | 62.5  | 128.4                 |
| 田 6    | 111.6            | 8.0   | 220.1                 |
| 田 7    | 139.8            | 14.0  | 189.0                 |
| 田 8    | 114.7            | 51.2  | 212.7                 |
| 田 9    | 121.6            | 17.0  | 199.0                 |

表 4.6 實驗田 B 減水深試驗結果(單位:mm/day)

| 階段     | 田區整體入滲率(減水深-蒸發量) |       | 坵塊面積(m <sup>2</sup> ) |
|--------|------------------|-------|-----------------------|
| 階段坵塊編號 | 田埂維護前            | 田埂維護後 |                       |
| 田 1    | 9.9              | 9.5   | 222.4                 |
| 田 2    | 16.9             | 10.0  | 113.7                 |
| 田 3    | 7.8              | 3.0   | 226.8                 |
| 田 4    | 12.1             | 10.6  | 136.6                 |
| 田 5    | 4.4              | 4.7   | 586.5                 |
| 田 6    | 6.6              | 14.6  | 234.6                 |
| 田 7    | 7.1              | 16.5  | 260.4                 |
| 田 8    | 11.9             | 8.9   | 207.7                 |
| 田 9    | 9.4              | 15.9  | 171.8                 |
| 田 10   | 16.4             | 11.7  | 111.1                 |
| 田 11   | 19.9             | 19    | 97.1                  |

表 4.7 實驗田 A 雙環定水頭入滲試驗結果(單位:mm/day)

| 階段<br>坵塊 | 田埂維護前 |       | 階段<br>坵塊 | 田埂維護後 |      |
|----------|-------|-------|----------|-------|------|
|          | 田區內   | 田埂交界  |          | 田區內   | 田埂交界 |
| 田 1      | 4.01  | 16.20 | 田 1      | 3.50  | 4.23 |
| 田 5      | 29.60 | 54.80 | 田 4      | 5.82  | 4.99 |
| 田 9      | 3.99  | 9.94  | 田 9      | 1.09  | 2.85 |

表 4.8 實驗田 B 雙環定水頭入滲試驗結果(單位 mm/day)

| 階段<br>坵塊 | 田埂維護前 |      | 階段<br>坵塊 | 田埂維護後 |      |
|----------|-------|------|----------|-------|------|
|          | 田區內   | 田埂交界 |          | 田區內   | 田埂交界 |
| 田 1      | 1.50  | 0.52 | 田 1      | 0.98  | 1.05 |
| 田 5      | 0.67  | 0.98 | 田 7      | 0.55  | 1.12 |
| 田 11     | 0.65  | 0.99 | 田 11     | 0.94  | 1.25 |

