

水庫水質模擬敏感度分析與優養化風險評估

Sensitivity Analysis of Reservoir Water Quality Simulation and Risk Assessment of Eutrophication

國立台灣大學農業工程學系所助理教授
兼水工試驗所助理研究員

吳 富 春

Fu-Chun Wu

國立台灣大學農業工程學研究所
研究生

沈 易 澈

Yi-Cheng Shen

摘 要

本研究利用水域生態系統模式進行水庫水質模擬，本文以德基水庫為探討對象，模擬其水體中氨氮、硝酸氮、正磷鹽酸、浮游植物與浮游動物間之互動關係。模擬結果顯示本模式能有效模擬水庫水質之動態變化。本研究藉此模式針對各項入流濃度對水庫水質之影響進行敏感度分析，並進一步根據敏感度分析之結果，評估各項入流濃度對水庫水質優養化風險所造成之影響。敏感度分析結果顯示磷酸鹽入流濃度是造成水庫內浮游植物大量生長之主控因素，而優養化風險評估之結果顯示若能控制上游浮游植物之入流濃度在 $10 \mu\text{g/L}$ 以下時，優養化風險可降至 0；若將各種營養源入流完全阻絕，可使優養化風險降至 40%。

關鍵詞：水域生態系統模式，水庫水質模擬，敏感度分析，優養化，風險評估，動態模式。

ABSTRACT

This study uses an aquatic ecosystem model to simulate the water quality in reservoir. The interactions between ammonia, nitrate, phosphorous, phytoplankton, and zooplankton in Te-Chi reservoir are investigated. The simulated results indicate that this model can effectively simulate the dynamic variations of the reservoir water quality. The model is used to investigate the sensitivity of inflow concentration of various nutrients on the water quality and further to assess the risk of eutrophication. The results of sensitivity analysis indicate that the inflow concentration of phosphorous is the governing factor for phytoplankton growth. The results of risk assessment indicate that the risk of

eutrophication can be lowered to 40% if all the nutrients are excluded from the inflow. However, if the inflow concentration of phytoplankton is maintained below 10 $\mu\text{g/L}$, the risk of eutrophication can be reduced to 0.

Keywords: Aquatic ecosystem model, Reservoir water quality simulation, Sensitivity analysis, Eutrophication, Risk assessment, Dynamic modeling.

一、前言

由於人類的開發活動頻繁，各種污水直接或間接流入水庫，增加水中之營養物質(如磷、氮)，促進藻類(浮游植物)繁殖，導致水質的惡化，嚴重影響水資源的營運。因此水資源運用規劃，不再是只有量的考慮，必須兼顧到質的問題，才能達到最佳之水資源利用。近年來水庫集水區被大量開發種植蔬果，因施肥引起水庫過量的養分負荷，造成水庫水質優養化問題。影響水庫水質的因素很多，包括水文水理條件、生化作用及環境因子(水溫與陽光等)，構成一複雜之生態系統，本研究之目的在藉生態系統模式探討與分析水庫內浮游植物數量改變之情況。水庫之水質變化可藉由水域生態系統模式(Aquatic ecosystem model)進行動態模擬。水域生態系統包含營養源、浮游植物與浮游動物三部分，三者所構成之食物鏈影響彼此消長，而水中營養源與浮游動、植物之濃度更是水質優養化程度之重要指標，本文藉生態系統模式模擬水庫水質(包括氨氮、硝酸氮、正磷酸鹽、葉綠素及浮游動物)之動態變化。

有關水質模式的發展自 1925 年 Steeter 與 Phelps[5]兩人發表的 BOD-DO 模式後，一直偏重於河川之研究，Riley et al.[12]於 1949 年首次在浮游植物模式中加入了物質傳輸機制(Transport mechanism)，同時將模式擴充為浮游植物與養分之耦合系統模式(Coupling system model)，雖然驗證結果並非十分良好，但已為水質優養模式奠定良好基礎。Brezonik 與 Messer[13]等人發展一廣泛模式，所包括的項目有溶解及懸浮有機物、浮游植物、溶解性養分及魚類等，但因其為線性系統，較缺乏真實性，後經 Schaffner 與 Oglesby[8] 等人的研究發展，模式功能增加許多。

Chen[9]則發展一非線性系統模式，加入浮游生物、無機氮、無機磷及細胞殘骸等項目，並考慮一維方向的質量傳輸，驗證結果較符合實測資料。Di Toro et al.[6、7]及 Orlob[10]等學者針對前述各生態模式進行改進及修正，生態模式之模擬結果及可信度提昇許多，然而隨著高速電腦的開發，三維水理水質模式的發展已是今後的趨勢。

現有水庫水質模式所能模擬之項目眾多，例如營養源、溶氧、酸度、藻類濃度及水中農藥殘餘濃度等，為使模擬結果之準確性提高，輸入資料勢必增加，模式操作之難度亦相對提高。本研究以水域生態系統觀念建立一簡易模式，將整個水庫水體當成一個控制體積，考慮入流、出流及水庫本身水質之各種變化，未考慮河川水理流況及水庫層化所造成之影響，期能快速模擬水庫中營養源與浮游動、植物之互動關係。另外為了探討水庫水質優養化的主要原因，本研究藉此模式分析水庫各項入流濃度對於水庫水體內水質影響之敏感度，以做為改善水庫水質各方案規劃之參考。

二、水域生態系統模式

水體中之有機氮、無機氮、磷酸鹽、浮游植物及溶氧等攸關水質，而水域生態系統中營養源、浮游植物與浮游動物間之動態關係可說是控制這些水質條件之重要機制。本研究所考慮之水域生態系統如圖 1 所示，其中營養源(包含氨氮、硝酸氮、正磷酸鹽)、浮游植物與浮游動物間之流動率(Flow rate)控制此系統之變化，各項流動率分別討論如下。

(一) 營養源及浮游動、植物隨水流進出之流動率， $J(i,i)$

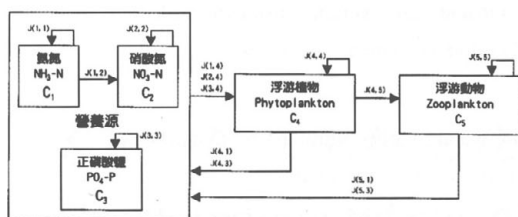


圖 1 水域生態系統之流動率關係圖

$$J(i, i) = \frac{1}{V} \cdot (Q_{in} \cdot C_{i0} - Q_{out} \cdot C_i) \dots\dots\dots(1)$$

式中 V 為水體體積(m^3)， Q_{in} 與 Q_{out} 分別為流入及流出控制體積之流量(m^3/day)， C_{i0} 與 C_i 分別為入流與水庫水體內之濃度(mg/L)， i 值為 1 至 5，分別代表氨氮、硝酸氮、磷酸鹽、浮游植物及浮游動物。

(二) 營養源

本研究所考慮之營養源包括氨氮(NH_3-N)、硝酸氮(NO_3-N)及正磷酸鹽(PO_4-P)。水體中氮以四種不同形式存在，有機氮因分解作用轉為氨氮，再轉化成亞硝酸氮，最後形成硝酸氮，此種轉換通常可視為一階反應(First-order reaction)^[3]，而亞硝酸氮(NO_2-N)在水體中含量很少，僅為過渡性產物，硝酸氮會在厭氧狀態下產生脫氮作用而還原成氣體形式之含氮化合物，但本研究並未模擬水中溶氧，故模式中不考慮脫氮作用，而將其效果包含在亞硝酸氮轉化成硝酸氮之反應中。水體中磷則以有機磷與無機磷等形式存在，有機磷會因細菌分解而形成無機磷，本研究亦將此反應設為一階反應。

