

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	100039
參展科別	工程學
作品名稱	點亮絲路：碳量子點螢光蠶絲的製備與光降解 環境污染物之應用
得獎獎項	四等獎

就讀學校	臺北市立景美女子高級中學 台北市立中崙高級中學
指導教師	周界志 郭志宇
作者姓名	劉愛薇 劉靜璇

關鍵詞	<u>碳量子點、螢光蠶絲、光降解</u>
-----	----------------------

作者簡介



我是劉愛薇(左)，是臺北市立景美女子高級中學的二年級學生，因為對科學有著越來越熱衷的熱忱，會考完後就一頭栽入科展研究。

我是劉靜璇(右)，是臺北市立中崙高級中學高中部的二年級學生，對科學十分感興趣，平時學科也較得心應手，參加科展開拓視野，並從中體會許多樂趣。我們過去小學時是巧固球隊好隊友，雖然現在不同高中，但期望一起探索科學新知識！

2025 年臺灣國際科學展覽會
研究報告

區別：

科別：工程學

作品名稱：點亮絲路：碳量子點螢光蠶絲的製備與光降解
環境污染物之應用

關鍵詞：碳量子點、螢光蠶絲、光降解

編號：

摘要

本研究以電紡絲法製作光動力活性的碳量子點 (carbon quantum dots, CQDs) 螢光蠶絲，用於光降解環境染劑汙染物與抗菌的應用探討。不同顏色螢光的碳量子點(紅、綠、藍色) 的合成是以檸檬酸作為主要碳源，分別參雜尿素與葉綠素用以合成三種螢光的碳量子點。接著將絲素蛋白、聚乙二醇與量子點溶液為原料，以電紡絲法分別製作成藍色、綠色與紅色的螢光蠶絲。螢光光譜儀 (PL) 與穿透式電子顯微鏡 (TEM) 結果呈現量子點的光學特性與尺寸呈現預期的量子效應。拉曼光譜則證實電紡絲法之螢光蠶絲具有絲素蛋白、聚乙二醇與量子點的特徵訊號。本研究使用之電紡絲法製備之螢光蠶絲，與我們之前使用蠶寶寶桑葉餵食法生產之螢光蠶絲來比較，電紡絲螢光蠶絲具有更加優異及穩定的光降解環境汙染物效率，未來可用於自清潔、抗菌織物與醫療敷料之應用。

Abstract

This study explores the application of electrospun photodynamically active carbon quantum dot (CQD) fluorescent silk for the photodegradation of environmental dye pollutants and antibacterial effects. CQDs with red, green, and blue fluorescence were synthesized using citric acid as the main carbon source, doped with urea and chlorophyll to produce each color. Solutions of silk fibroin, polyethylene glycol, and quantum dots were used as raw materials to produce blue, green, and red fluorescent silk through electrospinning. Photoluminescence (PL) spectra and transmission electron microscopy (TEM) showed the optical properties and quantum effects of the CQDs, while Raman spectroscopy confirmed the characteristic signals of silk fibroin, polyethylene glycol, and quantum dots in the electrospun fluorescent silk. Compared to fluorescent silk produced by feeding silkworms with quantum dot-enriched mulberry leaves in our previous studies, the electrospun fluorescent silk demonstrates superior and stable photodegradation efficiency for environmental pollutants. This suggests its potential for applications in self-cleaning, antibacterial fabrics, and medical dressings.

壹、研究動機

一、蠶絲的優點

蠶絲是天然生物蛋白材料，含有人體所需的 18 種胺基酸相同，因此具親膚性與低過敏性的優點，是對人體最健康且最安全的纖維。市面上有很多衣物、布料是聚酯纖維，然而其原料 - 石油，對環境影響很不環保，而蠶絲可以解決環保問題，且集以上優點是對環境友善且具有潛力的材料 (Ramos 等, 2022; Reizabal 等, 2023)。

二、碳量子點的優點

碳量子點是指奈米尺度的碳材料，一般小於 10 nm，表面含有豐富的含氧或其他摻雜原子的有機分子發光基團。比起傳統半導體量子點如 PbS、CdSe 等，有著天然無毒、環境友善及製備容易的優點，是未來極具潛力的碳基奈米材料。CQDs 具有優異的光穩定性，在紫外光或可見光激發下產生穩定的螢光發射，應用於生物成像、傳感和光催化時效果持久。碳量子點可由多種廉價且豐富的原料合成 (如植物材料、食品廢棄物)，製備成本低，適合工業化應用。CQDs 可通過不同摻雜元素 (如氮、硫) 或表面修飾調控其螢光顏色和光催化性質，以滿足不同應用需求。碳量子點通常具有親水性，在水溶液中能良好分散，適合生物系統和水性環境應用 (Zhang 等, 2022)。

三、螢光電紡絲對光降解環境染料污染物和抗菌的作用

我們觀察到後疫情時代與高齡長照時代下，可以長效抗菌-抗病毒醫療穿戴紡織用品有非常迫切的需求。而日常生活會自然地曝照在環境光下，若可以找到一種方法是待在日光燈下就有持續抗菌效果的複合紡織材料、防護衣物、家用紡織品或醫療敷料等，就可以讓使用者長時間穿戴，減少替換頻率。在資源相對缺乏、事態緊急或不易操作替換的情況下，可以擁有更好的醫療與衛生品質。

貳、研究目的

一、以綠色製程合成碳量子點

開發一種環保無毒、具備生物相容性 CQD 的合成方法，採用水相的環境友善策略，過程盡可能降低廢棄物產生和有害物質的使用，既可以取代傳統染色劑又符合淨零排放精神。

二、以電紡絲法生產螢光電紡絲

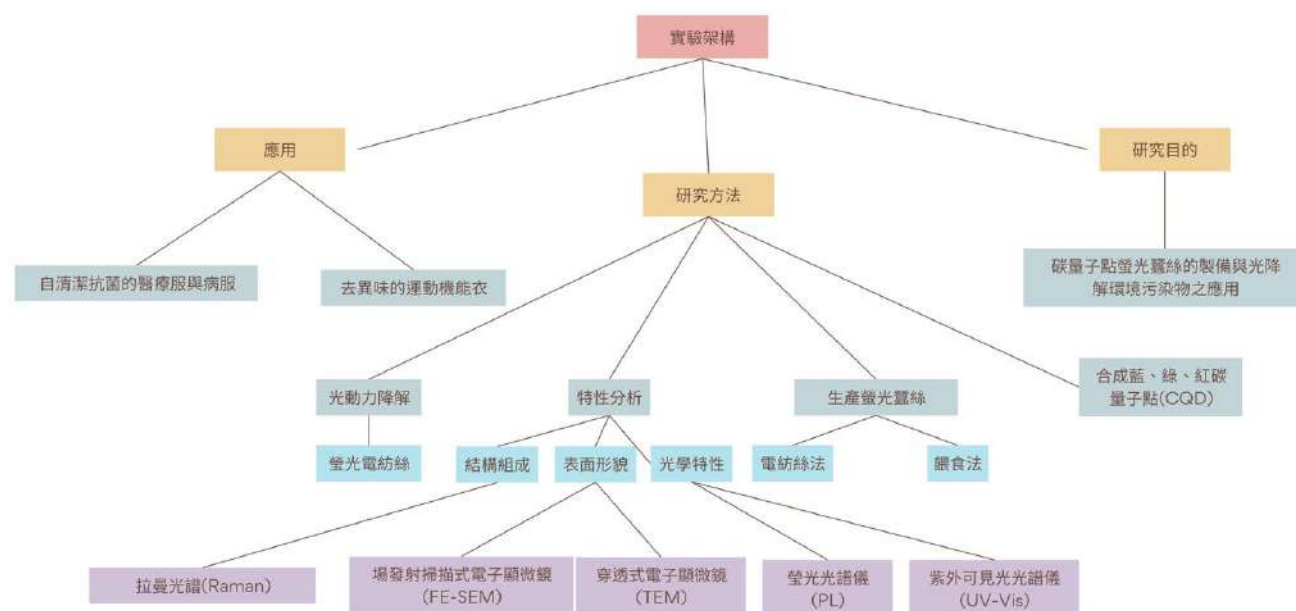
比起先前以餵食法生產螢光蠶絲，以電紡絲法生產螢光電紡絲，能使蠶寶寶有完整的生長週期，避免為了取平整的蠶絲而造成蠶寶寶死亡，並且更能有效控制螢光變化、提升產率與品質，滿足市場供應需求。

