

新竹市第 44 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

科別：生物科

組別：國中甲組

作品名稱：輪傘草的水上圓舞:不同環境條件下的形態演變

關鍵詞：兩棲植物、通氣組織、缺氧乾旱逆境

編號：115JA-B004

# 摘要

本研究探討輪傘草(*Cyperus involucratus* Rottb.)在不同水質與介質下的生理適應機制。結果顯示營養具「雙向影響」：清水最利於無性繁殖（月增 4 株）；肥水及 1/2 濃度污水則促進莖稈伸長（均增 5 公分），但高濃度污水致其乾枯。

分析發現，水生個體為因應缺氧，莖稈通氣組織佔比達 43%，水分運輸效率（4 cm/hr）為陸生組兩倍。葉片氣孔密度依「水生 > 半水生 > 陸生」遞減，水生組達 287.5 個/mm<sup>2</sup>，凸顯較高氣體交換效能。根部解剖顯示陸生根髓腔較大，水生根則皮層疏鬆以利根部呼吸。

環境轉換實驗證實，水生植株移至陸地後，會因通氣組織缺乏支撐、高氣孔密度導致過度失水及根系不適應而嚴重枯萎，反映出輪傘草在極端介質轉換間存在不可逆的生理限制。

## 壹、研究動機

### 一、溪埔子人工濕地輪傘草生長調查

我們在溪埔子人工溼地看到許多水生植物生長於池邊，由於水池的功能是淨化溪埔子大排的家庭生活廢水，但許多植物生長茂密的樣子，讓我們好奇汙水對植物生長的影響，尤其是輪傘草，雖然沒有分布很密集，但生長的茂盛且高度很高，初步調查顯示輪傘草高度最高有 200 公分，單株苞片最多有 25 片，與參考資料中的輪傘草生長狀況(高度 50 至 100 公分，苞片約 20 片)有許多出入，讓我們不禁連猜想初步淨化的家庭廢水是否有利輪傘草生長。



溪埔子人工濕地及高大輪傘草族群

### 二、水陸兩棲的輪傘草

當我們把溪埔子人工濕地的輪傘草，帶回學校生態池養殖時，發現水池旁的乾燥土地也有輪傘草生長，重複回到溪埔子人工濕地後，也發現靠近岸邊的泥濘地也有輪傘草族群分佈，在截然不同的環境下都有輪傘草分佈的觀察，更讓我們想了解輪傘草是否有獨特的適應機制。

## 貳、研究目的

- 一、使用不同水體種植輪傘草，探討對植株高度與葉片長度與數量的影響
- 二、使用不同濃度的水溝水種植輪傘草，探討對植株高度與葉片長度與數量的影響
- 三、調查土壤種植、泥地種植、水種植環境，輪傘草根、莖、葉是否以不同形態適應環境

## 參、研究設備及器材

栽培工具	水桶、盆栽、肥料(液態生長肥與土質氮磷肥)、水溝水、過濾水、溪埔子人工濕地水
測量工具	電子秤(最小單位 0.01 公克)、針筒、紅墨水、指甲油、透明膠帶、載玻片
觀察工具	複式顯微鏡(最高倍率 400 倍)、解剖顯微鏡(最高倍率 40 倍)
分析工具	ImageJ、excel

## 肆、研究過程或方法

### 一、使用不同水體種植輪傘草

1. 取 20 株輪傘草隨機分成四組，分別種植於溪埔子人工濕地水池水、校園水溝水、清水、施加肥料的清水中，每週紀錄莖稈長度、葉片長度、葉片數量，連續觀察一個月，同時注意植株外觀是否有明顯變化，例如葉片顏色及葉片是否枯萎。

### 二、不同水溝水濃度對輪傘草生長影響

1. 經由實驗一得知校園水溝水讓輪傘草生長出現乾枯的現象，這與文獻資料中的吸收重金屬、過濾水中污染物質、生物性吸附有明顯差異，我們推測是校園水溝水的濃度太高，以致於來不及過濾污染物，就因為水分吸收受阻而乾枯，因此我們調整校園水溝水的濃度，驗證假說。

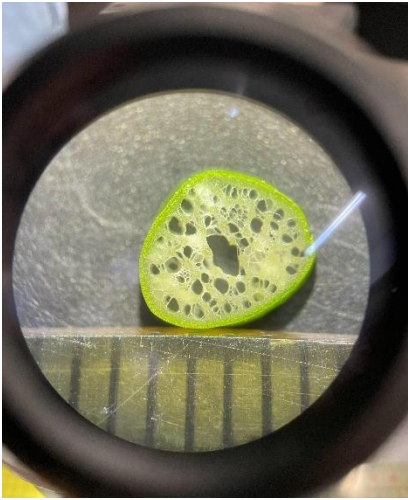
2. 取校園水溝水以序列稀釋 1/2、1/4、1/8、1/16 四種不同校園水溝水的濃度，各栽培五株輪傘草，每週紀錄莖稈長度、葉片長度、葉片數量，連續觀察一個月，同時注意植株外觀是否有明顯變化，例如葉片顏色及葉片是否枯萎。

### 三、水、陸栽培環境對莖稈通氣組織影響

1. 將水生的輪傘草與陸生的輪傘草莖稈橫切 1mm，在解剖顯微鏡下與尺一起拍照，利用 imageJ 測量孔洞面積，每組重複三次，取得通氣組織體積佔比。

2. 取輪傘草莖稈 8 公分長以電子秤測量初重，分切成四段至於裝水的注射針筒中，排出空氣並下拉真空直至水填入通氣組織而莖稈下沉，再取出擦去表面水分後以電子秤測量末

重，重量差異為通氣組織體積，再除以莖稈體積取得通氣組織體積佔比。



莖稈截面(10X)



浮起的莖稈



以針筒抽水排氣至下沉

#### 四、水、陸栽培環境對水分運輸的影響

1. 將水生與陸生的輪傘草，放入紅墨水中，於一小時後從底部橫切莖稈，依序由莖稈底部往上一次橫切 0.5 公分，直到橫切面沒有出現紅墨水的痕跡，紀錄為水分運輸的高度。

#### 五、水、陸栽培環境的葉片形態變化

1. 將指甲油塗抹於輪傘草的苞片表皮，等待 5 分鐘充分吹乾後，以透明膠帶黏取乾掉的指甲油薄膜，貼於載玻片上以複式顯微鏡觀察，拍攝 40、100、400 倍的照片。
2. 將照片以 imageJ 分析氣孔數量、氣孔佔比。
3. 重複上述步驟於水生、半水生、陸生環境之上、下表皮。

#### 六、水、陸栽培環境的根形態變化

1. 將根部取下後，從底部往下 2 公分處，以解剖刀橫切出很薄的小片段，放置於載玻片上先蓋上蓋玻片，確保橫切面朝上後，從蓋玻片邊緣滴加水直至玻片間無空隙，以複式顯微鏡觀察，拍攝 40、100、400 倍的照片
2. 將照片以 image 分析莖部截面積、中柱截面積、髓腔截面積。
3. 重複上述步驟於水生、半水生、陸生環境之根部。

