

以主成份分析評估台灣亞熱帶德基水庫水質變化 與藻類變遷關係

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS TO EVALUATE THE RELATIONSHIP BETWEEN WATER QUALITY AND ALGAL CHANGE
IN SUBTROPICAL TECHI RESERVOIR, TAIWAN

國立臺灣大學
環境工程學研究所
博士

陳怡靜*
Ying-Jing Cherry Chen

摘 要

大量且複雜的水質監測數據往往無法合理解釋和聯結湖泊水庫藻類大量繁殖成因，及直接作為水庫水質管理的指標。德基水庫早期曾出現二角多甲藻(*Peridinium* spp.)大量繁殖，本文應用多變量統計的主成份分析法對德基水庫水質及藻類長年監測數據(1983~2004)進行統計分類和簡化，期望能篩選出與特定藻類生長有關的環境敏感參數，預防甲藻藻華再度發生。

研究樣本包括 11 個水質參數及 3 種藻(二角多甲藻、綠藻和矽藻)豐度，結果顯示前四個主成份可解釋達 75.7%總變異量，第一主成份(PC1)可解釋 34.4%變異量，具有高度相關的正因子負荷包括多甲藻豐度、總磷(TP)、葉綠素-a(Chl-a)及氨氮(NH₃-N)。第二主成份(PC2)為 17.7%變異量，指出綠藻豐度、矽藻豐度、無機硝酸鹽氮(NO₃-N)和水溫變化具高度相關性。主成份三和四(PC3 和 PC4)包括溶氧(DO)、酸鹼值(pH value)和鈣(Ca)離子濃度，和藻類呈低相關性。結合水質時間序列和主成分分析結果，營養鹽磷和氮的含量和化學型態隨時間變化被認為是驅動德基水庫 1989 年和 1998 年藻類群落組成變化的關鍵因素。1989 年硝酸鹽氮的突然增加促進綠藻的生長；1998 年以後總磷濃度大幅降低使多甲藻失去競爭優勢。僅以卡爾森水體指標代表水質變化狀態已不足夠，這項研究證實營養鹽仍是影響藻類變遷的重要因子和發展多藻種水質生態模式的必要性。

關鍵詞：藻類，水庫，磷，氮，營養鹽，主成份分析。

* 通訊作者，國立臺灣大學環境工程學研究所博士，德明財經科大兼任助理教授
台北市大安區敦化南路 1 段 295 巷 46 號 5 樓 · yijingcherry@gmail.com

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS TO EVALUATE THE RELATIONSHIP BETWEEN WATER QUALITY AND ALGAL CHANGE IN SUBTROPICAL TECHI RESERVOIR, TAIWAN

Ying-Jing Cherry Chen

Graduate Institute of Environmental Engineering
National Taiwan University
Taipei, Taiwan

ABSTRACT

The large and complicated water quality monitoring data cannot appropriately explain the algal changes reasonably. Principal component analysis (PCA) of multivariate statistical technique was carried out by analyzing a 22-yr (1983-2004) water quality dataset including 14 parameters (physico-chemical water variables and three algae abundances) in the subtropical Techi Reservoir, Taiwan. The results identified the first four principal components explained up to 75.7% total variance. The abundance of heterotrophic dinoflagellates *Peridinium bipes* (*P. bipes*) in the first component (PC1) has a strong correlation with the concentrations of total phosphorus (TP), Chlorophyll-a, and ammonium nitrogen (NH₃-N). The second component (PC2) identified the positive correlation between the abundance of autotrophic species green algae and diatoms, inorganic nitrate nitrogen (NO₃-N) and water temperature. The third and fourth components (PC3 and PC4) including dissolved oxygen (DO), pH value and calcium (Ca) ion concentration have low significant correlation with algae.

Incorporated with the time series of water quality with the principal component analysis results, the temporal variations of nutrients phosphorus and nitrogen contents and chemical forms were considered the key factors driving the change in algae community composition occurred in 1989 and 1998 in the reservoir, respectively. The abrupt increase of inorganic nitrate nitrogen induced the growth of green algae while the decrease of total phosphorus closely correlated with the decrease in *P. bipes* density after 1998. This study confirms that nutrients are still an important factor triggering the algal blooms and the need to develop multi-algae models for useful water quality management.

Keywords: Algae, Reservoirs, Phosphorus, Nitrogen, Nutrients, Principal component analysis.

一、前言

1.1 文獻回顧

湖泊水庫藻類消長受到流體動力、環境水質以及水生生物複雜交錯的生化機制影響。在亞熱帶湖泊水庫，浮游植物(藻類)數量通常在初夏增加，整個夏季達到峰值，繼之於秋季水溫降低或發生湖庫翻轉時降低。隨著集水區的污染源日增，進入水庫的水質物理化學因子繁多且複雜，這些原始監測數據並不易直接觀察出水質動態變化，也無法有效解釋環境參數的變化與浮游植物動態間的聯繫。已有許多研究運用多變量統計分析技術的主成份分析法(Principle component analysis, PCA)將複雜的水體環境變數縮減、鑑定出關鍵性的環境因子羣，或建立水質指標應用於水資源管理(De Ceballos *et al.*, 1998; Perona *et al.*, 1999; Parinet *et al.*, 2004; Arhonditsis *et al.*, 2004; Çamdevýren *et al.*, 2005; 柳文成等, 2000; 吳政南和柳文成, 2013)。De Ceballos 等(1998)將系統中不相關的水質參數剔除，只關注與地表水優養化相關的參數。Parinet 等(2004)以主成份分析預測水體營養狀態。Çamdevýren 等(2005)使用主成份分析預測藻類的生物量(以葉綠素-a 濃度表示)。Leer 等(2007)以主成份分析位於美國印第安納州上瓦巴什河流域(Wabash River Basin, Indiana)38 個採樣點的藻類生物量、棲息地、盆地特徵、養分和生物群落數據，協助環保當局制定水體營養鹽管制標準。

