

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

佳作

030312

「蕈」聯網-探討蕈菇電訊刺激及其影響

學校名稱：有得學校財團法人桃園市有得國民中小學

<p>作者：</p> <p>國二 周于茜</p> <p>國二 周柏均</p> <p>國二 朱元杰</p>	<p>指導老師：</p> <p>吳沛穎</p>
--	-------------------------

關鍵詞：電訊刺激、逆境、蕈菇

摘要

本研究旨在探討電訊對於秀珍菇(*Pleurotus ostreatus*)、珊瑚菇(*Pleurotus citrinopileatus*)、玫瑰菇(*Pleurotus djamor*)之間的影响和遭遇逆境時產生電訊號的現象。研究發現：(1)提升菇蕾及子實體的個數—黑暗、電訊；提升子實體菌柄/菌傘大小—黑暗/半光暗；加速菇蕾發育成子實體—預冷、電訊。(2)電訊刺激能加速蕈菇完成生活史，且對於部分蕈菇而言，促菇蕾發育成子實體最佳電壓為 1.5 V。(3)電弧主要效應在菌絲與子實體的轉換。(4)菌絲會因突如其來之巨響而改變波形，澆灌酸、鹼、鹽液後電壓大多上升，頻繁出現之固定數值為 1221、1526.25 及 915.75 μV ，推測為菌絲受逆境時發出之有意義訊號。(5)1.5V 有利於減緩逆境對於子實體菌柄的損害。(6)外加鈣源有利於秀珍菇菌絲生長。(7)新鮮珊瑚菇能有效吸附銅離子。

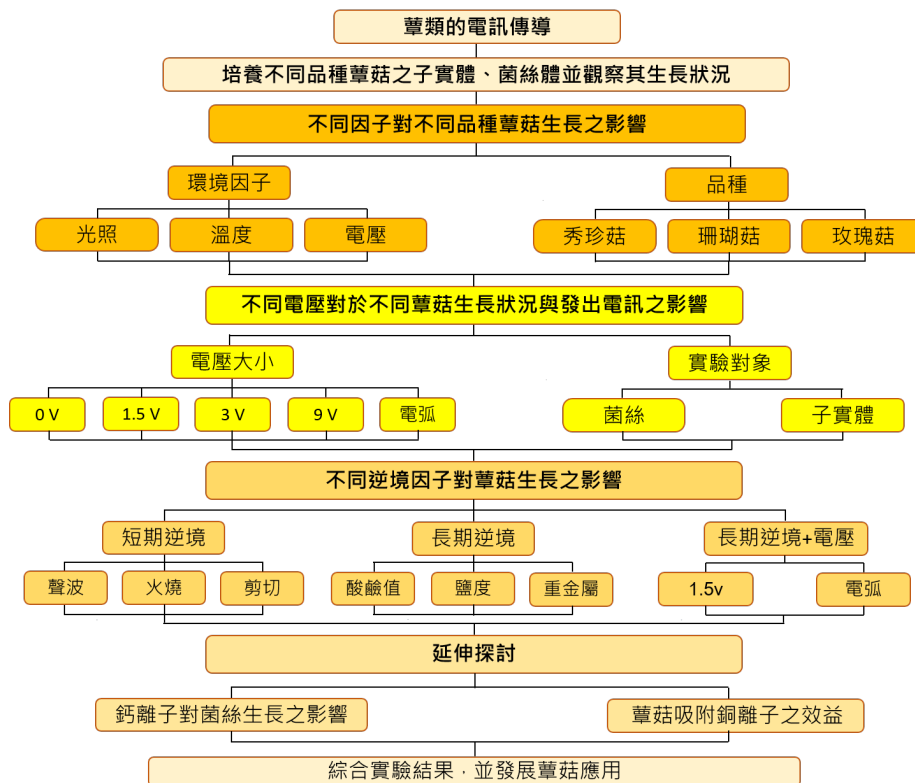
壹、研究動機

國中的生物課上，學到植物具有向光或向地的特性。我們好奇植物為何可以接受這些來自外在的刺激，經過查尋，知道了植物是因為體內具有多種感光受體才能對外在環境的光刺激做出反應(錢善勤、王忠禹、莫億偉與顧蘊潔，2004)。在查向性相關資料的同時，看到有一篇關於蕈類背地性的科展作品(陳柏熙與陳柏詠，2018)，蕈類會有向性這件事讓我們十分好奇，明明在國中的課程中教到植物與蕈類是不同界的生物，又為什麼會有類似的特性？我們發現蕈類也具有類似於植物的光接收器(吳芯妍與金湘雲，2014)，Andrew Adamatzky (2022)說明蕈類會發出電訊號來進行溝通行為，既然電也是一種來自外在的刺激，且蕈類本身已有發出電訊號的行為，那是否可用電刺激蕈類子實體內的某些受器，使其作出對應反應？因此我們從植物與電之關係的例子去尋找，發現一篇利用針灸探針以電刺激含羞草的科展作品(蕭佑安與賴禹圳與黃浩軒，2019)，其中提到植物在受到傷害時會產生電訊號，從受傷部位產生並系統性的傳遞至整個個體，稱為「系統性電位」，另一篇文章則是藉由測試植物在遭遇不同外在環境時(靠近、觸碰、剪切、濕度、溫度)體內電訊號會如何變化，並反向透過體內的電訊號變化來推測植物遭受何種刺激(王奕勳，2019)。前人研究使我們相信蕈類與電存在著某些特別的關係，故本研究企圖使用電訊刺激的方式使蕈類的生長發生變化，並加以運用於蕈類的農業之上。

與課本連結： 七上 5-1 神經傳導路徑、受器和動器
七上 5-3 植物的感應
八上 3-1 波的傳遞與特性

貳、研究目的

- 一、研究各種變因對於不同蕈類(秀珍菇、珊瑚菇、玫瑰菇)生長狀況之影響
 - (一) 不同光照程度對於不同蕈種生長狀況之影響
 - (二) 是否進行預冷處理對於不同蕈種生長狀況之影響
 - (三) 有無電訊刺激對於不同蕈種生長狀況之影響
- 二、研究不同電壓對於不同蕈菇(秀珍菇、珊瑚菇、玫瑰菇)生長狀況與發出電訊之影響
 - (一) 以電弧刺激菌絲對其生長狀況之影響
 - (二) 以不同電壓刺激不同蕈菇對其生長狀況與發出電訊之影響
- 三、研究各種逆境對於不同蕈菇(秀珍菇、珊瑚菇、玫瑰菇)生長狀況與發出電訊之影響
 - (一) 以短期逆境(音訊、火燒、剪切)刺激不同蕈菇對其發出電訊之影響
 - (二) 以長期逆境(酸化、鹼化、鹽化、重金屬)水溶液澆淋土壤對不同蕈菇生長狀況與發出電訊之影響
 - (三) 以不同電壓刺激受長期逆境澆淋之蕈菇，研究其生長狀況
- 四、延伸探討
 - (一) 探討菌絲生長機制與鈣離子之關係
 - (二) 探討不同蕈菇吸附銅離子之效益



圖一 實驗架構圖

參、研究設備與器材

一、儀器設備：



分光光度計



無菌操作台



示波器



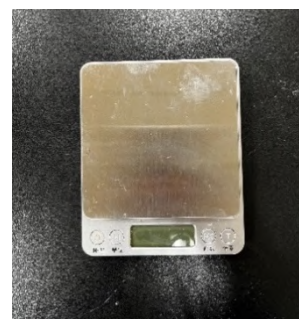
縮時攝影設備



游標卡尺



自製電弧產生器



電子秤



二氧化碳偵測儀

二、實驗藥品和材料：

- (一)馬鈴薯洋菜培養基 (PDA, Potato Dextrose Agar)：馬鈴薯、葡萄糖、洋菜粉
- (二)藥品：95%乙醇、導電凝膠、醋酸、碳酸氫鈉、硫酸銅、氨水、氯化鈣、EGTA
- (三)其他：酒精燈、解剖刀、鋁箔紙、鑷子、刮勺、玻璃棒、燒杯、量筒、培養皿、錐形瓶、解剖鐵盤、石蠟帶



培養基配置用裝置



滅菌消毒與種菌裝置

三、實驗生物：



秀珍菇



珊瑚菇



玫瑰菇

肆、研究過程與方法

一、不同環境因子對不同蕈菇太空包菇蕾與子實體生長狀況之觀察

(一) 太空包置於常溫 25°C 走菌一天，切成四等分(約 250 g)，以不同因子進行處理。

環境因子 蕈菇種類	光照	預冷	電訊
秀珍菇 珊瑚菇 玫瑰菇	操作變因： 照光(420 lux)、黑暗、光暗交替 控制變因： 常溫、無電訊	操作變因： 常溫、4°C 預冷 控制變因： 光暗交替、無電訊	操作變因： 無電訊、3 V 通電 控制變因： 光暗交替、無預冷
應變變因	蕈菇個數、蕈柄長度、蕈傘直徑		

(二) 原基長度達 1 cm 以上，未達 2 cm，即計為菇蕾。太空包菇蕾長度達 2 cm 以上，即計為子實體，利用游標卡尺固定測量子實體之蕈柄高度與蕈傘最大直徑。若原基過短或生長於太空包側面、底部，則不予計算。



圖二 不同種太空包栽培蕈菇環境因子刺激的生長發育實驗(A)切割太空包(購自豐年農場) (B)實驗測量之變因因子(C)原基(D)菇蕾、子實體示意圖(E)照光組裝置 (F)黑暗組裝置(G)半照光組裝置

二、不同電壓對蕈菇生長狀況與發出電訊之觀察

(一) 以電弧刺激菌絲對其生長狀況之影響

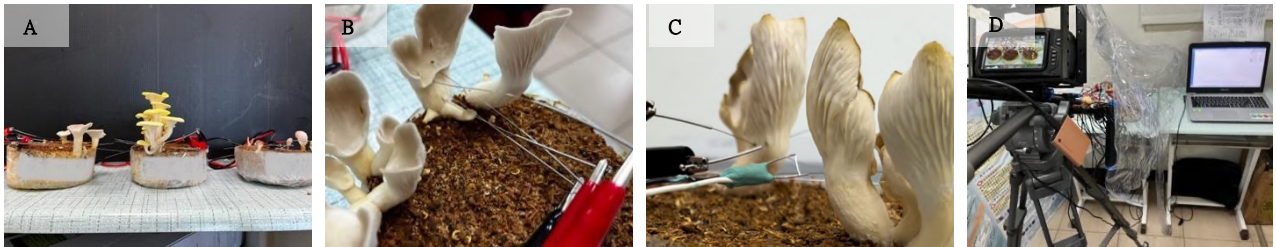
1. 製作 PDA 培養基：將馬鈴薯 200g(削皮切丁)、洋菜粉 20g、葡萄糖 20g、水 1000g 置入鍋中。以瓦斯爐沸煮 20 分鐘，利用紗布過濾並加水定量至 1000 ml。將配置好的溶液放入高壓滅菌釜滅菌 2 小時，再分裝至培養皿中。
2. 實驗方法：無菌操作台以紫外光殺菌 24 小時，以滅菌解剖刀去除子實體頭尾，浸泡酒精 30 秒後取出切取九宮格中段，約 0.3mm 之菇肉立方塊置入 PDA 中。每天紀錄菌絲之最長直徑，持續 14 天。

(二) 不同電壓對不同蕈菇生長狀況與發出電訊之觀察

1. 於光暗交替，不預冷常溫下於基質邊緣 1cm 處插入通電探針，兩探針距離兩公分，分別持續施予 0 V、1.5 V、3 V、9 V 及電弧。
2. 用示波器持續測量發出之電訊號(μV)，一秒取一數據，分析電壓刺激之影響。

(三) 離子通道檢測：配製 0.01M EGTA 及 0.5M CaCl_2 ，以紫外燈滅菌後依實驗設計加入 PDA 培養基中，待 24 小時後分別放入 0.3mm 之菇肉立方塊。

環境因子 蕈菇種類	電弧	電壓	鈣離子
秀珍菇 珊瑚菇 玫瑰菇	操作變因： 無電訊、電弧	操作變因： 0 V、1.5 V、3 V、9 V、電弧	操作變因： 無添加、EGTA、 CaCl_2 、EGTA + CaCl_2
控制變因	光暗交替、常溫		
應變變因	菌絲直徑	蕈菇個數、蕈柄長度、蕈傘直徑、電訊號	菌絲直徑



圖三 不同電訊因子對不同菇種太空包子實體發出電訊之觀察(A)電訊裝置圖(B)探針插入示意圖(C)電弧刺激(D)蕈菇訊號偵測裝置

三、不同逆境因子對不同蕈菇生長狀況與發出電訊之觀察

- (一) 音訊刺激：以應用程式 Frequency 靠近子實體發出不同頻率之音訊，持續 5 s。
- (二) 火燒刺激：以打火機停留於太空包子實體蕈傘邊緣，持續 5 s。
- (三) 剪切刺激：以解剖剪刀多次剪切子實體蕈傘邊緣，持續 5 s。
- (四) 酸鹼刺激：於光暗交替，不預冷常溫下澆淋 pH5 醋酸、pH9 碳酸氫鈉、蒸餾水於太空包。
- (五) 鹽化刺激：於光暗交替，不預冷常溫下澆淋飽和食鹽水與蒸餾水於太空包。
- (六) 重金屬刺激：於光暗交替，不預冷常溫下澆淋硫酸銅水溶液與蒸餾水於太空包。

環境因子 蕈菇種類	音訊	火燒	剪切	酸性基質	鹼性基質	鹽化基質	重金屬基質
秀珍菇 珊瑚菇 玫瑰菇	操作： 無音訊、 播放音訊	操作： 常溫、火 燒	操作： 無剪切、 剪切邊緣	操作： 蒸餾水、 pH5 醋酸	操作： 蒸餾水、 pH9 碳酸 氫鈉	操作： 蒸餾水、 飽和食鹽 水	操作： 蒸餾水、 0.5M 硫酸銅
控制變因	照光(420 lux)、常溫			光暗交替、常溫			
應變變因	電訊號			蕈菇個數、蕈柄長度、蕈傘直徑、電訊號			

四、重金屬吸附實驗

(一)製作 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ 之檢量線

1. 以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1.25g 溶解於二次水中並稀釋至 500ml，配置 0.01 M 標準溶液。
2. 將 1 配置之標準溶液各取 10 mL、5 mL、2.5 mL，各別加入 3.5 mL 的氨水形成氨錯離子，再加入二次水稀釋至 100 mL。
3. 分別取硫酸銅溶液 3.5 mL 之樣品槽測量，選定適合吸收的波長 590nm，以建立四氨銅之檢量線。

(二)比較子實體對 Cu^{2+} 之吸附能力

1. 取 250 ppm 硫酸銅水溶液 50 mL 於離心管中，並添加不同蕈菇子實體約 1g。
2. 將離心管連續震盪 1 小時，並完全過濾。
3. 加入氨水 0.5 mL，靜置 5 分鐘，再放入分光光度計測定吸光度，並減去背景值。

五、資料整理與統計

(一)名詞解釋

1. 生長差值(mm)：第 N+1 天生長數值(mm)－第 N 天生長數值(mm)
2. 生長比：
$$\frac{\text{第 N+1 天生長數值(mm)}}{\text{第 N 天生長數值(mm)}}$$
3. 生長比比例(%)：
$$\frac{[\text{實驗組生長比}-\text{對照組生長比}]}{\text{對照組生長比}} \times 100\%$$
4. 訊號反應強度(%)：
$$\frac{[\text{實驗組 mV}-\text{對照組 mV}]}{\text{對照組 mV}} \times 100\%$$

(二)描述性統計

1. 於 Excel 中整理菇蕾個數、子實體個數、蕈柄長度、蕈傘直徑及菌絲直徑。
2. 以 SPSS 第八版進行單因子變異數分析與獨立樣本 T 檢定。

(三)電訊波型分析

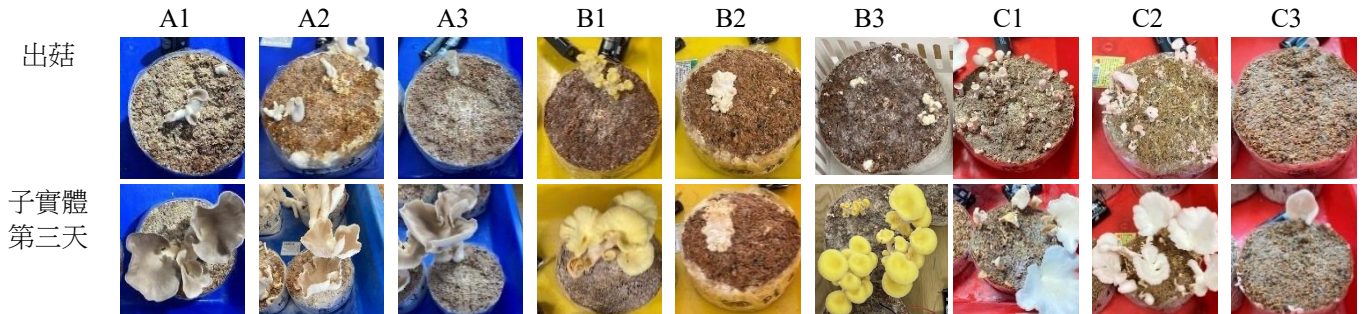
1. 匯出 PICO 紀錄之電訊圖，於 Excel 計算出其波峰、波谷與振幅。
2. 將組別資料依變因分類，進行波形分析。

