

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學(二)科

082916

綠塑有「解」？

探討不同菌種濃度對綠色塑膠生物降解之影響

學校名稱：高雄市楠梓區楠陽國民小學

作者：	指導老師：
小六 張芯瑤	李雪因
小六 黃郁翔	龔士琦
小六 周廷軒	
小六 黃瀟萱	
小六 葉名恩	
小六 何冠騏	

關鍵詞：綠色塑膠、農用微生物、生物降解

摘要

綠色塑膠(Bioplastic)之誕生，看似解決塑膠難以降解的特性，但，其實際生物降解效果是值得探討的。為能有效推廣綠色塑膠之使用及降解觀念，研究選用易取得的納豆菌、蕈狀芽孢菌、枯草桿菌等農用微生物，進行對聚乳酸(PLA)、聚乙烯醇(PVA)、聚己內酯(PCL)等綠色塑膠之降解實驗，以探究不同菌種對各類綠色塑膠之降解情形，並篩選優勢之降解菌種。

研究發現，添加菌種後，各實驗組培養土酸鹼值由 pH6.0 降為 pH4.5~5.5，並在降解過程中逐漸回升；其次，綠色塑膠在未添加菌種的對照組中亦有良好的降解情形，其中以 PVA 最佳；此外，實驗菌種中，以枯草桿菌對 PCL 及 PLA 的降解效果最佳，而枯草桿菌與培養土的最佳調配比例為 3：11，故建議可將枯草桿菌混入培養土，以加速綠色塑膠之降解。

壹、研究動機

近年來為了減少塑膠使用對地球環境的傷害，大量研發了號稱生物可降解塑膠，也就是「綠色塑膠」(Bioplastic)，但是這些塑膠，真的可以順利地在自然環境中降解嗎？在什麼樣的環境下才能夠進行降解呢？

為了減少難以被降解的塑膠使用量，我們想要推廣綠色塑膠的使用，且讓民眾在家就能降解使用過的綠色塑膠以達圾垃減量和有效的塑膠分類及回收，就像是居家自行準備的廚餘桶般，所以選用容易取得的農用微生物。

本研究嘗試藉由實驗探討市售常見綠色塑膠之生物降解情形，選擇容易取得的農業用微生物：納豆菌、蕈狀芽孢菌、枯草桿菌，先利用培養基擴大培養此三種菌種，再以實驗設計之比例混入培養土中，以這三種不同菌類對市面上常見的綠色塑膠進行降解實驗，計有聚乳酸 (PLA)、聚乙烯醇 (PVA)、聚己內酯 (PCL)三種，嘗試找出最容易被降解的塑膠，以及比較不同菌種對綠色塑膠降解之情形並篩選優勢之降解菌種。

貳、研究目的

- 一、瞭解培養土混入不同農業用菌叢發酵後，對培養土酸鹼值之影響。
- 二、探討不加入農用微生物之培養土對綠色塑膠 PLA、PVA、PCL 降解之影響。

- 三、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對聚乳酸(PLA)降解之影響。
- 四、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對聚乙烯醇(PVA)降解之影響。
- 五、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對聚己內酯(PCL)降解之影響。
- 六、探究三種農業用菌種中最適合做為生物降解綠色塑膠之菌種。
- 七、依研究結論提出綠色塑膠於運用上之建議。

參、文獻探討

一、綠色塑膠(Bioplastic)

綠色塑膠是一種生物可降解材料，是指在有足夠的溼度、氧氣與適當微生物存在的自然掩埋或堆肥環境中，可被微生物所代謝降解產生水和二氧化碳或甲烷，對環境危害較小。這類材料儲存方便，只要保持乾燥也不需避光，應用範圍廣用於地膜、包裝袋、醫藥等領域。各類綠色塑膠之特性，整理如表 1。

表 1 各類綠色塑膠特性

名稱	聚乳酸(PLA)	聚乙烯醇(PVA)	聚己內酯(PCL)
來源	一種熱塑性脂肪族聚酯。生產聚乳酸所需的乳酸或丙交酯可通過可再生資源發酵、脫水、純化後得到。	聚乙烯醇是一種白色粉末狀、片狀或絮狀固體且用途廣泛的水溶性高分子聚合物，其性能介於塑料和橡膠之間。具體取製過程為聚醋酸乙烯酯在鹼作用下與甲醇反應製得。	是一種半結晶型聚合物，是化學合成的生物降解性高分子材料，其結構重複單元上有 5 個非極性亞甲基—CH ₂ 澱粉等物質共混，可製得完全生物降解材料。
溫度	PLA 耐熱溫度約 50℃，熔點是 180℃	熔點 230℃，玻璃化溫度 75～85℃，在空氣中加熱至 100℃以上慢慢變色、脆化	PCL 熔點為 59～64℃，玻璃化溫度為 -60℃
一般用途	聚乳酸已經廣泛應用在生物醫學工程上，用作手術縫合線、骨釘和骨板等	可用作漿料、塗料、黏著劑（例如透明膠水）、穩定劑、分散劑、乳化劑、增厚劑、感光劑和填充材料、鼻涕膠（玩具）等。	汽車底漆、中塗和表面塗層，還有各種建材用的溶劑和乳膠塗料等的改性劑

*參考資料來源：日本塑膠工業聯盟（The Japan plastics industry federation），

網址: http://www.jpif.gr.jp/2hello/contents/youto_c.htm

二、納豆菌、枯草桿菌與蕈狀芽孢菌

本研究所選之菌種，以研究取得便利為考量，故選農業種植常用之菌種，菌種之介紹，整理如表 2

表 2 各類農用菌種特性

菌種	枯草桿菌	蕈狀芽孢桿菌	納豆菌
特性	枯草桿菌對病原真菌和細菌具有拮抗作用，可以產生許多代謝產物和抗生物質，為常見的生物性農藥	菌落呈乳白色、不透明，邊緣不圓整，表面不光滑、不隆起。可以產生生物表面活性劑	生長在葡萄糖瓊脂的細胞原生質染色均勻，有鞭毛能運動。生長溫度最高為 45-55℃，芽孢耐熱性強
益害	食品和飼料添加劑上廣泛使用	產生生物表面活性劑，能使發酵液的表面張力值降低到 $34.2\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$	可以製造納豆，可治療三高，高血糖、高血壓、高血脂和溶解血栓的作用

三、生物降解 (biodegradation)

(一) 生物降解的定義

生物降解指材料在生物體內通過溶解、酶解、細胞吞噬等作用，在組織長入的過程中不斷從體內排出，修復後的組織完全替代植入材料的位置，而材料在體內不存在殘留的性質。在本研究中指的是藉由環境中的微生物將某些物質以化學方式降解為自然元素。通常使用在關係到生態環境、廢棄物管理、生物醫學、自然環境等。現在，可生物降解一詞常用於環保產品，表示該產品能夠被微生物降解回歸自然。

(二) 生物降解材料

生物降解材料是指在適當和可知道期限的自然環境條件下，能夠被微生物（如：細菌、真菌和藻類等）完全降解變成低分子化合物的材料。

生物降解材料按其生物降解過程大致可分為兩類。一類為完全生物降解材料，如天然高分子纖維素、人工合成的聚己內酯等，其降解作用主要來自：**1.**由於微生物的迅速增長導致塑膠結構的物理性崩潰；**2.**由於微生物的生化作用、酶催化或酸鹼催化下的各種水解；**3.**其他各種因素造成的自由基連鎖式降解。另一類為生物崩解性材料，如澱粉和聚乙烯的摻合物，其降解作用主要由於添加劑被破壞並削弱了聚合物鏈，使聚合物分子量降解到微生物能夠消化的程度，最後降解為二氧化碳和水。(李蕙、余萬能、劉良炎，2006。)

肆、研究設備及器材

一、研究設備

本研究需要的實驗設備共 12 種，如圖 1 所示。

			
玻璃罐	26W 加熱墊	電子秤	量杯
			
電暖爐	攪拌機	整理箱	控溫器
			
培養土儀	8W 加熱墊	鏟子	澆花器
圖 1 研究設備			

二、實驗器材

本研究需要的實驗器材共 8 種，如圖 2 所示。

			
米糠	紅糖	椰纖	水苔
			
泥炭土	活性炭	麻布袋	棉蒸布
圖 2 實驗器材			

三、實驗菌種：

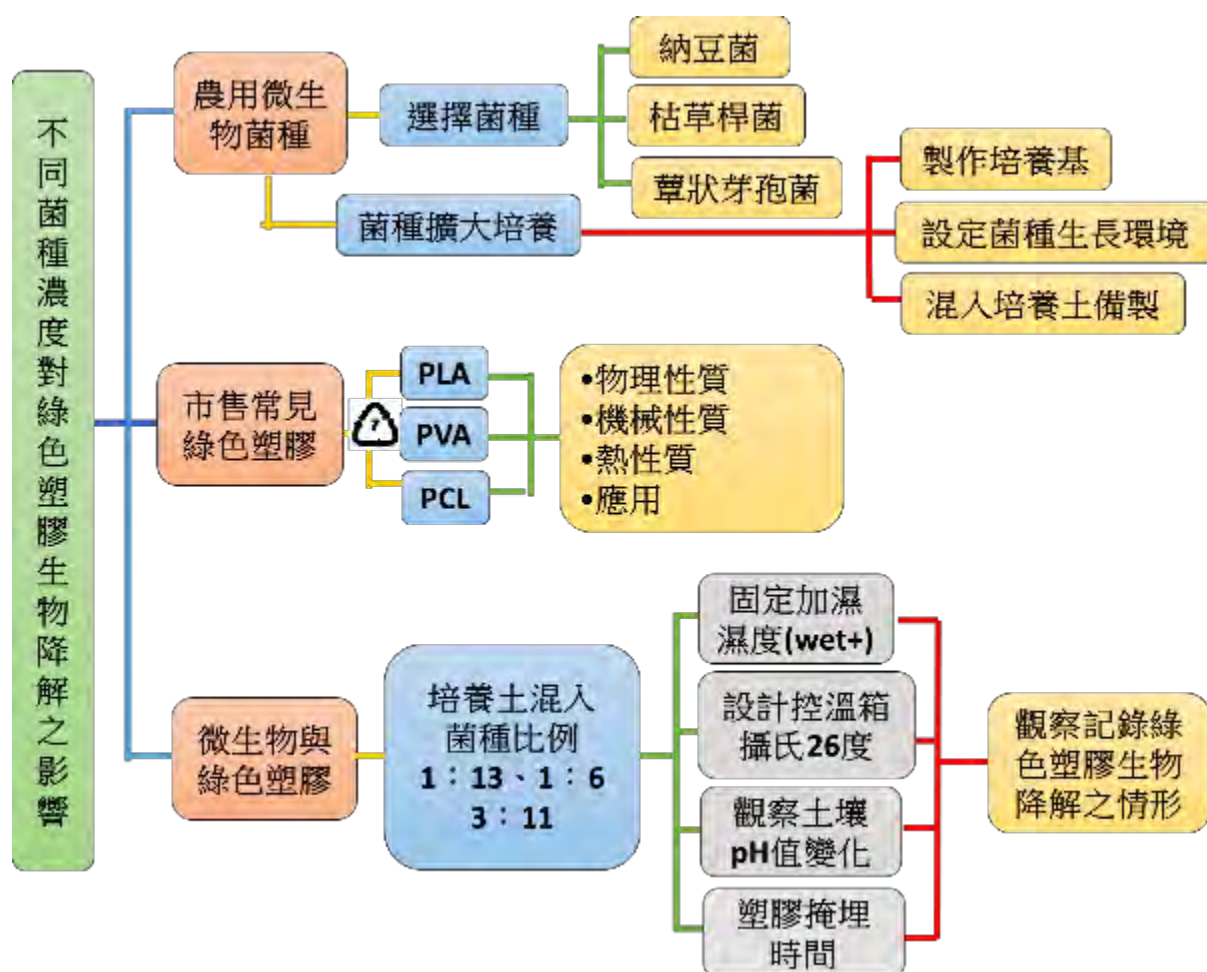
本研究實驗菌種為農用微生物：枯草桿菌、蕈狀芽孢菌、納豆菌三種，由市面購得後，經青旺生技公司技術指導、設備借用，自行操作擴大培養後使用，如圖 3 所示。