近年來台灣也有以主成份分析應用於水體環境研究，吳政南和柳文成(2013)以多變量統計分析評估臺北水源特定區集水區水質，區別出新店河流域及上游南勢溪及北勢溪三個流域具特定的水質主成份。陳育偉(1995)運用多變量統計分析建立台灣地區水庫優養評估模式。張傳恩(2010)應用多變量統計分析評估鴛鴦湖水質。黃富昌等(2005)以主成份分析與因子分析發展出台灣九座水庫優養化指標。陳鴻烈與蔡大偉(2008)以主成分分析探討德基水庫水質優養化之動力研究。劉瓊靄(2004)以主成份分析探討福山試驗林哈盆溪流域水化學的空間變異性。這些研究證實多變量統計分析技術可應用於地面水體的水質和污染來源定性分類，然而上述研究仍偏重於水質指標探討，極少直接關注藻類組成的多樣性與其特定環境因子關係或發展包含藻類的生態模式，畢竟對水庫飲用水源，水中浮游生物多寡及是否具水生毒性，是自來水處理困難度及水質管理的關鍵。僅以卡爾森水體指標代表水質變化狀態已不足夠，若能納入藻類生物數量，深入了解水生生態系

統和其特定環境因子關係(Arhonditsis *et al.*, 2004)，有助於發展特定藻類的動態生長模式以預測藻華，降低水質衝擊。

1.2 研究場址背景

德基水庫(26°8'N, 121°1'E)位於亞熱帶台灣中部的大甲溪上游，是台灣中部重要的水力發電及飲用水資源。德基水庫集水區上游武陵位在雪霸國家公園內，該地區的七家灣溪及高山溪是台灣特有種陸封型櫻花鉤吻鮭(Formosan landlocked salmon)重要的棲息地。德基水庫是在槽水庫，以大甲溪為主流及十九條小支流匯集而成。四週高山圍繞，水庫終年平均水溫 17 至 19°C，較接近溫帶型氣候。德基水庫年平均降雨量 2,800 公釐，水庫滿水位時 1,408 公尺，集水區高程介於海平面以上 1,500 至 3,000 公尺，總面積 601.61 平方公里。集水區內各主要支流平均坡降皆在 50%以上，水流湍急。德基水庫農業面積佔全區 5.71%，種植果樹及高山蔬菜。森林佔 81.58%，大多為天然二葉松林(Taiwan red pine)。德基集水區地質以粘板岩(slate)與石灰岩(limestone)為主，由於泥質黏板岩質地鬆軟，抗蝕力低，易受風化崩塌，上游有勝溪、七家灣溪及南湖溪流流域是本區沖蝕嚴重區域。地表天然林(松、鐵杉林)的原生土有機質含量高、酸度強且入滲性良好，土壤酸鹼值介於 6 至 7。表面 10 公分內多為腐葉分解形成之腐植質，土粒少黏性強，呈團粒結構。根據郭振泰等(2000)於德基水庫上游進行暴雨期採樣分析，上游泥砂和磷營養鹽多在暴雨期經地表逕流大量進入水庫。

在德基水庫出現藻類包括二角多甲藻(Peridinium spp.)、綠藻(green algae)和矽藻(diatoms)(陳伯中, 2000)。德基水庫上游在 1983 年曾出現二角多甲藻(Peridinium spp.)大量繁殖為優勢藻，水質惡化持續約 20 年。1998 年以後甲藻數量急劇下降，已改由綠藻和矽藻取代為優勢藻(經濟部水利署, 2008 和 2010)，水質由優養轉為中度優養至貧養狀態。根據德基水庫集水區管理委員會長期的定期監測公告紀錄(http://file.wra.gov.tw/wra_ext/tech/DD/DD-03.htm)，自 1998 年至 2017 年，甲藻數量仍保持在數百及 2000 個 cells/ml 以內，低於矽藻數量。甲藻通常出現在海洋以及部份的湖泊水庫(Wetzel, 2001; Rengefors and Legrand, 2001; Wu and Chou, 1998; Masato *et al.*, 1998)。甲藻的體型比其他藻類大，每毫升數量達千個細胞時水色即呈紅棕色，又稱赤潮。部份海洋中的甲藻在繁殖和死亡過程會釋放多種毒素，引起水生魚貝類神經中毒、代謝失調及呼吸障礙等。淡水的甲藻雖未具毒性，

若是形成藻華常伴隨藻腥味，消耗水體大量的營養物質，使水體缺氧從而間接造成其他水生生物(如魚類)窒息死亡。甲藻屬於廣溫性(wide temperature)藻類，可在10-28°C水域中大量繁殖。由於台灣屬於亞熱帶至熱帶性氣候，台灣平地湖泊水庫藻類多以藍綠微囊藻為主，甲藻並不是常見優勢藻。近年來中國的三峽水庫及各地湖泊也觀察到春季多甲藻的繁殖(徐耀陽等，2008；吳興華等，2017)。多甲藻異於其它藻類之處是它具有鞭毛和自由游泳移動的能力，可以晝夜垂直遷移運動，在白天光照充足時多甲藻停留在水體表層或近表層進行光合作用，在黑夜時下沉至氮磷營養鹽含量較高的深層水進行吸收。這使甲藻相對其他藻群有較高的生存優勢。根據 Round (1985)研究，矽藻是溫帶湖泊的主要優勢藻，此與于淑芬等(2005)在德基水庫上游溪流附生藻類調查發現，矽藻是溪流中的優勢種(佔所有藻種80%以上)結果相符。然而德基水庫上游在夏天5-8月(氣溫21-23°C)期間曾出現大量甲藻，代表集水區有特定物質釋出，供應甲藻生長。雖然自2000年以來德基水庫水質未再觀察到甲藻大量生長現象，但甲藻並沒有消失，只是數量降低。當環境允許時休眠的甲藻孢子即可破殼而出，恢復正常形態。為防範再度發生甲藻藻華，本研究以德基水庫為研究對象，以過去曾發生甲藻盛行的時間段落(1983~2008)為研究期間，運用主成份分析法對水質及藻類(甲藻，綠藻和矽藻)豐度的長期監測數據(1983~2008)進行分析，希望找出與甲藻生長有關的特定環境因子群，做為水質管理及發展藻類生態模式參考。

二、材料和方法

2.1 水質採樣與藻類鑑定

1976年起德基水庫集水區管理委員會對水質及藻類進行長期監測及分期集水區治理計畫(第三至第六期)(經濟部水資源局，1996，1997，2008，2014)。本研究係引用台灣經濟部水利署德基水庫集水區管理委員會於1983~2008年期間的定期水質監測資料，水庫上游第S-39斷面是入流控制點(圖1)，此處匯集七家灣溪、雪山溪、四季朗溪、松茂溪、佳陽溪等支流，具有代表性。然而自2002年以後管理單位的水質監測欠缺S-39斷面資料，故研究只好以S-28斷面水質資料取代。每年按季節性(即每4個月)取樣共收集134個樣本。水質監測項目共11項，包括在實驗室分析總磷(TP)，正磷酸鹽($\text{PO}_4\text{-P}$)，葉綠素-a(Chl-a)，氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)，硝酸

