

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生物科

030315

榕樹葉裡的鑽石-探討鐘乳體的形成與應用

學校名稱： 桃園市立平興國民中學

作者： 國二 姜佩羽 國一 溫欣庭	指導老師： 廖俊傑 賴玉芳
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞： 鐘乳體、榕屬植物、發育過程

摘要

本研究針對校園榕樹植物葉片中的石囊細胞、鐘乳體，探討其結構特徵、物種差異、發育過程、環境影響與中和酸雨的潛力，並使用 ImageJ 進行測量、量化分析。首先，顯微觀察不同榕屬植物的鐘乳體結構差異、不同年齡葉子的鐘乳體發育過程。接著，探討不同環境因子對鐘乳體形成的影響。最後，測試不同榕樹葉片對酸雨的中和效果，探究榕樹枯葉促進小白菜種子發芽與生長的效果。結果發現，鐘乳體要到半成熟葉才發育，到老葉就發育完整；不同的土壤酸鹼值、光照強度與光合作用，會影響鐘乳體的形成；利用鹽酸溶解和鈣濃度測試，驗證其成分為碳酸鈣。本研究提供鐘乳體形態、品種差異、發育過程與生理功能的深入理解，並探討其在環境保護上的潛在應用。

壹、前言

一、研究動機

在一次觀察植物葉片的實驗中，老師跟我們介紹了植物的代謝累積物，包括鴨跖草的針狀結晶，還有榕樹鐘乳狀的結晶-鐘乳體，它長得晶瑩剔透、如寶石一般，立刻吸引了我們的目光！因此我們很想知道這種構造在哪些校園植物也會有？如何形成的？以及為何形成？因此查詢了相關文獻、設計實驗進行了一系列的探究(圖 1-1)。

二、研究目的

- (一)分析不同種類的榕樹葉片中，鐘乳體的形狀、大小及數量的差異。
- (二)觀察榕樹葉片在不同成長階段，鐘乳體的形成、成熟與老化的變化。
- (三)探討不同的環境因子，是否影響鐘乳體的形成。
- (四)設計實驗以驗證鐘乳體的化學成分。
- (五)探討鐘乳體是否具有中和酸雨的效果。
- (六)探討鐘乳體是否具有緩衝酸雨且促進小白菜種子發芽與成長。

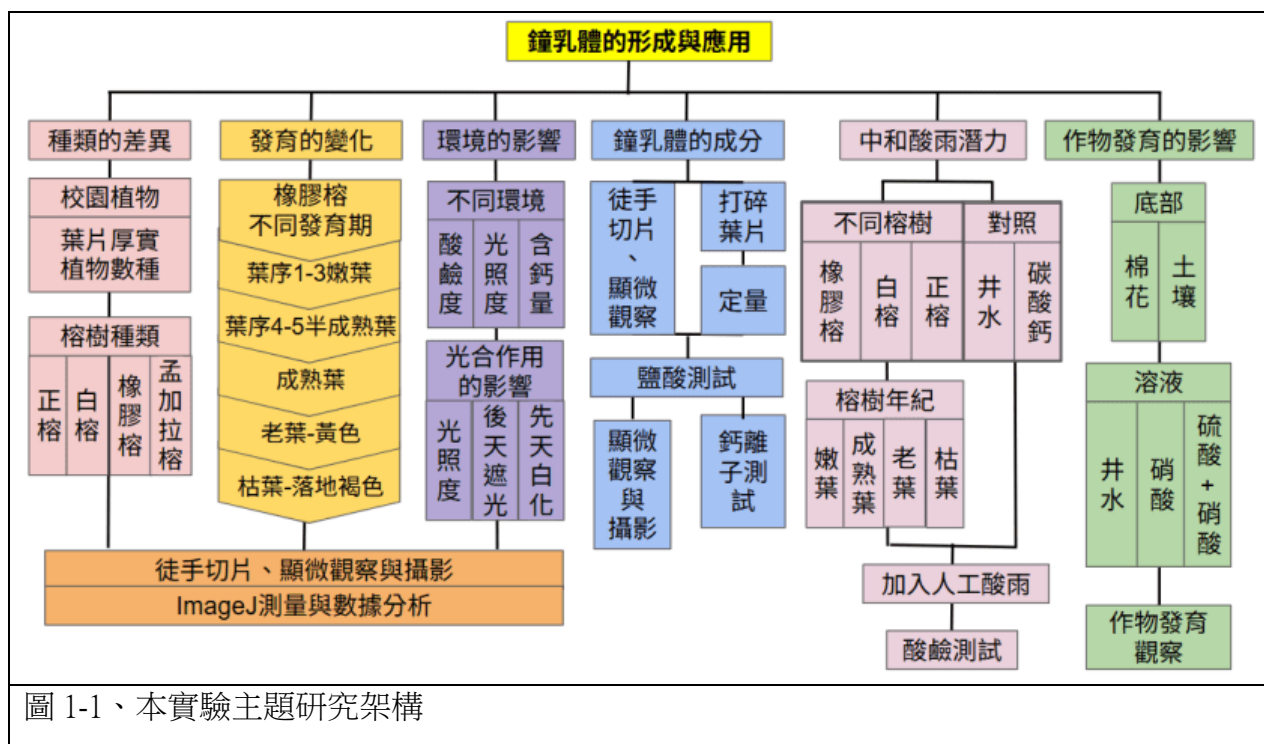
三、文獻探討

鐘乳體 (cystolith) 是某些植物葉片內累積的碳酸鈣結構，常見於桑科 (Moraceae) 植物，如榕樹 (榕屬 *Ficus* spp.)。過去研究顯示，鐘乳體可能與鈣的調節、機械強度與防禦機制有關 (Fink, 1991; Franceschi & Nakata, 2005; Lin, 1997; Lin et al., 2004; Seaward, 2003)。然而，我們也好奇鐘乳體的形成過程是如何變化、以及它的形成是如何受到環境因子影響，以及其在植物生理與生態上的潛在功能和意義，值得進一步探討。

在台灣歷屆科學展覽作品中，與榕屬植物鐘乳體相關的研究作品並不多見。然而，有一些探討植物體內鈣結晶的研究，值得參考。以下列出相關作品的參賽屆數、內容摘要及比較：

屆數與題目	重要研究結果摘要
第 50 屆高中組生物科（生命科學）040712 號作品 題目：葉裡的秘密－鈣離子對結晶形成的影響	探討不同鈣離子濃度對植物葉片內 <u>草酸鈣結晶</u> 形成的影響。實驗結果顯示，鈣離子濃度越高，結晶的平均長度和密度也隨之增加。此外，研究還發現 <u>新生葉片的結晶密度最高</u> ， <u>隨著葉片的成熟，結晶密度有所下降</u> 。
第 63 屆國中組生物科 030304 號作品 題目：一葉千「晶」－應用類神經網路識別繁星花草酸鈣結晶及其防禦功能研究	此研究運用類神經網路技術，成功設計出能識別繁星花葉片中 <u>草酸鈣結晶</u> 的模型，準確率達 0.948。實驗發現，繁星花的根部結晶密度最高，且 <u>越新、越小的葉片，結晶密度越高</u> 。研究推測這 <u>可能與植物的防禦功能和生長之間的權衡</u> 有關。

雖然上述研究未直接針對榕屬植物的鐘乳體，但其在植物鈣結晶研究方法上的探討，對於未來開展榕屬植物鐘乳體的相關研究具有參考價值。同時，也更肯定我們所提出研究目的與方向的價值。



貳、研究設備及器材

一、校園植物:

我們選擇質感與厚度和榕樹類似的常見木本植物，以及校園中常見的榕屬植物:

(一)質感與厚度和榕樹類似校園植物

七里香 <i>Murraya paniculata</i>	樟樹 <i>Cinnamomum camphora</i>	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>
福木 <i>Garcinia subelliptica</i>	鵝掌藤 <i>Schefflera arboricola</i>	茄冬 <i>Bischofia javanica</i>

(二)校園常見桑科榕屬植物

正榕 <i>Ficus microcarpa</i>	常見台灣地區行道樹，氣根明顯，葉小而密，枝葉茂密
小葉榕 <i>Ficus microcarpa</i>	正榕變異種，葉片較小，常見於盆景或盆栽植物
黃金榕 <i>Ficus microcarpa</i> 'Golden Leaves'	為正榕的園藝品種，葉色金黃。
白榕 <i>Ficus benjamina</i>	葉面光滑具光澤，枝條下垂，又名垂榕，常作為觀賞植物。
白錦星光垂榕 <i>Ficus benjamina</i> 'Starlight'	為白榕的斑葉園藝品種，葉片具白色斑紋，常作觀葉植物。
印度橡膠榕 <i>Ficus elastica</i>	又稱橡膠榕，葉片大而革質，具乳汁，常作為大型盆栽植物。
孟加拉榕 <i>Ficus benghalensis</i>	特徵為氣根發達，可形成「榕樹森林」般的群體結構。
雀榕 <i>Ficus subpisocarpa</i>	又名鳥榕，常見的園景樹。

二、實驗器材與藥品：

複式顯微鏡	載玻片	蓋玻片
手機顯微鏡支架	手機	單面刀片
切割墊	滴管	鑷子
培養皿	燒杯(玻璃、塑膠)	夾鏈袋
果汁機	剪刀與美工刀	廣用酸鹼試紙
調色盤	標籤紙	95%酒精
鹽酸	硝酸	硫酸
碘液	碳酸鈣粉末	Salifert 鈣離子測試劑
三合一土壤測試儀	照度計 TES1330A	測距儀 SW-100G

參、研究過程或方法

一、分析不同種類的榕樹葉片中，鐘乳體的形狀、大小和數量的差異

(一)實驗材料：

- 1.採集校園中葉片質感與厚度與榕樹類似的常見木本植物，收集其成熟葉各數片(葉序 4-5)，分別裝入標記好的夾鏈袋中。
- 2.採集正榕、白榕、橡膠榕、孟加拉榕、雀榕的成熟葉各數片(葉序 4-5)，分別裝入標記好的夾鏈袋中。

(二)顯微鏡觀察：

- 1.以單面刀片徒手切片，橫切方式製作出組織薄片、製作水埋玻片標本，進行後續顯微觀察；如圖 3-1，圖 3-2。
- 2.先用低倍鏡找到石囊細胞位置，再換到高倍鏡觀察；使用手機與手機支架，拍攝鐘乳體、石囊細胞結構結構，記錄其分布特徵、形態、大小、面積、密度，記錄其大小、面積、密度、形態。視需求在切片組織上滴加酒精去除葉綠素，或適量的染色劑（如碘液），以增強顯微觀察的對比度。



圖 3-1 徒手切片及水埋標本製作

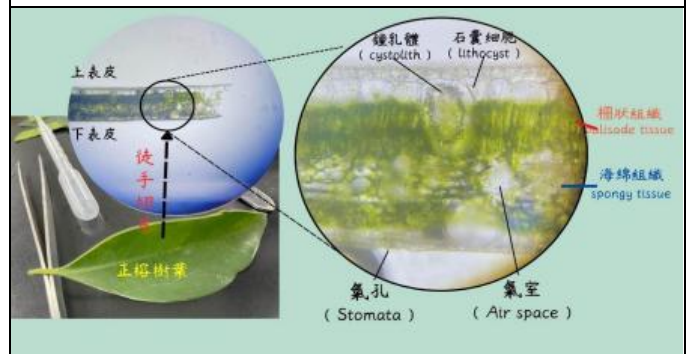


圖 3-2 光合作用構造與鐘乳體

- (三)影像繪製與測量：逐一拍攝鐘乳體、石囊細胞顯微影像，將顯微影像匯入 ImageJ 進行分析；針對不同拍攝倍率設定比例尺，確保測量結果準確，如圖 3-3 所示。

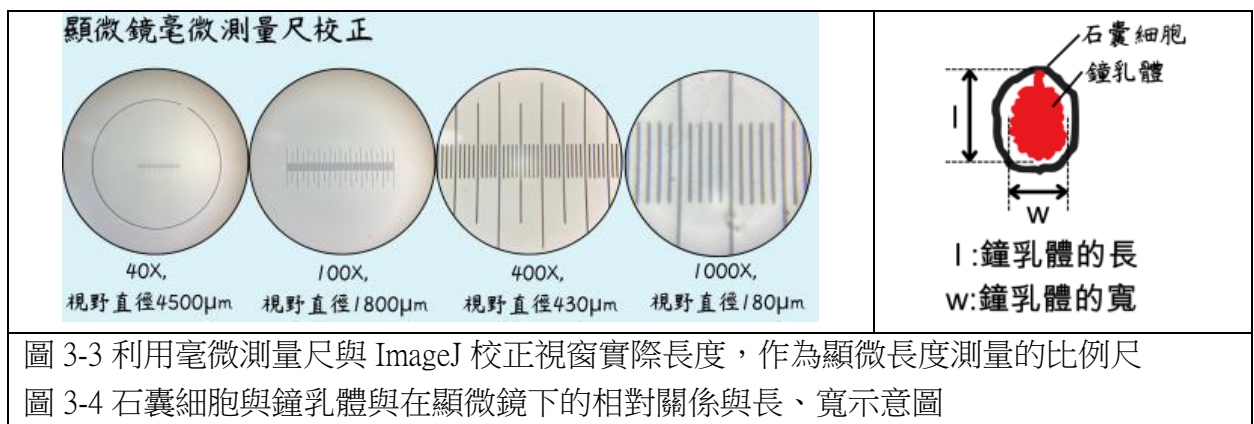


圖 3-3 利用毫微測量尺與 ImageJ 校正視窗實際長度，作為顯微長度測量的比例尺

圖 3-4 石囊細胞與鐘乳體與在顯微鏡下的相對關係與長、寬示意圖

- (四)比較石囊細胞與鐘乳體：不同種類榕樹的石囊細胞與鐘乳體的單位長度數量、形態、長與寬(如圖 3-4)、面積，比較之間的差異，使用 Excel、Google Sheets 與 GraphPad Prism5.0 進行統計、數據分析，以製作圖表呈現。

二、觀察榕樹葉片在不同成長階段，鐘乳體的形成、成熟與老化的變化

- (一)實驗材料：橡膠榕的嫩葉(葉序 1-3)、半成熟葉(葉序 4-5)、成熟葉、老葉和枯葉，切片後於顯微鏡下取得鐘乳體顯微照片。
- (二)比較石囊細胞與鐘乳體：觀察橡膠榕葉子在不同時期，石囊細胞與鐘乳體的形成、單位長度數量、大小、面積、形狀的差異，使用 Excel、Google Sheets 與 GraphPad Prism5.0 進行統計、數據分析，以製作圖表呈現。

三、探討河口、平地和丘陵等不同環境因子，如何影響鐘乳體的形成

- (一)測量河口、平地、丘陵的環境因子：土壤濕度、pH 值、 Ca^{2+} 濃度。
- (二)比較鐘乳體：如(一)所述的實驗操作，採集河口、平地、丘陵的正榕成熟葉片，各取得鐘乳體的顯微照片，匯入 ImageJ 分析，比較鐘乳體的差異性。
- (三)不同環境因子和鐘乳體形成的相關性分析：河口、平地、丘陵不同環境的鐘乳體實驗測量結果，使用 Excel、Google Sheets 與 GraphPad Prism5.0 進行數據統計分析，製作圖表。
- (四)探討光合作用，對鐘乳體形成影響的實驗：
- 1.照光差異：挑選學校正榕同高度、不同光照強度的成熟葉片，切片後進行鐘乳體顯微觀察，探討先天照光差異的影響。
 - 2.遮光處理：挑選高度與光照度相同的正榕成熟葉片，實驗組用鋁箔 100% 遮蔽光線，對照組沒有處理；50 天後，收集葉片進行鐘乳體顯微觀察，探討後天遮光的影響。
 - 3.自然白化：採集白錦星光垂榕自然白化的成熟葉片，觀察鐘乳體在綠色與白化部分的型態差異。
 - 4.將以上各組鐘乳體顯微照片，匯入 ImageJ 測量、分析比較鐘乳體的差異性。

四、設計實驗以驗證鐘乳體的化學成分

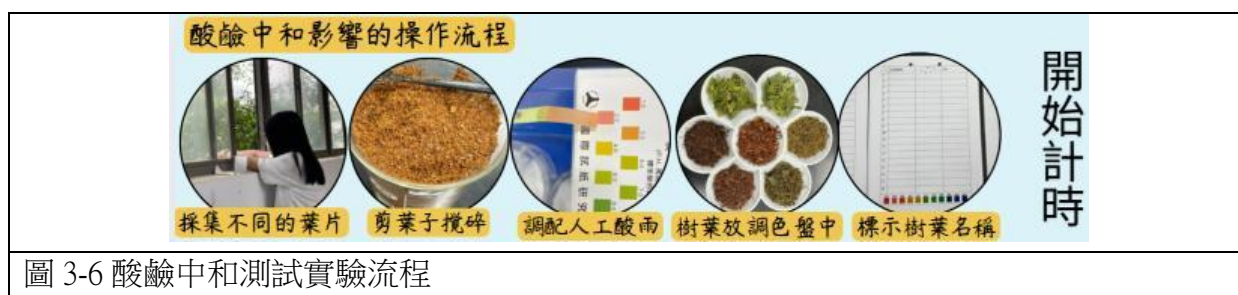
- (一)鹽酸溶解測試：將含有鐘乳體的橡膠榕樹葉薄片放入培養皿中，滴加鹽酸（1M HCl），觀察是否產生氣泡，有則表示含有碳酸鹽、碰到鹽酸會溶解，產生二氧化碳。
- (二)顯微鏡觀察：使用顯微鏡觀察滴鹽酸後的鐘乳體結晶是否開始瓦解，拍攝顯微照片紀錄。
- (三)鈣試劑測試：使用 Salifert 鈣離子測試劑，觀察鹽酸溶解鐘乳體的溶液，鈣離子濃度是否增加。
- 綜合 1, 2, 3 的正向反應，證明鐘乳體的化學成分為碳酸鈣，如圖 3-5 所示：



圖 3-5 Salifert 鈣離子測試劑組與對照表

五、探討鐘乳體中和酸雨溶液的效果

- (一)實驗材料：分別取印度橡膠榕、白榕、正榕等 3 種榕樹的嫩葉、成熟葉、老葉、枯葉。
- (二)實驗器材：電子秤、燒杯、刮勺、果汁機、7 格式調色盤。
- (三)配製 pH4 的人工酸雨溶液：酸雨主要來自燃燒煤炭、石油、工廠排放廢氣， SO_2 與水和氧氣反應，形成硫酸（ H_2SO_4 ），或 NO_x 與水和氧氣反應，形成硝酸（ HNO_3 ），使雨水酸化。故我們使用硫酸和硝酸(1:1)配置出 pH4 人工酸雨。
- (四)操作流程，如圖 3-6 所示：先取用 2g 碳酸鈣粉末作為中性的基準線(pH7)、配製硫酸加硝酸(pH4)作為酸性的基準線。另外再取印度橡膠榕、白榕、正榕三種榕樹不同年齡葉片(嫩葉、成熟葉、老葉、枯葉)，將每種葉子用果汁機攪碎，秤 2g 葉渣並放入 7 格式調色盤中，接著利用滴管在調色盤每格加入 7.5ml 的酸液，每隔 5 分鐘使用酸鹼廣用試紙測量 pH 值變化並記錄，觀察 1 小時(12 次)，實驗重複 3 次。



(五)比較中和酸性效果：將實驗測量結果採用 Excel 進行統計、數據分析，以 Google Sheets 製作圖表呈現。

六、鐘乳體能中和酸雨，促進小白菜種子發芽與成長嗎？

(一)第一階段實驗

- 1、實驗材料：印度橡膠榕枯葉、井水、pH4 的硝酸、棉花、小白菜種子、碳酸鈣粉末。
- 2、實驗器材：燒杯、培養皿、鑷子、滴管、刮勺、剪刀、標籤貼、便利貼。
- 3、準備 18 個培養皿，等分為兩組，分別進行**枯葉撕成矩形**、**枯葉攪碎成葉渣**。將印度橡膠榕枯葉葉片平鋪於培養皿底部，再將適量棉花覆蓋於葉片上，挑選健康小白菜種子在每個培養皿上，等距離(4X5 方式)鋪放 20 顆種子。每種條件皆 3 個培養皿，分別澆以井水、pH4 的硝酸，觀察種子的發芽數量並記錄，一共 7 天的觀察期，整理如下表：

井水	棉花	硝酸(pH4)	棉花
	棉花+攪碎枯葉(適量)		棉花+攪碎枯葉(適量)
	棉花+撕碎枯葉(適量)		棉花+撕碎枯葉(適量)
	棉花+碳酸鈣(適量)		棉花+碳酸鈣(適量)

後因正榕枯葉分布較廣泛，且以較貼近自然狀況來瞭解鐘乳體的應用，因此後續改採以正榕枯葉及土壤來進一步瞭解鐘乳體對於白菜種子發芽與生長的應用。

(二)第二階段實驗

- 1、實驗材料：正榕枯葉、硫酸與硝酸配置成人工酸雨(pH4)、井水、土壤、小白菜種子、碳酸鈣粉末。
- 2、實驗器材：果汁機、燒杯、培養皿、鑷子、滴管、刮勺、剪刀、標籤貼、便利貼。
- 3、(1) 準備 18 個培養皿，等分為兩組，分別進行**枯葉撕成矩形**、**枯葉攪碎成葉渣**。
(2)每 1 大組各使用土壤 30g、枯葉 6g、碳酸鈣 0.6g，每種條件皆 3 個培養皿，再澆以井水或人工酸雨，整理如下表：

井水	土壤	人工酸雨 (pH4)	土壤
	土壤+攪碎枯葉(土:枯=30g:6g)		土壤+攪碎枯葉(土:枯=30g:6g)
	土壤+撕碎枯葉(土:枯=30g:6g)		土壤+撕碎枯葉(土:枯=30g:6g)
	土壤+碳酸鈣(土:碳酸鈣=30g:0.6g)		土壤+碳酸鈣(土:碳酸鈣=30g:0.6g)

- 3、將正榕枯葉或碳酸鈣平鋪在培養皿底部，上面再覆蓋土壤，以繞圈方式將土壤澆濕。挑選健康小白菜種子在每個培養皿上，等距離(4X3 方式)鋪放 12 顆種子；觀察種子的發芽數量及成長長度、重量並記錄，一共 7 天的觀察期。

(四)比較小白菜發芽、成長的實驗結果：將實驗測量結果採用 Excel 進行統計、數據分析，以 Google Sheets 製作圖表呈現。

肆、研究結果

一、不同種類的榕樹葉片中，鐘乳體的形狀、大小和數量的差異

實驗 1-1 質感與厚度和榕樹類似的常見木本植物葉片

校園中常見的木本植物：七里香、樟樹、桂花、福木、鵝掌藤、茄冬與榕屬植物一樣，都具有厚實的葉片、表面光滑、增厚的多層上表皮細胞甚至有較多蠟質；觀察結果：七里香、樟樹、桂花、福木、鵝掌藤與茄冬都沒有觀察到鐘乳體。