伍、實驗結果

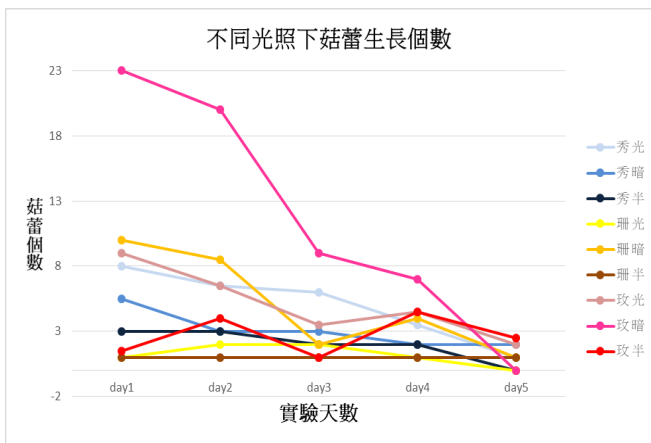
一、各種變因對於各種蕈類生長狀況之影響

(一) 不同光照程度對於不同蕈菇(秀珍菇、珊瑚菇、玫瑰菇)生長狀況之影響

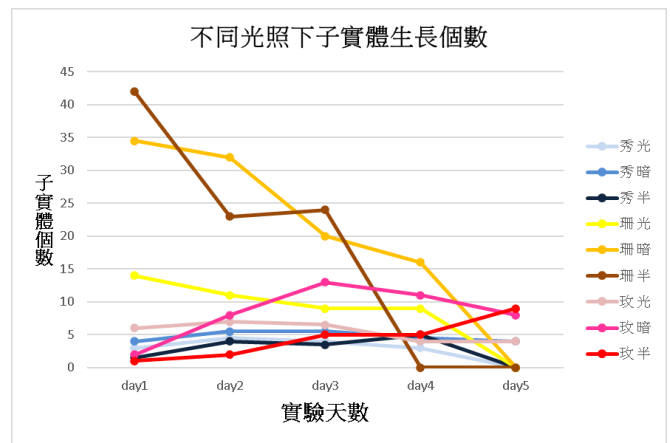
1. 不同光照程度下菇蕾出菇及子實體生長情形



圖四 不同光照生長情形(A1)秀珍菇照光(A2)秀珍菇黑暗(A3)秀珍菇半光暗(B1)珊瑚菇照光(B2)珊瑚菇黑暗(B3)珊瑚菇半光暗(C1)玫瑰菇照光(C2)玫瑰菇黑暗(C3)玫瑰菇半光暗



圖五 不同光照下菇蕾生長個數

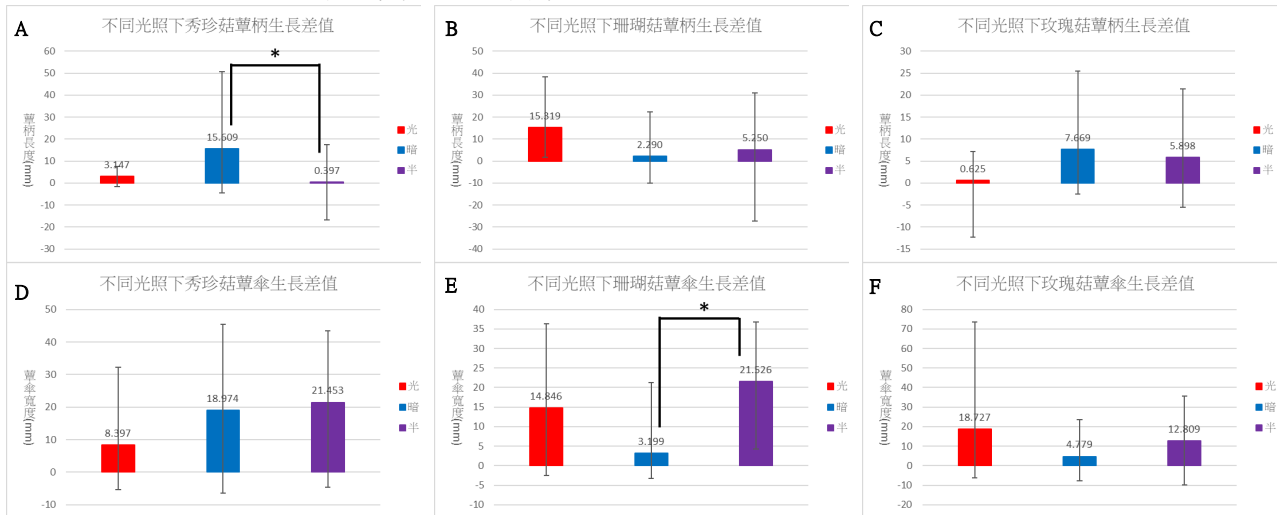


圖六 不同光照下子實體生長個數

根據圖五，菇蕾成長個數皆呈現下滑趨勢，表示菇蕾都持續發育為子實體且無新菇蕾出現。珊瑚菇和玫瑰菇在第三、四、五天成山丘型，推測因珊瑚菇與玫瑰菇停留於菇蕾階段時間較長，而秀珍菇則是較少此種狀況發生。最適合秀珍菇菇蕾生長條件為光>暗>半，但其數值接近，對珊瑚菇與玫瑰菇的菇蕾有利之生長條件皆為暗>光>半，且珊瑚菇菇蕾生長個數在除了黑暗環境中的其他兩種光照下都幾乎為零。總而言之，黑暗環境最能幫助菇蕾生長。

根據圖六，黑暗環境對秀珍菇和珊瑚菇子實體個數的益處高於其他兩種光線環境，且玫瑰菇面臨黑暗環境時雖然第一天子實體數量較低，在第三天達最高峰，整體數量如其他菇種一樣黑暗環境高於光照和半光暗。

2. 不同光照下子實體生長情形



圖七 不同光照影響子實體菌柄菌傘生長情況(A)秀珍菇菌柄(B)珊瑚菇菌柄(C)玫瑰菇菌柄(D)秀珍菇菌傘(E)珊瑚菇菌傘(F)玫瑰菇菌傘

註：顯著性標記*= $p<0.05$ ，**= $p<0.005$ ，***= $p<0.001$ 。

表一 不同光照影響子實體生長情況

組別	變因	個數	平均值±標準差(mm)	F	單因子變異數分析	
					顯著性	Post Hoc
秀珍菇菌柄	光	9	3.15± 3.31	4.035	0.031*	暗>半
	暗	11	15.61± 16.21			
	半	7	0.40± 12.87			
秀珍菇菌傘	光	9	8.40± 12.76	1.535	0.236	X
	暗	11	18.97± 17.28			
	半	7	21.45± 18.99			
珊瑚菇菌柄	光	8	15.32± 14.46	2.02	0.152	X
	暗	15	2.29± 12.10			
	半	7	5.25± 20.38			
珊瑚菇菌傘	光	8	14.85± 16.57	6.567	0.005*	半>暗
	暗	15	3.20± 7.77			
	半	7	21.53± 12.48			
玫瑰菇菌柄	光	12	0.63± 4.87	2.772	0.081	X
	暗	8	7.67± 8.25			
	半	9	5.90± 8.33			
玫瑰菇菌傘	光	12	18.73± 28.61	1.007	0.379	X
	暗	8	4.78± 9.73			
	半	9	12.81± 17.29			

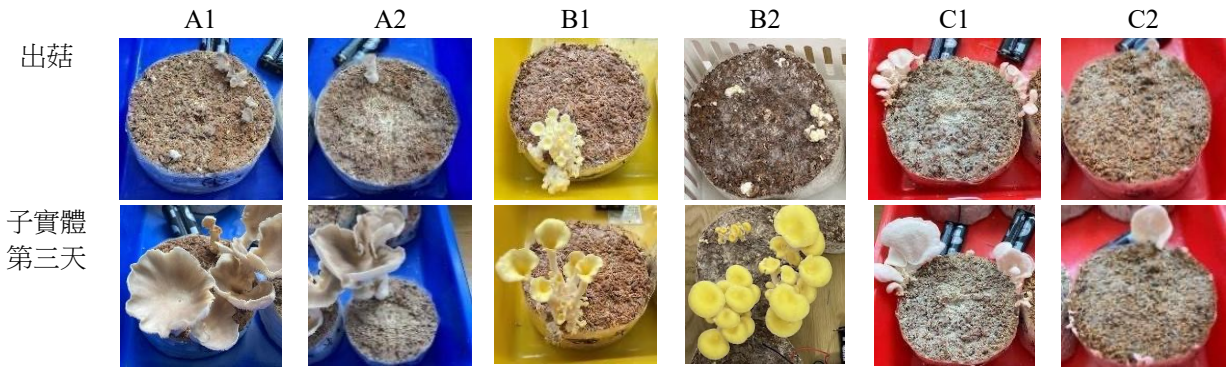
註：顯著性標記*= $p<0.05$ ，**= $p<0.005$ ，***= $p<0.001$ 。

秀珍菇和珊瑚菇成長期分明，玫瑰菇菌柄長度較其他兩種菇還要短小，整體生長幅度逐漸上升。至於光照影響，比較圖七(A)、(D)及(B)、(E)，對秀珍菇菌柄有益處的生長環境是黑暗環境(菌柄 $p=0.031$)，而對秀珍菇和珊瑚菇菌傘有益處的生長環境則都是半光半暗的環境，且其對珊瑚菇的影響達顯著標準(菌傘 $p=0.005$)。從圖七(C)、(F)來看，不管何種光線對玫瑰的菌柄和菌傘成長都無顯著影響(菌柄 $p=0.081$ ，菌傘 $p=0.379$)。

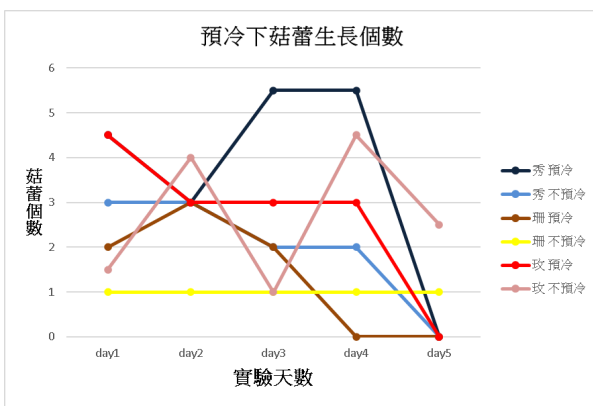
綜合結論，我們得知黑暗環境會使子實體生長數量變多，且黑暗對秀珍菇菌柄生長有益，且半光暗環境對珊瑚菇菌傘有益，玫瑰菇菌柄菌傘不管在何種環境下差異都不大。

(二) 預冷對於不同蕈種(秀珍菇、珊瑚菇、玫瑰菇)生長狀況之影響

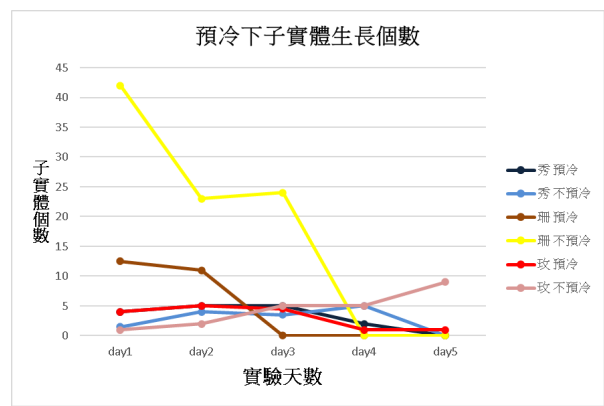
1. 預冷下菇蕾出菇及子實體生長情形



圖八 預冷影響生長情形(A1)秀珍菇預冷(A2)秀珍菇不預冷(B1)珊瑚菇預冷(B2)珊瑚菇不預冷(C1)玫瑰菇預冷(C2)玫瑰菇不預冷。



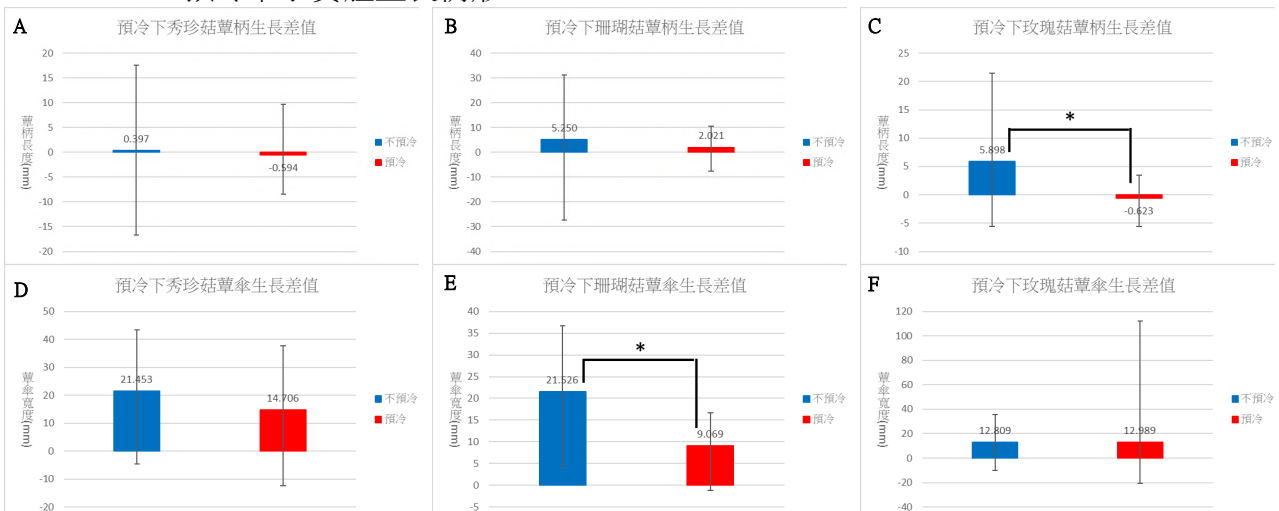
圖九 預冷下菇蕾生長個數



圖十 預冷下子實體生長個數

根據圖九、圖十，預冷組別第一天菇蕾個數皆較對照組多，且在三種蕈菇皆可發現預冷可使蕈菇縮短生命週期，刺激蕈類菇蕾生長個數，加速子實體死亡及枯萎。

2. 預冷下子實體生長情形



圖十一 預冷影響子實體菌傘菌柄生長情形(A)秀珍菇菌柄(B)珊瑚菇菌柄(C)玫瑰菇菌柄(D)秀珍菇菌傘(E)珊瑚菇菌傘(F)玫瑰菇菌傘

註：顯著性標記*= $p < 0.05$ ，**= $p < 0.005$ ，***= $p < 0.001$ 。

表二 預冷影響子實體生長情形

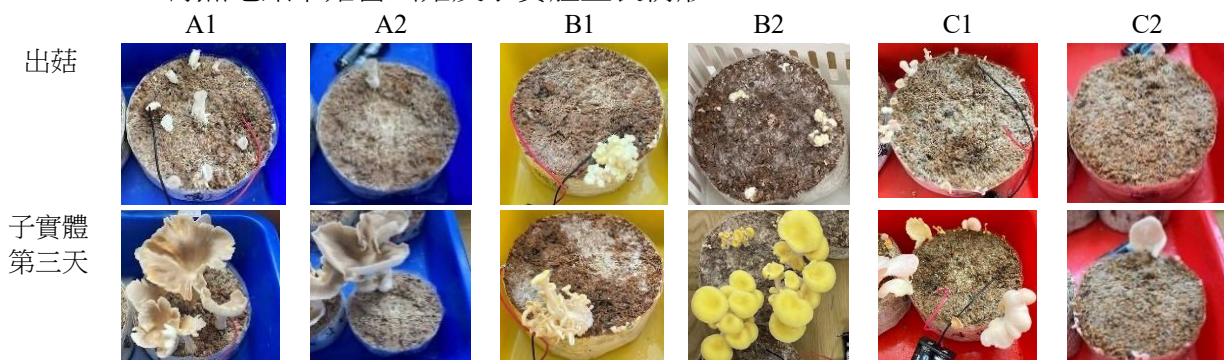
組別	變因	個數	平均值±標準差(mm)	F	顯著性
秀珍菇菌柄	預冷	7	-0.10± 8.33	0.008	0.932
	不預冷	7	0.39± 12.86		
秀珍菇菌傘	預冷	7	17.35± 16.66	0.184	0.675
	不預冷	7	21.45± 18.99		
珊瑚菇菌柄	預冷	8	2.02± 5.43	0.187	0.672
	不預冷	7	5.25± 20.38		
珊瑚菇菌傘	預冷	8	9.06± 6.74	6.010	0.029*
	不預冷	7	21.52± 12.48		
玫瑰菇菌柄	預冷	9	-0.62± 2.40	5.096	0.038*
	不預冷	9	5.89± 8.32		
玫瑰菇菌傘	預冷	9	12.98± 40.07	0.000	0.990
	不預冷	9	12.80± 17.29		

註：顯著性標記*= $p<0.05$ ，**= $p<0.005$ ，***= $p<0.001$ 。

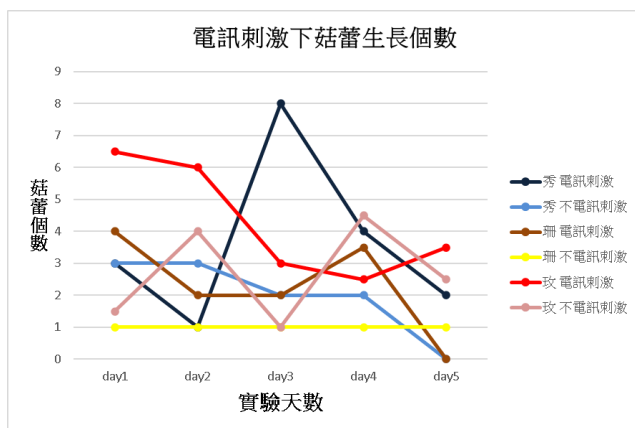
菌柄菌傘方面，據圖十一，預冷普遍不利於菌柄及菌傘生長，於珊瑚菇菌傘及玫瑰菇菌柄達顯著（珊瑚菇菌傘 $p=0.029$ 、玫瑰菇菌柄 $p=0.038$ ）。根據上述結果得知，預冷雖然幫助菌類菌蕾發育，但不利於菌類菌柄及菌傘生長，且會使其加速枯萎。

