

屏東縣第 66 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別： 生活與應用科學科(三)

組 別： 國中組

作品名稱： 落葉堆肥效果探討－酵素與蚯蚓土之應用比較

關 鍵 詞： 落葉堆肥、鳳梨酵素、蚯蚓土

編 號： B8005

摘要:

本研究在解決校園落葉堆積與廢棄物處理問題，探討鳳梨酵素與蚯蚓土對落葉堆肥腐化速率及肥效之影響。實驗設置四組處理：對照組（A）、酵素組（B）、蚯蚓土組（C）及酵素加蚯蚓土混合組（D）。經 65 天監測發現，D 組在初期利用酵素加速纖維分解，中後期藉由蚯蚓土微生物優勢，質量損失率達 98%，顯著高於對照組的 83%。在堆肥肥效驗證上，D 組堆肥種植之空心菜平均株高達 5.02cm，優於原土組的 2.92cm 及其他處理組。證實酵素與蚯蚓土具有顯著的協同加成效果，有效縮短堆肥時程，為校園資源循環提供一可行模式。

壹、前言

一、研究動機

校園內秋冬季節常見欖仁樹等植物大量落葉，形成顯著的有機廢棄物壓力。傳統的自然堆肥法雖符合生態原則，但分解速率極為緩慢，且在腐化過程中易產生異味與空間堆積問題，最終校方往往需委外清運，不僅增加經費負擔，更產生額外的碳排放。此外，校園日常維護產生的青草渣及辦公室廢紙，亦缺乏有效的資源循環路徑，而綠植槽土壤長期貧瘠，限制了植栽生長的生理表現。

本研究從國中自然科學概念出發，試圖透過科學實驗解決上述困境：酵素催化原理（七上生物）：應用鳳梨皮等農業廢棄物自製鳳梨酵素，利用生物催化劑降低反應活化能的特性，探討其是否能加速落葉纖維的降解速率。分解者與物質循環（七上生物）：引入富含微生物菌群與有機質的蚯蚓土，模擬生態系中分解者的角色，優化堆肥的腐熟品質。反應速率與變因控制（八下理化）：監測溫度、pH 值及電導率（EC 值），分析不同添加物對有機物分解速率的影響，驗證化學變化與養分釋放的關聯性。

基於環境永續（SDGs）與循環經濟理念，本研究嘗試開發「鳳梨酵素」與「蚯蚓土」的複合應用模式。我們期望找出兩者在堆肥過程中的協同加成效應，建立一套低成本、高效率且適合校園操作的標準作業流程（SOP），達成減廢與土壤改良之雙重目標。

			
校園欖仁樹大量落葉	飼養蚯蚓土進行實驗用材料	學校大量青草屑	家鄉大量的鳳梨田

圖一研究動機說明圖

二、研究目的

- (一)比較自然堆肥、添加酵素、添加蚯蚓土及混合處理對落葉分解速率之差異。
- (二)探討鳳梨酵素與蚯蚓土在堆肥過程中是否具有協同加成效應。
- (三)分析不同處理組之堆肥成品對植物（空心菜）發芽率與生長勢之影響。
- (四)建立一套低成本、高效率且適合校園操作的落葉堆肥標準流程。

貳、研究設備與材料

一、實驗材料

表一實驗材料說明表

材料名稱	用途說明	使用量或規格	備註
落葉（單一樹種）	堆肥主體，高碳有機物來源	每組約 10 g × 12 包	風乾
碎紙機碎紙	補最佳碳氮比的比例	每組 55 g	所有組共通
青草渣（新割草）	高氮物質，促進分解	每組 200 g × 12 包	新鮮狀態下使用
土壤	對照組用作微生物來源與保濕介質	每組 300 g	A、B 組使用
蚯蚓土	富含微生物與有機質的天然肥源	每組 300 g	C、D 組使用
鳳梨酵素液	加速落葉分解之酵素來源	B、D 組噴灑約 50 mL	D 需稀釋約 1:10

水	維持堆體濕度（約 60%）	每組約 250(BD)、500(AC)mL	所有組共通
紙箱容器 （15×15×20 cm）	堆肥容器	12 個（4 組 × 3 重複）	再利用廢紙箱製作
標籤與記錄貼紙	區分組別與記錄日期	若干	A1~D3 分組標示
空心菜種子	肥效測試發芽實驗	每組 25 粒	作為腐熟度驗證

二、實驗設備與工具

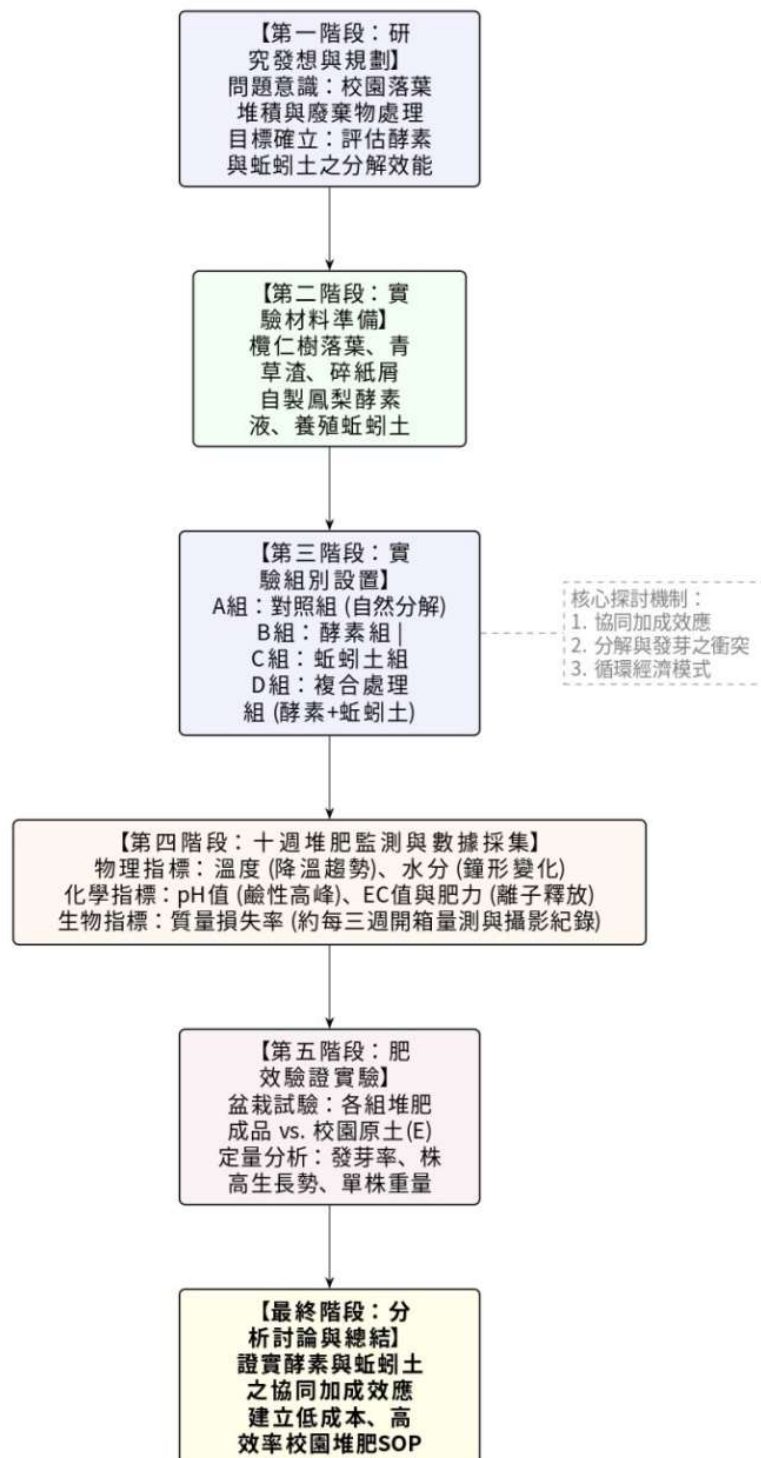
表二實驗設備說明表

設備名稱	用途	規格	實體照
電子天平	測量乾重、質量損失率	精度 0.01g	
烘箱（或日曬）	乾燥樣本以取得乾重	約 60°C 或日曬 2 - 3 日	
土壤溫度計	監測堆體中心溫度變化	可插入式	
土壤檢測儀	溫度、水分、電導率、酸鹼度、氮、磷、鉀、肥力	讓土壤資料數據化	
量杯與量筒	精確量取水分與酵素液	50 - 500 mL	
手套與口罩	實驗防護與衛生		
筆記本與紀錄表	紀錄數據與觀察結果	自製表格	
發芽試驗用培養皿或小花盆	發芽測試	每組一份，加對照組，共五組	

