

逢甲大學學生報告 ePaper

**CM6@Zn-MOF 奈米片的人工光補系統，
大幅提升光電效能**

**Artificial light harvesting system of CM6@Zn-MOF
nanosheets with highly enhanced
photoelectric performance**

學生：賴信汝

系級：材料三甲

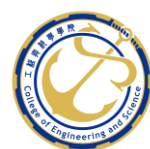
學號：D1148384

授課教授：駱榮富 教授

課程名稱：專題討論

開課系所：材料三甲

開課學年：113 學年度 第 2 學期



摘 要

二維鋅金屬有機框架 (Zn-MOF)，可以應用在人工光能收集系統上，也就是模仿植物行光合作用來收集光能的技術。設計了一種結構特殊的 Zn-MOF，利用了兩種有機配體(H_2mpda 和 tib)去合成這個材料，然後用原子力顯微鏡 (AFM) 確認這個材料的厚度大概只有 5 奈米。用超音波剝離技術，成功做出表面積很大的 Zn-MOF 奈米片。這些奈米片的特點是它們的螢光發射光譜跟 CM6 的紫外-可見光吸收光譜重疊，因此可以進行一種叫做螢光共振能量轉移 (FRET) 的機制，這個機制可以讓能量從一個分子傳遞到另一個分子，應用在人工光能收集系統 (ALHS) 上非常有潛力。跟傳統單晶的 Zn-MOF 相比，這種新型的材料 CM6@Zn-MOF(2) 有更大的比表面積 ($41\text{ m}^2/\text{g}$)、更高的量子產率 (約 30.56%)、更窄的能隙 (2.87 eV)，而且吸收光的範圍可以延伸到可見光區的綠光。更重要的是，它有很好的光電表現，像是開關電流比 (21 倍) 和光電流密度都比純 Zn-MOF 還要高。這篇研究提出了一種新材料，不但可以有效收集光能、轉換光成電，還為未來在光學裝置和電化學材料的應用上，打下了理論基礎。

關鍵字：金屬有機框架 (MOFs)；螢光共振能量轉移 (FRET)；人工光能收集系統；Coumarin 6；光電流響應

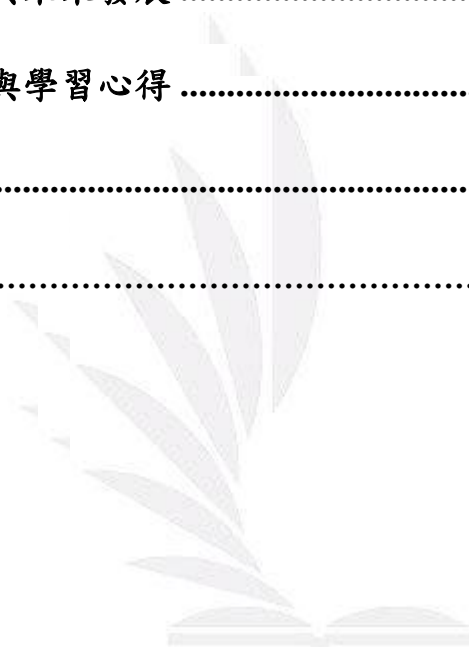
Abstract

A two-dimensional zinc metal-organic framework (Zn-MOF) can be applied in artificial light-harvesting systems, which mimic the photosynthesis of plants to collect solar energy. A specially structured Zn-MOF was designed using two organic ligands (H_2mpda and tib) to synthesize this material. Atomic force microscopy (AFM) confirmed that the thickness of the material is approximately 5 nanometers. Using ultrasonic exfoliation, Zn-MOF nanosheets with a large surface area were successfully produced. These nanosheets are characterized by the overlap between their fluorescence emission spectrum and the UV-visible absorption spectrum of CM6, enabling a mechanism known as Förster Resonance Energy Transfer (FRET). This mechanism allows energy to be transferred from one molecule to another, making it highly promising for applications in artificial light-harvesting systems (ALHS). Compared with traditional single-crystal Zn-MOFs, this novel material, CM6@Zn-MOF(2), possesses a larger specific surface area ($41\text{ m}^2/\text{g}$), higher quantum yield (approximately 30.56%), narrower band gap (2.87 eV), and its light absorption range extends into the visible green region. More importantly, it exhibits excellent photoelectric performance, such as a higher on/off current ratio (21 times) and greater photocurrent density than pure Zn-MOF. This study introduces a new material that not only effectively captures light energy and converts it into electricity but also lays a theoretical foundation for future applications in optical devices and electrochemical materials.

Keywords: Metal–Organic Frameworks (MOFs); Förster Resonance Energy Transfer (FRET); Artificial Light-Harvesting System (ALHS); Coumarin 6; Photocurrent Response.

目錄

1. 研究背景與現況.....	4
2. 實驗構想.....	6
3. 基本理論.....	7
4. 實驗方法.....	8
5. 結果與討論.....	12
6. 本研究的應用潛力與未來發展	21
7. 對本篇論文的觀察與學習心得	23
8. 結論.....	24
9. 參考文獻.....	25



1. 研究背景與現況

隨著全球對可再生能源需求日益提升，以及氣候變遷議題的日漸嚴重，如何有效利用太陽能成為現代科學技術發展的核心挑戰之一。在自然界中，植物、藻類所進行的光合作用，是目前已知最有效的太陽能捕捉與轉換機制。這些生物體內部所具備的光合作用系統，主要依賴複雜的蛋白質-色素複合體（如葉綠體中的天線蛋白）進行太陽光的吸收與能量轉移，並最終將能量傳遞至反應中心，進行一連串的光反應與化學轉換，生成有機分子作為能量儲存形式。

