

# 新竹市第四十三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：舞葉電襲－探討影響跳舞草側葉擺動的機制

關 鍵 詞：跳舞草、電擊、植物電壓感測

編號：

## 摘要

本研究在了解跳舞草的擺動規律，驗證網路上相關的資訊（照光、溫度、音頻的影響），包括跳舞草在高溫、有照光和音頻較高的環境中，小葉擺動速率會變快。我們分析擺動速率、擺動角度和滯留點時間，並發現擺動速率越快，擺動振幅越大，滯留點時間越短。從文獻得知，跳舞草的擺動現象和膜電位變化有關，所以我們使用不同電壓電擊跳舞草，發現電擊會使小葉的擺動速率變慢，認為是電子流干擾氫離子進出細胞，使鉀離子進出速率變慢。我們還設計自製的植物電壓感測器，探討小葉的擺動機制與電壓變化，發現當音頻越高，電位差改變的頻率越快。

## 壹、前言

### 一、研究動機

我們曾在書上看過跳舞草（*Codariocalyx motorius*），裡面提到當植株長到 15 公分以上且葉柄上長出三片葉時，它對環境的變化非常敏感，並會使產生葉片旋轉、擺動等反應，這讓我們非常好奇其中的原理，於是開始設計實驗並觀察跳舞草擺動的情況。

從文獻中我們得知跳舞草會因為不同溫度、照光、音頻影響葉片的擺動，我們發現那和植物的電訊號有關，因此我們設計了一系列的實驗，希望能更了解跳舞草葉片擺動的機制。

### 二、實驗目的

- (一) 跳舞草的擺動觀察分析
- (二) 溫度對跳舞草小葉擺動的影響
- (三) 照光對跳舞草小葉擺動的影響
- (四) 不同音頻對跳舞草小葉擺動的影響
- (五) 不同電壓對跳舞草小葉擺動的影響
- (六) 跳舞草擺動時的植物細胞電位差異
- (七) 跳舞草小葉轉動機制探討

### 三、文獻回顧

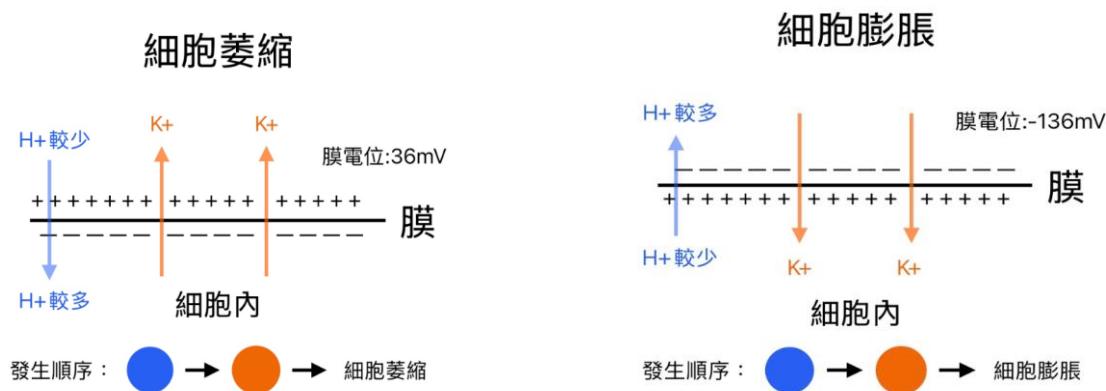
資料顯示，跳舞草在白天、陽光充足、水分充足的條件下葉片會升起，在晚上或是陰天、雨天、缺水的情況下則會進入睡眠狀態。因此在常溫強光且無風雨時的環境下，跳舞草的兩片側小葉會不停地擺動，光照越強或聲波振動越大，運動的速度就會越快，直至晚上所有葉片下垂閉合睡眠為止。(文獻 6、7)

關於跳舞草小葉能快速轉動的成因，許多文獻皆指出與細胞的水分變化及植物的電訊號有關，在受到特定刺激時會發出特殊的電訊號。另外研究指出葉枕細胞的膜電位震盪情形，與小葉擺動周期的規律性有關。(文獻 4)

另外葉枕細胞會因為電位變化而激活，而氫離子在跳舞草的葉運動中發揮了重要作用，影響了細胞膜電位、運動細胞體積變化，以及葉片的擺動節律。當氫離子進入細胞時，會產生跨膜電位梯度，並打開膜上的鉀離子通道，進而控制鉀離子的流動方向和小葉的擺動方向及速度。當環境條件達到一定的程度時，細胞膜內外的  $H^+$  會達到規律的震盪，且在葉枕細胞萎縮狀態時，細胞外鉀離子較多，膜電位呈現去極化，約為  $36\text{mV}$ ，反之，葉枕細胞膨脹時，膜電位呈現過極化(當回復到原先的電位時，離子的流動還尚未停止，使得膜電位變得比原來更負)，約  $-136\text{mV}$ ，當鉀離子進出會影響細胞水勢，使細胞的體積產生變化，如下圖所示：

#### 1. 葉枕細胞萎縮狀態

這時細胞內氫離子的濃度高，細胞去極化(約為  $36\text{mV}$ )，細胞體積縮小，導致葉片向下擺動。為了調節細胞外電荷平衡，在細胞膜內的鉀離子會離開細胞，使得細胞膜外呈現去極化，葉枕細胞萎縮。



(圖 1-3-1) 葉枕細胞萎縮時的膜電位變化

(圖 1-3-2) 葉枕細胞膨脹時的膜電位變化

#### 2. 葉枕細胞膨脹狀態

氫離子濃度低時，運動細胞過極化(約為  $-136\text{mV}$ )，細胞膨脹，導致葉片向上運動。在細胞膜外的鉀離子會進入細胞內，使得細胞膜外呈現過極化，葉枕細胞膨脹。

因此可知在小葉在適當的環境刺激下，會產生膜電位變化，呈現週期性快速轉動的狀態。綜合以上所知，我們將探討環境刺激誘發跳舞草小葉運動的條件，並用自製植物電壓感測器量測小葉轉動時的電位變化，並進一步了解電擊對於小葉運動的影響，以更完整的了解跳舞草小葉擺動機制。(文獻 9、10、14、15)

## 貳、研究設備及器材

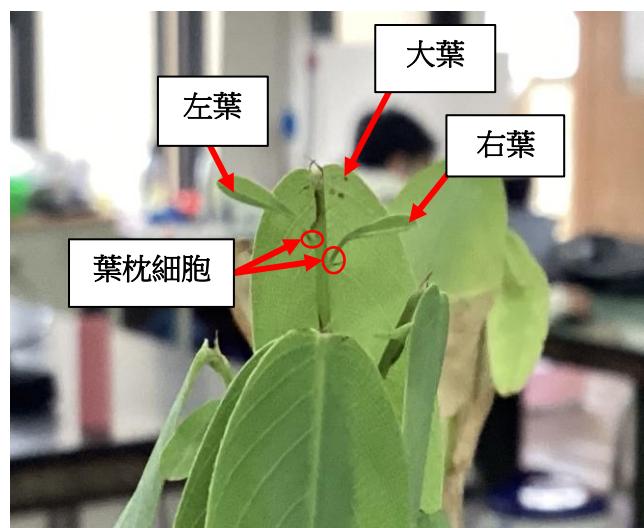
### 一、實驗植物

跳舞草 (*Codariocalyx motorius*) 別名：鐘萼豆，為臺灣原生植物，分布在丘陵及山區，多用於藥用或觀賞。本研究所使用的跳舞草原生於苗栗縣卓蘭鎮。葉片型態呈三出複葉，側生小葉通常成雙或是僅具單小葉，本研究將其稱為小葉，頂生葉則稱為大葉。此外，將背對大葉時的左側小葉稱為左葉，右側小葉稱為右葉 (圖 2-1-2)

我們觀察到跳舞草運動小葉擺動時的軌跡，在面對大葉時會呈上下擺動；在大葉側面觀察時軌跡則呈橢圓形或是圓形；大葉也有運動的現象，但只能上下擺動且擺動幅度極小。另外我們有觀察到主莖也會隨著環境刺激而產生平移的現象，但和大葉一樣不明顯且不易觀察，所以在之後的實驗中我們會固定主莖再進行實驗以減少誤差。因此本研究只探討小葉的擺動情形。



(圖 2-1-1) 跳舞草



(圖 2-1-2) 跳舞草各部位標示

### 二、實驗器材

直尺	平板*2	溫度計
自製隔音箱	直流電源供應器	鐵架
針灸針	導電凝膠	冰袋
喇叭	加熱器	訊號產生器
Arduino Nano	INA111 放大器晶片	單芯線
麵包版	DSOX1102G 示波器	LM7812 穩壓晶片
LM7912 穩壓晶片	針灸針	鱷魚夾

(表 2-2-1) 實驗材料

## 參、研究過程或方法

### 一、實驗裝置、步驟及方法

#### (一) 溫度對跳舞草小葉擺動速度的影響

1. 在安靜且無人的教室開燈進行實驗，並分成溫度低、溫度高兩組進行實驗
2. 低溫組：放入冰袋，將溫度控制在 15°C。固定植物主莖並架設平板錄影，確認左、右葉有無擺動後，拍攝小葉擺動狀態，約三分鐘，並重複十次
3. 高溫組：放入加熱器，並將溫度控制在室溫 25°C。固定植物主莖架設平板錄影，確認左、右葉是否擺動後，拍攝小葉的擺動狀態，約三分鐘，並重複十次



(圖 3-1-1) 低溫組拍攝畫面



(圖 3-1-2) 高溫組拍攝畫面

#### (二) 照光對跳舞草小葉的擺動速度的影響

1. 我們利用教室內的日光燈當作光源，使用安卓手機的 phyphox 軟體測量照度，分成照光組 (195.6 lux) 和無照光組 (25.1 lux) 進行實驗。
2. 固定植物主莖架設 iPad 錄影，確認左、右葉擺動後，再開始拍攝小葉擺動狀態，約三分鐘，並重複十次。