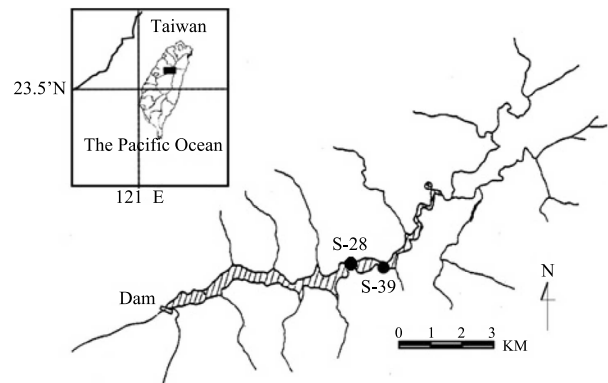


圖1 德基水庫地理位置及水質採樣點

鹽氮($\text{NO}_3\text{-N}$)，有機氮(Org-N)，鈣離子(Ca)和溶氧(DO)；在現場測定水溫，酸鹼值(pH value)和沙其盤深度(SD)。每年按季節性收集水體浮游植物樣品，經鑑定藻種包括二角多甲藻(*Peridinium bipes fa. oculatum*)，綠藻之小球藻(*Chlorella*)、浮絲藻(*Planctonema*)、角星鼓藻(*Staurastrum*)，以及矽藻類之曲殼藻(*Achnanthes*)、針桿藻(*Synedra*)、根管藻(*Rhizosolenia*)和小環藻(*Cyclotella*)等。

2.2 主成份分析和數據處理

主成份分析是描述生態系統梯度的有用方法(Gaugh, 1982)。本文應用多變量統計的主成份分析法目的是對德基水庫水質及藻類長年監測的複雜水質和藻類數據進行分類和簡化，使具有中高度相關性的環境參數被歸類在一群，藉以篩選出與特定藻類生長有關的環境敏感參數。主成份分析是多變量統計技術中極為重要且被廣泛應用方法之一。該方法將多個變數所形成的數學矩陣以降維方式處理，簡化為較少數的幾個互相獨立的線性組合變數(主成份)，使這些綜合指標盡可能地反映及解釋原來水質變數訊息及找出其相關性。為了減少因單位不同而產生的計算誤差，必須將原始數據進行標準化處理，再求出相關矩陣L，並計算出此相關矩陣之特徵值(eigenvalues) λ_i 及特徵向量(eigenvectors)。特徵向量即為主成份負荷(component loading)。為了讓主成份盡量保留原始變數所含有的訊息，經由線性組合而得的主成份變異數值應越大越好。第一個主成份(PC1)描述數據群中總變異量的最大百分比；第二主成份(PC2)描述總變異量的第二大百分比，依此類推。數值若大於0.75，代表具高度相關性；0.50~0.75代表中度相關性；0.30~0.50代表相關性較弱。本研究有14個主要變數，包含3種藻及11種水質參數。將這些變數分類為幾個主成份負荷後，與這3

表 1 1983~2001 年間水庫水質和藻類監測數據統計資訊

水質參數	縮寫或英文	單位	樣本數	最小值	最大值	中間值	平均值	標準偏差	變異數
Parameters		Unit	No.	Min	Max	Median	Mean	St Dev	C.V.
水溫	Temp	°C	134	4	25	19.5	19.6	1.8	0.10
溶氧	DO	mg/L	134	7.9	12.2	9.7	9.7	1.2	0.12
酸鹼值	pH value	value	134	6.6	9.4	7.9	8.0	0.3	0.04
沙其盤深度	SD	m	118	0.7	3.2	1.42	1.6	0.7	0.44
總磷	TP	mg/L	133	3	715	75.4	84.4	65.6	0.78
正磷酸鹽	PO ₄ -P	mg/L	132	1	110	10.70	12.1	9.1	0.75
葉綠素-a	Chl-a	mg/L	132	0.04	1,628	117.7	172.7	191.1	1.11
氨氮	NH ₃ -N	mg/L	125	0.04	0.9	0.22	0.2	0.13	0.60
硝酸鹽氮	NO ₃ -N	mg/L	132	0.01	3.7	0.83	1.1	0.85	0.77
有機氮	Org-N	mg/L	129	0.01	11	0.70	0.89	0.80	0.90
鈣離子	Ca	mg/L	133	18	99	67	67.7	13.3	0.20
二角多甲藻	<i>Peridinium bipes</i>	cells/ml	26	24	10,767	1,683	2,460	2,855	1.16
矽藻	diatoms	cells/ml	26	2	1,613	167	362	455	1.26
綠藻	green algae	cells/ml	26	0	5,061	388	730	1,180	1.62

種藻具有高度相關的參數即可被歸類在一群；和藻類變化無明顯相關性，呈低度或不相關的參數則歸類為其他成份。其次，將不同年份的樣本繪於以 PC1 和 PC2 雙軸定義之二維圖上的得分(scores)分布，也可比較不同年份的藻類特性隨時間變化。本研究係使用 XLSTAT(version 2018.4)統計分析軟體進行主成份分析和後續的數據處理。

三、結果與討論

3.1 水質及藻類隨時間變化趨勢

1983 年 2 月至 2004 年 11 月期間，季節性地收集水庫水質和當年度測得最大藻數量樣本的統計資訊如表 1 所示，德基水庫水溫介於 4~25°C，平均溫度 19.6±1.8°C。溶氧(DO)濃度很高，平均為 9.7±1.2mg/L。沙其盤深度(SD)介於 0.7-3.2 m 範圍，平均為 1.6±0.7m。水中 pH 值和 Ca 離子濃度分別為 8.0±0.3 和 67.7±13.3mg/L。營養鹽濃度包括氮和磷不同型態(NH₃-N, Org-N, NO₃-N, TP 和 PO₄-P)，葉綠素-a 及鈣 Ca 離子濃度時間變化如圖 2(a~g) 所示。氨氮(NH₃-N)濃度(圖 2(a))隨時間在 0.04~0.89mg/L 範圍內波動。有機氮(Org-N)濃度(圖 2(b))在 1983 年時達到峰值 11mg/L，1991 年和 1995 年分別達到 6~7mg/L，而其他時間保持濃度低於 2mg/L。硝酸鹽氮(NO₃-N)濃度略有週期性波動(圖 2(c))，每年早春和深秋的硝酸鹽氮(NO₃-N)濃度較高，秋冬季較低，大多數時間濃度低於 2mg/L，但

