

# 南化水庫集水區水質管理決策系統之策略研究

## Study on Decision-Making System of Water Quality in Nan-Wha Watershed

梁大慶<sup>1</sup> 陳鴻烈<sup>2</sup> 鄭慧玲<sup>3</sup> 江永哲<sup>4</sup>

針對後崛溪南化水庫集水區為對象，連結地理資訊系統，將數理模式與現場的地文狀況作適當的結合，經由總量管制及環境管理模式系統分析，可有效管理集水區內的水質。透過集水區管理模式，評估區內現有土地利用狀況與水質污染之關聯性，進而對未來集水區內人為開發與維護作適當的經營管理。提供最佳之因應對策，將經費作效益最大的處理，避免造成經濟、人力及資源的浪費。

### 一、前言

南化水庫於建壩前後之懸浮固體、生化需氧量及氮氮之含量均明顯上升，其中氮氮的變化，在十年之中增加超過了三倍，可見水質惡化情形日益嚴重。若自來水公司採用已污染水源，水質淨化處理費用將呈倍數增加，諸如消毒用氯劑量提高，沈澱、混凝及過濾等程序複雜化，不符合經濟原則。且經淨水處理後的自來水，仍會含有許多微量有機物質、無機性物質及殘餘的農藥等。在未有適當的處理前，可能會有不良之影響：腫瘤、癌症、突變等之發生，對下游飲用水居民，有生命健康的威脅，社會成本難以估計。

在早期的水資源管理目的著重水量的開發與規劃，如蓄水、防洪、灌溉及排水等。但隨著時代的變遷及人口的增加

---

1 國立中興大學水土保持研究所博士班研究生

2 國立中興大學水土保持研究所副教授

3 國立中興大學水土保持學系毒物處理研究室特別助理

4 國立中興大學水土保持學系教授

，上游集水區內常因不當的開發或未加以水土保持的維護及處理，可能因部份地區特殊之地質特性，加速土壤沖蝕，使得河水中產生懸浮固體物漸高，導致水質產生變化，並減少水庫使用年限。再者，由於土地利用在國內低度管制政策下，非法的開發利用非常普遍，集水區內常作為果園及農作物栽培使用，又因農業上普遍利用化學肥料、殺蟲劑、殺草劑等化學物質，引起非點源污染。另外，由於人口移入聚落形成，產生家庭廢水及垃圾污染水源之問題。所以現階段水源之管理以水源水質為主要的目標。在地理、氣候因素及水、土交互作用影響下，不同的土地利用型態、目的事業及環境保育必然會發生保護和開發間的衝突，如何管制集水區內的水質，為一重要的課題。

在實際的水資源管理時，牽涉的範圍極廣，觸及多個團體或事件之衝突，因此環境的規劃及管理不是只由規劃單位所擬出的多種方案中尋求各方團體皆可接受的一者；而是需要建立集水區環境管理模式，連結地理資訊系統，將數理模式與現場的地文狀況作適當的結合，透過總量管制及環境管理模式系統分析，可有效管理集水區內的水質。並可透過環境管理模式，對未來集水區內人為開發與維護作適當的規劃。本管理模式以科學的規劃管理技術為基礎，其最大的優點在於公正而客觀的模擬決策行為，可避免不當或妥協的決策，並將經費作效益最大的處理，避免造成經濟、人力資源的浪費。南化水庫集水區污染來源非常複雜，在眾多變因及效益之考量下，應將水源品質數量化以利集水區管理及決策之訂定，而建立完整的水量水質控制；再以環境管理模式為基礎，進行土地利用之管制及污染物排放總量管制等措施，將可維護集水區內環境品質以確保水庫水質之安全。

## 二、進行步驟及流程

### (一) 進行步驟

為達到集水區水質經營管理之目的，須進行下列步驟：

1. 國內外對於水體內污染物傳輸理論模式之蒐集及分析
  2. 國外對於水資源管理之研究及策略探討
  3. 試區調查
    - (1) 地理圖表之調查
    - (2) 地形調查
    - (3) 土壤及地質狀況
    - (4) 植生分佈
    - (5) 氣候狀況
  4. 地理資訊系統的數位化及資料庫的建立
  5. 傳輸理論模式的推導
  6. 水質傳輸室內實驗
  7. 集水區現地水質的監測
  8. 修正數理模式
  9. 水資源管理系統的模擬及分析
  10. 專家諮詢系統的建立
- (二) 工作流程依序，如圖 1 所示：