選擇對照的正榕與白榕具有鐘乳體(圖 4-1-1 箭頭處)，多數集中於上表皮的組織中；這一結果與文獻符合：鐘乳體經常出現在桑科榕屬植物。

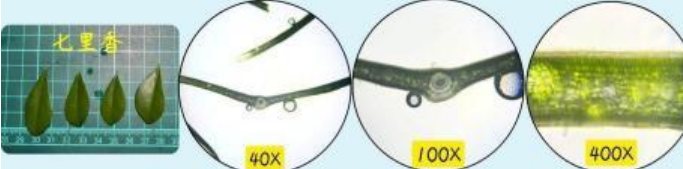
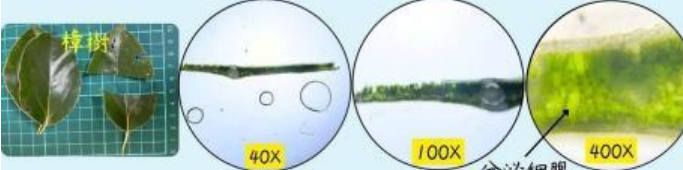
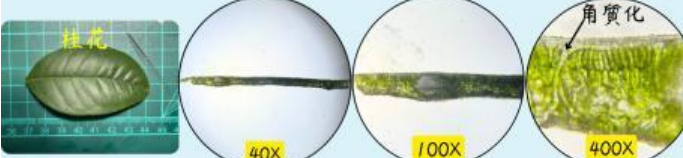
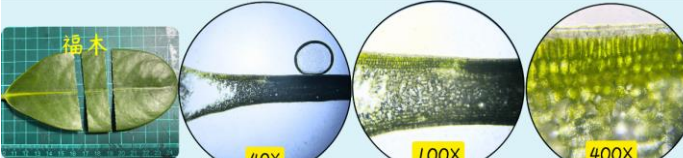
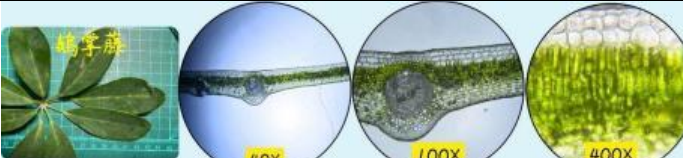
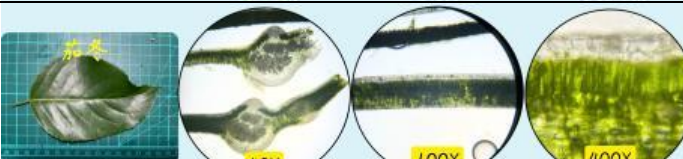
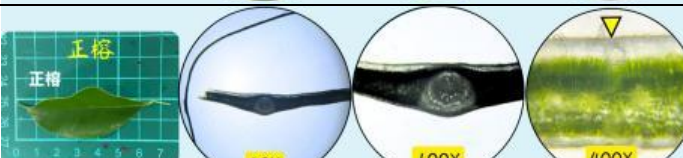
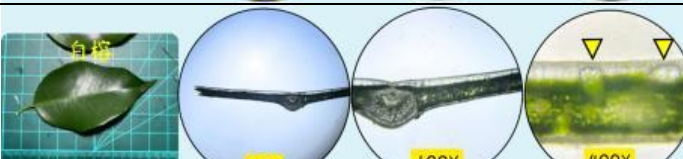
	<ul style="list-style-type: none"> ● 上表皮 1-2 層 ● 排列緊密的柵狀細胞 2-3 層
	<ul style="list-style-type: none"> ● 上表皮 2-3 層 ● 柵狀細胞一層 ● 具有分泌細胞(箭頭所指)
	<ul style="list-style-type: none"> ● 上表皮 1 層 ● 排列緊密的柵狀細胞 2 層 ● 具有特殊角質化構造(箭頭所指)
	<ul style="list-style-type: none"> ● 上表皮 1 層 ● 角質增厚與蠟質 ● 排列緊密的柵狀細胞
	<ul style="list-style-type: none"> ● 上表皮 3 層 ● 增厚角質 ● 排列緊密的柵狀細胞 3-4 層
	<ul style="list-style-type: none"> ● 上表皮 2-3 層 ● 排列緊密的柵狀細胞 ● 海綿細胞橫向排列
	<ul style="list-style-type: none"> ● 特別增厚的上表皮與角質 ● 柵狀細胞排列緊密 2-3 層
	<ul style="list-style-type: none"> ● 特別增厚的上表皮細胞 2-3 層與角質 ● 排列緊密的柵狀細胞 1-2 層

圖 4-1-1 不同校園植物的顯微切片觀察與構造特色

實驗 1-2 不同榕屬植物的石囊細胞與鐘乳體形態特徵比較

我們顯微觀察了白榕(垂榕)、正榕(黃金榕、小葉榕)、橡膠榕、孟加拉榕與雀榕。按學名分類，石囊細胞與鐘乳體的特徵比較如圖 4-1-2 所示。

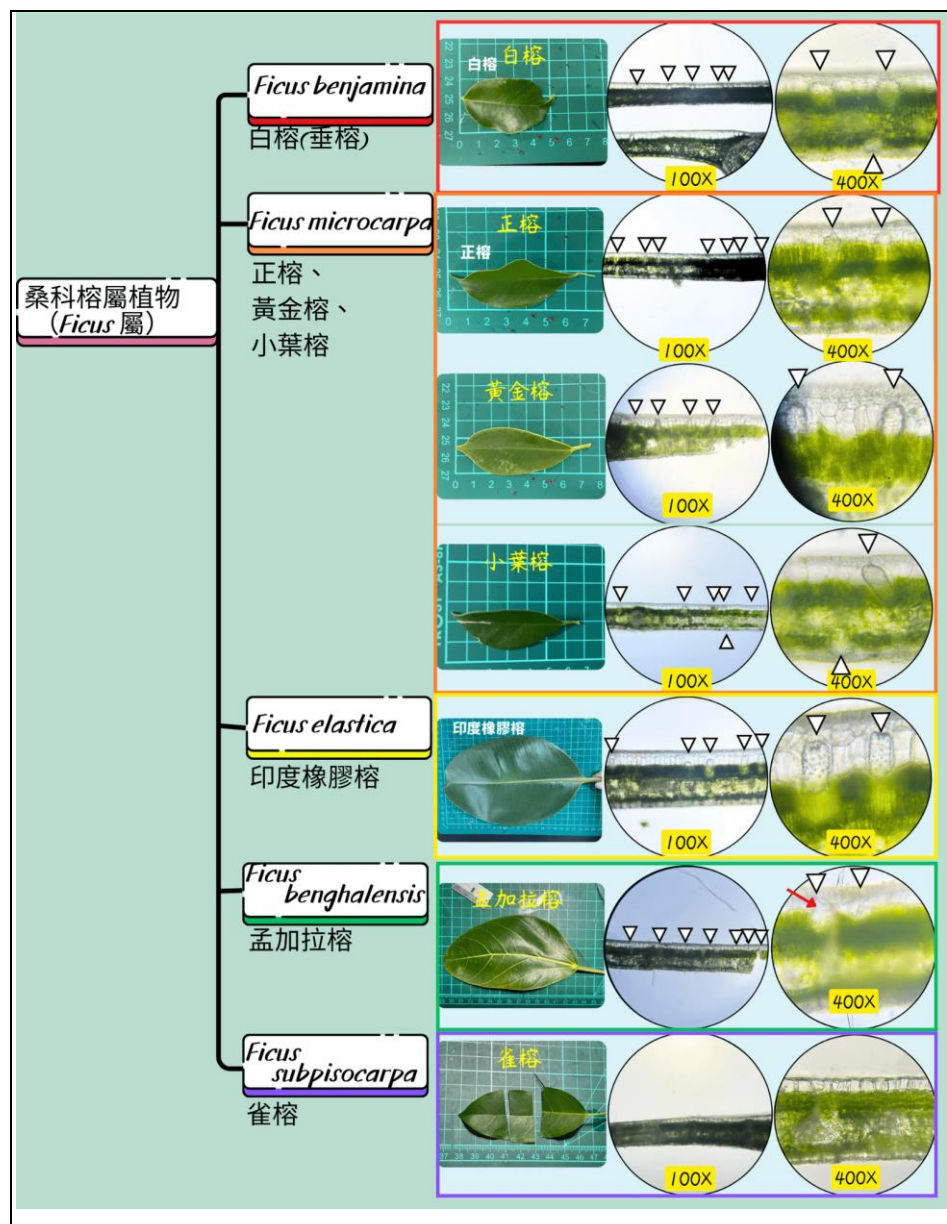


圖 4-1-2 常見校園榕樹的分類與鐘乳體在不同榕樹的顯微構造特徵 (放大倍率 100X 與 400X)

分類圖以白色箭頭標示石囊細胞所在位置，大多位於上表皮，少數分布於下表皮。

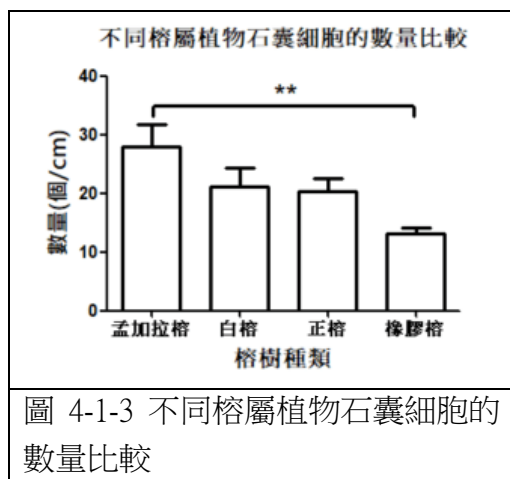
不同榕樹鐘乳體特徵描述：

- 1.白榕:石囊細胞分布較密集、鐘乳體為飽滿的橢圓形；
- 2.正榕:石囊細胞分布平均、鐘乳體較白榕的瘦長；黃金榕、小葉榕與正榕特徵類似。
- 3.橡膠榕:石囊細胞分布較稀疏、鐘乳體偏大、呈長圓柱形。
- 4.孟加拉榕:石囊細胞分布密集、鐘乳體明顯和其他榕樹比起來小很多形狀為扁橢圓、略扁，許多甚至沒有鐘乳體形成，只有中間的莖(stalk，紅色箭號)。
- 5.雀榕:沒有石囊細胞，亦沒有鐘乳體。

綜合可得，鐘乳體大多為長柱狀、部分為角錐型，且都具有圓錐狀突起；其中白榕、正榕、印度橡膠榕與孟加拉榕都具有石囊細胞與鐘乳體，雀榕則是沒有觀察到石囊細胞，因此在後續顯微觀察與分析比較，我們只比較前四者。此外，孟加拉榕有些石囊細胞並沒有累積形成鐘乳體，只有出現中間的矽質莖(silica stalk)；矽質莖是鐘乳體沉積的基質(Politi et al., 2012)，我們在尚未形成鐘乳體的石囊細胞中，幾乎都會觀察到。

實驗 1-3 不同榕屬植物石囊細胞的數量比較

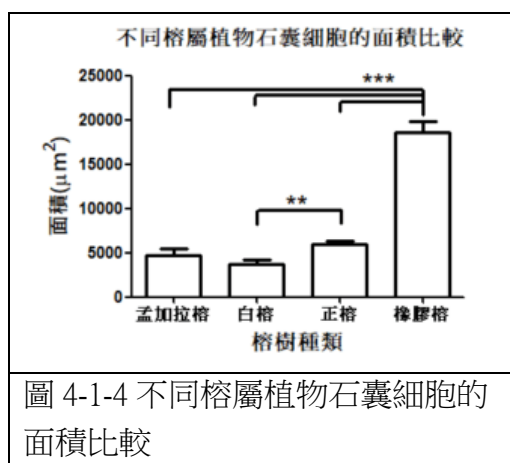
我們取 100X 倍率的顯微畫面，計算榕樹超微葉切片視野下的石囊細胞數量，如圖 3-3 視野直徑為 1800μm，為方便呈現、換算為單位公分的個數(個/cm)，結果如下：



孟加拉榕單位長度具有的鐘乳體最多，接著依序是白榕、正榕與橡膠榕，數量由多到少依序為：
 孟加拉榕 27.9 ± 3.77 (n=6)、
 白榕 21.1 ± 3.23 (n=6)、
 正榕 20.2 ± 2.19 (n=6)、
 橡膠榕 13.1 ± 1.09 (n=6)，單位：個/cm。
 其中孟加拉榕的石囊細胞數量最多、白榕與正榕相近，橡膠榕最少，且孟加拉榕和橡膠榕間具有顯著差異(t test, $p < 0.01$)。

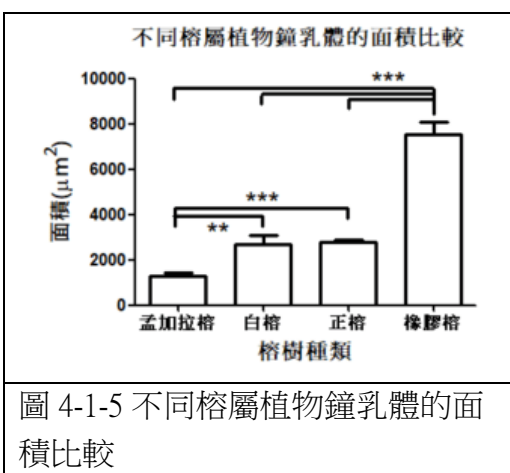
因此，不同種類的榕樹石囊細胞數量依序：孟加拉榕 > 白榕 \approx 正榕 > 橡膠榕，其中孟加拉榕顯著比橡膠榕多。

實驗 1-4 不同榕屬植物石囊細胞的面積比較



利用 ImageJ 測量與分析，橡膠榕石囊細胞最大，接序是正榕、孟加拉榕與白榕，面積依圖 4-1-4 順序為：
 孟加拉榕 4669 ± 820.2 (n=5)、
 白榕 3734 ± 482.0 (n=5)、
 正榕 5957 ± 318.2 (n=5)、
 橡膠榕 18590 ± 1295 (n=5)，單位： μm^2 。
 經由 t 檢定結果，正榕的石囊細胞面積顯著大於白榕的 ($p < 0.01$)、橡膠榕的石囊細胞面積顯著大於其他三種榕樹的 ($p < 0.001$)，達到 3 倍之多！

實驗 1-5 不同榕屬植物鐘乳體的面積比較



利用 ImageJ 測量與分析，橡膠榕鐘乳體最大，接序是正榕、白榕、孟加拉榕，面積依圖 4-1-5 順序為：
 孟加拉榕 1296 ± 143.8 (n=5)、
 白榕 2701 ± 359.3 (n=5)、
 正榕 2759 ± 140.1 (n=5)、
 橡膠榕 7520 ± 587.6 (n=5)，單位： μm^2 。
 經由 t 檢定結果，橡膠榕的鐘乳體顯著大於其他三種榕樹的 ($p < 0.001$)，大約 3 倍；正榕和白榕的鐘乳體面積顯著大於孟加拉榕的 ($p < 0.01$ 、 $p < 0.001$)。

總結以上實驗結果可以知道：石囊細胞數量：孟加拉榕 > 白榕 \approx 正榕 > 橡膠榕
 石囊細胞面積：橡膠榕 > 正榕 > 孟加拉榕 > 白榕
 鐘乳體面積：橡膠榕 > 正榕 \approx 白榕 > 孟加拉榕

實驗 1-6 不同榕屬植物石囊細胞形成鐘乳體的效率

使用鐘乳體面積除以石囊細胞面積的百分比(鐘乳體/石囊細胞面積%)來表示石囊細胞產生鐘乳體的效率，如圖 4-1-6。結果如下：

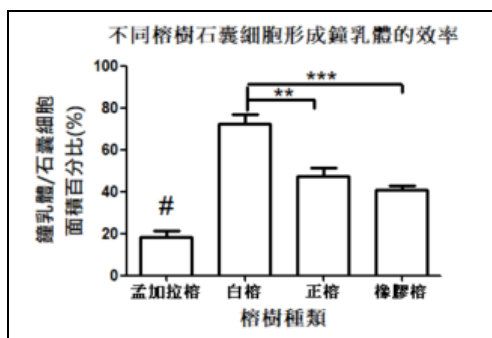


圖 4-1-6 不同榕屬植物石囊細胞形成鐘乳體的效率

鐘乳體/石囊細胞的面積百分比依圖 4-1-6 順序為：

孟加拉榕 18.3 ± 2.79 (n=5)、

白榕 72.5 ± 4.25 (n=5)、

正榕 47.1 ± 4.30 (n=5)、

橡膠榕 40.6 ± 2.33 (n=5)，單位%。

經由 *t* 檢定結果，孟加拉榕的鐘乳體產生效率(18.3%)，顯著小於其他榕樹的(#, $p < 0.001$)，白榕的鐘乳體產生效率明顯大於正榕的($p < 0.01$)和橡膠榕的($p < 0.001$)。

石囊細胞產生鐘乳體的效率由大到小依序為：白榕 > 正榕 > 橡膠榕 > 孟加拉榕。

實驗 1-7 不同榕屬植物鐘乳體的形狀與長寬比

觀察四種榕樹的鐘乳體形狀，如圖 4-1-2，白榕鐘乳體偏圓形、正榕較橢圓形、孟加拉榕長橢圓形、橡膠榕則呈圓柱形；利用 ImageJ 測量與分析數據，將得到的數據繪圖表示各種榕樹鐘乳體的鐘乳體的長與寬數據平均值(±標準差)，並描繪它們的鐘乳體形狀示意圖，如圖 4-1-7。

各榕屬植物的長/寬數據依序為：

孟加拉榕： $83.60 \pm 3.052 / 26.25 \pm 1.480$ (n=5)

白榕： $61.70 \pm 3.557 / 51.12 \pm 5.309$ (n=5)

正榕： $73.37 \pm 1.662 / 48.08 \pm 1.609$ (n=5)

橡膠榕： $136.8 \pm 6.049 / 62.49 \pm 3.661$ (n=5)

各種榕樹的長寬由大到小依序為：

長：橡膠榕 > 孟加拉榕 > 正榕 > 白榕 (皆達顯著差異 $p < 0.05$)

寬：橡膠榕 > 白榕 \approx 正榕 > 孟加拉榕

分析結果看來，榕樹鐘乳體從接近圓形到扁長形狀，若以鐘乳體的寬/長來定義形狀：圖 4-1-7 標示 1、2、3、4 依序代表孟加拉榕、白榕、正榕與橡膠榕。

形狀指數=寬度/長度

則形狀指數越接近 1，代表接近圓形；數值越接近 0，代表較接近長橢圓形。

將形狀指數經由 *t* 檢定，各榕樹間的鐘乳體形狀指數具有顯著差異性(圖 4-1-8)；形狀指數的數值由大到小依序：

白榕 > 正榕 > 橡膠榕 > 孟加拉榕

因此，白榕的鐘乳體最接近圓形、孟加拉榕的最細長。根據顯微照片繪製成形狀與相對大小示意如圖 4-1-9。

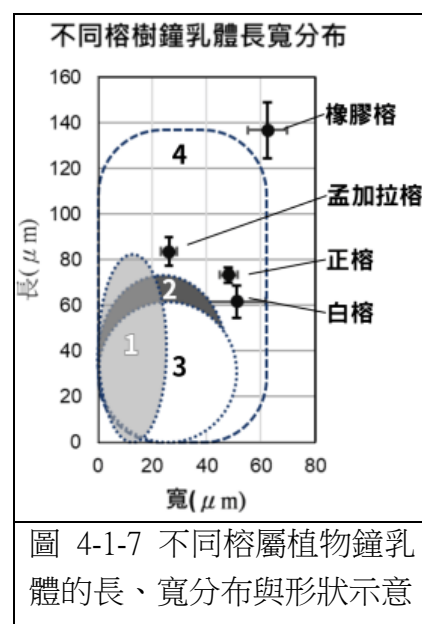
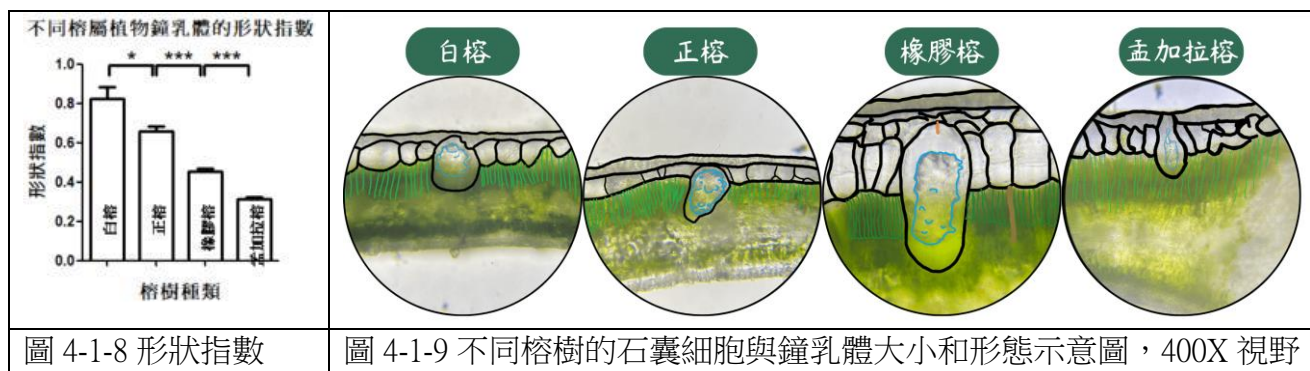


圖 4-1-7 不同榕屬植物鐘乳體的長、寬分布與形狀示意

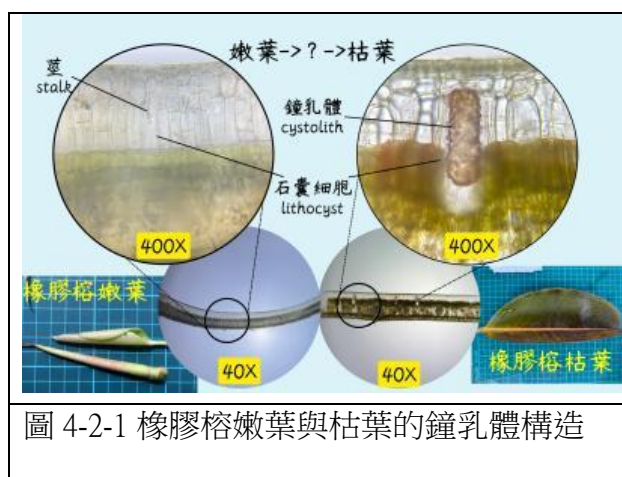


二、觀察榕樹葉在不同成長階段，鐘乳體的形成、成熟與老化

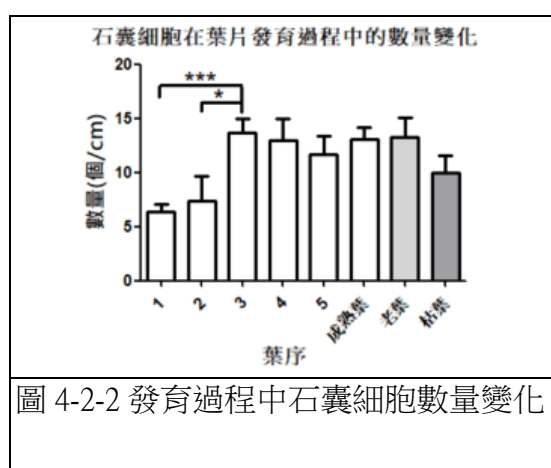
因為橡膠榕的鐘乳體較大、容易觀察，不同發育時期的幼葉會同時捲曲在一起、且可以用葉序明確區分其發育先後，因此本實驗我們以橡膠榕作為鐘乳體發育的研究材料。

