

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 動物與醫學科

052016

蟲塑未來—探討小蠟蛾幼蟲攝食塑膠之研究

學校名稱： 國立羅東高級中學

作者：	指導老師：
高二 翁心芸	陳怡帆
高二 黃羽安	

關鍵詞： 小蠟蛾、塑膠、口罩

摘要

在後疫情時代，口罩儼然成為人們不可少的必備品，其所帶來的塑膠垃圾處理問題急需妥善解決。蜂蠟與PE為結構相似的聚合物，而小蠟蛾（*Achroia grisella* Fabricius）幼蟲又以蜂巢為食且食量驚人。本研究主要針對不同種塑膠、不同齡期的攝食情況、環境中蜂巢有無的影響、攝食塑膠後的產物變化等等。

根據實驗結果，我們發現第二齡期（0.18g）小蠟蛾幼蟲攝食MB最為顯著；另外，混和蜂巢與塑膠樣本可大幅降低小蠟蛾的死亡率；塗抹小蠟蛾體液的MB透光度提升，並以FTIR分析攝食MB組的糞便，比純吃蜂巢組產生更多的甲基。我們推測小蠟蛾體液中含有將MB分解的酵素，希冀未來能持續研究，將其應用於塑膠處理問題。

壹、研究動機(含文獻回顧)

在現今塑膠垃圾泛濫的時代，因塑膠而製造出大量的環境難以消化的垃圾，嚴重影響了生態，甚至是人類的生活，而疫情時代大量崛起的口罩也是塑膠製品之一。根據美國化學期刊的統計，全球每月口罩消耗量約為1290億片，僅僅一個月，世界廢棄口罩就多了51萬多公噸的垃圾，且口罩內含有聚丙烯，在自然中要經過很長一段時間才能被分解，欲解決此問題已是刻不容緩。

在偶然一次參訪養蜂場的過程中，我們認識了「小蠟蛾（*Achroia grisella* (F.)」，以其幼蟲數量眾多且多以攝食蜂巢為生進而破壞蜂巢，對於於蜂農而言，小蠟蛾是一種困擾許久的害蟲。

對於他們的困擾，我們查找資料想更進一步了解這種「吃蜂巢」的昆蟲。而Paoletti Bombelli, Christopher J. Howe, 與Federica Bertocchini(2017)的研究指出同為以攝食蜂巢為生的大蠟蛾（*Galleria mellonella*）幼蟲的唾液因含有屬於酚氧化酶族的酶而在室溫中便可降解塑膠。西班牙的生醫學家貝里托基尼解釋：「既然牠們能食用蜂蠟，也許已經演化出一種能分解蜂蠟的分子，而這種分子很可能也能分解塑膠。」貝里托基尼曾掃描大蠟蛾的消化道，發現塑膠袋的主要成分聚乙烯(polyethylene)已經降解為乙二醇。

我們開始思考與大蠟蛾同為螟蛾科 (Pyralidae)的小蠟蛾是否也有此功用，與在養蜂場工作的老師深入討論後才知道連同蜂巢片一起放在垃圾袋裡的小蠟蛾會將垃圾袋咬出破洞鑽出。此說法更證實我們的猜想，於是我們設計了實驗，探討小蠟蛾攝食塑膠運用於減少塑膠垃圾可行性、攝食塑膠對於小蠟蛾生長及繁衍的影響等等，期望做出有利於幫助現況的研究成果。



圖(一)、圖(二) 養蜂場的蜂箱 (照片為作者自行拍攝)

貳、研究目的

- 一、小蠟蛾對不同種塑膠的攝食情況
- 二、不同齡期小蠟蛾幼蟲的攝食差異
- 三、蜂巢的有無對小蠟蛾幼蟲攝食塑膠面積的影響
- 四、攝食塑膠對小蠟蛾生長速度與死亡率的影響
- 五、小蠟蛾攝食塑膠後的分解產物探討

參、研究設備及器材

一、實驗一

(一) 四種塑膠樣本：(2X2 cm²)

1. EP(口罩內層)X15張
2. MB(口罩過濾層)X15張
3. HDPE(塑膠袋)X15張
4. LLDPE+HDPE(垃圾袋)X15張

(二)試管X90支

(三)試管架X3個

(四)蜂巢片若干

(五)黏土X1包

(六)載玻片X1盒

(七)電子秤X1台

(八)小蠟蛾幼蟲X90隻

二、實驗二

(一)保鮮盒X5盒

(二)小蠟蛾幼蟲25隻

(三)蜂巢片若干

(四)加溫燈X1台

(五)鑷子X5支

(六)電子秤X1台

三、實驗三

(一)四種塑膠：

1. EP(口罩內層)X10張
2. MB(口罩過濾層)X10張
3. HDPE(塑膠袋)X10張
4. LLDPE+HDPE(垃圾袋)X10張

(二)小蠟蛾幼蟲X20隻

(三)尼羅紅染劑

(四)螢光顯微鏡

(五)試管若干

(六)雙氧水

(七)UV燈管

圖(三)螢光顯微鏡 (照片為作者自行拍攝)	圖(四)螢光顯微鏡 (照片為作者自行拍攝)	圖(五)尼羅紅染劑 (照片為作者自行拍攝)

四、實驗四

(一)MB(口罩過濾層)X50張

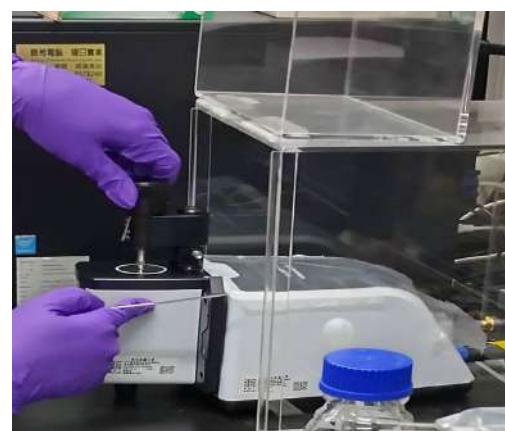
(二)小蠟蛾幼蟲X180隻

(三)蜂巢片若干

(四)傅立葉轉換紅外光譜儀(FTIR)

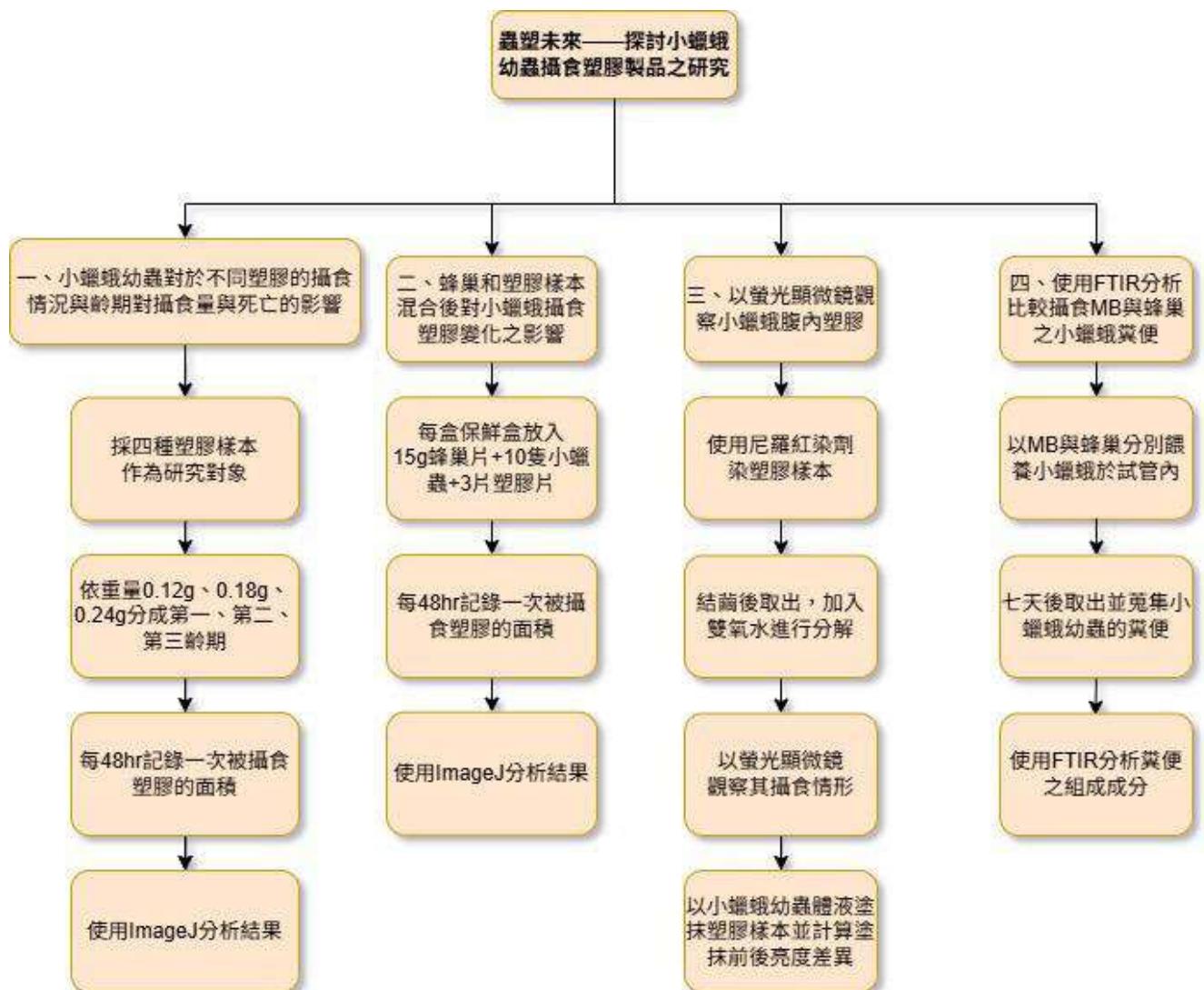


圖(六)小蠟蛾糞便蒐集
R)



圖(七)傅立葉轉換紅外光譜儀(FTI
(照片為作者自行拍攝)
(照片為作者自行拍攝)

肆、研究過程或方法



圖(八)研究流程圖 (作者自行製作)

一、小蠟蛾幼蟲對於不同塑膠的攝食情況與齡期對攝食量與死亡、結繭率的影響

(一)採不同塑膠樣本作為研究對象

我們選擇四種常見的塑膠袋作為實驗對象，分別為口罩過濾層（常見材質為PP Melt-blown，一般簡稱為MB）、口罩內層（聚丙烯PP+聚乙烯PE，簡稱EP）、家用塑膠袋（高密度聚乙烯HDPE）、垃圾袋（LLDPE+HDPE），將其分別剪裁為

2cm X 2cm的大小，另有蜂巢1.5g組，模擬原本的生長環境，並以空試管作為對照組。



圖(九) 四種塑膠樣本 (照片為作者自行拍攝)

(二) 將小蠟蛾幼蟲以重量分成：0.12g、0.18g、0.24g(第一、第二、第三齡期)

小蠟蛾直至結繭成蟲為止肉身外觀並無明顯變化，在齡期上不易區別，因此我們以重量為級距，將事先準備的小蠟蛾分門別類，各自取其數量最多的重量等級：0.12g(第一齡期)、0.18g(第二齡期)、0.24g(第三齡期)，將小蠟蛾依據秤量好的重量置入試管內。

(三)於試管內進行實驗並以玻片與黏土封口

我們選擇以實驗室常見的試管作為實驗的器材，能夠分門別類地詳細觀察攝食情形，並以玻片配上黏土封口使小蠟蛾不會有出逃現象。

(四)每48hr記錄一次被攝食塑膠的面積

首先，仔細從試管中取出小蠟蛾幼蟲後，以拍照方式紀錄。許多塑膠片上有明顯的缺口或空洞，為小蠟蛾幼蟲攝食之證據。



圖(十)、圖(十一)、圖(十二) 依序為:MB、EP、HDPE樣本被啃食之情形

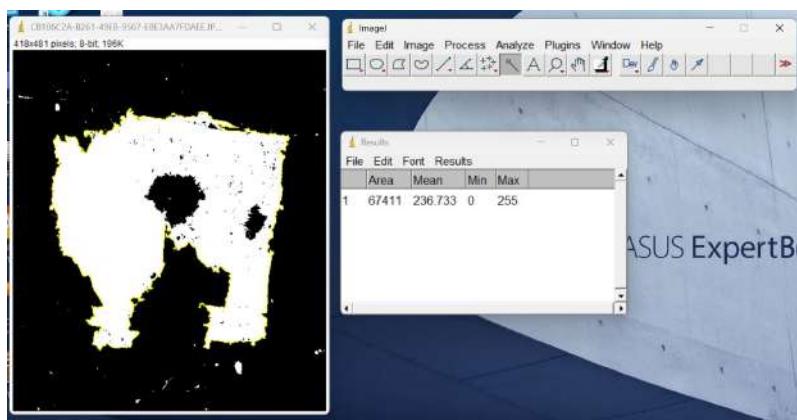
(照片為作者自行拍攝)

(五) 結繭率與死亡率

紀錄小蠟蛾幼蟲的結繭成功數量與死亡數量來探討攝食不同種塑膠對小蠟蛾的影響與不同齡期的小蠟蛾幼蟲攝食塑膠的差異。

(六) 分析結果

將照片載入電腦中分析其攝食面積所佔整體的比例，以ImageJ協助分析，因每片塑膠片面積同為4cm²，算出攝食的面積比例並乘上4cm²即為攝食面積。將結果紀錄下來並以圖表呈現，完成實驗。



圖(十三) 運用ImageJ 分析攝食面積 (照片為作者自行拍攝)

二、蜂巢和塑膠片混合後對小蠟蛾攝食塑膠變化之影響

(一)在裝有15g蜂巢片之保鮮盒內分別放入10隻小蠟蛾與3片塑膠片(共5盒：MB、EP、HDPE、LLDPE+HDPE、無塑膠)

