Non-point Pollution of Nitrogen and Phosphorus from Agriculture in Taiwan

Ching-Gung Wen[1,3] Chih-Hua Chang[2]

Abstract

Reservoirs are the most important drinking water sources in Taiwan, however, most were eutrophicated due to nutrient overenrichment from watershed nonpoint sources (NPS). Except for the undistributed forest which occupied the largest area of the reservoir watershed, agriculture activities are the most important source of NPS pollution. Based on the NPS monitoring program enabled by Environmental Protection Administration and Water Resources Agency since 1995, data from rural catchments were selected to estimate the event mean concentrations (EMCs) and unit NPS loads. Based on those single-event data, the annual NPS loads for those studied catchments were derived by appropriate models to evaluate the NPS pollution from agriculture in Taiwan. The results indicated that the nitrogen and phosphorus loads from free-ranged chicken farm (FRCF) were almost 10 times to those from other rural catchments. Except for the FRCF, the average annual loads for recreation fruit farm, high mountain tea farm, betel palm farm, wasabi farm and broomcorn farm respectively are 5.1, 24, 8.3, 3.3 and 5.3 kg total nitrogen per hectare; 1.0, 0.24, 1.2, 6.7 and 0.96 kg total phosphorus per hectare.

1. Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University
2. Earth Dynamic System Research Center , National Cheng Kung University
3. Corresponding author, E-mail: t15250@mail.ncku.edu.tw

台灣農業非點源污染

溫清光 [1,3] 張智華 [2]

摘要

台灣飲用水水源有三分之二來自水庫，水庫水質影響民眾健康很大，而水庫水質優養造成藻類過多之繁殖，不但增加原水有機碳含量和三鹵甲烷潛勢，也促使毒藻的過量生長。如何減少水庫優養保護飲用水安全,是當今環保界最重要之課題。台灣水庫營養鹽的來源有 90%以上來自非點源污染，除了林地外，農業活動是最重要的來源。本文主要目的是把水庫集水區較重要的農業非點源污染調查結果加以統計並以模式分析，提供茶園、山葵園、檳榔園、放山雞養雞場、休閒農場和高粱與小麥輪種農田等非點源污染輸出係數，供從事農業經營者參考。研究顯示放山雞養雞場氮、磷輸出負荷很高，約爲一般農地 10 倍以上；除養雞外，全年單位面積輸出 TN 負荷爲高山茶園 (平均 24 kg/ha)、檳榔園 (平均 8.3 kg/ha)、高粱田 (5.3 kg/ha)、休閒農場 (5.1 kg/ha)及山葵園 (3.3 kg/ha)；TP 部分則依序爲山葵園 (6.7 kg/ha)、檳榔園 (平均 1.2 kg/ha)、休閒農場 (1.0 kg/ha)、高粱田 (0.96 kg/ha)及高山茶園 (平均 0.24 kg/ha)。

關鍵詞：農業非點源污染，單位面積輸出之污染量，輸出係數，茶園，山葵園，檳榔園，高粱小麥輪作農田，放山雞養雞場

1. 國立成功大學環工系
2. 國立成功大學地球動力系統中心
3. 通訊作者，電子郵件：t15250@mail.ncku.edu.tw

前言

河川與水庫的水質與承受的污染量成正比例，污染分別來自外來和內部自生，其中又以外來的污染占主要部分。外來污染又可分成點源 (point source) 和非點源 (Non-point source, NPS)。最主要的點污染源是家庭污水、工業廢水及養豬廢水，而 NPS 主要是由降雨逕流，淋洗溶解地面和土壤中之物質所造成。以前自然界產生的逕流，被視爲背景逕流，並不認爲是污染，但近代人類活動頻繁，舉凡伐木建設、農業活動、工礦、車輛及生活廢污排放等產生之污染物，堆積在排水渠或土壤上，下雨將污染物沖洗而進入承受水體，造成污染，尤其久旱第一次暴雨或每場降雨前幾十分鐘所排的水，常含有可觀的污染物 (Chang *et al*., 2008b)。NPS 污染主要來源有林區、農地、礦區、工地、建築區、市區、遊憩區、廢污處理場、河床淤泥等，主要污染物包括沉澱物、BOD、營養鹽、有毒物質、農藥、細菌及鹽類等。來自農業之 NPS 污染物，主要爲懸浮固體物（Suspended Solids, SS）、肥料中的氮、磷和農藥。

台灣河川中下游污染主要來自點源，而上游的污染主要來自 NPS，尤其水庫大約有百分之八十以上的污染來自 NPS，而台灣飲用水又有三分之二來自水庫，NPS 將造成水庫優養而導致後續飲用水處理的問題，水庫集水區除林地 (Chang *et al*., 2008a) 外，農業是最重要之污染源。因 NPS 污染量測定非常困難，且模式推估仍需正確的實測資料率定與驗證，所以國內對農業流出的 NPS 污染資料非常少。李公哲等 （1987）在三峽農業地區測出晴天 COD, SS, TKN 和 TP 的單位污染量（輸出係數）分別爲 1.3, 8.1, 3.6 和 1.7 kg/ha/yr，至於全年之輸出係數則缺乏資料。中華水土保持學會（1996），根據國內外文獻資料及 81 年至 84 年在德基水庫集水區之土壤調查資料（楊秋忠，1995) 推估來自農果園和菜園 TP 的單位污染量分別爲 7.3 和 5.4 kg/ha/yr。日本小島貞男 (1984) 推估翡翠水庫集水區 TN 和 TP 之輸出係數分別爲 2.5 和 0.3 kg/ha/yr。國內輸出係數多爲推估值，仍需較多之現場調查資料才會可靠。

