

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 植物學科

第二名

052101

好酵—探討毛氈苔黏液的抑制能力與啟動腺毛
彎曲的誘發物質

學校名稱：國立中山大學附屬國光高級中學

作者： 高二 謝謹暄	指導老師： 黃翠瑩 楊家真
---------------	---------------------

關鍵詞：毛氈苔、酵母菌、腺毛

摘要

從試驗中得知毛氈苔可以消化分解酵母菌，同時發現不同品種的毛氈苔會有不同的捕食行為：圓葉毛氈苔的外腺毛彎曲將酵母菌移入葉片中心並進行消化；寬葉毛氈苔在彎曲過程中會做一次折返。毛氈苔的黏液皆可抑制酵母菌的發酵，並使用 3D 列印自製與改良儀器，來量化其抑制酵母菌發酵能力的差異。此抑制能力來自黏液裡的消化酶，發現外腺毛黏液的抑制效果優於內腺毛。利用酵母菌被消化後所釋出成分的模式，將實驗數據逐一歸納出誘發腺毛彎曲的物質是磷酸根、鈉離子、銨根與幾丁質，且以磷酸根為主要物質並會產生彎曲訊息傳遞現象。最後解釋為何寬葉毛氈苔的外腺毛在彎曲過程中會一次折返：不同品種的毛氈苔誘發其腺毛彎曲的物質與所需濃度是有差異的。

壹、研究動機

國二開始接觸毛氈苔，從現地踏查野生毛氈苔之地、購買、種植、馴化，到觀察比較各種類的毛氈苔及其生長狀態，開花、結果。直到聚焦其捕食獵物的“腺毛”與“黏珠”特性。至今，仍然不斷利用已掌握的相關研究成果，儀器，繼續設計實驗和可資利用的設備，去探索啟動腺毛彎曲的物質，並在這幾年研究中最想知道的是：有關毛氈苔黏液中所含的酵素(消化酶)其對應不同的獵物來源會發生什麼作用，啟動腺毛彎曲的誘發物質有哪些？家中常用酵母菌發麵團製作饅頭，想起毛氈苔黏液可以分解昆蟲的幾丁質^[1,7]。而幾丁質又是酵母菌細胞壁的成分之一，因此酵母菌、幾丁質、昆蟲與毛氈苔這一連串結合，興起試用酵母菌餵食毛氈苔，是否可引起毛氈苔奇特的捕食動作，同時又觸發另一個有趣的問題：毛氈苔黏液中消化酶抑制酵母菌發酵能力，於是開啟了這次的探究旅程。

貳、研究目的

- 一、利用酵母菌判別啟動圓葉、寬葉毛氈苔腺毛彎曲有何不同？
- 二、如何量化毛氈苔黏液抑制酵母菌的發酵能力的差異？
- 三、毛氈苔黏液抑制酵母菌的發酵能力與其所含消化酶的關係為何？
- 四、哪些是啟動毛氈苔腺毛彎曲的訊息粒子？

參、研究設備及儀器

- 一、“1600 倍 USB 數位顯微鏡”（圖一）及“物聯網”（圖二）：
市售 USB 數位顯微鏡頭、3D 水管支架與座盤的整合，並利用 wi-fi 串接成物聯網架構。



圖一：USB 數位顯微鏡的實際圖



圖二：數位顯微鏡的物聯網

二、自製複式顯微鏡的手機架：

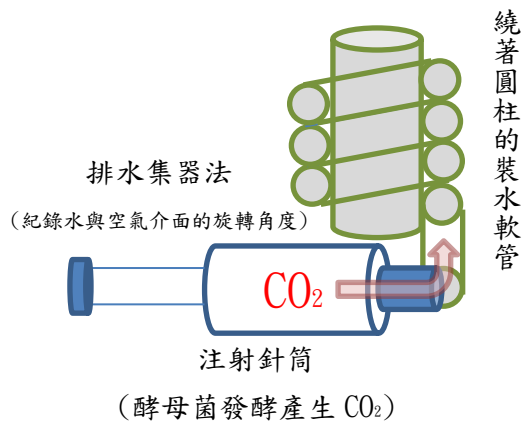


圖三：自製複式顯微鏡的手機架(正面)

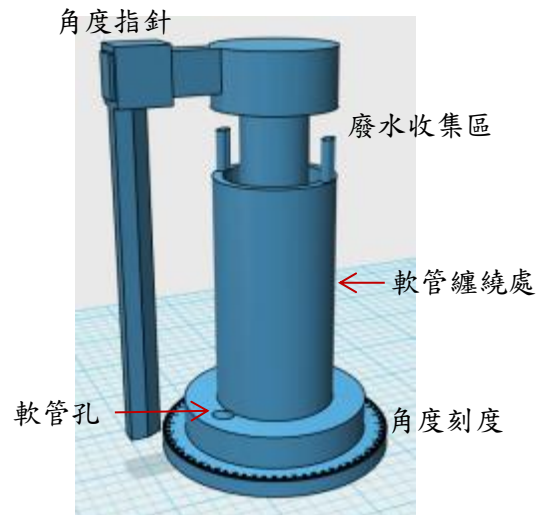


圖四：使用手機架觀察(側面)

三、“酵母菌發酵”和“排水集氣法”(Y-CO₂法)：



圖五：Y-CO₂ 儀器原理說明圖



圖六：Y-CO₂ 儀器 示意圖

四、藥品與器材：

(一)、藥品：

KCl、KNO₃、K₂SO₄、KH₂PO₄、K₃PO₄、NaCl、NaNO₃、Na₃PO₄、NH₄Cl、NH₄NO₃、(NH₄)₃PO₄、MgCl₂、CaCl₂、CuCl₂、甘胺酸、氨水、幾丁質、酵母菌(食用乾酵母菌)、凡士林、蔗糖。


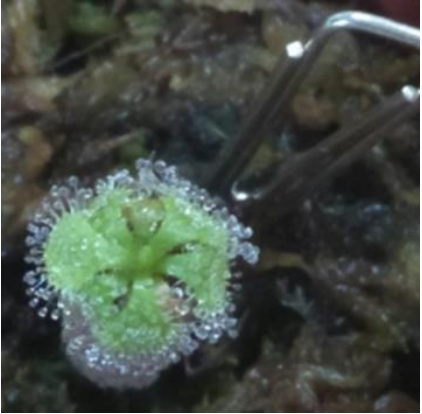
(二)、器材：

自製數位顯微鏡、自製複式顯微鏡的手機架、自製 Y—CO₂ 儀器、加熱台、數位溫度計、3D 列印機、針筒(1、3、5、10ml)、電子天平、燒杯、試管、複式顯微鏡、單凹懸滴玻片、解剖刀具、ImageJ 分析軟體、tracker 軟體。

肆、研究過程與方法

一、文獻探討：

(一) 圓葉毛膏菜與寬葉毛氈苔在植物學的分類地位與特性如下表：

名稱	中文名：圓葉茅膏菜 學名： <i>Drosera rotundifolia</i>	中文名：寬葉毛氈苔 學名： <i>Drosera burmannii</i>
分類地位	植物界/被子植物門/雙子葉植物綱/石竹目/茅膏菜科/茅膏菜屬/ <i>D. rotundifolia</i>	植物界/被子植物門/雙子葉植物綱/石竹目/茅膏菜科/茅膏菜屬/ <i>D. burmannii</i>
別名	圓葉毛氈苔	錦地羅、金錢草
外貌特徵	圓葉茅膏菜是分布最廣泛的茅膏菜之一。葉子聚生呈蓮座狀。一般直徑約長 3-5 厘米，花序高 5-25 厘米。花朵呈白色或粉紅色，有五瓣。種子長 1-1.5 毫米 ^[1] 。	一年生草本，容易開花及自花授粉，通常在早晨開花，約 2-3 小時授粉後，花就謝了，種子掉落會再長出小苗。葉聚生呈蓮座狀，直徑約 1-3 公分。捕蟲反應很快。陽光充足下，葉片和腺毛呈現紅色，不足時則呈綠色。
藥用價值	藥理作用：對流感病毒及金黃色葡萄球菌有抑制作用。 功能主治：祛痰；鎮咳；平喘；止痢 ^[2] 。主咳嗽；哮喘；百日咳；痢疾	功效：清肺止咳、解毒療疔。 功用主治：治痢疾，肺熱咳嗽，咽喉碎痛，小兒疳積，耳內流膿。 具有醫學活性的植物成分 ^[4] ，包括茶醌，plumbagin 和 hydroplumbagin
圖片	全株 	全株 

(二) 酵母菌的成分與發酵過程：

1. 酵母的成分^[四,五]：酵母細胞比大多數細菌大，多數為單細胞生物，常呈卵圓形或圓柱形。一般平板培養基上的酵母菌落呈白色凸起粒狀，常帶有酒香味。酵母屬於真核微生物，除沒有鞭毛外，一般都具有細胞壁、細胞膜、粒線體、核糖體、液泡等細胞器。

(1)細胞壁：呈“三明治”形：內層葡聚糖、外層甘露聚糖以及中間蛋白層。有研究表明，葡聚糖是維持細胞壁內壁強度最主要的物質。

(2)細胞膜：細胞膜為磷脂雙分子層，與其他生物一樣都是雙膜中間鑲嵌著蛋白質。

(3)細胞核：酵母具有成形的細胞核，不同種的酵母染色體數不同，且細胞核的形態會隨著細胞分裂週期而變化。細胞核是酵母菌遺傳信息的主要儲存與轉錄場所，其 DNA 量佔總細胞 DNA 的絕大部分。

(4)粒線體：粒線體為酵母細胞能量的主要提供場所。

(5)核糖體：與真核生物一樣為 80S 型的。

(6)液泡：大多數酵母菌都具有液泡，其主要用於儲藏一些營養物質或者水解酶前體物，另外還有調劑滲透壓的作用。

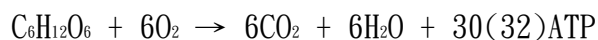
(7)酵母菌是一種很營養的食物^[1,8]，酵母菌富含蛋白質(約 47%)、維他命，特別是維他命 b 群、礦物質、微量元素(如鐵、鉀、磷)和酵素，其富含磷而磷可影響鈣的吸收，因此人們將酵母菌當作食品添加物來確保身體能得到足夠的鈣。在酵母菌的礦物質成分(Minerals, 約 8%)中，最多是鉀，次之是磷。

2. 酵母菌發酵過程^[六]：

(1)無氧發酵：在缺乏氧氣時，酵母會進行無氧發酵，當中通過糖酵解作用將葡萄糖轉化成 CO₂ 與乙醇並產生能量(ATP)。



(2)有氧發酵：在有氧條件下酵母菌能夠迅速出芽繁殖，酵母將葡萄糖經有氧呼吸代謝生成 CO₂ 和 H₂O。

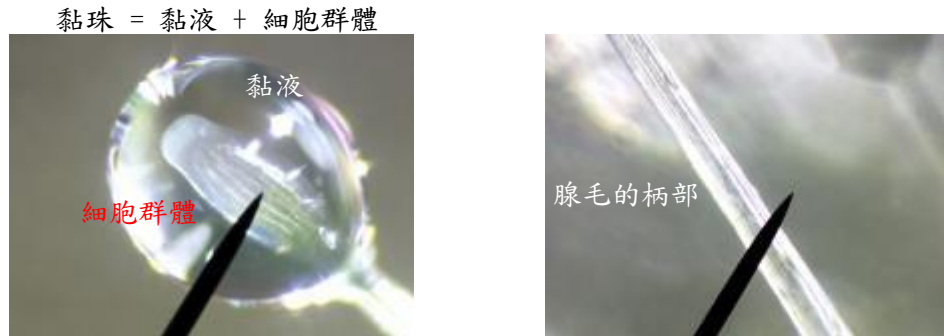


(3)酵母菌在有葡萄糖的環境下，一定是先無氧發酵(酒精發酵)。而等到酵母用完葡萄糖，或使用其他糖類、胺基酸時，才可能進行有氧發酵。

(4)酵母菌的細胞壁成份有幾丁質^[七]，幾丁質不但是昆蟲的外殼所具有的成分，也是控制植物疾病防禦機制的良好誘因。它被評估為可以提高整體農作物產量的肥料。

(三) 腺毛(觸手)的說明：

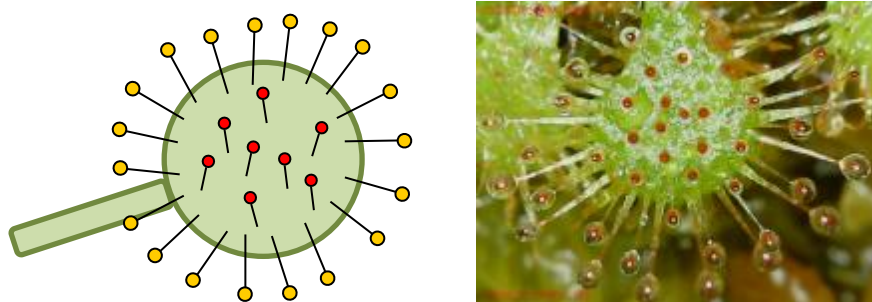
1. 細部圖：



圖七：寬葉毛氈苔腺毛(觸手)的細部圖

2. 內、外腺毛：

根據植物學者研究，將外側較長的腺毛細分為三種^[7]，在本實驗中僅簡化成外側腺毛(黃色標明)與內側腺毛(紅色標明)(圖八)。事實上外側腺毛有3到4層且不等長。內側腺毛分佈在葉片中間，也有很多層且不等長，內外側僅是方便實驗對照說明。



圖八 內、外側腺毛的示意圖與實照圖(圓葉)

(四) 毛氈苔腺毛黏液的消化與膨壓

無論動物、植物或是微生物都需要吸收體外的營養物質，以維持生命，包括：醣類、蛋白質、脂肪、礦物質和維生素。絕大部分的動物合成上述營養的能力太差，得仰賴其他植物或是微生物合成，稱為“異營”^[8]。而大部分的植物則藉由根部吸收無機養分，是屬於“自營”。食蟲植物，如豬籠草、捕蠅草和本實驗的主角“毛氈苔”是少數除根部吸收水中養分和土壤中無機養分外，還可藉捕捉小昆蟲獲取養分。於是毛氈苔腺毛上的黏液進行與大多數的動物類似的“消化作用”，就是將上述營養大分子用“酶”(酵素)使其分裂為小單元，如蛋白質變成胺基酸。

膨壓^[9]是細胞內推動細胞膜對細胞壁的力，通常膨脹壓力是由水的滲透流引起的，發生在植物、真菌和細菌中，在動物細胞中看不到這種運動。食蟲植物的捕蟲運動中^[+]，在昆蟲來時，特化的葉片(如毛氈苔的觸手)會向內捲曲以消化之，這也是因特定細胞的水分的變化而造成的膨壓運動。

二、研究方法：

(一)縮時攝影的資料取得方式：

1. 將毛氈苔放入觀測杯內，調整顯微鏡後，設定每 2 分鐘(或適當間隔)拍攝一次照片，並啟動縮時攝影軟體。
2. 先將針尖置入觀測拍攝鏡頭內，並固定。再將酵母菌顆粒沾到針尖，最後移入毛氈苔碰針尖上的酵母菌顆粒。
3. 取得照片，先置入已知長度後再輸入 ImageJ 軟體或製成影片後再輸入 Traker 軟體，分析後得到數據資料。
4. 用網路將數台自製顯微鏡連線成“物聯網”架構，可同時處理及監控各別實驗進度。



圖九 軟體執行畫面

(二) 酵母菌發酵-排水集氣儀器(Y-CO₂ 儀器)的資料取得方式：

1. 將軟管注水後平放，酵母菌與糖水混和在針筒內。
2. 針筒塞入軟管下端接口，調整角度指針於軟管內氣體與水的交界處後，讀取起始角度。
3. 每間隔 15 分鐘後，調整角度指針並讀取角度讀數(建議在室溫 25°C 以下操作)。
4. 實驗時間約 3hr 至 4hr。

三、實驗流程及步驟：



伍、研究結果

實驗 1-1：用酵母菌啟動圓葉、寬葉毛氈苔腺毛彎曲

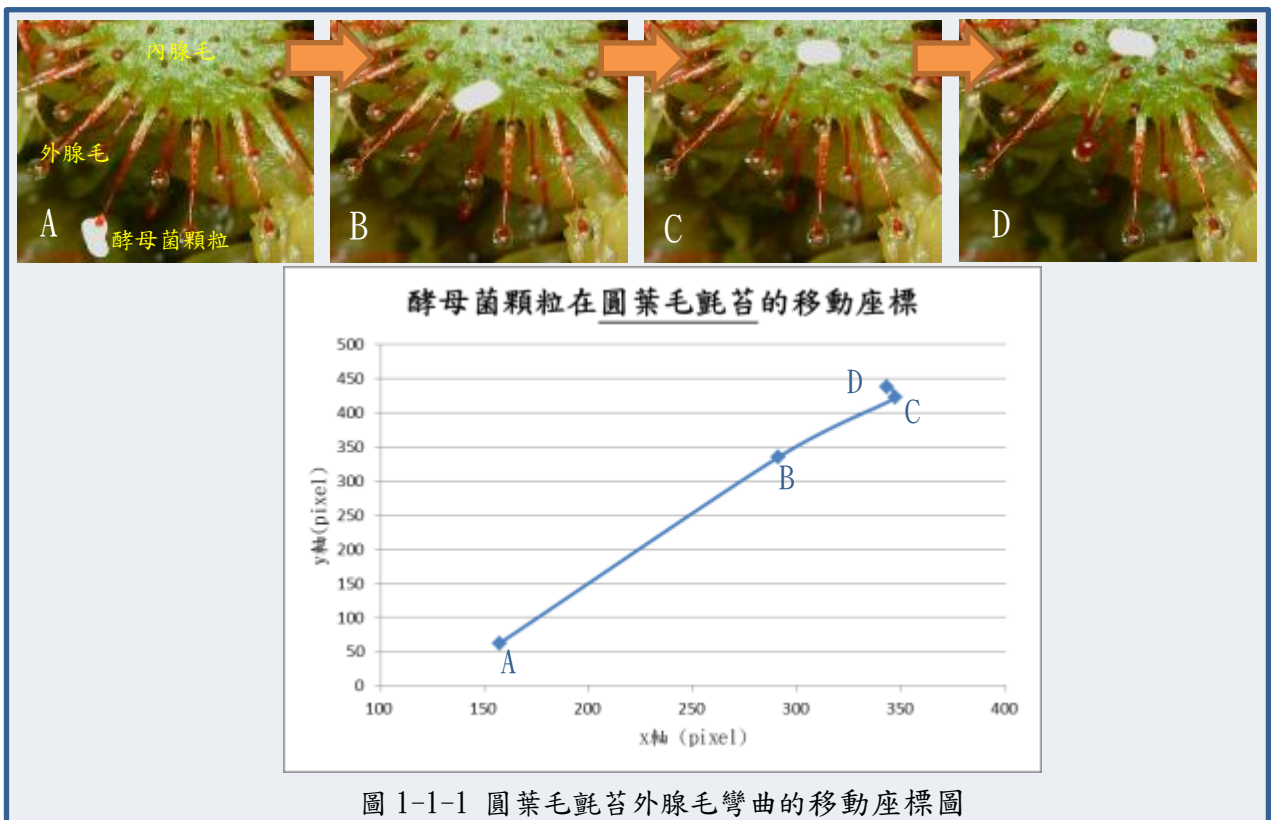
說明：欲從不同品種的毛氈苔(茅膏菜)對同一物質產生腺毛彎曲並比較其差異性，進而設計實驗探討腺毛誘發物質的相關性質。

步驟：

1. 調整 USB 數位顯微鏡對準圓葉毛氈苔的外腺毛與葉片。
2. 在吸管尖部上放置一粒酵母菌顆粒，沾黏在一根外腺毛的細胞群體上。
3. 觀察外腺毛彎曲至葉片中心的過程。
4. 再使用寬葉毛氈苔，重複步驟 1-3。
5. 重複步驟 1-4 數次，比較兩者差異，並討論。

結果：

1. 將照片轉成影片，置入 tracker 軟體中。求得酵母菌顆粒移動的(x, y)座標。繪圖並說明兩者腺毛彎曲的性質。
2. 圓葉毛氈苔外腺毛上酵母菌的移動座標與繪圖，如下圖：



3. 圓葉毛氈苔的 4 點(ABCD)說明：

- A：將酵母菌顆粒沾黏在外腺毛上。
- B：外腺毛彎曲，將酵母菌高舉在葉面上端，A→B 約 15min。
- C：外腺毛持續彎曲到葉面表面，周圍腺毛開始彎曲，B→C 約 3hr40min。
- D：內腺毛彎曲朝向酵母菌，並將酵母菌移至葉面中心，C→D 約 1hr。

