



QUAL2K 模式應用於河川水質管理 —以筏子溪為例—

陳宜清

大葉大學環境工程系助理教授

柳孟宏

大葉大學環境工程系碩士班研究生

摘要

涵容能力分析為水污染防治規劃工作中重要的一環，其目的在瞭解河川為符合某特定之水質標準時，所能容納之最大污染負荷量，以作為研擬水污染防治方案、水質管理及擬定水體水質標準之參考。而美國環境保護署研發的 QUAL2K 是國內外常用的水質模式，主要用於模擬河川系統在受點源或非點源污染排放下，分析河川水體中各種生化反應過程及水質變化情形，是運用於河川污染整治規劃及水質管理之相當有效且能快速評估之重要工具。本文中以台中市筏子溪污染整治為例，應用 QUAL2K 水質模式來探討點源污染量分區削減量之分配，並說明該模式之內涵及功能。

關鍵字：涵容能力，QUAL2K，水質模式

通訊作者：陳宜清

通訊電話：(04)8511888#2365

傳真電話：(04)8511336

E-mail: yiching@mail.dyu.edu.tw

壹、前言

藉由河川水質嚴重污染河段長度，常反映市鎮系統對於河川水質管理之成效，以及市鎮生活環境品質的概況。廢污水未經處理或處理不當而直接排放入河川，勢必造成河川水質污染，影響水資源供給的質與量。為使水環境有邁向永續利用的可能，必須訂定合理可行的污染排放標準與有效的防治策略及措施，以抑制污染源及污染量。電腦模式是相當快速及有效之評估工具，可估算水體涵容能力後，以總量管制方式來控制污染之排放。

近年來，台灣地區已約有三分之一以上的河段已受到不同程度的污染，特別於西岸河川之中下游段多為中度至嚴重污染。其主要的的原因在於過去未針對河川水體特性，規劃妥善之水質管理方案，造成排入河川水體之污染負荷超出水體涵容能力，形成污染問題；解決方法將朝向就各河川流域有限的涵容能力予以合理地分配給各種污染源之水質管理方案。

自1925年H. Streeter和E. Phelps發展第一個河川水質模式(簡稱S-P模式)以來，水質數學模式在河川水質模擬研究中的應用越來越廣泛。而QUAL2E 則是美國環保署(USEPA)所發展出一個綜合性、多用途的河川綜合水質模式，在國內外已被廣泛應用於河川水質模擬及河川污染整治規劃管理(謝斌暉，1998；黃聖授，2001；葉桂君等，2002；李志賢等，2002；萬騰州等，2002；張秀琴，2004)。本文以台中市筏子溪為例，以應用QUAL2K(依據QUAL2E新改版及增加功能)水質模式來探討點源污染量分區削減量之分配，並說明該模式之內涵及功能。

貳、河川水質管理概念

一、河川涵容能力

河川污染的成因係由於污染物(物質、生物或能量)未經妥善處理排入河川，超過河川的涵容能力(carrying capacity)，致無法進行自淨作用，而變更水的品質，影響河川正常用途，進而危害國民健康及生活環境。因此必須訂定合理可行的污染排放標準與有效的防治策略及措施，以抑制污染源及污染量，才能達成河川分類水質標準的目標，維護生態平衡，確保河川水資源的永續利用。

污染排入河川後，由於河水的稀釋及曝氣作用而減少其污染狀態，有機物則

由微生物利用水中之溶氧，氧化分解為二氧化碳、硝酸鹽及硫酸鹽等，供給藻類營養，這就是河川的自淨作用，而河川如同天然的廢污染物處理廠。而影響水中溶氧主要有（一）脫氧作用：微生物分解廢污水中有機物所消耗的氧量，及（二）再氧化作用：水面曝氣及水生物光合作用。若廢污水中的有機物濃度不高，所消耗的溶氧量尚能由水表面的曝氣作用及藻類植物的光合作用所供給的氧量補充，仍可使河川維持各種正常用途。但若有機物濃度甚高，即使有大量河水，亦不足以稀釋此廢污水至可允許的濃度，甚至降至零而發生厭氧分解，產生甲烷、硫化氫等臭味氣體，如廢污水仍繼續排入，遠超過河川自淨作用，河川將經常處於腐臭狀態，將失去利用價值。

故防治河川污染及水質管理之基本原則，乃是避免妨害河川水體之用途，利用河川來承受或傳輸放流水，是不得超過河川的正常涵容能力。河川涵容能力在不同目標下其定義也有所不同：如 Novotny 等人在 1981 年界定涵容能力係針對在表面水體之用途不致受破壞之情況下，表面水體所能涵容潛在性污染物的能力（Novotny & Olem, 1994）。又如 MacKay *et al.*（1995）則界定水體的環境容量對某一物質，其可存在於水體中但是會引起水質變化時，對被認可使用此水體的使用者無法使用任何方法偵測出該物質有不利的效應下，該物質所存在的量即為水體的涵容能力。而依我國「水污染防治法」的定義，涵容的能力則是在不妨害水體正常用途的情況下，水體所能涵容污染物的量。

二、流域整體性總量管制

近年來，流域整體性總量管制逐漸受到重視，最大日承載量（Total Maximum Daily Load, TMDL）其乃是針對污染嚴重之水體執行水污染防治措施之一，其主要對策係以電腦模式估算水體涵容能力後，以總量管制方式管制之。總量管制係經評估水體涵容能力後，以排放許可等方式，分配該水體水污染排放點源如工廠、礦場、牧場、公有污水處理廠等之排放量。總量管制之指標污染物（如生化需氧量、總氮、總磷等），可視水體水質現況，選擇一種或多種管制之。總量管制的實施應跨行政區域之主體，以整體流域集水區為管制單元，對於流域內所有水污染控制作為進行評估。

國內之河川並未有實施總量管制之經驗案例，而且依「水污染防治法」，目前污染排放管制方式以事業、污水下水道系統或建築物污水處理設施，排放廢（污）水於地面水體者，應符合「放流水標準」，各相關事業之放流水標準的水

質項目及限值，由中央主管機關訂定公告之。此一方式為「排放申請制」，並無如 TMDL 先評估水體涵容能力後，以「排放許可制」方式進行，以及無法以考量整體流域集水區來管制。為了彌補過去水質管理之缺失以及促使各水體水質能達到水體水質標準，近年來總量管制之精神便逐漸被納於我國水污染防治法與水污染防治法施行細則中。

而國內對涵容能力或最大日承載量相關之研究多以選定之模式來評估之，例如有謝斌暉（1998）探討由於非點源污染引起之河川水質污染，在每日最大總污染負荷下，其設計暴雨或河川流量（歷線）應選擇之型式及大小，採用模式有 QUAL2E, VAST, WASP5 等。如林鎮洋等（2000）運用集水區水質總量管制模式來進行集水區經營之探討。如黃鈺真（2000）用 HSPF 模式模擬整個集水區的流量歷線及污染物歷線，並將率定、驗證後之 HSPF 模式參數，用以推估曾文水庫集水區之污染負荷。如童慶斌等（2004）應用 HSPF 模式建立水質總量管制評估方法應用於鹽水河流域，以最佳化方式分配可容許排放總量與管理單元。林亮君（2005）利用移動平均數、移動標準偏差和相關分析來估算高屏河流域水文環境的時間性與空間性，及利用蒙地卡羅模擬法來模擬流量的隨機性，在不確定環境下估算並分配河川的涵容能力。

參、河川水質模式

一、河川水質模式之概述

河川水質受水理、水文、物理反應、生化反應、地理狀況及人口生活型態等因素所影響，故水質的變化十分複雜，為了解各水質項目的變化及分佈，則可以水理、生化等理論為基礎，針對影響水質變化及傳輸作用的各因子，建立成一數學模式，來代表水質系統的現象；並且可藉由改變某些參數來觀察某一參數對水質系統的影響，以供現況水質模擬及預測未來水質狀況。

