

水庫優養化評估之專家系統

An Expert System for Reservoir Eutrophication Assessment

駱尚廉* 蔡淑芬** 萬哲勳***

摘 要

關於水庫優養化問題，目前國內外各專家學者相繼提出各種判斷水庫優養化之指標，然各指標之決判依據及其限值迄今仍爭議不斷。本研究乃以已發表之水庫優養化理論為基礎，以 Turbo Prolog 語言建立水庫優養化專家系統 ESRE (Expert System for Reservoir Eutrophication)，共歸納七種較簡單且易於水庫管理者使用之優養指標，可從不同角度、不同情況及不同決判限值探討水庫之優養潛勢。ESRE 系統共分二個子系統：ESRE1 及 ESRE2。ESRE1 子系統一次處理單一水庫水質資料及藻類資料，並可視其水質優劣程度提出評估與建議，具有教育諮詢之功能；ESRE2 子系統一次可處理多筆水庫水質資料及藻類資料，可對水庫作長期之判斷評估。目前國內各水庫由於管理單位不一，已有之水質資料並不完全適合作優養判斷，本研究則選定德基、翡翠、曾文、烏山頭等四個資料較為齊全之水庫，建立水庫優養化資料庫，並以 ESRE 系統作示範性之評估，結果發現德基水庫之優養程度最為嚴重，曾文及烏山頭水庫次之，翡翠水庫則水質最佳。

一、前 言

台灣地區水庫水為自來水之主要來源，近來由於污染漸增，有些水庫已有優養化之情形發生。然而有關優養化問題，目前尚無完善統一之定論，以往因水庫管理單位不同，各專家學者所採用之優養指標評估標準亦互有出入，以致各水庫之水質調查項目未能統一，故各水庫間難以比較或交換經營經驗，鑑於多種優養評估指標及爭議性之評估基準，可藉由電腦專家系統之應用，取代人為主觀之判斷及計算，使水庫優養化之評斷更具周詳、客觀。本研究發展之水庫優養化專家系統 (Expert System for Reservoir Eutrophication, ESRE) 將現有較受贊同的優養化知識及七種優養化評估指標轉換成電腦語言，藉電腦的邏輯判斷與數學計算，可迅速地評估水庫優養化情形，並可視水質資料之適用性及多寡，同時進行多項指標及多筆資料之判斷，以供水庫作長期性、綜合性之評估。並且，又將國內數個重要水庫之水質資料建成立成符合 ESRE 系統之動態資料庫，並作實例評估。

* 國立臺灣大學環境工程學研究所教授

** 國立臺灣大學環境工程學研究所碩士

*** 國立臺灣大學環境工程學研究所研究助理

二、優養之評估指標

優養化乃為許多複雜因子（如營養物質、生物量、溫度、日照、水力條件等）相互作用後之綜合表徵。故判斷或預估水體是否優養時，應當考量多種項目間之影響，然而由於各項目間之關係太過複雜、不明確，又因水質指標之建立應以簡單化為原則，故許多專家學者相繼提出各種不同之評估法，然而至今仍未有一指標能取代所有項目，適用所有水體之優養化判斷，以致優養化之評估一直未能統一。

1. 單一水質指標

(1) 磷 (Phosphorus)：總磷常被用為營養濃度之指標，然而關於各營養階層之標準限值並無定論，表1為台灣地區已發表文獻中所採用之各種分級標準。

(2) 葉綠素 a (Chlorophyll a)：可代表植物生物量，故葉綠素 a 為判斷優養化之常用指標，唯其界定標準各學者亦有爭論（表2）。

(3) 透明度 (Secchi depth)：亦可為優養指標，其分級標準尚無定論（表3）。

(4) 氮 (Nitrogen)：氮雖亦是藻類之主要營養來源，但與磷相較則為次要之生長限制因子，又因有些微生物自身有固氮作用，它可利用溶解於水中之氮氣轉化成生物可利用之氨氮、硝酸氮或亞硝酸氮，縱使水中有機氮含量不多，仍不影響此類微生物之繁殖，是以總氮並非良好之優養指標。

(5) 下層水溶氧指標 (Hypolimnetic DO)：Yeasted and Morel (1978) 指出下層水溶氧大於80%飽和溶氧以上之水體為貧養性，小於10%者為優養性，界於10%~80%之間者為普養性。

表1. Status range of total phosphorus (unit: mg/m³)

Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Source
<7.9	12-17	≥40	Jones & Lee (1982), 史等(1987), 蕭等(1986, 1988), 台北自來水事業處(1988)
<10	10-20	≥20	馮(1982), 胡(1983), 林等(1985), 程(1986), 中興顧問社(1986), 曾等(1987)
<10-15		>20-25	曾與陳(1984), 陳等(1985)
8.6 (3.0-17.7)	25.1 (10.9-95.6)	113 (16.2-386)	劉等(1985)
≥10	10-35	35-100	Henderson-Sellers & Markland (1987)
		≥20	小島貞男(1984)

