

德基水庫優養水質因子之研究

陳鴻烈⁽¹⁾ 蔡大偉⁽²⁾

摘 要

本研究是以德基水庫為對象，針對其水質因子做統計分析，以找出造成水質優養化之最重要因子，協助水庫進行優養化的有效管理。研究內容分為兩部分，第一部分為應用基礎敘述統計分析方法來解讀水質資料，以了解水庫水質情形與變化趨勢；第二部分則是利用單迴歸分析方法來尋找與優養化最相關的水質因子。研究結果顯示，以整體水庫為考量時，最能掌握與優養化相關的重要水質因子，包括總磷、懸浮固體、透明度與葉綠素 a，與卡爾森優養指標理論相符合。

(**關鍵詞**：優養化、水質因子、德基水庫)

Water Quality Factors of Eutrophication in Te-Chi Reservoir

Paris Honglay Chen⁽¹⁾, David D-W. Tsai⁽²⁾

Professor⁽¹⁾ and Graduate Student⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

ABSTRACT

This research was to analyze the water quality factors of Te-Chi reservoir by statistic method, and to find out the most important factors of eutrophication. The results could enhance the eutrophication management of reservoir efficiently. The study was divided into two parts. One part was to analyze the data of water quality in reservoir by the basic descriptive statistic method, which could let us understand the situations and variations of water quality. The other was to look for the most relative factors with eutrophication by using simple regression. When we considered all data of watershed, the most important eutrophication factors including total phosphorous, suspend solid, water transparency and chlorophyll-a could be obtained. This result was corresponding to Carlson's eutrophication index.

(**Keywords**: Eutrophication, Water quality factor, Te-Chi reservoir)

(1) 國立中興大學水土保持學系教授

(2) 國立中興大學水土保持學系研究生

前言

雖然台灣年平均降雨量約為世界平均值的 2.6 倍，但由於地形特殊與分布不均的關係，並無法完整的保留水資源，缺水問題仍時有所聞。在台灣，興建水庫來增加可用的水資源，雖然不失為良策之一，但水庫常面臨淤積、優養化與毒藻 (涂，2003)，甚至若為自來水水源時，於水處理場中經氯化消毒會產生三鹵甲烷 (丁，2004) 等水質問題，不但降低水庫的使用壽命，並威脅人民飲水的安全。因此，為了保護珍貴的水資源，我們必須思考其因應對策。

本研究是以大甲溪流域上游之德基水庫為對象，由於德基水庫受到梨山地區大量農業開發行為的影響，水質日益惡化。尤其農民過度使用肥料，加速營養鹽的循環，因而造成水庫優養化情形的發生 (Antikainen，2005)。經本研究群不斷的分析研究後，已逐漸能掌握德基水庫優養化的變動趨勢 (陳，1997b，1998，1999a，2004，2005)，對於因應對策之制定將有很大的助益。

本研究之目的，是使用迴歸分析方法進一步探討優養化情形背後之動力要素。研究分兩部分來進行，一部分是以水庫出水口的資料為依歸，另一部分則是採用代表整體水庫之資料。其後再比較二者間何者的分析效果較佳，以利於找出優養化之動力因子。研究結果將有助於制定對策時，能選擇經濟效益最高之標的，以提高執行效率。

研究方法

一、觀測值數據之選擇

對於需要進行分析之數據依據的選擇，本研究將以兩種類型來進行結果之比較，一是選擇最靠近水庫出水口之測站數據，另一則是選擇代表整體水庫測站之平均值。對兩

種數據分別作迴歸分析後，再挑選其中結果較佳者來當作本迴歸分析研究之根據。

(一) 水庫出水口測站值

本研究根據德基水庫測站位置及觀測數據資料，選擇最靠近出水口的 S6 測站來作為根據 (如圖 1)。然後，以優養化指標 TSI 作為因變數，其他水質觀測項目作為獨立變數，分別做單迴歸分析。

(二) 代表整體水庫之測站平均值

為了與水庫出水口測站資料所做的迴歸分析作比較，本研究另外在德基水庫上、中、下游各挑選一測站，將三測站之水質資料進行平均，用以代表整體水庫之變化情形。同樣的，以 TSI 為因變數，其他水質觀測項目為獨立變數，一一分開做單迴歸分析。

二、統計分析

本研究將以 SAS 軟體來做敘述統計與單迴歸分析，然後再比較以水庫出流水與整體水庫為資料之統計結果，最後，更進一步探討優養化發生的動力因子。

(一) 敘述統計 (Descriptive Statistics)

本研究將選用敘述統計中的平均數、標準誤、中位數、眾數、標準差、變異數、峰度、偏態、範圍、最小值、最大值、總和以及個數等共 13 個統計量，來分析水域水質之變化情形。此外，並以各種不同水質指標之統計量來說明水質特性，使能了解整個水域的整體水質概況。

(二) 單迴歸分析 (Simple Regression)

