

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生活與應用科學科

040804

含羞草的避震效應

學校名稱： 國立台東高級中學

作者： 高二 田弘康 高二 張育蒲 高二 潘宣任 高二 鄭朝誠	指導老師： 許淑玲 曾大誠
---------------------------------------------	---------------------

關鍵詞：含羞草、削減力量、葉枕

含羞草的避震效應

壹、摘要

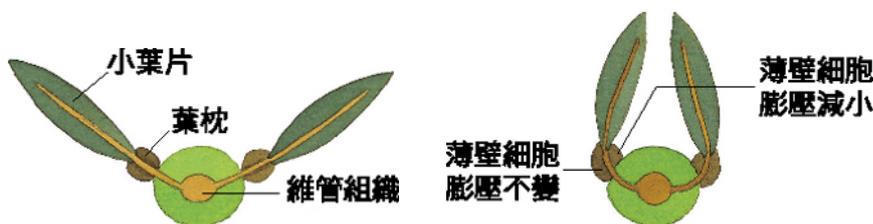
本實驗分別以水滴及擺錘敲擊含羞草的關節，試圖測量究竟多大力量才會引發含羞草的觸發運動。結果發現三級關節最敏感，一級關節較遲鈍，二級關節則無反應。當經由水滴滴在羽軸以檢測含羞草觸發運動的敏感度變化時，發現一級關節在夜間反應率比白天高很多。進一步以擺錘直接敲擊一級關節，發現其敏感度日夜間無甚差距。此外在小葉都是閉合的情況下，敲擊羽軸以檢測一級關節的反應；結果日夜間也差距甚小。我們推測在小葉展開時，敲擊的作用使三級關節的葉枕萎縮；當作用力透過羽軸、葉柄傳遞至一級關節時，三級關節的的葉枕如同避震器一般藉由變形而削減了作用力。這個推測透過比較小葉展開與閉合時一級關節的敏感度而證實。藉著測量一級關節在小葉展開與閉合時最低作用力矩推算，每經過一對葉枕大株含羞草大約可以削減 1.8~2.2%的作用效應，小株含羞草大約可以削減 6.1~8.5%的作用效應。

貳、研究動機

含羞草夜間有睡眠運動，受機械刺激會產生觸發運動。含羞草的葉子為二級羽狀複葉，在小葉、羽軸和葉柄的基部都有個肥大區叫作葉枕。當受到刺激時，葉枕的水分會排出，使細胞失去膨壓變得癱軟，因而造成小葉閉合或葉柄下垂。這三處葉枕就分別稱為三級、二級和一級關節。

過去以含羞草為材料的研究，有的是探討土壤酸鹼度、濕度對觸發運動的影響；有的是探討光強度、光質對睡眠運動的影響。更深入的則是以離子通透性探討葉枕的變形的機制。觀測的指標多半為關節變形的角度或回復的時間長短。當我們隨意玩弄含羞草葉片時，觀察到閉合的小葉數量有多有少，有時還會造成葉柄下垂。引起我們興趣的是：需要用多大的力量才會引發觸發運動？多層次的關節構造在受刺激時有什麼效應？

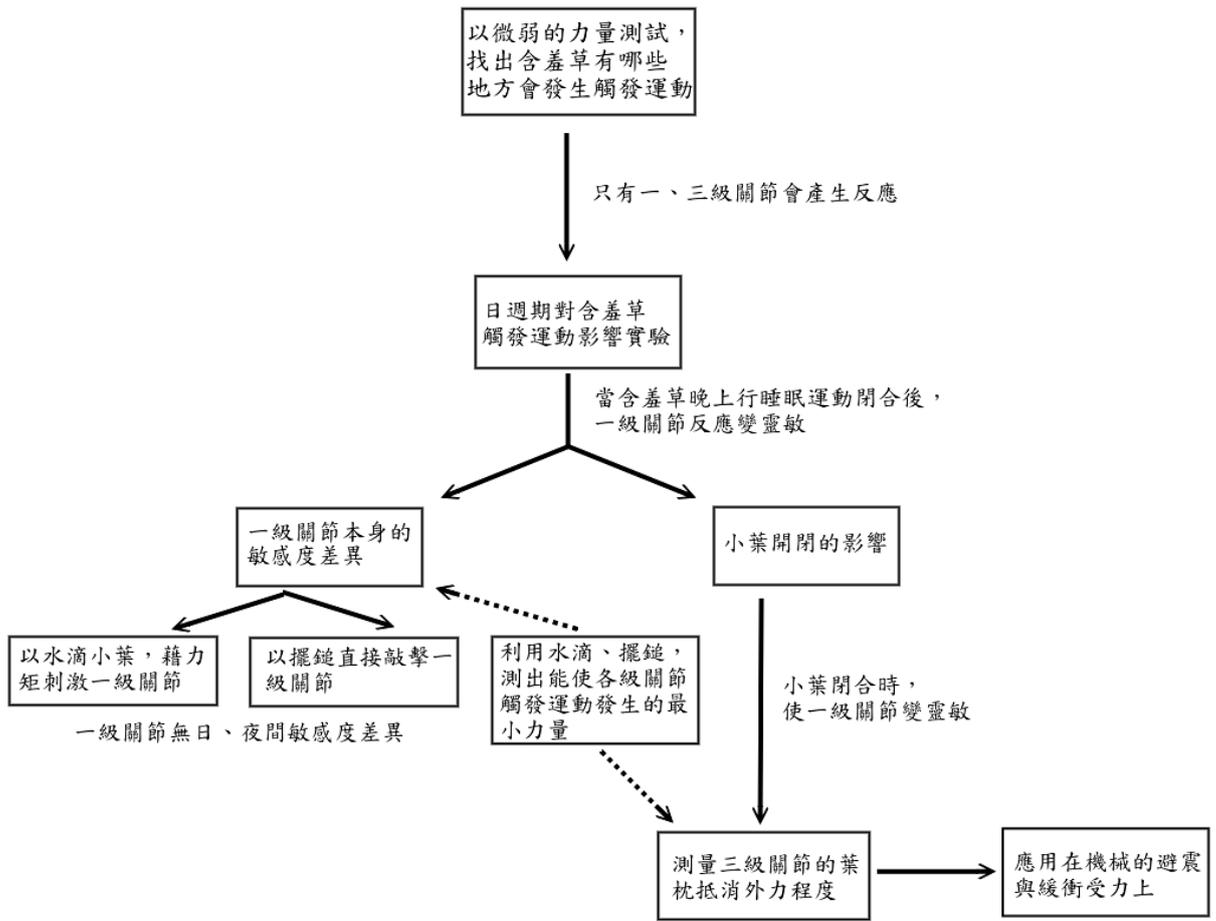
(高中生物下冊第十章，高中物質科學物理上冊第一章、下冊第七、八、九章)



參、研究目的

- 一、找出含羞草有哪些地方會發生觸發運動。
- 二、檢測日週期對含羞草觸發運動的影響。
- 三、利用水滴、擺錘測出能使各級關節觸發運動發生的最小力量。
- 四、探討一級關節夜間反應比例高的原因。
- 五、檢測三級關節葉枕產生觸發運動時，藉葉枕細胞變形削減作用力的效率。
- 六、分析其他環境因素對觸發運動實驗的干擾。

圖一、研究流程圖



圖二、各級關節示意圖： (展開狀態)



(閉合狀態)



肆、器材

大株含羞草*12、小株含羞草*12、滴管、數位攝影機、花盆、鐵尺(30cm、45cm)、電子天秤、綿繩(20cm)、小鉛球(0.88g)、三角板、光度計、乾溼球溫度計。

圖三、大株與小株含羞草示意圖



(大株)



(小株)

(以 2 級關節上著生的羽軸數來分大、小株含羞草，4 片為大株，2 片為小株)

伍、研究方法

- 一、找出含羞草有哪些地方會發生觸發運動：
 - (一) 取 6 株小株含羞草，用不同高度滴水在三級關節上，紀錄各級關節反應狀況。
 - (二) 以更大力量直接敲擊二級關節：
 - 1、以水滴能瞄準的最大高度滴下。
 - 2、把擺錘裝置拉到能瞄準的最大高度敲擊。
 - 3、用手扳起中指在距二級關節 5cm 的位置彈擊。
 - (三) 以水滴能瞄準的最大高度滴一級關節。
- 二、日週期對含羞草觸發運動的影響：

取 12 株小株含羞草，分別在八個時段(3:00、6:00、9:00、12:00、15:00、18:00、21:00、24:00)由 2cm 高度滴水在三級關節上，紀錄反應。
- 三、利用水滴、擺錘測出能使各級關節觸發運動發生的最小力量：
 - (一) 取 9 株小株含羞草，用不同高度的水滴分別滴在三級關節上，利用自由落體、碰撞等原理測出能使觸發運動發生的最小力量。
 - (二) 設計一個簡易的擺錘，直接敲擊在一級關節上，利用位能差求出能使一級關節反應的最小力量。