表2. Status range of chlorophyll a (unit: mg/m³)

Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Source
<2.0	3.6-6.9	≥10	Jones & Lee (1982), 蕭等(1986, 1988), 史等(1987), 台北自來水事業處(1988)
<7	7-12	≥12	馮(1982), 林等(1985)
<4	4-10	>10	程(1986), 中興顧問社(1986), 曾等(1987)
<2-7		>5-12	曾與陳(1984), 陳等(1988)
1.8 (0.3-4.5)	5.2 (3-11)	19.1 (2.7-78)	劉等(1985)
≤2.5	2.5-8.0	8.0-25	Henderson-Sellers & Markland (1987)

表3. Status range of Secchi disc depth (unit: m)

Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Source
>4.6	3.7-2.4	≤1.7	Jones & Lee (1982), 蕭等(1986, 1988), 史等(1987), 台北自來水事業處(1988)
>3.7	2.0-3.7	<2.0	程(1986), 中興顧問社(1986), 曾 等(1987), 馮(1982), 林等(1985)
>3.7-4.6		<2-2.7	曾與陳(1984), 陳等(1988)
11.1 (5.4-28.3)	4.8 (1.5-8.1)	2.8 (0.8-7)	劉等(1985)
>6.0	3-6	1.5-3.0	Henderson-Sellers & Markland (1987)

2. 生物指標

由於生物之特性及其適合生長之水域環境不盡相同，有些生物只能於溶氧高、水質良好之環境中生長；有些則於營養豐富、水質較差之環境中佔優勢，故水中生物之種類便成為判斷水體水質之指標，唯藻類生長受陽光、溫度、季節氣候、地理環境等因素之影響，故欲從藻數含量直接反映水質狀況，須考慮地域上的差異。依史等 (1987) 及程 (1986) 等之研究報告指出：一升之水樣中藻類數目 (cells) 大於50萬以上即為藻華 (algal bloom)，此時水體亦可被視為已優養。

另外，藉由藻類群落的特性分析也可反映水質狀況，此種方法包括指標種的鑑定與群落結構分析，前者是依水中出現之指標種所代表的污染程度、藻種出現頻率及該藻種之指標權重，依Zenlinka & Marvan (1961) 公式算得水質腐水度，但藻種鑑定需有相當專業知識與經驗，一般人員不易鑑定。後者基於水質變化過大時，大多數藻類數量減少甚至消失，而適應該環境者數量大增，因此群落歧異度可反映水質情況。常用之歧異度有Shannon指數、Margalef指數、Pielou指數、McIntosh指數與水質指數QI (略等, 1992)。各種方法之比較及計算式列於表4。

表4 The measurement of different diversity Indexes

指數名稱	計算方式
Shannon 指數 (H)	$H = - \sum_{i=1} P_i \log_2 P_i$
Margalef 指數 (MI)	$MI = (S - 1) / \ln N$
Pielou 指數 (PI)	$PI = H / \log S$
McIntosh 指數 (McI)	$McI = 1 - (\sum P_i^2)^{1/2}$
水質指數 (QI)	$QI = (0.1H + 0.5McI) \times 100\%$
註：P：各藻種出現之頻度；S：藻種之數目；N：總藻數； H和McI之理論最大值各為5.0和1.0；QI>75為貧養， 75>QI>50為中養，50>QI為優養	

3. 多變數指標

Carlson (1977) 總磷、葉綠素 a 與透明度三種指數之 TSI 值評判水體之營養狀態：

$$TSI(TP) = 14.42 \ln [TP] + 4.15 \quad (1)$$

$$TSI(Chl a) = 9.81 \ln [Chl a] + 30.6 \quad (2)$$

$$TSI(SD) = 60 - 14.41 \ln [SD] \quad (3)$$

式中，[TP] 為總磷濃度 mg/m^3 ，[Chl a] 為葉綠素 a 濃度 mg/m^3 ，[SD] 為透明度 m。平均以上各值即得整體之指數值，曾與陳 (1984) 指出 TSI 值大於 60 為優養，界於 50 至 60 之間為普養，此與 Carlson 歸納結果相差了 10 (其判定準則為 50 與 40)，由於各水域的特性不同，TSI 公式亦非絕對的，例如 Morihiro 研究日本 29 個湖泊，將 Carlson 的 TSI 作了以下修正 (此時 [TP] 以 mg/l 計算)：

