



移动扫码阅读

唐雨菲, 宋佳诚, 郭宇航, 等. 有机固废制备生物炭材料及应用 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(3): 27–39.

TANG Yufei, SONG Jiacheng, GUO Yuhang, et al. Preparation and Applications of Biochar Materials from Organic Solid Waste [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(3): 27–39.

有机固废制备生物炭材料及应用

唐雨菲¹, 宋佳诚¹, 郭宇航¹, 瞿佳璐¹, 熊 健¹, 乔怡娜², 吕学斌^{1,*}

(1. 西藏大学 生态环境学院, 西藏 拉萨 850000; 2. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 随着城镇化和工业化进程的不断推进, 全球有机固体废物的产量急剧增加, 加剧了环境污染, 并造成大量的资源浪费。如何高效、可持续地处理此类废弃物已成为全球环境治理和资源利用的重要研究课题。生物炭作为具有良好环境适应性和多功能性的碳材料, 因其在有机固废处理、土壤改良、水体修复等方面的潜力而成为研究热点。探讨了生物炭的制备方法、影响因素及其在环境修复中的应用。首先, 回顾了有机固废转化为生物炭的技术路线, 包括热解、气化、水热碳化和微波热解等, 并深入分析了不同技术对生物炭性能的影响。为了优化生物炭的性能, 考察了物理改性、化学改性和生物改性 3 种主要的生物炭改性技术。此外, 广泛探讨了生物炭在实际应用中的潜力。同时, 生物炭在碳封存领域的潜力也引起了广泛关注。通过将有机废弃物转化为生物炭, 可有效锁定大气中的 CO₂, 减少温室气体排放, 对缓解全球气候变化有积极意义。然而, 尽管生物炭在多个领域有广阔的应用前景, 但对其长期环境影响和潜在风险的研究相对有限。同时, 生物炭的制备成本、原料来源和规模化生产的可行性等挑战也亟待解决。为推动生物炭技术的广泛应用, 未来需更深入地探讨生物炭在不同环境中的行为, 评估其长期生态效应, 并开发低成本、高效率的制备工艺。此外, 生物炭的社会经济效益将成为未来研究的重点。

关键词: 有机固废; 生物炭; 生物炭制备; 改性技术; 环境修复

中图分类号: X505

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)03-0027-13

Preparation and Applications of Biochar Materials from Organic Solid Waste

TANG Yufei¹, SONG Jiacheng¹, GUO Yuhang¹, QU Jialu¹,
XIONG Jian¹, QIAO Yina², LYU Xuebin^{1,*}

(1. School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: With the continuous progress of urbanization and industrialization, the generation of global organic solid waste has increased sharply. This surge exacerbates environmental pollution and leads to significant resource waste. Efficient and sustainable management of such waste has become a critical research topic in global environmental governance and resource utilization. Biochar, a carbon material with excellent environmental adaptability and multifunctionality, has gained prominence as a focal point of research due to its potential applications in organic waste treatment, soil improvement, water remediation, and pollutant adsorption. This paper reviews the preparation methods, influencing factors,

收稿日期: 2024-12-19

修回日期: 2025-02-08

接受日期: 2025-02-15

DOI: 10.20078/j.eep.20250303

基金项目: 2022 年西藏自治区科技计划中央引导地方项目 (XZ202202YD0027C); 中央财政支持地方高校发展专项资金项目 (2024 年 1 号)

第一作者: 唐雨菲 (2001—), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为生物质废物利用。E-mail: tang419417@163.com

*通讯作者: 吕学斌 (1980—), 男, 河北衡水人, 教授, 主要研究方向为有机固废处理处置与资源化与生物质能源开发。

E-mail: xbltu@utibet.edu.cn

and applications of biochar in environmental remediation. Various technological pathways for converting organic solid waste into biochar have been summarized, including pyrolysis, gasification, hydrothermal carbonization, and microwave pyrolysis, as well as exploring the impact of these technologies on biochar properties. To optimize biochar performance, this paper examines biochar modification techniques, focusing on three main approaches: physical, chemical, and biological modifications. Physical modification primarily enhances the adsorption performance of biochar through methods such as physical activation and thermal treatment. Chemical modification introduces various chemical agents to improve biochar's adsorption capacity for specific pollutants or to enhance its electrochemical properties. Biological modification combines biochar with microorganisms or plants to further improve its biodegradability and ecological adaptability. Moreover, the paper extensively discusses the potential applications of biochar in practical scenarios. In water purification, the porous structure and surface functional groups of biochar enable it to effectively adsorb dissolved organic and inorganic pollutants, thereby reducing the concentration of harmful substances in water bodies. In soil improvement, biochar enhances the physical and chemical properties of soil, increases soil fertility, improves aeration, and promotes plant growth, due to its high specific surface area and rich nutrients. Additionally, the potential of biochar in carbon sequestration has garnered widespread attention. By converting organic waste into biochar, atmospheric carbon dioxide can be effectively sequestered, reducing greenhouse gas emissions and contributing to the mitigation of global climate change. Despite its promising applications across multiple fields, research on the long-term environmental impacts and potential risks of biochar remains relatively limited. At the same time, challenges such as the cost of biochar production, raw material availability, and the feasibility of large-scale production require further investigation. To promote the widespread adoption of biochar technology, future research should focus on biochar's behavior in different environments, assess its long-term ecological effects, and develop cost-effective and efficient production methods. Additionally, the socioeconomic benefits of biochar should become a key focus in future studies.

Keywords: Organic solid waste; Biochar; Biochar preparation; Modification techniques; Environmental remediation

0 引 言

近年来,随着我国城市化、工业化快速发展,有机固体废弃物(Organic Solid Waste, OSW, 以下简称有机固废)的产量迅速增加。1980 年至 2021 年,我国每年产生的有机固废从 27.27 亿 t 增长到 36.97 亿 t^[1]。有机固废中含有脂类、蛋白质、碳水化合物、矿物质等营养成分,按来源可分为农业废弃物、林业废弃物、工业废弃物和城市生活垃圾^[2]。这些有机固废若处理不当会导致环境污染和资源浪费,对生态系统和人类健康构成严重威胁。例如,有机固废含有大量易腐有机质和病原菌,若未经妥善处理,易腐败发臭、传播疾病,同时排放大量温室气体,加剧全球气候变化^[3]。

传统的有机固废处置方法主要包括填埋和焚烧。填埋方法简单,但占用大量土地资源,并且可

能导致地下水污染和气体排放的问题。焚烧可以有效减少废物体积,但会产生有害气体和灰渣,对环境造成二次污染^[3]。此外,这些方法都没有实现废物的资源化利用,造成了资源的浪费。

在这一背景下,生物炭因其具有优异的吸附性能、土壤改良能力以及潜在的能源价值而逐渐成为当下的研究热点。利用有机固废制备生物炭不仅可以有效减少有机固废的环境影响,还能应用于土壤改良、水体修复、污染物吸附、能源存储等多个领域^[4],为有机固废的资源化处置提供了一种环境友好的解决方案,有助于实现经济和环境的双重效益。

