

德基水庫水質營養狀況判別指標 A Trophic State Index for Te-Chi Reservoir Water Quality Evaluation

國立臺灣大學農業工程學系
博士班研究生

雷 祖 強

Tsu-Chiang Lei

國立臺灣大學農業工程學系副教授
兼水工試驗所副研究員

鄭 克 聲

Ke-Sheng Cheng

摘 要

德基水庫位於大甲溪上游，為中部地區重要水資源之來源，但位於德基水庫上游之梨山地區，由於果園、蔬菜的大量種植，造成本地區水土保持不良，肥料、農藥大量流入河川中，最後造成德基水庫嚴重優養化之問題。目前國內評估水庫水質優養化問題，一般均使用 Carlson 所提出之營養狀況指標(CTSI)。Carlson 以迴歸關係方式將葉綠素-a(Chla)、透明度(SDD)及總磷(TP)轉換至同一尺度上，以易於判斷水質狀態，為研究湖泊、水庫優養化問題提供定量之指標。但由於一般水生環境因素複雜，不同地區存在不同的優養成因與特性。環境特性不同，直接使用 CTSI 模式將會得到不適合之結果。

本研究中考慮臺灣地區污染狀況及環境因子不同於美國，故針對 Carlson 模式中兩個主要因子，也就是最大透明度(即 64 m)與 SDD 倍率因子 2 予以修正。首先參考日本摩周湖之實測值，設定最大透明度為 42m，然後考慮修正 SDD 倍率因子，以使得當 SDD 為 42m 時，TSI 值為 0。另外從德基水庫之水質採樣記錄顯示，Chla 之濃度絕大多數均低於 2000ppb，為使得選用之倍率因子 b 能反映水庫水質採樣記錄範圍，我們設定 $TSI(Chla = 2000) = 100$ ，最後可得到修正後之倍率因子 b 為 1.544 及係數 a 為 8.605。

修正後之德基營養狀況指標(TTSI)，在各斷面上所得之三種單一營養狀況指標(TTSI(SDD), TTSI(Chla), TTSI(TP))，均比 CTSI 模式之單一營養狀況指標(CTSI(SDD), CTSI(Chla), CTSI(TP))具較一致之結果。由於轉換後葉綠素-a、透明度及總磷的尺度較符合德基水庫環境特性，將三種營養指標平均後之結果也比直接使用 CTSI 模式更具合理性，可見針對德基水庫，這樣的修正是適當的。

關鍵詞：營養狀況指標，水庫，水質。

ABSTRACT

Te-Chi reservoir, located in Central Taiwan, is a major source of water supply for the region. It has long been suffering eutrophication from pollutants received from upstream watershed where vegetable plantations and orchards are widespread. The Carlson trophic state index(CTSI) is commonly used for reservoir water quality evaluation. However, coefficients in CTSI model is based on local data and therefore should be adjusted to accommodate the characteristics of local water quality. The pollutant concentrations observed in Te-Chi reservoir are much higher than that reported by Carlson. In this study we modify two major factors in CTSI model, i.e. the maximum depth of transparency expressed as Secchi disk depth(SDD) and the depth multiplicity factor. The new trophic state index for Te-Chi reservoir(TTSI) gives consistent index values with respect to chlorophyll-a, total phosphorous and SDD. Also, the ranges of Chlorophyll-a and total phosphorous concentrations corresponding to TTSI scale coincide with the observed extremals, indicating that the new TTSI model is adequate for Te-Chi reservoir water quality evaluation.

Keywords: Trophic state index , Reservoir , Water quality.

一、前言

在湖泊或水庫生態系統中，浮游植物(Phytoplankton)、藻類可將無機物轉變成生物可利用之有機物，經由食物鏈作用而至更高層水生動物體內，生物死後又由分解者分解成無機物回歸自然，如此周而復始的循環，而構成自然界生態現象。

若集水區中有污染物注入湖泊水庫時(農藥、肥料)，其中有機物將被微生物分解而成磷鹽、氮鹽等無機鹽類，當水體中氮、磷等營養鹽(Nutrients)濃度累積至某一程度後，配合適宜水溫、pH、日照、水深等各項環境因素時，將導致自營性生物(Autotrophic Microorganism)或藻類大量異常繁殖，此種累積營養鹽之過程稱為優養化。若以湖泊所含營養物質的多寡，可將湖泊分成三種營養狀況(Trophic Status)：營養成分低、生物量少、溶氧高、透明度高的水體稱為貧營養性(Oligotrophic)；營養成分高、生物量多、溶氧低、透明度低的水體稱為優養性(Eutrophic)；界於兩者之間則為普營養性(Mesotrophic)。由上述之定義

中，可以看出湖泊的營養狀態是指營養鹽的供給程度。由於湖泊營養物質含量受多項因素影響，加上生態系統、地理位置以及季節變化相差極大，使得判斷湖泊營養狀態極為困難。

在湖泊優養問題調查上，Sakamoto(1966)以日本的湖泊為對象，分析氮、磷、溫度以及浮游植物與生產量相互之關係。Dillon 與 Rigler(1974)依照 Sakamoto 觀念，調查加拿大地區的湖泊，並得到總磷濃度與葉綠素之關係，進而對湖泊之營養量與生物量之關係進行預測。Carlson(1977)提出以磷為限制因子之優養評價方式，將湖泊優養狀態以總磷(Total phosphorous,TP)、沙奇盤深度(Secchi disk depth,SDD)及葉綠素-a(Chlorophyll-a,Chla)濃度等因子分別計算之，而此三項因子所得之營養狀況指標(Trophic state index,TSI)大體接近，其值介於0與100之間，使得評估淡水湖泊優養問題時不再複雜，而且簡單明瞭。Kratzer 與 Brezonik(1981)研究美國佛羅里達州數個湖泊並提出以氮為限制因子之TSI值，使描述湖泊優養成因之計算式更為完整，文章中提出三個觀點：(1)將 Carlson 所提出之三個單一

