

農廢生物炭作為 CDI 電極於廢水處理之應用與潛力

APPLICATION AND POTENTIAL OF AGRICULTURAL WASTE-DERIVED BIOCHAR AS CDI ELECTRODES IN
WASTEWATER TREATMENT

東海大學
環境科學與工程學系
助理教授

陳柏安
Po-An Chen

東海大學
化學工程與材料工程學系
專題生

李佳恩
Chia-En Lee

東海大學
化學工程與材料工程學系
助理教授

李冠廷*
Kuan-Ting Lee

東海大學
環境科學與工程學系
專題生

劉家妤
Chia-Yu Liu

國立成功大學
航空太空工程學系
特聘教授

陳維新
Wei-Hsin Chen

東海大學
環境科學與工程學系
專題生

陳鳳妤
Feng-Yu Chen

東海大學
化學工程與材料工程學系
專題生

宋吉年
Ji-Nien Sung

東海大學
化學工程與材料工程學系
碩士生

韓佩家
Pei-Jia Han

摘要

65

隨著氣候變遷加劇與水資源短缺問題日益嚴峻，各國積極尋求兼具環境永續與資源效率的解決方案。有鑑於此，有效降低農業廢棄物及農業剩餘資材對環境衝擊已成為當前重要議題之一。生物炭因具備高比表面積、碳含量及良好導電性與發達孔隙結構，作為一種綠色永續材料，不僅可協助農業廢棄物資源化，亦廣泛應用於碳封存、土壤改良與環保吸附劑等環境領域。近年來，生物炭更於電容去離子 (Capacitive Deionization, CDI) 技術中展現出優異的電極表現，具低能耗、無化學添加劑、無污泥產生等特性，逐漸成為次世代水處理與資源回收系統中的關鍵材料。本研究聚焦於生物炭電極材料於 CDI 系統中的應用潛力與國際商業化現況，整理歐洲、美國、日本、印度、中國與澳洲等地之實證研究與推動策略。研究發現，歐洲地區的政策支持與美國因製藥與半導體等高純水需求而推升 CDI 技術應用，同時開發不對稱生物炭電極以提升脫鹽效率；亞洲國家如中國與印度廣泛利用農業廢棄物資源，開發具經濟效益之生物炭-CDI 電極材料，亦展現可觀潛力。澳洲研究堅果殼生物炭於 CDI 中可延長系統壽命並提升其效率約 1.5 倍。綜合國際趨勢與應用案例，生物炭於 CDI 技術中所扮演之環境友善材料角色，並指出各國政策與市場環境對其商業化發展之重要影響，為我國後續推動生物炭資材於永續水處理與資源回收領域提供參考依據。

關鍵詞：生物炭、電容去離子、農業廢棄物、資源循環、專利、商業化。

* 東海大學化學工程與材料工程學系助理教授

407224 台中市西屯區臺灣大道四段 1727 號 · ktlee@thu.edu.tw

APPLICATION AND POTENTIAL OF AGRICULTURAL WASTE-DERIVED BIOCHAR AS CDI ELECTRODES IN WASTEWATER TREATMENT

Po-An Chen

Tunghai University
Department of
Environmental Science
and Engineering

Kuan-Ting Lee*

Tunghai University
Department of
Chemical and Materials
Engineering

Wei-Hsin Chen

National Cheng Kung
University Department
of Aeronautics and
Astronautics

Ji-Nien Sung

Tunghai University
Department of
Chemical and Materials
Engineering

Chia-En Lee

Tunghai University
Department of
Chemical and Materials
Engineering

Chia-Yu Liu

Tunghai University
Department of
Environmental Science
and Engineering

Feng-Yu Chen

Tunghai University
Department of
Environmental Science
and Engineering

Pei-Jia Han

Tunghai University
Department of
Chemical and
Materials Engineering

ABSTRACT

Under the increasing threats of urban flooding disasters caused by climate change and extreme rainfall events, adaptive stormwater management has become a critical component of urban flood risk management. This approach involves the integration of hydrological monitoring data—such as rainfall and water levels—with advanced technologies including flood image recognition through intersection CCTV footage, real-time monitoring of rivers and regional drainage systems, and the operational status of pump stations. These data are transmitted via IoT networks to support an intelligent disaster prevention platform with geospatial visualization capabilities. By incorporating real-time monitoring data from regional drainage systems, stormwater sewer networks, and pumping equipment, a comprehensive urban catchment monitoring network can be established. This network enables the correlation and visualization of rainfall intensity, water level fluctuations, and pump operations. In addition, setting up warning thresholds and utilizing real-time data surveillance allows for automated alerts to be pushed to disaster response teams once values exceed predetermined thresholds, assisting emergency personnel in identifying potential disaster-inducing factors in advance. The system also enables proactive strategies such as the early activation of pumping stations and preparation of standby units, thereby enhancing the internal detention capacity of sewer systems and enabling early deployment for flood mitigation. These measures significantly improve emergency response capabilities, increase lead time for flood response, reduce inundation duration and probability, and ultimately enhance urban stormwater tolerance. This study uses the New Taipei City Smart Flood Prevention Platform as a case study to explore its applications and practical

operation strategies, with the aim of advancing adaptive urban flood management and promoting the development of resilient cities.

Keywords: Biochar, Capacitive Deionization, Agricultural Waste, Resource Recycling, Patent, Commercialization.

一、介紹

電容去離子 (Capacitive Deionization, CDI) 技術是一種新興且具潛力之脫鹽與水質淨化技術。目前 CDI 已廣泛被視為新一代可持續海水淡化及水資源處理之解決方案^[1]。其原理是透過外加電場驅動原理進行離子移除，當兩塊多孔性導電電極間施加電壓時，溶液中與電極表面極性相反之離子會在靜電力作用下遷移並吸附於電極表面，於電極與溶液介面形成電雙層 (Electrical Double Layer, EDL)，進而實現離子的選擇性去除。此過程不需添加任何化學藥劑，操作條件溫和，具能耗低、模組化潛力高及電極可再生等優點，適用於海水淡化、地下水脫鹽及工業廢水處理等多元應用^[1]。CDI 系統之操作電壓通常不超過 2 伏特 (Voltage, V)，因此相較於傳統脫鹽程序，其能源消耗極低^[2]。於電吸附過程中，電解質溶液會流經兩塊施加電壓的多孔集電電極，帶有相反電荷之離子受庫倫引力影響，向相對應極性的電極表面遷移，並被 EDL 捕獲與暫時儲存。其中，陽離子儲存於帶負電的電極，陰離子則儲存於帶正電的電極^[3]。EDL 為電化學系統中重要之微觀界面結構，當施加電壓後，電極表面會吸附反離子，形成具有離子選擇性與暫時儲存能力的電雙層。當移除外加電壓後，已吸附之離子將脫附回釋於溶液中，實現可逆的離子捕集與釋放循環。此特性使 CDI 技術除脫鹽外，亦具備應用於稀貴金屬回收與目標離子濃縮等潛力^[4]。

典型 CDI 裝置由一對平行配置之集電電極所組

成，兩電極間以開放式流道或具孔洞之墊片材料隔開，以防止電極接觸短路，如圖 1 所示。常見墊片材料包括不織布、聚合物網狀材或其他具備電絕緣性、化學惰性與抗腐蝕性質之材料^[5]。在吸附過程中，離子遷移進入電極，反離子亦會從對向電極排出，該「共離子效應」將導致能耗增加與去除效率下降。為減緩此不利效應，進一步發展出薄膜電容去離子技術 (Membrane Capacitive Deionization, MCDI)，於電極前方裝設具選擇性之離子交換膜以提升選擇性與效能。MCDI 系統常使用兩種離子交換膜，分別為陰離子交換膜 (Anion Exchange Membrane, AEM) 與陽離子交換膜 (Cation Exchange Membrane, CEM)，分別配置於陽極與陰極前方，AEM 允許陰離子通過，CEM 則僅允許陽離子通過，能有效防止共離子穿透與反向遷移之現象^[6]。目前主流 MCDI 裝置多採用膜直接塗佈於電極表面，而非獨立式膜片配置，以減少膜電阻與增進整體緊密性^[7]。有研究結合還原氧化石墨烯與磁性氧化鐵奈米顆粒所製備的複合電極，利用高比表面積與導電性的碳材料作為基底，並透過磁性奈米顆粒提高對陰離子之選擇性脫鹽效率，當配置於陰極並結合陰離子交換膜時，可有效抑制共離子效應^[8]。另一研究則將導電聚合物聚苯胺與活性碳製成複合電極，應用於 MCDI 系統以提升脫鹽效能。此類複合材料兼具高導電性與多孔結構，不僅增加比電容，亦促進離子傳輸動力與吸附速率，且搭配離子交換膜使用後，有效減緩離子反向遷移現象，整體性能顯著優於傳統碳材料所製電極^[9]。

