

以藻類生長潛勢探討水庫優養化程度的研究

姚寶蓮¹ 黃金旺²

摘 要

水是人每天生活必需的要素之一，而水資源得來不易，水庫又為水資源的重要保存庫。面對今日污染問題日益嚴重，致使水資源遭受污染，所以水體優養化的問題，成為目前重要的課題。

研究水庫水質的方法，一般可得自理化分析方法及生物指標方法，本研究乃融合兩者，以藻類生長潛勢 (AlgalGrowth Potential = AGP) 來探討水庫本身之優養潛勢 (Eutrophic Potential) ，且探討探討 Carlson 氏 TSI (Trophic State Index) 系統的適用性，並加以修正。

本實驗以石門水庫及其上游河川為研究對象，分別作 AGP 的測試及各理化因子的分析，藉以探討水庫優養化的潛勢。

由結果顯示，AGP 與水體營養有明顯的線性關係，可作為優養化的指標。以 *Chlorella* sp. 為測試藻種，則當 AGP 大於 8.6 時為優養性，而 AGP 小於 5.1 時屬貧養性。以 AGP 修正 Carlson 氏的 TSI 系統，以 TSI (AGP) 探討水庫的優養程度，TSI (AGP) 值大於 60 為優養，界於 50 至 60 之間為中養。

¹自來水公司工程員

²中原大學化學研究所教授

一. 前言

臺灣地區由於人口及工業快速增長，致使生活用水與工業用水的需求量逐年增加，而此類之供水即稱為公共給水。一般而言，公共給水水源可分為三種，水庫水、河川水及地下水。截至目前，地下水源受到抽取量及含有量有限的限制，無法滿足日益增加的水需求量；而根據環保署近年來對於臺灣西部各河川的水質監測調查，證實大部份河川之中、下游水質皆已受到輕、中、重不等程度之污染；故相形之下，水庫水源乃日形重要，甚而成為臺灣地區重要公共給水水源。

臺灣目前約有二十多座水庫作為公共給水水源。根據有關調查研究，部份水庫已存在強勁的優養潛勢(Eutrophication Potential)。為提供水庫及操作營運、集水區治理以及公共給水之參考，實有必要對水庫及其集水區支流進行調查研究，建立一具有代表性之水質指標系統，以針對水庫發生優養化的情形，充份掌握並控制之。

本研究係定期對石門水庫上游集水區各河川及水庫內所選定之採樣點作水質分析試驗，判斷水庫之污染來源及影響，並建立水庫污染指標，以作為水質監測之基礎及研擬污染防治措施之依據。其方向包括：

- (一) 現有之營養程度(Trophic States)指標系統，直接引用於石門水庫的適用性探討。
- (二) 當地藻類對水質所潛藏的優養潛勢，將利用實驗方法，配合統計分析原理，探討出具應用性的藻類生長潛勢(Algal Growth Potential)指標。

二. 理論基礎

2-1 現有之營養程度指標系統

許多發生優養化的湖泊，大都由於過多的營養源進入水體所引起，而這些營養源又以磷為藻類生長的限制因子，因此流入湖泊的磷負荷量及湖水中含磷量多寡，成為多年來研究優養化的焦點。Vollenweider 直接描述營養因子和水庫營養狀況的關係，以磷質之負荷量對複合因子 (composite factor) 作圖，並以封閉曲線來表示不同的營養狀況⁽¹⁾⁽²⁾。Snow和 Digiano則詳盡描述水體內部反應，考慮底泥磷的釋放，及水中磷的沉降所造成磷的變化；Dillon和Rigler、Rast和Lee 利用統計學之迴歸分析，定量描述外界營養進入水體，所引起與優養化作用相關的水質變化⁽³⁾⁽⁴⁾。Carlson⁽⁵⁾更以總磷、葉綠素a 與透明度的TSI(Trophic State Index)值來評估水體的營養狀態，其公式如下：

$$TSI (TP) = 10 \left[6 - \frac{\ln 48/TP}{\ln 2} \right]$$

$$TSI (Chl) = 10 \left[6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln (Chl)}{\ln 2} \right]$$

$$TSI (SD) = 10 \left[6 - \frac{\ln (SD)}{\ln 2} \right]$$

[TP] : 總磷濃度 (mg/m³)

[Chl]: 葉綠素 a (mg/m³)

[SD] : 透明度 (m)

TSI 值大於 60 為優養，界於 50 至 60 之間為中養。而 Gakstatter 等人研究水質資料與水體營養狀況的關係，如表 2-1。

表 2-1 水質參數與水體營養狀況之關係

營養狀況	總磷量 (μg/l)	葉綠素 a (μg/l)	沙奇盤深度 (m)
貧養性	<10	<4	>3.7
中養性	10-20	4-10	2.0-3.7
優養性	>20	>10	<2.0

2-2 藻類生長潛勢 (AGP) 與水庫優養化的相關性

水體中過多的營養源破壞原有之生態平衡，造成藻類的大量繁殖，使水質惡化，加速水庫的優養化。因此，水庫本身之優養潛勢 (Eutrophic potential) 和水體中藻類生長潛勢 (Algal growth potential = AGP) 有互為因果的關係。最近有學者提出描述水庫發生優養化機會大小的定量分析實驗方法⁽⁶⁾，此即決定營養潛勢 (Trophic potential)。簡言之，營養潛勢乃比較天然水體內藻類最大生長情況和已知營養成份水體內之藻類生長狀況，計算出二者之間的差值。於理想狀況下，水體的營養潛勢可於實驗室中，藉著單種藻類培養 (Unialgal culture)，以觀察藻類生長潛勢 AGP 來加以評估⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

根據國外研究報告^{〔1〕}指出，AGP 試驗最早應用於檢驗污水處理廠排放水質是否合乎放流水標準。其原理乃根據藻類本身能攝取水體環境中的營養成份，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)。同時利用乾重量的方法，可求出許多不同的AGP值。當AGP 值越大，代表著水體中有使藻類大量繁衍的營養成份存在，如此水體內所隱藏的優養化潛勢亦相對增高，可作為判斷水庫優養潛勢大小的有效指標。