(三) 電訊對於不同菌種(秀珍菇、珊瑚菇、玫瑰菇)生長狀況之影響

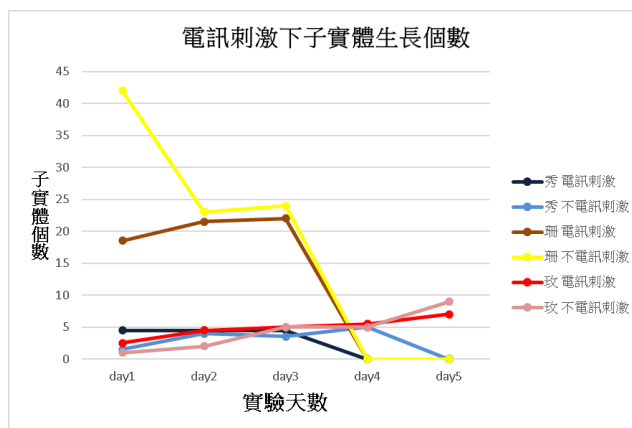
1. 有無電訊下菌蕾出菇及子實體生長情形



圖十二 電訊刺激影響生長情形(A1)秀珍菇電訊刺激(A2)秀珍菇不電訊刺激(B1)珊瑚菇電訊刺激(B2)珊瑚菇不電訊刺激(C1)玫瑰菇電訊刺激(C2)玫瑰菇不電訊刺激



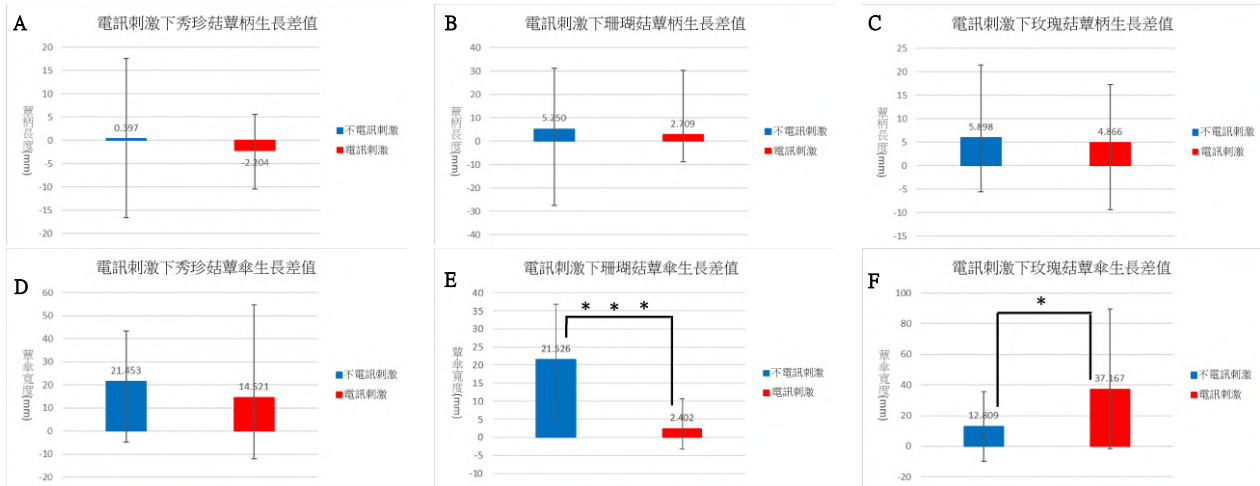
圖十三 電訊刺激下菌蕾生長個數



圖十四 電訊刺激下子實體生長個數

根據圖十三，我們得知電訊刺激能提高秀珍菇與珊瑚菇的菇蕾生長數目，在玫瑰菇中，雖然看似電訊刺激讓菇蕾個數快速降低了，但我們透過實驗觀察及對照圖十三、十四，讓菇蕾個數快速降低的原因並不是死亡，而是因菇蕾都快速成長為子實體。因此我們推測電訊刺激能有效的刺激蕈類菇蕾生長為子實體或縮短生長週期。

2. 有無電訊下子實體生長情形



圖十五 電訊刺激影響子實體蕈傘蕈柄生長情況(A)秀珍菇蕈柄(B)珊瑚菇蕈柄(C)玫瑰菇蕈柄(D)秀珍菇蕈傘(E)珊瑚菇蕈傘(F)玫瑰菇蕈傘

註：顯著性標記*= $p < 0.05$ ，**= $p < 0.005$ ，***= $p < 0.001$ 。

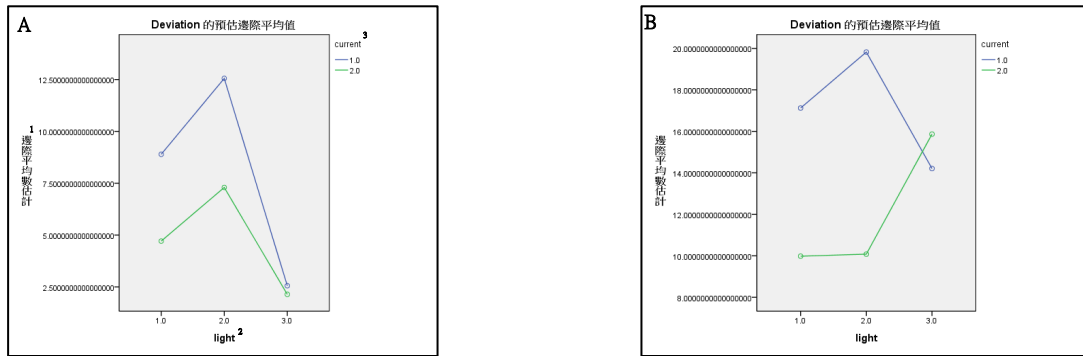
表三 電訊影響子實體生長情況

組別	變因	個數	平均值±標準差(mm)	F	顯著性
秀珍菇蕈柄	電訊	9	-2.20± 4.74	0.318	0.582
	無電訊	7	0.39± 12.86		
秀珍菇蕈傘	電訊	9	14.52± 23.04	0.413	0.531
	無電訊	7	21.45± 18.99		
珊瑚菇蕈柄	電訊	16	2.70± 10.43	0.160	0.693
	無電訊	7	5.25± 20.38		
珊瑚菇蕈傘	電訊	16	2.40± 4.18	31.250	0.000***
	無電訊	7	21.52± 12.48		
玫瑰菇蕈柄	電訊	9	4.86± 8.59	0.670	0.799
	無電訊	9	5.89± 8.32		
玫瑰菇蕈傘	電訊	9	37.16± 23.71	6.200	0.024*
	無電訊	9	12.80± 17.29		

註：顯著性標記*= $p < 0.05$ ，**= $p < 0.005$ ，***= $p < 0.001$ 。

蕈柄蕈傘方面，根據圖十五可知電訊刺激與否對於蕈柄生長無顯著影響，而比較圖十五(E)，珊瑚菇蕈傘在電訊刺激狀況下顯著低於無電訊刺激，而玫瑰菇則是相反，如圖十五(F)。綜合以上結果推論，電訊刺激能使菇蕾和子實體個數增加但會縮短其生命週期，使之更快枯萎。

(四) 中介變因討論



圖十六 子實體光照與電訊刺激交互作用剖面圖(A)葶柄(B)葶傘

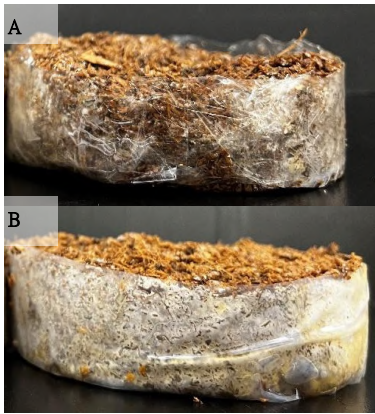
備註：1.邊際平均數估計: 模式內資料格的預測平均數
2.light1:光照、light2:黑暗、light3:半光半暗
3. current1:電訊刺激、current2:不電訊刺激

另外，我們討論了三種變因是否有交互作用，如圖十六顯示葶柄於光照環境與電訊刺激並無呈現交互作用。而葶傘則於黑暗環境加上電訊刺激的情況對子實體葶傘的生長最有益。

根據以上實驗可知電擊對於葶菇生長有趨勢上的明顯差異，有效刺激葶菇出菇，卻不像光照或預冷般常被作為影響作物生長的依據。根據文獻，葶類在不同的外在環境下會發出不一樣的電訊號(Andrew Adamatzky, 2022)，我們認為葶類與電的關係是雙向的，葶類可能會因為接受到電訊而有不同的生長狀況，也因為不同的外在環境與刺激發出電訊號，故推測葶類接收到電刺激時，也會發出不同的電訊號做回應，而這些訊號或許可作為葶菇的語言系統。

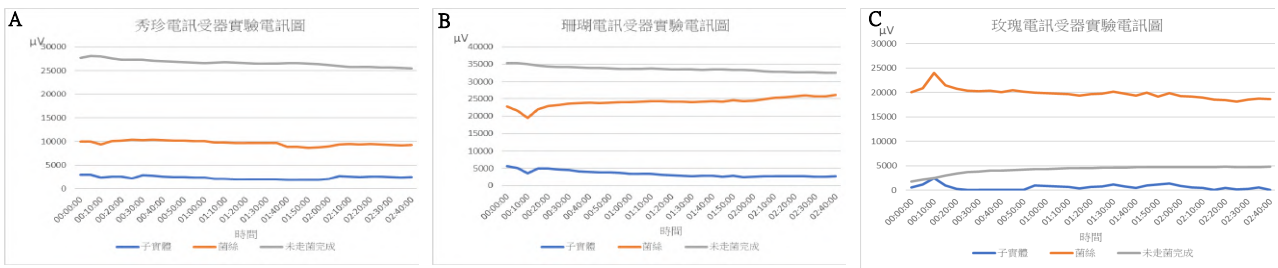
二、不同電訊號對於蕈類生長狀況之影響

(一) 探討接受電刺激之受器部位



一般我們認為能夠接受電訊刺激的受器位於子實體，但在實驗中發現菌絲也能作為電刺激的受器，也就是說只要走菌完成便能接收到電訊刺激，如圖十七所示。走菌完成之基質在環境變化時能產生電訊號波動，而未走菌完成的基質則無法感測電訊並做出反應。另外，秀珍和珊瑚菇感受到電弧刺激後的電訊圖產生向下的波形，而玫瑰菇則是向上。三者相比，秀珍菇對於電弧刺激產生的反應波動較小。

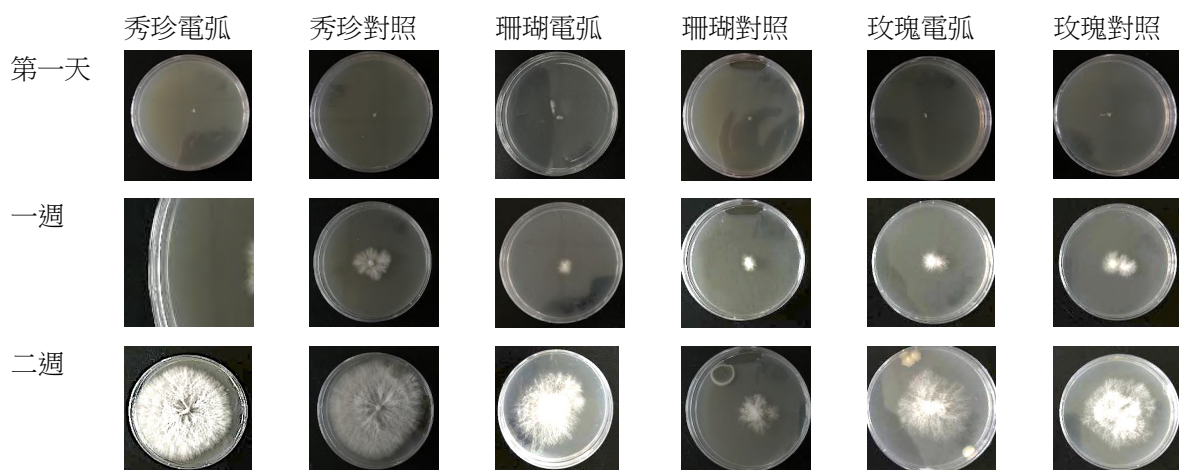
圖十七 走菌情形示意圖(A)未走菌完成(B)走菌完成



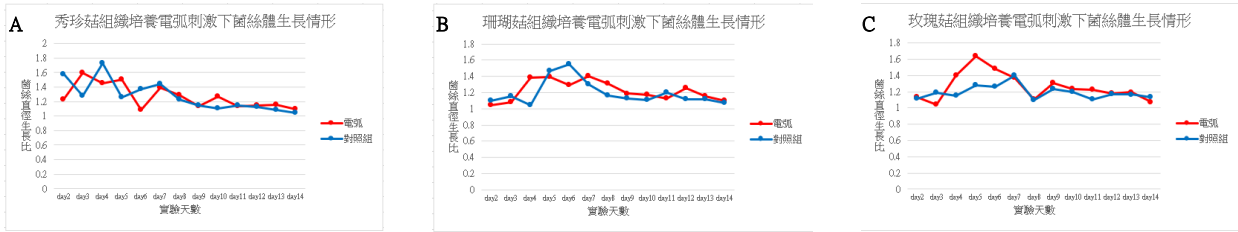
圖十八 電弧接收之部位觀察(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇
註:電弧所指為在短時間利用自製電弧裝置釋放高電壓低電流之電訊刺激

(二) 電弧刺激對於菌絲體與子實體之影響

1. 電弧刺激對於組織培養菌絲生長之影響



圖十九 不同時期菌絲生長狀態

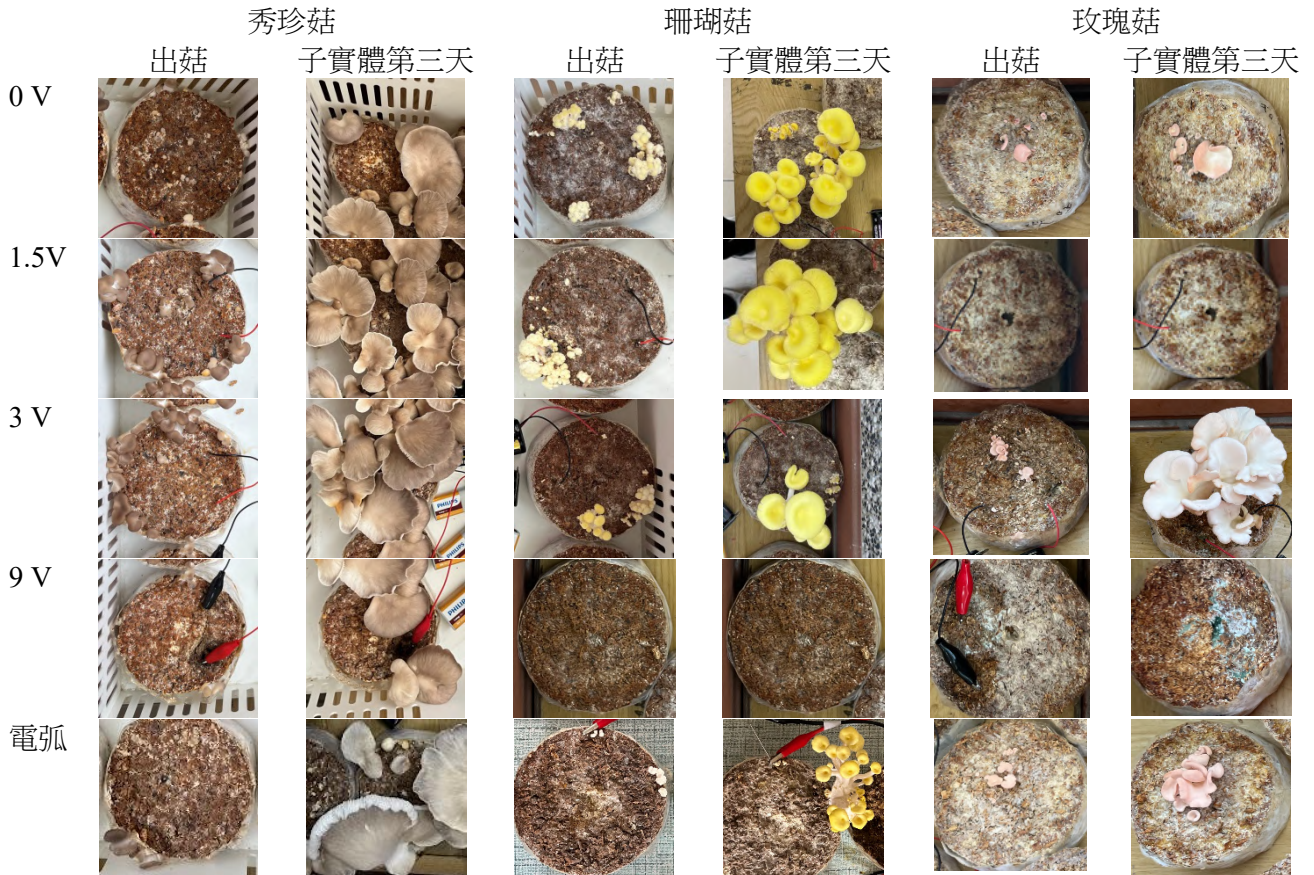


圖二十 電弧刺激下不同菇種組織培養之菌絲直徑生長比(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇

根據圖二十，秀珍菇與珊瑚菇對照組於第三、四天大幅成長，其菌絲直徑於第八天前較電弧刺激長，第八天後則生長緩慢。有別於對照組，電弧刺激組菌絲直徑於第八天後仍有上升趨勢，因此可得知電弧刺激相較於對照組菌絲尖端持續生長時間較久。

