



行政院環境保護署
Environmental Protection Administration
Executive Yuan, R.O.C. (Taiwan)

前瞻計畫水環境改善與管理研討會



水庫藻類監測技術與水質營養狀態評估

報告人：林志麟 助理教授

109年10月23日

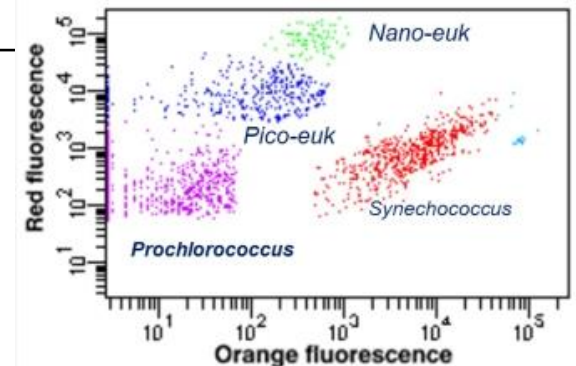
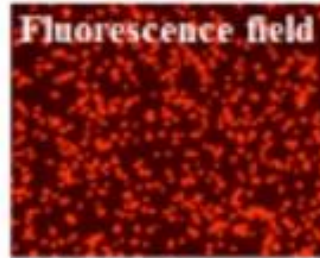
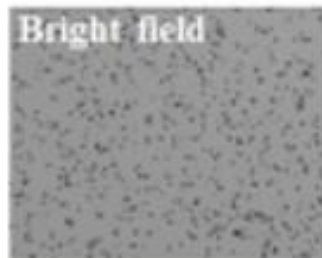
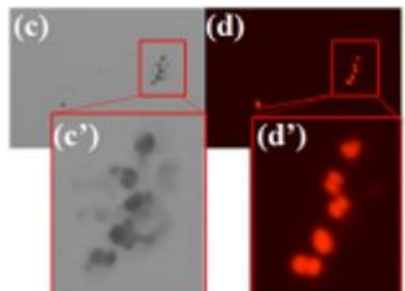


中原大學
Chung Yuan Christian University

水庫藻類監測技術

傳統鏡檢與自動藻類計數技術比較

| 方法 | 缺點 | 優點 | 總評 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 傳統鏡檢法 <ul style="list-style-type: none"> 光學顯微鏡 血球計數器 | 每個細胞計數器有時難以區分微藻與其他顆粒(如碎片, 小污點)以及微氣泡 | 使用顯微鏡可從影像中直接拍攝各種藻類形狀外觀 | <ul style="list-style-type: none"> 藻類尺寸小於5 μm肉眼難以準確辨視其為微藻或其他顆粒, 但若以自動數藻技術可準確偵測1-10 μm的微藻細胞 如有超過10 μm的細胞團不管是用明視野或是螢光計數皆可能形成誤判, 辨識為一塊狀細胞 螢光計數法與傳統鏡檢法相比有較高的準確性, 在實際藻數越低的情況下鏡檢的誤差較大 |
| 自動數藻技術 <ul style="list-style-type: none"> 螢光光譜儀 流式細胞儀 | <ul style="list-style-type: none"> 葉綠素a螢光分析儀可能會因為藻類的螢光物質射出波長接近而導致誤判藻種 某些微藻細胞需使用不同染劑以利其吸收 | <ul style="list-style-type: none"> 可同時偵測葉綠素a及了解藻類狀態 流式細胞儀可分析微藻尺寸 | |

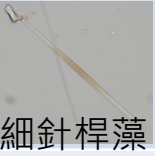




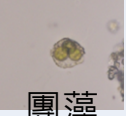


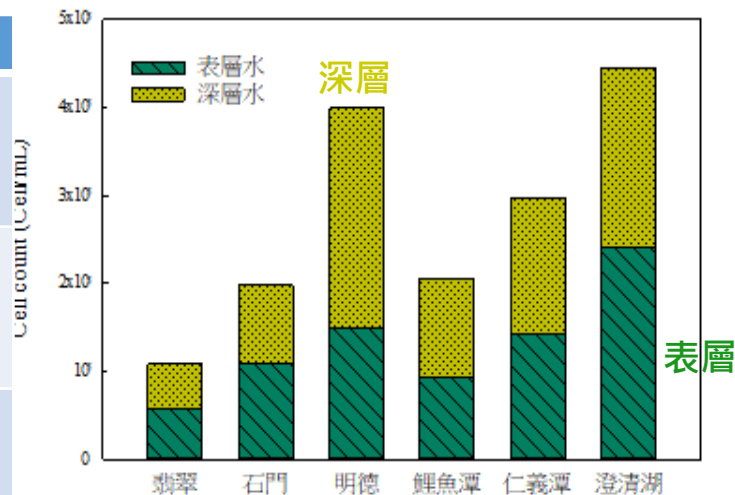
現地藻類計數技術(On-site Algae Counter)

| 儀器 | 原理 | 限制 | 干擾物 |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 分光光度計 (Spectrophotometer) | 藻膽蛋白的主要吸收波長為450-660 nm的光，測量藻藍蛋白(PC)波長為590 nm-670 nm 藻紅蛋白(PE)波長為535-670 nm可以經由換算區分綠藻、藍綠藻、矽藻、隱藻四種 | <ul style="list-style-type: none">● 需建置藻數檢量線● 無法偵測未知水樣藻種、藻數 | 濁度物質 |
| 螢光光度儀 (Fluorescent meter) | 利用LED燈管射出多種特定波長的光束，測定不同藻種之色素(Pigments)，利用量測不同特徵波長數值，測定藻種，再測其葉綠素a、藻數 | <ul style="list-style-type: none">● 濁度<50 NTU● 葉綠素a<2000 µg/L● 可偵測範圍:10³-10⁶ cells/mL | 濁度物質、螢光物質組成相似者 |
| 流式細胞儀 (Flow Cytometer) | 利用雷射螢光激發產生並分析的信號，除了波長的設定外可選擇紅、藍、紫的燈管(特定激發波長)，更精準地激發出藻類蛋白螢光發射訊號，藍綠藻以藻藍蛋白(PC)發出藍光為主，綠藻為藻紅蛋白(PE)發出紅光 | <ul style="list-style-type: none">● 細胞濃度需<10⁶ cells/mL● 細胞太大(>20 µm)無法偵測 | 無 |

水庫藻類特性檢測-鏡檢法

鏡檢藻數及藻種

| 水庫 | 藻門 (表層水) | 藻門 (深層水) |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 石門 | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 隱藻 Cryptophyta  | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY) |
| 翡翠 | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY) ● 隱藻 Cryptophyta  | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) |
| 明德 | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY)  | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY) |
| 鯉魚潭 | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY)  | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) |
| 仁義潭 | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY)  | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY) |
| 澄清湖 | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY) ● 隱藻 Cryptophyta  | <ul style="list-style-type: none"> ● 綠藻 Green algae (G) ● 矽藻 Diatoms (D) ● 藍綠藻 Cyanobacteria (CY) |



- 每座水庫藻種至少10種，優勢藻多為矽藻及綠藻
- 水庫表層水平均藻數常態性高於深層水

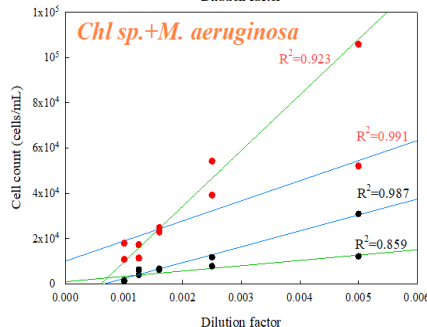
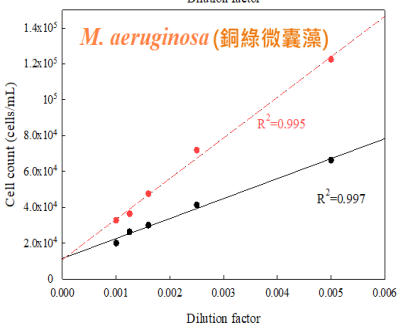
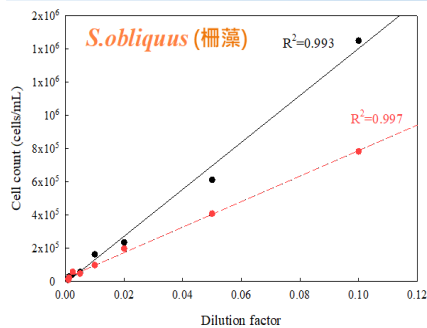
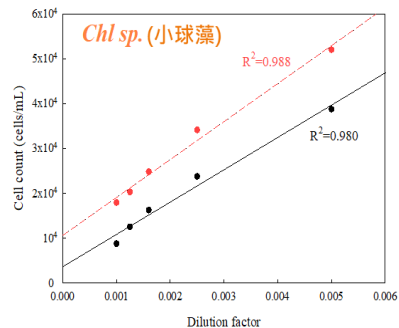
石門、翡翠、明德、鯉魚潭及仁義潭水庫深層水:水面以下10 m處

澄清湖深層水:底層水(因水庫水深不足10 m)

採樣期間:108/11~109/4

水庫藻類特性檢測-螢光技術 (bbe)

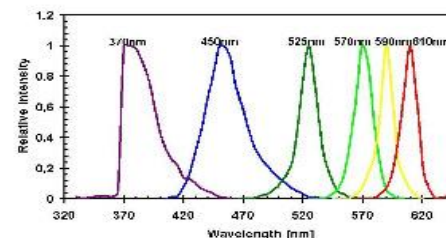
可偵測範圍:
10³-10⁶ Cells/mL



- Hemocytometer(鏡檢)
- Automated cell count(螢光)
- Mix culture – *Chl sp.*
- Mix culture – *M. aeruginosa*



Emission Spectra of Light-Emitting Diodes



Chlorella Vulgaris (*Chl sp.*)
Microcystis aeruginosa (*M. aeruginosa*)
Scenedesmus obliquus (*S. obliquus*)

Excitation Wavelength(nm)

Algae Division

450-480

綠藻 (特徵波長：470 nm)

525-560

矽藻 (特徵波長：525 nm)

590-620

隱藻 (特徵波長：570 nm)

