

新北市113學年度中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：生活應用科學科(一)

組 別：國中組

作品名稱：綠能發電：C3、C4、CAM葉綠素的發電效能比較

關 鍵 詞：葉綠素、電池、C3C4CAM（最多3個）

摘要

在這個實驗中，我們分別將C3、C4及CAM植物的葉綠素提煉出來，探討葉綠素電池在不同植物中的發電效率。我們的植物取用地瓜葉、白莧菜和石蓮，研究過程包括從中提取葉綠素，測量其吸光值及發電效率，並分析不同植物的效果。研究結果顯示，石蓮在常溫和高濕條件下的發電效果最佳，也就可以比較得知CAM植物的發電效率是最好的。因此未來可以考慮在做葉綠素電池時可以以CAM植物為優先開發，但未來也須要把植物的生長期和成本考慮進去。

壹、前言

一、研究動機

我們曾經在網路上看到了許多有關於臺灣能源拮据的問題，恰好發現一篇有關植物發電的文章，這讓我們靈光乍現，想要知道如何利用植物來發電，解決臺灣現有的電力缺乏的問題。

二、研究目的

- (一)、探討如何以植物的葉綠素發電。
- (二)、做出葉綠素電池。
- (三)、比較C3、C4、CAM植物發電的效率。

三、文獻探討

(一)、葉綠素

葉綠素(Chlorophyll)是普遍存在具光合作用能力生物中，主要反射綠光的光合色素的合稱，並可依照其吸收波段被分為葉綠素a, b, c 及 d。葉綠素的作用在是光合作用中光反應的部分(*Exp. 15 Photosynthetic Pigments.*)。



(二)、電解質

電解質是指鈉、氯化物、鎂、鈣和鉀等礦物質離子。電解質(electrolyte)是指在水溶液或熔融狀態可以產生自由離子而導電的化合物。通常指在溶液中導電的物質，而固態可導電的物質則不算電解質。這包括大多數可溶性鹽、酸和鹼。有些氣體，例如氯化氫，在高溫或低壓的條件下也可以作為電解質。電解質通常分為強電解質和弱電解質(臨床實驗室, 2022)。

(三)、電池

電池的基本結構包含電解質與導電材質等，正負極由隔離膜隔開，其中正極由電解質製成，而負極上方則有碳棒用來通電，外部則由防水紙製成(小小發電廠, 2016)。

(四)、葉綠素電池

葉綠素電池是一種有機電池，將其中電解質以葉綠素替代，產生電流(第 53 屆國小化學科作品, 2015)。

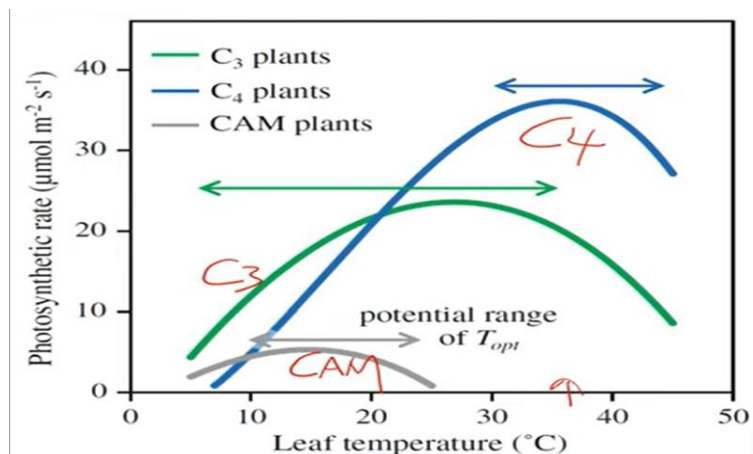
(五)、葉綠素電池的發電原理

葉綠素電池的構想來自植物的光合作用，葉綠素吸光、遇水後，會先成為離子態，再進行化學反應。葉綠素形成離子態後，與水進行氧化還原反應，產生電流。葉綠素在照光後會進行光反應，能量會聚集於葉綠素P680中激發電子，之後在光水解反應中藉由酵素使水強制氧化出2個氫離子和2個電子，而電子就可以拿來發電(楊 & 楊, 2011)。

(六) C3、C4、CAM植物差異

表一、C3、C4、CAM植物之比較 (許與王與沈，2019)

	C3植物	C4植物	CAM植物
主要分佈地區	溫帶地區	熱帶、亞熱帶地區	乾燥沙漠地區
氣孔開啟時間	白天	白天	晚上
光固定CO ₂ 的途徑	PCR循環	PCA循環+PCR循環	CAM循環+PCR循環
固碳產物	3-磷酸甘油酸 (3-PGA)(3C)	草醋酸→蘋果酸 (OOA)→(MA)(4C)	晚上： 草醋酸→蘋果酸 (OOA)→(MA)(4C)
例子	稻、麥、馬鈴薯、番茄、胡瓜、東亞蘭、拖鞋蘭	甘蔗、玉米、高粱、熱帶牧草、多數禾本科植物	仙人掌科、龍舌蘭、景天科等多肉植物、萬代蘭



圖一 C3、C4、CAM植物在不同溫度下光合作用的速率

(蔡任圖, 2023影片中 3:14)

(七)、葉綠素種類簡介

表二、葉綠素種類簡介(葉綠素 A、B、C 分析. (n.d.). EUROLAB Laboratory Services.)

葉綠素種類	存在物種	可吸收的光波長	功能
葉綠素 A	所有高等植物、藻類和藍細菌	429 nm ~ 659 nm	
葉綠素 B	植物和綠藻 (苔蘚)	455 nm ~ 642 nm	負責將光能傳遞給葉綠素 A
葉綠素 C	矽藻、甲藻和褐藻 (海藻)	447 nm ~ 452 nm 之間	
葉綠素 D	紅藻	光學範圍以外波長的光線 例如 710 nm	

貳、研究設備及器材

一、實驗器材

地瓜葉 (地瓜葉最有效的吸收波長：429~659nm，大多屬於葉綠素a)、白莧菜 (白莧菜葉綠素最有效的吸收波長：413~440nm，屬於葉綠素a)、石蓮的葉子(石蓮葉綠素最有效的吸收波長：410~416nm，屬於葉綠素a和葉綠素b)、95%酒精、純水、燒杯、酒精燈、陶瓷纖維網、三腳架、濾紙、漏斗、電子秤、三用電表、麵包板、電阻(10Ω)、鋅片、炭棒、3號電池空盒、保鮮膜。

參、研究過程及方法

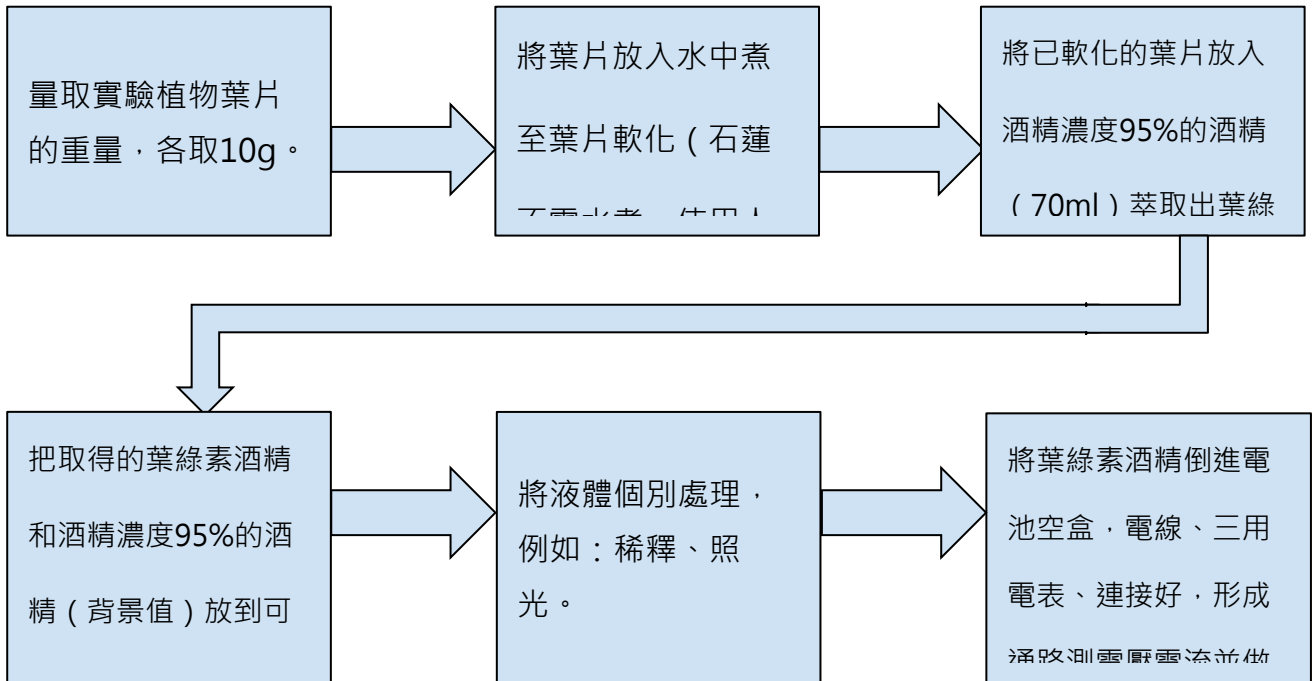
一、研究方法

我們會準備實驗中要使用到的植物以及簡易電池材料，製作葉綠素電池，並比較C3、C4、CAM植物用來做葉綠素電池的效率，比較液體稀釋、有無照光等影響。

表三、實驗植物的種類

實驗植物	光合作用類型	植物分類
地瓜葉	C3	雙子葉植物
白莧菜	C4	雙子葉植物
石蓮	CAM	雙子葉植物

二、實驗流程



圖二、實驗流程

（一）、測量取出10公克的葉片



（二）、軟化葉片



（三）、萃取出葉綠素酒精溶液



（四）、測量其溶液的吸光值



(五)、製成電池。或以鋅片(負極)和碳棒(正極)作為電極，直接測量葉綠素萃取液的電力。



(六)、測量各個自製葉綠素電池的電壓電流，比較差異。

三、研究設計

實驗一：地瓜葉、白莧菜、石蓮的葉綠素溶液原液

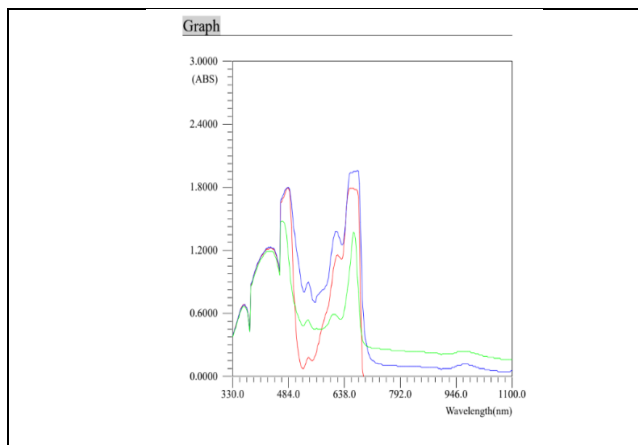
實驗二：常溫保存、冷藏保存

實驗三：用純水或酒精稀釋成25%、50%、75%

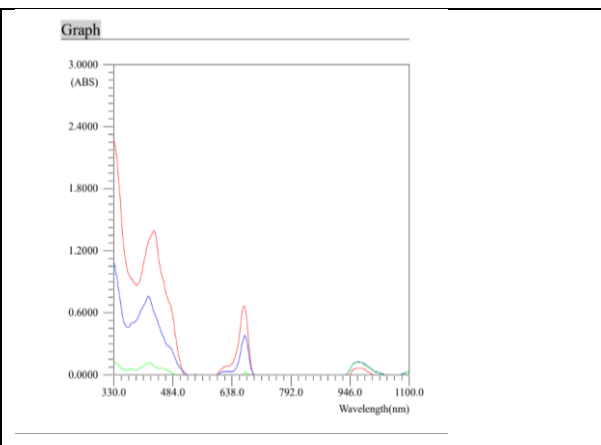
實驗四：照光、通電續航力

肆、研究結果

實驗一：



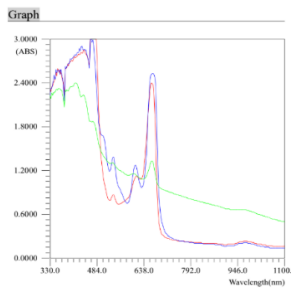
圖(三)、地瓜葉、白莧菜和石蓮15g葉綠素酒精溶液的吸光值



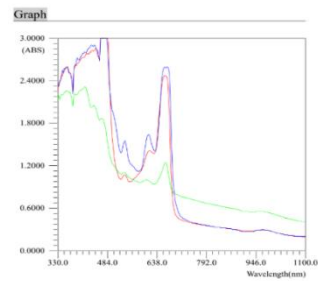
圖(四)、地瓜葉、白莧菜和石蓮各15g用純水稀釋後的葉綠素酒精溶液吸光值

由圖三圖四可知

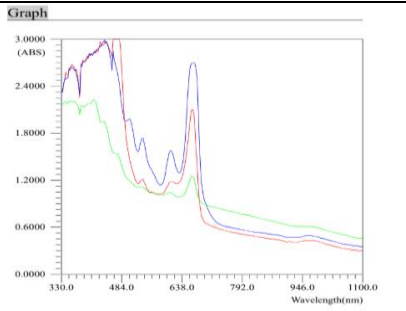
1. 純水稀釋會導致吸光率下降，吸收光的效率變差。
2. 三种植物的吸光度高峰的波長相近