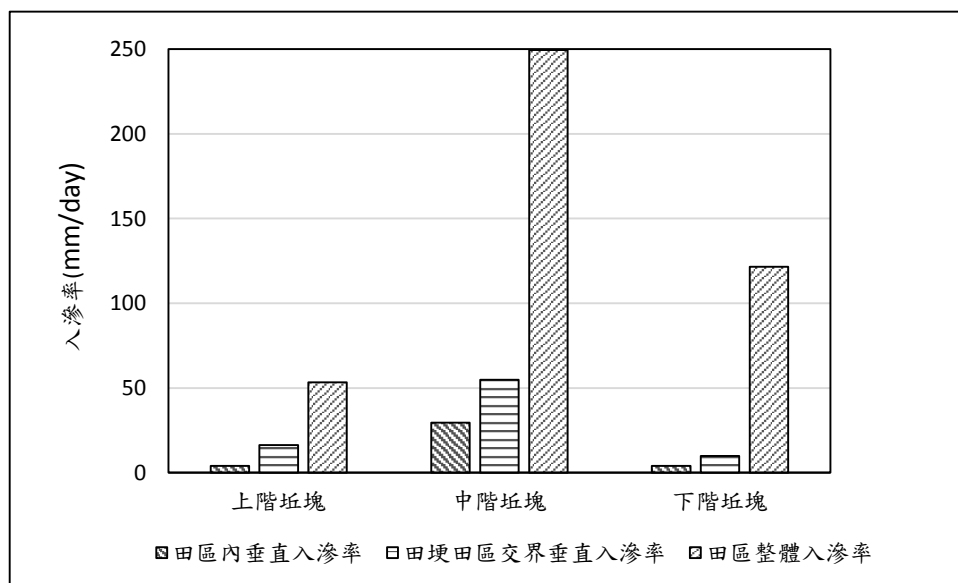


圖 4.14 實驗田 A 田埂維護前田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較

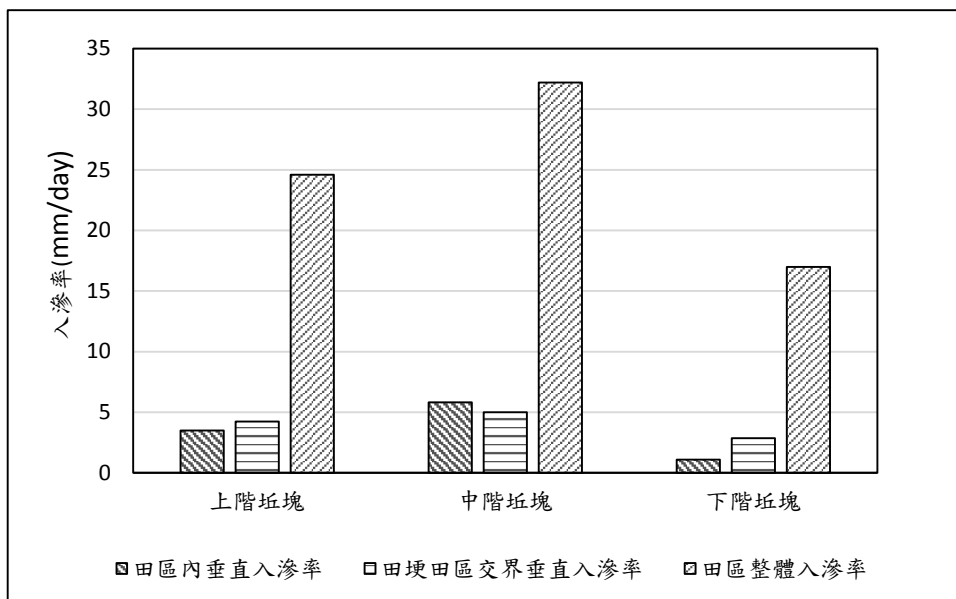


圖 4.15 實驗田 A 田埂維護後田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較

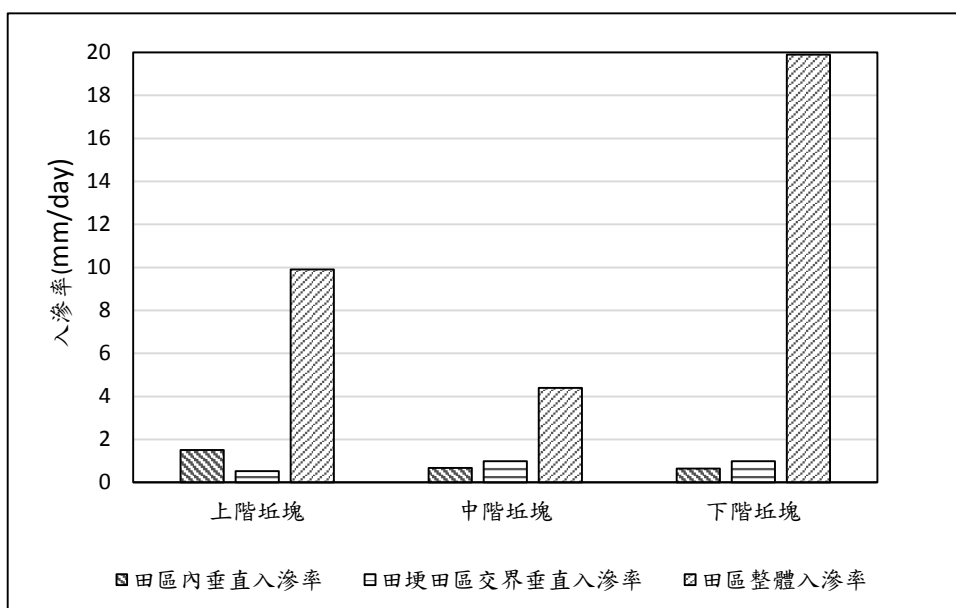


圖 4.16 實驗田 B 田埂維護前田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較



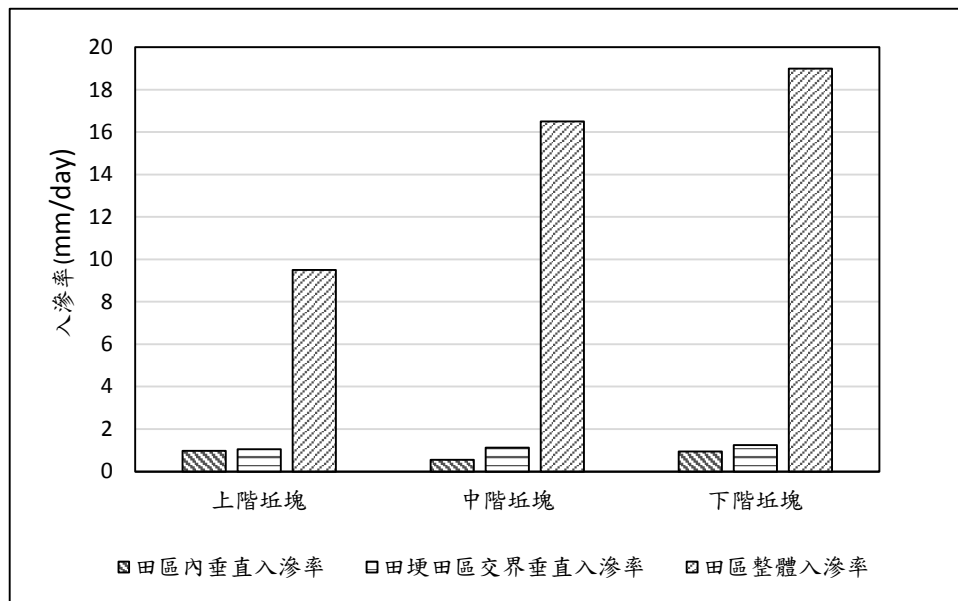


圖 4.17 實驗田 B 田埂維護後田區整體入滲率與雙環垂直入滲試驗結果比較



(a) 滲漏點以點狀分佈為主



(b) 滲流於疊石邊坡縫流出



(c) 滲漏位置以邊坡中、高位置為主

圖 4.18 實驗田 A 田埂邊坡滲漏情形

#### 4.4.2 水梯田耕作歷史對入滲補注之影響

本研究實驗田 A 為休耕 38 年後於近兩年復耕之新田，實驗田 B 則已持續耕種超過百年。表 4.3 及表 4.4 之減水深結果顯示，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平均值為 113.37mm/day，田埂維護後平均值為 25.24mm/day；實驗田 B 田埂維護前扣除蒸發量後之田區整體入滲率平均值為 9.02mm/day，田埂維護後平均值為 9.96mm/day。實驗田 A 田埂維護前、後田區整體入滲率分別為實驗田 B 之 12.6 倍及 2.5 倍，相較兩處實驗田區於相近時期量測之減水深試驗結果，屬於耕作歷史達百年以上之老田區減水深均遠低於新復育田區。



Janssen et al. (2009) 針對 20 年與 100 年歷史之水稻梯田田埂滲漏進行研究，於田埂上下層接連處田區分別裝設隔絕設施，使下坵塊隔絕區域接收自上方隔絕區域入滲後流出之水。上區內加入示蹤劑，並於田埂多處安裝張力計。經由挖開田埂剖面顯示，百年田埂內之示蹤劑尚集中於田埂上方內側，20 年田埂內之示蹤劑則近乎均勻分布。於入滲期間，當水流通過 20 年田埂時壓力水頭瞬間明顯地上升，代表有優勢流存在。相反地在百年田埂內之壓力水頭呈緩慢上升，說明百年田埂下方已有基礎水通量存在，其原因歸究於 20 年田埂密度較低且有較多的孔隙。Lin (2013) 研究評估入滲率隨時間變化的函數以計算犁底層之入滲率（垂直入滲）和稻田周圍田埂（埂間滲漏）的時間變化，經由分析入滲率的時間函數、湛水深度和入滲速率之間的關係以及稻田耕作歷史對於垂直水損失和側向水損失的影響。結論為耕犁和經常性的間歇灌溉，將會改變土壤的結構並使滲透能力隨時間產生變化，耕作歷史僅幾十年的水田可能導致較大之灌溉水損失。本研究結果加上前述文獻佐證，顯示水梯田之耕種歷史影響其入滲補注功能。

#### 4.4.3 水梯田田埂維護情形對入滲補注之影響

有關田埂邊坡維護對於滲漏損失入滲補注之影響，Lin (2013) 之研究顯示維持湛水與排水階段的平衡，並且注意維護田埂可以減少灌溉水的損失。Bouman et al. (2005) 之研究甚至指出在缺乏良好維護下田埂內之鼠洞將會導致非常高之水損失。本研究針對實驗田 A 及實驗田 B 分別於民國 102 年 10 月至 12 月初間田埂邊坡維護前與民國 103 年 3 月間田埂邊坡維護後進行減水深試驗，探討田埂邊坡維護對於入滲補注量之影響。將減水深試驗結果(表 4.3、表 4.4)以長條圖顯示(圖 4.19、圖 4.20)，實驗田 A 田埂維護前田區整體入滲率明顯皆大於田埂維護後，實驗田 B 則呈現或增或減之微幅變化。為以統計方式比較田埂維護前、後田區整體入滲率母體有無變化，成對樣本 T 檢定適用於兩組樣本個數相等且樣本組相互影響或在不同條件下由相同抽樣對象取得資料加以分析之情況。假設田埂維

護前、後田區整體入滲率母體平均值相等，並視為欲驗證之虛無假設(Null Hypothesis)，即 $H_0: \mu_1 = \mu_2$ 。而田埂維護前、後田區整體入滲率母體平均值不同則視為對立假設(Alternative Hypothesis)，即 $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ 。成對樣本 T 檢定統計量之計算為：

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad (4.1)$$

其中 $t$ 為 T 檢定統計量； $\bar{d}$ 為兩樣本其平均值的差； $\mu_d$ 為兩樣本的母體其平均值的差； $n$ 為樣本數； $S_d$ 為標準偏差。

求得 T 檢定統計量後依顯著水準( $\alpha$ )與自由度(Degree of Freedom, D.F.)查詢 $t$ 分配臨界值表，若 T 檢定統計量介於正負臨界值之間則接受虛無假設，反之則拒絕。本研究選定信賴區間為 95%(即 $\alpha=0.05$ )，成對樣本 T 檢定結果如表 4.9，實驗田 A 之 $t$ 統計量為 6.161，自由度 8，根據 $t$ 分配臨界值表，虛無假設接受範圍為 $-2.306 < t < 2.306$ ，故拒絕虛無假設，即實驗田 A 田埂維護前田區整體入滲率母體平均值不等於田埂維護後母體平均值，並且根據結果可判斷田埂維護前田區整體入滲率母體平均值大於田埂維護後母體平均值。實驗田 B 之 $t$ 統計量為 -0.110，自由度 10，根據 $t$ 分配臨界值表，虛無假設接受範圍為 $-2.228 < t < 2.228$ ，故接受虛無假設，即實驗田 B 田埂維護前田區整體入滲率母體平均值等於田埂維護後母體平均值。

試驗結果分析顯示，實驗田 A 經田埂維護後減水深大幅減少，而實驗田 B 田埂維護前、後並無太大差異。比較田埂維護前後之樣貌(圖 4.21a 及圖 4.21b)，實驗田 A 於田埂維護前田埂上因缺乏維護而雜草叢生，研判可能因動物活動與雜草根系發展/腐敗等原因使田埂會產生較多孔隙，從而導致更多埂間滲漏或側滲，缺乏維護亦有可能使湛水經由田埂較低處流出田區外，造成較高水損失。而田埂之維護為使用田中爛泥填補田埂並壓密，田埂大孔隙因此減少，湛水經由非越田灌溉缺口流出之情況亦改善，使減水深大幅下降。實驗田 B 田埂邊坡維護

前(圖 4.22a)相較於田埂邊坡維護後(圖 4.22b)，只多了些許雜草，情況不如實驗田 A 般差異甚大，田埂邊坡維護狀況持續保持良好，且實驗田 B 從田埂邊坡維護前樣貌可以得知，其即使在休耕期仍持續有局部性填補田埂之行為，使實驗田 B 之水損失較低並保持於一定範圍內。