我們先用橡膠榕嫩葉與枯葉作比較，觀察兩者鐘乳體差異(圖 4-2-1)。嫩葉已經有石囊細胞，中間有莖，但還未形成鐘乳體；枯葉有完整的石囊細胞跟鐘乳體，鐘乳體表面有很多圓錐狀突起。

接著觀察與比較 5 種發育階段葉片的鐘乳體：
 (1)嫩葉：葉序 1~3；(2)半成熟葉：葉序 4~5；(3)成熟葉：色澤深綠、葉片超過平均大小；(4)老葉：位於樹枝末端且轉為黃色；(5)枯葉：掉落在地上且顏色轉變為咖啡色的。



實驗 2-1 觀察石囊細胞在葉片發育過程中的數量變化



各種葉片的石囊細胞之發育數量如下表，石囊細胞在葉序 1 嫩葉最少，然後依序增加，到葉序 3 嫩葉已經最多，與葉序 1、葉序 2 的具有顯著差異 ($p < 0.05$, $p < 0.001$)。

葉序 1	6.35 ± 0.75	石囊細胞最少
葉序 2	7.38 ± 2.26	
葉序 3	13.67 ± 1.31	石囊細胞最多
葉序 4	12.95 ± 2.00	
葉序 5	11.72 ± 1.64	
成熟葉	13.09 ± 1.09	
老葉	13.28 ± 1.81	石囊細胞次多
枯葉	9.957 ± 1.56	

接著從葉序 4、葉序 5 的半成熟葉、成熟葉到老葉，石囊細胞維持相當的數量，到枯葉時，石囊細胞數量稍微下降，但沒有顯著差異。因此，石囊細胞的數量主要在葉片發育早期增加，後來維持穩定。

實驗 2-2 觀察葉片發育過程當中，石囊細胞的面積變化

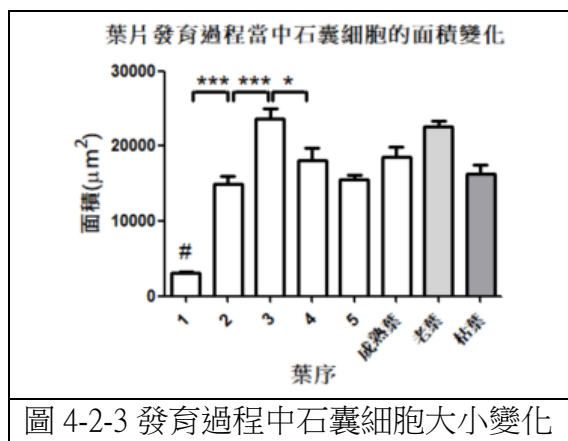


圖 4-2-3 發育過程中石囊細胞大小變化

從葉序 1、2 到 3 的嫩葉，石囊細胞面積依序顯著增加($p < 0.001$)，這時期也是增長最快(圖 4-2-3)。葉序 4、葉序 5 的半成熟葉，石囊細胞面積則略為減少($p < 0.05$)。接著，石囊細胞的面積在成熟葉、老葉到枯葉，雖然略有波動，但都維持在一定範圍內。

總結實驗結果，實驗 2-1 和實驗 2-2 的結果相呼應，石囊細胞個數和面積是隨著葉片發育而發育的、隨著葉片成熟而成熟的。

實驗 2-3 觀察葉片發育過程當中，鐘乳體的形態與面積變化

由圖 4-2-4 發現，在葉序 1~3 的嫩葉，石囊細胞中只有位於中央的莖已經出現(紅色箭號處)、尚未累積產生鐘乳體；葉序 4、葉序 5 的半成熟葉的莖開始累積出鐘乳體(100X 與 400x 畫面下白色箭頭所指)，逐漸長大。成熟葉、老葉的鐘乳體維持固定的形態，出現一層層的輪廓，具有明顯的層狀紋理，推測鐘乳體應該是逐層沉積所形成的。到枯葉時期的鐘乳體稍微變小，推測有些已經慢慢分解了。

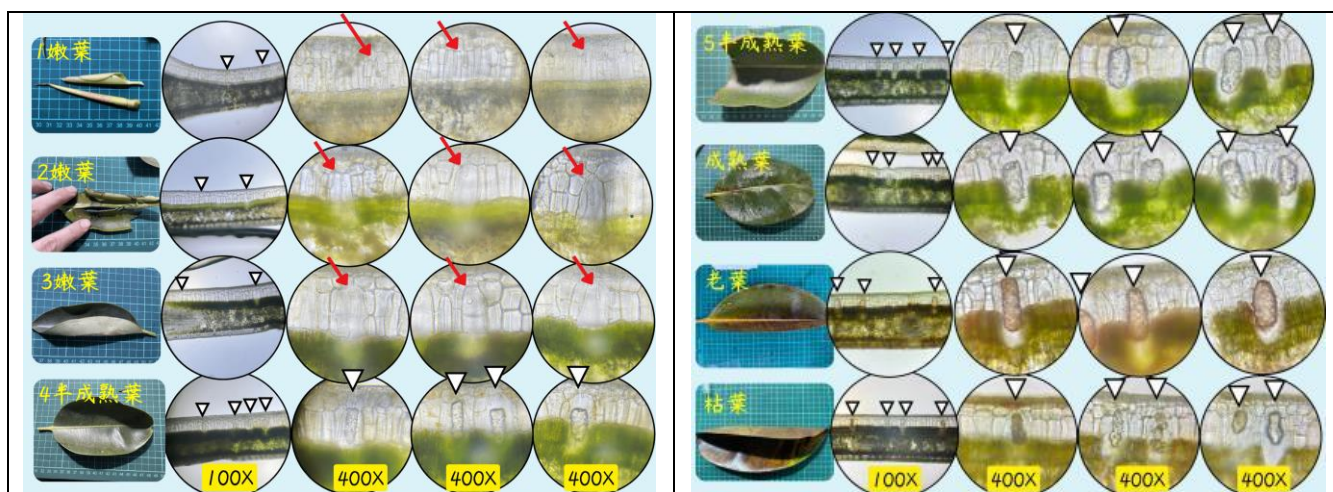


圖 4-2-4 橡膠榕石囊細胞與鐘乳體隨著發育過程的變化

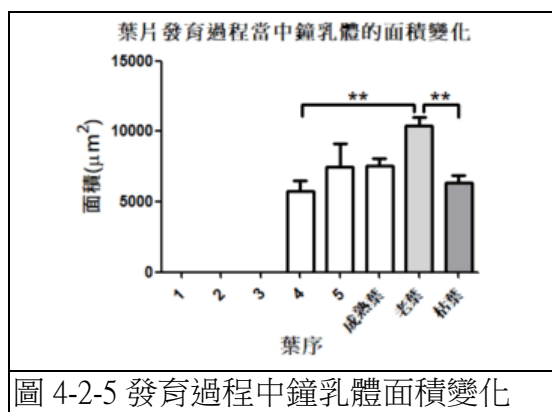
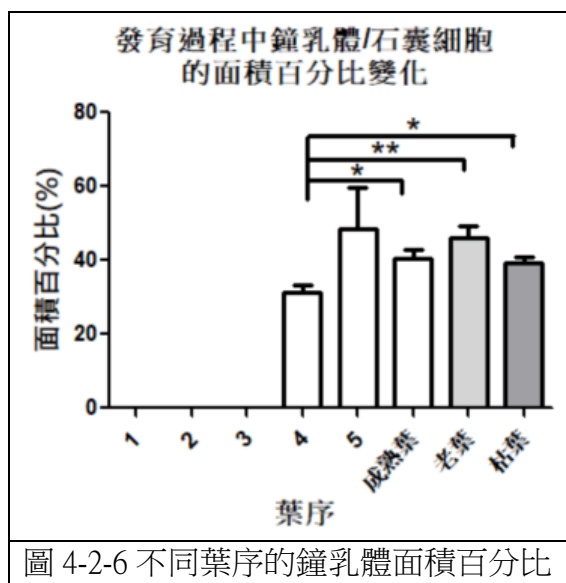


圖 4-2-5 發育過程中鐘乳體面積變化

由圖 4-2-5 發現，葉序 1-3 嫩葉的石囊細胞中尚未有鐘乳體出現(中間的莖面積只有大約 $550 \mu m^2$)，葉序 4、葉序 5 的半成熟葉、成熟葉的鐘乳體面積快速增加($5722 \pm 804 \mu m^2$)，到老葉的鐘乳體面積達到最大($10430 \pm 600.0 \mu m^2$, $p < 0.01$)。枯葉的鐘乳體面積縮小($6356 \pm 524 \mu m^2$)，和老葉的面積有顯著差異($p < 0.01$)。

實驗 2-4 觀察葉片發育過程中，鐘乳體/石囊細胞的面積百分比變化



我們計算並比較[鐘乳體/石囊細胞]面積百分比隨發育的變化(圖 4-2-6)。葉序 1,2,3 石囊細胞中只有莖、鐘乳體尚未發育，因此面積百分比為 0；葉序 4, 5 半成熟葉的鐘乳體發育了，鐘乳體/石囊細胞的面積百分比為 31.22%, 48.67%。成熟葉、老葉、枯葉的鐘乳體和石囊細胞穩定成長，鐘乳體/石囊細胞的面積百分比也維持穩定，明顯比葉序 4 的百分比大。

這代表石囊細胞在葉片一開始發育時就已經快速增長(圖 4-2-2)，而鐘乳體累積則要等到葉序 4 之後，開始快速累積、生成(圖 4-2-5、4-2-6)。

綜上所述，在嫩葉時，石囊細胞的數量、面積逐漸增加，葉序 3 時達到最大值；鐘乳體則要等到葉序 4 的半成熟葉開始出現，而鐘乳體的數量、面積在老葉時達到最大值，枯葉則有縮小的現象。鐘乳體開始累積生成的時間，也是葉片展開、照光之後開始成熟的時間。

三、河口、平地和丘陵等不同環境因子，如何影響鐘乳體的形成

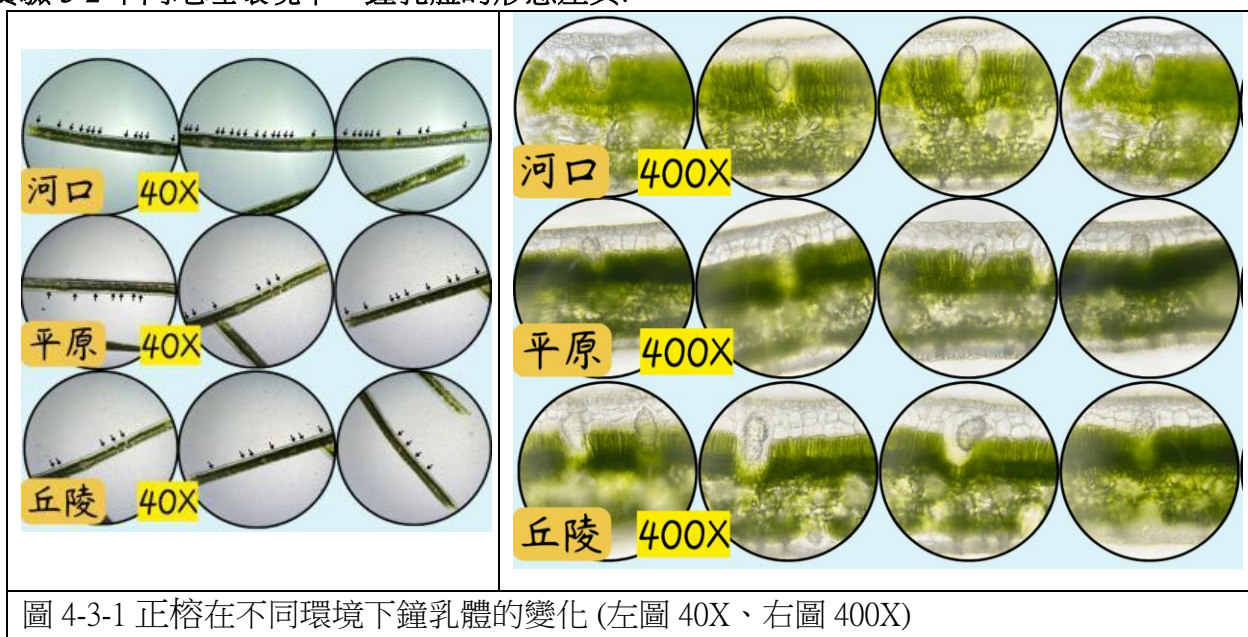
我們推測桑科榕屬植物的石囊細胞、鐘乳體結晶，應該會受到環境因素影響，因此我們探討不同地域環境的光照度差異、土壤鈣離子濃度差異、光合作用條件對鐘乳體形成的影響。由於正榕最常見，因此使用正榕作為實驗材料。

實驗 3-1 不同地理環境因子的調查

在不同地理環境，在採樣當天用照度計測量取樣的葉片光照強度，三合一土壤測試儀測量土壤的相對濕度與酸鹼值，再進行土壤採樣、帶回實驗室以 Salifert 鈣離子測試劑測試土壤的鈣含量，鈣離子的測試方法是取 5 克乾燥土壤用 20ml 一次水充分稀釋後測試。環境條件紀錄如下：

環境種類	採樣環境條件	土壤照片
<u>河口</u> 座標:25°01'05.7"N 121°02'07.6"E 海拔: 1m	河流出海口，土壤相對溼度 8.5/10，pH 值 7.8 偏鹼，土壤鈣離子濃度 45 ppm。土壤鹽分較高、濕度較大、顏色較深。	
<u>平原</u> 座標:24°56'53.8"N 121°12'21.8"E 海拔:140m	海拔 140m 左右、開闊平地，土壤相對溼度 6/10，pH 值 6.9，土壤鈣離子濃度 35ppm。土壤偏中性、濕度適中。	
<u>丘陵</u> 座標:24°53'46.0"N 121°09'06.7"E 海拔:250m	丘陵小山坡邊，土壤相對溼度 5/10，pH 值 6.8，土壤鈣離子濃度 35 ppm。土壤略偏酸性、相對濕度稍低。	

實驗 3-2 不同地理環境下，鐘乳體的形態差異:



由圖 4-3-1 發現，在 40X 視野下，河口地區有較多數量的石囊細胞與鐘乳體(圖中黑色箭號)。在 400X 視野下，河口地區的鐘乳體表面平滑無太多突起；平原地區的鐘乳體形狀較規則，多為紡錘狀或棒狀，表面有錐狀突起，沉積層次清晰且均勻；丘陵地區的鐘乳體形態多變，呈現細長條、緻密短小的結構，鐘乳體表面突起都十分明顯。

實驗 3-3 不同地理環境下，正榕的石囊細胞數量、大小的觀察與分析

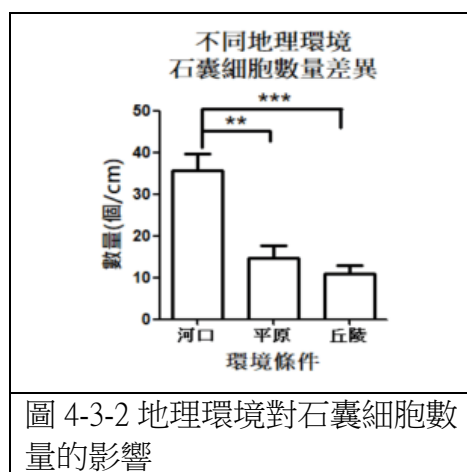
顯微攝影不同地理環境下，正榕的石囊細胞數量，結果：

河口: 35.58 ± 4.010 (n=6)

平原: 14.64 ± 3.091 (n=6)

丘陵: 10.85 ± 2.041 (n=6)

經由 t 檢定結果(圖 4-3-2)，河口生長榕樹有較多數量的石囊細胞，顯著多於平原與丘陵的 ($p < 0.01$, $p < 0.001$)。



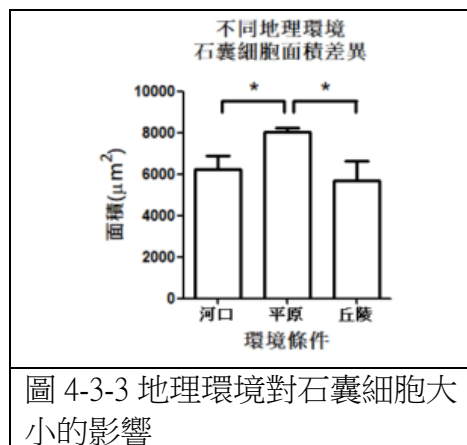
顯微攝影不同地理環境下，正榕石囊細胞面積測量結果：

河口: $6224 \pm 659.2 \mu m^2$ (n=5)

平原: $8012 \pm 218.8 \mu m^2$ (n=5)

丘陵: $5670 \pm 982.2 \mu m^2$ (n=5)

經由 t 檢定結果(圖 4-3-3)，平原生長的榕樹其石囊細胞面積較大、其次是河口的，最小是丘陵的。平原生長的石囊細胞大於河口、丘陵的石囊細胞($p < 0.05$)。



實驗 3-4 不同地理環境下，正榕的鐘乳體面積大小的觀察與分析

顯微攝影不同地理環境下正榕生成的鐘乳體，並進行面積測量，結果：

河口: $2982 \pm 146.3 \mu m^2$ (n=5)

平原: $3148 \pm 384.2 \mu m^2$ (n=5)

丘陵: $2150 \pm 363.7 \mu m^2$ (n=5)

經由 t 檢定結果(圖 4-3-4)，雖然平原地區的鐘乳體面積最大、其次是河口地區的，最小是丘陵地區的。但三者之間都沒有達顯著差異。

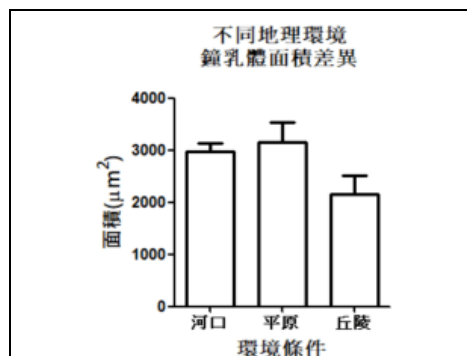


圖 4-3-4 地理環境對鐘乳體大小的影響

實驗 3-5 不同光照強度對鐘乳體發育的影響

我們選擇位於植株靠近內側的正榕葉片(光照度 400lux，照度低)與外側的正榕葉片(光照度 2100lux，照度高)，觀察鐘乳體發育的差異性。從圖 4-3-5 發現，在 40X 視野下，光照強度對石囊細胞的數量並沒有顯著影響；在 400X 視野下，石囊細胞的面積也沒有太大的差異，但可以看到光照強的環境，鐘乳體的面積比較大。接下來實際計算石囊細胞數量，並用 ImageJ 進行面積測量，結果如下：

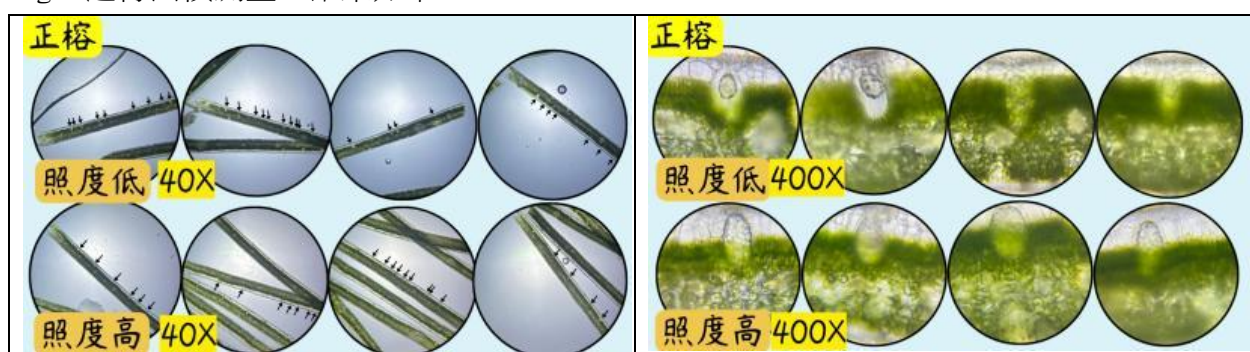


圖 4-3-5 正榕在不同光照環境下鐘乳體的變化

型態測量數據分析部分：

1.圖 4-3-6 顯示不同光照度的石囊細胞數量：

400lux: 19.26 ± 2.809 (n=6)

2100lux: 15.02 ± 1.461 (n=6) 單位：個/cm。

經由 t 檢定結果(圖 4-3-6)，不同光照度環境下，石囊細胞的數量沒有差異。

2.圖 4-3-7 顯示不同光照度的石囊細胞面積：

400lux: $8333 \pm 447.2 \mu m^2$ (n=5)

2100lux: $9044 \pm 700.5 \mu m^2$ (n=5)

經由 t 檢定結果(圖 4-3-7)，不同光照度環境下，石囊細胞的面積沒有差異。

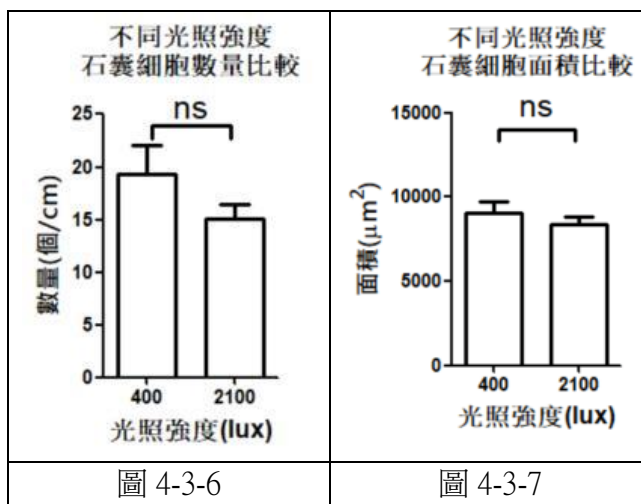


圖 4-3-6

圖 4-3-7

因此，環境的光照強度，不會影響石囊細胞的數量或是面積。接著，我們來看鐘乳體的形成是否會受到光照強度的影響。

3.圖 4-3-8 顯示不同光照度下的鐘乳體面積：

400 lux: $5783 \pm 200.4 \mu m^2$ (n=5)

2100 lux: $3071 \pm 650.0 \mu m^2$ (n=5)

經由 t 檢定結果，光照度 2100lux 的環境下，鐘乳體的面積顯著大於光照度 400lux 的 ($p < 0.01$)。

綜上所述，不同光照度不會影響石囊細胞的數量與面積，但會影響鐘乳體的累積，推測：充足的光線有助於鐘乳體的累積，陽光不足會使石囊細胞無法累積碳酸鈣、鐘乳體面積較小。

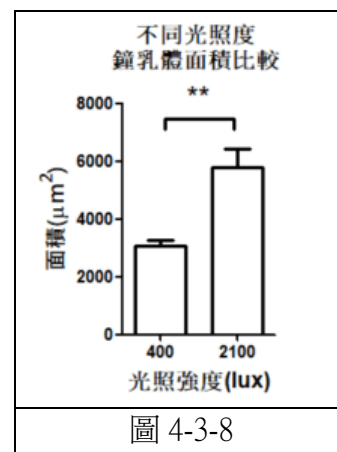


圖 4-3-8

實驗 3-6 後天遮光對鐘乳體發育的影響

我們思考後天遮光，植物無法進行光合作用，是否會影響石囊細胞與鐘乳體。以正榕為材料、分成兩組，對照組：相同高度與成熟度的成熟葉片，正常照光；實驗組：已經成熟的榕樹葉片，用鋁箔完全遮光 50 天。