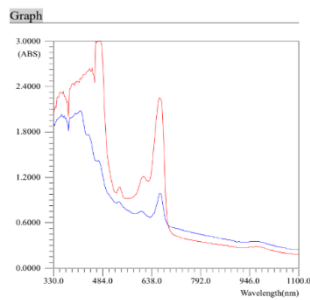
圖(五)、地瓜葉、白芻菜和石蓮15g葉綠素酒精溶液常溫一週後的吸光值



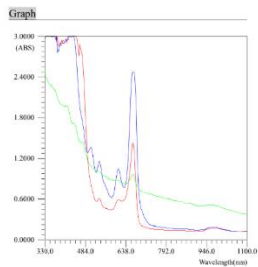
圖(六)、地瓜葉、白芻菜和石蓮15g葉綠素酒精溶液冷藏一週後的吸光值



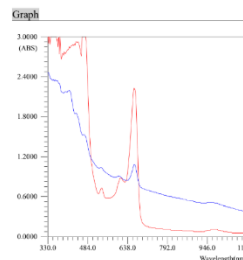
圖(七)、地瓜葉、白芻菜和石蓮15g葉綠素酒精溶液常溫三週後的吸光值



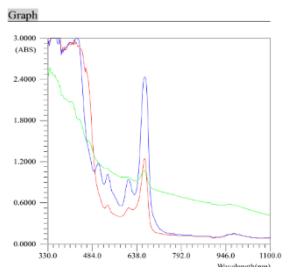
圖(八)、地瓜葉(紅)和石蓮(藍)15g葉綠素酒精溶液冷藏三週後的吸光值



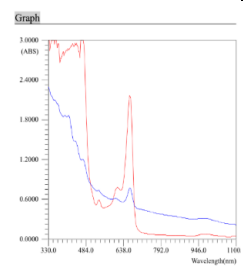
圖(九)、地瓜葉、白芻菜和石蓮15g葉綠素酒精溶液常溫四週後的吸光值



圖(十)、地瓜葉(紅)和石蓮(藍)15g葉綠素酒精溶液冷藏四週後的吸光值



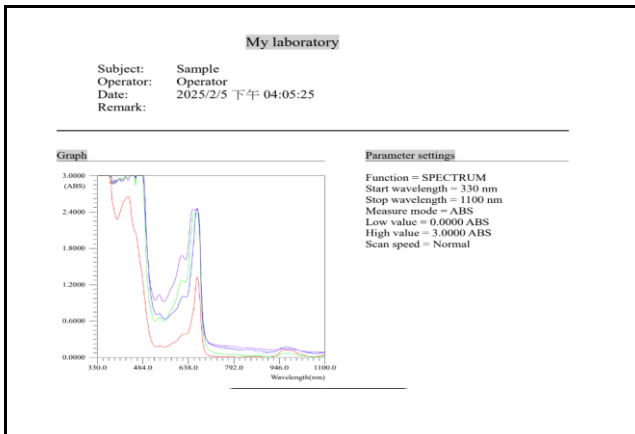
圖(十一)、地瓜葉(紅)和石蓮(藍)15g葉綠素酒精溶液冷藏四週後的吸光值



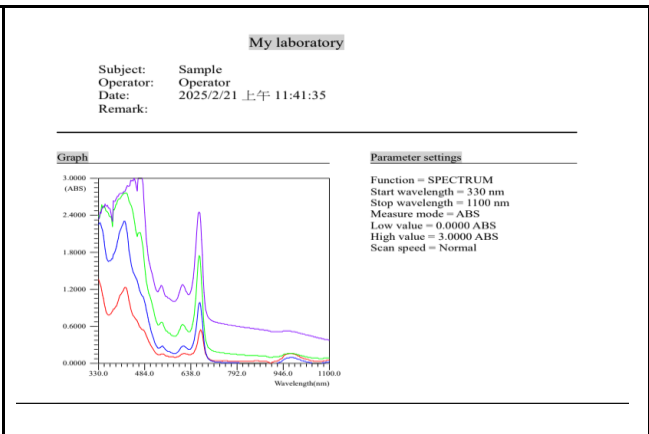
圖(十二)、地瓜葉(紅)和石蓮(藍)15g葉綠素酒精溶液冷藏五週後的吸光值

由圖三~圖十二可得知，吸光值受時間影響較小，數值大致相同，但冷藏和常溫下的吸光值仍有差異。

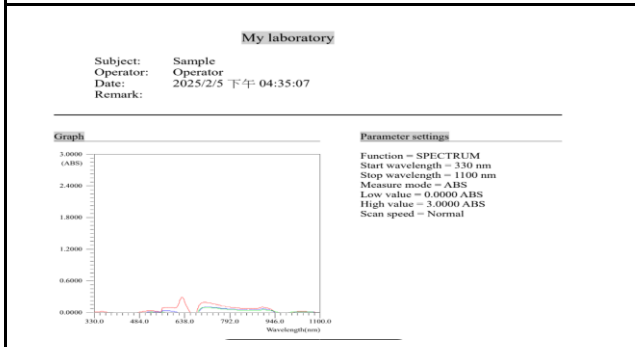
實驗二、實驗三的吸光值：原液和加純水、酒精稀釋的吸光值比較(25%(紅色)、50%(藍色)、75%(綠色)、原液(紫色)，由低到高)(皆為10g)(從圖十三到圖十八)



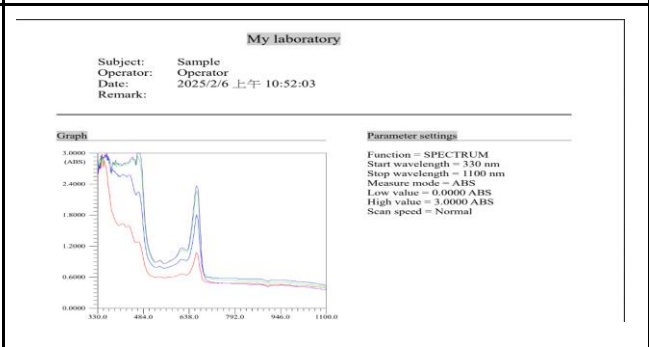
圖(十三)、地瓜葉用純水稀釋(紅藍綠紫)



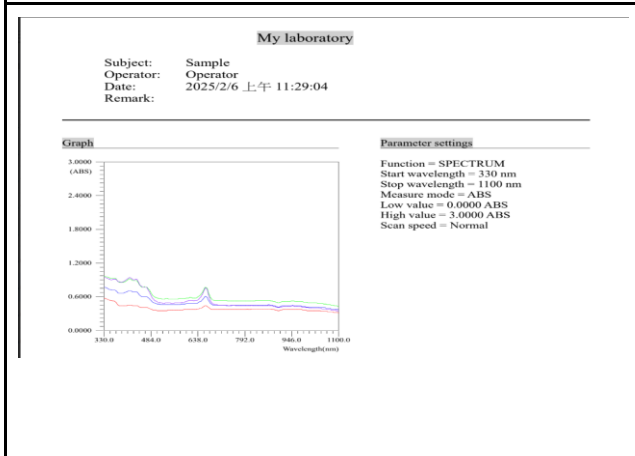
圖(十四)、白莧菜用純水稀釋(紅藍綠紫)



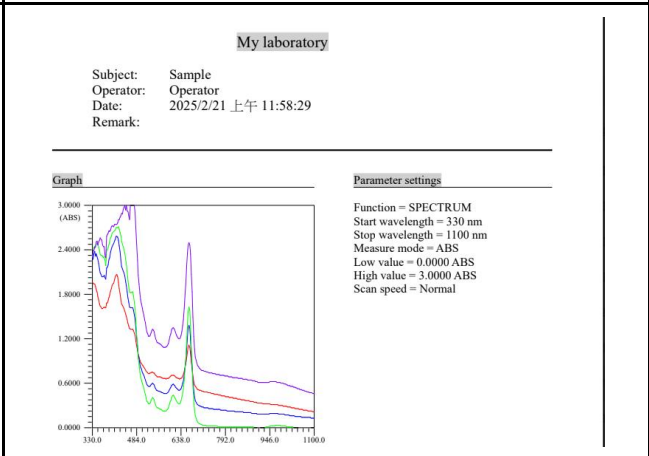
圖(十五)、石蓮用純水稀釋(紅藍綠紫)



圖(十六)、地瓜葉用酒精稀釋(紅藍綠紫)



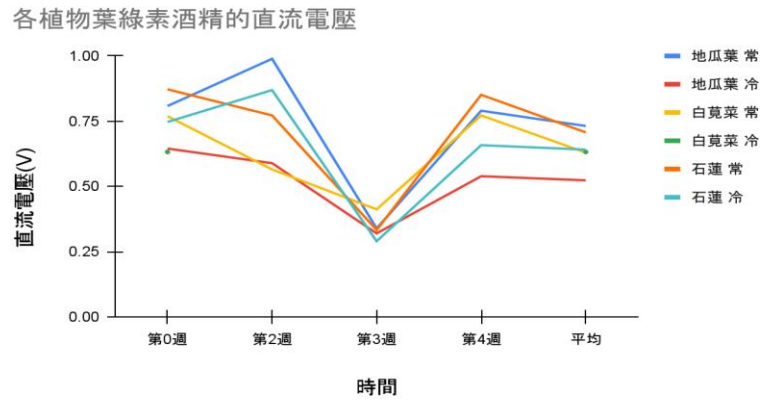
圖(十七)、石蓮用酒精稀釋(紅藍綠紫)



圖(十八)、白莧菜用酒精稀釋(紅藍綠紫)

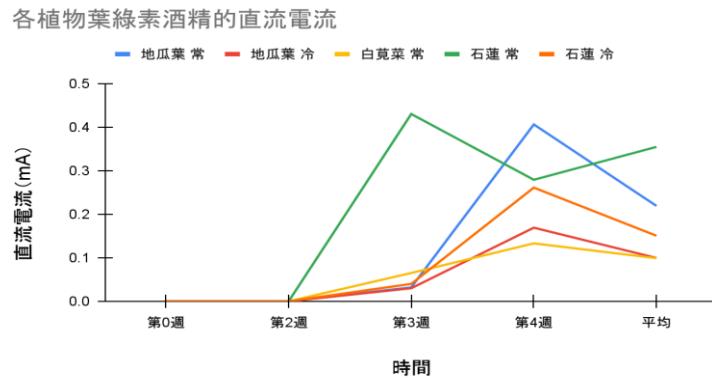
由圖十三~圖十八可知原液的吸光值較高，稀釋過後的液體吸光值會隨濃度越低而越低，地瓜葉原液和白莧菜原液的吸光值變化幅度相似。

