

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

第二名

030316

**台灣欒樹-探討蒴果與果瓣對種子成長與擴散模
式的關係**

學校名稱：花蓮縣立國風國民中學

作者： 國一 蔡睿庭 國三 徐茂倫	指導老師： 蔡欣吟 蔡尚軒
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：果瓣、種子、發芽率

摘要

台灣欒樹種子生長過程種皮顏色由綠轉紅變黑，一開始種皮長大讓內部胚根與子葉等結構長出後，內部開始累積大量澱粉，而種子重量越重發芽率越高。種子要進行發芽時，養分從胚根開始分解，沿子葉基部至子葉尖端。

有果瓣的種子在枝頭上變色速度慢，發芽率(63.7%)高於無果瓣的種子(27.5%)種子掉落率(55.3%)小於無果瓣的種子(70.1%)，可知果瓣是種子發育不可或缺的。

有風的情況下，果瓣傳播模式與水平位移的關係並無一致趨勢，但滯空時間越長，越容易傳播到遠方。而質量輕、大果瓣、兩顆種子等因子較常傳播到遠處，越重的種子飛越近，但發芽率最高，使得果瓣總重量與大小必須兼顧傳播距離及發芽率。；滯空時間越長，越容易傳播到遠方。

壹、研究動機

在閱讀關於台灣欒樹的歷屆科展時，我們發現其他科展的研究方向大致可分為**病蟲害防治**，例：欒樹葉萃取液防治福壽螺或以紋白蝶和淡黃蝶幼蟲為對象，利用台灣欒樹的葉子汁液直接殺蟲(噴灑於菜葉及蟲體)的方式進行實驗研究，和**台灣欒樹與生物之間的關係**，例：無患子椿象對於台灣欒樹的種子選擇因素、無患子椿象喙的長度差異與台灣欒樹果莢大小的關係，而很少注意到台灣欒樹果實(蒴果)果瓣與種子發育及傳播的功用，所以我們決定要以台灣欒樹的「**種子與果瓣**」作為研究主軸，想知道台灣欒樹的種子成長的歷程及果瓣能在種子的成長過程中扮演舉足輕重的角色嗎？除此之外，果瓣是如何幫助種子傳播出去的呢？還有更多功用嗎？我們對這些心中的疑惑感到非常有興趣，所以我們決定要深入研究這些問題，解決心中一直以來的疑惑。

欒樹簡介

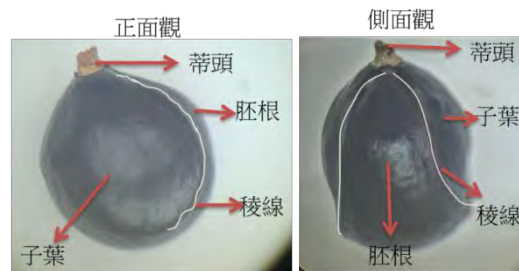
台灣欒樹（學名：*Koelreuteria elegans*）為雙子葉植物，是一種無患子科的落葉喬木，是臺灣特有種植物，高可達 17 公尺，生長頗速能耐乾旱，不擇土壤，抗風力強，但需充足日照。分布河谷兩岸及 1000 公尺以下低海拔向陽的闊葉林內。

台灣欒樹果實（蒴果）成氣囊狀，有三瓣果瓣，每個果瓣中有一中肋突起，中肋兩端能各連結一顆種子，蒴果果瓣顏色變化為玫瑰紅色→紅褐色→最後呈土色，到了最後階段蒴果會乾燥，中肋連結處會互相分離，蒴果因此裂成三片獨立果瓣，帶著種子傳播出去。飄散出去的種子為黑褐色圓形有光澤，每片果瓣上的種子數與大小不一。在種子的其中一側有明顯稜線，往蒂頭方向延伸。

種子在蒴果內的排列



種子的外觀與構造



貳、研究目的

一、種子的成長過程：

- (一) 不同階段種子的外在型態
- (二) 種子發芽過程養分的變化
- (三) 不同階段的種子發芽情況之差異
- (四) 不同階段種子的內部構造

二、釐清果瓣對種子的影響：

- (一) 果瓣是否具有葉綠體
- (二) 利用阻斷光源及破壞果瓣等的方式探討果瓣對種子大小、落果率及發芽率的影響

三、探討種子在果瓣上不同排列狀態的傳播距離：

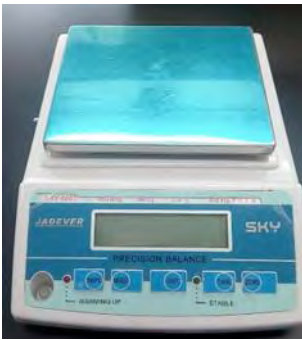
(一) 果瓣飄落的模式

(二) 種子數量、總重量、及果瓣大小對傳播距離的影響

參、研究設備及器材

一、研究設備：

數位電子天秤



游標尺



顯微鏡



穴盆



二、器材與材料：

台灣欒樹蒴果、玻片、研磨鉢與研磨棒、酒精燈與三腳架、碘液與本氏液、解剖針與鑷子、手機、燒杯、培養皿、風扇。

三、應用軟體：

Tracker、ImageJ、小畫家、Excel。

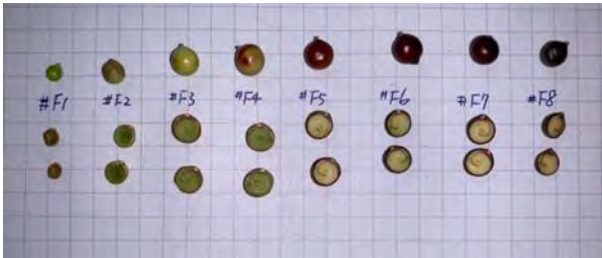
肆、研究方法

一、種子的探究

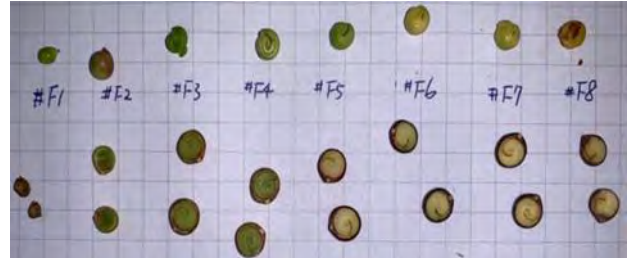
- 1.取各種不同階段的種子測量重量、長度、寬度、厚度並拍照，利用縱剖（種子立起，將稜線處放置於右手之側，沿著穿越蒂頭—底部的軸線，將種子切成均勻兩瓣）以及剝除種皮之方式，觀察種子內部的結構，並拍照紀錄之。如圖 1、圖 2
- 2.選取不同狀態的種子數顆，先記錄其重量後，分別放入穴盆中的每一穴洞後覆土澆水，每日澆水到水能自穴盤底部滲出，以保持種子的濕潤。記錄其發芽與否與發芽天數，

並量測幼苗高度，計算平均生長速率（cm/day）。

- 3.解剖新鮮種子及久未發芽種子，觀察其構造。並分別對新鮮種子、浸泡種子的水溶液及久未發芽的種子做醣類測試，：利用碘液測試種子是否殘存澱粉；泡製5%種子內含物溶液，利用本氏液測試是否含有葡萄糖。



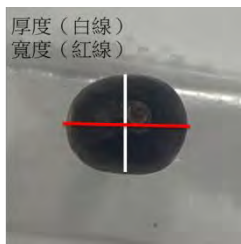
利用縱切的方式觀察不同階段的內部構造



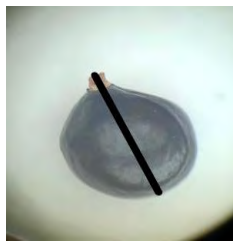
利用撥種皮的方式觀察不同階段的內部構造

圖 1 利用縱切與撥種皮的方式觀察種子的內部構造

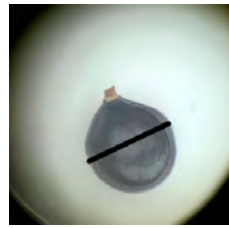
二、果瓣對種子發育的影響



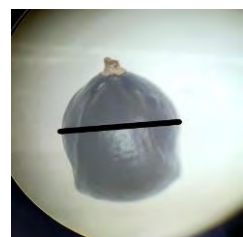
種子的俯視圖



種子的長度



種子的寬度



種子的厚度

圖 2 種子長度、寬度、厚度的定義

- 1.取得各種大小及各種顏色的台灣欒樹蒴果與種子。將紅色蒴果、綠色蒴果與乾燥蒴果的果瓣，夾在兩片保麗龍之間，利用超薄的雙面刀片橫切此保麗龍組，製成蒴果果瓣的剖面水埋玻片標本，利用複式顯微鏡觀察其切片，並拍照紀錄之。
- 2.將黑色紙袋套在結著蒴果的枝條中，阻擋蒴果接近光線，再定期將黑色紙袋打開，紀錄其顏色變化並拍照。兩個星期後，將一部分的蒴果摘下，記錄其形質。一個月後，將其枝條取下，觀察並記錄蒴果與種子。若其種子 $>0.04g$ ，則同以上方法進行發芽測試（圖3）。



圖 3 遮光與剪果瓣的樣貌

3.選定同一棵樹的兩枝條，使其枝條上蒴果內的總種子數接近，將其中一枝條上的蒴果，剪去果瓣，剪果瓣的方式為沿著果瓣交接處剪去約 $1/2 \sim 1/3$ 的果瓣（圖 3），使種子裸露在外，另一枝條則不做處理當成對照組。在這兩組枝條下用網子圍繞，收集掉落種子，並每天記錄剩餘的種子，一個月後再將樹枝上的種子一併採下，計算最後留在枝頭上的種子數，測量種子的重量，並將收集的種子種植於穴盆中，進行發芽測試。記錄各顆種子發芽與否與日期。若無發芽者，則進行解剖以了解種子不發芽的可能原因。

4.發芽測試後，解剖未發芽的種子，觀察內部是否完整，且作醣類測試：利用碘液測試種子是否殘存澱粉；泡製 5 % 種子內含物溶液，利用本氏液測試是否含有葡萄糖。

三、果瓣大小、總重量與種子數量對傳播的影響

1.將果瓣分成大果瓣與小果瓣，每類皆取其大小一致的果瓣備用。

2.取 7 片大果瓣與 7 片小果瓣，利用黏土做成圓球形當成種子，黏在每片果瓣的中肋上（原本種子附著在果瓣的位置），使其總重量為 0.1g，此為實驗組一與實驗組二。對照組則是 7 顆黏土，每顆 0.1g。

3.在門窗緊閉的空間中，利用電扇製造固定的風，將步驟 2 的實驗組與對照組，從 160 cm 的高度釋放，記錄其翻轉模式及每個樣本與釋放基準點間的距離。

4.重複步驟 2，實驗組為 21 片大果瓣，其中 7 片果瓣的重量為 0.04g；另 7 片為在果瓣的中肋兩端黏上黏土，使總重量為 0.1g；最後 7 片為果瓣與中肋兩端黏土的總種為 0.2g。這三種重量是依據野外果瓣總重的最小值、平均值與最大值而決定。對照組則是 7 顆

黏土，每顆 0.1g。

5.重複步驟 3。

6.取 14 片大果瓣，分成兩組（各為 7 片），其中一組的黏法為單顆黏土黏於中肋的一側（實驗組 1），另一組為黏土黏於中肋的兩側（實驗組 2），但每組的果瓣 + 種子總種為 0.1g。對照組則是 7 顆黏土，每顆 0.1g。

7.重複步驟 3。

伍、研究結果

一、種子的成長過程：

（一）外部型態



圖 4 種子成長過程外皮的顏色變化

種子成長過程外皮的顏色變化：綠色→綠紅色→紅色→紅黑色→黑色，如圖 4。種子在綠轉紅色階段，其大小與重量達到高峰（平均重量 $0.10\pm 0.01\text{g}$ ），之後在紅黑色階段時，大小及重量會逐漸變小且變硬（平均重量 $0.09\pm 0.01\text{g}$ ），到最後黑色階段時，種子堅硬且體積較前一階段小，其平均重量為 $0.07\pm 0.01\text{g}$ ，大小介於長度 5.6mm- 6.7mm、寬度 4.7mm-5.5mm、厚度 4mm-5.2mm。

根據測量到的形質來分析各階段種子的形態，我們將採集的種子依重量大小排列，觀看各種顏色種子的長寬高的分布，如表一。發現在綠色階段（圖 5），種子的寬度大於長度與厚度，且長與厚的差異不大，比較偏向圓球形；然而在紅色階段（圖 6），種子的長度都大過寬與厚，呈長偏扁的圓形；黑色階段種子（圖 7）寬度與厚度的變化量不大且趨勢大致相同，但長度有較明顯的變化，顯示種子在

最後階段是以變長來增加體積，也是長偏扁的圓形。

對比大小與重量的關係，紅色與綠色階段都是越大而越重。黑色的組別，也是越大則越重，長度超過 5.6mm 的種子，重量才能大於 0.06g 以上。在長度接近 6mm 左右時，長度的變化趨緩，但重量的差異則持續增大，亦即同樣大小，卻有不同重量（圖 8）。表一 不同階段種子形質之平均值

	平均長度(mm)	平均寬度(mm)	平均厚度(mm)	形狀描述
綠色時期	5.2±0.9	4.5±0.9	3.9±1.0	接近圓球形（圖 5）
紅色時期	6.2±0.6	5.3±0.6	4.6±0.5	長偏扁的圓球形(圖 6)
黑色時期	6.1±0.2	5.2±0.2	4.6±0.3	長偏扁的圓球形(圖 7)

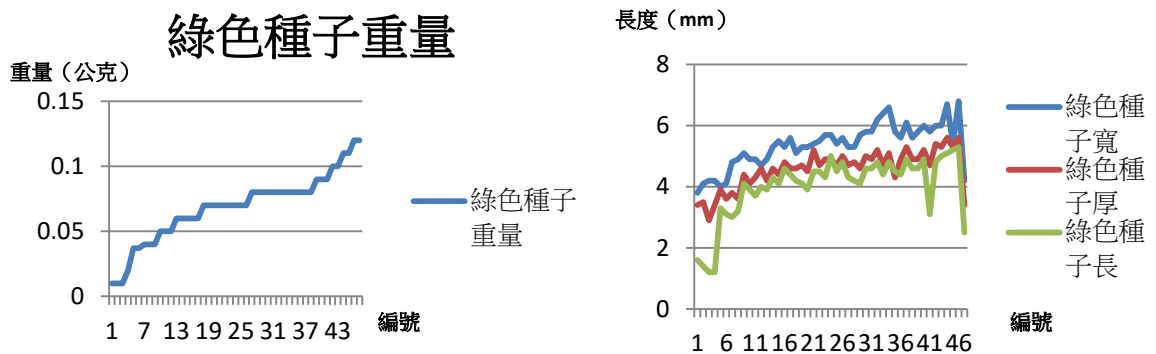


圖 5 綠色種子重量與大小的關係

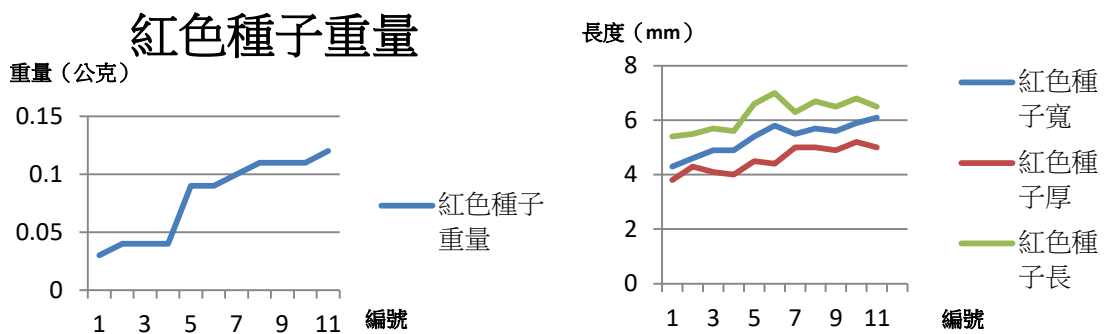


圖 6 紅色種子重量與大小的關係

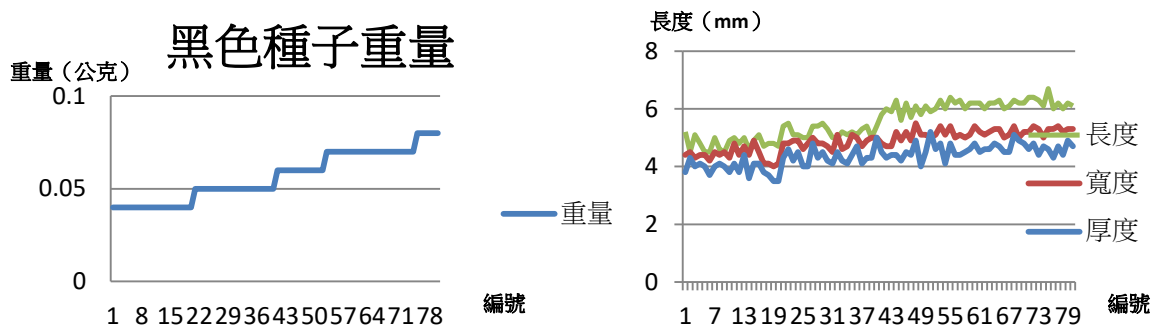


圖 7 黑色種子重量與大小的關係

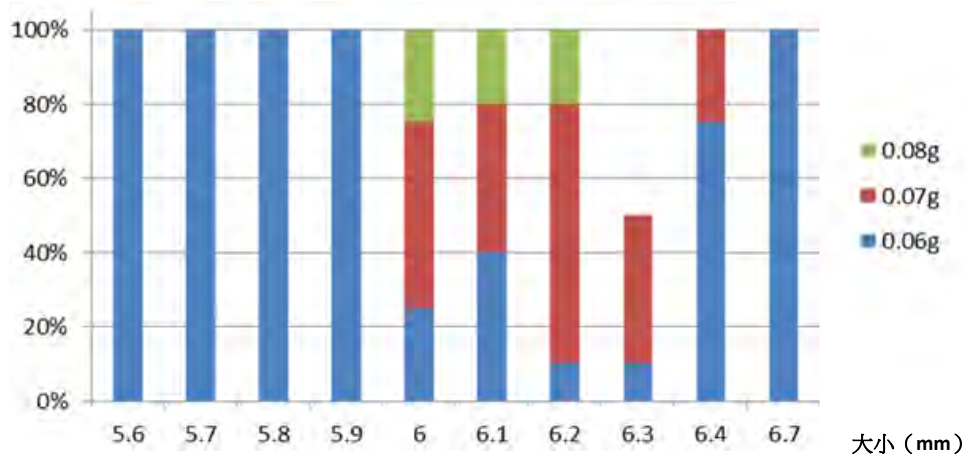


圖 8 黑色種子大小與重量的關係

進一步分析黑色種子在大小相似的狀況下，重量與發芽率的關係，整理如表二：

表二 不同重量與發芽率的關係

種子重量	0.06g	0.07g	0.08g
發芽率	50%	77%	83%
平均生長速率 cm/day	0.35±0.08	0.31±0.12 cm/day	0.35±0.09cm/day

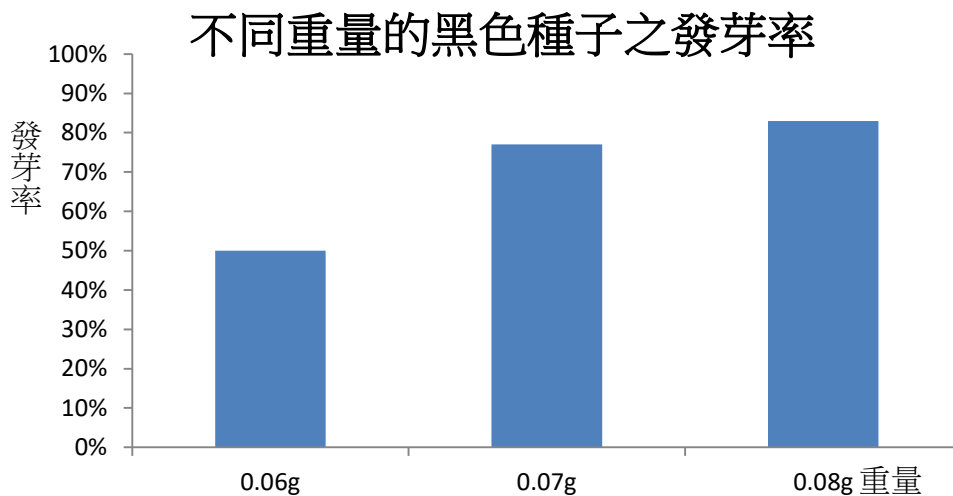


圖 9 不同重量的黑色種子之發芽率

經卡方檢定各重量組別間的發芽率有顯著差異($p < 0.05$)，隨著重量越重，發芽率越高（圖 9），但組間的發芽天數則無顯著差異。我們嘗試合併其他組的實驗數據，將自然生長的黑色種子之發芽率合併計算，可得到重量與發芽率的關係如表三、圖 10：

