中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組　植物學科

最佳團隊合作獎

052103

瘋流蘊試—水蘊草的細胞質流機制初探

學校名稱：國立新竹女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 游昕頤	張淳琤
高二 李亦庭	張智鈞
高二 林奕妘	

關鍵詞：水蘊草、細胞質流、淨光合作用

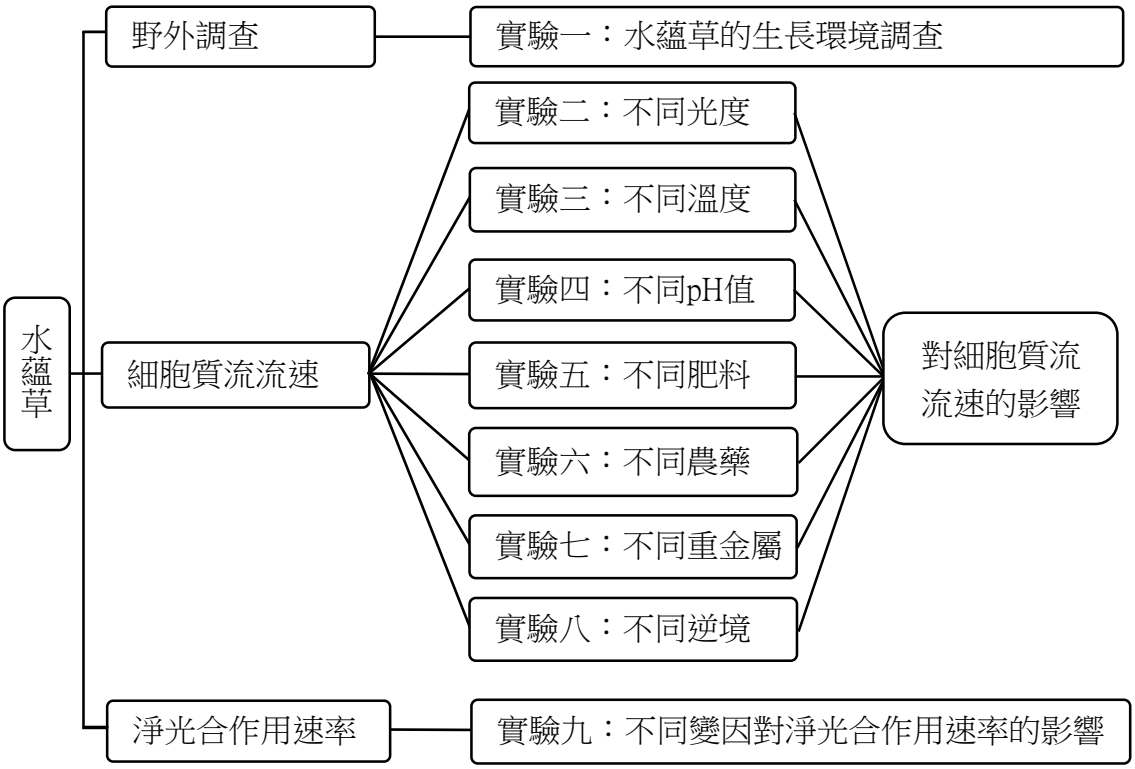
摘要

細胞質流（cytoplasmic streaming）的機制，目前通常被認為是藉由 ATP 提供能量，使肌動蛋白分子連接胞器而沿著細胞骨架移動，並以此促進相鄰的兩個細胞透過原生質絲（plasmodesmata）交換物質。本研究建立水蘊草（*Egeria densa*）之細胞質流流速的觀察及測量方法，並以能量的角度去探討其機制層面。我們發現當光度小於 1000 lux 時，細胞質流流速及淨光合作用速率具有高度正相關。硝酸鎳能明顯促進細胞質流流速及淨光合作用速率，而 40℃、pH1、pH13、硝酸汞、4℃一天能使細胞質流停止。

壹、研究動機

高中選修生物的第一個實驗，便是觀察水蘊草的細胞質流，當我們透過顯微鏡觀察到一顆顆葉綠體隨著細胞質流整齊的流動時，這股細胞質流就猶如偉大的航道般壯闊，因此我們便對細胞質流這個現象十分好奇。經一番收集資料後，我們了解細胞質流與蛋白質構成的細胞骨架及 ATP 有關，但卻未有進一步探討的文獻，勾起了我們想一探究竟的初衷。

貳、研究目的



參、研究設備及器材

一、水蘊草（*Egeria densa*）簡介：

域：真核域 *Eukarya*

界：植物界 *Plantae*

門：被子植物門 *Magnoliophyta*

綱：單子葉植物綱 *Liliopsida*

目：澤瀉目 *Alismatales*

科：水鱉科 *Hydrocharitaceae*

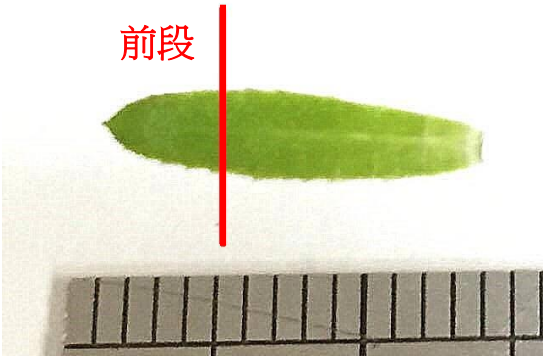
屬：水蘊草屬 *Egeria*

種：*Egeria densa*

水蘊草，別名蜈蚣草。主要分布在湖邊或池塘中，為沉水性水生植物，因容易生長而非常常見。適合生長在營養及光線充足的環境中，葉輪生，葉片上有一主脈。老葉枯硬而幼葉嫩綠且極薄，老葉比幼葉大許多。頂端葉片十分密集，越靠近根部其節間愈長。極少開花，若將一段莖扦插即可生長至極長。



圖一、水蘊草植株頂端示意圖



圖二、水蘊草葉片前段示意圖

二、實驗器材：

表一、實驗材料（硬體）

實驗材料	數量	實驗材料	數量
1. 電腦（UX303-LB）	一臺	12. LED 燈泡（7W）	數個
2. 可攝影的數位生物顯微鏡（D341b）	一臺	13. 燒杯	數個
3. Canon600D 單眼相機	一臺	14. 攪拌棒	數支
4. PASCO sparklink Air	一臺	15. 鑷子	數支
5. Optical Dissolved Oxygen Sensor（PS-2196）	一組	16. 玻璃滴管	數支
6. Advanced Water Quality Sensor	一組	17. 光度計	數支
7. 熱風循環烘箱（H150）	一臺	18. 溫度計	數支
8. 冰箱	一臺	19. pH meter（PH-208）	數支
9. 家用機械式定時器	一臺	20. 載玻片	數個
10. 半網機械工作燈	一臺	21. 蓋玻片	數個
11. 四聯燈座	一個		

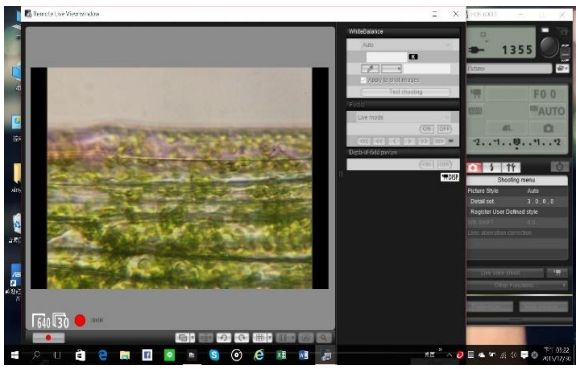
表二、實驗材料（軟體）

實驗材料	數量	實驗材料	數量
1. EOS Utility 攝影軟體 2.10.2.0 版	一個	4. SigmaPlot 10.0 統計繪圖軟體	一個
2. Tracker 電腦軟體 4.90 版	一個	5. SigmaStat 3.5 統計軟體	一個
3. SPARKvue 電腦軟體	一個		

表三、實驗材料（實驗溶液）

實驗材料	數量	實驗材料	數量
1. 池水（500 lux，20℃，pH≒8）	適量	9. 0.1%鈣肥（硝酸鈣）	適量
2. pH1、pH3 及 pH5 的氯化氫水溶液	適量	10. 稀釋 3000 及 6000 倍的芬化利	適量
3. pH7 的逆滲透水	適量	11. 稀釋 96000 倍的因滅丁	適量
4. pH9、pH11 及 pH13 的氫氧化鈉水溶液	適量	12. 100ppm 硫酸銅水溶液	適量
5. 0.1%氮肥（硫酸銨）	適量	13. 100ppm 硝酸鎳水溶液	適量
6. 0.1%鉀肥（氯化鉀）	適量	14. 100ppm 硝酸鉛水溶液	適量
7. 0.1%磷肥（過磷酸鈣）	適量	15. 100ppm 硝酸汞水溶液	適量
8. 0.1%鎂肥（氯化鎂）	適量	16. 1.5%氯化鈉水溶液	適量

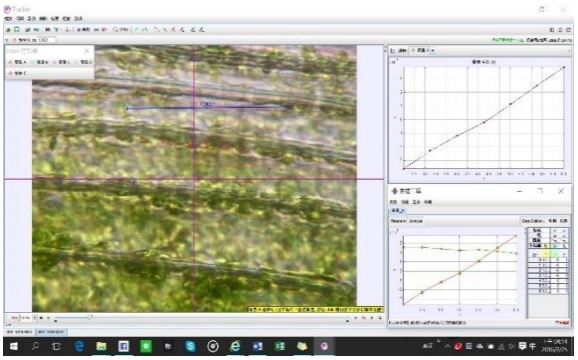
三、實驗器材圖：



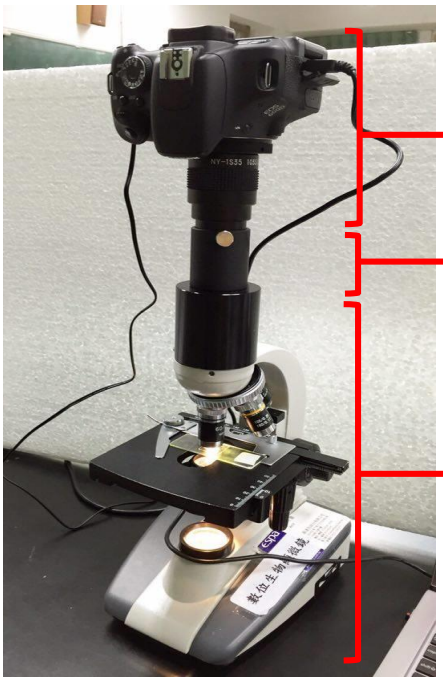
圖三、EOS Utility 攝影軟體介面

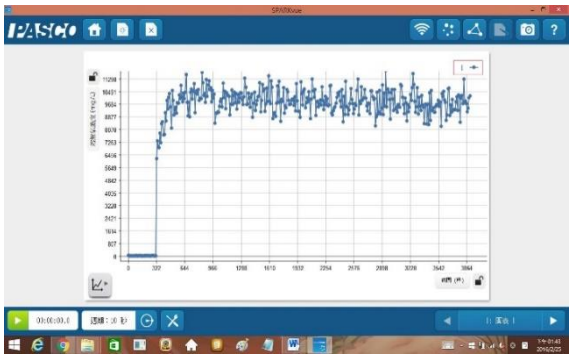


圖七、實驗裝置



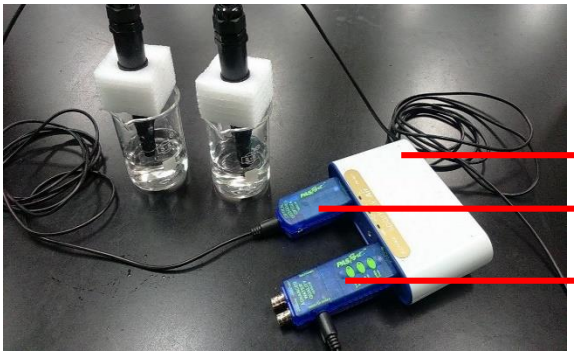
圖四、Tracker 電腦軟體介面





圖五、SPARKvue 電腦軟體介面

圖八、顯微鏡攝影裝置



圖六、PASCO 溶氧量裝置

肆、研究過程或方法

一、野外調查：

（一）實驗一：水蘊草的生長環境調查：

1. 利用光度計、溫度計、pH meter 及 PASCO sparklink Air 測量水蘊草原生環境之光度、溫度、pH 值及溶氧量。
2. 測量多次後取平均值，以此數據做為水蘊草原生環境之光度（lux）、溫度（℃）、pH 值及溶氧量（mg/L）。