實驗二：地瓜葉葉綠素酒精溶液、白莧菜葉綠素酒精溶液、石蓮葉綠素酒精溶液的發電量。



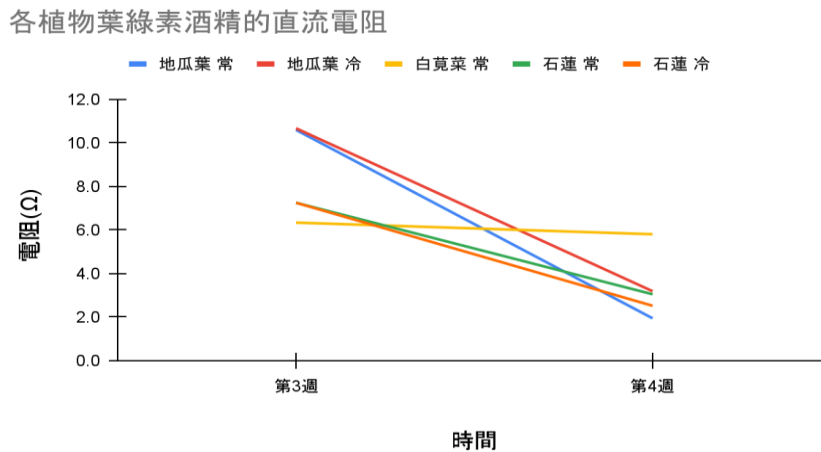
圖十九、各植物葉綠素酒精的直流電壓

由圖十九可知，在第三週有個大幅度的下降，推測跟當天天氣有關。另，白莧菜(冷藏)因為不明原因打翻，實驗數據就無法參考。



圖二十、各植物葉綠素酒精的直流電流

由圖二十可知，石蓮常溫的電流折線變化異於其他的植物。

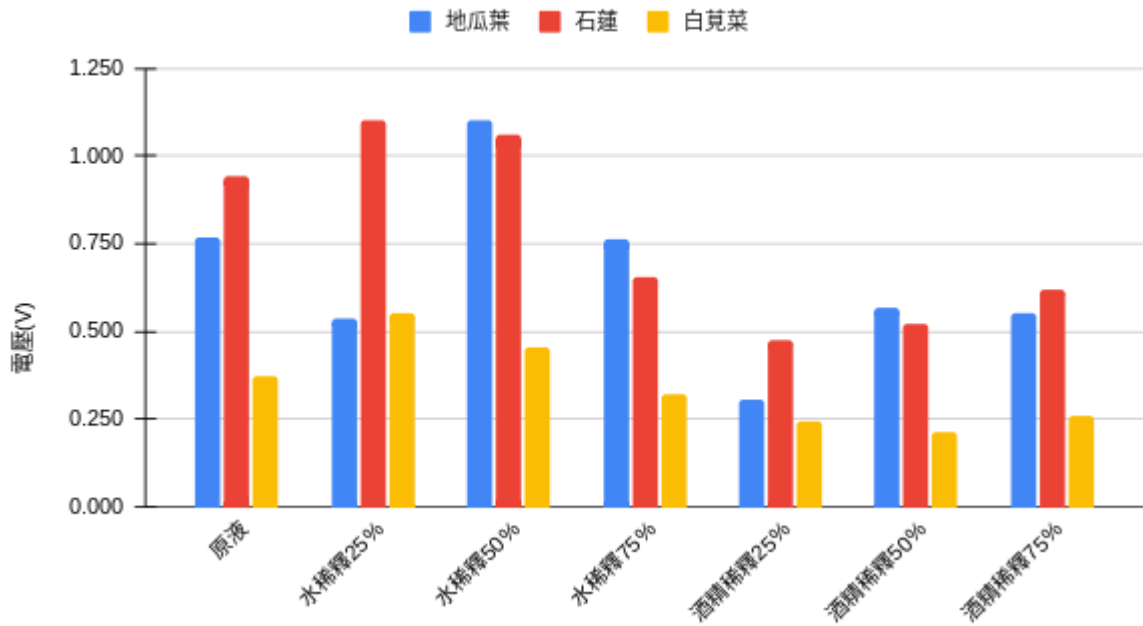


圖二十一、各植物葉綠素酒精的直流電阻

由圖二十一可知，白莧菜的常溫電阻幾乎沒有變化，其他的電阻皆下降。

實驗三：酒精稀釋和純水稀釋發電比較

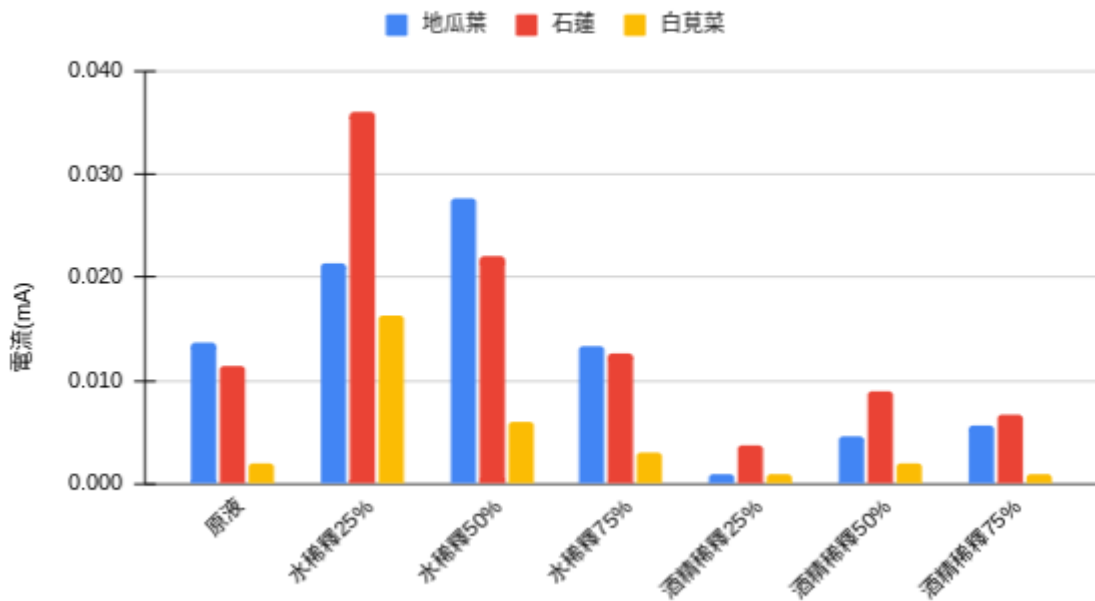
地瓜葉和石蓮和白莧菜各組電壓



圖二十二、地瓜葉和石蓮和白莧菜各組電壓

由圖二十二可知，石蓮用純水稀釋25%、地瓜葉用純水稀釋50%的電壓是一樣的，白莧菜各組平均的直流電壓是三種植物中最低的。

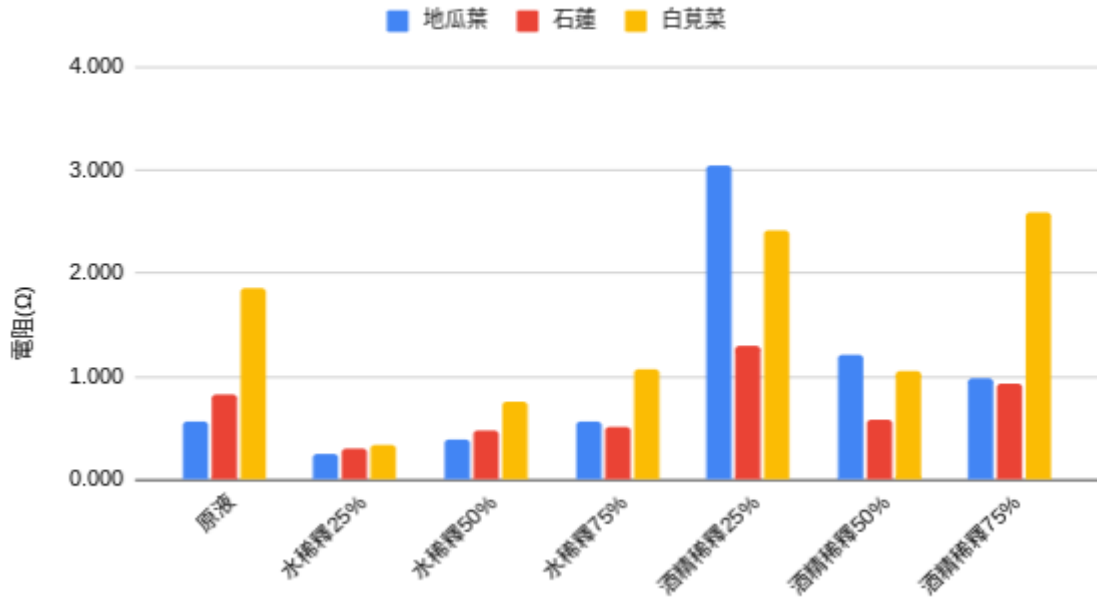
地瓜葉和石蓮和白莧菜各組電流



圖二十三、地瓜葉和石蓮和白莧菜各組電流

由圖二十三得知，石蓮用純水稀釋25%的電流位居第一，白莧菜各組的直流電流是三種植物中最低的。

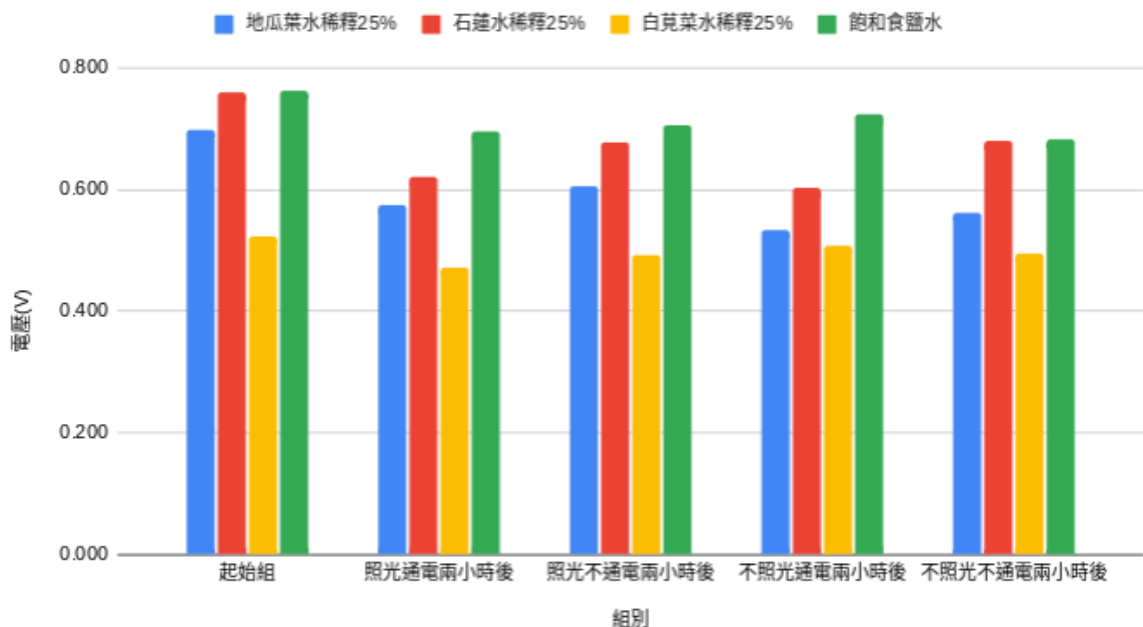
地瓜葉和石蓮和白莧菜各組電阻



圖二十四、地瓜葉和石蓮和白莧菜各組的電阻

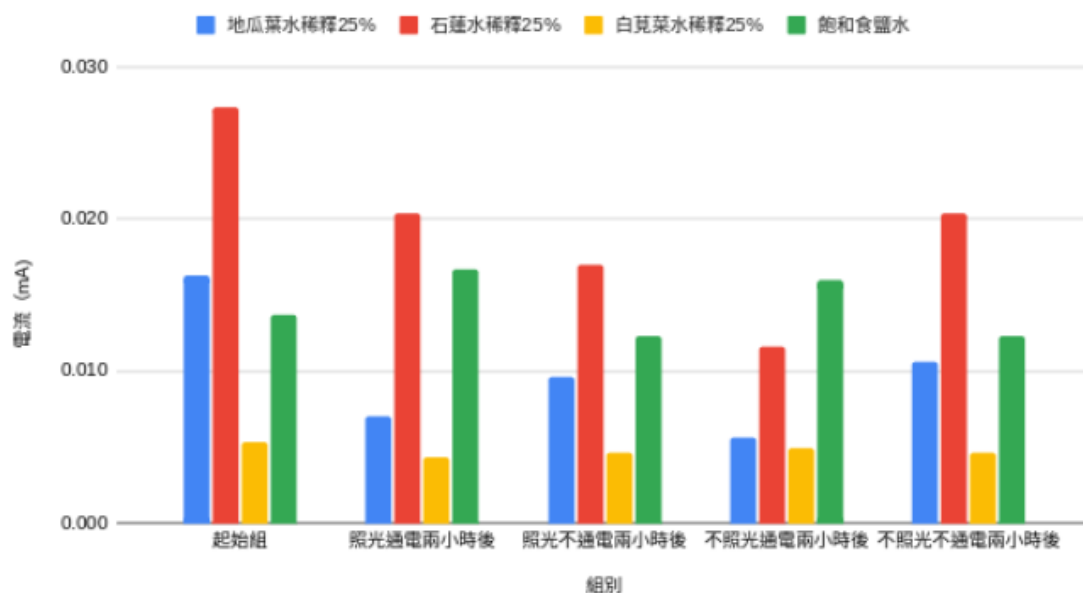
從圖二十四可知地瓜葉用酒精稀釋25%的電阻非常高，白莧菜各組平均的電阻是三種植物中最高的。

