

翡翠水庫集水區非點源污染模擬與防治順序之評估

Simulation of Nonpoint Source Pollution in the Fei-Tsui Reservoir Watershed for Evaluation of Remedy Sequence of Pollution Area

國立台北科技大學
土木工程系暨水環境研究中心

教授
林鎮洋

Jen-Yang Lin

國立台北科技大學
土木工程系暨水環境研究中心

助理教授
陳彥璋

Yen-Chang Chen

國立台北科技大學
環境規劃與管理研究所

碩士班研究生
張玉姍

Yu-Shan Chang

摘要

為瞭解水庫集水區在暴雨時期所產生之非點源污染量，選定翡翠水庫集水區為研究區域，應用 BASINS 整合性集水區管理系統，建立翡翠水庫集水區資料庫。選擇可連續性模擬之 HSPF 模式進行水文與水質模擬，進行集水區水文與水質參數之率定與驗證，並模擬各子集水區產生之非點源污染量，作為水質管理的資料來源；最後，以優化模型之線性規劃數學模式評估子集水區防治之優先順序，提供日後防治翡翠水庫集水區非點源污染效益之提升。由已經驗證之 HSPF 模式，模擬 2001 年翡翠水庫集水區 SS 總污染量為 353,506 kg/yr，TP 總污染量為 18,935 kg/yr，NH₃-N 總污染量為 25,535 kg/yr；2002 年翡翠水庫集水區 SS 總污染量為 132,644 kg/yr，TP 總污染量為 15,705kg/yr，NH₃-N 總污染量為 5,312 kg/yr。建立最小防治成本為決策目標的線性規劃模式，以線性規劃求得優化解。結果顯示，當水庫放流之水質維持在陸域地面甲類水體水質標準，翡翠水庫集水區非點源污染防治區域之優先順序為：水域子集水區為第一順位、北勢溪子集水區為第二順位，而金瓜寮溪子集水區與逮魚溪子集水區無需進行防治。

關鍵詞：非點源污染、BASINS、HSPF、線性規劃

ABSTRACT

The purpose of this research is to understand the nonpoint source pollutant loads caused by rain storm in the Feitsui Reservoir watershed. We establish the Feitsui Reservoir watershed databases by BASINS. First, we proceed hydrology and water quality simulations by the HSPF which can be simulated continuously. Second, we calibrate and

verify the hydrology and water quality parameters in reservoir watershed, then we simulate the non-point source pollutant loads caused in each sub-watershed to be the data source for water quality management. At least, we evaluate the sequence which should be remedied with the linear programming of optimization model. To advance the benefits in the Feitsui Reservoir watershed remedied area. According to second step, the results simulating the data of the Feitsui Reservoir watershed in 2001 are the Suspended Solids (SS) of the total pollutant loads is 353,506 kg/yr, the Total Phosphorous (TP) of the total pollutant loads is 18,935 kg/yr, and the Ammonia Nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) of the total pollutant loads is 25,535 kg/yr. The results in 2002 are the Suspended Solids (SS) of the total pollutant loads is 132,644 kg/yr, the Total Phosphorous (TP) of the total pollutant loads is 15,705 kg/yr, and the Ammonia Nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) of the total pollutant loads is 5,312 kg/yr. The linear programming model is used to obtain the optimal solution under the condition of the least remedied cost. Consequently, when the water quality maintains in the first water-body, the first sequence in non-point source pollution remedied area of the Feitsui Reservoir watershed is the water-body sub-watershed, the second sequence is the Pei-Shih creek sub-watershed. The Dai-Yu creek sub-watershed and the Chin-Kua-Lau creek sub-watershed do not need to be remedied.

Keywords : Nonpoint Source Pollution, BASINS, HSPF, Linear Programming

一、前言

台灣受到地形與氣候條件的影響，降雨情況因季節性差異大，且降雨在地表停留的時間短暫，使得水資源的有效利用相對困難。為了更有效的利用地表上的水資源，便在河谷內建立水庫或攔河堰等以蓄水及引水，故台灣相當程度的依賴水庫作為有效利用水資源的工具，但水庫的興建對環境的影響相當巨大，且台灣經過數十年的開發，可利用作為水庫興建的集水區已經不多，加上近年來民眾的環境保護意識高漲，使得大型水庫的興建相當困難。故現今的水資源問題已從如何建立新水庫以擴充水源，轉而思考如何

對現今已有的水庫作更有效的利用與管理，使得水資源永續利用，便成為一個相當重要的課題。

近年來台灣地區多座水庫經調查已呈現優養化（Eutrophication）情況，或者正受優養程度加深之重要威脅，而水庫污染主要是來自集水區（Watershed）之點源污染（Point Source Pollution）及非點源污染（Nonpoint Source Pollution）。典型的暴雨於初期逕流（Runoff）尖峰時，造成初期沖刷（First Flush）之尖峰濃度可達晴天家庭污水的 15 到 30 倍（蔣本基等，1987），所以當點源污染逐步受到控制後，並未真正使水庫集水區之水質獲得改善，反而是因人口集中或土地開發利用等因素產生的各種非點源污染成為水庫水污染之主要來源。

非點源污染量的推估方法甚多，有單位面積輸出法、負荷函數法、濃度乘流量法、迴歸曲線法及非點源污染模式法。通常非點源污染分佈範圍十分廣泛、污染形態甚多且難以掌握其發生及傳輸途徑，若要進行大規模實地調查，則常受限於經費與人力而不易達成，若採用前四種方法進行推估，則亦各有其優缺點。國內外近年來以非點源污染模式來推估非點源污染量漸受重視，且配合電腦科技的快速發展，結合模式和各種資訊系統，例如地理資訊系統（Geographic Information System，GIS）的應用，在效率與準確性等方面皆有相當進展。

本研究目的為應用 BASINS（Better Assessment Science Integrating point and Non-point Sources）建立翡翠水庫集水區年降雨量與非點源污染量之關係，並應用優化模式（Optimization Model）以評估子集水區防治之優先順序。

二、研究方法與研究區域

2.1 研究方法

為瞭解水庫集水區在暴雨時期所產生之非點源污染量，選定翡翠水庫集水區為研究區域，應用整合性集水區管理系統，建立該集水區資料庫，並將翡翠水庫集水區劃分為四個子集水區，分別為水域子集水區、北勢溪子集水區、金瓜寮溪子集水區及鱸魚堀溪子集水區。本研究選擇可連續性模擬之 HSPF（Hydrological Simulation Program-Fortran）模式進行水文與水質模擬，並根據翡翠水庫管理局之水文與水質資料，進行集水區水文水質參數率定（Calibration）與驗證（Verification），並模擬各子集水區產生之非點源污染量，以建立非點源污染與年降雨之關係，作為水質管理的資料來

源；最後，以優化模型之線性規劃（Linear Programming, LP）數學模式評估子集水區防治之優先順序，提供日後防治翡翠水庫集水區非點源污染效益之提升，作為非點源污染總量管制（Total Maximum Daily Load, TMDL）及最佳管理作業（Best Management Practices, BMPs）設計重要參考依據。本研究方法流程如圖 1 所示。

美國環保署（USEPA）推行的整體性集水區管理系統—BASINS，結合地理資訊系統，可輸入點源資料、土地利用資料，運用數值高程圖（Digital Elevation Model, DEM）自動切割子集水區，再進行 HSPF 模式模擬，輸入降雨、蒸發等氣象資料即可模擬所需之水文與水質結果。因此，本研究應用 BASINS/HSPF 模式，考慮集水區內透水區（Pervious Area）之入滲、逕流等水文傳輸及泥砂運移（Transport）過程，配合河川本身之物理、化學反應，作為暴雨期水質模擬之工具。

BASINS 是以集水區的範疇為概念，將集水區資料及評估總量管制所需之點源及非點源污染分析，整合於 ArcView 的架構下，BASINS 整個系統架構如圖 2 所示，其三大目標為：（1）落實環境資訊的調查；（2）進行環境系統的分析；（3）提供評估管理方案的架構。

HSPF 為美國環保署（USEPA）與 Hydrocomp Inc. 所共同發展，將原本各自獨立的 HSP、ARM 及 NPS 三個模式整合，並進行改良而成的模式。其中 HSP 為集水區水文模式，水文模擬功能強大且精確度高，而 ARM 和 NPS 之功能在於針對農業區之非點源污染模擬。HSPF 為集合水文、水理與水質於一體之模擬程式。

HSPF 為一連續性模擬模式，以降雨、蒸發、大氣溫度、風速、日輻射、葉蒸潛勢、露點溫度、雲覆蓋量等八項氣象資料，以及土地利用型態、土壤特性和農業耕作方式等作為基本輸入資料，根據基本輸入資料，考慮截留、入滲、蒸發散，及地表逕流、中間流、地下水流等水文傳輸情形，可預測逕流量、泥砂運移量、營養鹽、殺蟲劑、毒性物質及其它水質成份的濃度與負荷量，亦可考慮河道行為，模擬河道中水量及水質之變化。WinHSPF 提供 HSPF v.12 一個視窗介面，連結於 BASINS 3.0 中。

HSPF 將集水區分為透水區、不透水區及河段或蓄水庫）三個模組，可分別模擬所需之傳輸結果。由於翡翠水庫集水區之透水區面積佔約 99.01%，即不包括道路與建築用地，因此忽略不透水區之影響，僅選擇透水區與不透水區二模組進行模擬，所包含之副程式功能如表 1，各副程式間並非完全獨立，而是有相互關係的，必須先有良好之水文模擬基礎，才能模擬出合理的水質變化。

2.2 研究區域概述

翡翠水庫集水區位於新店溪上游，北勢溪的翡翠谷，集水區面積約 303 平方公里；集水區內計有主流北勢溪、支流火燒樟溪、後坑子溪、金瓜寮溪、鯉魚堀溪及灣潭溪（圖 3）。根據逢甲地理資訊中心（2000）所調查的原始土地利用資料，本研究將其分類簡化為農地、荒地、林地、果園、草地、茶園、建築、水體等八種土地利用型態，全區及本研究劃分之各子集水區土地利用分類之統計如表 2 所示。

翡翠水庫集水區內之水文氣候站如圖 4 所示，綜合型氣象站紀錄集水區內之風速、風向、氣溫、氣壓、輻射、蒸發量及相對溼度等氣象資料，由於綜合型氣象站僅在翡翠大壩處設立，所以本區所需之氣象資料由綜合型氣象站提供。在集水區內之水文站計有雨量站六處（翡翠、坪林、十三股、九芎根、碧湖、太平）、水位站七處、流量站三處（坪林、鯉魚堀溪、金瓜寮溪）及多處水質監測站（圖 5），採樣監測項目包括總磷、氨氮、水溫、導電度、溶氧量、pH 值及濁度等。

雨量資料方面，由於雨量站在空間分佈上並不均勻，利用徐昇多邊形法（Thiessen Polygon Method）決定子集水區各雨量站之影響控制面積，估計代表子集水區之平均降雨量，其結果如表 3 所示。