本文僅將十幾年來，環保署（溫清光等，1995，1996，1997，1998，1999，2000，2008）支持之 NPS 污染研究，及水利署南區水資源局（溫清光等，2001，2002）支持的水庫優養控制規劃，所測定之農業 NPS 污染量，做一統計分析，供大家參考。

材料與方法

1. 調查地點

本研究農地 NPS 污染調查，地點涵蓋台灣南部及金門地區之飲用水水庫集水區（如圖

1)，包含檳榔、山葵園、高山茶園、休閒農場、放山雞養雞場及高粱田。各調查區的地形及基本特性列於表 1。

調查地點 1 (走馬瀨農場) 位於曾文溪中游，在自來水水源水質保護區內，下游有山上自來水場取水口，以休閒農場經營，面積 120 公頃，每年露營、採果遊客達 40 萬人次以上，污水收集經處理後排入曾文溪，但牧場、果園、遊樂場等之雨水逕流流入上潭和下潭後注入曾文溪，構成重要之 NPS 污染；調查地點 2~6 位於曾文水庫集水區內，曾文水庫爲台灣蓄水量最大及南部最重要的水庫，容量爲 54080 萬立方公尺，除了是國內最大農產地嘉南平原的主要灌溉水源外，水庫同時也供發電、工業用水及飲用水。根據近三年調查，水庫水質爲普養，但相當接近優養的臨界值 (卡爾森優養指標爲 45~50 之間)，水庫 75 %的營養鹽來自集水區的 NPS 污染 (Chang *et al*., 2004)。集水區主要土地利用爲天然林地，佔 70 %以上，農地使用最多爲檳榔（兩千多公頃）、其次依序爲茶園（一千多公頃且持續擴大）、果園及山葵園，本研究除了果園外，其餘都納入調查。茶及山葵都是高價值作物，因重施肥產生之 NPS 污染很可觀，爲瞭解不同種植方式對 NPS 負荷的影響，茶園有等高（編號 2，石桌茶園）及平台階段種植（編號 3，隙頂茶園）兩種，茶葉品種以清心烏龍及金萱爲主；檳榔挑選坡地（編號 4，永興檳榔園）與平地種植（編號 5，大埔檳榔園）兩類；山葵園選在種植密度最高的阿里山區（編號 6，阿里山山葵園），海拔爲 2300 公尺；調查地點 7、8 爲放山雞養雞場，分別位在二仁溪及曾文溪上游，養雞數分別約爲 10000 隻（編號 7，龍崎養雞場）及 5000 隻（編號 8，南化養雞場），養雞一年兩收，本研究採樣均在有養雞的週期內進行。金門農業以高粱與小麥輪作爲主，調查地點 9（斗門溪高粱田）屬於金沙溪流域，下游爲金沙水庫。金沙溪流域爲金門最大的高粱產地，砂質土壤，肥料極易流失，每年降雨淋洗出大量氮、磷，流至金沙水庫，使水庫常年處於超優養狀態（卡爾森優養指標爲 65~70 之間）。

2. 農業 NPS 污染負荷測定的方法

(1) 自動採樣設備

NPS 污染是由降雨逕流淋洗地表所引起，所以必須同時測定降雨過程的流量和污染物的濃度，爲測定大小不同的降雨事件以建立代表性 NPS 模式，污染量準確量測非常重要。台灣降雨特性不易掌握，加上水庫集水區都位於山區，測流量和採水樣非常困難，必須以自動採樣設備才能得到完整的數據。本文 1996 年測定走馬瀨休閒農場時，因經費限制自動化設備不足，採用人工採水樣和看尖頂堰的水位量流量，能測到之降雨場數較少。其他的農地皆採用

美國 ISCO 公司 6700 和 6712 型之自動採樣器，該型附有雨量計（674 Rain Gauge）和超聲波水位計（710 Ultrasonic Module）。ISCO 原設計自動採樣器的電池是 12V 電壓，電容小待機時間只能維持四天，爲了適應野外持時間待機，本計畫將原電池改裝，用汽車蓄電池代替，可待機 60 天左右。

(2) 暴雨期間水質自動採樣頻率

美國 ISCO 6700 或 6712 型的自動採樣器，可藉由降雨量或流量啓動採樣器、雨量計和水位計，依筆者之經驗，採用雨量啓動最適合。設定啓動條件，必須先研究調查區之降雨型態和可能持續時間，再應用機內之電腦軟體設定。如爲夏季降雨，常是強度大時間短，啓動條件降雨強度可設定 3mm/15min，採樣的頻率於短，若爲綿綿之春雨，需設定爲 2mm/30min。採樣頻率的設定，必須依據降雨的型態和集水區的面積，也就是及流時間的長短，因爲機器內裝之採樣瓶只有 24 支，夏季強度大持續時間短之暴雨，集水面積小的實驗場，尖峰流量在降雨開始後 5 至 10 分鐘就到達，所以最初幾瓶的採樣間距 3~5 min 採一次，尖峰流量過後可設定 10~20 min 採一次；若爲綿綿細雨季節，採樣間距需加長；颱風雨或梅雨下的時間長，中間必須拿空採樣瓶去替換裝滿水之採樣瓶回實驗室分析水質。分析項目有化學需氧量（COD）、總磷（TP）、正磷酸鹽（PO_4-P）、總凱氏氮（TKN）、氨氮(NH_3-N)、硝酸氮（NO_3-N）懸浮固體物（SS）等，分析方法依照環保署檢驗所公告或美國水質標準檢驗法（APHA, 1998）。