三. 實驗

3-1 採樣時間

本實驗自民國八十年八月開始，至八十一年五月止，研究期間共十個月，以每月一次分兩日的頻率進行採樣。

3-2 採樣地點

採樣點共有十七點，分別為石門水庫內六點、後池及上游集水區各重要支流河川有十點(圖3-1)。

第一點(1-0):在大壩附近，是水庫終點，附近觀光業發達，另設有遊艇碼頭，還有挖砂船作業。

第二點(2-0):為滴仔溝入口，附近有遊樂區及大型之遊艇業，另外滴仔溝本身水量雖不大，但流域內農業發達。

第三點(3-0):高遠溪入口，其流域農業發達，並有箱網養殖。

第四點(4-0):三民溪入口，上游三民村為較大之村鎮，家庭廢水及垃圾污染較多。

第五點(5-0):在阿姆坪碼頭附近，碼頭上方觀光事業發達，飯店遊樂場所眾多。

第六點(6-0):生活廢水，為阿姆坪附近之排放水口。

第七點(7-0):後池，為水庫洩洪排放水的靜水及調節池。

第八點(8-0):三民溪上，游在三民蝙蝠洞附近，附近有茶園，住戶稀疏，水量不大。

第九點(9-0):三民溪中游，沿岸為三民部落所在，家庭廢水及垃圾多。

第十點(10-0):滴仔溝上游，附近有卡拉 OK 餐廳。

第十一點(11-0):滴仔溝中游，附近有農田、果園。

第十二點(12-0):位在高遠溪，其上游有社區部落及鱒魚養殖場。

第十三點(13-0):斷匯，附近為農業用地，有零星部落及義興發電廠，河岸旁有砂石場。

第十四點(14-0):蘇樂，為農業用地、村鎮，上游有大型鱒魚養殖場。

第十五點(15-0):巴陵，大型村鎮，為北橫公路東西向公車的終點站。

第十六點(16-0):三光，部落聚集地，附近有砂石場。

第十七點(17-0):霞雲溪，上游為垃圾場及枕頭山墓地。

3-3 水質分析

- (1). 總磷 (TP): 氯化亞錫比色法。
- (2). 總氮 (TN): 硝酸-氮 + 氨氮。
- (3). 透明度 (SD): 以沙奇盤 (Secchi Disc) 測定之 (12)。
- (4). 葉綠素 a (Chl) 的測定 (13)。

3-4 AGP 試驗

3-4-1 測試藻種的確定

於標準方法中以藻類生物試驗 (Bioassay) 測試水中毒性的實驗, 所建議的標準藻種為 *Selenastrum*。另外 *Nostoc muscorum*, *Chlorella* sp., *Oscillatoria* sp., *Asterionella formosa*, *Haematococcus pulvialis*, *Scenedesmus quadricauda*, *Stigeoclonium tenue*, *Chlamydomonas* sp. 亦可為試驗藻種。但是如果有特定水域為研究對象時, 可將該水域中藻類加以分離培養單一種藻, 作為 AGP 的測定。所以我們取石門水庫內的水樣, 以 AAM 藻類培養基加以培養分離, 取得最容易繁殖的單一種藻, 作為測試藻種。

3-4-2 AGP 的測定

水樣經 0.45 μ m millipore 過濾膜過濾, 以 autoclave, 在 1.1 kg/cm² 及 121°C 條件下滅菌 15 分鐘。加測試藻種 2ml, 經培養十天, 將培養水樣過濾、烘乾而測得 AGP (mg/l) 值。

四. 結果與討論

4-1 藻類生長潛勢實驗結果

4-1-1 藻類培養基 (AAM) 的測試結果

稀釋各種 AAM 的濃度, 加入 2ml 測試藻種溶液後培養十天, 分別以 AGP 對 AAM 及 TP 作圖, 如圖 4-1、4-2、4-3。

由直線迴歸分析結果:

$$AGP = 1.040 \times AAM + 2.245 \dots\dots\dots (1)$$

$$(n = 10, r = 0.934)$$

$$\ln AGP = 0.744 \times \ln AAM + 1.060 \dots\dots\dots (2)$$

$$(n = 10, r = 0.997)$$

$$\ln AGP = 0.744 \times \ln TP + 0.598 \dots\dots\dots (3)$$

$$(n = 10, r = 0.997)$$

顯示 $\ln AGP$ 和 $\ln AAM$ (或 $\ln TP$) 比 AGP 和 AAM 的相關性較好

[相關係數 (r) $0.997 > 0.934$], 此意味著 AGP 隨著 AAM (或 TP) 呈指數的成長 (本實驗未配製高濃度的 AAM 溶液, 所以由圖 4-1 不能明顯看出指數曲線)。

4-1-2 基礎實驗—AGP 與葉綠素 a 之關係

稀釋不同濃度的營養劑培養，分別測 AGP、葉綠素 a。以 AGP 對 Chl a 作圖，如圖 4-4。其線性迴歸分析結果：

$$\ln \text{AGP} = 1.181 (\ln \text{Chl a}) - 1.148 \dots\dots\dots(4)$$
$$(n = 10, r = 0.997)$$

由上述關係得知藻類生物量分析的二種方法：AGP 及葉綠素 a 之間具有良好的線性關係。

4-1-3 石門水庫及集水區各河川試水之 AGP 實驗結果

根據 3-3 中的分析方法，所得各項理化因子 [葉綠素 a、透明度、總磷、總氮 (硝酸氮 + 氨氮)] 及 AGP 分析結果，分別探討水庫內五點 (1-5)，及將水庫和上游集水區各河川視為一體共十七點，討論其 AGP 與各項理化因子的變化關係。同時利用線性迴歸分析，將其結果用以檢定各因子間之相關程度。

4-1-3-1 水庫內五點 (1-5) 的探討

水庫內五個採樣點代表著水庫整體的變化，所以將此五點合併作分析討論。由各採樣點分析結果顯示，TN (由氨氮加硝酸氮所得) 與 TP 之比值皆大於 10，故推判石門水庫屬 P-限制的水體。分別以 AGP 對 TP、Chl a、SD (沙奇盤深度) 及 TN 作圖，如圖 4-5、4-6、4-7、4-8、4-9。其線性迴歸分析結果：

$$\text{AGP} = 0.225 (\text{TP}) + 3.460 \dots\dots\dots(5)$$
$$(n = 50, r = 0.659)$$

$$\ln \text{AGP} = 0.502 (\ln \text{TP}) + 0.622 \dots\dots\dots(6)$$
$$(n = 50, r = 0.952)$$

$$\ln \text{AGP} = 0.960 (\ln \text{Chl a}) + 0.806 \dots\dots\dots(7)$$
$$(n = 50, r = 0.773)$$

$$\ln \text{AGP} = 0.152 (\ln \text{SD}) + 1.812 \dots\dots\dots(8)$$
$$(n = 50, r = 0.133)$$

$$\ln \text{AGP} = 0.288 (\ln \text{TN}) + 2.00 \dots\dots\dots(9)$$
$$(n = 50, r = 0.139)$$

