

新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生物科

組 別：國中甲組

作品名稱：環境刺激下的趨性抉擇：

探討多頭絨泡菌對聲波與辣椒素之耐受性與生長適應

關 鍵 詞：黏菌、辣椒素、聲波

編 號：115JA-B003

摘要

本研究主要探討黏菌在物理性(聲波)與化學性(辣椒素)環境刺激條件下，其變形體生長趨性的改變情形。我們發現(1) 440Hz 以下低頻音會活化細胞訊號路徑，使黏菌原生質收縮速度變快，並展現出朝向聲源靠近的正趨性，這可能與其自然覓食機制有關；14,000Hz 以上高頻音會使原生質收縮速度減緩，且頻率越高抑制效果越明顯。同時，會使黏菌生長面積擴大，推測是因為超出了其生理適應範圍而產生的逃避反應。(2) 100 μ M 以下低濃度辣椒素：黏菌表現出正趨向性，推測低濃度辣椒素能促進細胞代謝，並有效抑制環境中其他微生物的競爭。1,000 μ M：為黏菌能忍受的極限。10,000 μ M 以上高濃度：會直接對黏菌生理機能產生抑制並造成迴避或死亡現象，可能與細胞鈣離子調控機制失衡有關。黏菌對環境的物理性與化學性刺激具備高度生理敏感性，非常適合作為環境指標生物與真核細胞模式生物。

壹、前言

一、 研究動機

本研究之動機源於生物課堂上，老師提供黏菌走迷宮實驗的影片，並告訴我們黏菌雖然沒有大腦，卻可以很精準地走完迷宮到達終點，展現良好的環境感知與適應能力，此結果讓我們非常驚訝也引發強烈的好奇心，於是回家查閱相關資料後，發現黏菌具有許多獨特且值得探討的特性，因此我們決定對黏菌進行進一步的觀察研究。

二、 研究目的

本研究探討黏菌在物理性與化學性環境刺激條件下，對其變形體(黏菌生活史中的營養階段)生長趨性改變情形。

(一)探討在高頻及低頻音環境下，對黏菌變形體產生的生理影響。

- 1.比較高、低頻聲波對黏菌生長速率的影響。
- 2.比較高、低頻聲波對黏菌原生質收縮頻率的影響。
- 3.探討聲波對黏菌影響的生理意義。

(二)探討辣椒素對黏菌變形體生長的影響。

- 1.比較不同辣椒素濃度對黏菌生長趨性的差異。
- 2.比較不同辣椒素濃度的環境下黏菌生長速率的差異。
- 3.探討辣椒素對黏菌影響的生理意義。

三、文獻回顧

(一)聲波(物理性刺激)相關研究

黏菌以真菌孢子及腐敗子實體為食，而子實體生長時會產生**微弱振動**，因此黏菌會**朝向振動方向移動**，這可能是**自然覓食策略**的一部分(文獻五)。

在生理機制方面，聲波引發的**細胞膜與細胞骨架形變**，能活化**機械感受性離子通道**與相關訊號傳遞路徑，進而調控基因表現。研究顯示，聲波刺激在抑制脂肪細胞分化方面具有**高效性**。針對不同頻率的聲波，其影響也有所不同：**440Hz 時**，由於波長較長，會使細胞整體產生較**明顯的形變**，研究指出受此頻率刺激的細胞會表現出**明顯擴張**。**14,000Hz 時**，由於波長較短，會造成**細胞局部且快速的振動**，這種頻率會影響機械感受性基因的表現，且會**抑制細胞分化**(文獻六)。

(二)辣椒素(化學性刺激)相關研究

黏菌對**辣椒素**展現**正趨性**(文獻七)。實驗可先以 95%酒精製備高濃度辣椒素母液再稀釋成不同濃度使用(文獻八)。辣椒素是胡椒噴霧的主要刺激物，對部分**初級感覺神經元**產生**神經毒性**(文獻十一)。

辣椒素對多種微生物具有**抑制作用**，透過影響**細胞膜、代謝與訊號傳遞**干擾其生長。其抑制效果**因物種而異**：對細菌而言，金黃色葡萄球菌的最小抑制濃度為 1.2 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 、霍亂弧菌為 100 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 。對真菌抑制較弱，念珠菌的最小抑制濃度(MIC₁₀₀)介於 187.5~1500 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 。對真核多細胞寄生蟲方面，弓形蟲的半數抑制濃度(IC₅₀)為 42.1 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 。整體而言，辣椒素對不同生物抑制效果差異明顯，可作為評估其**生物活性的指標**(文獻十二)。

貳、研究設備及器材

一、實驗對象

多頭絨泡菌(*Physarum polycephalum*)，由南投的森林取得。

二、實驗材料

材料項目	實驗材料			
共同	黏菌	洋菜培養基	解剖刀	鑷子
	刮勺	麥片	乳膠手套	電鍋
	酒精燈	ImageJ	平板	
洋菜培養基	攪拌棒	培養皿	微波爐	刮勺
	洋菜粉 (廠牌:NEOGEN)	秤量紙	秤	水
前置實驗	直徑 15cm 玻璃培 養皿	定位表		
實驗一	塑膠盆	吸音棉	喇叭	訊號發聲器
	隔音泡棉	解剖顯微鏡		
實驗二	辣椒粉	95%酒精	微量滴管	

參、研究過程與方法

一、前置操作

(一) 洋菜培養基製作

1. 將 20g 洋菜粉加入裝 1L 純水的錐形瓶。
2. 將錐形瓶放入微波爐加熱直到沸騰。
3. 將錐形瓶拿出來攪拌冷卻。
4. 點燃酒精燈使空氣對流，利用酒精蒸氣對環境進行初步殺菌。
5. 將洋菜溶液倒入培養皿直到凝固。

(二) 黏菌移植

1. 將麥片研磨成粉末狀裝入燒杯，並置於電鍋中。
2. 於鍋內加入 50ml 的水進行加熱滅菌。
3. 將解剖刀置於酒精燈火焰上消毒。
4. 使用解剖刀切取黏菌邊緣生長較活躍(較年輕)的突起體，移置到培養皿內。
5. 將滅菌後的麥片粉末均勻撒在黏菌樣本周圍，作為生長所需的營養來源。
6. 定期觀察黏菌的生長狀態，並處理掉發霉的部分。

(三) 休眠變形體乾燥菌塊製作

(菌核具極強耐受性，於常溫(20~25°C)、乾燥、避光處即可存活大約半年)

1. 在塑膠盆內鋪上餐巾紙，並倒入一些水，使餐巾紙呈現濕潤不滴水狀態。
2. 切一大塊黏菌置於餐巾紙上。
3. 在餐巾紙上撒上滅菌後的麥片。
4. 保持濕潤環境-觀察紙巾呈略乾燥狀態時，即噴水加以保濕。
5. 直至黏菌長滿餐巾紙就可以停止加水。
6. 觀察黏菌顏色轉為深黃色時，代表它已進入菌核(Sclerotium)階段；若顏色呈現淺黃色則表示該黏菌已死亡。

(四) 辣椒素培養基製作(實驗二)

1. 辣椒素萃取：取辣椒粉 10g 加入 50ml 的酒精中，配製飽和辣椒素酒精溶液 (飽和濃度約：0.1M)。
2. 將辣椒素酒精溶液加入水中。
10,000 μ M 水:辣椒素飽和酒精溶液 = 10ml : 1000 μ l。
1,000 μ M 水:辣椒素飽和酒精溶液 = 10ml : 100 μ l。
100 μ M 水:辣椒素飽和酒精溶液 = 10ml : 10 μ l。
10 μ M 水:辣椒素飽和酒精溶液 = 10ml : 1 μ l。
3. 加入洋菜粉並放入微波爐加熱直到沸騰(完全溶解)。
4. 將錐形瓶拿出來攪拌冷卻。
5. 點燃酒精燈使空氣對流，利用酒精蒸氣對環境進行初步殺菌。
6. 將洋菜溶液倒入培養皿直到凝固。