(二)每48小時取出塑膠片並拍照觀察其攝食面積

(三)使用ImageJ進行面積分析

三、以螢光顯微鏡觀察小蠟蟲腹內塑膠

(一) 用尼羅紅染劑染塑膠片

以250ml的甲醇加0.04g的尼羅紅粉末配置尼羅紅染劑，將塑膠樣本置入蒸餾水中，並以50ml蒸餾水加入2ml尼羅紅染劑的濃度，將其染色後靜置。

(二)秤量重量後，依序在試管內放入小蠟蛾

(三)每48小時觀察一次，並記錄其體重變化

(四)在結繭後取出，加入雙氧水進行分解

配置35%的雙氧水，將小蠟蛾樣本放置其中，並送入加熱器，設定為60°C，維持24小時，加速分解。

(五)以螢光顯微鏡觀察其攝食情形

(六)以小蠟蛾幼蟲體液塗抹塑膠片並檢測塗抹前後亮度差異

四、使用FTIR分析比較攝食MB與蜂巢之小蠟蛾糞便

(一)以MB與蜂巢分別餵養小蠟蛾於試管內

(二)七天後取出並蒐集小蠟蛾幼蟲的糞便

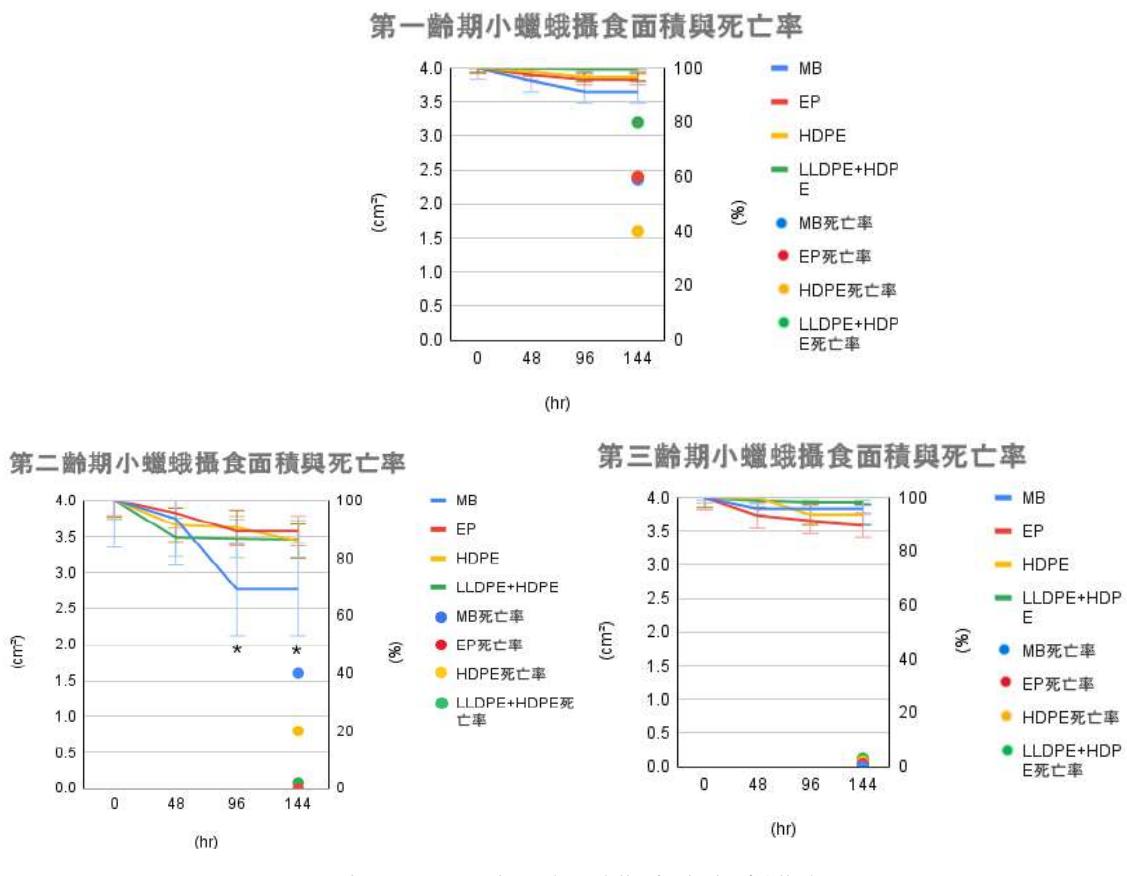
(三)使用FTIR分析糞便之組成成分

伍、研究結果

一、小蠟蛾幼蟲於不同塑膠的攝食情況與齡期對攝食量與死亡、結繭率的影響

在使用ImageJ分析完攝食面積後，我們將研究結果以圖表呈現。

(一)各齡期的攝食塑膠面積比例與死亡率



圖(十四)～圖(十六) (作者自行製作)

1.第一齡期

根據圖(十四)，在144小時，平均每隻第一齡期小蠟蛾144小時後使MB減少0.35 cm²、EP減少0.17cm²、HDPE減少0.13cm²、LLDPE+HDPE減少0.02cm²，而死亡率約分別為60%、60%、40%、80%，相較於其他齡期死亡率偏高。

2.第二齡期

圖(十五)中第二齡期小蠟蛾攝食塑膠樣本的面積較高，在144小時，MB、EP、HDPE、LLDPE+HDPE樣本減少面積約分別為 1.23cm^2 、 0.42cm^2 、 0.56cm^2 、 0.54cm^2 ，明顯地以MB的樣本減少量最多，且透過雙因子單變異數分析(Two-way ANOVA)結合估計邊際平均數(Estimated Marginal Means)檢定比較得到MB組在96小時與144小時樣本減少面積達顯著差異。而死亡率相較於第一齡期降低許多，MB組死亡率約為40%，HDPE組約20%，其餘皆為0%。

3.第三齡期

以圖(十六)可知，MB組在144小時的攝食面積減少 0.17cm^2 ，EP組減少 0.41cm^2 ，HDPE組減少 0.25cm^2 ，LLDPE+HDPE減少 0.07cm^2 。第三齡期小蠟蛾的死亡率皆為0%，多半在攝食塑膠樣本後不久迅速結蛹成蟲。

比較圖(十四)～圖(十六)中齡期對於四種塑膠樣本面積減少的差異，發現在第二齡期小蠟蛾組中的塑膠樣本減少面積最多，就減少面積最多的MB組來說，第二齡期組的樣本減少面積比第一齡期、第三齡期分別多了 $c.1.06\text{cm}^2$ ，可見第二齡期小蠟蛾最有效減少MB塑膠，其餘三種塑膠一樣以第二齡期組樣本減少最多，可見第二齡期小蠟蛾較具攝食塑膠樣本能力。

綜上所述，在後續實驗過程中，我們選擇以成蟲率最高且攝食塑膠面積比例最高的第二齡期小蠟蛾作為後續實驗對象。

延續實驗二之實驗方法養殖小蠟蛾幼蟲，在結繭後移至裝有蜂巢之保鮮盒進行繁殖，以觀察攝食塑膠是否影響小蠟蛾之繁殖能力。

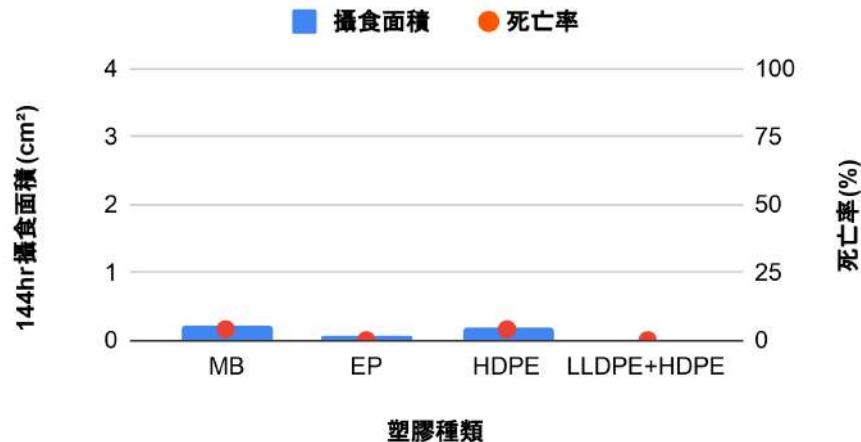
放置一段時間後，可明顯於盒內發現第二代小蠟蛾之蹤跡。MB、EP、HDPE、LLDPE+HDPE與純蜂巢(對照組)皆有出現。

二、蜂巢和塑膠片混合後對小蠟蛾攝食塑膠變化之影響

欲解決圖(十五)中的高死亡率以達永續，設計了實驗二。圖(十七)為小蠟蛾於含有蜂巢的實驗環境中對不同種塑膠的攝食面積比例。如圖所示，MB的攝食比例為 0.22cm^2 ，HDPE的攝食比例為 0.18cm^2 ，維持著相對較高的攝食面積比例。EP為0.

07cm²，而LLDPE+HDPE為0.01cm²，小蠟蛾之主動攝食情況最不明顯。實驗結果顯示，四種塑膠樣本組的死亡率皆在5%以下。

蜂巢和塑膠片混合攝食面積和死亡率



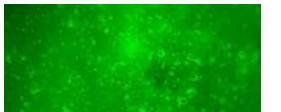
圖(十七) (作者自行製作)

三、以螢光顯微鏡觀察小蠟蛾幼蟲腹內塑膠

我們先將塑膠片以尼羅紅染劑進行染色後，再提供給小蠟蛾攝食並計算攝食面積，以螢光顯微鏡或UV光的照射檢驗實驗結果，發現小蠟蛾體內確實有螢光碎片出現，證實小蠟蛾會主動啃食塑膠並進行消化分解。

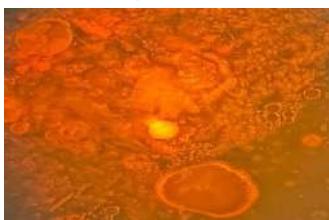
表(一)分別呈現以螢光顯微鏡之不同色光觀察塑膠樣本之差異。

	白光	綠色螢光	紅色螢光
MB			
EP			
HDPE			

LLDPE +HDPE			
----------------	---	--	---

表(一) (照片為作者自行拍攝)

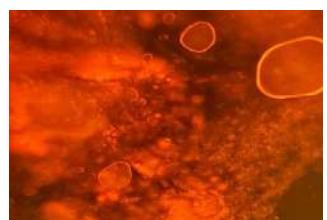
下圖為在螢光顯微鏡照射下小蠟蛾體內的染色塑膠亮點。



圖(十八)小蠟蛾MB組
(有塑膠亮點)



圖(十九)小蠟蛾MB組
(無塑膠亮點)



圖(二十)小蠟蛾
LLDPE+HDPE組
(無塑膠亮點)

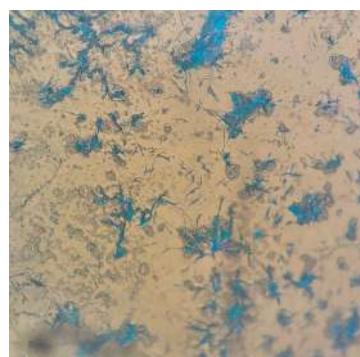
(照片為作者自行拍攝)

以下為呈現在UV光照射下小蠟蛾體內的亮點，紅圈處為染色後的塑膠微粒亮點。



圖(二十一)小蠟蛾MB組

(照片為作者自行拍攝)



圖(二十二)小蠟蛾MB組

(照片為作者自行拍攝)

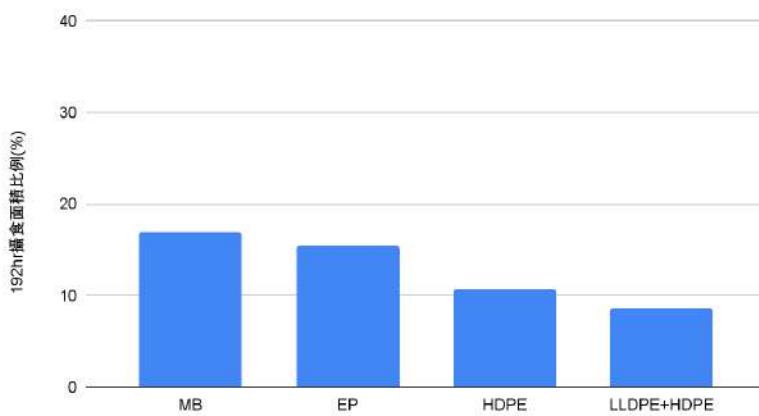


圖(二十三)小蠟蛾EP組

(照片為作者自行拍攝)

原以為在經過染色後，小蠟蛾的攝食面積比例會下降，但在EP組反而上升了4.92%，其餘樣本組則下降3.21%至16.52%不等。普遍仍具有高於10%的攝食面積比例，顯見體內有出現塑膠微粒的可能。

小蠟蛾(第二齡期)攝食染色塑膠之面積比例



圖(二十四) (作者自行製作)

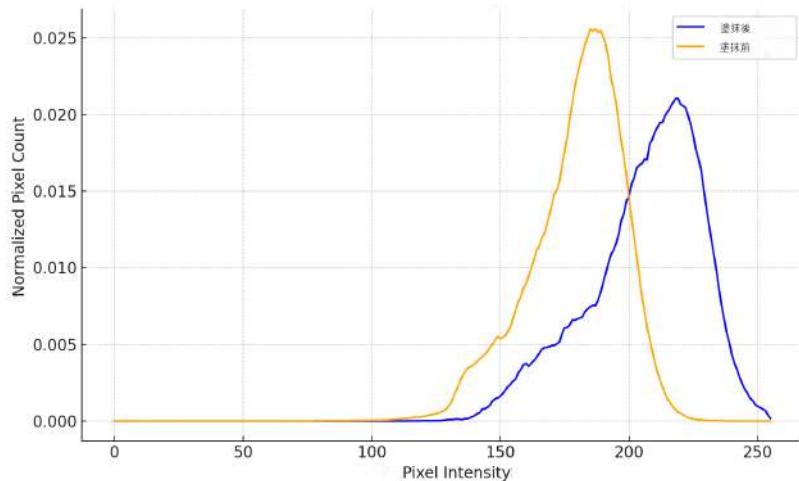
已證實小蠟蛾幼蟲有攝食塑膠進入體內之現象，欲進一步探討其體液對塑膠樣本的影響。我們將小蠟蛾幼蟲體液塗抹於各類塑膠片上觀察是否有侵蝕情況。圖為MB(左上)、EP(右上)、HDPE(左下)、LLDPE+HDPE(右下)被侵蝕前後對比，圖中左為塗抹體液前，右為塗抹後。