三、材料特性分析與應用

- (一) 探討螢光電紡絲的組成、表面官能基種類、微觀型貌、光學性質等特性。
- (二) 透過光動力降解測試，探索此機能蠶絲的應用潛力。

參、研究方法及過程

一、研究方法



(作者自行繪製)

二、研究設備與器材

(一) 藍、綠、紅光碳量子點合成設備與藥品：在水相中以鍛燒法與水熱合成法合成具有生物相容性的碳量子點，需要燒杯、攪拌棒、量筒、天秤、烘箱、研鉢、紫外光手電筒、檸檬酸、尿素與葉綠素。

(二) 蠶寶寶養殖設備與靜電紡絲機台：分別為餵食法與電紡絲法製作螢光蠶絲。

(三) 材料分析儀器：用於深入分析與比較碳量子點、一般蠶絲與螢光蠶絲的結構組成、微觀形貌與光學性質等。

(四) 污染物的光降解測試：紫外光點光源照明設備(365 nm 波長)與 UV-Vis 光譜儀。

(1) 穿透式電子顯微鏡(TEM)	(2) 紫外可見光光譜儀 (UV-Vis)	(3) 拉曼(Raman)光譜
		
(4) 場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM)	(5) 螢光光譜儀 (PL)	(6) 電紡絲機台
		
(7) 高溫爐	(8) 紫外光點光源	(9) 冷凍乾燥機
		

(作者自行拍攝)

三、電紡絲機台原理

電紡絲 (Electrospinning) (圖 1) 技術其原理為將聚合物溶液或熔體填入注射器，在外加電場下聚合物溶液會在針頭下方產生佈滿電荷的圓錐形液滴泰勒錐 (Taylor cone)，隨著電壓上升，聚合物液滴電荷產生斥力克服表面張力，進而朝向收集器噴射形成奈米纖維 (Li 等, 2024)。

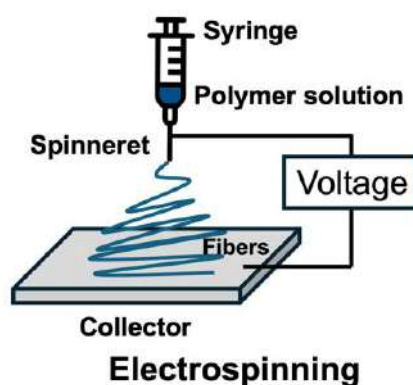


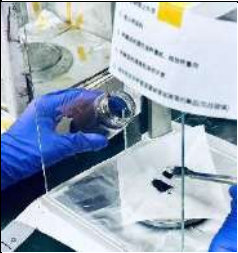
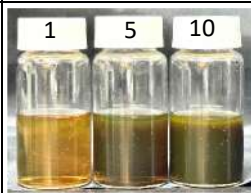
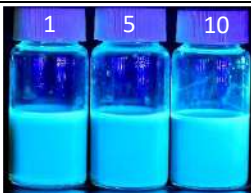
圖1 為我們製程使用的電紡絲機台的架設示意圖。(作者自行繪製)

四、實驗步驟

(一) 以綠色製程合成藍光、綠光與紅光碳量子點 (圖 2)

1. 藍光碳量子點：將 3 g 檸檬酸以及 1 g 尿素；綠光碳量子點：將 1 g 檸檬酸以及 3 g 尿素，分別加入 2 ml 的超純水，加以攪拌會呈現白色固體狀，放入烘箱並設定 180 度反應 6 小時。
2. 將鍛燒完成的量子點從燒杯取下並研磨成細緻粉末。
3. 將研磨後的量子點粉末，配製三種濃度分別為 1 mg/ml、5 mg/ml、10 mg/ml 的酒精溶液，並以超聲波震盪 30-60 分鐘使其分散，過濾後將樣本溶液避光保存。
4. 紅光碳量子點-葉綠素摻雜檸檬酸 R-CQDs：將葉綠素 a 與檸檬酸按質量比 1 : 8，加入無水乙醇中，充分溶解。
5. 將混合液進行超聲處理 30 分鐘。將混合液轉移至水熱反應器中。在 160 °C 下反應 10 小時。冷卻反應液，通過 0.22 μm 過濾器過濾，去除大顆粒和沉澱。
6. 將合成所得的碳量子點，進行材料特性分析。

- 延續性研究說明：與去年研究 (合成藍色碳量子點) 的不同處與突破處在於，此次研究是在相同合成體系下，合成綠色與紅色的碳量子點，故特此說明。

(1) 檸檬酸與尿素秤重	(2) 加入超純水	(3) 放入烘箱反應後研磨成粉末
		
(4) 配製成水溶液	(5) 濾紙過濾 CQD 溶液	(6) 白光與 UV 光下的三種濃度 CQD
		 

(作者自行拍攝)

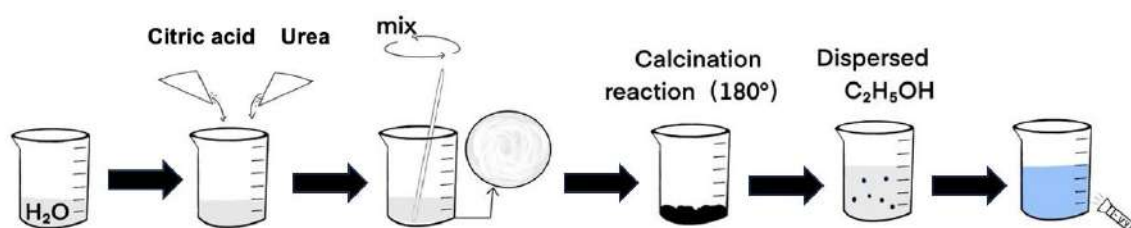
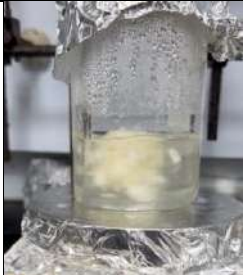


圖2 為我們合成碳量子點的製程示意圖。(作者自行繪製)

(二) 製作絲素蛋白(fibroin)粉末

1. 配製 0.05 wt% Na_2CO_3 除膠溶液：混合 0.1 g Na_2CO_3 和 199.9 ml H_2O 。
2. 去除絲膠：將繭切成塊 (約 1*1cm) 並在 0.05 wt% Na_2CO_3 除膠溶液中沸煮兩次。溫度：105 度；轉速：350 rpm；時間：30 分鐘。
3. 將溶液倒掉、將絲素蛋白擠乾，放置冷凍乾燥機乾燥。
4. 配製 CaCl_2 /EtOH/ H_2O 溶解液 (莫耳比, 1:2:8)：混合 H_2O 20 ml、EtOH 16.38 ml 與 CaCl_2 15.42 g。
5. 溶解絲素蛋白：將絲素蛋白溶解在 CaCl_2 /EtOH/ H_2O 溶解液。溫度：70°C；轉速：200 rpm；時間：20 分鐘。
6. 透析兩天，置換兩次去離子水。
7. 離心，去除上清液，並將產物冷凍乾燥成粉末備用。

