

# 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 農業與食品學科  
團隊合作獎

052208

鋁鎂生物炭的材料轉化與應用：從離子吸附到光  
催化降解的水體淨化策略

學校名稱： 高雄市立高雄女子高級中學

作者：  高一 孫緯潔  高二 柳采彤	指導老師：  呂雲瑞  謝東瀛
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞： 層狀雙氫氧化物、光催化、水質淨化

## 摘要

本研究自製鋁鎂改質生物炭，應用於吸附三種常見水污染物：磷酸根、亞甲藍與阿特拉津。透過鋁與鎂的共沉澱反應，在生物炭表面生成具正電層的層狀雙氫氧化物（LDHs），有效提升吸附能力。實驗結果顯示，鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲藍與阿特拉津皆展現優異的吸附能力，在 180 分鐘內的去除率分別達 94.8%、89.3%、94.1%，動力學分析皆較符合擬二階模型，顯示吸附以化學作用為主，其中阿特拉津亦符合 Langmuir 等溫線，推測為單層吸附。我們進一步將二氧化鈦負載於材料上進行光催化測試，在紫外光照下亞甲藍去除率提升逾 50%。本研究自製的鋁鎂生物炭對多種污染物皆具高效去除能力，更結合  $\text{TiO}_2$  對污染物進行分解。展現出吸附與光催化雙效潛力，具水體淨化的應用前景。

## 壹、前言

### 一、研究動機

近年來，水體中多種污染物的共存問題日益受到關注，特別是在農業與工業活動密集的区域，常見的污染物包括磷酸根( $\text{PO}_4^{3-}$ )、亞甲基藍(Methylene Blue)，以及農藥阿特拉津(Atrazine)。這些污染物雖來源不同，卻具有共同特點：難以自然分解、濃度低但具生態風險、且常同時出現於廢水中。目前大多數處理技術仍針對單一污染物設計，若能開發一種具多功能吸附能力的材料，將對實際水處理應用帶來更高效且低成本的解方。

本研究選擇以鋁鎂生物炭(Al-Mg biochar)進行探討。生物炭具有孔隙結構發達、比表面積大等特性，而鋁與鎂的引入可於生物炭表面原位形成層狀雙氫氧化物(Layered Double Hydroxides, LDHs)結構，該結構由帶正電的金屬氫氧化層與層間可交換的陰離子組成，具有良好的陰離子吸附能力。LDHs 結構中的金屬離子提供穩定的陽離子層，能與磷酸根等陰離子產生靜電吸附或離子交換作用；同時，其層間孔隙與表面官能基也有助於捕捉極性染料分子與疏水性有機污染物，如亞甲基藍與阿特拉津，進而提升整體多功能吸附能力。本研究希望比較鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍與阿特拉津的吸附效果，並分析其在動力學與結構上的吸附行為差異。

此外，本研究也進一步探討將光觸媒二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )附載於鋁鎂生物炭表面的可能性。這樣的複合材料不僅具有吸附能力，也有機會在光照條件下進行污染物的光催化降解，提升材料的再生性與使用壽命，朝向環保、可再利用的方向發展。

透過本研究，希望能建立一套簡便、有效的多污染物處理材料系統。

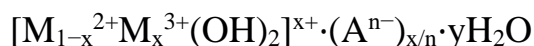
## 二、研究目的

- (一) 改質鋁鎂生物炭並觀察其結構。
- (二) 評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力。
- (三) 評估鋁鎂生物炭負載  $\text{TiO}_2$  後，對亞甲基藍及阿特拉津的光催化降解能力。

## 三、文獻回顧

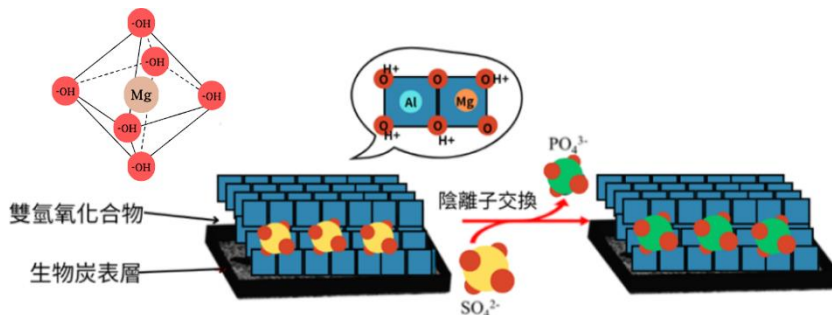
### (一) 層狀雙氫氧化物 (Layered double hydroxides, LDHs)

層狀雙氫氧化物的形成可分為四個階段：金屬離子共沉澱、層間陰離子與水分子吸附、晶核生長與層狀結構形成，及記憶結構效應。在 pH 值約 9~10 的鹼性條件下，二價與三價金屬離子與氫氧根反應，形成氫氧化物晶核。形成非整數比、帶正電的層狀氫氧化物。



- $\text{M}^{2+}$  為二價陽離子。本實驗採  $\text{Mg}^{2+}$ 。
- $\text{M}^{3+}$  為三價陽離子。本實驗採  $\text{Al}^{3+}$ 。
- $\text{A}^{n-}$  代表陰離子。本實驗採  $\text{PO}_4^{3-}$ 。
- $x$  為三價金屬的摩爾分率（通常  $0.2 \leq x \leq 0.33$ ）。
- $y\text{H}_2\text{O}$  為層間水分子，影響 LDHs 的水化程度。

為了保持電中性，層間會夾帶陰離子和水分子，由於層間陰離子與正電晶層間為靜電吸引，且層間具有水分子與空隙，陰離子在層間具一定程度的可動性(受層間距與水化程度影響)。當外界陰離子與晶層間的靜電吸引力更強時，便可發生陰離子交換反應[1]。常見製備 LDHs 的方法有共沉澱法、水熱法、離子交換法、焙燒記憶法等，而共沉澱法在反應過程中無需高溫高壓，生成物污染少，符合綠色化學原則。

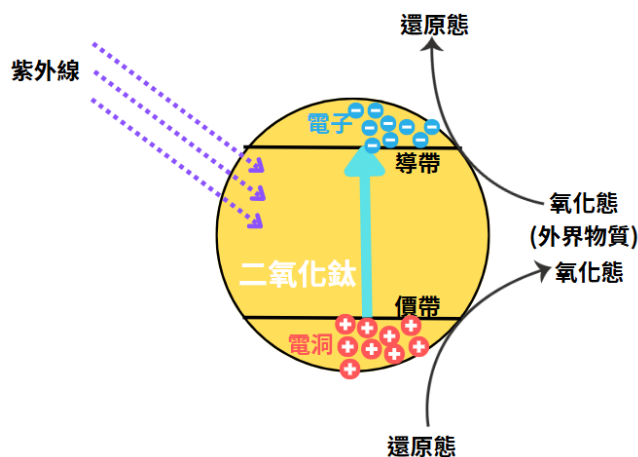


圖一：層狀雙氫氧化物陰離子交換示意圖

(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

## （二）二氧化鈦光觸媒

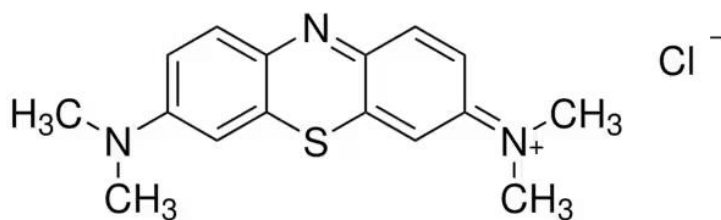
光觸媒是利用光能來促進化學反應的催化劑。當光觸媒吸收紫外光時，會激發電子從價帶（valence band）躍遷至導帶（conduction band），電子原所在處便會出現一個電洞，形成電子-電洞對，與周圍的氧氣和水反應，產生活性氧物種（Reactive Oxygen Species，ROS）（如，超氧陰離子  $O_2^-$  和氫氧自由基  $\cdot OH$ ），這些活性物質能分解有機物質、殺菌、除臭[2]。二氧化鈦因價格便宜、穩定性高、無毒且易製備，是目前最廣泛使用的光觸媒材料。其光催化反應是通過氧化還原機制，將有機物分解成二氧化碳和水，達到環境淨化的效果。



圖二：二氧化鈦光觸媒原理示意圖  
(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

## （三）亞甲基藍

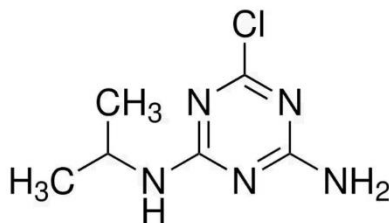
亞甲基藍是一種多用途的藍色染料和藥物，化學式為  $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ，常見於紡織、製藥等工業廢水。亞甲基藍具高穩定性與毒性，對水生生物有潛在危害，且難以經由自然降解消除。亞甲基藍在高濃度或特定 pH 條件下（如， $pH > 13$ ），若濃度介於  $5 \times 10^{-6} M$  到  $5 \times 10^{-5} M$ ，吸光度與濃度符合比爾定律，呈現良好線性；但當亞甲基藍濃度大於  $1 \times 10^{-5} M$  時，會發生二聚化現象，導致吸光度與濃度的關係偏離線性[3]。故本研究之亞甲基藍檢量線採濃度 1、2、4、5、10 ppm 進行繪製。



圖三：亞甲基藍結構式  
(出處:圖源參見參考文獻 7)

#### (四) 阿特拉津(Atrazine)

又名草脫淨，化學式為  $C_8H_{14}ClN_5$ ，廣泛用於農田除草，因其高水溶性、土壤流動性與長半衰期，易殘留於地表水與地下水，難以生物降解並具持久性。阿特拉津可對水生生物產生神經、內分泌等多重毒性作用，對人類亦有致癌與神經毒性風險。



圖四：阿特拉津結構式  
(出處：圖源參見參考文獻 8)

#### (五) 等溫吸附

##### 1. 吸附模型比較

###### (1) Langmuir 模型

適用於單層吸附且表面均勻的系統，常用於氣體吸附及液相吸附量的分析。

假設吸附劑表面具有均勻且固定數量的吸附位點且每個位點只能吸附一個分子（單層吸附）、吸附質分子間無相互作用，及吸附與解吸為可逆動態平衡。

###### (2) Freundlich 模型

適用於表面不均勻、吸附多層的系統，常用於液相吸附的描述。假設吸附劑表面不均勻，存在不同能量的吸附位點。吸附為多層且非理想吸附。

###### (3) BET 模型 (Brunauer–Emmett–Teller Model)

基於朗繆爾模型，考慮多層吸附。適用於氣體吸附，特別是測定固體材料比表面積。

##### 2. 模型選擇及公式

文獻指出，鋁鎂改質生物炭對磷酸鹽及亞甲基藍的吸附行為可能同時符合 Langmuir 與 Freundlich 模型[4][5]。阿特拉津的具體模型資料較少，但一般有機農藥吸附常用 Langmuir 與 Freundlich 模型進行擬合分析。

(1) Langmuir 模型方程式：

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{\max}} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{\max}}$$

- $q_e$ ：平衡吸附量(mg/g)。  $q_e = V(C_0 - C_e)/M$ 
  - $V$ ：溶劑體積(L)
  - $C_0$ ：吸附質初始濃度(ppm)；  $C_e$ ：平衡濃度(ppm)
  - $M$ ：吸附劑質量(g)
- $q_{\max}$ ：單層最大吸附容量
- $C_e$ ：平衡濃度(ppm)
- $K_L$ ：吸附常數( $K_L$  越大，吸附劑對吸附質的吸附親和力越強，吸附過程越容易進行。)

利用  $1/q_e$  當  $y$  軸， $1/C_e$  當  $x$  軸，及可求得斜率( $1/K_L q_{\max}$ )、截距( $1/q_{\max}$ )。得到單層最大吸附量( $q_{\max}$ )。

(2) Freundlich 模型方程式：

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$$

上式可取  $\log$  變成：

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \left(\frac{1}{n}\right) \log(C_e)$$

利用  $\log(q_e)$  當  $y$  軸， $\log(C_e)$  當  $x$  軸，及可求得斜率( $1/n$ )、截距( $\log(K_F)$ )。

- $q_e$ ：平衡吸附量(mg/g)。
- $K_F$ ：經驗吸附常數(反映吸附劑的吸附容量，與吸附劑性質及溫度有關。 $K_F$  值越大，表示吸附容量越大)。
- $n$ ：異質性因子，表示吸附強度。
  - $n > 1$  時表示有利吸附，吸附劑表面非均勻且吸附強度較高。
  - $n = 1$  表示線性吸附，吸附為線性，表示吸附位點均勻。
  - $n < 1$  時表示不利吸附，吸附強度較弱。

#### (六) 動力吸附學分析

吸附動力學探討吸附和脫附的速度與影響因素(如，溫度、濃度、吸附劑性質)之關聯性。本研究將以(二氧化鈦改質)鋁鎂生物炭搭配不同吸附質(磷酸根、亞甲基藍、阿特拉津)。

### 1. 擬一階動力學模型 (Pseudo-first-order kinetics)

假設吸附速率與吸附劑表面未被吸附的活性位點數量成正比。適用於低覆蓋度吸附行為，物質與吸附劑作用較弱。公式如下：

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

積分後線性形式：

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

以將  $\ln(q_e - q_t)$  對  $t$  作圖，理論上應呈現直線，斜率為  $-k_1$

- $q_t$ ：時間  $t$  時吸附量
- $q_e$ ：平衡吸附量
- $k_1$ ：一階速率常數

### 2. 擬二階動力學模型 (Pseudo-second-order kinetics)

假設吸附速率與吸附劑表面活性位點數量平方成正比，反映化學吸附（如，電子共享或轉移）。適用於高覆蓋度吸附，吸附位點間存在競爭。公式如下：

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

積分後線性形式：

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}$$

- $q_t$ ：時間  $t$  時的吸附量 (mg/g)
- $q_e$ ：平衡吸附量 (mg/g)
- $k_2$ ：二階動力學參數 (g/mg · min)
- $t$ ：吸附時間

### 3. 顆粒內擴散模型 (Weber-Morris)

主要用來描述吸附過程中吸附質分子在吸附劑顆粒內部的擴散行為。吸附質分子首先從溶液擴散到吸附劑表面，然後通過顆粒表面孔隙向內擴散，最後被吸附於內部吸附位點。若顆粒內擴散為速率控制步驟，則吸附量隨時間的變化可用顆粒內擴散模型描述[6]。顆粒內擴散模型方程式為：

$$q_t = k_{id} t^{0.5} + C$$

- $q_t$ ：時間  $t$  時的吸附量 (mg/g)
- $k_{id}$ ：顆粒內擴散速率常數 (mg/g · min)
- $t$ ：時間 (min)
- $C$ ：與邊界層厚度相關的常數，反映初始吸附階段的影響。

若直線通過原點，表示內部擴散為唯一速率控制步驟；若不通過原點，表示吸附過程還存在其他速率限制步驟（如，表面吸附、外擴散等）。通過擬合此模型，可判斷吸附過程中顆粒內擴散的影響程度及速率。

#### 4. Elovich 模型

常用於描述不均勻固體表面上的化學吸附動力學，適合解釋吸附速率隨吸附量增加而指數減少的現象。其基本假設是吸附能隨表面覆蓋率線性增加，吸附速率隨吸附量指數下降。方程的微分形式為：

$$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q_t}$$

其中：

- $q_t$ ：時間  $t$  時的吸附量（mg/g）
- $\alpha$ ：初始吸附速率（mg/g·min）
- $\beta$ ：與活化能相關的常數（g/mg）
- $e$ ：用來描述吸附速率的指數衰減的常數

經積分並假設初始時刻（ $t=0$ ）時  $q_t=0$ ，可得其線性化形式：

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$$

將  $q_t$  對  $\ln t$  作圖，可得一條直線，斜率為  $1/\beta$ ，截距為  $\frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta)$ 。

模型名稱	主要描述	適用情況
擬一階動力學模型	吸附速率與未吸附位點數量成正比	物理吸附、低覆蓋度吸附
擬二階動力學模型	吸附速率與未吸附位點數量平方成正比	化學吸附、較高覆蓋度
顆粒內擴散模型	吸附質在顆粒內孔隙擴散	多孔吸附劑內擴散控制
Elovich 模型	化學吸附且表面異質性	表面能量不均勻，化學吸附








表一：4 種動力吸附學模型的比較

(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)











## 貳、研究設施與器材

### 一、實驗設備及器材

				
研磨機	純水機 (採用 UP 水)	桌上型酸鹼度計	電磁加熱攪拌器	烘箱
				
超音波洗淨機	UV-Vis 分光光度計	電氣恆溫水槽	離心機	定量吸管

(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

### 二、(二氧化鈦改質)鋁鎂生物炭配製藥品

			
市售生物炭	十八水合硫酸鋁	七水合硫酸鎂	氫氧化鈉
			
二氧化鈦前驅物(四異丙氧基鈦，TTIP)	乙醇	十二烷基硫酸(SDS)	乙酸



(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

### 三、磷酸鹽還原溶液/磷酸鹽溶液配製藥品

			
抗壞血酸	鉬酸銨	硫酸	二水合磷酸二氫鈉

(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

### 四、光觸媒降解污染物實驗藥品

	
亞甲基藍(1000 ppm)	阿特拉津(草脫淨, ATR)

(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

### 五、儀器介紹

#### (一) SEM (掃描式電子顯微鏡)

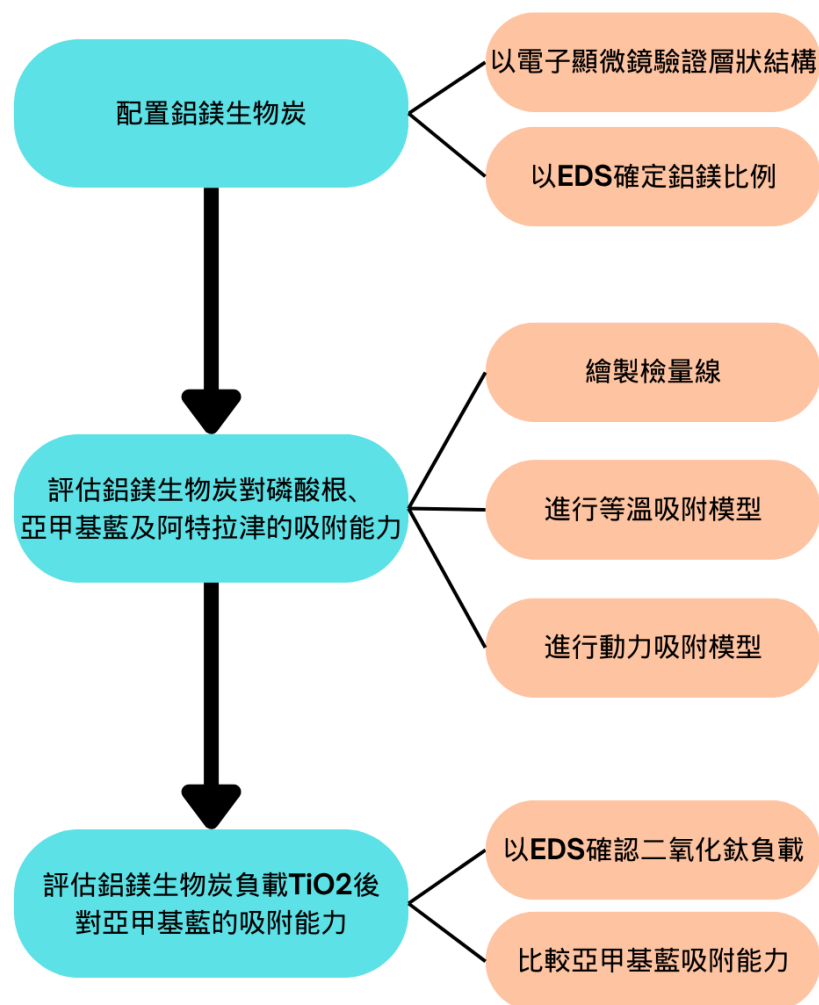
利用聚焦的電子束在樣品表面掃描，並接收由電子束與樣品交互作用產生的各種訊號，如二次電子或背向散射電子，以形成影像。提供高解析度與高放大倍率觀察樣品。

#### (二) EDS (X 射線能量分散能譜)

利用 X 射線照射樣品，激發原子內層電子，使其發射出光電子。透過偵測光電子的動能，可以分析樣品中的元素組成，並確定其化學狀態和分子結構。

## 參、研究過程與方法

### 一、實驗流程圖



圖五：實驗流程圖（此照片或圖片由作者拍攝或繪製）

### 二、改質鋁鎂生物炭並觀察其結構

#### （一）製備鋁鎂生物炭

1. 使用研磨機將生物炭打碎，秤取 450.00 g 至 2.5 L 的大燒杯。
2. 取十八水合硫酸鋁 740.00 g 及七水合硫酸鎂 400.00 g 溶入 1600.00 mL 水中 ( $\text{Al}^{3+}:\text{Mg}^{2+}=1:2$ )，加熱待完全溶解。將生物炭和金屬鹽溶液放入超音波洗淨機混合，同時以玻棒攪拌生物炭確保鹽類分佈均勻。
3. 調配 1.6M 的氫氧化鈉水溶液 1.0 L。
4. 將大燒杯放到電磁加熱攪拌器(60 度、1500 rpm)，將氫氧化鈉水溶液放入滴定管，以約 3 秒 1 滴的速率加入燒杯。
5. 以桌上型酸鹼度計測量生物炭酸鹼值，當  $\text{pH}=10$  停止滴定。
6. 將燒杯內容物分裝置容器中，放置於烘箱中以  $180.0^{\circ}\text{C}$  乾燥 24 小時。

7. 將乾燥鋁鎂生物炭敲碎後沖純水，至所有鋁鎂生物炭沉澱於底部後進行傾析，重複至 pH=5~6，放入烘箱 180 度 24 小時至乾燥。

8. 將鋁鎂生物炭研磨至細粉狀。



圖六：鋁鎂粒子共沉澱過程(滴氫氧化鈉)



圖七：燒製完成的生物炭(未沖洗)

(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

(二) 以 SEM 觀察結構和 EDS 分析組成

### 三、評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力

(一) 鋁鎂生物炭對磷酸根的吸附能力

#### 1. 繪製磷酸根檢量線

(1) 配製磷酸鹽還原溶液

將 1.00 g 鉬酸銨加入 50.0 mL 容量瓶(0.1M)；1.76 g 維生素 C 加入 100 mL 容量瓶(0.1M)，加水至標記處，再將 17.0 mL 的濃硫酸加入 200.0 mL 水中(1.4 M)，攪拌均勻，把 39.0 mL 鉬酸銨溶液和 60.0 mL 維生素 C 溶液加入 250 mL 容量瓶，用硫酸水溶液(1.47M)注至標記處，用力搖晃三十秒。

(2) 配製磷酸鹽標準溶液

將 1.640g 二水合磷酸二氫鈉加入 1 L 容量瓶，加水至標記處，製成 1000 ppm 的磷酸根水溶液，以超音波震盪機震盪 10 分鐘使之均勻，將 1.25、2.50、5.00、12.50、25.00、50.00 mL 的磷酸二氫鈉水溶液分別加入 250.00 mL 容量瓶中，加水至標記處。調製成濃度 5、10、20、50、100、200ppm 的磷酸鹽標準溶液。

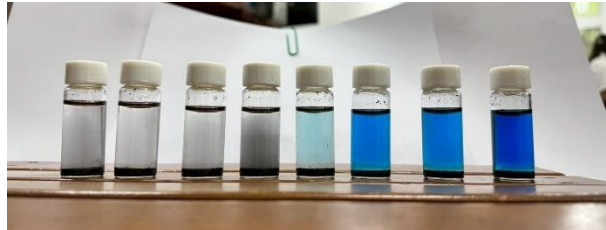
(3) 取 6 支試管，分別加入 6.00 mL 的還原溶液和 1.00 mL 已知濃度的磷酸鹽溶液充分混合。將試管放入恆溫加熱器隔水加熱(50°C)，反應 1 小時。

(4) 測定混和溶液在 880 nm 下的吸光值，並用 Excel 繪製「濃度—吸光值」的檢量線。



## 2. 等溫吸附曲線

- (1) 取 0.50 g 生物炭和 10.00 mL 磷酸根標準溶液 (5、10、20、50、100、200 ppm)，放入樣品瓶，於電氣恆溫水槽震盪 4hr。
- (2) 過濾樣品瓶中的混合物。取 6.00 mL 的還原溶液和 1.00 mL 濾液加入試管。將試管放入恆溫加熱器隔水加熱 (50°C)，反應 1 小時。
- (3) 測定其在 880 nm 下的吸光值，換算濃度。
- (4) 使用 Langmuir、Freundlich 等溫吸附方程式，判斷鋁鎂生物炭對磷酸根的吸附機制。



