

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 生物科

最佳創意獎

030320

粗細之尖！植物根的吸水力！

—探討植物萌芽生長過程對土壤含水量之影響

學校名稱：彰化縣立陽明國民中學

作者：  國二 許依婷  國一 李阡慧  國一 施春潯	指導老師：  蔡俊明  陳雅慈
---	-----------------------------

關鍵詞：土壤含水量、植物的根、電容

## 摘要

為了瞭解植物萌芽成長時根部與吸水的關聯，又因水分多寡會影響土壤的電容，本研究以探針電極測量土壤電容，發現水含量約 17-60%範圍內，土壤電容(C)與水土質量比值 $(\frac{M_{水}}{M_{土}})$ 有如下的關係： $C = -52.04 + 31.33 \times (1 + \frac{81 \times M_{水}}{3.5 \times M_{土}})$ ；藉此以櫻桃蘿蔔為觀察對象，發現根毛生長與土壤水分消耗量關係密切：從發芽開始到第 4 天，根毛數量及長度顯著增加，此時土壤水份消耗迅速；接著根毛退化、主根長大，水分消耗趨緩；第 12 天後，因側根長出根毛、葉面積變大，水份消耗又重新變多。以上觀察結果與預期一致，故利用探針電極測量土壤電容可反應植物消耗水分的狀況。藉由測量土壤電容，應可設計以植物生理變化為基礎的自動給水系統，其較之目前常見的定時自動灑水系統，更能幫助植物生長。

## 壹、研究動機


還記得八歲時，有一次我進到阿嬤的花園裡看到了生機勃勃的植物，阿嬤說每天都要按時給它們足夠的水，才能成長茁壯，這時我便對它們感到興趣，開始思索著、好奇著它們的吸水力。進入國中後，發現學校有許多剛種下的樹，但是卻修剪掉許多枝葉，生物老師說因為在移植過程根有受傷，吸水力變差，若不修剪枝葉，水分將會散失太多引起植物枯萎，因此再次引起我對根的興趣，想要進一步了解植物的萌芽成長與根部吸水的相關性，便找尋另外二位對生物有興趣的朋友開始了這次的實驗。

## 貳、研究目的

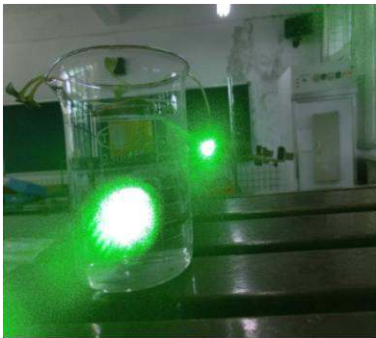




- 一、找出電容和水土質量比值的關係式
- 二、找出最佳方法去測量含水土壤的電容值大小
- 三、尋找櫻桃蘿蔔萌芽過程對土壤資源利用的最佳化條件
- 四、利用綠光雷射及顯微鏡觀察根的變化情形與並與水分減少量做比較

## 參、實驗器材與設備

### 一、主要材料

	<p><b>櫻桃蘿蔔</b> <i>Raphanus sativus</i></p> <p>習 性：一年生草本          生長室溫：15-25 °C          產 地：中國甘肅          公 司：翠筠有限公司</p>
<p>櫻桃蘿蔔種子</p>	

### 二、實驗儀器與器材：

		
<p>綠光雷射</p>	<p>解剖顯微鏡</p>	<p>複式顯微鏡</p>
		
<p>USB 數位顯微鏡</p>	<p>顯微攝錄機</p>	<p>顯微測微器</p>

		
電容計	鋅、銅片各一個	量筒
		
砂紙	直尺	植物生長箱
		
亞甲藍液	裝土的培養皿八個	塑膠袋與滴管
		
電子天平	雷射測距儀	護目鏡



## 肆、研究過程與方法

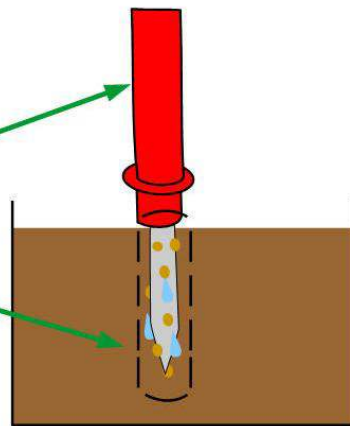
### 一、研究原理

(一)自行設計土壤含水量的測量方法：

1. 自行設計的土壤含水量偵測器係由互相平行、且分離的兩電極和電容計所構成。土壤含水量偵測器原理為量測兩探針電極間，水分滲入後造成電極間介質之介電係數變化，顯現在電容計的數據上，藉以量測周圍土壤含水量，**可有效偵測土壤含水量(水土質量比值)範圍在 16.65%~58.00%之間。**
2. 實驗裝置圖如下：



探針周遭形成介電場，其大小由吸附在探針表面的水土質量比例而決定，可近似於圓柱形電容。

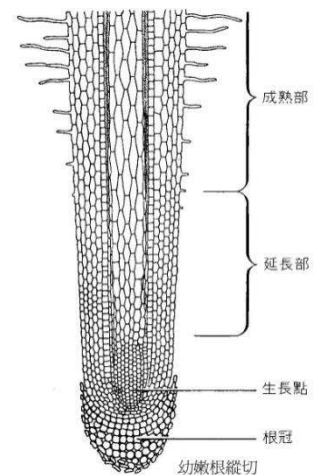


3. 利用測得的電容值，代入土壤和水的介電常數，可找出土壤含水量(水土質量比)和電容的關係，運用這關係式可以將觀察電容值的變化視為土壤含水量的變化。

(二)因為植物獲得水分，只能藉由根部吸收，所以先查閱根的資料，

下表為根的分區名稱及功能：

1.成熟部	根吸收水分和無機鹽的主要部位，密生根毛。 根毛：表皮細胞向外延伸的單細胞構造 →增加吸收的表面積。
2.延長部	細胞不分裂，細胞因吸水而延長增大→使根延長。
3.生長點	細胞較小，可分裂→遞補根冠和延長部的細胞。
4.根冠	保護生長點，與根的向地性有關。



圖片來源:

<http://210.60.246.140/bio/>

new\_page\_1811.htm

### (三)根毛的功能：

植物的根毛可以增加吸收水分與無機鹽的表面積，如碗豆的根毛可以使其根部面積增大 12 倍。根部表面積增大可使植物更充分地吸收土壤中水分與無機鹽，輸送至根的內部，再向上輸送到植物的莖和葉。根毛細胞細胞壁的外層物質還可以形成黏液，覆蓋在根毛表面。這些分泌的黏液中包含有機酸等多種物質，使土壤中難於溶解的鹽類溶解，成為容易被植物吸收的養分。

## 二、研究步驟

### (一)找出電容和水土質量比值的關係式：

1. 先秤空培養皿質量。再加入已乾燥 10 天的土壤。
2. 秤土壤和培養皿總重。
3. 用電容計測量此時土壤的電容。兩電極距離保持一致。
4. 逐次加水 10mL 並測量加水後的電容。
5. 記錄水土質量比值和對應的電容數據。
6. 將所得數據利用 OriginPro 軟體繪圖並用線性擬合，找出電容和水土質量比值的關係式。

### (二)找出最佳方法去測量含水土壤的電容值大小

1. 使用鋅銅片測量含水土壤電容值的流程(詳細流程照片參考[附錄一](#))

(1)兩金屬板固定距離與沒入土壤深度且平行放置，近似測量平行板電容，裝置如右圖。

(2)電容計正極(紅線探針)連接銅片、負極(黑線探針)連接鋅片。

(3)分別測量加水前後的電容值，紀錄之。



2. 改使用電容計的探針直接測量含水土壤電容值：

(1)兩圓柱形探針固定距離置入土中，近似測量圓柱形電容，裝置如右圖。

(2)分別測量加水前後的電容值，紀錄之。



### (三)尋找櫻桃蘿蔔萌芽過程對土壤資源利用的最佳化條件

1. 首先準備八個培養皿，分別種 1 顆、2 顆、3 顆、4 顆、5 顆、10 顆、20 顆、30 顆種子（示意圖如附錄二）。
2. 實驗架構流程圖如下

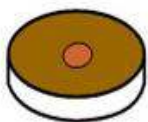

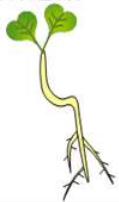


		
(1) 準備土壤裝入培養皿，置入種子。	(2) 在加水前後，使用探針測量電容。	(3) 在加水前後，使用鋅銅測量電容。

3. 為了控制生長時的環境因素相同，我們將我們將培養皿放置於植物生長箱生長，以下為生長箱的設定條件：
  - (1) 日照時間：上午 6:00--下午 6:00，共 12 小時
  - (2) 溫度設定 20°C。
  - (3) 濕度維持在 55%。