二、細胞質流流速：

（一）實驗二：不同光度對細胞質流流速的影響：

1. 取水蘊草頂端的葉片（如圖一）置入池水中，並以水浴法（如圖七）將水溫控制在 20℃。
2. 待小燒杯內的水溫與大燒杯內的水溫達平衡後，放入光度為 500 lux 的環境中，並以計時器開始計時。
3. 以 10 分鐘為間隔取出一片水蘊草葉片，製成水埋玻片，並於顯微鏡下攝影 1 分鐘（如圖三及圖八）。
4. 重複步驟 3.，連續 12 次，實驗共持續 2 小時。
5. 每段影片擷取 5 顆葉綠體，利用 Tracker 追蹤葉綠體在不同時間的位置（如圖四），並計算葉綠體的移動速率，以此數值表示為細胞質流流速。
6. 重複步驟 1.~ 5.，分別將光度調整為 0 lux、100 lux、1000 lux、5000 lux 及 10000 lux。
7. 重複實驗多次，取平均值後利用 SigmaPlot 畫成折線圖及長條圖，用 SigmaStat 做 ANOVA 分析，再用 Tukey 做事後檢定。
8. 將 ANOVA 統計分析後有顯著差異（$p<0.05$）的數據以小寫英文字母標記於長條圖之上。

（二）實驗三：不同溫度對細胞質流流速的影響：

1. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為溫度，並分別將水溫調整為 10℃、20℃、30℃及 40℃。

（三）實驗四：不同 pH 值對細胞質流流速的影響：

1. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為水溶液的 pH 值，並分別將水蘊草葉片置入 pH1、pH3 及 pH5 的氯化氫水溶液、pH7 的逆滲透水及 pH9、pH11 及 pH13 的氫氧化鈉水溶液。

（四）實驗五：不同肥料對細胞質流流速的影響：

1. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為施加肥料，並分別將水蘊草葉片置入重量百分濃度 0.1%的氮肥溶液（硫酸銨水溶液）、重量百分濃度 0.1%的鉀肥溶液（氯化鉀水溶液）、重量百分濃度 0.1%的磷肥溶液（過磷酸鈣水溶液）、重量百分濃度 0.1%的鎂肥溶液（氯化鎂水溶液）及重量百分濃度 0.1%的鈣肥溶液（硝酸鈣水溶液）。

（五）實驗六：不同農藥對細胞質流流速的影響：

1. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為施加農藥，並分別將水蘊草葉片置入稀釋 3000 倍的芬化利、稀釋 6000 倍的芬化利及稀釋 96000 倍的因滅丁。

（六）實驗七：不同重金屬對細胞質流流速的影響：

1. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為重金屬，並分別將水蘊草葉片置入 100ppm 的硫酸銅水溶液、100ppm 的硝酸鉛水溶液、100ppm 的硝酸鎳水溶液及 100ppm 的硝酸汞水溶液。

（七）實驗八：不同逆境對細胞質流流速的影響：

1. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為高鹽逆境，並將水蘊草葉片置入重量百分濃度 1.5%的氯化鈉水溶液。
2. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為低溫逆境，以水浴法將水溫控制在 4℃，並將水蘊草葉片置入，再放置到冰箱裡以維持溫度，持續 24 小時。
3. 重複實驗二之步驟，將實驗變因改為高溫逆境，以水浴法將水溫控制在 30℃，並將水蘊草葉片置入，再放置到烘箱裡以維持溫度，持續 24 小時。

三、淨光合作用速率：

（一）實驗九：不同變因對水蘊草淨光合作用速率的影響：

1. 將 125mL 的池水置於 250mL 燒杯中，並架設 PASCO 溶氧量裝置之感應器（如圖六），感應器的探針正好浸於液面之下。
2. 利用 PASCO 裝置及 SPARKvue 軟體，以每 10 秒為間隔，測量池水之溶氧量（mg/L），共測 30 次，持續 5 分鐘，將此狀態當作基準值。
3. 將水蘊草頂端的葉片置入裝置的池水中，利用 PASCO 裝置及 SPARKvue 軟體，以每 10 秒為間隔，測量池水之溶氧量。待溶氧量值維持穩定狀態持續至少 20 分鐘，此穩態之值扣除基準值即是水蘊草的淨光合作用速率。
4. 重複實驗多次，取平均值後利用 SigmaPlot 畫成長條圖，用 SigmaStat 做 ANOVA 分析，再用 Tukey 做事後檢定。
5. 將 ANOVA 統計分析後有顯著差異（$p<0.05$）的數據以小寫英文字母標記於長條圖之上。
6. 當進行實驗九（一）時，重覆步驟 1.~ 5.，將實驗變因改為：光度 0 lux、100 lux、500 lux、1000 lux、5000 lux 及 10000 lux，測量不同光度下水蘊草的淨光合作用速率。
7. 當進行實驗九（二）時，重覆步驟 1.~ 5.，將實驗變因改為：溫度 10℃、20℃、30℃ 及 40℃ 之池水，測量不同溫度下水蘊草的淨光合作用速率。

8. 當進行實驗九（三）時，重覆步驟 1.~ 5.，將實驗變因改為：pH1、pH3 及 pH5 的氯化氫水溶液、pH7 的逆滲透水及 pH9、pH11 及 pH13 的氫氧化鈉水溶液，測量不同 pH 值下水蘊草的淨光合作用速率。
9. 當進行實驗九（四）時，重覆步驟 1.~ 5.，將實驗變因改為：重量百分濃度 0.1%的氮肥溶液（硫酸銨水溶液）、重量百分濃度 0.1%的鉀肥溶液（氯化鉀水溶液）、重量百分濃度 0.1%的磷肥溶液（過磷酸鈣水溶液）、重量百分濃度 0.1%的鎂肥溶液（氯化鎂水溶液）及重量百分濃度 0.1%的鈣肥溶液（硝酸鈣水溶液），測量不同肥料下水蘊草的淨光合作用速率。
10. 當進行實驗九（五）時，重覆步驟 1.~ 5.，將實驗變因改為：稀釋 3000 倍的芬化利、稀釋 6000 倍的芬化利及稀釋 96000 倍的因滅丁，測量不同農藥下水蘊草的淨光合作用速率。
11. 當進行實驗九（六）時，重覆步驟 1.~ 5.，將實驗變因改為：100ppm 的硫酸銅水溶液、100ppm 的硝酸鉛水溶液、100ppm 的硝酸鎳水溶液及 100ppm 的硝酸汞水溶液，測量不同重金屬下水蘊草的淨光合作用速率。
12. 當進行實驗九（七）時，重覆步驟 1.~ 5.，將實驗變因改為：重量百分濃度 1.5%的氯化鈉水溶液，製作成高鹽水溶液；取水蘊草頂端葉片以水浴法將水溫控制在 4℃，並放置到冰箱裡以維持溫度，持續一天，以此低溫逆境前處理 24 小時；取水蘊草頂端葉片以水浴法將水溫控制在 30℃，並放置到烘箱裡以維持溫度，持續一天，以此高溫逆境前處理 24 小時。

伍、研究結果

一、實驗一：水蘊草生長環境的調查：

我們測得水蘊草原生環境資料（如表四），以此值當作後續實驗的對照組（在長條圖中以紅色表示）。

表四、水蘊草原生環境資料

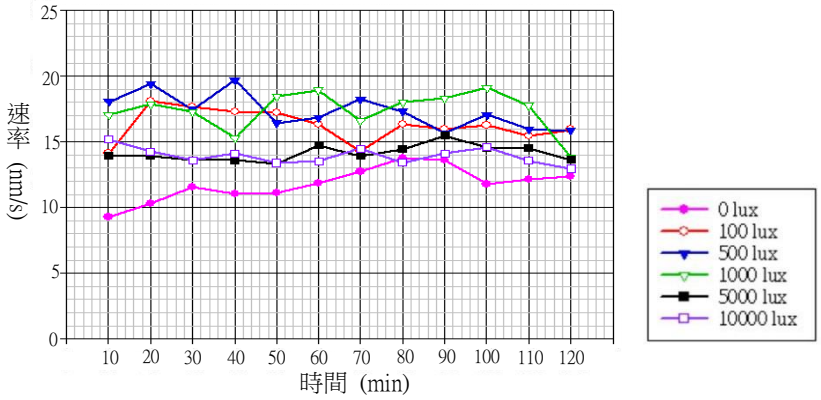
平均光度（lux）	平均溫度（℃）	平均 pH 值	平均溶氧量（mg/L）
453	19	8	27

二、實驗二：不同光度對細胞質流流速的影響：

在不同光度下，我們連續觀察水蘊草細胞質流流速並畫成折線圖（如圖九），求其平均流速及標準差（如表五）並繪製成長條圖（如圖十）。我們發現：

（一） 當光度介於 0 lux~1000 lux 之間時，光度愈高，細胞質流流速有升高趨勢。

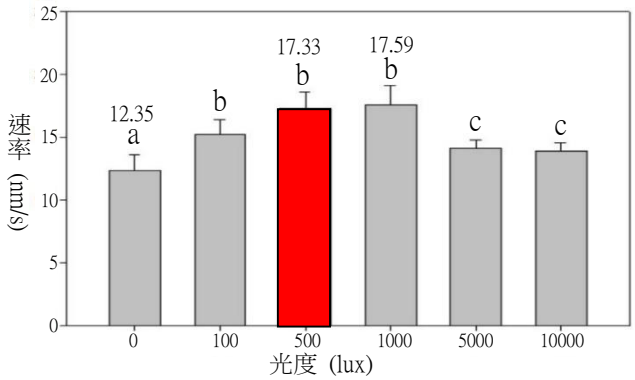
（二） 當光度大於 1000 lux 時，光度上升，細胞質流則無差異。



圖九、不同光度對細胞質流流速的影響

表五、細胞質流於不同光度下的平均流速

光度（lux）	0	100	500	1000	5000	10000
平均流速（nm/s）	12.35	15.22	17.33	17.59	14.15	13.94
標準差	1.29	1.23	1.32	1.54	0.62	0.63