圖八：磷酸根等溫吸附(水槽震盪)      圖九：亞甲基藍動力吸附成果(下方步驟(二)-2.)  
(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

## 3. 吸附動力學

- (1) 取 1.00 g 生物炭放入 200.00 mL 的 200 ppm 磷酸根溶液中，放置電磁加熱攪拌器以 25°C、700rpm 攪拌。
- (2) 每 15 分鐘吸取 10.00 mL 測量 880 nm 下的吸光值。
- (3) 繪製動力吸附學 4 種模型的曲線。

### (二) 鋁鎂生物炭對亞甲基藍的吸附能力

#### 1. 繪製亞甲基藍檢量線

##### (1) 配製亞甲基藍標準溶液

將 1.25、2.50、5.00、12.50、25.00、50.00 mL 的亞甲基藍水溶液分別加入 250.00 mL 容量瓶中，加水至標記處。調製成濃度 5、10、20、50、100、200ppm 的亞甲基藍標準溶液。

- (2) 測定標準溶液在 665 nm 下的吸光值，並用 Excel 繪製「濃度－吸光值」的檢量線。

#### 2. 等溫吸附曲線

- (1) 取 0.50 g 生物炭和 10.00 mL 亞甲基藍標準溶液 (30、50、60、80、100、125、300、400、500 ppm)(濃度設定在討論解釋)，放入樣品瓶，於電氣恆溫水槽震盪 4hr。
- (2) 離心樣品，測定清液其在 665 nm 下的吸光值。
- (3) 使用 Langmuir、Freundlich 等溫吸附方程式，判斷鋁鎂生物炭對亞甲基藍的吸附機制。

#### 3. 吸附動力學

- (1) 取 1.00 g 生物炭放入 200.00 mL 的 200 ppm 磷酸根溶液中，放置電磁加熱攪拌器以 25°C、700 rpm 攪拌。
- (2) 每 15 分鐘吸取 10.00 mL 測量 225 nm 下的吸光值。
- (3) 繪製動力吸附學 4 種模型的曲線。

### (三) 鋁鎂生物炭對阿特拉津的吸附能力

#### 1. 繪製阿特拉津檢量線

##### (1) 配製亞甲基藍標準溶液

取 0.1g 阿特拉津粉末，加入 1000.00 mL 容量瓶中，加水至標記處，調製成濃度 100 ppm 的阿特拉津母液。用定量吸管將 5.00、10.00、20.00、50.00、100.00 mL 的 1000 ppm 阿特拉津水溶液分別加入 100.00 mL 容量瓶中，加水至標記處。調製成濃度 5、10、20、50、100 ppm 的阿特拉津標準溶液。

(2) 測定標準溶液在 225 nm 下的吸光值，並用 Excel 繪製「濃度－吸光值」的檢量線。

#### 2. 等溫吸附曲線

(1) 取 0.50 g 生物炭和 10.00 mL 阿特拉津標準溶液 (5、10、20、50、100、200 ppm)，放入樣品瓶，靜置 4hr。

(2) 過濾樣品瓶中的混合物，測定其在 225 nm 下的吸光值。

(3) 使用 Langmuir、Freundlich 等溫吸附方程式，以 n 值判斷有利吸附與否，並比較其 K 值。

#### 3. 吸附動力學

(1) 取 1.00 g 生物炭放入 200.00 mL 的 200 ppm 亞甲基藍溶液中，放置電磁加熱攪拌器以 25°C、700rpm 攪拌。

(2) 每 15 分鐘吸取 10.00 mL 測量 225 nm 下的吸光值。

(3) 繪製動力吸附學 4 種模型的曲線。

### 四、評估二氧化鈦改質鋁鎂生物炭對亞甲基藍光催化降解能力

#### (一) 二氧化鈦改質鋁鎂生物炭

1. 將 50.00 g 鋁鎂生物炭與 10.00 g 鈦酸四異丙酯加入 30.00ml 乙醇混和

2. 混和物鋪平在烘箱以 250 度烘乾，促進鈦酸四異丙酯轉化為二氧化鈦，去除有機殘留。

3. 將二氧化鈦改質鋁鎂生物炭研磨成粉末狀。

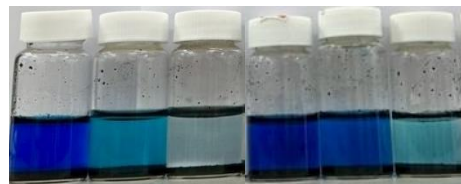
#### (二) 比較二氧化鈦改質鋁鎂生物炭對亞甲基藍去除能力的影響

將 1.00 g 二氧化鈦改質鋁鎂生物炭放入 10.00 mL 的 100ppm 亞甲基藍溶液，分別放置 3、6、9 小時（實驗組以黑色塑膠袋隔絕外部光源，並照功率 8W 的紫外線燈），並測量其吸光度，

以檢量線換算濃度後換算其去除率。 $(C_0 - C_t / C_0) \times 100\%$



圖十：二氧化鈦改質鋁鎂生物炭  
(由作者拍攝或繪製)

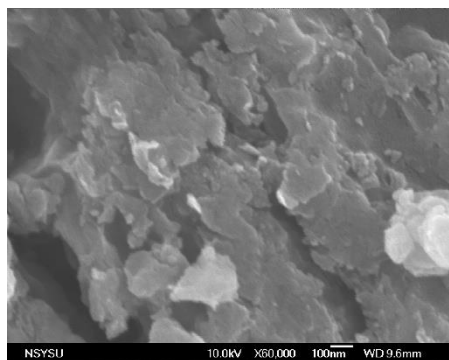


圖十一：二氧化鈦改質鋁鎂生物炭對亞甲基藍去除  
(左實驗組，右對照組，左至右皆為 3、6、9 小時)

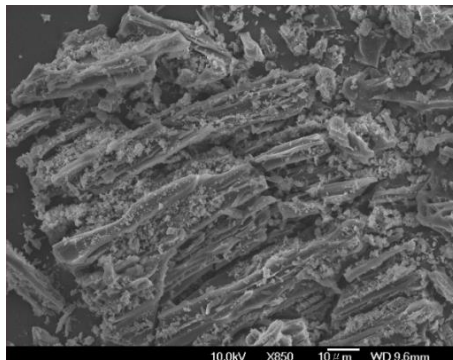
## 肆、研究成果

### 一、改質鋁鎂生物炭並觀察其結構

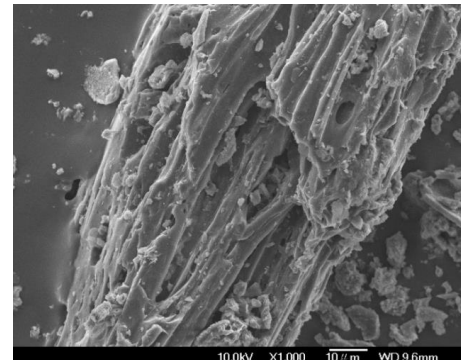
#### (一) SEM



原生物炭



鋁鎂生物炭



二氧化鈦改質鋁鎂生物炭

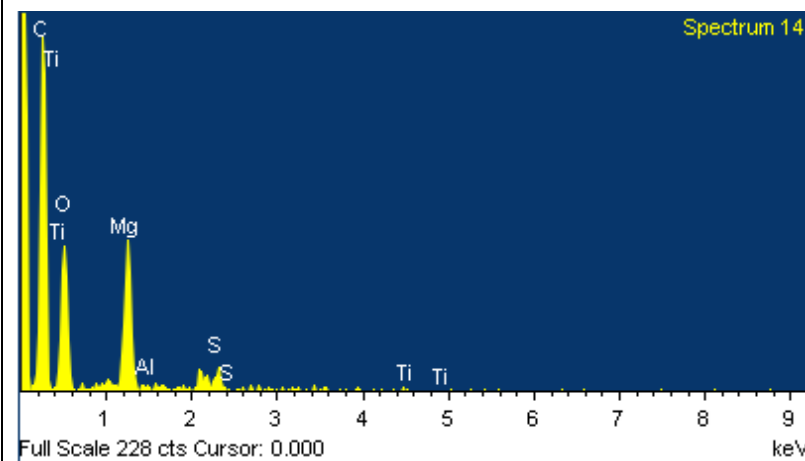
圖十二~十四(左至右)：生物炭 SEM (此圖片由 SEM 產出)

鋁鎂生物炭 SEM 圖中，層狀堆疊結構明顯、片狀晶體邊緣清晰緊密、結晶方向具一致性，進一步佐證為高結晶度 LDHs。二氧化鈦改質鋁鎂生物炭與鋁鎂生物炭 SEM 圖特徵類似。經二氧化鈦改質後，生物炭表面會覆蓋一層均勻分布的二氧化鈦顆粒。SEM 圖中，孔隙部分可能因二氧化鈦覆蓋而部分堵塞、破壞或變形，表面粗糙度增加。

#### (二) EDS

##### 1. 鋁鎂生物炭

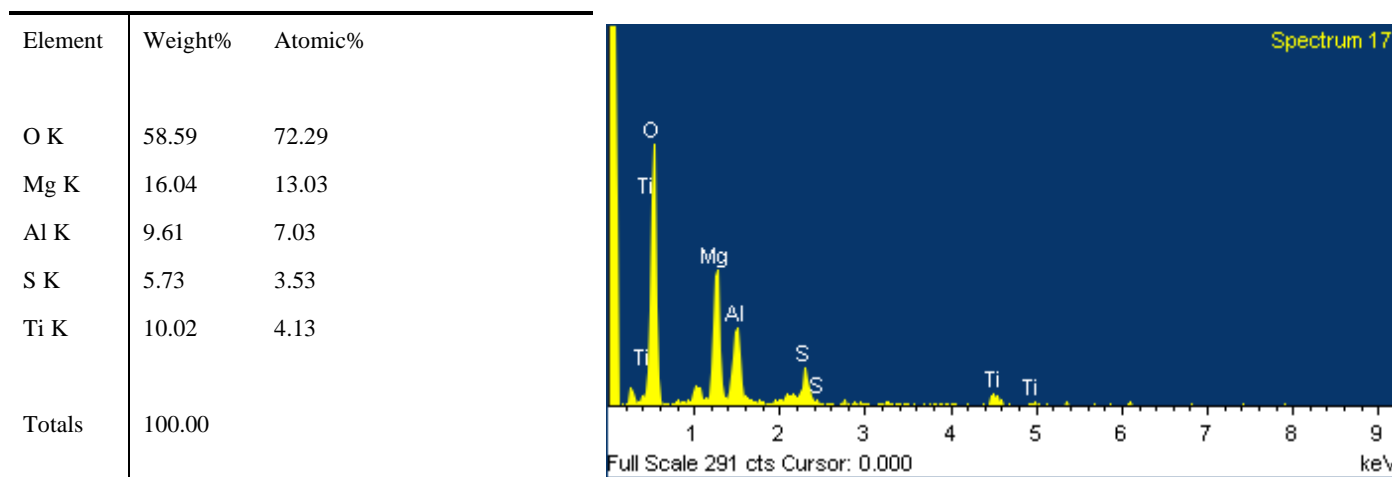
Element	Weight%	Atomic%
C K	56.05	66.02
O K	30.19	26.69
Mg K	10.08	5.87
Al K	0.07	0.04
S K	2.21	0.98
Ti K	1.40	0.41
Totals	100.00	



圖十五、十六：鋁鎂生物炭 EDS (此圖片由 EDS 產出)

氧含量高，推測來自層狀雙氫氧化物。碳含量高表示鋁鎂生物炭結構仍完整，適合做吸附與光催化複合材料的骨架。鋁含量普遍較低，僅 0.07–1.02 wt%，原先推測鋁與鎂比例失衡或鋁未有效沉積。然而，二氧化鈦改質鋁鎂生物炭的鋁鎂比例卻是正常的，推測是 EDS 打到分布不均的點位遭成的誤差，鋁鎂生物炭整體仍成功形成鋁鎂層狀雙氫氧化物。(後續吸附實驗的效果也能佐證此推論)

## 2. 二氧化鈦改質鋁鎂生物炭



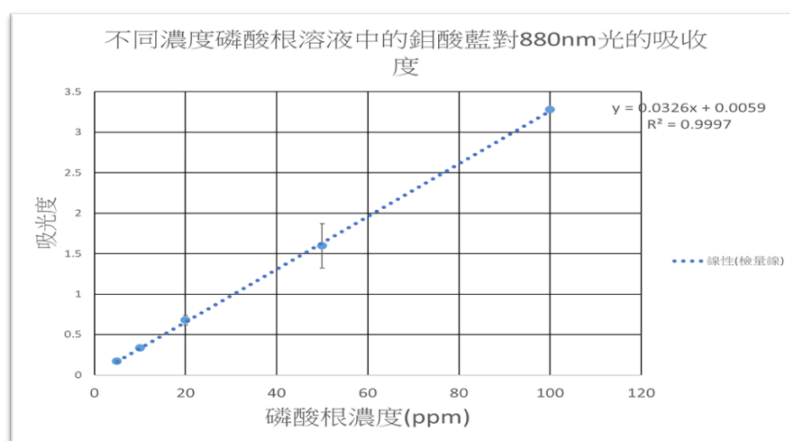
圖十七、十八：二氧化鈦改質鋁鎂生物炭 EDS (此圖片由 EDS 產出)

Mg (16 wt%) 與 Al (9.61 wt%) 比例接近 1.7:1，接近常見 LDHs 組成比。推測此區為 Al-Mg LDHs 為主、並伴隨少量  $\text{TiO}_2$  嵌入的結構區域。

## 二、評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力

### (一) 鋁鎂生物炭對磷酸根的吸附能力

#### 1. 繪製磷酸根檢量線



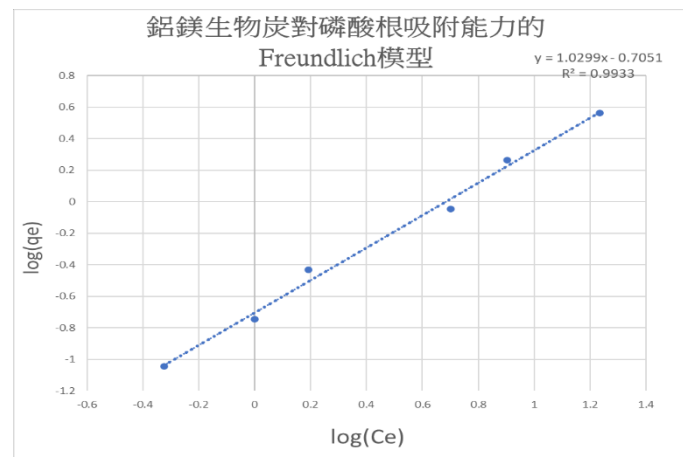
圖十九：不同濃度磷酸根溶液中的鉬酸藍對 880nm 光的吸收度

(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

利用數據(五重複)得出直線方程式  $y = 0.0326x + 0.0059$  ( $R^2 = 0.9997$ )，可以利用溶液在波長 880nm 的吸光度倒推磷酸根濃度，協助後續實驗溶液中磷酸根濃度的計算。



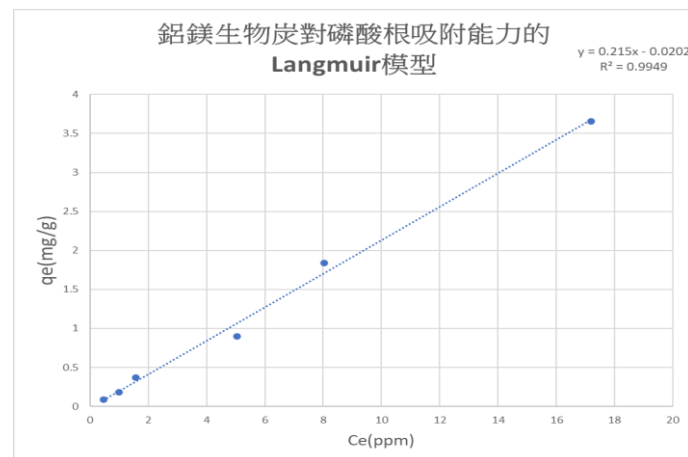
## 2. 等溫吸附曲線



圖二十：Freundlich 模型(鋁鎂生物炭對磷酸根)  
(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

- 線性回歸方程式： $y = 0.215x - 0.0202$
- 相關係數  $R^2$ ：0.9949
- 斜率  $1/n$ ：1.0299
- 截距  $\log(K_F)$ ：-0.7051

由於  $1/n > 1$ ，說明此吸附屬於有利吸附，即吸附容量隨溶液濃度增加而提升。然而其值略大於 1，可能表示吸附劑表面存在較多高能吸附位點，或吸附機制具特殊性。模型擬合顯示  $R^2$  高達 0.9933，表明 Freundlich 等溫模型能有效描述此系統的吸附行為。



圖二十一：Langmuir 模型(鋁鎂生物炭對磷酸根)  
(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

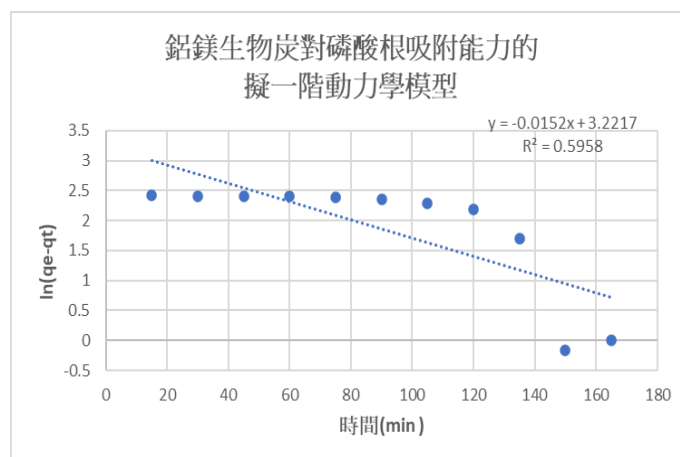
- 截距  $1/q_{\max}$ ：-0.0202
- 線性回歸方程式： $y = 0.215x - 0.0202$
- 相關係數  $R^2$ ：0.9949

$R^2$  值為 0.9949，顯示 Langmuir 模型同樣能非常良好地描述此吸附系統。

兩種模型的  $R^2$  值都非常高 ( $>0.99$ )，說明鋁鎂生物炭對磷酸根的吸附行為能同時被單層和多層吸附理論良好描述。驗證鋁鎂生物炭對磷酸根的吸附同時具有單層與多層吸附的特性。

### 3. 吸附動力學

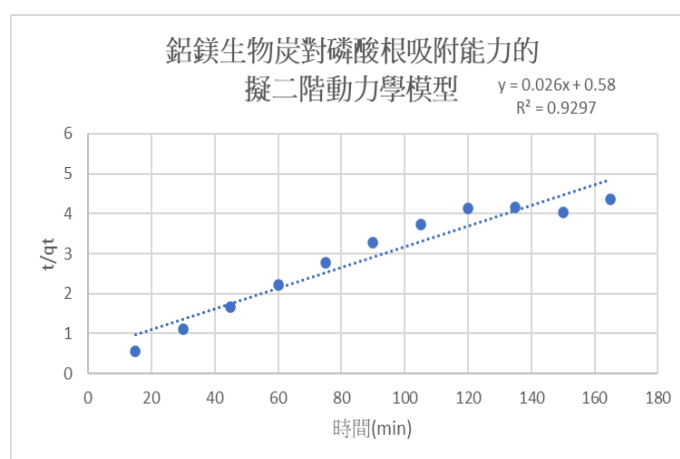
#### (1) 擬一階動力學模型



圖二十二：擬一階動力學模型(鋁鎂生物炭對磷酸根)  
(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

低  $R^2$  值表明吸附過程不完全符合擬一階假設的物理吸附，暗示存在更複雜的速率控制步驟。得最大吸附量  $q_e = e^{3.2217} \approx 25.06 \text{ mg/g}$ 。

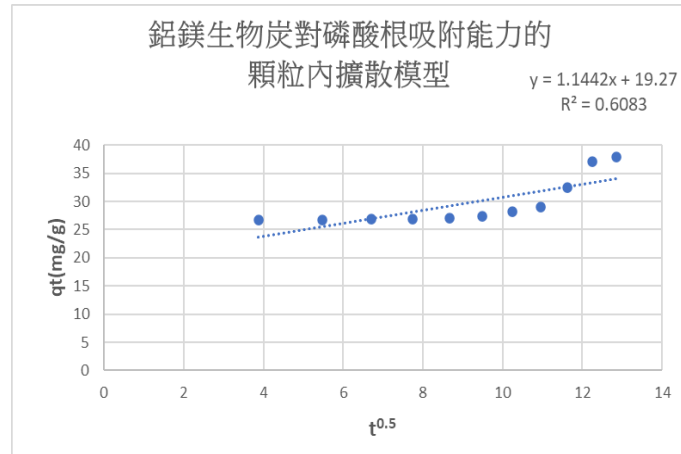
#### (2) 擬二階動力學模型



圖二十三：擬二階動力學模型(鋁鎂生物炭對磷酸根)  
(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

$R^2$  值顯示吸附行為高度符合化學吸附機制，可能涉及離子交換或配位鍵形成。文獻中記載鎂或鈣改性生物炭的磷酸鹽吸附同樣以擬二階模型為主，驗證此機制。得最大吸附量  $q_e = 1/0.0261 \approx 38.46 \text{ mg/g}$ 。

### (3) 顆粒內擴散模型

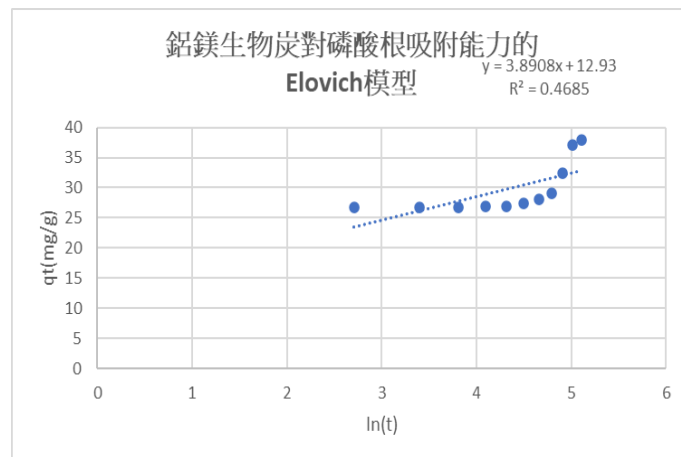


圖二十四：顆粒內擴散模型(鋁鎂生物炭對磷酸根)

(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

擬合曲線未通過原點（截距 19.27），代表擴散並非唯一控制因子，而是有吸附過程包含表面吸附與內部擴散雙重步驟。此結果與改性生物炭多孔結構特性相符，初期快速吸附由表面活性位點主導，後期擴散影響有限。

### (4) Elovich 模型



圖二十五：Elovich 模型(鋁鎂生物炭對磷酸根)

(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

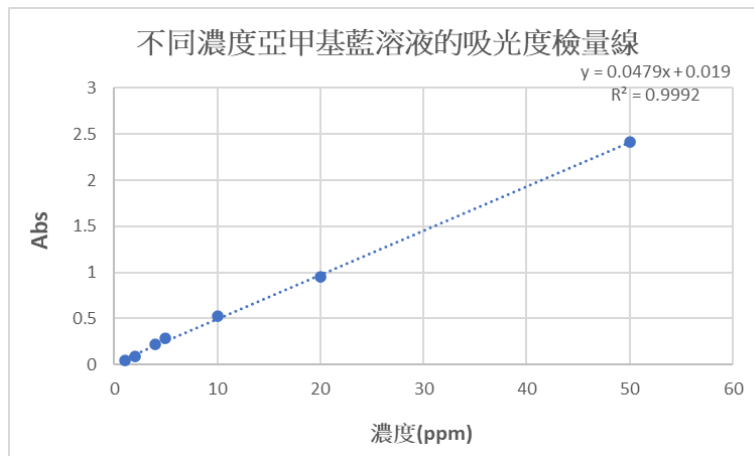
低擬合度反映吸附速率未明顯受表面活性位點飽和或能量障礙主控，進一步支持化學吸附為核心機制，而非複雜的表面反應動力學。

模型	控制機制	擬合度(R <sup>2</sup> )	主導步驟
擬一階	物理吸附	0.5958	次要(初期表面吸附)
<b>擬二階</b>	<b>化學吸附</b>	<b>0.9297</b>	<b>主控(離子交換/配位)</b>
顆粒內擴散	擴散	0.6083	參與(非唯一機制)
Elovich	表面活性點位飽和	0.4685	不顯著