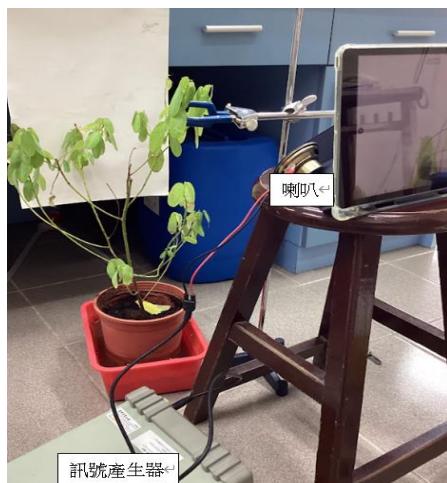
(圖 3-1-3) 照光組的實驗裝置



(圖 3-1-4) 無照光組的實驗裝置

### (三) 不同音頻對於跳舞草小葉擺動速度的影響

1. 在安靜無人的教室，並開啟教室內的日光燈，分成 100、1000、5000、10000Hz 和無音頻(對照組)進行實驗。
2. 固定植物主莖並架設 iPad 錄影，並確認左、右葉擺動。
3. 用訊號產生器播放相對應的音頻，並將喇叭對準小葉，如圖 3-1-5 所示。
4. 以三分鐘為一組拍攝，中間間隔三分鐘。



(圖 3-1-5)音頻實驗的實驗裝置

### (四) 同電壓對跳舞草小葉的擺動速度的影響

1. 在安靜的教室開燈，並分成 1.5V 和 3V 不同電壓進行實驗
2. 將正極放在小葉上方的主莖，負極放在小葉下方主莖，讓電流通過小葉葉柄基部的葉枕細胞，並在接點塗上導電凝膠，以增加導電面積
3. 以三分鐘為一個錄製單位，電擊前、電擊中、電擊後為一組
4. 固定植物主莖並架設平板錄影，拍攝電擊前小葉擺動
5. 0~3 分鐘：拍攝電擊前小葉擺動
6. 4~6 分鐘：開啟電源，正負極通電後，錄製電擊中的小葉擺動
7. 7~9 分鐘：關閉電源，錄製電擊後的小葉擺動



(圖 3-1-6) 電擊實驗的裝置



(圖 3-1-7) 電擊跳舞草的位置

## (五) 自製的植物電壓感測器

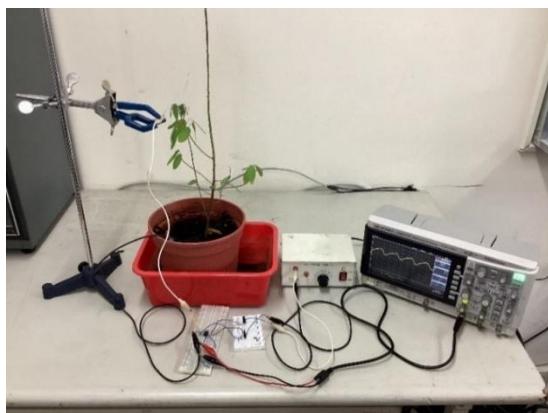
因為植物的電流較為微弱，因此我們使用 INA111 放大器，並用電阻控制增益，所以我們會將測出來的電壓值除以放大倍率進而推算出植物體原始的電壓值。電流供應器的正極端連接 LM7812 穩壓器，負極端連接 LM7912 穩壓器，提供運算放大器 INA111 運作的電流。

為了測試自製植物電壓感測器是否能夠準確的測得植物細胞電位，先做背景值的測試：

1. 將兩根針灸針插入土中。
2. 播放各種音頻的聲音。
3. 所有音頻下所呈現的波紋應為一水平線，確認環境中並沒有干擾的電訊號。

## (六) 比較跳舞草在不同的音頻下與其電位的變化

1. 先錄下植物葉片的擺動情形，並觀察何處小葉的擺動幅度最大。
2. 將自製的植物電壓感測器的正極端插在跳舞草擺動幅度最大的小葉基部上，負極插在土中，並在正極接點塗上導電凝膠，增加導電面積。
3. 打開電流供應器提供 INA111 的運作電流。
4. 開啟示波器後，植物電位的波形便會出現在屏幕上。
5. 播放不同音頻(2000、5000、10000Hz)3 分鐘，將測得的波形以 excel 格式儲存至電腦分析