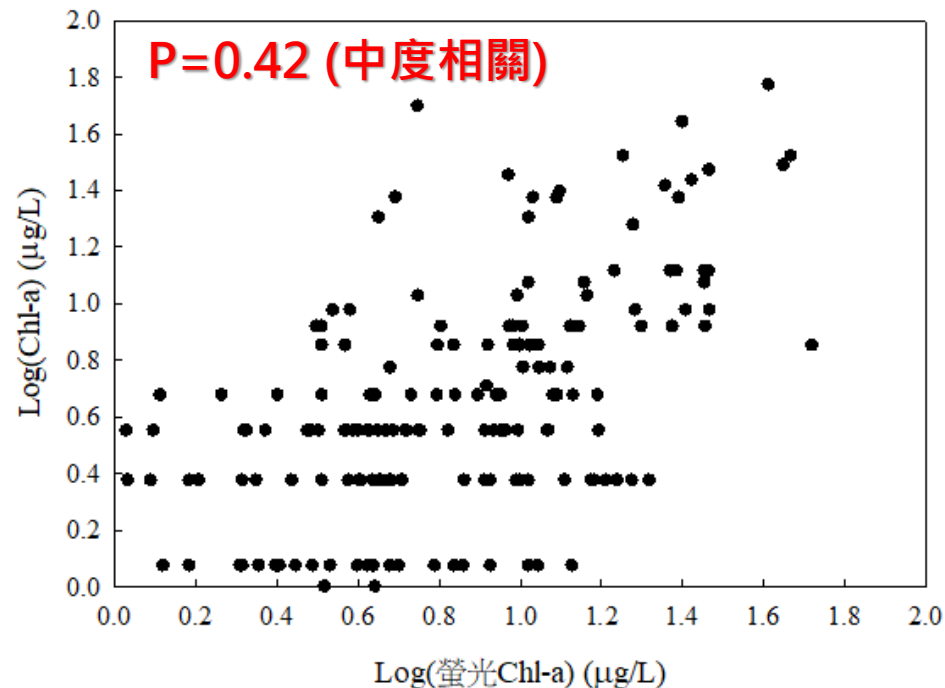
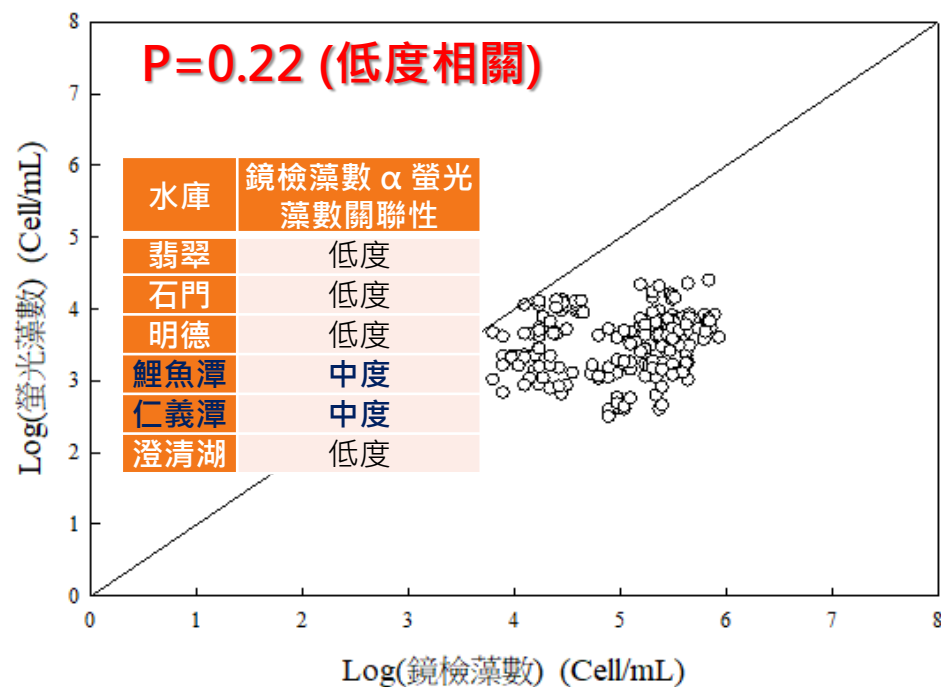
600-620

藍綠藻 (特徵波長：610 nm)

水庫藻類特性現地分析

現地螢光分析儀檢測法與傳統檢測法比較

- 螢光法量測之藻數較傳統鏡檢法低，兩者呈現低度相關($P=0.22$)，主要是因為螢光會受到水中色度物質或濁度物質干擾而降低量測數值
- 螢光法與傳統法(即萃取葉綠素a方法)相比，兩種方法所得的數據呈現中度相關($P=0.42$)，顯示**螢光法量測葉綠素a濃度較量測藻數更具代表性**

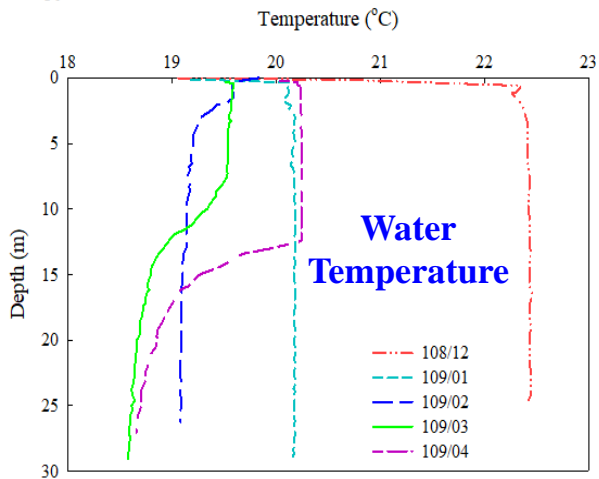
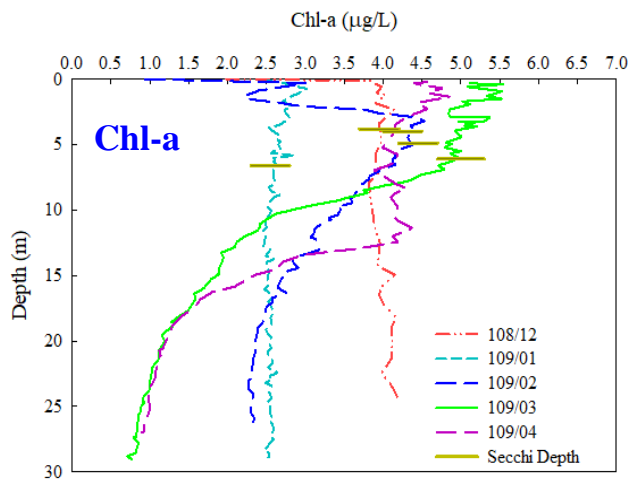


水樣採集時間:108.11~109.4

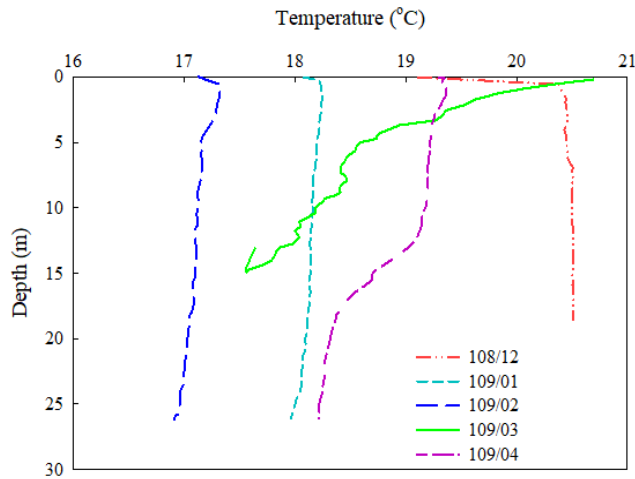
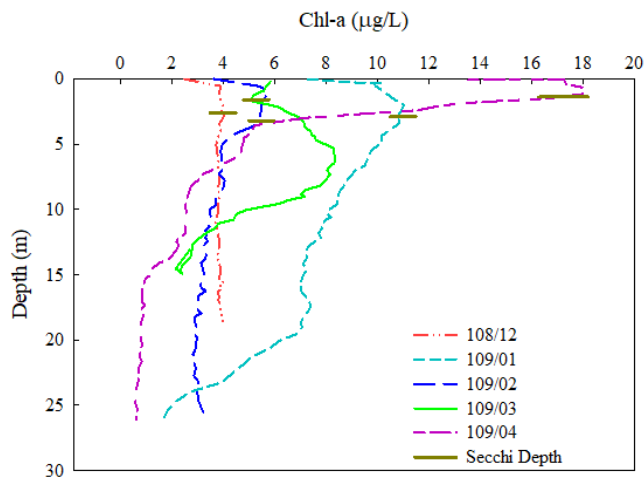
水庫藻類特性現地分析(取水口)

現地螢光分析儀檢測葉綠素a及水溫

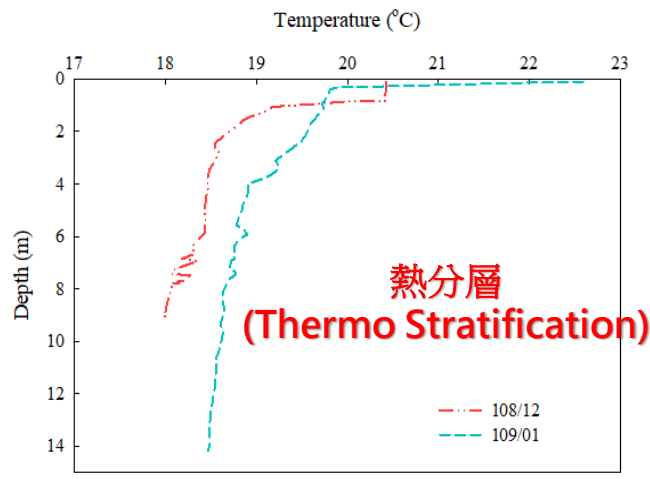
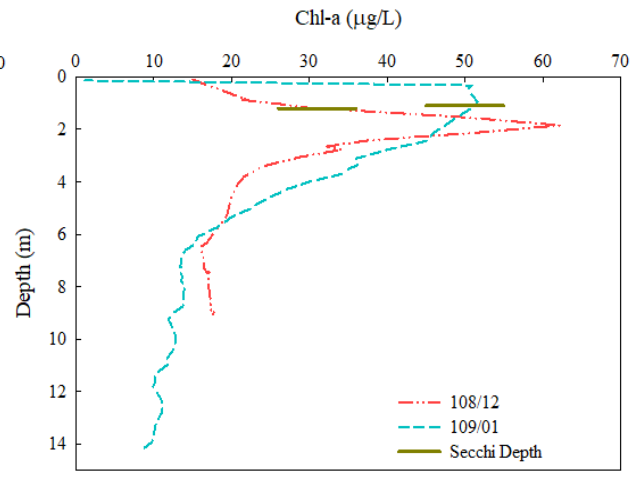
翡翠水庫