### 三、管制對象及範圍

集水區內水質污染的發生，主要多由於當地土地利用之行為所造成之各種污染，其中包括了農業經營，禁用或過多之農藥、肥料及畜產廢水，造成河川水體中，氮磷鉀等營養鹽過多。不同的污染源對水質會形成不同型態的破壞，所以集水區內進行污染管制之初，應就集水區特性，訂立符合該區內問題之水質目標予以加強，考慮的管制範圍，通常是以一集水區為單元。以南化水庫為對象，其集水區內作為農業使用之土地甚多，因此水質優養化問題在水庫開發後可能會突顯出來，所以初步以危及水庫水質最重要的營養鹽為例，此即是水體中總磷含量為管制的對象，並在數個支流集水區水流出口設控制點，並加以監測。其管制之範圍以後堀溪集水區南化水庫水源地為試區，其詳細概況分述如下：

- (一) 地理位置：南化水庫位北緯23度5分，東經120度32分，也就是在曾文溪支流之後堀溪中游，約在關山產業道



路一號橋下游 100公尺。行政區屬台南縣南化鄉，壩址位於玉山村茅埔社區附近，如圖 2所示。

- (二) 流域概況：後堀溪發源於頂平林山區，全長35公里，後堀溪集水區由東北向西南傾斜，面積約104平方公里，平均高程為 473公尺，平均坡度為39.3 %，流域水系狀況如圖 3所示。
- (三) 土壤概況：主要為紅黃色灰化土及磚紅土，前者為地表岩石風化而成，其灰化程度隨高程成正比；磚紅土位於高程較低處，風化程度極深。土層淺薄而貧瘠，土壤受降雨量之影響極大。
- (四) 地質概況：計劃區域內之岩層以砂岩及頁岩為主，地層走向為北北東--南南西，大致與河道平行。
- (五) 土地利用：依山地農牧局之調查，土地利用現況以農業用途(栽種水稻或其它雜糧作物)之土地面積高達總面積23%。

#### 四、水質模式之建立

##### (一) 污染水質模式：

本模式主要以質量平衡原理，在河川多項營養來源，如總磷、氮、碳、硝酸氮或農藥等，由於水體中的磷含量為一優養化主要的限制因子，故本試驗先以水體中總磷含量為例說明，考慮單一污染源，進入及輸出水庫集水區之平衡方程式。Vollenweider (1968)之質量平衡模式，其方程式表示如下：

$$\frac{d(P \cdot V)}{dt} = W + Bs - Q_o \cdot P - V \cdot K_s \cdot P$$

V：水庫集水區蓄水體積(L<sup>3</sup>)

P：總磷濃度(M/L<sup>3</sup>)

t：時間(T)

W：總磷負荷量

Bs：總磷釋出率

Ks：總磷之沈降率(T<sup>-1</sup>)

Qo：出流量(L<sup>3</sup>/T)

其中  $V = V_0 + t \cdot (Q_i - Q_0)$

$V_0$  : 水庫集水區初始水容量 ( $L^3$ )

$Q_i$  : 入流量 ( $L^3/T$ )

其中污染之消失率 ( $K_s$ ) 之估計，由 Vollenweider (1976) 提出經驗式，如下所示：

$$K_s = \sqrt{\frac{Q}{V}}$$

在本模式之各項參數，如  $Q_i$ 、 $Q_0$ 、 $B_s$  及  $K_s$  為常數，其中  $V$  為時間之函數。假設單位時間  $\Delta t$  內水體為完全混合之狀態，即是水體之磷濃度在任一個  $\Delta t$  內均視為相同。可將總磷濃度  $P$  以冪級數表示如下：

