

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物科

第三名

030319

探討電位差變化對含羞草觸發運動過程的影響

學校名稱：新竹市立光武國民中學

作者： 國二 顏韶葦 國二 王博濂 國二 黃羽萱	指導老師： 蔡明曉 江慶華
---	-----------------------------

關鍵詞：含羞草、觸發運動、生物電訊號

摘要

本研究探討外加電位差變化對含羞草觸發運動的影響機制。我們發現含羞草葉齡會影響電阻變化量及閉合速率。使用 9V 以上外加電壓能使含羞草產生觸發運動，電壓越高能使閉合速率加快。長時間外加電位差刺激時，閉合會產生延遲現象，刺激時間越長閉合反應越慢，恢復時間也會延長，並影響鄰近葉片的閉合速率。外加電位差刺激會使葉片從負極到正極閉合，具方向性，推測電子流可使細胞膜外產生電中和，導致去極化產生動作電位，並引發離子通道開啟，使葉枕細胞水分釋出葉片閉合；長時間刺激造成延遲現象可能與通道持續開啟讓膜電位無法恢復有關。我們發現靜電也會引起觸發運動，且與葉片距離遠近會造成不同的閉合情形，推測與葉枕細胞的電子分布改變有關。

壹、研究動機

我們在國一生物課學到，動物的神經訊號是利用電訊號的動作電位變化來傳遞，因此我們便思考植物會不會也是利用電訊號傳遞訊息，為此我們查詢了許多關於植物如何傳遞訊號的資料，發現有一些觸發運動或捕蟲運動的植物是利用電訊號傳遞來產生反應。由於動物的神經與肌肉細胞會因為外加的電訊號而產生動作反應，那麼植物的觸發運動是否也會有同樣的情形發生？因此我們便決定利用容易取得的含羞草來進行後續的探究。

貳、文獻探討

一、植物可利用電訊號傳遞訊息

1873年 Burdon-Sanderson 研究捕蠅草葉片發現植物動作電位的存在，後續有許多研究也證實植物動作電位普遍存在於被子植物中(文獻一)。後續 Bose 的研究團隊證實電訊號引起含羞草的觸發運動且可持續產生系統性的電訊號(文獻二)。

二、植物可透過離子通道傳遞電訊號

生物的細胞膜上，有特定的接受器和離子通道，而通道能使離子快速地順著電化學濃度梯度的方向穿透細胞膜並產生化學或電訊號(文獻三)，植物及動物的動作電位都是透過「電位閘控離子通道」來感應膜電位的改變而產生並傳播。

三、含羞草透過電訊號傳遞訊息並影響觸發運動

含羞草受到外部刺激後，葉片會依序閉合，且透過 9V 電訊號啟動膨壓作用影響觸發運動。同時發現含羞草觸發運動會因為連續相同程度的刺激而不敏感，在空氣中或土壤加入乙醚會使含羞草麻醉導致反應延遲或沒反應，而在 20-40K 流明的藍光下，葉片閉合後恢復的速率會變快(文獻四)。

四、含羞草透過鈣離子通道傳遞訊息

含羞草在被襲擊或被觸碰時，會透過鈣離子訊號傳遞受傷訊號，讓整片羽狀複葉快速閉合並下垂。研究團隊使用了鈣離子通道抑制劑觀察反應，且透過基因編輯技術改變含羞草的鈣離子通道基因，發現鈣離子通道改變會使含羞草對觸碰沒有閉合反應，且更容易受到草食性昆蟲的攻擊(文獻五)。此外，利用乙醚散佈在密閉空間中，並觸發捕蠅草的捕蟲運動，發現乙醚會抑制植物的觸發毛感覺器官讓其被觸碰時無反應，乙醚也會造成觸發引起的鈣離子訊號無法傳遞至整個植物，只會散發到附近的區域，並且對含羞草也有相同效果，同時發現細胞的膜電位變化會逐漸變小至無(文獻六)。

五、含羞草葉枕在閉合時動作電位及離子濃度的關係

含羞草是透過動作電位傳遞訊號來閉合，因此研究團隊測定閉合時含羞草葉枕內部的電位變化，並發現動作電位的產生是透過多種離子通道(鈣、氯、氫、鉀離子)快速流動使電位變化產生訊號，並推論在刺激時，細胞內的鉀和氯離子會流出，而鈣離子會從單寧液胞內流出，並且細胞膜外的鈣離子也會流入，他們認為電位差會進而使水通道開啟使水分釋出，但還沒找到銜接這兩個動作的訊號(文獻七)。

參、研究目的

在過去的研究中，以電訊號為變因對含羞草觸發運動的影響討論有限，因此我們想外加不同條件的外加電位差，觀察含羞草的觸發運動會有什麼變化，分別以下列項目進行實驗與討論：

- 一、比較不同葉齡的含羞草葉片之閉合所需時間與導電性(電阻)的差異。
- 二、探討能有效引起含羞草觸發運動的外加電位差強度。
- 三、觀察外加電位差刺激葉片不同部位後產生觸發運動的速率差異。
- 四、探討長期持續外加電位差能否造成含羞草觸發運動延遲。
- 五、探討長期持續外加電位差是否會影響鄰近葉片之觸發運動。
- 六、探討外加電位差的正、負極位置對含羞草葉片閉合方向的影響。
- 七、探討局部外加電位差對含羞草葉片閉合速率及方向是否有影響。
- 八、探討靜電可否引起含羞草之觸發運動。

肆、研究設備及器材

一、研究植物：

含羞草(學名：*Mimosa pudica*)，豆科含羞草屬多年生草本植物。受到物件觸碰、搖晃、加熱時，小葉會閉合接著葉柄下垂，以減少受害面積，稱為觸發運動 (seismonastic movement)。此運動原理是因含羞草葉柄和小葉柄基部都有一稱為葉枕的膨大囊狀構造；平常葉枕內的水分支撐著葉片，但是當受到外力刺激時，葉枕內的水分会立即流向別處，使含羞草的小葉閉合。此外葉片在晚上也會進行睡眠運動自動收縮(文獻八)。

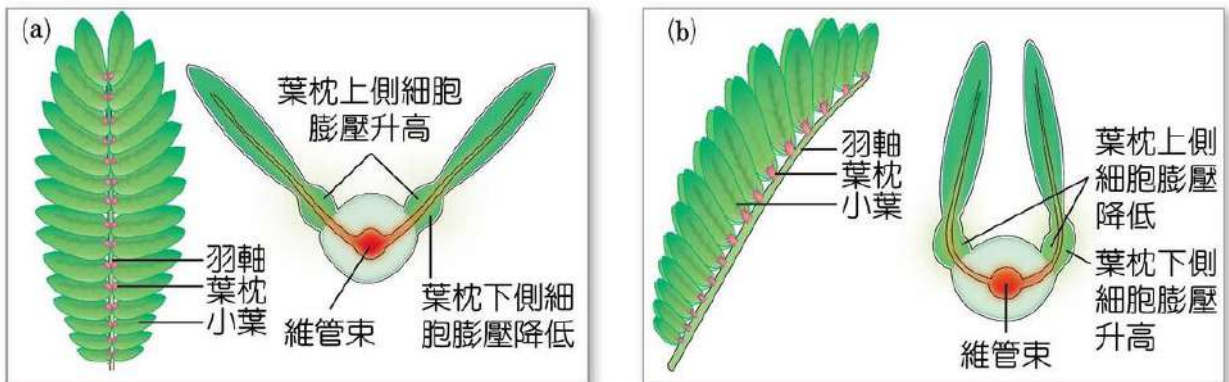


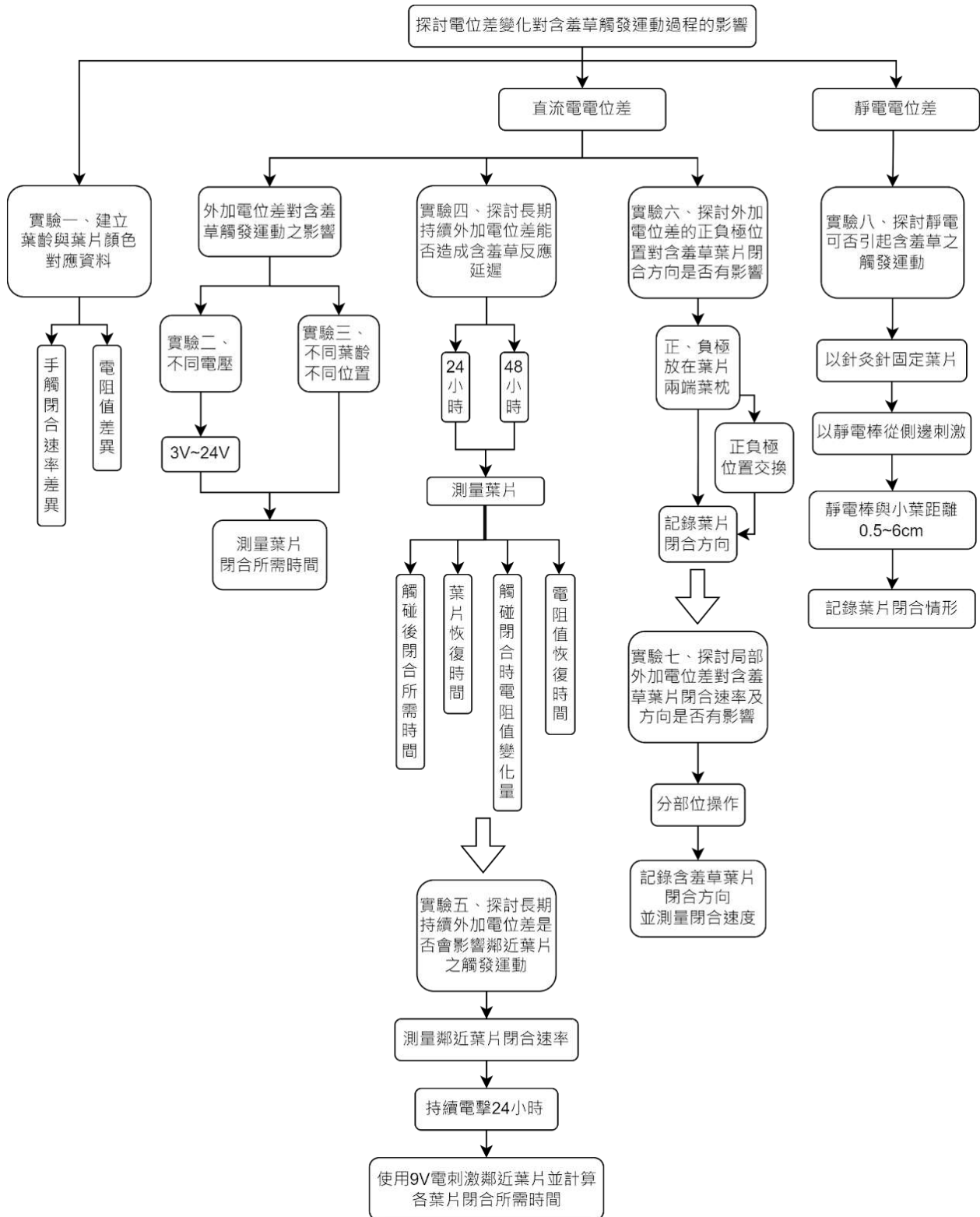
圖 4-1 含羞草膨壓運動示意圖(文獻十四)

二、研究器材：

直流電源供應器(可提供 1.5V-24V 電源)	三合一土壤檢測儀(可觀測土壤濕度、日照、pH 值，廠牌：VIVOSUN)
針灸針(規格：0.27*50mm)	計時器
注射針筒	手機(錄影)
離子導電膠(廠牌：AFIER，500ml/罐)	自製外加電位差支架
三用電表	靜電棒 Fly • Stick 

伍、研究過程或方法

一、實驗流程圖



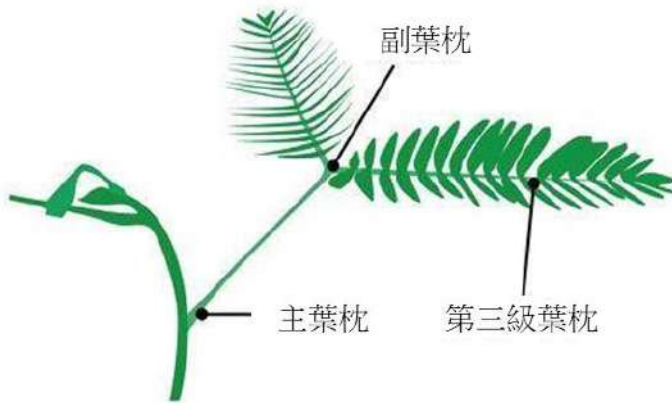


圖 5-1 葉枕定義(文獻二十)



圖 5-2 外加電位差位置

二、**實驗一** 比較不同葉齡的含羞草葉片之閉合所需時間與導電性（電阻）的差異

在含羞草上，我們觀察到葉片會有顏色深淺的不同，因此我們想探討葉片顏色變化的因素並觀察其觸發運動的速率和電阻值是否會有影響。

(一)實驗 1-1、葉齡與葉片顏色對應資料建立

- 1.選定新生葉片作為觀察對象，其他環境因素（如：光照、溼度）控制相同，每天用手機拍照記錄
- 2.比較不同天數葉片顏色，建立資料對照表

(二)實驗 1-2、葉齡對手觸葉片觸發運動之影響

- 1.挑選 15 天以上深色的成熟老葉及 1-9 天淺色的嫩葉
- 2.由同一人以相同姿勢手觸含羞草葉片，分別觸碰(1)葉片尖端(2)副葉枕(3)從尖端碰到副葉枕(4)從副葉枕碰到尖端
- 3.以手機進行錄影記錄葉片閉合過程
- 4.重複步驟 2.~ 步驟 3.，進行數次實驗
- 5.將錄影回放並以碼錶計時，記錄葉片閉合所需時間（秒/對）
（閉合所需時間定義：開始手觸葉片至葉片閉合完全所需的時間）

(三)實驗 1-3、葉片葉齡對電阻值影響

- 1.在同一葉片兩個相距 3 公分的葉枕上，塗抹導電凝膠
- 2.三用電表開啟至電阻 20MΩ 刻度，將探針接上針灸針並插進植物上的導電凝膠
- 3.待三用電表上電阻數值穩定後，以竹筷觸碰葉片使葉片閉合，並用手机全程錄影紀錄電阻值變化過程。