(圖3-1-10) 自製植物電壓感測器連接跳舞草



(圖3-1-11) 自製植物電壓感測器連接位置

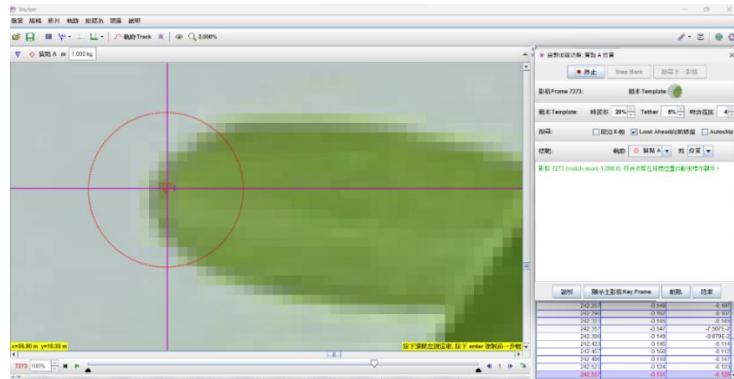
## 二、分析方法

### (一) 小葉擺動角度分析

1. 我們用 Tracker 影像分析軟體進行分析

(1) 側面擺動速率

設定葉尖為一質點，自動追蹤其軌跡，觀察擺動的角度變化，並算出速率。



(圖 3-2-1) Tracker 追蹤葉尖位置

## (2) 正面的擺動軌跡

以八百格影像為一單位，以手動追蹤軌跡，紀錄下正面的擺動方式。

## 2. t 檢定

(1) 定義：表示兩組數據是否有顯著差異。若  $P$  值小於 0.05 則在統計上達顯著差異；

若  $P$  值大於 0.05 小於 0.1 則在統計上達有點顯著；若  $P$  值大於 0.1 則在統計上未達顯著差異。

(2) 使用 Excel 進行統計分析。

### 3. 標準差

(1) 定義：指每一組數字離平均值的距離，可以代表每組數據的離散程度。

(2) 使用 Excel 進行分析。

## 肆、研究結果

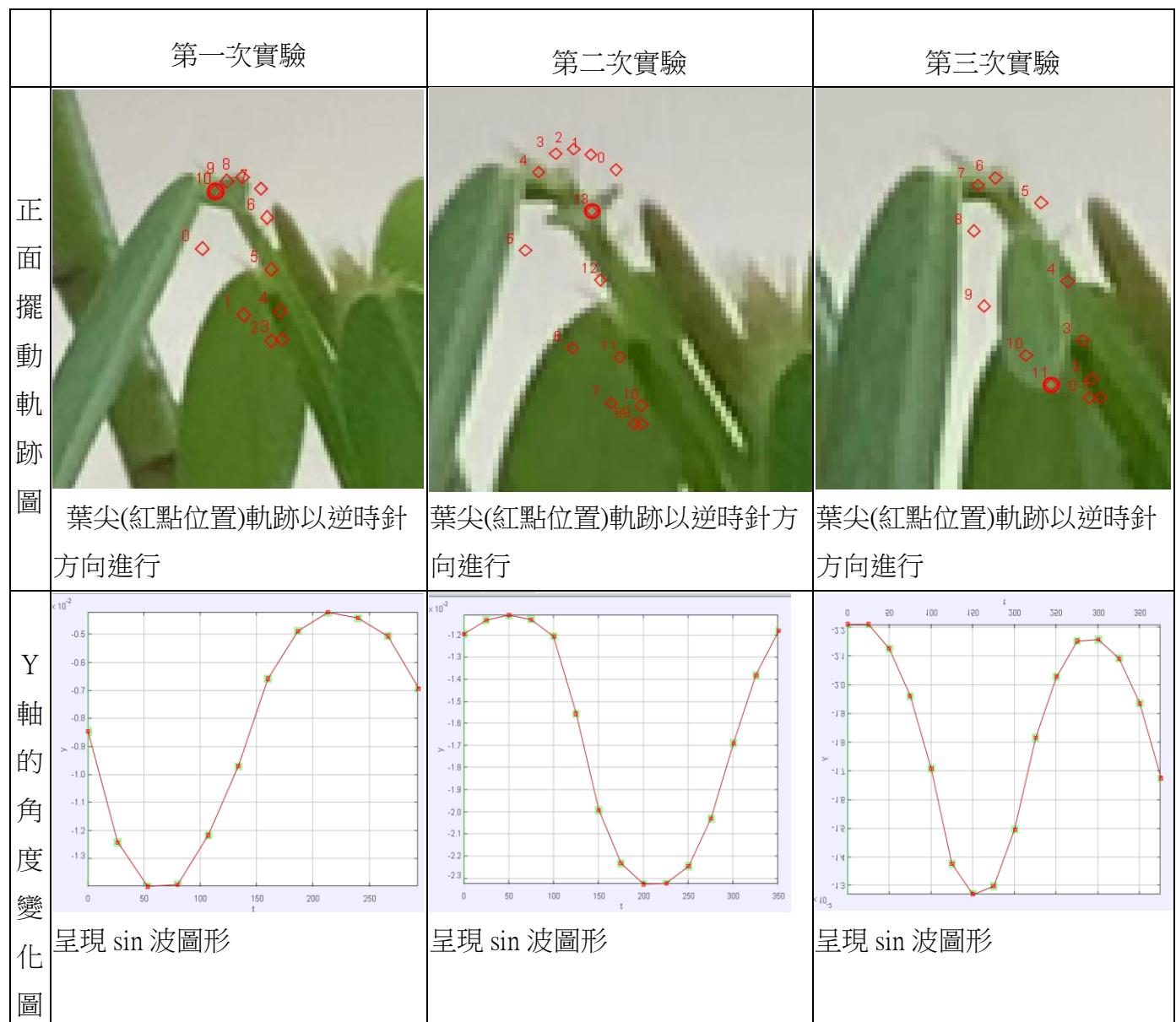
### 一、跳舞草的擺動觀察分析

#### (一) 小葉擺動的軌跡分析

在安靜的教室中拍攝跳舞草的擺動，攝影時間約 5 分鐘，使用 Tracker 進行分析，並分成正面和側面分析，為了方便比較，所以我們統一分析左葉。

##### 1、小葉正面擺動分析

###### (1) 摆動觀察分析



(表 4-1-1)tracker 分析正面擺動

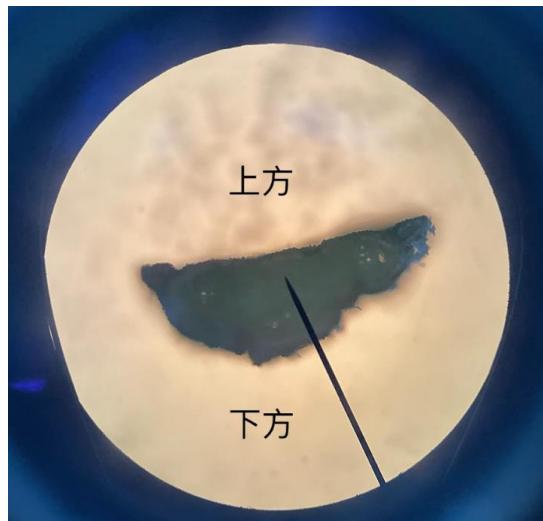
結果分析：

1.葉尖(紅點位置)軌跡以逆時針方向進行，Y 軸角度變化皆呈現 sin 波圖形。

2. 紅色質點是小葉正面的擺動軌跡，質點越多表示停留時間越久。可以發現跳舞草的最高點和最低點停留時間最久(即滯留點)，且向上擺動的時間會比向下擺動要久(因為質點數較多)。而跳舞草正面的擺動軌跡倒呈水滴的形狀，並非文獻中所提到的橢圓形擺動。

## (2) 葉枕細胞切片觀察

透過觀察小葉轉動，我們發現是葉片基部的葉枕細胞膨脹和萎縮，帶動小葉旋轉，並將葉柄切片，切片結果如圖下：



(圖 4-1-1) 葉柄的切片

由切片可觀察到，葉柄的形狀如半月形，我們將會在後面探討葉柄形狀和擺動軌跡的關聯性。

## 2、小葉側面擺動分析



(圖 4-1-2) 使用 Tracker 分析小葉側面軌跡

從側面分析的結果發現路徑呈現圓弧形，最高點和最低點停留時間較長。向上擺動(質點 1 到 6) 的速率較向下擺動(質點 7 到 9) 慢，和正面擺動分析的結果一致。

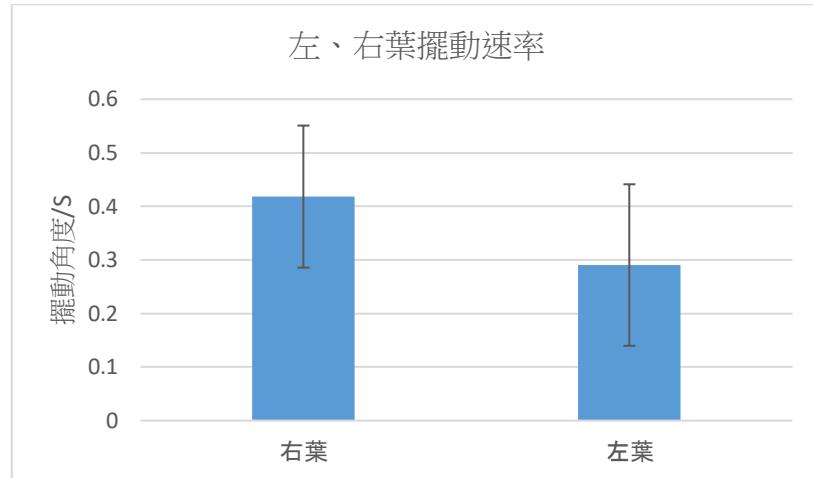
由於側面較容易觀察和分析，故後續對於跳舞草小葉的擺動分析，我們採取側面擺動進行分析速率、角度等差異。

## (二) 左、右小葉的擺動差異比較

為了瞭解兩片小葉的轉動速率與角度的變化上是否會有差異，我們在室溫攝氏 19 度的無人教室拍攝小葉轉動持續三分鐘，再將影片進行分析

### 1. 小葉的擺動速率差異分析

#### (1) 左、右葉擺動速率比較

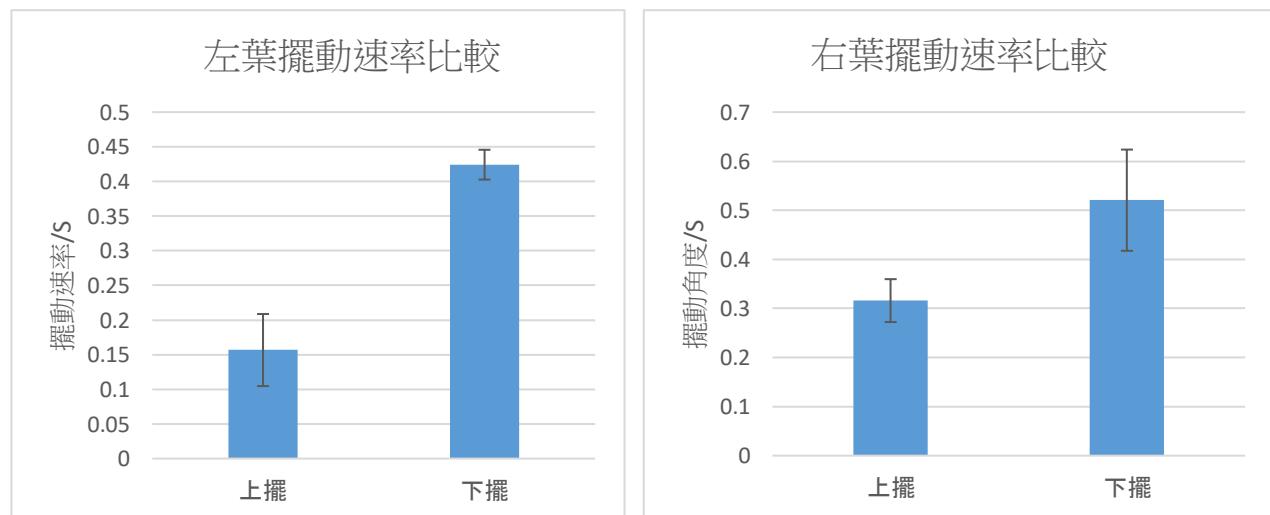


(圖 4-1-3) 左、右葉的擺動速率比較

結果分析：跳舞草的左右葉擺動速率不是一致的，右葉較左葉快，進行統計分析後，P 值為 0.07，表示兩葉擺動速率有達顯著差異。

#### (2) 向上與向下擺動速率的差異比較

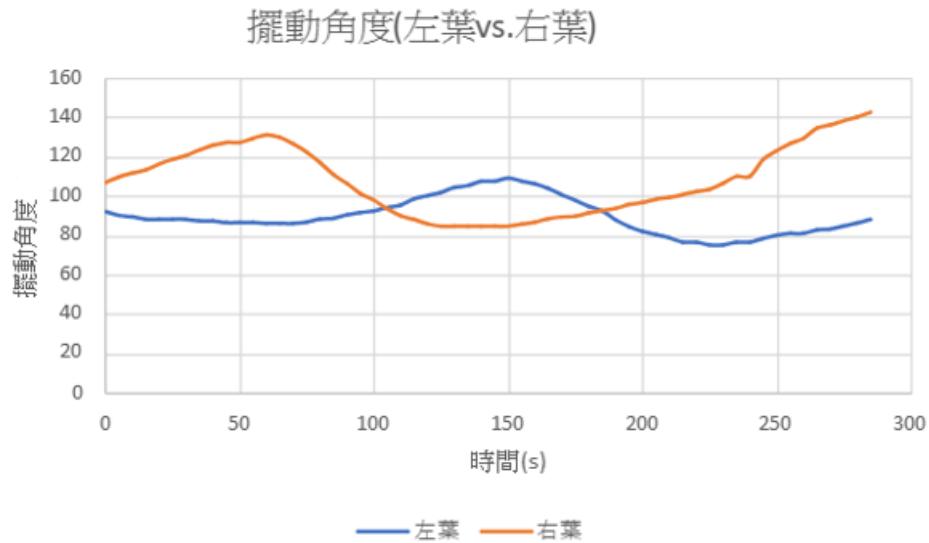
我們在拍攝小葉擺動影片時，用肉眼觀察到小葉往下擺動較明顯，為了驗證觀察到的差異，將左右葉擺動的資料分為「向上擺」和「向下擺」兩組，各進行五次實驗，分析結果如下：



(圖 4-1-4) 左葉上擺和下擺的擺動速率比較 (圖 4-1-5) 右葉上擺和下擺的擺動速率比較  
由實驗結果可知，左、右葉往下擺動時的速率皆較快於往上擺動時，做統計分析後，P 值分別為 0.001 (左葉) 和 0.02 (右葉)，皆達顯著差異。