受到自然光合作用的啟發，人工光合系統（Artificial Light-Harvesting Systems, ALHS）因其能夠模擬並重現這一過程，近年來在材料化學、能源科學、光電轉換與仿生工程領域成為研究焦點。建立一個有效的 ALHS，需要材料具備數項關鍵條件：良好的光吸收能力、能量轉移效率高、結構穩定、可調性強，且具備對外界環境刺激的感應能力。這些需求促使科學家不斷探索與開發新穎的功能材料。

其中，金屬有機框架材料（Metal-Organic Frameworks, MOFs）因其高度有序的孔洞結構、可調控的孔徑大小、高比表面積，而被認為是實現人工光合系統的理想平台。MOFs 是一種由金屬離子和有機配體組成的晶體材料，形成三維或二維結構的晶體網絡，其結構特性不

僅提供良好的分子封裝能力，還可作為染料分子在空間中的固定點，有效控制排列方向與距離，從而促進能量轉移效率。

特別是當螢光染料如 Coumarin 6 被嵌入 MOF 孔洞中時，可藉由 MOF 的孔洞尺寸與配位環境，提升染料的化學穩定性與耐光性，並可避免染料間的能量淬滅現象 (aggregation-caused quenching, ACQ)，進一步增強其光學性能。Coumarin 6 是一種常見的有機染料，具備高螢光量子產率與良好的光穩定性，其吸收光譜與某些 MOF 的發光波段有良好重疊，適合作為能量轉移研究中的受體分子 (acceptor)。

此外，近年研究發現 MOF 內部的結構可模擬自然光合作用中的共振能量轉移 (Förster Resonance Energy Transfer, FRET) 機制。FRET 是一種非輻射性的能量轉移方式，當供體 (donor) 與受體分子在距離上足夠接近、且光譜重疊良好時，能量可從激發態的供體分子傳遞至未激發的受體分子，而不需經過光子的釋放與吸收過程。這對於人工光合系統的能量收集與轉移效率具有關鍵影響。

綜合上述，將高螢光性染料分子 (Coumarin 6) 嵌入具光學活性之 MOF 結構中，可望建構出兼具穩定性、方向性與高效率的光能轉換平台，並為人工光合材料的發展開闢出一條新的技術路徑。透過深入

探討 MOF 與染料間的能量轉移機制，可望進一步推動 ALHS 在太陽能利用、光催化反應與發光元件等領域的應用潛力。

2. 實驗構想

在這項研究中，設計一個模擬天然光合作用中能量傳遞機制的人工光合系統。選擇以鋅金屬有機框架（Zn-MOF）為主要材料，並將有螢光特性的染料 Coumarin 6（簡稱 CM6）嵌入 Zn-MOF 的孔洞結構中，建立一個具備能量轉移功能的模型系統。

在這個系統中，Zn-MOF 本身能吸收特定波長的光並產生螢光，因此被視為能量的「供體」；而 Coumarin 6 可以吸收 Zn-MOF 發出的光並再發射出自己的螢光，扮演能量「受體」的角色。這種能量從一個分子傳遞到另一個分子的過程，就像自然界光合作用中所發生的現象，稱為螢光共振能量轉移（FRET）。

透過控制 Coumarin 6 在 Zn-MOF 中的濃度，來觀察和比較不同條件下的能量轉移情形。這樣的設計不僅可以深入了解染料分子在 MOF 中如何分佈、是否會彼此干擾，還能探討這些因素如何影響整

體的發光強度與能量傳遞效率。這項研究為未來開發高效率的太陽能轉換材料、光電元件或感測材料提供重要的基礎資訊與設計思路。

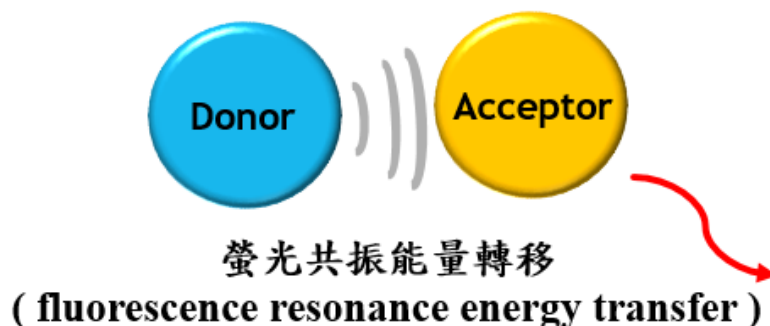
3. 基本理論

本研究之核心理論基礎為螢光共振能量轉移 (FRET)。它是一種長距離非輻射能量轉移機制，其效率依賴於供體與受體分子之間的距離、供體螢光光譜與受體吸收光譜之重疊程度，以及兩者間的相對取向。在 MOF 系統中，FRET 機制常見於主客體間能級匹配良好且空間接近之情況。

能量轉移效率 (Φ_{ET}) 可透過下式計算：

$$\Phi_{ET} = 1 - \frac{I_{DA}}{I_D}$$

其中 I_{DA} 為在受體存在下供體的螢光強度， I_D 為無受體時的供體螢光強度。當受體吸收光譜與供體發射光譜有良好重疊時，即可觀察到顯著的能量轉移現象。Coumarin 6 的吸收波段與 Zn-MOF 的發光波段具有良好的光譜重疊，因此非常適合作為 FRET 的研究對象。



