

中華民國第 65 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

第一名

052106

「萍」分秋色—探討浮萍季節消長的關鍵因子與
競爭策略

學校名稱： 國立臺南第一高級中學

作者： 高二 楊滄佑 高二 王泓閔 高二 薛渝樺	指導老師： 鄭楷騰
-----------------------------------------------	------------------

關鍵詞： 浮萍、種間競爭、光週期

得獎感言

夢碎與圓夢：一段浮萍科展的青春航程

人們都說青春是夢的搖籃。現在回想起，當初對於科展主題的執著與尋找有如我們一起做過的夢，循著似有似無的目標，夢碎了好多次。夢碎的第一次，我們選了有關xy精子分離的題目，卻被農委會告知應該不可行。夢碎的第二次，我們選擇做水族箱內土壤與養分的適當成分實驗，卻發現這實驗沒什麼內容與發展性。夢碎的第三次，我們想做綠豆的根對於水聲的向性，做了整整四個月，中間不斷的更改實驗的變因，結果最後才發現其實一點相關性也沒有。最後浮萍競爭的題目是我們殘存的希望。我們小心翼翼的進行，因為若又再一次夢碎，我可能會開始懼怕做夢，青春也在這樣的嘆息中結束。幸運的是，我們的浮萍研究最終進行順利，從最剛開始只有對浮萍的外觀型態做觀察，到後來慢慢增加實驗的變因，發現了青萍和水萍在擁擠的逆境下會有不同的競爭策略，再從這些競爭策略延伸到植物內的生理機制。接著我們在家中的生態缸發現了浮萍會有季節消長的現象。為了找到這個特殊現象背後的關鍵成因，我們從溫度下手，做了許多的實驗發現對於浮萍消長的影響不大，我們害怕實驗因此沒了結果，而導致再一次的夢碎。所幸後來我們探討了光週期，發現消長有很明顯的趨勢，甚至我們換成紅光與遠紅光探討是否和光敏素有關的實驗時，發現消長的趨勢更加的明顯，因而找出了季節消長的重要因子，順利的把整個研究串連在一起，讓我們對浮萍研究提出一個全新見解。我們也很幸運的在全國賽時，受到評審的認可，得到了第一名。也因為這個具特殊意義的第一名，讓我們所付出的一切得到了回報，也讓那些碎裂的夢有了歸宿。

李遠哲院士在獲諾貝爾獎時，曾引希爾德本教授所言：「對我們科學家來講，得獎並不是重要的。但是，對一個社會來說，獎勵科學家是重要的事，因為能藉

此讓社會上的人了解科學家在做什麼，對社會有什麼貢獻。」我們有幸獲得高中科展上的殊榮，亦是如此。然而區區一個高中生的社會貢獻，如一粒塵土落入水窪，掀不起一絲波瀾；作品如同這篇得獎感言般，無人知曉也無人在意。既然如此，對於參與這場盛宴的莘莘學子而言，科展究竟意味著什麼？它或許是科學班制度下的必然、抑或是如奧賽般足以發光發熱的舞台。但我認為科展真正的價值，在於它提供了一個機會，讓我們得以在貧乏無味的高中課業以外，擁有一個值得投入心力的目標；過程中每一步，一再訓練著我們科學邏輯的嚴謹，並預見未來投身研究、回饋社會的可行性。這些深刻的體驗與思維的淬煉，便是科展帶給我最寶貴的收穫。這段研究的成功，不僅需要隊友間的合作，也有賴家長與師長的支持。最後，特別感謝指導老師鄭楷騰老師，沒有您如黑暗中的提燈引領我們科學研究的方法，我們必在探索的路上徬徨而不知所措。



楊滄佑、王泓閔、薛渝樺與全國賽展版之合照

摘要

生態棲位相近的青萍和水萍如何共存？同時我們也觀察到兩浮萍在夏冬有明顯消長：夏季水面多由水萍主導，冬季則青萍佔優勢。深入探討兩者競爭策略，發現水萍透過提升抗氧化能力增加葉狀體間連結數，放大植株間吸引力，並以鈣離子誘發的葉狀體隆起等方式釋出更多生長空間，偏向保守鞏固策略；青萍則任由 ROS 累積觸發葉狀體斷裂，降低植株間吸引力，憑藉個體小與高填充效率，採取侵略佔領策略。此外，研究發現光週期與光敏素為浮萍季節消長的關鍵因子：夏季長日照累積 Pfr 造成連結數提升，利於水萍鞏固優勢；冬季短日照誘使 Pfr 變回 Pr，促進葉狀體斷裂，助青萍佔領水面。此發現揭示光週期如何調控浮萍季節消長，為水生植物競爭提供新見解。

壹、前言

一、研究動機

家中庭院的生態池中可見到浮萍生存於水體表面，經仔細觀察發現，水池中的浮萍種類不單只有一種，而是兩種共存，分別為水萍(*S. polyrrhiza*)與青萍(*L. minor*)，這不禁讓我們好奇，兩種浮萍的生態棲位如此相似，應會產生強烈的競爭現象，為何兩者卻能共存在一起？另外，我們同時觀察到一個有趣的現象，兩種浮萍會隨著季節變換產生消長，夏天水萍具有優勢，到了冬天則變成青萍強勢。因此，我們產生兩個問題。**兩種浮萍各自的競爭策略是什麼？造成兩種浮萍產生季節消長的因子是什麼？**因此我們進行一系列實驗深入探討。

二、研究目的

- (一) 觀察浮萍的外觀型態。
- (二) 比較浮萍根部在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異。
- (三) 比較浮萍葉狀體連接數(p 數)在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異。
- (四) 探討兩種浮萍在擁擠環境下，葉狀體連接數目(p 數)的改變的生理調控機制。
- (五) 比較浮萍葉狀體的交疊面積在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異。
- (六) 比較浮萍葉狀體隆起角度在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異。
- (七) 探討浮萍因為季節而產生消長現象的關鍵因子。
- (八) 光週期對浮萍競爭的影響。
- (九) 光敏素對浮萍競爭的影響。

三、文獻回顧

浮萍科(*Lemnaceae*)植物透過小型漂浮形態和快速繁殖能力，廣泛分佈於全球淡水環境中。青萍(*Lemna minor*)與水萍(*Spirodela polyrrhiza*)作為生態棲位相近的物種，常被觀察到在同一水域中共存，這一現象引起了我們的興趣。我們在野外發現，夏季水萍在數量上佔據優勢，而冬季則以青萍為主，這提示季節性環境因子可能影響它們的競爭動態。研究指出，青萍在光照充足、養分豐富的环境中具有競爭優勢，因其能有效遮蔽下方的品萍(*Lemna*

trisolca)，而品萍在光照較弱、養分較少的條件下更具競爭力，這得益於其較低的養分需求和較高的養分吸收效率(AL McIlraith et al,1989)。雖然該研究聚焦於青萍與品萍的競爭關係，但我們推測類似的機制可能適用於青萍與水萍之間，即季節變化可能改變了對青萍或水萍有利的環境因子，從而調控它們的競爭優勢並影響其消長。

此外，查閱過去全國科展研究中得知，活性氧(ROS)的累積顯著觸發浮萍葉狀體的斷裂(呂家瑋&賴楚元,2024)。這一發現為我們提供了細胞機制層面的線索。因此，在本研究中，當觀察到青萍或水萍葉狀體連接數有所增減時，我們將測量 ROS 含量，以驗證是否由過氧化物質的累積或減少所驅動。這將有助於揭示青萍與水萍在不同季節條件下的生存策略。在前人研究中我們還得知營養鹽對於青萍與水萍對抗鉛的累積有非常顯著的影響(Z Leblebici & A Aksoy,2011)。而在不同環境水裡的營養鹽濃度是會有變化的，顯示出環境中的因子的確會影響兩者的生存，使我們知道可以從不同季節中每個有可能會被影響的單一因子做討論，而非盲目的討論許多季節變化並不會影響的因子。

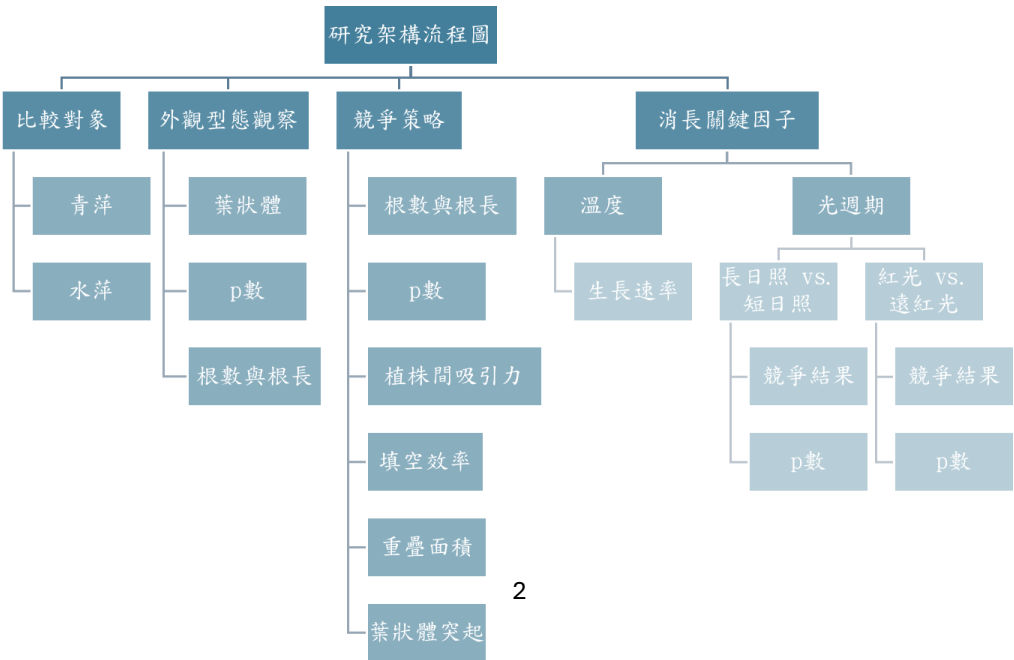
總結而言，基於野外觀察及 AL McIlraith et al,1989 的研究啟示，我們旨在探討青萍與水萍在競爭中的各自優勢，以及夏季與冬季的環境因子如何調控它們的消長。去年的科展第三名則幫助我們得知我們在探討兩者競爭過程中可能會運用到的胞內機制。同時，Z Leblebici & A Aksoy,2011 則讓我們理解環境因子的確會顯著影響植物的生存，也讓我們知道需著重於在不同季節中會被改變的因子，使我們的實驗將更有效率的進行。

貳、研究設備與器材

- 一、研究材料:青萍(*Lemna minor*)、水萍(*Spirodela polyrhiza*)
- 二、實驗器材:玻棒、量筒、燒杯、浮萍、浮萍養殖箱、小塑膠盆、微量分注器、滴管、鑷子、蒸餾水、藥劑 (測 ROS、POD、花青素、培養液)、黑布、電腦分析軟體 ImageJ、插座定時器、紅光與遠紅光、控溫箱。

參、研究過程與方法

一、研究架構流程圖



研究架構流程圖(圖由作者自製)

二、實驗方法

(一) 比較青萍及水萍的根部在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異。

我們放置青萍與水萍，以佔燒杯面積 20%的浮萍作為稀疏環境，以佔滿燒杯全部面積的浮萍作為擁擠環境。然後我們分別記錄浮萍在稀疏環境及擁擠環境中的根長、根數及根系總長。一週後再進行一次記錄，並將兩次的數據皆繪製成長條圖，比較兩者之間的差異。

(二) 比較浮萍葉狀體連接數(p 數)在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異。

我們同樣設置稀疏與擁擠的環境，分別對稀疏及擁擠環境下的浮萍進行分類計數，將浮萍不同葉狀體連接數(p 數)的數量分別量化，靜置一週後再進行一次記錄，並將兩次的數據皆繪製成長條圖，比較兩者之間的差異。

(三) 探討兩種浮萍在擁擠環境下，葉狀體連接數(p 數)改變的生理調控機制。

在測量青萍和水萍葉狀體中 ROS 含量的實驗中，我們準備兩個離心管。第一個離心管中加入 0.1g DAB 和 20mL 水，震盪混勻；第二個離心管中加 5 滴鹽酸、0.097g MES、和 20mL 水，同樣震盪混勻。接著，將上述兩種溶液混合震盪，並將混合溶液加水定容至 50mL。我們將浮萍樣本整株浸泡在上述混合溶液中，並且抽真空 10 分鐘。將抽真空後的樣本浸泡於 99%酒精中，置於暗處 24 小時。靜置結束後將樣本取出，再對浮萍的正面觀及背面觀進行拍照記錄。

在測量花青素含量的實驗中，我們設置稀疏與擁擠環境，靜置一周後對浮萍的背面觀進行拍照記錄，並觀察葉狀體背面和根部是否有花青素累積。

在測量青萍和水萍葉狀體 POD 酵素活性的實驗中，我們設置稀疏與擁擠環境，靜置一周。一週後，從稀疏及擁擠環境中取出青萍及水萍。將浮萍樣本冷凍後磨碎，加入 pH7.0 的磷酸氫鉀緩衝溶液中，樣本與溶液的比例為 1g 的樣本搭配 2mL 的溶液。接著，將上述溶液放入離心機中，並以 13200rpm 離心十分鐘後抽取上方澄清液，作為蛋白質萃取液。另外再取一個新的離心管，在 50mL 離心管中加入 25mL 磷酸氫鉀緩衝溶液(pH7.0)、5mL 愈創木酚 (2.5%)、5mL 過氧化氫，並將混合溶液加水定容至 50mL。然後在比色管中倒入上述混合溶液，加入 2μL 蛋白質萃取液。最後測量 470nm 波長下 1 分鐘的吸光值變化，將數值繪製成長條圖。

(四) 比較青萍及水萍的葉狀體交疊面積在稀疏及擁擠環境下生存策略差異。

我們同樣設置了稀疏和擁擠的環境，靜置一週後，分別從稀疏及擁擠環境中各取出 3 個 p3 或 p4 的浮萍，並將其拍照記錄。接著，我們利用鑷子將每個浮萍的葉狀體一一分離，並將其拍照下來。將分離前和分離後的照片分別透過 ImageJ 軟體進行分析，藉由分離前後葉狀體面積的數據，進而推算出葉狀體的交疊面積，繪製成長條圖。為了量化 p 數下降會造成整體交疊面積的影響，我們定義了一個「交疊參數」。

* 參數公式: (單片葉狀體交疊面積比例)×[葉狀體連接數(p 數)-1]

藉公式算出青萍和水萍在稀疏及擁擠環境下的交疊參數，再次繪製成長條圖。

(五) 測量青萍及水萍的葉狀體隆起角度。

我們從浮萍培養箱中取出青萍及水萍，並在透明培養皿中加入約一半高度的水，放置浮萍於培養皿邊緣，使用手機從培養皿外部向浮萍進行拍攝。接著，將照片透過 ImageJ 軟體測量單一葉狀體的彎曲角度。

(六) 探討水萍葉狀體突起是否由鈣離子介導。

我們挑選具有顯著隆起角度的水萍，將其放置於兩杯直徑 4.8cm 的燒杯，使其形成 20% 的稀疏環境。其中一杯為 100mL 自來水，另一杯則是 100mL 的 10mM EGTA 溶液。分別以實驗(六)的方法計算放置 Day 0 與 Day 3 的隆起角度。

另外，我們也準備同樣的四杯燒杯，其中兩杯裝有 100mL 自來水、兩杯裝有 100mL 10mM CaCl_2 溶液。隨機挑選水萍，分別設置成 20% 的稀疏環境與 100% 的擁擠環境。以實驗(六)的方式計算 Day 0 與 Day 7 的隆起角度。

(七) 探討青萍和水萍因為季節而產生消長現象的關鍵因子。

我們先了解青萍和水萍在不同溫度下(16°C 及 28°C)競爭時生長曲線上的差異。我們取兩個燒杯，並從浮萍養殖箱中取出青萍及水萍。接著，取佔燒杯一半面積的青萍及水萍，並將它們置於同一燒杯中做為競爭環境，然後將這兩組種間競爭實驗的燒杯，分別置於 16°C 及 28°C 的環境中，並且每天對燒杯進行拍照記錄。持續三週後，利用 ImageJ 軟體，分別對青萍及水萍的葉狀體面積進行分析，最後將分析數據繪製成兩浮萍在 21 天兩環境競爭實驗的生存曲線。

再來，我們希望了解青萍和水萍在不同光週期(13.5hr 及 10.5hr 的日照)競爭時，生長情形的差異。同樣先取兩個燒杯，並從浮萍養殖箱中取出青萍及水萍，然後取佔燒杯一半面積的青萍及水萍，並把它們置於同一燒杯中做為競爭環境，並且記錄實驗開始時，兩種浮萍的原始總面積，以及最初葉狀體 p 數的分布情形。再來，我們將兩個種間競爭實驗的燒杯，分別置於 10.5hr 及 13.5hr 的環境中，放置一週後，再次記錄兩種浮萍分別在水面上的面積及 p 數的分布，並且計算出 7 天後的葉片總面積變化量和 p 數變化，最後將面積變化量數據繪製成長條圖，p 數分布則畫成比例圖。

最後我們想了解青萍和水萍在不同光波長(紅光 660nm 與遠紅光 730nm)競爭時，生長情形的差異。與上述的不同光週期的過程完全相同，只是將 13.5hr 的日照改成持續的紅光照射，10.5hr 的日照改成持續的遠紅光照射。

(八) 比較青萍和水萍降低葉狀體連接數(p 數)在紅光下的競爭結果。

我們取用三杯直徑 4.8cm 燒杯，並預先將少量青萍與水萍以手撕裂為 p1 作為預備。燒杯其中一杯放入一半正常青萍一半正常水萍作為控制組，另一杯放入一半撕裂青萍一半正常水萍，還有一杯放入一半正常青萍一半撕裂水萍。將三個燒杯放置於紅光 660nm 照射下進行競爭，拍攝 Day 0 與 Day 5 的俯視圖照片，並以 ImageJ 計算兩種浮萍在燒杯內各所佔據的面積。

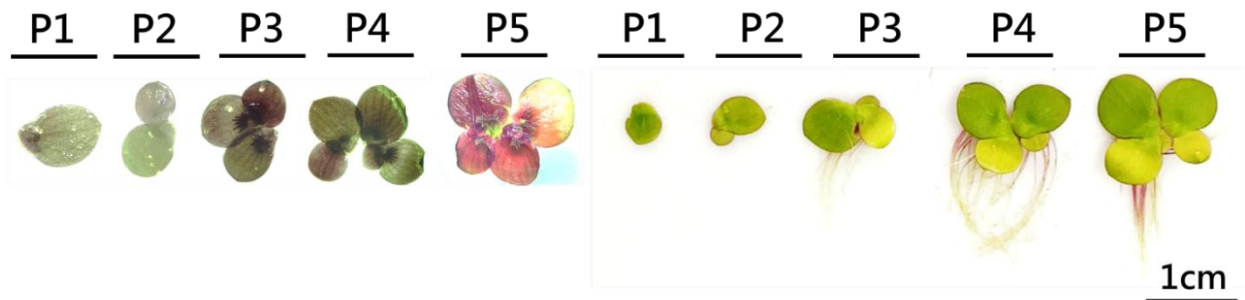
肆、研究結果

一、浮萍的外觀型態觀察

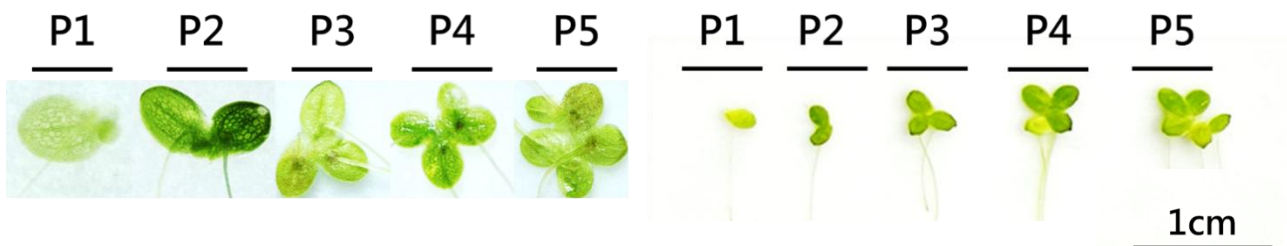
在家中庭院的生態池中可見到浮萍生存於水體表面，經仔細觀察發現，水池中的浮萍種類不單只有一種，而是兩種共存，分別為水萍(*S. polyrhiza*)與青萍(*L. minor*)，這不禁讓我們好奇，兩種浮萍的生態棲位如此相似，應會產生強烈的競爭現象，為何兩者卻能共存在一起？兩浮萍在面對擁擠競爭環境時分別會採取什麼生存策略？此外，經多年的觀察我們發現，兩種浮萍竟然會因季節變換產生消長！夏天時池中水萍佔大多數，而冬天青萍會布滿水面，水萍則佔少數，根據這有趣的消長現象我們提出了兩個項主要的問題：

1. 兩者各自的競爭策略是什麼？
2. 造成兩浮萍消長的關鍵因子是什麼？

然而想要了解這個競爭機制前我們想先透過深入觀察兩種浮萍的外觀型態差異，以便後續做深入研究探討。為了深入了解浮萍的外觀型態，首先我們先從浮萍培養箱中挑出不同葉片數目的葉片，並依序幫浮萍的正面觀及背面觀拍照。

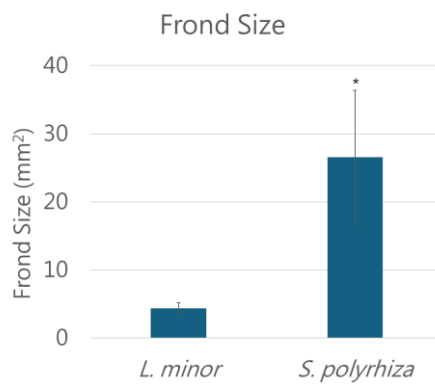


(圖 1-1)水萍的背面觀及正面觀，p 代表葉狀體連接數(圖由作者自製)



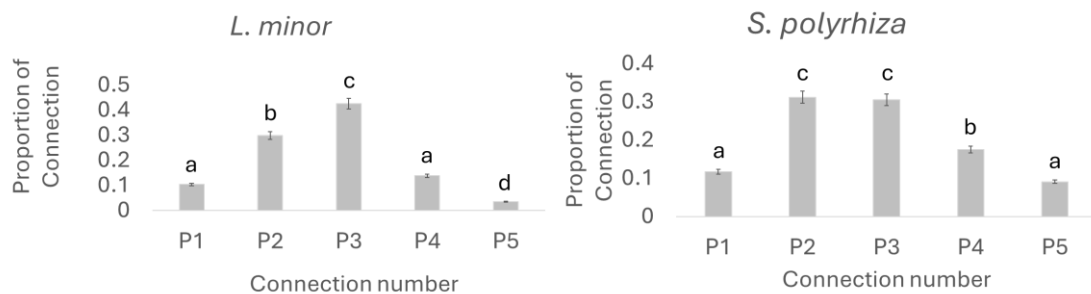
(圖 1-2)青萍的背面觀及正面觀，p 代表葉狀體連接數(圖由作者自製)

由圖 1-1 及 1-2 可知，水萍的葉狀體呈現偏圓形，而青萍的葉狀體則是較為細長，呈現偏橢圓形，在面積部份，水萍葉狀體面積明顯較青萍大，經量化分析，結果如圖 1-3 所示，水萍的單片葉狀體面積是青萍葉狀體面積的 5 倍多。我們推測較大的葉狀體可以替水萍爭取更多的生存空間，進而提升自身在生存上的優勢。在兩浮萍的葉背部分，水萍根的數量明顯較青萍密集，此外，從水萍的背面可以發現明顯花青素累積，除了葉背以外，水萍靠近葉狀體交接處的根部也可觀察到花青素累積，而青萍則無此現象。



(圖 1-3)青萍及水萍的單片葉狀體面積(圖由作者自製)

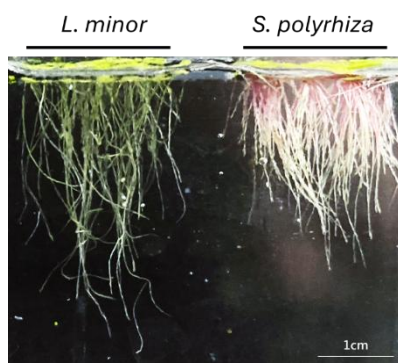
經過仔細觀察，我們發現我們所飼養的兩種浮萍其葉狀體的連接數(p 數)似乎有著不同的趨勢，水萍似乎傾向以多個葉狀體相連的方式生存，而青萍則似乎傾向以較少的葉狀體相連存活。為了確認我們的觀察，我們將自己飼養的浮萍之葉狀體連接數的占比進行計算，並繪製成長條圖，結果如圖 1-4、圖 1-5 所示。



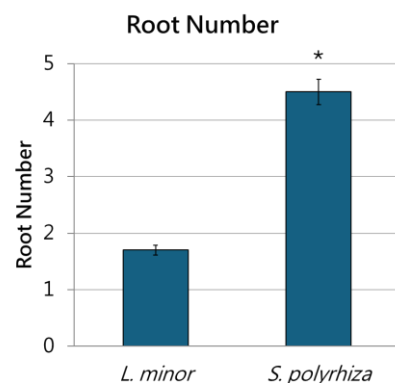
(圖 1-4)青萍的 p 數分布圖，p 代表連接數 (圖 1-5)水萍的 p 數分布圖，p 代表連接數
(圖由作者自製) (圖由作者自製)