水質模式發展至今，已能涵蓋河川、湖泊、感潮河川、濕地等水體；模擬項目上也由簡單的BOD-DO模式，發展到優養模式、毒性模式。在模式計算上，也從定常態模擬發展到動態模式，並藉由與動態水理模式的連結，使模擬過程能更接近實際狀態；再加上電腦科技的提升，模式的維度也從簡單的一維模式，發展

到二維或三維模式。常用水質模式種類甚多，其中絕大多數來自於美國環保署與相關單位合力推動之模式。較廣泛被利用者諸如ESTUARY、WQRRS、BASINS、HSPF、QUAL2E (或QUAL2K)、WASP等，其各自之功能、與應用性均略有不同。一般而言，在選擇適當模式以模擬河川水質時，應至少考慮下列因素：

- (一) 是否能達成計畫之目的；
- (二) 是否能掌握所欲模擬河川之特性；
- (三) 是否曾應用於實際之河川系統並獲致預期成果；
- (四) 是否易於取得；
- (五) 是否易於使用及修改；
- (六) 其理論背景及說明是否完整。

通常好的模式未必是複雜的模式，而其決定則完全取決於計畫的需求程度。愈複雜的模式所能模擬的狀況愈多，但其所需要的資料也愈多，所花費的人力、時間與經費亦自然相當可觀。依本計畫所需要使用的模式複雜性及資料需求度而言，程度上並不需要龐大複雜之模式，而前述之常用模式中一維水質模式 QUAL2E (或 QUAL2K) 則是相當簡易、準確且易學之有效模式，常被環境工程及管理方面相關人員所使用。

二、QUAL2模式之發展

QUAL2模式可模擬定常態 (steady state) 及擬動態 (pseudo dynamic) 下的樹枝狀混合均勻的河川水質；適用水體為感潮或非感潮河川，可模擬之污染物有 DO、BOD、藻類、有機氮、氨氮、亞硝酸鹽氮、有機磷、溶解磷、大腸桿菌等，應用性頗高。QUAL2 模式全名為 “The Enhanced Stream Water Quality Model”，是由美國環保署(EPA) Athens Research Laboratory 的暴露評估模擬中心所發展的。原始的QUAL- I I 模式乃是在1972年Water Resources Engineers, Inc. (WRE) 在與U.S. EPA的合作之下更改及擴充由F.D. Masch and Associates及Texas於1970年在Water Development Board所發展的QUAL- I 河川水質模式為基礎來建立的；該模式並且為反應不同使用者的需求而發展出許多不同的版本，後來經由覆審、編輯及修正後被廣泛使用，改良過之QUAL- I I 模式被重新命名為QUAL2E (或簡稱Q2E)。爾後，此模式亦繼續改良，加入了河段氣象因子、模式模擬之不確定性分析等功能。

該模式可提供使用者詳細說明及預測污染物對自然水體的影響，以作為水污

染相關管理決策分析之依據，是一套相當完備的模式，而且它是免費軟體，也提供原始的程式碼可供彈性修改。然而，原來 Q2E 之應用以 DOS 作業系統為主，其後雖然可應用於 Windows 系統，但仍以虛擬 DOS 視窗而為之，使用上略有不便。而 QUAL2K（或簡稱 Q2K）則是美國環保署自 1987 年進行對 Q2E 的修改，於 2003 年公佈之新版本，可適用於新的電腦作業系統如 Windows ME/2000/XP+/MS Office 2000 or Higher 等，其結合了微軟視窗環境下的 EXCEL 及 VBA 軟體，並具有圖像化交談界面（GUI）功能。而模擬功能方面，破除原 Q2E 等間距河段而改用不等間距河（unequally-spaced reaches）段輸入，另外修正缺氧狀況（anoxia）模擬、含泥砂水質之模擬（sediment-water interactions）、光衰減（light extinction）、底藻類（bottom algae）及病原（pathogens）等模擬，其基本資料如表 1 所列。目前 EPA 也正推廣 Q2K 來取代 Q2E，因此本計畫將嘗試使用 Q2K 模式來演算。

以往國內應用 Q2E 於河川水質研究者較多，例如採用 Q2E 模式來探討由於非點源污染引起之河川水質污染，在每日最大總污染負荷下，其設計暴雨或河川流量應選擇之型式及大小（謝斌暉，1998）。又如採用 Q2E 模式對高屏溪涵容能力之評估，探討河川污染惡化的關係，使得政府修訂適當法律並強制執行放流水標準，以有效管理河川及控制污染情形（黃聖授，2001）。又如在輔助東港流域的養豬業管理，以 Q2E 河川水質模式來配合執行（葉桂君等，2002）。又在水質管理決策之評估方面，結合 Q2E 模式與地理資訊系統來完成（萬騰州等，2002）。又如利用 Q2E 水質模式模擬淡水河系興建污水下水道之水質影響，模擬單一流域與全流域普及率對淡水河系之比較分析，以建立一套完整規劃淡水河流域水體水質之管理系統（張秀琴，2004）。而 Q2K 之使用則是近年來開始轉型，如探討水稻田面積變化及其灌溉尾水排入對河川水質的影響，以非點源輸入來應用模式及地理資訊系統評估之案例（張鈞凱、張慶源，2005）。

表 1 Q2K 模式基本資料

目前版本	1.0
發行日期	2003 年 12 月 1 日
作業系統	Windows ME/2000/XP + MS Office 2000 or Higher

運算方式	EXCEL 及 VBA
適用對象	環工工程師/研究人員，政府部門相關人員
關鍵字	水生物學(aquatic biology)、評價(assessment)、符合法規(compliance)、排放(discharge)、環境效應(environmental effects)、水文(hydrology)、非點源釋放(NPS related)、國家污染排放免除系統(NPDES)、點源(point source)、地表水(surface water)、測試/分析(test/analysis)、最大日承載量相關議題(TMDL related)
傳輸介質	地表水
污染物 類型	傳統污染物 (氮 Nitrogen、磷 Phosphorus、溶氧 Dissolved Oxygen、生化需氧量 BOD、底泥需氧量 Sediment Oxygen Demand、藻類 Algae)、酸鹼度 pH、浮游植物 Periphyton、病原體 Pathogens

(引自 USEPA 網頁 <http://www.epa.gov/ATHENS/wwqtsc/html/qual2k.html>)

三、Q2K 水質模式功能

(一) 河段模擬

Q2K 模式假設河水中物質的主要傳輸方式為沿著河川縱軸流向上的傳輸 (Advection) 及延散 (Dispersion)，亦即假設該模式為一維模式。該模式允許許多個廢污水同時排放、汲水、支流流入以及沿著河道增加加入流量與出流量，同時也有計算需要的稀釋流量以達到河段要求的溶氧水質標準。

不同於Q2E可直接模擬系統河道 (主支流)，Q2K以模擬單一河道為準，但支流可用點源方式輸入，模擬系統如圖1所示範例。河道由數個河段 (reach) 所組成，每個河段可定義其上下游斷面之相關地理位置，且不同於Q2E必須區分為等長河段，Q2K可視需要輸入不同長度之河段。河道必須先定義出上下游邊界，河段由上游往下游依序編號，其間可輸入點源 (point sources) 及非點源 (non-point sources)，也可以輸入引水點 (point abstraction) 及引水段 (non-point abstraction)；兩河段之間為斷面，中間斷面也可以模擬為堰 (weirs) 或跌水 (waterfalls)。

