

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

030316

探究花感知蜜蜂聲音分泌更多甜份的奧秘

學校名稱：新北市私立光仁高級中學附設國中部

作者： 國二 雷可安 國二 林羿佑 國二 楊靖綸	指導老師： 江明岳 莊順安
---	-----------------------------

關鍵詞：蜜蜂聲音、花分泌甜份、花感知聲音

摘要

以色列演化理論學家哈德尼，對月見草作植物聲音感知實驗，發現只要一感知到蜜蜂翅膀振動發出的嗡嗡聲，月見草就會在 3 分鐘內將花蜜中的糖分濃度增加到 20%。本研究想探知花內蜜腺提升花蜜甜度所需之醣類養分，在植物主動運輸的鈉鉀幫浦及質子幫浦在運送醣類養分下，記錄流經韌皮部時，在等效電路所產生的電位變化，由莖取出訊號觀察有無蜜蜂聲出現時之差異性。本研究用五星花及仙丹花兩種蜜源植物，從花萼下方取相距3cm 的兩點直流電壓，觀察無蜜蜂聲及有蜜蜂聲3分鐘測試電壓變化，確實電壓約有2mV~12mV 變化，且證實花的甜度會增加12%~20%，對花做單一頻率測試，找到與蜜蜂相近的反應頻譜，期待對提升蜂蜜品質有幫助。

壹、前言

一、研究動機

以色列特拉維夫大學 (Tel Aviv University) 演化理論學家哈德尼 (Lilach Hadany) 來說，聲音是無所不在的自然資源，如果植物不能像動物一樣「聽」到聲音，植物就是在浪費資源。所以哈德尼認為，植物其實能聽到聲音。於是，哈德尼選擇月見草 (*Oenothera drummondii*) 當作研究對象，因為月見草在特拉維夫的公園和沙灘都很常見，而且月見草的開花期很長，產生的花蜜量夠多，能讓她進一步分析。哈德尼的研究可以分成兩個部分。**第一階段**，哈德尼和同事發現，不管是養在實驗室的月見草，或在戶外的月見草，只要一聽到蜜蜂翅膀振動發出的嗡嗡聲，月見草就會在 3 分鐘內將花蜜中的糖分濃度增加到 20%。那月見草真的分得出來蜜蜂聲和其他聲音的不同嗎？根據哈德尼的研究，她們將月見草放在 5 種不同的聲音環境：寂靜無聲、距離 10 公分內錄下的蜜蜂嗡嗡聲 (0.2~0.5kHz)、電腦生成的高頻率 (158~160kHz)、中頻率 (34~35kHz) 和低頻率 (0.05~1kHz)。結果發現，月見草在靜音、高頻、中頻率的環境下，花蜜糖分濃度沒有太多改變，但如果是蜜蜂的嗡嗡聲或頻率接近的低頻聲，花蜜糖分濃度就會從 12% 上升到 17%~20%。既然現在知道月見草真的能「聽」到蜜蜂的嗡嗡聲了，那月見草的「耳朵」是誰？月見草的「耳朵」又在哪裡呢？哈德尼的答案很簡單：月見草的花朵就是月見草的「耳朵」。哈德尼和研究生維特斯 (Marine Veits) 利用隔音玻璃分別罩住月見草的莖、葉子和花朵，結果發現只有當月見草的花朵被罩住時，即使月見草的其他部位圍繞在接近蜜蜂嗡嗡聲的低頻聲，月見草也不會改變花蜜甜度。哈德尼等人還進一步拔掉月見草的花瓣，結果發現少了

花瓣的月見草就「聽不到」嗡嗡聲，證實了花朵就是植物的「耳朵」。(Y.Yovel and L.Hadany, 2019)

在生物課程中談到人的細胞與植物的細胞，人有神經細胞傳遞訊息，植物細胞則有葉子表皮細胞、保衛細胞、葉肉細胞及莖的木質部、韌皮部管狀的細胞，一朵典型的花，由外而內包括萼片、花瓣、雄蕊與雌蕊四部分，著生在花托上，我們好奇花對蜜蜂的聽覺反應訊息是如何傳遞？要提升植物花蜜甜度的花內蜜腺所分泌之醣類養分輸送運作，在儲存醣養分的韌皮部有何徵兆可尋？也就是說植物主動運輸的鈉鉀幫浦($\text{Na}^+\text{-K}^+$ pump)及質子幫浦(H^+ pump)在運送醣類養分過程時，細胞膜電位變是否有電訊息可尋？我們想從莖取出訊號做頻譜分析了解有蜜蜂聲出現與沒蜜蜂聲時之差異性。

二、研究目的

為了探究研究動機所提的諸多問題，我們在仙丹花及五星花花萼下方與莖銜接處設測試 A 點，再往下 3 公分的莖部設測試點 B 點，AB 兩點訊號取出方式分侵入式(接線夾直接夾上)及非侵入式(用銅箔包覆)，我們的研究目的如下：

- (一)無蜜蜂聲音時觀察 AB 兩端直流電壓的變化，證實植物莖韌皮部等效電路電容的放電特性。
- (二)有蜜蜂聲音時觀察 AB 兩端直流電壓的變化，證實花為了提升花蜜甜度的花內蜜腺所需之醣類養分輸送運作確實有電訊息變化。
- (三)對花播放不同頻率時觀察 AB 兩端直流電壓的變化，比對與蜜蜂聲音頻譜是否相符合。
- (四)分時段做無蜜蜂聲音及有蜜蜂聲音甜度測試驗證甜度提升比率。

三、文獻回顧

(一)植物養分運送相關文獻探討

1. 植物體醣類運輸路徑

植物體的組成細胞間與動物體存在一項明顯的差異：植物細胞間有原生質絲相互串聯，動物沒有。原生質絲是兩個植物細胞間由細胞膜圍成的一個通道，植物細胞間的物質傳輸可由這個捷徑通過，不像動物細胞必須穿過兩層細胞膜才能完成。對植物而言最普遍的物質運輸要算是光

合作用的產物—醣類，它由葉肉細胞先合成葡萄糖，再轉換成蔗糖經原生質絲一路送往韌皮部，之後再依「供需理論」將蔗糖運輸到能量需求較高的部位，例如發芽、開花或結果處。

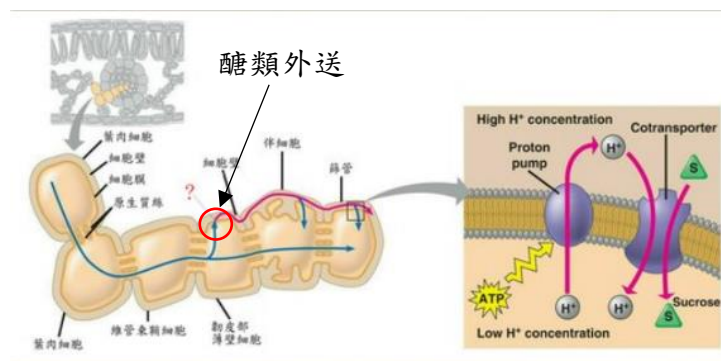


圖1. 植物體細胞與細胞間養分輸送圖

美、中、德三國科學家組成的團隊，他們確認在(部分)植物韌皮部的薄壁細胞內能表現有一群基因—SWEET，產生的蛋白質稱為 SWEET 可附著於細胞膜上，**專職將細胞內的醣類(葡萄糖或是蔗糖)往外送**。當 SWEET 蛋白將蔗糖送到細胞外(即細胞壁間隙)後，蔗糖偕同運輸機制便接手將這些蔗糖送入韌皮部的伴細胞，伴細胞再經原生質絲將蔗糖運送到韌皮部的篩管內。(江芳銘，2013)

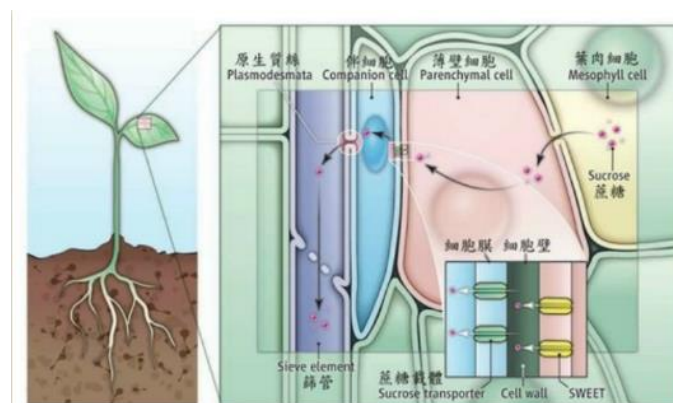


圖2. 植物體葉子行光合作用後養分輸送圖

2. 植物體內養分的運輸

(1) 植物體內養分的運輸 (Nutrition) 韌皮部內物質種類(多數是帶電離子)

韌皮部中物質的成分與木質部不同，其中水分的含量比例較低，含量最多的溶質是醣類，其中最主要的是蔗糖，可佔篩管汁液乾重的90%，因此韌皮部中的液體會呈現輕度的黏稠狀。**除了蔗糖外，韌皮部中的液體也含有植物激素、胺基酸與有機酸等有機物，另外也具有磷酸鹽、硫酸鹽、及 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 等礦物質，其中 K^+ 含量最高。**

(2) 韌皮部內物質運送的方向與速度

韌皮部內物質的運送方向十分多樣化，其通則便是由糖分的來源(source)部位轉移至糖分需求(sink)的部位。來源部位(source)可能是進行光合作用旺盛的葉片，或是正在分解澱粉提供

養分給新芽的貯存器官；需求部位(sink)則多為消耗糖分的部位，如新生的嫩芽或是成長中的花果等、或是正在貯存養分的塊莖或塊根。植物體內何處會成為養分需求的部位，可能依照不同的季節或生長階段而有差異，例如果實或種子，在發育期間是需求非常強烈的 sink，吸引大量的養分輸入；但是當到了種子發芽的階段，種子又成為 source，子葉或胚乳中的養分會移往莖頂與根尖，提供生長發育之用。**物質在韌皮部內運送的速度相當快，平均大約每小時可達1公尺左右**，不同植物間略有差異，同一植物的不同生長時期也有差異。

(3) 韌皮部內物質的運送原理

關於韌皮部內養分運輸的原理，曾有許多不同的解釋，但目前最為大家接受的，是在1927年德國植物生理學家閔希(Munch)提出的壓力流學說，壓力流的學說認為韌皮部內，**物質是受到物質滲透所產生的壓力驅使推動**。葉肉經光合作用產生的醣類產物，會先以共質體運輸至維管束附近，然後移至質外體由細胞壁縫隙流至篩管與伴細胞旁。**伴細胞上的質子幫浦藉耗能的主動運輸將質子移出細胞外**，形成細胞內外的氫離子濃度梯度，然後再藉由質子與蔗糖的同向運輸蛋白，在質子順著濃度梯度移回細胞內時，將蔗糖帶入伴細胞，然後蔗糖再藉由原生質絲送入篩管中。

(二) 植物電訊號的傳遞文獻 (實驗設計的學理依據)

目前認為植物電訊號的傳遞，在細胞和細胞間，刺激所引發的膜電位變化是透過共質體 (symplast) 或質外體 (apoplast) 途徑，經原生質絲 (plasmodesmata) 在細胞間傳遞如 圖3 (Fromm, J. and Lautner, S., 2007)。如果是整株植物的話，植物電訊號則被認為透過既有的物質輸送通道傳遞，即韌皮部或木質部 (Malone et al., 1994; Zawadzki et al., 1995; Zawadzki et al., 1991)。1992 年 Zhang and Willison 利用侵入式電阻測定模擬出胡蘿蔔塊根與馬鈴薯塊莖的等效電路模型，並藉以測量細胞澱粉分佈。如圖4 (M. Zhang and J. H. M. Willison, 1992)。

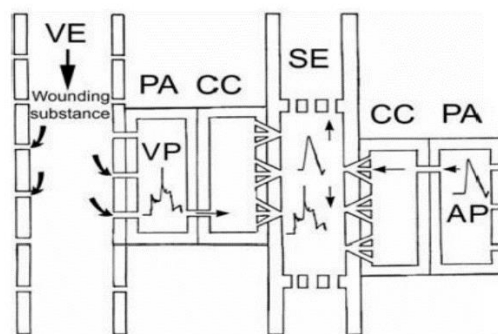


圖3. 植物細胞與細胞間利用原生質絲傳遞電訊號的模擬圖(Fromm, J. and Lautner, S., 2007)。

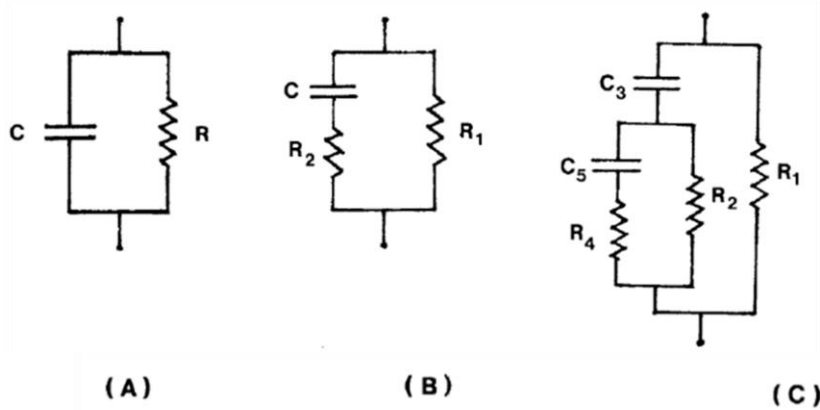


圖4. 利用侵入式電阻測定模擬出胡蘿蔔塊根與馬鈴薯塊莖的等效電路模型，(A)單一電阻電容並聯模型(B)電容與電阻串並聯的模型(C)多電容電阻串並聯的模型 (M. Zhang and J. H. M. Willison, 1992)。

(三)生物演化(蜜蜂與蜜源植物)報導-文獻探討

一吻定「蜂」身？昆蟲與植物的專情「蜜」碼可能改寫

(105年4月6日，楊正澤：中興大學昆蟲學系；管力慶：台灣大學植物科學研究所)



在長久的互利合作下，蟲媒花與授粉昆蟲演化出專一的關係，但最近的科學研究發現情況可能有變。(圖片來源：Shutterstock)