## 2. 左、右葉的擺動角度比較

我們將跳舞草完整的擺動一個周期，所得到的擺動角度分析如下：



(圖 4-1-6) 左、右葉的擺動角度比較

由上圖可知，左右葉會交錯擺動，當左葉擺動至最高點時，右葉剛好在最低點，反之亦然。且每次擺動的最高點和最低點會有些微差異，右葉擺動的振幅較左葉大。從本次分析我們也發現當小葉擺動到最高或最低點時，跳舞草會停留一陣子後，才開始往下轉動，與之前查到的相關文獻一致，我們將小葉擺動到最高點與最低點時，停留的位置稱為「滯留點」。以下實驗皆是以最高點的滯留點計算停留時間，以減少誤差。

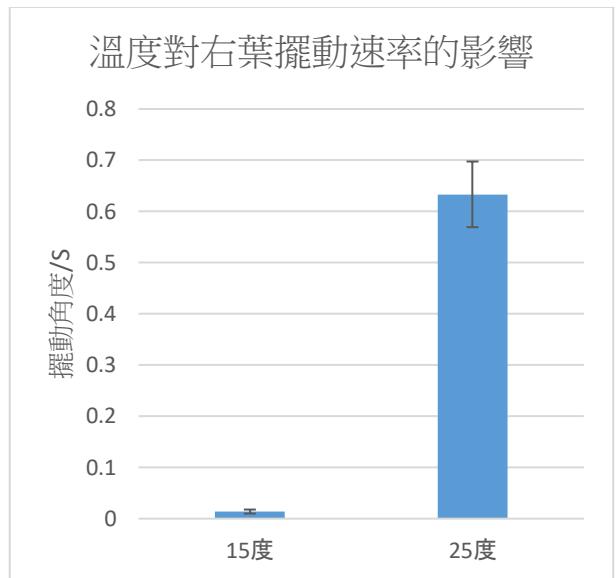
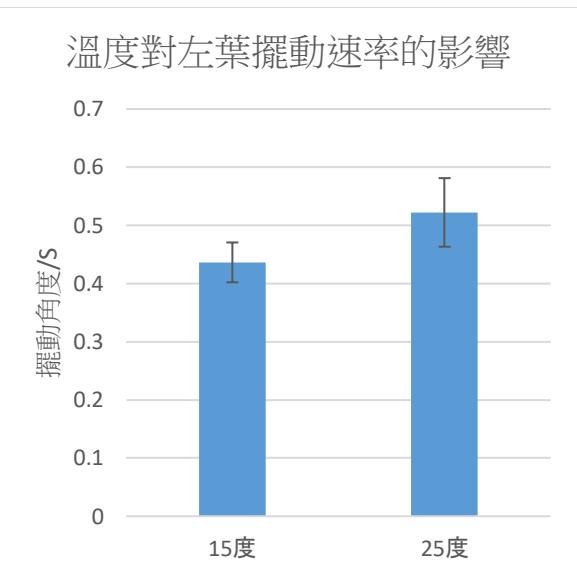
由跳舞草的小葉轉動觀察分析，可知左、右葉結果不相同，不同方向（上擺和下擺）的擺動速率不相同，且滯留點的長短亦會影響小葉的速率分析，因此我們在後續的探討實驗會將這些因素納入考量，以減少誤差。

## 二、溫度對跳舞草小葉擺動的影響

為了探討溫度高低對小葉轉動速率與角度的影響，我們將跳舞草放在不同溫度的環境，拍攝小葉轉動的狀況，再以影片分析小葉「上擺」轉動時的速率

### (1) 溫度對小葉擺動速率的影響

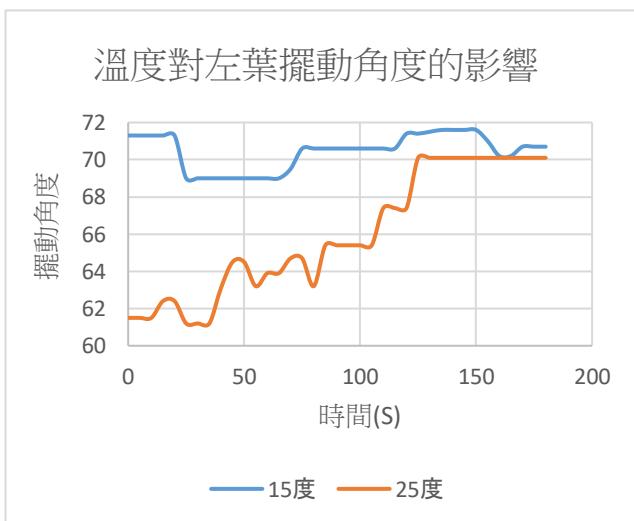
以下是我們分成左、右葉各別分析比較的結果，並使用加溫設備及降溫裝置，達到目標溫度約 15 度和 25 度兩組，各十次數據進行分析：



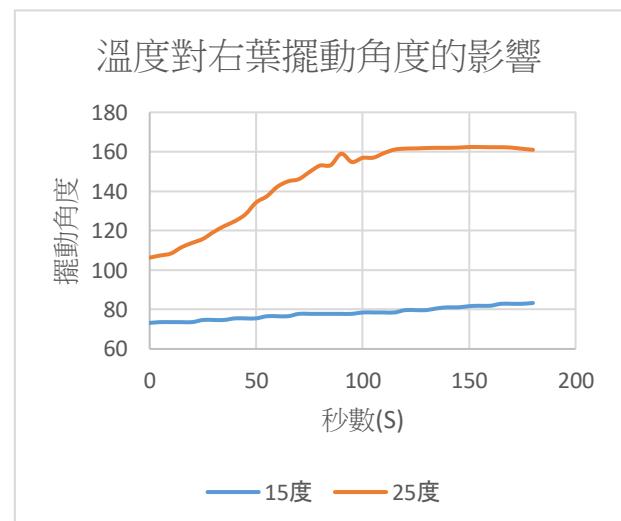
(圖 4-2-1) 不同溫度對左葉擺動速率的影響 (圖 4-2-2) 不同溫度對右葉擺動速率的影響

由以上結果可得知，跳舞草不論左、右葉，溫度較高擺動速率較快。統計分析的 P 值分別為 0.003 (左葉) 和 0.007 (右葉) ，在統計上皆達顯著差異

## (2) 溫度對小葉擺動角度的影響



(圖 4-2-3) 不同溫度對左葉角度變化的影響

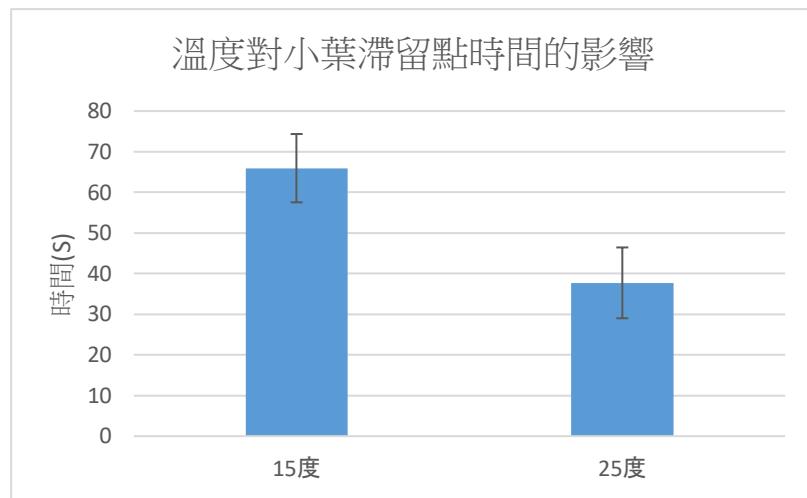


(圖 4-2-4) 不同溫度對右葉擺動角度的影響

由上圖可知，不論左、右葉，高溫時小葉的擺動幅度和擺動斜率皆高於低溫

### (3) 溫度對小葉滯留點時間長短的影響

因右葉擺動差異較明顯，因此溫度的滯留點皆以分析右葉為主：



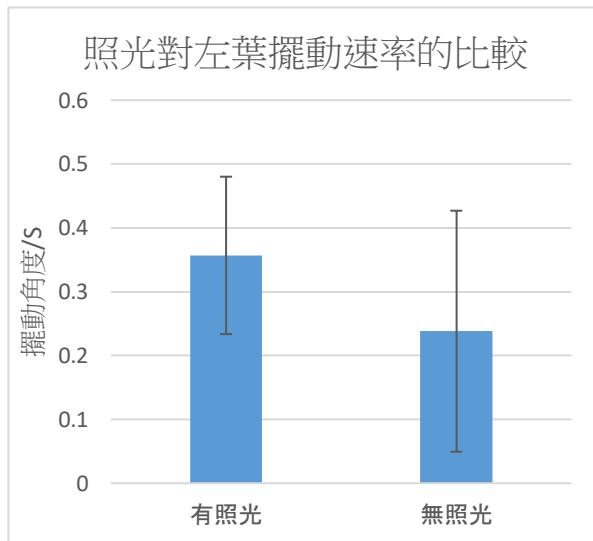
(圖 4-2-5) 不同溫度對右葉滯留點時間的影響

由上圖可知溫度越低，小葉的滯留點時間越長。P 值=0.00002，在統計上達顯著差異

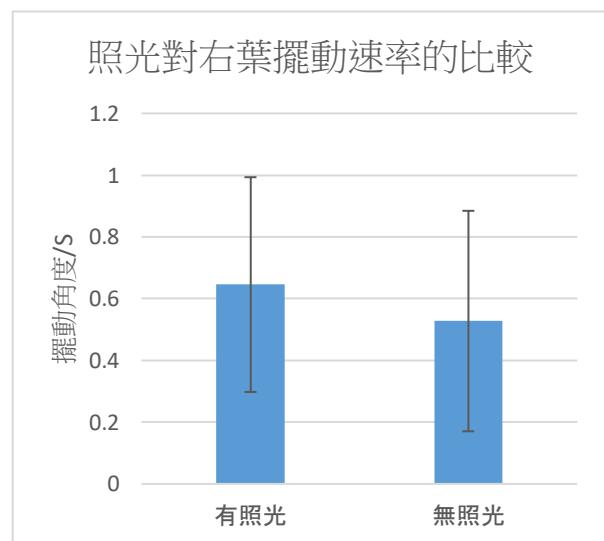
## 三、照光對跳舞草小葉擺動的影響

我們將光照組置於室溫 21 度的空教室裡，並開啟電燈，黑暗組則關燈進行拍攝約三分鐘，並且我們使用安卓手機的 phyphox 軟體測量照度，光照組為 195.6 lux，黑暗組為 25.1 lux，各別拍攝十組，影片分析結果如下：