由式 (5) (6) 比較可印證 4-1-1 中所探討 AGP 隨 TP 成指數變化，所以其它的討論都以取自然對數來相互比較。而由式 (3) 及式 (6) 兩式比較，實驗室配製之 AAH 中之 TP 較實際水體中之 TP 能為藻類所吸收，也就是說實際水體中之 TP 並不能完全被藻類吸收，所以 TP 並不能真正反應水體的營養。式 (8) 中 AGP 與 SD 的相關係數只有 0.133，表示二者間之關係不甚佳，其原因是石門水庫的透明度受地形的影響，高山陰影遮蔽，不能反應出真正的透明度；且石門水庫為具多項功能之水庫，水之滯留時間很短，水中之懸浮顆粒未能達到自然沉降，所以透明度偏低。式 (9) 中 AGP 與 TN 的相關係數也只有 0.139，代表此水體中 TN 與藻類生長關係不佳，TN 不是限制因子。

4-1-3-2石門水庫及上游集水區各河川之AGP 與TP、TN的探討

八十年八月至八十一年五月有十次採樣，共 164個樣品（八十年八月上游河川 12-17點沒有採樣），其 AGP與TP及TN綜合探討，如圖4-10、4-11。其線性迴歸分析結果：

$$\ln \text{AGP} = 0.741 (\ln \text{TP}) - 0.071 \dots\dots\dots(10)$$

$$(n = 164, r = 0.932)$$

$$\ln \text{AGP} = 0.776 (\ln \text{TN}) + 2.284 \dots\dots\dots(11)$$

$$(n = 164, r = 0.538)$$

視集水區各河川與水庫為一體，來探討所得AGP 仍與TP有良好的關係($r=0.932$)。而與TN的關係($r=0.538$)，雖較只有水庫內五點時好($r=0.139$)，但仍不是很好的關聯性，再次印證TN不是限制因子。由上討論得AGP 較TP更能代表營養的潛勢，由式(10)與表2-1 比較可得AGP < 5.1 時為貧營養性，而AGP > 8.6為優養性。

4-1-3-3各採樣點AGP 的變化

將各採樣的AGP 值作圖，如圖4-12及4-13。由圖4-12、圖4-13中見水庫內五點(1-5) 的AGP大多在8.0以下，屬中養性。而6-0， 因為是生活排放水非常髒，是營養的主要來源，其AGP 值特別高。上游河川8-11點為三民溪中、上游及涵仔溝中、上游，其AGP 值也偏高，部落家庭排水及農業灌溉為主要原因。

4-2 Carlson 的TSI 營養程度指標系統之修正與應用

Carlson 在建立TSI (trophic state index) 指標系統時所考慮使用的參數，乃以大家都關心的藻類生物量 (Algal biomass)為重心來探討，其範圍包括藻類的重量、細胞體積(cell volume)、葉綠素a 或沙奇盤透明度(SD)。於是以前一般研究湖沼學時都會偵測的沙奇盤透明度(SD)來建立營養程度指數系統(TSI)。定義能使生物量依一些標準值產生雙倍的程度時為一營養狀態，於是將 SD 值取 \log_2 ，使TSI 值的零點落在研究過的最大SD值上。Hutchinson⁽¹²⁾ 在1957研究日本的Masyuko 湖，最大SD值為41.6m，為使其 $\log_2 \text{SD}$ 為整數，其SD值為64m。於是得到式(12)：

$$\text{TSI (SD)} = 10 \left[6 - \frac{\ln (\text{SD})}{\ln 2} \right] \dots\dots\dots(12)$$

其值從SD=64m的 0到SD=6.4cm 的100。又以SD對Chl 及TP作線性迴歸分析，分別得到SD與Chl 及SD與TP的關係式，代入(12)而得：

$$TSI(chl) = 10 \left[6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln(chl)}{\ln 2} \right] \dots (13)$$

$$TSI(TP) = 10 \left[6 - \frac{3.70 - 0.98 \ln(TP)}{\ln 2} \right] \dots (14)$$

式(13)、式(14)係參考Schelske et al. (1972)⁽¹³⁾，Powers et al.(1972)⁽¹⁴⁾，Lawson et al(1972)⁽¹⁵⁾，Carlson(1975)，Megard(未發表)及Shapiro⁽¹⁶⁾所作的研究結果。但國外湖泊、水庫的環境與本研究之對象石門水庫差異頗大，探討的各項因子深受環境的限制，其 TSI值變異大，如圖4-14。其可能原因

- (1) SD: 水庫因地處山區，受山之陰影遮蔽，且水滯留時間太短，濁度較高，SD值偏低，致使TSI(SD)值偏高。
- (2) Chl: 水庫內表面水之葉綠素a 頗低，偵測易受干擾致使TSI(Chl)偏低。
- (3) TP: 由4-1-1的研究認為TP雖與AGP 有很好的關係，但AGP 更能代表生物量。Bradford 於1972年的研究中指出⁽¹⁷⁾：真正能夠反應出生物量的因子，應該是生物可以利用的磷(Bioavailable P)，而非TP。

基於以上的因素，探討營養程度的TSI 值時，應利用AGP 值更切實際。於是將式(6)代入式(14)中而得：

$$TSI(AGP) = 28.71 \ln AGP - 13.7334 \dots (15)$$

以式(15)求水庫內各點(1-5)之TSI(AGP)值，如圖4-15。由圖中可明顯看到TSI(AGP)值大多落在40-50 之間，屬於中養性。

五. 結論

- (一). 由實驗結果顯示利用AGP 為指示優養潛勢的指標，的確具備精確簡單明瞭的應用價值。它綜合了一般理化因子的特性，卻也反應了水體中生物量的關係營養源(TP、TN)愈多藻類生長潛勢愈大，水體的優養潛勢也就愈大。以本實驗對石門水庫及其上游為河川的研究探討得到以Chlorella sp. 為測試藻種，則當AGP 值大於8.6 為優氧化階段，AGP 小於5.1 為貧營養性。此方法應可適用於其他水體。
- (二). Carlon氏的營養程度指數(TSI) 系統不能完全適用於石門水庫，將其理化因子TP以AGP 取代，將之修正為：

$$TSI(AGP) = 28.74 \ln AGP - 13.734$$

其TSI(AGP)值大於60為優養性，介於50-60 為中養性，而石門水庫之 TSI 值大多介40-50間為貧營養性。

- (三). 以AGP 來探討研究石門水庫及其上游各河川，發現水庫內五點其差異並不大，第五點有時會受第六點之生活廢水影響。而上游河川部份三民溪中、上游及滷仔溝中、上游受污染嚴重，間接影響到水庫水質。所幸石門水庫是個多功能的水體，水滯留時間短，加速水的進出速度，降低了優養化的程度。