「招蜂引蝶」競合互利

多種生物間之關係不只是生存競爭 (competition)，兩種或兩種以上生物互相協助的共生關係是互利共生 (mutualism) 也是在自然界維持生態系平衡穩定的另一重要現象。在社會生物學而言，生物間由合作 (co-operation) 而使同族類得到利益，這樣的生活史或生物學特性，在自然選汰下得以存留下來，這樣的自然選汰稱為族類選汰 (kin selection)。至於不同物種之間的交互作用，對合作的兩者或各方有一定的效益，而在共同演化 (co-evolution) 的定義下，有些人則質疑這是巧合 (coincidence)，是機率 (probability) 問題。然而異種異類而在自然環境下交互作用，物種間互為壓力，不斷給予刺激而針對刺激產生反應，如此的交互作用產生的生物

種間關係，可以令生物在生態系中共存，也可能產生新的物種，這些物種在長期適應之下，所產生互動的模式，稱為「穩定的演化策略」(evolutionary stable strategy, ESS)。

以昆蟲與植物間的授粉關係為例，現今授粉昆蟲之起源可能是取食花粉之植食性昆蟲，或許是取食花粉昆蟲之捕食者 (Van Schaik et al., 1993)。植物利用此等昆蟲之移動能力，將自己的花粉送到另一朵花上之利用價值，為引誘適合自己要求的特定昆蟲，必得進化成各自特殊的花形、花色、花香；相對的授粉昆蟲也受到花種及能量策略的選汰，對於基因組成做重組，累積基因型所造成的表現型，來調整授粉者之形態、訪花行為及生態特性等，因植物刺激所造成的因果反應，逐漸適應於特定植物上，而產生長期交互作用的特有方式。

(四) 蜜蜂聲音頻譜文獻探討

蜜蜂發出的聲音根據其目的而有所不同。在蜜蜂中，工蜂發出的聲音頻率約為 309 Hz，而蜂王 (蜂后管道) 發出的聲音頻率約為 450 Hz。工蜂踩了花蜜後影響身體重量可能造成振動頻率也跟著受影響，喚醒飢餓幼蟲頻率為 118-140 Hz，受威脅飛行發生在 221 Hz，而工蜂面對蜂王的舞蹈發生在 600-637 Hz。(J. S. Ishay, 1982.)

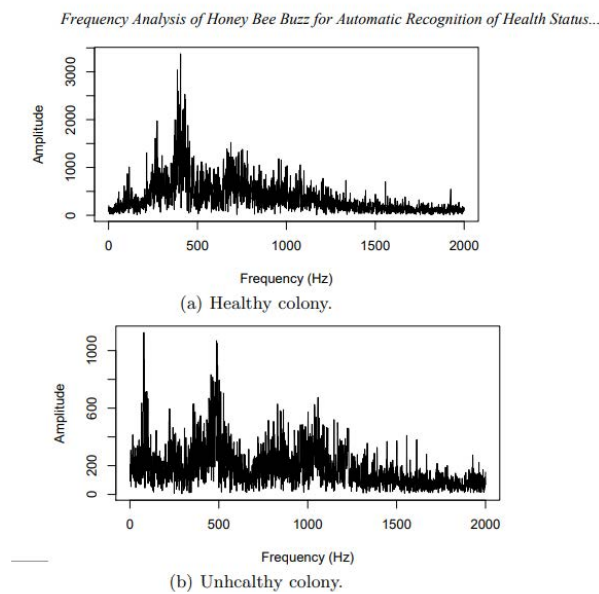


圖5. 蜂群頻譜(a)健康蜂群(b)不健康蜂群

(五)花甜度相關文獻

1.花蜜腺

能分泌蜜液(花糖或花蜜)的一種腺體。

位于植物體表，分泌物排出體外，故屬外部分泌組織。由一群表皮細胞與相鄰的深層細胞特化而來。

其特點是:細胞質濃、胞壁薄、角質層無或很薄。

蜜腺下常有維管組織，蜜液通過角質層擴散或經

腺體上表皮的氣孔排出體外。蜜腺形狀各異，呈突

起、扁點、小穴、小槽、喇叭狀或癩瘤狀等。一般位于花瓣、花萼、子房、花柱的基部

或花盤上。蜜腺是植物體上常見的外部分泌結構，是植物在長期演化過程中，適應獲取異源

基因、保證種群繁衍和進化而形成的一種特殊腺體。蜜腺的種類和形狀根據蜜腺在植物體著生部位的不同，可將其分為兩類。一類叫花蜜腺，一類叫花外蜜腺。花蜜腺著生在花的各組成部位上，常見的有花被蜜腺的形狀各異，有小瘤形、圓環形、二裂形、波浪形、喇叭形、杯狀、淺杯狀等。

2. 花蜜[植物分泌的液體]

花蜜是植物花蜜腺分泌的液體，味甜，是糖的水溶液。花蜜是植物提供給訪花者最重要的報酬之一，也是影響訪花者訪花行為的重要性狀。蜜蜂採集花蜜用來釀製成蜂蜜。花蜜來自植物的蜜腺，是植物從土壤中吸收的營養和光合作用製造成的，除滿足自身生長發育外，多餘的就貯存在植物體內。開花時有些營養物質被輸送到花部，一部分轉化為糖汁，貯存在蜜腺細胞里，另一部分用於形成果實和種子。蜜腺細胞中有豐富的營養物質，在適宜條件下，則通過蜜腺表皮分泌到體外而形成花蜜。

花蜜中含有糖類、胺基酸、蛋白質、無機離子、脂類、酚類、生物鹼以及萜類等化學成分，但總體上可以看作是糖類的水溶液。通過對蜜腺的顯微形態和超微結構及其泌蜜模式的大量研究，人們發現，花蜜中的碳水化合物和無機離子主要來自於韌皮部汁液;部分次生化合物如生物鹼(alkaloids)、環烯醚萜甙(iridoids)、硫代葡萄糖苷(glucosinolates)和酚類(phenolics)等也是通過被動擴散從韌皮部中轉運而來;其他非糖物質如花蜜蛋白、脂類、萜類等(蜜腺自身加工的產物)主要來自於蜜腺組織(Heil, 2011)。



圖6. 花蜜腺圖

貳、研究設備及器材

一、發射模擬聲頻：UTG-2062B 函數訊號產生器(做單一頻率聲音對花播放)



圖7. UTG-2062B 函數訊號產生器



圖8. 音箱

二、錄音之蜜蜂聲頻譜分析：Tektronix 太克 TBS2104B 數位儲存示波器(具有 FFT 頻譜分析)



圖9. Tektronix 太克 TBS2104B 數位儲存示波器



圖10. 本實驗測試用網路蜜蜂聲音頻譜分析

三、數位電表(測量花的莖直流電訊號測試)



圖11. 精密型數位電表

四、甜度計(測試花甜度%)

電器規格

直流電壓

檔位：220mV, 2.2V, 22V, 220V, 1000V

解析度：0.01mV

準確度： $\pm(0.05\% \text{ 讀值} + 5 \text{ 位})$

輸入阻抗：220mV 檔：100M Ω

2.2V 檔：10M Ω

22V~1000V 檔：9.1M Ω

過載保護：1000VDC 或 750VAC rms 有效值

四、甜度計(測試花甜度%)



五、銅箔(做莖包覆非侵入式測試用)



參、研究過程或方法

一、研究流程

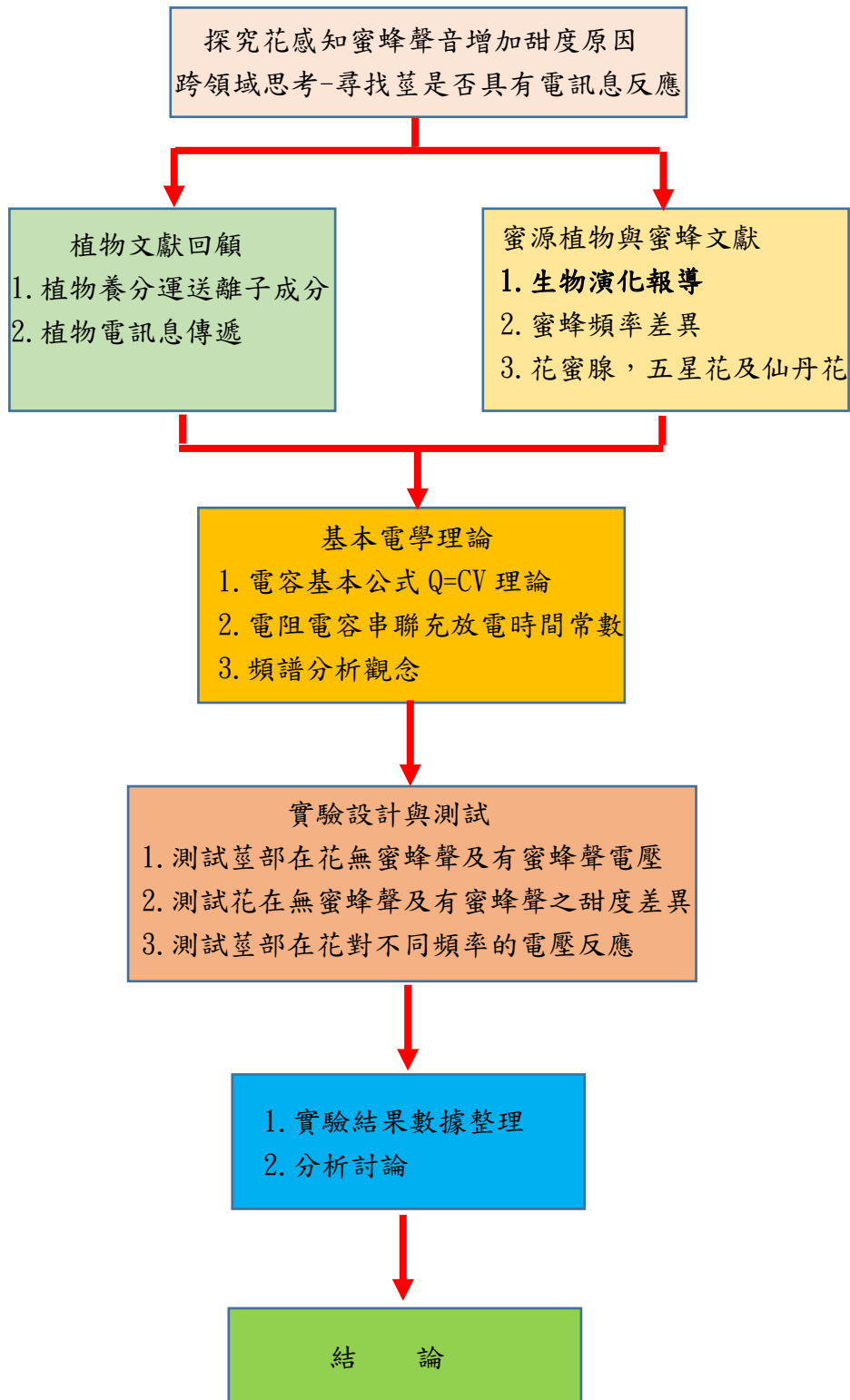


圖12. 研究流程圖

二、研究方法

(一) 蜜蜂影片聲音波形做頻譜分析

1. 熊蜂(624HZ-937HZ)



2. 台灣蜂(468HZ-1249HZ)



(二) 校園內蜜源的植物來源

1. 仙丹花



大王仙丹



矮仙丹

仙丹的品種繁多，矮仙丹高度僅60~70公分，葉子為卵型或橢型，葉子較光滑。是屬於灌木植物。仙丹花這可是緬甸的國花呢！傳說很久以前在中國南部的深山裡，住著一對母子，母親體弱多病，孝順的兒子，每天清晨上山去給母親採藥，並祈求神仙賜藥來醫治母親。後來，看見了這種花，就把母親的病給治好了，從此人們就把它叫做「仙丹花」。而其名有修『仙』煉『丹』的意境，台灣許多廟宇都可見其足跡，如台北行天宮外人行道就種植一整排。

仙丹花的花期很長！一年會開花三次，似乎隨時在開花，在庭院及綠籬中展露似火球般的笑顏，同時也是蝴蝶的好朋友(蜜源植物)。仙丹花是常綠灌木，可高達2公尺，花序頂生，數十朵組成一半圓球，每一朵花有一細長花筒，稱為「高杯形花冠」。朵朵小花煞是花團錦簇，熱鬧繽紛。(記住不想忘記的，2008，繁星花和仙丹花)

2. 五星花

五星花為茜草科常綠亞灌木狀草本植物。高30~50厘，繁星花，也叫雨傘花、五星花、星形花、埃及眾星花、草本仙丹花。多年生草本花卉。頂生聚傘形花序，小花呈五角星狀，故名五星花。

花數十



五星花



五星花

繁星花耐旱、耐高溫，適應性強。花期持久，花期主要集中在3-10月間。花色有紫、粉紅、緋紅、桃紅、白色等，適和盆栽及布置花台、花壇及景觀布置。養護需要注意以下幾點，繁星花花期就會延長。

(三) 電容特性

電容器的電容 (C) 是測量當電容器兩端的電位差或電壓 (V) 為單位值時，儲存在電容器電極的

電荷量 (Q): $C = \frac{Q}{V}$ ，若根據國際單位制，若一電容器兩極施加一伏特的電壓，其儲存電荷量為一庫侖，則此電容器的電容量為一法拉 (F)

(四) 電阻與電容電學暫態特性(劉文雄，109，基本電學下冊，全華圖書)