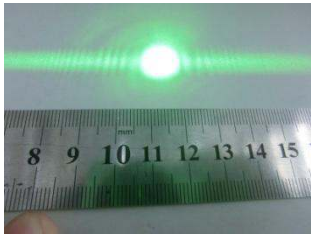

### (四)利用綠光雷射及顯微鏡觀察根的變化情形並與水分減少量做比較

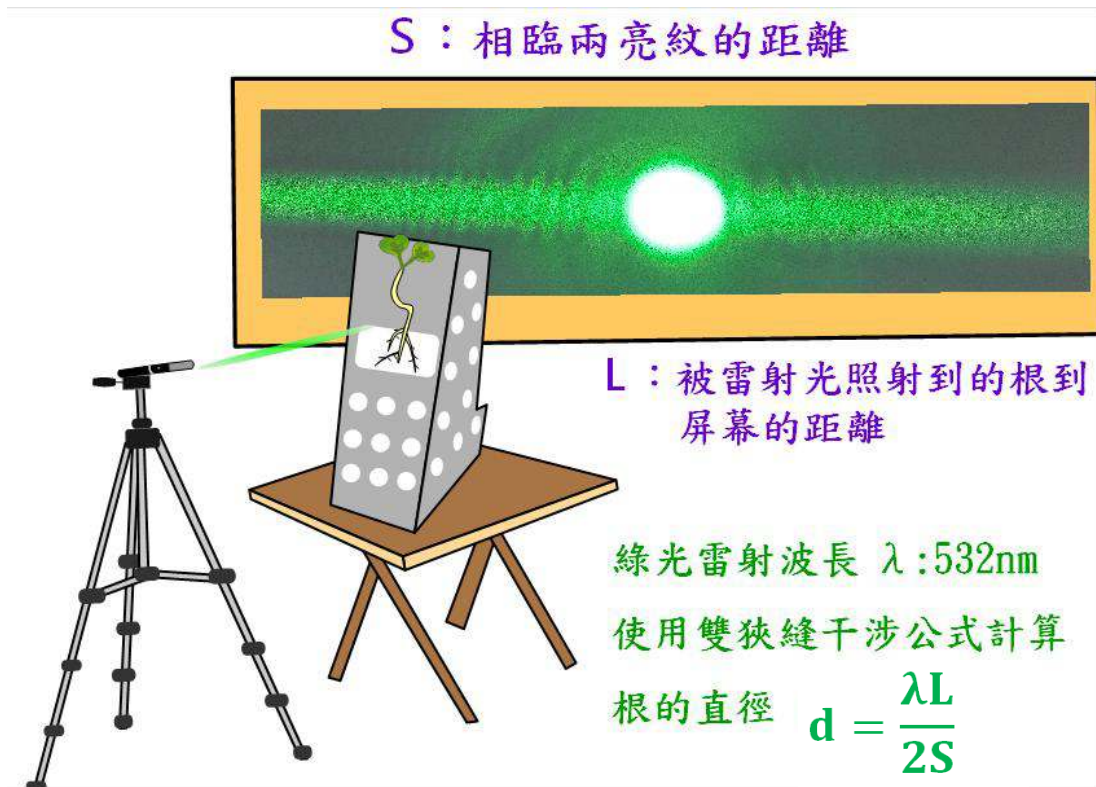
1. 藉由綠光雷射照到植物的根而發生的干涉條紋，計算出根的直徑。

- (1) 實驗架構流程圖如下表

	 鋅片      銅片	
a. 將種子放入裝滿土的培養皿中。	b. 分別在澆水 10 毫升前後，使用探針及鋅銅片測量電容值。	c. 數天之後，再將植物從土壤中拔起。
	 第二亮紋   第一亮紋   中央亮紋   第一亮紋   第二亮紋	
d. 再將雷射光打在剛拔出來的植物根上。	e. 屏幕上就會呈現光的干涉條紋，而利用根對光的干涉，可計算得知根的直徑。	

(2)本實驗藉由干涉原理，利用亮紋算出植物根的直徑，另外還發現植物根越細照射出來的每個亮紋的距離則比較長，所算出來的根直徑數據則較小，植物根越粗所照射出來的亮紋距離則短，所得的直徑數據也會較大。

		
<p>a.架設雷射光源。</p>	<p>b.雷射光照射植物根。</p>	<p>c.形成光的干涉條紋，用 ImageJ 計算相鄰亮紋距離 S。</p>
 <p>d.用雷射測距儀測量根到屏幕的距離 L。</p>	<p>e.將算得的數據代入雙狹縫干涉公式。</p> $d = \frac{\lambda L}{2S}$ <p>f. 重複步驟 a.~f.，過程如以下示意圖。</p>	


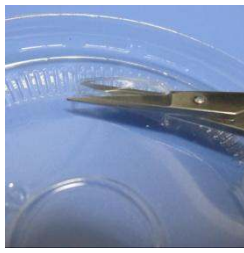



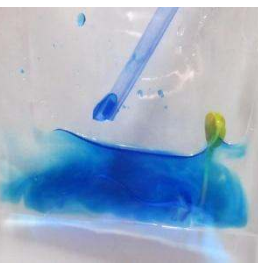
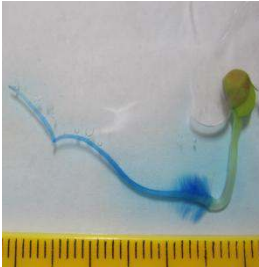
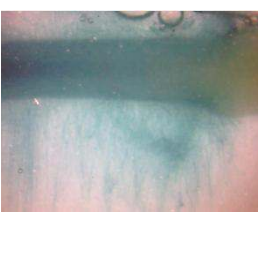




## 2. 顯微鏡觀察根的變化情形並與水分減少量做比較



(1) 因為將根從土壤拔起，根毛會斷掉，主根或支根也會受傷，所以改放於水面上使其萌芽。

(2) 實驗流程如下：

			
a. 取透明塑膠杯。	b. 將蓋子凹槽剪洞，方便讓種子泡到水。	c. 裝滿水，蓋上蓋子，將種子放在凹槽。	d. 觀察萌芽不同天數中，根在水中的生長情形。
			
e. 透明塑膠袋裝水，將根取出，放在塑膠袋中拍照。	f. 可用亞甲藍液染色	g. 將染液吸出，換上乾淨的水。	h. 放在 USB 數位顯微鏡、解剖和複式顯微鏡下觀察。

(3) 用 imageJ 分析軟體分析主根、側根、根毛的長度及表面積的變化。

(4) 用 imageJ 分析軟體分析葉子面積的變化。步驟如下：

<p>a. 將葉子平鋪於 A4 紙上。</p> <p>b. 放上直尺當比例尺。</p> <p>c. 用數位相機拍照。</p> <p>d. imageJ 分析軟體將影像改為 8-bit。</p> <p>e. 計算葉片面積。</p>		
	照片	8-bit 影像

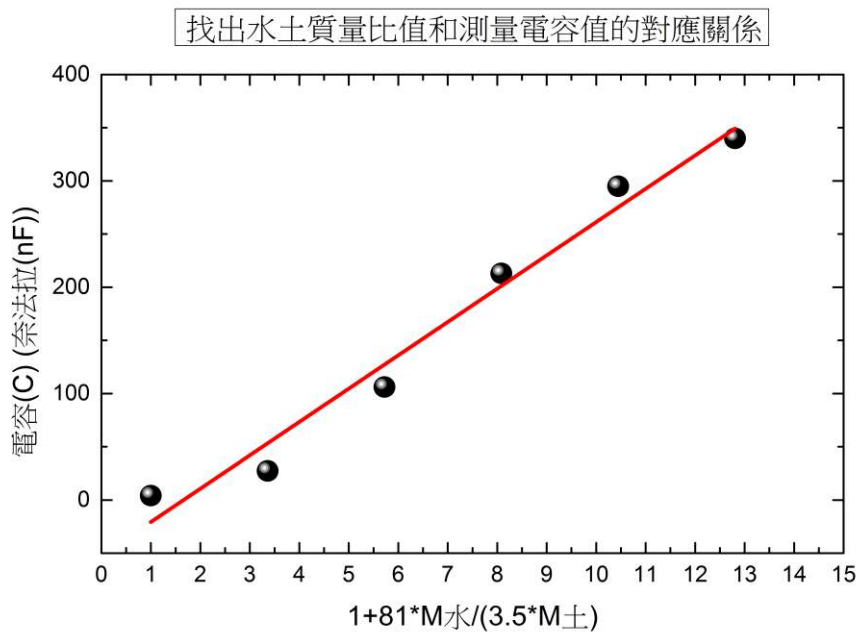
## 伍、研究結果

### 實驗一、找出電容和水土質量比值的關係式

(一)此盆土質量 147 克(乾燥 10 天的土壤 98 克、壓克力容器 49 克)

用探針當電極測量電容時，探針可以全沒入土壤之中，這時測到的電容，主要跟土壤與水分的介電常數有關，水的介電常數為 81，土壤為 3.5。土壤中的空氣影響小，可以忽略。從原理得知電容和 $[1+81 \times M_{\text{水}} / (3.5 \times M_{\text{土}})]$ 成正比，於是我們畫出圖 5-1，得到電容和 $[1+81 \times M_{\text{水}} / (3.5 \times M_{\text{土}})]$ 的關係式：

$$C = -52.04 + 31.33 \times \left(1 + \frac{81 \times M_{\text{水}}}{3.5 \times M_{\text{土}}}\right)$$



Equation	$y = a + b \cdot x$		
Weight	No Weighting		
Residual Sum of Squares	2351.93143		
Pearson's r	0.98795		
Adj. R-Square	0.97005		
	Value	Standard Error	
電容(C)	Intercept	-52.04429	19.62537
	Slope	31.33	2.45457

水土質量比值和電容的關係式

$$C = -52.04 + 31.33 \times \left[1 + \frac{81 \times M_{\text{水}}}{3.5 \times M_{\text{土}}}\right]$$

圖 5-1 電容和 $[1+81 \times M_{\text{水}} / (3.5 \times M_{\text{土}})]$ 的關係式

(二)以此公式算出 (水的質量/土壤質量)，如表 5-1 所示，實際值與計算值十分接近，故測得土壤電容就可以算出土質質量比，從而知道其中水含量。

表 5-1 比較水土質量比值的實際值及由公式計算值

物理量 (單位)	加水體積(ml) 加水質量(克)	電容(C) 奈法拉(nF)	M 水/M 土	
			實際值	公式算出值
備註 次數	1ml→1 克			
1	0	4.1	0	0.03422
2	10	27.3	0.10204	0.06621
3	20	106.1	0.20408	0.17489
4	30	213	0.30612	0.32233
5	40	295	0.40816	0.43542
6	50	340	0.5102	0.49749