本研究使用單迴歸分析方法，將每一種水質指標一一對優養化指標 TSI 作迴歸分析，希望藉此找出與優養化之相關因子，再進一步對其動力機制做探討。

先將需要找出線性相關的兩個因子，合理假設為含有一個隨機誤差項的線性關係式。在此假設下，我們可暫定此直線迴歸式為 x 與 y 之間的關係式 (林，2002)：

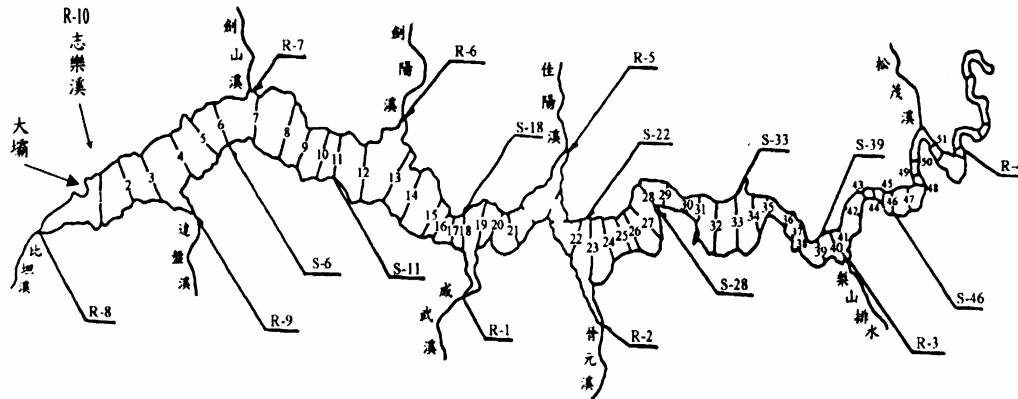


圖 1. 德基水庫測站位置 (經, 2002)

Figure 1. Location of monitoring stations in Te-Chi reservoir.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

x_i : 獨立變數 x 的第 i 個觀測值

y_i : 對應於 x_i 的反應變數, 又稱為因變數

β_0, β_1 : 線性關係係數

ε_i : 散佈於線性 $\beta_0 + \beta_1 x_i$ 附近的誤差

一般而言, 我們假設 ε_i 為相互獨立且平均數為 0, 及變異數 σ^2 的常態分配。

我們可以使用最小距離平方和來衡量迴歸直線與觀測值之間的接近程度, 然後再用最小平方方法使平方和最小, 以求得 β_0, β_1 之估計量 a, b (潘, 2003):

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

結果與討論

一、敘述統計分析

本研究首先以德基水庫出水口與整體水庫之水質資料為依據, 分別進行敘述統計分

析。找出歷年來水質的變化情形, 及其與優養化之關聯, 然後再比較兩者之結果的異同。

(一) 水庫出水口分析結果

以水庫出水口之水質資料來做敘述統計分析後, 其統計結果可整理如表 1。本研究將結果分為 (1) 平均數、中位數與眾數; (2) 標準差; (3) 峰度與偏態; (4) 最大值與最小值等四組統計值來做探討。

1. 平均數、中位數與眾數

由表 1 中可看出, 有些水質指標之平均數、中位數與眾數呈現一致的情形, 當然亦有三者不一致的指標, 包括溶氧、飽和溶氧、濁度、氨氮、氯鹽、硫酸鹽、硝酸鹽、總磷、磷酸鹽、總有機碳、BOD、COD、有機氮、鈉、鉀、葉綠素 a 與透明度等 17 個因子。以下將就平均數、中位數與眾數三者不一的情形作分類說明。

(1) 飽和溶氧與透明度

這兩個指標分析結果均為平均數接近中位數, 而眾數較低的情形。對飽和溶氧而言, 表示其分布為非連續性, 且平時為非污染性較多; 至於透明度方面, 則意味著其品質經常表現不佳, 所以在此量測透明度時, 應採納眾數的結果。

表 1. 水庫出水口水質之敘述統計分析

Table 1. Analysis of descriptive statistics for water quality of reservoir's effluent.

項目	TSI (TP)	水溫 (°C)	溶氧量 (mg/L)	飽和溶氧 (%)	pH	懸浮固體 (mg/L)	總固體 (mg/L)	濁度 (NTU)	電導度 (μS/cm)
平均數	48.05891	18.476	9.3146667	98.946	8.329067	4.406667	154.9773	2.695333	201.5867
標準誤	1.478212	0.3518079	0.1981781	3.08219	0.051468	0.418147	5.221569	0.423691	4.535271
中位數	48.05506	18	9.1	97	8.3	4	152	1.8	206
眾數	38.73005	18	10	88	8	4	152	1.6	218
標準差	12.80169	3.0467457	1.7162729	21.79437	0.445728	3.238951	34.63597	3.669268	39.2766
變異數	163.8832	9.2826595	2.9455928	474.9948	0.198673	10.4908	1199.651	13.46353	1542.651
峰度	2.069504	-1.1034525	0.6865275	1.098628	-0.35195	5.955636	6.65245	48.87002	12.18318
偏態	-0.60444	0.1016474	0.88071	1.003744	0.427702	2.113728	0.627296	6.403245	-2.71798
範圍	83.42509	11	7.9	99	1.8	18	248	30.77	251
最小值	-1.62529	13	6.7	71	7.5	0	37	0.23	12
最大值	81.7998	24	14.6	170	9.3	18	285	31	263
總和	3604.418	1385.7	698.6	4947.3	624.68	264.4	6819	202.15	15119
個數	75	75	75	50	75	60	44	75	75

