

2025年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告格式

題目名稱：聚乳酸Bang不見！ 改質二氧化鈦催化聚乳酸(PLA)分解

一、摘要

聚乳酸雖可自行分解，但卻需要花費大量時間，且分解所需的條件嚴苛，文獻[1]提出一個能在室溫條件下分解聚乳酸的方法，然而文獻中使用的催化劑 CdS 對環境不友善，本研究選擇低毒性的 TiO_2 替代 CdS。我們以醋酸改質二氧化鈦，並透過一系列測試(溶劑、光源、濃度、劑量、溫度等)，使奈米級 TiO_2 產生的電子電洞能有效接觸到聚乳酸促使其分解，並有效降低分解反應的活化能，分解效率比圖(八)中的實驗(1%PLA、4%二氧化鈦、 20°C)提升250倍。

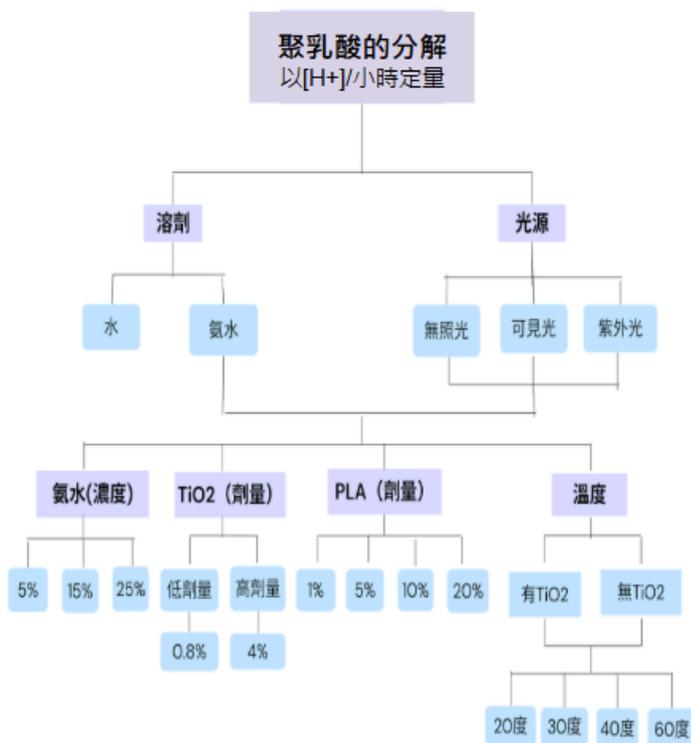
此項成果可從根本上減少由聚乳酸所製成的垃圾，且實驗過程符合節能、低毒、簡潔、可解等原則，期盼能為海洋及陸域生態保育、永續發展等SDGs指標做出貢獻。

二、探究題目與動機

聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)是一種廣泛應用於包裝材料、纖維、醫療器械等領域的生物降解性塑料。然而，在自然條件下，PLA 的分解速度通常較慢，根據文獻[2] (丁亞涵 2021)，PLA 必須在厭氧的環境下，具有足夠高的濕度、溫度和 60 天的時間才能分解 90%，文獻[6]也指出在 37.5°C 時，分解7日的聚乳酸薄膜失重率達 18.18%。光催化是一種利用光能驅動化學反應的技術，光催化技術具有許多優勢：其一，能夠在常溫常壓下進行，降低了操作成本；其二，使用過程中不會產生二次污染，符合環保需求；其三，能源的再生性使得光催化技術具有較高的經濟效益。我們從文獻[1]中發現一個可在室溫下分解 PLA 的方案，本研究參考此方法，以氨水為溶劑，然而因CdS具有毒性，所以我們以具相同催化效果的奈米級 TiO_2 替代，並透過醋酸改質，使在水中的分散效果增加。

