

風中奇緣 桃花心木種子的傳播

壹、研究動機

二年級生命科學上冊學到了有關種子的散播方式，介紹了有關種子的傳播方式，當提到依賴風力散播的種子時，我就想到了校園內的大葉桃花心木(*Swietenia macrophylla* King)。種子有薄翅的桃花心木在果實成熟時，果實的外殼會開裂，風一吹種子便像竹蜻蜓般飄飛下來。課本中提到，若植物種子皆落在母株附近，則幼苗將因缺乏足夠的陽光，因而無法正常成長。於是，桃花心木的種子如何飄散到遠處以爭取最大的生長機率？激起了我們的好奇心，希望藉著這次實驗能得到進一步的了解。

貳、研究目的

- 一、探討桃花心木種子的構造、形態與散播的關係
- 二、探討風力對桃花心木種子散播的影響
- 三、探討桃花心木果實著生之高度和種子散播的關係
- 四、探討天氣(下雨)對桃花心木種子的散播有無影響
- 五、探討桃花心木種子的飄飛與空氣動力學的關係

參、研究設備及器材

桃花心木種子 234 個、大電風扇、5 米捲尺、電子天平、碼錶、身高計、剪刀、泡棉膠帶、寵物箱、自來水、15 公分直尺、簽字筆、風速計、徒手切片機、光學顯微鏡、顯微照相機、游標尺、玻片、吸管、角錐體模型、立可白

肆、研究過程

- 一、收集桃花心木種子183個，並用簽字筆在種子上寫上號碼予以編號。
- 二、用電子天平測量種子的質量及用直尺測量種子的全長(含種翅之長度，以下簡稱種子長度)、翅寬(測量種翅的前端、底端及中段)，並紀錄之。
- 三、選定一間空教室作為種子飄落實驗之場所，將門窗緊閉，大電風扇及身高架擺放固定位置(圖版一)。
- 四、將各種子從身高架150cm之高度釋放使之落下，同時按下碼錶計時。
- 五、測量種子從被釋放至飄落地面的秒數(飄落時間) 並紀錄之。
- 六、另二人拿皮尺測量種子飄散的距離(水平距離)，即種子落地處至身高架正下方的距離(圖版二)。
- 七、每個種子都重複進行三次釋放，並記錄測量結果，再求其平均值。
- 八、接著將風扇依序開啟至弱風(3.6m/sec)、強風(6.1m/sec)的狀態，並重複步驟四至七。
註：括弧()內的值是以風速計測量風扇的風速(圖版三)三次，求得的平均值。
- 九、再將各種子從身高架200cm之高度釋放使之落下，並重複步驟四至八。
- 十、上述步驟完成後，從中取三分之一的種子樣本，將其翅的前端剪斷(約占種子翅長的

三分之一)，如圖版四，並重複步驟四至八。

- 十一、再取三分之一的種子樣本，在其靠近種仁的部位外緣貼上質量0.04g，面積1平方公分(長、寬各1公分)的泡棉膠帶(圖版五)，並重複步驟四至八。
- 十二、取最後剩餘的三分之一種子樣本，將其翅的前端寬度剪掉一些，使之與翅的底端切齊(圖版六)，並重複步驟四至八。
- 十三、為了顧及種子樣本數不至於過小，我們再從校園中撿拾蒐集今年三月剛飄落的桃花心木種子51個，針對種子傳播是否受雨水淋濕之影響進行研究。方法是將乾燥的種子先進行步驟一至八，再將這些種子置於水中浸溼後(圖版七)，重複步驟四至八。
- 十四、果實著生位置的觀察
 - (一) 選擇校園中的6棵桃花心木為觀察對象，在三月份時大量落葉後的一週內進行觀察。
 - (二) 以目測的方式將各棵樹的樹冠等分成樹冠上層、樹冠中層及樹冠下層三層，觀察記錄各分層中的果實數量及著生位置。此外，觀察時我們也特別注意果實開裂情形，開裂後種子是否仍附著在果實的中軸上，以及種子在果實中軸上的排列情形。
- 十五、將種子的翅及種仁外圍木質化的部分進行橫切面的切片，製成水埋玻片標本置於顯微鏡照相機下觀察種子的構造，並拍照記錄之。
- 十六、種子重心的測定：將種子置於角錐體模型頂端，稍微移動位置直到種子平衡地靜止在角錐體頂點(圖版八)。
- 十七、種子萌芽試驗：將種子外圍木質化的部分剝掉，分為A、B二組，置於培養皿中，加入等量的水及棉花，將A組培養皿外以鋁箔紙包裹，B組培養皿外則以透明保鮮膜包裹，置於生長箱中並給予光照處理。

伍、結果

一、種子形態構造與散播

(一) 種子形態特徵之描述與資料分析

1. 桃花心木的種子為單翅的具翅種子，翅全緣、平滑，木質易脆裂，先端截狀，褐色，種子全長 7.02 ± 0.084 公分(mean \pm SE, n=184, range=3.2-9.7)，翅寬 1.71 ± 0.024 公分(mean \pm SE, range=1.0-2.4)，質量 0.32 ± 0.014 克(mean \pm SE, range=0.02-0.63)。根據楊勝任教授(2002)對於具翅種子的分類，桃花心木的種子為頂生翅，種翅著生於種子的一端，且從種子的中心軸向一邊延伸。
2. 種翅的形態若從上往下看(正面觀)為盾形，中段較寬(1.92 ± 0.026 公分, range=1.2-2.6)，二端略窄(基部為 1.41 ± 0.015 公分, range=1.0-1.7，前端為 1.36 ± 0.022 公分, range=1.0-2.0)；若從側面看則呈流線形，一邊稍厚且硬，且愈往種翅的前端愈薄(基部厚度為 0.22 ± 0.005 公分，中段 0.12 ± 0.003 公分，前端 0.08 ± 0.003 公分)，另一邊則相當薄(0.05mm 以下)，大多略為扭曲有弧度，少數(11.3%)則較平直。種翅上翹，類似飛機機翼的上反角，翅基部與水平的夾角為 23.8 ± 0.63 度(mean \pm SE, n=100, range=10-40)。
3. 種子的形態有順、反二型，二者有如鏡像，左右互為對稱(圖版九)，以下簡稱左旋種子及右旋種子。
 - (1) 在種子樣本中左、右旋種子的比例為 1:1(左旋占 50.6%；右旋占 49.4%，n=183)，二者之各測量形值無明顯差異(表一)。