表二：鋁鎂生物炭對磷酸根的吸附動力學模型綜合比較 (由作者拍攝或繪製)

(二) 鋁鎂生物炭對亞甲基藍的吸附能力

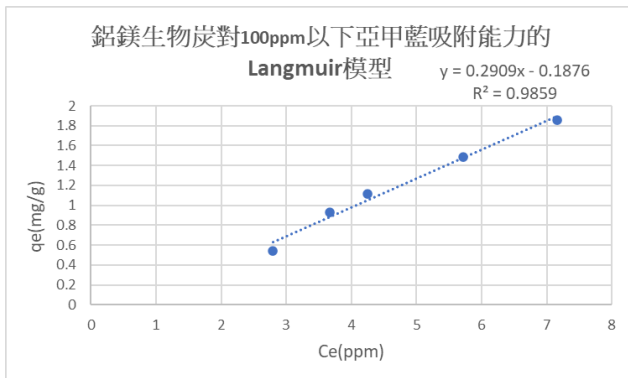
1. 繪製亞甲基藍檢量線



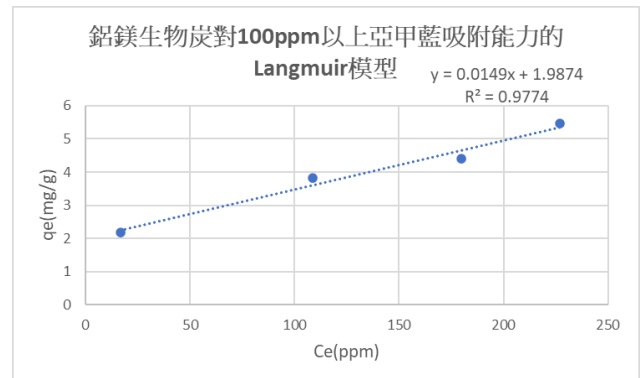
圖二十六：不同濃度亞甲基藍溶液對 665nm 光的吸收度  
(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

利用數據(五重複)得出直線方程式  $y = 0.0479x + 0.0019$  ( $R^2 = 0.9992$ )，可以利用溶液在波長 665nm 的吸光度倒推亞甲基藍濃度，協助後續實驗溶液中亞甲基藍濃度的計算。

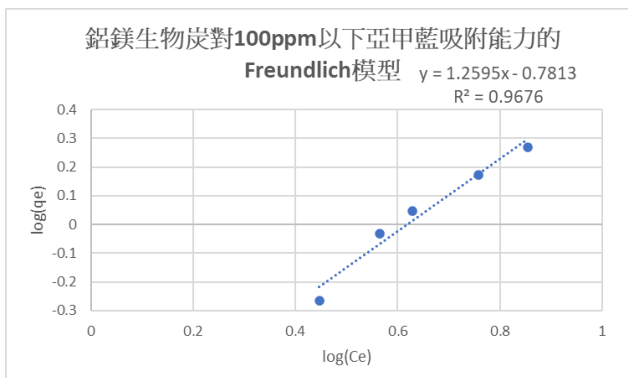
2. 等溫吸附曲線 (由作者拍攝或繪製)



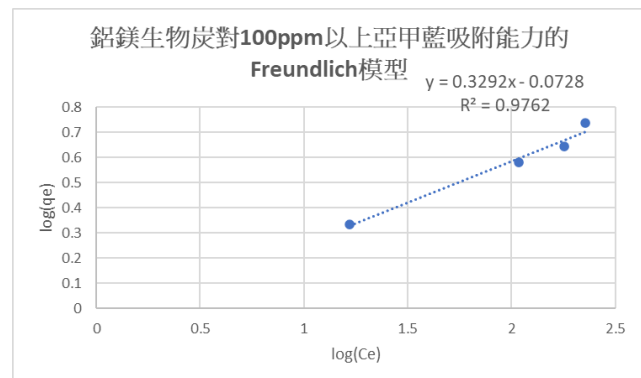
圖二十七：Langmuir 模型  
(鋁鎂生物炭對 100ppm 以下磷酸根)



圖二十八：Langmuir 模型  
(鋁鎂生物炭對 100ppm 以上磷酸根)



圖二十九：Freundlich 模型  
(鋁鎂生物炭對 100ppm 以下磷酸根)



圖三十：Freundlich 模型  
(鋁鎂生物炭對 100ppm 以上磷酸根)

(1) 濃度分區

在亞甲藍吸附實驗中，我們將濃度區間分為低濃度(小於 100 ppm)與高濃度(大於 100 ppm)。主因是吸附行為在不同濃度下會有所變化。低濃度時，吸附劑表面的活性位點還很充足，染料分子比較容易被單層吸附，因此整體趨勢較符合 Langmuir 模型；高濃度時，活性位點逐漸被佔滿，分子之間也會產生競爭，導致吸附效率下降，吸附行為變得更複雜。如果不分區擬合，可能會誤解材料在高污染情況下的實際應用表現。

## (2) Langmuir 模型

低濃度 ( $R^2=0.9859$ )，表示吸附系統具明顯飽和吸附趨勢。吸附量隨  $C_e$  增加快速上升，斜率高 (0.2909)，反映吸附初期效率高(表面的活性位點未被完全佔滿)。高濃度 ( $R^2=0.9774$ )，斜率變小，且截距大，推測活性位點逐漸趨於飽和，亞甲基藍分子間競爭加劇，吸附效率受限。

## (3) Freundlich 模型

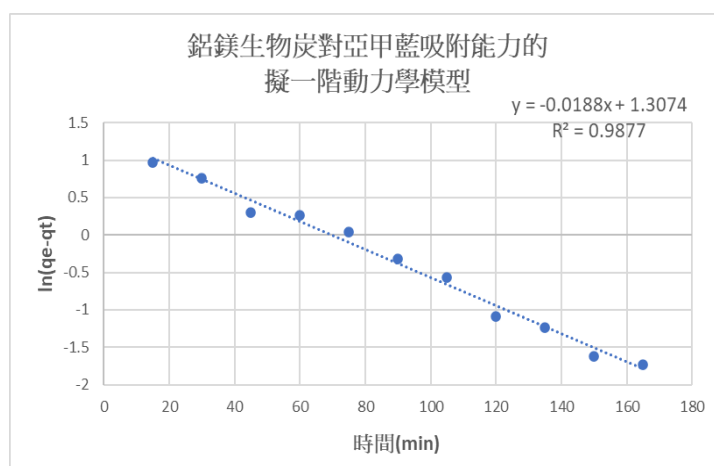
低濃度 ( $R^2=0.9676$ )， $1/n > 1$ ，表示吸附難以進行。推測鋁鎂生物炭在初始濃度較低時，其表面活性位點對 MB 的吸附能力尚未有效發揮，吸附力偏弱。高濃度 ( $R^2=0.9762$ )  $1/n = 0.3292 < 1$ ，屬於明顯有利吸附，表現出多層覆蓋與非線性吸附特性。

濃度	吸附行為	模型適配	含意
低濃度 <100 ppm	初期吸附效率高，但表面位點分布不均	Langmuir 模型最佳擬合，Freundlich 次之(不利吸附)	表面活性位點有限且不均，吸附以單層為主
高濃度 > 100 ppm	吸附進入飽和，但對亞甲藍有良好親和力	Freundlich 模型擬合較佳，顯示多層吸附作用出現	吸附趨於非線性、表面異質性明顯，吸附位點可持續利用。

表三：鋁鎂生物炭對亞甲基藍的等溫吸附模型比較 (由作者拍攝或繪製)

## 3. 吸附動力學

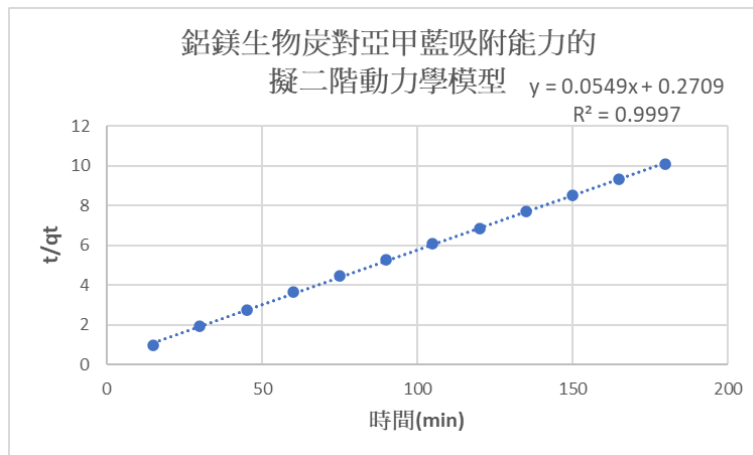
### (1) 擬一階動力學模型



圖三十一：擬一階動力學模型(鋁鎂生物炭對亞甲基藍)  
(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

擬一階動力學模型對鋁鎂生物炭吸附亞甲基藍的擬合結果良好，顯示吸附初期的速率與尚未被吸附的活性位點數量呈正比關係。代表在吸附過程的早期階段，亞甲基藍吸附速度快且受限於可用吸附位點的數量，主要透過物理吸附機制。

## (2) 擬二階動力學模型

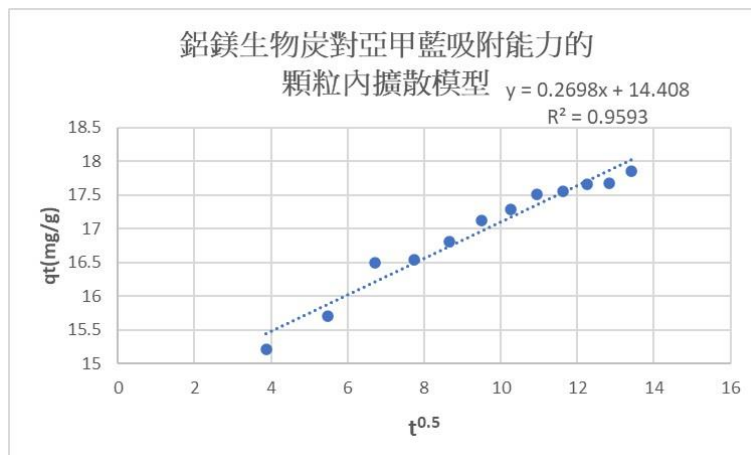


圖三十二：擬二階動力學模型(鋁鎂生物炭對亞甲基藍)

(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

擬二階動力學模型的擬合度接近完美( $R^2=0.9997$ )，說明鋁鎂生物炭吸附亞甲基藍的整體過程主要由化學吸附機制所主導。

## (3) 顆粒內擴散模型

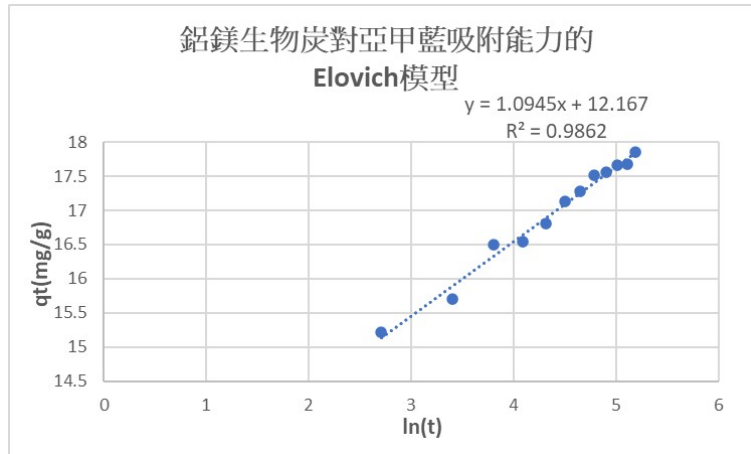


圖三十三：顆粒內擴散模型(鋁鎂生物炭對亞甲基藍)

(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

顆粒內擴散模型擬合度較高，說明顆粒內部的擴散過程在吸附中扮演重要角色。然而，擬合曲線也不過原點，表示吸附並非完全由顆粒內擴散所控制，存在其他速率限制因素。

#### (4) Elovich 模型



圖三十四：Elovich 模型(鋁鎂生物炭對亞甲基藍)  
(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

Elovich 模型擬合效果良好，說明吸附過程中表面活性位點逐漸被佔據而趨於飽和。此模型反映出吸附表面存在非均勻的能量分布特性，且吸附主要屬於化學吸附，表明不同活性位點對吸附分子的親和力不盡相同，導致吸附速率隨時間逐步減緩。

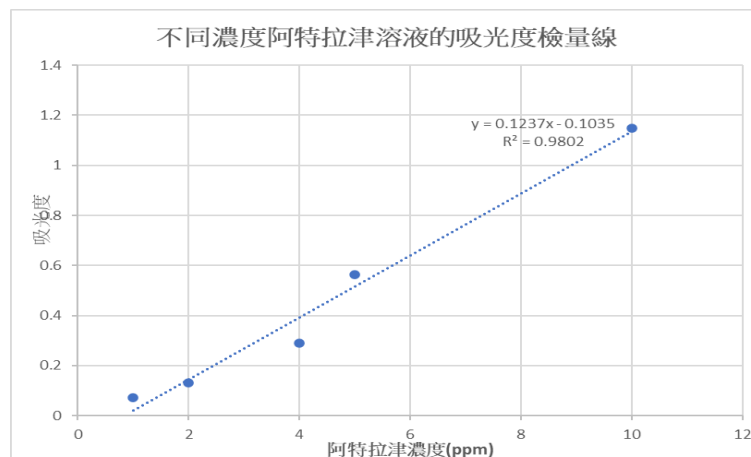
模型	擬合度(R <sup>2</sup> )	主導步驟
擬一階	0.9877	初期物理吸附快速
<b>擬二階</b>	<b>0.9997</b>	<b>主要為化學吸附</b>
顆粒內擴散	0.9593	參與，非唯一速率限制因素
Elovich	0.9862	表面活性位點逐漸飽和，屬化學吸附

表四：鋁鎂生物炭對亞甲基藍的吸附動力學模型綜合比較 (由作者拍攝或繪製)

鋁鎂生物炭對亞甲基藍的吸附過程以化學吸附為主，輔以顆粒內擴散，且存在活性位點逐步飽和現象。這與 LDHs 中正電層與多孔吸附區的協同作用密切相關，顯示其在亞甲基藍染料污染處理中的良好應用潛力。

#### (三) 鋁鎂生物炭對阿特拉津的吸附能力

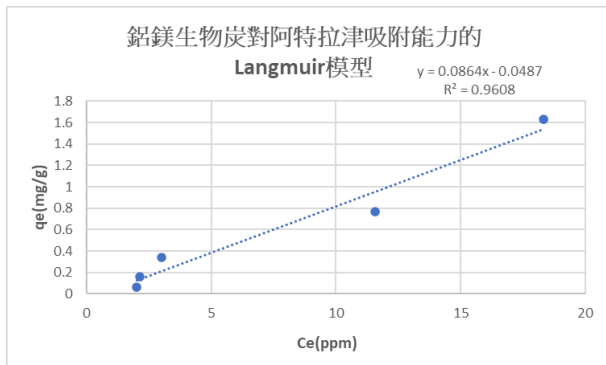
##### 1. 繪製阿特拉津檢量線(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)



圖三十五：不同濃度阿特拉津溶液中的鉬酸藍對 225nm 光的吸收度

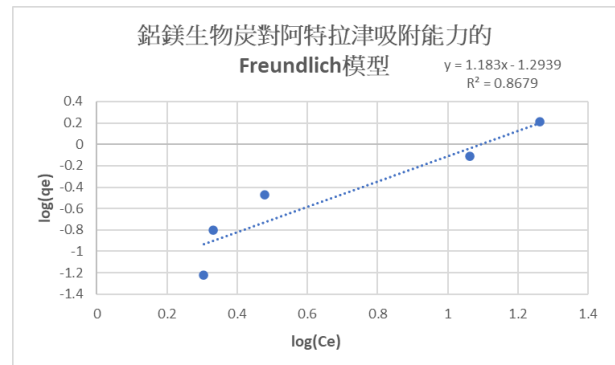
利用數據(五重複)得出直線方程式  $y=0.1237x-0.1035$  ( $R^2=0.9802$ ), 可以利用溶液在波長 225nm 的吸光度倒推阿特拉津濃度, 協助後續實驗溶液中阿特拉津濃度的計算。

## 2. 等溫吸附曲線:(三重複) (此照片或圖片由作者拍攝或繪製)



圖三十六：Langmuir 模型  
(鋁鎂生物炭對阿特拉津)

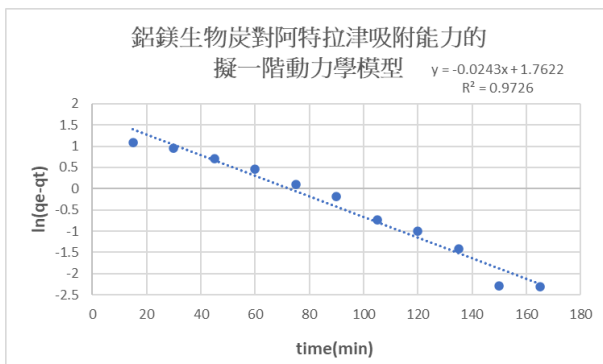
$R^2=0.9608$  顯示阿特拉津在鋁鎂生物炭表面的吸附行為非常接近理想的單分子層吸附模式。



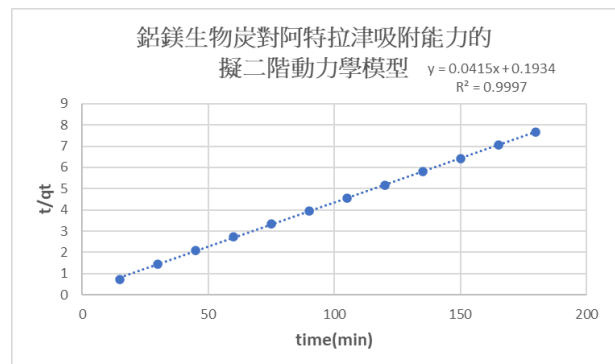
圖三十七：Freundlich 模型  
(鋁鎂生物炭對阿特拉津)

$R^2 = 0.8679$  略低於 Langmuir 模型, 整體吸附行為仍以單分子層吸附為主, 多層吸附或表面非均質性對吸附過程的影響較為有限。

## 3. 吸附動力學: (三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)



圖三十八：擬一階動力學模型  
(鋁鎂生物炭對阿特拉津)

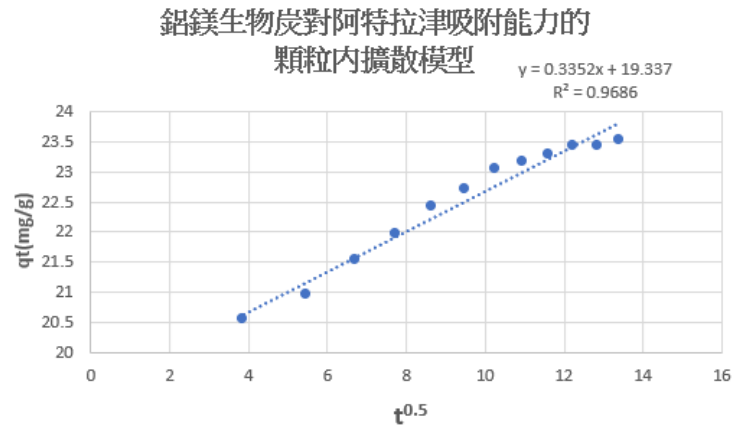


圖三十九：擬二階動力學模型  
(鋁鎂生物炭對阿特拉津)

擬二階模型幾乎完美擬合( $R^2=0.9997$ ), 代表以化學吸附機制為主, 與 LDHs 主要吸附機制相符, 說明材料的結構特性直接促進了吸附反應的發生。模型預測吸附平衡容量為 24.1 mg/g, 明顯高於擬一階模型預測值 5.83 mg/g, 顯示擬二階模型更能反映真實吸附歷程。



### (3) 顆粒內吸附模型

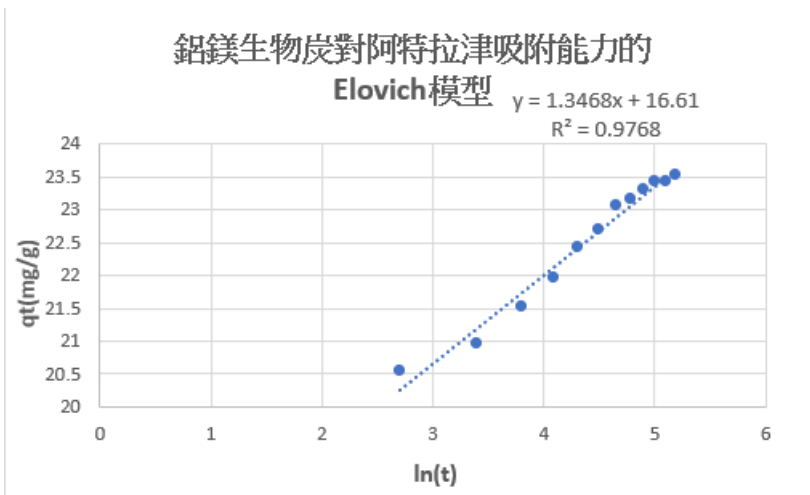


圖四十：顆粒內吸附模型(鋁鎂生物炭對阿特拉津)

(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

顆粒內擴散參與吸附過程且擬合良好，但截距不為零，表示內擴散非唯一控制步驟，吸附初期可能同時受表面擴散等機制影響。

### (4) Elovich 模型



圖四十一：Elovich 模型(鋁鎂生物炭對阿特拉津)

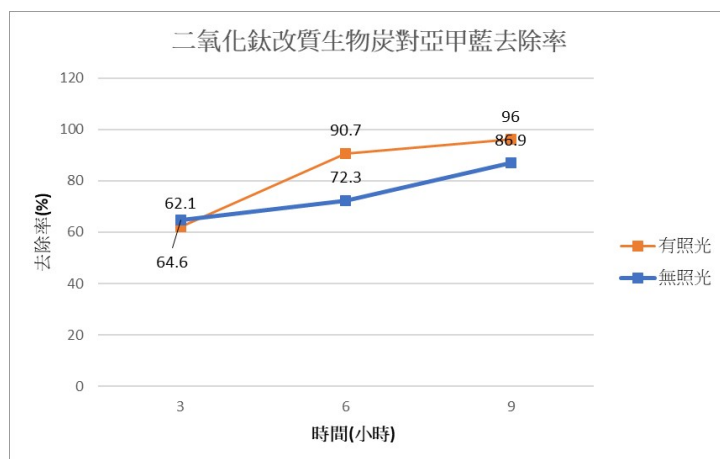
(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

支持吸附過程為化學吸附，也反映出反應速率因活性位點的變化而逐步減緩。

模型	擬合度( $R^2$ )	主導步驟
擬一階	0.9726	較弱擬合（物理吸附）
<b>擬二階</b>	<b>0.9997</b>	<b>主導（化學吸附）</b>
顆粒內擴散	0.9686	參與但非控制步驟
Elovich	0.9768	次佳擬合（表面活化）

表四：鋁鎂生物炭對阿特拉津的吸附動力學模型綜合比較（由作者拍攝或繪製）

### （三）評估鋁鎂生物炭負載 $\text{TiO}_2$ 後，對亞甲基藍及阿特拉津的光催化降解能力



圖四十二：二氧化鈦改質鋁鎂生物炭對亞甲藍去除率

(三重複)(此照片或圖片由作者拍攝或繪製)

從實驗結果來看， $\text{TiO}_2$  改質鋁鎂生物炭在有光和無光條件下都能有效去除亞甲藍，這說明該材料除了本身具備不錯的吸附能力。在有光照的情況下，去除速度明顯較快。在第 6 小時，有光組的去除率達到 90.7%，比無光組高出近 20%，顯示光照能激發  $\text{TiO}_2$  的光催化作用，幫助分解染料分子，也有助於釋放原本被佔據的吸附位點。

## 伍、討論

### 一、材料特性與吸附機制探討

本研究所自製的鋁鎂生物炭經由鋁、鎂金屬離子共沉澱改質後，成功形成層狀雙氫氧化物（LDHs）結構，表面帶有正電荷，能有效吸附帶負電的磷酸根離子，展現出優異的靜電吸附能力。除此之外，材料具有良好的孔隙性與高比表面積，使其亦能吸附較大的有機染料分子（亞甲藍）與疏水性農藥（阿特拉津）。從三種污染物的實驗數據來看，鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲藍及阿特拉津皆展現了明顯的去除能力，顯示其具備多重吸附機制與實際應用潛力。