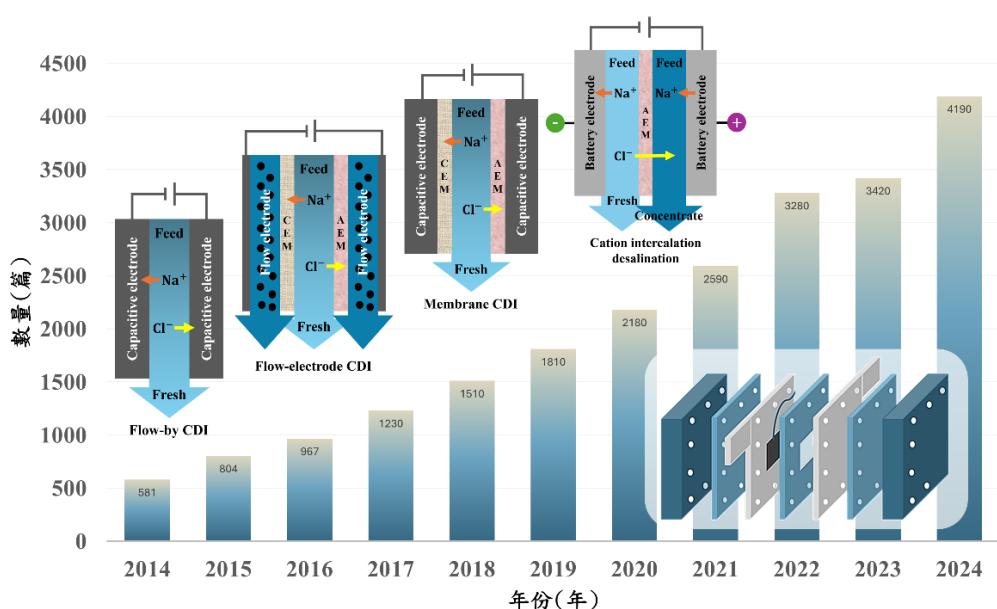


圖 1 CDI 演變及研究趨勢

在選擇 CDI 電極塗佈材料方面，經常使用具有優異導電性與比表面積之碳基材料，如碳氣凝膠、碳奈米管與石墨烯等^[5, 10, 11]。然而，受限於其高成本與製程複雜性，尚不利於大規模應用。為降低材料成本並提升資源永續性，近期開始有研究轉向至發展以農業廢棄物為原料之生物炭作為低成本、高性價比之電極塗佈材料，使其不僅保有良好吸附與導電性能，更可應用於多種廢水處理與離子回收領域^[12, 13]。其中，以稻殼為原料製備之生物炭 CDI 電極因具備豐富的矽質結構與微孔體系，展現出優異脫鹽效率，實驗結果顯示其在低電壓操作下能有超快的電吸附速率 (10.52 mg/g min)，顯示生物炭具發展潛力^[14]。此外以玉米芯製成之生物炭所製成的電極具有高比電容 (141.4 F/g)，在 CDI 脫鹽測試中鹽吸附容量 (Salt Adsorption Capacity, SAC) 高達 19.2 mg/g。另一項研究則比較由柚子皮、藻類及玉米芯製備之三種生物炭在去除 Cd²⁺效率上的差異，結果發現玉米芯生物炭不僅擁有最佳的 SAC (約 20 mg/g)，亦於多次循環後維持良好穩定性與可再生性，進一步證實生物炭應用於 CDI 系統的實用潛力^[15]。

二、分析方法

2.1 文獻與專利分析

使用 Clarivate 的 Web of Science 資料庫，做為本研究彙整與分析農業廢棄物再利用與電容去離子技術領域的文獻檢索平台。透過檢索關鍵字包含 Biochar、Capacitive deionization、Electrode materials，依照標題、摘要、發表年度、地區及研究主題進行系統性檢索、篩選與統計，以確保所文獻檢索之完整性與代表性。專利分析部分則使用經濟部智慧財產局的中華民國專利資訊檢索系統作為本研究之專利檢索平台，關鍵字鎖定生物炭與電容去離子。

三、結果與討論

3.1 農業廢棄物再利用

農業廢棄物 (Agricultural waste) 是指生質物 (Biomass) 於生產或加工所產生且已不具備使用價值之物質^[16]，例如，咖啡渣、茶葉渣、菱角殼、稻殼、樹木殘枝等。生質物是一種有機物質，其包含經光合

作用產生的物質，以及動物糞便、廚餘等其他有機廢棄物^[17]。農業廢棄物若未經妥善處理與管理的農業廢棄物，將會對土壤、空氣和水質造成嚴重的污染。2019 年，中華民國彰化縣芳苑鄉農田遭民眾檢舉被堆置大量食品加工所產生之生質廢棄物，導致土壤黑化、臭味散發，並影響土壤酸鹼值，造成地下水污染與生態失衡^[18]。此類食品生質廢棄物本應被加工為肥料，但因清運處理成本高昂，部分業者規避廢棄物清理法規範，隨意堆置與掩埋，而造成嚴重土壤與水污染。此外，中華民國屏東縣環保局於 2024 年 10 月至 12 月期間，查獲 28 件露天燃燒案件^[19]。露天燃燒指於開放空間進行農業廢棄物燃燒，且未設置任何燃燒控制設施或空氣污染防治設備之行為^[20]。露天燃燒除了會產生惡臭外，更會釋放大量空氣污染物，包含氮氧化物、二氧化硫、碳氫化合物、一氧化碳、PM10 及 PM2.5 等^[21]。依空氣污染防治法第 32 條規定，露天焚燒而造成空氣污染者，將處新台幣 1,200 元以上 10 萬元以下罰鍰。如果這些有害物質隨風飄散，除了會對燃燒區域附近的空氣造成污染外，還可能會隨著大氣飄散到更遠的地方，進而造成更大範圍的危害。

焚燒與掩埋為當前國內處理生質廢棄物的主流方式^[22]。臺灣和日本每年大部分的農業廢棄物均以焚化爐焚燒進行處理。焚燒雖可快速減少廢棄物產量，但在燃燒過程中需消耗大量能源，並伴隨大量二氧化碳排放。掩埋是一種在特定區域，透過填埋或覆蓋土壤來達到隔離或去化廢棄物的方式。雖然掩埋的技術門檻較低，但卻需佔用較多的土地資源，並且農業廢棄物於掩埋過程對於環境污染與溫室氣體排放的風險也相對高。根據統計，掩埋過程會釋放多種全球暖化潛勢 (Global Warming Potential, GWP) 高於二氧化碳的溫室氣體，如甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物等^[23]，如表 1 所示。溫室氣體會加劇氣候暖化，破壞氣候系統穩定性，破壞生態系統平衡，威脅生物多樣性，增加農業生產不確定性，加劇城市熱島效應等。為了取代傳統且非永續之焚燒與掩埋技術，發展低能耗與低溫室氣體排放之生質廢棄物處理技術，已成為全球推動環境永續與環經濟之重要議題。

表 1 各類溫室氣體之全球暖化潛勢比較^[24]。

溫室氣體	GWP (以 CO ₂ 為基準)
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298
HFCs	124-14800

生物炭為一種富碳材料，主要由生質物於厭氧或低氧環境中經熱解或碳化製成^[25]。絕氧或低氧條件是指在氯氣或二氧化碳等惰性氣體氛圍條件下^[26]。一般而言，熱化學碳化溫度在 200 ~ 300 °C 範圍通常被歸類為焙燒，而 300 °C 以上則被定義為熱解^[27]。生質物來源廣泛，包括農業廢棄物（如稻殼、玉米芯、甘蔗渣、椰殼、果殼及核）及都市廢棄物^[28]。生物炭的富碳特性與穩定結構使其成為優異的碳儲存庫，不僅能捕集並固定二氧化碳，減少溫室氣體排放，有助於緩解氣候變遷對環境的衝擊^[29]。若將生物炭再利用至廢棄物資源化領域，則可有效間接降低大氣二氧化碳排放量，並同時解決因廢棄物產量所引發的環境負荷問題^[30]。性質穩定的生物炭具有低含水率、疏水性、易研磨、低 O/C 和 H/C、高儲存性等優點^[31]，因此被認為是農廢再利用領域最具發展的資源化產物。Chen *et al.*^[32] 將咖啡渣於 200 ~ 300 °C 的條件下進行焙燒，並將所製備的咖啡渣生物炭應用於吸附大氣中的 CO₂。根據實驗結果顯示，所製備之咖啡渣生物炭的碳含量、最大比表面積和總孔體積分別為 77%、42.050 m²/g 和 0.1389 cm³/g，其中最大比表面積和總孔體積相較焙燒前咖啡渣分別增加了 14% 和 76%，也因此咖啡渣生物炭之最佳 CO₂ 吸附效能可達到 0.32 mmol/g。生物炭的製備依不同碳化溫度可區分成 200 ~ 300 °C 的焙燒和 300 °C 以上的熱解，溫度越高則碳化程度越高^[33]，如表 2 所示。根據文獻結果顯示，經焙燒所產製的生物炭其碳含量平均在 40% ~ 70%，熱解溫度在 300 °C 以上之碳含量約在 60% ~ 80%。碳含量越高之生物炭表示可間接儲存的二氣化碳也越高。此外，生物炭的孔洞結構通常與生質物組成比例（半纖維素、纖維素和木質素）和碳化溫度有關。當半纖維素或纖維素含量較高時，容易生成孔隙率較低的生物炭。這主要是因為木質素相較半纖維素與纖維素在高溫熱解環境中具有更強的結構穩定性，其碳骨架不易因