## 實驗二、找出最佳方法去測量含水土壤的電容值大小

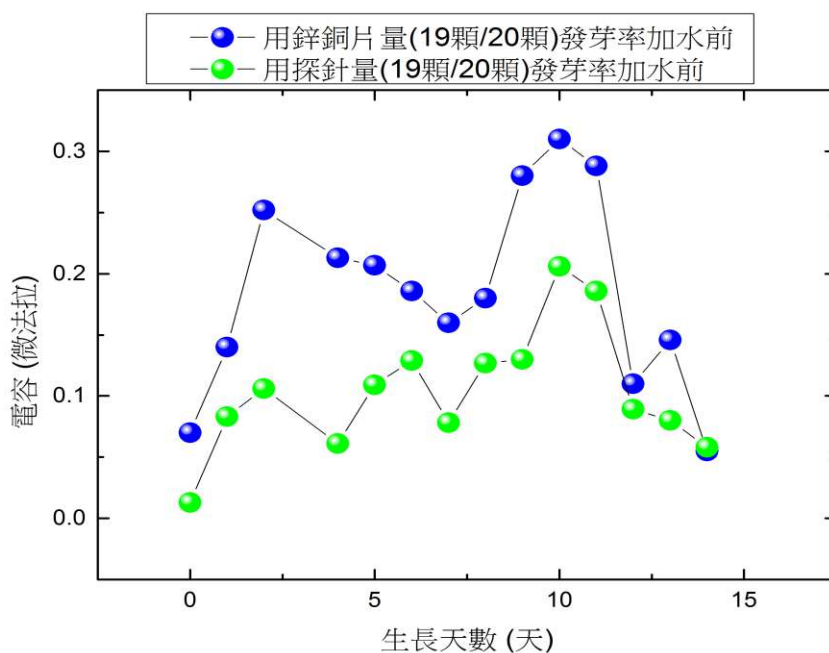


圖 5-2 比較使用鋅銅片和探針電極在加水前的土壤電容值

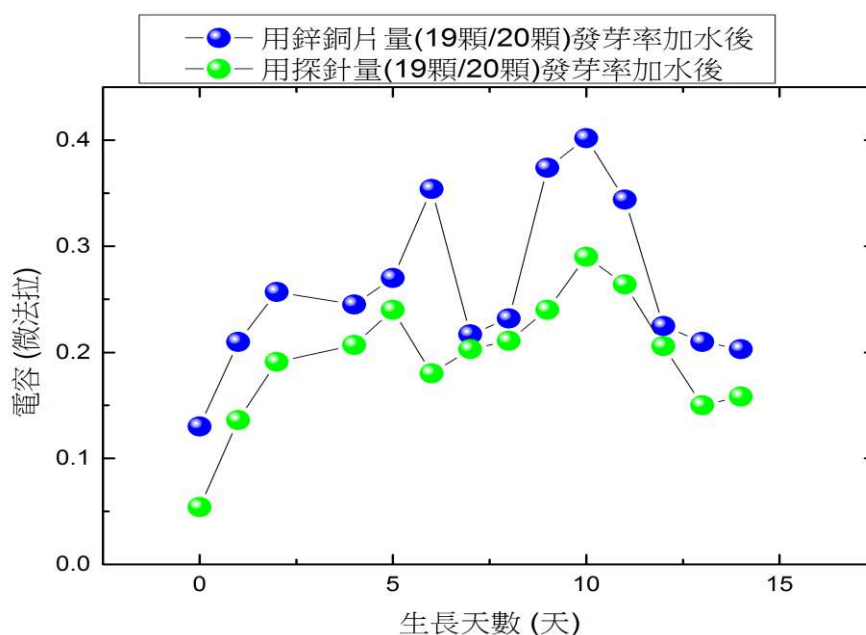


圖 5-3 比較使用鋅銅片和探針電極在加水後的土壤電容值

(一)根據圖 5-2 和 5-3，發現使用鋅銅片皆可提升土壤的電容值，所得數值皆高於使用探針所測得。

(二)使用鋅銅片和探針電極測量電容所呈現的變化趨勢相似，但最後我們決定使用探針電極，原因詳見[討論二](#)。



### 實驗三、尋找櫻桃蘿蔔萌芽過程對土壤資源利用的最佳化條件

(一)觀察植物生長過程並以照片記錄(附錄三)，從發芽、長根毛、到根變長、長葉子、長側根，測量生長過程中的電容值。

(二)使用電容計，測量土壤中的電容：

1.土壤中電容的減少量 = 前一天加水後的電容 - 今天加水前的電容

意義：電容減少量為正，表示水分和土壤的質量比減少，表示水分比前一天少。

若電容減少量為負，表示水分和土壤質量比增加，表示水分比前一天多。

因為實驗過程中每天加水 10mL，若加水量超過每天可由土壤散失和由植物吸收的水量總和，土壤中電容的減少量就會測到負值。

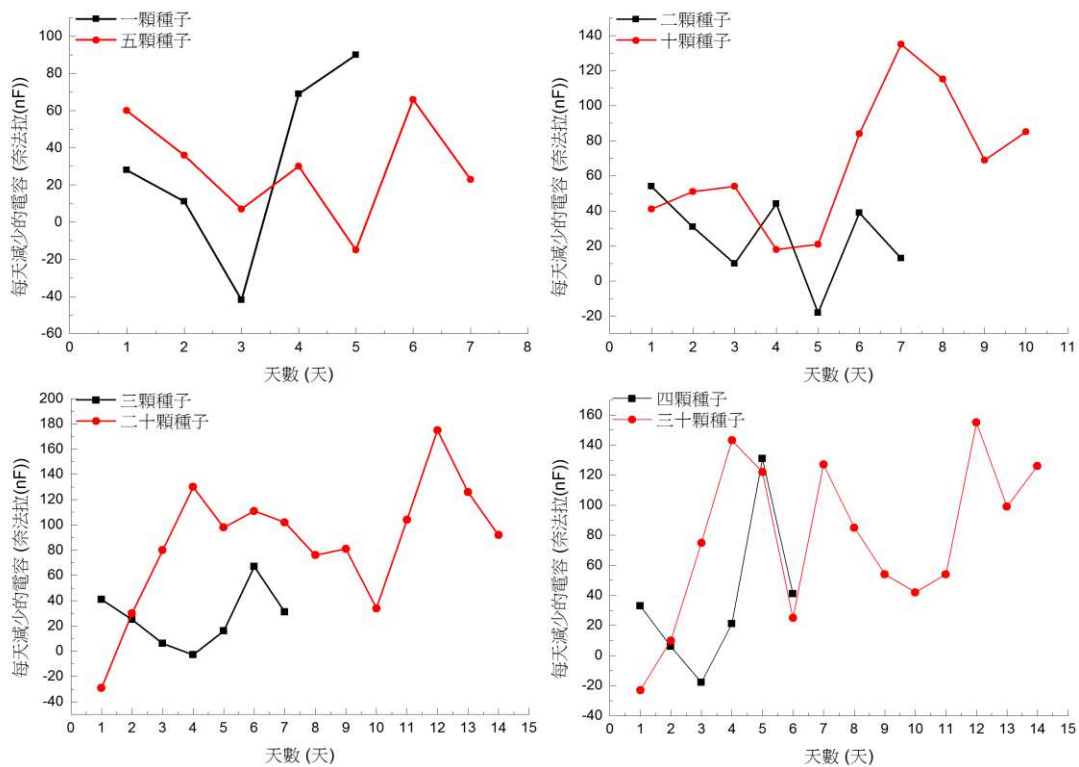


圖 5-4 比較不同種子數，不同生長天數下的電容減少值

(1)一顆到五顆種子的趨勢圖都是前三天至五天向下走，且出現負值，表示每天的給水量超過環境與植物對水的利用率。

(2)十顆種子的趨勢圖不會出現負值，但是前三天的走勢持平，四五兩天往下掉，直到第六天才快速揚升。

(3)二十顆和三十顆種子第一天土壤含水量不減反增(因為電容減少量是負),猜測是加進去的水一開始均勻分布,經過一天水會往種子周圍靠攏,才使測得的電容不減反增。前四天的趨勢向上,水分可以快速被種子吸收運用。