(三) 不同電壓對蕈菇成長之影響

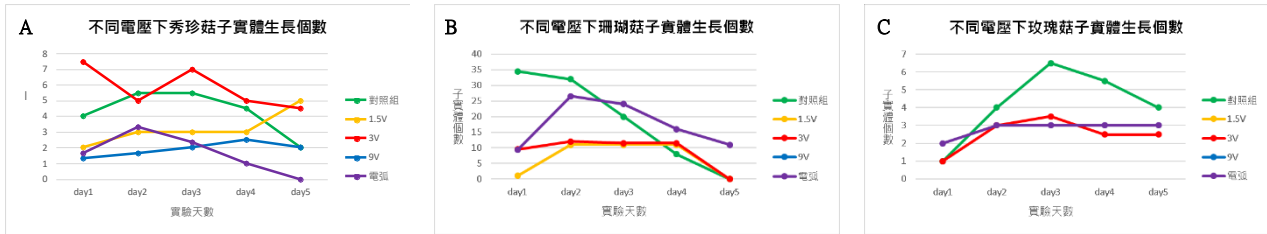
1. 不同電壓菇蕾出菇及子實體生長情形



圖二十一 不同電壓對蕈菇成長之影響

註:電弧所指為在短時間利用自製電弧裝置釋放高電壓低電流之電訊刺激。

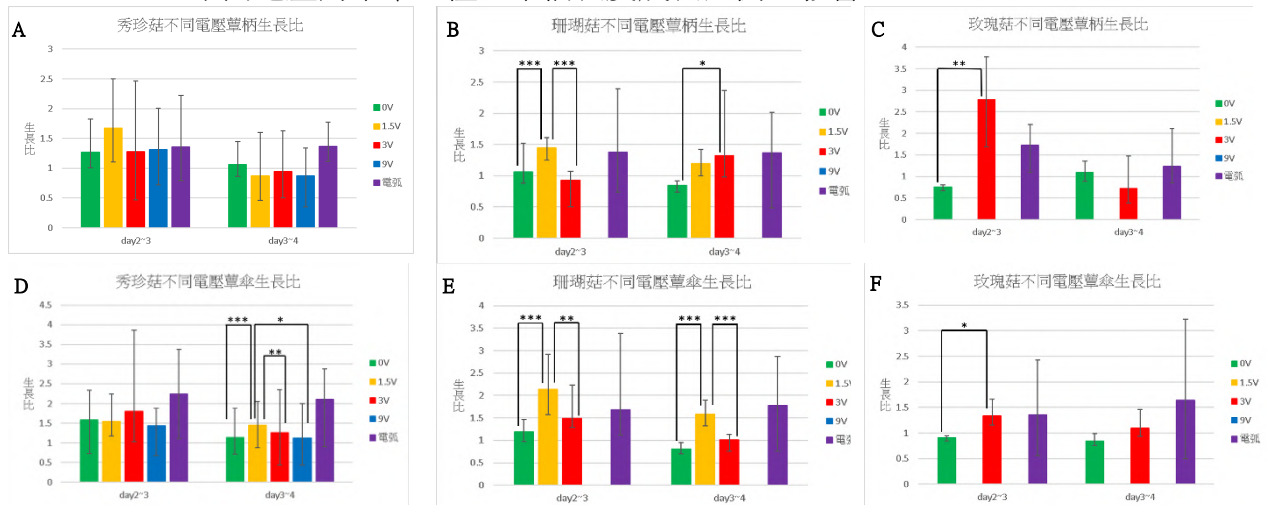
根據圖二十一，對於部分蕈菇而言，對於子實體的最佳電壓為 1.5V，而對照組雖與電弧刺激組於同一天出菇，但兩天後才長出子實體，故可知電弧刺激可加速蕈菇發育成子實體。



圖二十二 不同電壓下子實體生長個數(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇

根據圖二十二，得知雖然電流刺激能促使蕈菇生長與階段轉換，但對於子實體個數並無明顯影響。

2. 不同電壓對蕈傘直徑、蕈柄長度成長比例之影響



圖二十三 不同電壓對蕈菇成長之影響(A)秀珍菇蕈柄(B)珊瑚菇蕈柄(C)玫瑰菇蕈柄(D)秀珍菇蕈傘(E)珊瑚菇蕈傘(F)玫瑰菇蕈傘

註：顯著性標記*= $p < 0.05$ ，**= $p < 0.005$ ，***= $p < 0.001$ 。

由生長週期影響成長速度的快慢差異，我們發現蕈菇子實體的成長期多集中於第二～三天，而凋零期則集中在第三～四天，故以兩種生長週期進行比較。

據圖二十三可得知不同電壓對不同菇種生長造成的影響具差異性，如圖二十三(A)、(D)中，對秀珍菇生長助益最大的電壓是 1.5V，在圖二十三(B)、(E)中對珊瑚菇生長助益最大的電壓也是 1.5V，9V 則未有蕈菇產生，在圖二十三(C)、(F)中對玫瑰菇而言最佳電壓為 3V。電弧能加快蕈菇的生長週期，此外，電弧刺激對蕈傘的益處相對於蕈柄來的大，在實驗過程中同時發現電訊刺激可使蕈菇提前噴孢子、萎縮死亡。除此之外，未施予電壓之成長比率則普遍低於通電組。

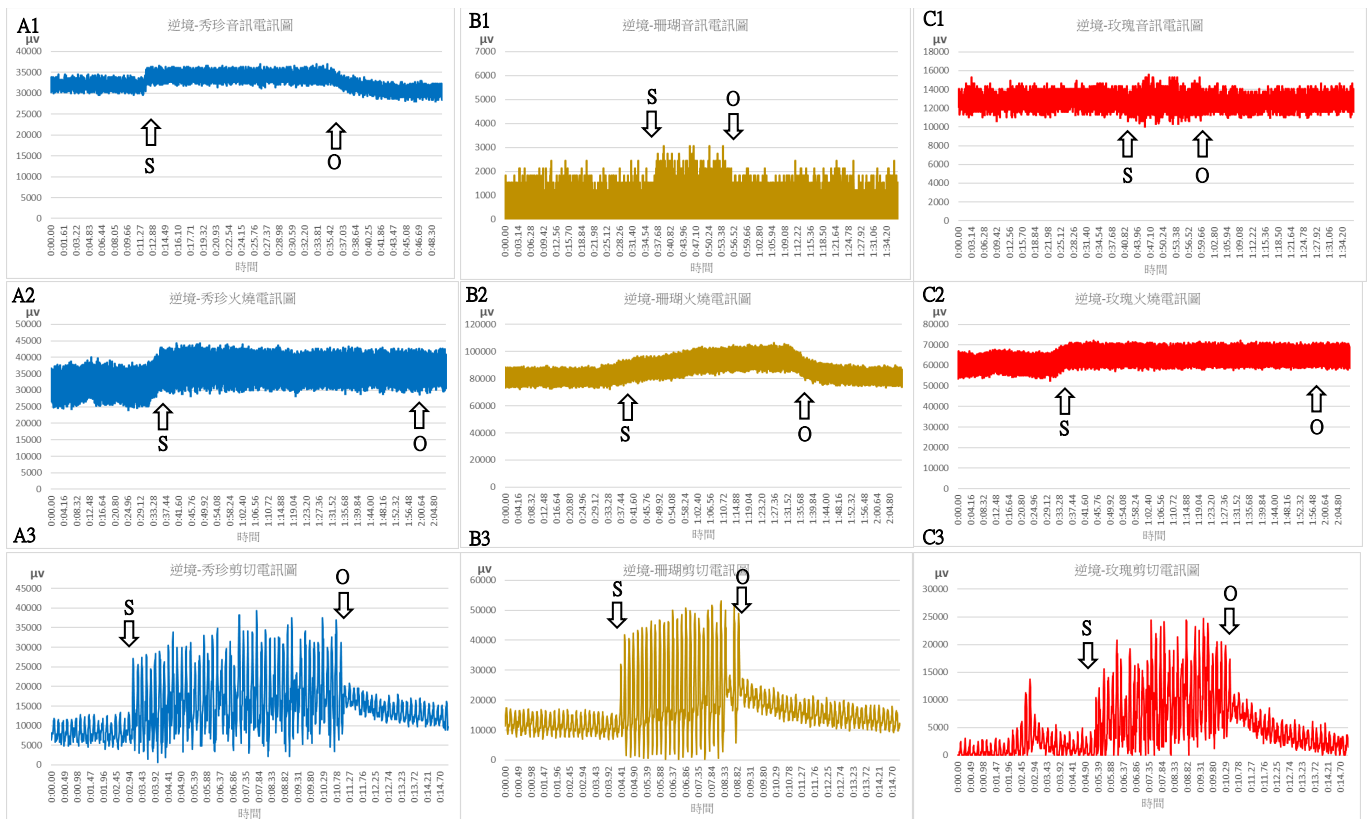
我們在實驗中發現正極針腳容易斷裂、被分解，此現象在電訊號的實驗中更為明顯，推測是正極發出的電訊使菌絲以為是待分解的養分，進而分解了正極的針腳，並且正極針腳附

近容易生長黴菌，推測也是被電訊吸引導致。在蕈菇感測環境因子的部分我們發現不同太空包但同種菇種的電訊號波形相同，可得知不同菇種對於環境因子的感測是穩定的，從此也能證明我們測到的電訊號不是背景值。

三、各種逆境對於蕈類生長狀況之影響

(一) 短期逆境因子：音訊刺激、火燒刺激、剪切刺激

1. 波形完整分析

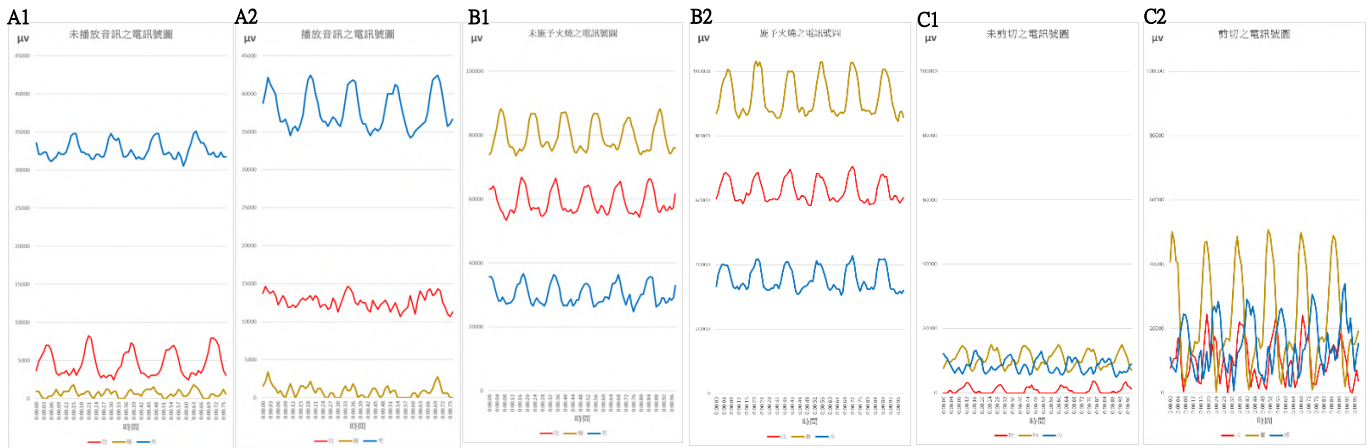


圖二十四 短期逆境因子對蕈菇電訊之影響(A1)秀珍菇音訊電訊圖(A2) 秀珍菇火燒電訊圖(A3)秀珍菇剪切電訊圖(B1) 珊瑚菇音訊電訊圖(B2)珊瑚菇火燒電訊圖(B3)珊瑚菇剪切電訊圖(C1)玫瑰菇音訊電訊圖(C2) 玫瑰菇火燒電訊圖(C3)玫瑰菇剪切電訊圖

註：S=訊號起始，O=訊號結束。

太空包在我們靠近時電訊號會出現高峰，因此我們回顧收資料時曾改變的變因，選擇研究光線與音訊刺激這兩項變因對蕈菇電訊之影響，後來發現只有音訊改變時蕈類發出的電訊號才有明顯的變化，實驗結果如圖二十四(A1~C1)，發現菌絲會因聲音而發生改變波形起伏、振幅變大、電壓升高等現象，且秀珍菇出現電壓上升的狀況。其中有無子實體、音訊頻率與音訊響度對菌絲波形反應無明顯差異。圖二十四(A2~C2)可知，蕈菇施予火燒後電壓將會升高。圖二十四(A3~C3)可知，蕈菇施予剪切後電壓升高且振幅變大。

2. 單一波形分析



圖二十五 短期逆境因子波形分析(A1)音訊對照組(A2)音訊組(B1)火燒對照組(B2)火燒組(C1)剪切對照組(C2)剪切組

細部波形如圖二十五，相對於對照組可知，遇逆境後蕈菇單一波形之振幅皆會上升，尤以剪切最為明顯。

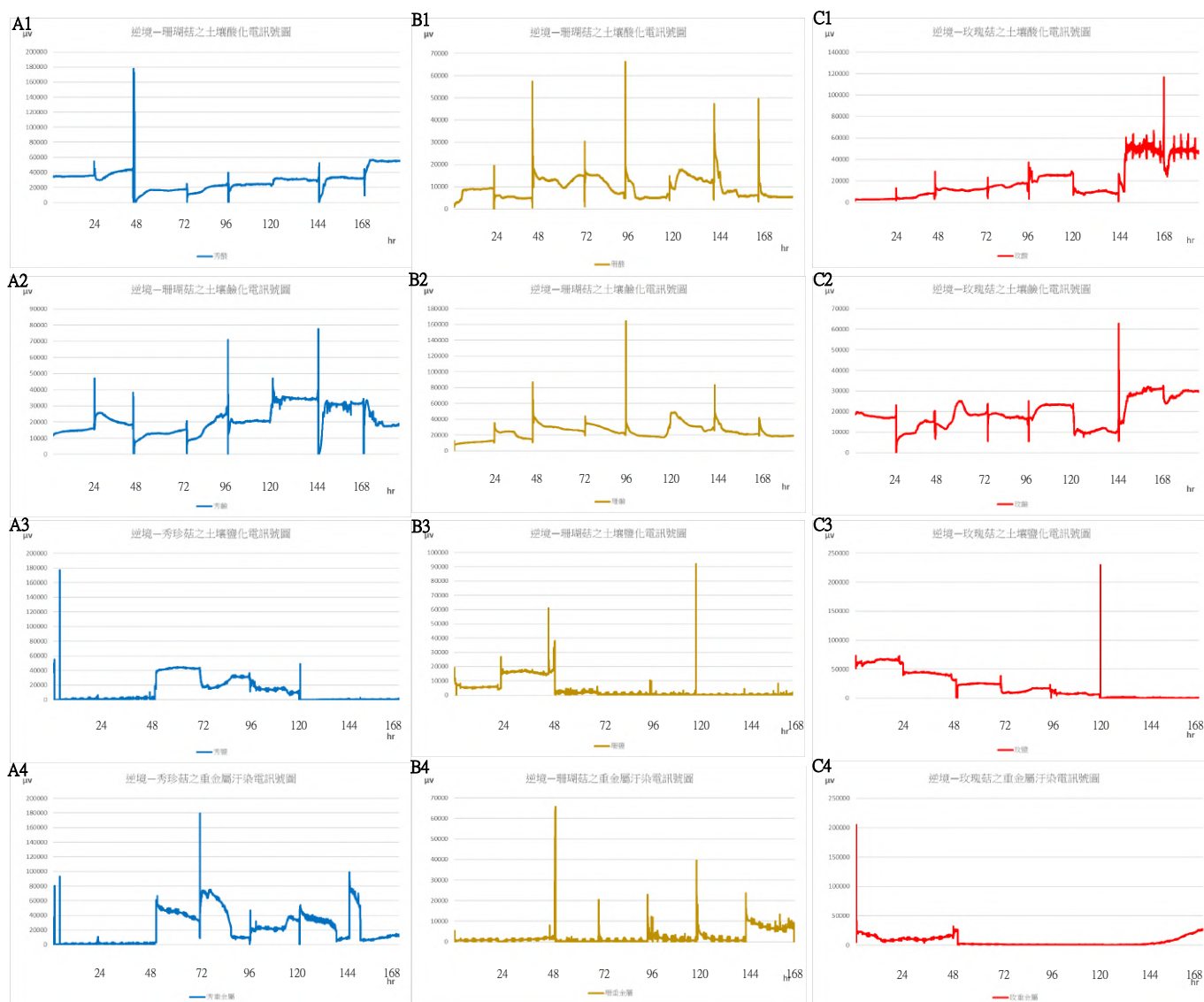
(二) 長期逆境因子：酸化、鹼化、鹽化、重金屬

1. 長期逆境菇蕾出菇及子實體生長情形

	秀珍菇		珊瑚菇		玫瑰菇	
	出菇	第三天	出菇	第三天	出菇	第三天
對照						
酸化						
鹼化						
鹽化						
重金屬						

土壤酸化下三種蕈菇皆成功出菇並發育為子實體，但其出菇所需之時間約為對照組的兩倍(約於走菌完成後第十二天)。土壤鹼化下三種蕈菇皆成功出菇並發育為子實體，秀珍菇所需出菇時間與對照組相同，而珊瑚菇與玫瑰菇則需再一到兩天的時間，土壤鹼化並無明顯影響蕈菇出菇時間。土壤鹽化下僅秀珍菇順利出菇並發育為子實體，其出菇所需時間較對照組多兩天(約於走菌完成後第八天)，且其蕈柄長度、蕈傘直徑明顯小於對照組。澆灌重金屬溶液下三種蕈菇皆成功出菇並發育為子實體，但玫瑰菇出菇所需時間約為對照組的兩倍(約於走菌完成後第十一天)，而秀珍與珊瑚菇則需再三到四天的時間，為因此我們可得知土壤酸化、鹽化及重金屬逆境會降低蕈菇的出菇率並減緩其出菇速度。