表一、左、右旋種子兩個樣本形值平均數差的 t 檢定

	質量(g)		長度(cm)		寬度(cm)	
	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋
平均數	0.34	0.31	7.2	6.9	1.7	1.7
變異數	0.035	0.035	1.069	1.518	0.085	0.081
觀察值個數	92	90	92	90	73	69
Pooled 變異數	0.035				0.083	
假設的均數差	0		0		0	
自由度	180		173		140	
t 統計	1.150		1.756		0.826	
P(T<=t) 雙尾	0.252		0.081		0.410	
臨界值：雙尾	1.973		1.974		1.977	

註：左、右旋種子長度的變異數不相等(F 值=0.7, p=0.049<0.05), 故採母體變異數不等的 t 檢定

- (2) 不論是左旋或右旋種子，種子在釋放後落下一小段距離才開始自旋而下，種子飄落自旋時皆有二種穩定平衡的狀態。一種是種翅的凸面朝上旋轉而下，另一種則是種翅的凹面朝上旋轉而下。但不論哪一種狀態，種翅稍厚的一邊一定朝向旋轉的方向。
- (3) 左、右旋種子的飛落時間無顯著差異，飄散距離只在強風狀態下有顯著差異 ($t_{151}=1.99, p=0.049<0.05$), 如表二。

表二、左、右旋種子兩個樣本飄落時間、飄散距離平均數差的 t 檢定

	無風(sec)		弱風(sec)		強風(sec)		無風(m)		弱風(m)		強風(m)	
	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋
平均數	1.39	1.35	1.23	1.16	1.18	1.16	17.4	16.3	105.2	101.4	163.8	149.3
變異數	0.085	0.118	0.041	0.041	0.055	0.048	54.52	48.78	1601.25	1100.28	2126.27	1617.84
觀察值個數	80	73	80	73	80	73	80	73	80	73	80	73
Pooled 變異數	0.101		0.041		0.052		51.78		1362.37		1883.84	
假設的均數差	0		0		0		0		0		0	
自由度	151		151		151		151		151		151	
t 統計	0.694		1.933		0.783		0.980		0.648		1.987	
P(T<=t) 雙尾	0.489		0.055		0.435		0.329		0.518		0.049*	
臨界值：雙尾	1.976		1.976		1.976		1.976		1.976		1.976	

- (4) 以 F 檢定測驗左、右旋種子之間的飄落時間、飄散距離，發現變異數皆無顯著差異(表三)，遂將左、右旋種子的研究資料合併，進行以下的分析。註：以下分析以種子於 1.5m 高度的飄落時間及飄散距離測量值為主。

表三、左、右旋種子兩個樣本飄落時間、飄散距離變異數的 F 檢定

	無風(sec)		弱風(sec)		強風(sec)		無風(m)		弱風(m)		強風(m)	
	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋	左旋	右旋
平均數	1.39	1.35	1.23	1.16	1.18	1.16	17.4	16.3	105.2	101.4	163.8	149.8
變異數	0.085	0.118	0.041	0.041	0.055	0.048	54.52	48.78	1601.25	1100.28	2126.27	1617.84
觀察值個數	80	73	80	73	80	73	80	73	80	73	80	73
自由度	79	72	79	72	79	72	79	72	79	72	79	72
F	0.714		1.014		1.160		1.118		1.465		1.314	
P(F<=f) 單尾	0.072		0.477		0.262		0.317		0.054		0.120	
臨界值：單尾	0.684		1.467		1.467		1.467		1.467		1.467	

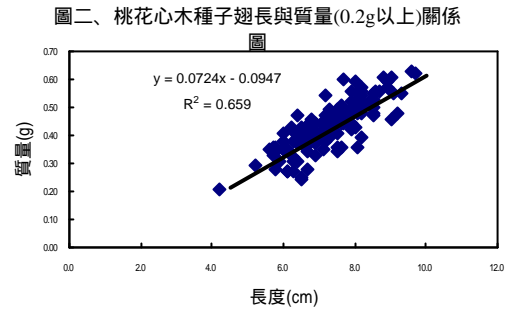
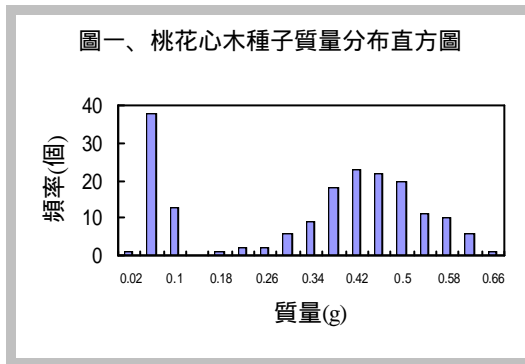
4. 種子的質量分布分為質量小(小於 0.18g)及質量大(大於 0.2g)二群(圖一)。

(1) 質量小的種子之各形值均顯著小於質量大的種子，前者的飄落時間及飄散距離則均明顯多於後者(表四)。註：95%的信賴區間皆沒有相重疊。

表四、質量小(小於 0.18g)及質量大(大於 0.2g)種子之形值、飄落時間、飄散距離比較表

		質量(g)	長度(cm)	寬度(cm)	無風(sec)	弱風(sec)	強風(sec)	無風(m)	弱風(m)	強風(m)
質量小的種子	平均數	0.06	6.3	1.5	1.69	1.36	1.39	21.9	143.5	205.1
	標準誤	0.003	0.16	0.04	0.053	0.033	0.038	1.25	4.39	5.76
	最小值	0.02	3.2	1	1.15	1.04	0.95	7.67	87.8	132
	最大值	0.15	8.9	1.9	2.38	1.92	2.18	40	220.8	313
	個數	53	53	40	44	44	44	44	44	44
	信賴度(95.0%)	0.005	0.33	0.08	0.107	0.066	0.077	2.51	8.86	11.61
質量大的種子	平均數	0.43	7.3	1.8	1.24	1.13	1.08	14.9	86.9	137.7
	標準誤	0.008	0.09	0.024	0.018	0.015	0.014	0.54	2.45	2.74
	最小值	0.19	4.2	1.2	0.84	0.83	0.79	5.7	29.3	62.3
	最大值	0.63	9.7	2.4	2.04	1.79	1.41	43.5	164.3	208.8
	個數	130	130	101	108	108	108	108	108	108
	信賴度(95.0%)	0.016	0.17	0.048	0.036	0.030	0.027	1.07	4.86	5.43