綜合上述分析結果，實驗田 A 田埂邊坡維護前、後情況差異甚大，田埂邊坡長期維護良好之實驗田 B 水損失則維持於一定範圍內，顯示水梯田田埂維護對於新田區入滲補注具有極高之影響性，對於老田區之影響則較輕微。

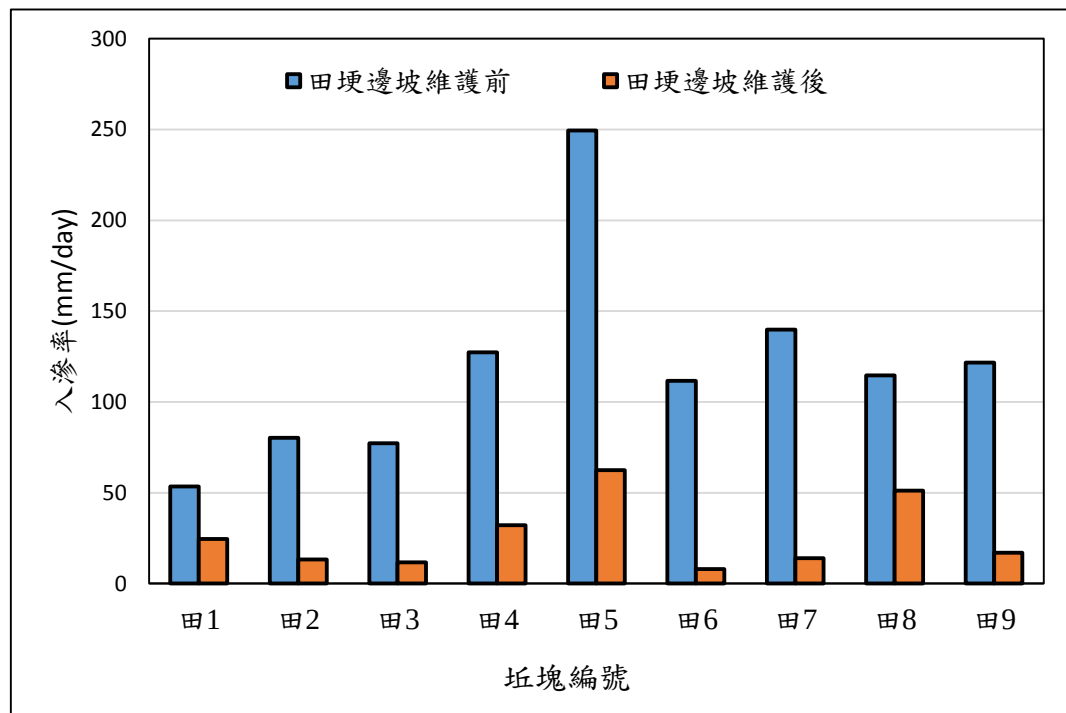


圖 4.19 實驗田 A 田埂邊坡維護前、後之田區整體入滲率比較

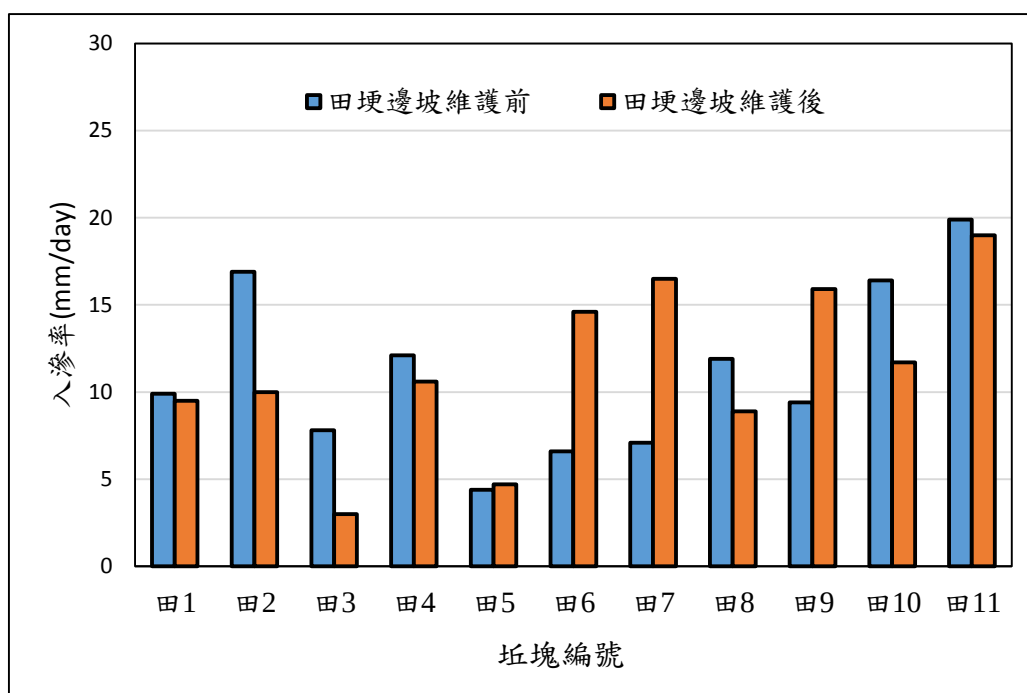


圖 4.20 實驗田 B 田埂邊坡維護前、後之田區整體入滲率比較

表 4.9 成對樣本 T 檢定結果

|       | T 統計量( <i>t</i> ) | 自由度(D.F.) |
|-------|-------------------|-----------|
| 實驗田 A | 6.161             | 8         |
| 實驗田 B | -0.110            | 10        |



(a)田埂邊坡維護前樣貌



(b)田埂邊坡維護後樣貌

圖 4.21 實驗田 A 田埂邊坡維護前、後樣貌





(a)田埂邊坡維護前樣貌



(b)田埂邊坡維護後樣貌

圖 4.22 實驗田 B 田埂邊坡維護前、後樣貌

## 4.5 水梯田入滲補注地下水綜合分析

耕作中之水稻田，因田埂圍築具有長期保持湛水之特性，就水收支平衡觀點來看，降雨或灌溉造成田面湛水升高，多餘水量由田埂缺口溢流，而湛水除提供蒸發散量外，經由田埂垂直滲漏及穿越牛踏層之田間滲漏水量，即成為涵養地下水之重要來源，而側滲至鄰接田區之滲流，亦可提供其他回歸水而重覆加以利用。

