

种植业废弃物制备生物炭及其复合材料研究进展

林宇豪 丁焱 胡宏志 张胥雪 刘洋 刘尊奇

Research progress of biochar and its composite materials prepared from plantation wastes

LIN Yuhao, DING Tao, HU Hongzhi, ZHANG Xuxue, LIU Yang, LIU Zunqi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241021.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

农林废物生物炭/高密度聚乙烯复合材料的制备与性能

Preparation and properties of agroforestry wastes biochar/high density polyethylene composites

复合材料学报. 2021, 38(2): 398–405 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200610.004>

共热解法制备方解石/生物炭复合材料及其吸附Pb(II)性能和机制

Preparation of calcite/biochar composite by co-pyrolysis and its adsorption properties and mechanism for Pb(II)

复合材料学报. 2021, 38(12): 4282–4293 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210309.002>

层状双氢氧化物-生物炭复合材料在废水处理中的应用

Application of layered double hydroxide-biochar composite in wastewater treatment

复合材料学报. 2024, 41(7): 3467–3478 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231106.002>

活性炭/高密度聚乙烯复合材料的力学性能

Mechanical properties of activated carbon/high density polyethylene composites

复合材料学报. 2020, 37(11): 2816–2824 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200224.001>

生物炭/二十烷复合定型相变材料制备及其光热、电热转换和储存性能

Form-stabilized phase change composites based on biochar and n-Eicosane for photo- and electro-thermal conversion and heat storage

复合材料学报. 2023, 40(1): 310–322 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220223.002>

生物炭负载绿色纳米铁颗粒去除水中U(VI)

Biochar supported green nano-iron particles to remove U(VI) from water

复合材料学报. 2022, 39(12): 5934–5945 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211129.004>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

种植业废弃物制备生物炭及其复合材料研究进展



分享本文

林宇豪¹, 丁焱¹, 胡宏志^{1,2}, 张胥雪¹, 刘洋^{*1,2,3}, 刘尊奇^{*1,2,3}

(1. 新疆农业大学 化学化工学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 聚合物新型成型装备国家工程研究中心 新疆分中心, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆农业化学与生物材料重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 我国种植业废弃物数量庞大, 其资源化利用具有极其重要的意义, 将种植业废弃物转化为生物炭是实现高效利用的一个重要途径。生物炭是由生物质原料在无氧或限氧环境下经过热转化过程得到的固体产物, 因其具有高含碳量、高阳离子交换量、大比表面积和结构稳定等特点, 在多个领域具有广泛应用。本文对生物炭的制备、改性及生物炭基复合材料在不同领域的应用进行了系统地总结和归纳, 并介绍了由生物炭制备的生物炭基复合材料在吸附、催化、缓释肥料、储能、传感及电磁干扰 (EMI) 屏蔽等领域的重要应用价值。

关键词: 种植业废弃物; 生物炭; 复合材料; 制备和改性; 可持续发展

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)05-2501-13

Research progress of biochar and its composite materials prepared from plantation wastes

LIN Yuhao¹, DING Tao¹, HU Hongzhi^{1,2}, ZHANG Xuxue¹, LIU Yang^{*1,2,3}, LIU Zunqi^{*1,2,3}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. New Polymer Molding Equipment National Engineering Research Center Xinjiang Branch, Urumqi 830052, China;
3. Xinjiang Key Laboratory of Agricultural Chemistry and Biomaterials, Urumqi 830052, China)

Abstract: The quantity of plantation waste in China is huge, its resource utilization is of great significance, and the conversion of plantation waste into biochar is an important way to realize efficient utilization. Biochar is a solid product obtained by thermal conversion of biomass raw materials in an oxygen-free or oxygen-limited environment, which has a wide range of applications in many fields due to its high carbon content, high cation exchange capacity, large specific surface area and stable structure. In this paper, the preparation and modification of biochar as well as the application of biochar-based composites in different fields are systematically summarized and generalized. Furthermore, the important application value of biochar-based composites prepared from biochar in the fields of adsorption, catalysis, slow-release fertilizers, energy storage, sensing, and electromagnetic interference (EMI) shielding are introduced.

Keywords: plantation waste; biochar; composites; preparation and modification; sustainable development

随着化石燃料价格的飙升和资源的日渐枯竭, 生物质作为一种多样化的可再生碳资源, 可替代世界范围内正迫切寻求着可替代且可持续的能源。化石资源应用于热能、电力、燃料生产及高附加

收稿日期: 2024-08-20; 修回日期: 2024-09-24; 录用日期: 2024-10-12; 网络首发时间: 2024-10-22 09:16:46

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241021.002>

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发专项 (20220264-3); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目 (2022D01A76); 新疆农业化学与生物材料重点实验室开放课题基金资助项目 (KF202206); 国家自然科学基金 (21561030); 新疆“天山英才”计划项目 (2021061)
Key Research and Development Projects of Xinjiang Uygur Autonomous Region (20220264-3); General Program of Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022D01A76); Open Research Fund of Xinjiang Key Laboratory of Agricultural Chemistry and Biomaterials (KF202206); National Natural Science Foundation of China (21561030); Xinjiang "Tianshan Talent Plan" Project (2021061)

通信作者: 刘洋, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为化学功能材料、生物质功能材料等 E-mail: ly2021@xjau.edu.cn;

刘尊奇, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为化学功能材料、生物质功能材料等 E-mail: lzq@xjau.edu.cn

引用格式: 林宇豪, 丁焱, 胡宏志, 等. 种植业废弃物制备生物炭及其复合材料研究进展 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(5): 2501-2513.

LIN Yuhao, DING Tao, HU Hongzhi, et al. Research progress of biochar and its composite materials prepared from plantation wastes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5): 2501-2513(in Chinese).

值副产品的制造，已成为全球关注的焦点^[1]。农业生产与农村生活中产生的废弃物种类繁多，特性各异，显著影响环境与资源利用。根据来源，这些废弃物分为种植业、养殖业、农产品加工业及农村居民生活废弃物四大类。相较于林业废弃物或其他废弃物^[2]，种植业废弃物(包括农作物秸秆、蔬菜的残体、果树和林木枝条、杂草、落叶及果实外壳等废弃物)在资源丰富性、成分多样性、环境友好性、技术可行性和经济效益上展现出显著优势，是一种重要的生物质资源(图 1)。在限氧或无氧条件下通过热化学转化种植业废弃物得到的具有高芳香性的生物炭(Biochar, BC)材料(含碳量>60%)^[3]，以其独特的孔隙结构和吸附性能，在能源和环境领域展现出非凡的应用，对推动全球可持续发展具有重要意义。

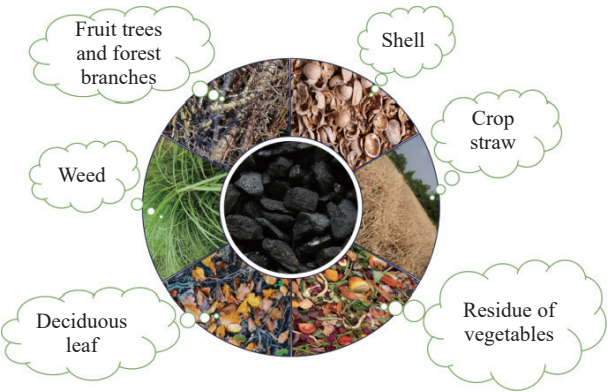


图 1 种植业废弃物用于制备生物炭

Fig. 1 Planting waste for the preparation of biochar

生物质^[4-5]能够经由热解(Pyrolysis)、气化(Gasification)、水热炭化(Hydrothermal carbonization, HTC)和微波热解(Microwave pyrolysis)等热转化方式得到生物炭(表 1)。为了