(3) 暴雨逕流測量設備和方法

超聲波水位計只能測水位，必須搭配尖頂堰，才可量流量。依集水區大小，估計最大流量，設計尖頂堰之形狀和尺寸，用合板或鍍鋅鋼板在現場依渠道形狀安裝。小集水區採用一個矩形堰（隙頂茶園、永興檳榔園、走馬瀨農場、南化及龍崎養雞場使用，以照片 1 爲例）或三角堰（阿里山山葵園、大埔檳榔園、石桌茶園，以照片 2 爲例），中集水區可採用梯形堰(永興檳榔園，如照片 3)，大集水區因流量變化大採用矩形複合堰（金門斗門溪，如照片 4），再配合超聲波水位計，每分鐘自動記錄堰頂水頭，儲存在記錄器內，再用各種尖頂堰之公式計算流量。台灣山區暴雨逕流之流量範圍大，很適合以複合堰量測，在降雨初期流量較小時，水位只達到第一個旁縮矩形堰，用矩形堰公式計算，如果流量較大，水位達到第二個矩形堰，分別計算兩個矩形堰之流量再相加。根據研究(Jan *et al*., 2006)，複合堰採用兩個單矩形堰流量相加，其流量比實際小，誤差約 1~10 %（平均約 5 %），實際量測時這個誤差是可以接受的。

3. 農業 NPS 污染負荷之估計方法

台灣降雨時空分佈十分不均，加上很難取得足夠的 NPS 污染調查數據，因此，若只以採樣所得的數場降雨 (single-event) 推估污染負荷可能會產生很大的偏差，必須採統計或模式分析將實測數據進行推論以估計代表性的 NPS 污染量。NPS 污染估計方法有很多，包括簡易的單位係數輸出法、統計回歸法及模式分析法等，本研究採用模式法。

模擬 NPS 污染模式，包含降雨產生逕流及物質在地表或地面下產生和輸送的過程、因此包含逕流及水質的模擬，其模擬與水土保持界常見的輸砂模式類似。不過，NPS 污染模式包含營養鹽及物化水質之模擬，其模擬比土壤侵蝕複雜，再加上下雨時採樣及測定流量困難，不易取得大量的資料來率定和驗證模式，即使歐美已發展各種套裝模式，不過 NPS 負荷之模擬結果還是有很大的誤差。

爲減少模式適用性所造成的誤差，通常需視集水區空間尺度、數據時間尺度及使用者需求來選擇適當的模式。以尺度來區分，NPS 模式可分爲流域 (basin scale)、集水區 (watershed scale) 或小區域 (field scale) 模式；以時間尺度來分，可分爲單一暴雨 (AGNPS)、多場暴雨 (AnnAGNPS) 及連續性暴雨 (HSPF，SWMM) 模擬三種，單一暴雨一般用於評估平均 NPS 污染負荷，多場暴雨則同時考量乾期與雨期之污染流布情形，連續模擬可模擬短時間之連續性變化；若以用途來區分，可分爲簡易及管理分析模式二種，前者以實際數據之分析爲主，模式部份機轉以迴歸統計方程式或地區經驗式替代，優點是參數少且容易使用，在農業上最常使用的 AGNPS 模式 (李岳豐，1996) 即爲此類。管理分析型模式可供決策者依假想狀況進行模擬，牽涉到集水區各種作用與機轉，通常需要較多參數及較詳細的率定過程，因此又稱爲複雜模式，國內常用的有 HSPF 模式 (Liu *et al*., 2006; Chang *et al*., 2008a) 及 SWMM 模式 (Chang *et al*., 2008b)。

本研究現調資料有單場降雨短時間的降雨-逕流-污染負荷歷線，除了走馬瀨農場因降雨場次較少，採用參數少的 AGNPS 模式外，其餘可適用連續性暴雨模擬。在空間尺度方面，一般歐美發展的連續性暴雨模式都適用於中、大尺度集水區之模擬，因此本研究除了斗門溪高粱田採用 SWMM 模式 (溫清光，2008) 外，其他小集水區採用自行開發的小尺度降雨逕流-污染負荷模式進行模擬。有關 AGNPS 及 SWMM 模式之使用則請參照相關文獻，本文不再贅述。

本研究 7 處農業小集水區採用降雨逕流-污染負荷模式估計全年污染負荷，此模式屬小尺度複雜型連續降雨模擬，在逕流部分採用成大水利系游保杉教授發展之分佈型降雨逕流模式

(Yu and Jeng, 1997)，在污染負荷部分則根據各種懸浮及溶解性污染物經土壤侵蝕產生 (soil erosion)、溶解洗出 (washoff) 及泥沙釋出 (sediment yield) 等特性，選擇適用之污染負荷方程式 (loading functions)，結合降雨逕流模式計算出的流量模擬而得，以養雞場爲例，整個模式架構如圖 2 所示。各場址的污染負荷方程式因地而異，詳細內容請參考相關文獻 (陳起鳳，2002；范楓旻，2002；李怡真，2003；吳致良，2004)。

結果與討論

1. 農業 NPS 污染測定結果

(1) 測定之天候條件

本研究 9 處採樣點的調查時間，有效調查場次及降雨概況列於表 2。台灣降雨集中在每年 5~8 月，主要可分爲梅雨、山區午後雷陣雨、颱風及西南氣流造成的豪雨，場址調查均歷時一年以上，採得降雨多有涵蓋上述降雨類型，惟因調查年份及場址高程不同，各場址的降雨強度分佈也不相同，紀錄最大降雨量爲 2001 年 9 月 18 日龍崎養雞場的 303 mm。列入計算之降雨事件均爲可形成地表逕流之有效降雨，場次最少爲走馬瀨農場之 2 場，場次最多爲龍崎養雞場的 14 場，其餘均採得 5 場有效降雨以上。