變數營養指標予以平均，而得綜合指標，(2)當 TSI 平均營養程度值介於 40 及 50 間水體可視為普養；若 TSI 平均營養程度值大於 50 時水體可視為優養，(3)除了上述描述水體的三個等級外，另外又提出極貧養(Ultraoligotrophic)及超優養(Hypereutrophic)這兩個營養狀態，以更細微的角度來觀察優養化問題。Osgood(1982)使用 Carlson 營養狀況指標(Carlson Trophic State Index, CTSI)計算明尼蘇達州 60 個湖泊之營養狀態，並提出若是這三種營養狀況差異極大時，如何取捨以決定湖泊營養程度。Gregor 與 Rast(1982)應用類似概念調查加拿大五大湖區，並建立適合該區之綜合營養指標。Zakova 等人(1993)則調查捷克摩拉瓦(Morava)流域中之非點源污染對於環境上的衝擊，由於此區域是一高度農業開發區，上游集水區的農業開發造成水庫嚴重優養化，文章中除了研究不同非點源污染對於環境影響，並對嚴重的優養問題進行分級。舒金華(1993)調查中國大陸 24 個湖泊，選擇 Chla、TN、TP、化學需氧量(Chemical oxygen demand ,COD)、生化需氧量(Biochemical oxygen demand ,BOD)以及 SDD 作為評估參數，採用綜合評估指數法，以對湖泊優養程度進行評價。李祚泳與張輝軍(1993)，調查並選用 24 個湖泊做為 CTSI 修正依據，以供中國大陸地區湖泊使用。舒金華、黃文鈺與吳延根(1996)調查中國大陸 130 個湖泊，並提出三等級多型態之分類準則。

台灣地區評估淡水湖泊或水庫優養問題時，大多直接引用 CTSI 之評估方法(郭振泰與吳俊宗，1990；德委會，1993；水資會，1993；胡景堯，1996)。僅有郭祥亨(1986)曾經對澄清湖水庫提出修正之 TSI 值。由於一般水生環境因素複雜，不同地區存在不同的優養成因與優養特性，環境特性不同，直接使用北美湖泊適合之 CTSI 值是否適當？是否會造成問題誤判？這些因素都值得再深入探討，因此本研究之目的是依據德基水庫之水生環境特性，建立環境參數間之各項關係，修正 CTSI 值使符合德基水庫當地之特性，以提供水庫管理單位適當的水質優養化評價指標。

二、研究地區及資料簡介

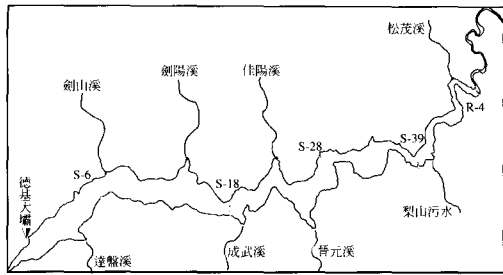
德基水庫位於大甲溪上游，是臺灣中部地區重要之多目標水庫。此地區開發早期是以旱作為主，之後大量的進行溫帶水果種植，並沿著中橫公路，宜蘭支線沿線開發。大量開墾之結果，造成本地區水土保持不良，夏季時大量降雨沖蝕表土，並將殘留有高濃度肥料、農藥之土壤顆粒沖刷至河川、水庫當中。德基水庫基本資料列於表 1 (水資源統一規劃委員會，1993)。

研究中收集德基水庫管理委員會與行政院環境保護署對德基水庫水質所監測之資料。德基水庫管理委員會與經濟部水資源局自民國 72 年以來，共同合作進行監測集水區與水庫水質。就水庫水體而言，其採樣的位置分兩種：(1)各支流流入流處，(2)水庫部份編號斷面處。水質採樣分析項目多達 25 種，但只有在 S-6、S-18、S-28、S-39 以及 R-4 五處斷面資料中有表層葉綠素-a 與透明度值，如圖 1(a)中所示。其水質採樣大約在每年的 1、3、5、7、9 以及 11 月時期，但從歷史記錄中發現民國 78 年一整年，記錄中缺失透明度值，民國 72、73 以及 75 年記錄中也嚴重的缺乏透明度與斷面資料。因此本研究選擇自民國 80 年 1 月至 86 年 1 月資料進行分析。行政院環境保護署自民國 82 年以來，針對國內 23 個中大型水庫進行水質狀態監測，對於德基水庫而言只有四處有斷面資料，斷面編號為(1)、(2)、(3)以及(4)如圖 1(b)中所示。研究中選擇葉綠素-a、總磷以及透明度三項因子評估水庫水質優養化。

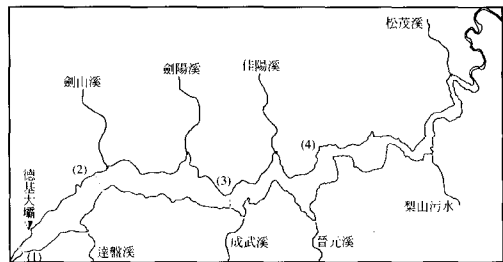
表 1 德基水庫基本資料

水域面積	4.5 km ²
湖岸長	39.3 km
平均寬度	1.2 km
最大深度	123.3 m
平均深度	52.7 m
滿水位	1400 m -MSL

(表中數據代表滿水位時之特性)