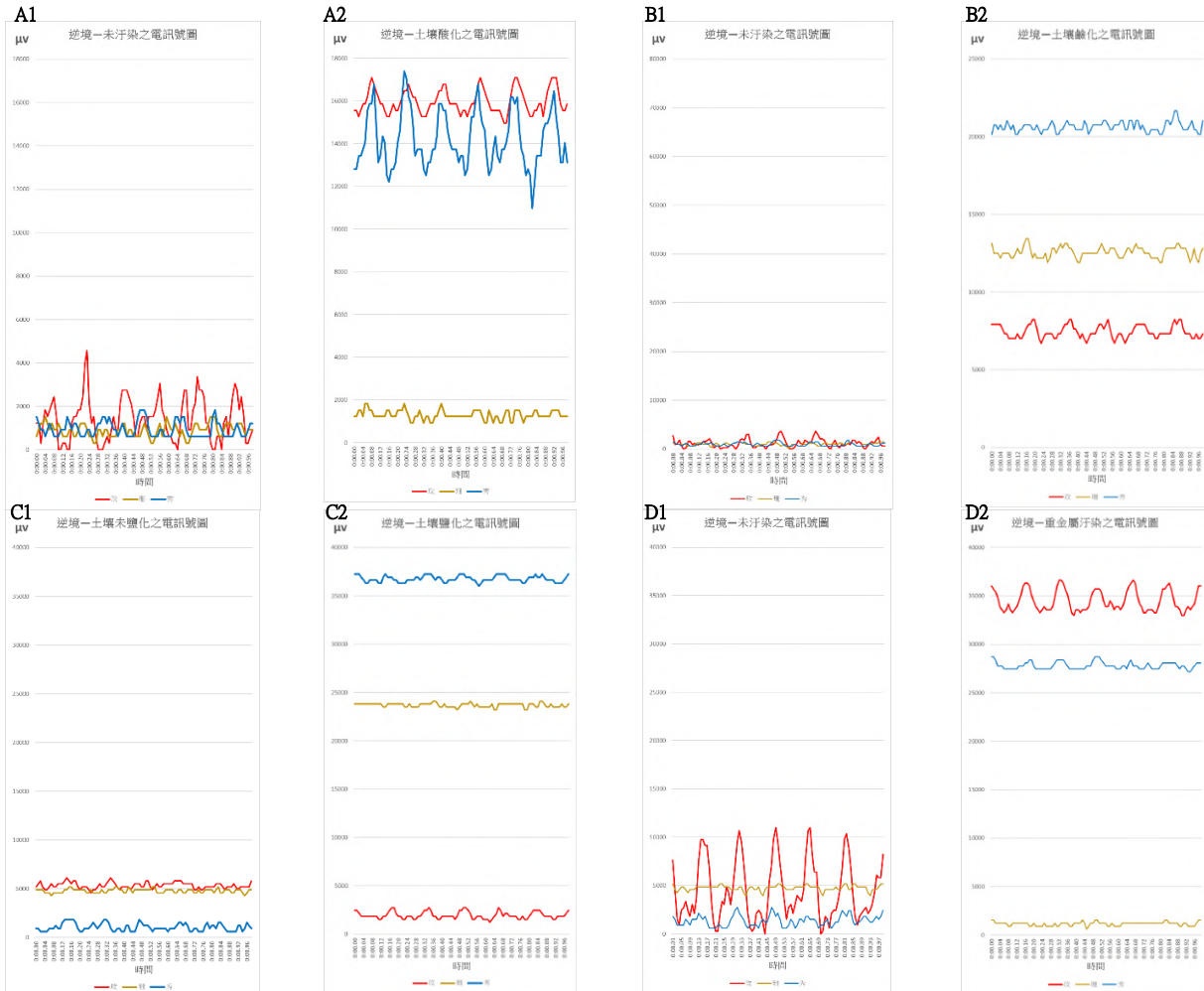
2. 波形完整分析



圖二十六 長期逆境因子對蕈菇電訊之影響(A1)秀珍菇酸化電訊圖(A2) 秀珍菇鹼化電訊圖(A3)秀珍菇鹽化電訊圖(A4)秀珍菇重金屬電訊圖(B1)珊瑚菇酸化電訊圖(B2)珊瑚菇鹼化電訊圖(B3)珊瑚菇鹽化電訊圖(B4)珊瑚菇重金屬電訊圖(C1)玫瑰菇酸化電訊圖(C2)玫瑰菇鹼化電訊圖(C3)玫瑰菇鹽化電訊圖(C4)玫瑰菇重金屬電訊圖

由圖二十六所示，以一秒作為間隔持續採集電訊數據可觀察到，電訊號會出現平均一天六次的周期性電壓變化，在土壤鹽化、重金屬污染電訊圖中最为顯著。另外，圖(C1)中玫瑰菇電訊號電壓產生劇烈的波動，推測為生長末期，子實體死亡所造成，此現象也在多項實驗中被發現。

3. 單一波形分析



圖二十七 長期逆境因子波形分析(A1)酸化對照組(A2)酸化組(B1)鹼化對照組(B2)鹼化組(C1)鹽化對照組(C2)鹽化組(D1)重金屬對照組(D2)重金屬組

由圖二十七所示，土壤酸化、鹼化皆會導致電訊之電壓升高。秀珍和珊瑚菇的電訊振幅變大，玫瑰菇的電訊振幅變小。而土壤鹽化後秀珍與珊瑚菇電壓增強，玫瑰菇電壓下降。且表八中所有菇種土壤鹽化前後的振幅皆不變且為固定數值。土壤澆灌重金屬溶液時秀珍菇和玫瑰菇電壓上升，珊瑚菇電壓下降。三種菇種的電訊振幅皆變小。

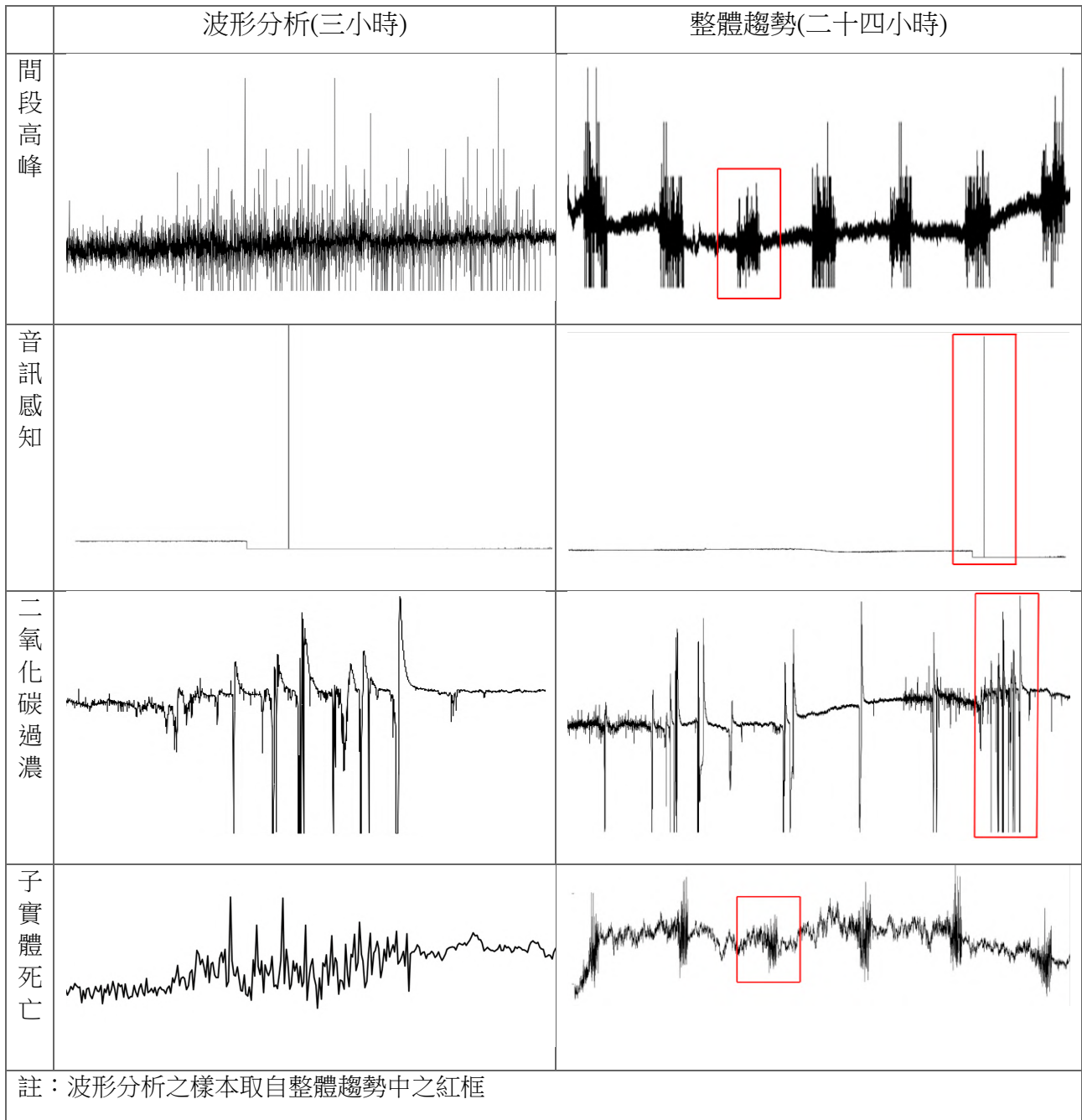
表四 逆境下電訊波形分析統整表

逆境因子	蕈種	蕈菇電訊反應					樣本	波形圖	
		訊號範圍(mV) (波谷~波峰)		振幅變化(mV) (波峰-波谷)		振幅反應 強度(%)			
		對照組	實驗組	對照組	實驗組				
短期	音訊	秀珍菇	24.7~36.6	30.5~42.7	11.9	12.2	+3	對照 600 實驗 180	圖 二十四 二十五
		珊瑚菇	73.6~88.2	84.5~103.2	14.7	18.6	+27		
		玫瑰菇	53.4~66.8	58.3~70.3	13.4	12.2	-9		
	火燒	秀珍菇	30.5~35.1	34.2~42.4	4.6	8.2	+80		
		珊瑚菇	0~1.8	0~3.4	1.8	3.4	+83		
		玫瑰菇	2.4~8.2	10.7~14.6	5.8	4.0	-58		
	剪切	秀珍菇	3.7~13.4	0.6~39.4	9.8	38.8	+296		
		珊瑚菇	5.5~16.4	0.3~53.1	11.0	52.8	+380		
		玫瑰菇	0~4.6	0~24.7	4.6	24.7	+437		
長期	酸化	秀珍菇	0.6~1.8	11.0~17.4	1.2	6.4	+425	對照 600 實驗 600	圖 二十六 二十七
		珊瑚菇	0.3~1.5	0.9~1.8	1.2	0.9	-25		
		玫瑰菇	0~3.4	15.0~17.1	3.4	2.1	-36		
	鹼化	秀珍菇	0.6~1.8	20.1~21.7	1.2	1.5	+25		
		珊瑚菇	0.3~1.5	11.9~13.4	1.2	1.5	+25		
		玫瑰菇	0~3.7	6.7~8.2	3.7	1.5	-58		
	鹽化	秀珍菇	0.6~1.8	36.0~37.2	1.2	1.2	0		
		珊瑚菇	4.3~5.2	23.2~24.1	0.9	0.9	0		
		玫瑰菇	4.6~6.1	1.2~27.0	1.5	1.5	0		
	重金屬	秀珍菇	0.6~2.7	27.2~28.7	2.1	1.5	-28		
		珊瑚菇	4.0~5.2	0.6~1.5	1.2	0.9	-25		
		玫瑰菇	0~11.0	33.0~33.6	11.0	3.7	-66		

由於長期記錄的電訊圖中出現週期性高峰，我們推測為靠近活動時造成蕈菇的電訊反應，因而實驗光線和音訊對電訊之影響發現，蕈菇能感測環境中的聲音，且頻率的差異不造成影響。剪切實驗對蕈傘邊緣剪切一公分並偵測其電訊號，發現子實體及土壤菌絲發出之電訊反應一致。剪切後，電訊電壓皆上升，且振幅反應強度較其他變因強。

土壤酸鹼化實驗中，澆灌後電訊電壓均上升，且秀珍菇、珊瑚菇對照組振幅頻繁出現 $1221\mu\text{V}$ ，三種菇種土壤鹼化後振幅皆為 $1526.25\mu\text{V}$ ，由波峰和波谷不一樣，振幅卻相同的情況可見蕈菇的電訊號有一定的規律性。經實驗結果發現，土壤鹽化前後三種菇種電訊振幅均為特定數值，且前後振幅不變，可見蕈菇電訊號不受土壤鹽化影響。土壤重金屬污染後，三種菇種電訊振幅強度皆弱化，推測菌絲經硫酸銅水溶液浸泡後可能抑制鈣離子流動，導致電訊號反應減弱。













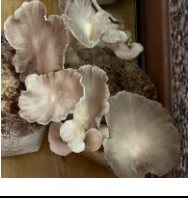
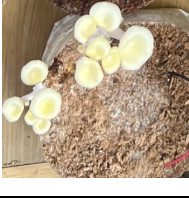
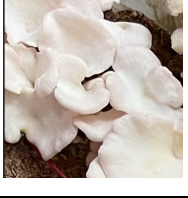
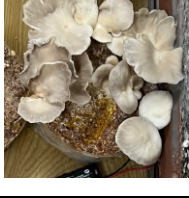
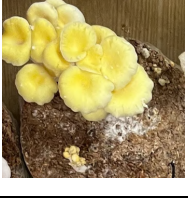

4. 綜合整理電訊號與事件關聯










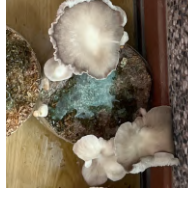


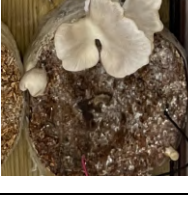
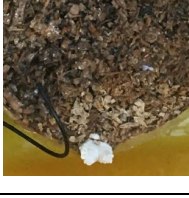


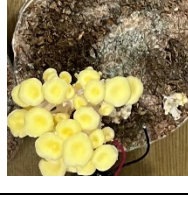
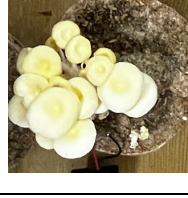


實驗中的特殊情況電訊圖，包含前文所提到平均一天六次的周期性電壓變化，此稱間段高峰、感知音訊時的單一高電壓訊號外，我們還發現當蕈菇處於高二氧化碳濃度(大於600ppm)環境時會產生比原本高出數倍的電訊振幅，子實體死亡時的連續形波動，兩者皆是在子實體第三天後出現的電訊反應。前者振幅較大，發生頻率較高；後者產生連續型波動的振幅較小，頻率較低但波動密集。

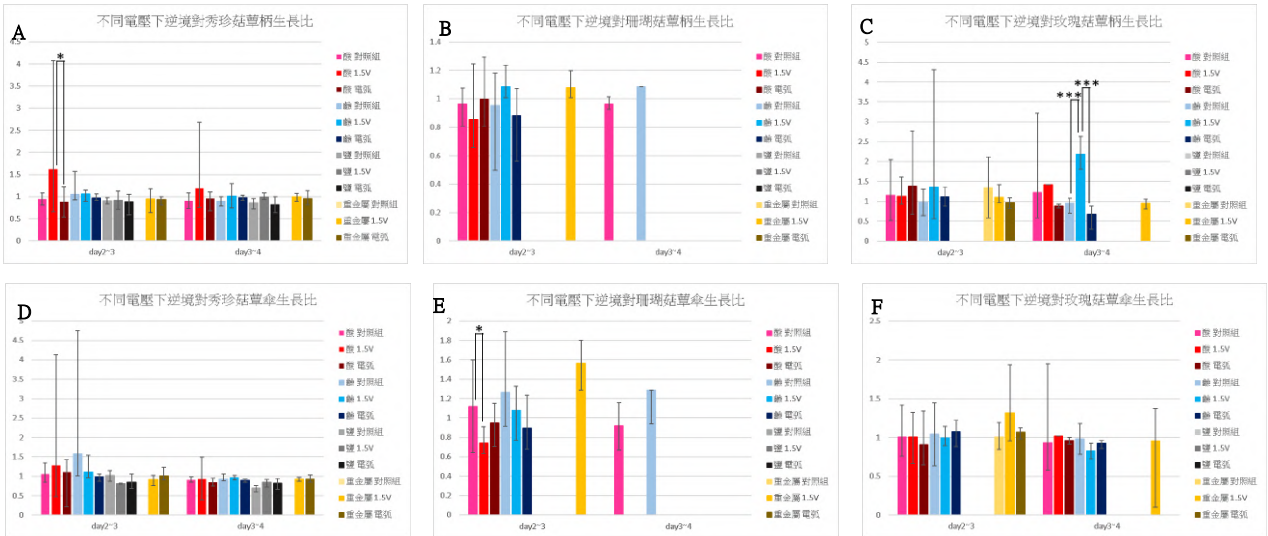
(三) 逆境與電訊

1. 長期逆境下，電訊對菇蕾出菇及子實體生長情形（實驗第六天）

	酸化			鹼化		
	秀珍菇	珊瑚菇	玫瑰菇	秀珍菇	珊瑚菇	玫瑰菇
無電訊						
電弧						
1.5 V						

	鹽化			重金屬		
	秀珍菇	珊瑚菇	玫瑰菇	秀珍菇	珊瑚菇	玫瑰菇
無電訊						
電弧						
1.5 V						

2. 長期逆境下，電訊對蕈傘直徑、蕈柄長度成長比例之影響



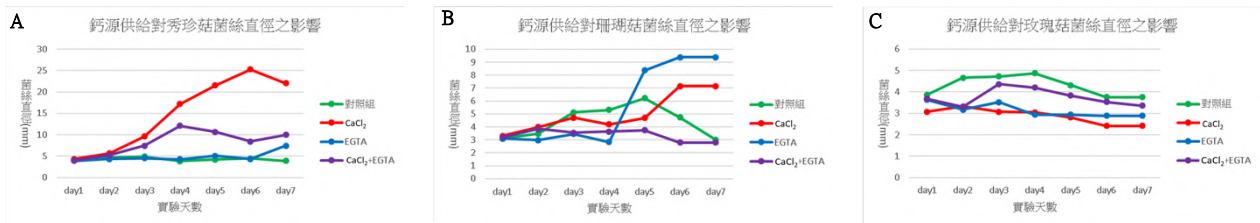
圖二十八 不同電壓下逆境對蕈菇之影響(A)秀珍菇蕈柄(B)珊瑚菇蕈柄(C)玫瑰菇蕈柄(D)秀珍菇蕈傘(E)珊瑚菇蕈傘(F)玫瑰菇蕈傘