三、流量及水質之模擬

3.1 水文模擬

水文模擬主要應用模式中之 PWATER 與 HYDR 模組。PWATER 主要在模擬透水區水循環之收支變化，考慮降雨、截留、入滲、滯蓄、漫地流、中間流、地下水流及蒸發散等因子，最後匯成總出流量之途徑有：地表出流量、中間流出流量和地下水流出流量。HYDR 主要在模擬河道的水文反應，考慮河道之入流量、出流量，加上降雨及蒸發散之影響，計算該河段之流量。利用連續方程式）模擬河段中水理行為，河段中的最終流量計算如下：

$$VOL = VOLT - ROVOL \quad (1)$$

$$VOLT = IVOL + PRSUPY - VOLEV + VOLS \quad (2)$$

$$ROVOL = (KS \times ROS + COKS \times ROD) \times DELTS \quad (3)$$

$$COKS = 1.0 - KS \quad (4)$$

其中 VOL 為河段最終體積； $VOLT$ 為河段總入流體積； $ROVOL$ 則為河段總出流體積； $IVOL$ 為河段初始入流體積； $PRSUPY$ 為河段表面降雨量； $VOLEV$ 為河段表面蒸發散量； $VOLS$ 為河段水量初始體積； KS 為水力路徑之權重因子(0~0.99)； ROS 為模擬時間之起始總出流量； ROD 為模擬時間之最終需求總出流量； $DELTS$ 則為模擬時間。

3.2 水質模擬

水質模擬應用到之模組則有 $SEDMNT$ 、 $SEDTRN$ 、 $PQUAL$ 及 $GQUAL$ 。 $SEDMNT$ 主要在模擬泥砂之生成及運移，考慮大氣沈降及降雨引起的土壤分離、漫地流沖刷等因素，計算由地表土壤、泥砂所攜帶之總輸出量。

3.2.1 $SEDMNT$ 模組

考慮雨滴之動能將土壤中顆粒分離，土壤之分離量之計算如下：

$$DET = DELT60 \times (1.0 - CR) \times SMPF \times KRER \times \left(\frac{RAIN}{DEL60} \right)^{JRER} \quad (5)$$

其中 DET 為降雨引起之土壤分離量； CR 為土壤覆蓋比例； $SMPF$ 為操作管理因子； $KRER$ 為土壤分離係數； $RAIN$ 為降雨； $JRER$ 則為土壤分離指數。

土壤經由漫地流的傳輸過程而流失，漫地流引起的之泥砂運移量如下：

$$STCAP = DELT60 \times KSER \times \left(\frac{SURS + SURO}{DEL60} \right)^{JSER} \quad (6)$$

其中 $STCAP$ 為泥砂運移量(tons/acre/interval)； $KSER$ 為分離泥砂之沖刷係數； $SURS$ 為表面水儲存量(in)； $SURO$ 為地表逕流(in/interval)； $JSER$ 則為分離泥砂之沖刷指數。

當運移能力大於土壤有效分離量時，沖刷量由下式計算：

$$WSSD = DETS \times \left(\frac{SURO}{SURS + SURO} \right) \quad (7)$$

當土壤有效分離量足以滿足運移能力時，沖刷量由下式計算：

$$WSSD = STCAP \times \left(\frac{SURO}{SURS + SURO} \right) \quad (8)$$

其中 $WSSD$ 為泥砂沖刷量($tons/acre/interval$)； $DETS$ 則為分離泥砂之初始存量($tons/acre$)。

土壤沖蝕量由下式模擬：

$$SCRSD = \left(\frac{SURO}{SURS + SURO} \right) \times DELT60 \times KGER \times \left(\frac{SURS + SURO}{DELT60} \right)^{JGER} \quad (9)$$

其中 $SCRSD$ 為土壤沖蝕量($tons/acre/interval$)； $KGER$ 為土壤沖蝕係數； $JGER$ 則為土壤沖蝕指數。 $WSSD$ 和 $SCRSD$ 之總和，即為地面泥砂之總出流量。

因壓密作用而再回附於土壤之附著量，根據一階遞減率公式（First-Order Rate of Reduction）計算如下：

$$DAT = DT \times (1.0 - AFFIX) \quad (10)$$

其中 DAT 為附著量($tons/acre/interval$)； DT 為分離土壤儲存量($tons/acre$)； $AFFIX$ 則為附著係數。

3.2.2 SEDTRN 模組

SEDTRN 模擬無機泥砂之行為，考慮河道中懸浮及底床之砂土、粉土、黏土儲存量，藉由沖蝕和沈澱的轉換過程，計算河道中之泥砂總出流量，由 BDEXCH 及 SANDLD 所控制。

BDEXCH 副程式模擬底床凝聚性泥砂之交換過程，底床凝聚性泥砂是依賴底床表面之剪應力來進行交換動作，若底床剪應力小於臨界剪應力時，則產生沈澱，凝聚性泥砂之沈澱率是簡化 *Krone* 方程式來計算：

$$D = W \times CONC \times \left(1.0 - \frac{TAU}{TAUCD} \right) \quad (11)$$

其中 D 為懸浮泥砂之沈澱率($lb/in^2/interval$)； W 為沈澱速度($in/interval$)； $CONC$ 為懸浮泥砂之濃度(mg/l)； TAU 為剪應力(lb/ft^2)； $TAUCD$ 則為底床之沈澱臨界剪應力(lb/ft^2)。

若底床剪應力大於臨界剪應力時，則產生沖蝕，凝聚性泥砂之沖蝕率修改於 *Partheniades* 方程式來計算：

$$S = M \times \left(\frac{TAU}{TAUCS} - 1.0 \right) \quad (1)$$

其中 S 為底床泥砂沖蝕率($lb/in^2/interval$); M 為泥砂沖蝕係數($lb/in^2/interval$); $TAUCS$ 則為底床之沖蝕臨界剪應力(lb/ft^2)。

SANDLD 模擬砂土和礫石之行為。非凝聚性之泥砂是由水流所攜帶，若泥砂量少於流水動力條件下可攜帶之泥砂量，則不足之泥砂會由底床中被沖蝕出，直到實際泥砂傳輸率和水流攜帶量相當；反之，泥砂傳輸率超過水流可攜帶量時，則會產生沈澱。潛在由底床沖蝕或沈澱的泥砂量由連續方程式表示如下：

$$PSCOUR = (VOL \times PSAND) - (VOLS \times SANDS) + PROSND - ISAND \quad (1)$$

其中 $PSCOUR$ 為潛在沖蝕或沈澱量($tons$)； VOL 為河段最終體積($volumes$)； $PSAND$ 為潛在泥砂量(mg/l)； $VOLS$ 為河段初始體積($volumes$)； $SANDS$ 為泥砂初始濃度值(mg/l)； $PROSND$ 為潛在泥砂出流量($tons$)； $ISAND$ 則為模擬期間之泥砂總入流量($tons$)。

3.2.3 PQUAL 模組

PQUAL 主要是運用水和泥砂之關係來模擬水質，考慮路面和土壤之沖蝕、沈澱、運移等因素，包括地表、中間流、地下水流之模擬物質出流量，由 **QUALSD**、**QUALOF**、**QUALIF** 及 **QUALGW** 模組所控制。**QUALSD** 模擬和泥砂有關之運移量，其和 **SEDMNT** 模組有關，假設污染物與泥砂運移有比例關係，而泥砂對不同污染物亦有不同的攜帶能力，因此，當泥砂運移同時，也挾帶污染物進入承受水體。因泥砂沖刷流失所攜帶的污染量如下式：

$$WASHQS = WSSD \times POTFW \quad (1)$$

其中 $WASHQS$ 為因泥砂流失所攜帶的污染物通量($lb/acre/interval$)； $WSSD$ 為泥砂沖刷量($tons/acre/interval$)； $POTFW$ 則為沖刷攜帶能力因子(lb/ton)。

因土壤沖蝕所攜帶的污染量如下式：

$$SCRQS = SCRSD \times POTFS \quad (1)$$

其中 $SCRQS$ 為因土壤沖蝕所攜帶的污染物通量($lb/acre/interval$)； $SCRSD$ 為土壤沖蝕量($tons/acre/interval$)； $POTFS$ 則為沖蝕攜帶能力因子(lb/ton)。

$WASHQS$ 、 $SCRQS$ 之和，代表某土地利用之泥砂運移所攜帶之污染物總量，因此

$$SOQS = WASHQS + SCRQS \quad (16)$$

其中 SOQS 為泥砂運移所攜帶之總污染量($lb/acre/interval$)。

QUALOF 模擬和漫地流有關之運移與累積量。考慮漫地流所引起之泥砂沖刷與累積過程，漫地流沖刷污染量的通式如下：

$$SOQO = SQO \times [1.0 - e^{(-SURO \times WSFAQ)}] \quad (17)$$

其中 SOQO 為地表沖刷之污染物通量($lb/acre/interval$)；SQO 為地表有效污染物儲存量($lb/acre$)；SURO 為地表逕流($in/interval$)；WSFAC 則為污染物沖刷敏感度($1/in$)。

考慮污染物每天經由沖刷和累積的過程，地表之有效污染物儲存量計算如下：

$$SQO = ACQOP + SQOS \times \left(1 - \frac{ACQOP}{SQOLIM}\right) \quad (18)$$

其中 ACQOP 為污染物累積量($lb/acre/day$)；SQOS 為 SQO 的初始值($lb/acre$)；SQOLIM 則為無沖刷時，污染物最大存量($lb/acre$)。

QUALIF 為和中間流有關之模擬，其設定各污染物在中間流之濃度值，每月的值可以隨當地氣候、水文條件而有所不同。

QUALGW 則模擬地下水流，因此需設定各污染物在地下水流之濃度值，每月的值可以隨當地氣候、水文條件而有所不同。

3.2.4 GQUAL 模組

GQUAL 主要在模擬一般水質行為，考慮和泥砂之吸附、脫附、衰減關係，及化合物本身的水解、氧化、光解、揮發、生物等作用，計算水中模擬物質之濃度或負荷量。河段中來自上游河段、支流土地面積、大氣沈降等之溶解污染物總輸入量為：

$$INDQAL = IDQAL + SAREA \times ADFX + SAREA \times PREC \times ADCN \quad (19)$$

其中 INDQAL 為河段中溶解污染物之總輸入量($mg/interval$)；IDQAL 為來自上游河段或支流土地之溶解污染物輸入量($mg/interval$)；SAREA 為河段表面積(in^2)；ADFX 為乾或總大氣沈降通量($mg/in^2/interval$)；PREC 為降雨深度($in/interval$)；ADCN 則為濕大氣沈降的濃度值(mg/l)。

污染物之衰減作用可藉由 DDECAY 模擬，其根據一些化學或生物方法，衰減作用考慮以下六個過程：水解、氧化、光解、揮發、生物及廣義的一階衰減反應。

A. 水解作用

$$KHYD = (KA \times 10.0^{-PHVAL} + KB \times 10.0^{(PHVAL-14.0)} + KN) \times THHYD^{TW20} \quad (20)$$