表三 不同重量與發芽率的關係

種子重量	0.04g	0.05g	0.06g	0.07g	0.08g
發芽率	35%	65%	75%	69%	83%

不同重量的黑色種子之發芽率

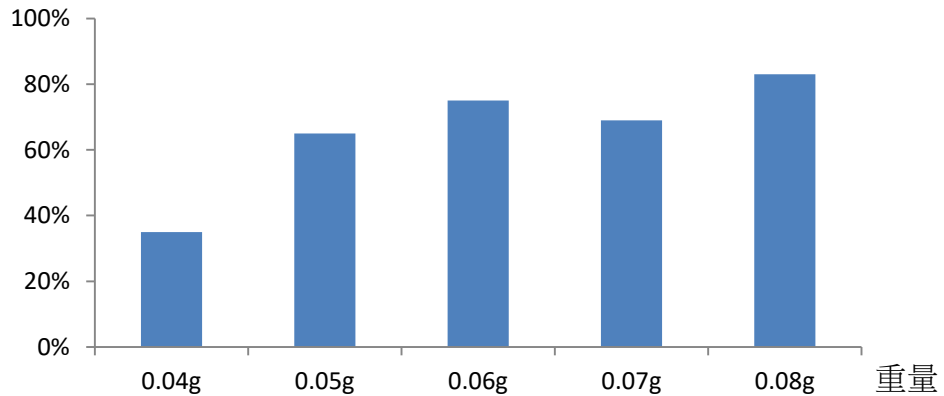


圖 10 不同重量的黑色種子之發芽率

小種子不易發芽，而大種子中，重量越重越容易發芽。趨勢符合表二，顯示在樹上發育到最後黑色階段的種子，越大越重則越有利於發芽。

(二) 種子發芽過程養分的變化

由於種子發芽過程中，需要分解養分以進行旺盛的呼吸作用，因此我們將在樹上已變黑的種子不同處置後進行醣類測試，來檢視種子內醣類的種類：所有新鮮種子都能偵測到澱粉和葡萄糖（圖 11、圖 12）。泡水兩天後，種子的平均重量會達到高峰，增加為原本的兩倍，之後就沒太大的變化（表四），以此可知種皮的通透性高。我們進一步發現任何種子在浸潤作用的過程中，葡萄糖都會被釋放到種子外，如圖 13。

泡水兩天的種子在播種 10 天後，隨著種子重量越輕，內含有澱粉的面積與澱粉變色的程度也越低，葡萄糖含量也都幾乎測不到（圖 14、圖 15），表示在發芽過程中，澱粉會不斷被水解，而產生的葡萄糖也會很快的消失。



圖 11 新鮮種子的澱粉測試

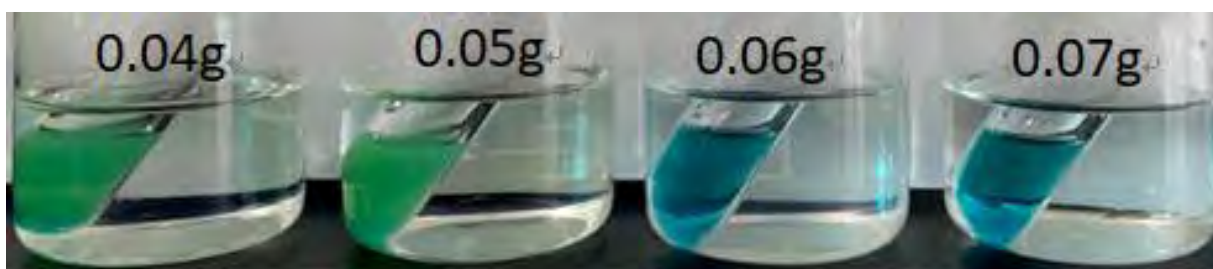


圖 12 新鮮種子的葡萄糖測試

表四 新鮮種子泡水後的重量變化

原本重量	0.04g	0.05g	0.06g	0.07g
泡水 2 天	0.09±0.007g	0.10±0.008g	0.10±0.006g	0.10±0.022g
種植 10 天	0.08±0.011g	0.09±0.012g	0.10±0.012g	0.12±0.113g

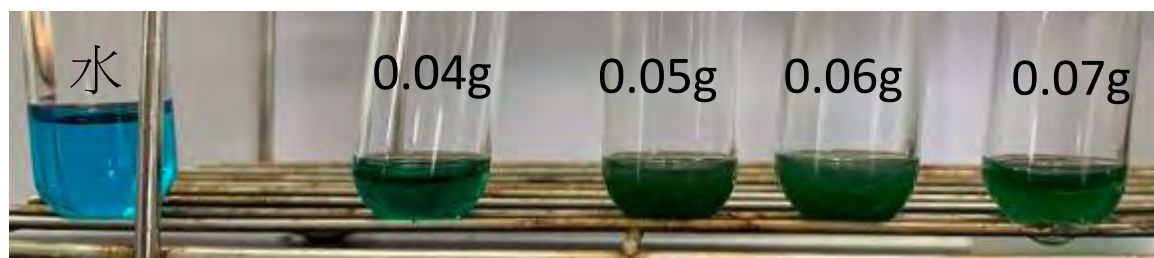


圖 13 種子泡水溶液的葡萄糖測試

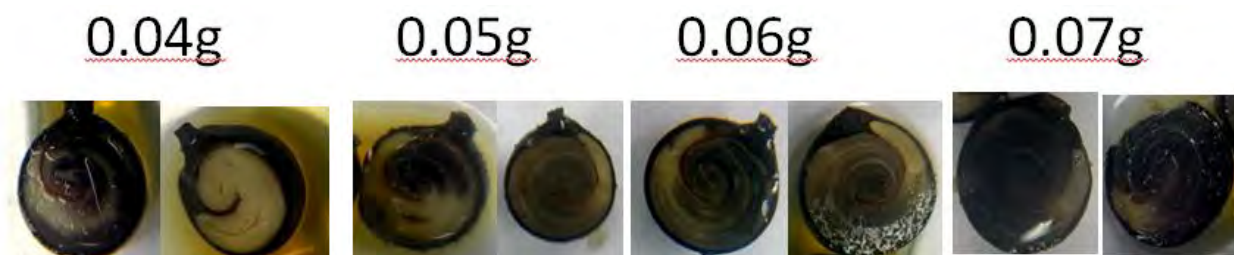


圖 14 種植 10 天澱粉測試

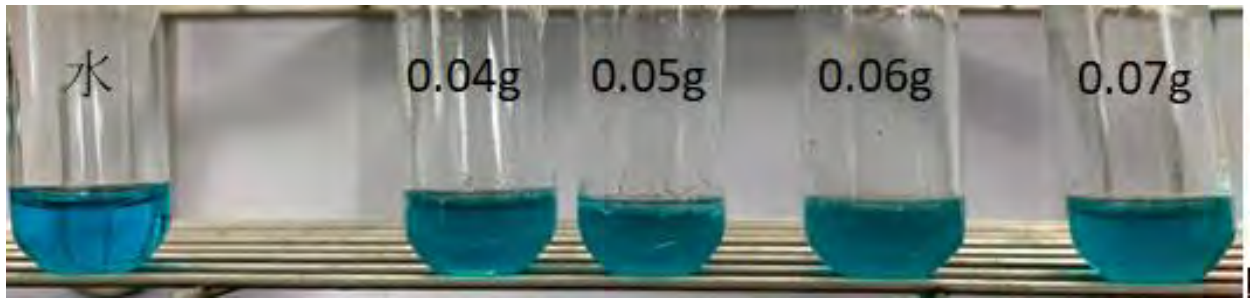


圖 15 種植 10 天葡萄糖測試

(三) 不同階段的種子發芽情況之差異

我們發現重量越重的種子發芽率越高，想知道重量與大小到達高峰的紅色種子是否發芽率最高，所以進一步進行發芽測試，發芽資料如表五、圖 16：

表五 不同階段的種子發芽資料

	發芽種子平均重量	發芽率	平均生長速率 cm/day
F3-F4 綠色種子(n=58)	0.10g	1.7%	0.07 cm/day
F5-F7 紅色種子(n=22)	0.11g	4.5%	0.23 cm/day
F8 黑色種子(n=40)	0.07g±0.01	70.0%	0.33±0.11

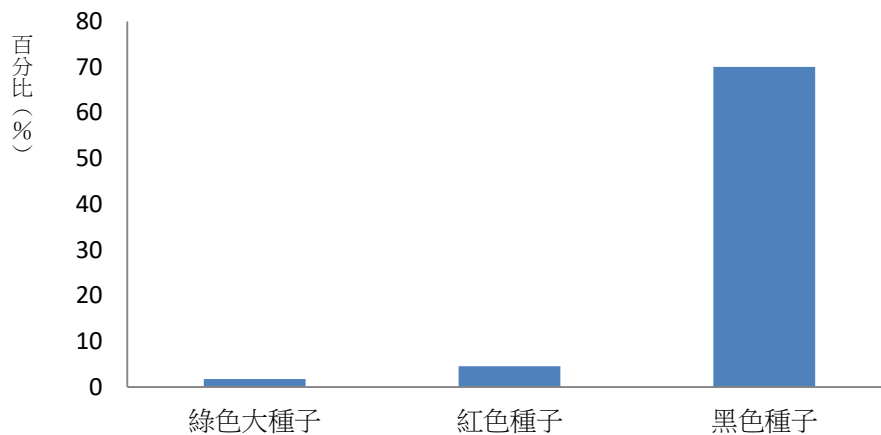
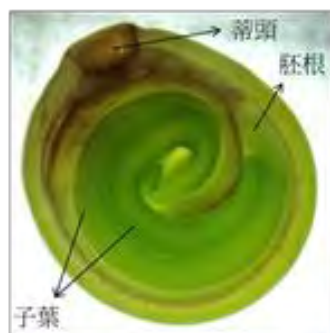


圖 16 不同階段的種子發芽率

由表五、圖 16 可看出黑色種子之發芽率高達 70%，且黑色種子發芽後的生長速率也明顯最高。因此可知綠色與紅色種子雖然皆大且重，但皆為不成熟的種子。

(四) 內部構造



種子內部構造名稱標示圖

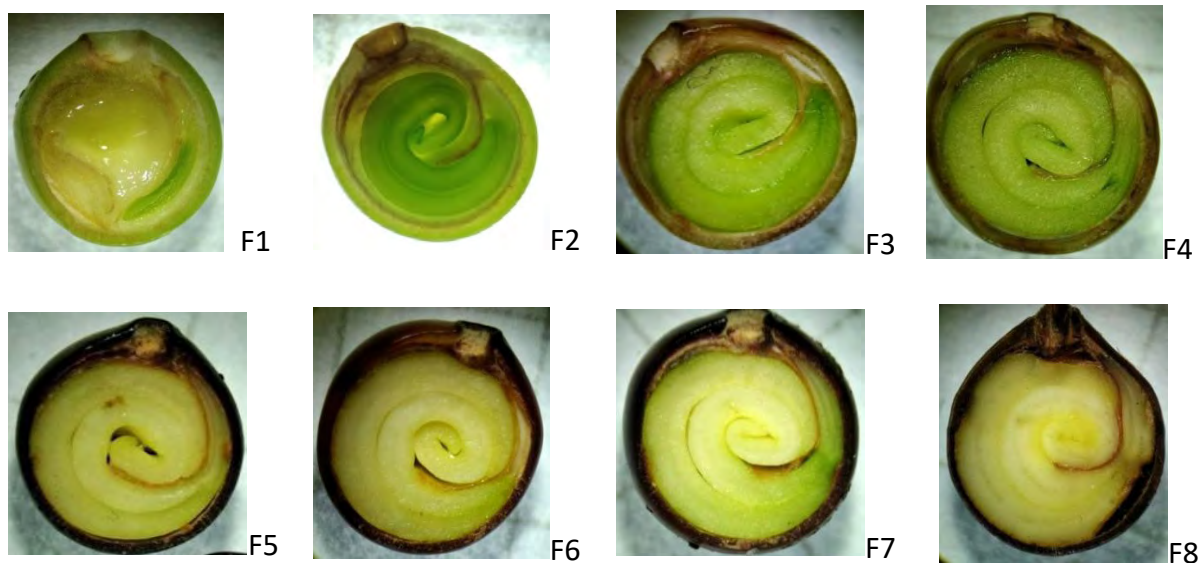


圖 17 種子成長過程內部構造

當剖開不同階段的種子，發現在種子初期，內部充滿液體與胚乳，子葉於種子下方處開始發育，之後子葉逐漸往種子上方生長，且胚根也於子葉基部的反方向逐漸往蒂頭方向延伸，如圖 17。

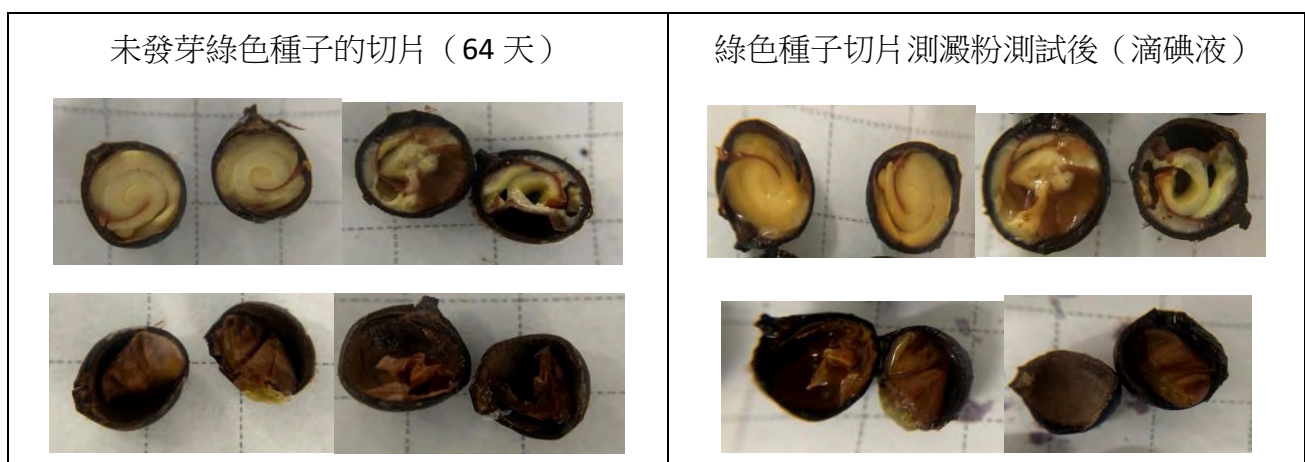
綠色小種子的 F2 時期，已大致具備有胚根與子葉的雛型，之後階段變化重點在子葉的大小及顏色及舒展性。初期子葉為綠色且富舒展性，撥開種皮後能輕易將蜷曲的子葉舒展開來，種皮內空隙大。到了 F5 種子外皮變紅後，子葉的顏色轉為黃綠色，舒展性較差但仍可把子葉稍稍分開，種皮內仍有空隙但變小。直到 F8 種子變黑變硬的階段，子葉填塞滿種子內部空間且為黃色粉質，若將兩枚子葉分開則容易斷掉（表六）。

表六 不同階段的種子資料分析

	F2 時期	F5 時期	F8 時期
種子顏色	綠	紅	黑
種子硬度	柔軟易變形	柔軟富彈性	堅硬
種子大小的變化趨勢	小----->大----->小		
種皮與子葉間空間	空隙多且大	空隙變少且小	無空隙
胚根與子葉顏色	綠	黃綠	黃
子葉質地	柔軟富含水分，容易舒展	柔軟但彈性較差，但不易舒展	較硬，粉質易斷

我們將種植後未發芽的種子，進行碘液測試及本氏液測試後，結果如圖 18 與新鮮種子相較之下，各組別未發芽的種子澱粉含量都不多，甚至沒有澱粉。而進行各組葡萄糖測試時，可以看見在各組均為 5% 的溶液的情況下，葡萄糖的含量並不相同。黑色種子與綠色及紅色組別沒有太大的差異，且三組的葡萄糖含量都小於新鮮種子。

另外，隨著實驗時間的增長，未發芽種子的不完整率越高，其中綠色種子的壞死速度又較黑色種子高，顯示越成熟的種子其存活時間越長，到第 91 天，無論是什麼顏色種子，內部構造皆（100%）腐爛不完整。



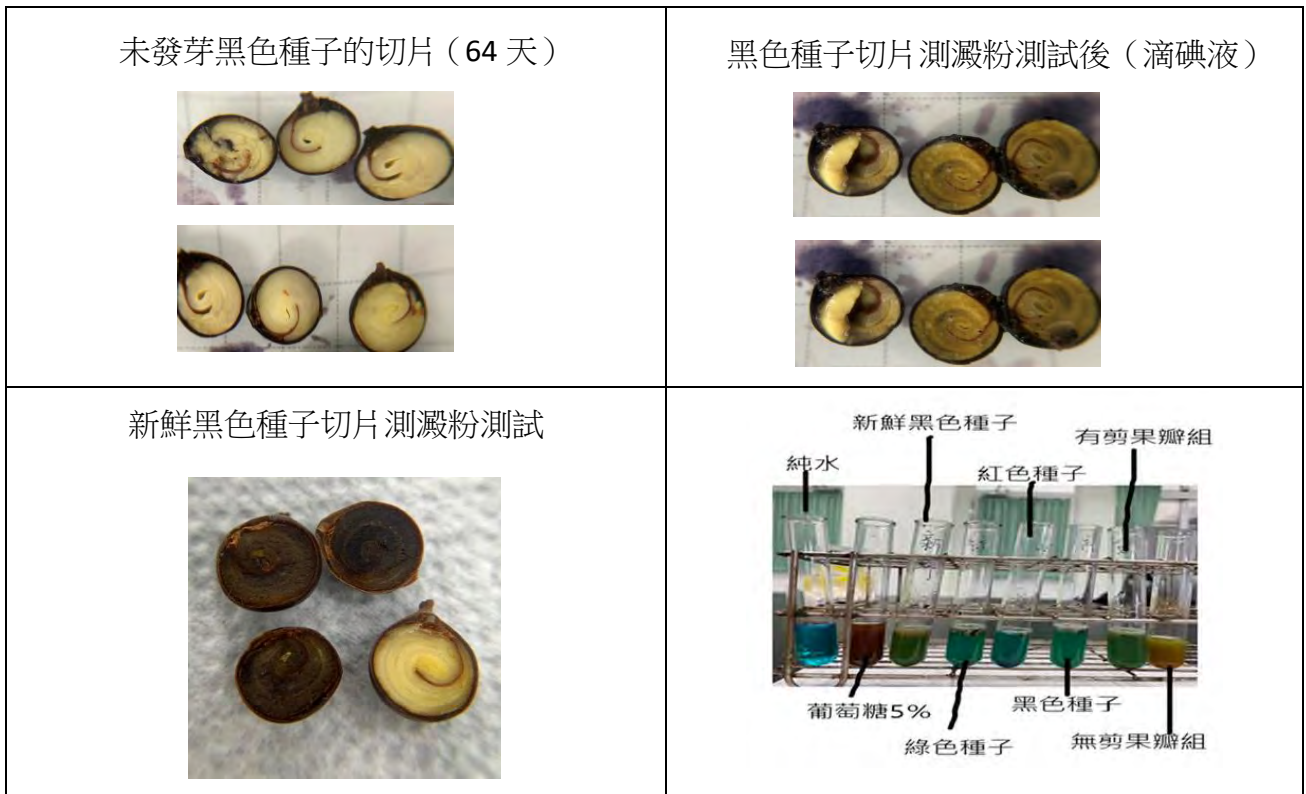


圖 18 各階段未發芽種子之醣類測試

三、果瓣對種子的影響

(一) 蒴果的切片標本觀察：

在剛開始結果時期，蒴果為紅色，經切片後發現蒴果外緣細胞布滿紅色色素，但中間組織內則為綠色。當蒴果變成綠色階段時，切片後在顯微鏡底下顯示蒴果外緣已無紅色存在，綠色依然填滿中間組織，最後等蒴果乾燥時，所有的細胞（壁）內都是透明的，沒有任何顏色，如圖 19。



圖 19 不同狀態的果瓣切片

(二) 蒴果完全遮光對種子發育的影響：

在蒴果剛長出不久，還是鮮紅色的時期時進行遮光，內部的小種子(<0.01g)幾乎完全沒有長大，維持原來大小就變成黑色，位置則一樣是附著在蒴果上，而蒴果也多數還留在枝頭上。因種子太小，所以沒有發芽的可能性，如圖 20。