本文综述了不同制备方法、影响因素和改性技术对生物炭性质的影响,以及生物炭在环境中的应用。同时提出生物炭应用的未来前景和潜在解决方案,为生物炭的规模化生产和应用提供一

定的理论指导。

1 生物炭概述

生物炭是一类功能碳材料,其主要组成元素为 C、H、O。常见的原材料包括污泥废料、粪便、农业和林业废料。生物炭之所以在环境污染治理领域备受青睐,是因为其含碳量高、阳离子交换能力强、比表面积大且结构稳定^[5],这些特性使其在土壤改良、水质净化和碳捕获等多个领域中发挥重要作用。

生物炭可通过吸附作用有效去除重金属和有机污染物,这一过程主要依赖于其物理化学性质,包括阳离子交换能力、比表面积、孔隙结构和官能团的数量与种类^[6]。这些特性会随着原料种类及制备工艺的不同而存在差异。一般而言,高温制备的生物炭因有效去除了挥发性有机物,从而具有较大的比表面积和碳含量,促使生物炭的微孔体积增大。然而,随着制备温度的升高,生物炭产量却呈现下降的趋势^[7]。鉴于此,针对生物炭产量及其吸附能力之间的平衡,亟须探索并实施一种优化的制备策略。

生物炭在环境修复如土壤改良、水体修复、污染物吸附、能源存储等多个领域中显示出巨大的应用潜力,但其对环境的实际影响机制尚不明

确,例如可能向环境中释放多环芳烃和金属离子^[8],因此对其应用过程还需进一步研究。

2 生物炭制备方法及影响因素

2.1 制备方法

2.1.1 热解

热解是制备生物炭的常见方法,即在高温(300~900 ℃)且无氧或厌氧的环境中加热生物质生成生物炭、生物油和热解气^[9],如图 1 所示。生物质中木质纤维素的各组分因受热发生交联、解聚和破碎^[9]。通常根据升温速率、停留时间,将热解分为慢速热解和快速热解,详见表 1。由于快速热解时生物炭的孔隙中存在焦油状物质,因此该热解类型的生物炭比表面积和产率较低。

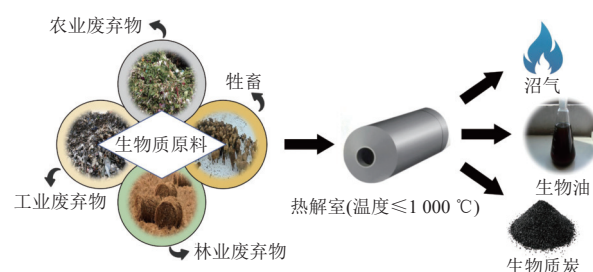


Fig. 1 Various raw biomass materials and corresponding pyrolysis products^[9]

表 1 不同热解方法制备生物炭的对比

Table 1 Comparison of biochar properties prepared by different pyrolysis methods

热解类型	升温速率	停留时间	产率	比表面积	参考文献
慢速热解	3~10 ℃·min ⁻¹	≥1 h	较低	较低	[9]
快速热解	200 ℃	≤10 s	较高	较高	[10]

2.1.2 气化

气化所需温度约为 800 ℃,同时需在活性气体存在下(如 O₂ 和空气)才可进行^[11]。该过程包括干燥、热解、部分氧化和还原 4 个主要阶段,并产生 H₂、CO、CO₂、N₂、焦油、半焦和灰分等产物^[9]。气化技术最初用于生产合成气以回收能源,然而目前已呈现出用于生产副产物(即生物炭)的趋势。该技术面临的难题是如何在保证生物炭产量的同时对能源进行高效利用或回收,这还需要进一步探索优化工艺条件。

2.1.3 水热碳化

水热碳化(Hydrothermal Carbonization, HTC),也称为湿法烘焙,制备的生物炭通常被称为水热

炭。该方法无需预干燥,直接在密闭系统中将湿原料加压至 2~10 MPa,温度范围为 120~260 ℃^[12]。HTC 制备的生物炭产量高,但碳和灰分含量相对热解生物炭低,并且比表面积和孔隙体积也更小^[9]。值得注意的是,通过 HTC 合成的水热炭作为燃料具有较高的能量密度^[13]。

2.1.4 微波热解

微波热解(Microwave Pyrolysis, MAP)通过微波辐射对生物质进行加热,能够在短时间内均匀地将原料转化为生物炭。该方法所需的能量和时间更少,且在产物质量和能源效率方面相对优于其他热解方法^[14]。然而,其转化效率受到包括微波功率、操作频率以及加热时间等多个因素的制

约。据报道,当功率为 500 W,辐照时间为 3 min,频率为 $(2\,450 \pm 25)$ MHz 时可以提高生物炭的比表面积^[15]。需要注意的是,当微波温度过高时生物炭可能因高温失水而收缩,从而破坏生物炭的微孔结构导致其孔隙率低、比表面积小,进而使得其吸附能力降低^[16]。此外,生物炭的产率往往随着功率或升温速率的增加而降低^[9]。

2.1.5 其他方法

除了上述方法,闪速碳化和烘焙也被用于制备生物炭。闪速碳化^[9]是指在较高压力下(1~2 MPa),通过引燃和控制闪火,将生物质转化为气体和固相产物。在此过程中,燃烧火焰逆气流运动,使接触的物质在短时间内转化为气体和焦炭。一般情况下,反应时间小于 30 min,反应温度在 300~600 °C 范围内。

烘焙是热解或气化前的温和预处理过程,在惰性条件下进行,操作温度为 200~300 °C,升温速率慢,停留时间短^[17]。该过程将生物质中的多糖长链解聚,通过去除生物质中含有的水、CO₂ 和 O₂,产生具有低氧碳比的疏水性固体产物。此外,由于升温速率慢,经烘焙预处理后的生物炭产率得到了提高^[9],但烘焙过程中原料的部分氧化导致生物炭的吸附能力降低^[18]。

2.2 影响因素

生物炭的制备受多个参数的影响,包括原料种类、热解温度、升温速率、停留时间等,都对生物炭的理化性质有重要影响,表 2 展示了不同条件下制备的生物炭的特性。在制备过程中必须仔细考虑这些参数,以确保生产具有所需性质的生物炭。

表 2 不同条件下制备的生物炭的特性

Table 2 Properties of biochar prepared under different conditions

生物炭原材料	热解温度/°C	升温速率/(°C·min ⁻¹)	停留时间/h	生物炭产量/%	灰分/%	w _C /%	C/H	C/O	参考文献
秸秆	200	—	1	84.95	11.90	45.57	7.90	1.19	[19]
秸秆	200	—	4	78.24	12.78	46.52	8.46	1.29	
秸秆	400	—	1	37.30	25.74	57.07	17.14	3.46	
秸秆	400	—	4	36.65	28.40	57.92	19.05	3.77	
木杆	500	10	1	42.60	2.28	89.31	34.75	12.17	[20]
椰糠	500	10	1	62.90	15.90	84.44	29.32	7.24	
棕榈仁壳	500	10	1	53.50	6.86	87.85	30.19	10.79	