(二) 水理模擬

Q2K模式本身並無動態水理計算功能，僅能靠經驗式來計算相關之水理，說明如下：

1. 水量平衡：

在定常態下之各河段流量連續公式為前後河段及流入流出之平衡式：

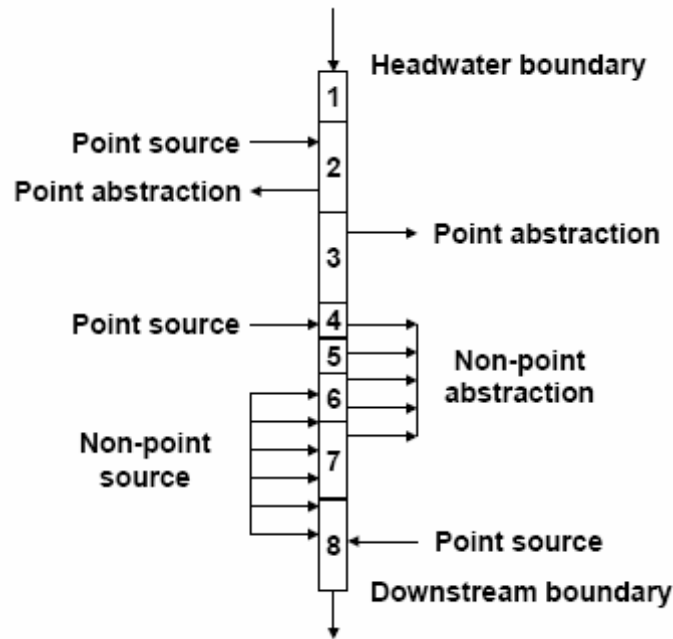


圖 1 Q2K 模擬河道系統圖 (引用 Chapra & Pelletier, 2003)

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \quad (1)$$

其中 Q_i = 河段 i 流到河段 $i+1$ 之流量， Q_{i-1} = 河段 $i-1$ 流到河段 i 之流量， $Q_{in,i}$ = 河段 i 之流入， $Q_{ab,i}$ = 河段 i 之流出，流入及流出包括點源及非點源部份。而引水段之流入及流出不若點源般之位置確定，其為線狀均勻分佈，但可能跨數個河段或僅為某河段之部分，如圖2所示。因此必須輸入非點源之起終點里程，並由模式計算其跨河段之比例值分配於各相關河段。

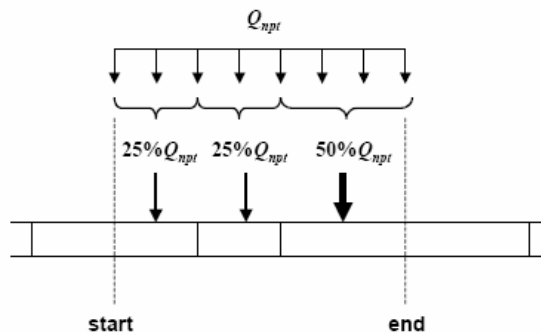


圖 2 引水段於跨河段之分佈例圖 (引用 Chapra & Pelletier, 2003)

2. 流速與水深：

Q2K 之水理可自由選擇率定曲線公式或曼寧公式計算，其以曼寧公式為優先，如果輸入曼寧糙率係數 n 為 “0” 值，則改採用率定曲線。兩種公式之說明如下：

a. 率定曲線公式 (rating curve)

Q2K 可利用流量 (Q) 及指數公式來表示流速 (U) 及水深 (H)，其公式如下：

$$U = a Q^b \quad \text{及} \quad H = \alpha Q^\beta \quad (2)$$

其中，指數 (b 及 β) 及係數 (a 及 α) 需由觀測資料來進行迴歸分析求出，但表2中有建議常使用之指數值 (b 及 β)。而水質模式中所需用到的通水斷面積 (A_c) 及河寬 (B) 則可用下列公式分別求出：

$$A_c = Q / U \quad \text{及} \quad B = A_c / H \quad (3)$$

表2 率定曲線公式指數表 (引用Chapra & Pelletier, 2003)

公式	指數	通常使用值	範圍
$U = aQ^b$	b	0.43	0.4 - 0.6
$H = \alpha Q^\beta$	β	0.45	0.3 - 0.5

b. 曼寧公式 (Manning formula)

Q2K 將斷面假設為梯形斷面 (trapezoidal shape)，在定常態水流下，以曼寧公式表示流量為：

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n} \frac{A_c^{5/3}}{P^{2/3}} \quad (4)$$

其中， Q = 流量 [m^3/s]， S_0 = 渠底縱坡度 [m/m]， n = 曼寧糙率係數， A_c = 通水斷面積 [m^2]， P = 潤周 [m]。曼寧糙率係數 n 為經驗值，大致由平滑狀況約 0.015 至粗糙狀況約 0.15 左右。

3. 縱向延散：

一維平移延散方程式是Q2K 模式之主要應用理論，而縱向延散

(longitudinal dispersion) 則是兩兩河段間污染擴散的主要機制，如果已知延散係數(經實驗測得或依經驗估計)則可直接輸入各河段。但於多數時機下，延散係數實不可得，如果輸入延散係數 E 為“0”值，則Q2K將提供理論計算之延散係數：

$$E_{p,i} = 0.011 \frac{U_i^2 B_i^2}{H_i U_i^*} \quad (5)$$

其中， $E_{p,i}$ =河段 i 及 $i + 1$ 間的延散係數[m²/s]， U_i = 河段 i 平均流速 [m/s]， B_i = 河段 i 河寬 [m]， H_i =河段 i 平均水深 [m]， U_i^* = 河段 i 剪力速度[m/s]，剪力速度為：

$$U_i^* = \sqrt{g H_i S_i} \quad (6)$$

其中， g =重力加速度 [= 9.81 m/s²]， S =渠底縱坡度。但為避免於數值計算過程產生發散現象，無論是以輸入或模式自行計算之延散係數外，仍要比較數值延散係數(numerical dispersion) 如：

$$E_{n,i} = \frac{U_i \Delta x_i}{2} \quad (7)$$

(三) 水質模擬

Q2K的基本污染物傳輸公式 (Advection-Dispersion Equation) 為：

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} c_i + \frac{E_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (8)$$

其中， c = 污染物濃度 [mg/L 或 μg/L]， Q = 流通河段 $i-1$ ， i 及 $i+1$ 間的流量 [cms]， $Q_{ab,i}$ =河段 i 之流出流量[cms]， E = 河段 $i-1$ 及 i 間的延散係數[m²/s]， V = 河 i 之水體體積[m³]， S =河段 i 內之反應生成或消失[g/m³/day 或 mg/m³/day]， W = 河段 i 之額外污染負荷[g/day 或 mg/day]，公式為：

$$W_i = \sum_{j=1}^{psi} Q_{ps,i,j} c_{ps,i,j} + \sum_{j=1}^{npsi} Q_{nps,i,j} c_{nps,i,j} \quad (9)$$

其運動模式包括：溶解 (dissolution)、水解 (hydrolysis)、氧化 (oxidation)、硝化 (nitrification)、脫硝 (de-nitrification)、光合作用 (photosynthesis)、死亡 (death) 及呼吸 (respiration) 等；質量傳遞包括：再曝氣 (re-aeration)、沉降 (settling)、底泥需氧 (sediment oxygen demand, SOD) 及沉積物無機碳流 (sediment inorganic carbon flux) 等。整個質量平衡之機制關係包括河段內之傳輸及延散、與大氣間之交換 (熱交換)、額外污染負荷之質量或取出、與底泥間之交換、與底藻間之交換。

Q2K 的水質主要項目為浮游植物(PHYT)、有機磷(OP)、無機磷(IOP)、有機氮(ON)、氨氮(NH₃)、硝酸鹽氮(NO₃)、碳生化需氧量(CBOD)以及溶氧(DO)共八個變數。八個水質變數可以(1)浮游植物動力學、(2)磷的循環、(3)氮的循環、及(4)溶氧平衡等四個交互作用的系統來表示。有關 Q2K 各水質因子的反應式相當複雜，其公式可參見 Q2K 的使用手冊 (Chapra & Pelletier, 2003)。

肆、案例應用

一、筏子溪河系介紹及基本資料

筏子溪屬烏河流域，發源於台中縣神岡鄉，主流流經台中縣大雅鄉、台中市之西屯區與南屯區，並於台中縣烏日鄉匯入烏溪，長約 21.3 公里，流域面積 132.6 平方公里，匯集了大度山麓各野溪及農田的排水。筏子溪是一條河床寬淺的平地河川，原來主要功能為提供農田灌溉用水和排水，風景優美，常有人來此賞景、釣魚及戲水。近年來因家庭廢水、工業廢水、畜牧廢水、砂土廢棄物等大量流入，造成河川污染日易嚴重，生態逐漸遭受破壞。