項目	總鹼度 (mg/L)	鈣 (mg/L)	鎂 (mg/L)	總硬度 (mg/L)	氨氮 (mg/L)	氨鹽 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	硝酸鹽 (mg/L)	總磷 (μg/l)
平均數	72.58	59.044267	36.6075	107.7786	0.587778	1.776818	23.37033	1.015467	29.88627
標準誤	1.782704	2.0636361	1.8006637	10.78383	0.40052	0.202715	1.839112	0.237896	3.434064
中位數	73.5	59	37.5	108.5	0.15	1.4	29	0.66	21
眾數	73	59	37	#N/A	0.15	1.1	35	0.68	11
標準差	12.60562	17.871613	11.388397	40.3494	3.398527	1.344657	14.2457	2.060236	29.73987
變異數	158.9016	319.39453	129.69558	1628.074	11.54998	1.808101	202.9401	4.244571	884.4597
峰度	3.049097	4.8581738	2.6213162	-0.18901	71.73929	4.815086	-1.30993	64.6081	21.19841
偏態	-0.95478	0.1833750	-1.0296754	-0.09612	8.462675	2.172349	-0.4702	7.807213	3.768614
範圍	73	131.68	62.2	141.7	28.98	6.2	45.18	17.81	217.33
最小值	26	0.32	1.8	40.3	0.02	0.4	0.82	0.19	0.67
最大值	99	132	64	182	29	6.6	46	18	218
總和	3629	4428.32	1464.3	1508.9	42.32	78.18	1402.22	76.16	2241.47
個數	50	75	40	14	72	44	60	75	75

項目	磷酸鹽 (μg/l)	總有機碳 (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	有機氮 (mg/L)	鈉 (mg/L)	鉀 (mg/L)	葉綠素a (μg/l)	透明度 (m)
平均數	2.941404	1.4691892	2.1730509	5.976271	0.507297	4.6456	2.4875	20.30859	2.922
標準誤	0.564029	0.2821522	0.397152	0.63327	0.07174	1.016421	1.628505	3.317218	0.185336
中位數	1.5	0.885	1.3	4.5	0.265	3	0.785	9.5	2.8
眾數	0	1.1	1.7	1.8	0.1	3	1	18	1.1
標準差	4.258323	2.4271646	3.0505823	4.864238	0.617131	7.187184	11.28261	26.53774	1.374492
變異數	18.13332	5.8911281	9.3060526	23.66081	0.38085	51.65561	127.2974	704.2517	1.889227
峰度	5.245527	38.445047	18.318361	1.425008	13.32339	26.19417	47.92724	14.30648	-0.64971
偏態	2.386327	5.7441210	3.924996	1.395479	2.976371	5.074863	6.920523	3.402344	0.507547
範圍	18	19	19.4	20.9	4	45.26	78.63	161.97	5.37
最小值	0	0	0	0	0	0.71	0.37	0.03	0.83
最大值	18	19	19.4	20.9	4	45.97	79	162	6.2
總和	167.66	108.72	128.21	352.6	37.54	232.28	119.4	1299.75	160.71
個數	57	74	59	59	74	50	48	64	55

(2) 濁度、氨氮、硝酸鹽與鈉

四個水質因子的分析情形是平均數大於中位數與眾數，且中位數和眾數相近。這表示有受到極大值的影響，為非平均分配，亦即集中在某些時間點。

(3) 氯鹽、硫酸鹽、總磷、磷酸鹽、COD 與有機氮

這些水質指標的情況為眾數最小，平均數最大。代表平時分布較為分散，以及濃度較集中在特定時間等兩種情形。

(4) 總有機碳、BOD、鉀與葉綠素 a

四種指標的分析數據均呈現平均數大於眾數，而眾數大於中位數。這種情形代表著水中有機物含量及鉀鹽污染平時偏向高濃度，且有時會發生明顯的集中現象。至於以葉綠素 a 為優養指標時，結果顯示不但優養發生次數較多，且集中程度也較明顯。

(5) 溶氧

溶氧的情形較為特別，分析值顯示眾數最大，而平均數則與中位數近似。這代表著較多的時間溶氧量偏高，而這種情形可能是因優養化而造成。

2. 標準差

標準差代表著數據變動程度的大小(陳，1997a)。由表 1 可知，飽和溶氧、總硬度、總固體、總磷、葉綠素 a 與電導度等六個指標變動幅度最大，代表這些污染物發生濃度集中的時間不固定，也意味著其敏感度較高。至於 pH 值，因變動幅度小，代表一般均維持在穩定的狀態。

3. 峰度與偏態

在曲線分布方面，峰度代表著資料向中央集中的程度(俞，1990)。表 1 指出，除了水溫、pH 值、總硬度、硫酸鹽與透明度外，其他水質指標均呈現高峰態，表示資料有集中的情形發生；尤其是濁度、氨氮、硝酸鹽、

有機碳與鉀更是明顯，代表這些因子的濃度均集中在一較狹小的範圍，亦即平時就保持在一定的濃度下，所以並非控制因子。至於其他呈現低峰度的因子，則代表資料為較分散的情形。

偏態表示資料分布偏離中間值的情形(俞，1990)。由表 1 可知，除了電導度、總鹼度、鎂、總硬度和硫酸鹽外，其他水質因子均為正偏態情形，表示觀測值集中於左側較小處，即平時濃度會較平均值為小。至於呈現負偏態的因子，則代表高峰在右，觀測值集中於較大的部位，且平時濃度大於平均值的情形較多。