叁、研究過程與方法

一、研究流程圖

本研究針對落葉堆肥之腐熟速率與肥效驗證，規劃整體實驗流程如圖二 所示：



圖二 研究流程圖

二、準備實驗器材及設置

(一)實驗地點選擇

- 1.實驗設置於校園內一棵大樹下方，該地點樹蔭充足、通風良好、可避免強光直射與雨淋。
- 2.地面以木枝圍出固定區域，模擬自然堆肥環境，讓堆肥過程接近真實落葉分解情境。
- 3.所有實驗紙箱置於相同區域中，以確保環境溫度與濕度一致。

			
決定實驗場地 114/10/2	布置實驗場地 114/10/2	實驗中 114/10/16	覆蓋防雨 114/10/16

圖三實驗場地設置說明圖

(二)材料與容器準備

- 1.收集校園內相同樹種的乾落葉，清除雜質後剪碎；青草渣則取自操場割草後的新鮮草。
- 2.取用校園有機蚯蚓土與一般園土作為不同處理基質。
- 3.鳳梨酵素液由鳳梨皮、甘蔗渣與水依比例 3:1:10 調製，發酵三週後過濾使用。
- 4.使用廢紙箱摺成約 15 × 15 × 20 公分 容器（容量約 4.5 L），底部開小孔利於排氣，外貼標籤（A1~D3）以區分組別。

			
自己製作鳳梨酵素，放置 2 個月	操場割草後的新鮮草	碎紙機的廢碎紙	落葉-校園大量欖仁樹葉

圖四實驗材料準備說明圖

(三)設置方式

- 1.紙箱容器整齊擺放於樹下的圍框區域，底部墊防水布防潮。

- 2.完成後以防水布全面覆蓋，保持整體堆肥區的溫度與濕度一致，可促進微生物活性反應。
- 3.每週揭開布面檢查，測量溫度、pH 與濕度後再覆蓋回去。

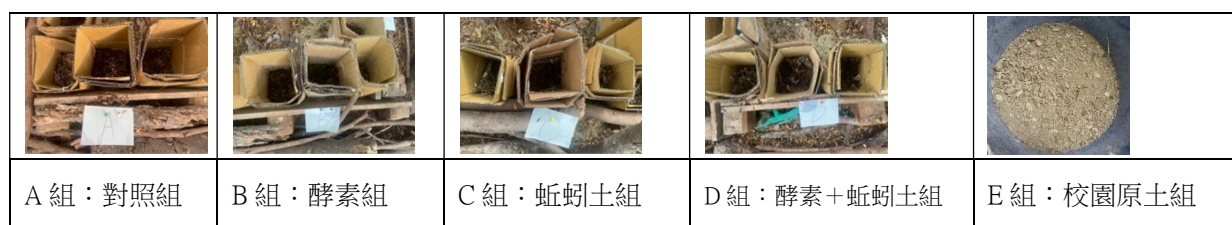
(四)維護與觀察

- 1.每兩週翻動堆體一次，保持通氣。
- 2.測量堆體中心溫度（℃）與 pH 值，拍照記錄顏色、質地變化。
- 3.定期取樣稱重，計算樹葉損失率。
- 4.記錄外觀變化，確保每組水分含量相近。

三、實驗設計

表三 實驗組別說明表

組別	處理方式	組成內容	功能說明
A 組：對照組	自然分解	落葉 + 青草 + 土壤 + 水	模擬自然堆肥分解
B 組：酵素組	酵素處理	落葉 + 青草 + 土壤 + 酵素液 + 水	測試酵素促進初期分解
C 組：蚯蚓土組	蚯蚓土處理	落葉 + 青草 + 蚯蚓土 + 水	評估蚯蚓土促進長期腐熟
D 組：酵素 + 蚯蚓土組	複合處理	落葉 + 青草 + 蚯蚓土 + 酵素液 + 水	測試雙效加成效果
E 組：校園原土組	未經實驗過程	A、B 組未經實驗過程的土	種植空心菜時的對照組



圖五-五組土壤實驗圖

- (一)每組設三個重複（A1～A3、B1～B3、C1～C3、D1～D3），共 12 個紙箱實驗包。

(二)每箱材料配比：落葉約 10 g、碎紙屑 55g、青草約 200 g、土壤或蚯蚓土約 300g、水或酵素液約 500 mL。

			
利用厚度一致的紙箱為材料	測量箱子的重量	測量葉子的重量	製作落葉再生包

圖六-實驗過程圖

(三)實驗期程

第 0 週：製作酵素液、收集材料、完成堆肥設置。

第 1~10 週：測量溫度、pH、含水率、乾重，並記錄外觀變化。

第 10 週後：取樣進行發芽率與肥效測試，分析不同處理組的堆肥品質。

			
製作酵素液-放置 2 個月	養殖蚯蚓取蚓糞土	進行數據測量	進行五組土壤肥力種植試驗

圖六實驗期程圖

肆、研究結果與討論

一、前期 10 周實驗過程數據與討論

共 10 次的測量數據如下，針對以下五個項目進行測量，每一個組別都有三個小組，取其平均數據進行分析，以下針對實驗目的進行討論與分析。

表 4-10 次數據測量各組數據平均表

日期	溫度(°C)				水分(%)				肥力				PH 值				電導率(EC)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
10/20	30.7	30.4	30.5	30.9	8.8	8.3	20.8	17.9	23.7	6.7	100	66.3	7.0	7.0	6.7	6.9	43.7	12.7	181.7	120.3
10/23	30.5	30.7	30.5	30.8	9.3	16.9	16.5	25.4	21.0	101.7	109.3	147.7	7.0	6.3	6.7	6.4	39.0	185.7	199.7	269.3
10/30	30.6	30.9	30.2	30.2	24.4	15.7	18.1	16.4	171.3	104.3	105.0	213.7	6.9	6.9	6.9	7.2	311.7	146.3	191.3	389.7
11/06	29.7	29.4	29.8	29.9	11.7	20.3	27.3	28.7	32.7	130.3	204.3	281.7	7.2	7.1	7.6	7.6	59.7	239.0	368.7	513.7
11/13	26.3	25.9	26.7	26.0	24.5	30.0	36.3	44.5	127.0	269.7	300.7	382.3	7.1	7.1	7.0	9.9	232.0	370.0	547.7	696.0
11/20	22.3	22.8	23.0	23.5	24.7	28.9	30.9	23.4	125.0	145.7	182.7	175.7	8.5	7.4	9.7	8.7	227.7	265.7	332.7	320.3
12/01	25.0	24.8	24.6	25.2	17.4	24.5	19.7	12.9	27.7	96.0	87.7	48.3	8.3	10.0	9.9	7.4	105.7	175.3	160.7	88.3
12/08	23.8	23.5	22.8	23.6	17.9	17.7	21.2	16.8	53.7	62.0	114.0	63.0	8.2	9.4	8.6	9.3	98.3	113.7	208.7	115.3
12/11	24.7	24.7	24.0	24.8	19.2	25.2	21.2	18.6	58.3	125.3	92.0	59.0	8.8	9.6	8.7	7.8	107.3	229.0	167.3	98.0
12/18	23.0	23.0	22.6	23.3	14.7	21.2	17.5	14.2	30.7	52.7	57.0	28.7	7.0	8.0	7.9	7.3	57.0	96.7	104.3	52.5