(2) 農業活動雨水逕流污染物之濃度

農地雨水逕流濃度可反映集水區地形、地質、土壤、植披、耕作方式、作物類型及施肥型態，因一場降雨中不同時期的逕流濃度變異相當大，所以一般均採用降雨事件逕流平均濃度 (Event Mean Concentration, EMC) 來代表，EMC 由該場降雨總輸出污染負荷除以總逕流體積而得。一般來說，單場降雨初期逕流中之污染物濃度會比 EMC 高，末期則較 EMC 低 (梁銘基，2008)，這種現象在都市區比農業區明顯。同一地區，全年不同大小之降雨，每場次都有一個大小不同之 EMC 值，根據美國統計，這些 EMC 值大部分會成對數常態分佈，所以本研究所調查各場址之幾何平均 EMC 值列於表 3。兩處養雞場均位於陡坡，養雞密度高使場址內植披覆蓋程度低，再加上記錄到數場颱風及豪雨，所以 SS 濃度相當高已接近土石流水準；另大埔檳榔園及走馬瀨農場也因植披覆蓋程度低，所以 SS 較高；而平台種植的茶園 SS 明顯較等高種植者低。由 SS 的 EMC 可發現，各場址的 SS 主要受到降雨強度、植被、土壤性質及耕作方式的影響。

在有機污染方面，雞農通常只回收雞舍內之雞糞，戶外不回收的部分爲放山雞養雞場主

要污染來源，因此有機性水質參數如 COD 及 TKN 特別高，造成相當嚴重的環境衛生問題；森林蔽蔭及雞糞打底使土壤有機質較高，使阿里山山葵園流出的 COD 濃度較其他農地高。

在無機鹽類方面，因 NO_3 在土壤中的移動力高，由其 EMC 可看出茶園氮肥的嚴重流失，研判兩處茶園的施氮肥量應遠高於建議值；除了養雞場流出 TN 以有機氮爲主之外，農地 NPS 污染的 TN 均以 NO_3 爲主要組成份。山葵及養雞場的磷 EMC 特別高，研判與其肥料及飼料中的高含磷量有關。此外，TP 與 SS 的相關性高，顯示有許多磷以泥沙爲載體而流出。

NPS 造成承受水體的影響主要來自泥沙之沖刷及無機鹽類，從台灣農地的的 EMC 分析結果看來，SS 雖主要爲天然因素所致，適當的坡度管理可有效減少沖刷；農地 NPS 流出的無機鹽類通常與施肥行爲有關，過量的氮肥會轉換爲高 NO_3-N 之流失；放山雞養雞場的飼養型態及山葵園的施肥習慣會造成來自於生糞便之有機污染。

(3) 農業活動之單位污染負荷測定值

測定之總污染負荷量與表面積及降雨量有關，本研究各調查地點之面積及降雨事件都不相同，因此採用單位降雨面積負荷 (g/ha-mm) 在同一基準下進行農地間流出 NPS 污染負荷之比較，結果如表 4，將集水面積及雨量正規化後，各場址輸出負荷的排名與 EMC 的結果仍然一致。透過單位降雨面積負荷可更清楚看出農地使用與 NPS 污染負荷的關係。除了養雞場之外，在磷的部分以高粱田及山葵園最高，TP 單位輸出負荷分別達 4.3 及 2.9 g/mm-ha；在氮的部分以高粱田及茶園較高，TN 單位輸出負荷分別爲 38.5 及 19 g/mm-ha。農地土壤中淋洗出的氮磷主要來自肥料，可合理推論當某種成分的營養素流失較多，表示該農地在正常產量下已超量供給該生長要素，造成污染。SS 輸出負荷與施肥及作物類型關聯性較低，主要與坡度及土壤有關，SS 輸出負荷較高者如大埔檳榔及高粱田屬砂質土；平台種植的茶園顯然對 NPS 污染負荷的控制比等高種植有效。

2. 農業活動之單位污染負荷模擬值

除了前述雨量與集水區面積之影響外，各種土地利用之 NPS 輸出負荷與還會與降雨強度、採樣代表性與降雨前污染物累積時間有關。研究指出，台灣水庫集水區的 NPS 污染負荷往往來自數場較大的降雨 (Chang *et al*., 2008a)。以金門高粱田及阿里山茶園爲例，高粱田的五場事件包含當年度最大的豪雨 (2007 年 8 月的聖帕颱風)，但阿里山茶園的採樣歷程中並沒有採到當年度最大的山區豪雨，所以吾人若直接以平均測定值來估計，可能會高估金門高粱田的負荷，但卻低估了阿里山茶園的真正負荷量。可見，用平均單位降雨面積負荷雖可消除雨量與集水區面積對輸出負荷的影響，不過若細究 NPS 的成因，我們還必需將場址調查時間、

降雨調查場次以及降雨規模等等條件都盡量一致後，才能進一步比較各農地間實際人爲影響的差異量。此外，國內常引用國外的文獻值做爲一般快速評估各種農地 NPS 污染負荷的簡易方法，由以上討論可發現，因國外氣候類型與農耕型態與國內差異很大，採用國外文獻係數推估本土污染一定會有更大的偏差。基於以上原因，國內有建置本土資料庫的必要，而資料庫中的數據還必須將各種影響因素一致化。

本研究利用測得數據率定模式參數，當模擬污染負荷可符合實測數據時 (以龍崎養雞場爲例，如圖 3)，再輸入全年參考降雨量，以此組率定後的參數模擬各農地代表水文年典型的 NPS 輸出負荷，計算結果如表 5。SS 負荷推演到全年後，與測定值相比有增加者可看出植被覆蓋 (休閒農場) 及坡度 (山葵、坡地檳榔) 對 NPS 的影響；等高與平台茶園的差距降低；因金門高粱田測定值以大雨爲主，推演至全年後排名降低；在營養鹽部分，高山茶園的 NO_3-N 及 TN 最高，即使以平台種植仍有很高的氮輸出，尤其是硝態氮；金門高粱田總磷輸出降低，使山葵園成爲特別突出的 PO_4-P 及 TP 農業區。兩個養雞場污染負荷與養雞隻數未成正比，因此用本文單位雞隻負荷與雞隻數估計其他放山雞養雞場會有偏差，無論如何放山雞養雞場氮磷輸出十分可觀，以一公頃 8000 隻雞估計，其輸出負荷爲一般農地 10 倍以上。