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} A_n (\Delta t)^n$$

以質量平衡方程式代入總磷濃度  $P$  以冪級數，可求得  $A_n$  係數：

$$A_0 = P = t = 0$$

$$A_1 = \frac{1}{V_0} [W + B_s - P \cdot (Q_i + K_s \cdot V_0)]$$

$$A_n = \frac{1}{n \cdot V_0} \{-A_{n-1} \cdot [K_s \cdot V_0 + n \cdot Q_i - (n-1) \cdot Q_0] - A_{n-2} \cdot K_s \cdot (Q_i - Q_0)\}$$

為模擬水庫集水區內總磷的發生及傳輸，將集水區劃分單位網格，將零維質量平衡方程式推廣成為二維 (郭振泰，1990)。則對於網第  $(i, j)$  之二維質量平衡方程式及示意圖4，如下所示：

$$\begin{aligned} \frac{d(V \cdot P)}{dt} = & Q_i P_{(i,j)} - P_{(i,j)} Q_0 + K_{(i,j)} V_{(i,j)} P_{(i,j)} + \beta_{(i,j)} B_{s(i,j)} - K_{(i,j)} V_{(i,j)} P_{(i,j)} \\ & + [\alpha_{(i,j)-(i,j)} P_{(i,j)} + (1-\alpha_{(i,j)-(i,j)}) P_{(i,j)}] Q_{(i,j)-(i,j)} - [\alpha_{(i,j)-(i,j)} P_{(i,j)} + (1-\alpha_{(i,j)-(i,j)}) P_{(i,j)}] Q_{(i,j)-(i,j)} \\ & + [\alpha_{(i,j)-(i,j)} P_{(i,j)} + (1-\alpha_{(i,j)-(i,j)}) P_{(i,j)}] Q_{(i,j)-(i,j)} - [\alpha_{(i,j)-(i,j)} P_{(i,j)} + (1-\alpha_{(i,j)-(i,j)}) P_{(i,j)}] Q_{(i,j)-(i,j)} \\ & + E_{(i,j)-(i,j)} A_{(i,j)-(i,j)} \cdot (P_{(i,j)} - P_{(i,j)}) + E_{(i,j)-(i,j)} A_{(i,j)-(i,j)} \cdot (P_{(i,j)} - P_{(i,j)}) \\ & + E_{(i,j)-(i,j)} A_{(i,j)-(i,j)} \cdot (P_{(i,j)} - P_{(i,j)}) + E_{(i,j)-(i,j)} A_{(i,j)-(i,j)} \cdot (P_{(i,j)} - P_{(i,j)}) \end{aligned}$$

式中

$V_{(i,j)}$  : 於網格  $(i, j)$  內之蓄水體積 ( $L^3$ )

$P_{(i,j)}$  : 於網格  $(i, j)$  內之總磷濃度 ( $M/L^3$ )