圖(二十五)～圖(二十八) 以小蠟蛾幼蟲體液抹塑膠片前後 (解剖顯微鏡10X1.5倍)
(照片為作者自行拍攝)

比較MB塗抹前後亮度之差異，如圖(二十九)所示，Normalized Pixel Count (標準化像素數) 之峰值對應Pixel Intensity (像素強度) 的數值有所提升，塗抹前的平

均亮度為179.46，塗抹後平均亮度為206.15。此現象顯示小蠟蛾體液具備降解MB塑膠之能力，且在短時間內就可得到顯著效果。

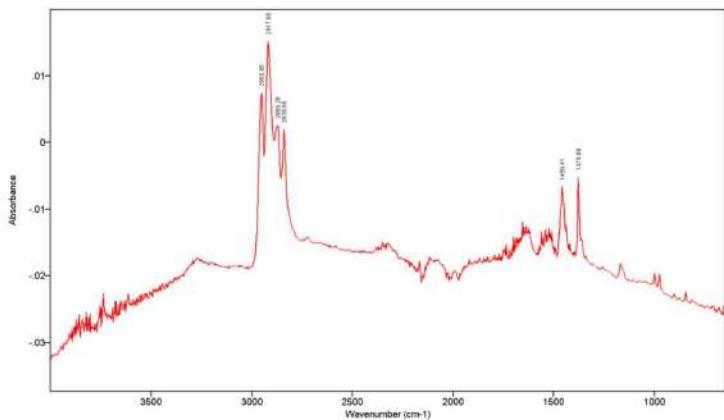


圖(二十九) (作者自行製作)

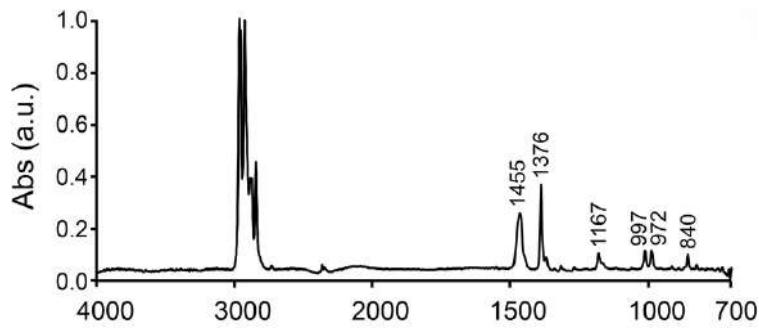
四、使用FTIR分析比較攝食MB與蜂巢之小蠟蛾幼蟲糞便

分別餵食小蠟蛾幼蟲MB樣本，並以蜂巢作為對照組，在攝食七天後蒐集各組的糞便以FTIR進行分析，結果如下所示。

以攝食後MB樣本的傅立葉轉換紅外光譜圖對照Kimura-Suda等(2018)的研究可發現與PP的FTIR結果極為相似，在 1376cm^{-1} 與 1455cm^{-1} 皆出現吸收峰，證實MB的主要成分为聚丙烯(PP)。



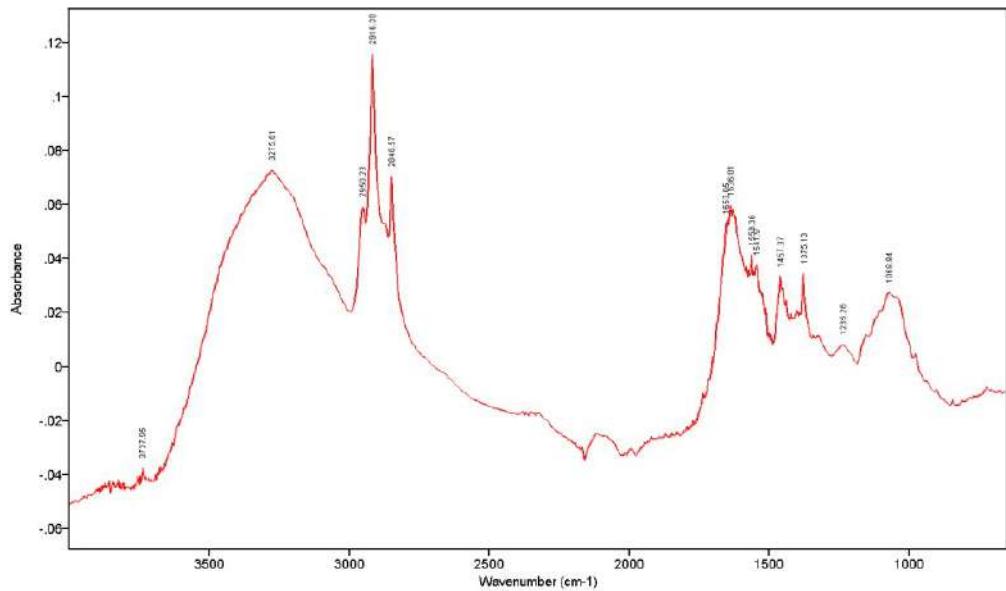
圖(三十)MB的FTIR分析
(作者自行製作)



圖(三十一)PP的FTIR分析

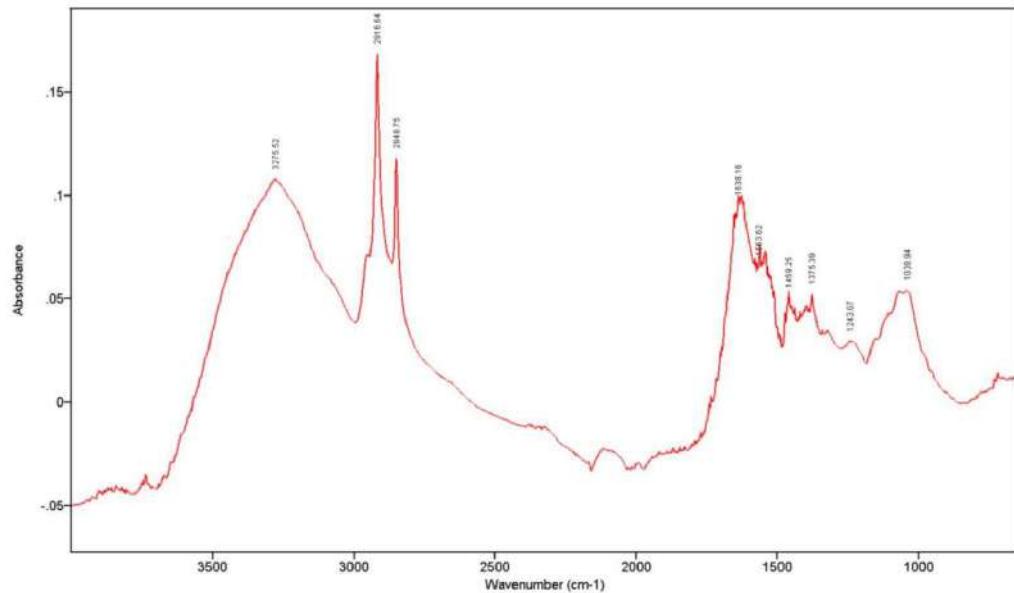
(引用自Kimura等(2018))

另得出攝食MB的小蠟蛾幼蟲糞便之成分，如圖(三十二)所示。



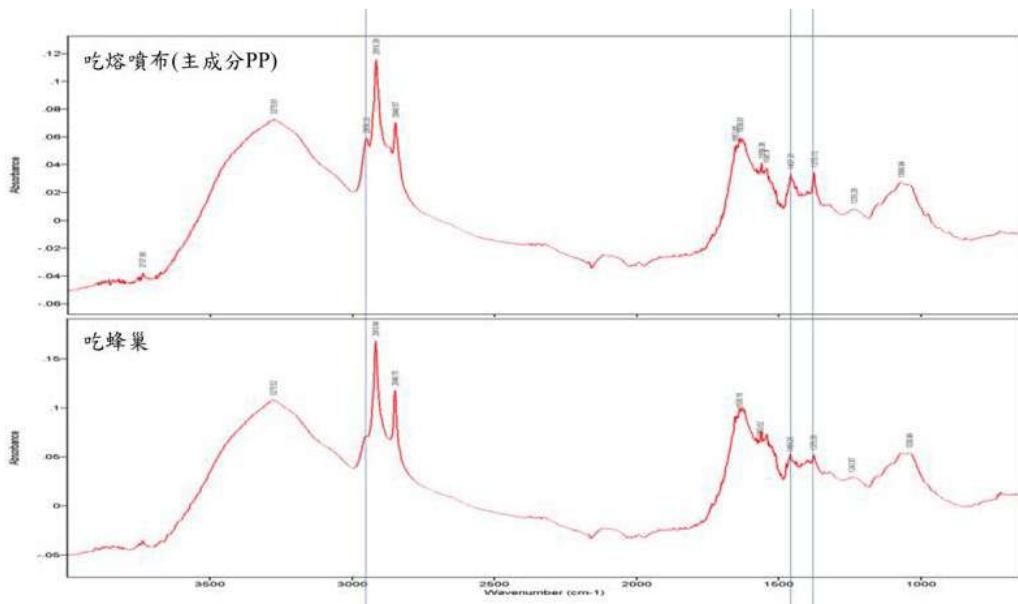
圖(三十二)攝食MB的FTIR分析 (作者自行製作)

以攝食蜂巢為對照組，同樣用FTIR對小蠟蛾幼蟲的糞便進行分析，結果如圖(三十三)所示。



圖(三十三)攝食蜂巢的FTIR分析（作者自行製作）

比較兩者實驗結果，如圖(三十四)所示，可發現攝食MB組在 2950cm^{-1} 出現吸收峰，經查找文獻後發現為甲基的產生。



圖(三十四)比較實驗組與對照組的FTIR分析結果（作者自行製作）

陸、討論

一、不同塑膠的攝食情況與齡期對攝食量與死亡、結繭率的影響

在實驗二中我們觀察到小蠟蛾於各齡期皆有攝食PE之跡象，且第二齡期的小蠟蛾在兩周後也都能順利結繭化蛹。在Kundungal等(2019)的報告中指出，攝食PE的大蠟蛾糞便中顯示出新的羧基和羥基的存在，且有生物降解中間產物的不飽和碳氫化合物也隨之增加，我們計劃參考文獻中的實驗，使用氣相層析質譜分析小蠟蛾幼蟲攝食MB後塑膠改變情形。

此外Paolo Bombelli等(2017)也指出，蜂巢的蜜蠟由一種多樣化的脂質化合物組成，包括烷烴、烯烴、脂肪酸和酯類。最常見的碳氫化學鍵是C-C鍵，像聚乙烯(PE)中的結構。C-C單鍵（即這些脂肪族化合物中的碳氫鍵）可能是小蠟蛾消化的目標之一。因此我們推論，小蠟蛾會以HDPE、HDPE+LLDPE作為啃食對象，後續進行消化分解。

比較研究結果顯示，第一齡期的小蠟蛾攝食塑膠的情況在三個齡期中最差。攝食最多的MB也僅有 0.35cm^2 。針對第一齡期小蠟蛾攝食面積有限且死亡率偏高之現象，本研究提出推測。雖本研究並非從小蠟蛾孵化就開始餵食塑膠而是等其生長至第一齡期時才開始實驗，仍觀察到高死亡率，即小蠟蛾一生中若只單純攝食塑膠則無法存活，推論其體內酵素或分解塑膠之共生菌之分解效率無法滿足蟲體生長至結繭成蟲之完整營養需求。第三齡期在實驗開始多快速結繭成蛹，故無高攝食率且死亡率偏低。可知非適當齡期小蠟蛾幼蟲進行實驗將不能達到最高效能。

實驗結果顯示，小蠟蛾幼蟲在MB擁有最佳的攝食面積。我們使用SPSS中變異數同質性檢定(Levene's test)，結果顯示資料違反變異數齊性假設($p < .001$)，故拒絕虛無假設。隨後進行二因子變異數分析，探討塑膠樣本類型(type)與攝食時間(time)之間的交互作用。在受試者間效應分析(Between-Subjects Effects)中，發現 type * time 的交互作用達顯著水準($p < .001$)，顯示不同塑膠材質在不同攝食時間下的攝食效果存在顯著差異，且單變量檢定(Univariate Tests)顯示MB組、96小時組($p < .001$)與144小時組($p < .005$)皆達顯著，顯示不同組別在因變項上存在顯著差異。為提高解釋的可靠性，後續亦採用估計邊際平均數(Estimated Marginal Means)進行事後分

析，並使用Bonferroni 方法進行修正，發現第二齡期小蠟蛾MB組的P值小於0.05，
在96hr與144hr的攝食面積達到顯著差異。

Zhang, Hu, Zhang 和其他學者(2025)研究表明聚乙烯微塑料(PE-MPs)會影響科羅拉多金花蟲的生長和捕食行為，延長了科羅拉多金花蟲幼蟲的發育時間與降低其存活率。與之相比，我們在實驗的過程中也有類似發現。第二齡期攝食EP與LLDP E+HDPE的小蠟蛾幼蟲有明顯較晚成蛹的狀況，推測攝食此兩種塑膠製品可能減緩小蠟蛾成長速度。

透過小蠟蛾繁殖力之實驗，我們於實驗組與對照組皆可發現第二代小蠟蛾幼蟲的出現與成長。Kundungal等(2019)也指出，以蜂巢或PE為食的小蠟蛾幼蟲於實驗中完成了所有生命週期階段(幼蟲、蛹、成蟲和卵)，並發育成第二代。我們進一步延伸，在MB、EP、HDPE、LLDPE+HDPE同樣發現相似結果。證實攝食塑膠的小蠟蛾仍具備孕育下一代的能力。

二、蜂巢和塑膠片混合後對小蠟蛾攝食塑膠變化之影響

Kundungal等(2019)指出，在小蠟蛾的PE飼料中添加蜂巢可以促進PE降解。以蜂巢、PE和PE+蜂巢為食的小蠟蛾的28天存活率分別為 $91.3\pm1.01\%$ 、 $74.6\pm2.9\%$ 和 $86\pm1.4\%$ 。這與我們實驗二的研究結果相符，存活率皆得到提升。小蠟蛾攝食喜好仍以MB為首，比起單獨放塑膠，在混和蜂巢與塑膠片後的攝食量降低了許多，但死亡率從40%降低至0%，能順利完成生命週期，結蛹成蟲。