(a)德委會採樣位置圖



(b) 環保署採樣位置圖

圖 1 德基水庫河系與水質採樣位置圖

三、Carlson 營養狀況指標之評估

Carlson 營養指標是 Carlson(1977)研究美國 Minnesota 州數個湖泊之水質狀況，所提出之湖泊水質狀況評估指標。本節中首先介紹該指標之計算方式，並進而評估其計算式在台灣地區之適用性。

3-1 營養鹽限制因子

藻類在生長時，其所吸收的營養比例為 C : N : P = 106 : 16 : 1，此稱為 Redfield ratio(Redfield, 1934)，雖然以碳源的需求量較大，但由於藻類大多屬於自營性微生物，其所需要的碳源可仰賴大氣中的 CO₂ 供給而不虞匱乏，故限制藻類大量生長的營養成分，主要是氮和磷。若氮磷比小於 10，此時氮為限制因子，若氮磷比大於等於 16，此時磷為限制因子，若氮磷比介於 10~15 間，氮磷均不是限制因子(郭祥亭，1986；黃炳達與陳鎮東，1994)。因此可由氮磷比的數值中判斷水體污染主因以及影響藻類生長之因子。

3-2 Carlson 營養狀況指標

以各項污染源為單一參數的湖泊水質評估，指標簡單明瞭，但在使用時，常因各項環境因子影響，往往難以反映水庫優養狀態的真實情況，且可能發生以不同參數評估同一水體卻結果互異。所以發展多參數的綜合評估指標方法是十分必要的。

藻類生物量與透明度的關係可由下列描述光線垂直穿透水體之方程式來模擬(Carlson, 1977):

$$I_z = I_o \text{Exp} [-(k_w + k_b)Z] \dots\dots\dots(1)$$

式(1)中 I_z 為透明度消失處之光線強度(Light intensity)， I_o 為水體表面光線強度， k_w 為水體及溶解物質所造成之光線衰減係數(Coefficient for attenuation of light)， k_b 為顆粒物質所造成之光線衰減係數， Z 為透明度深度。其中 k_b 項可改寫成 αC ， α 為受藻類影響之光線衰減係數(Incremental extinction coefficient from algal)， C 為藻類濃度(Algal concentration)，因此可改寫成下式：

$$Z = (\ln \frac{I_o}{I_z}) (\frac{1}{k_w + \alpha C}) \dots\dots\dots(2)$$

移項再改寫成下式:

$$(\frac{1}{Z})(\ln \frac{I_o}{I_z}) = (k_w + \alpha C) \dots\dots\dots(3)$$

I_z 大約是 I_o 的 10%，但在實際上 α 會因顆粒之大小、吸光性以及散光性質不同而異。在許多湖泊的研究中 k_w 比 C 值小許多，所以透明度之衰減主要是水體中顆粒物質所造成之影響(Carlson, 1977)。

Carlson 在了解透明度與葉綠素-a、總磷間相互關係的基礎上，提出以透明度為基礎的連續性營養程度指標，在此透明度是以沙奇盤深度(Seech Disk Depth,SDD)代表之。其透明度模型是根據日本北海道摩周湖(Masyuko Lake)之調查記錄而建立，由於此湖完全未受到人為的污染，其透明度值特別高，可供淡水湖泊當成背景值參

考，根據 1931 年 8 月 31 日的記錄顯示湖中的透明度值為 41.6m(近藤次郎，1987)，因此其假設水中所有的懸浮物幾乎全是浮游植物，並定義營養程度以每透明度的倍增為一分界，也就是說，每當透明度從一基本數值變為兩倍時，即代表達到一個新的營養程度。由於浮游植物量與透明度成倒數關係，每當透明度減少一半，浮游植物量就增加二倍，近而推導出 TSI 與透明度之關係式：

$$TSI = 10 (6 - \log_2 SDD) \dots\dots\dots(4)$$

式(4)中將此數值乘以 10，以期得到從 0 至 100 之指標值，其完整之等級為當 TSI 為 0 或 100 時，其透明度分別為 64m(由 41.6m 取其延伸至 64m)或 0.0625m。當 TSI 為 20 時，其透明度為 16m；當 TSI 為 30 時，其透明度為 8m，並以此類推出水體 SDD 與營養狀態之指標計算式。

另外 Carlson 選擇葉綠素-a 與總磷作為判定營養程度之指標參數，並分別計算其與 SDD 之迴歸關係式：

$$\ln(SDD) = 2.04 - 0.68 \ln(Chla) \\ (r = 0.93, n = 147) \dots\dots\dots(5)$$

其中 SDD 單位為 m，Chla 單位為 $\mu g/l$ ，n 為樣本數。

然而計算總磷與 SDD 之關係並不理想，因此採用夏季之採樣資料建立葉綠素-a 與總磷之關係式：

$$\ln(Chla) = 1.449 \ln(TP) - 2.442 \\ (r = 0.846, n = 43) \dots\dots\dots(6)$$

再將其與(5)式合併成 SDD 與總磷之關係：

$$\ln(SDD) = 3.876 - 0.98 \ln(TP) \dots\dots\dots(7)$$

TP 單位為 $\mu g/l$ 。

將(5)、(7)兩式分別代入(4)式以取代 SDD，則營養狀況指標則可轉換成下面形式：

$$TSI(TP) = 10(6 - \frac{\ln(48/TP)}{\ln(2)}) \dots\dots\dots(8-a)$$

$$TSI(Chla) = 10(6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln(Chla)}{\ln(2)}) \dots\dots\dots(8-b)$$