水中藻類及浮游動物體中含有氮及磷，藻類之死亡或呼吸以及浮游動物之死亡或排泄，部分變成無機磷及無機氮而供其他藻細胞吸收，其餘部分為有機磷及有機氮，須靠細菌分解成氨氮及無機磷方可被藻類使用。本模式中僅模擬浮游植物生長所攝取之無機氮(氨氮及硝酸氮)及無機磷(正磷酸鹽)等部分，未納入有機氮及有機磷之變化，將藻類及浮游動物體中有機氮轉換為氨氮之反應加在藻體轉換成氨氮之反應中，而藻類及

浮游動物體中有機磷轉換為無機磷之反應亦同。本研究係將整個水庫水體視為一控制體積，並未對水庫做分層之探討，並且假設水體中沉降之營養成份與底泥所釋出者維持一平衡狀態，故未將水庫底泥列入模式考慮。

(三) 浮游植物與營養源間之關係

1. 營養源被植物吸收之流動率， $J(1,4)$ 與 $J(2,4)$ 與 $J(3,4)$

浮游植物吸收營養源之流動率受水體溫度、入射光線及養分濃度之影響，本研究採用 Shoemaker^[11]及德基水庫水質模擬探討報告^[1]之植物生長公式模擬藻類生長，氨氮、硝酸氮及正磷酸鹽至浮游植物之流動率分別表示如下：

$$J(1,4) = \alpha_{41} \cdot G(N) \cdot G_T(X_T) \cdot G_S(X_S) \cdot C_4 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \dots(2)$$

$$J(2,4) = \alpha_{42} \cdot G(N) \cdot G_T(X_T) \cdot G_S(X_S) \cdot C_4 \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} \dots(3)$$

$$J(3,4) = \alpha_{43} \cdot G(N) \cdot G_T(X_T) \cdot G_S(X_S) \cdot C_4 \dots\dots\dots(4)$$

式中 $J(1,4)$ = 氨氮至浮游植物之流動率 [$mg/L-day$]

$J(2,4)$ = 硝酸氮至浮游植物之流動率 [$mg/L-day$]

$J(3,4)$ = 正磷酸鹽至浮游植物之流動率 [$mg/L-day$]

$\alpha_{41} = \alpha_{42}$ = 浮游植物至無機氮之轉換比率 [$mg-N/mg-C$]

α_{43} = 浮游植物至正磷酸鹽之轉換比率 [$mg-P/mg-C$]

$G(N)$ = 浮游植物生長之養分限制因子 [無因次]

$G_T(X_T)$ = 浮游植物生長之溫度限制因子 [$1/day$]

$G_S(X_S)$ = 浮游植物生長之光線限制因子 [無因次]

各項限制因子分述如下：

(a) 溫度限制因子

在養分充足與適當陽光條件下，藻類生長受溫度影響最大，Di Toro et al.^[6]建議：

$$G_T(X_T) = c_1 \cdot X_T \dots\dots\dots(5)$$

式中 c_1 = 浮游植物之飽和生長率 [1/day-°C]
 X_T = 溫度 [°C]

(b) 光線限制因子

根據 Di Toro et al. [6], 光線限制因子可表示成：

$$G_S(X_S) = \left[\frac{2.718 \cdot f}{k_e \cdot z} (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_2}) \right] \dots\dots\dots(6)$$

式中 $\alpha_1 = \frac{X_S}{I_S} e^{-k_e z}$; $\alpha_2 = \frac{X_S}{I_S}$

X_S = 日照強度 [ly/day]

I_S = 飽和日光強度 [ly/day]

f = 白天有陽光時間佔一天之比例 [無因次]

k_e = 消散係數 = $k'_e + 0.17 \cdot C_4$ [1/m]

k'_e = 無藻類時水體之消散係數 [1/m]

z = 有效深度 [m]

(c) 養分限制因子

本研究探討之營養源包括無機磷及無機氮兩部分，依 Di Toro et al. [6] 假設浮游植物養分限制因子乃是各消滅因子之乘積，可表示成：

$$G(N) = \frac{TN}{TN + K_1} \cdot \frac{C_3}{C_3 + K_2} \dots\dots\dots(7)$$

式中 TN = 無機氮濃度 = $C_1 + C_2$ [mg/L]

K_1 = 無機氮之半飽和係數 [mg/L]

K_2 = 無機磷之半飽和係數 [mg/L]

2. 浮游植物死亡回歸至營養源之流動率, J(4,1) 與 J(4,3)

浮游植物之總死亡率由植物本身內呼吸率 (Endogenous respiration rate)、浮游動物攝食率 (Grazing rate)、沉澱率 (Sinking rate) 及其他寄生蟲或魚類吃食之速率所組成，本研究僅考慮前兩項較重要者。浮游動物攝食率將於下節討論，而浮游植物之內呼吸作用使植物轉化成氨氮及無機磷，其流動率如下所示：

$$J(4,1) = (\alpha_{41} + \beta_{41}) \cdot C_4 \cdot G_T^P(X_T) \dots\dots\dots(8)$$

$$J(4,3) = (\alpha_{43} + \beta_{43}) \cdot C_4 \cdot G_T^P(X_T) \dots\dots\dots(9)$$

式中 $G_T^P(X_T) = E_T \cdot X_T$ [1/day]

E_T = 浮游植物之內呼吸率 [1/day-°C]

β_{41} = 浮游植物中有機氮轉換成氨氮之比例 [mg-N/mg-C]

β_{43} = 浮游植物中有機磷轉換成無機磷之比例 [mg-P/mg-C]

(四) 浮游動物與浮游植物及營養源間之關係

水域生態系統中與浮游動物相關之流動率包括浮游動、植物間以及浮游動物與營養源間之關係，分述如下：

1. 浮游動物攝食浮游植物之流動率, J(4,5)

浮游植物到浮游動物之流動率即為浮游動物之攝食率，每一隻浮游動物所能攝取之數量與本身對於週遭浮游植物之收尋率和浮游植物濃度有密切關係，浮游動物之攝食率 J(4,5) 表示如下：

$$J(4,5) = c_g \cdot C_4 \cdot C_5 \dots\dots\dots(10)$$

式中 c_g = 浮游動物之攝取率 [L/day-mg]

2. 浮游動物回歸至營養源之流動率 (包含排泄及死亡), J(5,1) 與 J(5,3)

Di Toro et al. [6] 認為浮游動物轉換成氨氮及無機磷之流動率是由於浮游動物之死亡與排泄作用所造成，死亡流動率與浮游動物之死亡率及數量有密切關係，而浮游動物因排泄而使養分回歸到水中，綜合兩者則可得到由浮游動物到氨氮及無機磷之流動率 J(5,1) 與 J(5,3)，如下所示：

$$J(5,1) = (\alpha_{51} + \beta_{51}) \left[D \cdot C_5 + \alpha_{45} \cdot \left(c_g - \frac{a \cdot K_3}{K_3 + C_3} \right) \cdot C_4 \cdot C_5 \right] \dots\dots\dots(11)$$

$$J(5,3) = (\alpha_{53} + \beta_{53}) \left[D \cdot C_5 + \alpha_{45} \cdot \left(c_g - \frac{a \cdot K_3}{K_3 + C_3} \right) \cdot C_4 \cdot C_5 \right] \dots\dots\dots(12)$$

式中 D = 浮游動物之死亡率 [1/day]

K_3 = 浮游植物之半飽和係數 [mg/L]

$a = c_g \cdot \alpha_{45}$ [L/mg-day]

α_{45} = 浮游植物至浮游動物之轉換比率 [mg-C/mg-C]