由圖 1-4 可以看出青萍在 p1、p2、p3 的數量就佔總數量的 80%，由圖 1-5 可以看出水萍在 p3、p4、p5 的數量佔總數量的 60%。明顯的青萍傾向低連接數的生存模式，而水萍則傾向高連接數的生存模式。

除了葉狀體以外，植物根部具有無機鹽類的吸收能力，我們想透過觀察及量化找出青萍與水萍根部是否存在差異。因此，我們將浮萍在水下的側面觀拍照，並且記錄浮萍的根長、根數、根系總長等數據，並將數據繪製成長條圖，以下為我們的實驗結果。圖 1-6 為兩種浮萍根部水下的側面觀照片，可以清楚看出兩種根系的發展策略截然不同，青萍的每片葉狀體長出來的根數明顯比水萍少，將兩浮萍葉狀體的連接根數量化，結果如圖 1-7 所示，青萍每片葉狀體最多連接 2 條根，平均每片葉狀體約連接 1.5 條根，而水萍則是青萍的 3 倍，每個葉狀體約連接 4.5 條根。

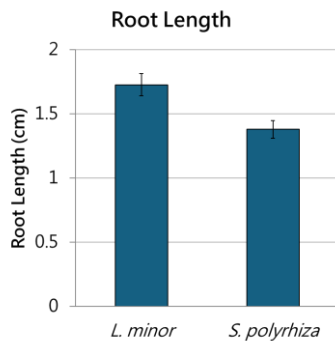


(圖 1-6)青萍及水萍根部水下的側面觀
(圖由作者自製)

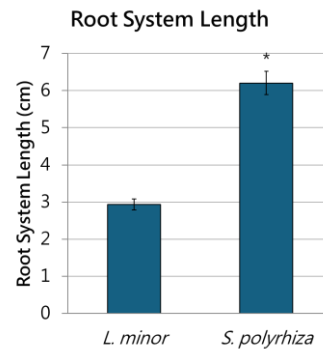


(圖 1-7)青萍及水萍葉狀體連接根數比較圖
(圖由作者自製)

雖然水萍的根數明顯較青萍多，但在根長部分卻不如青萍，經由量測根部長度得知，青萍在根長方面是比水萍平均來的長 0.5 公分，如圖 1-8 所示。透過上述觀察與量化統計可知，兩種浮萍根部的生長策略截然不同，青萍雖然根數較少，但透過增加根長來提升根系的總量，水萍雖然根長短，但透過增加根數以提升根系發展。接著我們好奇，這兩種不同的根部生長策略，何者具有最佳的根系總長呢？我們將根長乘上根數，算出根系總長，結果如圖 1-9 所示，可以看出水萍的根系總長大約是青萍的 2 倍。因此，我們推論水萍在根部養分吸收的方面來的比青萍更具有生存優勢。



(圖 1-8)青萍及水萍的根長比較圖
(圖由作者自製)

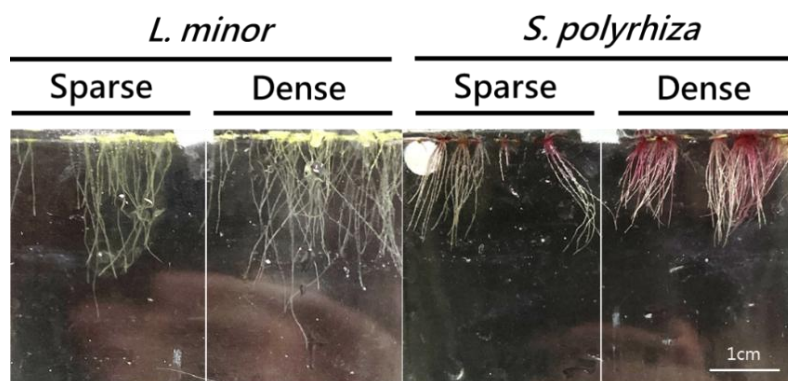


(圖 1-9)青萍及水萍的根系總長比較圖
(圖由作者自製)

二、浮萍的根部在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異

植物只要生長在受到外力擠壓或者植物互相競爭等惡劣的環境，就會對植物體產生一定的影響，而浮萍漂浮於水面的生長特性，當族群數量上升時勢必會產生擁擠的競爭環境，我們好奇，青萍與水萍在應對擁擠競爭環境下時，兩者各自有著什麼獨特的應對機制。因此，我們想到透過調整養殖盆中的浮萍數量，製造出擁擠的惡劣生長環境，以及稀疏的良好生長環境，藉以探討兩種浮萍在擁擠競爭環境下的應對機制。

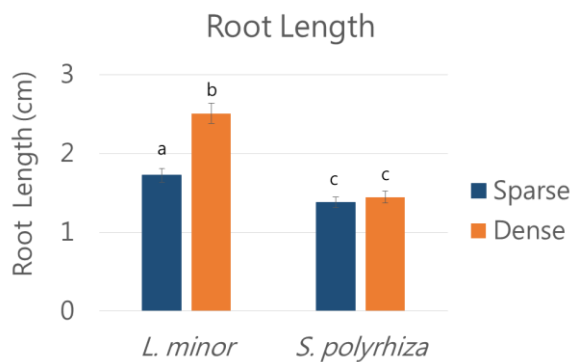
我們在實驗中，用佔水面面積 20% 覆蓋量的浮萍作為稀疏組，佔水面面積 100% 為擁擠組，接著將其靜置一週，並深入觀察記錄稀疏和擁擠環境中的型態差異。



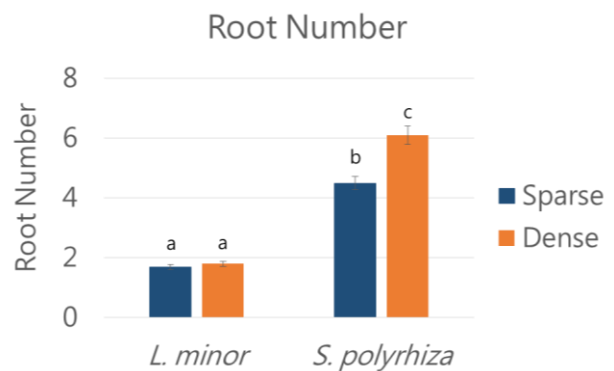
(圖 2-1)青萍及水萍在稀疏及擁擠環境下的水下側面觀(圖由作者自製)

我們首先針對稀疏與擁擠培養組的根部進行深入觀察，結果如圖 2-1 所示。根長的部分，可以發現青萍的根長在擁擠狀態下會比在稀疏環境下平均增加約 1 公分，而水萍的根長在稀疏及擁擠的環境下則沒有太大的區別，如圖 2-2 所示，但在根部數量的部分，水萍的根數在擁擠環境下會比在稀疏環境下平均多 2 根，而青萍的根數在兩個環境中的差別不大，結

果如圖 2-3 所示。這也說明，兩種浮萍在擁擠條件下都願意投入能量在根系的發展，青萍選擇增加根長，水萍則是提升根的數量。

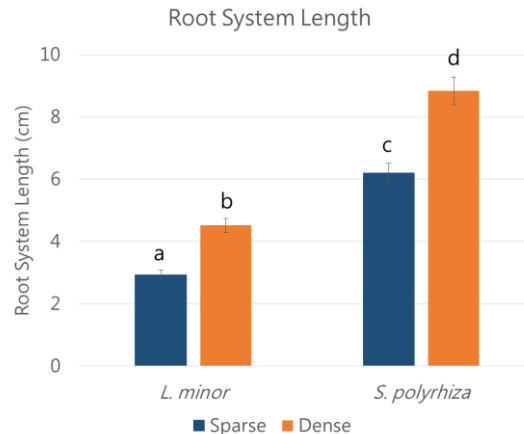


(圖 2-2)稀疏與擁擠條件下浮萍的根長變化
(圖由作者自製)



(圖 2-3)稀疏與擁擠條件下浮萍的根數變化
(圖由作者自製)

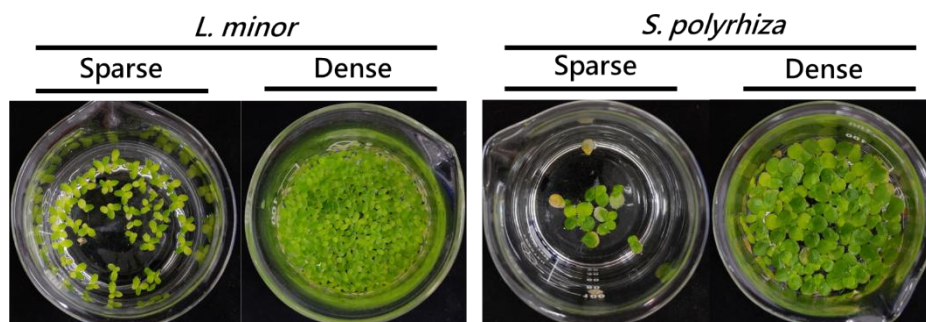
接著我們好奇兩種浮萍雖有著不同的根部生長策略，何者對於根系總長的增加更為明顯？我們將根數與根長相乘得出根系總長，如圖 2-4 所示。發現青萍和水萍兩者在擁擠環境下，根系總長相較於稀疏環境都有所提升。但是整體的根系總長還是以水萍來的比青萍多，因此我們證實擁擠的惡劣環境確實會對植物的根部造成一定的影響，雖然青萍與水萍擁有著不同的策略來增加根系總長，但在總增加量的部分，水萍來的比青萍更突出。我們推測之所以根系總長會提升是因為擁擠環境下，和浮萍競爭水中養分的競爭者提升，因此需要透過增加根系總長來多吸取養分以利自己生存，而水萍在這方面表現可能較青萍更具優勢。



(圖 2-4)稀疏與擁擠條件下浮萍的根系總長變化(圖由作者自製)

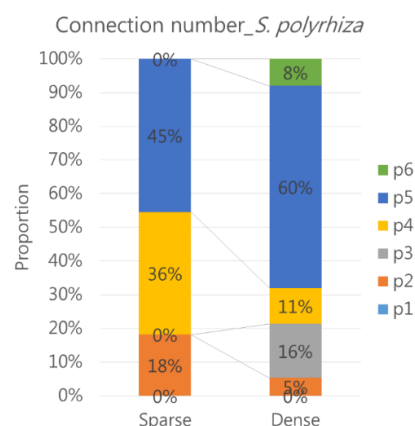
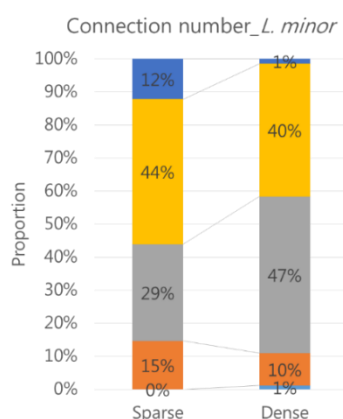
三、浮萍葉狀體連接數(p 數)在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異

接續稀疏及擁擠環境下，除了根部所產生的差異，葉狀體的部分是否也同樣受到影響？因此，我們深入比較稀疏與擁擠環境下，兩種浮萍的葉狀體變化。首先，我們觀察到一個有趣的現象，青萍與水萍在擁擠的培養環境下，其葉狀體連接數(p 數)似乎有著明顯的變化！如圖 3-1 所示。為了量化此現象，我們將兩種浮萍分別於稀疏及擁擠的環境培養的一週，並將浮萍挑出後逐一統計每個浮萍的葉狀體連接數(p 數)，並計算每個葉狀體連接數的個體占比。結果如圖 3-2、3-3 所示。



(圖 3-1)青萍與水萍葉狀體在稀疏及擁擠環境下的連接數形態照片(圖由作者自製)

由圖 3-2 顯示出，水萍在稀疏環境下，看不見葉狀體連接超過 6 片(p6)的個體，其中葉狀體連結數 5 片(p5)的個體占比未超過一半，約占 45%，但當水萍處於擁擠的環境下，即可看到葉狀體連接超過 6 片(p6)的個體，此外，葉狀體連接數超過 5 片(p5)的個體占比大幅提升至 70%左右！然而，青萍的結果與水萍完全相反，由圖 3-3 可看出，青萍在稀疏環境下，葉狀體連結數超過 4 片(p4)的個體占比約為 56%，占比超過一半，但當青萍處於擁擠環境下，葉狀體連接數顯著下降！其中葉狀體連接數小於 3 片(p3)的個體占比將近 60%！



(圖 3-2)青萍在稀疏及擁擠環境的葉狀體連接占比 (圖 3-3)水萍在稀疏及擁擠環境的葉狀體連接占比

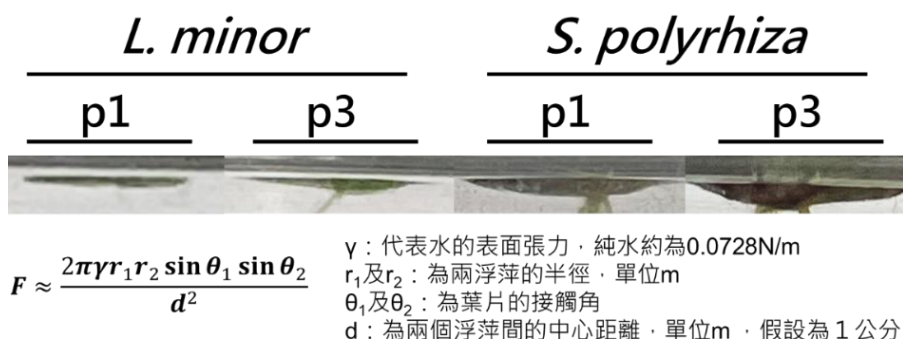
(圖由作者自製)

(圖由作者自製)

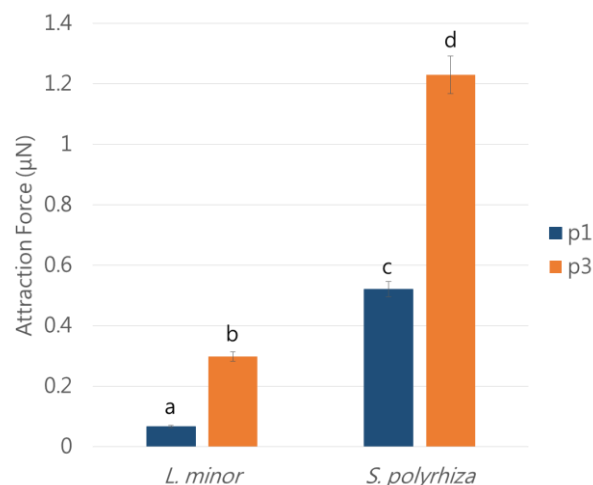
從實驗結果我們得知青萍與水萍在應對擁擠環境時，兩者葉狀體連接的策略截然不同，**青萍宛如進攻型策略**，透過提升葉狀體斷裂機制來降低葉狀體連接數(p 數)，釋出小葉來強佔並且填補水面空間，進而取得其生存上的優勢。**水萍則偏向防守型策略**，增加葉狀體連接數(p 數)，減少小葉的釋出，雖然不能透過釋出小葉強佔水面空間，但可透過相互交疊來填滿葉狀體間的空隙。總結上述實驗結果，**在擁擠環境下，青萍傾向增加斷裂能力釋出小葉填充並搶占水面空間，水萍傾向提升葉狀體連結數，增加交疊比例的方式應對擁擠環境。**

接著我們好奇，兩種浮萍在擁擠環境下為何有著截然不同的葉狀體連結策略？首先，我們思考到**葉狀體面積越小，其填充細小空間的能力應越佳！**圖 1-3 所示，**青萍葉狀體面積比水萍小了五倍**，這也說明若選擇增加斷裂率，藉由釋出小葉來填充水面的話，**葉狀體較小的青萍應比葉狀體大的水萍擁有更好的填充能力**。除了青萍葉狀體面積較小的因素外，**青萍在水體表面上會不會擁有更好的分散移動能力呢？**在實驗的過程我們觀察到一個特殊的現象，漂浮於水上的浮萍彼此間有著一股**相互吸附的力量**，根據文獻探討，這現象稱作「**麥片圈效應 The Cheerios Effect**」，漂浮於水上的浮萍會讓水面產生一個凹陷角，進而產生相互吸引的力量。我們猜測，青萍間相互吸引的力量可能較水萍低，使其擁有更好的分散移動能力來填

充並搶占水體表面空間，為了確認我們的猜想，我們將 p1 與 p3 的水萍與青萍放置水體表面，並以相機側向拍攝水體凹陷角度，透過公式計算出兩浮萍相距 1 公分時的吸引力大小。



(圖 3-4)青萍與水萍 p1、p2 的水面凹側面照
與吸引力公式，p 代表連接數(圖由作者自製)

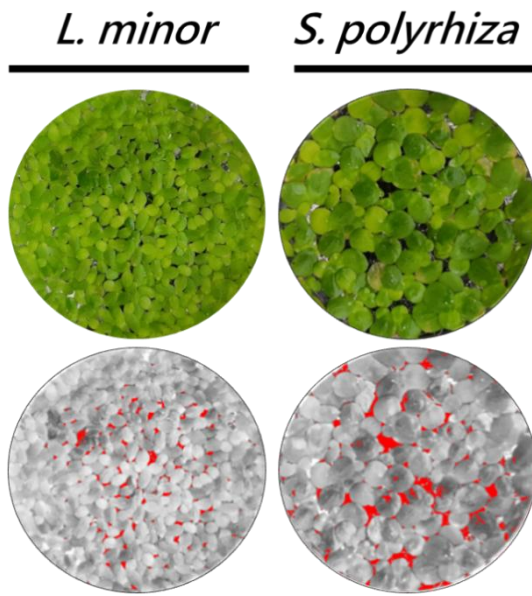


(圖 3-5)青萍與水萍 p1、p3 的吸引力大小
(圖由作者自製)

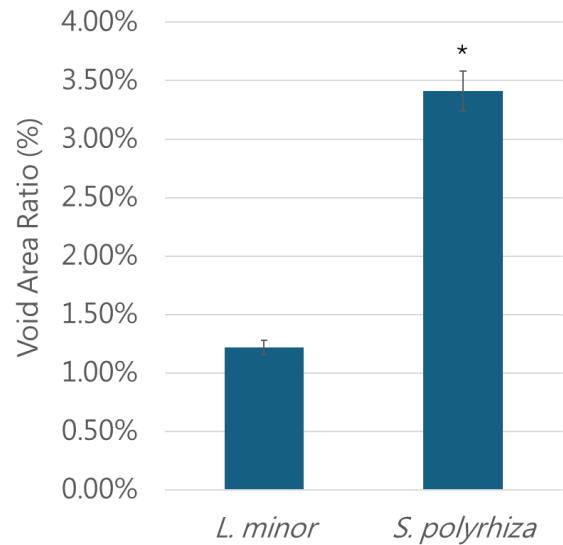
從圖 3-4 所顯示的吸引力公式可看出，兩浮萍間的吸引力與水面凹陷角及浮萍半徑有著正相關之關係。從水下側面觀照片可清楚看出，水萍不只擁有較大的半徑，其所產生的水面凹陷角也明顯較青萍大，這也說明，水萍彼此相互的吸引力較青萍更大。此外，可以觀察到當浮萍因斷裂變成單片葉狀體時，除了半徑減少外，水面凹陷角也隨之下降，說明斷裂釋出新小葉應能有效降低浮萍間的吸引力。為了算出浮萍間相互吸引力的實際數值，我們測量浮萍的半徑與水面凹陷角度，並假設浮萍間相互距離 1 公分的距離套入麥片圈效應公式進行計算，結果如圖 3-5 所示。

結果顯示，即便是三片葉狀體的青萍(p3)其相互吸引力也比單片葉狀體的水萍(p1)低了 62%！此外，水萍從 p3 斷裂成 p1 時，相互吸引力可下降約 40%，但青萍卻能下降高達 80% 的吸引力！比較水萍三片葉狀體(p3)與青萍單片葉狀體(p1)的吸引力，兩者差異高達 18 倍。從實驗結果可知青萍無須斷裂就擁有較低的相互吸引力，斷裂成單片葉狀體後又可大幅降低 80% 吸引力，有助其透過風吹、水流快速分散移動搶占空間，對於利用斷裂釋出新小葉狀態策略的青萍應較水萍更具優勢！而水萍的葉狀體型態與質量造成其具有較高的吸引力，使其分散移動能力較差，容易匯集成群不易分散，不利其選用斷裂釋出新小葉強佔空間的生存策略，推測水萍轉而偏向防守型策略，以提升相互交疊來填補空隙。

前面實驗結果顯示，青萍在擁擠環境下傾向降低葉狀體的連接數，釋出面積較小葉，以較佳的分散移動能力來填充並搶占水面空間。然而，青萍的填充策略是否真的比水萍來得更優秀呢？為了確認此事，我們讓青萍與水萍在燒杯不斷生長，直到族群數量不再增加的飽和狀態後，觀察燒杯中兩種浮萍空隙占比，並以 ImageJ 量化分析，結果如圖 3-6、3-7 所示。



圖(3-6)飽和狀態下青萍與水萍的間隙占比圖，紅色區域為電腦分析的間隙區域(圖由作者自製)



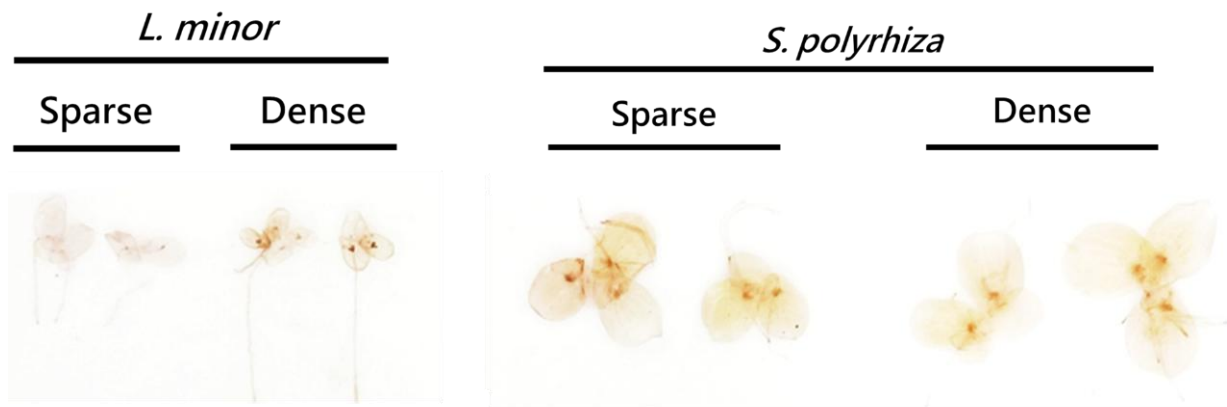
圖(3-7)飽和狀態下青萍與水萍的間隙占比量化分析(圖由作者自製)

圖 3-6 顯示，生長至飽和狀態下，青萍的間隙確實較水萍來的更小，量化分析結果顯示，飽和狀態下的青萍僅有 1.25% 的間隙占比，水萍的間隙占比高出青萍 2.7 倍，來到 3.4% 左右，這說明青萍以斷裂釋出小葉的方式，在填充策略上要比水萍來的更為優勢。

四、探討兩種浮萍在擁擠環境下，葉狀體連接數(p 數)改變的生理調控機制。

(一)ROS 的測定

前面的實驗我們發現青萍在擁擠環境下傾向斷裂釋出葉狀體，透過其卓越的分散移動能力來搶佔水面空間，水萍的葉狀體間則具有較強的吸引力，不利其分散移動，因此偏向減少斷裂，以增加葉狀體的連接數，透過交疊來填補空隙。我們接著好奇，兩種浮萍在擁擠環境下截然不同葉狀體連結策略，其背後的生理調控機制為何？前人研究顯示，過氧化物質(ROS) 不只是對植物體造成傷害，也可能被植物體用來做為訊息傳遞分子，啟動對抗逆境的機制，此外，前人研究也發現，浮萍會透過在其節處累積 ROS 的方式啟動其葉狀體斷裂機制。因此我們猜想，擁擠環境下，青萍傾向斷裂、水萍傾向相互連結的背後生理機制是否與其內部 ROS 累積有關？因此，我們以 DAB 藥劑進行組織染色，藉此探討稀疏及擁擠環境下浮萍體內的 ROS 累積狀況，結果如圖 4-1 所示

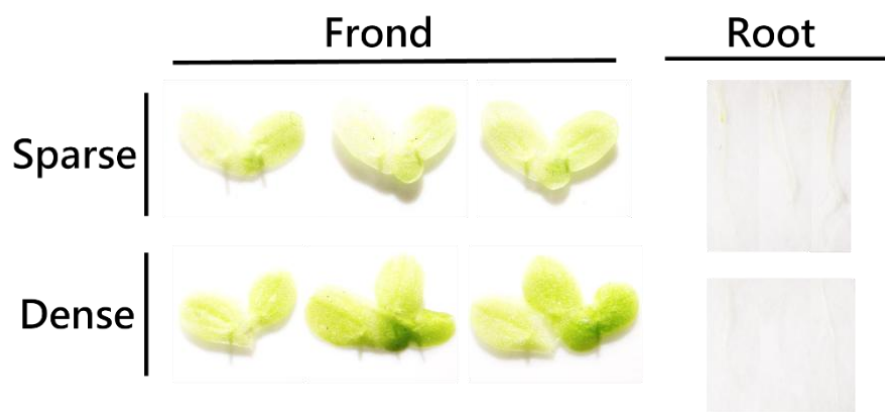


圖(4-1)浮萍在稀疏及擁擠環境下，組織內 ROS 的累積狀況(圖由作者自製)