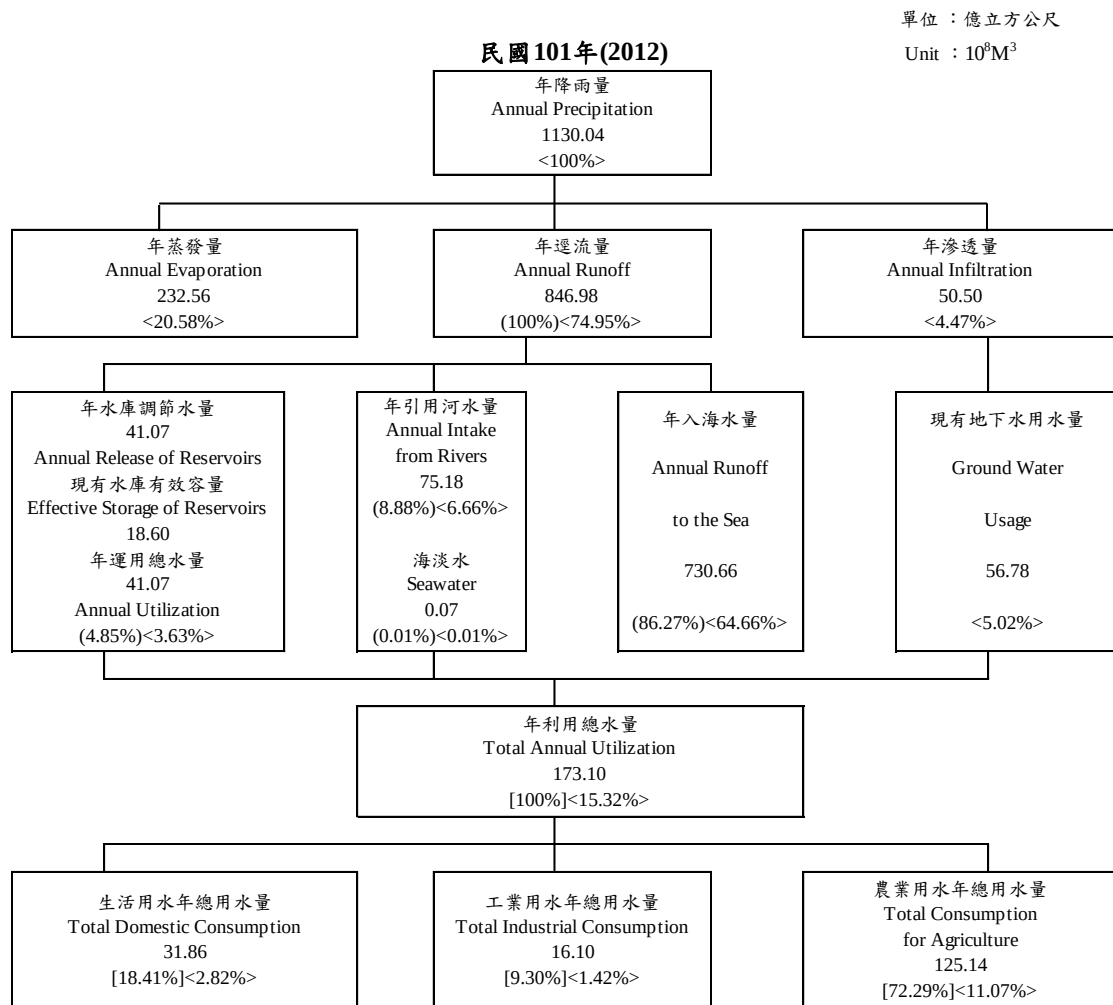
對於地下水補注效益，雖然因牛踏層之阻滯，使入滲率看似偏低，Chen et al.(2002)量測彰化田中鎮之實驗田，地下水補注率約在 5mm/day 左右；簡傳彬(2003)於桃園農田水利會桃園大圳二支線灌區田區實測之地下水補注率為 3.8 mm/day；曹以松及林俊男等（1987）於集集共同引水計劃中探討以水田超量灌溉方式作為人工補注地下水源之措施，除於雲林麻園地區實施超量灌溉之現地水收支平衡試驗外，並以灌溉水質數學模式進行模擬，結果顯示該區超灌入滲量約為 5.5mm/day。而本研究實驗田 A 田埂邊坡維護前平均減水深 113.37 mm/day，維護後平均減水深 25.24mm/day，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

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 640mm/hr、144mm/hr、84mm/hr 及 168mm/hr。均遠高於本研究試驗垂直入滲率試驗結果。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 8,834mm 及實驗田 B 之 3,486mm，為當地年均降雨量 5,146mm 之 171.7% 及 67.7%。

根據經濟部水利署 101 年水利統計中，臺灣年降雨量 1130.04 億立方公尺，其中年逕流量高達 74.95%，年蒸發量占 20.58%，年滲透量僅占 4.47%(圖 4.23)。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 號森林集水區的年降雨量各有 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 1,182mm；以 Thornthwaite 法估算為 1,004.7mm；以 Hamon 法估算為 983.9mm) 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。而貢寮吉林里年均降雨量 5,146mm，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(包括於二期作休耕及裏作期間湛水)，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。

水田補注地下水之效益在轉作旱作或休耕棄耕而不湛水之情況下，亦將使地下水之補注來源將大為減少，根據吳瑞賢(2003)以水稻田及早作 (以西瓜為例) 之回歸水及地下水補注分析加以比較，結果顯示短期旱作在水稻田一期作期間，將減少地下水補注量 136.8mm (約 21%)，回歸水量 (含逕流量) 降低 308.5mm (約 69%)，地下水回歸水量降低 22.1mm (約 23%)。轉作旱作在一期作期間，將減少地下水補注量及地下水回歸水量。同樣比例之轉作面積，上游轉作旱作之地下水補注及地下水回歸水量大於下游轉作旱作。Chen et al.(2002)實驗觀測亦證實水田區在灌溉期間與停灌期間，淺井水位有明顯之變化，停灌後水位約下降 0.9~1.2 公尺，此說明水田滲透水為淺層地下水之重要來源。此一地下水流，或伏流迴歸至下游田區，或滲漏至深層之地下水含水層，為更下游之各標的用水使用。在此概念下，一般所習稱之水田灌溉滲漏損失，就不再是水資源的浪費，反而成為調節水資源利用之重要方式。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。



資料來源：經濟部水利署水源經營組及水文技術組。

Data Source：Management Division & Hydrology Division, WRA, MOEA.

說明：1.<>以降雨量為基數 Base on Annual Precipitation<100%>

Note：( )以年逕流量為基數 Base on Annual Runoff (100%)

[ ]以年利用總水量為基數 Base on Total Annual Utilization[100%]

2.歷年(民國38年至100年)平均年雨量：2,497毫米

Average Annual Rainfall of Taiwan (1949~2011)：2,497mm

民國101年平均年雨量：3,139毫米

Annual Rainfall of Taiwan in 2012：3,139mm

歷年平均年逕流量(民國38年至100年)：645.67億立方公尺

Annual Rainoff of Taiwan (1949~2011)：645.67\*10<sup>8</sup>M<sup>3</sup>

民國101年年逕流量：846.98億立方公尺

Average Annual Rainoff of Taiwan in 2012：846.98\*10<sup>8</sup>M<sup>3</sup>

3.本表不含河川保育用水量。

4.本表水庫相關資料係依據40座主要水庫為計算標準。

5.本表除地下水用水量外均不含非灌區農業用水量。

6.合計百分比之加總數不等於100%及總計不等於細數和，係因電腦計算四捨五入之關係。

7.本表資料不含金門縣及連江縣資料。

圖 4.23 台灣水資源運用實況(經濟部水利署 101 年水利統計)

## 4.6 水梯田土壤沖蝕防制功能分析

本研究先針對實驗田區降雨特性、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，進行陡坡水梯田在湛水耕作以及棄耕噴灑除草劑呈裸土狀態下之沖蝕量推估。以下為針對實驗田區各項因子之推估：

### 4.6.1 USLE 參數推估

#### 一、降雨沖蝕指數(Rm):

降雨沖蝕指數的大小代表了降雨及逕流對土壤可能造成沖蝕程度的高低。實驗田區並無長期觀測資料，因此採用盧昭堯等人(2005)所修訂之台灣地區年等降雨沖蝕指數圖，取五堵、瑞芳、火燒寮等三處雨量站(圖 4.24)之 Rm 值(表 4.10)，利用距離平方反比法推估兩處實驗田區之 Rm 值(表 4.11)，貢寮鄉因位於台灣東北角，直接受鋒面影響，而雨量站皆設立於較內陸之區域，因此利用此方法進行內插可能會產生低估之情況。

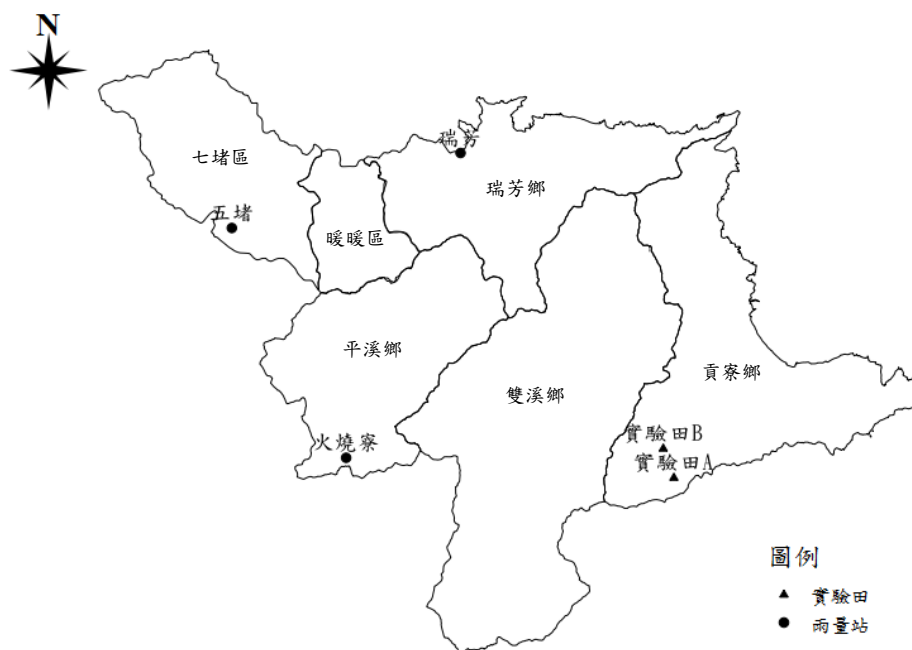


圖 4.24 雨量站與實驗田位置圖

表 4.10 鄰近雨量站降雨沖蝕指數表

| 站名  | TWD97_X(m) | TWD97_Y(m) | Rm(Mj·mm/ha·hr·yr) |
|-----|------------|------------|--------------------|
| 火燒寮 | 324813.70  | 2764092.90 | 23610              |
| 瑞芳  | 330186.20  | 2778442.80 | 24050              |
| 五堵  | 319447.50  | 2774911.40 | 15980              |