$$TSI(SDD) = 10(6 - \frac{\ln(SDD)}{\ln(2)}) \dots\dots\dots(8-c)$$

依據(8)式之 Carlson 營養狀況指標模式，SDD、Chla 及 TP 等三項因子所計算得之 TSI 值可列如表 2。

Carlson 所提出的計算式簡單易用，但有幾個重要觀點，通常容易被忽略：(1)經過迴歸關係式可將葉綠素-a、總磷以及透明度轉換成相近似營養程度之比較，但若有任一指標顯示極大的差異，應當特別仔細檢查資料來源，或者環境背景因素，(2)若是湖泊當中含有多量非藻類的顆粒物質時，透明度值容易造成問題誤判，(3)由於不同地區的湖泊、水庫水體，其 TP、Chla 與 SDD 之迴歸關係與(5)、(7)兩式不同，故(8)式 TSI 計算式之各項係數值，必定無法適用於所有水體，而應當依地區特性建立修正的 CTSI 模式，(4)不同季節將有不同的環境控制因子，在夏季是生物性的控制因子也就是葉綠素-a，而冬季則會是化學性的控制因子也就是總磷，因此在使用 Carlson 模式時應考慮上述條件。

表 2 湖泊之營養狀態表

TSI*	SDD*	Chla*	TP*	TN**	Trophic
	(m)	($\mu g/l$)	($\mu g/l$)	(mg/l)	State**
0	64	0.04	0.75	0.02	極貧養
10	32	0.12	1.5	0.05	極貧養
20	16	0.34	3	0.09	極貧養
30	8	0.94	6	0.18	貧養
40	4	2.6	12	0.37	貧養
45	2.8	5	17	0.52	普養
50	2	7.3	24	0.74	普養
53	1.6	10	30	0.92	優養
60	1	20	48	1.47	優養
70	0.5	56	96	2.94	超優養
80	0.25	154	192	5.89	超優養
90	0.12	427	384	11.7	超優養
100	0.06	1183	768	23.6	超優養

(* Carlson 1977, ** Kratzer & Brezonik 1981)

Kratzer 與 Brezonik(1981)提出以氮為限制因子的 TSI 值,配合 Carlson 以磷為限制因子的 TSI 值,使描述湖泊問題更為完整,研究中並提出更精細的營養分級(見表 2)與平均營養指標觀念:

$$CTSI = \frac{1}{3} (TSI(TP) + TSI(Chla) + TSI(SDD)) \dots\dots\dots (9)$$

平均營養指標的觀念一直被外界與 Carlson 所提出之計算式混合使用,然而文章中並未特別指出,是否在任何情況下均可加權平均。由於北美地區湖泊優養與水土保持問題不如臺灣地區嚴重,其湖泊之 TSI(Chla)、TSI(TP)與 TSI(SDD)這三者差異並不大(如圖 2 中所示),因此將其平均是適合的,但將此觀念與 CTSI 計算式直接應用於台灣地區是否適當,值得存疑。特別是在類似德基水庫因上游集水區水土保持不當,水體中的泥沙含量高時,極容易造成問題的誤判。

為評估 Carlson 指標在臺灣地區之適用性,本研究分析德基水庫各項水質採樣資料間之關係,並與 Carlson 指標所使用之迴歸式(5、6、7 式)比較,其步驟如下:

- (1)由經濟部水資源局與行政院環境保護署,對於德基水庫水體所進行水質監測記錄中,選擇總磷、葉綠素-a 與透明度三項因子作為評定水庫水體優養因素。
- (2)選擇夏季(5、6、7、8、9 月)以及冬季(11、12、1 月)兩季的資料進行分析,並且計算水體中氮、磷比值,若 $N/P \geq 16$ 可視為水體當中由磷控制, $N/P \leq 10$ 可視為水體當中由氮控制,介於 $10 < N/P < 16$ 當中的水體亦非磷或氮控制。
- (3)由夏、冬兩季中氮、磷比的資料顯示,水體樣本數總共有 131 點,但由氮所控制的水體樣本數只有 16 點,點數相當少,不足以合理描述氮控制之水生狀態,因此可認定德基水庫主要為磷控制之生態環境。
- (4)選擇水庫水體由磷控制之資料,並建立葉綠素-a、總磷與透明度彼此迴歸關係式:

$$\ln(SDD) = 1.8751 - 0.3264 \ln(Chla) \quad (r = 0.75, n = 114) \dots\dots\dots (10)$$

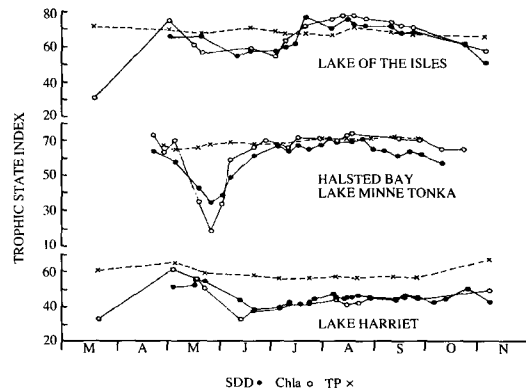


圖 2 明尼蘇答州三個湖泊於 1972 年之營養狀況變化(Carlson, 1977)

$$\ln(Chla) = 1.2961 \ln(TP) - 0.9816 \quad (r = 0.85, n = 115) \dots\dots\dots (11)$$

其中 SDD 之單位為 m,而 Chla 及 TP 之單位皆為 $\mu g/l$,n 為樣本數。葉綠素-a 與透明度及葉綠素-a 與總磷之關係圖如圖 3 與圖 4。

將(11)代入(10)式得:

$$\ln(SDD) = 2.1775 - 0.4230 \ln(TP) \quad (12)$$

關係式(10)(11)及(12)所代表的是德基水庫之環境特性,配合 Carlson 對於水體環境之假設(即(4)式),我們可以得到修正之 Carlson 營養狀況指標計算式:

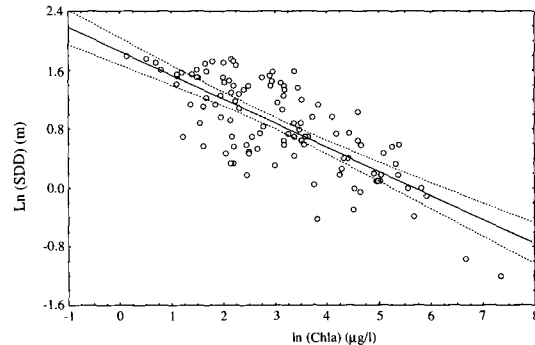


圖 3 透明度與葉綠素之迴歸關係圖

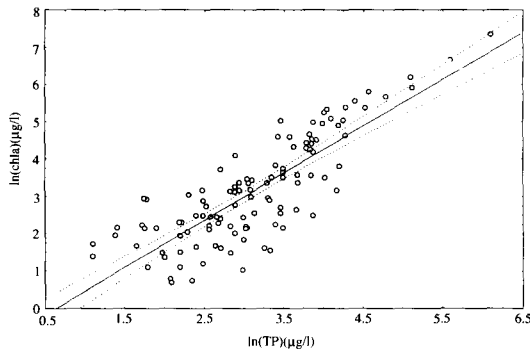


圖 4 葉綠素與總磷之迴歸關係圖

$$TSI(TP) = 10(6 - \frac{2.1775 - 0.4230 \ln(TP)}{\ln(2)}) \quad (13-a)$$

$$TSI(Chla) = 10(6 - \frac{1.8751 - 0.3264 \ln(Chla)}{\ln(2)}) \quad (13-b)$$

$$TSI(SDD) = 10(6 - \frac{\ln(SDD)}{\ln(2)}) \dots\dots\dots (13-c)$$

利用(13)式可計算德基水庫之營養狀況評估表，如表 3。

表 3 德基水庫修正後之 CTSI 表

TSI	SDD (m)	TP (µg / l)	Chla (µg / l)
0.00	64.00	0.01	0.001
10.00	32.00	0.05	0.007
20.00	16.00	0.24	0.061
30.00	8.00	1.26	0.51
40.00	4.00	6.49	4.23
50.00	2.00	33.42	35.38
60.00	1.00	172.04	295.79
70.00	0.50	885.72	2473.17
80.00	0.25	4559.85	20678.92
90.00	0.13	23475.01	172902.42
100.00	0.06	120853.87	1445687.22

表 3 之數據顯示，當 TSI 值較高時(例如 TSI>70)則 TP 及 Chla 之濃度均遠遠高於觀測值之上限，極不合理。由於(10)至(12)式是依據德基水庫水質資料而建立，其反映該水庫水質參數之特性，上述較高 TSI 值所對應之 TP 及 Chla 不合理之現象，應是肇因於德基水庫 TSI 與 SDD 之關係不適合以(4)式描述之。我們回顧當初 Carlson 採用(4)式之原因，係假設 SDD 每倍增時，則 TSI 減少 10，且 SDD 之最大值達 64m。由於臺灣河川之水質污染狀況及懸浮質濃度與 Carlson 當初研究之湖泊狀況不同，故(4)式難以適用於臺灣地區。例如臺灣地區水庫或湖泊之 SDD 觀測值鮮有大於 40m 者，且 TSI 因 SDD 增加而減少之程度可能更甚於北美地區之湖泊。故有必要針對德基水庫各項水質參數之特性，對(4)式加以修正，並配合(10)及(12)式，以建立適合於德基水庫之營養狀況指標。

四、Carlson 營養狀況指標修正及應用

Carlson 指標中 SDD 每倍增則 TSI 值即降低 10，且當 TSI 達到 0 時，SDD 為 64m，該模式之兩個主要因子為最大透明度(即 64 m)與 SDD 倍率因子 2。本研究中考慮臺灣地區污染狀況及環境因子不同於美國，故針對此兩個主要因子予以修正。首先我們參考日本摩周湖之實測透明度 41.6m，設定最大透明度為 42m，然後考慮修正 SDD 倍率因子，以使得當 SDD 為 42m 時，TSI 值為 0，亦即：

$$b^a = 42 \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} TSI(SDD) &= 10(a - \log_b SDD) \\ &= 10(a - \frac{\ln SDD}{\ln b}) \dots\dots(15-a) \end{aligned}$$

將(10)，(12)式代入(15-a)式得：

$$TSI(Chla) = 10(a - \frac{1.8751 - 0.3264 \ln(Chla)}{\ln b}) \quad (15-b)$$

$$TSI(TP) = 10(a - \frac{2.1775 - 0.4230 \ln(TP)}{\ln b}) \dots(15-c)$$

德基水庫之水質採樣記錄顯示，Chla 之濃度絕大多數均低於 2000ppb，為使得選用之倍率因子 b 能反映水庫水質採樣記錄範圍，故我們設定：

$$TSI (Chla = 2000) = 100 \dots\dots\dots(16)$$

將(14)，(16)之關係式代入(15-c)中，可以得到修正後之倍率因子 b 及係數 a 分別為：

$$\begin{cases} b = 1.544 \\ a = 8.605 \end{cases} \dots\dots\dots(17)$$

將修正後的係數分別代入(15-a)、(15-b)、(15-c)式中，將可得到德基營養狀況指標(Techi Trophic State Index, TTSI)與德基水庫之營養狀況表(表4)：

$$TTSI(SDD) = 10(8.605 - \frac{\ln(SDD)}{\ln(1.544)}) \dots\dots\dots (18-a)$$

$$TTSI(Chla) = 10(8.605 - \frac{1.8571 - 0.3264 \ln(Chla)}{\ln(1.544)}) \dots\dots\dots (18-b)$$

$$TTSI(TP) = 10(8.605 - \frac{2.1775 - 0.4230 \ln(TP)}{\ln(1.544)}) \dots\dots\dots (18-c)$$