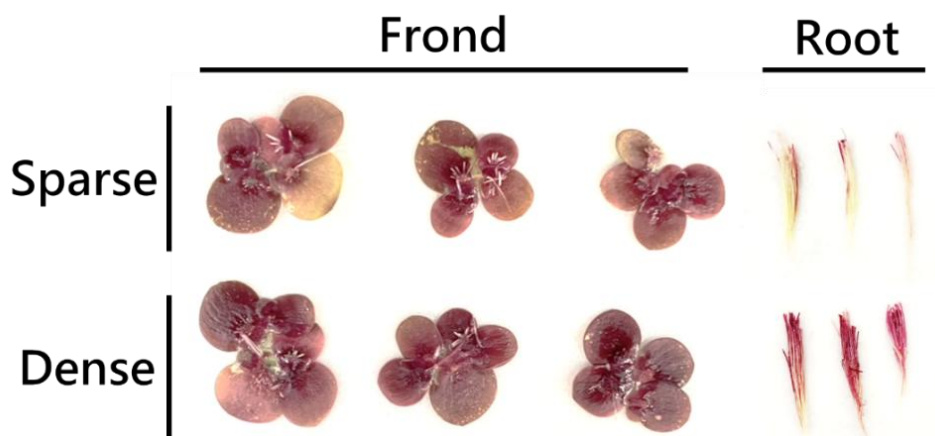
DAB 試劑能與 ROS 反應後產生棕色沉澱物。因此棕色越深，表示浮萍 ROS 累積含量越多。就青萍而言，我們檢測到青萍在擁擠環境下所產生的棕色沉澱比稀疏環境下的來的深，代表青萍在擁擠環境下所產生的 ROS 較多，尤其在節處更為明顯！這也說明青萍會在擁擠環境下，透過在葉狀體與節處內累積 ROS，來誘發葉狀體斷裂機制，促使其釋出小葉來強佔水面空間。在水萍方面，則是擁擠環境下的棕色沉澱比稀疏環境下來的少，這也說明水萍在擁擠環境下會透過降低體內 ROS 的累積，來減少其葉狀體斷裂的能力，使其葉狀體相互聚集、交疊來填空間隙。

(二)花青素的累積

接著我們好奇，青萍是如何做到累積 ROS 來觸發斷裂機制，而水萍又是如何做到減少 ROS 累積來增加葉狀體連結能力？植物可利用酵素或某些化學物質來清除體內的 ROS，因此我們猜測，兩種浮萍在擁擠的環境下，是否能調控其體內的抗氧化能力藉此改變 ROS 含量，進而影響其葉狀體連結策略？前人研究顯示，花青素除了能影響植物的顏色外，同時具有相當不錯的抗氧化能力，因此我們好奇，兩種浮萍在擁擠環境下的 ROS 累積變化是否與花青素有關？經文獻查詢後得知，水萍根部和葉狀體的交界處會呈現紫色，即為花青素，因此我們就做了花青素的觀測實驗，仔細比較青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的花青素含量變化。



(圖 4-2)青萍在擁擠及稀疏環境下的背面觀及根部花青素累積的狀況(圖由作者自製)



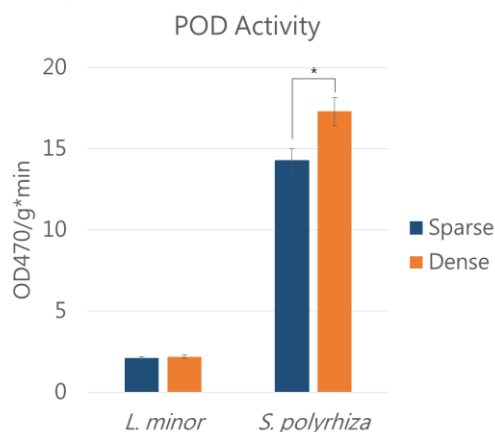
(圖 4-3)水萍在擁擠及稀疏環境下的背面觀及根部花青素累積的狀況(圖由作者自製)

我們首先觀察青萍稀疏與擁擠環境下的花青素累積的狀況，結果如圖 4-2 所示。圖中可以清楚看到青萍無論在稀疏或者擁擠的環境中，葉狀體或者根部都沒有花青素累積的情況，這也說明，在擁擠環境下，青萍並不會增加其花青素的累積來提升其抗氧化力，推測這應該是青萍在擁擠環境下能累積體內 ROS，來觸發斷裂機制的原因之一。

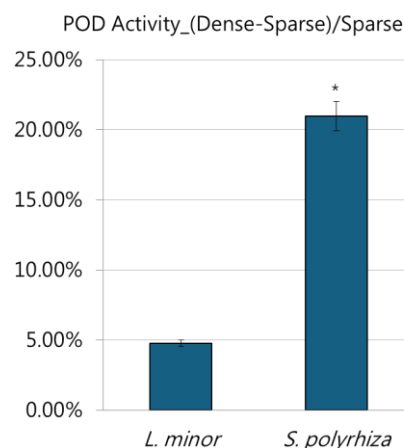
水萍的結果如圖 4-3 所示。我們觀察到水萍在擁擠環境下，其葉狀體背部與根部的紫色更深，代表水萍葉狀體與根部中花青素含量應在擁擠環境下含量有所提升，其中根部的差異更為明顯！因此我們可以推斷，水萍在擁擠環境下可透過花青素的累積來提升其抗氧化能力，藉以壓制體內 ROS 累積，進而減少斷裂機制的觸發，增加葉狀體的連接數。

(三)POD 酵素活性的測定

除了花青素能清除植物體內 ROS 外，植物體中的抗氧化酵素亦能參與調控植物體內 ROS 的含量。因此我們想知道青萍及水萍在擁擠環境下體內抗氧化酵素(POD)的活性變化，藉以了解抗氧化酵素(POD)是否有參與擁擠環境下的 ROS 含量調控，進而影響到浮萍的葉狀體連結策略。因此我們進行實驗，來檢測兩種浮萍在稀疏與擁擠環境下 POD 的酵素活性，結果如圖 4-4、4-5 所示。



(圖 4-4)擁擠與稀疏環境下浮萍 POD 活性測定
(圖由作者自製)



(圖 4-5)擁擠與稀疏環境下浮萍 POD 活性倍率差異
(圖由作者自製)

結果顯示，在 POD 酵素活性的檢測中，青萍在擁擠環境下和稀疏環境下的 POD 活性並無顯著差異。而水萍在擁擠環境下 POD 酵素活性則較稀疏環境下來的更高，約提升 20%。我們推測，水萍在擁擠環境下透過提升 POD 酵素活性來抑制 ROS 的累積，藉此減少其斷裂機制的觸發，增加葉狀體的連接數，而青萍則無此趨勢。

綜合上述結果，我們推論，青萍在擁擠環境下其體內的抗氧化機制不會明顯提升，有助於其累積 ROS 來觸發葉狀體分離，以較佳的分散移動能力搶佔水面空間。而水萍在擁擠環境下則會透過提升 POD 活性與花青素含量來增加其抗氧化力，使其體內 ROS 含量減少，減緩葉狀體斷裂機制發生，造成其葉狀體更聚集，而不傾向分離，以相互聚集、交疊來填補縫隙的策略應對擁擠環境。

五、浮萍葉狀體的交疊面積在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異

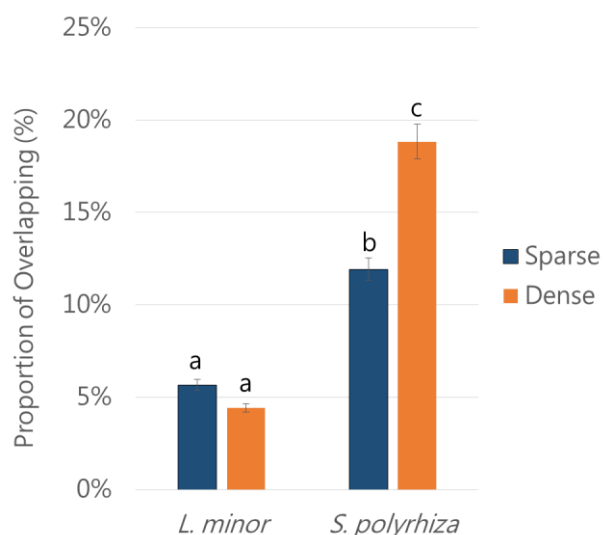
上述實驗得知，擁擠環境下青萍會透過觸發斷裂機制，以較低的葉狀體相互吸引力，來快速移動分散用以搶佔水面空間，而水萍則不具有此策略。這讓我們好奇，擁擠環境下的水萍究竟是透過何種策略來提升其擁擠環境下的競爭優勢？為了解開疑惑，我們深入觀

察稀疏與擁擠環境下的浮萍型態變化，其中我們觀察到一個明顯的差異！**水萍葉狀體似乎會在擁擠環境下靠得更加緊密，葉狀體相互交疊的面積似乎有所提升**，結果如圖 5-1 所示。為了確認擁擠會增加浮萍葉狀體交疊比例，我們將稀疏與擁擠環境培養一週的浮萍取出，以 ImageJ 量化算出單片葉狀體交疊面積比例，結果如圖 5-2 所示。

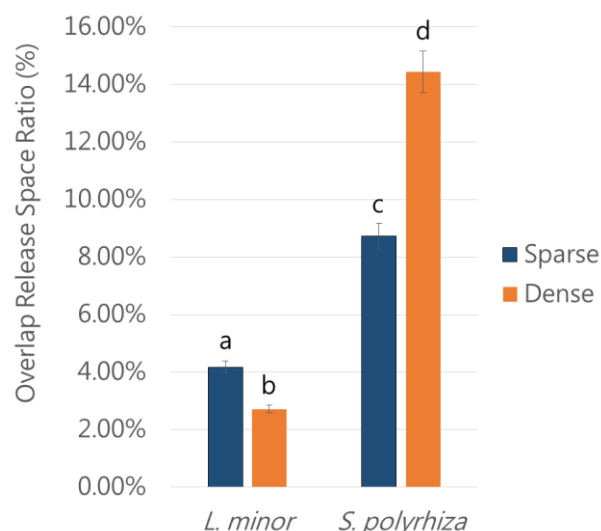


(圖 5-1)青萍及水萍在稀疏及擁擠環境的交疊面積圖(圖由作者自製)

圖 5-2 的結果顯示，**不論稀疏或擁擠的環境，青萍的單片葉狀體交疊面積比例並不高**，每片葉狀體大約都只有 5% 左右的交疊面積，**且在擁擠的情況下反而傾向葉狀體更分散，交疊比例下降到 4% 左右**，反觀**水萍不論稀疏或擁擠情況，其單片葉狀體交疊面積比例明顯較高**，在稀疏環境下有大約 12%，**在擁擠環境水萍葉狀體間會靠得更近，單片葉狀體交疊面積比例會上升至接近 18%**。



(圖 5-2)稀疏與擁擠下兩種浮萍的交疊面積比例 (圖由作者自製)



(圖 5-3)稀疏與擁擠下兩種浮萍的交疊總釋放面積 (圖由作者自製)

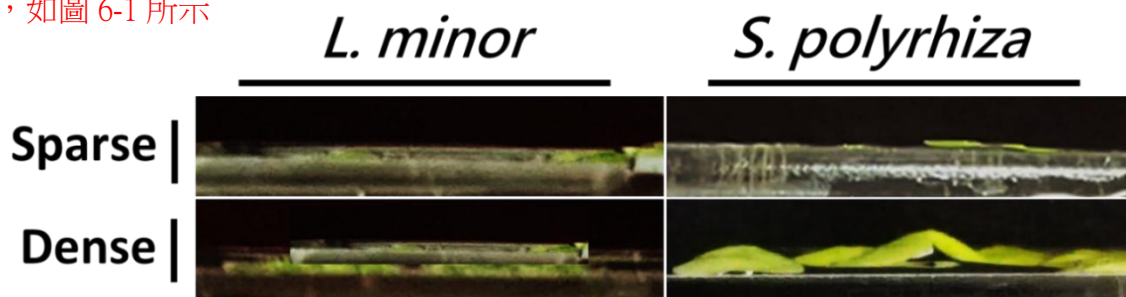
根據上述我們量測的浮萍單片葉狀體面積，發現擁擠狀態下，水萍每片葉狀體的交疊比例會上升，且比青萍高出許多。而我們接著思考，水萍擁擠狀態下除了單片葉狀體交疊比例會上升外，圖 3-2 顯示，**擁擠狀態下水萍的葉狀體連接數亦會提升**，這讓我們好奇，**葉狀體連接數的提升對整體的交疊比例是否存在放大效應？**為此我們嘗試計算交疊所造成的整體面積釋放量。首先我們計算各種葉狀連結接數分別會產生多少的交疊面積，我們將(單片葉狀體交疊面積比例)×[葉狀體連接數(p 數)-1]，藉以量化每種連結數會產生多少的交疊面積，之所以

公式要減 1，是因為在交疊時最上層的葉狀體並不會產生交疊，所以才要減 1，接著計算出稀疏與擁擠環境下各個葉狀體連接數(p 數)的個體數目，並將個體數乘上該葉狀體連接數能釋放出來的面積後將全部加總，藉此得到浮萍整體因交疊所釋放出的總面積，並將此數值除以燒杯中所有浮萍的葉狀體總面積後得出交疊可釋放出來的整體空間比例，結果如圖 5-3 所示。

結果顯示，稀疏狀態下的青萍透過交疊僅能釋放其總體面積的 4%，並且在擁擠環境下，因葉狀體斷裂，造成交疊釋出的總面積下降到僅剩 3%左右，這說明青萍透過交疊釋放空間給族群生長的效益非常差。然而，水萍在擁擠環境下不只提升了單片葉狀體的交疊面積，還能透過增加葉狀體連接數來放大每片葉狀體的交疊效益，使整體總面積釋放量從 8.7%上升到 14.4%，藉由葉狀體交疊大幅釋出的空間，提供新的個體生存。總結以上實驗，我們推論青萍不傾向這種生存策略，而水萍則是很仰賴這套生存機制，甚至在惡劣的競爭環境中，會透過增加交疊面積的比例，來提高自己生存的機會。

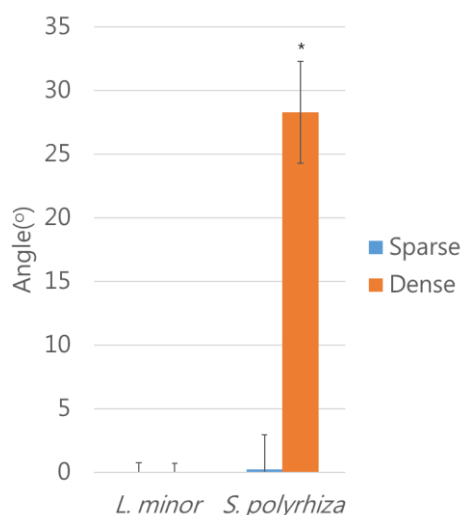
六、浮萍的葉狀體隆起角度在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異

上述實驗我們得知，水萍在應對擁擠環境時，除了透過增加單一葉狀體的交疊面積，令水萍能透過提升葉狀體連結數來放大葉狀體的交疊效益，讓其能釋出高達 14.4%的生長空間供新生的個體使用，而青萍則無此機制。然而我們好奇，除了相互交疊的機制外，水萍在擁擠環境下是否還有著其他生存策略？在我們飼養浮萍過程中偶然發現了一個特殊的現象，水萍在擁擠環境下，有許多個體不像一般我們所見服貼在水面上，而是葉狀體會產生向上隆起現象，如圖 6-1 所示

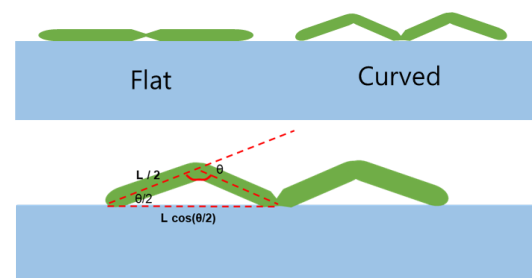


(圖 6-1)浮萍在稀疏及擁擠環境葉狀體隆起的示意圖(圖由作者自製)

對此我們就很好奇究竟是什麼樣的原因導致這個現象的發生，以及這個現象會對浮萍的生存策略造成哪些影響？因此我們把稀疏及擁擠環境(培養約三週)的浮萍取出，並且透過切片在顯微鏡下觀測，最後量化出葉狀體彎曲角度，結果如圖 6-2 所示。



(圖 6-2)浮萍與水面夾角長條圖(培養三週)
(圖由作者自製)

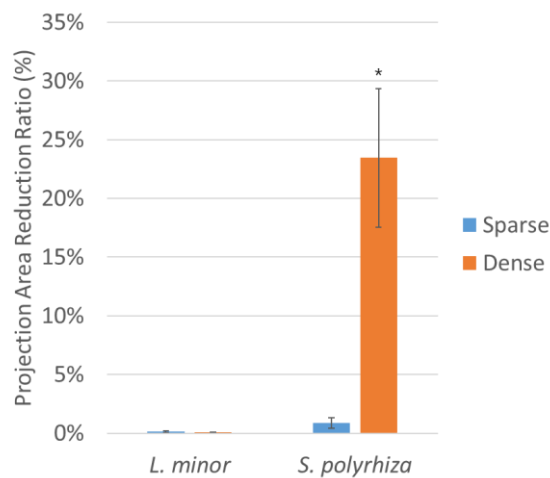


θ : leaf angle
 $\theta/2$: water surface angle
 L : leaf length
 Projection length = $L \cos \theta$

(圖 6-3)浮萍彎曲釋出交疊面積示意圖
(圖由作者自製)

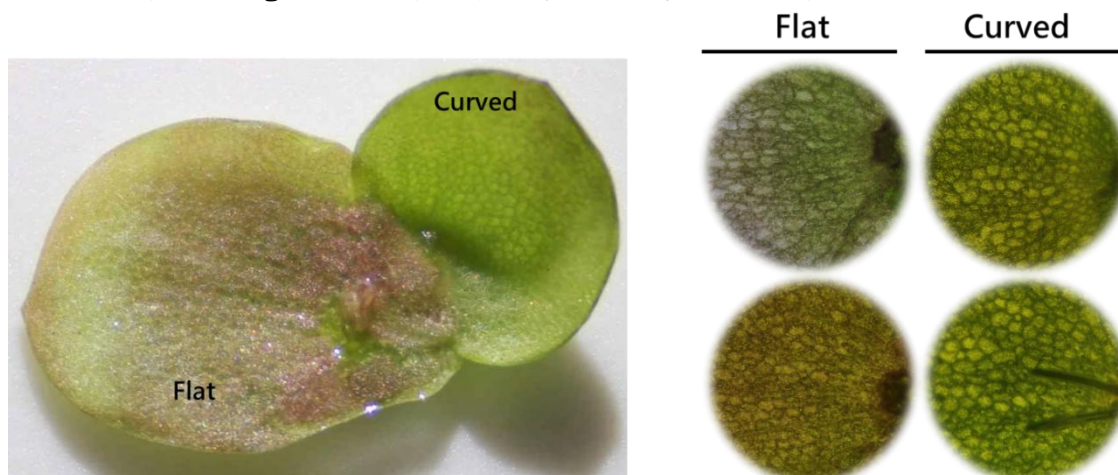
圖 6-2 的實驗結果顯示，水萍葉狀體確實會因擁擠環境下觸發其彎曲並產生向上隆起現象，而青萍則無。我們透過 ImageJ 量測葉片彎曲角度，發現青萍不論擁擠與否，其葉狀體近乎維持水平，與水面近乎無夾角(約為 0 度)，水萍的部分則是在疏鬆情況下葉狀體呈現水平，但當其處於擁擠時，其葉狀體會產生彎曲，葉片與水面夾角從原本水平狀態變成約 28 度。

在上述實驗後我們開始思考，水萍擁擠環境下葉狀體向上隆起的用意為何？**水萍會不會是透過隆起讓葉狀體能相互靠得更近，藉此釋出更多的水面空間供新個體生長使用？**為了解葉片彎曲產生的隆起能釋放出多少水面生長空間，**我們將量測到的角度以三角函數計算葉狀體彎曲後對水面產生的投影面積**，如圖 6-3 所示，假設原本葉片全長(直徑)為 L ，當葉片與水面夾角為 θ 時，則葉片實際佔水面的面積為 $\frac{1}{4}\pi L^2 \cos^2 \theta$ ，因此釋出的面積比例即為 (原來葉片面積-葉片實際佔水面面積)/原來葉片面積。計算結果如圖 6-4 所示。



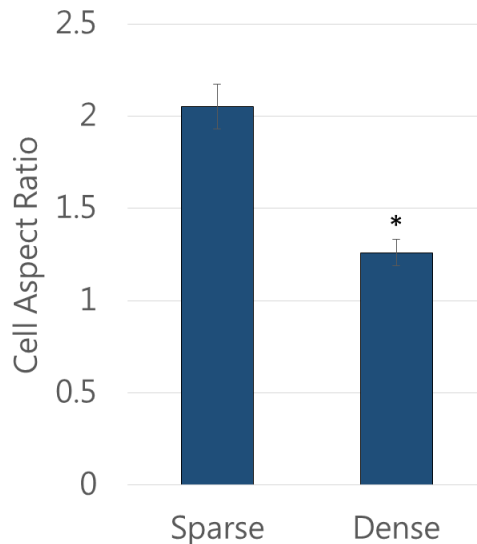
(圖 6-4)浮萍因葉狀體彎曲所釋放出來的水面空間比例(圖由作者自製)

圖 6-4 的結果顯示，**水萍在擁擠條件下，其葉狀體彎曲能讓浮萍葉狀體靠得更近，並能釋放 23% 的表面積供新生個體生長，但青萍則無此機制。**接著我們好奇，**擁擠環境下的水萍是如何使其葉狀體產生彎曲？**我們想透過顯微鏡觀察，了解水萍在稀疏與擁擠環境下細胞形態的變化，藉此了解水萍是否透過細胞形態變化來造成葉狀體彎曲現象，結果如圖 6-5 所示。**水萍葉狀體背面有著特殊的網格形態的組織**，其中平坦葉狀體的網格形態都比較細長，並向葉尖延伸的縱向排列發展；彎曲葉狀體的網格形態則比較圓、寬，整體偏向橫向發展，我們以 ImageJ 加以量化兩種葉狀體的長寬比，結果如圖 6-6。



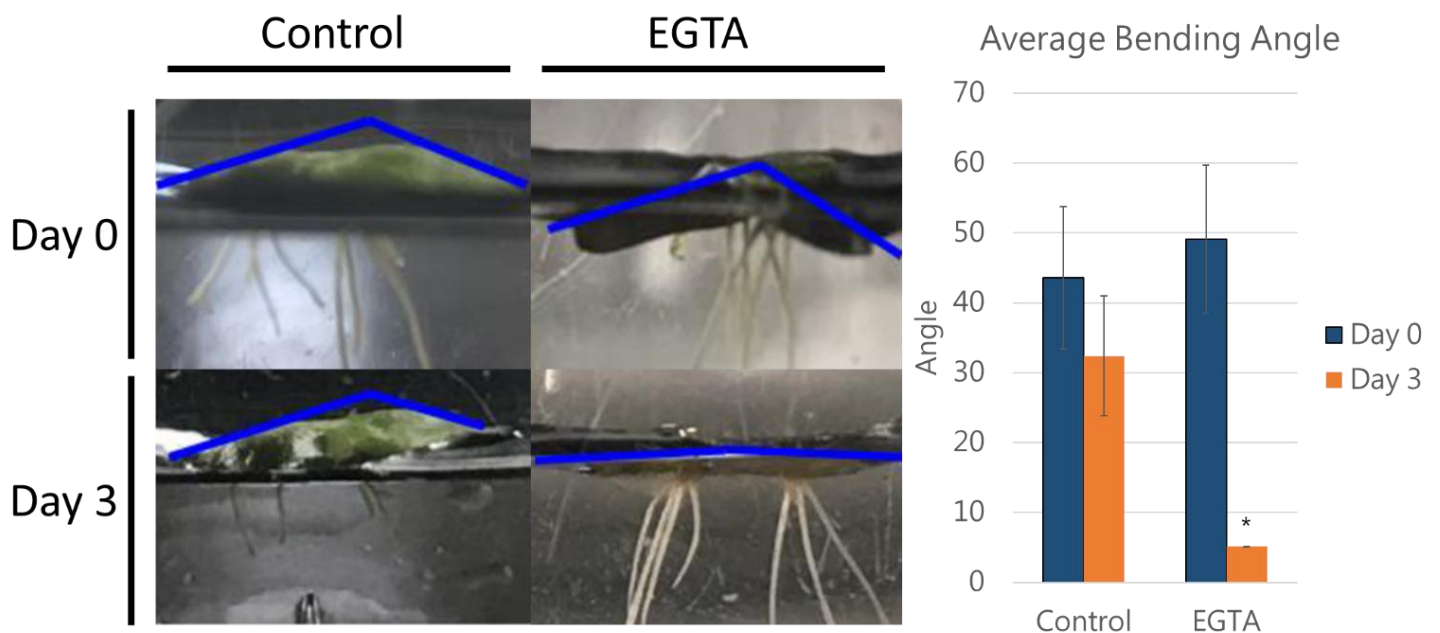
(圖 6-5)浮萍彎曲和平坦的葉狀體網格組織型態圖(圖由作者自製)