1. 充電

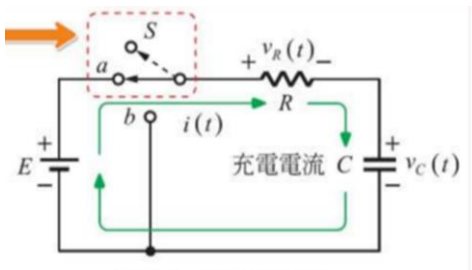


圖13. RC 充電迴路

RC 充電電路的时间常數(time constant) 為電阻值與電容值的乘積，單位為秒(s)。R 或 C 值愈大，充電放電過程所需的時間愈久。

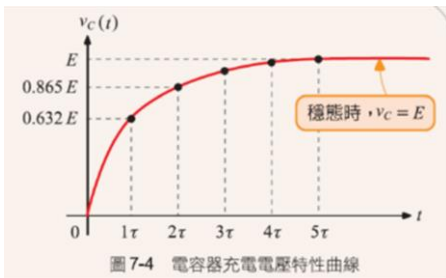


圖14. RC 充電電容電壓與時間常數關係

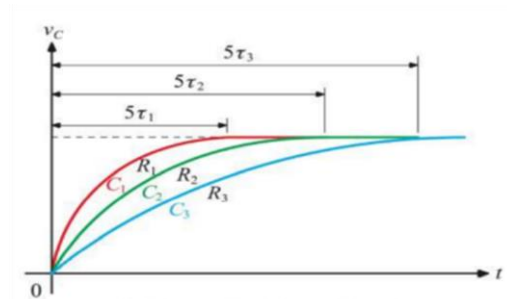


圖15. RC 充電電阻與電容值大小乘積關係

2. 放電

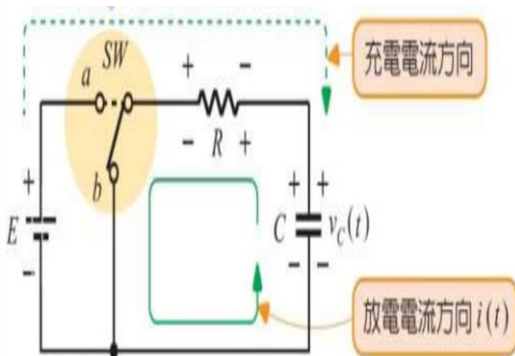


圖16. RC 放電迴路

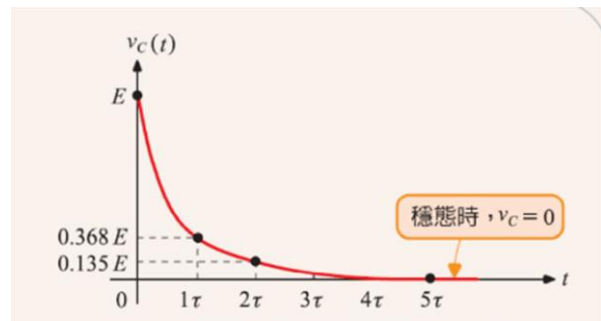


圖17. RC 放電電容電壓與時間常數關係

(五)跨領域想像實驗測試思考

1.測試設計



圖18.仙丹花

2. 莖部維管束等效電路模型分析

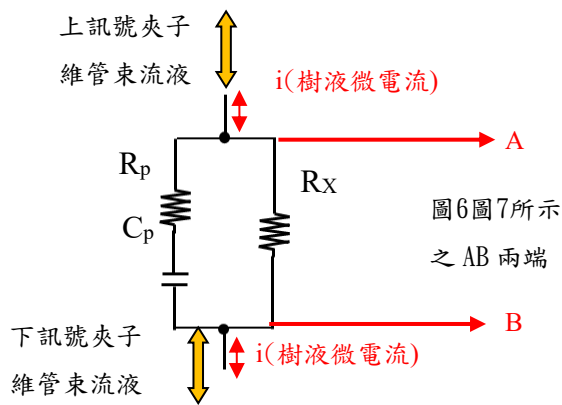


圖19. 莖部維管束等效電路模型與樹液微電流

R_p 是韌皮部等效電阻， R_x 是木質部等效電阻
 C_p 是韌皮部等效電容，AB 兩端電壓會由樹液微電流 i 流經等效電路產生，電壓之正負會與樹液流向有關，當花聽蜜蜂激時，儲存在韌皮部醣類養分開始輸送，**伴隨的帶電離子也會移形成微電流**，使樹液微電流 i 應會變大進而使 AB 兩端電壓改變。

(六)實驗設計：實驗一至實驗三之實驗設計步驟

實驗一：做測試夾剛夾上無蜜蜂聲音時**3分鐘訊號變化**。

1. 數位電表切至 mV 檔；2. 接線夾紅色接電錶紅端(+)黑色夾電表黑端；另一端紅色接線夾在花萼下方與莖銜接處設測試 A 點，另一端黑色接線夾再往下**3公分**的莖部設測試點 B 點；3. 再做正式測試前 A 點先不要夾上去，等錄影機都架設好且對焦電表數據按下錄影後，再夾上 A 點，觀察 AB 兩點直流電壓變化。

實驗二：銜接實驗一做1分鐘無蜜蜂聲；3分鐘有蜜蜂聲音；2分鐘蜜蜂聲停止共**6分鐘測試訊號**。

如實驗一第1及第2點步驟，第3則是事先以夾上花的A點，觀察數據穩定後再做實驗二的6分鐘順序操作及電表測得數據錄影。

實驗三：測試非蜜蜂聲音頻率時，400HZ、450 HZ、500 HZ、550 HZ、600 HZ、650 HZ、700 HZ、750 HZ、800 HZ、850 HZ、900 HZ、950 HZ、1000 HZ、1050 HZ、1100 HZ、1150 HZ、1200 HZ、1250 HZ，每頻率播2分鐘並記錄 AB 兩點訊號直流電壓變化。

如實驗二步驟，只是蜜蜂聲改由不同頻率發聲測試。

實驗四：做沒蜜蜂聲及無蜜蜂聲時花的甜度實驗

實驗五：測試1：非侵入式測試監測 A、B 兩花朵，無蜜蜂聲1600秒電訊息變化後取1朵測甜度；

測試2：剩下1朵做做3分鐘無蜜蜂聲；3分鐘有蜜蜂聲音；3分鐘蜜蜂聲停止共**9分鐘測試訊**

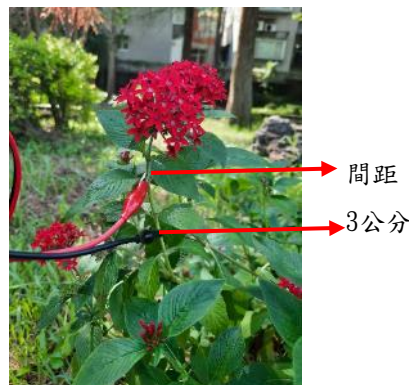
電訊息變化後，再作甜度測試。

(七)校園蜜源植物五星花及仙丹花實際測試照片(第一次採侵入式測試)

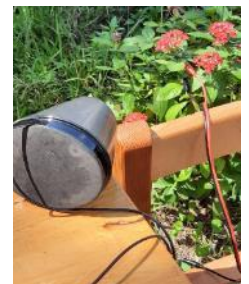
1.五星花

(1) 取訊號位置 (兩訊號夾間距固定取3公分)

(2)測試時整體照片 (用手機播放蜜蜂聲音)



(3)測試花對(400-1250Hz)單頻正弦波聲音反應(使用訊號產生器及音箱輸出80Db 對花播單頻聲音)



2. 仙丹花

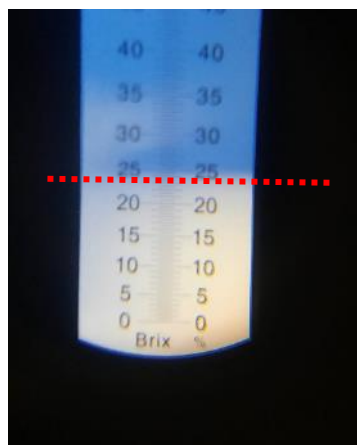
(1) 取訊號位置(兩訊號夾間距固定取3公分)



(2) 測試時整體照片(用手機播放蜜蜂聲音)



3. 使用甜度計做甜度測試實驗



25%



20%

(八)實驗五莖部包銅箔做非侵入式測試監測 A、B 兩花朵照片



包銅箔做非侵入式測試



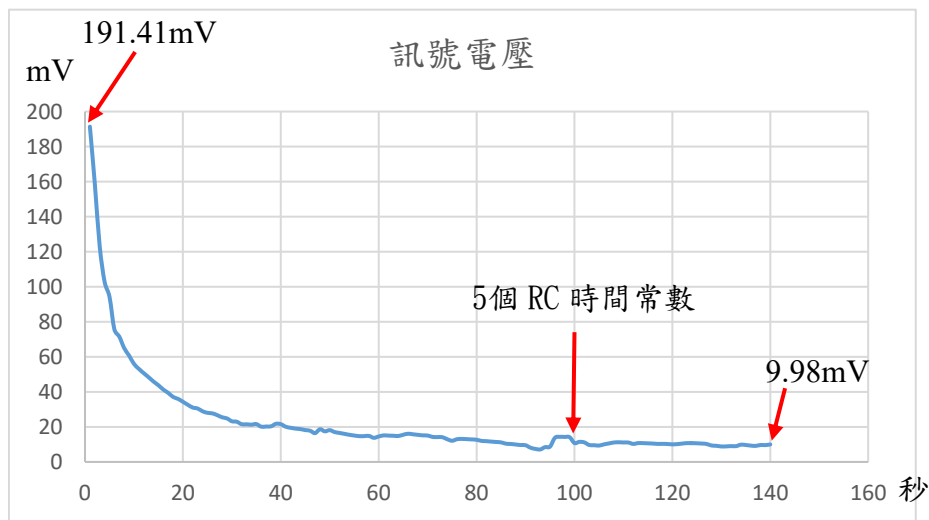
做 A、B 兩花朵同時測試

肆、研究結果

一、實驗數據

(一)實驗一：做測試夾剛夾上無蜜蜂聲音時3分鐘訊號變化。此實驗是莖的電容會對數位電表放電

1. 仙丹花測試(8月24日)



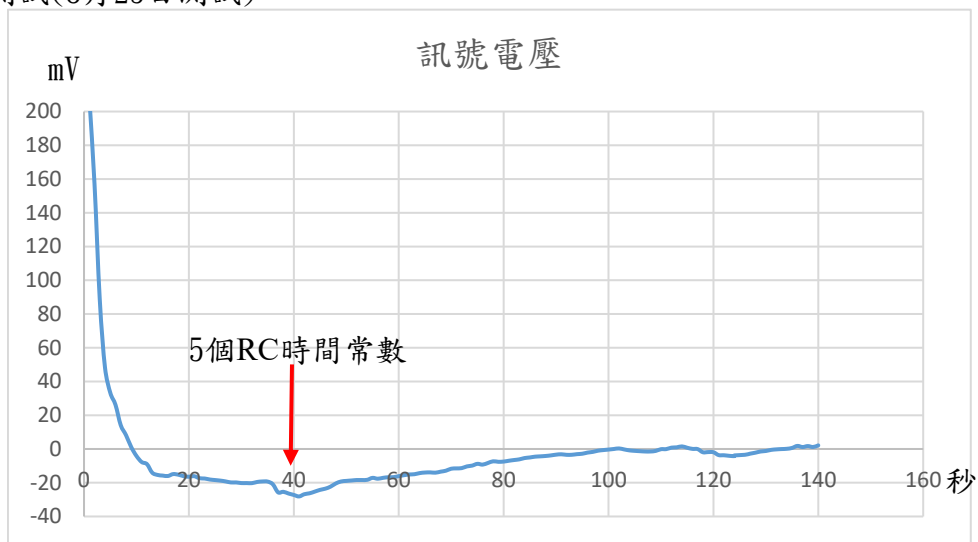
曲線圖1. 仙丹花測試

若以放電到5個時間常數為穩定電壓來看，若取100秒為5個時間常數，可略估出韌皮部電容值為

$$(0.2 \mu\text{F}) : 100 \text{ 秒} = 5RC ; \text{ 數位電表內組是 } 100\text{M}\Omega , 100 \text{ 秒} = 5 \times 100\text{M}\Omega \times C ; C = 100 / (500 \times 10^6) = 0.2 \times 10^{-6} = 0.2 \mu\text{F}$$

間接證明植物莖的等效電路是具有電容效應的正確性

2. 五星花測試(8月25日測試)



曲線圖2. 五星花測試

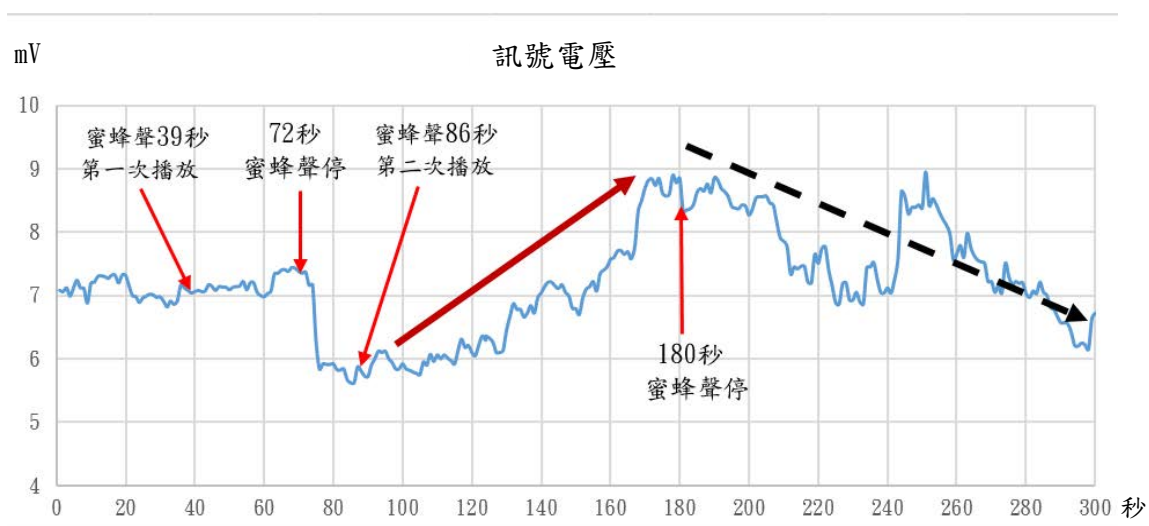
若以放電到5個時間常數為穩定電壓來看，若取40秒為5個時間常數，可略估出韌皮部電容值為

$$(0.08\mu\text{F}) : 40\text{秒} = 5RC ; 40\text{秒} = 5 \times 100\text{M}\Omega \times C ; C = 40 / (500 \times 10^6) = 0.08 \times 10^{-6} = 0.08\mu\text{F}$$