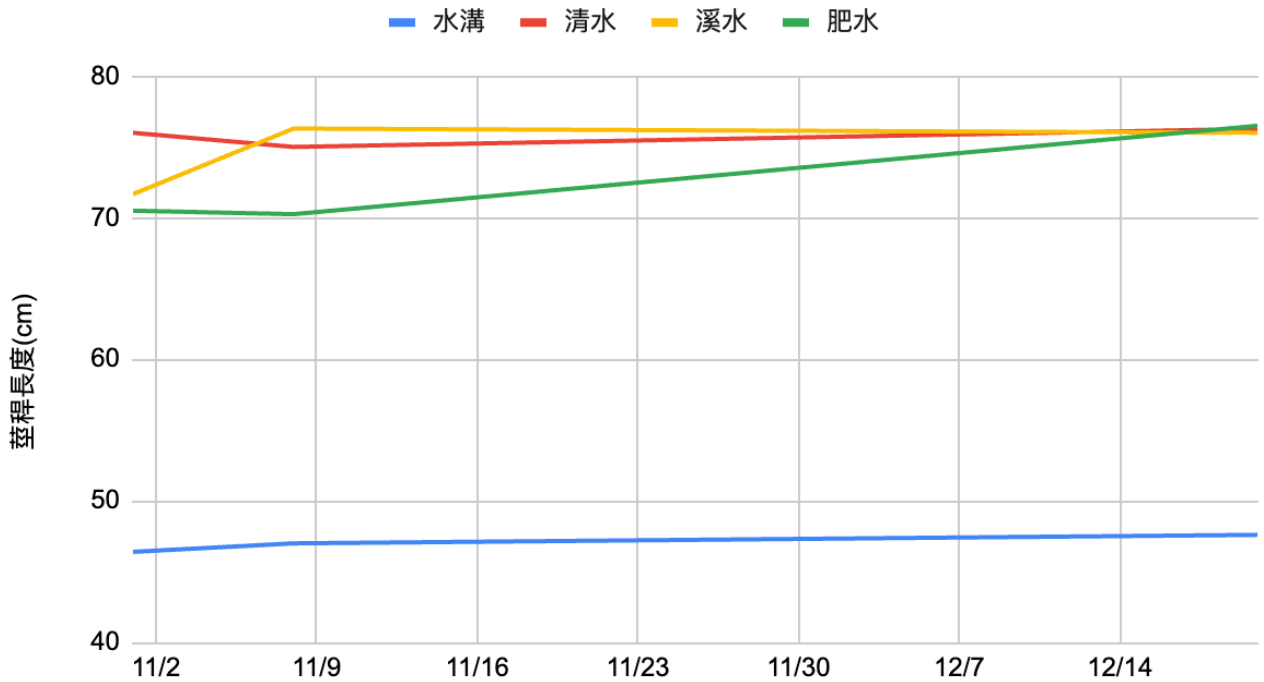
#### 七、調換水、陸栽培環境對植株影響

1. 將陸生的輪傘草，小心地將整株挖出，分別種植於四桶清水中，每桶約 4 株輪傘草。另將水生的輪傘草，種植於五盆土壤盆栽中，每盆約 4 株輪傘草，每天澆水保持濕潤。每週紀錄莖稈長度、葉片長度、葉片數量，連續觀察一個月，同時注意植株外觀是否有明顯變化，例如葉片顏色及葉片是否枯萎。
2. 將改變生長環境的輪傘草以實驗三的步驟取得通氣組織體積。