三、探究目的與假設

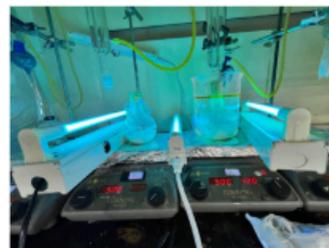
實驗流程與假設：



圖(一)實驗架構圖



圖(二)以HOAc改質 TiO_2 粉末



圖(三)加熱迴流及照光裝置

我們在確保溶液因攪拌而均勻分散後，使用pH Meter測量酸鹼值以量化實驗結果，然而pH值因取負log，會影響數據呈現的結果，所以我們的實驗都是以氫離子莫耳數除以時間做定量，縱軸是氫離子濃度，橫軸是時間，因此我們可以從斜率表示分解情形

當降解過程進行時，會釋放小分子單體(乳酸)，這些含有羧基的分子會放出氫離子或與溶液中的氨反應(產生乳酸銨)，使溶液的pH值下降。

另外，我們推測聚乳酸的分解會和溶劑、濃度、光源、溫度有關係。

1. 溶劑: 根據文獻[1]，聚乳酸在氨水中能夠被氨解，因此我們推論聚乳酸在氨水中的分解效果較氨水好。

2. 濃度: 依照速率定律式，聚乳酸的濃度提高，應會使分解速率加快

3. 光源: 二氧化鈦需照射適當光源才能產生電子電洞對，且紫外光的能量可破壞聚乳酸的鍵結。

4. 溫度: 根據阿瑞尼斯方程式，溫度的提高能使反應速率加快。

實驗目的

一、以TiO₂替代有毒的CdS作為光催化劑並以醋酸做表面改質，提升分散性。

二、探討改質後TiO₂在不同光照條件下的分解效率。

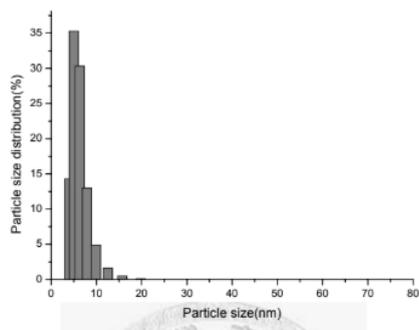
三、優化反應條件(如氨水、聚乳酸濃度、TiO₂劑量、照度、溫度等)，找出最適合聚乳酸分解的環境。

四、探究方法與驗證步驟

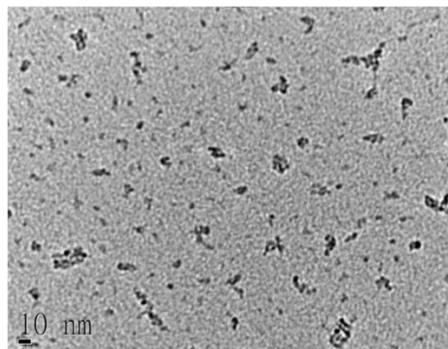
一、以醋酸改質二氧化鈦

我們使用了文獻[3]中所提到的溶膠-凝膠法(sol-gel method)合成奈米級TiO₂，將12g醋酸加入58.6g的TTIP後攪拌15分鐘，再加入290毫升的水攪拌一小時，之後加入4毫升65%的硝酸攪拌15分鐘。將上述混和液加熱至80°C，並迴流冷凝水兩小時，溶液降至室溫後烘乾並使其成粉末狀，文獻[3]指出以此方法製作出的TiO₂(HOAc)粒子結構為nanoparticle，且粒徑約為5-10nm，如圖(四)、圖(五)所示。

TiO₂的結晶型態主要為銳鈦礦(anatase)，其中參雜一些非晶態金屬(Amorphous metal)。以此方法改質後的二氧化鈦，能夠在水中有更好的分散性，且吸收光譜也較未改質的寬，根據文獻[4]建議，會更有利於吸收光。(圖四、五為二氧化鈦粒徑大小和在TEM下的圖，來源節錄自文獻[3])。