三、**實驗二** 外加不同電壓電位差對含羞草觸發運動之影響

由於動物的神經能感知到不同刺激大小的變化，因此我們想探討含羞草的閉合速率是否會因外加電位差的大小而有變化，以外加直流電不同電壓進行實驗。

- 1.將導電凝膠塗抹在含羞草葉片兩端的第三級葉枕上
- 2.用鱷魚夾夾住針灸針，接上電源，電壓分別設定為 3V、6V、9V、12V、15V、18V、21V、24V
- 3.將針灸針插進植物上的導電凝膠並等待數秒再開啟電源，防止抖動造成含羞草閉合
- 4.用手機錄影記錄葉片閉合過程
- 5.重複步驟 1.~步驟 4.，進行數次實驗
- 6.用碼表計算閉合反應所需時間，並換算為閉合所需時間（秒/對）（閉合所需時間定義：開啟電源時至閉合完全時）

四、**實驗三** 外加固定電壓電位差對含羞草葉片不同部位觸發運動之影響

含羞草的羽狀複葉上有許多葉枕，而葉枕是含羞草膨壓運動的重要角色，因此我們想觀察外加電位差不同位置對含羞草觸發運動的速率影響。

- 1.將導電凝膠塗抹在含羞草的葉枕上，分部位操作，以(1)第三級葉枕靠近尖端(+)--副葉枕(-) (2)第三級葉枕靠近尖端(+)--第三級葉枕靠近副葉枕(-) (3)葉片尖端(+)--副葉枕(-) (4)葉片尖端(+)--第三級葉枕靠近副葉枕(-) 四組分別進行實驗(如圖 5-2 所示)
- 2.用鱷魚夾夾住針灸針，接上電源，電壓固定為 9V
- 3.將針灸針插進植物上的導電凝膠(如圖 5-3 所示)
- 4.等待數秒再開啟電源，防止抖動造成含羞草閉合
- 5.用手機錄影記錄葉片閉合過程
- 6.正負極端位置交換，重複步驟 3.~步驟 5.
- 7.重複步驟 1.~ 步驟 6.，進行數次實驗
- 8.分析實驗影片，用碼錶計算各組閉合所需時間（秒/對）（閉合所需時間定義：開啟電源時至閉合完全時）



圖 5-3 電極(針灸針)位置圖



圖 5-4 實驗裝置圖

五、**實驗四** 探討長期持續外加電位差能否造成含羞草反應延遲

在動物的感官細胞中，會有受器疲勞的情況出現，而我們想探討長期外加電位差是否也會對含羞草達到類似的效果，為此我們測量葉片的閉合速率、電阻值變化及恢復時間。

1. 確認實驗組和對照組土壤濕度和 pH 值接近
2. 將導電凝膠塗抹在含羞草葉片兩端的葉枕上
3. 用支架上的鱷魚夾夾住針灸針，接上電源，電壓固定為 9V
4. 將支架調整成適當的高度，使針灸針插進含羞草上的導電凝膠裡(如圖 5-4 所示)
5. 開啟電源後觀察反應並記錄閉合所需時間(秒/對)及恢復時間
6. 分別持續外加電位差 24、48 小時
7. 時間到後關閉電源，觀察觸發運動反應並錄影記錄，紀錄
 - (1)手觸後閉合所需時間(秒/對)、(2)葉片恢復時間、(3)竹筷觸碰閉合時電阻值變化量
(在同一葉片兩個相距 3 公分的葉枕上，塗抹導電凝膠，測量電阻)、(4)電阻值恢復時間(說明：電阻值恢復時間為開始刺激時間-電阻值恢復至初始值時間)
8. 將實驗組、對照組植株交換，反覆進行實驗並比較數值。

六、**實驗五** 探討長期持續外加電位差是否會影響鄰近葉片之觸發運動

在實驗四中我們觀察到長期外加電位差會對葉片有反應遲緩的現象，而我們想觀察長期外加電位差時含羞草是否會像某些植物透過化學訊號或電訊號來警告其他葉片或植株。

1. 測量 A、B、C、D 葉片的閉合所需時間，A：長時間外加電位差刺激之葉片；B：同葉片不同小葉、一回復葉段落；C：同分支不同葉片、一回復葉段落；D：同株不同分支、一回復葉段落。

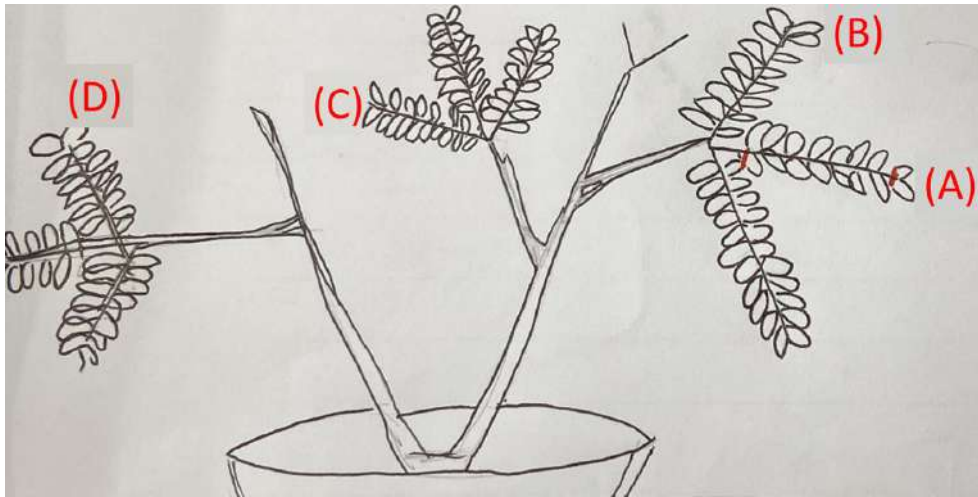


圖 5-5 鄰近葉片位置示意圖

- 2.將導電凝膠塗抹在 A 葉片兩端的葉枕上
- 3.用支架上的鱷魚夾夾住針灸針，接上電源，電壓固定為 9V
- 4.將支架調整成適當的高度
- 5.將支架上的針插進 A 葉片上的導電凝膠裡
- 6.持續外加電位差刺激 24 小時
- 7.時間到後關閉電源，使用 9V 外加電位差刺激 A、B、C、D 葉片並計算各葉片閉合所需時間，比較是否會受到影響
- 8.重複步驟 2.~步驟 7.，進行數次實驗

七、**實驗六** 探討外加電位差的正負極位置對含羞草葉片閉合方向是否有影響

在前面實驗中，我們觀察到含羞草葉片的閉合方向似乎會隨著外加電位差位置而有所差異，因此，我們設計實驗觀察外加電位差於不同位置和正負極方向改變對閉合方向之影響。

- 1.將導電凝膠塗抹在含羞草的葉枕上，分部位操作，以(1)第三級葉枕靠近尖端(+)--副葉枕(-) (2)第三級葉枕靠近尖端(+)--第三級葉枕靠近副葉枕(-) (3)葉片尖端(+)--副葉枕(-) (4)葉片尖端(+)--第三級葉枕靠近副葉枕(-) 四組組別進行實驗
- 2.用鱷魚夾夾住針灸針，接上電源
- 3.將針灸針插進植物上的導電凝膠
- 4.等待數秒再開啟電源，防止抖動造成含羞草閉合
- 5.錄影記錄含羞草葉片閉合方向
- 6.交換電極位置，重複步驟 3.~ 步驟 5.操作
- 7.重複步驟 1.~ 步驟 6.，進行數次實驗

八、**實驗七** 探討局部外加電位差對含羞草葉片閉合速率及方向是否有影響

動物的訊號傳遞，是利用神經細胞的電訊號，而之前的研究指出含羞草的閉合和許多離子的流動有關聯，因此我們想探討含羞草是否能和動物一樣有特殊構造能傳遞動作訊號，因此我們設計了只在局部葉片外加電位差刺激觀察含羞草的其他未受刺激複葉是否有閉合的現象和速率差異。

- 1.將導電凝膠塗抹在含羞草的葉枕上，分部位操作(如圖 5-6)，(1)第三級葉枕靠近尖端(+)--第三級葉枕靠近尖端 1/3 處(-) (2)第三級葉枕靠近尖端 1/3 處(+)--第三級葉枕靠近副葉枕 1/3 處(-) (3)第三級葉枕靠近副葉枕 1/3 處(+)--第三級葉枕靠近副葉枕(-)
- 2.用鱷魚夾夾住針灸針，接上電源，電壓固定為 9V
- 3.手拿針灸針插進植物上的導電凝膠
- 4.等待數秒再開啟電源，防止抖動造成含羞草閉合
- 5.用手機錄影記錄
- 6.記錄含羞草葉片閉合方向並計算各組閉合所需時間(秒/對) (閉合所需時間定義：開啟電源時至閉合完全時)
- 7.交換電極位置，重複步驟 3.~ 步驟 6.
- 8.重複步驟 1.~ 步驟 7.，進行數次實驗

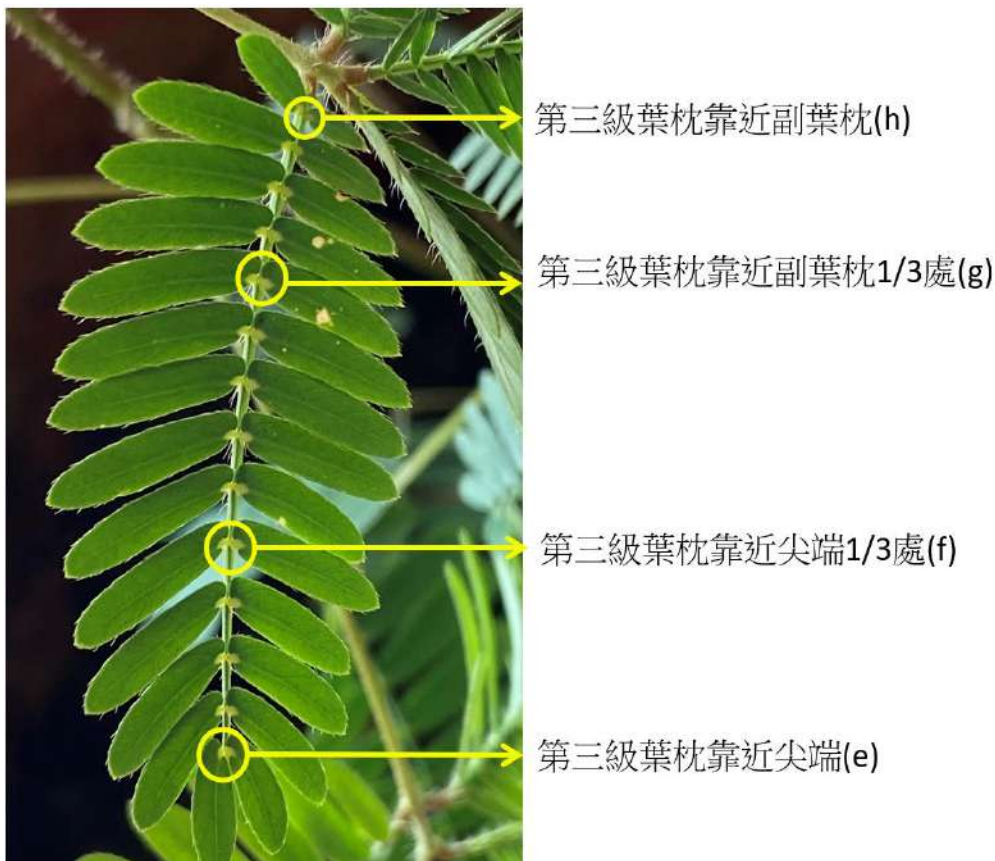


圖 5-6 外加電位差時電極位置圖

九、**實驗八** 探討靜電可否引起含羞草之觸發運動

在之前的實驗中，我們都是用直流電來製造電位差作為外加刺激，而感應式的電刺激是否也能引發植物有電位差的變化呢？我們查找文獻，發現過去研究中未曾提及此類型刺激的影響，我們便設計以靜電作為外加電位差的刺激，測試其對含羞草的反應是否有影響。

- 1.將針灸針置於葉片前後固定葉片，以免葉片受靜電影響被吸起，並避免葉片產生物理性動作
- 2.將靜電玩具 Fly • Stick 開啟產生靜電，並和葉片維持距離(0.5cm-6cm)，觀察是否因靜電感應而產生觸發運動(如圖 5-7)
- 3.用手機錄影記錄葉片閉合動作，而後進行分析
- 4.重複步驟 1.~ 步驟 3.，進行數次實驗








圖 5-7 實驗八之實驗裝置圖

一、**實驗一** 比較不同葉齡的含羞草葉片之閉合所需時間與導電性（電阻）的差異

(一)實驗 1-1、葉齡對葉片顏色深淺的影響

表 6-1 葉齡對葉片顏色深淺的影響

葉齡	Day1	Day4	Day10	Day15	Day22
葉片顏色					
R	155	135	106	101	96
G	208	196	159	140	113
B	121	88	65	85	36

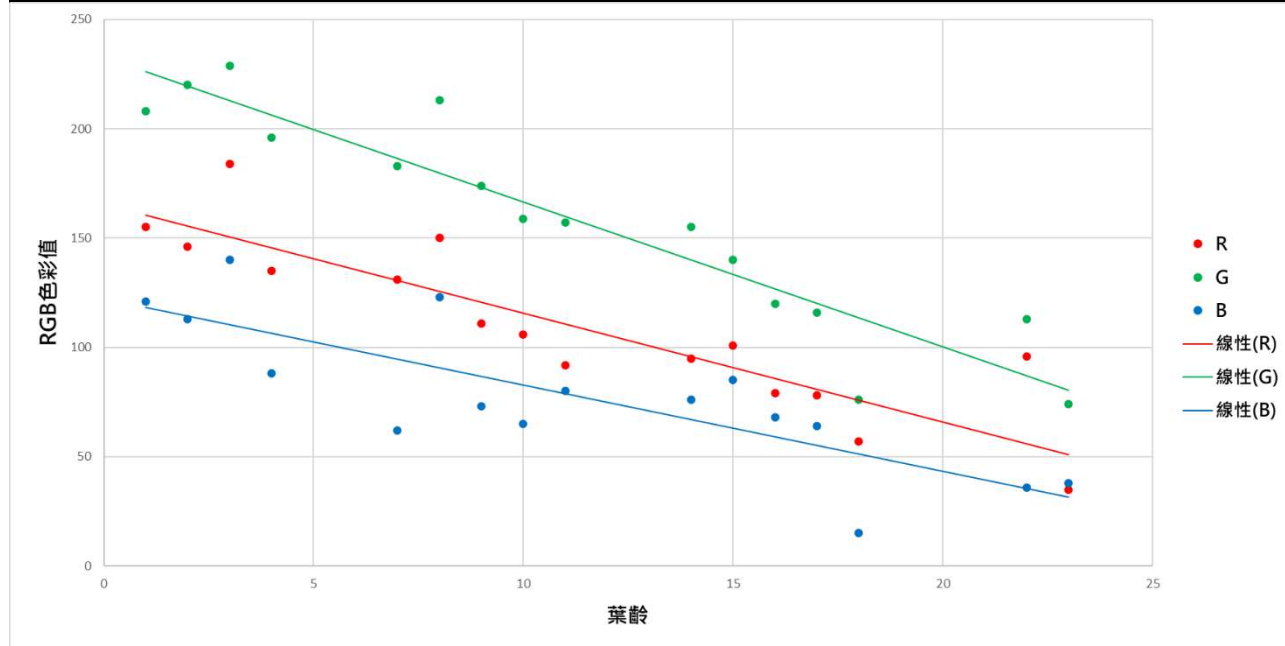


圖 6-1 葉片 RGB 色彩值與葉齡之趨勢圖

由表 6-1 和圖 6-1 可得知，葉片年齡越大，顏色就越深，且 RGB 之值皆會下降，因此在後續實驗中，我們採用 Day1~Day9，G170~250 定義為嫩葉，而 Day15 以上，G<150 則定義為老葉。