$$MTSI(SD) = 64.9 - 16.7 \ln [SD] \quad (4)$$

$$MTSI(Chl a) = 24.6 + 10.9 \ln [Chl a] \quad (5)$$

$$MTSI(TP) = 97.8 - 12.6 \ln [TP] \quad (6)$$

當 MTSI(SD) 大於 48~52，MTSI(Chl a) 大於 42~52，MTSI(TP) 大於 49~52 時，視為優養 (曾與陳，1984)。美國北卡羅林納州 (North Carolina) 亦提出以總磷、總有機氮、透明度及葉綠素-a 四種複合參數指標，其計算公式如下：

$$TP = 2.63 \log [TP] + 4.07 \quad (7)$$

$$TON = 3.83 \log [TON] + 1.72 \quad (8)$$

$$SD = 4.05 - 2.34 \log [SD] \quad (9)$$

$$CHL = 1.93 \log [Chl a] - 1.93 \quad (10)$$

式中，[TON] 為有機氮濃度 (mg/l)，其餘 [TP]、[SD] 及 [Chl a] 之濃度單位與 Morihiro 之公式相同。其指標值為各單項值之總和，優養等級區分如下，貧養： $TSI < -3.0$ ，次貧養： $-3.0 < TSI < -1.5$ ，普養： $-1.5 < TSI < 0.5$ ，優養： $0.5 < TSI < 5.0$ ，超優養： $TSI > 5.0$ 。

三、水庫優養化專家系統

1. 專家系統之基本結構

專家系統大致可分為知識庫、推論機、解釋子系統、知識獲得子系統和人機界面等五部分：

(1) 知識庫 (Knowledge base)：存放知識的資料庫，以供推論時之依據，知識庫的表示型態包括事實 (facts) 和規則 (rules)。

(2) 推論機 (Inference engine)：決定專家系統中規則推論順序的驅動系統，其功能包括事實和規則的查驗及工作的執行。

(3) 解釋子系統 (Explanation facility)：解釋系統在推論運作的過程，亦即將電腦符號轉換成人類的自然語言。

(4) 知識獲得子系統 (Knowledge acquisition facility)：藉由此系統可將使用者輸入之資訊加入知識庫中。

(5)人機界面 (User interface)：專家系統與使用之間的溝通界面。專家系統運作的流程是先將問題由人機界面傳至專家系統中之推論機，然後推論機再根據知識庫裡已有之知識尋求問題的解答，再經由解釋子系統將解答傳達給使用者。其概觀架構如圖1所示。

2. 專家系統的優點

以知識為基礎之專家系統固無法與真正專家表現一般，但有下列優點：

(1)提高知識可及性：只要電腦正常運作，專家系統二十四小時皆可提供諮詢，人類專家則有工作時數限制，且人類專家一次僅可能服務一人或一單位，專家系統則可同時被廣泛利用，供改善決策品質及降低決策成本。

(2)減輕專家負擔：有了專家系統之後，可取代專家回答一般性或經常性之問題，使專家有餘力從事於其他問題之研究。

(3)知識保存與傳播：記錄保存人類專家之知識，並廣泛利用。

(4)推論一致性：某些狀況下，專家無法對其答案保持一般性，而可能不慎忽略一些重要因素，設計良好之專家系統可避免此缺憾。

(5)協助訓練：專家系統可提昇新進工作人員之專業知識，減少訓練新專家之精力與時間。

(6)多重知識來源：專家系統可綜合多種專業知識，超越單一專家所擁有之知識領域及經驗。

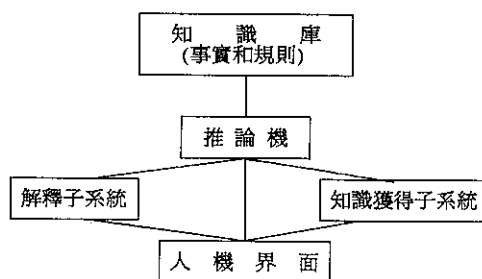


圖1 專家系統概觀圖

3. 水庫優養化專家系統簡介

ESRE (略1990, 1991) 是為客觀分析水庫水質以利規劃管理而建立的，它包含七種優養指標，可從化學與生物二方面性質分別探討水庫的優養情形，以較客觀的方式將各指標的判斷結果作一整合，並可一次處理多筆水庫水質資料及藻類資料，輔助水庫管理者判斷水庫優養化程度，俾儘速採取適當復育對策。本套專家系統建立時主要有三項基本原則：