(2) 質量大的種子其質量與種子全長呈正相關($r=0.8$, $p<0.001$)，且以簡單回歸分析其質量與全長的關係(圖二)，顯示質量的變異量有 64% 受種子全長的影響 ($r^2=0.638$)；質量小的種子其質量的變異量受種子全長的影響則較小($r^2=0.381$)。



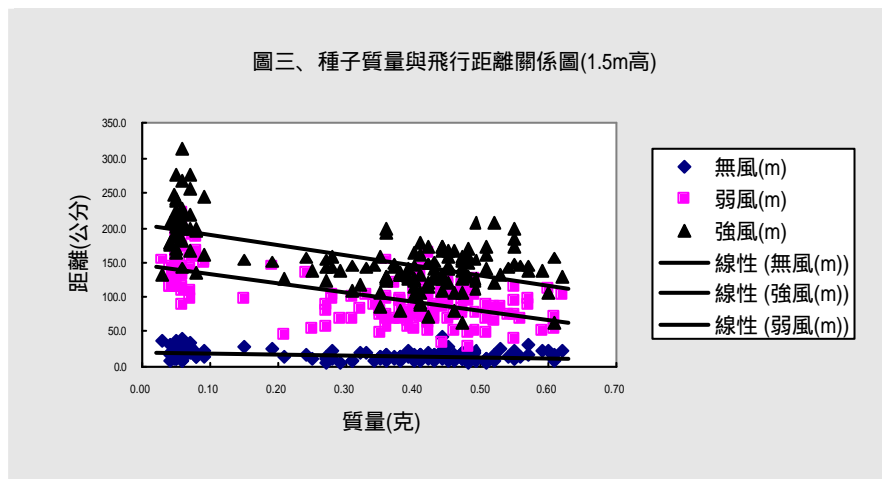
- 我們將質量小於 0.18g 及質量大於 0.2g 的種子各剝開 70 個，發現質量輕的種子絕大部分(98.6%)找不到種仁，反之，質量重的種子全部(100%)找得到發育完好的種仁。
- 種子的重心多位於種子的一端，即種仁所在的部位，重心距離種子末端(重心位置)1.74 ±0.022 公分(變異係數 CV=12.6)，重心位置與種子長度之比為 0.24 ±0.003(變異係數 CV=10.5)。重心位置與種子長度呈正相關($r=0.59$ ， $p<0.001$)，亦與種子質量呈正相關($r=0.37$ ， $p<0.001$)。

(二) 種子的構造

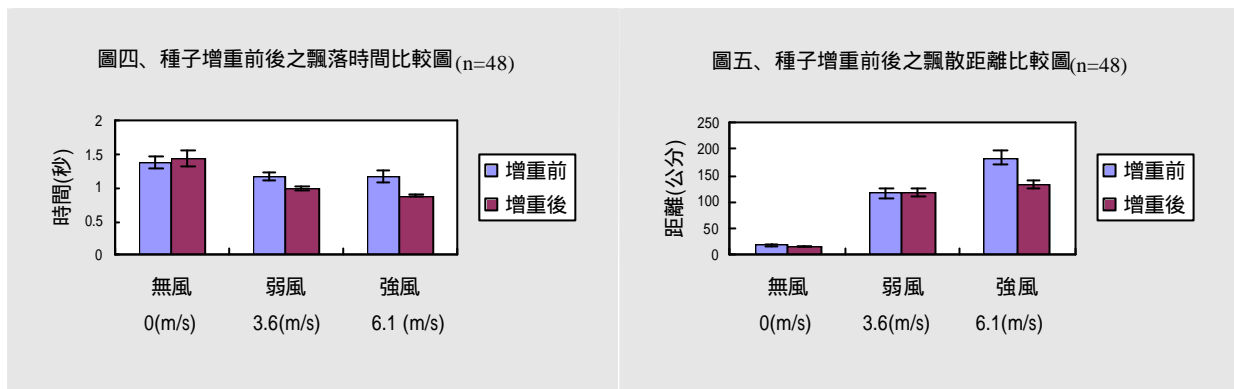
經顯微鏡觀察種子切片發現，翅及種仁外圍木質化的部分其內部是許多類似氣囊的構造所構成(圖版十)，且靠近邊緣的囊較小，靠近內部的囊較大；在翅的較厚部分，則有木質化的脈貫穿中央(圖版十一)。

(三) 種子質量與散播

- 種子質量與飄落時間呈負相關($p<0.001$)，如表五，即較輕的種子，飄飛的時間較久。
- 在無風狀態下，種子飄落之水平距離較不受質量之影響 ($r^2=0.134$)；風吹(弱風及強風)時，種子飄落之水平距離受質量之影響較大 ($r^2=0.425$ ； $r^2=0.391$)，如圖三。顯示質量較輕的種子飄散得較遠，但無風時則不然。



- 增加種子的質量後，在無風狀態下的飄落時間與增重前無顯著差別(成對的 t 值測驗， $t_{47}=-1.77$ ， $p=0.08$)，而在弱風及強風狀態下，種子飄落之時間均顯著縮短(成對的 t 值測驗，各為 $t_{47}=9.65$ ， $t_{44}=7.78$ ， $p<0.001$ ，單尾)，如圖四。顯示增加種子的重量，會使種子加快飄落至地面。
- 增加種子的質量後，只有強風狀態下，種子飄散的水平距離顯著縮短(成對的 t 值測驗， $t_{44}=-7.06$ ， $p<0.001$ ，單尾)，無風及弱風狀態下，則無顯著差別(圖五)。