石門水庫



明德水庫

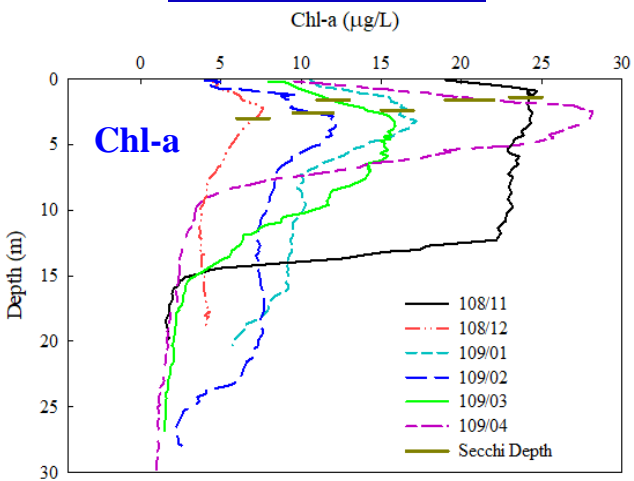


水樣採集時間:108.11~109.4

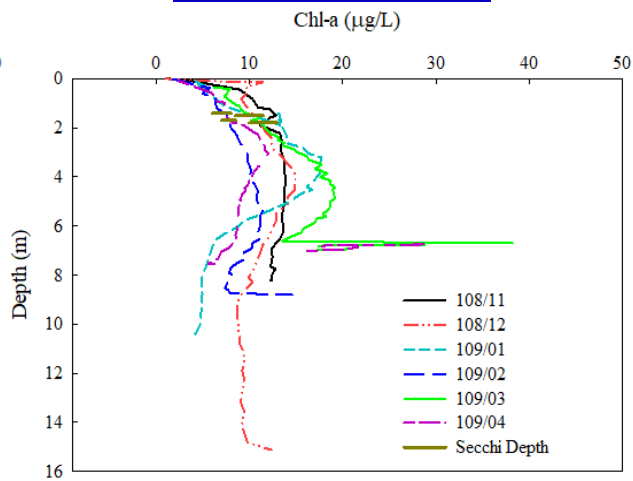
水庫藻類特性現地分析(取水口)

現地螢光分析儀檢測葉綠素a及水溫

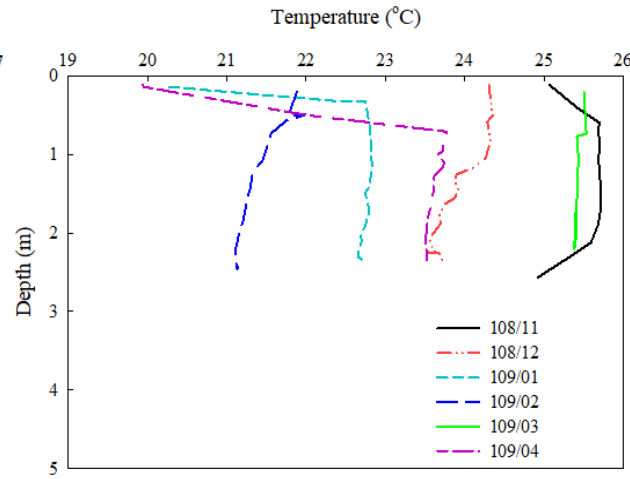
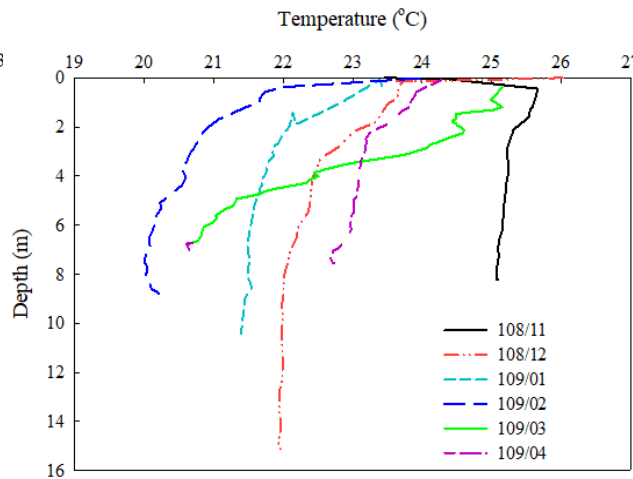
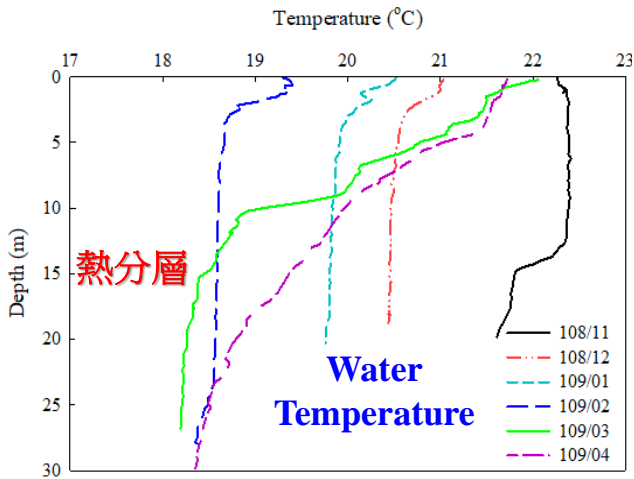
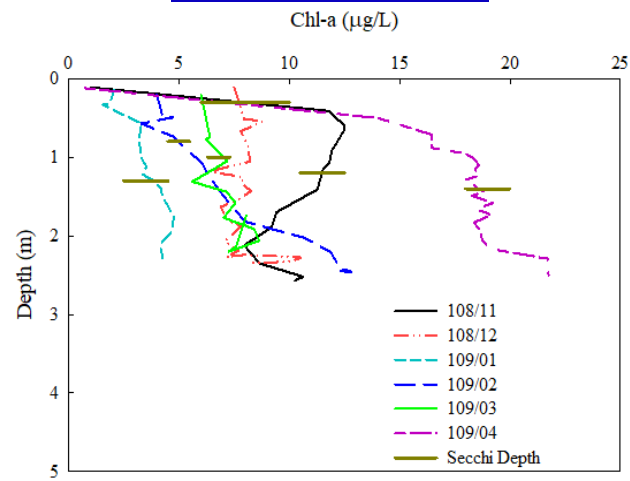
鯉魚潭水庫



仁義潭水庫



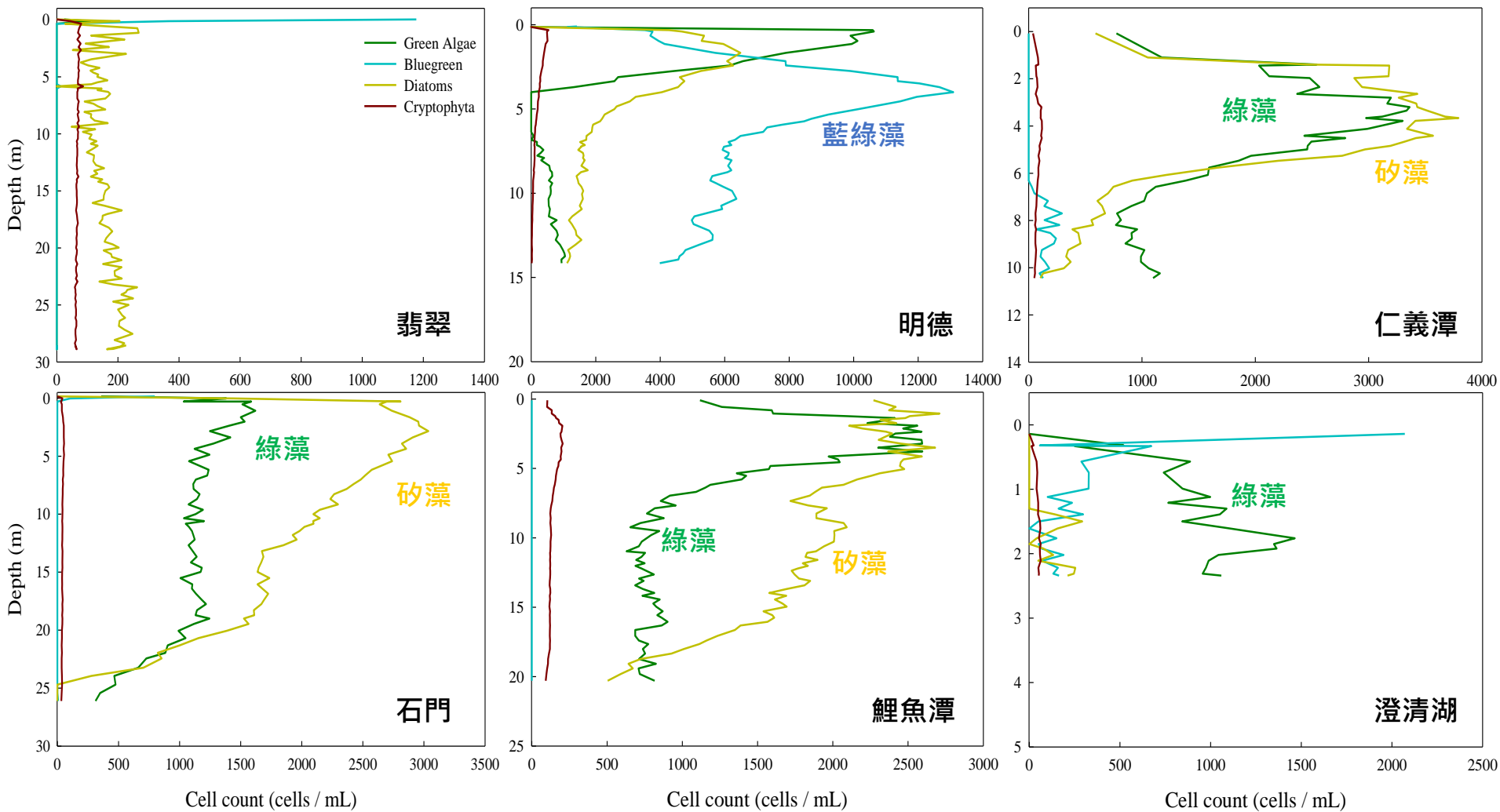
澄清湖水庫



水樣採集時間:108.11~109.4

水庫藻類特性現地分析(取水口)

