

以AGP指標指示水庫優養潛勢之研究

曾四恭*

吳俊宗**

程樹森***

摘 要

藻類生長潛勢與水庫優養潛勢，二者之間有互為因果的關係，而分析水體內之營養狀況，常為判斷水庫優養化程度高低之依據，然因營養狀況之定義與營養化界限的劃分，易受個人主觀認定，而較缺乏客觀性和精確性；是故國外依不同的研究觀點，利用統計與數學方法，將水庫之優養化狀況以數學模式來加以描述，然因其所需參數極多，模式之適用範圍亦有地域性限制，故欲建立符合實際狀況之優養模式，必須收集完整的相關資料與數據。營養潛勢之觀念與理論基礎，即著眼於以人為的實驗方法，藉著純種藻類的培養，以觀察藻類生長潛勢來評估水庫的營養潛勢，並進而導出評估水庫優養潛勢的簡易指標。

於進行AGP實驗前，必須收集水庫中藻類生態演替的基本資料，然後選擇較適合的藻類優勢種，以進行AGP實驗；而本研究所用的三種綠藻類和二種矽藻類材料中，以綠藻類系統做為優養潛勢指標，具有相當明顯的優越性及應用性，其中Scenedesmus系統之指示範圍較廣，其AGP值大於 $2\text{ mg}/\ell$ 以上，即表示水庫有優養化現象；Pediastrum系統中，若AGP值大於 $3\text{ mg}/\ell$ 時，顯示水庫已呈優養化，若要將本研究的藻類系統指示，推廣及應用至各類水體，可能要經某種程度之修正，而選擇更具廣泛應用性的藻類品種，做為AGP指標，亦為未來的研究方向。

前 言

據近年來有關青潭蓄水庫之研究報告指出，青潭蓄水庫水體中氮、磷質含量均各超出 $0.3\text{ mg}/\ell$ 和 $0.02\text{ mg}/\ell$ 之臨界值，由此顯示，青潭蓄水庫有藻類繁衍的問題；換言之，與季節性藻類繁衍息息相關的優養潛勢(Eutrophication Potential)危機，其對於水質，取水口或下游淨水廠之正常運作功能，均有負面的影響。而翡翠水庫於民國七十二年十二月開始蓄水，屬於相當年輕的水庫，如何使其儘量避免發生如青潭蓄水庫的

* 國立台灣大學環境工程學研究所教授兼所長

** 中央研究院植物學研究所副研究員

*** 國立台灣大學環境工程學研究所碩士

優養化 (Eutrophication) 現象，乃是常務之急。

本研究即以台北地區水源特定管制區內之青潭堰和翡翠水庫為探討對象，並針對當地藻類優劣種對水質所潛藏的優養潛勢 (Eutrophication Potential)，利用實驗方法，配合統計分析原理，訂定出一系列具代表性和應用性的藻類生長潛勢指標 (Algal Growth Potential)，以此提供水源管理機關釐定政策時之參考。

實驗材料與方法

一、實驗材料

根據行政院衛生署環境保護局和中央研究院植物研究所，分別發表之研究調查報告，再參酌本研究之主要研究重點，篩選出五種藻類，其中包括綠藻類三種、矽藻類二種。此五種經分離純化的純種藻類，其特性互異，分別說明於下：

※純種藻類實驗材料由中央研究院植物研究所提供。

(一) Scenedesmus quadricauda Var. crassicaudatus f. granulatus Hortobagy

屬綠藻植物門 (Phylum Chlorophyta)，綠藻綱 (Class Chlorophyceae)，綠球藻目 (Order Chlorococcales)，柵藻科 (Family Scenedesmaceae)，柵藻屬 (Genus Scenedesmus)。通常由 2 個細胞或 4 個細胞組成群體，細胞排列形成直線或交錯排列，細胞為長橢圓形或卵形；二細胞群體長 $9.6 - 23.4 \mu$ ，寬 $6.9 - 8.3 \mu$ ，高 $9.6 - 24.8 \mu$ ；四細胞群體長 $12 - 36 \mu$ ，寬 $5.6 - 11 \mu$ ，高 $10 - 26 \mu$ 。見圖 1。

(二) Pediastrum duplex Meyen

屬綠藻植物門 (Phylum Chlorophyta)，綠藻綱 (Class Chlorophyceae)，綠球藻目 (Order Chlorococcales)，水網藻科 (Family Hydrodictyceae)，盤星藻屬 (Genus Pediastrum)。

細胞通常以 16 個或 32 個結合成群體，有時亦由 4 個、8 個、64 個或 128 個細胞結合成群體；細胞本身為四角形，並有二根明顯突起，有一澱粉粒，細胞間以四個角彼此連接在一起，形成數環，每一環細胞外緣之一邊凹入，單細胞直徑 $6 - 21 \mu$ ，16 個細胞群體之直徑可達 $52 - 90 \mu$ 。見圖 2。

(三) Sphaerocystis schroeteri Chodat

屬綠藻植物門 (Phylum Chlorophyta)，綠藻綱 (Class Chlorophyceae)，四孢藻目 (Order Tetrasporales)，四集藻科 (Family Palmellaceae)，球囊藻屬 (Genus Sphaerocystis)。

細胞呈球形，群體亦成球形，通常由 4 - 32 個細胞組成群體，群體細胞外有透明膠質膜。群體直徑 50 - 500 μ ，單細胞直徑 6 - 20 μ 。見圖 3。

四 Melosira granulata (Ehrenberg) Ralfs

屬矽藻植物門 (Phylum Bacillariophyta)，矽藻綱 (Class Bacillariaceae)，中心目 (Order Centrales)，Family Melosiraceae Genus Melosira。

細胞為長柱形，細胞壁表面上有點狀花紋，通常細胞長 60 - 100 μ ，寬 5 - 10 μ ，多細胞群體則長達數百 μ 。見圖 4。

五 Nitzschia palea (Kützting) W. Smith

屬矽藻植物門 (Phylum Bacillariophyta)，羽紋綱 (Class Pennatae)，管殼縫目 (Order Aulonographidinales)，菱形藻科 (Family Nitzschiaceae)，菱形藻屬 (Genus Nitzschia)。

殼面為線形至披針形，向兩端逐漸狹窄，末端呈楔形，殼長 20 - 65 μ ，寬 2.5 - 5 μ ，龍骨點 10 μ 內有 10 至 15 個。見圖 5。

三 水樣分析方法

(一) 水質分析

參照 15 版標準水質檢驗法 (Standard Method)⁽¹⁾，各項水質分析前，水樣均先經 0.45 μ 濾膜過濾。

1. 總磷：先以硝酸和硫酸消化，再以鉬酸銨—氫化亞錫法測定。
2. 正磷酸鹽：不經消化，直接以鉬酸銨—氫化亞錫法測定。
3. 總氮：採凱氏法測定。
4. 硝酸鹽氮：以比色法測定。