β_{51} = 浮游動物中有機氮轉換成氨氮之比例 [mg-N/mg-C]

β_{53} = 浮游動物中有機磷轉換成無機磷之比例 [mg-P/mg-C]

(五) 各項濃度改變率

水域生態系統中氨氮、硝酸氮、無機磷、浮游植物及浮游動物之濃度改變乃是由上述各項流動率所造成，分述如下：

1. 氨氮：

$$\frac{dC_1}{dt} = J(1,1) - K_{N1} \cdot C_1 + J(4,1) + J(5,1) - J(1,4) \dots\dots\dots(13)$$

式中 K_{N1} = 氨氮之衰減係數 [1/day]

2. 硝酸氮：

$$\frac{dC_2}{dt} = J(2,2) + K_{N2} \cdot K_{N1} \cdot C_1 - J(2,4) \dots\dots(14)$$

式中 K_{N2} = 亞硝酸氮之衰減係數 [1/day]

3. 無機磷：

$$\frac{dC_3}{dt} = J(3,3) + J(4,3) + J(5,3) - J(3,4) \dots\dots(15)$$

4. 浮游植物：

$$\frac{dC_4}{dt} = J(4,4) + G_P - D_P - J(4,5) \dots\dots(16)$$

式中 $G_P = (J(1,4) + J(2,4)) / \alpha_{44} = J(3,4) / \alpha_{34}$ = 浮游植物成長率 [mg/L-day]

$D_P = J(4,1) / (\alpha_{41} + \beta_{41}) = J(4,3) / (\alpha_{43} + \beta_{43})$ = 浮游植物死亡率 [mg/L-day]

5. 浮游動物：

$$\frac{dC_5}{dt} = J(5,5) + \alpha_{45} \cdot J(4,5) - D_z \dots\dots\dots(17)$$

式中 $D_z = J(5,1) / (\alpha_{51} + \beta_{51}) = J(5,3) / (\alpha_{53} + \beta_{53})$ = 浮游動物死亡及排泄率 [mg/L-day]

將(13)至(17)式轉換為差分方程式後便可進行水庫水質變化之動態模擬。

三、模擬案例

(一) 模擬對象與輸入資料

本研究以德基水庫為模擬對象，此水庫屬峽谷型，水體長而深，為大甲溪一系列水庫之一，其下游有青山、谷關、天輪、石岡等水庫與電廠。本研究以德基水庫上游第 39 斷面至德基大壩之間為控制體積進行模擬，考慮水庫上游河川及各支流之入流、水庫放流以及水庫水體中養分與浮游動、植物間之消長，流入河川包括大甲溪、松茂溪、佳陽溪、晉元溪、成武溪與梨山污水等六條主流。由於德基水庫上游斷面實測資料時常會出現較高之葉綠素濃度，與中下游段葉綠素濃度實測資料相距頗大，故將模擬之上游邊界定於第 39 斷面，以其各項濃度代表大甲溪及松茂溪之入流濃度，藉此模擬德基水庫中下游水體之水質變化，各測站位置及支流分佈如圖 2 所示。

本研究採用德基水庫水質模擬報告^[1]民國 72 年 2 月至 12 月之實測資料為模式檢定與驗證之依據，入流濃度則以各支流之流量加權平均值代表之，水庫日入流量、放流量與各種入流濃度等輸入條件分別如圖 3 至圖 8 所示。浮游動物入流濃度因缺乏實測資料故根據 Di Toro et al. ^[6]之假設採用固定值輸入。葉綠素與浮游植物之轉換係數採用 Di Toro et al. ^[6]之建議值(50 mg-C=1 mg-Chl)。演算時距(Δt)採 1 天，控制體積 V 為水庫當日容積加上每日進出水流體積變化量。



圖 2 德基水庫模擬範圍示意圖

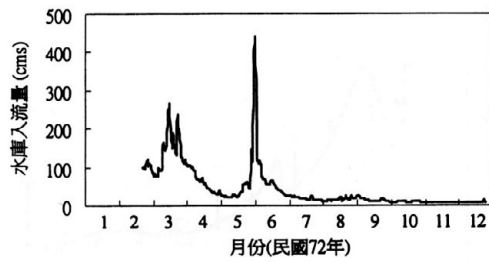


圖 3 河川日入流量

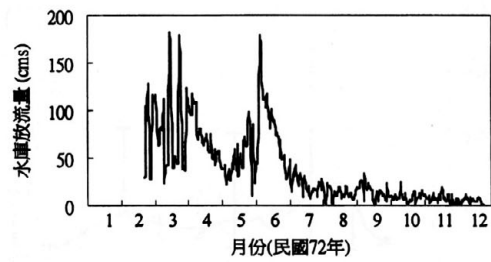


圖 4 水庫日放流量

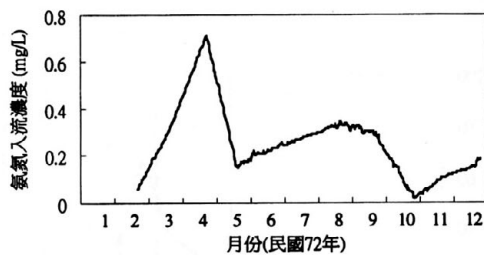


圖 5 氨氮入流濃度

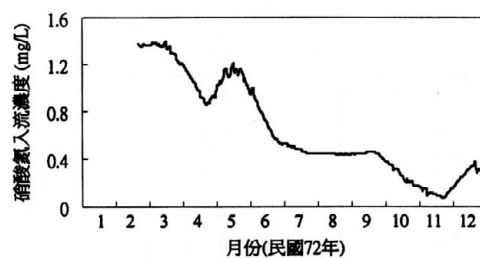


圖 6 硝酸氮入流濃度

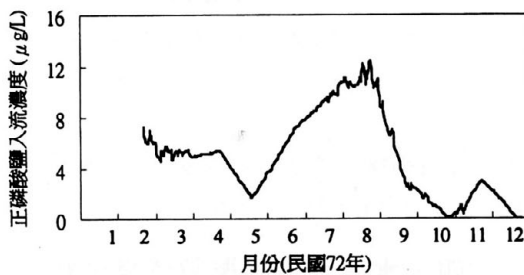


圖 7 正磷酸鹽入流濃度

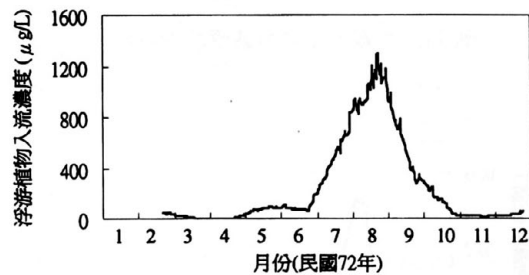


圖 8 浮游植物入流濃度

(二) 模式參數檢定及結果驗證

本研究中各項參數乃參照相關文獻^[6, 11]中之參數值並參考比較德基水庫水質模擬與探討研究報告^[1, 2]之檢定參數值，再針對本模式進行各項參數分析而得，各項參數檢定值列如表 1。

模擬結果驗證如圖 9 至圖 13 所示，分別代表民國 72 年水庫內氨氮、硝酸氮、正磷酸鹽、葉綠素與浮游動物等濃度變化，圖中實測值是利用水庫各斷面濃度與體積加權平均而得，誤差線乃是標示各斷面濃度之最大值及最小值。由圖 9