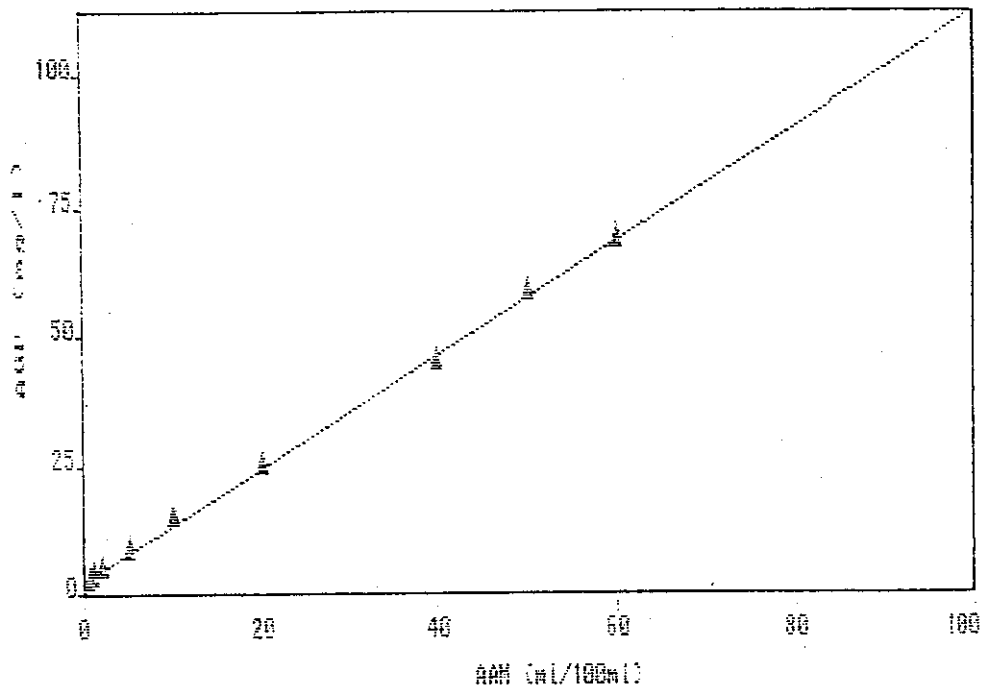


圖 4-1. AGP 與 AAM 之關係圖 (TEST)

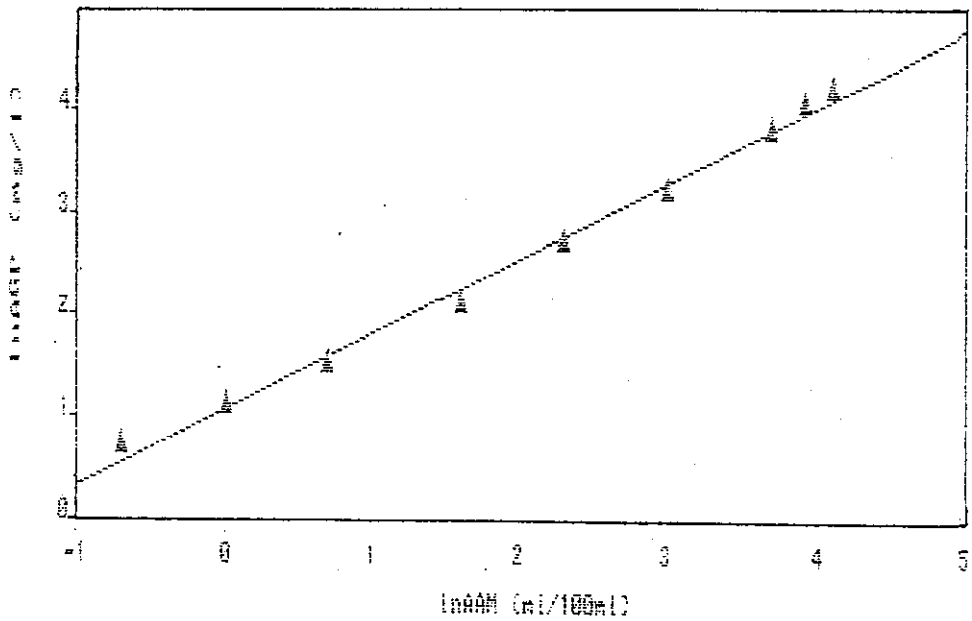


圖 4-2. \ln AGP 與 \ln AAM 之關係圖 (TEST)

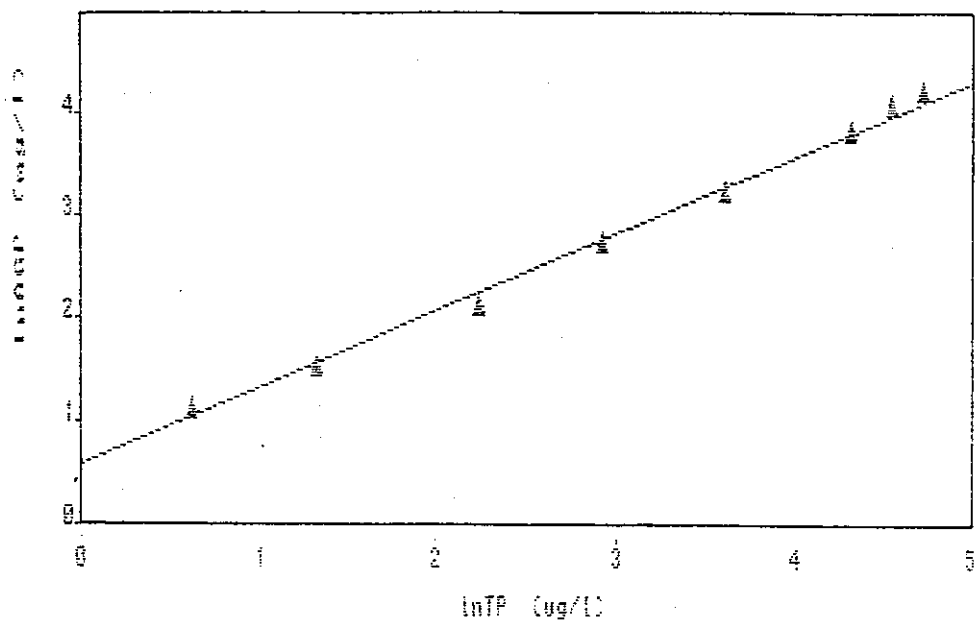


圖 4-3. \ln AGP 與 \ln TP 之關係圖 (TEST)