1989 年曾出現峰值 3.7mg/L。1983 至 1997 年間總磷(TP)濃度(圖 2(d))經歷了周期性波動，與硝酸鹽氮(NO₃-N)不同，總磷每年夏季和秋季都會急劇增加，應歸因於 5 月至 9 月雨季期間使大量集水區的污染被暴雨攜帶進入水庫造成。總磷濃度介於 3~715µg/L，平均為 84.4±65.6µg/L (見表 1)。圖 2(e) 為正磷酸鹽(PO₄-P)濃度，平均 12.1±9.1µg/L，遠低於總磷濃度。

陳怡靜(2004)曾對德基集水區地表逕流釋出的總磷進行化學分選(chemical fractionation)，結果指出集水區釋出的總磷除了固體顆粒磷(接近 58%總磷)，溶解態總磷包含溶解正磷酸鹽(PO₄-P)及溶解態有機磷(dissolved organic phosphorus, DOP)，後者 DOP 數量佔 38% 總磷，遠高於 PO₄-P(僅佔 4%總磷)。這些溶解態的有機磷(DOP)可能來自集水區果園和菜園的施肥肥料，或原始林地的腐植土，而前者可能性更高。1998 年水中總磷(TP)濃度從 84µg/L 急劇下降至 26µg/L (1999 年)，此後保持在 10~20µg/L，略高於正磷酸鹽(PO₄-P)。根據集水區治理報告(經濟部水利署，2008)，應是集水區治理發揮成效，又因 1999 年 9 月發生 921 地震，使道路中斷，集水區人為活動降低，使營養鹽的釋放量下降所致。葉綠素-a 濃度(圖 2(f))時間序列變化與總磷類似，夏秋季的濃度都較高，冬和春季濃度較低。葉綠素-a 濃度在 1983 年和 1995 年夏秋季曾達到峰值，分別為 1,628µg/L 和 1,560µg/L，平均值 238.4±321µg/L。

水庫各種藻的年度最大藻數量(豐度)隨時間變化如圖 3 所示，二角多甲藻在大多數期間是優勢藻，藻數量最多，介於 24~10,767cells/ml，平均為 2,460cells/ml。

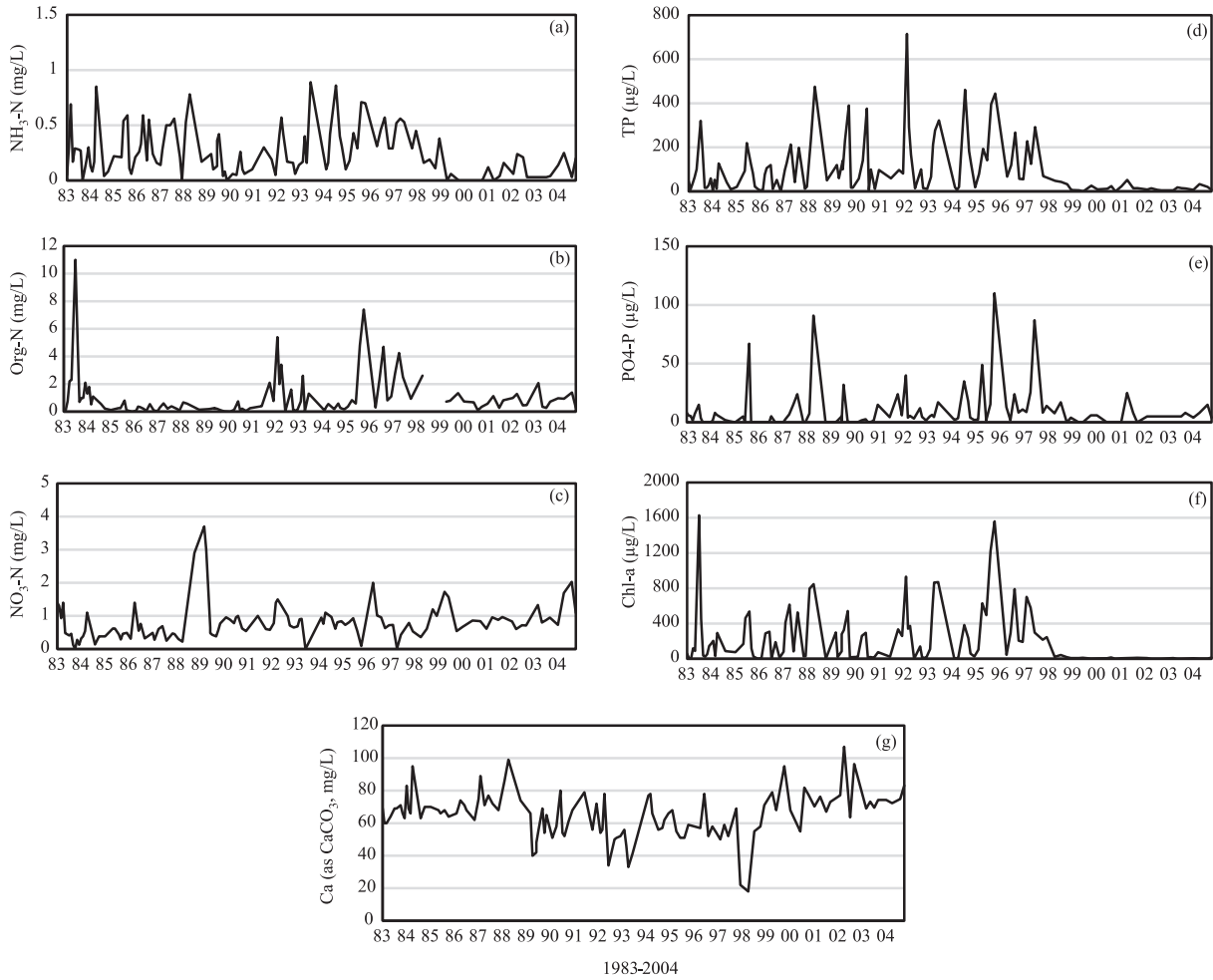


圖 2 德基水庫水體主要水質參數隨時間變化 · (a) 氨氮(NH₃-N); (b) 有機氮(Org-N); (c) 硝酸鹽氮(NO₃-N); (d) 總磷(TP); (e) 正磷酸鹽(PO₄-P); (f) 葉綠素-a(Chl-a); (g) 鈣離子(Ca)