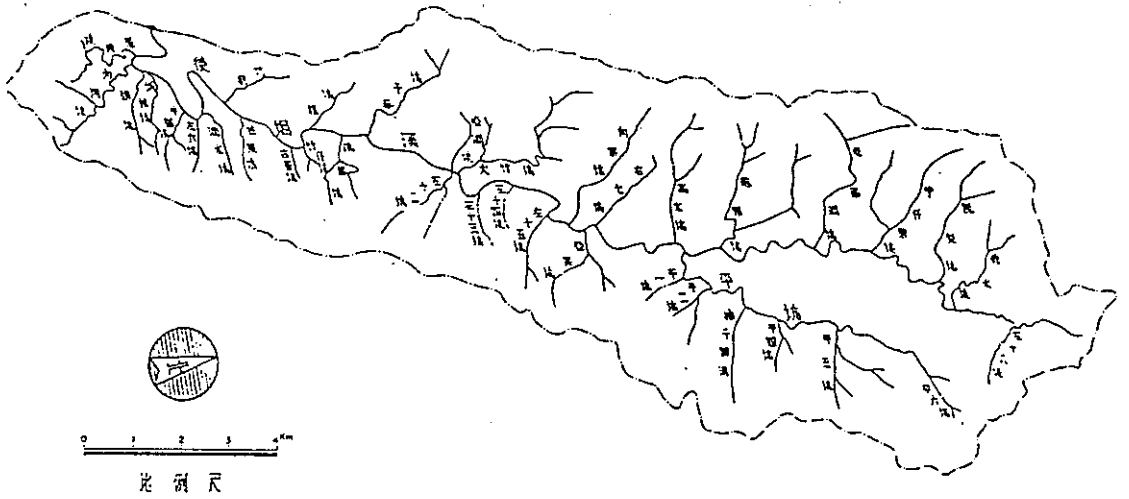


圖 3：南化水庫集水區水系分佈圖

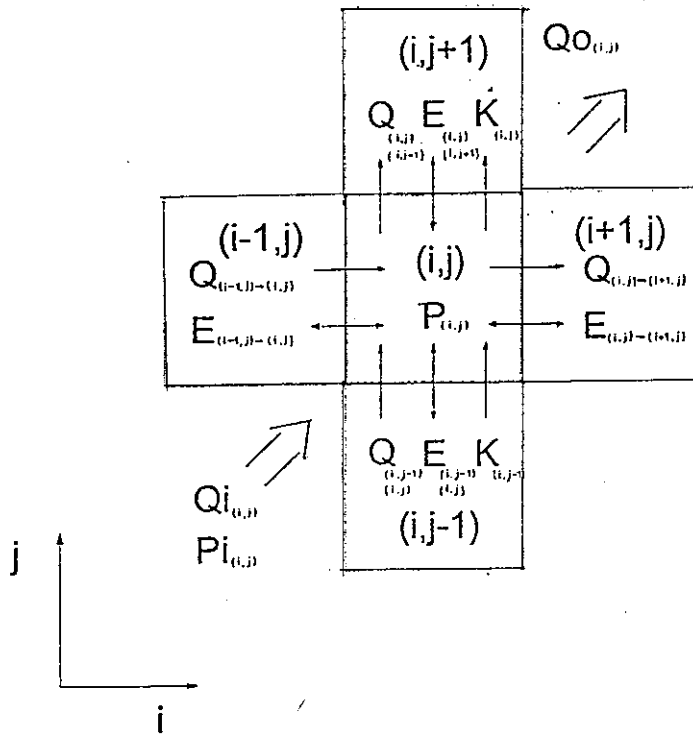


圖 4：網格  $(i, j)$  與鄰近網格水體交互作用示意圖

$P_{i(j)}$ ：流入網格(i, j)內之總磷濃度(M/L<sup>3</sup>)

$K_{(i,j)}$ ：於網格(i, j)內總磷之沈降率(T<sup>-1</sup>)

$Q_{i(j)}$ ：進入網格(i, j)內入流量(L<sup>3</sup>/T)

$Q_{o(i,j)}$ ：流出網格(i, j)之流量(L<sup>3</sup>/T)

$Q_{(i,j) \rightarrow (x,y)}$ ：由網格(i, j)進入(x, y)之流量(L<sup>3</sup>/T)

$E_{(i,j) \rightarrow (x,y)}$ ：由網格(i, j)進入(x, y)之交換係數(L<sup>3</sup>/T)

$A_{(i,j) \rightarrow (x,y)}$ ：由網格(i, j)進入(x, y)之截面積(L<sup>2</sup>)

$\alpha_{(i,j) \rightarrow (x,y)}$ ：流向判斷係數

$\beta_{(i,j)}$ ：網格(i, j)內總磷釋出率

$$P_{(i,j)} = \sum_{n=0}^{\infty} B_{n(i,j)} (\Delta t)^n$$

同理於網格(i, j)之B<sub>n</sub>係數可表示為：

$$B_{0(i,j)} = P_{0(i,j)}$$

$$B_{1(i,j)} = \frac{1}{V_{0(i,j)}} [Q_{i(i,j)} \cdot P_{i(i,j)} + \beta_{(i,j)} \cdot B_{s(i,j)} + B_{o(i,j)} (G_{(i,j)} - Q_{n(i,j)}) + B_{o(i-1,j)} U_{(i,j)} + B_{o(i,j)} W_{(i,j)} + B_{o(i,j-1)} X_{(i,j)} + B_{o(i,j-1)} Z_{(i,j)}]$$