伍、研究過程及方法

一、研究流程

(一)研究流程圖



(二)研究進度甘特圖

1. 2017 年研究進度如下。



2. 2018 年研究進度如下。



二、擴大培養菌種

經諮詢進行酵素培養與加工的青旺生技有限公司，並且到該公司學習如何培養與活化菌種後，以下為本研究自行操作擴大培養菌種之方式：

(一)培養基準備材料

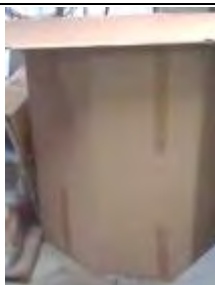
培菌前須先混合出菌種所需要的營養，即培養基，以下為所需培養基的材料與重量：1. 脫水豆粕 4 公斤；2. 紅糖 0.25 公斤；3. 米糠 1 公斤；4. 過濾水 5.25 公斤。

(二)菌種培育過程

菌種擴大培育之步驟如下：

1. 取納豆菌原菌 90 克(30 億/克)、枯草桿菌原菌取 270 克(10 億/克)、蕈狀芽孢菌原菌取 270 克(10 億/克)，個別倒入攪拌機中攪拌使乾料與菌能混合均勻。

2. 先使用 0.25 公斤紅糖與 5.25 公斤水混合，混合後加入攪拌機攪拌 5 分鐘，此處須注意水分問題，過多的水分會讓發酵速度比較慢。
3. 先鋪上麻布袋，再於麻布袋上鋪上乾淨的棉蒸布，倒入培養基與菌種的混合物後鋪平，再鋪上乾淨的棉蒸布以及麻布袋。
4. 視發酵溫度使用電暖器協助加溫，加溫時必須使用紙板隔離，避免溫度逸散。

			
混菌	將培養基與菌種的混合物取出	鋪上麻布袋	將培養基平鋪在棉蒸布上
			
將混和物取出	周圍罩上紙箱控溫	控溫即便是在夏天製作，發酵環境溫度仍然不足，因此我們在專家的建議使用電暖爐協助加溫，以營造可以成功發酵的環境	
圖 4 菌種擴大培育過程			

(三) 發酵環境設置

菌種需要在特定的高溫才會進行分裂繁殖，以下是發酵溫度及時間。

1. 發酵環境之溫度：先在溫度 40 度下維持 10 小時，然後在溫度 50 度下維持兩天，溫度不足時，使用電暖器協助加溫。
2. 發酵時間：發酵時間約兩天半，發酵時須注意當加溫超過 50 度後，細菌會形成細胞壁並且停止發酵、分裂。
3. 發酵後保存方式：在溫度為 60 度的環境下，使其乾燥便於保存以及後續利用。

三、菌種混入培養土

先使用水苔、椰纖、泥炭土、活性碳等介質混入培養土作為基底，之後在培養桶中依表 3 的比例和不同的菌種進行混合，在培養桶中發酵 10 週後再分裝到玻璃罐中。

表 3 培養桶編號及混菌比例表 (公升)

編號 菌種	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
蕈狀芽孢菌	0	0.5	1	1.5	0	0	0	0	0	0
枯草桿菌	0	0	0	0	0.5	1	1.5	0	0	0
納豆菌	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	1.5
混菌比例	0	1 : 13	1 : 6	3 : 11	1 : 13	1 : 6	3 : 11	1 : 13	1 : 6	3 : 11

	
水苔、椰纖、泥炭土、活性碳混合，並使用量杯測量並分裝。	將基底與菌種混合，攪拌均勻，免得菌種分散不均，影響實驗結果。
圖 5 將菌種混入培養土	

四、實驗過程與步驟

- (一) 設定對照組與實驗組，A 桶為不加入任何菌種之對照組，而 B~J 桶等 9 桶為加入依實驗設計比例之菌種之實驗組。
- (二) 每一培養桶使用加濕器加濕至培養土儀顯示 WET+，定期測量培養桶培養土酸鹼值，為期 10 週。
- (三) 準備玻璃罐 30 個，並在各罐中放入 700g 於培養桶取出之培養土。
- (四) 準備各 10g 的 PVA、PLA、PCL 並將其放入罐子中作為實驗組與對照組，混和後共有 PVA、PLA、PCL 各十罐。

- (五) 以 8W 加熱片、26W 加熱片、控溫器設計整理箱，使箱內溫度維持 26 度左右，以營造適合菌叢生長的環境。
- (六) 定期打開罐子，將其中的綠色塑膠(PVA、PLA、PCL)線段取出，用電子秤測量塑膠線段的重量及觀察塑膠碎裂之情形，並拍照及記錄。
- (七) 由於 PVA 為水溶性塑膠，遇水後會具有黏性，在掩埋的過程中會沾附許多的培養土與雜質，在測量重量時會造成測量誤差，因此統一沖洗，於隔日統一晾乾後再秤重。
- (八) 將秤重後取出之塑膠線材放置回實驗罐中，並以灑水器平均灑水以維持培養土溼度達 wet+後，放置回整理箱接上控溫器電源以維持攝氏 26 度溫暖潮濕之環境。

五、觀察與紀錄

定期將埋在玻璃罐中的綠色塑膠取出，然後藉由秤重、觀察綠色塑膠碎裂情形之方式進行觀察與測量，並將觀察與測量的結果以照片和紀錄表的方式詳實記錄，並將其輸入於電腦中，方便未來進行觀察與比對。

(一) 經過 7 日塑膠降解情形

觀察塑膠降解之碎裂情形，記錄如下表。

表 4 經過掩埋 7 日塑膠降解之碎裂情形

日期	PCL		PLA		PVA	
	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組
經過				B.D.F.G.I.J		
7 日	A 無碎裂	B.C.D.E.F.G. H.I.J 無碎裂	A 碎裂	無碎裂	A 碎裂	B.C.D.E.F.G. H.I.J 碎裂
(1/31)				C.E.H 碎裂		

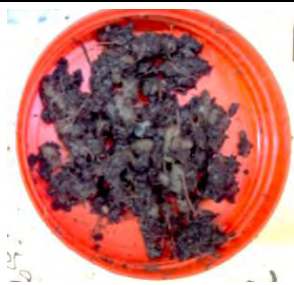
對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
B 蕈狀芽 孢菌 1 : 13			
C 蕈狀芽 孢菌 1 : 6			
D 蕈狀芽 孢菌 3 : 11			
E 枯草 桿菌 1 : 13			

圖 6 經過掩埋 7 日之對照組暨實驗組降解情形

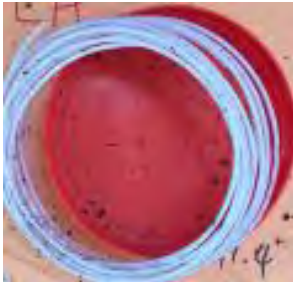
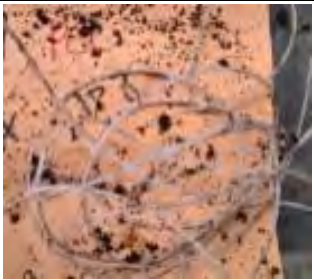
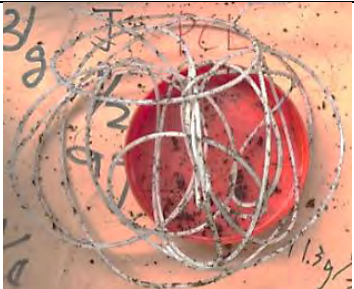
實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
F 枯草桿菌 1 : 6			
G 枯草桿菌 3 : 11			
H 納豆菌 1 : 13			
I 納豆菌 1 : 6			
J 納豆菌 3 : 11			

圖 7 經過掩埋 7 日之實驗組降解情形

(二) 經過掩埋 14 日塑膠降解情形

觀察塑膠降解之碎裂情形，記錄如下表。

表 5 經過掩埋 14 日塑膠降解之碎裂情形

日期	PCL		PLA		PVA	
	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組
經過				B.D.F.G.I.J		
14 日	A 無碎裂	B.C.D.E.F.G. H.I.J 無碎裂	A 碎裂	無碎裂	A 完全降解	B.C.D.E.F.G. H.I.J 碎裂
(2/7)				C.E.H 碎裂		

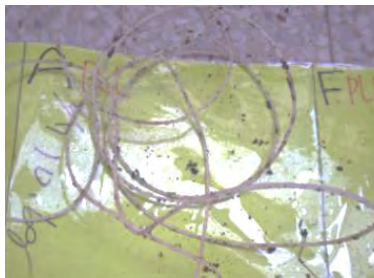
對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
B 蕈狀芽 孢菌 1 : 13			

圖 8 經過掩埋 14 日之對照組暨實驗組降解情形

實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
C 蕈狀芽 孢菌 1 : 6			
D 蕈狀芽 孢菌 3 : 11			
E 枯草 桿菌 1 : 13			
F 枯草 桿菌 1 : 6			
G 枯草 桿菌 3 : 11			
圖 9 經過掩埋 14 日之實驗組降解情形			

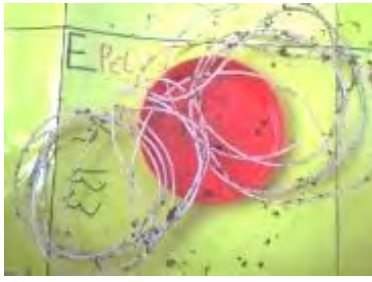
實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
H 納豆菌 1:13			
I 納豆菌 1:6			
J 納豆菌 3:11			
圖 10 經過掩埋 14 日之實驗組降解情形			