二、前置實驗

(一) 探討方位及磁場對黏菌之影響

目的：為了確保實驗的準確性，我們先測試培養基的擺放方向是否會干擾黏菌的行為。

1. 用直徑 15cm 的玻璃培養皿做洋菜培養基。
2. 在洋菜培養基的四邊都移植邊長 1cm 的正方形黏菌。
3. 在黏菌內外側都撒上麥片(如圖 3-0-1)。
4. 觀察黏菌的生長是否有特定規律。

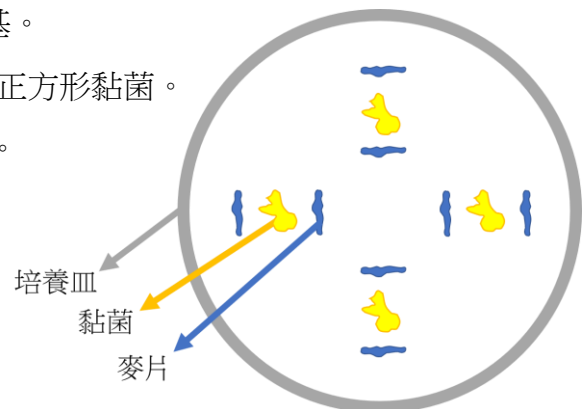


圖 3-0-1 前置實驗操作圖

三、實驗步驟及研究方法

(一) 實驗一、探討不同聲波對黏菌之影響

目的：由於現今自然環境中存在各種人為或自然噪音，本實驗旨在探討不同頻率聲波對於黏菌生長趨勢及行為反應之影響。

1. 在塑膠盆內的周圍圍上吸音棉。
2. 將喇叭連接上訊號發聲器，並放置於塑膠盆內。
3. 將培養皿置於喇叭前 19cm 處(如圖 3-1-1)。
4. 持續播放低頻聲波(50Hz)。
5. 觀察黏菌的生長狀況並計算原生質收縮頻率及生長面積(詳細計算方法將在後面說明)。
6. 記錄連續 5 次的生長面積並繪製成折線圖，以觀察其面積變化。
7. 以 400Hz、14,000Hz、20,000Hz，重複步驟 1~6，記錄並比較結果差異性。

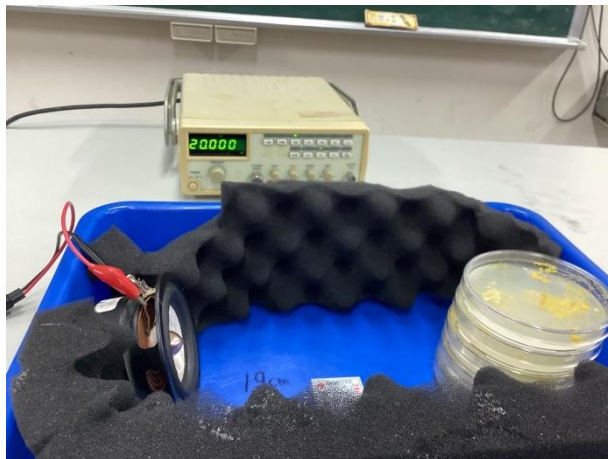


圖 3-1-1 實驗一實際實驗裝置圖



圖 3-1-2 實驗一操作圖

(二) 實驗二、探討不同濃度辣椒素對黏菌之影響

目的：探討不同濃度辣椒素對黏菌造成的直接化學傷害，是否抵消其環境滅菌所帶來的益處，並進一步尋找會導致黏菌受損的濃度上限。

1. 用解剖刀將一半的一般洋菜培養基放置於培養皿的左側。
2. 將一半的辣椒素洋菜培養基(10,000 μ M)放置於培養皿右側。
3. 觀察黏菌的生長狀況並計算黏菌往兩邊生長的個體數及面積(計算面積方法與實驗一相同)。
4. 以 1,000 μ M、100 μ M、10 μ M，重複以上 1~3 實驗步驟，記錄並比較結果差異性。

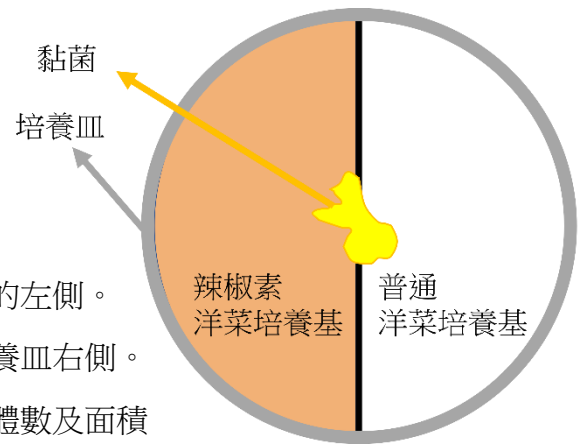


圖 3-2-0 實驗二操作圖

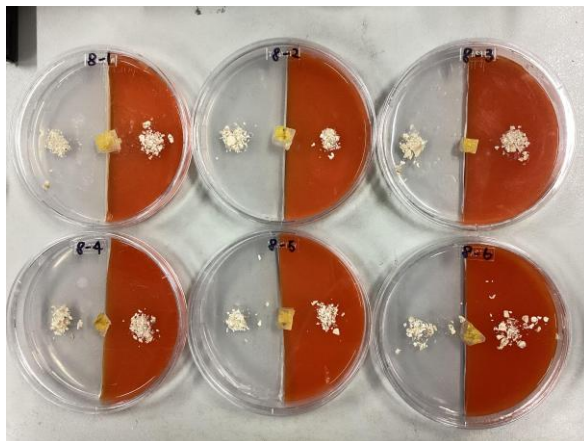


圖 3-2-1 10,000 μ M 照片

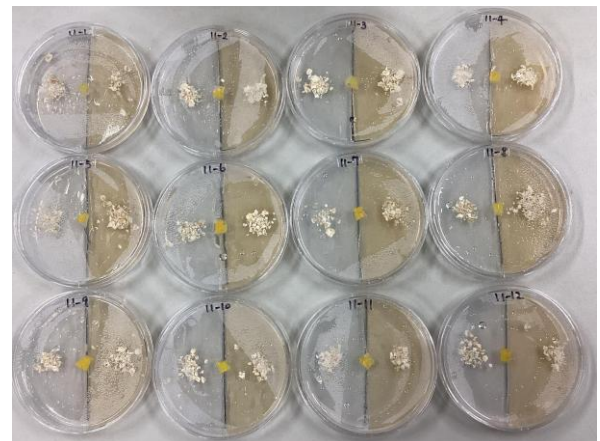


圖 3-2-2 1,000 μ M 照片

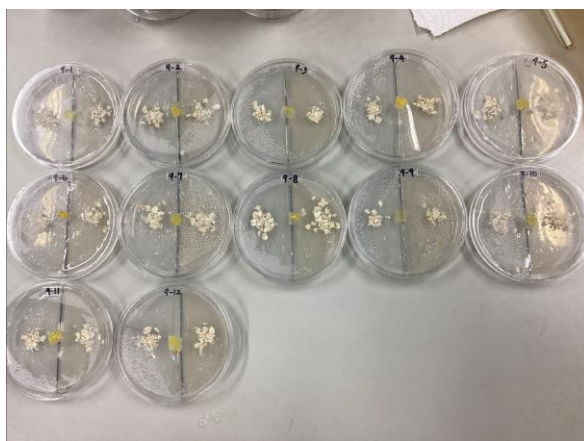


圖 3-2-3 100 μ M 照片

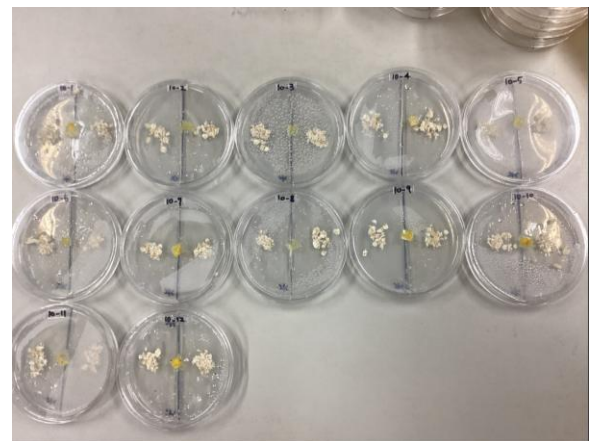


圖 3-2-4 10 μ M 照片

計算原生質收縮頻率：

1. 將培養皿置於複式顯微鏡下進行觀察。
2. 利用平板配合顯微鏡，對黏菌進行 10 分鐘的縮時錄影。
3. 記錄並統計黏菌收縮次數即原生質收縮（以黏菌原生質收縮與舒張一次來回計為一次）。