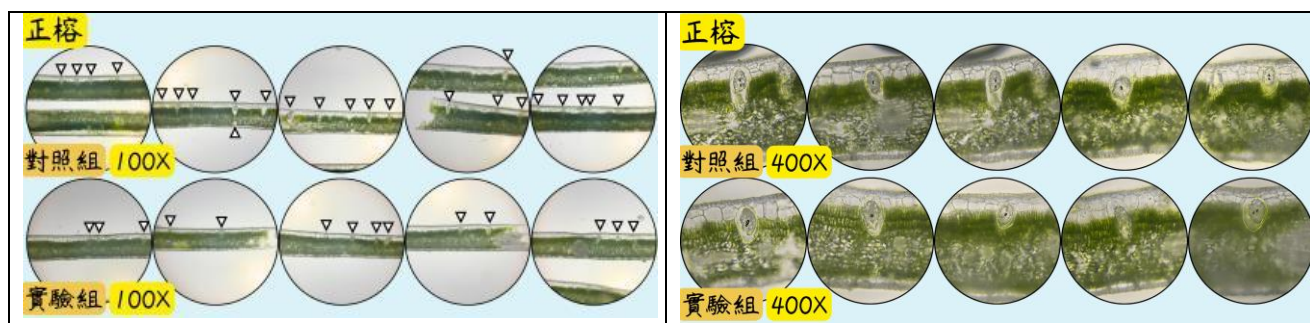


圖 4-3-9 後天遮光對於榕樹鐘乳體的影響與比較(△代表石囊細胞所在位置)

圖 4-3-9 顯示，遮光 50 天後，石囊細胞的數量稍微減少了，但石囊細胞與鐘乳體的面積大小與形態看起來差異不大。接下來實際計算石囊細胞數量，並用 ImageJ 進行石囊細胞與鐘乳體面積測量，結果如下：

1.圖 4-3-10 顯示遮光對石囊細胞的數量：

對照組: 19.03 ± 0.949 (n=6)

實驗組: 11.10 ± 1.885 (n=6)

單位：個/cm。經由 t 檢定結果(圖 4-3-10)，遮光導致石囊細胞的數量減少 ($p < 0.01$)，達顯著差異。

2.圖 4-3-11 顯示遮光對石囊細胞的面積：

對照組: $6729 \pm 485.2 \mu m^2$ (n=5)

實驗組: $6699 \pm 418.0 \mu m^2$ (n=5)

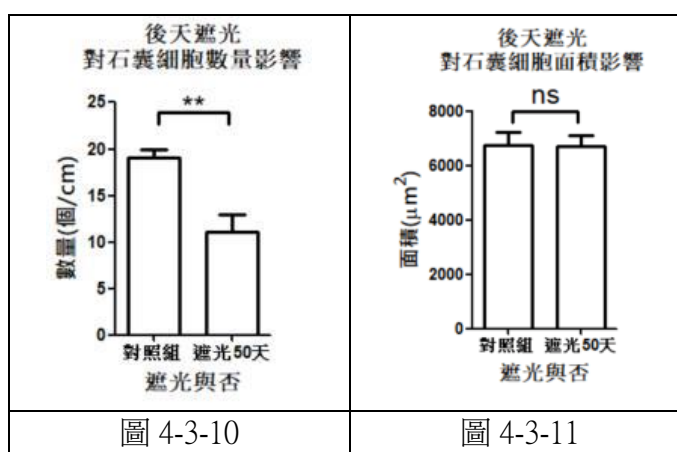


圖 4-3-10

圖 4-3-11

經由 t 檢定結果(圖 4-3-11)，石囊細胞的面積在兩組之間沒有差異($p = 0.482$)。

因此，後天遮光處理之後，石囊細胞的單位長度數量會減少、面積則不受影響。接著，我們來看鐘乳體的面積是否會受到後天遮光的影響。

3.圖 4-3-12 顯示遮光對鐘乳體面積：

對照組: $2755 \pm 332.2 \mu\text{m}^2$ (n=5)

實驗組: $3325 \pm 459.9 \mu\text{m}^2$ (n=5)

經由 t 檢定結果(圖 4-3-12)，雖然遮光 50 天的榕樹鐘乳體面積略為增加，但在兩組之間沒有差異($p=0.1725$)。

綜上所述，後天針對成熟葉片進行遮光並不會影響鐘乳體大小，但會使石囊細胞的數量減少；這是個很有趣的結果，因為成熟葉片的大小應該已經固定，鐘乳體的面積沒有影響也合理；但是石囊細胞的數量卻因遮光而減少，是否因為缺乏葉綠素的關係，值得另外設計實驗探討。

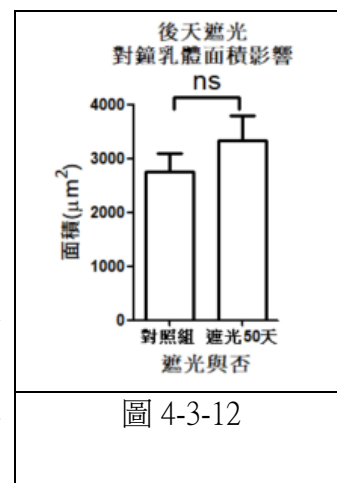


圖 4-3-12

實驗 3-7 先天白化對鐘乳體發育的影響

從前面幾個實驗觀察可以知道，光線對於鐘乳體的累積具有很重要的地位，為了驗證是否經由光照影響光合作用、光合作用再進一步影響鐘乳體的累積，接著進行實驗 3-7：

- (1)查詢網路資料，葉綠素是光合作用的主要色素，通過光能驅動二氧化碳和水合成有機物，同時產生 ATP 和 NADPH 等能量分子。
- (2)推測光合作用產生的有機酸（如草酸）可與鈣離子結合，形成可移動的鈣草酸鹽，並在特定細胞中轉化為碳酸鈣，沉積成鐘乳體。
- (3)假設：若葉綠素含量不足或缺乏，即使光線充足，但光合作用效率降低，可能導致鐘乳體形成的碳酸鈣減少，進而影響鐘乳體的大小、數量和層次結構。

為了探究天生缺少葉綠素對於鐘乳體生成是否有影響，我們利用鑲嵌型白化症的白錦星光垂榕來進行觀察。

對照組：正常、有葉綠素的綠色葉片部分；

實驗組：白化症、葉子缺乏葉綠素的部分。

圖 4-3-13 顯示，白化症的葉片，40X 下單位長度石囊細胞(黑色箭頭所指)數量較少，400X 下柵狀組織與海綿組織排列較對照組不規律、細胞結構不是很清晰；石囊細胞看起來沒有太大差異，但白化部分的鐘乳體看起來比較小、表面的圓錐狀突起也比較少。

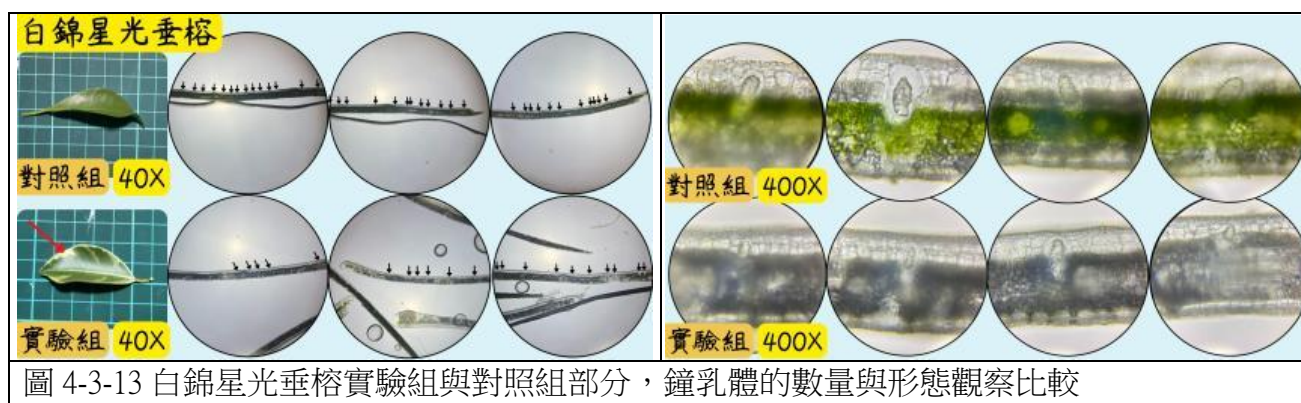


圖 4-3-13 白錦星光垂榕實驗組與對照組部分，鐘乳體的數量與形態觀察比較

接下來實際計算石囊細胞數量，並用 ImageJ 進行石囊細胞與鐘乳體面積測量，結果如下：

1.圖 4-3-14 顯示石囊細胞的數量差異：

對照組: 26.08 ± 2.041 個/cm ($n=6$)

實驗組: 17.00 ± 4.274 個/cm ($n=6$)

經由 t 檢定結果，白化區域的石囊細胞數量顯著較少($p<0.05$)。

2.圖 4-3-15 顯示石囊細胞的面積差異：

對照組: $4001 \pm 309.1 \mu m^2$ ($n=5$)

實驗組: $7625 \pm 641.9 \mu m^2$ ($n=5$)

經由 t 檢定結果，白化區域的石囊細胞面積顯著增加($p<0.001$)。

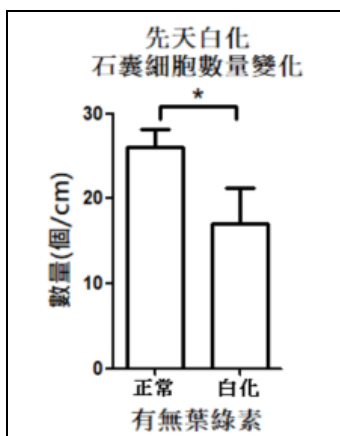


圖 4-3-14

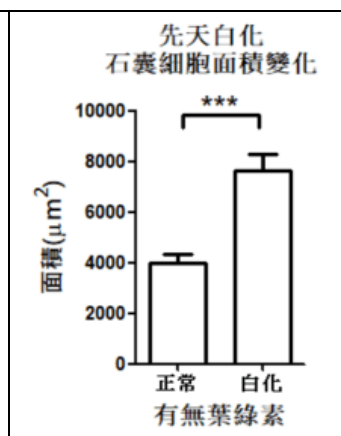


圖 4-3-15

因此，白化區的石囊細胞數量會減少、但面積會增加。接著，來看鐘乳體的面積是否會受到先天白化的影響。

3.圖 4-3-16 顯示鐘乳體的面積差異：

對照組: $1796 \pm 108.5 \mu m^2$ ($n=5$)

實驗組: $1362 \pm 229.7 \mu m^2$ ($n=5$)

經由 t 檢定結果，白化的葉片部分，鐘乳體面積較小，且達顯著差異($p<0.05$)。

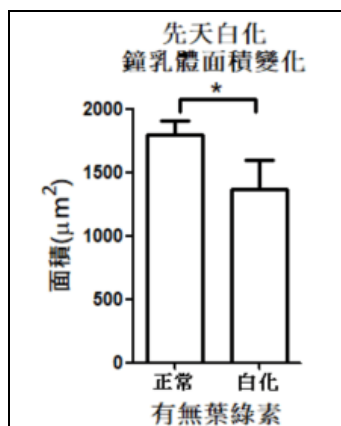


圖 4-3-16

綜合以上的結果，葉片白化、缺乏葉綠素會導致石囊細胞數量減少，但石囊細胞的面積增大，鐘乳體面積變小。因為有石囊細胞才能結晶鐘乳體，所以整體而言，鐘乳體的數量也是減少的。

推測缺乏葉綠素，會導致植物葉片無法行光合作用，沒有光合作用產生的能量來累積生成完整鐘乳體，因此鐘乳體較小、形態不完整、表面的圓錐狀突起也比較少；而石囊細胞面積變大，可能是細胞的一種回饋與補償機制。

四、設計實驗以驗證鐘乳體的化學成分

文獻提到鐘乳體的成分應該是碳酸鈣 ($CaCO_3$)、可能參與鈣的調節 (Seaward, 2003)，我們以化學方法：鹽酸溶解測試、鈣離子濃度滴定與顯微觀察來驗證。

實驗 4-1 鹽酸溶解測試：

將含有鐘乳體的橡膠榕樹葉薄片，滴加 1M HCl 並進行攝影觀察。在圖 4-4-1 中可以看到，鐘乳體的位置(黃色箭頭)，慢慢出現氣體、氣體會聚集成大氣泡、從下表皮氣孔處(紅色箭號處)冒出來。

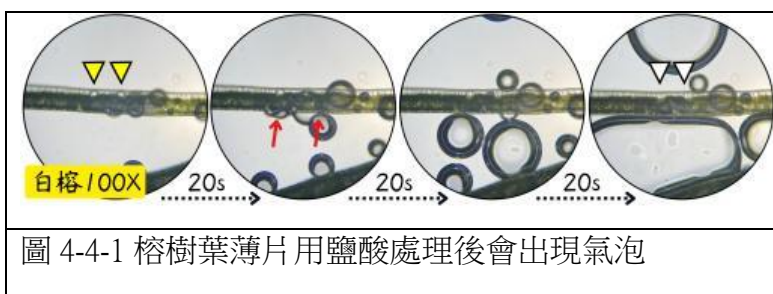


圖 4-4-1 榕樹葉薄片用鹽酸處理後會出現氣泡

氣泡聚集形成更大的氣泡，最後鐘乳體消失並留下石囊細胞空腔(白色箭頭處)。證明葉片當中含有碳酸鹽，因為碳酸鹽碰到鹽酸會溶解，產生二氧化碳。

實驗 4-2 顯微鏡觀察：

這個實驗運用兩種方式印證顯微鏡下觀察到的結果：

- 1.直接加鹽酸觀察(圖 4-4-2)，發現橡膠榕的葉片超薄片在稀鹽酸處理後 5 分鐘，石囊細胞中的鐘乳體結晶會分解、產生氣泡；石囊細胞仍可見，即使鐘乳體溶解，石囊細胞的結構，包含莖，仍然存在，代表莖的組成成分並非碳酸鹽。

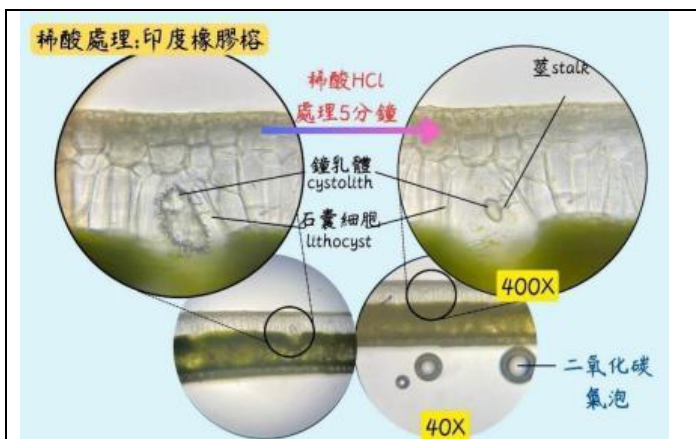


圖 4-4-2 稀鹽酸使鐘乳體分解只剩下莖

- 2.使用酒精去除葉綠素後，再用碘液染色，輔助觀察。在圖 4-4-3 中，400X 下可以清晰看到鐘乳體，先用酒精去除葉綠素，然後用碘液染色增加對比，這時候鐘乳體未受影響；最後加入 1M HCl 後，鐘乳體消失產生氣體、剩下石囊細胞與當中殘留的莖(紅色箭頭所指)。

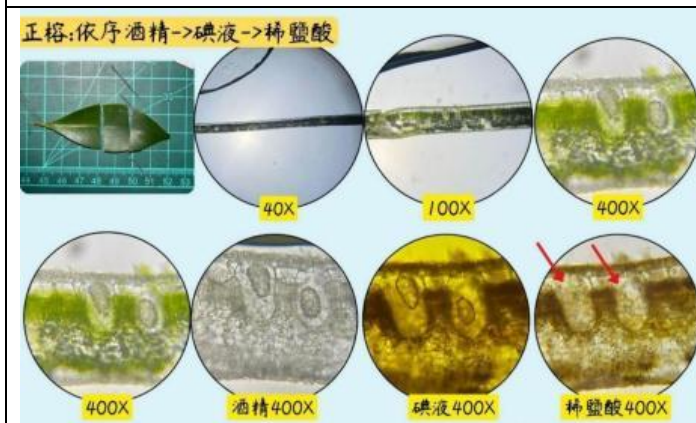


圖 4-4-3 用酒精與碘液染色輔助觀察鐘乳體

對比不同種類榕樹的鐘乳體樣本變化狀況，經測試結果顯示，正榕、白榕、黃金榕、小葉榕、橡膠榕和孟加拉榕，鐘乳體都會有一樣的反應結果：加入稀鹽酸後，鐘乳體會分解並產生氣泡，氣泡聚集後由氣孔溢出、並留下石囊細胞與中間的莖。

實驗 4-3 鈣試劑測試：

先將橡膠榕枯葉用果汁機攪碎後，取 2.5g 橡膠榕枯葉碎片，用 0.5N 鹽酸溶液充分溶解、用濾紙過濾後，分別用一次水稀釋成體積 20ml、40ml、60ml 和 80ml，並在稀釋過程中，分別用 Salifert 鈣試劑測得榕樹葉溶液的鈣離子濃度。所得結果如右圖 4-4-4，在 20ml 體積時鈣離子約 500ppm，隨著稀釋濃度會跟著減少、兩者呈現反比。因此，榕樹葉經鹽酸處理，會溶出大量的鈣離子。

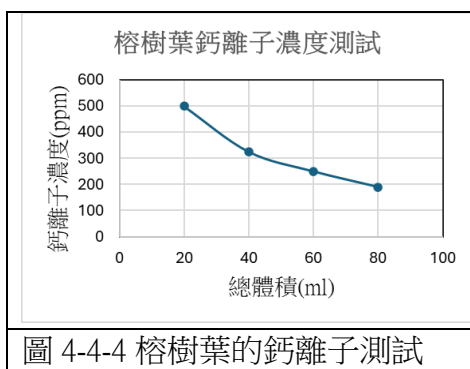


圖 4-4-4 榕樹葉的鈣離子測試

綜上實驗 4-1、4-2 與 4-3 的結果，我們證明榕屬植物當中鐘乳體的化學成分確實為碳酸鈣，發生的化學反應為： $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$ 而石囊細胞與裡面莖的構造，則不受鹽酸影響。

五、鐘乳體是否具有中和酸雨溶液的效果

實驗 5-1 榕樹葉的處理方式與酸鹼中和速率

測試榕樹葉鐘乳體中的碳酸鈣成分，是否有中和酸雨的能力，我們考慮兩種葉片處理方式：1.用剪刀剪或手撕成小塊；2.用果汁機攪成碎渣，各秤重 2g、放入 7 格式調色盤中，接著利用滴管在調色盤每格加入 7.5ml 的人工酸液(pH 4)。每隔 5 分鐘用廣用酸鹼試紙測量酸鹼變化，將酸鹼值紀錄下來如圖 4-5-1，結果發現：

榕樹葉可以中和人工酸雨，讓酸鹼值最後接近 pH6、接近中性。攪碎的葉片在 50 分鐘時達到中和酸雨的效果，撕碎小塊的樹葉，則要到 210 分鐘。

從這個結果可以推測，葉片攪碎之後有效釋放出鐘乳體中的碳酸鈣，增加跟人工酸雨的接觸面積、加快酸雨中和的速率。**榕樹葉片確實有中和酸雨的能力。**

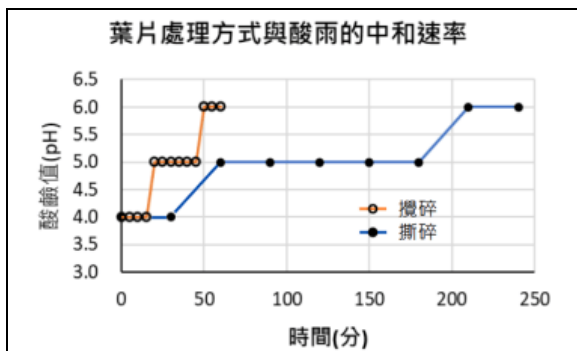


圖 4-5-1 葉片處理方式與酸雨中和速率

實驗 5-2 不同發育時期的榕屬植物葉片，中和人工酸雨的效果

從榕樹鐘乳體形態觀察，可以知道校園中常見的榕樹中，白榕、正榕跟橡膠榕，都具有發育完整的鐘乳體。而鐘乳體的面積，會隨著發育嫩葉、成熟葉到老葉漸漸增加，枯葉會減少。接著我們取這三種榕屬植物、不同發育時期的葉片依實驗 5-1 的方式打碎之後，觀察它們對於人工酸雨的中和效果，並將結果記錄後繪製成圖。