至圖 12 中可看出模擬結果與實測之水庫水質非常接近，變化趨勢也大致相同。

由圖 9 之模擬結果可看出氨氮濃度在三月有一高峰，由圖 3 及圖 6 可知，此時受到入流影響較大，水庫內氨氮濃度在九月也有一高峰產生，此乃因藻類在此時生長較旺(如圖 12 所示)，藻類死亡及內呼吸作用回到氨氮之流動率隨之增加。另外硝酸氮之模擬結果(圖 10)顯示三月底有一高峰，此亦可由圖 3 及圖 6 得知是因為較大之入流量及濃度所造成。正磷酸鹽之模擬結果

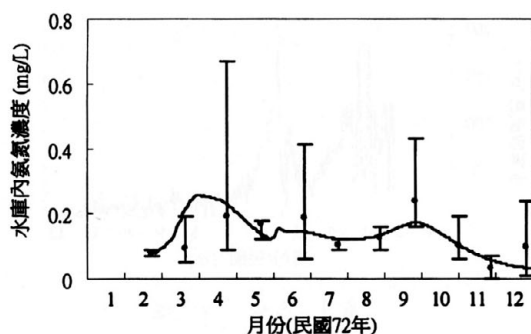


圖 9 水庫內氨氮濃度模擬結果

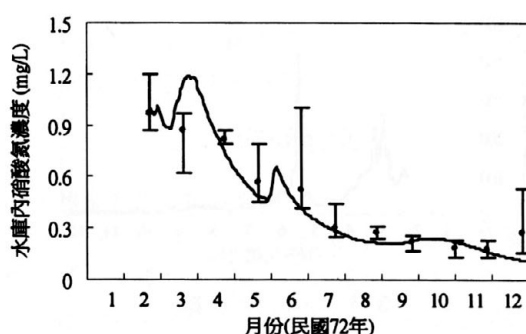


圖 10 水庫內硝酸氮濃度模擬結果

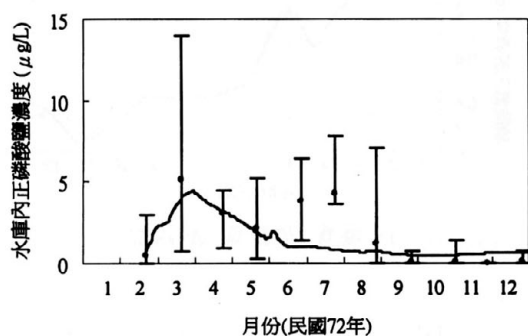


圖 11 水庫內正磷酸鹽濃度模擬結果

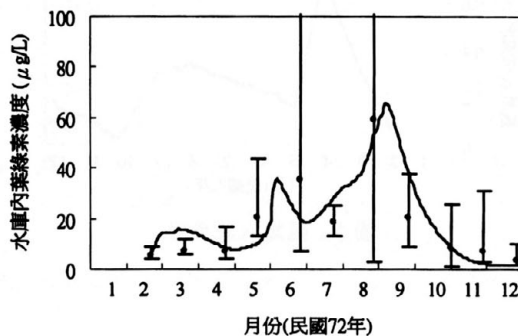


圖 12 水庫內葉綠素濃度模擬結果

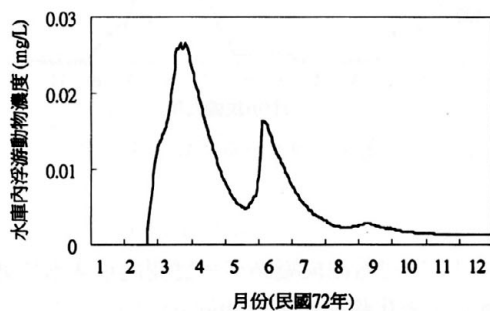


圖 13 水庫內浮游動物濃度模擬結果

(圖 11)顯示，由於六月開始藻類急劇增加，正磷酸鹽被攝取量大於河川入流量，故造成水庫內正磷酸鹽含量偏低。圖 12 顯示水庫內葉綠素濃度在八、九月時有一高峯值，此亦為上游入流的影響，此時上游斷面出現極高的葉綠素含量，可由圖 8 看出此時葉綠素入流濃度高達 $1000\mu\text{g/L}$ 以

上。浮游動物之濃度與入流量變化趨勢大致相同，受到入流(圖 3)之影響相當大。

四、水庫水質模擬敏感度分析

上述案例之模擬結果顯示，水庫之水質變化和水庫上游入流濃度有密切關係，本研究乃藉水域生態系統模式分析水庫入流之各項濃度對水庫水質之影響。模擬時每次固定一種營養源之入流濃度並計算其他各項水質濃度之變化，以探討此入流濃度對水庫水質之影響。在沒有實測資料可供驗證的情況下，本研究在浮游動物之敏感度分析方面係將水庫內浮游動物濃度固定，以探討水庫內浮游動物多寡與水質之相關性。分成下列五種情況討論之。

(一) 固定氨氮入流濃度

表 1 模式參數檢定值

參 數 名 稱	符號	單位	檢定值
藻類飽和生長率	c_1	l/day-°C	0.08
有效深度	z	m	2
飽和日光強度	I_s	Ly/day	350
氮半飽和係數	K_1	mg/L	0.08
磷半飽和係數	K_2	mg/L	0.0025
植物半飽和係數	K_3	mg/L	0.025
藻類內呼吸率	E_T	l/°C	0.005
藻類轉換成無機氮之比例	α_{41}, α_{42}	mg-N/mg-C	0.05
藻類轉換成無機磷之比例	α_{43}	mg-P/mg-C	0.0025
藻類轉換成浮游動物比例	α_{45}	mg-C/mg-C	0.6
浮游動物轉換成無機氮的比例	α_{51}	mg-N/mg-C	0.083
浮游動物轉換成無機磷的比例	α_{53}	mg-P/mg-C	0.004
藻類中有機氮轉換成氨氮之比例	β_{41}	mg-N/mg-C	0.009
藻類中有機磷轉換成正磷酸鹽之比例	β_{43}	mg-P/mg-C	0.005
動物中有機氮轉換成氨氮之比例	β_{51}	mg-N/mg-C	0.015
動物中有機磷轉換成正磷酸鹽之比例	β_{53}	mg-P/mg-C	0.008
浮游動物攝取率	c_g	L/day-mg	0.13
浮游動物死亡率	D	1/day	0.075
無藻類時水體之消散係數	k'_e	1/m	4
氨氮之衰變係數	K_{N1}	無因次	0.05
亞硝酸氮之衰變係數	K_{N2}	無因次	0.09
浮游動物入流濃度	C_{50}	mg/L	0.5

本研究固定氨氮入流濃度，每次模擬採用不同之定值輸入，其餘入流濃度則參照民國 72 年德基水庫實測資料，以探討氨氮之入流濃度對水庫內各項水質之影響，模擬結果如圖 14 所示。

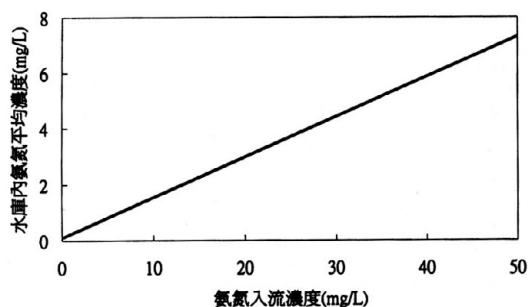
模擬結果顯示水庫內氨氮及硝酸氮平均濃度會隨著氨氮入流濃度增加而呈線性增加，顯示氨氮入流量的增加會直接影響到水庫內氨氮濃度，而硝酸氮之唯一來源乃是氨氮，所以硝酸氮濃度亦會隨著氨氮濃度增加而增加。當水庫內氨氮及硝酸氮濃度增加後，因為營養源供給充裕，所以水庫內葉綠素濃度會隨之增加，但是當氨氮入流濃度到達約 10 mg/L 時，葉綠素濃度即不會再大幅改變，當氨氮之入流濃度從 0mg/L 增加到