(二)實驗 1-2、葉齡對手觸碰反應速率的影響

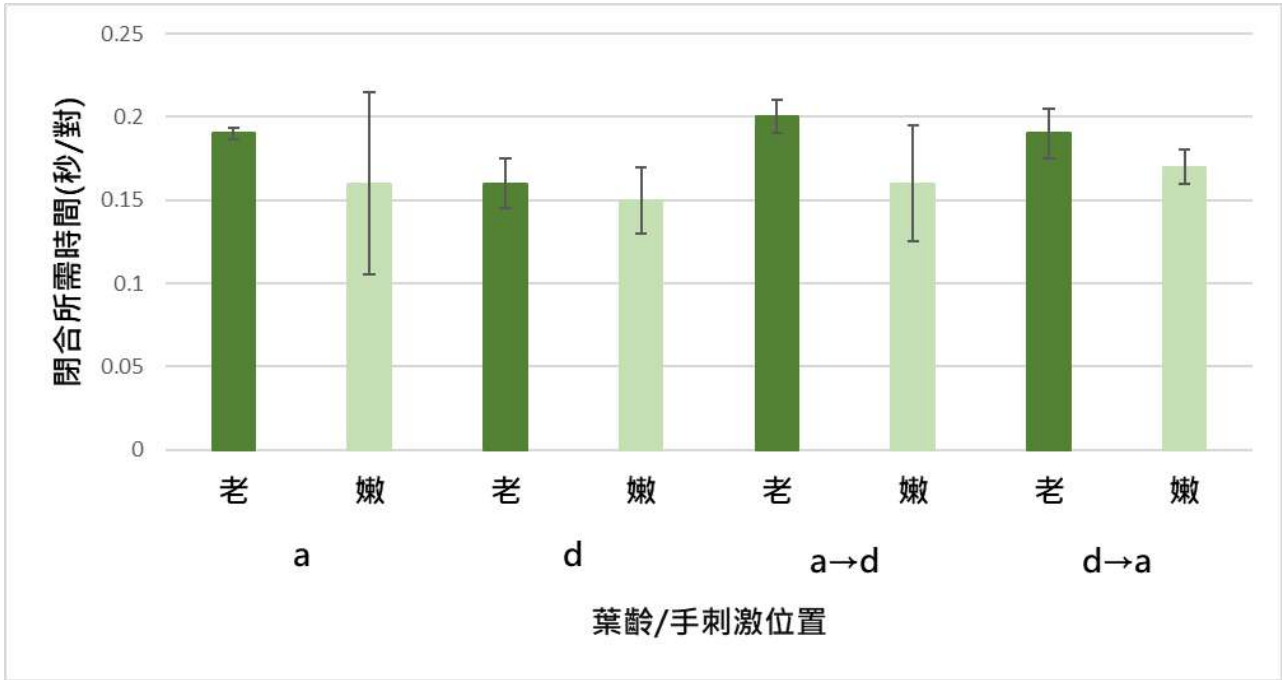


圖 6-2 手刺激對不同葉齡葉片閉合所需時間的影響

註：結果為三至四次實驗之統計值

圖表文字備註：a：葉片尖端；d：副葉枕

由圖 6-2 得知，以手碰觸含羞草葉片，老葉的閉合所需時間較嫩葉多。

(三)實驗 1-3、葉齡對電阻值之影響

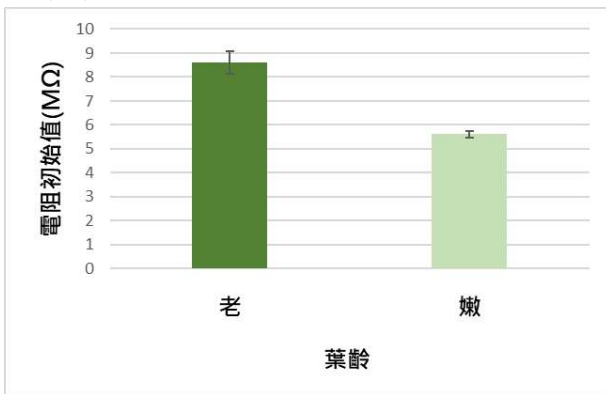


圖 6-3-1 葉齡對初始電阻值之影響

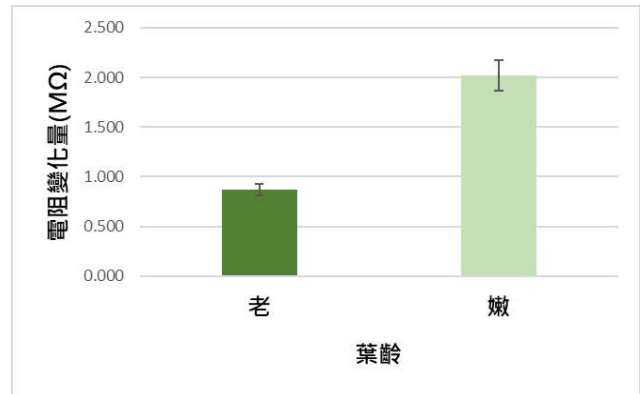


圖 6-3-2 葉齡對閉合前後電阻變化量影響

註：結果為五次實驗之統計值

由圖 6-3-1 得知嫩葉的初始電阻值較老葉小，使用竹筷觸碰葉片，閉合開始時電阻值會產生下降的情形，之後電阻值會緩慢上升至葉片打開。將初始電阻值減電阻最低值計算閉合前後電阻值變化量，由圖 6-3-2 可得知，嫩葉受到刺激後電阻的變化量會較老葉多。

二、**實驗二** 外加不同電壓電位差對含羞草觸發運動之影響

表 6-2 電壓大小對含羞草閉合所需時間之影響(電極位置：b(+)/c(-))

電壓	3V	6V	9V	12V	15V	18V	21V	24V
有無反應	無	無	有	有	有	有	有	有

註：結果為八次實驗之統計值。外加電位差位置為正極在第三級葉枕靠近尖端，負極在第三級葉枕靠近副葉枕。

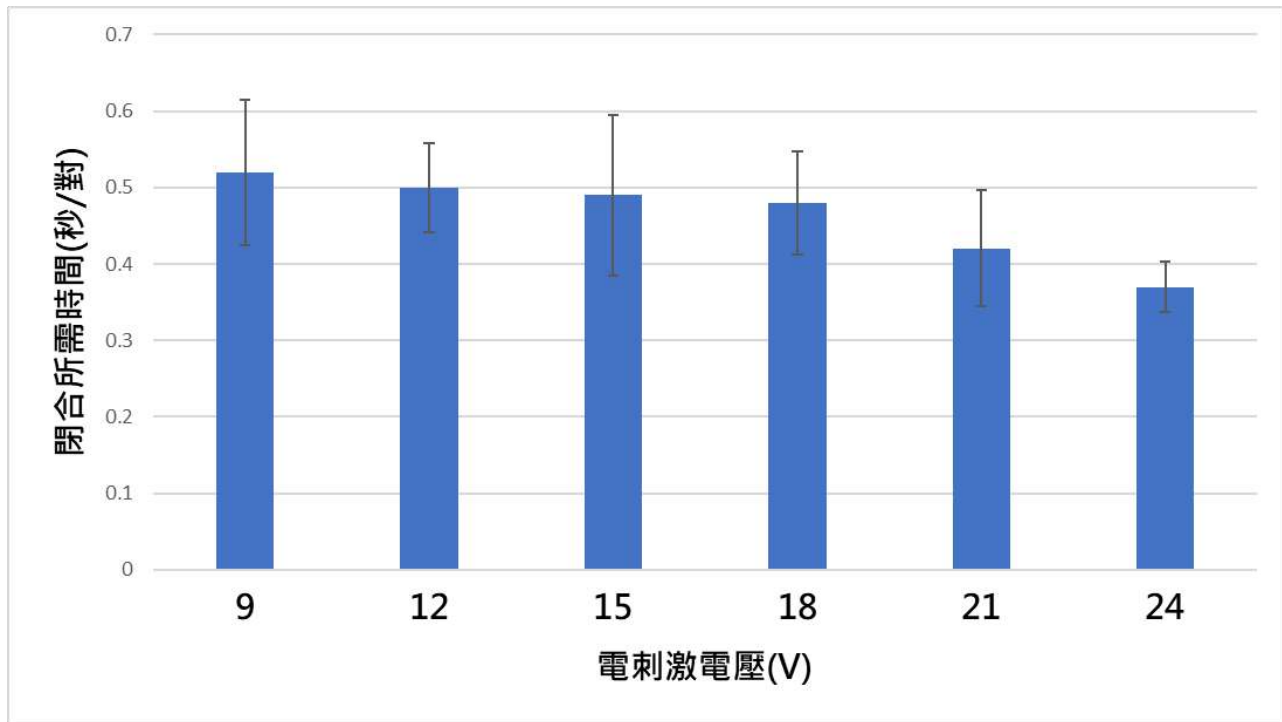


圖 6-4 電壓大小對閉合所需時間的影響

由圖 6-4 和表 6-2 得知，要使含羞草產生觸發運動大約需要 9V 以上的外加電位差刺激，且電壓越大，反應越快。

三、**實驗三** 外加固定電壓電位差刺激對含羞草葉片不同部位觸發運動之影響

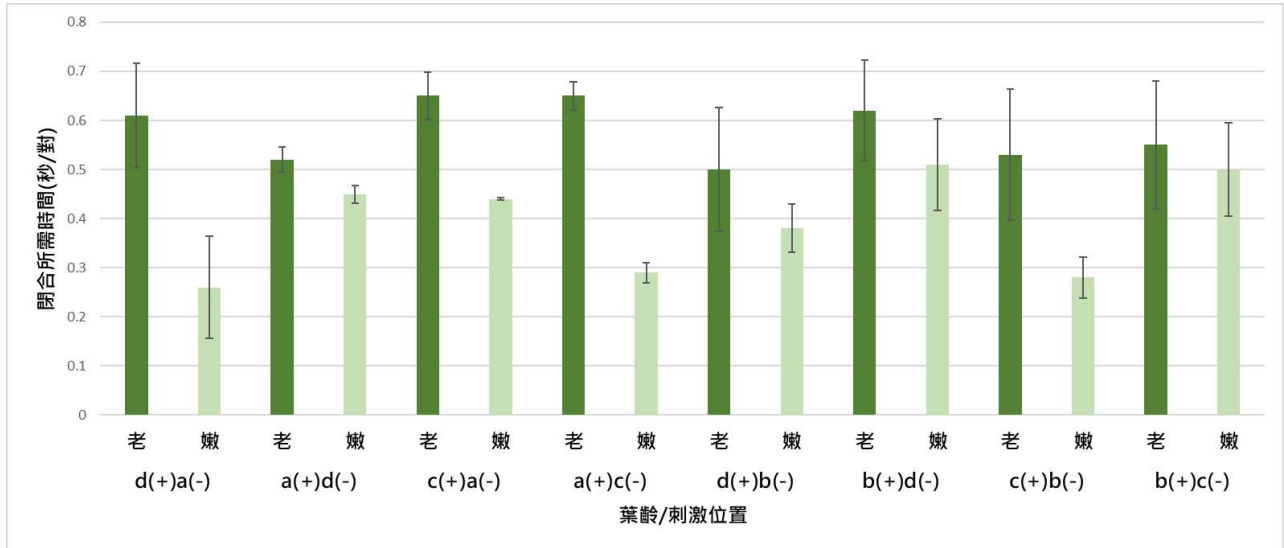


圖 6-5 外加固定電壓電位差刺激不同部位對閉合所需時間之影響

註：結果為八次實驗之平均值



圖表文字備註：
 a：葉片尖端；
 b：第三級葉枕靠近尖端；
 c：第三級葉枕靠近副葉枕；
 d：副葉枕。
 例：d(+)(-) = 正極在副葉枕，負極在葉片尖端