$$B_{n(i,j)} = \frac{1}{n \cdot V_{0(i,j)}} [B_{n-1(i,j)} (G_{(i,j)} - n \cdot Q_{n(i,j)}) + B_{n-2(i-1,j)} S_{(i,j)} + B_{n-2(i,j-1)} Y_{(i,j)} + B_{n-1(i-1,j)} U_{(i,j)} + B_{n-1(i-1,j)} W_{(i,j)} + B_{n-1(i,j-1)} X_{(i,j)} + B_{n-1(i,j-1)} Z_{(i,j)}]$$

其中 $G_{(i,j)}$ 、 $S_{(i,j)}$ 、 $U_{(i,j)}$ 、 $W_{(i,j)}$ 、 $X_{(i,j)}$ 、 $Y_{(i,j)}$ 及 $Z_{(i,j)}$ 為水質模擬之各項參數

(二) 採用平面二維的網格，以流動方向累計污染量，無論點源、線源甚至面源，皆包含在本模式計算與計算之內。

(三) 參數之校正 (Calibration)：將所需要的系統參數查物理及化學之污染物沈降率或釋出率，並以坡度推估平均流速，其餘為定值或操縱變因。反復多次推導，對以上之參數作適當的校正。

(四) 模式之驗證 (Verification)：經校正後參數代入此模式，調整操縱變因以複因子試驗設計進行模式的驗證，

是否超出臨界區域之外或發生不合理之現象；若有者，則應折回參數校正項目再次進行勘驗，直至完全符合為止。

(五) 地域性模式之修正：經過驗證一步驟之後，已得到集水區內水源水質之數理模式，再由已輸入實測後，地理資訊系統之地文及水質資料，套入此模式，對於參數作部分的修正，使之合於特定水庫集水區之區域特性。

## 五、地理資訊系統(GIS)之運用

正確的模式需要多項且龐大的現地環境資料庫作為基礎。地理資訊系統不但有空間及屬性資料，還具有數位化輸入、儲存、讀取、分析及圖形展示之功能，資料庫建立後可透過圖形介面將不同的屬性之資料予以結合，配合數學模式等評估技術綜合評定集水區內水質的各項特性，劃分單位網格可對水質模式進行計算或模擬，並且在第二階段專家系統建立之後，對現地的水質可監測及模擬，可達對集水區內水質管理之目的。

### (一) 集水區資料庫之建立

在整個管制對象及集水區範圍確定後，就要致力於集水區之基本資料蒐集，欠缺之部分則要透過實地量測或調查，以達到資料的完整。地理資訊系統所以不同於一般的地圖，是以圖層 (Coverge) 為單位來輸入地圖資訊，數位化的方式儲存於電腦之中，並具備將地理的特徵與屬性資料連結、分析及套疊的功能。圖層由許多圖徵 (Coverge Figure) 所構成，如村落、河流或湖泊等，分別可在圖中以點、線及面表示之。每個圖徵包含位置 (Location) 及屬性 (Attribute) 資料二部份，分別詳述如下：

1. 位置資料：各圖徵輸入後在此系統中，以正交座標表示其所在之位置，並建立在立體結構中圖徵間之位相 (Topology) 關係。
2. 屬性資料：儲存於圖徵屬性資料表中，由連結式資料

庫管理系統處理之，對於不同種類的圖徵，有特別的格式屬性資料與之對應。資料庫的形式在資訊系統，分為兩大類：第一類為集水區之地文屬性資料：包括有降雨量、地形地物、水文、土地利用狀況資料等。第二類為集水區水質污染資料：包含了現地及水體中重金屬、懸浮固體、營養鹽、生物藻類等調查資料。

## (二) 集水區數學模式之結合：

以網格四周邊界之高程相互比較，以最低者是為單位網格內實際地表逕流之流動方向，並可由地形坡度計算平均流速。經由地區雨量、土地利用及植生狀況對數學模式中參數 $K_s$ 、 $B_s$ 等加以修正，並由GIS地理資訊系統作水體總磷量的計算及累加工作，經由水流之流向以模擬水體總磷量之傳輸。