(二)實驗二：銜接實驗一做1分鐘無蜜蜂聲；3分鐘有蜜蜂聲音；2分鐘蜜蜂聲停止共6分鐘測試訊號。

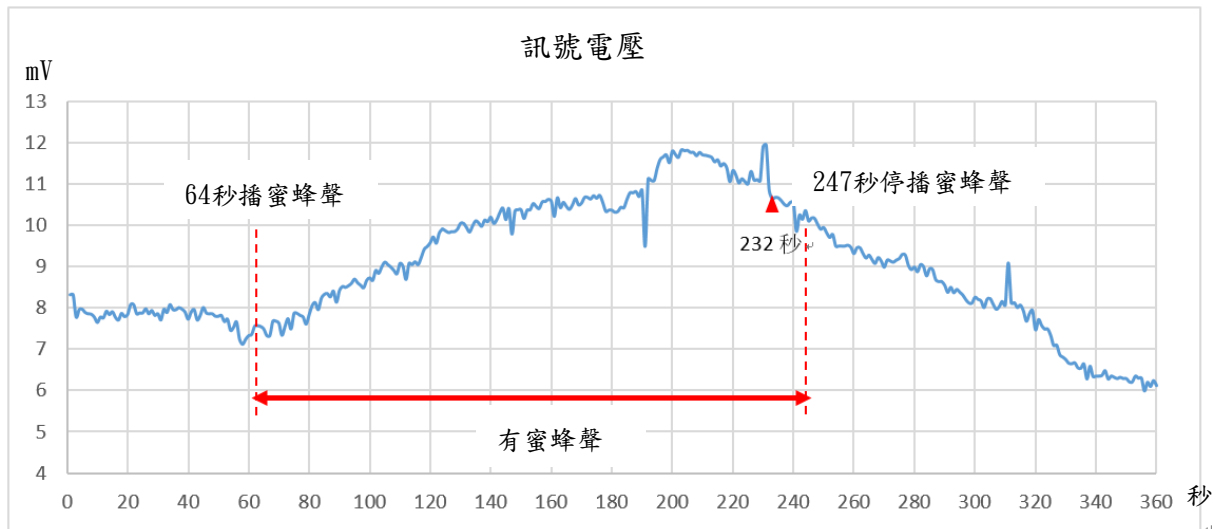
1. 五星花測試

(1) 8月18日12點00分第一次實驗數據曲線(表件1如附件)



曲線圖3. 五星花蜜蜂聲第一次測試

(2) 08月19日10點17分五星花第二次實驗(表件2如附件)

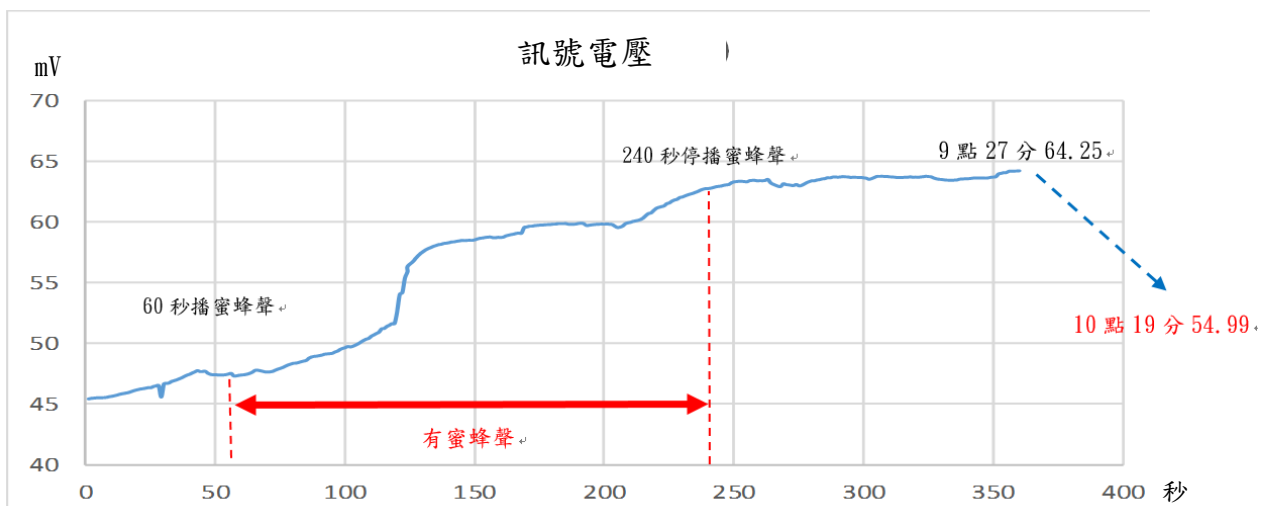


曲線圖4. 五星花蜜蜂聲第二次測試

分析：此蜜蜂聲頻譜如圖8所示，是由網路下載，播放後確實看到花有反應，蜜蜂播放停止後也看到訊號慢慢回復。

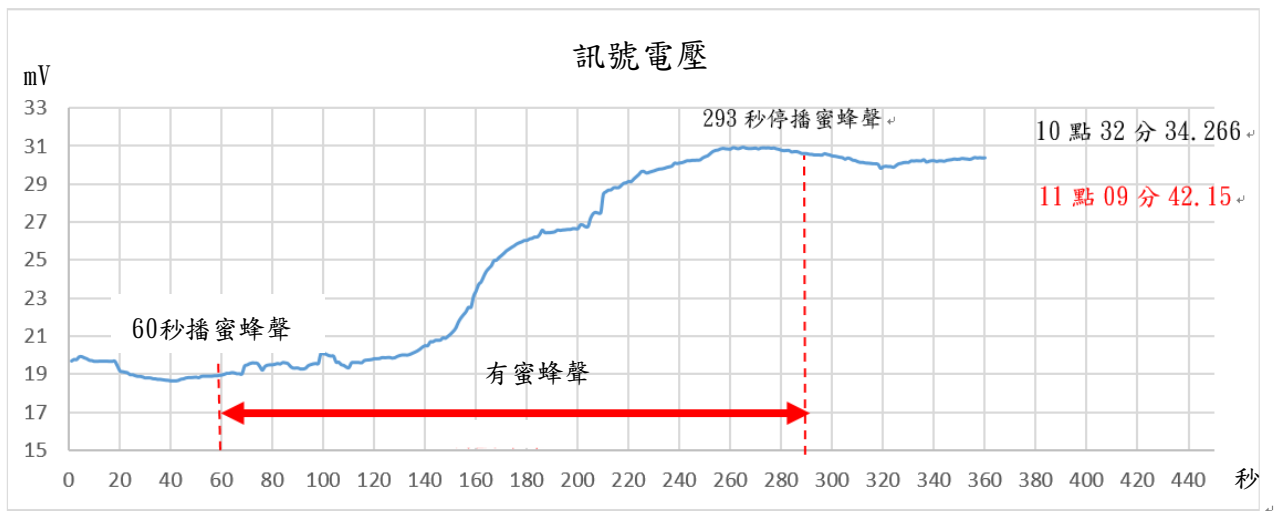
2. 仙丹花測試

(1) 08月23日9點21分仙丹花第一次實驗(單株花)



曲線圖5. 仙丹花蜜蜂聲第一次測試

(2) 08月24日10點23分仙丹花第二次實驗(雙株花)



曲線圖6. 仙丹花蜜蜂聲第二次測試

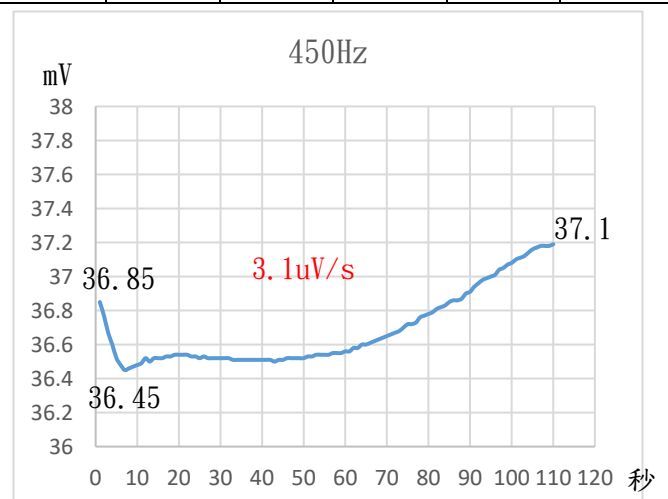
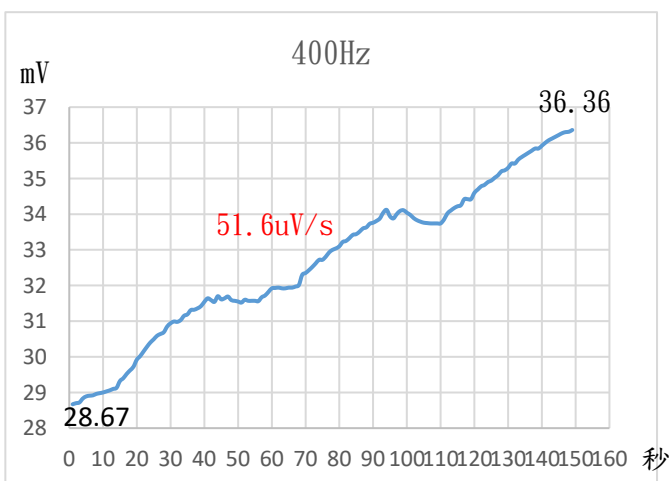
分析：此蜜蜂聲頻譜如圖8所示，與五星花一樣，播放後確實看到花有反應，曲線圖6雙株花反應較明顯，且電壓值維持較久。

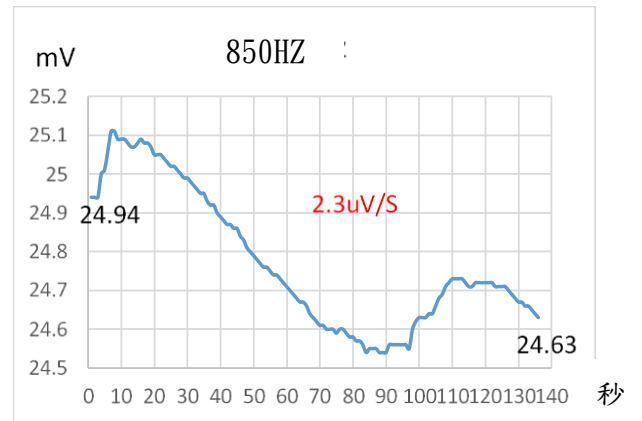
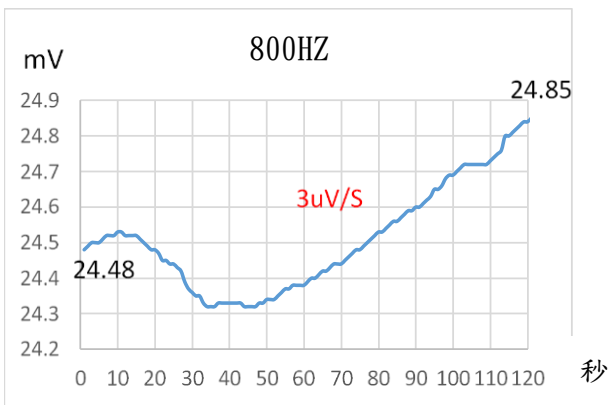
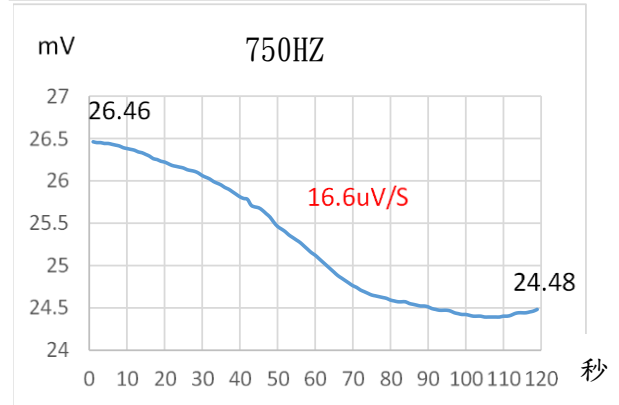
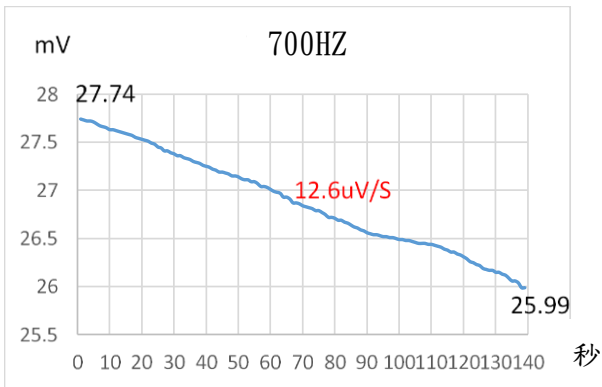
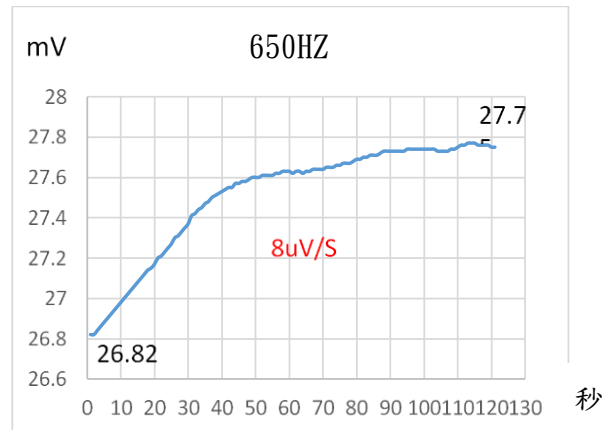
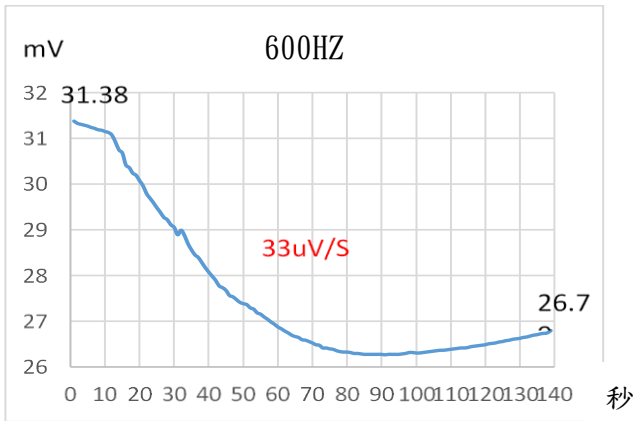
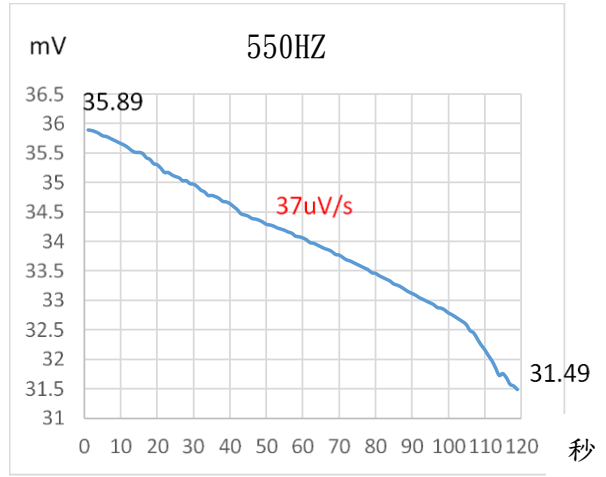
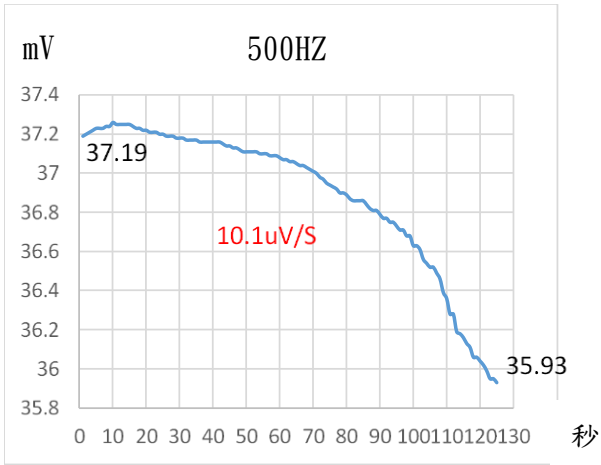
(三)實驗三：做400Hz-1250Hz 單頻正弦波播放測試花的反應