### 二、濃度對吸附行為的影響

在亞甲藍吸附實驗中，將濃度區間分為低濃度（<100 ppm）與高濃度（>100 ppm）進行分析，發現兩者吸附行為明顯不同。低濃度時，鋁鎂生物炭表面活性位點相對充足，吸附過程接近單分子層吸附，與 Langmuir 模型相符；而高濃度時，吸附位點逐漸飽和，染料分子間可能產生競爭與堆疊，使得吸附機制變得更為複雜。這種濃度依賴性的吸附特性說明，未來在實際水體應用中應考慮原水濃度，進一步調整材料投加量或處理方式。

## 陸、結論

### 一、改質鋁鎂生物炭並觀察其結構

本研究透過共沉澱法將鋁與鎂改質至生物炭表面，成功生成具層狀結構的雙氫氧化物(LDHs)，這樣的改質過程提升了材料表面活性與孔隙性，也讓整體結構更有利於後續吸附進行。

### 二、評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力

#### (一) 磷酸根的吸附能力

等溫吸附結果顯示，Langmuir 與 Freundlich 吸附等溫線模型對鋁鎂改質生物炭吸附磷酸根之行為進行分析，結果顯示兩者皆具有極佳的線性擬合度，代表模型對實驗數據具良好描述能力。Freundlich 模型所得之  $1/n > 1$  顯示此系統於高濃度條件下吸附行為趨於飽和，反映出吸附位能分佈異質性不顯著，吸附位點使用接近飽和狀態。綜合判斷，鋁鎂改質生物炭對磷酸根離子具有明顯吸附能力，但吸附效率於高濃度時將因表面活性位點受限而降低，整體行為符合 Langmuir 單層吸附機構特徵。

動力學擬合結果顯示，擬二階動力學模型的擬合效果 ( $R^2=0.92$ ) 明顯高於其他模型，表明磷酸根的吸附過程主要由化學吸附控制。擬一階動力學模型則是反映吸附過程包含初期快速表面物理吸附，但整體吸附速率仍以化學吸附為主。相比之下，Elovich 模型 ( $R^2=0.46$ ) 及顆粒內擴散模型 ( $R^2=0.6$ ) 的擬合效果較弱，顯示雖然吸附過程中存在活化能不均勻性及多階段傳質(內部擴散)現象，但這些因素並非吸附速率的主要限制。本研究證實生物炭-鋁鎂層狀氫氧化物對磷酸根的吸附過程以化學吸附為主，顆粒內擴散及活化能不均勻性則為輔助機制。在動力吸附實驗中，磷酸根去除率在 180 分鐘內達 94.8%。

#### (二) 亞甲基藍的吸附能力

根據 Freundlich 模型分析，鋁鎂生物炭在 100 ppm 以下對亞甲基藍的吸附屬於不利吸附 ( $1/n > 1$ )，推測為表面活性位點尚未飽和或親和性不足；而在高濃度 ( $>100$  ppm) 時，吸附行為轉為有利吸附 ( $1/n=0.3292 < 1$ )，顯示材料可在高濃度下有效吸附亞甲基藍。整體而言，Freundlich 模型可良好描述其多層、異質表面吸附行為，特別是在高濃度條件下。

根據 Langmuir 模型分析，鋁鎂生物炭對亞甲基藍的最大單層吸附量由低濃度 ( $<100$  ppm) 時的 3.44 mg/g 大幅提升至高濃度 ( $>100$  ppm) 時的 67.11 mg/g，顯示材料在高濃度環境中具有更強的吸附潛力與持續吸附能力。兩區段的亦表明單層吸附行為仍為主要控制機構，但吸附容量明顯受濃度提升影響。

動力學擬合結果顯示，擬二階模型以最高決定係數 ( $R^2=0.99$ ) 最佳描述吸附過程，表明吸附機制以化學吸附為主。Elovich 模型 ( $R^2=0.98$ ) 亦能很好地擬合吸附數據，反映吸附過程中存

在活化能不均勻性，吸附速率隨時間呈非線性下降，說明吸附位點的多樣性及化學吸附活化能的變化。顆粒內擴散模型 ( $R^2=0.95$ ) 的良好擬合表明，亞甲藍分子在複合材料多孔結構中的擴散過程是吸附速率的重要限制步驟，吸附過程可分為初期快速表面吸附及後期較緩慢的內部擴散階段。擬一級模型 ( $R^2=0.98$ ) 亦有不錯的擬合效果，反映吸附初期可能存在部分物理吸附過程。整體而言，擬二階及 Elovich 模型更能全面描述吸附動力學特性。在動力吸附實驗中，亞甲藍去除率在 180 分鐘內達 89.3%。

### (三) 阿特拉津的吸附能力

等溫吸附結果顯示，鋁鎂生物炭對阿特拉津的吸附行為較符合 Langmuir 單層吸附模型 ( $R^2=0.9608$ )，其最大理論吸附容量為 11.57 mg/g。Freundlich 模型擬合度較低 ( $R^2=0.8679$ )，且  $1/n > 1$  顯示吸附趨勢不利，推測鋁鎂生物炭表面結構較為均勻，主要透過單層表面吸附完成阿特拉津去除。

動力學擬合結果顯示，擬二級模型以最高決定係數 ( $R^2=0.99$ ) 最佳描述吸附過程，表明吸附過程以化學吸附為主。同時，Elovich 模型 ( $R^2=0.97$ ) 擬合效果良好，反映吸附速率隨時間呈非線性下降，說明吸附位點活化能不均勻，吸附過程具有化學吸附的活化能分布特性。顆粒內擴散模型 ( $R^2=0.96$ ) 亦能有效描述吸附過程中阿特拉津分子在複合材料孔隙中的擴散，顯示吸附速率受多階段傳質限制。擬一級模型 ( $R^2=0.97$ ) 對吸附初期階段亦有一定描述能力，反映部分物理吸附或初期吸附速率特性，但整體動力學過程更適合用擬二級模型及 Elovich 模型來解釋。本研究確認生物炭-鋁鎂層狀氫氧化物對阿特拉津的吸附主要由化學吸附與離子交換主導，並輔以物理吸附和孔隙內擴散的多重機制。在動力吸附實驗中，阿特拉津去除率在 180 分鐘內達 94.1%。

### 三、評估鋁鎂生物炭負載 $\text{TiO}_2$ 後，對亞甲基藍及阿特拉津的光催化降解能力

鋁鎂生物炭在負載  $\text{TiO}_2$  後，在光照條件下對亞甲基藍與阿特拉津的去除效率明顯提升。以亞甲藍為例，6 小時內有光照組的去除率達 90.7%，相較無光照組僅 72.3%，提升幅度超過 25%，顯示光催化反應能加速染料分解並再生吸附位點。阿特拉津在光照下也呈現較快的去除速率，說明  $\text{TiO}_2$  負載能有效應用於多種有機污染物的降解。整體而言，鋁鎂生物炭在吸附基礎上加入  $\text{TiO}_2$ ，使材料同時具備吸附與光催化雙重功能，能在照光條件下持續分解污染物、延長材料效能，提升在實際廢水處理中的應用價值。

## 柒、參考文獻資料

1. 李中光 & 萬能科技大學環境工程系 (2013)。層狀複金屬氧化物(LDHs)作為陰離子捕獲劑之應用。環保技術與法規資訊電子報, 104。  
<https://proj.ftis.org.tw/eta/epaper/PDF/ti104-2.pdf>
2. 王文裕、顧洋 (2005)。二氧化鈦可見光光觸媒的發展。界面科學會誌, 27(2), 111-121。  
<https://doi.org/10.30020/JCCIS.200506.0003>
3. Adamčíková, L., Pavlíková, K., & Ševčík, P. (2000). The Decay of Methylene Blue in Alkaline Solution. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 69(1), 91 - 94.  
<https://doi.org/10.1023/a:1005696926749>
4. 曾冠銘 (2022)。不同表面處理生物炭對磷酸鹽吸附行為之影響〔碩士論文，國立屏東科技大學〕。華藝線上圖書館。<https://doi.org/10.6346/NPUST202200410>
5. 洪文強、鄭慈儀、邱求三 (2012)。合成具雙金屬 (鈣／鋁) 之磁性顆粒以吸附水溶液中磷酸鹽。國立宜蘭大學工程學刊, (8), 42-60。  
<https://doi.org/10.6176/BCE.2012.08.14>
6. Hsuen, H. K. (2000). A Non-Driving-Force Approximation for Intraparticle Diffusion and Reaction. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 31(4), 423-427.  
<https://doi.org/10.6967/JCICE.200007.0423>
7. 亞甲基藍結構網址 <https://www.sigmaaldrich.com/TW/zh/product/sial/77515>
8. 阿特拉津結構網址 <https://www.sigmaaldrich.com/TW/zh/product/supelco/49085>

## 【評語】 052208

本研究針對水體污染問題，探索鋁鎂生物炭的多功能應用，尤其是在吸附和光催化方面，這對於環境保護和水質改善具有重要意義。通過鋁和鎂的共沉澱反應形成層狀雙氫氧化物(LDHs)，展示了材料改質的創新思路，這一方法有效提升了生物炭的吸附能力。鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍和阿特拉津的去除率分別達到 94.8%、89.3%和 94.1%，顯示出優異的吸附能力。吸附動力學分析顯示，鋁鎂生物炭的吸附行為符合擬二階模型，主要以化學作用為主。負載  $\text{TiO}_2$  的鋁鎂生物炭在紫外光照下對亞甲基藍的去除率提升超過 50%，顯示出良好的光催化性能。

各項動力吸附學模型之公式，應附引用之文獻。阿特拉津雖不是劇毒性，但仍會影響人類健康，進行試驗時要採取防護措施，並在方法中敘述。

考慮在研究中加入對鋁鎂生物炭應用對環境可能影響的評估，以更全面地探討其可持續性和生態影響。

研究應評估鋁鎂生物炭在長期使用過程中的性能變化及再生能力，這對於實際應用至關重要。

本研究以材料改質技術提高生物炭之表面吸附能力，並添加光觸媒物質以降解吸附之汙染物質，雖非屬新穎或創新研究，但可以同時探討動力學模式，解析其吸附乘載機制，將有利於未來場域之應用。

作品海報



The background of the image shows several small green seedlings with two leaves each, growing out of a dark, moist, and textured soil. There are small, clear water droplets on the surface of the soil, particularly around the base of the plants. The lighting is soft, highlighting the vibrant green of the plants against the dark earth.

鋁鎂生物炭的材料轉化與應用：

從離子吸附到光催化降解

的水體淨化策略

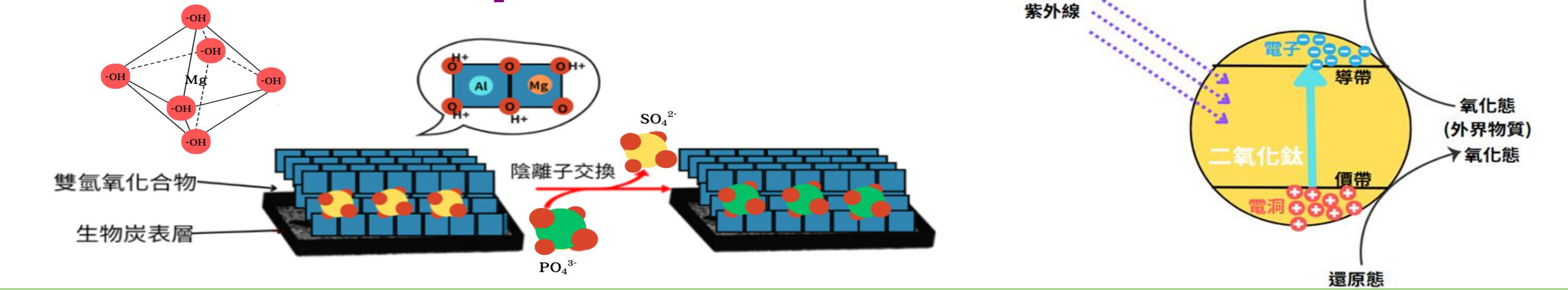


# 壹、研究動機

本研究旨在開發具多功能吸附與光催化能力的鋁鎂生物炭材料，以因應水體中磷酸根、染料與農藥等複合污染問題，提升污染物去除效率與材料再利用性，建立一套簡便、有效的多污染物處理材料系統。

# 貳、研究目的

- 一、改質鋁鎂生物炭並觀察其結構。
- 二、評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力。
- 三、評估鋁鎂生物炭負載TiO<sub>2</sub>後，對亞甲基藍的光催化降解能力。

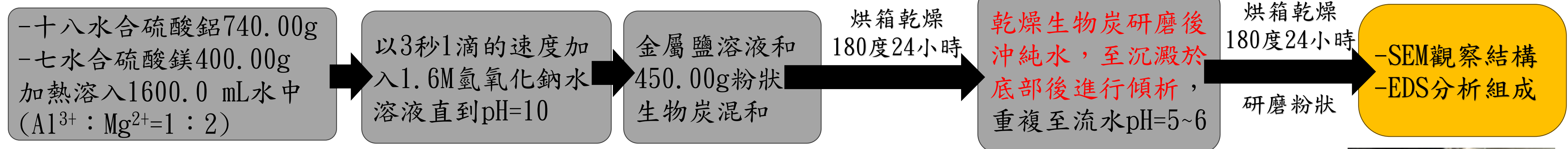


# 參、研究設備與器材

十八水合硫酸鋁	七水合硫酸鎂	氫氧化鈉	二氧化鈦前驅物(四異丙氧基鈦)	十二烷基硫酸鈉(SDS)	乙醇	乙酸	維生素C	鉬酸鉍	硫酸	二水合磷酸二氫鈉	亞甲基藍 (1000ppm)	阿特拉津	烘箱	UV-Vis分光光度計	電子顯微鏡 (SEM/EDS)

# 肆、研究過程及方法

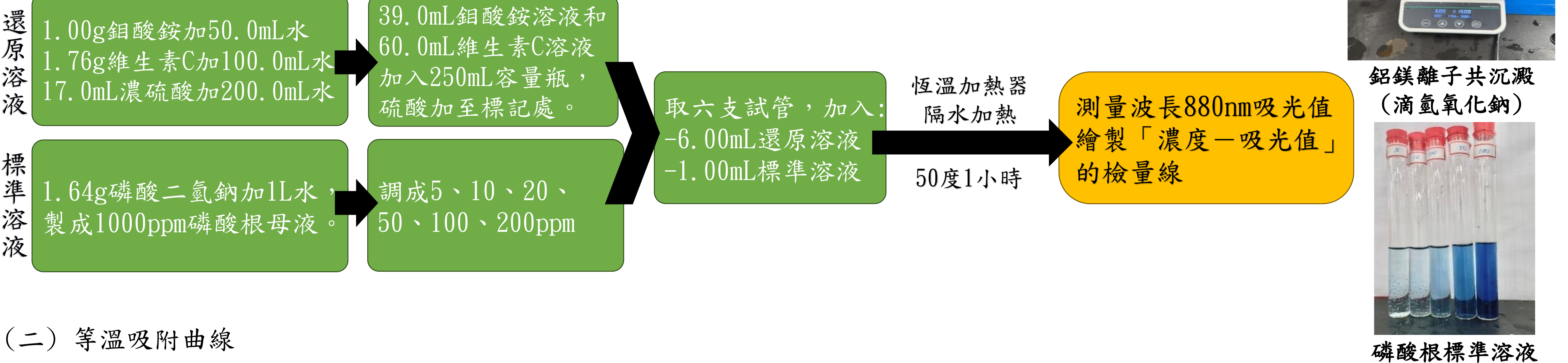
## 【實驗一】改質鋁鎂生物炭並觀察其結構



## 【實驗二】評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力

### 一、鋁鎂生物炭對磷酸根的吸附能力

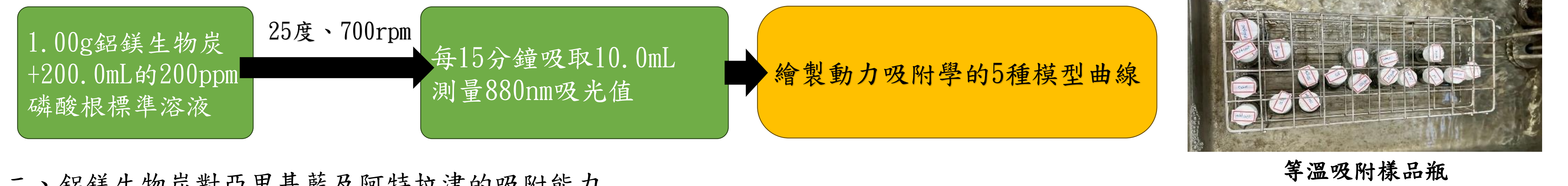
#### (一) 繪製磷酸根檢量線



#### (二) 等溫吸附曲線

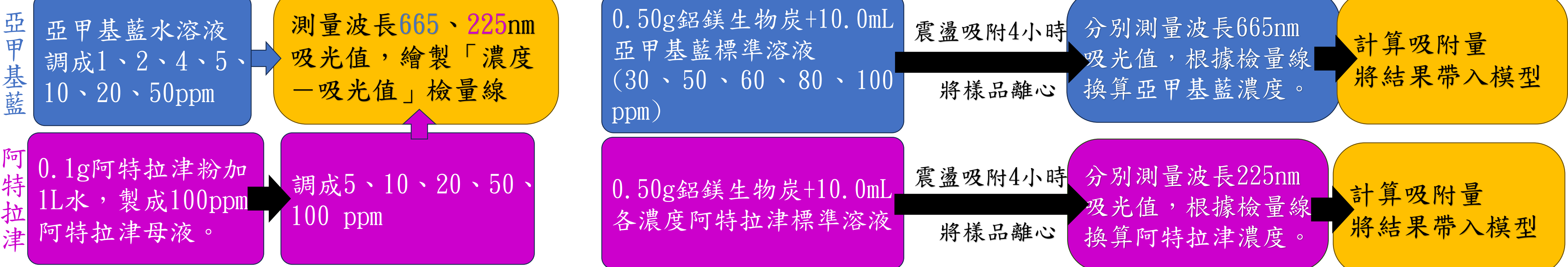


#### (三) 吸附動力學



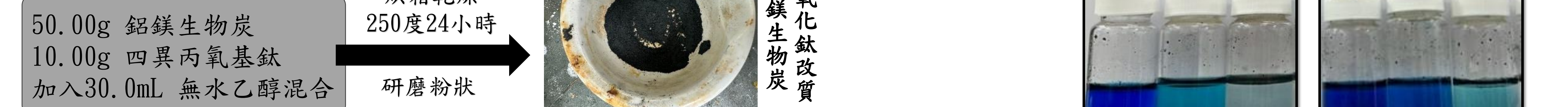
### 二、鋁鎂生物炭對亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力