2.表 5-2 種子數量與萌芽數

種子數量	萌芽數量	萌芽率
20	19	95.0%
30	22	73.3%

(1)20 顆和 30 顆種子都可快速利用水資源,但萌芽數分別是 19 和 22 顆,萌芽數目多寡,除了水資源之外還受到土壤與有機物的影響。

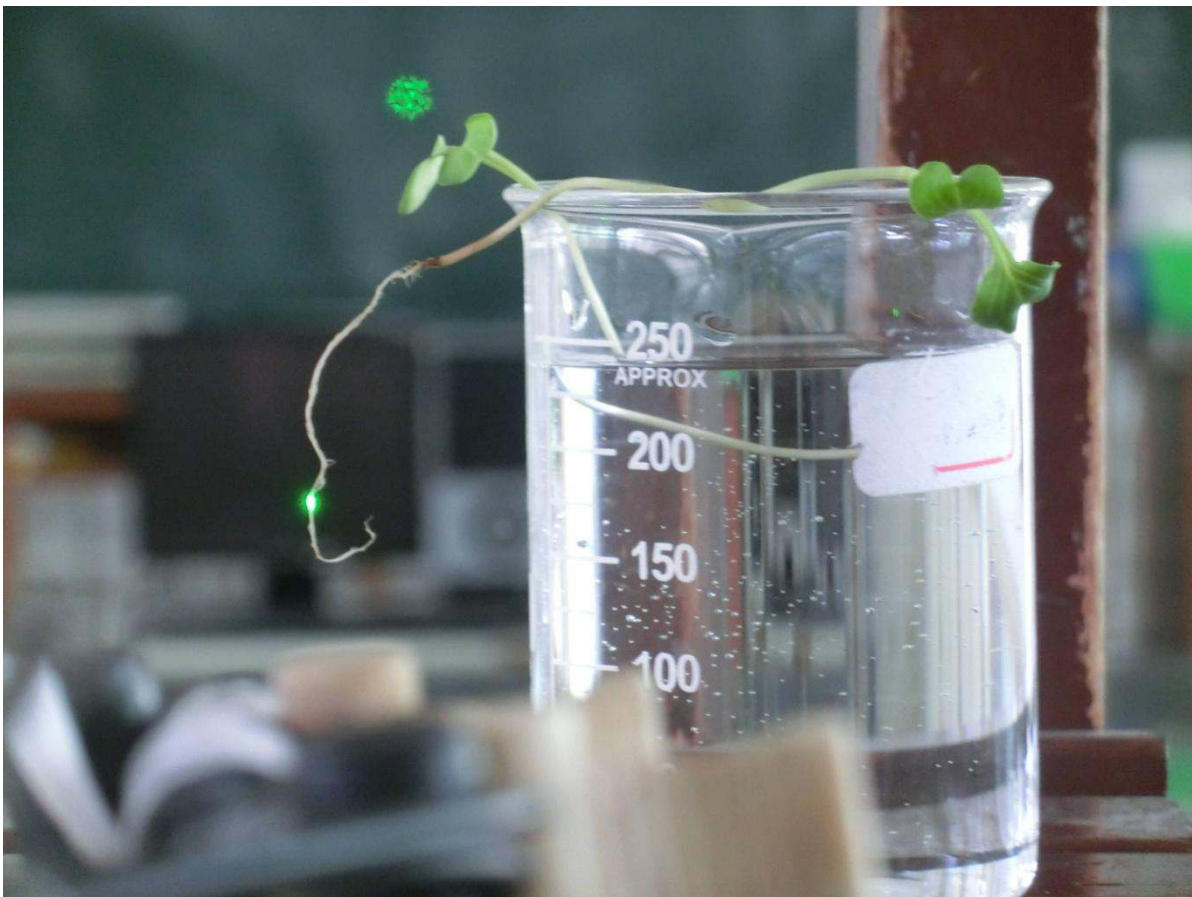
(2)由表 5-2 可判斷櫻桃蘿蔔萌芽過程對土壤資源利用的最佳化條件:土壤 100 克,水每天加 10mL,種子數目 20 顆。

#### 實驗四、利用綠光雷射及顯微鏡觀察根的變化情形並與水分減少量做比較

(一)利用綠光雷射測量根的直徑:使用雙狹縫干涉公式計算  $d = \frac{\lambda \times L}{2 \times S}$

表 5-3 利用綠光雷射測量根的直徑

從根尖由下往上測量根直徑	相鄰兩亮紋的距離 S(mm)	根到圖紋的距離 L(mm)	綠光雷射波長 $\lambda$ (mm)	根直徑 d(mm)
第 1 次	2.04	8394	0.000532	1.094511765
第 2 次	1.921	8394	0.000532	1.162313378
第 3 次	1.8797	8394	0.000532	1.187851253
第 4 次	1.833	8394	0.000532	1.218114566
平均				1.165697741



六條亮紋五個間隔總長度除以5，  
用ImageJ算出相鄰兩亮紋的距離S

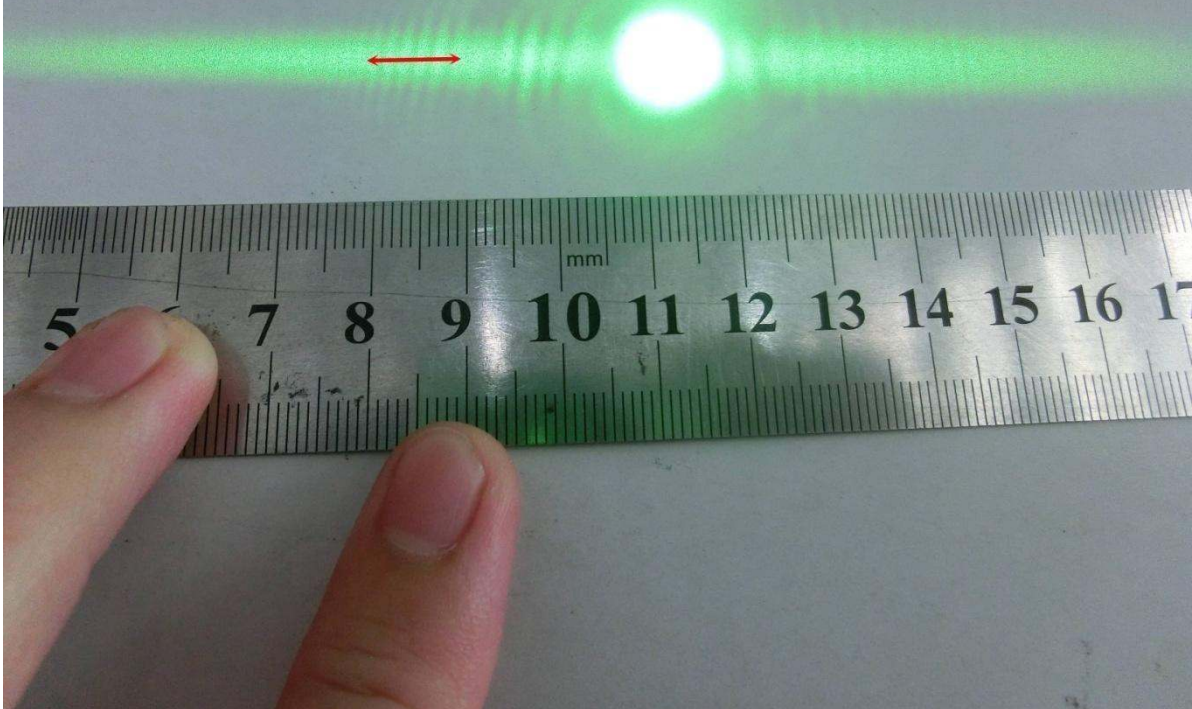


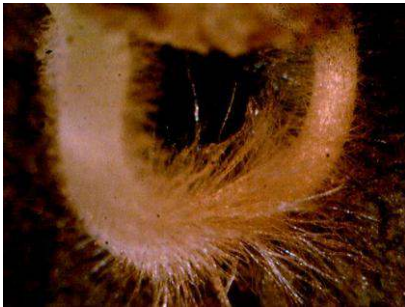
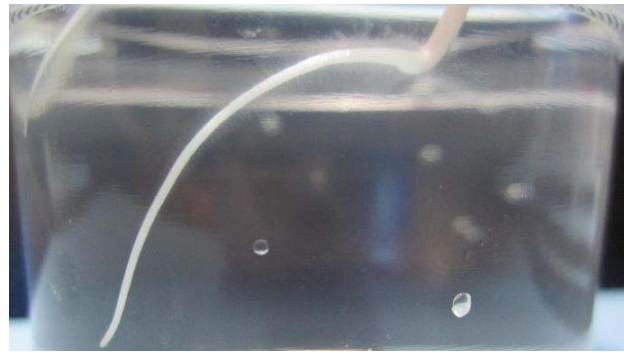
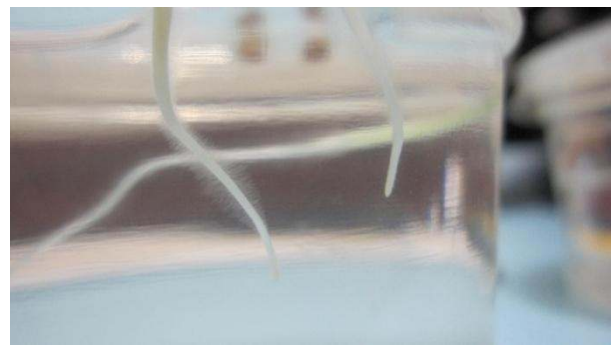


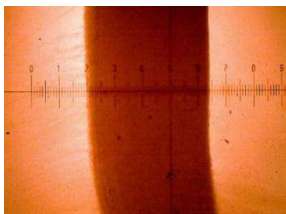
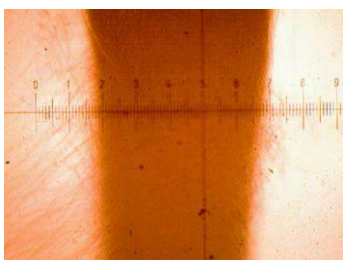
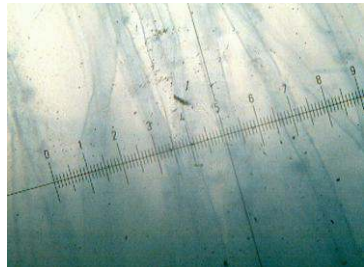
圖 5-5 雷射光從根尖由下往上，照射根直徑產生干涉條紋，計算相鄰兩亮紋距離 S



(二)表 5-4 根毛的生長(1-3 為種植在土壤)

		
<p>1.萌芽 2 天—數位顯微鏡 平灑於土壤表面，暴露在空氣中的根毛，特別長。</p>	<p>2.萌芽 3 天—解剖顯微鏡 愈往子葉的方向看，根毛愈短且愈粗。</p>	<p>3.萌芽 3 天—解剖顯微鏡 往根尖的方向看，根毛愈長且在空氣和土壤的交界面散開。</p>
		
<p>4. 灑在水盤上，發芽後可直接向下吸水，根長得較快，根毛雖較短，但分布廣。由上面兩張圖可明顯看到根的成熟部有明顯根毛，靠近延長部的成熟部也有明顯根毛。</p>		

(三)表 5-5 根毛及根直徑觀察及測量(詳細的照片參考附錄四)

<p>萌芽 3 天--根長 8.07mm</p>	<p>萌芽 7 天--根長 36.888mm</p>	
		
<p>複式顯微鏡 100 倍 成熟部根直徑約 <math>0.025\text{mm} \times 44 \text{ 格} = 1.1\text{mm}</math></p>	<p>複式顯微鏡 100 倍 成熟部根直徑約 <math>0.025\text{mm} \times 50 \text{ 格} = 1.25\text{mm}</math></p>	<p>成熟部根毛(複式 1000 倍-有染色)根毛直徑約 <math>0.0025\text{mm} \times 5 \text{ 格} = 0.0125\text{mm}</math></p>