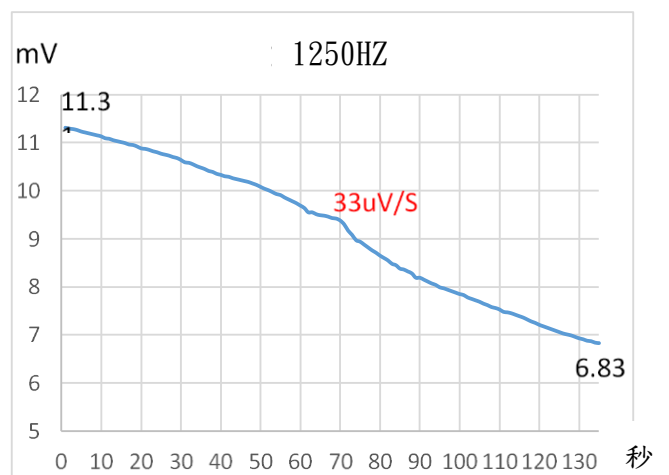
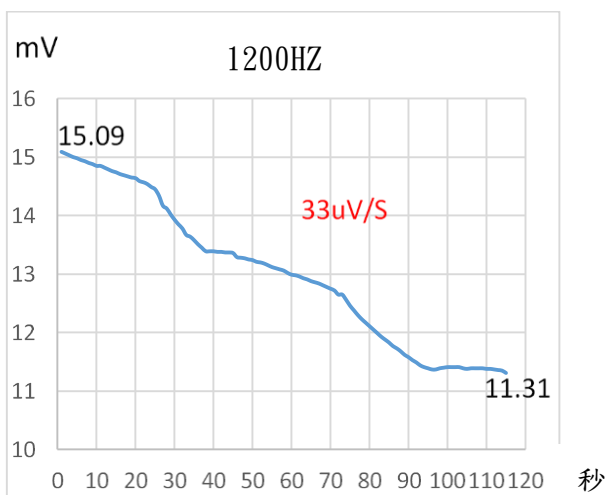
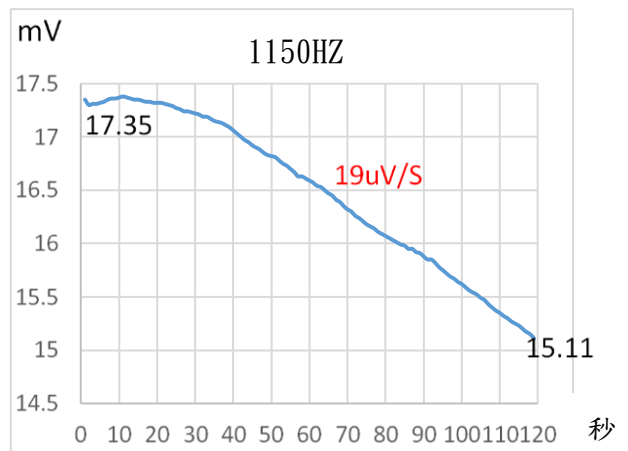
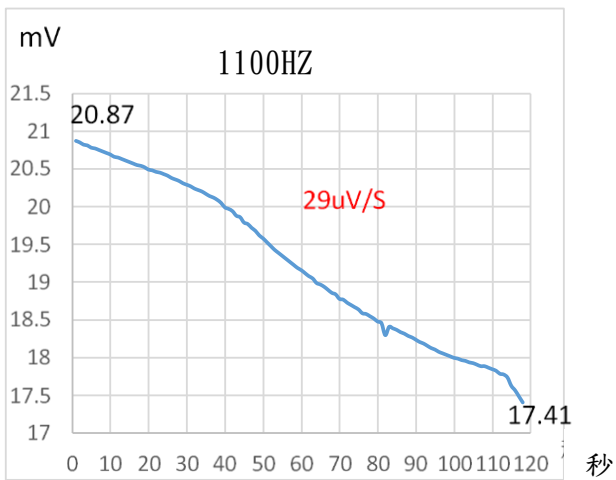
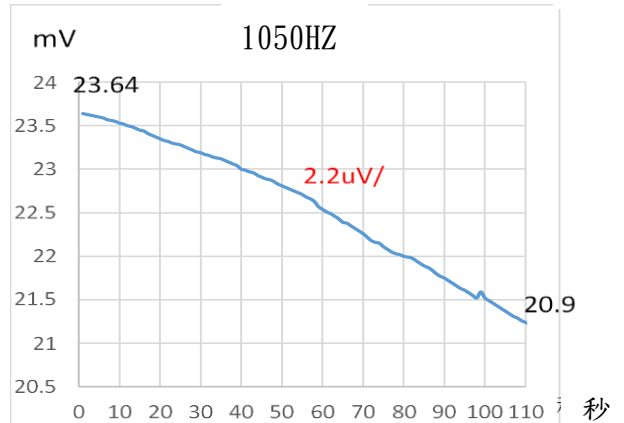
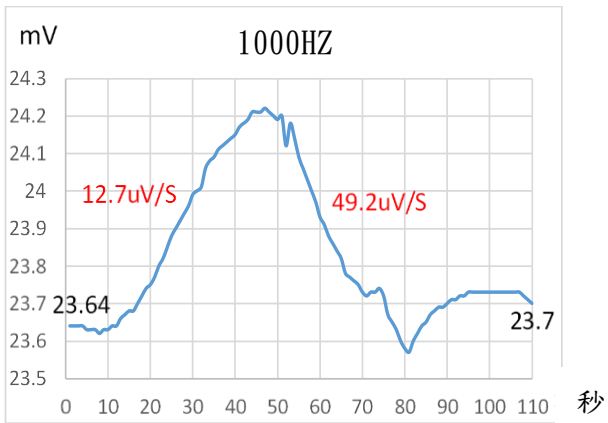
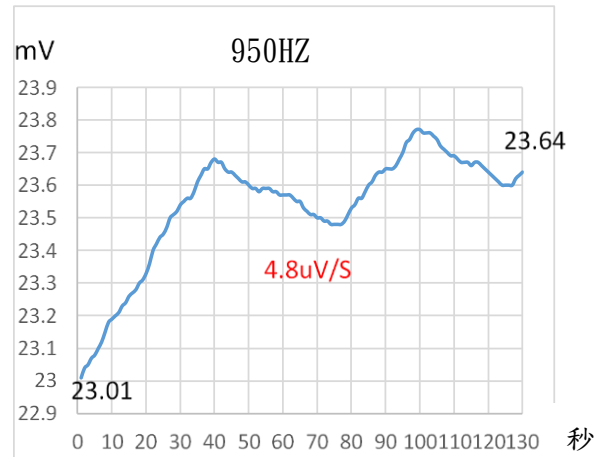
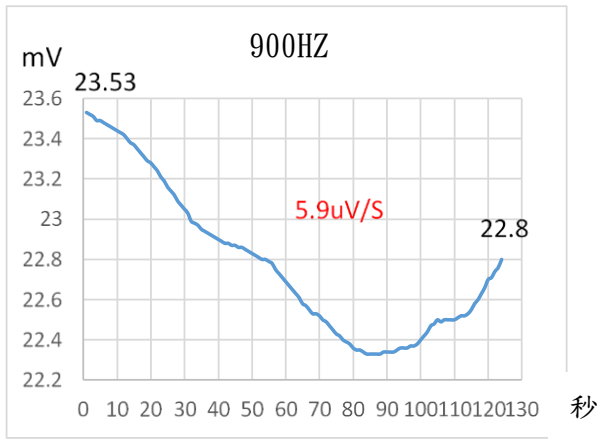
1. 五星花：單頻正弦波播放(400HZ、450 HZ、500 HZ、550 HZ、600 HZ、650 HZ、700 HZ、750 HZ、800 HZ、850 HZ、900 HZ、950 HZ、1000 HZ、1050 HZ、1100 HZ、1150 HZ、1200 HZ、1250 HZ)，頻率規劃是依據 p12兩種蜜蜂聲的頻譜設計的。

五星花單頻播放電壓反應(上升：400HZ、450HZ、650HZ、800HZ、950HZ、1000HZ，400HZ 最明顯)

頻率	400HZ	450HZ	500HZ	550HZ	600HZ	650HZ	700HZ	750HZ	800HZ
上升電壓(uV/s)	51.6	3.1				8			3
下降電壓(uV/s)			10.1	37	33		12.6	16.6	
頻率	850HZ	900HZ	950HZ	1000HZ	1050HZ	1100HZ	1150HZ	1200HZ	1250HZ
上升電壓(uV/s)			4.8	12.7					
下降電壓(uV/s)	2.3	5.9		49.2	2.2	29	19	33	33







(四)實驗四 甜度實驗(當春季時花開數量多時會多採樣做成統計表做數據分析)

1. 仙丹花花朵數量對甜度的影響

(1)時間及花朵數之甜度關係

花別	仙丹花					
日期	12月2日 晴天			12月7日 晴時多雲		
時間	11點15分	11點15分	13點95分	下午15點-16點		
花朵數	1	8	8	10	20	30
甜度	10%	14%	15%	15%	18%	20%

說明：仙丹花甜度與花朵數成正比

(2) 有蜜蜂聲及無蜜蜂聲之甜度差異

花別	仙丹花(20朵)			
日期	12月14日 晴天		12月20日 陰天	
時間	10點18分	10點38分	15點26分	15點44分
無蜜蜂聲甜度	16%		16%	
有蜜蜂聲甜度		19%		19.5%
增加比率	18.75%		21.88%	

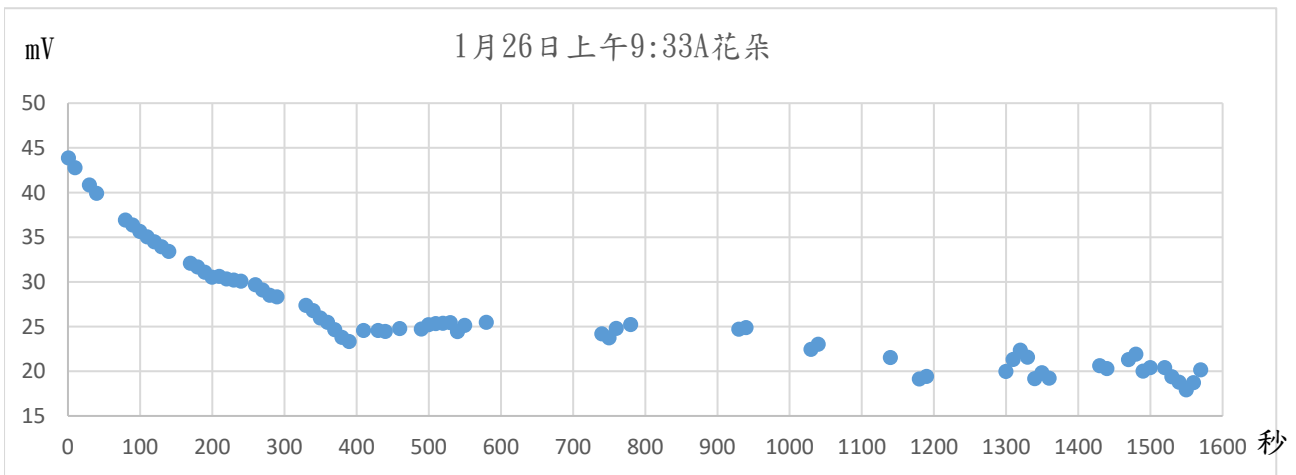
說明：仙丹花甜度播放蜜蜂聲後確實甜度會增加

2. 五星花花朵數量對甜度的影響

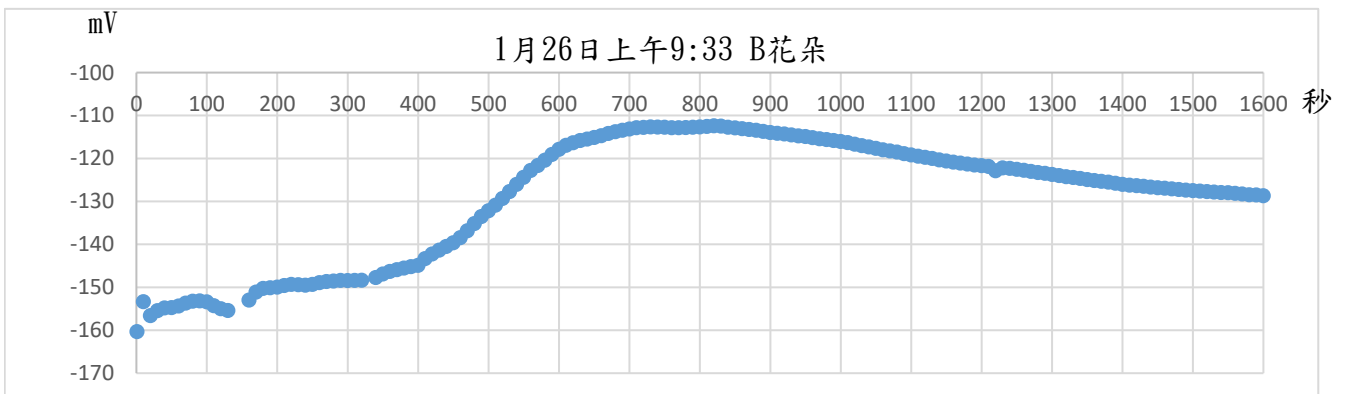
花別	五星花							
日期	5月18日		5月19日		5月23日		5月30日	
時間	13:58	14:49	08:41	08:46	13:25	13:31	13:27	13:52
無蜜蜂聲甜度	15		46.5		29		63	
有蜜蜂聲甜度		15.5		47.5		32		67
增加比率	3.3%		2.2%		10.3%		6.3%	
溫度(攝氏)	30		28		30		30	