結論

本文將十幾年來筆者實際參與之國內農業區 NPS 調查背景、方法及結果做一整理，主要結論有下列幾點：

1. 農地類型及施肥行爲會影響降雨逕流水質和 NPS 污染負荷，茶樹以施氮肥爲主，加上無機氮溶解度高，所以茶園流出的雨水氮濃度與負荷較高；山葵和高粱施肥以磷肥較重，流出雨水以磷較嚴重。
2. 同一類型 (如茶園) 但耕作方式不同的農地，在 NPS 污染輸出負荷上會有顯著差異，平台種植可有效減少土壤與肥料流失。
3. 放山雞養雞場排出之 NPS 荷含高濃度有機質污染物，已接近廢水程度，若未經處理即逕行排放會造成嚴重的環境衛生問題。
4. 曾文水庫集水區在 TP 部分以山葵園單位面積負荷較高，TN 則以高山茶園最高。
5. 金門斗門溪高粱田屬砂地，肥料中的營養鹽無論氮磷均大量流失，使承受溪流長滿大量水生植物並造成水庫優養。

6. 除養雞場外，本研究調查農業區全年單位面積輸出 TN 負荷依序爲高山茶園 (平均 24 kg/ha)、檳榔園 (平均 8.3 kg/ha)、高粱田 (5.3 kg/ha)、休閒農場 (5.1 kg/ha)及山葵園 (3.3 kg/ha)；在 TP 部分則依序爲山葵園 (6.7 kg/ha)、檳榔園 (平均 1.2 kg/ha)、休閒農場 (1.0 kg/ha)、高粱田 (0.96 kg/ha)及高山茶園 (平均 0.24 kg/ha)。

引用文獻

小島貞男。1984。翡翠水庫之水質預測與污染防治對策。翡翠水庫管理局。

中華水土保持學會。1996。德基水庫集水區第四期整體治理規劃報告。德基水庫集水區管理委員會。

吳致良。2004。茶園非點源地表逕流與滲漏水污染負荷模式之研究。國立成功大學環境工程學系碩士論文。

李公哲、郭振泰、顏有利。1987。非點源之都市及農業區逕流對河川污染負荷影響之研究。台大環工所研究論文。

李岳峰。1996。AGNPS 對觀光農場非點源污染輸出負荷之研究。國立成功大學環境工程研究所碩士論文。

李怡真。2003。山葵園非點源污染負荷模式之研究。國立成功大學環境工程學系碩士論文。

范楓旻。2002。放山雞養雞場非點源污染模式之研究。國立成功大學環境工程學系碩士論文。

梁銘基。2008。農業區非點源污染初期沖刷現象之分析。國立成功大學環境工程學系碩士論文。

陳起鳳。2002。茶園非點源污染之模式分析研究。國立成功大學環境工程學系碩士論文。

楊秋忠。1995。德基水庫集水區土壤、植物、降水及空氣分析。國立中興大學土壤研究所。

溫清光等。1995。不同類型非點源污染之最佳控制(BMP)規範(一)：遊憩活動及施工活動非點源污染之調查及管制手冊編訂。行政院環境保護署。

溫清光等。1996。不同類型非點源污染之最佳控制規範(二)：遊憩活動及施工活動非點源污染最佳管理作業測試(一)。行政院環境保護署。

溫清光等。1997。不同類型非點源污染之最佳控制規範(三)：遊憩活動及施工活動非點源污染最佳管理作業測試(二)。行政院環境保護署。

溫清光等。1998。非點源示範計畫。行政院環境保護署。

溫清光等。1999。施工活動及遊憩活動非點源污染最佳管理作業規範。行政院環境保護署。

溫清光等。2000。流域性集水區非點源污染最佳管理作業。行政院環境保護署。

溫清光等。2001。曾文水庫水質調查及改善計畫。經濟部水利署南區水資源局。

溫清光等。2002。曾文水庫水質調查及改善後計畫。經濟部水利署南區水資源局。

溫清光等。2008。金門太湖、榮湖水庫污染整治規劃與初步設計計畫。金門縣環保局。

APHA. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Chang, C.H., C.G. Wen, S.M. Chuang, C.S. Lee, S.P. Chang, J.L. Wu, and P.W. Liu. 2004. Pollution and water quality evaluation for Tsengwen Reservoir. World Water & Environmental Resources Congress, ASCE, Salt Lake City, Utah.

Chang, C.H., C.G. Wen, C.H. Huang, S.P. Chang, and C.S. Lee. 2008. Nonpoint source pollution loading from an undistributed tropic forest area. Environ. Monit. Assess. 146: 113-126.

Chang, C.H., C.G. Wen, and C.S. Lee. 2008. Use of intercepted runoff depth for stormwater runoff management in industrial parks in Taiwan. Water Resour. Manage. 22: 1521-1708.

Jan, C.D., C.J. Chang, and M.H. Lee. 2006. Discussion of "Design and calibration of a compound sharp-crested weir" by J. Martinez, J. Reca, M.T. Morillas, and J.G. Lopez. J Hydraul Eng-ASCE 132: 868-871.

Liu, W.C., H.H. Chen, W.H. Hsieh, and C.H. Chang. 2006. Linking watershed and eutrophication modeling for the Shihmen Reservoir, Taiwan. Water Sci. Technol. 54.