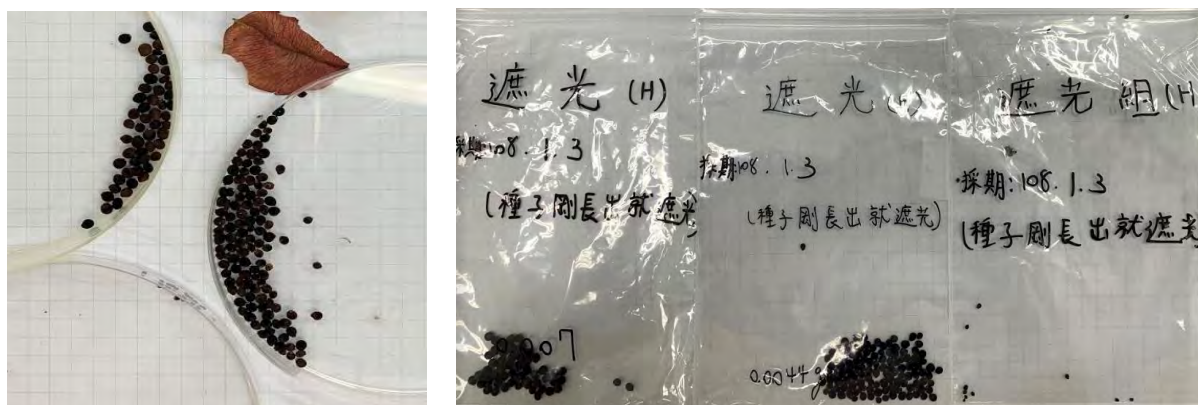


圖 20 蒴果遮光一個月後的種子

在蒴果已變為綠色階段—即內部有大顆的綠色種子時進行遮光，種子在遮光後的短時期內會變色，由綠色轉變成紅色再變成黑色，對照組的種子則變色速度較慢，都還維持綠色狀態。另外，觀察在遮光後兩個星期的種子，發現 30 顆當中有 26 顆種子有歪斜的現象，如圖 21，同株未遮光的 67 顆種子中，則只有 4 顆有此現象。收集遮光組掉落枝頭且為黑色的種子 (>0.04g) 進行發芽測試(n=7)，發現沒有種子發芽。

遮光種子在枝頭上變色的過程

遮光組種子歪斜



圖 21 蒴果遮光後,種子的狀態

(三) 剪去果瓣對種子的影響

和遮光實驗一樣，剪去果瓣後，種子變色的速度比較快，而且根據每隔 7 天統計

留在枝頭上的種子數量，發現剪去果瓣的種子掉落的較早也較多，結果如表七、圖 22，無剪果瓣的種子在較晚期的時候才有大量掉落的現象，且掉落率也小於剪果瓣的種子。

表七 不同組別種子的掉落率

	原先數量	最後數量	掉落率
剪果瓣	381 顆	114 顆	70.1%
無剪果瓣	419 顆	187 顆	55.3%

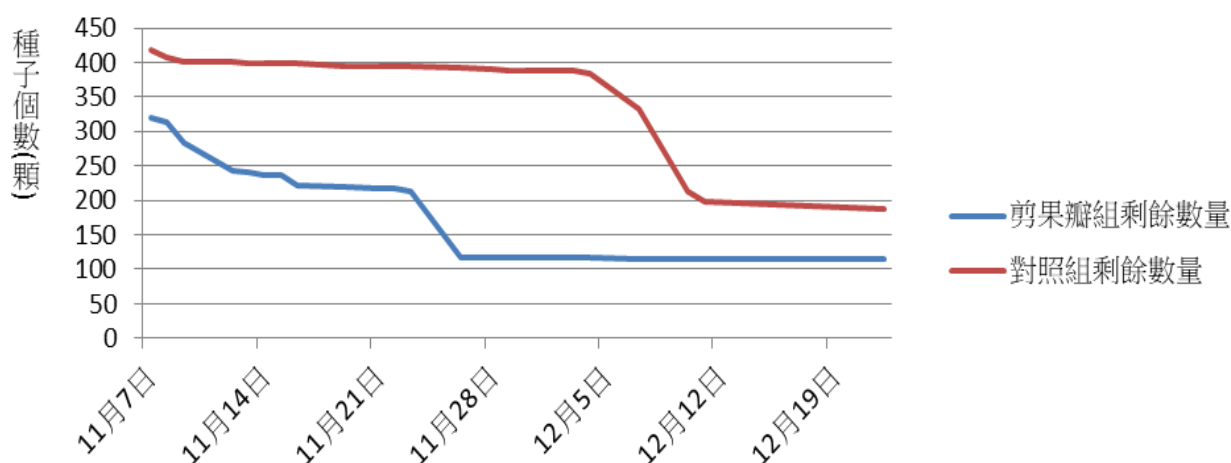


圖 22 不同組別種子的掉落狀況

比較兩組的發芽率，結果如表八，進一步分析各組不同重量的發芽情形，如表九：

表八 不同來源之種子發芽狀況

	發芽種子數	發芽率	平均生長速率
有剪果瓣：採樹枝上(n=80)	22	27.5%	0.26 cm/day
無剪果瓣：採樹枝上(n=80)	53	63.8%	0.30 cm/day
有剪果瓣：期間掉落(n=33)	1	3%	無法測量

表九 各組種子重量與發芽狀況的比較

有剪果瓣重量	發芽種子數	發芽率	平均生長速率
0.04g(n=20)	4	5%	0.25 cm/day
0.05g(n=20)	6	7.5%	0.24 cm/day
0.06g(n=20)	4	5%	0.26 cm/day
0.07g(n=20)	8	10%	0.29 cm/day

無剪果瓣重量	發芽種子數	發芽率	平均生長速率
0.04g(n=20)	7	8.8%	0.29 cm/day
0.05g(n=20)	14	17.5%	0.29 cm/day
0.06g(n=20)	18	22.5%	0.32 cm/day
0.07g(n=20)	12	15%	0.29 cm/day

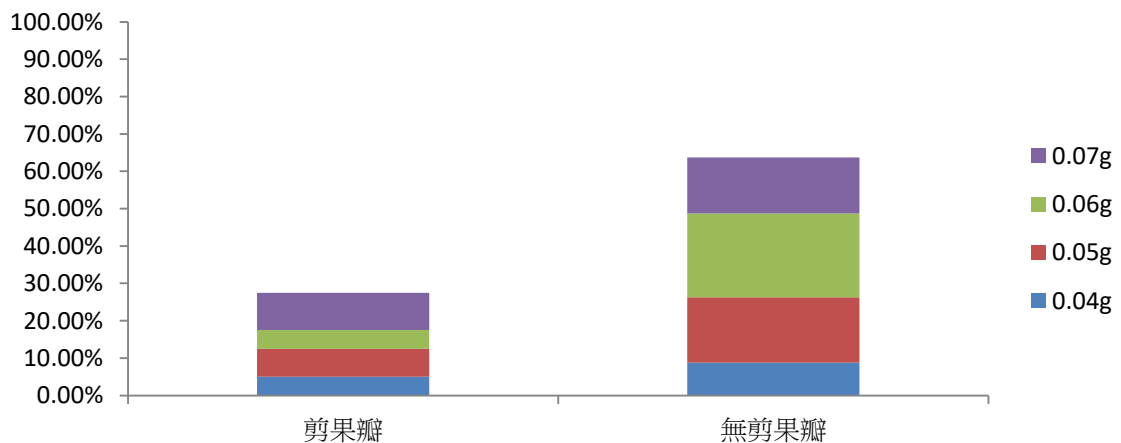
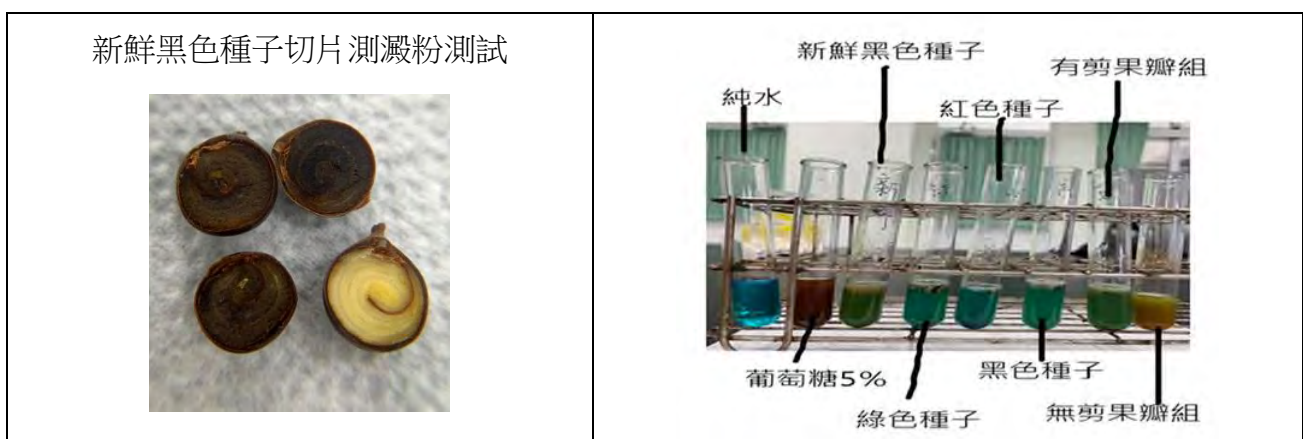


圖 23 各組別重量與發芽率的關係

以上可看出：兩組之間有顯著的差異 ($p < 0.05$) 各組內不同重量的種子發芽率雖然沒有穩定趨勢，但比較最輕與最重的組別，仍可看出越重越有利於發芽。而重量不是影響發芽率的唯一關鍵，如圖 23 剪果瓣組中最重的種子，其發芽率仍低於無剪果瓣的三個組別。

將這兩組未發芽的種子進行碘液測試及本氏液測試後，結果如圖 24 與新鮮種子相較之下，兩組未發芽種子的澱粉含量都不多，甚至沒有澱粉。而進行各組葡萄糖測試時，無剪果瓣組 > 新鮮種子 > 剪果瓣組。



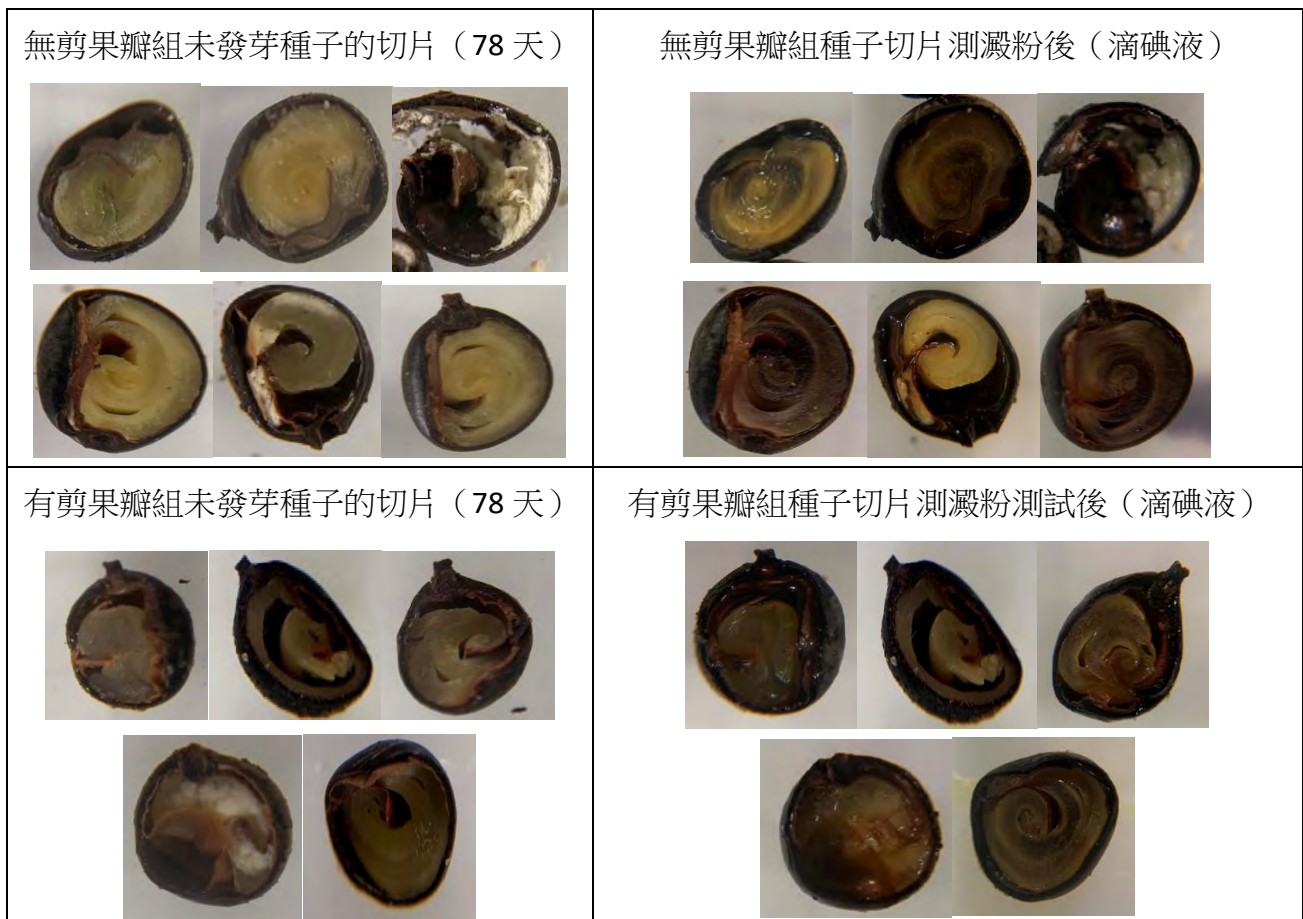


圖 24 各組別未發芽種子之醣類測試

三、果瓣對種子傳播的影響

（一）果瓣飄落模式：

根據實驗時的攝影影片，我們發現果瓣在無風傳播時，大致有以下 4 種移動模式，如圖 25：

1. 平滑式：指果瓣在傳播時，像滑翔翼平穩滑行飄落
2. 螺旋式：指果瓣在傳播時，果瓣不翻滾，而是螺旋狀盤旋飄落
3. 搖擺式：指果瓣在傳播時，像平滑式但是果瓣左右大幅來回移動飄落
4. 翻轉式：指果瓣在傳播時，不停上下或左右翻滾飄落

平滑式



搖擺式



翻轉式

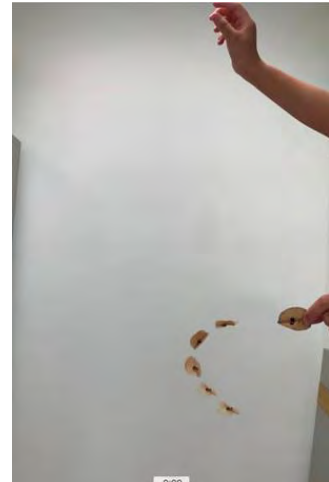


圖 25 無風時蒴果的飄落模式

這四種模式中，平滑式的水平位移最大，其他三式則會隨著飄落的過程中，水平移動距離不斷地來回游移，而使最後位移較短。但四種模式都比種子直接垂直墜落的位移來的長。

(二) 有風時，不同因子對果瓣飄落模式與水平位移的影響：

在有風的情況下，我們選了三個因子：果瓣大小（面積）、總重量、種子數（重心位置）作為操縱變因，探討這些因子對果瓣飄落模式與水平位移的影響，以及飄落的模式與水平位移是否有相關性。

*飄落模式：

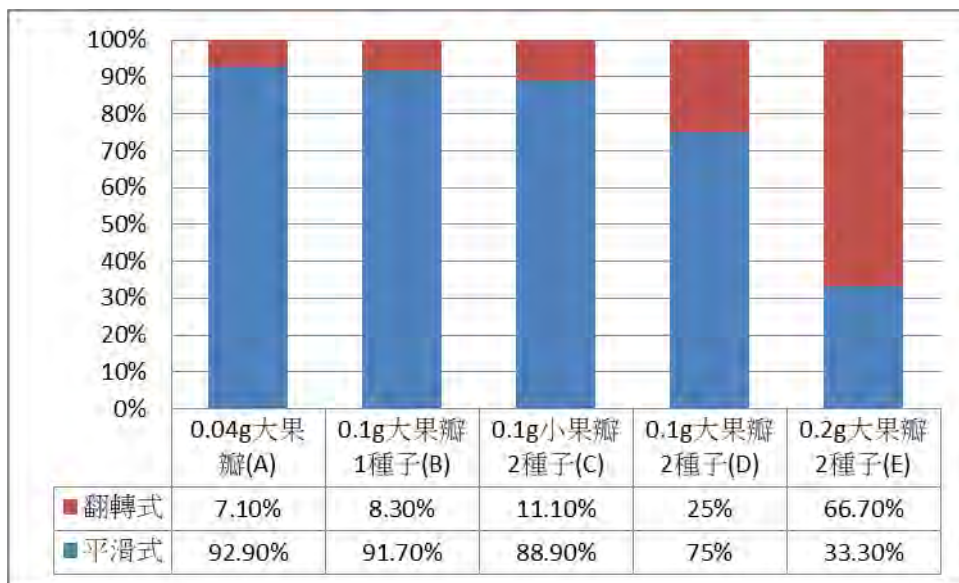


圖 26 飄落模式比例圖

1.大小果瓣的差異:

由圖 26 中(C). (D)：大小果瓣主要皆為平滑式，但大果瓣翻轉式的機率較高。

2.重量分布的差異:

由(B). (D)：單顆種子（重量偏一旁）比 2 顆種子（重量集中）更不易形成翻轉式。

3.重量不同的差異:

圖中(A). (D).(E)可知當重量越重時越容易翻轉。

*水平位移：

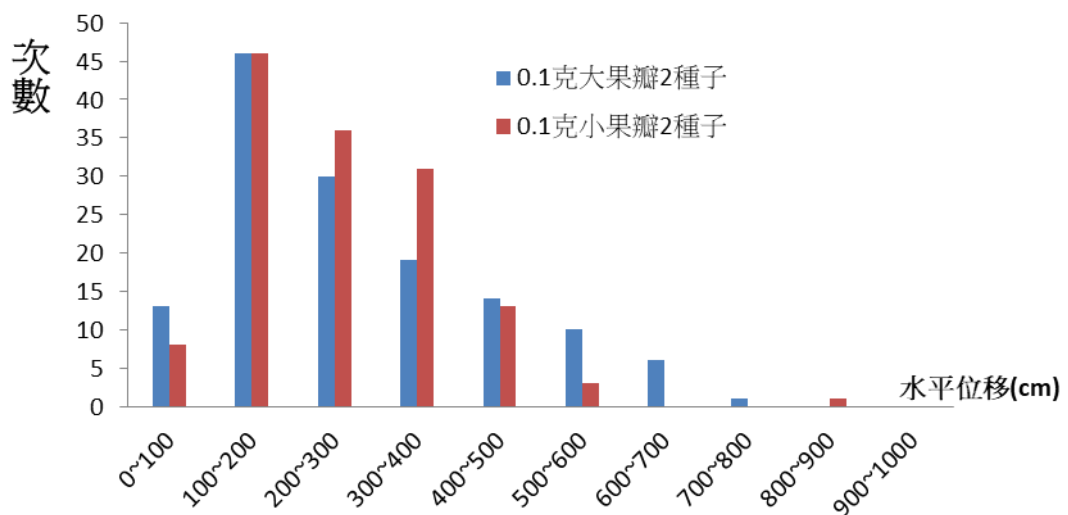


圖 27 大小果瓣移動距離的次數分布圖

首先探討果瓣大小對種子水平位移的影響，大果瓣的平均面積為 17.58cm^2 ，小果瓣平均面積為 11.89cm^2 ，不論果瓣大小，只要有果瓣就能比裸露種子傳播的遠。圖 27 可看出大果瓣落在遠距離的次數比小果瓣多，也就是說果瓣越大，種子越有機會散佈到遠方。

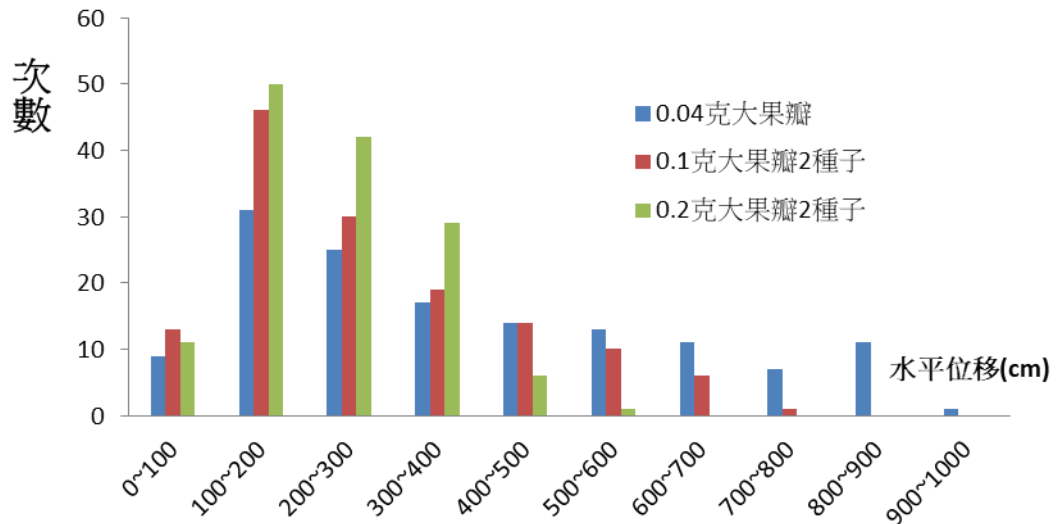


圖 28 不同總重下,果瓣移動距離的次數分布圖

而在果瓣面積相同的情況下，總重量越輕飄落距離就越遠（圖 28）。0.04g 的果瓣超過 700cm 的次數明顯較多，而 0.2g 克的果瓣飛行距離幾乎都在 500cm 內。