此實驗組與對照組小蠟蛾的死亡率將近0%，可見此方法可行程度。即使攝食面積無法達到最大化，然確保小蠟蛾的存活，也證明若無強迫小蠟蛾幼蟲攝食塑膠，在有其他營養來源的情況下亦會主動攝入，並且不影響生長。透過圖(十七)可知，雖各種類的攝食面積皆有所減少，但整體死亡率皆小於5%。

EP組的攝食面積降低了 0.35cm^2 ，死亡率與實驗一相同，最終都順利成蟲，顯示在攝食EP的同時無論有無蜂巢皆能成長，且在僅有塑膠片的環境下可達到較高的攝食成效。

採用混和蜂巢與塑膠片的方法能有效增加小蠟蛾的存活率卻會大幅度降低小蠟蛾幼蟲攝食率，但根據Kundungal等(2019)指出，在小蠟蛾的PE飼料中添加蜂巢可以促進PE降解，推測可能是15g蜂巢配給10隻小蠟蛾過於充足，因為在小蠟蛾結束生命週期後仍可發現蜂巢殘存。此環境對於小蠟蛾來說，攝食蜂巢的機會多而無競爭要素，降低了競爭壓力，使小蠟蛾幼蟲無需轉向較不理想的替代食物來源(如MB、EP等塑膠樣本)。

蜂巢的出現改變牠們的選擇性行為，偏好導致攝食塑膠量下降。此結果顯示在「蜂巢與塑膠混合」的條件下，食物偏好性與資源供給量皆可能影響小蠟蛾幼蟲的塑膠攝食與降解行為。在未來的實驗中，我們希望可以找到最佳的配方，使提升攝食面積比例的同時達到降低死亡率的效果，增加應用之可行性。

三、以螢光顯微鏡觀察小蠟蟲腹內塑膠

證實小蠟蛾會啃食塑膠後，我們想進一步探討牠是否把塑膠樣本攝食進入體內，而非僅僅啃咬。尼羅紅染劑(NR)常用來檢測塑膠微粒的存在，我們以此來驗證小蠟蛾攝食塑膠情形。尼羅紅染劑是一種疏水性、異染性、親脂性、光化學穩定的染料，在以此染劑標定塑膠並藉此觀察小蠟蛾幼蟲體內塑膠時，考慮到其親脂性，以雙氧水分解其脂肪等以方便觀察並減少誤差。

使用螢光顯微鏡，我們確認了小蠟蛾體內會有塑膠出現，證實小蠟蛾不僅僅啃食塑膠片，更攝食進入體內。後續，我們進一步探討小蠟蛾體液是否能夠分解塑膠。

在MB組觀察到圖(二十五)的右邊較左邊透光，指被塗抹體液後塑膠片變得較薄為有明顯被侵蝕現象，而EP與HDPE則以肉眼看不出差異，LLDPE+HDPE則有些許透光程度不同。證實小蠟蛾體液會對MB樣本產生一定影響。

四、使用FTIR分析比較攝食MB與蜂巢之小蠟蛾糞便

Razak 等(2024)指出從南極土壤中分離並鑑定一株能夠分解聚丙烯(PP)微塑膠的細菌(*Dermacoccus* sp. strain AYDL3)並以FTIR分析PP樣本。結果顯示在 1647cm^{-1} 出現C=O，為羰基，表示PP鏈段被部分氧化，形成醛或酮等含氧化合物。本實驗也

出現相似結果。攝食MB組在 1636cm^{-1} 處出現吸收峰，而MB樣本的光譜圖中並無顯著的C=O吸收峰，顯示本身不含酯類官能基。然攝食蜂巢組也於 1638cm^{-1} 出現吸收峰。推測於攝食MB組的吸收峰可能為蜂巢殘留脂肪酸酯類或初步氧化酯類產物(如脂肪酸酯、醇類氧化物等)。由於小蠟蛾在攝食MB之前已攝食蜂巢使其生長，故攝食MB組中出現之C=O酯類吸收訊號而非純粹源自PP降解產物。因此，未來若要判斷降解產物需排除蜂巢等干擾較佳。

Razak 等(2024)的AYDL3之FTIR分析處理後的PP，發現於 1049cm^{-1} 產生C-H彎曲振動的新吸收峰，結構改變導致原本穩定震動模式出現異常，可能是斷鏈與重組造成。本實驗的MB並未在此波段產生訊號，但攝食MB組於 1068cm^{-1} 顯示出吸收峰，推測可歸因於降解後產生的C-H彎曲振動，或伴隨生成之醇、醚類產物的C-O伸縮震動。其在實驗組的出現，支持MB經小蠟蛾幼蟲攝食後發生結構改變，產生新的官能基團的可能，但對照組同樣於 1038cm^{-1} 處產生吸收峰，不排除為蜂巢蠟或酯類的組成成分。

比較實驗組與對照組之光譜圖，最顯著的差異為攝食MB組於 2950cm^{-1} 出現的甲基吸收峰，較為明顯且尖銳。攝食蜂巢組也同樣出現，但較寬、較鈍，因為蜂蠟脂肪酸結構也含甲基，但結構更長、振動模式更複雜。MB樣本組同時具備 2950cm^{-1} 、 2916cm^{-1} 、 2838cm^{-1} 三個吸收峰，因PP本身即含有比蜂巢多的甲基。綜上所述，推測攝食MB組的甲基吸收峰可能來自MB抑或是新的甲基降解產物。

Paolo Bombelli等(2017)指出若以FTIR分析塗抹過大蠟蛾勻漿後的PE聚合物可得知大蠟蛾體液可以降解PE塑膠袋產生乙二醇，推測C-C可能是大蠟蛾消化的目標之一。本實驗攝食MB組出現的甲基需藉由C-C連結至聚丙烯主鏈，因此可間接推測含有C-C，有可被降解的機率。Paolo Bombelli等(2017)也表示，目前尚不清楚大蠟蛾的降解是利用本身的酵素，還是其腸道菌群的酶，如同小蠟蛾，有待後續研究。

柒、結論與未來展望

一、小蠟蛾在第二齡期(0.18g)時，有較佳的攝食成效。

二、四種塑膠樣本內，以MB之攝食面積最多，顯見對於分解口罩之問題有可發展性。

三、混合蜂巢與塑膠片可使死亡率接近0%，在MB與HDPE維持較高攝食比例。證實在生存環境內有其他營養來源時，小蠟蛾也會主動攝食塑膠。

四、以螢光顯微鏡或UV光照射攝食塑膠後的小蠟蛾皆能發現明顯螢光亮點，證實小蠟蛾並非僅啃咬塑膠樣本，而是塑膠樣本有確實進入小蠟蛾體內進行分解。

在未來，我們希望能持續對小蠟蛾進行追蹤，繁殖出第二、三代，比較其攝食塑膠之能力或生理狀態是否與母族產生差異。我們已著手進行實驗，將第二齡期小蠟蛾作為第一代，餵食MB飼養，預計培養出五對小蠟蛾進行繁殖，記錄其繁殖能力、子代減少MB塑膠的效能與死亡率等等數據，探討是否有生物累積之影響。

為追求較高的攝食面積比例與較低的死亡率，我們將持續實驗，期望搭配出混合蜂巢與塑膠之完美比例，不僅有利於處理塑膠垃圾之環境問題，還能有助於小蠟蛾幼蟲的生長以達到永續的效果。

欲探討小蠟蛾降解可能產物，預計未來可透過同位素標定MB樣本餵給小蠟蛾攝食，再進行氣象層析質譜法分析標定的產物，確定該降解物的組成。

我們將持續針對小蠟蛾的塑膠降解過程與產物進行研究，期許能實際應用於生活中，為當今社會亟需解決的口罩問題貢獻一份心力。

捌、參考資料

一、章加寶、謝豐國、許麗容 (1993)。小蠟蛾(*Achroia grisella* (F.))之形態及其生活習性初步調查。*中華昆蟲*，13，219-227。[中華昆蟲](#)

二、章加寶、謝豐國 (1992)。大蠟蛾(*Galleria mellonella* L.)之形態及其生活習性觀察。*中華昆蟲*，12，121-129。[中華昆蟲](#)

三、黃俊睿、宋淳、張紘嘉 (2019)。蠶蟲觀察～燈光下的零食！取自中華民國第59屆中小學科學展覽會

四、蘇于婷、洪郁晴、邱士珈 (2019)。「蠶」「咀」成灰淚始乾。取自中華民國第59屆中小學科學展覽會

五、Bouwmeester, H., & Wijnands, J. (2017). This caterpillar can digest plastic. *Nature*, 545 (7655), 438 – 440.[Nature](#)

六、Paolo Bombelli, Christopher J. Howe, & Federica Bertocchini. (2017). Polyethylene Bio-Degradation by Caterpillars of the Wax Moth Galleria Mellonella. *Current Biology*, 27(8), 292 – 293.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982217302312>

七、Kundungal, H., Gangarapu, M., Sarangapani, S. et al. (2019). Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). *Environ Sci Pollut Res*, 26, 18509 – 18519.<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05038-9>

八、V.C. Shruti, Fermín Pérez-Guevara, Priyadarsi D. Roy, & Gurusamy Kutralam-Muniasamy. (2022). Analyzing microplastics with Nile Red: Emerging trends, challenges, and prospects. *Journal of Hazardous Materials*, 423, Part B.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389421021397>

九、Zhang, J., Hu, Y., Zhang, Y., & et al. (2025). Polyethylene microplastics inhibit the growth and reproduction of Colorado potato beetle and the predation efficiency of Stinkbug. *Environmental Pollution*, 369, 125840. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125840>

十、Razak, N. A. S. A., Habib, S., Abd Shukor, M. Y., Alias, S. A., Smykla, J., & Yasid, N. A. (2024). Isolation and characterisation of polypropylene microplastic-utilising bacterium from the Antarctic soil. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.02096>

十一、Kimura-Suda, H., Ito, T., Takahata, M., Shimizu, T., Kanazawa, K., Ota, M. & Iwasaki, N. (2018, 2). Quick and easy sample preparation without resin embedding for the bone quality assessment of fresh calcified bone using fourier transform infrared imaging. *PLOS one*. [10.1371/journal.pone.0189650](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189650)

【評語】052016

本研究利用小蠟蛾幼蟲攝食蜂巢（與聚乙烯 PE 結構相似的聚合物）的特性，針對現今疫情後口罩等塑膠廢棄物難分解的議題，探討其對塑膠（尤其是熔噴布 MB）的生物降解能力，研究設計涵蓋了不同種類塑膠的攝食情況、不同齡期幼蟲的攝食效率、環境中蜂巢是否存在對幼蟲攝食的影響，以及攝食塑膠後產物的變化分析。研究發現小蠟蛾幼蟲攝食熔噴布（MB）後，經其體液處理的 MB 透光度提升，且糞便中經傅立葉轉換紅外光譜（FTIR）分析後，發現比純吃蜂巢組產生更多的甲基。這初步推測小蠟蛾體液中含有能夠分解 MB 的酵素，為後續深入探討降解機制提供了關鍵證據。

本研究相當有趣，緊扣環保口罩垃圾議題，切入社會需求與生命科學結合點，主題明確且具備應用前景，且設計多元，探討材料類型、齡期、群落生理參數與分解產物，層層對照，橫跨生態與分子層級。儘管如此，仍有建議與疑問如下：

1. 分解路徑與產物分析還不夠深入，只用 FTIR 定性甲基產生，缺乏進一步降解產物的確定（如 GC-MS、小分子實證等）。

2. 分解機制「體液/菌群/酵素」尚未分離，建議可設置無菌對照組或菌群分析(例如 antibiotic 處理、Microbiome 測序)。
3. 雖推論可能生成酯類、醇類、甲基等產物，但未進行 GC-MS (氣相層析質譜) 等更明確的化學分析。
4. 降解效率與規模實用性未計算，真實減重、降解率與應用成本效益需更嚴謹數據支撐。
5. 圖表資料部分可視化略少，有些圖說與誤差統計可再豐富。
6. 生態應用風險討論不足，如大量養殖對蜂群及環境衝擊等。
7. 研究指出攝食 MB 後糞便中會產生更多的甲基，但未提及這些降解產物是否對環境無害或是否存在二次污染的風險。這是生物降解技術應用中一個關鍵的安全性考量。
8. 儘管研究在控制的環境下進行，但小蠟蛾幼蟲在自然環境中是否會攝食塑膠、攝食量如何以及生物降解效率是否一致，仍需進一步的生態學研究來驗證。
9. 實驗組 (MB 組) 與對照組 (蜂巢組) FTIR 結果差異不明顯，很難判斷消化後產物為甲基。

作品海報



塑料 蟲食

研究

探討小蠶蛾幼蟲攝食塑膠之研究

摘要

在後疫情時代，口罩儼然成為人們不可少的必備品，其所帶來的塑膠垃圾處理問題急需妥善解決。蜂蠟與PE為結構相似的聚合物，而小蠟蛾(*Achroia grisella* Fabricius)幼蟲又以蜂巢為食且食量驚人。本研究主要針對不同種塑膠、不同齡期的攝食情況、環境中蜂巢有無的影響、攝食塑膠後的產物變化等等。

根據實驗結果，我們發現第二齡期 (0.18g)小蠟蛾幼蟲攝食MB最為顯著；另外，混和蜂巢與塑膠樣本可大幅降低小蠟蛾的死亡率；塗抹小蠟蛾體液的MB透光度提升，並以FTIR分析攝食MB組的糞便，偵測出比純吃蜂巢組產生更多的甲基訊號。我們推測小蠟蛾體液中含有將MB分解的酵素，希冀未來能持續研究，將其應用於塑膠處理問題。