2.2.1 原料种类

由于原料的元素构成比例各异,使用不同原料制成的生物炭在物理化学性质和性能上存在明显区别。作为原料的生物质材料通常分为 2 类:木质和非木质生物质^[21]。木质生物质主要包括林业和树木残留物(如木材、树枝等);非木质生物质主要包括农作物残留物(如秸秆、稻草等)、动物粪便以及城市和工业固体废物。非木质生物质通常含有较高的水分和灰分,这会增加热解过程中的能量消耗。非木质生物质的低热值意味着热解过程中释放的能量较少,可能导致生物炭的碳含量较低,从而影响其稳定性和应用效果^[21]。比如,猪粪和牛粪也表现出不同比例的元素组成^[22],猪粪可能含有较高的氮含量,而牛粪可能含有较高的碳含量。

2.2.2 热解温度

生物炭的理化性质和结构特性受热解温度的

影响呈现一定的规律。热解温度升高往往导致 H/C、O/C 和 (N+O)/C 比值的降低以及 pH 升高。这是由于表面酸性官能团的流失,如醚键、羰基、甲基和亚甲基^[23]。此外,热解温度升高加速了生物炭内部多孔结构的形成,为有机物吸附或电子转移反应提供了表面活性位点,并且较高的热解温度降低了生物炭表面的亲水性和极性,从而增强了其芳香性和稳定性^[24]。

低温热解能够使蒸汽在反应器中停留较长时间,因此连续的气相反应提高了生物炭的产率^[24]。低温下(<300 °C)纤维素炭化分解不完全,因此制备的生物炭保留了部分含氧官能团(例如—COOH、—C=O 和—OH)^[23],与高温热解制备的生物炭相比,其阳离子交换容量更高。

2.2.3 升温速率

升温速率对热解过程中的产率和产品成分有重大影响。常规的热解方法根据升温速率可分为

2类:慢速热解和快速热解。在慢速热解中,生物炭产量主要取决于原料种类和热解温度,与加热速率之间没有明显的关联趋势^[25]。然而,快速热解有利于生物油和热解气的产生,导致生物炭产量偏低,通常低于20%^[26]。INGUANZO等^[27]通过比较5℃/min和60℃/min 2种加热速率评估加热速率对生物炭特性的影响。结果表明,较高的加热速率可以促进生物质中挥发性物质分解,同时提高灰分含量,从而获得质量更好的生物炭。

升温速率也会改变生物炭的孔隙结构。低加热速率和长时间的停留时间通常有利于生物炭微孔和中孔的形成。因为在较低的加热速率下,有机物的热解过程较为缓慢,从而有利于形成更多的孔隙结构^[28]。相比之下,高加热速率下有机物没有足够的时间进行充分分解和重组,导致挥发性物质快速逸出,使得生物炭中留下较大的孔隙,从而形成松散的结构^[29]。

2.2.4 停留时间

停留时间是区分慢速热解和快速热解的关键因素,对炭化速率和生物炭产量有直接影响。较长的停留时间通常会增强生物炭炭化,导致不稳定碳的数量减少^[30]。然而,若生物炭在相对较低的温度下(<500℃)制备,较长的停留时间通常会导致灰分含量更高^[31]。

停留时间还显著影响生物炭的比表面积和孔隙特性。LU等^[32]证明,当停留时间超过2h时,生物炭比表面积和孔隙面积的变化趋势由增加转变为减少。因此,在生物炭生产过程中选择合适的停留时间对于获取所需孔隙特性和比表面积的生物炭至关重要。

3 生物炭改性

3.1 物理改性

3.1.1 蒸汽/气体活化

蒸汽/气体活化是一种清洁、绿色的改性方法,但需要较高的活化温度和较长的处理时间。通常用蒸汽、CO₂或其他氧化气体在高于700℃的条件下处理生物炭,以增加生物炭的孔隙率和比表面积从而达到提高生物炭活性的效果^[33]。此外,蒸汽/气体活化生物炭已被证明可以去除抗生素和重金属。例如,在蒸汽活化茶废生物炭中,RAJAPAKSHA等^[34]报道了磺胺二甲氧嘧啶的最大吸附容量为33.81 mg/g。LIMA和MARSHALL^[35]研究表明,当生物炭以特定蒸汽流速活化时,获得

了最大的Cu(II)吸附量(93%)。

3.1.2 球磨

球磨是一种有效的改性方法,可以显著提高生物炭的比表面积和孔体积,从而增强其对水中污染物的吸附能力。例如,LYU等^[36]通过球磨法合成了硫醇修饰的生物炭,以增强对无机Hg²⁺和有机CH₃Hg⁺的吸附能力。此外,球磨甘蔗渣生物炭表现出比原生生物炭更高的Ni²⁺去除效率,对Ni²⁺和亚甲基水溶液的吸附能力都有所提升。这归因于球磨可以增加生物炭的内外表面积,并暴露其石墨结构和含氧官能团^[37]。然而,球磨生物炭的分散性可能会影响其在水处理中的有效性,并且若处理不当,可能会将生物炭释放到水体中,造成潜在的二次污染风险。因此,需要进一步研究来评估球磨生物炭在实际水处理应用中的环境影响。

除上述方法外,在生物炭表面涂覆功能性纳米颗粒以制备复合材料也是一种提升生物炭吸附能力的有效策略,能够显著增强其对多种污染物的吸附能力。例如,壳聚糖改性的生物炭,该方法结合了生物炭和功能纳米颗粒的优点,克服了纳米材料溶解性差、易聚集等缺点^[38]。

3.2 化学改性

3.2.1 酸改性

酸改性是一种常用的生物炭改性方法,其主要目的是去除金属等杂质,并在生物炭表面引入酸性官能团,增强其吸附性能和环境修复能力。用于改性常见的酸有盐酸、硫酸、硝酸、磷酸、草酸和柠檬酸^[39]。赵洁等^[40]使用硝酸和磷酸改性松木屑生物炭,其酚羟基、羧基的含量明显增加。

酸改性也可以改变生物炭的比表面积,如XU等^[41]使用硝酸、硫酸、磷酸对玉米秸秆进行改性,酸改性生物炭的比表面积和孔隙体积是原始生物炭的4~6倍,其中磷酸改性的生物炭表现出最大的比表面积和孔隙体积。

3.2.2 碱改性

碱改性的主要目的是增加比表面积和含氧官能团。一般来说,碱处理的生物炭比酸处理的生物炭具有更大的比表面积^[42]。常见用于改性的碱包括KOH和NaOH。

生物炭的多孔结构可以通过KOH处理来定制^[9]。GE等^[43]报道了经KOH改性和在900℃活化温度下获得的竹粉生物炭,具有较大的比表面积,达到562 m²/g,总孔容为0.460 cm³/g。此外,NaOH处理可以显著提高生物炭的比表面积、阳