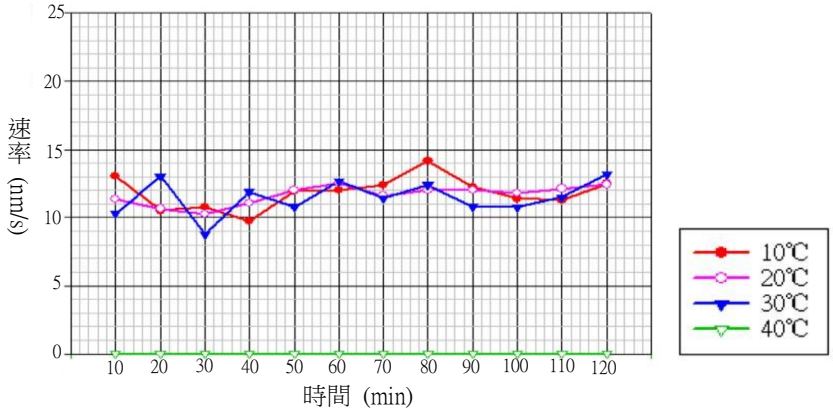
圖十、細胞質流於不同光度下的平均流速

三、實驗三：不同溫度對細胞質流流速的影響：

在不同溫度下，我們連續觀察水蘊草細胞質流流速並畫成折線圖（如圖十一），求其平均流速及標準差（如表六）並繪製成長條圖（如圖十二）。我們發現：

（一） 當溫度介於 10℃~30℃之間時，溫度對水蘊草細胞質流流速無顯著影響（$p > 0.05$）。

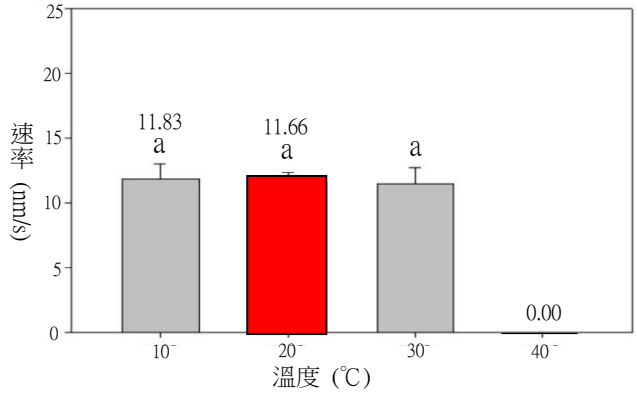
（二） 當水蘊草處於 40℃的環境下，細胞壁會軟化，且細胞質不流動。在顯微鏡下，其葉綠體聚集成團，甚至融合成一團綠色（如圖十三及圖十四）。



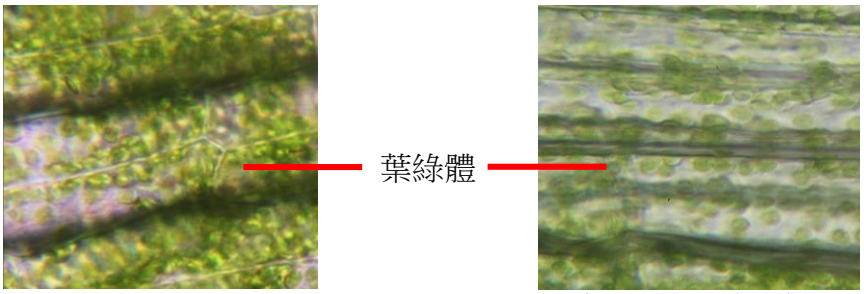
圖十一、不同溫度對細胞質流流速的影響

表六、細胞質流於不同溫度下的平均流速

溫度（℃）	10	20	30	40
平均流速（nm/s）	11.83	11.66	11.46	0.00
標準差	1.18	0.70	1.28	0.00



圖十二、細胞質流於不同溫度下的平均流速



圖十三、40℃葉綠體的形態（15x60）　圖十四、對照組（15x60）

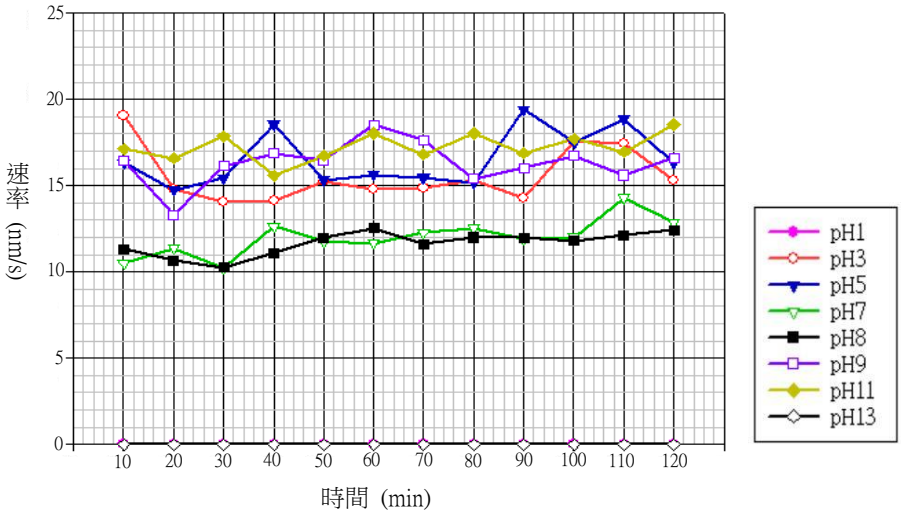
四、實驗四：不同 pH 值對細胞質流流速的影響：

在不同 pH 值下，我們連續觀察水蘊草細胞質流流速並畫成折線圖（如圖十五），求其平均流速及標準差（如表七）並繪製成長條圖（如圖十六）。我們發現：

（一） 當於 pH3、pH5、pH9 及 pH11 時，細胞質流流速明顯高於 pH7 及 pH8。

（二） pH1 的水溶液使水蘊草變黃變軟，葉綠素溶出，且細胞質不流動。

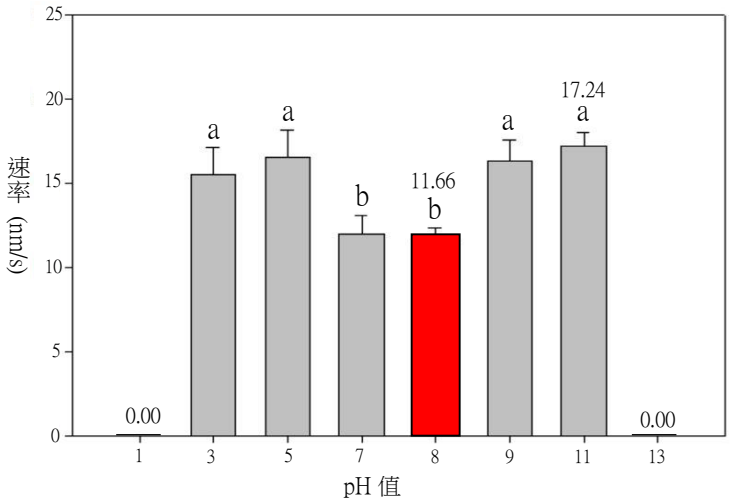
（三） pH13 的水溶液使水蘊草軟化，細胞質亦不流動。



圖十五、不同 pH 值對細胞質流流速的影響

表七、細胞質流於不同 pH 值下的平均流速

pH值	1	3	5	7	8	9	11	13
平均流速（nm/s）	0.00	15.56	16.56	12.01	11.66	16.31	17.24	0.00
標準差	0.00	1.59	1.62	1.08	0.70	1.27	0.82	0.00



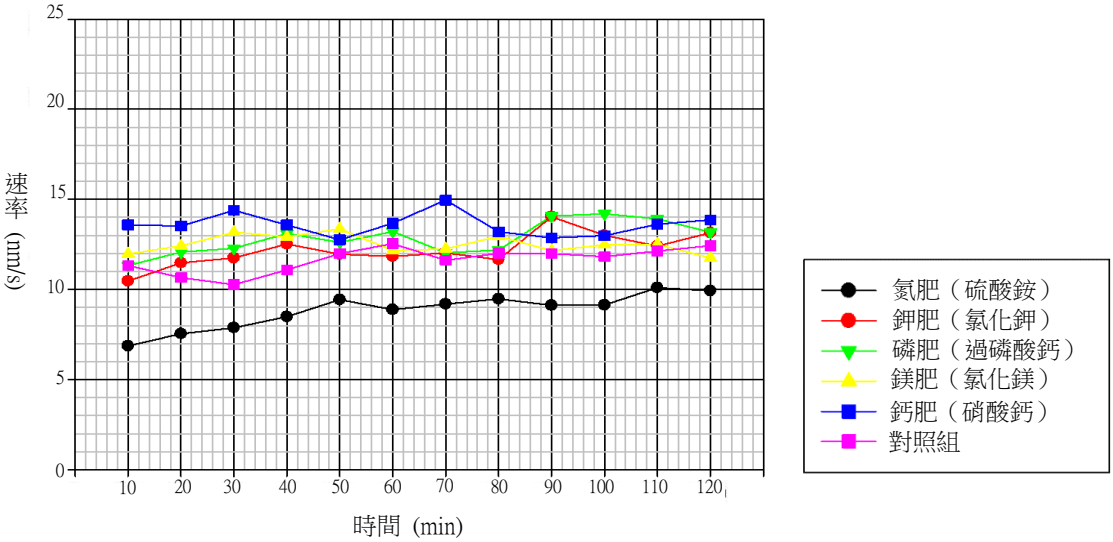
圖十六、細胞質流於不同 pH 值下的平均流速

五、實驗五：不同肥料對細胞質流流速的影響：

在不同肥料下，我們連續觀察水蘊草細胞質流流速並畫成折線圖（如圖十七），求其平均流速及標準差（如表八）並繪製成長條圖（如圖十八）。我們發現：

（一） 當施用鉀肥、磷肥、鎂肥及鈣肥時，水蘊草細胞質流流速明顯高於對照組。

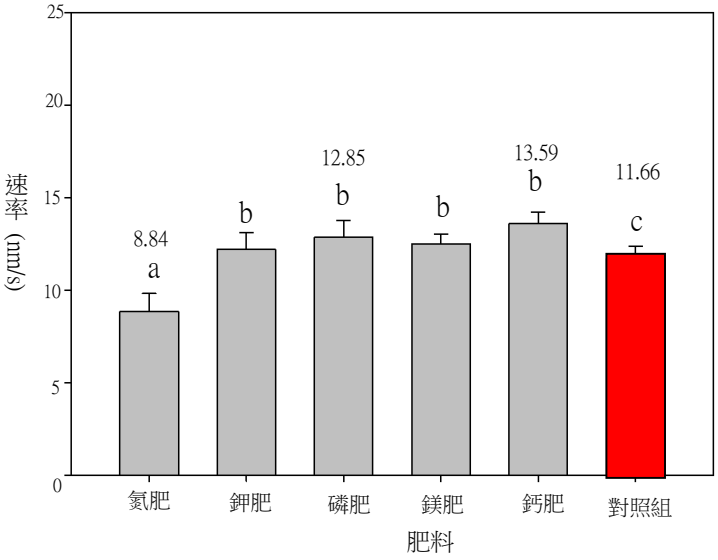
（二） 當施用氮肥時，水蘊草細胞質流流速明顯低於對照組。



圖十七、不同肥料對細胞質流流速的影響

表八、細胞質流於不同肥料下的平均流速

肥料	氮肥	鉀肥	磷肥	鎂肥	鈣肥	對照組
平均流速（nm/s）	8.84	12.19	12.85	12.51	13.59	11.66
標準差	0.97	0.92	0.91	0.50	0.63	0.70