1.不同發育時期白榕葉片對人工酸雨的中和效果

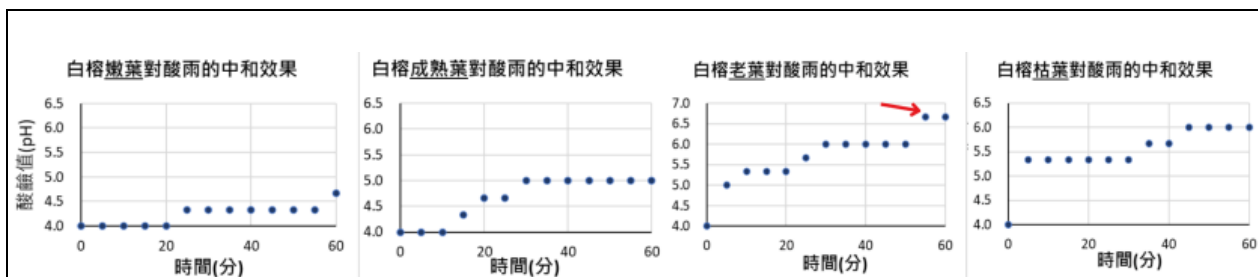


圖 4-5-2 白榕不同發育時期葉片對人工酸雨的中和效果

2.不同發育時期正榕葉片對人工酸雨的中和效果

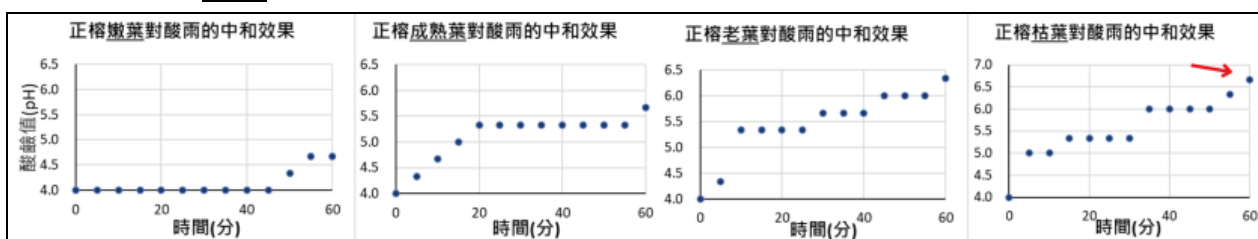


圖 4-5-3 正榕不同發育時期葉片對人工酸雨的中和效果

3.不同發育時期橡膠榕葉片對人工酸雨的中和效果

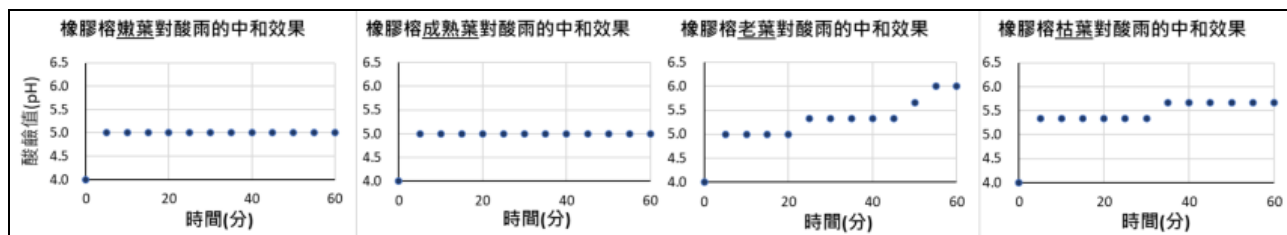


圖 4-5-4 橡膠榕不同發育時期葉片對人工酸雨的中和效果

從圖 4-5-1、圖 4-5-2、圖 4-5-3 發現，三種榕樹的嫩葉中和酸雨的效果，5 分鐘之後 pH 值從 4 到 5，之後都一直維持著 5；成熟葉中和酸雨的效果，5 分鐘之後，pH 值從 4 到 5，之後都一直維持著 5，而正榕的成熟葉可以到 pH5.5；三種榕樹的老葉中和酸雨的效果較好，pH6.0~ pH6.6(n=3)；三種榕樹的枯葉中和酸雨的效果比老葉的能力稍差，但可維持在 pH5.6(印度橡膠榕), pH6.0(白榕)和 pH6.5(正榕)。

因此，所實驗的三種榕屬植物：白榕、正榕和橡膠榕，打碎的葉片都具有中和人工酸雨的效果，而不同發育時期的葉片比較來說，其中和效果：老葉 > 枯葉 > 成熟葉 > 嫩葉。

實驗 5-3 不同榕屬植物嫩葉中和人工酸雨的效果比較

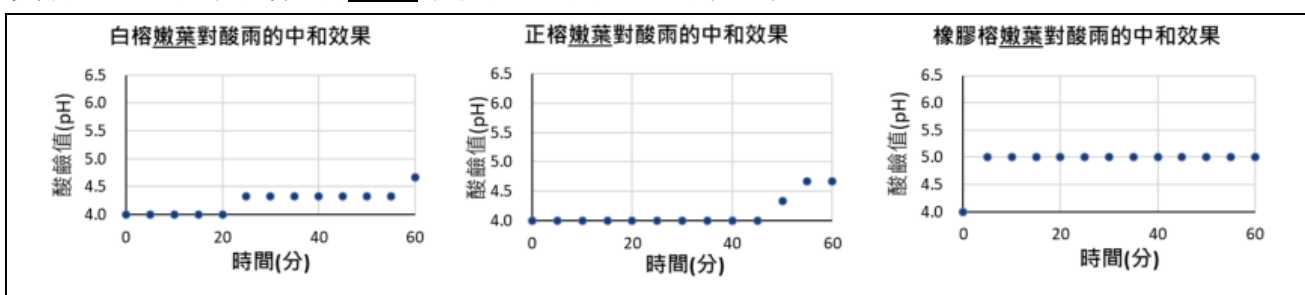


圖 4-5-5 不同榕屬植物嫩葉中和人工酸雨的效果

從圖 4-5-5 可以觀察到，橡膠榕中和人工酸雨效果稍微好一點，可以讓 pH4 的酸雨轉變到 pH5，但仍在酸雨範圍內；因此整體來說，三種榕樹的嫩葉中和酸雨的效果都很差。

實驗 5-4 不同榕屬植物成熟葉中和人工酸雨的效果比較

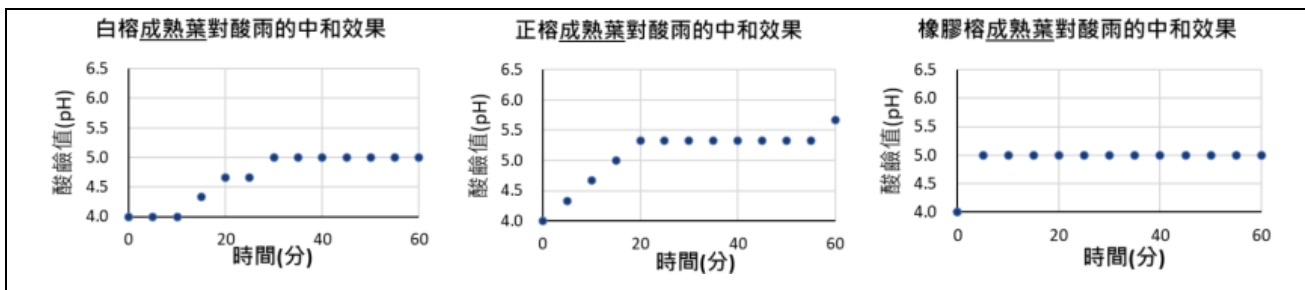


圖 4-5-6 不同榕屬植物成熟葉中和人工酸雨的效果

從圖 4-5-5 可以觀察到，正榕的成熟葉中和酸雨效果最好(pH5.7)，其次是橡膠榕、白榕 (pH5.0)，但都還是在酸雨的 pH 值範圍內、且白榕的反應速率較慢。

實驗 5-5 不同榕屬植物老葉中和人工酸雨的效果比較

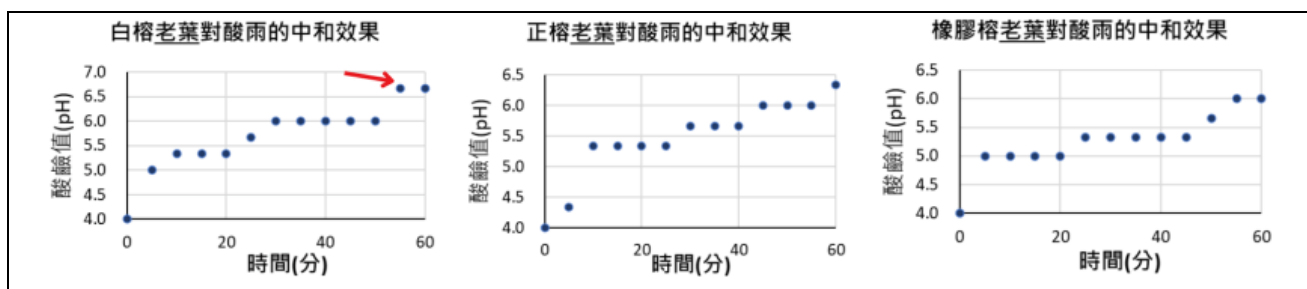


圖 4-5-7 不同榕屬植物老葉中和人工酸雨的效果

從圖 4-5-7 可以觀察到，白榕的老葉中和酸雨的能力最好，可中和酸鹼值到 pH6.6，其次是正榕的(pH6.3)，最差是印度橡膠榕的(pH6.0)。

實驗 5-6 不同榕屬植物枯葉中和人工酸雨的效果比較

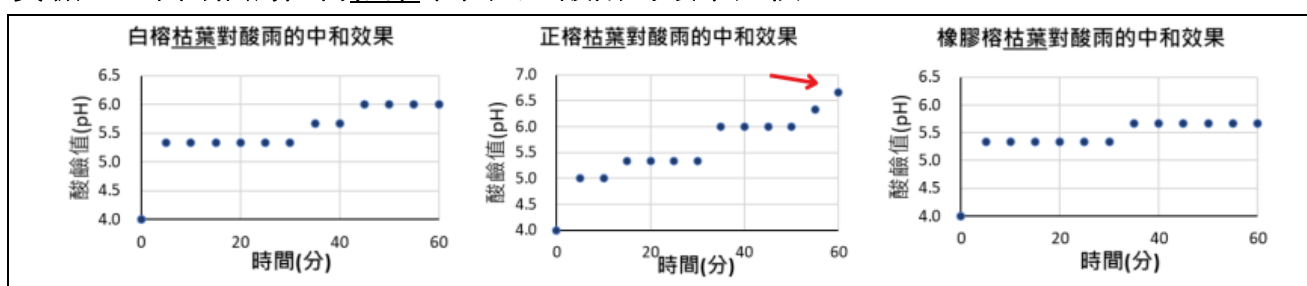


圖 4-5-8 不同榕屬植物枯葉中和人工酸雨的效果

從圖 4-5-8 發現，正榕的枯葉中和酸雨的能力最好(pH6.6)，其次是白榕的 (pH6.0)，最差是印度橡膠榕的 (pH5.7)。

綜上所述，以發育時期來說，三種榕樹的嫩葉中和酸雨的效果不明顯，可能與鐘乳體尚未發育完全有關(圖 4-2-4)；老葉是中和酸雨的效果最佳，可能與老葉鐘乳體達最大有關(圖 4-2-5)；枯葉次之。

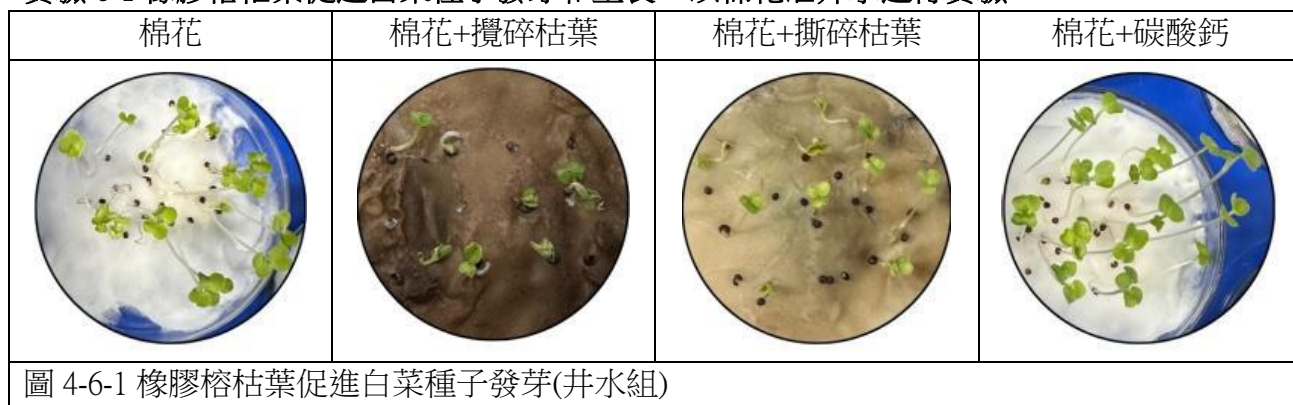
而榕樹種類，若以老葉跟枯葉來比較，白榕的老葉跟正榕的枯葉，都具有不錯的效果，以中和酸雨以及校園普遍性來看，後續實驗或未來應用，建議可以採用正榕的老葉或是枯葉作為材料，進行在環境改善方面的應用實驗。

六、鐘乳體是否具有緩衝酸雨且促進小白菜種子發芽與成長

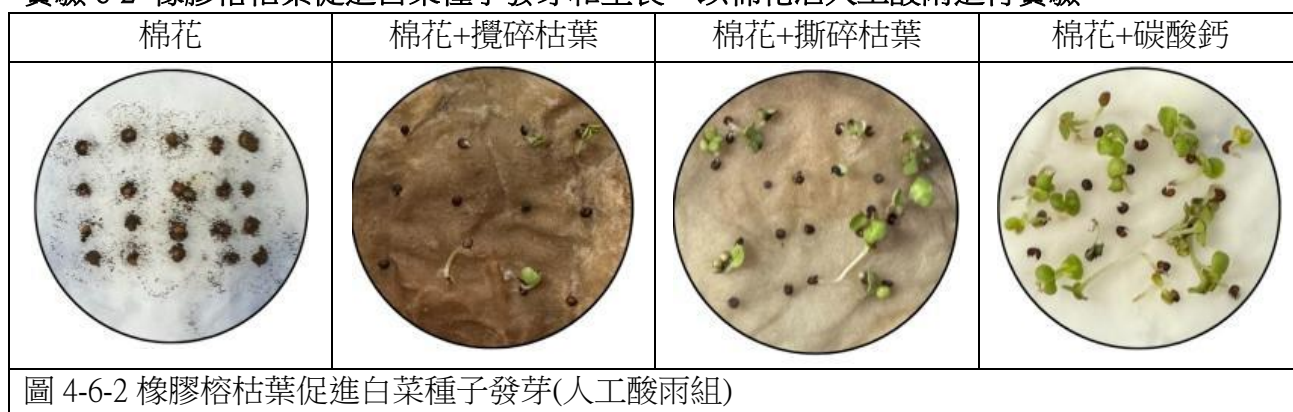
汪書平、舒偉傑(2005)提到榕樹粗萃取物有抑制種子萌發及生長的現象，因為葉片乳汁的關係。因此，我們採用中和酸雨的能力較好的橡膠榕枯葉和正榕枯葉(不含乳汁)，選擇攪碎及撕碎兩種形式進行此項實驗，並紀錄小白菜種子發芽及成長數據。

第一階段，我們先採用橡膠榕枯葉來測試鐘乳體是否能促進小白菜發芽，以棉花為種植基底，採用攪碎及撕碎兩種形式進行此項實驗，並紀錄小白菜種子發芽數據。

實驗 6-1 橡膠榕枯葉促進白菜種子發芽和生長，以棉花沾井水進行實驗

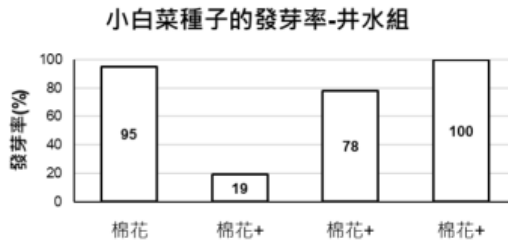
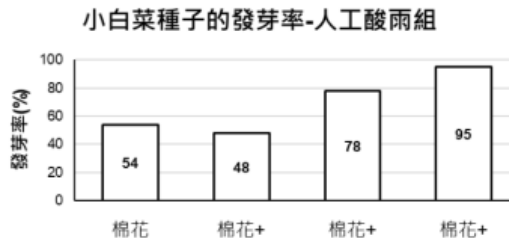


實驗 6-2 橡膠榕枯葉促進白菜種子發芽和生長，以棉花沾人工酸雨進行實驗



接著，我們統計小白菜種子的發芽率說明如表 4-6-1，並且繪製成長條圖做比較。

表 4-6-1 棉花實驗，小白菜種子的發芽率測量

條件	井水組				人工酸雨組			
	棉花	棉花+攪碎枯葉	棉花+撕碎枯葉	棉花+碳酸鈣	棉花	棉花+攪碎枯葉	棉花+撕碎枯葉	棉花+碳酸鈣
發芽率(%)	95	19	78	100	54	48	78	95
發芽率(%)	<p>小白菜種子的發芽率-井水組</p> 				<p>小白菜種子的發芽率-人工酸雨組</p> 			

(一)橡膠榕枯葉促進白菜種子發芽

綜合實驗 6-1、實驗 6-2 棉花實驗的結果發現：

- 井水組，發芽率以棉花+碳酸鈣組最好，100%發芽，發芽的優劣依序為：
棉花+碳酸鈣組 > 棉花組 > 棉花+撕碎枯葉組 > 棉花+攪碎枯葉組
- 人工酸雨組，發芽率以棉花碳酸鈣組最好，95%發芽，發芽的優劣依序為：
棉花+碳酸鈣組 > 棉花+撕碎枯葉組 > 棉花組 > 棉花+攪碎枯葉組。

第二階段，我們接著採用正榕枯葉來測試鐘乳體是否能促進小白菜發芽及生長，以土壤為種植基底，採用攪碎及撕碎兩種形式進行此項實驗，並紀錄小白菜種子發芽及生長數據。

實驗 6-3 正榕枯葉促進白菜種子發芽和生長，以土壤加井水進行實驗

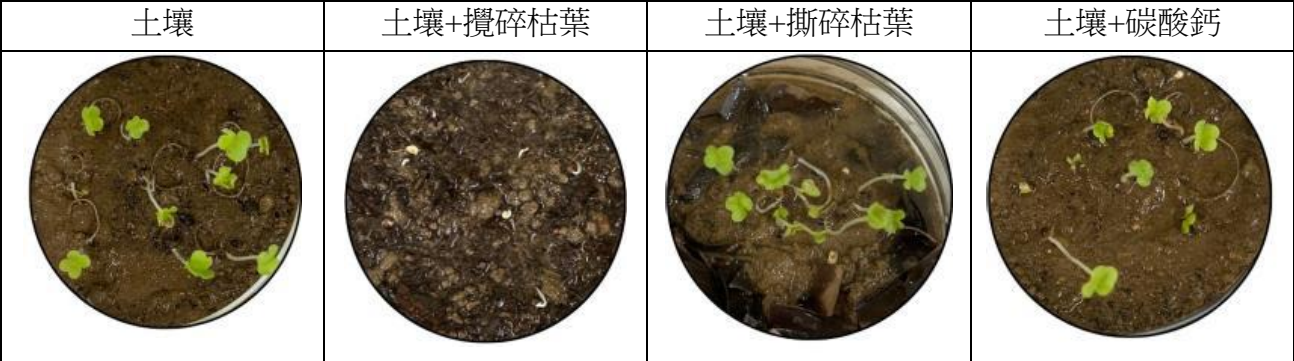


圖 4-6-3 正榕枯葉促進白菜種子發芽和生長(井水組)

實驗 6-4 正榕枯葉促進白菜種子發芽和生長，以土壤加人工酸雨進行實驗

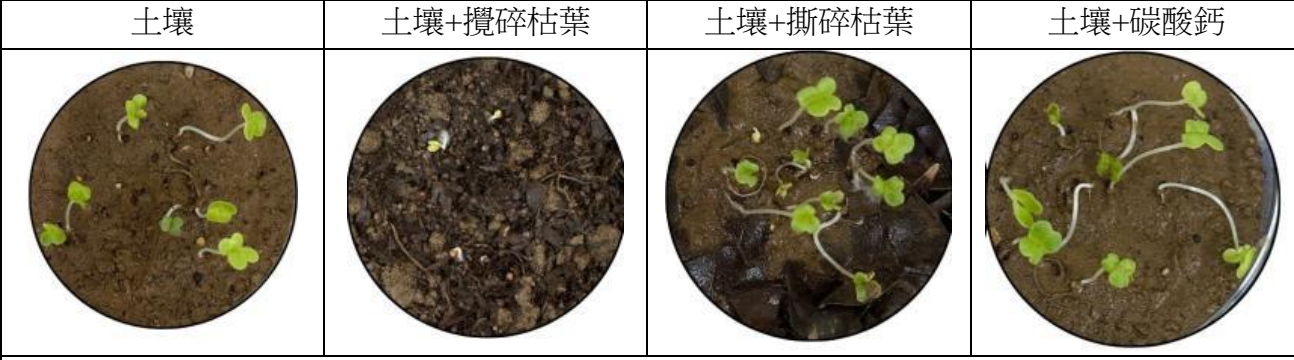


圖 4-6-4 正榕枯葉促進白菜種子發芽和生長(人工酸雨組)

接著，我們統計小白菜種子的發芽率、生長高度和平均重量，說明如表 4-6-2，並且繪製成長條圖做比較。

表 4-6-2 土壤實驗，小白菜種子的發芽率、生長高度和平均重量測量

條件	井水組				人工酸雨組			
	土壤	土壤+攪碎枯葉	土壤+撕碎枯葉	土壤+碳酸鈣	土壤	土壤+攪碎枯葉	土壤+撕碎枯葉	土壤+碳酸鈣
發芽率(%)	92	58	100	83	92	58	100	100
平均重量(g)	2.3	0.3	1.3	2.7	2.2	0.5	1.1	2.1
平均長度(cm)	6.2	2.5	6.4	5.7	5.1	2.8	5.5	5.7
發芽率(%)	<p>小白菜種子的發芽率-井水組</p>				<p>小白菜種子的發芽率-人工酸雨組</p>			

表 4-6-2(續) 土壤實驗，小白菜種子的發芽率、生長高度和平均重量測量																						
條件	井水組	人工酸雨組																				
平均重量 (g)	<p>小白菜種子的發芽率-井水組</p> <table><tr><th>處理組</th><th>平均重量 (g)</th></tr><tr><td>土壤</td><td>2.3</td></tr><tr><td>土壤+攪碎枯葉</td><td>0.3</td></tr><tr><td>土壤+撕碎枯葉</td><td>1.3</td></tr><tr><td>土壤+碳酸鈣</td><td>2.7</td></tr></table>	處理組	平均重量 (g)	土壤	2.3	土壤+攪碎枯葉	0.3	土壤+撕碎枯葉	1.3	土壤+碳酸鈣	2.7	<p>小白菜種子的發芽率-人工酸雨組</p> <table><tr><th>處理組</th><th>平均重量 (g)</th></tr><tr><td>土壤</td><td>2.2</td></tr><tr><td>土壤+攪碎枯葉</td><td>0.5</td></tr><tr><td>土壤+撕碎枯葉</td><td>1.1</td></tr><tr><td>土壤+碳酸鈣</td><td>2.1</td></tr></table>	處理組	平均重量 (g)	土壤	2.2	土壤+攪碎枯葉	0.5	土壤+撕碎枯葉	1.1	土壤+碳酸鈣	2.1
處理組	平均重量 (g)																					
土壤	2.3																					
土壤+攪碎枯葉	0.3																					
土壤+撕碎枯葉	1.3																					
土壤+碳酸鈣	2.7																					
處理組	平均重量 (g)																					
土壤	2.2																					
土壤+攪碎枯葉	0.5																					
土壤+撕碎枯葉	1.1																					
土壤+碳酸鈣	2.1																					
平均長度 (cm)	<p>小白菜種子的發芽率-井水組</p> <table><tr><th>處理組</th><th>平均長度 (cm)</th></tr><tr><td>土壤</td><td>6.2</td></tr><tr><td>土壤+攪碎枯葉</td><td>2.5</td></tr><tr><td>土壤+撕碎枯葉</td><td>6.4</td></tr><tr><td>土壤+碳酸鈣</td><td>5.7</td></tr></table>	處理組	平均長度 (cm)	土壤	6.2	土壤+攪碎枯葉	2.5	土壤+撕碎枯葉	6.4	土壤+碳酸鈣	5.7	<p>小白菜種子的發芽率-人工酸雨組</p> <table><tr><th>處理組</th><th>平均長度 (cm)</th></tr><tr><td>土壤</td><td>5.1</td></tr><tr><td>土壤+攪碎枯葉</td><td>2.8</td></tr><tr><td>土壤+撕碎枯葉</td><td>5.5</td></tr><tr><td>土壤+碳酸鈣</td><td>5.7</td></tr></table>	處理組	平均長度 (cm)	土壤	5.1	土壤+攪碎枯葉	2.8	土壤+撕碎枯葉	5.5	土壤+碳酸鈣	5.7
處理組	平均長度 (cm)																					
土壤	6.2																					
土壤+攪碎枯葉	2.5																					
土壤+撕碎枯葉	6.4																					
土壤+碳酸鈣	5.7																					
處理組	平均長度 (cm)																					
土壤	5.1																					
土壤+攪碎枯葉	2.8																					
土壤+撕碎枯葉	5.5																					
土壤+碳酸鈣	5.7																					