离子交换能力和热稳定性。用 NaOH 改性的椰壳生物炭的比表面积达到 $2\,885\text{ m}^2/\text{g}$, 显著高于用 KOH 改性的椰壳生物炭 ($1\,940\text{ m}^2/\text{g}$)^[44]。与 KOH 相比, NaOH 的腐蚀性更小、更经济。

除碱的种类不同外, 碱与生物炭的质量比也能够显著影响生物炭的性质。WANG 等^[45]研究表明碱的强腐蚀性会加速生物炭的老化并降低其结构强度。当 NaOH 与生物炭的质量比小于 1.0 时, 生物炭的结构未受损。

3.2.3 氧化剂改性

氧化剂改性主要是利用过氧化氢(H_2O_2)、高锰酸钾(KMnO_4)等氧化剂对生物炭进行处理。这一过程中, 氧化剂会与生物炭表面的碳原子发生反应, 引入大量含氧官能团(如羧基、羟基等), 从而改变生物炭的表面化学性质。

莫贞林等^[46]使用 KMnO_4 对桉木生物炭改性, 结果表明, pH 为 5 时生物炭对 Pb(II) 的吸附量最大 ($83.059\text{ m}^2/\text{g}$), 去除率为 99.67%。ZHAO 等^[47]用 5% H_2O_2 改性后, 澳洲松生物炭的比表面积最高, 为 $7.143\text{ m}^2/\text{g}$, 侧柏生物炭的比表面积为 $9.848\text{ m}^2/\text{g}$ 。表征结果表明, H_2O_2 增加了生物炭的微孔和介孔体积以及微孔和介孔表面积, 破坏了微晶结构, 并降低了生物炭的规则性。

3.2.4 金属盐或金属氧化物改性

利用金属盐或金属氧化物进行改性, 可以改变生物炭的吸附、催化和磁性等特性。常见的用于改性的金属有 Fe、Mg、Al、Mn^[48]。

KAJBAF 等^[49]通过将 AgO、CuO 和 ZnO 等不同金属氧化物纳米粒子浸渍到荷叶上制备了不同的改性生物炭。结果表明, 金属氧化物影响了生物炭的形态, 尤其是锌改性的生物炭, 改性后的生物炭对 Cr^{3+} 和 Co^{2+} 的去除率分别高达 78% 和 98%, 同时显示出优异的光催化降解铬酸盐离子的性能。这种通过引入磁性颗粒等磁性材料制备的生物炭赋予了生物炭磁性, 有利于生物炭的回收和再生。然而, 磁性生物炭的制备过程较为复杂, 并且磁性材料的引入可能会对生物炭的孔隙结构产生影响, 从而影响其吸附性能。同时, 金属材料也带来了一定程度的金属浸出问题^[50]。

3.3 生物改性

厌氧消化是活性生物炭生物改性技术之一。厌氧消化和热解后, 获得的生物炭具有比原生生物炭更高的 pH、比表面积、阳离子交换能力和更多的负表面电荷^[51]。

另一种生物改性方法是利用富含高浓度矿物质的生物质, 或通过长期培养植物幼苗使目标元素自然积累在生物质中。例如, WANG 等^[52]将重金属高富集植物转化为生物炭, 生产出具有附加值的生物炭纳米复合材料。YAO 等^[53]用含 Mg 溶液灌溉番茄植株, 缓慢热解后生产富含 Mg 的生物炭, 从而产生含有 MgO 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 纳米颗粒的生物炭, 可有效吸附水中的磷。

3.4 其他方法

碳纳米管(CNT)具有基于石墨烯的圆柱形结构, 以其卓越的性能而闻名, 包括超轻重量和化学稳定性。然而, 溶解度差和快速聚集等挑战阻碍了其实际应用。YANG 等^[54]在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 下将栗子壳(CS)和 CNTs 混合物缓慢热解合成了创新的 BC 负载纳米材料。与原始 BC ($1\,568\text{ m}^2/\text{g}$) 相比, CS-CNT 的吸附容量 ($1\,641\text{ m}^2/\text{g}$) 更好。此外, CS-CNT 对重金属表现出稳定和优异的吸附能力, 甚至具备 4 次循环的可重复使用性, 显示出其应用潜力。

此外, 有研究表明, 通过甲醇改性的生物炭对四环素的吸附能力得到了显著增强。这种改性过程可能涉及羰基和生物炭表面之间的酯化反应, 从而增加了生物炭表面的含氧官能团, 而这些官能团可以与四环素等污染物形成较强的相互作用^[55]。

综上所述, 不同改性条件对生物炭的性能有显著影响。通过优化原料选择、热解温度和改性方法可以制备出具有特定性能的生物炭, 以满足不同的应用需求。表 3 介绍了不同改性条件下制备的生物炭。

4 生物炭的环境应用

生物炭在环境领域的应用非常广泛, 包括但不限于图 2 涉及的方面。

4.1 水和废水的净化

生物炭在水体修复方面具有广泛的应用潜力, 能够通过吸附和催化氧化等多种机制去除水中的多种污染物, 如重金属、农药、染料、持久性有机污染物、抗生素^[57] 等以及磷、硝酸盐、氟、铵^[58] 等无机污染物。表 4 为生物炭对水中部分有机污染物的去除情况。

重金属污染是环境修复面临的严峻问题。吸附法是去除水中重金属的有效方法。表 5 列出了生物炭对重金属离子的去除情况。

表 3 不同改性条件下制备的生物炭特性^[56]Table 3 Properties of biochar prepared under different modification conditions^[56]

生物炭 原材料	改性方法	表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均 孔径/nm
稻壳	—	25.76	0.025	3.90
稻壳	酸	20.70	0.025	4.75
稻壳	碱	89.08	0.109	4.89
稻壳	氧化剂	11.94	0.017	5.79
稻壳	MnO_x	34.20	0.044	5.20
稻壳	氧化铁	10.26	0.021	8.12
木屑	—	0.31	0.002	28.26
木屑	酸	0.42	0.003	30.21
木屑	碱	0.38	0.005	53.73
木屑	氧化剂	0.38	0.003	33.87
木屑	MnO_x	9.32	0.020	8.76
木屑	氧化铁	2.04	0.018	35.06

