

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 生物（生命科學）科

040713

藻就知道—水體電擊與藻類移動關係之探討

學校名稱：臺北市立中正高級中學

作者： 高二 陳宥謙 高二 張惟淳 高二 游楚鈞	指導老師： 呂瑞智
---	------------------

關鍵詞：細胞膜電位、藻華、水體電擊

摘 要

我們在生物專題課，進行水生生物觀察，通入電流後，發現在電擊板上有稠狀物，置於顯微鏡下觀察，主要是由微囊藻所組成。銅綠微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 及綠球藻 (*Chlorella vulgaris-KP*) 為台灣淡水水域常見的藻體，一般水質淨化的方式是以加入氯離子殺菌、活性碳吸附及臭氧降解法，存在許多風險與無法解決的問題。因此，我們希望藉由物理方法吸附水中過度增質的藻體。本實驗利用細胞膜上電位差的原理，以自行設計製作電擊裝置，對少量的藻體進行電擊，發現它們明顯吸附於電擊板正極處。進一步製作淡水養殖模型，取樣校園嚴重優養化的水體，持續五天電擊，卡爾森優養化指數 (CTIS) 由 99.8 降至 47.0，水體的總磷量降低、葉綠素 *a* 含量下降、透明度上升，證明水體電擊能有效淨化水質並降低優養化。

關鍵詞：細胞膜電位(membrane potential)、藻華、水體電擊

壹、 研究動機

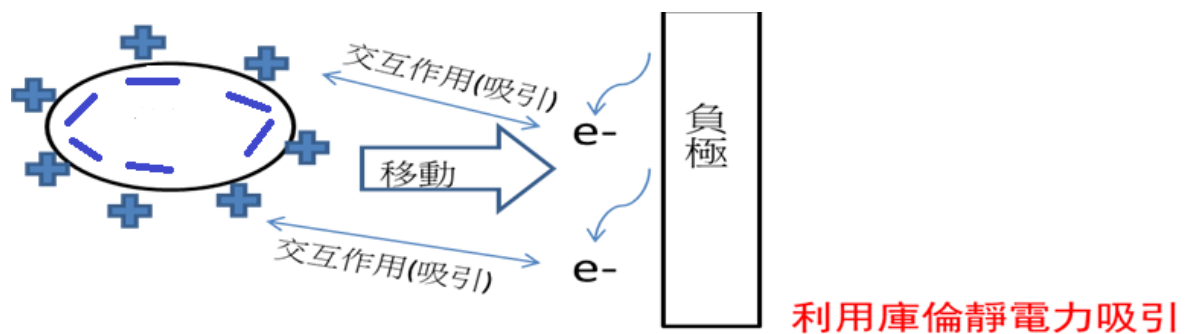
我們在校園附近水域採樣進行藻類等水生生物觀察實驗，本想觀察電擊下的草履蟲移動情形，於是在水體中放入電擊板並通入4.5 V電流 (1.5 V * 3顆電池)，意外觀察到在電擊棒上有白色稠狀聚集物產生。將白色稠狀聚集物放在顯微鏡下觀察，發現大部分是由微囊藻堆積而形成的。我們推測：微囊藻趨附在電擊板上，可能與細胞膜電位有著密切的關係。因此希望經由電擊的方式，吸附水體中過多的藻體，以達到淨化水質，降低優養化的目的。

高中生物課程提到，當細胞在靜止狀態，細胞膜內側帶負電，外側帶正電，稱為極化現象 (圖一，自繪)。當外界給予細胞的電壓超過了細胞膜所能承受的閾值 (threshold) 時，將產生電位反轉，則正電荷位於內側，負電荷位於外側，這種狀態稱為去極化現象 (圖二，自繪)。

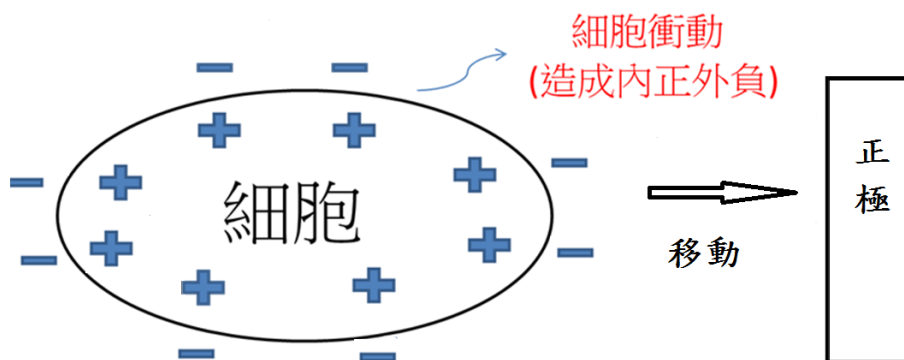
國內學者的研究結果顯示，台灣島內的水域廣泛存在著微囊藻，其中銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 常見於台灣各水域，包括淡水、半淡鹹水養殖池及水庫等，且具有釋放微囊藻毒 (microcystins) 的能力，造成養殖池生物的死亡及污染水庫，造成飲用水的安全問題 (潘, 2009)。而綠球藻 (*C. vulgaris*-KP)，一般產於淡水，常在有機質較豐富的水體中，為台灣開放水域常見的藻類 (沈, 2009)。加上細胞生長週期短，繁殖速度快，容易成為優勢種的來源，進而加速水質優養化。

現今一般水域是以加入氯離子殺菌法或以活性碳吸附法、臭氧降解法，使水域達到淨化的效果。但其中仍存在許多風險與無法解決的問題，例如：氯離子殺菌法可能產生致癌物——氯仿 (黃, 2010)；活性碳往往有效果不彰的問題；水中含有難分解或高濃度的有機污染物，以目前水廠的臭氧施加劑量及接觸反應時間，可能尚無法將此類有機物完全分解破壞。

本實驗是利用細胞膜上電位差的原理，在水體內通入微電流，使藻體的細胞膜電位翻轉為內側帶正電，外側帶負電，而被電擊裝置所捕獲。



圖一：細胞極化現象，電荷分佈圖 (自繪)



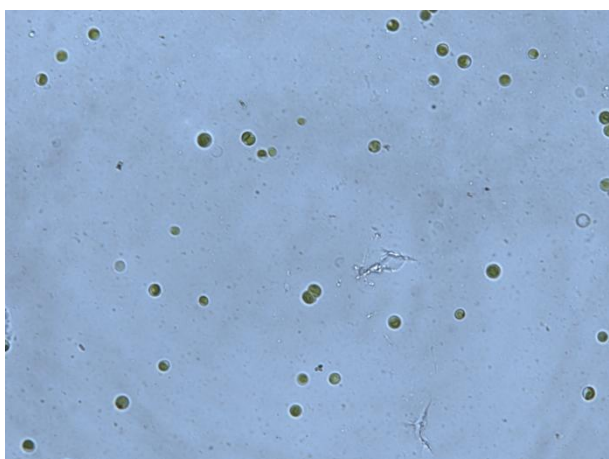
圖二：細胞去極化現象，電荷分佈圖 (自繪)

(一)藻華的相關學理如下：

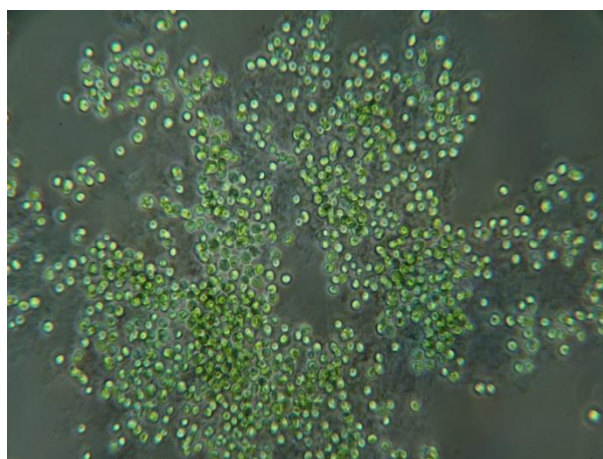
淡水中的“藻華”與海洋中的“赤潮”並稱為水環境污染的兩大災害。“藻華”是因為大量營養鹽，導致內陸水域中一些浮游生物的大量繁殖引起之水體優養化的問題。(潘, 2009)。

銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 為原核生物，藍綠菌的一種，它的細胞通常呈圓形或橢圓形，內含有氣囊 (gas vesicle)，因此能漂浮在水面，藉此得以在水體中進行升降 (Robarts and Zohary, 1987)，以利於競爭陽光。藻體外有一層薄黏液 (mucilage) 或透明膠質外鞘，在自然情況下，藉由不定型的黏液保護外鞘聚集在一起 (圖三-A，自攝)。

綠球藻 (*C. vulgaris- KP*) 為原生生物，是一種單細胞綠藻，以單生或聚集成群的方式生長 (圖三-B，自攝)，一般產於淡水，常在有機質較豐富的水體中，為台灣開放水域常見的藻類 (沈, 2009)。加上細胞生長週期短，繁殖速度快，容易成為優勢種，加速水質優養化。



