

# 以 SWAT 模式模擬有機肥料對溪流中營養鹽濃度之影響-以坪林拱橋控制點以上集水區為例

SIMULATING THE EFFECT OF ORGANIC FERTILIZERS ON NUTRIENT CONCENTRATION IN STREAMS BY SWAT MODEL-  
A CASE STUDY OF THE CATCHMENT AREA ABOVE THE CONTROL POINT OF PINGLIN ARCH BRIDGE

逢甲大學  
水利工程與資源保育學系  
碩士

張立群  
Li-Qun Zhang

逢甲大學  
水利工程與資源保育學系  
教授

許少華\*  
Shao-Hua Marko Hsu

僑光科技大學  
財務金融系  
副教授

洪碧芳  
Pi-Fang Hung

## 摘要

翡翠水庫是大台北地區最主要的水源，其上游為水源保護區，但仍有許多產生水庫優養化之氮磷來源的農業。國內外相關研究指出，有機肥料的使用仍可能衝擊水環境。本研究探討農業施肥行為對於集水區水質的影響，並聚焦於有機與慣行農業對於集水區下游水質的影響比較。首先蒐集 1990 年到 2014 年氣象資料，將氣象資料、高程地形、土地利用圖和土壤資料建置到 SWAT 模式中，先進行流量率定驗證，再進行非點源污染模式率定驗證。模擬結果顯示 SWAT 能有效模擬坪林拱橋集水區日流量，但在颱風期間，日流量模擬有低估無法準確模擬洪峰期間流量。出流水中總磷濃度與雨量呈正相關。完成流量、總磷及硝酸鹽氮的檢定及驗證後，設計四種施肥情境進行模擬，分別為 1)純慣行、2)純有機、3)純有機氮磷肥及 4)不施肥的自然農法。於純有機模擬條件，有機施肥相對於慣行農法能夠減少 70 % 總磷(TP)總量及 68 %硝酸鹽氮( $\text{NO}_3 - \text{N}$ ) 總量進入水體。故有機施肥能夠有效減少總磷及硝酸鹽氮於水體中的含量。若輸入等量且等比例的有機氮、磷肥，亦會減少水體中的總磷及硝酸鹽氮含量。另外，對於環境衝擊最小的施肥行為乃自然農法。

**關鍵詞：**翡翠水庫、非點源污染、SWAT、有機農業、總磷、硝酸鹽氮。

\* 通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系教授

40724 台中市西屯區文華路 100 號 · shhsu@fcu.edu.tw

## SIMULATING THE EFFECT OF ORGANIC FERTILIZERS ON NUTRIENT CONCENTRATION IN STREAMS BY SWAT MODEL- A CASE STUDY OF THE CATCHMENT AREA ABOVE THE CONTROL POINT OF PINGLIN ARCH BRIDGE

**Li-Qun Zhang**

Department of Water  
Resources Engineering  
and Conservation, Feng Chia  
University, Taichung, Taiwan

**Shao-Hua Marko Hsu**

Department of Water  
Resources Engineering  
and Conservation, Feng Chia  
University, Taichung, Taiwan

**Pi-Fang Hung**

Associate professor,  
Department of Finance,  
Overseas Chinese University

### ABSTRACT

Feitsui Reservoir is the major source of drinking water in the Greater Taipei area. The upstream catchment of the Feitsui Reservoir is a water source protected area. However, in many catchment areas, there are still agricultural activities that produce nitrogen and phosphorus which might cause the reservoir's eutrophication. Some studies have pointed out that the use of organic fertilizers may also impact the water environment (Zhang Jialing, 2016). The purpose of this study is to investigate the effects of agricultural practices on water quality in catchment areas, and to compare the impact of organic and conventional agriculture on water quality at the catchment outlet. This study collected meteorological data from 1990 to 2014, elevation maps, land use maps, and soil data in the catchment area of the Pinglin arch bridge. Simulation results show that SWAT can effectively simulate the daily flow in the catchment area of Pinglin Arch Bridge. However, during typhoon events, daily simulations are underestimated and cannot accurately simulate the flow during the flood peak. The total phosphorus concentration in the outflow water was positively correlated with rainfall. After verification of flow, as well as verification of total phosphorus and nitrate nitrogen, four agricultural scenarios were designed for simulation, which were (1) purely traditional, (2) purely organic, (3) purely organic nitrogen and phosphorus fertilizer, and (4) natural agricultural without fertilizer method. For the simulated conditions, compared to the traditional agriculture, organic fertilization could reduce the total phosphorus (TP) content by 70 % and the total amount of nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3 - \text{N}$ ) by 68 % into the river. According to the simulation results of this study, organic fertilization can effectively reduce the total phosphorus and nitrate nitrogen content in water. If input the same amount and the proportion of organic nitrogen and phosphate fertilizers, it will also reduce the total phosphorus and nitrate nitrogen content in the water. In addition, the agricultural behavior with minimal environmental impact is by natural farming.

**Keywords:** Feitsui reservoir, Non-point source pollution, SWAT, Organic agriculture, Total phosphorus, Nitrate nitrogen.

Zhang, L.Q., Hsu, S.H. Marko\* & Hung, P.F (2021). "Simulating the Effect of Organic Fertilizers on Nutrient Concentration in Streams by SWAT Model- A Case Study of the Catchment Area above the Control Point of Pinglin Arch Bridge." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 67(1), 1-13.

[https://doi.org/10.29974/JTAE.202103\\_67\(1\).0001](https://doi.org/10.29974/JTAE.202103_67(1).0001)

## 一、前言

非點源污染是造成地面水體之水質嚴重不良的主要因素之一，肥料與農藥隨著地表水進入河川，進一步造成河川水質的污染。

根據行政院農業委員會農糧署統計，自 2016 年止，台灣的有機栽培種植面積約為 6783.6 公頃，大約只占了全台耕地總面積的 1.17 % (有機農業全球資訊網 2018)，大多數的農戶由於經濟層面以及作物品質的考量，大多數不願放棄慣行農業，甚至有些農戶已經部分轉變為有機農業，卻由於鄰近農地的非有機肥料施用，導致其耕作範圍內依然受到影響。

台灣在 200 餘年前先人從福建武夷山引進茶種種植，目前已發展為世界有名的茶葉產區，其中南投縣種植面積占全國 48.9 %，其次為嘉義縣(14.1 %)及新北市(11.5 %)。在這樣單一作物的背景下，由於茶樹易受到病蟲危害，台灣多數的茶園依然使用殺蟲劑以消滅病蟲害，用除草劑以節省人工除草並以化學肥料保證茶葉的產量。在上游集水區中此類非點源污染控制與管理不當，可能造成河川及下游水庫受到嚴重的污染。

大台北地區最主要的民生用水水源來自翡翠水庫，翡翠水庫上游為自來水水質水量保護區，但許多地區仍有產生水庫優養化之氮磷來源的農業行為例如：茶園、菜園等等，本研究之研究動機為想瞭解農業行為對於水質的影響，並比較不同的肥料放行行為所造成河水中營養物濃度的變化。

## 二、研究方法

### 2.1 研究區域

翡翠水庫上游集水區，其主要的河流為北勢溪，位於台灣北部，是新店溪的源流之一，全長約 50 公里，流域面積約 310 平方公里，月平均溫度 11~25℃，年降雨量約 4,500 mm，幾乎全年有雨，七、八月雨量較多。流域分布於新北市雙溪區、坪林區、石碇區、新店區等行政區。其源流有二，皆位於雙溪區，北支發源於三方向山，南支發源於北、宜兩縣邊界的鷲子嶺，兩溪合流後向西南流，隨後注入翡翠水庫，經水庫後往西流至龜山橋邊，與來自南方的南勢溪會合，始稱為新店溪。