將(18-a)、(18-b)、(18-c)三者平均，最後可得平均營養判別指標：

$$TTSI = \frac{1}{3} (TTSI(TP) + TTSI(Chla) + TTSI(SDD)) \dots\dots\dots (19)$$

表 4 德基水庫修正後之 TTSI 表

TSI	SDD (m)	TP ($\mu g / l$)	Chla ($\mu g / l$)
0.00	42.00	0.03	0.0031
10.00	27.20	0.07	0.012
20.00	17.62	0.20	0.045
30.00	11.41	0.54	0.170
40.00	7.39	1.52	0.645
50.00	4.79	4.25	2.440
60.00	3.10	11.85	9.234
70.00	2.01	33.10	34.938
80.00	1.30	92.42	132.197
90.00	0.84	258.05	500.208
100.00	0.55	720.53	1892.692

由於泥沙之影響極可能造成問題的誤判，特別是在優養問題嚴重時的影響較大，在問題判別上應特別謹慎，若透明度值特別的低(當 SDD<0.5m)，應小心判斷資料來源的正確性，探討問題的成因(是由藻類、泥沙或者兩者混合等各種因素所造成之影響)，進而決定是否平均計算 TTSI 值，因此當透明度值顯示異常現象，且泥沙是造成問題主因時，應修正優養問題之評估方式(見表 5)。

表 5 透明度異常時所修正之評估方式

透明度發生異常 現象(SDD<0.5m)	修正結果
IF TTSI(SDD)>> [TTSI(Chla)≡TTSI(TP)]	$TTSI = \frac{1}{2} (TTSI(Chla) + TTSI(TP))$
IF TTSI(SDD)>> [TTSI(Chla) ≠ TTSI(TP)]	選擇 TTSI(Chla)或 TTSI(TP)中較高值

五、結果與討論

(1)水質優養化評判表：

湖泊、水庫優養化的調查，一般均是以反映湖水中藻類數量多寡的葉綠素-a 為主要的評價指標，但是對於用水標準，目前國內只有行政院環保署依據水污染防治法所頒布之通用於河、川、湖、潭以及庫的水體分類水質標準(水資源統一規劃委員會，1993)，依其水體用途，將水體分成甲、乙、丙、丁、戊五類，其中甲類水質最佳、依序逐漸惡化，戊類水體水質最差，但有關優養化評比的項目中，也只有甲類水體有含磷量 10 ppb 的限制，其他項目均付之闕如；另外一方面國內調查水質優養化問題上，均將營養問題分成三級，甚少調查嚴重優養化問題，但若以優養問題而言，當葉綠素-a 濃度在 20ppb 與 2000ppb 相比較，都被評估成為優養化，但這兩者數據對於水生態衝擊與水質應用上有完全不同之含意，從德基水庫歷年水質採樣資料中指出，在 1980 年 5 月 31 日於 S-46 斷面上曾有葉綠素-a 濃度高達

2300ppb，而總磷濃度高達 1300ppb 的記錄，這項結果令人憂心，雖然這項記錄屬特異值，但德基水庫存在嚴重優養問題的情況並非少見，因此有必要在優養的基礎上再進行分類，使水質分類上更有其意義，研究中參考各國在優養問題上之分類標準(U.S. E.P.A.標準，1975；Carlson，1977；O.E.C.D.標準，1978；Kratzer & Brezonik，1981；Heiskary，1992；Zakov，1993；舒金華，1993；舒金華等人，1996；胡景堯，1996)，配合德基水庫營養狀況指標，訂定出德基水庫水質營養狀況評判表(見表 6)。

(2)結果驗證：

Carlson 將葉綠素-a、總磷與透明度投射到相同之營養狀態，其目的就是使其容易評比，也就是說這三者因子應有相類似之結果，或者差異也不應太大，若是差異太大，不但不易解釋現象，而且在平均量化的過程中，甚至會將問題掩蓋。因此本研究中採用德基水庫四個斷面所有之歷史資料，自 1991 年 1 月 14 日至 1997 年 1 月 6 日，將葉綠素-a、總磷與透明度記錄值代入(8)式中，以(9)式將其平均，並將結果繪如圖 5(斷面 S-6)，圖 7(斷面 S-18)，圖 9(斷面 S-28)及圖 11(斷面 S-39)。另外亦將同樣資料代入(18)式中，以(19)式將其平均，並將結果繪如圖 6(斷面 S-6)，圖 8(斷面 S-18)，圖 10(斷面 S-28)及圖 12(斷面 S-39)。從圖中可以清楚的看出，在各斷面上使用 TTSI 模式所得之三種單一營養狀況指標(TTSI(SDD)，TTSI(Chla)，TTSI(TP))，均比 CTSI 模式之單一營養狀況指標(CTSI(SDD)，CTSI(Chla)，CTSI(TP))具較一致之結果。平均後之結果也較能反映出問題的真實性，可見針對德基水庫，這樣的修正是適當的。在圖 12 中顯示使用 TTSI 模式計算 S-39 斷面上，有兩點資料顯示較為異常之現象，回顧歷史資料中發現，在 1991 年 7 月 29 日的記錄顯示，其 SDD 為 0.3m，TP 為 97ppb，Chla 為 75ppb，但濁度(Turbidity，TB)則高達 27N.T.U.，查詢水文年報發現在 7 月 19 日有一場暴雨，相信降雨所帶來之泥沙是造成透明度降低之重要因素；另外在 1992 年 3 月 23 日的記錄顯示，其 SDD 為 0.2m，TP 為