#### (一)繪製檢量線



## 【實驗三】評估鋁鎂生物炭負載TiO<sub>2</sub>後，對亞甲基藍的光催化降解能力

### 一、二氧化鈦改質鋁鎂生物炭



### 二、比較二氧化鈦改質鋁鎂生物炭對亞甲基藍去除能力的影響

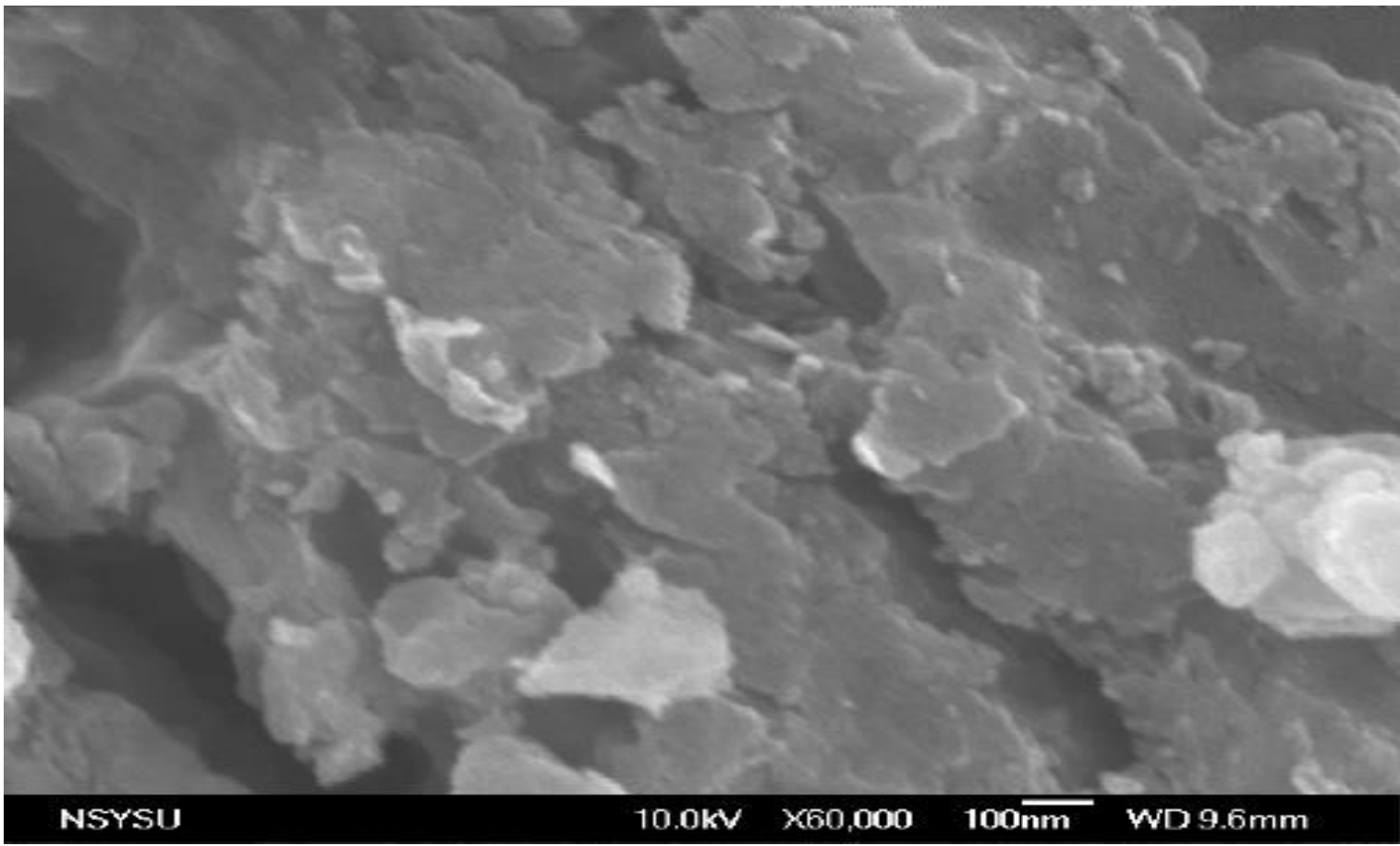




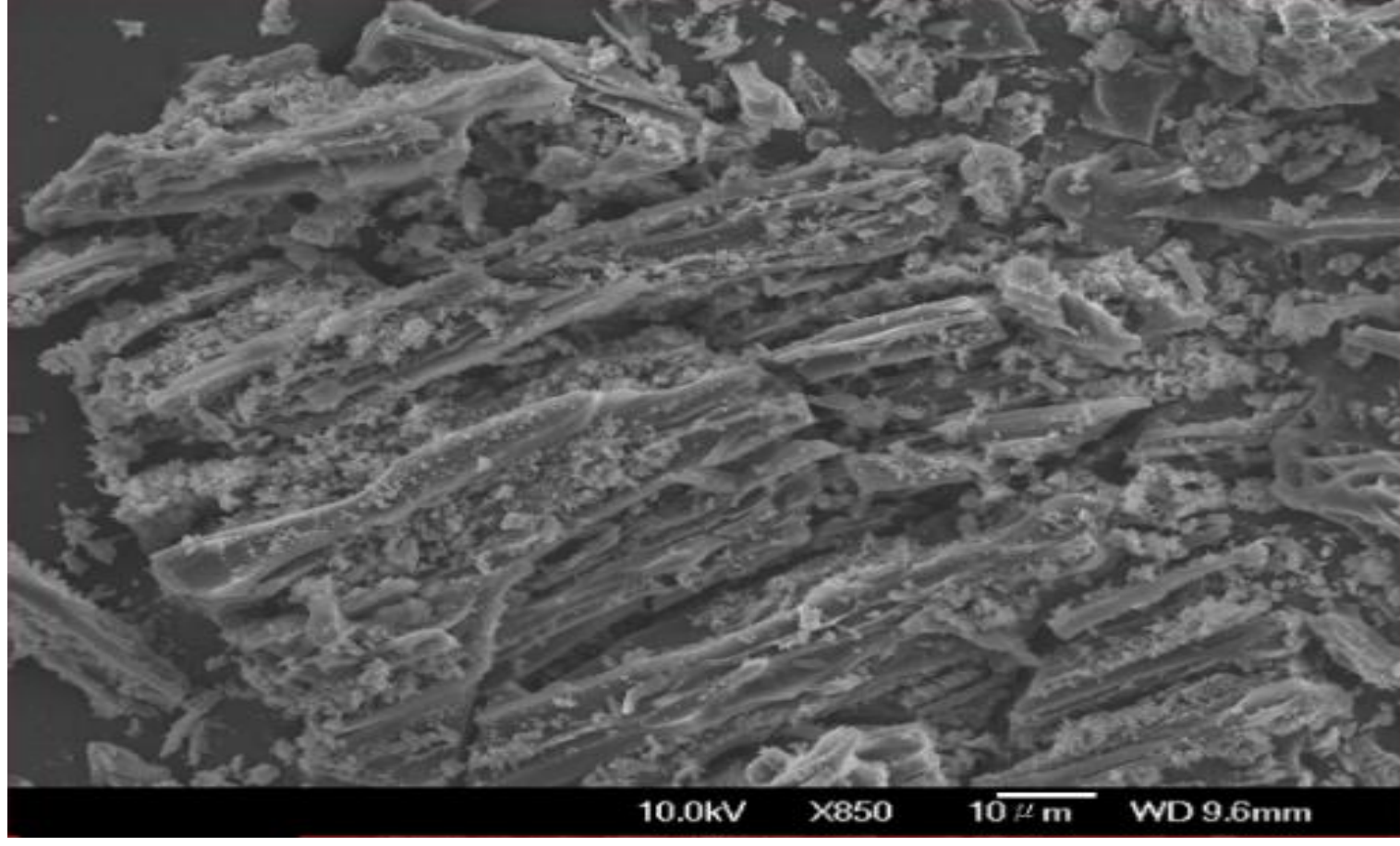
伍、研究成果

一、改質鋁鎂生物炭並觀察其結構

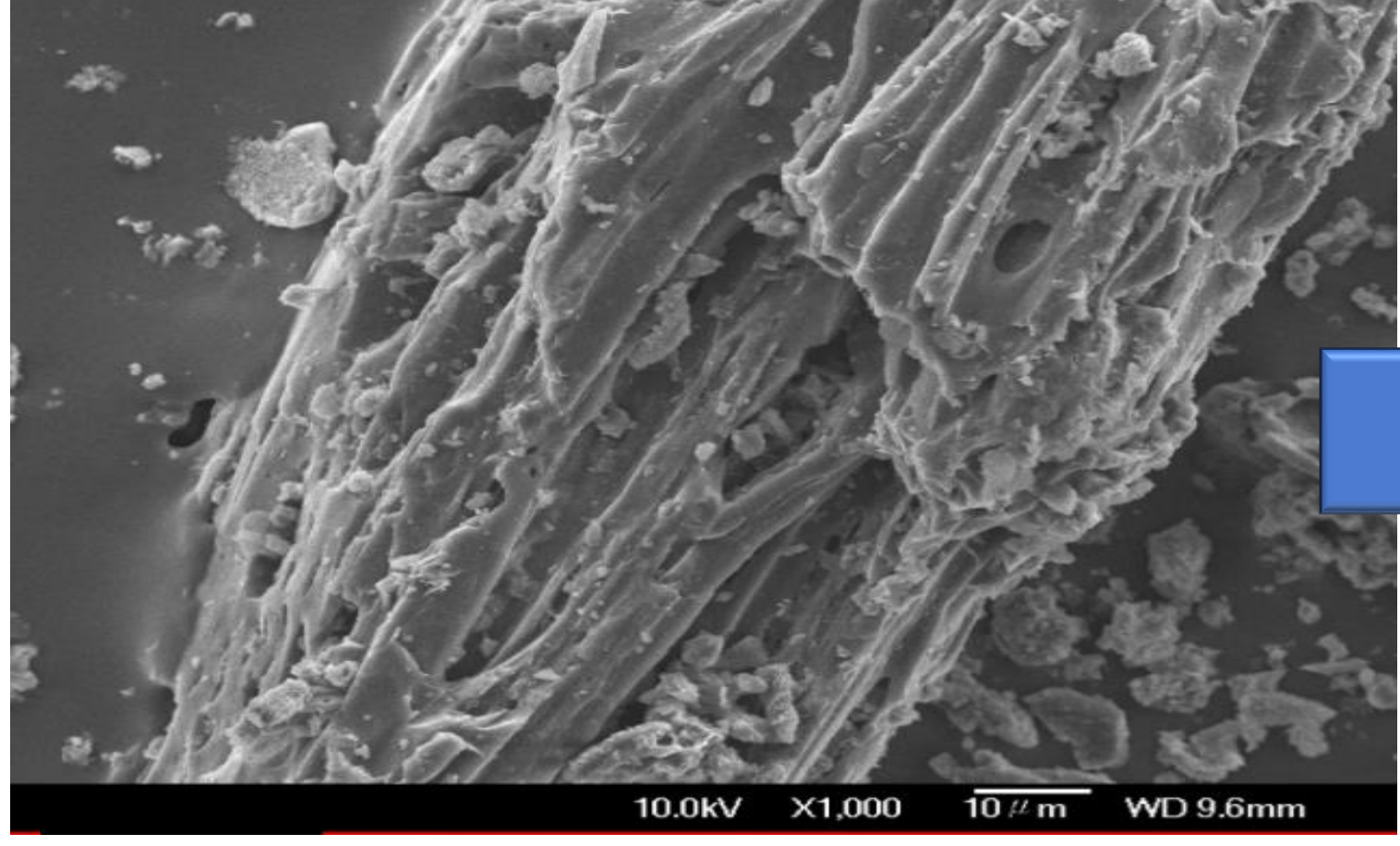
(一) SEM



原生物炭



鋁鎂生物炭



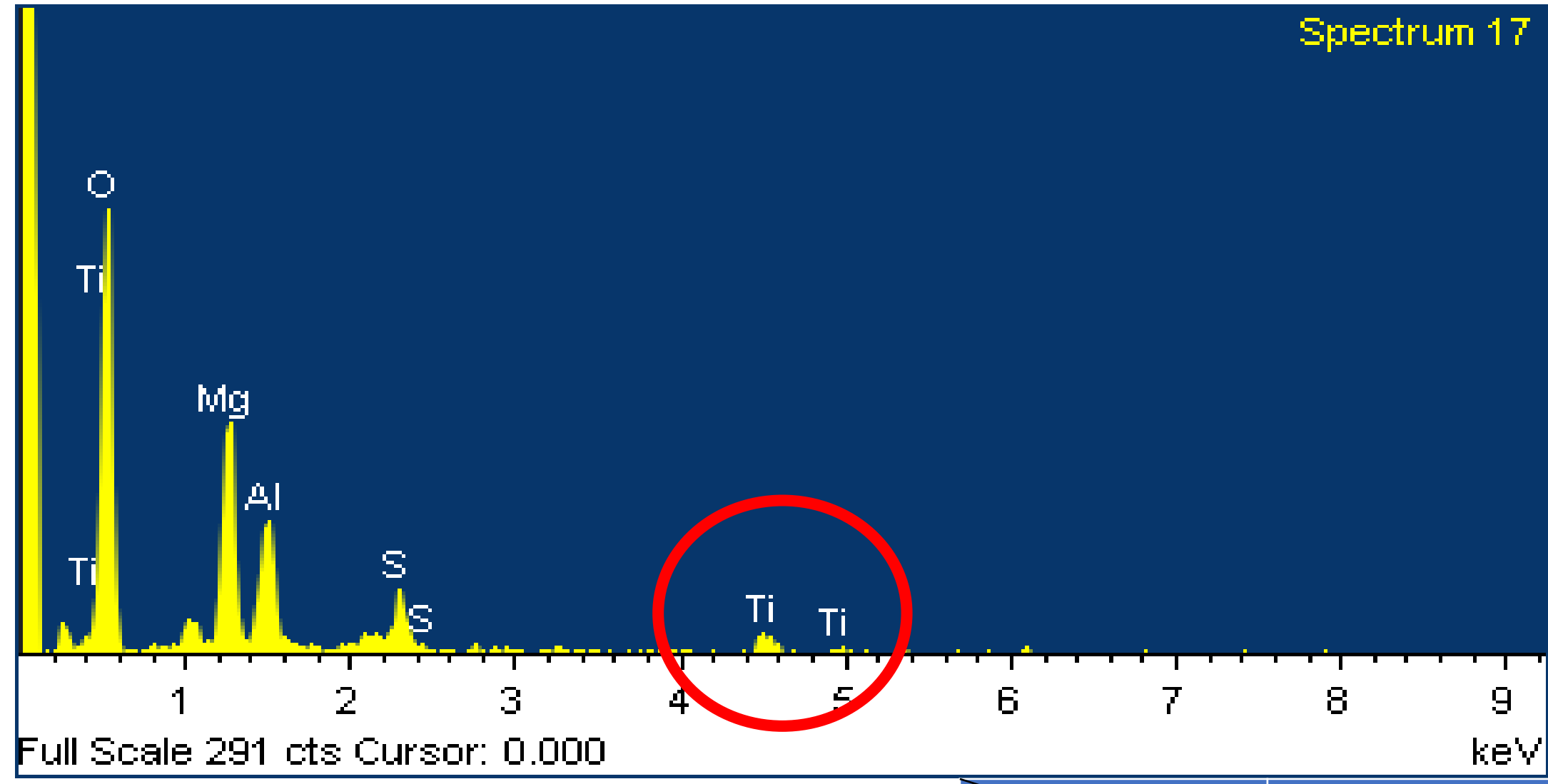
二氧化鈦改質鋁鎂生物炭

改質後的生物炭表面出現層狀結構

(二) EDS

鋁鎂生物炭(二氧化鈦改質)

Element	Weight%	Atomic%	
O K	58.59	72.29	
Mg K	16.04	13.03	
Al K	9.61	7.03	
S K	5.73	3.53	
Ti K	10.02	4.13	
Totals	100.00		



成功在生物炭表面附載鋁、鎂、氧及鈦元素

- 鋁鎂占比約2:1
- 鈦元素占比達4.13%

二、評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力

(一) 等溫吸附曲線

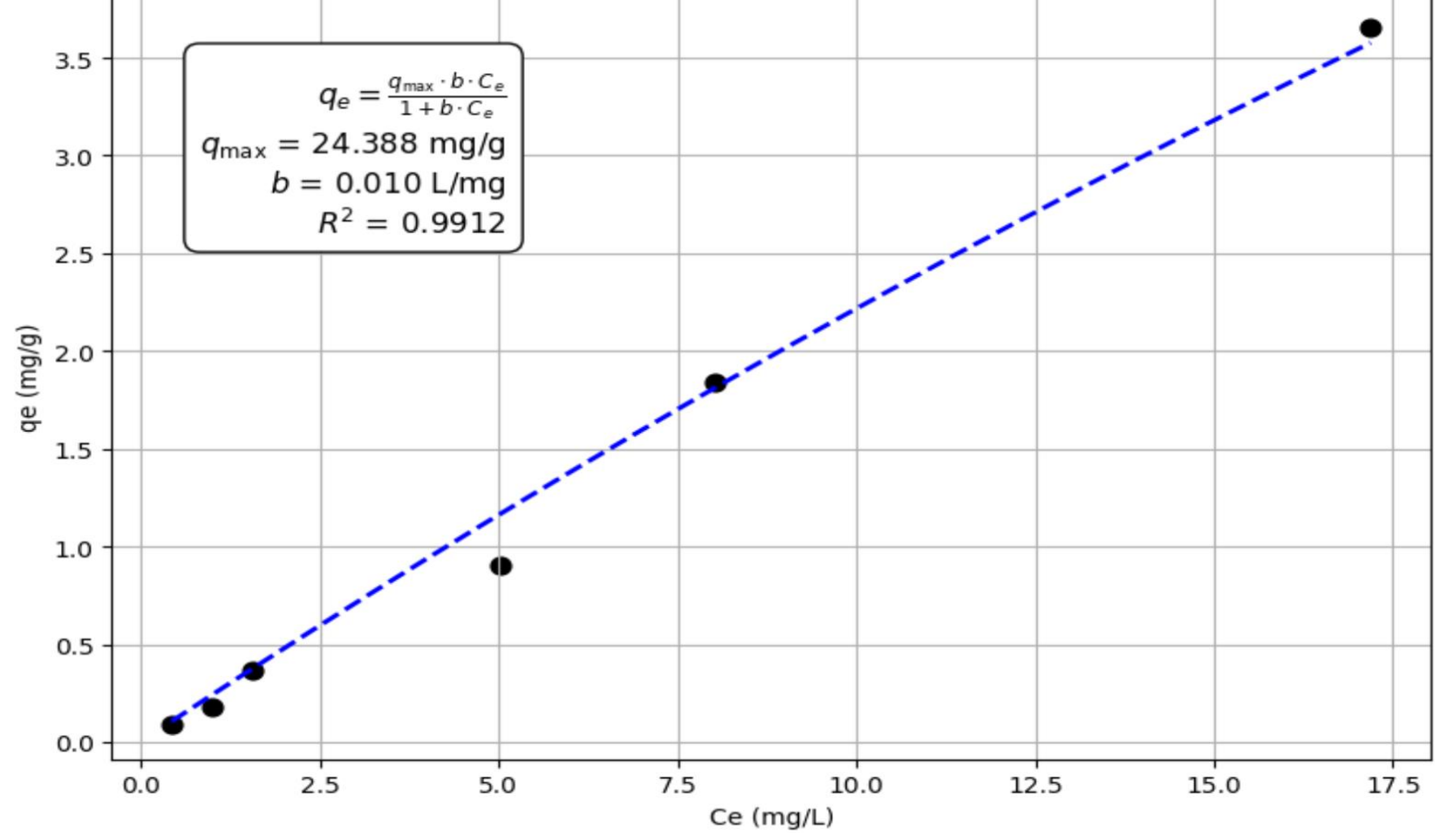
1. Langmuir模型

$$qe = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$$

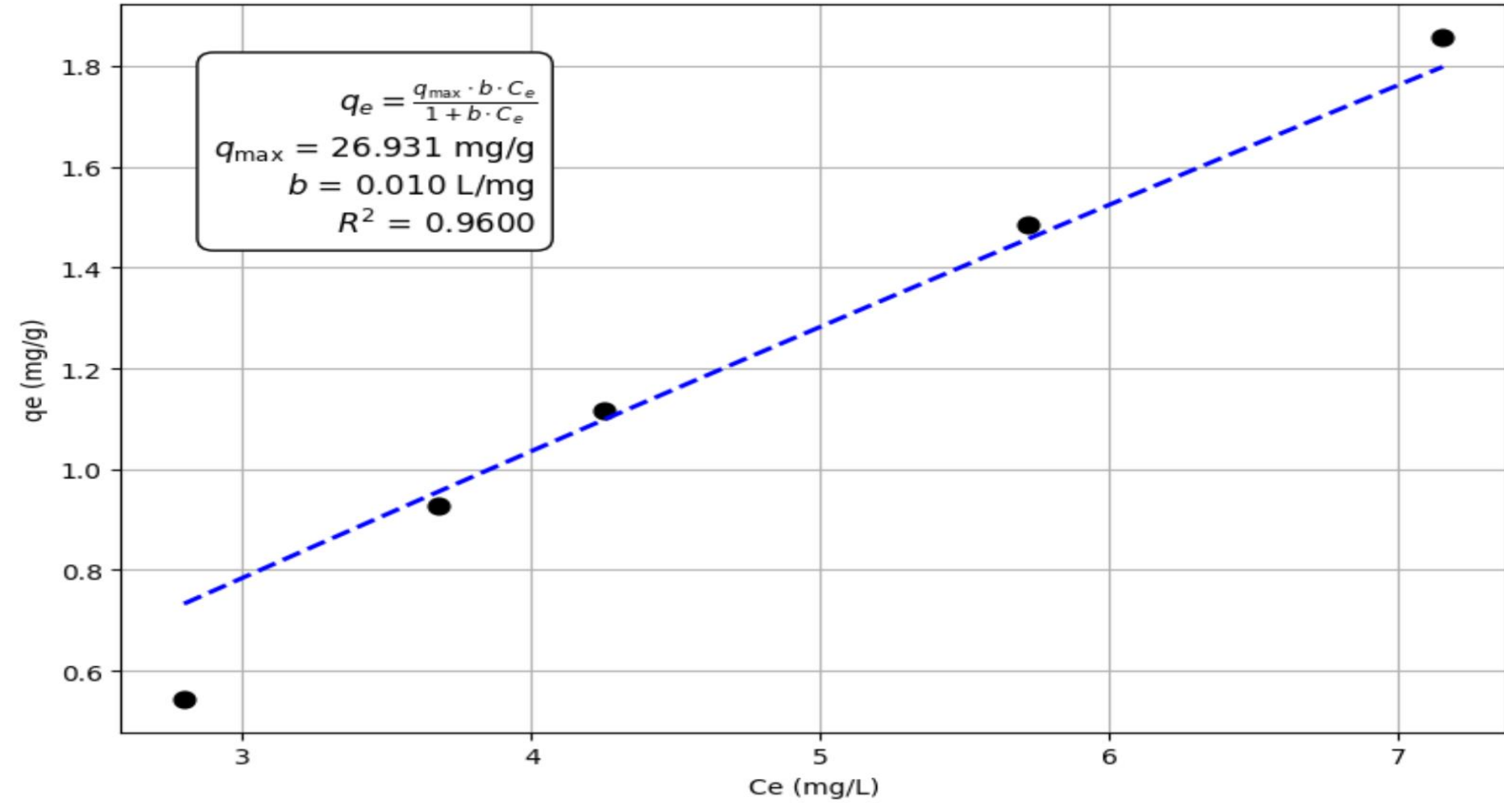
	$Q_{max}$	$R^2$
磷酸根	24.388	0.9912
亞甲藍	26.931	0.9600
阿特拉津	9.526	0.9420