提升生物炭在不同环境过程中的理化性能，多种改性策略被开发出来，主要分为物理和化学改性两大类^[6]。化学改性主要包括酸、碱、氧化剂、金属盐或金属氧化物和碳质材料改性；物理改性主要包括蒸汽吹扫、气体吹扫和球磨改性(图 2)。生物炭的改性为制备高性能的生物炭基复合材料提供了基础，通过对生物炭进行改性，可以调整生物炭的孔隙结构、比表面积和表面化学性质，使其更适合与其他材料结合形成复合材料，可以低成本制备出具有高效、稳定、物理化学性能更加优异的生物炭基复合材料，也是近年来生物炭应用的一大研究热点(表 2)。目前，有关生物炭基复合材料的综述大都集中于论述生物炭的改性及复合材料的制备等方面^[7-9]，或仅关注生物炭基复合材料在某一领域的应用^[10-12]，本文旨在前人研究的基础上，总结归纳了种植业废弃物制备生物炭及其复合材料的应用，以期为今后生物炭基复合材料的研究提供借鉴和参考。

1 生物炭的制备

1.1 热解

热解是生物质转化最有前景的技术之一，是将生物质在高温(300~900℃)的惰性气体中加热的热过程^[4]，可将生物质分解为固体生物炭、液体生物油和可燃气体(合成气)。一般认为，生物质的热解包括 3 个主要阶段：(1)可利用水分的蒸发；(2)初级生物质的降解；(3)二次反应(包括石油裂解和再聚合)^[1]。根据操作条件的不同，热解可分为 6 个亚类(慢速、快速、闪速、真空、中间和加氢热解)，慢速热解和快速热解分别有着高的生物炭和生物油产量，真空热解的产物则分布较平均。热解作为一种快速发展的技术，具有广泛的适应

表 1 生物炭的制备方法及其优缺点

Table 1 Preparation methods of biochar and their advantages and disadvantages		
生物炭的制备方法	优点	缺点
热解	慢速热解生物炭产量较高; 快速热解反应时间短, 生物油产量高; 热解过程可根据预期结果优化; 热解对原料类型和运行条件灵活性强。	能耗高; 慢速热解反应时间长; 快速热解生物炭产量较低。
气化	产物生物炭具有更好的物化特性; 产生各种高能值气体产品。	目标产物通常为气态, 生物炭产量低; 反应温度高, 能耗高。
水热炭化	可直接处理含水量较高的原料; 反应条件温和, 节能环保; 生物炭产量通常较高。	反应时间长, 在封闭容器中反应, 不够灵活; 消耗水量大, 产生大量复杂的水相。
微波热解	加热均匀、能量利用率高、反应时间短; 相比传统热解, 生物炭品质更高, 比表面积和孔隙率更大, 微孔分布均匀且非常干净。	若原料吸波能力低, 则能量转化效率低; 微波环境中, 温度测量和控制非常困难; 微波泄漏风险。



图2 生物炭的改性方法

Fig.2 Modification methods of biochar

性，其有两个主要的优势：一个优势是可以根据期望的结果进行优化；另一个优势是对原料类型和操作条件有很强的灵活性^[13]。

1.2 气化

气化过程是在常压或高压和高温 (>700℃) 的条件下，通过控制氧化剂的用量(水蒸气、空气、O₂或其他混合气体)，将生物质材料转化为气体混合物，称为合成气(包括 CO₂、CH₄、H₂ 和 CO 等)及少量的生物炭和生物油^[14]。气化过程一般包括干燥、热解、部分氧化和还原 4 个连续的

步骤^[15]。与热解不同的是，气化过程中的目标产物为气态产物，因此气化过程中生物炭的产率通常低于热解过程，相同点是两种方法均需要采用干法工艺^[6]。

1.3 水热炭化 (HTC)

HTC 是指在封闭体系中，以水为反应介质，在温度为 180~250℃ 之间发生的一种热化学转化过程^[16]。生物质通过 HTC 后，通常也会得到 3 个主要的物相。相比于热解，HTC 的操作温度更低且发生在亚临界水热反应条件下，而热解的反应环境主要为惰性气体氛围。由于 HTC 发生在封闭体系中，对于控制生物质的热转化过程不如热解灵活。在产物分离方面，HTC 的缺点在于固相和水相分离困难，而油炭难以分离是热解的缺点^[17]。HTC 操作温度更低且在自身压力下进行，能够比热解消耗更少的能量，此外，HTC 具有碳排放量低、不使用强效化学药品、节约原料等优点^[18]。

1.4 微波热解

微波热解是利用微波作为热源对生物质废弃物进行热化学转化的过程，与传统电炉加热技术相比，微波热解具有快速、针对性强、节能等优点。此外，生物质炭基材料可以选择性吸收微波辐射，且吸波性良好。因此，通过选择性加热生物质炭基材料和某些反应物，可以使温度分布更加均匀，加快反应速率，提高产物产率^[19]。该技术已广泛应用于生物质热解制备生物炭和生物燃料。微波热解的加热原理是将电磁能转化为热能

表 2 生物炭 (BC) 改性方法比较

Table 2 Comparison of biochar (BC) modification methods

生物炭改性方法	特点
酸性	除去生物炭中的杂质； 向生物炭表面引入酸性官能团，如—COOH、—C=O—和—COO—等。
碱性	增加生物炭的比表面积； 向生物炭表面引入含氧官能团，如—OH、—C—O—、—COOH和—C=O—等。
氧化剂改性	丰富生物炭中的含氧官能团，如—OH、—C—O—、—COOH和—C=O—等。
金属盐或金属氧化物改性	增强生物炭的吸附性能； 增强生物炭的催化性能； 使生物炭具有磁性。
碳质材料改性	增加生物炭的比表面积。
水蒸气吹扫改性	增加生物炭的比表面积； 优化生物炭的孔隙结构。
气体吹扫改性	增加生物炭的比表面积和孔体积； 在生物炭表面形成活性位点。
球磨改性	增加生物炭的比表面积； 增强生物炭的吸附性能； 增强生物炭的催化性能。

进行能量传递,被处理物料吸收微波辐射的能力越强,加热速率就越快。研究表明,与传统热解工艺相比,微波热解生产的生物炭具有品质更高、比表面积和孔体积更大、微孔分布均匀且非常干净等优点^[20]。

1.5 其他制备方法

值得注意的是,烘焙作为一种生物质预处理方式,正受到越来越多研究人员的关注。由于生物质原料自身独特的物理化学性质(如水分、氧和碱金属含量高、低体积密度和能量密度、可磨性差等),导致其热解效率和产品质量均不如预期,而通过烘焙可以改善生物质原料的理化性质,提高热解效率和产品品质^[21]。

2 生物炭的改性

2.1 酸性

酸改性技术能够调整生物炭的比表面积与孔隙结构,同时影响其灰分含量,进一步丰富并提升生物炭表面官能团的种类与数量。常用来改性的酸包括硫酸、硝酸、磷酸、草酸和柠檬酸等。酸改性对生物炭理化性质的影响与酸的种类有关,Xu等^[22]采用不同酸(H_2SO_4 、 H_3PO_4 、 HNO_3)对玉米秸秆生物炭进行改性,研究显示,酸改性生物炭的H和O含量均有增加,改性过程向生物炭表面引入了含氧基团,3种酸改性生物炭的比表面积和孔体积较原始生物炭增加程度排序如下: $\text{H}_3\text{PO}_4 > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{HNO}_3$,灰分含量均有减少。此外,酸改性对生物炭比表面积和孔隙结构的影响还与原料有关,Chen等^[23]采用硫酸对玉米秸秆和稻壳生物炭进行改性,改性后玉米秸秆生物炭的比表面积、总孔体积和平均孔径相比于原始生物炭均减小,而稻壳生物炭比表面积和总孔体积较原始生物炭都有增加。

2.2 碱性

碱改性的核心目的在于提升原始生物炭的特定比表面积,并丰富其表面的含氧官能团种类^[24]。Liu等^[25]采用KOH制备了碱改性水稻秸秆生物炭(KRBC),其比表面积和总孔体积分别是未改性生物炭(RBC)的2.74和2.68倍,红外光谱显示,KRBC比RBC含有更多的含氧基团,芳香性也更强,增强了对Zn的吸附能力。Tang等^[26]采用NaOH制备了碱改性的小麦秸秆生物炭,研究显示,碱改性生物炭的比表面积、总孔体积和微孔体积分别是原始生物炭的4.5、2.3和5.7倍,但是红外光谱