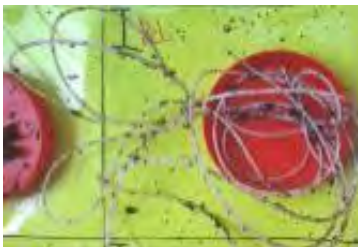
(三) 經過掩埋 24 日塑膠降解情形

觀察塑膠降解之碎裂情形，記錄如下表。

表 6 經過掩埋 24 日塑膠降解之碎裂情形

日期	PCL		PLA		PVA	
	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組
經過		B.C.D.E.H.I.		B.D.I.J		
24 日	A 無碎裂	J 無碎裂	A 碎裂	無碎裂	A 完全降解	B.C.D.E.F.G.
(2/27)		F.G 碎裂		C.E.H.G.F 碎裂		H.I.J 碎裂

對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
B 蕈狀芽 孢菌 1 : 13			
C 蕈狀芽 孢菌 1 : 6			
D 蕈狀芽 孢菌 3 : 11			
E 枯草 桿菌 1 : 13			
圖 11 經過掩埋 24 日之對照組暨實驗組降解情形			

實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
F 枯草桿菌 1 : 6			
G 枯草桿菌 3 : 11			
H 納豆菌 1 : 13			
I 納豆菌 1 : 6			
J 納豆菌 3 : 11			
圖 12 經過掩埋 24 日之實驗組降解情形			

(四) 經過掩埋 34 日塑膠降解情形

觀察塑膠降解之碎裂情形，記錄如下表。

表 7 經過掩埋 34 日塑膠降解之碎裂情形

日期	PCL		PLA		PVA	
	對照組	實驗組	對照組	實驗組	對照組	實驗組
經過		B.C.D.E.H.I.J		B.D.I.J		F.J 完全降解
34 日	A 無碎裂	無碎裂	A 碎裂	無碎裂	A 完全降解	B.C.D.E.G.H.
(3/09)		F.G 碎裂		C.E.G.H 碎裂		I 碎裂

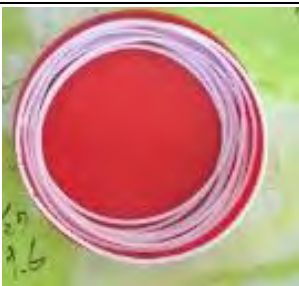
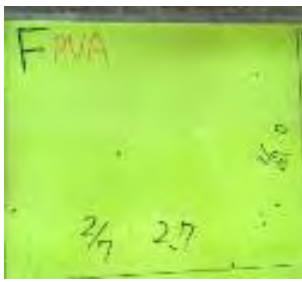
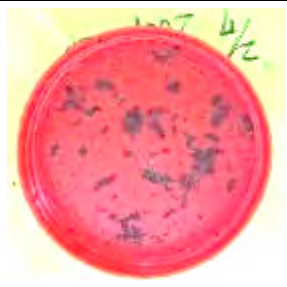
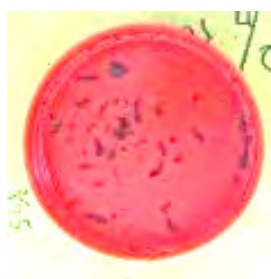
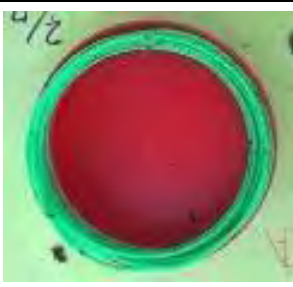
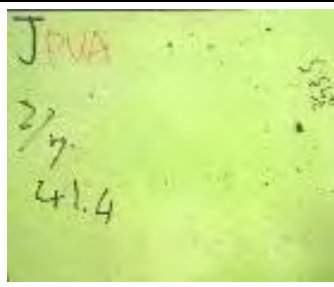
對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
B 蕈狀芽 孢菌 1 : 13			

圖 13 經過掩埋 34 日之對照組暨實驗組降解情形

圖 13 經過掩埋 34 日之對照組暨實驗組降解情形

實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
C 蕈狀芽 孢菌 1:6			
D 蕈狀芽 孢菌 3:11			
E 枯草 桿菌 1:13			
F 枯草 桿菌 1:6			
G 枯草 桿菌 3:11			
圖 14 經過掩埋 34 日之實驗組降解情形			

實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
H 納豆菌 1 : 13			
I 納豆菌 1 : 6			
J 納豆菌 3 : 11			
圖 15 經過掩埋 34 日之實驗組降解情形			

六、實驗數據分析之方式

(一)平均數：將每次測量重量之和/總數。

(二)百分比：將最後一天/第一天*100%，以了解綠色塑膠降解之程度。

陸、研究結果與討論

一、培養土混入不同菌叢發酵後，對培養土 pH 值的影響。

表 8 培養土 pH 值變化表

編號 日期	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	pH 值									
9 月 27 日	6	5.5	5	5.5	5	5	4.5	5	5	5
10 月 11 日	6.7	5.5	5	5	5	5.5	5	5	5	5.5
10 月 18 日	7	6.5	5.5	6.5	5.5	6.5	6.5	6.5	7	7
12 月 6 日	7	6.5	5.5	5.5	6	5.5	5.5	6.5	6.5	6.5

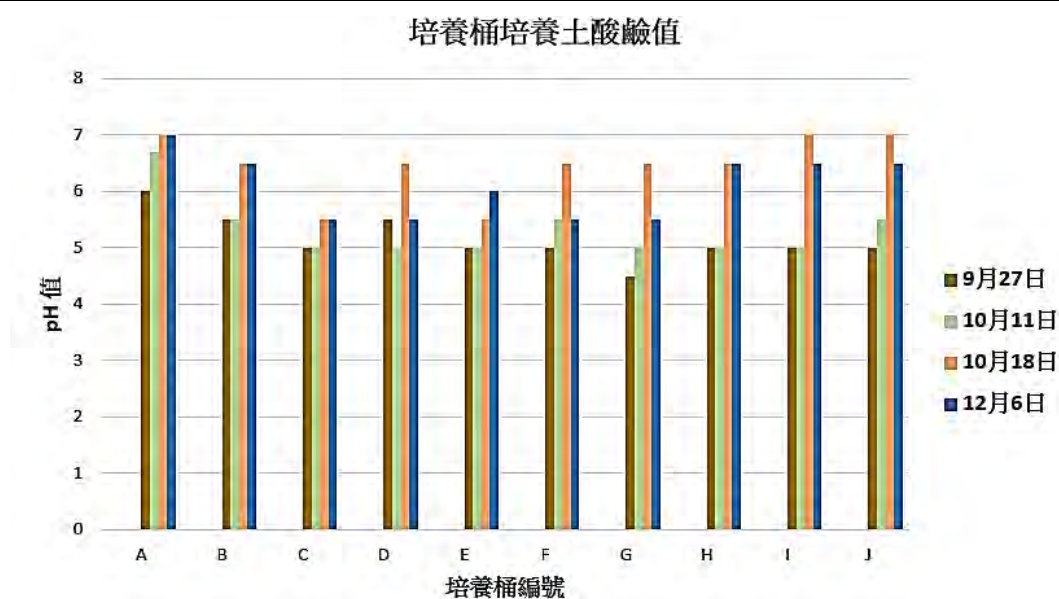


圖 16 培養土 pH 值變化圖

結果與討論

- (一) 觀察 9/27 之培養土酸鹼值可知，A~J 桶的培養土皆呈酸性，其中以 G 桶「枯草桿菌 1.5 公升」酸度最高，以 A 桶最趨近中性，故推論，在培養土中混入菌種會使得土壤酸性增加。
- (二) 經過 2 週的加濕、放置，除了 D 桶(蕈狀芽孢菌 1.5 公升)外，每一培養桶的培養土酸鹼值有上升或是持平的狀況，不含菌種的 A 桶 pH 值上升 0.7，說明加濕對培養土酸鹼值有趨近中性的影響，故 F、G、J 桶皆上升 pH 值 0.5，其他桶則是持平。
- (三) 經放置、加濕三週後，A、I、J 桶內的酸鹼值已為中性，且每一培養桶培養土酸鹼值皆有上升，平均上升 1.13，其中以 I 桶(納豆菌 1 公升)上升最多。

(四) 培養桶放置十週後，每一培養桶培養土酸鹼值皆為中性或是弱酸性，D、F、G、I、J 桶為弱酸性且 pH 值較上次測量下降，其中 D、G 桶 pH 值下降最多，pH 值下降 1.0。培養桶中以 G 桶(枯草桿菌 1.5 公升)最酸，經十週培養後，最終的 pH 值只上升 0.5 為 5.0，D 桶在放置、加濕十週的實驗處遇後，最終維持原來的 pH 值 5.5。

二、探討無混入菌種(A)之對照組對綠色塑膠降解之影響

表 9 對照組綠色塑膠降解紀錄表

綠色塑膠 日期	PLA	PCL	PVA
起始日	10	10	10
第 7 日	8.3	10	25
第 14 日	9.1	10.6	-
第 24 日	8.2	11.7	-
第 34 日	7.5	9.3	-
平均值(g)	8.6	10.3	7
剩餘重量百分比(%)	75%	93%	0%

對照組綠色塑膠降解情形

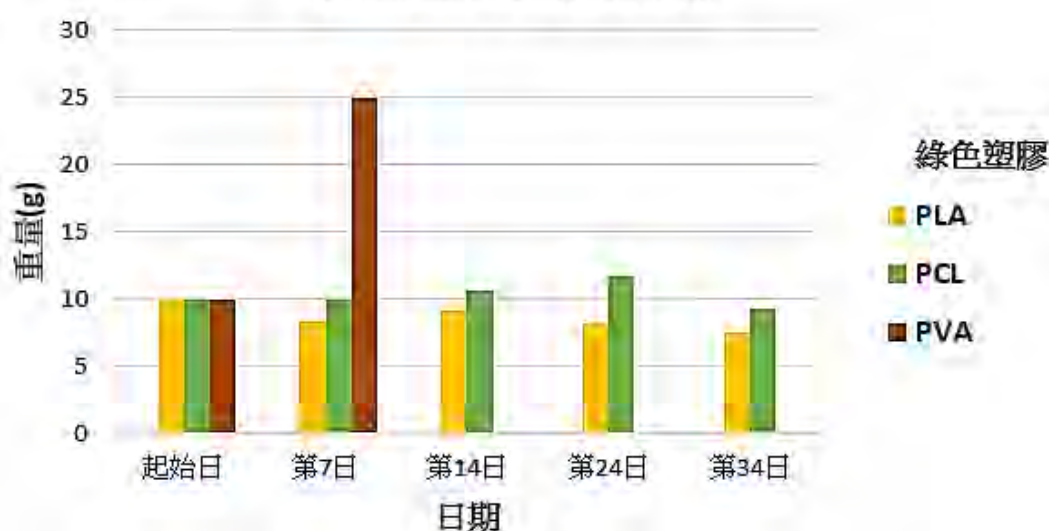


圖 17 對照組綠色塑膠降解變化圖

結果與討論

(一) 起始日，在無加入任何菌種的對照組，埋下各 10 克的 PLA、PVA、PCL，經過 34 天降解的結果為 PLA 已降解 25%；PVA 於 2/7 完全降解；PCL 降解 7%。