由圖 6-5 能得知，用外加電位差刺激嫩葉的閉合速率會比較快，而電極放置於不同位置對閉合速率沒有明顯趨勢。

四、**實驗四** 探討長期持續外加電位差能否造成含羞草反應延遲

(一)實驗 4-1、持續外加電位差對閉合所需時間之影響

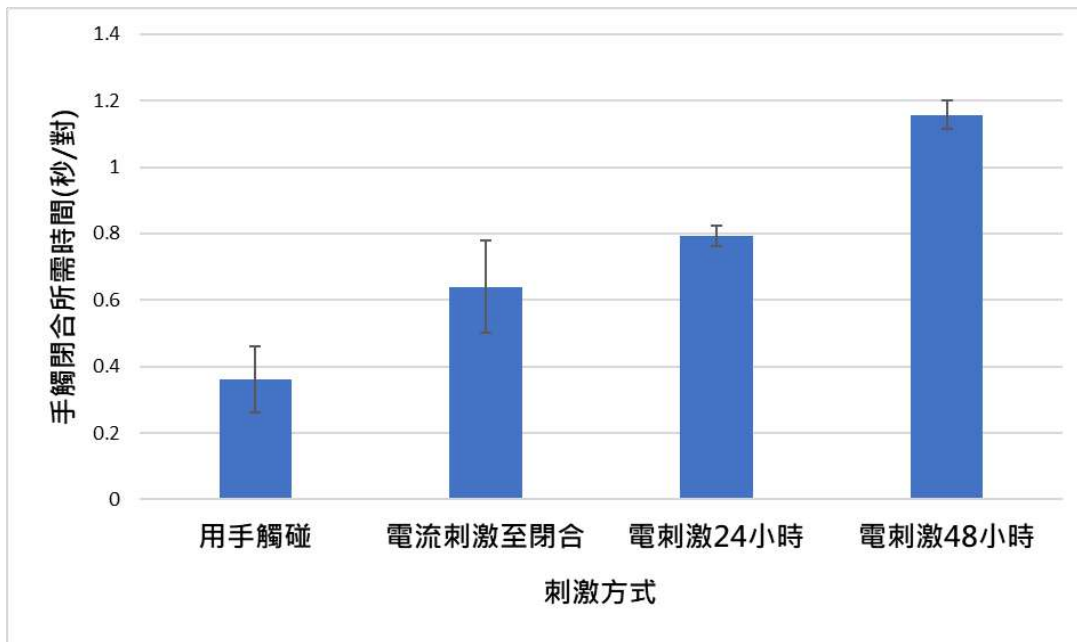


圖 6-6 持續外加電位差對葉片閉合所需時間的影響

註：結果為 3 次實驗之平均值

由圖 6-6 可知，含羞草在受 9V 外加電位差刺激一段時間後，閉合所需時間會變長，且刺激時間越長越明顯。

(二)實驗 4-2、持續外加電位差對葉片恢復時間之影響

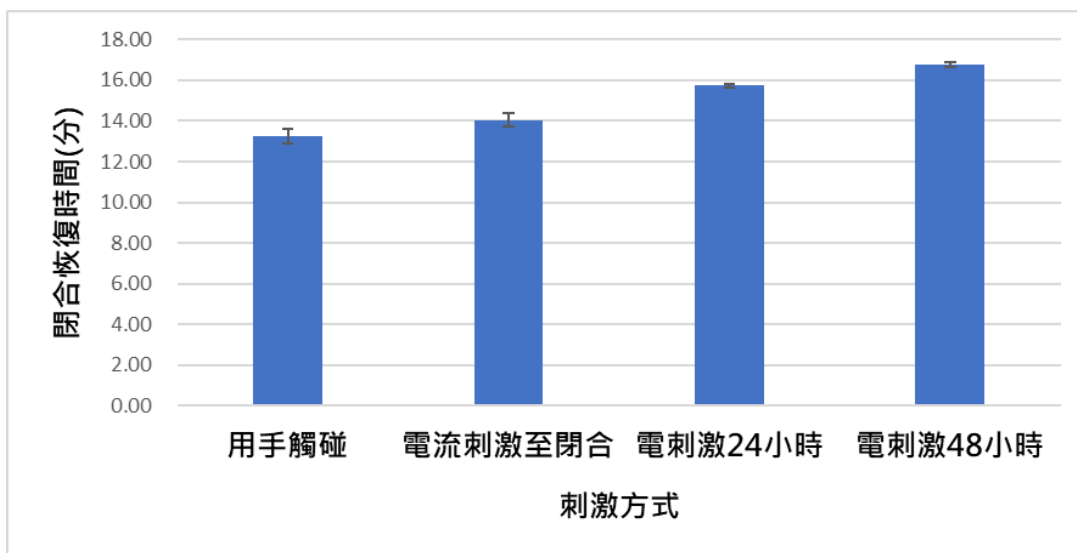


圖 6-7 持續外加電位差對葉片恢復時間的影響

註：結果為 3 次實驗之平均值

由圖 6-7 能得到，外加電位差刺激一段時間後，閉合恢復時間也會拉長，且會隨著刺激時間變長而更明顯。

(三)實驗 4-3、持續外加電位差對葉片電阻變化量之影響

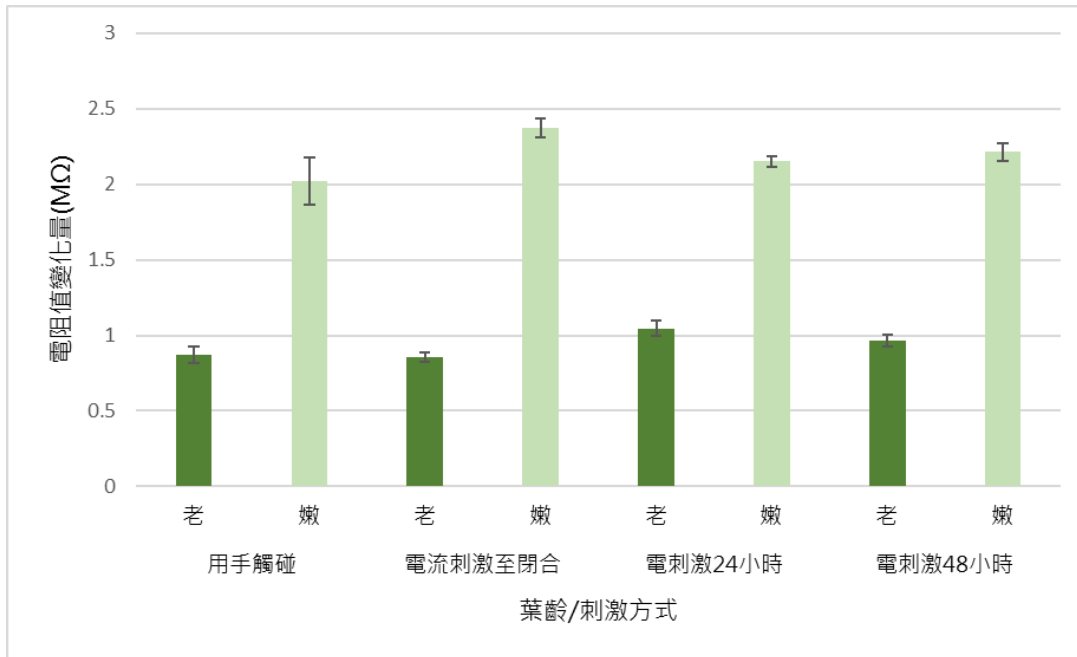


圖 6-8 持續外加電位差對電阻值變化量的影響

註：結果為 3 次實驗之平均值

在圖 6-8 可以觀察到，在長期外加電位差組與其他組電阻值變化量無明顯變化。

(四)實驗 4-4、持續外加電位差對葉片電阻恢復時間之影響

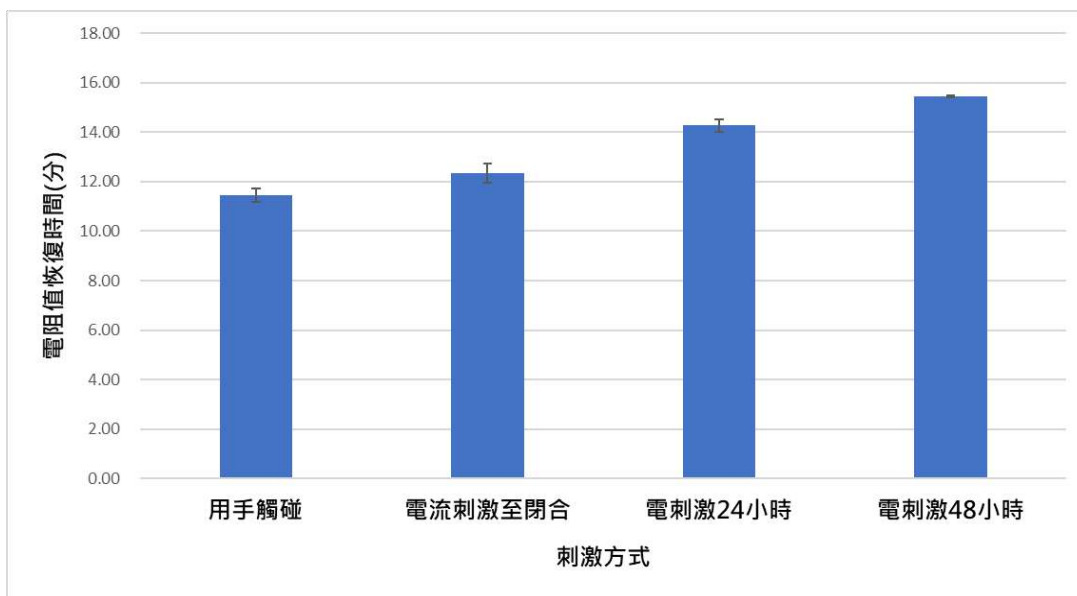


圖 6-9 持續外加電位差對葉片電阻恢復時間之影響

註：結果為 3 次實驗之平均值

在圖 6-9 能觀察到持續外加電位差會使電阻恢復時間變長。

五、**實驗五** 探討長期持續外加電位差是否會影響鄰近葉片之觸發運動

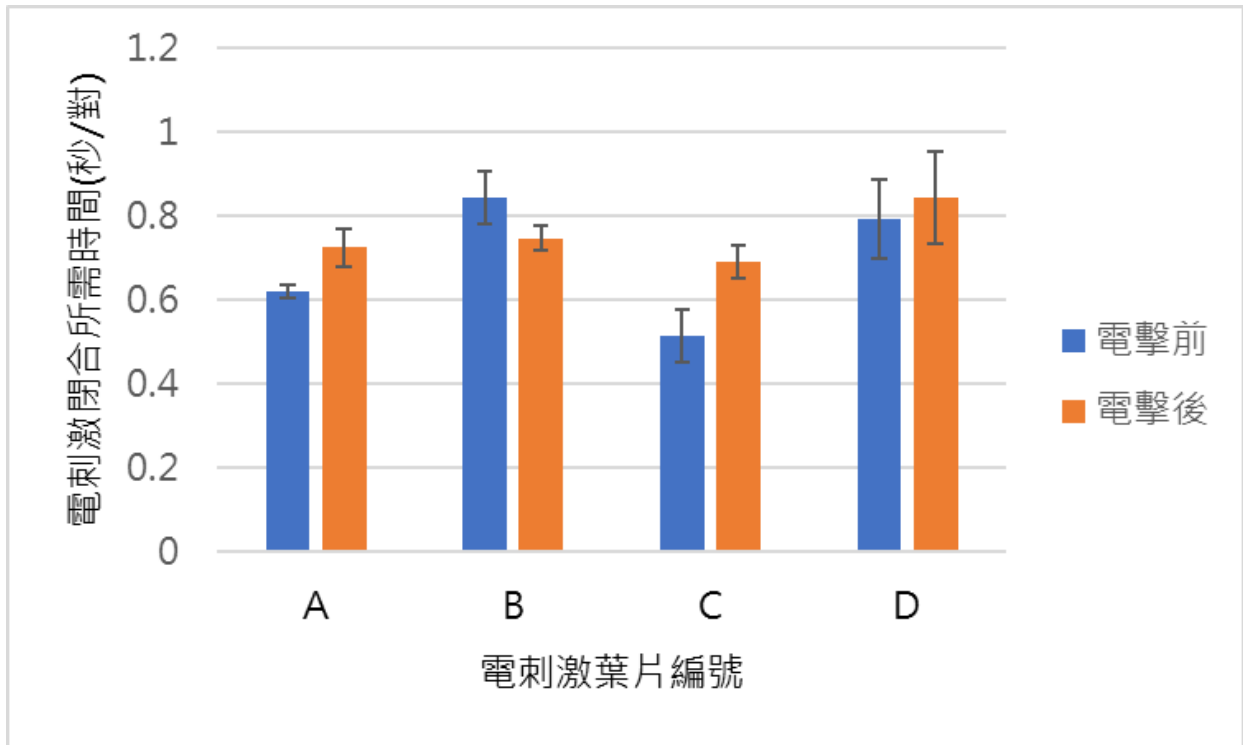
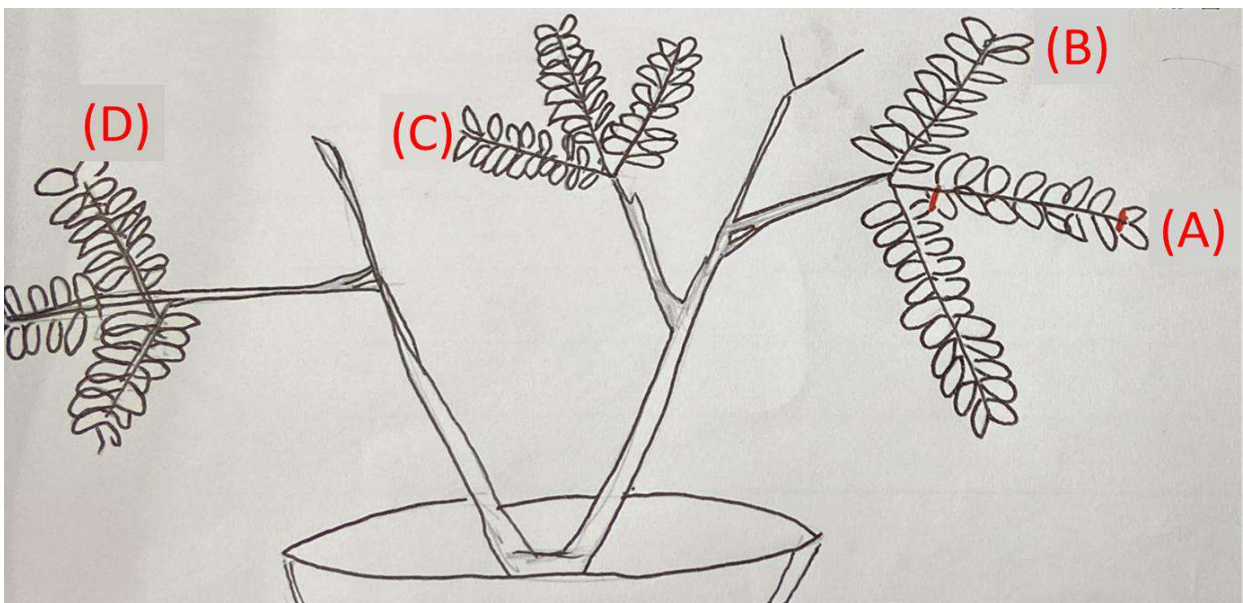


圖 6-10 持續外加電位差和鄰近葉片之閉合速率圖

註：結果為 3 次實驗之平均值



註：A：長時間外加電位差刺激之葉片；B：同葉片不同小葉、一回複葉段落；

C：同分支不同葉片、一回複葉段落；D：同株不同分支、一回複葉段落。

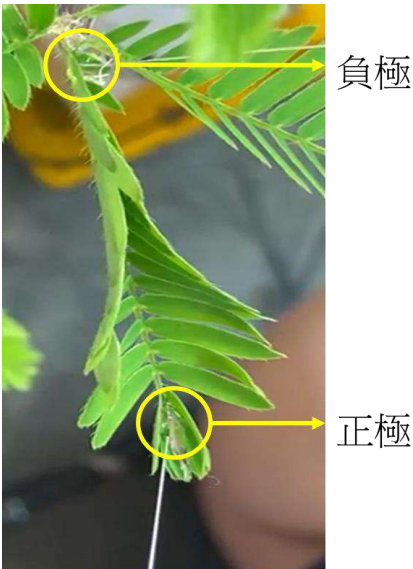
由圖 6-10 可得知，長期持續外加電位差刺激後，同葉片的小葉閉合速率會變快，而同分支和不同分支的其他葉片閉合速率無明顯趨勢。