4. 寬葉毛氈苔外腺毛上酵母菌的移動座標與繪圖，如下：

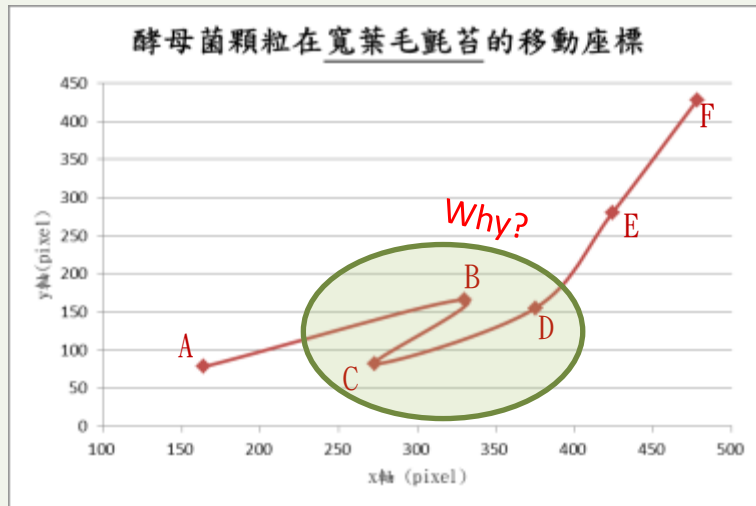
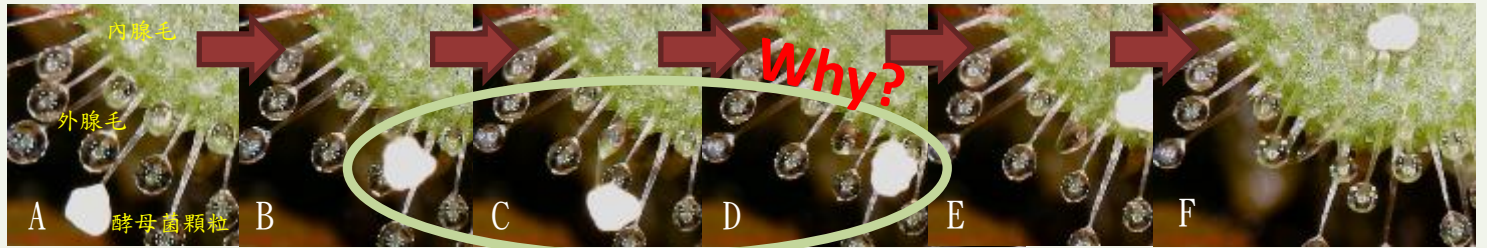


圖 1-1-2 寬葉毛氈苔外腺毛彎曲的移動座標圖

5. 寬葉毛氈苔的 6 點(ABCDEF)說明：

- A：酵母菌顆粒沾黏在外腺毛上。
- B：外腺毛彎曲，將酵母菌高舉在葉面上端，A→B 約 8min。停滯約 2hr 後，腺毛開始向外伸直。
- C：外腺毛向外伸直到 C，B→C 約 4hr。
- D：外腺毛又開始彎曲，在 D 與另一根相撞，C→D 約 3hr40min。
- E：兩根外腺毛一起彎曲至葉面上，D→E 約 3hr42min，周圍腺毛開始彎曲。
- F：由數根內腺毛將酵母菌顆粒移至葉片內部約 10min。

討論：

1. 將兩處酵母菌顆粒被移動的情形其位置座標繪製成圖形，如圖 1-1-1 和圖 1-1-2。利用座標移動方式呈現兩者的外腺毛彎曲的差異。

2. 討論兩者外腺毛彎曲過程的異同：

(1) 圓葉毛氈苔：

- a. 外腺毛都一直向葉片中心彎曲。
- b. 前半段 AB 彎曲較快(約 15min)，後半段 BC 彎曲很慢(約 3hr40min)。
- c. 移至葉片中心約 1hr，共經歷 5hr。

(2)寬葉毛氈苔:

- a. 外腺毛的彎曲過程會在中途發生折返現象。
- b. 前半段彎曲 AB 較快(約 8min)，停滯與每段折返都很耗時。
- c. 折返時須與另一根腺毛合力彎曲，才將酵母菌顆粒送至葉片中心。共經歷 12hr。

(3)小結：寬葉毛氈苔總是耗時較久，又需其他腺毛幫忙，方能將酵母菌送至葉片中心。

3. 以酵母菌觸發外腺毛彎曲，兩者皆產生前半段彎曲較快，但非全部可以將酵母菌彎至葉片中心(後半段彎曲)。往往是暫停在某一位置不動。因此，將“是否可以彎至葉片中心記為成功或失敗”，統計如下表。得知寬葉毛氈苔此一行為的成功率偏低。

表 1-1-1 圓葉、寬葉毛氈苔腺毛彎曲至葉片中心的成功率

次數	圓葉(10次)	寬葉(10次)
成功	9	5(3)
失敗	1	5
成功率	90%	50%

圓葉的失敗處是“一直保持彎曲角度，腺毛無法進一步彎至葉片中心”。寬葉的失敗處是“在 C 時，無法進一步到 D。成功 5 次中有 3 次折返”。

4. 根據文獻^[-,5,9]：毛氈苔的黏液中含有“幾丁質分解酵素酶”，可分解昆蟲外殼的幾丁質，然而酵母菌細胞壁也有幾丁質的保護層，而且黏液內有抑制細菌生長的物質，並酵母菌的成分內且含蛋白質。若毛氈苔的消化酶可以順利分解其保護層，就可以讓酵母菌內部成分流出，使腺毛彎至葉片中心。

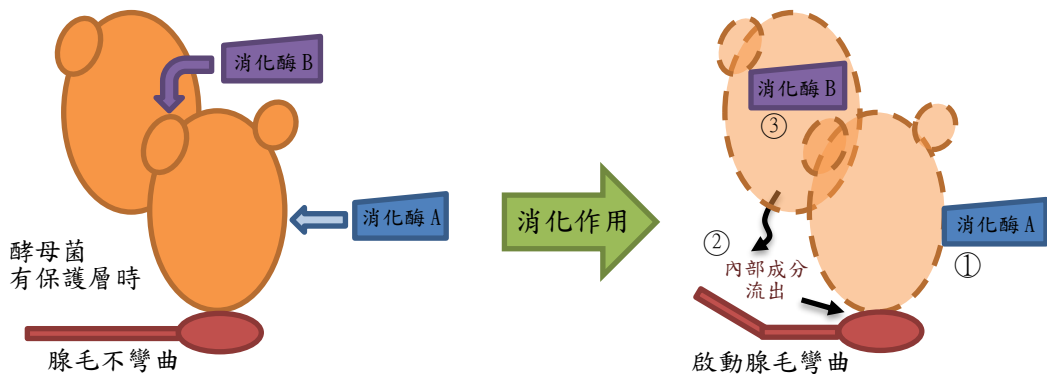


圖 1-1-3 酵母菌被消化後所釋出成分的模型

5. 從比較外腺毛彎曲各階段所花的時間與角度來說，兩種毛氈苔的 A→B 階段皆是彎曲較大且時間較短。因此，對於外腺毛的觸發彎曲應該分成先“物理觸發”，後“化學觸發^[10]”。

- (1)物理觸發 = 因與外界物碰觸(受力時)，而產生膨壓使腺毛彎曲。
可能與受力大小、受力時間與受力點有關。
- (2)化學觸發 = 因細胞群體經外界物質化學感應，引起腺毛膨壓變化使之彎曲。可能與物質種類、物質濃度、物質多寡有關。
6. 對於寬葉毛氈苔腺毛的彎曲折返現象，先提出三點可能的因素：
(1)分解掉酵母菌的保護層速率很慢。(2)酵母菌內可引發腺毛彎曲的成分物質濃度太低。(3)酵母菌中可啟動腺毛彎曲的成分較少。


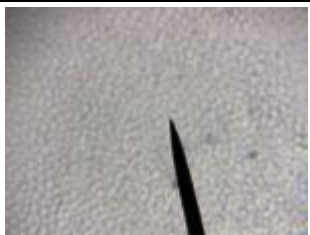
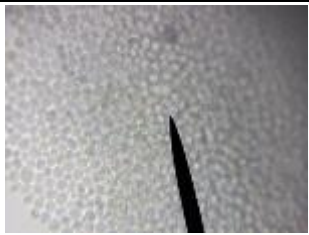
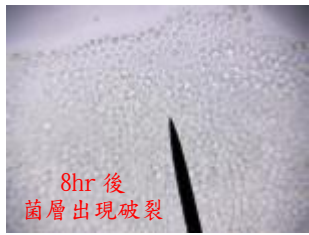
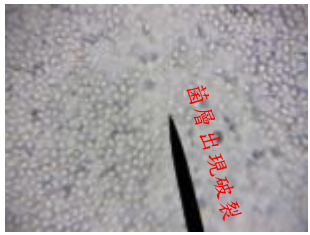
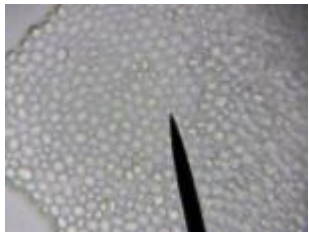
實驗 1-2：觀察毛氈苔黏液會抑制酵母菌生長情形

說明：若毛氈苔腺毛上的黏液可以消化分解酵母菌，因此推論黏液會使酵母菌死亡，也可能抑制酵母菌的發酵過程。

步驟：

1. 取拭鏡紙裁成 2x1 cm² 紙片，沾滿圓葉毛氈苔黏液後，置懸滴玻片中央，並放置少量酵母菌作為“實驗組”。
2. 另取一紙片及懸滴玻片，將沾水後，放置少量酵母菌，作為“對照組”。
3. 以凡士林封住蓋玻片的四個接觸邊，防止水分蒸發。
4. 使用自製複式顯微鏡手機架拍攝酵母菌生長情形(600 倍 × 手機 4 倍)。
5. 觀察 4hr 後，紀錄其變化。使用寬葉重複步驟 1-4，比較三者差異並討論。

結果：觀察紀錄如下表(1-2-1)：

	實驗組(圓葉)	實驗組(寬葉)	對照組
開始時			
4hr 後			
說明	1. 酵母菌數量會減少 2. 酵母菌會萎縮 3. 酵母菌表層有破裂面(8hr 後)	1. 酵母菌數量會減少 2. 粒狀酵母菌會變模糊不清 3. 酵母菌表層有破裂面	1. 酵母菌數量不會明顯減少 2. 酵母菌表層無破裂

討論：讓酵母菌直接與毛氈苔黏液接觸，並用顯微鏡觀察酵母菌數目變化，得知黏液會使酵母菌分解，破裂，表層菌數減少，且菌層出現缺口。此模擬實驗說明：毛氈苔黏液可使昆蟲的外殼在此條件下出現破裂缺口。

實驗 2-1：量化毛氈苔黏液抑制酵母菌發酵能力

說明：利用酵母菌發酵過程產生CO₂，並測量CO₂的體積。因毛氈苔黏液的消化酶有抑制酵母菌生長能力，所以產生CO₂體積的速率會降低。故進行改良排水集氣的儀器(Y-CO₂儀器)適合發酵過程，希望可以檢測出其抑制酵母菌生長的能力。

步驟：

1. 取圓葉毛氈苔黏液溶於 2.0ml 水中。
2. 配製糖水 1.8g/30ml，依下表比例混和各溶液於 A、B、C 針筒中。

藥品	A 針筒	B 針筒	C 針筒
黏液溶液(ml)	0	0.5	1.0
蒸餾水(ml)	1.0	0.5	0
糖水(ml)	1.5	1.5	1.5
酵母菌	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水
體積共計(ml)	3.5	3.5	3.5

3. 裝於 Y-CO₂ 儀器(圖 2-1-1)中，每隔 15 分鐘測量 CO₂ 體積，紀錄並繪製體積與時間的關係圖及當時的氣溫。
4. 再取寬葉毛氈苔黏液，重複步驟 1-3。並討論之。



圖 2-1-1 Y-CO₂ 儀器組

結果：利用圓葉、寬葉毛氈苔黏液量的多寡來測量抑制酵母菌發酵過程反應，其反應時間與 CO₂ 體積關係圖如下：

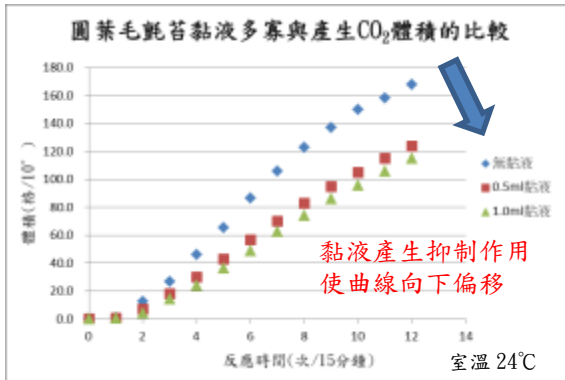


圖 2-1-2 “圓葉” 黏液量與 CO₂ 體積的關係

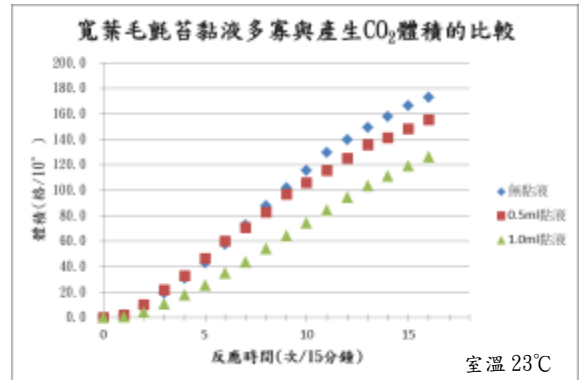


圖 2-1-3 “寬葉” 黏液量與 CO₂ 體積的關係

討論：

1. 隨著兩種毛氈苔黏液的劑量增加，其抑制酵母菌生長的能力也增強。
2. 利用酵母菌發酵過程及 Y-CO₂ 儀器測出毛氈苔黏液抑制酵母菌生長能力。

實驗 2-2：解剖毛氈苔的內、外腺毛構造

說明：依據實驗 1-1 結果，在一般情況下，外腺毛捕捉獵物後，再送至內腺毛消化吸收，內外腺毛在功能作用方面有不同。本實驗先從構造上觀察是否也有不同處，所以分泌的消化酶或抑制物質就可能會有所差異。故先瞭解內、外腺毛構造，再利用實驗 2-1 的儀器測量其抑制酵母菌發酵能力的差異。

步驟：

1. 剪下圓葉、寬葉毛氈苔的葉片。
2. 切下葉片上外腺毛與內腺毛的交界。
3. 放在解剖顯微鏡下觀察。
5. 比較內、外腺毛兩者差異，並討論。

結果：

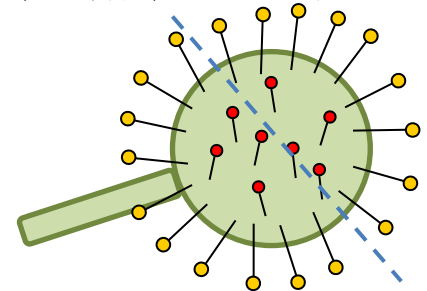


圖 2-2-1 葉片切片方向示意圖



圖 2-2-2 圓葉_內、外腺毛剖面圖

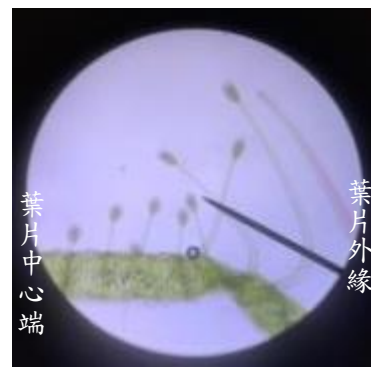


圖 2-2-3 寬葉_內、外腺毛剖面圖



圖 2-2-4 圓葉_內、外腺毛之細胞群體的解剖圖

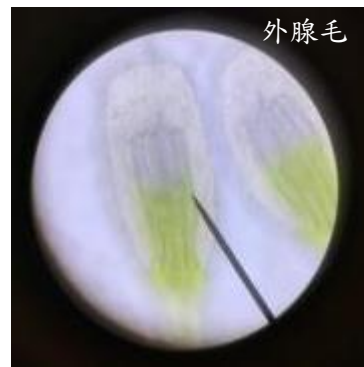
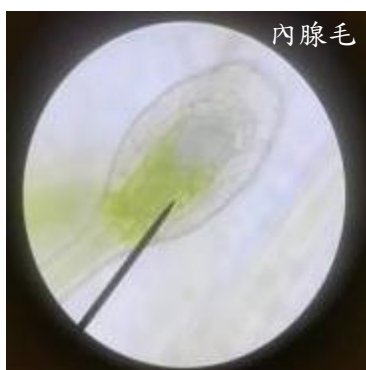


圖 2-2-5 寬葉_內、外腺毛之細胞群體的解剖圖

1. 圓葉、寬葉毛氈苔內腺毛較圓(左側)，外腺毛則略呈長橢圓形(右側)。
2. 圓葉、寬葉毛氈苔外腺毛黏珠大於內腺毛黏珠，其柄部約是內腺毛 2~5 倍。
3. 圓葉、寬葉毛氈苔的外腺毛接近基部處，柄部的寬度比內腺毛更寬。
4. 寬葉毛氈苔葉片上的腺毛數量比圓葉毛氈苔多。
5. 越靠近葉片中心的內腺毛越短，越靠近葉片外緣的外腺毛越長。
6. 內腺毛的膨壓彎曲部位是“腺毛與葉面的相連處”，外腺毛的膨壓彎曲部位是“腺毛基部”。

討論：

1. 內、外腺毛的外觀構造有很大的差異，整體的差異是有利於包覆獵物。
2. 在消化功能上，內外腺毛所分泌的消化酶與抑制物質可能也有所不同。因此，設計下列實驗來探討。

實驗3-1：內、外腺毛黏液抑制能力的差異

說明：內、外腺毛的外觀構造有很大的差異^[7]，在消化獵物的功能上，兩者所分泌的消化酶與抑制物質可能也有所不同。

步驟：

1. 取等量的圓葉毛氈苔內、外腺毛黏液溶於 1.5ml 水中。
2. 配製糖水 1.8g/30ml，依下表比例混和各溶液於 A、B、C 針筒中。

藥品	A 針筒	B 針筒	C 針筒
黏液溶液(ml)	0	1.0(內腺毛)	1.0(外腺毛)
蒸餾水(ml)	1.0	0	0
糖水(ml)	1.5	1.5	1.5
酵母菌	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水
體積共計(ml)	3.5	3.5	3.5

3. 裝於 Y-CO₂ 儀器中，每隔 15 分鐘測量 CO₂ 體積，紀錄並繪製體積與時間的關係圖。
4. 再取寬葉毛氈苔黏液，重複步驟 1-3，並討論之。

結果：

1. 將圓葉、寬葉毛氈苔所獲得的數據繪製如下表：

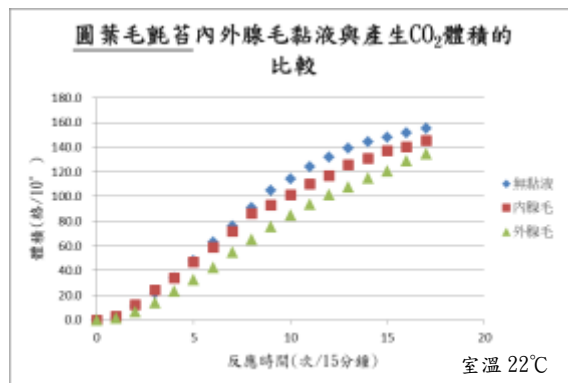


圖 3-1-1 圓葉_內、外腺毛抑制能力的差異

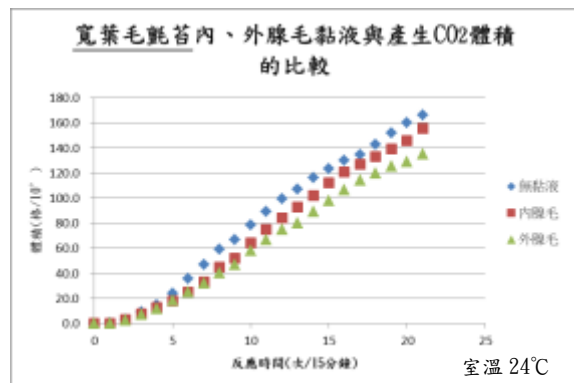


圖 3-1-2 寬葉_內、外腺毛抑制能力的差異

討論：

1. 兩者外腺毛的曲線都偏低，顯示外腺毛黏液的抑制能力都較強。推測其生物涵義可能為：
 - (1) 儘快判定是否為可消化的獵物(營養物質)。
 - (2) 進而傳遞出訊息讓更多腺毛參與捕食活動(訊息傳遞)。
 - (3) 儘快分解獵物組織，減少其逃脫機會。
2. 內腺毛黏液的抑制能力會較慢發生抑制效果。
3. 汲取內、外腺毛黏液時，外腺毛黏液易產生黏絲現象。