## 六、集水區管理模式

### (一) 管理模式之因子

水源水質保護區是屬於需要限制土地利用行為之管制區，通常是以集水區來劃分單元，一個水質保護區可能包含一個到數個集水區，由於各集水區屬性不儘相同，所以在水質保護策略上，相當複雜，不過其基本考量，仍然以總量管制理論為基礎。另外南化水庫集水區內河短坡陡，暫時忽略河道內傳輸之影響。

#### 1. 水質保護區內事業排放之濃度管制

(1) 濃度管制之原因：集水區內河、川、湖、潭、水庫之水體，用途上按中華民國台灣地區水體分類及水質標準第三條來區分，包含了工業用水、水產用水、公共給水、生態保育等許多層次。基於集水區用水標準之要求，所設定目標有所不同，但其排放污水必須要能符合法令的標準，才具公認性及客觀性。以排放的污水濃度須達到上述之安全範圍之內，

作為集水區內水質保護之重要條件。

- (2)濃度管制之對象：集水區內目的事業用地，有污染水源水質之虞者。例如：施用肥料及農藥之農場、礦渣散落之礦場周圍、排放家庭廢水之聚落或寺廟等。
- (3)濃度管制之方法：於排放口設水質量測計，以偵測排放污染物之濃度。

## 2. 水質保護區內之污染物之總量管制

- (1)總量管制理論：集水區是以分水嶺為邊界，劃分出天然排水匯流至一處之地理區域。若集水區內某支流污染源雖合於濃度管制的標準，但該地從事此事業之密度極高，大量污染物質必會順水流的流動而向下游集中，甚至污染整個集水區的水質。南化水庫之目的是供給灌溉及民生用水，對於水質的要求相對較高。所以水源水質保護區內各污染源排放濃度必須符合現行排放標準，再以總量管制方式控制集水區內污染量的排放總量，如此可避免濃度管制下的盲點，進而保護集水區水質的要求。
- (2)總量管制之對象：集水區內各點、線、面污染源。
- (3)總量管制之方法：由於各污染源之規模、種類均不一致，且在處理污染物之成本以大污染源者較小污染源者為經濟，並且大污染源者對環境之影響較直接也較大，因此為公平起見，對大污染源的要求也相對較高為原則。

## 3. 控制點的建立：

集水區內各支流匯入主流之交會處為控制點。架設水質量測儀器，以估算該控制點之上游污染物質總量。初步分為臨時控制點及長期監測點，其說明如下：

- (1)臨時控制點：集水區內支流匯合點上游處。

(2)長期控制點：污染較為嚴重、聚落或作為農業使用地之下游段，架設水質監測儀器長期觀測及紀錄。

## (二) 模式分析

影響集水區水質之因素包括溪流流量、上游河段流出之污染量、污染物質在水中的擴散度、河川水質標準及國家放流水標準濃度。本模式將應用線性規劃，探討集水區內不同土地利用之可容許最大污染物排放濃度，以修正後二維水質模式為目的函數 (Object Function)，再以污染源排放濃度達到國家放流水標準濃度及污染總量符合河川水質標準為限制條件進行模式之分析，其各項步驟說明如下：