(二) 藻類生物量分析

1. 藻類葉綠素分析

(1) 原水中藻類葉綠素 a 分析方法

- a. 使用 0.45 μ 孔徑濾膜，將 50 - 500 ml 原水中的藻類細胞濃縮分離。
- b. 將濾膜置於有蓋試管中，注入 10 ml 90% 丙酮 (Acetone)，並以鋁箔紙包住試管，激烈震盪 30 秒，使有機性濾膜完全溶解後，靜置於黑暗冰箱 20 - 24 小時。
- c. 另外準備一張乾淨空白的濾膜，以相同步驟處理之，做為空白標準試液。
- d. 隔天將試管取出，以 3000 - 5000 Rpm 的轉速，離心 5 - 10 分鐘。
- e. 然後以 Spectrophotometer 測定吸光度，波長固定於 665 nm，645 nm 和

630 nm 三種可見光範圍，每個水樣均測定三次，求其平均值。

f. 利用 Parsons and Strickland 方程式(2)

$$Ca = 11.6 A_{665} - 1.31 A_{645} - 0.14 A_{630}$$

再經稀釋倍數 (Dilution Factor) 換算後，可計算出葉綠素 a 濃度，其公式如下：

$$\text{Chlorophyll a (mg / m}^3 \text{)} \\ = \frac{Ca \times (\text{溶劑體積, ml})}{(\text{水樣體積, } \ell) (\text{光路徑, cm})}$$

(2) 培養液中藻類葉綠素 a 分析方法

- a. 取 10 ml 水樣置於有蓋試管中，每個水樣各取三支，以 3000 - 6000 R P m 的轉速，離心 3 - 5 分鐘。
- b. 倒掉上澄液，加入 5 ml 甲醇 (Methanol)，攪拌均勻後，置於水浴槽中，水溫設定於 60°C，保持黑暗狀態，靜置 30 分鐘。
- c. 若甲醇因揮發而體積減少，需添滿至 5 ml 處；待冷卻後，再以 3000 - 6000 R P m 的轉速，離心 3 - 5 分鐘。
- d. 以 Spectrophotometer 測吸光度，波長定於 665 nm 和 650 nm，所得三個數據，求其平均值。
- e. 利用中央研究院植物研究所提供之經驗公式：

$$Ca = 16.45 E_{665} - 8.29 E_{650}$$

所得 C_a 值再經稀釋倍數換算，可得葉綠素 a 濃度，單位為 mg / m³。

2. 藻類乾重量分析

- (1) 將含藻培養液充分搖盪，使藻類細胞均勻分佈後，取 50 - 200 ml 水樣，通過預先稱重的 0.45 μ 濾膜，每個水樣，重覆二次，然後再注入少量蒸餾水，清水藻類細胞，繼續過濾直到表面完全乾燥為止。
- (2) 將濾膜置入烘箱中，溫度保持於 80 - 90°C，隔天取出後，放入乾燥瓶中，待完全冷卻後，再稱重。
- (3) 將濾膜過濾前後的淨重，以及過濾水樣的體積，二者相除，即為藻類乾重量，單位為 mg / ℓ。

藻類生長潛勢實驗

(一) 實驗原理

1. 根據國外研究報告指出，A G P test 最早應用於檢驗污水處理廠的排放水質，是

否合乎放流水標準⁽³⁾，藉之做為改善污水處理單元效果之參考。

2. AGP test 主要的評估原理，乃根據藻類本身能攝取水體環境中的營養成分，經生化代謝作用，而逐漸將之累積於體內，形成相當穩定的生物量 (Biomass)；同時利用分析乾重量的方法，可求出許多不同的 AGP 值，而 AGP 值愈大，則代表水體中有使藻類大量繁衍的營養成分存在；同理，也表示此水體內所隱藏的優養化潛勢亦相對增高。
3. 利用 AGP 評估法，可使水源管理當局與民衆充分瞭解水源中所潛藏的優養化危機。

(二) 藻類培養液之配製

(1) 完全培養液 (Completed Medium)

- (a) NC Medium：培養綠藻類。
- (b) IDI Medium：培養矽藻類。

(2) 標準培養液 (Standard Medium)

- (a) NC—N—P Medium：NC 培養液不含氮、磷營養成分者，培養綠藻類。
- (b) IDI—N—P Medium：IDI 培養液，不含氮、磷營養成分者，培養矽藻類。

(3) 檢驗培養液 (Test Medium)

- (a) NC—N Medium：NC 培養液，不含氮營養成分者，培養綠藻類。
- (b) IDI—N Medium：IDI 培養液，不含氮營養成分者，培養矽藻類。
- (c) NC—P Medium：NC 培養液，不含磷營養成分者，培養綠藻類。
- (d) IDI—P Medium：IDI 培養液，不含磷營養成分者，培養矽藻類。

(三) 實驗步驟

1. 完全培養液培養期

- (1) 準備數個 1 ℓ 錐形瓶，分別裝入 50 ml 培養藻原液，再加滿完全培養液至 500 ml，培養於培養箱中、調整最佳溫度和照度，每天持續光照 16 小時，同時供應內含 1.5 % CO₂ 之混合空氣，使無機碳濃度維持恆定，利用震盪器將 CO₂ 充分溶入培養液中，並使藻類得以均勻分佈生長。
- (2) 於培養初期和第 3 天時，分別取出 180 ml 之含藻培養液，其中部分供作營養分析，而分析前水樣需經 0.45 μ 濾膜過濾，分析項目包括：總磷、正磷酸鹽、總氮和硝酸鹽氮；其餘水樣則為藻類生物量分析所用，而葉綠素 a 與乾重量為藻類生物量參數。

(3)自第 0 天至第 3 天，藻類生物量所增加的重置以 m_1 表示。

(4)將剩餘的含藻完全培養液，通過 0.45μ 濾膜，藻類濃縮之後，以標準培養液清洗 3 次，再繼續第二階段實驗。

2. 標準培養液培養期

(1)緊接著把第一階段濃縮藻類，轉移至 1 l 錐形瓶中，加滿標準培養液至 600 ml，維持原有培養狀況，置入培養箱中培養。

(2)於第 0 天和第 3 天時，分別取出 180 ml 含藻培養液，重覆第一階段各分析項目。

(3)自第 0 天至第 3 天，藻類生物量所變化的重置以 m_0 表示。

(4)將其餘含藻標準培養液，通過 0.45μ 濾膜，濃縮後的藻類，再以檢驗培養液清洗 3 次，繼續往後實驗。

3. 檢驗培養液培養期：

(1)接著上階段的藻類濃縮液，置入 1 l 錐形瓶中，並取缺氮培養液和水庫原水以等比例混合，調配成 500 ml 的含藻培養液；同時亦取缺磷培養液和水庫原水以等比例混合，調配成 500 ml 含藻培養液；此外，將藻類置於 1 l 錐形瓶中，只加水庫原水，調配成 500 ml 含藻原水溶液，連續培養 3 天。

(2)於第 0 天和第 3 天時，分別取出 180 ml 含藻培養液，分成以上三組，分析項目同前。

(3)自第 0 天至第 3 天，將缺氮混合培養液的藻類重量變化以 m_2 表示；缺磷混合培養液的藻類重量增加量以 m_3 表示；而水庫原水培養液的藻類重量增加量以 m_4 表示。