显示,碱改性生物炭的官能团在改性过程中没有发生明显变化。由此可见,碱改性通常会增大生物炭的比表面积,但对生物炭表面官能团的影响与原料和制备方法有关。

2.3 氧化剂改性

通过氧化剂的改性处理,可以大幅提升生物炭中含氧官能团的含量,常用的氧化剂有过氧化氢(H_2O_2)、高锰酸钾(KMnO_4)等。Zhang等^[27]将在不同热解温度下制备的山核桃片生物炭进行球磨,然后用10%的 H_2O_2 溶液进一步改性后用于吸附亚甲基蓝(MB), H_2O_2 改性增加了生物炭表面羟基和羧基的含量,提高了生物炭对MB的吸附能力。不同的是,Qi等^[28]采用 H_2O_2 溶液对小麦秸秆进行预处理,在100~600 W微波功率下制备生物炭用于吸附重金属, H_2O_2 预处理提高了小麦秸秆生物炭的比表面积(从 $3.5589 \text{ m}^2/\text{g}$ 到 $6.1466 \text{ m}^2/\text{g}$)和孔体积,增强了生物炭对重金属的吸附。但是,红外光谱显示 H_2O_2 预处理前后小麦秸秆生物炭显示出相似的峰,未在生物炭表面引入含氧官能团。可以看出, H_2O_2 改性对生物炭表面官能团的影响与原料的种类和生物炭的制备方式有关。

同时,对未经炭化的生物质原料进行氧化剂预处理及对炭化后得到的生物炭进行氧化剂后处理,会对最终生物炭的性能产生不同的影响。这种处理方式的选择与应用,能够精细调控生物炭的物理化学特性,以满足不同领域的应用需求。Huang等^[29]制备了 KMnO_4 预处理小麦秸秆(Mn-BC)和后处理原始生物炭(BC-Mn)后的不同生物炭,两种改性生物炭的比表面积和孔体积相较于原始生物炭都有显著提高,且Mn-BC的两项指标均高于BC-Mn,提高了对四环素的吸附性能,但是,红外光谱显示,原始BC中含有丰富的官能团,而Mn-BC和BC-Mn中含有的官能团相对较少。

2.4 金属盐或金属氧化物改性

利用金属盐或金属氧化物对生物炭进行改性,生物炭作为多孔碳平台,金属氧化物在其上沉淀,从而改变生物炭的吸附^[30]、催化^[31]和磁性^[32]等特性。金属盐或金属氧化物改性可以通过两种方式实现:(1)预热解处理,将生物质原料浸泡在金属盐溶液中,然后在无氧环境下热解;(2)热解后处理,将生物质热解后再浸泡在金属离子溶液中^[33]。

2.5 其他改性

碳质材料(如碳纳米管、石墨烯等)改性也被用于增加生物炭的比表面积。Gao 等^[34]制备了大片磷状氧化石墨烯改性的甘蔗渣生物炭用于去除水中的双酚 S, 改性生物炭的比表面积较原始生物炭显著增大(从 5.08 m²/g 到 188.9 m²/g), 吸附双酚 S 的能力是原始生物炭的 2.8 倍。

水蒸气改性技术涉及在高温(> 700℃)环境下, 利用水蒸气对生物炭进行处理。这一过程显著地扩大了生物炭的比表面积, 并优化了其孔隙结构, 从而增强了其物理吸附能力。同时, 水蒸气处理还常常导致生物炭中含氧官能团(如羟基、羧基等)的增加, 进而提升了其化学活性和反应性能。Šváblová等^[35]制备了未活化、空气活化和水蒸气活化的核桃壳和杏核生物炭用于吸附丙酮, 比表面积大小顺序如下: 蒸汽活化(500~727 m²/g)>空气活化(59~514 m²/g)>未活化生物炭(1.71~236 m²/g), 具有最大比表面积的蒸汽活化生物炭对丙酮的吸附量最高(60.3~277.3 mg/g)。

气体吹扫可以提高生物炭的比表面积和孔体积, 并在生物炭表面形成活性位点, 主要使用的气体为 CO₂^[36]。Rawat 等^[37]在 700℃ 下热解得到荔枝核生物炭用于制备对称超级电容器, 在 1 A/g 的电流密度下实现了 190 F/g 的比电容, CO₂ 活化后, 生物炭比表面积显著提高, 具有分级多孔结构和丰富的杂原子官能团, 电容显著提高, 达到 493 F/g, 且活化生物炭超级电容器的充放电循环稳定性得到了很大提升。

球磨改性, 即将生物炭研磨成极细的粉末, 生物炭的比表面积随着粒径的减小而增大, 从而增强生物炭的吸附、催化等性能。球磨改性增加了不同热解温度下稻壳、玉米秸秆和松木锯末生物炭的比表面积和含氧官能团含量, 相比于原始生物炭, 球磨改性生物炭对丙酮和甲苯的吸附量分别提高了 1.2~3.2 倍和 1.2~2.9 倍^[38]。

3 生物炭及其复合材料的应用

3.1 吸附材料

在过去几十年里, 有机污染物的无节制排放导致环境不断恶化, 公共健康越来越受到人们关注。为了应对这一挑战, 科研人员开发了如吸附、光催化降解、高级氧化工艺和生物降解等一系列技术, 旨在从废水和受污染的土壤中清除有害有机物。吸附法由于具有操作简便、效果好等优点,

近年来被越来越多的应用于环境修复中^[39]。生物炭具有丰富的孔隙结构、较大的比表面积、丰富多样的表面活性官能团、稳定的化学性质、高矿物质含量、高碳含量和高阳离子交换量等独特特性, 使其成为一种很有前途的吸附剂, 生物炭基复合材料在吸附和去除重金属污染物和有机污染物及从废水中回收利用营养元素(氮、磷等)等方面具有很高的潜力。

Gao 等^[40]以棉花秸秆为原料, 在 250~650℃ 下制备生物炭用于吸附 Pb²⁺, 研究结果表明, 在作者所构建的吸附体系下, 当热解温度在 450℃ 以上时, Pb²⁺去除效率达到 98% 以上。使用最优生物炭样品(550℃ 下制备所得)进行批量吸附实验, 准二级动力学模型和 Freundlich 模型能较好地拟合吸附数据, Langmuir 模型计算的最大吸附量高达 146.78 mg/g。Yuan 等^[3]以 5 种常见中药渣(丹参、川芎、当归、党参和黄芪)为原料制备生物炭, 通过批量吸附实验研究生物炭对 Pb²⁺的吸附特性。研究结果表明, 生物炭的吸附动力学遵循准二级动力学模型, 等温线符合 Langmuir 模型, 为单分子层化学吸附, 其中丹参生物炭吸附能力最强, 可达 36.42 mg/g。

Wang 等^[41]开发了一种新颖的氨化-水热法制备芦苇生物炭用于吸附水溶液中的菲(PHE), 通过多种方法对芦苇生物炭的形貌和物理化学性质进行表征, 研究其对 PHE 的吸附等温线和动力学, 同时基于密度泛函理论(DFT)分析生物炭结构对吸附性能的影响。结果显示, 氨化-水热法制备的生物炭具有较大的比表面积, 最大非平衡吸附量为 1.97 mg/g, 吸附过程符合 Freundlich 等温线模型和准二级动力学模型。吸附能计算表明, 生物炭中掺杂的 N 官能团(如吡啶 N)与 PHE 表现出强的结合能力。

近年来, 由水体中氮、磷等营养物质过量供给引起的水体富营养化问题已成为一个全球性的环境问题, 它威胁饮用水安全和水生生态系统的生物多样性, 从而危害鱼类和人类的健康。因此, 去除水中的氮和磷具有重要意义^[42]。Li 等^[43]采用浸渍法制备了铁改性玉米秸秆生物炭(Fe-BC)用于回收沼液中的氮和磷, 结果显示, Fe-BC 对 N 和 P 的最大吸附量分别为 11.68 mg/g 和 26.14 mg/g, 与未改性生物炭相比分别提高了 131.7% 和 253.2%。Fe-BC 可逐渐释放约 10% 的吸附态养分, 后续可作为土壤肥料使用(图 3)。