台中市境內之筏子溪主流河段，上游處以台中縣大雅鄉與台中市西屯區之交界處的烏橋上游處之兩支流匯集口為起點，至烏溪口 (集泉橋下游處) 為終點，長約 12.5 公里；其間有林厝幹線、港尾子溪、知高支線、內新莊支線、山子腳坑支線及鎮平支線等支流匯入。筏子溪之流域及支流系統如圖 3 所示。

二、污染推估量及點源污染濃度

污染推估量包括集水區內之生活污水、工業廢水、畜牧廢水、垃圾滲出及非點源污染之轉換等，以點源模式由各支流輸入，筏子溪之各點源流達污染推估量

(台灣曼寧公司, 2005)。點源污染生化需氧量 (BOD) 及氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 之推估量是以質量流 (mass flux) 表示, 故必須轉換成濃度輸入, 溶氧 (DO) 部分並無推估值, 故採用現場量測值; 各點源之流量、流達率及污染推估輸入如表 3 所列。

三、模式建立及驗證

依據水利署第三河川局之治理工程實施報告 (2004), 筏子溪河床坡度大致在 0.5%~1%, 河床寬度由下游 30m 至下游約 90m, 河床大致為卵礫石, 草叢並不密集, 曼寧糙率估計約為 0.028。筏子溪主流之 Q2K 模擬河段長約 12.5 公里, 以 0.5 公里為一河段 (reach) 之計算單元, 共 25 個河段, 如圖 4 所示; 以烏橋為上游邊界及烏溪口為下游邊界, 各支流則在相關位置之河段以點源輸入。水質模式之可以成功模擬, 除模式本身具有完整之模擬機制外, 也要使用適當之參數或係數, 所以必須藉由校正 (calibration) 及驗證 (verification) 來調整參數或係數。各相關輸入條件說明如下:

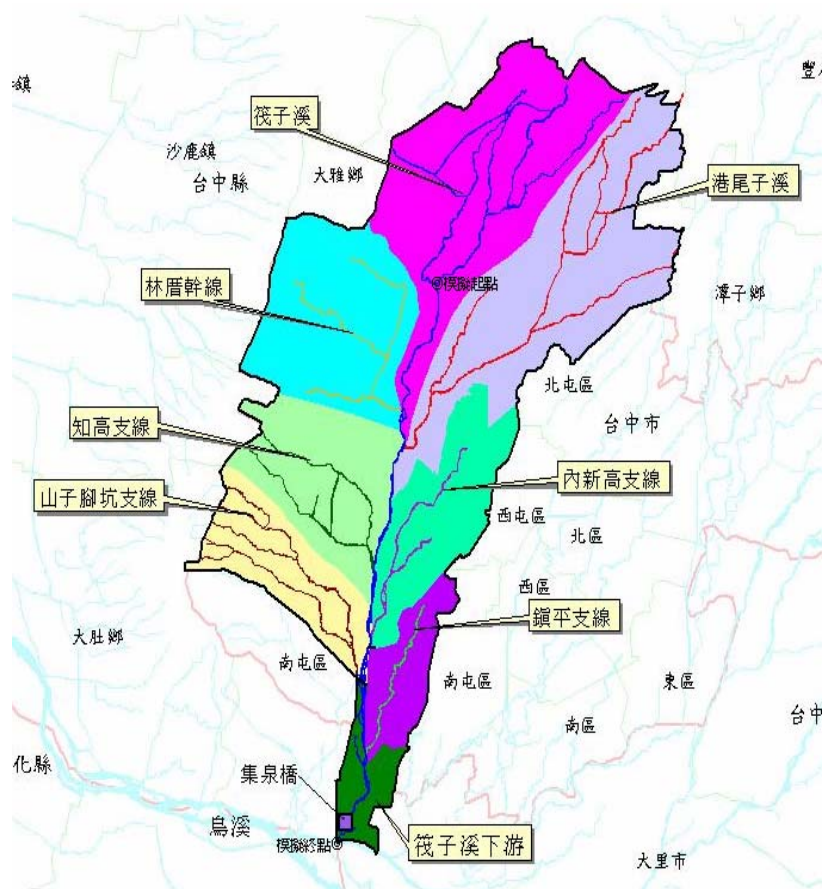


圖 3 筏子溪河系圖 (台灣曼寧公司, 2005)

表 3 筏子溪 Q2K 模擬點源推估輸入表

位置	流量 (cms)	流達率	BOD flux (kg/day)	C _{BOD} (mg/L)	NH ₃ -N flux (kg/day)	C _{NH3-N} (µg/L)	C _{DO} (mg/L)
烏橋	2.51	0.16	809	3.74	153	709	7.2
林厝幹線匯入	1.10	0.15	298	3.13	46	489	7.2
港尾子溪匯入	0.75	0.16	628	9.69	94	1449	7.5
知高支線匯入	4.07	0.62	2309	6.56	789	2243	5.1
內新莊支線匯入	0.73	0.62	1269	20.12	219	3465	6.0
山子腳坑支線匯入	1.33	0.43	1073	9.33	43	373	6.8
鎮平支線匯入	0.49	0.37	342	8.08	36	843	6.1

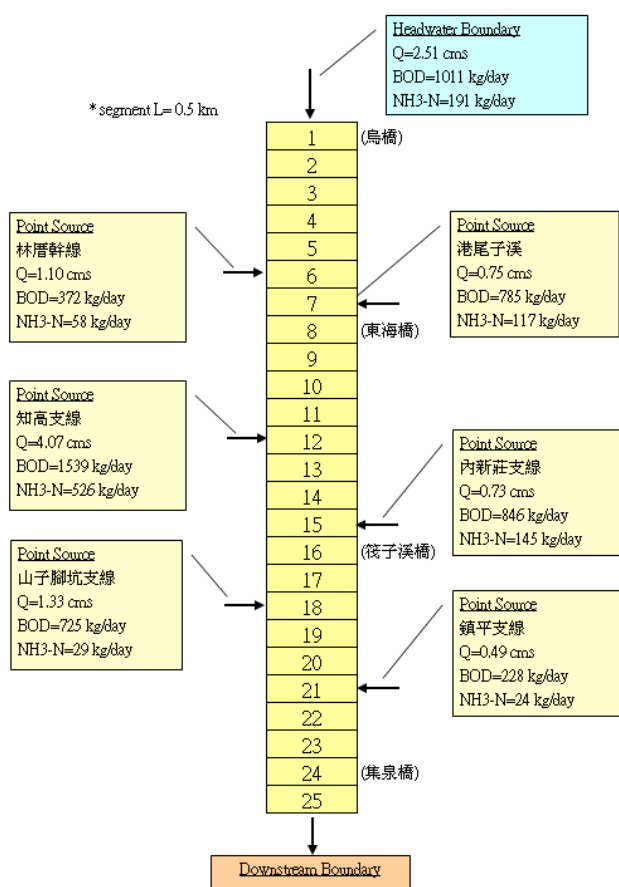


圖 4 筏子溪之 Q2K 模擬河段圖

(一)流量：本案例由於缺乏長期實測流量資料，乃採用污染推估之流量為輸入。

(二)水理：流速及水深之計算擬採用率定曲線公式，指數採用建議值，係數則概略估計，如表 4 所列。

表4 筏子溪Q2K模擬採用率定曲線公式之指數及係數

公式	指數	係數
$U = aQ^b$	$b=0.43$	$a=0.4$
$H = \alpha Q^\beta$	$\beta=0.45$	$\alpha=0.3$