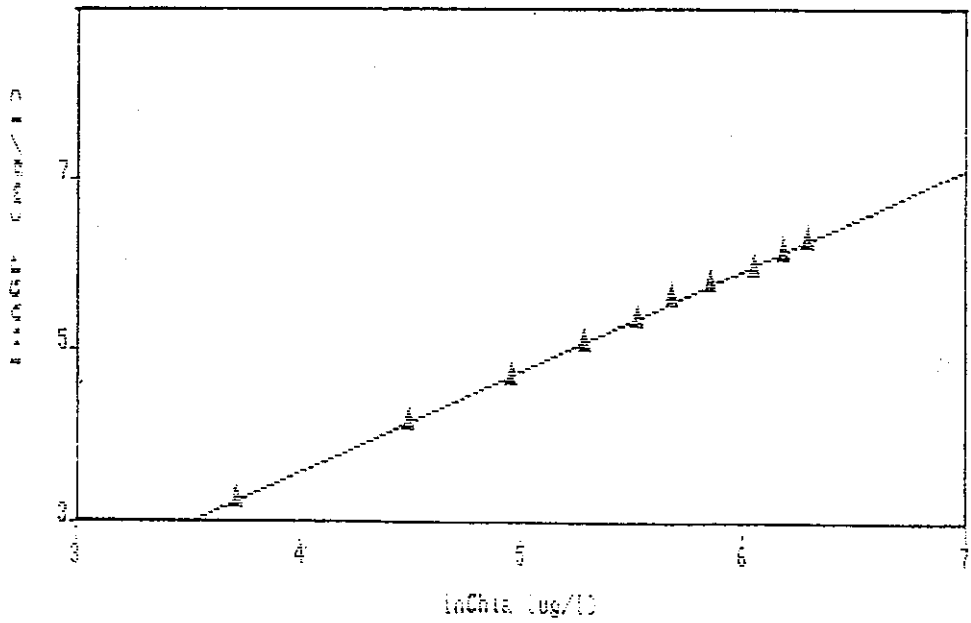


圖 4-4. \ln AGP 與 \ln Chl a 之關係圖 (TEST)

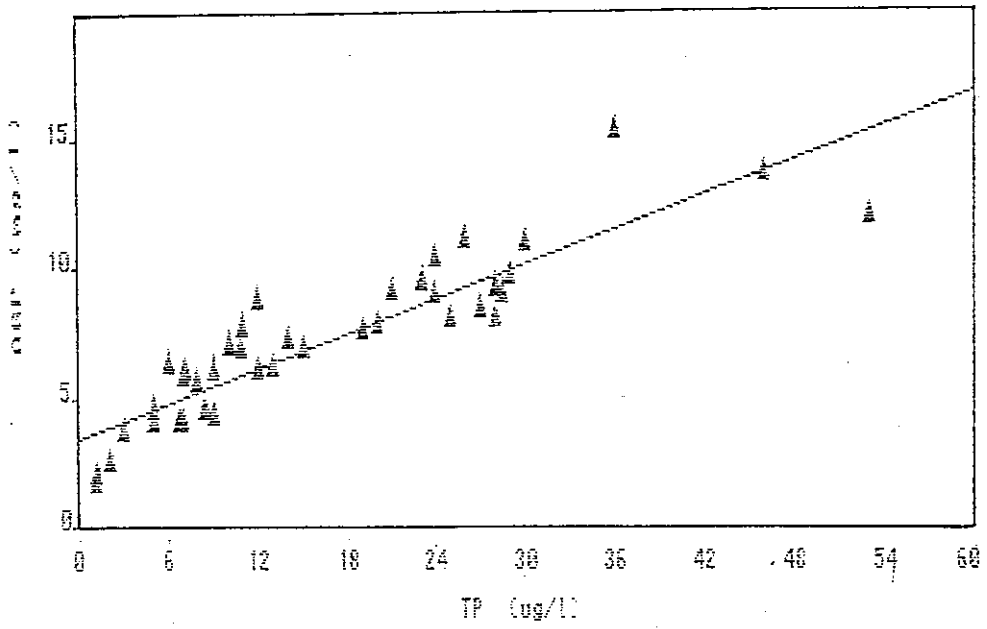


圖 4-5. AGP 與 TP 之關係圖 (水庫內五點)

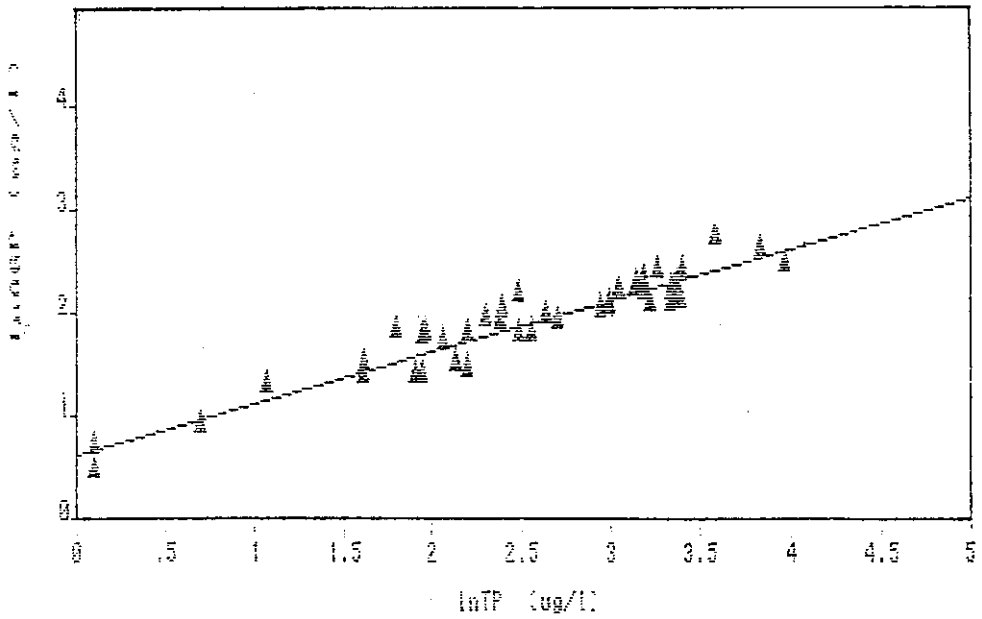


圖 4-6. $\ln AGP$ 與 $\ln TP$ 之關係圖 (水庫內五點)