四、探討一級關節夜間反應次數高的原因：

(一) 一級關節日夜敏感度的比較：

- 1、取 3 株大株含羞草，分別在 12 點至 14 點以及 20 點至 22 點，以擺錘直接敲擊一級關節，比較此兩種時段一級關節需要產生反應的最小力量是否有不同。
- 2、同樣的時段取 3 株小株含羞草，以水滴在小葉已閉合的三級關節外側，藉由力矩作用刺激一級關節作比較。

(二) 小葉的開閉對一級關節的影響：

取 12 株含羞草，分為大小兩組，每組 6 株分別做實驗。固定每天中午 12 點至 14 點做實驗，分別在小葉展開與閉合時，滴水在三級關節的外側，紀錄一級關節的反應情形。小株滴水高度由 1cm 至 3cm，每 1cm 為一間距，大株滴水高度由 5cm 至 15cm，每 5cm 為一間距(因為在前測時，發現了大株含羞草必須要施相較於小株含羞草較大的力才產生閉合，所以大株含羞草的間距取的範圍較大)。

五、三級關節的葉枕抵消外力的效應：

- (一) 在小葉展開時，分別在三級關節的內側及外側用不同高度滴水，紀錄一級關節下垂所需的最低水滴高度。
- (二) 當小葉閉合時，重覆上列實驗。
- (三) 記錄敲擊點到一級關節間的力臂與敲擊點至二級關節間的葉枕數量。

六、其他環境因素對觸發運動實驗的影響：

做各實驗時，紀錄當時的光度、溫度、溼度，並以 2cm 高度滴水在三級關節，觀察並紀錄小葉有無反應。用統計軟體 SPSS 算出實驗期間的環境因子的變動是否會對含羞草的觸發運動反應靈敏度有影響。

陸、結果與討論：

一、找出含羞草有哪些地方會發生觸發運動：

(一) 滴水在第三級關節的結果：

表一、由高度 0.5cm 高處滴水，各級關節的反應

測試結果 反應區	反應次數/滴水次數	百分比
1 級關節	7/90	8%
2 級關節	0/90	0%
3 級關節	46/90	51%

- 1、我們定義葉柄倒下為一級關節有反應、羽軸與葉柄的夾角有改變為二級關節有反應、小葉閉合為三級關節有反應。
- 2、從高度 0.5cm 滴在第 3 級關節時，三級關節就超過 50%有閉合反應；而一級關節也連帶有 8%有反應，在這裡我們可以發現一、三級關節皆會產生反應。
- 3、二級關節皆無產生反應，推測二級關節需要更大的力量才会有反應。

(二) 直接敲擊第二級關節：

表二、以能夠準確敲擊的最高強度敲打二級關節的結果

施力方式	反應次數/滴水次數
以 30cm 高度滴水	0/90
以擺錘拉至 20 高 cm 敲擊	0/90
扳起中指彈擊二級關節	0/90

在這個實驗中，我們找了幾種增強施力的方法：

- 1、水滴高度 30cm 是我們能用水滴瞄準葉片的最大高度，但二級關節仍都沒有產生反應。
- 2、擺錘施力：把擺錘拉到能瞄準的最大水準高度（鉛直距離差 20cm，施力為 2049.76 達因），敲擊二級關節，也沒有產生反應。
- 3、用中指在距二級關節 5cm 的位置彈擊，二級關節仍無產生反應。
- 4、以實驗中最強的力量敲擊，二級關節皆沒有產生反應，故在接下來的實驗不考量二級關節。

(三) 高度 30cm 滴水在第一級關節上：

以同樣的水滴高度 30cm 直接滴水在一級關節上，並不會產生觸發運動，但是滴水在三級關節上時，一級關節有時會產生反應，推測有兩個可能：(1)一級關節產生反應需要的力量比三級強。(2)葉枕位於下側。

二、日週期對含羞草觸發運動的影響：

含羞草會行睡眠運動，我們便想瞭解含羞草的觸發運動是否會受到時間的影響，於是我們每隔三小時以 2cm 的高度滴水第三級關節上。把同時段施測結果做統計，紀錄如下

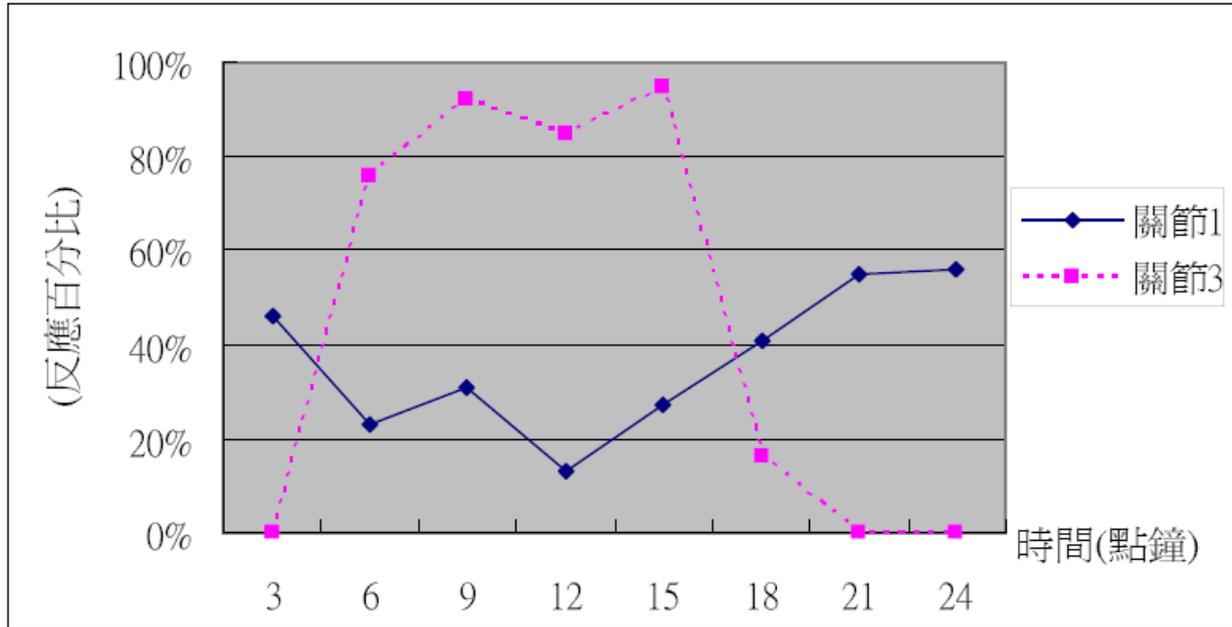
表三、關節敏感度的日週期：敲擊 168 次的反應次數

	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00	24:00
一級關節	77	39	52	22	46	69	92	94
三級關節	0	127	154	142	160	27	0	0

表四、關節敏感度的日週期：有反應百分比

	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00	24:00
一級關節	46%	23%	31%	13%	27%	41%	55%	56%
三級關節	0%	76%	92%	85%	95%	16%	0%	0%

圖四、一、三級關節觸發運動的敏感度日週期：



- (一) 從以上圖表可看出，三級關節約在 6 點至 15 點之間超過 76% 有反應，而晚上約 6 點以後含羞草行睡眠運動，小葉都已閉合，故無反應。
- (二) 白天一級關節反應並不明顯，在 6 點至 15 點之間低於 31%，但在晚上當小葉閉合後，一級關節的反應次數卻開始上升，我們推測有兩種可能：
 - 1、一級關節在晚上的靈敏度比較高。
 - 2、小葉展開時會削減刺激的力量。
- (三) 由實驗我們發現時間會影響觸發運動，所以實驗時間皆固定在午休時間 (12:00~14:00)，以避免受到時間因素的影響。
- (四) 在晚上為減少光線的影響，只開微弱的燈光做實驗，實驗期間觀察到小葉一直維持閉合狀態。可能植物的延滯效應，使得實驗中短暫的光照，並未影響反應靈敏度。