表 6 德基水庫水質營養狀況評判表

等級	TTSI	水質狀況
極貧養 (Ultraoligotrophic)	$TTSI < 35$	水質極佳
貧養 (Oligotrophic)	$35 \leq TTSI < 50$	水質佳，污染極少
普養 (Mesotrophic)	$50 \leq TTSI < 61$	可用於各項用途
普養-優養 (Meso-eutrophic)	$61 \leq TTSI < 64$	有初期污染之傾向，未來將增加水質處理費用
優養(Eutrophic)	$64 \leq TTSI < 82$	水質受到污染，已形成調配用水壓力
重優養 (Polyeutrophic)	$82 \leq TTSI < 95$	水質不佳，已嚴重污染
超優養 (Hypereutrophic)	$TTSI > 95$	極不佳，非常嚴重污染問題

715ppb，Chla 為 932ppb，但濁度 TB 亦高達 22N.T.U.，查詢水文年報發現在 3 月 7 日有一場暴雨，由於降雨時間較遠，推測應該是降雨與藻類所共同造成之影響，因此類似這樣問題，就不應當直接平均營養狀況指標，而應當使用表 5 之方法加以限制。

六、結論

1. 由氮磷比的分類結果可以看出，德基水庫環境水體基本上受磷控制。
2. 雖然德基水庫環境水體基本上受磷控制，但仍有受氮控制之生長環境，由於樣本少，証據不明顯，希望未來有更長期的資料收集，並計算 TSI(TN)值以獲得完整描述德基水庫地區之水環境優養狀態指標方程式。
3. 使用 CTSI 模式可以將原本生態系統中之各項複雜因子，轉換至相同之營養程度，令水體水質有分類之依據。但 Carlson 當初假設其營養指標，浮游植物量與透明度之關係為，SDD 每倍增 TSI 值即降低 10，且當 TSI 達到 0 時，SDD 為 64m，該模式之兩個主要因子為最大透明度(即 64 m)與 SDD 倍率因子