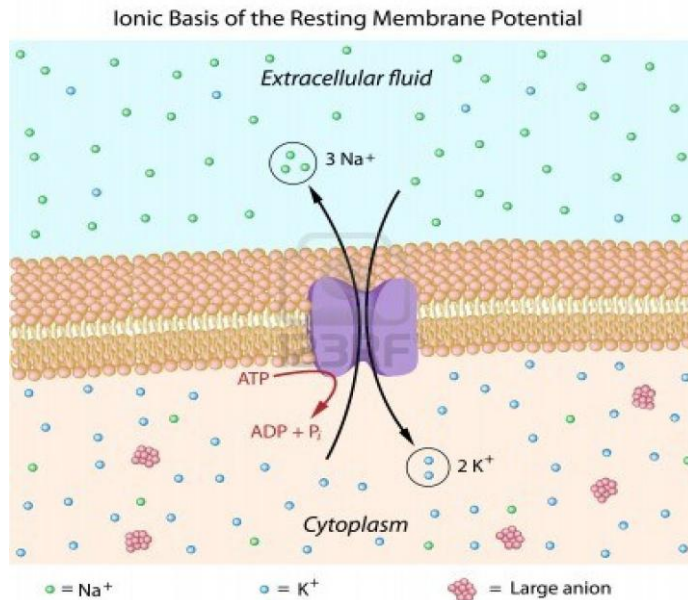
圖三-A (自攝)：銅綠微囊藻顯微攝影 (*400)



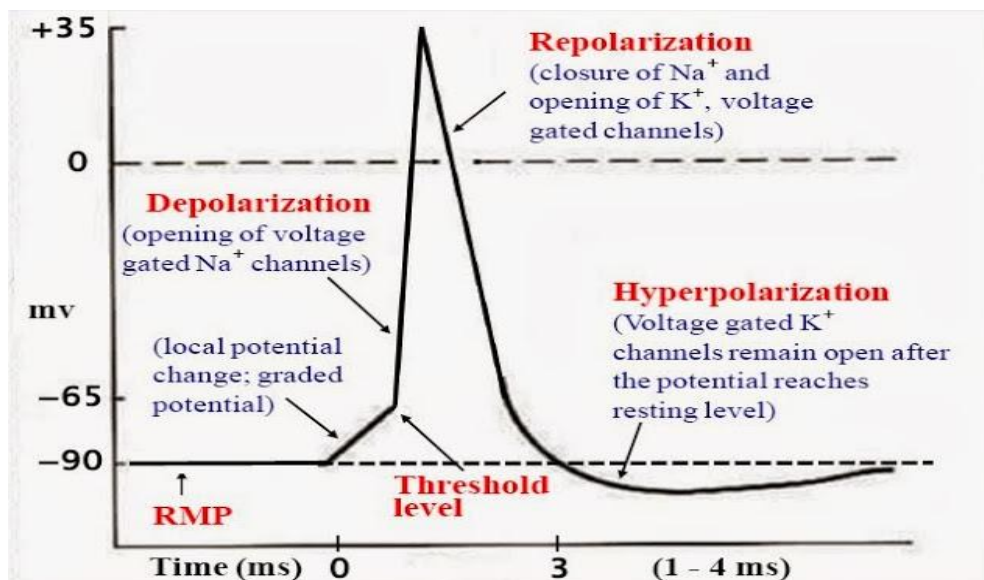
圖三-B (自攝)：綠球藻顯微攝影 (*400)

(二)細胞膜電位變化的學理：

細胞膜存在著特殊的鈉-鉀離子幫浦($\text{Na}^+/\text{K}^+\text{-ATPase}$) (圖四), 造成細胞內外的電荷數有所差異。當細胞在安靜狀態, 呈現的是正電荷位於膜外側, 負電荷位於內側, 這種狀態稱為極化 (polarization); 當外界給予細胞的電壓超過了細胞膜所能承受的閾值 (threshold) 時, 細胞膜將產生去極化 (depolarization), 有部分膜上區域呈現電位反轉現象。隨著去極化現象變得更加明顯, 會造成全區細胞膜電位反轉, 是一種負電荷位於膜外側, 正電荷位於膜內側的活動電位 (action potential), 而這種狀態稱為逆極化 (overshoot) (圖五)。



圖四：細胞膜電位與鈉-鉀幫浦(University of Miami, Membrane potential, 2012)



圖五：細胞的極化(polarization)、去極化(depolarization)與逆極化(overshoot) (University of Miami, Membrane potential, 2012)

因此，本次實驗我們先選用銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 及綠球藻 (*C. vulgaris-KP*) 為實驗對象進行小型電擊實驗，試試看電擊對於藻體吸附的效果。由於效果顯著，我們進一步設計淡水養殖水域模型，取樣校園中嚴重優養化的水體，進行電擊以附吸水中過多的藻體，希望能達到淨化水質的目的。

貳、 研究目的

- 一、 小型水體電擊實驗對於銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 及綠球藻 (*C. vulgaris-KP*) 藻體趨性的探討。
- 二、 水體電擊應用在自行設計製作的小型淡水養殖模型中，加入水體電擊實驗裝置，以吸附水中的藻體。並藉由水質監測指標探討水體電擊對水質淨化及降低優養化的影響。

本實驗是利用細胞膜上電位差的原理，通入微電流，使水域中過度增質或會釋放毒素的微囊藻等藻體聚集在電擊實驗裝置旁。期望藉由電擊器附吸水中過多的藻體，達到淨化水質的目的。

參、 研究設備及器材

- 一、 儀器：
 - (一) 分光光度計
 - (二) 電子天平
 - (三) 水浴槽
 - (四) 離心機
 - (五) 加熱裝置
 - (六) 過濾裝置
 - (七) 真空抽氣裝置或抽濾器材
 - (八) 濾紙
 - (九) 定量瓶
 - (十) 微量吸管
 - (十一) 測光管：光徑長 1.0 cm
 - (十二) 採樣瓶或量筒
 - (十三) 直徑兩公分之砂奇盤
 - (十四) 保麗龍魚箱

二、 藥品：

(一) 葉綠素 *a* 含量測試液配方:

1. 乙醇 95%
2. 1 M HCl

(二) 無機磷含量測試液配方：

1. 酚酞指示劑
2. 硫酸溶液，11 N，5 N，1 N
3. 過硫酸銨
4. 氫氧化鈉溶液，1 N
5. 酒石酸銻鉀溶液：在 500 mL 量瓶內，溶解 1.37 g 酒石酸銻鉀於 400 mL 水。
6. 鉬酸銨溶液：溶解 20 g 鉬酸銨於水中，再定量至 500 mL。
7. 維生素 C 溶液，0.1 M，使用當天配製。
8. 混合試劑：混合 50 mL 5 N 硫酸溶液，5 mL 酒石酸銻鉀溶液，15 mL 鉬酸銨溶液及 30 mL 維生素 C 溶液使成 100 mL 混合試劑。

三、 浮游生物：

(一)

1. 銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*): 藻體原液 (由中央研究院 吳俊宗教授實驗室提供)
原核生物界 (Bacteria)
真細菌 (Eubacteria)
藍菌門 (Cyanobacteria)
藍菌綱 (Cyanophyceae)
色球藻目 (Chroococcales)
微囊藻科 (Microcystaceae)
微囊藻屬 (Microcystis)
銅綠微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)
2. 綠球藻 (*C. vulgaris*-KP): 藻體原液 (由中央研究院 吳俊宗教授實驗室提供)
原生生物界 (protist)
綠藻門 (Chlorophyta)
綠球藻綱 (Chlorophyceae)
綠球藻目 (Chlorococcales)
綠球藻科 (Chlorellaceae)
綠球藻屬 (Chlorella)
綠球藻 (*Chlorella vulgaris*)

(二) 校園生態池水體

四、銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 與綠球藻 (*C. vulgaris*-*KP*) 皆使用 BG11 培養基：