(1) 將繭切成塊	(2) 配製 0.05 wt% Na_2CO_3 除膠溶液	(3) 將蠶繭放入除膠溶液，沸煮 30 分鐘
		
(4) 將溶液倒掉，重複煮沸以充分除膠	(5) 將絲素蛋白纖維擠乾，放置冷凍乾燥機乾燥	(6) 秤重絲素蛋白纖維
		
(7) 將絲素蛋白纖維放入溶解液充分溶解	(8) 透析兩天，置換兩次去離子水	(9) 離心、去除上清液、冷凍乾燥成粉末備用
		

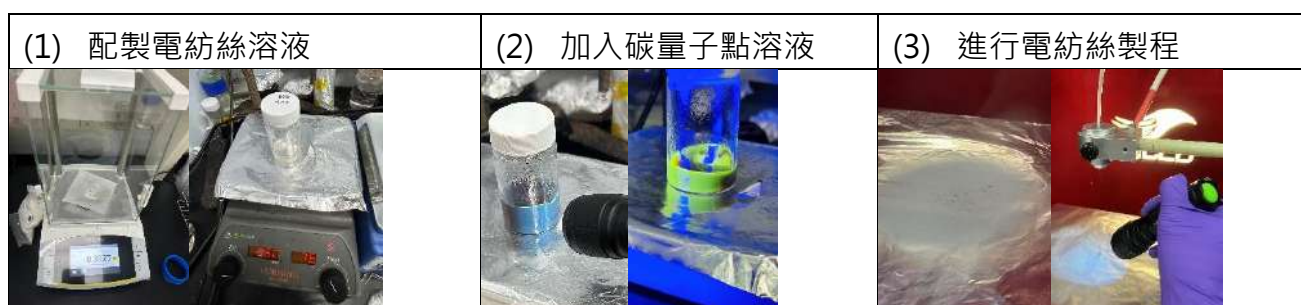
(作者自行拍攝)

(三) 以電紡絲法生產螢光蠶絲

1. 配製電紡絲溶液：混合聚乙二醇 (poly ethylene oxide, PEO) 0.56 g、甲酸 (formic acid, FA) 9.5 ml 與絲素蛋白 (fibroin) 1.285 g；溫度：75°C；轉速：550 rpm。
2. 分別加入 1 ml 濃度 10 mg/ml 的藍、綠、紅光碳量子點備用。
3. 設定電紡絲參數 (如下表) 後開始製作。

	Temp. (°C)	Humidity (%)	Voltage (kV)	Hot plate Temp. (°C)	Height (cm)	Flow rate (ml/h)
Fibroin/PEO/B-CQD	27.2	43	10.7	80	12	0.8
Fibroin/PEO/G-CQD	25.8	45	13.8	85	12	0.9
Fibroin/PEO/R-CQD	25.6	47	12.6	97	12	1.2

- 延續性研究說明：與去年研究 (餵食法螢光蠶絲) 的不同處與突破處在於，此次是開發新的電紡絲製程製作螢光蠶絲，可增加螢光變化、製程穩定性與生產效率等，故特此說明。



(作者自行拍攝)

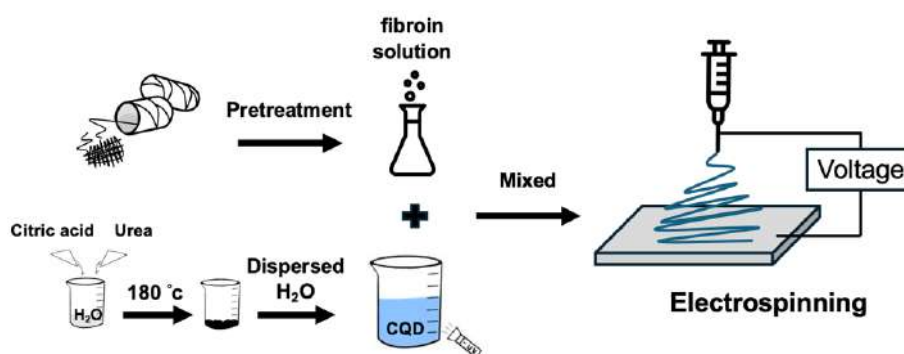


圖3 電紡螢光蠶絲的製程示意圖。(作者自行繪製)

(四) 以餵食法生產天然螢光蠶絲

1. 以一般桑葉持續餵食幼蠶成長直至蛻皮為五齡蠶。
2. 於五齡蠶的第一天分為四組，一組 20 隻蠶寶寶。對照組的蠶餵食新鮮桑葉。
 - (1). 實驗組的蠶餵食不同濃度 (1 mg/ml、5 mg/ml、10 mg/ml) 的綠色碳量子點桑葉：每次餵食時，以水彩筆分別將三個濃度的碳量子點溶液，塗在新鮮桑葉並用吹風機充分吹乾桑葉。
 - (2). 計算各主要階段之存活率。
3. 將蠶繭放入沸騰水中煮 5 分鐘，找到蠶絲的線頭固定至抽絲機，滾動抽絲機來收集蠶絲。
4. 將所製備出不同參數的蠶絲，進行材料特性分析。

- 延續性研究說明：與去年研究 (餵食藍色碳量子點桑葉) 的不同處與突破處在於，此次是餵食綠色碳量子點桑葉而生產之螢光蠶絲，故特此說明。

(1) 一般桑葉餵食幼蠶	(2) 成長為五齡蠶進行分組	(3) 分組飼養蠶寶寶
		
(4) 桑葉塗碳量子點並乾燥	(5) 抽絲機抽出的蠶絲	(6) 蠶繭與蠶絲
		

(作者自行拍攝)

(五) 螢光蠶絲的光動力降解測試

- 實驗目的：羅丹明 (rhodamine 6G, R6G) 是一種紅色色素分子、亞甲基藍 (methylene blue, MB)，是一種藍色色素分子，都是常見會污染天然水源的工業染劑，是一種指標性環境污染物，故在此實驗中選用 R6G 和 MB 作為有機污染物代表分子。
- 實驗設計：
 1. 分別將螢光蠶絲浸泡於 10^{-4} M R6G、MB 溶液，並在浸泡過程同時以 UV 光 (365 nm) 照射不同時間。光降解效應的對照組則不用照光。
 2. 量測初始 R6G、MB 溶液與不同照射時間下之 R6G、MB 溶液的 UV-Vis 吸收光譜。

(1) 設定光照時間與強度	(2) 點光源照射	(3) 於遮光布下實驗避免環境光源影響
		

(作者自行拍攝)

肆、研究結果與討論

一、藍、綠、紅光碳量子點的合成

我們選用檸檬酸、尿素及葉綠素作為碳量子點的反應原料，因為他們的取得來源相對天然，可以從許多植物萃取物或農業廢棄物中萃取取得原料，是對環境友善並可具循環利用價值的前驅物選擇。我們的合成設計是依據參雜比例與分子種類不同，希望有系統地調變碳量子點的光學特性。相較於藍色碳量子點，綠色碳量子點的合成有更高莫耳數的尿素參雜；而相較於藍色與綠色碳量子點，紅色碳量子點的合成過程有則更高分子量（尿素分子質量 60 g/mol；葉綠素分子質量 893.5 g/mol）的葉綠素分子參雜。



圖4 為實驗室製備之不同參雜劑與不同分散溶劑中的碳量子點，以 365 nm 波長 UV 激發，下所形成的七彩螢光。(作者自行拍攝)

(一) 碳量子點的結晶性與粒徑分析：高解析度穿透式電子顯微鏡 (TEM)

我們將所合成的三種碳量子點滴到銅網，以高解析度 TEM 影像拍攝影像 (圖 5 a-c)，測量所得的晶格間距皆是 0.21 nm，此結果與石墨 (100 facet) 的面內晶格間距是相匹配的，顯示三種碳量子點的核心是石墨而且具有良好的結晶性。

以 image J 軟體統計各顏色碳量子點的大小分佈，顯示我們合成的藍色碳量子點的平均粒徑尺寸為 2.78 ± 0.40 nm、綠色碳量子點的平均粒徑尺寸為 3.57 ± 0.70 nm、紅色碳量子點的平均粒徑尺寸為 4.70 ± 1.31 nm。而粒徑分佈以藍色碳量子點最佳 (RSD 14.38%)、綠色碳量子點其次 (RSD 19.58%)、與紅色碳量子點最差 (RSD 27.79%)。藍色碳量子點具有最集中的粒徑分佈 (圖 5 d)。我們推測尺寸變化與其顏色能隙大小有關，與光學特性的結合分析將於後續說明。

結果如預期，我們成功以檸檬酸作為主要碳源的體系下，分別參雜尿素與葉綠素合成了三種螢光顏色的碳量子點，並且各顏色碳量子點尺寸變化呈現預期的量子效應：量子點的光電特性隨著尺寸和形狀的變化而變化。直徑 5-6 nm 的較大量子點會發射更長的波長，並具有橙色或紅色等顏色。較小的 2-3 nm 量子點發射的波長較短，產生藍色和綠色等顏色。