Yu, P.S. and Y.C. Jeng. 1997. A Study on Grid Based Distributed Rainfall Runoff Models. Water Resour. Manage. 11: 83-99.

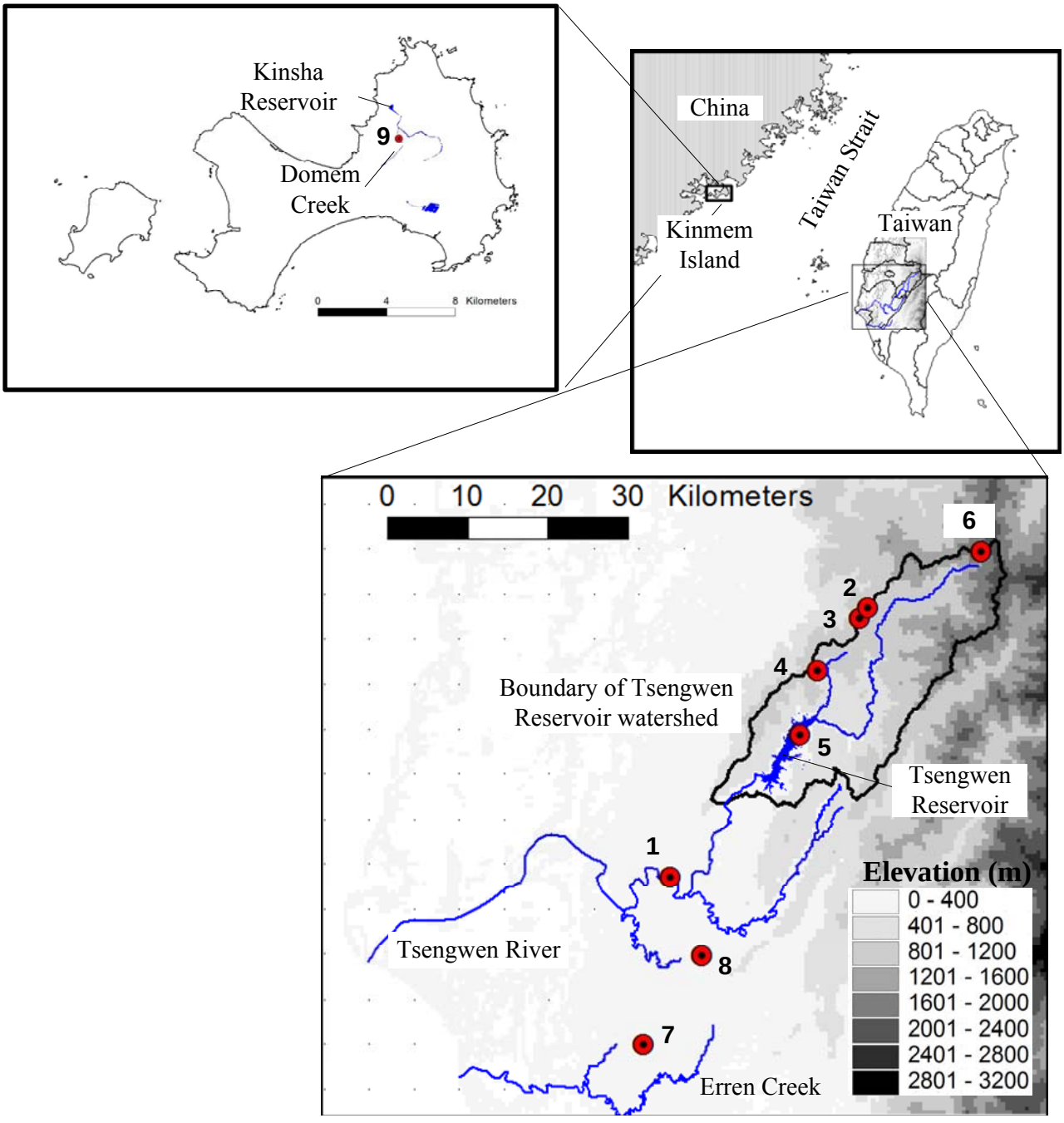


圖 1. 本研究農業非點源污染調查場址分佈圖