$R^2$ 皆大於0.9  
→擬和度良好  
磷酸根及亞甲藍的最大吸附量優異

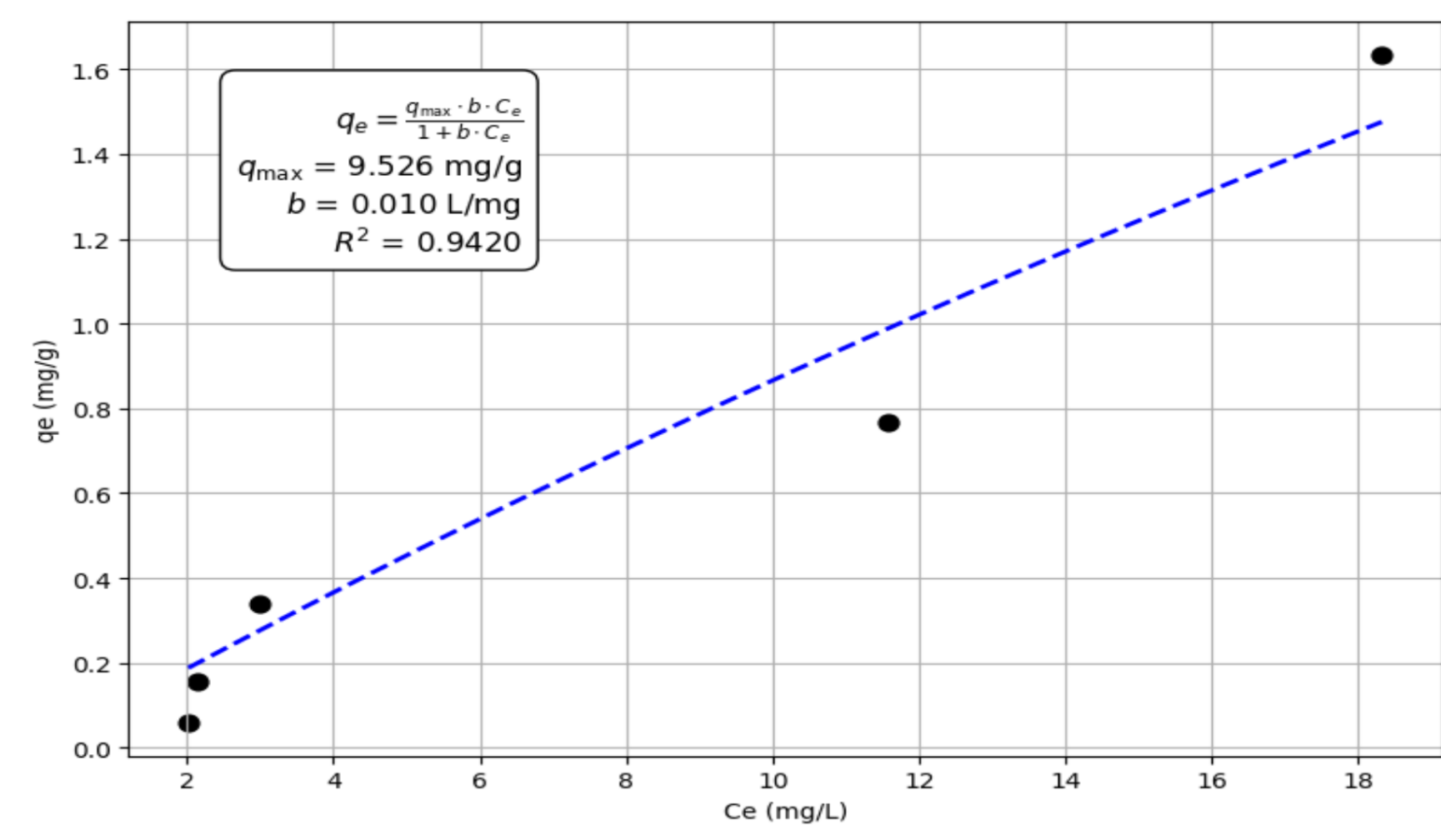
鋁鎂生物炭對磷酸根吸附能力的Langmuir模型



鋁鎂生物炭對亞甲藍吸附能力的Langmuir模型

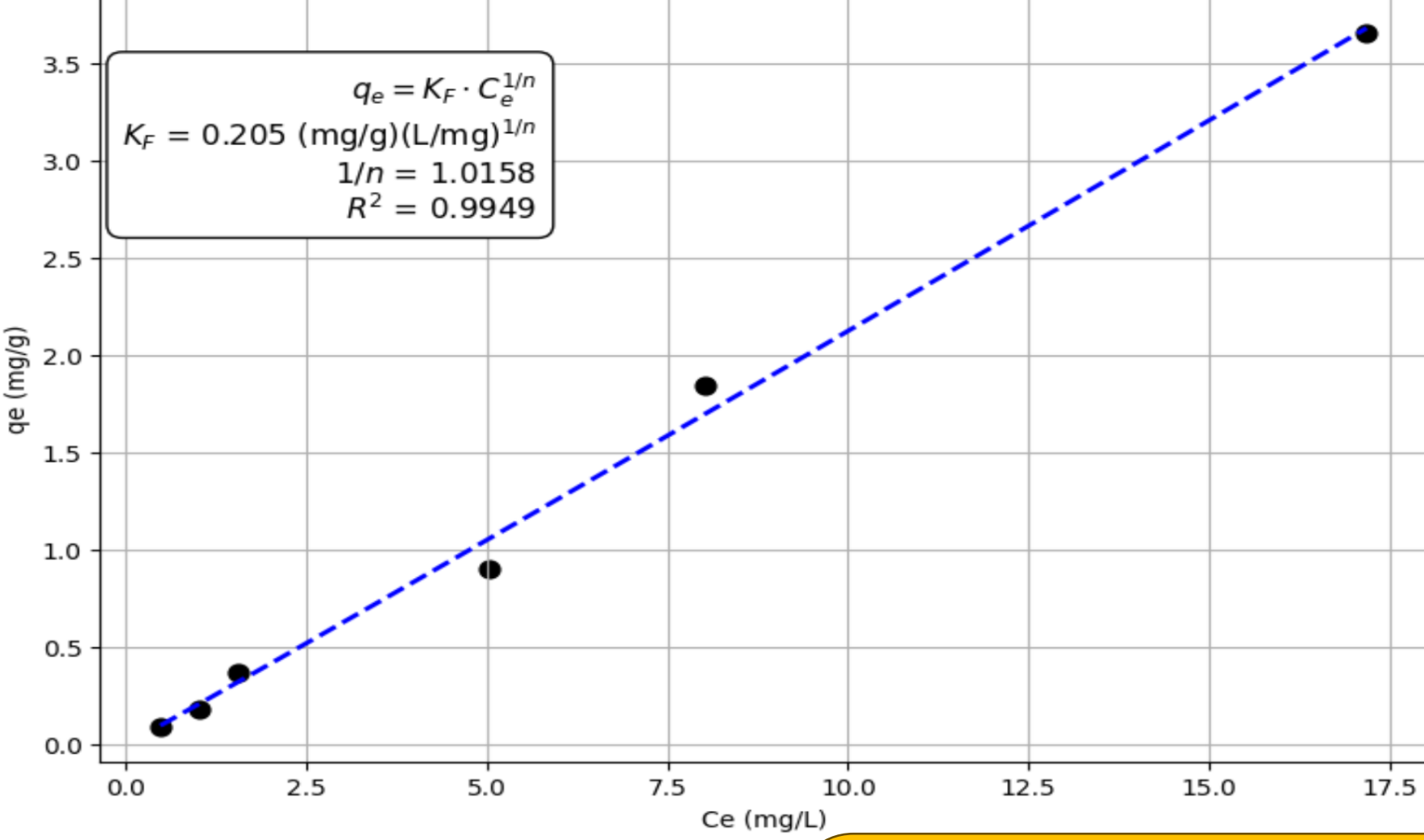


鋁鎂生物炭對阿特拉津吸附能力的Langmuir模型

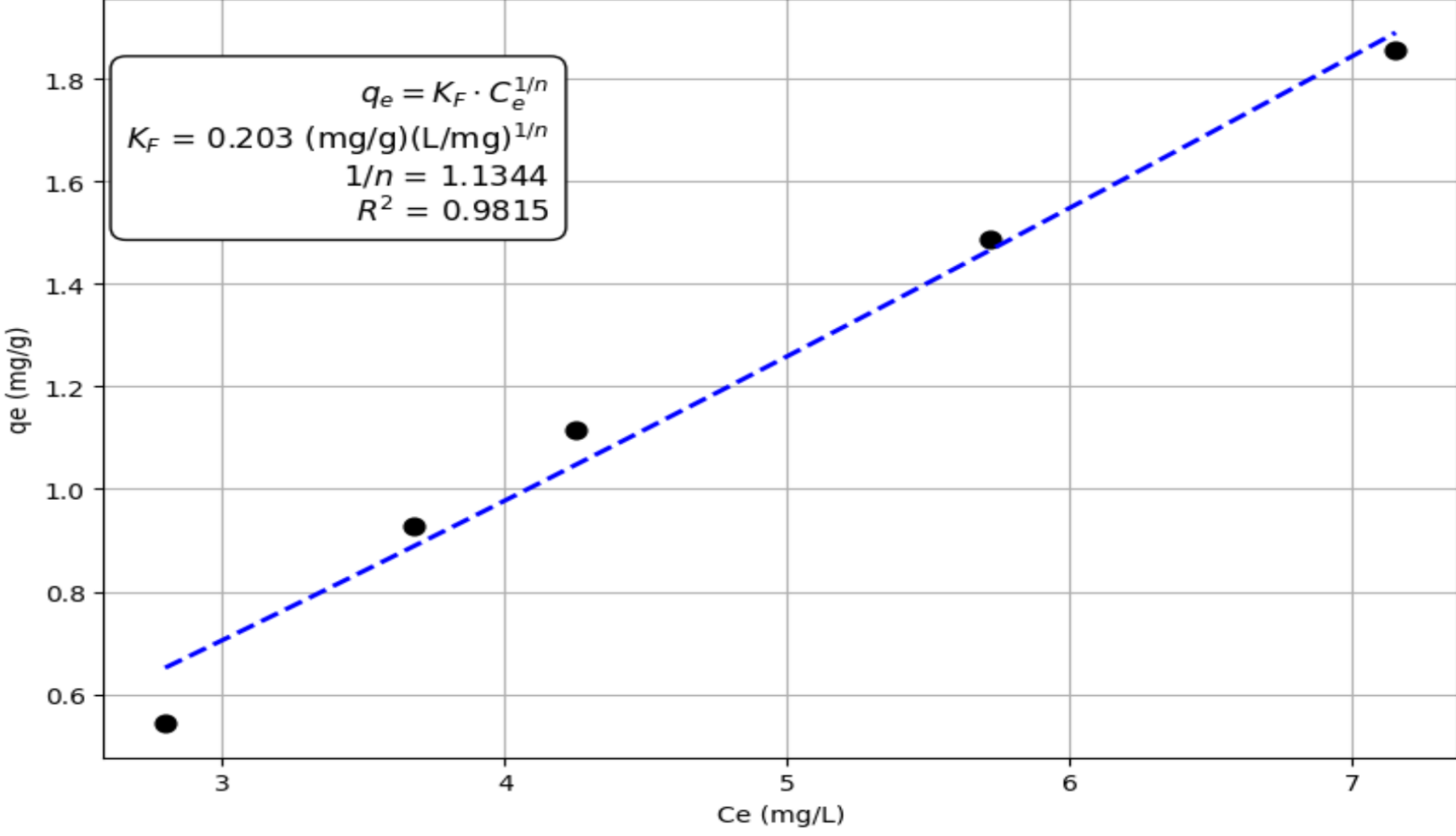


2. Freundlich模型

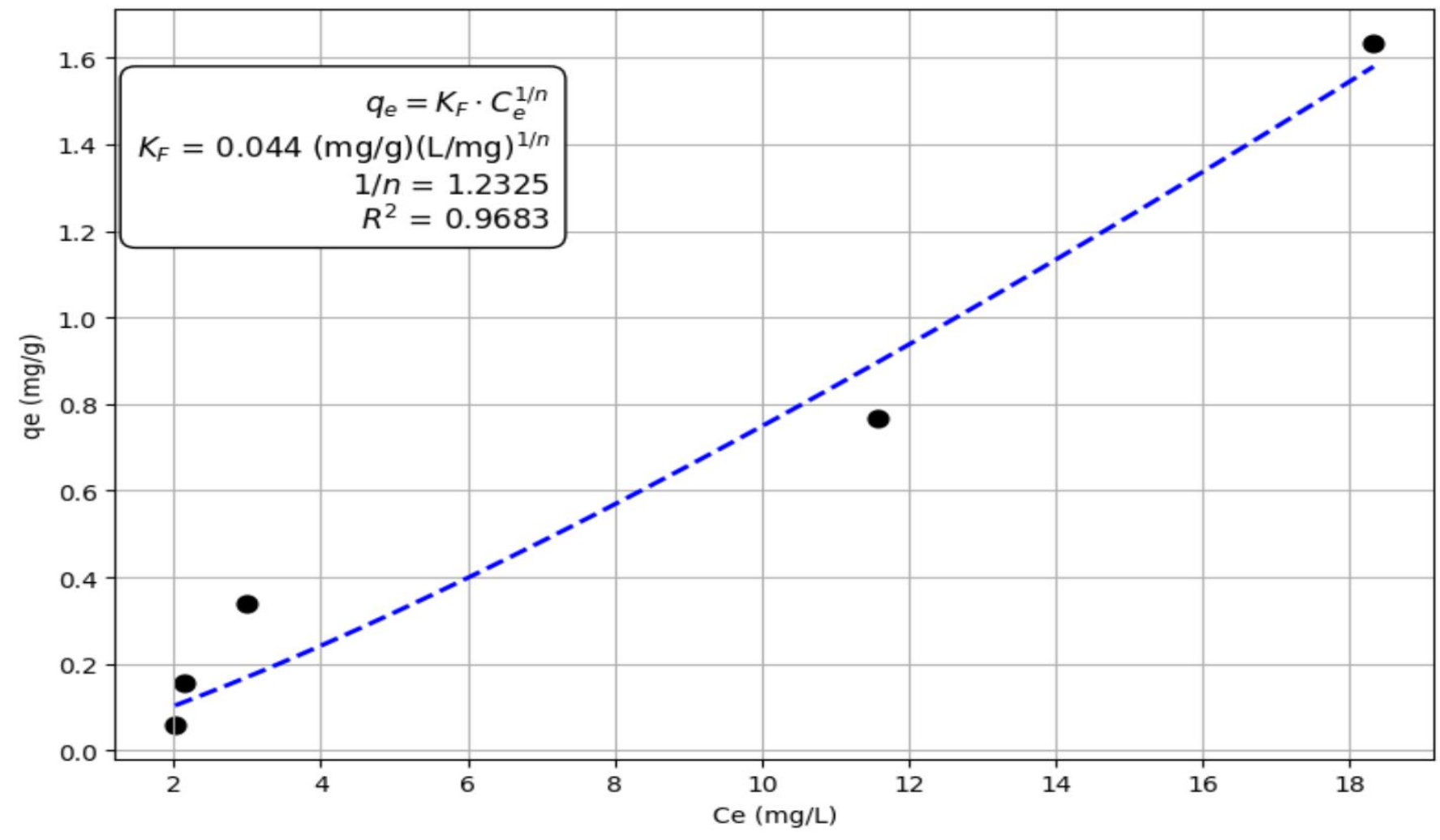
鋁鎂生物炭對磷酸根吸附能力的Freundlich模型



鋁鎂生物炭對亞甲藍吸附能力的Freundlich模型



鋁鎂生物炭對阿特拉津吸附能力的Freundlich模型



(二) 吸附動力學

1. 擬一階動力學模型

擬二階模型之 $R^2$ 大於擬一階模型

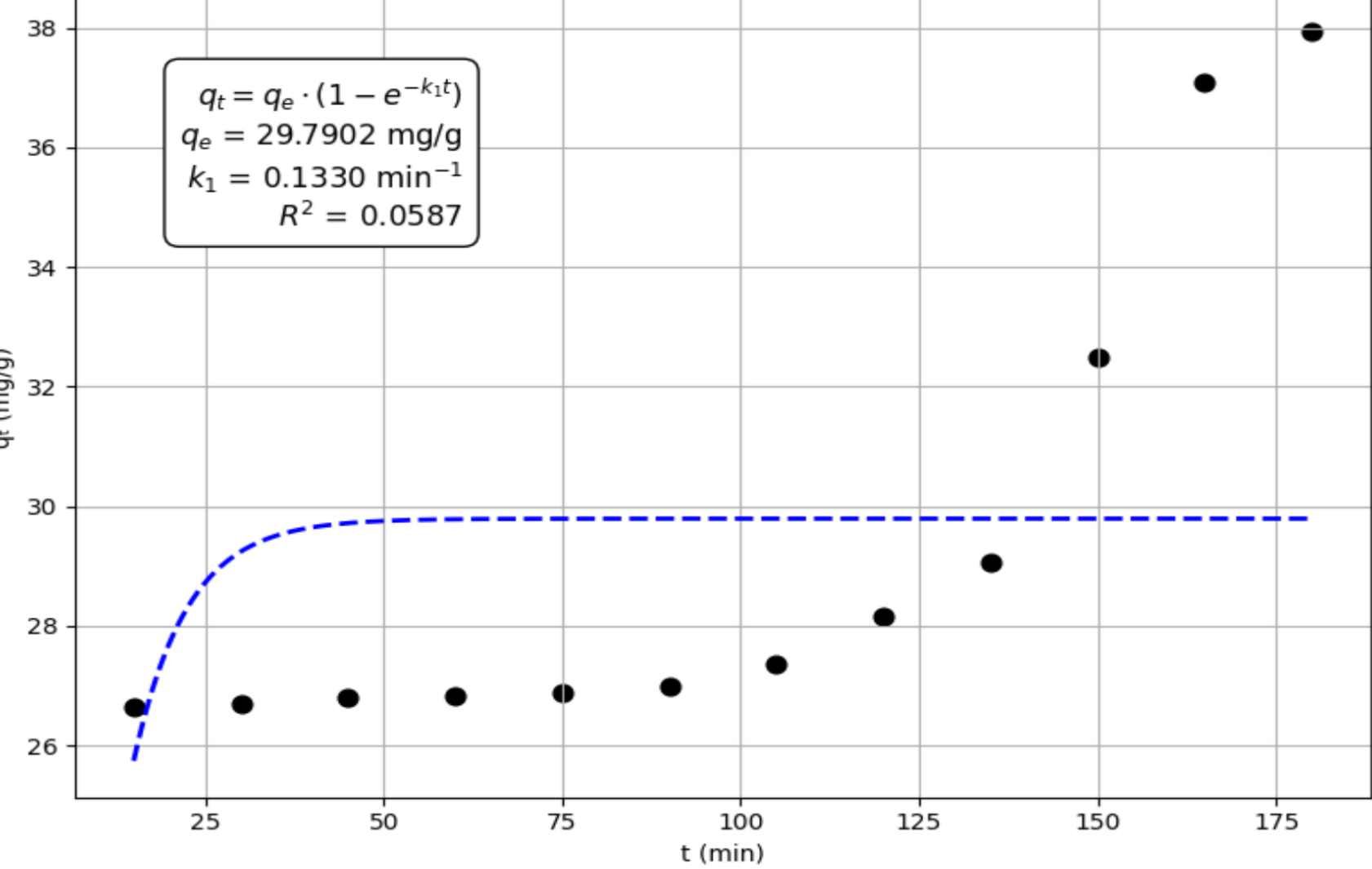
→ 吸附速率與未吸附位點數量平方成正比

→ 主要以化學吸附、靜電吸附為主

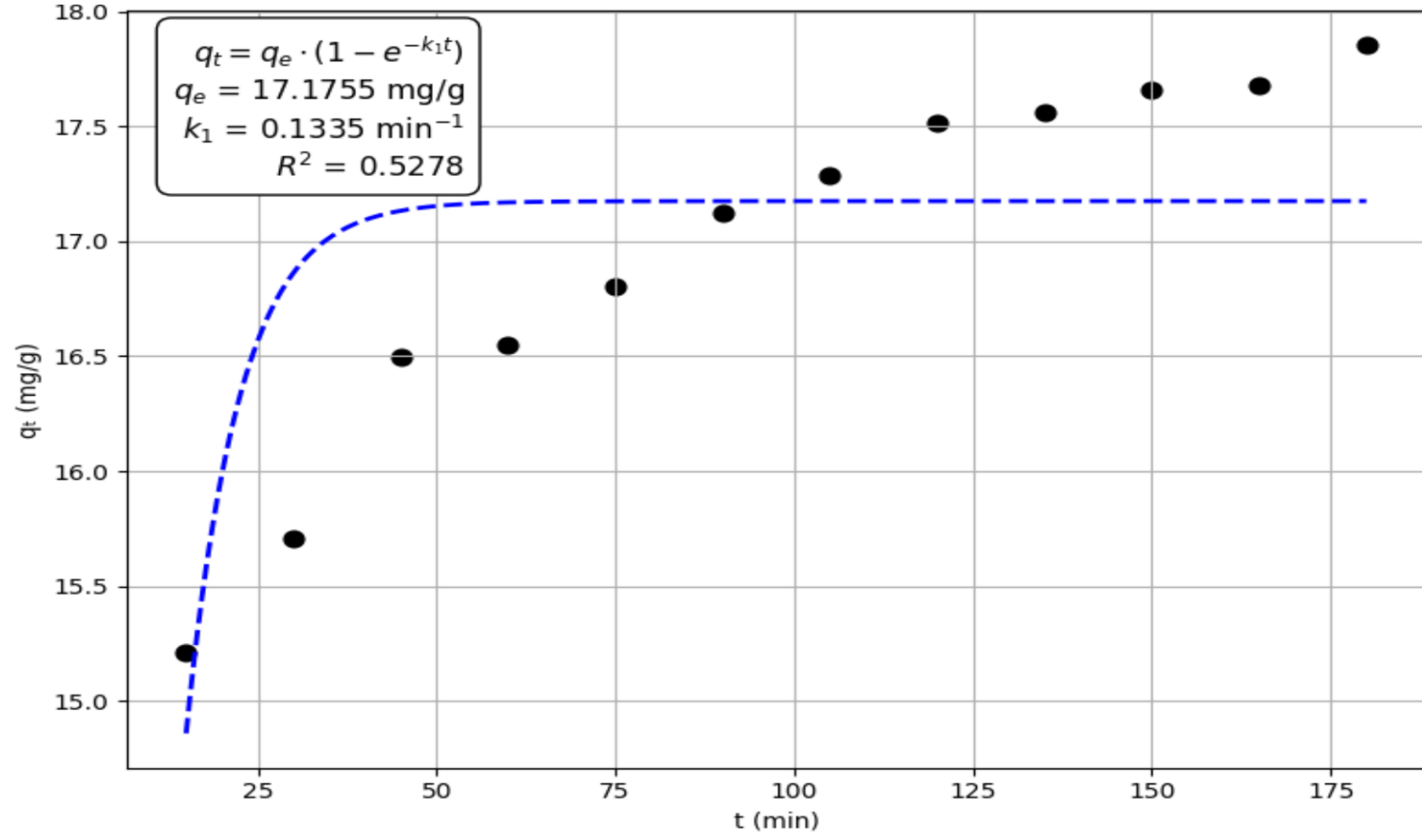
	Kf	1/n	$R^2$
磷酸根	0.205	1.0158	0.9949
亞甲藍	0.203	1.1344	0.9815
阿特拉津	0.044	1.2325	0.9683