5. 在種子的種仁(重心)部位貼上泡棉膠帶增重後，14.8%的種子重心位置不變，68.9%的種子重心位置往種子末端移動，5.2%往上移，11.1%往左、右二側移；重心位移 0.14 ± 0.014 公分，位移的多寡與種子質量呈負相關($r=-0.84, p<0.001$)，與種子長度亦呈負相關($r=-0.45, p<0.001$)。加重後的種子有 63.4% 自旋時種翅與水平面的夾角明顯變大，有 32.6% 的種子自旋時種翅與水平面的夾角無明顯變化。

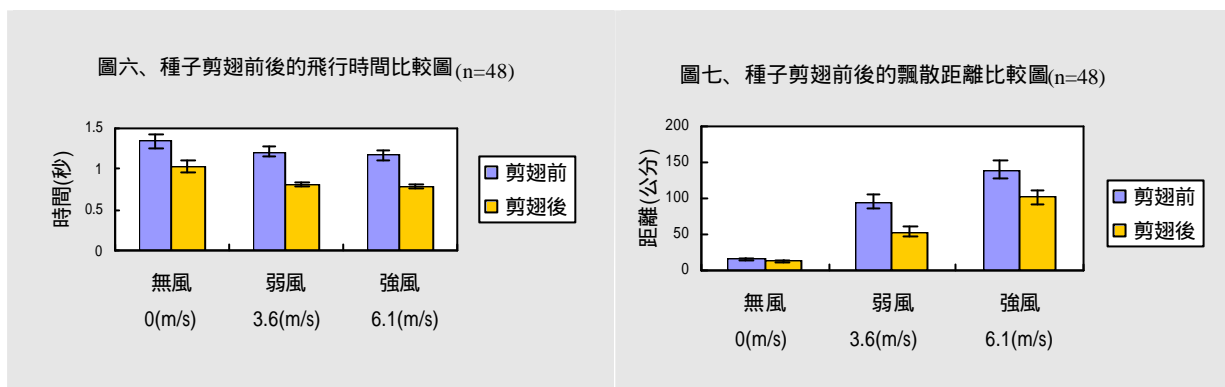
(四) 種子的長度與散播

1. 不論風吹與否，種子長度與飄落時間無關($p>0.05$)，如表五。
2. 不論風吹與否，種子長度與其飄散的水平距離亦無關或相關性低 (表五)。

表五、桃花心木種子之形值、飛落時間、飄散距離之相關係數比較表

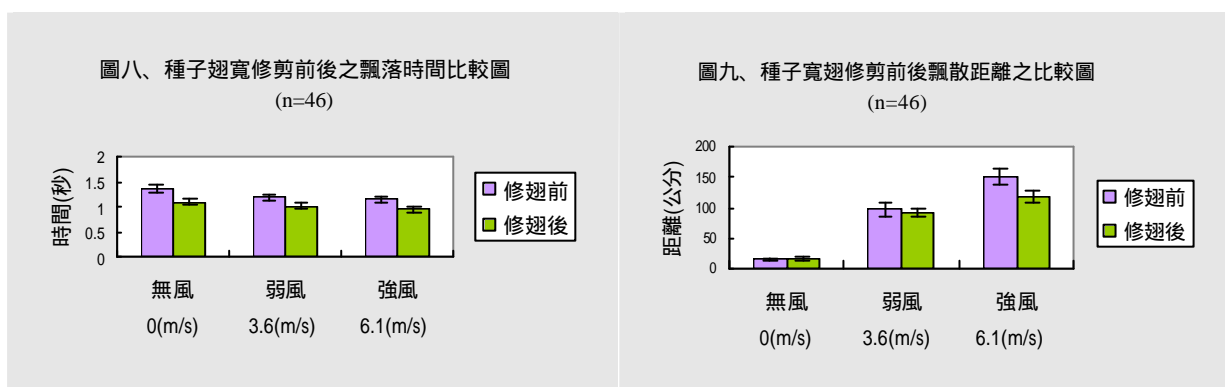
		種子形值			飄落時間(sec)			飄散距離(m)		
		質量(g)	長度(cm)	寬度(cm)	無風(sec)	弱風(sec)	強風(sec)	無風(m)	弱風(m)	強風(m)
種子形值	質量(g)	1								
	長度(cm)	0.58	1							
	寬度(cm)	0.53	0.36	1						
飄落時間 (sec)	無風(sec)	-0.62	-0.05	-0.21	1					
	弱風(sec)	-0.45	0.09	-0.07	0.72	1				
	強風(sec)	-0.57	-0.07	-0.26	0.73	0.63	1			
飄散距離 (m)	無風(m)	-0.41	-0.14	-0.24	0.26	0.13	0.15	1		
	弱風(m)	-0.66	-0.21	-0.32	0.53	0.42	0.47	0.41	1	
	強風(m)	-0.62	-0.16	-0.25	0.49	0.43	0.51	0.43	0.67	1

3. 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子剪翅前後飄落時間的均值差，結果顯示種子剪翅後，飛落時間顯著縮短($p<0.001$)，如圖六。
4. 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子剪翅前後飄散距離的均值差，結果顯示種子剪翅後，飛落之水平距離亦顯著縮短($p<0.001$)，如圖七。



(五) 種子的翅寬與散播

1. 不論風吹與否，種子翅寬與飛落時間無關或相關性低(表六)。
2. 不論風吹與否，種子翅寬與其飛落之水平距離亦無關或相關性低 (表六)。
3. 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子翅寬修剪前後飄落時間的均值差，結果顯示種子翅寬修剪後，飛落時間顯著縮短($p < 0.001$)，如圖八。
4. 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子翅寬修剪前後飄散距離的均值差，結果顯示種子翅寬修剪後，只有在強風的狀態下，飛落之水平距離顯著縮短($p < 0.001$)，在無風($t_{46} = -0.53$, $p = 0.30$)及弱風($t_{46} = 0.96$, $p = 0.17$)的狀態下，則無顯著差異，如圖九。