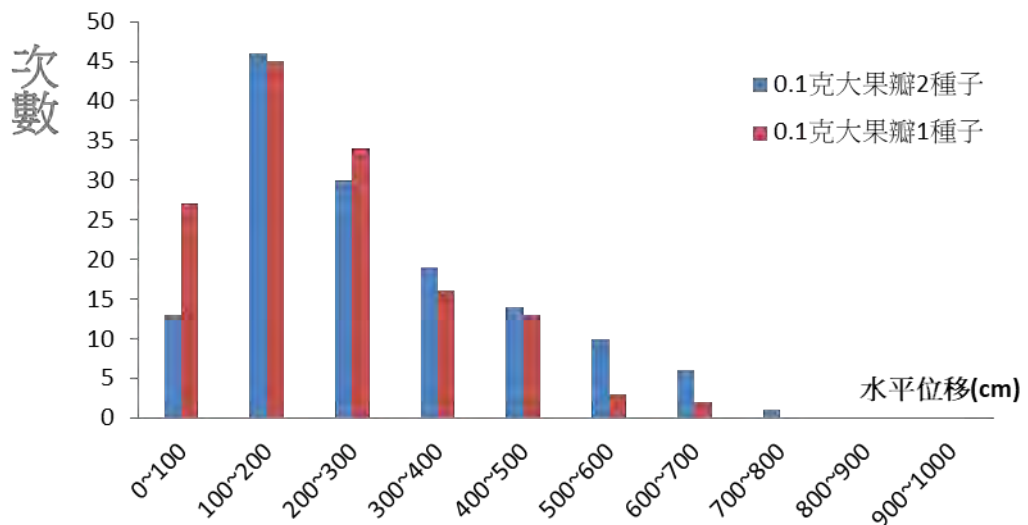


圖 29 不同種子數的果瓣移動距離的次數分布圖

最後我們認為果瓣內種子數不同，關係到整體重心的分布而影響飄落時的平衡：果瓣的中肋兩側皆有種子，重心會比較偏果瓣中間；若果瓣內只有 1 顆種子，重心就比較偏向果瓣一側。在果瓣大小與重量相同的前提下，兩顆種子的果瓣比較容易散佈到遠方(圖 29)。

*飄落模式與水平位移的關係：

檢視上述實驗中，檢視飄落模式和水平位移的趨勢是否有一致性，發現在**無風時果瓣呈平滑式散佈時能飛的較遠**。但在**有風時**，總重量越輕、重心歪偏旁等較常以平滑式滑落的組別，他們的水平位移不一定較遠。因此不同果瓣在有風時，飄落模式與水平位移的大小並無明顯的相關性。

陸、討論與結論

一、種子成熟與發芽的過程

種子成熟的過程中，從外部的形質測量可以發現：大小和重量會先到達高峰，之後會逐漸變小且變硬，再比對各階段內部的構造，我們可以推知種子的生長歷程：一開始種子維持柔軟易變形的狀態以便成長，逐漸長出胚根及子葉後變得較有固定的形狀，隨著子葉逐漸的變長，外部生長速度比內部快，內部和種皮間有較大空隙，且多填充著液體，緊接著種子外部「長度」增加的速率比「寬度」和「厚度」快，重量持續增加，內部質地也開始轉變。之後種子體積就會逐漸變小，重量也會變輕，種皮與內部之間的空隙逐漸變小，濕潤程度變少，所以子葉的彈性變得很差。參照許的文獻整理，我們知道種子在發芽時會先吸水，活化原本就儲存於種子中的澱粉酶，並由胚合成更多的澱粉酶與激素，產生一系列的生化反應，啟動後續發芽機制，使細胞變大與分裂讓胚根突破種皮。在這過程中，有一部分被分解出的葡萄糖可能會因種子通透性高而跑出種子外，但隨著種子被活化，細胞膜修復的更完整後，葡萄糖就不再流出種子外。而這能解釋為何泡水兩天後，種子重量高達原本 2 倍且有葡萄糖跑到種子外，如果種子本身有活性，這樣的情況不會持續太久，因此在種植 10 天後，種子內葡萄糖的量較少或許可被視為被呼吸作用消耗掉。在我們實驗中發現黑色階段的種子儲存大量的澱粉，這些養分在泡水後會從胚根開始分解，沿著子葉基部一路推移到子葉尖端。檢視種子在泡水後 10 天的澱粉含量，發現越輕的種子剩餘的澱粉量越少，再對照種子重量與發芽率的相關性，可以推知若在種子發芽初期，種子內的澱粉量太少，有可能影響後續而導致發芽失敗。對照各組最後沒有

發芽種子的醣類測試結果：不論是綠色、紅色或黑色種子，其碘液與本氏液變色的程度不多，顯示澱粉含量和葡萄糖含量都比新鮮黑色種子低，更進一步支持了上述的推論。

結合以上結果，我們認為種子在最後階段質地的轉變——降低濕潤程度而變成粉質狀的過程是在填充澱粉，填充的養分越多種子就越重。有些種類的植物是後熟型種子，儲存的養分能提供給尚未發育好的種子構造，使之能持續發育直到成熟，以利後續的發芽。但欒樹並非此類植物，因此我們認為儲存的養分是用來提供發芽所需的能量，量若不足以支持到胚根長大且延長，則發芽就會失敗。

至於黑色種子的重量與發芽後幼苗的生長速度，從資料上來看沒有明顯差異，也就是說種子一旦發芽，提供生長的養分來源似乎不再是種子本身，而是新長出的葉子，以至於種子重量和生長度的相關性不大，所以我們推測重量對種子的影響可能只在發芽之前。

二、蒴果顏色與作用

剛開始發育的蒴果外觀為紅色，根據蒴果的切片觀察，蒴果外緣的表皮組織充滿了紅色色素，查閱資料後發現這極可能是花青素，花青素普遍存在於植物的外緣的組織，尤其幼嫩的葉。有關花青素的功能，不同學者提出不同假說，包含：抗真菌作用、光保護效果、抗氧化作用，以及抗食植動物，這些假說在不同植物上有些得到驗證，但有些則無（鹿與蔡,2008）。從欒樹的生活史來看，它生長在開闊的向陽地上且初結蒴果時的秋季並非雨季，陽光有時猛烈，因此感染真菌的機率並不高。另外根據「欒紅椿動—台灣欒樹和紅姬緣椿象互利共生探究」的科展報告中指出：台灣欒樹成熟種子的量與紅姬緣椿象的族群大小有關，換句話說當欒樹種子未成熟時，椿象的數量不多，或許這並非椿象無法取食未成熟的種子，而有可能是抗食植動物假說內提及的「隱藏說」—大部分無脊椎動物接收紅色色光的能力較弱；或是「警戒說」—認為紅色也有可能是警戒色，警告食植昆蟲這株植物在防禦上已下了功夫，別來招惹比較好。不過若是避免要椿象在種子未成熟前就取食吸汁，那蒴果應該在種子成熟前都維持紅色，而非快速地被綠色取代。所以我們不認為紅色蒴果

是避免動物取食。從蒴果果瓣被剪去後，種子會快速變成紅色，因此我們懷疑花青素可能可以產生光保護作用，讓蒴果與種子在剛發育時，避免受到強光破壞。

在做果瓣的切片觀察時，發現果瓣中間組織內為綠色，顯示其含有葉綠素。實驗中，不論是遮光蒴果或減少果瓣面積，其種子與未做任何處理而自然成熟的種子的型態、重量、發芽率都有明顯差異。例如遮光蒴果的小種子不再繼續生長，較大種子會發生歪斜現象，且後續的發芽率極低(3.03%)。再進一步檢視未發芽的種子，發現內部都有不完整的現象，胚根先不見，而子葉也開始爛掉。大多未發芽種子在澱粉測試的結果是沒變色或稍微變色，顯示澱粉含量低，而且剪果瓣的葡萄糖含量比較低，表示剪果瓣的種子儲存較少的養分。

因此我們推測蒴果在正常光照情況下能進行光合作用，合成轉化為某些物質(或許是單純的養分，也可能轉化為激素)協助種子發育及儲存養分，當果瓣被破壞或遮光時，光合作用效率差，就無法供給種子足夠的養分來儲存；也有可能是養分多由葉運輸至種子，而果瓣上有連接葉與種子的維管束。若剪掉果瓣或將果瓣遮光使果瓣死亡，都會中斷運輸管道，使養分無法從葉運輸到種子，而影響種子的發育及儲存養分的多寡。

另外，在測量種子掉落率時，剪去果瓣的種子變色速度及掉落的數量比對照組快，且多集中在剪果瓣後的初期掉落，我們懷疑可能的原因是種子裸露時，受到環境中例如強光、風等物理因子影響。在種子發育初期，種皮可能因為蒸散速度過快而變硬，影響子葉與胚根後續的生長空間，讓它無法成熟；也有可能是種子在胚發育的初期，細胞分裂速度快的情況下接受大量紫外線照射，產生突變的機率高，因此在剪果瓣後不久，種子因無法繼續發育而掉落，即便是最後留在枝頭上的種子也不容易發芽，其發芽率明顯與對照組有明顯差異。換句話說，果瓣可能提供物理性的保護，阻絕環境中對種子會產生傷害的因子。

三、果瓣對種子傳播的影響

若要擴張族群，種子必須要依靠各種方式傳播到較遠的地方，欒樹主要的傳播方式是利用風把種子帶離母樹，所以果瓣大小與總重量理論上會影響種子散播的距離。我們觀察到無風狀態下，欒樹的飄落模式中以平滑式的水平位移最為明顯，螺旋式與翻轉式的位移主要是垂直方向，因此我們認為在種子傳播的過程中，果瓣應會以平滑式為主要降落模式，且飛的越遠的果瓣，平滑式的比例應越高。但實驗的結果並不支持這樣的想法，我們發現有風時**重量輕、面積小、重心偏移**的果瓣最易形成平滑式，推測原因如下：由於果瓣形狀並非平面而是凹向蒴果內側呈現碟型，受風時因風與果瓣夾角的因素，會導致兩側產生的力矩不同而翻轉：總重量輕的果瓣不易形成支點使果瓣翻轉；果瓣面積越小，力矩差距就越小也不容易翻轉；只有一顆種子在果瓣中肋時，其擺盪過程中質量重心比較低，也不易快速翻轉。但對比水平位移的結果，上述三種使果瓣容易以平滑式飄落的組別卻不一定飄的最遠，例如果瓣面積小易形成平滑式，但卻較不易飄落到遠處，因此應該有其他因素更直接影響傳播的距離。

我們在實驗中發現不同因子的飄落時間並不一致，於是我們分析各組的滯空時間（圖 31），對比水平位移的遠近（圖 30），發現兩者趨勢是吻合的，也就是說果瓣滯空時間和傳播距離呈正相關：同樣條件下，大果瓣的滯空時間比小果瓣長，傳播的也比較遠，總重量越輕的滯空時間越長，傳播距離也能比較遠。從這邊看出來，果瓣最主要是幫助種子停留在空中較長時間，至於在果瓣傳播中是否能維持平衡，並非決定傳播距離的主要因素。

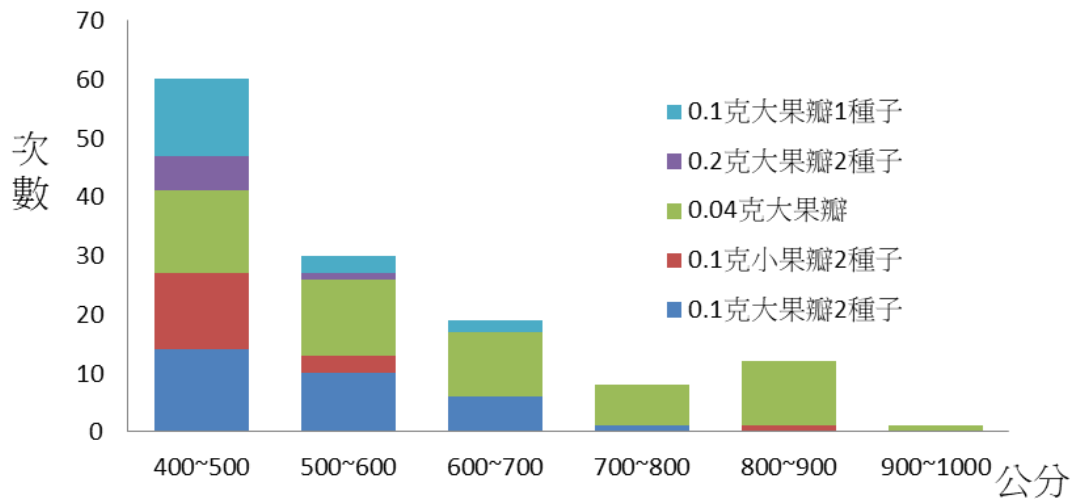


圖 30 不同因數下,果瓣移動距離的次數分布圖

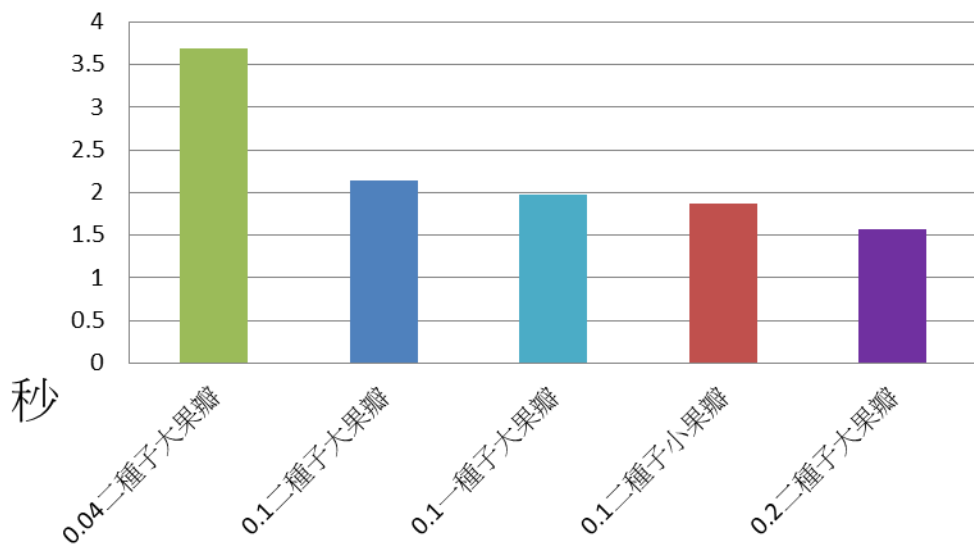


圖 31 不同果瓣的滯空時間比較圖

一般而言重量和受風面積會影響飛行距離，實驗結果也支持這樣的推論，越輕則越有機會飛的越遠；果瓣面積大，也較有機會落在遠處。綜合以上會發現這三個影響飛行距離的因子會有交互作用而影響種子發芽率。例如說果瓣加上種子的總重越輕能飛越遠，但會犧牲種子的發芽率。一果瓣有 2 種子較有機會飛遠，但在不增加總重的情況下，意味著這個果瓣中的單顆種子會比較輕，也因而犧牲發芽率。或者是大果瓣能飛得比小果瓣遠，但果瓣越大相對重量也越重，又因此減少飛的遠的機率。

生物的基因有一部分會受環境影響，而使表現型具有一定的彈性，例如身高會受基因及環境共同影響。我們推測既然欒樹種子靠飛行傳播，其果瓣面積、種子數及總重量應會有不同的組合，來因應不同的環境條件與物候變化。例如說在水份、日照充足的環境下，欒樹可能會產生大量的種子，這些種子可能質量較輕而能散佈到遠方，雖然種子輕發芽率較小，但因為數量大因此還是能有一定的發芽個數；相反地，在環境不利生長、結果的年份，欒樹可能產生少量但較重的種子，雖然數量少但因發芽率高，所以仍能有一定的發芽率。而這些推論是否正確，以及欒樹適應環境的策略與模式，則須待更進一步的觀察與實驗來驗證。

最後在野外的觀察，我們常發現欒樹下方就有許多發芽的欒樹幼苗，但很少看到這些幼苗成長茁壯，我們推論可能的原因是人為擾動大。由於觀察之地都是人為活動大的地方，這些幼苗有可能被踩踏或除草而無法繼續生長。若是如此，在減少人為干擾後，欒樹幼苗若能繼續發育為大樹，則意味著果瓣幫助種子傳播到比較遠的地方，可能只是為了要把基因散播到更遠的地方，擴展自己的族群，而非是因為在母樹下不利於幼苗的生長。倘若如此，以上傳播距離的測試以及野外觀察經驗中，大多數的果瓣都落於近距離的地方就有較合理的解釋。

* 結論：

- 1.種子發育過程，長度、寬度、厚度的生長速度不等速。種子在綠色階段以具備形狀完整的胚根子葉，而後會填充養分。種子需到黑色階段才能真正成熟。
- 2.發芽時初期葡萄糖會滲漏到種子外，澱粉會持續被水解。大多沒發芽的種子，其種子內幾乎沒有澱粉存在，因此判斷種子儲存的養分含量不足則會影響發芽。
- 3.果瓣會明顯影響種子的發育，果瓣被遮光或破壞後，種子的發芽率皆會降低，也會使種子提前掉落，縮短它們的發育時間。
- 4.在傳播方面，果瓣用於延長種子墜落的時間，以增加它們的傳播距離。有風時，果瓣大小、種子數量及總重量會影響傳播的距離，大果瓣、重量越輕及內有2顆種子都能使種子有機會飛的遠。而果瓣的飛行模式則與傳播距離無直接相關。

柒、參考資料

- 1.蘇銘言 蘇桂榕 溫宜文 劉怡佳，2004，風中奇緣—桃花心木種子的傳播，科學教育月刊第 272 期，取自：[www.sec.ntnu.edu.tw/monthly/93\(266-275\)/272/02.pdf](http://www.sec.ntnu.edu.tw/monthly/93(266-275)/272/02.pdf)。
- 2.楊正釧 陳裕星 林讚標，2000，大頭茶、黃連木與台灣欒樹種子之儲藏性質，台灣林業科學
取自：
[file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/ㄖjÄY~ùìB¶lÄ³sṁì»P¥xÆW÷á¼ð°Øṁlṁ§ÄxÄÄ©Ê½è%20\(8\).pdf](file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/ㄖjÄY~ùìB¶lÄ³sṁì»P¥xÆW÷á¼ð°Øṁlṁ§ÄxÄÄ©Ê½è%20(8).pdf)
- 3.史家瑩主編，2011，國民中學自然與生活科技課本第一冊，翰林出版。
- 4.陳宥任 鄭佳宜，2010，喙生會食—探討無患子椿象喙的差異對食物選擇的影響，中華民國第 50 屆中小學科學展覽會，取自：<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/50/pdf/030304.pdf>
- 5.陳謙易 鍾慈芬 羅士哲，2016，以「欒」擊「螺」~探討台灣欒樹萃取液對福壽螺及其他生物的影響，中華民國第 56 屆中小學科學展覽，取自：
[file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/13005_nphssf2016-030308%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USER/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/13005_nphssf2016-030308%20(1).pdf)
- 6.陳宥誠 陳雅香 侯盈如，2009，育鈴還需刺鈴蟲 -探討小紅姬緣椿象與倒地鈴的關係，中華民國第 49 屆中小學科學展覽會，取自：<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/pdf/030305.pdf>
- 7.彭鏡毅，2015，植物學中英百科全書，貓頭鷹出版。
- 8.kplant.biodiv.tw/台灣欒樹/台灣欒樹.htm
- 9.<https://zh.wikipedia.org/wiki/台灣欒樹>
- 10.<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%A1%E9%97%A8%E6%B6%A1%E8%A1%97>
- 11.許博行，林木種子的發芽 <http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/bhsheu/lesson/34.pdf>
- 12.鹿兒陽 蔡仲涵，2008，嫩葉的紅，台灣林業，取至：
<https://drive.google.com/drive/folders/1IorJoQHKY0uSfSBUvf9ssZ0iTz1ygagl>
13. william G. Hopkins、Norman P.A. Huner，2013，植物生理學
14. 郭華仁，2015，種子學，國立臺灣大學出版中心

【評語】 030316

1. 此研究作品主旨是探討台灣欒樹種子成長、萌芽與擴散傳播模式的關係。研究結果顯示成熟的台灣欒樹種子內部累積大量澱粉，而種子重量越重發芽率越高，果瓣在種子發育過程中扮演重要角色；在傳播方面，果瓣用於延長種子墜落的時間，以增加種子的傳播距離。此研究針對台灣欒樹果實與種子特性進行研究，以了解果瓣與種子成熟和傳播的關係。
2. 此研究對象台灣欒樹在過往相關科展研究已出現多次，現今此部分以果實和種子發育過程探討其影響，包含形態與生化數據的獲得，此部分具有研究性。
3. 作品主題明確具新意，科學研究的方法適切，並有系統地收集觀察數據並加以分析討論。此研究以簡單的材料與方法，探討有趣的問題，每個子研究間也是環環相扣，實驗的重複數充足，結果具有說服力，以中學生的知識背景、可用的器材，有如此高完整度的研究成果，實為佳作，應予以肯定。