其中 KHYD 為污染物水解比例常數；KA 為 pH=5 的水解係數；PHVAL 為河段中水的 pH 值；KB 為 pH=9 的水解係數；KN 為 pH=7 的水解係數；THHYD 為水解作用之溫度修正係數。TW20=TW-20；TW 則為水溫(°C)。

B. 氧化作用

$$KROX = KOX \times ROC \times (THOX^{TW20}) \quad (21)$$

其中 KROX 為污染物氧化比例常數；KOX 為二階氧化分解係數；ROC 為原有的自由氧濃度(mole/l)；THOX 為氧化作用之溫度修正係數。

C. 光解作用

$$KPHOL = \left(\frac{PHI \times INLITL}{DEP} \right) \times FSLAM \times FQLAM \quad (22)$$

其中 KPHOL 為污染物光解作用的損失率；PHI 為光解作用的反應量(moles/einstein)；INLITL 為入射光強度(einsteins/cm²/day)；DEP 為水深；FSLAM 為被系統吸收的光線；FQLAM 為系統中被污染物吸收的光線。

D. 揮發作用

$$KVOL = KOREA \times CFGAS \quad (23)$$

其中 KVOL 為污染物揮發作用的損失率；KOREA 為氧再曝氣係數；CFGAS 為揮發率和氧再曝氣率的比例。

E. 生物作用

$$KBIO = BIOCON \times BIO \times (THBIO^{TW20}) \quad (24)$$

4)

其中 KBIO 為污染物生物反應比例常數；BIOCON 為二階生物分解係數；BIO 為生物濃度；THBIO 為生物作用之溫度修正係數。

F. 廣義的一階衰減作用

$$KGEN = KGEND \times THGEN^{TW20} \quad (2)$$

5)

其中 KGEN 為污染物一階衰減率；KGEND 為污染物基本一階衰減率；THGEN 為一階衰減作用之溫度修正係數。

經過衰減過程，則污染物之總衰減損失量由下式表示：

$$DDQALT = DQAL \times (1.0 - e^{-KTOTD}) \times VOL \quad (2)$$

6)

其中 DDQALT 為污染物之總衰減損失量($mg/interval$)；DQAL 為溶解污染物之濃度值(mg/l)；KTOTD 為模擬期間污染物總衰減率($/interval$)；VOL 為河段水體積(l)。

ADVQAL 模組主要模擬泥砂物質的交替作用，主要針對吸附於泥砂之污染物，考慮沈澱、沖蝕過程中懸浮和底床的泥砂交換，是接續 SEDTRN 副程式中的底床沖蝕過程，若部分泥砂從底床被沖蝕出，則沖蝕出的污染量為：

$$DSQAL = BQAL \times DEPSCR \quad (2)$$

7)

其中 DSQAL 為從底床泥砂沖蝕/沈澱之污染量($mg/l*ft^3/interval$)；BQAL 為底床泥砂中之吸附污染物濃度 (mg/mg)；DEPSCR 為從底床沖蝕/沈澱之泥砂量 ($mg.ft^3/l/interval$)。

沖蝕後懸浮泥砂的污染量濃度為：

$$SQAL = \frac{(ISQAL + RSQALS - DSQAL)}{(RSED + ROSED)} \quad (2)$$

8)

其中 SQAL 為懸浮泥砂中之吸附污染物濃度(mg/mg)；ISQAL 為入流泥砂中之污染量($mg/l*ft^3/interval$)；RSQALS 為懸浮泥砂之污染量($mg/l*ft^3$)；RSED 為模擬最終之懸浮泥砂量($mg.ft^3/l$)；ROSED 為模擬時間之泥砂出流量($mg.ft^3/l/interval$)。

若部分懸浮泥砂沈澱，則沈澱的泥砂污染量為：

$$DSQAL = SQAL \times DEPSCR \quad (2)$$

沈澱後懸浮泥砂的污染量濃度為：

$$SQAL = \frac{(ISQAL + RSQALS)}{(RSED + DEPSCR + ROSED)} \quad (3)$$

考慮底床與懸浮泥砂之轉換過程，則該河段吸附於泥砂之污染物總出流量為：

$$ROSQAL = ROSED \times SQAL \quad (3)$$

其中 ROSQAL：泥砂吸附之污染物總出流量(mg/l*ft³/interval)。

ADECAY 模組主要模擬吸附物質的衰減作用，其考慮到包含懸浮和底床泥砂的衰減，使用一階衰減法計算模擬時間內吸附污染量的衰減率：

$$FACT = 1.0 - e^{(-DK)} \quad (3)$$

其中 FACT：模擬時間內吸附污染量的衰減率；DK：溫度修正後之泥砂物染物衰減率。

衰減後泥砂污染物之濃度計算為：

$$DCONC = SQAL \times FACT \quad (3)$$

最終衰減後之泥砂污染量計算為：

$$SQDEC = DCONC \times RSED \quad (3)$$

其中 SQDEC：泥砂衰減後之污染量(mg/l*ft³/interval)；DCONC：泥砂衰減後之污染量濃度(mg/mg)。

四、翡翠水庫集水區非點源污染及流量之推估

模擬結果之正確性，必須藉由模式的參數率定與驗證過程來提升其可信度。率定方式是調整每項有關之參數，使得模擬結果與實測資料最接近的一組參數值；驗證方式是利用率定結果之參數值，進行連續性之模擬，使得模擬結果亦能接近實測資料值。正確可靠的操作方式，必須基於完整的環境資料蒐集，同時並配合長時間多次觀測資料的率定，才能表達出適當之物理行為（李鴻源等，1991）。率定與驗證之程序，首要為水文

模擬，其次為泥砂傳輸，再者為水質模擬，因此，要有好的水質模擬結果，需先有良好的水文模擬基礎。

將翡翠水庫集水區劃分為四個子集水區進行模擬演算，根據翡翠水庫管理局提供之流量資料及水庫水域、支流採樣之水質監測資料，做為參數率定與驗證之依據。率定過程先依據本研究區域之環境特性，設定部分可掌握之參數值，再參考過去學者對 HSPF 模式之參數率定值，配合各參數之特性調整，以找到一組合理之參數值，並驗證之。

4.1 水文參數率定與驗證

本研究選用資料最完整且流量有明顯變化時期之降雨情形，模擬連續暴雨之日流量變化，進行參數率定及模式驗證，因此將資料區切割為三組資料，分別作為參數率定、模式驗證與模式測試使用，其中用於模式參數率定及模式驗證之資料為完全獨立之資料，而全部資料則作為模式測試使用。北勢溪、金瓜寮溪及鯉魚堀溪子集水區之日流量資料為實測值，而水域子集水區所使用之流量資料為翡翠水庫大壩站日流量實測資料減去其上游三個子集水區之日流量實測資料

圖 6 為金瓜寮溪子集水區水文率定及驗證結果，圖 7 則為 2001 年至 2003 年北勢溪子集水區、金瓜寮溪子集水區及鯉魚堀溪子集水區日流量模擬結果，以相關係數 (R^2) 檢驗觀測值與模擬值兩組資料間之線性相關性 (R^2 愈接近 1 表模擬值愈接近觀測值)，各子集水區流量率定、驗證之模擬值與觀測值相關係數計算結果如表 4 所示，顯示模擬值與觀測值之相關性頗高。

4.2 水質參數率定與驗證

以 2001 年翡翠水庫集水區每季懸浮固體物監測數據進行參數率定，以 2002 年翡翠水庫集水區每季懸浮固體物監測數據進行參數驗證，在北勢溪、金瓜寮溪及鯉魚溪子集水區懸浮固體物參數率定與驗證所使用之觀測值為各子集水區下游出流口水質監測站之實測資料，而翡翠水庫集水區全區懸浮固體物參數率定與驗證所使用之觀測值為水域表水八處採樣點之平均水質。

模式經率定與驗證後，各子集水區懸浮固體物之模擬結果如圖 8 所示。懸浮固體物之觀測數據相當有限，缺乏連續性及暴雨觀測資料，模式率定及驗證無法以更精確之逐日變化進行，模擬結果顯示與觀測值大致吻合。

以 2001 年每月總磷及氨氮監測數據進行參數率定，以 2002 年每月總磷及氨氮監測數據進行參數驗證，在北勢溪、金瓜寮溪及逮魚溪子集水區總磷及氨氮參數率定與驗證所使用之觀測值為各子集水區下游出流口水質監測站之實測資料，而翡翠水庫集水區全區總磷及氨氮參數率定與驗證所使用之觀測值為水域表水八處採樣點之平均水質。各子集水區總磷及氨氮之模擬結果，如圖 9 與圖 10 所示。

同樣地，以相關係數檢驗懸浮固體物、總磷及氨氮觀測值與模擬值兩組資料間之線性相關性，各子集水區懸浮固體物、總磷及氨氮之率定、驗證之模擬值與觀測值相關係數整理如表 5 所示，顯示模擬結果與觀測值大致吻合。如同於懸浮固體物之模擬，總磷與氨氮模擬受限於觀測數據之不足，無法以連續性或暴雨資料進行率定，模擬結果之正確性建立於水文模擬之良窳。

根據率定及驗證後的水文、水質模式，模擬 2001 年至 2002 年各子集水區之懸浮固體物、總磷及氨氮總污染量，整理如表 6（2001 年）、表 7（2002 年）所示，2001 年所模擬的流量與懸浮固體物、總磷及氨氮之總污染量皆大於 2002 年所模擬的結果，且由翡翠水庫歷年年降雨降雨量資料得知，2001 年及 2002 年之年降雨量分別為 5134.3 mm 及 2512.0 mm，因此，本研究所模擬之流量與懸浮固體物、總磷及氨氮之總污染量應為合理之結果。

歷年國內研究單位應用 BASINS/HSPF 針對翡翠水庫集水區非點源污染總磷量之推估，整理如表 8 所示，2001 年為相同計算年份，本研究所計算翡翠水庫集水區全部四個子集水區之總磷量為 18,935 kg/yr，（林鎮洋等，2001-2003）模擬北勢溪、金瓜寮溪及逮魚溪三個子集水區之總磷量為 10,450 kg/yr，加上本研究所模擬 2001 年水域子集水區之總磷量為 15,741 kg/yr 來判斷，總磷量模擬結果相差並不算大。

污染量之推估會因欲推估之該年度水文、氣象、土地利用狀況之改變及推估方式之不同而有所不同，本研究經過實際監測資料率定及驗證模式後得到 2001 年翡翠水庫集水區非點源年輸出量總磷為 18,935 kg/yr，氨氮為 25,535 kg/yr。表 9 為以不同方法推估 1992 年至 2001 年之翡翠水庫非點源污染所產生之總磷量，最大值為 1995 年之 35,671 kg/yr，而最小值為 1993 年之 9,677kg/yr。因此，本研究之推估值介於最大與最小值之間，應尚屬於合理範圍內。

五、評估集水區防治優先順序

本研究以系統優化 (System Optimization) 之線性規劃數學模式來評估集水區防治優先順序方法。本研究所建立之線性規劃數學模式是使用簡捷法 (Simplex Method) 來求解，為求能簡便的使用簡捷法來做計算，以求得優化解。