壹、前言

小蠟蛾(*Achroia grisella*(F.))以其幼蟲數量眾多且多以攝食蜂巢為生進而破壞蜂巢，對於蜂農而言，小蠟蛾是一種困擾許久的害蟲。研究指出同為以攝食蜂巢為生的大蠟蛾(*Galleria mellonella*)幼蟲唾液因含有屬於酚氧化酶族的酶而在室溫中便可降解塑膠。小蠟蛾與大蠟蛾同為螟蛾科(Pyralidae)，且被觀察到連同蜂巢片一起放在垃圾袋裡的小蠟蛾會將垃圾袋咬出破洞鑽出。

在現今塑膠垃圾泛濫的時代，全球每月口罩消耗量約為1290億片，欲解決此問題已是刻不容緩。因此我們開始進行實驗，探討小蠟蛾攝食塑膠樣本運用於減少塑膠垃圾可行性、攝食塑膠對於小蠟蛾生長及繁衍的影響等等，期望做出有利於幫助現況的研究成果。

研究目的

- 一、小蠟蛾對不同種塑膠的攝食情況
- 二、不同齡期小蠟蛾幼蟲的攝食差異
- 三、蜂巢的有無對小蠟蛾幼蟲攝食塑膠面積的影響
- 四、攝食塑膠對小蠟蛾生長速度與死亡率的影響
- 五、小蠟蛾攝食塑膠後的分解產物探討



(圖片引用聯合國永續發展網站)

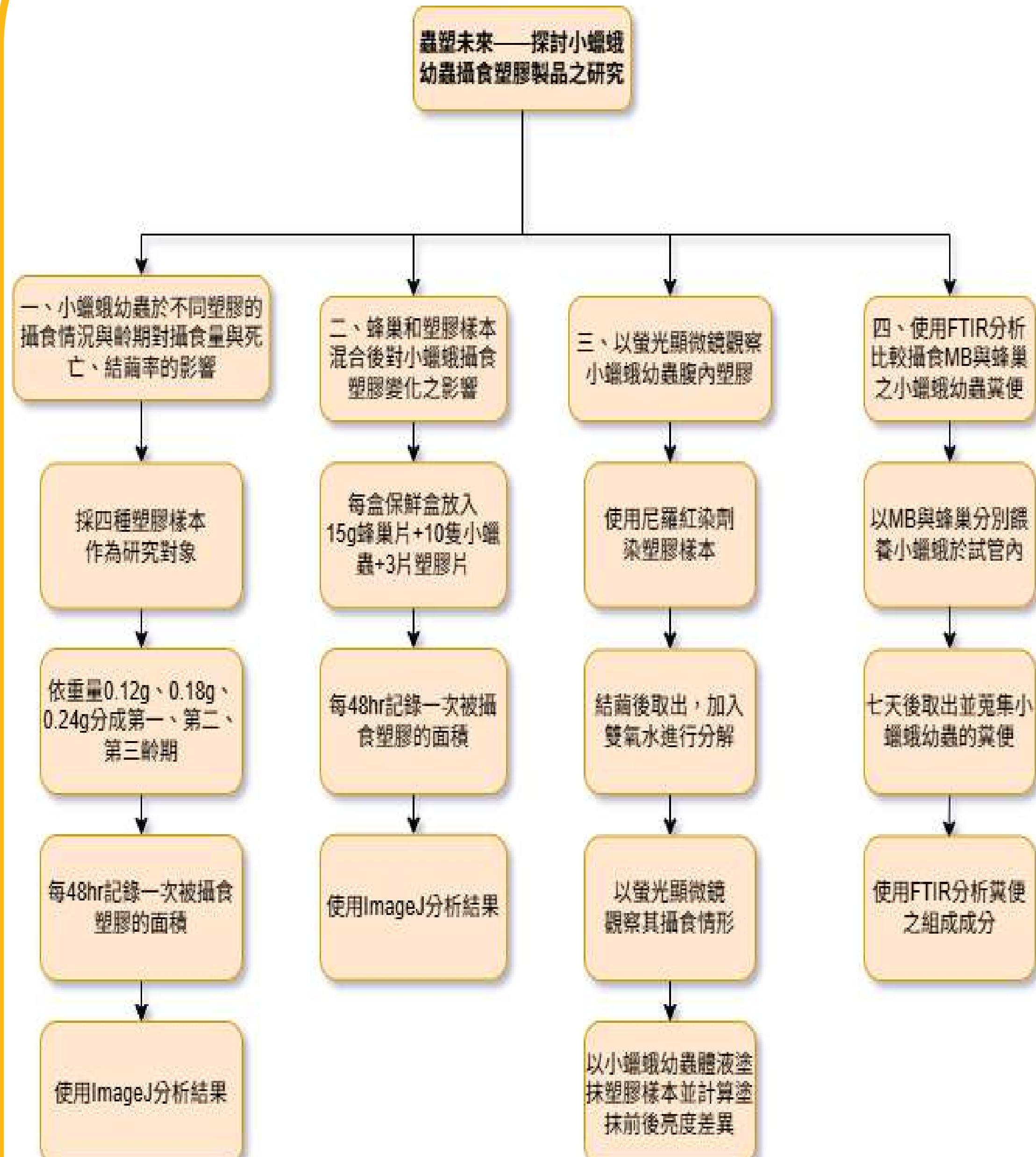
貳、研究設備及器材



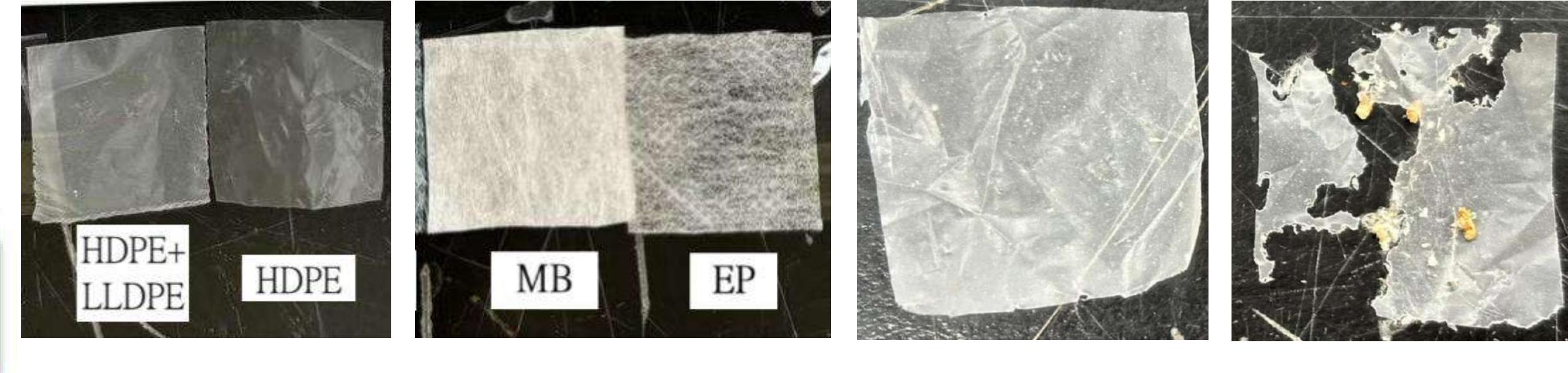
觀察箱 螢光顯微鏡 尼羅紅染劑 傳立葉轉換紅外光譜儀(FTIR)

(以上圖片為作者自行拍攝)

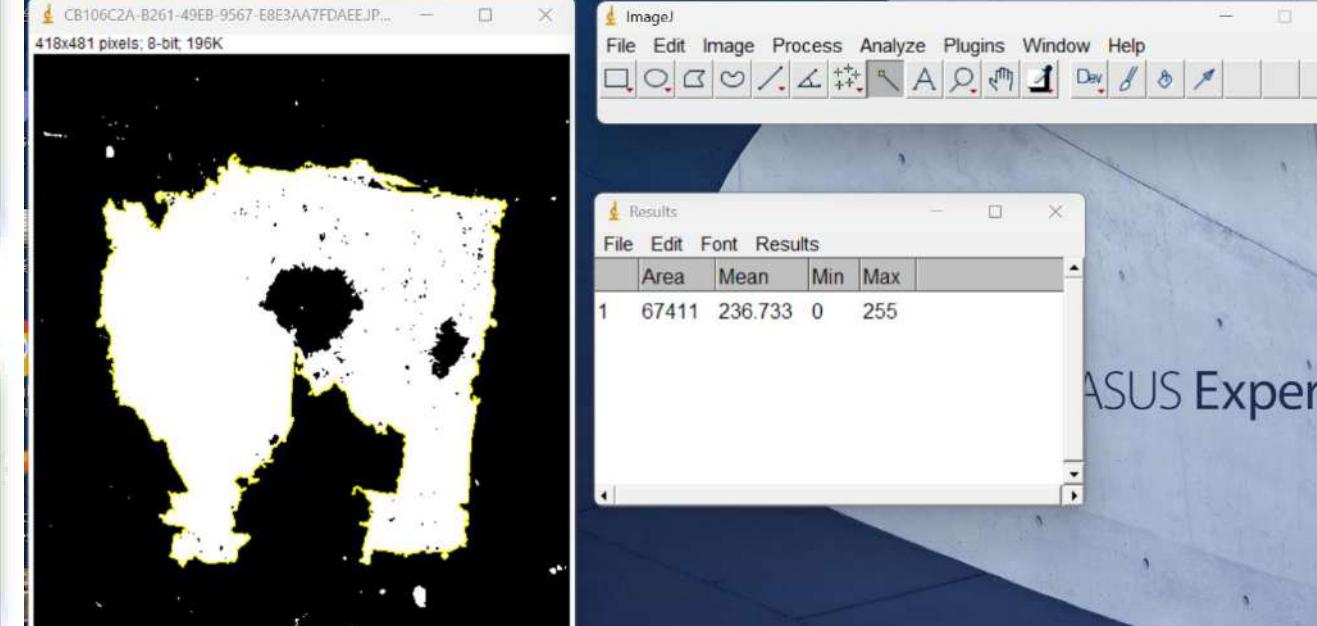
參、研究過程或方法



一、小蠟蛾幼蟲於不同塑膠的攝食情況與齡期對攝食量與死亡、結繭率的影響



四種塑膠樣本



運用ImageJ 分析攝食面積

(以上圖片為作者自行拍攝)