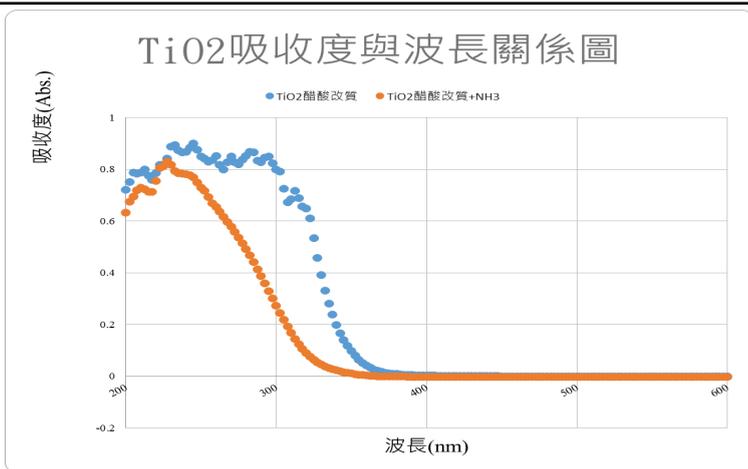
圖(四)二氧化鈦粒徑大小分布



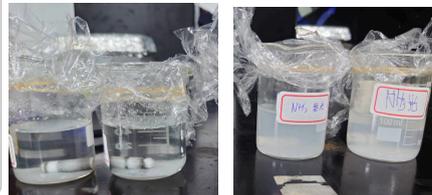
圖(五)二氧化鈦在TEM下的照片

二、溶劑的選擇

因過高的氨水濃度不利植物生存，且人體可能嗆傷，我們使用低濃度的5%氨水作為溶劑，在常溫下加入溶液重1%之PLA粉末並放入裝有紫外燈管的暗箱，期間確保溫度固定，並攪拌八小時或更久。我們發現二氧化鈦在氨水中的吸收光譜範圍較水中少，但是氨水除了能提供孤對電子使PLA氨解外，聚乳酸在氨水中的分散效果比水來得好，如圖(六)、圖(七)。因此在後續的實驗中，我們選擇以氨水作為實驗的基礎。



圖(六)二氧化鈦在水與氨水中的吸收光譜



圖(七)水與氨水中PLA的變化

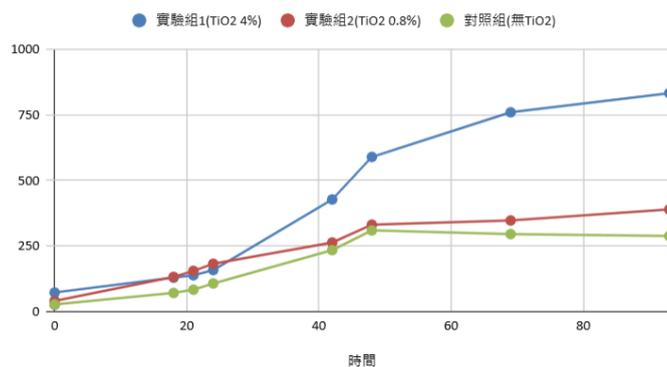
三、濃度

3-1 二氧化鈦(催化劑)劑量

我們每個實驗皆會有三組數據，其中一組為對照組(不加 TiO_2)，其餘兩組則以催化劑的多寡做區分，方便我們看出 TiO_2 對於其分解效率的影響。另外因改質後的 TiO_2 表面具有醋酸根，會影響溶液的pH值，故初始的pH值會因 TiO_2 加入量的多寡而有所不同。