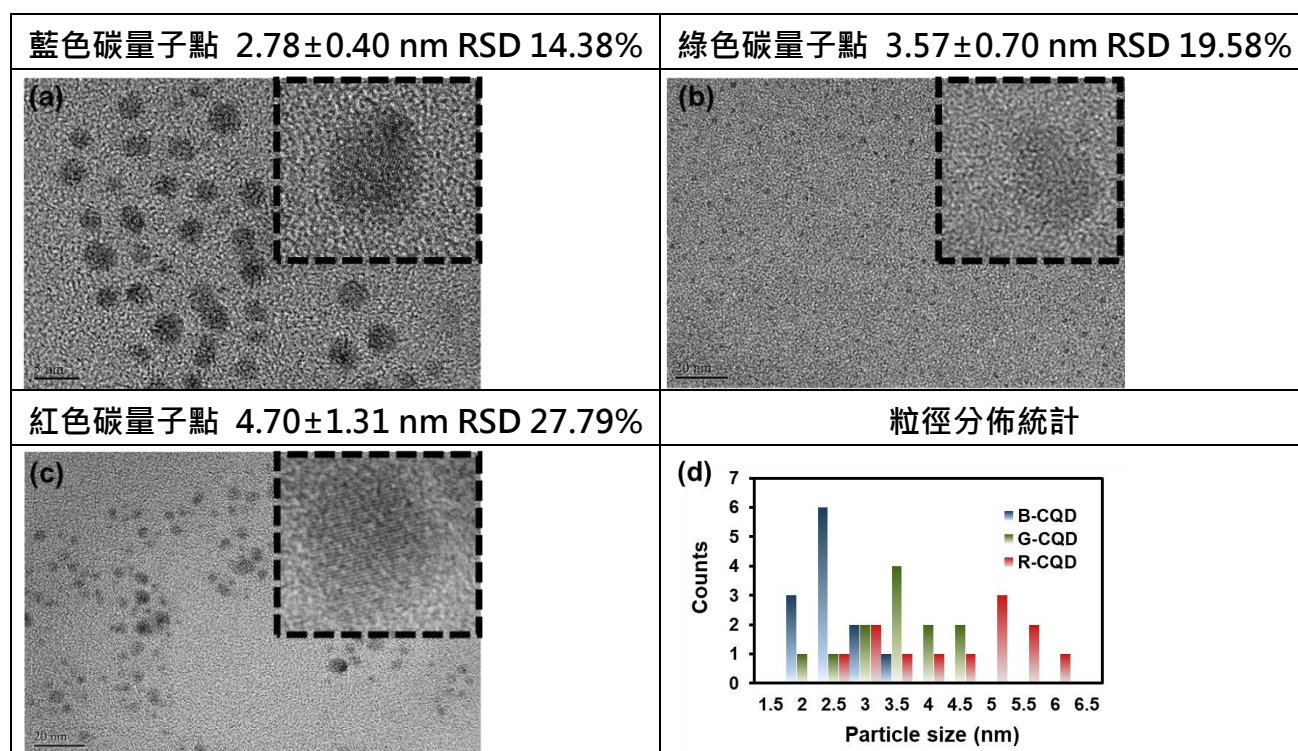


圖5 (a) 藍色碳量子點 (比例尺為 5 nm)、(b) 綠色碳量子點 (比例尺為 20 nm) 與 (c) 紅色碳量子點 (比例尺為 20 nm) 的 TEM 圖像 (d) 各色碳量子點的粒徑大小分佈統計。(作者自行拍攝繪製)

二、電紡螢光蠶絲的特性分析與先前研究之餵食法螢光蠶絲的比較

(一) 藍、綠、紅光碳量子點和螢光電紡絲在白光和 UV 光下的影像

我們先以肉眼觀察，分別比較 UV 光 (365 nm) 與白光下照射藍、綠、紅光碳量子點，可以很容易判別碳量子點合成成功，碳量子點呈現清晰的放光顏色 (圖 6a-c)，可以初步證實藉由參雜分子來調變螢光特性的成功。

與先前研究之餵食法螢光蠶絲的差異：我們去年的研究題目是以餵食法生產綠色螢光蠶絲，當時發現餵食塗藍色量子點的桑葉，蠶寶寶會吐出綠色螢光蠶絲 (圖 6g)。今年一開始我們進一步是測試餵食綠色量子點塗佈的桑葉，然而，卻發現蠶寶寶吐出螢光蠶絲的顏色變化不大，依舊是綠色無法進一步生產紅色螢光蠶絲，在螢光蠶絲產量、品質與特性的提升上受限 (圖 6h)。因此我們改變研究方向，在查找文獻後，決定測試電紡絲法製作螢光蠶絲。

在經過絲素蛋白製作與電紡絲參數優化過程後，我們最終使用混和絲素蛋白、聚乙二醇與碳量子點 (絲素蛋白/PEO/CQD) 所製作的高分子電紡絲。結果顯示，電紡螢光蠶絲非常明顯的維持了碳量子點的放光顏色，可以看到 UV 光下的電紡螢光蠶絲可以依序呈現與其相對應所加入碳量子點相同的螢光色 (圖 6d-f)。

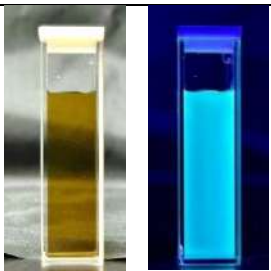
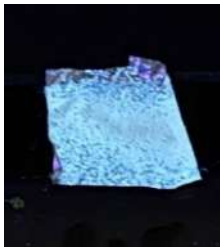
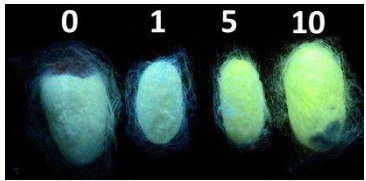
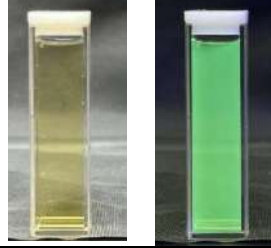
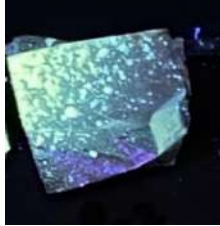
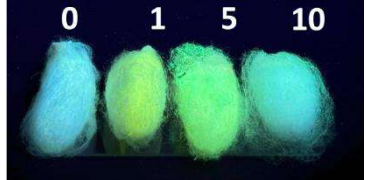
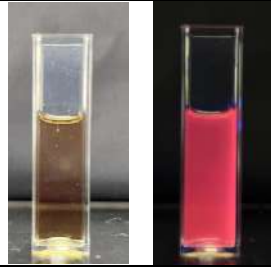
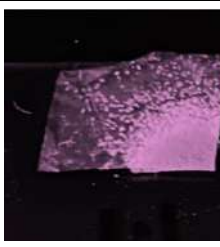
白光與 UV 光下的碳量子點		UV 光下的電紡絲法螢光蠶絲	UV 光下的餵食法螢光蠶絲
(a)		(d) 	(g) 
(b)		(e) 	(h) 
(c)		(f) 	ND

圖6 (a) 藍色 (b) 綠色和 (c) 紅色碳量子點在白光和紫外燈下的影像。(d-f) 藍、綠、紅光電紡絲法螢光蠶絲在 UV 光下的影像。餵食不同濃度 (g) 藍色碳量子點與 (h) 綠色碳量子點的螢光蠶絲在 UV 光下的影像。(作者自行拍攝)

(二) 螢光蠶絲的掃描電子顯微鏡 (SEM) 影像

和天然蠶絲 (對照組：餵食一般桑葉蠶的蠶絲) 相比 (圖 7a)，餵食法蠶絲在纖維接縫處有明顯積聚纖維、纖維直徑也較大，纖維表面也顯得較為粗糙 (圖 7b)。餵食綠色碳量子點的螢光蠶絲纖維表面更呈現不規則剝離，可以推斷蠶寶寶在吐出蠶絲的纖維排列可能受量子點影響 (圖 7c)。