資料來源:盧昭堯等(2005)

表 4.11 實驗田降雨沖蝕指數推估結果

| 田區    | TWD97_X(m) | TWD97_Y(m) | Rm(Mj·mm/ha·hr·yr) |
|-------|------------|------------|--------------------|
| 實驗田 A | 340142.83  | 2763146.31 | 22261.70           |
| 實驗田 B | 339644.96  | 2764518.49 | 22287.74           |

## 二、土壤沖蝕指數(Km)

依據水土保持手冊(2005)，土壤沖蝕指數 Km 可以經由下式中 a、b、c、d、e 等 5 項參數進行計算，此公式只適用於極細砂與粉土小於 70%。

$$Km = 0.1317 \frac{2.1[d(d+e)]^{1.14} (10^{-4})(12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)}{100} \quad (4.2)$$

1. a 值:有機質含量百分比。
2. b 值:土壤結構參數，參數值之判定如表 4.12。

表 4.12 土壤結構參數

| 參數值 | 土壤結構     | 顆粒大小   |
|-----|----------|--------|
| 1   | 極細顆粒狀    | <1 mm  |
| 2   | 細顆粒狀     | 1-2 mm |
| 3   | 中或粗顆粒狀   | 2-10mm |
| 4   | 塊狀，片狀整塊狀 | >10 mm |

3. c 值:土壤滲透性參數之判別如表 4.13。

表 4.13 土壤透性參數

| 參數值 | 滲透速度 | 滲透率(mm/hr) |
|-----|------|------------|
| 1   | 極快   | >125       |
| 2   | 快    | 62.5 至 125 |
| 3   | 中等   | 20 至 62.5  |
| 4   | 中等慢  | 5 至 20     |
| 5   | 慢    | 1.25 至 5   |
| 6   | 極慢   | <1.25      |

4. d 值:土壤粉粒與極細砂(粒徑 0.001 至 0.1 mm)含量百分比。

5. e 值:土壤粗砂(粒徑 0.1 至 2 mm)含量百分比。

其中,參數a有機質含量係於實驗田區採取表層土壤,委託農改場進行化驗;  
b、d、e 參數則是在現地進行土壤取樣,帶回實驗室進行篩分析及比重計試驗求得。其中粒徑小於 1mm 之顆粒超過 50%,而極細砂的含量約佔砂粒之 30%;c 參數則是在實驗田進行雙環入滲試驗結果,各項土壤分析結果如表 4.14,土壤沖蝕指數計算結果如表 4.15。

表 4.14 實驗田土壤分析結果

| 田區    | 有機質(%) | 砂土(%) | 粉土(%) | 平均滲透率(mm/hr) |
|-------|--------|-------|-------|--------------|
| 實驗田 A | 5.61   | 63.8  | 29.9  | 0.82         |
| 實驗田 B | 5.13   | 53.4  | 36.6  | 0.04         |

表 4.15 土壤沖蝕指數計算結果

| 田區    | a    | b | c | d     | e     | Km    |
|-------|------|---|---|-------|-------|-------|
| 實驗田 A | 5.61 | 1 | 6 | 49.04 | 44.70 | 0.038 |
| 實驗田 B | 5.13 | 1 | 6 | 52.62 | 37.40 | 0.041 |



現地試驗周邊二處休耕水梯田之入滲率分別為 2.17mm/hr 及 2.86mm/hr，則休耕後實驗田 A 之 Km 值略減至 0.03，對實驗田 B 則影響甚微。

### 三、坡長因子(L):

坡長因子計算式中 $\lambda$ 為逕流形成至出口或停止點之水平投影距離(m)，計算式如下：

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (4.3)$$

式中，m 值之設定值如表 4.16，

表 4.16 坡長因子中 m 之設定值

| 坡度(%) | m   |
|-------|-----|
| <1%   | 0.2 |
| 1-3%  | 0.3 |
| 3-5%  | 0.4 |
| >5%   | 0.5 |

實驗田 A、B 坡長分別為 63.24、35.04m，坡度皆大於 5%，因此，m 值皆設定為 0.5，計算結果如表 4.17。

表 4.17 坡長因子(L)計算結果

| 田區    | 水平投影長  | 坡度  | 坡度百分比(%) | L(m=0.5) |
|-------|--------|-----|----------|----------|
| 實驗田 A | 63.24m | 35° | 36       | 1.69     |
| 實驗田 B | 35.04m | 20° | 58       | 1.26     |

### 四、坡度因子(S):

依照水土保持手冊(2005)，若現場之地形變化不大，可求得平均坡度後，再以下式求得坡度因子(S)值。

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (4.4)$$

實驗田 A、B 坡度因子分別為 9.27 及 18.68。

## 五、覆蓋與管理因子(C)

C 值為標準田間之土壤流失與具特殊作物覆蓋田間的土壤流失之比值，且兩者具備相同的 R，K，L，S 值。而與 C 值有關之因素包括作物之種類、生產季節、耕作方式以及降雨分佈等，作物的地表覆蓋及栽培管理對於土壤侵蝕的影響非常複雜，例如作物的莖葉不僅可遮蔽雨滴的衝擊，收穫以後在地表有殘留落葉亦有助於抑制沖蝕；此外，作物的雨滴緩衝作用與作物的種類、生長發育狀況及季節也有相關。由於作物的地表覆蓋及栽培管理對於土壤沖蝕的影響很複雜，難以個別作評價，即使是相同的作物用相同的管理方法栽培，也未必會有相同的 C 值，因此若要求得所屬對象地域的 C 值，有關降雨特性和栽培管理的正確資訊之獲得是必要的。依現地之地表及植被狀況，可由表 4.18 直接求得覆蓋與管理因子(C)值，實驗田 A、B 皆種植水稻，如休耕且長期噴灑除草劑則參考林俐玲(2004)將其假設為裸露地。

表 4.18 覆蓋與管理因子值對照表

| 地表及植被狀況      | C 值  | 地表及植被狀況  | C 值  |
|--------------|------|----------|------|
| 百喜草          | 0.01 | 裸露地      | 1.00 |
| 水稻           | 0.10 | 水泥地      | 0.00 |
| 雜作           | 0.25 | 瀝青地      | 0.00 |
| 果樹           | 0.20 | 雜石地      | 0.01 |
| 香蕉           | 0.14 | 水體       | 0.00 |
| 鳳梨           | 0.20 | 建屋用地     | 0.01 |
| 林地（針業、闊葉、竹類） | 0.01 | 牧草地      | 0.15 |
| 蔬菜類          | 0.90 | 高爾夫球場植草地 | 0.01 |
| 茶            | 0.15 | 雜草地      | 0.05 |
| 特用作物         | 0.20 | 墓地       | 0.01 |
| 檳榔           | 0.10 |          |      |

資料來源:水土保持手冊(2005)

## 六、水土保持措施因子(P)

若採用能抑制坡面逕流流速的方法，就有防止侵蝕的效果，此類農地保全方法有等高線栽培法、等高線修栽法及平台階段等。P 值為採用這類保全方法下的土壤流失量與標準田間土壤流失量之比值。一般而言，必需根據現地所採用之水土保持措施進行水土保持措施因子的決定，水梯田屬於階段平台，但因圍築田埂，使其具有長期湛水能力，P 值在世界各國均有其不同設定，本計畫參考林俐玲(2004)中所推估之 P 值(表 4.19)，由於兩處實驗田區坡度介於 20~30 度，統一設定為 45%，採平台階段/局部除草作為湛水耕作之水梯田 P 值設定(P=0.09)，而將休、棄耕施用除草劑呈裸土狀態之水梯田設定為平台階段/完全除草(P=0.31)，進行沖蝕量的推估。