以下實驗為1%PLA下加入 TiO_2 的分解效率：

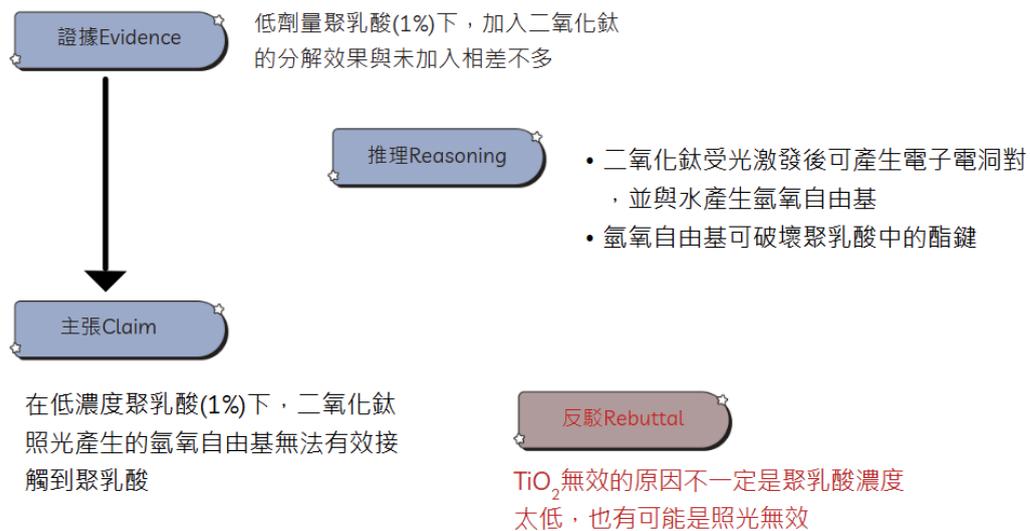
實驗組1(TiO_2 4%)、實驗組2(TiO_2 0.8%)和對照組(無 TiO_2)



圖(八)1%PLA下加入 TiO_2 的分解效率

若以圖(八)中各數據的斜率來看，可得知各組效率在24小時內相差不大，我們認為可能的原因有濃度與光源，因此我們做了CER的論證並嘗試找出主要因素。

CER論證一 濃度



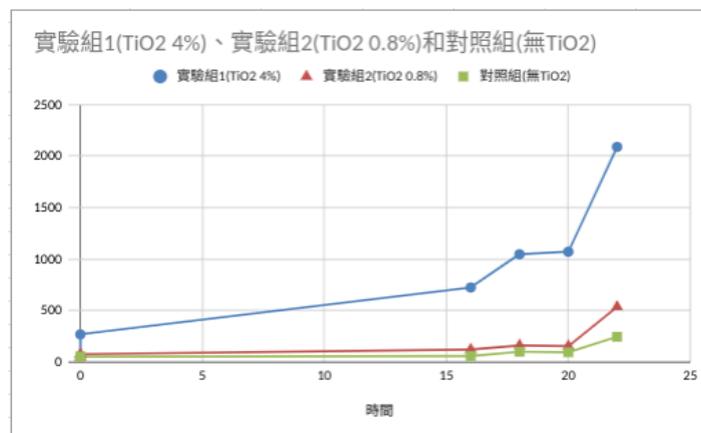
圖(九)CER論證 濃度

依照速率定律式，反應物濃度可能直接影響反應速率，因圖(八)實驗說明在低劑量1%聚乳酸下有無二氧化鈦的差異不大，所以我們先行調高聚乳酸劑量至10%，並探討在此濃度下加入二氧化鈦的效果。

操縱變因：二氧化鈦的濃度

控制變因：5%氨水、20%聚乳酸、溫度(20°C)