線性規劃數學模式中，包含目標函數 (Objective Function) 與限制式 (Constraint) 兩部分。控制非點源污染的方法，以及其他被認為有效的一些措施，目前皆以「最佳管理作業」(BMP) 稱之，「最佳」一詞是指「經濟而有效」之意 (余嘯雷等，1993)。所以本研究是以最佳管理作業作為消滅非點源污染之方式，並設定最小防治成本為決策目標，即最小防治成本為模式之目標函數。

而模式之限制式以水質標準限制式為主軸，並分為 SS、TP 及 NH₃-N 三項水質標準限制式，根據淡水河水區制定公告 (行政院衛生署 1986 年 2 月衛署環字第 582284 號公告) 中表示翡翠水庫集水區為陸域地面甲類水體，所以水質標準限制式是以陸域地面甲類水體水質標準為依據。

本研究之線性規劃數學模式以翡翠水庫集水區 2001~2002 年為設計時段。根據率定及驗證後之 HSPF 水文、水質模式，進行模擬 2001~2002 年翡翠水庫集水區之各子集水區之流量、SS、TP 及 NH₃-N 濃度，並模擬出 2001 年~2002 年各子集水區之總污染量。

本研究線性規劃數學模式之目標函數及限制式說明如下：

1. 目標函數

以最小防治成本為目標函數

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 C_{ij} \quad (3)$$

5)

本研究非點源污染防治方案有四種，第一種方案為不進行防治 (即零方案)；第二種方案為採用結構性 BMP 之入滲池 (Infiltration Basins) 為防治措施；第三種方案為採用結構性 BMP 之拘留池 (Retention Basins) 為防治措施；第四種方案為採用結構性 BMP 之人工溼地 (Constructed Wetlands) 為防治措施，並以探討其建造之成本為主要成本考量，上述三種結構性 BMP 對 SS、TP 及 NH₃-N 污染物去除效率如表 10 所示，其建造成本則參考美國環保署之相關報告 (USEPA, 1999)。其中其中入滲池之建造成本為

$$C_{ij} = 13.2(35.29 \times X_{ij} \times DT)^{0.69} \quad (3)$$

6)

拘留池之建造成本為

$$C_{ij} = 7.75(35.29 \times X_{ij} \times DT)^{0.75} \quad (3)$$

7)

人工溼地之建造成本則為

$$C_{ij} = 13.2(35.29 \times X_{ij} \times DT)^{0.69} \quad (3)$$

8)

其中 C 為防治措施之成本（美元）； C_{ij} 為編號 i 集水區進行防治措施 j 之成本（美元）； X_{ij} 為編號 i 集水區進行防治措施 j 之處理流量； i 為集水區編號（1 為水域集水區；2 為北勢溪集水區；3 為金瓜寮溪集水區；4 為逮魚溪集水區）； j 為防治措施（1 為無進行防治-零方案；2 為結構性 BMP-入滲池；3 為結構性 BMP-拘留池；4 為結構性 BMP-人工溼地）； DT ：停留時間（Detention Time）。

2. 限制式

(1) 水質標準限制式

由於排出水庫之水質必須維持在水質標準，因此，必須加上水質標準限制式。經過防治措施處理後由 HSPF 模式計算出污染物之濃度，必須小於污染物之陸域地面甲類水體水質標準，並分別設定 SS、TP 與 $\text{NH}_3\text{-N}$ 水質標準限制式：

$$\sum_{i=1}^4 HSPF_k(L_i) \leq QUAL_k \quad \forall k=1 \sim 3 \quad (3)$$

9)

其中 $HSPF_k(L_i)$ 為經過防治措施處理後由 HSPF 模式計算出污染物 k 之濃度 L_i (mg/l)； $QUAL_k$ 為污染物 k 之陸域地面甲類水體水質標準 (mg/l)； k 為污染物項目（1 為 SS；2 為 TP；3 為 $\text{NH}_3\text{-N}$ ）。

(2) 水量限制式

各集水區進行防治之流量不能大於該集水區總流量：

$$X_{ij} \leq Q_i \quad \forall k=1 \sim 3 \quad \forall i=1 \sim 4 \quad (4)$$

0)

其中 Q_i 為編號 i 集水區之總流量。

(3) 非負限制式

所有決策變數均須大於或等於零：

$$X_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

1)

綜合上述的目標函數與限制式，建立本研究之線性規劃數學模式。經求解後，首先得知第一種防治措施即不進行防治（零方案），不能滿足訂定之水質標準限制式，無法求得優化解。進行第二種防治措施（結構性 BMP—入滲池）、第三種防治措施（結構性 BMP—拘留池）或第四種防治措施（結構性 BMP—人工溼地），求解後之結果，表示能符合訂定之水質標準，可求得四個子集水區必須進行防治的水量如表 11~表 13 所示。

由目標函數係數範圍（Objective Coefficient Ranges），可判定何者更具重要性與經濟效益，所以可以由此決定子集水區之防治優先順序；非零偶價（Dual Price）之限制式必是一條關鍵限制式。所以由 LINDO 所分析之結果與敏感度分析，顯示無論是採用人滲池、拘留池或人工溼地為防治措施，顯示子集水區之防治優先順序皆為：水域子集水區為第一順位、北勢溪子集水區為第二順位，而金瓜寮溪子集水區與逮魚溪子集水區無需進行防治；SS、TP 與 $\text{NH}_3\text{-N}$ 三個水質標準限制式中，TP 水質標準限制式為影響模式最關鍵之限制式，由於拘留池和人工溼地對 TP 的去除效率相同（表 9），所以造成各子集水區之需防治水量及比例相同之結果（表 11、表 12）。

BMPs 設施是處理暴雨初期沖刷（First Flush）之暴雨逕流，為使 BMPs 經濟而有效控制非點源污染，將 BMPs 設施界定處理「水質體積」(Water Quality Volume) 為 13 mm (0.5 inch) 之地表逕流，此時之初期暴雨逕流量不大，且濃度最高，在此設計參數下，可達到表 10 之處理效率。本研究提出各方案為理論可行之處理方案，實際執行時尚須搭配非結構性 BMPs 才能達到非點源污染控制目的。

六、結論與建議

6.1 結論

- (1) 翡翠水庫集水區之水域、北勢溪、金瓜寮溪及逮魚溪子集水區，在流量模擬方面，模擬結果顯示觀測值與模式模擬值之相關性良好。在水質模擬方面，水質模擬項目：SS、TP 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ ，限於觀測資料不足，無法進行連續性之水質參數率定與驗證，但是根據良好的水文模擬基礎，模擬之水質結果與觀測值大致吻合。
- (2) HSPF 模式在水質模擬方面，考慮到漫地流沖刷以及河川的稀釋作用等水文現象，使得水文模擬基礎顯得相當重要，所以必須先有良好的水文模擬結果，才能得到合理可信的水質模擬結果。

- (3) 2001 至 2002 年 SS、TP 及 NH₃-N 模擬結果，顯示暴雨期間水質濃度大多高於晴天水質濃度甚多，可推斷為非點源污染所造成。
- (4) 2001 年所模擬之流量與 SS、TP 及 NH₃-N 總污染量皆大於 2002 年所模擬的結果，由於 2001 年及 2002 年之年總降雨量分別為 5134.3 mm 及 2512.0 mm 相差甚大，因此，本研究所模擬之流量與懸浮固體物、總磷及氨氮之總污染量應為合理之結果。
- (5) 評估非點源污染防治區域之優先順序方面，由 HSPF 模式模擬 2001 至 2002 年四個子集水區之 SS、TP 及 NH₃-N 污染量來進行評估，若要符合陸域地面甲類水體水質標準，以最小防治成本為決策目標所建立之線性規劃模式，經由 LINDO 所分析之結果與敏感度分析，顯示無論是採用入滲池、拘留池或人工溼地為防治措施，皆顯示子集水區之防治優先順序為：水域子集水區為第一順位、北勢溪子集水區為第二順位，而金瓜寮溪子集水區與逮魚溪子集水區無需進行防治；SS、TP、NH₃-N 三個水質標準限制式中，TP 水質標準限制式為影響模式最關鍵之限制式。

6.2 建議

- (1) HSPF 模式具有連續性模擬之優勢，但由於翡翠水庫集水區之連續性水質監測資料不足，加上水質採樣時間多為晴天，但是水庫集水區之非點源污染物傳輸大多於暴雨時期，所以增加模擬之困難度。建議主管機關在現有基礎上，增加水質採樣頻率，並增設暴雨採樣項目，監測位置包括主要支流點及特定污染源，以監測、分析集水區內非點源污染對水質之影響。
- (2) HSPF 模式之水文與水質參數眾多，而集水區實際之水文與地文等相關資料有限，若能進行相關資料調查，增加參數的確定性，可增加模擬結果的準確度及調整參數的合理性。
- (3) 本研究將翡翠水庫集水區劃分為四個子集水區，進行非點源污染防治區域優先順序之評估，得知水域子集水區與北勢溪子集水區需進行防治，防治區域範圍甚大，建議將所需防治之子集水區作更小面積之切割，並進行非點源污染之模擬，再次進行非點源污染防治區域優先順序之評估。
- (4) 評估非點源污染防治區域之優先順序方面，本研究建立之線性規劃數學模式是以「經濟因子－防治成本最小」為決策目標，以建造結構性 BMP 之入滲池、拘留池或人工溼地為防治措施，以及符合陸域地面甲類水體水質標準為主要考量，建議應納入

多種防治非點源污染方式（例如其他結構性 BMP 與非結構性 BMP），並且評估其對於各子集水區之適用性及資源的限制，或者採行多目標之決策方式來進行評估，更為完善。

參考文獻

- 蔣本基、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」，台大環工所研究報告第 145 號。
- 逢甲大學地理資訊系統研究中心，2000，「台灣地區重要水庫集水區水資源資料庫建置及保育計畫」，經濟部水資源局。
- 李鴻源、黃良雄、郭振泰、許銘熙、楊錦釧，1991，「水質保護綱要計畫－非點源污染防治計畫研究（二）」，行政院環保署。
- 林鎮洋、黃丕陵、黃正義、陳孝行，2001~2003，「水環境研究中心綜合執行計畫(2/5~4/5)－Part 2 建立前瞻性水質水量管理」，經濟部水利署。
- 余嘯雷、駱尚廉、郭振泰，1993，「台灣地區水庫集水區非點源污染控制技術及策略之研究」，台大環工所研究報告第 354 號。
- Brun et al., 2000, “Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed,” *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 24, pp. 5-22.
- Bosch et al., 2003, “Hydrological and Fiscal Impacts of Residential Development: Virginia Case Study,” *Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 2, pp. 107-114.
- Duda, A.M., 1993, “Addressing Nonpoint sources of water pollution must Become An Interational Priority”, *Water Science and Technology*, vol.28, No.3~5.
- Pionke, H. B., Gburek, W. J., Sharpley, A. N. and Schabel, R. R., 1996, “Flow and Nutrient Export Patterns for an Agricultural Hill-Land Watershed,” *Water Resources Research*.
- Stein, S. M., N. Goulet, T. Kammer, D. Wayne and K. Saffarinia, 1998, “Occoquan Water Supply Protection Tool,” *Water Resources Engineering, ASCE*, Vol. 2, pp. 1159-1164.