### 1. 目標函數：

$$Z = \sum_i \sum_j \sum_k W_{ijk} \cdot C_i \cdot (T_i - Tt_i)$$

Z：最大利益函數

$W_{ijk}$ ：第i種污染物質在第j個控制點第k條支流集水區之修正係數

$C_i$ ：第i種污染物質之處理成本

$T_i$ ：未經處理之第i種污染總量

$Tt_i$ ：超過標準量第i種污染處理總量

### 2. 限制條件：

(1)水質總量控制：污染總量符合河川水質標準。

$$\sum (Q_{iklm} \cdot D_{ikl} \cdot R_{ikl}) < T_{ik}$$

$Q_{iklm}$ ：代表第i種污染物質第k條支流

第l個污染源所屬第m種規模之總排廢水量

$D_{ikl}$ ：代表第i種污染物質第k條支流

第l個污染源之放流水濃度

$R_{ikl}$ ：代表第i種污染物質第k條支流

第l個污染源之流達率

$T_{ik}$ ：代表第i種污染物質第k條支流

總量管制下容許排放污染量

(2)水質濃度控制：污染源排放濃度達到國家放流水標準濃度

$$D_{ijk} < D_{s_i}$$

式中：

$D_{ijk}$ 代表第*i*種污染物質

在第*j*個控制點

第*k*條支流之污染物質濃度

$D_{s_i}$ 代表第*i*種污染物質容許排入濃度

(3)經濟效益：在集水區內以最少的處理所花費的成本及最大利益為原則，來進行各種污染源排放量的濃度控制。

①處理成本(Cost)：

$$C_i = a_i \cdot b_i \sqrt{\frac{1}{T_i}}$$

$$T_{t_i} = T_i - c_i \cdot \sum T_i$$

式中

$a_i$ ：第*i*種污染物質處理成本乘常數

$b_i$ ：第*i*種污染物質處理成本指數常數

$c_i$ ：第*i*種污染物質減量處理效率

②經費限制：

$$C = \sum C_i \cdot (T_i - T_{t_i}) \leq F$$

式中

$C$ ：所有經過處理所花之總處理費用

$F$ ：財政預算

- 3.最佳化分析：以上述水質總量、濃度及經濟效益為限制條件，取目標函數發生極小值時之解，即為此集水區水質模式管理下之最佳特徵，並可瞭解不同地區污染源管制排放量的濃度及污水處理的總量。
- 4.敏感度分析：就不同的總量管制及土地利用狀況，以模擬水質模式之最佳化特徵。在水源水質保護的條件之下，藉以推估土地利用、容許開發的程度及污染物質處理的對策。再與地理資訊系統結合，在不同的地區進行開發或栽植所影響水質之程度，進而推估最佳的

開發模式。

## 八、預期成果

- (一) 結合地理資訊系統，將數理模式與現場的地文狀況結合，經由總量管制及環境管理模式系統分析，可有效管理集水區內的水質。
- (二) 兼顧水質保護與經濟效益，使管理模式更具人性化，最佳化得出集水區之特徵，是為切實可行之方案。
- (三) 水質數理模式可再經集水區地理特性之校正後，所得之決策深具意義與公信力。
- (四) 同時考慮污染物質濃度及總量，在模式中以邊界條件的方式形成必要限制式，以控制水質在滿足此條件下的最佳狀況。
- (五) 透過環境管理模式可對未來集水區內人為開發與維護作適當的規劃。提供最佳之因應對策，將經費作效益最大的處理，避免造成經濟、人力資源的浪費。

## 參考文獻

1. 溫清光、廖彥雄，高屏河流域污染總量管制之研究。第四屆中華民國環境工程學會環境規劃與管理研討會論文集，第162 - 174頁。(1991)。
2. 郭振泰等，「台灣地區給水水源優養化評估法之建立及其優養程度調查(一)」，行政院環境保護署 (1990)。
3. Peter W. M. John, Statistic Design and Analysis of Experiments Macmillan Company, New York, pp. 86-104 (1971).
4. Bernard P. Zeigler, Theory of Modelling and Simulation, Robert E. Krieger Publishing Company, Florida, pp.119-305(1984)
5. Michael F. Goodchild, Bradley O. Parks , Louis T. Steyaert, Environmental Modeling with GIS,

- Oxford University press, pp.58-238 (1993)
6. Stanley E. Manahan, Environmental Chemistry, Fifth Edition , Lewis Publishers, pp.145-218 (1991)
  7. Paul A. Erickson , Environmental Impact Assessmental Academic Press,Inc., pp.71-94(1994)
  8. Ortolano, Leonard, Environmental Planning and Decision Making, John Wiley & Sons, Inc., pp.305-328, 387-416 (1984)
  9. Vollenweider , R. A., "Advance in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrofication", Mem. Inst. Ital. Idrobiol.33. (1976).