4. 最大值與最小值

由表 1 最大與最小值數據可看出水庫出水口的環境水質狀況，包括溶氧量最大僅達 14.6mg/L，與最大飽和溶氧 170%有明顯差距，代表著水質已呈優養化狀態。此外，因優養而產生的大量藻類繁殖，在死亡後經細菌分解的生化反應，使蛋白質被分解成為氨基酸，氨基酸經水解後形成氨；或是因優養使水層中的溶氧降低，造成水體底部與底泥接觸帶溶氧減低，導致底泥有機質礦化作用不完全，而釋出氨於水中，這些皆造成水中氨氮含量的增加，使 pH 值上升(陳，1999b)，pH 值最大達 9.3，表示優養化程度嚴重。

在濁度方面，其最大與最小值差距甚大，代表濁度在觀測時間內有激增的事件，可見是因雨季影響或是優養的發生使藻類數量增加，而造成濁度的上升。

其他如氨氮，最大與最小值相差甚多，表示在特定時節會有嚴重的有機污染；總磷與磷酸鹽的差距大，則代表此水域有嚴重的有機污染；至於葉綠素 a，其含量範圍的差距大亦表示有優養化的污染情形。

(二) 整體水庫分析結果

以整體水庫水質資料來做敘述統計分析後，其統計結果整理如表 2。本研究亦將結果分為 (1) 平均數、中位數與眾數；(2) 標準差；(3) 峰度與偏態；(4) 最大值與最小值等四組來做討論。

1. 平均數、中位數與眾數

由表 2 的數據可知，大部分水質資料之平均數、中位數及眾數均無一致的現象。以下將針對三個統計量不一致之現象加以討論。

(1) 水溫、溶氧與飽和溶氧

三種水質指標均呈現眾數最大，而平均數與中位數相近的情形。對水溫而言，這代表著在大多數的時間下，水溫為溫暖的狀態；而對溶氧和飽和溶氧來說，則意味著污染所佔的時間較無污染的時間多。

(2) 懸浮固體、氯鹽、硝酸鹽、總磷、磷酸鹽、BOD、COD、有機氮、鈉、鉀與透明度

這 11 個水質資料有共同的特性，均顯示平均數大於中位數，而中位數又大於眾數。代表這些水質指標在多數的時間下偏向濃度較低的狀況，且偶爾會發生濃度集中的現象。然而，透明度的定義是「值越低，污染越嚴重」，與其他水質指標不同，因此，量測時應以眾數為準較適合。

(3) 濁度與葉綠素 a

濁度與葉綠素 a 兩組數據均呈現眾數大於平均數，而平均數又大於中位數的情況。這樣的結果代表以這兩組數據來描述優養化現象時，不但優養次數發生頻繁，且程度上也頗為嚴重，亦表示此兩種指標較為敏感。

(4) 氨氮與總有機碳

平均數 > 眾數 > 中位數是氨氮與總有機碳的狀況。以氨氮來說，這表示發生優養的時間較多，且數據受到極大值的影響，例如 87 年 1 月 5 日的觀測值達 29，而使得平均值大幅上揚。至於總有機碳，亦有類似情形，

而其異常觀測值則發生在 78 年 11 月 7 日的 38 與 87 年 1 月 5 日的 24。

(5) 總固體與電導度

這兩個水質指標的情況為眾數最小，而平均數則與中位數近似。這代表在大部分的時間下，水中固體與鹽類含量較平均值為少。

(6) 總鹼度與硫酸鹽

總鹼度與硫酸鹽之數值呈現眾數 > 中位數 > 平均數，這代表水中總鹼度與硫酸鹽含量在多數時間裡均較平均值為高，亦即其抗酸化能力偏高，同時也可能已遭農業污染。另外，因這兩種指標受某些時間點之極小值影響，故使得平均值降低。

2. 標準差

在變異程度方面，葉綠素 a 變動劇烈，是因其含量會隨季節而變化，故敏感度較高；至於溶氧、pH、氯鹽、有機氮與透明度等水質指標，則相對的敏感程度較小。

3. 峰度與偏態

在資料集中度方面，TSI、溶氧量、飽和溶氧、懸浮固體、硫酸鹽與透明度均呈現低峰度的情形，表示資料較分散；至於其他的因子，相對的均呈現高峰度狀態，表示數值較集中，尤其是氨氮與硝酸鹽，更是出現高度集中的現象，代表此兩個因子平時含量濃度較固定，對於優養化的控制較無影響。

另外，在分布偏態比較方面，TSI、電導度、鈣、鎂及硫酸鹽為負偏態情形，表示圖形高峰位於右側，資料集中於較大值的部分，意謂著大於平均值濃度的情形居多。至於其他的水質資料，則呈現正偏態情況，分布曲線向右偏斜，資料集中於較小值，表示在多數時間下濃度含量較平均值為小。

4. 最大值與最小值：

由表 2 中大約可看出整個水庫的水質情形，包括溶氧與飽和溶氧的最大值均相當高，表示水質遭受污染而產生藻類繁殖的現

表 2. 整體水庫水質之敘述統計分析

Table 2. Analysis of descriptive statistics for water quality of all watershed.