50mg/L 時，葉綠素濃度僅從 20.1mg/L 增加到 20.4 mg/L，顯示磷酸鹽對植物生長之限制因素仍然存在，故單純增加氮含量並不會使植物生長活動加劇。水庫內正磷酸鹽濃度則會因為浮游植物濃度增加而增加對磷酸鹽的攝取量，故水庫內磷酸鹽濃度會因而減少，而浮游動物之濃度則不受影響。

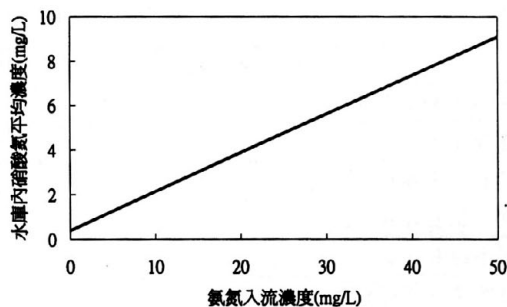
(二) 固定硝酸氮入流濃度

固定硝酸氮之入流濃度，每次模擬採用不同之定值輸入，以探討硝酸氮入流濃度對水庫內各項水質之影響，模擬結果如圖 15 所示。

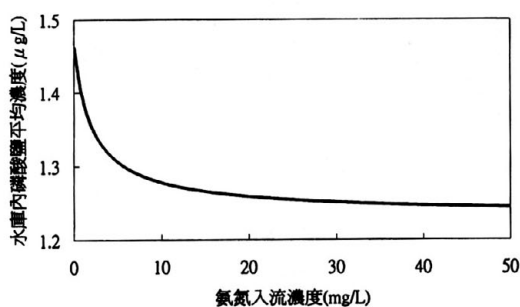
固定硝酸氮入流濃度之模擬結果與(一)之模擬結果類似，水庫內氨氮及硝酸氮濃度會隨著



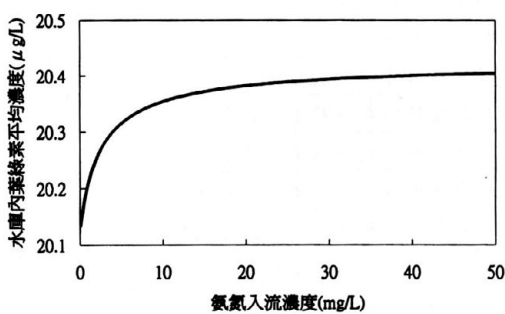
(a)



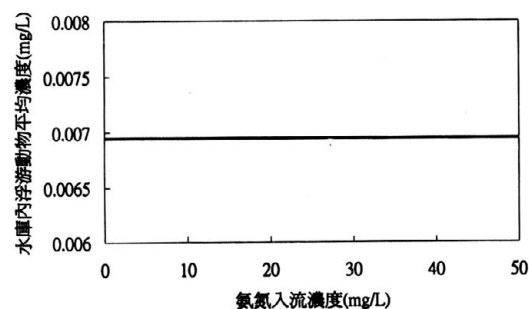
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 14 (a)至(e)分別代表水庫內氨氮、硝酸氮、無機磷、葉綠素及浮游動物之年平均濃度隨氨氮入流濃度改變之情況

硝酸氮入流濃度增加而呈線性增加，由於水庫內硝酸氮之濃度增加，植物攝取硝酸氮之比率也會增加，水庫內剩餘氨氮濃度因而增加。正磷酸鹽與葉綠素模擬結果則與(一)相同，由於無機氮之限制因素消失，所以造成葉綠素之增多及正磷酸鹽之消耗，但與(一)之結果差異並不大。而對於浮游動物仍是沒有影響。

(三) 固定正磷酸鹽入流濃度

固定正磷酸鹽之入流濃度，每次模擬採用不同之定值輸入，以探討正磷酸鹽入流濃度對水庫內各項水質之影響，模擬結果如圖 16 所示。

模擬結果顯示正磷酸鹽入流濃度增加會直接造成水庫內正磷酸鹽濃度增加，此時葉綠素濃度會隨著養分限制因素減低而急劇增加，當正磷酸鹽濃度增加至約 $1000 \mu\text{g/L}$ 使浮游植物生長達到極限時，葉綠素濃度約維持在 $80 \mu\text{g/L}$ ，由 (一) 及 (二) 之模擬結果可知，無機氮濃度增加僅能使葉綠素濃度增加到約 $20.4 \mu\text{g/L}$ ，故水庫內營養源之限制因子乃由無機磷濃度主控。

圖 16(a)與(b)分別顯示水庫內氨氮濃度會隨著正磷酸鹽入流濃度增加而漸增，而硝酸氮濃度則會漸減，而在正磷酸鹽入流濃度到達約 $100 \mu\text{g/L}$ 時趨於平衡，原因可由圖 16(d)中看