圖十八、細胞質流於不同肥料下的平均流速

六、實驗六：不同農藥對細胞質流流速的影響：

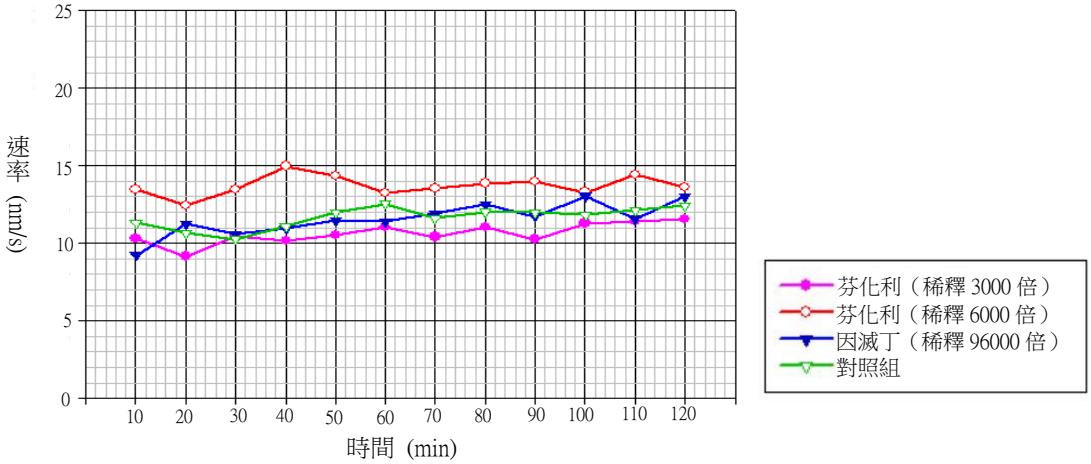
在不同農藥下，我們連續觀察水蘊草細胞質流流速並畫成折線圖（如圖十九），求其平均流速及標準差（如表九）並繪製成長條圖（如圖二十）。我們發現：

（一） 施用因滅丁時，須稀釋至 96000 倍才不會使水蘊草細胞質流停止，所以我們做了不同稀釋倍率的芬化利兩組，但僅做一組因滅丁。

（二） 當施用稀釋 3000 倍的芬化利時，水蘊草細胞質流流速明顯低於對照組。

（三） 當施用稀釋 6000 倍的芬化利時，水蘊草細胞質流流速明顯高於對照組。

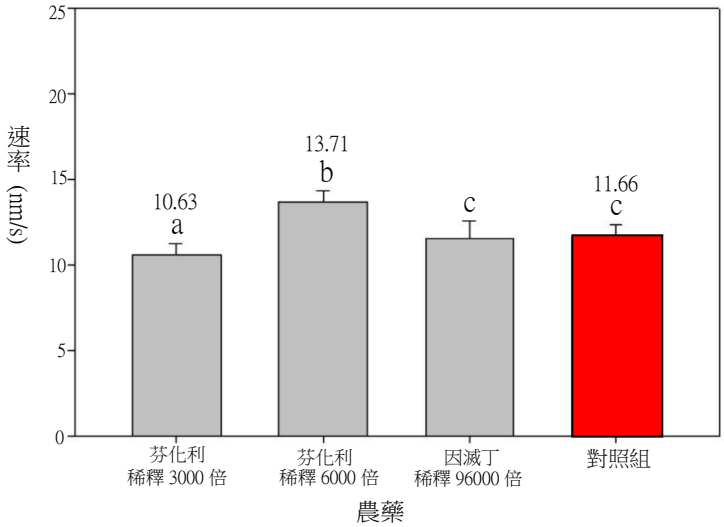
（四） 當施用稀釋 96000 倍的因滅丁時，與對照組無顯著差異。



圖十九、不同農藥對細胞質流流速的影響

表九、細胞質流於不同農藥下的平均流速

農藥	芬化利 稀釋 3000 倍	芬化利 稀釋 6000 倍	因滅丁 稀釋 96000 倍	對照組
平均流速（nm/s）	10.63	13.71	11.55	11.66
標準差	0.67	0.66	1.05	0.70



圖二十、細胞質流於不同農藥下的平均流速

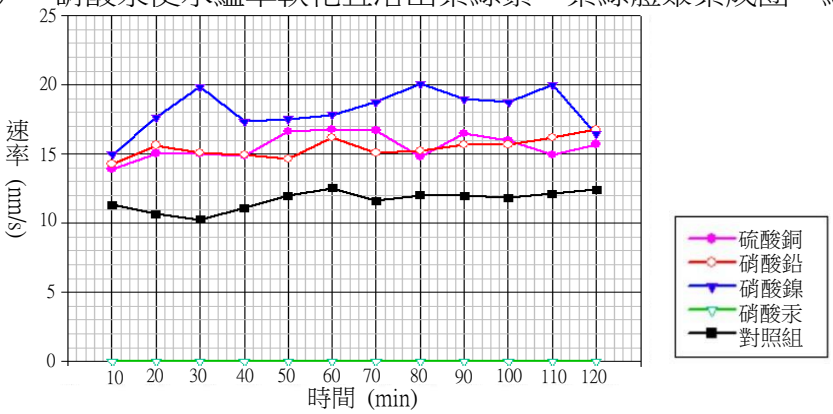
七、實驗七：不同重金屬對細胞質流流速的影響：

在不同重金屬下，我們連續觀察水蘊草細胞質流流速並畫成折線圖（如圖二十一），求其平均流速及標準差（如表十）並繪製成長條圖（如圖二十二）。我們發現：

（一） 當施用硫酸銅及硝酸鉛時，水蘊草細胞質流流速明顯高於對照組。

（二） 當施用硝酸鎳時，水蘊草細胞質流流速甚至比硫酸銅及硝酸鉛高。

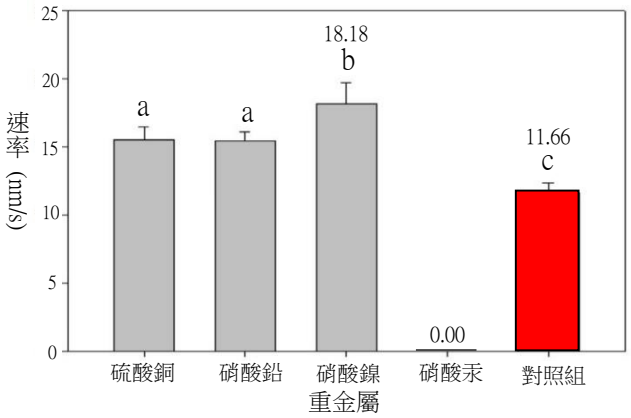
（三） 硝酸汞使水蘊草軟化且溶出葉綠素，葉綠體聚集成團，細胞質流停止。



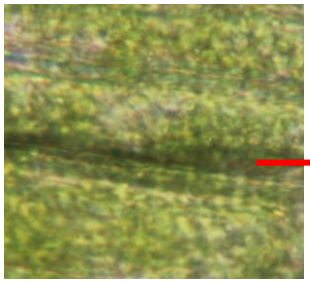
圖二十一、不同重金屬對細胞質流流速的影響

表十、細胞質流於不同重金屬下的平均流速

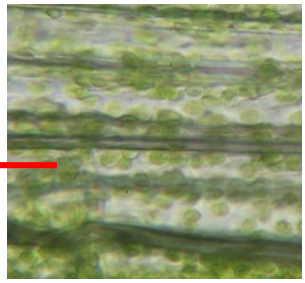
重金屬	硫酸銅	硝酸鉛	硝酸鎳	硝酸汞	對照組
平均流速（nm/s）	15.57	15.45	18.18	0.00	11.66
標準差	0.94	0.71	1.53	0.00	0.70



圖二十二、細胞質流於不同重金屬下的平均流速



圖二十三、硝酸汞下葉綠體（15×60）



圖二十四、對照組（15×60）

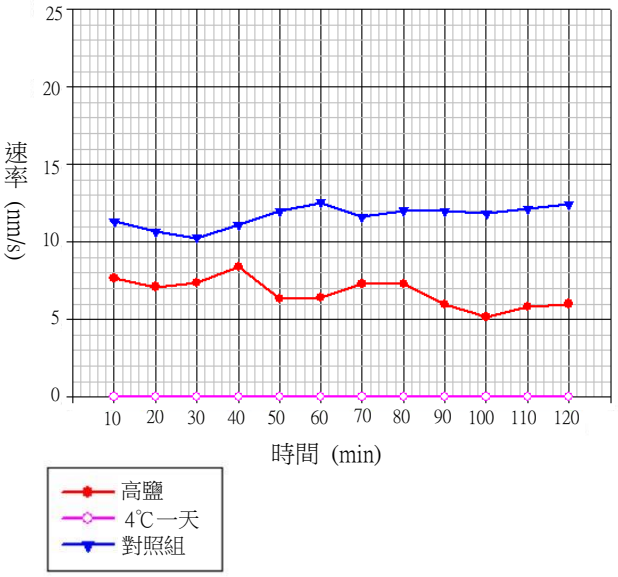
八、實驗八：不同逆境對細胞質流流速的影響：

在不同逆境下，我們連續觀察水蘊草細胞質流流速並畫成折線圖（如圖二十五及二十七），求其平均流速及標準差（如表十一及十二）並繪製成長條圖（如圖二十六及二十八）。我們發現：