HDPE+LLDPE樣本被啃食前後對比



圖左、圖右分別為:MB、EP樣本被啃食之情形

三、以螢光顯微鏡觀察小蠟蛾幼蟲腹內塑膠

以250ml的甲醇加0.04g的尼羅紅粉末配置尼羅紅染劑，將塑膠樣本置入蒸餾水中，並以50ml蒸餾水加入2ml尼羅紅染劑的濃度，將其染色後靜置。

配置35%的雙氧水，將小蠟蛾幼蟲放置其中，並送入加熱器，設定為60°C，維持24小時，加速分解，後以螢光顯微鏡觀察並記錄。

四、使用FTIR分析比較攝食MB與蜂巢之小蠟蛾幼蟲糞便

將MB與蜂巢分別餵養小蠟蛾於試管內，七天後取出並蒐集小蠟蛾幼蟲的糞便，以FTIR分析糞便之組成成分。

肆、研究結果

一、小蠟蛾幼蟲於不同塑膠的攝食情況與齡期對攝食量與死亡、結繭率的影響

在使用ImageJ分析完攝食面積後，我們將研究結果以圖表呈現。

1.各齡期的攝食塑膠面積比例與死亡率

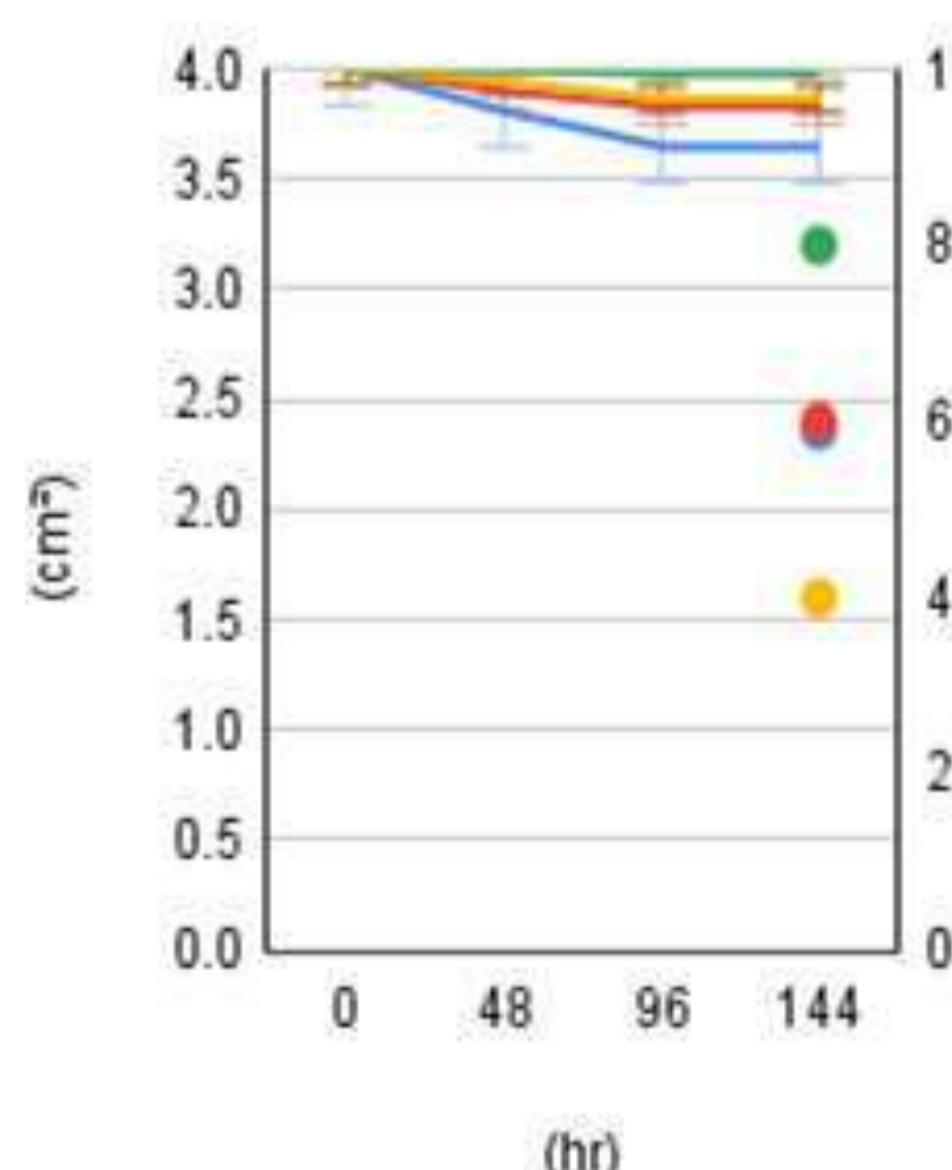
第二齡期小蠟蛾MB組平均減少1.23cm²，為所有組別中減少幅度最大者。

2. 各齡期小蠟蛾之死亡率

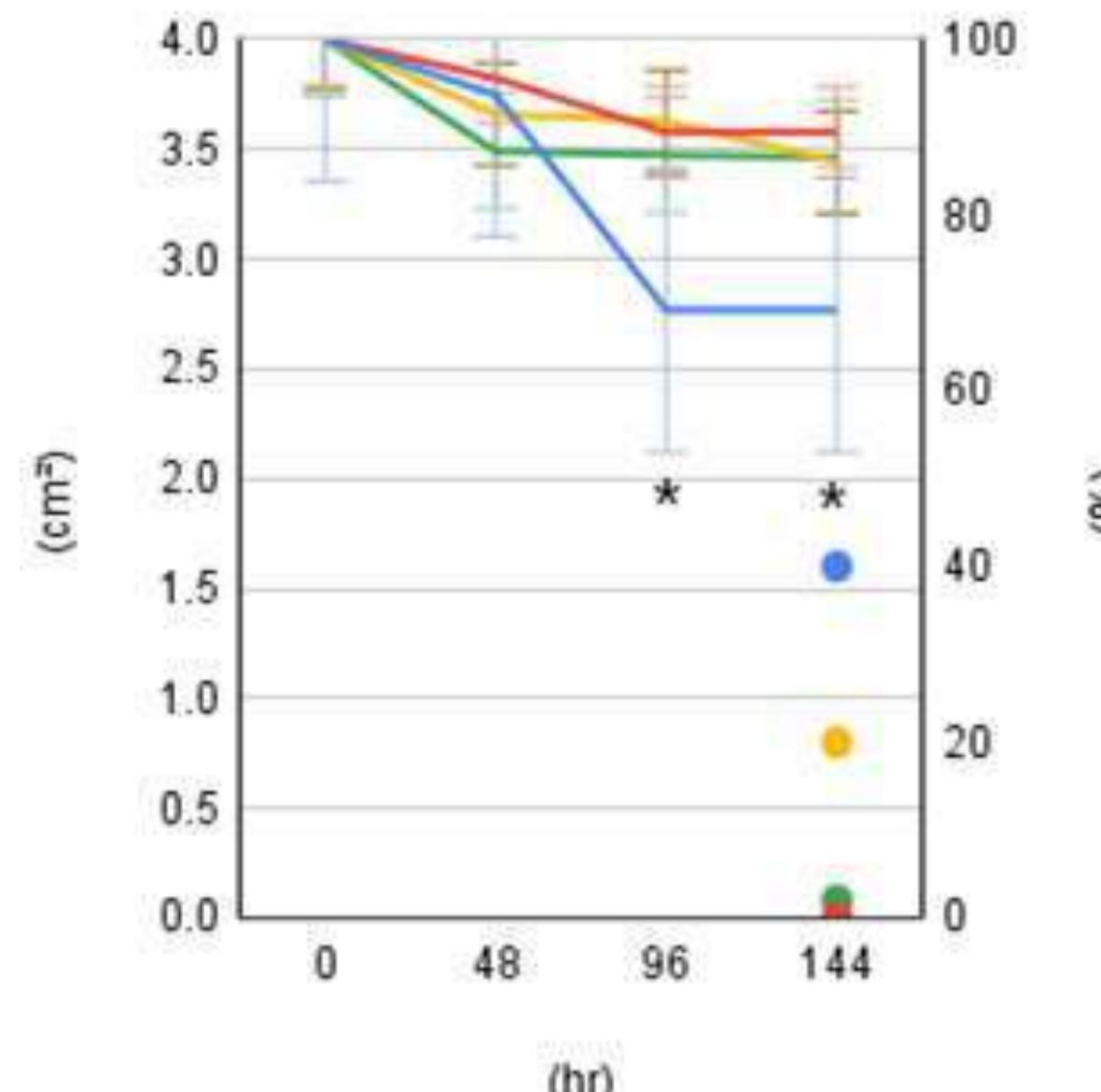
觀察到第二齡期小蠟蛾組塑膠面積減少效果最明顯且死亡率較低，因此在後續實驗過程中，我們選擇以第二齡期小蠟蛾作為實驗對象。

延續實驗二之實驗方法養殖小蠟蛾幼蟲，在結繭後移至裝有蜂巢的保鮮盒進行繁殖，以觀察攝食塑膠是否影響小蠟蛾之繁殖能力。放置一段時間後，可明顯於盒內發現第二代小蠟蛾之蹤跡。MB、EP、HDPE、LLDPE+HDPE與純蜂巢(對照組)皆有出現。

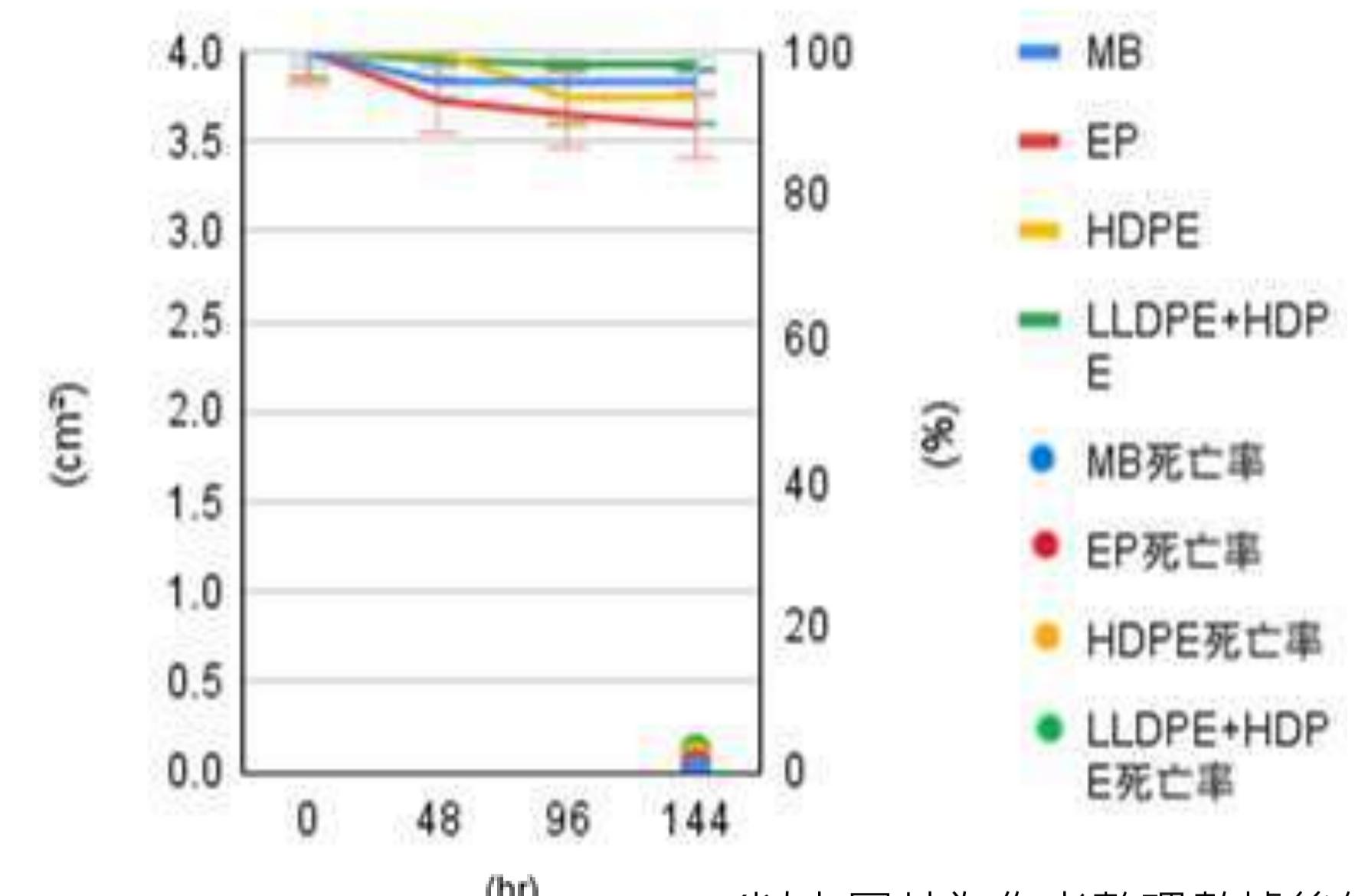
第一齡期小蠟蛾攝食面積與死亡率



第二齡期小蠟蛾攝食面積與死亡率



第三齡期小蠟蛾攝食面積與死亡率



(以上圖片為作者整理數據後繪製)

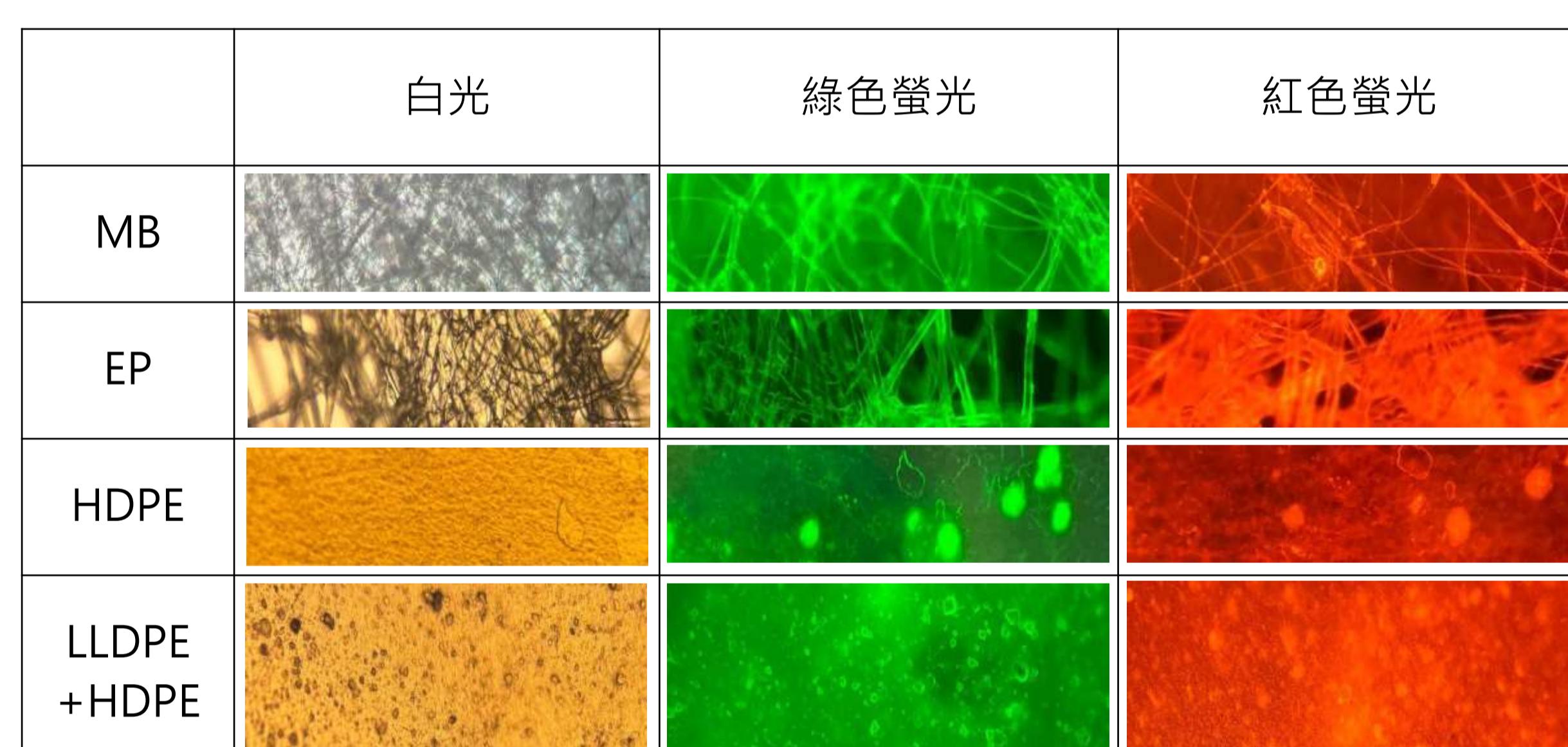
二、蜂巢和塑膠樣本混合後對小蠟蛾攝食塑膠變化之影響

如圖所示，MB與HDPE維持著相對較高的攝食面積比例。而LLDPE+HDPE在此環境下的攝食面積比例為0.38%，相對於單純餵食塑膠，攝食面積降低了13.05%，小蠟蛾之主動攝食情況最不明顯。

實驗結果顯示，四種塑膠樣本組的死亡率皆在5%以下。

三、以螢光顯微鏡觀察小蠟蛾幼蟲腹內塑膠

我們先將塑膠樣本以尼羅紅染劑進行染色後，再提供給小蠟蛾幼蟲攝食並計算攝食面積，以螢光顯微鏡或UV光照射檢驗實驗結果，發現小蠟蛾體內確實有螢光碎片出現，證實小蠟蛾會主動啃食塑膠進入體內。



(以上圖片為作者自行拍攝)