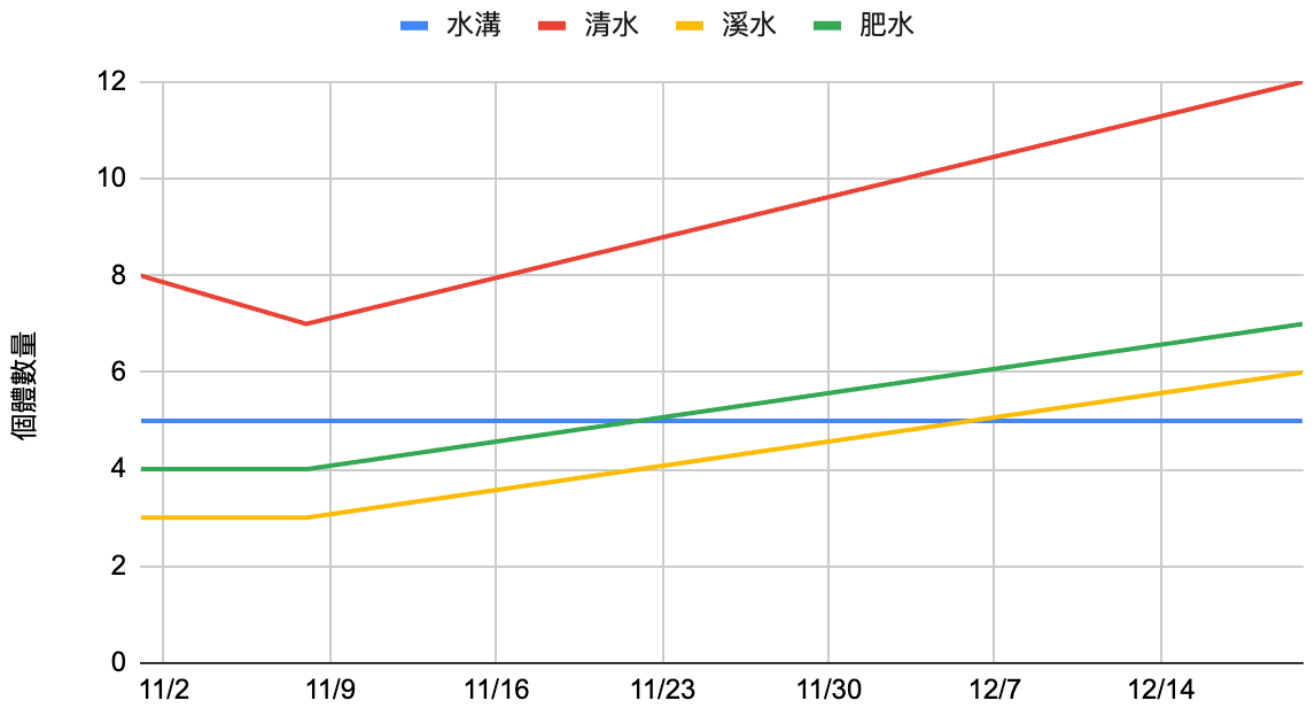
## 伍、研究結果

### 一、使用不同水體種植輪傘草

#### 不同水體對莖桿平均長度影響



#### 不同水體對個體數量影響



肥水對於輪傘草的莖桿增長有優勢，一個月的時間使平均高度延長 5 公分，而清水、溪水、肥水都能使輪傘草無性生殖的個體數量增加，其中以清水處理可使個體增加 4 株。

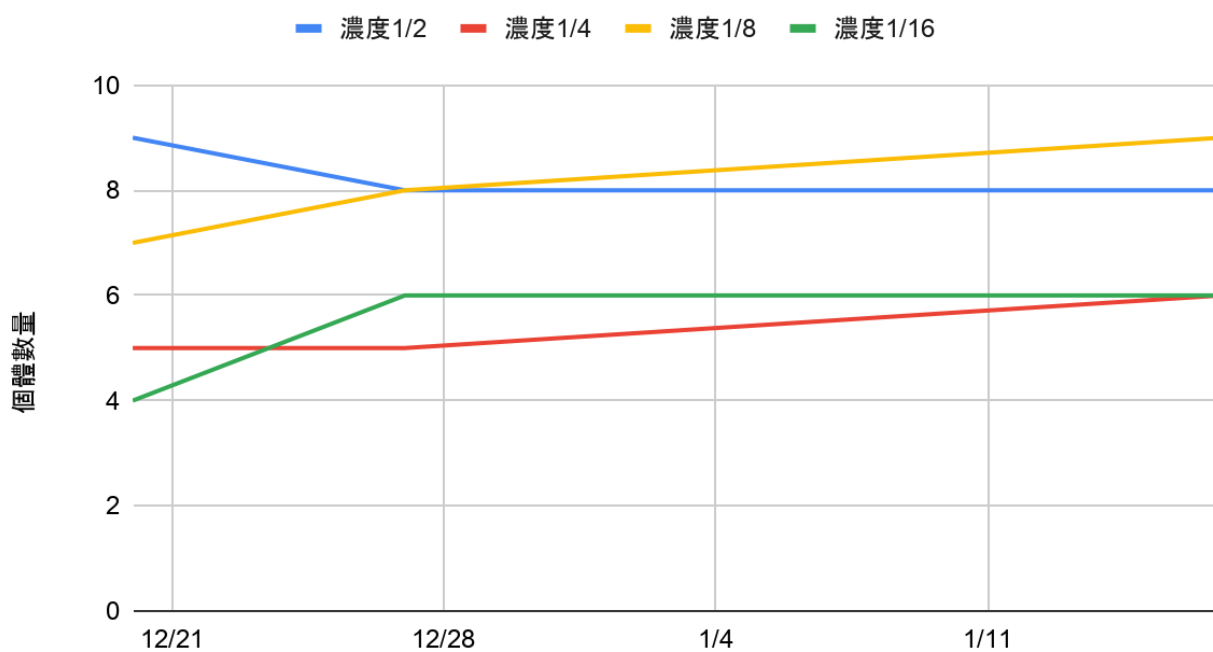
水溝水種植的輪傘草不只長度增加與個體增長不明顯，還出現苞片變黃乾枯的狀況



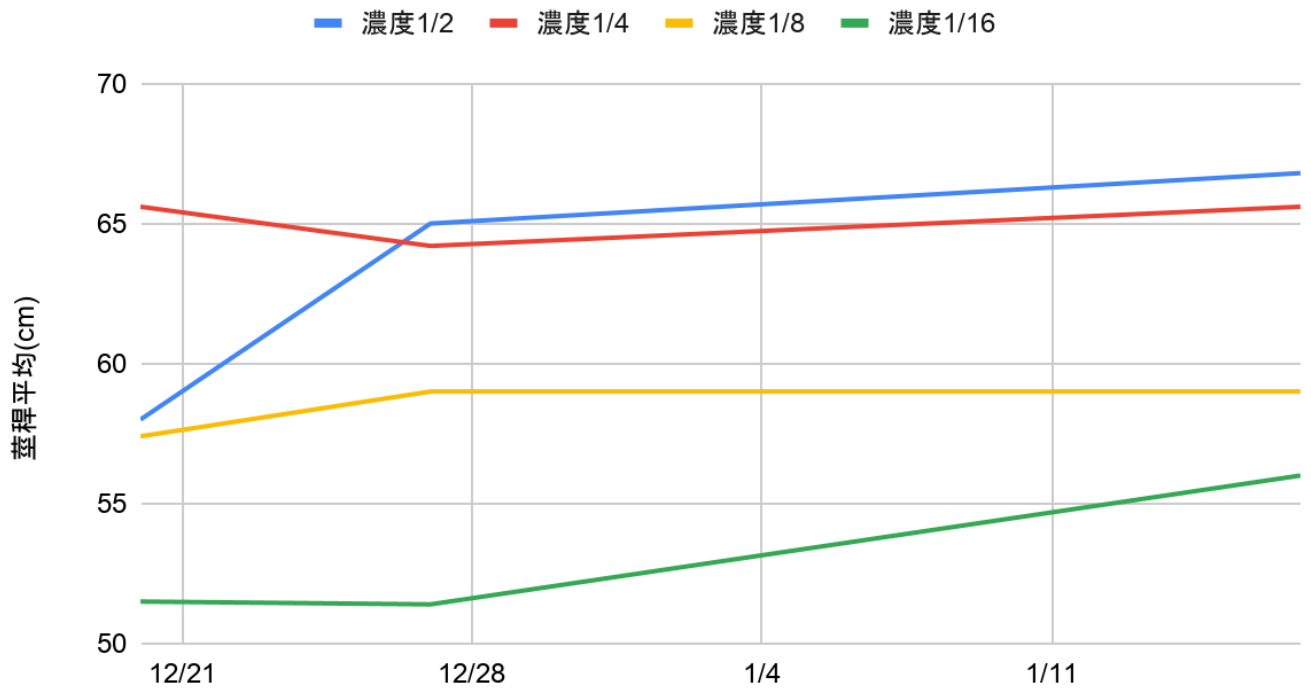