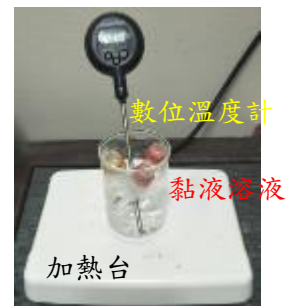
實驗3-2：加熱處理後的黏液會抑制酵母菌發酵嗎？

步驟：

1. 取圓葉毛氈苔黏液溶於 2.0ml 水，隔水加熱至 50℃，冷卻 30min 後至室溫。
2. 配製糖水 1.8g/30ml，依下表比例混和各溶液於 A、B、C 針筒中。

藥品	A 針筒	B 針筒	C 針筒
黏液溶液(ml)	0	0.5	1.0
蒸餾水(ml)	1.0	0.5	0
糖水(ml)	1.5	1.5	1.5
酵母菌	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水
體積共計(ml)	3.5	3.5	3.5

3. 裝於 Y-CO₂ 儀器中，每隔 15 分鐘測量 CO₂ 體積，紀錄並繪製體積與時間的關係圖。
4. 再取寬葉毛氈苔黏液，重複步驟 1-3。並討論之。



結果：將圓葉、寬葉毛氈苔所獲得的數據繪製如下表：

圖 3-2-1 黏液加熱處理

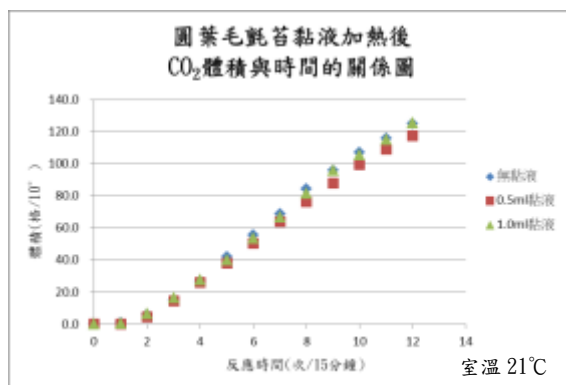


圖 3-2-2 圓葉_黏液加熱後的抑制能力

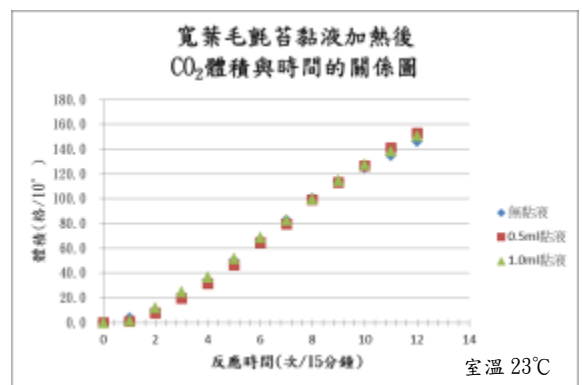


圖 3-2-3 寬葉_黏液加熱後的抑制能力

討論：

1. 在圓葉與寬葉毛氈苔兩圖中的三條線幾乎重疊在一起，換句話說：“加熱後的黏液已無抑制能力”。
2. 加熱處理黏液是破壞了其消化酶的功能，由實驗得知：抑制能力是來自於消化酶的作用，而非黏液中的其他物質^[5,6]。
3. 當酵母菌沾在外腺毛黏液時，黏液中的消化酶已開始產生分解消化的作用並使酵母菌保護層(細胞壁)破裂。那麼是酵母菌中何種物質使毛氈苔腺毛彎曲的呢？因此，朝著酵母菌的主要成分^[1,8]著手。

實驗4-1：啟動毛氈苔腺毛彎曲的訊息粒子-尋找良好的測試點與方法

說明：1. 一般毛氈苔由外腺毛捕捉昆蟲後，彎向葉片中心的內腺毛，如下圖流程的A至D四步驟。許多內、外腺毛會形成外胃^[10]進行消化。所以在內、外腺毛之間尋找良好的測試地點與測試方法。

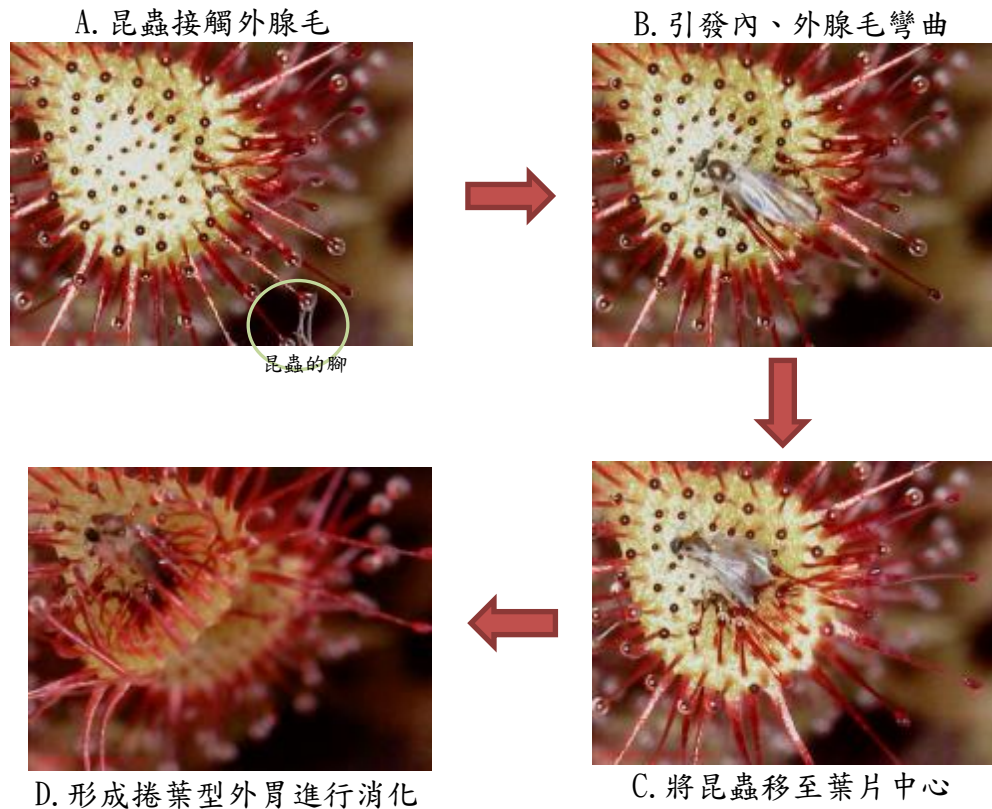


圖 4-1-1 毛氈苔捕食與消化昆蟲的過程

ps:外胃：在我們先前的研究^[+]中分成“平面”及“捲葉”兩種消化區

2. 從實驗 1-1 得知，腺毛觸發是先物理觸發，後化學觸發，如何減少物理觸發的干擾，才能測得較真實的化學觸發相關反應。
3. 在化學觸發方面，推論外腺毛彎曲的角度與快慢會與物質種類、物質濃度、物質多寡有關。

步驟：

1. 分析：當毛氈苔捕食昆蟲時，所面臨的一些外力作用。
2. 設計用針尖沾蒸餾水珠於黏液上，討論水珠大小與外腺毛是否彎曲。
3. 用上述方法沾稀 KNO_3 溶液於黏液上，討論水珠大小與外腺毛是否彎曲。
4. 繪製腺毛彎曲刻度及確認啟動腺毛彎曲物質的測驗程序。

結果與討論：

1. 分析毛氈苔捕食過程的物理作用力順序：

步驟A：昆蟲的拉力，昆蟲的重力，黏液的表面張力，黏液的附著力。

步驟B：葉面受昆蟲的重力、腺毛膨壓彎曲及步驟A的4項作用力。

步驟C：移動昆蟲的摩擦力、腺毛膨壓彎曲及步驟B的5項作用力。

步驟D：葉面捲曲、腺毛膨壓彎曲及步驟C的6項作用力。

整個捕食動作中，從頭到尾都出現的是：黏液的表面張力與附著力。於是我們將朝這個方向設計實驗，可能較容易成功。

2. 用針筒調整蒸餾水珠大小，

用針尖沾在黏液上，僅蒸餾水珠與黏液接觸（如右圖 4-1-2 所示）。這樣設計就可以減少其他作用力。

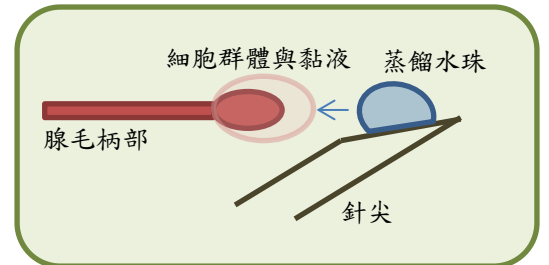


圖 4-1-2 針尖沾取單根腺毛的方式

3. 使用上述方式，水珠與腺毛間會發生以下兩種情形：

(1) 由多根腺毛支撐水珠時：

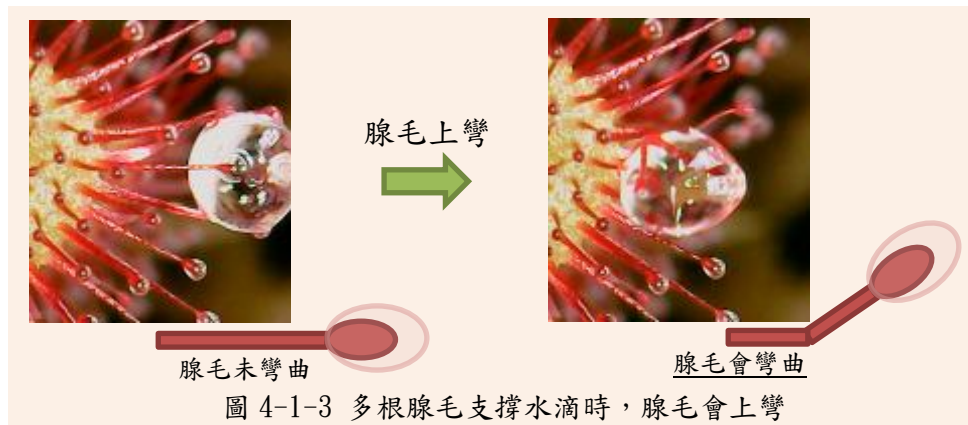


圖 4-1-3 多根腺毛支撐水滴時，腺毛會上彎

» 水珠重力及多根腺毛一起支撐下，容易引起物理觸發。

(2) 僅由一根腺毛支撐水珠時：

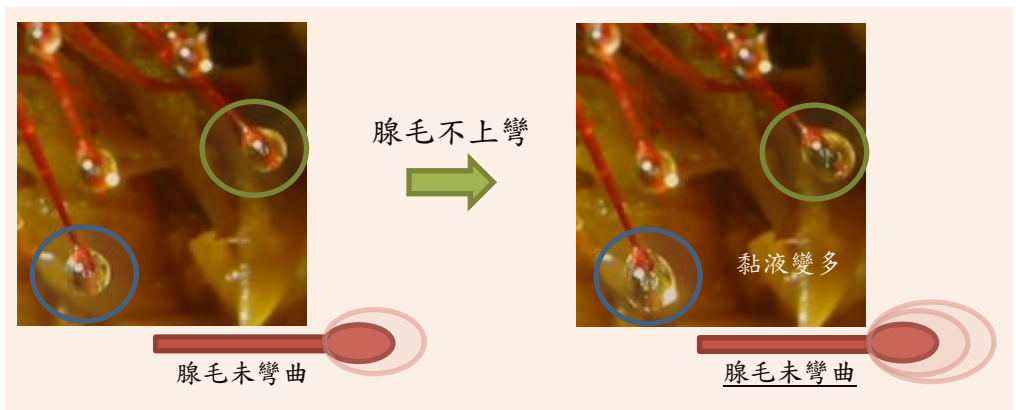


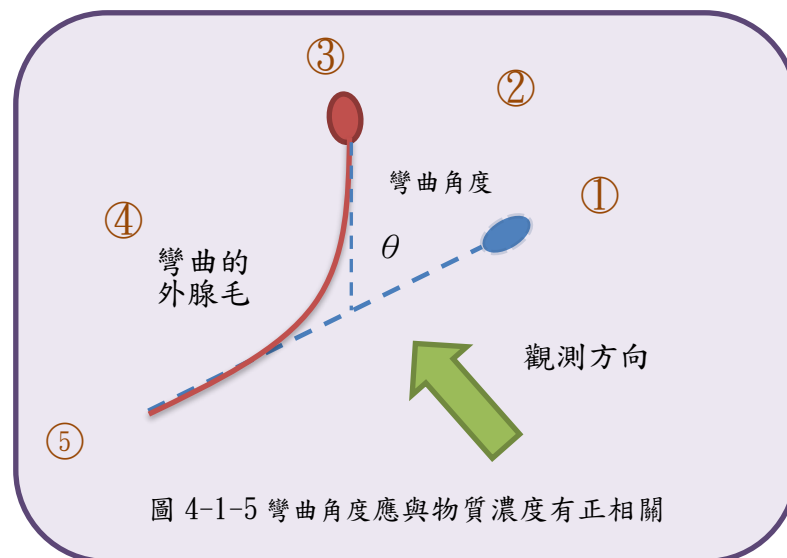
圖 4-1-4 單根腺毛支撐水滴時，腺毛不會上彎

» 僅一根腺毛與蒸餾水珠緩慢相互接觸(表面張力)，單一黏珠僅外圍附上水層(附著力)，腺毛不會彎曲。並且可觀察到外圍水層慢慢被吸收，黏珠回復原狀。

(3)小結：接著又試了不同植株的圓葉及寬葉單根腺毛皆有相同的反應(不彎曲)。再改用稀 KNO_3 溶液試驗，其腺毛也未肥傷。所以使用單一根腺毛支撐水珠的方式就可以減少物理觸發的干擾。

4. 繪製腺毛彎曲刻度(如下圖)：

- (1)將 180° 的角度劃成 ①= 0° (記為 \times)、②= 45° 、③= 90° 、④= 135° 、⑤ $\geq 180^\circ$ 或腺毛已彎至葉片中心。
- (2)紀錄腺毛最大彎曲位置。
- (3)讀取與腺毛最相近的刻度。



5. 確認是否為啟動腺毛彎曲物質的程序：

- (1)每次用一滴沾一根腺毛共兩次(如圖 4-1-4)，若再能引起腺毛訊息傳遞現象^[+,10](已彎曲的腺毛可以透過腺毛基部將彎曲的訊息傳遞給附近尚未彎曲的腺毛，使之彎曲)，就可以確定該物質就是使腺毛彎曲的訊息粒子。實驗操作時紀錄此類腺毛的數目。
- (2)因濃度越高，腺毛彎曲角度會越大，故配製高、低濃度溶液來比較。
高濃度= 0.01M ，低濃度= 0.001M 。
- (3)實驗所配製的溶液必須要都能讓這兩種毛氈苔的腺毛彎曲。

實驗4-2：誘發毛氈苔腺毛彎曲的物質-無機鹽

說明：依據酵母菌的成分^[1,8]、有關植物傳遞訊息物質^[5,10]等多方面綜合後，找出哪些可能是使腺毛彎曲的誘發物質。提出了下列物質： K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、甘胺酸、氨水、幾丁質等。

步驟：

1. 配製下列物質 0.01M (高濃度)及 0.001M 溶液(低濃度)：
KCl、KNO₃、K₂SO₄、KH₂PO₄、K₃PO₄、NaCl、NaNO₃、Na₃PO₄、NH₄Cl、NH₄NO₃、(NH₄)₃PO₄、MgCl₂、CaCl₂、CuCl₂。
2. 以實驗 4-1 所設計的方式(針尖沾取單一根外腺毛)，攝影後測量圓葉與寬葉毛氈苔腺毛的彎曲刻度。
3. 實驗時間 3-6hr 後，將彎曲角度(①-⑤)與傳遞訊息的腺毛數目的實驗結果填入下表中，並討論之。(ex: 記為 圓⑤-1 根 表示 可使圓葉毛氈苔外腺毛彎至葉片中心，並傳遞訊息給另 1 根相鄰外腺毛)

結果：

1. 使用各高濃度溶液(0.01M)時，紀錄如下表：

表 4-2-1 各高濃度溶液使圓葉與寬葉毛氈苔腺毛彎曲 紀錄表

負離子 彎曲刻度 正離子	Cl^-	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	說明
K^+	×	×	圓②-0 根 寬×	圓⑤-11 根 寬⑤-8 根	×	
Na^+	圓④-0 根 寬④-0 根	圓× 寬②-0 根		圓⑤-25 根 寬⑤-11 根		
NH_4^+	圓④-0 根 寬②-0 根	圓⑤-1 根 寬×		圓⑤-13 根 寬⑤-4 根		
Mg^{2+}	×					變黑
Ca^{2+}	×					
Cu^{2+}	×					變黑
訊息傳遞	No	Yes	No	Yes	No	

ps 變黑：細胞群體變成黑色，腺毛不會彎曲

腺毛彎曲與訊息傳遞的圖形說明：

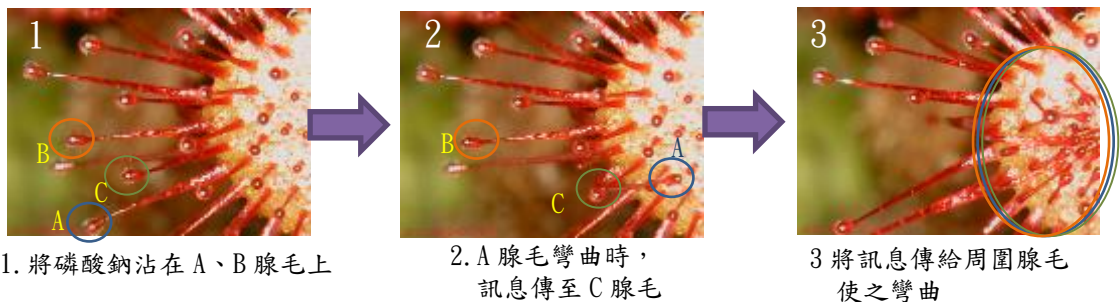


圖 4-2-1 腺毛彎曲與訊息傳遞的圖形說明

2. 高濃度的誘發物質歸納於表 4-2-1 左上角的區域內，再將此區域內物質改配置成低濃度溶液(0.001M)實驗，實驗紀錄如下表：

表 4-2-2 各低濃度溶液使圓葉與寬葉毛氈苔腺毛彎曲 紀錄表

正離子 彎曲刻度 負離子	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	PO ₄ ³⁻
K ⁺			圓②-0根 寬×	圓⑤-7根 寬③-4根
Na ⁺	圓②-0根 寬×	圓× 寬×		圓⑤-12根 寬⑤-12根
NH ₄ ⁺	圓× 寬×	圓②-0根 寬×		圓⑤-11根 寬⑤-3根
訊息傳遞	No	No	No	Yes

討論：

1. 從兩表中歸納得知：磷酸根(PO₄³⁻)、鈉離子(Na⁺)及銨根(NH₄⁺)可以使腺毛彎曲，又以磷酸根會產生較多的傳遞訊息，容易使腺毛彎曲且保持彎曲狀態的時間也較久。
2. 由於磷酸鈉與磷酸銨溶液是鹼性溶液，那麼是否為鹼性環境使腺毛彎曲呢？所以再以 0.01M 的“氨水”進行試驗。結果是：腺毛不彎曲，也無傳遞訊息現象。因此，我們將鹼性性質因素排除。
3. 在低濃度時，圓葉毛氈苔腺毛彎曲程度比寬葉大，傳遞訊息使相鄰腺毛彎曲的數量也多；若兩者彎曲角度及傳遞訊息數量相同，寬葉所需濃度較高。
4. 再用低濃度(0.001M)實驗一次，確認磷酸根(PO₄³⁻)仍會傳遞訊息使腺毛彎曲。“磷酸根”產生的訊息可以進入葉片組織內並產生膨壓作用啟動腺毛彎曲。
5. 若沾取溶液的黏珠經吸收而縮小，其縮小程度比原黏珠還小(如圖 4-2-2)，為確保實驗結果的穩定性，則需要更換植株，進行後的實驗。



圖 4-2-2 排除感受差異較大植株

實驗4-3：誘發毛氈苔腺毛彎曲的物質-有機物

說明：從昆蟲外殼^[3]接觸毛氈苔黏液起與消化蛋白質形成小分子胺基酸來考量，這些物質會引來更多腺毛彎曲至葉片中心一同消化分解與吸收養分嗎？

步驟：

1. 將幾丁質(昆蟲外殼的主要成分)粉末先沾於針尖上。
2. 以實驗 4-1 所設計方式(針尖沾取單一腺毛)，攝影後測量腺毛彎曲刻度。
3. 實驗時間 3-6hr 後，將實驗結果填入下表中。
4. 配製甘胺酸 0.01M、0.001M 溶液。重複步驟 1-3，並討論之。

結果：

表 4-3-1 幾丁質粉末、甘胺酸溶液使圓葉與寬葉毛氈苔腺毛彎曲紀錄表

物質 彎曲刻度 項次	幾丁質	甘胺酸 (0.01M)	甘胺酸 (0.001M)
彎曲刻度	圓⑤-0 根 寬⑤-0 根	圓③-0 根 寬×	圓②-0 根 寬×
訊息傳遞	No	No	No
說明	驗證方式需不同	是消化分解的產物	是消化分解的產物