以電紡絲法製作的螢光電紡絲則可以大幅縮小纖維直徑至奈米纖維尺度，這可以大幅增加纖維的比表面積，對提升表面觸媒活性會有很大幫助。添加量子點後的絲素蛋白/PEO 纖維直徑比對照組 (未添加量子點的絲素蛋白/PEO 纖維) 更小。而隨著添加量子點濃度的增加，絲素蛋白/PEO 纖維的表面皆不規則粗糙顆粒逐漸增大並呈現不規則團聚 (圖 7d-h)，同時也可以在綠色和紅色螢光電紡絲皆可以觀察到 (圖 8)。觀察放大 150K 倍的場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM) 影像，則可以看到螢光電紡絲表面排列的緻密量子點顆粒凸起；對照組 (未添加量子點的絲素蛋白/PEO 纖維) 則相對平滑很多 (圖 9)，證實我們成功以電紡絲法將三種顏色的量子點均勻分散於蠶絲纖維表面。

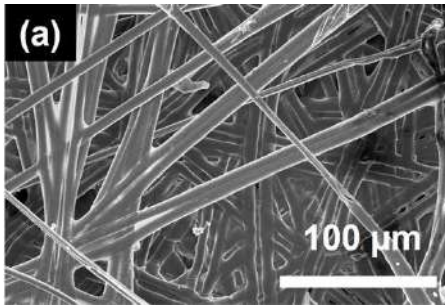
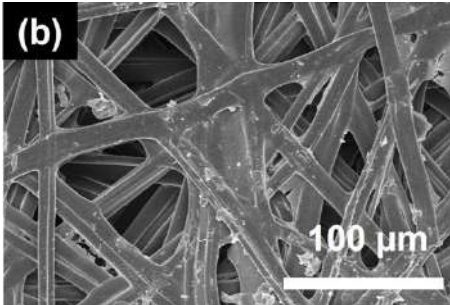
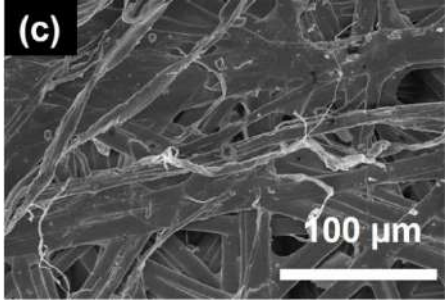
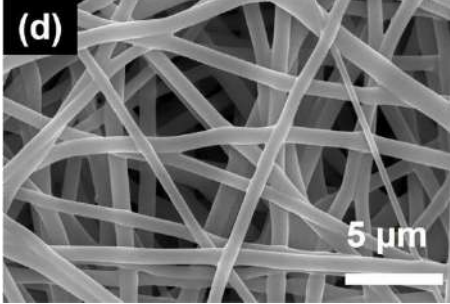
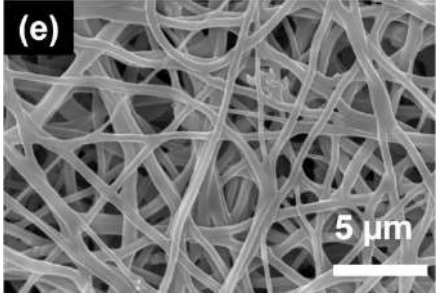
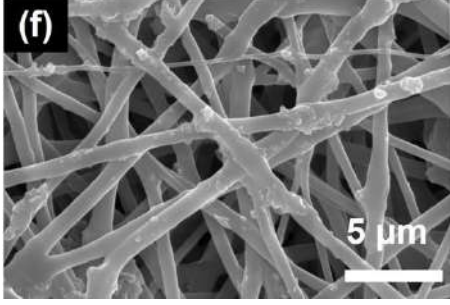
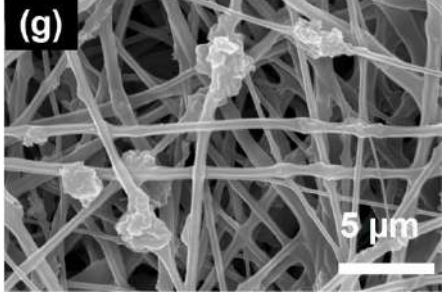
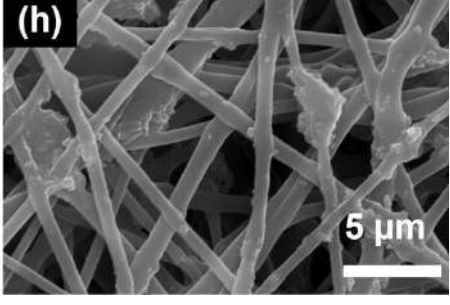
天然蠶絲 $8.1 \pm 2.7 \mu\text{m}$ (RSD 33.3%)	餵食法 BCQD-S $13.2 \pm 5.6 \mu\text{m}$ (RSD 42.0%)
(a) 	(b) 
餵食法 GCQD-S	絲素蛋白/PEO 纖維 $0.68 \pm 0.19 \mu\text{m}$ (RSD 28.4%)
(c) 	(d) 
絲素蛋白/PEO/ 1 wt% BCQD 纖維 $0.44 \pm 0.09 \mu\text{m}$ (RSD 21.0%)	絲素蛋白/PEO/ 2 wt% BCQD 纖維 $0.86 \pm 0.12 \mu\text{m}$ (RSD 13.6%)
(e) 	(f) 
絲素蛋白/PEO/ 4 wt% BCQD 纖維 $0.89 \pm 0.23 \mu\text{m}$ (RSD 25.9%)	絲素蛋白/PEO/ 8wt% BCQD 纖維 $0.97 \pm 0.19 \mu\text{m}$ (RSD 19.6%)
(g) 	(h) 

圖7 天然蠶絲、餵食法螢光蠶絲、電紡絲法螢光電紡絲的 SEM 影像。(作者自行拍攝)

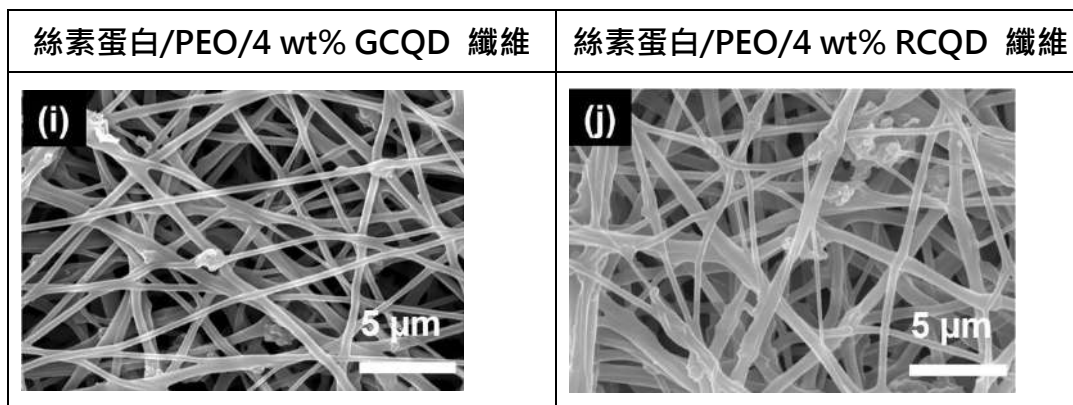


圖8 綠色和紅色電紡絲法螢光電紡絲的 SEM 影像。(作者自行拍攝)