現地螢光分析儀檢測藻種

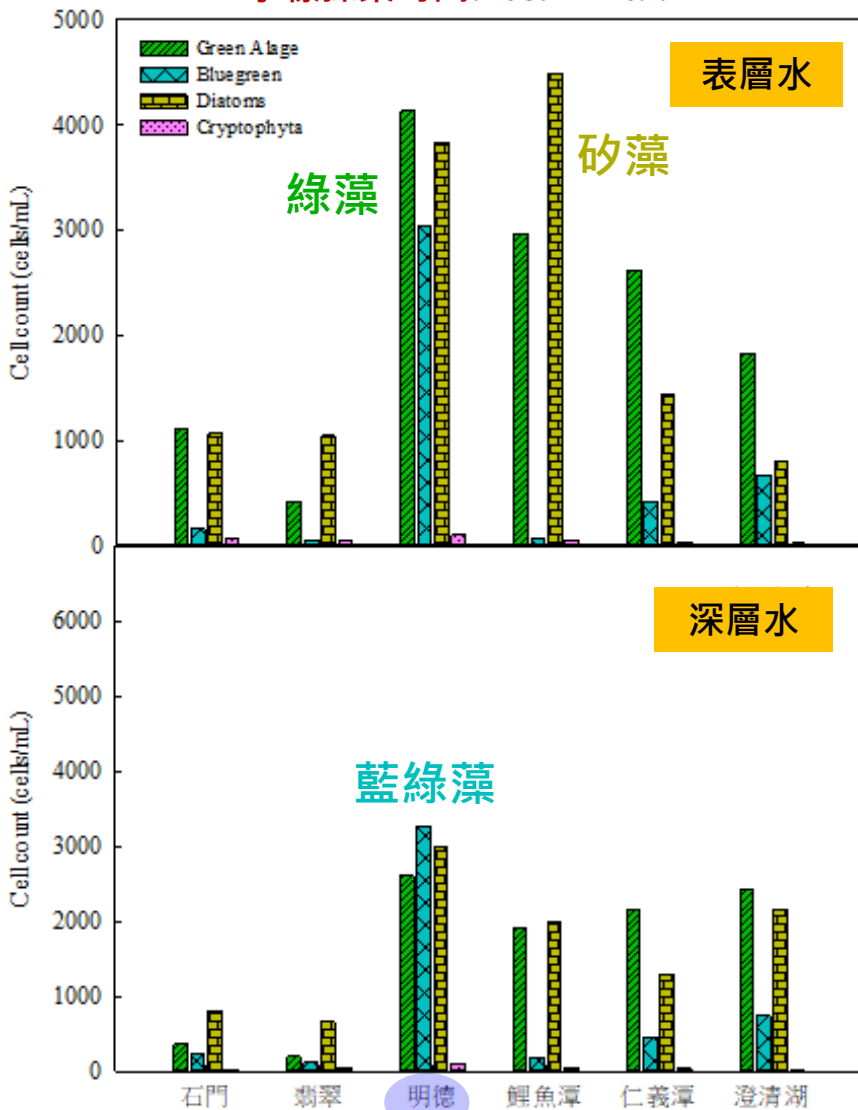


水樣採集時間:109.01

水庫藻類特性現地分析

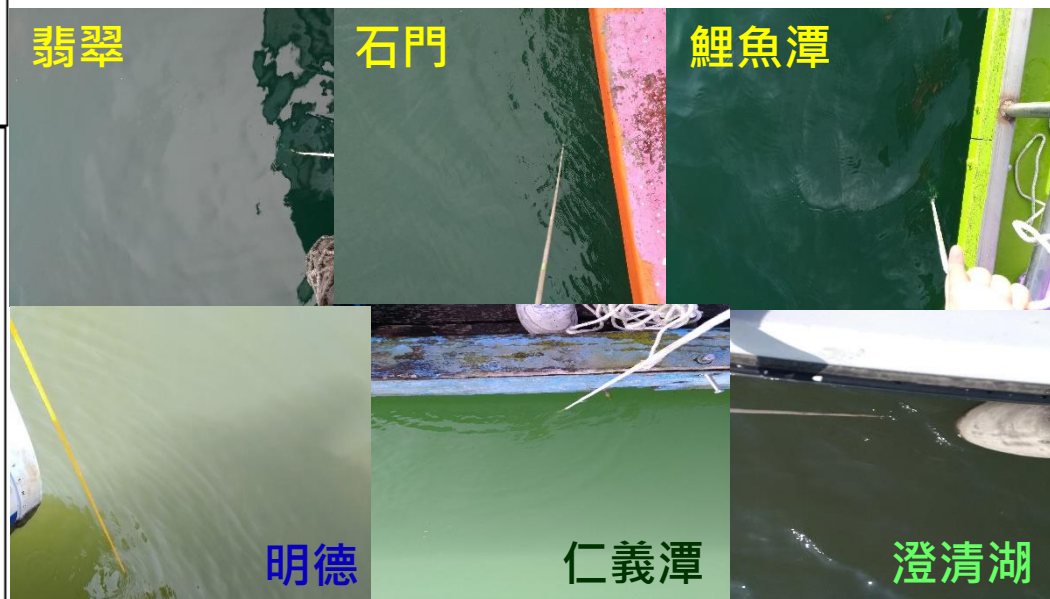
現地螢光分析儀檢測藻種

水樣採集時間:108.11~109.4



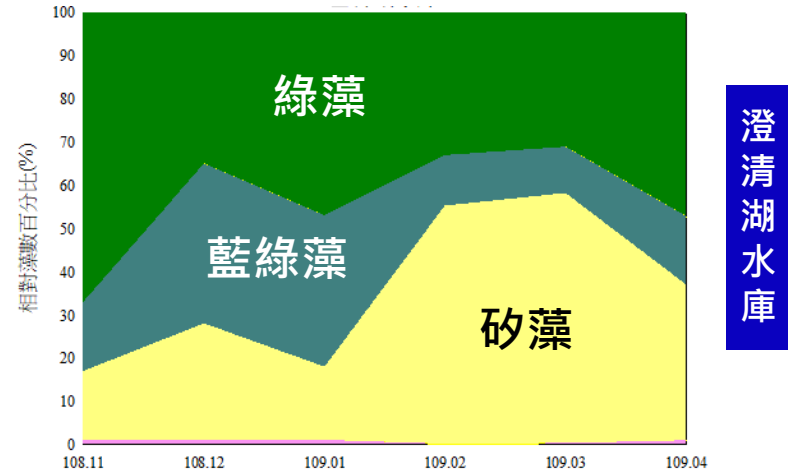
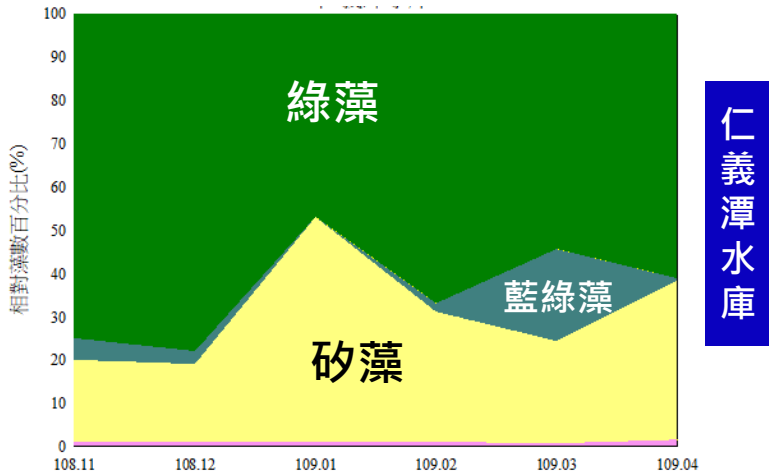
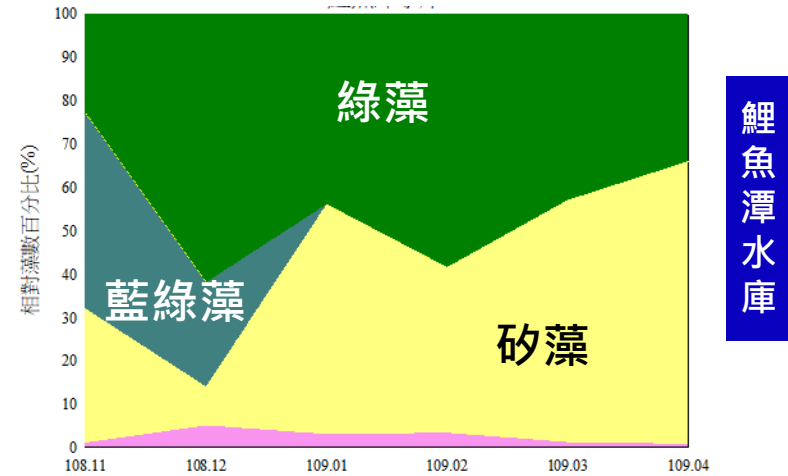
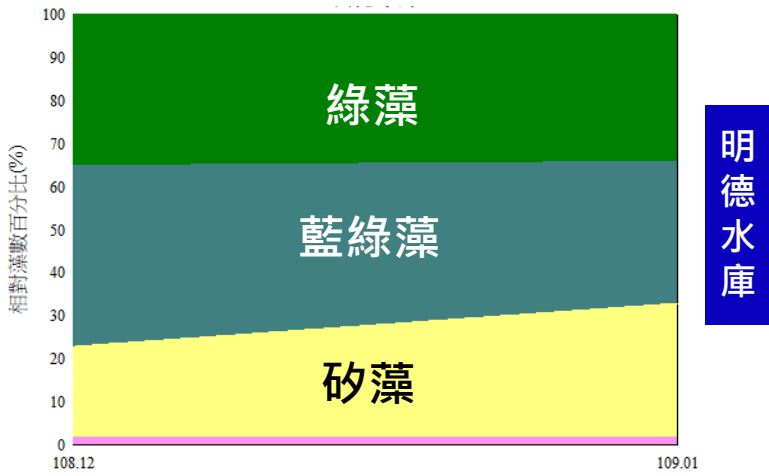
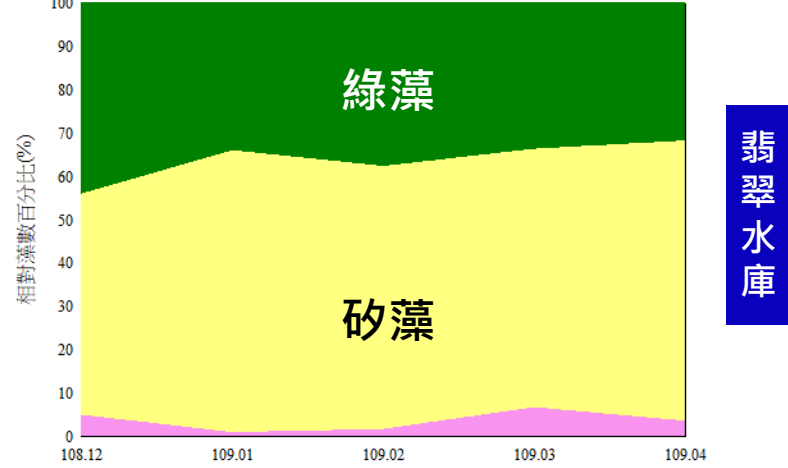
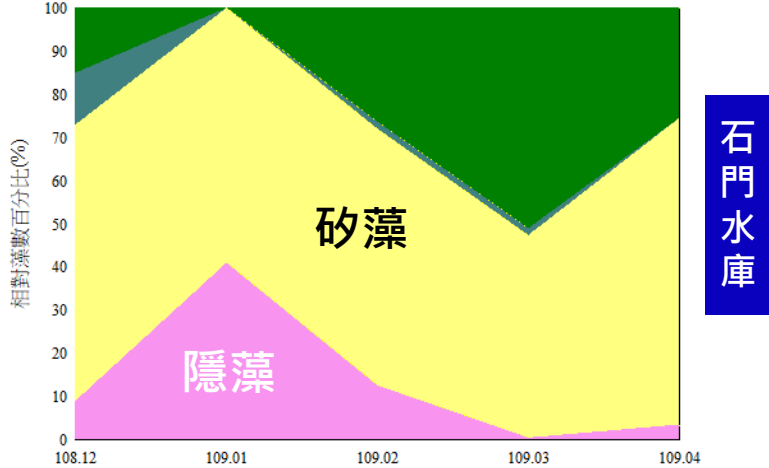
優勢藻種

