

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 環境學科

052605

「炭」「桃」問題---自製鐵磁生物炭並活化過硫酸鹽(PMS)降解水中四環黴素之研究

學校名稱：高雄市立高雄女子高級中學

作者： 高一 羅子苙 高一 何采宣 高一 王宜臻	指導老師： 呂雲瑞 邱建龍
---	-----------------------------

關鍵詞：鐵磁生物炭、過硫酸鹽(PMS)、四環黴素

摘要

大葉桃花心木為校園常見樹種，本身具有毒性，鮮少被回收再利用；四環黴素為汙水常見之新興汙染物，對人類健康與生態穩定造成威脅。生物炭是將木材或枯死的植物，在高溫下以無氧方式加熱裂解，作為土壤改良物質或吸附劑，為低成本、多孔且富含碳元素材料；過硫酸鹽（peroxymonosulfate, PMS）具有超強氧化性，產物毒性較低，廣泛應用於去除水中有機汙染物。

本研究以各種溫度（300~900°C）將果殼燒製成生物炭，用於吸附四環黴素溶液，探討活化不同濃度 PMS 降解效果，得出最佳條件為 300°C 生物炭添加於 0.01mM 之 PMS。並將表面改質為鐵磁流體，催化 PMS 具有回收再利用的永續概念，實際投放人工淡水和魚類養殖水體中，提供快速簡易的淨化水質方法。

壹、前言

一、研究動機

近年來全球污染情況加劇，我們發現水質污染之議題備受各界關注，因水體的乾淨與否將直接影響到生物的健康，乾淨的水源也象徵著一個國家的經濟發展情況，因此我們欲探究如何改善水體污染，而我們選擇以去除排放水中的污染物作為目標。

在查找資料時，發現「抗生素 (antibiotic)」在水污染方面占有一席之地，常因家庭與工業不當排放藥物而污染水體，因此我們想設定一項與人體較容易接觸到且會帶來危害的抗生素樣本作為研究對象。查找過程發現「四環黴素 (Tetracycline)」為最常見的抗生素之一，普遍用於農藥、皮膚用藥、眼藥水…等，而我們所處的南部平原分布廣，為農業發展主要地區，常使用含有四環黴素的農藥，因此可能導致農作物吸收過多四環黴素，最終透過食物鏈回到人類身上，提高人體受負面影響的可能性（如：牙齒與骨骼發育不全、具肝毒性）而農業廢水等受污染水排入河川則會抑制動植物生長，且會使雄魚雌性化、水中細菌產生抗藥性。綜合各方探討，各國雖未訂定四環黴素排放標準，水質中依然可檢測出其含量，因此我們希望找出一套方法來加以去除。

參閱文獻時，發現經過熱裂解 (pyrolysis) 的多孔碳具有吸附能力，可將水中抗生素轉移到其孔洞中，後來在網路上看到名為「生物炭 (biochar)」的新興吸附材料，只要再使用氧化劑即可達成去除效果。經過了上述的實驗動機與發想過程，我們須著手尋找可製作成生物炭的樣本，並搭配成本低且降解效率高之氧化劑，設計一套吸附與降解抗生素實驗，想找出一個對環境友善的去除了有機污染物的流程，並應用在生活中。

二、文獻回顧

(一) 生物炭的定義

生物炭 (Biochar)，是指有機物在不完全燃燒或缺氧環境下，經過高溫熱裂解 (Pyrolysis) 後的固體產物，像是森林大火後未燒盡的焦黑植體殘株，就是自然界製造的生物炭；而人工的炭更是不勝枚舉，像是木炭、竹炭、稻殼炭等都是。

整個高溫熱裂解過程即所謂的「炭化」或「乾餾」，除了產生固體的炭之外，同時也會產生液體與氣體，產生的液體包含乾餾液（或稱醋液）及焦油等，氣體則有一氧化碳及其他可燃性氣體。由於生物炭的碳鏈為生物惰性，不易經生物分解，有研究指出，生物

炭在自然環境下的半衰期高達 500~1000 年甚至更長，因此若將有機物燒成生物炭再存於土壤中，可成為長期碳匯，降低碳排放。

（二）生物炭的應用

生物炭為微鹼性，具有多孔性及高「比表面積」（即單位重量的表面積），可中和酸性土壤、增加土壤的保水力及通氣性，並吸附土壤養分使養分不易流失。生物炭中的大小孔隙也能作為土壤微生物的棲所，提高族群數量及多樣性，維持土壤生態作用；若應用於受污染的土壤中，則能暫時將污染物吸附在孔隙中，避免污染擴大。而生物炭因顏色較深，在冬季或早春時節適量添加，可加深土色吸收太陽能，以增高土溫、減緩寒害的程度。作為栽培介質材料，生物炭耐腐性佳，可長期使用，並可吸附各種養分，慢慢釋出供給作物養份，有助於延長肥效、減少肥料浪費。此外，經高溫熱裂解成生物炭的植物體中，鹼性金屬元素像是鉀、鈣、鎂等，經炭化後成為作物容易吸收的形態，有助於供給植物養分，尤其炭化的稻殼及稻草富含矽與鉀，可使植株健壯，不易受病蟲危害。其他用途像是將生物炭磨成細粉，裹覆於速效型的肥料外，可延長肥效；或作為微生物農藥或肥料活菌的載體，包裹於種子外，確保有益微生物能接種於植物根部；亦可作為生物膜的載體，或作為水產養殖的水過濾、畜產之廢水處理及廢棄物除臭等用途。

（三）生物炭的來源

生物炭的原料來源相當廣泛，目前多利用農業副產物，物盡其用以提升作物的附屬價值，諸如稻殼、玉米穗軸、果樹修枝等，或是將木屑、椰子殼、乾草等資材經壓縮造粒成為顆料燃料，皆為可供直接燃燒與炭化的資材。

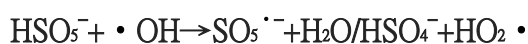
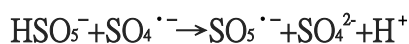
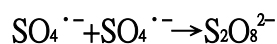
稻殼的含水量低，燃燒後所產生的腐蝕性氣體（如二氧化硫等）非常少，量大且集中在碾米廠，取得的管道明確，是很好的替代燃料。其灰燼富含矽與鉀，可提高水稻抗病能力、作為有機農業鉀肥及酸性土壤改良，並可提供半導體工業矽原料及橡膠的添加材料。目前燃糠爐技術發展成熟，國內有三升及三久兩大廠牌。

果樹修枝雖缺乏背景資料，但以產業面積估算，廢棄枝條的數量應相當多。各類樹材的燃燒特性可能有所不同，但炭化後可望縮小材質間的差異性，提高其作為木炭或氣化燃料的可行性。顆料燃料則是藉由壓縮造粒的技術，將木屑、椰殼、乾草等製成顆料燃料，

(五) PMS 氧化法

是一種以自由基為活性物種的水處理方法，已經廣泛應用於微污染物的降解。其中，過硫酸鹽高級氧化法因產生的硫酸根自由基 ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) 具有更高的氧化還原電位和更長的半衰期，使其在微量有機污染物的氧化降解中更有優勢。目前，最常用於活化 PMS 產生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的催化劑主要是過渡金屬，如 Fe、Co、Cu 和 Mn。在以上這些金屬中，鐵基催化劑，如鐵 (Fe) 由於其環境友好、氧化還原電位強 ($2\text{EFe}^{+}/\text{Fe}^0 = -0.44$)、無毒且成本低，而被廣泛用於活化 PMS。然而，Fe 的表面活性較高、穩定性較差且易團聚，很難穩定存在於環境中，且其催化效率低。為了克服這些缺點，提高對污染物的處理效果，最有效的解決方式是利用穩定介質對其進行負載。近年來，生物炭材料由於其獨特的等級孔結構、較強的穩定性、較低的成本和環境友好性，利用其作為改質材料的載體。將 Fe 負載在生物炭上，不僅可以提高 Fe 的分散性及穩定性，而且有利於其活性保持。

以下為 PMS 法之化學反應式：



因此我們希望透過桃花心木果殼生物炭以物理吸附的方式吸附四環黴素在其表面孔洞後，再以溶於水將產生大量硫酸根自由基 ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) 與氫氧自由基 ($\cdot\text{OH}$) 參與降解反應的過硫酸氫鉀鹽 (PMS) 作為氧化劑，欲以高效率且有循環性的方式達到去除四環黴素的作用。

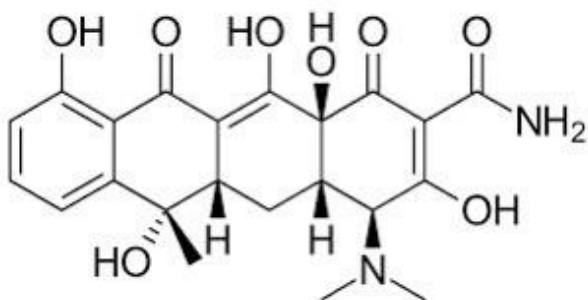


圖 (三) 四環黴素 (TC) 結構式

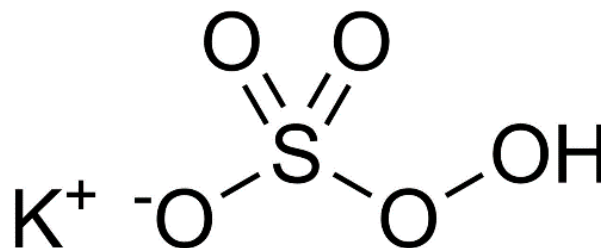
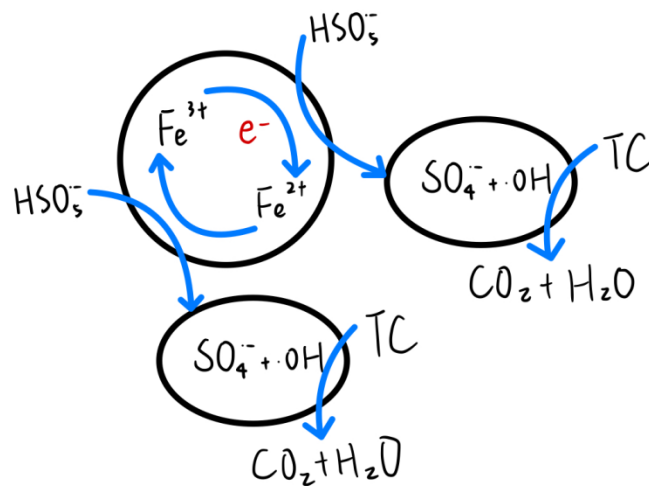
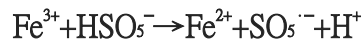
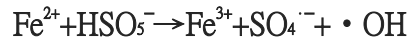


圖 (四) 過硫酸氫鉀鹽 (PMS)

(六) 鐵離子 (Fe^{3+}) 與亞鐵離子 (Fe^{2+}) 催化 PMS 降解

以鐵離子催化高級氧化技術的進行已廣泛應用。其中，鐵離子與亞鐵離子交互發生氧化還原反應，個別與過硫酸鹽反應可產生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ ，故可提升過硫酸鹽產生的效率。

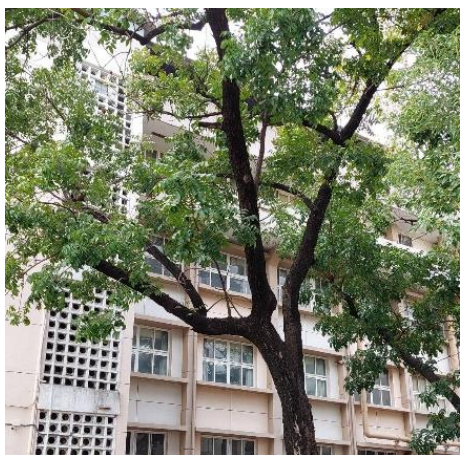
以下為 Fe^{3+} 與 Fe^{2+} 活化 PMS 的反應式與機制圖：



圖(五) Fe^{3+} 與 Fe^{2+} 活化 PMS 的機制圖

三、研究目的

現今因各產業的快速發展造成嚴重的水汙染，又工業與家庭的藥物不當處理，使水體中常有抗生素殘留，這些廢水一旦流入自然環境中，將對生態造成威脅；在農業方面，因高度吸收含抗生素的農藥與水體，農作物會累積過量抗生素，透過生物放大作用造成人類與其他生物的健康負擔，我們所研究的四環黴素（TC）為常見的抗生素之一。其大量使用及其處置不當，使其不可避免地暴露於環境中。雖然 TC 在環境中的濃度較低，卻具有較高的生物毒性、遺傳毒性和生殖毒性。基於對人類健康和環境的危害，尋找一種快速、有效且簡便的方法對以 TC 為代表的有機汙染物進行高效降解具有重要意義。