三、利用水滴、擺錘測出能使各級關節觸發運動發生的最小力量：

(一) 水滴施予葉片力量的計算：

用水滴滴含羞草，發現含羞草會閉合，就決定用水滴來測量敲擊的力量。利用 $F = m \times a$ 計算施力大小。

1、水滴重量統計：

將塑膠培養皿放入電子天平，滴一滴水後秤重，總計測 10 滴。扣除培養皿重量後結果如下：

表五、穩定控制下，每一滴水的質量：

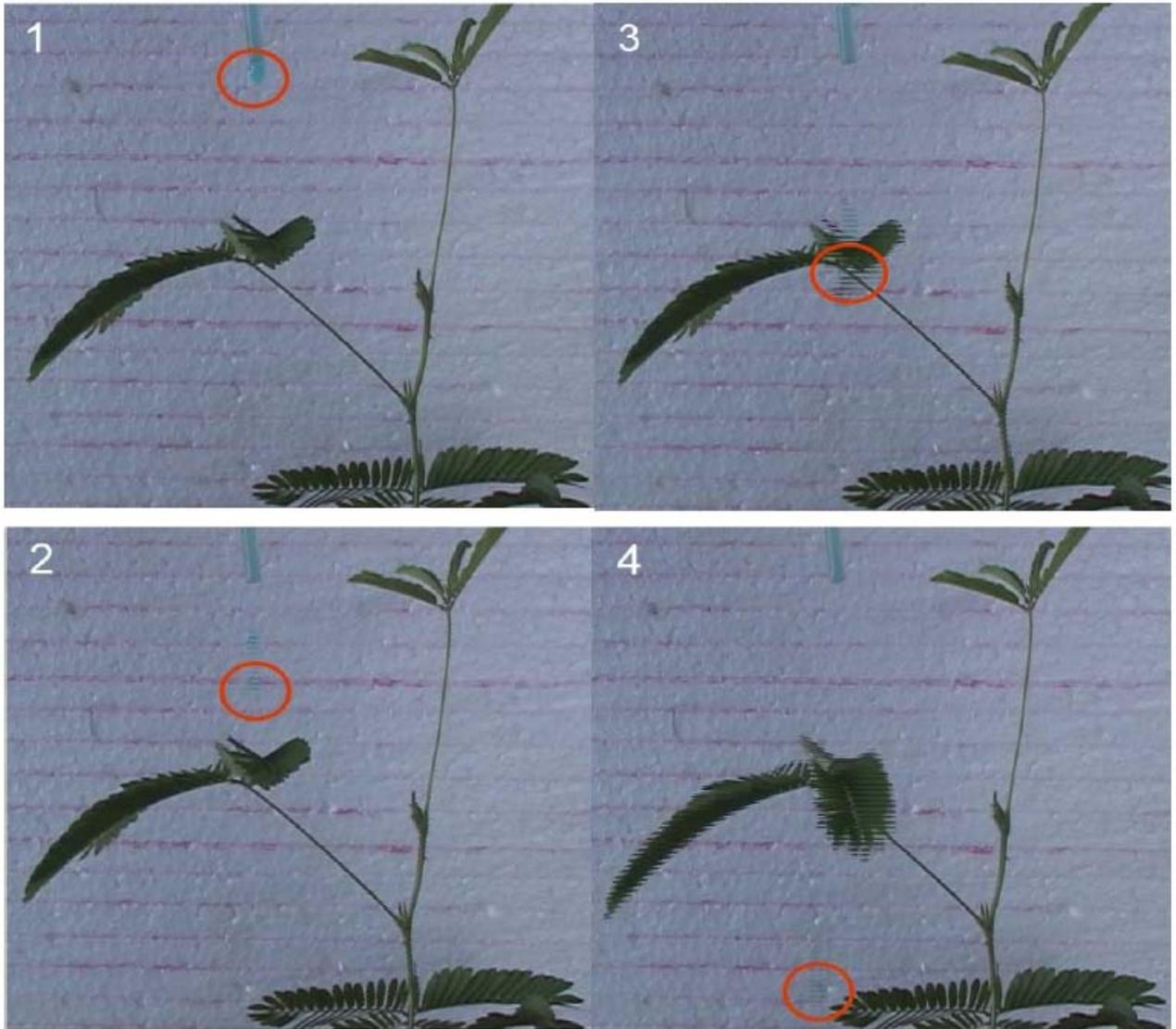
次數	1	2	3	4	5	
水滴質量 (g)	0.0513	0.0500	0.0497	0.0510	0.0502	
次數	6	7	8	9	10	平均
水滴質量 (g)	0.0512	0.0509	0.0510	0.0514	0.0506	0.0507

- (1) 水滴敲擊方式是緩緩擠壓塑膠滴管，擠出長約 0.1cm 再讓水滴由懸掛的管口自行滴落。
- (2) 由表五可知每次水滴重量十分接近，平均值取到小數點下第三位，約為 0.051g。
- (3) 因為每次水滴重量差距不大，所以計算水滴施力時統一以平均值代入。

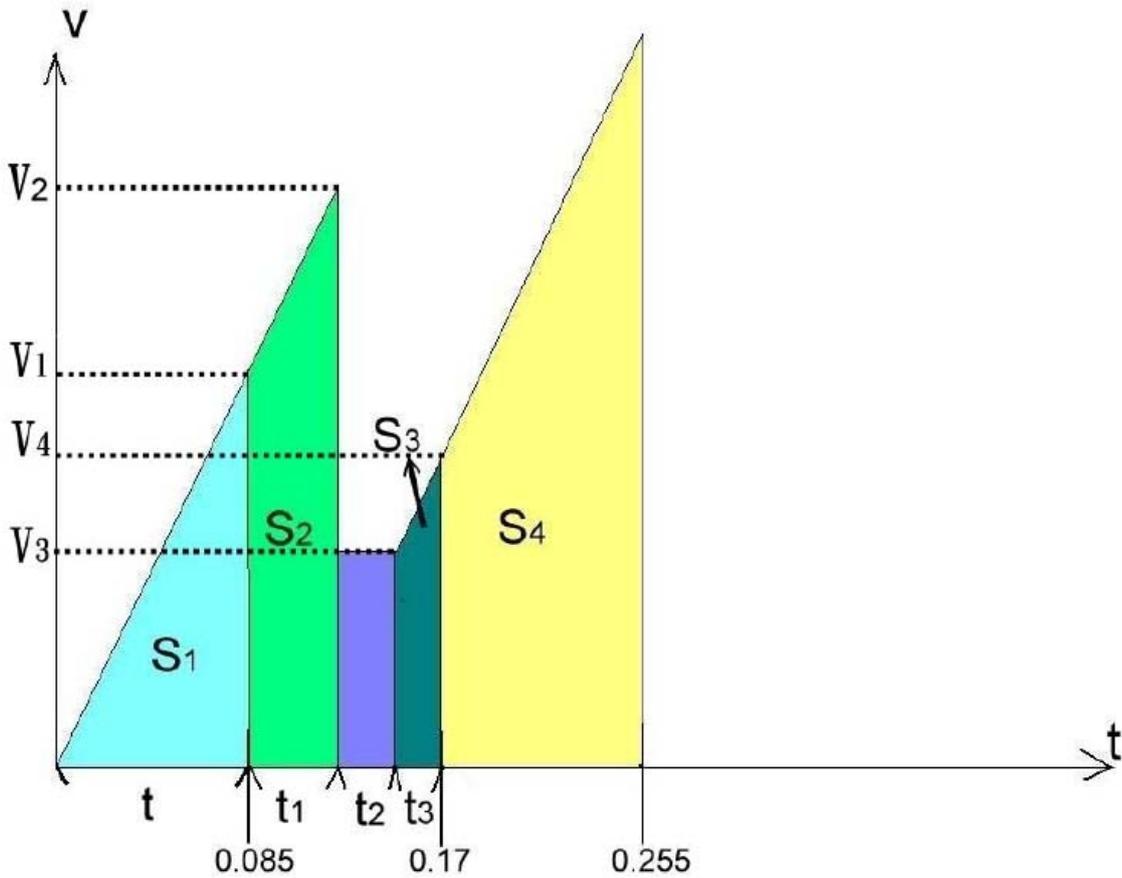
2、水滴接觸葉面時間的計算：

- (1) 要求出加速度需要知道水滴接觸到葉面的時間，以及敲擊前後的速度。我們以白色保麗龍板當背景，板上每隔 1 公分劃一條線當做量尺；水中加入硫酸銅使水滴成藍色，用數位攝影機拍攝水珠滴落小葉的過程，採用軟體 Vidiostudio 將影片擷取至電腦，並切換成一張一張的連續圖片。(如圖六)

圖六、水滴敲擊葉子前後的連續畫面



圖七、水滴敲擊葉片的接觸時間測量示意圖



- S_1 ：第一張與第二張照片中水滴的距離。
- S_2 ：第二張照片的水滴位置到葉子的距離。
- S_3 ：葉子未被滴到前的原位置到第三張照片的水滴距離。
- S_4 ：第三張照片的水滴位置到第四張的水滴距離。
- t_2 ：水滴接觸葉片的時間。

表六、水滴第一段移動距離

	S_1 (cm)
	3.8
	3.5
	3.2
平均	3.5

間隔時間：

$$S = v_0 \times t + \frac{1}{2} \times a \times t^2$$

$$\text{由初速} = 0, S_1 = \frac{1}{2} \times 980 \times t^2$$

$$3.5 = \frac{1}{2} \times 980 \times t^2$$

$$t = 0.085 \text{ 秒}$$

接觸時間：

$$V_1 = V_0 + a \times t, \quad V_1 = 0 + 980 \times 0.085 = 83.3$$

$$S_2 = V_1 \times t_1 + \frac{1}{2} \times a \times t_1^2, \quad S_2 = 83.3 \times t_1 + \frac{1}{2} \times 980 \times t_1^2$$

$$t_1 = \frac{-83.3 + \sqrt{(83.3)^2 + 4 \times S_2 \times 490}}{980}$$

由實驗上測量出 S_2 解得 t_1

$$S_4 = V_4 \times 0.085 + \frac{1}{2} \times a \times (0.085)^2, \quad V_4 = \frac{S_4 - 3.54}{0.085}$$

$$V_4 = V_3 + a \times t_3, \quad \frac{S_4 - 3.54}{0.085} = V_3 + 980 \times (0.085 - t_1 - t_2) \text{--- 第一式}$$

$$S_3 = V_3 \times t_3 + \frac{1}{2} \times a \times t_3^2, \quad S_3 = V_3 \times (0.085 - t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \times 980 \times (0.085 - t_1 - t_2)^2 \text{--- 第二式}$$