摘要

台灣欒樹種子生長過程種皮顏色由綠轉紅變黑，一開始種皮長大讓內部胚根與子葉等結構長出後，內部開始累積大量澱粉，而種子重量越重發芽率越高。種子要進行發芽時，養分從胚根開始分解，沿子葉基部至子葉尖端。

有果瓣的種子在枝頭上變色速度慢，發芽率(63.7%)高於無果瓣的種子(27.5%)種子掉落率(55.3%)小於無果瓣的種子(70.1%)，可知果瓣是種子發育不可或缺的構造。

有風的情況下，果瓣飄落模式與水平位移的關係並無一致趨勢，但滯空時間越長，越容易傳播到遠方。而質量輕、大果瓣、兩顆種子等因子較常傳播到遠處，越重的種子飛越近，但發芽率最高，使得果瓣總重量與大小必須兼顧傳播距離及發芽率。

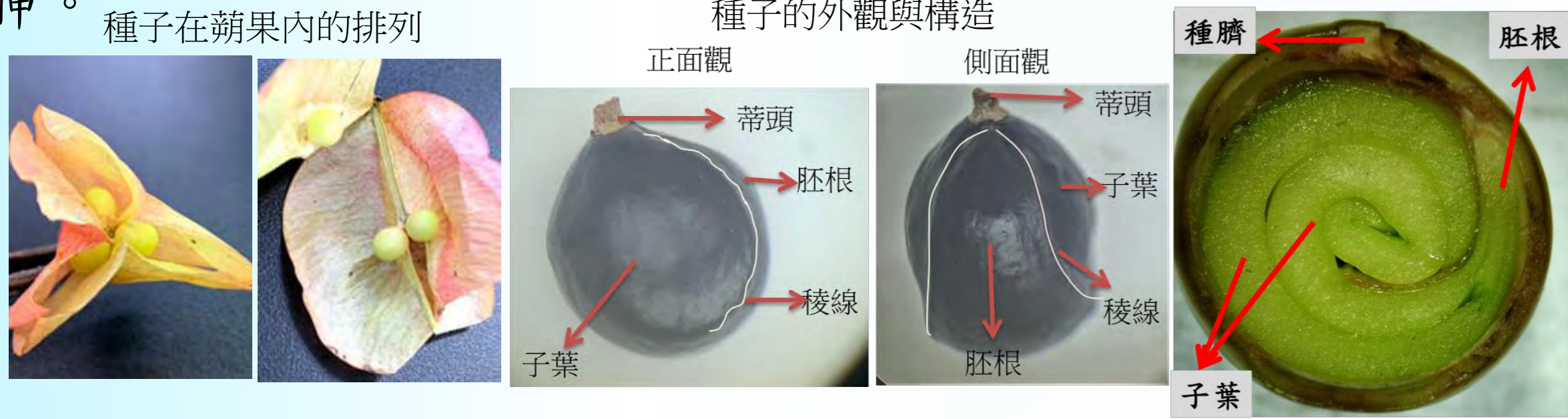
壹、研究動機

在閱讀關於台灣欒樹的歷屆科展時，我們發現其他科展的研究方向可分為病蟲害防治和台灣欒樹與生物之間的關係，而很少注意到台灣欒樹果實(蒴果)的果瓣與種子發育及傳播的功用，所以我們決定要以台灣欒樹的「種子與果瓣」作為研究主軸，想知道台灣欒樹的種子成長歷程及果瓣能在種子的成長過程中扮演舉足輕重的角色嗎？除此之外，果瓣是如何幫助種子傳播出去的呢？還有更多功用嗎？

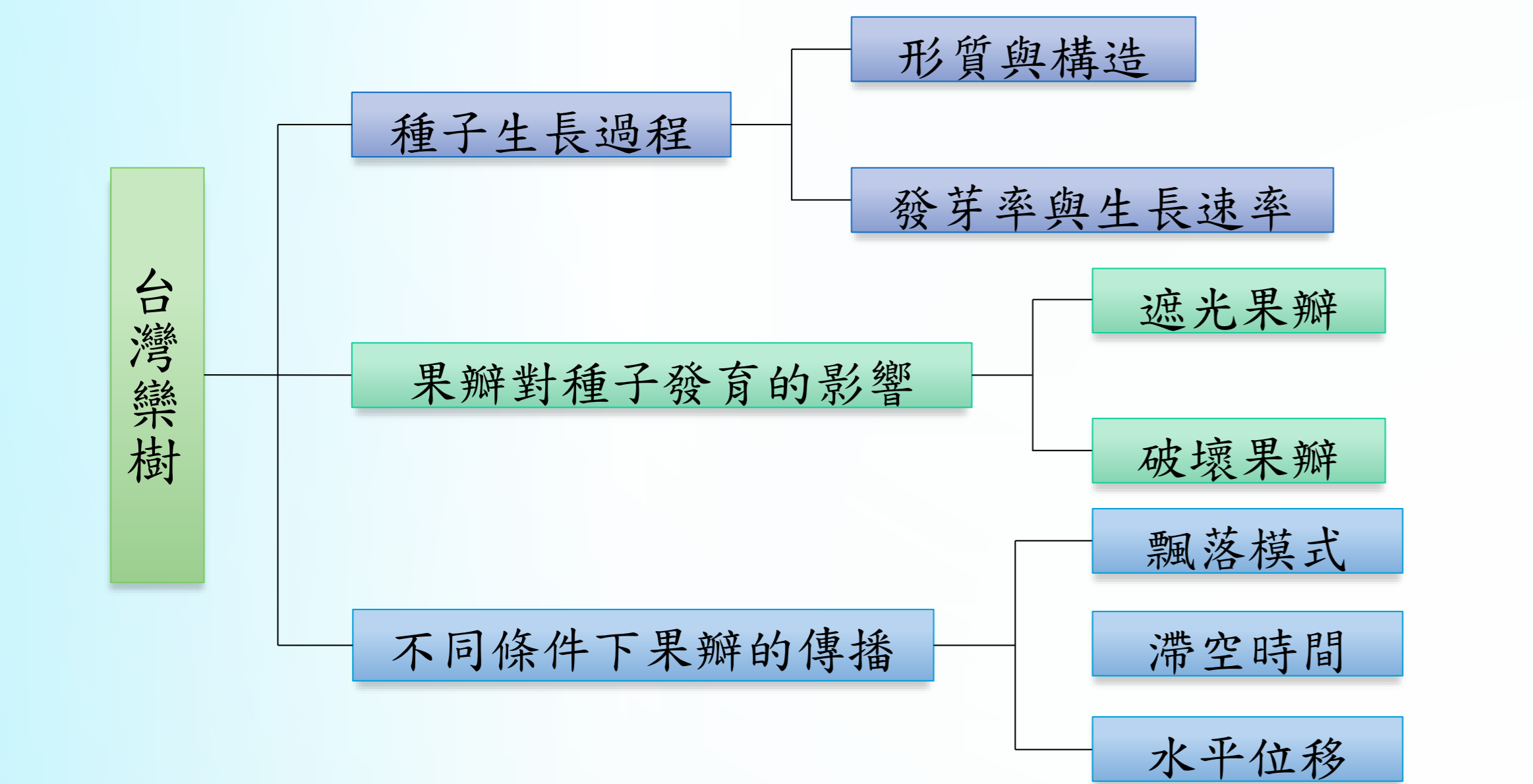
欒樹簡介

台灣欒樹(學名：*Koelreuteria elegans*)為雙子葉植物，是一種無患子科的落葉喬木，是臺灣特有種植物，最高可達17公尺。

台灣欒樹果實(蒴果)成氣囊狀，有三瓣果瓣，每個果瓣中有一中肋突起，中肋兩端能各連結一顆種子，蒴果果瓣顏色變化為玫瑰紅色→紅褐色→最後呈褐色，到了最後階段蒴果會乾燥，中肋連結處會互相分離，蒴果因此裂成三片獨立果瓣，帶著種子傳播出去。飄散出去的種子為黑褐色圓形有光澤，每片果瓣上的種子數與大小不一。種子的其中一側有明顯稜線，往蒂頭方向延伸。



貳、研究目的



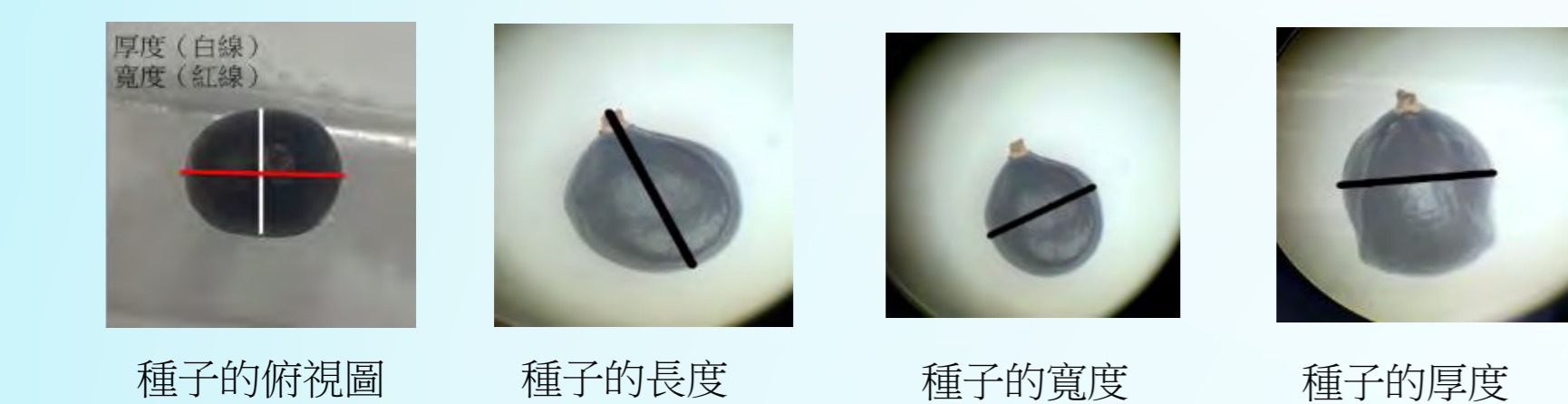
參、研究設備與器材

- 一、研究設備：數位電子天秤、游標尺、顯微鏡、穴盆
- 二、器材與材料：台灣欒樹蒴果、玻片、研磨鉢與研磨棒、酒精燈與三腳架、碘液與本氏液、解剖針與鑷子、手機、燒杯、培養皿、風扇。
- 三、應用軟體：Tracker、ImageJ、小畫家、Excel。

肆、研究方法

一、蒴果與種子構造的探究

1. 測量不同階段種子的重量、長度、寬度、厚度，利用縱剖及剝除種皮等方式，觀察種子內部的結構。



2. 記錄不同種子的重量及發芽與否與發芽天數，並量測幼苗高度，計算平均生長速率(cm/day)。
3. 解剖未發芽的種子，觀察內部是否完整，且作醣類測試。

二、果瓣對種子發育的影響

1. 用複式顯微鏡觀察不同顏色的果瓣切片。
2. 阻擋蒴果接觸光線，再定期紀錄其顏色變化，若其種子重 $>0.04g$ ，則進行發芽測試(圖1)。
3. 選定同一棵樹的兩枝條，一枝條剪去果瓣，另一枝條則當成對照組。用網子圍繞，收集掉落種子(圖2)，並每天記錄剩餘的種子，最後計算留在枝頭上的種子數，並進行發芽測試。
4. 解剖未發芽的種子，觀察內部是否完整，且做醣類測試。



三、果瓣大小、總重量與種子數對傳播的影響

1. 準備較大果瓣(9-15cm²)與較小果瓣(平均面積15-21cm²)
2. 利用黏土模擬種子，將其黏在原本生長在果瓣的位置上，模擬野外果瓣與種子的狀態。利用此裝置，來控制各樣本條件一致。
3. 分別改變其果瓣大小(大果瓣VS. 小果瓣)、總重量(0.04g、0.1g、0.2g)、與果瓣內的種子數(1顆VS. 2顆)(圖3)。在密閉空間中，利用電扇製造固定的風(4.7m/s)，將每一操縱變因的實驗組與對照組(沒黏在果瓣的黏土)從160cm的高度釋放，記錄每個樣本距離釋放基準點的長度。針對每個變因，實驗重複操作20次，對照組與實驗組各7個樣本。
4. 利用同樣的樣本在上述的實驗條件下，測量各組的滯空時間



伍、研究結果與討論

一、種子的成長過程：

(一) 外部形態與內部構造

外皮的顏色變化：綠色→綠紅色→紅色→紅黑色→黑色，生長過程體型由小變大再縮小(表一)。後期時，種子長度的生長速度變快(圖4)。當剖開不同階段的種子，發現在種子初期，內部充滿液體與胚乳，子葉於種子下方處開始發育，之後子葉逐漸往種子上方生長，且胚根也於子葉基部的反方向逐漸往蒂頭方向延伸(圖5)。

	F2時期	F5時期	F8時期
種子顏色	綠	紅	黑
種子硬度	柔軟易變形	柔軟富彈性	堅硬
種子大小的變化趨勢	小----->大----->小		
種皮與子葉間空間	空隙多且大	空隙變少且小	無空隙
胚根與子葉顏色	綠	黃綠	黃
子葉質地	柔軟富含水分，容易舒展	柔軟但彈性較差，不易舒展	較硬，粉質易斷
重量(平均)	極輕----->重----->輕 ($>0.01g$)	($0.10\pm 0.01g$)	($0.07\pm 0.01g$)

表一種子生長過程內外部的變化

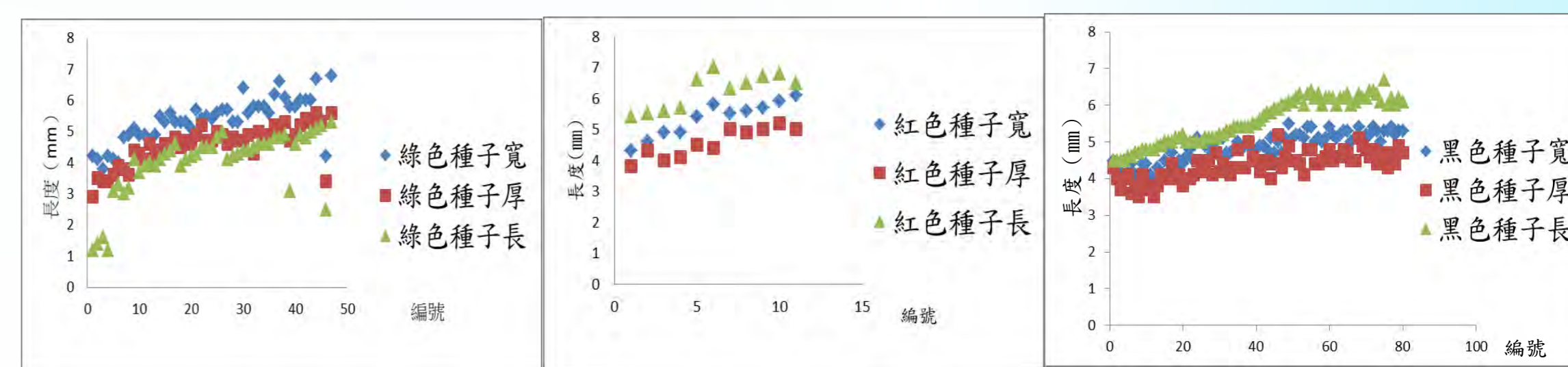


圖4種子不同階段外在形質的分布圖

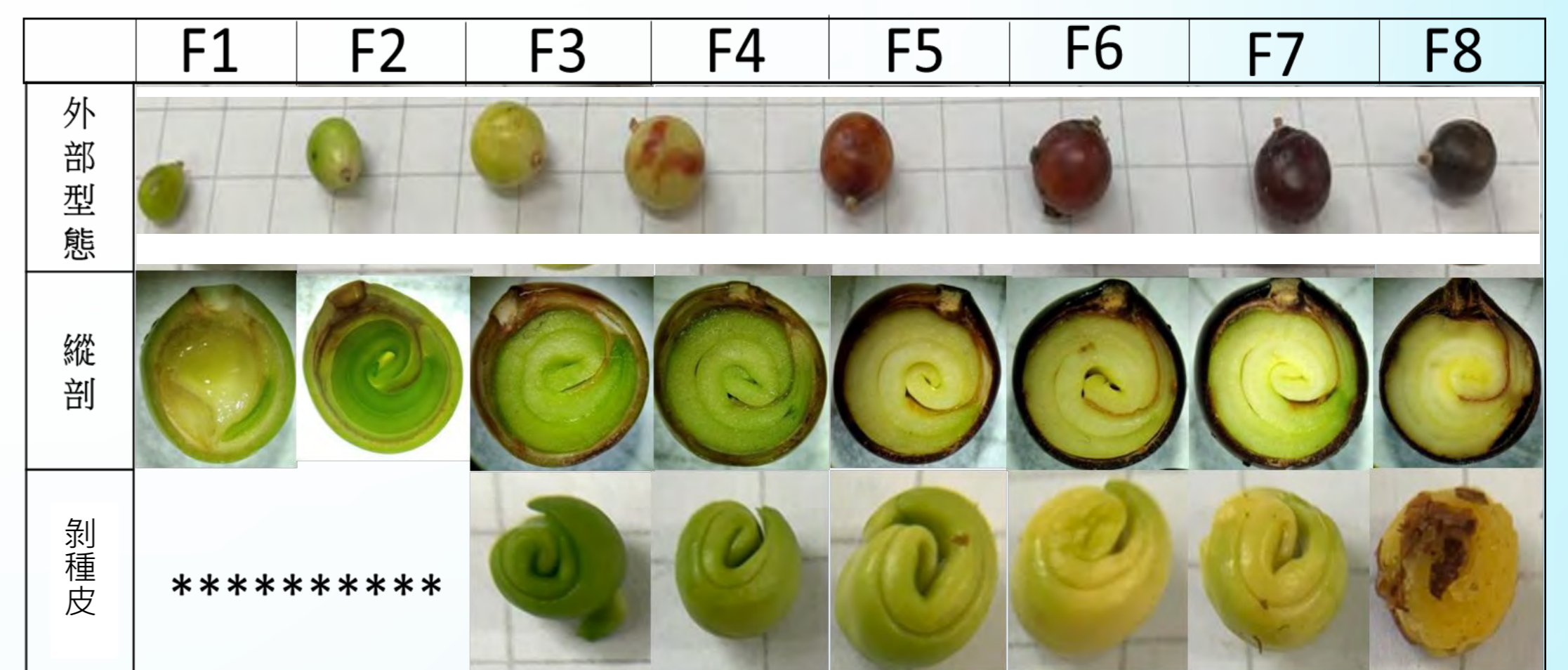
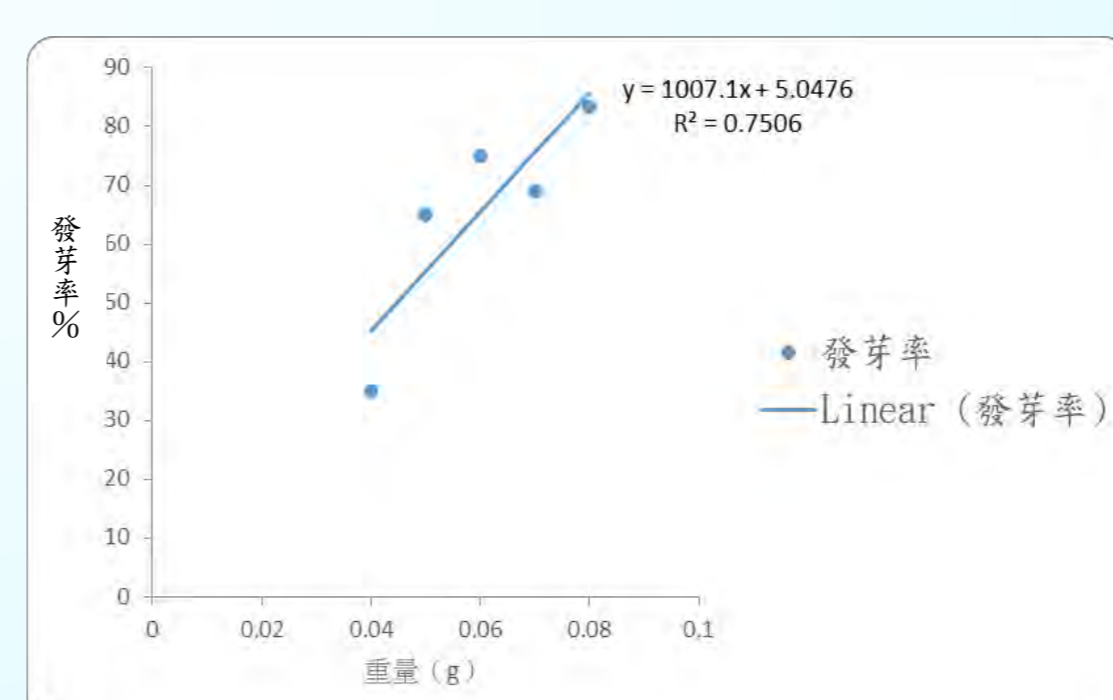


圖5種子不同階段的型態與構造

最末期的種子為黑色，重量分布從0.04~0.08g，比較各種不同重量種子的發芽率，發現種子的重量與發芽率為正相關($R^2=0.75$)，重量越重發芽率越高(圖6)，然而一旦發芽後，幼苗的生長速率沒有明顯的差異($0.31\pm 0.12\sim 0.35\pm 0.09$ cm/day)。