### (一) 有無光照對於小葉擺動速率的影響



(圖 4-3-1)有無光照對左葉擺動速率的影響

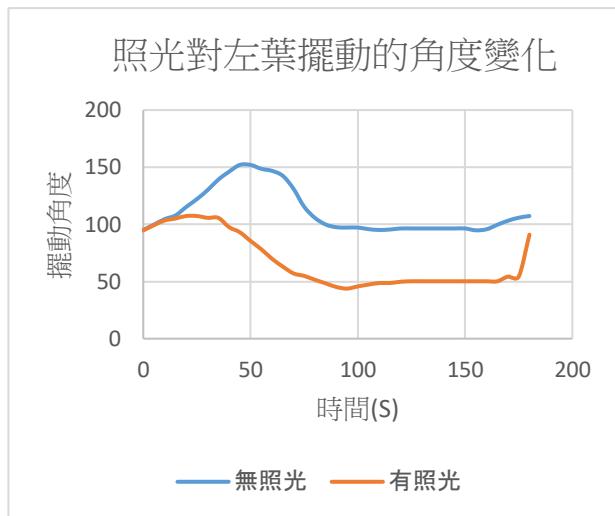


(圖 4-3-2) 有無光照對右葉擺動速率的影響

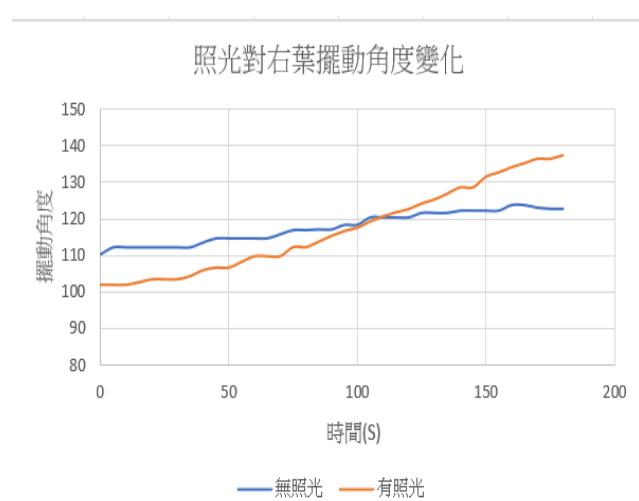
由上圖可知，有照光的小葉擺動速率均高於無照光，但 P 值分別為 0.2(左葉)和 0.1(右葉)，在統計上未達顯著差異。

## (二) 照光對小葉擺動角度的影響

接著分析 3 分鐘內，有無照光時，小葉擺動的角度：



(圖 4-3-3)有無照光對左葉擺動角度的影響

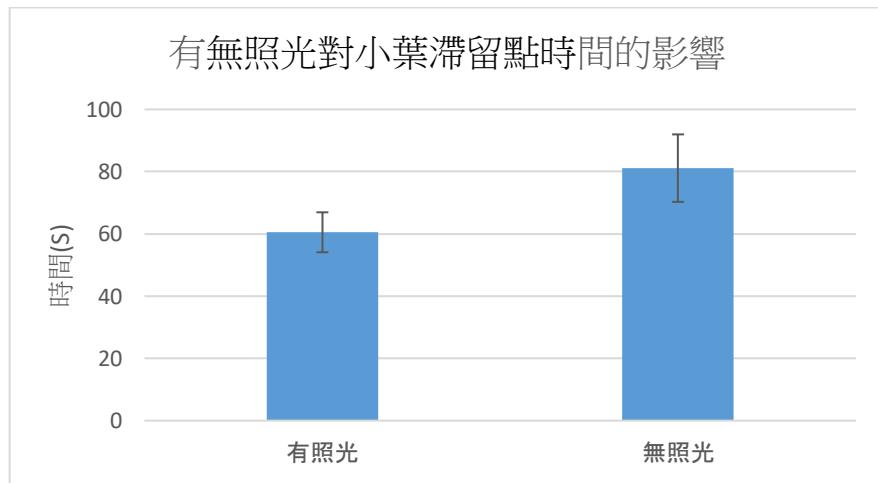


(圖 4-3-4) 有無照光對右葉擺動角度的影響

由上圖可知，不論左、右葉，有照光的擺動幅度和擺動斜率皆較無照光的大。而從左葉的結果可知，照光會使擺動角度變大

## (三) 有無照光對小葉滯留點時間的影響

因右葉擺動差異較明顯，因此照光時小葉的滯留點分析以右葉為主：



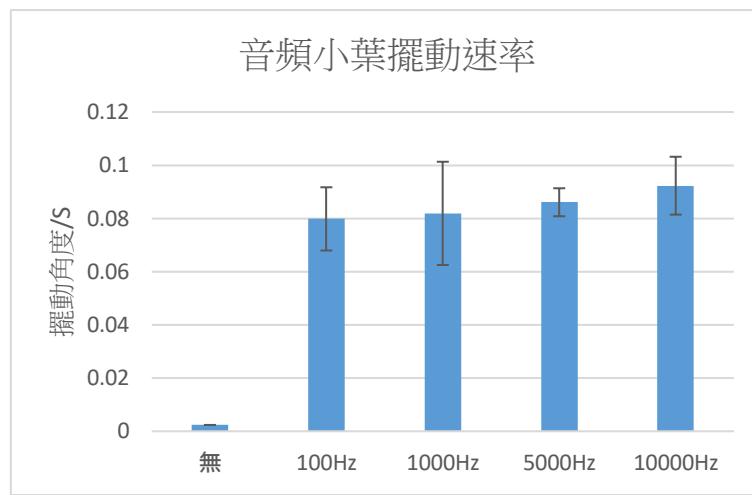
(圖 4-3-5)有無照光對小葉滯留點時間的影響

由上圖可知，有照光比無照光的滯留點時間短。P 值=0.006 在統計上達顯著差異。

## 四、音頻對跳舞草小葉擺動的影響

為了探討音頻對小葉擺動的影響，我們用訊號產生器發出 100Hz、1000Hz、5000Hz、10000Hz 和無音頻，並與跳舞草一同放在室溫約 16 度的空教室中錄影，觀察在其音頻下小葉擺動的差異。由溫度和照光實驗中得知，左、右葉的擺動是同步的，所以音頻實驗將左、右葉合併分析：