Tsihrintzis, V. A., Fuentes, H. R. and Gadipudi, R. K., 1996, "Modeling Prevention Alternatives for Non-point Source Pollution at a Well-field in Florida," Water Resource Bulletin.

Tony, P., Ron, S. H. R., and Merlyn, B., 1989, "Soil Erosion and Nonpoint Sources Pollution Control in an Idaho Watershed," Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 24, pp. 323-328.

M. J. Bergman, W. Green, and L. J. Donnangelo, 2002 "Calibration of storm loads in the south prong watershed, Florida, using BASINS/HSPF," Journal of the American Water Resources Association, Vol.38, No.5, , pp.1423-1436.

USEPA, 1999, Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices, Washington DC, EPA-821-R-99-012.

表 1 PERLND 與 RCHRES 模組副程式功能

模組	副程式	功能說明
PERLND 執行透水區土地之計算	ATEMP	模擬不同高程之溫度
	SNOW	模擬冰雪堆積和溶化
	PWATER	模擬透水區水循環收支變化
	SEDMNT	模擬泥砂之生成及運移
	PSTEMP	估算土壤溫度
	PWTGAS	估算水溫及氣體溶解濃度
	PQUAL	運用水和泥砂之關係模擬水質成分
	MSTLAY	估算土層內之含水量及收支變化
	PEST	模擬更詳細的殺蟲劑反應
	NITR	模擬更詳細的氮反應
	PHOS	模擬更詳細的磷反應
	TRACER	模擬追蹤劑的移動
	RCHRES 執行河段或蓄水庫之計算	HYDR
ADCALC		模擬污染物在水中之延散作用
CONS		模擬保守性不反應污染物之組成
HTRCH		模擬河段中之水溫
SEDTRN		模擬無機泥砂之行為
GQUAL		模擬一般水質行為
OXRX		主要模擬 DO 和 BOD 之平衡
NUTRX		主要模擬無機氮和磷之平衡
PLANK		模擬浮游生物族群變化和相關反應
PHCARB		模擬 pH、CO ₂ 、總無機碳和鹼度

表 2 翡翠水庫集水區土地利用分類表

土地利用種類	水域子集水區		金瓜寮溪子集水區		逮魚堀溪子集水區		北勢溪子集水區		全區集水區	
	面積 (km ²)	比例 (%)	面積 (km ²)	比例 (%)	面積 (km ²)	比例 (%)	面積 (km ²)	比例 (%)	面積 (km ²)	比例 (%)
水體	8.645	10.30	0.106	0.44	0.658	0.84	1.423	1.25	10.832	3.61
林地	68.614	81.74	22.059	91.39	74.710	95.12	100.164	88.13	265.547	88.43
茶園	2.659	3.17	1.380	5.72	1.590	2.02	5.914	5.20	11.543	3.84
果園	0.675	0.80	0.059	0.24	0.275	0.35	0.352	0.31	1.361	0.45
農地	0.043	0.05	0.003	0.01	0.044	0.05	1.243	1.09	1.333	0.44
草地	1.656	1.97	0.238	0.99	0.426	0.54	1.259	1.11	3.579	1.19
荒地	0.860	1.02	0.130	0.54	0.367	0.47	1.857	1.63	3.241	1.08
崩塌地	0.015	0.02	0.011	0.05	0.006	0.01	0.093	0.08	0.125	0.04
建築	0.770	0.92	0.151	0.62	0.464	0.60	1.345	1.2	2.729	0.91
總計	83.937	100	24.137	100	78.54	100	113.65	100	300.29	100

表 3 子集水區之控制雨量站與其控制面積權重

集水區	水域子集水區			北勢溪子集水區			金瓜寮溪子集水區		逮魚溪子集水區	
	雨量站	翡翠	十三股	九芎根	坪林	碧湖	太平	九芎根	坪林	碧湖
權重	0.43	0.35	0.22	0.36	0.11	0.53	1.00	0.14	0.86	

表 4 各子集水區流量模擬率定及驗證之 R² 相關係數

子集水區	水域	北勢溪	金瓜寮溪	逮魚溪
率定	0.90	0.99	0.90	0.99
驗證	0.68	0.93	0.98	0.89
2001~2004 年	0.70	0.84	0.86	0.68

表 5 水質模擬率定及驗證之相關係數

		北勢溪子集水區	金瓜寮溪子集水區	逮魚溪子集水區	翡翠水庫集水區
SS	率定	0.72	0.80	0.95	0.71
	驗證	0.74	0.78	0.76	0.76
TP	率定	0.66	0.71	0.67	0.67
	驗證	0.69	0.65	0.67	0.64
NH ₃ -N	率定	0.75	0.76	0.77	0.72
	驗證	0.74	0.71	0.76	0.75

表 6 各子集水區 2001 年懸浮固體物、總磷及氨氮總污染量

集水區	流量(cms)	SS(kg/yr)	TP(kg/yr)	NH ₃ -N(kg/yr)
水域子集水區	2,086	95,800	4,942	6,573
北勢溪子集水區	3,550	165,000	8,140	10,977
金瓜寮溪子集水區	597	16,914	1,292	1,819
逮魚溪子集水區	2,232	75,792	4,561	6,166
總計	8,465	353,506	18,935	25,535

表 7 各子集水區 2002 年懸浮固體物、總磷及氨氮總污染量

集水區	流量(cms)	SS(kg/yr)	TP(kg/yr)	NH ₃ -N(kg/yr)
水域子集水區	542	42,600	4,122	1,460
北勢溪子集水區	935	60,000	5,126	2,165
金瓜寮溪子集水區	163	2,964	1,849	348
逮魚溪子集水區	511	27,080	4,563	1,339
總計	2,151	132,644	15,705	5,312

表 8 翡翠水庫集水區歷年非點源污染量推估

估算方法	集水區範圍	估算單位	計算 年份	總年降雨量 (mm)	總磷 (kg/yr)
BASINS 模式	逮魚溪子集水區	台北科大土木系	1998	5736.6	3,883
BASINS 模式	逮魚溪子集水區	台北科大土木系	1999	2887.5	1,882
BASINS 模式	逮魚溪子集水區	台北科大土木系	2000	5199.7	3,578
BASINS 模式	逮魚溪、北勢溪、金瓜寮溪子集水區	台北科大土木系	2001	5134.3	10,450
BASINS 模式	翡翠水庫集水區	本研究	2001	5134.3	18,935
BASINS 模式	翡翠水庫集水區	本研究	2002	2512.0	15,705

表 9 歷年翡翠水庫非點源輸出量推估值

估算方法	估算單位	總磷 (kg/yr)
流量推估法	台北自來水事業處 (1992 年)	12,017
單位面積法	巨廷工程顧問公司 (1993 年)	9,677
VAST 模式	台大農工所 (1995 年)	35,671
單位面積法	台大農工所 (1995 年)	10,645
VANTU 模式	台大土木系 (1995 年)	18,659
單位面積法	環保署 (1999 年)	16,136
單位面積法	崑山技院環工系 (1999 年)	16,636
單位面積法	美商傑明公司 (2000 年)	21,618
單位面積法	台北科大土木系 (2000 年)	9,892
BASINS 模式	台北科大土木系 (2001 年)	18,935

表 10 結構性 BMP 針對 SS、TP、NH₃-N 去除效率

BMP 種類	污染物項目		平均去除效率 (%)			
	SS	監測數目	TP	監測數目	NH ₃ -N	監測數目
入滲設施 (Infiltration Practices)	89	2	65	5	83	3
拘留池 (Retention Basins)	70	43	46	44	23	14
人工溼地 (Constructed Wetlands)	76	26	46	37	33	15

資料來源：美國環保署 (USEPA, 1999)

表 11 各子集水區應防治水量及比例（方案 2：結構性 BMP—入滲池為防治措施）

集水區 編號	集水區名稱	需要防治水量 (m ³ /yr)	總水量 (m ³ /yr)	防治比例 (%)
1	水域子集水區	226,998,720	226,998,720	100
2	北勢溪子集水區	41,374,352	387,495,360	10.7
3	金瓜寮溪子集水區	0	65,664,000	0
4	逮魚溪子集水區	0	236,977,920	0

表 12 各子集水區應防治水量及比例（方案 3：結構性 BMP—拘留池為防治措施）

集水區 編號	集水區名稱	需要防治水量 (m ³ /yr)	總水量 (m ³ /yr)	防治比例 (%)
1	水域子集水區	226,998,720	226,998,720	100
2	北勢溪子集水區	157,338,752	387,495,360	40.6
3	金瓜寮溪子集水區	0	65,664,000	0
4	逮魚溪子集水區	0	236,977,920	0

表 13 各子集水區應防治水量及比例（方案 4：結構性 BMP—人工溼地為防治措施）

集水區 編號	集水區名稱	需要防治水量 (m ³ /yr)	總水量 (m ³ /yr)	防治比例 (%)
1	水域子集水區	226,998,720	226,998,720	100
2	北勢溪子集水區	157,338,752	387,495,360	40.6
3	金瓜寮溪子集水區	0	65,664,000	0
4	逮魚溪子集水區	0	236,977,920	0