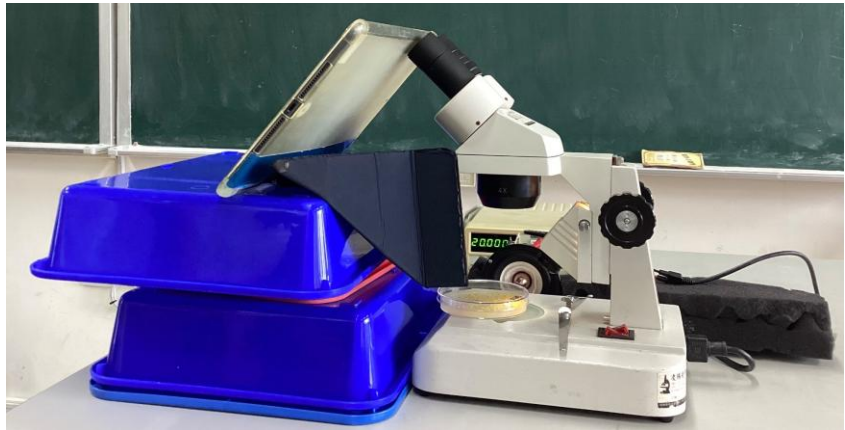


圖 3-1-3 裝置示意圖

計算生長面積：

我們利用 ImageJ 測量實驗一和實驗二的黏菌面積，並計算平均。

1. 將要測量的黏菌檔案匯入 ImageJ 程式。
2. 先用「工具列的直線」畫一段培養皿的直徑。
3. 設定比例尺
 - 再選 Analyze 中的 Set Scale。
 - 在 Unit of length 輸入 cm(單位)。
 - 在 Know distance 中輸入培養皿真實直徑(設定標準)。
4. 最後，再使用 freehand selections(不規則曲線工具)順著黏菌生長邊緣完整的框出要計算的面積。
5. 按 Analyze 中的 Measure 即可知道 Area(即面積)。

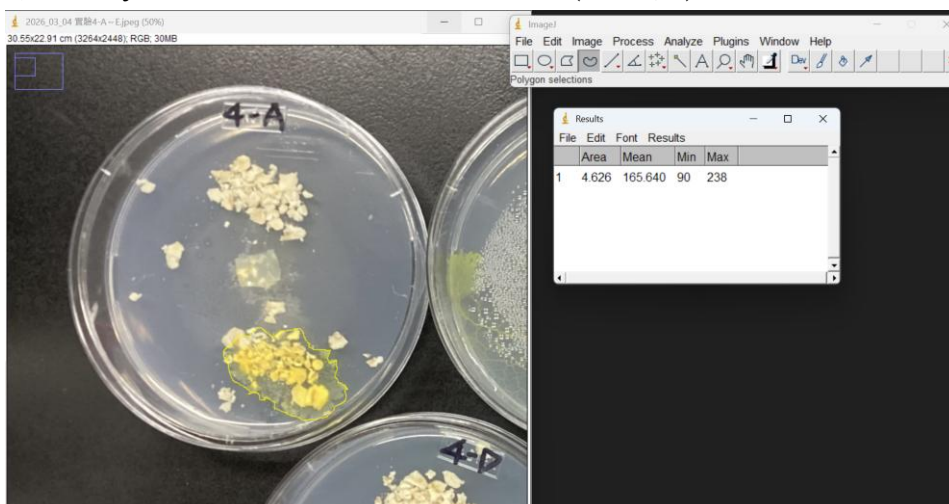


圖 3-1-4 ImageJ 模擬操作圖

肆、研究結果

一、前置實驗：探討方位及磁場對黏菌之影響

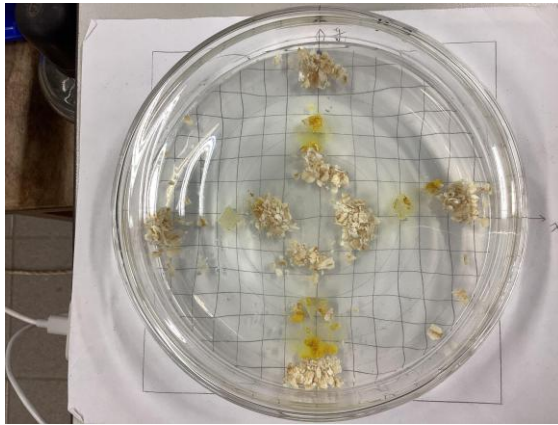


圖 4-0-1 前置實驗 實驗結果-1

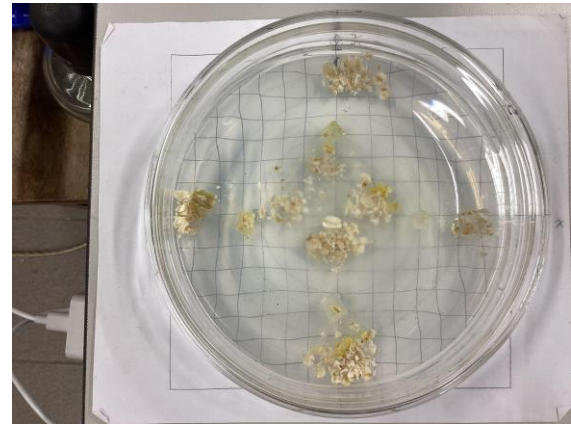


圖 4-0-2 前置實驗 實驗結果-2

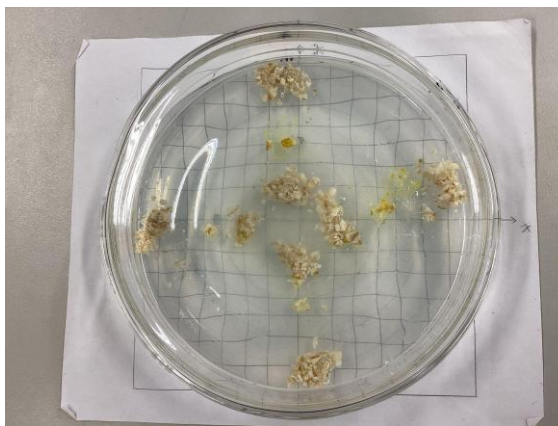


圖 4-0-3 前置實驗 實驗結果-3

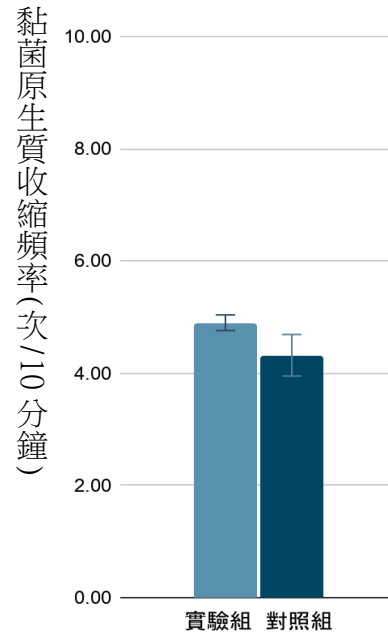
實驗結果顯示，在前置實驗中，黏菌向內與向外生長的機率約各佔 50%，兩者並沒有明顯的數量差距。由此可知，培養皿的擺放方向並不會對黏菌的生長選擇產生引導作用。這項觀察進而證實，後續實驗的結果將不會受到擺放位置的影響。