（一） 當水蘊草置於高鹽溶液中時，水蘊草細胞質流流速明顯低於對照組。

（二） 當水蘊草置於 30℃一天時，水蘊草細胞質流流速明顯低於 30℃對照組。

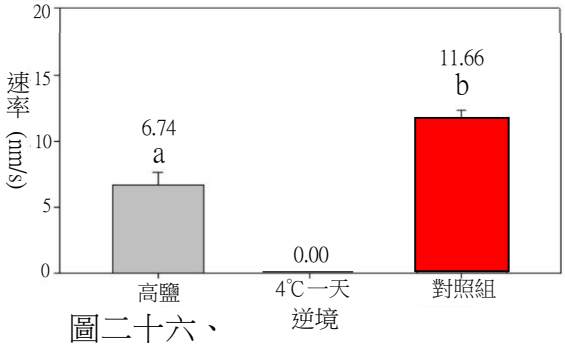
（三） 4℃一天會使細胞質流停止。



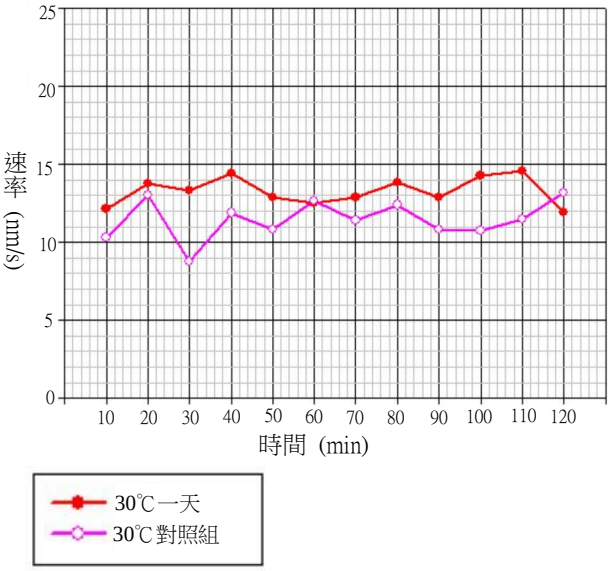
圖二十五、不同逆境對細胞質流流速的影響

表十一、細胞質流於不同逆境下的平均流速

逆境	高鹽	4℃一天	對照組
平均流速（nm/s）	6.74	0.00	11.66
標準差	0.93	0.00	0.70



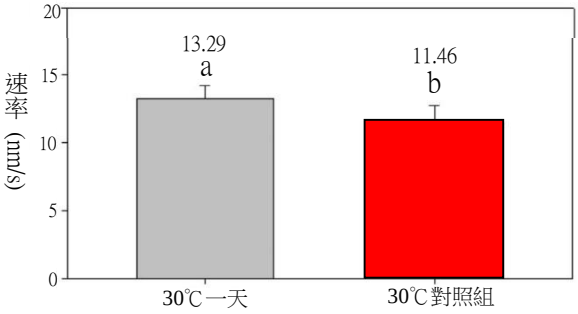
圖二十六、細胞質流於不同逆境下的平均流速



圖二十七、不同逆境對細胞質流流速的影響

表十二、細胞質流於不同逆境下的平均流速

逆境	30℃一天	30℃對照組
平均流速（nm/s）	13.29	11.46
標準差	0.89	1.28



圖二十八、細胞質流於不同逆境下的平均流速

九、實驗九：不同變因對水蘊草淨光合作用速率的影響：

由 Campbell biology 得知，細胞質流需要 ATP 供給，而水蘊草產生能量的機制主要為經由光合作用將光能轉變為化學能，再經由呼吸作用將化學能轉變為 ATP。目前高中程度無法精準測得細胞內 ATP 的變化。而

單位時間內 光合作用釋出的氧氣	－	單位時間內 呼吸作用消耗的氧氣	＝	淨光合作用速率

故我們利用 PASCO 裝置檢測水蘊草的溶氧量，表示為淨光合作用速率。若溶氧量愈高，則淨光合作用速率愈高，也合理推測細胞內的 ATP 含量愈多，藉此以能量的角度探討水蘊草細胞質流流速的機制層面。

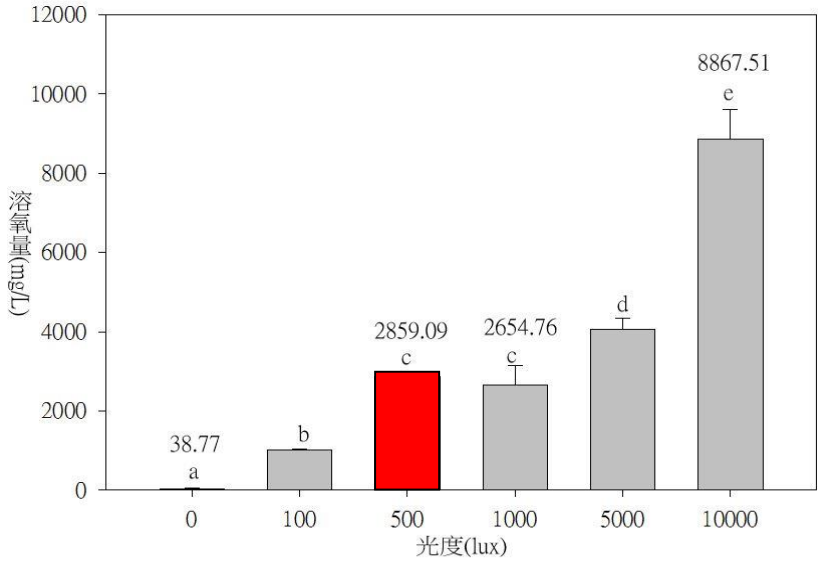
（一） 不同光度對水蘊草淨光合作用速率的影響：

我們將不同光度測得的溶氧量當作淨光合作用速率，求其平均值及標準差（如表十三）並繪製成長條圖（如圖二十九）。我們發現：

1. 當光度介於 0 lux~10000 lux 之間時，光度愈高，淨光合作用速率顯著上升。

表十三、不同光度下平均溶氧量

光度（lux)	0	100	500	1000	5000	10000
平均溶氧量（mg/L）	38.77	1004.34	2859.09	2654.76	4059.45	8867.51
標準差	12.58	21.27	96.44	485.84	291.19	750.47



圖二十九、不同光度下平均溶氧量

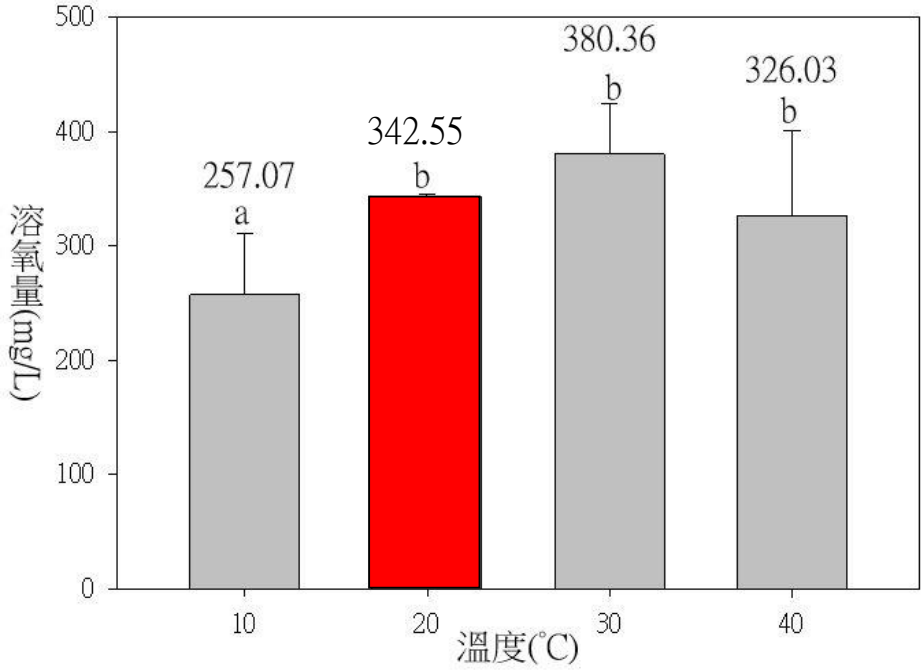
（二） 不同溫度對水蘊草淨光合作用速率的影響：

我們將不同溫度測得的溶氧量當作淨光合作用速率，求其平均值及標準差（如表十四）並繪製成長條圖（如圖三十）。我們發現：

1. 當溫度 10℃ 時，淨光合作用速率明顯低於其他溫度組別。

表十四、不同溫度下平均溶氧量

溫度（℃）	10	20	30	40
平均溶氧量（mg/L）	257.07	342.55	380.36	326.03
標準差	54.23	3.02	44.68	75.21



圖三十、不同溫度下平均溶氧量

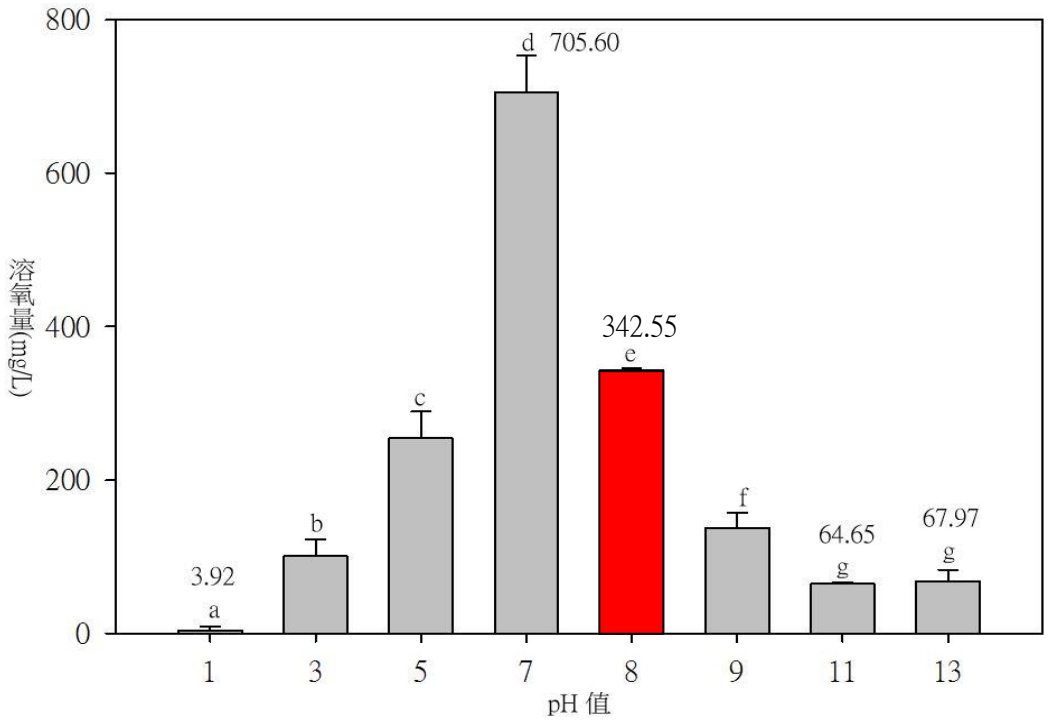
（三） 不同 pH 值對水蘊草淨光合作用速率的影響：

我們將不同 pH 值測得的溶氧量當作淨光合作用速率，求其平均值及標準差（如表十五）並繪製成長條圖（如圖三十一）。我們發現：

1. 當於 pH7 時，淨光合作用速率明顯高於其他組別。
2. 當 pH 值介於 1~7 之間時，pH 值愈大，淨光合作用速率顯著上升。
3. 當 pH 值介於 7~13 之間時，pH 值愈大，淨光合作用速率顯著下降。

表十五、不同 pH 值下平均溶氧量

pH 值	1	3	5	7	8	9	11	13
平均溶氧量（mg/L）	3.92	100.65	254.46	705.60	342.55	137.87	64.65	67.97
標準差	4.53	22.07	34.97	47.69	3.02	19.31	2.10	15.13