(三)縱向延散：缺乏實證資料，延散係數擬採用模式之內部計算。

(四)系統參數：反應機制所需之參數及係數，以採用模式建議經驗值為準。

筏子溪之水力觀測紀錄並不多，僅在筏子溪橋有較多資料(配合水質監測)，另外在水堀頭 4 號橋及烏橋僅有少量資料。經 Q2K 之模擬，其水力結果如圖 5 所示，水堀頭 4 號橋及筏子溪橋之流量模擬結果良好，烏橋及水堀頭 4 號橋之流速模擬結果可接受，烏橋之水位模擬結果良好。水力驗證顯示 Q2K 模式在水力驗證上是可接受的。

筏子溪之長期水質監測紀錄，計有兩類：

(一)行政院環保署在東海橋之紀錄(2002~2005 年)；

(二)台中市環保局在筏子溪橋之紀錄(2004~2005 年)。

東海橋及筏子溪橋歷年紀錄之平均、最大及最小值如表 5 所列。Q2K 之水質模擬結果如圖 6 所示，由於水質監測結果變化極大，乃以平均值為比較依據。結果顯示東海橋之 DO 模擬結果均良好，而筏子溪橋略低，但可接受；東海橋之 BOD 模擬結果均良好，筏子溪橋模擬結果卻偏低較多；東海橋及筏子溪橋 NH₃-N 模擬結果均良好；整體而言，驗證結果可接受。

表 5 監測紀錄之平均、最大及最小值

位置	水質項目	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	水溫 (°C)	pH 值
東海橋	平均值	7.27	4.00	0.48	26.1	7.3
	最大值	9.80	9.70	1.73	31.8	7.9
	最小值	5.20	1.00	0.30	16.4	6.9
筏子溪橋	平均值	7.30	8.70	1.40	25.5	7.1

最大值	9.60	15.50	4.80	30.4	8.3
最小值	5.50	2.90	0.20	19.0	6.3

四、涵容能力分析

河川涵容能力與其背景污染量、水體水質標準、流量、流速、水溫、及其污染源排入河川之污染負荷與地點有關。涵容能力之推算通常使用方法為溫清光 (1989) 提出之「流域性水質管理模式」，其說明如下：

(一) 目標函數：

$$Goal = Max \sum_i \sum_j \sum_k A_{i j k} \quad (10)$$

式中 A_{ijk} 為第 i 個水質站、第 j 個河段支流、第 k 個排水之容許排入之污染量。

(二) 限制條件：包括 1. 水質控制點之水質標準限制；2. 河川自淨作用之限制；及 3. 流達率及等去除率之限制等。

水質標準限制將以環保單位最常使用的河川污染指標 (River Pollution Index, RPI) 為準，此指標乃早期引自日本的河川污染分類法，它是以溶氧量、生化需氧量、懸浮固體及氨氮等四項水質參數加以評定，其點數和積分分類如表 6 所示，指標即為四項水質點數之算術平均值。

筏子溪於豐水期內水質多能保持在輕度污染的範圍，在枯水期則保持在中度污染程度，生態資源豐富。依筏子溪監測資料 (環保署及台中市環保局定期監測) 來統計，河川污染等級在上游段 (東海橋以上) 大致能維持未稍受污染狀況，而中游段 (筏子溪橋以上) 則多為中度污染。於本案例之涵容能力水質標準限制擬以「未稍受污染」為準，亦即控制河段水質之溶氧在 6.5 mg/L 以上，生化需氧量在 3.0mg/L 以下，及氨氮 0.5mg/L (或 500 μ g/L) 以下，依此標準來削減各點源污染量。河川自淨作用之限制則由 Q2K 模式模擬來處理，該模式驗證後已可有

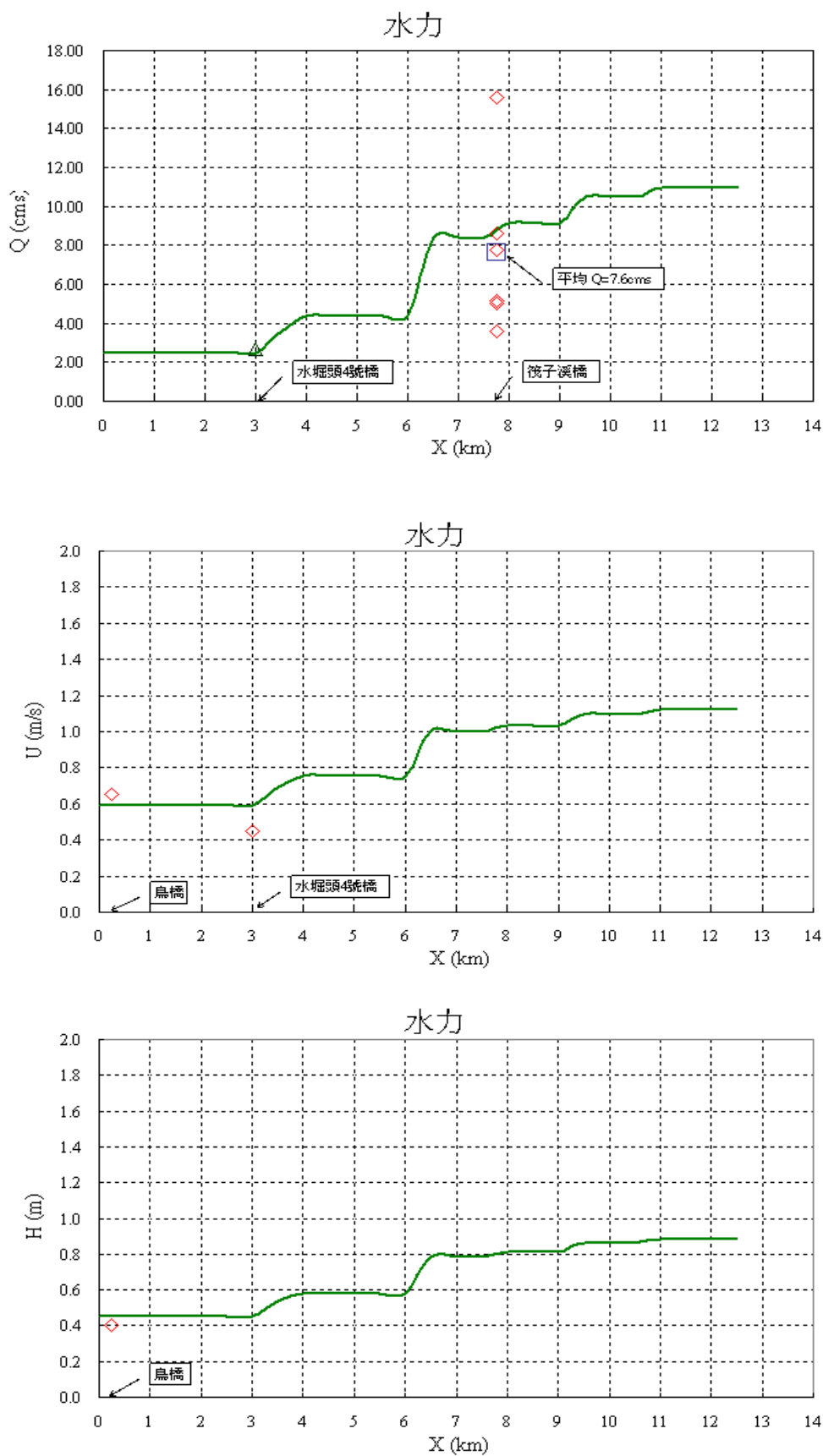


圖 5 筏子溪之水力模擬驗證 (流量、流速及水深)