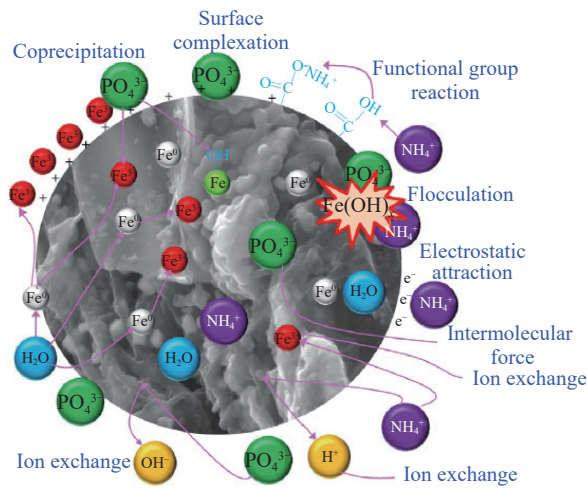


图3 N、P的吸附机制^[43]
Fig. 3 Adsorption mechanism of N and P^[43]

3.2 催化材料

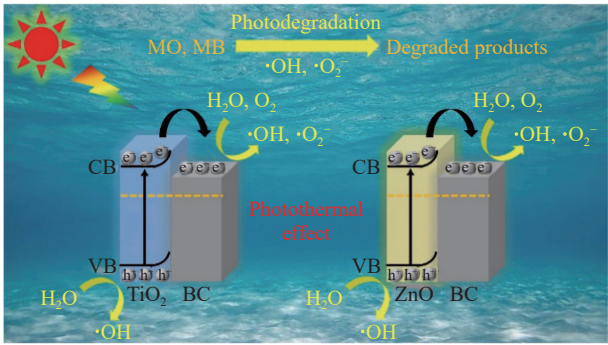
催化降解技术是处理环境污染物的重要手段之一，生物炭因其表面含有丰富多样的官能团和外部过渡金属，可作为降解污染物的催化剂^[10]。近年来，生物炭和生物炭基催化剂已广泛用于降解各种有机污染物，如双酚A、烯酰吗啉、四环素、磺胺和甲苯等。

在不添加化学氧化剂的环境下，生物炭中含有的环境持久性自由基 (Environmental persistent free radicals, EPFRs) 可以与氧气反应诱导产生羟基自由基 (•OH) 用于降解污染物，特别是有机污染物。Qin 等^[44] 研究发现稻壳生物炭对 1, 3-二氯丙烯 (1, 3-D) 的降解速率受热解温度影响。随着生物炭热解温度从 300℃ 升至 500℃，1, 3-D 的降解速率逐渐减小 (从 0.00152 h⁻¹ 到 0.00073 h⁻¹)，然后在 500℃ 到 700℃ 之间增加 (从 0.00073 h⁻¹ 到 0.00305 h⁻¹)。纯生物炭的氧化还原活性可以通过在其上负载金属得到增强。Duan 等^[45] 制备的负载零价铁生物炭复合材料可以高效活化氧气产生 •OH，在生物炭与零价铁质量比为 1 : 1 时，活化氧气产生 •OH 的能力最强，在浓度为 1.0 g/L 时可达 20.19 μmol/L。

在添加化学氧化剂 (如 H₂O₂、过硫酸盐等) 的情况下，生物炭及生物炭基催化剂可以分别诱导其产生 •OH 或硫酸根自由基 (SO₄•⁻)。Devi 等^[46] 制备了小麦秸秆生物炭在 H₂O₂ 氧化体系中降解 1-甲基-1-环己烷羧酸，结果显示，生物炭对 H₂O₂ 分解 (反应速率常数 $k=2.0\times10^{-4} \text{ mol}^{-1}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)、•OH 产生量 (182 mg/L) 和环烷酸降解 (当 1-甲基-1-环己

烷羧酸的初始浓度 C₀=100 mg/L 时，降解率为 100%) 均表现出优异的催化活性。同时，化学氧化剂存在下的非自由基途径也被广泛研究。Cai 等^[47] 开发了双金属氧化物 (Fe₃O₄-CuO) 改性的核桃壳生物炭用于活化过二硫酸盐降解诺氟沙星，在作者构建的催化体系下，180 min 内诺氟沙星降解了 94.5%，单线态氧 (¹O₂) 非自由基在降解过程中占据主导地位。

另外，生物炭可作为光催化剂的支撑材料，增强催化剂的光降解性能。Jiang 等^[48] 已合成负载 TiO₂ 和 ZnO 的玉米秸秆生物炭用于降解甲基橙 (Methyl orange, MO) 和亚甲基蓝 (图 4)。改性生物炭中的肖特基结改善了电子转移，而生物炭的光热效应提升了光催化剂的表面温度，有助于促进光生电子-空穴对的分离与传输，从而提高对污染物的光降解效率。同时，吸附-光降解协同处理污染物也受到广泛研究。Bi₂O₂CO₃/稻壳生物炭复合材料对四环素具有强的吸附能力 (173.0 mg/L) 和光催化活性，60 min 内，吸附-光降解对四环素的联合去除率可达 84.7%^[49]。



CB—Conduction band; VB—Valence band
图4 BC/TiO₂ 和 BC/ZnO 在光照条件下光降解甲基橙 (MO) 和亚甲基蓝 (MB) 的机制^[48]

Fig. 4 Mechanisms of photodegradation of methyl orange (MO) and methylene blue (MB) by BC/TiO₂ and BC/ZnO under light irradiation^[48]

3.3 生物炭基缓释肥料

化肥施用可以快速提高作物产量，有效缓解世界范围内面临的粮食危机问题。但是，常规肥料直接施用时，一来作物对营养成分的吸收效率有限，N、K 吸收率约为 50%~60%，P 吸收率则低至 10%~25%，二是这些肥料具有高溶解性、低热稳定性和小分子特性，导致养分易通过地表径流、反硝化作用、淋溶和挥发等方式进入环境中，显著降低了肥料利用率，施用成本随之上升^[50]。缓释肥料通过控制养分的释放速度，使养分在土壤

中缓慢释放，减少养分的流失，从而提高植物对养分的吸收利用效率。这种肥料有助于实现持续、稳定的作物生长，同时也有助于减少环境污染，是一种高效且环保的农业投入品。生物炭具有高的比表面积、多孔的结构及存在多样化的官能团，是制备缓控释肥料的优良基质^[12]。缓释肥料根据其养分释放机制可分为包膜肥料和非包膜肥料。

包膜缓控释肥料的工作原理是通过在肥料颗

粒外层覆盖一层包膜，实现肥料内核与土壤之间的物理隔离(图 5)。这种包膜材料能够有效控制养分的释放速度，使养分在土壤中逐渐扩散或在包膜破损后逐步释放^[51]。Sim 等^[52]以黑胡椒废料为原料制备了尿素浸渍生物炭(UIB)，并将木薯淀粉/棕榈油生物膜涂覆在 UIB 上，制备了包封尿素浸渍生物炭(EUIB)，与 UIB 颗粒和纯尿素相比，EUIB 颗粒表现出最低的氮累积释放率。