熱分解而坍塌，從而能更好地保留熱解過程中形成的孔隙結構^[34]。生質物的碳化溫度越高易使生物炭孔洞結構越豐富，若碳化溫度過高則容易導致孔洞結構坍塌。

Ma *et al.*^[41] 以不同熱解溫度（250 ~ 750 °C）針對棕櫚殼進行碳化處理，並探討不同熱解溫度對棕櫚殼生物炭之化學組成、官能基、孔隙結構及晶體結構的影響。結果表明，隨著熱解溫度升高，碳元素含量、HHV 值、pH 值、比表面積及熱穩定性也會增加，但生物炭之 H/C、O/C 比例及表面官能基含量則會降低。棕櫚殼生物炭的碳含量和熱值在 750 °C 時，分別達到最高的 78.95% 與 31.55 MJ/kg，而其比表面積則在 650 °C 時達到最大的 403.99 m²/g。

生物炭由於其特殊的結構與性質，目前已被廣泛再利用至固態燃料、土壤改良、複合材料、生醫材料、鋰電池、廢水處理等領域，表 3 彙整了生物炭再利用的應用領域。

Liu *et al.*^[48] 使用水熱法在 150 至 375 °C 的溫度範圍內針對椰子纖維進行碳化，並評估其燃料品質。研究結果顯示，水熱碳化方法用於熱解碳化生質物的最佳溫度為 250 °C。生物炭與生質物相比，發現生物炭具有更好的燃料品質，包含高碳含量、高點火溫度、

表 2 不同農業廢棄物之性質分析

原料	溫度 (°C)	碳含量 (%)	孔體積 (cm ³ /g) / 比表面積 (m ² /g)	來源
咖啡渣	270	65	0.007 / 9	[35]
咖啡渣	300	77	0.138 / 42	[32]
茶梗	400	68	0.39 / 1462	[36]
玉米芯	500	81	0.27 / 656	[37]
稻殼	800	94	1.829 / 3366	[38]
椰子殼	850	79	> 0.34 / 1042	[39]
花生殼	1000	82	0.330 / 555	[40]

表 3 生物炭應用領域

應用領域	功能特性	應用分類	實際案例	來源
固態燃料	高碳含量、可取代煤炭。	工業燃料	替代 6% 焦炭可減少 43% CO ₂	[42]
土壤改良	提升保水性、改善土壤品質。	農業利用	於 670 °C 熱解木質生質後之保水率介於 200% ~ 240%	[43]
複合材料	可作為導熱與儲能載體。	相變材料	菊花莖基材料相變潛熱達 213.6 J/g	[44]
生醫材料	可應用於藥物釋放、生物感測、免疫檢測。	醫療用	氧化鋅改性生物炭可用於青光眼治療，藥物穩定釋放長達 17 天	[45]
鋰電池	高電容量、導電性佳，適合作為陽極材料。	能源儲存	甘蔗渣生物炭初始容量達 2347.56 g ⁻¹	[46]
廢水處理	高比表面積，具吸附汙染物能力	物理吸附	荔枝皮生物炭可吸附 2468 mg/g 孔雀綠染料	[47]
		電容去離子	玉米芯碳去除鉻(VI)達 96.2%	[2]

燃燒溫度範圍廣、低灰分與高熱值等。生物炭的能量密度會隨著水熱溫度升高而增加，並且最佳的熱值接近褐煤。Singh *et al.* [49]針對四種生物炭進行土壤肥力的分析，包含碳化溫度 400 °C 和 550 °C 的桉樹木材、桉樹葉、造紙廠污泥、家禽糞便和牛糞碳化。生物炭 pH 值分布依不同生質物種類與碳化溫度從中性到強鹼性。研究指出，桉樹木材生物炭的總碳含量相對較高。家禽牛糞便生物炭則有最高的總氮、磷、鉀等含量。而桉樹葉生物炭的碳、氮、磷、鉀等含量則介於桉樹木材和糞便生物炭之間。Schulz *et al.* [50]在優化植物反應和土壤肥力的條件下，針對 *Avena sativa L.* 植物的生長，討論生物炭和堆肥的最佳添加量及混合比例。此研究以沙質土壤為基質。定期採集土壤基質樣本，並分析其植物生長素率和產量、總有機碳、總氮、礦化氮、pH 和電導率。結果表明，隨著生物炭和堆肥用量的增加，植物產量也隨之增加。Kamonwan and Mai [51]使用木薯根莖、榴槤皮、鳳梨皮和玉米芯做為生質原料，並利用簡易熱解法將這些農業廢資材製成固定碳的含量在 11.91% 至 17.51% 之間的生物炭。研究指出，生物炭碳含量高低與生質原料來源高度相關，並且其碳含量隨熱解溫度的升高而增加。實驗結果顯示木薯根莖生物炭的碳含量是這四種農業廢資材最高的。為了提高農業廢資材的再利用率，此研究將生物炭複合至聚乳酸中並分析其拉伸性能。碳含量越高的 PLA/生物炭複合材料有較佳的機械性能。Kane *et al.* [52]指出生物炭因優異的高電導率，因此具潛力在未來作為以石墨為電極材料的添加劑。由於生物炭和傳統炭黑添加劑的顆粒大小和形狀不同，因此若要直接取代碳黑，則生物炭尺寸需要進一步縮小，才有機會作為鋰離子電池之通用導電添加劑。Caprariis *et al.* [53] 將兩種不同熱解溫度 550 °C 和 750 °C 所製的生物炭，作為吸附材料並評估其廢水處理之應用潛力。研究結果顯示，熱解溫度越高，則生物炭的比表面積越高，進而使其廢水之有機物吸附能力越強。氫氧化鈉是作為此研究的生物炭活化劑。生物炭在活化的過程，會增加生物炭的比表面積，使其吸附能力是市售活性碳的 2.5 倍。Song *et al.* [15]分別以柚子皮、藻類和玉米芯做為生物炭的原料，並應用至電容去離子系統以驗證自廢水回收鎘離子的性能。研究結果顯示，藻類生物炭和玉米芯生物炭在電容去離子系統是一個具潛力自廢水中去除鎘離子的碳材。

3.2 電容去離子技術

電極材料是影響 CDI 脫鹽與去離子性能的關鍵因素之一。目前 CDI 技術中最常見的碳基電極材料包括

多孔碳、石墨烯基材料、碳氣凝膠與碳奈米管等^[5, 10, 11]。理想的電極材料應具備高比表面積、合適的孔徑分布、高導電性、良好的機械強度及優異的化學穩定性，以確保在電化學過程中具備高效的離子脫鹽效率及良好的循環壽命^[2, 5]。其中，石墨烯作為一種僅具單層原子厚度的二維材料，由於其高度共軛 π 電子結構與高導電性，在提升電極導電性與離子傳輸性能方面表現卓越，已被廣泛應用於高效 CDI 系統設計^[7]。然而，石墨烯的高製備成本與工藝複雜性成為大規模應用的重要限制因素，因此促使研究者積極探索更具經濟性與可持續性的替代材料^[12]。

生物炭因具低成本、資源豐富、來源多樣化及環境友善等特性，已成為碳基電極材料的有力候選者。生物質原料來源廣泛，包括農業廢棄物（如稻殼、玉米芯、椰殼、果殼、及甘蔗渣）、林業副產物及都市廢棄物（如污泥），其轉製生物炭過程通常經由熱解或碳化程序，在厭氧或缺氧環境下進行，生成高碳含量之多孔材料^[54]。生物炭天然形成的分層孔結構包含微孔 ($< 2 \text{ nm}$)、中孔 ($2 \sim 50 \text{ nm}$) 及大孔 ($> 50 \text{ nm}$)，賦予其高比表面積與良好的離子傳輸通道，有利於快速吸附與脫附離子^[2]。此外，生物炭表面常帶有不同官能團與電荷位點，可與溶液中目標離子形成靜電吸附或排斥作用，增強其在電化學去離子過程中的效能^[55]。

在 CDI 系統性能評估中，常用指標包括脫鹽效率、鹽吸附容量 (Salt Adsorption Capacity, SAC) 及充電效率。脫鹽效率係指電極在單次操作中實際去除溶液中鹽分的百分比，反映系統對目標離子的去除效果。SAC 為單位電極質量所吸附鹽分的質量 (mg/g)，為比較不同電極材料離子脫鹽效率的重要指標。充電效率則指實際用於去除溶液中離子之電量與總輸入電量的比值，顯示輸入電能的有效利用程度。充電效率愈高，表示能量主要用於驅動離子吸附過程，而非消耗於副反應或電極內阻損耗，對提升系統能效與經濟性具有重要意義。值得注意的是，CDI/MCDI 技術在中低鹽度 ($< 5 \text{ g/L NaCl}$) 的水源處理中具能耗與成本優勢，但在高鹽度 ($> 30 \text{ g/L NaCl}$) 如海水環境中，因離子濃度高與電極吸附位點飽和速度快，導致能耗上升與效率下降，因此商業化應用多集中於半鹹水與工業回用水領域^[56]。

不同類型生物質原料所製得之生物炭在孔結構、比表面積及化學組成等方面具有差異，進而影響其電極性能與應用潛力。木質類生物炭（如木屑、枝幹）通常具有高碳含量與良好的結構穩定性，孔隙結構以中孔與大孔為主，適合作為高導電性電極基材。果實類及殼核類生物炭（如椰殼、果核、杏殼）則以高硬度、