表 4.19 適用於台灣不同水土保持措施及坡度之因子

| 坡度(%) | 水土保持措施    |           |      |      |
|-------|-----------|-----------|------|------|
|       | 平台階段/完全除草 | 平台階段/局部除草 | 內斜階段 | 等高密植 |
| 10    | 0.52      | 0.00      | 0.07 | 0.43 |
| 15    | 0.51      | 0.00      | 0.03 | 0.43 |
| 20    | 0.49      | 0.07      | 0.01 | 0.42 |
| 25    | 0.47      | 0.16      | 0.02 | 0.40 |
| 30    | 0.44      | 0.20      | 0.05 | 0.36 |
| 35    | 0.40      | 0.20      | 0.11 | 0.31 |
| 40    | 0.36      | 0.16      | 0.19 | 0.25 |
| 45    | 0.31      | 0.09      | 0.30 | 0.18 |
| 50    | 0.25      | 0.01      | 0.44 | 0.09 |

資料來源：林俐玲等(2004)

#### 4.6.2 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，結果如表 4.20 所示。其中，實驗田 A 水梯田土壤流失量由 119.89ton/ha/year 增至 3382.09ton/ha/year；實驗田 B 水梯田土壤流失量由 194.15ton/ha/year 增至 6687.35ton/ha/year。推估結果顯示，水梯田在休、棄耕後若無植被保護，土壤沖蝕量將大幅上昇。

表 4.20 實驗田區土壤沖蝕量推估

| 田區     | A    | Rm    | Km   | L    | S     | C    | P    | 田區年沖蝕量     | 單位面積          |
|--------|------|-------|------|------|-------|------|------|------------|---------------|
|        |      |       |      |      |       |      |      | (ton/year) | 年沖蝕量          |
|        |      |       |      |      |       |      |      |            | (ton/ha-year) |
| 湛水耕作狀態 |      |       |      |      |       |      |      |            |               |
| 實驗田 A  | 0.20 | 22261 | 0.04 | 1.69 | 9.27  | 0.10 | 0.09 | 23.98      | 119.89        |
| 實驗田 B  | 0.38 | 22287 | 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 | 22261 | 0.03 | 1.69 | 9.27  | 1.00 | 0.31 | 676.42     | 3382.09       |
| 實驗田 B  | 0.38 | 22287 | 0.04 | 1.26 | 18.68 | 1.00 | 0.31 | 2541.19    | 6687.35       |

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，在當地降雨沖蝕指數(Rm)值極高之情況下，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，方使估算之水梯田土壤沖蝕量接近於實測值。該研究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 0.77ton/ha/yr，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 3400mg/L 以上，為水田湛水耕作時期之 500mg/L 以下之 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。Machito Mihara (1996)則指出日本水梯田的侵蝕崩塌最常見於田埂邊坡處，遭受到侵蝕崩塌的地點比例以水田田埂的崩塌或溝蝕為最多，分析中也特別說明雖然田埂邊坡是水田的一部分，但是將其從水田中分隔出來，更能突顯出其重要性。

經以上綜合分析顯示貢寮區吉林里實驗梯田具有極佳之回歸水作用及地下水涵養效果，水梯田休、棄耕之後，若噴灑除草劑使表土呈現裸土狀態，亦會使土壤沖蝕量大幅增加。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，但因國內農村人口老化勞動力不足等後天條件的欠缺，使水梯田較一般平地水田有更大比例之轉作、休耕甚至棄耕，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。

## 第五章 結論與建議

本研究選擇完整之梯田試驗區，藉由水收支平衡概念配合現地雙環垂直入滲試驗及減水深試驗，量化比較水梯田田區垂直入滲與埂間滲漏之比例，並藉由耕種歷史、田埂維護情形等確認影響水梯田入滲補注之重要因子，藉此做為量化評估水梯田入滲補注地下水功能之基礎。此外，亦根據實驗田區降雨特性、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，進行陡坡水梯田在湛水耕作以及棄耕噴灑除草劑呈裸土狀態下之沖蝕量推估。結論及建議如下：

### 5.1 結論

1. 根據本研究現地踏勘調查顯示，水稻梯田在休耕後，多成為芒草梯田，雖具有一定之植物覆蓋率，但田埂逐漸消失，將喪失其蓄水功能，部分休耕梯田在施用除草劑後，呈現表土裸露及紋溝產生之狀態，其水土保持功能將逐漸喪失。
2. 本研究實驗田 A 與實驗田 B 田區之淺層土壤在分類上均以砂質壤土為主，土壤水分飽和度分析結果顯示在長期湛水狀態下，田區內土壤水分變化在深度 5cm 以下即多屬非飽和狀態，惟飽和度相當高，多數在 90% 以上；深度 10cm 以下之土壤飽和度變化並不大且均接近飽和，田埂內側交界處往下量測之飽和度幾乎皆為 100%，表示田區湛水易循田區內田埂內側邊界滲漏至深層土壤。
3. 實驗田 A 在未維護狀態下，疊石邊坡滲漏極為嚴重，滲漏點以點狀分佈為主，滲流主要於疊石縫流出且滲漏位置以邊坡中、高位置為主。可以推論有大量湛水循田埂與田區內之交界處以優勢流(Preferential flow)之方式側滲至下階田

區，惟在田埂邊坡維護後，此現象大幅減少，而屬於老田區之實驗田 B 在田埂維護前後，均未發現其田埂邊坡有明顯滲流狀況。

4. 復耕後之實驗田在整田前、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。鄰接田埂交界之垂直入滲率多高於田區中央之垂直入滲率。
5. 實驗田 A 田埂維護前減水深扣除蒸發量後依面積加權計算之田區整體入滲率平均值為 113.37mm/day，田埂維護後平均值為 25.24mm/day；實驗田 B 田埂維護前之田區整體入滲率平均值為 9.02mm/day，田埂維護後平均值為 9.96mm/day。實驗田 A 田埂維護前、後田區整體入滲率分別為實驗田 B 之 12.6 倍及 2.5 倍，屬於耕作歷史達百年以上之老田區減水深均遠低於新復育田區。而兩實驗田區兩次試驗之垂直入滲率均遠低於田區整體入滲率，顯示水梯田之湛水之主要入滲途徑為經由田埂與田區內之交界，進而補注地下水。
6. 水梯田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，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 天作一簡單估算，補注量分別為實驗田 A 之 9,135mm 及實驗田 B 之 3,958.5mm，為當地年均降雨量 5,146mm 之 177.5% 及 76.9%。而其他非湛水型之土地利用，以蓮華池地區為例，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、逕流後將無法達到如本研究實驗田 A、B 如此高之年累積地下水補注率。
7. 貢寮地區年雨量極為豐沛，在當地降雨沖蝕指數(Rm)值極高之情況下，坡地土壤沖蝕風險亦隨之提高。現勘結果顯示，休、棄耕之水梯田，田埂將逐步侵蝕而失去蓄水能力，邊坡崩塌亦極為常見。而水梯田休、棄耕後，若呈裸



土狀態亦會導致覆蓋與管理因子(C 值)大幅上升，利用 USLE 公式推估之土壤沖蝕量將大幅增加。

## 5.2 建議

1. 貢寮吉林里年均降雨量 5,146mm，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。
2. 水梯田防制土壤沖蝕或邊坡崩塌之功能可由現地踏勘充分獲得證實。但因 USLE 公式中之 C、P 值具有較高之不確定性，本計畫所推估之沖蝕量僅供比對參考，雖然國內其他現地實驗結果顯示湛水耕作之水梯田，因有大面積之土地處於湛水狀態，降雨時雨滴不易直接打擊土壤表面，可以將其視為水體，因此國內外所觀測或推估之土壤沖蝕量均甚低。但因水梯田仍有非湛水之邊坡存在，因此，相關參數之獲得，仍有賴更進一步之現地試驗加以分析。但水梯田休耕後若長期施用除草劑，必定對生態及水土保持功能造成嚴重衝擊，值得政府相關單位重視，應積極對農民進行宣導，或制定其他相關措施加以避免。
3. 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、基金會、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畫。