水溝水種植輪傘草造成枯黃

## 二、不同水溝水濃度對輪傘草生長影響

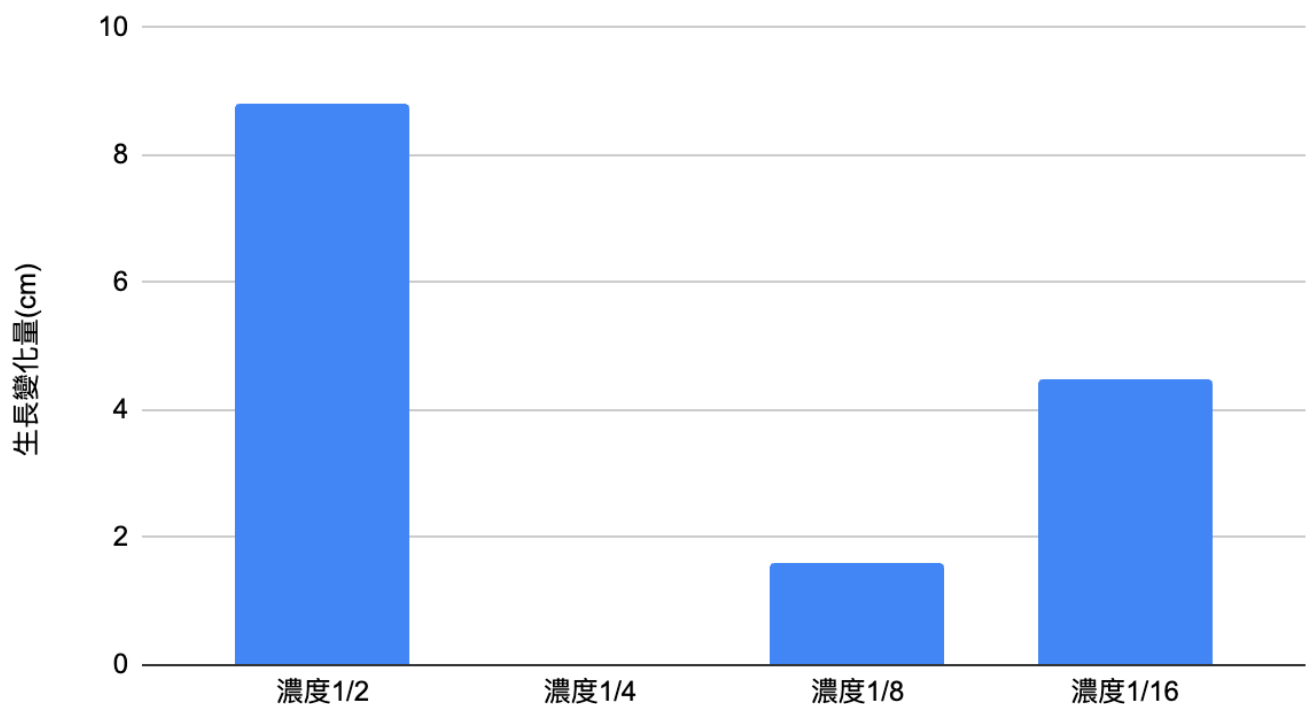
### 不同水溝水濃度對個體數量影響



## 不同水溝水濃度對莖桿平均長度影響



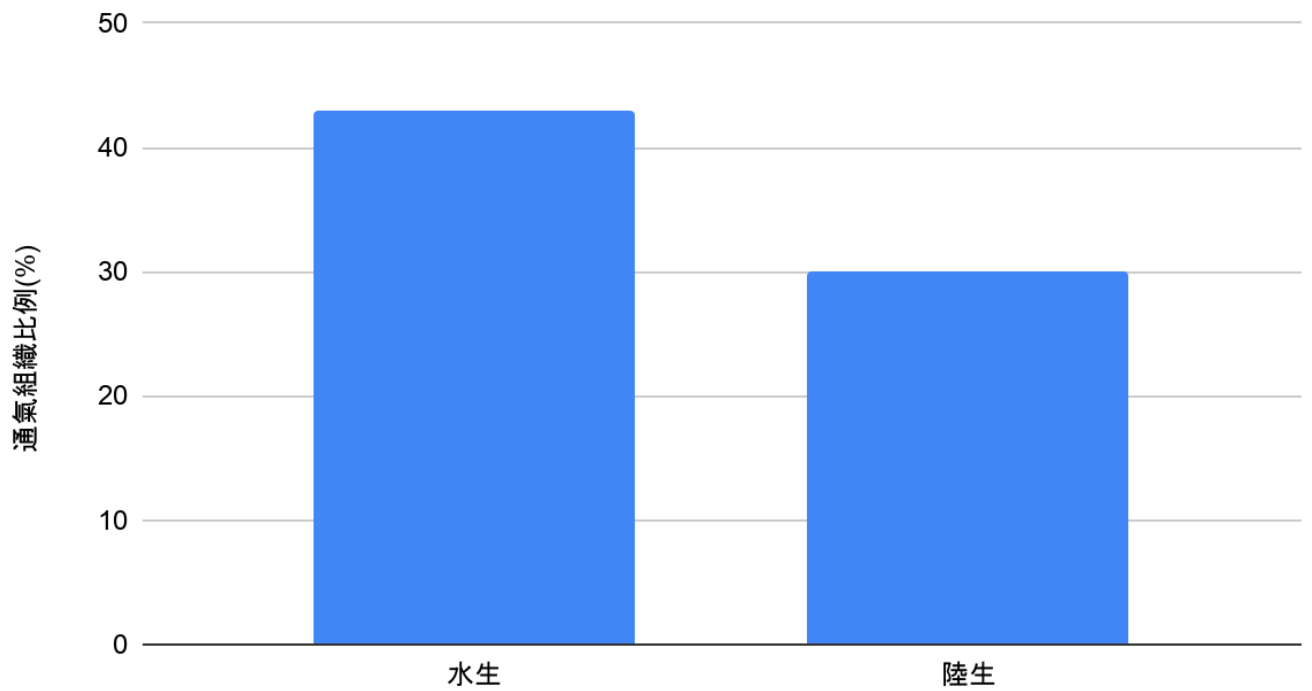
## 不同水溝水濃度對莖桿生長變化量



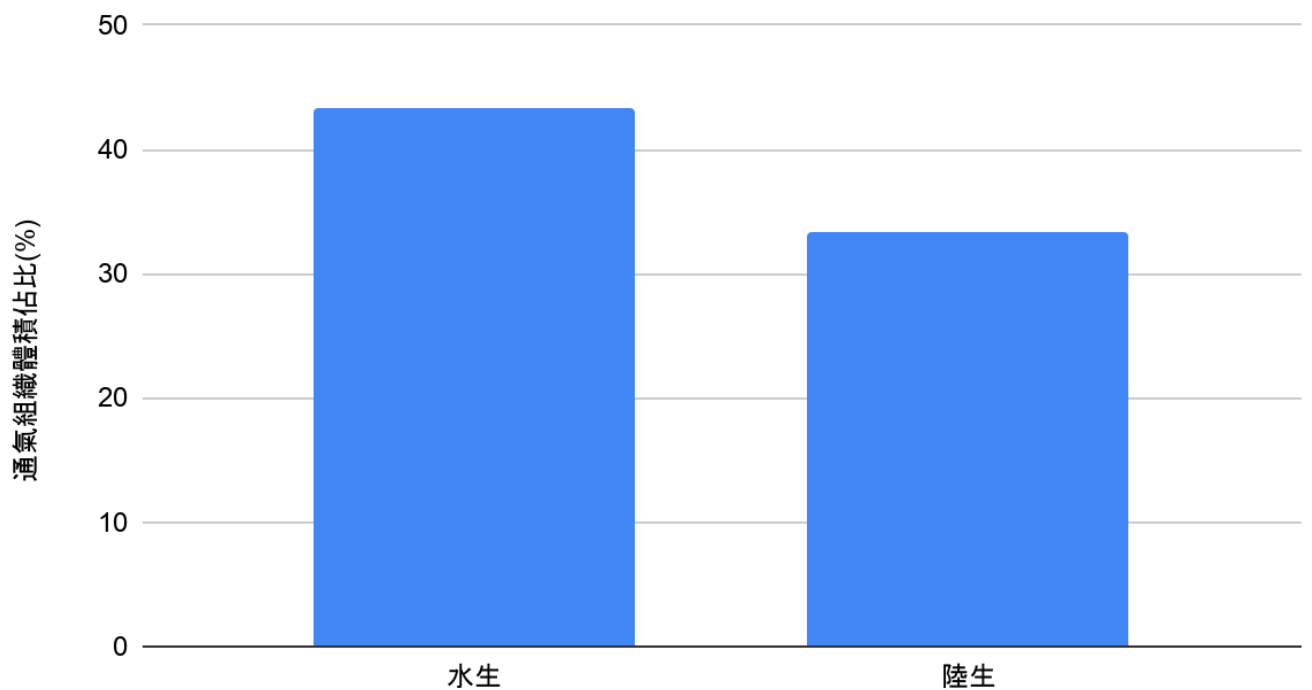
校園水溝水稀釋 1/8 倍的水體對於輪傘草的個體數量增加最有優勢，一個月的時間使無性生殖個體增加 4 株。稀釋 1/2 倍的水溝水對於莖桿平均長度增加最有影響，一個月內使莖桿長度平均增加 8 公分。