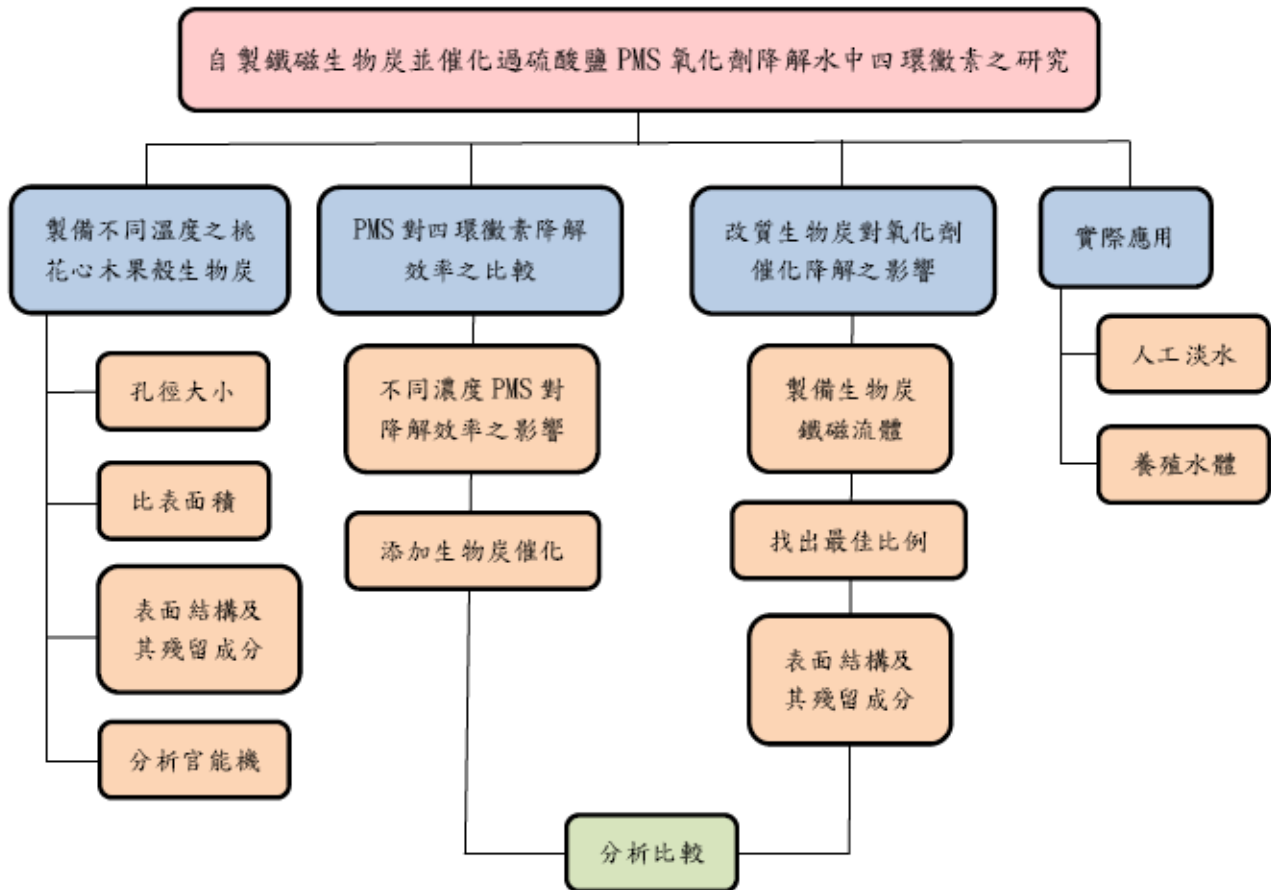


圖（六） 校園內大葉桃花心木



圖（七）大葉桃花心木果殼

本文以大葉桃花心木果殼生物炭為基礎，表面接上鐵磁流體改質，製備鐵磁生物炭，添加到 PMS 系統中，提升其降解能力。探討生物炭鍛燒溫度及催化降解效果，找出最佳化條件參數，歸納出以下三個研究方向，期望設計最理想標準流程用以去除新興汙染物(以四環黴素為例)之方法。



表（一） 本研究實驗流程






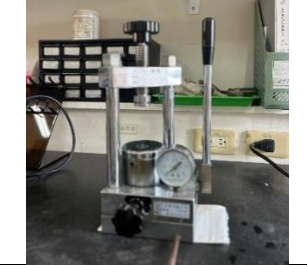


1. 製備不同溫度之桃花心木果殼生物炭
 - (1) 製備生物炭
 - (2) 生物炭吸附效果
 - (3) 孔徑大小（比表面積）
 - (4) 表面結構及其殘留成分
 - (5) 分析官能基
2. PMS 對四環黴素降解之比較
 - (1) 不同濃度降解效率比較
 - (2) 添加生物炭催化
 - (3) 應用於實際水體
3. 鐵磁生物炭對氧化劑催化降解之影響
 - (1) 製備鐵磁生物炭
 - (2) 找出鐵磁生物炭之最佳比例
 - (3) 表面結構及其殘留成分
4. 比較添加生物炭及鐵磁生物炭催化 PMS 降解之差異

貳、研究設備與藥品

表（二）本實驗所需藥品

			
四環黴素 (TC)	燒製好的生物炭	過硫酸氫鹽 (PMS)	溴化鉀 (KBr)
			
氯化鐵 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	氯化亞鐵 ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	過氧化氫 (H_2O_2)	氨水 (NH_4OH)
			
鹽酸 (HCl)	甲醇 (MeOH)	乙腈 (ACN)	草酸 ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$)

表（三）本實驗所需設備

			
破碎機	500 μm 篩網	能量散射光譜儀與掃描電 (SEM&EDS)	管式爐
			
高效能液相層析儀	壓錠器	超純水製造機	傅立葉轉換紅外光譜儀

參、研究過程或方法

一、製備不同溫度之桃花心木果殼生物炭

(一) 製備桃花心木果殼生物炭之步驟如下：

- 1.將桃花心木果殼以去離子水洗淨，放入 105°C 之烘箱烘乾。
- 2.放入破碎機將果實打成粉末狀並以 500 微米的篩網過篩。
- 3.將粉末放入管式爐通入氮氣以 300、500、700、900°C 燒製 2 小時。
- 4.冷卻至室溫後，以研鉢磨碎至更小顆粒，可得本實驗所需生物炭。

(二) 探討生物炭吸附效果步驟如下：

在 0.05mM 四環黴素溶液中分別加入 300、500、700、900°C 之生物炭，分別反應 1、3、5、10、15、20、30、45、60 分鐘，再抽取樣本至**高效能液相層析儀 (HPLC)** 進行分析。

(三) 檢測孔徑大小 (比表面積)：比表面積與孔隙分佈分析儀 (BET)

BET 主要分析材料比表面積、孔隙度和孔體積及微孔之吸附數據，其原理是依據氣體在固體表面的吸附特性，在一定的壓力下，被測樣品顆粒 (吸附劑) 表面在超低溫下對氣體分子 (吸附質) 具有可逆物理吸附作用，對應一定壓力存在確定的平衡吸附量，通過測定出該平衡吸附量，利用理論模型來等效求出被測樣品的比表面積。該方法測定的是吸附質分子所能到達的顆粒外表面和內部通孔總表面積之和。氮氣因其易獲得性和良好的可逆吸附特性，成為最常用的吸附質。樣品的比表面積是通過其表面密排包覆 (吸附) 的氮氣分子數量和分子最大橫截面積來表示。

(四) 觀察表面結構及其殘留成分：掃描式電子顯微鏡 (SEM)

掃描式電子顯微鏡的主要工作原理為電子鎗透過熱游離或是場發射原理產生高能電束，經過電磁透鏡組後，可將電子束聚焦至試片，利用掃描線圈偏折電子束，在試片表面上做二度空間的掃描。當電子束與試片作用時，會產生各種不同訊號，如二次電子、背向散射電子、吸收電子、特徵 X 光等。而在 SEM 中主要偵測二次電子及背向散射電子來進行成像，二次電子是樣品表面被擊所釋放出來電子，只有表面下約 5~50nm 的二次電子才有機會脫離表面被偵測到，因而可以得到表面凹凸的影像；背向散射電子是電子束與樣品之間發生彈性碰撞而被反射回去的電子，其帶有元素成分的訊息，原子序越高，背向散射電子越多，因此在背向射電子影像中，越亮的部分代表原子序越大的區域。

(五) 傅立葉轉換紅外光譜儀(FT-IR)分析官能基：

- 1.取桃花心木果殼生物炭當原始樣本，再壓製 300、500、700、900°C 下通入氮氣所燒製而成之生物炭。
- 2.將錠片固定於錠劑架上並放入紅外線分光光譜儀中進行分析。

二、PMS 對四環黴素降解之比較

(一) 不同濃度 PMS 降解效率比較過程如下：

- 1.在 0.05mM 的四環黴素溶液中分別加入 0.005、0.01、0.02、0.03mM 之 PMS，個別反應 1、3、5、10、15、20、30、45、60 分鐘，再抽取樣本至 HPLC 進行分析。
- 2.測試 PMS 降解四環黴素水體後酸鹼值。

(二) 添加生物炭催化的過程如下：

在 0.05mM 的四環黴素溶液中分別加入 300、500、700、900°C 之生物炭 6mg 及 0.01mM 的 PMS，個別反應 1、3、5、10、15、20、30、45、60 分鐘，再抽取樣本至 HPLC 進行分析。

(三) 挑選環境水體

1. 養殖水體(生活中)：

取用鄰近合作大學吳郭魚養殖池水，作為未來實際應用的參考背景值。因養殖水質不能標準化常處變動，加上高屏地區水硬度高，因此在初期評估生物炭作用下對魚體的影響，最好是在可控的環境中進行，避免水質不穩的波動影響。



圖片來源：引用「國立高雄科技大學水產養殖系暨研究所環境」介紹網頁

2.人工淡水(實驗室)：

人工淡水主要方便我們控制水中離子濃度及 pH(8.9)值等變因。避免一些外在因素不穩定干擾，水樣狀態穩定。使用以下鹽類調製一公升的人工淡水。

濃度 (mM)	藥品名稱	劑量 (mg/L)
0.5	氯化鈉 (NaCl)	29.22
0.2	硫酸鎂 (MgSO ₄)	24.07
0.2	二水硫酸鈣 (CaSO ₄ · 2H ₂ O)	34.43
0.16	磷酸二氫鉀 (KH ₂ PO ₄)	21.77
0.16	磷酸氫二鉀 (K ₂ HPO ₄)	27.87

為了測試本研究生物炭實際應用於實際生活上或生物實驗室養殖魚之效果，分別在上述兩水體中先配製 50ppm 之四環黴素後，再以 0.01mMPMS 進行降解，同時投入 300°C 生物炭催化，個別反應 1、3、5、10、15、20、30、45、60 分鐘，再抽取樣本至 HPLC 進行分析。

三、鐵磁生物炭對氧化劑催化降解之影響

(一) 製備鐵磁生物炭的過程如下:

- 1.取 12M HCl 稀釋成 2M HCl 250ml：將 41.66ml HC 加水定量至 100ml。
- 2.調配 2M 二價鐵溶液 100ml：取 FeCl₂·4H₂O 39.80g 加水定量至 100ml 並震盪。
- 3.調配 1M 三價鐵溶液 100ml：取 FeCl₃·6H₂O 27.03g 再加入 2M HCl 後加水定量至 100ml，並震盪。
- 4.調配 1M 氨水 250ml：取 23.8ml 25%濃氨水至 250ml 容量瓶並加水定量。

(二) 找出鐵磁生物炭之最佳比例

- 1.加入 4ml 1M 的 FeCl₃ 溶液、1ml 2M 的 FeCl₂ 溶液及 0.06g 之生物炭並放入攪拌磁石，以磁石攪拌器攪拌。
- 2.攪拌過程中以滴定管滴定 25ml 1M 之氨水，約一秒兩滴。
- 3.滴定完成後持續攪拌 5 分鐘。
- 4.將燒杯置於強力磁鐵上方使鐵磁生物炭被磁力吸至下方，取出上方澄清液體並清洗鐵磁生物炭顆粒 2~3 次。

(三) 以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察表面結構及其殘留成分之步驟如下:

1. 利用 SEM 以 500x、1000x、5000x、10000x 四種倍率觀察了桃花心木果殼生物炭、與鐵磁生物炭的表面形態和微觀結構。
2. 驗證鐵磁生物炭的效果，利用元素掃描 (EDS) 進一步分析其元素分佈。

四、比較添加生物炭及鐵磁生物炭催化 PMS 降解之差異

在 0.05mM 的四環黴素溶液中分別加入 300、500、700、900°C 之生物炭 6mg 與生物炭鐵磁流體 6mg 及 0.01mM 的 PMS，個別反應 1、3、5、10、15、20、30、45、60 分鐘，再抽取樣本至 HPLC 進行分析後進行比較。

肆、研究結果

一、製備不同溫度之桃花心木果殼生物炭

(一) 生物炭的製備

圖 (八) 是本實驗製作出不同溫度燒製的生物炭外觀。由左而右分別為 300、500、700、900°C 燒製 2 小時。



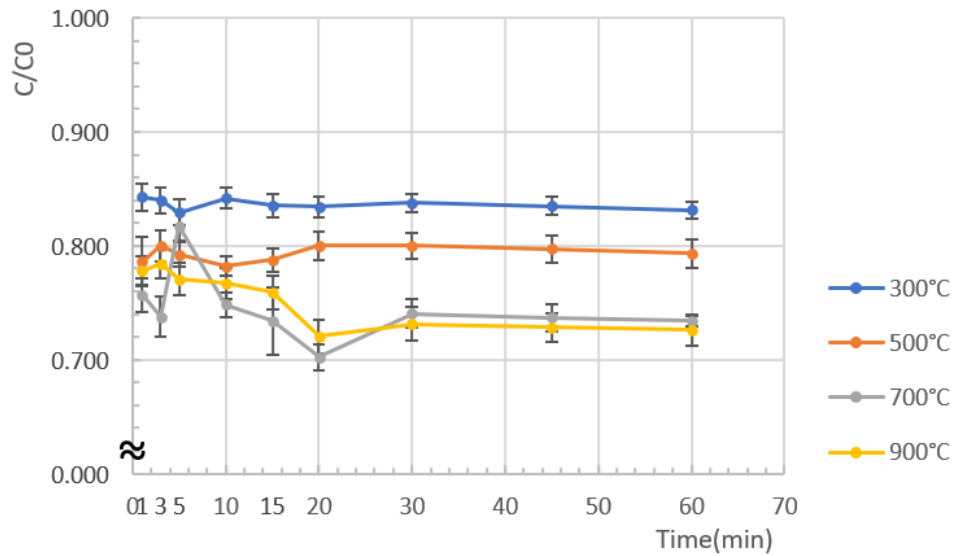
圖 (八) 不同溫度下燒製的生物炭外觀

(二) 生物炭吸附效果

如圖 (九)，本實驗發現 300<500<700≈900°C 以 700、900°C 燒製桃花心木果殼生物炭吸附能力較佳。

C=平衡後濃度，C₀=初始濃度，1-[C/C₀]=去除率

不同生物炭吸附後濃度



圖（九） 不同溫度所燒之桃花心木果殼生物炭吸附率

（三）孔徑大小（比表面積）

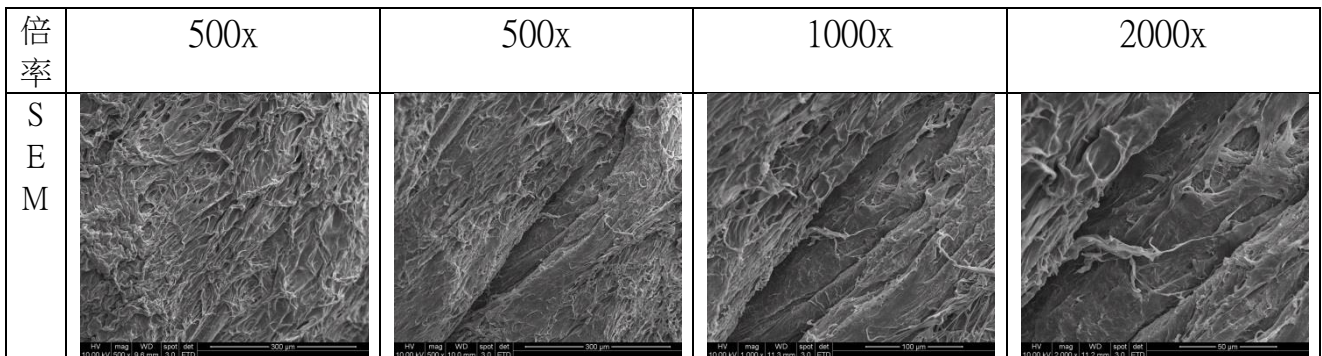
由表（四）可得知燒炭的溫度越高，其比表面積越大。

溫度 (°C)	300	500	700	900
比表面積 (m ² /g)	38.6	44.3	53.8	54.7

表（四） 不同溫度燒製之生物炭與其比表面積

（四）觀察表面結構及其殘留成分

以掃描式電子顯微鏡（SEM）觀察及能量散射光譜儀（EDS）檢測可得知生物炭表面之成像及所含成分，表（五）可看出生物炭表面孔洞分布情形，圖（十）可得知生物炭的表面成分主要為碳。



表（五） 生物炭表面 SEM 成像圖

EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	75.66	84.79	0.5326	1.0184	0.6912	1.0001
O K	17.53	14.75	0.0391	0.9992	0.2234	1.0000
AuM	6.80	0.46	0.0539	0.6452	1.2284	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	43.99	0.15	1.95	293.11
O K	7.17	0.18	4.94	39.09
AuM	3.24	0.40	8.02	8.08

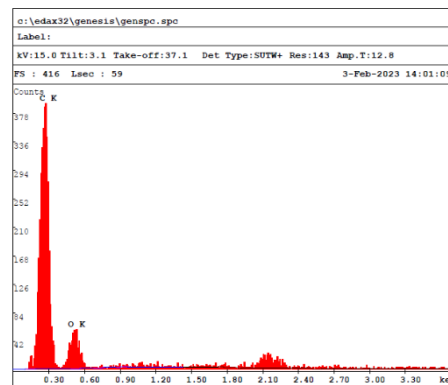


圖 (十) 生物炭表面成分 EDS 結果

(五) 傅立葉轉換紅外光譜儀分析官能基

由圖 (十一) 可以看出桃花心木果實粉末 (原樣) 上之官能基含有 $\equiv\text{C-H}$ 、 C-H 、 O=C=O 、 C=C 與 C-O ，以及經不同溫度燒製過後所剩之官能基。除了 300°C 可能含有少許 (非碳) 官能基殘留，在其它的溫度幾乎炭化完全。

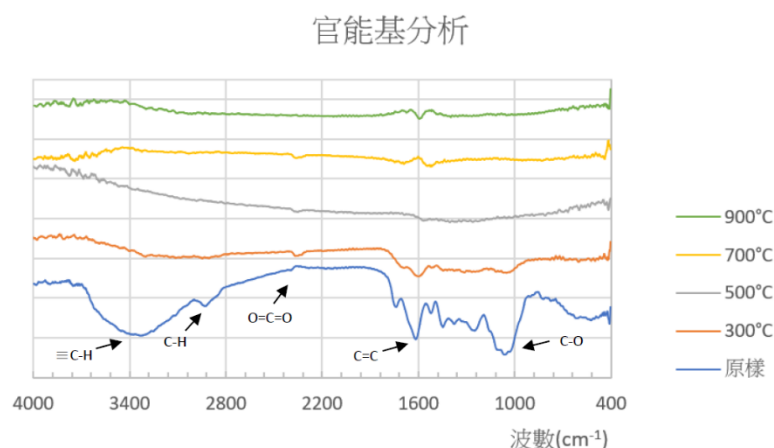


圖 (十一) 傅立葉轉換紅外光譜儀之分析結果

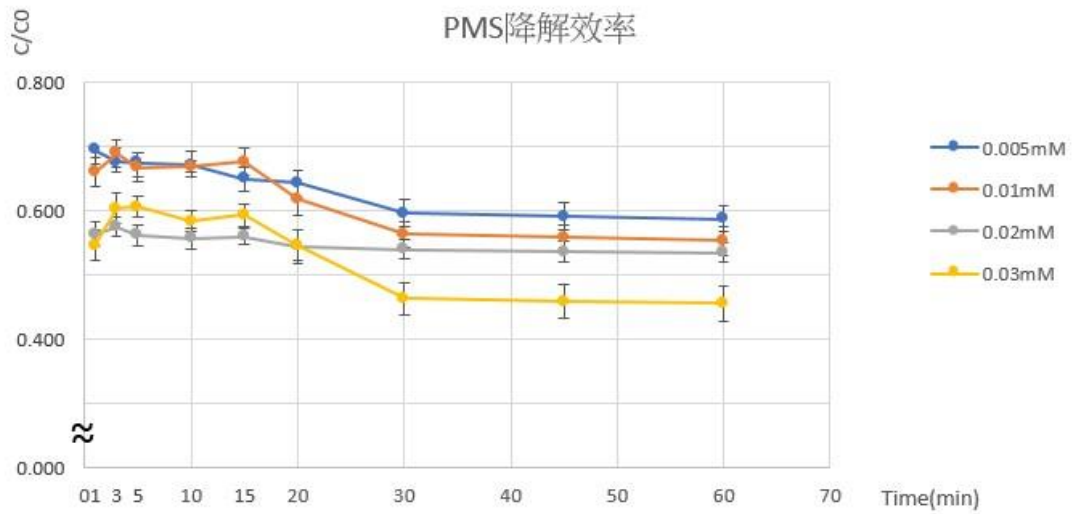
二、PMS 對四環黴素降解之比較

(一) 不同濃度 PMS 降解效率

如圖 (十二)，經實驗發現該 PMS 濃度與的降解效率呈正相關，故不同濃度之降解效果比較為 $0.005 < 0.01 < 0.02 < 0.03 \text{mM}$ ，由於高濃度 PMS 會使得降解效率過高，導致實驗無法看出差異，且 PMS 成本遠高於生物炭，根據綠色化學的十二項原則觀念「廢物低、節能、再簡化、可監測、低毒性」，因此我們在生物炭催化降解的實驗中所使用的 PMS 濃度為 0.01mM 。