二、實驗一、探討不同聲波對黏菌之影響

1. 50Hz 聲波 (單位:次/10 分鐘)

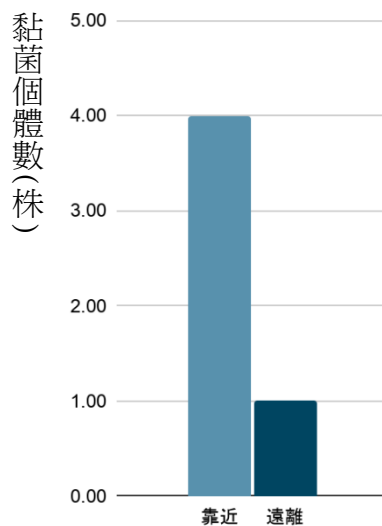
組別	黏菌原生質收縮頻率	
	實驗組	對照組
A	5	4.8
B	5	4.2
C	4.7	3.8
D	4.8	4.3
E	5	4.5
平均	4.9	4.3

表格 4-1-1 50Hz 聲波結果



圖表 4-1-1 50Hz 聲波結果

(每項數據皆由 4 次實驗平均計算而來，A,B,C,D,E 為重複數)



圖表 4-1-2 50Hz 頻率下生長個體

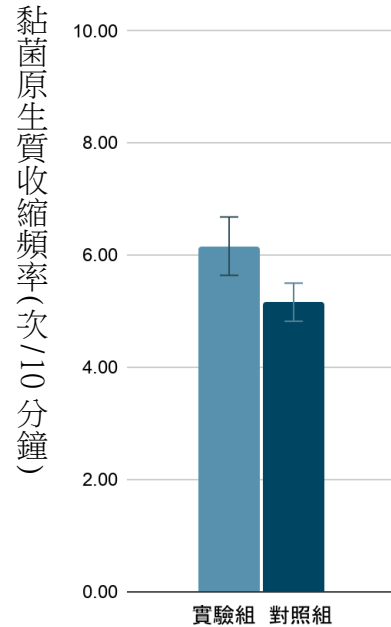
實驗結果顯示，在 50Hz 低頻聲波刺激下，黏菌的原生質流動頻率明顯高於無聲波之對照組。此現象顯示低頻聲波能有效提升黏菌原生質的收縮與流動速率，對其生理活性具有正面影響。此外，透過照片記錄，實驗組中有 80%的黏菌表現出向聲源靠近的趨向，顯示該頻率之物理刺激對於黏菌的空間分布具有引導作用。

2. 400Hz 聲波

(單位:次/10 分鐘)

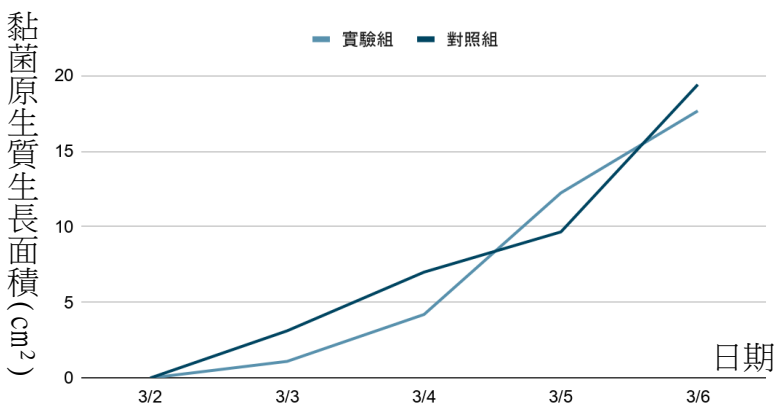
組別	黏菌原生質收縮頻率	
	實驗組	對照組
A	6.3	5.3
B	5.7	5.3
C	5.8	4.6
D	6.0	5.1
E	7.0	5.5
平均	6.16	5.16

表格 4-1-2 400Hz 聲波結果

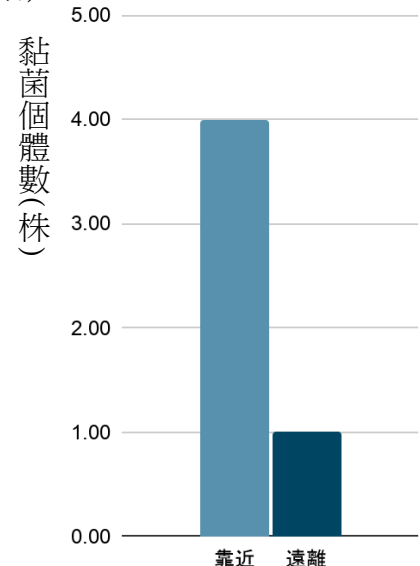


圖表 4-1-3 400Hz 聲波結果

(每項數據皆由 4 次實驗平均計算而來，A,B,C,D,E 為重複數)



圖表 4-1-4 400Hz 聲波生長面積變化折線圖



圖表 4-1-5 400Hz 頻率下生長個體

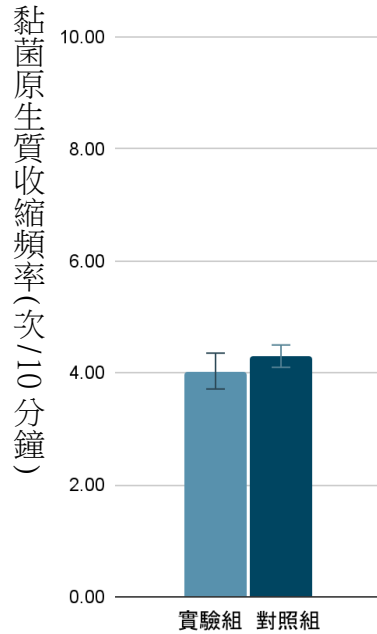
實驗結果顯示，在 400Hz 聲波刺激下，黏菌的原生質流動頻率顯著高於對照組及其他頻率組別，顯示該頻率能誘發較為活躍的生理反應。在生長面積方面，各組間並無觀察到明顯差異，這表明 400Hz 聲波主要影響的是黏菌的收縮，而非擴張速率。然而，透過照片觀察發現，實驗組黏菌均呈現向聲源處移動的趨勢，據此推測 400Hz 聲波除了加快收縮頻率，對於黏菌的生長方向也有正向趨性。

3. 14,000Hz 聲波

(單位:次/10 分鐘)

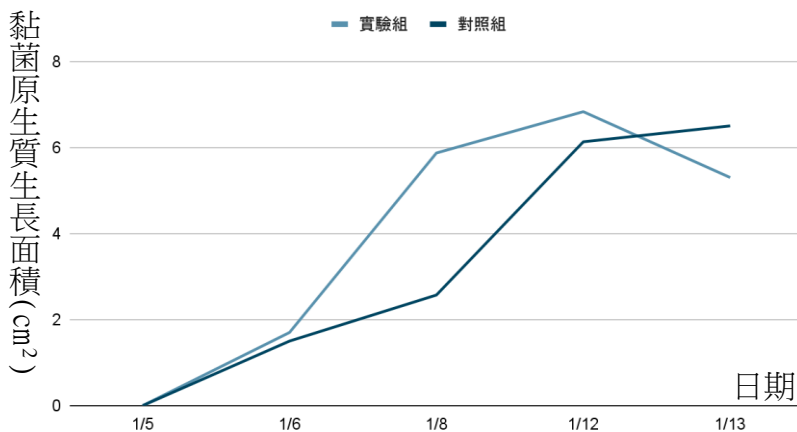
組別	黏菌原生質收縮頻率	
	實驗組	對照組
A	3.9	4.1
B	3.8	4.3
C	4.4	4.5
平均	4.03	4.30