4. 最後依據 AGP test 結果，定義出 AGP 數量化指標系統，並評估台北地區蓄水庫優養化潛勢的大小。

結果與討論

一、藻類生長潛勢實驗結果

根據 AGP test 所得數據，列於表 1、表 2，並將青潭堰和翡翠水庫兩水源區視為一整體；同時利用線性迴歸分析，將其結果用以檢定各變數間之相關程度，做為建立指標系統之基本參考資料結果列於表 3。並更進一步，使用多變數複迴歸分析，尋求多變數之間的相關程度，結果見表 4。

二、AGP 數量化指標系統之建立

(-) Scenedesmus 系統：

由表 3 所列結果，可以導出 A G P 與 T P 間之線性迴歸方程式為：

$$A G P = 1.3355 + 797.896 (T P) \dots\dots\dots (1)$$

A G P 與 T K N 間之迴歸方程式為：

$$A G P = 12.676 + 26.724 (T K N) \dots\dots\dots (2)$$

A G P 與 N / P 比間之迴歸方程式為：

$$A G P = 17.258 + 0.0541 (N / P) \dots\dots\dots (3)$$

A G P 與 μ 間之迴歸方程式為：

$$A G P = - 8,2263 + 581.96 (\mu) \dots\dots\dots (4)$$

其次，再應用多變數複迴歸分析，由表 4 中所見結果，先利用三變數複迴歸分析，求得 A G P、T P 和 T K N 三者間的相關性，其複迴歸方程式為：

$$A G P = 13.84 - 57.68 (T P) + 28.40 (T K N) \dots\dots\dots (5)$$

並以 F- test 檢定其相關性的顯著與否，可得到

$$F = 4.3565 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 2 \\ \nu_2 = 15 \end{matrix} , 0.05) = 3.68, \text{ 表示三者之間有顯著相關性存在。}$$

再利用四變數複迴歸分析，求得 A G P、T P、T K N 和 N / P 四種參數間之相關程度，其複迴歸方程式為：

$$A G P = 255.77 - 3155.94 (T P) + 194.44 (T K N) - 14.15 (N / P) \dots\dots (6)$$

經 F- test 後，得到

$$F = 9.0385 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 3 , 0.05 \\ \nu_2 = 14 , 0.01 \end{matrix}) = \begin{matrix} 3.34 \\ 5.56 \end{matrix}$$

四變數間顯然有相關性。

最後以五變數複迴歸分析，求出 A G P、T P、T K N、N / P 和 μ 五種參數間之相互關係，其方程式如下：

$$A G P = 255.92 - 3660.37 (T P) + 202.51 (T K N) - 14.91 (N / P) + 364.50 (\mu) \dots\dots\dots (7)$$

經 F- test 結果，

$$F = 7.2060 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 4 , 0.05 \\ \nu_2 = 13 , 0.01 \end{matrix}) = \begin{matrix} 3.18 \\ 5.20 \end{matrix},$$

顯示還是有顯著相關性存在。

依照複迴歸分析之定義，F- test 檢定的結果，可做為判別 A G P 受其它多項

參數影響的程度大小，由以上檢定結果分析，取三變數複迴歸分析方程式為建立本指標系統的主要模式，並配合直線迴歸方程式(1)–(3)，再參酌美國環境保護署 (EPA) 的研究結果(4)，以及 Gakstatter et al 的研究報告(5)可知，當蓄水庫瀕臨優養化階段時，往往水體內之總磷含量將達 $20 \mu\text{g}/\ell$ 以上，且 N/P 比也大於 17 以上，故 N/P 比並非優養化之決定因子，應用此種觀念，所繪製成的圖 6，做為定義本指標系統的重要依據。由圖所示，先從 TP 曲線中找出其最大總磷飽和濃度為 $0.109 \text{ mg}/\ell$ ，將之定為高度優養化的臨界值，其相對的 AGP 值為 $110 \text{ mg}/\ell$ ，從此 AGP 值再找出其它參數的對應值，TKN 為 $3.08 \text{ mg}/\ell$ ；當 TP 為 $0.020 \text{ mg}/\ell$ 時，相對 AGP 值為 $2 \text{ mg}/\ell$ ，而 TKN 為 $0.4 \text{ mg}/\ell$ 做為輕度優養化的臨界值；最後應用幾何數學上的定義，延長 TP 曲線漸近線和切線，使其交於一點，再經此點劃出角平分線，並交 TP 曲線於一點，將此點定義為中度優養化的臨界值，AGP 值為 $30 \text{ mg}/\ell$ ，對應的 TP 值為 $0.085 \text{ mg}/\ell$ ，TKN 為 $2.40 \text{ mg}/\ell$ ，結果列於表 5。

(二) Pediastrum 系統：

從表 3 可導出 AGP 與 TP 間之直線迴歸方程式：

$$AGP = 7.2248 + 844.49 (TP) \dots\dots\dots(8)$$

AGP 與 TKN 間之迴歸方程式為：

$$AGP = 18.0685 + 25.4126 (TKN) \dots\dots\dots(9)$$

AGP 與 N/P 比間之迴歸方程式為：

$$AGP = 15.09 + 2.9523 (N/P) \dots\dots\dots(10)$$

AGP 與 μ 間之迴歸方程式為：

$$AGP = 4.062 + 438.45 (\mu) \dots\dots\dots(11)$$

再使用複迴歸分析，先求三變數複迴歸分析，得到方程式如下：

$$AGP = -11.88 + 2479.4 (TP) - 47.18 (TKN) \dots\dots\dots(12)$$

經 F - test 後，得到

$$F = 50.88 > F \left(\begin{array}{l} \nu_1 = 2, 0.05 \\ \nu_2 = 15, 0.01 \end{array} \right) = \begin{array}{l} 3.68 \\ 6.36 \end{array},$$

所以三者之間有顯著相關性。

其次進行四變數複迴歸分析，得到下列方程式：

$$AGP = 1.0474 + 2214.3 (TP) - 35.881 (TKN) - 0.6433 (N/P) \dots\dots\dots(13)$$

再經 F - test ，得到

$$F = 32.37 > F \left(\begin{array}{l} \nu_1 = 3, 0.05 \\ \nu_2 = 14, 0.01 \end{array} \right) = \begin{array}{l} 3.34 \\ 5.56 \end{array} ,$$

四變數間有顯著相關性。

最後以五變數複迴歸分析，可得方程式：

$$A G P = 44.47 + 629.93 (T P) + 18.267 (T K N) - 3.457 (N / P) + 279.96 (\mu) \dots\dots\dots(14)$$

以 F - test 檢定後，得到

$$F = 46.46 > F \left(\begin{array}{l} \nu_1 = 4, 0.05 \\ \nu_2 = 13, 0.01 \end{array} \right) = \begin{array}{l} 3.18 \\ 5.20 \end{array} ,$$

顯示五參數間之顯著相關性。

因此，本指標系統係以三變數複迴歸分析方程式(12)為基本模式，再利用圖 7 為本系統之主要根據，首先得到總磷飽和濃度為 0.102 mg / ℓ，其對應 A G P 值為 90 mg / ℓ，T K N 值為 3.0 mg / ℓ；此外，T P 為 0.020 mg / ℓ 時，A G P 值為 3 mg / ℓ，對應 T K N 值為 0.5 mg / ℓ；再定義出中度優養化的 A G P 值為 35 mg / ℓ，T P 值為 0.083 mg / ℓ，T K N 值為 2.34 mg / ℓ。將結果列於表 6。