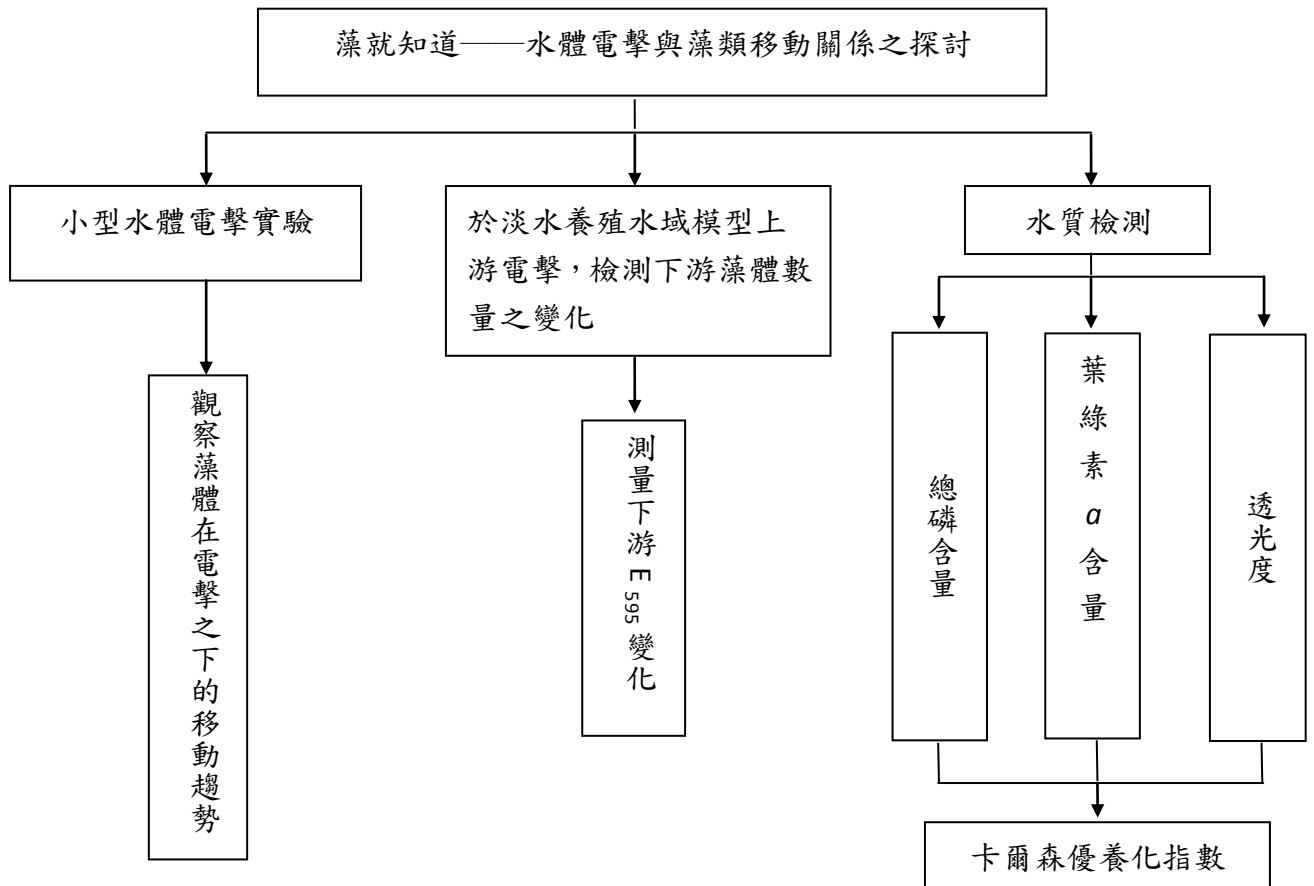
表一：BG11 medium 配方

NaNO ₃	1.5 g	
K ₂ HPO ₃	0.04 g	
MgSO ₄ * 7H ₂ O	0.075 g	
CaCl ₂ * 2H ₂ O	0.036 g	
檸檬酸	6.0 mg	
檸檬酸鐵胺	6.0 mg	
EDTA	1.0 mg	
Na ₂ CO ₃	0.02 mg	
H ₂ O(dist)	1.0 L	
微量元素	H ₃ BO ₃	2.86 g
	MnCl ₂ * 4H ₂ O	1.81 g
	ZnSO ₄ * 7H ₂ O	0.22 g
	Na ₂ MoO ₄ * 2H ₂ O	0.39 g
	CuSO ₄ * 5H ₂ O	0.08 g
	Co(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	49.4 mg
	H ₂ O(dist)	1.0 L

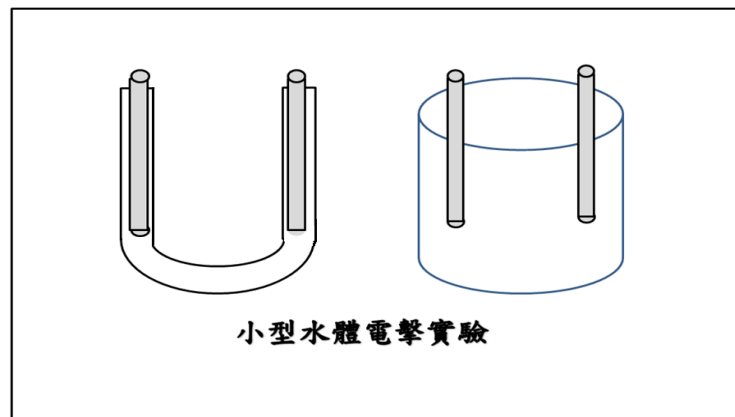


圖六：自行培養之銅綠微囊藻體(*M. aeruginosa*)

肆、研究過程或方法



一、小型水體電擊實驗對於銅綠微囊藻 (*M.aeruginosa*) 及綠球藻 (*C. vulgaris- KP*) 藻體趨性的探討



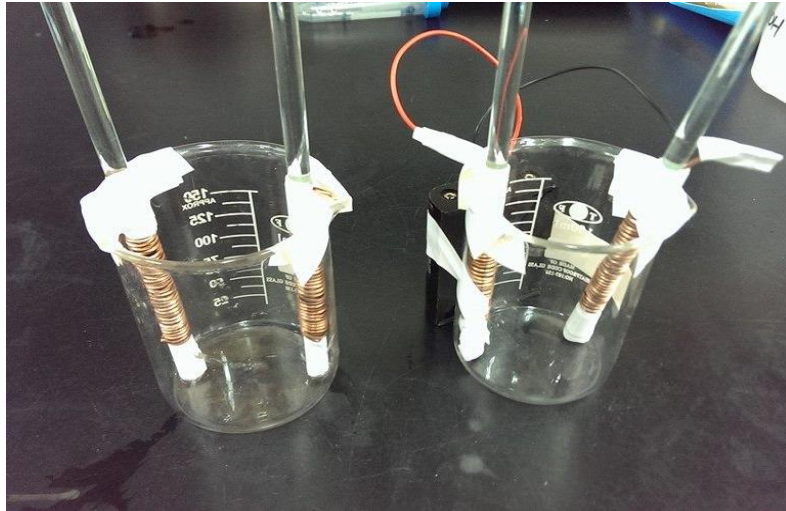
圖七：小型水體電擊實驗

- (一)取 10 mL 之銅綠微囊藻藻體加入培養基 BG11 100 mL 中，置於 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的培養箱中 (圖六)。
- (二)15 mL 小型銅綠微囊藻水體電擊實驗(U 型管，經 1.5 V、2.5 V、5 V 直流電電源供應器)(圖七)：

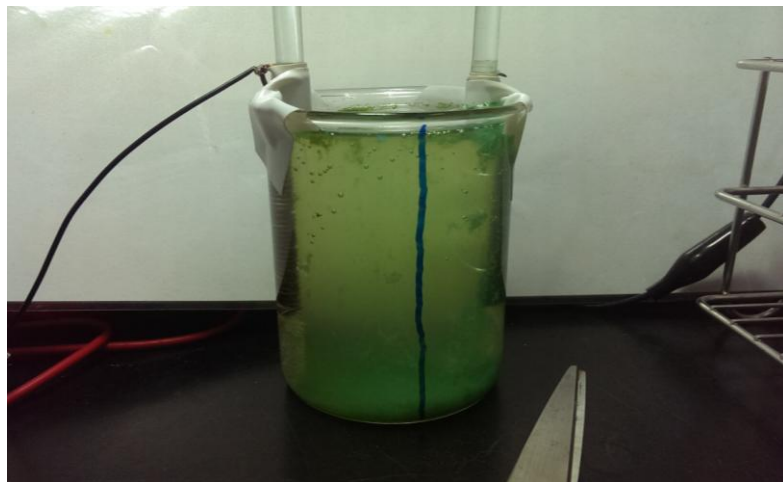
1. 加入含微囊藻的培養液 15 mL 於 U 型管，分別通入 1.5 V、2.5 V、5 V 的電壓。
2. 經過三小時連續電擊，每小時測 E595 吸光值。
3. 觀察水體中藻類移動情形。