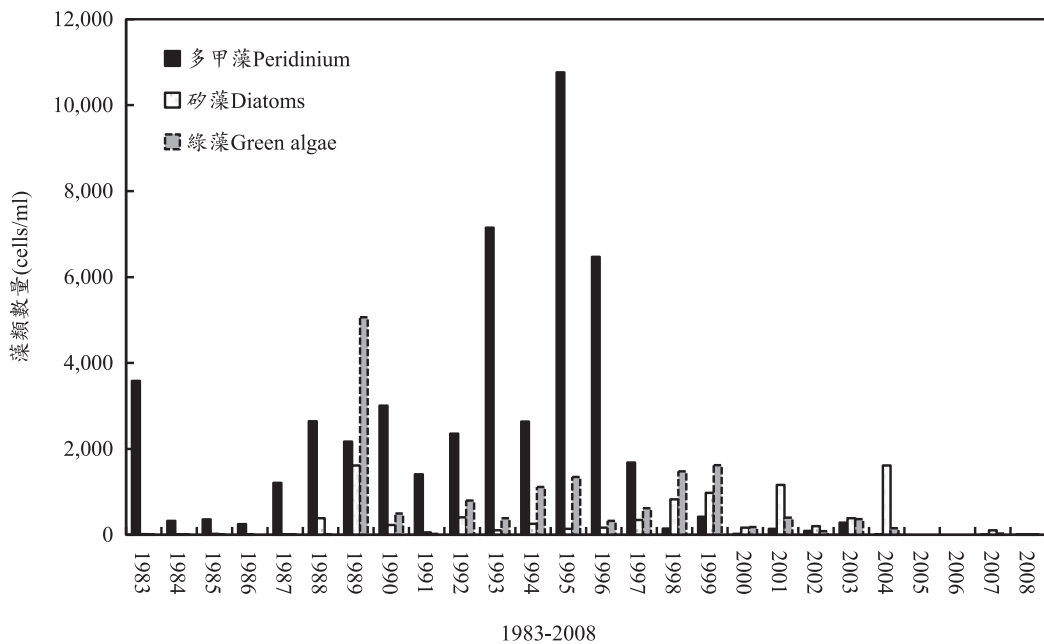


圖 3 德基水庫三種藻的最大藻數量(豐度)隨時間變化

表 2 為德基水庫主成份分析之特徵值及變異量

函數	特徵值	變異量	累積總變異量
Function	Eigenvalue	Total variance (%)	Cumulative variance (%)
F1	4.809	34.352	34.352
F2	2.477	17.689	52.041
F3	2.091	14.939	66.981
F4	1.212	8.658	75.639
F5	0.736	5.260	80.899
F6	0.651	4.651	85.550
F7	0.570	4.073	89.623
F8	0.389	2.777	92.400
F9	0.354	2.527	94.927
F10	0.261	1.863	96.789
F11	0.194	1.385	98.175
F12	0.126	0.902	99.076
F13	0.094	0.670	99.747
F14	0.035	0.253	100.000

多甲藻常在夏季上游開始出現及繁殖，由於它的細胞體積很大(單個多甲藻細胞體積為 $2,800\mu\text{m}^3$)，相較於綠藻和矽藻(約數十至數百 μm^3)要大很多，也貢獻最多的葉綠素-a。綠藻和矽藻豐度不若多甲藻有顯著變化，綠藻和矽藻生物量保持在數百 cells/ml，通常見於春季和秋季。值得注意的是，德基水庫的藻群曾在 1989 年及 1998 年發生兩次不同的演替。1998 年以後，甲藻數量降至 148cells/ml，比前幾年低 1-2 個數量級。1989 年，綠藻和矽藻的生物量有顯著增加(綠藻從前一年的 12cells/ml 突然增加至 5,061cells/ml；矽藻略增至 1,613cells/ml)。因此甲藻的相對豐度從 86.9%(1988)降至 24.5%(1989)，藻種組成比例隨之改變。然而綠藻優勢在隔年 1990 即消失，綠藻生物量降回 496cells/ml，甲藻繼續保持優勢到 1995 年夏季，達到峰值 10,767cells/ml。甲藻在 1998 年後豐度逐年下降，數量保持在數十至數百 cells/ml，但是 2005~2008 年水庫當局監測甲藻數量只有測到個位數甚至 0 檢出，是很奇怪的現象。因為正常的水域甲藻數量不會這麼低，甲藻並沒有消失，當條件不利生存，通常是營養耗盡或者不充分的光照，有些甲藻仍可以透過休眠躲藏在水下環境，俟機破殼而出，恢復正常形態。為確保藻類調查數據的合理性，本研究不引用 2005~2008 年的藻類數據進行分析。

水中鈣離子濃度曾於 1998 年 1 月和 5 月降至 22 及 18mg/L，遠低於平均值 63.7mg/L，但 8 月又恢復至 55mg/L。經參考德基水庫集水區松茂水文站的河川日平均流量(中華民國 87 年台灣水文年報)得知，當年 1 月和 5 月是河川低流量期，1 月日平均流量 10.64CMS，5 月日平均流量 19.3CMS，遠低於全年平均日流量

32.4CMS。河川低地表逕流代表此時集水區地表降雨減少，主要是從地下伏流水流出，本文推測水中的鈣離子多數來自集水區地表施肥產生的外部輸入，而不是存在原生地質土壤，故低地表逕流時，被攜帶進入河川的鈣離子也因此減少。

3.2 主成份分析

由於 2005~2008 年監測之甲藻數量只有個位數甚至 0，不盡合理。為確保調查數據的合理性和品質，本研究係引用 1983 至 2004 年期間的水質及藻類監測資料進行主成份分析。表 2 為德基水庫主成份分析之特徵值及變異量，前四個主成份(PC)的特徵值高於 1，共可解釋達 75.7%總變異量(PC1, PC2, PC3 和 PC4 分別有 34.4%，17.7%，14.9%和 8.7%的變異量)。表 3 為德基水庫主成份負荷矩陣，各水質變數在各主成份的因子負荷欄位內以粗體字表示代表變數與主成份 PC 間具高正相關性(具高輸入和有影響的輸入)，負值則代表低輸入。第一主成份(PC1)可解釋 34.4%變異量，和其具有高度正相關(變量>0.6)的因子負荷包括多甲藻豐度，總磷(TP)濃度，葉綠素-a (Chl-a)濃度，氨氮(NH₃-N)濃度，具中度相關為正磷酸鹽(PO₄-P)濃度(變量=0.49)和有機氮(Org-N)濃度(變量=0.54)，而和 PC1 呈負中度相關因子為沙其盤深度(SD)(變量=-0.74)。第二主成份(PC2)可解釋 17.7%變異量，其中以綠藻豐度，矽藻豐度，硝酸鹽(NO₃-N)濃度和水溫為中高相關的正因子負荷(變量>0.6)。第三主成份(PC3)可解釋 14.9%變異量，以溶氧(DO)和酸鹼值(pH value)具中高度相關。第四主成份(PC4)可解釋 10.4%變異量，僅鈣(Ca)離子濃