### 三、水、陸栽培環境對莖稈通氣組織影響

#### 以imageJ測量莖稈橫切截面通氣組織比例



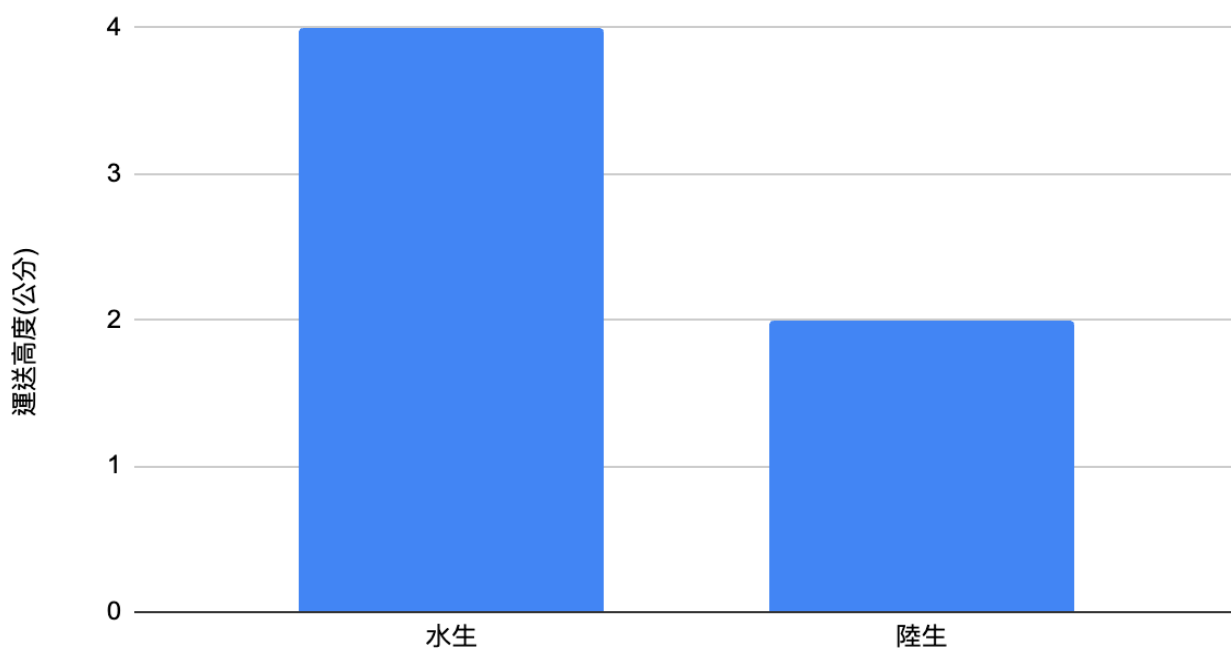
#### 以排水秤重測量通氣組織體積佔比



水生環境下的輪傘草，其莖稈有較多通氣組織佔比，不論是 imageJ 的測量還是排水秤重皆得到此結果。

#### 四、水、陸栽培環境對水分運輸的影響

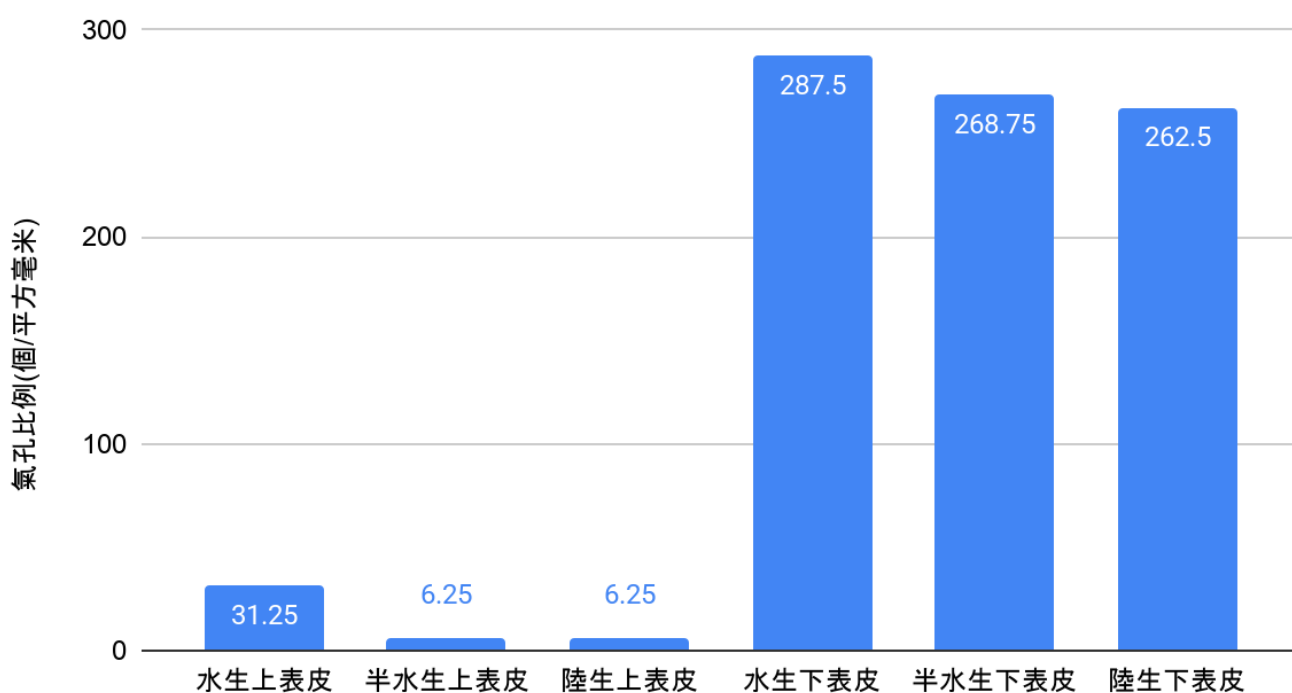
##### 不同培養環境的輪傘草水分運輸高度



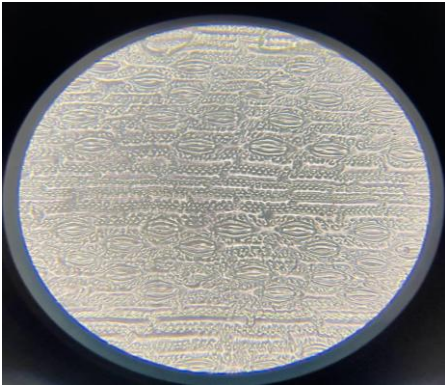
水生環境下的輪傘草，其水分運輸效率較陸生環境的輪傘草高，一定時間內運送的高度比陸生高出一倍。

#### 五、水、陸栽培環境的葉片形態變化

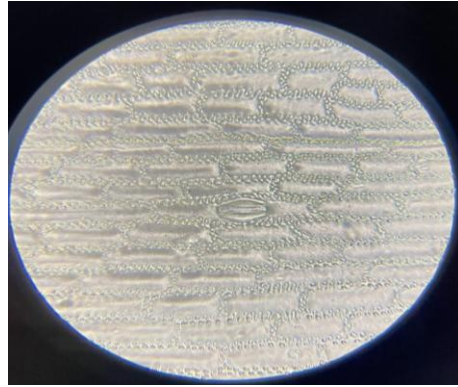
##### 不同栽培環境下的氣孔數佔比



輪傘草的氣孔大多分佈於下表皮，且呈現保衛細胞平行於葉脈的排列方式，以三至四直排的氣孔為一單位，間隔排列於三至四直排的表皮細胞，以極穩定之規律整齊排列。水生的氣孔數量較多，平均每平方毫米有 287.5 個氣孔