(三)130 mL 小型銅綠微囊藻水體及綠球藻水體電擊實驗(150 mL 燒杯，經 7.5 V 直流電電源供應器)(圖八、圖九)：

1. 燒杯中分別加入銅綠微囊藻及綠球藻水體的培養液 130 mL，通入 7.5 V 電壓。經過五小時連續電擊。
2. 觀察水體中藻類移動情形。

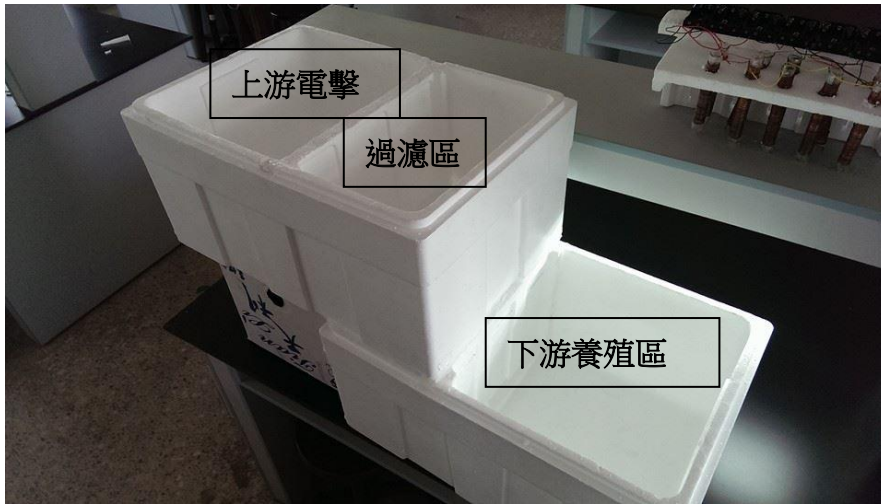


圖八：小型水體電擊實驗電擊器裝置



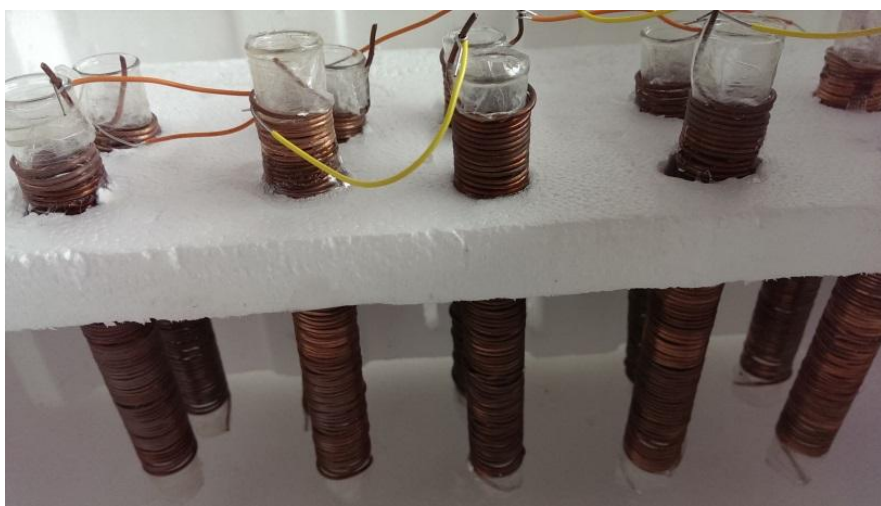
圖九：以攝影方式記錄電擊對藻類移動影響

二、於自製小型淡水養殖模型中 (圖十)，加入校園附近水域優養化程度高的水體約 30 L，置入上游電擊區，並自製水體電擊裝置(圖十一)，對照組不通電，實驗組通電 30 V(1.5 V 電池直流電 * 20 顆)，測定模型下游水域的 E595 吸光值，每一天取樣一次，檢測其吸光值變化，連續五天 (圖十二)。



圖十：自製淡水養殖模型

1. 長：60 公分
寬：40 公分
高：30 公分
2. 加入水體約 30 L 於上游電擊區。



圖十一：自製水體電擊裝置

1. 準備 10 公分高的玻璃試管 10 根。
2. 以經過漆磨處理之漆包線加以纏繞呈現線圈狀



圖十二：自製淡水養殖模型
設置實驗裝置

1. 將電擊器置於淡水養殖模型
2. 過濾區：有鐵網過濾。
3. 下游為養殖區：以水管將水送回上游進行循環水流。

三、水質優養化檢測

以卡爾森優養化指標 (Carlson trophic state index : CTSI) 為依據，檢測總磷量 (total phosphorus : TD)、葉綠素 *a*、透明度 (SD)，代入 CTSI，計算出其優養化程度。

(一)總磷 (TD)：

1. 取 50 mL 水樣，加入一滴酚酞指示劑，如水樣呈紅色，滴加 11 N 硫酸溶液至顏色剛好消失，再加入 1.0 mL 11 N 硫酸溶液。
2. 加入 0.4 g 過硫酸銨。
3. 置於已預熱之加熱裝置上，緩慢煮沸 30~40 分鐘或直至殘留約 10 mL 液體。
4. 加水稀釋至約 30 mL，加入 1 滴酚酞指示劑，以 1 N 氫氧化鈉溶液，至淡粉紅色出現，再加水定量至 50 ml。
5. 加入 8 mL 混合試劑，在 10~30 分鐘內以分光光度計於波長 880 nm 處讀取吸光度，並由檢量線求得磷濃度 (mg P/L)。

(二)葉綠素 *a* 之萃取和測定

1. 採取代表性水樣 500 mL。
2. 進行過濾濃縮，水樣濾至接近抽乾時，濾片呈綠色或褐色者為佳。
3. 取 10 mL 乙醇，加入內含前項濾片之離心管中，置於 60 °C 水浴槽中，在黑暗下萃取 30 分鐘，萃取期間須每 10 分鐘搖混一次。
4. 取出離心管，迅速冷卻至室溫後，置入離心機中，以 3000–5000 g 離心 10–15 分鐘。
5. 取出離心管，避免震動，用微量吸管自上清液取 3 mL 測光管中，用分光光度儀測其在波長 665 及 750 nm 之吸光值，分別為 E665a 和 E750a。
6. 加 0.03 mL 1 M HCl 溶液於測光管中，搖混 1 分鐘後靜置，5–30 分鐘內重新測量其在 665 及 750 nm 之吸光值，此分別為 E665b 和 E750b。
7. 空白分析值：以不含葉綠素 *a* 之濾片，重複上步驟與做空白分析。吸光值均須分別扣除此空白分析值才是實際之吸光值。
8. 濁度校正：樣品在 665 nm 之吸光值扣除在 750 nm 之吸光值即校正後的吸光值：
 - (1) 校正後的吸光值 C665a = E665a - E750a
 - (2) 校正後的吸光值 C665b = E665b - E750b
9. 水樣之葉綠素 *a* 濃度：經濁度校正後，用以下之公式計算水樣之葉綠素 *a* 濃度 (Ca, µg/L)。

使用 1 cm 光徑之測光管時：

$$Ca = 29.62 (C665a - C665b) \times Ve / Vs$$

式中 Ve 為所用乙醇體積 (mL) Vs 為水樣體積 (L)

(三)水質透明度 (SD) 測量----沙奇盤 (圖十三)

以直徑 6 公分的排水孔蓋為材料，上面加上直徑 2 公分之紙片

1. 將沙奇盤垂直沈入自製模型下游水域中，直到看不見為止，讀取其水深。
2. 將沙奇盤徐徐拉起，至恰可看見為止，讀取其水深。
3. 如此反覆三次，共 6 次測值，取其平均值，即為透明度。



圖十三：自製沙奇盤

(四)卡爾森優養化指標 (CTSI) 之計算方法及比對基準如下所示：

$$CTSI = [TSI(SD) + TSI(Chl) + TSI(TP)] / 3$$

$$TSI(SD) = 60 - 14.41 \times \ln SD$$

$$TSI(Chl-a) = 9.81 \times \ln Chl-a + 30.6$$

$$TSI(TP) = 14.42 \times \ln TP + 4.15$$

式中：

SD = 透明度(m)

Chl-a = 葉綠素 a 濃度($\mu\text{g/L}$)

TP = 總磷濃度($\mu\text{g/L}$)

表二：卡爾森優養化指數(CTSI)與水質優養化的程度對照表

CTSI 指標值	水質優養程度
CTSI < 40	貧養狀態
$40 \leq CTSI \leq 50$	普養狀態
CTSI > 50	優養狀態

伍、 研究結果

一、 小型水體電擊實驗對於銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*)及綠球藻 (*C. vulgaris-KP*)趨性探討

(一) 15ml 小型銅綠微囊藻水體電擊實驗：



圖十四：小型 U 型管水體電擊實驗

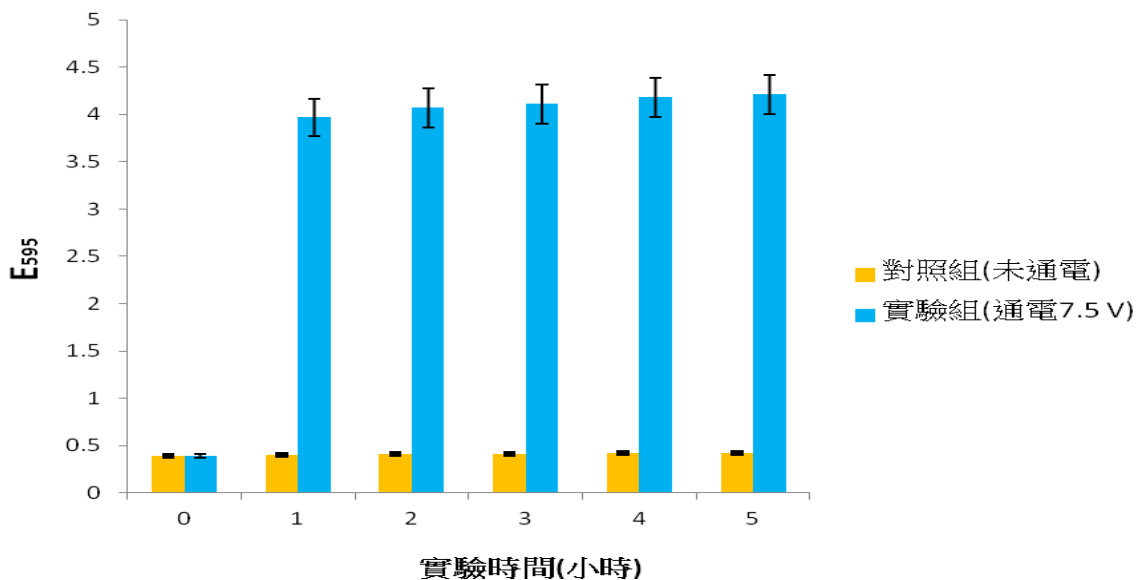
圖十四實驗：實驗得知：

- (1) 在含有微囊藻的培養液中的 U 型管通入 1.5 V 穩定直流電，沒有明顯偏向負極沉澱。
- (2) 當在含有微囊藻的培養液中通入 1.5 V、2.5 V、5 V 電流，由拍攝的影片證實，在通電三小時過程，一開始微囊藻會往負極方向移動，隨著電壓得持續進行，細胞膜因為被去極化，而轉往正極方向堆積。