進一步測試綠色與紅色階段種子的發芽率，黑色種子之發芽率高達70%，其餘兩者發芽率皆低，因此可知綠色與紅色種子雖然大且重，但皆為不成熟的種子(圖7)。



(二) 種子發芽過程

由於種子發芽過程中，需要分解養分以進行旺盛的呼吸作用，因此將在樹上已變黑的種子在不同處置後進行醣類測試：結果發現所有新鮮乾燥的種子都能偵測到澱粉(圖8)。

泡水後，種子的平均重量在增加為原本的兩倍後就沒太大的變化，而這些重量的變化在兩天內完成(表三)。

表三泡水後種子的重量變化

原本重量	0.04g	0.05g	0.06g	0.07g
泡水2天	0.09±0.01g	0.10±0.01g	0.10±0.01g	0.10±0.02g
種植10天	0.08±0.01g	0.09±0.01g	0.10±0.01g	0.12±0.01g

我們發現種子在浸潤作用的過程中，葡萄糖會被釋放到種子外，不同重量的種子都有較明顯的滲漏現象(圖9)。

把泡水兩天再種植10天後的種子滴入碘液，發現種子內碘液變色的面積與程度都明顯較新鮮種子低(圖10)，顯示在發芽過程中，澱粉會不斷被水解。然而葡萄糖含量在各組中皆是微量，推測澱粉分解成的葡萄糖很快就被消耗掉或滲漏到種子外。

解剖各個不同階段久未發芽的種子，發現內部多為腐爛的狀態，檢視未爛掉的種子內部醣類狀況，可以看見黑色、綠色及紅色種子都沒有太大的差異，各組碘液與本氏液的變色程度皆小於新鮮乾燥的種子(圖11)。顯示這些種子內部養分含量少，也就是說這些種子並非處於休眠狀態而不發芽，有可能是**養分含量不足**而造成無法完成發芽。

* 討論

種子成熟的過程中，種子先維持柔軟易變形的狀態，逐漸長出胚根及子葉後，種子外部「長度」增加的速率會比「寬度」和「厚度」快，內部質地也開始轉變。之後種子體積就會逐漸變小，重量也會變輕，種皮與內部之間的空隙逐漸變小，濕潤程度變少，內含許多澱粉質。

在實驗中發現黑色階段的種子儲存大量的澱粉，這些養分在泡水後有逐漸從**胚根開始**分解，沿著子葉基部一路**推移到子葉尖端**的趨勢。檢視種子在泡水後10天的澱粉含量，發現剩餘澱粉量有隨著種子越輕而越少的**趨勢**，再對照種子重量與發芽率的相關性，可以推知若在種子發芽初期，種子內的**澱粉量不足**，有可能導致**發芽失敗**。

種子在發芽時，有一部分被分解出的葡萄糖可能會因種子通透性高而跑出種子外，如果種子本身有活性，細胞膜修復的更完整後，葡萄糖就不再流出，因此在種植10天後，種子內葡萄糖的量較少可能是種子活性小，葡萄糖持續滲漏，或者是種子活性大，被發芽過程中旺盛的呼吸作用消耗掉。

結合以上結果，我們推測種子在最後階段質地的轉變——降低濕潤程度而變成粉質狀的過程是在填充澱粉，填充的養分越多種子就越重。我們認為儲存的養分是用來提供發芽所需的能量，量若不足以支持到胚根長大且延長，則發芽就會失敗。

至於黑色種子的重量與發芽後幼苗的生長速度，從資料上看沒有明顯差異，也就是說種子一旦發芽，提供生長的養分來源似乎不再是種子本身，而是新長出的葉子，所以我們推測**重量對種子的影響**可能只在**發芽之前**。

二、果瓣對種子的影響

(一) 蒴果的切片標本觀察：

紅色蒴果的切片顯示外緣細胞布滿紅色花青素，但中間組織內則為葉綠素。綠色蒴果切片顯示蒴果外緣已無花青素，中間組織依然充滿葉綠素，最後等蒴果乾燥時，所有的細胞(壁)內都是透明的，沒有任何顏色(圖12)。

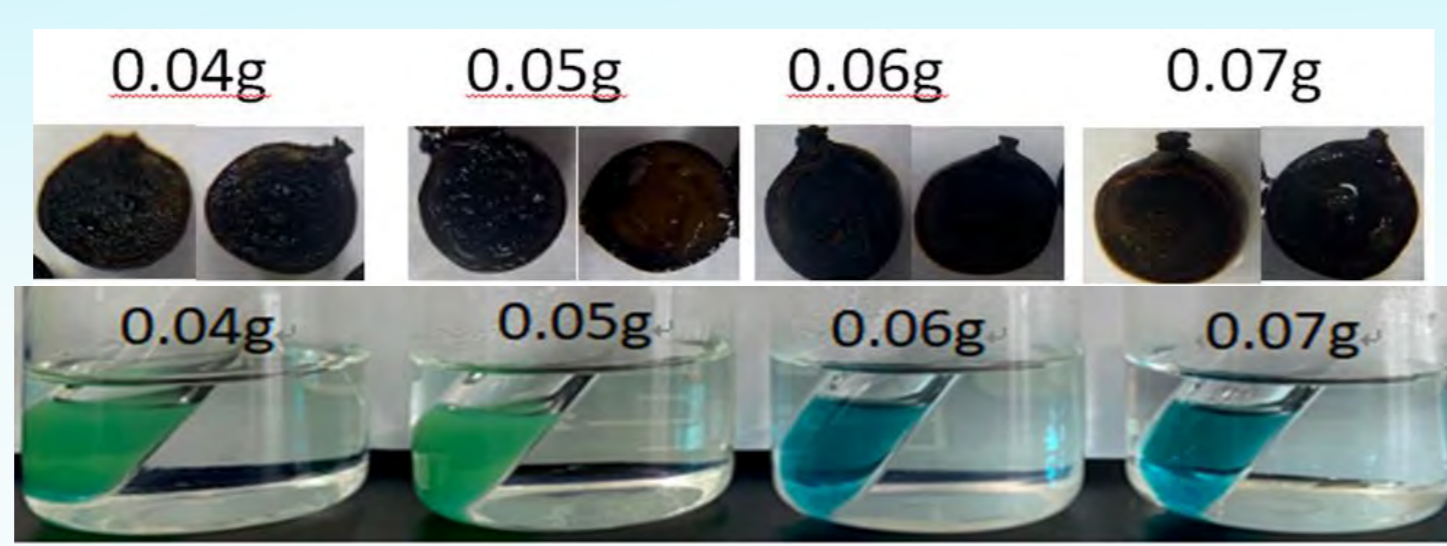


圖8新鮮乾燥的黑色種子醣類測試圖

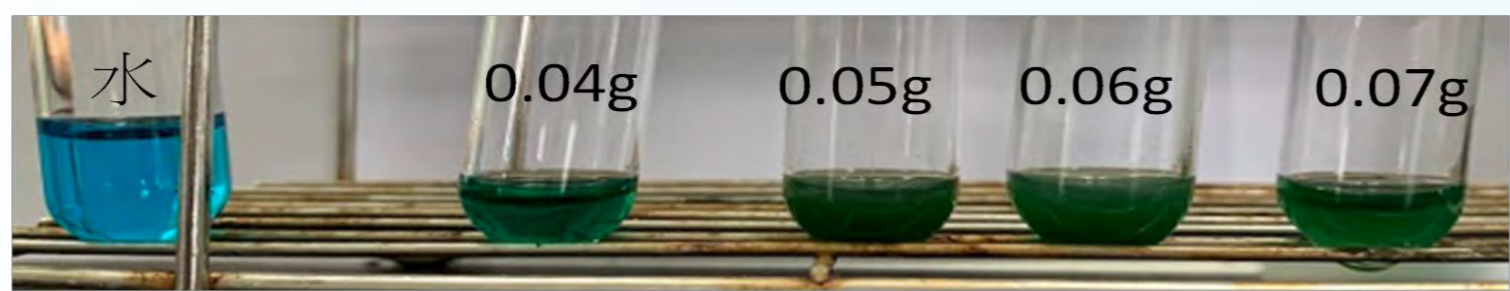


圖9黑色種子泡水後，溶液的葡萄糖測試圖

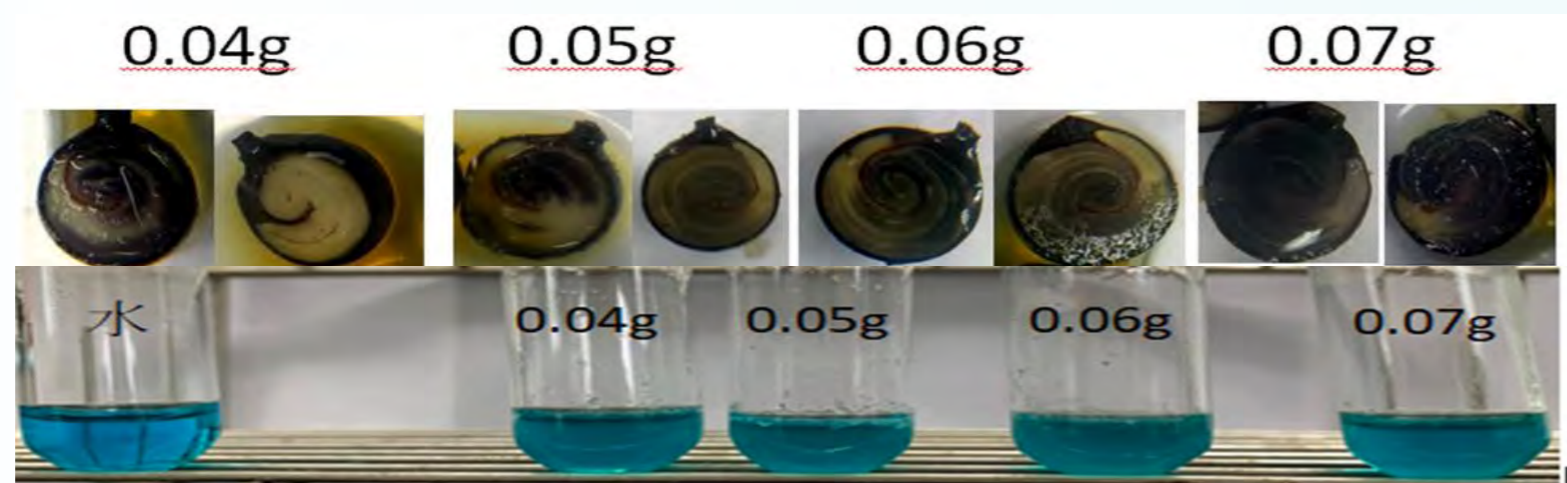


圖10種植10天後，黑色種子的醣類測試圖

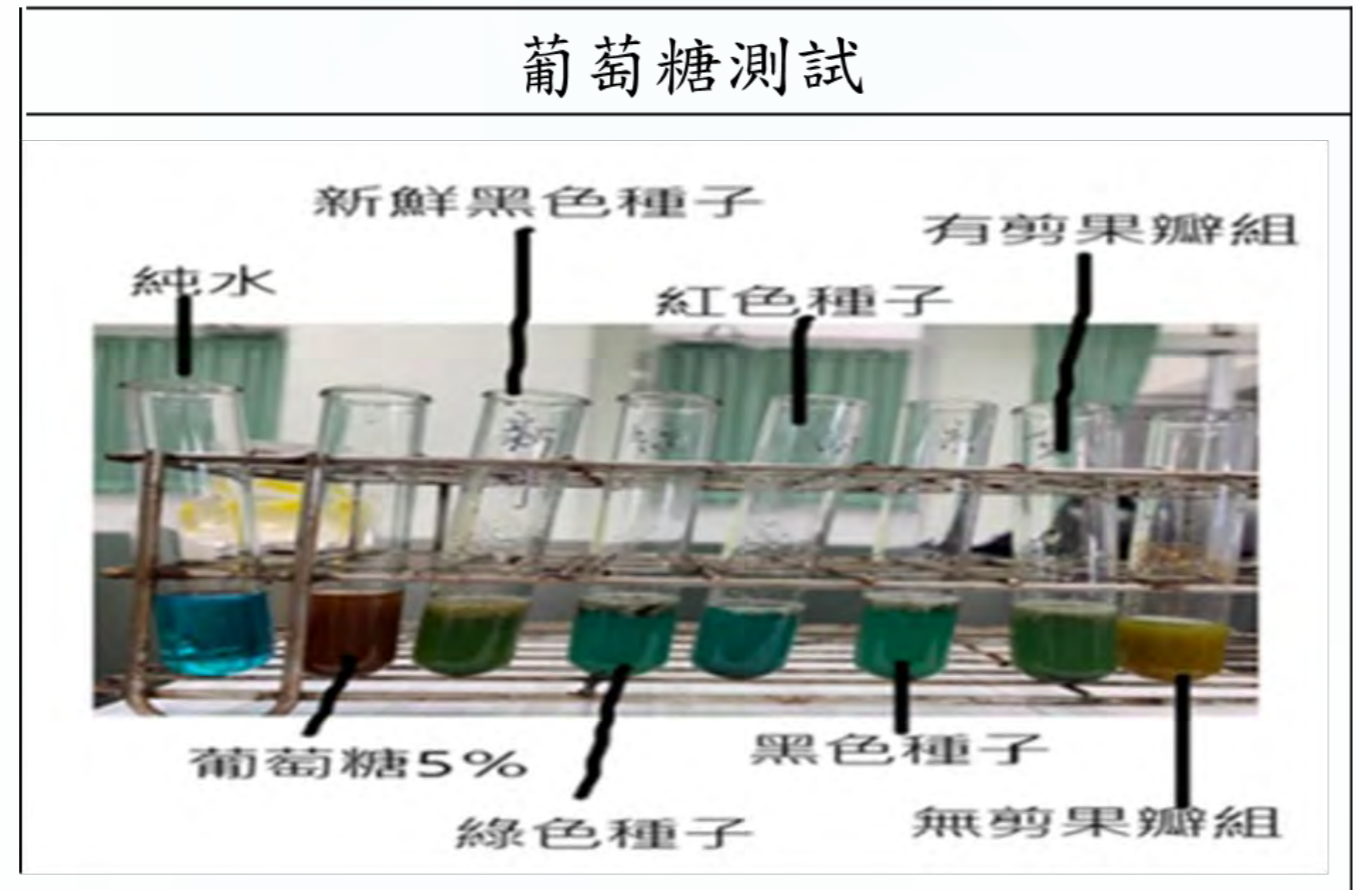
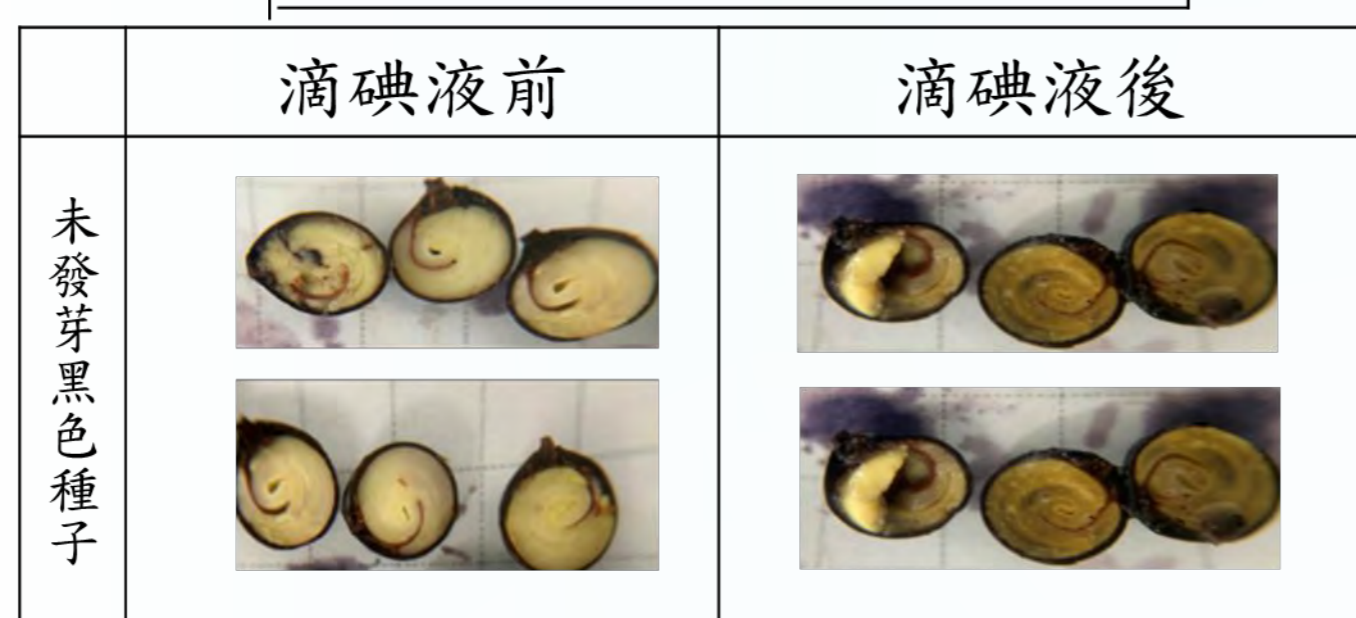


圖11各階段未發芽種子之醣類測試

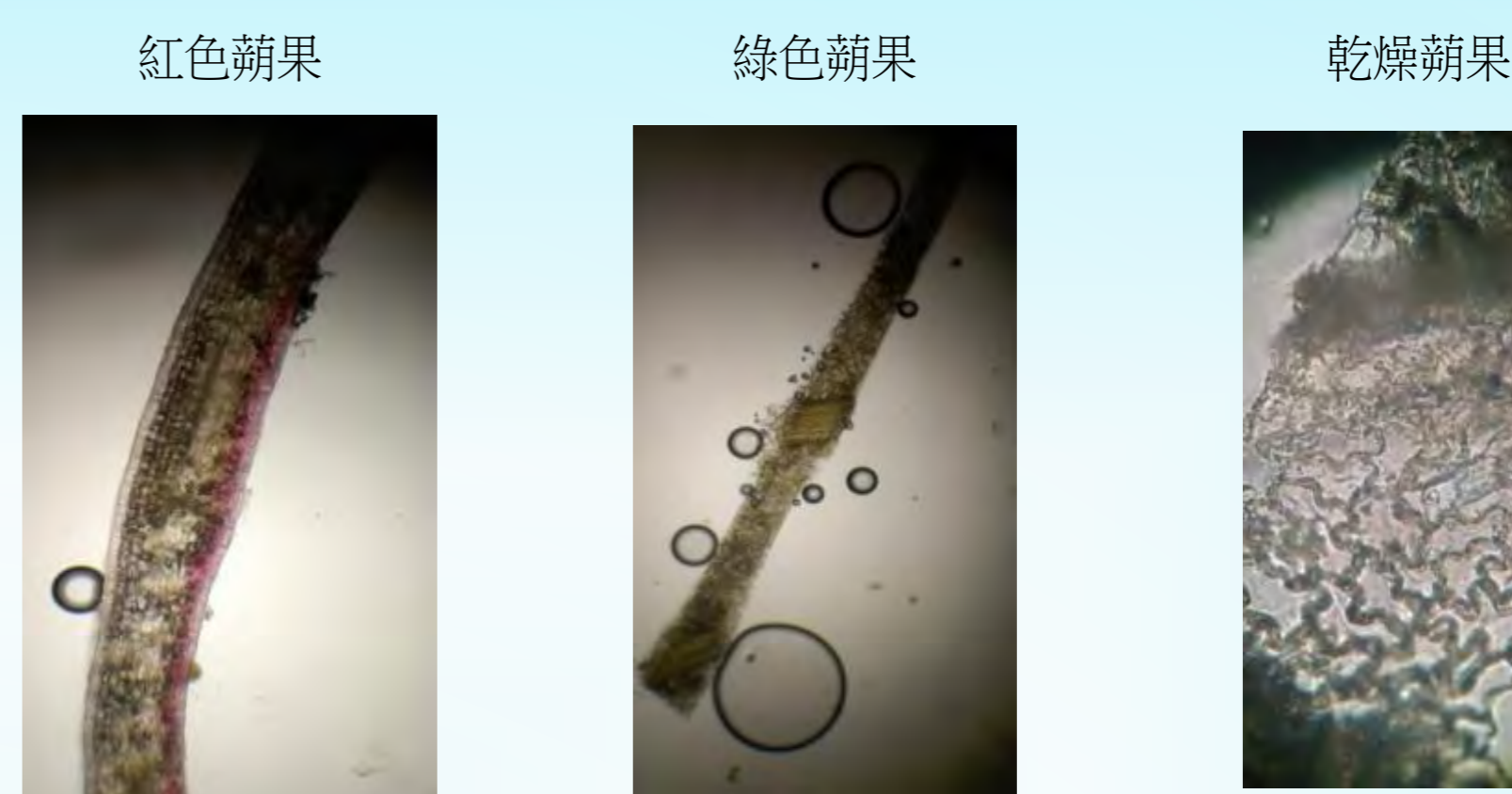


圖12不同狀態的果瓣切片

(二) 蒴果完全遮光對種子發育的影響：

將紅色蒴果遮光，內部的小種子(<0.01g)幾乎完全沒有長大，維持原來大小就變成黑色，因太小而不可能發芽(圖13)。

將綠色蒴果遮光，內部的種子會在短時期內會變色，由綠轉成黑色，相較之下，沒有遮光的對照組種子都還維持綠色狀態。另外，遮光兩個星期後，有87%大顆種子的種臍具有**突起且歪向一側**的歪斜現象(圖14)，同株未遮光的種子中，則只有5%有此現象。收集遮光組中大於0.04g以上的種子進行發芽測試，皆沒有種子發芽。