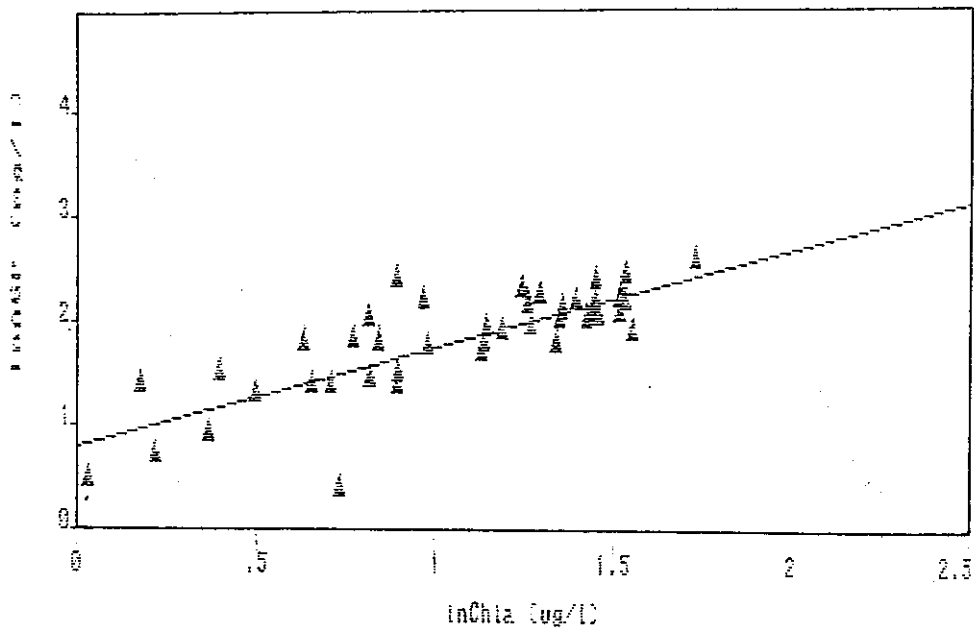


圖 4-7. ln AGP 與 ln Chl a 之關係圖 (水庫內五點)

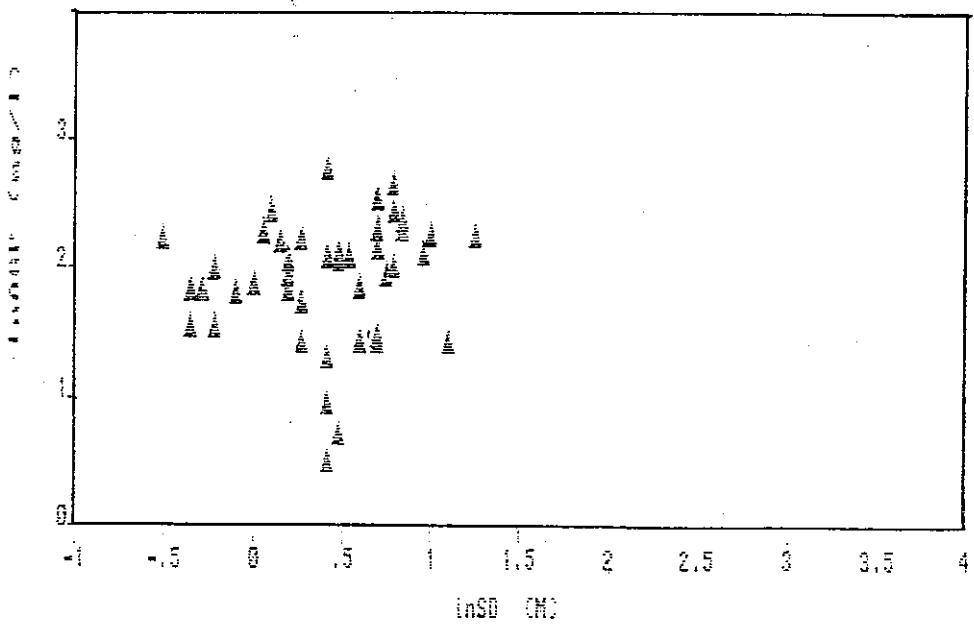


圖 4-8. ln AGP 與 ln SD 之關係圖 (水庫內五點)

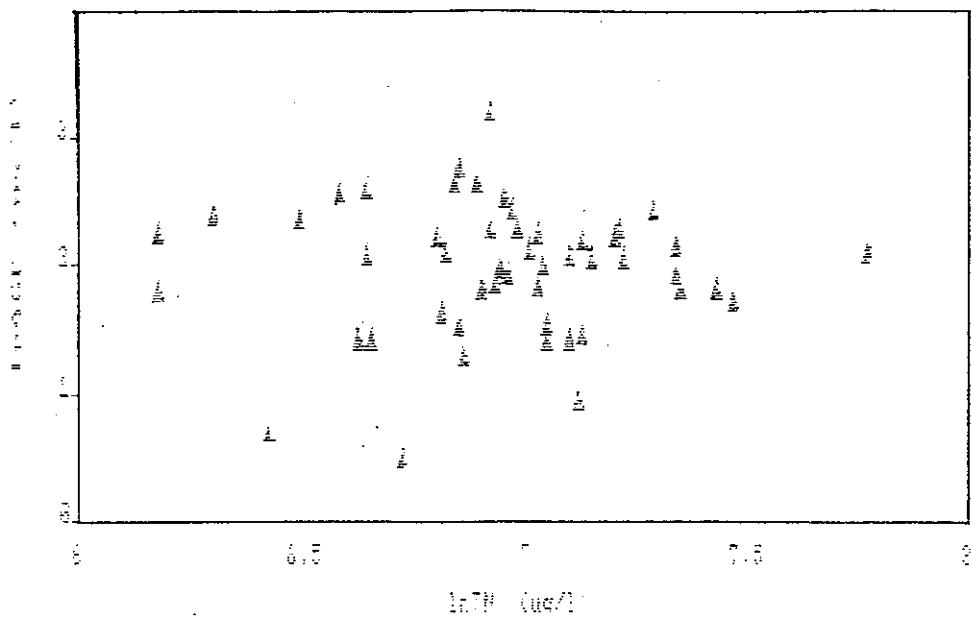


圖 4-9. $\ln AGP$ 與 $\ln TP$ 之關係圖 (水庫內五點)