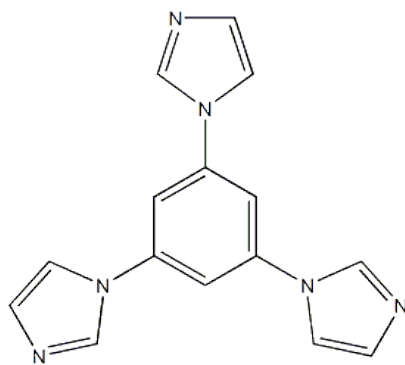
4. 實驗方法

4.1 實驗材料

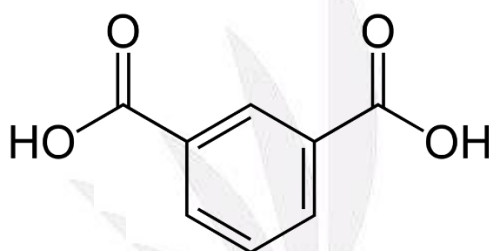
(1)合成 Zn-MOF 使用了三種前驅物：

硝酸鋅六水合物 ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 是 MOF 結構中的金屬離子來源，提供 Zn^{2+} 作為金屬節點。 Zn^{2+} 與有機配體結合後，形成穩定且具有孔洞結構的 MOF 晶體，這些孔洞便是後續嵌入染料 CM6 的空間基礎。

1,3,5-三(1-咪唑基)苯 (tib) 是一種多齒有機配體，含有三唑環與苯環結構，具有良好的配位能力。tib 可以與 Zn^{2+} 形成穩定的三維框架結構，同時提供氮原子供金屬配位，使整個 MOF 具有剛性與穩定性，也有助於形成規則的孔洞排列。

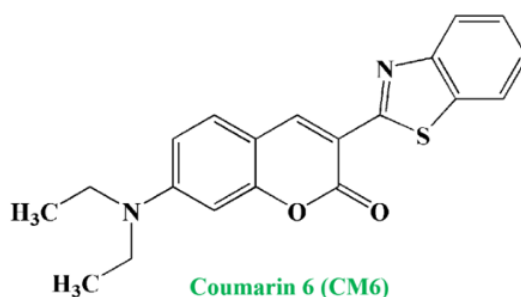


間苯二甲酸 (H_2mpda) 是另一種有機酸類配體，提供羧酸官能基與 Zn^{2+} 形成配位鍵。 mpda 的芳香環結構也能增強 MOF 的剛性與導電性，有利於後續能量轉移過程中的電子運輸。



(2) 螢光染劑

CM6 作為能量接收材料，主要原因是其吸收波段與 Zn-MOF 的發光波段有良好重疊，適合用來建立螢光共振能量轉移模型。CM6 具有高純度與穩定性，能有效嵌入 MOF 結構中而不易降解。



(3)溶劑

乙醇、N,N-二甲基甲醯胺（DMF），兩者皆為常見的有機溶劑，用於合成與分散 MOF 材料。

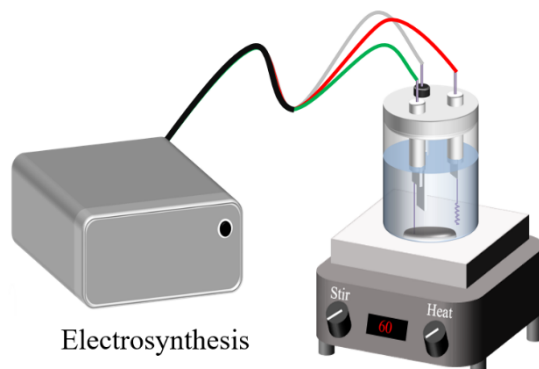
(4)三電極系統

工作電極是 FTO 導電玻璃，它是一種透明導電材料，表面具有良好的導電性，在實驗中，CM6@Zn-MOF 樣品會滴塗在 FTO 表面，乾燥後形成活性薄膜，這個薄膜會參與實際的電子轉移反應，因此 FTO 玻璃就是測試光電材料性能的主要平台。

對電極是鉑片，它具備高導電性與化學惰性，能承受電解過程中產生的電流而不被腐蝕，它的作用是完成整個電流迴路，使電子能從工作電極移動到對電極，保持系統電荷平衡，不參與反應本身，只提供電子傳導路徑。

參考電極是 Ag/AgCl 電極，它是一種標準電極，提供一個穩定且已知的電位基準點，能夠準確測量工作電極的電位變化，獲得可靠的電化學數據。Ag/AgCl 電極的電位不會因電解反應而改變。

電解質溶液是 0.5 M 硫酸鈉，它是中性鹽，不會與材料發生副反應，能維持實驗條件穩定，確保電子從工作電極流向對電極的同時，離子在溶液中移動以維持電荷平衡。



Electrosynthesis

4.2 實驗流程

(1) Zn-MOF 的合成

在 20 mL 的玻璃瓶裡面把硝酸鋅六水合物、tib、H₂mpda 各 0.1 mmol，分別加入 2 mL 氫氧化鈉水溶液（濃度為 0.065 M）和 2 mL 純水中。溶液經過超音波震盪 30 分鐘後，密封並在 95°C 下加熱一週。冷卻後會產生淡黃色晶體，即為所需的 Zn-MOF。

(2) CM6@Zn-MOF 的製備

將合成好的 Zn-MOF 分散在乙醇中，經過超音波震盪 30 分鐘後，形成均勻懸浮液。取 10 mL，分別加入不同體積（200–1000 μ L）濃度為 1 μ M 的 CM6 乙醇溶液，混合均勻後用離心機以 8000 rpm 轉速離心 5 分鐘，並將沉澱物乾燥，即可得到不同濃度的 CM6@Zn-MOF 樣品。這些樣品分別命名為 CM6@Zn-MOF(1)到(5)。

(3)電化學測試樣品的製備

將製備好的 CM6、Zn-MOF 以及不同濃度的 CM6@Zn-MOF 懸浮液，滴加在 2 x 2 cm 的導電玻璃 (FTO) 上，乾燥後作為工作電極進行電化學測試。