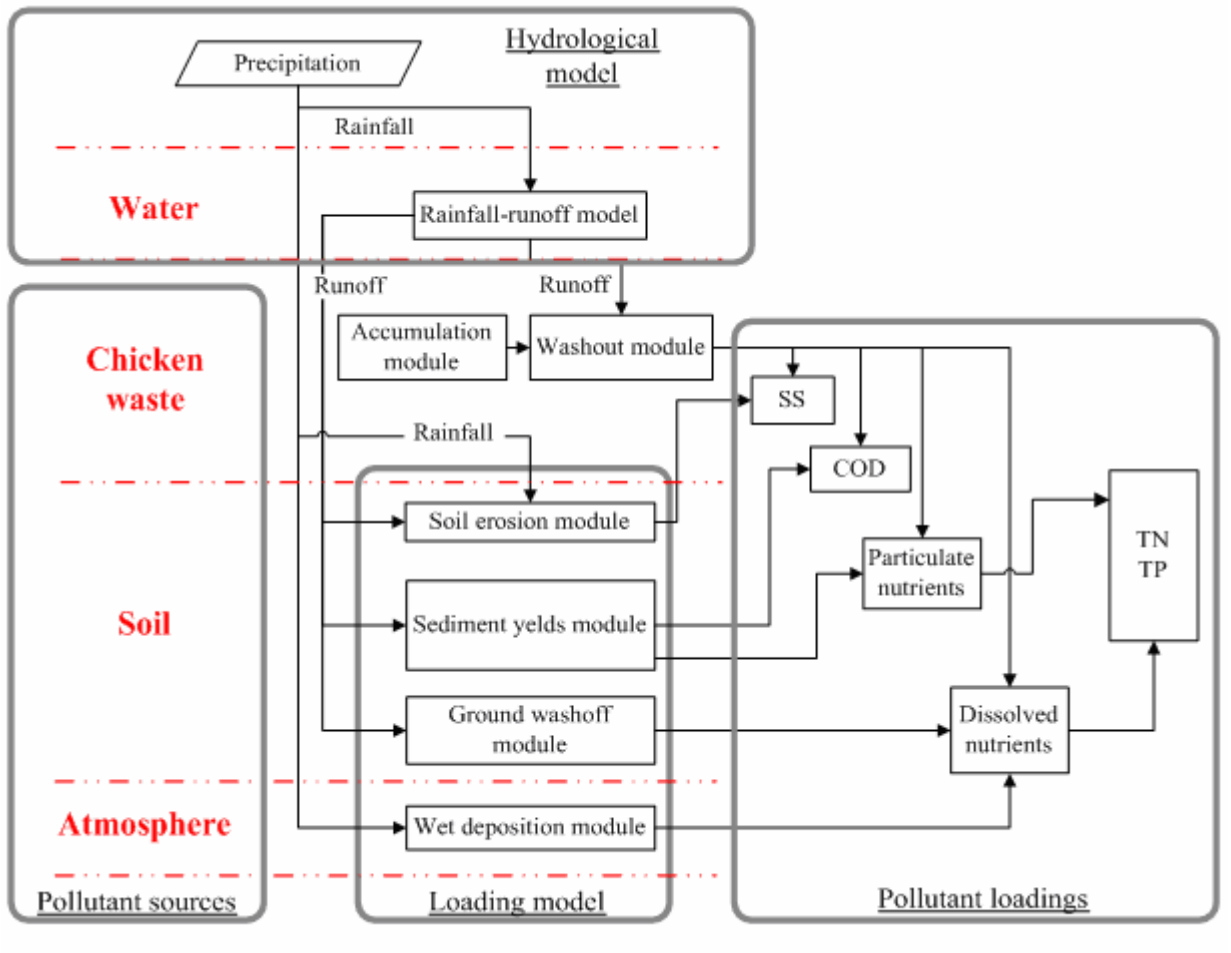


圖 2. 以放山雞養雞場爲例說明本研究非點源污染模式概念及流程圖

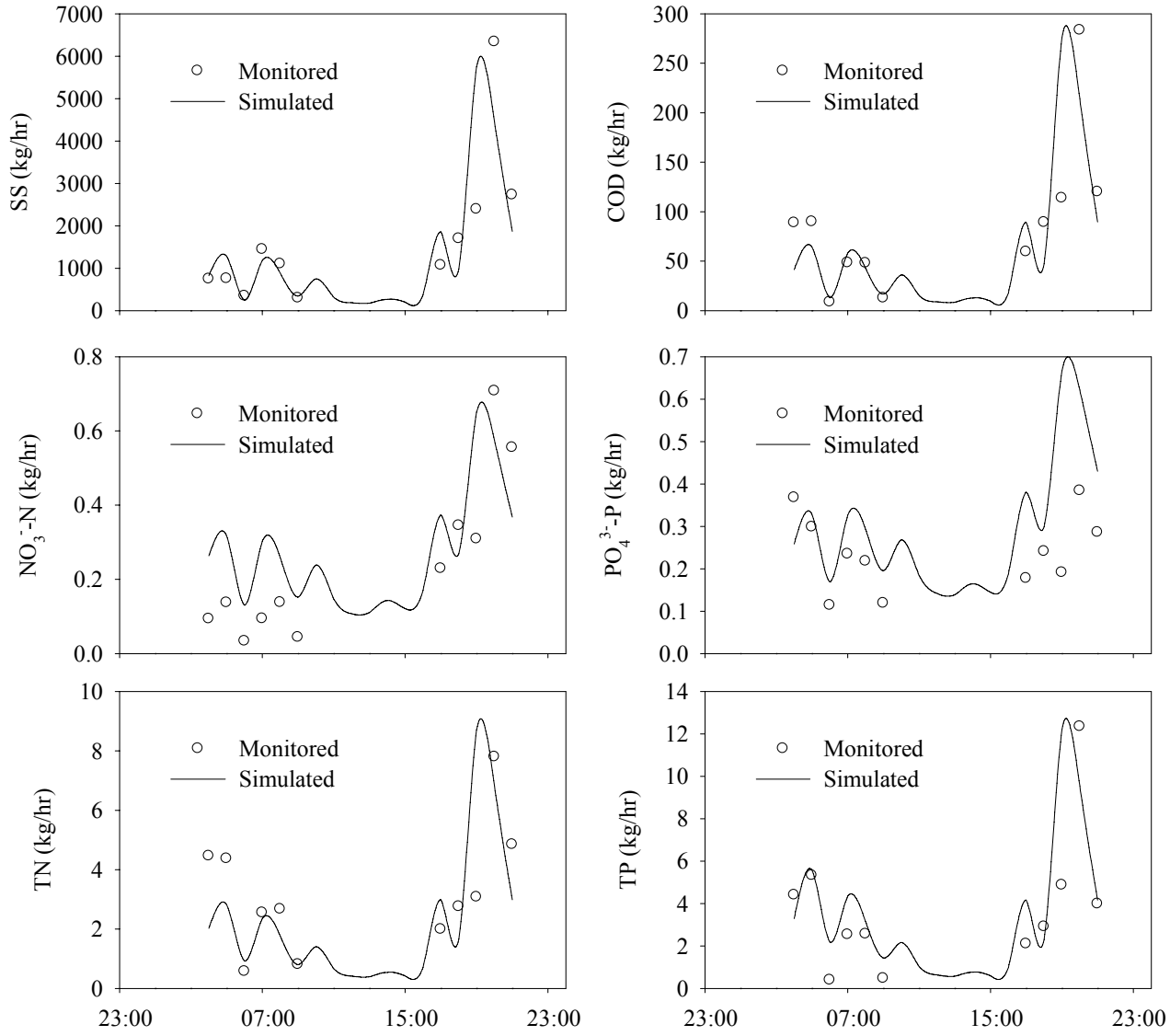


圖 3. 放山雞養雞場(C1)單場降雨非點源污染歷線及模擬結果之比較(以 2001 年 9 月 18 日降雨事件爲例)