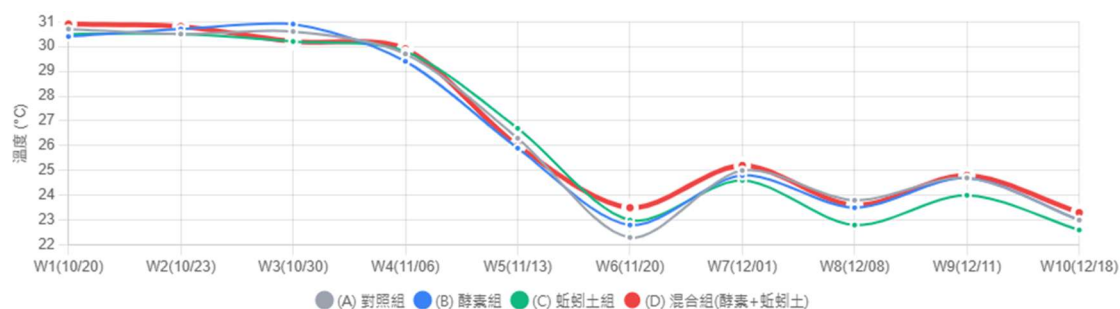
(一)落葉堆肥包溫度討論

表 5-10 次測量落葉堆肥包各組平均溫度表

單位: °C

測量時間	A 對照組	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組
10/20	30.7	30.4	30.5	30.9
10/23	30.5	30.7	30.5	30.9
10/30	30.6	30.9	30.2	30.2
11/6	29.7	29.8	29.8	29.9
11/13	26.3	25.9	26.7	26.0
11/20	22.3	22.8	23.0	23.5

12/1	25.0	24.8	24.6	25.2
12/8	23.8	23.5	22.8	23.6
12/11	24.73	22.8	23.0	24.8
12/18	23.0	23.0	22.6	23.3



圖七-10 次測量落葉堆肥包各組平均溫度折線圖

可以從這份溫度數據與折線圖中看出以下幾個現象：

1. 整體呈現受氣候主導的「季節性降溫」 這十次的溫度變化呈現極為穩定的線性下降趨勢，從 10 月下旬到 12 月中旬，整體環境溫度總共下降了約 7 – 8°C，這反映季節的變化。

2. 堆肥過程的三個溫度階段堆肥的溫度變化不僅受天氣影響，也與內部微生物的分解活性息息相關。數據可分為三個階段：

(1) 第一階段：高溫穩定期（第 1~3 週）：各組溫度皆維持在 30°C 以上。這段期間環境炎熱，且堆肥初期的微生物正大量活躍、分解有機物並產生熱能。各組之間幾乎沒有溫差。

(2) 第二階段：降溫轉折點（第 4~5 週）：第 4 週開始跌破 30°C，到了第 5 週更出現 3 – 4°C 的驟降（降至 26°C 左右）。有趣的是，這正好對應了另一份數據中 D 組（酵素+蚯蚓土）在第 5 週發生「pH 值飆升」的時間點。

(3) 第三階段：低溫熟成期（第 6~10 週）：在第 6 週（11/20）達到全期的最低點（約 22.3 – 23.5°C），隨後在 23 – 25°C 之間小幅震盪，最終在第 10 週穩定於 23°C 左右。

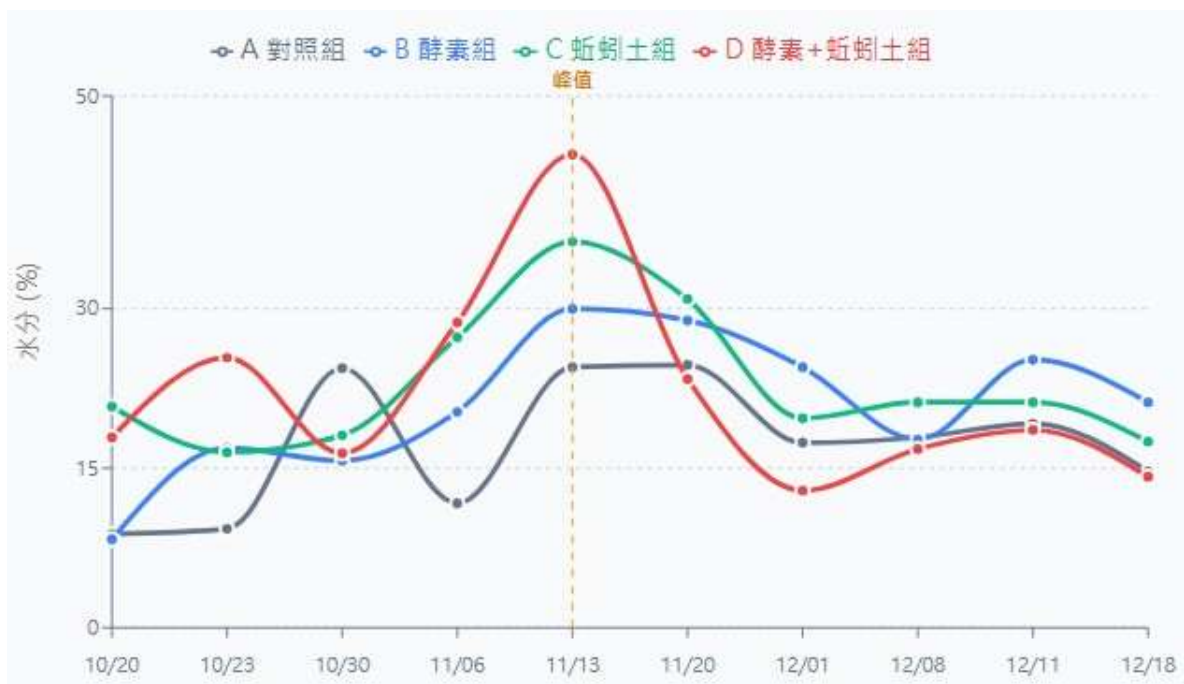
綜合討論：在堆肥科學中，若溫度在初期升高（或維持高溫）後逐漸下降並趨於穩定，就代表分解過程正常。這份數據證明了所有組別都順利完成了發熱分解，並在第 10 週進入了不再劇烈產熱的「熟成穩定期」。此時的堆肥溫度與外界相近（約 23°C），已經處於可以直接接觸植物根系而不致發生「燒根」的安全狀態。

(二)落葉堆肥包水分討論

表 6-10 次測量落葉堆肥包各組平均水分表

單位: %

測量時間	A 對照組	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組
10/20	8.8	8.3	20.8	17.9
10/23	9.3	16.9	16.5	25.4
10/30	24.4	15.7	18.1	16.4
11/6	11.7	20.3	27.3	28.7
11/13	24.5	30.0	36.3	44.5
11/20	24.7	28.9	30.9	23.4
12/1	17.4	24.5	19.7	12.9
12/8	17.9	17.7	21.2	16.8
12/11	19.2	25.2	21.2	18.6
12/18	14.7	21.2	17.5	14.2