高密度及豐富微孔結構為特徵，比表面積大，吸附性能良好，特別適合應用於高效去離子與重金屬捕集。葉類生物炭（如玉米葉、甘蔗葉）則因富含揮發分與灰分，碳含量相對較低，但其孔徑分布多樣且製程靈活，可用於調控電極的孔結構與表面化學官能團。圖2為木質、果實及葉類等不同生物炭原料類型，以及2021年至2022年間生物炭相關研究文獻數量的統計分布，反映該領域之學術關注度持續攀升。生物炭具備多重優勢，包括來源資源豐富（如水果殼與核、穀物、甘蔗渣與椰殼）、低成本、環境友善、對水分與化學性質惰性、易於再生及可規模化生產等特點^[2, 57-59]。生物炭具多孔結構，有利於提升離子傳輸效率與電吸附性能，其中，微孔（ $<2\text{ nm}$ ）可提供大量比表面積以形成穩定的電雙層，中孔（ $2\sim50\text{ nm}$ ）則有助於離子快速擴散與降低傳輸阻力，大孔（ $>50\text{ nm}$ ）可作為電解質進入內部結構的通道，三者協同作用可顯著提升CDI電極性能，且其表面含有多種含氧官能團及帶電位點，可藉由靜電作用與溶液中目標離子進行選擇性吸附或排斥，進一步增強其作為電化學水處理電極材料的潛力^[60]。

以甲殼素與稻殼為原料製備生物炭電極為例，兩者經氫氧化鉀（KOH）活化後均展現優異電化學性能。甲殼素經KOH活化後，其與幾丁質中的官能團及碳骨架發生反應，生成氣體（如CO與H₂），並於高溫條件下誘導多孔結構的形成，顯著提升比表面積。同時，生成的金屬鉀鹽於熔融狀態下可滲透至碳基體內部並降低表面張力，促進電解質離子的快速傳質，

強化材料的化學穩定性。在1.2V操作電壓下，此甲殼素基生物炭電極SAC高達11.52 mg/g，並具良好循環穩定性^[61]。同樣地，稻殼基生物炭經KOH鹼性浸出與化學活化後，亦形成高比表面積與優良孔徑分布，在1.2V操作條件下表現出卓越的脫鹽效率。經10次再生循環後，其去除無機離子及水軟化表現依然穩定，可有效去除水中重金屬與其他無機污染物，顯示其具備長期穩定應用潛力^[62]。以上研究結果驗證KOH活化可顯著改善生物炭孔結構與比表面積，並有效提升其脫鹽效率與電化學穩定性。

表4對不同來源及製備工藝之生物炭電極在比表面積、孔結構、SAC與循環穩定性等性能進行綜合比較，以呈現各類生物炭電極材料於CDI應用中的潛力與發展趨勢。甲殼素製得之生物炭電極比表面積為833.76 m²/g，電容量為120 F/g，在160 μS/cm NaCl溶液及1.2V操作條件下，其鹽吸附容量（Salt Adsorption Capacity, SAC）為11.52 mg/g，展現良好的鹽吸附表現與穩定性^[61]。稻殼經碳化處理所製成的生物炭比表面積高達1839 m²/g，電容量為120.5 F/g，在20 mM NaCl溶液及1.2V條件下，SAC為8.11 mg/g，並具可多次循環再生能力與優異穩定性^[62]。甘蔗渣經微波處理後製備之生物炭，比表面積為1019 m²/g，電容量達208 F/g，在5 mM NaCl溶液及1.2V條件下，其SAC為28.9 mg/g^[7]。稻草來源之生物炭比表面積為1371 m²/g，電容值為221.9 F/g，在500 mg/L NaCl溶液及1.2V條件下，SAC為19.3 mg/g，亦顯示優異的鹽吸附表現^[63]。

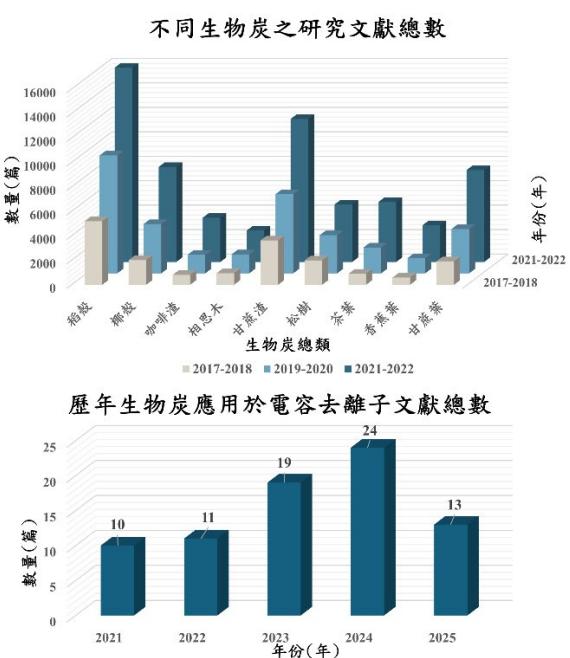


圖2 生物炭原料種類舉例及研究文獻總數

表 4 生物炭應用於電化學電極之應用

性能指標 / 來源材料	甲殼素	稻殼	甘蔗渣	稻草
比表面積 (m ² /g)	833.76	1839	1019	1371
電容量 (F/g)	120	120.5	208	221.9
SAC (mg/g)	11.52	8.11	28.9	19.3
操作條件	160 μS/cm NaCl, 1.2 V	20 mM NaCl, 1.2 V	5 mM NaCl, 1.2 V	500 mg/L NaCl, 1.2 V
參考文獻	[61]	[62]	[64]	[63]

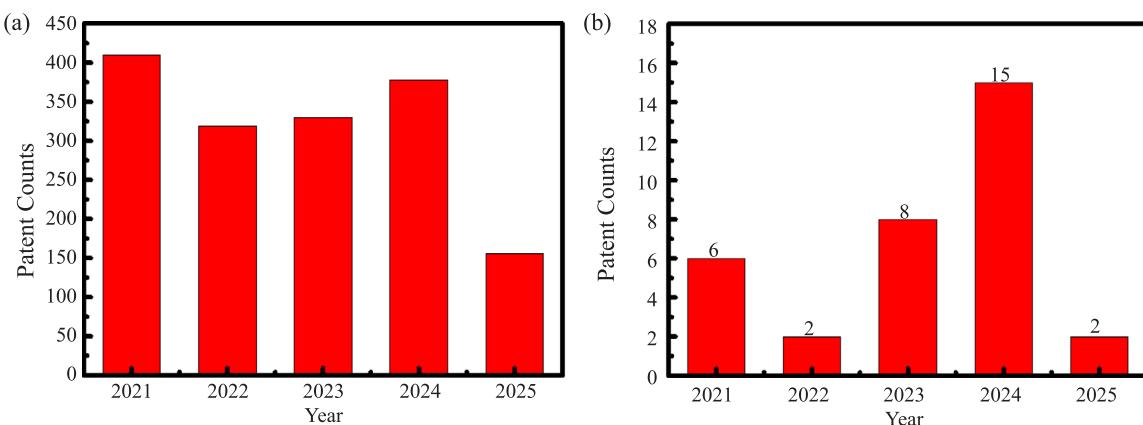


圖 3 全球專利檢索系統 (a) 關鍵字 Capacitive Deionization · (b) 關鍵字 Capacitive Deionization + Biochar

3.3 專利分析與案例分享

根據中華民國專利資訊檢索系統的檢索結果 (截至 114 年 6 月)，以「生物炭」為關鍵字進行檢索，共檢索出 203 件專利，其中發明專利佔 158 件，新型專利佔 45 件。同樣以「生物炭」檢索，全球專利檢索系統則有 29,550 筆。若改以「電容去離子」為關鍵字使用中華民國專利資訊檢索系統，顯示其效期內之專利數量降低 37 件。這些專利中有 9 件已因期限屆滿而失效，26 件正處於實質審查階段，另有 2 件已被駁回。進一步將檢索範圍限縮至「Biochar」與「Capacitive Deionization」的組合關鍵字，中華民國專利資訊檢索系統顯示 0 筆，但全球專利檢索系統顯示仍有 60 筆的資料，其中美國佔 35 筆、歐洲佔 2 筆、大陸佔 14 筆，以及世界智慧財產權組織佔 9 筆。圖 3a 是近 4 年電容去離子技術的專利數量之年增長曲線，可以發現此領域之年專利數約穩定在 300 ~ 410 間，若進一步限縮關鍵字至 Biochar，共可檢索到 60 件專利，並且其專利數目在 2021 ~ 2024 年間，以年增長率 2.25% 的速度向上成長，如圖 3b 所示。

2015 年由美國 University of Idaho 所申請的專利 (公開編號 US20150144564A1)，專利名稱為“BIOCHAR WATER TREATMENT”。該專利提出了一