(三) Sphaerocystis 系統：

利用二變數直線迴歸分析結果，可導出以下各方程式：

$$A G P = 2.5389 + 421.719 (T P) \dots\dots\dots(15)$$

$$A G P = 9.2113 + 15.254 (T K N) \dots\dots\dots(16)$$

$$A G P = 13.2348 + 0.1535 (N / P) \dots\dots\dots(17)$$

$$A G P = - 4.5988 + 525.69 (\mu) \dots\dots\dots(18)$$

首先應用三變數複迴歸分析，導出方程式如下：

$$A G P = 5.1799 + 299.02 (T P) + 4.1352 (T K N) \dots\dots\dots(19)$$

經過 F - test ，得到

$$F = 19.306 > F \left(\begin{array}{l} \nu_1 = 2, 0.05 \\ \nu_2 = 15, 0.01 \end{array} \right) = \begin{array}{l} 3.68 \\ 6.36 \end{array} ,$$

表示三變數有顯著相關性。

其次，以四變數進行複迴歸分析，得方程式為：

$$A G P = 52.394 - 143.09 (T P) + 34.508 (T K N) - 3.3201 (N / P) \quad \dots\dots\dots 20$$

經 F - test 後，得到

$$F = 18.732 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 3, 0.05 & = & 3.34 \\ \nu_2 = 14, 0.01 & & 5.56 \end{matrix}) ,$$

顯示四變數間有顯著相關性。

接著以五變數複迴歸分析，得到如下方程式：

$$A G P = 21.037 - 385.53 (T P) + 22.279 (T K N) - 1.6247 (N / P) + 502.41 (\mu) \quad \dots\dots\dots 21$$

再以 F - test 檢定，可得

$$F = 68.496 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 4, 0.05 & = & 3.18 \\ \nu_2 = 13, 0.01 & & 5.20 \end{matrix}) ,$$

顯示五參數間有顯著相關性。

因此本系統以三變數複迴歸分析為基本模式，圖 8 中所示結果為主要依據。首先得到 T P 值為 0.118 mg / l，其對應 A G P 值為 50 mg / l，T K N 值為 2.90 mg / l，此外，T P 為 0.020 mg / l 時，對應之 A G P 值為 0 mg / l，T K N 值為 0.40 mg / l，再定義出中度優養化的範圍，T P 值為 0.094 mg / l，對應之 A G P 值為 25 mg / l，T K N 值為 2.62 mg / l，結果列於表 7 中。

四 Melosira 系統：

利用二變數迴歸分析，可導出直線迴歸方程式如下：

$$A G P = 0.7342 + 22.063 (T P) \quad \dots\dots\dots 22$$

$$A G P = 0.8787 + 1.3911 (T K N) \quad \dots\dots\dots 23$$

$$A G P = 12.618 + 0.3693 (N / P) \quad \dots\dots\dots 24$$

$$A G P = - 0.5824 + 93.579 (\mu) \quad \dots\dots\dots 25$$

其次利用複迴歸分析，首先以三變數複迴歸分析，可得方程式如下：

$$A G P = 0.6442 + 39.381 (T P) - 1.1136 (T K N) \quad \dots\dots\dots 26$$

以 F - test 檢定，得到

$$F = 3.8409 > F \left(\begin{array}{l} \nu_1 = 2, \\ \nu_2 = 15, \end{array} 0.05 \right) = 3.68,$$

顯示三變數間之顯著相關性。

再進行四變數複迴歸分析，可得方程式：

$$A G P = - 1.0415 + 34.218 (T P) - 1.1908 (T K N) + 0.15 (N / P) \dots(27)$$

經過 F - test 後，

$$F = 3.0419 < F \left(\begin{array}{l} \nu_1 = 3, 0.05 \\ \nu_2 = 14, 0.01 \end{array} \right) = \begin{array}{l} 3.34 \\ 5.56 \end{array},$$

顯示四參數間無顯著相關性。

最後再進行五變數分析，得以下方程式：

$$A G P = 2.1315 + 23.739 (T P) - 1.4815 (T K N) + 0.0871 (N / P) + 96.314 (\mu) \dots\dots\dots(28)$$

以 F - test ，得到

$$F = 7.5762 > F \left(\begin{array}{l} \nu_1 = 4, 0.05 \\ \nu_2 = 13, 0.01 \end{array} \right) = \begin{array}{l} 3.18 \\ 5.20 \end{array},$$

顯示有相關性存在。

本指標系統是以三變數為基本模式，由圖 9 為主要依據；所以先從 T P 飽和濃度 0.159 mg / ℓ 推求 A G P 值為 7.5 mg / ℓ，對應 T K N 值為 2.42 mg / ℓ，再由 T P 值為 0.020 mg / ℓ，得到 A G P 值為 0 mg / ℓ，對應 T K N 值為 0.3 mg / ℓ，中度優養化之範圍 T P 為 0.138 mg / ℓ，A G P 值為 2 mg / ℓ，對應 T K N 值為 2.06 mg / ℓ，結果見表 8。

(五) Nitzschia 系統：

先利用直線迴歸分析，導出方程式如下：

$$A G P = 0.4182 + 11.243 (T P) \dots\dots\dots(29)$$

$$A G P = 0.5059 + 0.9482 (T K N) \dots\dots\dots(30)$$

$$A G P = 9.6076 + 0.55789 (N / P) \dots\dots\dots(31)$$

$$A G P = 0.2168 + 77.492 (\mu) \dots\dots\dots(32)$$

此外，再利用三變數複迴歸分析，可導出方程式如下：

$$A G P = 0.5226 - 1.7580 (T P) + 1.0937 (T K N) \dots\dots\dots(33)$$

再經 F - test , 得到

$$F = 7.9449 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 2, 0.05 \\ \nu_2 = 15, 0.01 \end{matrix}) = \begin{matrix} 3.68 \\ 6.36 \end{matrix} ,$$

顯示三變數間有顯著相關性。

其次，以四變數複迴歸分析，可得方程式如下：

$$A G P = - 3.7996 + 46.103 (T P) - 3.1673 (T K N) + 0.4006 (N / P) \dots\dots\dots(34)$$

經 F - test , 得到

$$F = 6.1862 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 3, 0.05 \\ \nu_2 = 14, 0.01 \end{matrix}) = \begin{matrix} 3.34 \\ 5.56 \end{matrix} ,$$

顯示四參數間有顯著相關性。

最後，進行五變數分析，得方程式如下：

$$A G P = - 2.2597 + 16.328 (T P) - 1.0917 (T K N) + 0.174 (N / P) + 64.323 (\mu) \dots\dots\dots(35)$$

再經 F - test , 得到

$$F = 13.8033 > F (\begin{matrix} \nu_1 = 4, 0.05 \\ \nu_2 = 13, 0.01 \end{matrix}) = \begin{matrix} 3.18 \\ 5.20 \end{matrix} ,$$