(1)確立目標、簡化問題，在程式設計之前先把優養化的知識理論整理成有條理的規則，並依其相關性質分成各種模組 (modules)。

(2)節省佔據電腦記憶體的空間，領域劃分清楚之後，解決問題時只需載入該問題的相關資料，避免記憶體不勝負荷造成溢流。

(3)具有擴充性，系統開發階段保留一些彈性空間以利日後之擴充。

為達成以上三種原則，ESRE共切割成數個執行檔，分別獨立進行各種目標而隸屬於一個共同的主控制系統。目標的確立與執行檔的驅動則由主控制系統決定。每一個目標或問題皆由一個執行檔負責，如此不但減少記憶體的使用空間，而且可獨立於其他目標，在修改或增加目標時，只需修改該目標程式或另寫一個獨立的執行檔即可，不致影響到他目標程式。

4. ESRE系統之優養指標判斷

(1)總磷、葉綠素 a 和透明度：由於三者判斷營養階層的方法相同，故可用相同的推論機，

其推論過程如圖2：首先讀取水質資料檔內之資料，然後查驗動態知識庫內之限值標準換算出各營養階層的可能機率，再依各階層機率大小決定水庫最可能的營養階層，並針對此結果提出相對的評估與建議。若讀不到水質資料時，則出現錯誤訊息，並停止作業而跳回主目錄。

由於各階層的限值標準至今仍有爭議，使用者可依各地性質選用適當的限值標準以做為ESRE的動態知識庫。為使ESRE具有客觀的判斷分析能力，當動態知識存在有二種以上不同的限值標準時，系統先將計算各階層的機率，例如：總磷濃度 $21\text{mg}/\text{m}^3$ ，在表1的各種分級標準中，有53%之文獻認為是優養；47%之文獻認為普養，故其貧養、普養及優養之機率依次為0，0.47及0.53。再依表5的劃分準則判定為優養性。

(2) TSI及MTSI指標：如圖3，首先檢查水質資料檔內是否有充足之水質資料，然後代入公式計算TSI或MTSI值，再對照判斷資料庫的判斷準則裁定營養階層，最後再從評估資料庫中篩選適當的評估與建議。(3) 下層水溶氧指標：如圖4，其推論過程與TSI及MTSI類似，但多了內定值之設定，當水質資料檔中缺乏次要資料時，系統將直接以內定之假設值取代之。計算下層水溶氧飽和度之前當先計算下層水的理論飽和溶氧，即需先知道下層水的溫度、壓力及chlorinity，若不知下層水的壓力則以水表面大氣壓力加上水深壓力取代之，若不知水表面大氣壓力則以一大氣壓取代之。

表5 Status decision criteria

eutrophic	mesotrophic	oligotrophic
Y1=0 Y2=0 Y3=1	Y1=0 Y2=1 Y3=0	Y1=1 Y2=0 Y3=0
Y3 ≤ 1 Y3 > Y2 Y3 > Y1	Y2 ≤ 1 Y2 > Y3 Y2 > Y1	Y1 ≤ 1 Y1 > Y2 Y1 > Y3
Y2 = Y3	Y3 = Y1	
	Y1 = Y2	

Y1, Y2及Y3為貧養、普養及優養之機率

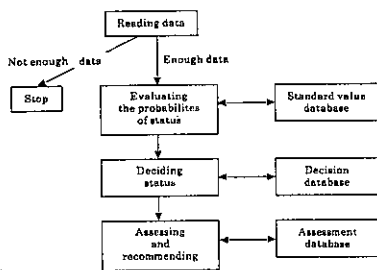


Fig.2 The data-flow diagram for the total phosphorus, chlorophyll α and Secchi disc depth inference system.

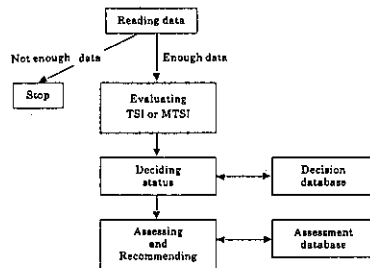


Fig.3 The data-flow diagram for TSI and MTSI inference system.

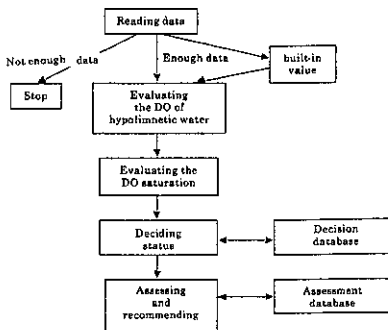


Fig.4 The data-flow diagram for hypolimnetic dissolved oxygen inference system.

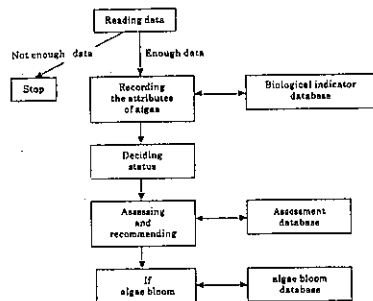


Fig.5 The data-flow diagram for Biological indicator inference system.