$C = \text{平衡後濃度}$ ， $C_0 = \text{初始濃度}$ ， $1 - [C/C_0] = \text{去除率}$

PMS 濃度	0.005	0.01	0.02	0.03
$1-[C/C_0]$ =去除率	0.404	0.437	0.461	0.537

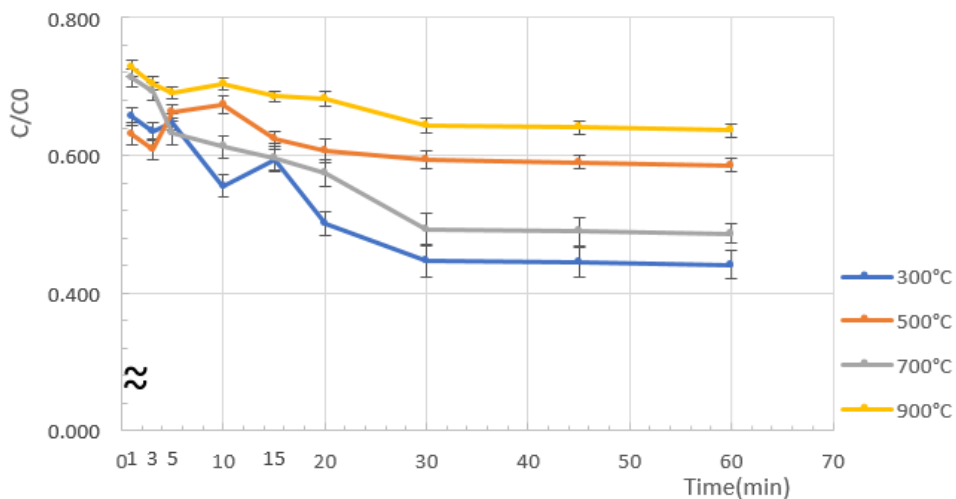


圖（十二） PMS 經不同反應時間之降解速率

（二）添加生物炭活化

如圖（十三），經實驗發現 300°C 之生物炭與 0.01mM 之 PMS 搭配效果最佳，因此本實驗將以 300°C 之生物炭進行表面改質。

PMS+生物炭	300°C	500°C	700°C	900°C
$1-[C/C_0]$ =去除率	0.574	0.421	0.522	0.368

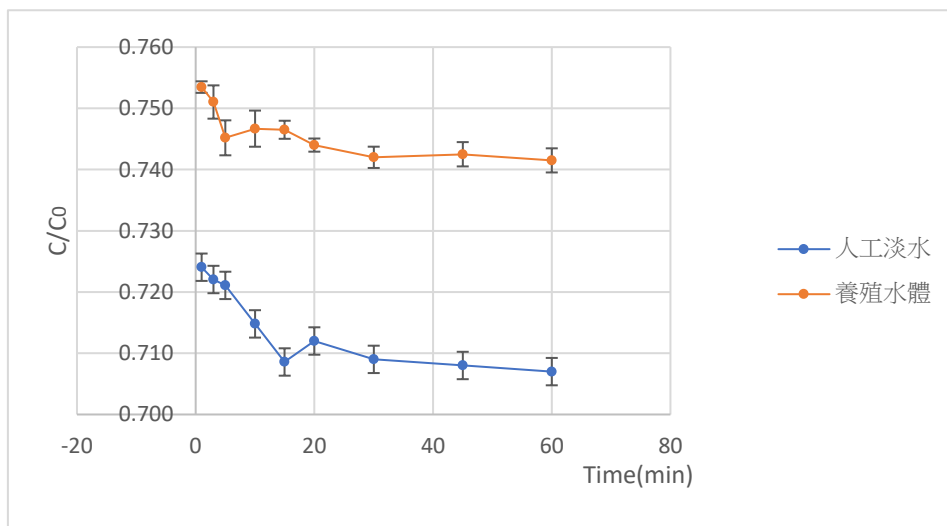
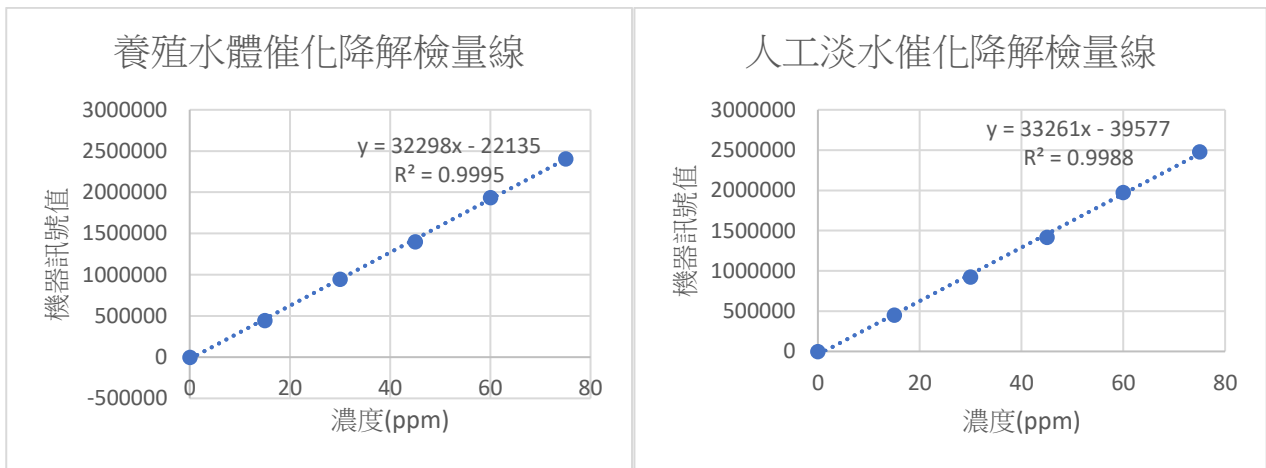


圖（十三） 以不同溫度燒製之生物炭催化 0.01mMPMS 之反應速率

(三) 實際水體催化降解後的效果比較

如圖(十四)，經實驗發現，以 300°C 生物炭添加於 0.01mM 之 PMS，在人工淡水中其去除率變化不大，平衡時間縮短。查詢相關文獻後，發現含有多種鹽類離子(SO₄²⁻，PO₄³⁻)並產生緩衝作用的溶液，會加速 PMS 作用；而養殖水體中其他(非 TC)有機物含量高，干擾 PMS 氧化選擇性與 TC 去除率，同時縮短反應時間。

類型	PMS+純水	PMS+300°C 生物炭 +純水	PMS+300°C 生物炭 +人工淡水	PMS+300°C 生物炭+ 養殖水體
1-[C/C ₀]=去除率	0.437	0.574	0.291	0.255
平衡時間	30	30	15	5



圖(十四) 實際水體之催化降解效率

三、鐵磁生物炭對氧化劑催化降解之影響

(一) 製備鐵磁生物炭

由表(六)可看出，鐵磁生物炭之外觀較未改質前偏紅，其表面改質嵌有四氧化三鐵。

表(六) 製備鐵磁生物炭

			
合成鐵磁生物炭	超純水沖洗過過濾	烘箱去除多餘水分	鐵磁生物炭粉末

(二) 找出生物炭體流體之最佳比例

由於合成鐵磁流體， Fe_3O_4 會附著於生物炭孔洞中，降低吸附率。因此我們調整 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 與 C 的比例，完成不同比例的鐵磁流體。

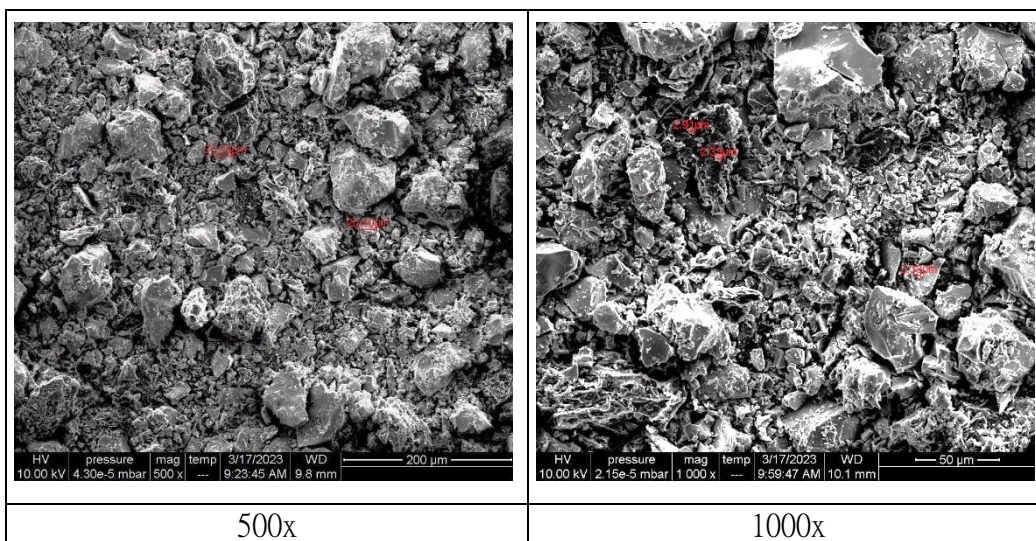
1.原始比例 $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}:\text{C} = 6:12:25$ (莫耳數比)

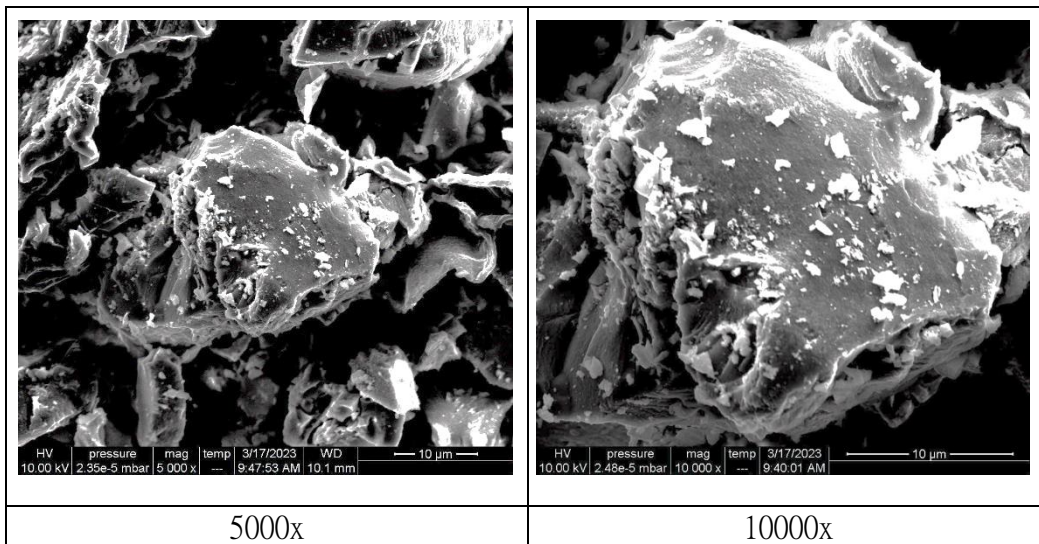
2.調整比例 $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}:\text{C} = 3:6:25$ (莫耳數比)

(三) 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察表面結構及其殘留成分

1.分析生物炭表面微觀結構 (SEM)

如圖(十五)，以掃描電鏡對其進行觀察樣品特徵，拍攝四種倍率下改質後生物炭的表面形態和微觀結構。在微觀下進行測量，得知鐵磁生物炭的顆粒大小大可至 $37\mu\text{m}$ ，而表面粉末可細小到 2 至 $3\mu\text{m}$ 。





圖（十五） 掃描式電子顯微鏡拍攝不同倍率的鐵磁生物炭影像

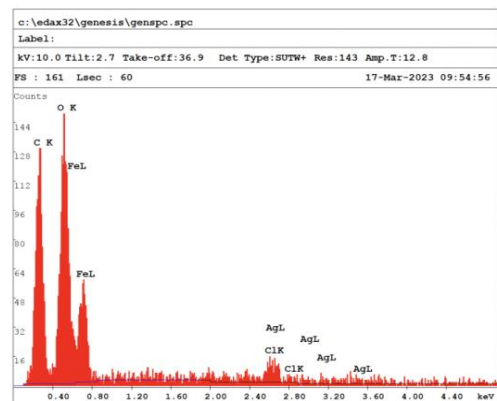
2. X 射線光譜分析 (EDS)

圖（十六）與（十七）為一組兩者為同樣品鐵磁生物炭之不同採樣點。根據分析結果，我們發現鐵磁生物炭中含有碳、氧、鐵、氯與極少量銀元素，碳為生物炭本身成分，而氧與鐵來自於磁性氧化鐵，氯則來自製備時使用的氯化鐵、氯化亞鐵和鹽酸。證明本研究自製鐵磁生物炭成功，改質表面嵌有四氧化三鐵。

EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	36.83	58.34	0.1838	1.0833	0.4604	1.0003
O K	23.48	27.92	0.1235	1.0587	0.4965	1.0009
FeL	34.95	11.90	0.1946	0.8717	0.6388	1.0000
ClK	2.78	1.49	0.0254	0.9394	0.9728	1.0030
AgL	1.97	0.35	0.0151	0.7490	1.0245	1.0034
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkqd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	13.94	0.15	3.49	93.11
O K	17.54	0.17	3.11	105.41
FeL	6.97	0.33	5.11	20.95
ClK	1.85	0.40	11.36	4.63
AgL	0.43	0.22	27.74	2.00

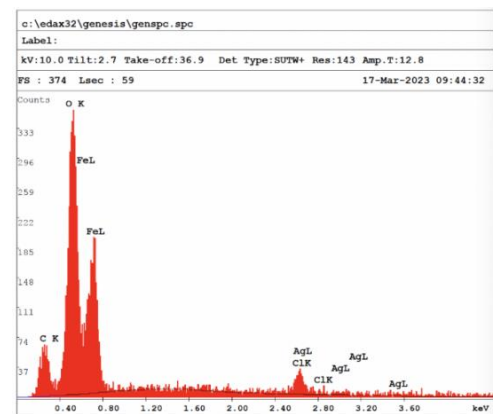


圖（十六） 點 1 之 EDS 數據分析結果詳細數據及分布圖

EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	12.52	27.85	0.0509	1.1390	0.3569	1.0004
O K	25.01	41.77	0.1718	1.1126	0.6163	1.0016
FeL	57.69	27.60	0.3647	0.9158	0.6903	1.0000
ClK	3.16	2.38	0.0299	0.9897	0.9520	1.0029
AgL	1.62	0.40	0.0129	0.7897	1.0087	1.0044
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkqd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	7.13	0.18	4.96	38.91
O K	45.06	0.50	1.94	90.11
FeL	24.13	0.82	2.72	29.55
ClK	4.01	0.77	7.58	5.23
AgL	0.68	0.65	26.61	1.05