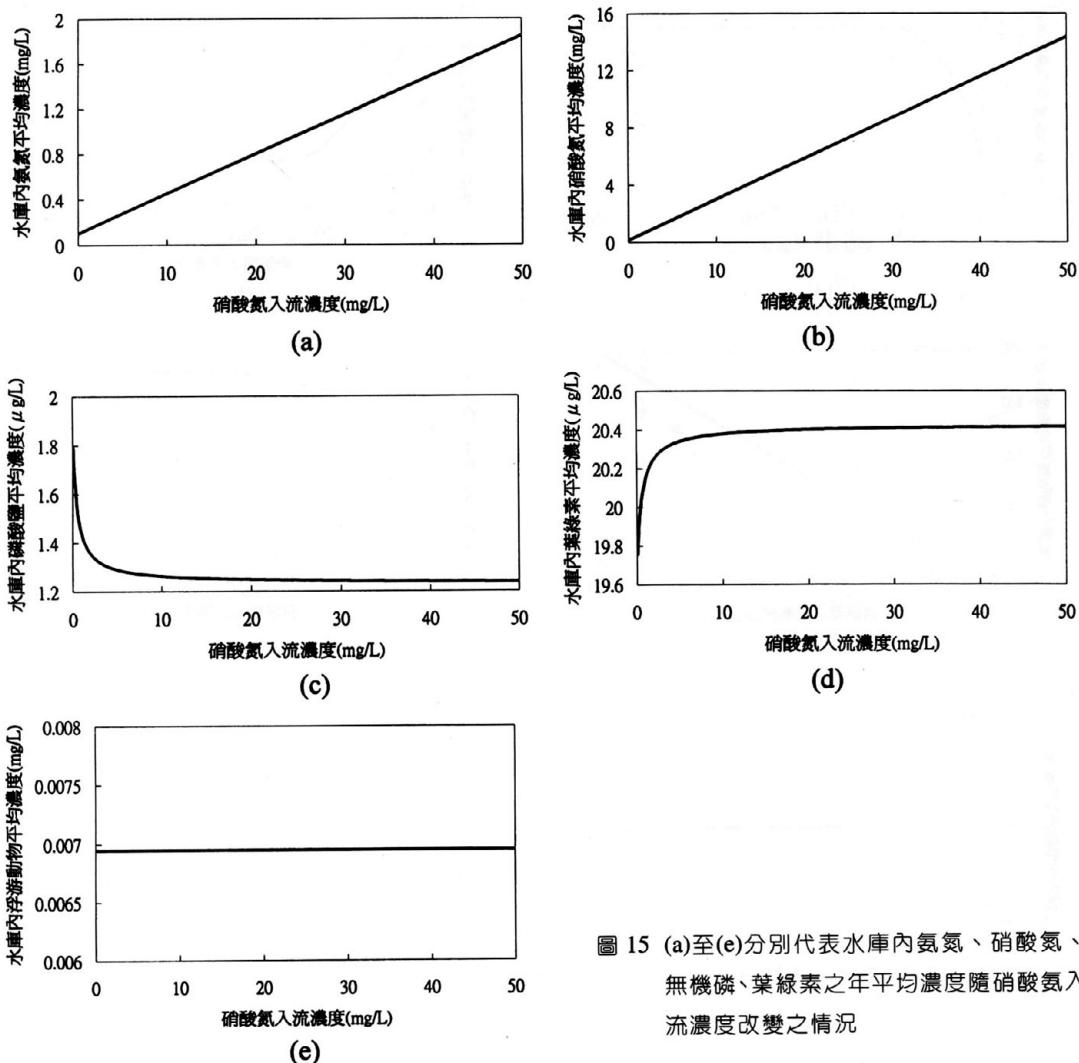


圖 15 (a)至(e)分別代表水庫內氨氮、硝酸氮、無機磷、葉綠素之年平均濃度隨硝酸氮入流濃度改變之情況

出，此時葉綠素濃度已經不再增加，而葉綠素增加乃是因為生化作用加劇，所以無機氮(包含氨氮及硝酸氮)被攝取量則會增加，因此硝酸氮濃度會減低，但因浮游植物死亡後會使養分回歸至氨氮，兩者相加成之後，氨氮濃度仍有增加之趨勢。

(四) 固定浮游植物入流濃度

固定浮游植物之入流濃度，每次模擬採用不同之定值輸入，以探討浮游植物入流濃度對水庫內各項水質之影響，模擬結果如圖 17 所示。

由圖 17 中可看出浮游植物入流濃度增加

後，受到影響最大的是水庫內葉綠素濃度，一般河川中所含葉綠素濃度並不會太高，本研究模擬之入流濃度為水庫上游斷面之浮游植物濃度，由於德基水庫上游斷面有優養化之情況，葉綠素濃度時常會高達 100 mg/L 以上，模擬結果中葉綠素之增加乃是受到水流之影響，與增加正磷酸鹽後所造成葉綠素增加的結果不同，顯示水庫上游浮游植物多寡會直接影響到水庫中下游浮游植物的量。

圖 17 顯示水庫中葉綠素濃度之增加受到水流之影響，生化反應並未因此加劇，所以氨氮及硝酸氮則會因浮游植物增多而增加，顯示此時植物回歸至氨氮的量比植物攝取氨氮的量，而正

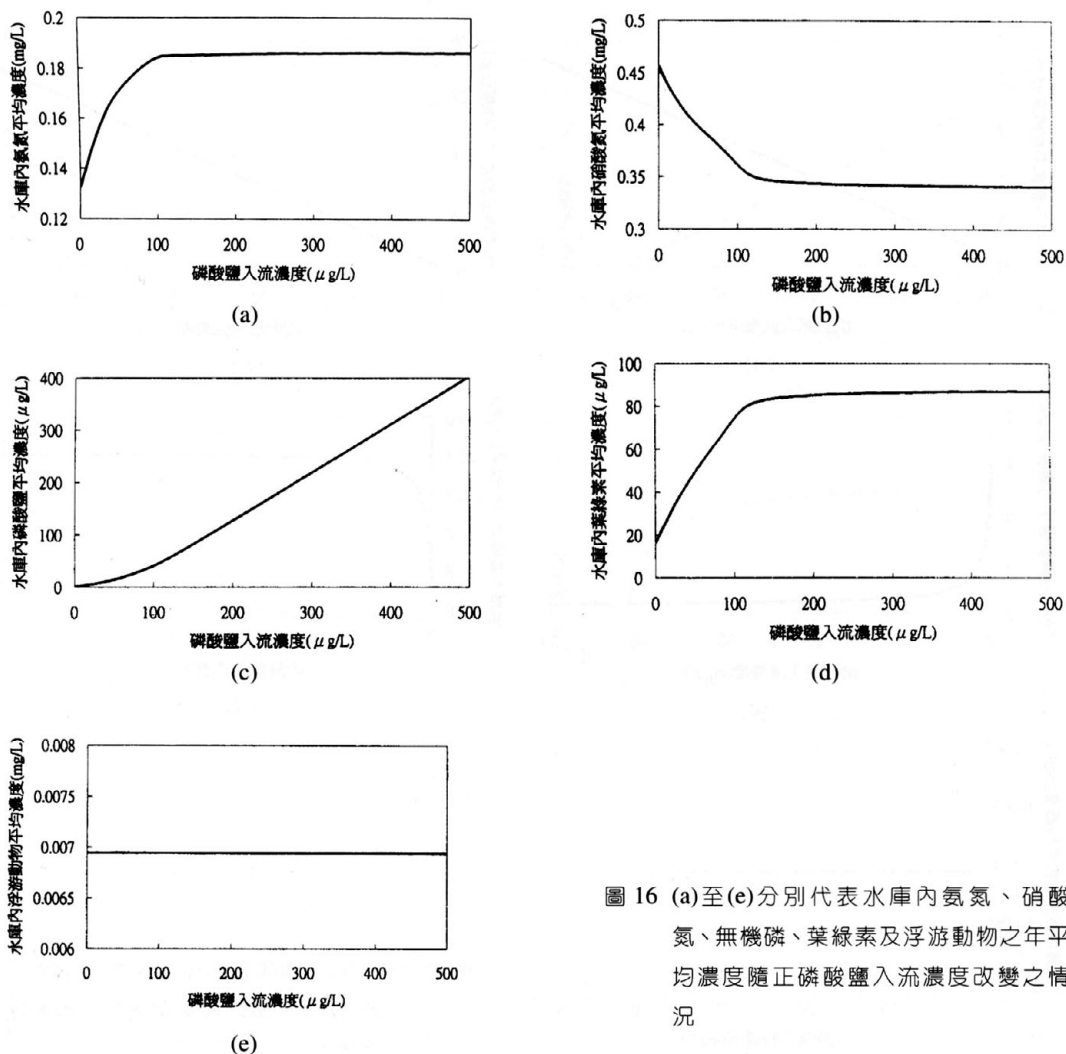


圖 16 (a)至(e)分別代表水庫內氨氮、硝酸氮、無機磷、葉綠素及浮游動物之年平均濃度隨正磷酸鹽入流濃度改變之情況

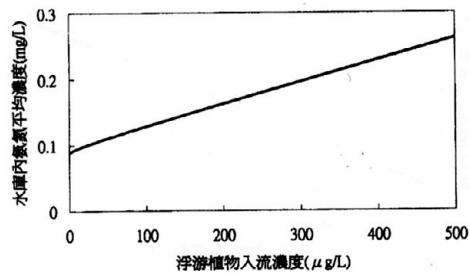
磷酸鹽則相反，植物體內含磷量較少，而且磷又是浮游植物生長最重要的限制因子，因此植物攝取磷的量比植物回歸至磷的量。

(五) 固定水庫內浮游動物濃度

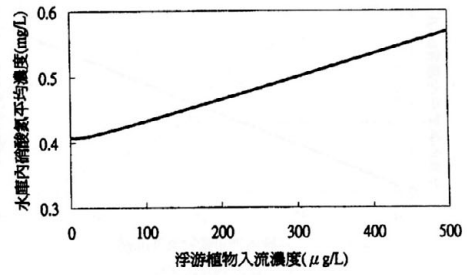
上述(一)至(四)之模擬結果顯示水庫內浮游動物年平均濃度並不會隨著其他水質濃度變化而產生增減，年平均濃度均為 0.0069mg/L ，可能係由於浮游動物之起始濃度及入流濃度假設值太低，使浮游動物濃度僅受到入流量之影響，並不會與其他水質濃度有相關性。因此本研究固定水庫內浮游動物濃度進行水質模擬，探討水庫