(二) 130 mL 小型銅綠微囊藻及綠球藻水體電擊實驗：

表三：銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 經過連續五小時電擊後 E_{595} 的變化(測三次平均)

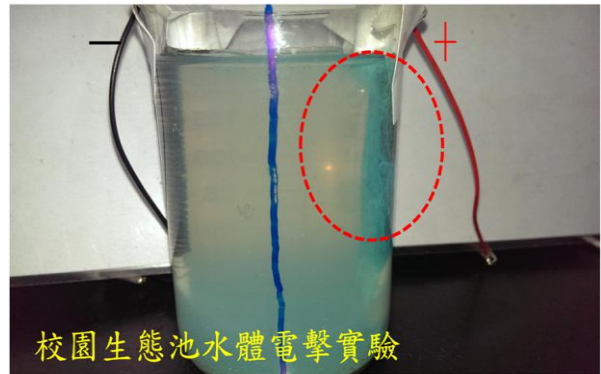
銅綠微囊藻經五小時電擊極棒區 E_{595} 變化	實驗時間					
	0 小時	1 小時	2 小時	3 小時	4 小時	5 小時
對照組(未通電)	0.389	0.388	0.382	0.379	0.377	0.372
實驗組(通電 7.5 V)	0.389	3.97	4.07	4.11	4.18	4.21



圖十五：銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 經過連續五小時電擊極棒區 E_{595} 的變化



銅綠微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 電擊實驗



校園生態池水體電擊實驗

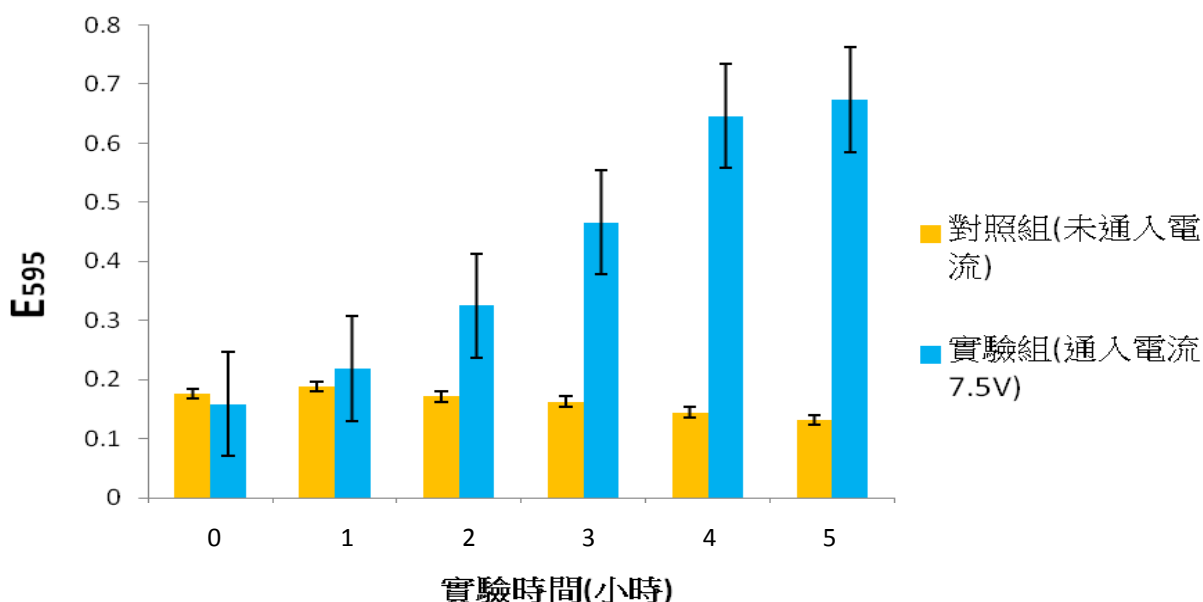
圖十六：銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*)及校園生態池水體經過連續三小時電擊，於正極處匯集成一團

由 (表三)及(圖十五) 銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 實驗結果得知：在未通電的狀態下五小時後，E₅₉₅ 由 0.389 緩慢下降至 0.372，藻體的自然沉降率為 4.4 %。在通入 7.5 V 微電流進行吸附 1 小時後，E₅₉₅由 0.389 快速上降至 3.97，以 10 倍的速度往正極方向移動，之後 2 至 5 小時 E₅₉₅ 數值變動不大，得知在電擊 1 小時藻體即可達最大的吸附量。

由(圖十六)得知，銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 及校園生態池水體經過連續三小時電擊後，於正極處匯集成一團。

表四：綠球藻 (*C. vulgaris-KP*)經過連續五小時電擊極棒區 E595 的變化(測三次平均)

綠球藻經五小時電擊極棒區 E595 變化	實驗時間					
	0 小時	1 小時	2 小時	3 小時	4 小時	5 小時
對照組(未通電)	0.176	0.188	0.172	0.163	0.145	0.132
實驗組(通電 7.5 V)	0.159	0.219	0.325	0.466	0.646	0.673

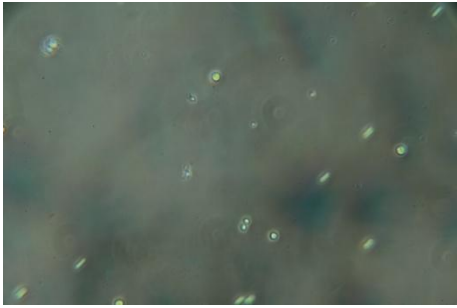
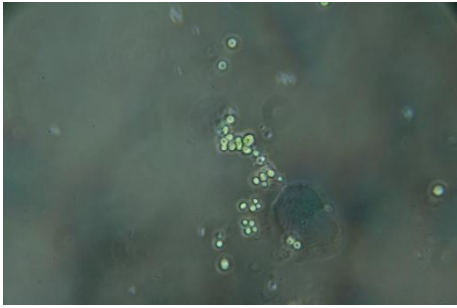
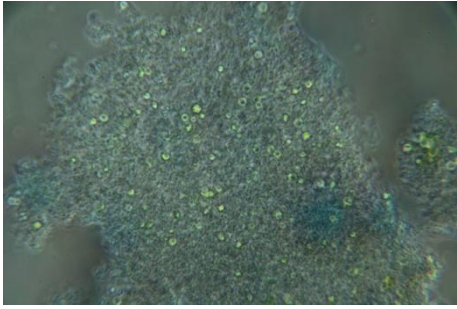
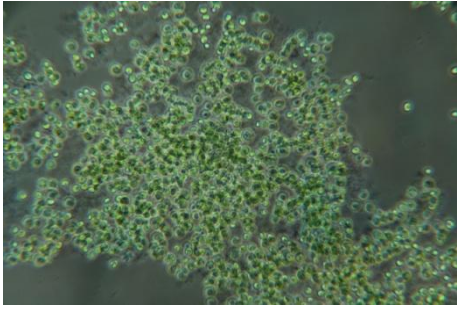
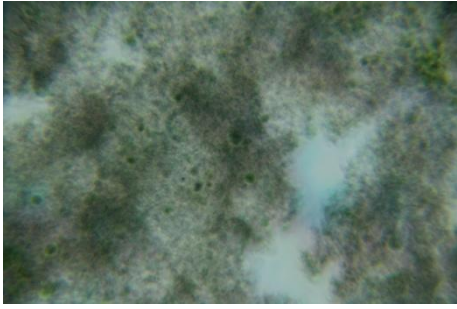
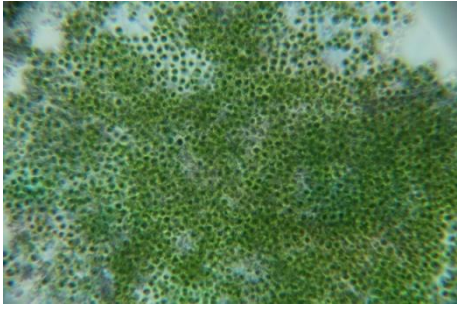


圖十七：綠球藻 (*C. vulgaris-KP*) 經過連續五小時電擊後極棒區 E595 的變化

由 (表四)及(圖十七) 綠球藻 (*C. vulgaris-KP*) 實驗結果得知：在未通電的狀態下五小時後，E595 由 0.176 緩慢下降至 0.132。將藻體倒入燒杯後 2 小時後開始沉降，3 至 5 小時，藻體的自然沉降率分別為 7.4 %、17.6 %、25 %。而在通入 7.5 V 電流下，連續五小時之後 E595 吸光值由 0.163 上升至 0.673，電擊 4 小時即達最大吸附量。其中 1 至 4 小時，對藻體的吸附倍率分別為 1.5 倍、2 倍、4 倍。

在含有銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 與綠球藻 (*C. vulgaris-KP*) 之培養液中，通入 7.5 V 穩定直流電，由拍攝影片觀察，一開始藻體會往負極方向移動，隨著電壓得持續進行，細胞膜因為被去極化，而轉往正極方向堆積。因為微囊藻具有氣囊可以往上飄浮，所以同電流及同時間下，移動的速度比綠球藻來的快，綠球藻一部分會往下沉降。