應變變因：聚乳酸的分解速率



圖(十)10%PLA下加入二氧化鈦的分解效果

從結果中可看出PLA濃度確實會影響效率，且較高劑量之TiO₂在24小時內的pH值下降幅度較大，因此加入TiO₂會加快此反應。

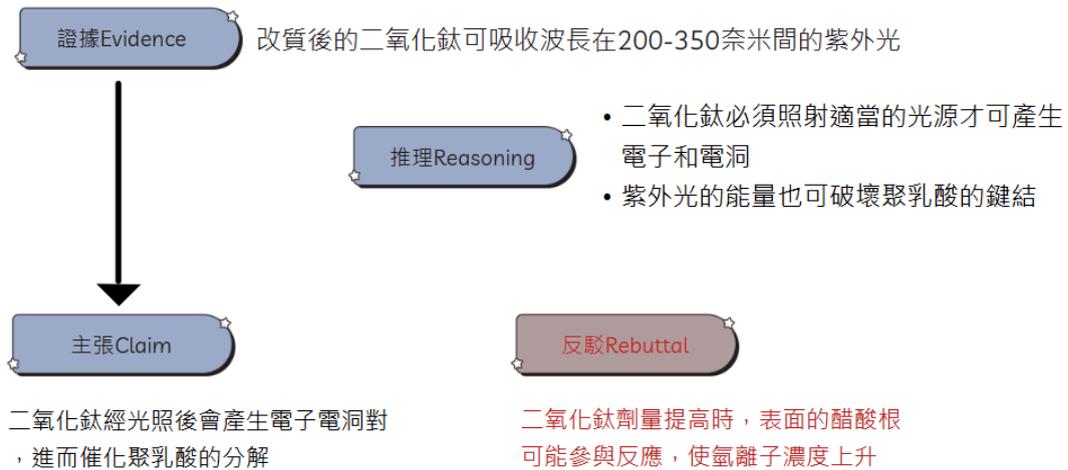
3-2 PLA劑量

在圖(八)、(十)中可發現PLA劑量會影響反應速率，我們後續以PLA劑量1%、5%、10%、20%做實驗，結果證明PLA濃度與反應速率呈正相關，且劑量20%的組別速率約為1%組別的4.8倍。

四、光源

紫外光本身具有分解聚乳酸的能力，因此我們推測分解效率可能與光源有直接關係。

CER論證二 光源



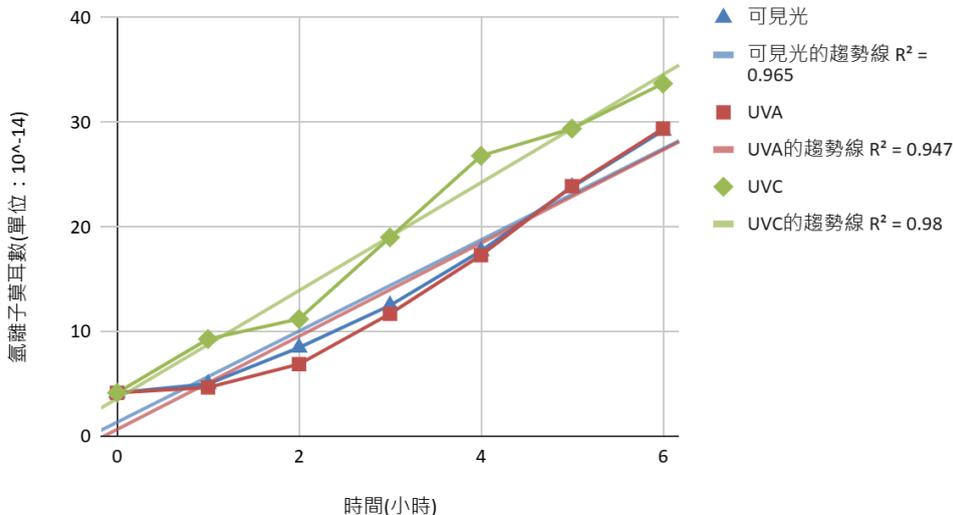
圖(十一)CER論證 光源

操縱變因: 光源波長(可見光、UVA、UVC)

控制變因: 20%聚乳酸、5%氨水、4%二氧化鈦、溫度(20°C)、照度(樣品距燈管約27cm)

應變變因: 聚乳酸的分解速率

光源探討(無TiO₂)