本研究之集水區坪林拱橋控制點以上集水區如圖

1，流域面積約 103 平方公里，海拔最高 947.4 (m)，最低 172.5 (m) 如圖 2。土地利用圖層取自國土測繪中心，本研究以 2007 年為代表，並以民國 82 年第二次國土利用調查作業之土地使用分類系統表將其分類。最後將 2007 年台北土地利用圖細分為七類：茶樹、果樹、稻米、森林、交通、水利、建築。如表 1，可以發現坪林拱橋控制點以上集水區占地最廣的是森林地 (89.12 %)，其次分別為茶樹(5.17 %)、建築用地(2.29 %)、水利用地 (1.45 %)、交通用地(1.43 %)、果樹(0.44 %)，以及稻米(0.1 %)其分佈狀況如圖 3 所示。

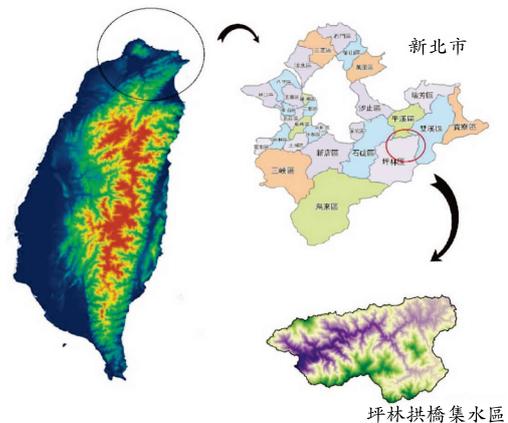


圖 1 坪林拱橋控制點以上集水區位置圖

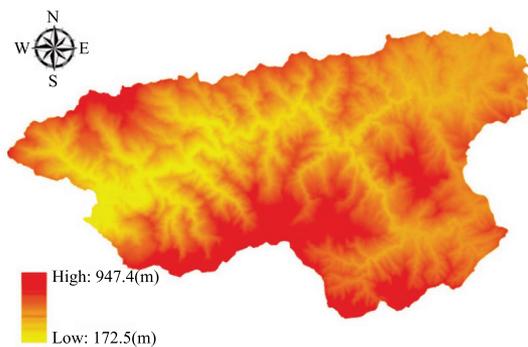


圖 2 坪林拱橋控制點以上集水區高程圖

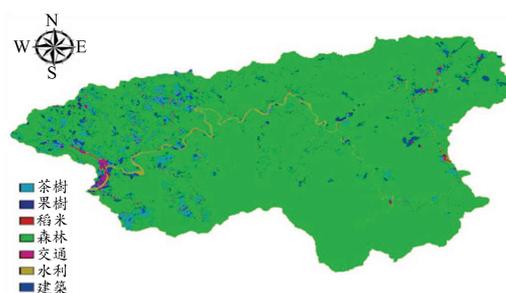


圖 3 坪林拱橋控制點以上集水區土地利用分配圖

表 1 坪林拱橋控制點以上集水區土地利用分配表

土地利用名稱	茶樹	果樹	稻米	森林	交通	水利	建築
占地面積 (km <sup>2</sup> )	5.32	0.453	0.10	91.79	1.47	1.49	2.36
比例(%)	5.17	0.44	0.1	89.12	1.43	1.45	2.29

土壤分布以幼黃土 40.89% 為最多，其次為崩積土 27.15%、石質土 18.98%、黃壤 9.91%、岩石 1.38%、無母質 0.99%，其餘為混和地 0.7%，模式中將土壤分為比例最高的幼黃土及崩積土。坪林拱橋地區農業以茶樹為主要經濟作物，茶葉年產量可達 550 Kg/ha，茶種有東方美人茶與包種茶等，為北部最大之茶產地。茶葉之作物參數養分吸收的方式是以新梢 45%，木材 25%，茶葉約 30% 為氮養分分配比例，茶(林冠州 2017)。

## 2.2 研究方法及流程

本研究主要探討坪林拱橋控制點以上集水區之水質變化，蒐集 1990 年到 2014 年氣象資料，將所蒐集的氣象資料、高程圖、土地利用圖和土壤資料建置於到坪林拱橋控制點以上集水區模式中，首先進行流量

率定驗證，再進行非點源污染模式率定驗證。因該集水區測站資料多缺失，故使用歷史資料較為完整的坪林拱橋測站作為模式率定驗證之用途，使模式能更有效模擬現地流量及水質情況。模式建置及檢定驗證流程示如圖 4。

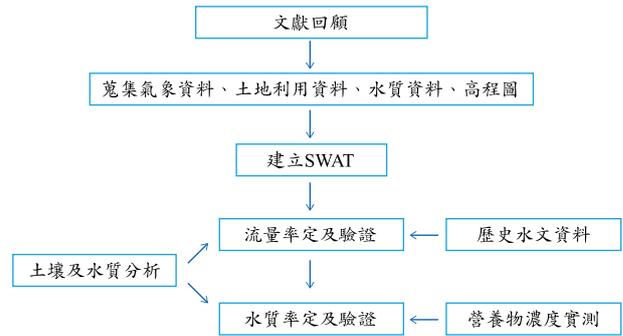


圖 4 模式建置及檢定驗證流程圖

## 2.3 施肥情境設計

本研究以四種施肥情境進行比較，分別為施肥情境(一)全慣行農業、施肥情境(二)全有機農業以及施肥情境(三)有機氮、磷肥農業及(四)不施肥的自然農法，其情境設計如表 2。其中在慣行農業的部分由於坪林

表 2 施肥情境設計表

	月份	日期	作物名稱	施肥情境(一)	施肥情境(二)	施肥情境(三)	自然農法
施肥	1	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	2	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	3	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	4	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
採收	4	5	茶樹	-	-	-	-
施肥	5	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	6	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	7	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	8	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	9	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
施肥	10	1	茶樹	(26-13-13) 824 kg/ha	油粕類有機肥(5.38-2.61-1.9) 3090 kg/ha	有機氮、磷肥(26-13-13) 824 kg/ha	無施肥
採收	10	5	茶樹	-	-	-	-

拱橋控制點以上集水區當地雖有部分茶園使用慣行農業但比例相當低，因此先假設其皆為慣行施肥，而慣行施肥所施用的肥料為台肥 1 號即溶複合肥料，其氮、磷酐(P<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)及氧化鉀(K<sub>2</sub>O)為 26:13:13。在模擬有機施肥的部分，採用油粕類有機肥作為主要肥料，由於茶園經常使用之有機肥料主要為油粕類，而其氮、磷酐(P<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)及氧化鉀(K<sub>2</sub>O)之比例大多相近，由於油粕類大多磷含量過低，故採用磷含量較高的棉仔柏作為代表進行模擬，其比例為 5.38:2.61:1.9。油粕類有機質肥料為臺灣茶區最常用之有機質肥料，無論是日本、中國大陸或是台灣的報告均認為油粕類有機肥對茶葉增產及品質之改善有良好效果。然而大部分油粕類在土壤中分解迅速，可供應茶樹速效性的氮素，但有機質含量少且售價偏高是其缺點。(行政院農委會 農業試驗所作作物病蟲害與肥培管理技術資料光碟)。有機氮、磷肥情境即將慣行農業下等重量、等比例的無機磷及無機氮轉換為有機磷及有機氮並輸入模式進行模擬。自然農法即完全不施用任何肥料。農業情境(一)及農業情境(二)肥料之施用比例由淨園茶廠提供。

### 三、數值模擬條件設置

#### 3.1 地表逕流模擬

地表逕流模擬為水文模擬中的一環，是流量與非點源污染模擬研究的基礎。SWAT 模式模擬地表逕流以 SCS Curve Number 法進行入滲估算，該方程式最早是於美國開發並應用在小型的鄉村集水區，藉由雨水與逕流之關係建立而成，估算土地利用與土壤條件產生的地表逕流量(Rallison and Miller, 1982)。