種利用生物炭進行水處理的方法，尤其針對廢水中的污染物，如重金屬、毒性有機物等有害物質。生物炭經過特別的處理，使其表面積和孔隙結構得到優化，進而提升其對有害物質的吸附能力，能夠有效地吸附水中的污染物。此方法可以廣泛應用於各類水體的污染治理，並且具有環保、可持續的優勢，因為生物炭是由有機廢料製成的，因此不僅有助於水質改善，也有助於資源的回收和再利用。此專利聚焦於生物炭的吸附特性來處理水中的污染物，此性質與電容去離子技術高度相關。在電容去離子技術中，生物炭作為電容去離子之電極材料，能進一步提升廢水處理的效率。2023 年由中國 SHANGHAI UNIVERSITY OF ENGINEERING SCIENCE (CN) 所申請的專利 (公開編號 CN116514239A)，專利名稱為“Activated composite biochar electrode and preparation method and application thereof”。此專利介紹了一種以生質物為原料所製備之活化複合生物炭電極，並探討其在電容去離子 (Capacitive Deionization, CDI) 脫鹽中的應用。研究團隊選用蝦殼與菸稈，依找特定比例混合，經過粉碎、限氧預炭化、氫氧化鉀溶液浸漬活化以及高溫熱處理等步驟，製得具有高比表面積 (約 1753 m²/g 以上) 與豐富孔隙結構的活化複合生物炭，並將其與導電劑及膠黏劑混合製成電極。該電極在 500 mg/L NaCl

溶液中表現出優異的脫鹽性能，最大脫鹽量可達 84.50 mg/g。專利指出，這種材料來源可再生、製程簡單且成本低廉，兼具結構穩定性與高效電吸附能力，顯示其在可持續水處理與鹽分去除領域具有良好的應用前景。由此可見，生物炭在電容去離子技術中的運用，不僅為提升脫鹽效率提供了一條具成本效益且環保的路徑，也為未來水資源淨化技術的發展開拓了新的方向。2020 年同樣由中國 HUNAN UNIVERSITY (CN) 申請的專利 (公開編號 CN111573792A)，專利名稱為 “Preparation method of capacitive deionization electrode active material, capacitive deionization electrode and application of capacitive deionization electrode”。主要探討用於電容去離子技術之電極活性材料製備方法及其應用。該專利選用高比表面積的碳材料，結合表面改性與多孔結構設計，成功提升了電極的導電性和離子吸附能力，進而顯著提高了去離子效率與電極的循環穩定性。實驗結果顯示，這種優化的電極材料不僅在去除水中離子方面表現出色，且能在多次充放電循環中保持穩定，具備良好的長期使用潛力，適用於實際的廢水處理應用。此專利的創新製備方法為 CDI 技術的發展提供了重要支撐，也強調了碳基材料在電容去離子領域的廣泛應用潛力。

74

3.4 商業化

3.3.1 臺灣

臺灣每年約產生超過數百萬公噸的農業廢棄物，如何有效資源化處理與永續再利用，已成為國內農業與環境治理的重要課題^[65]。自 2017 年起，行政院農業委員會推動多項生物炭技術研發專案，積極建立原料回收與物流體系，並發展多樣化的炭化設備，以因應各地不同作物與廢棄物特性^[66]。相關研究指出，若於預留農地種植快生長樹種 (如楊樹) 並製備生物炭後應用於稻田，透過熱解技術可實現碳固定效益，進而達成溫室氣體減量目標。具體而言，快速與慢速熱解處理每噸原料分別可減少約 1.4 與 1.57 公噸之二氧化碳當量排放，顯示此類應用對氣候變遷具實質貢獻^[67]。在水資源領域，政府亦長期支持電化學水處理技術之研發與應用，包含膜電容去離子 (MCDI) 系統於海水淡化、硬水軟化、重金屬與地下水砷去除、再生水回用與工業廢水中稀貴金屬回收等方向。國內研究團隊已成功開發具奈米孔洞結構之高性能碳材電極，並完成模型規模之驗證測試，具備技術商轉潛力。此外，考量臺灣工業活動產生大量生質副產物，如甘蔗渣等，近年亦有研究團隊利用其為原料，發展分層多

孔結構之生物炭材料。透過微波加熱結合 KOH/CO₂ 雙重活化策略，有效調控孔隙結構與比表面積，並系統性探討物理活化氣體 (N₂ 或 CO₂) 流速對材料電化學性能之影響。相關研究顯示，CO₂活化能促進介孔生成，提升導電性與比電容，對於提升膜電容去離子系統的海水淡化效率具有實質助益^[64]。目前，臺灣生物炭-CDI 技術雖已完成模型規模驗證，但受限於電極材料量產穩定性、模組封裝防腐蝕技術、長期運行耐久性及成本控制等因素，尚未進入量產階段。於臺灣中部科學園區的廣泰環保能源 (TCHAR) 則以符合國際最高標準認證的農業及生物炭為基礎，並與塑膠、碳纖維、及水泥等材料結合以拓展應用，成為臺灣首家獲得國際生物炭認證的公司^[68]。目前雖已具生物炭規模化生產能力，但尚無以自家生物炭進行電極大規模量產並商轉整合 CDI 系統的案例，技術成熟度約介於 TRL 4 至 5 之間。未來若能在電極量產穩定性、模組封裝防腐蝕技術、長期運行耐久性及成本控制等方面取得突破，並建立完善的產業鏈與品質驗證機制，將有望推動臺灣生物炭-CDI 技術邁向商業化與國際市場。

3.3.2 歐洲

歐洲在推動永續農業與淨零排放政策的背景下，積極尋求低碳材料與綠色水處理技術的整合應用。生物炭因具備高導電性、發達孔隙結構與良好電化學穩定性，近年來逐漸成為 CDI 中具潛力的環境友善電極材料。在政策與產業需求驅動下，2023 年歐洲地區生物炭產量已達 75,000 公噸，年增率達 41%，預計 2024 年將進一步成長至 115,000 公噸，部分原料已開始導向高附加價值的水處理應用領域^[69]。以德國為例，其工業廢水處理市場產值居歐洲首位，2023 年總營收達 114.1 億美元；當地研究機構如 Fraunhofer IGB 已於歐盟 REWAGEN 計畫中建構多階段 CDI 水處理流程，並成功應用於乳品產業廢水的脫鹽與再利用，展示了生物炭-CDI 融合系統在能源回收與高效除鹽方面的實務可行性^[5]。此外，西班牙 Tedagua 公司與 Tecnalia 研究中心則合作開發節能型 CDI 海水淡化系統，並導入天然生物質碳材作為可再生電極，進一步提升循環壽命與系統能效^[70]。在材料開發層面，來自土耳其的研究團隊於《Energy Technology》期刊中發表以氧電漿活化改質之生物炭，其電極比電容由 80 F/g 提升至 97.5 F/g，並有效增進鹽分吸附性能^[71]。整體而言，歐洲各國正透過政策引導、材料創新與產業實證三軸並進的方式，加速推動生物炭應用於 CDI 系統之技術成熟與商業化進程，預期將在未來永續水處理產業中扮

演關鍵角色。目前歐洲生物炭-CDI 技術已具備政策支撐、研發基礎與初步商業案例，正處於初期商業化的關鍵轉折期。若能進一步建立穩定量產的電極供應鏈並驗證長期運行效益，預期在 3 ~ 5 年內可推進至 TRL8 ~ 9，成為永續水處理解決方案的重要支柱。因歐洲各國正透過政策引導、材料創新與產業實證三軸並進，加速推動生物炭在 CDI 系統的技術成熟與商業化進程，未來在永續水處理產業中有望扮演關鍵角色。

3.3.3 美國

美國 2021 年面臨嚴重的水土流失與氣候變遷挑戰，氣候極端事件大幅加劇農業生產鏈的不穩定性。在此背景下，生物炭不僅被視為提升土壤保水與養分供應的修復資材，也成為推動碳中和與永續農業策略的重要工具^[72]。據美國農業部 (USDA) 與能源部 (DOE) 統計，美國每年可用生物質原料量約達 10 億噸，其中秸稈約佔 4.28 億噸；北美地區當前生物炭年產約 35,000 至 76,600 噸^[73, 74]。在水處理領域方面，CDI 技術在美國獲得顯著發展，主要受市政與工業水質法規 (如 EPA 要求)、製藥與半導體產業高純水需求所驅動^[75]。美國研究顯示，以活化道格拉斯冷杉 (Douglas-fir) 生物炭作為 CDI 電極，搭配 Nafion 與 p-苯二胺功能化，不對稱 CDI 系統 (asymmetric CDI) 的脫鹽效率比傳統對稱系統提高 54%，NaCl 的 SAC 從 6.01 提升至 9.25 mg/g biochar，電荷效率也提升約 67%，展現其作為低成本、可持續電極材料的實用性^[72]。美國的生物炭-CDI 技術在充足的生物質資源與嚴格水質法規推動下，已由實驗室研究邁入產業示範階段，並在製藥、半導體高純水及市政水處理等領域展現出明顯的商業化潛力。整體而言，美國純 CDI 技術已達 TRL9，而生物炭-CDI 技術則處於 TRL6 ~ 7，正進行場域驗證與初期商業化，未來在智慧水處理、工業回用等領域具高度應用前景。

3.3.4 日本

日本因氣候暖化速度超全球平均兩倍，加上颱風與豪雨頻繁，對農業生產造成重大挑戰，政府與研究機構遂將生物炭廣泛納入永續農業與氣候調適實踐。根據 2020 年 UNFCCC 報告，日本已透過 J-credit 制度將生物炭應用於農地碳封存 (農地面積約 437 萬公頃)，並指出稻殼為主要原料，計畫在生產設施 30 km 範圍內收集稻殼，年利用 1,200 ~ 1,600 噸稻殼生產約 300 ~ 400 噸生物炭，用於減少化肥使用並改善土壤狀態^[76]。在去離子應用方面，日本雖非 CDI 技術的主要市場，但在連續式電去離子 (Continuous