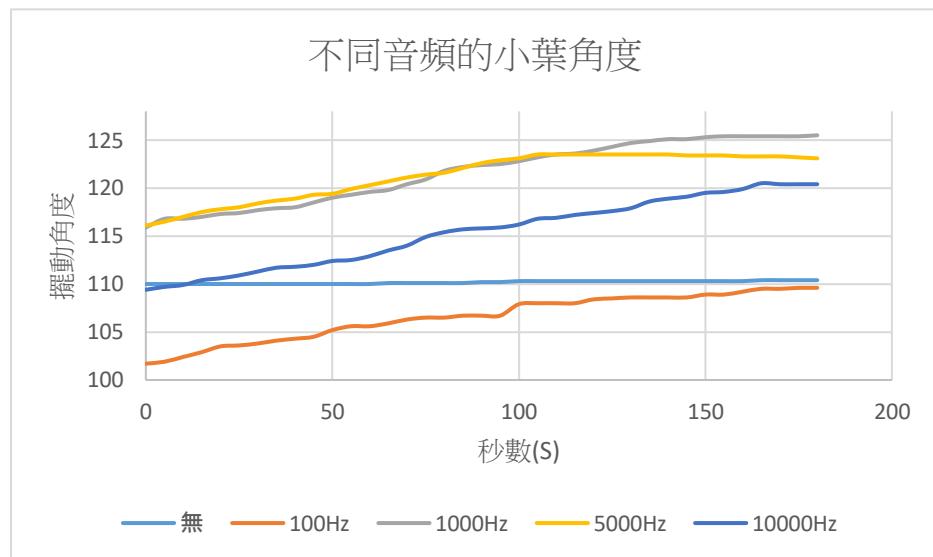
### (一)不同音頻對小葉擺動速率的影響



(圖 4-4-1)不同音頻對小葉擺動速率的影響

由上圖可知，小葉擺動速率的快慢依序為：無音頻<100<1000<5000<10000Hz，因此可知音頻越高的刺激下，小葉的擺動的速率越快。

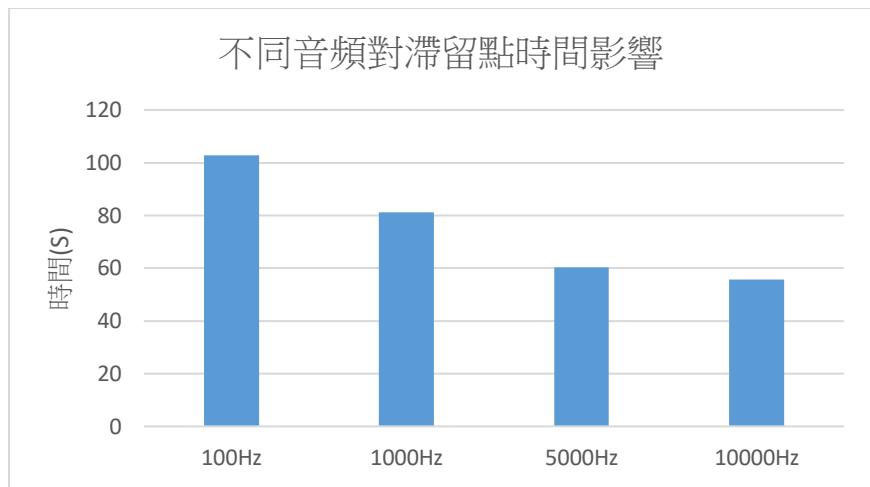
### (二) 不同音頻對於小葉轉動角度的影響



(圖 4-4-2) 不同音頻對於小葉的擺動角度影響

由上圖可知，100~10000Hz 的擺動角度幾乎相同，5000Hz 角度差異較小，無音頻的對照組沒有擺動。

### (三) 音頻對滯留點時間的影響



(圖 4-4-3) 不同音頻對右葉滯留點時間的影響

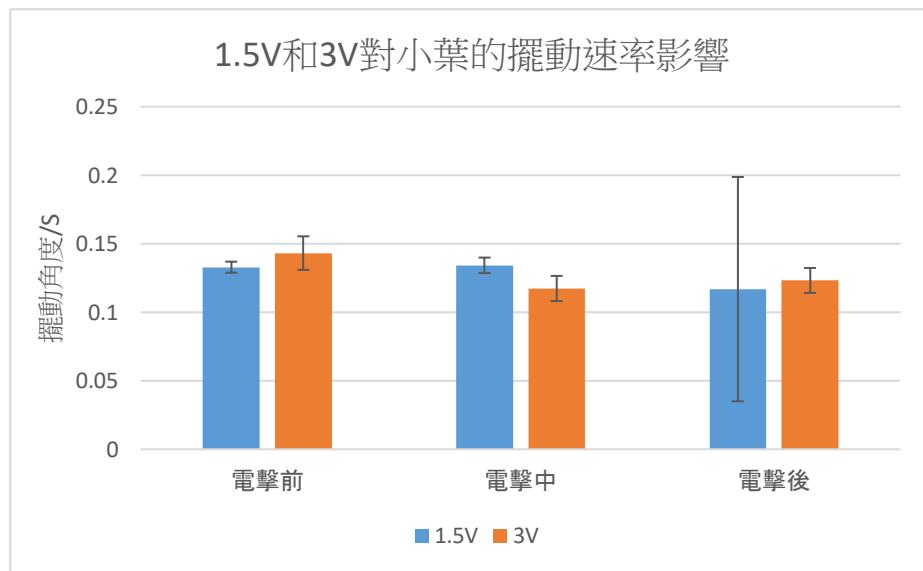
由上圖可知，音頻越高，小葉的滯留點時間越長。無音頻幾乎不擺動，所以不列入圖表分析。

## 五、電擊對跳舞草小葉擺動速率的影響

分析完環境因素對跳舞草的影響後，我們想進一步了解電流是否會影響跳舞草的轉動機制。以 1.5V 與 3V 的電流電擊跳舞草的葉枕細胞三分鐘後，預期能讓細胞膜電位改變，進而影響小葉擺動速率，並錄影觀察小葉的擺動情形。

由溫度和照光實驗中得知，左、右葉的擺動是同步的，故電擊實驗也將左、右葉合併分析：

### (一) 電擊對小葉擺動速率的影響

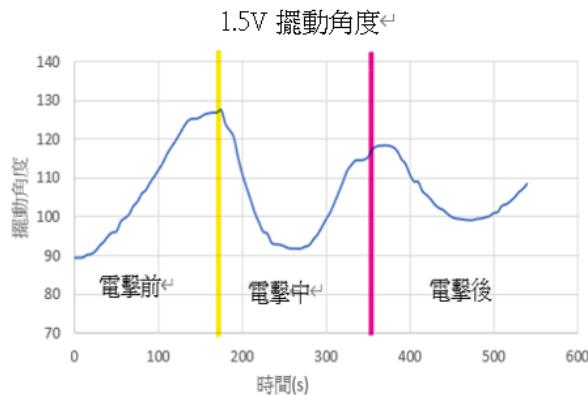


(圖 4-5-1) 電擊對小葉擺動速率的影響

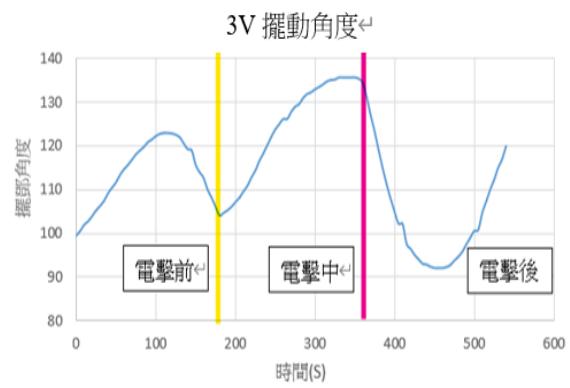
由結果可知，不論是 1.5V 或 3V，跳舞草被電擊時的擺動速率會變慢，而電擊結束後的擺動速率會較電擊時稍快。而且 1.5V 和 3V 對小葉擺動速率的影響並無明顯差別。