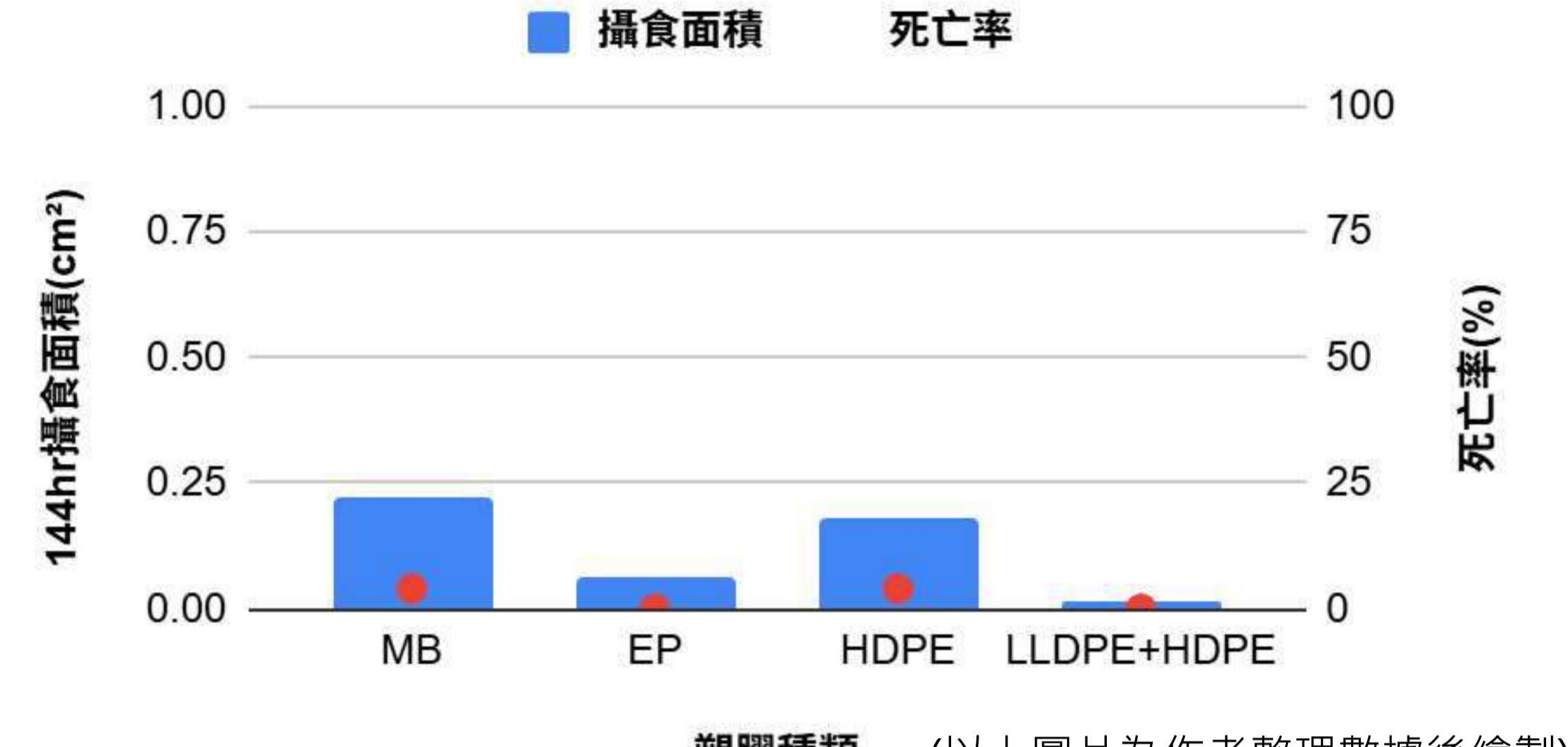
以小蠟蛾幼蟲體液塗抹於各類塑膠樣本上觀察是否有侵蝕情況。

比較MB塗抹前後亮度之差異，Normalized Pixel Count (標準化像素數)之峰值對應Pixel Intensity (像素強度)的數值有所提升，塗抹前的平均亮度為179.46，塗抹後平均亮度為206.15。此現象可推測小蠟蛾體液具備降解MB之能力，且在短時間內就可得到顯著效果。



以上樣本均採：左為塗抹體液前，右為塗抹後 (圖片為作者自行拍攝)

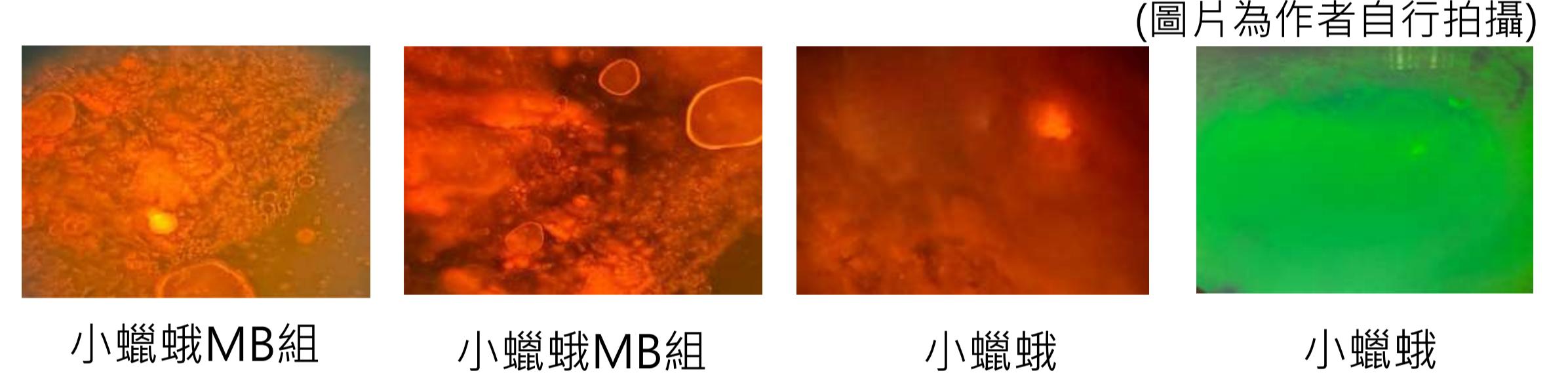
蜂巢和塑膠片混合攝食面積和死亡率



(以上圖片為作者整理數據後繪製)

在螢光顯微鏡照射下小蠟蛾體內的染色塑膠亮點。

(圖片為作者自行拍攝)



小蠟蛾MB組

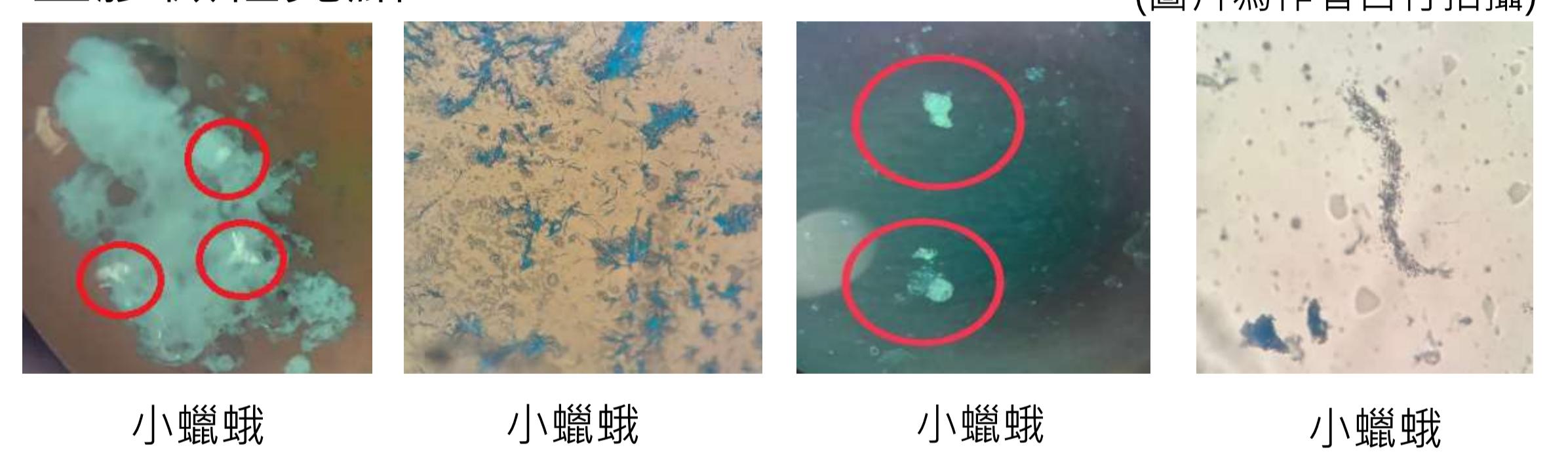
小蠟蛾MB組
(無塑膠亮點)

小蠟蛾
LLDPE+HDPE組

小蠟蛾
HDPE+LLDPE組
(無塑膠亮點)

在UV光照射下小蠟蛾體內的亮點，紅圈處為染色後的塑膠微粒亮點。

(圖片為作者自行拍攝)