5. 結果與討論

5.1. 螢光染料濃度對光電性能之影響與最佳組成選擇

在本研究中，共製備了五種不同濃度的複合材料樣品，分別命名為 CM6@Zn-MOF(1) 至 CM6@Zn-MOF(5)，其主要差異在於引入 Zn-MOF 中的螢光染料 CM6 添加量不同。透過調控染劑濃度，可系統性探討其對能量轉移效率與光電性質的影響，進而篩選出最佳的光電性能材料。

在圖 a 中，CM6@Zn-MOF(2) 表現出顯著的光電特性。在可見光照射 10 秒後，其光電流密度迅速上升，顯示材料對可見光具有良好的感應能力；當光源關閉後，電流密度迅速降至接近零，說明其能準確對光照產生即時反應。經過多次重複的開關光循環測試後，CM6@Zn-MOF(2) 的光電流密度依然穩定且無明顯衰減，展現了良好的光穩定性與循環再現性。

此外，圖 b 的 EIS 測試圖，可觀察到 CM6@Zn-MOF(2) 的 Nyquist 曲線所對應的半圓弧最小，代表其電荷傳輸阻抗最低，這代表在光照作用下，電子可以更快速且順利地在材料內部傳導，提升整體能量轉換效率。而在低頻區域的直線段中，CM6@Zn-MOF(2) 的斜率最高，代表它的離子擴散阻力最低，有利於離子在電解質與材料界面間的遷移與交換，進一步改善整體導電性。

綜合上述光電流響應與電化學阻抗分析結果可以知道，CM6@Zn-MOF(2) 在所有樣品中展現出最佳的光學與電化學性能。不僅在光電流密度方面具有高靈敏度與穩定性，也在電荷與離子傳輸上具有最低阻抗與最佳效率。因此，本研究選擇 CM6@Zn-MOF(2) 作為後續實驗的重點分析，藉以深入探討其在人工光合系統中的應用潛力。

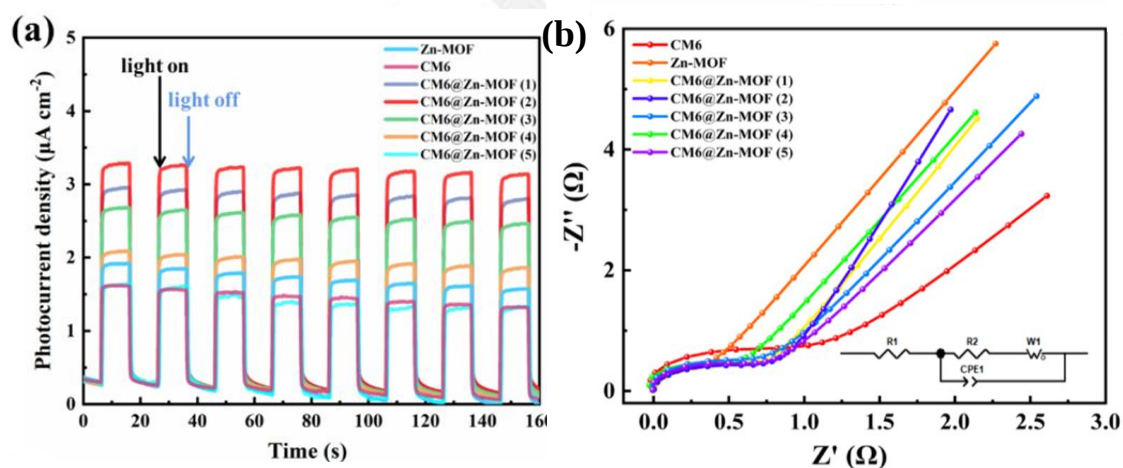


圖 1. (a) 光電流密度-時間曲線圖 (b) CM6@Zn-MOF(1)~(5)的 EIS 測試圖。

5.2. Zn-MOF 的晶體結構解析與層狀排列特徵

透過單晶 X 射線繞射分析可知，Zn-MOF 結晶於單斜晶系，空間群為 $P2_1/c$ ，說明它具有良好的晶體規則性與可解析的三維結構。從圖二的(a)中，可以發現 MOF 中的 Zn(II) 金屬中心呈現扭曲的四面體幾何構型，每一個鋅離子分別與兩個氮原子（來自 tib 配體）與兩個氧原子（來自 mpda 配體）進行配位，形成穩定的金屬節點。根據晶體學數據，Zn–N 鍵長約介於 1.991 Å 至 2.056 Å，Zn–O 鍵長則約為 1.933 Å 至 1.984 Å，皆落在典型配位鍵長範圍之內，顯示結構穩定。