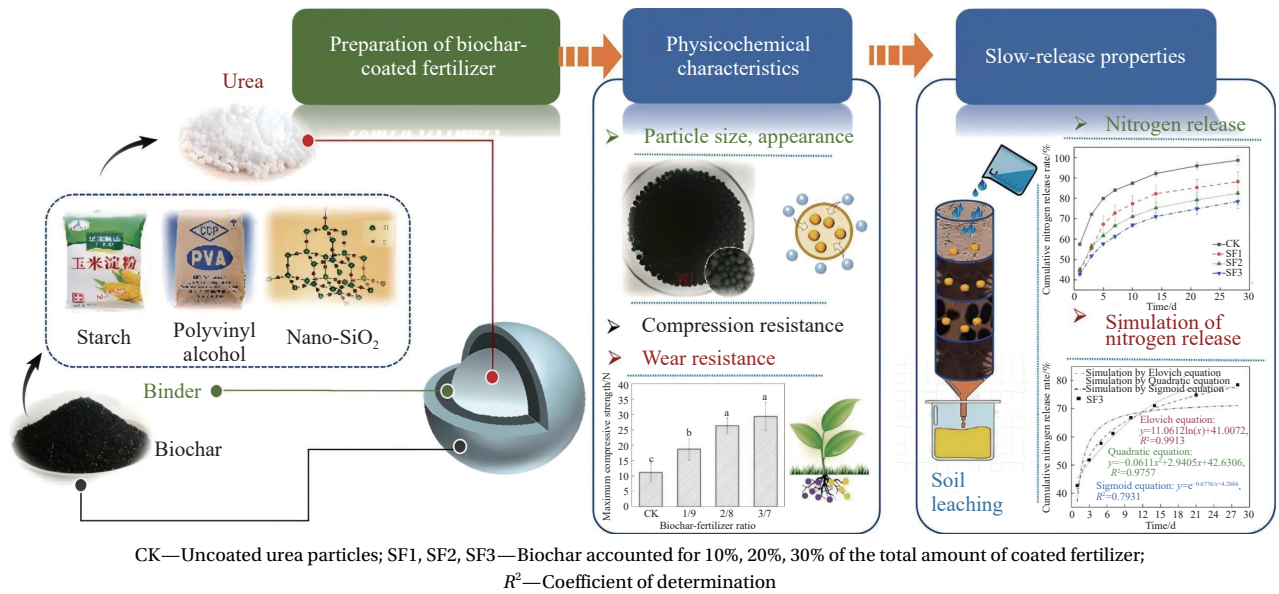


图 5 纳米 SiO₂-淀粉-聚乙烯醇生物炭包膜尿素缓释肥料的制备与表征^[51]

Fig. 5 Preparation and characterization of nano-SiO₂-starch-polyvinyl alcohol biochar coated urea slow-release fertilizer^[51]

非包膜肥料通过精心调配肥料与缓释材料的组合，有效降低了肥料在水中的溶解速率，从而实现了养分的缓释效果^[51]。An 等^[53]以棉花秸秆(CS)、K₃PO₄和膨润土为原料，在微波辐射下共热解制备了生物质炭基缓释肥料(BSRFs)，与仅有CS和K₃PO₄共热解得到的缓释肥料相比，所合成的BSRFs能够更好地缓释P和K；膨润土的存在有利于提高BSRFs的缓释性能，盆栽试验表明，BSRFs比仅有CS和K₃PO₄共热解得到的缓释肥料更能促进辣椒幼苗的生长。

3.4 储能和能源生产器件

3.4.1 超级电容器

随着能源生产技术的不断进步，储能技术的重要性日益凸显。超级电容器凭借其高功率密度和高能量密度等独特优势，受到了业界的广泛关注^[54]。超级电容器分为三类：电化学双电层电容器(Electrical double-layer capacitor, EDLC)、赝电容器和混合电容器，生物炭因其具有高比表面积、

高能量密度、高导电性和强循环性能，是EDLC和混合超级电容器的理想电极材料^[55]。

Rawat 等^[37]在 700℃下热解得到荔枝核生物炭用于制备对称超级电容器电极，在 1 A/g 的电流密度下实现了 190 F/g 的比电容。使用 CO₂ 对生物炭进行活化后，电容显著升高(从 190 F/g 到 493 F/g)，活化生物炭超级电容器经过 10 000 次充放电循环后，电容保持率在 90 % 以上，其能量密度和功率密度分别为 24.6 W·h/kg 和 0.6 kW/kg。

3.4.2 蓄电池

相较于传统的石墨材料，生物炭因其出色的性价比、可持续的合成过程及卓越的高比电荷存储能力，已经逐渐成为制造各类可充电电池的理想选择。它不仅在成本效益上表现出色，而且其生产方法对环境友好，更具备强大的电荷存储能力，使它在电池技术领域备受瞩目^[56]。

Salimi 等^[57]制备了两种(活化/未活化)常春藤衍生的生物炭基负极作为锂硫电池中锂金属负极

的替代品，结果显示，未活化的生物炭基负极拥有更好的性能，在 0.1 A/g 下实现了 400 mA·h/g 的稳定容量和长寿命 (0.5 A/g 下循环次数 > 400 次)，将未活化的生物炭基负极与硫正极耦合制备无锂金属硫电池，其能量密度高达 600 W·h/kg。

3.4.3 燃料电池

在质子交换膜燃料电池中，生物炭因其作为氧化还原反应的高效催化剂而具有突出的应用，有极其强大的潜力应用于直接碳燃料电池 (Direct carbon fuel cells, DCFCs) 和微生物燃料电池 (Microbial fuel cell, MFCs) 中^[56]。基于电池结构和所采用电解质的类型，DCFCs 可分为熔融氢氧化物、熔融碳酸盐、固体氧化物、混合型和液态金属阳极等类型，其中，直接碳固体氧化物燃料电池 (Direct carbon solid oxide fuel cell, DC-SOFCs) 技术因其清洁高效、具有发电效率高和可用燃料广等优点而被广泛研究。生物炭的多孔结构和其组成成分中天然存在的金属元素使生物炭作为 DC-SOFCs 的燃料得到广泛研究和应用。

DC-SOFCs 技术，作为一种前沿的生物质能源转化方案，其显著特点是无需依赖传统的高温液体介质或外部气体供应，而是能够直接在生物炭上进行高效、稳定的能量转换过程。这种技术革新了传统能源利用模式，为可持续能源发展提供了新途径^[58]。Gu 等^[59] 在 800℃ 下热解制备了棉花秸秆生物炭作为阳极支撑的管式 DC-SOFCs 的燃料用于电-气联产，结果表明，棉秆生物炭中大量的 K 和 Ca 是 DC-SOFCs 中逆 Boudouard 反应的催化剂，以其作为燃料，在 850℃、0.9 W/cm² 时具有极大的功率密度，且电-气联产的整体能量效率可以达到 70%(图 6)。

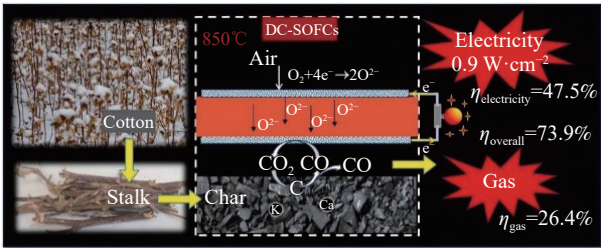


图6 棉花秸秆生物炭作为直接碳固体氧化物燃料电池 (DC-SOFCs) 原料实现高效电-气联产^[59]

Fig. 6 Cotton straw biochar as a direct carbon solid oxide fuel cell (DC-SOFCs) raw material to achieve efficient electricity and gas co-production^[59]

MFCs 以废水作为底物，利用废水中的电活性微生物和有机物将化学能转化为电能。MFCs 通过特定微生物的作用，将有机化合物氧化过程中累积的电子进行传递，这些由微生物传递至阳极的电子随后被外电路捕获并转移，而质子则通过阴极进行传输，这种电子和质子的流动机制导致了电荷的迁移，进而产生电能^[60]。生物炭在 MFCs 中展现出卓越电子传递效率，其特有的多孔结构为微生物提供了理想的附着和生长环境，促进了微生物的繁殖和发育。此外，生物炭的稳定性特点极大地增强了 MFCs 的长期运行稳定性和整体效率，这些优点使生物炭无论是作为 MFCs 氧化还原反应的电催化剂还是独立电极都有广泛的应用。Jiang 等^[61] 采用浸渍后热解法制备了 Mn/Fe 掺杂的西瓜皮生物炭 (Watermelon rind biochar, WRC) 作为 MFCs 的阴极氧化还原反应催化剂，700℃ 下制备的 Mn/Fe@WRC 催化剂表现出优异的电化学性能，氧化还原反应通过四电子途径发生，MFCs 最大功率密度为 (399.3±7.4) mW/m²。