$R^2$ 皆大於0.9  
→擬和度良好  
 $1/n \approx 1$   
→ 吸附行為接近線性  
→ 吸附位點均勻

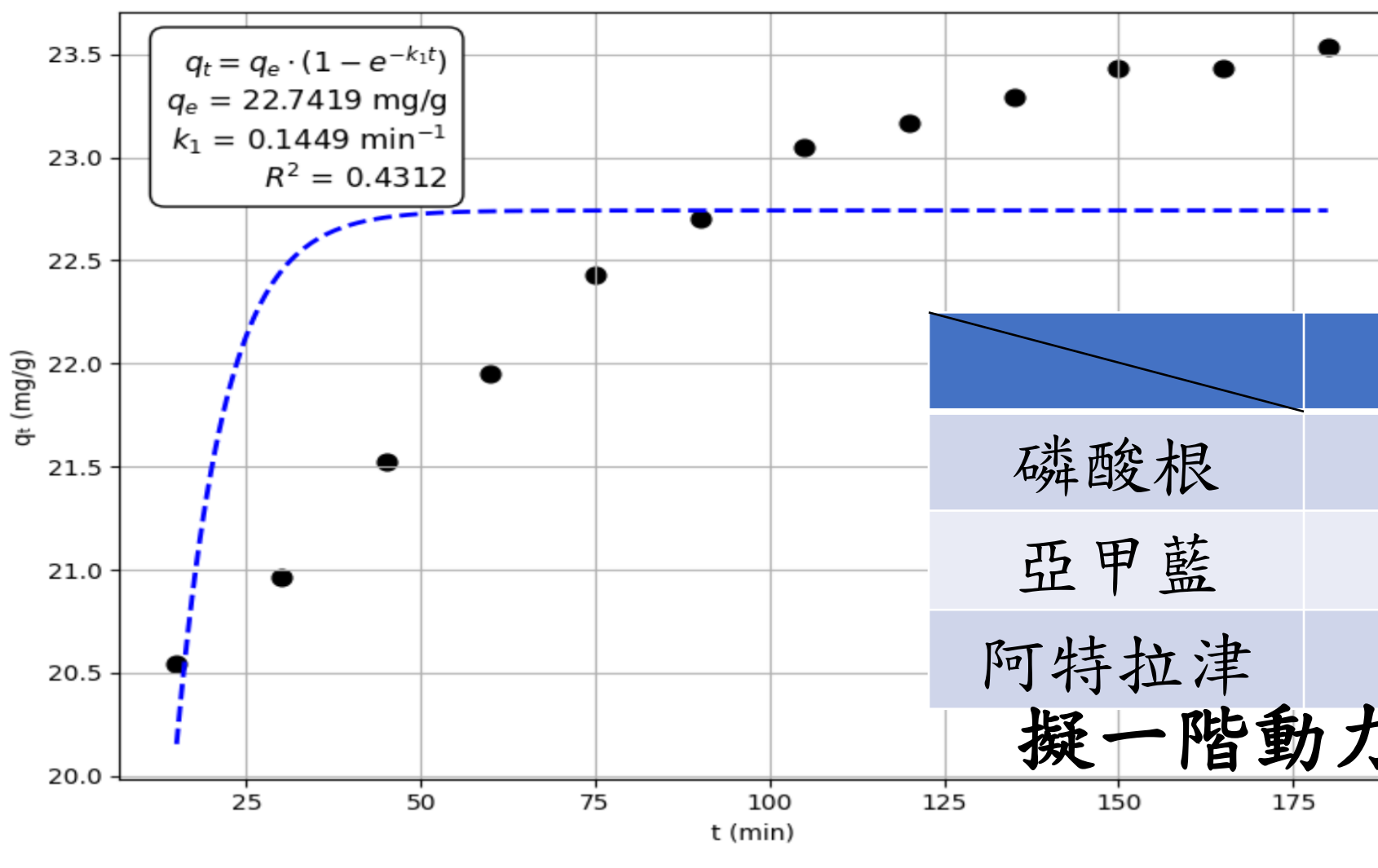
鋁鎂生物炭對磷酸根吸附能力的擬一階動力學模型



鋁鎂生物炭對亞甲藍吸附能力的擬一階動力學模型



鋁鎂生物炭對阿特拉津吸附能力的擬一階動力學模型

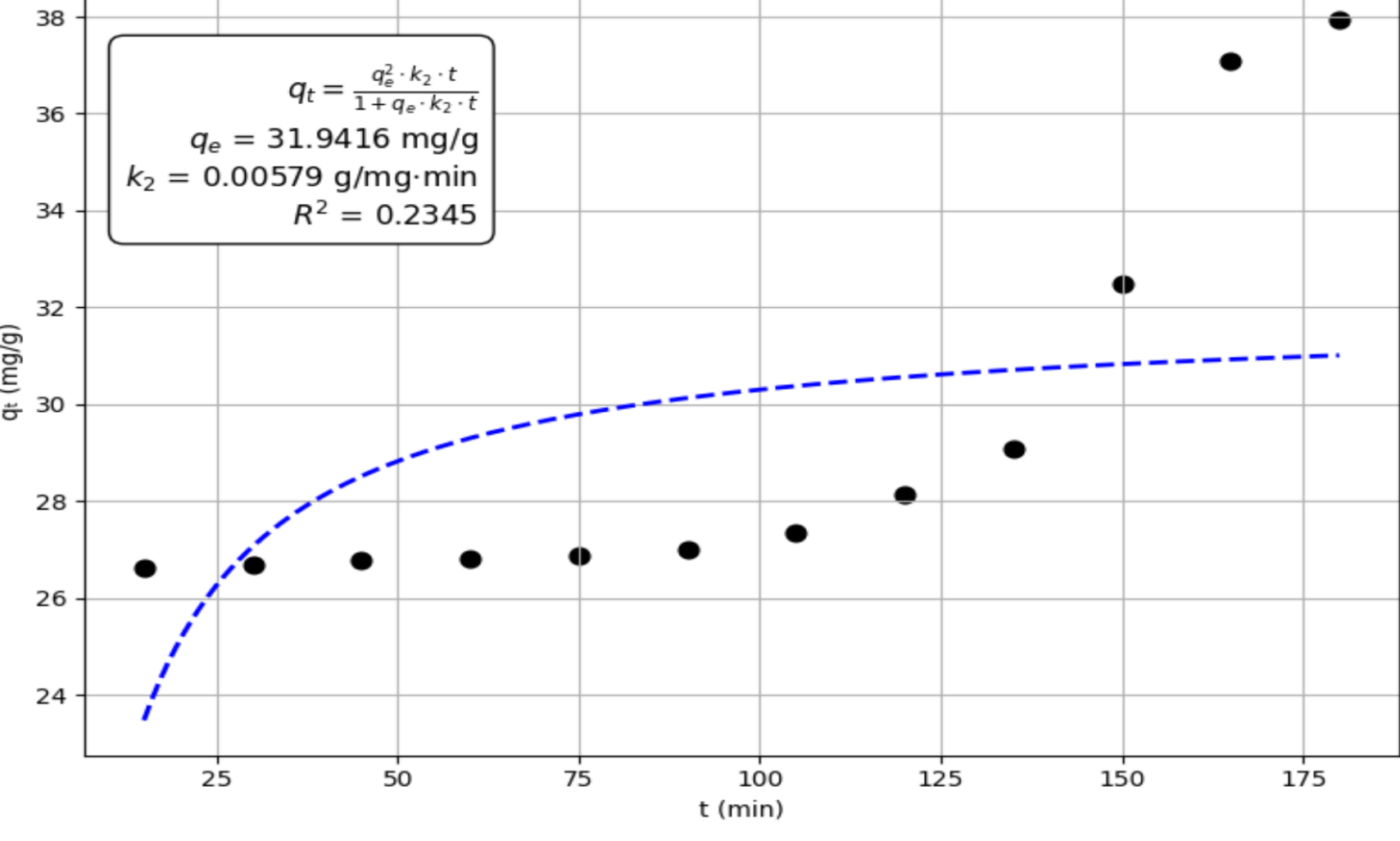


	$R^2$
磷酸根	0.0587
亞甲藍	0.4312
阿特拉津	0.5287

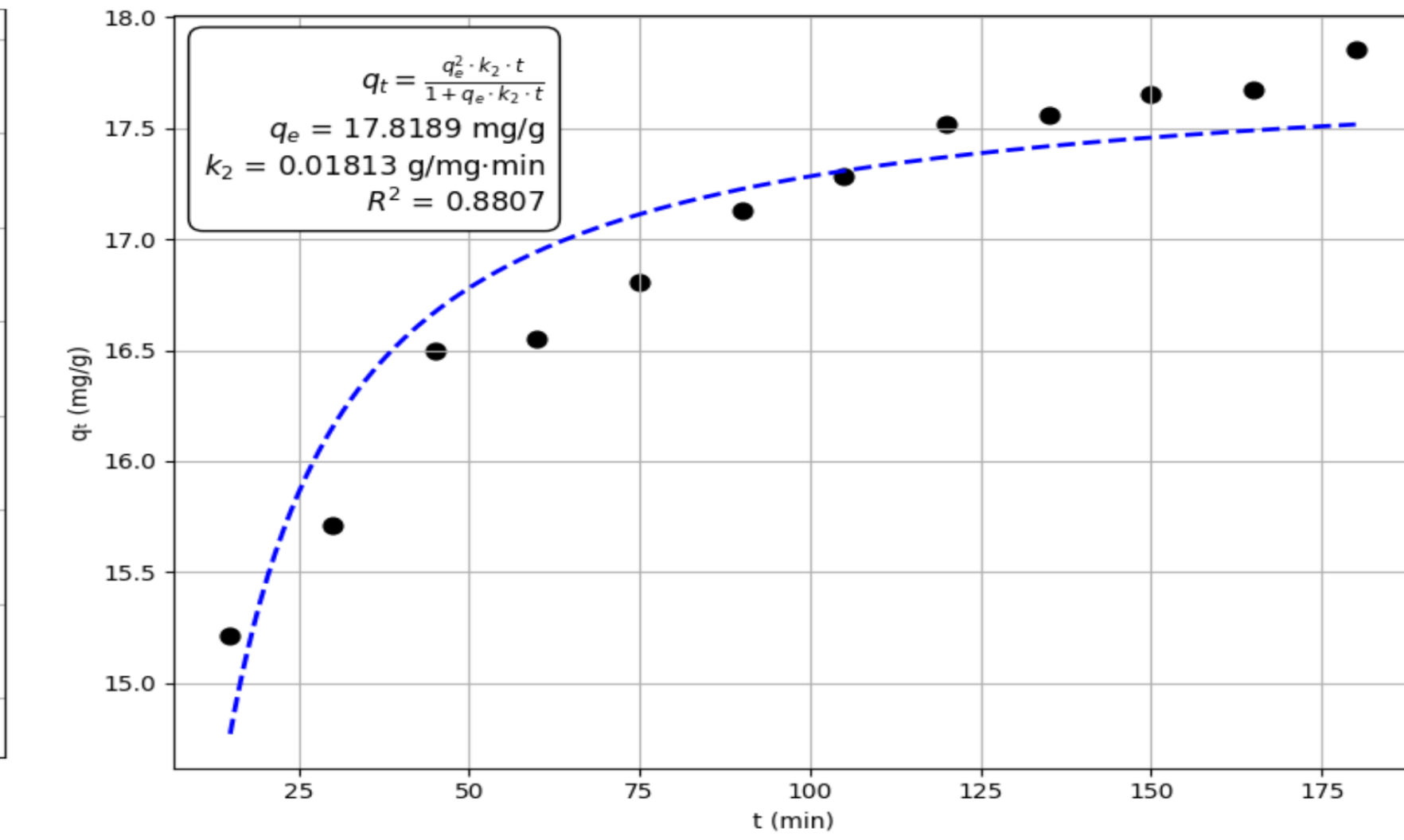
擬一階動力學模型

2. 擬二階動力學模型

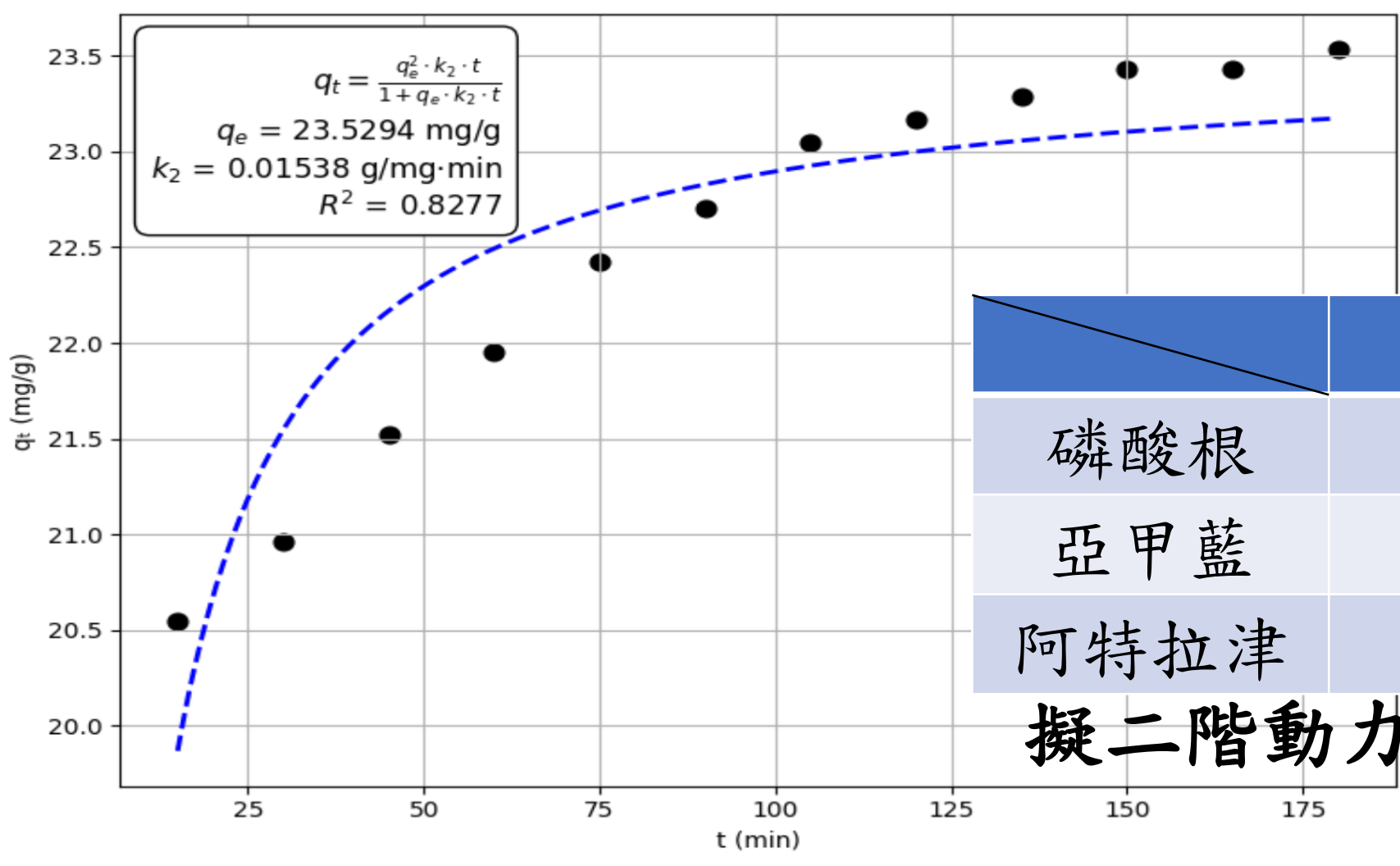
鋁鎂生物炭對磷酸根吸附能力的擬二階動力學模型



鋁鎂生物炭對亞甲藍吸附能力的擬二階動力學模型



鋁鎂生物炭對阿特拉津吸附能力的擬二階動力學模型

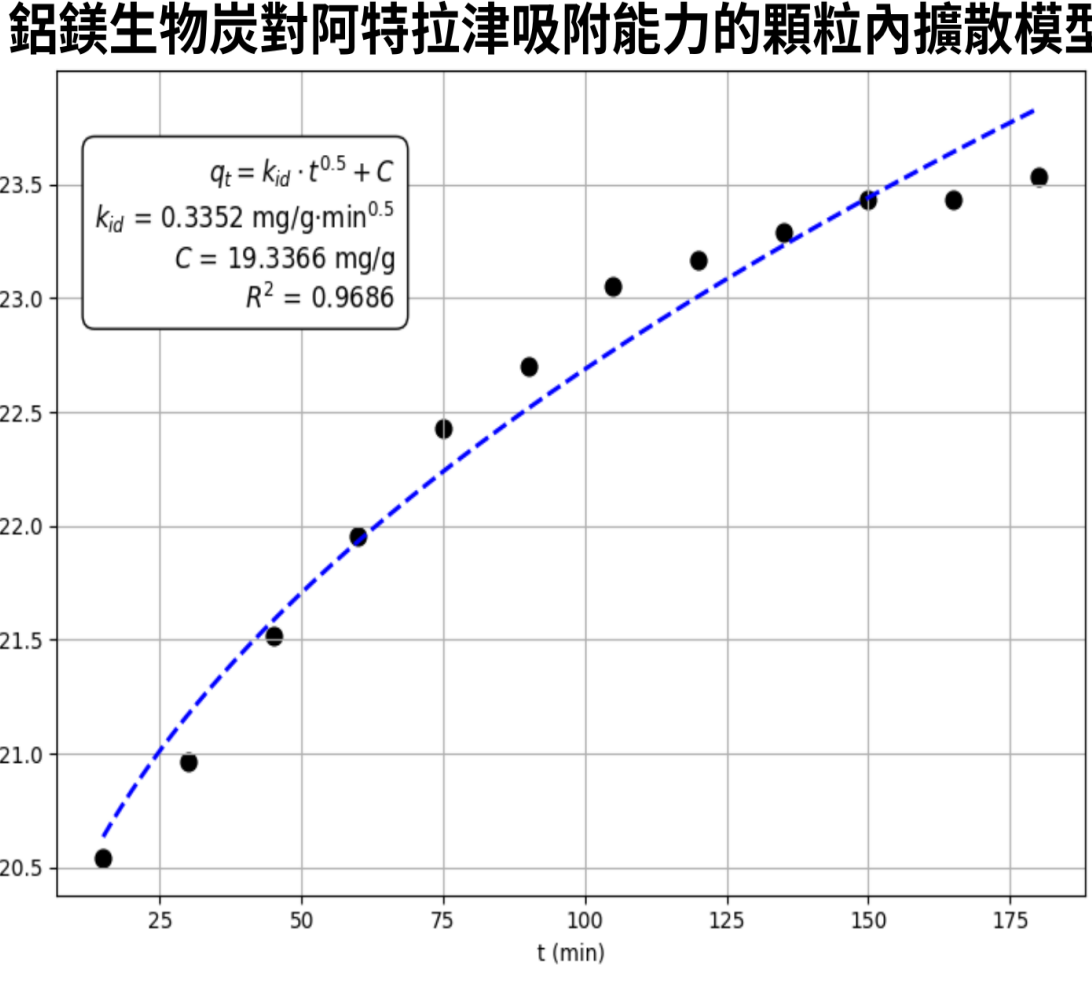
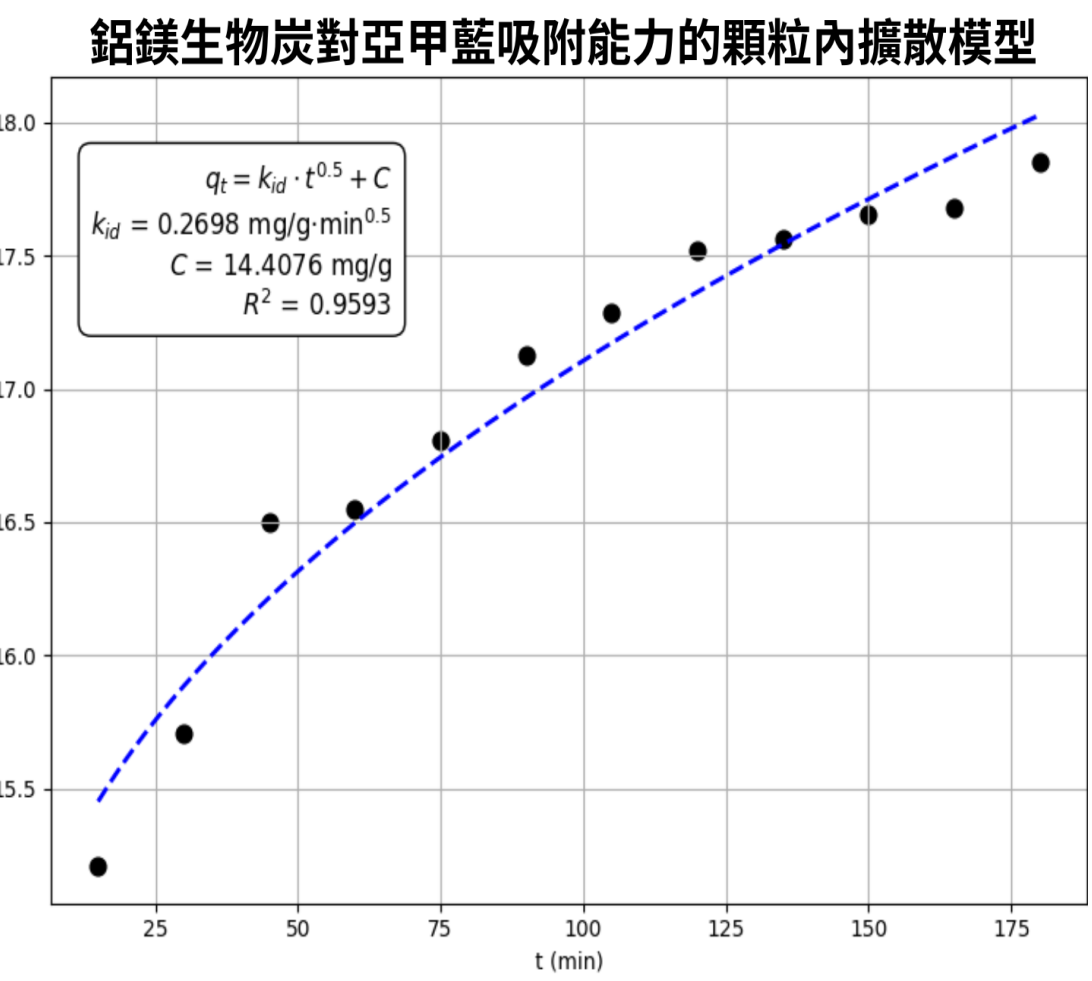
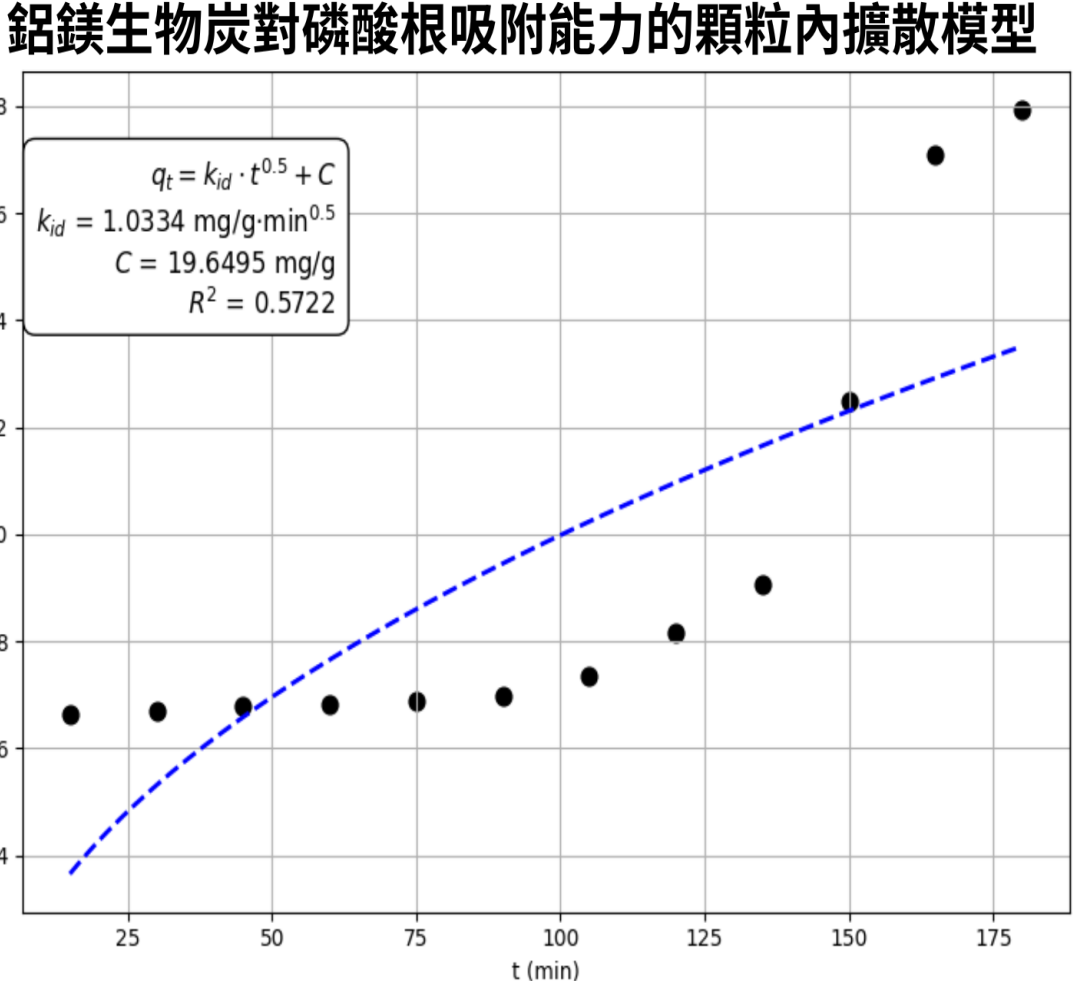


	$R^2$
磷酸根	0.2345
亞甲藍	0.8277
阿特拉津	0.8807

擬二階動力學模型



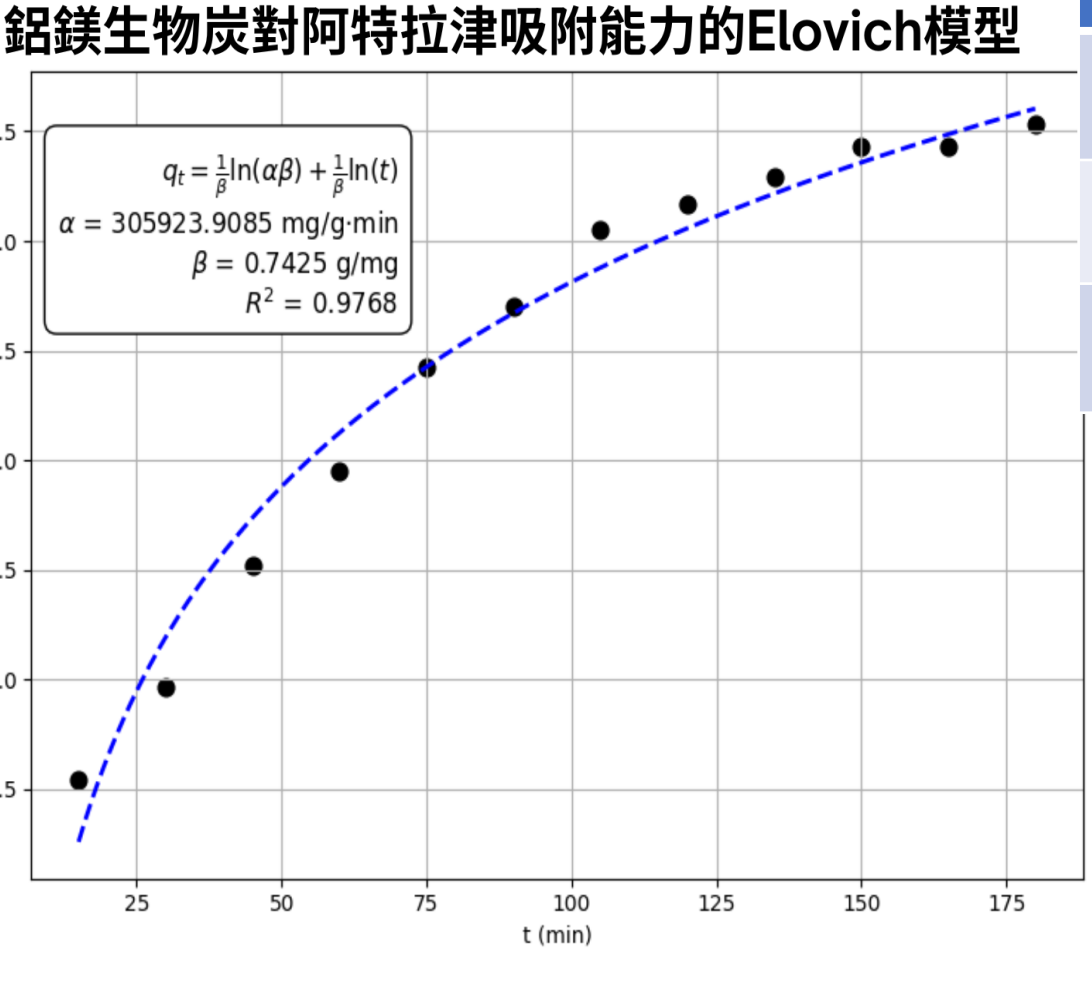
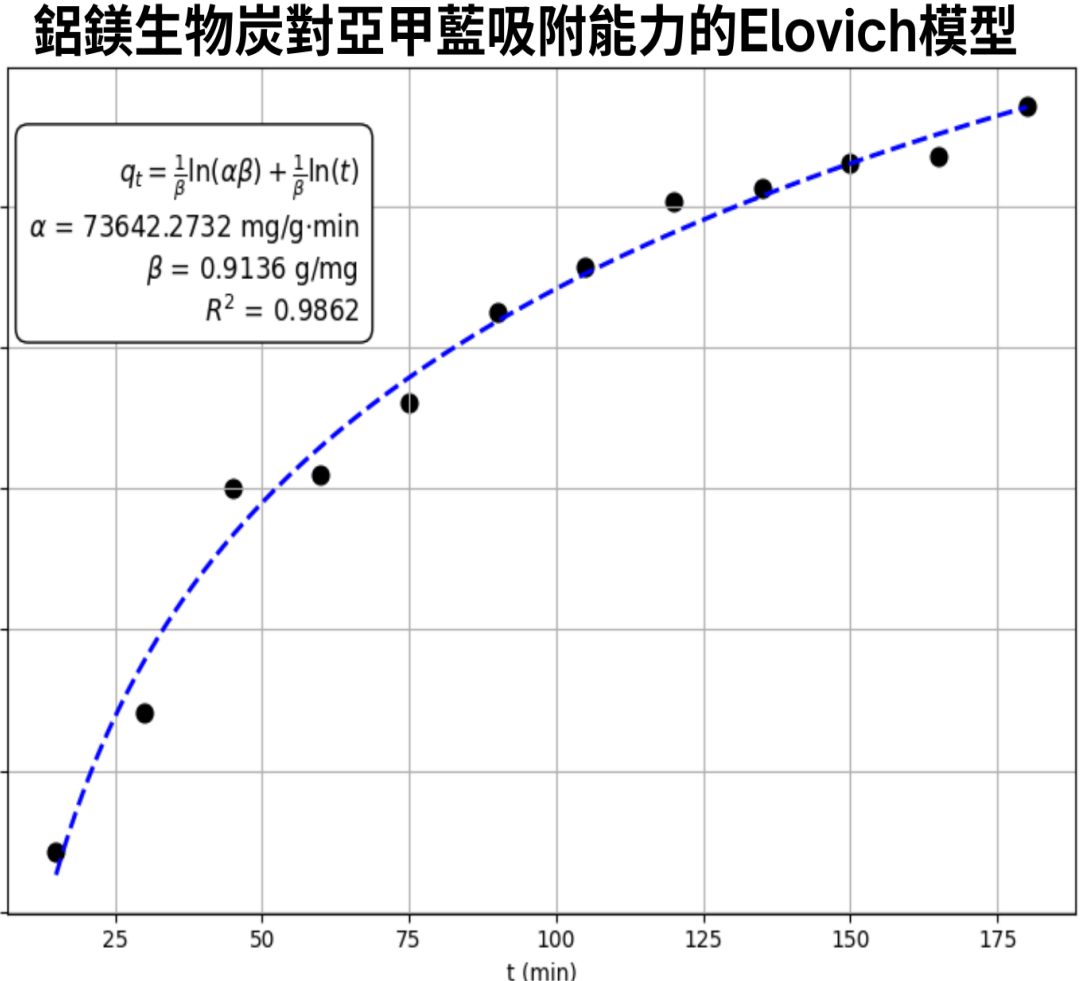
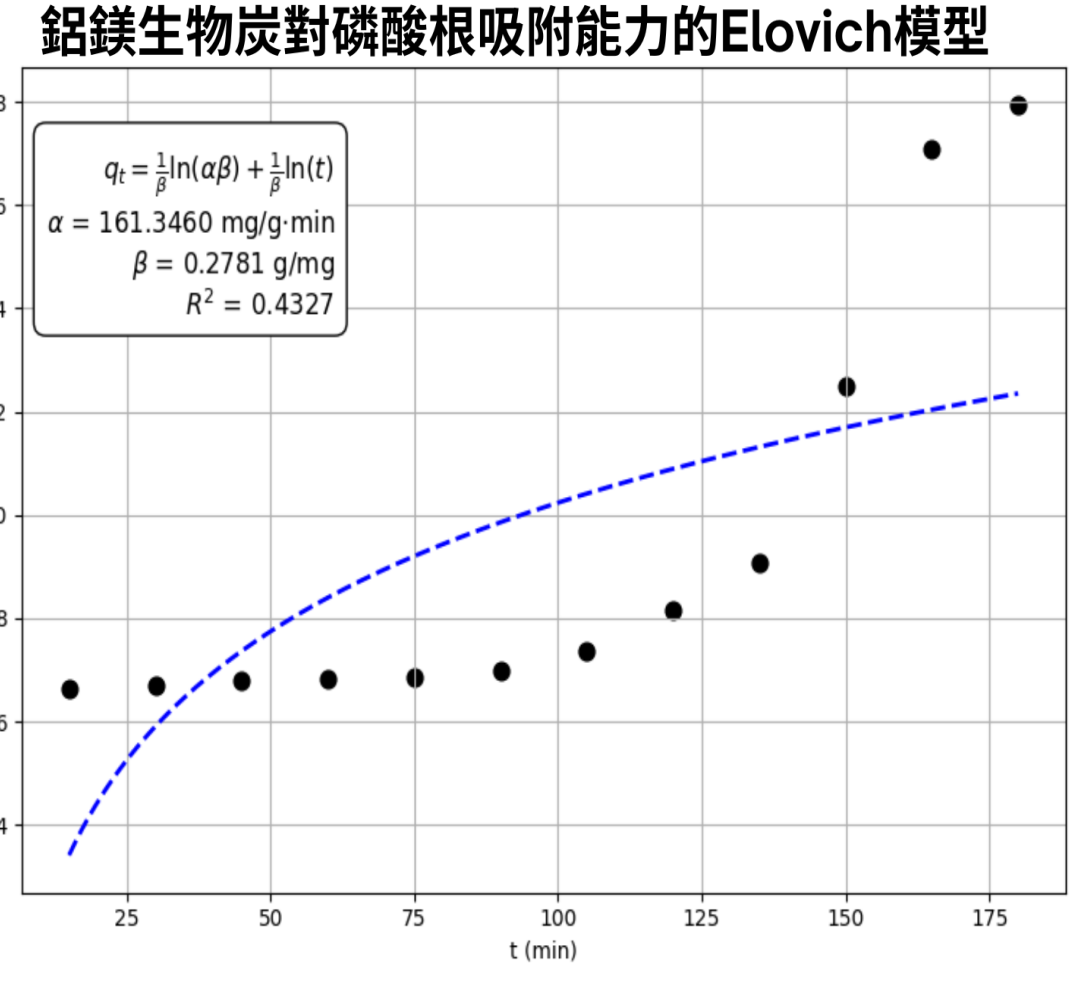
3. 顆粒內擴散模型