量化結果可以看出，水萍稀疏環境下的網格組織長寬比值約為 2，也說明其偏向細長形態。但擁擠環境下比值接近 1，這也表示其網格組織形態偏向圓型。而彎曲的葉狀體外形本身就偏短、圓，且橫向發展的比例較縱向發展更高，推測**偏向圓型的網格形態有助於葉狀體產生彎曲**，進而為自己釋出更多的生長生存空間以應對擁擠環境。



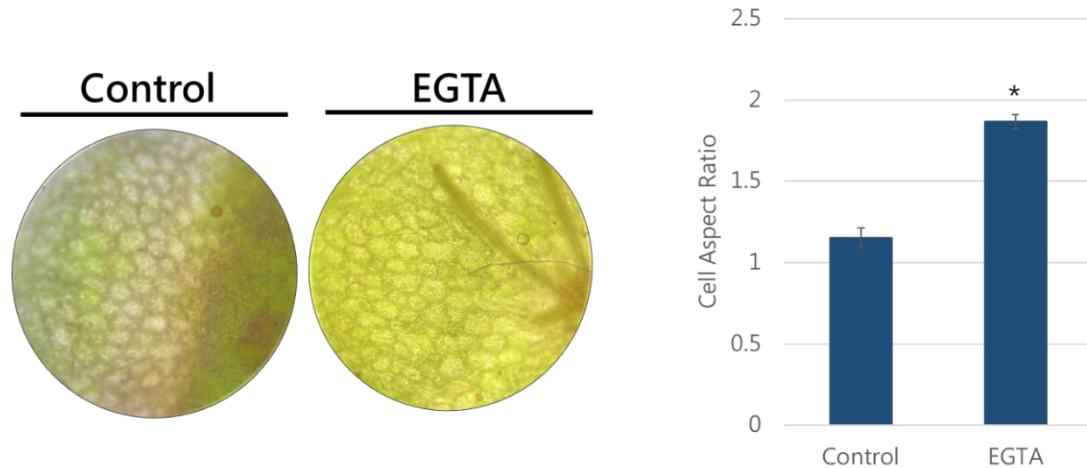
(圖 6-6)水萍彎曲和平坦的葉狀體的網格形態組織長寬比量化圖(圖由作者自製)

前面我們觀察到水萍在擁擠時的生存策略，有一策略是以葉狀體隆起，來增加水面對於水萍的容納率。於是我們開始思考，**水萍細胞內是以怎樣的傳訊，造成葉狀體隆起的？**由於前面觀察到水萍隆起時，網格組織變得比較圓，長寬比似乎較趨近於 1。當長寬比越趨近 1，表示網格組織越圓，葉狀體凸起程度越高。**植物細胞內的第二訊子主要是鈣離子，而 EGTA 藥劑的作用就是螯合鈣離子**，使細胞傳訊阻斷。若加入 EGTA 後發現細胞的長寬比發生變化，表示水萍的確牽扯到鈣離子的細胞傳訊而造成凸起的。



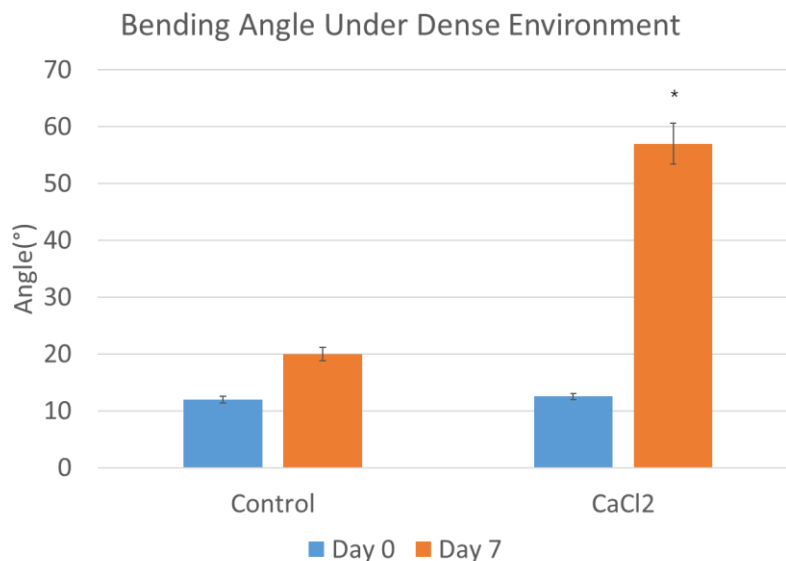
(圖 6-7) 水萍有無 EGTA 的葉狀體隆起與否的水下側面觀與角度量化圖(圖由作者自製)

結果顯示，加入 EGTA 後隆起程度有明顯減少的趨勢，如圖 6-7 所示！將結果量化發現，加入 EGTA 的組別在三天後，隆起角非常顯著的下降至 5 度以下，幾乎完全成為平整的水萍了！接著我們以顯微鏡觀察加入 EGTA 後網格組織的型態變化，結果如圖 6-8 所示。水萍細胞在有加 EGTA 後，網格組織型態長寬比變得更大，也就是網格組織變得更窄的趨勢！為了確認我們的觀察，我們統計顯微鏡下可分辨細胞的長寬比，資料統計於圖 6-8。控制組細胞長寬比平均為 1.15，而加入 EGTA 後長寬比則顯著上升至 1.87，應證了我們的觀察。



(圖 6-8)水萍有無 EGTA 的葉狀體網格型態組織與長寬比量化圖(圖由作者自製)

為了更加確認水萍葉狀體隆起現象與鈣離子有關，我們透過外加鈣離子觀察水萍在擁擠環境下葉狀體的型態變化。藉以正向佐證鈣離子確實有參與水萍葉狀體隆起的訊息傳遞機制。

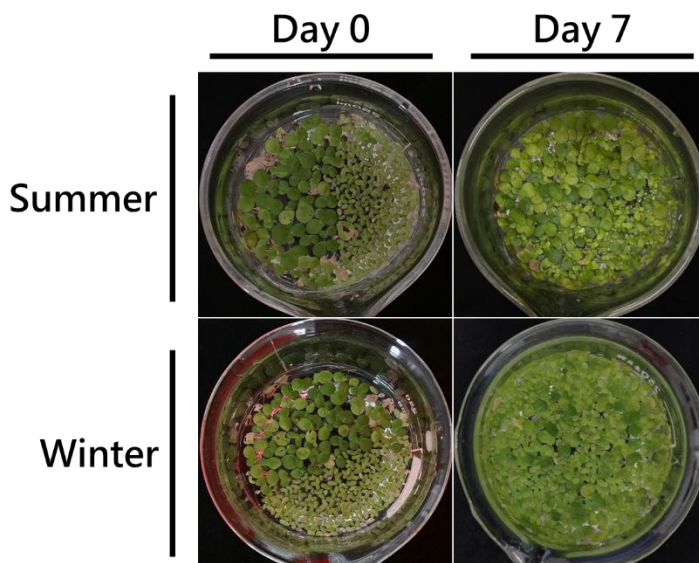


(圖 6-9)水萍擁擠下有無鈣離子的葉狀體突起角度量化圖(競爭一週)(圖由作者自製)

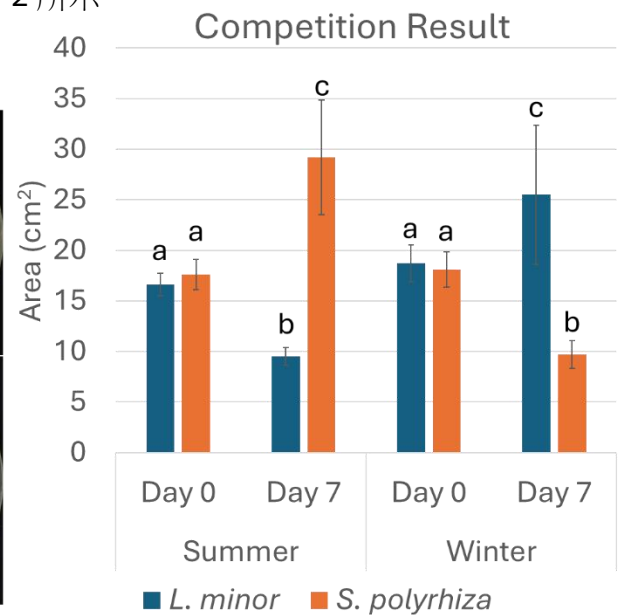
結果顯示，在加入鈣離子後擁擠環境下的水萍其葉狀體隆起現象有更加明顯的趨勢。將實驗結果量化後發現，沒加的組別在擁擠七天後彎曲角度約為 20 度，而外加鈣離子的組別則提昇到 56 度。綜合上述添加 EGTA 及鈣離子的實驗結果，我們可以得出一個重要的結論：水萍在擁擠環境下藉由鈣離子作為訊息傳遞因子，促使網格組織形態趨近圓形，藉此讓水萍葉狀體產生隆起的現象，助其釋放更多空間供其生長。

七、探討青萍和水萍因為季節而產生消長現象的關鍵因子。

根據上述實驗我們已經得知青萍與水萍在面臨擁擠環境下各自的競爭策略。我們接著深入探討我們所好奇的第二項核心問題：**造成浮萍因季節變換產生消長的關鍵因子是什麼？**為了確認我們所看到的現象不僅是出現在家中的生態池，**我們取自己飼養的青萍與水萍在夏天(6月)與冬天(12月)進行種間競爭實驗**。為了排除水池中的其它因子干擾，我們設計了一個半開放裝置，我們取等量的青萍與水萍放入裝有水的杯中，但實驗不在生長箱中進行，而是將其放置在能感受環境溫度並照射到陽光的陽台，觀察並記錄面積變化，藉以製出夏、冬兩季種間競爭下的族群生長曲線，結果如圖 7-1、圖 7-2 所示。

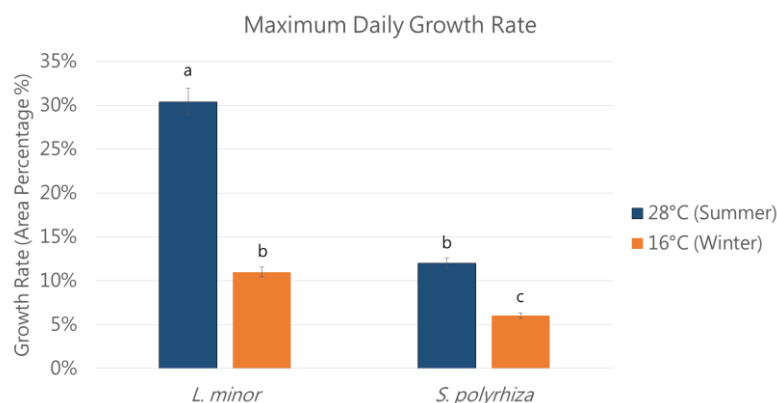


(圖 7-1)青萍與水萍夏天(六月)與冬季(12月)種間競爭實驗(圖由作者自製)



(圖 7-2)青萍與水萍在夏天(6月)與冬天(12月)種間競爭生長面積變化(圖由作者自製)

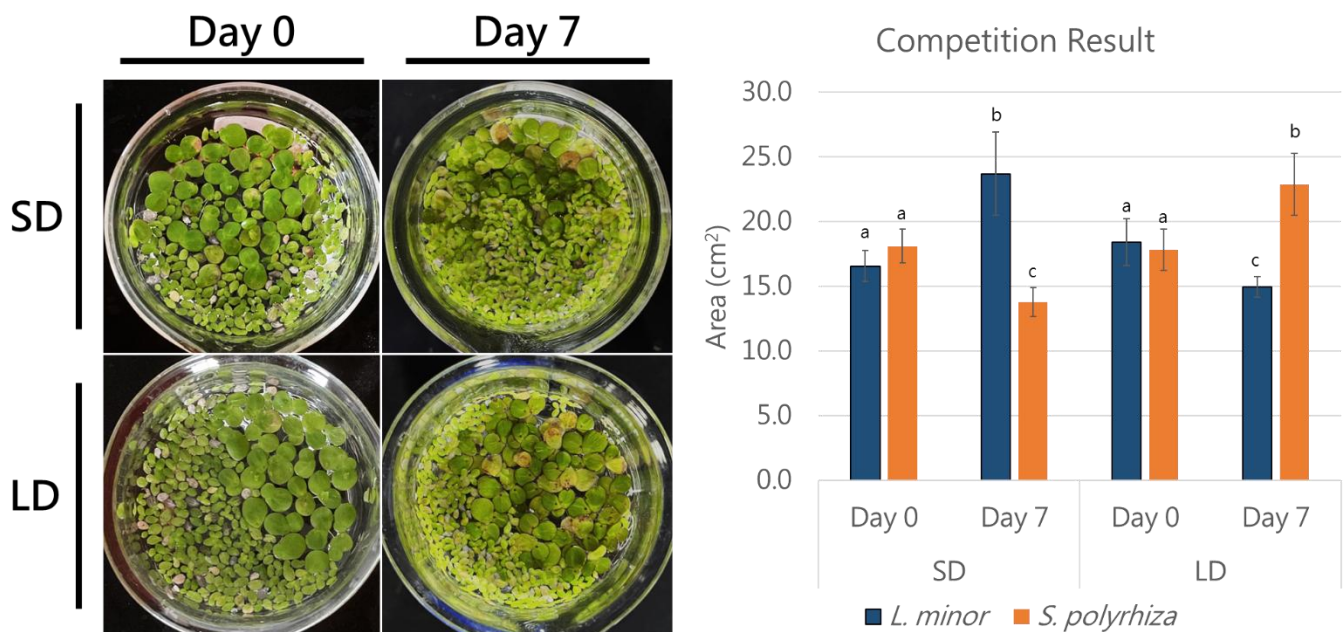
結果顯示，我們過去所觀察到的**池中消長現象在我們自製的半開放裝置中仍可再現！**只要裝置能照到陽光並感受到環境溫度，**夏天(6月)水萍將成為競爭優勢者**，覆蓋面積將來到青萍的**3倍**。但到**冬天(12月)**，青萍覆蓋面積最高能來到水萍的**2.5倍**，青萍為冬天競爭優勢者。影響兩浮萍消長的關鍵因子究竟是什麼？會隨季節的變化的因子包含**溫度與光週期**。我們首先對溫度著手，**將實驗環境改到生長箱**，觀察並計算**16°C (冬天均溫)與 28°C (夏天均溫)**下，兩種浮萍各自獨立培養的最大每日平均生長速率(每日增加面積百分比)，進而推斷溫度對競爭的影響，結果如圖 7-3 所示。



(圖 7-3)青萍與水萍在 16°C (冬天均溫)與 28°C (夏天均溫)下的最大每日平均生長面積百分比 (圖由作者自製)

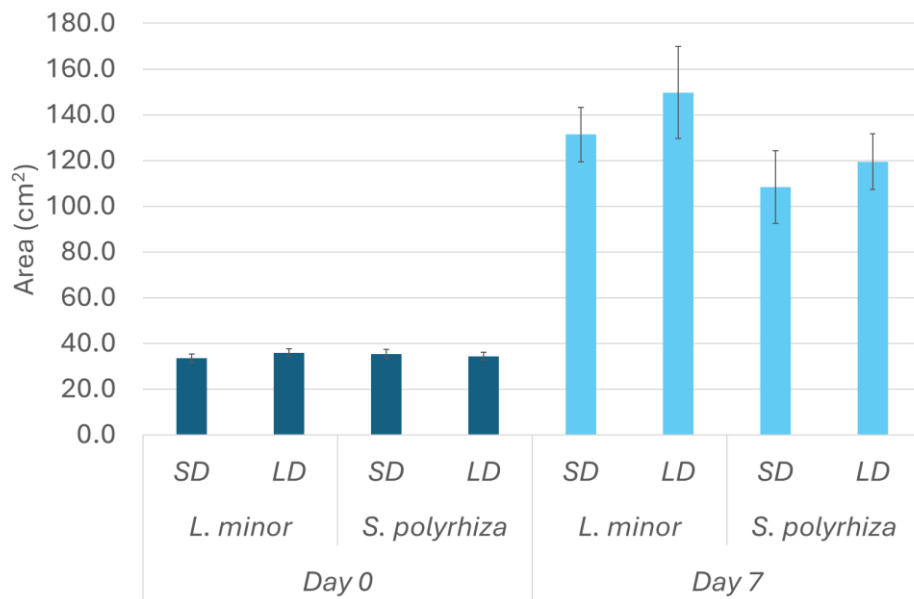
實驗結果顯示，相較於 28°C (夏天均溫) 下，16°C (冬天均溫) 下兩種浮萍的最大生長速率皆下降，水萍約下降一半，而青萍甚至下降超過 6 成，雖然 16°C (冬天均溫) 下青萍的最大生長速率超過水萍將近 1.83 倍，但在 28°C (夏天均溫) 下，青萍的最大生長速率超過水萍 2.5 倍，若是因溫度影響到兩者的生長速率造成競爭優勢差異的話，青萍在夏天應具有更好的競爭優勢才對，但事實結果恰好相反。

綜合以上數據我們推測，造成兩種浮萍季節性消長的關鍵可能不是溫度！季節也會影響光週期，我們好奇光週期是否會改變兩者的競爭優勢造成季節消長？因此，我們以定時器調控生長箱光週期，讓青萍與水萍分別處理長日照光週期(13.5hr 日照，夏至光週期，代號 LD) 與短日照光週期(10.5 hr 日照，冬至光週期，代號 SD)，觀察兩者的競爭情形，結果如 7-4 所示。在日照 10.5 小時的冬至光週期下，青萍有著顯著的競爭優勢，水面覆蓋面積上升 1.4 倍，水萍則下降 2 成。但當日照增加到 13.5 小時夏至光週期時，反而變成水萍佔優勢，水面覆蓋面積上升約 1.3 倍，青萍則下降 2 成。根據實驗結果可確認，光週期確實會影響青萍與水萍間的競爭優勢！在夏至長日照環境下，水萍比青萍更具競爭優勢，當冬至短日照時，則變成青萍比水萍更具競爭優勢。



(圖 7-4)浮萍在長日照光週期(13.5hr 日照，夏至光週期，代號 LD)與短日照光週期(10.5 hr 日照，冬至光週期，代號 SD)的生長照片(左)與面積量化圖(右) (圖由作者自製)

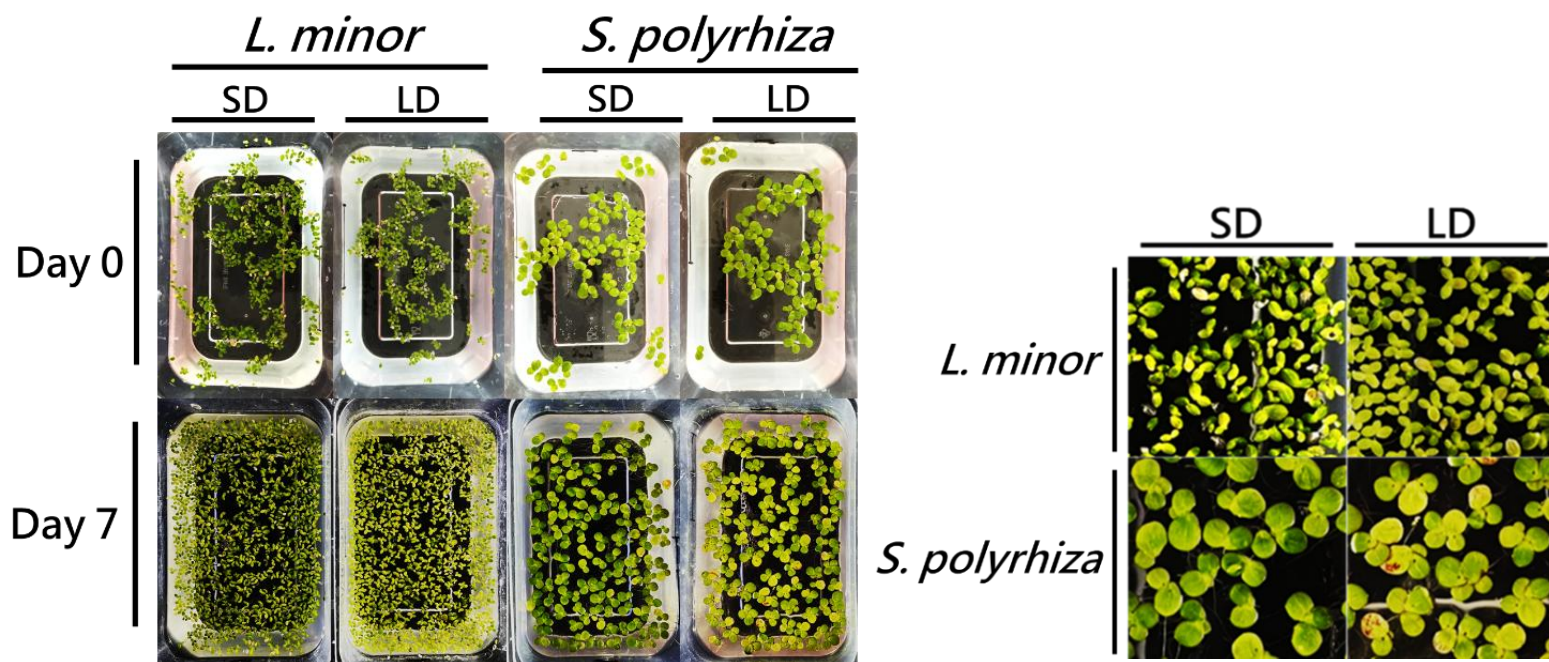
從前面的實驗結果我們知道，不同的日照時長會對青萍及水萍的競爭帶來不同的優勢，在夏天時就是水萍較具有優勢，而到了冬天則變成青萍是佔優勢的。因此我們猜測會產生這樣競爭上優勢的差異，是否與光週期(日照長短)控制浮萍的生長速率有關？於是我們做了兩浮萍在長日照與短日照下，測量生長速率差異的實驗。實驗結果如圖 7-5 所示。



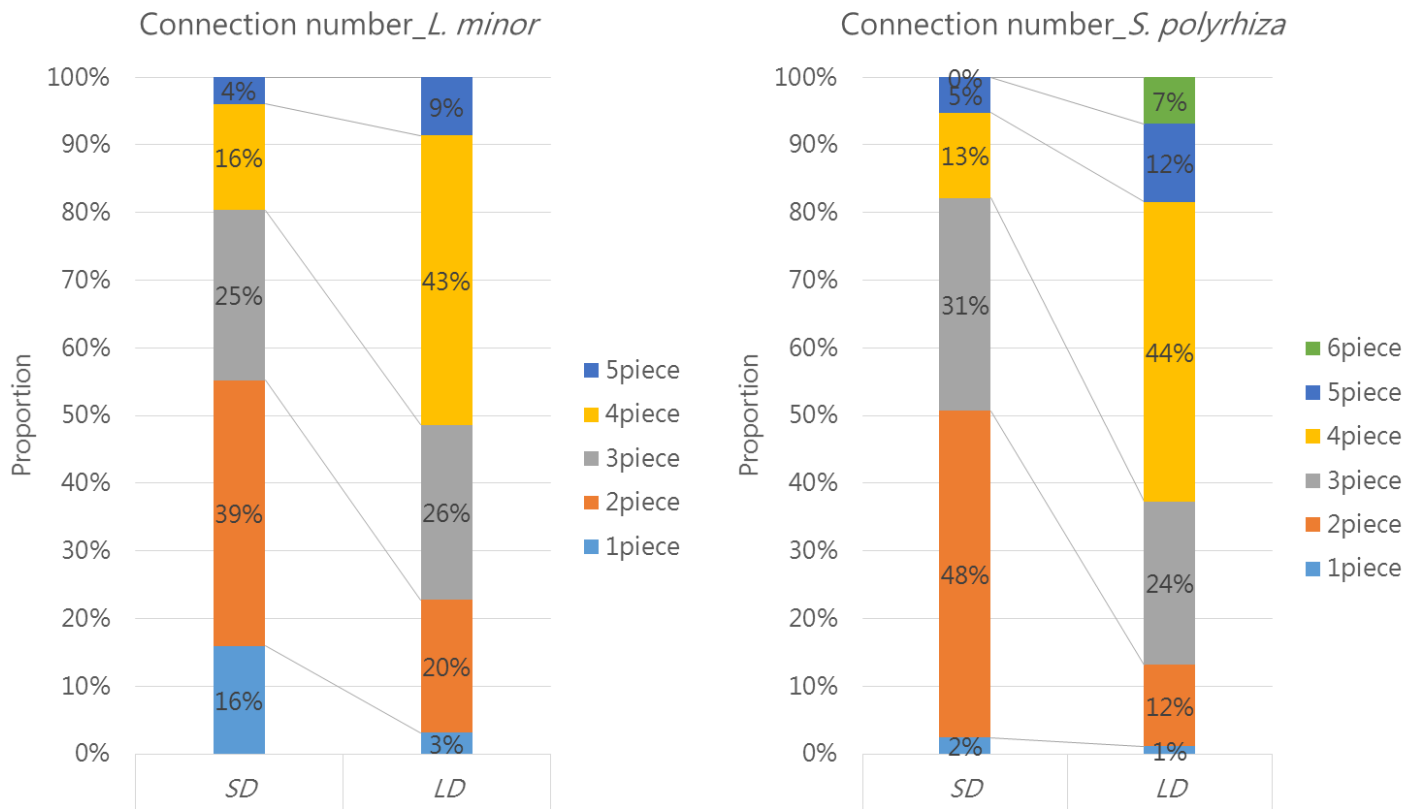
(圖 7-5)青萍及水萍在長日照與短日照實驗下 7 天前後的生長面積差異(圖由作者自製)