表五：銅綠微囊藻(*M.aeruginosa*)與綠球藻(*C.vulgaris-KP*)純種藻液
在以 7.5 V 電壓通電 2 小時後的藻體分布情形

藻體 電擊 時間	銅綠微囊藻	綠球藻
0 小時	 <p data-bbox="584 786 676 815">圖：A-1</p>	 <p data-bbox="1070 786 1163 815">圖：B-1</p>
1 小時	 <p data-bbox="584 1171 676 1200">圖：A-2</p>	 <p data-bbox="1070 1171 1163 1200">圖：B-2</p>
2 小時	 <p data-bbox="584 1556 676 1585">圖：A-3</p>	 <p data-bbox="1070 1556 1163 1585">圖：B-3</p>

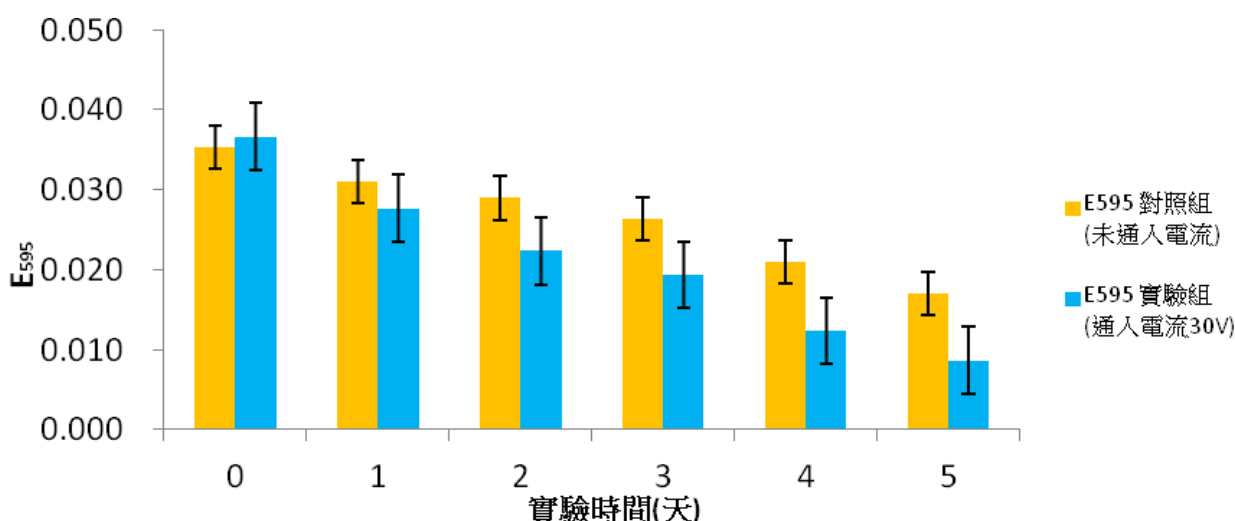
在表五中的顯微鏡觀察，銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*) 與綠球藻 (*C. vulgaris -KP*)，在未通入電流的狀態下，藻類的分布相當分散與稀疏 (圖 A-1,B-1)。隨著電擊時間經過 1 小時後，兩種藻體都有明顯的群聚現象出現 (圖 A-2,B-2)。電擊 2 小時後，藻體的聚集現象變得更加明顯 (圖 A-3,B-3)。

二、水體電擊應用在自行設計製作的小型淡水養殖模型中，藉由水質監測指標探討水體電擊對水質淨化及降低優養化的影響。

(一)在自製小型淡水養殖模型中，上游水域加入電擊裝置連續電擊五天，每日監測下游養殖區 E595 的變化。

表六：下游養殖區的 E595 變化 (測三次平均)

下游養殖區 E595 變化	實驗時間					
	0 日	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日
對照組(未通電)	0.035	0.031	0.029	0.026	0.021	0.017
實驗組(通電 30V)	0.037	0.028	0.022	0.019	0.012	0.009



圖十八：在經過五天時間電擊後之下游養殖區的 E595 變化

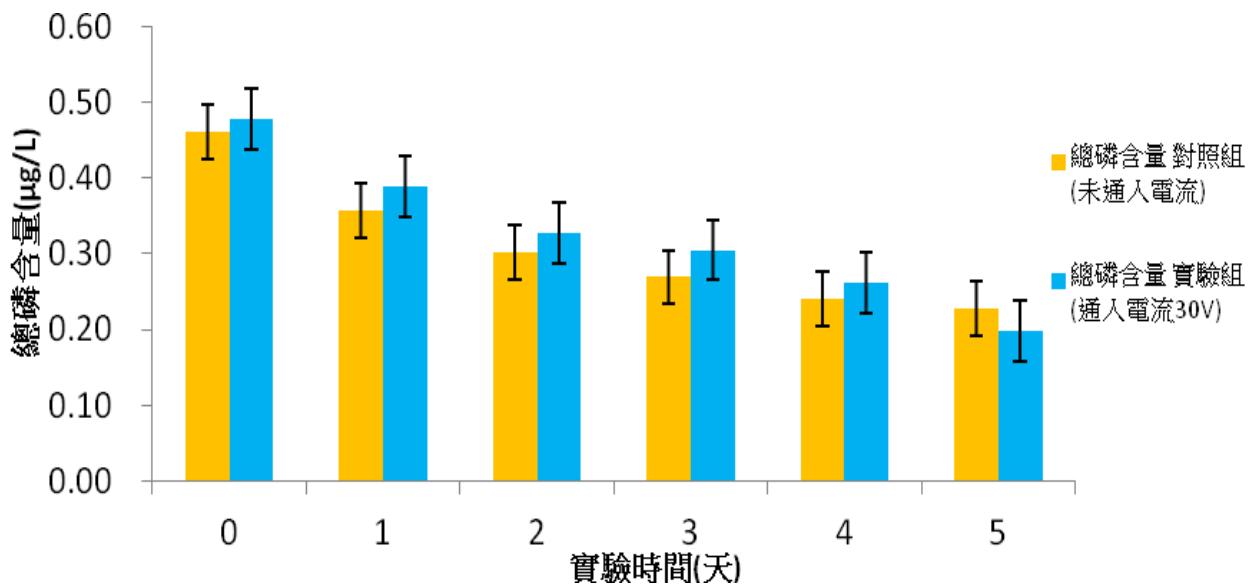
由 (表六)及(圖十八)實驗結果得知：在未通電的狀態下五天後，下游養殖區的 E595 由 0.035 逐漸下降至 0.017，其中 1 至 5 天藻體的自然沉降率分別為 11 %、17 %、26 %、40 %、51%。若在上游水域通入 30 V (1.5 V * 20 顆電池) 的微電流下進行吸附，連續五天後，E595 由 0.037 逐漸下降至 0.009。電擊 1 至 5 天，每日藻體含量減少 25 %、40 %、49 %、69 %、76%。

(二)水質優養化檢測

1. 總磷含量變化

表七：下游養殖區的總磷含量變化 (測三次平均)

磷含量變化	實驗時間					
	0日	1日	2日	3日	4日	5日
對照組(未通電) (µg/L)	0.46	0.36	0.30	0.27	0.24	0.23
實驗組(通電 30 V) (µg/L)	0.48	0.39	0.33	0.30	0.26	0.20



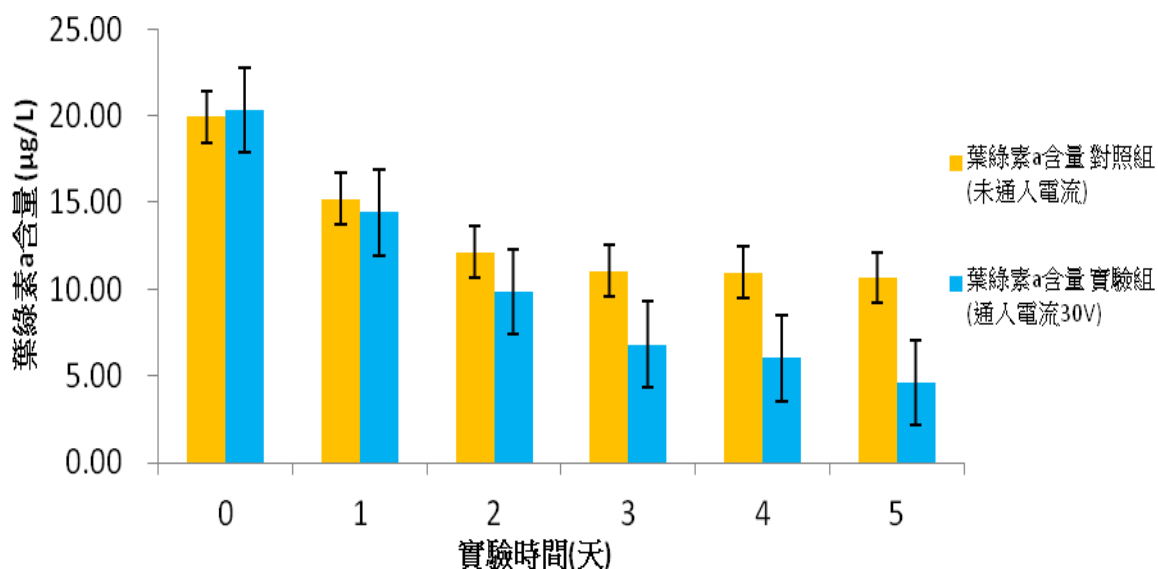
圖十九：在經過五天時間電擊後之下游養殖區的總磷含量變化

由 (表七)及(圖十九)實驗結果得知：若未給與電擊，五天後，總磷含量由 0.46 下降至 0.23 (µg/L)，共降低了 0.23 (µg/L)，其中 1 至 5 天下游養殖區的總磷含量分別減少 22%、35%、41%、48%、50%。而在上游水域通入 30 V (1.5 V * 20 顆電池) 的微電流下進行吸附，連續五天後，總磷含量由 0.48 下降至 0.2 (µg/L)，共降低了 0.28 (µg/L)，電擊 1 至 5 天，每日總磷含量分別減少 19%、31%、38%、46%、58%。