註：顯著性標記*= $p < 0.05$ ，**= $p < 0.005$ ，***= $p < 0.001$ 。

比較圖二十八生長比，對於蕈柄來說，秀珍菇土壤酸化施予 1.5V 組之蕈柄長度 > 電弧組($p=0.04$)，玫瑰菇土壤鹼化 1.5V > 對照組($p=0.000$)、及電弧組($p=0.000$)，可看出 1.5V 組可以有效減緩逆境對蕈菇之損害，而這些現象在蕈傘上效果不如蕈柄明顯。

四、延伸實驗

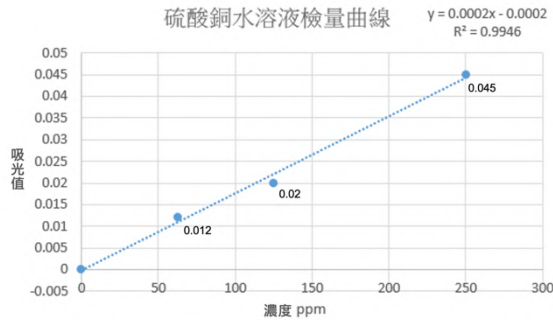
(一) 鈣源供給對菌絲生長之影響



圖二十九 離子添加物影響組織培養之菌絲直徑生長折線圖(mm)(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇

根據圖二十九，三種蕈菇菌絲中，秀珍菇於施予外加鈣源組中有明顯差異，其施予 0.5M 氯化鈣後，菌絲直徑與生長速度皆明顯較對照組佳。相較於秀珍菇，珊瑚菇不論是添加螯合劑或外加鈣離子皆比對照組優勢，而玫瑰菇之四組別其趨勢皆為相同，因此可得知鈣離子僅對部分種類蕈菇菌絲之生長有影響。

(二) 重金屬吸附



圖三十 硫酸銅檢量曲線

表五 蕈菇吸附硫酸銅之吸光值

	秀珍 粉末	珊瑚 粉末	玫瑰 粉末	新鮮 秀珍	新鮮 珊瑚	新鮮 玫瑰
吸 光 值	0.151	0.112	0.049	0.050	0.021	0.053

我們將蕈菇置入含 250 ppm 硫酸銅水溶液中探討蕈菇吸附重金屬效果，從圖三十可知，利用蕈菇粉末與新鮮蕈菇吸附硫酸銅，新鮮子實體之吸光值較粉末低，又以新鮮珊瑚菇最為有效，吸光值在檢量線下方，顯示新鮮珊瑚菇能有效降低銅離子濃度。

陸、實驗討論

一、 探討文獻提及之蕈菇發育所需因子：

- (一) 過往科展作品中可知蕈類有感光系統，光線波長和強度對於蕈菇原基形成與子實體發育有重要關聯(陳柏熙、陳柏詠，2018)，根據實驗結果我們發現半光暗環境可提升蕈類子實體蕈柄及蕈傘的大小，而若要提高菇蕾數量則必須讓太空包置於黑暗環境，完整走菌後得以快速出菇。
- (二) 根據劉陽、趙瑞華、賀曉龍及任桂梅(2016)提到預冷可縮短蕈類出菇時間並增加菇蕾數量。這與我們的實驗結果不謀而合，此外我們發現預冷處理生長之子實體重量低於常溫組，推測是因為菇蕾快速發育為子實體，使得菌絲生長不緊密。
- (三) 分析了光線、溫度及電訊刺激三種變因，發現三者具有中介效果，在黑暗環境加上電訊刺激的情況下對子實體蕈傘的生長最有益。且根據 Siu-Wai Chiu & David Moore(1995)，許多不同而平行的環境因子都可導致相同的結果，它們誘發子實體生長的路徑是相同的，而當同時有複數以上的刺激存在時，誘發子實體成長的門檻可能變低。

二、 蕈菇電訊傳遞與反應

- (一) 古今中外有許多關於菌物與雷電相關的記載，但卻很少談到促使蕈菇快速出菇的機制。我們懷疑這種驚蕈的過程究竟是因聲響刺激抑或雷電激活蕈菇，而蕈菇本身是否會受電訊吸引？在實驗中確實發現蕈菇會對突如其來的聲音有電訊號波動，菌絲

會因聲音而改變波形起伏、振幅變大、電壓升高等現象，而施放的音訊頻率及分貝範圍則影響不大。

- (二) 蕈類在不同的外在環境下會發出不一樣的電訊號(Andrew Adamatzky, 2022)，我們認為蕈類與電的關係是雙向的，蕈類可能會因為接受到電訊而有不同的生長狀況，也因為不同的外在環境與刺激發出電訊號。在文獻中得知許多細胞類型都具有向電性，包括真菌(Robinson, 1985；Gow, 1987)。其中向電性 (galvanotropism) 是指細胞因受施加的電場產生生長方向改變的現象。我們發現在通電的狀態下，菌絲從生長時期到子實體分化時期的時間縮短，且對於部分蕈菇，在 1.5V 電壓下的表現最佳，在長期逆境中以 1.5V 電壓操作，同樣也能促使蕈柄增長。
- (三) 根據文獻推測通電變因導致菌絲尖端質膜中鈣離子的分佈產生變化，使得蕈菇菌絲快速生長後進入子實體階段。另外，在實驗中發現正極針腳容易被菌絲分解，此現象在電訊號的實驗中更為明顯，推測是正極發出的電訊使菌絲往電流方向延伸，同時觀察到正極針腳附近容易生長黴菌，我們判斷也是被電訊吸引導致。
- (四) 前人研究成果提及菌絲細胞趨電的過程需要鈣離子的調節(Onuma and Hui, 1988)，已知某些鈣通道阻滯劑可降低趨電性的程度。對趨電現象的研究已被用於進一步探索菌絲頂端延伸的潛在機制，這些也暗示鈣離子濃度對尖端生長過程很重要。如同本延伸實驗中添加鈣源就能明顯提升秀珍菇菌絲生長，未來可進一步測試通電後的分佈與生長狀況。另雖然三種蕈菇皆為側耳屬，但在電訊與生長狀態的不同，或許可以作為物種鑑定的依據。

三、 逆境與調控

- (一) 因此參考文獻後我們預期在逆境的狀況下，子實體會受刺激加快生活史，從菌絲營養體長成具蕈傘蕈柄之子實體。但根據實驗結果卻發現除澆灌鹼性溶液之組別外，酸液、飽和食鹽水及重金屬皆使發出時間增長近一倍。Umar and Van Griensven (1997)提及高等真菌(如擔子菌)會透過某些菌絲的凋零，使菌絲進行有性生殖，這也應證了我們的逆境實驗組別中，蕈菇菇蕾及子實體個數普遍較低且生長所需的歷程較長的現象。
- (二) Trewavas, A. J., & Baluška, F. (2011)提到代謝造成離子流動並產生電訊，而鹽度對真菌生長和代謝活性的影響較小(Lin, J., Wang, Y., Sun, S., Mu, C., & Yan, X., 2017)，因此不會對電訊的傳輸產生明顯的干擾或影響，這些前人的研究都與我們的電訊結果相符。

四、 未來展望

相對於其他作物在面臨氣候變遷時的逆境與病蟲害，蕈菇為相對穩定的蛋白質糧食來源，延伸實驗中也證實了蕈菇能有效降低銅離子濃度。期望透過我們的基礎研究，達成食用蕈菇產量增加與環境永續利用之目的，以因應氣候變遷下菇類栽培環境的根本對策。

柒、 結論

一、研究各種變因對於各種蕈類生長狀況之影響

(一)提升菇蕾及子實體的個數：黑暗環境、電訊刺激。

(二)提升子實體蕈柄/蕈傘大小：黑暗環境/半光暗環境。

(三)加速菇蕾發育成子實體：事先預冷、電訊刺激。

二、不同電訊號對於各種蕈類生長狀況之影響

(一)不限於子實體，菌絲只要走菌完成便能接收電訊刺激。

(二)電弧對菌絲生長無顯著差異，主要效應在於菌絲體與子實體的轉換。

(三)1.5 V 可有效刺激部分蕈菇子實體生長，其中珊瑚菇的生長差異最為明顯。

三、各種逆境對於各種蕈類生長狀況之影響

(一)菌絲會因突如其來的聲音而改變波形起伏、振幅變大、電壓升高等現象，施放的聲音頻率及分貝範圍則影響不大。

(二)火燒刺激時三種菇種電壓皆升高，秀珍菇與珊瑚菇振幅變大，玫瑰菇振幅變小。

(三)三種菇種澆灌硫酸銅溶液後振幅皆變小，推測硫酸銅會減弱蕈菇的電訊號。

(四)澆灌酸、鹼、鹽液後蕈菇電訊特徵一致，三種菇種的電壓普遍上升。波峰減去波谷後頻繁出現之固定數值為 1221、1526.25 及 915.75 μV ，推測為菌絲受逆境後發出之有意義訊號。

(五)在長期逆境狀態下，1.5 V 能有效促使蕈柄生長。

四、延伸實驗

(一)秀珍菇對鈣離子濃度變化最為敏感。

(二)新鮮珊瑚菇吸附重金屬效果最佳。

捌、參考文獻

一、中文文獻

- 王秉旭(2013)。農業廢棄物再利用-吸附重金屬離子之研究。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會。
- 王奕勳(2019)。心花怒 Fun—植物有感?! 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會。
- 吳芯妍、金湘雲(2014)。菇 Go! 非「光」不可。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會。
- 李欣樺、洪進雄、薛智升、甘祥佑、謝易薨(2008)。低溫及 LED 光質處理對阿魏菇原基誘導之影響, *Fung. Sci.*23(1-4):p1-10。
- 陳柏熙、陳柏詠(2018)。菇 GO! 背地一「站」。中華民國第 58 屆中小學科學展覽會。
- 陳彥勳、蔡長祐(2021)。通風報「葷」, 「畸」不可失—發展食用菇類之形態變異栽培技術。中華民國第 61 屆中小學科學展覽會。
- 蕭佑安、賴禹圳、黃浩軒(2019)。「含流睿智」植物也會算數?~探討含羞草觸發運動其訊息傳遞的奧秘。中華民國第 59 屆中小學科學展覽會。
- 簡毓達、林佩霖、黃涵唯(2015)。低溫冷藏處理對菇類子實體生長發育的影響。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。

二、英文文獻

- Alscher, R. G., Donahue, J. L., & Cramer, C. L. (1997). Reactive oxygen species and antioxidants: relationships in green cells. *Physiologia Plantarum*, 100 (2), 224-233.
- Andrew Adamatzky(2022). Language of fungi derived from their electrical spiking activity. *The Royal Society*, 9 (4).
- Bedlack Jr, R. S., & Loew, L. M. (1992). Localized membrane depolarizations and localized calcium influx during electric field-guided neurite growth. *Neuron*, 9(3), 393-403.
- Bose, J. C. (1926). The nervous mechanism of plants. *Bible Study Fellowship*.
- Chiu, S. W., & Moore, D. (1990). Sporulation in *Coprinus cinereus*: use of an in vitro assay to establish the major landmarks in differentiation. *Mycological Research*, 94 (2), 249-253.
- Ferguson, I. B., & Drøbak, B. K. (1988). Calcium and the regulation of plant growth and senescence. *HortScience*, 23(2), 262-266.
- Gow, N. A. R., & Morris, B. M. (1995). The electric fungus. *Botanical Journal of Scotland*, 47 (2), 263-277.
- J. A. Casaretto and N. Oraguzie(2012). The Response of Fruit Body Formation on *Tricholoma matsutake* In Situ Condition by Applying Electric Pulse Stimulator. *ISRN Agronomy*, 2012
- Lin, J., Wang, Y., Sun, S., Mu, C., & Yan, X. (2017). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, photosynthesis and photosynthetic pigments of *Leymus chinensis* seedlings under salt-alkali stress and nitrogen deposition. *Science of the Total Environment*, 576, 234-241.
- Malone, M., Alarcon, J. J., & Palumbo, L. (1994). An hydraulic interpretation of rapid, long-distance wound signalling in the tomato. *Planta*, 193 (2), 181-185.
- Merlin Sheldrake (2020). Entangled Life: How Fungi Make Our Worlds, Change Our Minds & Shape Our Futures. *Random House*.
- Onuma, E. K., & Hui, S. W. (1988). Electric field-directed cell shape changes, displacement, and cytoskeletal reorganization are calcium dependent. *The Journal of cell biology*, 106 (6), 2067-2075.
- Robinson K. (1985). The response of cells to electric fields: a review. *J Cell Biol* 101:2023–2027.
- Siu-Wai Chiu & David Moore(1995). Deciphering Fungal Morphogenesis.
- Trewavas, A. J., & Baluška, F. (2011). The ubiquity of consciousness: The ubiquity of consciousness, cognition and intelligence in life. *EMBO reports*, 12(12), 1221-1225.
- Umar and Van Griensven(1997). Morphogenetic cell death in developing primordia of *Agaricus bisporus*. *Taylor & Francis*, 89 (2).

【評語】 030312

優點：

本研究以探討蕈菇類是否具有電訊號之溝通能力為題，深具吸引力。探討電訊對秀珍菇、珊瑚菇和玫瑰菇之間的影響，以及在遭遇逆境時電訊的現象。實驗架構和邏輯清楚，有助於讀者理解研究的設計和結果。透過電訊刺激的方式使蕈類的生長發生變化，有可能提高蕈菇的產量和品質。

建議及檢討：

1. 此研究對蕈菇生長和電訊號的關係已有發現，後續仍然需要更多試驗來驗證和深入探討這些現象的機制和意義。但在研究各因子與蕈菇的生長關係時，實驗結果都只有淺談而無較深入的論述或延伸實驗探討，以至於整篇報告的完整性稍嫌不足
2. 多種逆境實驗變因的選擇應說明理由。由於這些食用菇都是人工培養的經濟作物，很難想像會有火燒、剪刺和醋酸、碳酸氫鈉及硫酸銅液澆灌的遭遇。可以在研究動機的部分更清楚地說明這個研究對於環境永續議題的價值和應用。

3. 蕈菇類所展現的電生理訊號非常的新穎，但在設計生物電生理相關實驗時必須考慮人為震動對所獲取訊號之影響，例如剪切動作會引起大震幅偽訊號的產生。建議可針對「蕈類與電訊號的關係是雙向」為主題進行實驗設計加以證實。