3.5 传感器

传感器是一种检测装置，具备对被测量信息的感知能力。其核心功能在于，它不仅能捕获这些信息，还能将这些信息依据一定的规律转化为电信号或其他形式输出，以满足信息在传输、处理、存储、显示、记录及控制等多个环节的需求。这一转换过程确保了信息的准确性和可用性，从而在各种应用领域中发挥着至关重要的作用。生物炭具有稳定、高度芳香化、富碳、生态友好等特点。这些优点使其非常适用于电化学传感器和生物传感器的发展^[62]。

电化学传感器是一种基于电化学原理工作的传感器，其主要特点是将化学反应信号转化为电信号，从而实现对特定分子或离子的存在、浓度等参数的检测。Valenga 等^[63] 在不同热解温度下 (300~700℃) 制备了甘蔗渣生物炭，并用 HNO₃ 进行活化，用于构建检测 Cu²⁺ 的电化学传感器，400℃ 下得到的材料有着最强烈的响应；建立的用于检测 Cu²⁺ 的差分脉冲吸附溶出伏安法有着足够的准确度和精密度，线性范围为 1.0~15.0 μmol/L，检出限为 0.36 μmol/L，定量限为 1.09 μmol/L(图 7)。

四环素在水生环境中的普遍存在会对生态系统和人体健康产生不利影响，Chou 等^[64] 通过水

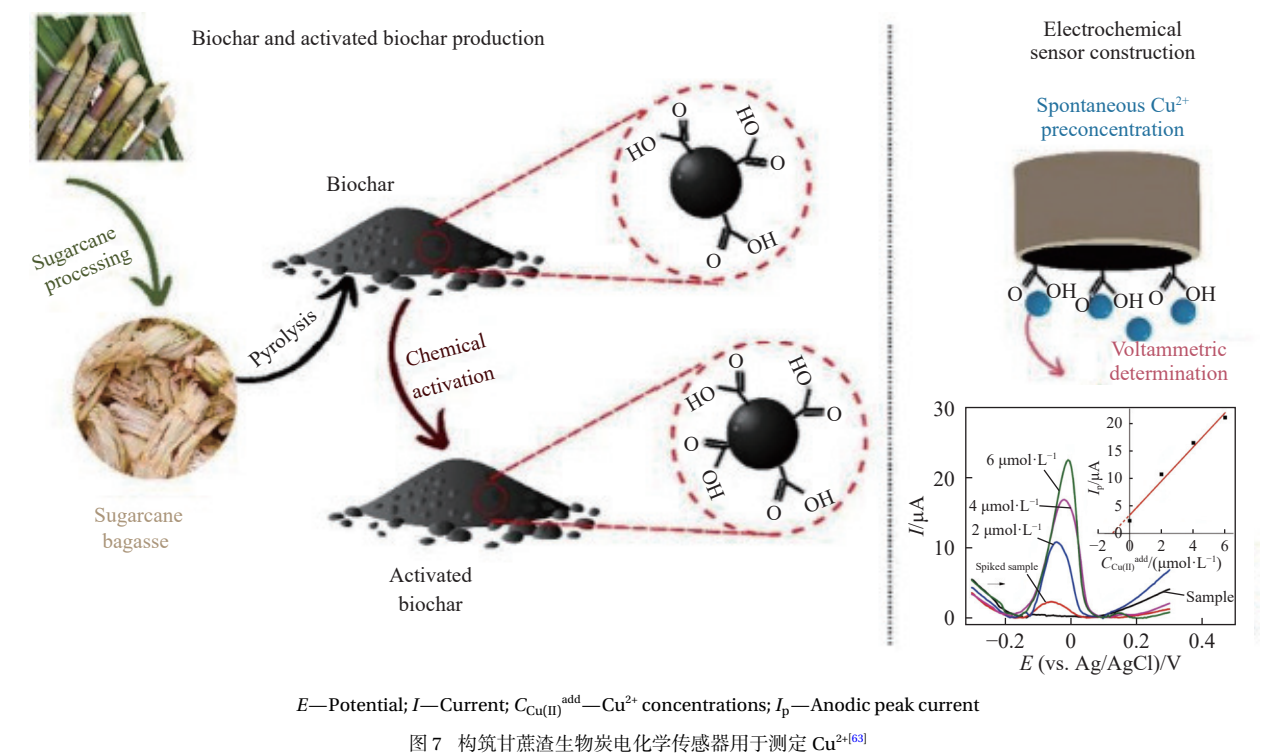


图7 构筑甘蔗渣生物炭电化学传感器用于测定 Cu^{2+} ^[63]

Fig. 7 Construction of bagasse biochar electrochemical sensor for the determination of Cu^{2+} ^[63]

热和热解从花生壳中制备了类石墨烯生物炭用于构建新型电化学传感器进而快速检测水中的四环素，传感器表现出优异的灵敏度，检测限为 3.6×10^{-9} nmol/L，线性范围为 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ μmol/L，且该传感器具有优异的稳定性和可重复性。

生物传感器是一种对生物物质敏感并将其浓度转换为电信号进行检测的仪器。生物炭可以作为负载氧化还原介体和生物受体的载体进而开发生物传感器，Kalinke 等^[65]在蓖麻饼生物炭上合成了普鲁士蓝纳米结构，同时将酶固定在生物炭上开发了葡萄糖生物传感器，该传感器具有良好的酶-底物亲和力、较宽的线性动态响应范围 (0.05~5.0 mmol/L)、较低的检测限 (0.94 μmol/L) 和定量限 (3.13 μmol/L)。大肠杆菌 O157:H7 作为主要的食源性致病菌之一威胁着食品安全，Sobhan 等^[66]将链霉亲和素用生物素标记的抗大肠杆菌多克隆抗体固定在水蒸气活化的玉米秸秆生物炭上，用于制备快速检测大肠杆菌 O157:H7 的生物传感器，检测限达到 10^4 CFU/mL，且无需孵育。

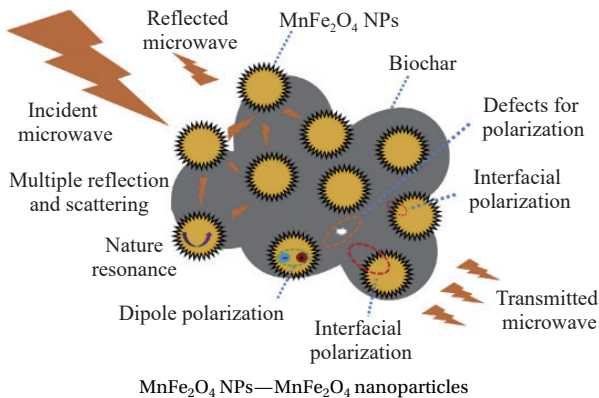
3.6 电磁干扰屏蔽材料

电磁干扰 (Electromagnetic interference, EMI) 源自电气和电子设备发射的电磁波之间的相互作

用，这种干扰会削弱信号质量，导致电子设备或其他系统出现故障，从而缩短其使用寿命。此外，电磁污染也对人类健康构成威胁，长期暴露于 EMI 环境下的人可能出现头痛、紧张、失眠和嗜睡等症状^[67]。为应对日益加剧的电磁辐射污染问题，研发轻质且高性能的 EMI 屏蔽材料已成为当前紧迫的任务，生物炭的诸多特性使其在该领域受到广泛研究。

Yin 等^[68]制备了负载 $MnFe_2O_4$ 纳米颗粒 ($MnFe_2O_4$ nanoparticles, $MnFe_2O_4$ NPs) 的旱芹茎秆生物炭，该复合材料拥有优异的低频电磁波吸收能力，在 0.78 GHz 处具有 -48.92 dB 的最大 RL 值，厚度为 2.5 mm 时的有效吸收宽带为 0.38~1.78 GHz，优异的性能归因于自然共振、多重界面和表面极化、强电磁衰减能力和良好的阻抗匹配特性 (图 8)。

Wang 等^[69]开发了松塔生物炭和可降解聚丁二酸丁二醇酯为基础的电磁波吸收复合材料。研究显示，增加生物炭含量显著提升电磁屏蔽性能，最高达 54.51 dB。酸洗处理生物炭是增强电磁屏蔽效果的有效手段，优于未处理或添加偶联剂。同时，复合材料还具备优异的热稳定性和机械强度，体现了低成本、环保且高效的特性。