	$k_{id}$	C	$R^2$
磷酸根	1.0334	19.650	0.5722
亞甲藍	0.2698	14.408	0.9593
阿特拉津	0.3352	19.337	0.9686

1. **磷酸根**雖內擴散速率快，但擬合度低(由多種機制共同影響)
2. **亞甲藍**與**阿特拉津**的吸附動力學主要由**顆粒內擴散**控制。
3. C值顯示邊界層效應對三者吸附均有一定影響力，需與考量。

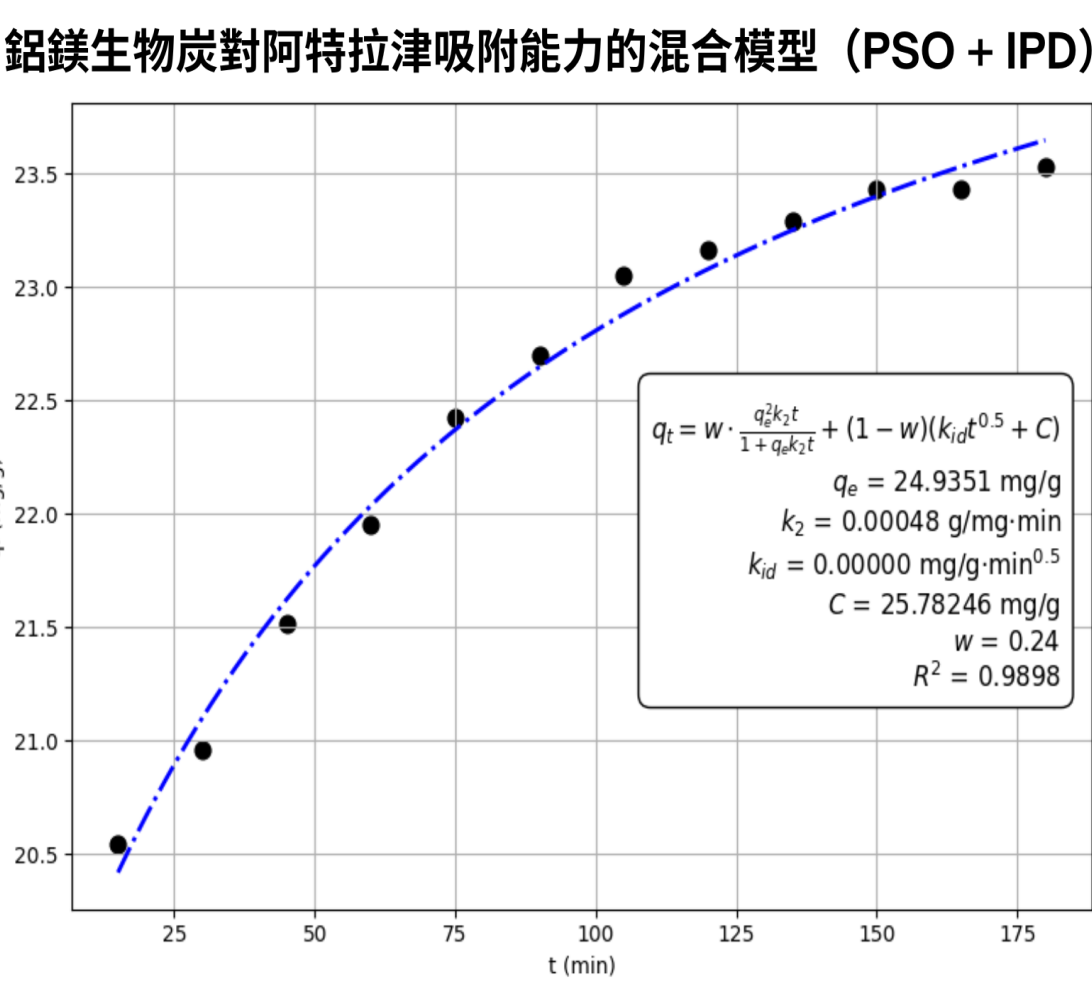
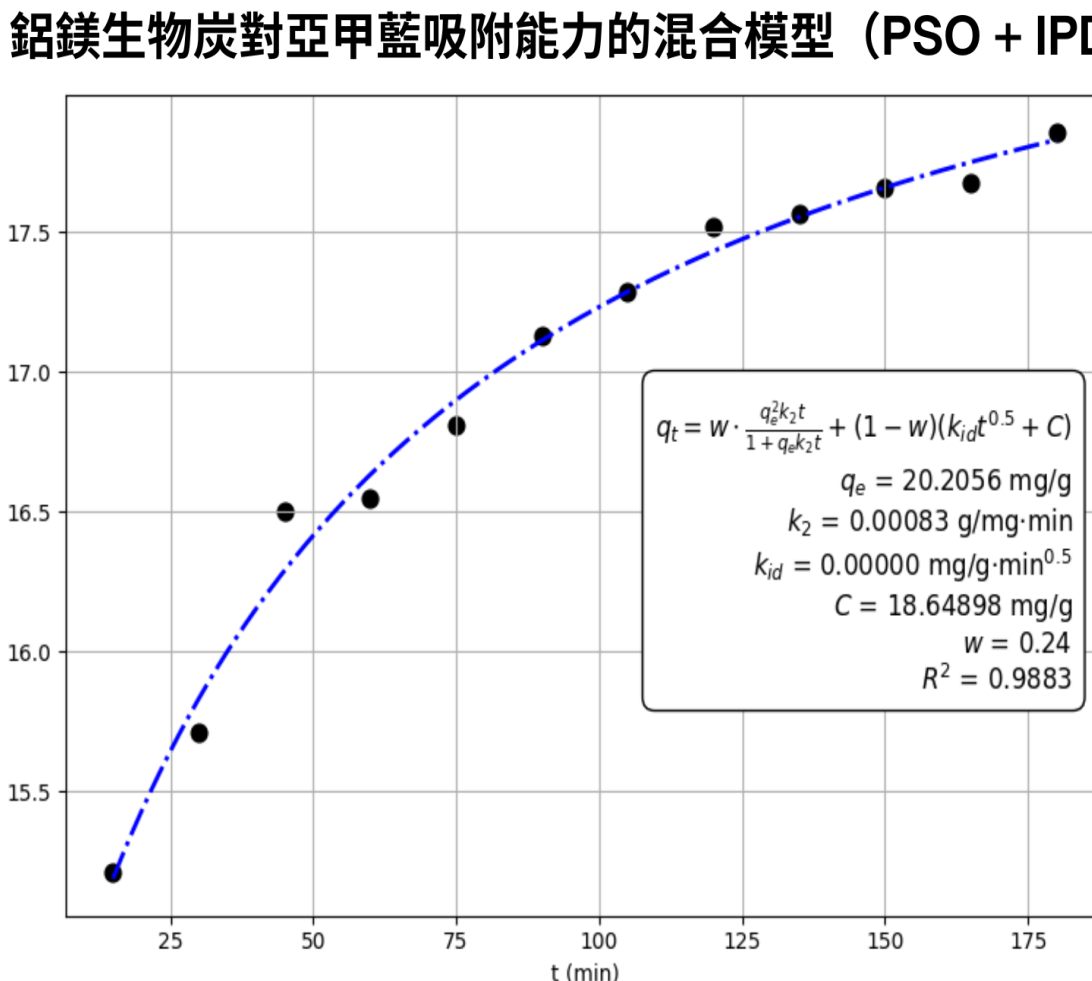
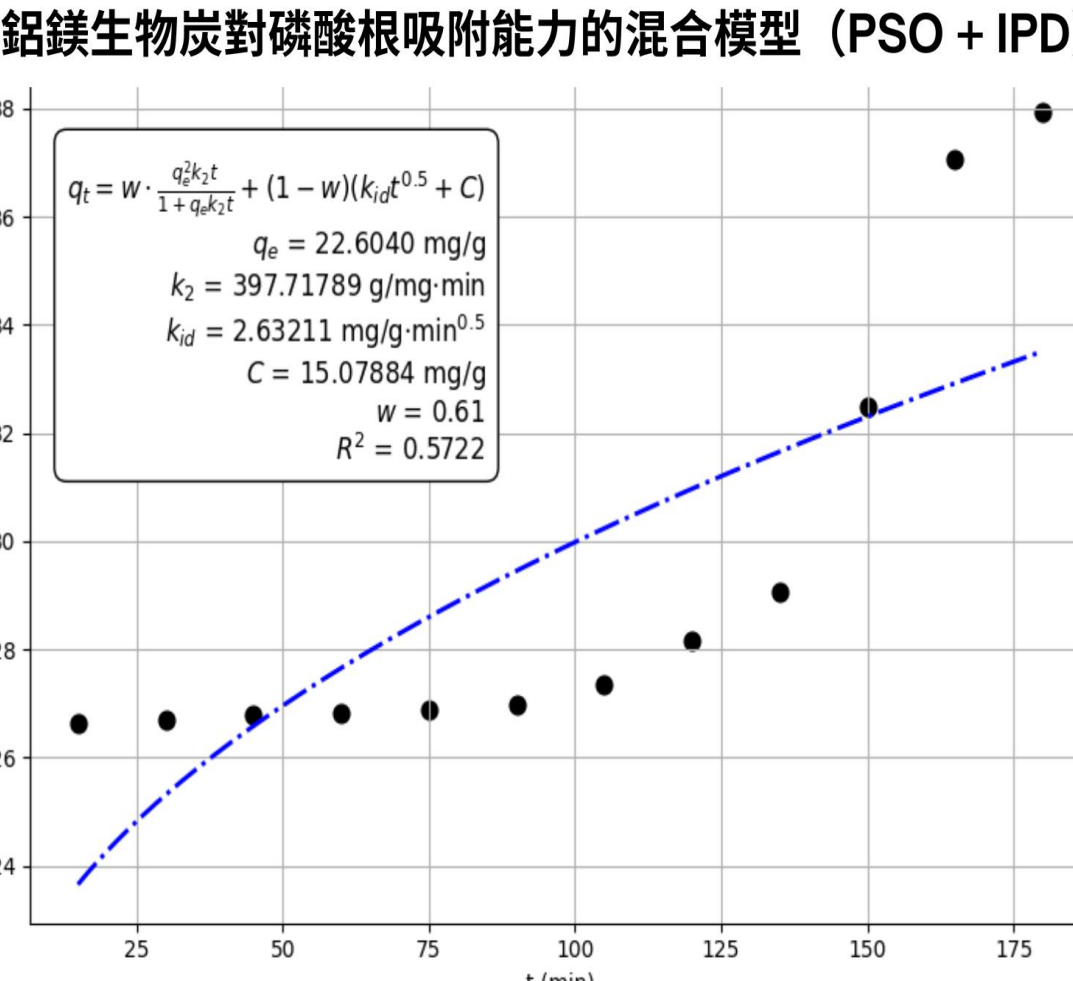
4. Elovich模型



	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
磷酸根	161.35	0.2781	0.4327
亞甲藍	73642.27	0.9136	0.9862
阿特拉津	305923.91	0.7425	0.9768

1. **亞甲藍**與**阿特拉津**初始速率高( $\alpha$ 高)但下降得也快( $\beta$ 高)，擬合良好。
2. **磷酸根**吸附初始速度相對慢，速度則是漸緩。R<sup>2</sup>也僅0.4327，模型無法完整描述磷酸根的吸附機制。

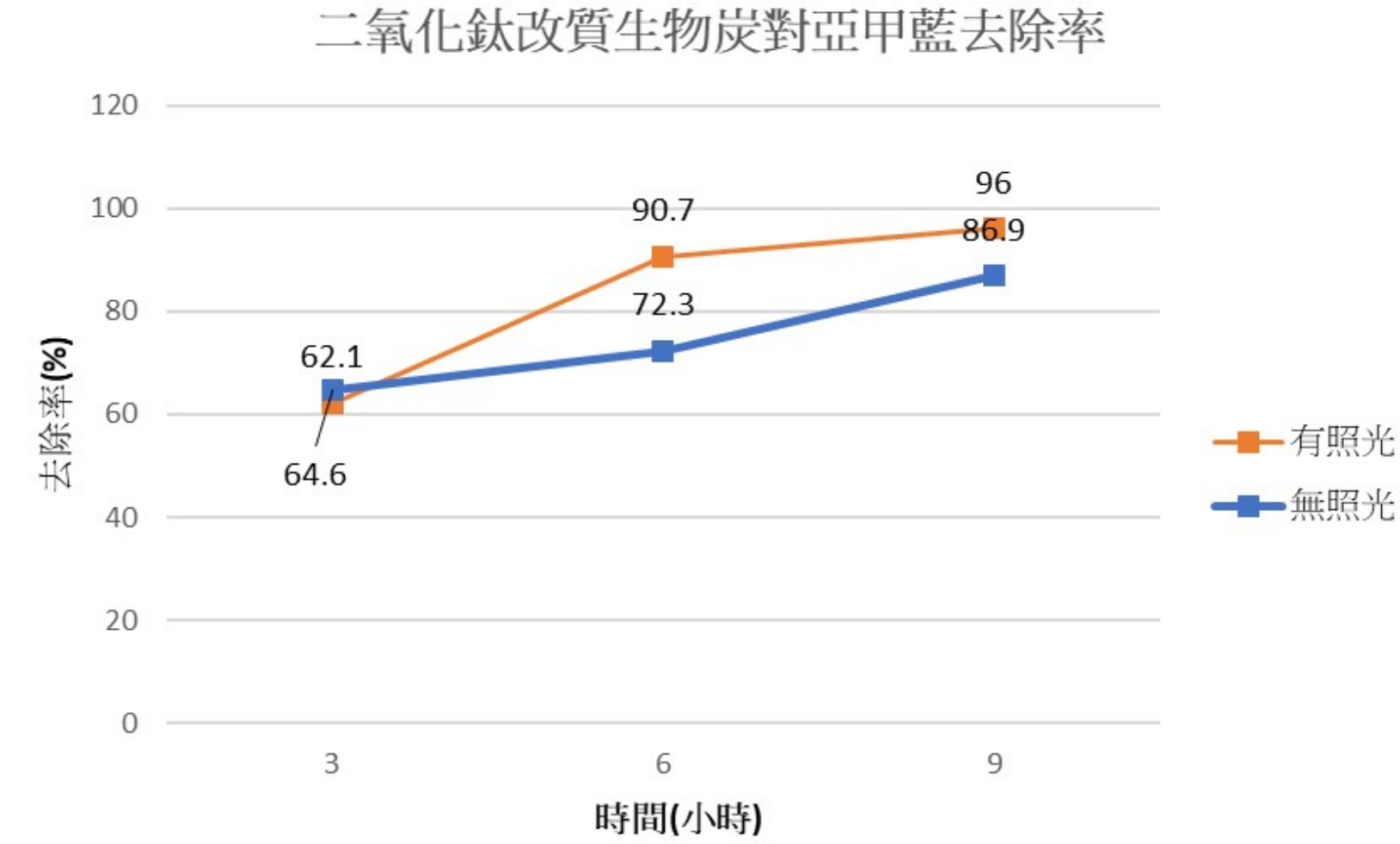
5. 混合模型(PSO+IPD)



	w	$R^2$
磷酸根	0.61	0.5722
亞甲藍	0.24	0.9883
阿特拉津	0.24	0.9898

1. **磷酸根**以化學吸附為主（61%），整體曲線卻對不上，代表吸附過程比較複雜、不穩定。
2. **亞甲藍**和**阿特拉津**主要靠內部擴散吸附（76%），化學吸附占24%，整體擬合很好。

三、評估鋁鎂生物炭負載TiO<sub>2</sub>後，對亞甲基藍的光催化降解能力



在有光照的情況下，去除速度明顯較快。在第6小時，有光組的去除率達到 90.7%，比無光組高出近20%

動力吸附實驗中(180分鐘內)

- 磷酸根去除率達94.8% (37.92mg/g)
- 亞甲藍去除率達89.3% (35.72mg/g)
- 阿特拉津去除率達94.1% (37.64mg/g)

陸、討論

依吸附動力學結果進行材料改良和應用

(一)高邊界層阻力(三汙染物 C高)：指受到液膜（邊界層）阻力的影響，阻礙汙染物分子向生物炭表面擴散。  
→使用孔徑細密顆粒小的生物炭改質、應用在高速流動的水體(減少液膜厚度)

(二)吸附速率下降快、擴散限制顯著(亞甲藍和阿特拉津  $\beta$ 高)：孔徑大小、孔隙結構不均一或堵塞可能限制內擴散。  
→顆粒越小，內部擴散路徑越短;適當的鹼性改性能增加孔容與比表面積。  
→高劑量生物炭投加可能導致活性位點重疊，降低有效吸附面積。應用需控制投加量、定期再生吸附劑，維持孔隙暢通。

柒、結論

一、改質鋁鎂生物炭並觀察其結構

本研究透過共沉澱法將鋁與鎂改質至生物炭表面，成功生成具層狀結構的雙氫氧化物（LDHs）。

二、評估鋁鎂生物炭對磷酸根、亞甲基藍及阿特拉津的吸附能力

（一）磷酸根的吸附能力  
表現**高吸附量**（180分鐘內至少可吸附31.9mg）與**極佳的等溫擬合度**（Freundlich  $R^2 = 0.9949$ 、Langmuir  $R^2 = 0.9912$ ），顯示鋁鎂生物炭在平衡條件下對**磷酸根**具有**強吸附潛力**；但其**動力學模型擬合普遍不佳**，推測吸附過程可能受到擴散阻力、反應速率慢或部分沉澱反映等多重因素影響，可能受到表面電荷排斥、競爭吸附導致速率不穩定。

（二）亞甲基藍的吸附能力  
具有**高吸附量**（180分鐘內至少可吸附17.8mg），且在**動力學與等溫模型**中皆有良好擬合（混合模型  $R^2 = 0.9883$ ，Freundlich  $R^2 = 0.9815$ ），顯示鋁鎂生物炭對亞甲藍具有**快速且穩定**的吸附行為，主要由**內部擴散**（約 76%）**搭配化學吸附**（約 24%）共同控制，吸附效果穩定且效率高。

（三）阿特拉津的吸附能力  
阿特拉津具有**高吸附量**（180分鐘內至少可吸附23.5mg），**吸附速率穩定**，**動力學擬合程度高**並快速達到吸附平衡，主要由**內部擴散**（約 76%）**搭配化學吸附**（約 24%）共同控制，吸附效果穩定且效率高。

三、評估鋁鎂生物炭負載TiO<sub>2</sub>後，對亞甲基藍的光催化降解能力

鋁鎂生物炭在負載TiO<sub>2</sub>後，在光照條件下對亞甲基藍的去除效率明顯提升。6小時內有光照組的去除率達90.7%，相較無光照組僅72.3%，提升幅度超過25%，顯示光催化反應能加速染料分解並再生吸附位點。鋁鎂生物炭在吸附基礎上加入TiO<sub>2</sub>，使材料同時具備吸附與光催化雙重功能，能在照光條件下持續分解汙染物、延長材料效能，提升在實際廢水處理中的應用價值。

捌、參考文獻

1. 李中光 & 萬能科技大學環境工程系（2013）。 層狀複金屬氧化物(LDHs)作為陰離子捕獲劑之應用。 環保技術與法規資訊電子報, 104. <https://proj.ftis.org.tw/eta/epaper/PDF/ti104-2.pdf>
2. 王文裕、顧洋（2005）。二氧化鈦可見光光觸媒的發展。界面科學會誌, 27(2), 111-121。 <https://doi.org/10.30020/JCCIS.200506.0003>
3. Adamčíková, L., Pavliková, K., & Ševčík, P. (2000). The Decay of Methylene Blue in Alkaline Solution. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, 69(1), 91 – 94. <https://doi.org/10.1023/a:1005696926749>
4. 曾冠銘（2022）。不同表面處理生物炭對磷酸鹽吸附行為之影響〔碩士論文，國立屏東科技大學〕。華藝線上圖書館。 <https://doi.org/10.6346/NPUST202200410>
5. 洪文強、鄭慈儀、邱求三（2012）。合成具雙金屬（鈣／鋁）之磁性顆粒以吸附水溶液中磷酸鹽。國立宜蘭大學工程學刊, (8), 42-60。 <https://doi.org/10.6176/BCE.2012.08.14>