(四)不同萌芽天數下，主根、側根與根毛的變化情形(詳細照片參考附錄五)，以下的紀錄與說明是將櫻桃蘿蔔放於水面上使根在水中生長的變化：

1.表 5-6：不同生長天數下，櫻桃蘿蔔根的長度及變化情形

萌芽天數	主根的長度	根的變化
第 1 天	3.57mm	萌芽長根，仍未長出根毛。
第 2 天	8.07 mm	根已出現明顯的根毛，。
第 3 天	11.05mm	最長的根毛已達 2.35mm，根毛分布長度 5.04mm
第 4 天	18.14mm	成熟部變長，根毛區變長、分布長度 13.97mm。
第 5 天	23.18mm	根毛分布長度 19.25mm
第 6 天	36.89mm	根毛分布長度 30.70mm
第 7 天	50.16mm	已開始長側根，根毛有些已經退化(如圖 5-6)。
第 8 天	71.54mm	根毛減少許多，慢慢長出側根，最長的側根長度 2.30mm。
第 9 天	75.52 mm	最長的側根長度 3.13mm。
第 10 天	80.22mm	最長的側根長度 4.57mm，側根開始長出根毛。
第 11 天	84.60mm	最長的側根長度 5.99mm
第 12 天	99.14mm	最長的側根長度 6.02mm

(1)主根生長的過程，約 2 天，在成熟部很快的生長出根毛，接著主根慢慢的生長變長，靠近延長部亦出現根毛。

(2)第 6-7 天，側根開始生長，但成熟部的根毛開始退化。側根長到一定長度後，在側根旁亦長出根毛。

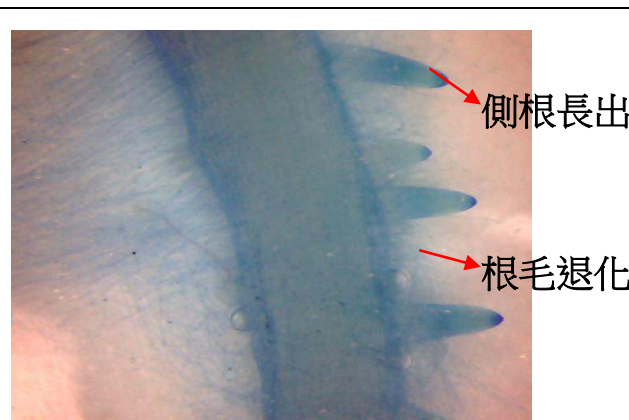


圖 5-6 USB 數位顯微鏡下(有染色)，側根與根毛之生長情形

2.根在水中生長(水耕)與在土壤中生長(土耕)的差異：

(1)水耕的根毛到第 6 天仍許多，第 7 天側根開始長出後，根毛才開始退化。土耕的根毛約第 4-5 天即開始退化，因為我們在此時將植物拔起，已發現有長一些側根。

(2)水耕的櫻桃蘿蔔根毛較土耕的旺盛。土耕的櫻桃蘿蔔側根較發達，應該較能有力地抓住土壤粒子。

### 3.主根、根毛及側根的截面積比較

(1)側根長出、根毛退化(圖 5-7、5-8)

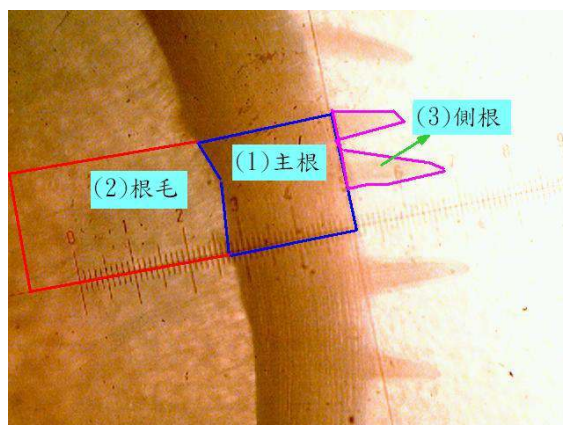


圖 5-7 側根長出,根毛退化(數位相機拍攝) 圖 5-8 根的成熟部、19 格/1mm  
(解剖顯微鏡 50 倍拍攝、有染色)

表 5-7 主根、根毛及側根的截面積比較一

	截面積	截面積增加為為原來的倍數
(1)主根	1.304mm <sup>2</sup>	(1)/(1) = 1
(2)根毛區	2.091 mm <sup>2</sup>	(1)+(2)/(1) = 2.604
(3)側根	0.405 mm <sup>2</sup>	(1)+(3)/(1) = 1.615
長出側根後減少的比率		(2)-(3)/(1) = 1.293

(2)側根生長變長後又長出根毛

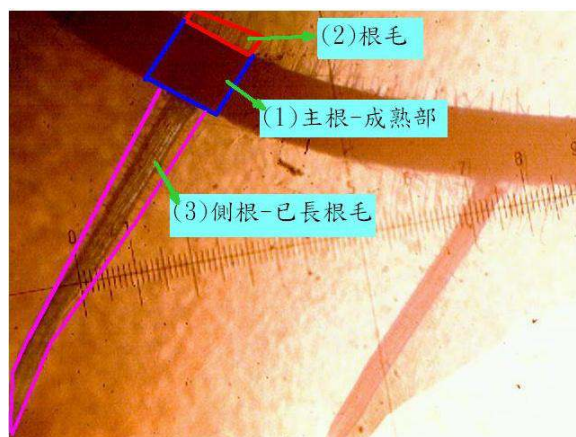
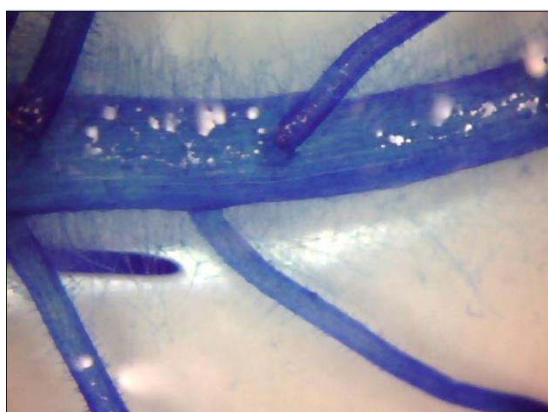


圖 5-9 側根長出根毛  
(USB 數位顯微鏡拍攝、有染色)

圖 5-10 根的成熟部、19 格/1mm  
(解剖顯微鏡 50 倍拍攝、有染色)

表 5-8 主根、根毛及側根的截面積比較二

	截面積	截面積增加為原來的倍數
(1)主根	0.455mm <sup>2</sup>	(1)/(1) = 1
(2)根毛區	0.113 mm <sup>2</sup>	(1)+(2)/(1) = 1.248
(3)側根+根毛	1.062 mm <sup>2</sup>	(1)+(3)/(1) = 3.334
長出側根後又長根毛增加的比率		(3)-(2)/(1) = 2.309

(3)圖 5-8、圖 5-10 是顯微鏡下所看到根的局部，且只有平面，以此法計算和真正的表面積會相差很大，但此方法仍能明顯看出：根毛的增加與減少對表面積影響很大，進而影響到根部吸收水分的能力。

(五)表 5-9 不同生長天數下，櫻桃蘿蔔葉面積的變化(詳細照片參考附錄六)

天數	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天
葉面積 mm <sup>2</sup>	0	47.37	60.83	94.602	109.75	130.22	143.79
天數	第 8 天	第 9 天	第 10 天	第 11 天	第 12 天	第 13 天	第 14 天
葉面積 mm <sup>2</sup>	145.41	162.21	183.53	292.68	316.22	326.91	<b>339.91</b>