## (二) 電擊對小葉擺動角度的影響

以下是電擊前、中、後的小葉擺動角度分析圖。



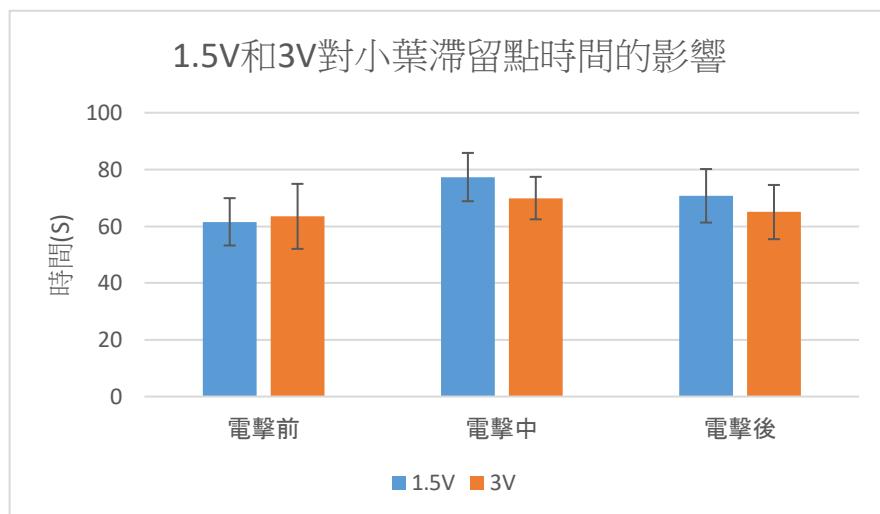
(圖 4-5-2) 1.5V 摆動角度變化



(圖 4-5-3) 3V 摆動角度變化

由上圖可知，不論是 1.5V 或 3V，當開啟或關閉電源時，會產生轉折點。

## (三) 電擊對小葉滯留點時間的影響



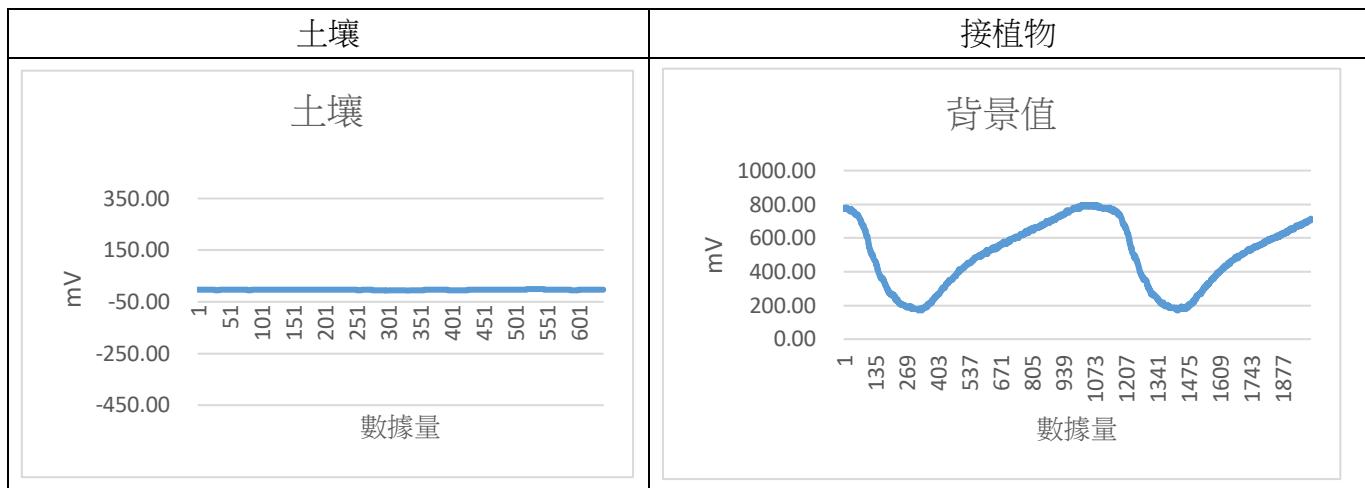
(圖 4-5-4) 1.5V 和 3V 的滯留點時間影響

由上圖可知，不論 1.5V 或 3V，電擊後的滯留點時間最久，電擊前的滯留點時間最短。而且 1.5V 和 3V 對小葉滯留點時間的影響並無明顯差別。

## 六、跳舞草擺動時的植物細胞電位差異

### (一)前置實驗一背景值測試

為了確認我們自製的植物電壓感測器是否可以正確測得相對應的電壓，我們使用探測針測試土壤及植物，測試結果如圖 4-6-1 及 4-6-2 所示：



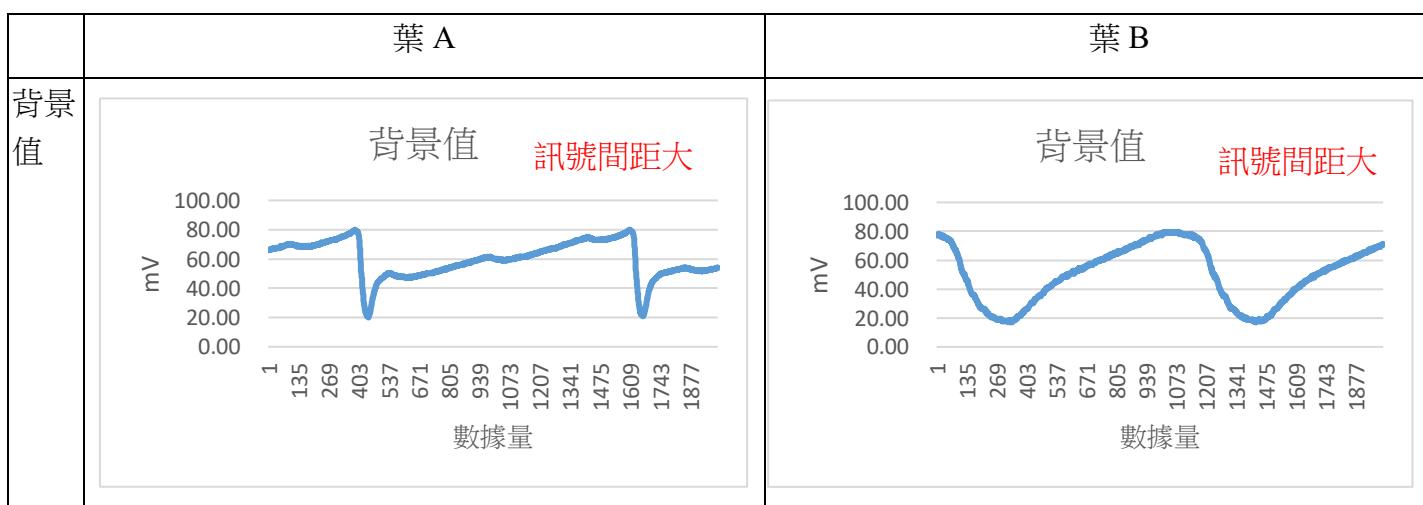
(圖 4-6-1) 探測針插在土壤時的波形

(圖 4-6-2) 探測針接在植物上時所產生的波形

由結果可以得知當自製的植物電壓感測器插在土壤中時，不會有任何電壓變化，因此可以確信此感測器可以正常的接收植物電壓

### (二)不同音頻對植物電位的影響

本實驗在未做隔音處理的實驗室內進行，所以在不播任何音頻的情況下，也會有環境雜音，我們用處於擺動狀態的小葉(分別為小葉 A 與小葉 B)進行測量，紀錄環境背景值及提供固定音頻時的植物體電位變化，結果如下：





從以上結果得知，當植物接受到的音頻越高，電位的變化越頻繁。而且因為植物電位皆在200-800mV間震盪，所以表示音頻不會影響到植物細胞的最高電位和最低電位之數值。

## 伍、討論

### 一、跳舞草的擺動觀察分析

由實驗結果，我們整理出跳舞草小葉的擺動規則下：

小葉轉動正面的軌跡形狀為倒水滴形，轉動一圈為一次轉動周期，到最高點和最低點時皆會停留一段時間，我們定義為滯留點，且向上擺的擺動速率較向下擺慢。

跳舞草轉動的側小葉有兩葉，左右葉擺動均存在差異，右葉的擺動明顯比左葉快，且左右小葉轉動的最高點和最低點並不一致，一邊振幅較大，一邊振幅較小，同時間的擺動方向也剛好相反，左葉擺動到最高點時，右葉葉尖位置剛好在最低點。

### 二、溫度對跳舞草小葉的擺動的影響

#### (一) 高、低溫對小葉擺動的影響

高溫時左右葉的擺動速率都較低溫時快，擺動振幅也較大，符合我們所查到的資料，當氣溫達到攝氏 20 度以上時，跳舞草的小葉會開始明顯轉動。

而高溫會使跳舞草擺動速率變快的原因我們推測有兩個：

- 1.跳舞草為熱帶至副熱帶分布的物種，故高溫為較適合的生理溫度，動作反應會較佳
- 2.高溫且未超過其適應極限溫度時，會有較好的細胞內生理反應，膜蛋白及水分滲透等。

#### (二) 高、低溫對小葉滯留點時間的影響

溫度越高滯留點時間越短，推測小葉擺動速率越快，滯留點時間越短。

### 三、照光對跳舞草小葉擺動的影響

照光時的左右小葉不論是擺動速率或擺動振幅都比無照光時更快，表示光照充足的環境會促使跳舞草的側小葉擺動；且有照光的小葉滯留點時間也較短，一樣擺動速率越快，滯留點時間越短。文獻也指出強光照射跳舞草，會導致細胞膜電位震盪變少，讓小葉轉動的週期變短，符合預期，但統計分析沒達到顯著差異的原因，我們猜測給予教室內的日光燈，此燈源的照光強度不足以產生明顯的差異。

## 四、不同音頻對跳舞草小葉擺動的影響

### (一) 不同音頻對跳舞草小葉擺動速率的影響

由實驗結果發現，當音頻變高，小葉擺動速率會變快，擺動振幅也會變大，滯留點隨之變短。表示高音頻的聲音有助於促進小葉的擺動，我們查了相關的文獻，推測可能是因為跳舞草葉面有敏感的特殊細胞，高音頻會造成強烈急促空氣振動，而刺激跳舞草加速擺動小葉。

### (二) 不同音頻對於跳舞草電位的影響

由實驗結果得知，音頻越高滯留點時間越短，與前面的推論符合。

## 五、不同電壓對跳舞草小葉擺動的影響

### (一) 1.5V和3V電擊對小葉擺動的影響：

- 1、小葉擺動速率：電擊前>電擊後>電擊中
- 2、小葉滯留點時間：電擊中>電擊後>電擊前
- 3、當開啟和關閉電源時擺動角度會產生轉折點
- 4、1.5V和3V的影響一致

在擺動速率和滯留點的分析上，看到一樣的實驗結果，電擊時滯留點的停留時間更長，而電擊後的停留時間又比電擊時還要長。另外在擺動角度分析上發現，電源開啟和關閉會使跳舞草擺動產生轉折點，並且讓小葉的擺動振幅沒有一定變大或變小的規律性。

跳舞草的轉動與葉枕細胞的電位變化有關，我們實驗也證實外加電流對於小葉擺動有影響，推測外加的電流會影響跳舞草電訊號的傳遞，導致小葉葉柄基部的葉枕細胞無法正常的調節水分變化，因此擺動速率會變慢，電擊結束後，電流的影響還尚未恢復，並繼續影響細胞的電位訊號，導致擺動還是比電擊前的速率慢。

### (二) 不論是擺動速率還是滯留點的停照留時間，不同電壓並未造成小葉擺動有明顯差別。

由文獻可知，跳舞草的膜電位差大約在36mV~136mV，遠低於我們實驗的1.5V和3V，所以不論是1.5V或3V都會影響跳舞草電訊號的傳遞，外加電壓遠大於跳舞草本身的膜電位變化，故造成的生理現象影響結果相近。

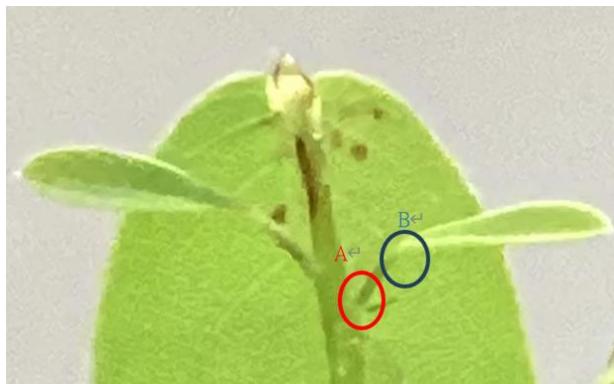
## 六、跳舞草擺動時的植物細胞電位差異

文獻中所提到跳舞草擺動時的電位差在10mV ~ -10mV，但因我們的探測針無法精確的量測到單一細胞內外膜的電位變化，而是葉枕細胞間的電位差，因此電位差的數值約在20~80mV之間，但從實驗結果可觀察到，播放越高音頻時，植物葉枕細胞組織的電訊號變化的間隔越短，推測音波的高速振動(高音頻)會讓細胞產生頻繁的電位差變化，導致細胞快速膨脹和萎縮，因此振動越快(高音頻)小葉轉動越快。

## 七、跳舞草小葉轉動機制探討

### (一)、小葉擺動的機制

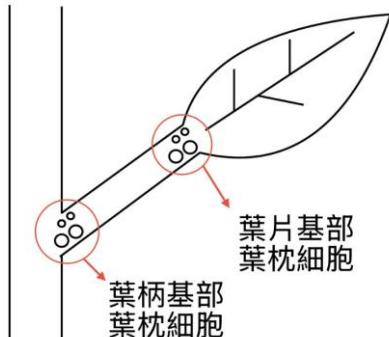
文獻中有提到，跳舞草小葉的擺動機制，最主要是因為葉枕細胞的水分變化。當跳舞草受到各種環境刺激後，葉枕細胞會膨脹或萎縮，使跳舞草的小葉可以進行擺動。我們透過觀察跳舞草小葉擺動，發現小葉有兩種擺動方式，分別為上下擺動和旋轉，我們認為上下擺動是因為葉柄基部的葉枕細胞(A處)膨脹和萎縮造成的，而旋轉是因為葉片基部的葉枕細胞(B處)所影響。