(二) 經過降解度百分比的比較分析後，降解速度最快的是 PVA，最慢的是 PCL。

(三) 經實驗結果得知，在無加入任何菌種，且維持高濕(wet+)、攝氏 26 度的環境下，降解速度最快的是 PVA，推測因 PVA 具水溶性，故不需要任何添加菌種的輔助，並可順利完全降解，而在無添加菌種的環境下對於 PLA、PCL 的降解是緩慢的。

三、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對 PLA 的影響

表 10 不同濃度菌種對於綠色塑膠 PLA 之降解情形

日期 編號	起始日	第 7 日	第 14 日	第 24 日	第 34 日	平均值(g)	剩餘重量百分比(%)
A	10	8.3	9.1	8.2	7.5	8.6	75%
B	10	10.3	9	9.6	9.6	9.7	96%
C	10	17.8	14.1	14.2	12.9	13.8	129%
D	10	10.4	10.2	10	9.8	10.0	98%
E	10	13.6	13.8	10.4	10.7	11.7	107%
F	10	11.4	11.1	11.4	10.8	10.9	108%
G	10	9.7	7.4	7.2	7	8.2	70%
H	10	20.1	11.2	8.6	8	11.5	80%
I	10	10.7	11.4	9.1	9.8	10.2	98%
J	10	9.7	11.4	10.4	10.1	10.3	101%
平均值(g)	10	12.2	10.8	9.9	9.6		

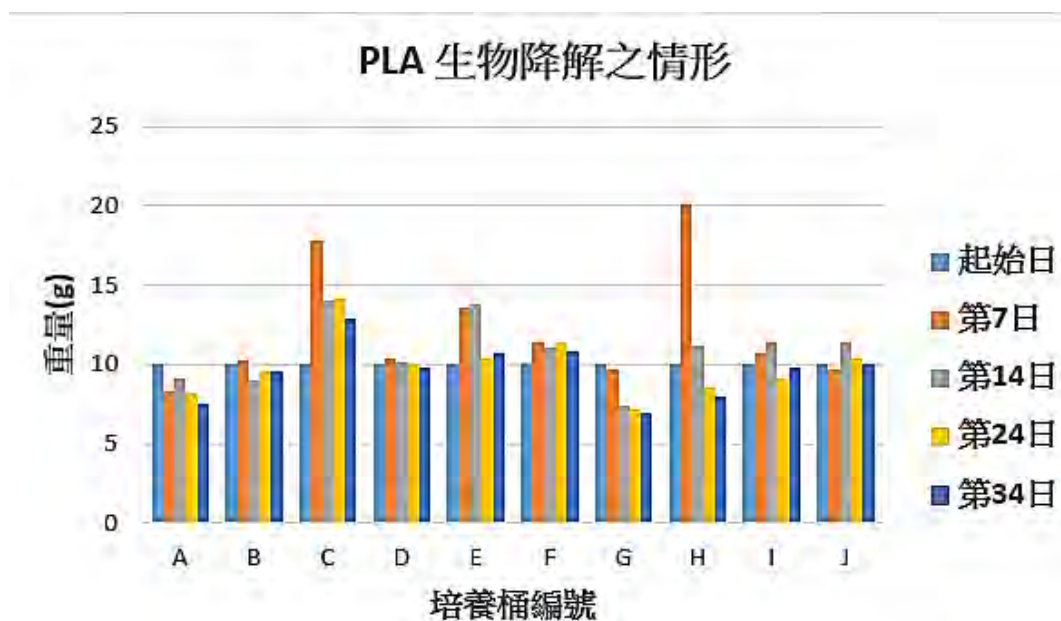


圖 18 不同濃度菌種對於綠色塑膠 PLA 之影響

結果與討論

- (一) 起始日，我們埋下了 10 克的 PLA，經過數十天後的結果為 A 罐的已降解 25%；B 罐降解 4%；C 罐吸水膨脹 29%；D 罐降解 2%；E 罐吸水膨脹 7%；F 罐吸水膨脹 8%；G 罐降解 30%；H 罐降解 20%；I 罐降解 2%；J 罐吸水膨脹 1%。
- (二) 經過降解度百分比的比較分析後，降解速度最快的是 G，最慢的是 C。
- (三) 經由實驗可知，降解 PLA 最快為比例 1：13 的蕈狀芽孢菌；其次為 3：11；降解最慢的比例為 1：6。
- (四) 經由實驗得知，降解 PLA 最快為比例 3：11 的枯草桿菌；其次為 1：13；降解最慢的比例為 1：6。
- (五) 經由實驗可知，降解 PLA 最快的納豆菌比例是 1：13；其次為 1：6；降解最慢的比例為 3：11。
- (六) 經實驗發現，針對 PLA 之降解，在同樣環境下以較高濃度的枯草桿菌的效果為最佳。

四、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對 PCL 的影響

表 11 不同濃度菌種對於綠色塑膠 PCL 之降解情形

日期 編號	起始日	第 7 日	第 14 日	第 24 日	第 34 日	平均值(g)	剩餘重量百分比(%)
A	10	10	10.6	11.7	9.3	10.3	93%
B	10	10.2	11.1	10.8	9.3	10.2	93%
C	10	11.4	13	7.2	11.5	10.6	115%
D	10	11.1	10.5	7.5	9.8	9.7	98%
E	10	12.3	13.3	12.4	10.2	11.6	116.4%
F	10	10.8	11	8.4	8.6	9.7	86%
G	10	10.2	7.7	8.8	5.9	8.5	59%
H	10	10.9	10.7	10.2	10.1	10.3	101%
I	10	12.1	11.4	10.3	10.1	10.7	101%
J	10	11.3	10.1	10.1	9.2	10.1	92%
平均值(g)	10	11.0	10.9	9.7	9.4		

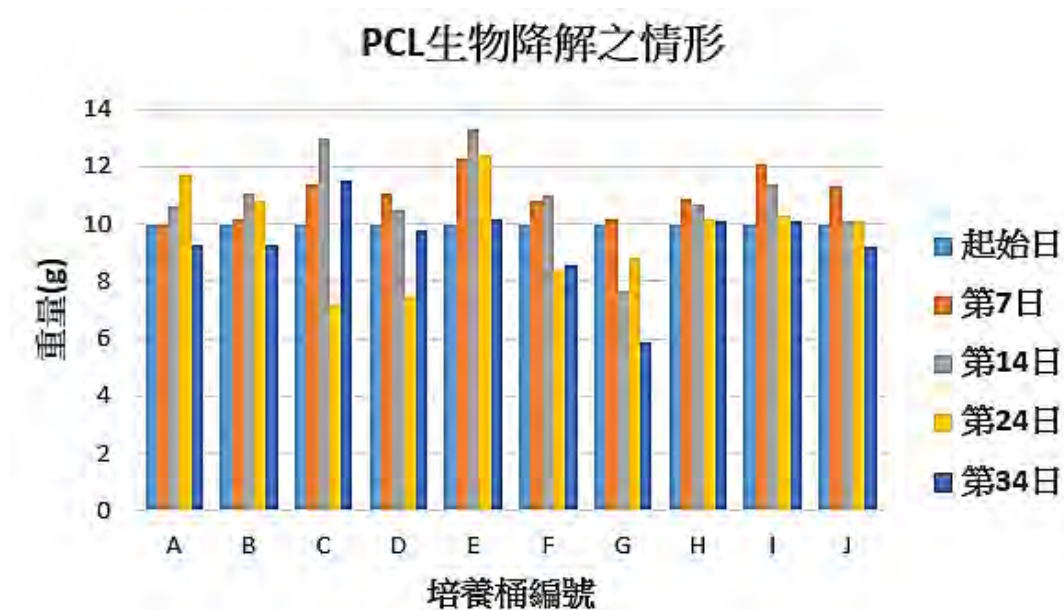


圖 19 不同濃度菌種對於綠色塑膠 PCL 之影響

結果與討論

- (一) 起始日，我們埋下了 10 克的 PCL，A 罐降解了 7%；B 罐降解了 7%；C 罐吸水膨脹了 15%；D 罐降解了 2%；E 罐吸水膨脹 16.4%；F 罐降解了 14%；G 罐降解 41%；H 罐吸水膨脹了 1%；I 罐吸水膨脹了 1%；J 罐降解了 8%。
- (二) 經過降解度百分比的比較分析後，降解速度最快的是 G，最慢的是 E。
- (三) 經實驗可知，降解 PCL 最快的蕈狀芽孢菌比例是 1：13；其次為 3：11；降解速度最慢的比例為 1：6。
- (四) 經實驗可知，降解 PCL 最快的枯草桿菌比例是 3：11；其次為 1：6；降解速度最慢的比例為 1：13。
- (五) 經實驗可知，降解 PCL 最快的納豆菌比例是 3：11；其次比例為 1：13 和 1：6。
- (六) 由實驗發現，針對 PCL 的降解，在同樣環境下以較高濃度的枯草桿菌的效果為最佳。

五、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對 PVA 的影響

表 12 不同濃度菌種對於綠色塑膠 PVA 之降解情形

日期 編號	起始日	第 7 日	第 14 日	第 24 日	第 34 日	平均值(g)	剩餘重量百分比(%)
A	10	25	0	0	0	7	0%
B	10	26	29	18.2	15.6	19.7	156%
C	10	51	19.7	8.5	0	17.8	0%
D	10	26	25.3	28.1	6.8	19.2	68%
E	10	34.9	32	17.3	7.5	20.3	75%
F	10	39	27	2.7	0	15.7	0%
G	10	28	24.4	13.8	0	15.2	0%
H	10	44	20.4	4	0	15.6	0%
I	10	39	30	5	0	16.8	0%
J	10	35.9	41.4	5.5	0	18.5	0%
平均值(g)	10	34.8	24.9	10.3	2.9		