Electrodeionization, CEDI) 及相關超純水製備技術上具重要地位。CEDI 模組已廣泛應用於微電子、製藥與電力等產業的超純水系統中，能將矽與硼等離子濃度降至 ppb 水準，並保持長期穩定運行。綜觀亞太 (Asia-Pacific) 地區在去離子技術的研發投入，日本雖主要聚焦於 CEDI 系統的超純水製備，但已有多篇研究探討稻殼生物炭在電化學去離子電極材料中的潛力。經高溫碳化與化學活化處理的稻殼生物炭可獲得高比表面積與良好導電性，在 CDI 系統中已證實具良好的脫鹽與去除重金屬能力及循環穩定性；此類性能特徵亦顯示其未來在去離子系統中具應用潛力^[56, 75, 77]。目前日本多數研究機構仍以生物炭製備與小型製炭設備開發為主，著重於透過表面改質提升導電性與孔隙結構，但尚未見將生物炭製成 CDI 電極並進行大規模示範的公開案例，技術成熟度約介於 TRL3 ~ 5^[76]。然而，隨著日本在環境保護法規與水質標準 (如 J-Credit 計畫) 的持續提升，以及稻殼基生物炭商業化應用與電極製備技術的逐步整合，水資源管理與農地利用的永續發展正被推動。透過從原料供應、材料研發到去離子技術應用的縱向整合，日本已初步建立產業鏈雛形，顯示其在未來相關市場中具備發展潛力與國際競爭力。

3.3.5 印度

印度每年產生超過 6 億噸農業廢棄物，主要包括稻殼、小麥秸稈、玉米梗與甘蔗渣等，其潛在轉化為生物炭的量估計達 1.21 億噸，相當於約 0.69 億噸煤炭當量，可替代全國火力發電燃煤需求約 11%，並有望每年減少約 1.65 億噸二氧化碳排放^[78]。根據政府間氣候變遷專門委員會 (IPCC) 報告，目前生物炭全球碳封存潛力達每年 26 億噸二氧化碳，其中約 11 億噸之封存成本低於每噸 100 美元，具經濟可行性，印度因勞動力與資源條件良好，能成為全球生物炭碳封存領導者的潛力^[79]。在水處理應用方面，總部位於印度那格浦爾的 ORAIP 公司開發 Eco-JAL 2K 系列 CDI 裝置，具備模組化與應用彈性，廣泛應用於海水淡化、食品與飲料製程、電子製造、電鍍、農業灌溉與水產養殖等領域^[80]。另一方面，印度學者亦開發核桃殼衍生之生物炭並進行 KOH 濃漬及鐵銅奈米顆粒摻雜處理，成功製備具選擇性之 CDI 電極。該電極具備高比表面積與優良導電性，在去除商業 RO 廢水中鹽分與污染物方面展現良好表現，比電容高達 97.5 F/g，為低能耗且高效率之不對稱 CDI 系統提供實證支持^[81]。印度生物炭原料主要來自農業廢棄物，其中 Varaha 已利用當地農業剩餘資材進行大規模生物炭製造，並展開

碳移除交易^[82]。在研究方面，利用甘蔗渣及稻殼等製得的生物炭經活化處理後，在 CDI 去離子測試中展現顯著電吸附性能，但多屬實驗室小型規模^[61]。產業層面，生物炭的生產與其在碳封存及農業改良上的應用已達商業化階段 (TRL7~9)，惟將生物炭應用於 CDI 電極材料的技術仍處於研發或小型模組測試階段 (TRL3~4)。若未來能結合更多國際投資與政策激勵，印度有望成為全球碳封存與水資源永續應用的重要實踐基地。

3.3.6 中國

中國作為全球農業大國，養育約 20% 世界人口，但同時面臨高排放與碳中和壓力。中國學者生命週期評估指出，若將農業廢棄物透過熱解轉化為生物炭並應用於農地與能量回收，可將主糧作物全生命週期溫室氣體排放從 666.5 Tg CO₂-eq/yr 降至 37.9 Tg CO₂-eq/yr；同時提升產量 8.3%，降低氮流失^[83]。此外，研究也指出，生物炭製備過程可產出熱能與電力，且其作為高導電性碳材具備應用於儲能裝置及水處理電極的潛力。中國研究團隊已投入生物炭電極材料的開發與性能優化。例如使用核桃殼為前驅體與硫酸鎂做為改質劑製備生物炭，該電極具高 SAC (27.79 mg/g)，並展示出良好的循環穩定性^[84]。作為亞太地區的生物炭生產大國，中國亦積極發展相關標準與產業鏈，從農業廢棄物回收、生物炭製備、材料 (核桃殼生物炭) 活化到 CDI 系統整合應用。目前相關技術已進入系統整合階段 (TRL 6~7)，若能與國家減碳及水資源管理

政策有效銜接，預期將具在國際市場快速推進商業化的優勢。若技術進一步商品化並與政策支持接軌，中國有望在市場中發揮關鍵影響力。

3.3.7 澳洲

澳洲每年生產堅果殼 (主要為澳洲堅果) 約 44,000 公噸，占全球總量的約 86%^[85]。其中僅約 5,000 公噸被回收作為燃料或園藝覆蓋物，其餘大多作為固體廢棄物處理^[86]。為有效提升資源循環利用效率，研究團隊將這些堅果殼熱轉化為生物炭，並應用於 CDI 系統中以處理水中硝酸鹽，他們還利用高頻交流電場消除堅果殼生物炭中殘留電荷，有效提升電極效能與操作穩定性，相較僅使用生物炭吸附塔，CDI 技術的系統可使塔層飽和時間延長至原本的 12 倍，比通量提升達 10 倍，同時降低碳使用率，顯著提升去除硝酸鹽的效率^[87]。因此，澳洲可利用本地豐富的堅果殼廢棄資源發展高性能生物炭電極，成功應用於 CDI 技術處理硝酸鹽，並具水處理領域的應用潛力，展現廢棄物轉化為高價值電化學材料的可行性。雖然生物炭生產在當地已有一定基礎，但作為 CDI 電極的商業化仍有限，應用規模主要停留在實驗室小規模測試階段 (TRL 約 3~5)，但因原料集中且可持續供應，未來具備水處理與資源循環領域的商業化潛力。如圖 4 所示，從全球角度觀察不同國家在生物炭與 CDI 技術的資源潛力、研究投入與實務應用呈現出顯著落差。如圖所示，中國與印度分別以每年 13,000 萬與 12,000 萬噸的農廢資源量，成為生物炭原料儲備最多的國家，有

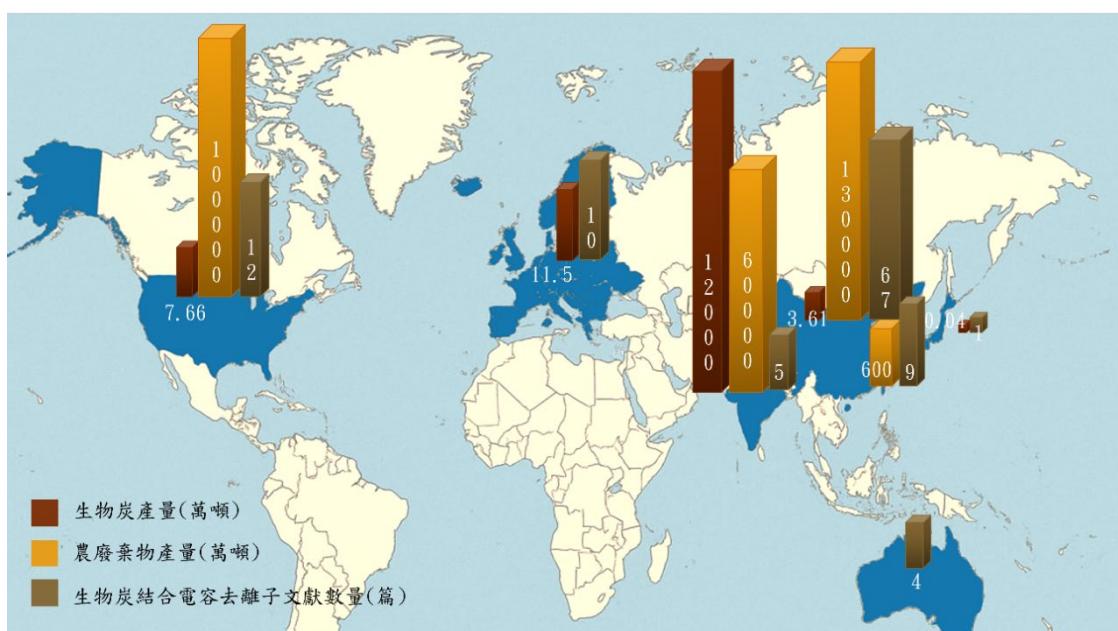


圖 4 各國生物炭產量及農廢物產量

較高數量之生物炭-CDI 研究；相對地，美國雖具每年高達 10 億噸生質原料潛力，但實際投入生物炭-CDI 研究的文獻不多。臺灣雖相較資源總量略少，但已建立材料開發與模型測試基礎，若能與亞洲與歐美團隊形成技術聯盟，整合農業循環與淨水產業系統，將有機會在生物炭-CDI 技術商業化之浪潮中占有一席之地。