- 明德水庫: 綠藻及藍綠藻
- 石門、翡翠及鯉魚潭水庫: 矽藻
- 仁義潭及澄清湖水庫: 綠藻
- 表層及深層水優勢藻: 綠藻、矽藻



照片拍攝時間:109年1月

相對藻數百分比



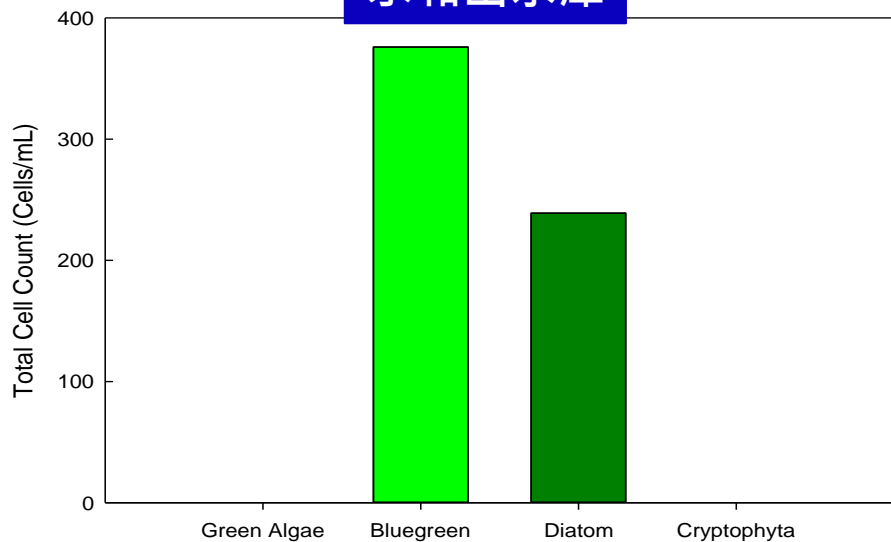
水庫藻類特性現地分析

藻類季節性分析

- 優勢藻種會受到環境因子如日照強度、時間及水溫變化影響，其中受季節變化影響程度較為顯著

| 水庫 | 季節性藻種變化 |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 石門、翡翠 | <ul style="list-style-type: none">● 石門及翡翠水庫優勢藻種矽藻不隨季節變動 |
| 明德 | <ul style="list-style-type: none">● 108年12月明德水庫優勢藻種為藍綠藻● 109年1月轉變成藍綠藻、綠藻和矽藻三種藻數相當接近 |
| 鯉魚潭 | <ul style="list-style-type: none">● 108年11月鯉魚潭水庫優勢藻為藍綠藻● 108年12月至109年3月間轉變成綠藻及矽藻 |
| 仁義潭 | <ul style="list-style-type: none">● 109年1月矽藻同增成為優勢藻● 其他月份優勢藻種主要為綠藻 |
| 澄清湖 | <ul style="list-style-type: none">● 108年11月澄清湖水庫優勢藻明顯為藍綠藻● 108年12月及109年1月間轉變成藍綠藻及綠藻● 109年2月及3月間轉變成矽藻 |

永和山水庫



藍綠藻

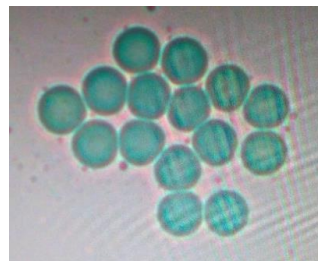
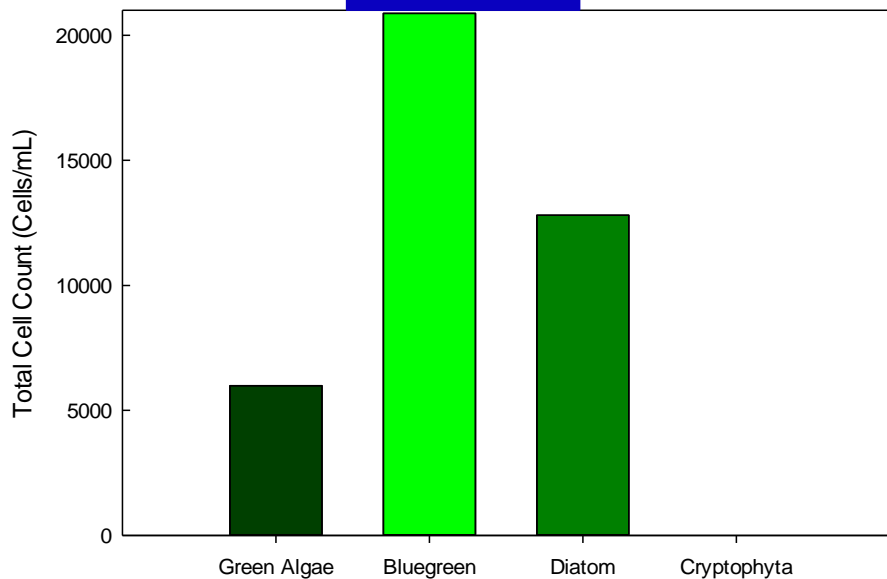


矽藻

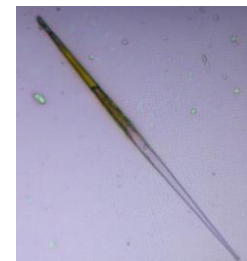


綠藻

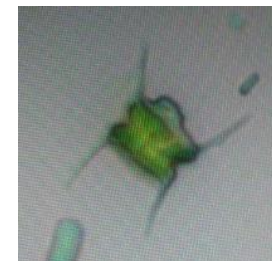
明德水庫



藍綠藻



矽藻



綠藻

水庫水質營養狀態評估

湖庫水質營養化過程

Time



營養化：營養源(N、P)增多導致藻類生長

我國水庫水質營養狀態指標(Trophic State Index)

卡爾森營養狀態指數(CTSI)

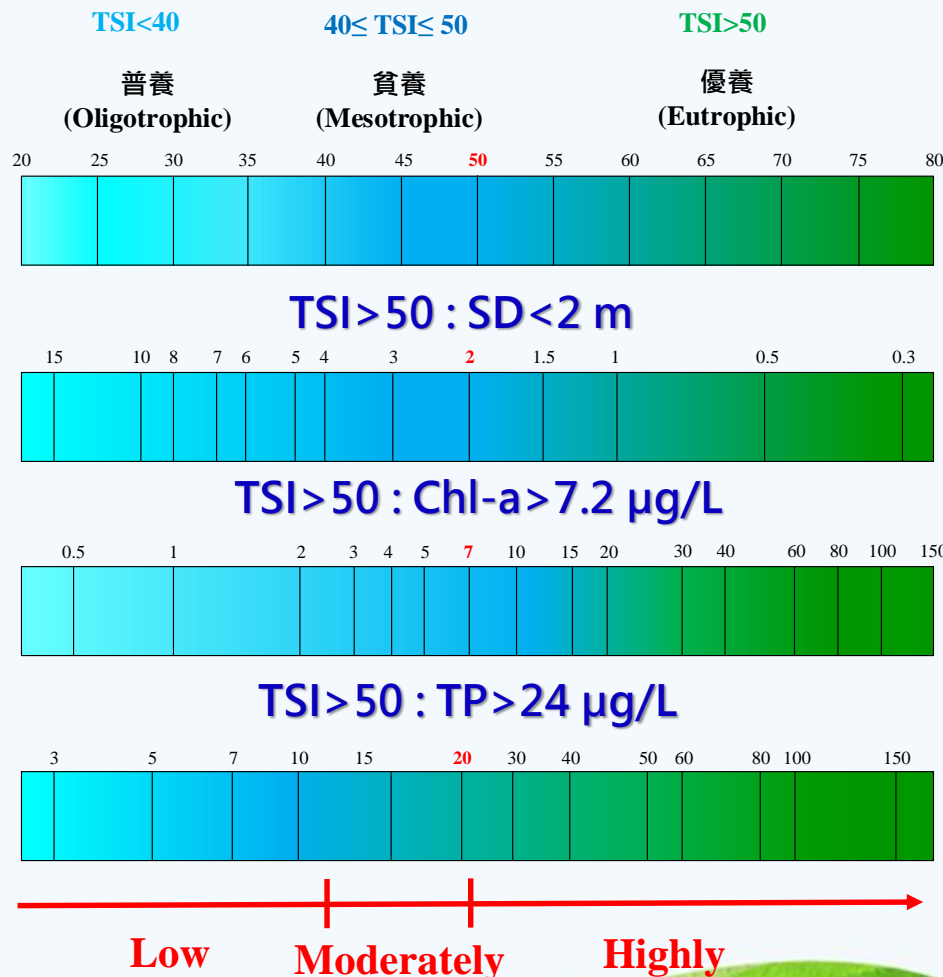
- $TSI(SD) = 10(6 - \ln SD / \ln 2)$
- $\ln Chl-a = 1.449 \ln TP - 2.442$ ($r = 0.846; n = 43$)
- $\ln SD = 3.876 - 0.98 \ln TP$