表格 4-1-3 14,000Hz 聲波結果

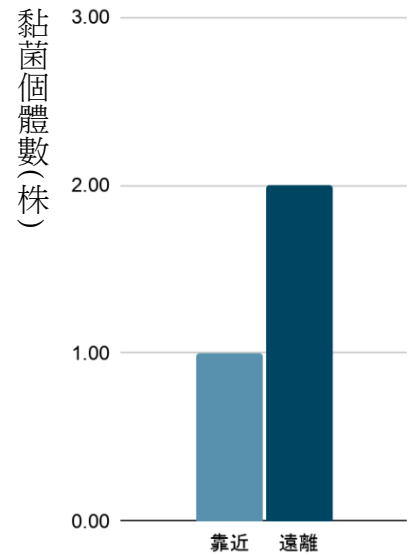


圖表 4-1-6 14,000Hz 聲波結果

(每項數據皆由 4 次實驗平均計算而來，A,B,C 為重複數)



圖表 4-1-7 14,000Hz 聲波生長面積變化折線圖



圖表 4-1-8 14,000Hz 頻率下生長個體

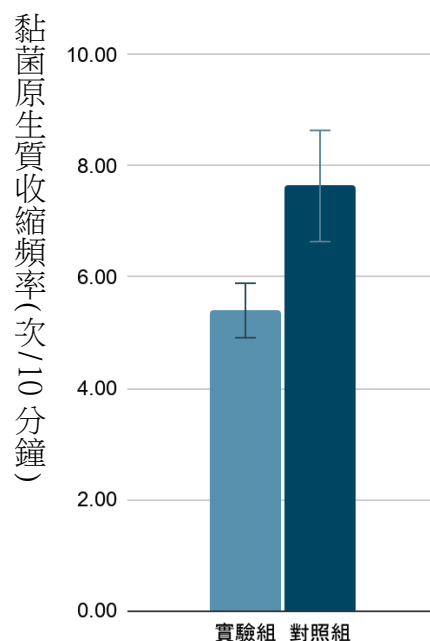
在實驗數據的觀察中，實驗組黏菌的原生質振動頻率顯著低於對照組，在 14,000Hz 高頻聲波環境下，黏菌的原生質平均振動頻率大幅減緩。而在生長面積方面，實驗組於觀測初期之擴張速率高於對照組，而後期則無明顯差異。此外，透過照片觀察，實驗組有 33%的黏菌表現出向聲源移動的趨勢。

4. 20,000Hz 聲波

(單位:次/10 分鐘)

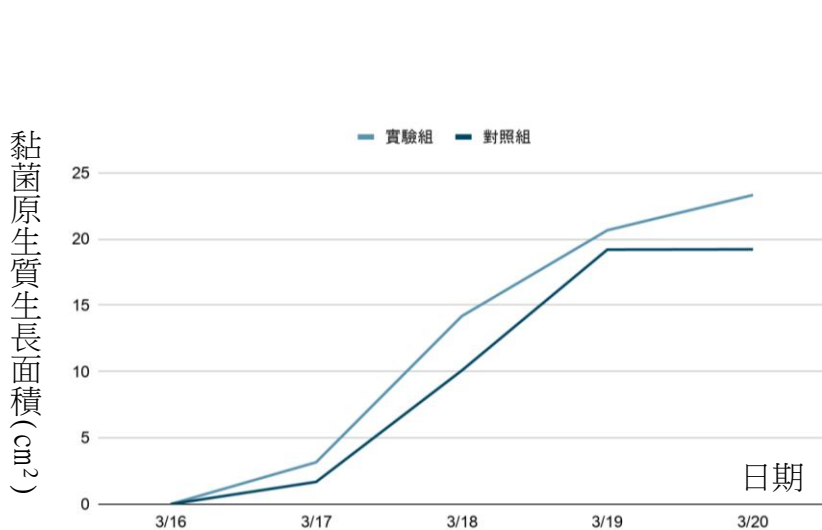
組別	黏菌收縮頻率	
	實驗組	對照組
A	4.7	9.3
B	5.3	7.8
C	5.3	7.3
D	6.0	6.8
E	5.7	7.0
平均	5.4	7.6

表格 4-1-4 20,000Hz 聲波結果

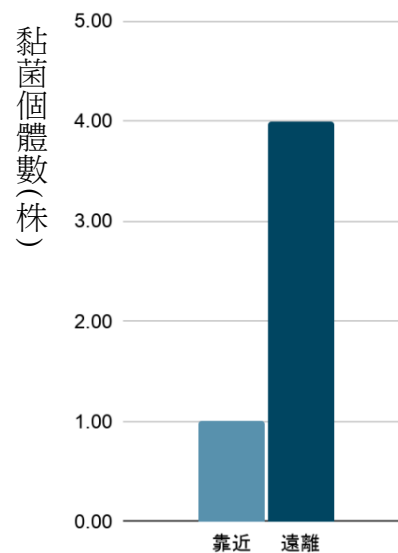


圖表 4-1-9 20,000Hz 聲波結果

(每項數據皆由 4 次實驗平均計算而來，A,B,C,D,E 為重複數)



圖表 4-1-10 20,000Hz 聲波生長面積變化折線



圖表 4-1-11 20,000Hz 頻率下生長個體

在實驗數據的觀察中，實驗組黏菌的原生質振動頻率明顯低於對照組。在 20,000Hz 高頻聲波環境下，黏菌的原生質平均振動頻率大幅減緩，與對照組相比具顯著差異。而在生長面積方面，實驗組之擴張速率高於對照組。此外，透過照片記錄，實驗組約有 20%的黏菌表現出向聲源處移動的趨勢，較高頻率少。

(二) 實驗二、探討不同濃度辣椒素對黏菌之影響

1. 10,000 μ M 辣椒素

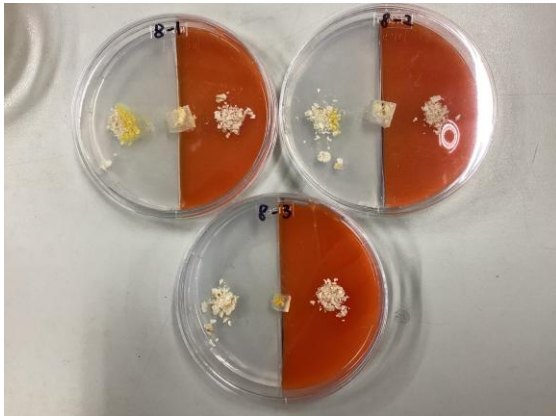


圖 4-2-1 10,000 μ M 辣椒素-1

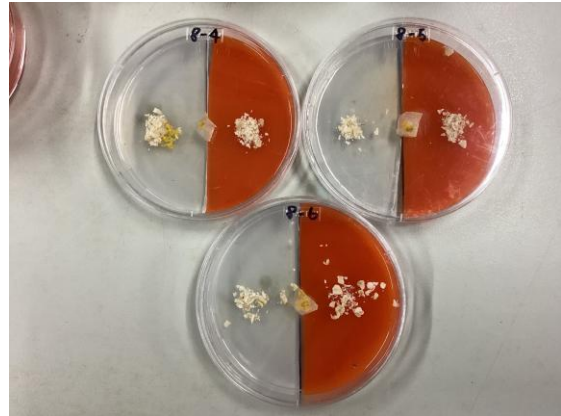
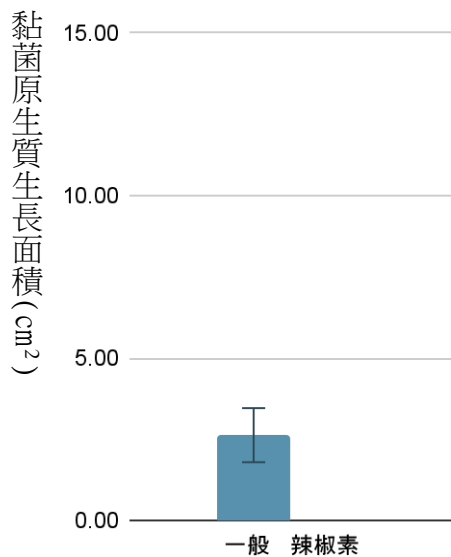