項目	TSI (TP)	水溫 (°C)	溶氧 (mg/L)	飽和溶氧 (%)	pH	懸浮固體 (mg/L)	總固體 (mg/L)	濁度 (NTU)	電導度 (μS/cm)
平均數	58.6117	19.01905	9.971825	106.721	8.198571	11.63449	166.7861	4.984603	211.7032
標準誤	1.756314	0.435007	0.249889	3.910622	0.053706	1.260622	4.210982	0.491282	4.321243
中位數	58.44229	18.7	9.6	101.3	8.13	9.67	163.5	3.913	213.3
眾數	55.6902	23.7	11	122.3	8.13	7.33	155.3	6.133	194.3
標準差	13.94031	3.452762	1.983431	25.0402	0.426277	8.824352	25.26589	3.89943	34.2988
變異數	194.3321	11.92157	3.933998	627.0117	0.181712	77.86918	638.3652	15.20555	1176.408
峰度	-0.60886	2.227491	-0.70068	-0.42072	0.047589	-0.68688	0.279102	0.582182	11.42593
偏態	-0.28002	0.881822	0.405066	0.49491	0.797809	0.642544	0.51447	1.030422	-0.66602
範圍	59.71395	19.5	7.603	100.97	1.8	30.97	115.4	17.31	304.4
最小值	24.37872	13	6.967	70.33	7.5	1.33	116.3	0.29	49.3
最大值	84.09267	32.5	14.57	171.3	9.3	32.3	231.7	17.6	353.7
總和	3692.537	1198.2	628.225	4375.56	516.51	570.09	6004.3	314.03	13337.3
個數	63	63	63	41	63	49	36	63	63

項目	總鹼度 (mg/L)	鈣 (mg/L)	鎂 (mg/L)	總硬度 (mg/L)	氨氮 (mg/L)	氯鹽 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	硝酸鹽 (mg/L)	總磷 (μg/l)
平均數	75.66262	58.15079	38.69412	107.3667	0.730169	1.921944	24.5808	1.243921	65.42117
標準誤	2.142526	1.779199	1.931297	10.28939	0.505	0.259462	2.005755	0.434586	7.206767
中位數	78.165	58.7	39.65	113.3	0.21	1.45	29.67	0.71	43.17
眾數	78.67	60.7	39.3	#N/A	0.32	1.2	34.67	0.537	35.67
標準差	13.88515	14.12196	11.2613	35.6435	3.878979	1.556769	14.04028	3.44942	57.20194
變異數	192.7975	199.4296	126.8169	1270.459	15.04648	2.42353	197.1295	11.8985	3272.062
峰度	8.554327	3.905242	3.204769	0.312953	58.82907	5.179209	-1.29507	59.55751	1.474175
偏態	0.122554	-1.18476	-1.41857	-0.79886	7.664774	2.273065	-0.52837	7.62897	1.339241
範圍	104.97	87.3	54.1	121.73	29.97	6.85	40.997	27.553	251.633
最小值	24.33	0.4	1.6	38.97	0.03	0.48	1.003	0.277	4.067
最大值	129.3	87.7	55.7	160.7	30	7.33	42	27.83	255.7
總和	3177.83	3663.5	1315.6	1288.4	43.08	69.19	1204.459	78.367	4121.534
個數	42	63	34	12	59	36	49	63	63

項目	磷酸鹽 (μg/l)	總有機碳 (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	有機氮 (mg/L)	鈉 (mg/L)	鉀 (mg/L)	葉綠素a (μg/l)	透明度 (m)
平均數	10.36529	2.923048	7.195708	17.40173	0.782742	4.817071	1.48655	111.6103	2.294565
標準誤	4.012062	0.751587	2.015271	2.104126	0.123653	1.168947	0.651136	16.95035	0.159163
中位數	2.955	1.1035	3.767	10.95	0.42	3.0535	0.818	77.773	2.015
眾數	0	2.1	3.1	2.867	0.1	2.7	0.657	134	1.07
標準差	27.79638	5.918004	13.96221	14.57781	0.973641	7.575641	4.118148	123.4004	1.079495
變異數	772.6387	35.02277	194.9433	212.5126	0.947978	57.39033	16.95914	15227.67	1.16531
峰度	37.59725	23.1332	34.8928	0.107662	7.233194	34.56392	39.79047	2.146331	-0.73143
偏態	5.864022	4.626678	5.557574	1.091113	2.44003	5.716795	6.300468	1.519411	0.607026
範圍	188.47	37.43	94.577	51.597	5.28	48.307	26.473	532.7867	3.88
最小值	0	0.57	0.553	2.233	0.02	2.303	0.377	0.0133	0.83
最大值	188.47	38	95.13	53.83	5.3	50.61	26.85	532.8	4.71
總和	497.5337	181.229	345.394	835.283	48.53	202.317	59.462	5915.348	105.55
個數	48	62	48	48	62	42	40	53	46

象；pH 最大值高達 9.3，表示有時會發生嚴重的優養化現象；懸浮固體、總固體、總鹼度與濁度之最大與最小值差距大，則代表優養化並非連續性長期發生，而是在特定時間下才會特別嚴重；氨氮變化範圍相當大，表示在特定時間裡有污水排入時，氨氮含量才會大幅提升；至於硝酸鹽、總磷、BOD、COD、葉綠素 a 和透明度，其最大與最小值都相距很遠，代表這些污染物在優養化情形出現時，才會大量的增加，而非均勻分布。

(三) 出水口與整體水庫結果比較

將出水口與整體水庫之資料進行比較，兩者呈現的水質狀況頗為相似，但整體水庫的水質資料分布較為平均，比單一出水口的資料更接近於常態分布，顯示整體水庫之代表性較高。另外，在優養化方面，使用整體水庫資料時，其優養化程度較高，表示水庫上游地區優養化情形較下游地區嚴重。