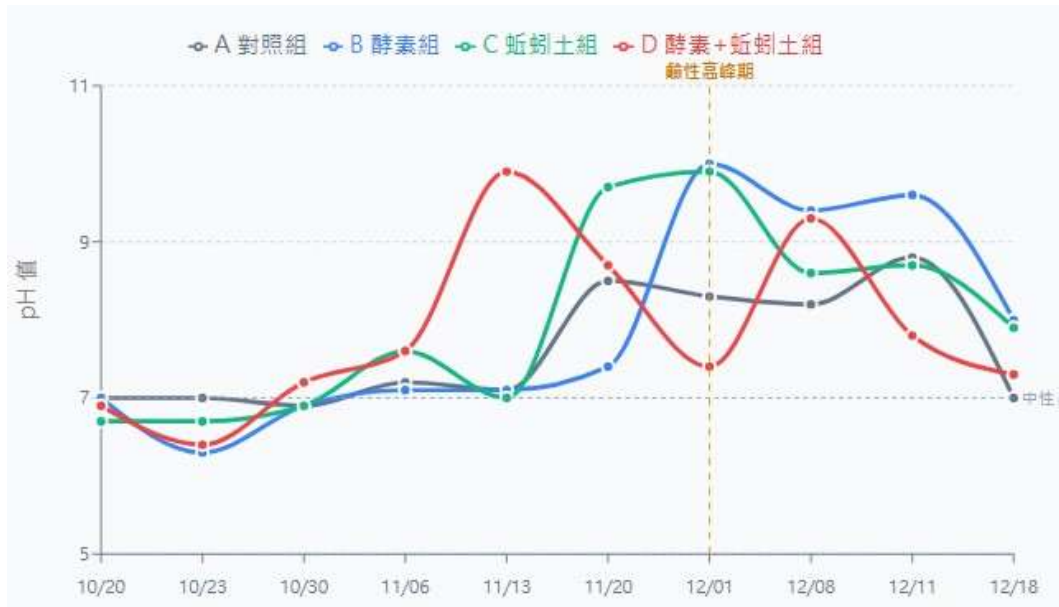
圖八-10 次測量落葉堆肥包各組平均水分折線圖

1. 乾燥期(10/20)：初期水分含量較低，尤其是 A、B 組僅有 8-9%。
 2. 濕潤高峰(11/06-11/13)：水分在第五週達到峰值。特別是 D 組在 W5 達到 44.5%，C 組達到 36.3%。這段期間的高水分可能與降雨或灌溉增加有關。
 3. 回歸乾燥(12/01-12/18)：第七週後水分開始下降，至第十週各組回落至 14-21% 的區間。
- 綜合討論: 水分中間濕潤，兩頭乾燥水分變化呈現「鐘形曲線」，中間週次水分最高。

(三)落葉堆肥包 PH 值討論

表 7- 10 次測量落葉堆肥包各組平均 pH 值表

測量時間	A 對照組	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組
10/20	7.0	7.0	6.7	6.9
10/23	7.0	6.3	6.7	6.4
10/30	6.9	6.9	6.9	7.2
11/6	7.2	7.1	7.6	7.6
11/13	7.1	7.1	7.0	9.9
11/20	8.5	7.4	9.7	8.7
12/1	8.3	10.0	9.9	7.4
12/8	8.2	9.4	8.6	9.3
12/11	8.8	9.6	8.7	7.8
12/18	7.0	8.0	7.9	7.3



圖九-10 次測量落葉堆肥包各組平均 PH 值折線圖

- 1.前期：穩定期（第 1 ~ 4 週）在前四週，大部分組別的 pH 值都非常穩定地維持在 7 上下。
- 2.中期：「鹼性高峰」（第 5 ~ 9 週）變化最劇烈的時期，且各組別 pH 值飆升的時間點，D 組（速效型）的最早爆發：在第 5 週，只有 D 組的 pH 值突然飆升至 9.9。這呼應了 D 組在此時極高的水分與電導率（EC 值高達 696），「酵素+蚯蚓土」讓堆肥溶解了大量的鹽分與養分。C 組與 B 組的滯後跟上：第 6 週起，當原本的高水分開始下降時，其他組別的 pH 值才全面進入鹼性區間。C 組（蚯蚓土）在第 6、7 週達到高峰（9.7、9.9）；而分解最慢的 B 組（酵素組），則遲至第 7 週才達到全場最高的 pH10 強鹼狀態。

3.末期：回歸中性穩定期（第 10 週）到了最後一週，隨著各項數值穩定、養分轉化完成，各組的 pH 值也紛紛回落至 7~8 的正常區間。環境進入了適合植物長期接觸的熟成穩定期。

綜合討論：這份 pH 數據不但再次印證了 D 組最快熟成（第 5 週）、B 組最慢熟成（第 7 週），等到第 10 週 pH 值降回中性後，才是最安全的施肥時機。

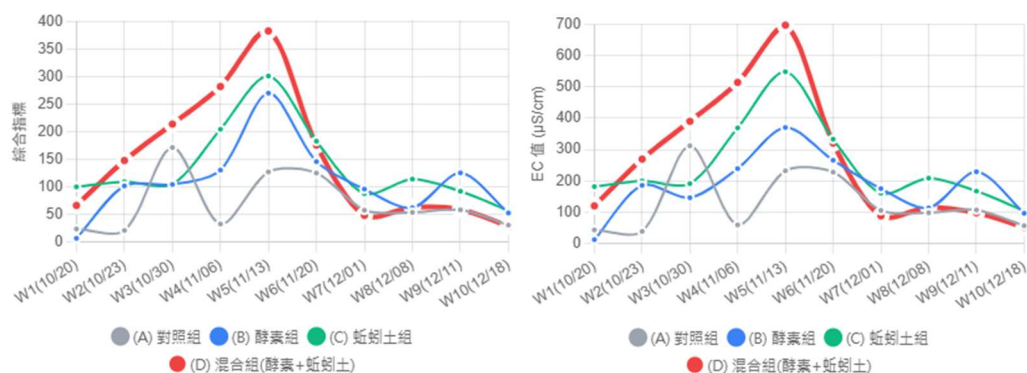
(四)落葉堆肥包肥力與電導率討論

表 8-10 次測量落葉堆肥包各組平均肥力表

測量時間	A 對照組	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組
10/20	23.7	6.7	100	66.3
10/23	21.0	101.7	109.3	147.7
10/30	171.3	104.3	105.0	213.7
11/6	32.7	130.3	204.3	281.7
11/13	127.0	269.7	300.7	382.3
11/20	125.0	145.7	182.7	175.7
12/1	27.7	96.0	87.7	48.3
12/8	53.7	62.0	114.0	63.0
12/11	58.3	125.3	92.0	59.0
12/18	30.7	52.7	57.0	28.7

表 9-10 次測量落葉堆肥包各組平均電導率(EC)表

測量時間	A 對照組	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組
10/20	43.7	12.7	181.7	120.3
10/23	39.0	185.7	199.7	269.3
10/30	311.7	146.3	191.3	389.7
11/6	59.7	239.0	368.7	513.7
11/13	232.0	370.0	547.7	696.0
11/20	227.7	265.7	332.7	320.3
12/1	105.7	175.3	160.7	88.3
12/8	98.3	113.7	208.7	115.3
12/11	107.3	229.0	167.3	98.0
12/18	57.0	96.7	104.3	52.5



圖十-10 次測量落葉堆肥包各組平均肥力與電導率(EC)值折線圖

1.累積期(W1-W4)：初期數值較低，但隨著時間推進逐漸上升。EC 值從 W1 的 43-180 上升至 W4 的 60-513。

2.爆發性峰值(W5)：第五週是關鍵轉折點。肥力與 EC 值同時達到最高峰。

(1)肥力：C、D 組分別飆升至 300.7 與 382.3。

(2)EC：D 組甚至達到 696.0 的極高值，C 組也有 547.7。這顯示在第五週土壤中溶解了大量的鹽分或養分（可能與該週的高水分有關，水分溶解了肥料）。

3.下降與穩定(W6-W10)：第六週開始數值腰斬，並在後續幾週逐漸降低。第十週時，肥力降至 30-50 左右，EC 值也回落至 50-100 的低位水準。

4.綜合討論：肥力（綜合指標）與電導率(EC)：高度正相關的劇烈波動，這兩項指標的走勢驚人地一致，顯示土壤中的離子濃度與養分變化緊密相連。

(五)約三周開箱一次，三次開箱落葉分解情況

約三個禮拜進行開箱測量落葉的重量，以下是三次開箱測量落葉的各別重量及取平均數進行分析，分析其分解效率。

表 10-三次開箱測量各組落葉重量 單位:公克

組別	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
落葉重量	9.69	10.50	10.61	9.90	10.7	10.84	9.68	10.60	9.88	9.73	10.34	10.84
重量平均	10.27			10.48			10.05			10.30		
第一次 1106 測量	26.8	33.1	31.2	23.4	35.4	36.5	25.15	34.55	36.25	22.5	21.5	33.5
平均重量	30.36			31.76			31.683			25.83		