從上述的實驗結果我們可以發現，**光週期(日照時長)**並不會對浮萍的生長速率造成顯著差異，雖然在短日照時，青萍的生長速率比水萍快，符合冬天時青萍比水萍更具有生存優勢這一實驗結果。但是在長日照方面，青萍的生長速率依舊比水萍快，這一實驗結果和我們先前所提到夏天時水萍更具有優勢的結果相矛盾。此外，不管青萍或水萍在長日照下，生長速率都來的比在短日照下快，但整體仍然是青萍更具有優勢。因此我們可以推論，**光週期對生長速率的影響並不是造成浮萍產生季節消長的關鍵因子**。

雖然光週期(日照時長)和控制浮萍的生長速率無關，但我們從圖 7-6 中可以發現，7 天實驗過後的水萍及青萍，**葉狀體連接數(p 數)**在短日照及長日照的環境下有著顯著的差異！



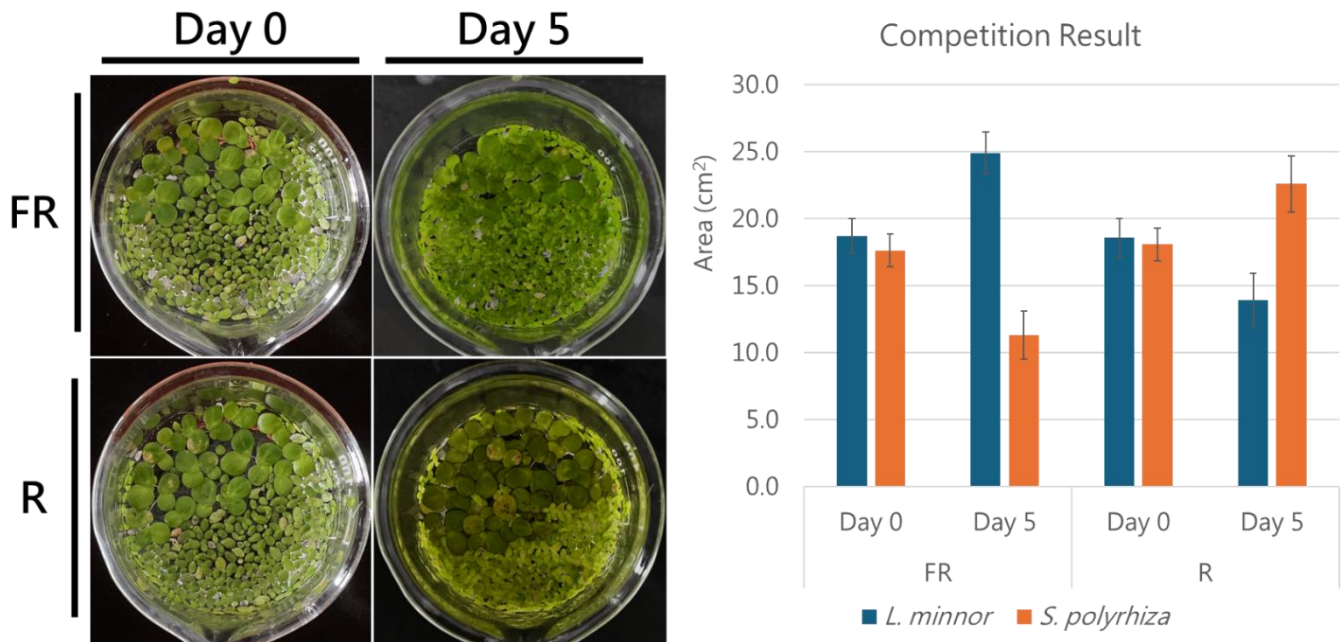
(圖 7-6)青萍與水萍在短日照及長日照下的生長圖，右圖為局部放大圖(圖由作者自製)



(圖 7-7)青萍與水萍分別在長日照及短日照下的連接數(p 數)占比圖(圖由作者自製)

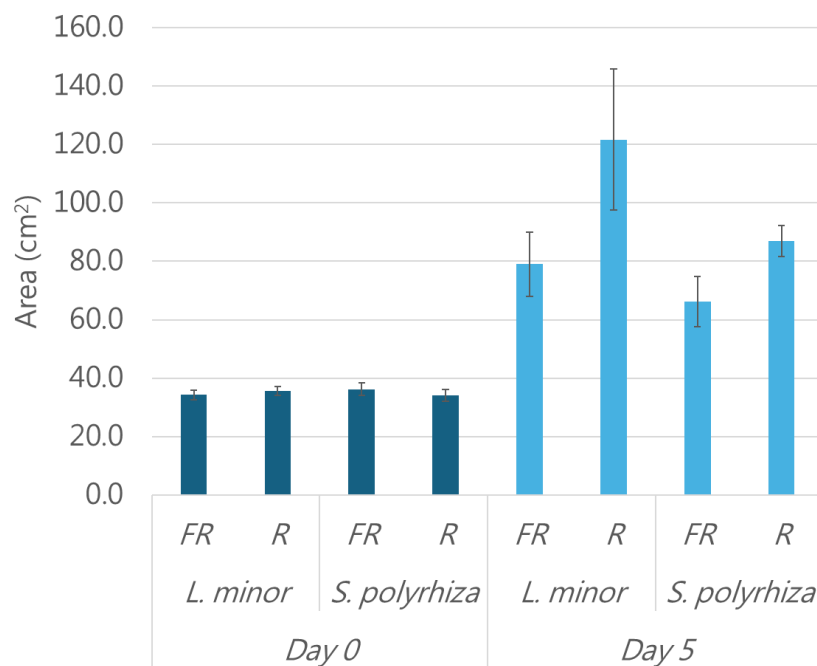
從圖 7-7 的實驗結果我們可以觀察到，青萍在短日照(冬至)時高連接數(p 數)大約占整體的 27%，而在長日照(夏至)時高連接數(p 數)則是佔了整體的 62%，比例有著很顯著的提升。水萍在短日照(冬至)時高連接數(p 數)則是大約占整體的 36%，長日照(夏至)時暴增至佔整體的 76%，甚至水萍在長日照(夏至)下還出現了 p6 的葉狀體。總結以上觀察我們得知，在長日照環境(夏至光週期)浮萍葉狀體連接數(p 數)會上升這個現象，正好與水萍在擁擠環境下會提高葉狀體連接數的競爭策略吻合！因此可以說明，在長日照(夏至光週期)的光週期下，有助水萍的相互交疊競爭機制，並且壓制了青萍斷裂釋出葉狀體強佔空間的競爭策略，使水萍能在夏天擁有更好的競爭優勢。相反的，短日照環境下(冬至光週期)，浮萍的連接數(p 數)下降現象，正好與青萍擁擠環境下斷裂釋出小葉狀體搶佔水面的競爭策略吻合！因此可以說明，在短日照(冬至光週期)的光週期下，有助於青萍斷裂釋出小葉強佔水面的競爭機制，並且壓制了水萍相互交疊的競爭策略，使青萍能在冬天擁有更好的競爭優勢。

前面實驗我們已經確認，光週期會影響浮萍連接數(p 數)，進而改變浮萍的競爭優勢造成季節消長，我們接著好奇，感受光週期並影響連接數(p 數)使浮萍競爭優勢改變的關鍵是否就是光敏素？為了確認光敏素是否參與其中，我們自己焊接組裝相同瓦數但不同波長的 LED 光源，包含了紅光(R,660nm)與遠紅光(FR,730nm)，接著取等面積的青萍與水萍放置在紅光與遠紅光下進行種間競爭實驗，結果如圖 7-8 所示。



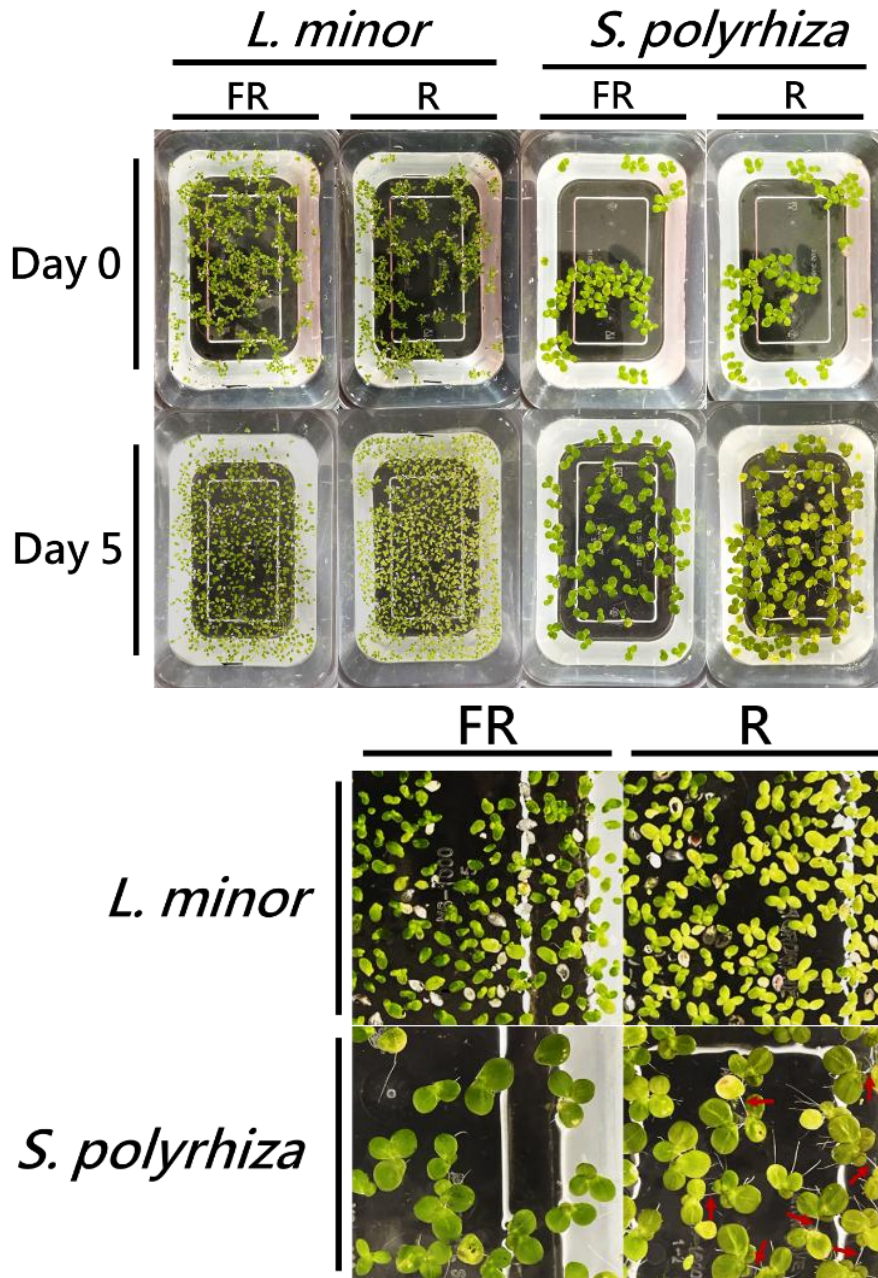
(圖 7-8)浮萍在紅光光週期(代號 R)與遠紅光光週期(代號 FR)的生長照片(左)與面積量化圖(右)
(圖由作者自製)

實驗結果我們可以觀察到，紅光和遠紅光的環境確實會對青萍及水萍的競爭帶來不同的優勢，在紅光(R,660nm)環境下水萍較具有優勢，這說明 Pfr 比值上升有助水萍提升競爭優勢，而長日照環境能提升植物體內 Pfr 比值，水萍也在長日照環境佔有優勢；而在遠紅光(FR,730nm)的環境中則變成青萍是佔優勢的，也暗示提升 Pr 比值能增強青萍的競爭優勢，而短日照環境會提升植物體內 Pr 比值，青萍也在短日照環境具競爭優勢，兩者間的關係讓我們確定，光敏素確實有參與兩者在季節轉換上的競爭優勢調節！接著我們好奇，光敏素是透過影響生長速率還是調控浮萍連接數(p 數)來改變彼此的競爭優勢？於是我們先量測兩浮萍在紅光與遠紅光環境下的生長速率差異。實驗結果如圖 7-9 所示。



(圖 7-9)青萍及水萍在紅光(R)與遠紅光(FR)實驗下 5 天前後的生長面積差異(圖由作者自製)

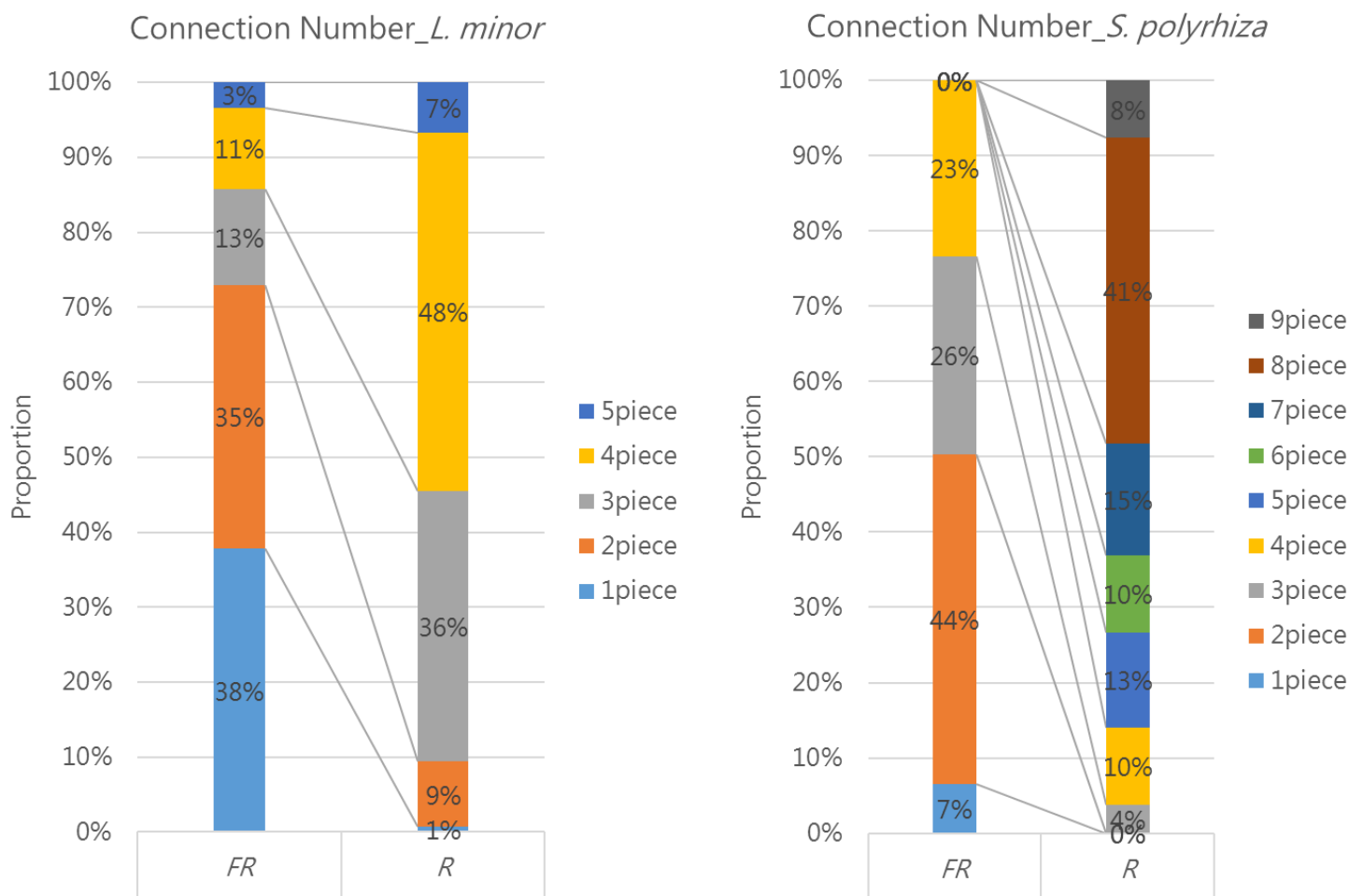
從圖 7-9 中我們同樣可以發現，紅光會同時提升兩種浮萍的生長速率，但青萍生長速率的提升要比水萍更明顯，這無法解釋為何紅光下生長較慢的水萍競爭能勝過青萍，兩者相互矛盾，因此我們推斷，**光敏素對浮萍生長速率的影響不是浮萍競爭優勢變化的關鍵因子**。那**光敏素能否調控浮萍連接數(p 數)造成競爭優勢改變呢?**我們接著統計紅光與遠紅光照射下浮萍連接數(p 數)變化，結果如圖 7-10 所示。



(圖 7-10)青萍及水萍在紅光(R)與遠紅光(FR)實驗下 5 天前後的生長照片(上)與局部放大圖(下)
(圖由作者自製)

實驗結果中我們可以發現，在紅光的環境下，青萍與水萍的連接數(p 數)皆明顯的上升，但遠紅光的環境則顯著下降，且趨勢比前面長日照(LD)和短日照(SD)實驗更為明顯！另外，紅光環境下除了青萍連接數大幅提升外，**水萍相互連接的柄狀構造竟然會延伸且緊緊相連在一起**，用鑷子撥也不會斷，使得水萍連結數大幅提升，甚至會出現 9 片葉狀體相連的個體，如 7-10 右側放大圖中**紅色箭頭**所示。

為了確認光敏素對浮萍連接數(p 數)的調控程度，我們實際計算各連接數(p 數)在浮萍族群中的占比，並且量化成圖，結果如圖 7-11 所示。

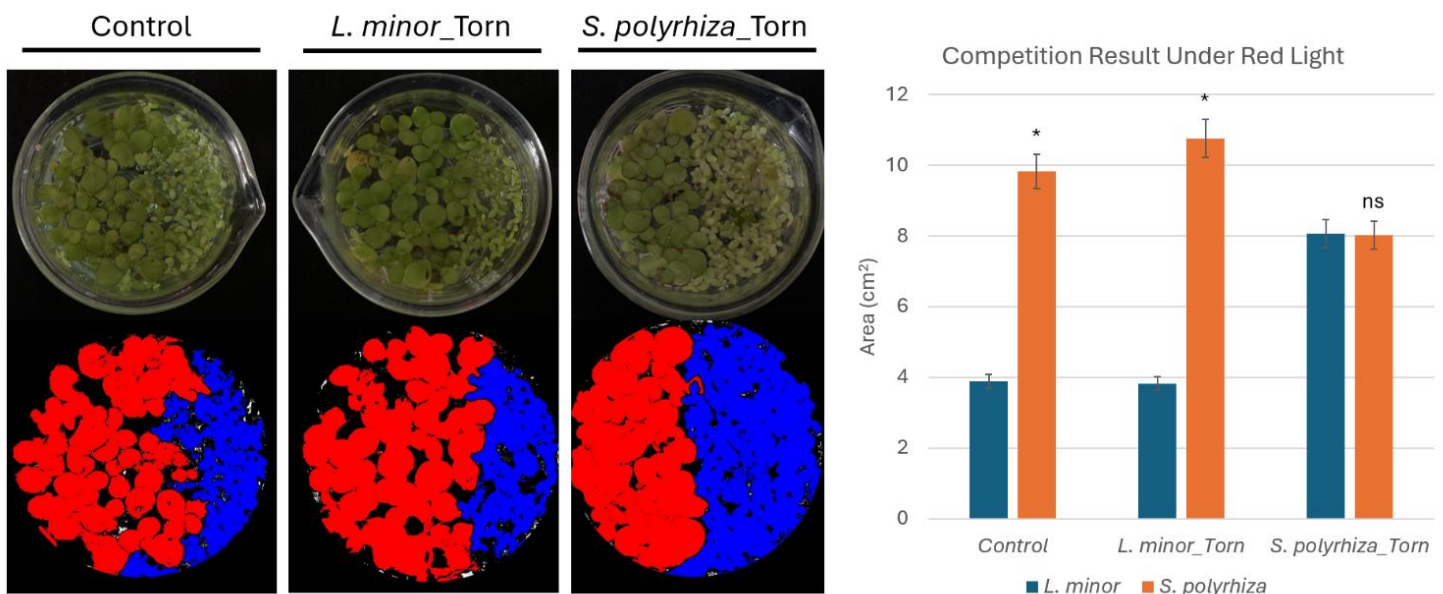


(圖 7-11)青萍與水萍分別在紅光(R,660nm)與遠紅光(FR,730nm)環境下的連接數(p 數)占比分布圖
(圖由作者自製)

從圖 7-11 可以發現，青萍在遠紅光的環境下，高連接數(p4 以上)的青萍約佔總體的 14%，紅光則是提升至佔整體的 55%。而水萍在遠紅光的環境下，高連接數(p4 以上)約佔總體的 23%，而到了紅光的環境下，則是會暴增至接近 96%，甚至在紅光的環境中還會出現 p 數達到 9 片的情況。這個趨勢與長短日照的實驗結果一致，但是紅光與遠紅光的結果更加的明顯，且只需要 5 天的時間就可以看出明顯的實驗結果。實驗結果我們得知，光敏素能影響浮萍連接數(p 數)來改變兩浮萍的競爭優勢，紅光(660nm)能提升浮萍內 Pfr 比值進而增加浮萍的連接數，而高連接數的競爭模式是水萍的策略，因此，長日照下 Pfr 的提升能增強水萍的競爭力。遠紅光(730nm)則提升浮萍內 Pr 比值觸發浮萍斷裂率上升，而斷裂釋出小葉搶占水面是青萍的競爭策略，因此，短日照下 Pr 的提升則會增強青萍的競爭優勢。綜合以上實驗我們確認，透過光敏素感受光週期後調控連接數變化是造成青萍與水萍產生季節消長的關鍵因子！

八、比較青萍和水萍降低葉狀體連接數(p 數)在紅光下的競爭結果。

為了確認紅光照射下水萍連接數(p 數)上升確實作為其面對逆境時所會觸發的生存機制，藉以提升其競爭優勢的手段，我們進行以下實驗確認。若紅光觸發的高連結數目現象真能帶給水萍競爭優勢，則透過人為方式降低水萍競爭前的連結數應能有效降低其競爭優勢。根據此概念我們設計以下實驗，我們利用物理方法分離青萍及水萍的葉片，並且分別使單片(p1)青萍和完整水萍競爭、單片水萍和完整青萍競爭、還有完整青萍和完整水萍競爭作為對照組，將實驗都置於紅光環境下。在先前實驗得知青萍和水萍在紅光下葉狀體連接數(p 數)都有增加的趨勢，而增加連接數若真的是水萍競爭時的重要生存策略，則單片水萍應會大幅降低其在紅光下的競爭優勢，藉以證實水萍會增加葉狀體連接數(p 數)這件事，就是其競爭時會使用的策略，而不是逆境下被迫產生的形態變化。



(圖 8)青萍與水萍在紅光下初始降低 p 數的競爭結果面積量化圖(圖由作者自製)

實驗結果顯示，在紅光下單片青萍對上完整水萍的競爭實驗結果顯示，其競爭趨勢和對照組一致，皆為水萍大幅壓制青萍，佔據燒杯超過 2/3 的空間。然而單片水萍對上完整青萍的實驗中，可以很明顯的看出青萍與水萍旗鼓相當，兩者各佔據一半的面積。綜合以上結果，我們發現到初始青萍皆為單片將無法在紅光環境下取得競爭優勢，推測是因為單片青萍已是最低連結狀況，無法再斷裂釋放小葉去搶占空間，使其斷裂占空間的策略無法在初始全為單片葉狀體的青萍上實現，應由生長至連結數上升後再誘發斷裂方可達成。而單片水萍在紅光環境下競爭力確實顯著下降！使其對青萍的競爭優勢消失，結果可說明紅光環境下水萍的高葉狀體連接數確實能提升水萍的競爭優勢，因此，當競爭初起水萍都是單片葉狀體時，其高連接數的優勢將不易展現，造成單片水萍在紅光下仍無法戰勝青萍。根據上述實驗結果，我們可以確定連接數(p 數)變化確實做為影響兩浮萍競爭優勢的關鍵因素。

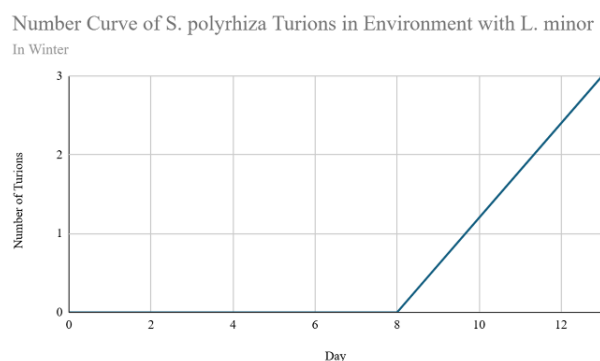
伍、討論

一、冬天水萍可以休眠芽的形式度過競爭劣勢時期

在 DL Jacobs,1947 中，觀察到水萍在對其不利的環境下會產生休眠芽，此狀態可以維持數個月，直到環境再次轉好，休眠芽會重新發育成水萍的葉狀體。而 DL Jacobs,1947 中也明確指出水萍的休眠芽的形成條件中，溫度是一個很重要的因子。研究將水萍分別置於不同溫度的恆溫箱內，發現低溫時休眠芽的數量明顯變多，而低溫正是冬天的特徵。從我們實驗結果也可發現，在冬天溫度下(16 度)，水萍會產生休眠芽並且沉降到水底，如附圖 8-1 箭頭所示。我們推測冬天時水萍會傾向產生休眠芽度冬，使得水萍得以延續至對其有利的夏天，再次浮出水體佔領水面。