表 1. 本研究調查農業區及其特徵

場址編號	場址代碼	植栽	類型	海拔 (m)	坡度 (%)	集水面積 (ha)
1	F1	果樹	休閒農場	200	5-40.0	31.0
2	Tea1	高山茶	等高種植	950	35.0	9.6
3	Tea2	高山茶	平台種植	900	30.0	1.3
4	Betel1	檳榔	斜坡種植	800	26.0	90.0
5	Betel2	檳榔	平地種植	320	2.0	0.5
6	W1	山葵	斜坡帶狀種植	2300	30.0	0.3
7	C1	放山雞	一萬隻放山雞養雞場	200	50.0	1.3
8	C2	放山雞	五千隻放山雞養雞場	400	15.0	0.6
9	B1	高粱小麥輪作	集區式種植	30	0.5	440.0

表 2. 本研究調查期間各場址之降雨狀況

場址代碼	調查期間	場次	降雨逕流深度 (m)	降雨量 (mm)	平均降雨強度 (mm/hr)
F1	Jul., 1995－Apr., 1996	2	0.02-0.34	20-50	7-13
Tea1	Apr., 2001－Sep., 2001	13	0-0.19	12-145	1-20
Tea2	Sep., 2001－Aug., 2002	10	0-0.31	12-239	2-19
Betel1	Jan., 2001－Jun., 2002	7	0.02-13.66	11-182	0-11
Betel2	Jun., 2002－Sep., 2003	13	0.01-0.25	14-217	2-16
W1	Jan., 2002－Aug., 2002	6	0-0.01	12-108	4-15
C1	Aug., 2001－Jul., 2002	14	0-1.17	8-303	1-40
C2	Jul., 2002－Aug., 2003	7	0-0.5	14-254	2-34
B1	Aug., 2007－Jul., 2008	5	6.3-138.5	26-116	2-4

表 3. 本研究調查農業區之平均事件降雨逕流濃度

場址代碼	SS	COD	TKN	NH3-N	NO3-N	TN	PO4-P	TP
F1	292	44	2.9	-	-	4.5	-	0.23
Tea1	164	77	1.5	0.4	13.1	14.5	0.11	0.50
Tea2	9	14	1.7	0.8	11.2	12.9	0.06	0.13
Betel1	57	10	1.3	0.5	1.6	2.9	0.05	0.17
Betel2	324	56	2.1	1.3	1.0	3.4	0.45	1.32
W1	476	214	0.6	0.1	0.9	1.5	3.00	4.50
C1	12978	2572	87.9	21.9	0.4	86.4	5.51	70.00
C2	7013	3993	169.0	138.0	0.3	268.0	22.00	111.00
B1	194	33	1.6	0.4	1.9	3.6	0.18	0.74

Unit: mg/L

表 4. 調查農業區之平均單位 NPS 流出負荷實測值

場址代碼	SS	COD	TKN	NH3-N	NO3-N	TN	PO4-P	TP
F1	138	18	1.6	-	0.02	-	-	0.04
Tea1	141	45	0.7	3.9	14.60	19.0	0.08	0.50
Tea2	2	4	0.5	0.2	6.20	6.7	0.93	1.90
Betel1	31	9	0.8	0.5	1.50	2.3	0.03	0.10
Betel2	1038	170	8.4	5.2	3.50	12.4	1.40	3.90
W1	311	126	2.9	0.1	0.60	1.0	2.00	2.90
C1	50914	10278	356.0	88.0	1.80	351.0	22.00	279.00
C2	29695	17102	1000.0	909.0	1.50	1682.0	105.00	598.00
B1	1100	209	9.5	5.7	28.20	38.5	1.16	4.32

Unit: g/ha-mm

表 5. 模式推估之農業區單位面積年 NPS 流出負荷

場址代碼	參考水文年降雨量 (mm/yr)	單位面積年 NPS 流出負荷 (kg/ha-yr)					
		SS	COD	NO3-N	TN	PO4-P	TP
F1	1264	1233	21	-	5.1	-	1.00
Tea1	2160	89	-	33.10	33.6	0.14	0.22
Tea2	2218	63	-	12.70	14.4	0.14	0.26
Betel1	2306	100	60	-	14.9	-	0.32
Betel2	1928	1497	-	-	1.6	1.07	2.12
W1	2197	597	-	1.10	3.3	4.50	6.70
C1	1660	810 a	419 a	0.02 a	1.3 a	1.33 a	4.67 a
C2	1212	5373 a	418 a	0.80 a	50.0 a	2.60 a	57.20 a
B1	1007	313	40	1.60	5.3	0.19	0.96

註 a: 放山雞養雞場 NPS 流出負荷已轉換爲每隻雞每年輸出負荷 (g/c-yr)



照片 1 束縮矩形堰

(場址代碼：T2)



照片 2 束縮式三角堰

(場址代碼：T1)



照片 3 梯型堰

(場址代碼：Betel1)



照片 2 複合堰

(場址代碼：B1)