圖 4-2-2 10,000 μ M 辣椒素-2

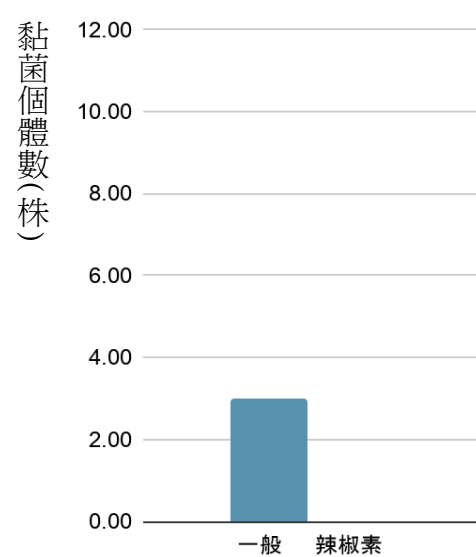
(單位:cm²)

組別	A	B	C	D	E	F	平均
一般培養基	3.3	1.7	0	2.9	0	0	2.63
辣椒培養基	0	0	0	0	0	0	0

表格 4-2-1 10,000 μ M 辣椒素結果



圖表 4-2-1 10,000 μ M 辣椒素下生長面積



圖表 4-2-2 10,000 μ M 辣椒素下生長個體數

實驗結果顯示，在 10,000 μ M 辣椒素的影響下，黏菌表現出明顯的負趨化性。實驗組中的黏菌大多偏好向一般培養基生長，部分則維持原地不移動。此現象證實高濃度辣椒素會產生強烈的化學刺激，迫使黏菌停止擴張或避開生長。

2. 1,000 μ M 辣椒素

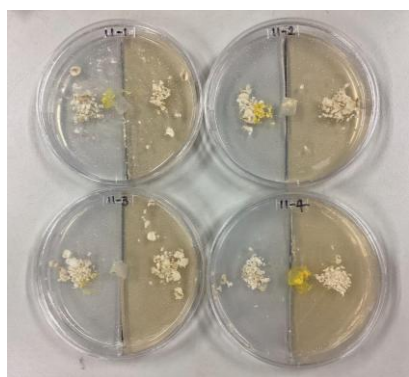


圖 4-2-3 1,000 μ M 辣椒素-1

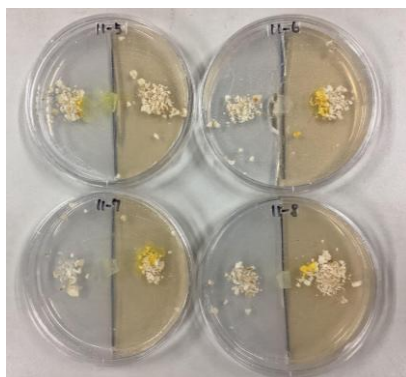


圖 4-2-4 1,000 μ M 辣椒素-2

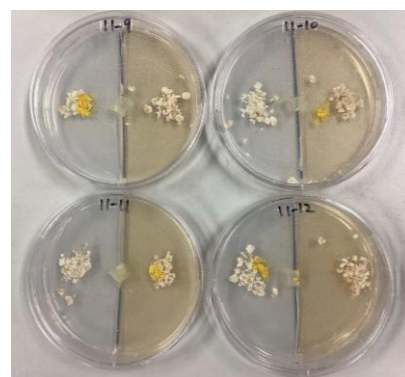
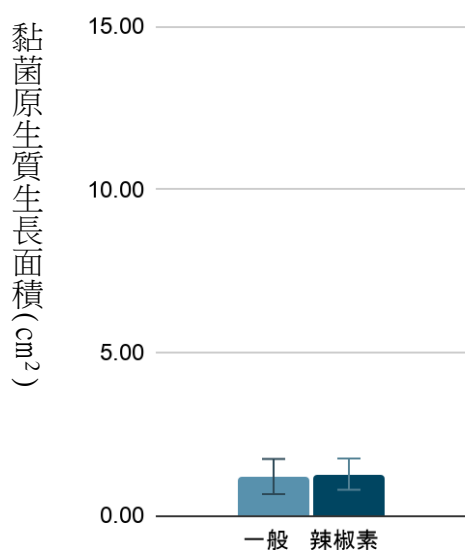


圖 4-2-5 1,000 μ M 辣椒素-3

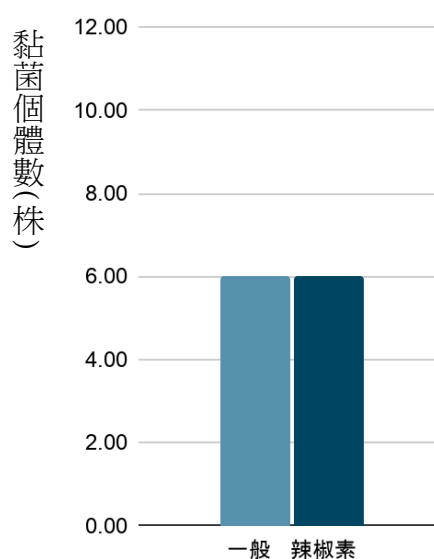
(單位:cm²)

組別	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	平均
一般	0.72	1.61	0.52	0	0.97	0	0	0	1.87	0	0	1.48	1.20
辣椒素	0	0	0	1.31	0	1.31	2.17	1.08	0	0.83	0.92	0	1.27

表格 4-2-2 1,000 μ M 辣椒素培養基生長結果



圖表 4-2-3 1,000 μ M 辣椒素下生長面積



圖表 4-2-4 1,000 μ M 辣椒素下生長個體數

實驗結果顯示，在 1,000 μ M 辣椒素的影響下，黏菌趨向辣椒素與一般培養基的個體數目相等，且生長面積亦無顯著差異。這說明了這個濃度的辣椒素對黏菌來說還在可以忍受的範圍內，並不會讓它想靠近或是刻意躲開。