(二)正榕枯葉促進白菜種子發芽和生長

綜合實驗 6-3、實驗 6-4 土壤實驗的結果發現：

- 井水組，發芽率以土壤+撕碎枯葉組最好，100%發芽，發芽的優劣依序為：
土壤+撕碎枯葉組 > 土壤組 > 土壤+碳酸鈣組 > 土壤+攪碎枯葉組。
 小白菜生長的平均重量以土壤+碳酸鈣組最好，2.7g，平均重量的優劣依序為：
土壤+碳酸鈣組 > 土壤組 > 土壤+撕碎枯葉組 > 土壤+攪碎枯葉組。
 小白菜生長的平均長度以土壤+撕碎枯葉組最好，6.4cm，平均長度的優劣依序為：
土壤+撕碎枯葉組 > 土壤組 > 土壤+碳酸鈣組 > 土壤+攪碎枯葉組。
- 人工酸雨組，發芽率以土壤+撕碎枯葉組及碳酸鈣組最好，100%發芽，發芽的優劣依序為：
土壤+撕碎枯葉組 = 土壤+碳酸鈣組 > 土壤組 > 土壤+攪碎枯葉組。
 小白菜生長的平均重量以土壤組最好，2.2g，平均重量的優劣依序為：
 土壤組 > 土壤+碳酸鈣組 > 土壤+撕碎枯葉組 > 土壤+攪碎枯葉組。
 小白菜生長的平均長度以土壤+碳酸鈣組最好，5.7cm，平均長度的優劣依序為：
 土壤+碳酸鈣組 > 土壤+撕碎枯葉組 > 土壤組 > 土壤+攪碎枯葉組。

(三)綜合以上棉花及土壤等四項實驗

- 無論是棉花或土壤實驗，加攪碎枯葉的發芽率皆是最差的；加撕碎枯葉的發芽率皆是較佳的。
- 加攪碎枯葉井水組的的生長狀況最差、加攪碎枯葉人工酸雨組的狀況也很差，由此可知攪碎枯葉有抑制植物生長的情形；反之，加撕碎枯葉的井水組生長狀況最好、加撕碎枯葉人工酸雨組的狀況也很不錯，由此可知撕碎枯葉有促進植物生長的情形。
- CaCO₃是很好的酸雨中和劑，可提供理想的發芽環境，但需留意過鹼發生的反效果，例如在土壤組，我們發現加入碳酸鈣會讓土壤硬化，可能會不利於作物接下來的生長。
- 推論攪碎枯葉不僅抑制植物發芽也抑制生長；而榕樹枯葉確實可中和酸雨、促進植物生長，然而以撕碎方式為佳。

(四)綜合上述結果可得，鐘乳體有中和酸液、促進種子發芽及生長的效果。然而若採用攪碎的方式反而會呈現抑制的現象，這樣的結果與文獻是吻合的。

(五)實驗過後發現小白菜生長數據引發我們更多好奇且可以更完善之構想，所以我們決定購買白菜小苗來重作促進白菜生長的實驗，因報名時間的關係，實驗結果會在國展當天顯示出來。

伍、討論

一、石囊細胞、鐘乳體的在榕屬植物的形態差異

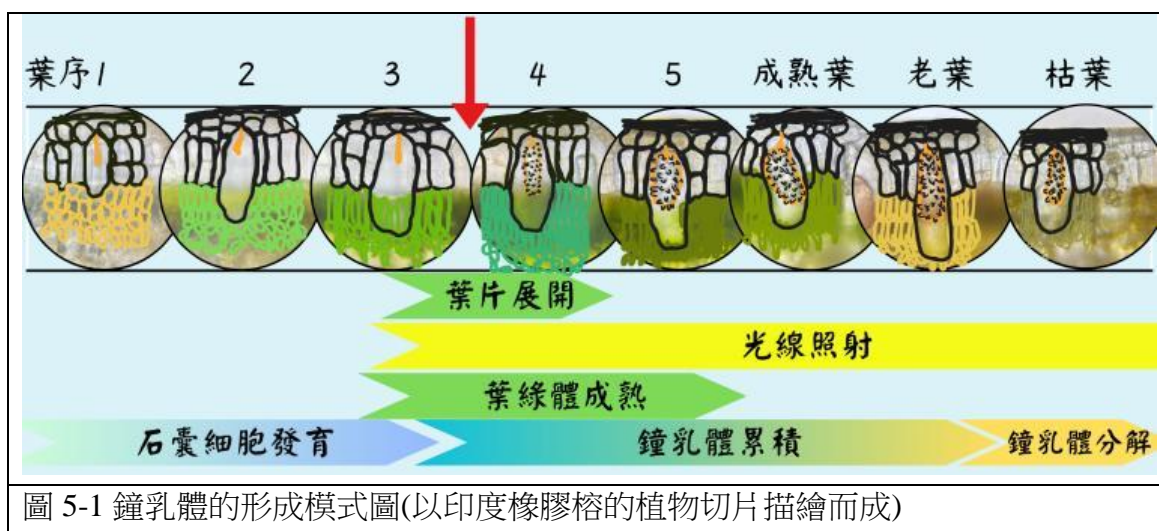
在顯微鏡下觀察鐘乳體的構造，讓我們感到驚艷，鐘乳體在葉子中所占比例極大；起初，我們覺得在肥厚的、上表皮有蠟質的葉子也有可能出現鐘乳體。但實驗結果，除了榕屬植物外，其他植物都沒有鐘乳體(圖 4-1-1)。這實驗結果和 Seaward (2003)所回顧的內容相吻合：鐘乳體主要存在於桑科、爵床科 (Acanthaceae) 等植物的石囊細胞內。這次實驗沒有進行爵床科植物的實驗，預計將來可以持續做實驗來探究。

透過教育部校園樹木資訊平台，我們調查各校園、社區中的榕樹種類，蒐集正榕(小葉榕、黃金榕)、白榕(白錦星光垂榕，白榕變異種)、印度橡膠榕、孟加拉榕與雀榕等，進行石囊細胞與鐘乳體的顯微觀察與分析。結果發現，印度橡膠榕的石囊細胞與鐘乳體最大(圖 4-1-2)，因為印度橡膠榕的葉形與細胞都較大。正榕與白榕的石囊細胞和鐘乳體大小與形態類似；孟加拉榕的鐘乳體很小，甚至只有石囊細胞中的莖、沒有鐘乳體。以上的觀察符合鐘詩文(2017)的桑科榕屬植物具有鐘乳體構造是相吻合的；但是雀榕也是屬於桑科榕屬植物，卻沒有看到石囊細胞和鐘乳體，值得進一步探究來探討原因。鐘乳體的形態和分布因植物種類不同而異，可能與演化歷程相關 (Metcalf & Chalk, 1983)，雀榕的演化也許有其他的路徑，結果缺乏石囊細胞和鐘乳體。

二、榕屬植物葉內石囊細胞的發育與鐘乳體的形成

我們根據印度橡膠榕葉片的觀察，繪製了鐘乳體的形成模式圖(圖 5-1)，嫩葉(葉序 1-3)開始發育石囊細胞和莖，但沒有鐘乳體累積。半成熟葉(葉序 4-5) 石囊細胞的莖開始累積鐘乳體，因為葉綠體成熟有足夠的能量。到成熟葉、老葉時，鐘乳體發展成熟，面積最大；枯葉的鐘乳體開始分解。Franceschi 與 Nakata (2005) 的文獻也說明，鐘乳體通常形成於石囊細胞的專門大型表皮細胞中，這些細胞於葉片發育過程中由普通表皮細胞分化而來

(Seaward, 2003; Metcalf & Chalk, 1983)，而這個過程可能是由鈣離子在特定有機基質（如黏多醣或多醣纖維）周圍聚集，逐漸發育為鐘乳體初生結晶（nucleation site），但對於詳細發育歷程還沒有一個完整性的研究報告出來。於是，我們仔細觀察榕樹葉的生長，按照葉序來判定葉子的年齡，分為嫩葉、未成熟葉、成熟葉、老葉與枯葉，詳細顯微鏡觀察、記載石囊細胞、莖和鐘乳體的形成與老化之發育歷程。



三、環境因素如何影響鐘乳體的形成

針對河口、平地和丘陵等不同環境因子如何影響鐘乳體的形成，我們的實驗發現土質偏鹼、鈣離子較多的河口地區，榕樹葉形成較多、較大的鐘乳體，較強的光照度(2100lux)也會促進鐘乳體的累積。這和文獻探討吻合，鐘乳體的形成過程受到細胞主動調控，包括：結晶核的定位、晶體生長方向與堆積速率，並可能受環境中鈣離子濃度、pH 值、水分條件及光照強度影響 (Franceschi & Nakata, 2005)。河口地區的土壤較黑、偏鹼性，同時具有較高的鈣、鈉和鎂離子，能促進榕樹葉片鐘乳體晶體的累積，所以鐘乳體的數量、面積都較多、較大。Seaward (2003)和 Franceschi & Nakata (2005)都有提出鹼性土壤、高鹽度與乾旱的環境條件，可能促進鐘乳體的形成與沉積。

另外，我們的實驗發現成熟葉片遮光 50 小時後，石囊細胞數量變少、但鐘乳體的大小卻不受影響。先天白化的白錦星光垂榕，本身缺乏葉綠素，鐘乳體的面積會變小。我們推測原因是鐘乳體的形成需要葉綠體行光合作用來提供能量幫助鈣離子的運輸，後天遮光則葉綠體無法進行光合作用提供足夠的能量，會導致葉片中的石囊細胞數量變少，相對的鐘乳體數量也會變少。Webb (1999) 的研究指出，光合作用會影響細胞的鈣離子運輸。先天白化的葉子葉綠體無法成熟，就算光線充足也沒有葉綠體來行光合作用、石囊細胞也就沒有能量來進行鈣離子主動運輸與堆積，因此，鐘乳體的面積會變小。

四、鐘乳體的組成成分驗證

Seaward (2003) 的研究指出，鐘乳體可能參與鈣的調節，是植物內部的鈣質累積物，主要由碳酸鈣構成，並在植物的機械支持與防禦系統中發揮作用。我們使用稀鹽酸處理鐘乳體，會產生氣泡，在顯微鏡觀察下，鐘乳體和稀鹽酸作用而解體；但這只能證明鐘乳體的成分為碳酸鹽(International Union of Pure and Applied Chemistry, 2005)。

想要證明鐘乳體的成分是碳酸鈣，我們查閱網站資料，購買 Salifert 鈣離子測試劑，將稀鹽酸溶解出的鐘乳體解體液，再用鈣離子測試劑檢定，發現鈣離子會增加，驗證鐘乳體的成分為碳酸鈣，這項發現支持鐘乳體在環境中具有中和酸性能力的假設。

五、榕樹葉對酸雨的中和能力

由於鐘乳體主要成分是由碳酸鈣組成，而碳酸鈣具有改善土壤酸鹼度、促進植物生長及增強土壤結構的潛力。我們想要證明鐘乳體具有中和酸雨的效果。實驗結果發現，三種榕樹的嫩葉中和酸雨的效果較差，因為鐘乳體尚未形成。成熟葉中和酸雨的效果逐漸提升，老葉中和酸雨的效果最好，能達到 pH6.0~ pH6.5；枯葉中和酸雨的效果比老葉的能力稍差。文獻也指出，當榕樹葉片枯落後，其殘存的碳酸鈣可能影響土壤 pH，進而影響周圍植物的生長條件（Fink, 1991）。落葉分解後可作為天然土壤改良劑，降低酸性土壤對作物的不良影響（Hutchinson, 2008）。因此，我們想要利用榕樹枯葉進行小白菜的種子發芽和生長實驗，觀察是否真的能促進植物的發芽或生長。

六、榕樹葉對酸雨中和與作物栽培的潛在應用價值

一些研究指出，鐘乳體可能降低植食性昆蟲的取食率，從而提高植物的存活能力（Massey et al., 2006），亦可能對抗真菌感染，提高植物抗病能力（Seaward, 2003）。本篇針對鐘乳體特性、形成過程、環境影響、化學成分到它對酸雨的中和能力與農業，提出榕樹葉與鐘乳體應用的新方向。

我們採用撕碎跟攪碎兩種方式，發現攪碎的榕樹枯葉會抑制其他植物的發芽與生長；比照前人研究（汪書平、舒偉傑，2005），我們進一步界定了這種抑制現象採用的樹葉為枯葉。而撕碎的榕樹葉片則可以提高小白菜發芽率與生長，特別是在酸雨環境中，可以讓降低的發芽率與生長情況有效恢復，這應該跟榕樹葉對抗真菌感染（Seaward, 2003）以及穩定環境酸鹼值（實驗四）的特性有關，而這跟鐘乳體的發育息息相關，以老葉跟枯葉的效果最佳。

榕屬植物作為熱帶與亞熱帶地區關鍵的綠色基礎設施，不僅在生態系統中扮演提供棲地、調節微氣候，更經本篇證實它具有改善土壤品質、穩定土壤酸鹼值的多重角色，因此，榕屬植物葉片中的鐘乳體對環境的保護與固碳潛力，是一項值得更深入探究的關鍵科學課題。

七、研究方法與未來改進方向

我們的研究包含：顯微觀察、影像分析、環境影響測試、化學成分分析與應用價值測試，並進行 *t* 檢定統計以確保數據可靠性。未來，我們想要進一步探究：1. 目前研究聚焦於榕屬植物，未來可擴展至爵床科植物（具有鐘乳體的植物），進一步探討桑科植物和爵床科植物，鐘乳體的生理與生態功能差異。2. 目前研究測試光照與白化葉片對鐘乳體形成的影響，但未進行詳細的定量分析。未來可擴展使用 ICP-MS（感應耦合電漿質譜儀）等技術測量葉片的鈣含量變化，分析其與鐘乳體形成的關係。3. 目前研究榕樹枯葉鐘乳體是否能中和酸雨、促進小白菜種子發芽與成長，實驗結果發現實際加碳酸鈣的效果最好，撕碎的榕樹枯葉比打碎的榕樹枯葉渣效果要好。我們懷疑榕樹枯葉渣中有某些成分不利於小白菜的生長。未來可進一步分析榕樹枯葉渣的成分，觀察那些成分促進小白菜生長、那些成分抑制小白菜生長。

陸、結論

一、分析不同種類的榕樹葉片中，鐘乳體的形狀、大小和數量的差異

不同種類的榕樹葉片中，鐘乳體主要分布於葉片上表皮細胞內，少數可見於下表皮，不同榕樹鐘乳體特性不同，有石囊細胞不一定可以形成鐘乳體；鐘乳體的大小：橡膠榕 > 正榕 ≥ 白榕 > 孟加拉榕。

二、觀察榕樹葉片在不同成長階段，鐘乳體的形成、成熟與老化的變化

根據印度橡膠榕葉的觀察，嫩葉(葉序 1-3)開始發育石囊細胞和莖，但沒有鐘乳體累積；半成熟葉(葉序 4-5) 石囊細胞的莖開始累積鐘乳體，到成熟葉、老葉時，鐘乳體發展成熟，面積最大；枯葉的鐘乳體開始分解變小。

三、河口、平地和丘陵等不同環境因子，如何影響鐘乳體的形成

從地理環境觀察，土質偏鹼、鈣離子較多的河口處，榕樹葉形成較多的鐘乳體，較強光照度(2100lux)會促進鐘乳體的累積。從實驗觀察，沒有葉綠素的白化葉片、遮光 50 小時缺乏葉綠素的葉片，石囊細胞數量減少，鐘乳體面積變小。

四、設計實驗以驗證鐘乳體的化學成分

利用鹽酸實驗證明鐘乳體含有碳酸鹽成分，在顯微鏡下可觀察到鐘乳體在鹽酸作用下分解、產生氣體。使用鈣離子試劑測試，證明鐘乳體含有鈣離子，證實鐘乳體的化學成分主要為碳酸鈣，而非草酸鈣。

五、探討鐘乳體中和酸雨溶液的效果

榕樹葉片中和酸溶液與人工酸雨的實驗結果，發現嫩葉中和酸雨的效果較差，成熟葉中和酸雨的效果逐漸提升，老葉中和酸雨的效果最好，枯葉中和酸雨的效果比老葉的能力稍差。果汁機打碎的葉片比撕碎的葉片中和效果更快。

六、鐘乳體中和酸雨，促進小白菜種子發芽與成長

榕樹葉中的鐘乳體，因具有中和酸雨的作用，具有潛力用來改善小白菜等作物在酸雨環境中的發育情況。

柒、參考資料及其他

1. 中華民國第 50 屆中小學科學展覽會 (2008)。葉裡的秘密——鈣離子對結晶形成的影響。作品說明書，高中組生物(生命科學)科，作品編號 040712。國立旗美高級中學，劉怡君、鍾立婷、蔡盈瑩、張尹柔。
2. 台灣 2005 年國際科學展覽會 (2005)。榕樹粗萃取液對種子萌發及生長之影響。生物化學科，大會獎第二名，加拿大正選代表參加加拿大 2005 年科學展覽會。臺北市立建國高級中學，汪書平、舒偉傑。
3. 林妙玲 (1997)。鈣與鋇對爵床植株生長及鐘乳體結晶形成的影響。國立臺灣大學植物學系碩士論文。
4. 教育部校園樹木資訊平台. (無年份). 取自 <https://edutreemap.moe.edu.tw/trees/#/>
5. 鍾詩文 (2017)。《台灣原生植物全圖鑑 (第四卷): 大戟科——薔薇科》。貓頭鷹出版社。
6. 臺灣維管束植物調查及物候觀察計畫. (無年份). 取自 <https://plant.tbn.org.tw/>
7. Barlow, P. W. (2015). Calcium in plants: Uptake, transport and function. *Journal of Plant Physiology*, 172, 1 – 12.
8. Fink, S. (1991). The significance of calcium oxalate crystals in higher plants. *Plant, Cell & Environment*, 14(7), 703 – 712.
9. Franceschi, V. R., & Nakata, P. A. (2005). Calcium oxalate in plants: Formation and function. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 41 – 71.
10. Hutchinson, G. E. (2008). *The Ecological Theater and the Evolutionary Play*. Yale University Press.
11. International Union of Pure and Applied Chemistry (2005). *Nomenclature of Inorganic Chemistry (IUPAC Recommendations 2005)*. Cambridge (UK): RSC – IUPAC. ISBN 0-85404-438-8. Electronic version
12. Lin, M.-L., Yen, T.-B., & Kuo-Huang, L.-L. (2004). Formation of calcium carbonate deposition in the cotyledons during the germination of *Justicia procumbens* L. (Acanthaceae) seeds. *Taiwania*, 49(4), 250 – 262.
13. Massey, F. P., Ennos, A. R., & Hartley, S. E. (2006). Herbivore-specific induction of silica-based plant defenses. *Oecologia*, 150(3), 471 – 479.
14. Metcalfe, C. R., & Chalk, L. (1983). *Anatomy of the Dicotyledons: Volume II - Wood Structure and Conclusion of the General Introduction*. Clarendon Press.
15. Seaward, M. R. D. (2003). Calcium carbonate deposition in plants: A review. *Botanical Review*, 69(1), 1 – 22.
16. Webb, M. A. (1999). Cell-mediated crystallization of calcium oxalate in plants. *The Plant Cell*, 11(4), 751 – 761.

【作品內圖表照片說明】

本作品『榕樹葉裡的鑽石-探討鐘乳體的形成與應用』內容所有照片、圖片、圖表皆由作者自行拍攝、繪製。

【評語】 030315

1. 本研究探討榕樹葉內鐘乳體的形態、物種差異、發育過程、環境影響及其在中和酸雨及促進種子發芽之潛力。
2. 研究團隊建立詳細實驗主題研究架構，與人工酸雨測試相結合的實驗更可與氣候變遷議題扣合。
3. 報告中呈現許多數據與描述，建議可簡化語句，使表達更精簡明瞭外，圖表標題和說明的說明可更為清晰，增加報告的易讀性。
4. 建議需要將實驗的材料與方法可以清楚表達、紀錄或陳述，尤其是對於該研究的重點規劃，如人工酸雨中和測試。
5. 可以多探討為何撕碎的葉片會比絞碎葉片更為有效中和酸雨所帶來的負面效益，也可多從其他科學文章中獲取知識或靈感。
6. 不同榕樹葉所形成的鐘乳體不盡相同，其可能原因為何？與其生長之生態環境、高度、葉子的厚薄、形式等是否有所關聯性？若鐘乳體較大或是面積較多，對於植物體之影響為何？鐘乳體和石囊細胞部分現階段以面積代表，可以思考如何測量鐘乳體含量以推估實際碳酸鈣含量，由此可再進一步計算可中和的能力。

7. 目前實驗結果看起來可以具備中和酸雨的潛力，團隊也提出未來可以進行應用的可能，但建議可提出更詳細的應用策略。

作品海報

榕樹葉裡的鑽石-



探討鐘乳體的形成與應用



鴨跖草-針狀草酸鈣結晶

榕屬植物-鑽石狀碳酸鈣結晶

鐘乳體 (Cystolith) :

- 碳酸鈣累積結構，桑科植物如榕樹 (榕屬Ficus Spp.)
- 鈣的調節、機械強度與防禦機制

動機&目的

- 植物生理上的潛在功能?
- 是否受環境因子影響?
- 環境應用上的可能性?