(六) 複直線回歸分析

1. 以複直線回歸分析種子的飄落時間與質量、翅寬(最大值)及全長的關係，可以得到幾條在不同風速下的回歸線方程式，經 F 檢定均達顯著水準($p < 0.001$)，顯示所得的回歸線(表六)都是有效的。

表六、以複直線回歸分析種子的飛落時間(y)與質量、翅寬及全長的關係

風強度	回歸線方程式	R ²	F	p
無風	$y = 0.697 - 1.66(\text{質量}) + 0.137(\text{長度}) + 0.146(\text{翅寬})^*$	0.54	53.4	<0.001
	可簡化為 $y = 0.889 - 1.543(\text{質量}) + 0.14(\text{長度})$	0.53	76.6	
弱風	$y = 0.558 - 0.955(\text{質量}) + 0.1(\text{長度}) + 0.143(\text{翅寬})$	0.42	32.4	<0.001
強風	$y = 0.863 - 1.03(\text{質量}) + 0.087(\text{長度}) + 0.023(\text{翅寬})^*$	0.42	49.5	<0.001
	可簡化為 $y = 0.894 - 1.008(\text{質量}) + 0.087(\text{長度})$	0.42	32.8	

註：*表示以 t 檢定之 p 值不顯著(>0.05)的變項，這些較不重要的變項，則可被刪除並將公式簡化。

2. 以複直線回歸分析種子的飄散距離與質量、翅寬及全長的關係，可以得到幾條在不同風速下的回歸線方程式，經 F 檢定均達顯著水準($p < 0.001$)，顯示所得的回歸線(表七)

亦都是有效的，但無風狀態下種子的飄散距離與質量的決定係數($r^2=0.18$)很小，顯示無風時種子的飄散距離之變異量受質量的影響很小。

3. 由以上結果得知，種子質量較輕、長度及翅寬較大者，飄落的時間及飄散距離較長。

表七、以複直線回歸分析種子的飄散距離(y)與質量、翅寬及全長的關係

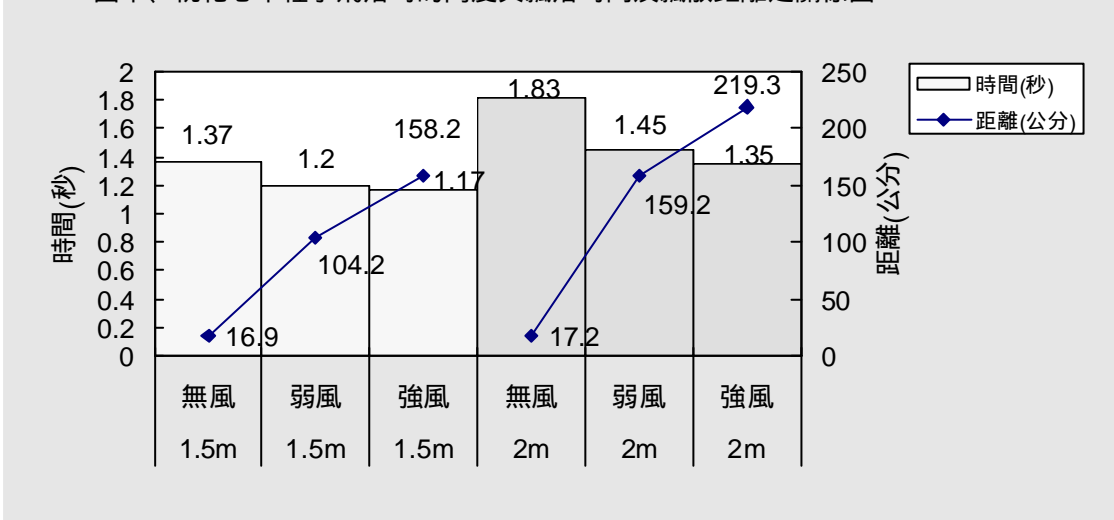
風強度	回歸線方程式	R ²	F	p
無風	$y=17.6-18.7(\text{質量})+1.04(\text{長度})*-1.11(\text{翅寬})*$	0.18	10.0	<0.001
	可簡化為 $y=22.2-16.2(\text{質量})$	0.17	27.3	
弱風	$y=87.9-168.8(\text{質量})+9.2(\text{長度})+3.6(\text{翅寬})*$ 可簡化為 $y=92.7-166(\text{質量})+9.3(\text{長度})$	0.48	41.1	<0.001
		0.48	62.0	
強風	$y=113.6-202.2(\text{質量})+12.2(\text{長度})+13.5(\text{翅寬})*$ 可簡化為 $y=131.3-191.7(\text{質量})+12.5(\text{長度})$	0.45	36.3	<0.001
		0.44	53.6	

註：*表示以 t 檢定之 p 值不顯著(>0.05)的變項，這些較不重要的變項，則可被刪除並將公式簡化。

二、風力與種子散播的關係

- (一) 種子於高度 1.5m 處落下，風強度愈強，種子飄落的距離愈長(ANOVA, $F_{2,456}=690.33$, $p<0.001$)，而飄落的時間則愈短(ANOVA, $F_{2,456}=28.01$, $p<0.001$)，且無風狀態下的飄落時間顯著高於風吹的狀況，如圖十。
- (二) 種子於高度 2m 處落下，結果與(一)相同，如圖十。
- (三) 即使種子經增重、修翅或剪翅處理後，結果仍是與(一)相同，如圖二至圖七。

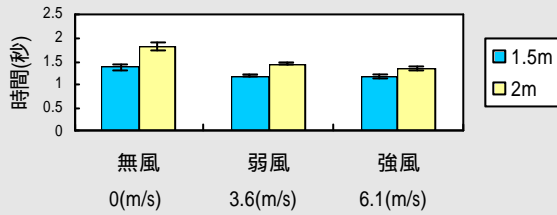
圖十、桃花心木種子飛落時的高度與飄落時間及飄散距離之關係圖



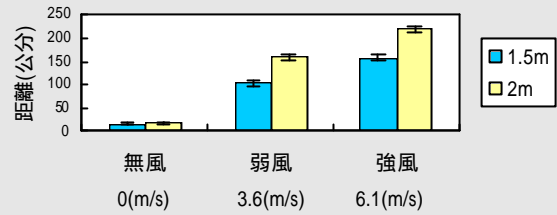
三、果實著生之高低與種子散播

- (一) 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子於高度 2m 及 1.5m 處落下的飄落時間均值差，結果顯示其飄落的時間有顯著差異($p<0.001$)。種子於高度 2m 飄落的時間顯著多於高度 1.5m 者(圖十一)。