除有机污染物和重金属外,研究表明在铵盐存在的情况下,生物炭会发生竞争吸附。例如,亚

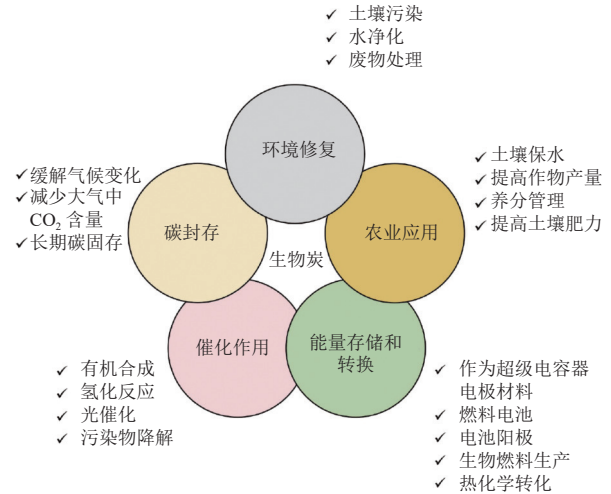


图 2 生物炭在各领域的应用

Fig. 2 Applications of biochar in various fields

硝胺类消毒副产物在竹制生物炭上的吸附存在相互竞争机制^[59]。此外,生物炭还可以富集微生物,为微生物提供栖息地,提高微生物的活性^[57]。

基于以上结果,在批量实验中生物炭去除目标污染物的性能优异,然而实际情况中,水体或废水中的污染物不止一种,因此可能发生竞争吸附,导致结果与实验室结果不一致。

表 4 生物炭对水体和废水中有机污染物的去除

Table 4 Removal of organic pollutants from water and wastewater by biochar

有机污染物	起始浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	生物炭原材料	投加剂量/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除效率/%	参考文献
四环素	30	含磁污泥	1.5	98.00	[60]
阿莫西林	5	玉米渣	1.0	93.00	[61]
环丙沙星	5	玉米渣	1.0	83.00	
磺胺甲噁唑	300	玉米芯	0.1	98.52	[62]
亚甲基蓝	160	竹桩	1.0	95.19	[63]
布洛芬	500	辣椒茎	1.0	80.00	[64]

表 5 生物炭对水体和废水中重金属的去除

Table 5 Removal of heavy metals from water and wastewater by biochar

重金属	起始浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	生物炭原材料	投加剂量/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除效率/%	参考文献
Pb^{2+}	500	核桃青皮	1.3	100.00	[65]
Cu^{2+}	200	核桃青皮	2.1	99.58	
Cd^{2+}	100	核桃青皮	1.9	98.50	
Cu^{2+}	200	香蕉秸秆	2.0	77.55	[66]
Zn^{2+}	200	香蕉秸秆	2.0	73.05	
Mn^{2+}	200	香蕉秸秆	2.0	77.25	
Cr^{6+}	200	香蕉秸秆	2.0	51.23	
As^{5+}	4	稻草	2.0	91.50	[67]
As^{5+}	30	稻草	2.0	63.50	

4.2 土壤修复

利用生物炭修复土壤环境的相关研究逐年增加,其中大部分与生物炭的功能有关,主要集中在

改善土壤理化性质、提高作物产量、吸附各种污染物和提高土壤养分元素的生物利用度。表 6 列举了生物炭对土壤中有机污染物的去除情况。

表 6 生物炭对土壤中有机污染物的吸附

Table 6 Adsorption of organic pollutants in soil by biochar

有机污染物	起始浓度/(mg·kg ⁻¹)	生物炭原材料	投加剂量(质量比)/%	去除效率/%	参考文献
苯并[a]芘	0.10	葵花籽壳	2.5	75.00	[68]
苯并[a]芘	0.10	葵花籽壳	5.0	95.00	
氯苯	1.34	芦苇秸秆	1.0	86.80	[69]
氯苯	1.34	芦苇秸秆	2.0	94.50	
氯苯	1.34	芦苇秸秆	3.0	97.80	
石油烃	15 000.00	芝麻秸秆	5.0	55.69	[70]
石油烃	35 000.00	向日葵秸秆	6.0	47.72	

除了有机污染物,生物炭还可以有效吸附土壤中的重金属离子,且对金属的吸附能力不同。刘剑楠等^[71]报道,对于同一热裂解温度,牛粪生物炭对 Cd²⁺、Zn²⁺的吸附效果总是优于核桃壳生物炭,且竞争吸附对 Cd²⁺的抑制作用大于对 Zn²⁺的抑制作用。表 7 总结了不同生物炭对重金属的

去除情况。

生物炭还可以中和酸性土壤。WANG 等^[72]发现生物炭的施用提高了土壤的 pH 以及有效磷、速效钾和有效镁的浓度。同时生物炭在提高土壤肥力上也有一定效果^[73]。

表 7 生物炭对土壤中重金属的稳定

Table 7 Stabilization of heavy metals in soil by biochar

重金属	起始浓度/(mg·kg ⁻¹)	生物炭原材料	投加剂量(质量比)/%	去除效率/%	参考文献
Cr	0.35	稻草、棕榈枝	1.5	63.0	[74]
Cr	0.35	稻草、棕榈枝	3.0	74.0	
As	20.87	稻草、棕榈枝	1.5	17.0	
As	20.87	稻草、棕榈枝	3.0	12.0	
Cd ²⁺	9.18	稻草	1.0	39.2	[75]
Pb ²⁺	1 182.00	稻草	1.0	11.1	
Cd	0.71	稻壳	2.0	70.6	[76]
Cu	0.96	稻壳	2.0	96.5	
Zn	0.24	稻壳	2.0	24.0	
Ni	0.58	稻壳	2.0	58.2	

4.3 碳封存

土壤作为重要的碳汇,在全球碳循环中起着重要作用,直接影响气候变化。生物炭与其他有机材料相比具有高度浓缩的芳香族结构,是一种具有卓越稳定性和抗微生物分解性的碳封存剂^[77]。生物炭施用到土壤后,可以影响土壤碳和氮循环,有机碳与土壤颗粒之间的结合导致土壤环境中 CO₂ 的排放量降低,从而减少温室气体排

放,缓解气候变化^[78-79]。

生物炭对土壤温室气体排放的影响取决于许多因素,例如原料、热解温度、生物炭施用量^[80-81]。此外土壤质地、肥料施用和气候等环境条件也会对其产生影响^[82]。据报道,生物炭的碳氮比、表面积和阳离子交换能力等可能对土壤碳封存^[83]和温室气体排放^[84]产生显著影响。虽然学者们探究了生物炭对土壤碳封存的影响,但尚无一致结论。

4.4 催化剂和活化剂

生物炭可以作为催化剂,例如将其作为催化剂用于生物柴油的生产。SHIKHALIYEV 等^[85]热解牛粪和鱼鳞制备生物炭催化剂,通过甘油三酯交换产生的高浓度生物甘油用于合成有价值的碳酸甘油(GC)。其中,牛粪生物炭催化剂在相似条件下表现出相似的 GC 产率和更长的反应时间。与该领域研究的许多催化剂相比,生物炭在等摩尔碳酸二甲酯/甘油摩尔比下表现出相对较高的催化活性,且生物炭可以在 4 个连续的反应循环中重复使用,而不会严重失活。

自 2012 年以来,石墨烯一直被用于活化过硫酸盐以降解有机物^[86]。尽管石墨烯作为活化剂具有卓越的性能,但高昂的价格限制了其大规模应用。生物炭活化过硫酸盐是一种有效的高级氧化技术,通过产生强氧化性自由基和羟基自由基进而降解有机污染物。如 WU 等^[87]研究了稻草生物炭活化的过硫酸盐对苯胺的降解,结果表明,苯胺可以通过二者的组合快速分解,在 80 min 内苯胺的降解效率高达 94.1%。