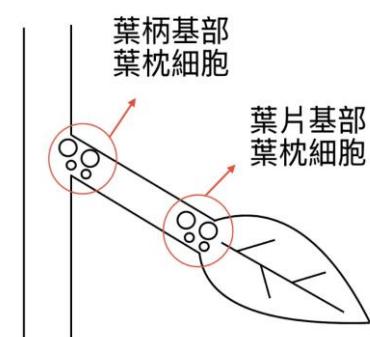
(圖 5-7-1) 葉柄基部和葉片基部的葉枕細胞標示

#### 1.跳舞草向上擺動的原理

當小葉往上擺動時，上方的葉枕細胞會萎縮，下方的葉枕細胞則會膨脹，使小葉向上擺動。



(圖 5-7-2) 小葉原理上擺示意圖



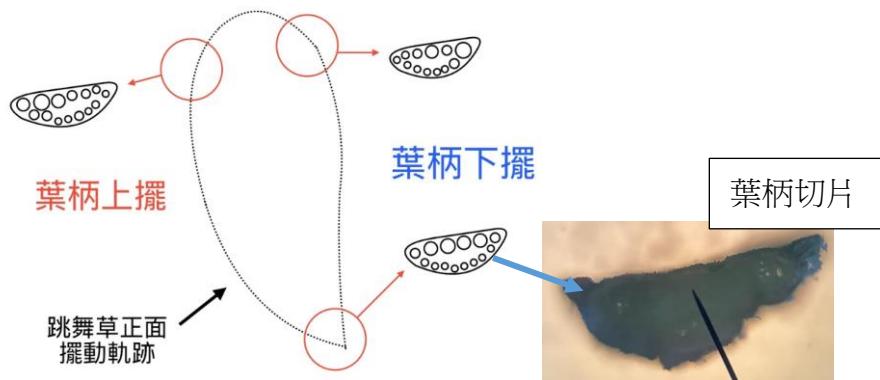
(圖 5-7-3) 小葉下擺示意圖

#### 2.跳舞草向下擺動的原理

當小葉往下擺動時，上方的葉枕細胞會膨脹，下方的葉枕細胞萎縮，使小葉向下擺動。

### 3.小葉旋轉的擺動原理

從前面的實驗可得知跳舞草小葉正面擺動時，擺動軌跡會呈現倒水滴的形狀進行轉動，而葉柄的切片呈現半月形的形狀，因此我們同時探討在葉柄上下擺動時，葉片基部的葉枕細胞膨脹或萎縮變化的轉動情形如下圖(圖 5-7-4)，雖然小葉基部的葉枕細胞呈現半月形，但旋轉的同時，葉柄上下擺動，將旋轉軌跡拉長，從而變成倒水滴形。

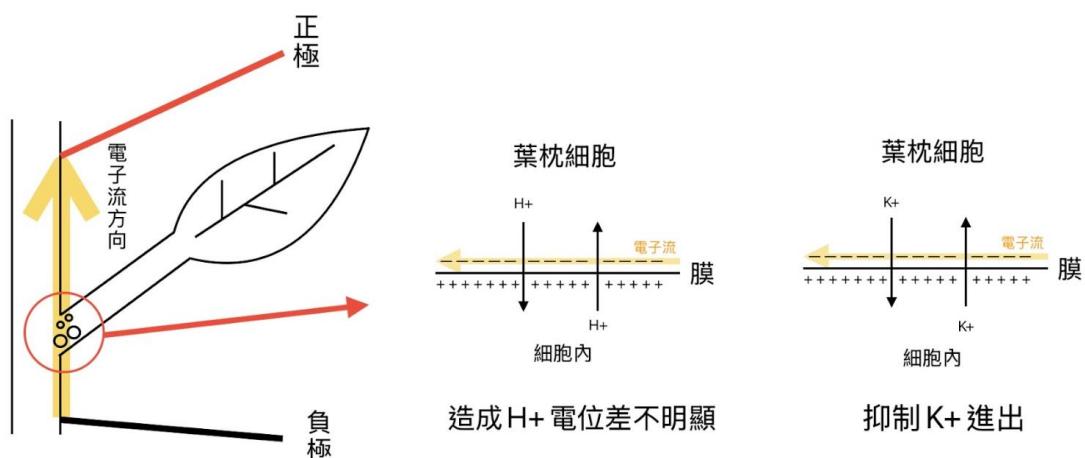


(圖 5-7-4) 小葉旋轉擺動原理示意圖

### (三)、電擊對小葉膜電位變化影響

因為電擊實驗中的 1.5V 和 3V 的電流，遠大於跳舞草的膜電位差 (約 36mV~136mV) ，並且透過前面的實驗結果，可以得知電擊會導致跳舞草小葉的擺動變慢。

由文獻得知小葉擺動與葉枕細胞的膜電位變化有關 (文獻 9、10)，因此推論額外提供的電子流(電擊)，經過葉柄基部的葉枕細胞時，使氫離子造成的膜電位變化不明顯，進而導致鉀離子進出細胞速度變慢，甚至抑制鉀離子的進出，使膨脹中或萎縮中的葉枕細胞停頓，甚至訊號反轉，因此我們同時也觀察到在開啟和關閉電源的時候，小葉擺動的角度在上擺或下擺時會出現轉折點。



(圖5-7-5) 電擊對膜電位變化的影響原理示意圖

## 陸、結論

- 一、跳舞草的小葉擺動軌跡呈倒水滴狀，右葉擺動速率快於左葉，上擺速率比下擺慢。
- 二、在高溫環境下，小葉擺動速率加快，振幅增大，滯留點時間縮短。
- 三、照光時，小葉擺動速度較快，振幅較大，滯留點時間縮短。
- 四、音頻越高，小葉擺動速率越快，滯留點時間縮短。
- 五、在1.5V和3V電壓下，電擊時小葉擺動速率變慢，電擊後更緩慢，滯留點時間延長，當電壓超過膜電位差時，影響並無顯著變化。
- 六、自製植物電壓感測器成功測得擺動時細胞的微電壓變化，且當小葉轉動速度越快時，電位變化越頻繁，未來可用於進一步分析跳舞草的電生理機制。
- 七、跳舞草的擺動受溫度、照光、音頻及電影影響，並伴隨可測量的細胞電位變化，為進一步研究其運動機制提供了科學依據。

## 柒、參考文獻資料

1. 台灣二〇〇五年國際科學展覽會。 (2005)。科別：植物學 作品名稱：聞音起舞—聲音對跳舞草小葉擺動之影響。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2005/pdf/060001-01.pdf>
2. 舞動奇蹟—跳舞草對聲音的感應。 (1994)。科展類別：全國中小學科展 屆次：第 44 屆。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/44/D/030311.pdf>
3. 中華民國第 63 屆中小學科學展覽會。 (2023)。科別：生物科 組別：國中 作品名稱：探討電位差變化對含羞草觸發運動過程的影響。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/63/pdf/NPHSF2023-030319.pdf?0.8510101141873747>
4. Meder, F., Saar, S., Taccola, S., Filippeschi, C., Mattoli, V., & Mazzolai, B. (2021). Ultraconformable, self-adhering surface electrodes for measuring electrical signals in plants. *Nature Materials*, 20(5), 609-617. 取自：[https://www.researchgate.net/publication/349847446\\_Ultraconformable\\_Self-Adhering\\_Surface\\_Electrodes\\_for\\_Measuring\\_Electrical\\_Signals\\_in\\_Plants](https://www.researchgate.net/publication/349847446_Ultraconformable_Self-Adhering_Surface_Electrodes_for_Measuring_Electrical_Signals_in_Plants)
5. 暗藏玄機—跳舞草的秘密武器。 (2018)。科展類別：全國中小學科展 屆次：第 45 屆 科別：生物及地球科學科。台灣。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/45/high/0317/031721.pdf>
6. 教育雲線上字典。舞草 - 教育百科。取自：  
<https://pedia.cloud.edu.tw/Entry/Detail/?title=%E8%88%9E%E8%8D%89&search=%E8%8D%89>
7. 維基百科。 (2006)。舞草。取自：<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%88%9E%E8%8D%89>
8. 臺灣維管束植物調查及物候觀察。鐘萼豆屬 *Codariocalyx*。取自：  
<https://plant.tbn.org.tw/taxa/1a60f529-c5b2-41c0-98ef-4c1b9ab34998>
9. Han, M., & Kim, S. (1995). Oscillations of apoplastic K<sup>+</sup> and H<sup>+</sup> activities in *Desmodium motorium* (Houtt.) Merril. pulvini in relation to the membrane potential of motor cells and leaflet movements. *Plant Physiology*, 107(3), 1049-1056. 取自：  
[https://pure.mpg.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item\\_1794514](https://pure.mpg.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_1794514)
10. Takahashi, A., & Yamaguchi, S. (1995). Oscillations of the membrane potential of pulvinar motor cells in situ in relation to leaflet movements of *Desmodium motorium*. *Journal of Experimental Botany*, 46(12), 1353-1360. 取自 <https://academic.oup.com/jxb/article-abstract/42/7/901/535046?redirectedFrom=fulltext>
11. 超人行銷。 (2025)。標準差怎麼解釋？取自：  
<https://www.isuperman.tw/%E6%A8%99%E6%BA%96%E5%B7%AE%E6%80%8E%E9%BA%BC%E8%A7%A3%E9%87%8B%EF%BC%9F/>
12. t 檢定-JMP。取自：<https://wwwjmp.com/zh-hant/statistics-knowledge-portal/t-test>

13. The enigmatic fast leaflet rotation in *Desmodium motorium*. (2013)。 *Nature Reviews*, 40(3), 230-240.  
取自：<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3908938/>
14. Smallcollation. ° 膜電位 (Membrane potential)。取自：  
<https://smallcollation.blogspot.com/2013/05/membrane-potential.html>
15. Smallcollation. ° 膜電位變化 (Membrane potential changes)。取自：  
[https://smallcollation.blogspot.com/2013/05/membrane-potential\\_11.html#gsc.tab=0](https://smallcollation.blogspot.com/2013/05/membrane-potential_11.html#gsc.tab=0)

【作品內圖表照片說明】本作品『舞葉電襲 – 探討影響跳舞草側葉擺動的機制』內容所有照片、圖片、圖表皆由作者自行拍攝、繪製。