SCS curve number 公式為：

$$Q'_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S} \dots\dots\dots(1)$$

$Q'_{surf}$  是累積地表逕流量或超滲降雨量(mm H<sub>2</sub>O)， $R_{day}$  為當天之降雨深度(mm H<sub>2</sub>O)， $I_a$  是初始入滲量(mm H<sub>2</sub>O)， $S$  為集水區最大蓄水量(mm H<sub>2</sub>O)會因為土壤與土地利用變化而改變，而  $S$  參數的估算如下：

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \dots\dots\dots(2)$$

其中的 CN 值為當天該地區的 CN 值，另外初始入滲量  $I_a$  通常會被設定為 0.2S，帶入後公式如下：

$$Q'_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{R_{day} + 0.8S} \dots\dots\dots(3)$$

當降雨量大於  $I_a$  時，才会有地表逕流的發生，若小於  $I_a$  則會全部入滲到土中。

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \times (1 - \exp(\frac{-surlag}{t_{conc}})) \dots\dots\dots(4)$$

上式中  $Q_{surf}$  為進入河川的地表逕流量(mm H<sub>2</sub>O)， $Q'_{surf}$  為次集水區當天產生之地表逕流量(mm H<sub>2</sub>O)， $Q_{stor,i-1}$  為前一日滯留於次集水區之地表逕流量(mm H<sub>2</sub>O)， $surlag$  為地表水延遲系數， $t_{conc}$  為次集水區之集流時間。 $(surlag$  與  $t_{conc}$  請參照 SWAT2009 theory P.117)

#### 3.2 側向流模擬

除地表逕流會流入河道外，側向流為另一個水流移動途徑，當水進入到土壤中，有些水會在表層土壤中進行流動，尤其是水力傳導度較高的土壤中，坡長與坡度都會影響側向流的計算。SWAT 模式中側向流之模擬是採用 Sloan (1984)的方法，假定飽和地表下逕流與側向流都是在飽和區間平行移動，且水力傳導度與坡度需要夠達到該門檻值才會發生，在邊坡的飽和水量計算上則是利用以下公式進行計算：

$$SW_{ly,excess} = \frac{1000 * H_0 * \phi_d * L_{hill}}{2} \dots\dots\dots(5)$$

$SW_{ly,excess}$  為坡地每單位面積之飽和含水層可排水量(mm)， $H_0$  為坡地出水口之飽和水層厚度(mm/mm) (SWAT 2009 P.161)， $L_{hill}$  為坡長(m)， $\phi_d$  為土壤孔隙率(mm/mm)，1,000 為公尺轉換為毫米之單位轉換，側向流之計算主要由上式跟邊坡飽和水量計算等參數組合而成，如下式所示：

$$Q'_{lat} = 0.024 * \frac{2 * SW_{ly,excess} * K_{sat} * slp}{\phi_d * L_{hill}} \dots\dots\dots(6)$$

$Q_{lat}$  為邊坡側向流量(mm)， $k_{sat}$  為飽和水力傳導度(mm/h)， $slp$  為集水區平均坡度。

$$Q_{lat} = (Q'_{lat} + Q_{latstor,i-1}) * (1 - \exp(\frac{-1}{TT_{lag}})) \dots\dots\dots(7)$$

其中  $Q_{lat}$  是排放到主通道的側向流量(mm H<sub>2</sub>O)， $Q'_{lat}$  是子流域產生的側向流量(mm H<sub>2</sub>O)， $Q_{latstor,i-1}$  是前一日所滯留之側向流之流量(mm H<sub>2</sub>O)， $TT_{lag}$  是水流側向流動時間(天)。

### 3.3 淺層地下水量模擬

淺層地下水層為河川基流補注來源，淺層地下水來源為地表水入滲，入滲過程將會把地表與土壤中的營養鹽帶入淺層地下水層，這些過程在河川流量與水質模擬尤其重要，以下將介紹 SWAT 模式中有關河川基流補注等相關公式。

淺層地下水總水量的計算是透過水平衡，將河川基流補注與地表水滲透等進行計算，藉以瞭解淺層地下水總水量，公式如下：

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchrg,sh} - Q_{gw} - W_{revap} - W_{pump,sh} \dots \dots (8)$$

上述公式  $aq_{sh,i}$  為淺層(shallow)地下水在第  $i$  天的水滯留量(mm H<sub>2</sub>O)， $aq_{sh,i-1}$  為淺層地下水在第  $i-1$  天的水滯留量(mm H<sub>2</sub>O)， $W_{rchrg,sh}$  為進入補注淺層地下水水量(mm H<sub>2</sub>O)， $Q_{gw}$  為從淺層地下水流出補注河川基流之水量(mm H<sub>2</sub>O)， $W_{revap}$  為土壤缺水時從淺層地下水補注回土壤的量(mm H<sub>2</sub>O)， $W_{pump,sh}$  這裡指的是人為抽水量(mm H<sub>2</sub>O)。

淺層地下水主要來源為雨水，雨水除了成為地表逕流，同時還會入滲土壤中，隨著重力往下流動，進入淺層地下水層中，其計算公式則與土壤滲透有關，該公式如下：

$$W_{rchrg,sh} = (1 - \exp[-\frac{1}{\delta_{gw}}]) * w_{seep} + \exp[-\frac{1}{\delta_{gw}}] * w_{rchrg,i-1} \dots (9)$$

上述公式中  $w_{rchrg,sh}$  為第  $i$  天入滲補注的淺層地下水水量(mm H<sub>2</sub>O)， $\delta_{gw}$  (GW\_DELAY) 為水流從地表流入淺層地下水的延時(天)， $w_{seep}$  是每天通過土壤底層的滲流量(mm H<sub>2</sub>O)， $w_{rchrg,i-1}$  為前一日補注的淺層地下水水量(mm H<sub>2</sub>O)。(w<sub>seep</sub> 參照 SWAT2009 theory P.184)

河川基流來自淺層地下水的補注，調節了河川乾季的水量與河川生物的存活，河川基流計算方式如下：

若  $aq_{sh} > aq_{shthr,q}$

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} * \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t] + W_{rchrg,sh} * (1 - \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t])$$

若  $aq_{sh} \leq aq_{shthr,q}$

$$Q_{gw,i} = 0 \dots \dots \dots (10)$$

上述公式中  $Q_{gw,i}$  為淺層地下水補注第  $i$  天的河川基流量(mm H<sub>2</sub>O)， $Q_{gw,i-1}$  為第  $i-1$  天的淺層地下水補注的河川基流量(mm H<sub>2</sub>O)， $\alpha_{gw}$  (ALPHA\_BF) 為退水常數(無因次)， $\Delta t$  為一天經過的時間， $aq_{sh}$  是第  $i$  天初始的淺層地下水量(mm H<sub>2</sub>O)  $aq_{shthr,q}$  (GWQMN) 為發生河川基流補注之淺層地下水量門檻值(mm H<sub>2</sub>O)。

### 3.4 流域中總磷模擬

某一天河流中無機磷的變化量：

$$\Delta solP_{str} = \beta_{P,4} \cdot orgP_{str} + \left( \frac{\sigma_2}{(1000 \cdot depth)} \right) \dots \dots \dots (11) - \alpha_2 \cdot \mu_a \cdot algae) \cdot TT$$