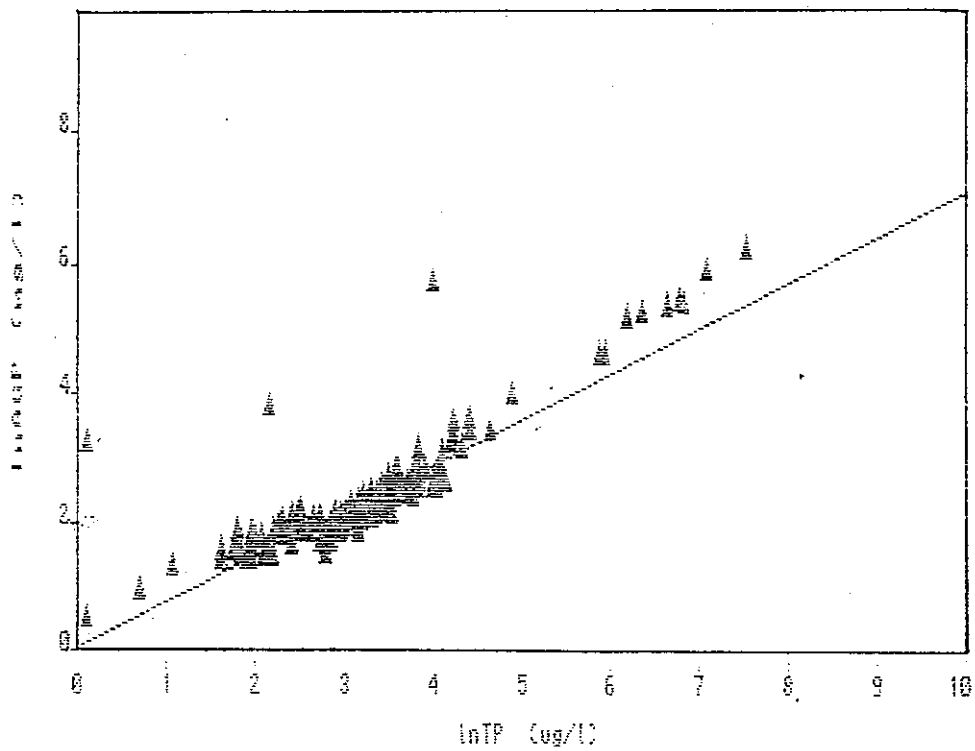


圖 4-10. $\ln AGP$ 與 $\ln TP$ 之關係圖 (全部十七點)

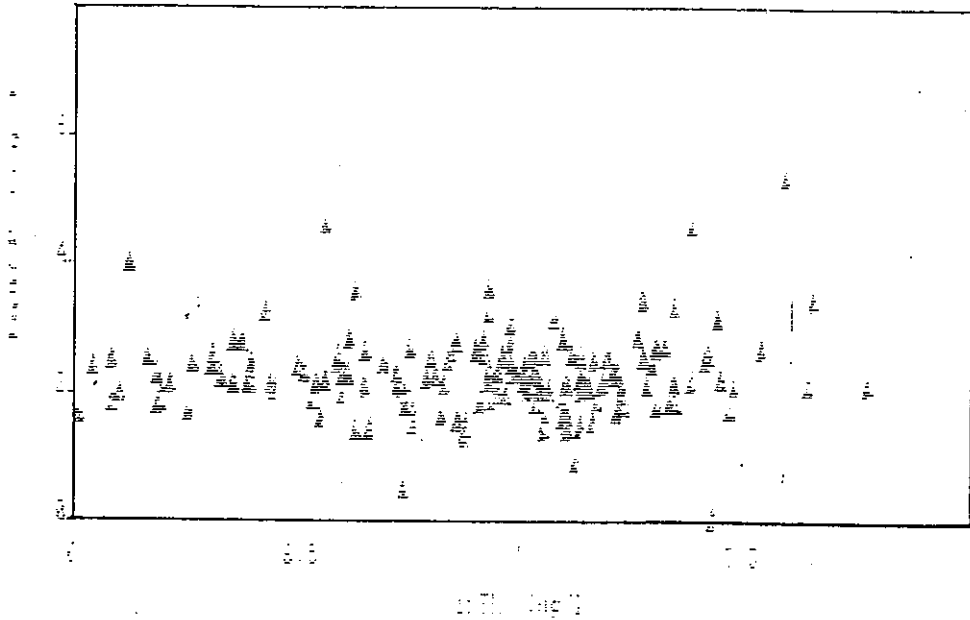


圖 4-11. ln AGP 與 ln TN 之關係圖 (全部十七點)