圖十一、種子飄落時間與飛落高度、風強度之關係圖



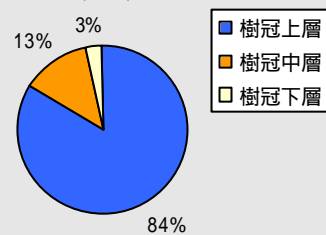
圖十二、種子飄散距離與飛落高度、風強度之關係圖



(二) 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子於高度 2m 及 1.5m 處落下的飄散距離均值差，結果顯示其飄落的距離在弱風及強風時有顯著差異(t 值分別為 $t_{140}=-15.68$, $t_{140}=-12.38$, $p<0.001$)，無風時則沒有差別($t_{140}=-0.39$, $p=0.35$)。在風的吹送下，種子於高度 2m 飄落的距離比高度 1.5m 者遠(圖十二)。

(三) 觀察果實著生的位置，發現果實(n=99)皆著生於莖頂(圖版十二)，其中大多分布於樹冠上層(83.84%)，13.13%分布於樹冠中層，分布於樹冠下層者則很少(3.03%)，如圖十三，三個分層中的果實數量有顯著的差異($\chi^2_2=348.5$, $p<0.001$)。

圖十三、桃花心木果實著生位置之垂直分布比例 (n=99)



(四) 果實開裂後，仍可見到許多果實的種子附著在果實的中軸上(圖版十三)，中軸有五面，每一面皆有二排種子附著排列在一起，且互為鏡像對稱排列。種子的附著點皆位在薄翅的前端，且附著於果實中軸的上方(圖版十四)。

(五) 果實開裂方式是從基部縱向裂開，慢慢裂開至頂端而掉落，共裂成五片(圖版十五)，每一片裂片的下方是二排種子。

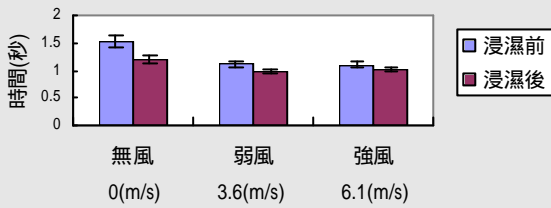
(六) 在果實開裂期間，我們觀察 55 個果實，結果發現有 76.4%的果實其果皮完全開裂掉落後，仍有種子附著在中軸上未飄散脫離，顯示果皮完全開裂掉落時不是種子散播飄飛的主要時機，多數的種子須藉外力(例如風力)始脫離母體散播開來，即使是一隻綠繡眼停在上面，種子依然附著在中軸上而未脫離(圖版十六)。

四、下雨對種子散播之影響

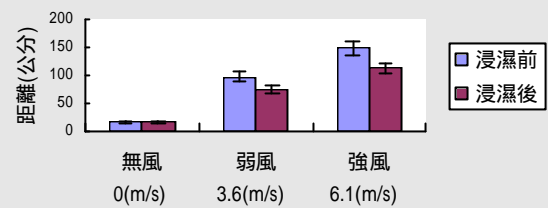
(一) 種子浸溼後增加的平均質量約占種子原平均質量的一半(49%)，愈輕的種子增重比例愈高($r=-0.927$, $p<0.001$)。

(二) 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子於浸溼前及浸溼後落下的飄落時間均值差，結果顯示其飄落的時間有顯著差異($p<0.001$)。種子於浸溼後飄落的時間顯著少於浸溼前者(圖十四)。

圖十四、種子浸溼前後之飄落時間比較圖(n=51)



圖十五、種子浸溼前後之飄散距離比較圖(n=51)



(三) 以成對的 t 值測驗單尾檢定種子於浸溼前及浸溼後落下的飄散距離均值差，結果顯示其飄散的距離在吹弱風及強風時有顯著差異(t 值分別為 $t_{50}=5.95$, $t_{50}=-6.40$, $p<0.001$)，無風時則沒有差別($t_{50}=-0.003$, $p=0.499$)。在風的吹送下，種子於浸溼後飄散的距離顯著少於浸溼前者(圖十五)。

(四) 在浸溼種子的過程中，我們發現種子都會漂浮於水面上，必須施力將其壓下才能浸入水中，此結果顯示桃花心木種子也有藉助水力漂流而散播的可能。

五、種子的萌芽率

種子置於生長箱中第 6 天開始萌芽，至第 10 天時，不照光的 A 組種子萌芽率為 30%(N=10)，照光的 B 組種子萌芽率為 72.7%(N=11)，B 組種子的萌芽率較高。由此結果得知，桃花心木種子在光照下萌芽率較高，其萌芽率可達七成以上；反之，在黑暗中則萌芽率低。

捌、討論

一、種子形態構造經長期演化而發展出許多有助於散播的特徵，歸納如以下幾點：

- (一) 種子的周邊發育成翅狀物，增加其表面積，猶如飛機之機翼有助於飛行，機翼面積加大，則飛行時的升力增加(羅天德，1981)，以抵抗重力的下拉作用。
- (二) 種子的翅平滑且薄，有助於降低空氣阻力；此外，翅表面平滑可減少水的附著，以降低重力的影響。
- (三) 種子外圍木質化的翅狀物內部是許多類似氣囊的構造所構成，使其質量很輕，也大大降低重力向下拉的作用，而有利於其飄飛散播。此外，氣囊也使得種子能漂浮於水面上，若遇地表逕流或其他水流，則有藉水力而散播之可能，甚至比風力散播更遠許多。
- (四) 種子形態呈流線型，翅的形態如鳥的羽翼或飛機的機翼，當種子旋轉飄飛時，厚的一邊先劃開空氣，根據伯努力定律(林明瑞，2002)，流經翅上方的空氣流速較流經翅下方的空氣快，造成上方的空氣壓力小於下方，而產生升力。
- (五) 飛機飛行時靠著機身二側機翼的上反角維持平衡(羅天德，1981)，桃花心木種子的翅也有上反角，雖是單翼，但或許是藉著種子飄落時自身的旋轉而維持平衡。
- (六) 種子形態似螺旋槳飛機的螺旋槳，外寬內窄且扭曲，當種子旋轉飄飛時翅表面的氣流發生的作用與飛機的螺旋槳旋轉時相似。相異點有二：
 1. 飛機的螺旋槳是靠發動機轉動才能旋轉，桃花心木的具翅種子則藉自身的形態與氣流的作用而旋轉。
 2. 飛機的螺旋槳是在垂直方向上旋轉，轉動時形成一股推力，使飛機向前推進(羅