(五)實驗五：

1. 測試1：非侵入式測試監測 A、B 兩花朵，無蜜蜂聲1600秒電訊息變化後取1朵測甜度；



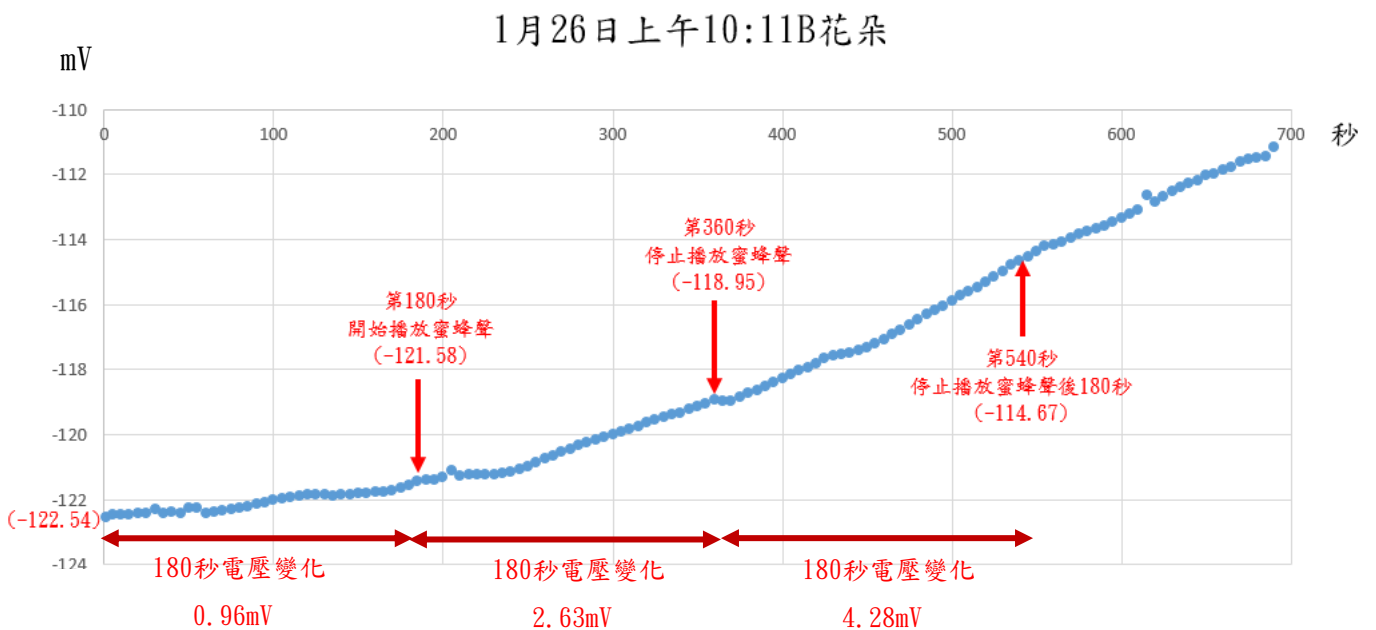
曲線圖7. 非侵入式測試監測 A 兩花朵，無蜜蜂聲1600秒電訊息變化後取1朵



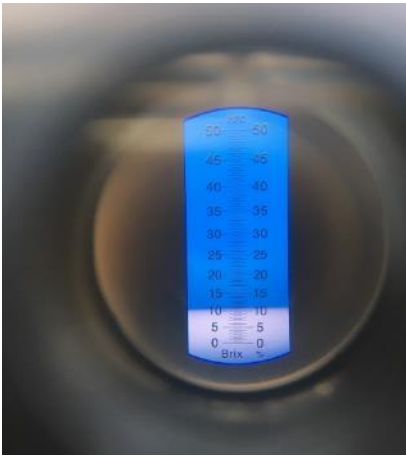
曲線圖8. 非侵入式測試監測 B 兩花朵，無蜜蜂聲1600秒電訊息變化後取1朵

2.測試2：剩下1朵做做3分鐘無蜜蜂聲；3分鐘有蜜蜂聲音；3分鐘蜜蜂聲停止共9分鐘測試訊

電訊息變化後，再作甜度測試。(聽蜜蜂聲後確實電訊息電壓較大)



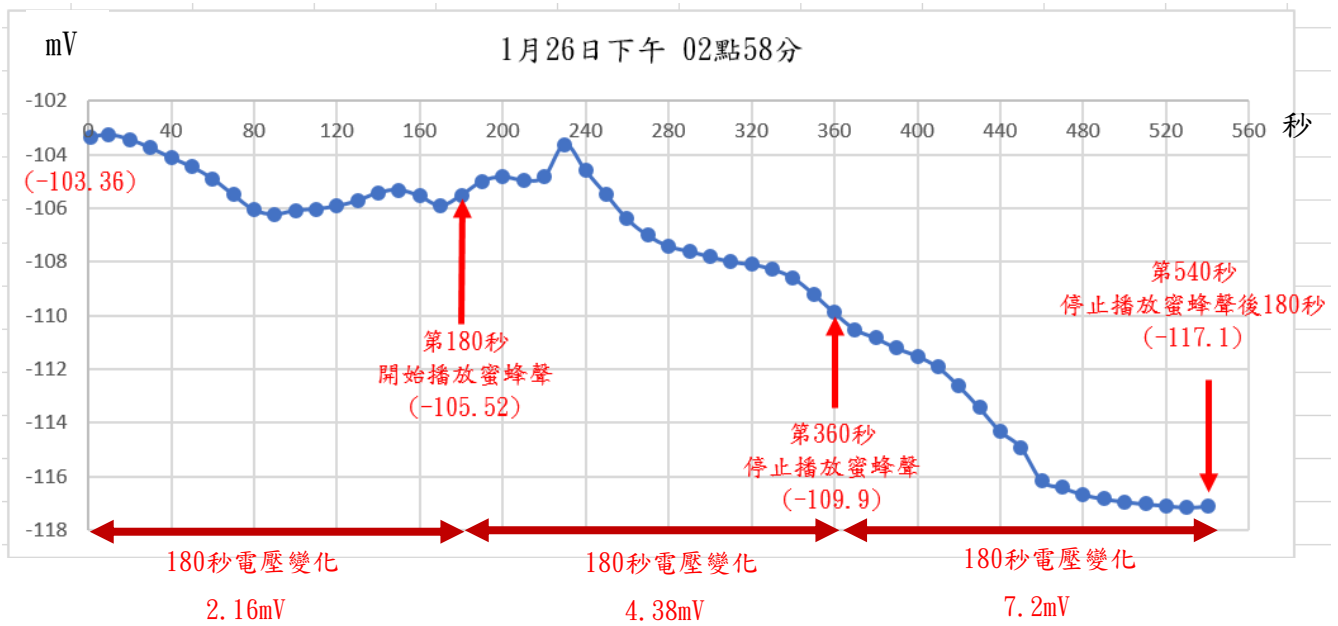
曲線圖9. 1月26日上午10:11 B 朵電訊息變化曲線



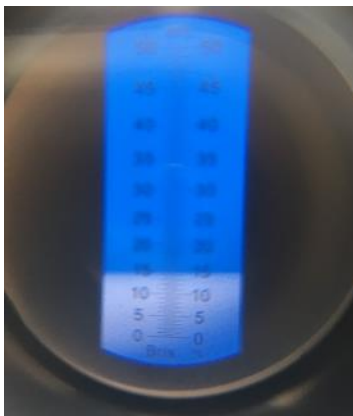
未播放蜜蜂聲 A 花9朵甜度10%



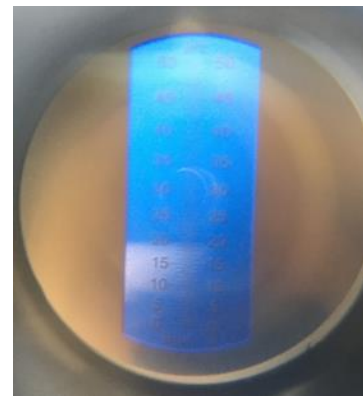
播放蜜蜂聲 B 花9朵甜度15%



曲線圖10. 1月26日下午02:58 B 朵電訊息變化曲線



未播放蜜蜂聲花9朵甜度15%



播放蜜蜂聲花9朵甜度20%

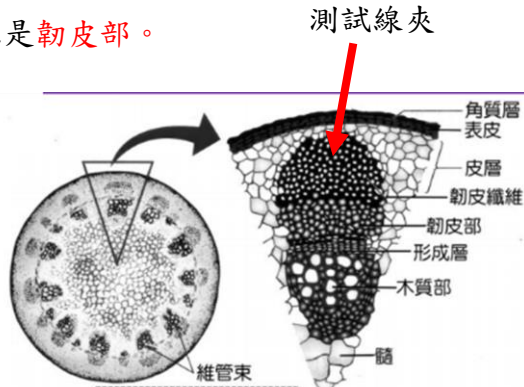
伍、討論

一、測試線夾上後曲線變化與韌皮部等效電路有何關聯？

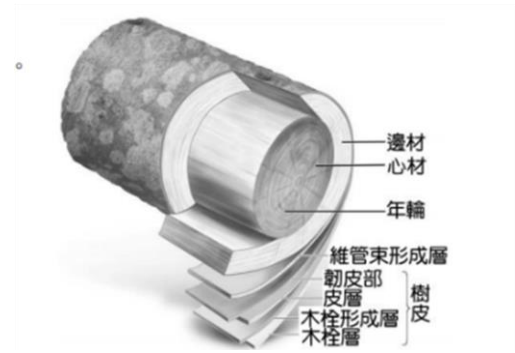
測試線夾上花莖時電壓瞬間變化之曲線分析(0824仙丹花測試0825五星花測試)

(1)五星花及仙丹花都是雙子葉植物，木質部靠較內側韌皮部靠較外側，因此測試線夾接觸

到的應是**韌皮部**。



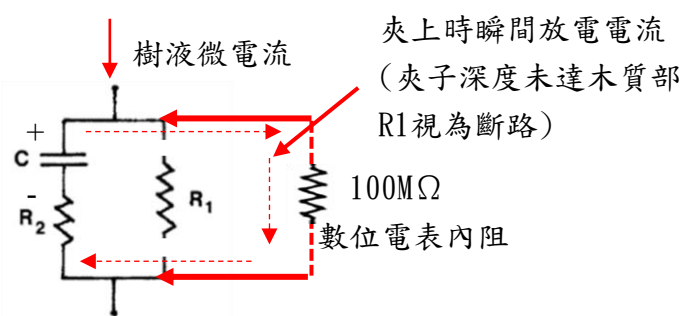
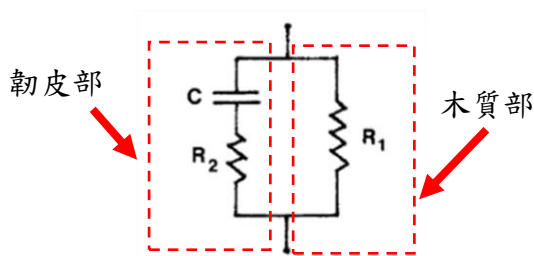
雙子葉植物草本莖(五星花)



雙子葉植物木本莖(仙丹花)

(2)植物莖等效電路模型

(3)當測試夾夾上時與數位電表電壓檔內阻 $100M\Omega$ 形成之電路



(4) RC 放電曲線(理應放電到0V)