(圖 8-1)水萍在冬天時傾向產生休眠芽
(圖由作者自製)



(圖 8-2)水萍在低溫環境下逐日產生休眠芽的數量
(圖由作者自製)

二、乙烯與光敏素之細胞傳訊

在 E Foo et al,2006 中，發現在豌豆植株中，光敏素與乙烯存在極大的關聯。在 *phyA* 與 *phyB* 基因的突變體中，也就是無法產生光敏素的突變體中，發現乙烯的水平升高。但這研究無法說明是 Pfr 還是 Pr 的減少影響了細胞的基因表現，進而影響了乙烯的表現，因為在光敏素基因突變體中代表光敏素的不產生，也代表 Pfr 與 Pr 均缺乏。但在眾多研究中如 M Ni,1998, PH Quail,2002, J Li et al,2011 中均支持 Pfr 會接上轉錄因子，進而調控下游基因的表現。因此在 E Foo et al,2006 中，Pfr 的減少使得乙烯含量增加的說法較為可能，而這說法也符合我們的研究結果，在短日照環境下，浮萍可能透過降低 Pfr 來增加乙烯含量，進而誘發浮萍斷裂。因此，我們接下來應該會嘗試測量乙烯的濃度，或是透過乙烯抑制劑搭配紅光照射以確認我們的猜想。

三、養分應為影響浮萍競爭優勢的因子

研究顯示青萍根部與葉狀體均會吸收氮源。根部對於氮源的吸收效率會隨著植物體內的氮含量而變化。當植物氮充足時，根的貢獻約為 32%；當植物缺氮時，根的貢獻則顯著增加至 73%(N Cedergreen & TV Madse,2002)顯示青萍根部吸收效率的影響並不只有在於根系總長的因子。而另一研究則指出水萍不定根的原始結構以及缺乏側根和根毛，與在此論文中提到水萍根部在營養吸收方面可有可無的功能一致。而遺傳網絡和根部形態的進化表明，水萍根部主要作為固定的作用，而不是吸收營養(D An et al,2019)。D An et al,2019 更加說明我們先前所講述之根系總長並無法代表吸收養分之效率。而這些研究也說明了影響競

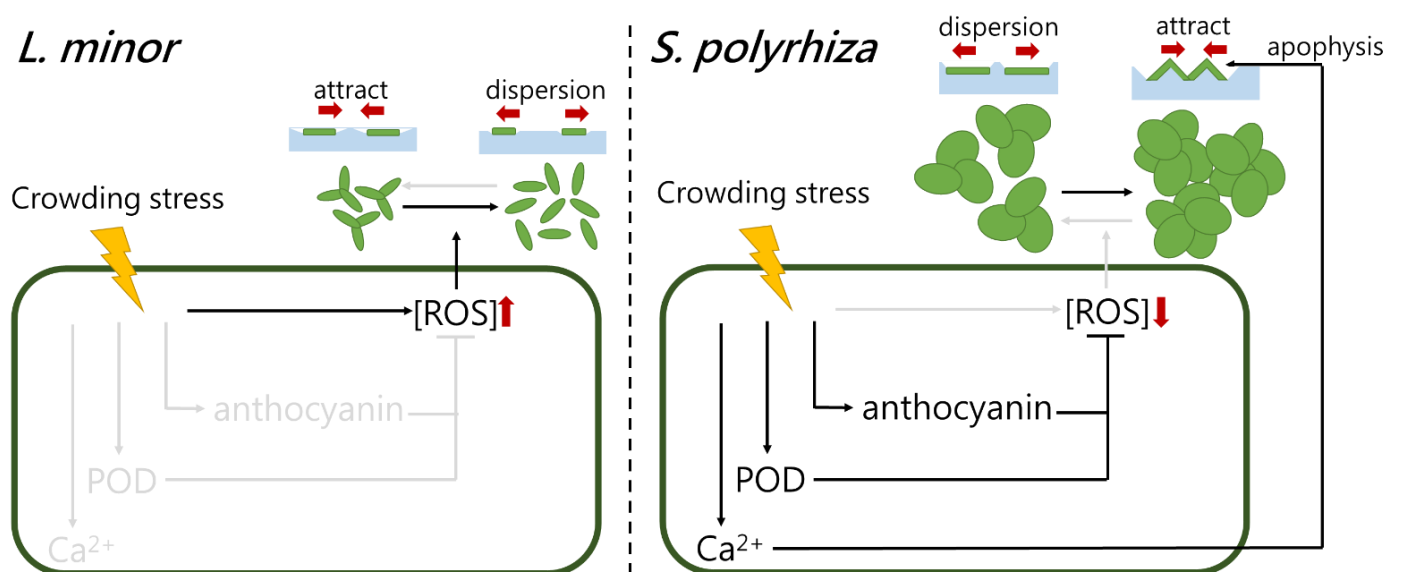
爭的因子並不只有光週期、光敏素，養分也在種間競爭中扮演極為重要的角色。但是這仍無法否定光週期與光敏素對於競爭結果的影響也是非常劇烈，甚至是極為關鍵的因子。

四、未來展望

由於我們對於擁擠情況造成 p 數上升的細胞內機制並未探討，希望可以將這個部分研究得更透徹。但最讓我們想要知道的是，是否光敏素跟乙烯在青萍與水萍中，確實有如 E Foo et al, 2006 中所述光敏素與乙烯在豌豆植株中的關係？我們會盡速測量在紅光與遠紅光下水萍與青萍的乙烯濃度來確認這一點。最後，若以演化的觀點，水萍應會優化其生存機制，同樣青萍也會，因此如果水萍與青萍的生存機制均是如此，那長期演化下來，現在看到的水萍應不管在夏天或冬天，均以高連結數佔多數，而青萍則是不管在什麼季節均是以低連結數佔多數。到底這只是演化的不完整性，如其劣勢基因與一個優勢基因同一條染色體上，造成劣勢基因也被傳遞下去，還是水萍的低連結數或青萍的高連結數在與其他植物的競爭下，其實變成一種優勢？這也是一項十分有趣的研究方向，供後人可以繼續探討。

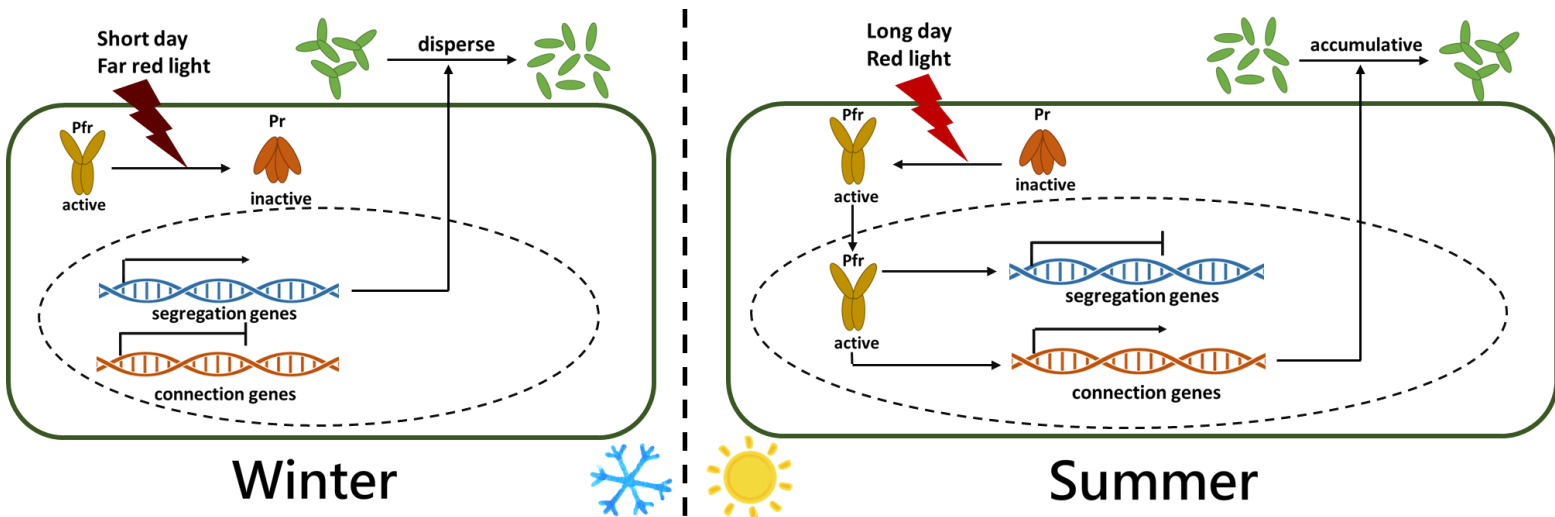
陸、結論

本研究我們發現，生態棲位相近的水萍及青萍，在面對擁擠的逆境時有著截然不同的應對機制。青萍在擁擠的環境中，會透過累積葉片的活性氧(ROS)濃度，進而促使葉片節處斷裂，讓葉狀體連接數(p 數)下降。由於青萍的 p 數下降，促使麥片效應的作用減弱，進而使青萍葉片間的作用力下降，使青萍更容易分散，並且憑藉自身個體小，以及較高的填充效率，採取進攻型的策略來搶佔水面上的生存空間。而水萍在面對擁擠逆境時，會透過累積葉片的花青素濃度，以及提高抗氧化酵素(POD)的活性，來提高自身的抗氧化能力，進而抑制 ROS 的累積，避免葉片產生斷裂，使葉狀體連接數(p 數)上升。藉由葉狀體連接數增加，可以使麥片效應的作用增強，讓葉片更加聚集。除此之外，水萍還可以透過在葉片間產生交疊，以及利用鈣離子誘發葉狀體產生突起等方式釋放將近 40% 的表面積空間，來彌補水萍因自身個體大而產生的葉片間隙，採取防守型的生存策略來應對外界的逆境。



(圖 9-1)青萍與水萍各自的競爭策略機制(圖由作者自製)

我們在實驗中觀察到浮萍在夏天及冬天有著明顯的消長現象：夏天水萍在水中處於優勢，而到了冬天反倒是青萍佔據優勢。經研究我們發現光週期是浮萍季節消長中的關鍵因子。光週期會對浮萍葉狀體連接數(p 數)產生顯著的影響。在長日照(夏至 13.5hr 日照)時會誘導光敏素(Pfr)累積，進而造成葉狀體連接數(p 數)提升，而此現象正好符合水萍在競爭下的生存策略，因此在夏天長日照環境下，水萍比青萍來的更具有競爭優勢。而到了冬天(冬至 10.5hr 日照)，日照時長下降時，則會促使光敏素(Pfr)變回光敏素(Pr)，促使葉狀體斷裂，降低葉狀體連接數(p 數)，而斷裂釋出小葉分散強佔水空間是青萍的競爭策略，因此在冬天短日照下反而是青萍來的比水萍更具有競爭優勢。



(圖 9-2)光週期影響光敏素進而改變浮萍競爭優勢，造成青萍與水萍產生季節消長(圖由作者自製)

柒、參考文獻資料

1. 呂家瑋、賴楚元；大「逆」不道——局部逆境下植物體內傳訊與物質分配機制，2024.64屆全國中小學科學展覽。
2. JACOBS, Don L. An ecological life-history of *Spirodela polyrhiza* (greater duckweed) with emphasis on the turion phase. *Ecological Monographs*, 1947, 17.4: 437-469.
3. FOO, Eloise, et al. A role for ethylene in the phytochrome-mediated control of vegetative development. *The Plant Journal*, 2006, 46.6: 911-921.
4. NI, Min; TEPPERMAN, James M.; QUAIL, Peter H. PIF3, a phytochrome-interacting factor necessary for normal photoinduced signal transduction, is a novel basic helix-loop-helix protein. *Cell*, 1998, 95.5: 657-667.
5. HUQ, Enamul; QUAIL, Peter H. PIF4, a phytochrome-interacting bHLH factor, functions as a negative regulator of phytochrome B signaling in *Arabidopsis*. *The EMBO journal*, 2002.
6. LI, Jigang, et al. Phytochrome signaling mechanisms. *The Arabidopsis Book/American Society of Plant Biologists*, 2011, 9: e0148.
7. MCILRAITH, Alexander L.; ROBINSON, Gordon GC; SHAY, Jennifer M. A field study of competition and interaction between *Lemna minor* and *Lemna trisulca*. *Canadian journal of botany*, 1989, 67.10: 2904-2911.
8. LEBLEBICI, Zeliha; AKSOY, Ahmet. Growth and lead accumulation capacity of *Lemna minor* and *Spirodela polyrhiza* (Lemnaceae): interactions with nutrient enrichment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 214: 175-184.
9. CEDERGREEN, Nina; MADSEN, Tom Vindbæk. Nitrogen uptake by the floating macrophyte *Lemna minor*. *New phytologist*, 2002, 155.2: 285-292.
10. AN, Dong, et al. Plant evolution and environmental adaptation unveiled by long-read whole-genome sequencing of *Spirodela*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116.38: 18893-18899.
11. Dominic Vella and L. Mahadevan (2005). “The Cheerios effect” , *American Journal of Physics*. 73(9),817-825.

【評語】 052106

1. 本研究透過比較青萍與水萍在季節變化下的生長策略差異，進一步探討光週期與光敏素在青萍和水萍間競爭與共存中的調控角色。結果發現水萍偏向鞏固連結、擴張空間的保守策略，而青萍則採高效率佔領的侵略策略，並與光週期調控的 Pfr/Pr 轉換相關聯，進而解釋夏冬消長現象。
2. 本研究實驗方法明確，整合了生理機制與生態觀察，所得初步成果對水生植物競爭機制提供了一個合理的解釋。
3. 水萍冬天種子沈入水中 及有休眠芽：此特性與水萍在冬天短日照下， 不具生長優勢的關係，需多加考慮及討論。

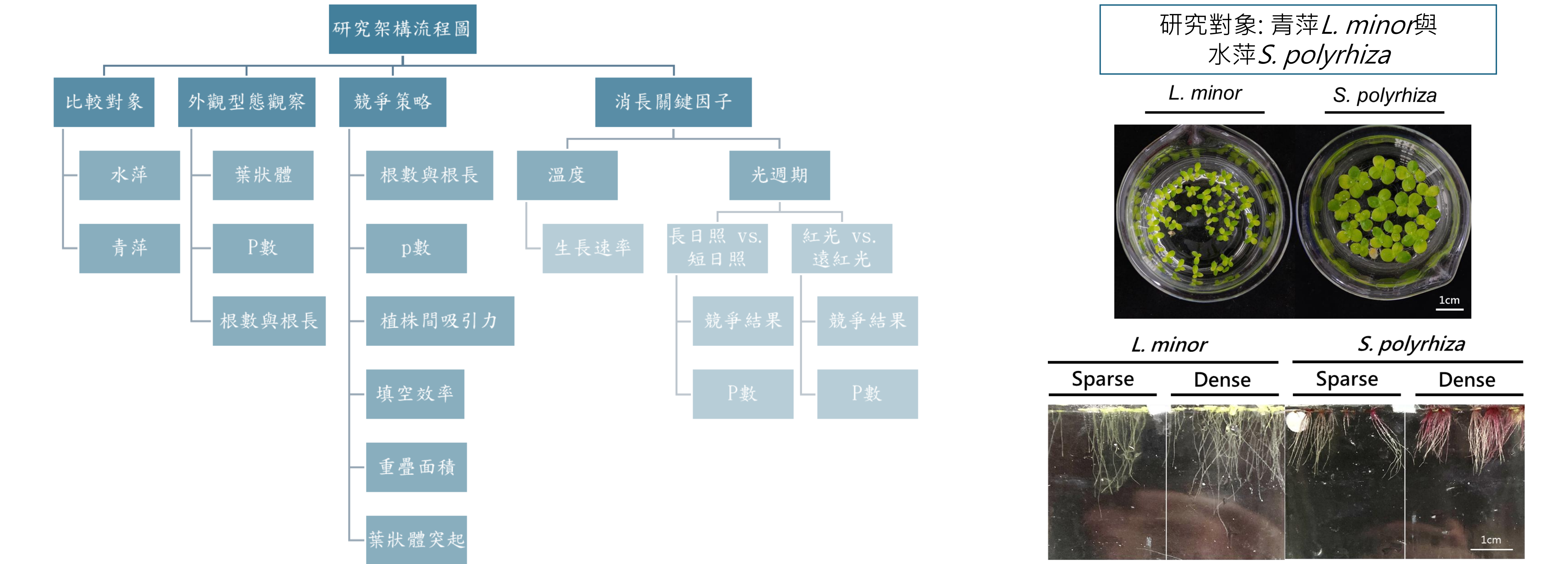
作品海報

「萍」分秋色——探討浮萍季節消長的 關鍵因子與競爭策略

摘要

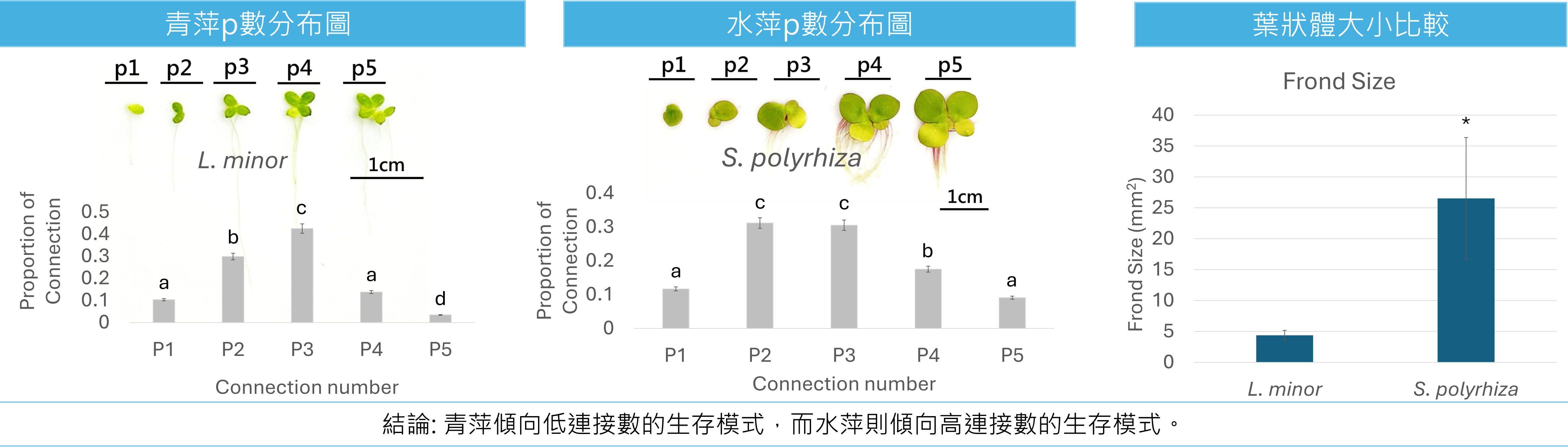
生態棲位相近的青萍和水萍如何共存的？我們觀察到浮萍在夏冬有明顯消長：夏季水面多由水萍主導，冬季則為青萍佔優。本研究探討兩者的生存策略，發現水萍透過提升抗氧化能力增加葉狀體間連結數（p數），放大植珠間吸引力，並以鈣離子誘發的葉狀體突起等方式，採取保守鞏固策略；青萍則任由活性氧（ROS）累積觸發葉狀體斷裂，降低植珠間吸引力，憑藉個體小與高填充效率，採取侵略佔領策略。為探究消長關鍵因子，研究發現光週期與光敏素扮演重要角色：夏季長日照誘導Pfr造成p數提升，利於水萍鞏固優勢；冬季短日照則誘使Pfr變回Pr，促進葉狀體斷裂，使青萍佔領水面。此發現揭示光環境如何調控浮萍生態適應，為水生植物競爭提供新見解。

貳、研究過程與方法



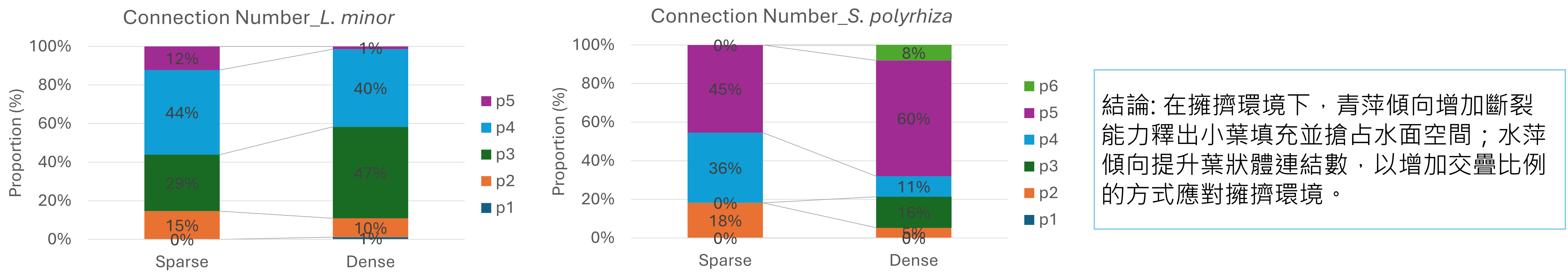
參、研究結果

浮萍的外觀型態觀察

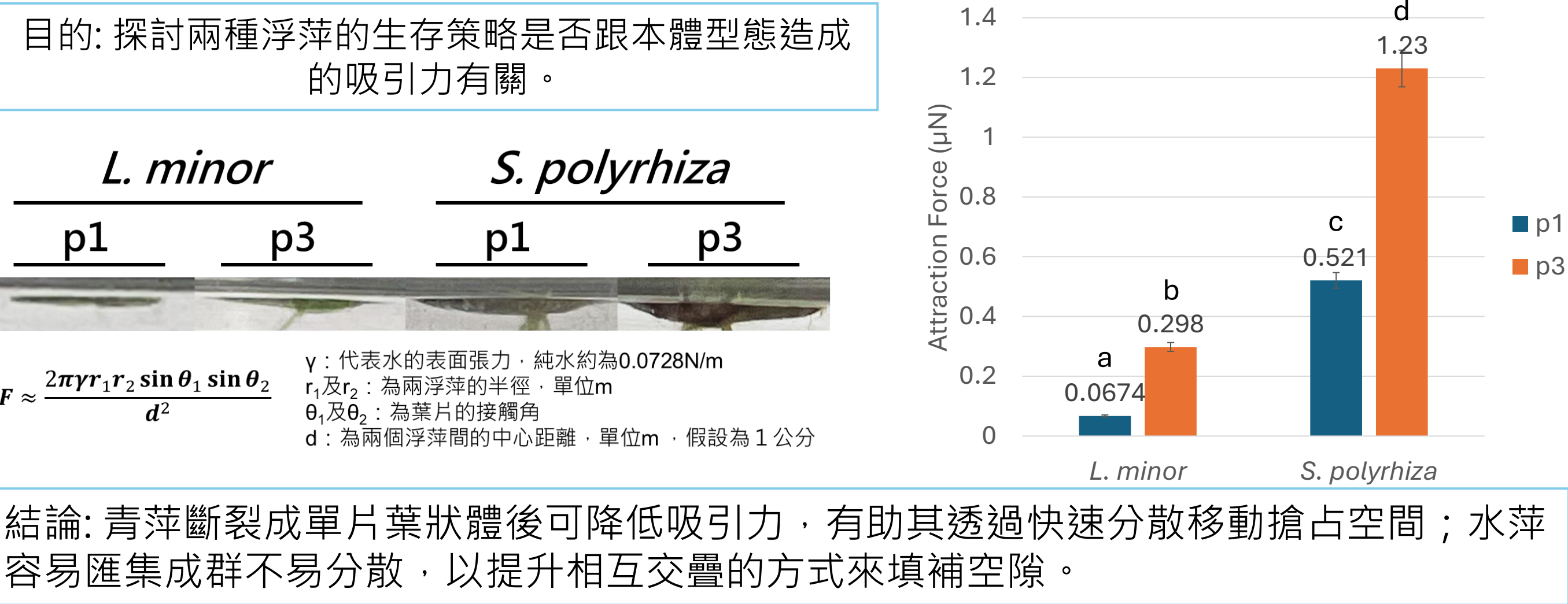


浮萍葉狀體連接數 (p數) 在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異

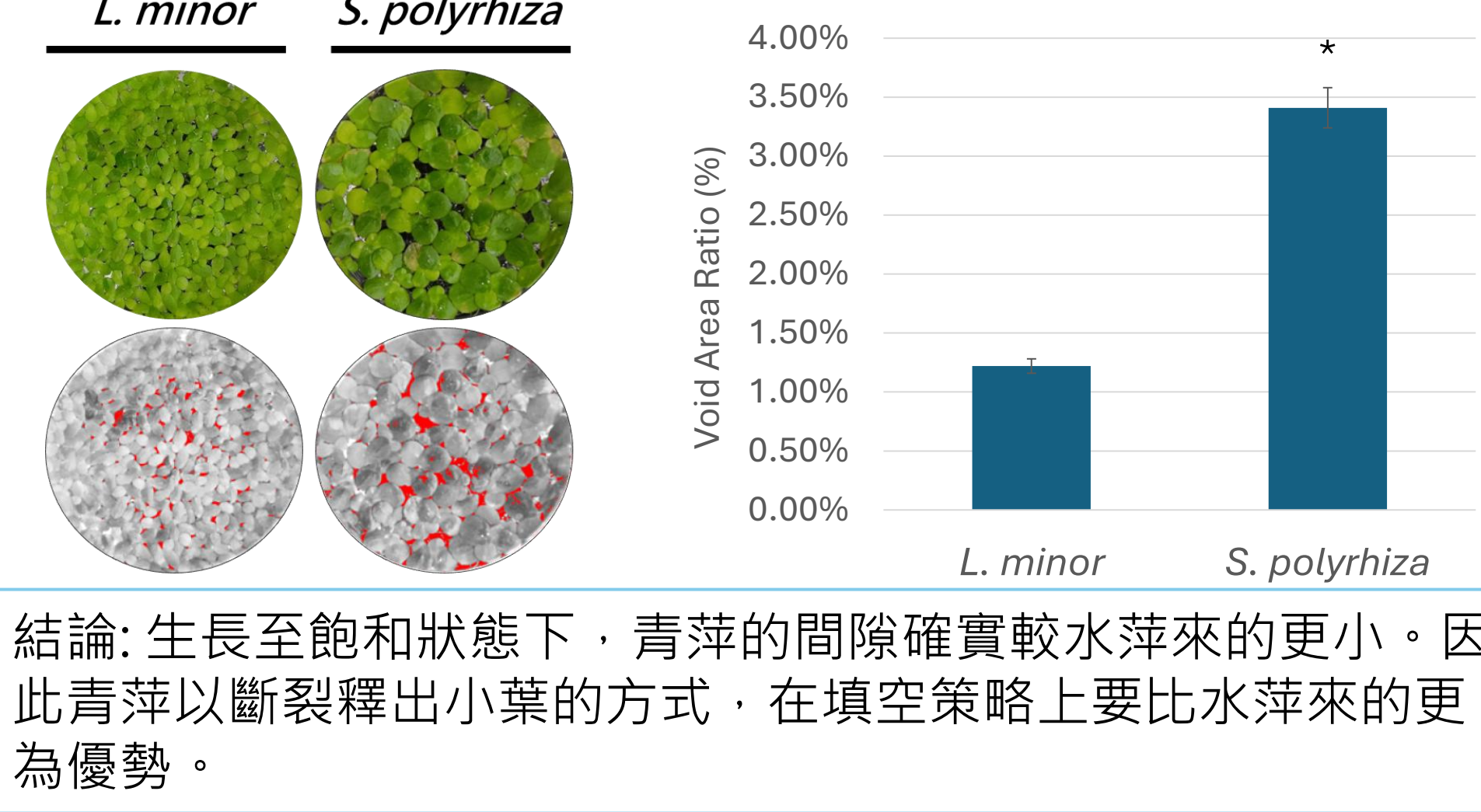
青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的連結數