天德, 1981); 桃花心木種子的翅則是在水平方向旋轉, 產生的力量是升力。

- 二、 種子飄落自旋時有二種穩定平衡的狀態, 顯示種子的形態相當特殊且有趣, 不論哪一種狀態, 種子都能藉穩定的自旋達到形成升力的效果。一般的飛行物體如鳥或各式飛機, 在失升或失去動力後即失事墜毀, 若能模擬桃花心木種子設計出一種雙穩定平衡的自旋體, 且應用在飛機墜落時使用, 將對飛航安全很有幫助。
- 三、 種子的形態有順、反二型, 互為鏡像對稱, 且比例為 1:1。這種多型性在開花植物中是可見的, 如報春花(*Primula veris*)的雌蕊和雄蕊高低有二型(Andrew, 1992), 雙型性(Distyly)在植物的 13 個不同的科中被發現到(John Maynard, 1989)。從果實中種子的生長排列方適來看, 中軸的每一面皆有二排種子附著排列在一起, 且互為鏡像對稱排列, 正好可以解釋順、反二型種子的比例為何恰為 1:1。從演化適應的角度來看, 左、右旋二型種子可能是強烈被天擇作用所選擇留下的形態, 介於此二型種子之間的中間形態種子, 可能在傳播適應上較為不良而被天擇作用所淘汰。從演化遺傳學的角度而言, 目前已有深入的研究發現, 報春花的雌蕊和雄蕊高低二型是受三個聯鎖不平衡(Linkage disequilibrium)的等位基因所控制, 這些基因稱為超基因(supergene), 其中一型的基因型 $T_1T_2T_3/t_1t_2t_3$, 另一型為 $t_1t_2t_3/t_1t_2t_3$ (John Maynard, 1989)。桃花心木種子的左、右旋雙型性是否也受超基因的調控, 待進一步研究。
- 四、 種子重量增加、翅長變短或翅寬變窄等, 會使得種子飄落時在空中停留的時間減少, 也能造成種子飄散的距離縮短, 但依風速而定, 尤其以強風較為明顯。其次, 以重量增加為例, 多數種子的重心位置會因此而下移, 且種子飄飛自旋時種翅與水平面的夾角也變大, 可能因此造成種子的飄落時間及飄散距離減少。由於種子的質量、長度等形值與重心位置有關, 所以改變種子的形態會導致種子重心位置的改變, 因而影響種子飄飛時的狀態(如自旋時種翅與水平面的夾角), 進一步影響其飄落時間及飄散距離。
- 五、 在種子上貼泡棉膠或將翅作修剪, 可能產生紊流或其他空氣動力學上的變因, 其影響的程度, 須進一步研究探討。本研究不論在種子上貼泡棉膠或將翅作修剪時, 已儘量將可能的改變(如質量、外形)降低, 以避免或減少其他變因的影響。
- 六、 由於影響種子散播的因子很多, 而且共同影響著種子的散播能力, 如重量、長度與翅寬等, 所以任選單一因子(如翅長)與種子的飄落時間或距離進行相關性分析, 往往難以看出其相關性。
- 七、 以複回歸分析種子的形值與飄落時間、飄散距離的關係, 顯示種子的飄落時間及飄散距離的變異量, 較易受種子本身的質量及長度影響, 受翅寬的影響較少。顯示種子的質量、長度及翅寬等因素, 對於其散播能力有不同程度的影響。以複回歸分析得到的幾條回歸線方程式, 可以將各種子本身的質量、長度及翅寬等變因代入公式中, 以精準預測在高度 1.5m、該風速下種子的飄落時間與飄散距離。
- 八、 依種子的飛落時間及飄散距離來看, 質量小的種子(0.18g 以下)較質量大的種子(0.2g 以上)能散播得遠, 但由於前者缺乏正常發育的種仁, 似乎散播得遠也無法正常萌發成長。此外, 由實驗結果得知, 桃花心木種子(0.2g 以上)在光照下萌芽率較高, 其萌芽率可達七成以上; 反之, 在黑暗中則萌芽率低。因此, 具正常發育之種仁的種子若能散播至較遠處, 除了可以減少與母株或其他成熟植株間有關土壤中水或無機養分等資源的競爭外, 還可避免因母株樹冠對於陽光的遮蔽, 而導致無法萌芽生長。
- 九、 種子飄落時, 若沒有風, 則幾近垂直飄落, 飄散的距離皆很短, 且不因飄落時在空

中停留的時間較久而較遠。反之，在風的吹送下，雖然飄落時在空中停留的時間會隨風增強而縮短，但飄散的距離卻是隨風增強而愈遠。所以，若沒有風的吹送，桃花心木的具翅種子只能飄落在母株下方；藉風的吹送則能飄散至他處。