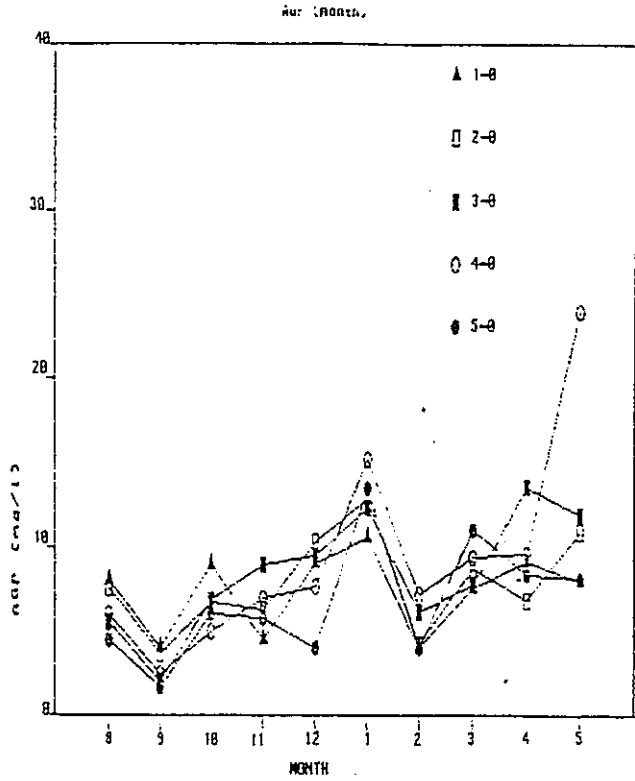


圖 4-12. 各採樣點的 AGP 值變化

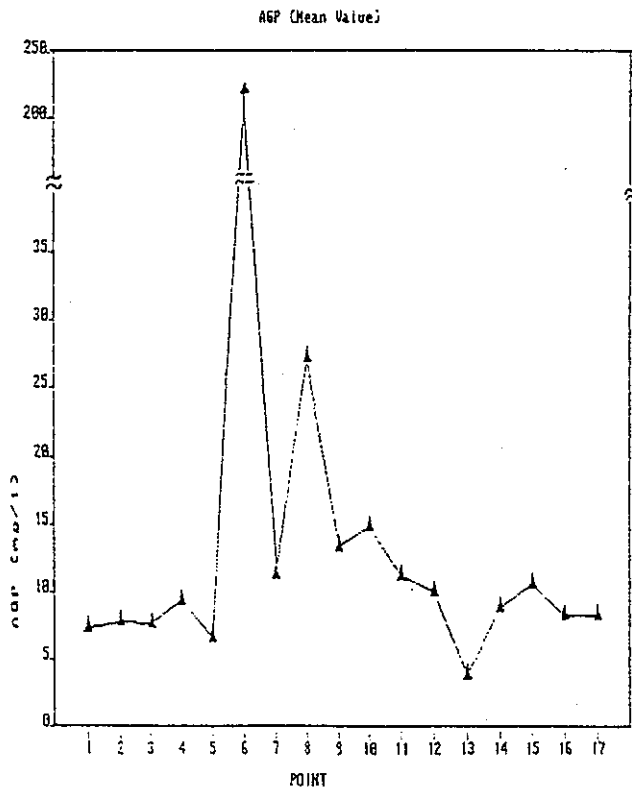


圖 4-13. 各採樣點的 AGP 平均值變化

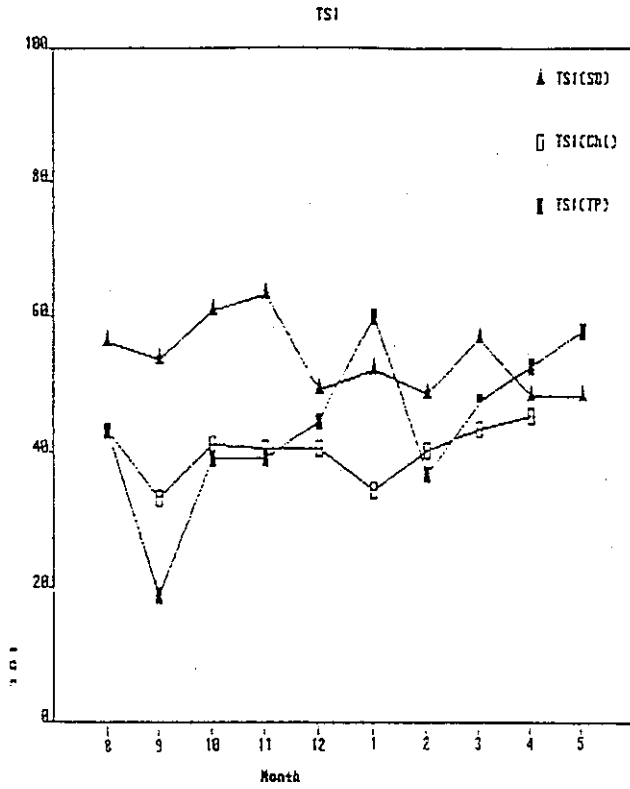


圖 4-14. 水庫內之 TSI 值變化

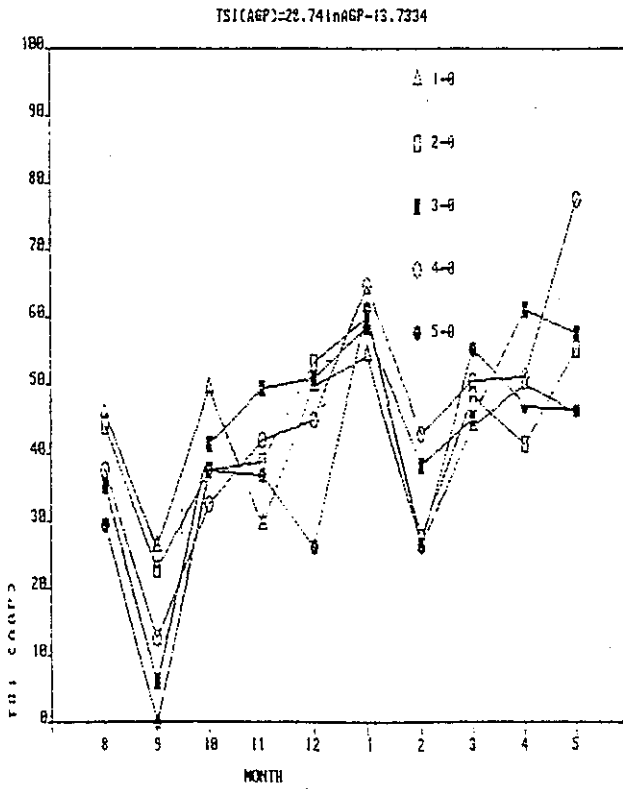


圖 4-15. 水庫內之 TSI(AGP) 值變化

六. 參考資料

1. 馮瀆華, 阮立麗 "水庫水質變化與特性" 土木水利論文專輯二, 72年11月.
2. Tapp, J.S., "Eutrophication analysis with simple and complex models" J.W.P.C.F. March 1978, P.484-492.
3. Feng, T.H., and Yuan, L. "Water quality changes and behavior in reservoirs ." Proceedings of the Annual Meeting of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineers.
4. 馮瀆華 "Lake eutrophication and its control." 工業污染防治
5. Carlson, R.E. "Trophic state index for lakes" Limnol.Oceanogr. ,22:2, 1977, P.361-369.
6. Strnadova, "Tropic potential" Arch.Hydrobio.Beih. Ergebn.Limnol. ,December 1977 , 9:215-222.
7. Lukavsky, J., "The evaluation of algae growth potential by cultivation on solid media" Water Research, 1983, 17:549-558.
8. Lehmusluoto, P.O., "Some aspects on the classification of natural waters by algae assays(AGP), prelude ." Mitt.Internat.Verein. Limnol., 1978, 21:437-440.
9. Forsberg, C.G. "Algal assay procedure" J.W.P.C.F., 1972, 44:1623-1628.
10. Yagi, Osami; Matsumaru, Michiyo; "Determination of AGP in brackish water "Kokuritsu Kogai Konkyusho Kenkyu Hokoku, 1987, 110:29-41 (JAPAN)
11. Forsberg, A., and Claesson, A., "Algal assays with wastewater to determine the availability of phosphorus for algal growth" Verh. Internat. Verein.Limnol., 1981, 21:763-769.

12. Edmondson, W.T., "Use of chlorophyll-Secchi disk relationships"
Limnol. Oceanogr., 25:2, 1980, P. 371-372.
13. Jones, R.A., and Lee, G.F., "Chlorophyll-a raw water quality
parameter" JAWWA. 1982, P. 490-494.
14. Powers, C.F., and Schuldt, M.D., "Algae responses to nutrient
additions in natural water." Am. Soc. Limnol. Oceanogr. Spec.
Symp. 1972, 1:141-154.
15. Lawson, D.W. "Temperature, transparency, and phytoplankton
productivity in Crater Lake." Oregon. Limnol. Oceanogr. 1972,
17:410-417.
16. Shapiro, J., Lundquist, J.B., and Carlson, R.E., "Involving the
public in Limnology— an approach to communication." Int. Ver.
Theor. Angew. Limnol. Verh. 1975, 19:866-874.
17. Bradford, M.E. and Robert, "The relationship between chemically
analyzed phosphorus fractions and bioavailable phosphorus"
Limnol. Oceanogr., 32(15), 1987, 1124-1137.