實驗四、三種植物25%純水稀釋照光通電電壓、電流、電阻、飽和食鹽水比較



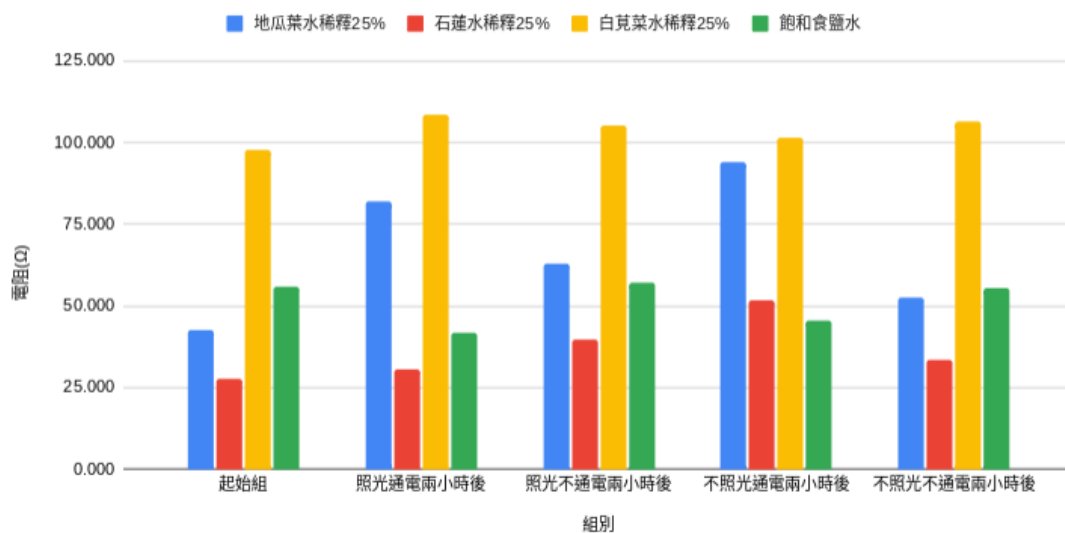
圖二十五、稀釋組電壓

從圖二十五得知，飽和食鹽水的電壓最高，石蓮純水稀釋25%次之，地瓜葉純水稀釋25%再次之，白莧菜純水稀釋25%最後一名。



圖二十六、稀釋組電流

從圖二十六可知，石蓮純水稀釋25%不照光通電兩小時後的電流居然比飽和食鹽水的電流還要低。



圖二十七、稀釋組電阻

由圖二十七得知白莧菜純水稀釋25%的電阻最高，地瓜葉純水稀釋25%次之，飽和食鹽水再次之，石蓮純水稀釋25%最後一名。

伍、討論

根據發電效率的比較標準，高電壓、高電流、低電阻的物質發電效率較佳，而根據實驗結果可以得知石蓮常溫電壓相對較高，因而可以間接推導得知CAM植物的發電效率較佳，根據實

驗的分析，石蓮的葉綠素顏色都是比較淡的，然而，這一結果仍需進一步探討，以確認其在實際應用中的可行性與挑戰。

一、石蓮（常溫）在高電壓，低電流，低電阻的條件下，其發電效果是全部六組中最優良的。

二、電壓（常溫）：地瓜葉（常：0.732）>石蓮（常：0.707）>白莧菜（常：0.630）

電壓（冷藏）：石蓮（冷：0.641）>白莧菜（冷：0.632）>地瓜葉（冷：0.523），常溫>冷藏

電流（常溫）：石蓮（常：0.355）>白莧菜（常：0.099）>地瓜葉（常：0.219）

電流（冷藏）：石蓮（冷：0.151）>地瓜葉（冷：0.100）>白莧菜（冷：0.000），常溫>冷藏

吸光值：地瓜葉>白莧菜>石蓮，常溫 \approx 冷藏

推測因為這些植物本身就不生存在寒冷的天氣裡，特別是石蓮，生存環境本就在炎熱的地方。

三、CAM植物為何發電效率較高？

（一）CAM植物主要生長在乾燥環境，因此在代謝過程中具有更高效的水分利用與能量儲存機制。

（二）這可能導致其葉綠素在光照下更容易觸發電子轉移，提升發電效能。

（三）但仍需進一步研究是否與葉綠素種類（如葉綠素A、B）或細胞結構有關。

（四）石蓮（CAM）的發電效率比較：

1. 各項比較

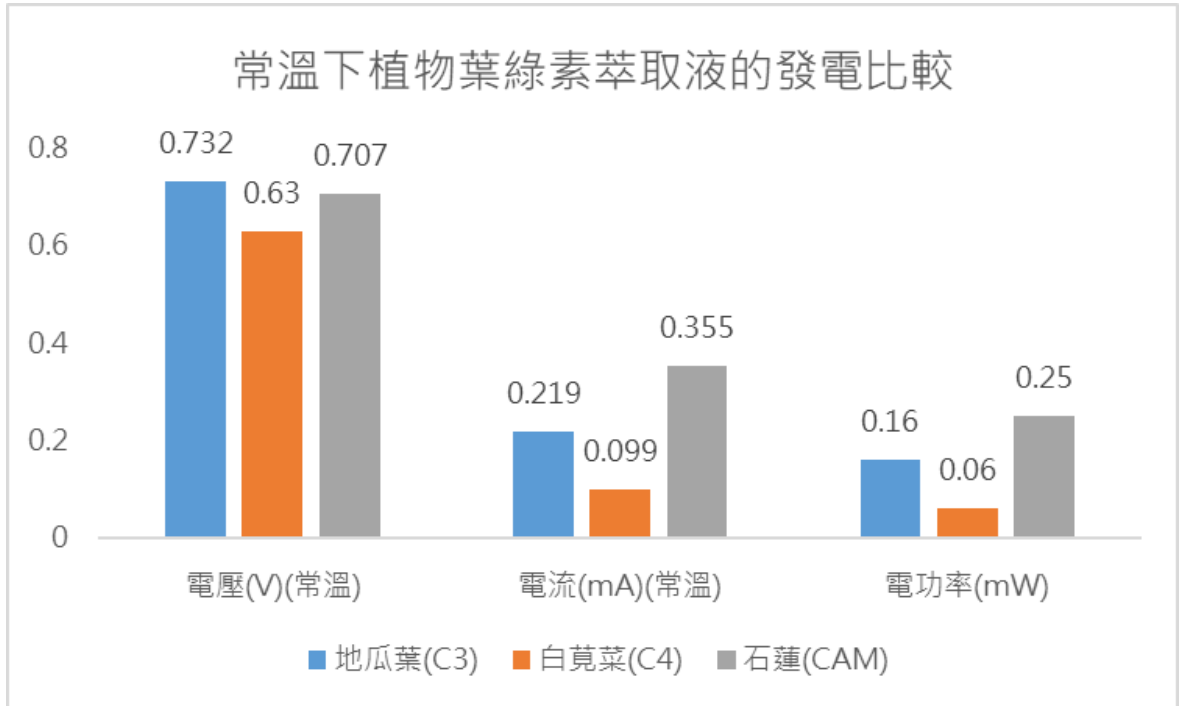
（1）電壓：比地瓜葉高 51.11%，比白莧菜高 30.77%。

（2）電流：比地瓜葉低 35%，但比白莧菜高 17.89%。

（3）電阻：比地瓜葉高 132.48%，比白莧菜高 59.34%。

這顯示出石蓮的葉綠素電池具有最高的電阻，意味著其發電特性傾向於高電壓、低電流輸出，適合作為穩定供電的來源，而地瓜葉則傾向低電阻、大電流輸出，可能較適合瞬時供電的應用。