(5)為何放電不會歸0V 是因為樹液養分微電流仍繼續流動緣故

二、花對蜜蜂聲音甜度反應原因？

(一)花對聲音共振分析：仙丹花與五星花共振頻率

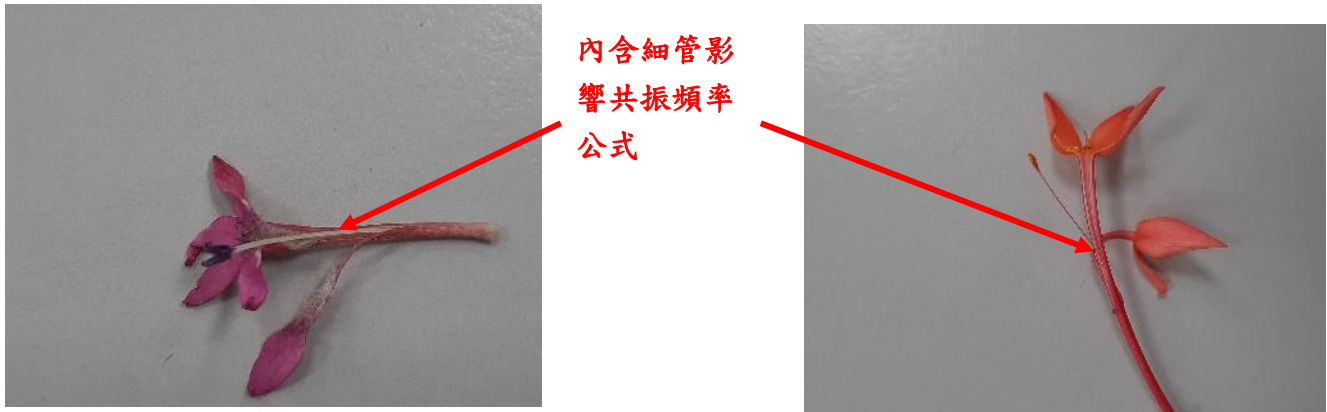
$$\text{圓柱狀閉管的共振頻率 } f = \frac{nv}{4(L + 0.4d)}$$

L 代表空氣管的長度， v 代表空氣中的聲速 (20°C 的海平面聲速大約是 343m/s)， d 代表共振管的內徑

1. 仙丹花： $L=2.7\text{cm}$ ， $d=0.08\text{cm}$ ， $n=1$ 時， $f_1=3138\text{Hz}$

2. 五星花： $L=1.5\text{cm}$ ， $d=0.08\text{cm}$ ， $n=1$ 時， $f_1=5597\text{Hz}$

符合與圖 8 所測出之蜜蜂聲音頻譜



(二) 電訊息應是共振能量轉移所產生(G. A. Jones and D. S. Bradshaw, 2019)

共振能量轉移 (RET) 是電子能量從一個原子或分子傳輸到另一個原子或分子的傳輸。

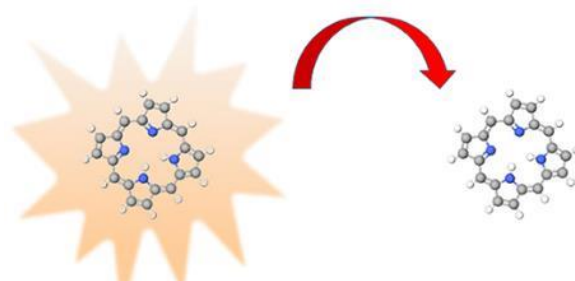


圖19. 能量轉移的表示，激發的供體（左側）將紅色箭頭表示的能量轉移到受體（右側）。

三、12月2日(晴天)當天上午11:17測8朵糖度14%下午13:20同樣測8朵糖度19%為何會有此差異？

說明：初步判定應光合作用養分產出有關，13:20日正當中光合作用最強產出養分多應會影響甜度。

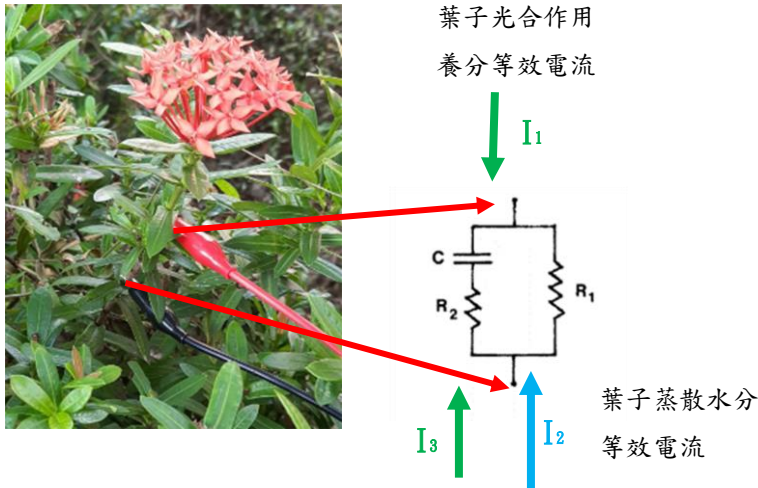
四、實驗四甜度實驗室否證實花聽蜜蜂聲音甜度會增加？

說明：由實驗四(3)甜度增加原先18.75%(4) 甜度增加原先21.88%可證實。

五、侵入式測試與非侵入式測試差異？

說明：侵入式測試之測試夾會較深入接觸到韌皮部，訊號輸入至儀器沒有接觸電阻串聯，如圖19所示，韌皮部電容反應時間常數較短，非侵入式測試之測試夾僅會透過樹皮再到韌皮部，訊號輸入至儀器需再串聯接觸電阻，讓韌皮部電容反應時間常數變長。

六、為何有的電訊息是上升？有的會是下降？



如左圖顯示，訊號取出段影響訊號電壓，有三電流 I_1 、 I_2 、 I_3 ，而且這些電流會因早上、下午、陰天、晴天會有大小差異，假設等效電流正離子 (K^+) 濃度高於負離子 (Cl^-)，當 I_2 、 $I_3 > I_1$ 時，負電位會增加波形往下掉，當 I_2 、 $I_3 < I_1$ 時，負電位會變小波形往上升

陸、結論

本研究以五星花及仙丹花成功證實以色列特拉維夫大學演化理論學家哈德尼 (Lilach Hadany) 花接收到蜜蜂聲後花蜜中的糖分濃度增加，再由文獻植物韌皮部等效電路推敲此糖分濃度增加會有電訊息反應，也成功證實花接收到蜜蜂聲後有電訊息反應，我們找到與花結構相關之共振模型文獻，以及共振能量轉移 (RET) 是電子能量從一個原子或分子傳輸到另一個原子或分子的傳輸，為花接收到蜜蜂聲後有電訊息反應，找到合理的解釋，也做了單一頻率對花做頻譜反應測試，確實某些頻率反應與實際蜜蜂頻譜接近，我們希望找尋更多蜜源植物繼續做測試，可收集更多證據來證明，希望將來提供給養蜂場作參考來提升蜂蜜品質。

柒、參考資料文獻

一、期刊

- (一) A. R. Guerrero and T. S. Anaya, 2017. Frequency analysis of honey bee buzz for automatic recognition of health status: a preliminary study.
- (二) G. A. Jones and D. S. Bradshaw, 2019. Resonance Energy Transfer: From Fundamental Theory to Recent Applications, School of Chemistry, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom.

- (三) J.S. Ishay ,1982. The sounds of honey bees and social wasps are always composed of a uniform frequency, The Journal of the Acoustical Society of America 72, 671.
- (四) J. and S. Lautner, 2007. Electrical signals and their physiological significance in plants, Plant, Cell and Environment, 30: pp. 249-257
- (五) M. Zhang and J.H.M. Willison, 1992, "Electrical impedance analysis in plant tissues: the effect of freeze-thaw injury on the electrical properties of potato tuber and carrot root tissues," Canadian Journal of Plant Science, vol. 72, pp. 545-553.
- (六) Y. Yovel and L. Hadany, 2019. Flowers respond to pollinator sound within minutes by increasing nectar sugar concentration.

二、網站

- (一) Tech News 科技新報 2019 年 01 月 20 日，研究：花聽得到蜜蜂嗡嗡聲，
資料來源：<https://technews.tw/2019/01/20/plants-can-hear-animals-using-their-flowers/>
- (二) 華人百科，蜜腺，
資料來源：<https://www.itsfun.com.tw/%E8%9C%9C%E8%85%BA/wiki-7364782-2123272>
- (三) 百科知識，花蜜[植物分泌的液體]，資料來源：
<https://www.easyatm.com.tw/wiki/%E8%8A%B1%E8%9C%9C%5B%E6%A4%8D%E7%89%A9%E5%88%86%E6%B3%8C%E7%9A%84%E6%B6%B2%E9%AB%94%5D>
- (四) 江芳銘，2013，植物體醣類運輸路的最後一快拼圖，
資料來源：https://chiangfm07.blogspot.com/2013/10/blog-post_4.html
- (五) 記住不想忘記的，2008，繁星花和仙丹花
資料來源：<https://blog.xuite.net/ingridk/wretch1/99200927-%E7%B9%81%E6%98%9F%E8%8A%B1%E5%92%8C%E4%BB%99%E4%B8%B9%E8%8A%B1>
- (六) 楊正澤、管力慶，2016，一吻定「蜂」身？昆蟲與植物的專情「蜜」碼可能改寫，
資料來源：科技大觀園
<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000003/detail?ID=aed30ba5-f0e4-4dc6-8a9e-3a00e2ae9304>
- (七) 劉文雄，109，基本電學下冊，全華圖書
資料來源：<http://www.ycvs.ntpc.edu.tw/ezfiles/0/1000/img/112/774614315.pdf>

【評語】 030316

1. 依據參考文獻中的先前以色列研究，蜜蜂的聲音頻率為低頻，介於 0.2~0.5kHz 之間（即 200-500 Hz）可誘發月見草甜味增加。本研究中也提到蜜蜂聲音頻譜不同（第 8 頁），因此建議可以進一步比較不同蜜蜂聲音頻率來測量花的甜度影響。
2. 甜度測試的次數亦不足，每個實驗的重複數無法判斷，花朵甜度的改變應使用生物統計分析是否有顯著差異。
3. 試問熊蜂或是台灣蜂的蜜蜂聲是如何錄製的？對測試花所撥放的”蜜蜂聲”是哪種蜜蜂聲？這些重要資訊，作者似乎不夠熟悉。
4. 本研究使用最低頻率為 400Hz,且五星花對 400Hz 反應最明顯。由於有些蜂的發出的震動頻率低於 400Hz，應嘗試測試低於 400Hz 的低頻效果是否更佳。
5. 實驗構想極佳，唯設計可再周延，讓數據更有說服力。

作品簡報

探究花感知蜜蜂聲音分泌更多甜份的奧秘



國中組 生物科

研究動機



電訊息傳遞

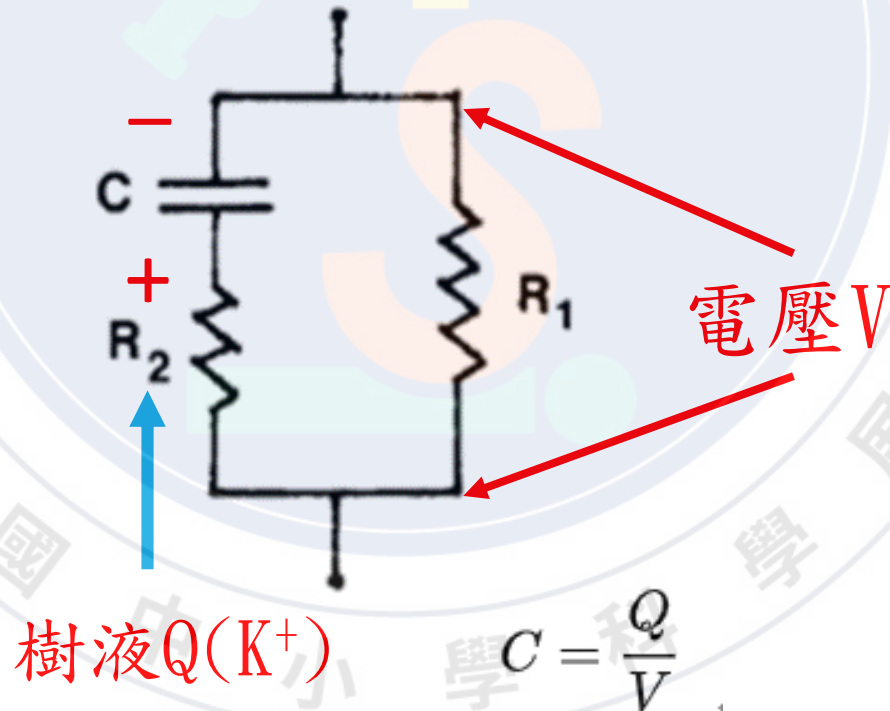
研究目的

- 一、證實植物莖韌皮部等效電路的電容放電特性
- 二、測試花在無蜜蜂聲及有蜜蜂聲下，莖部的電壓差異
- 三、測試花在無蜜蜂聲及有蜜蜂聲下，花蜜甜度的差異
- 四、測試花在不同頻率播放(單頻正弦波)下，
莖部的電壓反應