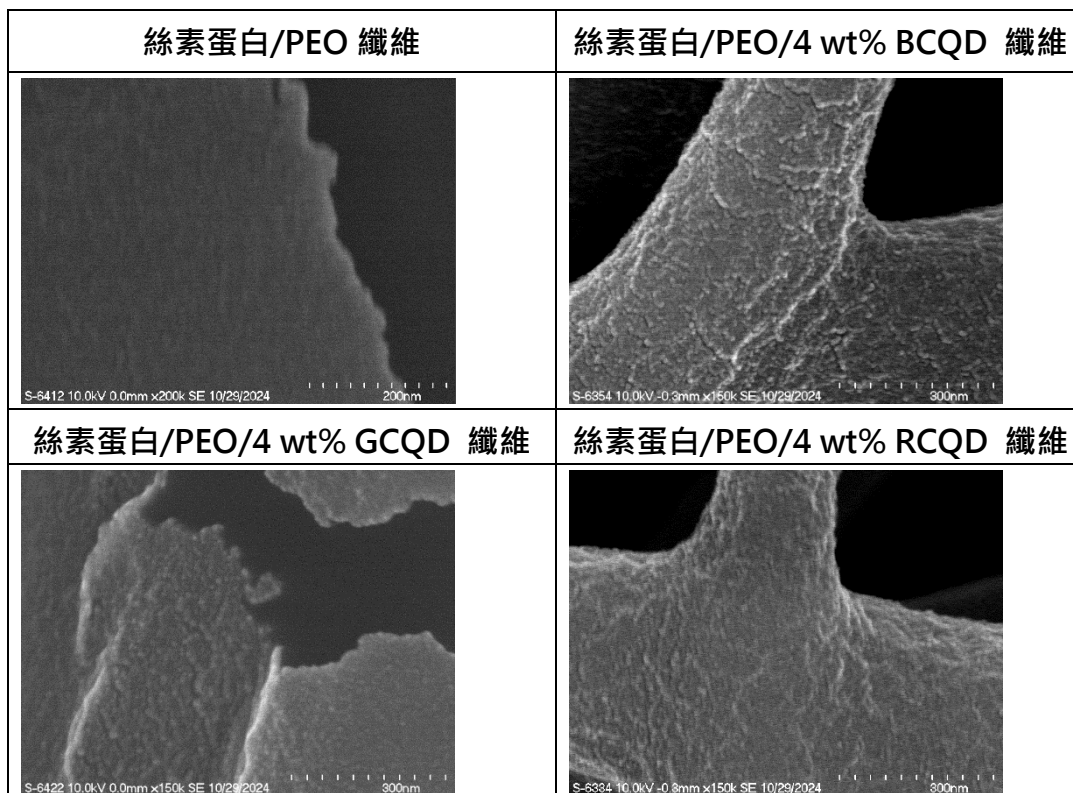


圖9 電紡絲法螢光電紡絲纖維的 FE-SEM 影像。(作者自行拍攝)

(三) 拉曼光譜

根據前人研究 (Liu 等, 2022; Wang 等, 2016; Cheng 等, 2017), 找出代表 β -sheet 結構的拉曼光譜特徵峰值為 1083 cm^{-1} 、 1226 cm^{-1} 與 1668 cm^{-1} 。天然蠶絲與去膠後的絲素蛋白皆有這些 β -sheet 結構的拉曼光譜特徵峰, 表示經過適當預處理的絲素蛋白維持天然蠶絲固有的氨基酸排列與特性。

綠碳量子點的拉曼光譜特徵峰值則出現在 1350 cm^{-1} 與 1580 cm^{-1} , 其中 1350 cm^{-1} 是 D band 代表的是石墨烯碳原子 sp^2 軌域的呼吸震動, 也是缺陷度指標; 1580 cm^{-1} 是 G band 代表的是石墨烯中 sp^2 雜化碳原子的面內振動模式, 也是結晶度指標。G/D 比被當作石墨結晶度的指標, 其值越大表示結晶度越高。綠碳量子點呈現的 G/D 比表示, 此碳核和表面缺陷會共同主導 PL 的發生。

而絲素蛋白/PEO/CQD 纖維 (螢光電紡絲) 的拉曼光譜顯示同時具有 β -sheet 結構、碳量子點的拉曼特徵峰, 此外 1150 cm^{-1} 則是聚乙二醇的拉曼特徵峰, 此結果證實了螢光電紡絲的材料特性組成。

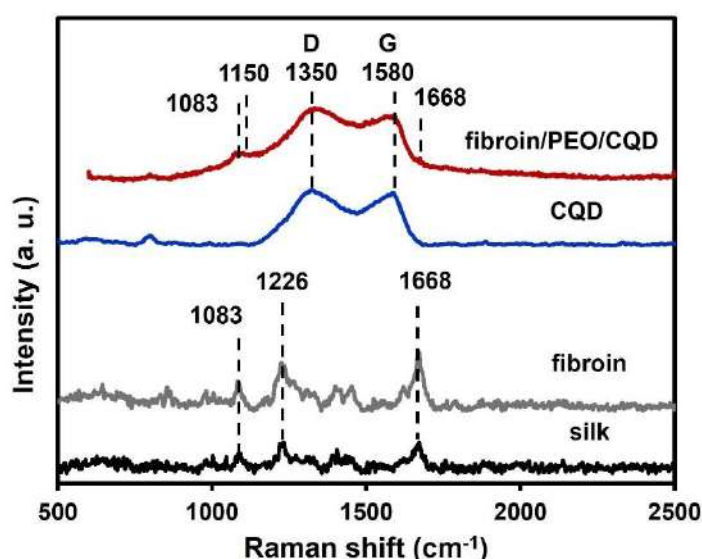


圖10 天然蠶絲、去膠溶解處理的絲素蛋白、碳量子點和絲素蛋白/PEO/CQD 纖維 (螢光電紡絲) 進行拉曼光譜分析。(作者自行繪製)

(四) 光致發光 (PL) 光譜

從 PL 光譜可以發現藍光碳量子點在 444 nm 、綠光碳量子點在 534 nm 、紅光碳量子點在 664 nm 有明顯的放射峰, 證明與其顏色能隙大小有關, 粒子尺寸越大、能隙越小、波長越長、顏色越往紅位移, 反之則越往藍位移 (圖 11a)。而藍、綠、紅光蠶絲的放射峰也符合其對應顏色量子點的放射峰。結果顯示電紡絲可成功電紡出不同顏色的螢光電紡絲 (圖 11 b-d) 並且可以維持放射峰的強度與峰半高寬, 表示量子點是均勻分布、沒有聚集而可以持續維持量子尺寸效應。

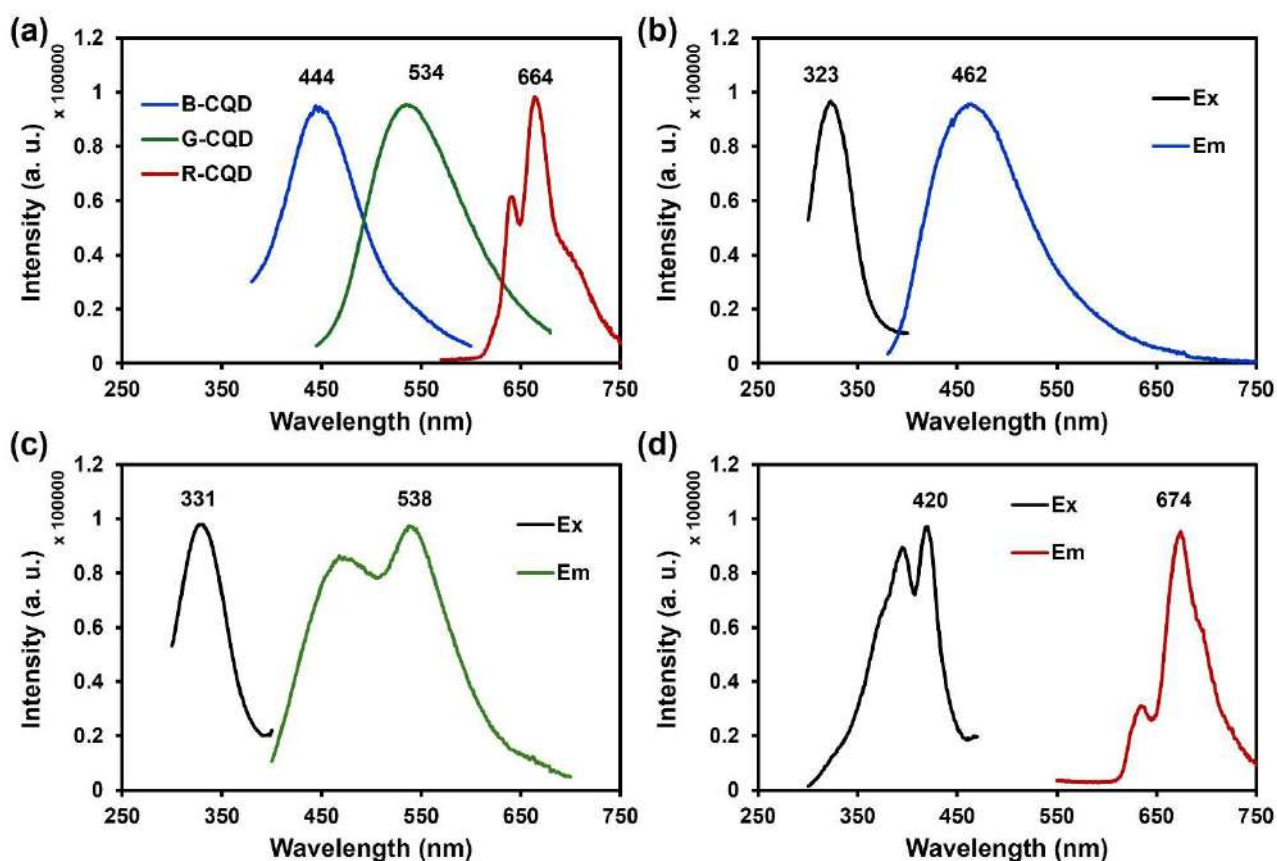


圖11 (a) 藍光、綠光、紅光碳量子點溶液；(b) 藍色 (c) 綠色和 (d) 紅色螢光蠶絲的 PL 光譜。(作者自行繪製)