四、未來發展與挑戰

以農業副產物為基礎所製備之多孔生物炭應用於 CDI 技術的可行性與潛力。生物炭具天然的孔隙結構與良好的電化學穩定性，使其成為一種具永續性與環境友善特質的電極材料來源。透過不同的製程條件調整，可賦予其適用於去除鹽分與污染物之能力，展現良好的去離子效能與重複使用特性，並具備進一步拓展至重金屬處理、地下水淨化與資源回收等多元應用的可能性。然而，在邁向實際應用與產業化過程中，仍面臨若干挑戰需進一步克服。首先，原料來源穩定性為關鍵考量之一，農業廢棄物受作物種類、產地氣候與耕作方式影響甚鉅，可能導致碳材性質批次間變異，進而影響電極性能與一致性。其次，製程一致性控制為商業應用之必要條件，目前許多生物炭製備程序仍缺乏標準化流程與品質驗證機制，導致不同批次材料在孔隙結構、導電性與表面官能基分布上仍存差異。最後，生物炭電極於長期操作下之結構穩定性亦須關注，實際應用中電極可能面臨電化學氧化、材料剝落、導電性衰退與孔洞阻塞等問題，進而降低其循環使用壽命與去離子效能。此外，如何與現行水處理系統進行模組化整合，以及在法規、經濟與技術層面取得平衡，亦為推動技術落地的關鍵。未來若能透過跨領域合作與政策支持，建立具我國特色之原料供應體系、標準化製程平台與電極驗證規範，將有助於加速生物炭應用於 CDI 技術在水資源治理與環境永續領域的推廣與應用。

致謝

感謝國科會計畫的經費支持，計畫編號：NSTC 113-2221-E-029-001-MY3、NSTC 113-2515-S-029-002-、NSTC 114-2221-E-029-004-。也感謝環境部環境管理署 113 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究專案，專案名稱：延展式流體電容去離子系統處理含砷地下水之研究。

參考文獻

1. Zhao Y, et al. "Performance Comparison and Energy Consumption Analysis of Capacitive Deionization and Membrane Capacitive Deionization Processes". *Desalination*. 324; pp.127-133, 2013.
2. Chu M, et al. "A Comprehensive Review of Capacitive Deionization Technology with Biochar-Based Electrodes: Biochar-Based Electrode Preparation, Deionization Mechanism and Applications". *Chemosphere*. 307; pp.136024, 2022.
3. Chu M, et al. "Deionization Performance, Desalination Enhancement Mechanism, Desorption Behavior and Energy Consumption Analysis of Biochar-Based Membrane Capacitive Deionization". *Chemical Engineering Science*. 291; pp.119953, 2024.
4. Jia B, Zhang W. "Preparation and Application of Electrodes in Capacitive Deionization (CDI): A State-of-Art Review". *Nanoscale Research Letters*. 11; pp.1-25, 2016.
5. Ahmed MA, Tewari S. "Capacitive Deionization: Processes, Materials and State of the Technology". *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 813; pp.178-192, 2018.
6. Lee J-Y, et al. "Preparation of Ion Exchanger Layered Electrodes for Advanced Membrane Capacitive Deionization (MCDI)". *Water Research*. 45(17); pp.5375-5380, 2011.
7. Kumar S, et al. "Electrode Materials for Desalination of Water via Capacitive Deionization". *Angewandte Chemie*. 135(35); pp.e202302180, 2023.
8. Vadahanambi S, et al. "Arsenic Removal from Contaminated Water Using Three-Dimensional Graphene-Carbon Nanotube-Iron Oxide Nanostructures". *Environmental Science & Technology*. 47(18); pp.10510-10517, 2013.
9. Zornitta RL, Ruotolo LA, de Smet LC. "High-Performance Carbon Electrodes Modified with Polyaniline for Stable and Selective Anion Separation". *Separation and Purification Technology*. 290; pp.120807, 2022.
10. Stephanie H, Mlsna TE, Wipf DO. "Functionalized Biochar Electrodes for Asymmetrical Capacitive Deionization". *Desalination*. 516; pp.115240, 2021.
11. Dehkhoda AM, Ellis N, Gyenge E. "Effect of Activated Biochar Porous Structure on the Capacitive Deionization

- of NaCl and ZnCl₂ Solutions". *Microporous and Mesoporous Materials*. 224; pp. 217-228, 2016.
12. Hussain H, et al. "Freestanding Activated Carbon Nanocomposite Electrodes for Capacitive Deionization of Water". *Polymers*. 14(14); pp. 2891, 2022.
13. Mer K, et al. "Capacitive Removal of Pb Ions via Electrosorption on Novel Willow Biochar–Manganese Dioxide Composites". *Environmental Technology*. 45(5); pp. 999-1012, 2024.
14. Silva AP, et al. "Ultrafast Capacitive Deionization Using Rice Husk Activated Carbon Electrodes". *Separation and Purification Technology*. 271; pp. 118872, 2021.
15. Song Z, et al. "Efficient Removal and Recovery of Cd²⁺ from Aqueous Solutions by Capacitive Deionization (CDI) Method Using Biochars". *Journal of Materials Science & Technology*. 148; pp. 10-18, 2023.
16. Obi F, Ugwuishiwu B, Nwakaire J. "Agricultural Waste Concept, Generation, Utilization and Management". *Nigerian Journal of Technology*. 35(4); pp. 957-964, 2016.
17. Bracmort K, Gorte RW. "Biomass: Comparison of Definitions in Legislation". Congressional Research Service, Library of Congress Washington DC; 2009.
18. 邱植培, 林玉。 「食品廢汙泥丟進農田汙染 大廠卜蜂涉案」。 2019。 Available from: <https://news.pts.org.tw/article/458850>.
19. 李卉婷。 「屏東 AI 判煙監控巡查 2 個月抓 28 件露天燃燒」。 2024。 Available from: <https://www.cna.com.tw/news/alloc/202412170149.aspx>.
20. 臺東縣環保局。 「空噪 Q&A」。 2025。 Available from: https://ttepbtaitung.gov.tw/News_Content.aspx?n=15186&s=107726.
21. 臺北市政府環境保護局。 「維護空氣品質 陸空同步聯合進擊 露天燃燒無所遁形」。 2017。 Available from: https://www.gov.taipei/News_Content.aspx?n=F0DDA F49B89E9413&sms=72544237BBE4C5F6&s=6561B7 D4761F1034.
22. 方俊琪。 「台灣地區廢棄物焚化處理之生命週期評估與不確定分析」。 2011。
23. 環境部。 「溫室氣體排放量盤查作業指引」。 2024。 Available from: <https://ghgregistry.moenv.gov.tw>.
24. Abeydeera L, Karunasena G. "Greenhouse Gas Emission Reporting Mechanism for Hotel Industry: A Case of Sri Lanka". *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*. 20(4); pp. 111-118, 2019.
25. Yu KL, et al. "Recent Developments on Algal Biochar Production and Characterization". 246; pp.2-11, 2017.
26. Das S, Goud VVJEP, Energy S. "Optimal Production of Bio-Char with Maximum Carbon Content Under Both Inert (N₂) and Reactive (CO₂) Environment Employing RSM". 41(6); pp.e13924, 2022.
27. Nandhini R, et al. "Thermochemical Conversion of Municipal Solid Waste into Energy and Hydrogen: A Review". 20(3); pp.1645-1669, 2022.
28. Bomfim ASCd, et al. "Valorization of Spent Coffee Grounds as Precursors for Biopolymers and Composite Production". 14(3); pp.437, 2022.
29. Zheng Y, Yu C, Fu L. "Biochar-Based Materials for Electroanalytical Applications: An Overview". *Green Analytical Chemistry*. 7; pp.100081, 2023.
30. Yang H, et al. "Utilization of Biochar for Resource Recovery from Water: A Review". *Chemical Engineering Journal*. 397; pp.125502, 2020.
31. 孙蒙蒙, et al. 「预处理技术在生物质热裂解中的应用」。 *林产工业*. 46(2); pp.33-38, 2019.
32. Chen W-H, et al. "Pore Volume Upgrade of Biochar from Spent Coffee Grounds by Sodium Bicarbonate During Torrefaction". *Chemosphere*. 275; pp.129999, 2021.
33. Lin S-L, et al. "Low-Temperature Biochar Production from Torrefaction for Wastewater Treatment: A Review". *Bioresource Technology*. 387; pp.129588, 2023.
34. Edeh IG, Masek O, Fusseis FJSR. "4D Structural Changes and Pore Network Model of Biomass During Pyrolysis". 13(1); pp.22863, 2023.
35. Yang J, et al. "Exploring the Properties and Potential Uses of Biocarbon from Spent Coffee Grounds: A Comparative Look at Dry and Wet Processing Methods". *Processes*. 11(7); pp.2099, 2023.
36. Putri AMH, et al. "Performance of Activated Carbon Derived from Tea Twigs for Carbon Dioxide Adsorption". *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 10; pp.100440, 2025.
37. Suwunwong T, et al. "Facile Synthesis of Corncob Biochar via In-House Modified Pyrolysis for Removal of Methylene Blue in Wastewater". *Materials Research Express*. 7(1); pp.015518, 2020.
38. Zhou F, Bi H, Huang F. "Ultra-Large Specific Surface Area Activated Carbon Synthesized from Rice Husk with High Adsorption Capacity for Methylene Blue". *无机材料学报*. 36(8), 2021.