顯示有相關性存在。

因此，本系統以三變數為基本模式，配合圖 10 所表示的結果，首先找出 T P 飽和濃度為 0.222 mg / l ，對應 A G P 值為 5 mg / l ， T K N 值為 2.6 mg / l ，此外，T P 為 0.020 mg / l 時，A G P 值為 0 mg / l ，對應 T K N 值為 0.40 mg / l ，而中度優養化定義成 T P 濃度為 0.192 mg / l ，A G P 值為 1.5 mg / l ，對應 T K N 值為 2.28 mg / l ，綜合以上資料，列於表 9 。

三 A G P 應用於指示水庫優養潛勢上之探討

藻類生長潛勢與水庫優養潛勢，根本上為一體之兩面，所以利用 A G P 測值，足以說明水庫水體內優養潛勢的程度大小，不過於進行 A G P 實驗前，必須事先調查此水域基本的藻類生態演替資料，然後根據季節性藻類優勢種 (Predominant Species

)的特性，選擇較適合進行 A G P 實驗的品種。本研究所使用的五種實驗材料，對於指示水庫優養潛勢，均具明顯的應用性，而五種系統間的異同，分別說明如後：

(一) Scenedesmus 系統：

由表 5 所示，當 A G P 值大於 $2 \text{ mg} / \ell$ 以上，即顯示此水庫已達輕度優養化；而 A G P 值大於 $30 \text{ mg} / \ell$ 以上，則顯示水體已呈中度優養化；當 A G P 值達 $110 \text{ mg} / \ell$ 以上時，表示此水體中的優養狀況，已相當嚴重了。此外，本系統對優養程度的描述，其指示範圍較大，顯示水體中營養狀況的變動，會使本指標系統有敏感的相應反應，即能確實地指示出水庫優養潛勢的程度和大小；所以，本系統對台北地區蓄水庫的優養狀況，具有極佳的指示效果。

(二) Pediastrum 系統：

表 6 中所列結果可知，A G P 值大於 $3 \text{ mg} / \ell$ 以上，表示水體中已有輕度優養化現象；而當 A G P 值超過 $35 \text{ mg} / \ell$ 以上，即達中度優養化程度；當 A G P 值達 $90 \text{ mg} / \ell$ 以上時，顯示水庫中已呈高度優養化。此外，本系統的指示範圍也很廣，亦具有良好的反應性，適合做為台北地區蓄水庫的優養潛勢指標。

(三) Sphaerocystis 系統：

由表 7 所列結果顯示，當 A G P 值大於 $0 \text{ mg} / \ell$ 以上，則表示水庫達輕度優養化程度；若 A G P 值超過 $25 \text{ mg} / \ell$ 以上時，表示水庫已呈中度優養化現象；而當 A G P 值大於 $50 \text{ mg} / \ell$ 以上，則顯示水庫中已達極嚴重的高度優養化階段；而本指標系統 A G P 值從 $0 \text{ mg} / \ell$ 開始的意義，表示 A G P 值小於 $0 \text{ mg} / \ell$ 時，即非屬優養化水庫；因此，本系統的指示較為明確，但却具有明顯季節性，對夏季優養化的指示效果較佳。

(四) Melosira 系統：

從表 8 中所示，當 A G P 值大於 $0 \text{ mg} / \ell$ ，即顯示此水庫有輕度優養化現象；但是 A G P 值大於 $2 \text{ mg} / \ell$ 時，却已呈中度優養化，其間雖然營養成分大量增加，然而本系統並未適切地反應優養狀況，最主要的原因是矽藻類本身生長時，除需要大量的氮、磷質營養外，尚需少量的矽質；因此，本系統未對矽質加以考慮，可能是影響 A G P 指示功能的原因之一。

(五) Nitzschia 系統：

由表 9 所列結果顯示，A G P 大於 $0 \text{ mg} / \ell$ 時，即達輕度優養化；而 A G P 值大於 $1.5 \text{ mg} / \ell$ ，却呈中度優養化；此外，A G P 值超過 $5 \text{ mg} / \ell$ ，則顯示高度優養化現象；所以本系統的指示效果較差，原因亦如前所述。

因此，應用 A G P 指標系統前，必須先選擇適合實際情況，並滿足一切條件的優養潛勢指標；根據本研究的實驗結果發現，以綠藻類做為優養潛勢指標，具有相當明顯的優越性，同時亦利於實驗的進行。所以，應用 A G P 優養指標來指示水庫優養潛勢的程度，是一項極具可行性和正確性的生物指標。同時應用 *Scenedesmus* 系統和 *Pediastrum* 系統亦可能擴及其它水體，而 *Sphaerocystis* 系統則較具地域性，不適合廣泛應用。

四 現階段台北地區蓄水庫優養潛勢的探討

根據前述五種優養化指標系統的優劣點比較結果，顯然是以綠藻類的指示功能較佳，而今欲將目前台北地區蓄水庫的優養潛勢，加以具體的描述，所以選擇三種綠藻類以為優養狀況的指標，結果詳見表 10。

由表 10 所列結果，可明顯看出青潭蓄水庫之優養潛勢較翡翠水庫為大，同時無論依據營養因子，或以葉綠素 a 濃度來判斷，台北地區蓄水庫中已呈現輕度優養化的現象；而且三種不同的指標系統，均一致指示優養潛勢會有季節性的變化，其中以夏季的情況最為嚴重；因此，水源管理當局，應該深入檢討，積極尋求出徹底、有效的污染防治方法，以免水質再繼續惡化；否則，若干時日以後，水源區內的水質恐將會有變為中度優養化的可能，甚至變成高度優養化的水源，屆時台北地區將面臨無飲用水可用的困境。

結論與建議

- 一 由實驗結果顯示，利用 A G P 為指示優養潛勢的指標，的確具備精確、簡單明瞭的應用性和價值；然而於此五種指標系統當中，要以三種綠藻類指標較具代表性。*Scenedesmus* 系統的指示範圍較廣，A G P 值大於 $2 \text{ mg} / \ell$ 即表示有優養化現象；*Pediastrum* 系統中，若 A G P 值大於 $3 \text{ mg} / \ell$ 以上時，顯示水庫已呈優養化；而以 *Sphaerocystis* 系統來判斷，當 A G P 值大於 $0 \text{ mg} / \ell$ 以上，則達優養化階段。
- 二 以上三種綠藻類指標，均有其特性，而欲應用於指示台北地區蓄水庫優養潛勢上，建議配合季節性藻類優勢種的生態演替；*Scenedesmus* 系統和 *Pediastrum* 系統應用範圍較廣，適合任何季節使用，而 *Sphaerocystis* 系統最好應用於夏季。同時，若要將本研究的藻類系統指標，推廣及應用至其它水體，可能要經某種程度的修正，當然藻類優勢種的考慮，亦屬絕對必要；總之，將此藻類指標系統，應用於指示水庫優養化潛勢，確實值得再進一步地探討。而且選擇更具廣泛應用性的藻類品種，做為 A G P 指標，亦為極有價值的研究。此外利用乾重量為 A G P 實驗參數，耗時過久，應該可採