4.5 电极材料和电极改性剂

超级电容器的电极材料主要包括过渡金属氧化物、导电聚合物、碳材料等,然而,前 2 类材料存在循环寿命短、比电容低的不足,碳材料具有稳定性好、孔结构发达、循环寿命长、比电容高等显著优势^[88]。研究表明生物炭具有作为超级电容器中电极材料的潜力。例如,玉米秸秆衍生的生物炭被用作电极材料,其在电流密度为 1 A/g 时的比电容高达 390 F/g。当以最佳多孔生物炭为电极材料和 3 mol/L 的 KOH 溶液为电解质时,组装液相对称超级电容器,并且该超级电容器在功率密度为 818 W/kg 时,其能量密度高达 7 (W·h)/kg,在循环 10 000 圈后的电容保持率高达 91.1%^[89]。

除了作为电极材料,生物炭还可以作为电极改性剂。MENDONÇA 等^[90]提出采用咖啡壳生物炭制备碳糊改性电极,可同时测定镉离子和铅离子。KUMAR 等^[91]将藻类生物炭用于阳极改性剂进行生产性电子传输,结果表明,负载生物炭的阳极电化学活性远优于石墨电极处的电化学活性。

5 结论与展望

综上所述,生物炭的性能受制备方法,以及制备过程中原料种类、热解温度、升温速率、停留时间等多种因素影响。通过调控上述条件以及一系

列改性手段可以制备出具有特定性能的生物炭,以满足不同的应用需求。目前生物炭在水体净化、土壤修复、碳封存、催化活化、能源储存等诸多领域都有一定的研究及应用,在促进环境可持续性方面显示出广阔的前景。

随着生物炭的广泛应用,未来的研究方向应该关注其对环境的负面影响。由于目前大多数关于生物炭的研究都是在实验室进行的短期、模拟实验,而实际环境比实验室环境更复杂。因此有必要进一步研究探索与生物炭工艺应用相关的稳定性、污染、对微生物的潜在毒性和高成本问题。

考虑以下几种潜在的解决方案和未来的前景:

(1) 优化预处理和提高热解设备效率可能是未来降低生物炭成本的有效策略。

(2) 加强生物炭在混合和多污染物系统中的研究并开展长期试验,以确定生物炭的稳定性和环境影响。

(3) 进一步探索生物炭对微生物功能基因的影响,特别是不同种类功能基因对氮循环过程的具体贡献以及影响因素。

(4) 开发更稳定、更高效的纳米材料,如金属纳米材料、半导体纳米材料、有机高分子纳米材料、金属-有机高分子材料等与生物炭复合,可制备具有增强环境应用的新型生物炭复合材料。

参考文献 (References):

- [1] 杭慧敏. 中国有机固废产生量的时空演化、驱动因素、资源回收潜力研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2023: 8-9.
HANG Huimin. Research on the spatiotemporal evolution, driving factors, and resource recovery potential of organic solid waste production in China[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023: 8-9.
- [2] MANU M K, LI Dongyi, LUO Liwen, et al. A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste digestate composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 334: 125032.
- [3] 杨雪艳, 殷绍雯. 我国园林绿化废弃物资源利用现状和建议 [J]. *再生资源与循环经济*, 2023, 16(8): 34-37.
YANG Xueyan, YIN Shaowen. Resource utilization and suggestion of landscape waste in China[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2023, 16(8): 34-37.
- [4] HRISTEA G, IORDOC M, LUNGULESCU E M, et al. A sustainable bio-based char as emerging electrode material for energy storage applications[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 1095.
- [5] RIZWAN M, ALI S, QAYYUM M F, et al. Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements

- in plants: A critical review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 2230–2248.
- [6] MOHAN D, SARSWAT A, OK Y S, et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—A critical review[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 160: 191–202.
- [7] XU Guoren, YANG Xin, SPINOSA L. Development of sludge-based adsorbents: Preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 151: 221–232.
- [8] XIANG Ling, LIU Shaoheng, YE Shujing, et al. Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420: 126611.
- [9] YU Shixin, ZHANG Wen, DONG Xiaowan, 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.
- [10] QIAN Kezhen, KUMAR A, ZHANG Hailin, et al. Recent advances in utilization of biochar[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 1055–1064.
- [11] 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: 467–481.
- [12] CZERWIŃSKA K, MACIEJ Ś, WILK M. Hydrothermal carbonization process: Fundamentals, main parameter characteristics and possible applications including an effective method of SARS-CoV-2 mitigation in sewage sludge. A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111873.
- [13] LIU Zhengang, QUEK A, KENT HOEKMAN S, et al. Production of solid biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization[J]. *Fuel*, 2013, 103: 943–949.
- [14] KUMAR A, SAINI K, BHASKAR T. Hydrochar and biochar: Production, physicochemical properties and techno-economic analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 310: 123442.
- [15] DURÁN JIMÉNEZ G, HERNÁNDEZ MONTOYA V, MONTES MORÁN M A, et al. Microwave pyrolysis of pecan nut shell and thermogravimetric, textural and spectroscopic characterization of carbonaceous products[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 135: 160–168.
- [16] ETHAIB S, OMAR R, KAMAL S M M, et al. Microwave-assisted pyrolysis of biomass waste: A mini review[J]. *Processes*, 2020, 8(9): 1190.
- [17] CHA J S, PARK S H, JUNG S C, et al. Production and utilization of biochar: A review[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 40: 1–15.
- [18] AHMED M B, ZHOU J L, NGO H H, et al. Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 836–851.
- [19] ZHANG Jie, LIU Jia, LIU Rongle. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 176: 288–291.
- [20] LEE Y, PARK J, RYU C, et al. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 148: 196–201.
- [21] JAFRI N, WONG W Y, DOSHI V, et al. A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 118: 152–166.
- [22] KOŁODYŃSKA D, WNĘTRZAK R, LEAHY J J, et al. Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 197: 295–305.
- [23] PAN Xuqin, GU Zhepei, CHEN Weiming, 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: 142104.
- [24] ZHAO Bin, O'CONNOR D, ZHANG Junli, et al. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 977–987.
- [25] INGUANZO M, DOMÍNGUEZ A, MENÉNDEZ J A, et al. On the pyrolysis of sewage sludge: The influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2002, 63(1): 209–222.
- [26] 袁彤. 热解过程中生物炭形成机理的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2020: 4–5.
- YUAN Tong. Study on formation mechanism of bio-chars during pyrolysis[D]. Yantai: Yantai University, 2020: 4–5.
- [27] INGUANZO M, MENÉNDEZ J A, FUENTE E, et al. Reactivity of pyrolyzed sewage sludge in air and CO₂[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2001, 58: 943–954.
- [28] FENG Dongdong, GUO Dawei, ZHANG Yu, et al. Functionalized construction of biochar with hierarchical pore structures and surface O-/N-containing groups for phenol adsorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 410: 127707.
- [29] KHATER E S, BAHNASAWY A, HAMOUDA R, et al. Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 2625.
- [30] ZORNOZA R, MORENO BARRIGA F, ACOSTA J A, et al. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of

- biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 122–130.
- [31] MUI E L K, CHEUNG W H, VALIX M, et al. Dye adsorption onto char from bamboo[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1–3): 1001–1005.
- [32] LU G Q, LOW J C F, LIU C Y, et al. Surface area development of sewage sludge during pyrolysis[J]. *Fuel*, 1995, 74(3): 344–348.
- [33] 安青, 陈德珍, 钦佩, 等. 生物炭活化技术及生物炭催化剂的研究进展 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4720–4735.
- AN Qing, CHEN Dezhen, QIN Pei, et al. Research progress of biochar activation technology and biochar catalyst[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(10): 4720–4735.
- [34] RAJAPAKSHA A U, VITHANAGE M, ZHANG Ming, et al. Pyrolysis condition affected sulfamethazine sorption by tea waste biochars[J]. *Bioresour Technol*, 2014, 166: 303–308.
- [35] LIMA I M, MARSHALL W E. Adsorption of selected environmentally important metals by poultry manure-based granular activated carbons[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2005, 80(9): 1054–1061.
- [36] LYU Honghong, GAO Bin, HE Feng, et al. Ball-milled carbon nanomaterials for energy and environmental applications[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(11): 9568–9585.
- [37] LYU Honghong, GAO Bin, HE Feng, et al. Effects of ball milling on the physicochemical and sorptive properties of biochar: Experimental observations and governing mechanisms[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 233: 54–63.
- [38] 左钧元, 李欣彤, 王星宇, 等. 壳聚糖基生物炭的制备及其在储能与环境治理领域的应用研究进展 [J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(12): 47–59.
- ZUO Junyuan, LI Xintong, WANG Xingyu, et al. Research progress on preparation of chitosan-based biochar and its applications in energy storage and environmental governance[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 49(12): 47–59.
- [39] RAJAPAKSHA A U, CHEN S S, TSANG D C W, et al. Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: Potential and implication of biochar modification[J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 276–291.
- [40] 赵洁, 贺宇宏, 张晓明, 等. 酸碱改性对生物炭吸附 Cr(VI)性能的影响 [J]. 环境工程, 2020, 38(6): 28–34.
- ZHAO Jie, HE Yuhong, ZHANG Xiaoming, et al. Effect on Cr(VI) adsorption performance of acid-base modified biochar[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 28–34.
- [41] XU Yonggang, BAI Tianxia, YAN Yubo, et al. Enhanced removal of hexavalent chromium by different acid-modified biochar derived from corn straw: Behavior and mechanism[J]. *Water Science and Technology*, 2020, 81(10): 2270–2280.
- [42] DING Zhuhong, HU Xin, WAN Yongshan, et al. Removal of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: Batch and column tests[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 33: 239–245.
- [43] GE Qing, LI Peng, LIU Miao, et al. Removal of methylene blue by porous biochar obtained by KOH activation from bamboo biochar[J]. *Bioresources and Bioprocessing*, 2023, 10(1): 51.
- [44] CAZETTA A L, VARGAS A M M, NOGAMI E M, et al. NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell: Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 174(1): 117–125.
- [45] WANG Hanxi, WANG Xinyu, TENG Haowen, et al. Purification mechanism of city tail water by constructed wetland substrate with NaOH-modified corn straw biochar[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 238: 113597.
- [46] 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, 等. 高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 [J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5440–5449.
- MO Zhenlin, ZENG Honghu, LIN Hua, et al. Adsorption characteristics of Pb(II) on eucalyptus biochar modified by potassium permanganate[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5440–5449.
- [47] ZHAO Yue, YANG Mo, QI Kezhen, et al. Hydrogen peroxide-modified biochars from wetland plants for bisphenol A removal in water[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(30): 13389–13400.
- [48] MURTAZA G, AHMED Z, VALIPOUR M, et al. Recent trends and economic significance of modified/functionalized biochars for remediation of environmental pollutants[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 217.
- [49] KAJBAF F, DERIKVAND E, SOLIMANI BABARSAD M, et al. Lotus-leaf biochar modified with metal oxide nanoparticles: Synthesis, characterisation and application to the photocatalytic removal of Cr⁶⁺, Cr³⁺ and Co²⁺ ions[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2023, 103(17): 5851–5867.
- [50] 宋佩佩, 马文静, 王军, 等. 铁改性生物炭的制备及其在重金属污染土壤修复技术中的应用进展 [J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4018–4036.
- SONG Peipei, MA Wenjing, WANG Jun, et al. Preparation of iron-modified biochar and its application in heavy metal contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(12): 4018–4036.
- [51] TANG Yao, ALAM M S, KONHAUSER K O, et al.

- Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 927–936.
- [52] WANG Shengsen, GAO Bin, LI Yuncong, et al. Biochar provides a safe and value-added solution for hyperaccumulating plant disposal: A case study of *Phytolacca acinosa* Roxb. (*Phytolaccaceae*) [J]. *Chemosphere*, 2017, 178: 59–64.
- [53] YAO Ying, GAO Bin, CHEN Jianjun, et al. Engineered carbon (biochar) prepared by direct pyrolysis of Mg-accumulated tomato tissues: Characterization and phosphate removal potential[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 138: 8–13.
- [54] YANG Yuewei, SUN Fengfei, LI Jing, et al. The effects of different factors on the removal mechanism of Pb(II) by biochar-supported carbon nanotube composites[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(10): 5988–5995.
- [55] JING Xiangrong, WANG Yuanying, LIU Wujun, et al. Enhanced adsorption performance of tetracycline in aqueous solutions by methanol-modified biochar[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 248: 168–174.
- [56] LEE H S, SHIN H S. Competitive adsorption of heavy metals onto modified biochars: Comparison of biochar properties and modification methods[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 299: 113651.
- [57] 孙漱玉, 黄梦鑫, 孔强, 等. 生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 [J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 2185–2194.
- SUN Shuyu, HUANG Mengxin, KONG Qiang, et al. Research progress in application of biochar-immobilized bacteria composites in environmental remediation[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(4): 2185–2194.
- [58] LALMALSAWMDAWNGLIANI, LALHRIATPUIA C, DIWAKAR T. Biochar-derived nanocomposites for environmental remediation: The insights and future perspectives[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(1): 111840.
- [59] YANG Kun, YANG Jingjing, JIANG Yuan, et al. Correlations and adsorption mechanisms of aromatic compounds on a high heat temperature treated bamboo biochar[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 210: 57–64.
- [60] ZHAO Liyang, HE Peixi, LI Qian, et al. Efficiently removal of tetracycline from water by Fe₃O₄-sludge biochar[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, 235(1): 38.
- [61] SUMITA, WANG Yong, YU Jianping, et al. Iron-modified biochar for enhanced removal of ciprofloxacin and amoxicillin in wastewater[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2025, 23(1): 27–32.
- [62] LI Yinxue, SHANG Hongru, CAO Yongna, et al. High performance removal of sulfamethoxazole using large specific area of biochar derived from corncob xylose residue[J]. *Biochar*, 2022, 4(1): 11.
- [63] YU Fang, TIAN Fengyu, ZOU Haowen, et al. ZnO/biochar nanocomposites via solvent free ball milling for enhanced adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415: 125511.
- [64] NAIMA A, AMMAR F, ABDELKADER O, et al. Development of a novel and efficient biochar produced from pepper stem for effective ibuprofen removal[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126685.
- [65] 朱晓丽, 程燕萍, 申烨华, 等. 核桃青皮生物炭对重金属的吸附效应分析 [J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5599–5609.
- ZHU Xiaoli, CHENG Yanping, SHEN Yehua, et al. Adsorption performance of walnut green husk biochar for heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5599–5609.
- [66] DENG Hua, LI Qiuyan, HUANG Meijia, et al. Removal of Zn(II), Mn(II) and Cu(II) by adsorption onto banana stalk biochar: Adsorption process and mechanisms[J]. *Water Science and Technology*, 2020, 82(12): 2962–2974.
- [67] NGUYEN T H, PHAM T H, NGUYEN THI H T, et al. Synthesis of iron-modified biochar derived from rice straw and its application to arsenic removal[J]. *Journal of Chemistry*, 2019, 2019: 5295610.
- [68] MAZARJI M, MINKINA T, SUSHKOVA S, et al. Biochar-assisted Fenton-like oxidation of benzo [a] pyrene-contaminated soil[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, 44(1): 195–206.
- [69] 李文章, 胡亚茹, 李法云, 等. 铁改性生物炭-凹凸棒石载体固定化菌剂制备及其对氯苯污染土壤修复作用 [J]. *生态环境学报*, 2024, 33(11): 1782–1791.
- LI Wenzhang, HU Yaru, LI Fayun, et al. Preparation of iron modified biochar-attapulgite carrier immobilized bacterial agent and its remediation for soil contaminated by chlorobenzene[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(11): 1782–1791.
- [70] 齐美霞. 长效广谱生物炭基修复载体对土壤中石油烃的去除机理 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023: 17–59.
- LIN Meixia. Removal mechanism of petroleum hydrocarbons in soil by long-acting broad-spectrum biochar-based remediation supporter composites[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023: 17–59.
- [71] 刘剑楠, 封吉猛, 李丹, 等. 牛粪和核桃壳生物炭对水溶液中 Cd²⁺和 Zn²⁺的吸附研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(5): 1142–1150.
- LIU Jiannan, FENG Jimeng, LI Dan, et al. The adsorption of Cd²⁺ and Zn²⁺ in aqueous solutions by dairy manure and walnut shell biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1142–1150.
- [72] 王海洋, 夏昊, 李红霞, 等. 生物炭配施土壤改良剂对酸

- 性土壤特性及烤烟品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(3): 79–89.
- WANG Haiyang, XIA Hao, LI Hongxia, et al. Effects of biochar combined with soil improver on acid soil characteristics and flue-cured tobacco quality[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2024, 39(3): 79–89.
- [73] 郭书亚, 尚赏, 张艳, 等. 生物炭施用五年后对土壤生物化学特性及夏玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2022, 11(3): 290–297.
- GUO Shuya, SHANG Shang, ZHANG Yan, et al. Effects of biochar application after five years on soil biochemical properties and summer maize yield[J]. Soils and Crops, 2022, 11(3): 290–297.
- [74] TANG Xianjin, SHEN Haoran, CHEN Min, et al. Achieving the safe use of Cd- and As-contaminated agricultural land with an Fe-based biochar: A field study[J]. Science of the Total Environment, 2020, 706: 135898.
- [75] FAN Jiajun, CAI Chao, CHI Haifeng, et al. Remediation of cadmium and lead polluted soil using thiol-modified biochar[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 388: 122037.
- [76] MA Xiaoyu, REN Qiang, ZHAN Wenhao, et al. Simultaneous stabilization of Pb, Cd, Cu, Zn and Ni in contaminated sediment using modified biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22(1): 392–402.
- [77] BEKCHANOVA M, KUPPENS T, CUYPERS A, et al. Biochar's effect on the soil carbon cycle: A rapid review and meta-analysis[J]. Biochar, 2024, 6(1): 88.
- [78] LIU Ning, ZHOU Jialiang, HAN Lujia, et al. Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting[J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 190–199.
- [79] FENG Qianwei, WANG Bing, ZIMMERMAN A R, et al. Application of C and N isotopes to the study of biochar biogeochemical behavior in soil: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 256: 104860.
- [80] HE Yanghui, ZHOU Xuhui, JIANG Liling, et al. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: A meta-analysis[J]. GCB Bioenergy, 2017, 9(4): 743–755.
- [81] WU Zhen, ZHANG Xi, DONG Yubing, et al. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: Six-year field observation and meta-analysis[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107625.
- [82] ZHOU Guiyao, ZHOU Xuhui, ZHANG Tao, et al. Biochar increased soil respiration in temperate forests but had no effects in subtropical forests[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 405: 339–349.
- [83] GROSS A, BROMM T, GLASER B. Soil organic carbon sequestration after biochar application: A global meta-analysis[J]. Agronomy, 2021, 11(12): 2474.
- [84] XU Hu, CAI Andong, WU Dong, et al. Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C : N ratio and soil pH: A global meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105125.
- [85] SHIKHALIYEV K, HAMEED B H, OKOYE P U. Utilization of biochars as sustainable catalysts for upgrading of glycerol from biodiesel production[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(2): 104768.
- [86] ZHAO Chongkai, ZHONG Shuang, LI Chenyang, et al. Property and mechanism of phenol degradation by biochar activated persulfate[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(1): 601–609.
- [87] WU Yao, GUO Jing, HAN Yijie, et al. Insights into the mechanism of persulfate activated by rice straw biochar for the degradation of aniline[J]. Chemosphere, 2018, 200: 373–379.
- [88] ZHANG Sijing, MA Xiaoxiao, DU Yile, et al. Wheat-bran-based hierarchically porous biochar as electrode materials for supercapacitors[J]. Advanced Powder Technology, 2023, 34(11): 104221.
- [89] 邓筠飞, 杜卫民, 王梦瑶, 等. 基于玉米秸秆合成的多孔生物质炭材料及其电化学储能[J]. 应用化学, 2019, 36(11): 1323–1332.
- DENG Junfei, DU Weimin, WANG Mengyao, et al. Synthesis and the electrochemical energy storage of porous biomass carbon from corn stalk[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2019, 36(11): 1323–1332.
- [90] MENDONÇA M Z M, DE OLIVEIRA F M, PETRONI J M, et al. Biochar from coffee husks: A green electrode modifier for sensitive determination of heavy metal ions[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2023, 53(7) : 1461–1471.
- [91] KUMAR A, SHARMA K, PANDIT S, et al. Evaluation of the algal-derived biochar as an anode modifier in microbial fuel cells[J]. Bioresource Technology Reports, 2023, 22: 101414.