青萍與水萍 p1, p3 葉狀體間吸引力



飽和狀態下青萍與水萍的間隙占比

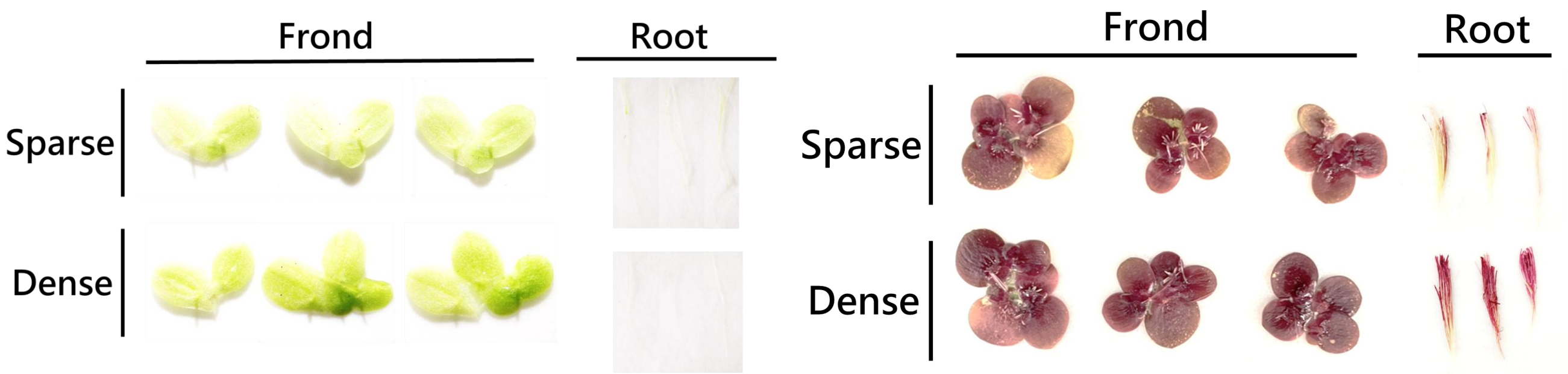


探討兩種浮萍在擁擠環境下，葉狀體連接數目(p數)改變的調控機制

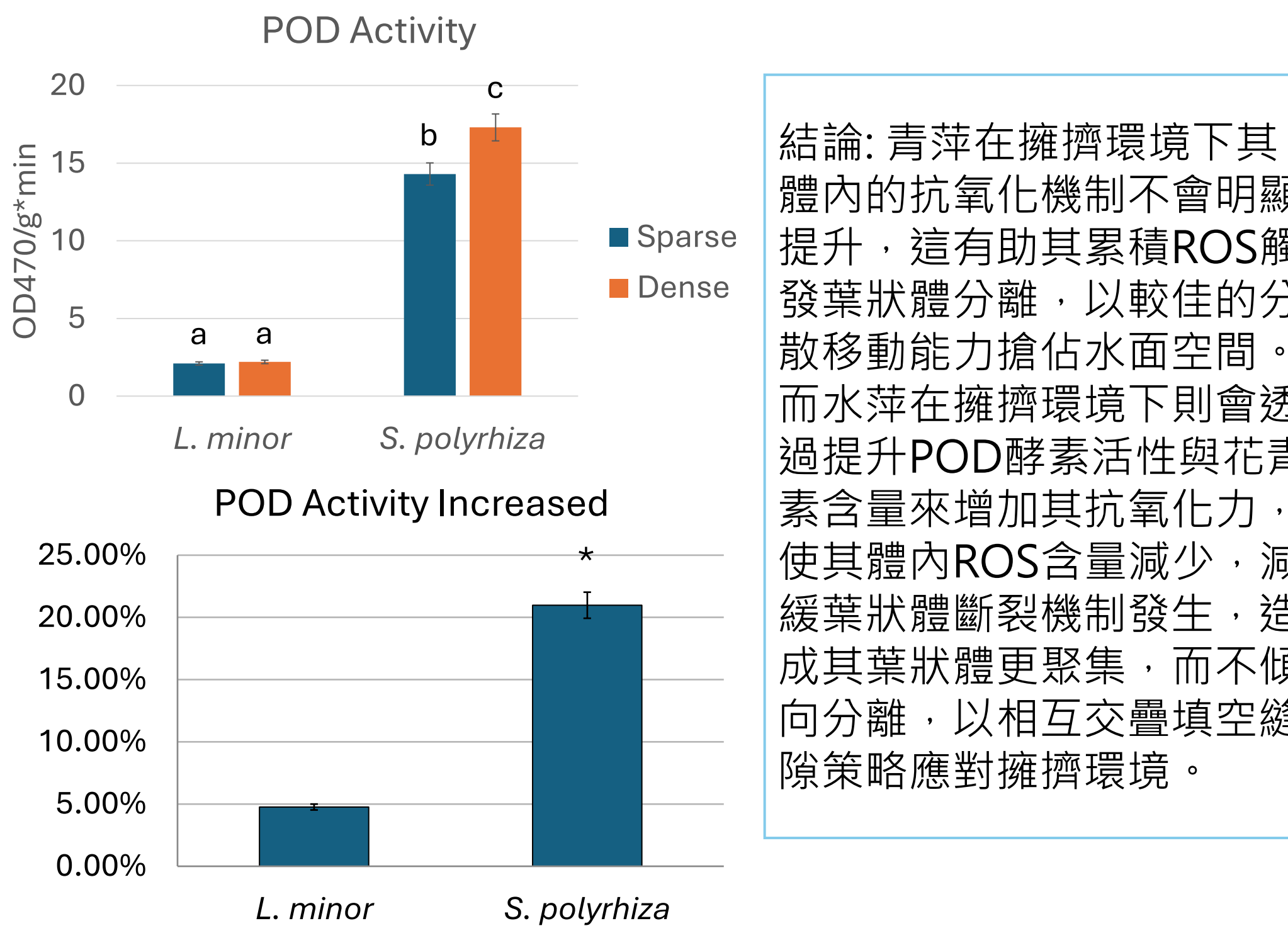
青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的ROS累積圖



青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的背面觀及根部花青素累積圖

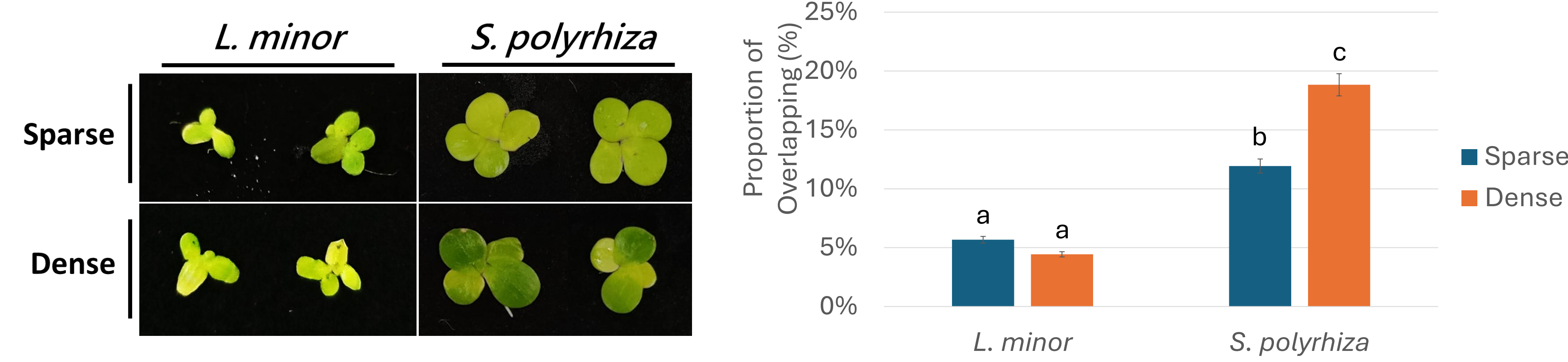


青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的POD活性變化

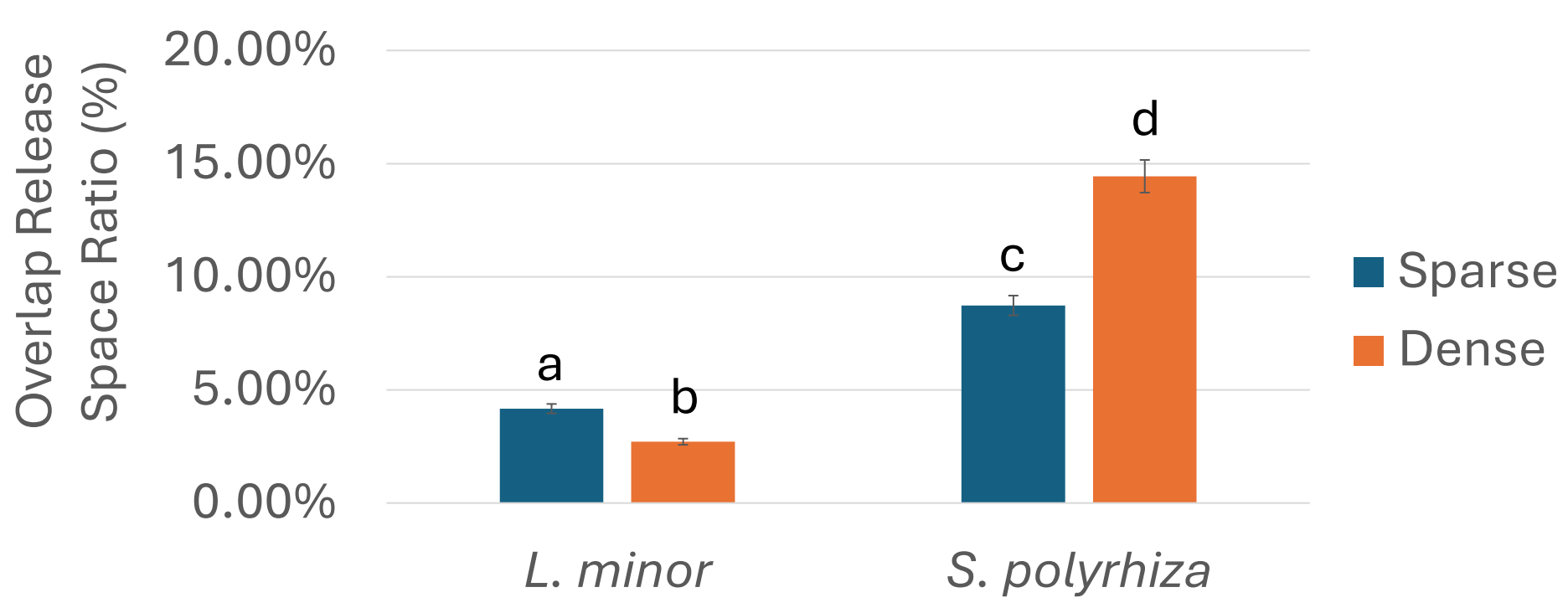


浮萍葉狀體的交疊面積在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異

青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的交疊圖片與交疊面積比例



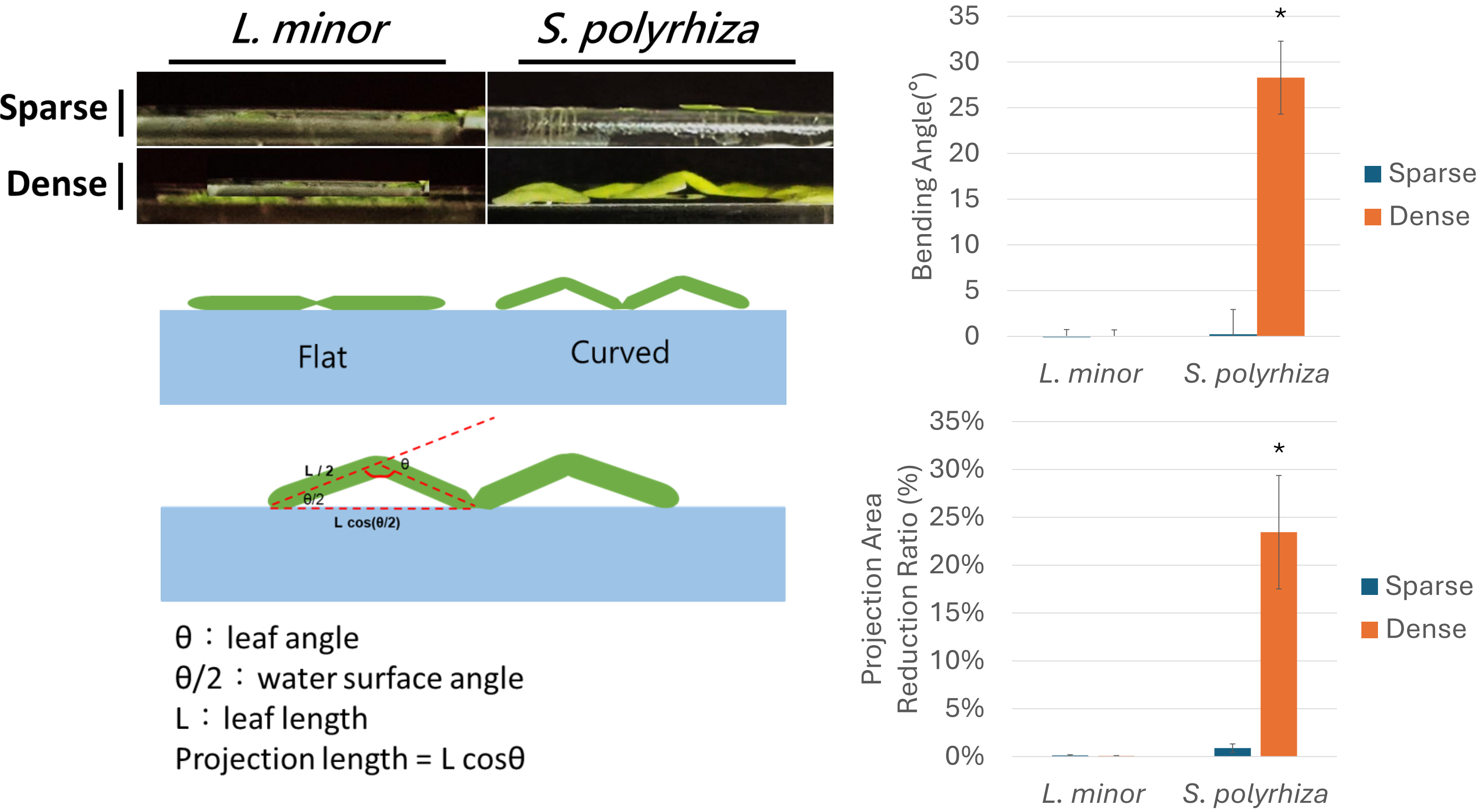
青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的交疊面積釋放空間比例



結論: 水萍在擁擠環境下不只提升了單片葉狀體的交疊面積，還能透過增加葉狀體連接數來放大每片葉狀體的交疊效益；而青萍並不傾向使用這種生存策略。青萍除了降低連接數，重疊面積還下降了少許以取得更多侵占空間。

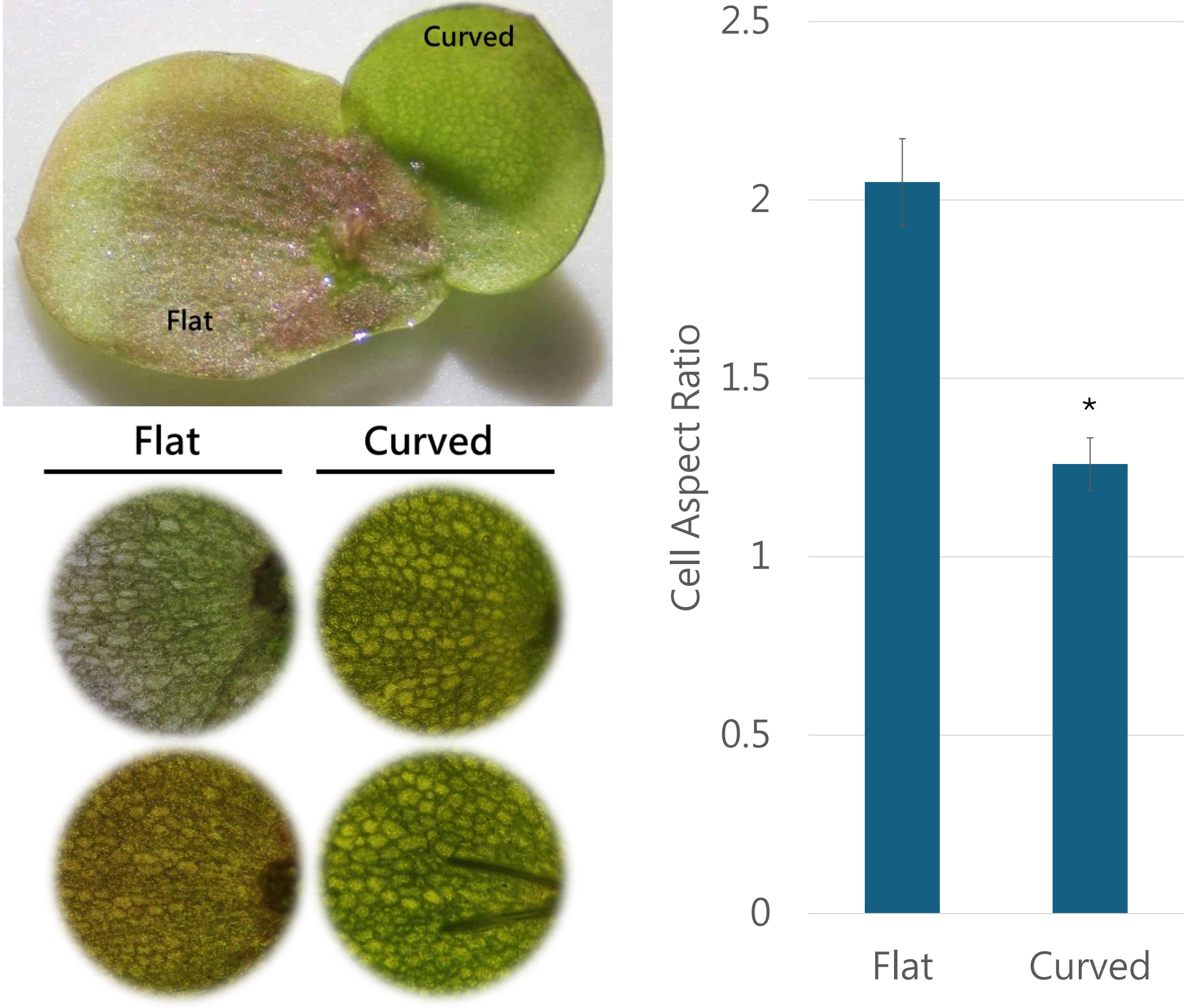
浮萍的葉狀體突起角度在稀疏及擁擠環境下生存策略上的差異

青萍與水萍在稀疏與擁擠環境下的葉狀體突起示意圖與突起角度及投影長度縮減比率



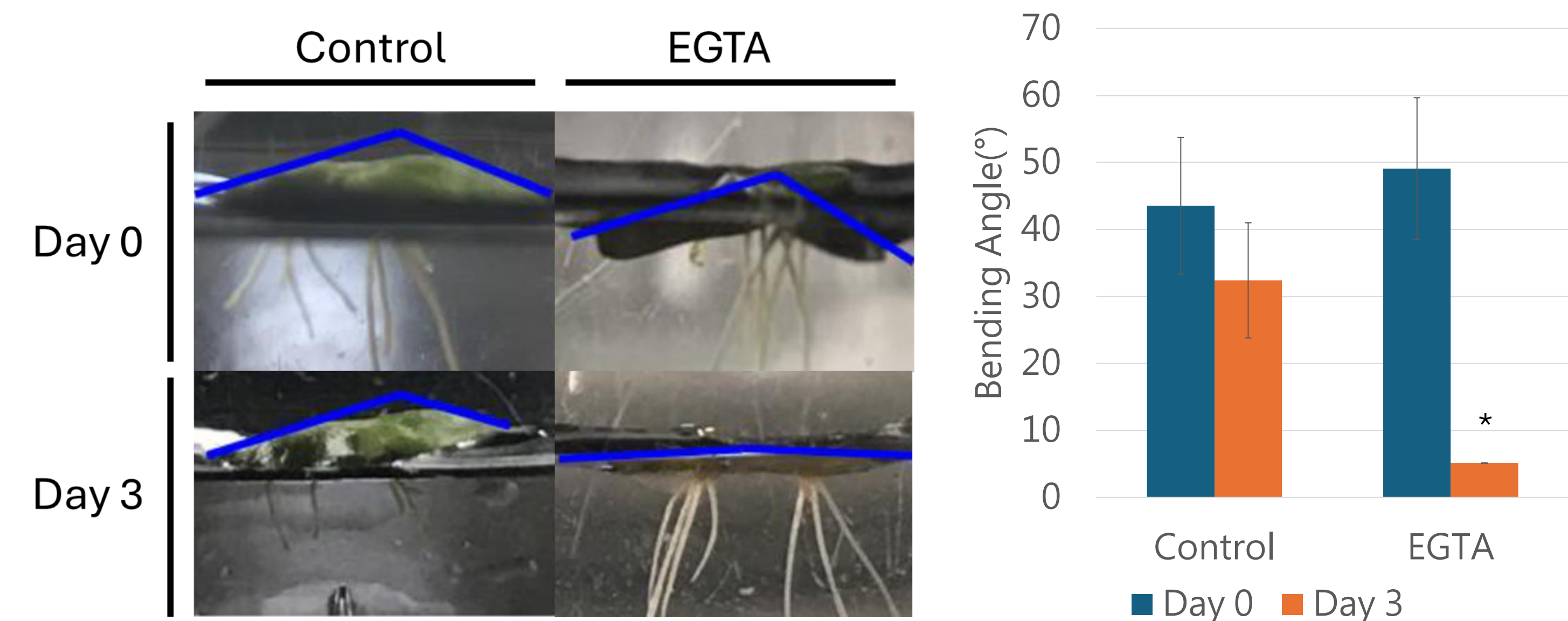
結論: 水萍在擁擠條件下，其葉狀體彎曲能讓浮萍葉狀體靠得更近，並能釋放最高約23%的表面積供新生個體生長；而青萍則無此機制。