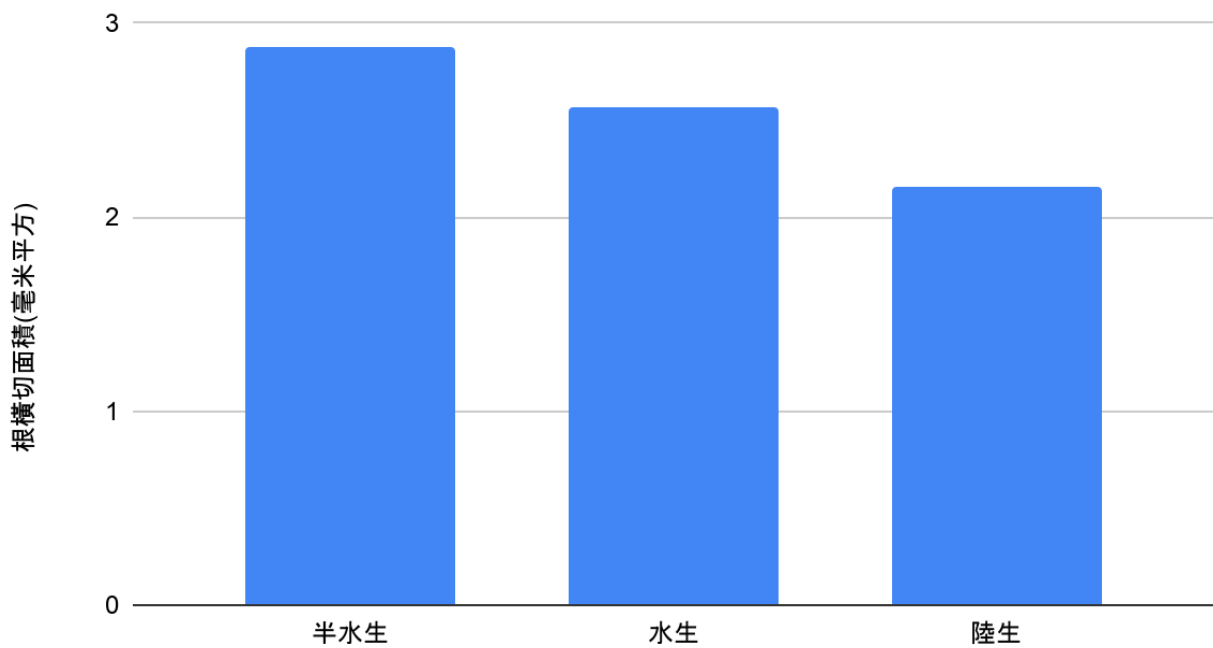
下表皮氣孔(400X)規則排列



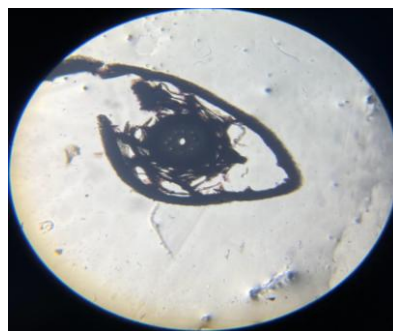
上表皮氣孔(400X)極少，僅零星分布於表皮細胞間

### 六、水、陸栽培環境的根形態變化

#### 不同栽培環境的根部截面積



半水生根橫切 40 倍



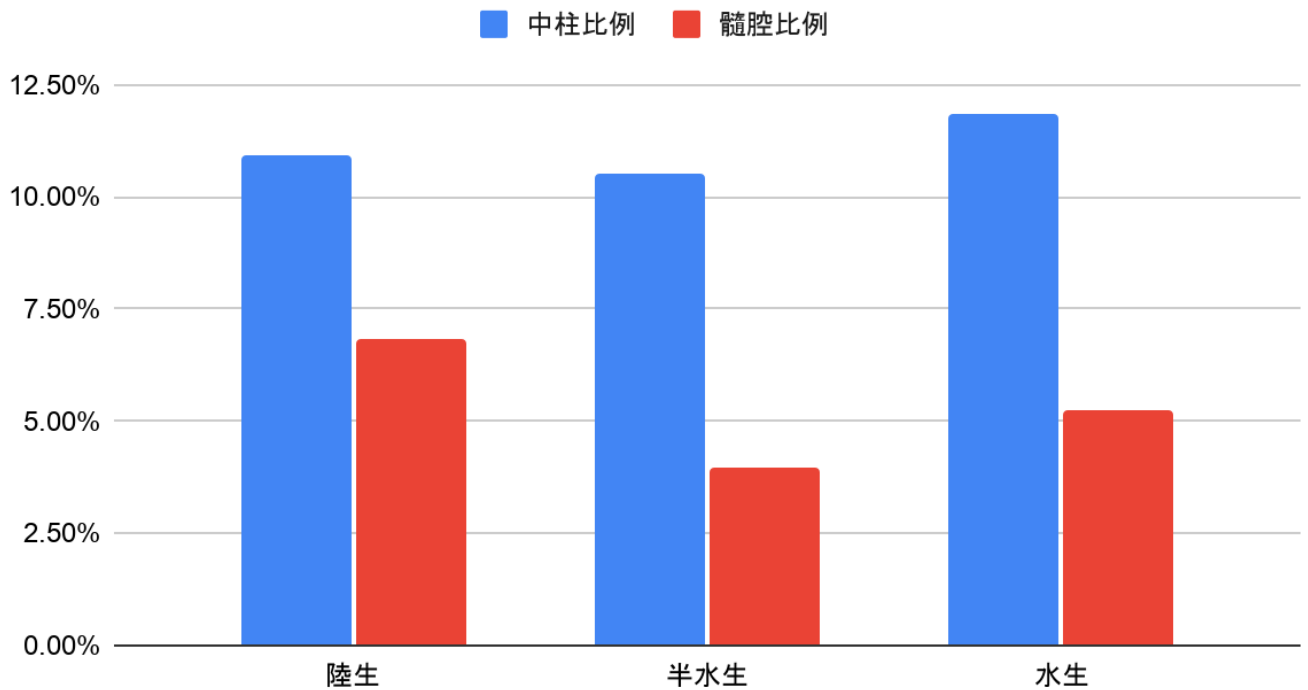
水生根橫切 40 倍



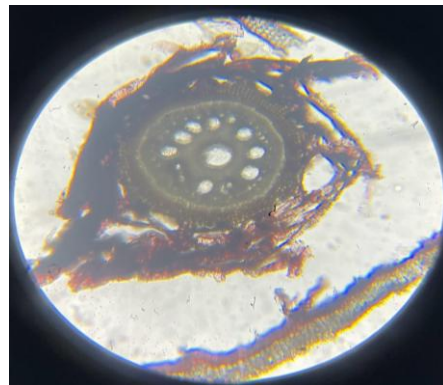
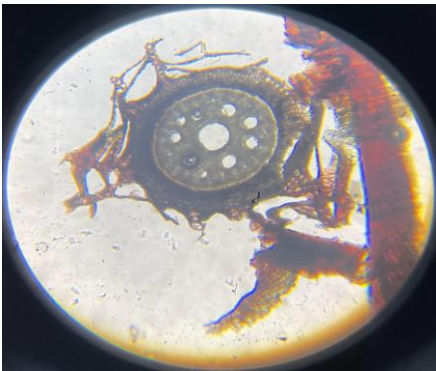
陸生根橫切 40 倍

半水生的根有較鬆散的表皮與皮層空隙，陸生的表皮與皮層空隙較多連接組織，水生與半水生的根輕捏有空氣感，陸生的根輕捏感覺較扎實

## 中柱佔根部比例和髓腔佔中柱比例



不同環境的根部中柱比例差異不明顯，中柱內部除了薄壁組織填滿的髓，還有明顯的中空髓腔，髓腔的截面積佔比以陸生的最大，半水生的最少。



陸生的根部橫切(100 X)，髓腔結構佔比較大 半水生的根部橫切(100 X)，髓腔結構佔比較小

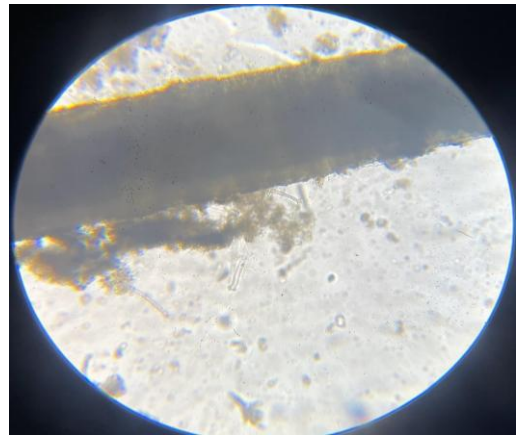


水生輪傘草(左)的根系短淺、細毛狀的鬚根較發達。

陸生輪傘草(右)的根系較廣、粗壯的鬚根延長明顯。



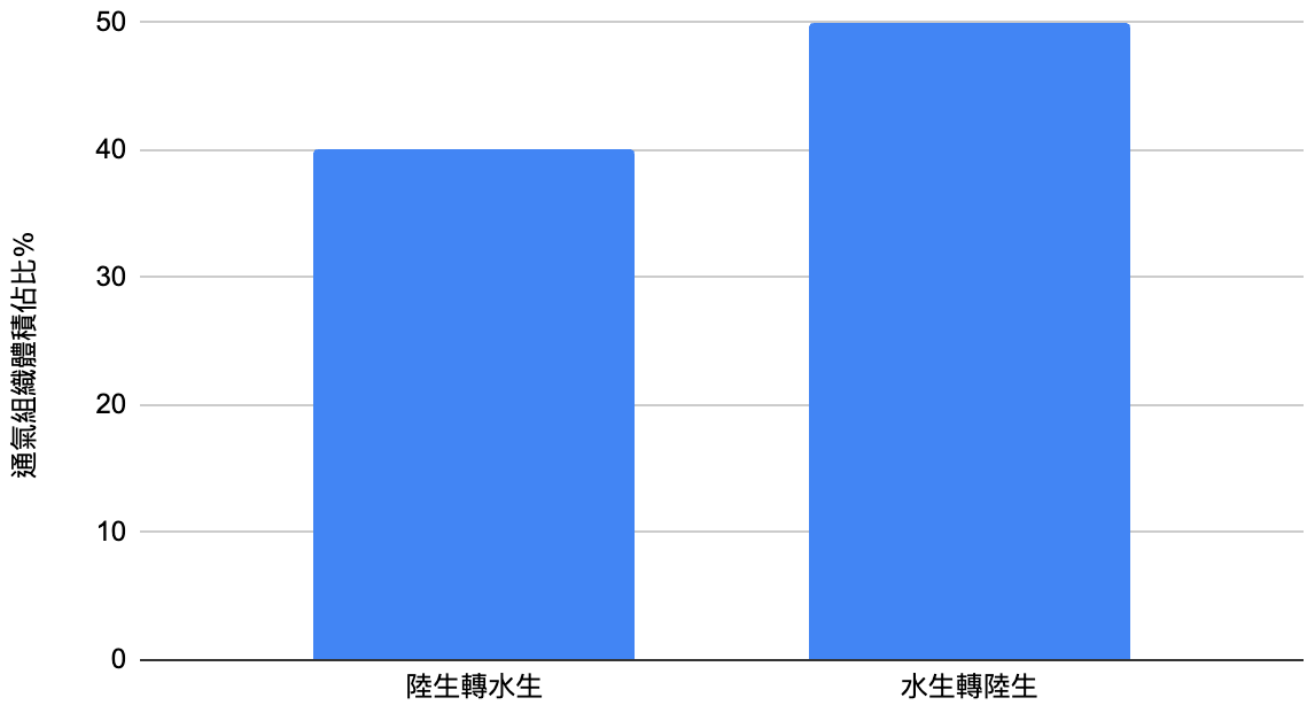
陸生輪傘草根表面多突起(40X)