2. 常溫下不同植物的電壓、電流、電功率比較



圖二十八、常溫下不同植物的電壓、電流、電功率比較

石蓮的電壓比白莧菜高 1.12 倍，比地瓜葉低 0.97 倍（電壓相近）。

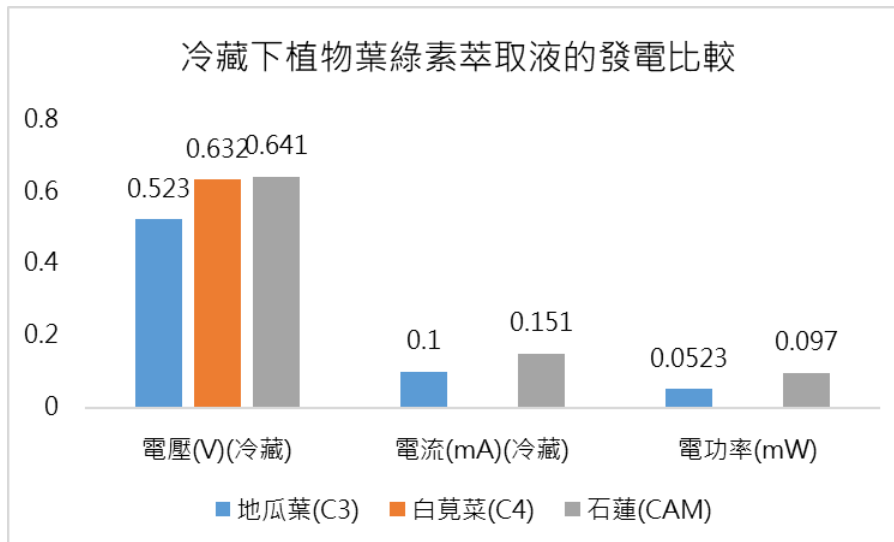
石蓮的電流是白莧菜的 3.59 倍，是地瓜葉的 1.62 倍。

石蓮的發電功率是白莧菜的 4.04 倍、地瓜葉的 1.57 倍

結論：

石蓮（CAM植物）的發電效率約為白莧菜的 4 倍、地瓜葉的 1.6 倍。這顯示 CAM 植物在葉綠素電池中的應用潛力較高，特別適合作為綠能技術開發方向。

3. 冷藏下不同植物的電壓、電流、電功率比較



圖二十九、冷藏下不同植物的電壓、電流、電功率比較

石蓮的電壓比白莧菜高 1.01 倍，比地瓜葉高 1.23 倍。

石蓮的電流是地瓜葉的 1.51 倍

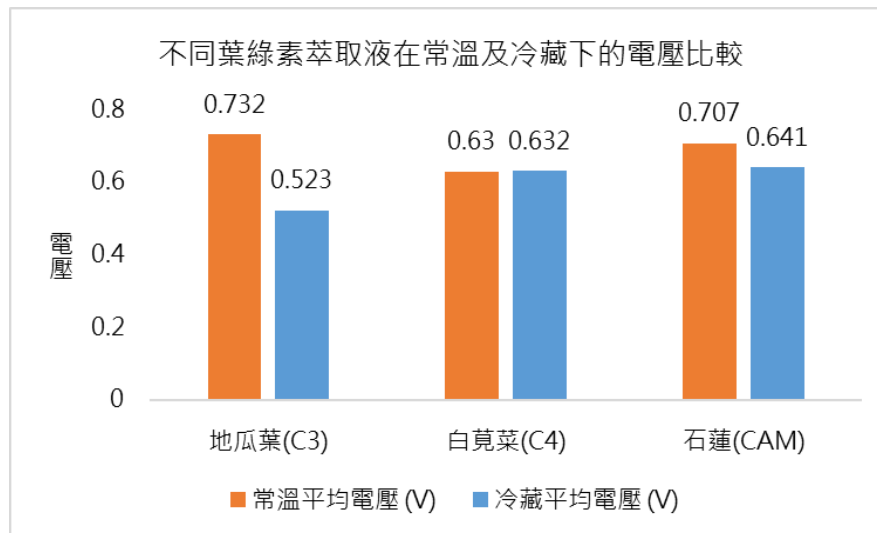
石蓮的發電功率是地瓜葉的 1.85 倍

結論：

(1)石蓮的發電效率仍然最高，約為地瓜葉的 1.85 倍。

(2)整體發電效率下降（相較於常溫），可能與葉綠素分解速率、電子傳輸能力下降有關。

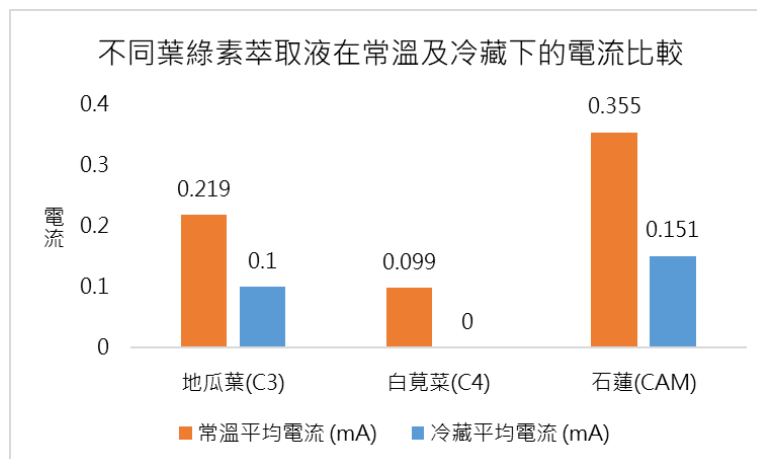
4. 不同葉綠素萃取液在常溫及冷藏下的電壓比較



圖三十、不同葉綠素萃取液在常溫及冷藏下的電壓比較

由圖三十可知，冷藏對地瓜葉(C3)影響較大，對白莧菜(C4)幾乎無影響，對石蓮(CAM)影響較小。

5. 不同葉綠素萃取液在常溫及冷藏下的電流比較



圖三十一、不同葉綠素萃取液在常溫及冷藏下的電流比較

由圖三十一可知，冷藏會降低地瓜葉(C3)和石蓮(CAM)的電流，且使白莧菜(C4)幾乎無發電能力。

6. 碳反應與發電效率的影響

表四、各植物的碳反應類型之對發電效率的影響

碳反應類型	對發電效率的影響
C3 (地瓜葉)	<p>在常溫下電壓較高，但因為 C3 植物主要在白天開啟氣孔進行光合作用，較容易受到溫度與水分變化影響，因此冷藏後發電能力大幅下降。</p>
C4 (白莧菜)	<p>具有更高效的碳固定機制，能夠在高溫、強光下保持良好的光合作用效率，但其能量主要用於增強生長，可能較少涉及電子轉移作用，因此影響發電能力。</p> <p>C4 植物的葉片內部組織結構不同，擁有維管束鞘細胞，這可能影響其導電性與發電效率。</p> <p>由於 C4 植物主要生長於乾燥環境，水分利用效率高，這可能也使其在生物電池系統中的離子遷移能力較低，影響電流輸出。</p>
CAM (石蓮)	<p>CAM 植物在晚上固定二氧化碳，因此代謝過程與 C3、C4 不同。實驗數據顯示石蓮的發電效率最高，且冷藏影響較小，可能與 CAM 植物較強的水分保持能力有關。</p>

四、為何要稀釋溶液？

(一) 測試不同濃度對發電效率的影響

不同濃度的葉綠素溶液可能影響電子傳遞效率，因此透過稀釋，可以觀察哪種濃度最有利於發電。

表五、葉綠素酒精濃度高低對發電效率的影響

濃度	對發電效率的影響
過高濃度	葉綠素分子可能會聚集，影響光吸收與電子傳輸，導致發電效率下降。
適中濃度	有助於光能吸收，促進電子釋放，提高發電效果。

過低濃度 葉綠素濃度過低，可能導致電子供應不足，發電效果減弱。

實驗結果顯示，不同植物在不同稀釋比例（25%、50%、75%）下的發電效率有所變化，因此需要稀釋來找出最佳濃度。

（二）模擬實際應用環境

在實際應用中，葉綠素電池不可能使用高濃度的純葉綠素，而是會與水或其他溶劑混合，因此研究不同稀釋比例可以：

1. 模擬電池內的實際環境，確保葉綠素濃度適合長時間運作。
2. 測試不同條件（如光照、溶劑影響）下的發電效果，提高葉綠素電池的應用價值。如果高濃度葉綠素發電效果較好，但稀釋後仍能維持高效率，則可考慮在應用中使用較低濃度的葉綠素，以降低成本。

（三）比較純水稀釋與酒精稀釋的效果

葉綠素電池的溶劑選擇影響葉綠素的穩定性，因此測試純水稀釋和酒精稀釋的影響，可以發現：

1. 純水稀釋：可能影響葉綠素的光吸收，但更環保且易取得。
2. 酒精稀釋：有助於葉綠素的穩定性，避免快速分解，但可能影響電子傳遞能力。
3. 比較不同稀釋方法的發電效率，有助於選擇最適合葉綠素電池的溶劑。

（四）減少雜質影響，提高數據準確性

1. 在葉綠素提取過程中，可能會混入細胞碎片、蛋白質等雜質，這些物質可能影響電池的導電性與穩定性。
2. 適當的稀釋可以減少雜質干擾，確保數據的準確性。
3. 可以測試葉綠素的真正發電能力，而不受雜質影響。

（五）延長葉綠素電池的使用壽命

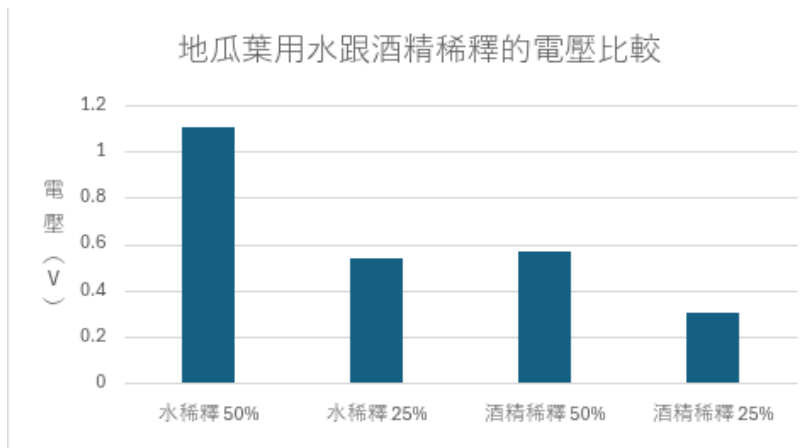
濃度過高的葉綠素可能會加速氧化或降解，導致發電效率快速下降，因此適當稀釋可以：

1. 降低葉綠素的降解速率，延長葉綠素電池的壽命。
2. 減少葉綠素的浪費，讓較少的葉綠素發揮更大的作用。

（六）結果

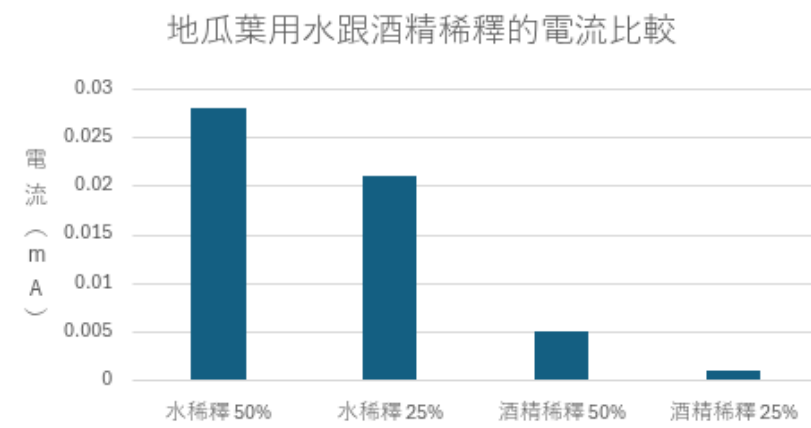
1. 純水稀釋和酒精稀釋的差別

（1）地瓜葉(C3)：



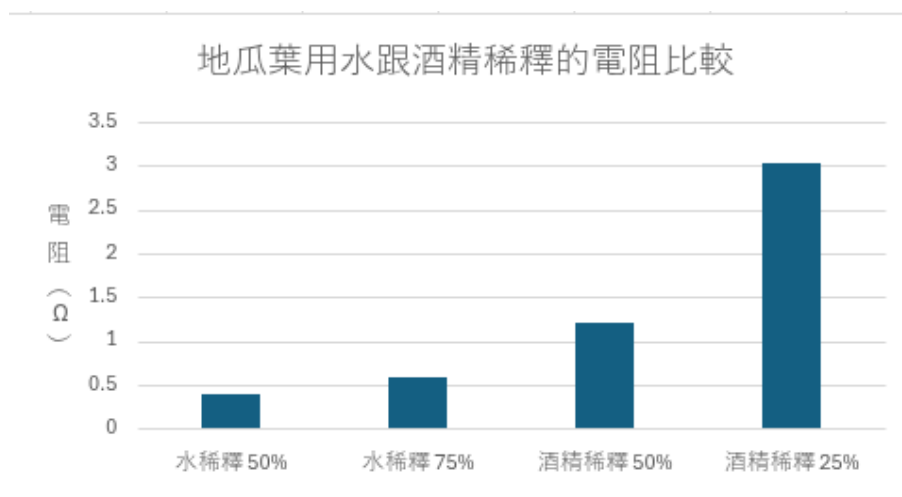
圖三十二、地瓜葉用純水跟酒精稀釋的電壓比較

由圖三十二得知純水稀釋的電壓較高，特別是 50% 的時候表現最佳，顯示純水稀釋有助於提升電壓。



圖三十三、地瓜葉用純水跟酒精稀釋的電流比較

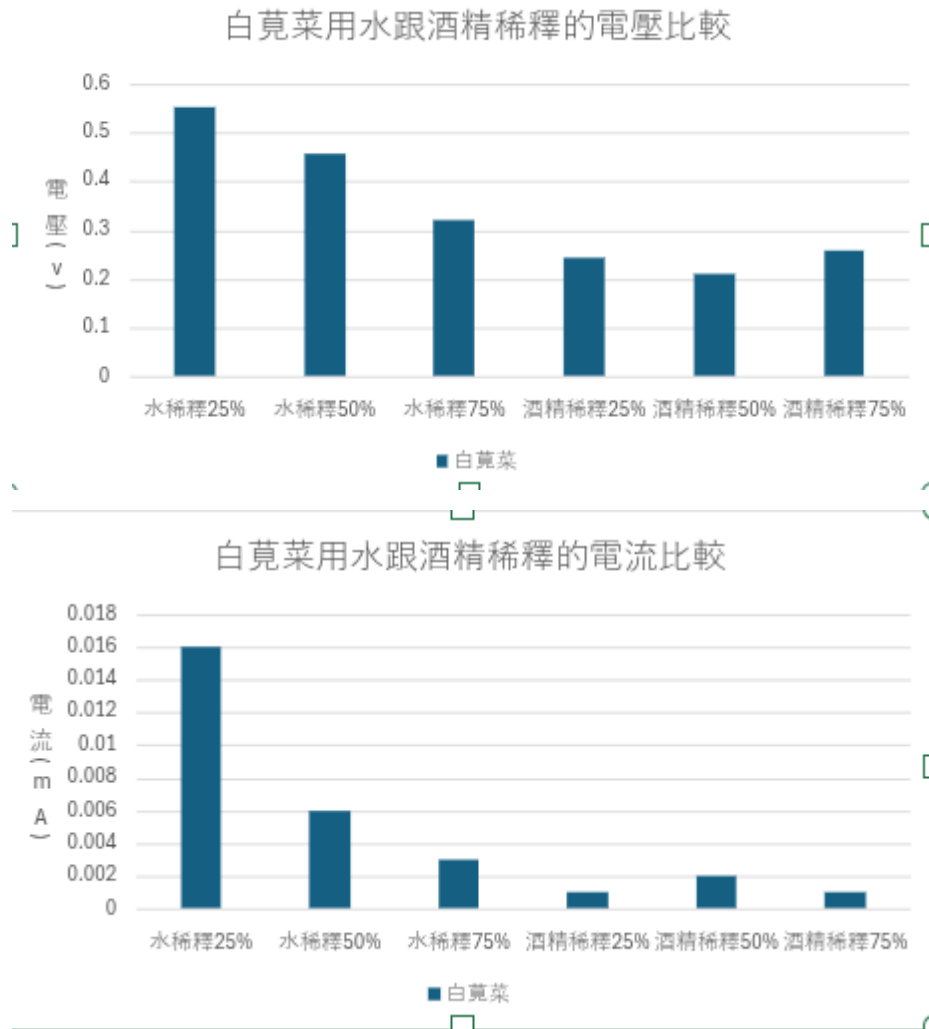
由圖三十三可知純水稀釋的電流遠高於酒精稀釋，代表純水稀釋能更有效幫助電子流動，提高發電能力。