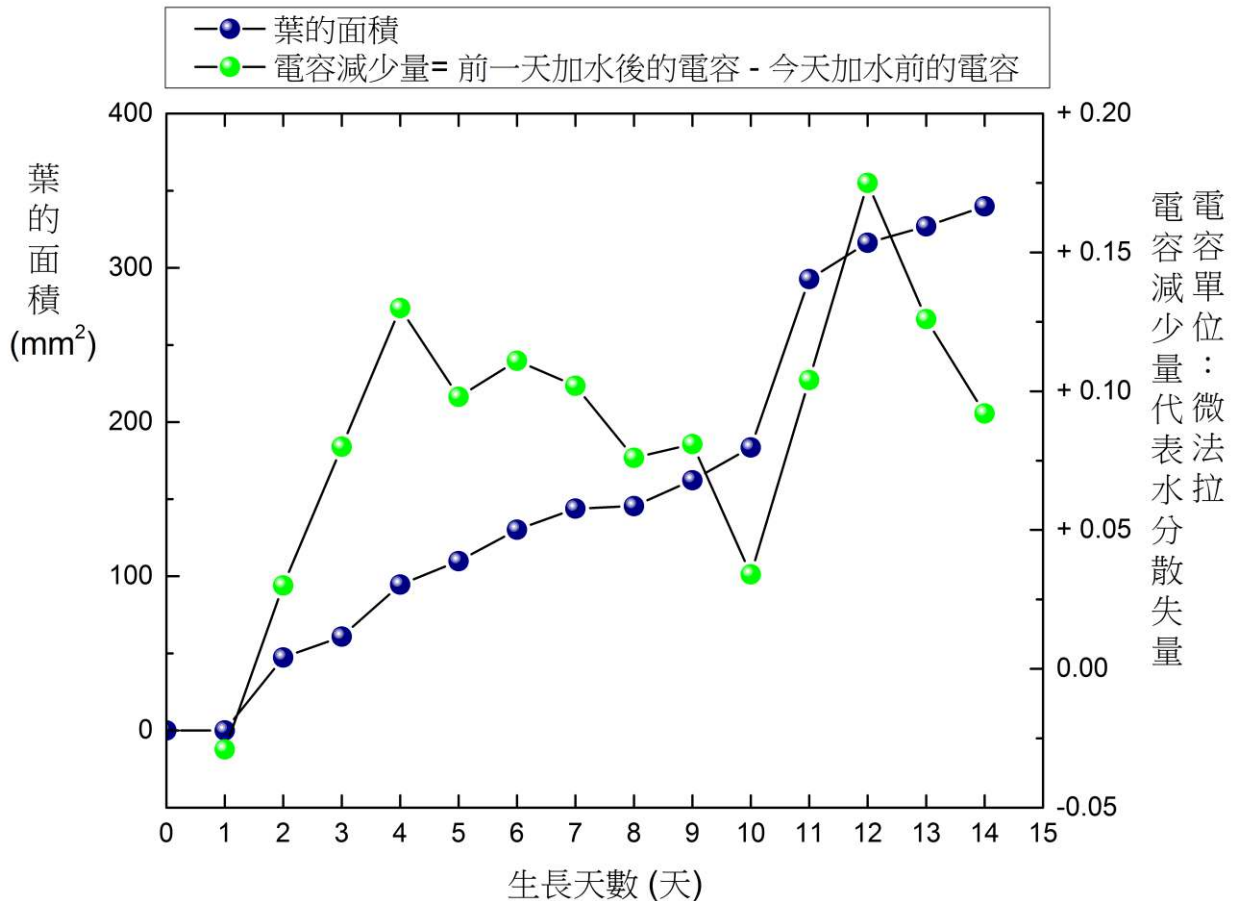


圖 5-11 不同生長天數下，葉面積與電容的關係圖

1. 第 1-4 天：葉面積增加，根毛生長速度很快，土壤中水分散失多。
2. 第 4-10 天：葉面積雖然有增加，但增加的比例不多，電容值的減少應該是根毛退化造成。
3. 第 10-14 天：除了葉面積變大，側根又長出根毛，所以水分散失的量又增加。

## 陸、討論

### 一、找出電容和水土質量比值的關係式

(一)找出關係式便能由土壤電容值得知含水量多寡。因為不同的土壤有不同的介電常數(3.5-4.2)，所以在應用此關係式時需根據不同土質作調整。

### 二、找出最佳方法去測量含水土壤的電容值大小

(一)用鋅銅量測有沒有比較好？好在哪裡？有，因為加了鋅銅片可以提升土壤的電容值，並且看出它的起伏變化減少誤差。可以由圖 5-2 和圖 5-3 觀察而得。

(二)使用鋅銅片，雖然有放大數值的效果，但是未沒入土壤中的鋅銅片會與空氣接觸而氧化，這樣會影響測量的準確性；且從測得電容換算土壤含水量時，雖可以用平行板電容公式做近似，但此時測量的電容除包含了吸附在金屬板表面的土壤和水的電容，還包括土壤上方與金屬板接觸的空氣之電容，使得換算土壤含水量時，就需要考慮和鋅銅片接觸的空氣，徒增換算上的複雜度。

(三)用探針電極也可以測量電容，得到電容變化的趨勢，使用上也較方便，所以我們決定直接使用電容計上的探針電極做測量，將它完全沒入土壤，就能免去暴露在空氣中的電極造成的影響。

### 三、尋找櫻桃蘿蔔萌芽過程對土壤資源利用的最佳化條件

(一)十顆以下種子的數據不採用，因為從實驗數據發現：

1. 一顆到五顆種子：前三天至五天向下走，且出現負值，表示每天的給水量超過環境與植物對水的利用率，顯示水資源過剩。
2. 十顆種子：第一天到第五天吸水能力弱，無法看出因為生長作用而影響土壤含水量，無法呈現本次實驗的重點，是故在土壤約 100 克的環境下，選擇 20 顆和 30 顆種子。
3. 二十顆和三十顆種子第一天土壤含水量不減反增(，猜測是加進去的水一開始均勻分布，經過一天水會往種子周圍靠攏，才使測得的電容不減反增。前四天的電容值趨勢向上，表示水可以快速被吸收利用。



(二)以本實驗設計的土壤環境，各取約 100 克的土，每天澆 10 毫升的水，各種 20 顆和 30 顆種子的發芽率來看，在有限的水和土壤的資源下，會局限植物生長的數量，初期 2~3 天 20 顆種子的發芽數較高，30 顆種子的發芽數較低，但是時間到七天以上，兩盆土的種子最大發芽數分別為 19 顆和 22 顆，這是這個土壤環境的最大資源運用，為了證明這個論點：我們又種了 37 顆和 51 顆，在 370 克有機培養土上，每天澆 30 毫升的水，結果發芽數分別為 26 顆和 27 顆，這又是這個土壤環境的最大資源運用一例。而且很明顯的，發芽率 26/37 的這一盆長得較快也較高。

(三)前一天加水後的電容減去今天加水前的電容，繪出每天電容的減少量，可以代表水分減少量，可得萌芽的不同時期對水的利用率不同。

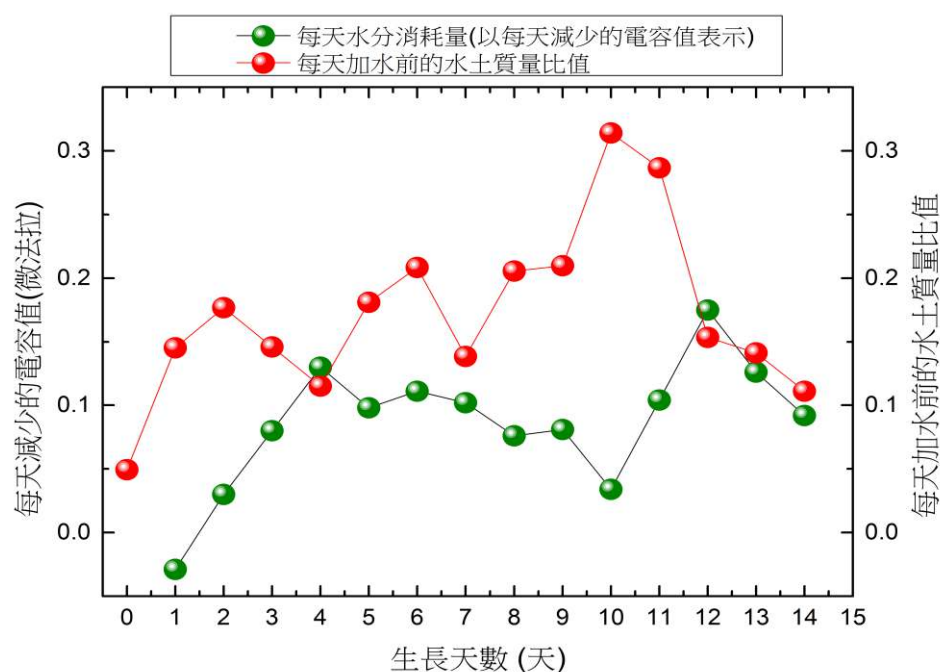
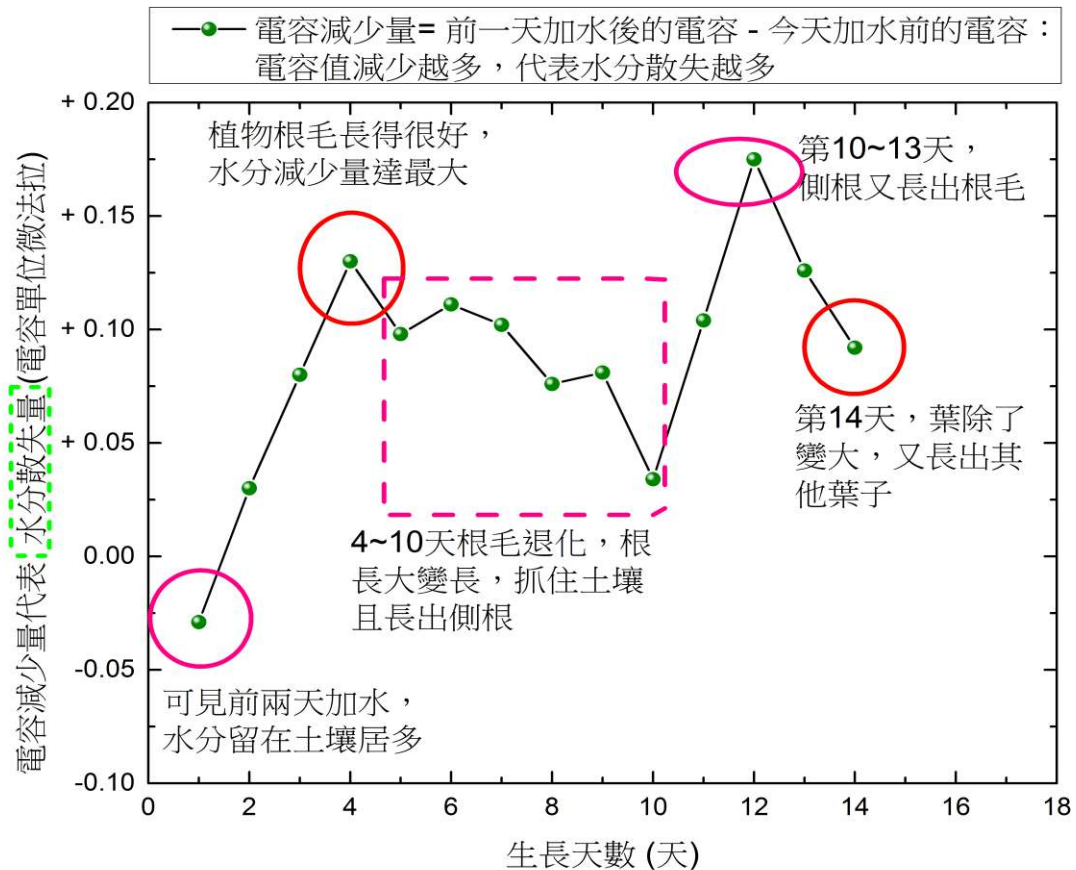