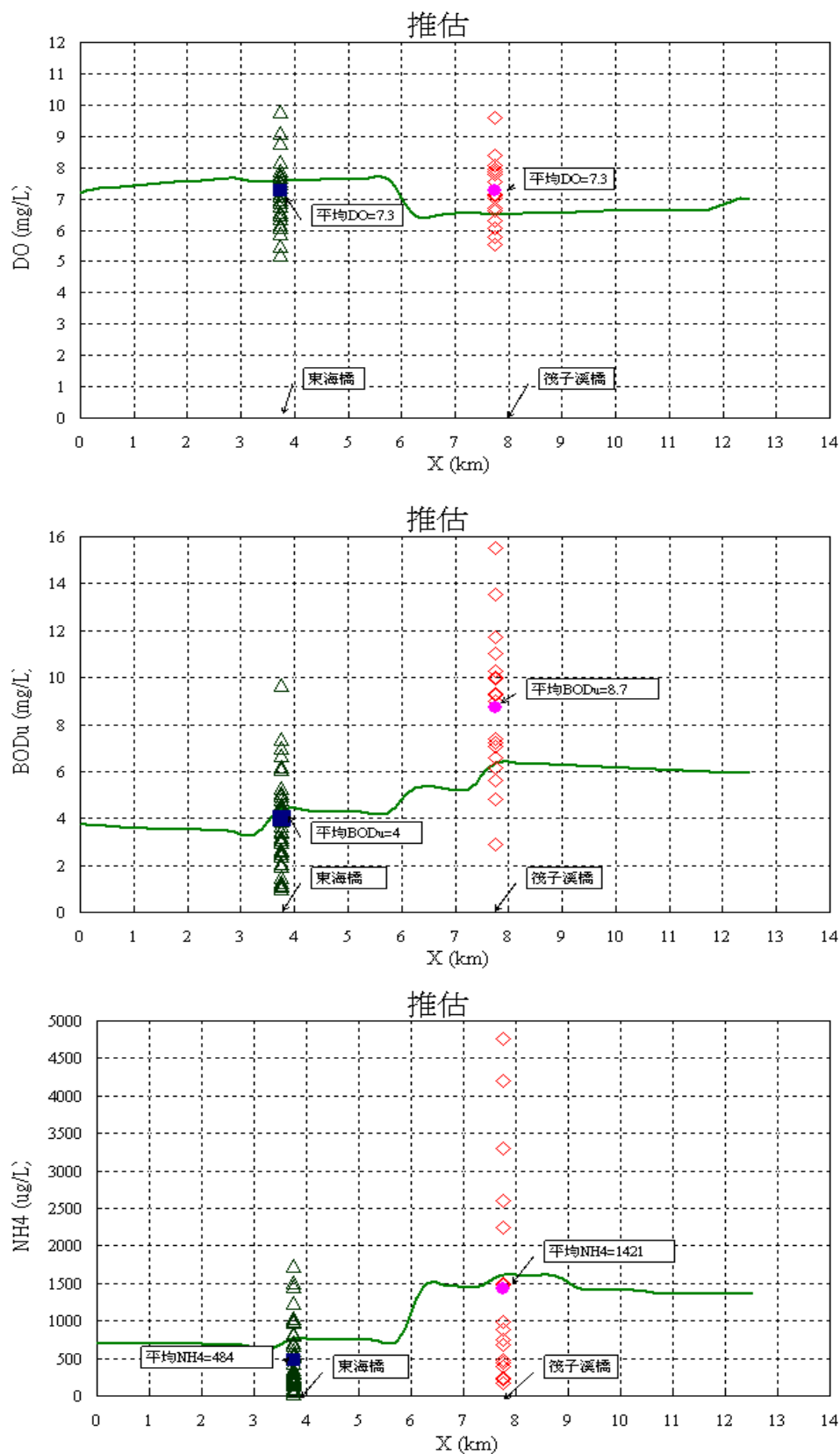


圖 6 筏子溪之水質模擬驗證 (溶氧、生化需氧量及氨氮)

表 6 河川污染指標 (RPI) 等級分類表

污染等級/項目	A(未稍受污染)	B(輕度污染)	C(中度污染)	D(嚴重污染)
溶氧量(DO) mg/L	6.5 以上	4.6~6.5	2.0~4.5	2.0 以下
生化需氧量(BOD) mg/L	3.0 以下	3.0~4.9	5.0~15	15 以上
懸浮固體(SS) mg/L	20 以下	20~49	50~100	100 以上
氨氮(NH ₃ -N) mg/L	0.5 以下	0.5~0.99	1.0~3.0	3.0 以上
點數	1	3	6	10
積分	2.0 以下	2.0~3.0	3.1~6.0	6.0 以上

效模擬筏子溪流況。涵容能力分析之執执行程序說明如下：

- (一)先區分河系為數段，分段原則以點源匯入口為斷點；
- (二)由上游往下游方向，每次以檢驗一段為原則（本河系非感潮，故下游之污染不會回溯至上游）；
- (三)檢驗時，逐步調整該段上游點源之污染輸入量（遞增設定污染削減率），再以 Q2K 進行模擬，以檢視該段內水質之變化程度來微調降削減率；
- (四)待該段水質能達限制標準內，則該段上游點源之污染輸入量即為該段之涵容能力；
- (五)直到逐段水質能達限制標準內，則整個河系之涵容能力分析完成。

由設定污染削減率來逐步調整某段上游點源之污染輸入量，即可推算該段之涵容能力，隨各點源之削減共七處，本文僅列出兩處之削減方案來說明：

- (一)源頭至港尾子溪匯入點：雖然原第一分段是以前林厝幹線匯入口為準，但該點源污染量原本不高，故不必調整，而第一分段則修正至港尾子溪匯入點。由多次試算及調整，本文僅列舉三種不同之污染削減率案例如表 7 所示來說明，Q2K 之水質模擬結果則如圖 7 所示，試算結果發現生化需氧量需削減 20%及氨氮需削減 30%即可達涵容能力目標。

表 7 源頭點源污染量削減案例

case	水質		生化需氧量		氨氮	
	削減率	污染量 (kg/day)	濃度 (mg/L)	削減率	污染量 (kg/day)	濃度 (µg/L)
cut-1A	10%	728	3.37	10%	138	638

cut-1B	20%	647	3.00	20%	123	567
cut-1C	20%	647	3.00	30%	107	496

(二)知高支線匯入點至內新莊支線匯入點：知高支線點源污染量較高，是水質惡化之主因；本文僅列舉三種不同之污染削減率案例如表 8 所示，Q2K 之水質模擬結果如圖 8 所示，試算結果發現生化需氧量需大量削減 50%及氨氮也需大量削減 75%方可達涵容能力目標，顯示該段之污染排入量太高，河段無法自淨。

表 8 知高支線點源污染量削減案例

case	水質		生化需氧量		氨氮	
	削減率	污染量 (kg/day)	濃度 (mg/L)	削減率	污染量 (kg/day)	濃度 (µg/L)
cut-3A	30%	1616	4.60	30%	552	1570
cut-3B	50%	1154	3.28	50%	394	1121
cut-3C	50%	1154	3.28	75%	197	561