2. 水體電擊對水質葉綠素 *a* 含量變化

表八：下游養殖區的葉綠素 *a* 含量變化 (測三次平均)

葉綠素 <i>a</i> 含量變化	實驗時間					
	0 日	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日
對照組(未通電) (µg/L)	19.9	15.2	12.1	11.0	10.9	10.6
實驗組(通電 30 V) (µg/L)	20.3	14.4	9.8	6.8	6.0	4.6



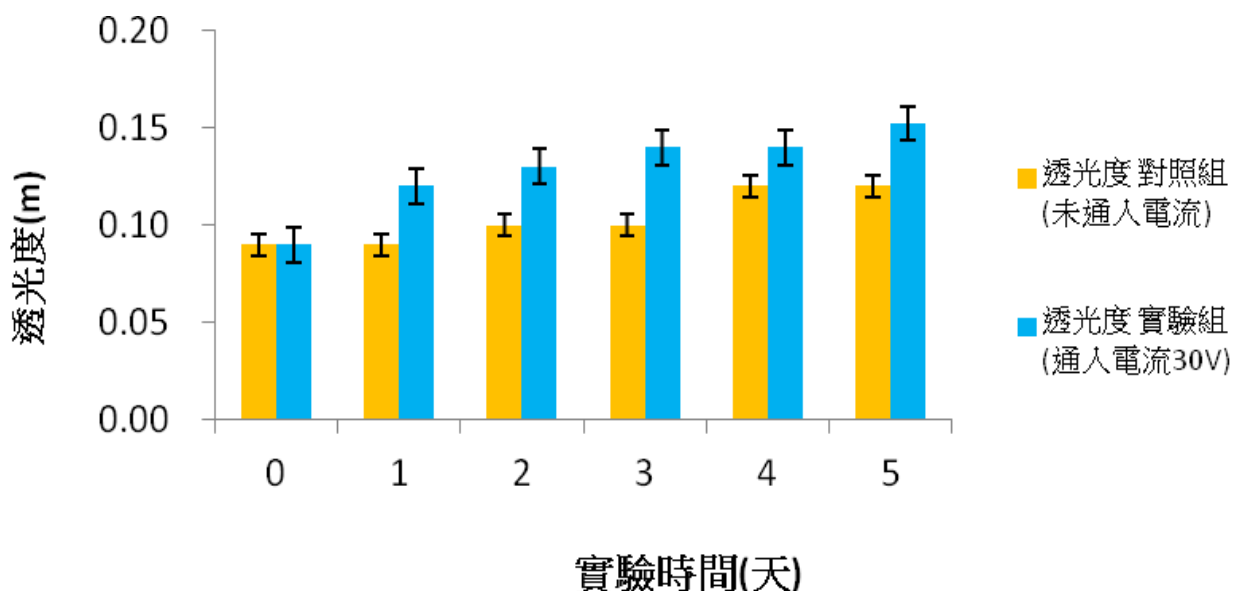
圖二十：在經過五天時間電擊後之下游養殖區的葉綠素 *a* 含量變化

由 (表八)及(圖二十)實驗結果得知：若未給與電擊時，五天後，下游養殖區的葉綠素 *a* 含量由 19.9 (µg/L) 逐漸下降至 10.6 (µg/L)。其中 1 至 5 天下游養殖區的葉綠素 *a* 含量分別減少了 24%、39%、44.7%、45%、47%。若在上游水域通入 30 V (1.5 V * 20 顆電池) 的微電流下進行吸附，連續五天後，葉綠素 *a* 含量由 20.3 mg/L 下降至 4.6 mg/L。電擊 1 至 5 天，葉綠素 *a* 含量變化分別降低了 29%、52%、67%、70%、77%。

3. 水質透光度變化

表九：下游養殖區的透光度變化變化 (測三次平均)

透光度變化	實驗時間					
	0 日	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日
對照組(未通入電流) (公尺)	0.09	0.09	0.10	0.10	0.12	0.12
實驗組(通入電流 30 V) (公尺)	0.09	0.12	0.13	0.14	0.14	0.15



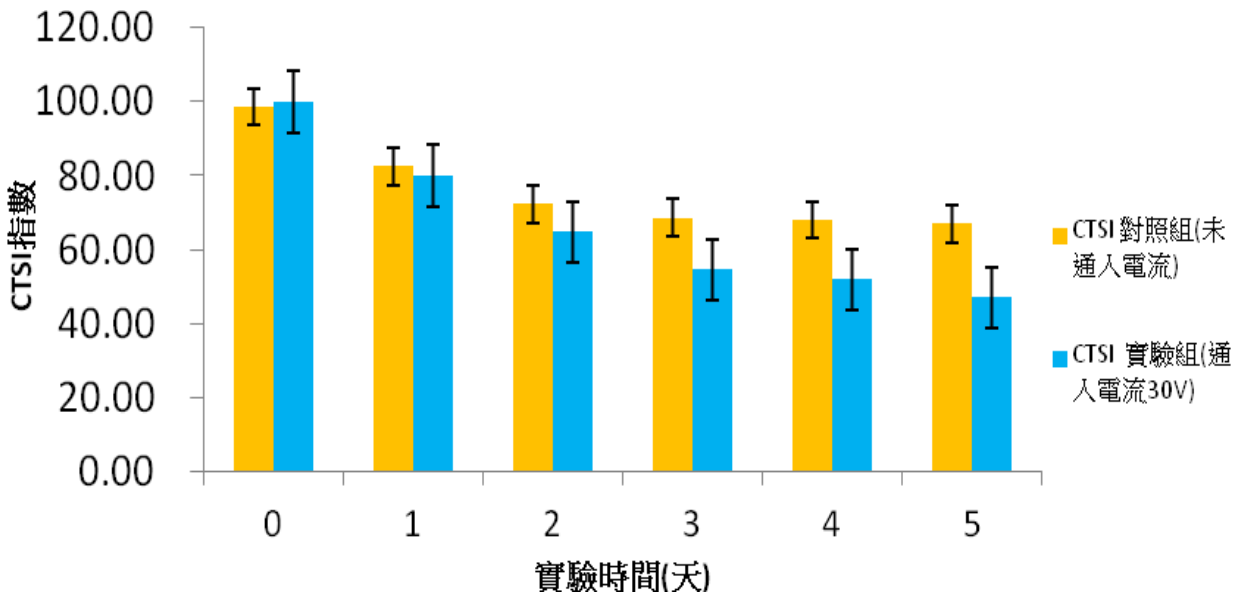
圖二十一：在經過五天時間電擊後之下游養殖區的透光度變化

經實驗結果 (表九)及(圖二十一) 得知：在未通電的情況下，五天後，下游養殖區水體的透光度由距離水面往下探 0.09 m 處，增加為下探至 0.12 m，這是因為藻類在一般情況下會自然沉落，所以導致光線穿透度增加 33 %。但是經過連續五天的電擊之後，藻體會逐漸趨附於電擊器極棒附近水域，進而使下游水體光線穿透度距離水面增加為下探 0.15 m，能見度增加 66%。

4. 卡爾森優養化指數變化

表十：下游養殖區的卡爾森優養指數 (CTSI) 變化

CTSI 變化	實驗時間					
	0 日	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日
對照組(未通電)	98.4	82.4	72.1	68.4	67.9	66.8
實驗組(通電 30 V)	99.7	79.9	64.8	54.6	51.8	46.9



圖二十二：在經過五天時間電擊後之下游養殖區的 CTSI 變化

由 (表十)及(圖二十二) 實驗結果得知：若未給與電擊時，卡爾森優養指數由 98.4 逐漸下降 66.8。其中 1 至 5 天下游養殖區的卡爾森優養指數變化分別為 16%、27%、30%、31%、32%。而在上游水域通入 30 V (1.5 V * 20 顆電池) 的微電流下進行吸附，連續五天後，原水體原本的 CTSI 高達 99.7 為嚴重優養狀態，降至 46.9 為普養優質水域。電擊 1 至 5 天，卡爾森優養指數變化分別降低 20%、35%、45%、48%、53%。

陸、討論

一、 小型水體電擊實驗對於銅綠微囊藻 (*M. aeruginosa*)及綠球藻 (*C. vulgaris- KP*)趨性的探討

(一) 15 mL 小型銅綠微囊藻水體電擊實驗：

由 (圖十四) 結果得知，由 15 mL 的微囊藻水體電擊實驗得知，通入 1.5 V 穩定直流電，沒有明顯偏向負極沉澱，但當電壓為 2.5 V 以上時，一開始因為細胞為極化狀態，呈現細胞內負電，細胞外正電的靜止膜電位，微囊藻會往負極方向移動；隨著電擊的持續進行，細胞膜因為被去極化，藻體進而轉往正極極棒方向堆積。