由第一式與第二式聯立，以及實驗上測量出 S_3 、 S_4 可解得 t_2

表七、接觸葉子前後時段的距離與時間：

	S_2 (cm)	S_3 (cm)	S_4 (cm)	t_1 (秒)	t_2 (秒)
	3	1.6	9.1	0.0288	0.0218
	3	1.4	8.8	0.0305	0.0229
	3.1	1.7	9.2	0.0305	0.0181
				平均	0.0209

- (2) 總計拍攝 14 次水滴片段，切取的連續畫面水滴落下為第一張，碰到葉子前為第二張，碰到葉子時為第三張，下一個畫面為第四張。
- (3) 取最清楚 3 段影片所測出的數據推算 t_2 (接觸時間) 的值。三次取平均值為 (0.0209)。
- (4) 實際碰撞的接觸時間應該比測量值短，礙於儀器的限制使我們只能逼近到這樣的數值。這樣的估測方式限制上無法克服之前，我們把每一次水滴接觸葉片的時間當成定值。以下的計算均採計平均值(0.0209)。

3、水滴施予葉片力量的計算：

(1) 由上列水滴質量與葉面接觸時間代入公式。(算法如下)

$$\begin{aligned}
 F &= m \times a \\
 &= m \times \frac{\Delta V}{\Delta t} \\
 &= m \times \frac{V_2 - V_3}{\Delta t} \text{-----(1)}
 \end{aligned}$$

由 $V_4 = V_3 + a \times t_3$, $\frac{S_4 - 3.54}{0.085} = V_3 + 980 \times (0.085 - t_1 - t_2)$ --- 第一式

$S_3 = V_3 \times t_3 + \frac{1}{2} \times a \times t_3^2$, $S_3 = V_3 \times (0.085 - t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \times 980 \times (0.085 - t_1 - t_2)^2$ --- 第二式

第一式與第二式聯立，以及實驗上測量出 S_3 、 S_4 可解出 V_3

表八、水滴接觸葉片後的末速(V_3)

	S_3 (cm)	S_4 (cm)	V_3
平均	1.6	9.1	29.66
	1.4	8.8	28.84
	1.7	9.2	28.96
			29.15

(2) 3 次測量出的 V_3 與平均值的差距介於 1%~1.7%，與後續計算影響不大，所以 V_3 階取平均值 (29.15)，並把 V_3 (水滴撞擊葉片後的速度) 當成定值。

$$\begin{aligned}
 V_2^2 &= V_0^2 + 2gh \\
 V_2 &= \sqrt{2gh} \\
 &= \sqrt{2 \times 980 \times h} \text{----代入(1)} \\
 F &= m \times \frac{\sqrt{2 \times 980 \times h} - V_3}{\Delta t}
 \end{aligned}$$

$$= m \times \frac{\sqrt{2 \times 980 \times h} - 29.15}{\Delta t}$$

由數位攝影機拍攝的切換圖片計算出接觸時間 $\Delta t = 0.0209$

m: 一滴水滴的質量(g) h: 水滴的高度(cm)

$$\text{所以 } F = 0.051 \times \frac{\sqrt{2 \times 980 \times h} - 29.15}{0.0209}$$

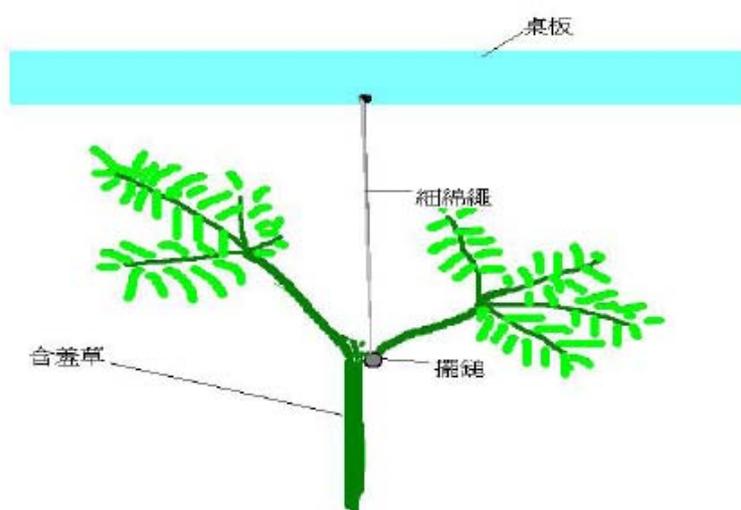
表九、水滴各種高度換算出來的施力對照：

高度 (cm)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
達因 (dyne)	5.258	36.90	81.65	116.0	144.9	170.4	193.5	214.7	234.4	253.0	270.5

(二) 擺錘敲擊關節的力量測量：

由於直接滴水無法使一級關節產生反應，故我們設計出一個簡易的擺錘(如圖八、九)，可直接敲擊一級關節的葉枕，再以擺錘和葉枕之間的能量轉換算出能使一級關節反應的最小力量。(算法如下)

圖八、以擺錘敲擊的示意圖：



圖九、以擺錘敲擊的照片：



$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

$$v^2 = 2gh$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$\text{又 } F = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{m \times \Delta v}{\Delta t}$$

$$= \frac{m \times \sqrt{2gh}}{\Delta t} = \frac{m \times \sqrt{2 \times 980 \times h}}{\Delta t}$$