(4)藻類生物指標：由於目前只知某單一藻類及其適合生長之水域環境，對二種以上藻類並存時，甚數量組合與水域環境之關係尚未有研究成果可引用，尤其台灣地區水庫鮮少作生物調查，此方面之文獻資料更是缺乏，故本系統從優勢藻類資料檔讀入各藻類之屬名、種名及數量權重，然後與生物指標資料庫比對，並記錄該藻類所適存之營養階層，再以優勢藻屬性代表水庫的營養階層，當不知優勢藻的營養階層時（資料庫缺乏該藻資料），則以第二優勢藻代替，若第一與第二優勢藻皆不詳，則不作斷定。另外從藻類資料檔讀取藻類總數量，以查驗是否有藻華現象，全部流程如圖5。

(5)指標綜合：優養化是種複雜的現象，故各種指標從不同角度判斷營養階層時將產生不同結果。若要綜合所有指標之評判結果，應加上權重之衡量，然而各指標之權重大小可能因各地區性質不同而更趨複雜，由於目前尚不知生物指標與化學指標間之關聯性，無法對指標作總合分析，故ESRE只能將推論方法相同的總磷、葉綠素 a 及透明度，假設三者的權重皆相等，作平均性評估。

5. ESRE系統資料庫（知識庫）

資料庫種類可分靜態資料庫 (static database) 與動態資料庫 (dynamic database) 二種，靜態資料庫之資料型態可為事實亦可為規則之組合，但必需附屬於主程式之中而與主程式同時共存；動態資料庫則獨立於主程式之外，可依主程式之需要隨時讀取，不用時則可拋出，不佔記憶體空間，但動態資料庫只能為事實之組合，不可為規則。

(1)靜態資料庫

①判斷資料庫：由營養階層斷定規則構成。例如總磷、葉綠素a、透明度由各階層機率大小判定，TSI指標由平均TSI值判定，HDO指標由溶氧飽和度判定，MTSI指標則由MTSI(TP)，MTSI(CHA)和MTSI(SD)三值大小劃分為優養或非優養，各指標之判定規則皆由 trophic state 述詞組成，分別建立於各模組程式中。

②評估資料庫：由一群Write指令所構成，由於評估與建議因使用指標之不同而略異，故各指標之評估資料庫亦分開建立。

③解釋資料庫：由一群Write指令構成，乃為解釋“影響”和“對策”而建立，其資料庫分別由impact-explain和explain二述詞組成。

(2)動態資料庫

①標準限值：總磷、葉綠素a和透明度是以濃度或深度範圍劃分營養階層，故以range述詞含括其限值屬性。

range (state, lower, upper, source)

其中，state為標明營養階層；lower為範圍之下限；upper為範圍之上限；source為便於搜尋查驗之引數，統一固定為1，營養階層機率便根據此引數傳回之數目而計算。例如：總磷濃度大於20 mg/m³為優養，則表為

range ("eu", 20, 9999, 1)

為便於辨別與節省搜尋時間，三種指標之標準限值資料庫分別存於不同檔案中。

②生物指標：藻類生物指標資料庫以status述詞組成，其表示法為：

status (grade, genus, species)

其中，grade為營養階層代號，貧養設為2.0；普養為3.0；優養為4.0；genus為藻類屬名；species為種名。例如：Pediastrum boryanum適合於普養之水質環境中生長，則表示為status (3.0, "Pediastrum", "boryanum")。

由於生物指標眾多，為節省搜尋時間，藍綠藻、矽藻、鞭毛蟲藻及其他藻類各分別存於不同檔案中。

③水質資料：供ESRE2系統處理之水質資料，以動態資料庫形式，建立成水質資料檔。

6. ESRE1系統之架構與功能

ESRE1共包括五大部分：資料、指標、影響、對策和知識庫。其功能有記錄水庫水質資料，優養程度之判斷，優養影響之說明，改善對策之建議及數學模式之推估等，系統架構見圖6。