(二) 130 mL 小型銅綠微囊藻及綠球藻水體電擊實驗：

由 (表三)及(圖十五) 得知，銅綠微囊藻在未通電的狀態的五小時後，藻體的自然沉降率為 4.4 %，但由 (表四)及(圖十七) 得知，綠球藻的自然沉降率卻高達 25 %。

於電擊棒上，通入 7.5 V 穩定直流電，銅綠微囊藻於 1 小時後，即以 10 倍的速度往正極方向快速移動，由 2 至 5 小時 E_{595} 數值變異不大，我們推論電擊 1 小時即達最大的吸附量。由 (圖十六) 得知連續 3 小時電擊後，銅綠微囊藻便在電擊棒正極處上方匯集成一團。而由(表四、圖十七)得知綠球藻，在電擊前3小時，吸附倍率分別為 1.5 倍、2 倍、4 倍，須連續電擊 4 小時才能達最大吸附量。

由拍攝影片觀察，在相同電流及同時間下，銅綠微囊藻移動的速度比綠球藻來的快，綠球藻一部分會往下沉降。

由 (表五) 中顯微鏡觀察實驗，銅綠微囊藻及綠球藻，兩者在未通入電流的狀態下，藻類的分布相當分散與稀疏。經電擊後，兩種藻體都有明顯的群聚現象出現，證實兩者均具有被電擊器吸附的能力。

綜合以上，我們推論：銅綠微囊藻內含有氣囊，因此得以在水體中進行升降 (Robarts and Zohary, 1987)，所以電擊吸附的效果比綠球藻快速。相對，綠球藻無飄浮能力所以往下自然沉降的速度較快。

二、 水體電擊應用在自行設計製作的小型淡水養殖模型中的應用，並藉由水質監測指標探討水體電擊對水質淨化及降低優養化的影響。

(一)小型淡水養殖模型中，於上游加入水體電擊實驗裝置連續電擊五天，每日監測下游養殖區藻體數目的變化：

由(表六)及(圖十八)實驗結果得知：在未通電的狀態下五天後，下游養殖區的自然沉降率分別為 11 %、17 %、26 %、40%、51%。若在上游水域通入 30 V (1.5 V * 20 顆電池) 的電流進行吸附，每日藻體含量減少 25 %、40 %、49 %、69 %、76%。置入水體電擊裝置 5 天對藻體的吸附作用，顯然是比藻體自然沉降來的快速而有效。

(二)在小型淡水養殖模型中之卡爾森優養化指數變化：

1.總磷量：

經實驗結果 (表七)及(圖十九) 得知：若未給與電擊，五天後，下游養殖區總磷含量共降低了 0.23 ($\mu\text{g/L}$)，電擊五日後，共降低了 0.28 ($\mu\text{g/L}$)。未施與電擊，每日總磷含量分別減少 22%、35 %、41 %、48%、50%；電擊後，每日總磷含量分別減少 19 %、31 %、38 %、46 %、58%。令人好奇的是，未施與電擊，下游養殖區的藻體含量高，但每日總磷的減少比例反而比經過電擊後，數值高出一些。我們推論，藻類的生長必須仰賴水中的磷為養分，所以藻體含量高時，總磷含量便降低。

2 葉綠素 a ：

經實驗結果 (表八)及(圖二十) 得知：對照組在未通電之下，微囊藻和水體中的其他藻類會自然逐漸沉澱至水底，因而造成葉綠素 a 含量由 19.9 逐漸下降至 10.6 ($\mu\text{g/L}$) 自然沉降佔 46.7 %。連續電擊五天後，葉綠素 a 含量由 20.3 下降至 4.6 ($\mu\text{g/L}$)，相對降低了 77.3 %，扣除自然沉降後，經電擊使葉綠素 a 含量可再降低 30.6 %。證實了電擊後因為藻類趨附於電擊極棒附近，使游離在下游水域中的藻類變少，造成下游水體中葉綠素 a 含量下降。

3.透光度：

經實驗結果 (表九)及(圖二十一) 得知：在未通電的情況下，五天後，下游養殖區水體的透光度由距離水面往下探 0.09 m 處，增加為下探至 0.12 m，這是因為藻類在一般情況下會自然沉落，所以導致光線穿透度增加 33 %。但是經過連續五天的電擊之後，藻體會逐漸趨附於電擊器極棒附近水域，進而使下游水體光線穿透度距離水面增加為下探 0.15 m，能見度增加 66%。

4.卡爾森優養化指數：

經實驗結果 (表十)及(圖二十二) 得知：我們的水體在未電擊的初始狀態下，CTSI 高達 99.7 的嚴重優養狀態，但經過我們長時間電擊後的結果，CTSI 從原先的 99.7 降至 46.9，轉化為普養優質水域，相對於對照組未通入電流的情況下，經過五天的時間，由於水體的自淨機能，CTSI 由 98.4 降至 66.8，下降幅度遠小於通入電流的實驗組，此實驗證實了水體電擊確實能夠有效地使水體中的藻體趨附而降低優養化現象。

柒、結論

- 一、在水體中通入微弱電流使銅綠微囊藻與綠球藻細胞膜產生去極化，剛開始藻體往負極方向移動，但大約電擊 1 小時，便轉往電擊棒正極附近水域堆積。推測是因為藻體細胞膜被逆極化，細胞膜電位改變，因而轉往正極方向堆積。銅綠微囊藻連續電擊 1 小時即達最大的吸附量，且以 10 倍的速度往正極方向移動，而綠球藻連續電擊 4 小時才能達最大吸附量。推測是微囊藻內含有氣囊，能漂浮在水面，因此較短的時間內即可達最大吸附量，而綠球藻自然沉降率高，所以須較長的時間才能達最大吸附量。
- 二、在小型淡水養殖模型中加入園生態池池水(CTSI 高達 99.78，為嚴重優養狀態)，上游水域經過連續五天電擊，吸附藻體的能力達 76%，使下游水域的指數下降至 46.98，成為優質普養水域。
 - (一) 藻體大量附著於電擊器擊棒附近水域，造成藻體競爭養分，使磷濃度下降 58%。
 - (二) 下游的葉綠素 *a* 含量若包含自然沉降佔 46.7%，再經電擊使葉綠素 *a* 含量降低 30.6%，水體中葉綠素 *a* 總量降低了 77.3%。
 - (三) 上游藻體被吸附，使下游水體的藻體含量下降，而透光度上升。

捌、參考資料

Robarts, R.D. and Zohary, T. (1987) Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria · J. Mar. Freshwater

Wang, C. H. Role of Bipolar Pulsed DBD on the Growth of *Microcystis aeruginosa* in Three-Phase Discharge Plasma Reactor (2007)

Zurawell, R. W., Chen, H., Burke, J. M., and Prepas, E. E., (2005.) Hepatotoxic cyanobacteria: a review of the biological importance of microcystins in freshwater environments. J. Toxicol. Environ. Health, Part B, 8, 1–37

National Rivers Authority, (1990.) Toxic Blue-Green Algae. Water Quality Series No. 2., National Rivers Authority, London, 128p.

WHO, (1997.) Report of the Working Group on Chemical Substances in Drinking Water, Section 5-2 Microcystin-LR. Geneva, Switzerland. pp. 152-172.

WHO, (1998.) WHO Guidelines for Drinking-Water Quality: Recommendations, Health Criteria and Other Supporting information, 2nd ed. World Health Organization, Geneva, Switzerland. pp. 79-81

WHO, (2003.) Algae and cyanobacteria in fresh water. In: Guidelines for Safe Recreational Water Environments. Vol. 1: Coastal and Fresh Waters. World Health Organization, Geneva, Switzerland, pp. 136–158.

潘復華 (2009)。藻類也會以毒反撲。行政院環境保護署環境檢驗所·台北市

黃致源 (2010)。優養化藻類原水前臭氧處理對加氯消毒生成消毒副產物三鹵甲烷影響之研究。弘光科技大學環境與安全衛生工程系·台中市

胡雅嵐 (2009)。自然水體中微囊藻毒傳輸行為之探討。國立中央大學環境工程研究所碩士論文·桃園縣

沈曉瑄 (2009)。綠球藻(*Chlorella*)的發現。海大養研所

科技部高瞻自然科學教育資源平台(2010)。極化、去極化與逆極化·台北市

行政院國家科學委員會(2010)。膜電位與動作電位·台北市

行政院環境保護署(2013)。水質標準·台北市

行政院環境保護署環境檢驗所(2013)。水體透明度測定·台北市

行政院環境保護署環境檢驗所(2002)。水中葉綠素 a 檢測方法—乙醇萃取法·台北市

行政院環境保護署環境檢驗所(2010)。水中磷檢測方法—分光光度計/維生素C法·台北市

【評語】 040713

探討水體電擊對二種藻類趨性的探討。

利用細胞膜上電位差的原理，使會釋放毒素之藻類吸附及聚集，達到淨水質之目的。在應用上似乎可行性並不大，小型水箱似乎可用，但即使假說正確，亦無法達到應用規模。