第二次 1127 測量	7.04	30.7	21.3	26.82	25.75	38.43	23.2	26.3	26.6	0.74	7.5	8.8
平均重量	19.68			30.33			25.36			5.68		
第三次 1218 測量	0.82	10.3	7.2	8.7	10.2	3.4	2.8	2.6	1.6	0.8	0.3	0.4
平均重量	6.11			7.43			2.33			0.5		

表 11 各組三次測量質量損失率 單位:公克

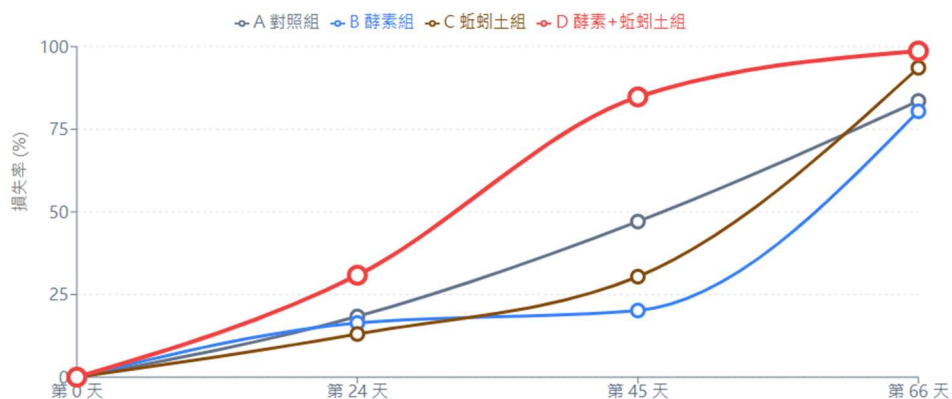
測量日期	天數	A 對照組	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組
10/13	第 0 天	37.19	37.99	36.44	37.35
11/6	第 24 天	30.36	31.76	31.683	25.83
11/27	第 45 天	19.68	30.33	25.36	5.68
12/18	第 66 天	6.11	7.43	2.33	0.5

計算公式：質量損失率(%)=(初始乾重-當前乾重)/初始乾重 × 100%

表 12 各組三次測量質量損失率彙整表 (%)

測量日期	天數	A 對照組	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組
10/13	第 0 天	0%	0%	0%	0%
11/6	第 24 天	18.37%	16.40%	13.05%	30.84%
11/27	第 45 天	47.08%	20.16%	30.41%	84.79%
12/18	第 66 天	83.57%	80.44%	93.61%	98.66%

各組別質量損失率隨時間變化趨勢



圖十一-各組三次測量質量損失率折線圖

根據數據分析與趨勢圖（如上圖所示），我們可以觀察到以下現象：

1.D 組（酵素+蚯蚓土）展現極其顯著的協同效應：從第 24 天起，D 組的分解速率便明顯優於其他各組。在第 45 天時，其質量損失率已高達 84.79%，而此時其餘各組均未超過 50%。最終在第 66 天，D 組幾乎完成全分解 98.66%。這顯示酵素與蚯蚓土中的微生物或物理作用結合，能極大化分解效率。

2.C 組（蚯蚓土組）的後期加速現象：C 組在實驗前中期的表現較為平緩，但從第 45 天到第 66 天出現了大幅度的增長（從 30.41%躍升至 93.61%）。這可能意味著蚯蚓土中的微生物菌群在適應環境後，於後期進入了對數生長期，加速了有機質的分解。

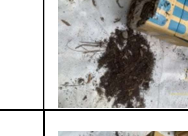
3.B 組（酵素組）的表現：令人意外的是，單獨添加酵素的 B 組在第 45 天之前的分解效率甚至低於對照組。這可能與酵素的活性受環境（如水分、pH 值）影響有關。然而在後期（第 66 天），其分解率也追趕至與對照組相近。

4.綜合討論：

D 組呈現明顯的「快反應」特徵，而 C 組則呈現「後發先至」的趨勢。若此研究應用於廢棄物處理，D 組的配方顯然具備最高的效能。

(六)質性觀察紀錄（每次拍照）表 13-三次開箱照片紀錄表

組別	10/13 開始	11 月 6 日(第 24 天)	11 月 27 日(第 45 天)	12 月 18 日(第 66 天)	觀察記錄
A	A 1				還是有少量葉片尚
	A 2				還是有少量葉片尚
	A 3				還是有少量葉片尚
B	B 1				還是有少量葉片尚
	B 2				還是有少量葉片尚

	B 3				還是有少量葉片尚
C	C 1				只剩比較粗葉脈
	C 2				只剩比較粗葉脈
	C 3				只剩比較粗葉脈
D	D 1				紙箱底部破損嚴重
	D 2				只剩比較粗葉脈
	D 3				只剩比較粗葉脈

察各組的演變過程，可以得出以下幾點共通現象：

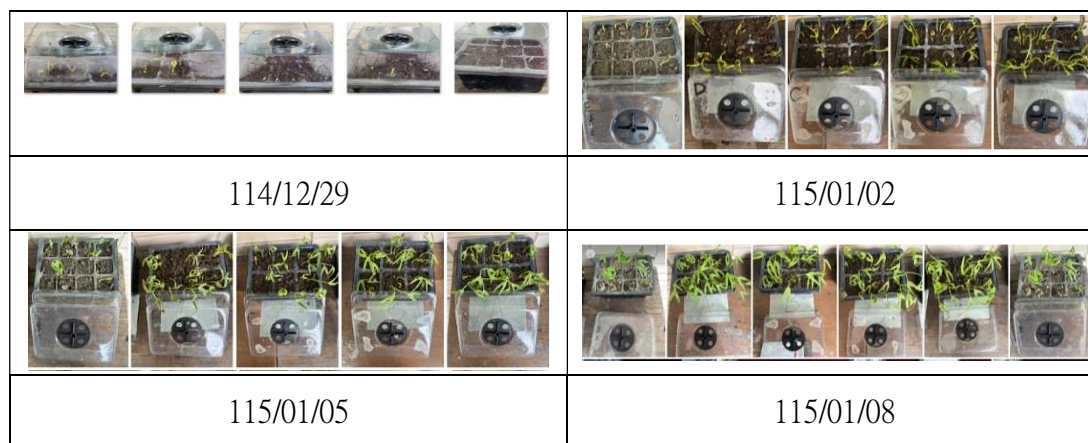
1.分解進度高度相似：無論是 A、B、C 還是 D 組，在 11/6 初期都還能清楚看見大片完整的樹葉。到了 11/27 與 12/18，所有組別中的大型樹葉都已經消失，並轉化為質地細碎、顏色深黑的土壤或堆肥狀物質。各組在最終階段的内容物外觀幾乎一致。

2.紙箱的外觀變化有些微不同：雖然內部有機物的腐爛程度看似相同，但外部紙箱的劣化情況有些許差異。特別是 D1 在 12/18 的照片中，紙箱結構比其他組別更軟塌、變形破損。

綜合討論:總結來說，就照片的視覺紀錄，四個組別的樹葉等有機物質都達到了深度的分解狀態。若要確切比較各組之間更細微的腐爛差異，可能需要進一步分析紀錄的數據。

二、後期三周五組種植空心菜實驗

	
114/12/19	114/12/26



註:測量各組發芽高度(長度)公分，高度(長度)是以取第一個根到莖的第一個分岔點距離。

圖十二-各組空心菜種植生長情況圖

(一)五組發芽實驗

表 13-五組發芽情況表

處理組別	播種數	發芽數	發芽率(%)	備註
A 對照組	30	25	83%	發芽率最高
B 酵素組	30	21	70%	發芽率最低
C 蚯蚓土組	30	21	70%	發芽率最低
D 酵素+蚯蚓土組	30	24	80%	
E 原土組	30	25	83%	發芽率最高