39. Ajien A, et al. "Coconut Shell and Husk Biochar: A Review of Production and Activation Technology, Economic, Financial Aspect and Application". *Waste Management & Research*. 41(1); pp.37-51, 2023.
40. Bai S, et al. "Facile Preparation of Porous Biomass Charcoal from Peanut Shell as Adsorbent". *Scientific Reports*. 10(1); pp.15845, 2020.
41. Ma Z, et al. "Evolution of the Chemical Composition, Functional Group, Pore Structure and Crystallographic Structure of Bio-Char from Palm Kernel Shell Pyrolysis Under Different Temperatures". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 127; pp.350-359, 2017.
42. Fan Meng GR, et al. "Incorporating Biochar into Fuels System of Iron and Steel Industry: Carbon Emission Reduction Potential and Economic Analysis". 15 February 2024.
43. Visser LFA. "Biochar for Soil Improvement: Evaluation of Biochar from Gasification and Slow Pyrolysis". 5 November 2015.
44. Qianwei Liang DP, Zhang X. "Construction and Application of Biochar-Based Composite Phase Change Materials". 1 February 2023.
45. Qiao Zhuo YL, et al. "Applications of Biochar in Medical and Related Environmental Fields: Current Status and Future Perspectives". 18 September 2023.
46. Ntalane Sello Seroka HL, Khotseng L. "Biochar-Derived Anode Materials for Lithium-Ion Batteries: A Review". 24 April 2024.
47. Bingbing Qiu QS, Shi J, Yang C, Chu H. "Application of Biochar for the Adsorption of Organic Pollutants from Wastewater: Modification Strategies, Mechanisms and Challenges". 1 November 2022.
48. Liu Z, et al. "Production of Solid Biochar Fuel from Waste Biomass by Hydrothermal Carbonization". *Fuel*. 103; pp.943-949, 2013.
49. Singh B, Singh BP, Cowie AL. "Characterisation and Evaluation of Biochars for Their Application as a Soil Amendment". *Soil Research*. 48(7); pp.516-525, 2010.
50. Schulz H, Dunst G, Glaser B. "Positive Effects of Composted Biochar on Plant Growth and Soil Fertility". *Agronomy for Sustainable Development*. 33; pp.817-827, 2013.
51. Aup-Ngoen K, Noipitak M. "Effect of Carbon-Rich Biochar on Mechanical Properties of PLA-Biochar Composites". *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 15; pp.100204, 2020.
52. Kane S, et al. "Biochar as a Renewable Substitute for Carbon Black in Lithium-Ion Battery Electrodes". *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 10(37); pp.12226-12233, 2022.
53. de Caprariis B, et al. "Pyrolysis Wastewater Treatment by Adsorption on Biochars Produced by Poplar Biomass". *Journal of Environmental Management*. 197; pp.231-238, 2017.
54. Cuong DV, et al. "A Critical Review on Biochar-Based Engineered Hierarchical Porous Carbon for Capacitive Charge Storage". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 145; pp.111029, 2021.
55. Li D, et al. "Biochar for Electrochemical Treatment of Wastewater". *Biochar Applications for Wastewater Treatment*. pp.171-192, 2023.
56. Kim J, et al. "Controlling Hierarchical Porous Structures of Rice-Husk-Derived Carbons for Improved Capacitive Deionization Performance". *Environmental Science: Nano*. 6(3); pp.916-924, 2019.
57. Ahmedna M, Marshall W, Rao R. "Production of Granular Activated Carbons from Select Agricultural By-Products and Evaluation of Their Physical, Chemical and Adsorption Properties". *Bioresource Technology*. 71(2); pp.113-123, 2000.
58. Rengaraj S, et al. "Agricultural Solid Waste for the Removal of Organics: Adsorption of Phenol from Water and Wastewater by Palm Seed Coat Activated Carbon". *Waste Management*. 22(5); pp.543-548, 2002.
59. Ziežio M, et al. "Preparation and Characterization of Activated Carbons Obtained from the Waste Materials Impregnated with Phosphoric Acid (V)". *Applied Nanoscience*. 10; pp.4703-4716, 2020.
60. Porada S, et al. "Review on the Science and Technology of Water Desalination by Capacitive Deionization". *Progress in Materials Science*. 58(8); pp.1388-1442, 2013.
61. Li P, et al. "Chitin Derived Biochar for Efficient Capacitive Deionization Performance". *RSC Advances*. 10(50); pp.30077-30086, 2020.
62. Cuong DV, et al. "Hierarchical Porous Carbon Derived from Activated Biochar as an Eco-Friendly Electrode for the Electrosorption of Inorganic Ions". *Separation and Purification Technology*. 242; pp.116813, 2020.
63. Wang H, et al. "Efficient Removal of Metal Ions by

- Capacitive Deionization with Straw Waste Derived Graphitic Porous Carbon Nanosheets". *Environmental Science: Nano*. 7(1); pp.317-326, 2020.
64. Tang Y-H, Liu S-H, Tsang DC. "Microwave-Assisted Production of CO₂-Activated Biochar from Sugarcane Bagasse for Electrochemical Desalination". *Journal of Hazardous Materials*. 383; pp.121192, 2020.
65. 朱海鵬。「農業廢棄物共同清除處理機構管理輔導辦法簡介」。2001。Available from: <https://www.moa.gov.tw/ws.php?id=1978>.
66. 李宜映、陳、邱祈榮、林俊成。「由國際生物炭產業趨勢臺灣農業應用發展之新契機（下）」。2018。Available from: <https://www.moa.gov.tw>.
67. Kung C-C, McCarl BA, Cao X. "Economics of Pyrolysis-Based Energy Production and Biochar Utilization: A Case Study in Taiwan". *Energy Policy*. 60; pp.317-323, 2013.
68. Chuang D. "Central Taiwan's TCHAR Becomes First Certified Biochar Innovator, Drives Low-Carbon Treadmills and Electronics". 2025. Available from: <https://www.reccesary.com>.
69. Sherrard A. "EBI Releases Annual European Biochar Market Report". 2024.
70. Tedagua. "Gestion Sostenible". 2025. Available from: <https://www.tedagua.com/es>.
71. Wang K, et al. "Enhanced Capacitance and Desalination Performance with Plasma-Activated Biochar Electrodes". *Energy Technology*. 11(7); pp.2300043, 2023.
72. Song B, et al. "Biochar-Based Agricultural Soil Management: An Application-Dependent Strategy for Contributing to Carbon Neutrality". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 164; pp.112529, 2022.
73. Groot H. "Survey and Analysis of the US Biochar Industry". 2018. Available from: <https://www.dovetailinc.org>.
74. Jennifer C. "美國年產數億噸的秸稈哪去了？". 2015. Available from: <https://www.chinatimes.com>.
75. DataHorizon. "De Ionization Service Market". 2025. Available from: <https://datahorizonresearch.com/de-ionization-service-market-44181>.
76. 農業科技決策資訊平台。「【綠趨勢】日本 2050 年實現碳中和目標之綠色成長戰略（農業領域）」。2022。Available from: <https://kmweb.moa.gov.tw>.
77. Osawa M, et al. "A New Continuous Electrodeionization to Meet Advanced Ultrapure Water Systems". *Journal of Ion Exchange*. 14(Supplement); pp.277-280, 2003.
78. Yee A. "印度大力發展生物質能等非常規能源". 2013. Available from: <https://cn.nytimes.com/south-asia/20131017/c17india/zh-hant/>.
79. Anand A, et al. "Biochar Production from Crop Residues, Its Characterization and Utilization for Electricity Generation in India". *Journal of Cleaner Production*. 368; pp.133074, 2022.
80. Tokhi R. "Capacitive Deionization (CDI) Water Treatment". 2025. Available from: <https://www.oraipl.com>.
81. Maheshwari K, Agarwal M, Gupta AJJotTIC. "Efficient Desalination System for Brackish Water Incorporating Biomass-Derived Porous Material". 134; pp.104316, 2022.
82. Varaha. "Rooted in Agriculture, Inspired by Nature, Committed to Carbon Removal at Scale". 2022. Available from: <https://www.varaha.earth/about-us>.
83. Xia L, et al. "Integrated Biochar Solutions Can Achieve Carbon-Neutral Staple Crop Production". *Nature Food*. 4(3); pp.236-246, 2023.
84. Yong X, et al. "Walnut Shell-Derived Porous Carbon with MgSO₄ Modification for High-Performance Capacitive Deionization". *Diamond and Related Materials*. 136; pp.110063, 2023.
85. Navarro SL, Rodrigues CE. "Macadamia Oil Extraction Methods and Uses for the Defatted Meal Byproduct". *Trends in Food Science & Technology*. 54; pp.148-154, 2016.
86. Wongcharee S, Aravinthan V, Erdei L. "Mesoporous Activated Carbon-Zeolite Composite Prepared from Waste Macadamia Nut Shell and Synthetic Faujasite". *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 27(1); pp.226-236, 2019.
87. Al-Juboori RA, et al. "Innovative Capacitive Deionization-Degaussing Approach for Improving Adsorption/Desorption for Macadamia Nutshell Biochar". *Journal of Water Process Engineering*. 47; pp.102786, 2022.