內浮游動物多寡對於水庫水質的影響，模擬結果如圖 18 所示。

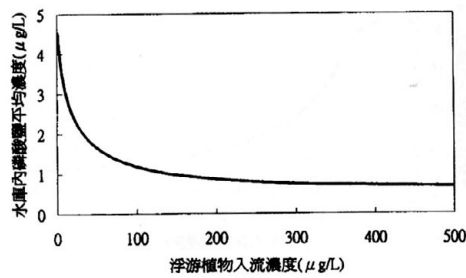
模擬結果顯示水庫內浮游動物之濃度增加對水庫內氨氮、硝酸氮、正磷酸鹽及葉綠素濃度都會造成影響。由圖 18(d)中可看出水庫內葉綠素濃度先增後減，一開始因為浮游動物濃度增加而回歸至營養源之生化反應增加，所以三種營養源皆呈現增加之趨勢，進而浮游植物生長率也隨之遞增，但是當浮游動物濃度達到約 5mg/L 時，浮游動物攝取浮游植物的量開始超過植物生長量，所以浮游植物開始遞減。模擬結果顯示浮游動物濃度對於水庫水質確實有所影響。



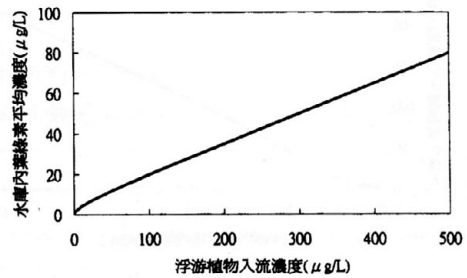
(a)



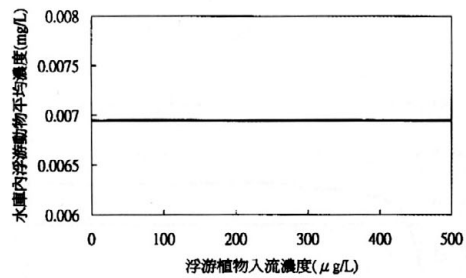
(b)



(c)



(d)



(e)

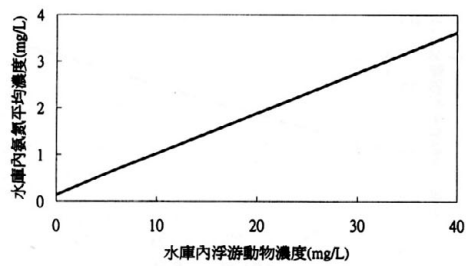
圖 17 (a)至(e)分別代表水庫內氨氮、硝酸氮、無機磷、葉綠素及浮游動物之年平均濃度浮游植物入流濃度改變之情況

五、水庫水質優養化風險評估

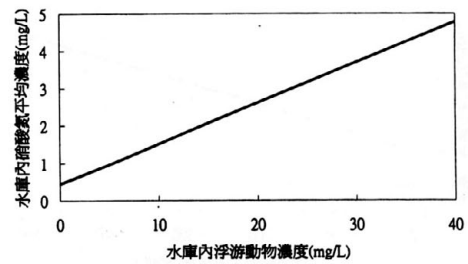
本節根據上述模擬結果，評估各項入流濃度及限制因子對於水庫水質優養化風險的影響，探討的項目包括氨氮、硝酸氮、正磷酸鹽、浮游植物入流濃度、水庫內浮游動物濃度以及植物生長之養分限制因子 $G(N)$ 。本文中優養化風險之定義為水庫內葉綠素濃度超過優養化標準之機率，即為模擬之時段內水庫內葉綠素濃度超過 10mg/L (OECD 之優養化標準)^[4] 之時間所佔之比例，本研究以德基水庫民國 72 年之優養化天數百分比(68%)為基準進行比較，其結果如圖

19 至圖 24 所示。

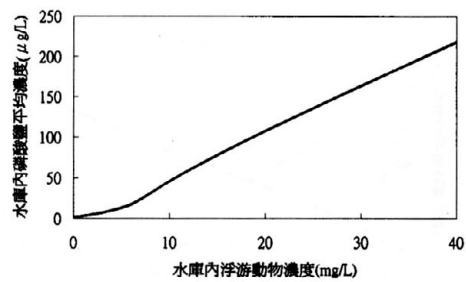
由圖 19 與圖 20 之結果可看出氨氮及硝酸氮入流濃度增加，對於水庫水質優養化之風險並未有太大影響，因為水庫內無機氮來源較多，即使氨氮或硝酸氮入流濃度為零，水庫內總無機氮仍能維持一定的濃度，而此一濃度已足夠植物生長所需，所以當氨氮或硝酸氮入流濃度增加時，對於植物生長並無太大影響。圖 21 中，正磷酸鹽入流濃度增加的結果將使水庫水質優養化風險從 58% 增至 100%，可見正磷酸鹽為水庫內影響植物生長最巨的一項營養源，若能控制其入流濃度，則可大幅降低水庫水質優養化之風險。



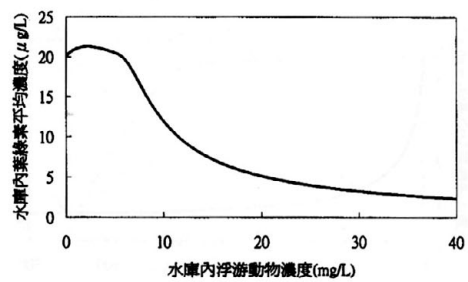
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 18 (a)至(e)分別代表水庫內氨氮、硝酸氮、無機磷、葉綠素及浮游動物之年平均濃度隨水庫浮游動物濃度改變之情況