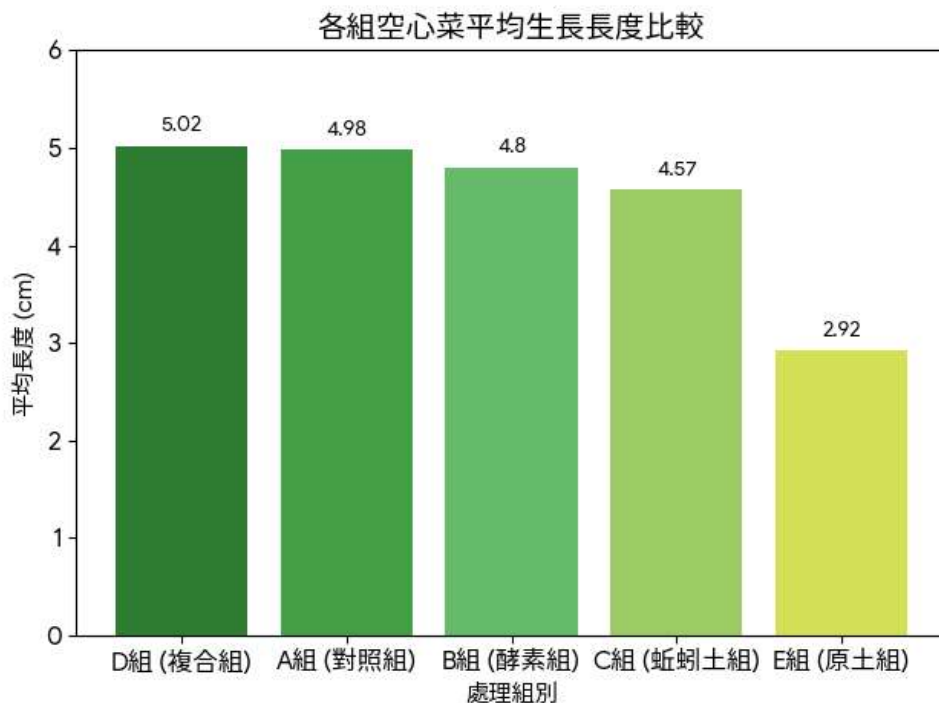
發芽率數據分析：

- 1.發芽率最佳：A 對照組與未經堆肥處理的 E 原土組均有最高的發芽率（83%）。
- 2.單一添加抑制發芽:添加幫助分解介質 B 組與 C 組，發芽率反而並列最低 70%。
- 3.複合配方具有「協同作用」：同時添加兩者的 D 酵素+蚯蚓土組（80%）發芽率明顯回升，優於單獨使用酵素或蚯蚓土的組別。
- 4.綜合討論：這份試驗數據顯示，經過大約一個半月處理的落葉堆肥（B、C 組），雖然外觀已經泥土化，但若直接用於播種，效果不如原土或對照組（A、E 組）。然而，若能採用「酵素+蚯蚓土」（D 組）的雙管齊下方式，似乎能有效改善單一堆肥介質對發芽率的負面影響。這些介質未來可能更適合做為植物生長中後期的「追肥」，而非初期的「播種土」。

(二)五組生長重量實驗

表 14-五組生長重量紀錄表

日期/發芽棵數	A 對照	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 酵素+蚯蚓土組	E 原土組
114/12/14	0	0	0	0	0
114/12/26	21	22	18	15	9
114/12/29	23	22	20	20	10
115/01/02	25	22	20	22	23
115/01/05	25	22	21	22	23
115/01/08	25	21	21	24	25
發芽總重量 (g)	11.52	10.56	10.96	12.53	8.79
平均單株重量(g)	0.461	0.503	0.522	0.522	0.352



圖十三-各組發芽重量直方圖

1.生長重量表現

- (1)最強增重組合：D 組不論在「總重量」12.53 g 還是「平均單株重量」0.522g 皆表現最優。
- (2)蚯蚓土的關鍵作用：觀察平均單株重量發現，C 組 0.522g 與 D 組 0.522 g 並列第一。這顯示「蚯蚓土」對於增加植物組織的重量有極其顯著的效果，甚至優於單純的酵素處理。
- (3)原土組的劣勢：E 組雖然最終發芽棵數最多（25 棵），但其平均單株重量僅 0.352 g，約只有 D 組的 67%。這代表在缺乏養分的土壤中，空心菜雖能發芽，但生長極其瘦弱。

2.發芽進度與生命力觀察

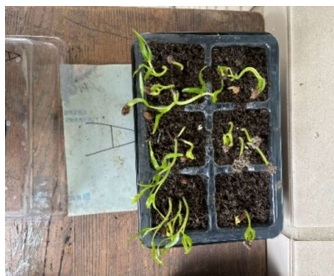
(1)發芽速度：A 組與 B 組在實驗初期 12/26 發芽速度最快，可能與酵素液促進了種子萌發環境有關。

(2)後發先至：D 組雖然初期發芽較慢（12/26 僅 15 棵），但後期追趕迅速且生長品質最佳。

綜合討論:本重量實驗進一步證實，「酵素+蚯蚓土」的複合處理（D 組）是最理想的種植方案，其培育出的空心菜不僅長度優異，單株重量也最高。此外，蚯蚓土 C 組在提升個體重量方面展現了成效。

(三)五組生長高度實驗

以下為五組生長情況敘述: A 組(25 取 21):

個數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
高度	3.5	5.3	5.3	5	4.2	4.8	5.8	3.8	5.2	5
個數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
高度	5.6	4	4.8	4.7	4.8	6.2	4.8	5.8	4.7	7.8
個數	21									
高度	3.5									
總長度		104.6			平均長度			4.98		
										
114/12/24		114/12/26				114/12/29				
										
115/01/02		115/01/08-A 對照組測量空心菜根與節點長度								

B 組(21 取 20):

個數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
高度	1.7	3.5	6	4.5	4	6.6	1.5	8.5	3	6
個數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
高度	4.5	3.9	4.3	5	5.1	6.6	5.25	4.3	5.3	6.5
總長度		96.05			平均長度		4.8			
										
114/12/24			114/12/26			114/12/29				
										
115/01/02			115/01/08- B 酵素組測量空心菜根與節點長度							

C 組(21 取 19):

個數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
高度	5.1	4.5	5.5	2	4.4	3.5	5.8	3	4.9	5.2
個數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
高度	4.7	3.5	5	6.3	4.6	4.7	4.4	5	4.7	
總長度		86.8			平均長度			4.57		

		
114/12/24	114/12/26	114/12/29
		
115/01/02	115/01/08- C 蚯蚓土組測量空心菜根與節點長度	

D 組(24 取 22):

個數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
高度	5.4	4.7	5.6	3	4.4	5.7	4	6	5.6	4.5
個數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
高度	4.5	5.6	4.2	3.1	6.4	4.9	4.5	5.6	6.6	4.5
個數	21	22								
高度	4.6	7								
總長度		110.4			平均長度			5.02		
										
114/12/24			114/12/26			114/12/29				

	
115/01/02	115/01/08- D 酵素+蚯蚓土組測量空心菜根與節點長度

E 組(25 取 19):