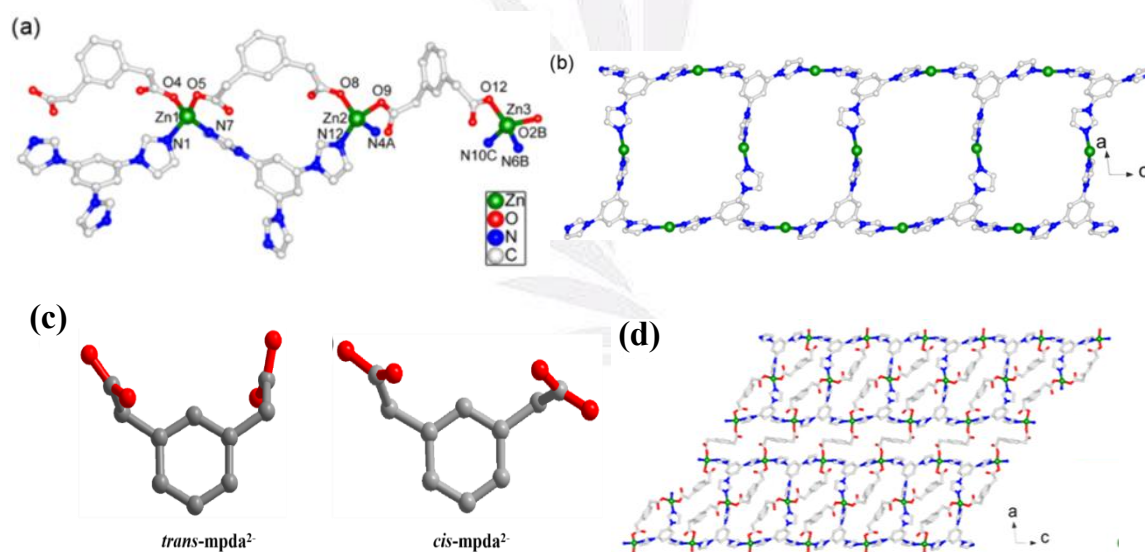


圖 2. (a) Zn 離子的配位環境 (b)沿 c 軸方向，tib 配體和 Zn(II) 離子連接形成一維梯子狀的鏈狀結構 (c) 反式與順式 mpda 配體 (d) 沿 [010] 方向觀察的 Zn-MOF 二維層狀結構。

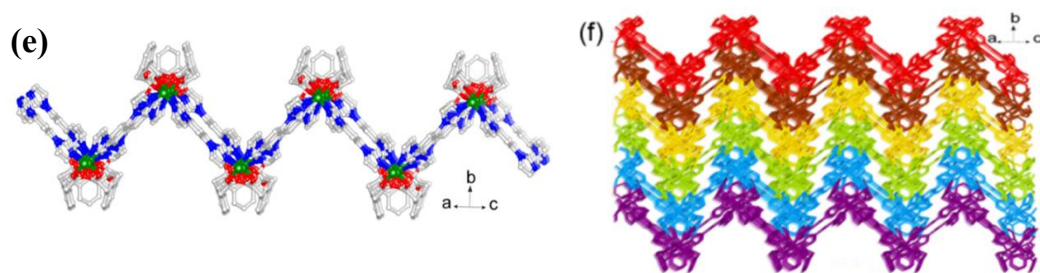


圖 2. (e) Zn-MOF 呈現波浪狀的層狀結構 (f) 二維的層狀結構堆疊，形成 3 維的結構。

圖二的 b，沿著晶胞的 c 軸方向，三齒式的 tib 配體與 Zn(II)

離子重複連接，形成一維「梯子狀」的鏈狀結構。圖 c，mpda 配體在結構中以反式 trans 與順式 cis 兩種構型共存。圖 d，羧酸官能基以單齒 ($\mu_1 - \eta_1 : \eta_0$) 的配位模式向鏈狀結構的上方延伸，交織出如圖 e 所示的「波浪狀」二維層狀結構。

圖 f，這些層狀結構以 AAAA 模式重複堆疊，在層與層之間形成穩定的 C-H $\cdots\pi$ 超分子作用力，形成三維晶體的結構，進行超音波剝離，可以破壞 Zn-MOF 層和層之間較弱的分子作用力，得到接下來進行實驗的 2D 奈米片

5.3. Zn-MOF 二維奈米片的剝離與形貌觀察

Zn-MOF 有 2D 層狀結構，進行超音波剝離，可以破壞 Zn-MOF 層和層之間較弱的分子作用力，得到接下來進行實驗的 2D 奈米

片。從圖三的 a，原子力顯微鏡圖可以看到 Zn-MOF 各層之間的間隙，它是層狀排列，並測得單層厚度約為 5 nm。圖 b 是 SEM 圖，Zn-MOF 看起來也是層狀結構。圖 c，可以看到，CM6@Zn-MOF(2) 的表面比純 Zn-MOF 更粗糙，但仍保有二維納米片結構。

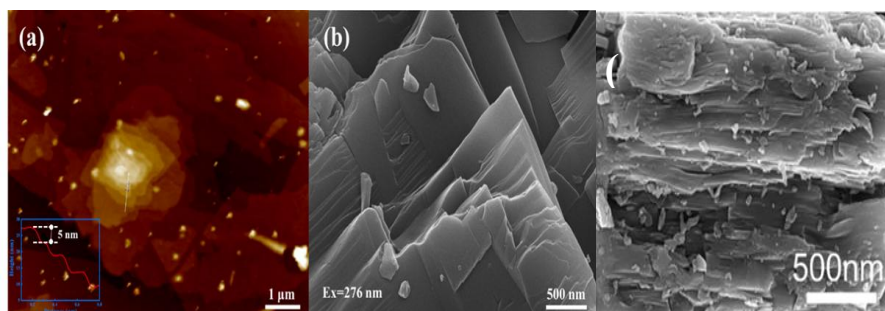


圖 3. (a) Zn-MOF 的原子力顯微鏡圖。(b) Zn-MOF 的 SEM 圖。(c) CM6@Zn-MOF(2) 的 SEM 圖。

5.4. 比表面積與光吸收能力的提升分析

在比表面積與光吸收能力方面，CM6@Zn-MOF(2) 同樣展現出顯著優勢。如圖四的 a 所示，透過氮氣吸脫附實驗獲得的等溫線中，藍色曲線代表的 CM6@Zn-MOF(2) 顯示出較高的氮氣吸附量，相較於紅色曲線的純 Zn-MOF 有明顯提升。這表示在經由染料 C6 修飾後，MOF 結構不僅未被阻塞，反而可能因為染料分子的存在導致孔道壁表面發生重新排列或層間距微調，進而提高了整體比表面積。比表面積提升，代表材料表面可提供更多潛在的反應活性位點，進一步增強光捕獲、能量轉移與電荷傳遞的效率。