3. 100 μ M 辣椒素

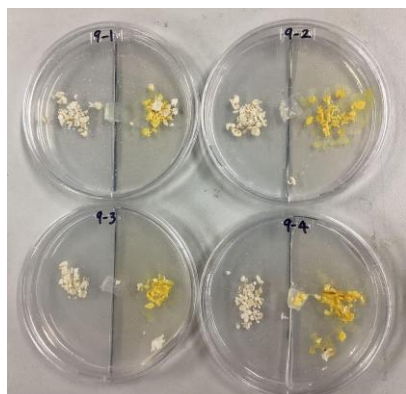


圖 4-2-6 100 μ M 辣椒素-1

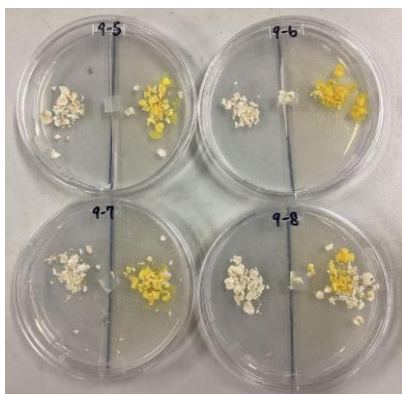


圖 4-2-7 100 μ M 辣椒素-2

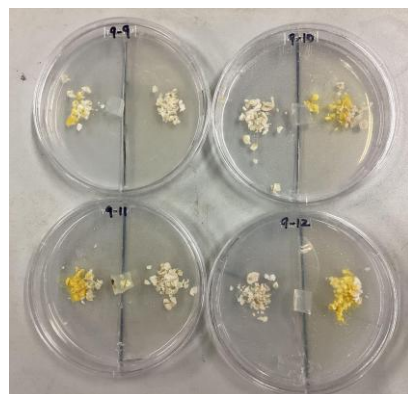
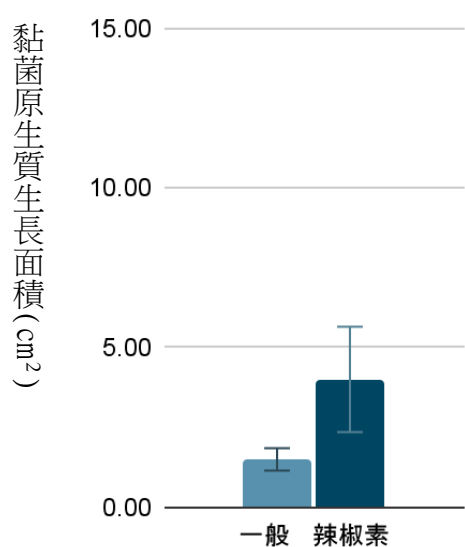


圖 4-2-8 100 μ M 辣椒素-3

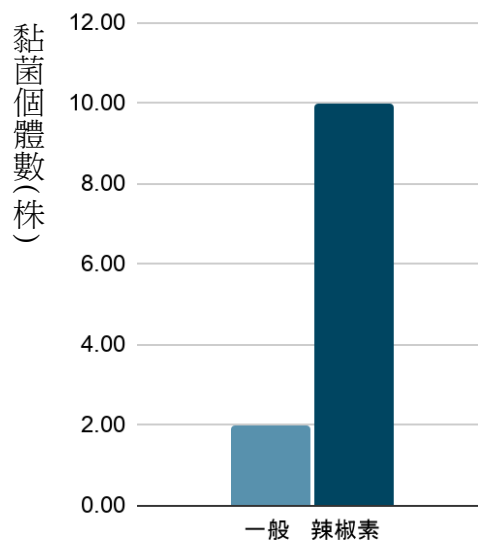
(單位:cm²)

組別	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	平均
一般	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25	0	1.74	0	1.50
辣椒素	1.95	6.94	2.67	6.03	4.56	4.73	4.44	3.65	0	2.15	0	2.90	4.00

表 4-2-3 100 μ M 辣椒素結果



圖表 4-2-5 100 μ M 辣椒素下生長面積



圖表 4-2-6 100 μ M 辣椒素下個體數

實驗結果顯示，黏菌對 100 μ M 的辣椒素表現出明顯的正趨性。無論是個體數還是生長面積，實驗組的表現都優於對照組(一般培養基)，顯示低濃度的辣椒素對黏菌具有良好的引導生長效果。

4. 10 μ M 辣椒素

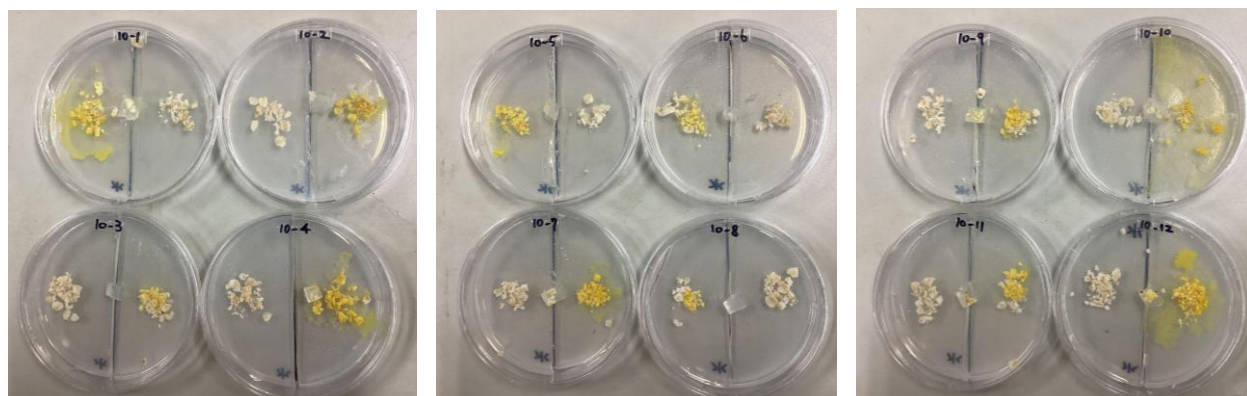


圖 4-2-9 10 μ M 辣椒素-1

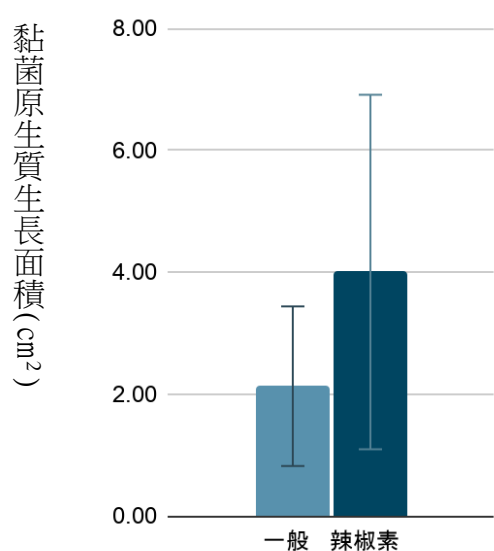
圖 4-2-10 10 μ M 辣椒素-2

圖 4-2-11 10 μ M 辣椒素-3

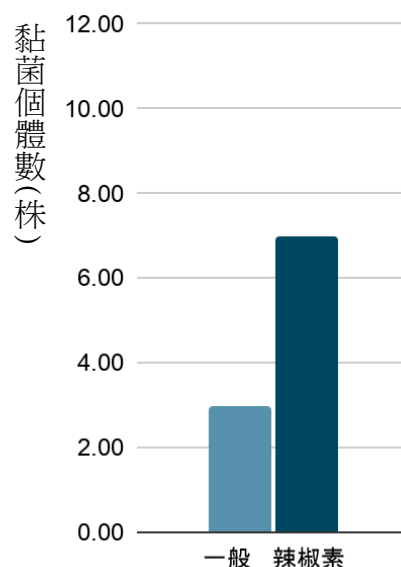
(單位:cm²)

組別	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	平均
一般	0	0	0	3.53	1.92	0	0.94	0	0	0	2.13
辣椒素	3.78	1.39	6.30	0	0	3.78	0	1.64	1.83	9.31	4.00

表格 4-2-4 10 μ M 辣椒素結果



圖表 4-2-7 10 μ M 辣椒素下生長面積



圖表 4-2-8 10 μ M 辣椒素下個體數

實驗數據顯示，黏菌在 10 μ M 辣椒素環境下表現出明顯的趨向性，其產生的生長吸引力顯著高於對照組。然而，相較於 100 μ M 辣椒素組，趨向此濃度的黏菌數量相對較少。這顯示 10 μ M 的辣椒素雖能引導黏菌生長，但其誘導效果尚不及 100 μ M 的組別。