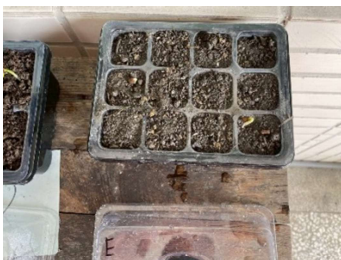
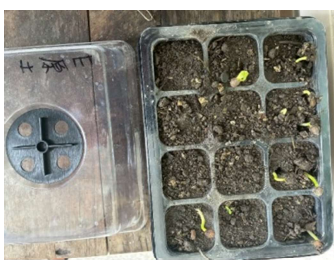
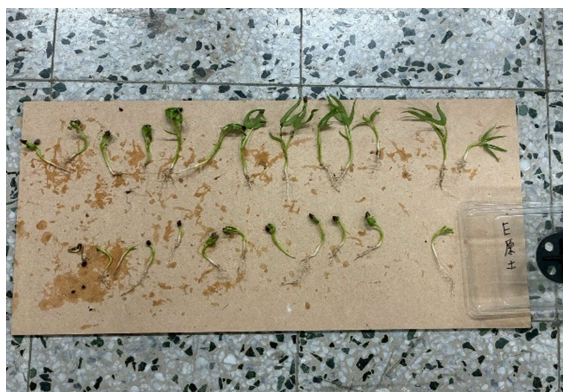
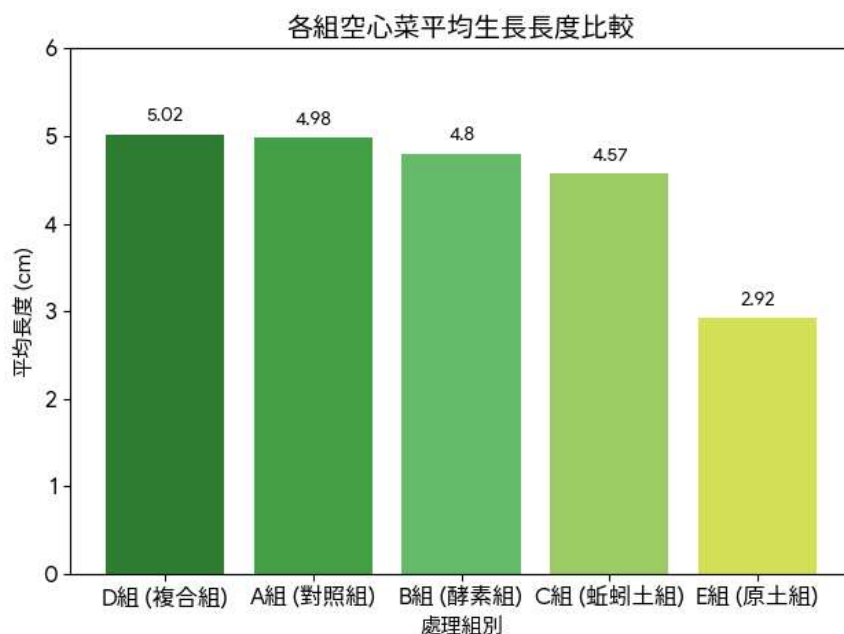
個數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
高度	2.6	3.7	1.6	3	2.1	3.4	3	2.4	2.5	2.9	
個數	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
高度	3	3.5	3.6	2.7	2	3.5	3.6	3.4	2.9		
總長度		55.4				平均長度			2.92		
											
114/12/24			114/12/26				11412/29				
											
115/01/02			115/01/08- E 原土組組測量空心菜根與節點長度								

表 15-種植空心菜採集數據

項目/組別	A 對照	B 酵素	C 蚯蚓土	D 酵素+蚯蚓土	E 原土
發芽棵數	25	21	21	24	25
有節點的棵數	21	20	19	22	19
發芽棵數總長	104.6	96.05	86.8	110.4	55.4
平均長度	4.98	4.8	4.57	5.02	2.92



圖十四-各組發芽長度長條圖

1.複合組展現最佳生長優勢

數據顯示，D 組在生長表現上最為優異。

(1)平均長度 5.02cm 與總長度 110.4 cm 均為各組最高，顯示堆肥提供的養分最利於植物。

(2)在品質指標上，D 組擁有 22 棵具節點的植株，也是所有組別中最高的，這代表植株不僅長得高，且生長品質較為成熟。

2.堆肥改善土壤貧瘠的效果顯著

若將實驗組與 E 組（原土組）相比，可以發現明顯差異：

(1)雖然 E 組的發芽棵數（25 棵）很多，但其平均長度僅有 2.92 cm，不到 D 組的六成。

(2)這證明了校園原本的土壤養分不足，透過落葉堆肥程序能大幅提升肥力。

3. 酵素與蚯蚓土的協同效應

(1)單使用酵素 B 組或蚯蚓土 C 組的發芽率與平均長度，優於原土，但皆略遜於 A 與 D 組。

(1)D 組的數據（5.02 cm）超越了 A 組（4.98 cm），說明了酵素與蚯蚓土結合後，不僅加速了落葉的分解，更轉化出了更優質、更易於植物吸收的養分。

伍、研究結果

表 16 研究結果彙整表

期程	評估指標	A 對照組 (自然分解)	B 酵素組	C 蚯蚓土組	D 複合組 (酵素+蚯蚓土)	E 原土組 (校園土)
前期 10 週：環境指標趨勢	溫度	穩步下降	穩步下降	穩步下降	穩步下降	未經發酵期程
	水分	鐘形曲線	鐘形曲線	峰值出現在 (第 5 週)	濕潤度最高 (第 5 週)	
	pH 值	中性 → 鹼性 → 中性 (7.0)	分解最慢，第 7 週才達 pH 10.0	第 6-7 週達鹼性高峰 (9.7-9.9)	反應最快，第 5 週即飆升至 pH 9.9	
	肥力與 EC 值	波動較小，相對穩定	分解初期數值較低	後期 EC 值顯著上升 3	養分最豐富，EC 峰值達 696.0	
中期：落葉分解效率	質量損失率	分析階段	最終達 80.44%	後期加速，最終達 93.61%	效能最高，最終達 98.66%	不適用
後期 3 週：空心菜種植結果	發芽率	83% (最高)	70% (最低)	70% (最低)	80%	83% (最高)
	平均長度	4.98 cm	4.80 cm	4.57 cm	5.02 cm (第一)	2.92 cm (最低)
	單株重量	0.461 g	0.503 g	0.522 g (並列第一)	0.522 g (並列第一)	0.352 g (最低)

表 17 研究結果分析彙整表

研究階段	項目	最佳組別	效果說明
前期：堆肥化過程 (第 1-10 週)	水分調控 (分解介質)	D 組	在第 5 週達到水分峰值 (44.5%)，有效促進微生物活性並協助養分溶解。
	熟成反應速度 (pH 值)	D 組	反應最快，第 5 週 pH 值即飆升至 9.9 進入強鹼分解高峰，並於第 10 週回落中性熟成。
	肥料養分 (電導率 EC)	D 組	電導率峰值達 696.0，顯示其釋放出的離子與養分濃度為各組之冠。
	分解效率 (質量損失率)	D 組	於第 66 天達到 98.66% 的質量損失率，落葉幾乎完全轉化為腐植質。
後期：空心菜種植 (第 11-13 週)	發芽協同作用	D 組	克服單一添加物的抑制現象，發芽率回升至 80%，優於單獨使用酵素或蚯蚓土之組別。
	生長高度 (節點長度)	D 組	平均長度達 5.02 cm，且擁有最多具節點的成熟植株 (22 棵)。
	生長重量 (生物量)	D 組	總重量 12.53 g 及平均單株重量 0.522 g 均為最高，植株發育最壯碩。
總結	土壤改良貢獻	D 組	顯著改善校園原土 (E 組) 養分不足問題，單株重量比原土組高出約 48%。

依據上面的結果，敘述整理如下：

一、堆肥準備期 (第 1-10 週)：

數據顯示 D 組在第 5 週是一個關鍵轉折點。此時水分 44.5%、pH 值 9.9 與 EC 值 696.0 同步達到高峰，顯示酵素與蚯蚓土的複合作用在初期極速破壞落葉結構，釋放大量養分。

二、種植實驗期 (第 11-13 週)：在堆肥熟成 (溫度降至約 23 度且 pH 回歸中性) 後進行種植。D 組不僅在發芽率上表現穩定，其產出的空心菜在長度與重量上均優於其他組別，驗證了前期高效分解所轉化的養分確實有利於作物生長。

三、整體效益：從期程排序可看出，前期的「劇烈分解與熟成」是後期「優質生長」的基礎。未經處理的 E 組雖然發芽快，但因缺乏前期累積過程，導致最終生長品質最差。

陸、結論

一、研究摘要與目的回顧:

本研究旨在解決校園秋冬季節大量落葉堆積、分解緩慢且清運成本高的問題，並結合在地農業廢棄物（鳳梨皮）與校園青草渣，實踐循環經濟理念。研究透過設置對照組（A）、酵素組（B）、蚯蚓土組（C）及複合處理組（D 酵素+蚯蚓土），進行為期 65 天的落葉堆肥實驗。後續加入校園原土組，目的在於評估不同添加物對落葉分解速率的影響，驗證鳳梨酵素與蚯蚓土之間是否具備協同加成效應，並透過空心菜的發芽與生長試驗，找出一套低成本、高效率且適合校園推廣的落葉堆肥標準流程。

二、主要實驗結果整理:

針對四項研究目的之結論彙整如下：

(一)落葉分解速率之差異比較

研究結果顯示，不同處理組在 65 天的監測期中，分解速率有差異：

- 1.混合處理組(D 組：酵素+蚯蚓土)：展現最強的分解能力，在第 45 天質量損失率已達 84.79%，最終第 66 天高達 98.66%，幾乎完全分解。
- 2.蚯蚓土組(C 組)：呈現「後發先至」趨勢，後期微生物進入，最終質量損失率達 93.61%。
- 3.對照組(A 組)：自然分解速率較慢，最終質量損失率為 83.57%。
- 4.酵素組(B 組)：分解效率最不理想，前期甚至低於對照組，最終質量損失率僅 80.44%。

(二)鳳梨酵素與蚯蚓土之協同加成效應

研究證實兩者具有顯著的協同加成效果：

- 1.機制分析：鳳梨酵素在初期能迅速破壞並加速落葉纖維的分解（快反應特徵）；蚯蚓土則提供豐富的優勢微生物群，接續進行中後期的深度腐熟。
- 2.數據支持：D 組在第 24 天起的分解速率便穩定優於單獨添加酵素或蚯蚓土的組別，顯示兩者完美互補，能極大化分解效率並縮短堆肥時程。

(三)對植物（空心菜）發芽率與生長勢之影響

堆肥成品的肥效驗證結果揭示了「肥效釋放」與「發芽/生長」之間的衝突機制：

- 1.發芽階段：未添加介質的 A 組與 E 組（原土組）表現最佳，發芽率達 83%。強效堆肥組（B、C、D）因中期釋放鹽分與鹼性物質（高 EC 與 pH 值），初期會抑制種子的發芽。
- 2.生長勢階段：一旦進入生長階段，D 組展現優勢。空心菜平均株高達 5.02 公分，且節點最多，優於原土組的 2.92 公分。這證明熟成後的混合堆肥能提供植物中後期生長的養分助力。

(四)校園落葉堆肥標準流程建議

依據實驗成功經驗，建立之高效率流程如下：

- 1.材料收集與處理：收集校園落葉，加入新鮮青草渣（氮源）與碎紙屑（調整碳氮比）。
- 1.配方調製：使用廢紙箱作為容器，添加鳳梨酵素液（比例 1:10 稀釋）與蚯蚓土作為介質。
- 2.環境維護：維持堆體濕度，每兩週翻動一次以保持通氣，並覆蓋防水布以穩定溫濕度。
- 3.熟成判定：監測 pH 值與溫度。當 pH 值由鹼性高峰回落至 7.0~8.0，且溫度趨於環境常溫（約 23°C）時，即為安全熟成期（約需 10 週），可直接用於植栽施肥。

三、研究意義與應用價值

本研究不僅成功驗證了加速落葉堆肥的科學配方，更為校園廢棄物處理提供了具體可行的應用策略：

- 1.資源循環與減廢減碳：運用「鳳梨酵素+蚯蚓土」的雙效配方，能將原本需耗時數月甚至委外清運的校園落葉、青草渣與碎紙，在短短兩個月內快速轉化為極具價值的有機肥料，大幅降低碳排放與處理經費。
- 2.分階段的精準施肥策略：本研究建立了實用的校園園藝 SOP：在「播種發芽期」應使用一般原土或自然對照組的介質以保護種子；而針對校園貧瘠綠植槽的「土壤改良或植株追肥」，則應全面引入 D 組（酵素+蚯蚓土）的複合堆肥技術，以獲取最佳的植株生長效益。

四、建議與後續研究方向

(一)實務應用建議：校園資源循環 SOP

推廣「雙效複合堆肥模式」：建議校方採納「鳳梨酵素 + 蚯蚓土」的 D 組配方處理校園有機廢棄物。實驗證明此配方能將欖仁樹落葉、青草渣與碎紙，在 65 天內達成 98.66%的質量損失率，顯著優於傳統自然堆肥。

- 1.實施「分階段精準用土」策略：基於「最肥的土不適合發芽」之發現，校園園藝應建立兩

階段標準作業：

- (1)播種萌發期：使用原土或自然對照組介質，避免堆肥熟成中期的強鹼與高鹽分（高 EC 值）對脆弱種子產生化學衝擊。
- (2)中後期追肥期：待幼苗長出後，大量施加 D 組複合堆肥，利用其高肥力顯著提升植株高度與單株生物量。
- (3)農業廢棄物與校園減廢結合：利用家鄉農產廢棄物「鳳梨皮」自製酵素，成本極低且具環保意義，能有效解決落葉清運造成的碳排放與經費負擔，實踐循環經濟理念。

(二)後續研究方向

- 1.探討不同落葉樹種分解普適性：本研究目前欖仁樹落葉為主，未來可測試此雙效配方對於校園內其他含蠟質或木質較高、更難分解樹種是否具備同等分解效能。
- 2.優化添加比例之「黃金配方」：進一步實驗不同濃度的酵素稀釋倍數，或調整蚯蚓土與落葉的質量比，以找出在最短時間內達成最高腐熟度的最佳經濟配比。
- 3.深化中期生長抑制機制微觀分析：針對第 5 週出現的 pH 9.9 與 EC 696 劇烈波動現象，建議未來進行土壤微生物相檢測，深入剖析酵素與蚯蚓微生物群在不同熟成階段的動態機制。
- 4.擴大作物種類與長期肥效監測：目前的驗證以短期葉菜（空心菜）為主，後續可針對需肥量較大的開花結果類植物（如番茄、辣椒）進行長期觀察，評估此複合堆肥對作物產量與品質的長遠影響。

柒、參考文獻資料

一、國中自然科學教科書

- (一)康軒文教事業（2024）。國民中學自然科學第一冊。新北市：康軒文教事業。七上第三章「生物體內的酵素」探討鳳梨酵素活性；第六章「生態系」探討蚯蚓為分解者的物質循環。
- (二)南一書局（2024）。國民中學自然科學第四冊。臺南市：南一書局。八下第二章「反應速率」探討酵素催化加速；第三章「電解質與酸鹼鹽」。
- (三)翰林出版事業（2024）。國民中學自然科學第二冊。臺南市：翰林出版事業。七下「植物的營養器官與生長」。

二、歷屆全國科展優秀作品

(一)石 O 瑋、林 O 宇、陳 O 翰 (2014)。「蚓」藏潛機—以蚯蚓處理食品污泥的研究。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會作品說明書。

三、學術期刊與專業文獻

(一)林俐玲、何國謙、林文英 (2004)。植物覆蓋與土壤性質對於蚯蚓族群影響之探討。水土保持學報，36(4)，333-344。

(二)農業新知與技術期刊 (2015)。點糞成金~蚓糞堆肥應用。農業新知與技術期刊，9。

(三)楊秋忠 (2001)。土壤與肥料。臺中市：中華農業資源學會。

四、政府指南與推廣手冊（展現實務應用價值）

(一)行政院環境保護署 (2020)。廚餘及落葉自主堆肥手冊。臺北市：行政院環境保護署。

(二)農業部農試驗所 (2022)。作物合理化施肥及土壤肥力檢測應用手冊。臺中市：農業部。