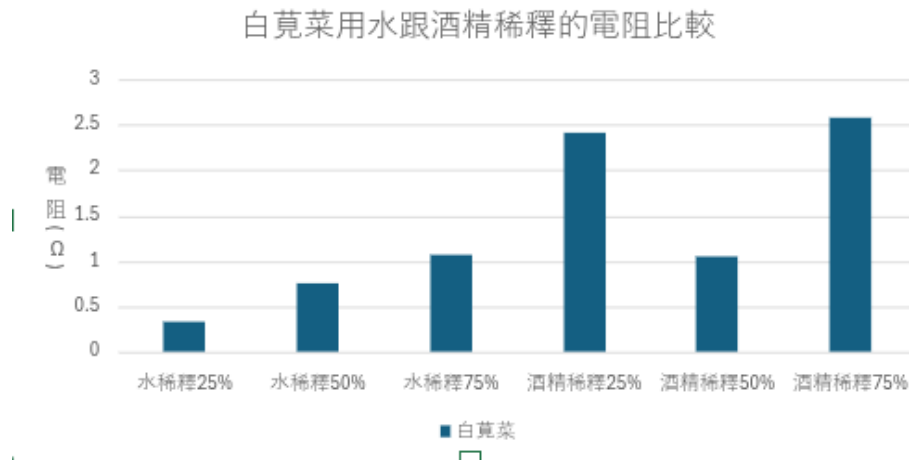


圖三十四、地瓜葉用純水跟酒精稀釋的電阻比較

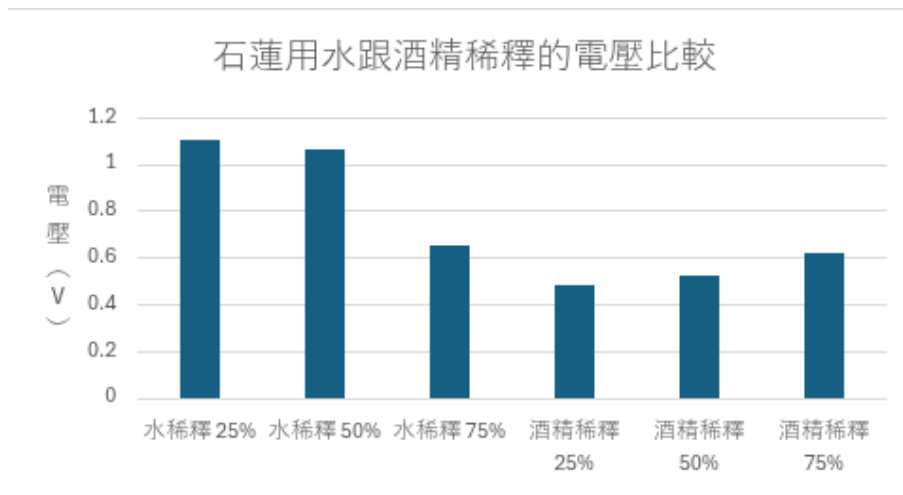
從圖三十四得知酒精稀釋的電阻明顯較高，特別是 25% 酒精的電阻高達 3.037Ω ，可能導致電子流動受阻，降低發電效率。純水稀釋的發電表現優於酒精稀釋。電壓較高，特別是純水稀釋50%表現最佳。電流較大，水能幫助電子流動，提高功率輸出。電阻較低，不會過度阻擋電流，使發電效率更佳。酒精稀釋對發電不利。電壓、電流都偏低，顯示電子流動受阻。電阻過高，尤其是 25% 酒精組，影響發電表現。最佳發電條件：純水稀釋 50% 最有利於地瓜葉發電。

(2)白莧菜(C4)：



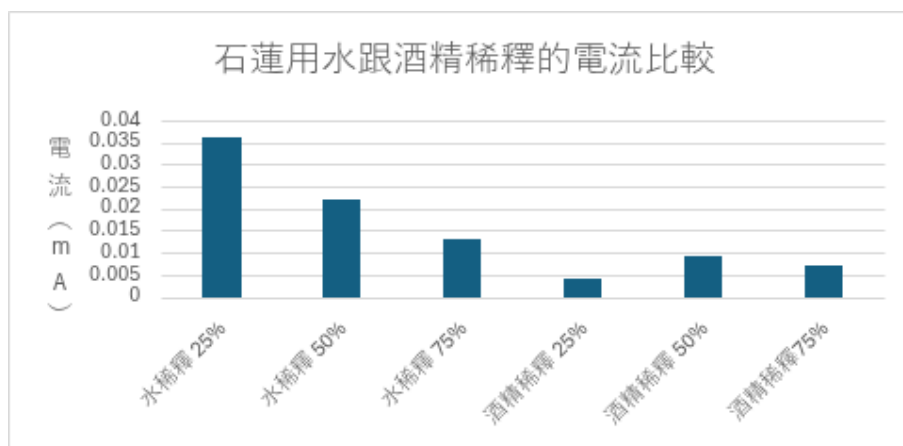


(3)石蓮(CAM)：



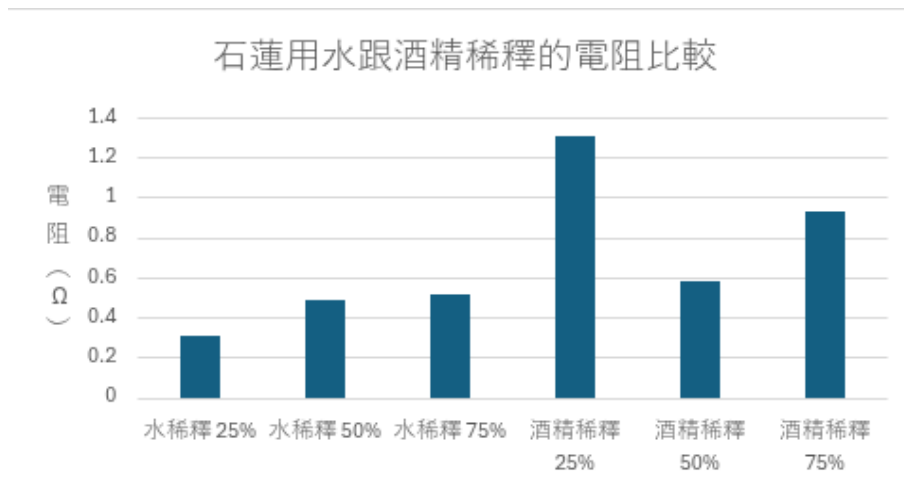
圖三十五、石蓮純水酒精稀釋的電壓比較

從圖三十五可知石蓮在純水稀釋時的電壓較高，表示導電效果較佳。



圖三十六、石蓮純水酒精稀釋的電流比較

從圖三十六可知純水稀釋時，電流較高，意味著較好的電子流動性。



圖三十七、石蓮純水酒精稀釋的電阻比較

由圖三十七得知酒精稀釋的電阻較高，表示電子不易流動，因此影響了發電效率。

整體：

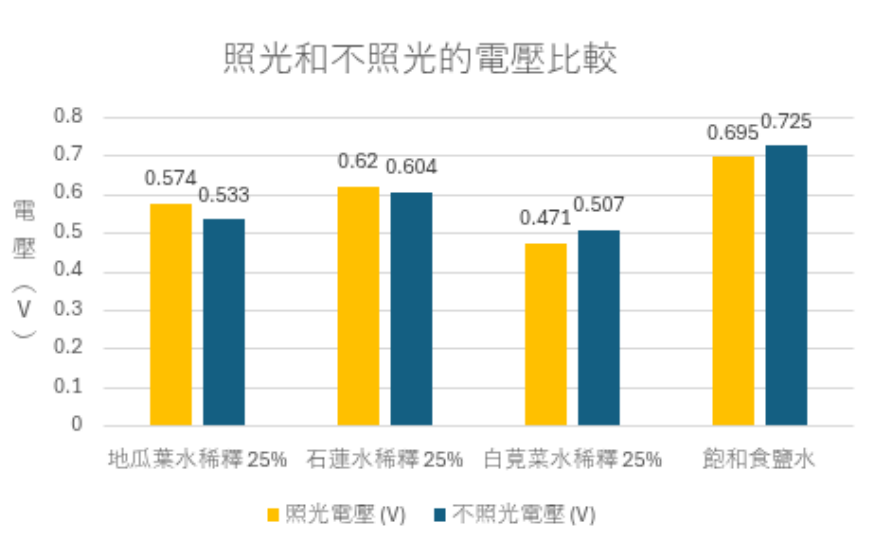
純水稀釋較佳，因為：電壓較高、電流較大、電阻較低。

酒精稀釋發電較弱，因為：電壓較低、電流較小、電阻較高，電子流動受限。

這顯示純水作為稀釋介質時，有助於提升石蓮的發電效能，而酒精可能影響了電子傳遞，導致效率下降。

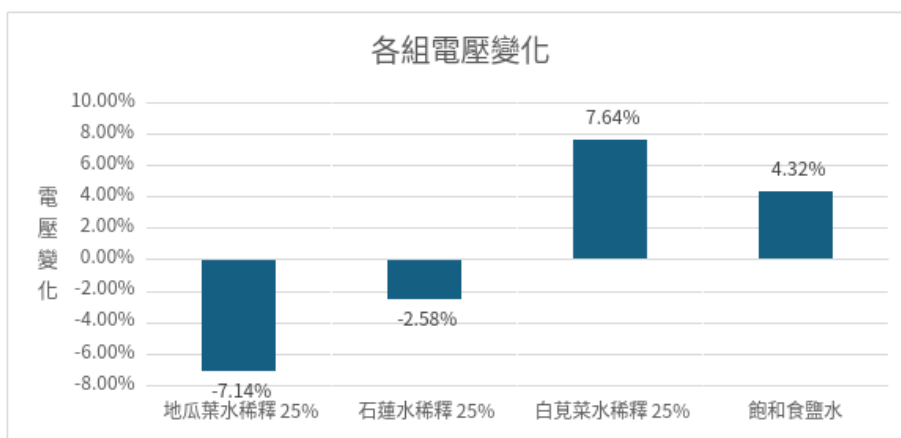
(註)實驗當時因為不是白荳菜的產季，無法製作白荳菜的葉綠素萃取液，故缺少白荳菜的實驗結果。

2. 照光與不照光的比較：比較各組照光或不照光2小時後的電力狀況

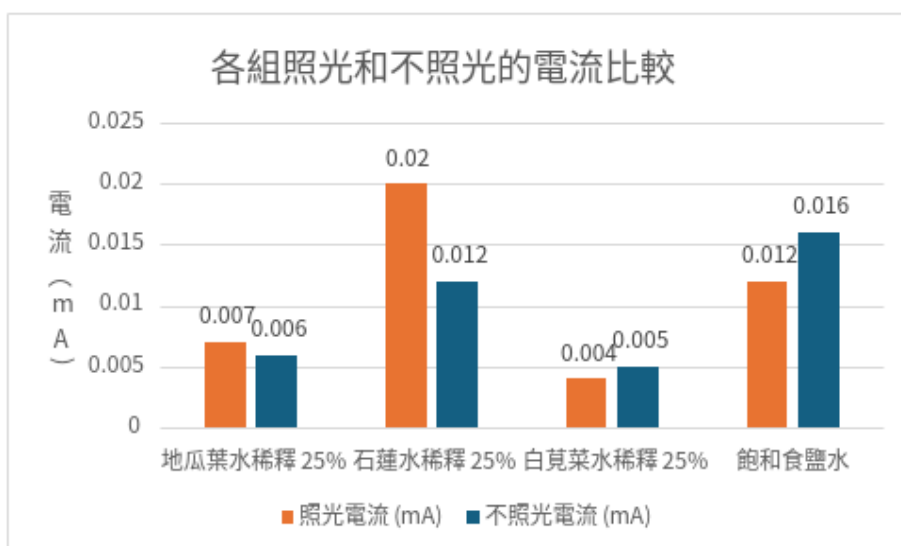


圖三十八、各組照光兩小時後和不照光2小時後的電壓比較

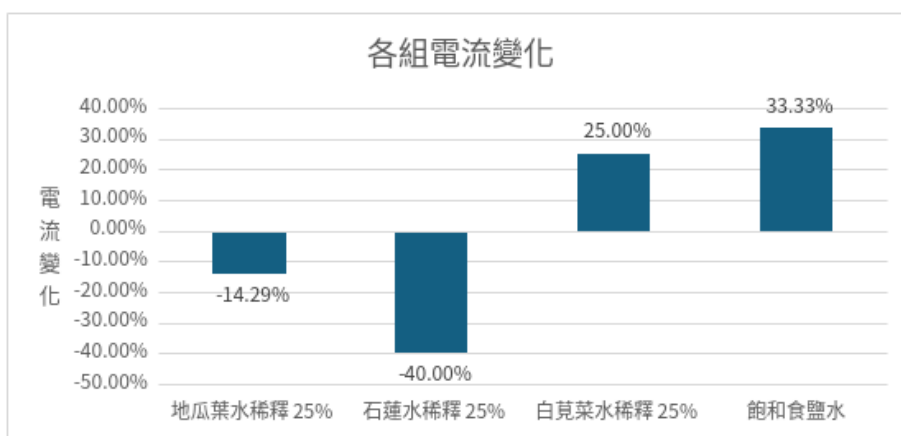
由圖三十八可知地瓜葉和石蓮照光的電壓比不照光的電壓還高，但白荳菜和飽和食鹽水則否。