六、**實驗六** 探討外加電位差的正負極位置對含羞草葉片閉合方向是否有影響

表 6-3 電極位置與閉合方向之關係

電極位置 (正極+負極)	b(+)/c(-)	c(+)/b(-)	d(+)/b(-)	b(+)/d(-)	d(+)/a(-)	a(+)/d(-)	c(+)/a(-)	a(+)/c(-)
閉合方向	c→b	b→c	b→d	d→b	a→d	d→a	a→c	c→a

註：結果為六次實驗之統計值



閉合方向:負到正

圖 6-11 外加電位差後葉片之閉合方向



圖表文字備註：

a：葉片尖端；

b：第三級葉枕靠近尖端；

c：第三級葉枕靠近副葉枕；

d：副葉枕。

例：d(+)/a(-) = 正極在副葉枕，負極在葉片尖端

由圖 6-11 和表 6-3 可知，不論電極位置如何，含羞草葉片閉合方向皆為負極到正極。

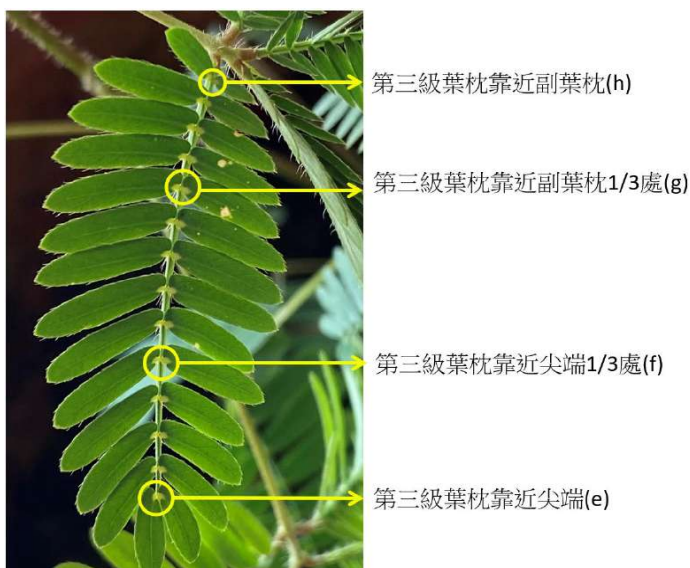
七、**實驗七** 探討局部外加電位差對含羞草葉片閉合速率及方向是否有影響

表 6-4 局部外加電刺激對葉片閉合速率和閉合方向

實驗葉片段落	電極位置(註)		葉片閉合方向	葉片閉合所需時間 (秒/對)
	正極	負極		
前 1/3 段	e	f	f→e	0.61
			f→h	0.81
	f	e	e→f	0.72
中 1/3 段	f	g	g→f	0.63
			g→h	0.62
	g	f	f→g	0.71
			f→e	0.67
後 1/3 段	g	h	h→g	0.61
	h	g	g→h	0.64
			g→e	0.59

註：1.結果皆為五次實驗之平均

2.每組實驗之定性結果皆一致



在表 6-4 中能發現，局部外加電位差時葉片會由負極端開始由兩端閉合，並且到正極端時會停止，而速率方面沒有太大差異。

八、**實驗八** 探討靜電可否引起含羞草之觸發運動

表 6-5-1 嫩葉之靜電源和閉合結果之分析

靜電源和葉片距離	0.5cm		1cm		2cm	3cm	4cm		5cm		6cm
閉合情形	甲	乙	甲	乙	甲	乙	乙	丁	乙	丁	丁
頻率 (次/10 次)	2	8	3	7	10	10	8	2	1	9	10

表 6-5-2 老葉之靜電源和閉合結果之分析

靜電源和葉片距離	0.5cm		1cm		2cm	3cm	4cm		5cm		6cm
閉合情形	甲	丙	甲	丙	甲	乙	乙	丁	乙	丁	丁
頻率 (次/10 次)	2	8	5	5	10	10	8	2	2	8	10

備註:

閉合情況代號	甲	乙	丙	丁
閉合情況說明	全閉	只閉靠近靜電源的 一半	先閉靠近靜電源的 一半，再閉另 一半	無反應
示意圖				

在表 6-5-1 和表 6-5-2 中能發現，靜電源刺激至少需要距離 5cm 以內含羞草葉片才有閉合反應，距離 3-4cm 時會只閉合靠近靜電源的半；距離 2cm 時會兩邊同時閉合；而在距離 0.5cm 時嫩葉會只閉靠近的一半，老葉則會先閉合靠近的一半，再閉另一半。

陸、討論

一、葉齡對含羞草閉合所需時間、電阻、顏色的影響

我們在建立葉齡與葉片顏色 RGB 對照圖時，觀察到幾個結果：(1)含羞草的葉片顏色會隨著葉齡增大而變深；(2)隨著葉齡上升，葉片顏色的 RGB 值也持續下降，因此可作為定義嫩老葉的標準；此外，(3)老葉在各部位的閉合所需時間皆比嫩葉長；(4)嫩葉的初始電阻值比老葉低，且受到刺激後的電阻變化值較大。綜合(1)~(4)，我們的推論是：含羞草在受到刺激時，細胞內外離子會流動產生電位差產生動作電位，其組織間細胞膜外的離子濃度瞬間變高，而嫩葉因為葉枕組織的含水量較高，因此葉枕導電度較好；而老葉因組織含水量較少所以初始導電度較差，導電度變化也較小。此外關於老葉閉合速率較慢，我們認為是細胞膜上的離子通道因老化反應較遲緩，或是老葉離子通道在刺激時開啟數目較少因此水分釋出較慢而產生的結果。

二、外加電位差對含羞草觸發運動影響

由文獻四中我們得知含羞草需要至少 9V 的外加電位差才能產生觸發運動，與我們的實驗結果一致，而用手觸碰的閉合速率又會比 9V 的外加電位差快，因此我們測試了更大電壓刺激下的閉合所需時間，發現閉合所需時間會隨著電壓增大變得更短。而根據文獻三，在動物的神經訊號機制中，能發現動物神經在受到更大的刺激時，神經細胞離子流動產生的膜電位變化產生的強度會較強，參考文獻四和文獻七的發現，推測是因刺激對含羞草傷害較大時，會發送受傷訊號(變異電位)，而受傷訊號傳遞速率會較一般刺激訊號快；又或許是電壓較大時電子流動對於細胞膜外帶電量的影響較大，在刺激前細胞膜外是帶正電，而電子大量流過會使細胞膜外電中和因此膜電位差較大，產生動作電位較強，因此反應比較強烈；而在動物的神經細胞中，是遵循了全有全無定律，因此我們推論含羞草可能沒有類似於動物神經細胞的構造，而是單純以細胞膜的去極化做閉合的動作。

三、外加固定電壓電位差刺激對含羞草葉片不同部位觸發運動之影響

我們測試了外加電位差在不同位置下對含羞草葉片閉合所需時間的影響，得知刺激葉片不同位置似乎對閉合速率沒有太大影響，接著我們測試了葉片顏色深淺(葉齡)會不會對閉合所需時間有影響，而根據圖 6-5 能得知葉片顏色深(葉齡大)的閉合所需時間會較淺色(葉齡小)長，我們推論可能是葉齡大的葉枕細胞在接受到動作電位時，其離子通道反應較慢，且通道受刺激時開啟數目較少，因此離子和水分流動較慢，膜電位動作訊號產生較慢，導致閉合速率較慢。

四、持續外加電位差造成含羞草觸發運動反應延遲

我們嘗試持續電流刺激一段時間後測試含羞草的反應，結果是閉合速率會下降，並且葉片閉合後的恢復時間和電阻的恢復時間也會變長。我們推論長期外加電位差對含羞草來說是持續電子流動的刺激，因此造成反應延遲和恢復時間拉長的現象。為此，我們測量了葉片在長期外加電位差後的電阻，結果我們觀察到長期外加電位差前後電阻變化量其實沒有明顯差異，也觀察到在長期外加電位差時葉片仍會開啟。參考動物的神經訊號傳遞，在動物的神經細胞中，是透過細胞幫浦製造細胞膜內外鈉鉀離子濃度差，因此內外的帶電量不同，細胞膜內是帶負電，而細胞膜外是帶正電，透過開啟離子通道時離子流動所攜帶的電荷製造動作電訊號來傳遞訊號；我們推測在此實驗中，含羞草和動物相似，在長期外加電位差時，由於電子持續流動而使細胞膜外正電被中和，而動作訊號是透過細胞內外電位差來驅動，因此電位差小訊號就較弱，或者是離子通道持續開啟，使膜內外離子濃度差難以回復，膜電位差不易恢復導致動作電位產生的訊號較弱，進而觀察到閉合反應延遲和恢復時間變長的現象。

五、長期持續外加電位差是否會影響鄰近葉片之觸發運動

在文獻七中，研究團隊得知刺激含羞草葉片時，變異電位的傳播會伴隨著透過維管束傳遞的非電訊號（可能為化學訊號），但目前還沒有關於這種訊號傳導的機制和影響的研究。而在實驗五中，我們觀察長期外加電位差時，鄰近葉片的反應會較快，推論是含羞草會把長期電刺激視為傷害性刺激，因此會對鄰近葉片發送訊號來警告其他葉片，但在距離較遠的葉片中無觀察到明顯趨勢。

六、外加電位差的正負極位置對含羞草葉片閉合方向的影響

在實驗六的結果，我們觀察到了含羞草受到外加電位差的閉合順序，都是從負極的位置到正極的位置。我們推測可能與通電時電子流動的方向有關係，電子流動的方向是由負極到正極，而根據文獻三，我們能知道動物的神經細胞在受到外加電位差時，細胞膜上的離子通道會開啟，導致離子快速流動使細胞膜產生動作電位訊號。我們推測外加電位差刺激含羞草產生的觸發運動與此原理類似，可能也是外加電位差時電子流動中和了細胞膜表面的正電，因此產生動作電位和離子流動，導致葉片產生膨壓運動。所以葉片在受外加電位差刺激時由負極的位置開始受到電子流刺激，使葉片一路從負極閉合到正極。

七、探討局部外加電位差對含羞草葉片閉合速率及方向是否有影響

在實驗七的結果中，能觀察到含羞草的羽狀複葉在受局部外加電位差時會由負極端開始閉合，而和實驗六不同的是，當閉合到正極後就會停止，正極後方的葉片不會閉合，而我們推論會有以上結果是因為通電時電子由負極開始往兩端流動，因此有電子流動的地方就會產生電位差導致一系列的離子流動變化和細胞膜的去極化，但電子流動到正極後會順著正極形成電迴路，因此在正極後面沒有電子流動所以不會閉合，並且電子在兩個流動方向的閉合速率沒有太大差異。

八、探討靜電可否引起含羞草之觸發運動

在實驗八的結果中，我們發現靜電源至少要距離葉片 5cm 以內才會讓含羞草葉片有反應。而含羞草葉枕細胞的表面和其他動物細胞一樣有電位差，表面是帶正電，當靜電源靠近時，我們推測電子會被帶正電的靜電源吸引而流動，如此可能會中和細胞膜表面電性，導致細胞膜表面產生去極化現象，因此產生動作電位導致一連串的離子流動和水分釋出。我們將推論靜電源靠近時電子的移動情形表示如下圖：在距離 3-4cm 時，只有靠近端的葉枕細胞因電子分布較多，因而和細胞膜外側的正離子產生電中和的情況，近似去極化現象的產生而引發動作電位，因此只有半邊的葉片產生閉合；在距離 2cm 時，由於兩側的葉枕細胞膜表面的電子分布數量皆提高，因此兩邊會幾乎同時閉合；在 1cm 時由於介於 0.5cm 和 2cm 之間，結果嫩葉大部分的是閉一半，有一小部分是全部同時閉合，而老葉全閉和先閉一半再閉遠端的一半各占一半；最後在距離 0.5cm 時，由於靜電源將離的較遠的葉片電子吸引至近端，嫩葉的遠端葉枕細胞因電子較少，故不會引發觸發運動，只有近端葉枕細胞可能因產生電中和現象而發生閉合。而老葉的反應與嫩葉不同，推測可能是整體含水量較低，電子受到感應時的移動與分布沒有嫩葉的變動快速，且老葉葉枕細胞膜表面含有較多水通道，故仍會引發閉合反應，只是會延遲。