作品海報

摘要

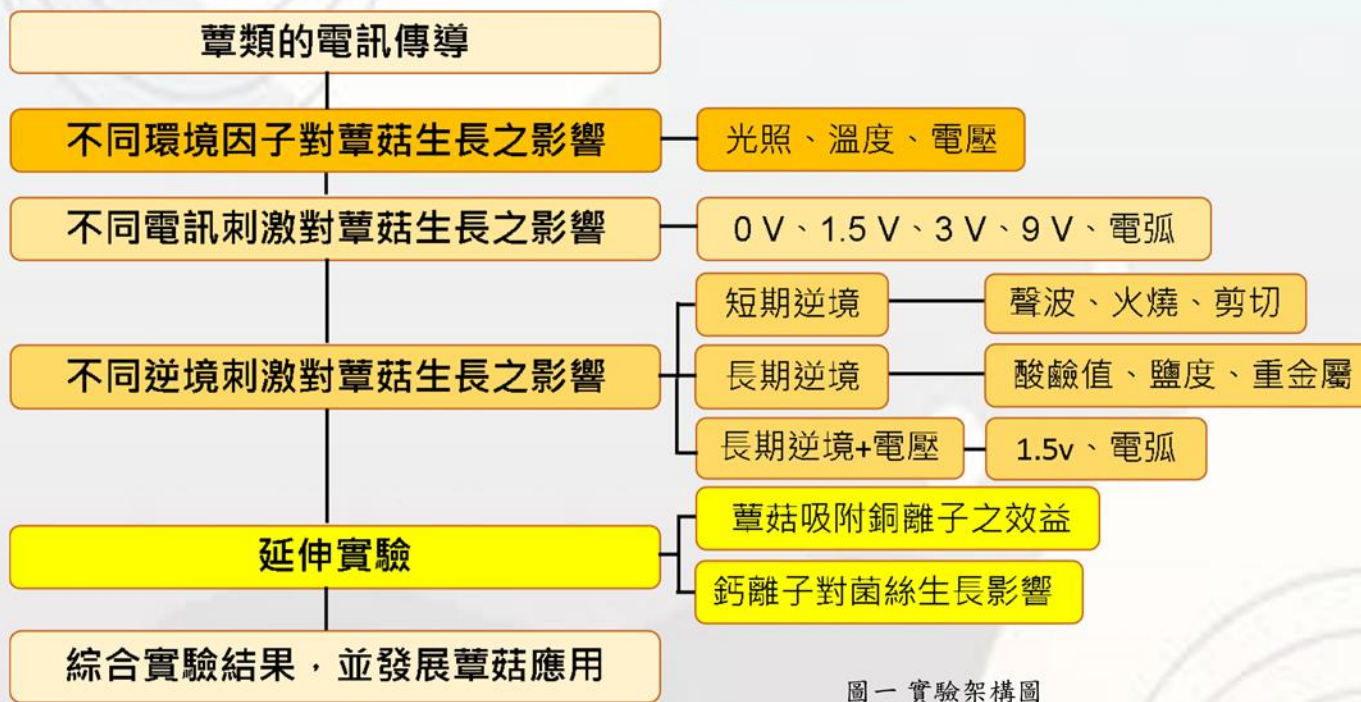


本研究旨在探討電訊對於秀珍菇(*Pleurotus ostreatus*)、珊瑚菇(*Pleurotus citrinopileatus*)、玫瑰菇(*Pleurotus djamor*)之間的影響和遭遇逆境時產生電訊號的現象。研究發現：(1)提升菇蕾及子實體的個數—黑暗、電訊；提升子實體菌柄/菌傘大小—黑暗/半光暗；加速菇蕾發育成子實體—預冷、電訊。(2)電訊刺激能加速菌菇完成生活史，且對於部分菌菇而言，促菇蕾發育成子實體最佳電壓為1.5V。(3)電弧主要效應在菌絲與子實體的轉換。(4)菌絲會因突如其來之巨響而改變波形，澆灌酸、鹼、鹽液後電壓大多上升，頻繁出現之固定數值為1221、1526及915 μV ，推測為菌絲受逆境時發出之有意義訊號。(5)1.5V有利於減緩逆境對於子實體菌柄的損害。(6)外加鈣源有利於秀珍菇菌絲生長。(7)新鮮珊瑚菇能有效吸附銅離子。

壹、研究動機

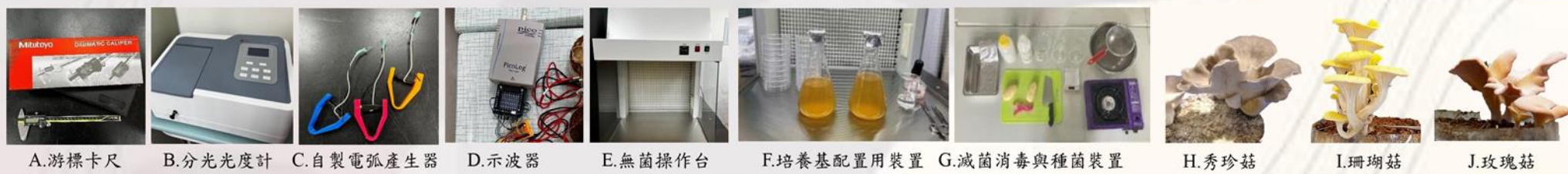
在查向性相關資料時，得知植物與菌類屬於不同界的生物，卻有類似於植物的受器(吳芯妍與金湘雲，2014)，另有研究說明菌類會發出電訊號進行溝通。電是一種外在的刺激，且菌類本身已有發出電訊號的行為，那是否可用電刺激菌類的受器，使其作出對應反應？我們相信菌類與電存在著某些特別的關係，故本研究企圖使用電訊刺激的方式使菌類的生長發生變化，並加以運用於農業上。

貳、研究目的



圖一 實驗架構圖

參、研究器材與設備



肆、研究過程及方法



一、各種變因對於不同菌類生長狀況之影響

環境因子	光照	預冷	電訊
操作變因	光照(420 lux)、黑暗、光暗交替	常溫、4°C預冷	無電訊、3V通電
控制變因	常溫、無電訊	光暗交替、無電訊	光暗交替、無預冷
應變變因	菌菇個數、菌柄長度、菌傘直徑		



三、不同逆境對於不同菌類生長狀況與發出電訊之影響

環境因子	音訊	火燒	剪切	酸性基質	鹼性基質	鹽化基質	重金屬基質
操作變因	無音訊、播放音訊	常溫、火燒	無剪切、剪切邊緣	蒸餾水、pH5醋酸	蒸餾水、pH9碳酸氫鈉	蒸餾水、飽和食鹽水	蒸餾水、0.5M硫酸銅
控制變因	光照(420 lux)、常溫			光暗交替、常溫			
應變變因	電訊號			菌菇個數、菌柄長度、菌傘直徑、電訊號			



二、不同電壓刺激不同菌類生長狀況與發出電訊之影響

環境因子	電弧	電壓
操作變因	無電訊、電弧	0V、1.5V、3V、9V、電弧
控制變因	光暗交替、常溫	
應變變因	菌絲直徑	菌菇個數、菌柄長度、菌傘直徑、電訊號



四、延伸實驗

外源種類	鈣離子	硫酸銅
操作變因	無添加、EGTA、CaCl ₂ 、EGTA+CaCl ₂	新鮮、粉末(子實體)
控制變因	光暗交替、常溫	
應變變因	菌絲直徑	添加250ppm硫酸銅溶液吸光度

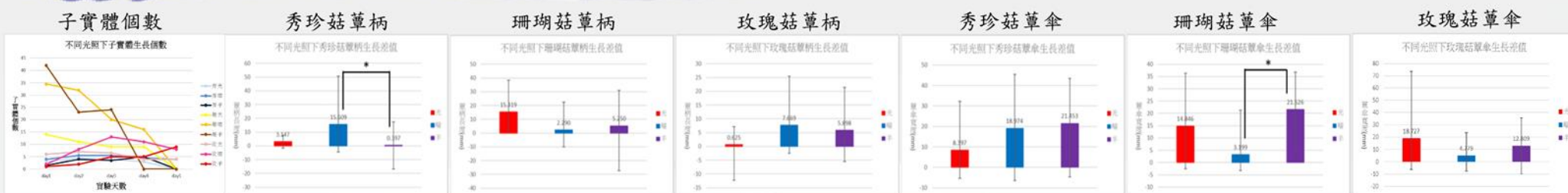


伍、實驗結果



一、各種變因對於各種菌類生長狀況之影響

不同光照程度對於不同菌類生長狀況之影響

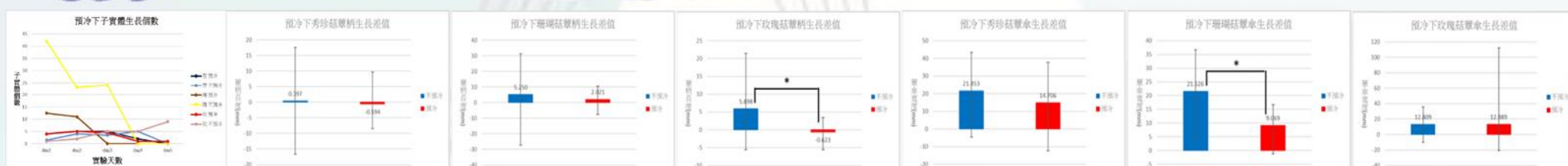


圖三 不同光照下子實體生長個數 圖四 不同光照影響子實體菌傘菌柄生長情形 註：顯著性標記* $p<0.05$ ，** $p<0.005$ ，*** $p<0.001$ 。

黑暗對秀珍菇和珊瑚菇子實體個數最有益。對秀珍菇菌柄有益處的生長環境是黑暗環境(菌柄 $p=0.031$)，對秀珍菇和珊瑚菇菌傘有益處的生長環境是半光暗環境(珊瑚菇菌傘 $p=0.005$)。任何光線對玫瑰菇的菌柄和菌傘成長皆無顯著影響。

過往科展作品中可知菌類有感光系統，光線波長和強度對於菌菇原基形成與子實體發育有重要關聯(陳柏熙、陳柏詠，2018)

預冷下菇蕾出菇及子實體生長情形

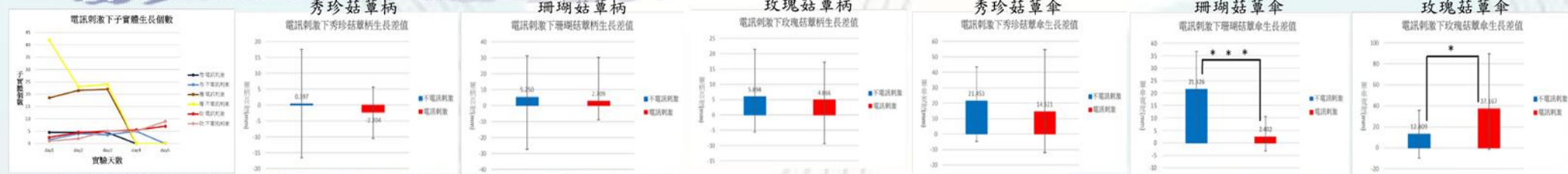


圖五 預冷下子實體生長個數 圖六 預冷影響子實體菌傘菌柄生長情形 註：顯著性標記* $p<0.05$ ，** $p<0.005$ ，*** $p<0.001$ 。

預冷雖然幫助菌類菇蕾發育，但普遍不利於菌柄及菌傘生長，(珊瑚菇菌傘 $p=0.029$ 、玫瑰菇菌柄 $p=0.038$)且會使其加速枯萎。

劉陽、趙瑞華、賀曉龍及任桂梅(2016)提到預冷可縮短出菇時間並增加菇蕾數量。

電訊對於不同蕈種生長狀況之影響



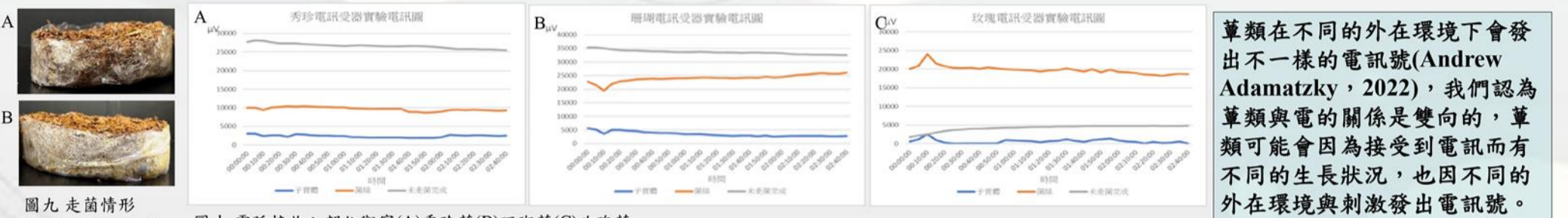
圖七 電訊刺激下子實體生長個數 圖八 電訊刺激影響子實體蕈傘蕈柄生長情形 註：顯著性標記 * $p < 0.05$, ** $p < 0.005$, *** $p < 0.001$ 。

我們得知電訊刺激能提高秀珍菇與珊瑚菇的菇蕾生長數目，玫瑰菇菇蕾快速成長為子實體。珊瑚菇蕈傘在電訊刺激狀況下顯著低於無電訊刺激，而玫瑰菇則是相反。

分析了光線、溫度及電訊刺激三種變因，發現三者具有中介效果，在黑暗環境加上電訊刺激的情況下對子實體蕈傘的生長最有益。且根據Siu-Wai Chiu & David Moore(1995)，許多不同而平行的環境因子都可導致相同的結果。

二、不同電訊號對於蕈類生長狀況之影響

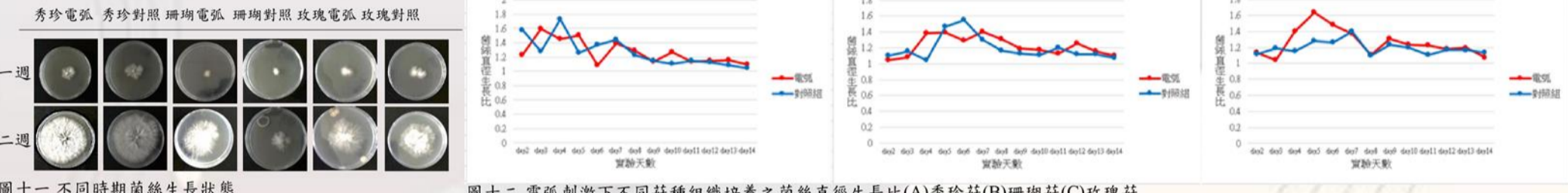
探討接受電刺激之受器部位



圖九 走菌情形 (A)未走菌(B)走菌 圖十 電弧接收之部位觀察(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇

一般我們認為能夠接受電訊刺激的受器位於子實體，但在實驗中發現菌絲也能作為電刺激的受器，也就是說只要走菌完成便能接收到電訊刺激。走菌完成之基質在環境變化時能產生電訊號波動，而未走菌完成的基質則無法感測電訊並做出反應。另外，秀珍和珊瑚菇感受到電弧刺激後的電訊圖產生向下的波形，而玫瑰菇則是向上。三者相比，秀珍菇對於電弧刺激產生的反應波動較小。

電弧刺激對於菌絲之影響

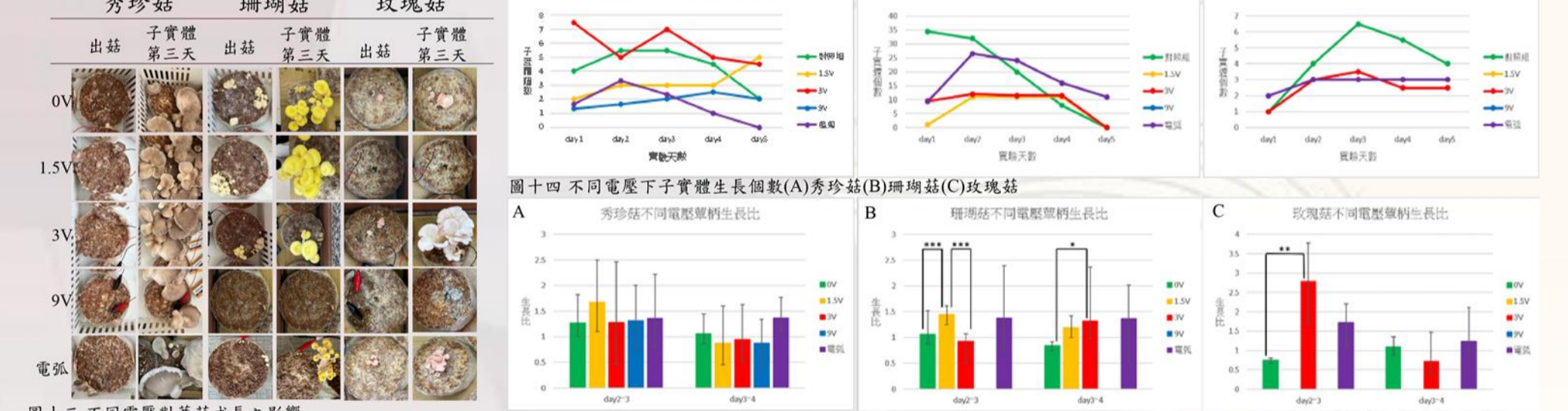


圖十一 不同時期菌絲生長狀態 圖十二 電弧刺激下不同菇種組織培養之菌絲直徑生長比(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇

秀珍菇與珊瑚菇對照組於第三、四天大幅成長，其菌絲直徑於第八天前較電弧刺激長，第八天後則是生長緩慢。有別於對照組，電弧刺激組菌絲直徑於第八天後仍然有上升的趨勢，因此可得知電弧刺激相較於對照組菌絲尖端持續生長時間較久。

前人研究成果提及菌絲細胞趨電的過程需要鈣離子的調節 (Onuma and Hui, 1988)。對趨電現象的研究已被用於進一步探索菌絲頂端延伸的潛在機制，這些也暗示鈣離子濃度對尖端生長過程很重要。

不同電壓對蕈菇成長之影響



圖十三 不同電壓對蕈菇成長之影響 註：電弧所指為在短時間利用自製電弧裝置釋放高電壓低電流之電訊刺激。

對於部分蕈菇而言，對於子實體的最佳電壓為1.5V，且可知電弧刺激可加速蕈菇發育成子實體對秀珍菇生長助益最大的電壓是1.5V，對珊瑚菇生長助益最大的電壓也是1.5V，9V則未有蕈菇產生，而對玫瑰菇而言最佳電壓為3V。電弧能加快蕈菇的生長週期，且未施予電壓之成長比率則普遍低於通電組。

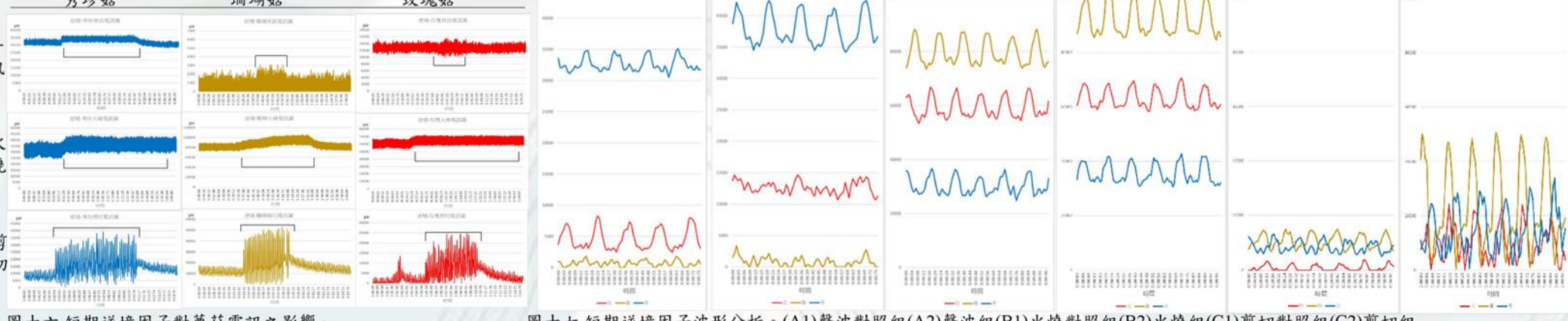
圖十四 不同電壓下子實體生長個數(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇

圖十五 不同電壓對蕈菇成長之影響(A)秀珍菇蕈柄(B)珊瑚菇蕈柄(C)玫瑰菇蕈柄(D)秀珍菇蕈傘(E)珊瑚菇蕈傘(F)玫瑰菇蕈傘 註：顯著性標記 * $p < 0.05$, ** $p < 0.005$, *** $p < 0.001$ 。

我們在實驗中發現正極針腳容易斷裂、被分解，此現象在電訊號的實驗中更為明顯，推測是正極發出的電訊使菌絲以為是待分解的養分，進而分解了正極的針腳，並且正極針腳附近容易生長黴菌，推測也是被電訊吸引導致。

三、各種逆境對於蕈類生長狀況之影響

短期逆境

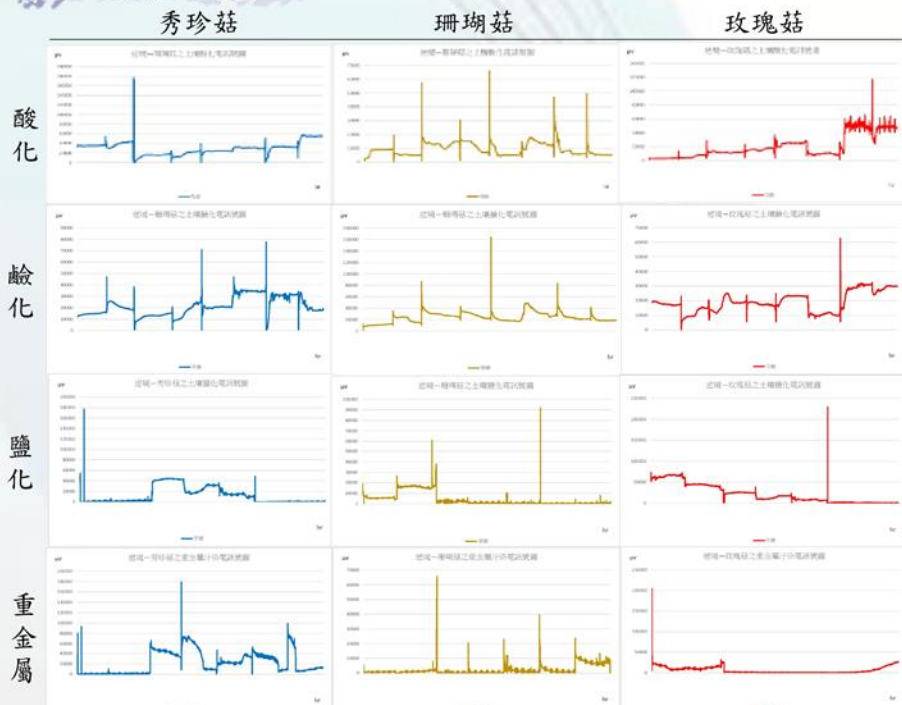


圖十六 短期逆境因子對蕈菇電訊之影響。 圖十七 短期逆境因子波形分析。(A1)聲波對照組(A2)聲波組(B1)火燒對照組(B2)火燒組(C1)剪切對照組(C2)剪切組

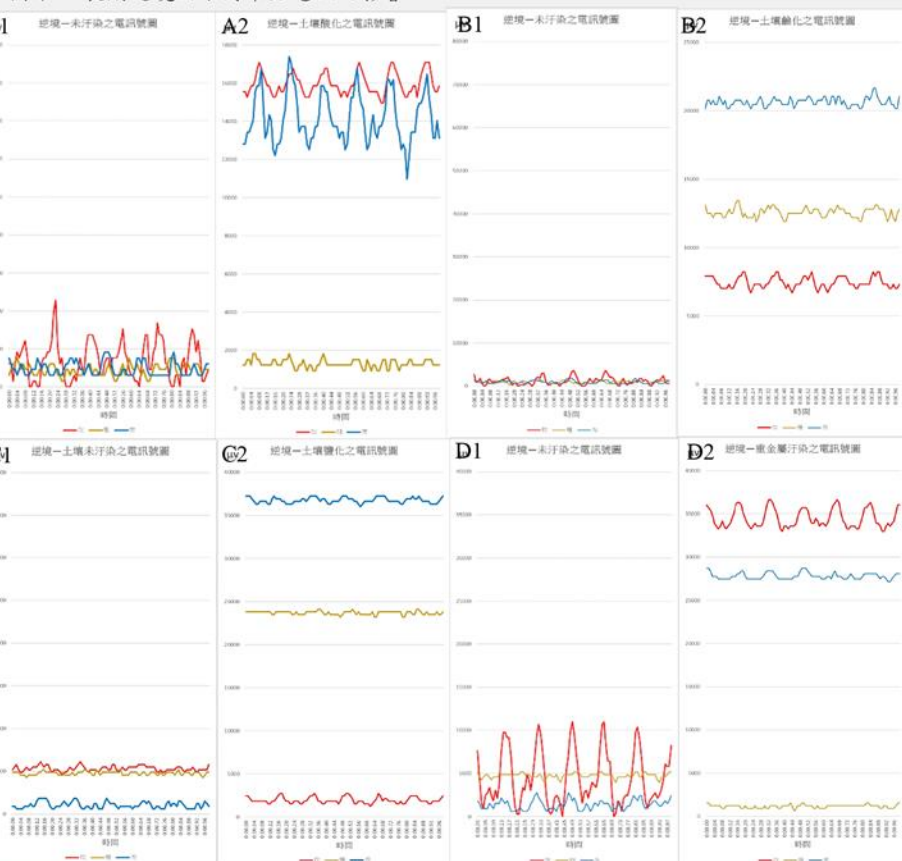
由於長期記錄的電訊圖中出現週期性高峰，我們推測為靠近活動時造成蕈菇的電訊反應，因而實驗光線和音訊對電訊之影響發現，蕈菇能感測環境中的聲音，且頻率的差異不造成影響。剪切實驗對蕈傘邊緣剪切一分公分並偵測其電訊號，發現子實體及土壤菌絲發出之電訊反應一致。剪切後，電訊電壓皆上升，且振幅反應強度較其他變因強。

我們發現不同個體但同種菇種的電訊號波形相同，得知不同菇種對於環境因子的感測是穩定的，從此也能證明我們測到的電訊號不是背景值。

長期逆境



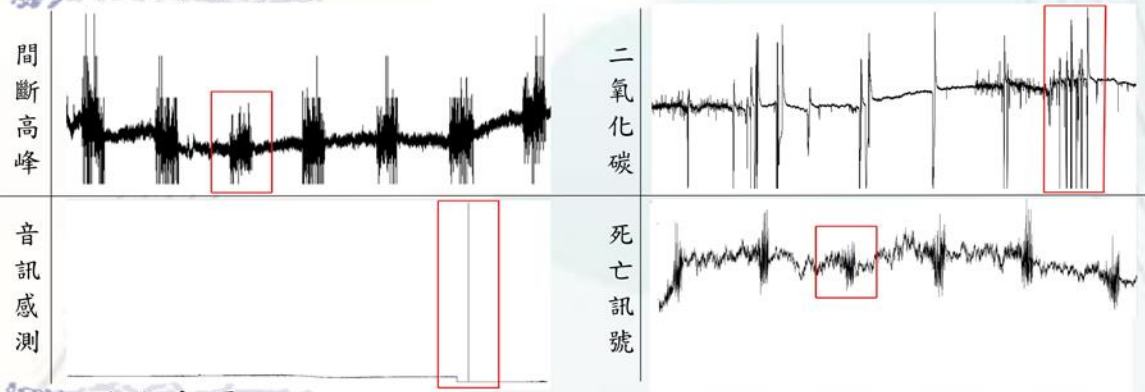
圖十八 長期逆境因子對菌菇電訊之影響。



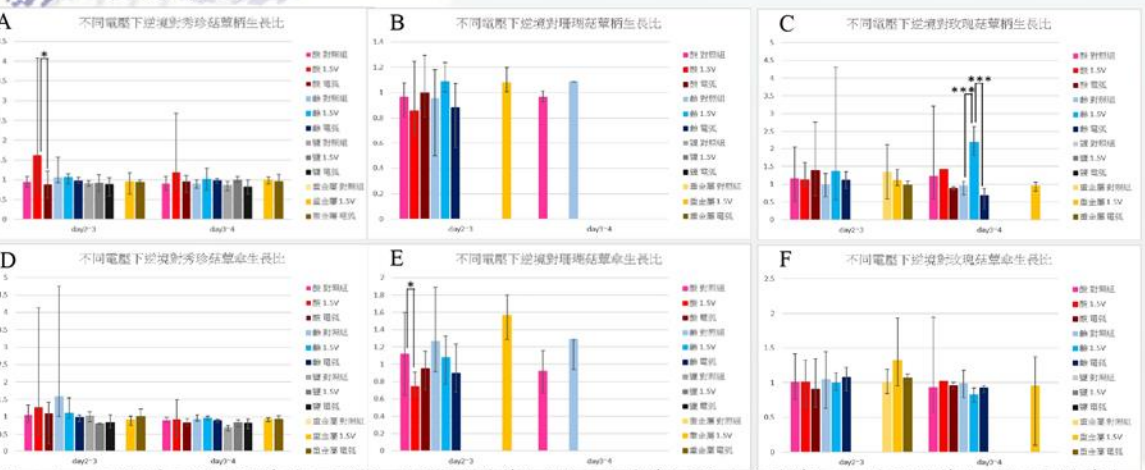
圖十九 長期逆境因子波形分析。(A1)酸化對照組(A2)酸化組(B1)鹼化對照組(B2)鹼化組(C1)鹽化對照組(C2)鹽化組(D1)重金屬對照組(D2)重金屬組

長期逆境實驗中，澆灌後電訊電壓均上升，由波峰和波谷不一樣，振幅卻相同的情況可見菌菇的電訊號有一定的規律性。經實驗結果發現，土壤鹽化前後三種菇種電訊振幅均為特定數值，且前後振幅不變，可見電訊號不受土壤鹽化影響。土壤重金屬污染後，三種菇種電訊振幅強度弱化，推測菌絲經硫酸銅水溶液浸泡後可能抑制鈣離子流動，導致電訊號反應減弱。

電訊事件分析



逆境與電訊



圖二十 不同電壓下逆境對菌菇之影響。(A)秀珍菇菌柄(B)珊瑚菇菌柄(C)玫瑰菇菌柄(D)秀珍菇菌傘(E)珊瑚菇菌傘(F)玫瑰菇菌傘

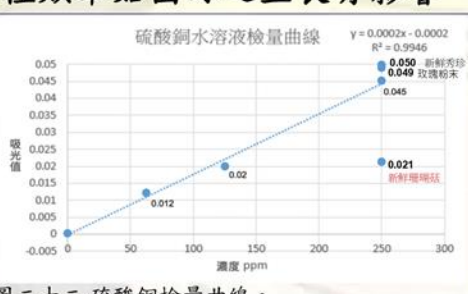
比較圖二十生長比，對於菌柄來說，秀珍菇土壤酸化施予 1.5V 組之菌柄長度 > 電弧組 ($p=0.04$)，玫瑰菇土壤鹼化 1.5V > 對照組 ($p=0.000$)、及電弧組 ($p=0.000$)，可看出 1.5V 組可以有效減緩逆境對菌菇之損害，而這些現象在菌傘上效果不如菌柄明顯。

延伸實驗



圖二十一 離子添加物影響組織培養之菌絲直徑生長折線圖(mm)。(A)秀珍菇(B)珊瑚菇(C)玫瑰菇

根據圖二十一，三種菌絲中，秀珍菇於施予外加鈣源組中有明顯差異，其施予 0.5M 氯化鈣後，菌絲直徑與生長速度皆明顯較對照組佳。相較於秀珍菇，珊瑚菇不論是添加螯合劑或外加鈣離子皆比對照組優勢，而玫瑰菇之四組別其趨勢皆為相同，因此可得知鈣離子僅對部分種類菌絲之生長有影響。



圖二十二 硫酸銅檢量曲線。

從圖二十二可知，利用菌菇粉末與新鮮菌菇吸附硫酸銅，新鮮子實體之吸光值較粉末低，又以新鮮珊瑚菇最為有效，吸光值在檢量線下方，顯示新鮮珊瑚菇能有效降低銅離子濃度。

伍、實驗討論

電弧刺激出菇

古人利用雷震和巨大聲響誘使菌菇出菇。但本次實驗中電弧的刺激並無對菌類生長有明顯的差異，推估是因為所使用之電弧產生器雖電壓大，但產生的電弧其電流極小，無法促使其菌蕾與子實體數量成長。

中介變因

分析光線、溫度及電訊刺激三種變因，發現三者有中介效果，在半光暗環境加上電訊刺激的情況下對子實體菌傘的生長最有益。根據 Siu-Wai Chiu & David Moore (2003)，許多不同而平行的環境因子都可導致相同的結果，它們誘發子實體生長的路徑是相同的，而當同時有複數以上的刺激存在時，誘發子實體成長的門檻可能變低。



向電性與機制

菌絲細胞趨電的過程需要鈣離子的調節 (Onuma and Hui, 1988)，已知某些鈣通道阻滯劑可降低趨電性的程度。我們發現在通電的狀態下，菌絲從生長時期到子實體分化時期的時間縮短，在實驗中尤以 1.5V 電壓下有最好的表現，顯示通電導致菌絲尖端質膜中鈣離子的分佈產生變化，使得菌絲快速生長後進入子實體階段。

電訊號討論

Trewavas, A. J., & Baluška, F. (2011) 提到代謝造成離子流動並產生電訊，而鹽度對真菌生長和代謝活性的影響較小 (Lin, J., Wang, Y., Sun, S., Mu, C., & Yan, X., 2017)，因此不會對電訊的傳輸產生明顯的干擾或影響。這些前人的研究都與我們的電訊結果相符。

逆境下的生長

因此參考文獻後我們預期在逆境的狀況下，子實體會受刺激加快生活史，從菌絲營養體長成具菌傘菌柄之子實體。但根據實驗結果卻發現除澆灌鹼性溶液之組別外，酸液、飽和食鹽水及重金屬皆使發出時間增長近一倍。Umar and Van Griensven (1997) 提及高等真菌(如擔子菌)會透過某些菌絲的凋零，使菌絲進行有性生殖，這也應證了我們的逆境實驗組別中，菌菇菌蕾及子實體個數普遍較低且生長所需的歷程較長的現象。

未來展望

相對於其他作物在面臨氣候變遷時的逆境與病蟲害，菌菇為相對穩定的蛋白質糧食來源，延伸實驗中也證實了菌菇能有效降低銅離子濃度。期望透過我們的基礎研究，達成食用菌菇產量增加與永續生產之目的，以因應氣候變遷下菇類栽培環境的根本對策。

陸、實驗結論

- 研究各種變因對於各種菌類生長狀況之影響
 - 提升菌蕾及子實體的個數：黑暗環境、電訊刺激；提升子實體菌柄/菌傘大小：黑暗/半光暗環境；加速菌蕾發育子實體：事先預冷、電訊刺激
- 不同電訊號對於各種菌類生長狀況之影響
 - (一) 不限於子實體，菌絲只要走菌完成便能接收電訊刺激。
 - (二) 電弧對菌絲生長無顯著差異，主要效應在於菌絲體與子實體的轉換。
 - (三) 整體而言，最能促使菌菇發育之電壓為 1.5V，其中珊瑚菇的生長差異最為明顯。
- 各種逆境對於各種菌類生長狀況之影響
 - (一) 菌絲會因突如其來的聲音而改變波形起伏、振幅變大、電壓升高等現象，施放的聲音頻率及分貝範圍則影響不大。
 - (二) 除澆灌鹼性溶液之組別外，酸液、飽和食鹽水及重金屬皆無法造成有效出菇。
 - (三) 澆灌飽和食鹽水組別需三週才能順利發菇，三種菇種土壤鹽化前後的電訊振幅不變且為固定數值，推測鹽水澆灌不對菌菇電訊造成影響。
 - (四) 三種菇種澆灌硫酸銅溶液後振幅皆變小，推測硫酸銅會減弱菌菇的電訊號。
 - (五) 澆灌酸、鹼、鹽液後電訊號電壓皆上升。電訊振幅頻繁出現之固定數值為 1221、915.75 及 1526.25 μV ，推測為菌絲發出之有意義訊號。
 - (六) 在長期逆境狀態下，1.5V 能有效促使菌柄生長。
- 延伸實驗
 - (一) 秀珍菇對鈣離子濃度變化最為敏感
 - (二) 新鮮珊瑚菇對重金屬的吸附力最佳

柒、參考文獻

- 吳志妍、金湘雲(2014)。菇Go! 非「光」不可。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會。
- Andrew Adamatzky(2022)。Language of fungi derived from their electrical spiking activity. The Royal Society, 9 (4).
- Gow, N. A. R., & Morris, B. M. (1995)。The electric fungus. Botanical Journal of Scotland, 47 (2), 263-277.
- Robinson K. (1985)。The response of cells to electric fields: a review. J Cell Biol 101:2023-2027.
- Bedlack Jr, R. S., & Loew, L. M. (1992)。Localized membrane depolarizations and localized calcium influx during electric field-guided neurite growth. Neuron, 9(3), 393-403.