$\Delta solP_{str}$  是溶液中磷濃度的變化(mg P/L)， $\beta_{P,4}$  是有機磷礦化的速率常數( $day^{-1}$  或  $hr^{-1}$ )， $orgP_{str}$  是一天開始時的有機磷濃度(mg P/L)， $\sigma_2$  是可溶性磷的沉積物來源率(mg P/m<sup>2</sup>-day 或 mg P/m<sup>2</sup>-hr)，深度是河道水深(m)， $\alpha_2$  為磷於藻類中的比例(mg P/mg alg biomass)， $\mu_a$  是藻類的當地生長速度( $day^{-1}$  或  $hr^{-1}$ )， $algae$  是一天開始時的藻類生物質濃度(mg/L)， $TT$  為流經某河段所需的時間(day or hr)。通過有機磷的礦化和河床沉積物的無機磷的擴散，可以增加流中可溶性磷的量。

某一天河道中有機磷濃度變化量：

$$\Delta orgP_{str} = (\alpha_2 \cdot \rho_a \cdot algae - \beta_{P,4} \cdot orgP_{str} - \sigma_5 \cdot orgP_{str}) \cdot TT \dots \dots \dots (12)$$

其中  $\Delta orgP_{str}$  是有機磷濃度的變化(mg P/L)， $\alpha_2$  為磷的藻類生物質的比例(mg P/mg alg biomass)， $\rho_a$  是藻類的呼吸或死亡率( $day^{-1}$  或  $hr^{-1}$ )， $algae$  是一天開始時的藻類濃度(mg alg/L)， $\beta_{P,4}$  是有機磷礦化的速率常數( $day^{-1}$  或  $hr^{-1}$ )， $orgP_{str}$  是一天開始時的有機磷濃度(mg P/L)， $\sigma_5$  是有機磷沉降速率係數( $day^{-1}$  或  $hr^{-1}$ )， $TT$  流經某河段所需的時間(day or hr)。

$$\sigma_5 = \sigma_{5,20} \cdot 1.024^{(T_{water} - 20)} \dots \dots \dots (13)$$

$\sigma_5$  是有機磷沉降速率係數( $day^{-1}$  或  $hr^{-1}$ )， $\sigma_{5,20}$  是 20°C 時有機磷的沉降速率， $T_{water}$  是一天或一小時的平均水溫(°C)。

$$P_{surf} = (P_{surf} + P_{stor,i-1}) * (1 - \exp(-\frac{-surlag}{t_{conc}})) \dots \dots \dots (14)$$

$P_{surf}$  是地表逕流中可溶性磷流失量(Kg P/ha)， $P_{solution,surf}$  是給定日內 HRU 中產生的可溶性磷(Kg P/ha)， $P_{stor,i-1}$  是前一天滯留的可溶性磷(Kg P/ha)。

## 四、流域中硝酸鹽氮模擬

計算從降雨進入土壤中的硝酸鹽含量：

$$NO_{3,rain} = 0.01 * R_{NO_3} * R_{day} \dots \dots \dots (15)$$

$NO_{3,rain}$  為透過降雨進入土壤中的硝酸鹽氮量(Kg N/ha)。 $R_{NO_3}$  為雨水中硝酸鹽氮的濃度。 $R_{day}$  為當日的降雨量(mm H<sub>2</sub>O)。

農業活動施放大量肥料(氨氮、硝酸鹽氮等)，將造成土壤酸化的現象，並且這些並未被植物吸收之硝酸鹽氮，藉由水流進入河川、地下水、土壤中，將可能影響土中與水中的氮循環過程，為了瞭解硝酸鹽氮是透過進入河川的主要途徑，本研究利用 SWAT 模式中硝酸鹽氮移動公式的計算，了解其每日的移動途徑分布比例，以下為硝酸鹽氮在水中移動濃度的計算(林冠州 2017)：

$$CONC_{NO_3, mobile} = \frac{NO_{3,ly} * \left[ 1 - \exp\left[\frac{-w_{mobile}}{(1-\theta_e) * SAT_{ly}}\right]\right]}{w_{mobile}} \dots\dots\dots(16)$$

上述公式中  $CONC_{NO_3, mobile}$  為隨水流移動的硝酸鹽氮濃度(Kg N/mm H<sub>2</sub>O)， $NO_{3,ly}$  為在不同層中硝酸鹽氮的總量(Kg N/ha)， $w_{mobile}$  為每一層水流移動量(mm H<sub>2</sub>O)， $\theta_e$  為陰離子除外的孔隙率係數， $SAT_{ly}$  為土壤飽和含水量(mm H<sub>2</sub>O)。在不同土層有不同水流移動的計算，如以下所示：

$$w_{mobile} = Q_{surf} + Q_{lat,ly} + w_{perc,ly}$$

for top 10mm .....(17)

$$w_{mobile} = Q_{lat,ly} + w_{perc,ly}$$

for lower soil layers .....(18)

$Q_{lat,ly}$  為土壤層中的側向流(mm H<sub>2</sub>O)， $w_{perc,ly}$  為每日水滲透入土壤底部的水量(mm H<sub>2</sub>O)。硝酸鹽氮經由地表逕流、側向流與滲透入地下水層的量，是經由濃度、水流與硝酸鹽氮融入水中的比例來進行計算，以下為硝酸鹽氮被水流移動途徑帶入河川總量的計算方法。

地表逕流：

$$NO_{3,surf} = (NO_{3,surf} + NO_{3,surstor,i-1}) * (1 - \exp(\frac{-surlag}{t_{conc}})) \dots\dots\dots(19)$$

此處  $NO_{3,surf}$  為被地表逕流帶入水體的硝酸鹽氮總量(Kg N/ha)， $NO_{3,surf}$  是在某一天 HRU 中地表逕流硝酸鹽量(Kg N/ha)， $NO_{3,surstor,i-1}$  是從前一天滯留的地表逕流硝酸鹽(Kg N/ha)。

$$NO_{3,surf} = \beta_{NO_3} * CONC_{NO_3, mobile} * Q_{surf} \dots\dots\dots(20)$$

此處  $NO_{3,surf}$  為被地表逕流帶入水體的硝酸鹽氮總量(Kg N/ha)， $\beta_{NO_3}$  為硝酸鹽氮滲透率(NPERCO)， $CONC_{NO_3, mobile}$  為土壤表層 10 mm 中硝酸鹽氮的濃度(Kg N/mm H<sub>2</sub>O)， $Q_{surf}$  為每天產生的地表逕流量(mm H<sub>2</sub>O)。

側向流：

$$NO_{3,lat} = (NO_{3,lat} + NO_{3,latstor,i-1}) * (1 - \exp(\frac{-1}{TT_{lag}})) \dots\dots\dots(21)$$

$NO_{3,lat}$  是在給定的一天(Kg N /ha)橫向流動中排放到主要河道的硝酸鹽量， $NO_{3,lat}$  為硝酸鹽氮經由側向流從該層帶出的總量(Kg N/ha)， $NO_{3,latstor,i-1}$  是從前一天滯留的側向硝酸鹽流量(Kg N/ha)。

$$NO_{3,lat} = \beta_{NO_3} * CONC_{NO_3, mobile} * Q_{lat,ly} \dots\dots\dots(22)$$

$CONC_{NO_3, mobile}$  為該層移動水流中硝酸鹽氮濃度(Kg N/mm H<sub>2</sub>O)， $Q_{lat,ly}$  為側向流從該層流出的水量(mm H<sub>2</sub>O)。

淺層地下水：

$$NO_{3,gw} = (NO_{3,sh,i-1} + NO_{3,rchrg,i}) * Q_{gw} / (aq_{sh,i} + Q_{gw} + w_{revap} + w_{rchrg,dp}) \dots\dots\dots(23)$$

$NO_{3,gw}$  是第 i 天來自淺層含水層的地下水流量中的硝酸鹽含量(Kg N/ha)， $NO_{3,sh,i-1}$  是前一日淺層含水層中滯留的硝酸鹽的含量(Kg N/ha)， $NO_{3,rchrg,i}$  是第 i 天進入含水層的補給硝酸鹽量(Kg N / ha)， $aq_{sh,i}$  是在第 i 天結束時滯留在淺層含水層中的水量(mm H<sub>2</sub>O)， $w_{revap}$  是在第 i 天(mm H<sub>2</sub>O)由於缺乏水分而進入土壤的水量，而  $w_{rchrg,dp}$  是第 i 天進入深層含水層的補給量(mm H<sub>2</sub>O)。