表 3 德基水庫主成份負荷矩陣

變數	主成份			
	PC1	PC2	PC3	PC4
二角多甲藻 <i>Peridinium bipes</i>	0.844	0.177	0.036	0.041
矽藻 diatoms	-0.382	0.745	0.275	0.181
綠藻 green algae	-0.001	0.631	0.582	0.109
總磷 TP	0.880	0.048	0.240	0.284
正磷酸鹽 PO ₄ -P	0.488	0.391	-0.523	0.182
葉綠素-a Chl-a	0.936	-0.020	-0.036	0.204
沙其盤深度 SD	-0.730	-0.073	-0.394	0.238
水溫 water temperature	-0.171	0.641	-0.218	-0.254
溶氧 DO	0.203	-0.380	0.626	0.354
酸鹼值 pH value	-0.498	-0.308	0.679	-0.166
鈣離子 Ca	-0.471	-0.265	-0.489	0.543
氨氮 NH ₃ -N	0.778	-0.184	-0.085	0.169
硝酸鹽氮 NO ₃ -N	-0.303	0.717	0.099	0.386
有機氮 Org-N	0.539	0.252	-0.177	-0.514
特徵值	4.809	2.477	2.091	1.212
變異量(%)	34.4	17.7	14.9	8.7
累積總變異量(%)	34.4	52.1	67.0	75.7

附註：以粗體字表示該變數對主成份 PC 具高度及正向的相關性

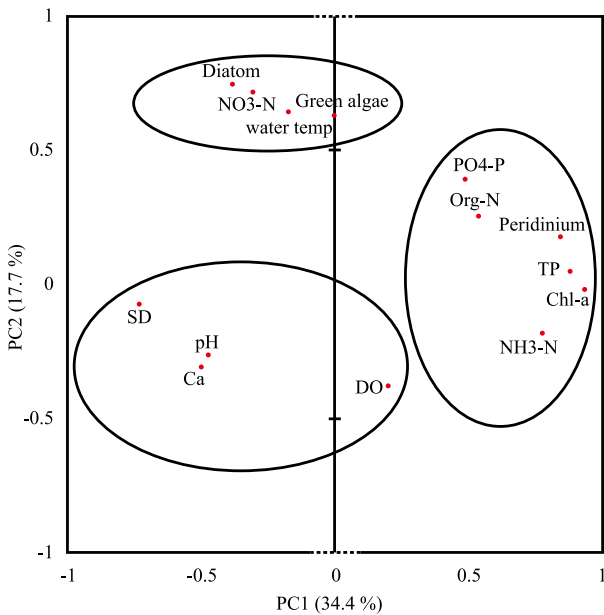


圖 4 各變量因子負荷相對於主要成份 PC1 和 PC2 雙軸空間分布

度具有中度相關負荷(變量=0.54)。根據上述結果，我們可將主成份 PC1 命名為與多甲藻有關的主成份，以主成份 PC2 代表與綠藻和矽藻有關的主成份。主成份三和四(PC3 和 PC4)歸類為其他成份，和藻類變化無明顯相關性。

圖 4 為每個變數因子負荷相對於主要成份 PC1 和 PC2 的二維空間分布。圖中顯示這些變數形成了三

個主要群落(I-III)。第 I 組包括多甲藻，總磷(TP)，葉綠素-a (Chl-a)，正磷酸鹽(PO₄-P)，氨氮(NH₃-N)和有機氮(Org-N)。第 II 組由綠藻，矽藻，水溫和硝酸鹽(NO₃-N)組成。其次是由酸鹼值(pH value)、沙其盤深度(SD)溶氧(DO)和鈣(Ca)離子組成第 III 組。很明顯地，三種藻類物種豐富度分別在 PC1 和 PC2 上具有正值，並與不同的水質參數群有關。

前述文獻回顧曾提到，已有許多研究發現具有鞭毛、可主動性游泳的多甲藻，其攝食策略和其他藻不同 (Cotner and Wetzel, 1992)。多甲藻可以在水下晝夜垂直遷移運動，白天光照充足時停留在水體表層或近表層進行光合作用，在黑夜下沉至氮磷營養鹽含量較高的深層水。多甲藻還可以分泌胞外酵素將水中有機磷分解為無機磷酸鹽予以吸收，使得它兼具有混合營養(mixotrophs)至異營性生物(heterotrophs)特性(Granéli and Carlsson, 1998; Purina *et al.*, 2003; 徐耀陽等, 2008; 吳興華等, 2017)。在上一節內文曾提到德基水庫的總磷主要型態是有機磷，溶解性正磷酸鹽(PO₄-P)並不多，但甲藻可分解吸收有機磷這種特殊的生理機制讓它可在德基水庫取得優勢，也有助於解釋為何甲藻對總磷具高相關性，但對正磷酸鹽是中低度相關的結果。

水庫人員曾在德基水庫進行藻類垂直性分佈取樣時發現，白天時二甲藻多集中在表水層(水下 2m)範圍(經濟部水資源局, 1996)，顯示甲藻的可主動移動能力。雖然藻類行光合作用通常會導致表水層(epilimnion) pH 值和溶氧(DO)濃度短暫增加(Wetzel, 2001)，然而主

成份分析結果並未顯示藻類豐度與 pH 值和 DO 濃度的相關性。由於德基水庫集水區各主要支流的河道平均坡降皆在 50% 以上，湍急水流速快提高了曝氣效果，使水質保持相當穩定且較高的 DO 和 pH 值(DO 平均值 9.72mg/L；pH 平均值 8.0)，應該是德基水庫表層水 DO 或 pH 值和藻類豐度呈現低相關性的原因。