水萍平坦與彎曲葉狀體的網格型態組織圖與網格型態長寬比

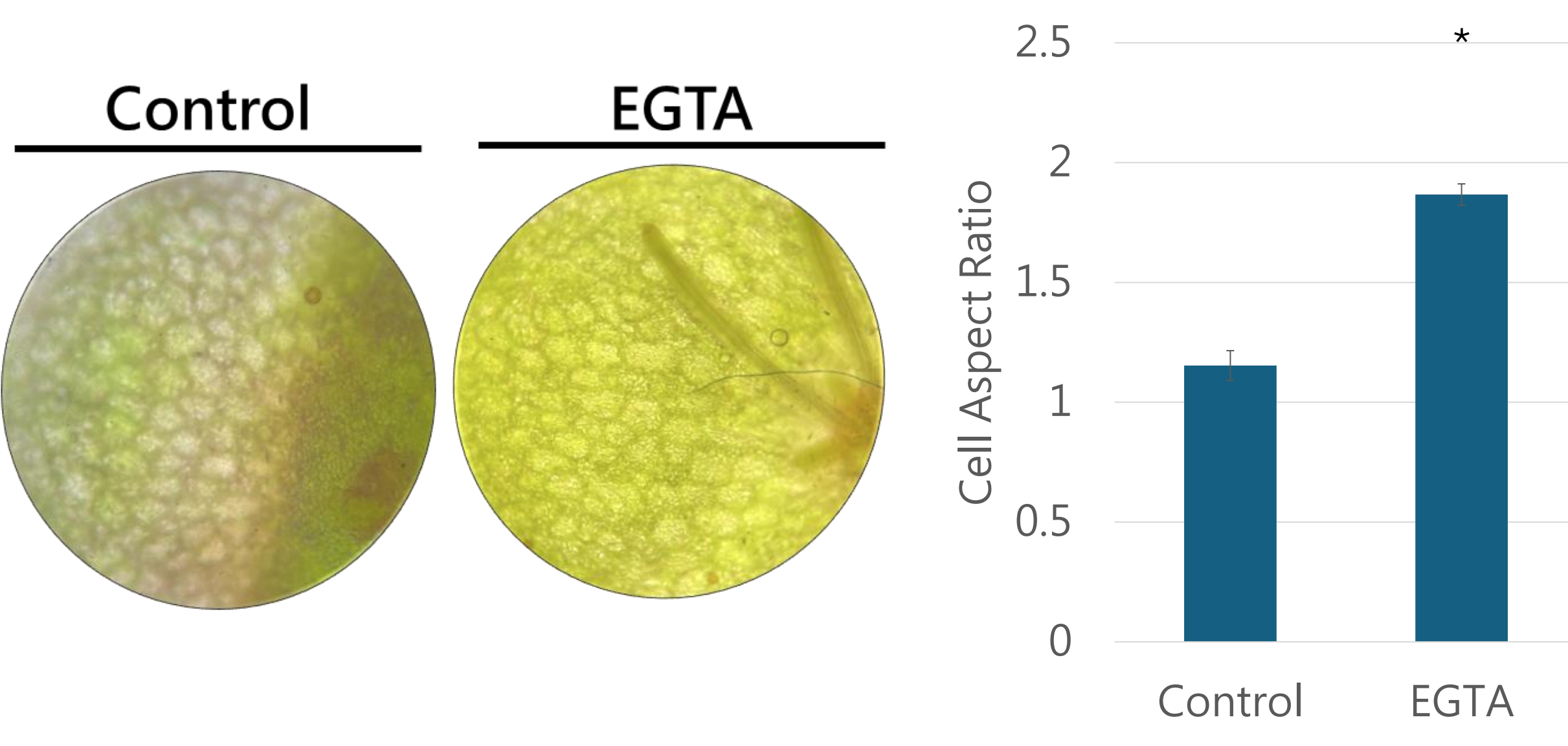


結論: 偏向圓型的網格型態有助於葉狀體產生彎曲，進而為自己釋出多的生長生存空間以應對擁擠環境。

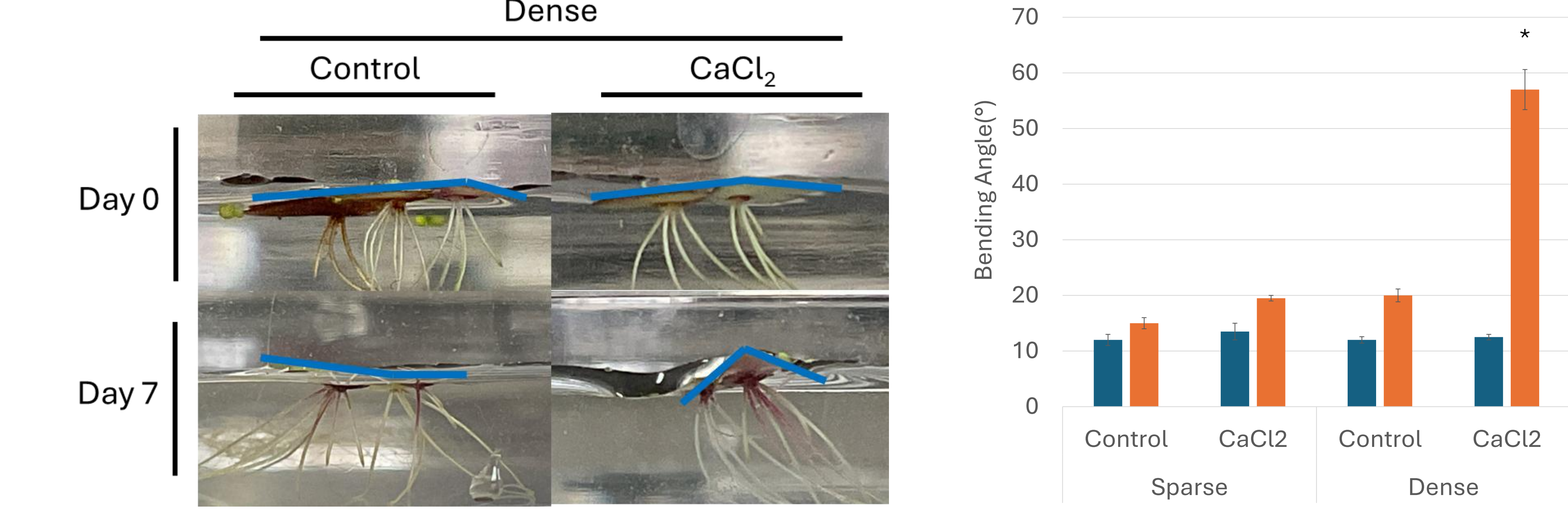
水萍添加EGTA後造成葉狀體彎曲角度下降情形



水萍添加EGTA後的葉狀體網格型態圖與長寬比量化圖



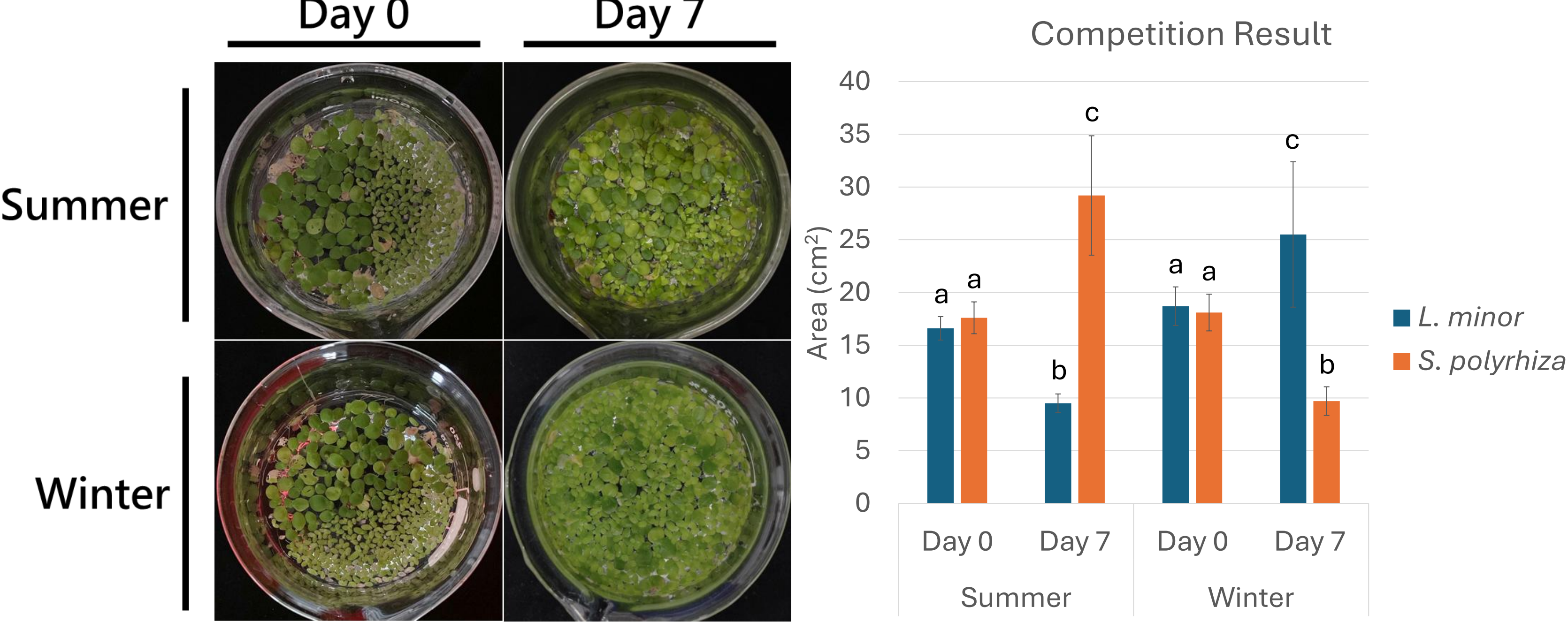
水萍在稀疏與擁擠環境下添加CaCl2後造成葉狀體彎曲角度下降情形



結論: 水萍藉由一系列以鈣離子作為第二信使的訊息傳遞，使得細胞變的更趨近於圓型，讓水萍的葉狀體得以突起。

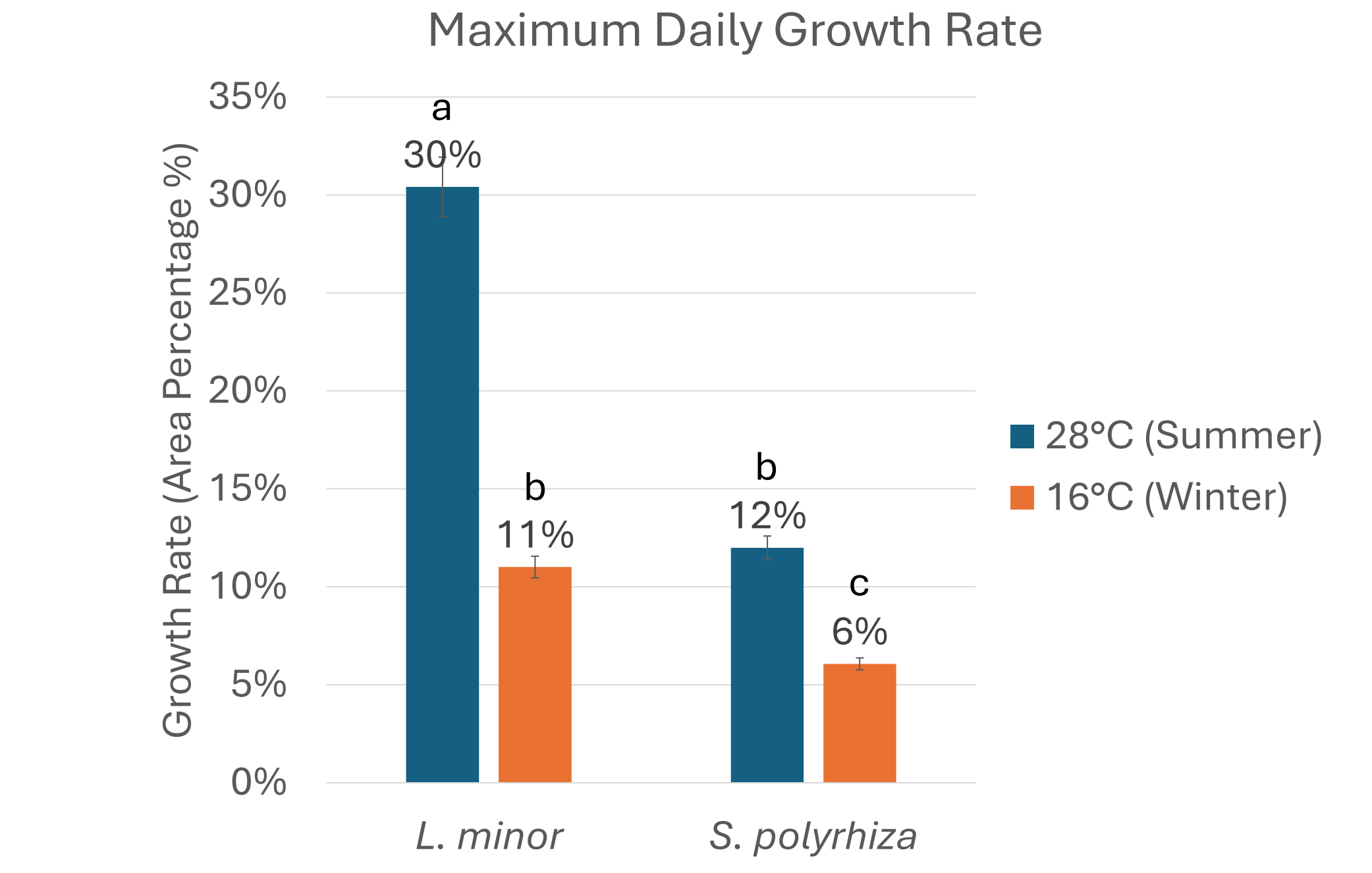
探討青萍和水萍季節消長現象的關鍵因子

青萍與水萍在夏天與冬天的種間競爭結果



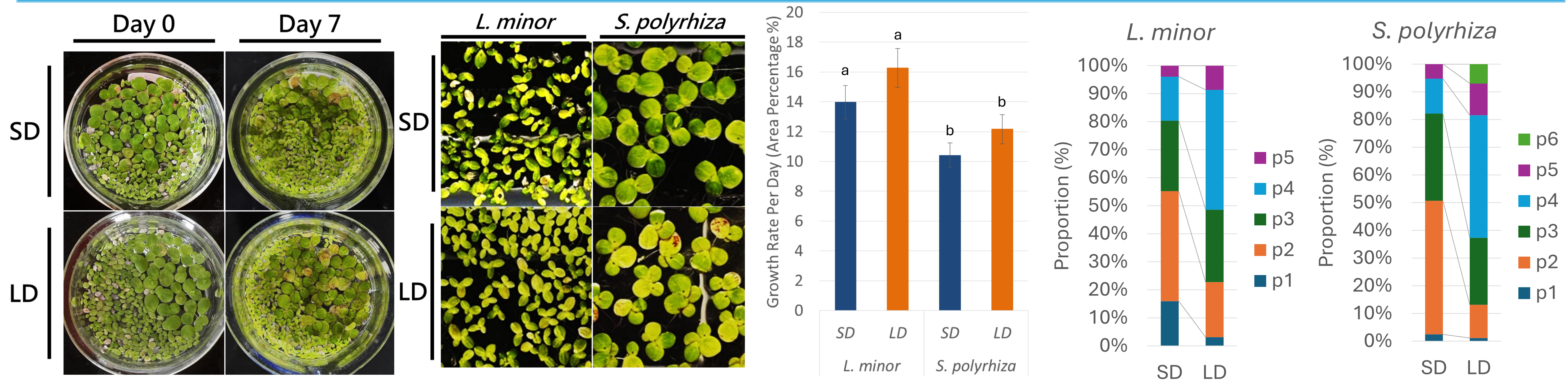
結論: 夏天時，水萍主導水面；冬天時，青萍佔優勢。

青萍與水萍在16°C與28°C下的最大每日生長率



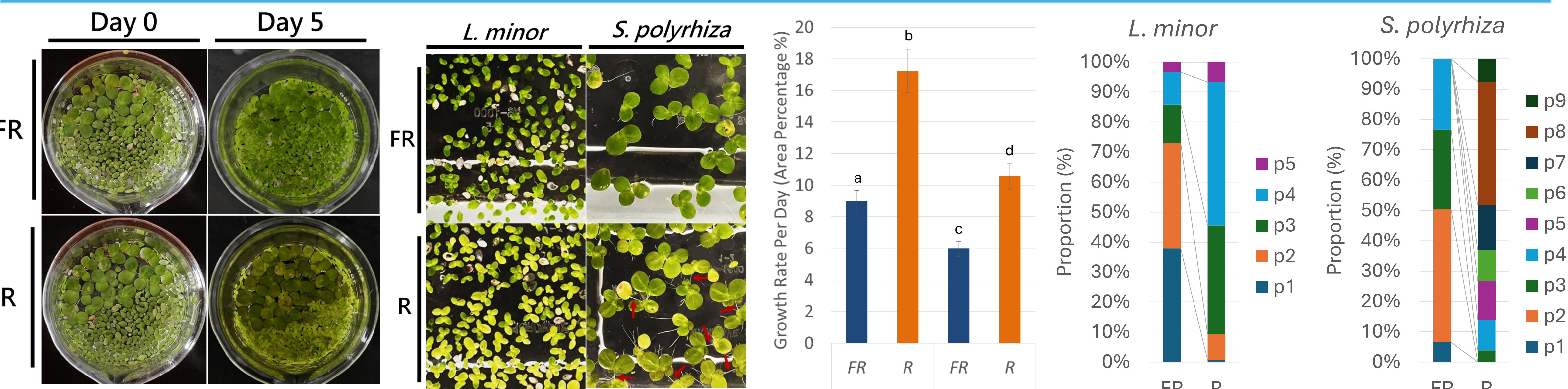
結論: 溫度應不是關鍵因子。

青萍與水萍在短日照與長日照的種間競爭結果與p數變化



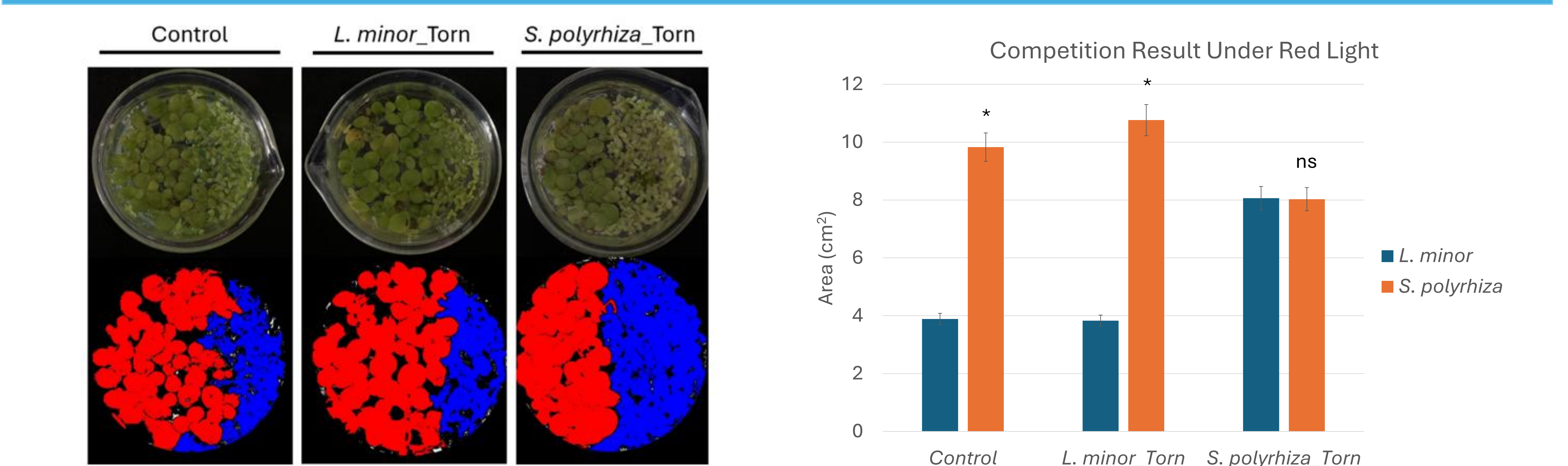
結論: 夏天時由於日照時間較長，導致兩者p數皆增加，恰好符合水萍的生存策略；冬天時則日照時長較短，造成p數下降，增進青萍優勢。

青萍與水萍在遠紅光與紅光下的種間競爭結果與p數變化



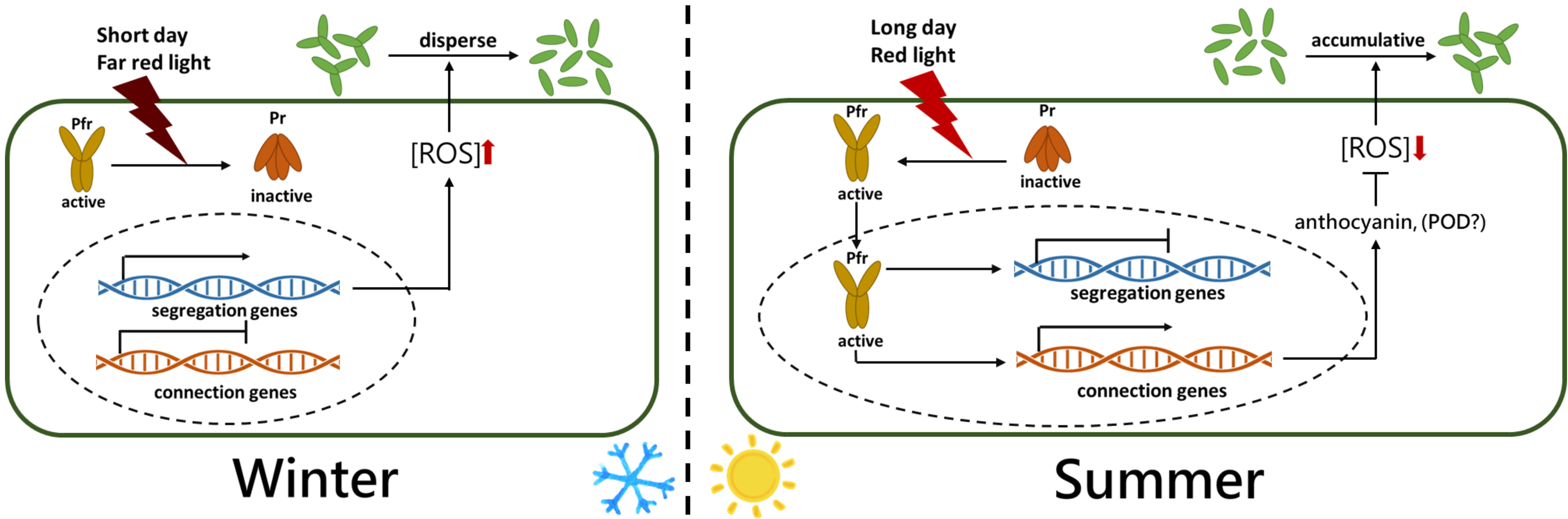
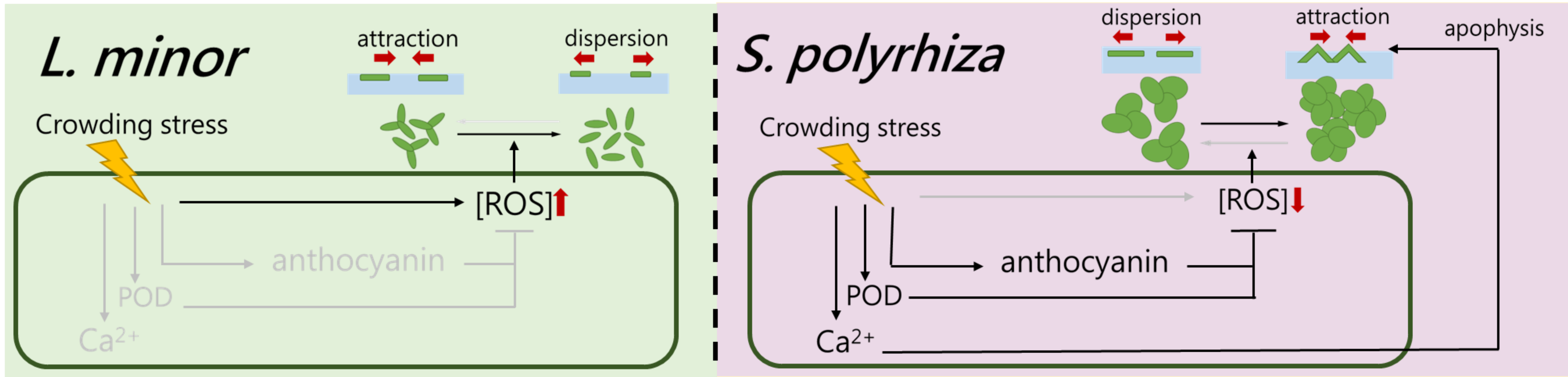
結論: 不同季節日照時間變化所誘導的p數改變很可能是由光敏素(phytochrome)所誘導。

青萍與水萍在紅光下且初始降低p數的的種間競爭結果與p數變化



結論:水萍葉狀體連接數的下降會使其失去本來的競爭優勢，無法以保守鞏固策略壓制青萍；而青萍斷裂搶占空間的策略無法由初始降低p數而實現，可能須由生長後自然斷裂才可達成。

肆、結論與討論



伍、參考資料

- 呂家璋、賴楚元；大「逆」不道——局部逆境下植物體內傳訊與物質分配機制．2024.64屆全國中小學科學展覽。
- JACOBS, Don L. An ecological life-history of *Spirodela polyrhiza* (greater duckweed) with emphasis on the turion phase. *Ecological Monographs*, 1947, 17.4: 437-469.
- FOO, Eloise, et al. A role for ethylene in the phytochrome-mediated control of vegetative development. *The Plant Journal*, 2006, 46.6: 911-921.
- NI, Min; TEPPERMAN, James M.; QUAIL, Peter H. PIF3, a phytochrome-interacting factor necessary for normal photoinduced signal transduction, is a novel basic helix-loop-helix protein. *Cell*, 1998, 95.5: 657-667.
- 海報中國片皆由作者自製