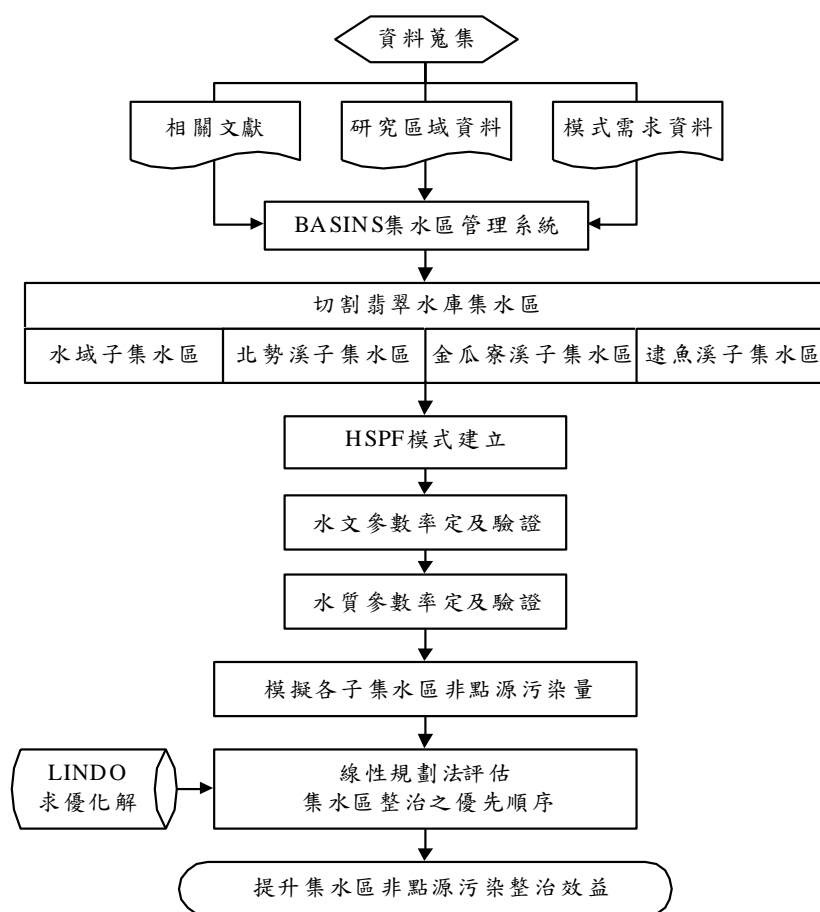


圖 1 研究方法流程

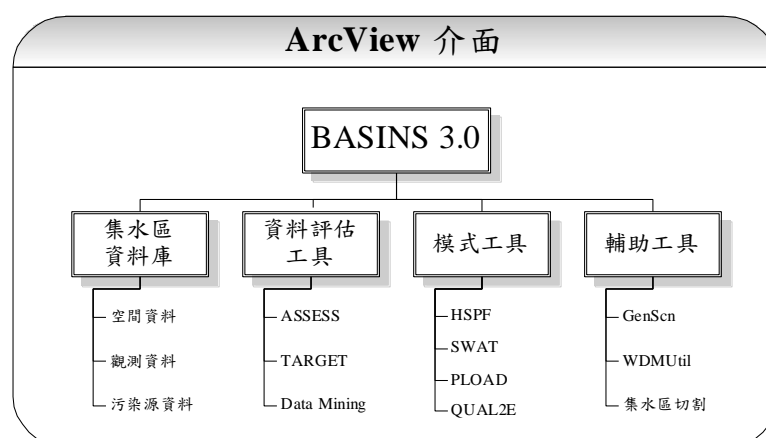


圖 2 BASINS 3.0 系統架構

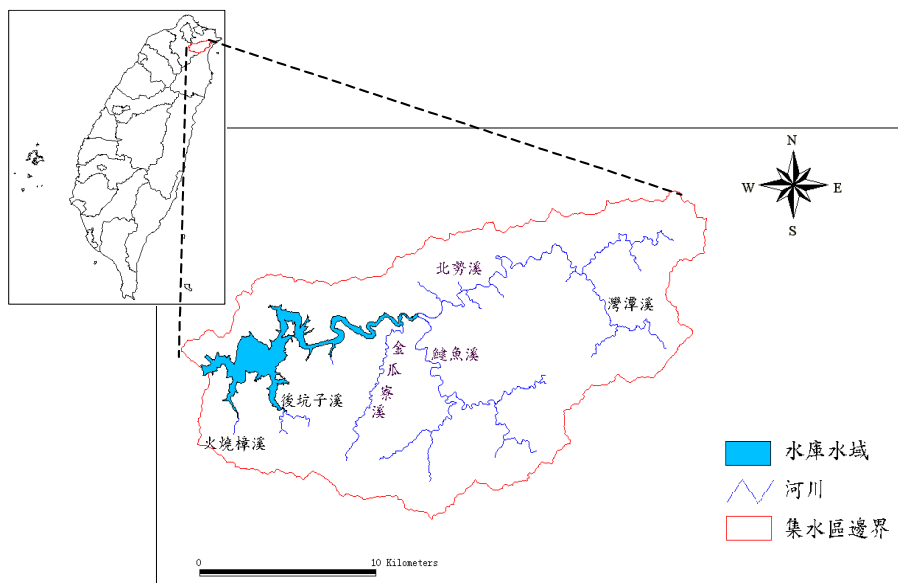


圖 3 翡翠水庫集水區位置與水系

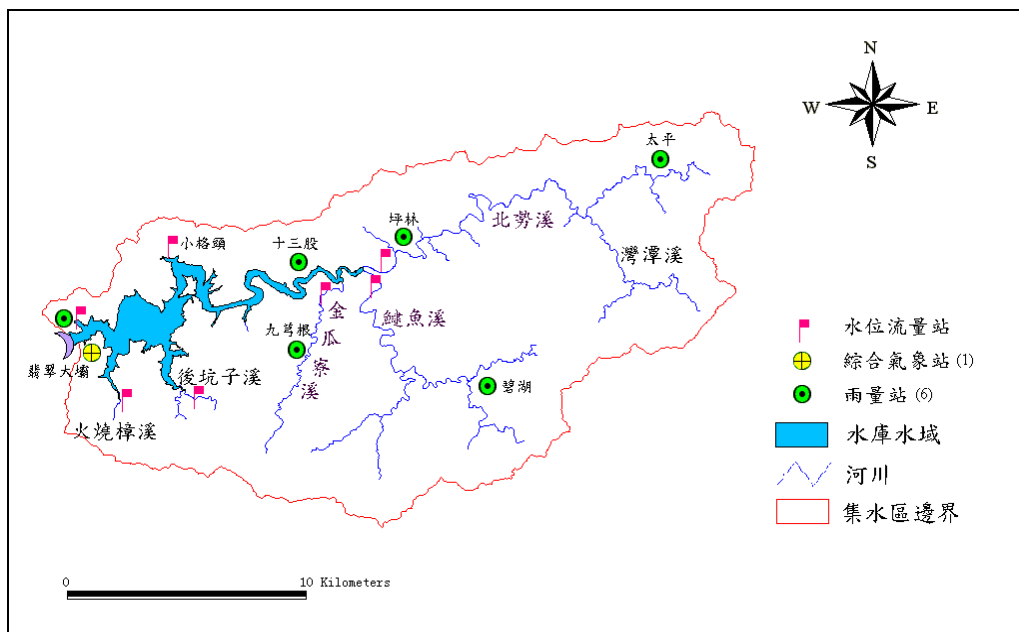


圖 4 翡翠水庫集水區水文氣候站分佈圖

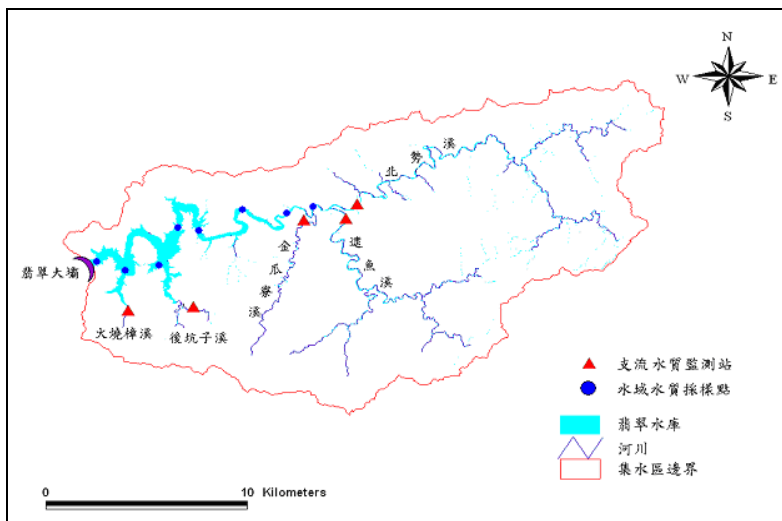
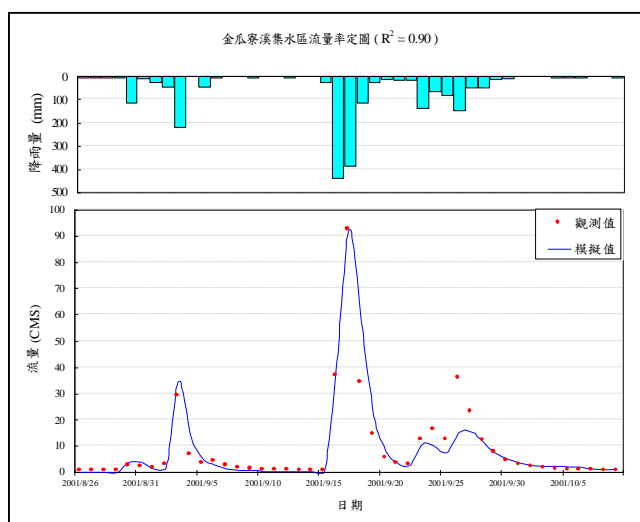
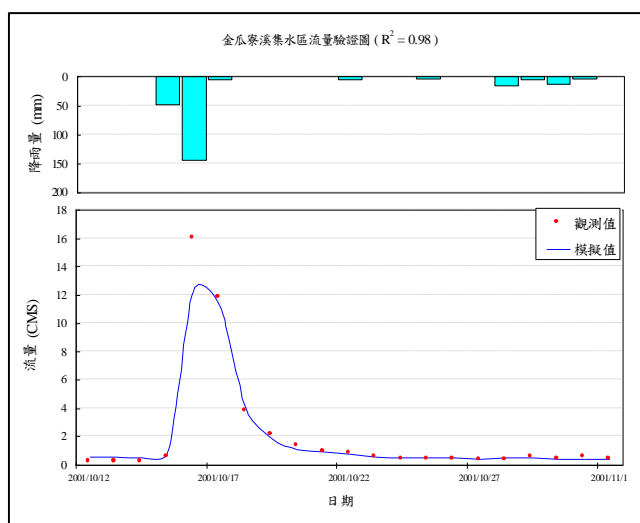


圖 5 翡翠水庫集水區水質監測站位置圖

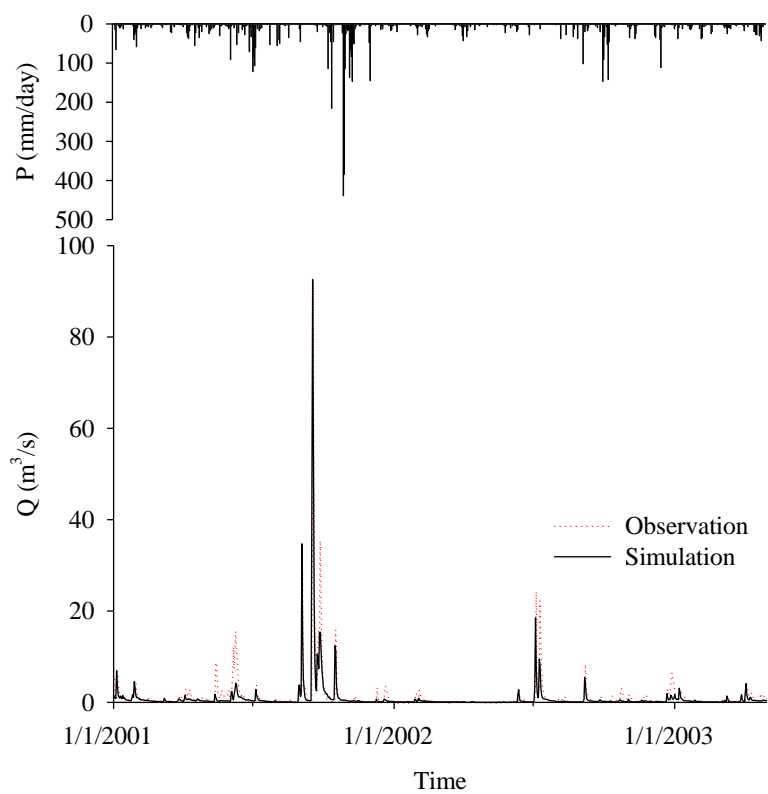


(a)