圖 6-1 萌芽的不同時期與電容的減少量、水土質量比值的關係

1. 第 2-4 天，每天電容減少量(即土壤中水分散失)趨勢向上，水土質量比值下降(水分散失多)，因為根毛在這三天生長很快，表面積增加許多，吸收水分的量增加，土壤中的含水量就下降許多。
2. 第 4-10 天，每天電容減少量趨勢向下，水土質量比值上升(水分散失少)，因為長出側根，根毛退化，吸收水分的量減少，土壤中的含水量就下降較少。
3. 第 10 天後，因側根長出根毛，加上葉變大，每天電容減少量趨勢向上，水土質量比值下降。



以20顆櫻桃蘿蔔種子萌芽生長過程為例：  
可觀察到水分散失量隨生長天數而變

圖 6-2 植物萌芽的不同時期與水分的散失關係

(四)根據圖 6-2，整體上來看，櫻桃蘿蔔種子生長過程，前四天左右水分吸收量最大時，根毛也最茂盛，而一天的土壤水分散失最高可高達 130 nF，代入我們自行推算出的電容對應水土質量比值的公式之中，可以推算出土壤水分散失最高可高達 20%。接著因為根毛退化，5~10 天的水分利用率處於下降的過程；後來因為側根又長出根毛，表面積又再增加，再加上葉子長大，光合作用很旺盛，10~13 天的土壤水分利用率又再次上升，到第十二天當天，電容值測水分散失可以高達 175nF 左右，換算成土壤水分散失可高達 27%左右。以櫻桃蘿蔔為例，我們可以在水分散失量較高的生長過程中，澆較多的水，也就是前四天、11~13 天。

#### 四、利用綠光雷射及顯微鏡觀察根的變化情形與並與水分減少量做比較

- (一) 由於雷射光線的寬度大於被照射的植物根，因此經過根的直徑邊緣的兩束光線，會在根後方形形成干涉條紋，其效應與雙狹縫干涉相似。利用光的干涉可以快速地得到植物根的直徑，與顯微測量結果相近。
- (二) 最初我們有使用藍光雷射筆，但成效較不好，後來採用綠光雷射筆，可以清晰的看到亮紋，方便計算出根的直徑。
- (三) 為了瞭解根及根毛的變化，我們將植物從土壤拔起，除了根會受傷，根毛幾乎全斷，所以我們將種子放於水面上，可觀察到根萌芽後，成熟部很快的長出較長的根毛，隨著根生長變長，靠近延長部的成熟部也長出較短的根毛，吸收水分的表面積增加許多，剛好可對應到圖 6-2 的第 1-4 天：水分的利用增加；接著因為側根的長出，該區根毛退化，雖然根仍持續生長變長，但表面積下降許多，對應到圖 6-2 的第 5-10 天：水分的利用率減少；最後因為側根又長出根毛，表面積再增加許多，加上葉片變大、數量增加，蒸散作用及光合作用旺盛，水分的利用又再次增加。
- (四) 觀察櫻桃蘿蔔種子萌芽，發現若根一開始未能向下扎到土壤，在土壤和空氣的界面很容易觀察到根毛，且伸展得很長，就像要盡最大全力吸住土壤和水一樣。我們觀察到生長七天的櫻桃蘿蔔，莖已長到 9 公分，一株直立高挺，另一株平躺，發現平躺的那一株，根毛仍很旺盛，可是直立高挺的那一株已不見根毛，我們推論：根毛初期雖是吸水為主，但可能還有其他功能，就是抓住土壤，因為根毛旺盛處都集中在莖根交界處，且特別長；當莖可以直直挺立時，根毛即開始退化，但是當莖已長到 9 公分，卻仍立不起來時，根毛就不退化，以確保此株有機會在未來抓住土壤而能站立。
- (五) 本實驗也發現根在水中生長(水耕)與在土壤中生長(土耕)的差異：
1. 水耕：主根的生長速度快，根毛生長的時間較長，較慢退化，但根毛的長度較短，可能是在水中生長不需克服土壤的阻力，側根也較慢長出。
  2. 土耕：主根的生長速度較慢，一開始為了有效吸收水分，根毛會長得較長，方便吸收土壤或空氣四周中的水，而側根較快長出，因為較能有效的抓住土壤粒子，使莖直立。

## 柒、結論

一、以探針電極可測量土壤電容，在水含量約 17-60%範圍內，土壤電容(C)與水土質量比值

( $\frac{M_{\text{水}}}{M_{\text{土}}}$ )有如下的關係： $C = -52.04 + 31.33 * (1 + \frac{81 * M_{\text{水}}}{3.5 * M_{\text{土}}})$  或

$\frac{M_{\text{水}}}{M_{\text{土}}} = (\frac{C+52.04}{31.33} - 1) \times \frac{3.5}{81}$ ，電容值會和加水量成正相關，利用此點，觀察電容值

就可知道土壤的含水量。

二、以櫻桃蘿蔔種子萌芽成長為例，土壤含水量的變化主要是先受到根部和後來葉子生長的影響。此研究可以應用於設計以植物生理變化為基礎的自動給水系統，也就是將電容器設計成水分偵測器，加裝於自動灑水器，適時地幫助植物生長。

## 捌、參考資料

一、干涉還是繞射？雷射光圖形的解碼 金門地區 52 屆中小學科學展覽會作品說明書

二、楊清富(2013 年 3 月 87 期) 土壤水分感測技術及應用 期刊 區農業專訊 (台南)

三、楊弘倫(2004 年 6 月)時域反射儀應用於土壤含水量及地下水監測技術中央大學土木工程研究所 碩士論文(第 22 頁)

四、沈建華 (2008 年 4 月 11 日) 雷射干涉儀原理與應用 簡介 PMC 財團法人精密機械研究發展中心

五、Root Hairs in Plants 網路媒體

<http://education-portal.com/academy/lesson/root-hairs-in-plants-function-definition-quiz.html>

六、王朝網路 (2011 年 12 月 9 日) 介電常數的定義 網路媒體

[http://www.wangchao.net.cn/xinxi/detail\\_932405.html](http://www.wangchao.net.cn/xinxi/detail_932405.html)

七、徐尚群 (2005) 光的干涉與繞射 文章報告 國立武陵高級中學

八、土壤的濕度 (2013 年 2 月 11 日) 網路媒體 <http://baike.baidu.com/view/542722.htm>

九、新化高中生物網路教室 根毛的觀察 網路媒體



[http://210.60.246.140/bio/new\\_page\\_1811.htm](http://210.60.246.140/bio/new_page_1811.htm)

十、Hamid Rarahani , Rahman Wagiran and Mohd Nizar Hamidon, Humidity Sensors

Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review , Sensors

2014, 14, 7881-7939.

十一、 蔡穎睿, 相對溼度計原理 <http://amebse.nchu.edu.tw/documents/2005%20train/rh.pdf>

十二、 感測器溼度計

[http://www.hvac-net.org.tw/CKEdit/upload/files/%E6%84%9F%E6%B8%AC%E5%99%A8\\_%E6%BF%95%E5%BA%A6%E8%A8%88.pdf](http://www.hvac-net.org.tw/CKEdit/upload/files/%E6%84%9F%E6%B8%AC%E5%99%A8_%E6%BF%95%E5%BA%A6%E8%A8%88.pdf)

十三、 陳孟逸, 曾士華, 電容式濕度感測電路之實作與探究

<http://www.shs.edu.tw/works/essay/2010/11/2010111216023283.pdf>

十四、 Capacitive Humidity Sensor Elements

<http://www.epluse.com/en/products/humidity-instruments/humidity-sensor/>

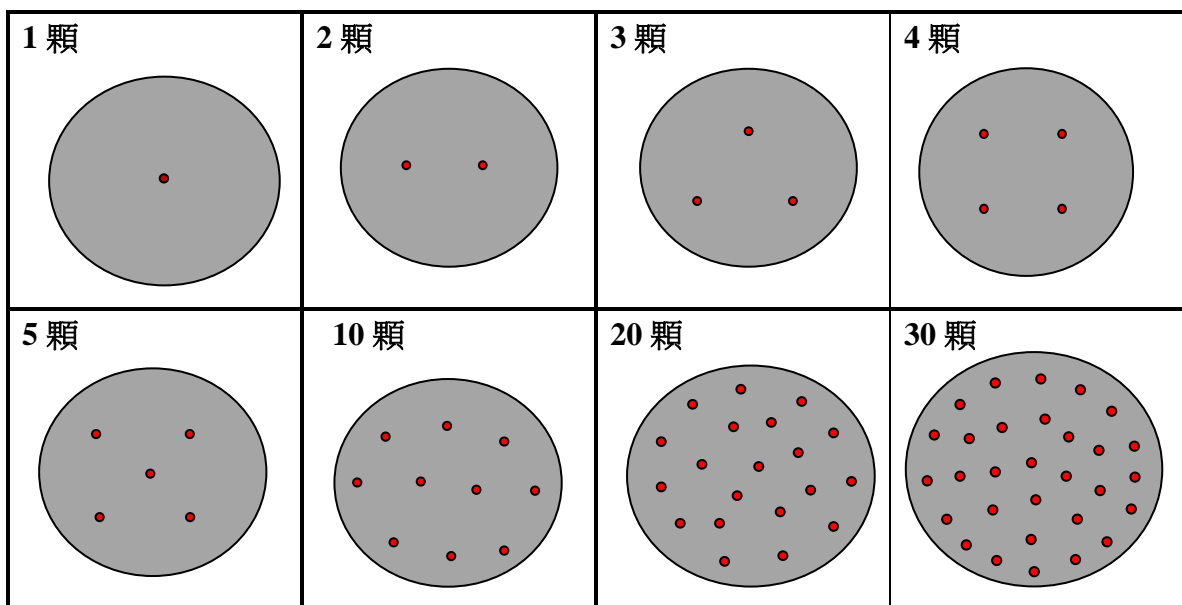
十五、 Hygrometer <http://en.wikipedia.org/wiki/Hygrometer>