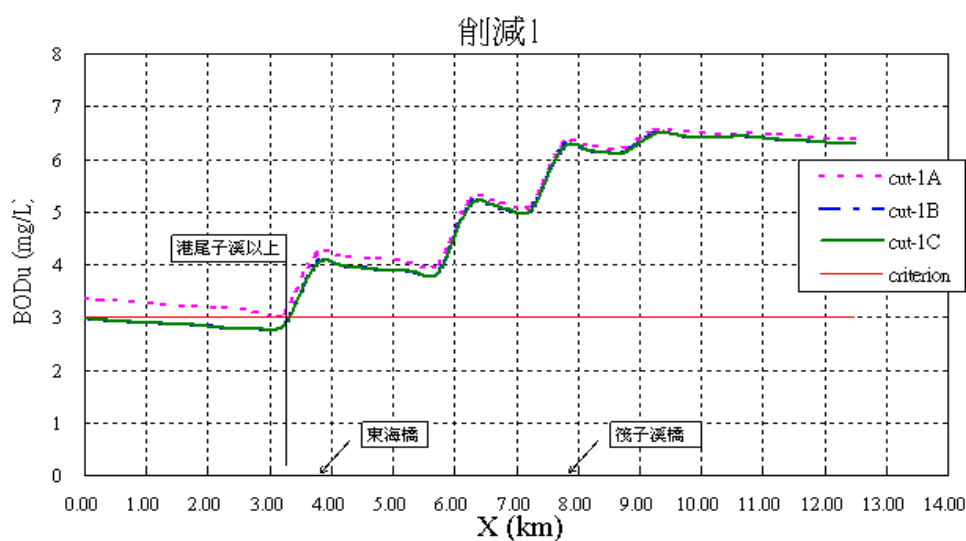
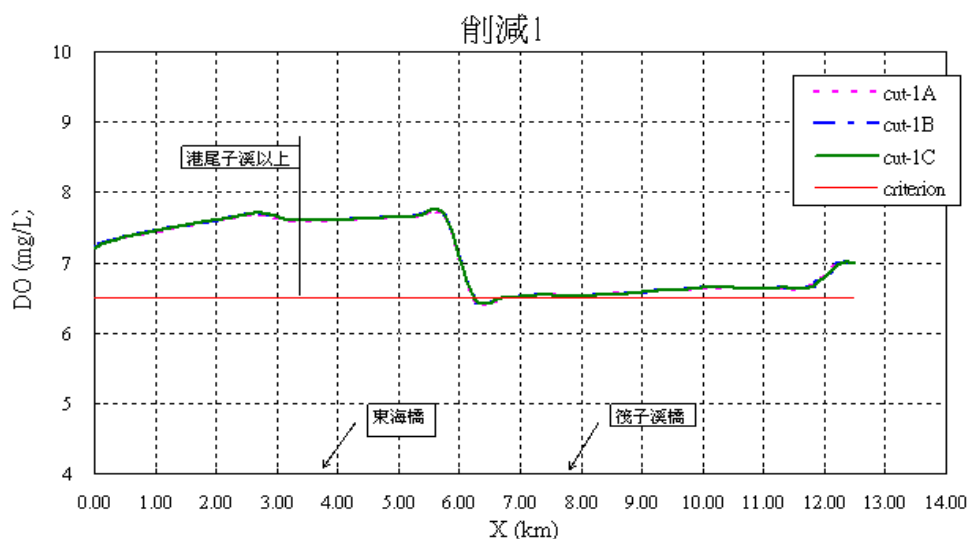
經 Q2K 分段模擬各削減方案所獲得之最佳涵容能力分析結果如表 9 所列，而逐步削減方案之水質變化趨勢如圖 9 所示，顯示水質高污染濃度梯度 (gradient) 隨逐段削減而後退及降低。其中污染量之生化需氧量削減率較大者分別為：內新莊支線(80%)、山子腳坑支線(70%)、港尾子溪(60%)及知高支線(50%)；而氨氮量削減率較大者分別為：內新莊支線(85%)、知高支線(75%)及港尾子溪(60%)。顯示筏子溪中游段（東海橋至筏子溪橋）之污染量較高，污染多數來自台中工業區，需特別注意與控制。

伍、結論與建議

以EXCEL試算表格式及配合VBA撰寫之Q2K水質模式是一個使用方便

(user-friendly)、電腦記憶空間需求小及執行迅速之程式，可依據使用者任何的需要任意組合各種水質參數，在定常態下模擬河川水質，是運用於河川污染整治規劃及水質管理之相當有效且快速評估之重要工具。本研究中也應用於筏子溪污染整治計畫，且獲得良好的涵容能力初步分析結果。

水質模式的使用雖有經實測資料檢定與驗證，但是實測資料的不足、模式本身健全性、模式參數概估、推估污染源負荷等均隱含許多不確定因數，加上多變的自然環境，使模式的輸出結果將有不確定性 (uncertainty)，仍有賴使用者更進一步之判斷及採用。而本案例為非感潮河川，故下游之污染不會回溯至上游，較為單純；如對於感潮河川，則河川水理及水質動態模擬將大為不同，可能 Q2K 模式將不宜適用。



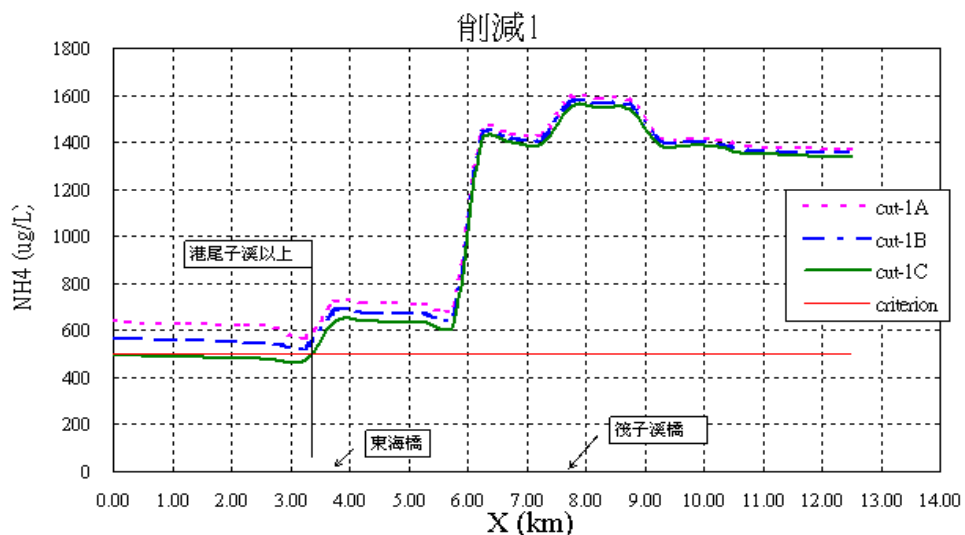
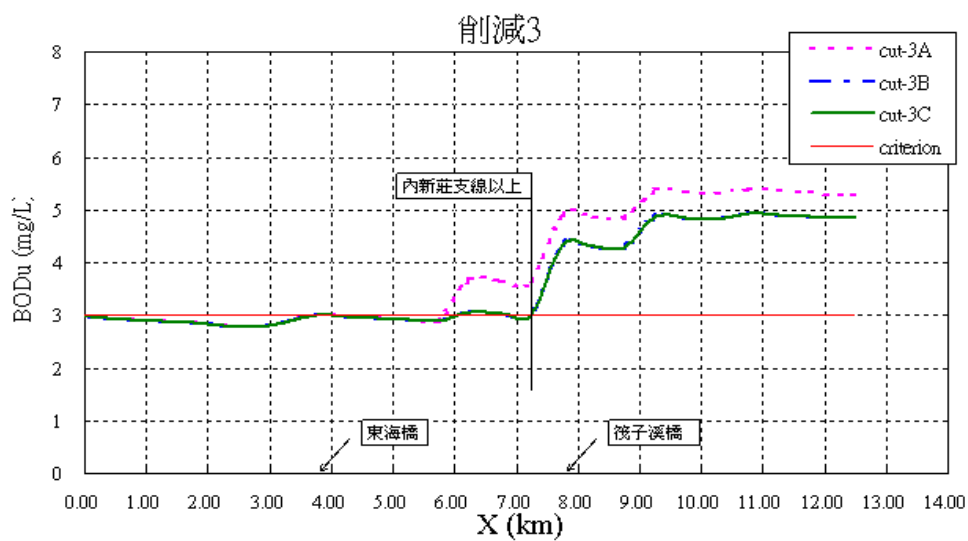
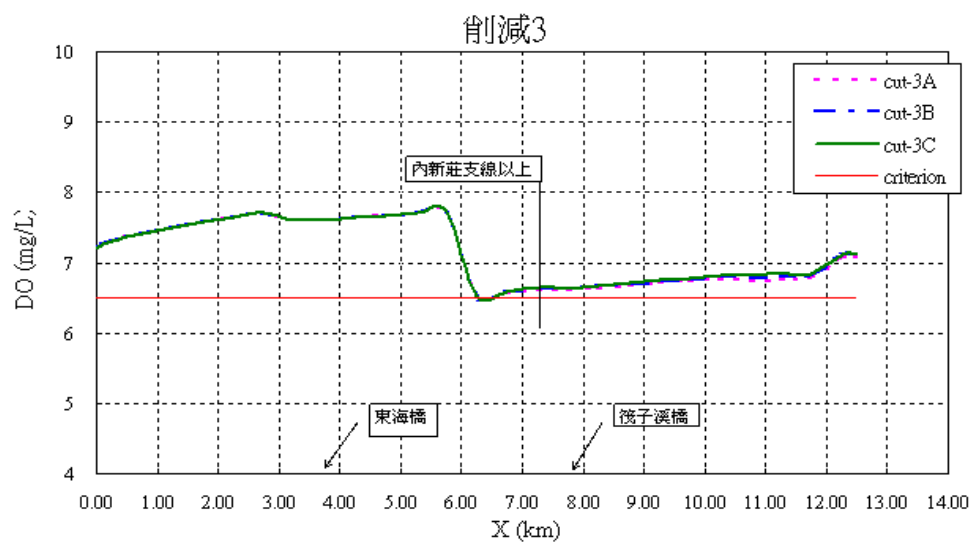