二、單迴歸分析

(一) 水庫出水口分析結果

以 S6 測站資料作單因子直線迴歸分析，各個水質指標因子與 TSI 的關係可以表 3 來表示。由表中可知，與優養化指標 TSI 達顯著相關的因子有溶氧、懸浮固體、總鹼度、總磷、磷酸鹽、化學需氧量、葉綠素 a 與透明度等水質指標。

1. 溶氧

藻類成長行光合作用會產生大量的氧氣，而影響其他生物，溶氧指標即為量測水中含氧量，故此因子達顯著相關具合理性。

2. 懸浮固體

懸浮固體為量測水中漂浮而不沉澱的固體量，藻類亦屬此類固體，所以，此因子達顯著相關亦為合理。

3. 總鹼度

總鹼度之數值受到氨氮的影響，當優養化情形發生時，氨氮含量亦呈現偏高的現象，同時也使得總鹼度升高。

表 3. 水庫出水口水質之單迴歸分析

Table 3. Analysis of simple regression for water quality of reservoir's effluent.

項目	水溫	溶氧	飽和溶氧	pH	懸浮固體	總固體	濁度
P-value	0.0584	0.0425	0.0805	0.131	0.0012	0.6365	0.0661
R-square	0.0482	0.0552	0.0623	0.031	0.1661	0.0054	0.0455

項目	電導度	總鹼度	鈣	鎂	總硬度	氨氮	氯鹽
P-value	0.5484	0.0435	0.5288	0.9797	0.0903	0.1023	0.475
R-square	0.005	0.0822	0.0055	0	0.2205	0.0377	0.0122

項目	硫酸鹽	硝酸鹽	總磷	磷酸鹽	總有機碳	BOD	COD
P-value	0.3981	0.0581	<0.0001	0.0132	0.2537	0.2544	0.0212
R-square	0.0123	0.0483	0.6268	0.1067	0.0181	0.0227	0.0896

項目	總有機氮	鈉	鉀	葉綠素a	透明度
P-value	0.3827	0.3071	0.2579	0.0073	0.0009
R-square	0.0106	0.0217	0.0277	0.1104	0.1885

4. 總磷

在淡水中，總磷一般均為藻類生長的營養控制因子 (Lau, 2002)，因其含量較少的緣故，所以藻類族群生長數量會因磷的含量而遭受限制。所以必定與藻類族群的數量相關。

5. 磷酸鹽

磷酸鹽為磷之無機態，會影響水中磷的含量，間接影響藻類生長，有機磷在水中經過氧化後會形成無機磷，將影響水中磷的含量，間接影響藻類生長，所以亦為相關因子之一 (Gruau, 2005)。

6. 化學需氧量

生化需氧量 (BOD) 可量測有氧狀態下細菌分解有機物所需的耗氧量，但由於藻類之細胞壁在一般狀態下無法分解，故應使用 COD 來量測，其偵測極限值較小，且 COD 的量測較快捷省時，因此，必須以化學需氧量 (COD) 來量測，才可以得到精準的優養化相關資料。

7. 葉綠素 a

葉綠素 a 即代表藻類的總量 (廖, 2002)，故可直接作為量測藻類數量的指標，而快速看出族群量與分布情形，因此必為相關因子之一。

8. 透明度

透明度為量測水的可透光度，因藻類生長會減低水的透光度 (洪, 2002)，故此因子與優養化程度具相關性。

由於相關係數的平方 (R^2) 代表著可解釋之變異度 (黃, 2002)，故將各個迴歸分析後接受因子之 R^2 排序如表 4。由表中可看出，各因子當中前四名分別是總磷、透明度、懸浮固體與葉綠素 a，代表這四種水質指標對優養化情形的影響最大。因此，亦可再次證明卡爾森優養化指標選擇總磷、葉綠素 a 和透明度 3 個因子作為評估優養化程度根據的理

由 (Xu, 2001)。

表 4. 水庫出水口水質變數之 R^2 排序
Table 4. R^2 order of water quality variables in reservoir's effluent.

排序	變數	R^2
1	總磷	0.6268
2	透明度	0.1885
3	懸浮固體	0.1661
4	葉綠素a	0.1104
5	磷酸鹽	0.1067
6	COD	0.0896
7	總鹼度	0.0822
8	溶氧	0.0552

上述以最靠近水庫出水口的測站作為迴歸依據時，獲選的相關因子中並未將水溫、濁度、氨氮和硝酸鹽等重要水質指標納入。推測可能原因為一個測站的觀測值數量仍嫌不足，在計算過程中有時會將一部分重要因子忽略掉。因此，我們再以代表整體水庫之測站平均值進行單迴歸分析，用來比較兩者結果的異同。

(二) 整體水庫分析結果

若以代表整體水庫之測站資料平均值作單迴歸分析，各個水質指標因子與 TSI 的關係如表 5 所示。由表中統計資料可知，與優養化指標 TSI 達顯著相關的因子，包括水溫、溶氧、懸浮固體、濁度、氨氮、硝酸鹽、總磷、磷酸鹽、化學需氧量、鈉、葉綠素 a 與透明度等水質指標。而達迴歸顯著之水質指標中，有許多與以出水口資料進行單迴歸分析時相重疊 (表 3 與表 5 比較)，因此以下分析結果說明僅以兩者之不同指標做說明，包括有總鹼度、水溫、濁度、氨氮、硝酸鹽和鈉等 6 個水質指標。

1. 總鹼度：

當以整體水庫的資料來觀察水庫水質情形時，觀察的尺度較僅以出水口資料觀察時

表 5. 整體水庫水質之單迴歸分析

Table 5. Analysis of simple regression for water quality of all watershed.