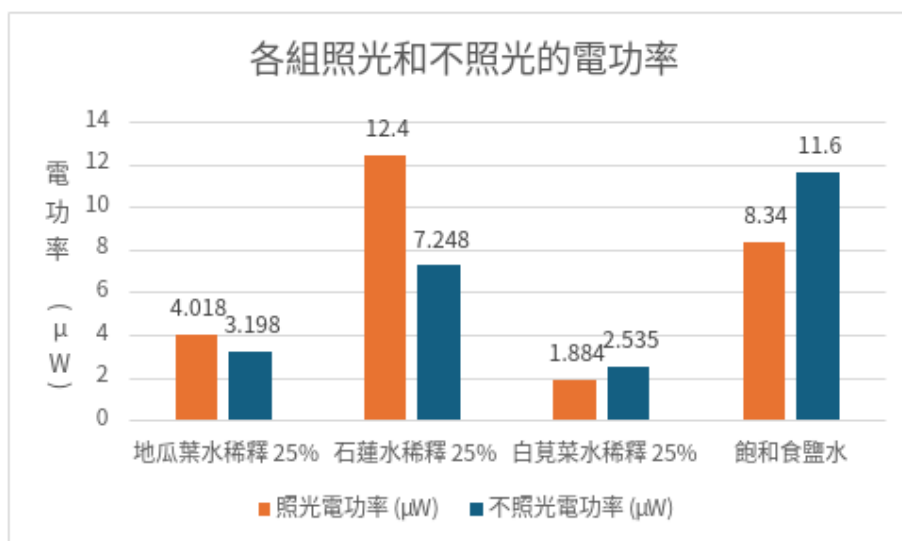
圖三十九、各組照光兩小時後和不照光2小時後的電壓變化(以照光為基準)
由圖三十九得知地瓜葉減少最多，而白莧菜增加最多。



圖四十、各組照光和不照光2小時後的電流比較
從圖四十得知地瓜葉和石蓮照光的電流比不照光的電流還高，但白莧菜和飽和食鹽水則否。

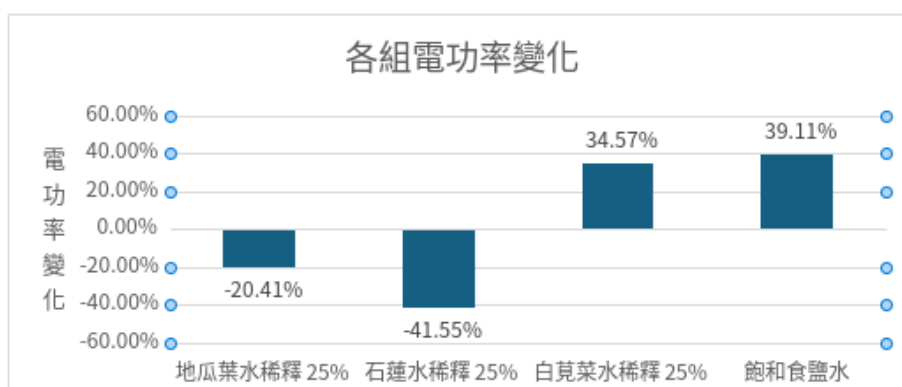


圖四十一、各組照光和不照光2小時後的電流變化(以照光為基準)
由圖四十一得知石蓮減少最多，而飽和食鹽水增加最多。



圖四十二、各組照光和不照光2小時後的電功率比較

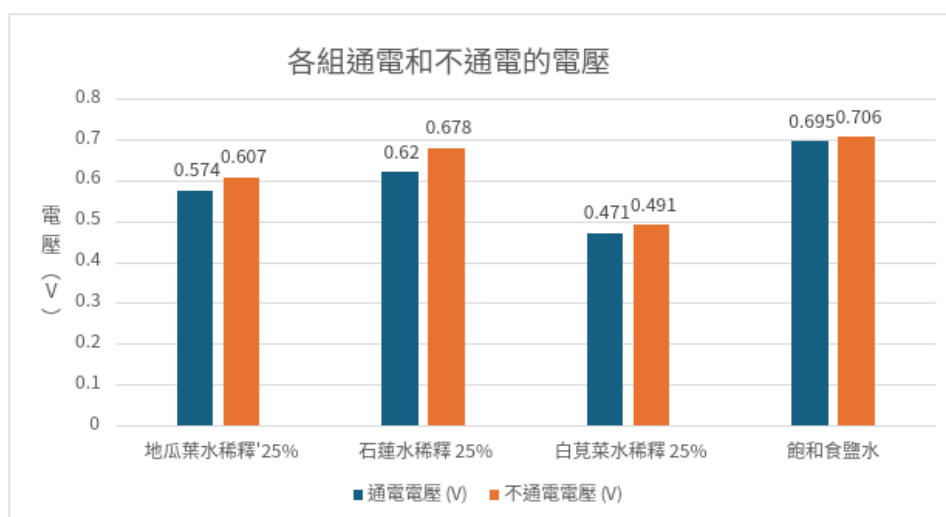
由圖四十二可知地瓜葉和石蓮照光的電功率比不照光的電功率還高，但白莧菜和飽和食鹽水則否。



圖四十三、各組照光和不照光2小時後的電功率變化（以照光為基準）

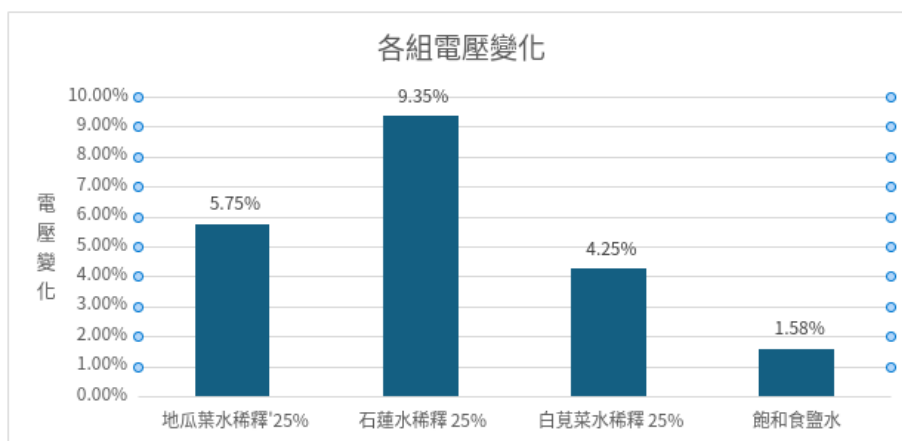
由圖四十三可知石蓮減少最多，而飽和食鹽水增加最多。

3. 通電與不通電的比較：將各組分別通電2小時或不通電2小時，觀察電壓、電流的變化。



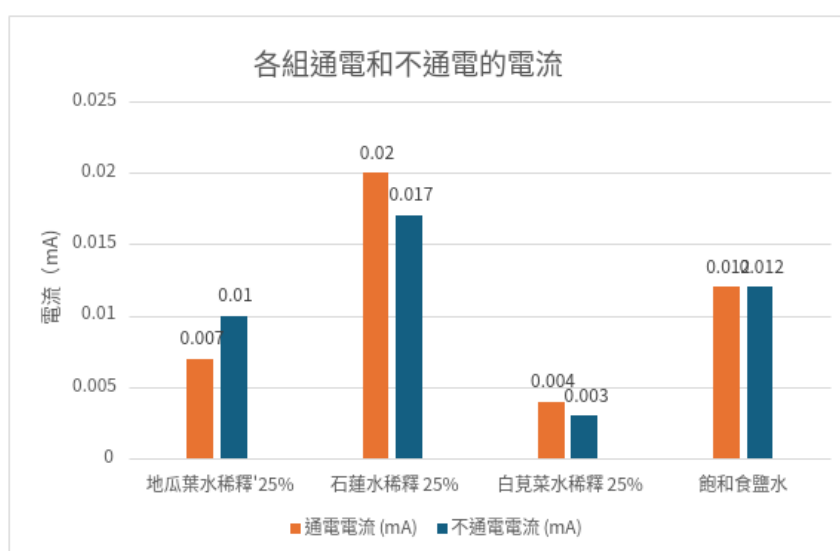
圖四十四、各組通電和不通電的電壓比較

從圖四十四可知所有溶液通電的電壓比不通電的電壓還低。



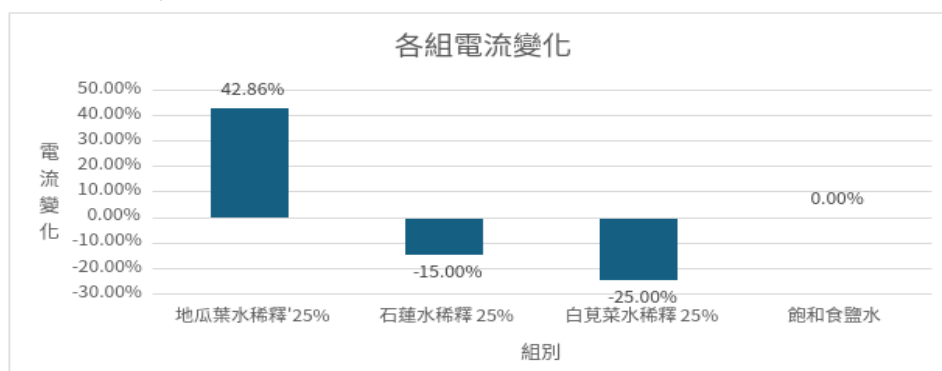
圖四十五、各組通電和不通電的電壓變化（以通電為基準）

由圖四十五可知石蓮增加最多，而飽和食鹽水增加最少。



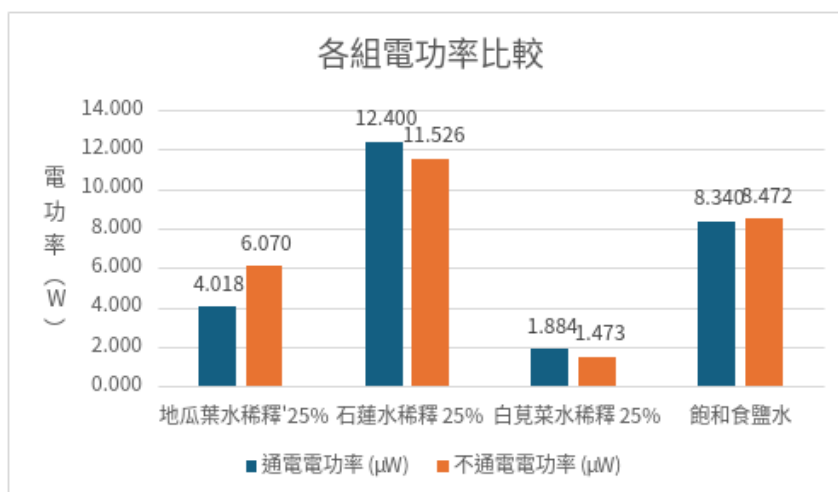
圖四十六、各組通電和不通電的電流比較

從圖四十六可知石蓮水稀釋25%的電流仍最高，但通電和不通電的電流差異不大。



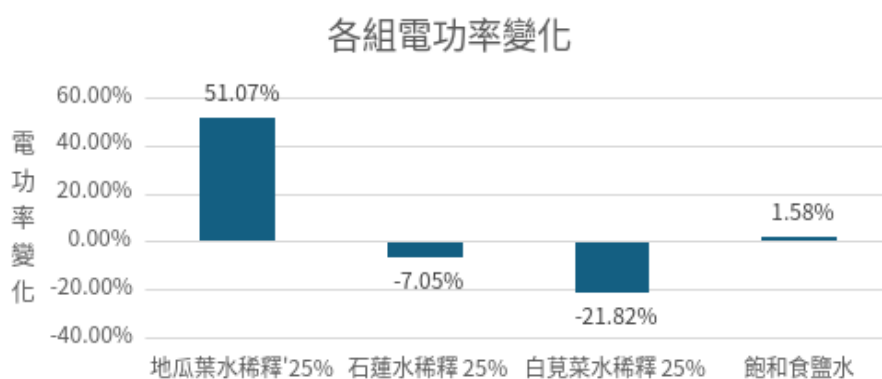
圖四十七、各組通電和不通電的電流變化（以通電為基準）

從圖四十七可知通電和不通電的電流差異因種類而異，有些通電較高，有些不通電較高，像是地瓜葉水稀釋25%的不通電比通電的電流上升約42.9%，但是白莧菜水稀釋25%卻比通電組下降25%。