討論：

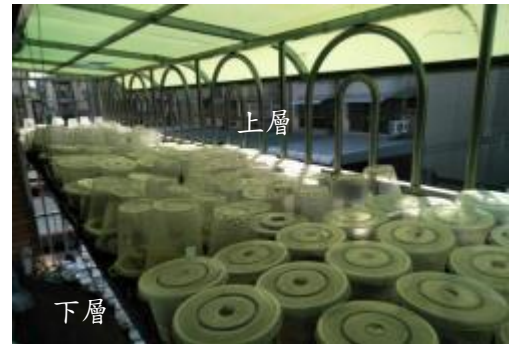
1. 幾丁質是不溶於水的固體，是無法以實驗 4-1 方式判定是否為誘發外腺毛彎曲。故引先前的研究^[+-]來辨別：在幾丁質附近的黏液是否有無週期性增減。實驗結果：黏液會產生週期性增減的現象，所以幾丁質也是可誘發外腺毛彎曲。
2. 甘胺酸可以使圓葉毛氈苔的腺毛彎曲，但不能使寬葉毛氈苔的腺毛彎曲。

陸、綜合實驗討論

1. 將多台數位顯微鏡串接成“物聯網”架構是為了可同時拍照紀錄測量、監控執行狀態與傳送數據。自製複式顯微鏡的固定架結合手機拍照，使老舊的複式顯微鏡仍可藉由手機拍照與網路功能來執行固定方式的縮時攝影紀錄。
2. 軟管不易拉直，長度單位讀取不易(需做記號再讀取)，氣體排水會漏水，不易攜帶，所以用纏繞式改良成 Y-CO₂ 儀器。
3. 1 公尺軟管須注水 10.8ml，可繞 7.5 圈，每圈刻畫 72 小格。最小刻度為 0.5，故每圈 = 36 大格 = 360°。藉此方便與毫升單位或角度換算。
4. 為了測量不同溶液在消化或腺毛彎曲過程的測量方法，在內腺毛、外腺毛及內、外腺毛之間尋找與測試很久。終於在外腺毛的彎曲過程上找到較良好的測試點與方法。

5. 毛氈苔的“葉片大小”和“相同品種的毛氈苔的感知差異”都會影響實驗四的結果。所以我們採用下列幾個原則來減少這兩項因素的影響。

(1) 實驗前大量培育圓葉與寬葉毛氈苔的數量(我們栽植的毛氈苔場所，至少 30 株以上，如圖十)。實驗時才能挑選葉片是健康、無老化、破損及黏珠較球型，且葉片大小相近的植株，並不餘匱乏。

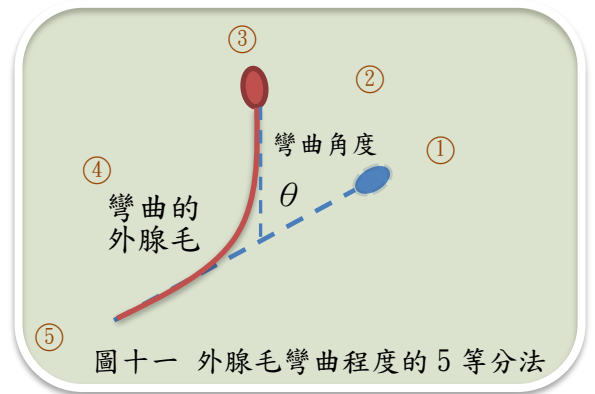


圖十 上、下兩層栽種的毛氈苔

(2) 對腺毛彎曲程度效果用 5 等分法(180°的 5 等分)。實驗值都是經多次測量的結果。發現實驗值為①都會是①，實驗值為⑤都會是⑤。若有訊息傳遞發生時腺毛根數會有差異。實驗值為②至④時會相差一個程度。例如實驗值為②，其實會呈現在②-③的範圍。

(圖十一)

(3) 紀錄完成表格中的實驗值，就可以清楚呈現出兩種毛氈苔的差異趨勢。



圖十一 外腺毛彎曲程度的 5 等分法

6. 使用測試溶液的濃度(0.01M, 0.001M)是由文獻中酵母菌的成分表^[1]先換算後再經實驗測試後而定的濃度。

7. 毛氈苔消化吸收酵母菌後，經觀察是可以促進生長的(圖十二)(毛氈苔種植在 2 吋花盆內)。成株使用酵母菌顆粒 1-2 粒為宜，太多也會造成肥傷。所以捕食昆蟲^[2]與人工餵食酵母菌^[1]皆可幫助毛氈苔成長。



圖十二 食用酵母菌前後的葉片比較

8. 本實驗不考慮多種物質混和的效果，並酵母菌尚有多種成分^[-,1,8]未測量(ex: Lipid、Nucleic acids、Carbohydrates、Vitamin 類)。

9. 本實驗設計暫不考慮毛氈苔不同消化階段會分泌不同的消化酶，僅考慮啟動腺毛彎曲的階段。

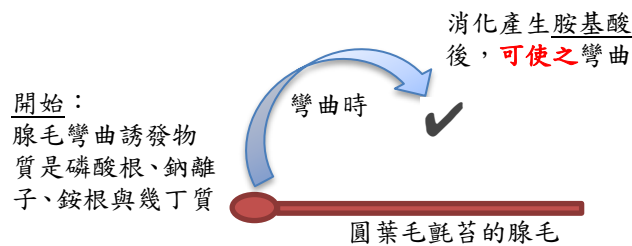
10. 之前的研究皆以洛弗麗毛氈苔為主體。但我們希望本實驗能從捕食行為上有最大差異的品種著手。故從毛氈苔的植株外觀、先前測試捕食行為的差異及毛氈苔基因序列分類圖(附錄)等資料，再加入目前種植毛氈苔的品種的考量，最後選用圓葉毛氈苔與寬葉毛氈苔進行實驗。然毛氈苔基因序列的不同與捕食行為的差異應有相對應的關係存在。

柒、結論

1. 以本實驗結果來解釋 “圓葉毛氈苔的腺毛會一直彎曲，而寬葉毛氈苔的腺毛會發生折返的現象”。根據酵母菌被消化後所釋出成分的模型 (圖 1-1-3)：

- ①黏液中消化酶 A 分解了保護酵母菌的外殼，
- ②使得酵母菌內部物質流出及黏液中消化酶 B 進入酵母菌內部，
- ③流出的酵母菌內部物質啟動了毛氈苔外腺毛彎曲，
- ④黏液中消化酶 B 將酵母菌內的大分子(ex：蛋白質…)分解成小分子。

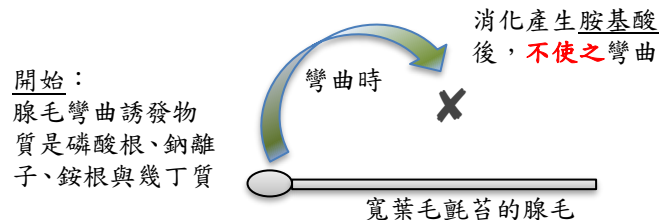
- (1)圓葉毛氈苔：



圖十三 說明圓葉毛氈苔的腺毛會一直彎曲

磷酸根、鈉離子、銨根與幾丁質啟動外腺毛彎曲，消化分解產生胺基酸持續使外腺毛彎曲。胺基酸濃度持續增加，故外腺毛會一直彎曲。

- (2)寬葉毛氈苔：



圖十四 說明寬葉毛氈苔的腺毛會折返式彎曲

磷酸根、鈉離子、銨根與幾丁質啟動外腺毛彎曲，消化分解產生胺基酸**不能使**外腺毛持續彎曲；且使外腺毛彎曲所需的誘發物質濃度較高，若幾丁質分解不多，且誘發物質的濃度無法明顯增加，外腺毛將不再彎曲，因而產生外腺毛折返的現象。

2. 對毛氈苔而言，每發動一次捕食行動與消化作用就是一種**能量成本**。為了獲取外界更多符合生存所需要的物質，不同品種的毛氈苔應會建立各自一套評估機制。使用餵食酵母菌的方式，恰能讓各自的評估機制顯示出來。

3. 從國中^[+三, +四]開始就不斷尋找可以探討毛氈苔食蟲性質的假昆蟲。保麗龍^[+]、泡棉、棉花、拭鏡紙片都曾試用過，然而酵母菌(假昆蟲)有一般昆蟲外殼的幾丁質，內部有引起毛氈苔捕食行動與消化作用的成分。再則顆粒狀，易保存，便宜易取得，易操作等優點。目前研究能在不同品種的毛氈苔之間能顯示出其捕食行為的差異，希望未來也能發現有關毛氈苔消化作用的差異。就能夠建立不同品種毛氈苔比較的基礎。
4. 文獻中^[-]曾提到用水楊酸來刺激毛氈苔，但不能誘使毛氈苔產生幾丁質分解酵素；另一方面也指出，毛氈苔捕獲獵物會誘使防禦相關的茉莉酮酸植物激素的累積^[10]。建議可以使用啟動彎曲的誘發物質(ex: 磷酸鈉)來測試誘使其產生分解酵素與累積植物激素。最後啟動彎曲的誘發物質如何與“膨壓機制”或與“消化機制”結合是未來繼續努力挑戰的方向。

捌、參考資料

中文：

- 一、毛氈苔具有分解昆蟲外殼的能力。2020年1月15，取自 http://cp-toxin.blogspot.tw/2007/07/blog-post_20.html。
- 二、圓葉茅膏菜，2020年1月15，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/圓葉茅膏菜>
- 三、中藥名稱：圓葉茅膏菜，2020年1月15，取自 <https://health.cloudtcm.com/herb/12558>
- 四、酵母。2020年1月15，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/酵母>。
- 五、翁月媚，酵母菌，2020年1月15，取自 <https://pws.niu.edu.tw/~whhsu/class/ci05.htm>。
- 六、酵母無氧發酵與有氧發酵作用的解析。2020年1月15，取自 <https://kknews.cc/health/a4objjn.html>。
- 七、幾丁質。2020年1月15，取自 <https://en.wikipedia.org/wiki/Chitin>
- 八、第二章 生命之運作。2020年1月15，取自 <http://microbiology.scu.edu.tw/MIB/lifescience/wong2/ch02-4.htm>
- 九、膨壓運動。2020年1月15，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/膨壓運動>
- 十、作者，中華民國第59屆全國中小學科展高中組 植物學科：點線面-探討毛氈苔的捕食運動機制
- 十一、以蜜露為致命誘餌的肉食植物—小毛氈苔 國家地理雜誌中文網。2020年1月15，取自 <https://www.natgeomedia.com/news/external/48886>
- 十二、探討毛氈苔腺毛的彎曲機制與捕食訊息傳遞，2020年5月15，取自 https://www.mxeduc.org.tw/scienceaward/history/projectDoc/18th/doc/SA18-077_final.pdf
- 十三、這不是我的菜_試種植毛氈苔與比較捕食特性，2020年1月15，取自

http://class.kh.edu.tw/sites/12821/upload_file02_第2名_這不是我的菜_試種植毛氈苔與比較捕食特性.pdf

十四、小鴨王 ducking(陳英佐)，食蟲植物新手指南：地表上最有個性的植物栽培方法&養護技巧完全解析，遠足文化，2015年11月，ISBN: 9789869235129
English :

1. Alaa El-Din K. Omar, Rashed S. Al-Obeed and Mahmoud A. Ahmed. (2018) Effect of foliar spraying with potassium dehydrogenase phosphate and yeast extract on yield and fruit quality of Sukary date palm (*Phoenix dactylifera* L.) in Saudi Arabia. *Advances in Agricultural Science*, Volume 6 (2018), Issue 03, 25-32.
2. Andrej P., Miroslav K., Michaela L. and Lubomír A. (2014). Feeding on prey increases photosynthetic efficiency in the carnivorous sundew *Drosera capensis*. *Annals of Botany.*; 113: 69 – 78, doi:10.1093/aob/mct254.
3. Andrej et al. (2016), A carnivorous sundew plant prefers protein over chitin as a source of nitrogen from its traps *Plant Physiology and Biochemistry* 104 11e16
4. Egan, P. A., & van der Kooy, F. (2013). Phytochemistry of the carnivorous sundew genus *Drosera* (*Droseraceae*) – future perspectives and ethnopharmacological relevance. *Chemistry & biodiversity*, 10(10), 1774-1790.
5. Finbarr G. Clancy and , Michael D. Coffey(1977). Acid phosphatase and protease release by the insectivorous plant *Drosera rotundifolia*. *Canadian Journal of Botany*, 1977, 55(4): 480-488, <https://doi.org/10.1139/b77-058>.
6. Gowda, D. C., Reuter, G., & Schauer, R. (1983). Structural studies of an acidic polysaccharide from the mucin secreted by *Drosera capensis*. *Carbohydrate Research*, 113(1), 113-124.
7. Hartmeyer, I., & Hartmeyer, S. R. H. Snap-tentacles and runway lights. *Carnivorous Plant Newsletter*, 2010 39, 101-113.
8. Horst Feldmann. *Yeast: Molecular and Cell Biology*, Second Edition. Published 2012 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
9. Ravee et al. (2018), Discovery of digestive enzymes in carnivorous plants with focus on proteases. *PeerJ* 6:e4914;DOI 10.7717/peerj.4914
10. Yoko Nakamura, Michael Reichelt, Veronika E. Mayer, and Axel Mithöfer(2013). Jasmonates trigger prey-induced formation of ‘outer stomach’ in carnivorous sundew plants. *Proc Biol Sci.*; 280(1759): 20130228. doi: 10.1098/rspb.2013.0228.

附件一：(實驗 1-1 座標、時間的實驗數據)

表 1-1-1 (圓葉毛氈苔的座標、時間)

	A	B	C	D
座標	(157, 62)	(291, 335)	(347, 422)	(343, 438)
時間	222400	223940	021840	032041

表 1-1-2 (寬葉毛氈苔的座標、時間)

	A	B	C	D	E	F
座標	(164, 78)	(330, 166)	(273, 82)	(375, 280)	(424, 280)	(478, 428)
時間	220211	231205	020405	075305	095005	111905

附件二：(酵母菌成分表^[1])：

Table 1. Chemical composition of bread yeast (Nagodawithana, 1991).

Protein	47%	Nucleic acids	8%
Carbohydrates	33%	Lipids	4%
Minerals	8%		
Approximate composition if vitamins (mg/g)			
Thiamine	6-100	Biotin	1.3
Riboflavin	35-50	Collin	4000
Niacin	300-500	Folic acid	5-13
Pyridoxine HCl	28	Vit-B12	0.001
Pantothenate	70		
Approximate composition if minerals (mg/g)			
Na	0.12	Cu	8.00
Ca	0.75	Se	0.10
Fe	0.02	Mn	0.02
Mg	1.65	Cr	2.20
K	21.00	Ni	3.00
P	13.50	Va	0.04
S	3.90	Mo	0.40
Zn	0.17	Sn	3.00
Si	0.03	Li	0.17

【評語】 052101

1. 本研究的結果對毛氈苔相關的研究可提供有用的資訊。
2. 有原創性，方法具可行性。
3. 自行設計多種觀測儀器，殊為難得。
4. 本研究可解釋毛氈台腺毛捕食運動的物理及化學誘發機制，數據足以證實結論及釋義。
5. 表達及說明實驗結果能力佳。

摘要

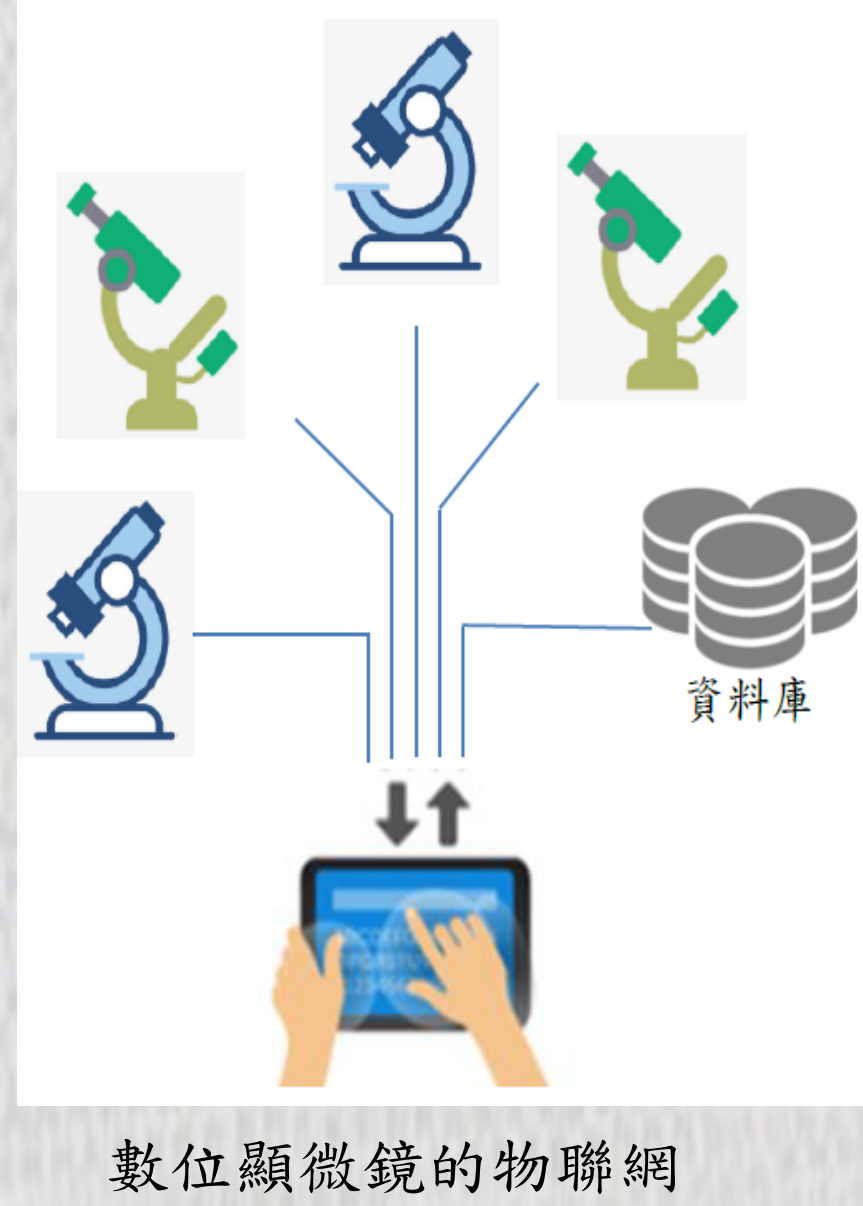
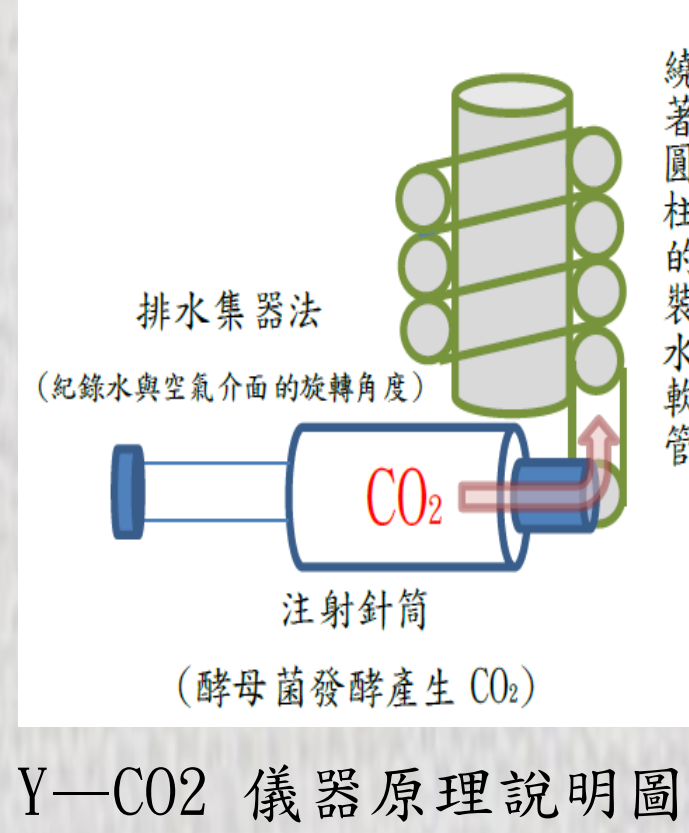
從試驗中得知毛氈苔可以消化分解酵母菌，同時發現不同品種的毛氈苔捕食行為有差異：圓葉毛氈苔的外腺毛彎曲將酵母菌移入葉片中心並進行消化；寬葉毛氈苔在彎曲過程中會做一次折返。毛氈苔的黏液皆可抑制酵母菌的發酵，並使用3D列印自製與改良儀器，來量化其抑制酵母菌發酵能力的差異。此抑制能力來自黏液裡的消化酶，發現外腺毛黏液的抑制效果優於內腺毛。利用酵母菌被消化後所釋出成分的模型，將實驗數據逐一歸納出誘發腺毛彎曲的物質是磷酸根、鈉離子、鉍根與幾丁質，且以磷酸根為主要物質並會產生彎曲訊息傳遞現象。最後解釋為何寬葉毛氈苔的外腺毛在彎曲過程中會一次折返：不同品種的毛氈苔誘發其腺毛彎曲的物質與所需濃度是有差異的。