水生輪散草的根部表面較平滑(100X)

## 七、調換水、陸栽培環境對植株影響。

### 改變培養環境後通氣組織佔比變化



水生的輪傘草種植於陸地後，其通氣組織佔比仍較大，但水生的輪傘草移植於土壤盆栽後，出現嚴重枯黃與萎縮的狀況，葉片捲曲枯黃、莖稈萎縮嚴重。陸生的輪傘草移植於清水後，只有葉片枯黃狀況出現，沒有嚴重的脫水捲曲狀況。



陸生種植於水中，葉片枯黃沒有嚴重萎縮 水生種植於土壤盆栽，葉片捲縮成細針狀且枯黃

## 陸、討論

### 一、水體營養成分與生長策略的分配機制

從實驗一與實驗二的生長曲線圖可以觀察到，輪傘草具備靈活的資源配置策略。在清水組

中，植株雖缺乏外界養分，但可能基於生存本能，將殘餘能量優先投入於個體繁衍，使其個體數增長率（+50%）居所有組別之冠。相對地，肥水組提供的氮磷養分則被導向至細胞伸長，促使莖稈高度穩定上升。最值得關注的是水溝水稀釋實驗：1/8 濃度的優異繁衍表現與 1/2 濃度的長度增長優勢，說明了環境壓力（污染度）與養分吸收之間存在一個平衡點。原始濃度的水溝水造成黃化現象，證實了過高濃度的溶質會產生滲透壓干擾，形成「生理性乾旱」，使植株即便處於水中也無法有效吸收水分。

## 二、通氣組織與水分運輸的效能權衡

研究中利用 ImageJ 測量與針筒抽水排氣法，雙重驗證了水生輪傘草莖部擁有極高比例(約 43%)的通氣組織。溶生通氣組織透過提供內部通氣系統，將氧氣從地面部分輸送到根部，增強植物耐受低氧土壤環境的能力。這種結構是典型的濕地植物適應機制，旨在缺氧的水環境中維持氣體交換。然而，本研究進一步發現，這類「空腔化」的構造雖然在紅墨水運輸實驗中展現出兩倍於陸生組的運輸高度(4cm vs 2cm)，卻也造成了機械強度的弱化。在「水生轉陸生」的實驗中，植株迅速枯黃萎縮，推測發達的通氣組織在乾燥環境下無法抵抗強大的蒸散拉力，且缺乏足夠的維管束支撐結構，導致內部水分傳導系統在脫水瞬間發生生理性塌陷。

## 三、不同栽培環境下的根部形態推論

根據根部橫切觀察實驗結果，輪傘草的根部在不同介質中呈現截然不同的形態。陸生根具備較多小突起與扎實的組織，這有利於在土壤顆粒間增加接觸面積並強化固著力；而水生根則呈平滑鬚根狀，適合直接吸附水中的溶解養分。有趣的是，中柱內部的「髓」在三種環境下均有明顯髓腔，且陸生根的髓腔比例反而較大。這可能暗示陸生輪傘草在適應上保留了一定的內源性儲水空間。又根據其他水生植物蘆葦的研究，其根莖與莖部具有發達的髓腔，主要用於支持長距離的加壓對流（Pressurized flow），將氧氣輸送到深處的根部。

半水生的泥濘環境下，根部處於難以獲得氧氣的環境，因此較大的皮層空隙，可以讓更多空氣保存在根部細胞周圍，使得根部適應缺氧、淹水的逆境。

## 四、不同栽培環境下的氣孔形態探討

與輪傘草生長於類似環境的單子葉植物蘆葦（*Phragmites australis*）在葉鞘和莖節上也分佈有微小的氣孔，且這些氣孔被認為是支撐植株內部加壓對流的重要構造。其氣孔的大小甚至被精確測量為用於氣體交換的「微孔（micropores）」，當氣孔排列規律且孔徑微小時，可以扮演「微孔隔板（microporous partition）」的角色，能利用濕度或溫度梯度產生的壓差，將外界空氣透過氣孔「壓」入內部的通氣組織（aerenchyma），建立起從葉部向下直到根尖的加壓氣流，提供根部呼吸所需的氧氣

水陸環境皆能適應的輪傘草與蘆葦在氣孔形態表現上有一致性，顯示規律且微小密集排列的氣孔，為適應極端逆境的必需構造。

水生的輪傘草氣孔密度較高，推測水中缺氧環境下，氣孔的氣體交換需求大過水分蒸散需求，更密集的氣孔可能有助於氣體進入植物體及內部通氣組織，增加在缺氧逆境下的適應能力。

## 五、環境轉換下生理鴻溝的成因分析

調換環境的結果呈現明顯的不對稱性。「陸生轉水生」僅導致葉片黃化，主因是其扎實的根部構造尚能維持基本的吸水與支持功能；但「水生轉陸生」卻發生不可逆的死亡反應，這說明水生植株的生理機制已經高度「專業化」於液體介質中（如高氣孔密度、高通氣組織佔比、淺鬚根）。一旦移至陸地，高密度的葉片氣孔（ $287.5$  個/ $\text{mm}^2$ ）會加速水分流失，而短淺的鬚根無法從深層土壤抓取水分，最終導致整株植物因供需嚴重失衡而迅速枯死。

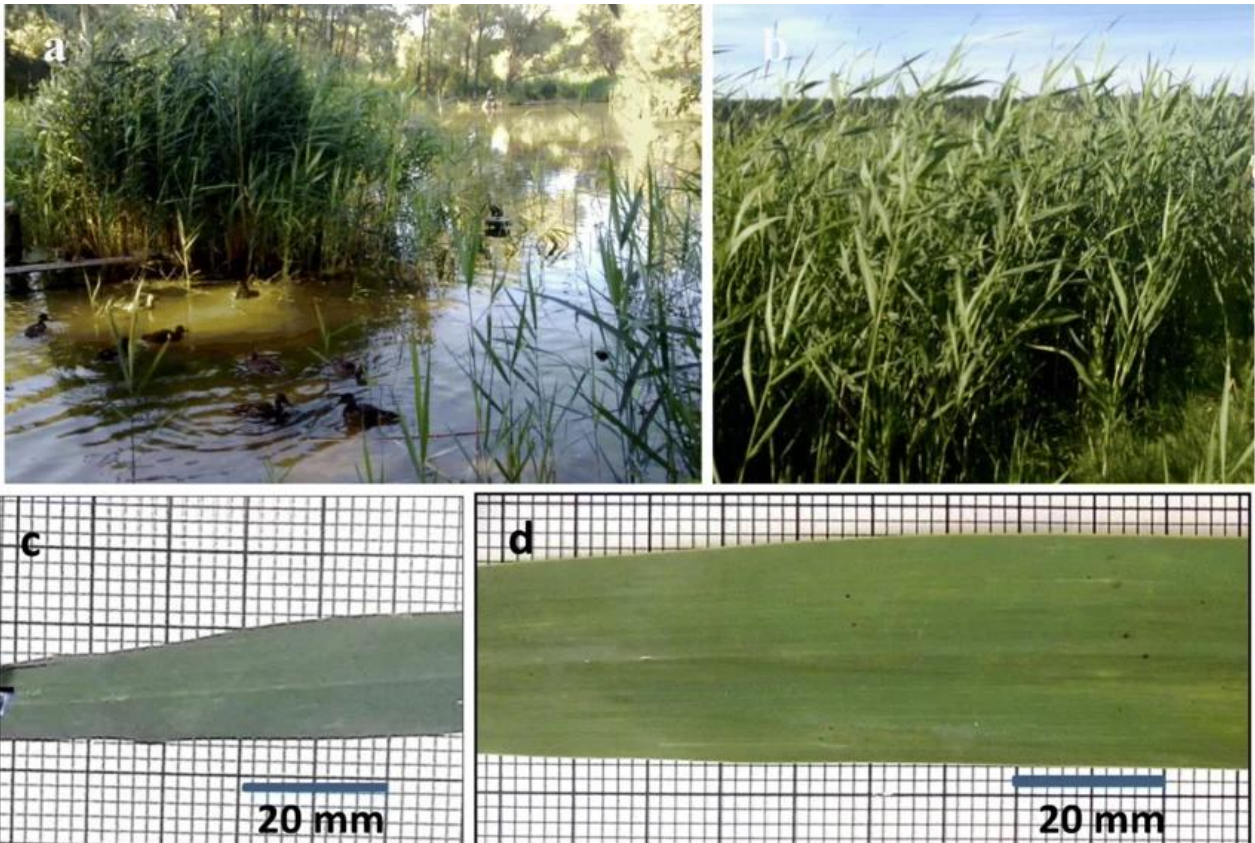
且根據調換環境後苞片都枯黃的結果，顯示水生根、陸生根的獲取礦物質的機制不同，且無法直接適用於相反的環境，缺乏合成葉綠素的必需元素。