用葉綠素 a 為參數以縮短實驗時間，這也值得進一步研究。

根據一年來的研究結果顯示，青潭堰的營養狀況已經有優養化的趨勢，其中總磷含量早已超過 $0.020 \text{ mg}/\ell$ 的臨界值，而沙奇盤深度亦小於 2 公尺，葉綠素 a 濃度也大於 $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ ；同時若以 T S I 指數的定義來看(6)，則 T S I 介於 60 - 70 之間，甚至 A G P 指標亦達輕度優養化的階段；翡翠水庫的總磷量也超過 $0.020 \text{ mg}/\ell$ ，沙奇盤深度則介於 2.0 - 3.7 公尺之間，葉綠素 a 濃度亦大於 $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，而 T S I 指數也介於 50 - 60 之間，A G P 值則落在輕度優養化範圍。由此看來，青潭堰的情況較翡翠水庫嚴重，但是翡翠水庫本身亦達輕度優養化的程度；因此，台北地區蓄水庫的優養潛勢已呈令人憂心的情況；有鑒於此，水源管理當局，應該立刻採取行動，來遏止情況的繼續惡化！

參考文獻

1. "Standard Methods for the examination of water and waste water." APHA, AWWA and WPCF. Washington D.C. (15th ed., 1985).
2. Stein, J.R. "Handbook of Phy cological Methods: Culture Methods and Growth Measurements." Cambridge University Press, (1st paperback edition 1979).
3. Forsberg, C., and Forsberg, A. "Algal Growth Potential Test Improves Sewage Effluent Control." AMBIO, 1:26-29 (February 1972).
4. Joseph, G. Yeasted, and Francois, M. M. Morel "Empirical Insights into Lake Response to Nutrient Loadings, with Application to Models of Phosphorus in Lakes. "Environmental Science & Technology, 12:2:195 (February 1978).
5. Mackenthun, K. M. "The Phosphorus Problem." AWWA, 1047-1054 (September 1968).
6. Carlson, R. E. "A trophic state index for lakes." Limnol. Oceanogr., 22:361-369 (March 1977).