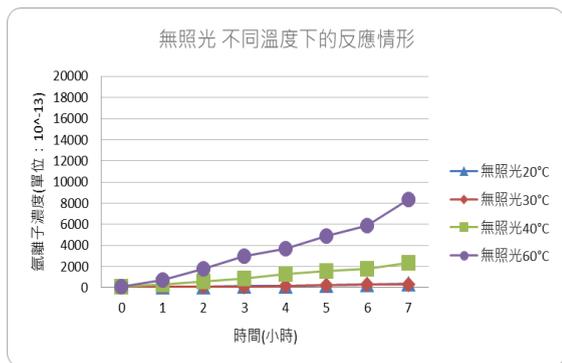
圖(十二)不同光源波長下聚乳酸的分解效率

根據圖(十二), UVC對於聚乳酸的分解較有幫助, 因為可段段聚乳酸的酯鍵, 而能量較低的UVA與可見光效果都較差。

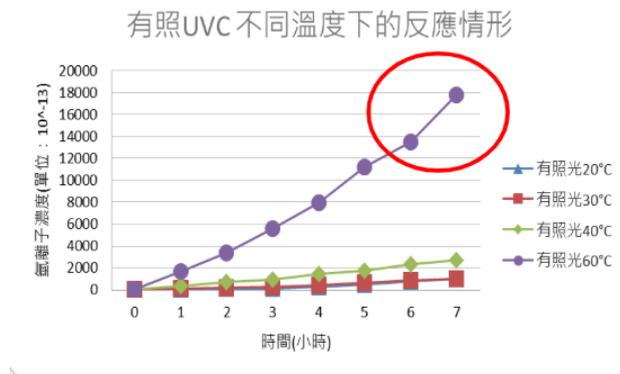
我們後續也有以改質後的二氧化鈦加入氨水中作為對照組, 結果發現pH值在一小時後即無明顯下降, 可推論醋酸根不會參與反應。

五、溫度

根據阿瑞尼斯方程式, 溫度上升時, 聚乳酸分解速率也會隨之提高。



圖(十三)無照光 不同溫度下的反應情形



圖(十四)有照UVC 不同溫度下的反應情形

從以上圖中可發現：

第一，溫度越高分解效率越快，符合速率定律式定性分析

第二，我們利用不同溫度的分解速率，計算反應活化能，可得有、無照光的分別38.8、77.1KJ/mol

第三，40~60°C時分解速率驟增，可能是因為達到PLA的玻璃轉換溫度，聚乳酸分子間的流動性提高會令其更容易被水或氨分解，進而使分解速率提升。當溫度升至60°C時，有照UVC的上升幅度出現非線性成長，分解速率約為20度的70倍，推測可能聚乳酸分子大量分解為小分子，使分解效果更好。

五、結論與生活應用

一、溶劑的選擇

PLA在氨水中的分解效率較水中好，考量高濃度的氨水對環境有危害，故採用5%氨水。

二、TiO₂劑量

根據圖(十)，較高劑量的TiO₂PH值下降幅度較低濃度的大(在八小時內TiO₂4%效率為8%分解效率的2倍。)

三、PLA劑量

PLA的濃度越高分解效率越佳(PLA劑量20%的效率約為1%組別的4.8倍)

四、溫度

分解效率隨溫度提高而上升，在照UVC光、60°C的組別中，其上升幅度為非線性成長，且速率約為20°C的70倍。

五、光源

根據圖(十二)，TiO₂有光照的分解效率是無照光的2.6倍，且UVC能夠光降解聚乳酸。照UVC的分解反應之活化能有顯著下降(從77.1降至38.8 KJ/mol)。

六、總結

從一開始的低濃度進展到4%的TiO₂、5%氨水、聚乳酸20%、照UVC、溫度60°C，聚乳酸分解速率提升了250倍。此項結果可運用在減少由PLA所製成的垃圾，並降低環境負擔。

參考資料

- [1]Yue Wu, Phuc T. T. Nguyen 2025Photocatalytic upcycling of polylactic acid to alanine by sulfur vacancy-rich cadmium sulfide
- [2]丁亞涵 2021生物可分解性塑膠聚乳酸的降解條件研究《臺灣農業化學與食品科學》59卷1期
- [3] 劉獻文 2008高折射率及高穿透度之二氧化鈦-環氧樹脂 奈米複合材料之合成與物性研究
- [4]Mixed amorphous and nanocrystalline TiO₂ powders prepared by sol - gel method: Characterization and photocatalytic study
- [5]柯亭宇 台灣網路科學教育館 綠色親善大使之誕生-生物可降解性奈米複合材料的研
- [6]蔡億穎 2011台灣網路科學教育館 聚對苯二甲酸乙二醇與聚乳酸共混材料之降解研究