## 五、結果與討論

### 5.1 坪林拱橋控制點以上集水區流量模擬成果

坪林拱橋控制點以上集水區位於翡翠水庫上游，為北勢溪上游之集水區，該集水區之人為開發比例較

高，本研究流量模擬時間為 2012 至 2014 年。流量檢定期為 2012 年，流量檢定為  $R^2=0.85$ ，Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 為 0.81，位於相當良好的範圍內，如圖 5。驗證期間為 2011 年，流量驗證成果為  $R^2=0.71$ 。Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 為 0.66，如圖 6。

如表 3，敏感性分析第一之參數 RCHRG\_DP 為淺層地下水滲透到深層地下水的係數，檢定成果為 0.219 檢定範圍為 0.218~0.75，敏感性分析第二之參數 REVAPMN 為淺層地下水往上發生毛細現象的水深門檻值(mm)，檢定成果為 334.087，檢定範圍為 59.36~354，敏感性分析第三之參數 GWQMN 為地下水補注河川流量深度的門檻值檢定成果為 225.69 (mm)，檢定範圍為 0~575 mm，敏感度分析第四之參數 ALPHA\_BF 為基流退水係數，檢定成果為 0.738，檢定範圍為 0~1 之間，敏感性分析第五隻參數 GW\_DELAY 為水從地表流入淺層地下水的延時(day)，檢定成果為 0.84 天，檢定範圍落於 0~16 天之間，敏感性分析第六之參數 CN 值為 SCS Curve number 計算地表逕流參數，比照於 SWAT 模式內建之數值，農地為 77，森林為 55，草地為 69，裸露地為 86，都市為 98。檢定成果下降 18.1%，範圍為±20%。流量模擬成果如圖 7。

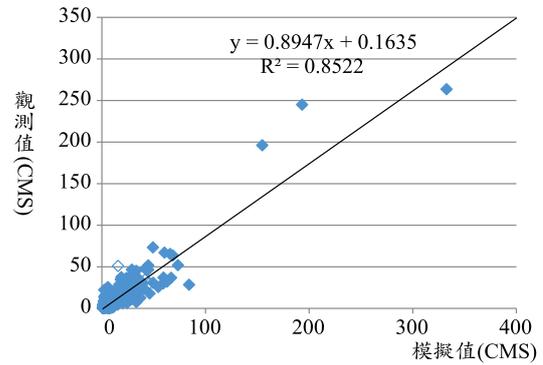


圖 5 拱橋控制點以上集水區流量檢定率定線

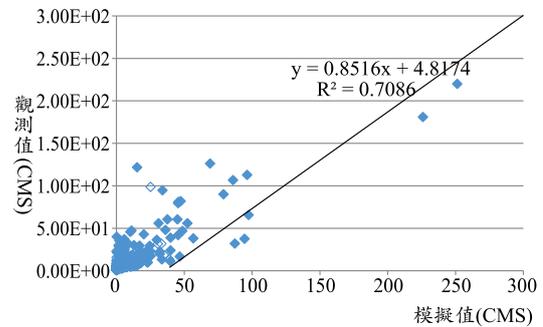


圖 6 坪林拱橋控制點以上集水區流量驗證率定曲線

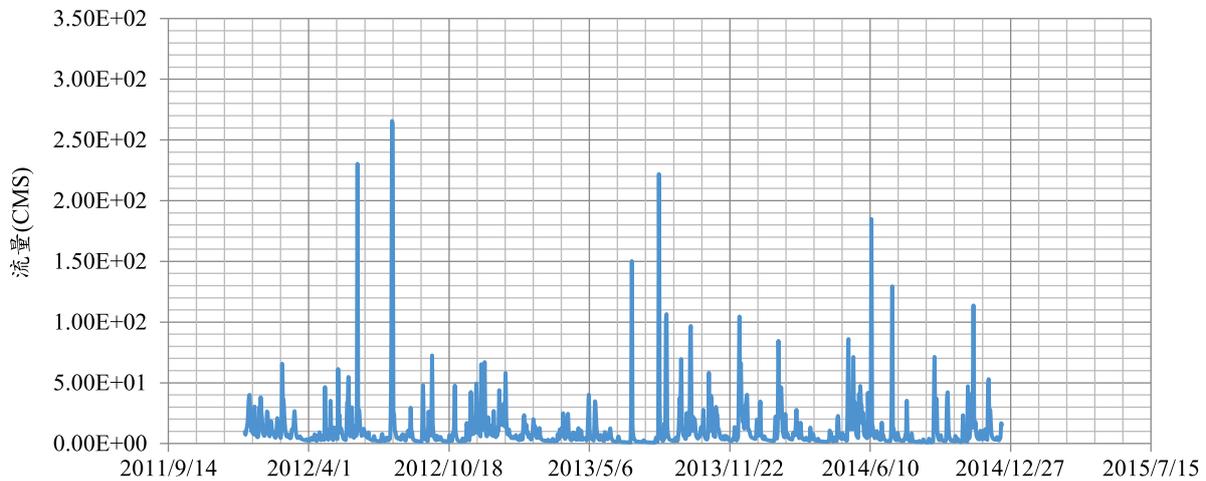


圖 7 坪林拱橋控制點以上集水區流量模擬成果

表 3 SWAT 模式流量參數檢定結果

Parameter	定義	subbasin	Sensitivity rank	Fitted value	Min_value	Max_value
RCHRG_DP	地下水滲透係數	ALL	1	0.219	0.218	0.75
REVAPMN	地下水往上發生毛細現象的水深門檻值(mm)	ALL	2	334.1	59.36	354
GWQMN	地下水補注河川流量深度的門檻值(mm)	ALL	3	225.7	0	575
ALPHA_BF	退水係數	ALL	4	0.738	0	1
GW_DELAY	水從地表流入淺層地下水的延時(day)	ALL	5	0.84	0	16
CN2	計算地表逕流參數	ALL	6	-0.18	-0.2	0.2
SURLAG	地表水延遲參數	ALL	7	13.03	10	24

## 5.2 集水區總磷模擬成果

研究總磷(TP)模擬時間為 2012 至 2014 年。總磷(TP)檢定期為 2010 年，如圖 8 所示，總磷檢定成果為  $R^2 = 0.711$ ，Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 為 0.695，位於相當良好的範圍內。驗證成果為  $R^2 = 0.688$ ，Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 為 0.612。如圖 9 所示，位於良好的範圍內。由圖 10 可以發現大部分的時候總磷的模擬量高於實測值。而在實測值偏高時較無法精準模擬。

敏感性分析排序第一之參數 PSP 為磷有效性指數，檢定成果為 0.25，檢定範圍為 0~1，敏感性分析第二之參數 PHOSKD 為磷土壤分配係數( $m^3/Mg$ )，檢定成果為 125，檢定範圍為 100~200。敏感性分析第三之參數 PPERCO 為磷滲透係數，檢定成果為 16，檢定範圍為 10~17.5。如表 4 所示。

若將慣行與有機磷肥施用下，河道中之有機及無機磷分開來看可以發現，在有機磷肥施用下，河道中的有機磷增加了 32% (4,804 Kg)，如圖 10。但在慣行施肥下，無機磷多了 141% (12889 Kg) 如圖 11。由此可見，有機磷肥的施用可以大幅的減少無機磷(可溶性磷)進入水體，雖然在有機磷肥的施用下仍然會導致較多的有機磷進入水體，但卻能夠大幅度的減少無機磷於河道中的含量，因此於有機磷肥施用情形下總磷(TP)是可以被減少的。