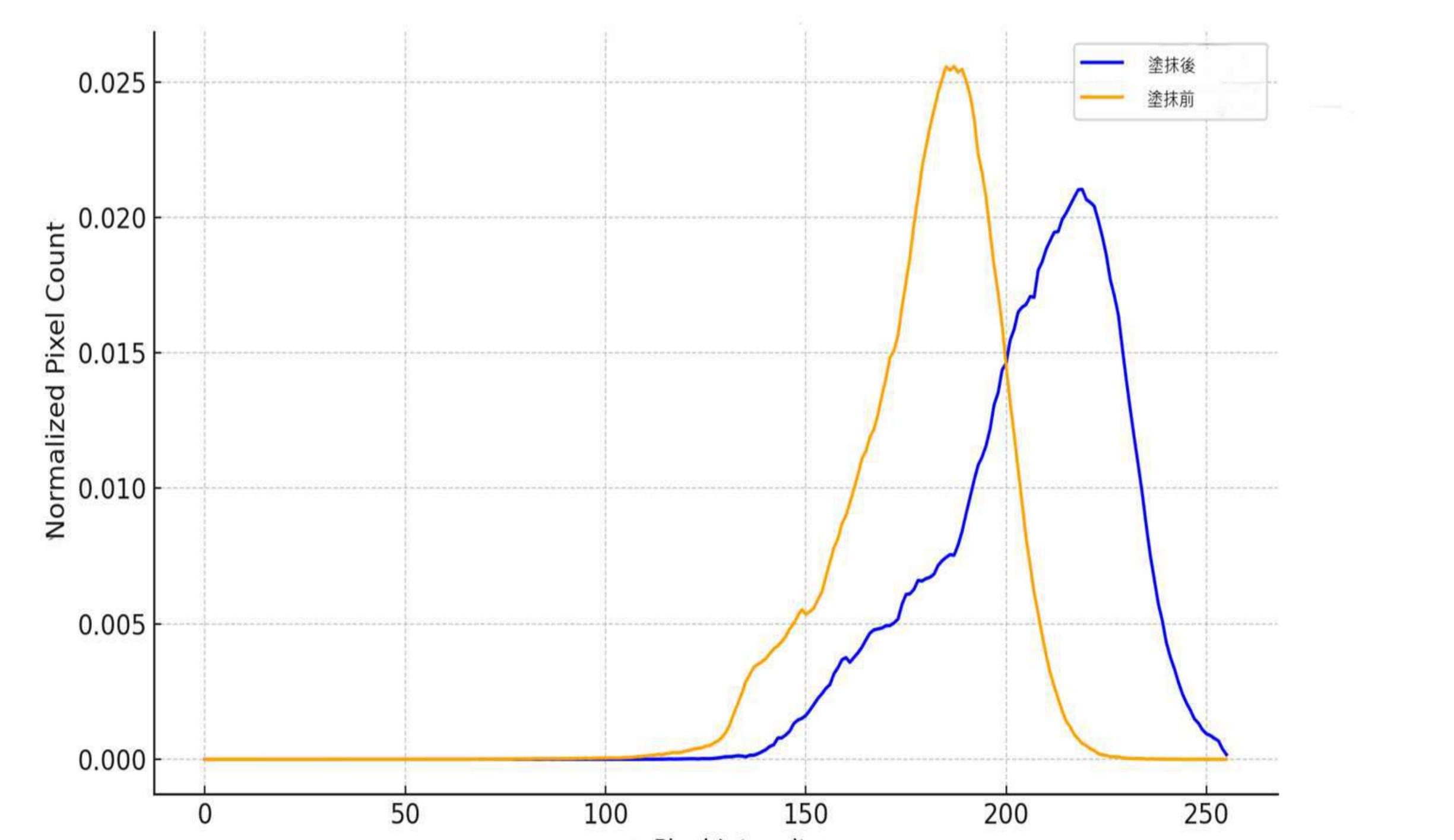


小蠟蛾
MB組

小蠟蛾
MB組

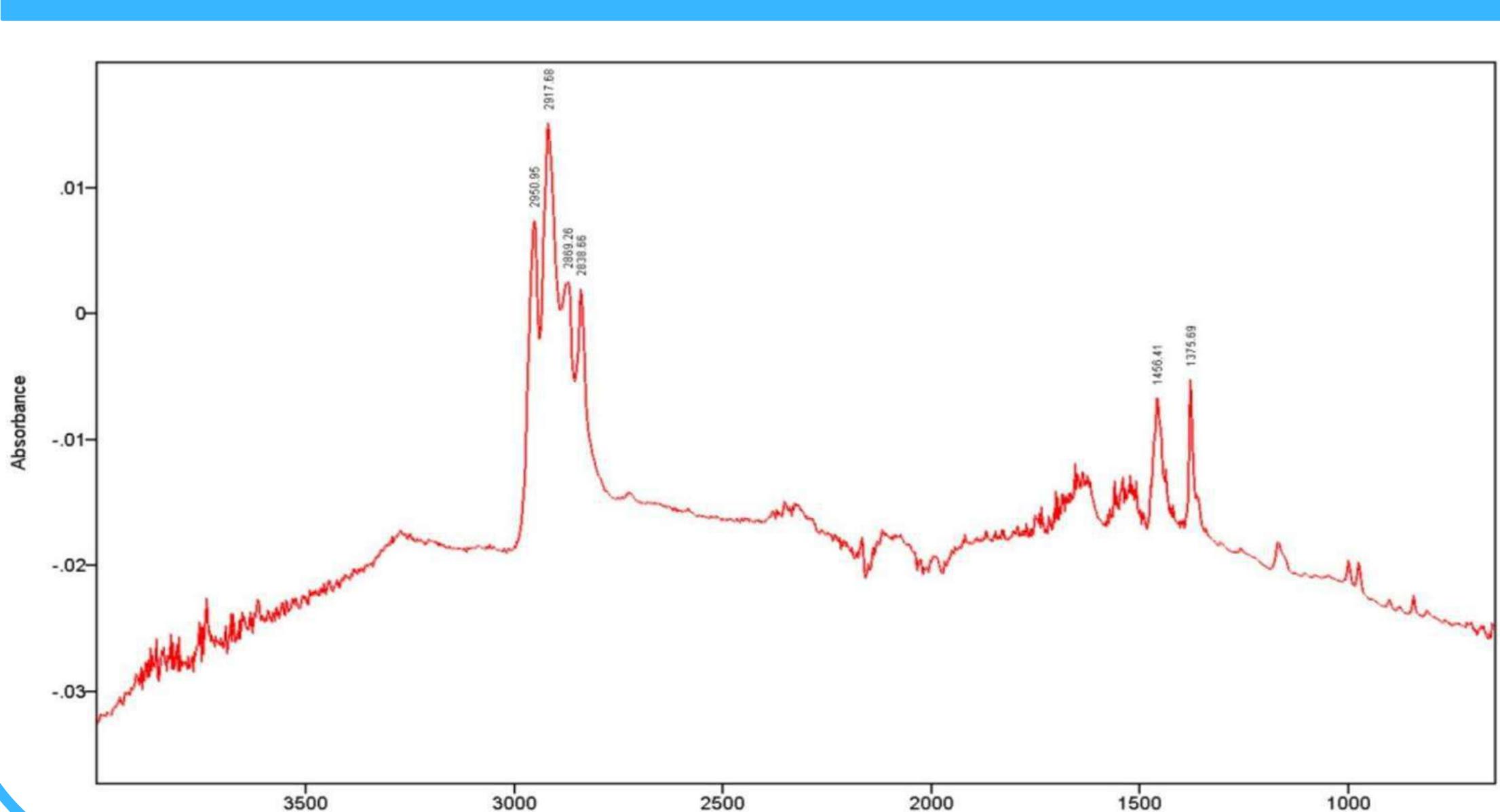
小蠟蛾
EP組

小蠟蛾
EP組

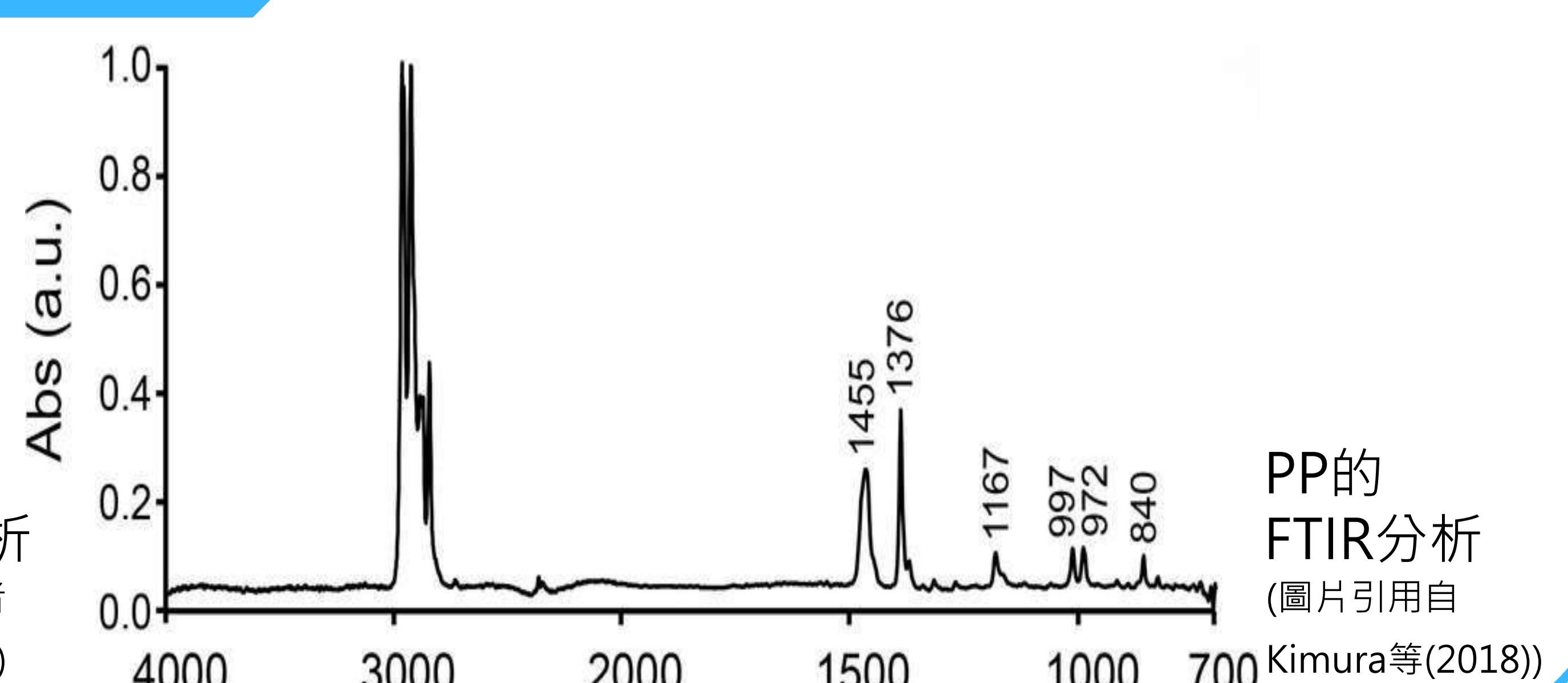


(以上圖片為作者整理數據後繪製)

四、使用FTIR分析比較攝食MB與蜂巢之小蠟蛾幼蟲糞便



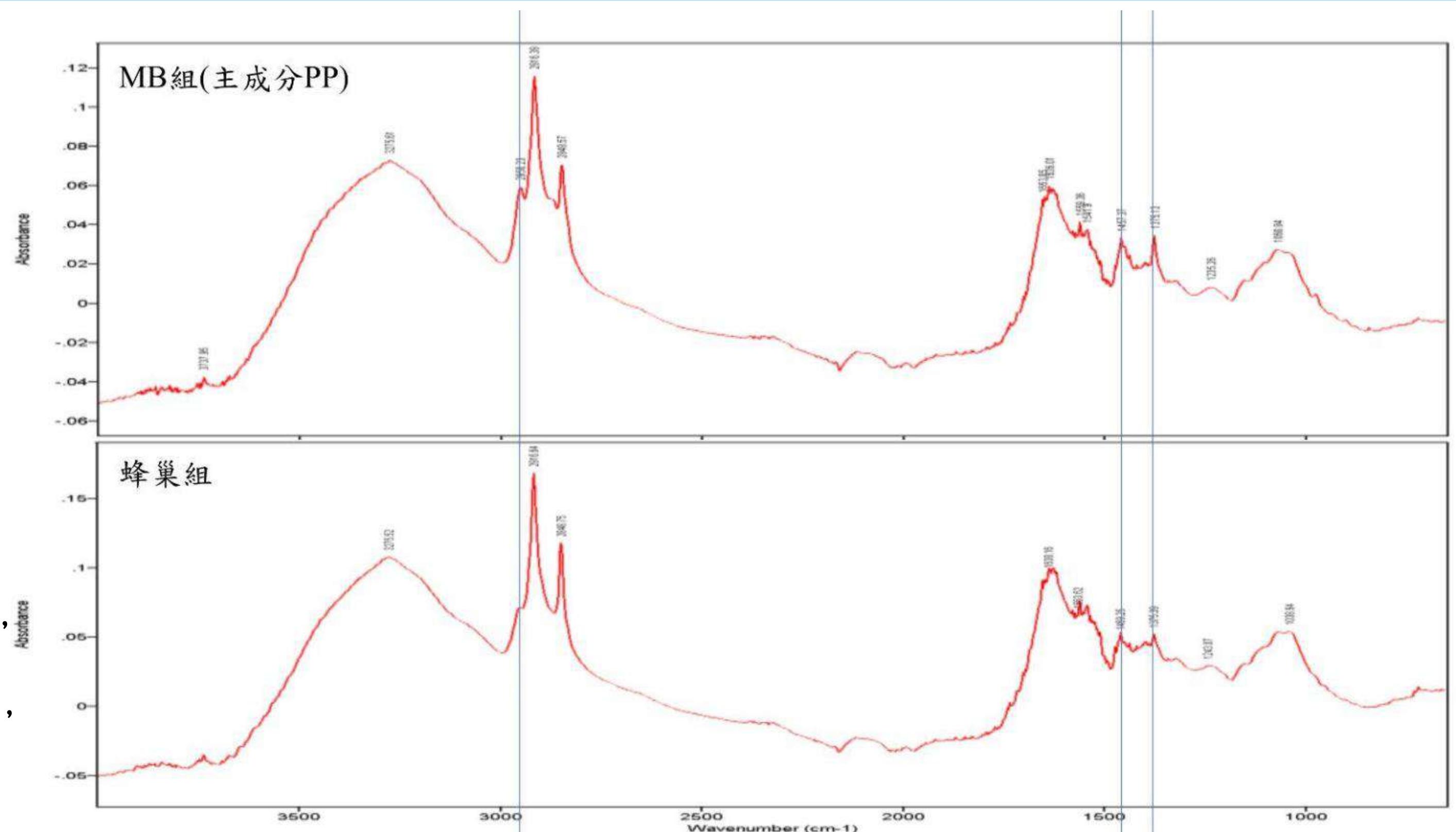
MB的
FTIR分析
(圖片為作者
實驗後繪製)



PP的
FTIR分析
(圖片引用自
Kimura等(2018))

以攝食後MB樣本的傅立葉轉換紅外光譜圖對照Kimura-Suda等(2018)的研究可發現與PP的FTIR結果極為相似，在 1376cm^{-1} 與 1455cm^{-1} 皆出現吸收峰，證實MB的主要成分为聚丙烯(PP)。

比較實驗組與對照組的FTIR分析結果，可發現攝食MB組在 2950cm^{-1} 出現吸收峰，經查找文獻後發現為甲基的產生。



比較實驗組與對照組的FTIR分析結果 (圖片為作者實驗後繪製)

伍、討論

一、小蠟蛾幼蟲於不同塑膠的攝食情況與齡期對攝食量與死亡、結繭率的影響

證明第二齡期小蠟蛾具有較佳攝食效能，針對第一齡期小蠟蛾攝食面積有限且死亡率偏高之現象，推論其體內酵素或分解塑膠之共生菌之分解效率無法滿足蟲體生長至結繭成蟲之完整營養需求。而第三齡期在實驗開始多快速結繭成蛹，故無高攝食率且死亡率偏低。又結果顯示小蠟蛾幼蟲在MB擁有最佳的攝食面積，我們使用二因子變異數分析與單變量檢定(Univariate Tests)得MB組、96小時組與144小時組皆達顯著。為提高解釋的可靠性，後續採用估計邊際平均數(Estimated Marginal Means)進行事後分析並使用Bonferroni 方法進行修正，亦得此結果。

二、蜂巢和塑膠片混合後對小蠟蛾攝食塑膠變化之影響

此貢獻大幅降低攝食量膠隻小蠟蛾死亡率，也證明在有其他營食來源的情況下亦會主動攝入塑膠。然而組攝食面積卻有所下降，根據Kundungal等(2019)指出，在小蠟蛾的PE飼料中添加蜂巢可以促進PE降解，與實驗結果不符，我們推測可能是蜂巢配給過於充足而降低了競爭壓力，使小蠟蛾幼蟲無需轉向較不理想的替代食物來源(如MB、EP等塑膠樣本)。在未來的實驗中，我們希望可以找到最佳的配方，使提升攝食面積比例的同時達到降低死亡率的效果，增加應用之可行性，以達到永續的效果。

二、以寶元顯微觀察小蠅蛾幼蟲內空腸

分解塑膠，以透光程度之不同證實小蠟蛾體液會對MB樣本產生一定影響。

上一节实验组作业1略组之光谱图，同属未知物为混合MR组於2050

構也含甲基，但結構更長、振動模式更複雜。MB樣本組同時具備 2950cm^{-1} 、 2916cm^{-1} 、 2838cm^{-1} 三個吸收峰，因PP本身即含有比蜂巢多的甲基。綜上所述，推測攝食MB組的甲基吸收峰可能來自MB抑或是新的甲基降解產物。

性、結婚與未來展望

- 二、四種塑膠樣本內，以MB之攝食面積最多，顯見對於分解口罩之問題有可發展性。

三、混合蜂巢與塑膠片可使死亡率接近0%，在MB與HDPE維持較高攝食比例。證實在生存環境內有其他營養來源時，小蠟蛾也會主動攝食塑膠。

四、以螢光顯微鏡或UV光照射攝食塑膠後的小蠟蛾皆能發現明顯螢光亮點，證實小蠟蛾並非僅啃咬塑膠樣本，而是塑膠樣本有確實進入小蠟蛾體內進行分解。

在未來，我們希望能夠守護到小蠶蛾進行追蹤，累積山地一二代，比較其捕食量形之能力或生理狀態，與母族產生差異，探討是否有生物累積之影響。

析標定的產物，確定該降解物的組成。我們將持續針對小蠅蛾的塑膠降解過程與產物進行研究，期許能實際應用於生活中，為當今社會亟需解決的口罩問題貢獻一份心力。

柒、主要參考文獻資料

- 二、Bouwmeester, H., & Wijnands, J. (2017). This caterpillar can digest plastic. *Nature*, 545(7655), 438–440.
 - 三、Kundungal, H., Gangarapu, M., Sarangapani, S. et al. (2019). Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). *Environ Sci Pollut Res*, 26, 18509–18519.
 - 四、Razak, N. A. S. A., Habib, S., Abd Shukor, M. Y., Alias, S. A., Smykla, J., & Yasin, N. A. (2024). Isolation and characterisation of polypropylene microplastic-utilising bacterium from the Antarctic soil. *arXiv*.