項目	水溫	溶氧	飽和溶氧	pH	懸浮固體	總固體	濁度
P-value	0.0034	0.0038	0.0851	0.9702	<0.0001	0.5626	<0.0001
R-square	0.1324	0.129	0.0741	0	0.54	0.01	0.2293

項目	電導度	總鹼度	鈣	鎂	總硬度	氨氮	氯鹽
P-value	0.4447	0.2004	0.7715	0.1479	0.4954	0.0142	0.6599
R-square	0.0096	0.0406	0.0014	0.0643	0.0477	0.1009	0.0058

項目	硫酸鹽	硝酸鹽	總磷	磷酸鹽	總有機碳	BOD	COD
P-value	0.8744	0.0094	<0.0001	0.0321	0.5724	0.5519	<0.0001
R-square	0.0005	0.1055	0.7997	0.0961	0.0053	0.0077	0.3259

項目	總有機氮	鈉	鉀	葉綠素a	透明度
P-value	0.9661	0.0194	0.269	<0.0001	<0.0001
R-square	0	0.1292	0.0321	0.3818	0.3956

來得大，因此以總鹼度指標來看時，其變化程度會被平均化，因而重要性會降低，所以在此單迴歸分析並未達統計顯著。

2. 水溫

日照為影響藻類生長的重要因子之一，因日照會影響水溫的高低，故水溫可間接表現出日照的影響，因此，水溫亦為優養化相關因子之一 (Cheng, 2003)。

3. 濁度

濁度量測方法為偵測光線射出後的折射量，而造成濁度的升高除了因降水使水中懸浮固體升高的原因外，水中單細胞藻類亦會對濁度有所貢獻，因此，量測時藻類的族群數量若相對龐大，濁度就會升高，故可藉此評估藻類族群變化這個重要的優養化相關因子 (Danilovw, 1999)。

4. 氨氮

氮雖然因含量大而非限制因子，但近年來台灣水源多數優養化均受此影響 (陳，

2003)，故此亦為藻類生長之重要營養控制因子之一。水中氨氮的含量會決定藻類生長的速度與族群數量，且在濃度過高時可能會使水產生毒性 (Nijboer, 2004)。

5. 硝酸鹽

硝酸鹽為氮之無機態，由氨氮氧化而成。其含量會影響水中氮的含量，故亦為藻類生長相關因子之一 (Pehlivanoglu, 2004)。

6. 鈉

在討論淡水水域之優養化情形時，鈉一般不列入重要因子。但在此經單迴歸分析後，因其達顯著水準而被接受。可能的原因仍須進一步探討。

將上述經迴歸分析後達顯著水準之因子的決定係數值 (R^2) 作一排序比較如表 6，由表中數據可發現，排序前四名與表 4 之結果相同，表示此四個水質指標為解釋優養化的最重要因素。其中磷酸鹽的解釋力明顯降低，可能是其含量對整體水庫而言變化量不

大，因而使其重要性降低；至於總磷，則還是解釋變異能力最高者，證明在淡水水域中優養化之最主要控制因子為磷含量。

表 6. 整體水庫水質變數之之 R^2 排序
Table 6. R^2 order of water quality variables in all watershed.

排序	變數	R^2
1	總磷	0.7997
2	懸浮固體	0.5400
3	透明度	0.3956
4	葉綠素a	0.3818
5	COD	0.3259
6	濁度	0.2293
7	水溫	0.1324
8	鈉	0.1292
9	溶氧	0.1290
10	硝酸鹽	0.1055
11	氨氮	0.1009
12	磷酸鹽	0.0961

(三) 水庫出水口與整體水庫之比較

將水庫出水口 (表 4) 與整體水庫 (表 6) 資料之單迴歸分析結果進行比較，發現在整體水庫中，相關因子雖然少了總磷，卻多了水溫、濁度、氨氮、硝酸鹽和鈉 5 個因子。

推論其原因，可能是以整體水庫為考量時，水質因子變化範圍較大，所以會有較多的因素被考慮進來。另外，也因為河川自淨功能的影響，會減緩下游的優養化情形，因此，在以水庫出水口為考量時，所考慮到的因子會減少。

以整體水庫作為迴歸考量因子後，除了發現更多潛在的相關因子，使優養化指標 TSI 之解釋更為周全外，大部分的相關因子之相關係數 (R^2) 都大為提升，表示其對變異的解釋程度增加。因此，在進行迴歸分析時，以整體水庫為考量會比單一出水口測站來得好。

結論與建議

本研究發現，當以整體水庫資料為依據時，不但重要因子之相關係數大為提升，使其重要性更加明顯，且還可以找出其他潛在之動力因子，讓研究更周詳，減少可能產生的誤差，提升研究結果可以解釋的程度。