整合以上討論內容，我們的推測模型如下圖 7-1 所示：

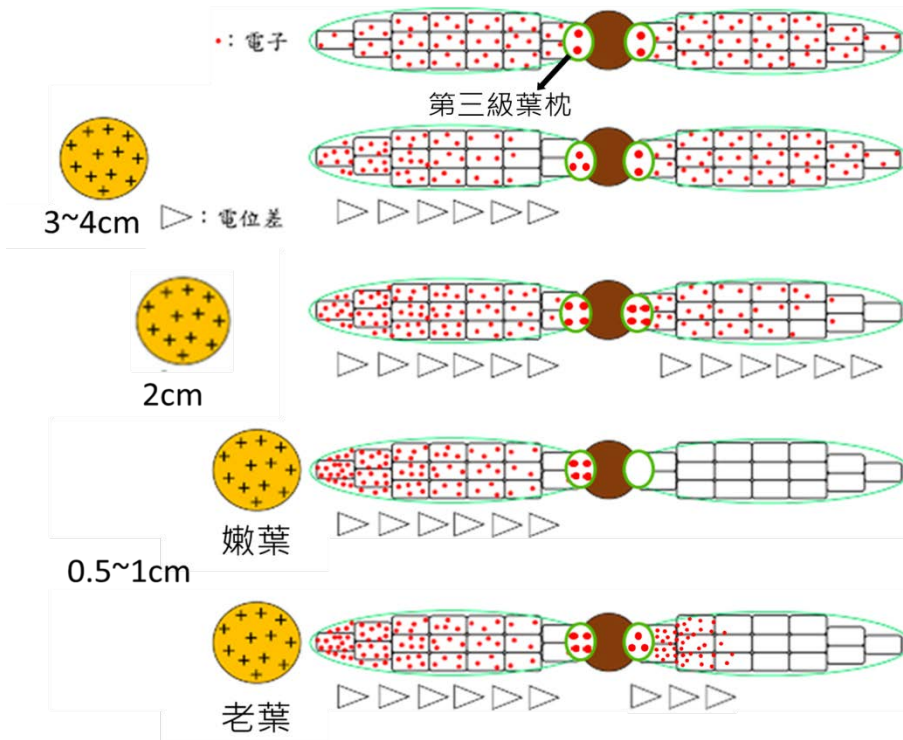
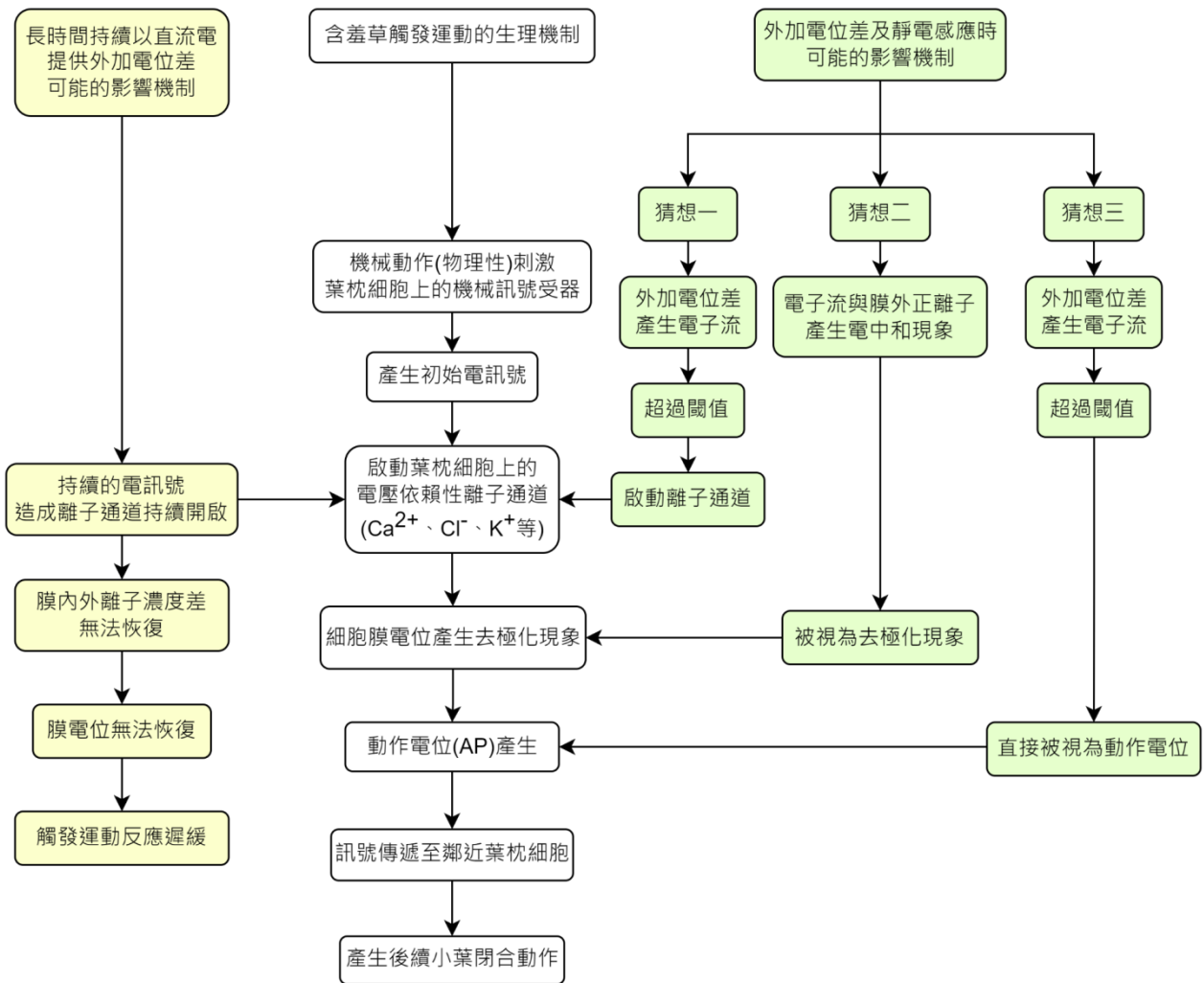


圖 7-1 靜電源靠近不同距離時葉片電子分布推論圖

九、總結以上，關於外加電訊號如何影響含羞草的觸發運動，我們推論出一個可能的生理機制流程：



柒、結論

- 一、葉片年齡大會使葉片顏色較深，且老葉的閉合前後電阻的初始值會較高，閉合速率較慢，電阻變化也較少，推測是因葉片含水量較少所致。
- 二、外加電位差使含羞草產生觸發運動需要 9V 以上，且電壓越高反應越快，推測是因大量電子流動時使細胞膜外電中和導致去極化現象產生動作電位較強，不遵循全有全無定律。
- 三、外加電位差刺激葉齡小的有反應較快的現象，推測是因葉齡大的葉枕細胞之離子通道對電訊號的反應較慢，因此動作電位產生較慢。
- 四、在長時間外加電位差刺激的環境下，含羞草會產生反應延遲的現象，且刺激時間越長反應越慢，推測是持續外加電位差使細胞膜內外無法製造電位差使動作電位弱。
- 五、長時間外加電位差時，鄰近葉片的反應會較快，推測是因有類似傷害訊號來傳遞警告訊號，而較遠的葉片則沒有明顯反應。
- 六、含羞草在受到直流電外加電位差刺激時，閉合方向會固定從負極到正極，推測是因為電子流動方向是由負極到正極，而電子流動使細胞膜表面的正電產生電中和現象，引發去極化及後續作用，使水分釋出產生觸發運動。
- 七、局部外加電位差時，葉片會由負極端往兩端閉合，並且只會閉到正極端，推測是因電子由負極往兩端流動，並且流動到正極端時電子流回電迴路。
- 八、靜電源在距離含羞草葉片 5cm 內能引起觸發運動，且其與葉片距離遠近會造成含羞草葉片有不同的閉合情形；近距離靠近時，不同葉齡的葉片對靜電刺激的反應不同。推測葉片上的電子受到感應時的移動與分布，會影響動作電位的產生，進而使水分釋出產生觸發運動，而不同葉齡葉片的含水量可能會影響電子受感應時的移動速率及葉枕膨壓變化。

捌、參考資料及其他

- 一、Sanderson, B., 1873. Note on the electrical phenomena which accompany stimulation of the leaf of *Dionea muscipula*. Proc. Roy. Soc., 495-496
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspl.1872.0092>
- 二、Bose, J. C., 1926. The nervous mechanism of plants. Longman, Green & Co.
<https://www.nature.com/articles/118654a0>
- 三、王瀚穎／台灣大學動物學研究所博士(民 102 年) 窺探動作電位的離子通道基礎
<https://www.scimonth.com.tw/archives/5849>
- 四、蕭佑安、賴禹圳、黃浩軒(民 108 年)中華民國第 59 屆全國中小學科學展覽會
『含羞草』植物也會算數?~探討含羞草觸發運動其訊息傳遞的奧秘
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-030315.pdf>
- 五、Takuma Hagihara, Hiroaki Mano, Tomohiro Miura, Mitsuyasu Hasebe(2022)Calcium-mediated rapid movements defend against herbivorous insects in *Mimosa pudica*.*Nature Communications* ,13, Article number: 6412 14 November 2022,from
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-34106-x>
- 六、Sönke Scherzer, Shouguang Huang, Anda Iosip, Ines Kreuzer, Ken Yokawa, Khaled A.S. Al-Rasheid, Manfred Heckmann & Rainer Hedrich(2022)Ether anesthetics prevents touch-induced trigger hair calcium-electrical signals excite the Venus flytrap,*Scientific Reports* 12, Article number: 2851 18 February 2022 from
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-06915-z>
- 七、Takuma Hagihara¹ and Masatsugu Toyota Mechanical Signaling in the Sensitive Plant *Mimosa pudica* L 4 May 2020
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7284940/>
- 八、含羞草-維基百科,自由的百科全書維基百科:含羞草觸發運動 取自
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%90%AB%E7%BE%9E%E8%8D%89>
- 九、電子流-翰林雲端學院 取自
<https://www.ehanlin.com.tw/app/keyword/%E5%9C%8B%E4%B8%AD/%E7%90%86%E5%8C%96/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E6%B5%81.html>
- 十、田弘康、張育蒲、潘宣任、鄭朝誠(民 95 年)中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
含羞草的避震效應
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/46/senior/0408/040804.pdf>

- 十一、林耕雍、李國昇(民 97 年)臺灣 2008 年國際科學展覽會
「從害羞到大方需要多少時間」(環境因子對含羞草開葉時間的影響)
<https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=106&a=6822&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=4&sid=3226>
- 十二、蔡佩穎、劉丞軒(民 101 年)中華民國第 52 屆全國中小學科學展覽會
不讓你睡~睡眠運動植物適應時差變化節奏之研究
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/030312.pdf>
- 十三、陳臆全(民 99 年)第九屆旺宏科學獎植物電療法-不同電壓下植物的生長情況
https://www.mxeduc.org.tw/scienceaward/history/projectDoc/9th/doc/SA9-184_final.pdf
- 十四、觸發運動與膨壓-生物科共同備課網
(原出處:國民中學自然科學備課用書(2022)。台北市:翰林出版)
<https://bioshchen.weebly.com/35320303323693921205332873319222739.html>
- 十五、羅中則、謝謹暄、王妍云、王妍樺、呂采蓓、黃薇珉(民 103 年)中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 淺眠與熟睡? 探討含羞草葉柄的睡眠律動
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/080315.pdf>
- 十六、含羞草中的信號轉導：生物閉合電路
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-3040.2009.02108.x>
- 十七、電信號及其在植物中的生理意義
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>
- 十八、Won-Gyu Choi, Richard Hilleary, Sarah J. Swanson, Su-Hwa Kim, and Simon Gilroy
March 17, 2016Rapid, Long-Distance Electrical and Calcium Signaling in Plants
https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-arplant-043015-112130?url_ver=Z39.88-2003&rft_id=ori%3Arid%3Acrossref.org&rft_dat=cr_pub++0pubmed
- 十九、Vladimir Sukhov, Ekaterina Sukhova, Vladimir Vodenev November 9, 2008
Long-distance electrical signals as a link between the local action of stressors and the systemic physiological responses in higher plants
https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-arplant-043015-112130?url_ver=Z39.88-2003&rft_id=ori%3Arid%3Acrossref.org&rft_dat=cr_pub++0pubmed
- 二十、含羞草扮頹廢：我唔好食㗎
<https://today.line.me/hk/v2/article/aY9yZ3>

【評語】 030319

優點：

本作品以含羞草作為實驗材料，從文獻回顧和實驗設計進行植物利用電訊號傳遞訊息之探討。和過往研究所不同的是首先以不同葉齡植株的反應切入，再以細膩具巧思的實驗設計從多項變因去探討電刺激對含羞草葉片閉合運動之影響。實驗設計相對完整，同時涵蓋不同葉齡、電壓和位置等因素，且詳細數據紀錄之結果支持研究。

建議及檢討：

1. 造成這些現象差異背後之原因僅能以推論敘明之，未針對可能的影響機制提出實驗設計加以釐清或證明。建議在實驗中探討所欲探討的議題或賦予其生存策略意義。這可以進一步提升研究的重要性和應用價值
2. 結果中的資料呈現以圖表資料為主體，在文字敘述部分宜描述相關重要數值資料，且說明組間差異的現象，而非平述性敘述，讓閱讀者自行由圖表中獲得資訊。

3. 建議在實驗中加入更深入的資料統計分析，以確定外加電位差變化對含羞草觸發運動的影響是否具有顯著差異，這可以增加研究結果的可信度和解釋性。

作品海報

探討電位差變化對

含羞草觸發運動過程的影響



前言

在生物課學到動物神經訊號是利用電訊號的動作電位變化來傳遞，我們便思考植物是否也是利用電訊號傳遞訊息？為此我們查詢資料後，發現有觸發運動或捕蟲運動的植物是利用電訊號傳遞來產生反應。由於動物的神經與肌肉細胞會因外加電訊號而產生反應，那麼植物的觸發運動是否也一樣？因此我們決定利用容易取得的含羞草來進行後續探究。

植物動作電位普遍存在於被子植物中，植物及動物的動作電位都是透過「電位閘控離子通道」來感應膜電位的改變而產生並傳播，含羞草即是透過動作電位傳遞訊號來閉合，研究團隊發現含羞草的動作電位產生是透過多種離子通道(鈣、氯、氫、鉀離子)快速流動使電位變化產生訊號，且認為電位差會使水通道開啟使水分釋出。

研究目的

- (一)比較不同葉齡的含羞草葉片之閉合所需時間與導電性(電阻)的差異。
- (二)探討能有效引起含羞草觸發運動的外加電位差強度。
- (三)觀察外加電位差刺激葉片不同部位後產生觸發運動的速率差異。
- (四)探討長期持續外加電位差能否造成含羞草觸發運動延遲。
- (五)探討長期持續外加電位差是否會影響鄰近葉片之觸發運動。
- (六)探討外加電位差的正、負極位置對含羞草葉片閉合方向的影響。
- (七)探討局部外加電位差對含羞草葉片閉合速率及方向是否有影響。
- (八)探討靜電可否引起含羞草之觸發運動。

研究設備器材

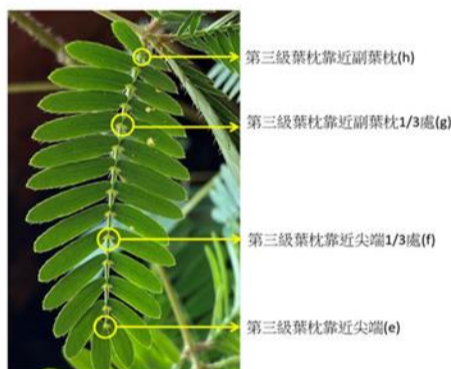
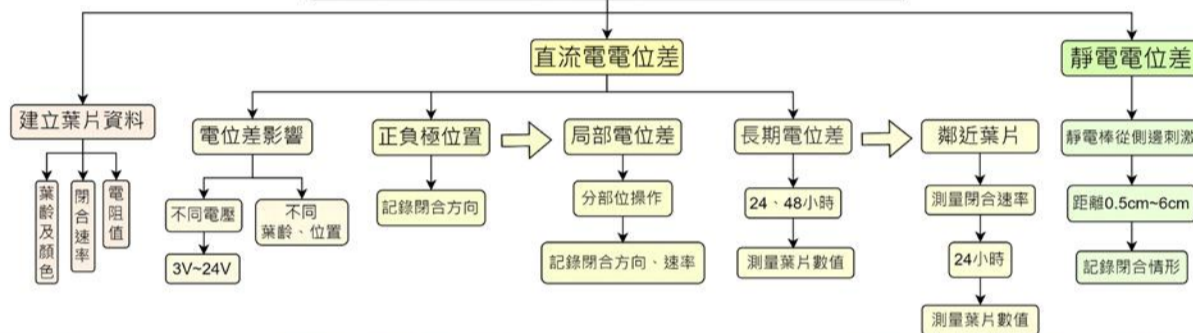
含羞草 <i>Mimosa pudica</i>	三合一土壤檢測儀(可觀測土壤濕度、日照、pH 值，廠牌：VIVOSUN)
直流電源供應器(可提供 1.5V-24V 的電壓)	針灸針(規格：0.25*50mm)
注射針筒	離子導電膠(廠牌：AFIER，500ml/罐)
靜電棒 Fly-Stick	三用電表
手機(錄影)	計時器