文獻回顧

1. 植物體內韌皮部的養分運輸物質，多數是帶電離子，其中以 K^+ 含量最高
2. 植物電訊號的傳遞文獻-等效電路

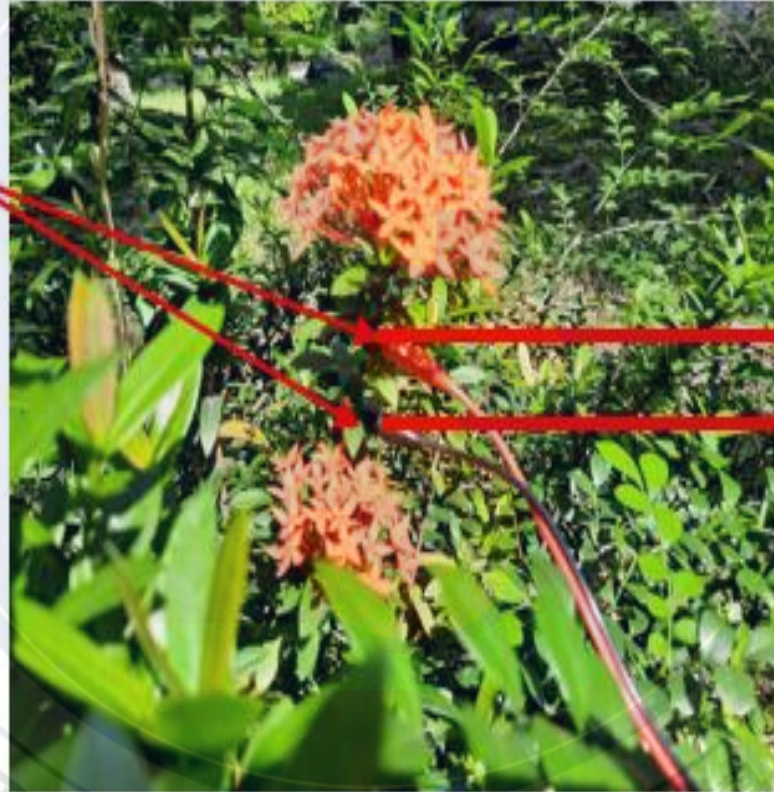
侵入式訊號測定
莖部等效電路模型



實驗設計理論依據



間距3cm



數位電表
測DCmV變化

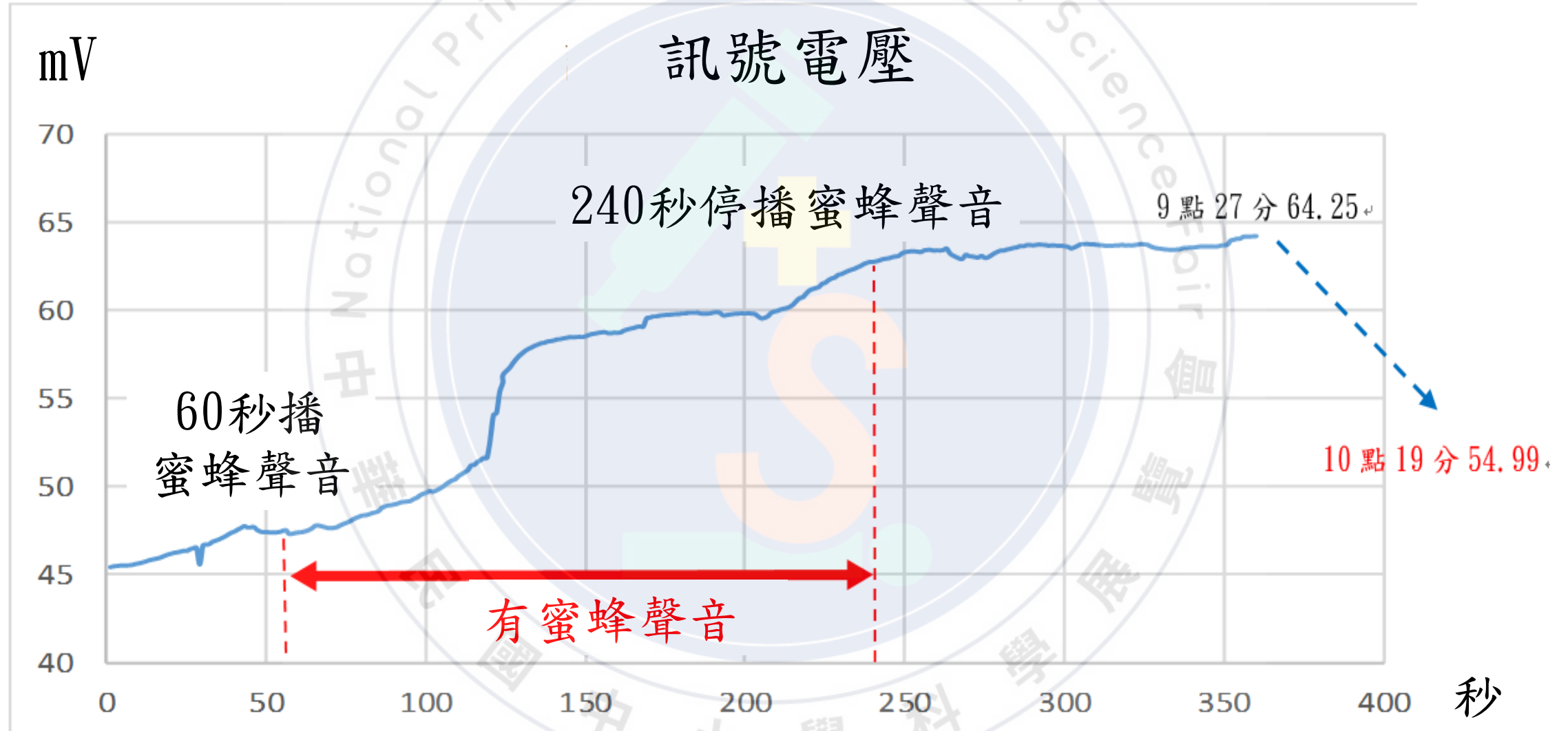
播放蜜蜂聲音箱

仙丹花

研究結果-五星花在有蜜蜂聲下的電訊息



研究結果-仙丹花在有蜜蜂聲下電訊息



研究結果-有蜜蜂聲及無蜜蜂聲之甜度差異

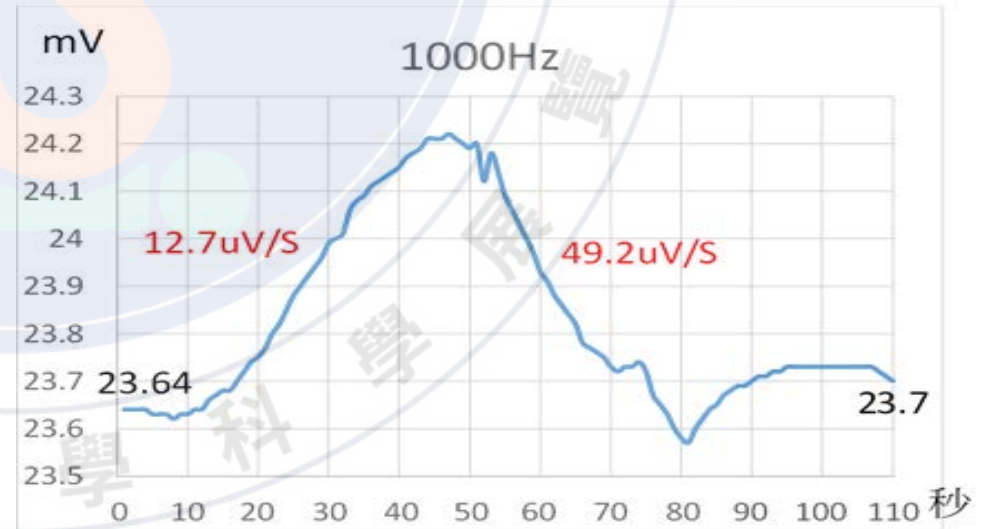
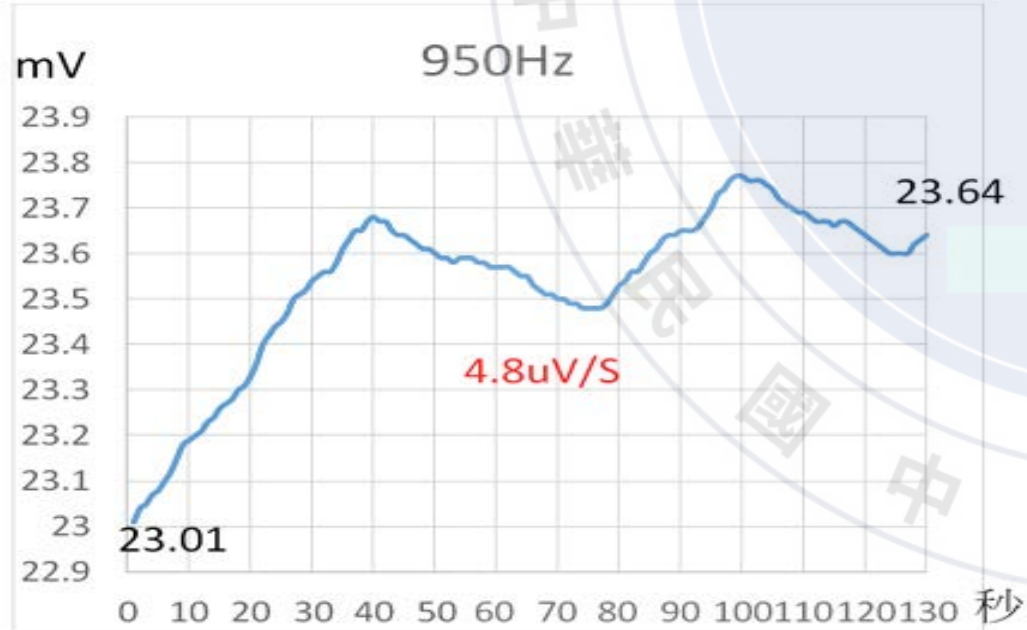
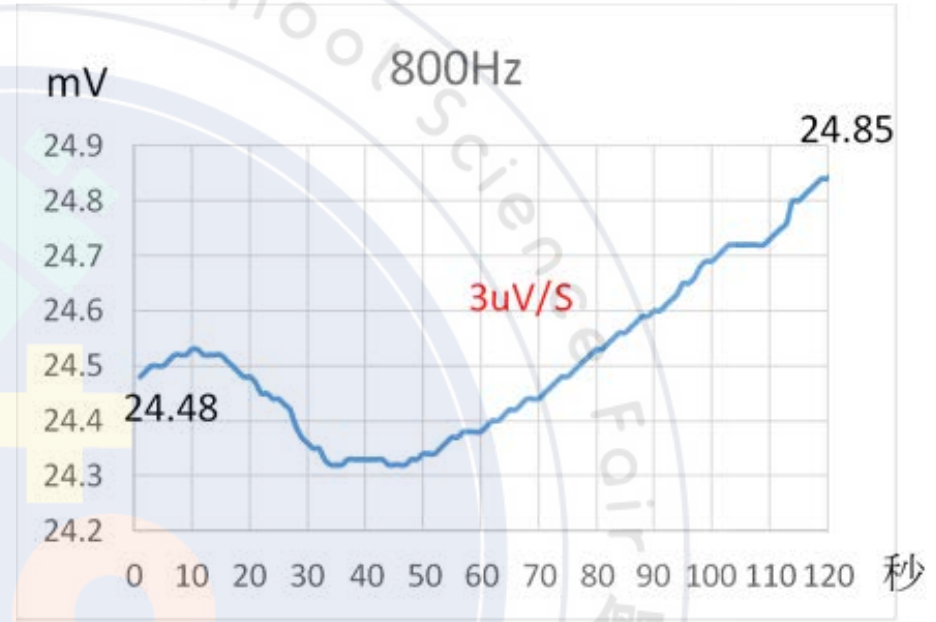
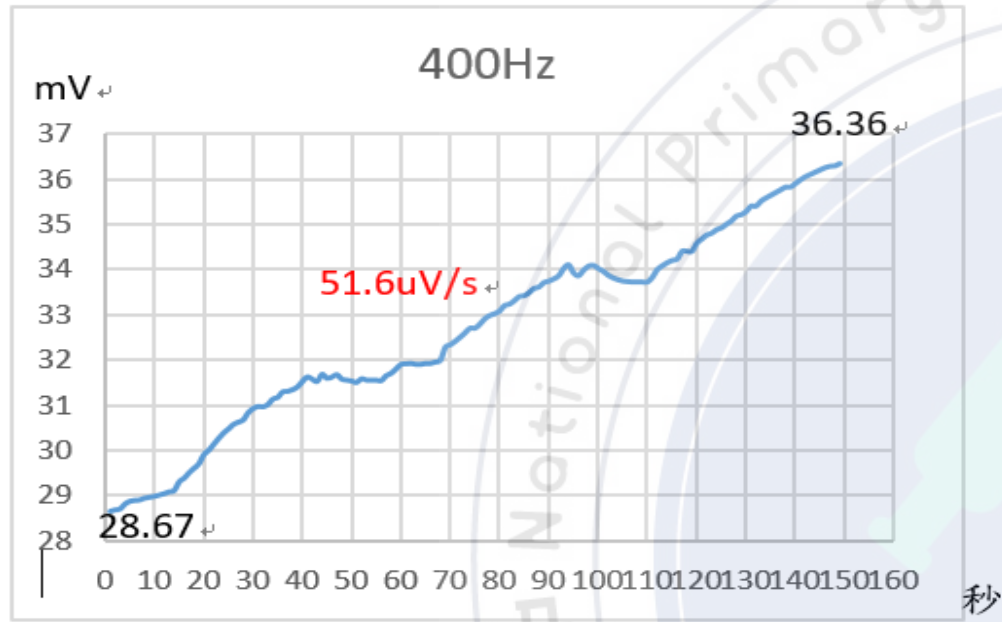
花別	仙丹花(20朵花絲)	
日期	12月14日 晴天	12月20日
天氣	晴天	陰天
時間	10：18~10：38	15：26~15：44
無蜜蜂聲甜度	16%	16%
有蜜蜂聲甜度	19%	19.5%
增加比率	18.75%	21.88%

研究結果-實驗數據(五星花)

單頻正弦波(400HZ-1250HZ)播放測試花的反應

頻率	400HZ	450HZ	500HZ	550HZ	600HZ	650HZ	700HZ	750HZ	800HZ
上升電壓 ($\mu\text{V/s}$)	51.6	3.1				8			3
下降電壓 ($\mu\text{V/s}$)			10.1	37	33		12.6	16.6	
頻率	850HZ	900HZ	950HZ	1000HZ	1050HZ	1100HZ	1150HZ	1200HZ	1250HZ
上升電壓 ($\mu\text{V/s}$)			4.8	12.7					
下降電壓 ($\mu\text{V/s}$)	2.3	5.9		49.2	2.2	29	19	33	33

研究結果-不同頻率播放測試花的反應(五星花)



討論

1. 電訊息反應與共振能量的轉移有關



內含細管影響
共振頻率公式

2. 花在特定幾個頻率下，
有電訊息反應：
推測與花絲的長度不同有關



結論

- ◆ 花接收到蜜蜂聲後有電訊息反應，且花蜜的甜度增加
- ◆ 對花做不同頻率測試，發現特定頻率與蜜蜂聲的電訊息反應接近
- ◆ 依據花結構之共振模型，為花感知到蜜蜂聲產生電訊息反應找到合理的解釋

參考文獻

1. Y. Yovel and L. Hadany, 2019. Flowers respond to pollinator sound within minutes by increasing nectar sugar concentration.
2. J. and S.Lautner, 2007. Electrical signals and their physiological significance in plants, Plant, Cell and Environment, 30: pp.249-257
3. M. Zhang and J.H.M. Willison, 1992, "Electrical impedance analysis in plant tissues:the effect of freeze-thaw injury on the electrical properties of potato tuber and carrot root tissues," Canadian Journal of Plant Science, vol. 72, pp.545-553.