沙其盤深度(SD)可代表水體透明度(transparency)，是指光線能夠穿透水之程度。如果水中懸浮物質濃度較高，干擾光穿透，則透明度或沙其盤可測得深度(SD)就越低，兩者成反比。沙其盤深度(SD)在第一主成份(PC1)內為負相關因子(變量=-0.74)是合理的，當水質優養化，藻類數量增加，透明度就降低。故與 PC1 的其它變數總磷、葉綠素-a、氨氮和有機氮呈負相關。雖然陳伯中(2000) 在實驗室進行多甲藻生長動力實驗發現 Ca 離子濃度是甲藻(*Peridinium bipes*)生長的重要因子，但本次主成份分析結果並沒有發現兩者具有相關性(見圖 4)。我們推測水庫 Ca 離子濃度(平均值 67.7±13.3mg/L)應遠高於實驗室甲藻最佳生長所需的濃度，因此 Ca 離子不是影響水庫多甲藻豐度的關鍵因子。

根據圖 4 綠藻和矽藻的豐度與水溫的相關性顯示，這兩種藻有明顯的季節依賴性。它們通常在春季和秋季繁殖，使得季節引起的水溫變化成為這兩種藻的重要參數。其次綠藻和矽藻都是自營性生物(autotrophs)，研究也發現水中無機硝酸鹽氮(NO₃-N)濃度是除水溫外，唯一與德基水庫綠藻和矽藻生長有關的因子。換言之，當硝酸鹽氮濃度改變就可能影響綠藻和矽藻生長。

3.3 與水質有關的藻群演替

圖 5 是 1983~2004 年期間藻類樣本在 PC1 和 PC2 雙軸定義的二維分布圖的得分(scores)。在第一主成份 PC1 軸具較高且正值者，代表當年有較高的多甲藻豐度，例如 1995 年樣本在 PC1 軸的坐標值為 5.5。同樣地，在平面的左上部，1989 年樣本在 PC2 軸坐標值為 3.5，代表具較高豐度的綠藻和矽藻。1988 年以前的藻類樣本多落在圖 5 的左下部區域，但 1989 年，綠藻和矽藻的生物量顯著增加(綠藻從 12cells/ml 增加至 5,061cells/ml；矽藻從 383cells/ml 增加至 1,613cells/ml)，使得 1989 年樣本爬升至圖 5 的左上部區域。當我們追溯 1989 年水質趨勢發現，硝酸鹽氮(NO₃-N)濃度出現峰值(圖 2(c)) 3.7mg/L，遠大於平時監測值 1.1±0.84 mg/L。硝酸鹽氮增加可能與集水區農業使用的化學肥料有關，1990 年其監測濃度下降，綠藻和矽藻的豐度也下降。多甲藻數量在 1995 年達到高峰後逐年下降，從

1997 年的 1,683 cells/ml 至 1998 年的 148 cells/ml，

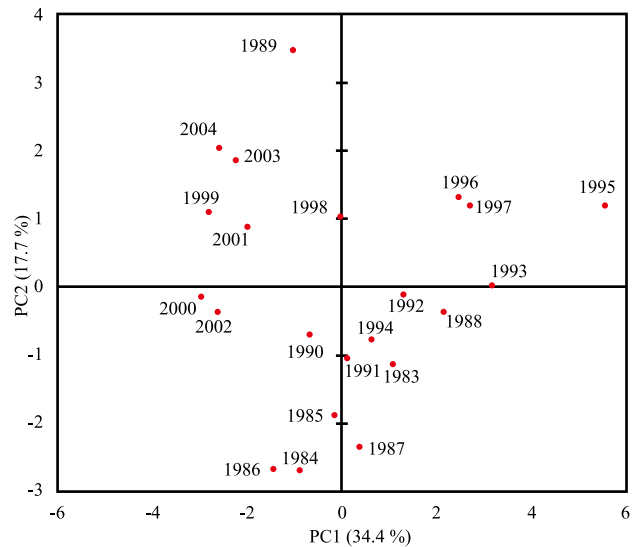


圖 5 藻類樣本在 PC1 和 PC2 雙軸二維分布及其得分(scores)

之後至 2004 年均保持在數十至百個 cells/ml。圖 5 顯示 1998~2004 年期間的藻類樣本位置已移至左半部區域。

水質趨勢變化顯示 1998 年後，總磷和葉綠素-a 濃度有明顯降低(圖 2)，卡爾森營養狀態指數(TSI)介於 37 至 46，近於中度優養狀態。根據德基水庫水質管理網站(http://file.wra.gov.tw/wra_ext/tech/default.asp)公告資訊，2017 年以前水庫的透明度、總磷、葉綠素等參數監測顯示水質已漸趨穩定，並未繼續增高，水中營養鹽濃度受到控制。本研究運用主成份分析已確認出總磷對多甲藻具高度相關性，總磷濃度降低應是造成多甲藻豐度下降的主因，但綠藻和矽藻的關鍵因子是硝酸鹽氮，其豐度隨時間並沒有顯著的變化。

四、結論

本文應用多變量統計的主成份分析法對德基水庫水質及藻類長年監測數據(1983~2004)進行統計分類和簡化，篩選出與特定藻類生長有關的環境敏感參數，預防甲藻藻華再度發生。第一主成份(PC1)為與多甲藻有關成份，相關因子有總磷濃度、葉綠素-a 及氨氮濃度。第二主成份(PC2)代表與綠藻和矽藻有關成份，包括無機硝酸鹽氮(NO₃-N)和水溫。主成份三和四(PC3 和 PC4)包括溶氧(DO)、酸鹼值(pH value)和鈣(Ca)離子濃度，和藻類變化無明顯相關性。德基水庫藻類曾於 1989 年及 1998 年發生兩次明顯的消長，與多甲藻最相關因子

為營養鹽總磷，但綠藻和矽藻的關鍵因子是硝酸鹽氮，顯示營養鹽磷和氮的型態及濃度高低，對水庫藻類物種競爭和共存有顯著影響。僅以卡爾森水體指標代表水質變化狀態已不足夠，研究建議除加強水庫磷營養鹽輸入量控制及監測，應發展多種藻類的水質動態生長模式，特別是營養鹽攝取子模式，強化水庫水質生態管理。