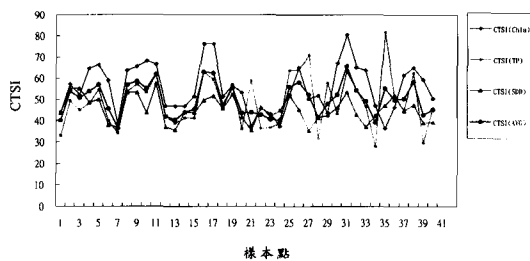


圖 5 S-6 斷面 CTSI 圖

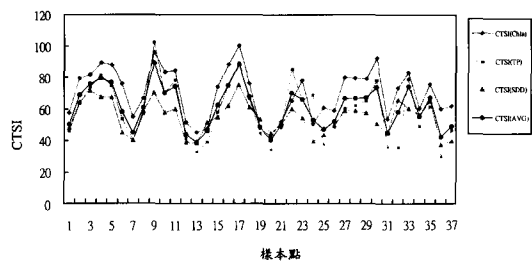


圖 9 S-28 斷面 CTSI 圖

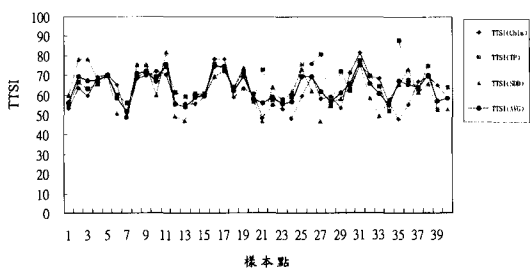


圖 6 S-6 斷面 TTSI 圖

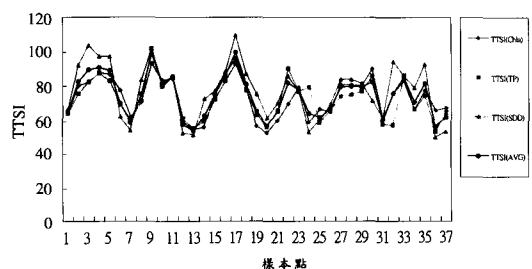


圖 10 S-28 斷面 TTSI 圖

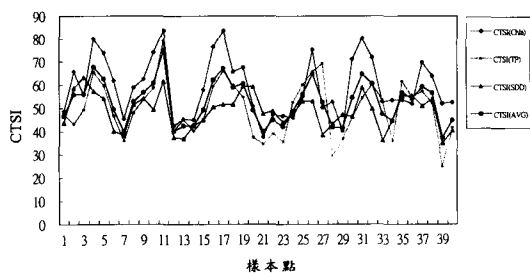


圖 7 S-18 斷面 CTSI 圖

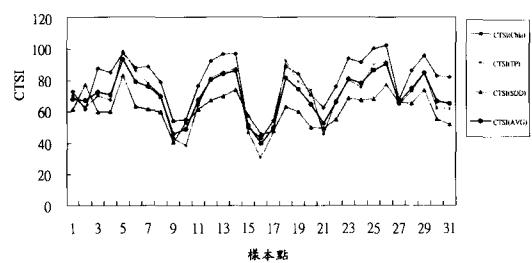


圖 11 S-39 斷面 CTSI 圖

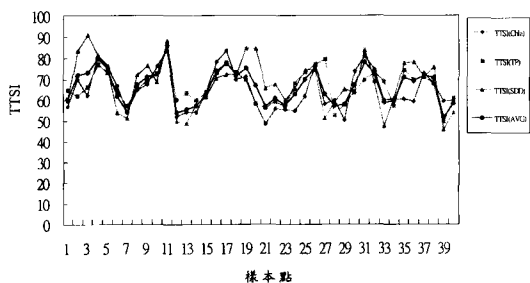


圖 8 S-18 斷面 TTSI 圖

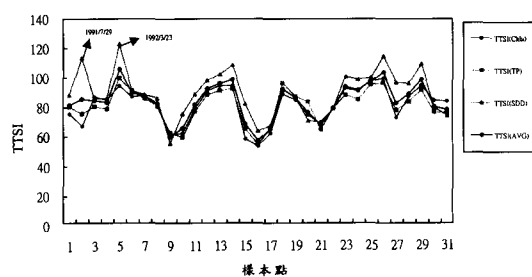


圖 12 S-39 斷面 TTSI 圖

- 2。但直接使用德基水庫中葉綠素-a 與總磷對透明度之迴歸關係式，將會得到不適合之結果，因此 CTSI 模式應當修正。
4. 修正後之德基營養狀況指標，在各斷面上所得之三種單一營養狀況指標(TTSI(SDD)，TTSI(Chla)，TTSI(TP))，均比 CTSI 模式之單一營養狀況指標(CTSI(SDD)，CTSI(Chla)，CTSI(TP))具較一致之結果。平均後之結果也較能反映出問題的真實性，可見針對德基水庫，這樣的修正是適當的。
 5. 本研究針對德基水庫水體特性，提出修正 CTSI 模式之方法，並且得到修正後三種單一指標有較一致之結果。但目前國內仍延用 CTSI 模式評估水庫水質優養化，未來研究希望能提出適合我國水質污染之營養狀態指標，以滿足不同水庫水質間之相互評比。
 6. 使用營養狀況等級表容易判斷水體狀況，但在高污染所帶來之問題，例如重優養及超優養之判定上仍有待後續進一步檢驗。
 7. 應用德基營養狀況指標模式需注意降雨與泥沙之影響。
 8. 在優養程度之判別上由於使用單點資料，並不容易掌握全部水域全貌，而一般判別水庫湖泊優養問題時，均是在採樣斷面處取樣後，計算 TSI 值並將各斷面結果再次平均以表達成該區域全體水域狀況，但此法容易造成問題嚴重誤判，因此未來應使用衛星遙測資料以取得全面水域狀況，進而對水域資料進行全面評估，並有效劃分管理等級，以供水庫管理單位調配用水時之重要參考。
 4. Gregor, D. J. and W. Rast, 1982. Simple trophic state classification of the Canadian nearshore waters of the Great Lakes, Water Resources Bulletin, Vol.18, No.4, pp.565~573.
 5. Heiskary, S., 1992. Developpoing eutrophication standards for lakes and reservoirs. North American Lake Management Society, Report, pp.23-28.
 6. Kratzer, C. R. and P. L. Brezonik, 1981. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. Water Resources Bulletin, Vol. 17, No.4, pp.713~715.
 7. Lorenzen, M. W., 1980. Use of Chlorophyll-Secchi disk relationships .Limnol. Oceanogr., 25(2), pp. 371~372.
 8. Osgood, R. A., 1982.Using differences among Carlson's trophic state index values in regional water quality assessment. Water Resources Bulletin, Vol. 18, No.1, pp.67~74.
 9. Redfield, A. C., 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. In James Johnstone Memorial Volume, Liverpool, pp. 171~192.
 10. Sakamoto, M., 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. Arch. Hydrobiol. 62:pp.1~28.
 11. Zakova, Z., Berankova, D., Kockova, E. and P. Kriz, 1993. Influence of diffuse pollution on the eutrophication and water quality of reservoirs in the Morava river basin. Wat. Sci. Tech., Vol. 28, No.3-5, pp79~90.
 12. 水資源統一規劃委員會(1993)，台灣地區重要水庫水質暨優養化之研究，研究報告，00-資-53。
 13. 李祚泳，張輝軍(1993)，我國若干湖泊水庫的營養狀態指數 TSI 及其與各參數的關係，環境科學學報，Vol.13, No4, pp.391~397。
 14. 近藤次郎著，劉鴻亮等人譯(1987)，環境科學

參考文獻

1. Carlson, R. E., 1977. A trophic state index for lakes .Limnol. Oceanogr., 22(2), pp. 361~369.
2. Carlson, R. E., 1980. More complications in the chlorophyll Secchi disk relationship .Limnol. Oceanogr. 25(2), pp. 379~382.
3. Dillon, P.J. and F. H. Rigler, 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. Limnol. Oceanogr, 19(5), pp. 767~773.

入門，中國環境科學出版社。

15. 胡景堯(1996)，模糊理論在水庫優養化判別上的應用，國立臺灣大學環境工程研究所碩士論文。
16. 郭祥亨(1986)，水庫水源簡易指標之可行性研究，國立臺灣大學環境工程研究所碩士論文。
17. 郭振泰，吳俊宗(1990)，臺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，EPA-79-003-01-008。
18. 黃炳達，陳鎮東(1994)，台灣地區湖泊水庫懸浮顆粒有機質之碳、氫、氧、氮、硫元素計量分析，海洋與湖沼，Vol.25, No.1, pp.29~36。
19. 舒金華(1993)，我國主要湖泊富營養化程度的評價，海洋與湖沼，Vol.24, No.6, pp.616~620。
20. 舒金華，黃文鈺，吳延根(1996)，中國湖泊營養類型的分類研究，湖泊科學，Vol.8, No.3, pp.193~200。
21. 曾四恭，吳先琪(1988)，德基水庫水質優養化改善對策研究，國立臺灣大學環境工程研究所。
22. 德基水庫集水區管理委員會(1993)，水資源統一規劃委員會，德基水庫集水區第期整體治理規劃_水質監測及管理模式研究，第一年(82年度)工作報告。
23. 劉學渠，盧誠吉，洪銘堅，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，pp.357~374。

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