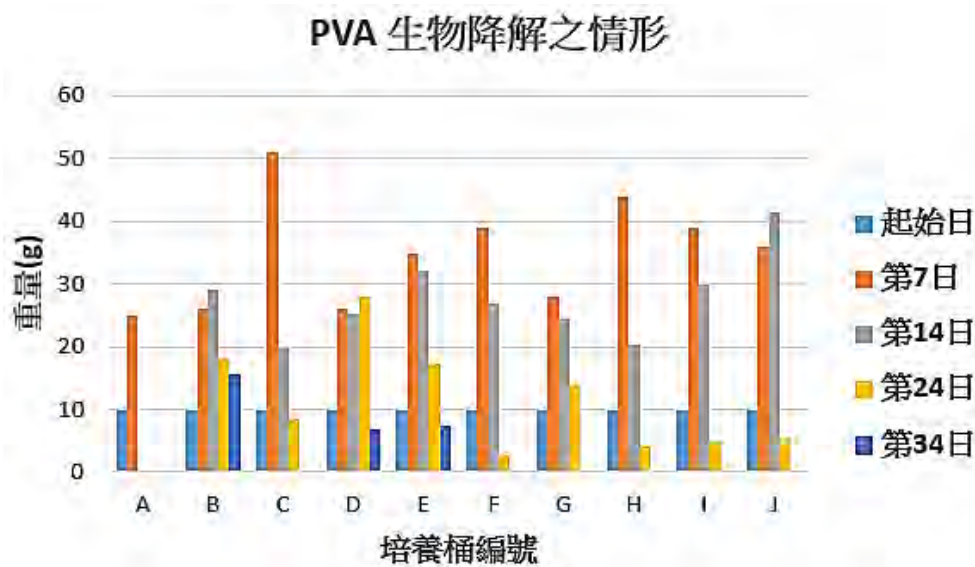


圖 20 不同濃度菌種對於綠色塑膠 PVA 之影響

結果與討論

- (一) 起始日，我們埋下了 10 克的 PVA，A 罐於 2/7 完全降解；B 罐吸水膨脹 56%；C 罐於 3/9 完全降解；D 罐降解 32%；E 罐降解 25%；F、G、H、I、J 罐於 3/9 完全分解。
- (二) 經過降解度百分比的比較分析後，降解速度最快的是 G，最慢的是 E。
- (三) 由實驗可知，降解 PVA 最快的蕈狀芽孢菌比例是 1：6；其次為 3：11；降解速度最慢的比例為 1：13。
- (四) 經由實驗可知，降解 PVA 最快的枯草桿菌比例是 1：6 和 3：11；其次為 1：13。
- (五) 經由實驗可知，納豆菌比例 1：13、1：6、3：11 完全降解 PVA。
- (六) 以加入菌種之實驗組作為比較，由實驗可得知，針對 PVA 的降解，在同樣環境下以較高濃度的枯草桿菌的效果是最好的，但是因 PVA 具水溶性，故在各種環境下完全降解皆無太大差異，故在降解 PVA 時，建議可直接使用高濕環境降解。

六、找出三種菌種中最適合做為降解綠色塑膠的菌種。

依據前述研究結果可知，枯草桿菌與培養土 3：11 的混和狀態下，對於三種綠色塑膠的降解程度皆最快，因此我們推論，培養土混入較高濃度的枯草桿菌，對於綠色塑膠之生物降解會有較佳的表現。

柒、結論

一、依培養土 pH 值變化，可知當培養土混入菌叢後，在控制溫度與濕度的環境下，各實驗組培養土酸鹼值由 pH6.0 降為 pH4.5~5.5，並在降解過程中逐漸回升至 pH5.5~6.5。

二、以控制組 A 桶為不加入任何菌種之對照組之實驗結果可得知。

(一) 定期加濕及控溫於攝氏 26 度對於培養土酸鹼值有趨向中性化之影響。

(二) 經過 7 日，有關 PLA 暨 PVA 之對照組均是碎裂的狀況，故推論，給予高濕、高溫的環境，有助於 PLA、PVA 之降解。

(三) 經過 14 日，PVA 之對照組均是完全降解的狀況，而實驗組是碎裂的狀況，故推論，加入微生物幫助 PVA 降解時，可能會產生生物抗拮，反而使 PVA 降解速度變慢，但此假設還需要再做實驗證實。

(四) 有關不同濃度菌種對於綠色塑膠 PLA 之影響，A 罐的最終已降解 25%，僅次於 G 罐降解 30%。

(五) 不同濃度菌種對於綠色塑膠 PVA 之影響，A 罐於 2/7 完全降解。

(六) 三種綠色塑膠在未添加菌種的對照組中亦有良好的降解情形，其中以 PVA 最容易降解，其次依序為 PLA 及 PCL，故給予高濕、高溫的環境有助於 PLA、PVA 之降解。

三、依研究結果直條圖，枯草桿菌 G 罐(3：11)降解 PLA、PCL 最為明顯，PVA 相較於其他塑膠的降解度，降解情形較不明顯；降解 PVA 最佳為不加任何菌種的培養土，PVA 被降解時會裂解成小段，同時也會因吸收土中的水分而造成黏著與膨脹。

四、PVA 為水溶性塑膠，遇水後會具有黏性，在測量重量時常會參雜許多雜質，因此進行實驗的時候必須採取額外處理的方式，以降低雜質對於實驗數據的干擾。

五、依據實驗結果可知，三種實驗菌種中，以枯草桿菌對 PCL 及 PLA 的降解效果最佳，而枯草桿菌與培養土的最佳調配比例為 3：11，因此建議可以採用枯草桿菌與培養土

混和，達到加速綠色塑膠降解之目的，可在家備用以降解使用過之綠色塑膠。

六、依文獻探討及本研究結論提出幾點綠色塑膠運用上的建議，在製作塑膠袋時，如是用來承裝乾燥物品，建議使用水溶性塑膠 PVA，因塑膠袋是生活中最常使用到的塑膠產品，所以，以降解度越高者為最佳，但由文獻探討得知 PVA 在空氣中加熱至 100℃ 以上會慢慢變色、脆化，因此無法作為耐熱袋使用；而結構強度最好的是聚乳酸 PLA，依文獻所知，PLA 的耐熱溫度為攝氏 50 度，故製作常溫盛裝容器部分，建議使用 PLA。

捌、未來展望

一、除了將這次實驗中有疏失的部分重新研究，希望能將培養土混合枯草桿菌濃度對於降解綠色塑膠之相關進行詳細研究，讓此研究更完善。並探討埋入綠色塑膠之含菌培養土，回歸自然後是否對自然環境之土壤的降解或生態造成影響。

二、依本實驗及廢棄物清理法，建議將回收編號 7 號「其他類塑膠」中的「綠色塑膠」進行單獨分類及回收處理，綠色塑膠容器與傳統塑膠容器的外觀相似，民眾不易辨識，加上與除了回收 1 號至回收編號 6 號的塑膠之外，都歸在回收編號 7 號其他類塑膠，造成民眾無法辨識綠色塑膠，且經本實驗研究可知，降解綠色塑膠需有條件的環境控制，方可達到生物降解的預期效果，且能避免與其他塑膠一起回收，使塑膠回收再製品質受到影響，導致再製塑膠結構強度變弱，如此也才能真正落實「減塑」。

玖、參考資料及其他

- E. S. Stevens(2002). *Green Plastics: An Introduction to the New Science of Biodegradable Plastics*.
李蕙、余萬能、劉良炎(2006)。《澱粉基生物降解塑料的開發與應用現狀》。化學與生物工程 2006, Vol.23 No.5 p.3-p.5
鄧婷、張書慈、陳彥中(2010)。《聚乳酸(PLA)、聚己內酯(PCL)、聚乙醇醇(PVA)三種生物可降解性高分子聚合物之物化性比較研究》。縣立后綜高中。

蔡億穎、謝楷立(2009)。PET 與 PLA 共混材料之降解研究。中華民國第 50 屆中小學科學展覽會，高中組化學科。

李沂臻(2013)。塑膠袋，行不行。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學科。

林宜珊、郭玗儀、黃靖娟(2009)。環保的救星-綠色塑膠。高雄市立高雄職業商業學校。

楊秋忠(2018)。培養土微生物世界。教育部國家講座簡報資料。

行政院環保署(2012)。應標示回收相關標誌之物品或容器責任業者範圍、標誌圖樣大小、位置及其他應遵行事項。<https://goo.gl/jf48Xc>

【評語】 082916

1. 運用生物降解綠色塑膠的研究，符合環保概念。
2. 對於本次實驗所選用的微生物造成 PCL、PLA 降解緩慢之情形，建議可在搜集文獻資料與嘗試延長實驗期程或輔以其他微生物以深入探究。

壹、研究動機

為了減少難以被降解的塑膠使用量，我們想要推廣綠色塑膠的使用，且讓民眾在家就能降解使用過的綠色塑膠以達圾垃減量和有效的塑膠分類及回收。

本研究嘗試藉由實驗探討市售常見綠色塑膠之生物降解情形，選擇容易取得的農業用微生物：**納豆菌**、**蕈狀芽孢菌**、**枯草桿菌**，以這三種不同菌種對市面上常見的綠色塑膠進行降解實驗，計有**聚乳酸 (PLA)**、**聚乙烯醇(PVA)**、**聚己內酯(PCL)**三種，嘗試找出最容易被降解的綠色塑膠，以及比較不同菌種對綠色塑膠降解之情形並篩選優勢之降解菌種。

參、文獻探討

一、綠色塑膠(Bioplastic)

綠色塑膠是一種生物可降解材料，指在有足夠的溼度、氧氣與適當微生物存在的自然掩埋或堆肥環境中，可被微生物所代謝降解產生水和二氧化碳或甲烷。

二、納豆菌、枯草桿菌與蕈狀芽孢菌

三、生物降解 (Biodegradation)