壹&貳、研究動機與目的

- 利用酵母菌判別啟動圓葉、寬葉毛氈苔腺毛彎曲有何不同
- 如何量化毛氈苔黏液抑制酵母菌的發酵能力
- 毛氈苔黏液抑制酵母菌的發酵能力與其所含消化酶關係
- 哪些是啟動毛氈苔腺毛彎曲的誘發物質

參、研究設備及器材

實驗藥品與器材： KCl 、 KNO_3 、 K_2SO_4 、 KH_2PO_4 、 K_3PO_4 、 $NaCl$ 、 $NaNNO_3$ 、 Na_3PO_4 、 NH_4Cl 、 NH_4NO_3 、 $(NH_4)_2PO_4$ 、 $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ 、 $CuCl_2$ 、甘胺酸、氫水、幾丁質、凡士林、蔗糖、圓葉毛氈苔、寬葉毛氈苔、食品用乾酵母菌、單凹懸滴玻片、解剖刀具、ImageJ 分析軟體、Tracker 軟體。



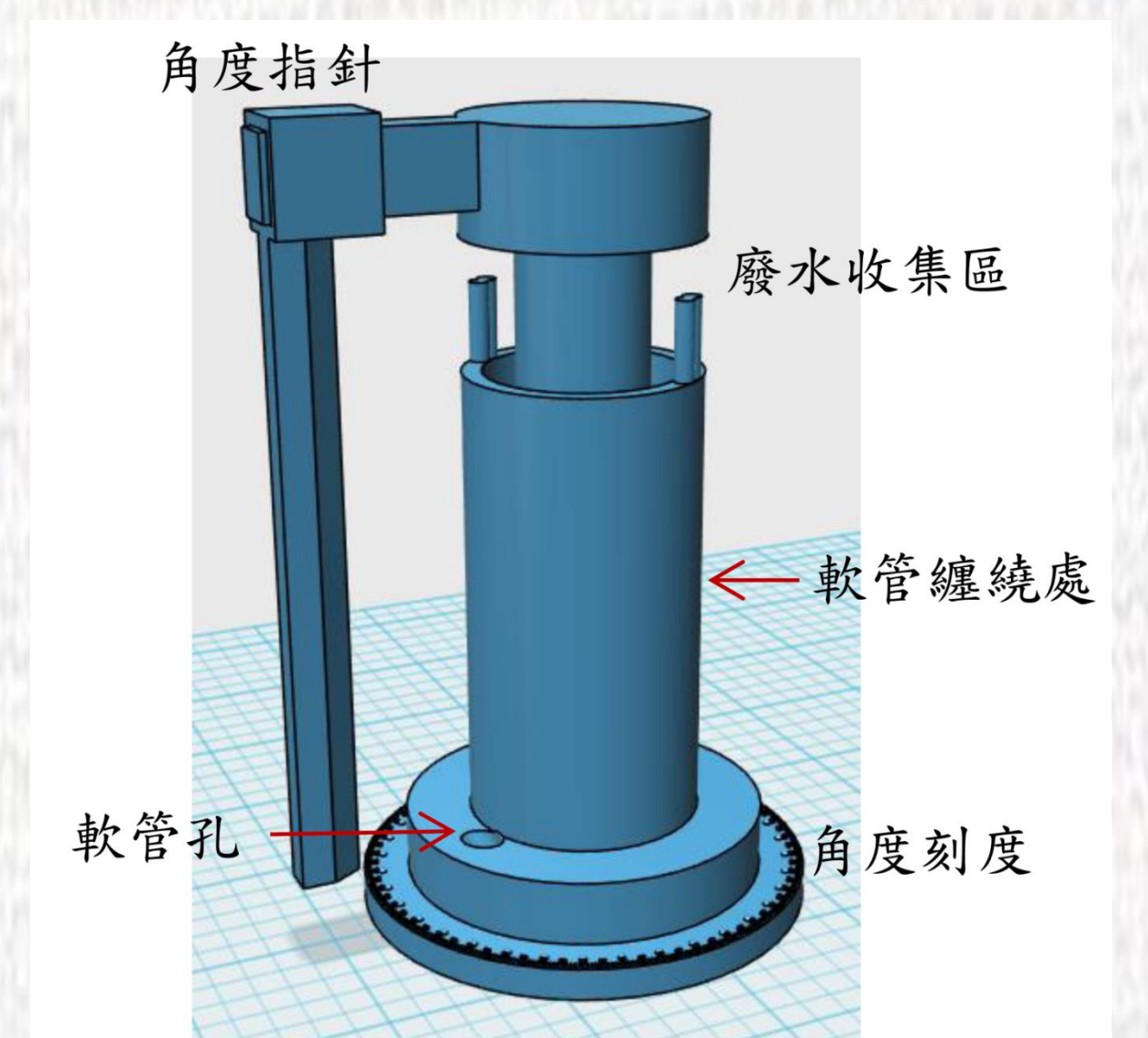
USB數位顯微鏡的實際圖



自製複式顯微鏡的手機架(正面)



手機架的使用(側面)



Y-CO₂ 儀器 示意圖

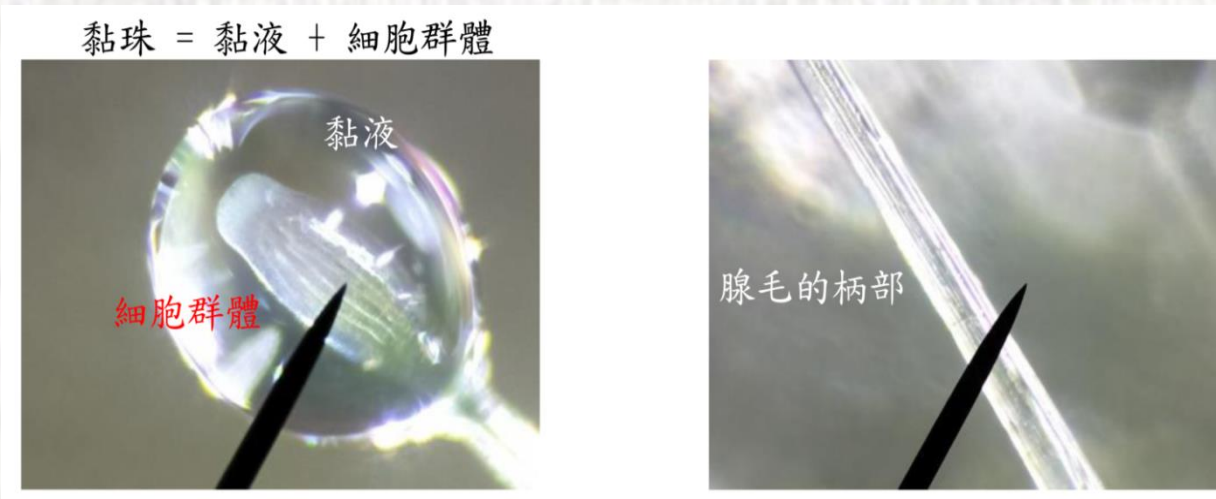
肆、研究過程方法

文獻探討

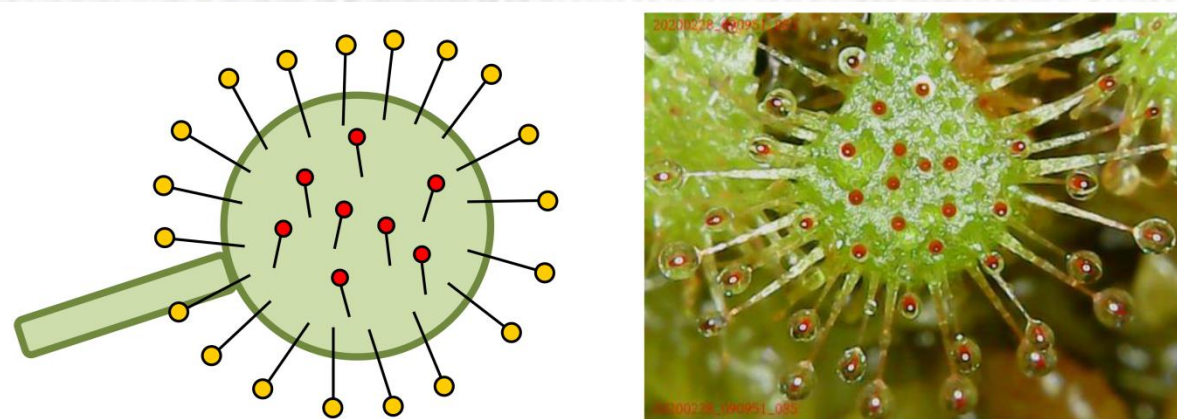
(一)圓葉毛氈苔與寬葉毛氈苔在植物學分類地位與特性如下

名稱	中文名：圓葉茅膏菜 學名： <i>Drosera rotundifolia</i>	中文名：寬葉毛氈苔 學名： <i>Drosera burmannii</i>
分類地位	植物界/被子植物門/雙子葉植物綱/石竹目/茅膏菜科/茅膏菜屬/ <i>D. rotundifolia</i>	植物界/被子植物門/雙子葉植物綱/石竹目/茅膏菜科/茅膏菜屬/ <i>D. burmannii</i>
別名	圓葉毛氈苔	錦地羅、金錢草
外觀特徵	圓葉茅膏菜一般直徑約長3-5公分，花序高5-25公分。在基生蓮座的中央會長出沒有毛的莖，花序會在莖上的一面長出。花序呈白色或粉紅色，有五瓣。種子長1-1.5毫米，呈褐色，細長及成錐形。	一年生草本，容易開花及自花授粉，通常在早晨開花，約2-3小時授粉後，花就謝了。種子掉落在葉面再長出小苗。葉聚生呈蓮座狀，直徑約1-3公分。捕蟲反應很快，陽光充足下，葉片和腺毛呈現紅色，不足時則呈綠色。
藥用價值	藥理作用：對流感病毒及金黃色葡萄球菌有抑制作用。 功能主治：祛痰；鎮咳；平喘；止痛。主咳喘；哮喘；百日咳；痢疾	功效：清肺止咳、解毒療癆。 功用主治：治痢疾、肺熱咳嗽、咽喉腫痛、小兒疳積、耳內流膿。具有醫學活性的植物成分 ^[1] ，包括茶鞣、plumbagin 和 hydroplumbagin
圖片		

(二)酵母菌的成分：它是一種很營養的食物，其富含蛋白質(約47%)、維他命，特別是維他命 b 群、礦物質、微量元素(如鐵、鉀、磷)和酵素。在酵母菌的礦物質成分中，最多是鉀，次之是磷。



寬葉毛氈苔腺毛(觸手)的細部圖

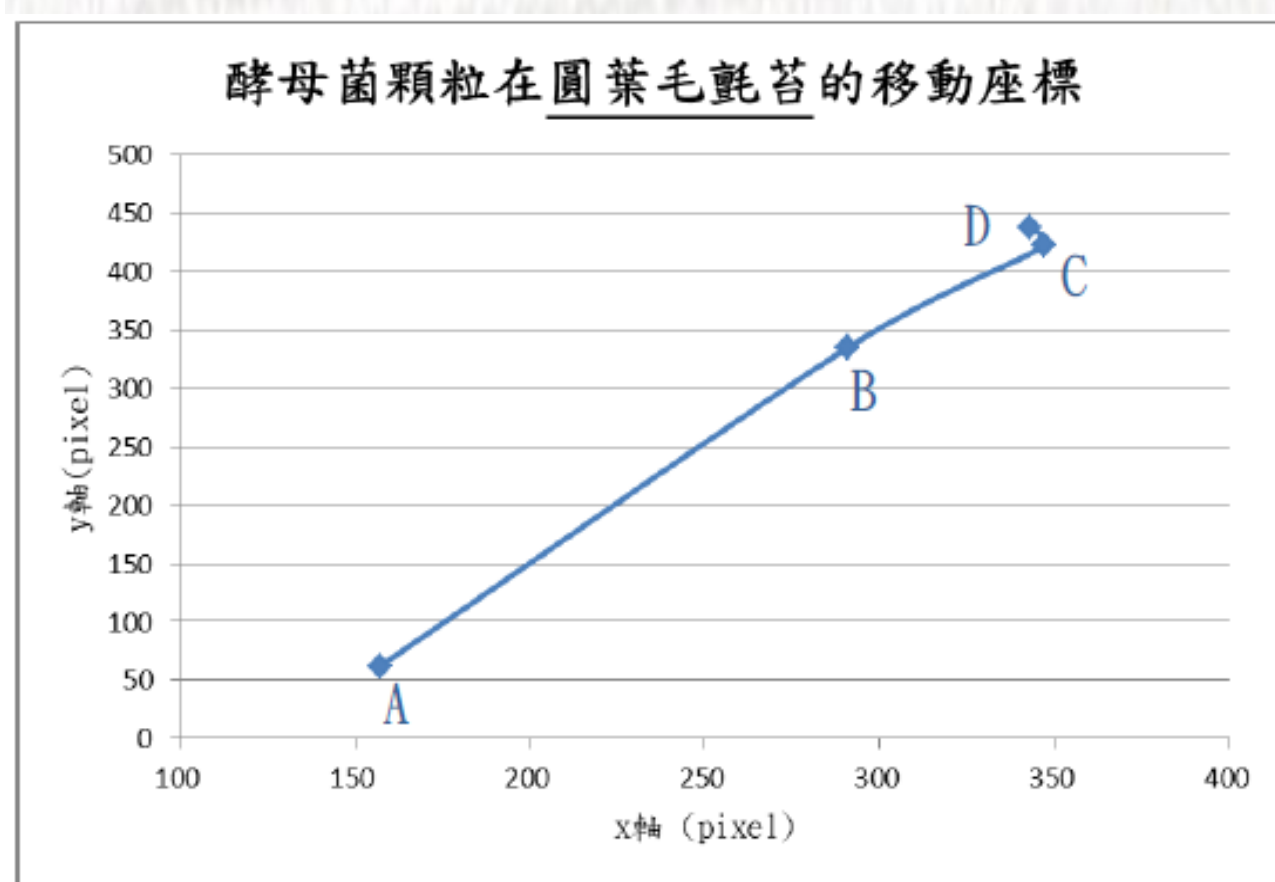
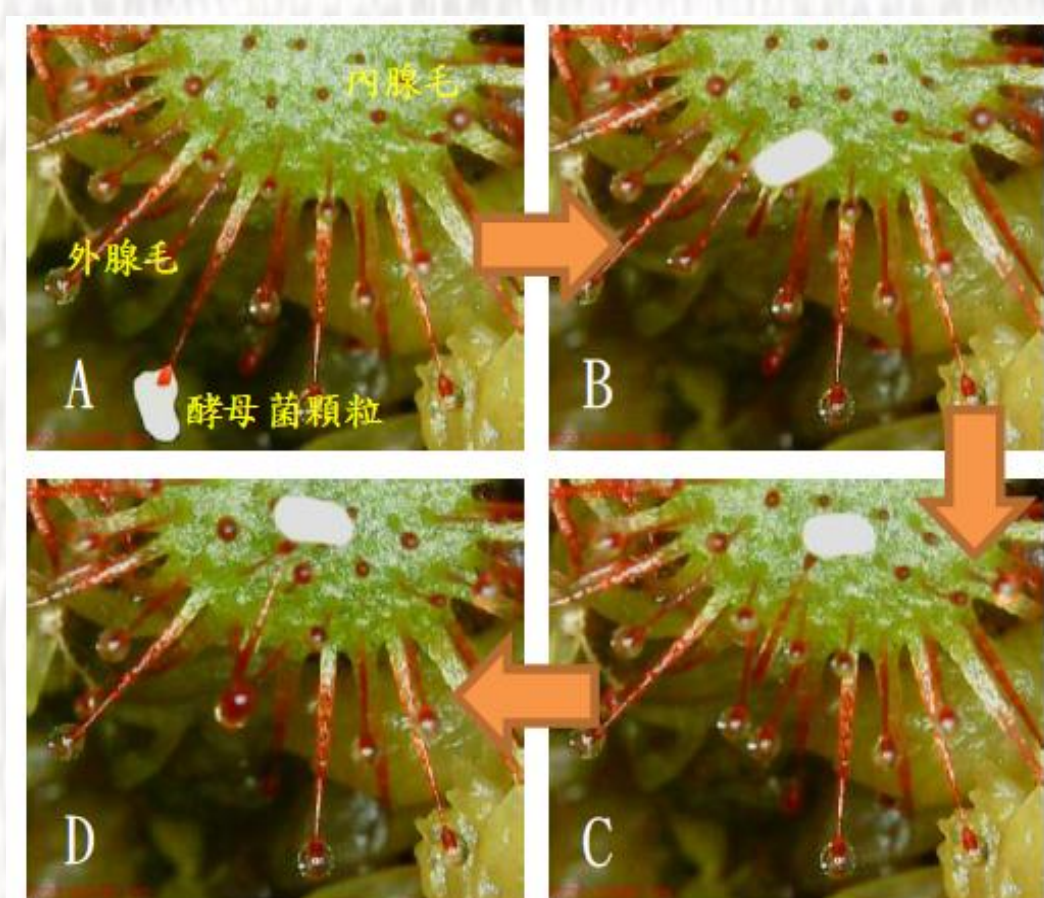