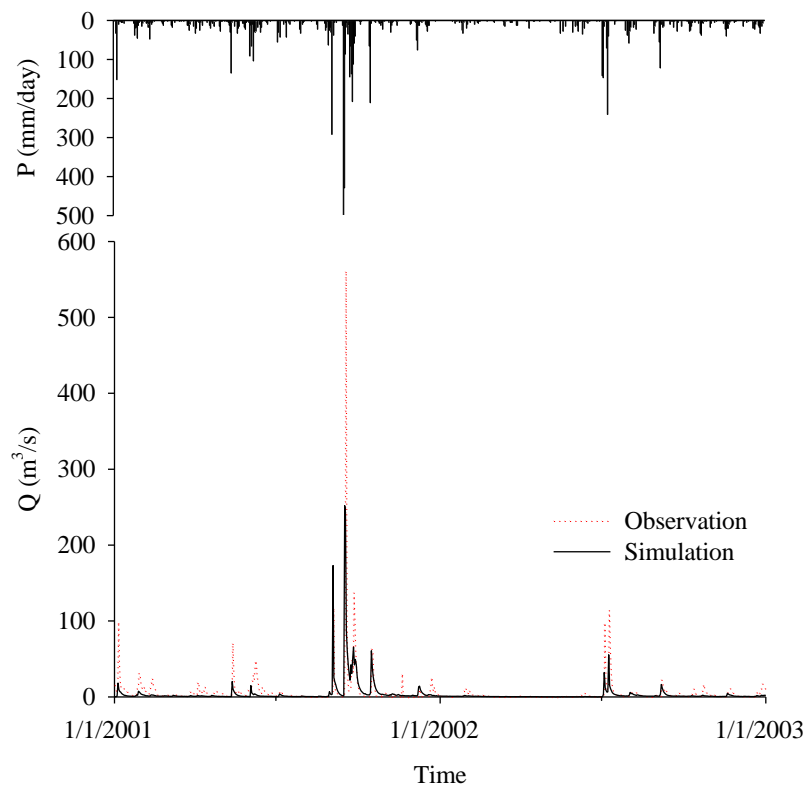


(b)

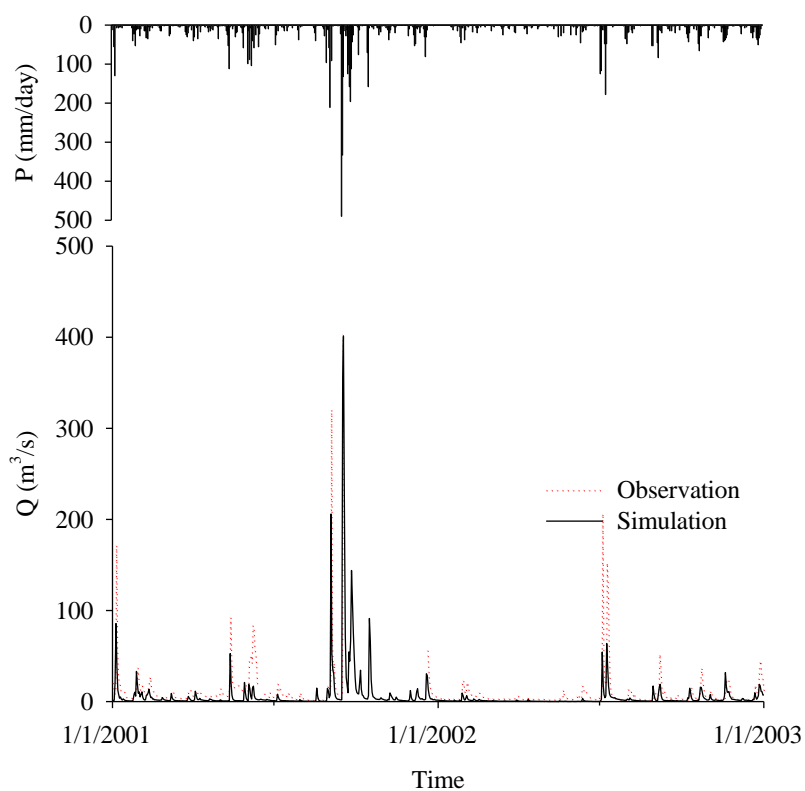
圖 6 金瓜寮溪子集水區；(a)流量率定結果 ($R^2=0.90$)；(b)流量驗證結果 ($R^2=0.98$)



(a)

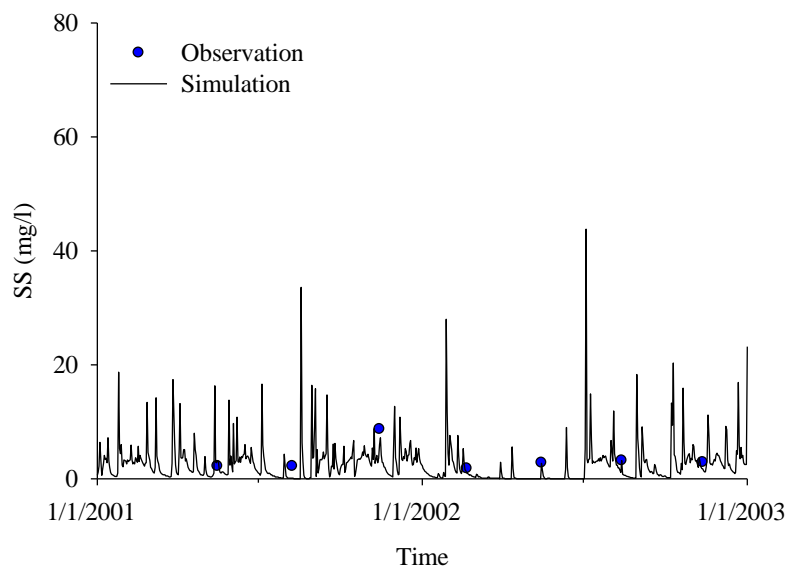


(b)

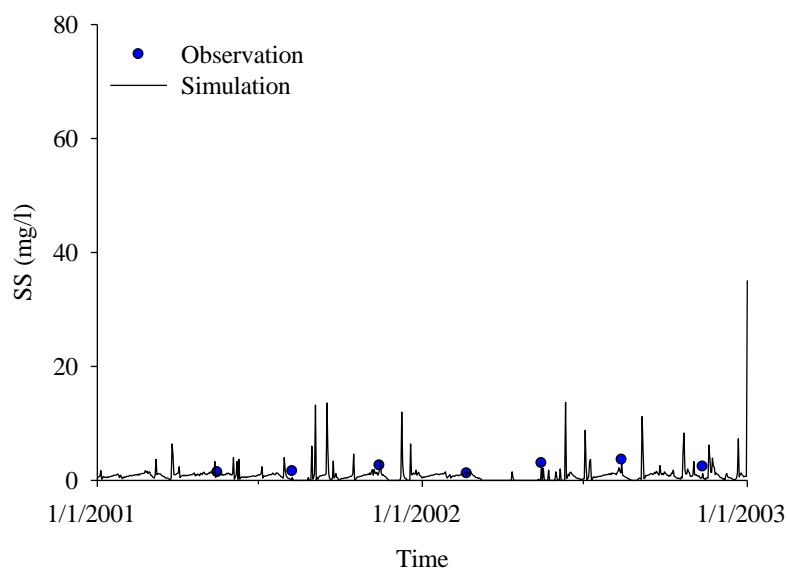


(c)

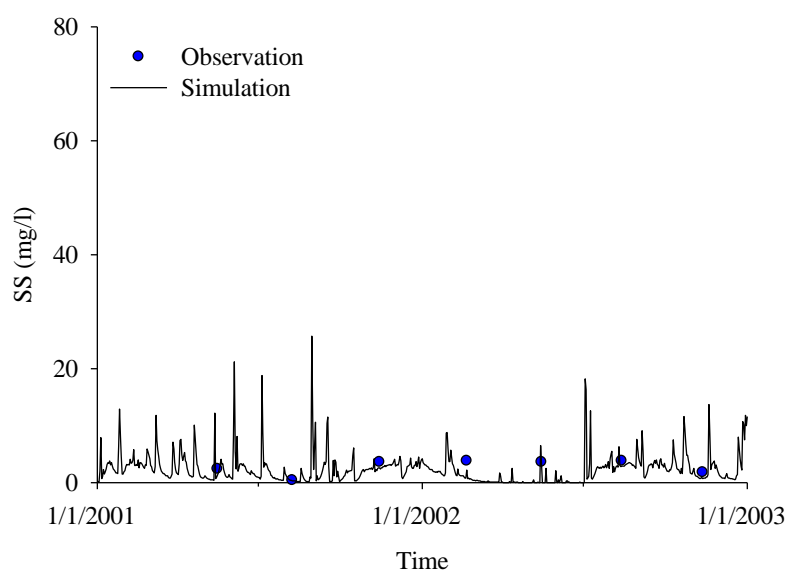
圖 7 2001 年至 2003 年翡翠水庫各子集水區日流量模擬結果；(a) 北勢溪子集水區；(b) 鱸魚堀溪子集水區；(c) 金瓜寮溪子集水區



(a)

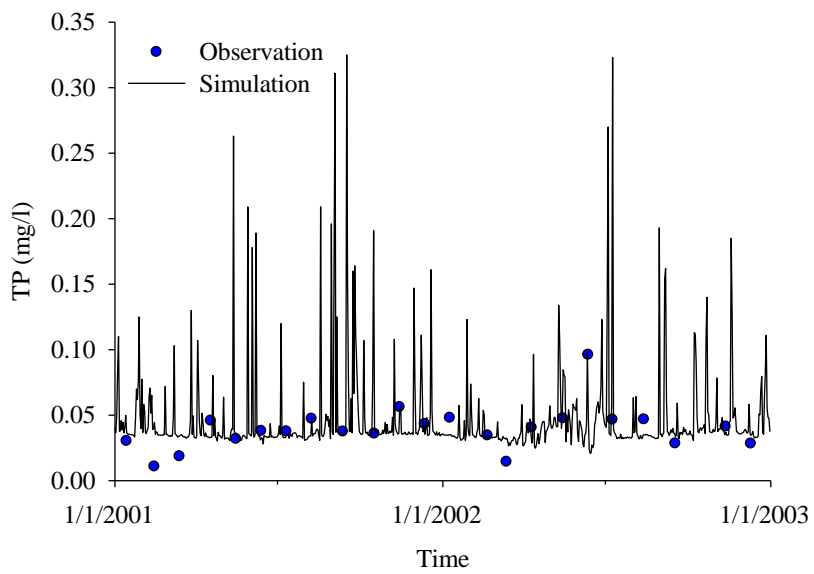


(b)