在光吸收特性方面，如圖 b 所示的紫外-可見光吸收光譜中，Zn-MOF 在 300 ~ 400 nm 的紫外區有明顯的吸收峰，主要來自其有機配體的 $\pi-\pi^*$ 躍遷。然而，當 CM6 染料被成功嵌入後，CM6@Zn-MOF(2) 的吸收範圍顯著拓展至可見光與近紅外區，波長最高延伸至約 800 nm，顯示它具有更廣的光響應範圍。這項特性對於提升光能利用效率尤其重要，因為太陽光中絕大部分的能量分布在可見光與近紅外區。透過延展材料的吸收能力，使其能捕捉更多波長的光子，有助於最大化光能轉換與應用效能。

CM6@Zn-MOF(2) 不但具備較大的比表面積，也因其擴展的吸光範圍而展現出更優異的光捕獲潛力，這些都為後續的能量轉移與光電性能提供了理想的條件與基礎。

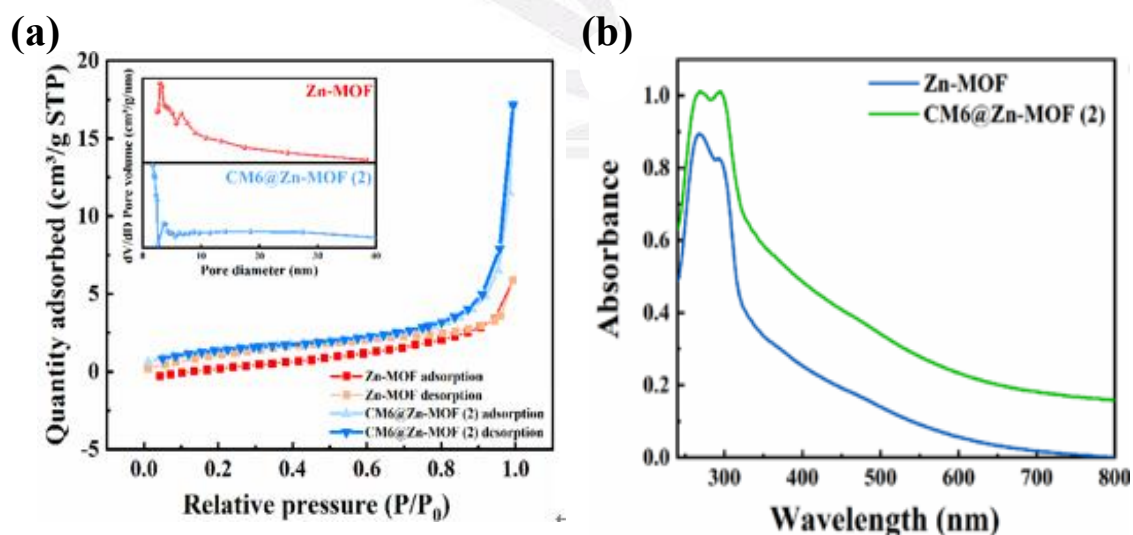


圖 4. (a)氮氣的吸脫附曲線圖 (b)紫外-可見光光譜

5.5. 發光特性與螢光共振能量轉移機制探討

發光性質主要來自於 Zn-MOF 和染料 CM6 的相互作用。由於 Zn(II) 為 d^{10} 電子構型，其 d 軌域已被電子完全填滿，這使得金屬中心本身不易參與螢光相關的電子躍遷，因此 Zn-MOF 的發光主要來源為配體相關的 $\pi-\pi^*$ 躍遷與電荷轉移過程。儘管如此，Zn-MOF 的剛性結構可有效限制配體分子的內部振動與旋轉，進一步降低非輻射衰減 (non-radiative decay) 的途徑，進而提高整體的光致發光效率，並可抑制傳統染料在高濃度下常見的能量淬滅現象。

從圖五的 a 所示的 CIE 色度座標可以看出，Zn-MOF 在紫外光激發下可發射出穩定且亮度高的藍色螢光。這表明 MOF 結構本身在無染料修飾下，已具備良好的光學特性，為其作為人工光合系統中的能量「供體」提供了堅實基礎。

光收集系統的效率取決於供體與受體之間的光譜重疊程度。從圖 b 可以明顯看到，Zn-MOF 的螢光發射波段與 CM6 的吸收光譜在 300~400 nm 區間具有良好重疊，這滿足了螢光共振能量轉移所需的基本條件，使得光激發後的能量可從 Zn-MOF 有效率地傳遞至 CM6 分子。這種能量轉移不僅提升了整體發光效率，也強化了染料在光電系統中的角色。