- $TSI(SD) = 60 - 14.41 \ln(SD)$
- $TSI(Chl-a) = 9.81 \ln(Chl-a) + 30.6$
- $TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15$

$$CTSI = \frac{[TSI(SD) + TSI(Chl-a) + TSI(TP)]}{3}$$

| 水質營養狀態 | 卡爾森指數(CTSI) |
|--------|------------------------|
| 優養 | $50 < CTSI$ |
| 普養 | $40 \leq CTSI \leq 50$ |
| 貧養 | $CTSI < 40$ |



湖泊或水庫生態區生產力

國際慣用之水質優養化指標

OECD判別優養化之標準 (單一參數)

| 水質狀態 | 總磷 (µg/L) | 透明度 (m) | | 葉綠素-a (µg/L) | |
|-----------|-----------|---------|---------|--------------|-------|
| | 平均值 | 平均值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 |
| 超貧養 | < 4 | > 12 | > 6 | < 1.0 | < 2.5 |
| 貧養 | < 10 | > 6 | > 3 | < 2.5 | < 8.0 |
| 貧養 | 10-35 | 6-3 | 3-1.5 | 2.5-8 | 8-25 |
| 優養 | 35-100 | 3-1.5 | 1.5-0.7 | 8-25 | 25-75 |
| 超優養 | > 100 | < 1.5 | < 0.7 | > 25 | > 75 |

資料來源:OECD : Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. (OECD, 1982)

美國環保署判定優養化之標準 (單一參數)

| 水質狀態 | 葉綠素-a (µg/L) |
|-----------|--------------|
| 超優養 | >30 |
| 優養 | 7-30 |
| 普養 | 2-7 |
| 貧養 | ≤2 |

資料來源:National Lakes Assessment (NLA) (USEPA, 2009)

美國：

- 美國環保署NLA報告2007年起對全美49,546座湖泊營養狀態評估採用單一指標**葉綠素a(Chl-a)濃度**作為判定水庫營養狀態之指標

OECD：

- 1982年起經濟合作暨發展組織(OECD)之會員國開始使用**透明度(SD)**、**總磷(TP)**或**葉綠素a(Chl-a)**三項指標其中一項判定湖泊或水庫水體營養狀態

日本：

- 日本獨立行政法人水資源機構(JWA)採用OECD**葉綠素a(Chl-a)**年平均值為**8 µg/L**作為判定水庫水質優養化之最低限值

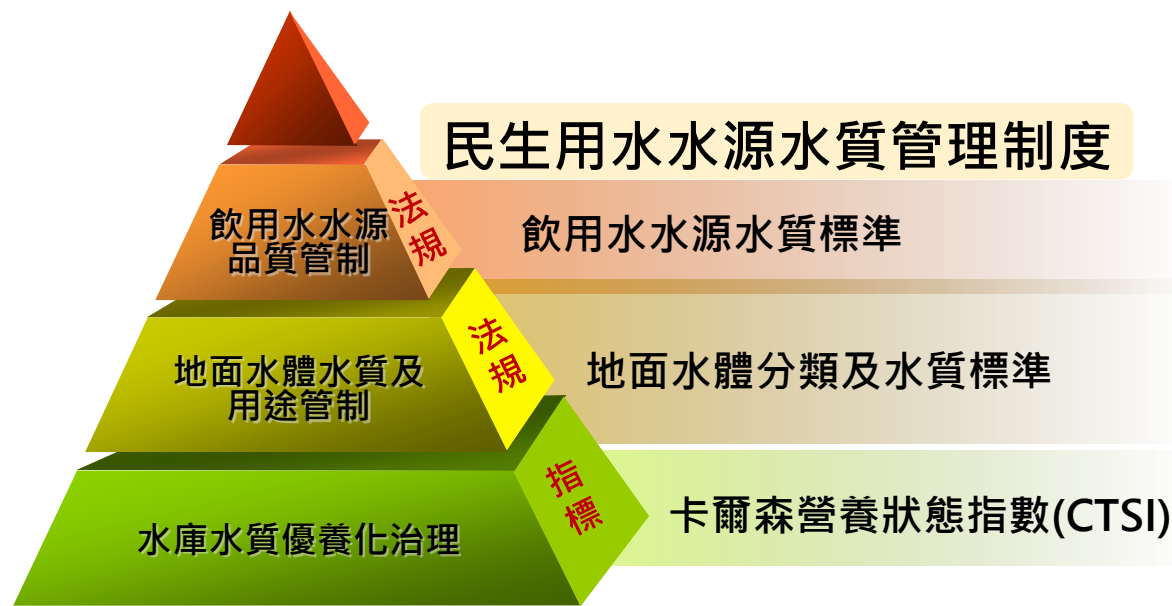


美國環保署(USEPA)、日本水資源機構(JWA)與OECD不使用CTSI評估水庫水質優養化

國際慣用水質營養狀態評估指標特性

| 指標 | 屬性 | 用途 | 管制法規 | 優點 | 缺點 |
|--------------|-----------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 透明度 (SD) | 物理性指標 (結果指標) | 評估水質混濁程度 | 無 | 現地量測透明度數值簡便，適用於濁度低之水庫 | 易受土砂懸浮固體物影響測值，無法精準評估藻類生長程度 |
| 總磷(TP) | 化學性指標 (過程指標) | 評估水質營養潛勢 | <ul style="list-style-type: none"> ● 台灣：地面水體分類及水質標準 ● 日本：水質污濁防止法-琵琶湖富營養化防止條例 ● 美國：Clean Water Act | 可了解藻類生長之限制營養源濃度，適合作為水庫或湖泊水質污染管制指標 | <ul style="list-style-type: none"> ● 水樣數據分析時間久，約需4小時 ● 因藻類生長會攝取水中總磷，現地量測總磷數值與藻類生長程度關聯性偏低，無法精準評估藻類生長程度 |
| 葉綠素a (Chl-a) | 生物性指標 (結果指標) | 評估水質營養狀態 | 無 | 可精準評估水庫或湖泊藻類生長程度 | <ul style="list-style-type: none"> ● 水樣數據分析時間較久，約需2小時 ● 可能會受取樣藻種及藻數差異影響測值 |

我國民生水庫水質管理制度



水質營養狀態指標

總有機碳(TOC)
氨氮(NH₃)
化學需氧量(COD)

總磷(TP)

透明度(SD)
總磷(TP)
葉綠素a(Chl-a)

關鍵問題

法規管制水質標準與指標評估水質營養狀態結果存在差異，符合水質管制標準之水源或水質良好之水源(甲類水體)可能是優養化水源

水質優劣無法與水質營養狀態劃上等號，應取決於水之用途(如飲用水或灌溉用水)

因應對策

水質營養狀態指標應與管制指標脫鉤，重新檢討CTSI之適宜性，確立營養狀態指標於水質管理之角色及功用，健全民生用水水源水質管理制度

CTSI指標適宜性

適用性

| 關聯性分析指標 | 皮爾森相關係數(P) | 關聯性 |
|----------------------|--------------|-----|
| TSI(TP) α TSI(SD) | 0.38±0.18 | 低度 |
| TSI(SD) α TSI(Chl-a) | 0.25±0.18 | 低度 |
| TSI(Chl-a) α TSI(TP) | 0.25±0.18 | 低度 |

- $TSI(SD) = 60 - 14.41 \ln(SD)$
- $TSI(Chl-a) = 9.81 \ln(Chl-a) + 30.6$
- $TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15$

$$CTSI = \frac{[TSI(SD) + TSI(Chl-a) + TSI(TP)]}{3}$$

適用性低

限制性

本島21座民生水庫水質關聯性分析

| 指標 | CTSI | TSI(TP) | TSI(Chl-a) | TSI(SD) |
|-------|------|---------|------------|---------|
| 筆數(-) | 430 | 291 | 341 | 896 |
| 比率(%) | 30.2 | 20.5 | 24 | 63 |

資料來源：環保署監資處97~108年水庫水質監測數據(1421筆)

- 個別水庫水SD、TP及Chl-a三者關聯性低
- SD主要受SS影響而非Chl-a
- CTSI受TSI(SD)影響大

限制性高

指標適宜性
不足

CTSI評估水質營養狀態
之適用性低且限制性高

- CTSI之三項指標相加總平均會讓營養狀態評估失真
- CTSI易受透明度(SD)影響

水質與營養狀態之關聯性分析-21座本島民生水庫

- 國際間對於水庫水質營養狀態指標之訂定主要參考水質指標與水質營養狀態之關聯性，以關聯性高者作為代表性指標，如**透明度(SD)**、**葉綠素a (Chl-a)**、**總磷(TP)**、**化學需氧量(COD)**或**溶氧(DO)**等水質指標
- 國內本島21座民生水庫TP、COD、NH₃-N、SD、DO與Chl-a之關聯性低
- **葉綠素a**主要是作為評估水質營養狀態現況之指標，因為藻類行光合作用生長越繁盛，水中葉綠素a濃度越高，營養化程度越高

皮爾森相關性迴歸分析

| | |
|-------------------|------|
| $ P < 0.4$ | 低度相關 |
| $0.4 < P < 0.7$ | 中度相關 |
| $ P > 0.7$ | 高度相關 |