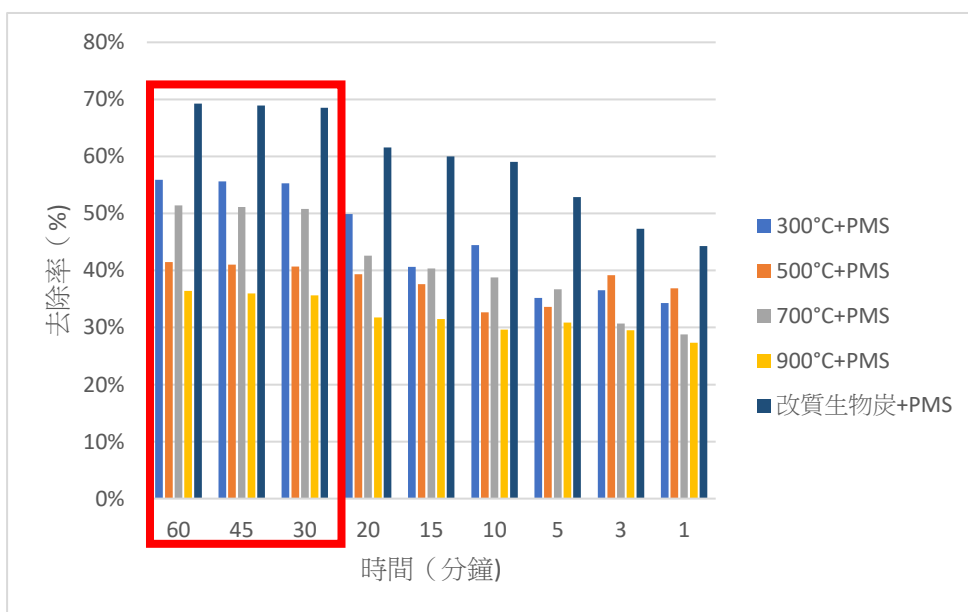
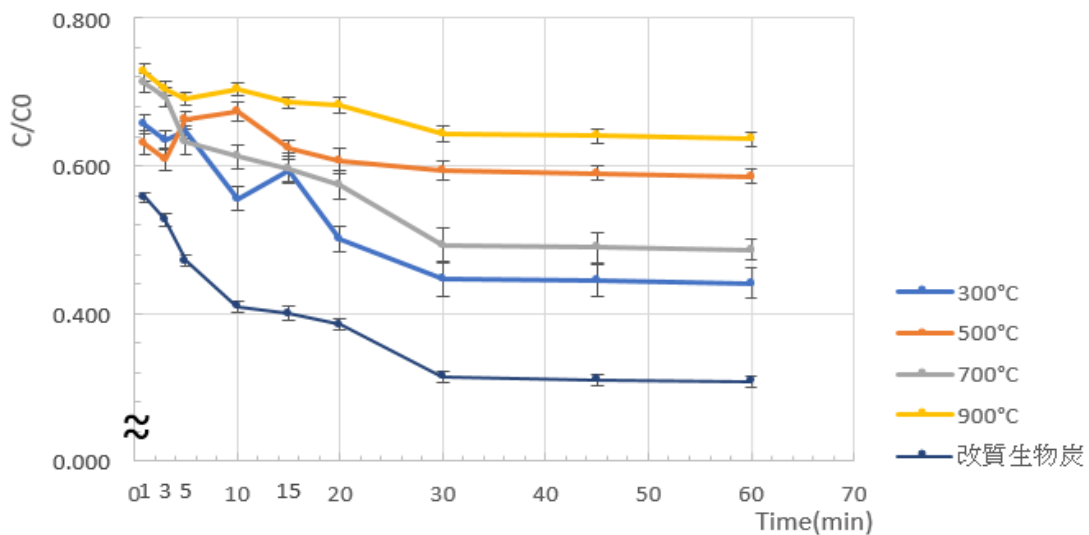
圖（十七） 點 2 之 EDS 數據分析結果詳細數據及分布圖

四、比較添加生物炭及鐵磁生物炭催化 PMS 降解之差異

在 0.05mM 的四環黴素溶液中分別加入 300、500、700、900°C 之 6mg 生物炭與 6mg 鐵磁生物炭及 0.01mM 的 PMS，個別反應 1、3、5、10、15、20、30、45、60 分鐘，再抽取樣本至 HPLC 進行分析後進行比較。由圖（十八）可看出加入鐵磁生物炭降解之效率明顯優於未改質生物炭。

PMS+生物炭	300°C	500°C	700°C	900°C	300°C 鐵磁生物炭
$1-[C/C_0]=$ 去除率	0.559	0.415	0.514	0.364	0.692

C=平衡後濃度，C₀=初始濃度， $1-[C/C_0]=$ 去除率



圖（十八）添加生物炭活化與或鐵磁生物炭催化之 PMS 降解效率

伍、討論

本研究先製備桃花心木生物炭，並以鐵離子改質成鐵磁生物炭，針對新興多孔炭材與鐵磁生物炭對水中四環黴素的催化降解的效果探討，本研究在降解方面以 PMS 氧化作為主軸，後來以不同儀器分析鐵磁生物炭的官能基 (FTIR)、微觀結構 (SEM) 與元素分佈 (EDS)，由研究方法與所得結果進行以下討論：

一、選用生物炭樣本

燒製生物炭最普遍的材料為稻殼，由於稻殼還有其他的經濟效益及用途，因此我們想尋找植物廢棄物作為燒炭的樣品，以達到廢棄物再利用之目的。

經過文獻探討及討論，我們發現大葉桃花心木的大量落果會導致清潔上的困難、常造成用路人不便 (如:絆倒、機車輾過果殼造成摔車)，且果殼對人類具有毒性，故用其作為燒製材料。

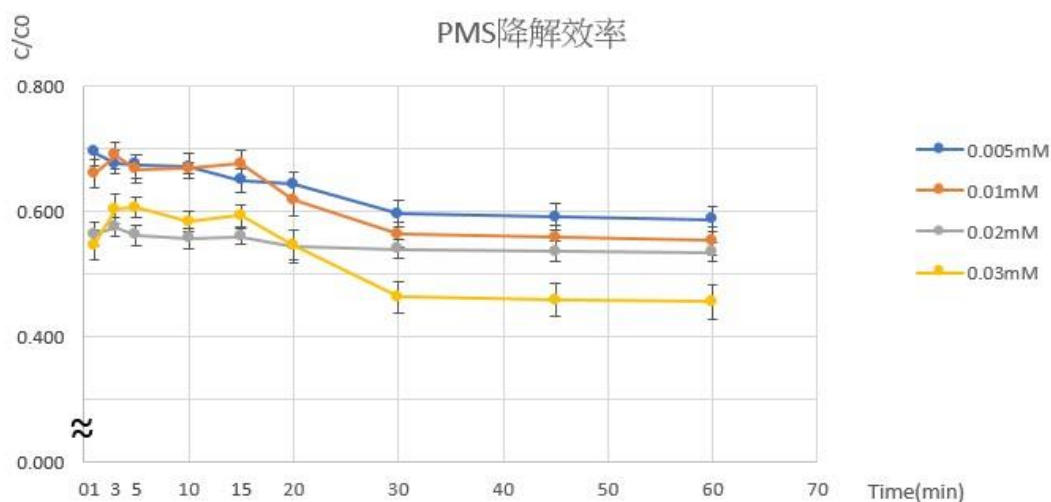
二、選用抗生素樣本

(一) 四環黴素：水汙染所帶來的危害日漸增加，又因藥物排放不當，使水體中殘留過量抗生素，進而對生態造成威脅。因此我們想尋找水體中普遍含有之抗生素進行去除。經過查找文獻，發現四環素為水體中常見的抗生素種類，其在環境中的濃度雖較低，卻具有較高的生物、遺傳和生殖毒性。經過討論，我們決定選擇四環素家族基本的四環黴素加以探討，由於許多四環素家族的抗生素 (如：土黴素、金黴素) 皆由四環黴素衍生而來，我們預測成功後的去除模式可以用於其他相似抗生素之去除。

(二) 調整四環黴素的濃度：本研究在尋找最佳去除四環黴素的方法的過程中，為求數據容易計算而選用 0.05mM (約 22ppm) 來配置四環黴素水體樣本。*依據行政院農委會水產試驗研究所—經四環黴素殘留之測定與魚類肝細胞檢測模型之應用(水試專訊，出版日期：105-03-01)*「*經四環黴素 (oxytetracycline) 屬四環黴素類抗生素，用於對抗各類細菌感染，也是目前水產養殖業者使用最廣泛的抗生素。投藥方式為經口，劑量為每天 50 mg/kg 魚體重，連續投餵 3—5 日，停藥期 30 日，藥物殘留檢測部位為肌肉，於魚體的最大容許殘留量為 0.2 ppm。*」因此在比較養殖水體與人工淡水的實驗裡，調整了四環黴素的濃度為 50ppm，更貼合實際抗生素投放情況。

三、定量 PMS 濃度為 0.01mM

由圖（十九）可得知 PMS 濃度與去除效果呈正相關。本實驗採用 0.01mM PMS，若濃度過高，催化 PMS 之效果將過於顯著，導致實驗無法看出差異。另外，使用 PMS 之成本遠高於生物炭，因此我們在生物炭催化降解的實驗中所使用的 PMS 濃度為 0.01mM，進一步展現生物炭與鐵磁生物炭的催化效果。



圖（十九） 不同濃度的 PMS 在反應時間內降解速率

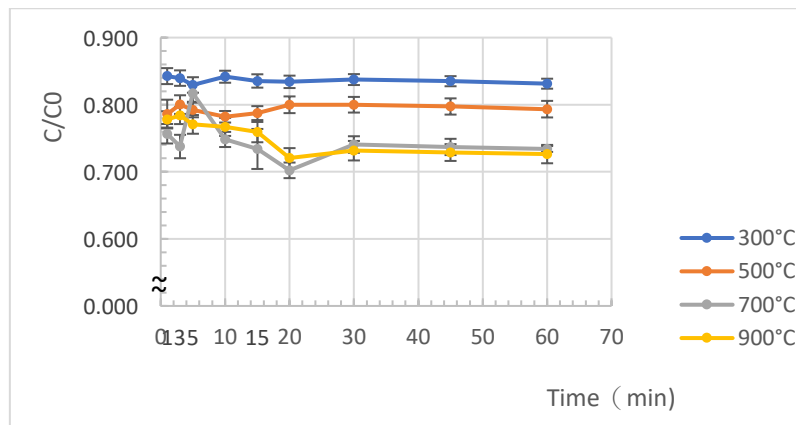
四、PMS 之優勢與問題

以過硫酸鹽做為氧化劑的化學氧化技術也逐漸被發展，過硫酸鹽包含過單硫酸鹽

（peroxymonosulfate, HSO_5^- ）和過二硫酸鹽（peroxydisulfate, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ）兩類，擁有 O-O 鍵（peroxide group），主要以液態或粉末的形式存在，在環境中可穩定存在數小時至數週，與上述其他氧化劑相比，兼具了在自然中存在時間長，適合在反應介質中長途運輸，可適用在較廣 pH 範圍的特性，亦可以藉由活化反應產生自由基，增加對有機污染物的選擇性，快速降解特定有機污染物。然而自由基的反應機制，會受到自然水體中的鹵素、天然有機物及其他水質參數的影響，可能間接影響反應速率或產生毒性更強的副產物，且 PMS 在水中解離呈酸性也是必須要考慮的問題。

五、生物炭吸附與比表面積

如圖（二十），生物炭之吸附效果依序為 $300 < 500 < 700 \approx 900^\circ\text{C}$ ，與測得的比表面積大小呈正相關，因此可以得知燒製溫度越高的生物炭比表面積越大，吸附率越好。



圖（二十） 不同溫度所燒之桃花心木果殼生物炭吸附率

溫度 (°C)	300	500	700	900
比表面積 (m ² /g)	38.6	44.3	53.8	54.7

六、本研究自製生物炭與鐵磁生物炭酸鹼值比較

PMS 溶於水解離硫酸根，故呈酸性 (pH=6.5)；而生物炭為植物燃燒後產物，故溶於水呈鹼性 (pH=9.6)

種類	生物炭	鐵磁生物炭
溶於水	9.6	6.5
催化 PMS 降解	7.8	4.2

陸、結論

一、製備不同溫度之桃花心木果殼生物炭

(一) 本實驗發現 $300 < 500 < 700 \approx 900^{\circ}\text{C}$ ，下表針對四者比表面積、吸附後濃度與去除率比較後，得 700、 900°C 燒製桃花心木果殼生物炭吸附能力較佳。

溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	300	500	700	900
比表面積 (m^2/g)	38.6	44.3	53.8	54.7
吸附後與 C_0 比值	0.831	0.793	0.728	0.726
吸附率 (%)	17	21	27	27

(二) 桃花心木果實以碳主要成分，化學結構中其官能基含有 $\equiv\text{C}-\text{H}$ (烯)、 $\text{C}-\text{H}$ (烴)、 $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ (酸、酮、酯、醛)、 $\text{C}=\text{C}$ (炔) 與 $\text{C}-\text{O}$ (醇或醚)，以及經不同溫度燒製過後所剩之官能基。除了 300°C 可能含有少許 (非碳) 官能基殘留，其他較高溫度幾乎完全炭化。

二、PMS 對四環黴素降解之比較

(一) 不同濃度：如圖 (二十一)，PMS 濃度與去除率呈正相關，但濃度過高會使得降解效率過高，導致降解幾乎完全，且 PMS 成本遠高於生物炭，根據綠色化學的十二項原則觀念—廢物低、保降能、再簡化、可監測、低毒性，在生物炭催化降解的實驗中所使用的 PMS 濃度為 0.01mM 。

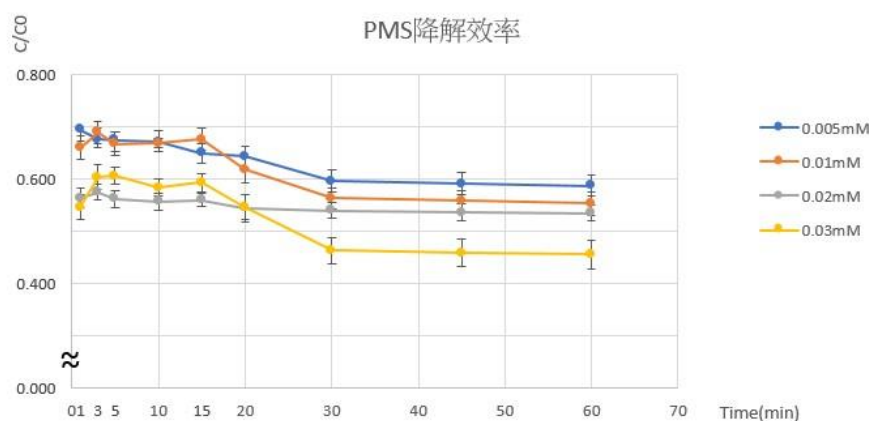


圖 (二十一) 不同濃度的 PMS 在反應時間內降解速率

下表為生物炭與 PMS 價格比較，生物炭為廢棄物，材料本身無成本，故其單價以電費計算：

項目	桃花心木生物炭	PMS
1g 單價 (元)	0.41	17

(二) 添加生物炭催化：由圖 (二十二) 可知 300°C 之生物炭與 0.01mM 之 PMS 搭配效果最佳，原因為低溫燒製導致其表面仍保留些許可引發分子特徵性化學反應的官能基，幫助催化 PMS 降解。

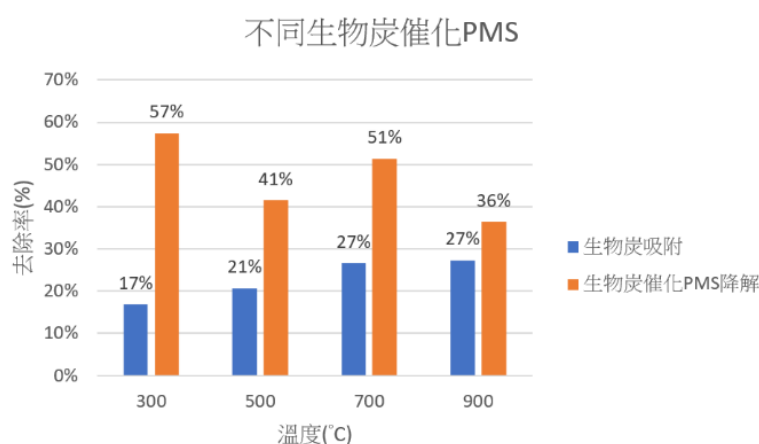


圖 (二十二) 生物炭催化降解與純吸附去除率

(三) 應用於實際水體：由圖 (二十三) 可知投放四環黴素至人工淡水與養殖水體後，推測加入 300°C 生物炭催化 0.01mM PMS 降解的效果會受不同變因影響：人工淡水中不同鹽類解離、養殖水體含有與四環黴素結構相似的有機物，兩者均會影響 PMS 的作用，而本實驗結果可作為未來實際應用的參考背景值。

三、鐵磁生物炭對氧化劑催化降解之影響

合成好的鐵磁生物炭表面， Fe_3O_4 會附著在其孔洞中，影響吸附率。因此我們調整 Fe 與 C 比例，使 Fe^{2+} 與 Fe^{3+} 用量降低。

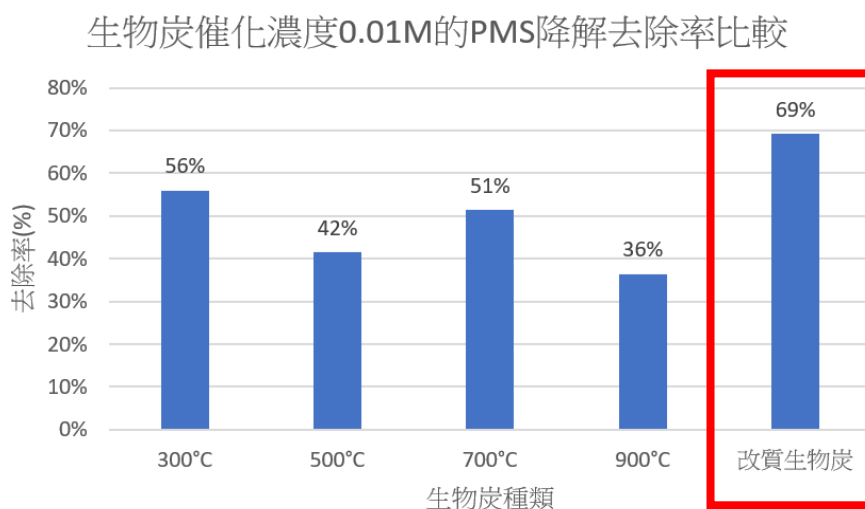
(一) 原始比例 $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+} : \text{C} = 6 : 12 : 25$ (莫耳數比)

(二) 調整比例 $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+} : \text{C} = 3 : 6 : 25$ (莫耳數比)

分析生物炭表面微觀結構 (SEM)，得知桃花心木生物炭的顆粒大小可至 $37\mu\text{m}$ ，其表面粉末可細小到 2 至 $3\mu\text{m}$ 。X 射線光譜分析 (EDS) 發現鐵磁生物炭含有碳、氧、鐵、氯與銀元素，碳為生物炭本身成分，而氧與鐵來自於磁性氧化鐵，氯則來自製備時使用的氯化鐵、氯化亞鐵和鹽酸。證明本研究自製鐵磁生物炭成功，表面改質嵌有 Fe_3O_4 。

四、比較添加生物炭及鐵磁生物炭催化 PMS 降解之差異

在 0.05mM 的四環黴素溶液中分別加入 300、500、700、900°C 之生物炭 6mg 與鐵磁生物炭 6mg 及 0.01mM 的 PMS，個別反應 1、3、5、10、15、20、30、45、60 分鐘，再抽取樣本至 HPLC 進行分析後進行比較，由圖（二十三）可知，加入鐵磁生物炭降解之效率明顯優於未改質之生物炭。



圖（二十三） 生物炭與鐵磁生物炭催化 0.01mMPMS 降解 TC 去除率差異

本研究成功利用改質的桃花心木鐵磁生物炭與過硫酸氫鉀複合鹽進行吸附與降解，並且製備鐵磁生物炭以提升其催化效果，並有效降低水中四環黴素含量。比較燒製生物炭的不同溫度與不同濃度氧化劑與套較不耗能且效率佳的去環方法，藉由其高吸附性與強氧化力來去除環境水體中的常見的新興污染物：四環黴素(TC)

透過生物炭的低溫燒製搭配適量的 PMS 氧化劑，降解抗生素對於自然環境的傷害。實際投放在不同水體比較，擴展其應用的多元性，落實生物廢材的再利用與環境保育。

本研究最佳條件

300°C 生物炭添加於 0.01mM 之 PMS。並將表面改質為鐵磁流體，催化 PMS 具有回收再利用的永續概念，實際投放人工淡水和魚類養殖水體中，提供快速簡易的淨化水質方法。

項目	桃花心木生物炭		PMS(過硫酸鹽)	
1g 單價 (元)	0.41		17	
類型	PMS+純水	PMS+300°C 生物炭+純水	PMS+300°C 生物炭+人工淡水	PMS+300°C 生物炭+養殖水體
1-[C/C ₀]=去除率	0.437	0.574	0.291	0.255
平衡時間	30	30	15	5

柒、參考文獻資料及其他

1. Yu, J.F., Feng, H.P., Tang, L., et al. (2020) Metal-Free Carbon Materials for Persulfate-Based Advanced Oxidation
2. Process: Microstructure, Property and Tailoring. Progress in Materials Science, 111, Article ID: 100654.
3. Benner, J. and Ternes, T.A. (2009) Ozonation of Metoprolol: Elucidation of Oxidation Pathways and Major Oxidation .
4. Guan, Y.H., Ma, J., Li, C.X., Fang, J.Y. and Chen, L.W. (2011) Influence of pH on the Formation of Sulfate and Hydroxyl Radicals in the UV/Peroxymonosulfate System. Environmental Science & Technology, 45, 9308-9314.
5. <https://www.itriwater.org.tw/technology/More?id=108>
6. https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_CN_CB71073086.htm
7. <https://smallHPLCollation.blogspot.com/2014/02/relation-between-functional-group-and.html#gsc.tab=0>
8. IR Spectrum Table (sigmaaldrich.com)

【評語】 052605

1. 本作品探討在不同溫度下，將校園內大葉桃花心木果殼燒製成生物炭，用於吸附四環黴素溶液，探討活化不同濃度過硫酸鹽對四環黴素之降解效果。雖得出最佳之操作條件，但由於整體研究工作甚多，對每一階段的成果，僅能直接表現其實驗數值，缺乏進一步探討，或與其他文獻值比較，例如生物炭的表面積比例是否偏低等，是未來可再精進之處。
2. 研究發現加入鐵磁生物炭降解之效率明顯優於未改質生物炭，請比較並說明目前台灣受四環黴素污染的環境水體中四環黴素濃度與本實驗計水溶液中四環黴素濃度之差異性，並評估在實際水體環境加入鐵磁生物炭的可行性。
3. 建議說明不同溫度所燒之桃花心木果殼生物炭吸附率吸附哪些物質？針對製備之鐵磁生物炭對氧化劑催化降解去除率四環黴素之實驗，可再加入探討實際養殖廢水中其他干擾物質對氧化劑催化降解四環黴素去除率之的影響，以及鐵磁生物炭可重複使用次數之估算。