MnFe₂O₄ NPs—MnFe₂O₄ nanoparticles
图 8 旱芹茎秆生物炭/MnFe₂O₄@C 复合材料电磁吸收机制示意图^[68]
Fig. 8 Schematic view of electromagnetic absorption mechanisms of
Apium-derived biochar/MnFe₂O₄@C composite^[68]

4 结论与展望

种植废弃物制备生物炭材料来源广，制备简单，成本相对低廉，不仅是一种极为有效的固废途径，而且在环境保护和能源利用方面具有广阔的应用前景。但是，生物炭在实际应用中具有一定的局限性，对生物炭进行改性制备生物炭基复合材料是解决这一问题的主要手段。总的来说，生物炭及其复合材料的相关研究工作已经取得了不错的成绩，仍有一些问题需要解决，未来研究方向在于：

(1) 在生物炭改性研究领域，单一改性方法占据主导，而多种改性方法相结合的协同效应研究较少，对于生物炭多种改性方法结合使用后，对生物炭及其复合材料应用的影响仍需探索，同时，寻找环保和可持续的生物炭改性方法需着重研究；

(2) 在吸附和催化领域，生物炭及其复合材料的研究目前多受实验室限制，需拓展至复杂多变的应用环境，以评估其在实际污染体系中的效能。催化领域尤其需通过大规模应用来全面考量生物炭基催化剂的生态影响、寿命及经济效益；

(3) 在农业领域，生物炭基缓释肥料的研究焦点在于显著提升其缓释效能，以确保养分释放的持久性与稳定性，然而，为了更精准地服务于现代农业，未来的研究亟需深化，将重点转向探索肥料缓释性能与特定植物生长需求的精准匹配度；

(4) 在储能领域，针对生物炭在电化学储能应用中的不足，可以通过表面改性、结构设计等方法来改善其电化学性能，重点可以通过建立精确的理论模型利用生物炭生产高性能储能和能源生产器件；

(5) 在传感技术领域，生物炭基传感器的精确度和准确度始终是研究的重点，在此基础上，重点关注传感器的生产成本和对生态环境的影响。此外，生物炭基传感器的大规模使用和工业化受限严重，需要重点研究；

(6) 在电磁干扰 (EMI) 屏蔽领域，如何研发轻质且高性能的 EMI 屏蔽材料是当前紧迫的任务。

参考文献：

- [1] YOGALAKSHMI K N, POORNIMA DEVI T, SIVASHAN-MUGAM P, et al. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review[J]. *Chemosphere*, 2022, 286(2): 131824-131839.
- [2] 张德平, 白妙琴, 马文江, 等. 农业废弃物资源利用途径研究[J]. *合作经济与科技*, 2024, 10(13): 22-23.
ZHANG Deping, BAI Miaoqin, MA Wenjiang, et al. Research on ways to utilize agricultural waste resources[J]. *CO-Oerativeconomy & Science*, 2024, 10(13): 22-23(in Chinese).
- [3] YUAN J D, WANG C J, TANG Z T, et al. Biochar derived from traditional Chinese medicine residues: An efficient adsorbent for heavy metal Pb(II)[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2024, 17(3): 105606-105620.
- [4] YU S X, ZHANG W, DONG X W, et al. A review on recent advances of biochar from agricultural and forestry wastes: Preparation, modification and applications in wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(1): 111638-111656.
- [5] ERCAN B, ALPER K, UCAR S, et al. Comparative studies of hydrochars and biochars produced from lignocellulosic biomass via hydrothermal carbonization, torrefaction and pyrolysis[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2023, 109: 101298.
- [6] WANG J L, WANG S Z. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 1002-1022.
- [7] PAN X Q, GU Z P, CHEN W M, et al. Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754(3): 142104-142120.
- [8] LIANG L P, XI F F, TAN W S, et al. Review of organic and inorganic pollutants removal by biochar and biochar-based composites[J]. *Biochar*, 2021, 3(3): 255-281.
- [9] SINGH P, RAWAT S, JAIN N, et al. A review on biochar composites for soil remediation applications: Comprehensive solution to contemporary challenges[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110635-110651.
- [10] LYU H H, ZHANG Q R, SHEN B X. Application of biochar

- and its composites in catalysis[J]. *Chemosphere*, 2020, 240(2): 124842-124852.
- [11] LUO D, WANG L Y, NAN H Y, et al. Phosphorus adsorption by functionalized biochar: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21: 497-524.
- [12] MARCINŹYK M, OLESZCZUK P. Biochar and engineered biochar as slow- and controlled-release fertilizers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 339(9): 130685-130698.
- [13] TRIPATHI M, SAHU J N, GANESAN P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55(2): 467-481.
- [14] VIJAYARAGHAVAN K. Recent advancements in biochar preparation, feedstocks, modification, characterization and future applications[J]. *Environmental Technology Reviews*, 2019, 8(1): 47-64.
- [15] YOU S M, OK Y S, CHEN S S, et al. A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 246(2): 242-253.
- [16] RODRIGUEZ CORREA C, HEHR T, VOGLHUBER-SLAVINSKY A, et al. Pyrolysis vs. hydrothermal carbonization: Understanding the effect of biomass structural components and inorganic compounds on the char properties[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2019, 140(2): 137-147.
- [17] YANG J T, ZHANG Z M, WANG J Y, et al. Pyrolysis and hydrothermal carbonization of biowaste: A comparative review on the conversion pathways and potential applications of char product[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2023, 33(2): 101106-101122.
- [18] NGUYEN T A H, BUI T H, GUO W S, et al. Valorization of the aqueous phase from hydrothermal carbonization of different feedstocks: Challenges and perspectives[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 472(3): 144802-144812.
- [19] FOONG S Y, LIEW R K, YANG Y F, et al. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 389(4): 124401-124420.
- [20] LI J, DAI J J, LIU G Q, et al. Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016, 94(5): 228-244.
- [21] CHEN Z W, WANG M F, JIANG E C, et al. Pyrolysis of torrefied biomass[J]. *Trends in Biotechnology*, 2018, 36(12): 1287-1298.
- [22] XU Y G, BAI T X, YAN Y B, et al. Enhanced removal of hexavalent chromium by different acid-modified biochar derived from corn straw: Behavior and mechanism[J]. *Water Science & Technology*, 2020, 81(10): 2270-2280.
- [23] CHEN M, WANG F, ZHANG D L, et al. Effects of acid modification on the structure and adsorption NH_4^+ -N properties of biochar[J]. *Renewable Energy*, 2021, 169(12): 1343-1350.
- [24] SINGH J, VERMA M. Waste derived modified biochar as promising functional material for enhanced water remediation potential[J]. *Environmental Research*, 2024, 245(5): 117999-118016.
- [25] LIU S C, XIE Z L, ZHU Y T, et al. Adsorption characteristics of modified rice straw biochar for Zn and in-situ remediation of Zn contaminated soil[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 22(5): 101388-101399.
- [26] TANG Y, LI Y, ZHAN L, et al. Removal of emerging contaminants (bisphenol A and antibiotics) from kitchen wastewater by alkali-modified biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805(10): 150158-150167.
- [27] ZHANG Y, ZHENG Y L, YANG Y C, et al. Mechanisms and adsorption capacities of hydrogen peroxide modified ball milled biochar for the removal of methylene blue from aqueous solutions[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337(7): 125432-125438.
- [28] QI G D, PAN Z F, ZHANG X Y, et al. Novel pretreatment with hydrogen peroxide enhanced microwave biochar for heavy metals adsorption: Characterization and adsorption performance[J]. *Chemosphere*, 2024, 346(6): 140580-140588.
- [29] HUANG Z J, FANG X, WANG S, et al. Effects of KMnO_4 pre- and post-treatments on biochar properties and its adsorption of tetracycline[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 373(3): 121257-121267.
- [30] NGUYEN D L T, BINH Q A, NGUYEN X C, et al. Metal salt-modified biochars derived from agro-waste for effective congo red dye removal[J]. *Environmental Research*, 2021, 200(5): 111492-111502.
- [31] ZHOU L L, JIANG Y, ZHANG G Y, et al. Pyrolysis-catalysis of medical waste over metal-doping porous biochar to co-harvest jet fuel range hydrocarbons and H_2 -rich fuel gas[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 175(5): 106157-106167.
- [32] DONG J, SHEN L F, SHAN S D, et al. Optimizing magnetic functionalization conditions for efficient preparation of magnetic biochar and adsorption of Pb(II) from aqueous solution[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(6): 151442-151453.
- [33] PREMARATHNA K S D, RAJAPAKSHA A U, SARKAR B, et al. Biochar-based engineered composites for sorptive decontamination of water: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372(2): 536-550.
- [34] GAO Y R, FANG Z, LIN W H, et al. Large-flake graphene-modified biochar for the removal of bisphenol S from water: Rapid oxygen escape mechanism for synthesis and improved adsorption performance[J]. *Environmental*