實驗流程及步驟

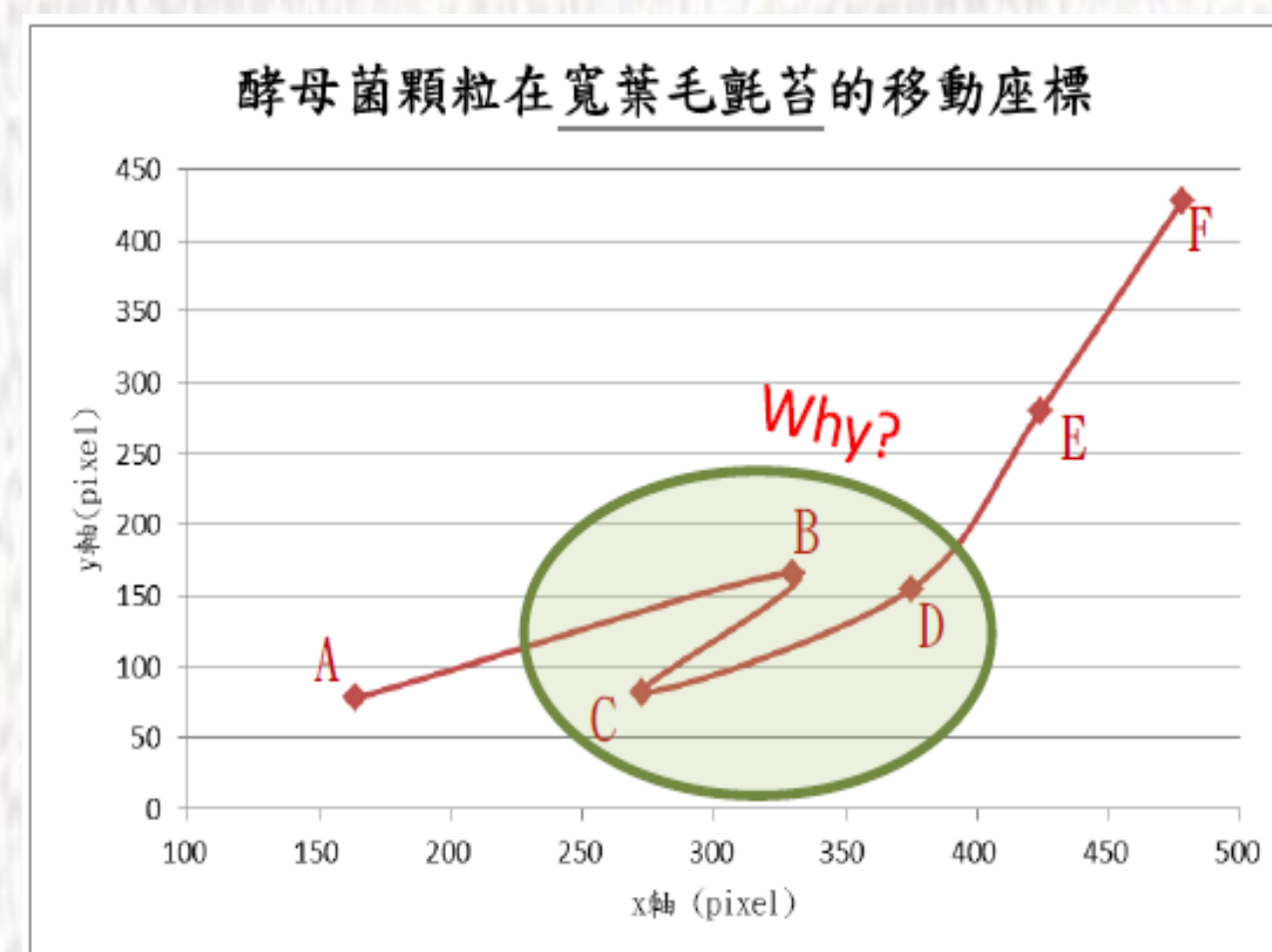
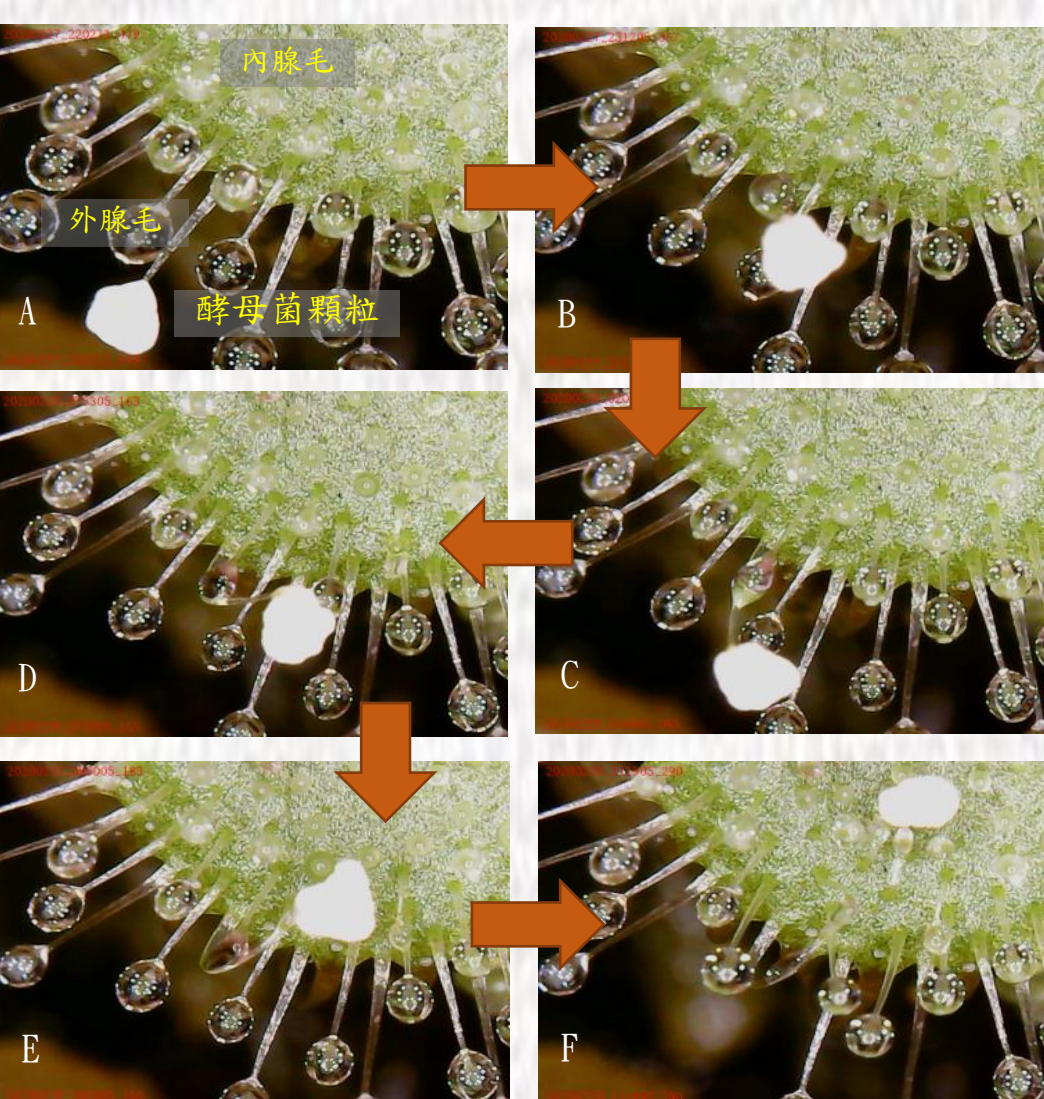


伍、研究結果與討論

實驗 1-1：用酵母菌啟動圓葉、寬葉毛氈苔腺毛彎曲。



- A: 將酵母菌顆粒沾黏在外腺毛上
- B: 外腺毛彎曲，將酵母菌高舉在葉面上端，A→B約15min
- C: 外腺毛持續彎曲到葉面表面，周圍腺毛開始彎曲，B→C約3hr40min
- D: 內腺毛彎曲向酵母菌，並將酵母菌移至葉面中心，C→D約1hr



- A: 酵母菌顆粒沾黏在外腺毛上
- B: 外腺毛彎曲，將酵母菌高舉在葉面上端，A→B約8min停滯約2hr後，腺毛開始向外伸直
- C: 腺毛向外伸直到C，B→C約4hr
- D: 腺毛又開始彎曲，在D與另一根相撞，C→D約3hr40min
- E: 兩根外腺毛一起彎曲至葉面上D→E約3hr42min，周圍腺毛開始彎曲
- F: 由數根內腺毛將酵母菌顆粒移至葉片內部約10min



酵母菌被消化後所釋出成分的模型

根據文獻，黏液中所含的酵素，有的可分解酵母菌外殼的幾丁質成分，有的可分解其內部蛋白質。

- 結論：**
- 圓葉-外腺毛一直向內彎，彎曲過程前段較快，後段較慢
 - 寬葉-外腺毛彎曲過程會折返，過程前段較快，後段較慢
 - 在數次實驗中並非所有酵母菌都被彎進內腺毛，寬葉的成功率低於圓葉
 - 比較外腺毛各階段彎曲的時間都是先快後慢，對於外腺毛的觸發彎曲應該分成先物理觸發，後化學觸發。

實驗 1-2：觀察毛氈苔黏液會抑制酵母菌生長情形

	實驗組(圓葉)	實驗組(寬葉)	對照組
開始時			
4hr 後			
說明	1. 酵母菌數量會減少 2. 酵母菌會萎縮 3. 酵母菌表層有破裂面(8hr 後)	1. 酵母菌數量會減少 2. 粒狀酵母菌會變模糊不清 3. 酵母菌表層有破裂面	1. 酵母菌數量不會明顯減少 2. 酵母菌表層無破裂面

比較後，得知毛氈苔黏液會使酵母菌分解，破裂或萎縮，之後死亡。

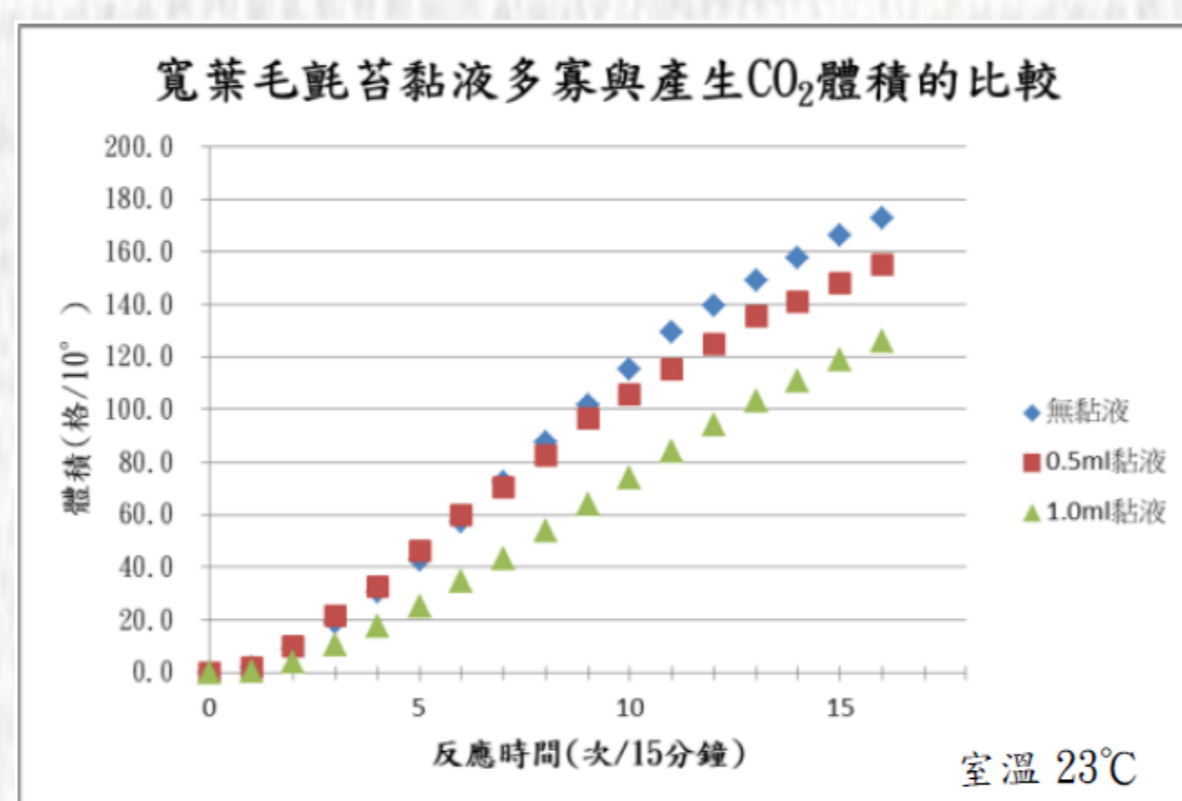
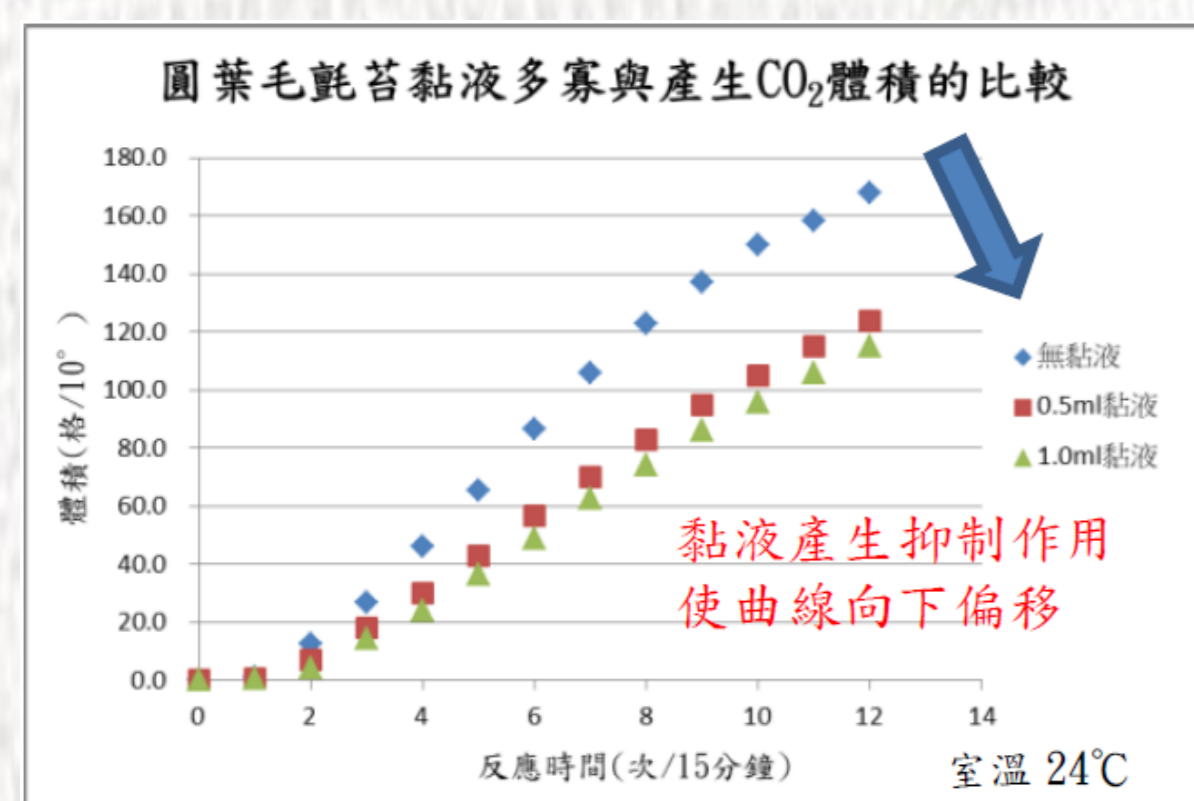
實驗 2-1：量化毛氈苔黏液抑制酵母菌發酵能力

利用酵母菌發酵過程產生CO₂和Y-CO₂儀器來檢測毛氈苔黏液抑制酵母菌的能力。

藥品	A 針筒	B 針筒	C 針筒
黏液溶液(ml)	0	0.5	1.0
蒸餾水(ml)	1.0	0.5	0
糖水(ml)	1.5	1.5	1.5
酵母菌	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水	0.05g/1.0ml 水
體積共計(ml)	3.5	3.5	3.5