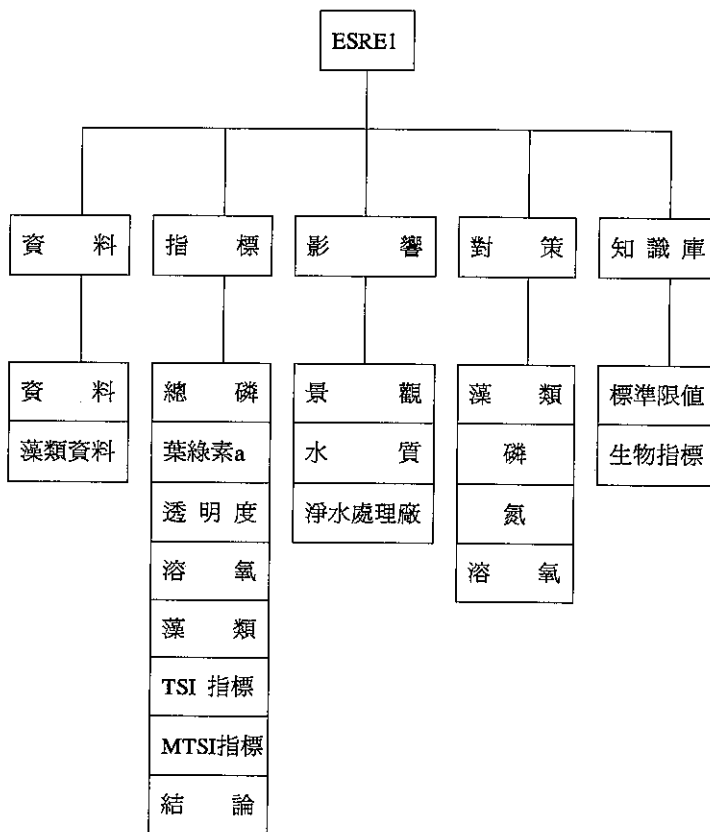


圖6 ESRE1之系統架構圖

(1)資料：分爲「水質資料」和「藻類資料」二部分，負責輸入ESRE所需之水庫資料。

(2)指標：ESRE共選用(1)總磷，(2)葉綠素a，(3)透明度，(4)TSI指標，(5)修正之TSI指標，(6)下層水溶氧指標，(7)藻類生物指標等七種優養指標。

(3)影響：分「景觀」、「水質」和「淨水處理廠」三方面分別說明水庫發生優養化後所引起之不良影響。

(4)對策：分爲「藻類」、「磷」、「氮」和「溶氧」四部分，分別警告使用者應當採取之相對補救措施。

(5)知識庫：設立「標準限值」及「生物指標」二欄，可隨時更換較適當的限值及生物指標。

7. ESRE2系統架構與功能

ESRE2系統共包含「資料」及「指標」兩大部份（圖7）。本系統係一次以多種指標處理多筆水庫水質及藻類資料，提供水庫管理者根據輸出之評估結果報表，瞭解水庫之優養情形。

(1)資料：分爲「水質資料」及「藻類資料」兩部份。

(2)指標：分爲「水質指標」及「藻類指標」，選用之優養指標項目與ESRE1相同。

(3)資料型態與格式：所需之資料以動態資料庫建立。原則上以同一年度資料，各月份、各測站之水質資料存於同一檔案中，水庫水質資料以wq述詞來宣告如下：

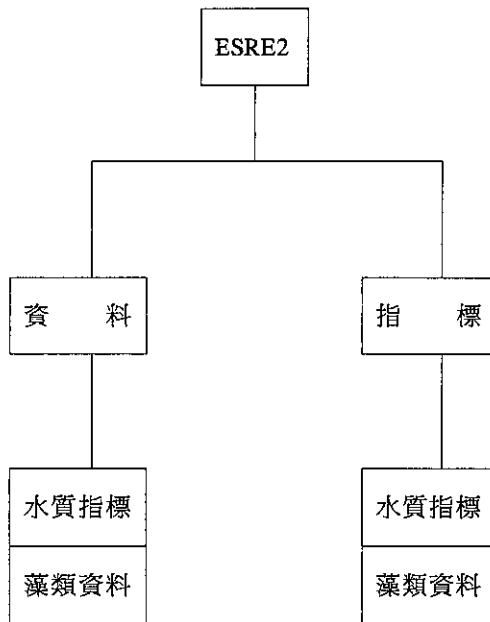


圖7 ESRE2系統架構圖

wq (station, month, layer, depth, temp, pressure, tp, tn, cha, sd, do, cl, org-p, org-n, nh₃-n, no₂-n, no₃-n, total-algae)

水庫藻類資料以algae述詞宣告如下：

algae (station, month, layer, depth, division, genus, species, weighting, total-algae)

各個引數(arguments)所代表之意義為：station表測站代號；month表月份；layer表在水庫某一分層所採水樣，分s（表層），m（中層）與b（底層）；temp表溫度，其單位為℃；depth表深度，其單位m（公尺）；pressure表壓力，其單位為atm；tp表總磷，其單位為mg/m³；tn表總氮，其單位為mg/m³；cha表葉綠素a，其單位為mg/m³；sd表透明度，其單位為m（公尺）；do表溶氧，其單位為mg/l；cl表氯濃度，其單位為g/kg；org-p表有機磷，其單位為mg/m³；division表門，藻類分類階層單位；genus表藻類種名；species表藻類屬名；weighting表權重，為各藻類之相對數目；total-algae表總藻類相對數目，單位為細胞數。