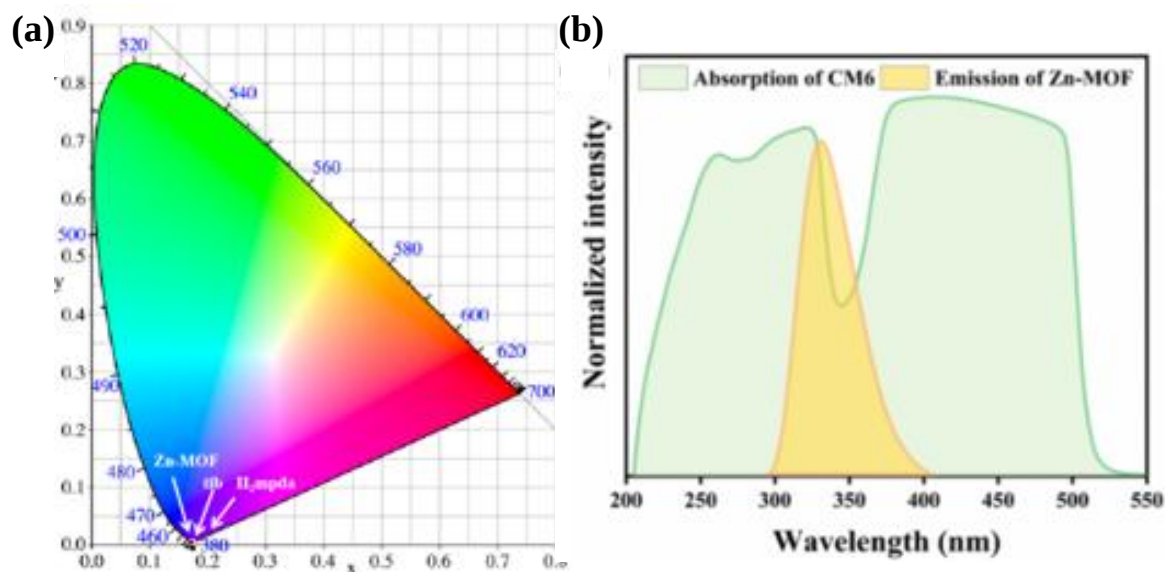


圖 5. (a) tib、H₂mpda 配體和 Zn-MOF 的 CIE 色度座標。(b) Zn-MOF (供體) 的螢光發射光譜與 CM6 (受體) 的吸收光譜之間的光譜重疊。

CM6 染料在水溶液中容易受到周遭極性分子干擾或是自我聚集現象的影響，進而導致螢光淬滅、量子效率下降。然而，當 CM6 被嵌入 Zn-MOF 的多孔結構中時，其空間受限效應可以有效抑制分子間的堆疊與能量非輻射耗散。這不僅能維持其原有的發光特性，甚至可能因框架環境的保護與排列誘導作用，進一步提升其螢光表現。

從圖六的 CIE 色度座標圖可觀察到，隨著 CM6 染料的引入，整體螢光顏色由 Zn-MOF 原本的藍色逐漸轉為綠色，顯示出染料與 MOF 之間的能量轉移確實發生。這樣的顏色轉變不僅是螢光性質改變的直接證據，也可視為螢光共振能量轉移現象的光學指標。這類可

調控的螢光輸出特性，使得 Zn-MOF 與 CM6 組成的複合材料具有高度潛力應用於智慧感測、光能轉換與仿生材料等領域。

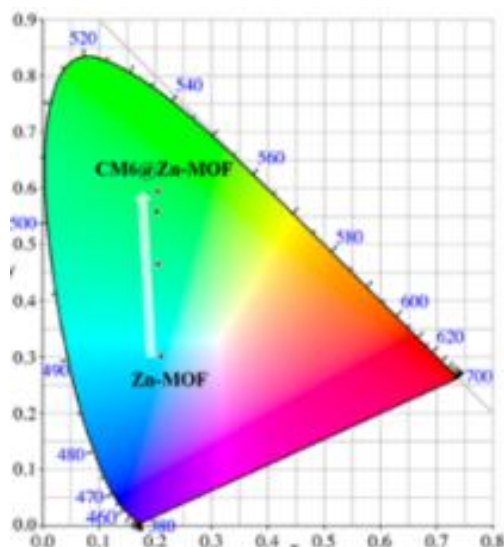


圖 6. Zn-MOF 和 CM6@Zn-MOF 的 CIE 色度座標。

圖七比較了 Zn-MOF 與 CM6@Zn-MOF(2) 的光電流密度在不同波長下的變化情形。純 Zn-MOF 對紫外光有明顯的光電流響應，尤其是在 300 ~ 400 nm 的範圍內，其光電流密度相對較高，這與其自身在紫外波段具有強吸收能力相符合。然而，當進一步引入螢光染料 CM6 製成複合材料後，CM6@Zn-MOF(2) 表現出更寬廣的光響應範圍。

從實驗數據可見，CM6@Zn-MOF(2) 在 300 nm ~ 800 nm 的整個波長範圍內皆有穩定的光電流產生，代表它對可見光及部分近紅外光也具有良好的感應能力。這樣的結果主要歸功於 CM6 分子本身的吸

收範圍涵蓋紫外至可見光，並且透過與 Zn-MOF 間的能量轉移，將吸收到的光能有效轉化為電子流動，進而提升光電流。特別是在 355 nm 波長的照射下，CM6@Zn-MOF(2) 所產生的光電流密度顯著高於未摻雜染料的 Zn-MOF，顯示其能量吸收與轉換效率在此波長下達到最佳。這可能是因為此波段同時落在 Zn-MOF 的發光區與 CM6 的吸收區的重疊區域，使得 FRET 能量轉移機制達到最有效的運作。整體而言，CM6@Zn-MOF(2) 在紫外與可見光區皆表現出良好的光電轉換能力，是一種很有潛力的光電材料。