## 玖、附錄










### 一、鋅銅片面積、沒入土壤高度與電容之測量

			
1.直尺測量銅鋅的長	2.直尺測量銅鋅的寬	3.將銅片插入後，用紅色奇異筆標記，拿直尺算得 8mm。	4.用砂紙刮磨氧化層，放置土壤中。
			
5.將電容計尺規調到 2 微法拉	6.再將紅線探針放置於正極銅片，黑線則放於負極鋅片	7.用探針測量乾燥時電容	(3)加水後，同步驟 1、2、3

### 二、八個培養皿，平均分配種子的位置示意圖。

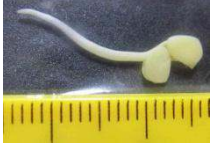
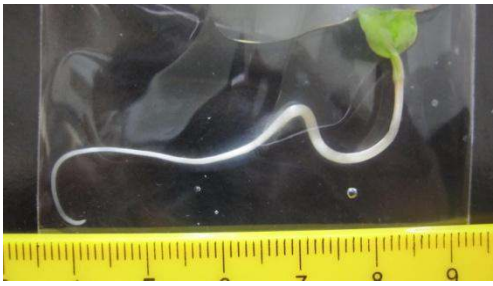
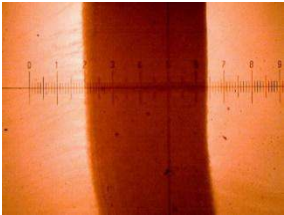
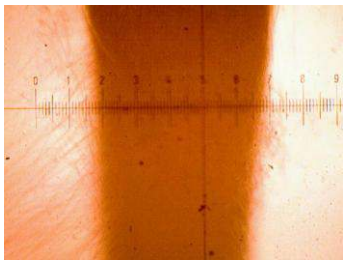
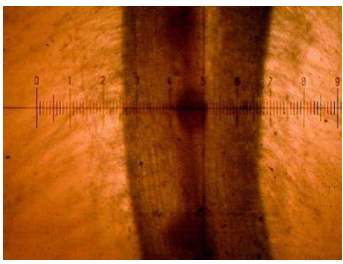
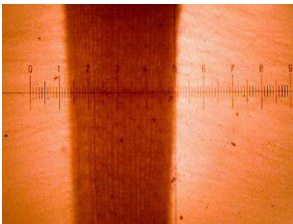
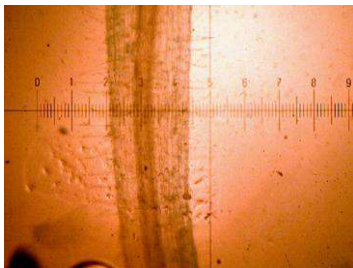
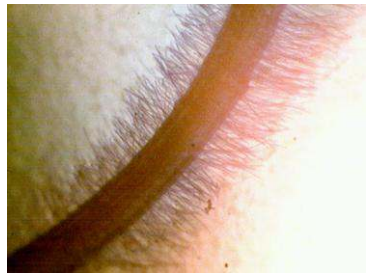
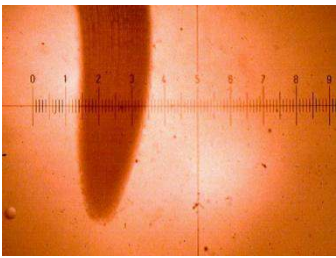
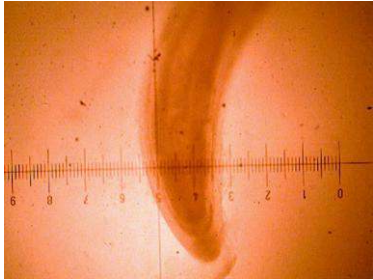
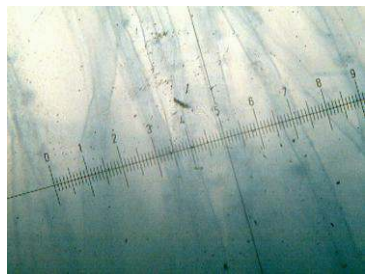


三、不同天數下，植物的萌芽生長情形

			
第一天	第二天	第三天	第四天
			
第五天	第六天	第七天	第八天
			
第九天	第十天	第十一天	第十二天
			
第十三天	第十四天	第十五天	第十六天








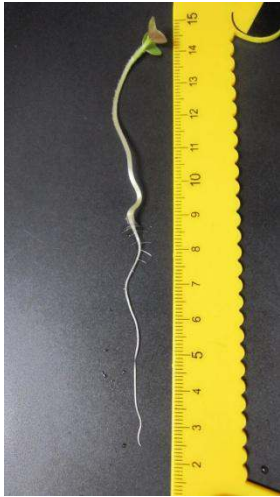

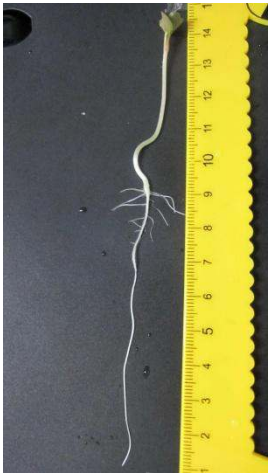
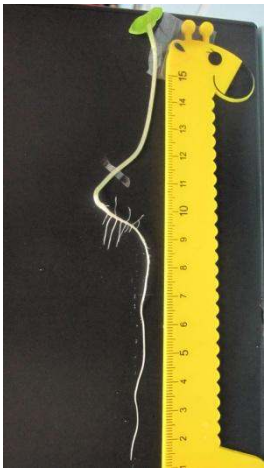


四、根毛及根直徑的觀察及測量


















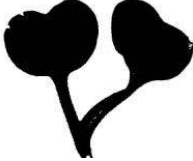





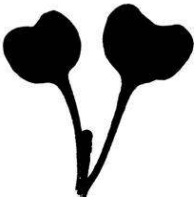
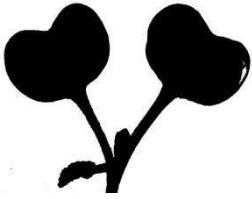

萌芽 3 天	萌芽 7 天	
		
根長 8.07mm	根長 36.888mm	
		
複式顯微鏡 100 倍 成熟部根直徑約 $0.025\text{mm} \times 44 \text{ 格} = 1.1\text{mm}$	複式顯微鏡 100 倍 成熟部根直徑約 $0.025\text{mm} \times 50 \text{ 格} = 1.25\text{mm}$	複式顯微鏡 100 倍(染色) 成熟部根直徑約 $0.025\text{mm} \times 41 \text{ 格} = 1.025\text{mm}$
		
複式顯微鏡 100 倍 成熟部(靠近延長部) 根直徑約 $0.025\text{mm} \times 36 \text{ 格} = 0.9\text{mm}$	複式顯微鏡 100 倍 成熟部(靠近延長部) 根直徑約 $0.025\text{mm} \times 24 \text{ 格} = 0.6\text{mm}$	成熟部(靠近延長部) (解剖顯微鏡 50 倍-有染色)
		
複式顯微鏡 100 倍 延長部直徑約 $0.025\text{mm}$ $\times 20 \text{ 格} = 0.5\text{mm}$	複式顯微鏡 100 倍 延長部直徑約 $0.025\text{mm} \times 22 \text{ 格} = 0.55\text{mm}$	成熟部根毛(複式 1000 倍- 有染色)根毛直徑約 $0.0025\text{mm} \times 5 \text{ 格} = 0.0125\text{mm}$



五、根在水中生長的變化

萌芽 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天
				
根長 3.57mm， 仍未長出根毛。	根長 8.07mm， 根已出現明顯 的根毛。	根長 11.05mm， 根毛分布長度 5.04mm	根長 18.14mm， 成熟部變長，根 毛區變長。	根長 23.18mm。
第 6 天	第 7 天	第 8 天	第 10 天	
				
根長 36.89mm。	根長 50.16mm， 已開始長側根，根 毛有些已經退化。	根長 71.54mm， 根毛減少許多，慢慢 長出側根	根長 80.216mm， 側根開始長出根毛。	
第 11 天	第 12 天			
				
根長 84.602mm。	根長 99.137mm。			

六、不同時間葉面積的變化情形

第2天	第3天	第4天	第5天	第6天
				
				
面積 47.370mm <sup>2</sup>	面積 60.830 mm <sup>2</sup>	面積 94.602mm <sup>2</sup>	面積 109.750mm <sup>2</sup>	面積 130.220mm <sup>2</sup>
第7天	第8天	第9天	第10天	
				
				
面積 143.785mm <sup>2</sup>	面積 145.414mm <sup>2</sup>	面積 162.21mm <sup>2</sup>	面積 183.528mm <sup>2</sup>	
第11天	第12天	第13天		
				
				
面積 292.675mm <sup>2</sup> 有出現小葉	面積 316.217mm <sup>2</sup>	面積 326.913mm <sup>2</sup>	面積 339.913mm <sup>2</sup>	

## 【評語】 030320

本研究探討土壤含水量對櫻桃蘿蔔種苗發育的影響，同時能應用物理學原理於生物學的基礎研究，值得嘉許。

然而用鋅銅片和探針電極的電容測量結果(圖 5-2、圖 5-3)並非高度一致，應加以闡釋，並說明選擇探針電極法的原因。此外，在種子萌芽期間土壤含水量變化的實驗中，建議從第 0 天，而非第 1 天，即自開始測定土壤含水量的變化。有關變化結果的解釋也需有較多實驗證據，才能得到肯定。