- 十、種子飄落時在空中停留的時間愈久，愈有機會遇到風或更強的風的助播，因而愈有利於種子散播至更遠處。所以在無風或風力弱的時候，桃花心木種子飄落下降的速度較緩慢，有增加傳播機會的作用。
- 十一、種子隨風飄落較有機會散播得較遠，所以蒴果完全開裂後，種子應是迎風而飛離，若是風力太小或無，種子則不脫離，並靜待風力增強才散播。這種方式對藉風力傳播的種子是相當有利的，可以發揮良好的效果，桃花心木已演化出這種傳播策略。
- 十二、種子從較高處飄落較有機會藉風力散播得較遠，所以果實生長的位置愈高對種子散播遠處愈有利。桃花心木的樹高在 12 公尺以上，果實多分布於樹冠上層，其具翅種子在高度上具有藉風力傳播的良好條件。
- 十三、種子的質量很輕，即使表面平滑的翅可減少水的附著，但稍有一點水的附著則足以造成質量上的大幅增加，尤其是愈輕的種子增加的幅度愈大。種子於浸溼後因增加了水的重量，而導致落下的飄落時間明顯縮短，且藉風力飄散的距離也明顯縮短，顯示下雨會影響風力對桃花心木種子的助播。根據我們的觀察，桃花心木的果皮開裂期主要在三月，恰好可以避開四至六月的梅雨期，更不會受到七至八月颱風季節的影響。
- 十四、本研究希冀對於傳單的空投、單螺旋槳飛行器以及電扇的風葉設計等具有應用價值。

玖、結論

- 一、桃花心木種子須藉風力散播，較強的風力有助於其種子散播至較遠處。
- 二、在風力的吹送下，桃花心木種子的質量和長度對其散播能力有顯著的影響。
- 三、桃花心木的果實長得愈高，愈有利於其種子的遠播。
- 四、天雨會影響桃花心木種子的散播能力，種子飄飛的時間與距離受雨水淋濕而減少。

拾、總結

桃花心木不僅在種子的形態及構造上演化出有利於藉風散播的特徵，且發展出風至才飄散的策略，而其果實則是往高處長以利種子遠播。桃花心木種子的散播與風力及天氣關係密切，在沒有下雨而颶風的天氣下，是桃花心木種子飛散的良機，較有助於它們散播至遠處；而其散播的主要時期恰好在台灣的梅雨季來臨之前，以發揮較佳的傳播效果。

拾壹、參考資料

- 一、王文中，1998。Excel 於資料分析與統計學上的應用。博碩文化。507 頁。
- 二、林明瑞，2002。高中物質科學物理篇(下)。南一書局。280 頁。
- 三、李學勇，1985。植物的繁殖。圖文出版有限公司。24 頁。
- 四、沈明來，1993。生物統計學入門。九州圖書文物有限公司。412 頁。
- 五、施河，2002。高中生命科學(上)。南一書局。136 頁。
- 六、施河，2002。高中生物(上)。南一書局。253 頁。
- 七、楊勝任，2002。台灣具翅種子。國立屏東科技大學森林系。61 頁。
- 八、羅天德譯，1981。飛行。時代公司。204 頁。

- 九、 Andrew Cockburn , 1992。 An Introduction to Evolutionary Ecology. Blackwell. Pp.370.
十、 John Maynard Smith , 1989。 Evolutionary Genetics. Oxford. Pp.325.

拾貳、圖版



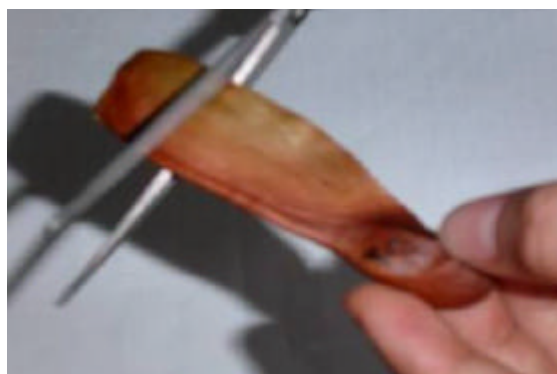
圖版一 實驗過程



圖版二 測量種子的飄落距離



圖版三 以風速計測量風扇的風速



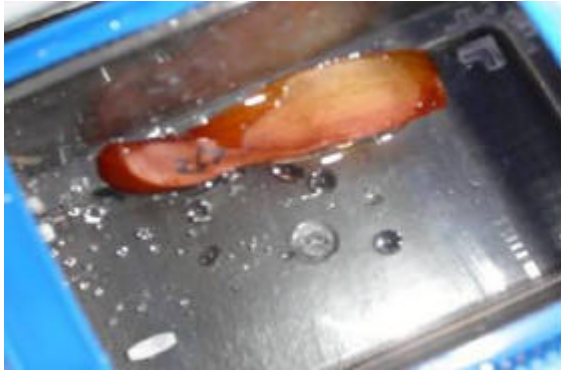
圖版四 剪翅示意圖



圖版五 種子黏上泡棉增重(側面)



圖版六 修剪翅寬示意圖



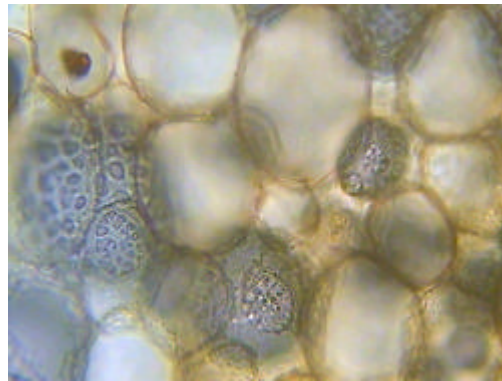
圖版七 種子浸水



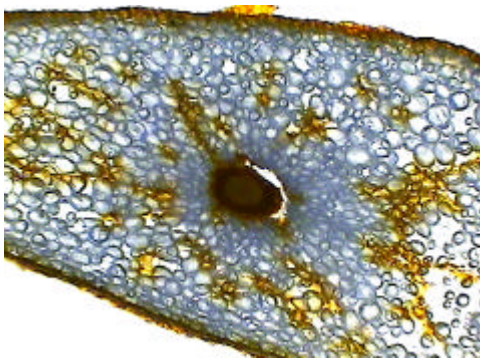
圖版八 測定重心位置



圖版九 左旋種子(上)及右旋種子(下)



圖版十 種翅內的氣囊



圖版十一 貫穿種翅內的木質脈



圖版十二 桃花心木的果實多長在枝頂



圖版十三 蒴果開裂後種子仍黏附在中軸



圖版十四 果實中軸上方為種翅的附著點



圖版十五 果皮從基部縱向開裂成五片



圖版十六 綠繡眼站在種子上