## 參考文獻

1. Bouman, B.A.M., Peng, S., Castaneda, A.R., Visperas, R.M., “Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems.”, *Agricultural Water Manage*, 74, 2005, pp87–105.
2. Chen S. K. and Liu C. W., “Analysis of Water Movement in the Paddy Rice Fields, (I) Experimental Study.”, *Journal of Hydrology*, 260, 2002, pp206-215.
3. Chen S. K., Liu C. W. and Hwang H.C., “Analysis of Water Movement in the Paddy Rice Fields, (II) Numerical Simulation.”, *Journal of Hydrology*, 268, 2002, pp259-271.
4. Chen S. K., Liu C. W., and Chen Y. R. , “Assessing soil erosion in a terraced paddy field using experimental measurements and universal soil loss equation.”, *Catena* 95, 2012, pp131–141.
5. Chen S. K. , Chen Y. R. , Peng Y. H. , “Experimental Study on Soil Erosion in Flooded Terraced Paddy Fields.”, *Paddy Water Environ*, 2013a, 11, pp433-444.
6. Chen Shih-Kai, Cheng-Shin Jang, Shu-Ming Chen, Kun-Hung Chen, “Effect of N-fertilizer application on return flow water quality from a terraced paddy field in Northern Taiwan”, *Paddy Water Environ*. 2013b, 11:123-133.
7. Liu C. W. , Huang H. C. , Chen S. K. , and Kuo Y. M. , “Subsurface Return Flow and Groundwater Recharge of Terrace Fields in Northern Taiwan.”, *Journal of the American Water Resources Association*, No.03041, 2004, pp603-614.
8. Frank R. Moormann, N. van Breemen , *Rice: soil, water, land* , International Rice Research Institute, 1978.
9. Hafeez, M.M., Bouman, B.A.M., Van de Giesen, N., Vlek, P., ”Scale effects on water use and water productivity in a rice-based irrigation system (UPRIIS) in the Philippines.”, *Agricultural Water Manage*, 92, 2007, pp81–89.
10. Hamada, H., Komae, T., “Analysis of recharge by paddy field irrigation using  $^{222}\text{Rn}$  concentration in groundwater as indicator.”, *Journal of Hydrol.* 205, 1998, pp92–100.
11. Huang H.C. , Liu C.W. , Chen S.K. , Chen J.S. , “Analysis of percolation and seepage through paddy bunds.”, *Journal of Hydrol.* 284, 2003, pp13–25.
12. Janssen M., Lennartz B., “Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields.”, *Soil Till. Res.* 94, 2007, pp133–141.
13. Janssen M., Lennartz B., “Water losses through paddy bunds: Methods,

- experimental data, and simulation studies.”, *Journal of Hydrology*, 2009,369, pp142–153
14. Kukal S.S., Aggarwal G.C., “Percolation losses of water in relation to puddling intensity and depth in a sandy loam rice (*Oryza sativa*) field.”, *Agricultural Water Manage.*,57, 2002,pp49-59.
  15. Liang X. Q., Li H., Chen Y. X., He M. M., Tian G. M., Zhang Z. J., “Nitrogen loss through lateral seepage in near-trench paddy fields.”, *Journal of Environmental Quality*, 37, 2008, pp712–717.
  16. Lin L.,Zhang Z., Manon J., Bernd L., “Infiltration properties of paddy fields under intermittent irrigation.”, *Paddy Water Environ*, 2013.
  17. Liu C.W., Hung H.C., Chen S.K. , and Kuo Y.M., “Subsurface Return Flow and Groundwater Recharge of Terrace Fields in Northern Taiwan.”, *Journal of the American Water Resources Association* ,40(3), 2004,pp603-614.
  18. Liu C. W., Chen S. K., Jou S. W., Kuo S. F., “Estimation of the infiltration rate of a paddy field in Yun-Lin.”, *Taiwan , Agricultural Systems , Volume 68, Issue 1*,2001, pp41-54.
  19. Masayuki I., Satoshi I., Takeo T., “Long-term evaluation of the groundwater recharge function of paddy fields accompanying urbanization in the Nobi Plain, Japan.”, *Paddy Water Environ*,2006,4,pp251-263.
  20. Machito Mihara , Effects of Agricultural Land Consolidation on Erosion Processes in Semi-mountainous Paddy Field of Japan , *J. agric. Engng Res.*(1996) 64,237-248 .
  21. Odhiambo L. O., Murty V. V. N., “Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields. I. Model development.”, *Agricultural Water Manage*, 30, 1996a,pp185–199.
  22. Odhiambo L. O., Murty, V. V. N., “Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields. II. Model application.”, *Agricultural Water Manage.* 30, 1996b,pp201–216.
  23. Painuli D.K., Woodhead T., Pagliai M., “Effective use of energy and water in rice – soil puddling.”,*Soil Till. Res.* 12, 1988,pp149–161.
  24. Reddi L. N., *Seepage in Soils: Principles and Applications.*, New Jersey:John Wiley and Sons, Hoboken.
  25. Sharma P. K. and De Datta S. K., “Puddling influence on soil, rice development and yield.”,*Soil Science Society of America Journal*, 1985,49,pp451-1457.
  26. Tabuchi T., “Studies on drainage in clayey paddy fields: 8. A method of calculation of drainage and its fluctuations due to the precipitation.”, *Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineers* 25,1968,pp50-56 (Japanese with English summary).

27. Takagi S., "Analysis of the vertical downward flow of water through a two-layered soil.", *Soil Sci*, 90, 1960, pp98-103.
28. Tsubo M., Fukai S., Tuong T. P., Ouk M., "A water balance model for rainfed lowland rice fields emphasising lateral water movement within a toposequence.", *Ecol. Mod.* 204, 2007, pp503-515.
29. Tuong T. P., Wopereis M. C. S., Marquez J. A., Kropff M. J., "Mechanisms and control of percolation losses in irrigated puddled rice fields.", *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1994, pp1794-1803.
30. Walker S. H., Rushton K. R., "Verification of lateral percolation losses from irrigated rice fields by a numerical model.", *J. Hydrol*, 1984, 71, pp335-351.
31. Walker S. H., Rushton K. R., "Water losses through the bunds of irrigated rice fields interpreted through an analogue model. " *Agricultural Water Manage*, 11, 1986, pp59-73.
32. Wickham T. H., Singh V. P., "Water movement through wet soils. In: *Soils and Rice*.", International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 1978, pp 337-357.
33. Wopereis M. C. S., Bouman, B. A. M., Kropff M. J., Tenberge H. F. M., Maligaya A. R., "Water-use efficiency of flooded rice fields. I. Validation of the soil - water balance model SAWAH.", *Agricultural Water Manage.* 26, 1994, pp277-289.
34. Zaslavsky D., "Theory of unsaturated flow into a non-uniform soil profile.", *Soil Science Society of America Journal*, 97, 1964, pp400-410
35. 丁澈士等，**農業灌溉用水對地下水補注影響之調查評估(I)：水稻灌溉部份研究**，財團法人曹公農業水利研究發展基金會，1997。
36. 永石義隆，**農家にできる暗渠排水**，農文協，1988，pp76~78(日文)。
37. 行政院主計處，**中華民國統計資訊網**，新北市統計年報資料，2012。
38. 行政院農業委員會，**梯田對地下水涵養補注及水土保持之綜合評估**，2004
39. 吳瑞賢，**水稻田轉作之可逆性，推廣水田生態環境保護及地下水涵養補注**，行政院農業委員會，2003。
40. 李光中，**鄉村地景保育的新思維-里山倡議**，台灣林業期刊，37 卷，第 3 期，2011a，pp59-64。
41. 林壯沛、盧惠生，**坡地栽植檳榔對水土流失之探討**，行政院農業委員會林業試驗所-林業研究專訊-第 2 卷第 3 期，1995。
42. 施鈞程，**台灣森林集水區之蒸發散量推估**，碩士論文，國立中興大學水土保持學系，台中，2003。
43. 張格綸，**應用蒸發皿係數推估地區蒸發散量之研究**，碩士論文，國立成功大學資源工程學系，台南，2007。
44. 曹以松、林俊男等，**集集共同引水計畫-人工補注技術及可行性實施計畫**，