三、螢光電紡絲的光動力染料降解效應探討

依照比爾-朗博定律，羅丹明 6G (R6G) 溶液的吸收光譜 (548 nm) 強度可以代表 R6G 溶液濃度的改變；亞甲基藍 (MB) 溶液的吸收光譜 (664 nm) 強度可以代表 MB 溶液濃度的改變。在 365 nm UV 光照射下進行 0.5/1/1.5/2 小時的光動力染料降解測試，測量殘留的 10^{-4} M R6G 在 548 nm 處和 MB 在 664 nm 處的吸收光譜，和同體積之 10^{-4} M R6G 初始溶液和電紡絲不照光組做比較。

從電紡絲不照 UV 光的部分來看，R6G 螢光強度、MB 螢光強度隨時間一直維持不變，而從 R6G、MB 照 UV 光的部分來看，可以發現其濃度隨時間變低，顯示其受 UV 光降解。而由結果圖可以看到電紡絲照 UV 光的部分濃度明顯更低於其他組，且可以發現降解 R6G 組以綠色電紡絲的效果最佳 (對 R6G 降解率 67%)；降解 MB 組以紅色電紡絲的效果最佳 (對 MB 光動力降解率 75%)，並且優於先前餵食法之螢光蠶絲 (對 R6G 降解率 60%)。

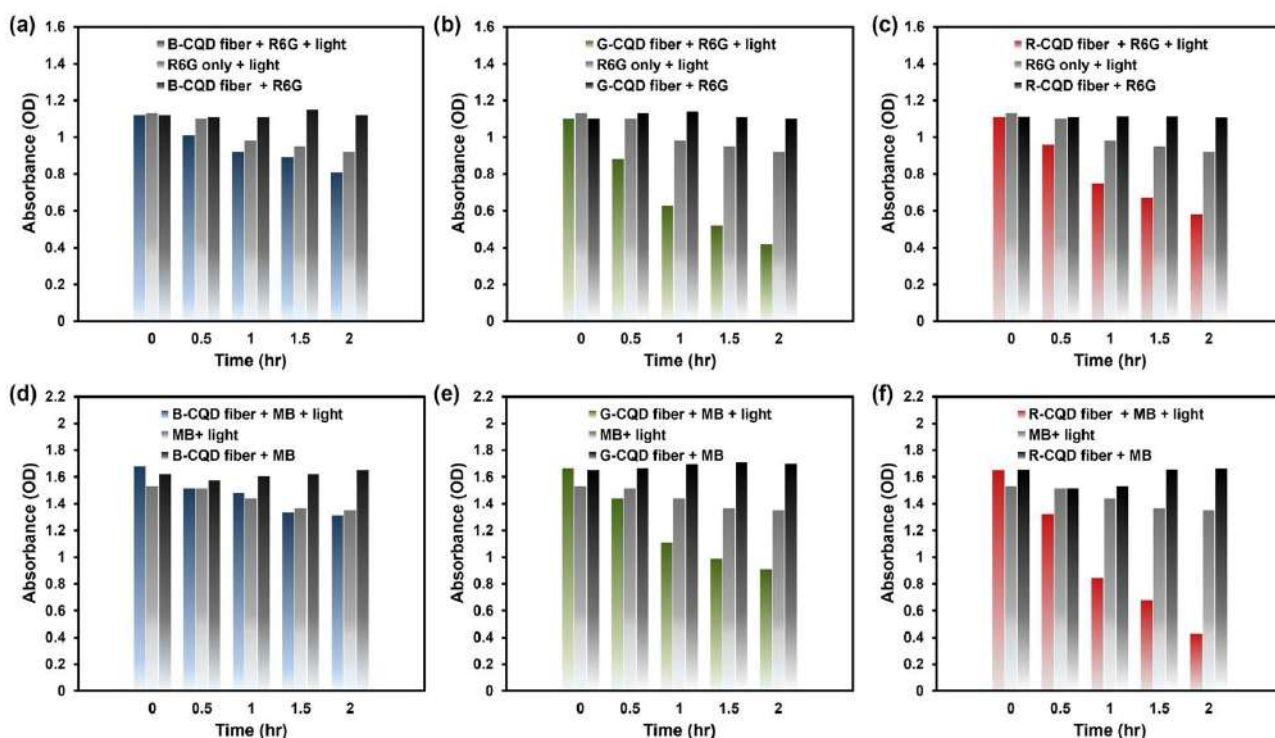


圖12 (a, d) 藍光電紡絲、(b, e) 綠光電紡絲、(c, f) 紅光電紡絲在光動力染料降解效應淨化污染物 (a-c) R6G 與 (d-f) MB 的結果。(作者自行繪製)

參考文獻 (Lui 等, 2021; Saputra 等, 2024) 推測可能之光動力降解機制 (圖 13) 說明，在 UV 光激發下形成電子電洞對，分別進行氧化及還原反應：氧化反應： $\text{H}_2\text{O} + \text{h}^+ \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{H}^+$ ，還原反應： $\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$ ， $\text{O}_2^- + \text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ ， $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{e}^- + \text{H}^+ \rightarrow \cdot\text{OH}$ ，因氫氧自由基不滿足八隅體而呈現不穩定狀態，進而攻擊有機分子，造成有機物降解。

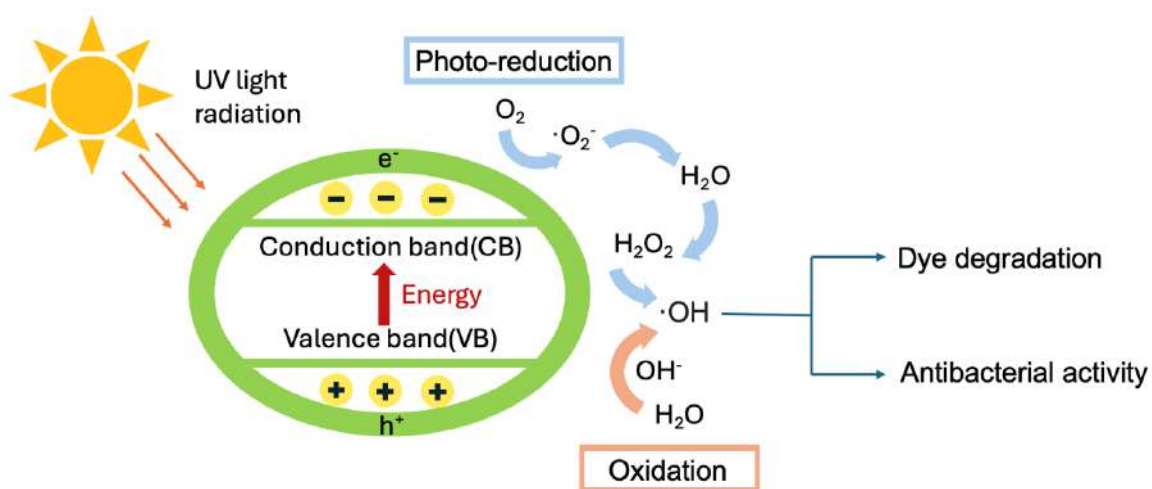


圖13 光催化降解效應機制。(作者自行繪製)