圖 7 筏子溪之涵容分析模擬：源頭至港尾子溪匯入點段



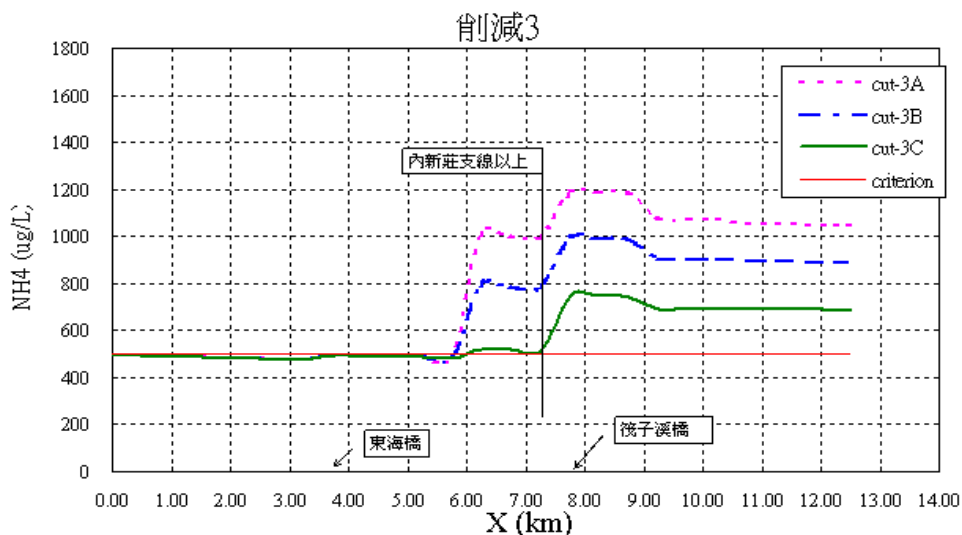


圖 8 筏子溪之涵容分析模擬：知高支線匯入至內新莊支線匯入段

表 9 筏子溪涵容能力分析結果

河段	水質	生化需氧量(kg/day)		氨氮(kg/day)	
		原推估量	削減後(削減率)	原推估量	削減後(削減率)
源頭匯入-港尾子溪匯入點以上	源頭	809	647 (20%)	153	107 (30%)
	林厝幹線	298	298 (0%)	46	46 (0%)
港尾子溪匯入-知高支線匯入點以上	港尾子溪	628	251 (60%)	94	38 (60%)
匯入-內新莊支線匯入點以上	知高支線	2309	1154 (50%)	789	197 (75%)
匯入-山子腳坑支線匯入點以上	內新莊支線	1269	254 (80%)	219	33 (85%)
山子腳坑支線匯入-鎮平支線匯入點以上	山子腳坑支線	1073	322 (70%)	43	43 (0%)
鎮平支線匯入-烏溪口	鎮平支線	342	308 (10%)	36	36 (0%)

陸、參考文獻

1. 台灣曼寧公司，2005，筏子溪集泉橋測站污染整治計畫成果報告，台中：台中市環保局。
2. 李志賢、張穗蘋、汪家銘、彭士豪，2002，「朴子溪 QUAL2E 水質模式之更新與應用」，第十五屆環境規劃與管理研討會，台北：中華民國環境工程學會、淡江大學主辦。
3. 林亮君，2005，不確定環境下的河川總量管制策略，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文。
4. 林鎮洋、余嘯雷、林英傑，2000，「集水區水質總量管制模式探討與實例應用」，第十一屆水利工程研討會，台北：台灣大學主辦。
5. 張秀琴，2004，利用 QUAL2E 水質模式模擬淡水河系興建污水下水道之水質影響，中原大學土木工程系碩士論文，桃園。
6. 張鈞凱、張慶源，2005，「利用 QUAL2K 模擬河川廊道上之水稻田對水質的影響-以三峽合為例」，2005 水稻田農業多樣性機能研討會，台中：農業工程研究中心、僑光技術學院主辦。
7. 童慶斌、陳韻如、劉柏廷、洪念民，2004，「應用 HSPF 模式建立水質總量管制評估方法」，93 年度農業工程研討會，桃園：農業工程研究中心、桃園農田水利會主辦。
8. 黃聖授，2001，高屏溪涵容能力之評估，國立中山大學環境工程研究所碩士論文。
9. 黃鈺真，2000，HSPF 模式應用於曾文水庫集水區非點源污染負荷之推估，國立成功大學環境工程系碩士論文。
10. 溫清光，1989，高屏河流域河川水質規劃-高屏溪水資源污染調查規劃報告，國立成功大學環境工程學系碩士論文。
11. 萬騰州、詹雅婷、潘盈穎、程奕誌，2002，「結合地理資訊系統與 QUAL2E 進行水質管理決策之評估-以朴子溪為例」，第十五屆環境規劃與管理研討會，台北：中華民國環境工程學會、淡江大學主辦。
12. 經濟部水利署，2004，筏子溪治理工程實施計畫（核定版），台中：經濟部水利署。
13. 葉桂君、郭鴻銘、張嵩林，2002，「以 QUAL2E 河川水質模式輔助東港河流域

養豬業管理之研究」，國立屏東科技大學學報，第 11 卷第 4 期：313-323。

14. 謝斌暉，1998，暴雨期間河川水質模式設計流量之研究，國立臺灣大學土木工程系碩士論文。
15. Chapra, S.C. and G.J. Pelletier, 2003, QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation and User Manual, Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
16. MacKay, H.M., D.J. Roux, P.J. Ashton, H.R. van Vliet, and S. Jooste, 1995, The Development of South African Water Quality Guidelines for the Natural Aquatic Environment, Water Science and Technology, Vol.32, No.5-6, pp. 293-299.
17. Novotny, V. and H. Olem, 1994, Water Quality-Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution, Van Nostrand Reinhold, New York

Application of QUAL2K Model for Water Quality Management in Fachi River

Yi-Ching Chen*

Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Da-Yeh University

Meng-Hung Liu

Graduate student, Department of Environmental Engineering, Da-Yeh University

Abstract

The analysis of carrying capacity should be the most important part in river pollution prevention works. Theoretically, carrying capacity can be defined as the maximum load of pollutant effluent for river under some specified water quality criteria. It can be a guideline for establishing proper water quality standard, suitable countermeasure of water pollution prevention, and effective management of water quality, too. In this study, a usable model, *e.g.* QUAL2K developed by U.S. EPA, is applied to evaluate the bio-chemical reaction and water quality variation within river water body discharged by point source as well as non-point source pollutant. It could play a key tool for effective and fast assessment in water pollution prevention and water quality management. Also, the application of QUAL2K is illustrated in water quality improvement of Fachi river in Taichuang city. The proper cut-off of the sectional point source pollutant is allocated and discussed. Besides, the content and major functions in this model are introduced.

Keywords: Carrying capacity, QUAL2K, Water quality model.

Yi-Ching Chen
Tel: (04)8511888#2365
Fax: (04)8511336
E-mail: yiching@mail.dyu.edu.tw