誌謝

本研究承蒙台灣經濟部水利署水資局暨德基水庫集水區管理委員會提供德基水庫水質和藻類長期監測資料，特予致謝。

參考文獻

1. 陳育偉：「應用多變量統計方法辨識水庫優養化」，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文，1995。
2. 王敏昭、林昭遠、鍾枝華：「德基水庫集水區水質之特性及近八年來變化趨勢」，集水區保育，pp.81-106，2000。
3. 陳伯中：「藻類作為水庫水質監測指標之重要性—以德基水庫為例」，集水區保育—水庫集水區整治規劃與管理研討會，pp.107-126，2000。
4. 經濟部水資源局：「德基水庫與集水區水質整合模式研究第五年(八十六年度)工作報告」，1997。
5. 經濟部德基水庫集水區管理委員會：「德基水庫集水區第四期整體治理規劃報告」，1996。
6. 經濟部德基水庫集水區管理委員會：「德基水庫集水區第五期治理工作計畫(93至97年)」，2008。
7. 經濟部德基水庫集水區管理委員會：「德基水庫集水區第六期治理計畫」，2014。
8. 陳怡靜：「水文變化、生物地質化學作用及集水區人為活動對水庫磷質量平衡及藻類消長之影響—以台灣亞熱帶深水水庫為例」，國立台灣大學環境工程學研究所博士論文，2004。
9. 郭振泰、吳先琪、邱照淋、顏本琦、洪鼎侃、林晉祥、徐年盛、潘志豪、董寧謙、林惠芬、許世孟、陳怡靜、劉紀宏、溫漢章：「台灣地區水庫入流泥砂、水質觀測方法及水壩安全評估風險分析(三)(Efficient method of measuring sediment and water quality of reservoir inflow and risk analysis for dam-safety assessment (III))」，經濟部水資局委託，88EC2B370018，國立台灣大學暨嚴慶齡工業發展基金會合設工業研究中心執行，2000。
10. 張傳恩：「應用多變量統計分析評估鴛鴦湖水質」，國立聯合大學土木與防災工程學系碩士班碩士論文，2010。
11. 吳政南、柳文成：「應用多變量統計分析評估臺北水源特定區集水區水質」，農業工程學報，59卷2期，pp.29-50，2013。
12. 黃富昌、李俊福、古煥林、賴允偉、陳淳圓、吳承恩、林諒昭、蕭博瑞、劉彥君：「以多變量統計分析探討水庫水質優養化最適指標」，台灣環境資源永續發展研討會論文集，2005。
13. 陳鴻烈、蔡大偉：「以主成分分析法探討水庫優養化之動力研究」，水土保持學報，40卷，2008。
14. 劉瓊霏、陳春雄、金恒鏞：「以主成分分析探討福山試驗林哈盆流域水化學的空間變異性」，臺灣林業科學，19卷4期，pp.363-374，2004。
15. 經濟部水利署：「德基水庫集水區第五期治理計畫水質監測與管理工作總報告」，中華民國工程環境學會編著，pp.37-38，2008。
16. 經濟部水利署：「97年度德基水庫集水區水質監測與管理計畫」，中華民國工程環境學會編著，pp.34-35，2008。
17. 經濟部水利署：「自來水源水水質監測與管理計畫-以德基水庫為例(2/2)」能邦科技顧問股份有限公司執行計畫，pp.4-1~4-6，2010。
18. 于淑芬、林永發、官文惠、林幸助：「武陵地區水質調查研究」，國家公園學報，15期1卷，pp.45-60，2005。
19. Leer, D.R., Caskey, B.J., Frey, J.W., Lowe, B.S., "Relations of Principal Components Analysis Site Scores to Algal-Biomass, Habitat, Basin-Characteristics, Nutrient, and Biological-Community Data in the Upper Wabash River Basin, Indiana," U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2007-5231, 2007.
20. 吳興華、李翀、陳磊、趙熒、王浩：「三峽水庫香溪河庫灣擬多甲藻(Peridiniopsis)水華對環境中磷的響應機制」，湖泊科學，29卷5期，pp.1054-1060，2017。
21. 徐耀陽、蔡慶華、黎道丰：「三峽水庫香溪河庫灣擬多甲藻晝夜垂直遷移分布初步研究」，武漢植物學研究，26卷6期，pp.608-612，2008。
22. Arhonditsis, G. B., Winder, M., Brett, M.T., Schindler, D.E., 2004. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). *Wat. Res.* 38: 4013-27.

23. Çamdevýren, H., Demýr, N., Kanik, A., Keskýn, S., 2005. Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of chlorophyll-a in reservoirs. *Ecological Modelling*, 181, 581-589.
24. Chu, G.Q., Sun, Q., Rioual, P., Boltovskoy, A., Liu, Q., Sun, P.Q., Han, J. T., Liu, J.Q., 2008. Dinocyst microlaminations and freshwater “red tides” recorded in Lake Xiaolongwan, northeastern China. *Journal of Paleolimnology*, 39: 319-333.
25. Round, F.E., The ecology of algae. Cambridge University Press, 1985.
26. Cotner, J.B., Wetzel, R.G., “Uptake of dissolved inorganic and organic phosphorus compounds by phytoplankton and bacterioplankton,” *Limnol. Oceanogr.*, 37(2), 232-243, 1992.
27. De Ceballo, B. S. O. A., Konig, M., De Oliveira, J.F., 1998. Dam reservoir eutrophication: a simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation. *Wat. Res.* 32(11), 3477-3483.
28. Gaugh, H., Multivariate analysis in community ecology, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
29. Masato, Y., Yoshiro, O., Isao, S., “Accumulation of freshwater red tide in a dam reservoir,” *Water Science and Technology*, 37(2), 211–218, 1998.
30. Parinet, B., Lhote, A., Legube, B., 2004. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management—application to a tropical lake system. *Ecological Modelling*, 178, 295-311.
31. Perona, E., Bonilla, I., Mateo, P., 1999. Spatial and temporal changes in water quality in a Spanish river. *The Science of the Total Environment*. 241, 75-90.
32. Wetzel, R.G., Limnology- Lake and river ecosystems. 3rd edition. Academic Press, New York., 2001.
33. Wu, J.T., Chou, J.W., “Dinoflagellate associations in Feitsui Reservoir, Taiwan,” *Bot. Bull. Acad. Sin.* 39, 137-145, 1998.
34. Rengefors, K., Legrand, C., “Toxicity in *Peridinium aciculiferum*—an adaptive strategy to outcompete other winter phytoplankton?,” *Limnol. Oceanogr.*, 46(8), 1990–1997, 2001.

收稿日期：民國 107 年 10 月 18 日
修正日期：民國 108 年 02 月 23 日
接受日期：民國 108 年 03 月 08 日