作品海報

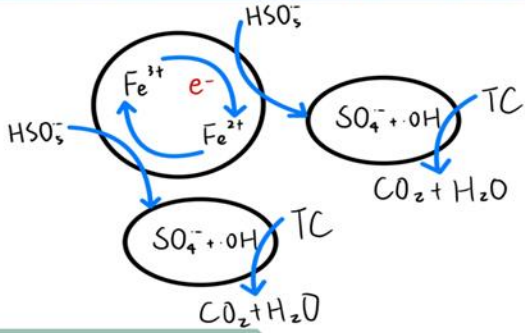
「炭」「桃」問題

自製鐵磁生物炭並活化過硫酸鹽PMS氧化劑降解水中四環黴素之研究

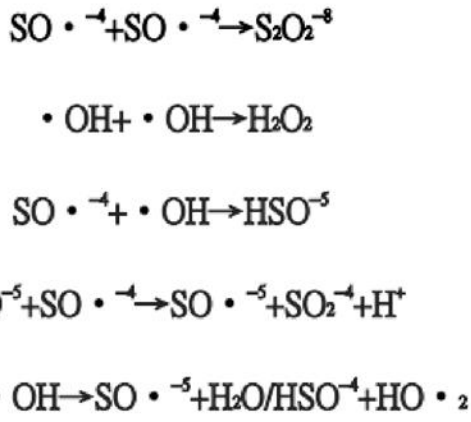
壹、前言

研究動機

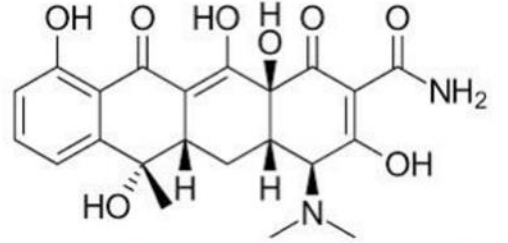
Fe²⁺與Fe³⁺活化過硫酸鹽機制圖



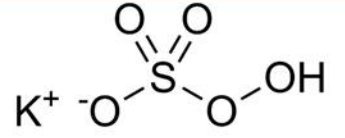
PMS降解之化學反應式



四環黴素(TC)結構式



過硫酸氫鉀鹽(PMS)結構式

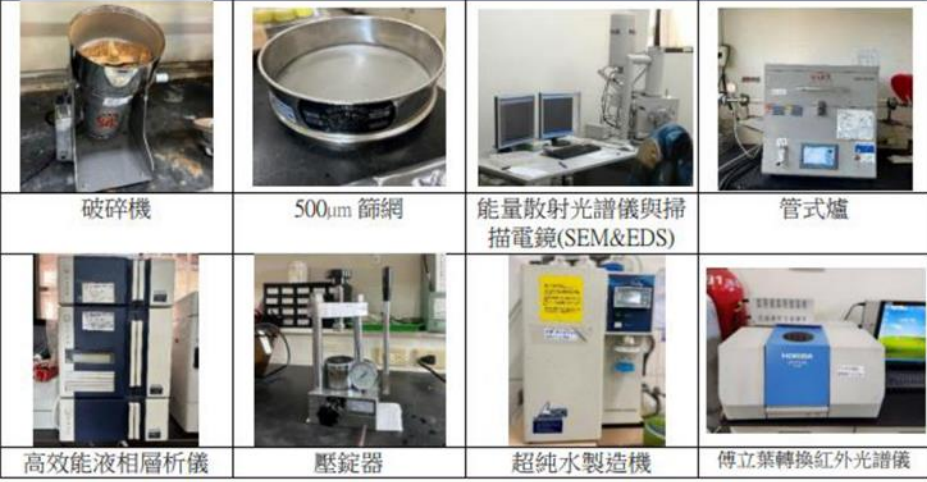


研究目的

1. 製備不同溫度之桃花心木果殼生物炭
 - (1) 製備生物炭 (2) 吸附效果 (3) 孔徑大小(比表面積) (4) 表面結構及其殘留成分 (5) 官能基分析
2. PMS 對四環黴素降解之比較
 - (1) 不同濃度 (2) 添加生物炭催化
3. 改質生物炭催化降解
 - (1) 製備生物炭鐵磁流體 (2) 找出製備生物炭鐵磁流體之最佳比例
 - (3) 表面結構及其殘留成分(4) 改質生物炭對氧化劑催化降解之影響
4. 應用於實際水體
 - (1) 添加生物炭催化降解 (2) 添加鐵磁生物炭降解

貳、研究設備與藥品

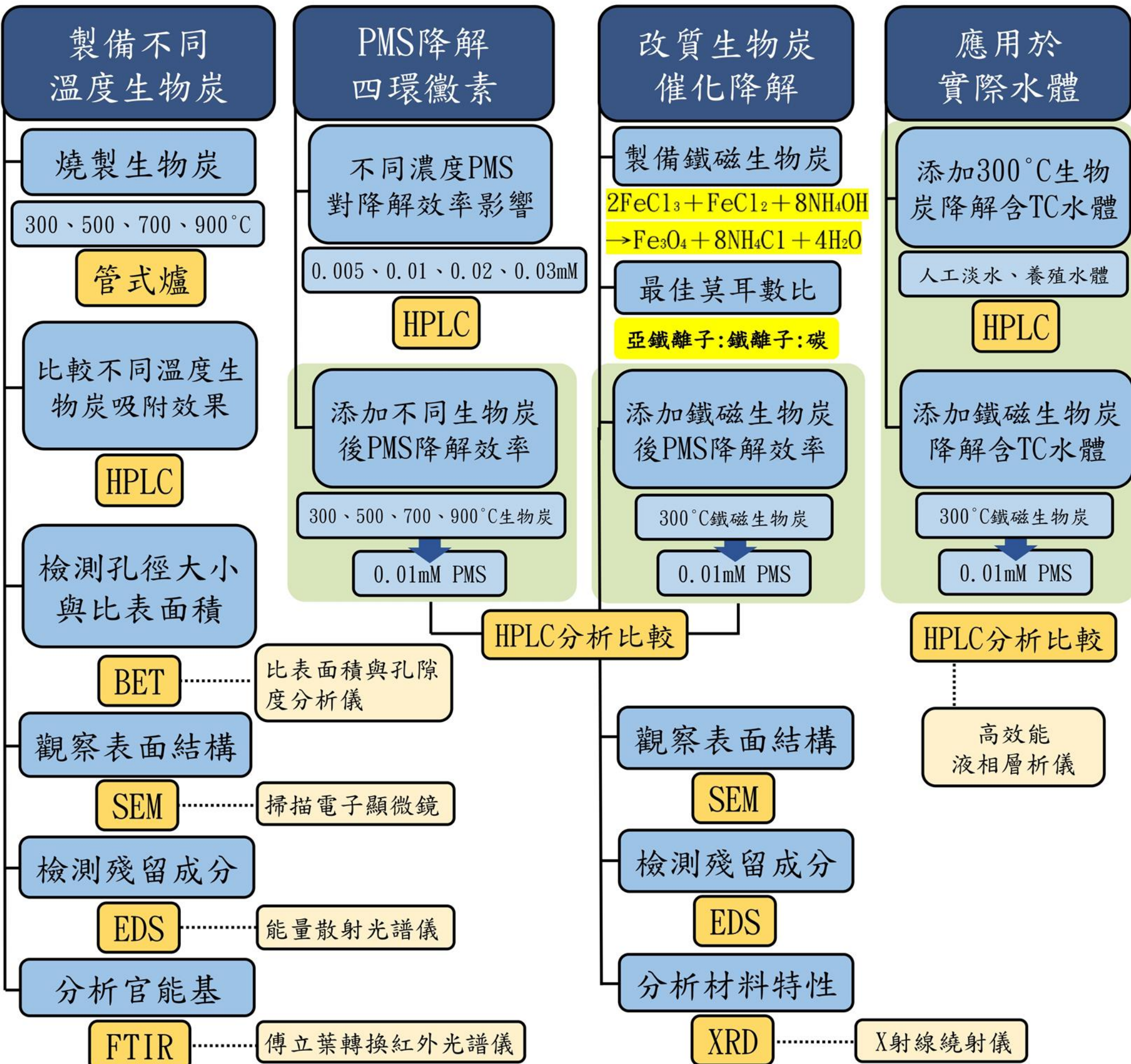
本研究儀器裝置



本研究使用藥品



參、研究過程或方法



一、燒製不同溫度之桃花心木果殼生物炭

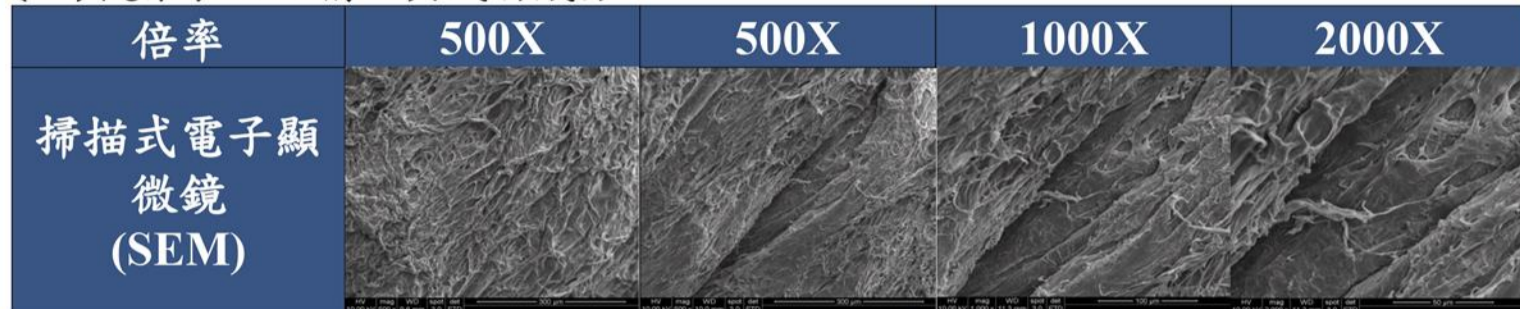
(一) 吸附效果與孔徑大小(比表面積)(BET)

溫度(°C)	300°C	500°C	700°C	900°C
比表面積(m ² /g)	38.6	44.3	53.8	54.7
吸附後與C0比值	0.831	0.793	0.728	0.726
吸附率	17%	21%	27%	27%

由左圖可知:

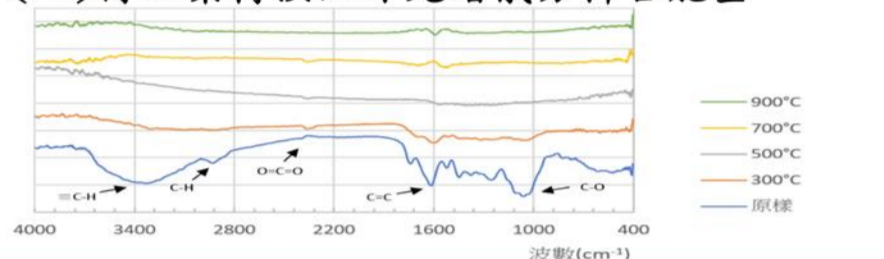
- 燒製生物炭的溫度愈高
→ 比表面積愈大
- 比表面積愈大
→ 吸附效果愈好

(二) 觀察表面結構及其殘留成分



以SEM觀察及EDS檢測得知生物炭表面之成像及所含成分，左表可看出生物炭表面孔洞分布情形，下圖可以得知本研究所燒製的生物炭的主要成分為炭。

(三) 傅立葉轉換紅外光譜儀分析官能基



由上圖可以看出不同的生物炭與桃花心木原樣所含官能基的差異，除了300°C可能含有少許官能基殘留，其它溫度幾乎炭化完全。

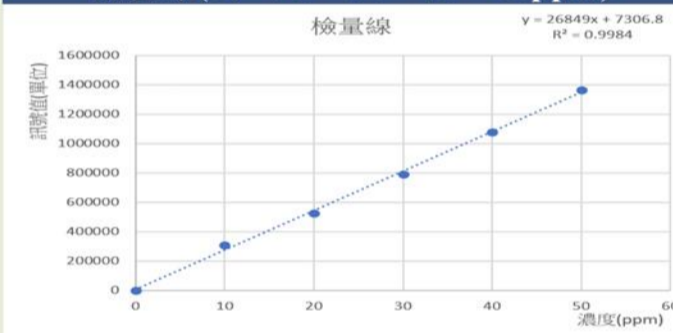
用能量散射光譜儀(EDS)檢測生物炭表面殘留成分

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	75.66	84.79	0.5326	1.0184	0.6912	1.0001
O K	17.53	14.75	0.0391	0.9992	0.2234	1.0000
AuM	6.80	0.46	0.0539	0.6452	1.2284	1.0000
Total	100.00	100.00				

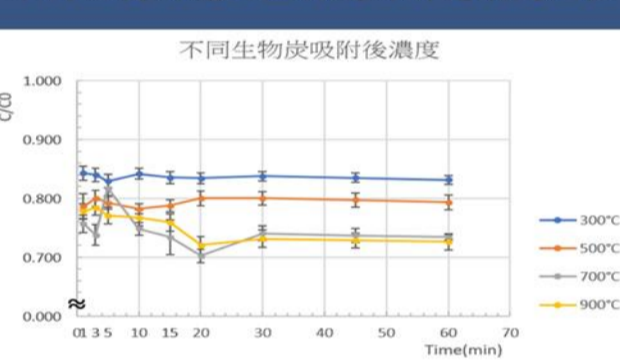
Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	43.99	0.15	1.95	293.11
O K	7.17	0.18	4.94	39.09
AuM	3.24	0.40	8.02	8.08