四、國內水庫實例評估

本研究選用曾文水庫（78年度）、烏水頭水庫（78年度）、翡翠水庫（78年度）及德基水庫（77年度）四個水質調查資料較齊全之水庫為例，以ESRE系統作示範評估，結果發現德基水庫之優養程度最為嚴重，曾文水庫與烏山頭水庫次之，翡翠水庫則水質最佳。詳細之評估如下：

1. 曾文水庫(78年9月～79年7月)

此水庫之水質及藻類資料係來自嘉南藥專工業安全衛生科所作「甘泉計畫(I)水庫水維護大型計畫烏山頭、曾文水庫調查報告」。由水質優養評估報表來看，總磷均顯示為優養狀況；葉綠素a項目優養情形多發生於5～10月，12～4月因溫度稍低，多顯示為普養狀態。參看實際水質調查資料，9月、10月葉綠素a濃度有達99mg/m³者，超出優養限值極多；透明度項目，則情況稍佳，優養及普養出現之頻率各半；由Total項目來看，則優養情形居多。

藻類資料之優養評估結果顯示曾文水庫常出現之藻類文獻上多未有其營養階層之記錄，故難以判斷其水體之營養階層，但從少數有屬性之藻類看來，則屬貧養性，其數量權重不高，表示該貧養性藻類並非優勢種，難以代表整體之營養階層；至於藻類總數方面，除12～4月外，各測站多有藻華現象，此與葉綠素a含量有相同之趨勢。

綜合判斷曾文水庫水質營養情形，應為優養狀態，12～4月因水溫較低，藻類數目較少，呈現普養狀態。

2. 烏山頭水庫(78年9月～79年7月)

此水庫之水質及藻類資料來源同前。由評估報表之結果看來，烏山頭水庫雖係曾文水庫之離槽水庫，但78年度水庫水質卻比曾文水庫稍好。由水質評估報表看，總磷情形，多為優養狀態，但少數亦出現貧養狀態；葉綠素a項目，則情況較好，多出現普養情形。透明度項目多顯示為普養狀態，S3、S4、S5、S6測站之78年11月至79年1月，則為優養狀態；以Total綜合項目

來看，則多為普養。由藻類優養評估報表來看，烏山頭水庫常出現之藻類，文獻上亦多未有其營養階層記錄，故也難判斷其營養階層。另外，各測站除2~4月外均顯示有藻華發生，然比對當時水質資料，葉綠素a評估結果卻多為中養。

綜合判斷烏山頭水庫之營養階層當屬普養略偏優養狀態，尤以總磷含量偏高表示其水體具有優養之潛勢，應注意總磷來源之控制。

3. 翡翠水庫

此水庫之水質及藻類資料來自台北翡翠水庫管理局之「翡翠水庫七十八年度操作年報」。由評估報表看來，總磷指標之營養階層大約界於普養與優養之間，少數亦出現貧養狀態。然以葉綠素a及透明度輔助判斷，則約界於普養至貧養間。而Total指標之綜合判斷，亦顯示水質營養狀況，界於普養及貧養之間。而大壩站78年6月~12月之下層水溶氧指標，呈優養狀況，查其溶氧實測資料，下層水溶氧多在0.2~4.2 mg/l之間，果有偏低之現象。至於藻類方面，僅大壩站有調查資料，其常出現之藻類，文獻上亦多未有其營養階層記錄，但大壩站全年均顯示有藻華現象，此與水質葉綠素a之狀況不符，由於本系統以藻類數目大於500 cell/ml即判定為藻華，此標準可能過於嚴格，宜再研究修正。

綜合評斷，翡翠水庫之水質優良，屬於普遍近貧養狀態。

4. 德基水庫(77年度)

此水庫之水質及藻類資料係來自「大甲溪流域河川水質長期追蹤計劃第六年工作報告」。由輸出報表看來，總磷項目於S28、S33、S39等中、上游測站優養頻率出現較高，可能與中上游果園農藥肥料之使用有關。下游測站則多出現普養或貧養；葉綠素a項目呈優養現象之測站範圍更大，如S11、S18、S22、S28、S33、S39等測站均多呈優養情形，尤以中、上游S22、S28、S33、S39等站全年之葉綠素a判斷結果皆為優養。透明度及Total項目因資料不足，無法下結論。而藻類優養評估結果則顯示，德基水庫77年度出現了文獻上記載優養性藻類，至於藻華之判斷，因無藻類總數之資料，故報表現「*****」符號。