含羞草

研究過程與方法

探討電位差變化對含羞草觸發運動過程的影響



電刺激含羞草的位置圖



針灸針接上電源供應器，電刺激含羞草葉片。

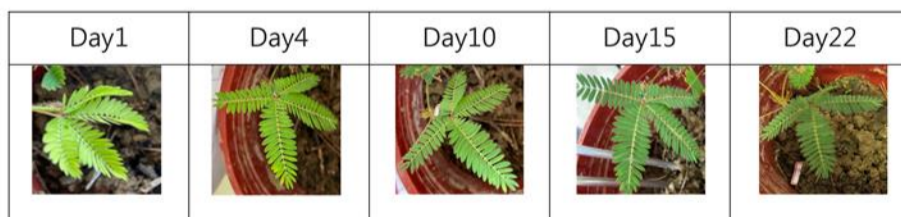
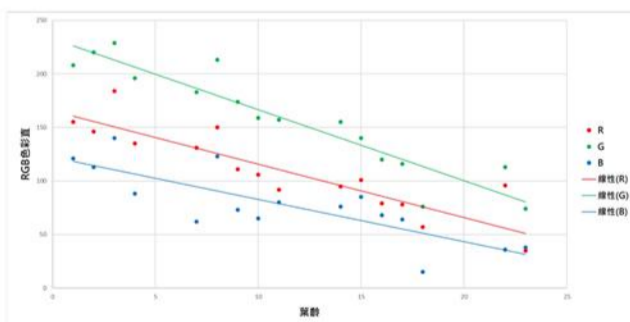


以靜電棒靠近含羞草

實驗結果

不同葉齡含羞草葉片的差異比較

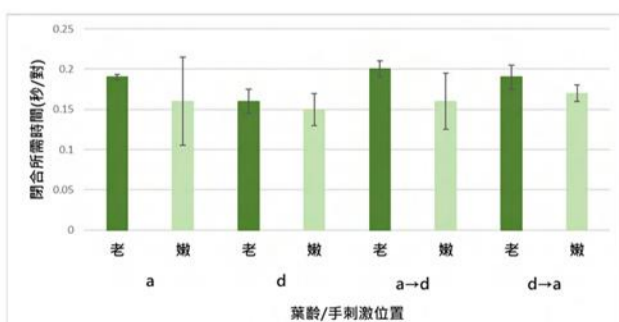
建立葉齡與葉片顏色對照表



葉齡越大，顏色越深，且 RGB 之值皆會下降。

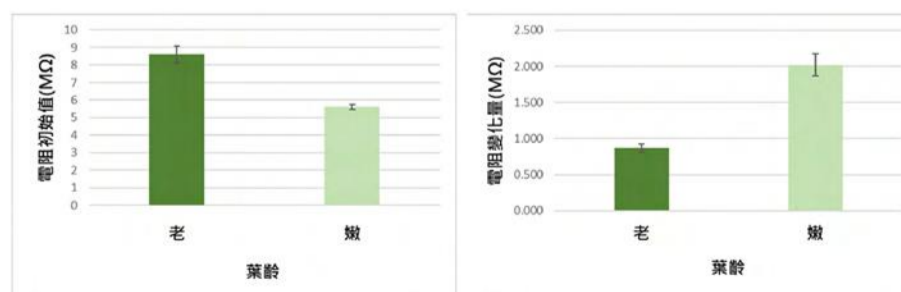
嫩老葉定義：
嫩葉 Day1~Day9 · G170~250；老葉 Day15~Day23 · G<150

葉齡對手觸碰反應速率之影響



碰觸含羞草葉片，老葉閉合所需時間較嫩葉多。

葉齡對電阻值之影響



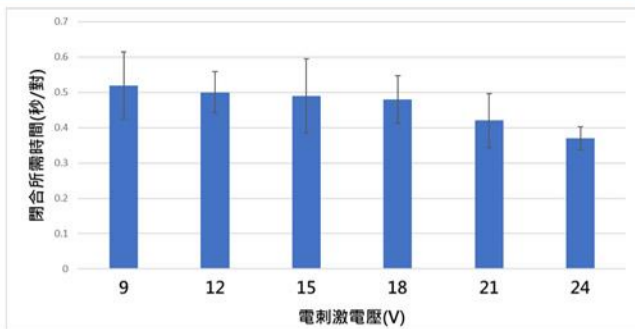
- (1)嫩葉的初始電阻值較老葉小。
- (2)嫩葉受到刺激後電阻的變化量會較老葉多。

含羞草受到外加電位差刺激時，細胞內外離子流動產生電位差後產生動作電位，細胞膜外離子濃度瞬間變高。

嫩葉因葉枕的含水量較高，因此葉枕導電度較好；老葉因葉枕含水量較少所以初始導電度較差，導電度變化也較小。

關於老葉閉合速率較慢，我們認為是細胞膜上離子通道老化反應較遲緩，或是老葉離子通道在刺激時開啟數目較少因此水分釋出較慢。

電壓大小對閉合速率的影響



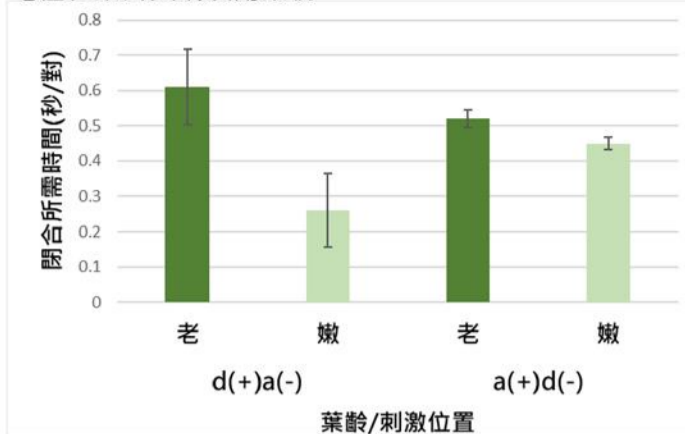
電壓	3V	6V	9V	12V	15V	18V	21V	24V
有無反應	無	無	有	有	有	有	有	有

9V 以上電刺激可產生觸發運動且電壓越大速度越快

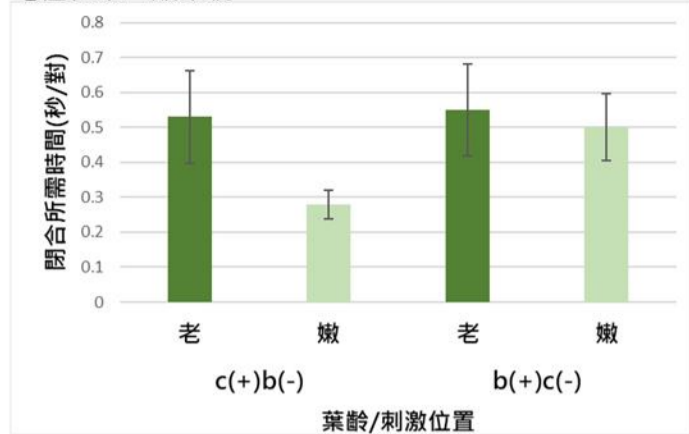
推測刺激對含羞草傷害較大時，會發送受傷訊號，而受傷訊號傳遞速率會較一般刺激訊號快。

電極在不同部位的閉合速率差異

電極在葉片尖端及副葉枕



電極在第三級葉枕



嫩葉的閉合速率較快，且電極放置於不同位置對閉合速率沒有明顯趨勢。

推測葉齡大的葉枕細胞在接受到動作電位時，其離子通道反應較慢，且通道開啟數目較少，因此離子和水分流動較慢，膜電位動作訊號產生較慢，導致閉合速率較慢。

正負極位置對閉合方向的影響

電極位置與閉合方向之關係

電極位置	b(+)/c(-)	c(+)/b(-)	d(+)/b(-)	b(+)/d(-)
閉合方向	c→b	b→c	b→d	d→b

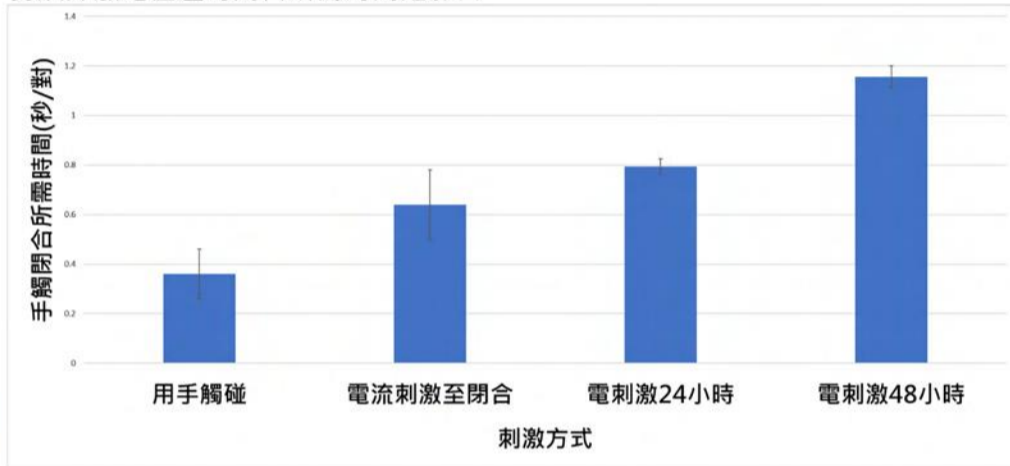
電極位置	d(+)/a(-)	a(+)/d(-)	c(+)/a(-)	a(+)/c(-)
閉合方向	a→d	d→a	a→c	c→a

不論電極位置如何，葉片閉合方向皆為負極到正極。

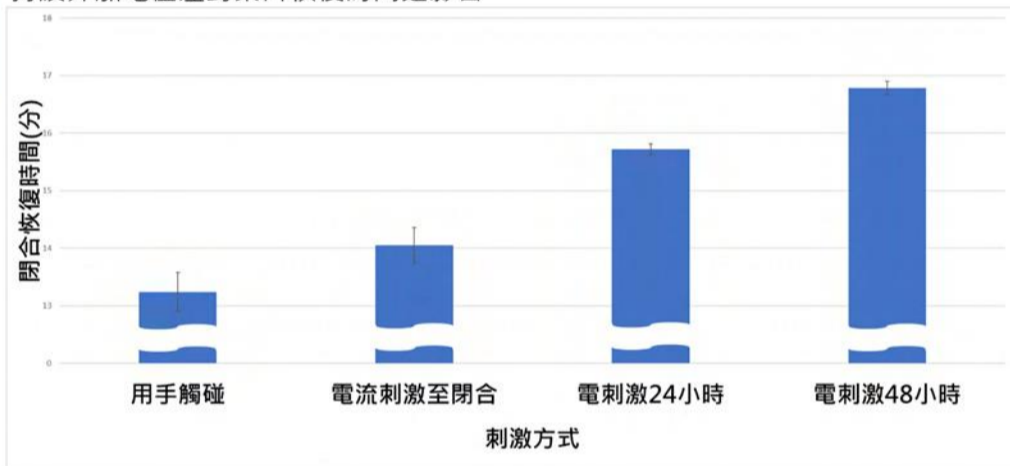
推測外加電位差刺激時電子流動中和了細胞膜表面的正電，因此產生動作電位以及離子流動，讓葉片產生膨壓運動。而受外加電位差時是由負極的位置開始受電子流刺激，使葉片會一路從負極閉合到正極。