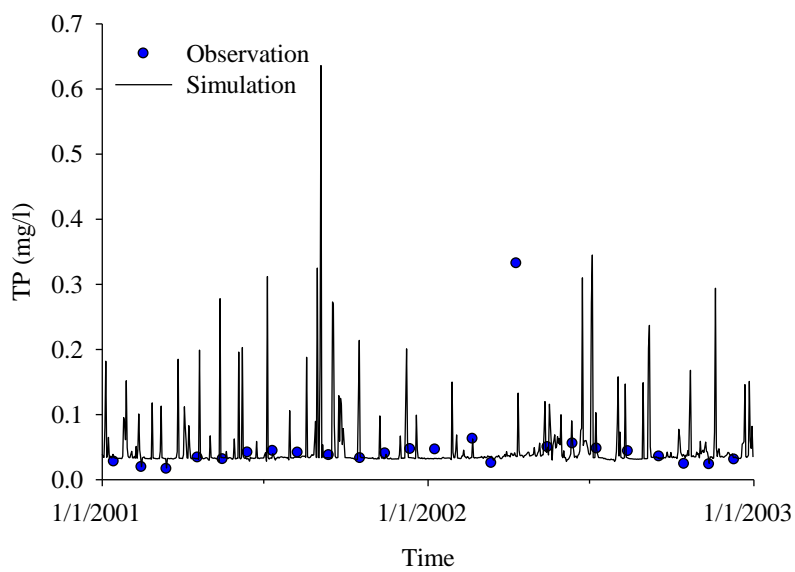


(c)

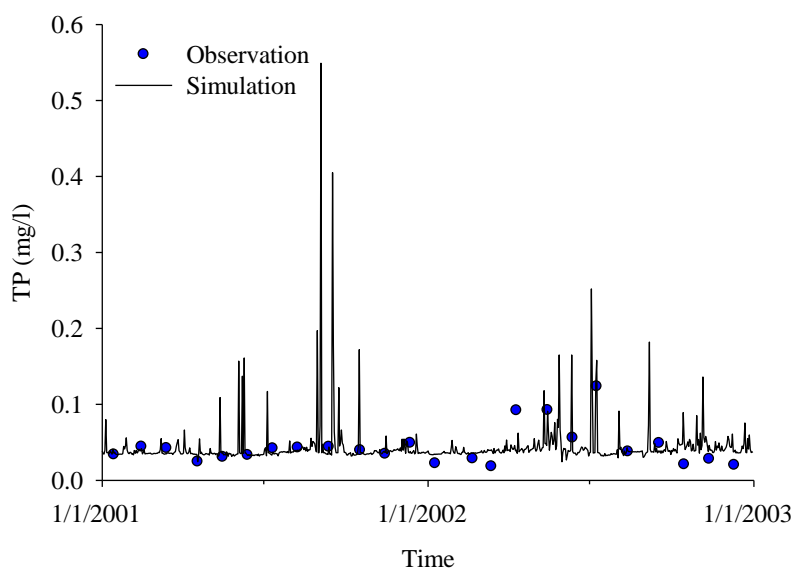
圖 8 各子集水區懸浮固體物之模擬結果；(a) 北勢溪子集水區；(b) 魚堀溪子集水區；(c) 金瓜寮溪子集水區



(a)



(b)



(c)

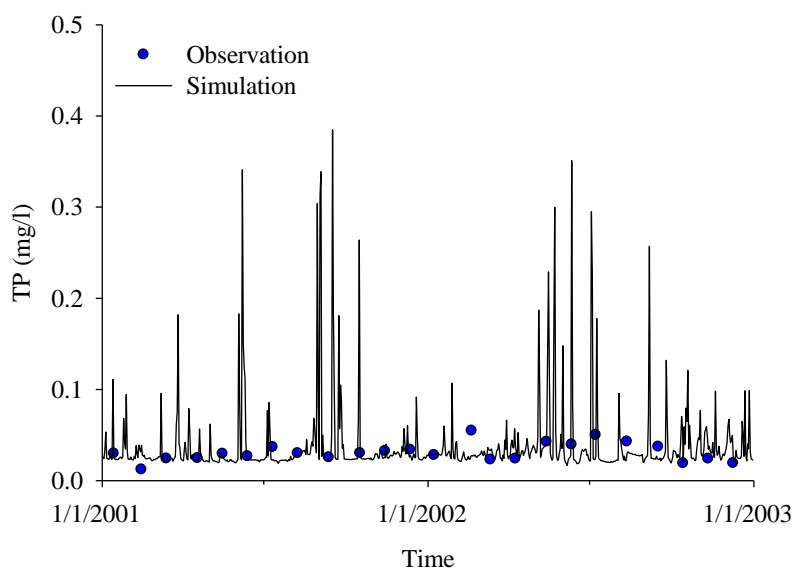
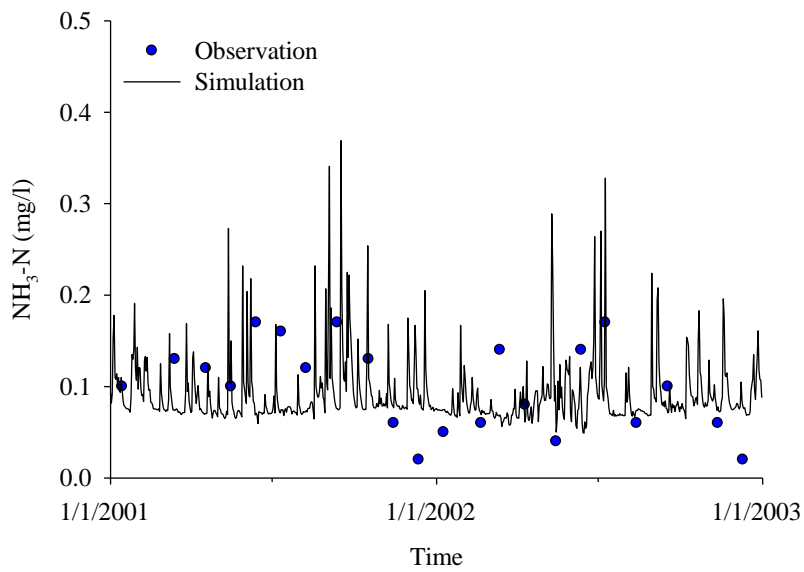
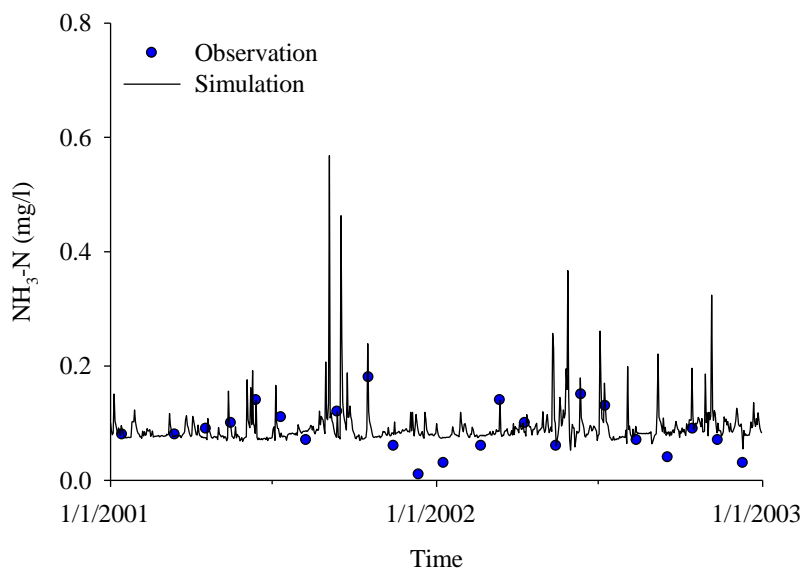


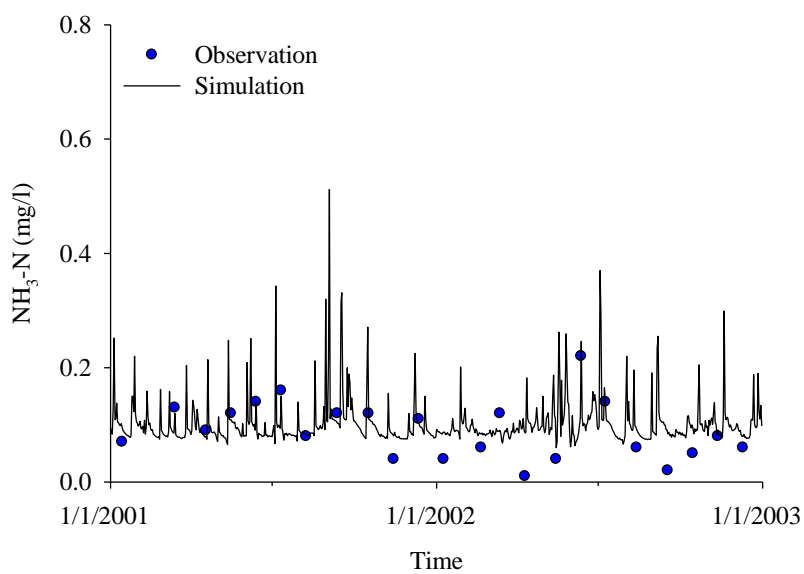
圖 9 各子集水區總磷之模擬結果；(a)北勢溪子集水區；(b)鯉魚堀溪子集水區；(c)金瓜寮溪子集水區 (d)翡翠水庫集水區



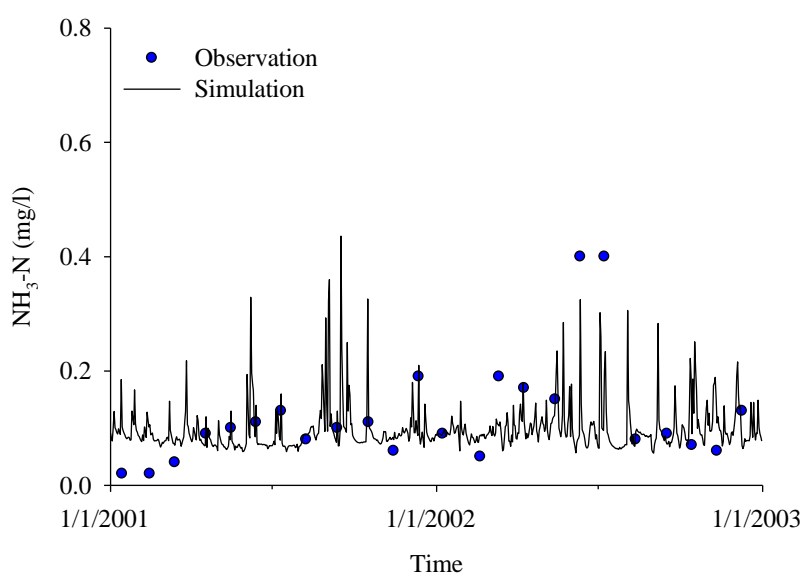
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 10 各子集水區 $\text{NH}_3\text{-N}$ 之模擬結果；(a) 北勢溪子集水區；(b) 鱸魚堀溪子集水區；
(c) 金瓜寮溪子集水區 (d) 翡翠水庫集水區