圖 12 為三種施肥情境與自然農法(無施肥)之總磷比較，施肥情境(一)的總磷含量為最多 36935.51(Kg)，

其次為施肥情境(三) 28853.22(Kg)，含量排行第三的為施肥情境(二) 17871.6(Kg)，含量最低的為自然農法 3694.08(Kg)。

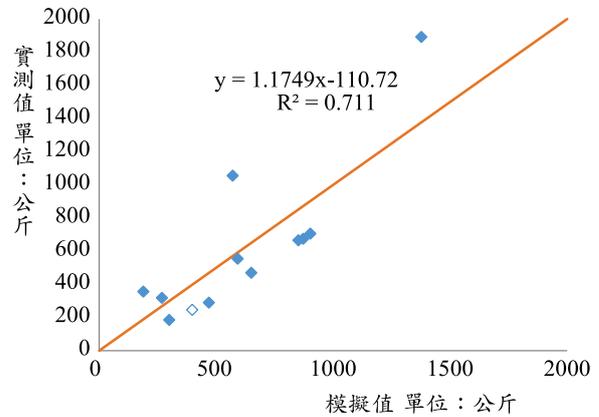


圖 8 總磷(TP)率定曲線(檢定期間 2010)

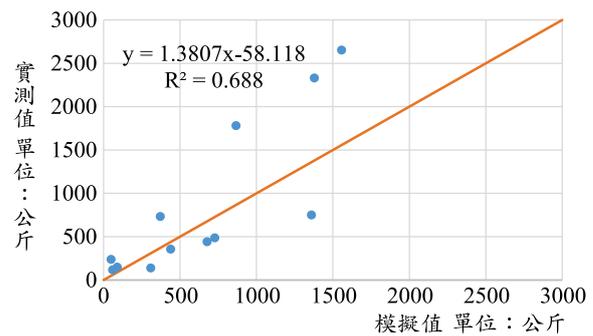


圖 9 總磷(TP)率定曲線(驗證期間 2011)

表 4 SWAT 模式總磷參數檢定結果

Parameter	定義	subbasin	Sensitivity rank	Fitted value	Min_value	Max_value
PSP	磷有效性指數	ALL	1	0.25	0	1
PHOSKD	磷土壤分配係數( $m^3/Mg$ )	ALL	2	125	100	200
PPERCO	磷滲透係數( $m^3/Mg$ )	ALL	3	16	10	17.5

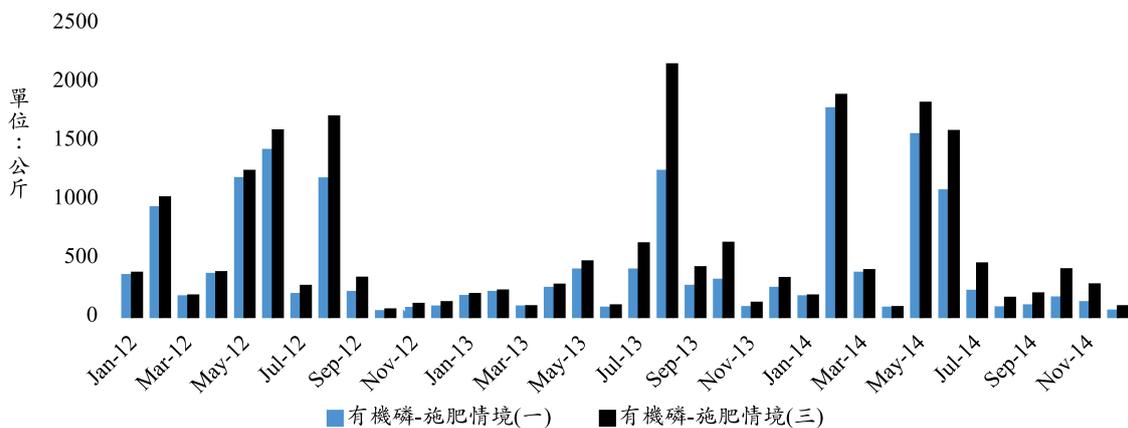


圖 10 施肥情境(一)與施肥情境(三)有機磷於河道中之含量比較

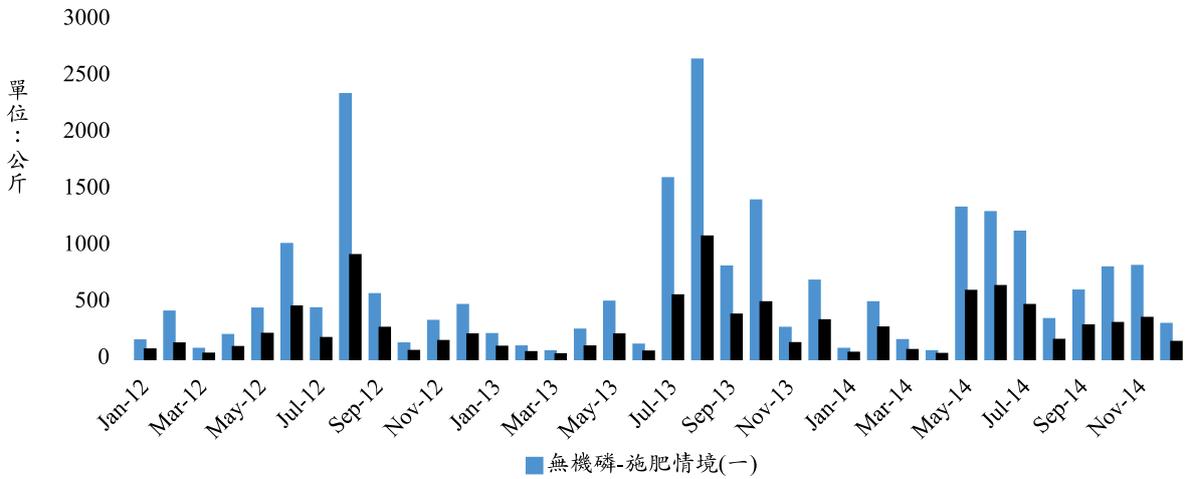


圖 11 施肥情境(一)與施肥情境(三)無機磷於河道中之含量比較

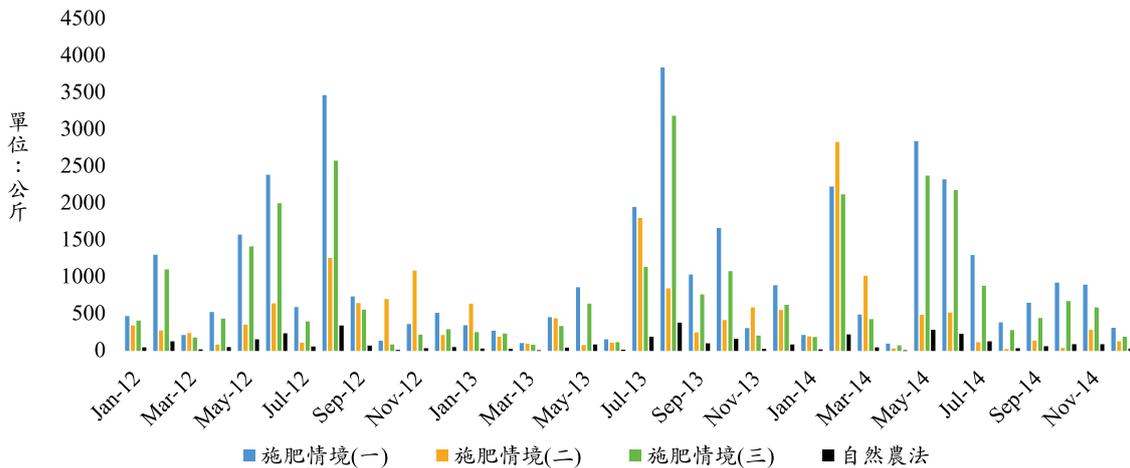


圖 12 三種施肥情境與自然農法之總磷比較

### 5.3 坪林拱橋控制點以上集水區硝酸鹽氮模擬成果

坪林拱橋控制點以上集水區硝酸鹽氮檢定時間為 2012 年，檢定成果  $R^2 = 0.81$ ，Nash 值為 0.69，如圖 13，目標函數位於良好的模擬範圍。驗證期間為 2013 年，驗證成果  $R^2 = 0.674$ ，Nash 值為 0.601，如圖 14。