研究架構

鐘乳體的形成與應用

種類的差異	發育的變化	環境的影響	鐘乳體的成分	中和酸雨潛力	作物發育的影響
校園植物 葉片厚實 植物數種	橡膠榕 不同發育期 葉序1-3嫩葉 葉序4-5半成熟葉 成熟葉 老葉-黃色 枯葉-落地褐色	不同環境 酸鹼度 光照度 含鈣量 光合作用的影響 光照度 後天遮光 先天白化	徒手切片、顯微觀察 打碎葉片 定量 鹽酸測試 顯微觀察與攝影 鈣離子測試	不同榕樹 橡膠榕 白榕 正榕 井水 碳酸鈣 榕樹年紀 嫩葉 成熟葉 老葉 枯葉 加入人工酸雨 酸鹼測試	底部 棉花 土壤 溶液 井水 硝酸 硫酸+硝酸 作物發育觀察

徒手切片、顯微觀察與攝影
ImageJ測量與數據分析

植物代謝累積物:依序碳酸鈣、矽酸鈣與草酸鈣

材料方法

(1)顯微觀察與照相設備：
複式顯微鏡、蓋玻片、載玻片、單面刀片、手機、滴管、切割墊、鑷子、手機顯微鏡支架。

(2)化學藥劑：鹽酸、95%酒精、硝酸、硫酸、碳酸鈣粉末、碘液、Salifert鈣離子測試劑。

(3)其他：三合一土壤測試儀、照度計TES1330A、果汁機、測距儀SW-100G、培養皿、燒杯、夾鏈袋、調色盤、酸鹼廣用試紙。

單面刀片

葉片裁切

切片後水埋

顯微鏡觀察

研究結果

正榕葉片切片顯微攝影：
葉片的光合作用構造與鐘乳體。
石囊細胞 (Lithocyst)：特殊的薄壁細胞，內部包含鐘乳體，是植物儲存碳酸鈣的部位。

實驗1-1.特徵和榕樹類似的常見木本植物葉片

七里香	桂花
樟樹	福木
鵝掌藤	正榕
茄冬	白榕

實驗1-2.鐘乳體在不同榕樹葉片中的差異

不同榕樹鐘乳體差異

正榕	白榕	孟加拉榕
小葉榕	黃金榕	雀榕
印度橡膠榕		

1. 七里香、樟樹、鵝掌藤、茄冬、桂花、福木與正榕、白榕等榕屬植物一樣，具有厚上表皮與蠟質，葉片厚實、表面光滑。

2. 正榕與白榕具有鐘乳體，大多位於上表皮、少數也會出現於下表皮。
1. 不同品種榕樹鐘乳體的數量及形狀存在明顯差異，例如雀榕並無石囊細胞與鐘乳體構造。

2. 鐘乳體特徵:多呈長柱狀，部分為角錐型，且都具有不規則圓錐狀突起。

桑科榕屬植物
(*Ficus* 屬)

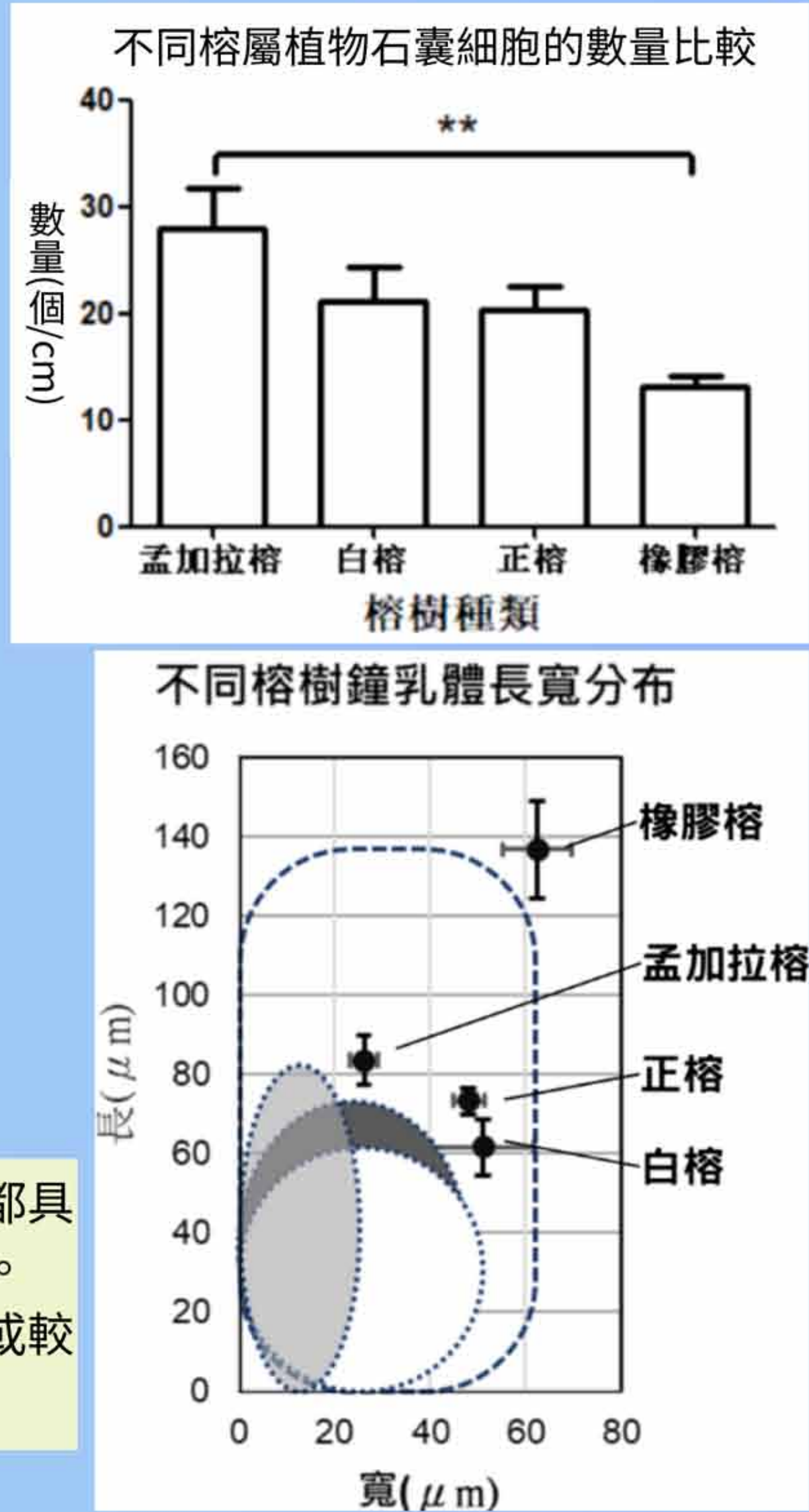
Ficus benjamina
白榕, 垂榕

Ficus microcarpa
正榕、黃金榕、小葉榕

Ficus elastica
印度橡膠榕

Ficus benghalensis
孟加拉榕

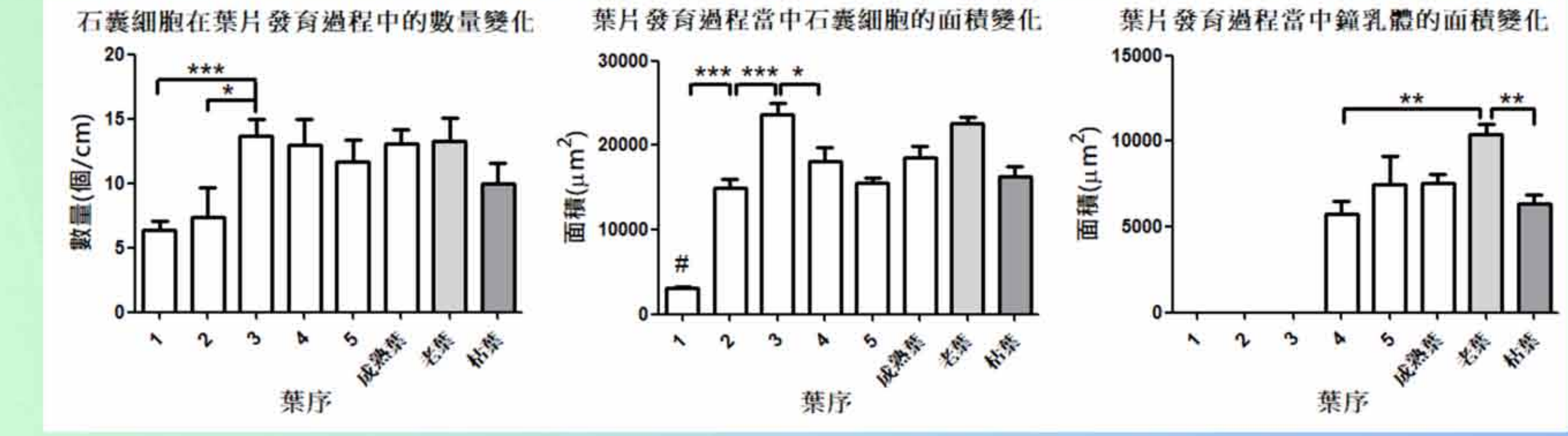
Ficus septica
雀榕



- 鐘乳體在數量、分布和形狀上與分類是相吻合的。
- 石囊細胞數量: 孟加拉榕最多, 白榕與正榕次之, 橡膠榕最少。
- 鐘乳體面積: 印度橡膠榕最大, 呈長柱狀; 正榕與白榕次之, 偏圓形; 孟加拉榕最小, 形狀為扁橢圓、略扁。

除雀榕外, 白榕、正榕、印度橡膠榕與孟加拉榕都具有石囊細胞與鐘乳體, 因此只觀察與分析這四種。此外, 孟加拉榕有些石囊細胞並沒有形成鐘乳體或較小, 因此後面實驗只用正榕、白榕、橡膠榕。

實驗2. 鐘乳體在葉片發育過程中的變化



- 鐘乳體在植物不同發育階段中存在顯著差異。
- 嫩葉隨著發育, 會先出現石囊細胞與內部的莖(stalk), 再慢慢累積成鐘乳體。
- 枯葉或受傷的葉子部位, 鐘乳體會慢慢分解。

實驗3-3 先天缺乏光合色素的影響

白錦星光垂榕

對照組 40X

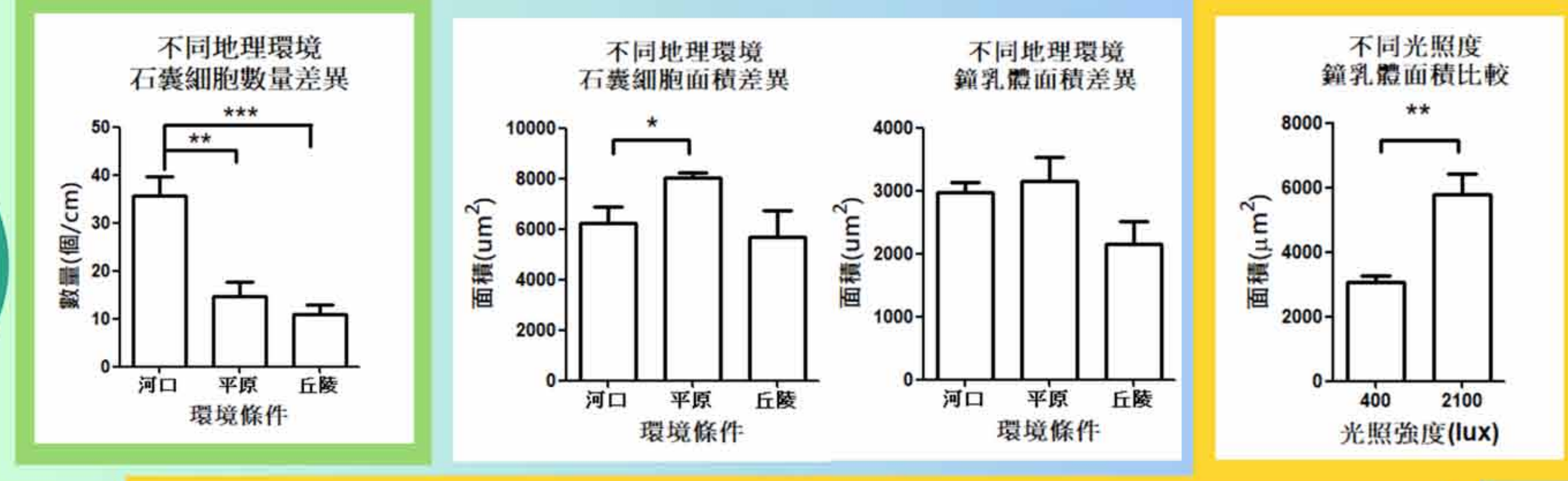
實驗組 40X

先天白化石囊細胞數量變化

先天白化石囊細胞面積變化

先天白化鐘乳體面積變化

實驗3-1. 環境因素對榕樹鐘乳體的影響



- 不同環境因子對鐘乳體相關構造會有影響, 例如土壤酸鹼度對石囊細胞數量有顯著影響; 濕度和光照度則是對鐘乳體形成有顯著影響。
- 光照度高者鐘乳體面積較大, 在同一植株內即存在明顯差異。

實驗3-2. 後天遮光的影響

正榕

對照組 100X

實驗組 100X

後天遮光對石囊細胞數量影響

遮光對石囊細胞面積影響

遮光對鐘乳體面積影響

遮光50天後:

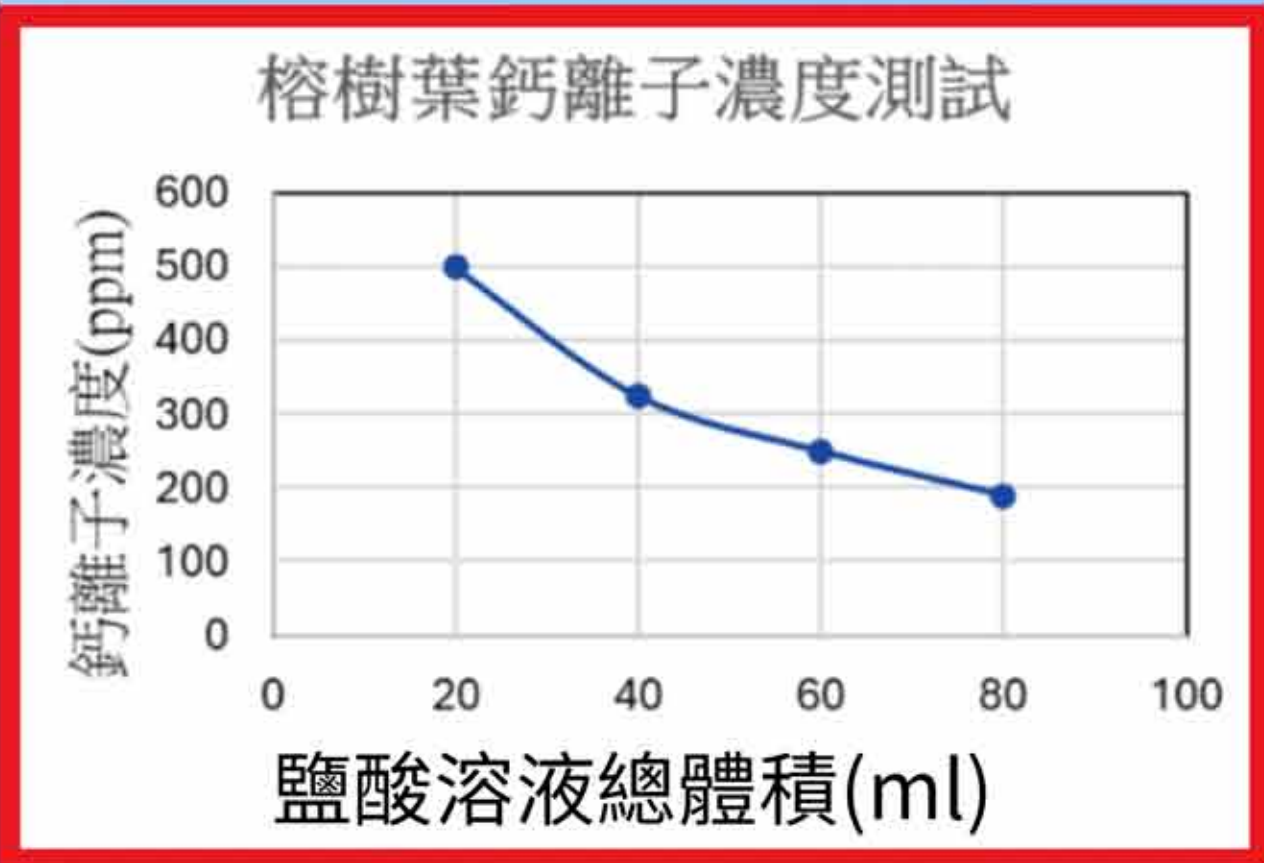
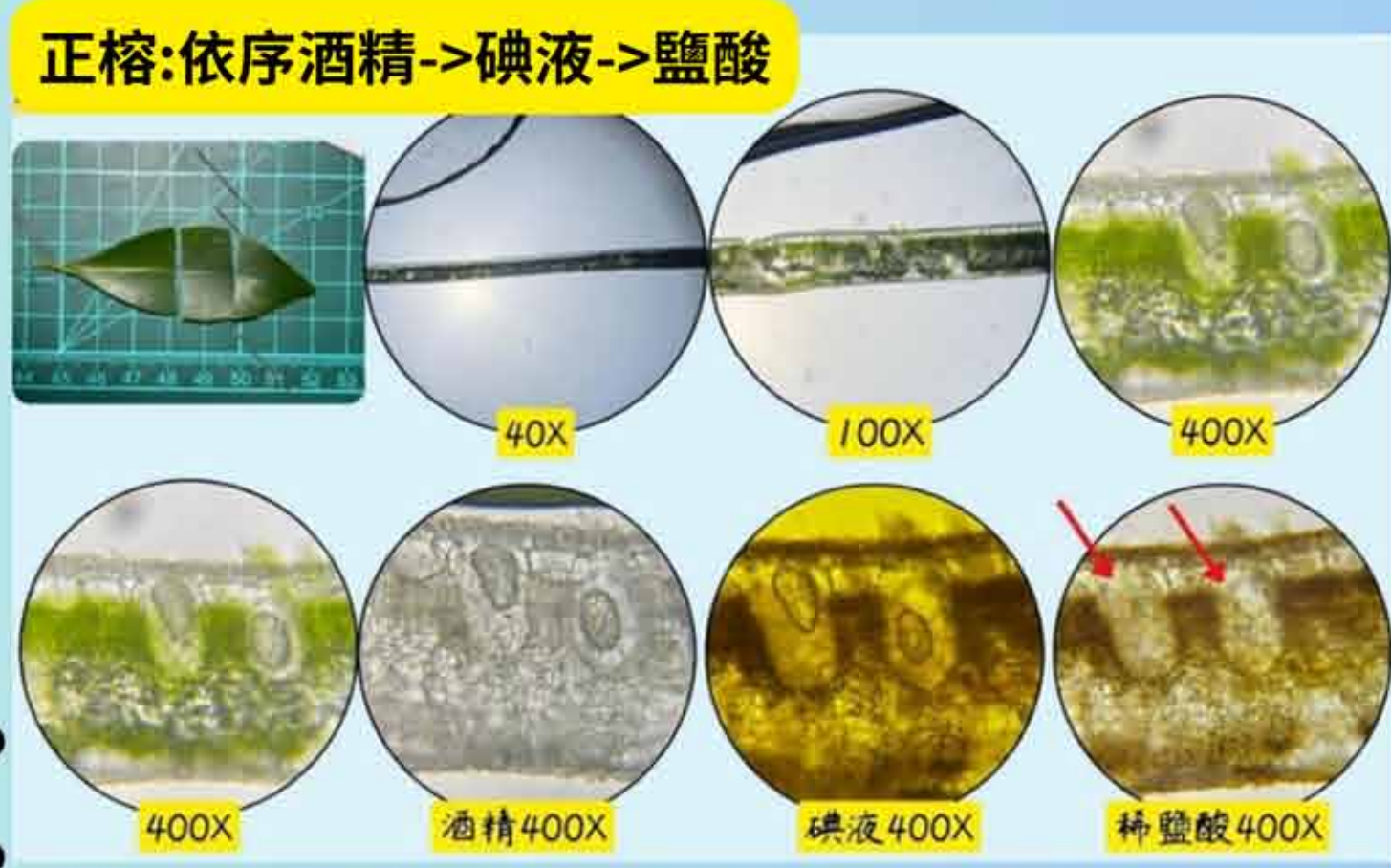
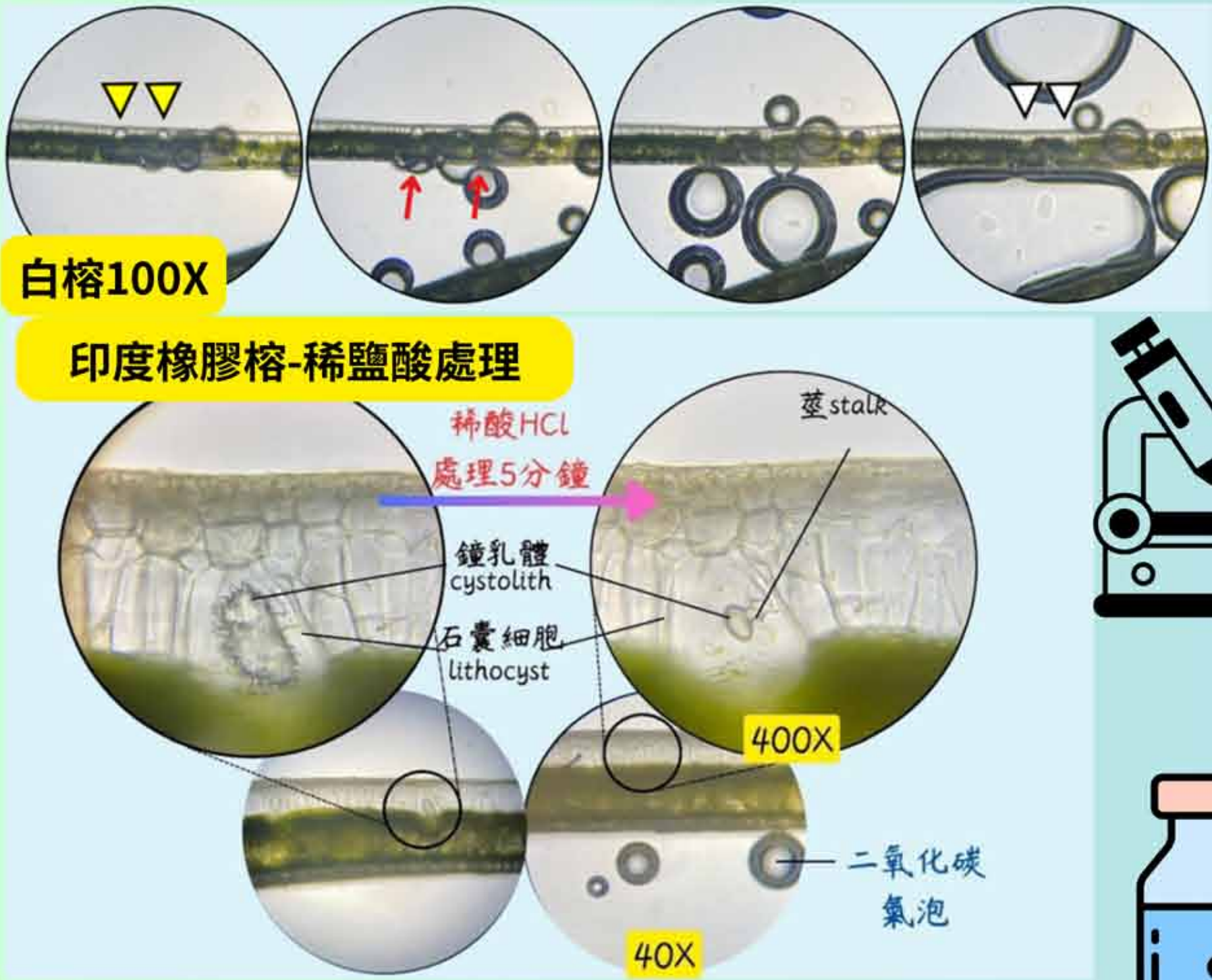
- 石囊細胞數量減少。
- 石囊細胞與鐘乳體面積則不變。

推測是因為成熟葉片的大小已經固定, 所以石囊細胞與所累積的鐘乳體面積不變; 但石囊細胞的數量卻因遮光而減少, 是否是因為缺乏光照的關係, 值得另外設計實驗探究。

先天白化區:

- 石囊細胞數量減少, 顯示白化可能會使鐘乳體數量減少。
- 石囊細胞面積在白化區明顯較大, 顯示白化可能促進石囊細胞發展。
- 白化區的鐘乳體明顯較小。
- 白化區的數據變異較高, 顯示白化可能使組織發展更加不穩定。

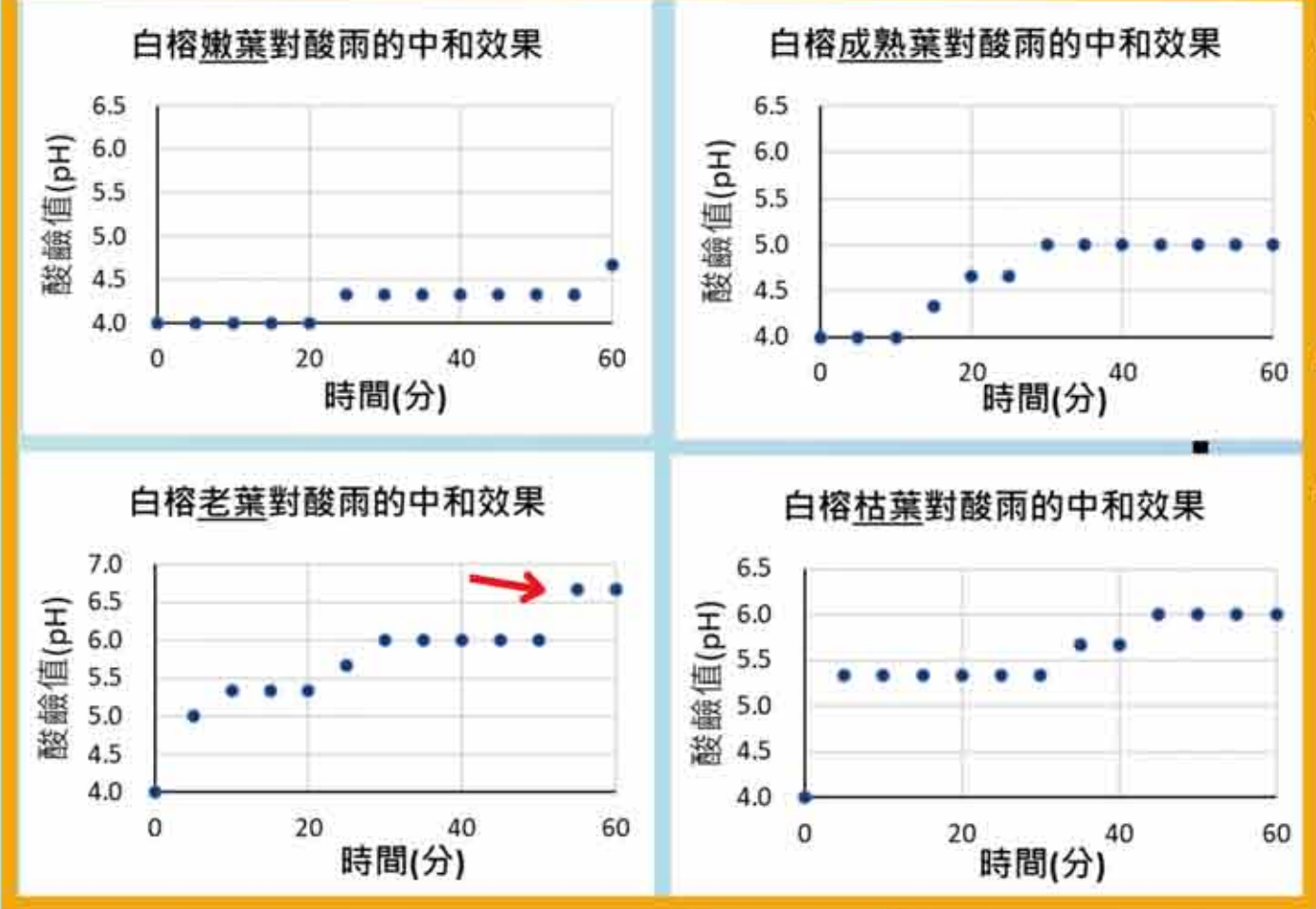
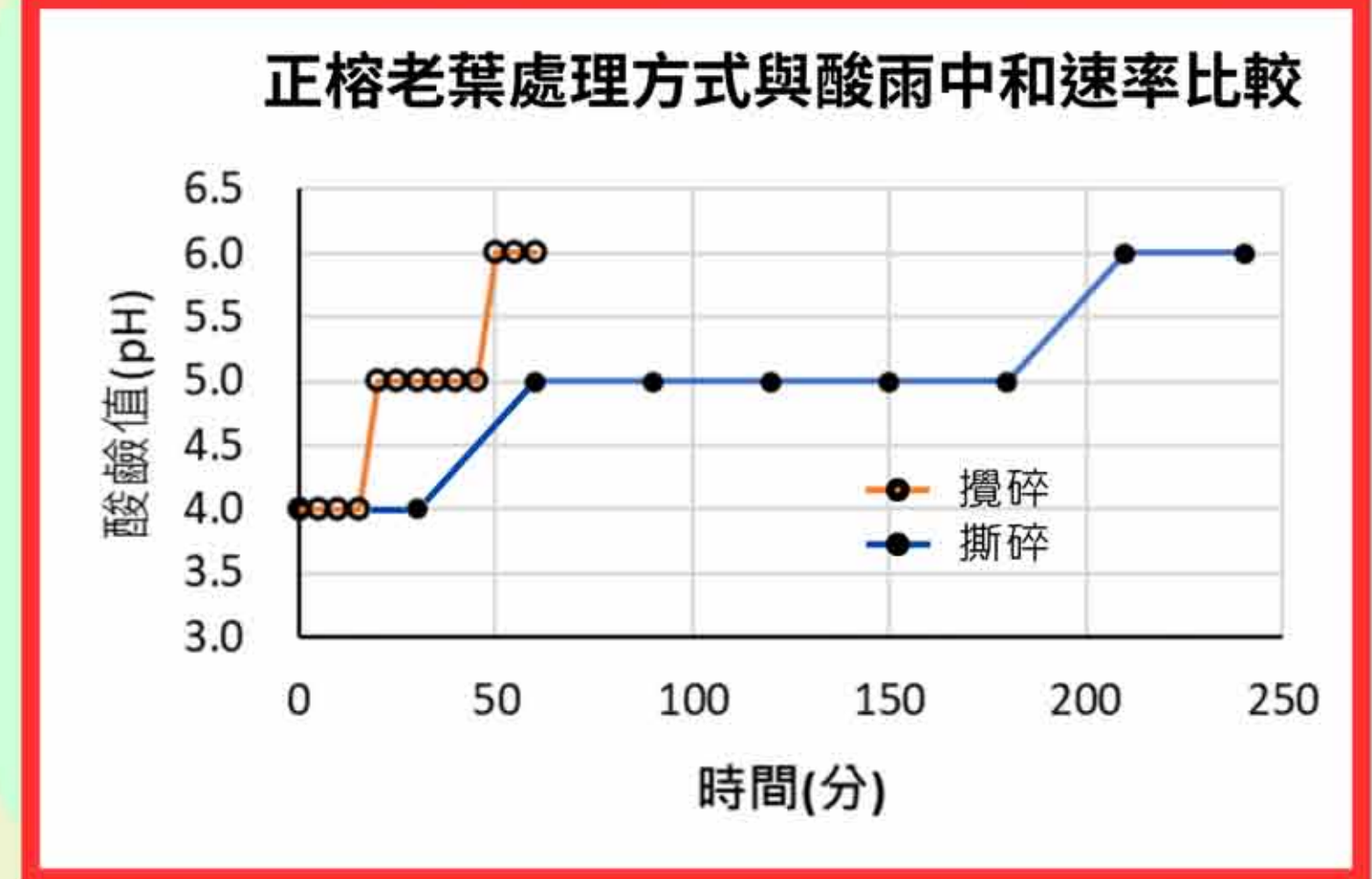
實驗4. 榕樹鐘乳體的主要化學成分



稀鹽酸處理後，鐘乳體本身會分解、產生二氧化碳氣泡，石囊細胞中殘留莖(stalk)。碳酸鈣(CaCO₃)與鹽酸(HCl)發生以下反應：
 $CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + CO_2 \uparrow + H_2O$

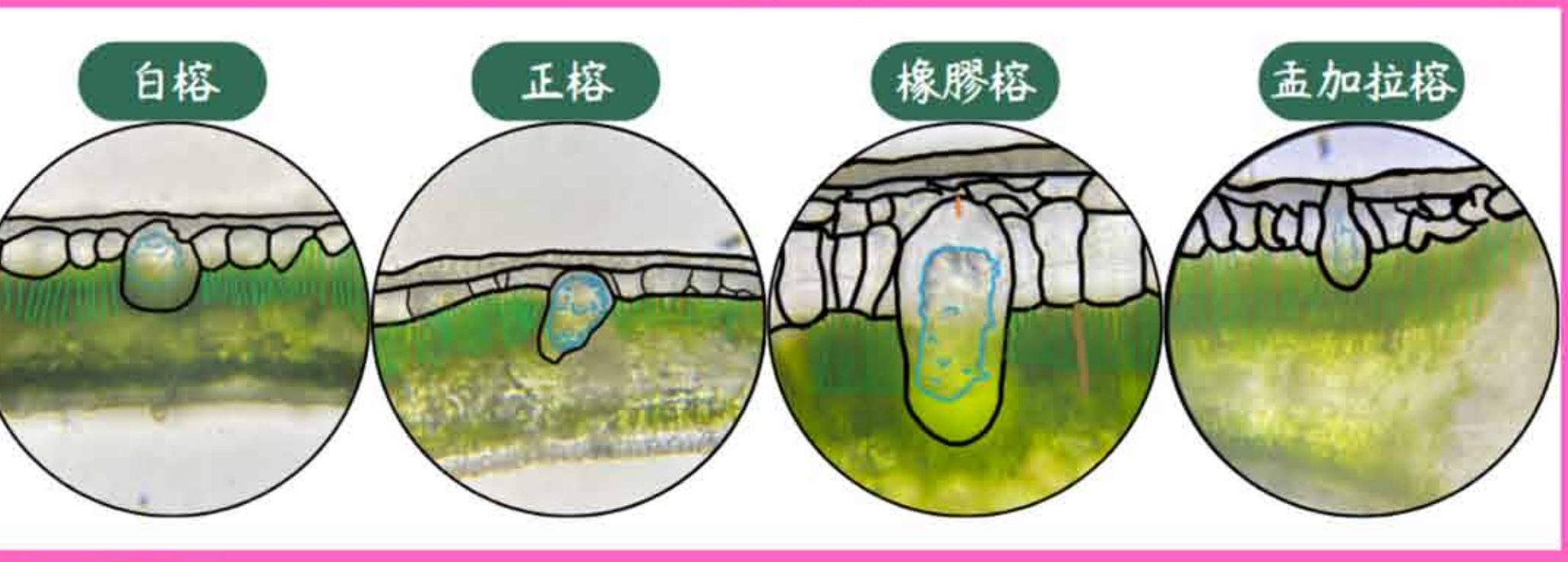
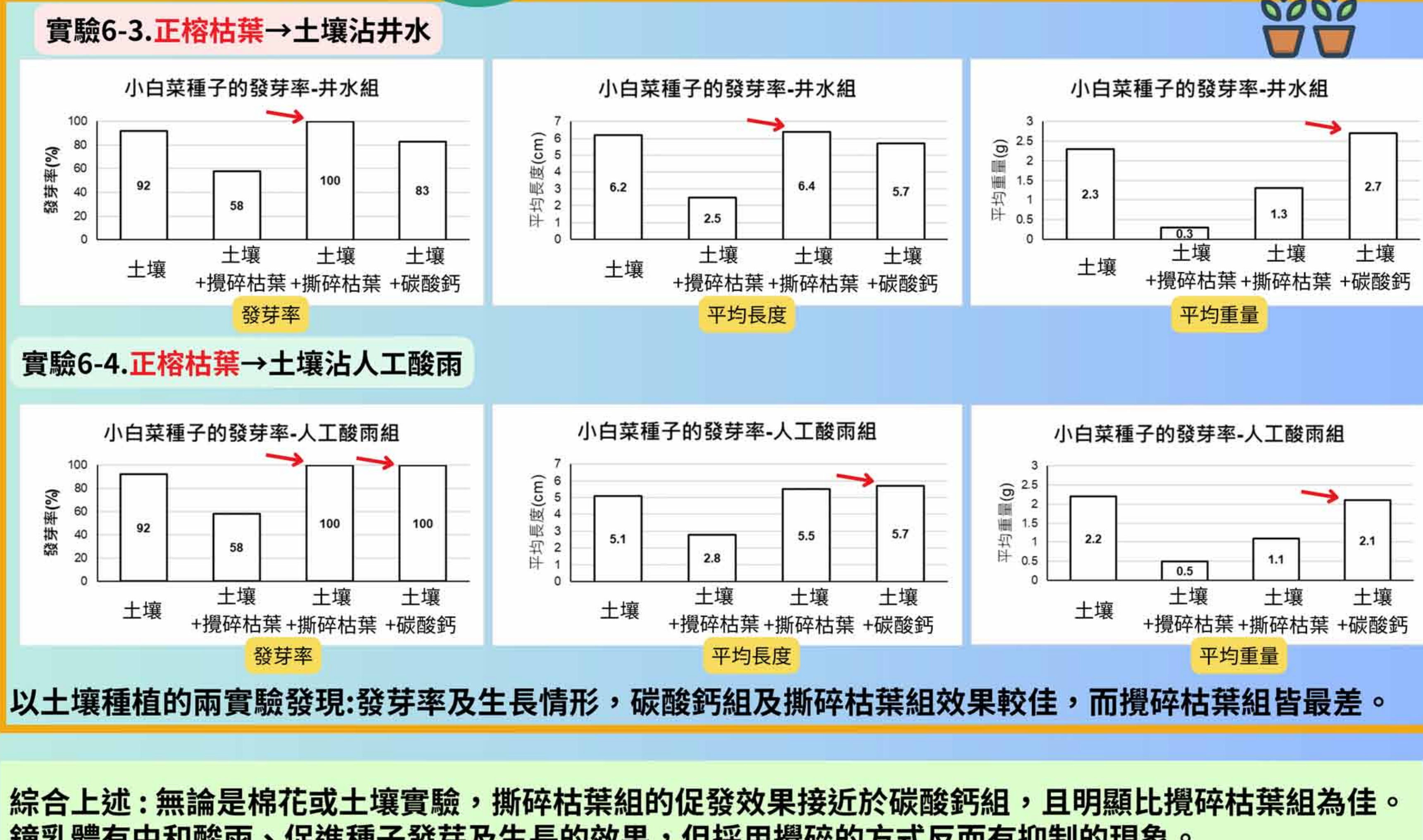
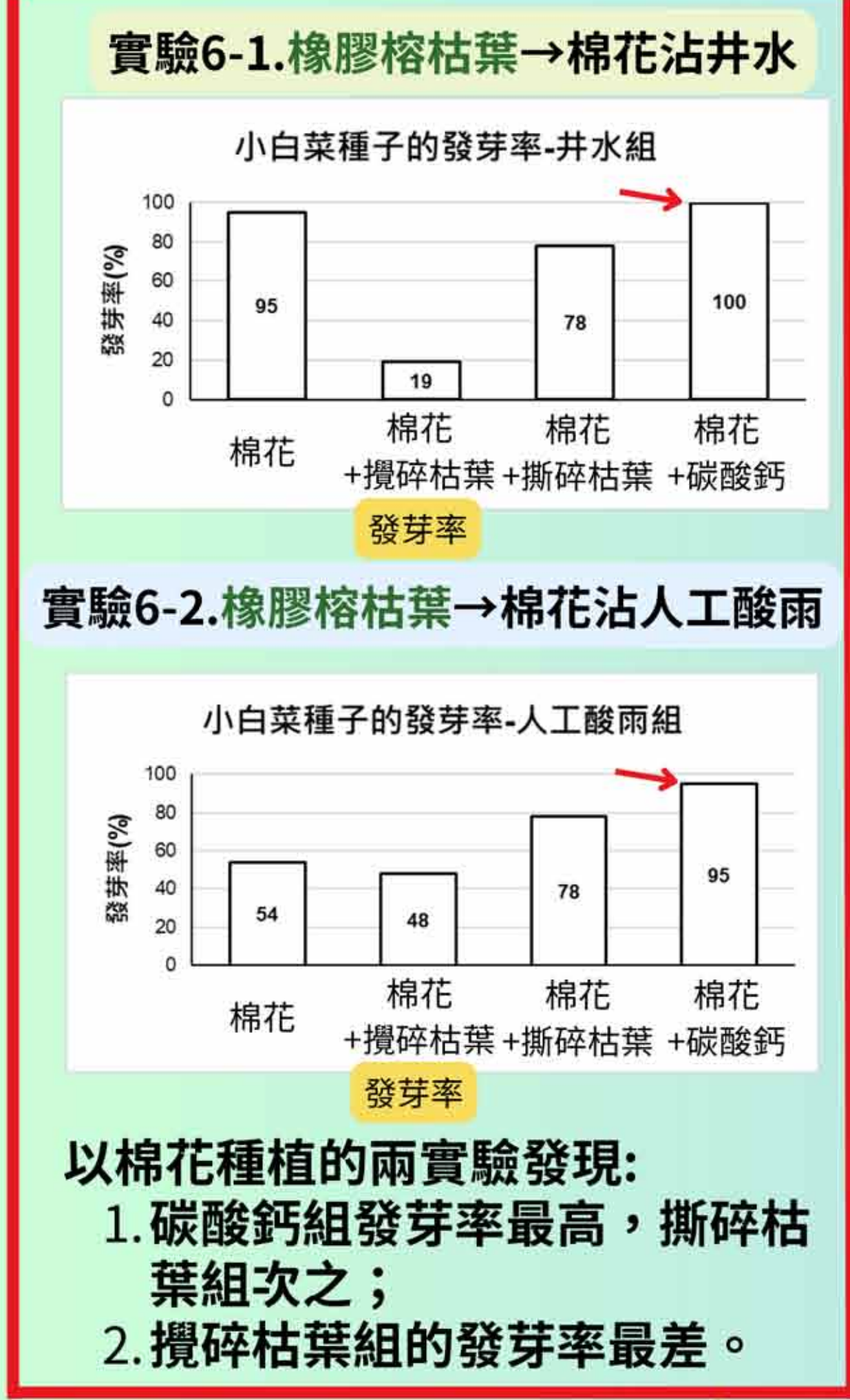
榕屬植物中鐘乳體的化學成分確實為碳酸鈣；而石囊細胞與裡面莖的構造，則不受鹽酸影響。

實驗5. 榕樹葉片對酸雨的中和效果

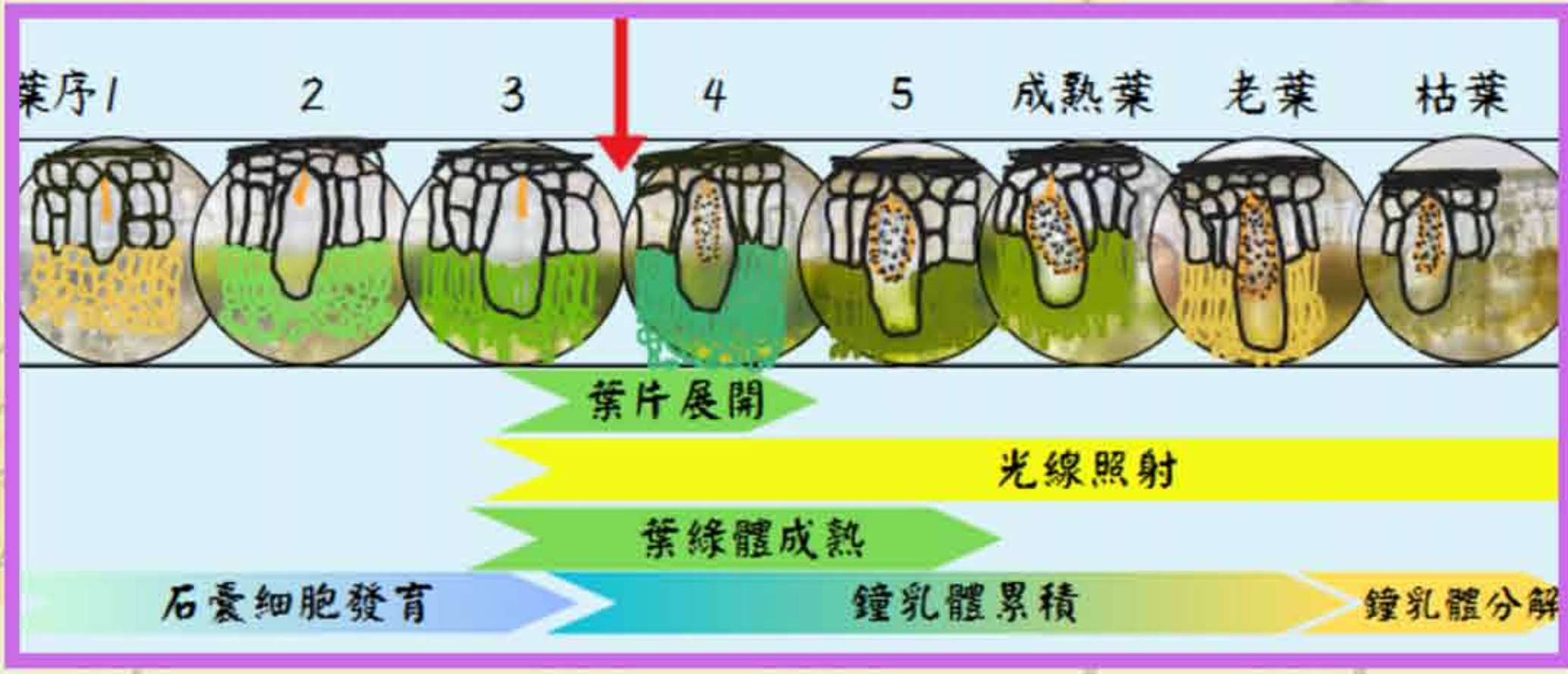


- 葉片中和酸雨的潛力？
- 1.嫩葉：效果不明顯，可能與鐘乳體尚未形成有關。
 - 2.成熟葉：提升幅度有限。
 - 3.老葉：效果最佳，可能與老葉鐘乳體達最大值有關。
 - 4.枯葉：效果次之，pH值仍有明顯提升。

實驗6. 榕樹葉片對幼苗發芽的影響



結論與討論



- 1.榕樹鐘乳體的分布與形態因種類而異
大多位於上表皮、形狀長柱狀，有不規則突起
- 2.鐘乳體隨發育而累積增長
在老葉時面積達到最大、枯葉略小或分解
- 3.環境因子會影響鐘乳體的形成
土壤酸鹼度、濕度、照光強度等條件造成差異

- 4.鐘乳體的化學成分為碳酸鈣
稀鹽酸測試→碳酸鹽、鈣試劑→碳酸鈣
- 5.鐘乳體具中和酸雨效果
老葉中和效果最佳、枯葉次之
- 6.鐘乳體的生態應用
對酸雨具中和能力、幫助作物發育