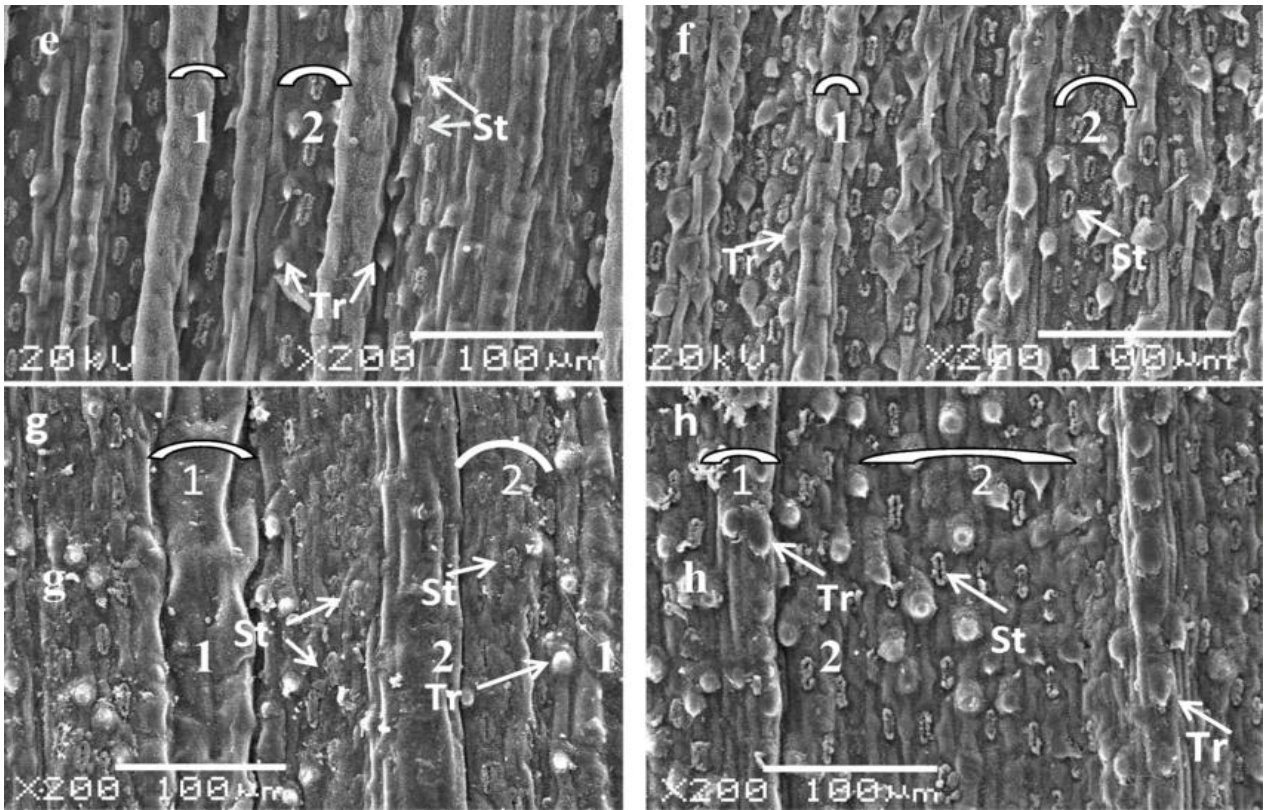
## 柒、結論

1. **水質濃度的關鍵影響：**輪傘草生長受養分濃度嚴格調控。低污染清水最利於無性繁衍； $1/8$  稀釋水溝水是促進個體增殖的最佳濃度； $1/2$  稀釋水溝水則對莖稈高度伸長最有幫助。原始高濃度污染物會阻礙吸水，造成植株乾枯。校園洗手槽廢水並不適合直接栽培輪傘草，但經過稀釋處理後仍有助於輪傘草生長。
2. **內部構造的演變：**水生環境會誘發莖部產生高達 43% 的通氣組織，這使水分運輸高度在相同時間內比陸生個體提升了 100%（從 2cm 提升至 4cm），展現出卓越的輸導效能。
3. **葉片氣孔的調節：**氣孔主要分布於下表皮，且排列極具規律。水生植株的氣孔密度（ $287.5/\text{mm}^2$ ）高於半水生與陸生組，反映了其在濕度充足環境下追求高效率蒸散的生理特性，與蘆葦的相似性，顯示此氣孔的形態具有趨同演化的環境適應性。
4. **根部構造的環境差異：**陸生根部具有較多突起且組織較扎實（輕捏無空氣感），而水生根部表皮與皮層間空隙較大，以求缺氧環境下充足獲得空氣。所有組別的根部髓腔明顯，且陸生組的髓腔截面積佔比最大，可能為陸生儲水、水生運輸空氣的兩種功能皆有相關性。
5. **環境適應的侷限性：**輪傘草的生理可塑性在「由水轉陸」時面臨極限。水生植株因根系短淺、氣孔過多及莖部支持力不足，移植至陸地會導致嚴重生理崩潰；反之，陸生轉水生則展現較強的存活耐受度。

## 捌、參考資料及其他

1. 行政院農委會林業試驗所. (n.d.). 臺灣生命大百科. <https://taieol.tw/pages/37657/articles>
2. 許家榕 (2012)。兩棲植物銅錢草 *Hydrocotyle verticillata* Thunb. 對水陸環境與水位高度變化的適應〔碩士論文，國立臺灣師範大學〕。華藝線上圖書館。  
<https://www.airtilibrary.com/Article/Detail?DocID=U0021-1610201315310154>
3. Nedukha, Olena. (2021). Micromorphology and monolignols of leaf epidermis in *Phragmites australis* (Poaceae) of air-aquatic and terrestrial ecotypes. *Protoplasma*. 258. 10.1007/s00709-021-01614-
- 4.





蘆葦 (*Phragmites australis*) 水生 (a) 和陸生 (b) 植株。水生 (c) 和陸生 (d) 蘆葦葉片的中部。水生 (e, f) 和陸生 (g, h) 蘆葦葉片上表面 (e, g) 和下表面 (f, h) 的掃描電子顯微鏡影像。縮寫：1，凸起拱形區；2，氣孔區；St，氣孔；Tr，毛狀體。

4. Drew M.C., He C.-J. & Morgan P.W. (2000) Programmed cell death and aerenchyma formation in roots. *Trends in Plant Science* 5, 123 – 127.
5. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots, *Plant, Cell and Environment* (2003) 26, 17 – 36 T. D. COL