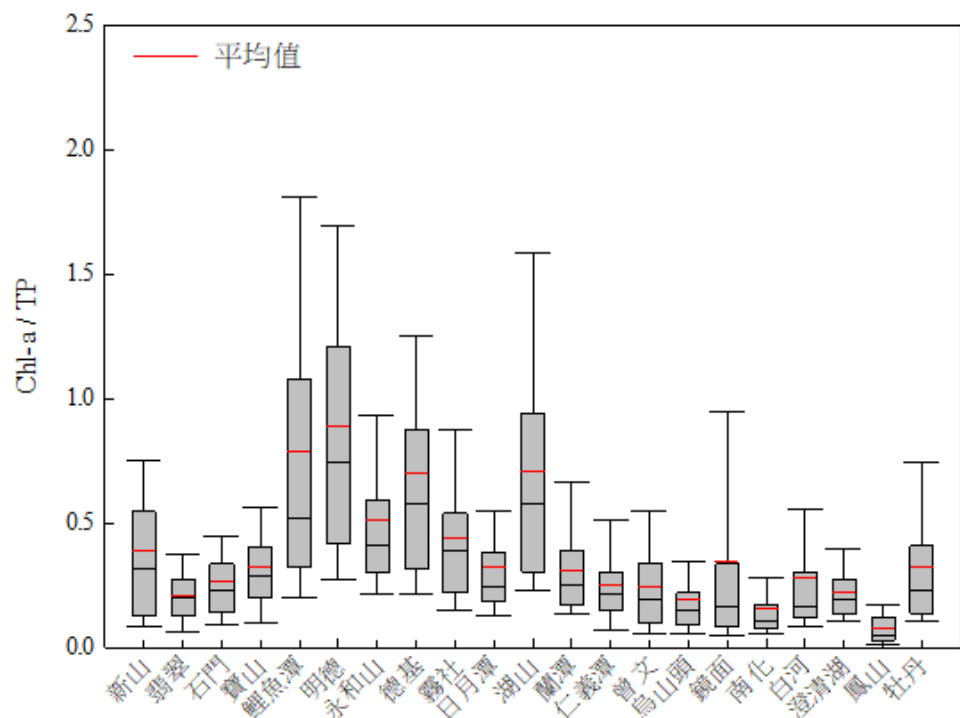
| 關聯性分析指標 | 皮爾森相關係數(P) | 關聯性 |
|-----------------------------------|-----------------|-----|
| TP α Chl-a | 0.26 \pm 0.19 | 低度 |
| COD α Chl-a | 0.38 \pm 0.2 | 低度 |
| NH ₃ -N α Chl-a | 0.12 \pm 0.11 | 低度 |
| SD α Chl-a | 0.27 \pm 0.13 | 低度 |
| DO α Chl-a | 0.28 \pm 0.2 | 低度 |

資料來源:環保署監資處(97年至108年共1421筆)

水質與營養狀態之關聯性分析-21座本島民生水庫(四季)

| 水質參數/季節 | 與葉綠素a關聯之皮爾森相關係數(P) | | | |
|-------------------|----------------------|----------|----------|----------|
| | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
| SD | 0.3±0.2 | 0.36±0.2 | 0.34±0.2 | 0.27±0.1 |
| TP | 0.22±0.2 | 0.24±0.2 | 0.34±0.3 | 0.31±0.2 |
| SS | 0.33±0.2 | 0.44±0.2 | 0.37±0.2 | 0.24±0.2 |
| Turbidity | 0.35±0.2 | 0.48±0.3 | 0.34±0.2 | 0.19±0.1 |
| Phosphate | 0.25±0.2 | 0.33±0.2 | 0.18±0.1 | 0.27±0.1 |
| Water Temperature | 0.23±0.2 | 0.25±0.2 | 0.24±0.1 | 0.23±0.2 |
| pH | 0.28±0.2 | 0.31±0.2 | 0.33±0.2 | 0.26±0.2 |
| Nitrate | 0.27±0.2 | 0.32±0.2 | 0.21±0.1 | 0.24±0.1 |
| Nitrite | 0.25±0.2 | 0.24±0.2 | 0.2±0.1 | 0.23±0.2 |
| COD | 0.32±0.2 | 0.44±0.3 | 0.39±0.3 | 0.34±0.2 |
| Ammonia | 0.29±0.2 | 0.26±0.2 | 0.21±0.2 | 0.29±0.2 |
| DOS | 0.39±0.2 | 0.34±0.2 | 0.33±0.2 | 0.21±0.2 |

水質與營養狀態之關聯性分析-21座本島民生水庫



國內民生水庫藻類生長之總磷利用率

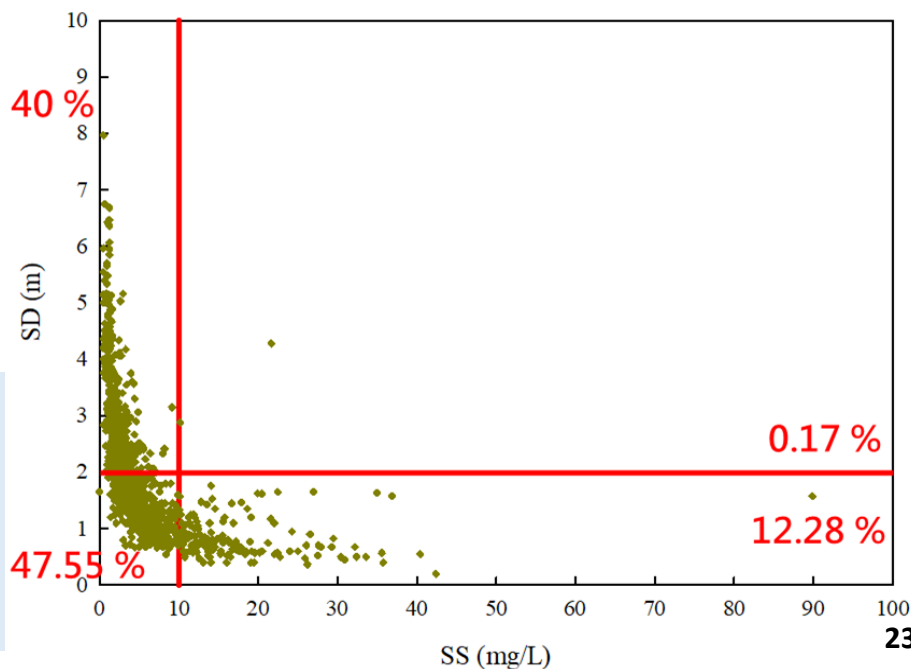


個別水庫水質、藻種、日照條件及水深差異性大，可能導致藻類攝取水中營養源之利用效率高低不同，致使營養源指標(TP、NH₃-N)與葉綠素a間之關聯性低

國內水庫水透明度容易受水中無機性SS(如土砂)影響，故個別水庫水透明度與水質營養狀態無直接關聯

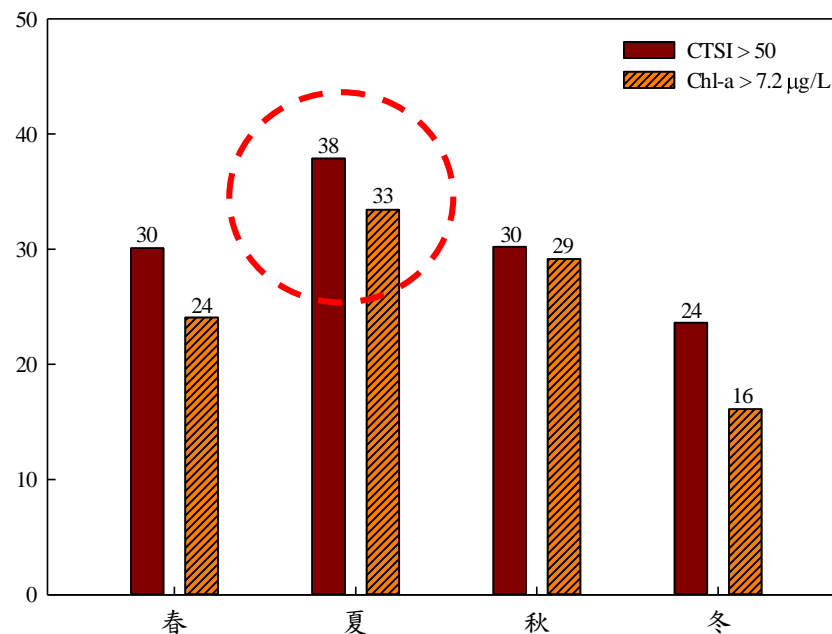
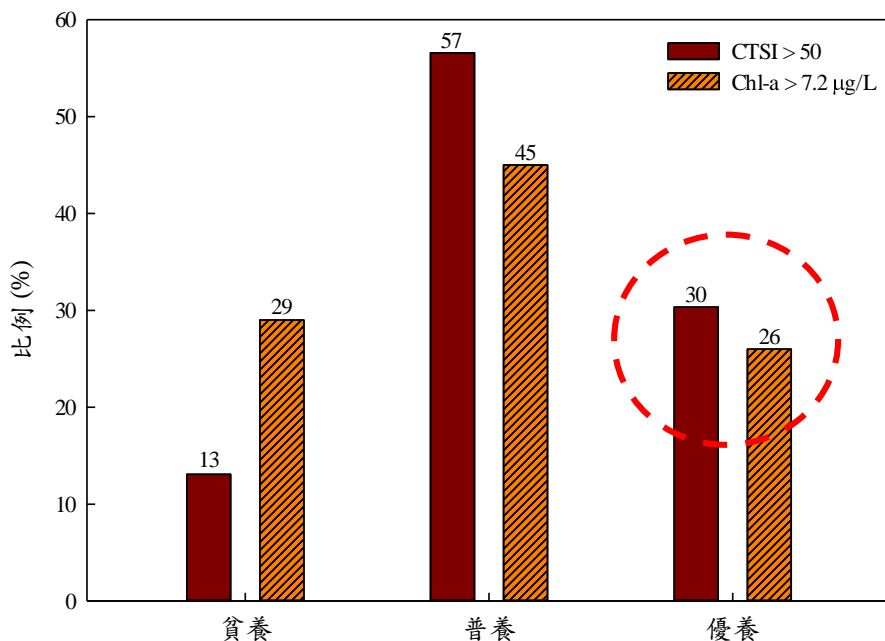


懸浮固體物(SS)濃度與透明度(SD)之關係



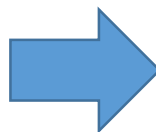
營養狀態指標選用-各級營養狀態比例

| 季節 | 21座水庫 | 20座 (不含鳳山水庫) |
|-----|--------------|--------------|
| | Chl-a (µg/L) | |
| 春 | 7.97 | 5.18 |
| 夏 | 9.66 | 7.56 |
| 秋 | 8.96 | 7.22 |
| 冬 | 5.31 | 4.23 |
| 總平均 | 7.96 | 6.04 |