黏液溶於2.0ml 純水+糖水1.8/30 各依比例混和溶液於各個針筒中



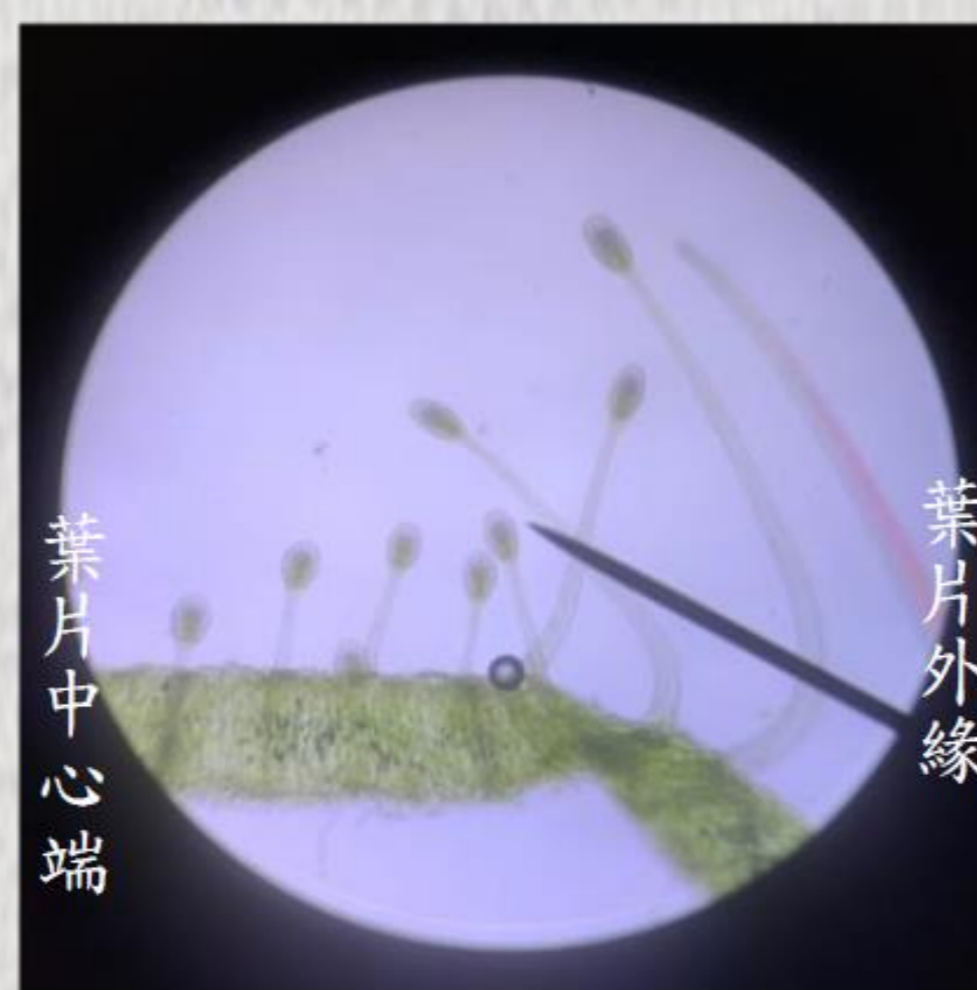
「圓葉」黏液量與CO₂體積的關係 「寬葉」黏液量與CO₂體積的關係

結論：兩個品種的黏液增加時皆會明顯抑制酵母菌的生長。

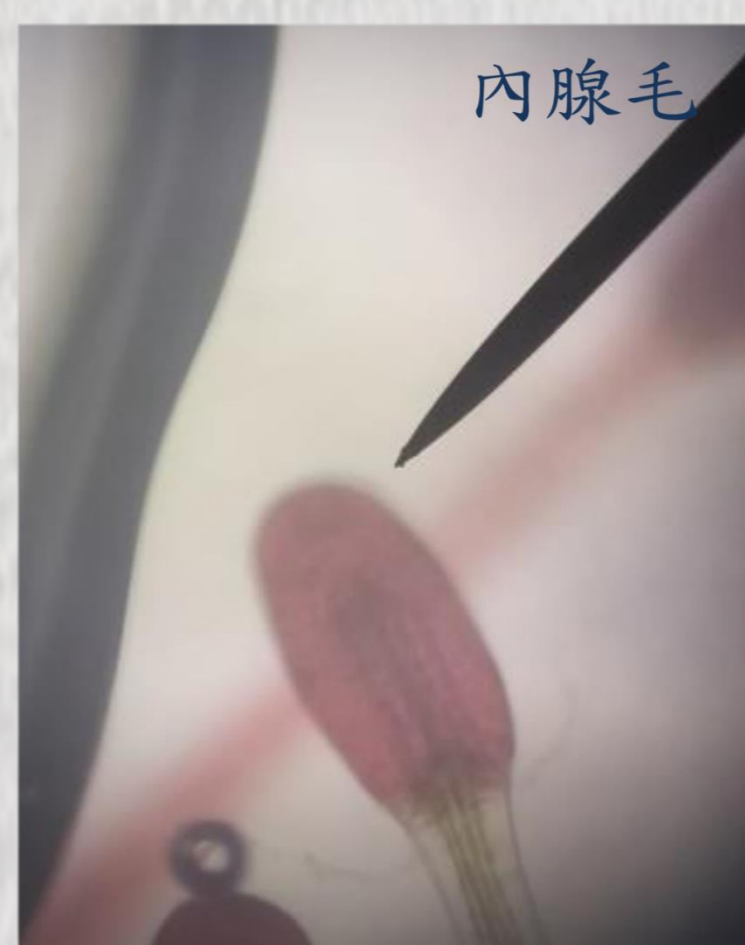
實驗 2-2：解剖毛氈苔的內、外腺毛構造



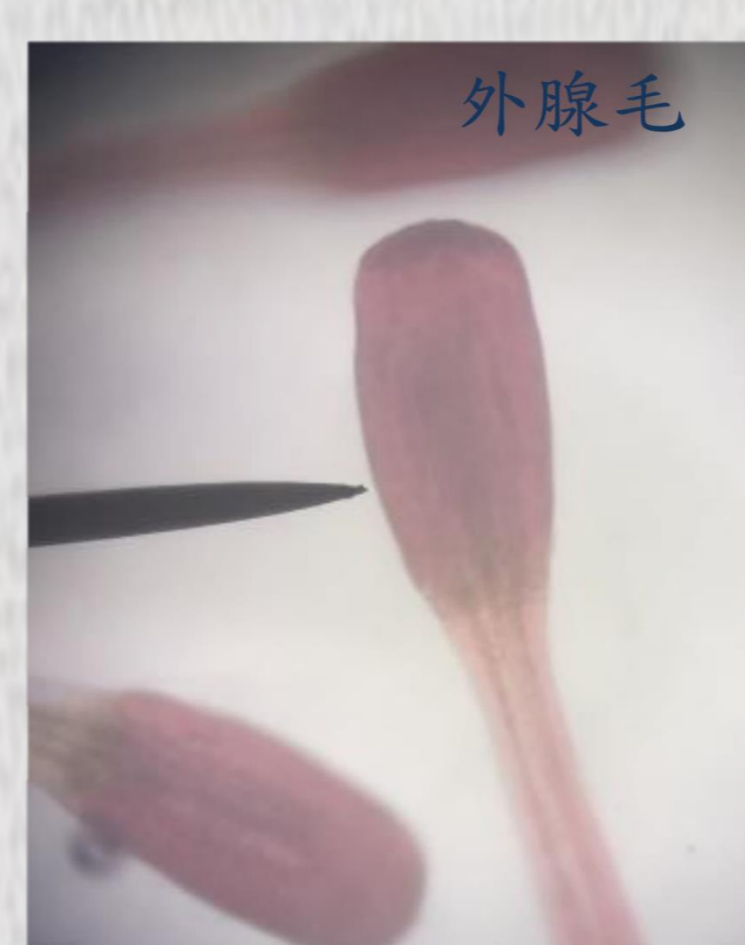
圓葉_內、外腺毛剖面圖



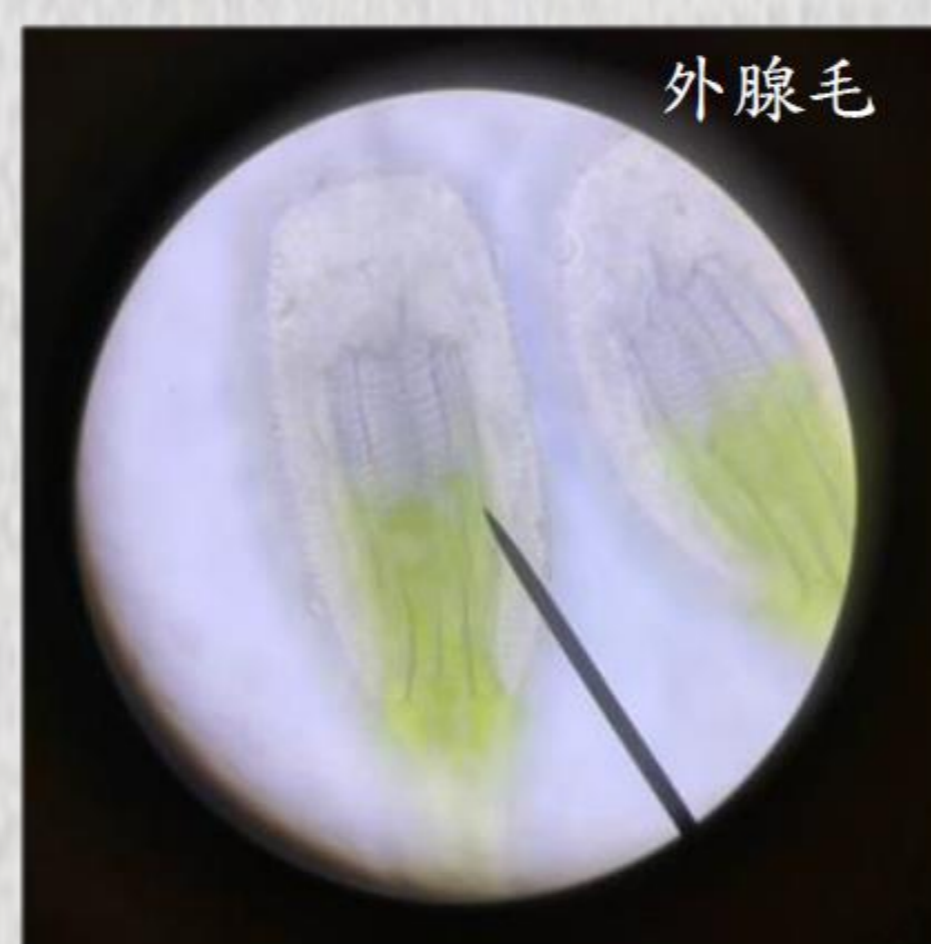
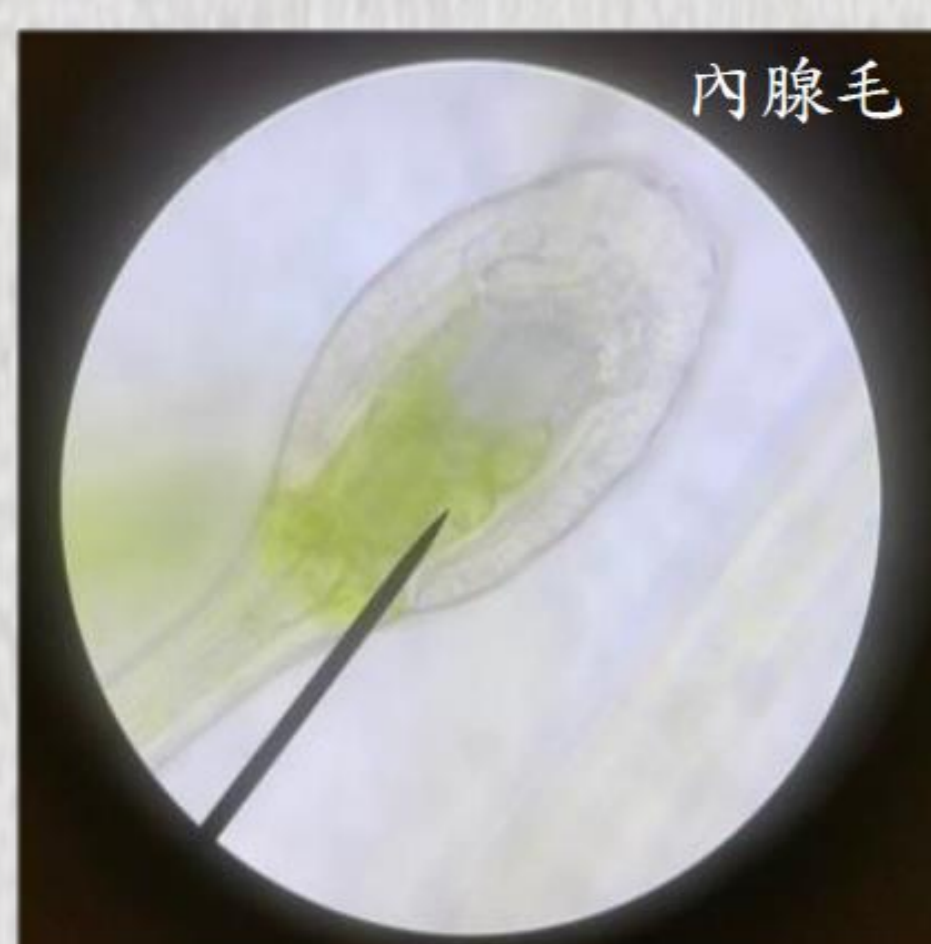
寬葉_內、外腺毛剖面圖



圓葉_內、外腺毛之細胞群體的解剖圖

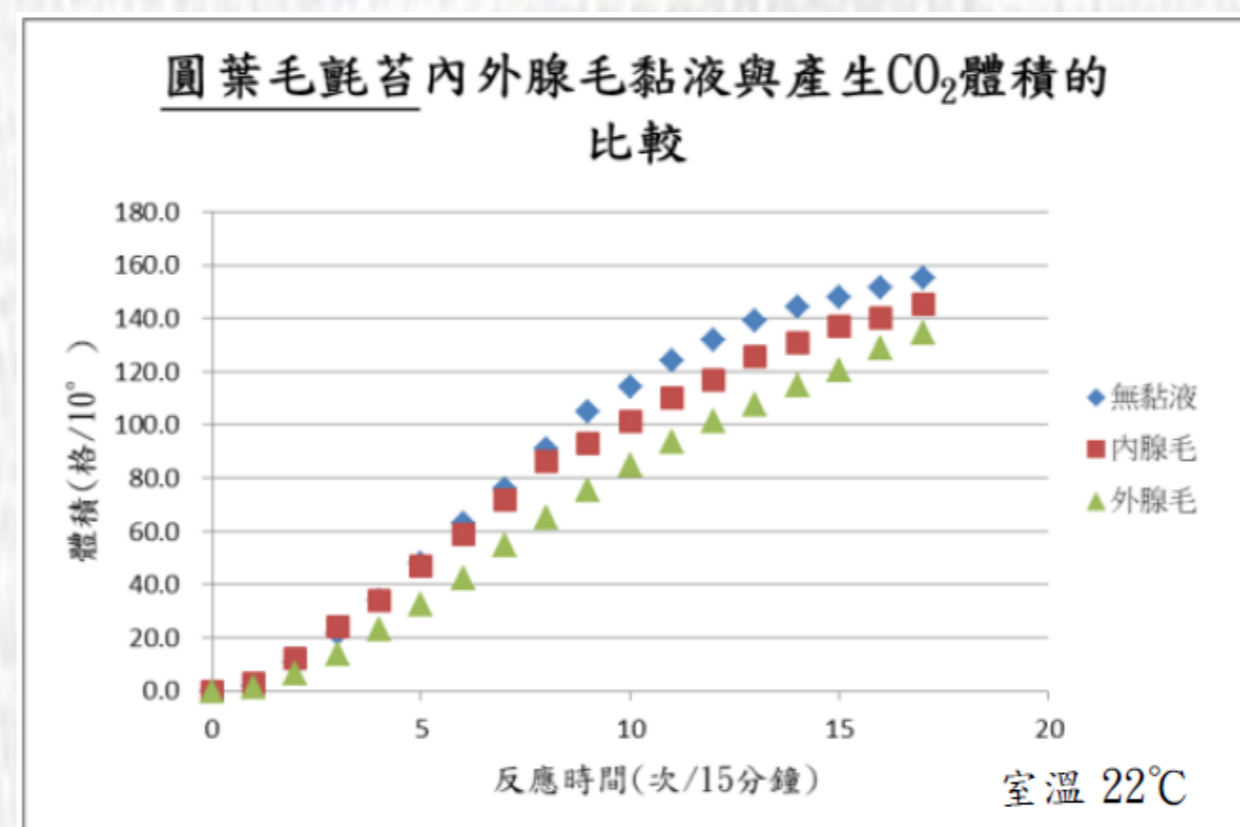


寬葉_內、外腺毛之細胞群體的解剖圖

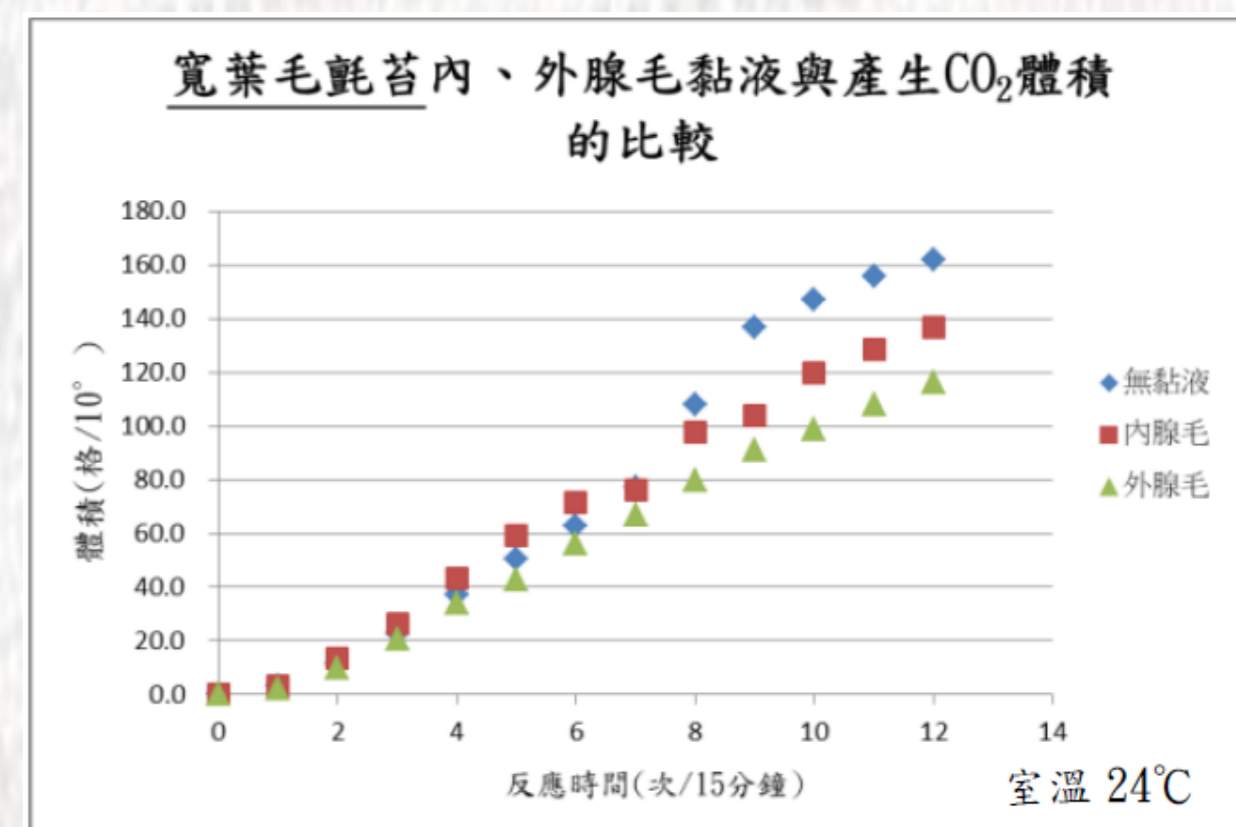


結論：內外腺毛在外觀構造上有很大差異，差異利於包覆獵物。內外腺毛所分泌的消化酶與抑制物質可能也有所不同。

實驗 3-1：內、外腺毛黏液抑制力的差異



圓葉_內、外腺毛抑制能力的差異

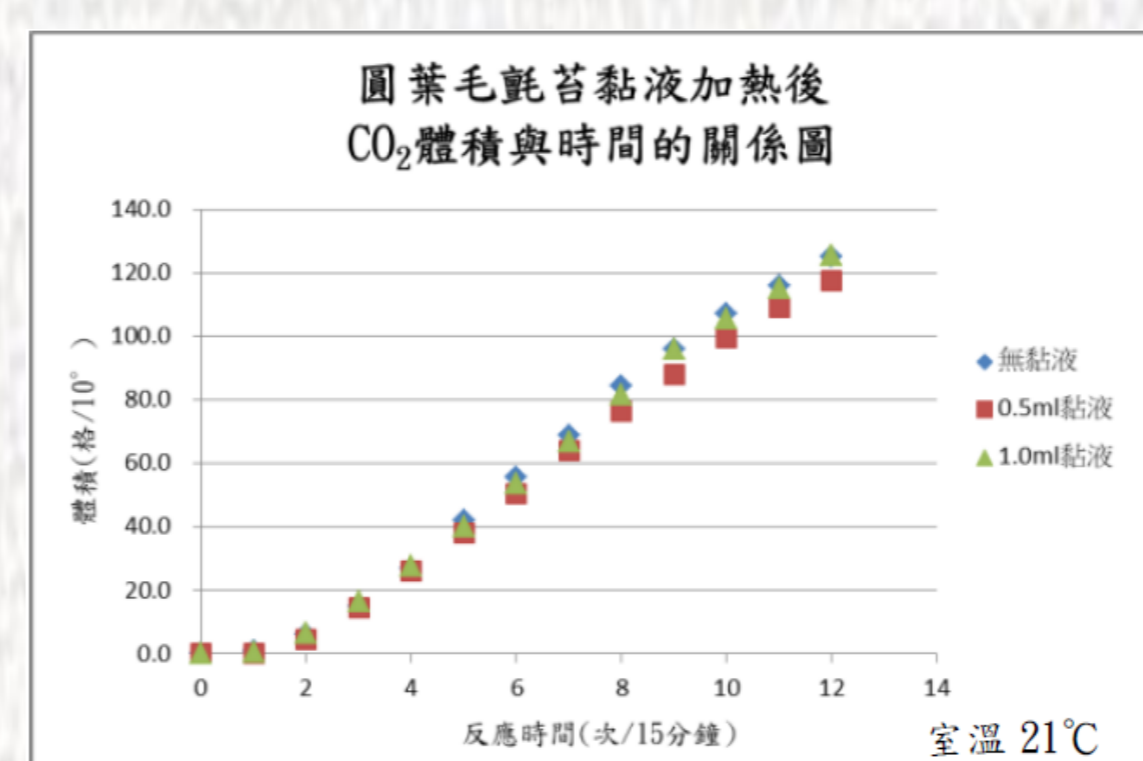


寬葉_內、外腺毛抑制能力的差異

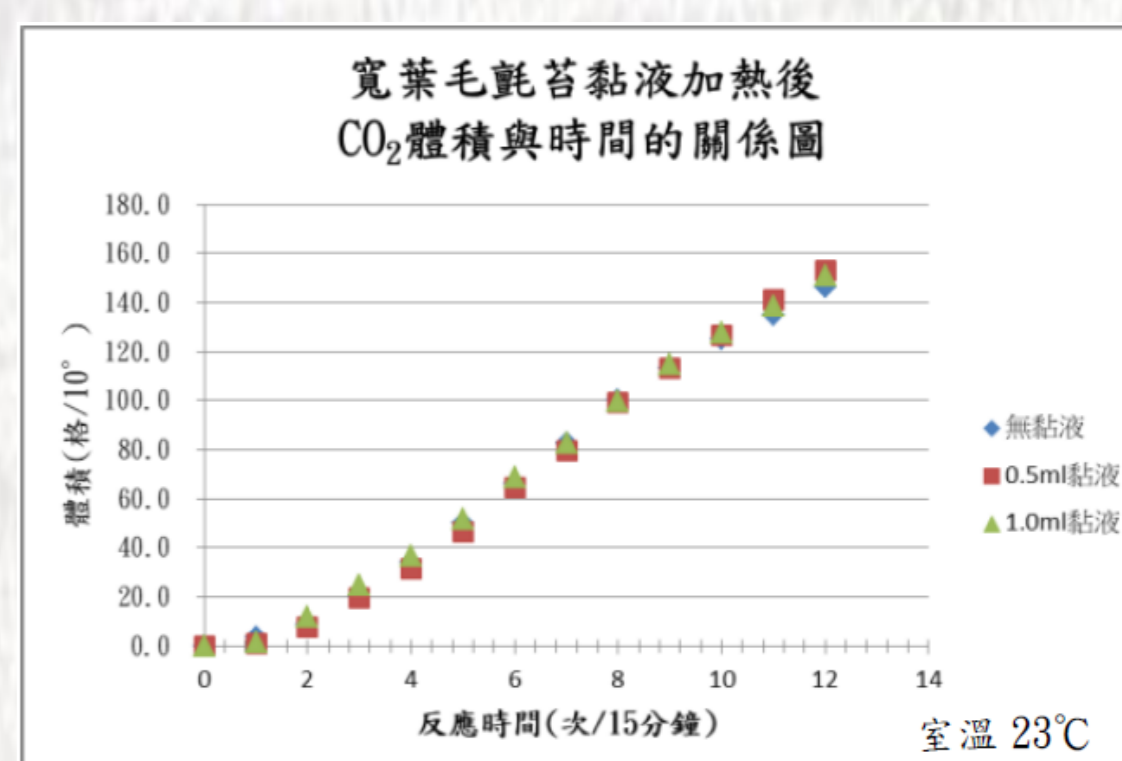
結論：外腺毛抑制能力較內腺毛好，故酵母菌在外腺毛就開始被分解
推論：

- 儘快判定是否為可消化的獵物(營養物質)。
- 進而傳遞出訊息讓更多腺毛參與捕食活動(訊息傳遞)。
- 儘快分解獵物組織，減少其逃脫機會。

實驗 3-2：加熱處理後的黏液會抑制酵母菌發酵嗎？



圓葉_黏液加熱後的抑制能力

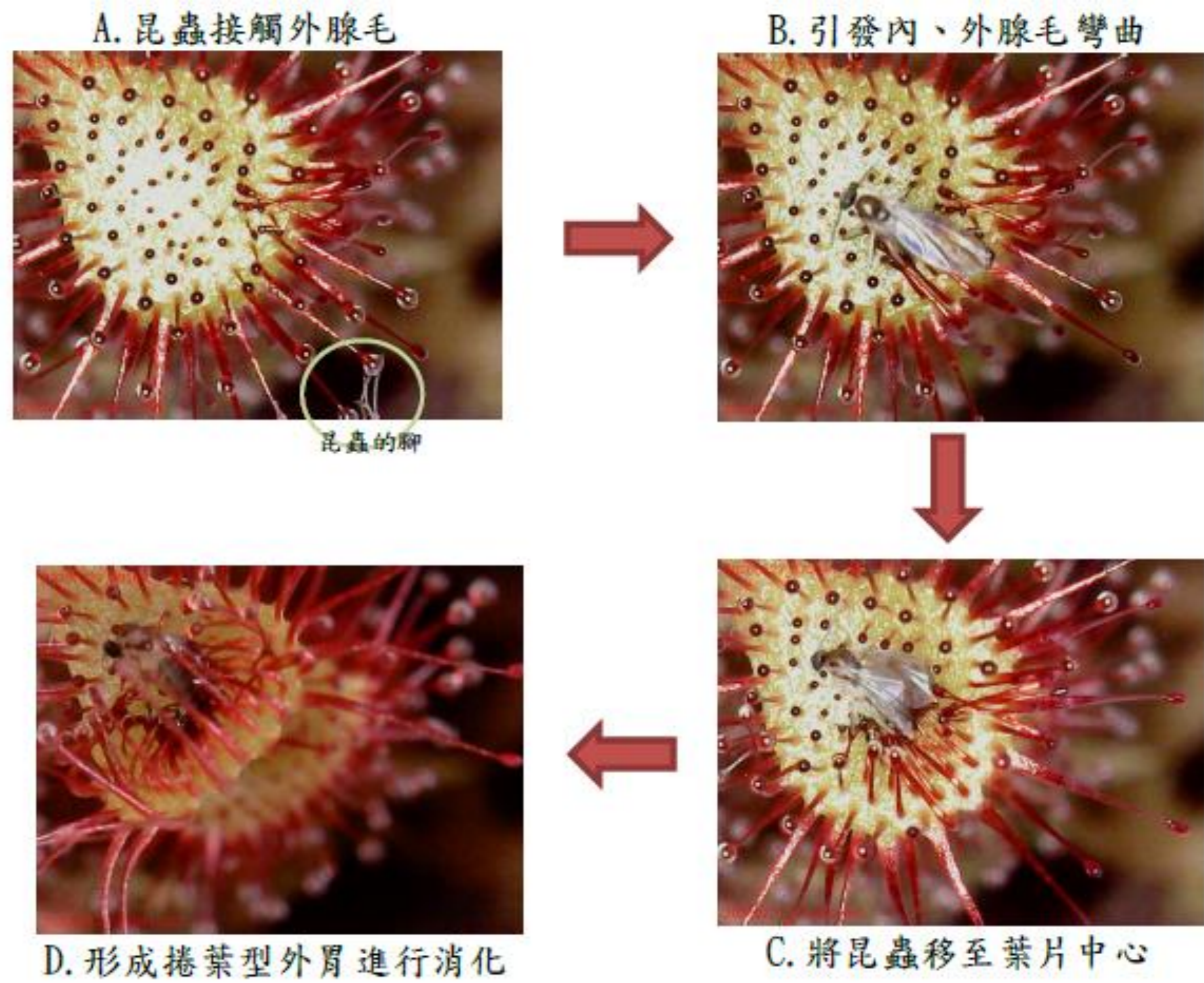


寬葉_黏液加熱後的抑制能力

結論：加熱會破壞黏液的酵素，同時黏液也失去抑制能力，所以抑制能力源於黏液內的酵素。當酵母菌沾外腺毛黏液時，黏液中的消化酶已開始產生分解消化作用並使酵母菌保護層破裂。那麼是酵母菌中何種物質使毛氈苔腺毛彎曲呢？將朝酵母菌主要成分著手。