$$m = 0.88(g), \Delta t = 0.085(s)$$

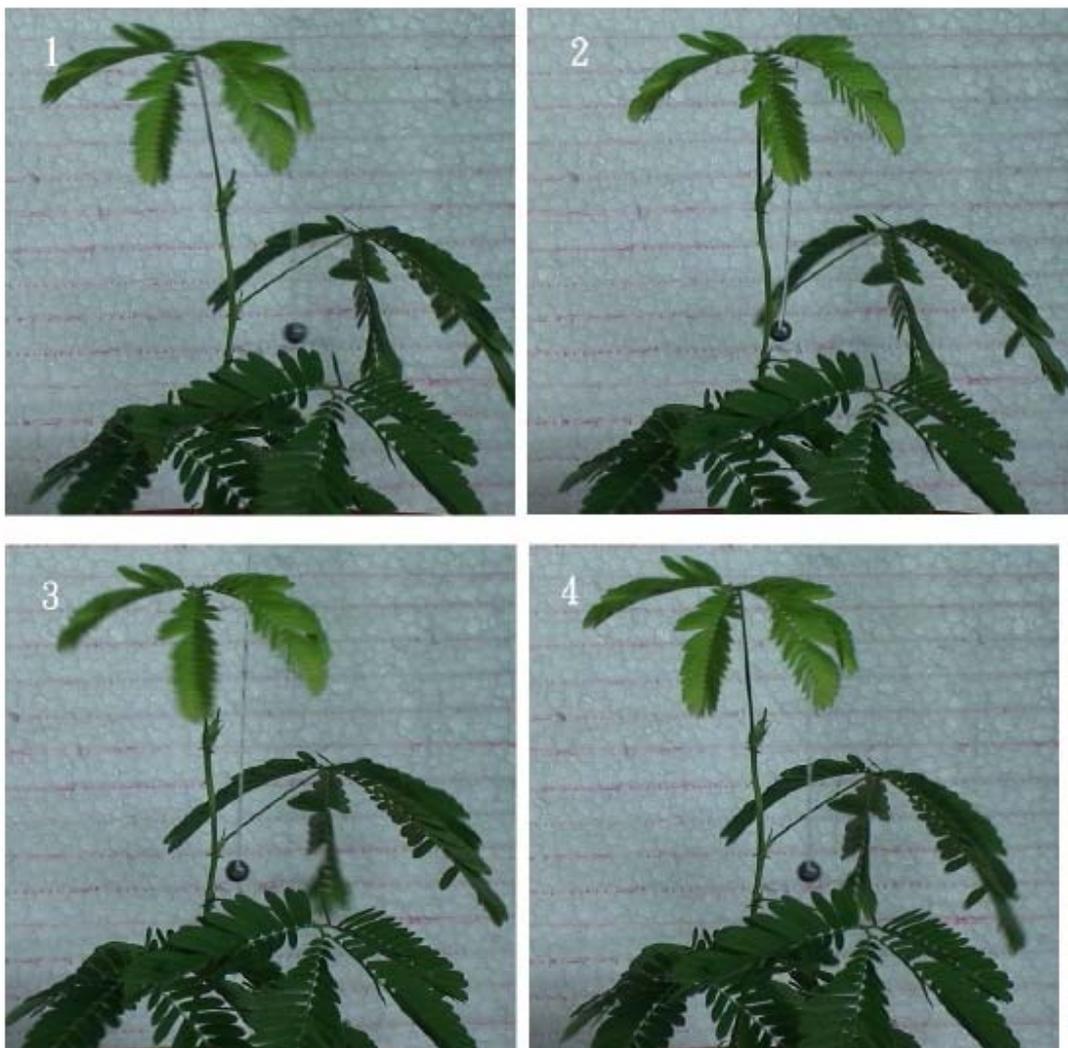
$$\Rightarrow 458.34 \times \sqrt{h}$$

h 代表擺錘高度差

m 代表擺錘上小鉛球的重量

Δt : 數位攝影機拍攝的影片切換成一張一張的圖片，看到擺錘接觸到含羞草的時間在兩張圖片之間，故接觸時間取0.085秒

圖十、擺錘敲擊一級關節前後的連續畫面



(三) 大株一級關節及三級關節最低刺激強度的比較：

表十、以擺錘敲擊一級關節所需產生反應的最小力量

編號	擺錘高度差 (cm)	力(達因)
1.1	1.5	561.35
1.2	1.1	480.71
1.3	1.4	542.32
2.1	1.0	458.34
2.2	1.2	502.09
3.1	2.0	648.19
3.2	2.3	695.10
3.3	2.2	679.83
3.4	2.1	664.20
平均	1.64	581.35

測量出擺錘高度差平均為 1.64cm，計算結果大株含羞草的一級關節最低刺激強度約為 581.35 達因。

表十一、以水滴使三級關節反應的最小力量

編號	滴水高度	力(達因)
1.1	1.0	36.90
1.2	1.5	61.18
1.3	1.0	36.90
2.1	0.5	5.258
2.2	0.5	5.258
3.1	1.5	61.18
3.2	0.75	22.43
3.3	0.5	5.258
3.4	1.5	61.18
平均	0.97	35.27

- 1、利用水滴測出大株的三級關節有反應的最低高度平均為 0.97cm，算得刺激力量強度為 35.27 達因。此數值比一級關節要小得多。
- 2、從數位攝影機切換圖片看出擺錘撞擊含羞草一級關節的接觸時間，其實是很粗糙的。實際上的接觸時間一定比所測量的(0.085 秒)還短，但是時間越短算出的力也會越大，故一級關節所受到的力一定比三級關節還大。

四、一級關節夜間靈敏度高的原因：

從日週期的實驗發現，一級關節在晚上時反應次數增加，推測可能是一級關節在晚上較靈敏或者是受到小葉閉合的影響。

(一) 一級關節日、夜間靈敏度的比較：

1、直接敲擊一級關節：

表十二、分別在日、夜間以擺錘敲擊一級關節引起反應所需的力量

葉子編號	白天(達因)	晚上(達因)	
1.1	561.35	561.35	
1.2	480.71	458.34	
1.3	542.32	542.32	
2.1	458.34	434.82	
2.2	502.09	502.09	
3.1	648.19	648.19	
3.2	695.10	679.83	
3.3	679.83	664.20	
3.4	664.20	679.83	
平均力量	581.35	574.55	差距-1%

2、以水滴滴在小葉已閉合的三級關節上，產生力矩使一級關節下垂：

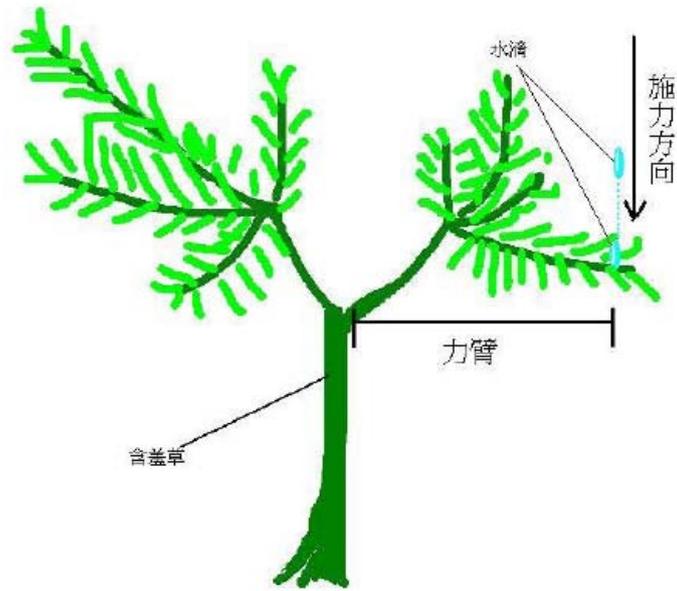
表十三、分別在日、夜間產生反應的最低水滴高度與力矩

葉子編號	白天(閉合外側)			晚上(閉合外側)			
	高度 (cm)	力臂 (cm)	力矩	高度 (cm)	力臂 (cm)	力矩	
1.1	2	2.1	171.5	1	2.1	77.49	
1.2	1	2.6	95.94	1	2.6	95.94	
1.3	1	1.6	59.04	2	1.6	130.6	
2.1	2	1.6	130.6	2	1.6	130.6	
2.2	2	4.7	383.8	2	4.7	383.8	
2.3	1	4	147.6	1	4	147.6	
3.1	1	3.7	136.5	1	3.7	136.5	
3.2	1	3.5	129.2	1	3.5	129.2	
3.3	2	3.8	310.3	2	3.8	310.3	
平均			173.8			171.3	差距-1%

- (1) 在白天及晚上直接敲擊一級關節，產生反應所需的最小力量相差 1%。
- (2) 從第三級關節施力，一級關節在白天及晚上產生反應所需要的力矩相差 1%。

因此我們推斷一級關節並無日、夜間敏感度的差別。

圖十一、一級關節與水滴的作用槓桿示意圖

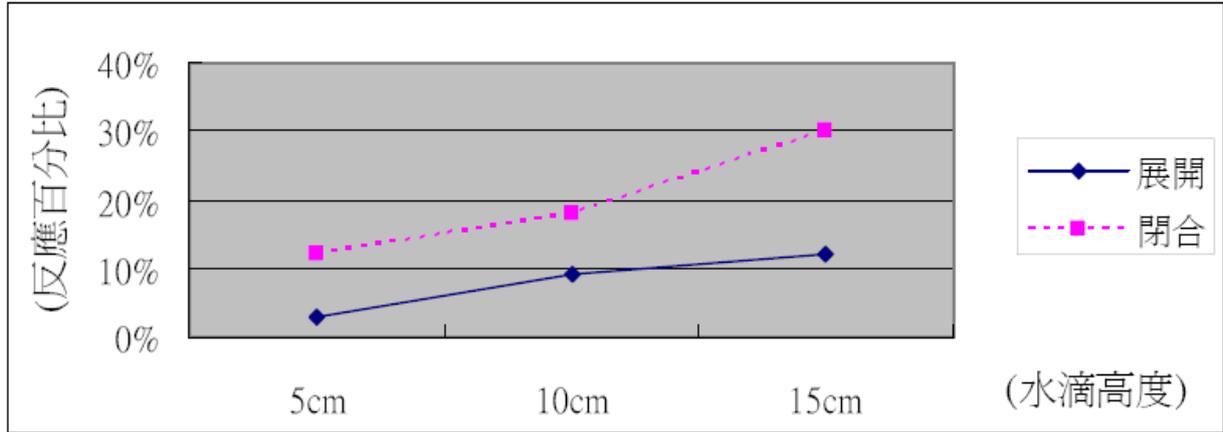


(二) 小葉的開閉對一級關節的影響：

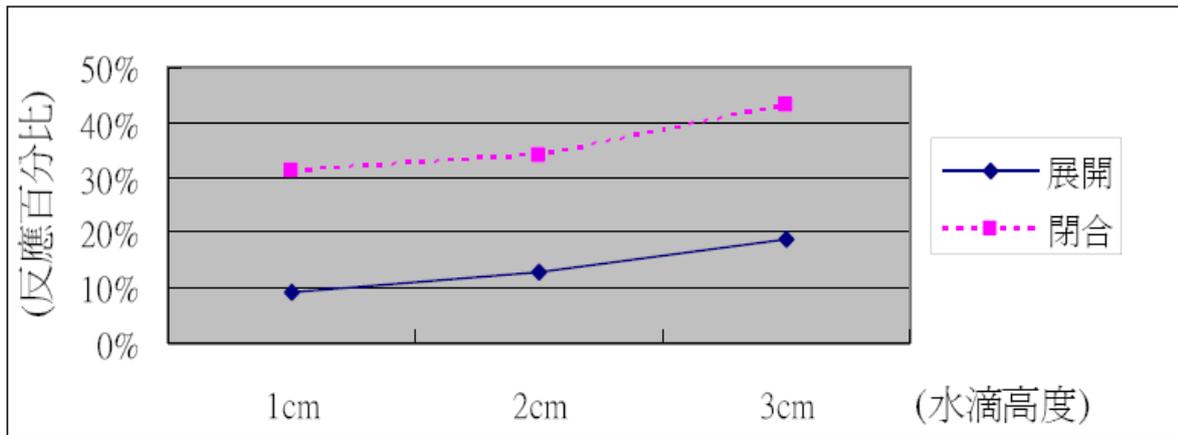
表十四、不同高度滴水時，一級關節有反應的百分比

大株			小株		
	展開	閉合		展開	閉合
5cm	3%	12%	1cm	9%	31%
10cm	9%	18%	2cm	13%	34%
15cm	12%	30%	3cm	19%	43%