(一) 生物降解的定義

研究指的是藉由環境中的微生物將某些物質以化學方式降解為自然元素。

(二) 生物降解材料

在適當和可知期限的自然環境條件下，能被微生物完全降解成低分子化合物。

伍、研究過程及方法

一、研究流程

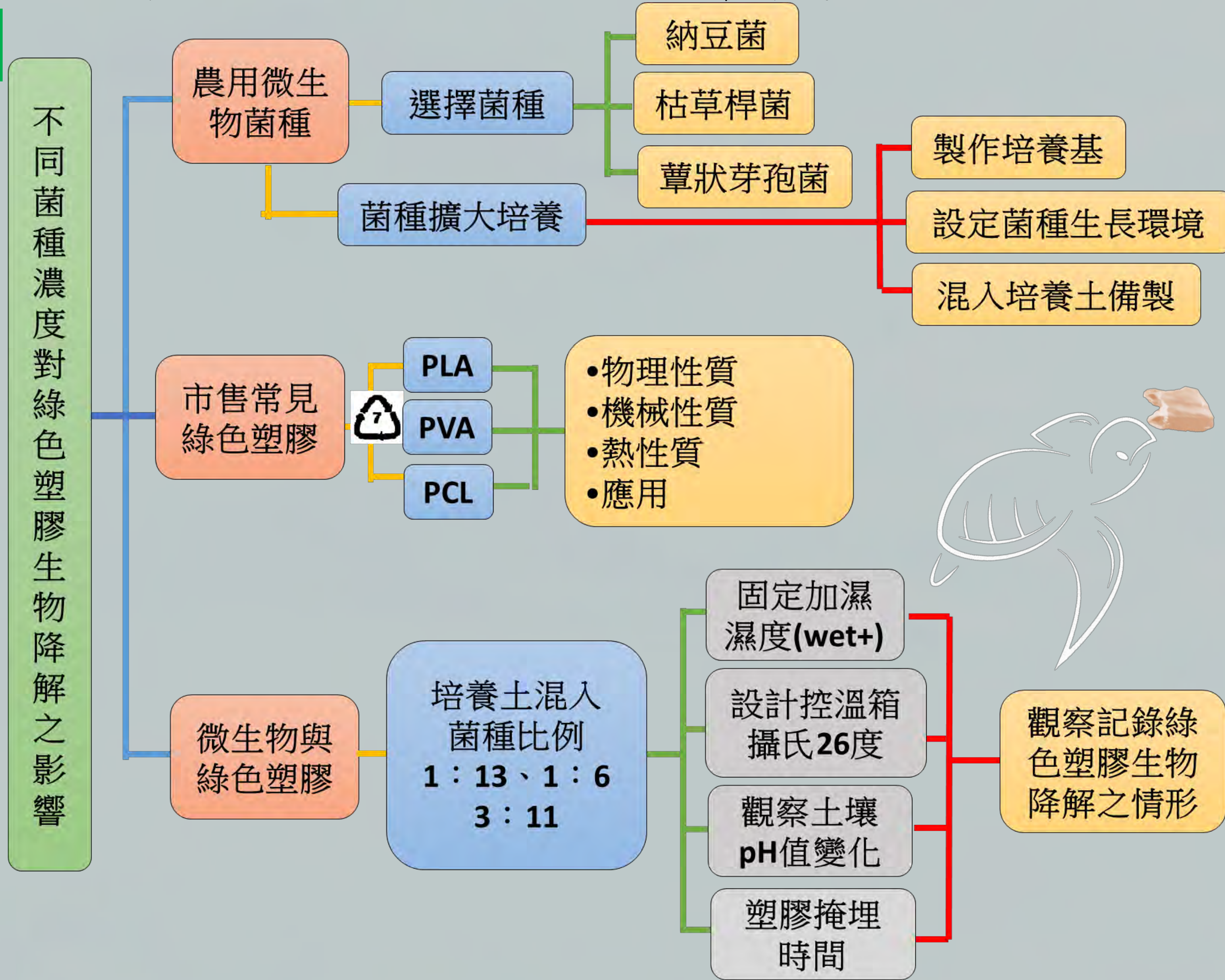
(一)研究流程圖

(二)研究進度甘特圖(略)



二、擴大培養菌種

經諮詢進行酵素培養與加工的青旺生技有限公司，並且到該公司學習如何培養與活化菌種後，以下為本研究自行操作擴大培養菌種之方式：



- 1.培養基混入菌種
- 2.將攪拌均勻的混合物取出
- 3.在地板鋪上麻布袋
- 4.在棉蒸布上鋪平混和物
- 5.周圍罩上紙箱控溫
- 6.使用電暖爐協助加溫，以營造可以成功發酵的環境

三、菌種混入培養土

編號 菌種	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
蕈狀芽孢菌	0	0.5	1	1.5	0	0	0	0	0	0
枯草桿菌	0	0	0	0	0.5	1	1.5	0	0	0
納豆菌	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	1.5
混菌比例	0	1 : 13	1 : 6	3 : 11	1 : 13	1 : 6	3 : 11	1 : 13	1 : 6	3 : 11



水苔、椰纖、泥炭土、活性炭混合，並使用量杯測量並分裝



將基底與菌種混合，攪拌均勻，免得菌種分散不均，影響實驗結果

貳、研究目的

- 一、瞭解培養土混入不同農業用菌叢發酵後，對培養土酸鹼值之影響。
- 二、探討**不加入**農用微生物之培養土對綠色塑膠PLA、PVA、PCL降解之影響。
- 三、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對**聚乳酸(PLA)**降解之影響。
- 四、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對**聚乙烯醇(PVA)**降解之影響。
- 五、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對**聚己內酯(PCL)**降解之影響。
- 六、探究三種農業用菌種中最適合做為生物降解綠色塑膠之菌種。
- 七、依研究結論提出綠色塑膠於運用上之建議。

肆、研究設備及器材

- 一、研究設備(詳見說明書)
- 二、實驗器材(詳見說明書)
- 三、實驗菌種



枯草桿菌



蕈狀芽孢菌



納豆菌

四、 實驗過程與步驟

- (一) 設定對照組與實驗組，A桶為不加入任何菌種之對照組，而B~J桶等9桶為實驗組。
- (二) 每一培養桶使用加濕器加濕至土壤儀顯示WET+，定期測量培養桶培養土酸鹼值，為期10週。
- (三) 準備玻璃罐30個，並在各罐中放入700g於培養桶取出之培養土。
- (四) 準備各10g的PVA、PLA、PCL並將其放入罐子中，混和後共有PVA、PLA、PCL各十罐。
- (五) 以8W加熱片、26W加熱片、控溫器設計整理箱，使箱內溫度維持26度左右。
- (六) 定期打開罐子，將其中的綠色塑膠線段取出，測量塑膠線段的重量及觀察塑膠碎裂之情形。
- (七) 由於PVA為水溶性塑膠，遇水後會具有黏性，在掩埋的過程中會沾附許多的培養土與雜質，在測量重量時會造成測量誤差，因此統一沖洗，於隔日統一晾乾後再秤重。
- (八) 將秤重後將取出之塑膠線材放置回實驗罐中，並以灑水器平均灑水以維持培養土溼度達wet+後，放置回整理箱接上控溫器電源以維持攝氏26度溫暖潮濕之環境。

五、觀察與紀錄：藉由秤重、觀察綠色塑膠碎裂情形之方式進行觀察與測量。

(一) 掩埋7日塑膠降解情形

對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
B 單狀芽 孢菌 1:13			
C 單狀芽 孢菌 1:6			
D 單狀芽 孢菌 3:11			

(二) 掩埋14日塑膠降解情形

對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
B 單狀芽 孢菌 1:13			
C 單狀芽 孢菌 1:6			
D 單狀芽 孢菌 3:11			

(三) 掩埋24日塑膠降解情形

對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
B 單狀芽 孢菌 1:13			
C 單狀芽 孢菌 1:6			
D 單狀芽 孢菌 3:11			

(四) 掩埋34日塑膠降解情形

對照組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
A 無			
實驗組			
B 單狀芽 孢菌 1:13			
C 單狀芽 孢菌 1:6			
D 單狀芽 孢菌 3:11			

實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
E 枯草 桿菌 1:13			
F 枯草 桿菌 1:6			
G 枯草 桿菌 3:11			
H 納豆菌 1:13			
I 納豆菌 1:6			
J 納豆菌 3:11			

實驗組			
材質 菌種	PCL	PLA	PVA
E 枯草 桿菌 1:13			
F 枯草 桿菌 1:6			
G 枯草 桿菌 3:11			
H 納豆菌 1:13			
I 納豆菌 1:6			
J 納豆菌 3:11			