圖三十一、不同 pH 值下平均溶氧量

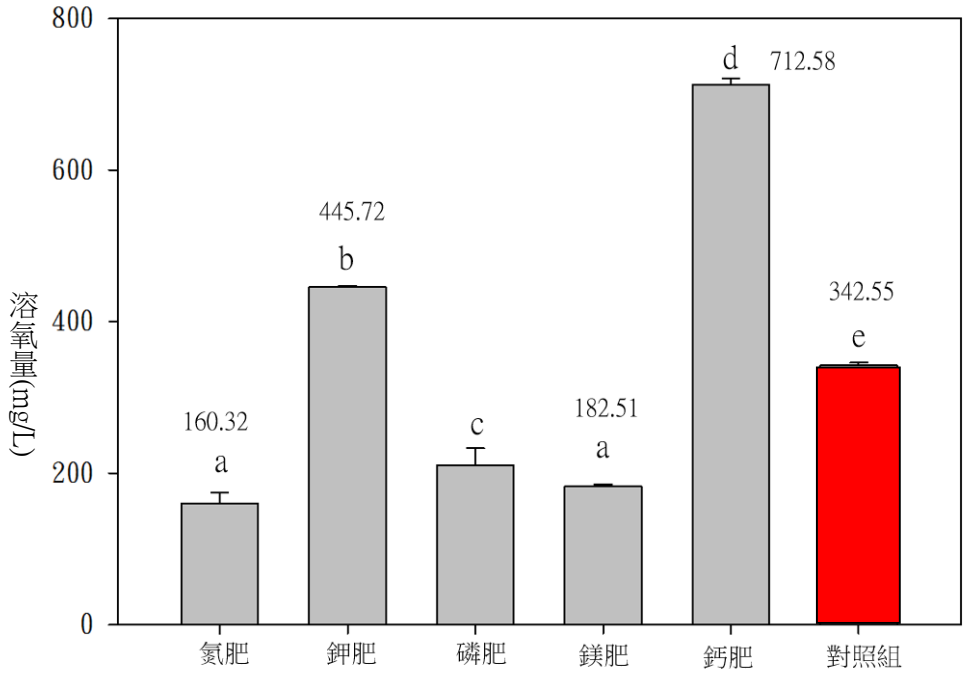
（四） 不同肥料對水蘊草淨光合作用速率的影響：

我們將不同肥料測得的溶氧量當作淨光合作用速率，求其平均值及標準差（如表十六）並繪製成長條圖（如圖三十二）。我們發現：

1. 當施用鉀肥及鈣肥時，淨光合作用速率明顯高於對照組。
2. 當施用氮肥、磷肥及鎂肥時，淨光合作用速率明顯低於對照組。

表十六、不同肥料下平均溶氧量

肥料	氮肥	鉀肥	磷肥	鎂肥	鈣肥	對照組
平均溶氧量（mg/L）	160.32	445.72	209.97	182.51	712.58	342.55
標準差	14.19	1.57	22.97	2.88	8.49	3.02



圖三十二、不同肥料下平均溶氧量

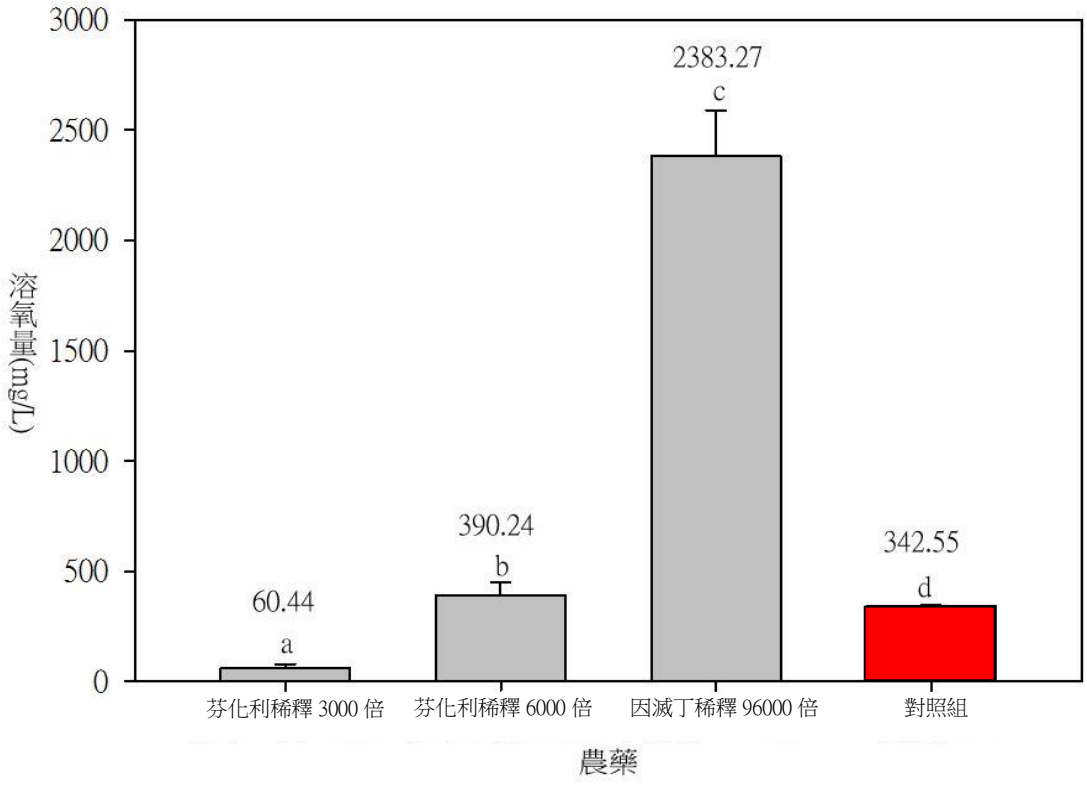
（五） 不同農藥對水蘊草淨光合作用速率的影響：

我們將不同農藥測得的溶氧量當作淨光合作用速率，求其平均值及標準差（如表十七）並繪製成長條圖（如圖三十三）。我們發現：

1. 當施用稀釋 6000 倍的芬化利及稀釋 96000 倍的因滅丁時，淨光合作用速率明顯高於對照組。
2. 當施用稀釋 3000 倍的芬化利時，淨光合作用速率明顯低於對照組。
3. 芬化利稀釋倍率愈高，淨光合作用速率愈不被抑制，甚至高於對照組。

表十七、不同農藥下平均溶氧量

農藥	芬化利 稀釋 3000 倍	芬化利 稀釋 6000 倍	因滅丁 稀釋 96000 倍	對照組
平均溶氧量（mg/L）	60.44	390.24	2383.27	342.55
標準差	17.09	58.53	207.49	3.02



圖三十三、不同農藥下平均溶氧量

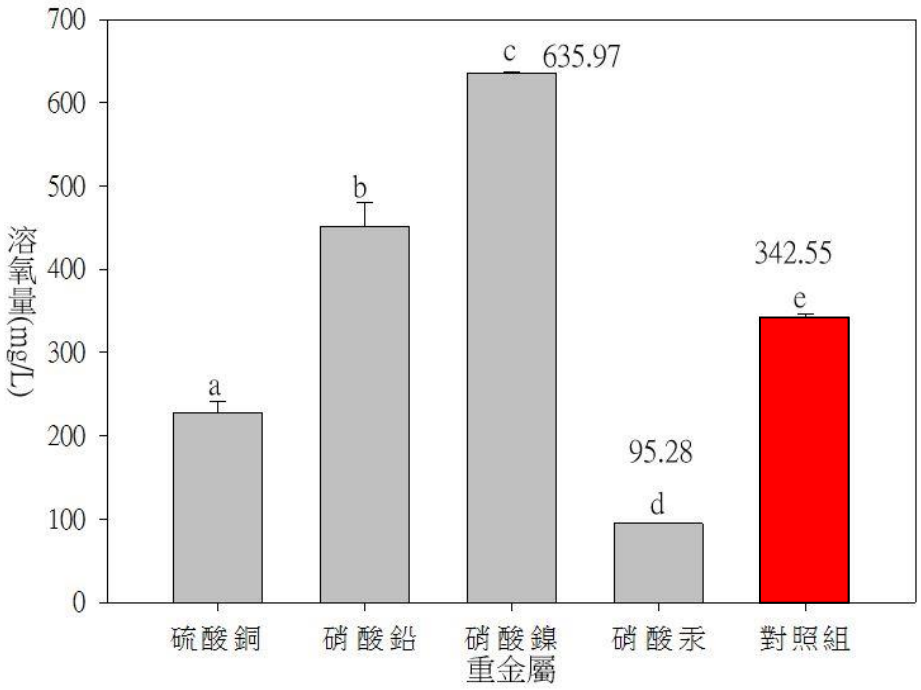
（六） 不同重金屬對水蘊草淨光合作用速率的影響：

我們將不同重金屬測得的溶氧量當作淨光合作用速率，求其平均值及標準差（如表十八）並繪製成長條圖（如圖三十四）。我們發現：

1. 當施用硝酸鉛及硝酸鎳時，淨光合作用速率明顯高於對照組。
2. 當施用硫酸銅及硝酸汞時，淨光合作用速率明顯低於對照組。

表十八、不同重金屬下平均溶氧量

重金屬	硫酸銅	硝酸鉛	硝酸鎳	硝酸汞	對照組
平均溶氧量（mg/L）	227.88	451.85	635.97	95.28	342.55
標準差	13.01	27.8	0.12	0.14	3.02



圖三十四、不同重金屬下平均溶氧量

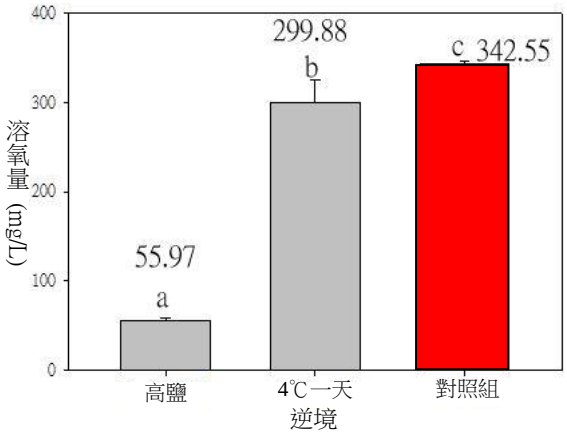
（七） 不同逆境對水蘊草淨光合作用速率的影響：

我們將不同逆境測得的溶氧量當作淨光合作用速率，求其平均值及標準差（如表十九）並繪製成長條圖（如圖三十五及圖三十六）。我們發現：

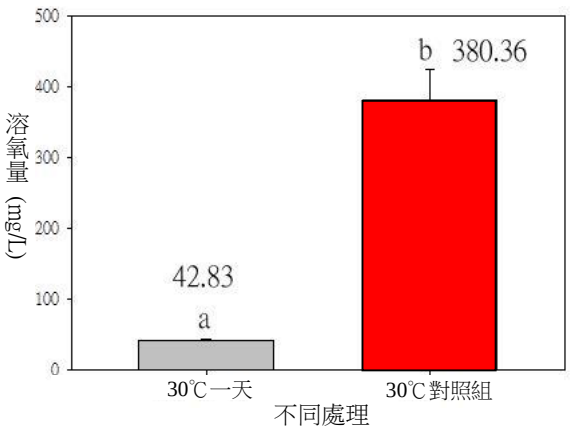
1. 當將水蘊草置於高鹽及 4℃ 一天時，淨光合作用速率明顯低於對照組。
2. 當將水蘊草置於高鹽處理時，淨光合作用速率明顯低於對照組，甚至比 4℃ 一天（低溫逆境）的淨光合作用速率更低。
3. 當將水蘊草置於 30℃ 一天時，淨光合作用速率明顯低於 30℃ 對照組。

表十九、不同逆境下平均溶氧量

不同處理	高鹽	4℃ 一天	對照組	30℃ 一天	30℃ 對照組
平均溶氧量（mg/L）	55.97	299.88	342.55	42.83	380.36
標準差	2.10	24.90	3.02	1.21	44.68