(三) 剪去果瓣對種子的影響

相較於對照組，剪去果瓣後，種子變色的速度約提早1~2週，掉落比例高達70.1%、掉落時間早約3~4週(如圖15)。



圖15不同組別種子的掉落狀況

分析這些剪果瓣組(提前掉落的種子、留在枝頭的種子)及對照組(無剪果瓣)種子間的發芽率差異(圖16)。可看出：三組之間有顯著的差異($p < 0.05$)，剪果瓣且提前掉落的種子發芽率最低(3%)，而對照組的發芽率最高(63.8%)。

比較各組內最輕與最重的種子，顯示越重越有利於發芽。然而重量不是影響發芽率的唯一關鍵，在剪果瓣組中最重的種子，其發芽率仍低於無剪果瓣的三個組別。

將剪去果瓣的種子與對照組比較，兩組別新鮮乾燥的種子皆含有澱粉，但剪果瓣組的碘液變色程度比對照組低，而且變色面積也有較小的趨勢(圖17)。

將種下後卻未發芽的種子進行解剖，發現其腐爛比例高，剩餘未爛的種子在醣類測試後顯示：兩組別中未發芽種子的澱粉含量都不多，甚至沒有澱粉(圖18)。而本氏液變色程度為：無剪果瓣組>新鮮乾燥種子>剪果瓣組(圖19)。種子一旦種植下去，會開始分解澱粉產生葡萄糖，開始進入發芽過程。然而在種子發芽成功前若澱粉不足，就算是種子內胚的構造完整，也無法成功發芽。

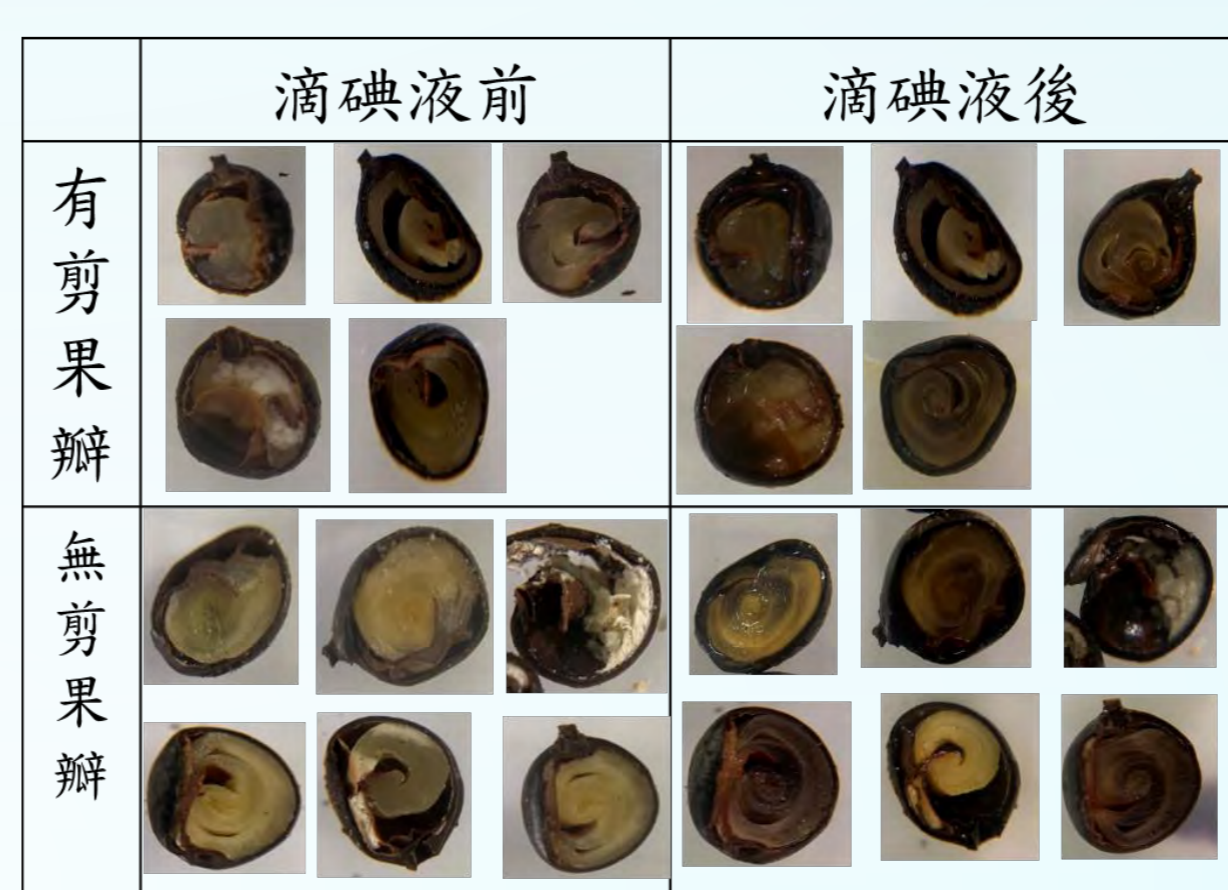


圖18各組別未發芽種子之澱粉測試

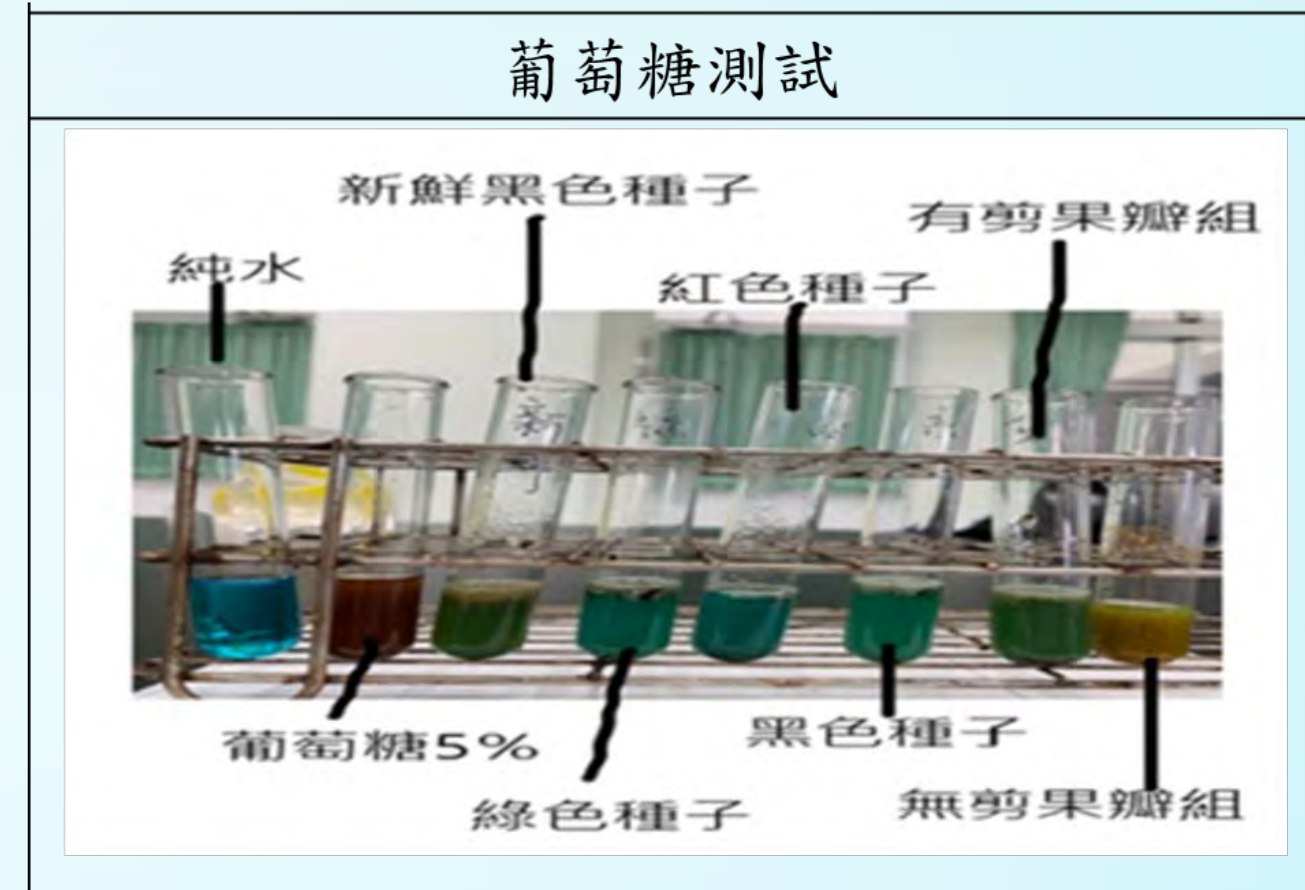


圖19各組別未發芽種子之葡萄糖測試

* 討論

我們發現剛開始發育的蒴果外側充滿花青素，對應蒴果內種子剛處於發育初期，這些色素是否能產生**光保護作用**，避免種子受到強光破壞值得進一步探究。

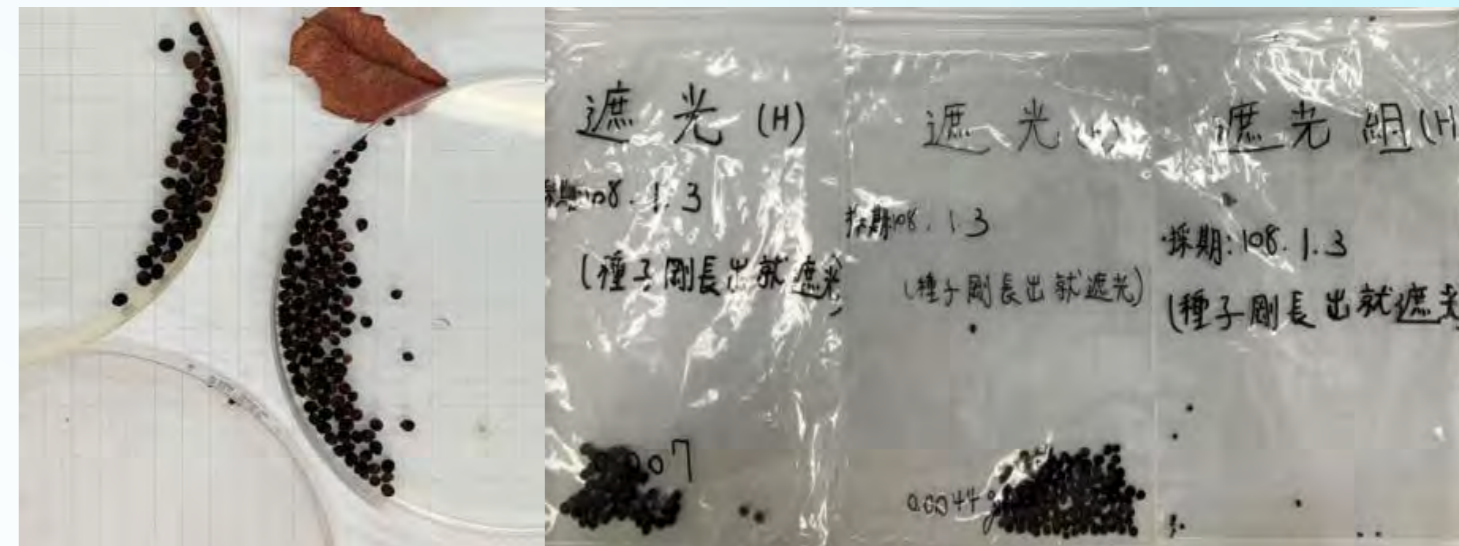


圖13蒴果遮光一個月後的小種子



圖14蒴果遮光後，種子的狀態

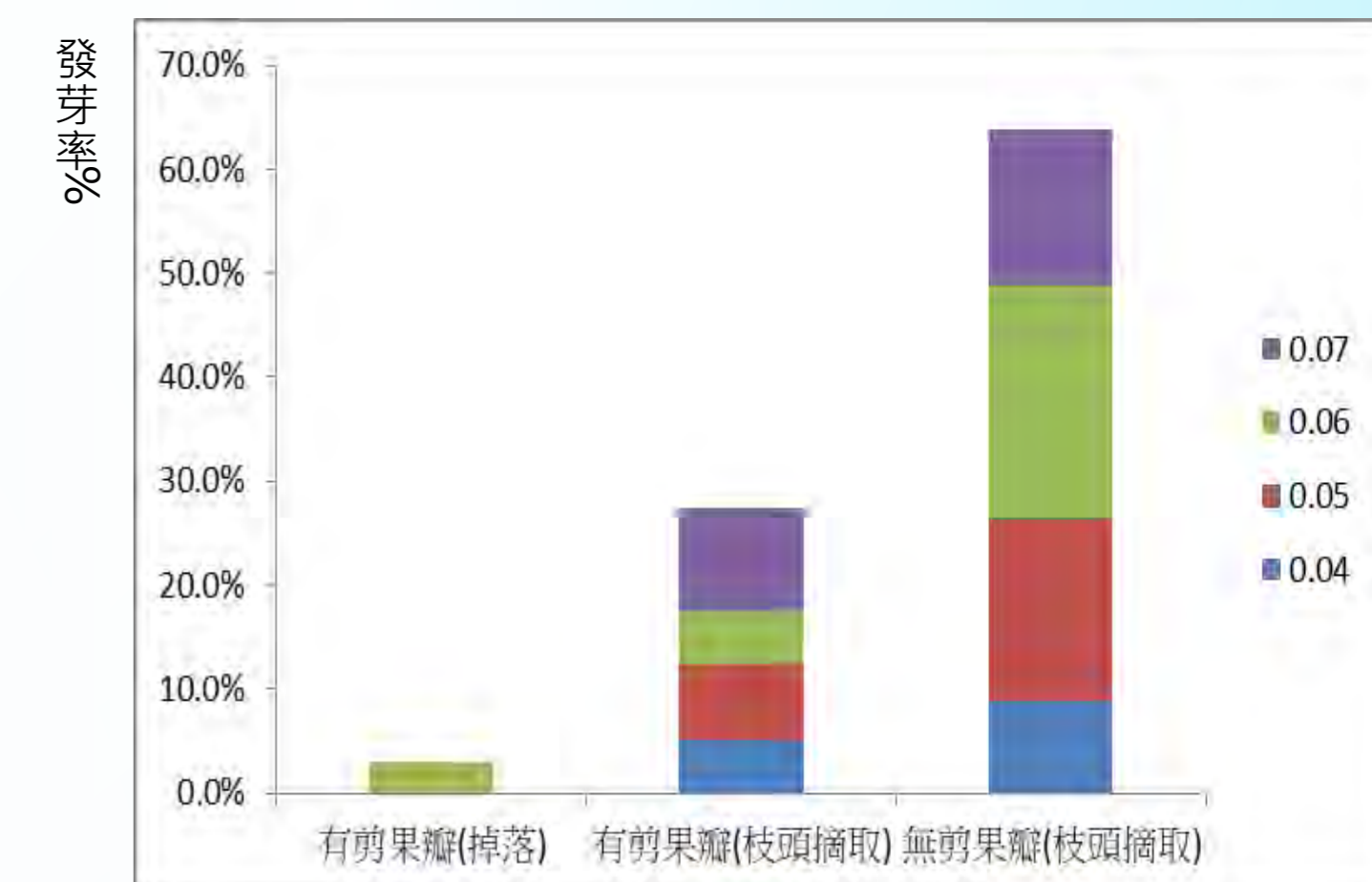


圖16各組別重量與發芽率的關係

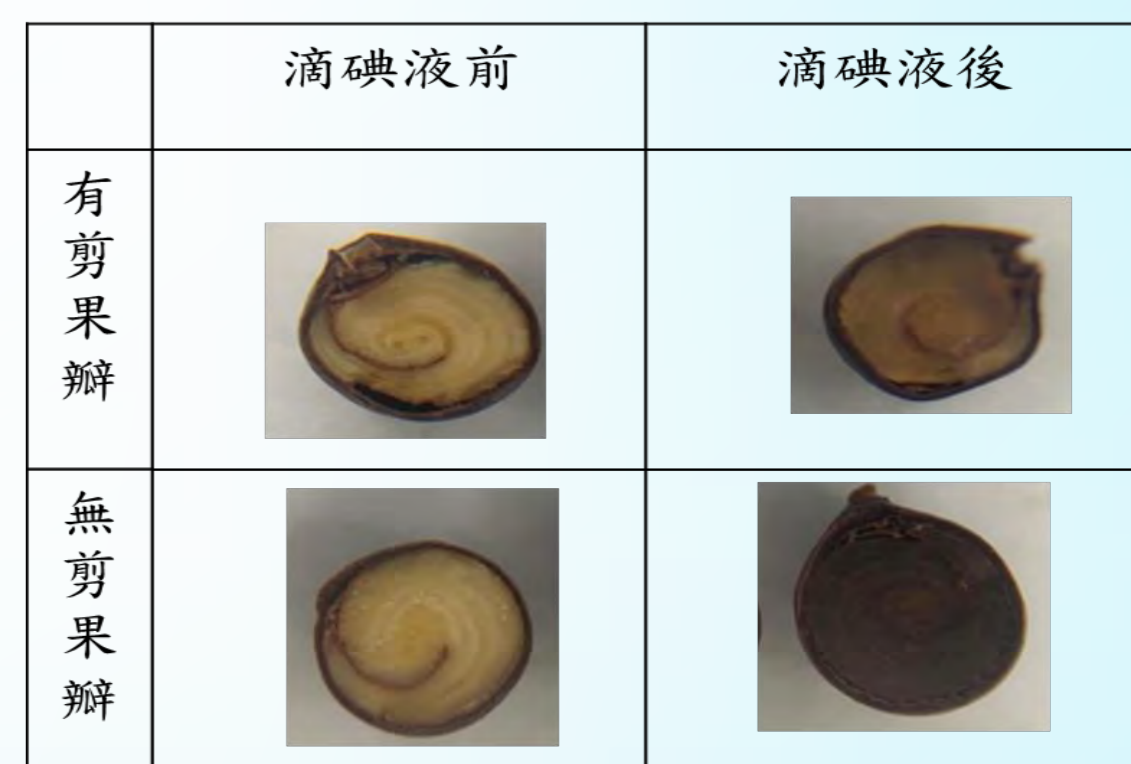


圖17各組別新鮮乾燥種子的澱粉測試

實驗中，不論是**遮光蒴果**或**減少果瓣面積**，其種子與自然成熟的種子的形態、重量、發芽率都有**明顯差異**，檢視未發芽的種子，剩餘的養分含量也較少。因此我們推測在正常光照情況下，蒴果進行光合作用來協助種子發育及儲存養分，當果瓣被破壞或遮光時，可能**供給種子養分**的效率變差；另一方面也可能果瓣提供運輸管道，協助養分由葉運輸至種子。若果瓣被破壞或遮光，都會**中斷運輸管道**，而影響種子的發育及儲存養分的多寡。上述兩個推論究竟是何者為果瓣對種子產生重大影響的主因，則有待更進一步的研究。

我們認為種子裸露時，也可能受到環境中物理因子（例如：光、風...）的影響，而使其提前掉落。另外，種皮在發育初期，可能因為蒸散速度過快而變硬，影響子葉與胚根後續的生長空間；也有可能是種子在胚發育的初期，細胞分裂速度快的情況下接受大量紫外線照射，產生突變的機率變高，而無法繼續發育並掉落，即便是最後留在枝頭上的種子其發芽率仍明顯低於對照組。換句話說，果瓣可能提供**物理性的保護**，阻絕環境中對種子會產生傷害的因子，並延長種子留在枝頭的時間。

三、果瓣對種子傳播的影響

在4.7m/s風速下，我們選了三個因子：**果瓣大小**、**果瓣與種子的總重量**、果瓣中的**種子數**作為操縱變因。

（一）不同因子果瓣的飄落模式

我們利用攝影畫面帶入Tracker軟體中，利用影格分析來算出各組果瓣飄落時不同模式的比例。大多組別飄落初期會翻滾，但到了中後段多以平滑式為主，整個過程平滑式占了92.9%~75.0%的比率，而重量越重越容易翻滾，例如0.04g~0.2g大果瓣的組別中，以0.2g組的平滑式比例33.3%為最低（圖20）。