- 財團法人農業工程研究中心研究報告，1987，pp52-99。
45. 陳尚，**水稻田在水土資源保育上之功用與影響問題之研究**，農業用水內部水量調整問題之研究，農業工程研究中心，1980，pp1101-1178。
  46. 陳尚、李德滋，**以土壤水分當量推算水稻灌溉需水量之研究**，農工學報第10卷第4期，1964，pp15-40。
  47. 須藤良太郎等，**農用地之開發整備**，山海堂，1980，pp108-109。
  48. 鄒禕、葉一隆及王裕民，**休耕水稻田蓄水對地下水涵養補注之影響-以彰化田中休耕示範田為例**，第九屆水利工程研討會論文集，中壢，1998，pp173~179。
  49. 劉振宇，**水田對地下水涵養補注及水土保持之綜合評估，推廣水田生態環境保護及地下水涵養補注**，行政院農業委員會，2003。
  50. 蔡玉娟，**「梯田保育意識與制度之建置-日本經驗之介紹」**，2010年海峽兩岸土地學術研討會，國立政治大學綜合院館，2010。
  51. 蔡明華，**水田灌溉公益效能剖析研究**，行政院農業委員會，1993。
  52. 簡傳彬，**水稻田入滲及回歸水之試驗及模擬**，博士論文，國立中央大學，土木工程研究所，2003。
  53. 林俐玲、林文英，**水田對防止土壤侵蝕與土砂崩塌功能量化之探討**，水田灌溉多功能之判定研討會論文集：37-48，2004。
  54. 行政院農委會水土保持局、中華水土保持學會，**水土保持手冊**，2005。
  55. 盧昭堯、蘇志強、吳藝昀，**台灣地區年等降雨沖蝕指數圖之修訂**，中華水土保持學報，36(2)，159-172，2005。
  56. 行政院農委會水土保持局，**水土保持技術規範**，2014，。
  57. 吳嘉俊，**從山坡地開發談土壤流失量估算之水土保持因子選取**，水保技術，5(3):184-188，2010。

## 附錄 A 計畫工作集景



附錄 A-圖 1 貢寮吉林里水梯田實景



附錄 A-圖 2 與人禾基金會踏勘實驗田區





附錄 A-圖 3 水梯田實驗田 A 實景



附錄 A-圖 4 水梯田實驗田 B 實景





附錄 A-圖 5 水梯田田埂邊坡土壤水分量測情形



附錄 A-圖 6 水梯田減水深試驗安裝浮球式水尺情形



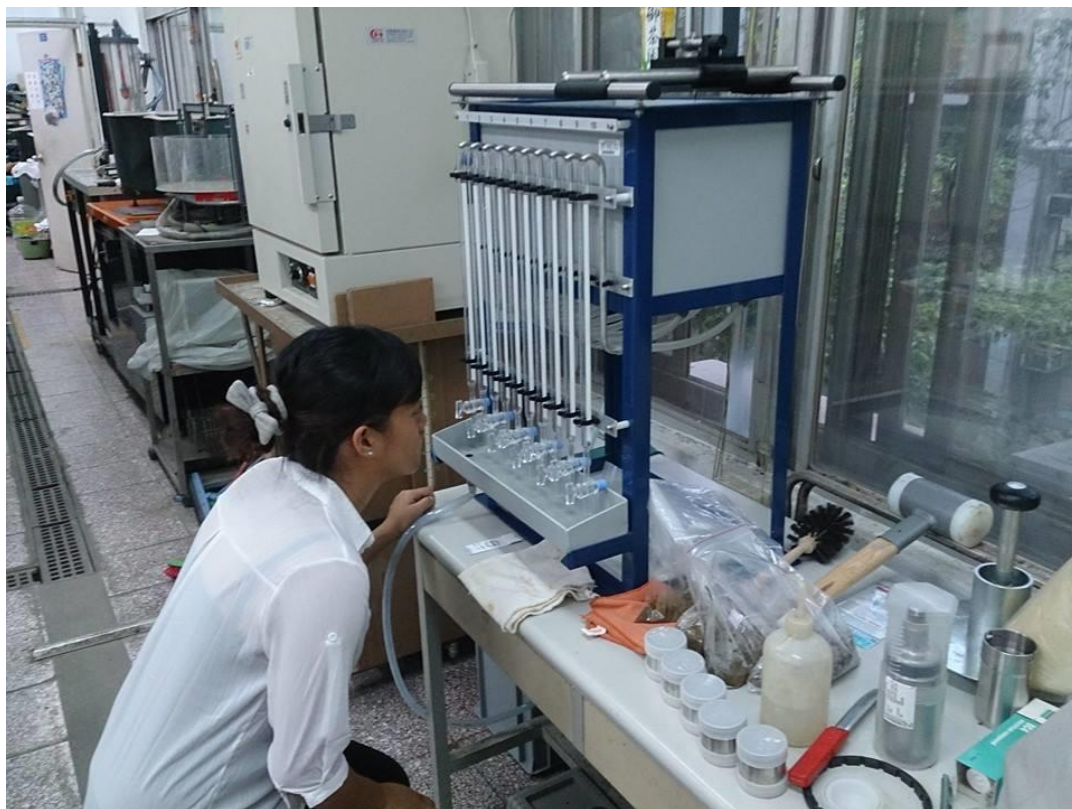


附錄 A-圖 7 棄耕水梯田垂直入滲試驗之實景(1)



附錄 A-圖 8 棄耕水梯田垂直入滲試驗之實景(2)





附錄 A-圖 9 水梯田土壤滲透性實驗室分析



附錄 A-圖 10 水梯田土壤分層調查及取樣情景

## 附錄 B 土壤分層粒徑分析結果

實驗田 A 上階坵塊粒徑分析結果

| 區位<br>質地  | 田埂   | 田區內泥濘層 | 田區內牛踏層 | 田區內未翻耕層 | 田埂邊泥濘層 | 田埂邊牛踏層 | 田埂邊未翻耕層 |
|-----------|------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 砂粒占百分比(%) | 64.3 | 63.3   | 68.0   | 70.0    | 63.0   | 75.3   | 74.9    |
| 粉粒占百分比(%) | 27.6 | 28.6   | 24.4   | 23.9    | 30.5   | 21.0   | 20.9    |
| 黏粒占百分比(%) | 8.1  | 8.1    | 7.6    | 6.1     | 6.5    | 3.7    | 4.2     |
| 分類結果      | 砂質壤土 | 砂質壤土   | 砂質壤土   | 砂質壤土    | 砂質壤土   | 砂質壤土   | 砂質壤土    |

實驗田 A 中階坵塊粒徑分析結果

| 區位<br>質地  | 田埂   | 田區內泥濘層 | 田區內牛踏層 | 田區內未翻耕層 | 田埂邊泥濘層 | 田埂邊牛踏層 | 田埂邊未翻耕層 |
|-----------|------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 砂粒占百分比(%) | 61.1 | 59.1   | 69.1   | 81.7    | 56.0   | 61.9   | 64.8    |
| 粉粒占百分比(%) | 31.8 | 35.4   | 26.4   | 15.5    | 40.6   | 33.8   | 28.0    |
| 黏粒占百分比(%) | 7.1  | 5.5    | 4.5    | 2.8     | 3.4    | 4.3    | 7.2     |
| 分類結果      | 砂質壤土 | 砂質壤土   | 砂質壤土   | 砂質壤土    | 砂質壤土   | 砂質壤土   | 砂質壤土    |

實驗田 A 下階坵塊粒徑分析結果

| 區位<br>質地  | 田埂   | 田區內泥濘層 | 田區內牛踏層 | 田區內未翻耕層 | 田埂邊泥濘層 | 田埂邊牛踏層 | 田埂邊未翻耕層 |
|-----------|------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 砂粒占百分比(%) | 68.0 | 69.1   | 80.6   | 79.1    | 70.3   | 75.1   | 82.1    |
| 粉粒占百分比(%) | 26.1 | 24.7   | 16.7   | 17.6    | 25.4   | 21.3   | 14.9    |
| 黏粒占百分比(%) | 5.9  | 6.2    | 2.7    | 3.3     | 4.3    | 3.6    | 3.0     |
| 分類結果      | 砂質壤土 | 砂質壤土   | 砂土     | 砂質壤土    | 砂質壤土   | 砂質壤土   | 砂土      |

實驗田 B 粒徑分析結果

| 區位<br>質地  | 下階坵塊 |        |        |         |        |        |         | 上階坵塊   |
|-----------|------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
|           | 田埂   | 田區內泥濘層 | 田區內牛踏層 | 田區內未翻耕層 | 田埂邊泥濘層 | 田埂邊牛踏層 | 田埂邊未翻耕層 | 田區內泥濘層 |
| 砂粒占百分比(%) | 56.3 | 51.0   | 66.2   | 67.6    | 52.5   | 50.6   | 65.8    | 53.4   |
| 粉粒占百分比(%) | 36.5 | 39.7   | 28.7   | 24.0    | 40.6   | 44.4   | 29.5    | 36.6   |
| 黏粒占百分比(%) | 7.2  | 9.3    | 5.1    | 8.4     | 6.9    | 5.0    | 4.7     | 10.0   |
| 分類結果      | 砂質壤土 | 壤土     | 砂質壤土   | 砂質壤土    | 砂質壤土   | 砂質壤土   | 砂質壤土    | 砂質壤土   |