在優養化動力因子探討方面，德基水庫中之主要動力因子為總磷、葉綠素 a 與透明度三個水質指標，符合卡爾森之優養化理論。此外，因溶氧、總磷、氨氮、硝酸鹽與水溫等均會影響藻類之生長，故亦納入相關因子。至於懸浮固體、濁度及化學需氧量，則是在測定時，會與藻類生物量相關，所以亦為重要因子。

在往後進行相關優養化動力分析研究時，本研究建議應以整體水庫資料作為迴歸分析之依據，將可得到較完整的優養化重要動力因子及潛在影響因子。另外，在動力因子分析方面，雖然結果顯示共有 12 個相關動力因子，但卻無法看出因子之間的關聯性與重要程度，因此希望日後可進一步分析研究，篩選出最重要的動力因子來進行背後控制機制之探討。

參考文獻

1. 丁安迪 (2004)，「自來水配水管網三鹵甲烷模式模擬之研究」，碩士論文，中興大學。
2. 林慧姿、張嘉容、黃春松、廖萃邁 (2002)，「統計學」，新科技書局出版，台北縣。
3. 俞其海 (1990)，「實用統計學」，昭人出版社出版，台中市。
4. 洪慧鈞 (2002)，「水庫優養化評估指標與優養化水體三鹵甲烷生成潛勢之探討」，碩士論文，中興大學。
5. 涂珮琪 (2003)，「二角多甲藻水層萃取物之毒性研究」，碩士論文，台灣大學。
6. 黃意茹 (2002)，「都市綠覆率與氣溫之相關研究~衛星影像類神經網路分類法之應用」，碩士論文，逢甲大學。

- 7.陳登源、楊錦洲、林茂文、蔡豐清 (1997a), 「管理數學」, 國立空中大學發行, 臺北縣。
- 8.陳琪婷 (2003), 「以二氧化錳催化降解水中氨氮之研究」, 碩士論文, 中山大學。
- 9.陳鴻烈、鄭慧玲 (1997b), 「台中縣政府大甲溪及德基水庫水質監測研究方案」, 台中縣環境保護局委託研究計畫, pp.94~117。
- 10.陳鴻烈、鄭慧玲 (1998), 「水庫優養化之時間數列分析研究」, 水土保持學報, 第三十卷, 第四期, 第 331~337 頁。
- 11.陳鴻烈、梁家柱、鄭慧玲、王久泰 (1999a), 「利用相加性季節變動模式之德基水庫優養化時間數列分析」, 水土保持學報, 第三十一卷, 第三期, 第 139~144 頁。
- 12.陳奕宏、王怡諭 (1999b), 「環境微生物」, 中華民國環境工程學會編印, 臺北市。
- 13.陳鴻烈、梁家柱、羅惠芬、鄭慧玲 (2004), 「水庫優養化時間序列模式分析比較研究」, 水土保持學報, 第三十六卷, 第二期, 第 169~178 頁。
- 14.陳鴻烈、蔡大偉 (2005), 「不同模式之預測能力研究」, 水土保持學報, 第三十七卷, 第二期。
- 15.經濟部水利署德基水庫集水區管理委員會 (2002), 「德基水庫集水區第四期整體治理計畫水質監測與管理工作成果摘要總報告」。
- 16.廖文蓓 (2002), 「翡翠水庫中藻類種群消長之動態模擬」, 碩士論文, 台灣大學。
- 17.潘南飛編譯 (2003), 「工程統計」, 全威圖書有限公司, 台北縣。
- 18.Antikainen, R., R. Lemola, J. I. Nousiainen, L. Sokka, M. Esala, P. Huhtanen and S. Rekolainen (2005), "Stocks and Flows of Nitrogen and Phosphorus in the Finnish Food Production and Consumption System", Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol.107, pp.287~305.
- 19.Cheng, W. P. and F.-H. Chi (2003), "Influence of Eutrophication on the Coagulation Efficiency in Reservoir Water", Chemosphere, Vol.53, pp.773~778.
- 20.Danilov, R. and N. G. A. Ekelund (1999), "The Efficiency of Seven Diversity and One Similarity Indices Based on Phytoplankton Data for Assessing the Level of Eutrophication in Lakes in Central Sweden", The Science of the Total Environment, Vol.234, pp.15~23.
- 21.Gruau, G., M. Legeas, C. Riou, E. Gallacier, F. Martineau and O. Henin (2005), "The Oxygen Isotope Composition of Dissolved Anthropogenic Phosphates: A New Tool for Eutrophication Research?", Water Research, Vol.39, pp.232~238.
- 22.Lau, S. S. S. and S. N. Lane (2002), "Biological and Chemical Factors Influencing Shallow Lake Eutrophication: A Long-Term Study", The Science of the Total Environment, Vol.288, pp.167~181.
- 23.Nijboer, R. C. and P. F. M. Verdonchot (2004), "Variable Selection for Modelling Effects of Eutrophication on Stream and River Ecosystems", Ecological Modelling, Vol.177, pp.17~39.
- 24.Pehlivanoglu, E. and D. L. Sedlak (2004), "Bioavailability of Wastewater-Derived Organic Nitrogen to the Alga *Selenastrum capricornutum*", Water Research, Vol.38, pp.3189~3196.
- 25.Xu, F.-L., S. Tao, R. W. Dawson and B.-G. Li (2001), "A GIS-Based Method of Lake Eutrophication Assessment", Ecological Modelling, Vol.144, pp.231~244.

93 年 02 月 15 日 收稿

93 年 03 月 20 日 修改

93 年 03 月 25 日 接受