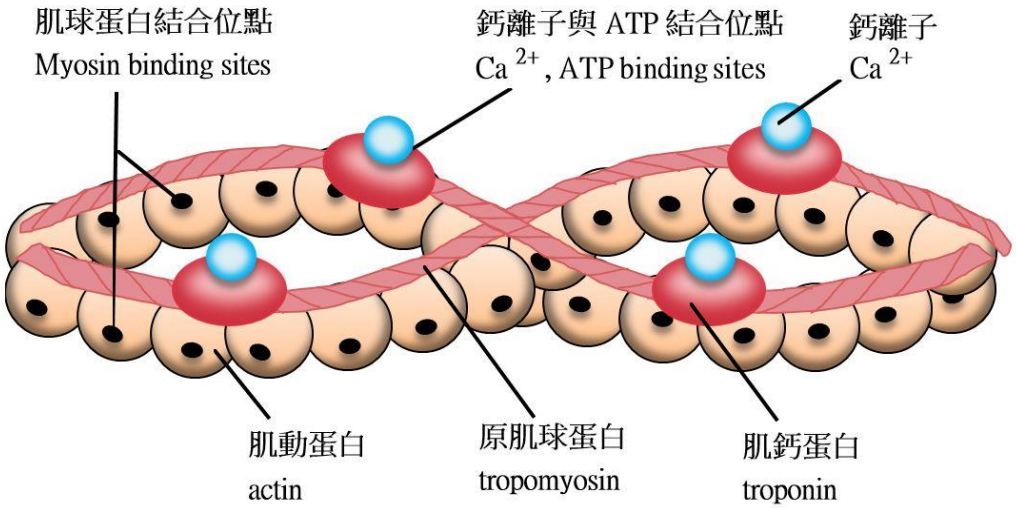
圖三十五、不同逆境下平均溶氧量



圖三十六、30℃ 一天和 30℃ 平均溶氧量

陸、討論

細胞質流，是植物細胞之間短距離溝通的方式，而關於其機制，目前已知與微絲有關。微絲的主要組成是肌動蛋白（actin）和肌球蛋白（myosin），為一直徑約 7nm 的纖維結構。單體肌動蛋白分子上有三個結合位點：一個是鈣離子與 ATP 結合位點，另兩個都是與結合蛋白結合的位點（如圖三十七），因此我們推測細胞質流的機制應與蛋白質的活性及 ATP 的供給有關。植物細胞可藉由光合作用將光能轉變為葡萄糖的化學能，再經由有氧呼吸將葡萄糖氧化，轉變為 ATP 的化學能。我們欲從測試蛋白質活性的角度及測量 ATP 供給的角度，來探討細胞質流的機制層面。然而測量細胞內 ATP 的淨產量不易，因此我們藉由測量水蘊草的淨光合作用速率（單位時間內光合作用釋出的氧氣－單位時間內呼吸作用消耗的氧氣＝單位時間內水蘊草釋出的氧氣量），來推測水蘊草細胞內 ATP 的變化率。試圖利用高中生可以量測的簡單方式，探究細胞質流的機制。



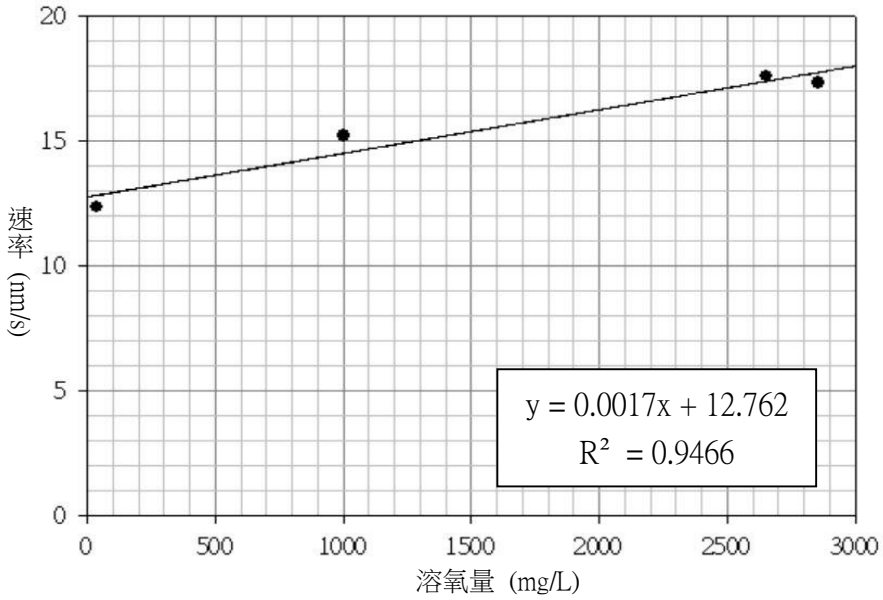
圖三十七、肌動蛋白結合位點示意圖（原出處：參考資料〔四〕）

要利用顯微鏡計算出細胞質流的流速實屬不易，要連續追蹤兩小時更甚困難。而本實驗裝置是以一可攝影的數位生物顯微鏡（D341b）裝上 Canon600D 單眼相機，再連結電腦，運用 EOS Utility 攝影軟體（2.10.2.0 版）錄製出水蘊草葉肉細胞的細胞質流，並利用 Tracker 追蹤葉綠體的移動，計算出細胞質流的流速，分析其流速隨變因的改變。此觀察系統經過多次測試後，我們認為能很精準的量測出細胞質流流速，對量化實驗的分析相當重要，以下是我們的綜合討論。

一、光度對細胞質流流速及淨光合作用速率的影響：

由實驗二及實驗九（一）綜合討論：

（一）我們將光度介於 0~1000 lux 間的細胞質流流速及溶氧量進行迴歸分析（如圖三十八），顯示出其之間具高度正相關（R^2=0.9466），證實我們提出利用淨光合作用速率（溶氧量）來解釋細胞質流流速的假設是合理的，對本研究後續的討論非常重要。



圖三十八、細胞質流流速及溶氧量之間的迴歸分析

（二）由圖十及圖二十九可知，當光度介於 0 ~1000 lux 間時，細胞質流流速及淨光合作用速率均隨光度提高而上升。當淨光合作用之溶氧量在 2859 mg/L 以內時，細胞內的 ATP 可讓細胞質流流速達到此狀態的最高峰（約 17.59 nnm/s）。

（三）由圖十及圖二十九可知，當光度大於 1000 lux 時，即使水蘊草淨光合作用速率上升，細胞質流流速卻下降。我們推測 ATP 的量對於細胞質流流速的影響具有一上限的臨界值，當能量供應超過此臨界值時，細胞質流流速便不再上升。我們推測造成此結果的可能原因有二：一是強光本身所造成的影響，二是當細胞內 ATP 過多時，生物體內會為了維持生理機制恆定，而產生抑制的效果。此現象與生長素影響根的生長方式類似，當根接受較高劑量的生長素時，反而會抑制其生長。

二、溫度對細胞質流流速及淨光合作用速率的影響：

由實驗三及實驗九（二）綜合討論：

（一）由圖十二及圖三十可知，當溫度為 10℃~30℃時，淨光合作用速率隨溫度升高而上升。我們將 10℃~30℃之淨光合作用速率值代入圖三十八之公式：y=0.0017x+12.762 之 x，得到的 y 值無顯著差異，因此推測此狀態下淨光合作用所提供的 ATP 已足夠讓細胞質流流速達到飽和的狀態（10~11 nm/s）。

（二）由圖十二及圖三十可知，當溫度為 40℃時，水蘊草淨光合作用速率與 20℃及 30℃沒有顯著差異，但細胞質流流速卻為 0 nm/s。我們推測是因為溫度太高而影響肌動蛋白分子活性，使其無法利用淨光合作用提供的 ATP，導致細胞質流流速為 0 nm/s。或者可能是因為細胞膜內的脂質液化，導致細胞膜脂質層破裂，對離子的選擇性消失。

三、pH 值對細胞質流流速及淨光合作用速率的影響：

由實驗四及實驗九（三）綜合討論：

（一）由圖三十一可知，當 pH 值為 7~8 時，水蘊草淨光合作用速率較高，我們推測是因為葉綠體酵素系統在接近水蘊草原生環境的 pH 值中活性較高。

（二）由圖十六可知，在酸（pH3~pH5）及鹼（pH9~pH11）的環境下，細胞質流流速顯著較高。我們推測影響細胞質流流速的蛋白質機制可能很複雜，而 pH 值會導致其在弱酸及弱鹼的環境下能有較高的流速。但此結果與水蘊草原生環境的 pH 值不相符，這點很有趣，未來我們會進一步探討其原因，期許能用水蘊草當作指標生物，利用生物檢測的方式初步檢測水域環境的 pH 值。

四、肥料對細胞質流流速及淨光合作用速率的影響：

由實驗五及實驗九（四）綜合討論：

（一）由圖十八及圖三十二可知，水蘊草淨光合作用速率在含有鉀肥的溶液中較快，符合參考資料〔六〕中所敘述之鉀離子有助於光合作用的進行，也符合 ATP 增

加，細胞質流流速也增加的假設。

（二）由圖十八可知，在含有氮肥的溶液中，細胞質流流速比對照組低 24%。而從參考資料〔七〕可知雖然氮肥助於植物生長，但若施加過多時，則會對其產生抑制的效果。

（三）由圖十八及圖三十二可知，在含有磷肥及鎂肥的溶液中，細胞質流流速僅微量增加（約 7%），但其淨光合作用速率卻沒有增加，故可排除 ATP 因子，推測是磷肥及鎂肥影響蛋白質因子導致流速變快。

（四）由圖十八及圖三十二可知，在含有鈣肥的溶液中，細胞質流流速及淨光合作用速率皆顯著上升，我們推測可能是因為鈣離子有助於肌鈣蛋白的運作，而鈣離子與 ATP 結合位點的存在，也說明了細胞質流與 ATP 的關聯，證實了我們的實驗方法是可行的。

五、農藥對細胞質流流速及淨光合作用速率的影響：

由實驗六及實驗九（五）綜合討論：

（一）由圖二十及圖三十三可知，當水蘊草行淨光合作用所釋出之溶氧量小於 1500 mg/L 時，細胞質流流速隨淨光合作用速率提高而上升，與先前假設相符。

（二）由圖二十及圖三十三可知，稀釋倍數低的芬化利對水蘊草的淨光合作用與細胞質流的抑制性皆較稀釋倍數高的芬化利還高，且使其細胞質流流速與淨光合作用速率明顯降低。而從參考資料〔九〕中得知，芬化利會影響鈉離子通道的開關，因此我們推測膜蛋白也與細胞質流和光合作用有相當的關聯性。

（三）雖然因滅丁屬於低毒性農藥，但其對水生物卻具有較高的毒性。在農藥實驗中，我們曾使用稀釋倍數較低的因滅丁溶液做為實驗變因，但發現細胞質流流速為 0nm/s，直到稀釋至 96000 倍時，細胞質流才有顯著移動的趨勢。由圖二十及圖三十三可知，稀釋 96000 倍的因滅丁不會影響細胞質流，卻能夠促進淨光合作用速率。稀釋後流入水域仍可能促使水生植物淨光合作用速率大幅提升，是否會造成水生植物過度繁殖而影響水域生態，此數據可提供後續的參考數值。