圖十二、由不同高度滴水在大株含羞草時，一級關節的反應



圖十三、由不同高度滴水在小株含羞草時，一級關節的反應

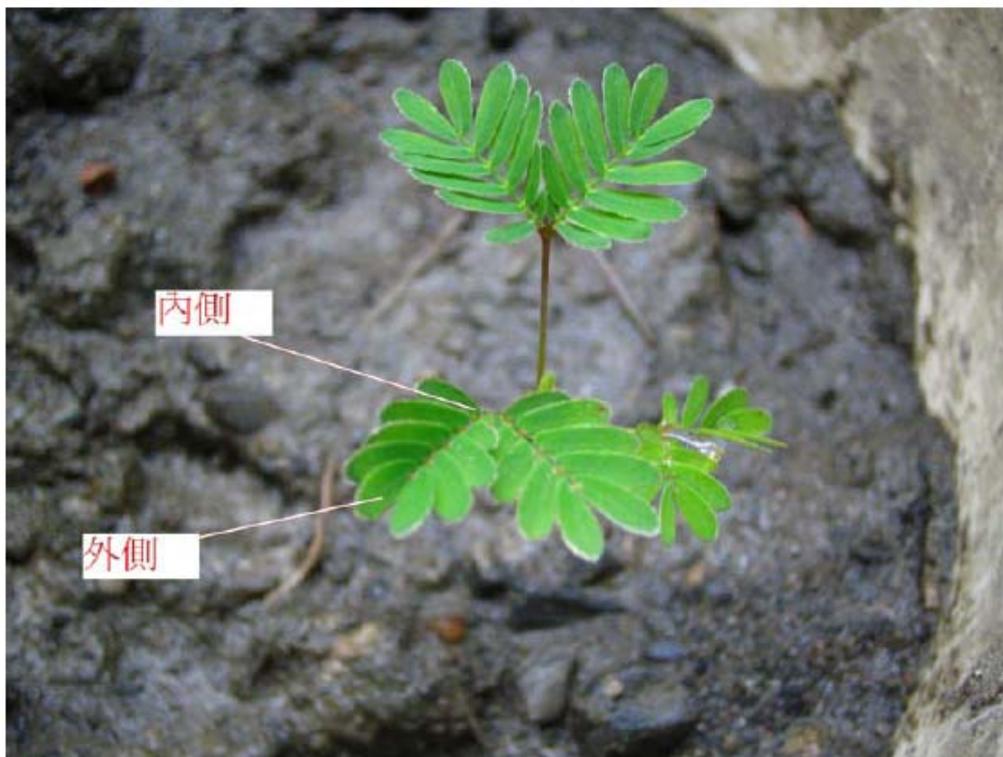


- 1、滴水高度相同時，一級關節的反應次數在閉合時都較展開時多。
- 2、綜合實驗(一)、(二)，一級關節在晚上反應時次數增多的原因是因為晚上行睡眠運動小葉已閉合，故傳導至一級關節上的力量比白天更強，而不是因為一級關節本身在晚上較敏感的原因。

五、三級關節的葉枕抵消作用力效應的的探討：

小葉展開時，敲擊的力量會導致三級關節變形而閉合，推測這個現象使傳遞到一級關節的力矩變小了。所以我們做底下檢測。

圖十四、三級關節內、外側示意圖

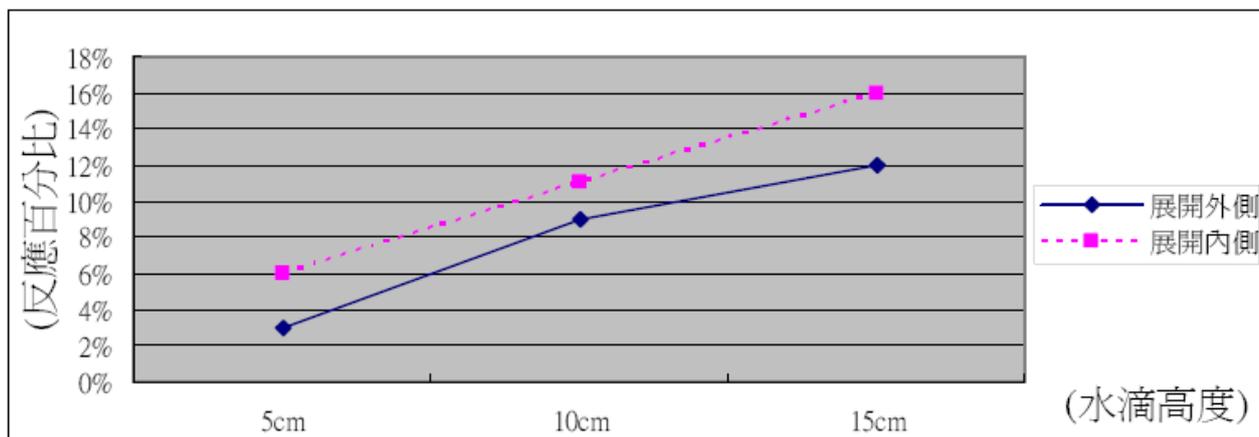


(一) 小葉展開時，由同樣高度滴水在三級關節外側和內側的比較

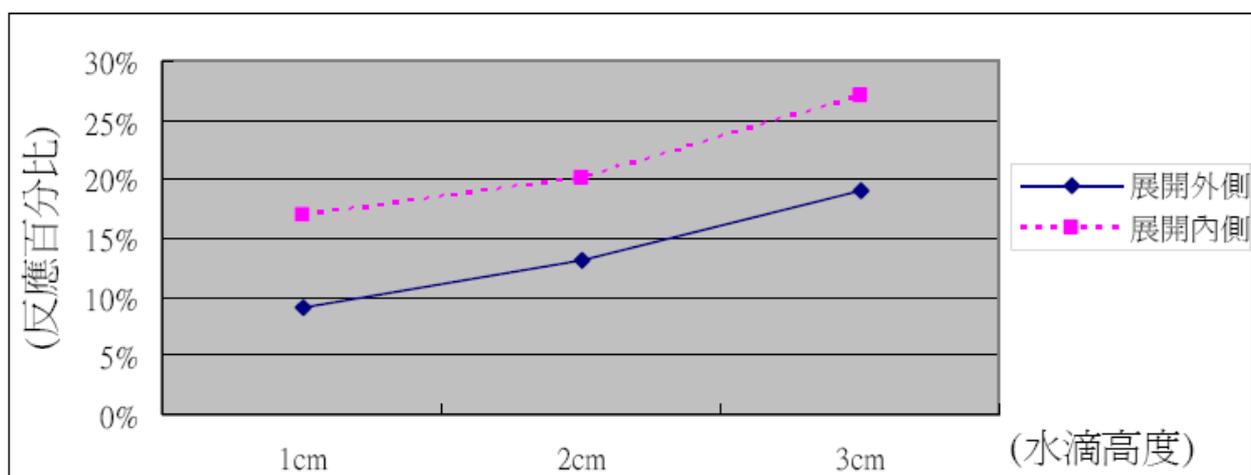
表十五、不同高度滴水時，一級關節有反應的百分比

大株	外側	內側	小株	外側	內側
5cm	3%	6%	1cm	9%	17%
10cm	9%	11%	2cm	13%	20%
15cm	12%	16%	3cm	19%	27%