伍、 結論

本研究探討電紡絲碳量子點光動力活性螢光絲的特性分析、對環境污染物進行光動力降解及生醫環境應用。透過簡單的綠色製程，我們以簡單的煅燒方法和水熱合成法製成藍、綠、紅碳量子點。與去年研究(合成藍色碳量子點)的不同處與突破處在於，此次研究是在相同合成碳源體系下，進一步合成綠色與紅色的碳量子點。透過參雜比例與分子種類不同，我們成功有系統地調變碳量子點的光學特性並探討尺寸變化下能隙改變與量子效應的相關性。

接著我們以電紡絲法生產螢光蠶絲，過程盡可能降低廢棄物產生和有害物質的使用，既可以取代傳統染色劑、符合淨零排放精神。相較先前的餵食法研究，電紡絲法製程製作螢光蠶絲，可有效增加螢光變化、穩定製程與提升生產效率等，同時也使蠶寶寶有完整的生命週期，更符合生物倫理。

最後我們探討此螢光蠶絲以光動力降解的應用與機制，發現以綠色電紡絲的降解 R6G 效果最佳；以紅色電紡絲降解 MB 的效果最佳，並且優於先前餵食法之螢光蠶絲。

(一) 螢光蠶絲的優點

CQD 具有良好水相分散性與窄半峰全寬的螢光。TEM 顯示有良好尺寸分佈和優異結晶性。本研究將蠶繭製成絲素蛋白粉末，再將其加入聚乙二醇和甲酸配製成高分子溶液，並用來進行電紡絲製程。使用電紡絲生成螢光蠶絲能避免為了取平整的蠶絲而造成蠶寶寶死亡，且能有效控制產量、品質，增加螢光變化，因此更可以滿足市場供應需求。

(二) 電紡絲法螢光蠶絲的特性

PL 光譜證實電紡絲法可成功製作出不同顏色的螢光蠶絲。比起天然蠶絲與餵食法蠶絲，SEM 影像顯示電紡螢光蠶絲的結構更完整、纖維直徑可以大幅縮小纖維直徑至奈米纖維尺度，可以大幅增加纖維的比表面積，提升表面觸媒活性。場發射掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)影像，則可以看到螢光電紡絲表面排列的緻密量子點顆粒凸起，證實我們成功以電紡絲法將三種顏色的量子點均勻分散於蠶絲纖維表面。拉曼光譜證明電紡螢光蠶絲的 β 折疊結構與天然螢光蠶絲相似，並具有綠碳量子點的 G 與 D 帶特徵峰，也表示此碳核和表面缺陷共同主導 PL 的發生。

(三) 電紡絲法螢光蠶絲的應用

R6G、MB 光降解實驗的結果顯示螢光電紡絲能有效移除 R6G、MB，探究其原因在於碳量子點提供了額外光動力降解機制產生之氫氧自由基分解了 R6G、MB。氫氧自由基的高反應性，同時具有殺菌抗病毒之潛力。

(四) 永續發展目標

此 CQD-S 的研究符合永續減碳，並兼具創新性與產業應用性。本研究亦切合聯合國 17 項永續發展目標 (SDGs) 中**第三項：健康與福祉**、**第六項：清潔飲水及衛生設施**與**第十二項：確保永續消費和生產模式** (如圖 14)。



圖14 本研究的預期達成的永續發展目標。(來源：聯合國)

陸、 未來展望與應用

具光動力活性的碳量子點螢光蠶絲可在環保和醫療領域擁有廣泛的應用前景。基於本研究的發現，電紡螢光蠶絲展現出優異的光催化降解環境污染物的能力，尤其適合應用於自清潔織物材料，使其能在光照下自行降解附著的污染物，減少化學清潔劑的使用並降低環境負荷。

在抗菌應用方面，螢光蠶絲的光動力活性可有效對抗細菌，有潛力被開發為抗菌纖維材料，用於生產防護衣物、家用紡織品、醫療敷料等。這類自淨性抗菌材料可在醫療場所、公共環境等細菌高風險區域提供長效保護。此外，因蠶絲材料對皮膚友好的特性，該螢光纖維可用於製作安全、有效的醫療敷料，有助於降低感染風險並促進傷口癒合。

長照醫療方面，螢光電紡絲製作的自清潔抗菌醫療服能夠提供更高的衛生標準，降低醫療環境中的感染風險，同時提高醫護人員的舒適度和工作效率。若做為長照病人的病服，則可以在日常環境光源下持續自潔抗菌，延長替換頻率，降低病患因移動造成的不適。

民生應用方面，可以開發去異味的運動機能衣。透過直接照射太陽光就能去異味的運動機能衣，方便經常運動的人免於煩惱因排汗而造成的異味，同時，蠶絲布料較親膚，整體感覺更舒適。

未來研究可以進一步優化碳量子點蠶絲的穩定性、螢光亮度和抗菌效率，以適應各種應用需求。結合人工智慧與大數據分析，還可預測最佳量子點配方，進一步提升光催化和抗菌表現。

柒、 參考文獻

1. Ramos, N., Miranda, M. S., Franco, A. R., Silva, S. S., Azevedo, J., Dias, I. R., Reis, R. L., Viegas, C., & Gomes, M. E. (2020). Toward spinning greener advanced silk fibers by feeding silkworms with nanomaterials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8.32: 11872-11887.
2. Reizabal, A., Costa, C. M., Pérez-Álvarez, L., Vilas-Vilela, J. L., & Lanceros-Méndez, S. (2023). Silk fibroin as sustainable advanced material: material properties and characteristics, processing, and applications. *Advanced Functional Materials* 33.3: 2210764.
3. Zhang, L., Yang, X., Yin, Z., & Sun, L. (2022). A review on carbon quantum dots: Synthesis, photoluminescence mechanisms and applications. *Luminescence* 37.10: 1612-1638.
4. Li, Q., Gong, H., Jia, X., Wang, R., Liu, Z., Zhang, L., ... & Jiao, T. (2024). Electrospinning Silk-Fibroin-Based Fibrous Membranes with AgNPs for Antimicrobial Application. *Polymers*, 16(5), 648.
5. Liu, J., Kong, T., & Xiong, H. M. (2022). Mulberry-Leaves-Derived Red-Emissive Carbon Dots for Feeding Silkworms to Produce Brightly Fluorescent Silk. *Advanced Materials* 34.16: 2200152.
6. Wang, Q., Wang, C., Zhang, M., Jian, M., & Zhang, Y. (2016). Feeding single-walled carbon nanotubes or graphene to silkworms for reinforced silk fibers. *Nano Letters* 16.10: 6695-6700.
7. Cheng, L., Huang, H., Chen, S., Wang, W., Dai, F., & Zhao, H. (2017). Characterization of silkworm larvae growth and properties of silk fibers after direct feeding of copper or silver nanoparticles. *Materials & Design* 129: 125-134.
8. Liu, Y. Y., Yu, N. Y., Fang, W. D., Tan, Q. G., Ji, R., Yang, L. Y., Wei, S., Zhang, X. W., & Miao, A. J. (2021). Photodegradation of carbon dots cause cytotoxicity. *Nature communications* 12.1: 812.
9. Saputra, A. M. A., Piliang, A. F. R., Goei, R., Ramadhan, H. R., & Gea, S. (2024). Synthesis, properties, and utilization of carbon quantum dots as photocatalysts on degradation of organic dyes: A mini review. *Catalysis Communications*, 106914.

【評語】100039

此一作品以電紡絲法製作光動力活性的碳量子點螢光蠶絲，期望達到降低汙染物與抗菌的應用。實驗架構完整且內容具有實用價值。

1. 建議可以加強作品應用之基本原理如碳量子點之合成、成分之調配、粉末之準備與光動力降解等加強論述。
2. 同學認為「布料是聚酯纖維，然而其原料—石油，對環境影響很不環保」，但 PEO 亦為石化產品。
3. 量子點既可以透過產生自由基的光化學過程，降解色素分子，且可以有效對抗細菌，如何認為其對皮膚友好？
4. 呈現 TEM 影像時，應同時呈現電子繞射圖與至少兩個不平行結晶面的資訊。