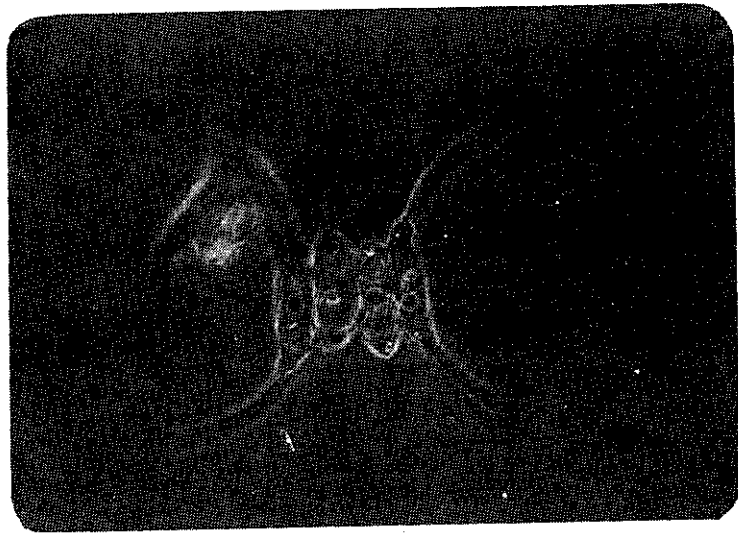


圖1. Scenedesmus quadricauda Var. crassicaudatus f. granulatus Hortob. 黑白照片 X 800

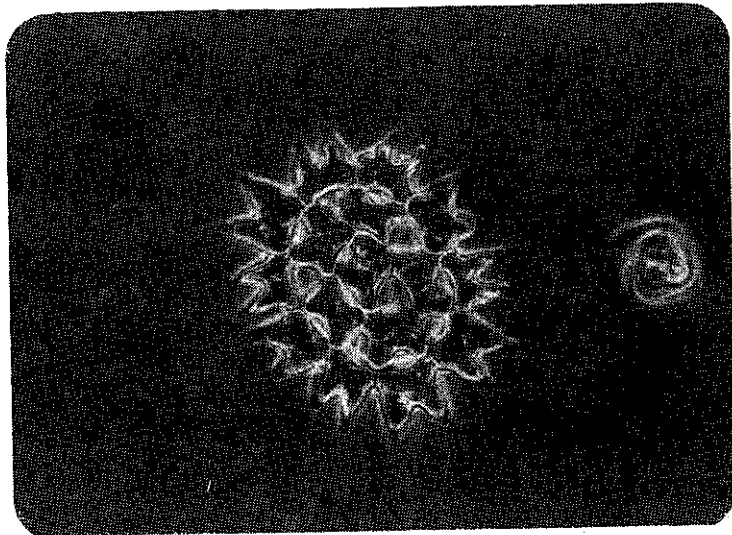


圖2. Pediatrum duplex Meyen 黑白照片 X 800

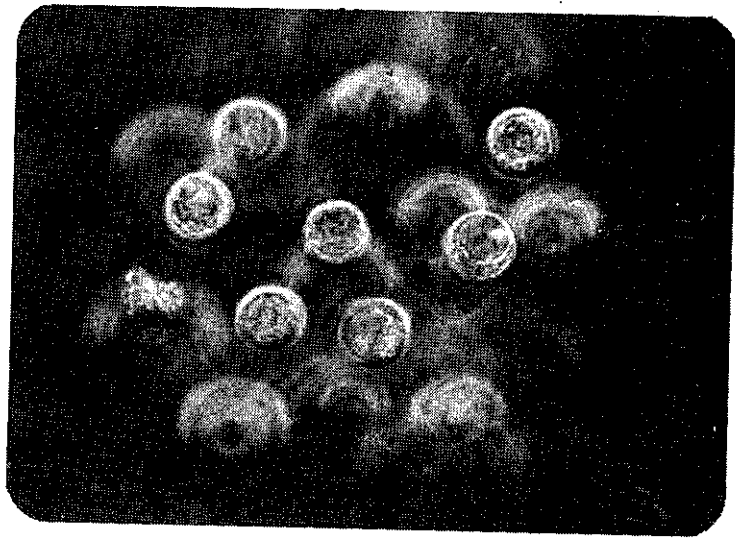


圖 3. Sphaerocystis schroeteri Chodat 黑白照片 X 800

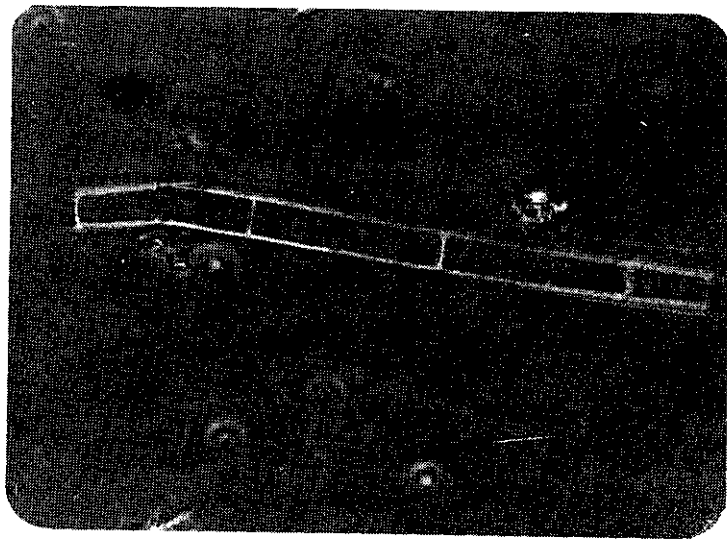


圖 4. Melosira granulata (Ehrenberg) Ralfs
黑白照片 X 800

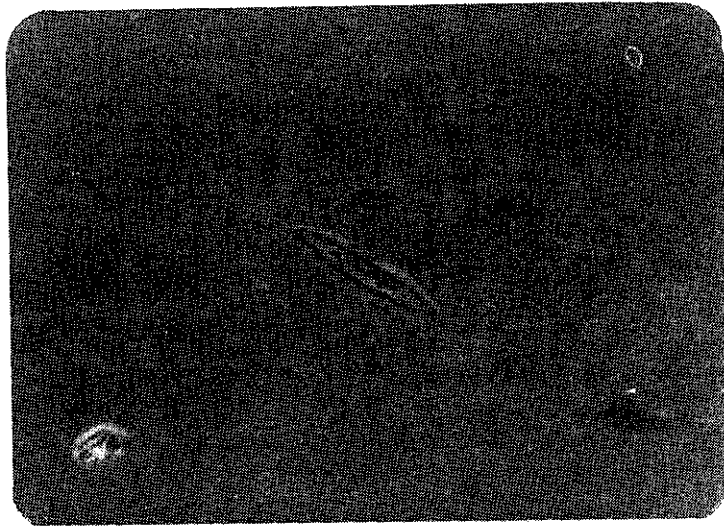


圖 5. Nitzschia palea (Kützing) W. Smith
 黑白照片 × 800

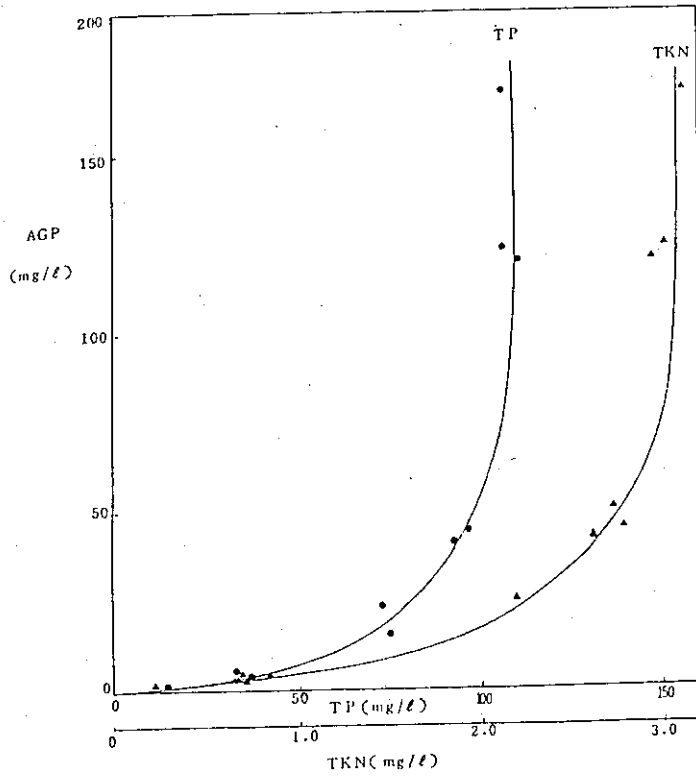


圖 6. Scenedesmus 指標系統模式

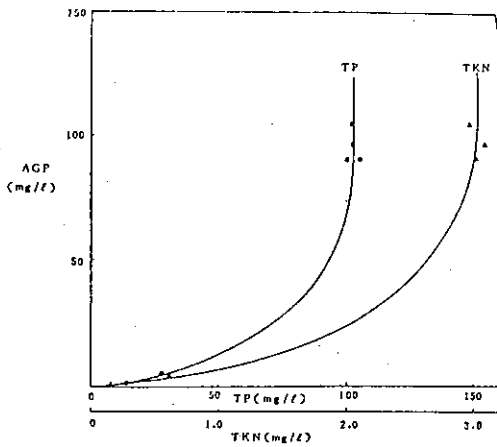


圖 7. *Pediastrum* 指標系統模式

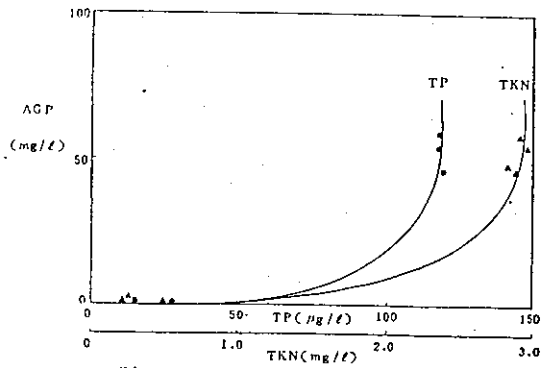


圖 8. *Sphaerocystis* 指標系統模式

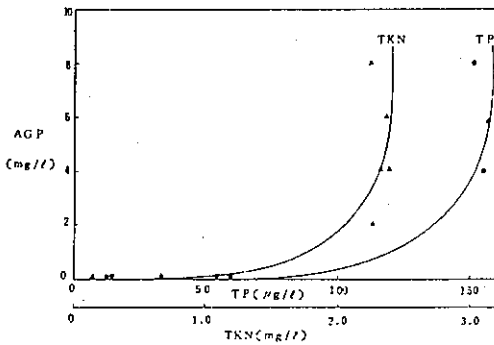


圖 9. *Melosira* 指標系統模式

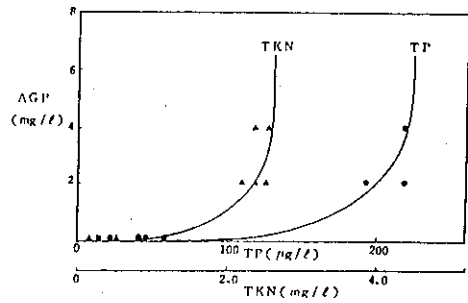


圖 10. *Nitzschia* 指標系統模式

表 1. 青源蓄水池取水口處表面水 AGP 值與 μ 值之關係

日期	種別	m ₁ (mg/l)	m ₂ (mg/l)	m ₃ (mg/l)	m ₄ (mg/l)	m ₅ (mg/l)	AGP ₁	AGP ₂	AGP ₃	AGP ₄	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
							(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(day ⁻¹)	(day ⁻¹)	(day ⁻¹)	(day ⁻¹)
8月1日	S	2	24	10	5	6	44	16	6	4	0.16	0.11	0.08	0.10
	P	5	49	33	26	24	88	56	46	19	0.18	0.13	0.11	0.09
	SP	1	33	20	11	7	64	38	20	6	0.12	0.08	0.05	0.03
	M	1	2	1	1	0	2	0	0	-1	0.05	0.04	0.01	0.009
	N	0	2	1	0	0	4	2	0	0	0.05	0.04	0.01	0.008
10月9日	S	1	22	6	4	4	42	10	6	3	0.13	0.09	0.07	0.09
	P	12	49	41	38	31	74	58	52	19	0.16	0.16	0.14	0.12
	SP	1	25	14	7	5	48	26	12	4	0.10	0.06	0.03	0.03
	M	0	2	1	0	1	4	2	0	1	0.04	0.03	0.02	0.01
	N	0	1	1	0	0	2	2	0	0	0.04	0.03	0.01	0.009
12月3日	S	1	26	13	9	6	50	24	16	5	0.15	0.10	0.075	0.06
	P	4	41	36	28	13	66	56	40	8	0.15	0.14	0.12	0.08
	SP	1	21	12	6	1	40	22	10	0	0.11	0.07	0.04	0.01
	M	0	1	1	1	2	2	3	2	2	0.03	0.02	0.01	0.01
	N	0	2	1	1	0	4	2	2	0	0.04	0.03	0.009	0.01