二、PMS對四環黴素降解之比較

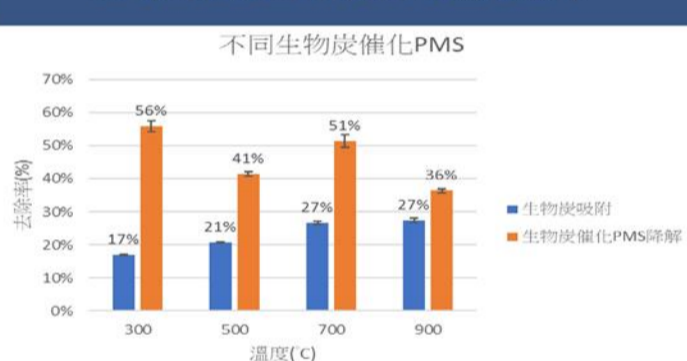
使用四種不同濃度的四環黴素溶液繪製檢量線(10、20、30、40、50ppm)



不同溫度所燒之生物炭吸附後濃度比值



生物炭催化降解與純吸附去除率



不同濃度PMS去除四環黴素比率

PMS濃度(mM)	0.005	0.01	0.02	0.03
去除率	40.4%	43.7%	46.1%	53.7%

900°C生物炭吸附TC能力最強

生物炭催化PMS降解TC效果較生物炭吸附佳，以300°C生物炭效果最好

種類	桃花心木生物炭	PMS
單價(元/g)	0.41	17

上為本研究自製生物炭及PMS價格表，每1公克PMS價格遠高於生物炭

三、改質生物炭催化降解

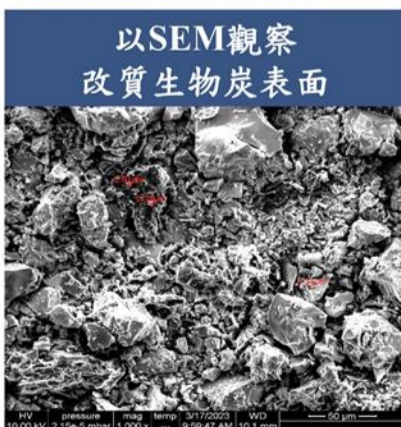


原始比例 6:12:25

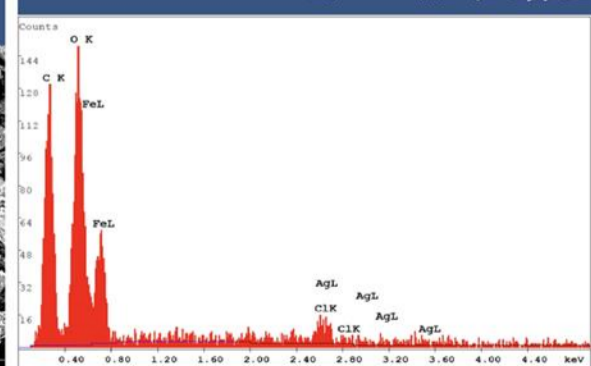
調整比例 3:6:25

本研究的鐵磁生物炭經磁鐵測試具有磁性

由SEM觀察及EDS檢測，發現生物炭表面碳、氧、鐵比例極高，再以XRD觀察生物炭表面的晶格結構，驗證生物炭表面嵌有四氧化三鐵。



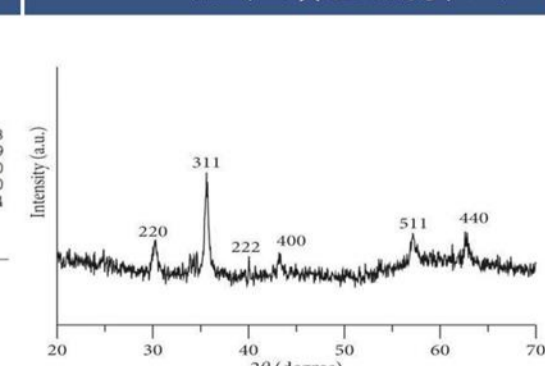
用EDS檢測改質生物炭表面殘留成分



Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	36.83	58.34	0.1838	1.0833	0.4604	1.0003
O K	23.48	27.92	0.1235	1.0587	0.4965	1.0009
FeL	34.95	11.90	0.1946	0.8717	0.6388	1.0000
ClK	2.78	1.49	0.0254	0.9394	0.9728	1.0030
AgL	1.97	0.35	0.0151	0.7490	1.0245	1.0034
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	13.94	0.15	3.49	93.11
O K	17.54	0.17	3.11	105.41
FeL	6.97	0.33	5.11	20.95
ClK	1.85	0.40	11.36	4.63
AgL	0.43	0.22	27.74	2.00

以XRD檢測改質生物炭表面

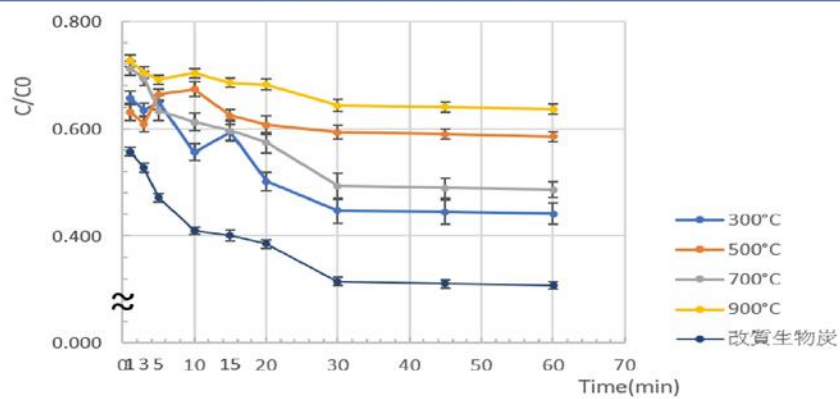


是否進行生物炭改質對催化降解PMS之差異

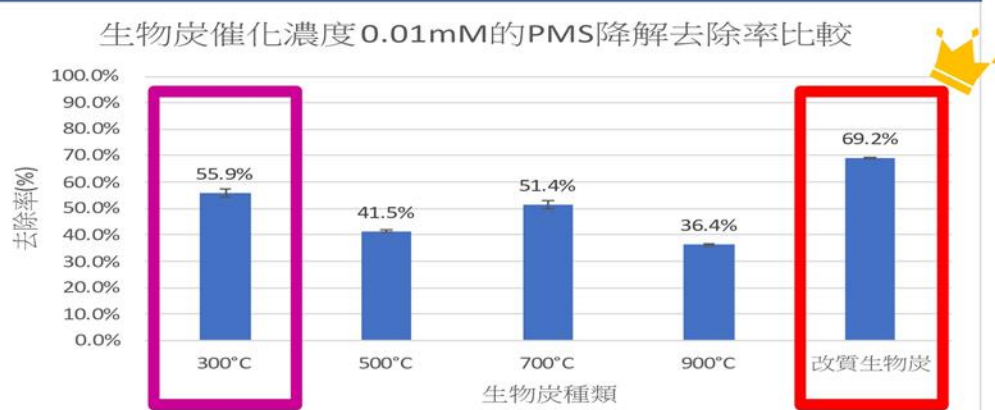


如左圖，改質後的300°C生物炭催化PMS降解TC的效果優於未改質的300°C生物炭10%以上，生物炭鐵磁流體催化降解效果非常優異。添加磁性物質之生物炭也利於使用後的回收。

不同溫度生物炭催化之PMS及生物炭鐵磁流體

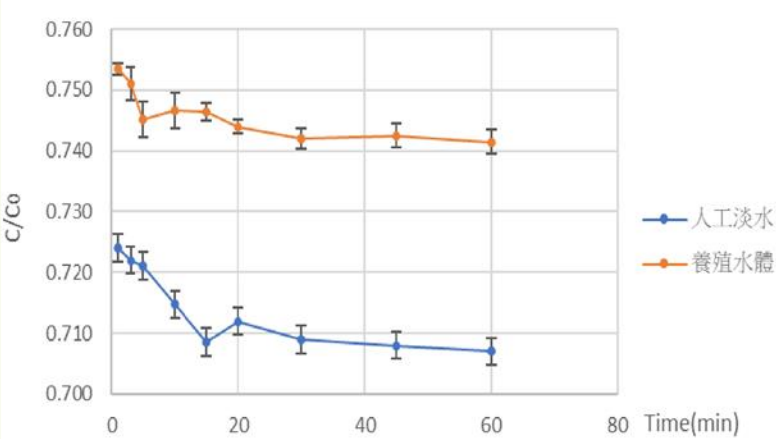


生物炭與改質生物炭催化PMS降解TC去除率差異



四、應用於實際水體

實際水體催化降解效率



生物炭於不同含TC水體催化PMS降解效率

含TC溶液之溶劑	純水	純水	人工淡水	養殖水體
300°C生物炭催化PMS降解	無	有	有	有
去除率(%)	43.7	57.4	29.1	25.5
平衡時間(分鐘)	30	30	15	5

改質前後生物炭對不同水體催化降解效率

生物炭種類+PMS	300°C	Fe-300°C	300°C	Fe-300°C
調配溶液	純水	純水	養殖水體	養殖水體
去除率(%)	57.9	76.3	35.3	61.0

由圖可知，在兩種實際水體中生物炭亦能發揮催化降解的效用，且改質後，去除率從35.3%提升到61.0%。代表本研究有實際應用的發展性。

伍、研究討論

一、選用生物炭樣本

望挑選無利用價值之植物廢棄物加以燒製，為其創造價值。因為大葉桃花心木大量落果導致清潔上的困難、常造成用路人不便，且果殼對人類具有毒性，故用其作為燒製材料。

二、選用抗生素樣本

望挑選環境中較普遍且造成危害的抗生素進行研究。四環素為水體中普遍存在之抗生素種類，四環黴素為其基本的抗生素，許多抗生素皆由其衍生而來，故先以四環黴素進行研究，希望可以將同一套去除方法用於相似抗生素。

三、定量PMS濃度為0.01mM

PMS濃度與去除效果呈正相關，濃度高會使降解效率過高，無法看出生物炭催化降解差異，且PMS價格遠高於生物炭，故使用濃度0.01mM進行降解。

四、PMS優勢與問題

自由基可幫助快速降解水中有機污染物，但反應會受到水中其他參數影響，影響反應速率或產生毒性副產物。PMS在水中解離呈酸性也是必須要考慮的問題。

五、生物炭吸附與比表面積

溫度(°C)	300	500	700	900
吸附率(%)	17	21	27	27
比表面積(m ² /g)	38.6	44.3	53.8	54.7

六、生物炭與鐵磁生物炭酸鹼值比較

種類	生物炭	鐵磁生物炭
溶於水	9.6	6.5
催化PMS降解	7.8	4.2

陸、結論

一、製備不同溫度之桃花心木果殼生物炭

經過BET分析比表面積及HPLC檢測吸附後TC殘留濃度後，發現比表面積愈大，吸附效果愈佳。再經FTIR分析表面官能基，除了300 °C可能含有少許官能基殘留，其它溫度幾乎炭化完全。

二、PMS對四環黴素降解之比較

PMS濃度越高降解效率越好，但因濃度高會使降解效率過高，無法看出生物炭催化降解差異，因此選用0.01mM做後續實驗。而添加生物炭能有效催化PMS降解，提高TC去除率，其中以300°C生物炭效果最佳43.7% (純PMS降解) → 55.9% (300°C生物炭催化PMS降解)。

三、改質生物炭催化降解

以3:6:25比例製備生物炭鐵磁流體，經EDS與XRD等儀器分析後證實生物炭表面嵌四氧化三鐵，再將其投入催化PMS降解TC實驗中，發現無論是在純水還是投入養殖水中，降解效果遠佳於未改質。57.9% (300°C生物炭在純水中) → 76.3% [改質生物炭 (Fe-300°C) 在純水中]
35.3% (300°C生物炭在養殖水中) → 61.0% [改質生物炭 (Fe-300°C) 養殖水中]

四、應用於實際水體

生物炭在人工淡水與養殖水體中亦能催化PMS降解TC，且改質後大幅提升去除率，本研究具有實際應用的發展性。

35.3% (300°C生物炭在養殖水中) → 61.0% [改質生物炭 (Fe-300°C) 養殖水中]

柒、參考資料

1. Yu, J.F., Feng, H.P., Tang, L., et al. (2020) Metal-Free Carbon Materials for Persulfate-Based Advanced Oxidation
2. Process: Microstructure, Property and Tailoring. Progress in Materials Science, 111, Article ID: 100654.
3. Benner, J. and Ternes, T.A. (2009) Ozonation of Metoprolol: Elucidation of Oxidation Pathways and Major Oxidation
4. Guan, Y.H., Ma, J., Li, C.X., Fang, J.Y. and Chen, L.W. (2011) Influence of pH on the Formation of Sulfate and Hydroxyl Radicals in the UV/Peroxymonosulfate System. Environmental Science & Technology, 45, 9308-9314.