六、重金屬對細胞質流流速及淨光合作用速率的影響：

由實驗七及實驗九（六）綜合討論：

（一）由圖二十二可知，在硝酸鉛及硝酸鎳的溶液中，水蘊草細胞質流流速皆比對照組還快。而從參考資料〔二〕中得知，重金屬會使植物啟動熱休克蛋白保護機制。因此我們推測可能是因為植物的熱休克蛋白保護機制使其細胞質流流速維持，甚至變快。

（二）由圖二十二及圖三十四可知，在硝酸鉛、硝酸鎳及對照組的實驗中，細胞質流流速與淨光合作用呈線性關係，與圖三十八的假設相符。

（三）由圖二十二及圖三十四可知，在硫酸銅的溶液中，細胞質流流速增加，但其淨光合作用速率卻沒有增加，故可排除 ATP 因子，推測是硫酸銅影響蛋白質因子導致流速變快。此現象可能與有些蛋白質需金屬離子協助作用有關，如鐵離子、銅離子有助於血紅素及血清素攜帶氧氣，因此我們推測相關重金屬可能會影響細胞質流的蛋白質。

（四）由圖二十二可知，在硝酸汞的溶液中細胞質流流速為 0 nm/s，我們推測可能是因為汞離子會影響蛋白質的活性。未來會深入探討原因，期許能用水蘊草當作指標生物，利用生物檢測的方式初步檢測水質是否有汞汙染。

七、光度、溫度、pH 值、肥料、農藥及重金屬對細胞質流流速的影響：

（一）綜合以上結果討論，未來我們可以藉由研究蛋白質體學，推測出何種蛋白質是影響細胞質流的主因。

八、逆境對細胞質流流速及淨光合作用速率的影響：

由實驗八及實驗九（七）綜合討論：

（一）由圖二十六及圖三十五可知，在高鹽溶液中水蘊草細胞質流流速顯著下降，我們推測是因為高滲透壓導致水蘊草葉肉細胞脫水。細胞脫水可能會使細胞質的黏稠度提升，造成細胞質流流速變慢。而淨光合作用速率亦可能是因為如此，導致化

學反應變慢。

（二）在高溫逆境的實驗中，我們曾以 40℃及 35℃作為實驗變因，但發現細胞質流流速為 0 nm/s，因此便以高於其原生環境溫度的 30℃作為此實驗之變因。由圖二十七及圖三十六可知，當水蘊草經 30℃的高溫逆境處理一天之後，細胞質流流速比實驗二中的 30℃還要快，兩實驗的相異處為經高溫處理下的時間長短不同。因此我們推測經過 24 小時高溫處理後的水蘊草會啟動熱休克蛋白保護機制，使細胞質流流速維持。而其淨光合作用速率較 30℃對照組有顯著下降的情形，推測是因為長期高溫使細胞內蛋白質變性甚至凝集，影響葉綠體酵素系統，進而使淨光合作用速率降低。

（三）由圖二十六及圖三十五可知，經低溫逆境處理一天之淨光合作用速率與對照組的差異甚小。而本實驗是以植物於單位時間內行光合作用所產生的氧氣，扣掉於單位時間內行呼吸作用消耗掉的氧氣，作為其淨光合作用之速率。因此我們推測在低溫環境下，不僅植物的光合作用的速率下降，呼吸作用的速率亦下降，所以兩者間的差值能維持，導致測量出的淨光合作用速率與對照組差異小。而其細胞質流流速為 0 nm/s，我們推測是因為低溫導致植物新陳代謝速率降低，造成細胞質流流速降低。由參考資料〔八〕可知，當溫度低於 10℃時，可能造成植物啟動寒害休眠的機制。

（四）由圖二十六及圖二十七可知，4℃處理一天之水蘊草細胞質流流速與對照組的差異，比 30℃處理一天者還大。我們推測是因為 4℃與水蘊草原生環境 20℃的溫度差異較大，而 30℃與水蘊草原生環境的 20℃的溫度差異較小，造成此結果。且植物有熱休克蛋白保護機制，可以耐熱，因此其細胞質流流速與對照組的差異較不明顯，水生植物的耐熱機制較耐寒機制穩定。

柒、結論

一、當光度小於 1000 lux 時，細胞質流流速及淨光合作用速率呈高度正相關，但當光度大於 1000 lux 時，雖然水蘊草淨光合作用速率上升，細胞質流流速卻下降。

二、當溫度大於 30℃時，細胞質流流速為 0 nm/s，推測與蛋白質活性有關。

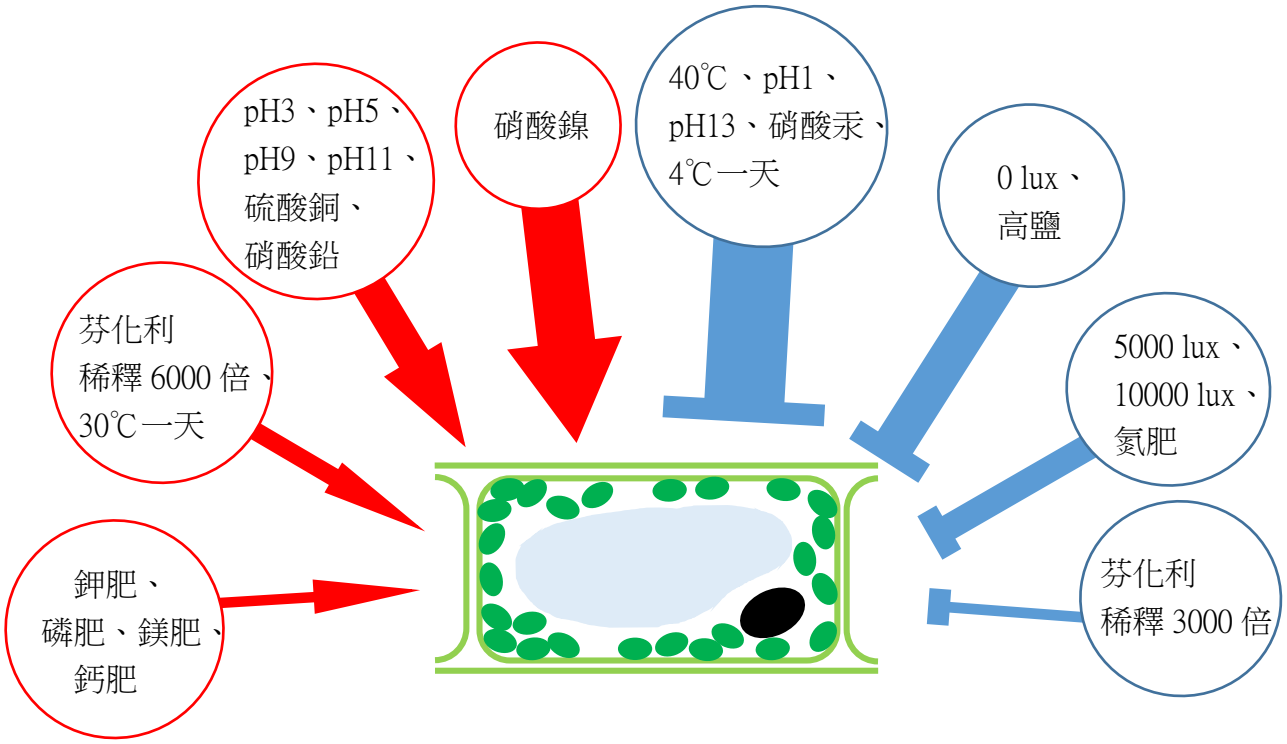
三、在酸（pH3~ pH5）及鹼（pH9~ pH11）的環境下，細胞質流有顯著較高的流速，推測與蛋白質活性有關。

四、水蘊草在氮肥中的細胞質流流速顯著下降；在鉀肥中的淨光合作用速率顯著上升；在鈣肥中的細胞質流流速及淨光合作用速率皆顯著上升

五、水蘊草細胞質流流速及淨光合作用速率隨著芬化利稀釋倍數的增加而上升；因滅丁促使淨光合作用速率顯著上升。

六、於硝酸鉛及硝酸鎳水溶液中的水蘊草，其細胞質流流速顯著變快。而於硝酸汞水溶液中者，其細胞質流流速為 0 nm/s。

七、高溫逆境對細胞質流流速的影響低於低溫逆境；但對淨光合作用速率的影響高於低溫逆境。高溫逆境使細胞質流流速及淨光合作用速率顯著變慢。



圖三十九、各種變因對細胞質流的影響（↓促進；⊥抑制）

捌、參考資料及其他

一、Reece, Jane B./ Urry, Lisa A./ Cain, Michael L./ Wasserman, Steven A./ Minorsky, Peter V.（2010）. *Unit two: The Cell, Chapter 6: A Tour of the Cell. Campbell Biology*. (pp. 117-118). London: Pearson College Div.

二、William G. Hopkins; Norman P.A. Huner（2013）. *Introduction to plant physiology,4th ed.*

三、Motoki Tominaga, Atsushi Kimura, Etsuo Yokota, Takeshi Haraguchi, Teruo Shimmen, Keiichi Yamamoto, Akihiko Nakano, Kohji Ito（2013, November 11）. *Volume 27, Issue 3. Cytoplasmic Streaming Velocity as a Plant Size Determinant.* (pp. 345-352). Amsterdam: Elsevier Inc.

四、Dr. Adam Ross. *Muscle Physiology* . Napa Valley College. from http://napavalley.edupeoplearossDocumentsLec16_Muscle1_219.pdf

五、鄭湧涇、林金盾、曾哲明（2014）*・選修生物（上）・*新北市：康熙文化

六、陳玟瑾（2014）*・元素鉀與植物營養及植物病害之關係・*取自 http://r.search.yahoo.com/_ylt=A8tUwYYQfelWXFEAicpr1gt.;_ylu=X3oDMTBybHBsNjc1BGNvbG8DdHcxBHBvcwM5BHZ0aWQDBHNlYwNzcg--/RV=2/RE=1458171280/RO=10/RU=http%3a%2f%2fwww.tdais.gov.tw%2fhtmlarea_file%2fweb_articles%2ftdares%2f7387%2fTC0211618.pdf/RK=0/RS=4sxEkC.et7WEYwUWrjtf9dkeyF0-

七、賴鴻裕、劉程煒、陳柏青（2011）・農業上的氮*・科學發展・*取自 http://r.search.yahoo.com/_ylt=A8tUwYEPulpXSkcA2RBr1gt.;_ylu=X3oDMTByYzhha3F2BGNvbG8DdHcxBHBvcwMxBHZ0aWQDBHNlYwNzcg--/RV=2/RE=1465592463/RO=10/RU=http%3a%2f%2fejournal.stpi.narl.org.tw%2fNSC_INDEX%2fJournal%2fEJ0001%2f10011%2f10011-06.pdf/RK=0/RS=aWowyqR6csWWcgKpQ.5e7GsYPmU-

八、行政院農業委員會農業試驗所（2005）*・低溫害・*取自 http://amis.tari.gov.tw/MapManager/PageContent.aspx?type=C&id=21

九、黃德昌、黃秀珠・農藥種類與特性簡介・行政院農業委員會動植物防疫檢疫局臺中分局、行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所・取自 http://kmsafe.kinmen.gov.tw/upload/cht/attachment/5180eec00db40a8685c2f7f39f76a41a.pdf

【評語】052103

1. 本研究用新的技術探討細胞質流的調控，建立水蘊草細胞質流流速的觀察及測量方法。

2. 團隊合作及表達能力，值得肯定。

3. 對實驗背景及相關研究尚待加強。