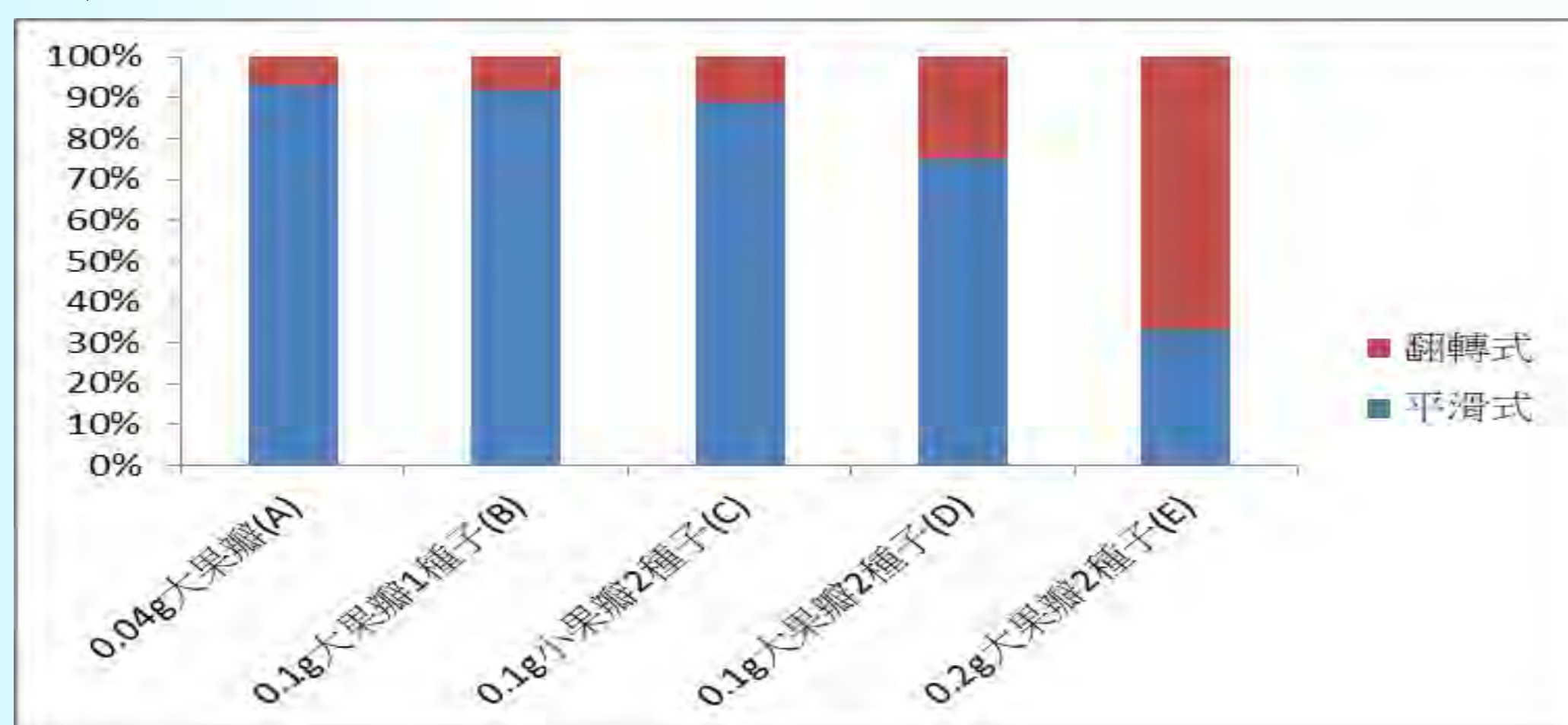


圖20 飄落模式比例圖

（二）不同因子果瓣的滯空時間

利用計算影格平均數來表示各組果瓣飄落時平均的滯空時間。重量越輕、果瓣越大、果瓣內含2顆種子，滯空的時間越久（圖21）。

160cm的高度裡，0.1g組的果瓣與0.2g組的最大平均影格數差異為114.2格，而樣本中最多可差到620格。

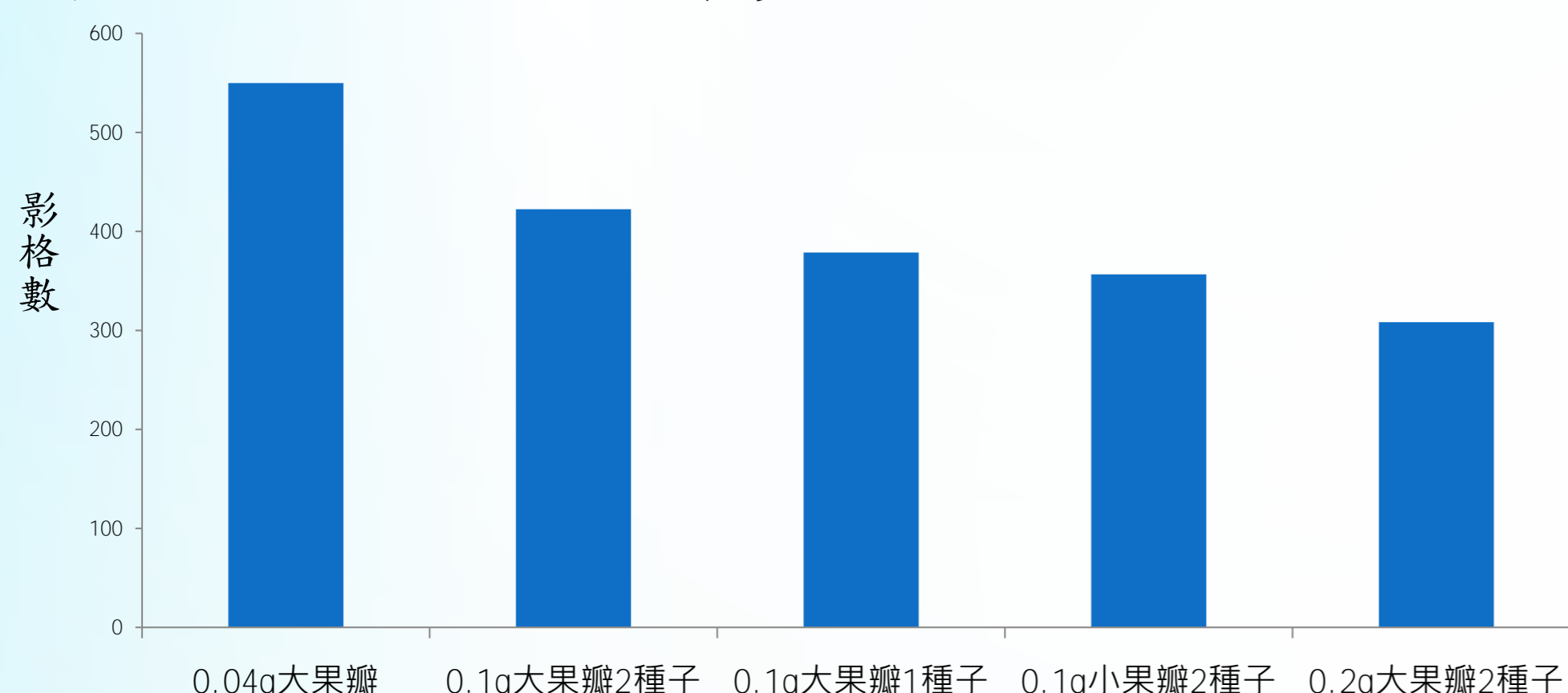


圖21 不同果瓣的滯空時間比較圖

（三）不同因子果瓣的水平位移

不論果瓣大小，只要有果瓣就能傳播的比裸露種子遠。由於我們要探討種子散播到遠方的機率，因此我們將焦點聚焦在極端值上。

圖22可看出大果瓣落在遠距離的次數比小果瓣多，也就是說**果瓣越大**，種子越有機會傳播到遠方。

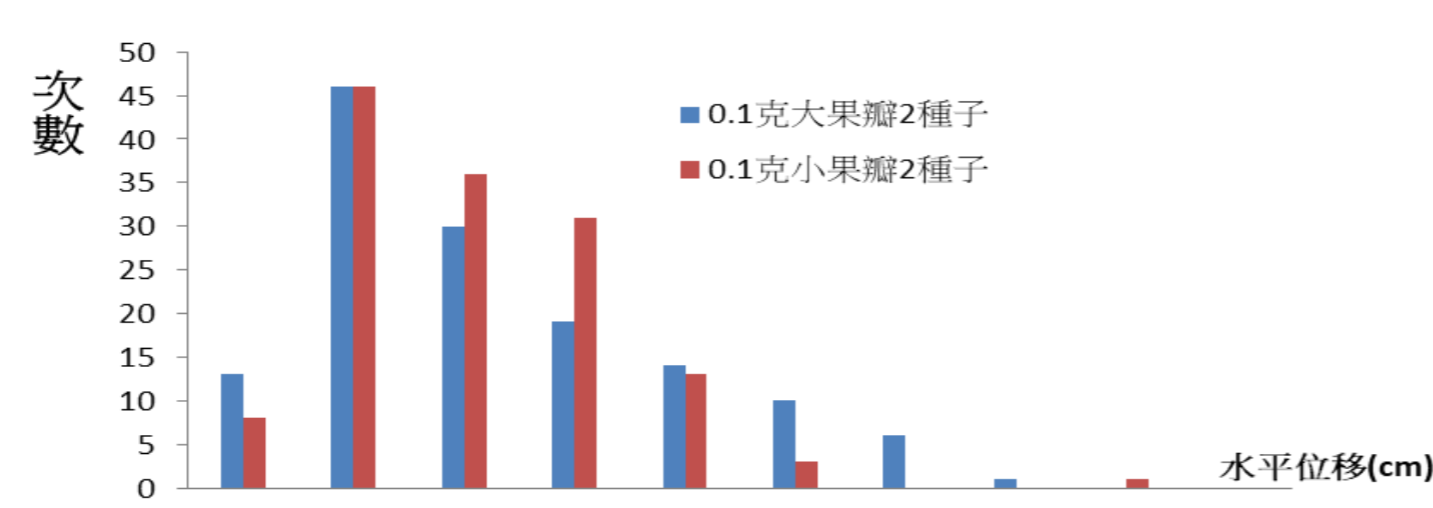


圖22 大小果瓣移動距離的次數分布圖

圖23可看出在果瓣面積相同的情況下，總重量越輕，越有機會傳播到遠方。**0.04g的果瓣**超過700cm的次數明顯較多，而0.2g克的果瓣飛行距離幾乎都在500cm內。

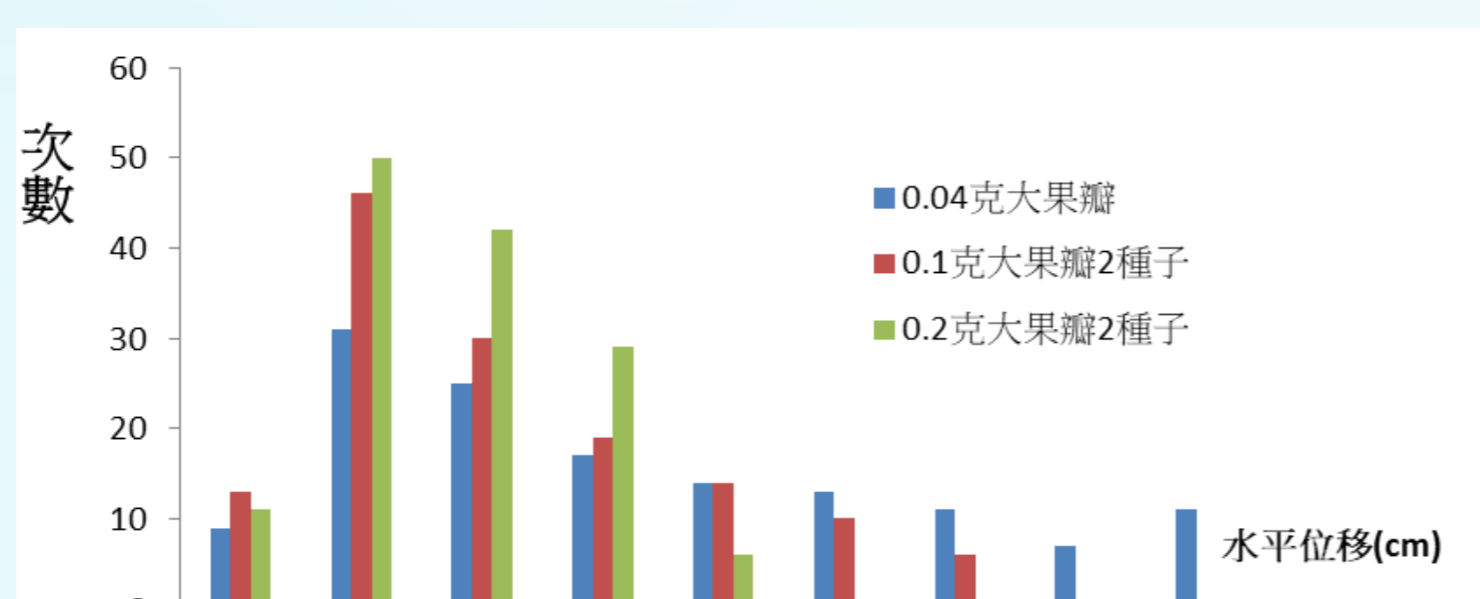


圖23 不同總重下，果瓣移動距離的次數分布圖

圖24可看出在果瓣大小與重量相同的前提下，**兩顆種子**比一顆種子更有機會傳播到遠方。

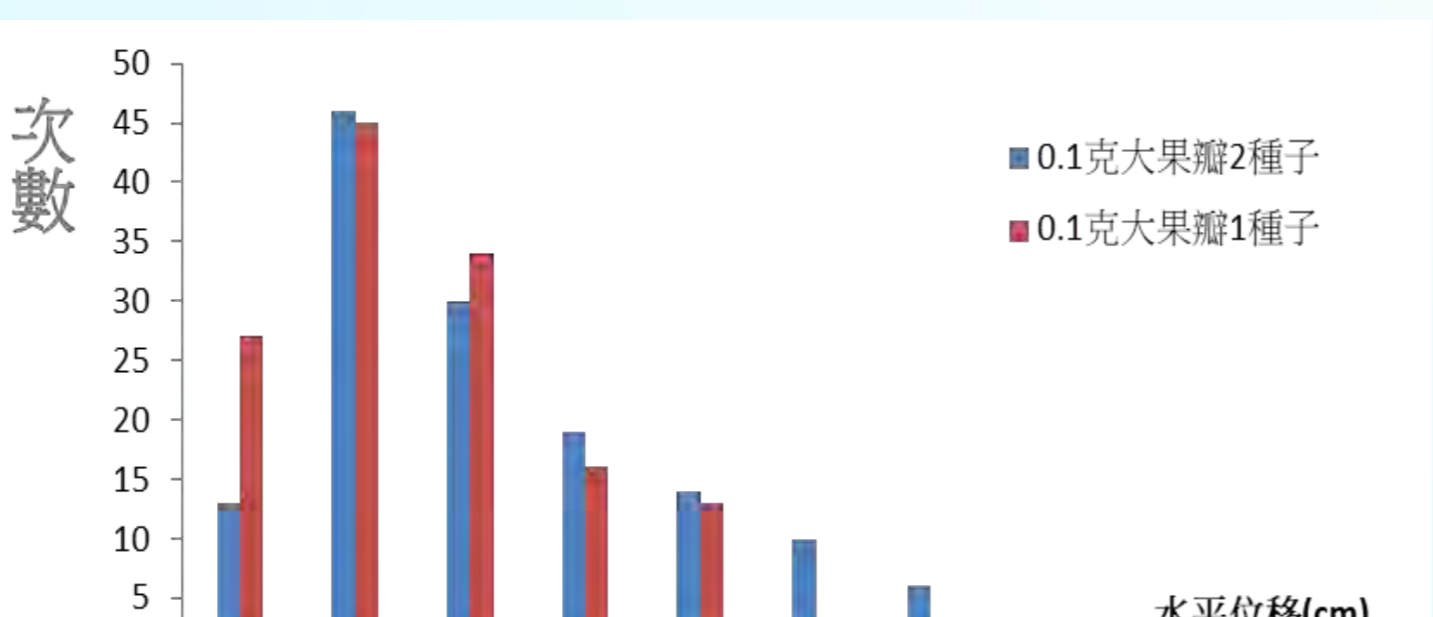


圖24 不同種子數的果瓣移動距離的次數分布圖

*飄落模式、滯空時間與水平位移的關聯性：

飄落模式和**水平位移**的距離，沒有一致性的趨勢，平滑式比例高的組別，飄向遠處的機會不一定較大。例如在同樣條件下，果瓣內有1顆種子以平滑式墜落的比例大於2顆種子，但2顆種子卻有機會飄的較遠。也就是說果瓣是用滑翔或是翻滾，和它能不能傳播的遠沒有絕對的關連性，不能用滑行的比例來判斷水平位移的遠近。

果瓣的**滯空時間**則與**飄到較遠處的次數**（圖25）有一致的趨勢。

停在空中越久，越有機會傳播的越遠。在眾多組合中，能傳播到較遠處的果瓣條件為：總重量較輕、帶有兩顆種子以及大面積的果瓣。而這些也正是能幫助種子停留在空中較久的條件。

*討論

樂樹主要是利用風把種子帶離母樹來擴張族群，我們觀察在無風狀態下，樂樹的飄落模式中以平滑式的水平位移最為明顯，因此我們認為在種子傳播時，果瓣應會以平滑式為主要飄落模式，傳播的越遠的果瓣，平滑式的比例應越高。但實驗的結果並不支持這樣的想法。

我們分析各組的滯空時間，對比水平位移的遠近，發現兩者**趨勢是吻合**的：同樣條件下，大果瓣的滯空時間比小果瓣長，傳播的也比較遠，總重量越輕的滯空時間越長，傳播距離也能比較遠。由此認為：果瓣最主要是幫助種子**停留在空中較長時間**，至於在果瓣傳播中是否能維持平衡，並非決定傳播距離的主要因素。

我們在戶外的觀察，發現樂樹下方就有許多發芽的樂樹幼苗，但很少看到這些幼苗成長茁壯，我們好奇在減少人為干擾後，樂樹幼苗能繼續發育為大樹而開花結果嗎？如果不能，表示果瓣幫助種子飄散到遠方不只是为了擴展族群，更重要的是提高生殖成功率。**總重量越輕、果瓣面積大、果瓣內含兩顆種子**等條件較有機會落在遠處，但在總重量輕的條件下，果瓣面積大且要有2顆種子，即會造成種子重量偏輕而降低**發芽率**，因此這三個會影響傳播距離的因子，其不同組合可能會影響種子發芽率。我們推測樂樹的果瓣大小、生產的種子數以及兩者組合的總重量，可能有特別的模式來因應不同的環境條件，例如長年多風的區域，母樹產生可能產生果瓣較小而種子較重的蒴果；而風較小的區域，母樹產生果瓣較大而較輕的蒴果，以提高傳播距離。我們期望未來能更進一步找到合適的地方，去檢視風速對樂樹種子重量與數量、果瓣大小的影響，以檢測我們的想法。

陸、結論

1. 種子發育過程，長度、寬度、厚度的生長速度不等速。種子在綠色階段以具備形狀完整的胚根子葉，而後會填充養分。種子需到**黑色階段**才能真正成熟。
2. 發芽時初期葡萄糖會滲漏到種子外，澱粉會持續被水解。沒發芽的種子內部大多幾乎無澱粉存在，因此**判斷種子儲存的養分含量不足則會影響發芽**。
3. 果瓣會**明顯**影響種子的發育，果瓣被遮光或破壞後，種子的**發芽率會降低**，也會使種子提前掉落，減少它們停留在樹上的發育時間。
4. 在傳播方面，**果瓣用於延長種子墜落的時間**，以增加它們的傳播距離。有風時，果瓣大小、種子數量及總重量會影響傳播的距離，大果瓣、重量越輕及內有2顆種子都能使種子有機會飛的遠。而果瓣的飄落模式則與傳播距離無直接相關。

柒、參考資料

1. 蘇銘言、蘇桂瑤、溫宜文、劉怡佳(2004)，風中奇緣—桃花心木種子的傳播，科學教育月刊第272期。
2. 楊正釗、陳裕星、林讚標(2000)，大頭茶、黃連木與台灣樂樹種子之儲藏性質，台灣林業科學。
3. 史家瑩主編(2011)，國民中學自然與生活科技課本第一冊，翰林出版。
4. 陳宥任、鄭佳宜(2010)，喙生會食—探討無患子椿象喙的差異對食物選擇的影響，中華民國第50屆中小學科學展覽會。
5. 陳謙易、鍾慈芬、羅士哲(2016)，以「樂」擊「螺」~探討台灣樂樹萃取液對福壽螺及其他生物的影響，中華民國第56屆中小學科學展覽會。
6. 陳宥誠、陳雅香、侯盈如(2009)，育鈴還需刺鈴蟲—探討小紅姬椿象與倒地鈴的關係，中華民國第49屆中小學科學展覽會。
7. 彭鏡毅(2015)，植物學中英百科全書。貓頭鷹出版。
8. 台灣樂樹(2009)，檢自kplant.biodiv.tw/台灣樂樹/台灣樂樹.htm
10. 許博行，林木種子的發芽 <http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/bhsheu/lesson/34.pdf>
11. 鹿兒陽、蔡仲涵(2008)，嫩葉的紅，台灣林業
12. William G. Hopkins、Norman P. A. Huner(2013)，植物生理學。五南出版
13. 郭華仁(2015)，種子學。臺大出版中心