實驗 4-1：啟動毛氈苔腺毛彎曲的誘發物質 - 尋找良好的測試點與方法

從一般毛氈苔由外腺毛捕捉昆蟲後，彎向葉片中心的內腺毛，形成外胃進行的消化現象著手

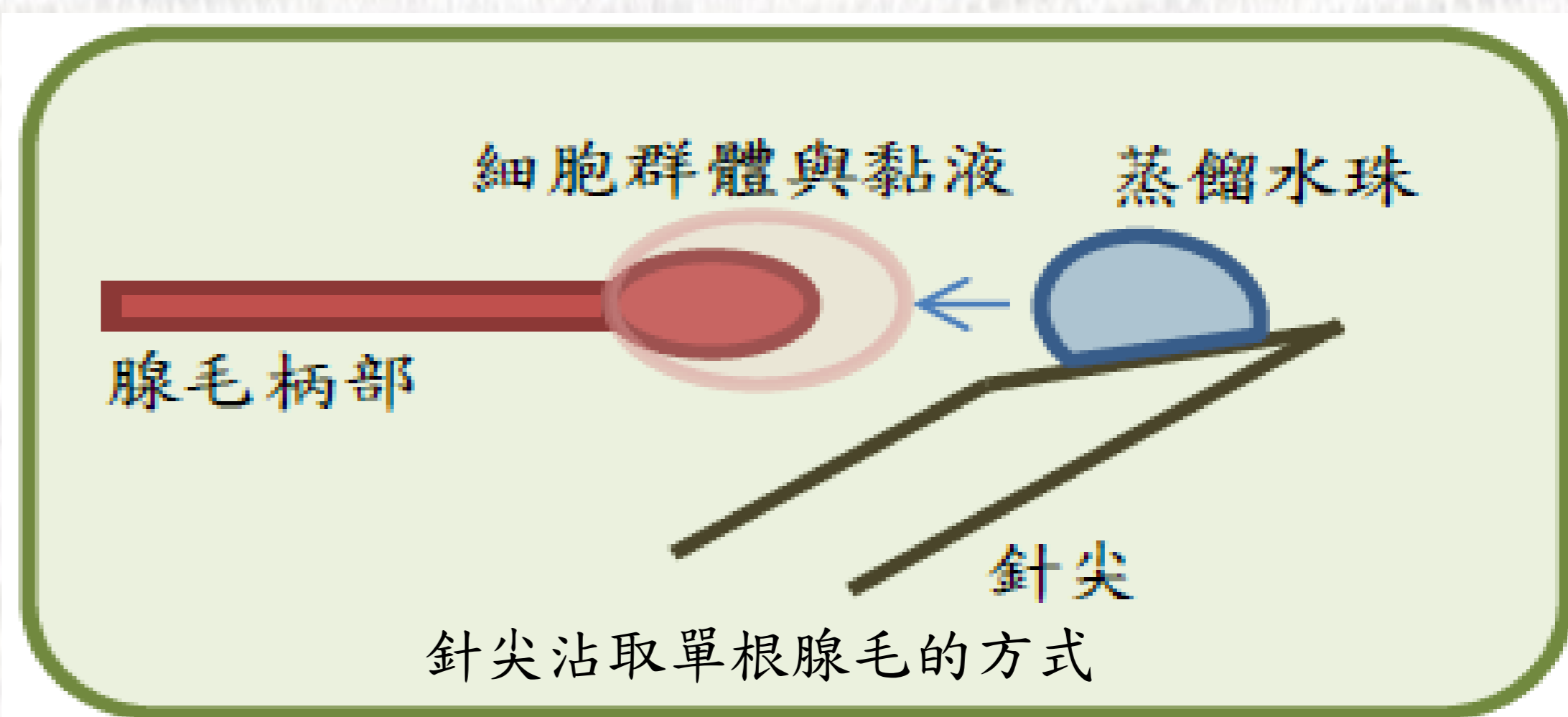


分析毛氈苔捕食過程的物理作用力順序：

- 昆蟲的拉力，昆蟲的重力，黏液的表面張力，黏液的附着力。
- 葉面受昆蟲的重力、腺毛膨壓彎曲及步驟A的4項作用力。
- 移動昆蟲的摩擦力、腺毛膨壓彎曲及步驟B的5項作用力。
- 葉面捲曲、腺毛膨壓彎曲及步驟C的6項作用力。

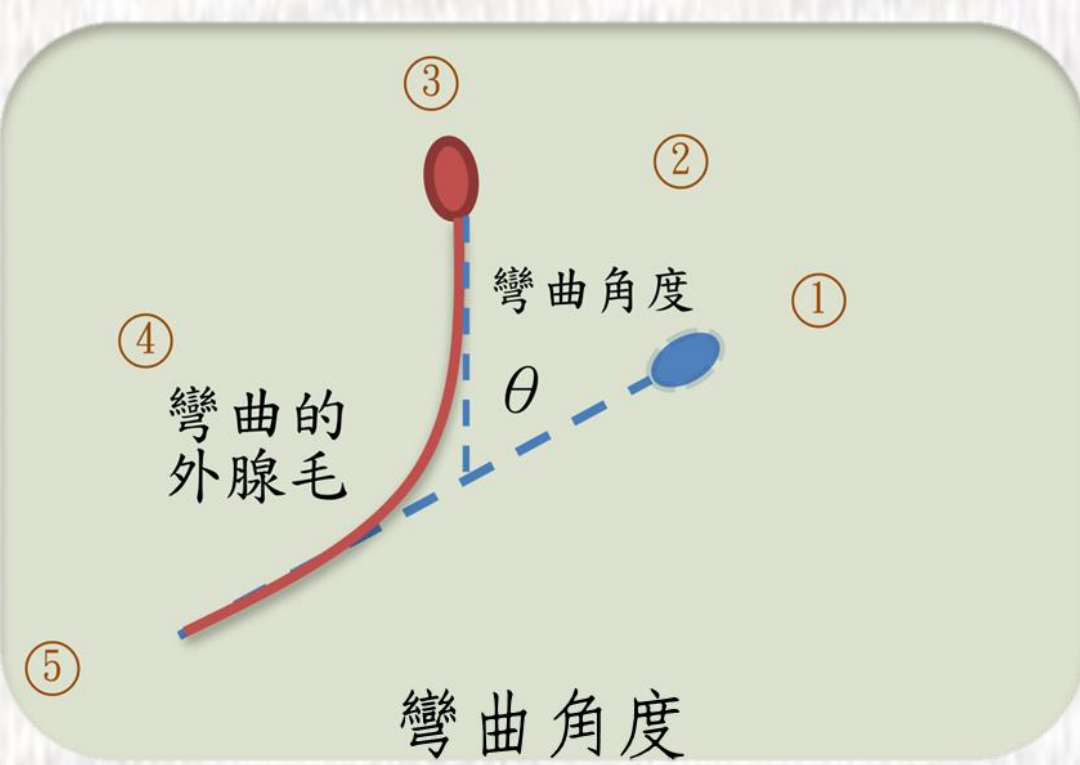
四個步驟中，受到表面張力和附着力，所以就此方向尋找方法

>>>用針筒調整蒸餾水珠大小，用針尖沾在黏液上，僅蒸餾水珠與黏液接觸(如下圖所示)，這樣設計就可以減少其他作用力。水珠與腺毛會發生同時多根支撐水珠和僅一根腺毛支撐。



由於多根腺毛支撐水珠容易引起物理觸發，所以最後決定以一根腺毛支撐水珠。

>>繪製腺毛彎曲刻度



1. 將180°的角度劃成①=0°(記為x)、②=45°、③=90°、④=135°、⑤≥180°或腺毛已彎至葉片中心。
2. 記錄腺毛最大彎曲位置。
3. 讀取與腺毛最相近的刻度。

實驗 4-2：啟動毛氈苔腺毛彎曲的誘發物質－無機鹽

依據酵母菌的成分、有關植物傳遞訊息物質等多方面綜合後，找出哪些可能是使腺毛彎曲的訊息粒子。提出了下列物質： K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 。

使用各高濃度溶液(0.01M)毛氈苔的訊息傳遞反應：

彎曲刻度 正離子 負離子	Cl^-	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	說明
K^+	x	x	圖②-0根 寬x	圖⑤-11根 寬⑤-8根	x	
Na^+	圖④-0根 寬④-0根	圖x 寬②-0根		圖⑤-25根 寬⑤-11根		
NH_4^+	圖④-0根 寬②-0根	圖⑤-1根 寬x		圖⑤-13根 寬⑤-4根		
Mg^{2+}	x					變黑
Ca^{2+}	x					
Cu^{2+}	x					變黑
訊息傳遞	No	Yes	No	Yes	No	

ps 變黑：細胞群體變成黑色，腺毛不會彎曲

訊息傳遞反應示意流程：



1. 將磷酸鈉沾在A、B腺毛上

2. A腺毛彎曲時，訊息傳至C腺毛

3. 將訊息傳給周圍腺毛使之彎曲

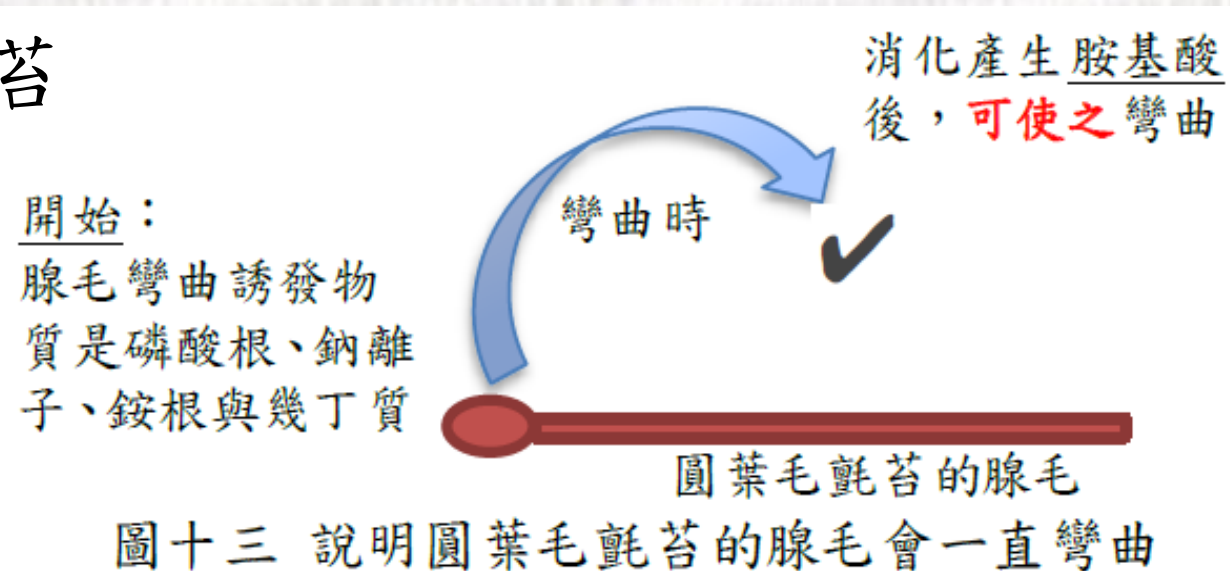
陸、綜合實驗討論

1. 將複式顯微鏡以物聯網的方式連接以增加實驗效率，專為實驗設計特殊實驗設施和找出最適當的測量方法。
2. 毛氈苔的“葉片大小”和“相同品種的毛氈苔的感知差異”都會影響實驗四的結果。所以我們採用下列幾個原則來減少這兩項因素的影響。
 - (1)在品種上選擇消化行為、葉片形狀差異最大的兩個品種。所以實驗圓葉毛氈苔與寬葉毛氈苔進行比較。
 - (2)實驗前大量培育圓葉與寬葉毛氈苔的數量(至少30株以上)實驗時才得以挑選葉片是健康、無老化、破損及黏珠較球形，且葉片大小相近的植株。
3. 毛氈苔消化吸收酵母菌後，經觀察是可以促進生長的。成株使用酵母菌顆粒1-2粒為宜，太多也會造成肥傷。所以捕食昆蟲與人工餵食酵母菌皆可幫助毛氈苔成長(毛氈苔種植在2吋花盆內)。
4. 本實驗不考慮多種物質混和的效果，並酵母菌尚有多種成分未測量(ex: Lipid、Nucleic acids、Carbohydrates、Vitamin類)。
5. 本實驗設計暫不考慮毛氈苔不同消化階段會分泌不同的消化酶，僅考慮啟動腺毛的階段。
6. 之前的研究皆以洛弗麗毛氈苔為主體。但我們希望本實驗能從捕食行為上有最大差異的品種著手。故從毛氈苔的植株外觀、先前測試捕食行為的差異及毛氈苔基因序列分類圖(附錄)等資料，再加入目前種植毛氈苔的品種的考量，最後選用圓葉與寬葉毛氈苔進行實驗。然毛氈苔基因序列的不同與捕食行為的差異應有相對應的關係存在。

柒、結論

1. 以本實驗結果來解釋“圓葉毛氈苔的腺毛會一直彎曲，而寬葉毛氈苔的腺毛會發生折返的現象”。根據酵母菌被消化後所釋出成分的模型
 - (1)黏液中消化酶A分解了保護酵母菌的外殼，
 - (2)使酵母菌內部物質流出及黏液中消化酶B進入酵母菌內部，
 - (3)流出的酵母菌內部物質啟動了毛氈苔外腺毛彎曲，
 - (4)黏液中消化酶B將酵母菌內的大分子(ex: 蛋白質...)分解成小分子。
2. 對毛氈苔而言，每發動一次捕食行動與消化作用就是一種能量成本。為了獲取外界更多符合生存所需要的物質，不同品種的毛氈苔應會建立各自一套評估機制。使用餵食酵母菌的方式，恰能讓各自的評估機制顯示出來。
3. 從國中開始就不斷尋找可以探討毛氈苔食蟲性質的假昆蟲。保麗龍、泡棉、棉花、拭鏡紙片都曾試用過，然而酵母菌(假昆蟲)有一般昆蟲外殼的幾丁質，內部有引起毛氈苔捕食行動與消化作用的成分。再則顆粒狀，易保存，便宜易取得，易操作等優點。目前研究能在不同品種的毛氈苔之間能顯示出其捕食行為的差異，希望未來也能發現有關毛氈苔消化作用的差異。就能夠建立不同品種毛氈苔比較的基礎。
4. 文獻中曾提到用水楊酸來刺激毛氈苔，但不能誘使毛氈苔產生幾丁質分解酵素；另一方面也指出，毛氈苔捕獲獵物會誘使防禦相關的茉莉酮酸植物激素的累積。建議可以使用啟動彎曲的誘發物質(ex: 磷酸鈉)來測試誘使其產生分解酵素與累積植物激素。最後啟動彎曲的誘發物質如何與“膨壓機制”或與“消化機制”結合是未來繼續努力挑戰的方向。

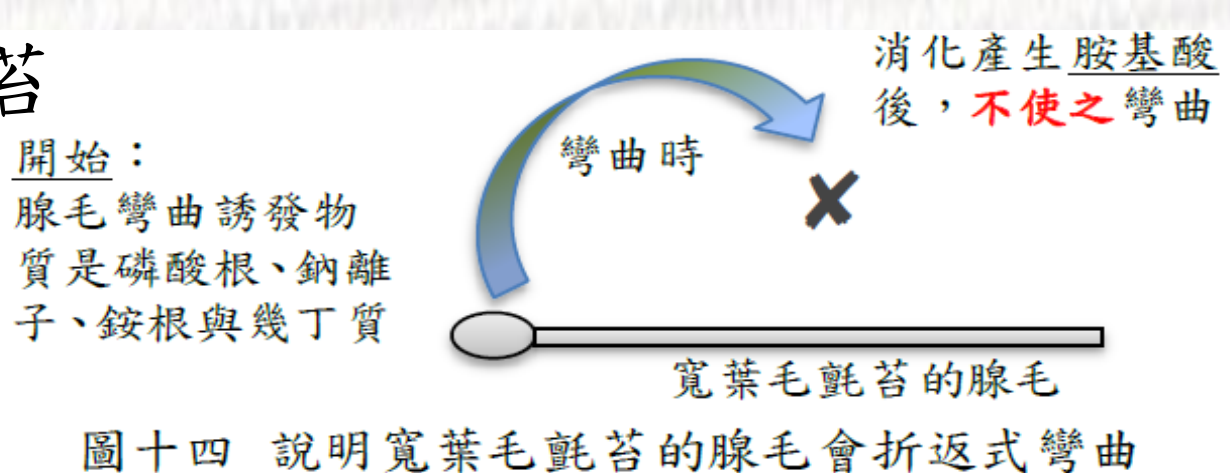
A 圓葉毛氈苔



圖十三 說明圓葉毛氈苔的腺毛會一直彎曲

磷酸根、鈉離子、銨根與幾丁質啟動外腺毛彎曲，消化分解產生胺基酸持續使外腺毛彎曲。胺基酸濃度持續增加，故外腺毛會一直彎曲。

B 寬葉毛氈苔



圖十四 說明寬葉毛氈苔的腺毛會折返式彎曲

磷酸根、鈉離子、銨根與幾丁質啟動外腺毛彎曲，消化分解產生胺基酸不能使外腺毛持續彎曲；且使外腺毛彎曲所需的誘發物質濃度較高，若幾丁質分解不多，且誘發物質的濃度無法明顯增加，外腺毛將不再彎曲，因而產生外腺毛折返的現象。

使用各低濃度溶液(0.001M)毛氈苔的訊息反應：

正離子 彎曲刻度 負離子	Cl^-	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	PO_4^{3-}
K^+			圖②-0根 寬x	圖⑤-7根 寬③-4根
Na^+	圖②-0根 寬x	圖x 寬x		圖⑤-12根 寬⑤-12根
NH_4^+	圖x 寬x	圖②-0根 寬x		圖⑤-11根 寬⑤-3根
訊息傳遞	No	No	No	Yes

結論：

- 磷酸根(PO_4^{3-})、鈉離子(Na^+)及銨根(NH_4^+)可以使腺毛彎曲，在低濃度下，圓葉毛氈苔腺毛彎曲程度都比寬葉大，傳遞訊息使腺毛彎曲的數量也多。
- 再用低濃度(0.001M)確定一次，磷酸根(PO_4^{3-})仍會傳遞訊息使腺毛彎曲。確認“磷酸根”可以順利進入葉片組織內產生膨壓作用啟動腺毛彎曲。

實驗 4-3：啟動毛氈苔腺毛彎曲的誘發物質－有機物

從昆蟲外殼接觸毛氈苔黏液起與消化蛋白質形成小分子胺基酸來考量，這些物質會引來更多腺毛彎曲至葉片中心一同消化分解與吸收養分嗎？

幾丁質粉末、甘胺酸溶液使圓葉與寬葉毛氈苔腺毛彎曲紀錄表

物質 彎曲刻度 項次	幾丁質	甘胺酸 (0.01M)	甘胺酸 (0.001M)
彎曲刻度	圖⑤-0根 寬⑤-0根	圖③-0根 寬x	圖②-0根 寬x
訊息傳遞	No	No	No
說明	驗證方式需不同	是消化分解的產物	是消化分解的產物

結論：來自蛋白質分解後的小分子胺基酸也可以使圓葉毛氈苔的腺毛彎曲，但不能使寬葉的腺毛彎曲，所以能使寬葉毛氈苔腺毛彎曲的物質較少。



捌、參考資料

一、毛氈苔具有分解昆蟲外殼的能力。2020年1月15日，取自 http://cp-toxin.blogspot.tw/2007/07/blog-post_20.html。