檢定分析結果，敏感性分析第一敏感的參數 RCN ( $R_{NO_3}$ ) 為雨水中的氮濃度(mg/L)，檢定成果為 6.225，檢定範圍為 0~15。敏感性分析第二之參數為 SOL\_ORGN ( $orgN_{hum,ly}$ ) 為土壤中初始的有機氮濃度(ppm)，檢定成果為 82.5，檢定範圍為 0 ~ 100。敏感性分析第三之參數 CDN ( $\beta_{demit}$ ) 為反硝化速率係數，檢定成果為 2.625，檢定範圍為 0 ~ 3。敏感性分析第四之參數 ANION\_EXCL ( $\theta_c$ ) 為陰離子交換孔隙度，檢定

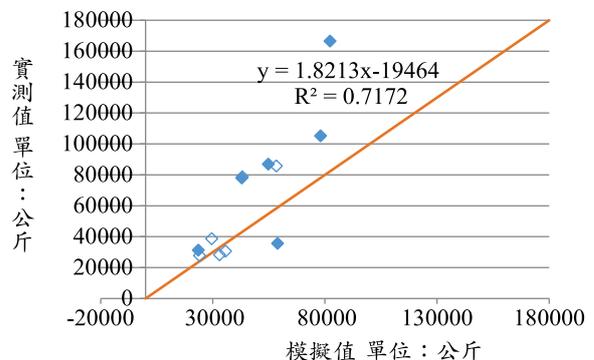


圖 13 坪林拱橋控制點以上集水區硝酸鹽氮率定曲線(檢定期間 2012)

成果為 0.5，檢定範圍為 0 ~ 1。敏感性分析第五之參數 SDNCO ( $\gamma_{sw,thr}$ ) 為脫氮門檻含水量，模擬成果為 5.25，模擬範圍為 0 ~ 10。當含水量  $\geq$  SDNCO，厭氧條

表 5 SWAT 模式硝酸鹽氮檢定結果

Parameter	定義	Subbasin	Sensitivity rank	Fitted value	Min_value	Max_value
RCN	雨水中的氮濃度(mg/L)	ALL	1	6.225	0	15
SOL_ORGN	土壤中初始的有機氮濃度(ppm)	ALL	2	82.5	0	100
CDN	反硝化速率係數	ALL	3	1.625	0	3
ANION_EXCL	孔隙率	ALL	4	0.5	0	1
SDNCO	反硝化作用的臨界值	ALL	5	5.25	0	10
NPERCO	硝酸鹽滲透係數	ALL	6	0.5	0	1
SHALLST_N	淺層含水層中的硝酸鹽含量	ALL	7	18.5	0	30
SOL_NO3	土壤中初始硝酸鹽濃度	ALL	8	41.5	0	100

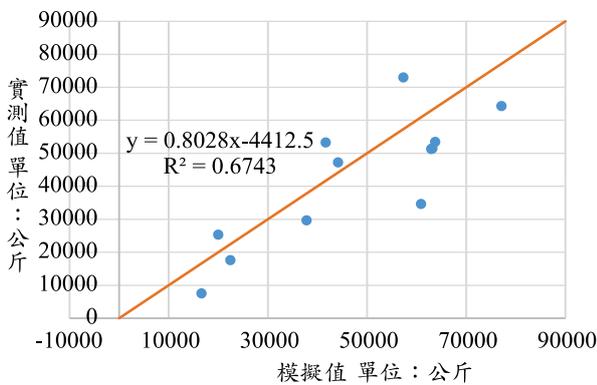


圖 14 坪林拱橋控制點以上集水區硝酸鹽氮率定曲線(驗證期間 2013)

件產生脫氮作用，反之，含水量 $<$ SDNCO，脫氮作用不被模擬。敏感性分析第六之參數為 NPERCO 為氮滲透參數，檢定成果為 0.5，檢定範圍為 0 ~ 1。敏感性

分析第七之參數 SHALLST\_N ( $\text{NO}_{3,\text{sh}}$ )為地下水初始含氮濃度，檢定成果為 8.5，檢定範圍為 0 ~ 100。敏感性分析第八之參數 SOL\_NO3 ( $\text{NO}_{3,\text{conc,ly}}$ )為土壤中初始的氮含量(ppm)，檢定成果為 41.5，檢定範圍為 0 ~ 100。檢定成果如表 5。

圖 15 為三種施肥情境與自然農法之硝酸鹽氮含量比較圖，硝酸鹽氮含量最高的為施肥情境(一) 1593843 (Kg)，其次為施肥情境(二) 947090 (Kg)，含量排名第三的為施肥情境(三) 484659 (Kg)，含量最低的為自然農法 11084.2(Kg)。根據圖 5-17 及 5-25 得知施肥情境(一)對於水環境的衝擊最大，總磷及硝酸鹽氮的含量均為最高，而施肥情境(二)之硝酸鹽氮較施肥情境(三)來得高，施肥情境(三)之總磷含量則較施肥情境(二)要來得高，自然農法不論在總磷或是硝酸鹽氮均得到最低的含量。

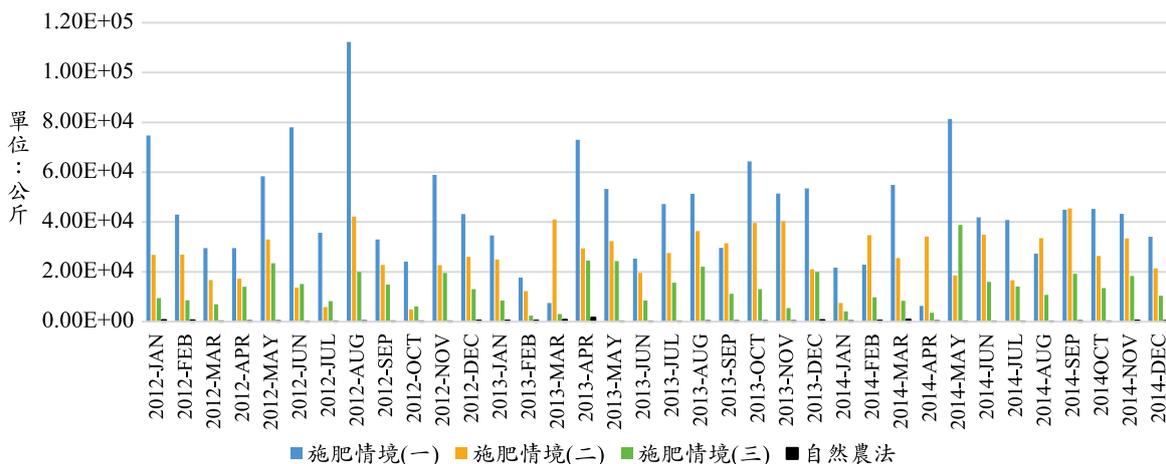


圖 15 三種施肥情境與自然農法之硝酸鹽氮含量比較圖

## 六、結論

1. 本研究使用非點源污染模式(SWAT)模擬 2012 年坪

林拱橋之流量，研究結果顯示 SWAT 能有效模擬坪林拱橋控制點以上集水區日流量，其統計分析結果顯示， $R^2 = 0.85$ ，Nash-Sutcliffe efficiency(NSE) = 0.81。但在颱風期間，日流量模擬有低估的情況，顯