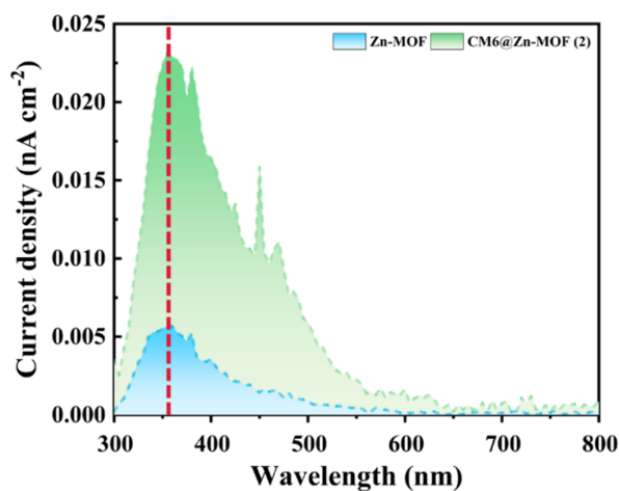


圖 7. 在不同波長照射下所產生的光電流密度

6. 本研究的應用潛力與未來發展

本研究結合 Zn-MOF 與 CM6，成功建立一套具備能量轉移與光響應功能的人工光合作用系統，不僅展現出良好的光學與電化學特性，

也為未來在能源轉換、感測與光電材料等領域的應用開啟了新的可能性。

在光電性能方面，設計不同染料濃度的 CM6@Zn-MOF 樣品，並以 CM6@Zn-MOF(2) 為代表進行深入分析。該樣品展現優異的光電流響應與穩定性，在可見光範圍內 300~800 nm 具有廣泛的光電流響應，代表其具備吸收並轉換太陽能的潛力。這些特性使 CM6@Zn-MOF 材料非常適合應用於太陽能轉換裝置（如染料敏化太陽能電池、光電化學水分解）以及可見光驅動的感測元件或光催化系統。

本研究提供了一個可擴展的材料設計策略，未來可以導入其他功能性染料、調控 MOF 孔徑結構，以進一步提升能量轉移效率與穩定性。此外，將此類材料結合於柔性基材或微奈米結構中，也將有助於發展新型光學感測器與便攜式能源裝置。

總結來說，Zn-MOF 與 CM6 在人工光合作用系統中有良好相容性與功能性，也為未來開發高效率、可設計的光能轉換平台奠定了重要基礎。透過材料科學與仿生光合作用的結合，將有機會推動下一代綠色能源技術的進一步發展。

7. 對本篇論文的觀察與學習心得

在閱讀論文時，我獲得了許多關於能量轉移機制與光電特性測試的知識，並對 MOF 在光功能應用上有了更加具體的理解。

首先，在能量轉移效率與光電性能分析的部分，我學習到如何將紫外-可見光譜 (UV-vis)、螢光光譜、CIE 色度座標與電化學測試結合，綜合評估材料的光響應能力。特別是在分析 CM6@Zn-MOF(2) 的光電行為時，論文並未僅止於數據呈現，而是進一步解釋了分子間的能量淬滅現象，讓我對於這些機制有更多的了解。

另外，論文並未將研究局限於材料製備本身，還延伸到其應用潛力的探索。CM6@Zn-MOF 在可見光範圍內的光電流響應與穩定的循環性能，讓我意識到，光學材料的開發不能只是看單一性能數值，應該以「穩定性、靈敏度、選擇性」為整體考量標準。這樣的多面向分析讓我學會，從應用角度回過頭去思考材料結構與合成設計的合理性。

最重要的是，這篇論文讓我更加體會跨領域整合（如化學、材料科學、光電工程）在當代能源研究中的重要性。未來在我自己的研究中，也希望能借鏡這篇論文的實驗設計與分析架構，嘗試將仿生概念與實際應用結合，開創實用性的研究方向。

8. 結 論

這項研究成功設計出一種新型的二維 Zn-MOF 奈米片的人工光合系統，透過單晶 X 光繞射、光譜和電化學分析，證實了 Zn-MOF 具備層狀結構並可經由超音波剝離形成奈米片，有效提升材料與染料間的能量轉移效率。特別是在樣品 CM6@Zn-MOF(2) 中，展示出最佳的光學與電化學特性，包括穩定的光電流響應、最低的電荷傳輸阻抗以及良好的光穩定性，顯示材料在光能轉換上的潛力。

此外，Zn-MOF 的螢光發射與 CM6 的吸收光譜在 300 ~ 400 nm 區段有良好重疊，有助於螢光共振能量轉移的進行，進一步提升了整體的能量轉移效率。研另外，透過將染料嵌入 MOF 結構中能有效抑制能量淬滅現象，讓染料在固態下仍保有高效的發光表現。紫外-可見光譜與氣體吸附分析也顯示，CM6@Zn-MOF(2) 有更寬廣的光吸收範圍及更大的比表面積，進一步證實它優異的光收集表現。

這項研究不僅提出一套模擬天然光合作用能量轉移機制的系統，還為光能轉換材料的開發提供了實驗與理論依據。MOF 與染料的結構，展現出人工光合系統在光電與光功能材料領域的應用潛力，也為未來在太陽能捕獲、感測器開發與智慧光電元件等方向提供更多可能性，為人造光合作用與再生能源科技的發展奠定基礎。

9. 參考文獻

Ma, Ya-Fei, et al. "Artificial light harvesting system of CM6@ Zn-MOF nanosheets with highly enhanced photoelectric performance." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular spectroscopy* 325 (2025): 125152.

Zheng, Jiewei, et al. "Passivation-Free, Liquid-Metal-Based Electrosynthesis of Aluminum Metal–Organic Frameworks Mediated by Light Metal Activation." *ACS nano* 17.24 (2023): 25532-25541.

Elgrishi, Noémie, et al. "A practical beginner's guide to cyclic voltammetry." *Journal of chemical education* 95.2 (2018): 197-206.

Wang, Pinpin, et al. "Tetraphenylethene-based supramolecular coordination frameworks with aggregation-induced emission for an artificial light-harvesting system." *ACS Applied Materials & Interfaces* 12.20 (2020): 22630-22639.

Wu, Zhiying, et al. "Recent advances in two-step energy transfer light-harvesting systems driven by non-covalent self-assembly." *Chinese Chemical Letters* 35.1 (2024): 108829.

Liu, Meiyong, et al. "Fluorescent nanoparticles from starch: Facile preparation, tunable luminescence and bioimaging." *Carbohydrate polymers* 121 (2015): 49-55.