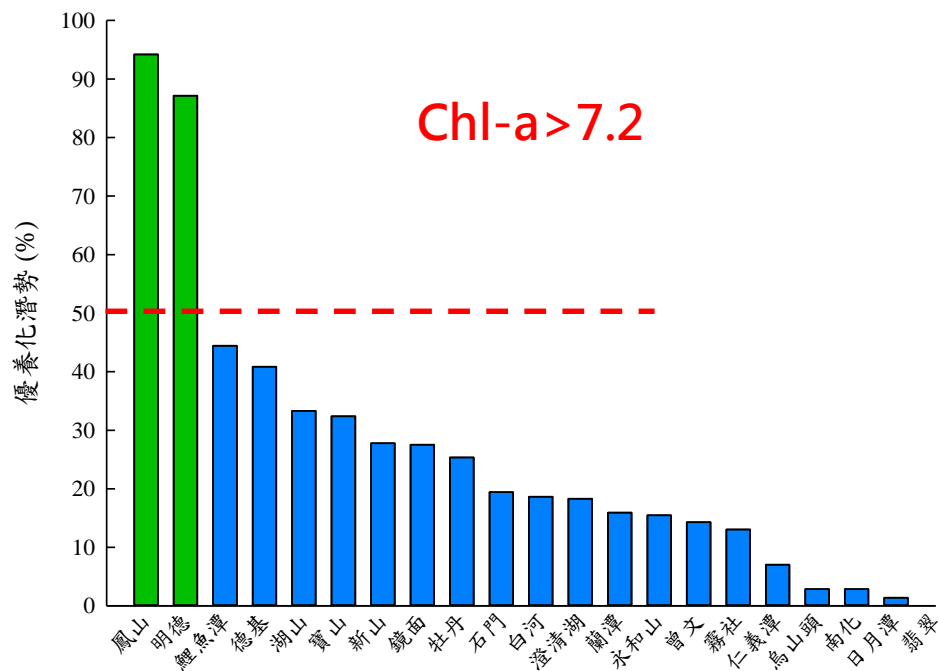
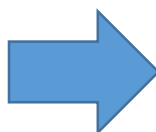
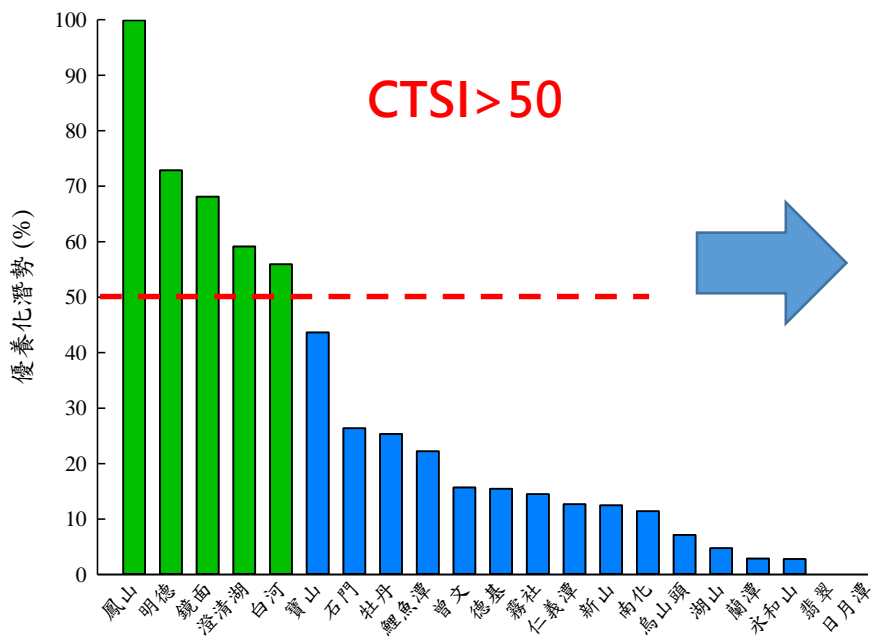


營養狀態指標選用-21座水庫優養化潛勢

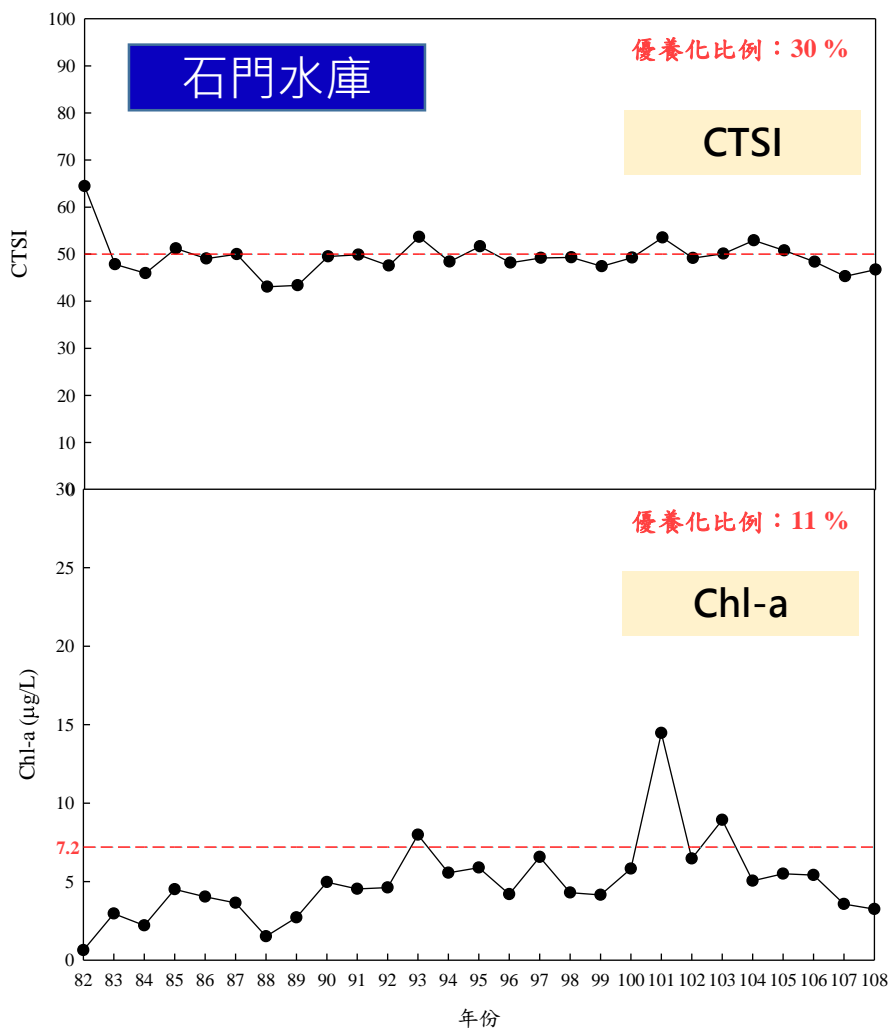
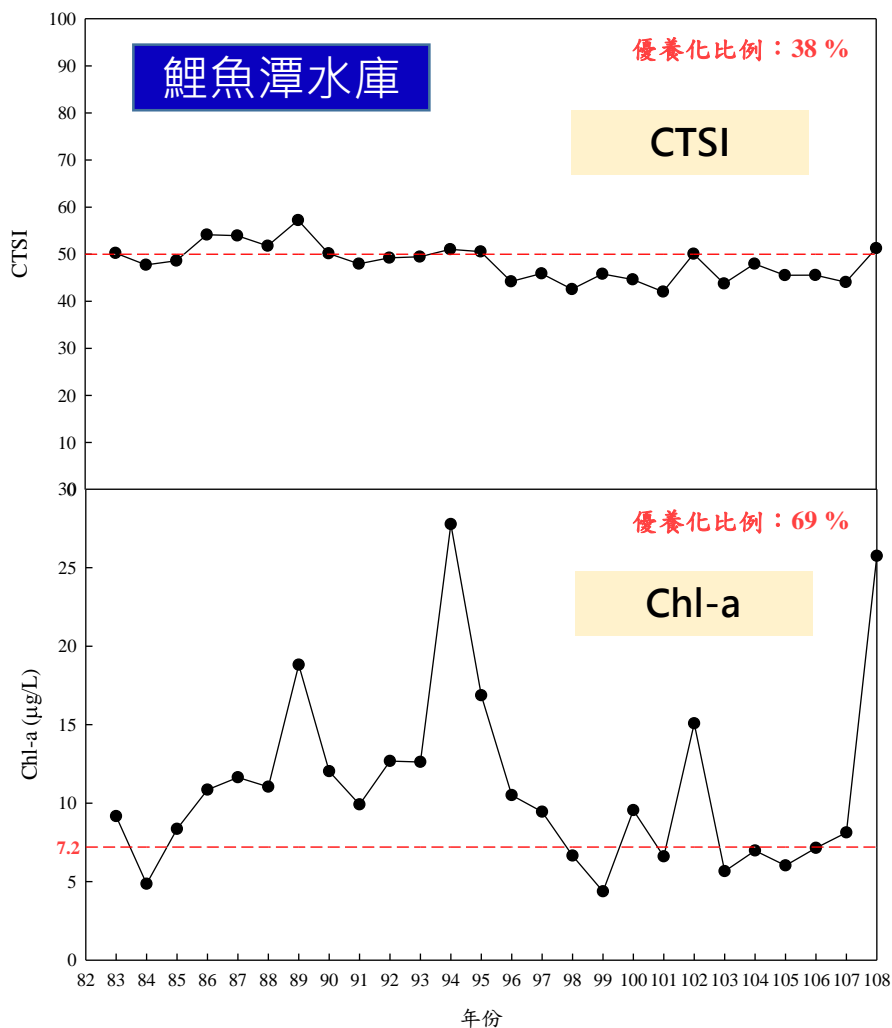
| 優養化潛勢 >50%排序 | 水庫/類型 |
|-----------------|--------|
| 1 | 鳳山/離槽 |
| 2 | 明德/在槽 |
| 3 | 鏡面/在槽 |
| 4 | 澄清湖/離槽 |
| 5 | 白河/在槽 |



| 優養化潛勢 >50%排序 | 水庫/類型 |
|-----------------|-------|
| 1 | 鳳山/離槽 |
| 2 | 明德/在槽 |



營養狀態指標選用-優養化水庫評估



結論

- 我國重要民生水庫(翡翠、石門、寶山、鯉魚潭)主要優勢藻種為矽藻(Diatoms)及綠藻(Green Algae)，藍綠藻(Blue-green Algae)並非民生水庫常見藻類
- 水庫藻類現地監測技術發展已趨於成熟，主要採用螢光(Fluorescence)光譜技術偵測葉綠素a、藻種及藻數，雖然實際水庫水樣藻種藻數計量與鏡檢法存在顯著差異，但仍可利用藻種相對百分比計算，即時掌握水庫藻類生長狀況，以作為水庫管理單位監測水質優養化現象發生之預警工具，提升水庫水質管理效率及成效
- 我國本島21座民生水庫SS會嚴重干擾透明度(SD)，且藻類生長階段葉綠素a與透明度、總磷測值均無顯著關聯，使用卡爾森營養狀態指數(CTSI)無法精準評估水質營養程度(或優養化)，故CTSI應用於我國民生水庫之適宜性低
- 國際間主要採用單一葉綠素a指標評估民生水庫水質營養狀態，其結果作為水質治理施政參考之用，以及確立葉綠素a為水質預警指標之角色，建立水質預警機制，發揮指標預警功用