圖十五、由不同高度滴水在大株含羞草時，一級關節的反應



圖十六、由不同高度滴水在小株含羞草時，一級關節的反應



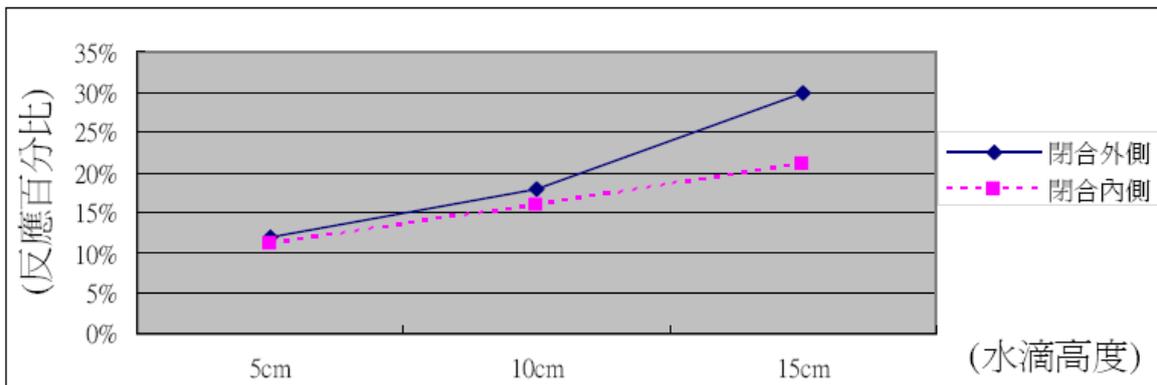
- 1、從此實驗結果可以發現，在小葉展開時，以同樣高度滴水，內側的反應率比外側多。如果依照槓桿原理，水滴在外側對一級關節所施的力臂比滴在內側長，也就是說外側產生反應的百分率應比內側還高。而實驗結果卻剛好相反，我們推測應是三級關節在產生觸發運動時葉枕的萎縮變形削減力量的效應在外側較明顯。
- 2、而從這個實驗結果反推，如果當小葉閉合時，分別滴水在三級關節內側及外側時，葉枕在萎縮狀態時是否還會抵消敲擊作用，於是接著做以下的實驗：

(二) 小葉閉合時，由同樣高度滴水在外側和內側的比較：

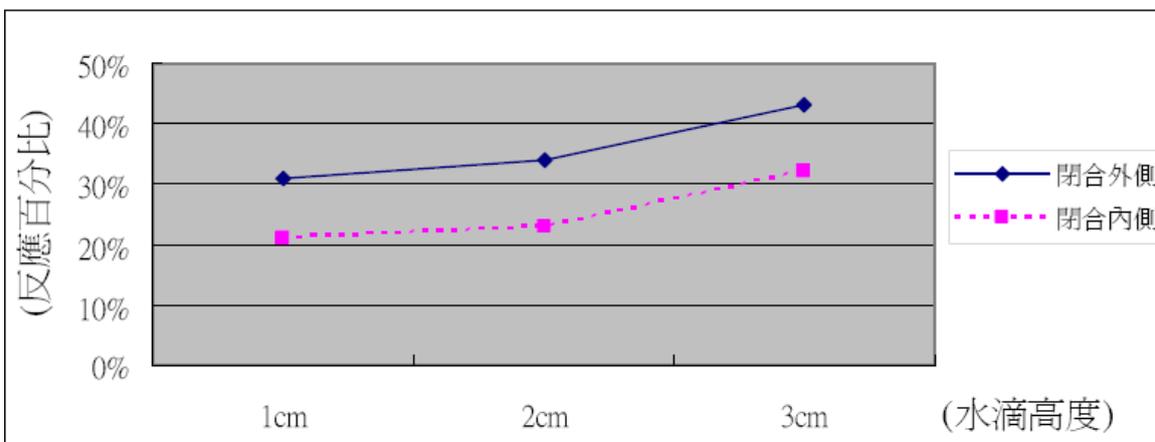
表十六、不同高度滴水時，一級關節有反應的百分比

大株	外側	內側	小株	外側	內側
5cm	12%	11%	1cm	31%	21%
10cm	18%	16%	2cm	34%	23%
15cm	30%	21%	3cm	43%	32%

圖十七、由不同高度滴水在大株含羞草時，一級關節的反應



圖十八、由不同高度滴水在小株含羞草時，一級關節的反應



- 1、從這個實驗結果可以看出，在含羞草小葉閉合時，以同樣高度滴水，滴在外側的反應數量比內側還多，也就是說刺激力矩較大則越容易起反應反應，結果符合槓桿原理。
- 2、比較(一)、(二)這兩個實驗我們可以推測當小葉展開時，受刺激產生觸發運動時葉枕的萎縮變形可以削減力量，若小葉閉合時，則無此抵消力量的效應。
- 3、接下來我們藉由測出施力於含羞草的力矩，來計算出三級關節削減力量的程度。

(三) 三級關節葉枕的緩衝效果：

1、小葉的變形所削減的力矩之比較：

表十七、在小葉展開與閉合時，大株含羞草一級關節產生反應所需的最小力矩

大株	展開 (達因*cm)	閉合 (達因*cm)	展開-閉合 (達因*cm)
外側	3614.14	2840.84	773.3
內側	2306.15	2155.75	150.4

表十八、在小葉展開與閉合時，小株含羞草一級關節產生反應所需的最小力矩

小株	展開 (達因*cm)	閉合 (達因*cm)	展開-閉合 (達因*cm)
外側	324.13	187.87	136.26
內側	188.42	157.86	30.56

- (1) 據槓桿原理，假如傳遞作用力的支軸是剛性的材質，造成一級關節產生反應的力矩應該要相同。
- (2) 從實驗結果來看，當小葉閉合時，滴水在大株含羞草外側所需產生反應的力矩約比展開時少 773.3，若滴水在內側，閉合時所需的力矩約比展開時少 150.4，而滴水在小株含羞草外側所需產生反應的力矩約比展開時少 136.26，若滴水在內側，閉合時所需的力矩約比展開時少 30.56。從此實驗結果可以發現，含羞草的葉枕可藉著變形抵消掉力量。
- (3) 而從削弱的程度來比較，滴水在內側力量削弱的程度比滴在外側時還小，我們推測是因為滴在三級關節外側通過的葉枕較多，葉枕因萎縮所削減的力量也多。
- (4) 比較大小植株：小株含羞草削弱的力量比大株的還多，推測是因為小株含羞草的三級關節的葉枕較敏感(細胞壁較薄)彈性較好，可抵消較多的力量，而大株含羞草的三級關節的葉枕則較不敏感(細胞壁較厚)，所以彈性較差。
- (5) 接下來我們再進一步估算出每一對葉枕所能抵消的力量大小。

2、 每對葉枕所能抵消的力量：

表十九、大株含羞草每對葉枕所削減的作用力

大株	展開 (達因)	閉合 (達因)	被削減的力 (達因)	經過葉枕數 (對)	被削減的力 /經過葉枕	削減百分比 /經過葉枕
外側	507.01	395.68	111.32	13	8.56	0.021641
內側	477.73	446.55	31.17	4	7.79	0.017450

表二十、小株含羞草每對葉枕所削減的作用力

小株	展開 (達因)	閉合 (達因)	被削減的力 (達因)	經過葉枕數 (對)	被削減的力 /經過葉枕	削減百分比 /經過葉枕
外側	85.80	51.03	34.77	8	4.34	0.085170
內側	68.77	58.09	10.67	3	3.55	0.061226

- (1) 因滴在外側的力臂是相等的，可以還原為水滴的施力來估算削減的效應。以所抵消的總力量除以所經過的葉枕數，即可算出每個葉枕所能抵消的力量。
- (2) 比較大株含羞草開閉的緩衝效應，可算出每對葉枕所能抵消的力量。內外側的數據做比較，發現大株含羞草每對葉枕削弱的力相當接近，約可削弱 7.8~8.6 達因，而換成削弱的百分比來看，外側約為 2.2%，內側約為 1.8%。
- (3) 小株含羞草算出每對葉枕所能抵消的力量，外側和內側也是相當接近，小株含羞草每對葉枕削弱的力約為 3.6~4.3 達因，而換成削弱的百分比來看，外側約為 8.5%，內側約為 6.1%。
- (4) 前一個實驗我們推測小株含羞草的三級關節的葉枕細胞壁較薄，彈性較好，較敏感，可抵消較多的力量，而大株含羞草的三級關節的葉枕則細胞壁較厚，彈性較差，所以較不敏感。此處估算出機械效率小株含羞草削弱 6.1~8.5%，比大株的 1.8~2.2% 還多，約為 3.4~3.7 倍。
- (5) 而在此實驗中，發現外側所能抵消的力量皆比內側要大，推測是因從外側力量傳導途中，多經過了羽軸的部份，而羽軸具有彈性，故也可抵消掉力量。此外，葉子外側離葉柄與莖的銜接點較遠，減震效應較大。

六、其他環境因素對實驗數據的影響：

由於在實驗操作時，需要足夠大的空間，無法控制光度、溫度及溼度。而我們的實驗延續超過半年，在不同日子的每一筆數據做比較的前提是必須減少實驗樣品的敏感度的變化。

- (一) 含羞草放在實驗室的角落裡觀察，所以空氣流動不明顯（實驗操作時不開風扇、無開窗），光度部分則是有窗簾遮住了上午陽光照射面東的窗戶，以降低光度變化幅度。
- (二) 在實驗期間觀測到的相對濕度在 84%~92%、光度在 257~565 lux、及溫度在 23.5~26.5 °C 間，含羞草的三級小葉閉合反應靈敏度無差異。

柒、結論：

一、一級和三級關節在受到刺激後有反應，二級關節在水滴高度 30cm 內無反應，以擺錘施力 2049.76 達因也無反應。

二、日週期

- (一) 6:00~15:00 前，一級關節反應比例低於 31%，18:00 到 24:00 靈敏度漸漸上升。
- (二) 三級關節在 6:00~15:00 靈敏度超過 76%。
(18:00 後，因睡眠運動而閉合，無法測量)。