綜合評斷德基水庫77年水質營養狀況，中、上游呈優養狀態，下游則屬普養近貧養狀態，然以優勢藻類判斷則可見優養性之藻類平均散佈。

五、結 論

判斷水庫優養化之指標雖多，但各指標之評估依據及限值迄今仍有爭議。ESRE系統以已發表之知識理論為基礎，考慮多種可能發生之情況，並依使用者意願兼顧各種評估基準，以客觀之立場作結論，可避免人為主觀判斷之缺失。此外，並可於短時間內進行多種指標及多筆資料之判斷，節省反覆計算及比對之時間，適合水庫作經常性及長期性之追蹤評估。由於台灣地區各水庫之水質調查項目多侷限於一般河川水質調查項目，而可判斷優養程度之項目調查則極為缺乏，故目前ESRE尚難顯現其功能，期望儘速建立合用之水質資料系統，並將水庫水質資料項目統一，以利水庫優養化專家系統之推廣。

五、參考文獻

1. Henderson-Sellers B., Markland H.R. (1987), *Decaying Lakes, The Origins and Control of Cultural Eutrophication*, New York.
2. Jones R.A. and Lee G.F. (1982), Recent Advances in Assessing Impact of Phosphorus Loads on Eutrophication-Related Water Quality, *Water Res.*, Vol.16, 503-515.
3. Yeasted J.G. and Morel F.M.M. (1978), Empirical Insights into Lake Response to Nutrient Loadings, with Application to Models of Phosphorus in Lakes, *ES&T*, Vol.12, 195-201.
4. Carlson, R.E. (1977), A Trophic State Index for Lakes, *Limnol. and Oceanogr.*, Vol.22, 361-369.
5. Morihiro, A., Outoski, A., Fuhushima, T., Kawai, T., Hosome, M., Muraoka, K. (1981), Application of Modified Carlson's Trophic State Index to Japanese Lakes and It's Relationships to Other Parameters Related to Trophic State, *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, Vol.23, 13-30.
6. Weiss, C.M., Francisco D.E., and Campbell, P.H. (1985), *Water Quality Study, B. Everett Jordan Lake N.C. Year II*, Depart. of Env. Sci. & Eng, Univ. of North Carolina at Chapel Hill, pp. 140.
7. 小島貞男著，張清源譯 (1984)，翡翠水庫水質預測與污染防治對策，台北翡翠水庫管理局。
8. 中興顧問社 (1986)，翡翠水庫水質調查研究報告。
9. 史午康，薛志宏，楊炳坤，黃蓓茵 (1987)，翡翠水庫之初期優養調查研究，第四屆給水工程技術研討會，197-230。
10. 林襟江，盧誠吉，洪銘堅，陳時仁 (1985)，德基水庫層化及優養化之研究，經濟部水資源統一規劃委員會。
11. 林襟江，盧誠吉，陳時仁 (1988)，大甲溪河川水質長期監視計劃工作報告，經濟部水資源統一規劃委員會。
12. 胡思聰 (1983)，翡翠水庫集水區磷之含量及其對自來水水源影響之研究，臺大環工所碩士論文。
13. 臺北自來水事業處 (1988)，翡翠水庫優養調查計畫研究報告。
14. 陳是瑩等 (1988)，鳳山水庫優養化問題與相關管制措施之研究，台灣省環保處。
15. 曾四恭，吳俊宗，程樹森 (1987)，以AGP指標指示水庫優養潛勢之研究，第四屆給水技術研討會論文集，175-195。
16. 曾怡禎，陳是瑩 (1984)，澄清湖生態的研究II，澄清湖水質的評估，第一屆給水技術研討會論文集，98-105。
17. 程樹森 (1986)，台北地區蓄水庫優養潛勢之初步探討及藻類去除技術之研究，臺大環工所碩士論文。
18. 馮纘華 (1982)，*Lake Eutrophication and Its Control*, 工業污染防治，第四期，155-165。
19. 駱尚廉 (1990)，水庫優養化資料庫及專家系統研究，台大環工，No.240。

20. 駱尚廉 (1991)，水庫優養化資料庫及專家系統研究(II)，台大環工，No.275。
21. 駱尚廉等 (1992)，湖泊水庫水質改善及優養化評估法之建立和調查，台大環工，No.313。
22. 劉學渠，盧誠吉，洪銘堅 (1985)，水庫水質簡易預測模式之研究，第十屆廢水處理技術研討會論文集，357-374。
23. 蕭榮超，江弘斌，林康 (1988)，烏山頭水庫水質與浮生物之調查研究，第五屆自來水論文發表論文集，85-100。
24. 蕭榮超，江弘斌，賴雪瑞 (1986)，明德水庫水與浮遊生物之調查研究，第三屆給水技術研討會論文集，15-31。
25. 何先聰(1990)，甘泉計劃(I)水庫水質維護大型計劃—烏山頭、曾文水庫調查報告，行政院環境保護署。
26. 台北市翡翠水庫管理局(1989)，翡翠水庫年報(78年)。