- Pollution, 2023, 317(7): 120847-120856.
- [35] ŠVÁBOVÁ M, BIČÁKOVÁ O, VOROKHTA M. Biochar as an effective material for acetone sorption and the effect of surface area on the mechanism of sorption[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348(8): 119205-119213.
 - [36] PANWAR N L, PAWAR A. Influence of activation conditions on the physicochemical properties of activated biochar: A review[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12(3): 925-947.
 - [37] RAWAT S, BOOBALAN T, SATHISH M, et al. Utilization of CO₂ activated litchi seed biochar for the fabrication of supercapacitor electrodes[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2023, 171: 106747.
 - [38] ZHUANG Z C, WANG L, TANG J C. Efficient removal of volatile organic compound by ball-milled biochars from different preparing conditions[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2021, 406(6): 124676-124717.
 - [39] LUO Z R, YAO B, YANG X, et al. Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: A review[J]. *Chemosphere*, 2022, 287(7): 132113-132129.
 - [40] GAO L, LI Z H, YI W M, et al. Impacts of pyrolysis temperature on lead adsorption by cotton stalk-derived biochar and related mechanisms[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105602-105615.
 - [41] WANG X Q, GUO Z Z, HU Z, et al. Adsorption of phenanthrene from aqueous solutions by biochar derived from an ammoniation-hydrothermal method[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733(3): 139267-139274.
 - [42] WU X C, QUAN W X, CHEN Q, et al. Efficient adsorption of nitrogen and phosphorus in wastewater by biochar[J]. *Molecules*, 2024, 29(5): 1005-1033.
 - [43] LI B T, JING F Y, HU Z Q, et al. Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus from biogas slurry by Fe-modified biochar[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2021, 25(4): 101213-101224.
 - [44] QIN J L, CHEN Q C, SUN M X, et al. Pyrolysis temperature-induced changes in the catalytic characteristics of rice husk-derived biochar during 1, 3-dichloropropene degradation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 330: 804-812.
 - [45] DUAN L S, LIU X H, ZHANG H D, et al. A novel way for hydroxyl radicals generation: Biochar-supported zero-valent iron composite activates oxygen to generate hydroxyl radicals[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(4): 108132-108139.
 - [46] DEVI P, DALAI A K, CHAURASIA S P. Activity and stability of biochar in hydrogen peroxide based oxidation system for degradation of naphthenic acid[J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 125007.
 - [47] CAI S, WANG T H, WU C Y, et al. Efficient degradation of norfloxacin using a novel biochar-supported CuO/Fe₃O₄ combined with peroxydisulfate: Insights into enhanced contribution of nonradical pathway[J]. *Chemosphere*, 2023, 329(9): 138589-138599.
 - [48] JIANG P, ZHOU L, HAN Y F, et al. Utilizing waste corn straw to photodegrade methyl orange and methylene blue: Photothermal effect of biochar enhances photodegradation efficiency[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112914-112922.
 - [49] LUO Y D, ZHENG A F, LI J D, et al. Integrated adsorption and photodegradation of tetracycline by bismuth oxycarbonate/biochar nanocomposites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457(7): 141228-141241.
 - [50] SIM D H H, TAN I A W, LIM L L P, et al. Encapsulated biochar-based sustained release fertilizer for precision agriculture: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 303(3): 127018-127035.
 - [51] ZHAO C, XU J F, BI H W, et al. A slow-release fertilizer of urea prepared via biochar-coating with nano-SiO₂-starch-polyvinyl alcohol: Formulation and release simulation[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 32(2): 103264-103278.
 - [52] SIM D H H, TAN I A W, LIM L L P, et al. Synthesis of tapioca starch/palm oil encapsulated urea-impregnated biochar derived from peppercorn waste as a sustainable controlled-release fertilizer[J]. *Waste Management*, 2024, 173(3): 51-61.
 - [53] AN X F, WU Z S, YU J Z, et al. Copyrolysis of biomass, bentonite, and nutrients as a new strategy for the synthesis of improved biochar-based slow-release fertilizers[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(8): 3181-3190.
 - [54] DING M T, MA Z W, SU H, et al. Preparation of porous biochar and its application in supercapacitors[J]. *New Journal of Chemistry*, 2022, 46(45): 21788-21797.
 - [55] KHEDULKAR A P, PANDIT B, DANG V D, et al. Agricultural waste to real worth biochar as a sustainable material for supercapacitor[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 869(9): 161441-161459.
 - [56] RAHMAN M Z, EDVINSSON T, KWONG P. Biochar for electrochemical applications[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2020, 23(3): 25-30.
 - [57] SALIMI P, VERCRUYSE W, CHAUQUE S, et al. Lithium-metal-free sulfur batteries with biochar and steam-activated biochar-based anodes from spent commoniv[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2024, 6(7): e12758-e12768.
 - [58] CAI W Z, TONG X, YAN X M, et al. Direct carbon solid oxide fuel cells powered by rice husk biochar[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(4): 4965-4974.
 - [59] GU X F, YAN X M, ZHOU M Y, et al. High efficiency electricity and gas cogeneration through direct carbon solid oxide fuel cell with cotton stalk biochar[J]. *Renewable Energy*, 2024, 226(6): 120471-120484.

[60] BATAILLOU G, LEE C, MONNIER V, et al. Cedar wood-based biochar: Properties, characterization, and applications as anodes in microbial fuel cell[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2022, 194(9): 4169-4186.

[61] JIANG J W, ZHANG S X, LI S N, et al. Magnetized manganese-doped watermelon rind biochar as a novel low-cost catalyst for improving oxygen reduction reaction in microbial fuel cells[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802(2): 149989-150001.

[62] LI Y X, XU R, WANG H B, et al. Recent advances of biochar-based electrochemical sensors and biosensors[J]. *Biosensors*, 2022, 12(6): 377-396.

[63] VALENGA M G P, GEVAERD A, MARCOLINO-JUNIOR L H, et al. Biochar from sugarcane bagasse: Synthesis, characterization, and application in an electrochemical sensor for copper (II) determination[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 184(4): 107206-107214.

[64] CHOU C M, DAI Y D, YUAN C, et al. Preparation of an electrochemical sensor utilizing graphene-like biochar for the detection of tetracycline[J]. *Environmental Research*, 2023, 236(6): 116785-116791.

[65] KALINKE C, DE OLIVEIRA P R, MARCOLINO-JÚNIOR L H, et al. Nanostructures of Prussian blue supported on activated biochar for the development of a glucose biosensor[J]. *Talanta*, 2024, 274(4): 126042-126050.

[66] SOBHAN A, JIA F, KELSO L C, et al. A novel activated biochar-based immunosensor for rapid detection of *E. coli* O157: H7[J]. *Biosensors*, 2022, 12(10): 908-921.

[67] AKGÜL G, DEMIR B, GÜNDOĞDU A, et al. Biochar-iron composites as electromagnetic interference shielding material[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(1): 015604.

[68] YIN P F, ZHANG L M, SUN P, et al. Apium-derived biochar loaded with MnFe₂O₄@C for excellent low frequency electromagnetic wave absorption[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(9): 13641-13650.

[69] WANG H, XU R M, DONG L J, et al. Development of biodegradable and low-cost electromagnetic shielding composite by waste porous biochar and poly (butylene succinate)[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(9): 6049-6070.