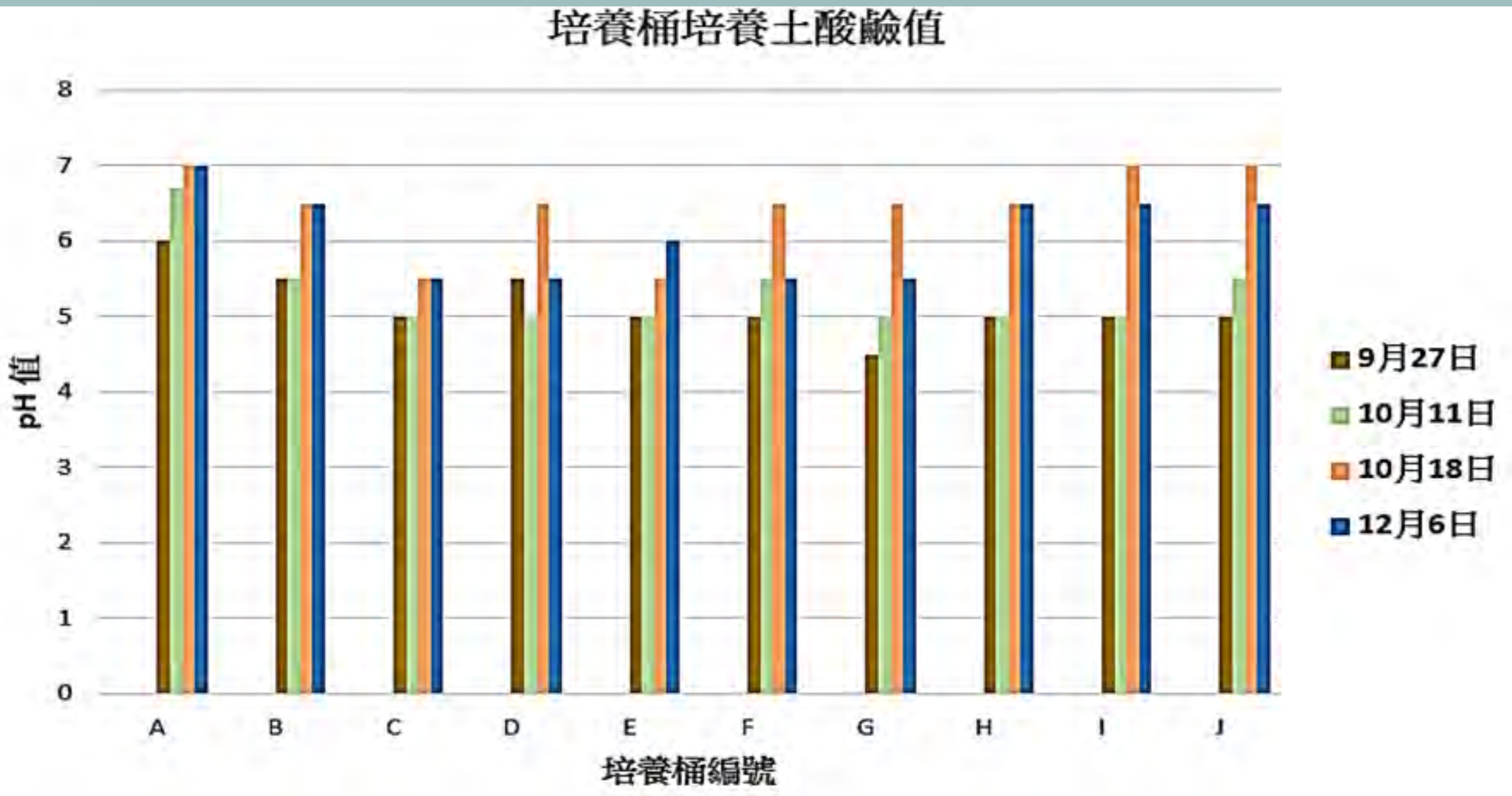
六、實驗數據分析之方式

- (一)平均數：將每次測量重量之和/總數。
- (二)百分比：將最後一天/第一天*100%，以了解綠色塑膠降解之程度。

陸、研究結果與討論

一、培養土混入不同菌叢發酵後，對培養土pH值的影響。

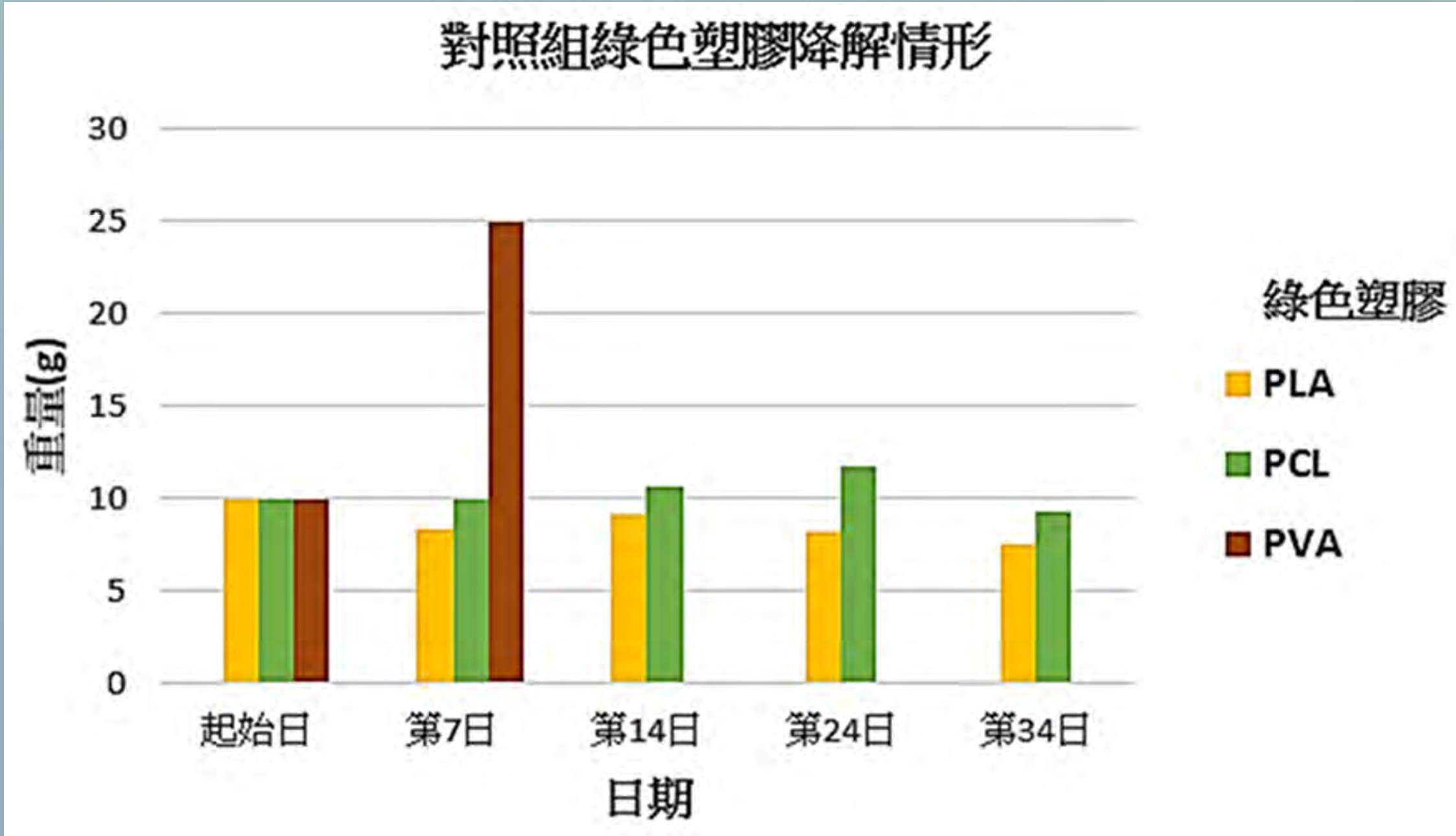
編號 日期	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	pH 值									
9月27日	6	5.5	5	5.5	5	5	4.5	5	5	5
10月11日	6.7	5.5	5	5	5	5.5	5	5	5	5.5
10月18日	7	6.5	5.5	6.5	5.5	6.5	6.5	6.5	7	7
12月6日	7	6.5	5.5	5.5	6	5.5	5.5	6.5	6.5	6.5



培養桶放置十週後，每一培養桶培養土酸鹼值皆為中性或是弱酸性

二、探討無混入菌種(A)之對照組對綠色塑膠降解之影響

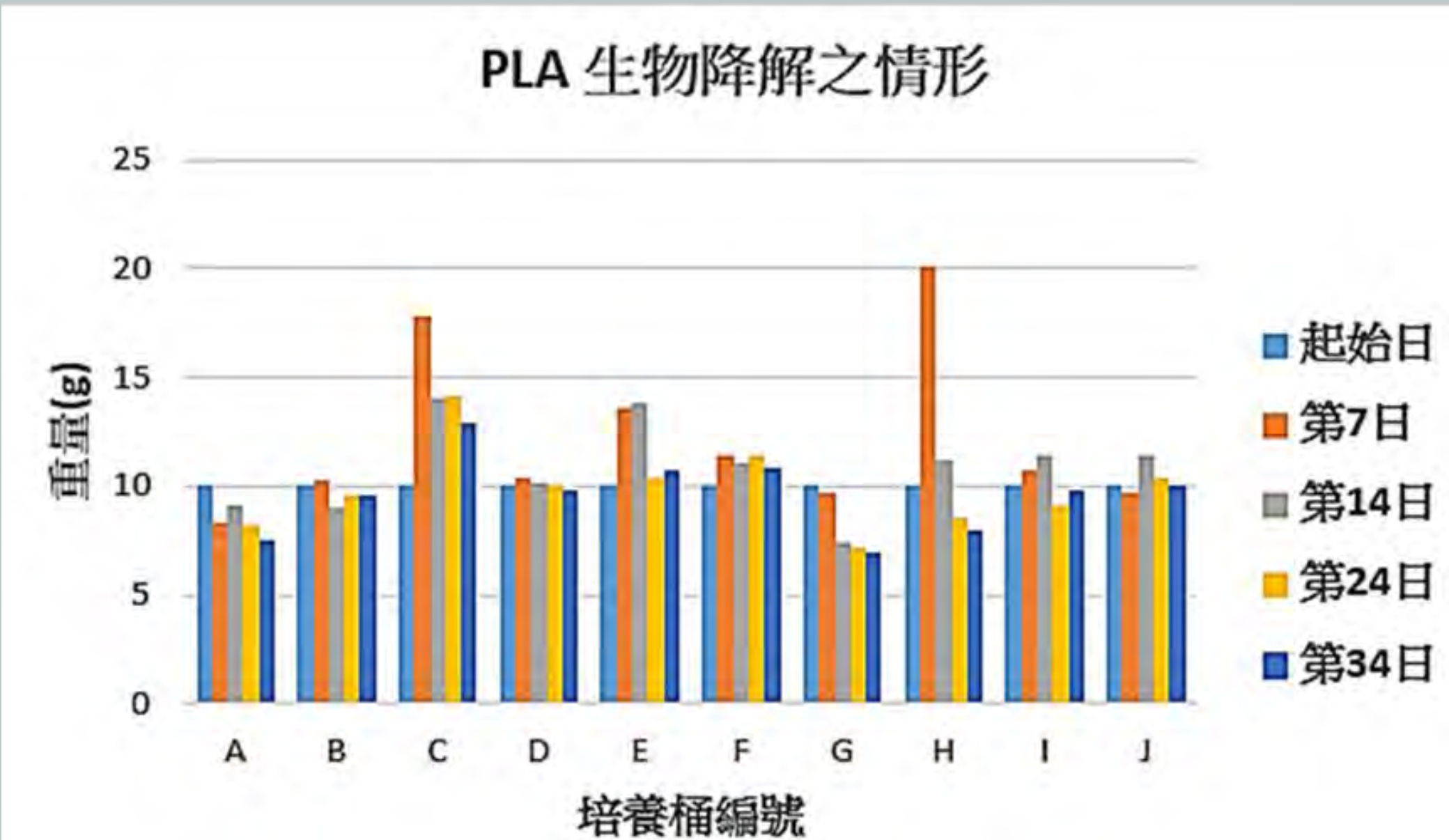
綠色塑膠 日期	PLA	PCL	PVA
	PLA	PCL	PVA
起始日	10	10	10
第7日	8.3	10	25
第14日	9.1	10.6	-
第24日	8.2	11.7	-
第34日	7.5	9.3	-
平均值(g)	8.6	10.3	7
剩餘重量百分比(%)	75%	93%	0%



在無加入任何菌種，且維持高濕(wet+)、攝氏26度的環境下，降解速度最快的是PVA，推測因PVA具水溶性，故不需要任何添加菌種的輔助，並在無添加菌種的環境下對於PLA、PCL 的降解是緩慢的。