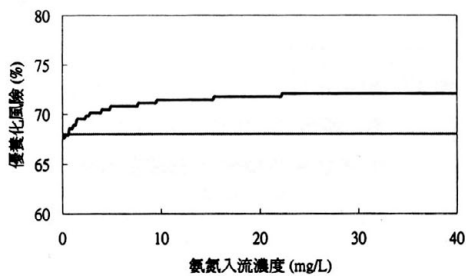


圖 19 氨氮入流濃度與優養化風險之關係

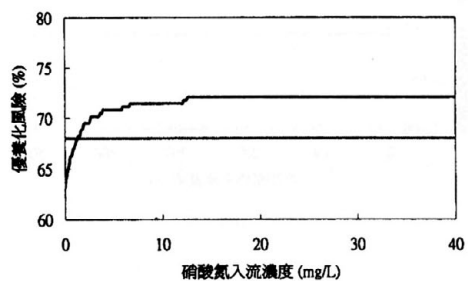


圖 20 硝酸氮入流濃度與優養化風險之關係

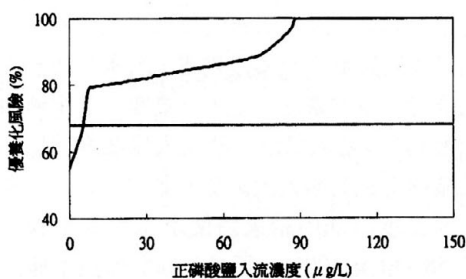


圖 21 正磷酸鹽入流濃度與優養化風險之關係

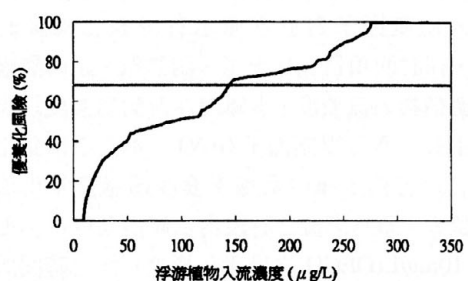


圖 22 浮游植物入流濃度與優養化風險之關係

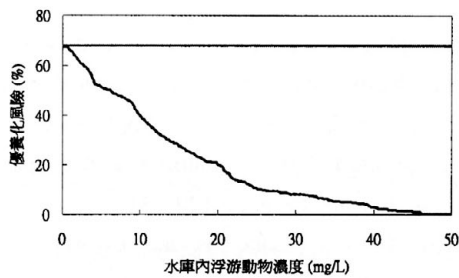


圖 23 水庫內浮游動物濃度與優養化風險之關係

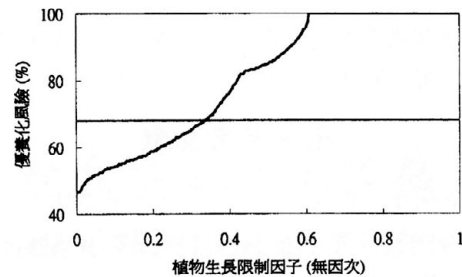


圖 24 營養源限制因子與優養化風險之關係

圖 22 顯示浮游植物之入流濃度增高會造成優養化風險之急劇增加，民國 72 年之資料顯示上游水庫及河川浮游植物入流平均濃度最低為 $0 \mu\text{g/L}$ ，而最高可達 $1000 \mu\text{g/L}$ 以上。圖 22 之結果顯示上游浮游植物入流濃度控制在 $10 \mu\text{g/L}$ 以下時，優養化風險可降低至 0%，但是浮游植物平均入流濃度增至 $280 \mu\text{g/L}$ 左右時，則水庫水質優養化風險高達 100%，可見浮游植物入流濃度直接影響水庫水質優養化的程度。

圖 23 顯示水庫內浮游動物濃度的增加，使水庫水質優養化風險降低，當水庫內浮游動物濃度增至約 47mg/L 時，優養化風險降至 0%，由此結果得知增加水庫內浮游動物的量可以降低葉綠素的濃度，但卻會造成營養源(氮、磷)的增加。無機氮及無機磷的濃度均會對植物生長造成影響，此兩項限制因子之乘積便是植物生長之減低因子 $G(N)$ ，如公式(7)所示。由各項模擬結果可知，增加任何一種營養源的入流濃度都能降低對植物生長所造成的限制，由圖 24 可知，當 $G(N)$ 增大越趨近於 1 時，因植物生長越旺故優養化風險越高，但 $G(N)$ 為 0 時，優養化風險仍在 40% 以上，此乃因上游入流的浮游植物濃度非常高，故雖然此時無植物生長之生化反應發生，但僅靠水力傳輸就可使中下游水庫水質發生優養化現象。

六、結論

1. 本研究以水域生態系統模式模擬水庫水質之動態變化，模擬結果顯示本模式能有效模擬水庫水質(包含氨氮、硝酸氮、正磷酸鹽、浮

游植物與浮游動物)之互動關係。

2. 磷酸鹽是造成水庫內葉綠素濃度急劇增加之主控因素，本研究之模擬結果顯示正磷酸鹽入流濃度增高至植物生長所需攝取的最大量時，將使水庫內葉綠素平均濃度由 20mg/L 左右增至約 80mg/L 。
3. 水庫水質除了受水體中生化作用之控制外，水庫入、放流量之影響亦不可忽略，本研究之模擬結果顯示上游浮游植物入流濃度太高為造成水庫水質優養化之主因之一，生化作用因受到正磷酸鹽的限制，其效果並不顯著。
4. 敏感度分析結果顯示，增高水庫內浮游動物濃度會增加回歸至水庫水體之營養源，但浮游動物攝取浮游植物的量卻因而增多，此對降低水庫內藻類的大量繁殖有顯著的效果。
5. 本研究分析結果顯示控制上游浮游植物或營養源之入流濃度皆可降低水庫水質優養化之風險，若能將浮游植物入流濃度控制在 $150 \mu\text{g/L}$ 以下，則水庫水質優養化風險可低於民國 72 年的優養化風險，浮游植物入流濃度降至 $10 \mu\text{g/L}$ 以下時，優養化風險可降至 0。另一方面，控制營養源之入流濃度亦可降低水庫水質優養化之風險，但因營養源之來源較多，若只單獨減低一種營養源之入流並不會造成太大之影響，若將植物生長之營養源完全阻絕，可將水質優養化風險降至約 40%，此時水庫水質之優養化主要受浮游植物入流之影響。由此可知，若能適當控制水庫上游之營養源入流濃度，使水庫上游斷面

之葉綠素濃度降低，則水庫水質優養化之風險可大幅降低。

七、參考文獻

1. 郭振泰、楊德良、何政儒，德基水庫水質模擬探討第一年研究報告，水資會/台大土木研究所，民國 73 年 12 月。
2. 郭振泰、楊德良、何政儒，德基水庫水質模擬探討第二年研究報告，水資會/台大土木研究所，民國 74 年 12 月。
3. 陳樹群，河川動態水質數學模式之建立與應用，台大土木研究所碩士論文，民國 73 年 6 月。
4. 經濟部水資源統一規劃委員會，德基水庫集水區第三期整體治理規劃，第二年(83 年度)工作報告，25-資-07-02，民國 83 年。
5. Streeter, H.W., and E.B. Phelps, "A Study of the Pollution and Nature Purification of Ohio River", U.S. Pub. Health Service, Pub. Health Bull., No.146, 1925.
6. Di Toro, D. M., D. J. O'Connor, and R. V. Thomann, "A Dynamic Model of Phytoplankton Populations in the Sacramento-San Joaquin Delta", American Chemical Society Ser., 106:131-180, 1971.
7. Di Toro, D. M., D. J. O'Connor, and R. V. Thomann, "Phytoplankton Zooplankton Nutrient Interaction Model for Westtren Lake Erie", Chap.11 in: Systems Analysis and Simulation in Ecology, Vol. 3, B. C. Patten (ed.), Academic Press Inc., New York, 1975.
8. Schaffner, W. R. and Oglesby, R. T., "Phosphorus Loadings to Lakes and Some of Their Responses. Part 1. A New Calculation of Phosphorus Loading and Its Application to 13 New York Lakes", Limnology and Oceanography, January 1978, pp.120-134.
9. Chen, C. W., "Concepts and Utilities of an Ecologic Model", J. Sanit. Div. ASCE, Vol. 95, No. SA5, Paper No. 7602, 1970.
10. Orlob, G.T., "Models for Stratified Impoundments", Chap. 8 in: Models for Water Quality Management, A.K. Biswas (ed.), McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
11. Shoemaker, C. A., "Mathematical Construction of Ecological Models", in: Ecosystem Modeling in Theory and Practice, C.A.S. Hall and J.W. Day, Jr. (ed.), pp. 75-114, John Wiley and Sons, New York, 1977.
12. Riley, G. A., H. Stommel, and D. F. Bumpus, "Quantitative Ecology of the Plankton of the Western North Atlantic", Ball. Bingham Oceanog. Cou., Vol. 12, No.3, pp.1~169, 1949.
13. Brezonik, P. D., and J. J. Messer, "Analysis of Trophic Conditions and Eutrophication Factors in Lake Weir, Florida", in *North American Project - A study of U. S. Water Bodies*, compiled by L. Seyb and K. Randolph, Env. Res. Lab, Corvallis, USEPA, 1977.

收稿日期：民國 87 年 9 月 1 日

修正日期：民國 87 年 9 月 24 日

接受日期：民國 87 年 10 月 7 日