長期電位差對恢復時間的影響

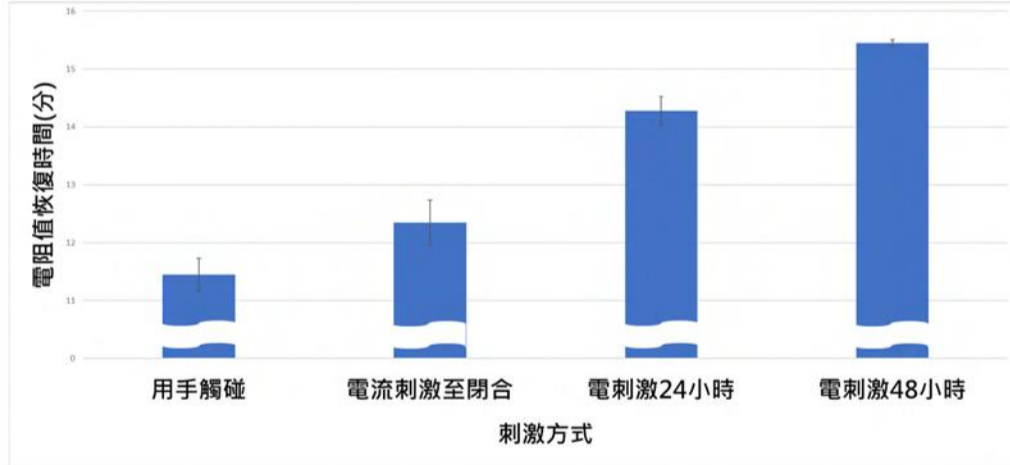
持續外加電位差對閉合所需時間之影響



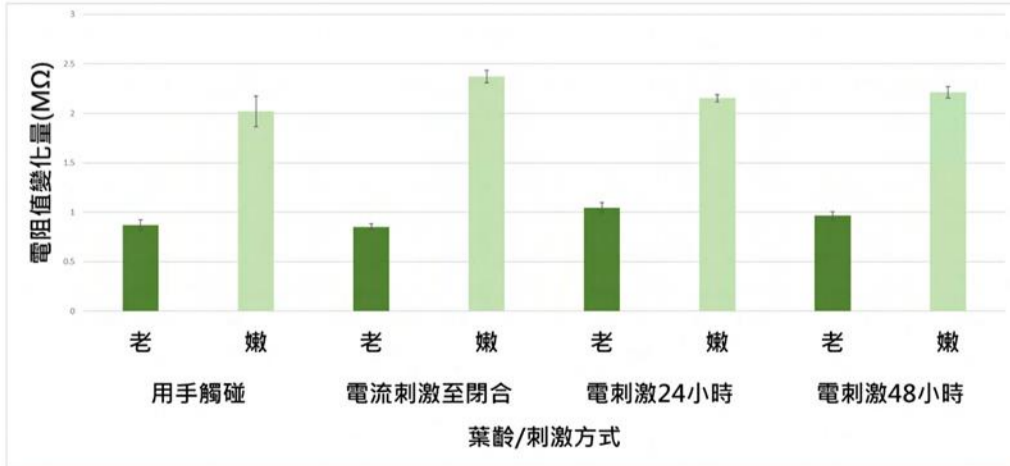
持續外加電位差對葉片恢復時間之影響



持續外加電位差對葉片電阻恢復時間之影響



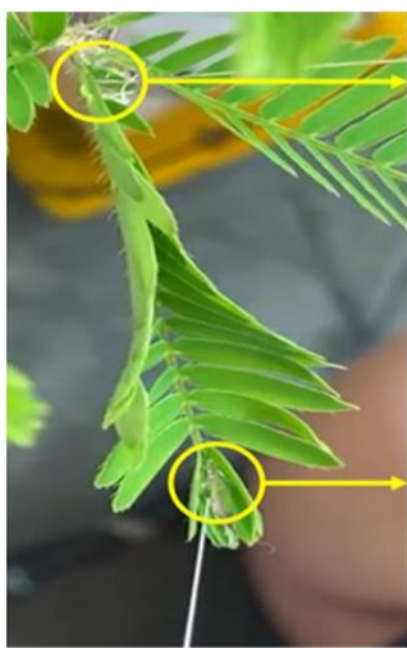
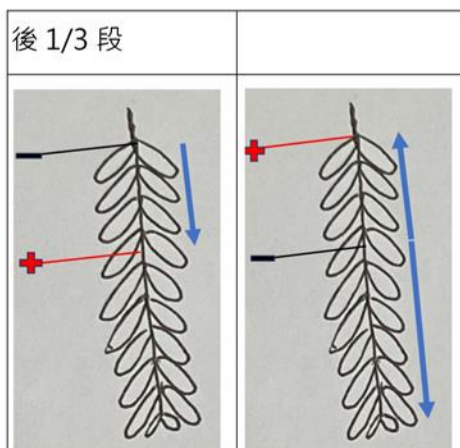
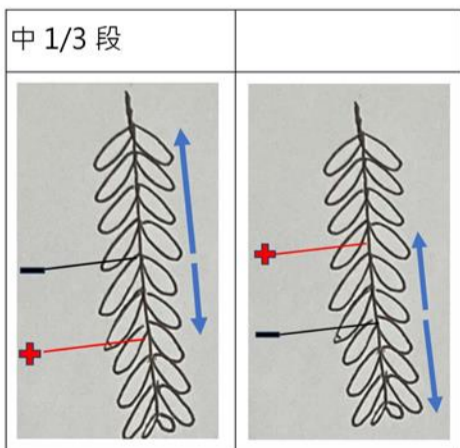
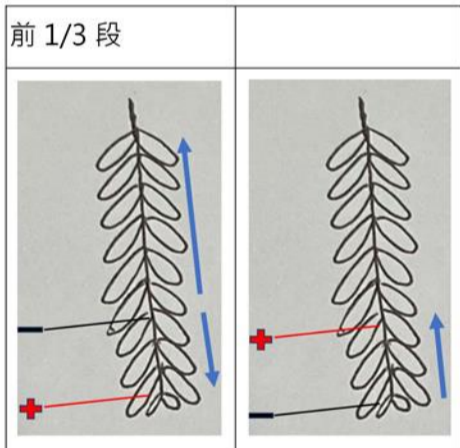
持續外加電位差對葉片電阻變化量之影響



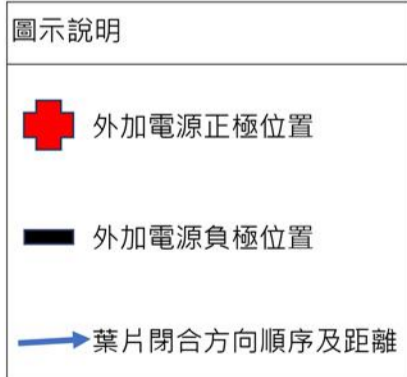
長期電位差刺激一段時間後，閉合速率會下降，且葉片閉合後的恢復時間和電阻的恢復時間也會變長，而電阻變化量沒有明顯差異。

推測長期外加電位差時，由於電子持續流動使細胞膜外正電被中和，因此電位差小動作訊號就較弱，或者是離子通道持續開啟，使膜內外離子濃度差難以回復，導致動作電位產生的訊號較弱，進而觀察到閉合反應延遲和恢復時間變長的現象。

電流方向與閉合方向



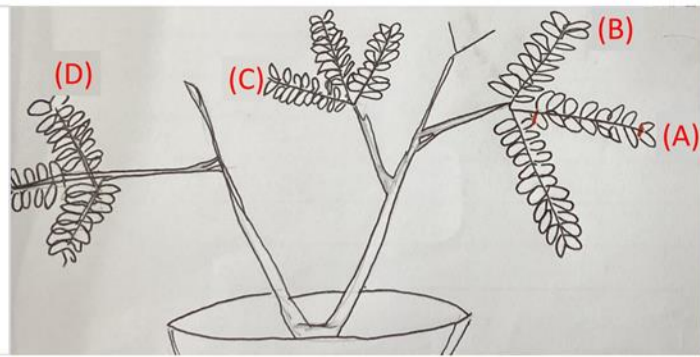
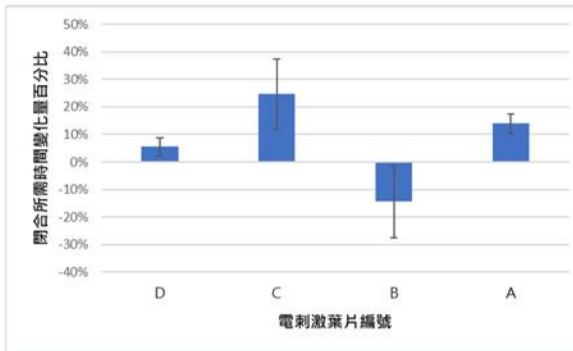
閉合方向:負到正



外加電位差時葉片會由負極往兩端閉合，到正極停止。

推論是因為在通電時電子會由負極往兩端流動，造成離子流動和細胞膜去極化。而到正極端後由於電子被導出植物體，所以之後段落的葉片不會閉合。

長期外加電位差對鄰近葉片觸發運動影響

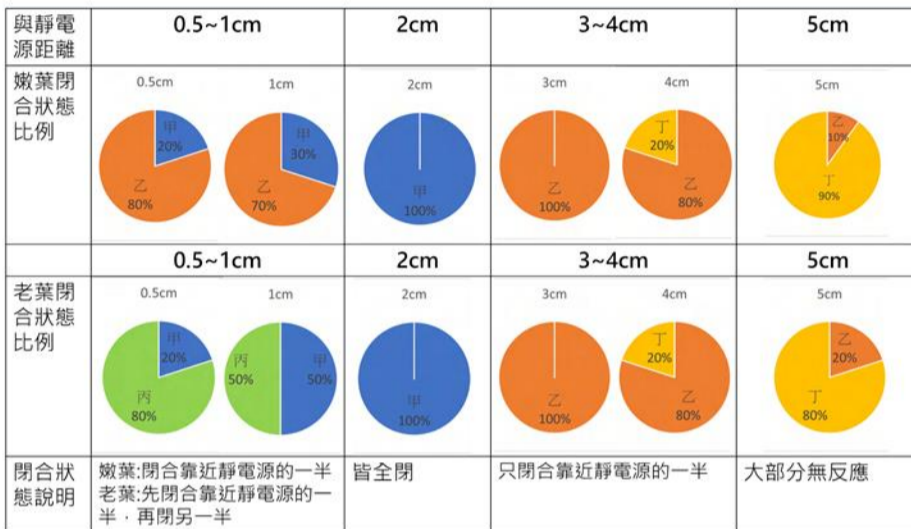


圖表文字備註：
A：長時間外加電位差之葉片；B：同葉片不同小葉、一回複葉段落
C：同分支不同葉片、一回複葉段落；D：同株不同分支、一回複葉段落

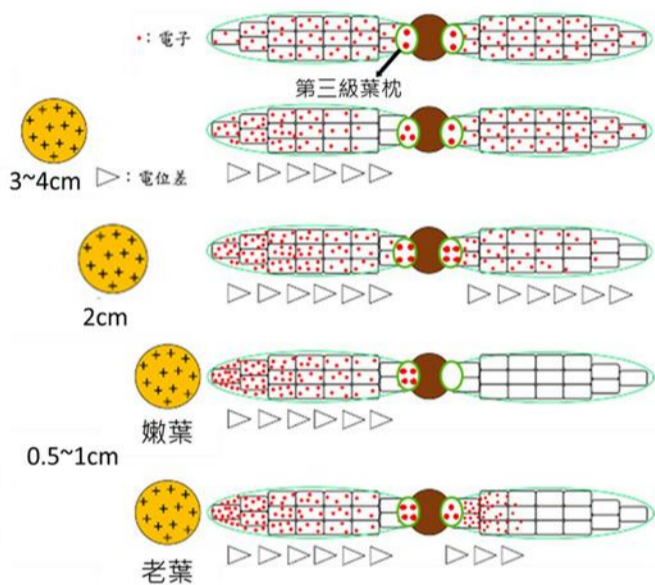
長期持續外加電位差後，同葉片的小葉閉合速率會變快，同分支和不同分支的其他葉片閉合速率會變慢。

推測含羞草把長期電刺激視為傷害性刺激，因此會對鄰近葉片發送訊號來警告其他葉片，推測其生理意義為在受到食草昆蟲襲擊時，使近端葉片閉合快，遠端葉片閉合動作慢，來分散昆蟲啃食的面積。

靜電對觸發運動影響



靜電源靠近不同距離時電子分布之推測圖



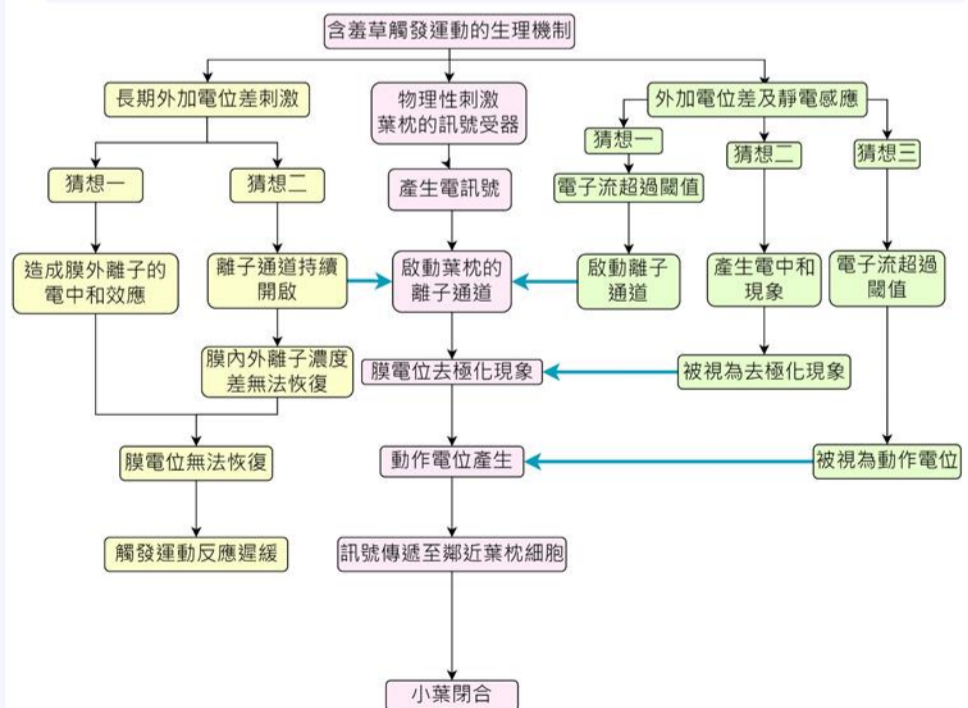
推論葉枕的電子被吸引，而葉枕細胞內電子分布決定閉合狀態，造成細胞膜去極化。

閉合情況	甲	乙	丙	丁
說明	全閉	只閉靠近靜電源的一半	先閉靠近靜電源的一半，再閉另一半	無反應
示意圖				

結論

一、葉齡大顏色深，老葉電阻的初始值較高，閉合速率較慢，電阻變化較少，推測是葉片含水量較少所致。
二、外加 9V 以上電位差方可使含羞草產生觸發運動，電壓越高反應越快，推測是電子流動時使細胞膜外電中和，導致去極化現象產生動作電位，且外加電位差刺激嫩葉反應較快，推測是老葉之離子通道反應較慢。
三、在長時間外加電位差下，產生反應延遲的現象，推測是持續外加電位差使細胞膜電位難以回復，鄰近葉片反應會較快，推測是因傳遞警告訊號導致近端葉片閉合速度快，而較遠的葉片因要分散昆蟲啃食面積而反應遲緩。
四、含羞草在受到外加電位差時，閉合方向從負極到正極，並且只會閉到正極端，推測是電子流動方向由負極到正極，而電子流動使細胞膜產生電位差，電子流動到正極端時流回電迴路而離開植物體。
五、靜電源距離含羞草葉片 4cm 內能引起觸發運動，近距離靠近時，不同葉齡葉片的反應不同。推測葉片上的電子會受到感應時的移動與分布，進而影響動作電位的產生，不同葉齡葉片的含水量可能會影響電子受感應時的移動速度及葉枕膨脹變化。

六、我們推論出外加電訊號影響含羞草觸發運動的可能生理機制流程：



重要參考文獻

- 蕭佑安、賴禹川、黃浩軒 民 108 年中華民國第 59 屆全國中小學科學展覽會『含流睿智』植物也會算數?~探討含羞草觸發運動其訊息傳遞的奧秘
- Takuma Hagihara, Hiroaki Mano, Tomohiro Miura, Mitsuyasu Hasebe (2022) Calcium-mediated rapid movements defend against herbivorous insects in *Mimosa pudica*. *Nature Communications*, 13, Article number: 6412 14 November 2022
- Takuma Hagihara¹ and Masatsugu Toyota Mechanical Signaling in the Sensitive Plant *Mimosa pudica* L 4 May 2020
- Sönke Scherzer, Shouguang Huang, Andalousip, Ines Kreuzer, Ken Yokawa, Khaled A.S. Al-Rasheid, Manfred Heckmann & Rainer Hedrich (2022) Ether anesthetics prevents touch-induced trigger hair calcium-electrical signals excite the Venus flytrap, *Scientific Reports* 12, Article number: 2851 18 February 2022