圖四十八、各組通電和不通電的電功率比較

由圖四十八可知石蓮和白莧菜的電功率是通電比不通電高，但地瓜葉和飽和食鹽水則否。



圖四十九、各組通電和不通電的電功率變化（以通電為基準）

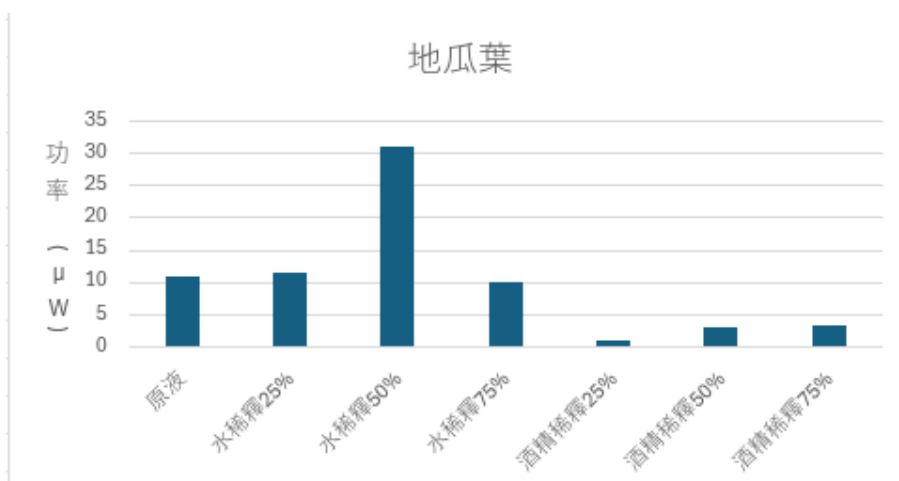
由圖四十九得知地瓜葉增加最多，而白莧菜減少最多。

表六、照光通電比較表

條件	電壓	電流	電阻
照光 vs. 不照光	照光較高	照光較高	不照光較高
通電 vs. 不通電	通電較低	通電較高	通電較高

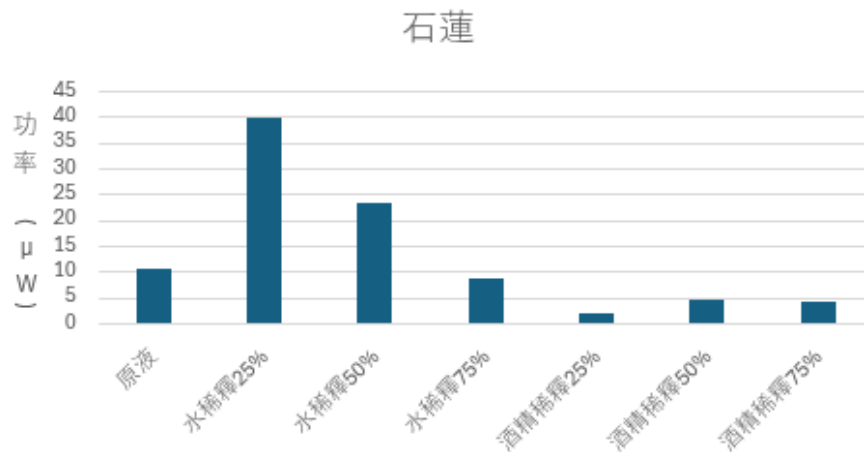
發電效率：照光>不照光，不通電>通電。

4. 發電功率



圖五十、地瓜葉的發電功率

由圖五十得知地瓜葉用純水稀釋50%的發電功率較高。



圖五十一、石蓮的發電功率

由圖五十一得知石蓮用純水稀釋25%的發電功率較高。

最高功率：出現在石蓮純水稀釋25% ($39.71 \mu\text{W}$)。

最低功率：出現在地瓜葉酒精稀釋25% ($0.30 \mu\text{W}$)。

純水稀釋比酒精稀釋的發電功率更高，特別是 50%稀釋的地瓜葉 ($30.88 \mu\text{W}$) 與 25%稀釋的石蓮 ($39.71 \mu\text{W}$) 表現最佳。

這些數據顯示不同的稀釋方式對發電功率有明顯影響，純水稀釋（特別是 25-50%）比酒精稀釋效果更好。（註：當時因為不是白莧菜的產季，故沒有白莧菜的發電功率）

五、葉綠素電池的技術挑戰

（一）、穩定性問題：

1. 研究結果顯示，葉綠素酒精溶液在長時間存放後，吸光值有所降低，可能影響發電效果。
2. 這表明葉綠素容易分解，未來需尋找更好的保存方式，如抗氧化處理。且由實驗結果得知，冷藏後電力較差，因此要避免冷藏保存。

（二）、發電能力有限：

1. 與現有的商業電池相比，葉綠素電池的發電量仍然偏低，難以直接應用於大功率電子設備。
2. 可能需要改進葉綠素的提取技術，或結合其他能量轉換技術（如納米材料催化、半導體技術等）。

六、成本與應用考量

（一）、植物培育與取得成本：

1. CAM植物通常生長較慢，且部分種類難以大量種植，可能會影響其作為可再生能源的應用。

2. 相較於C3、C4植物，其生產成本可能更高，未來需進一步評估量產的可行性。

(二)、潛在應用場景：

1. 雖然葉綠素電池發電量較小，但可用於低功耗設備，例如環境感測器、微型電子裝置等。

2. 若能解決穩定性與發電量問題，可能可作為綠色能源補充技術，減少對傳統電池的依賴。

七、研究的改進與未來方向：

(一)、增加不同植物類型的測試：

研究主要選取了地瓜葉 (C3)、白莧菜 (C4) 與石蓮 (CAM) 作為研究對象，但未來可加入更多植物，進一步驗證結果的普適性。

(二)、改進葉綠素電池的設計：

目前的葉綠素電池設計較為簡單，未來可嘗試不同的電解質、材料或電極設計，以提升發電效能。

例如，可以嘗試奈米碳材料電極，提高電子傳輸效率。

(三)、延長葉綠素電池的壽命：

研究結果顯示葉綠素溶液的穩定性不佳，未來可嘗試添加穩定劑（如抗氧化劑）或不同溶劑來延長其使用壽命。

八、影響發電效率的因素：

電壓 (V) 高 → 提供更多能量，提高發電效率。

電流 (I) 高 → 代表電子流動更順暢，也能提升發電功率。

電阻 (R) 適中 → 太高的電阻會降低電流，影響發電效率；但若電阻過低，可能導致短路或功率損失。

最佳發電條件：

電壓高（但不能過高導致損失）

電流高（但不能因短路過大而損壞）

電阻適中（確保電流流動順暢，不至於過大或過小）

從實驗數據來看，石蓮在純水稀釋 25%時電壓、電流表現最佳，而酒精稀釋的電阻較高，導致電流下降，功率也降低。因此，選擇適當的稀釋條件，讓電壓與電流達到平衡，電阻維持適中，才能獲得最佳發電效率。

陸、結論

實驗一：石蓮葉綠素電池的發電效率最佳，發電功率是白莧菜的 4.04 倍、地瓜葉的 1.57 倍，也就可以推斷出CAM植物發電效率最佳，未來在開發葉綠素電池時，可優先考慮此類植物。而最讓我們意外的是，石蓮的葉綠素濃度約為白莧菜和地瓜葉的66%，可是發電功率卻是其他的幾倍。

實驗二：我們發現無論是使用何種植物，放在常溫中的電池，效果比放在冷藏中的電池還好，以石蓮為例：放了兩週之後，在常溫的電功率下降了約3%，冷藏電功率下降了約63%。而在兩週後常溫的電功率比冷藏電功率高了約 159%。

實驗三：我們發現，如果使用純水稀釋至濃度25%的效果會是最好的，電壓是最高的，甚至比原液的電壓還高，以石蓮為例：電壓比高出近56%。也就是說，我們未來在做葉綠素電池的時候，可以用純水來稀釋使發電效率更佳。

如果我們是使用酒精來稀釋的話，我們發現效果並不會變好，電壓都會直接下降變得更差了很多，以25%酒精和純水稀釋為例，高出了約132%。因此我們可以了解到，葉綠素在酒精中解離度是比純水還要差的。

實驗四：我們發現照光葉綠素電池的電功率高，以石蓮為例，電功率比高出近71%，光照下電力>黑暗中電力，有助於他的續航力，此外，在不通電狀況下的電壓較高、且電流較小，更具備一個良好電池的特質。因此如果要讓電池續航力最高的狀態，電池外殼要是透明的會更有電，這是令人意外的，因為C3、C4、CAM植物主要的差異是在碳反應，沒想到這裡的光反應也有差，真是個有趣的發現，這也可以讓我們去深入研究光反應的機制看看這些C3、C4、CAM植物光反應的差異。

總結：使用CAM的植物、常溫保存、用純水稀釋為25%、使電池照到光，會有最好的發電效率，由於葉綠素的穩定性、發電能力以及生產成本等問題，葉綠素電池仍有許多技術挑戰需解決。未來可以透過改進電池設計、尋找更穩定的葉綠素提取方法，以及探索不同植物類型來進一步提升葉綠素電池的實用性。也可以研究是C3、C4、CAM植物在光反應的不同。

柒、參考文獻資料

- 吳佳臻, 范宇茵, 連名妤, 管雅涵, 游雅涵, & 張承涵. (n.d.). 雜草也能做電池? / 中華民國第 53 屆中小學科學展覽會作品說明書. 國立臺灣科學教育館. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/53/pdf/080212.pdf>
- Exp. 15 Photosynthetic Pigments. (n.d.). 東海大學生物化學實驗室. <https://bclab.thu.edu.tw/ppt/15.pdf>
- 臨床實驗室 (Ed.). (2022, November 9). 電解質檢驗 | 衛教資訊 | 臨床實驗室. 草屯療養院. https://www.ttpc.mohw.gov.tw/?aid=509&pid=105&page_name=detail&iid=1140
- 小小發電廠. (2016, May 1). 中央研究院. https://tea.japs.tp.edu.tw/~japsteagif/old/guaidis/10503-No39/Goods/Science_Middle_28_Wang.pdf
- 臺中市豐原區翁子國民小學的同學們. 第 53 屆 國小化學科作品 (2015, November 1). 雜草也能做電池? / 科展指導老師 - 科學X博士. Doctorx9000.Com. <https://doctorx9000.com/126/>
- 楊嘉慧, & 楊秉晃. (2011). 葉綠素電池沾水即發電 (廖重賓, Ed.). 龍騰文化. <https://www.ltedu.com.tw/web/scientific-epaper-content.aspx?KEY=106&ARTICLE=01>
- 洪千卉, 許子謙, 盧瑋澤, & 陳語柔. (n.d.). 豐功偉『葉』 ~ 做一顆最佳『綠能』可充式行動電池之研究 / 中華民國第 56 屆中小學科學展覽會作品說明書. 國立臺灣科學教育館. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/56/pdf/080217.pdf>
- 何郁庭. (2023, February 9). 種植物也可以發電? 植物微生物燃料電池黑科技. CASE報科學. <https://case.ntu.edu.tw/blog/?p=41493>
- 東森電視「科學大解碼」製作小組 (Ed.). (2009, April 1). 葉綠素電池. 科技大觀園. <https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000009/detail?ID=de703a82-f608-4739-8bb4-e00927177473>
- 化工群 (Ed.). (n.d.). 植物能發電. 全國高級中等學校專業群科 105 年專題暨創意製作競賽. <https://vtedu.kl2ea.gov.tw/uploads/1608706444044VJQZ5UcP.pdf>
- 蔡任圖. (2023, February 24). 【任圖講科普】181 C3、C4、CAM植物的光合效率比較. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=VmzY2Ks9F60>
- 許庭羽, 王婷卉, & 沈晏如. (n.d.). 葦兒藏奧秘, 一葉知千秋 / 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會作品說明書. 國立臺灣科學教育館. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-052103.pdf>

- 林玟娟 (Ed.). (2009, July 10). 光呼吸作用-上 (*Photorespiration*). 科學Online高瞻自然科學教學資源平台. <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1085>
- Ted-ed. (2014, April 1). 自然界最小的工廠：卡爾文循環 - 凱西·希明頓 (*Cathy Symington*). YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=0UzMaoaXKaM>
- 匿名用戶 (Ed.). (2019, August 9). 葉綠素的提取和分離實驗步驟是什麼?. 化源網. <http://www.chemsrc.com/news/350.html>
- 林芷瑄, & 林姿婷. (n. d.). 葉綠素電池之應用/中華民國第 59 屆中小學科學展覽會. 國立臺灣科學教育館. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-052609.pdf>
- 葉綠素 A、B、C 分析. (n. d.). EUROLAB Laboratory Services. <https://www.eurolab.net/zh-TW/testler/cevre-testleri/klorofil-a-b-c-analizi/>