註: S 為 *Scenedesmus quadricauda*
 P 為 *Pediastrum duplex*
 SP 為 *Sphaerocystis Schroeteri*
 M 為 *Melosira granulata*
 N 為 *Nitzschia palea*

表 2. 翡翠水庫取水口處表面水 A G P 值與 μ 值之關係

日期	樣品	m_0 (mg/L)	m_1 (mg/L)	m_2 (mg/L)	m_3 (mg/L)	m_4 (mg/L)	AGP ₁ (mg/L)	AGP ₂ (mg/L)	AGP ₃ (mg/L)	AGP ₄ (mg/L)	μ_1 (day ⁻¹)	μ_2 (day ⁻¹)	μ_3 (day ⁻¹)	μ_4 (day ⁻¹)
9月12日	S	5	89	49	19	16	168	88	28	11	0.14	0.10	0.04	0.03
	P	4	52	28	16	12	96	48	24	8	0.12	0.08	0.04	0.03
	S P	0	27	17	7	5	54	34	14	5	0.11	0.07	0.03	0.02
	M	0	3	2	0	0	6	4	0	0	0.05	0.05	0.01	0.009
	N	0	1	1	1	0	2	2	2	0	0.03	0.03	0.01	0.008
11月5日	S	3	65	42	15	4	124	78	24	1	0.12	0.08	0.03	0.01
	P	4	49	25	12	14	90	42	16	10	0.10	0.06	0.03	0.02
	S P	1	30	17	6	3	58	32	10	2	0.10	0.06	0.02	0.01
	M	0	4	1	1	0	8	2	2	0	0.07	0.04	0.02	0.04
	N	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0.02	0.02	0.01	0.009
12月3日	S	5	65	48	10	4	120	86	10	-1	0.11	0.09	0.02	0.009
	P	4	56	32	9	5	104	56	10	1	0.11	0.07	0.02	0.01
	S P	0	23	11	2	2	46	22	4	1	0.09	0.05	0.01	0.008
	M	0	2	2	1	1	4	4	2	1	0.05	0.03	0.01	0.013
	N	0	1	1	1	1	2	2	2	1	0.02	0.02	0.02	0.01

註: $AGP_1 = (m_1 - m_0) \times 2$
 $AGP_2 = (m_2 - m_0) \times 2$
 $AGP_3 = (m_3 - m_0) \times 2$
 $AGP_4 = (m_4 - m_0)$

表 3. 台北地區蓄水庫 A G P 值與單項參數間之相關係數

藻類	參數	A G P 與 μ	A G P 與 N / P	A G P 與 T P	A G P 與 T K N
Scenedesmus		$r = 0.540$	$r = 0.389$	$r = 0.561$	$r = 0.606$
Pediastrum		$r = 0.724$	$r = 0.621$	$r = 0.902$	$r = 0.855$
Sphaerocystis		$r = 0.968$	$r = 0.594$	$r = 0.863$	$r = 0.831$
Melosira		$r = 0.810$	$r = 0.413$	$r = 0.580$	$r = 0.572$
Nitzschia		$r = 0.794$	$r = 0.443$	$r = 0.709$	$r = 0.717$
n*		24	18	18	18

*n = 樣品數目

表 4. 台北地區蓄水庫 A*G P 值與多項參數間之相關係數

參數類	TP AGP與 TKN	TP AGP與TKN N/P	TP TKN AGP與 N/P μ
Scenedesmus	R ² = 0.3674	R ² = 0.6595	R ² = 0.6892
Pediastrum	R ² = 0.8714	R ² = 0.8740	R ² = 0.9346
Sphaerocystis	R ² = 0.7202	R ² = 0.8006	R ² = 0.9547
Melosira	R ² = 0.3387	R ² = 0.3946	R ² = 0.6998
Nitzschia	R ² = 0.5144	R ² = 0.5700	R ² = 0.8094
n	18	18	18

表 5. Scenedesmus 系統之優養化潛勢數量指標

優養參數 優養程度	TP (mg/l)	TKN (mg/l)	AGP (mg/l)
輕度優養化	0.020 - 0.085	0.40 - 2.40	2 - 30
中度優養化	0.085 - 0.109	2.40 - 3.08	30 - 110
高度優養化	> 0.109	> 3.08	> 110

表 6. Pediastrum 系統之優養化潛勢數量指標

優養參數 優養程度	TP (mg/l)	TKN (mg/l)	AGP (mg/l)
輕度優養化	0.020 - 0.083	0.50 - 2.34	3 - 35
中度優養化	0.083 - 0.102	2.34 - 3.0	35 - 90
高度優養化	> 0.102	> 3.0	> 90

表 7. Sphaerocystis 系統之優養化潛勢數量指標

優養參數 優養程度	TP (mg/l)	TKN (mg/l)	AGP (mg/l)
輕度優養化	0.020 - 0.094	0.40 - 2.62	0 - 25
中度優養化	0.094 - 0.118	2.62 - 2.90	25 - 50
高度優養化	> 0.118	> 2.90	> 50

表 8. Melosira 系統之優養化潛勢數量指標

優養參數 優養程度	TP (mg/l)	TKN (mg/l)	AGP (mg/l)
輕度優養化	0.020 - 0.138	0.3 - 2.06	0 - 2
中度優養化	0.138 - 0.159	2.06 - 2.42	2 - 7.5
高度優養化	> 0.159	> 2.42	> 7.5

表 10. 台北地區蓄水庫現場水質分析與優養化潛勢之關係

地點	時間	參數 系統	AGP (mg/l)	TP (mg/l)	TKN (mg/l)	葉綠素 a (mg/m ³)
青潭	8月1日	S	4	0.047	1.12	50.8
		P	19			
		SP	6			
蓄	10月9日	S	3	0.063	0.83	41.5
		P	19			
		SP	4			
水庫	12月3日	S	5	0.064	0.86	37.5
		P	5			
		SP	0			
碧	9月12日	S	11	0.029	0.47	22.0
		P	8			
		SP	5			
水庫	11月5日	S	1	0.032	0.49	13.7
		P	10			
		SP	2			
庫	12月3日	S	-1	0.046	0.45	11.1
		P	1			
		SP	1			

表 9. Nitzschia 系統之優養化潛勢數量指標

優養參數 優養程度	TP (mg/l)	TKN (mg/l)	AGP (mg/l)
輕度優養化	0.020 - 0.192	0.40 - 2.28	0 - 1.5
中度優養化	0.192 - 0.222	2.28 - 2.6	1.5 - 5
高度優養化	> 0.222	> 2.6	> 5