三、最低刺激強度

- (一) 三級關節：以水滴(每滴水滴平均質量為 0.0513g)滴三級關節，高度 0.97cm，施力強度為 35.27 達因。
- (二) 一級關節：以擺錘直接敲擊大株含羞草的一級關節，擺錘高度差 1.64cm，施力約為 581.35 達因

四、一級關節夜間靈敏度高的原因：

(一) 日夜靈敏度比較：

以擺錘直接敲擊一級關節，日、夜間差距 1%，及在小葉閉合時以水滴分別在日、夜間敲擊三級關節使一級關節產生反應的力矩，差距為 1%。

(二) 小葉夜間閉合的效應：

在小葉閉合時，用同樣的力量敲擊三級關節的外側，產生反應次數較敲擊在內側多。在小葉展開時，則相反。

滴水在三級關節時，小葉的夜間閉合使得一級關節容易下垂。

五、三級關節抵消外力的差異

- (一) 滴水在三級關節外側時使一級關節反應的力矩，閉合時約比展開時少 136~773。
滴水在內側時的力矩，閉合時約比展開時少 31~150。
- (二) 大株含羞草平均每對葉枕約可抵消 7.8~8.6 達因，削弱百分比約為 1.8%~2.2%。
小株含羞草平均每對葉枕約可抵消 3.6~4.3 達因，削弱百分比約為 3.1%~8.5%。

六、當實驗時間固定在 12~14 點間時(光度在 257~565 lux 範圍內，溫度在 23.5~26.5°C 範圍內，相對濕度在 84%~92%範圍內)，並不會影響含羞草的觸發運動的靈敏度。

七、三級關節的葉枕形同保險絲，當作用力超過一定值時，才會引起下一個關節起反應，可當作一個特殊的避震器。

八、由於儀器限制，敲擊時的接觸時間無法更精確，希望以後能找出更精確的器材。

捌、未來展望

希望在以後能夠找出葉枕削減力道的詳細機制，利用避震的效應運用在微型機械，並製作成模型將其作用機制具體化。以及在電梯通道兩旁加裝類似的器具，當電梯墜落時，模擬含羞草的觸發運動，減緩墜落速度降低衝擊，進而減少傷害。

玖、參考資料

- 一、譯者：易希道等 科學圖書大庫 斯氏植物學 徐氏基金會出版。
- 二、總編輯：許明俊(民 94) 高中生物 下冊(第十章 生物對外界刺激的感應) 康熙圖書。
- 三、編著：柯勇 植物生理學 藝軒圖書出版。
- 四、原著：WILLIAM G.HOPKINS 譯者：廖玉琬等 植物生理學 啓英文化出版。
- 五、主編：林明瑞(民 95) 高中物質科學物理 上、下冊 南一書局。
- 六、原著：HALLIDAY/RESNICK/WALKER 譯者：黃崢瑜等 物理 第六版 全華科技出版。
- 七、原著：HARRIS BENSON 譯者：朱達勇等 普通物理學（上）歐亞圖書出版。
- 八、含羞草的「含羞」現象。南 e 網。取自：
http://www.nani.com.tw/big5/content/2003-01/29/content_21432.htm

附錄：含羞草的小葉展開與閉合時，使一級關節閉合的最小力之實驗數據。

表二十一、小株-小葉展開時滴水在三級關節外側與內側的紀錄

	外側				內側			
	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)
1.2	3	115.98	2.1	243.56	1	36.90	1.1	40.59
1.3	2	81.64	2.6	212.28	1	36.90	1.8	66.42
2.3	2	81.64	1.6	130.63	2	81.64	1.1	89.81
2.4	2	81.64	1.6	130.63	2	81.64	1	81.64
2.5	2	81.64	4.7	383.74	2	81.64	3	244.94
2.6	2	81.64	4	326.59	2	81.64	3.2	261.27
3.1	2	81.64	3.7	302.09	2	81.64	2.8	228.61
3.2	2	81.64	3.5	285.7	2	81.64	2.2	179.62
3.3	2	81.64	3.8	310.26	2	81.64	2.8	228.61
4.1	2	81.64	2.4	195.95	3	115.98	1.7	197.17
4.2	1	36.90	1.8	66.42	1	36.90	1.2	44.28
4.3	1	36.90	2.3	84.87	1	36.90	1.2	44.28
4.4	6	193.49	3.5	677.21	3	115.98	2.7	313.15
5.1	1	36.90	2.5	92.25	1	36.90	1.7	62.73
5.2	1	36.90	3.1	114.39	1	36.90	2	73.80
5.3	2	81.64	6.2	506.22	2	81.64	5	408.24
5.4	6	193.49	6.4	1238.34	2	81.64	5.2	424.57
5.5	2	81.64	7.2	587.86	2	81.64	6.1	498.05
6.2	2	81.64	3.3	269.44	1	36.90	2.5	92.25
平均	2.2	85.80	3.8	324.13	1.7	68.77	2.5	188.42

表二十二、小株-小葉閉合時滴水在三級關節外側與內側的紀錄

	外側				內側			
	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)
1.2	1	36.9	2.1	77.49	1	36.9	1.1	40.59
1.3	1	36.9	2.6	95.94	1	36.9	1.8	66.42
2.3	2	81.64	1.6	130.63	2	81.64	1.1	89.81
2.4	2	81.64	1.6	130.63	2	81.64	1	81.64
2.5	2	81.64	4.7	383.74	2	81.64	3	244.94
2.6	1	36.9	4	147.6	2	81.64	3.2	261.27
3.1	1	36.9	3.7	136.53	2	81.64	2.8	228.61
3.2	1	36.9	3.5	129.15	2	81.64	2.2	179.62
3.3	2	81.64	3.8	310.26	2	81.64	2.8	228.61
4.1	1	36.9	2.4	88.56	1	36.9	1.7	62.73
4.2	1	36.9	1.8	66.42	1	36.9	1.2	44.28
4.3	1	36.9	2.3	84.87	1	36.9	1.2	44.28
4.4	1	36.9	3.5	129.15	1	36.9	2.7	99.63
5.1	1	36.9	2.5	92.25	1	36.9	1.7	62.73
5.2	1	36.9	3.1	114.39	1	36.9	2	73.8
5.3	2	81.64	6.2	506.22	2	81.64	5	408.24
5.4	1	36.9	6.4	236.16	1	36.9	5.2	191.88
5.5	2	81.64	7.2	587.86	2	81.64	6.1	498.05
6.2	1	36.9	3.3	121.77	1	36.9	2.5	92.25
平均	1.3	51.03	3.8	187.87	1.5	58.09	2.5	157.87

表二十三、大株-小葉展開時滴水在三級關節外側與內側的紀錄

	外側				內側			
	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)
1.1.3	30	520.5834	6.5	3383.792	30	520.5834	3.5	1822.042
1.1.4	30	520.5834	7	3644.084	30	520.5834	5	2602.917
3.1.2	30	520.5834	6	3123.5	30	520.5834	4	2082.334
4.2.	30	520.5834	6.5	3383.792	20	412.0017	4.5	1854.008
4.3.	20	412.0017	7	2884.012	15	347.2741	4.5	1562.733
4.4.	30	520.5834	9.5	4945.542	30	520.5834	6	3123.5
6.3.	30	520.5834	7.0	3644.084	26	479.7251	5	2398.625
6.4.	30	520.5834	7.5	3904.375	28	500.5194	6	3003.116
平均		507.0107		3614.148		477.7317		2306.159

表二十四、大株-小葉閉合時滴水在三級關節外側與內側的紀錄

	外側				內側			
	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)	水滴高度 (cm)	施力 (達因)	力臂 (cm)	力矩 (達因 -cm)
1.1.3	26	479.72	6.5	3118.21	30	520.58	3.5	1822.04
1.1.4	20	412.00	7	2884.01	28	500.51	5	2502.59
3.1.2	15	347.27	6	2083.64	20	412.00	4	1648.00
4.2.	15	347.27	6.5	2257.28	20	412.00	4.5	1854.00
4.3.	15	347.27	7	2430.91	15	347.27	4.5	1562.73
4.4.	23	446.97	9.5	4246.22	30	520.58	6	3123.50
6.3.	16	360.99	7	2526.97	21	423.93	5	2119.66
6.4.	21	423.93	7.5	3179.49	22	435.58	6	2613.49
平均	19	395.68	7.1	2840.84	23	446.55	4.8	2155.75

表二十五、光度、相對溼度、溫度對敏感度分析的結果

依變數:反應有無

來源	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
光度	6	0.329	5.138	0
相對濕度	6	0.329	5.138	0
溫度	5	0.395	6.205	0

評語

040804 含羞草的避震效應

本作品對含羞草的觸發運動有詳細的觀察及研究，但對於觸發運動所需的外力，無法準確的測量，難以呈現外力和觸發運動之相對的關係，更無法說明所謂的「觸發運動的緩衝效果」與作用位置之相對關係。