示 SWAT 無法準確模擬洪峰期間流量。

2. 出流水中總磷濃度與雨量呈正相關，大部分的時候模擬值會高估，但在颱風等洪峰值較大的時候，反而會低估，若將慣行農業與有機施肥情境模擬之水質相比，總磷多了 106 %。
3. 於有機種植模擬條件(施肥情境(二))下，有機種植能夠減少總磷(TP)濃度進入水體。
4. 出流水中硝酸鹽與雨量呈正相關，若將慣行農業與有機施肥情境模擬之水質相比，硝酸鹽多了 68 %。
5. 於有機種植模擬條件(施肥情境(二))，有機種植能夠減少硝酸鹽氮( $\text{NO}_3$ )濃度進入水體。
6. 硝酸鹽氮的主要來源來自地下水補注，其次為側向流、農作物，比例最低的則為地表逕流，因此於檢定時大多選用的參數與地下水有關。
7. 施用相等重量的化學肥料相較於有機氮、磷肥產生更多的總磷以及硝酸鹽氮。
8. 施肥情境(一)對於水環境的衝擊最大，總磷及硝酸鹽氮的含量均為最高，而施肥情境(二)酸鹽氮較施肥情境(三)來得高，施肥情境(三)之總磷含量則較施肥情境(二)要來得高，自然農法不論在總磷或是硝酸鹽氮均得到最低的含量。

## 七、建議

1. 建議在高濃度營養鹽河段，河岸可以保留或規劃植生保護帶，進行水質淨化，讓高濃度營養鹽的水變成低濃度營養鹽的水，再讓低濃度營養鹽的水排入到河中。
2. 在進行 SWAT 檢定時，經常遇到實測資料不足、遺漏，以及採樣頻率太低等問題，導致不能進行更精準的模擬及分析，建議往後可以再提高營養鹽濃度的監測頻率。
3. 由於本研究除了河川流量模擬外，總磷(TP)及硝酸鹽氮( $\text{NO}_3 - \text{N}$ )之模擬皆以月為單位進行模擬，因此施肥情境的規劃(肥料輸入)並不需要太精準的施肥量，在此建議農家可以工作日誌的模式對當年度的施肥量進行更詳細的紀錄，搭配更高頻率的採樣調查，可以進行更高精度的模擬。
4. 在營養鹽模擬的部分，未來可以增加農藥傳輸在 SWAT 模型對土壤、水文和營養鹽循環，以更貼近實際的環境。
5. 由研究結果顯示，有機農業能夠有效減少總磷以及硝酸鹽氮進入水體，往後可以更積極的推廣有機農業於該地區的發展，以改善現況的水質。

6. 建議除了增加採樣頻率外，更可以增加 TSS(總懸浮物)的採樣，以便於日後研究。

## 誌謝

本研究感謝慈心基金會蘇慕容執行長，慈心淨源茶場呂美瑩場長，陳善嘉師兄，福智文教基金會黃俊昌師兄等人多年以來的協助。台師大地理系李宗祐教授提供現地監測數據，其博班生林冠州先生協助 SWAT 之操作學習，在此皆一併誌上最感激之情。

## 參考文獻

1. 行政院農業委員會農糧署(2016)有機農業全球資訊網。
2. 行政院農委會(2016) 農業試驗所作作物病蟲害與肥培管理技術資料光碟。
3. 林冠州(2017)“應用非點源污染模式 SWAT 模擬翡翠水庫上游集水區流量及氮素之輸出與移動”，國立臺灣師範大學地理學系，碩士論文。
4. 林進財(2010)“以水土保持觀點結合有機農場初步研究”，國立中興大學水土保持學系，碩士論文。
5. 黃宇齊(2010)“翡翠水庫及水庫集水區水文暨水質模擬與其不確定性”，國立台北科技大學土木與防災研究所，碩士論文。
6. 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，碩士論文。
7. 許璋哲(2017)“評估有機農業活動對苗栗後龍溪上游集水區水質之影響”，國立聯合大學土木與防災工程學系，碩士論文。
8. 陳立宗(2009)“翡翠水庫集水區水文暨水質模擬”，國立臺北科技大學土木與防災研究所，碩士論文。
9. 蔡精強(2009)“台灣有機農業發展概況與前景”。臺中區農業改良場特刊；96 期(2009/06 /01)，Pages 1-8。
10. 張嘉玲(2016)“有機及傳統種植方式對水質影響之研究”。台灣農業工程學報 Vol. 62, No. 2, June 2016 Pages 18-26。
11. 謝順景(1989)“歐美國家之有機農業”，有機農業研討會專集，美國，Pages 31-50。
12. Arnold J.G., Srinivasan R, Muttiah R. S., Williams J.R.(1998)“Large Area Hydrologic Modeling And Assessment Part I: Model Development 1.”
13. Chu, T.W, Shirmohammadi, A. (2004).“Evaluation of the

- SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland”.
14. Cheng, Yi, Jing Wang, Jin-Bo Zhang, Christoph Müller, and Shen-Qiang Wang (2015) “Mechanistic insights into the effects of N fertilizer application on N<sub>2</sub>O-emission pathways in acidic soil of a tea plantation”. *Plant and Soil*, 389(1-2), 45-57.
  15. Ekstrand, S., Wallenberg, P., and Djodjic, F.(2010) “Process based modelling of phosphorus losses from arable land”, *Ambio* 39.2 , pp.100-115.
  16. Yen, Haw (2014) C-SWAT: The Soil and Water Assessment Tool with consolidated input files in alleviating computational burden of recursive simulations.
  17. Lin, Yu-Cheng (2013) “BMP evaluation for nutrient control in a subtropical reservoir watershed using SWAT model”.
  18. Moriasi, D., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L.,(2007) “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations,” *Trans. Asabe*, 50(3), 885-900.
  19. Nash, J.E, Sutcliffe, J.V.(1970) River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
  20. Neitsch, S.L (2011) Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009: Texas Water Resources Institute.
  21. Rallison, R.E. and Miller, N. (1982) Past, present, and future SCS runoff procedure. Paper presented at the Rainfall-runoff relationship/proceedings, International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21, 1981 at Mississippi State University, Mississippi State, Mississippi, USA/edited by VP Singh.
  22. Santhi, C. , Arnold, J.G., Williams, R. , Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M.(2001). “Validation of the SWAT Model on a Large River Basin With Point And Non-point Sources”, Wiley Online Library.
  23. Sloan, P.G.(1984) “Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds”, *Water Resources Research*, 20(12), 1815-1822.
  24. Tripathi, M.P., Panda, R.K, Raghuvanshi, N.S. (2003) Calibration and validation of SWAT model for predicting runoff and sediment yield of a small watershed in India.
  25. Veith, T.L., Sharpley, A.N. and Arnold, J.G., (2008) “Modeling a Small, Northeastern Watershed with Detailed, Field-Level Data,” *American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351*, Vol. 51(2):471-483.
  26. Vogt, *Esther, Christine F. Braban, Ulrike Dragosits, Patrick Durand, Mark. A.Sutton, Mark. R. Theobald, Robert M. Rees, Chris McDonald, Scott Murray, Michael F. Billett.*(2015) “Catchment land use effects on fluxes and concentrations of organic and inorganic nitrogen in streams”. *Agriculture, ecosystems & environment*, 199, 320-332.
  27. Yevenes, M.A, and Mannaerts, C.M.,(2011) “Seasonal and land use impacts on the nitrate budget and export of a mesoscale catchment in Southern Portugal,” *Agricultural Water Management*, Volume 102, Issue 1, Pages 54-65.

收稿日期：民國 107 年 10 月 14 日

修正日期：民國 109 年 04 月 09 日

接受日期：民國 109 年 04 月 15 日