三、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對PLA的影響

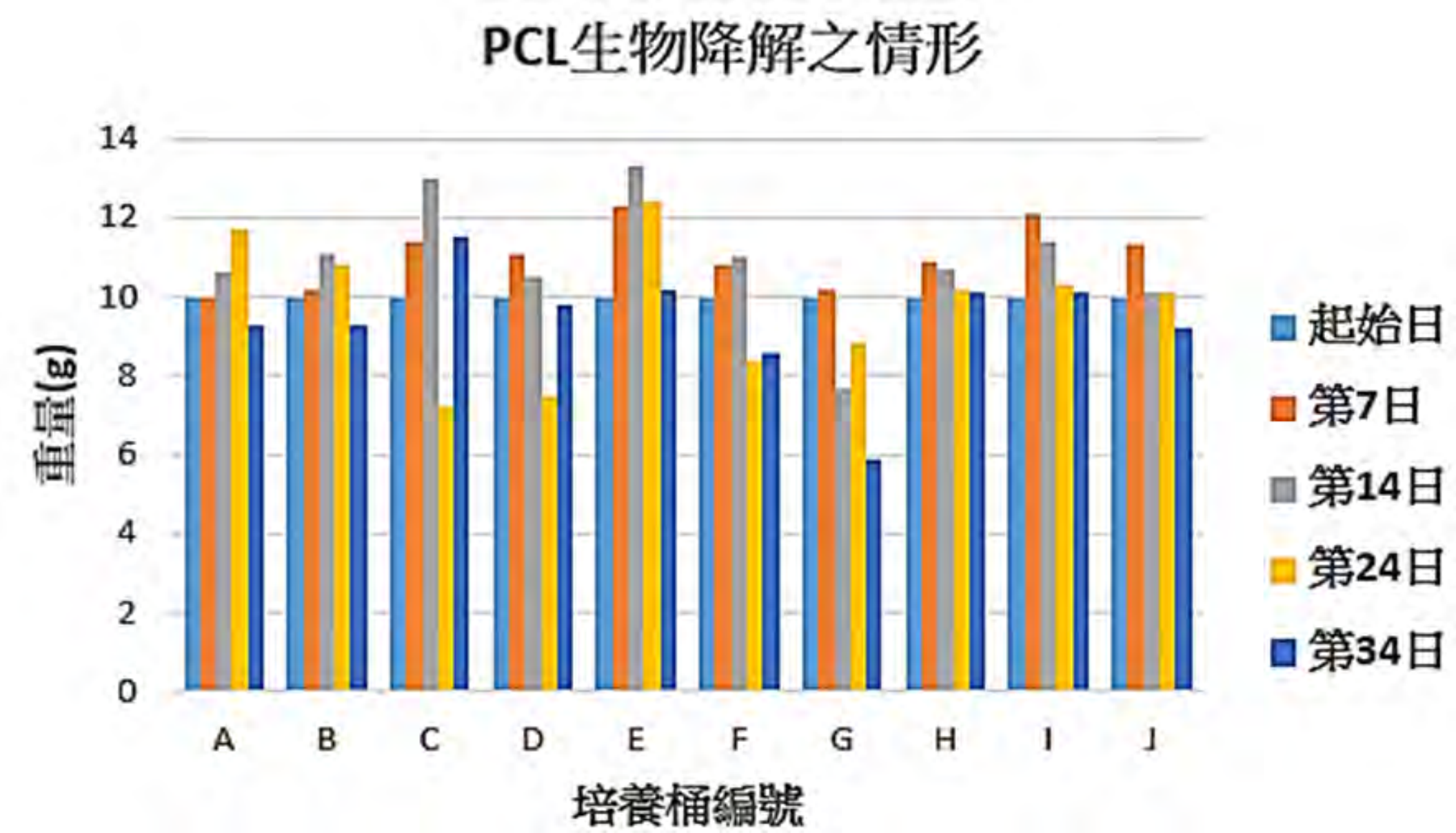
日期 編號	起始日	第 7 日	第 14 日	第 24 日	第 34 日	平均值(g)	剩餘重量百分比(%)
A	10	8.3	9.1	8.2	7.5	8.6	75%
B	10	10.3	9	9.6	9.6	9.7	96%
C	10	17.8	14.1	14.2	12.9	13.8	129%
D	10	10.4	10.2	10	9.8	10.0	98%
E	10	13.6	13.8	10.4	10.7	11.7	107%
F	10	11.4	11.1	11.4	10.8	10.9	108%
G	10	9.7	7.4	7.2	7	8.2	70%
H	10	20.1	11.2	8.6	8	11.5	80%
I	10	10.7	11.4	9.1	9.8	10.2	98%
J	10	9.7	11.4	10.4	10.1	10.3	101%
平均值(g)	10	12.2	10.8	9.9	9.6		



針對PLA之降解，在同樣環境下以較高濃度的枯草桿菌的效果為最佳。

四、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對PCL的影響

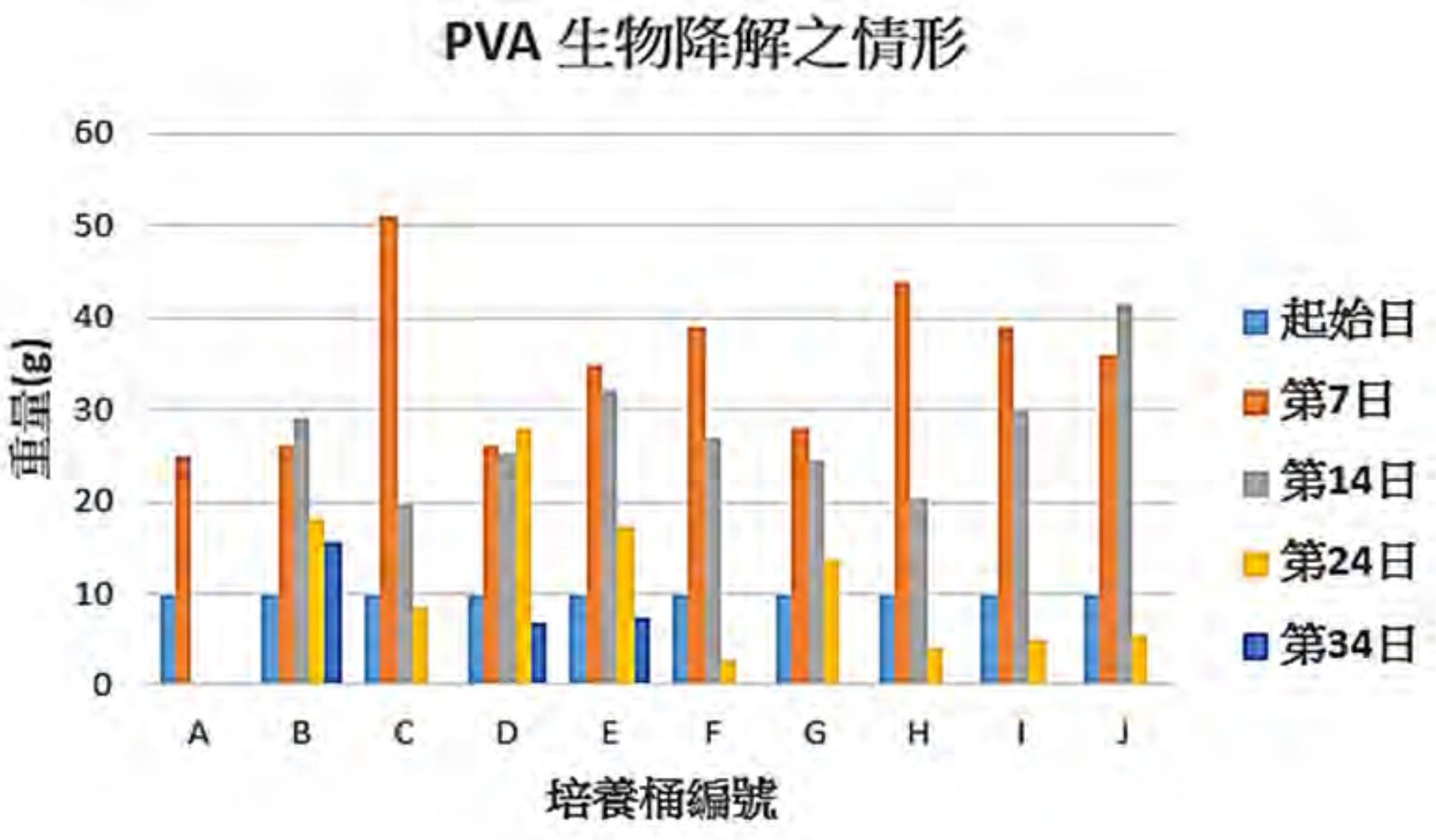
日期 編號	起始日	第 7 日	第 14 日	第 24 日	第 34 日	平均值(g)	剩餘重量百分比(%)
A	10	10	10.6	11.7	9.3	10.3	93%
B	10	10.2	11.1	10.8	9.3	10.2	93%
C	10	11.4	13	7.2	11.5	10.6	115%
D	10	11.1	10.5	7.5	9.8	9.7	98%
E	10	12.3	13.3	12.4	10.2	11.6	116.4%
F	10	10.8	11	8.4	8.6	9.7	86%
G	10	10.2	7.7	8.8	5.9	8.5	59%
H	10	10.9	10.7	10.2	10.1	10.3	101%
I	10	12.1	11.4	10.3	10.1	10.7	101%
J	10	11.3	10.1	10.1	9.2	10.1	92%
平均值(g)	10	11.0	10.9	9.7	9.4		



針對PCL的降解，在同樣環境下以較高濃度的枯草桿菌的效果為最佳。

五、探討不同濃度的納豆菌、枯草桿菌、蕈狀芽孢菌對PVA的影響

日期 編號	起始日	第 7 日	第 14 日	第 24 日	第 34 日	平均值(g)	剩餘重量百分比(%)
A	10	25	0	0	0	7	0%
B	10	26	29	18.2	15.6	19.7	156%
C	10	51	19.7	8.5	0	17.8	0%
D	10	26	25.3	28.1	6.8	19.2	68%
E	10	34.9	32	17.3	7.5	20.3	75%
F	10	39	27	2.7	0	15.7	0%
G	10	28	24.4	13.8	0	15.2	0%
H	10	44	20.4	4	0	15.6	0%
I	10	39	30	5	0	16.8	0%
J	10	35.9	41.4	5.5	0	18.5	0%
平均值(g)	10	34.8	24.9	10.3	2.9		



針對PVA的降解，在同樣環境下以較高濃度的枯草桿菌的效果是最好的，但是因PVA具水溶性，故在各種環境下完全降解皆無太大差異，故在降解PVA時，建議可直接使用高濕環境降解。

六、找出三種菌種中最適合做為降解綠色塑膠的菌種。

枯草桿菌與培養土3：11的混和狀態下，對於三種綠色塑膠的降解程度皆最快，因此我們推論，培養土混入較高濃度的枯草桿菌，對於綠色塑膠之生物降解會有較佳的表現。

柒、結論

一、以控制組A桶為不加入任何菌種之對照組之實驗結果可得知。

(一) 定期加濕及控溫於攝氏26度對於培養土酸鹼值有趨向中性化之影響。

(二) 經過7日，有關PLA暨PVA之對照組均是碎裂的狀況，故推論，給予高濕、高溫的環境，有助於PLA、PVA之降解。

(三) 經過14日，PVA之對照組均是完全降解的狀況，而實驗組是碎裂的狀況，故推論，加入微生物幫助PVA降解時，可能會產生生物抗拮，反而使PVA降解速度變慢，但此假設還需要再做實驗證實。

(四) 有關不同濃度菌種對於綠色塑膠PLA之影響，A罐的最終已降解25%，僅次於G罐降解30%。

(五) 不同濃度菌種對於綠色塑膠PVA之影響，A罐於2/7完全降解。

(六) 三種綠色塑膠在未添加菌種的對照組中亦有良好的降解情形，其中以PVA最容易降解，其次依序為PLA及PCL，故給予高濕、高溫的環境有助於PLA、PVA之降解。

二、依文獻探討及本研究結論提出幾點綠色塑膠運用上的建議，在製作塑膠袋時，如是用來承裝乾燥物品，建議使用水溶性塑膠PVA，因塑膠袋是生活中最常使用到的塑膠產品，所以，以降解度越高者為最佳；而結構強度最好的是聚乳酸PLA，依文獻所知PLA的耐熱溫度為攝氏50度，故製作常溫盛裝容器部分，建議使用PLA。

捌、未來展望

一、除了將這次實驗中有疏失的部分重新研究，希望能將培養土混合枯草桿菌濃度對於降解綠色塑膠之相關進行詳細研究，讓此研究更完善。並探討埋入綠色塑膠之含菌培養土，回歸自然後是否對自然環境之土壤的降解或生態造成影響。

二、依本實驗及廢棄物清理法，建議將回收編號7號「其他類塑膠」中的「綠色塑膠」進行單獨分類及回收處理，綠色塑膠容器與傳統塑膠容器的外觀相似，民眾不易辨識，降解綠色塑膠需有條件的環境控制，方可達到生物降解的預期效果。

玖、參考資料及其他