伍、討論

一、探討聲波對黏菌的生長及原生質收縮的影響

在我們的實驗觀察中發現，黏菌在不同音頻環境下，其原生質收縮頻率也會隨之改變，這與文獻中所提出的「聲波能以物理應力有效調節細胞生理行為」相符合。研究指出，細胞能透過感應聲波產生的震盪，進而改變其生物反應(文獻六)。根據我們的實驗結果顯示，低頻音(50Hz、400Hz)能使黏菌的原生質收縮頻率提升，推論低頻聲波可能藉由物理應力，活化了黏菌內部相關的細胞訊號傳遞路徑，進而加快了原生質流動的效率，因而對黏菌有正趨性；另外文獻指出黏菌子實體也會發出微弱振動(文獻五)，且黏菌變形體會吞噬子實體的情形，因此我們猜測黏菌可能藉由偵測到子實體的低頻振動而往振源靠近。而當頻率提升至高頻(14,000Hz 與 20,000Hz)時，原生質收縮頻率反而出現減緩趨勢，外加聲波頻率越高時黏菌原生質收縮減緩越明顯，因此推測過高頻率的物理刺激可能產生了干擾，或超出了黏菌生理調節的適應範圍，導致其活動力受到抑制，因此使黏菌呈現負趨性，也會讓原生質面積增大，而我們推測面積變大是為了逃避這種干擾性的聲波。這種隨頻率變化的反應差異，印證了黏菌具備感應物理訊號並做出動態調整的能力，反映出聲波頻率對生物活動具有實質的調控影響力。黏菌對聲音刺激展現高度敏感性，這可能是因為其具有高度黏附性與運動性的生物物理特性所致。文獻指出動物的黏附性基質細胞對聲音刺激展現高度敏感性，也會使細胞生長面積增加(文獻六)，而黏菌變形體也具有類似的生物特性，我們的實驗結果也呈現相似性，暗示真核細胞可能都具有類似的生理機制。

二、辣椒素對黏菌變形體的生長趨性及生理意義

在本研究討論中，黏菌對不同濃度辣椒素的反應與文獻所記載之抑菌特性相關(文獻十二)。在10 μ M~100 μ M的低中濃度下，黏菌表現出向辣椒素移動的趨性，我們推測有兩點可能的原因：(1)低濃度辣椒素可殺死細菌等原核生物，減少環境中的競爭者。文獻指出金黃色葡萄球菌等常見細菌的抑制劑量，約在4 μ M~82 μ M間，顯示低濃度的辣椒素就能有效排除環境中干擾黏菌生長的微生物(文獻十二)。(2)低濃度辣椒素可以加速細胞的代謝速率，使生長速率加快。文獻指出低濃度的辣椒素會活化動物細胞膜上的TRPV1受體，藉由一連串訊號傳遞路徑影響粒線體，進而提高細胞代謝效率(文獻四、十三)，我們推測黏菌可能也存在類似的生理機制。

當培養基中的辣椒素濃度提升至 1,000 μ M 時，黏菌在有無辣椒素區域中的生長速率與分布已無明顯差異，原先的促進效果不再出現。此結果可能表示，在該濃度下，此濃度已接近黏菌對辣椒素濃度的忍受上限，辣椒素對微生物的抑制作用與其對黏菌細胞所產生的潛在刺激或不利影響已相互抵消，整體呈現出一種抑菌效益與化學刺激之間的平衡狀態。

當濃度達到 10,000 μ M 的高劑量環境時，實驗黏菌出現生長方向遠離、死亡等現象，研究資料顯示高濃度辣椒素會引發大量鈣離子湧入粒線體，破壞鈣離子平衡(文獻十四)，使動物細胞發生生長迴避或受阻，與我們的實驗結果相符合，暗示在黏菌的細胞膜上可能也有功能相近的受體及生理機制存在。

三、我們的研究發現黏菌對辣椒素及聲波的生理敏感性，證實黏菌變形體在對應環境的物理性與化學性刺激時，具備靈敏的感應機制。同時黏菌也具備培養簡單與生長快速的優點，顯示黏菌作為環境指標生物與真核細胞模式生物的可行性。

陸、結論

- 一、50~440Hz 聲波(低頻音)物理應力活化細胞訊號路徑，會使黏菌原生質收縮速度變快，面積則沒有明顯影響，生長趨向低頻音可能跟覓食機制有關；而 14,000~20,000Hz(高頻音)則會使原生質收縮速度減緩，頻率越高抑制越明顯，但高頻音會使黏菌生長面積明顯變大，可能因為超出其生理適應範圍所致。證實黏菌具能感應不同頻率之聲波刺激，並對應不同的生理行為調整。
- 二、黏菌對辣椒素的反應：在 10~100 μ M 低濃度辣椒素中可能類似動物細胞透過粒線體促進細胞代謝及改善外界生長環境獲益；1,000 μ M 辣椒素為黏菌能忍受的上限；10,000 μ M 以上高濃度辣椒素則直接對黏菌生理機能產生抑制並造成死亡，推測可能與動物細胞的鈣離子調控機制失衡有相近的生理機制。
- 三、黏菌具有對環境物理性與化學性刺激的生理敏感性，可作為環境指標生物與真核細胞模式生物。

柒、參考文獻資料

1. 吳長祐、劉鎮璋。第 62 屆科展高中動物組-關於史萊姆那檔事-黏菌爬行的相關研究
<https://www.ntsec.edu.tw/science/detail.aspx?a=21&cat=19539&sid=19723>
2. 黃生。淺說黏菌
https://www.sec.ntnu.edu.tw/uploads/asset/data/66f9256d0e0b308479fb9a43/1987-040-14_67-74_.pdf
3. 王郁文。第 22 屆--民國 71 年 國中生物科第三名 台灣的黏菌
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/22/pdf/22m/225.pdf>
4. 臧宇凡，秦虹(2019)。辣椒素酯生理功能及機制研究進展
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20193324071>
5. Rowena Gehrke and Jannes Freiberg(2025).Revisiting Chirality in Slime Mold:On the Emergence and Absence of Lateralized Movement in Physarum polycephalum Influenced by Various Stimuli
<https://www.mdpi.com/2073-8994/17/5/756>
6. Masahiro Kumeta, Makoto Otani, Masahiro Toyoda, and Shige H Yoshimura (2025).Acoustic modulation of mechanosensitive genes and adipocyte differentiation
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40240542/>
7. Alice Scott, Ian Hands-Portman(2019). Slime Santa beard likes hot peppers
https://warwick.ac.uk/news/pressreleases/slime_santa_bear/
8. Michael T Costanzo, Richard A Yost, Paul W Davenport (2014) . Standardized method for solubility and storage of capsaicin-based solutions for cough induction
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25342957>
9. Sigma-1 receptors are essential for capsaicin-induced mechanical hypersensitivity:studies with selective sigma-1 ligands and sigma-1 knockout mice
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28355213/>

10. Bernd Meyer, Cedrick Ansorge, Toshiyuki Nakagaki(2017). The role of noise in self-organized decision making by the true slime mold *Physarum polycephalum*
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28355213/>
11. Sigma-Aldrich(2002). Sigma-Aldrich-Capsaicin-Product Information Sheet
<https://www.sigmaaldrich.com/deepweb/assets/sigmaaldrich/product/documents/266/296/m2028pis.pdf>
12. Aristodemos-Theodoros Periferakis, Argyrios Periferakis, Konstantinos Periferakis, Ana Caruntu, Ioana Anca Badarau, Ilinca Savulescu Fiedler, Cristian Scheau, Constantin Caruntu(2023) . Antimicrobial Properties of Capsaicin: Available Data and Future Research Perspectives
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC105>
13. Zhidan Luo, Liqun Ma, Zhigang Zhao, Hongbo He, Dachun Yang, Xiaoli Feng, Shuangtao Ma, Xiaoping Chen, Tianqi Zhu, Tingbing Cao, Daoyan Liu, Bernd Nilius, Yu Huang, ZhenchengYan,ZhimingZhu (2012).TRPV1 activation improves exercise endurance and energy metabolism through PGC-1 α upregulation in mice
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22184011/>
14. Shichen Xu, Xian Cheng, Liying Wu, Jiangxia Zheng, Xiaowen Wang, Jing Wu 1, Huixin Yu, Jiandong Bao, Li Zhang(2020). Capsaicin induces mitochondrial dysfunction and apoptosis in anaplastic thyroid carcinoma cells via TRPV1-mediated mitochondrial calcium overload
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32771398/>