

引用本文格式 王秀青, 王英, 王伟, 等. 生物炭制备改性及其应用研究进展[J]. 农业工程, 2025, 15(8): 58-67. DOI: [10.19998/j.cnki.2095-1795.202508311](https://doi.org/10.19998/j.cnki.2095-1795.202508311). WANG Xiuqing, WANG Ying, WANG Wei, et al. Research progress on biochar preparation modification and applications[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(8): 58-67.

生物炭制备改性及其应用研究进展

王秀青^{1,2}, 王英^{2,3}, 王伟^{2,4}, 李翊宁^{2,3}

(1. 陕西工业职业技术学院财经与旅游学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 咸阳市太阳能光热转换材料重点实验室, 陕西 咸阳 712000; 3. 陕西工业职业技术学院机械工程学院, 陕西 咸阳 712000; 4. 陕西工业职业技术学院航空工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 生物炭作为一种可再生且环境友好的多功能碳材料, 凭借优异的吸附性能、发达的孔隙结构及化学稳定性, 在污染治理、土壤改良及农业可持续发展等领域具有广阔应用前景。系统综述生物炭主要制备方法(热解法、气化法和水热碳化法)及其关键参数对材料特性的影响, 探讨化学改性、物理改性及复合改性在生物炭性能优化方面的作用。重点分析生物炭在水污染控制、重金属去除、土壤修复、农业增效及新兴领域的应用, 总结当前技术研究瓶颈, 如长期环境影响、规模化生产成本及产业化推广等问题。提出未来生物炭发展应聚焦低碳高效制备工艺、多功能改性策略、长期生态安全性评估及市场推广模式优化等方面建议, 以推动其在环境治理与绿色低碳发展中的广泛应用。

关键词: 生物炭; 制备工艺; 改性技术; 污染治理; 土壤改良; 可持续发展; 农业增效; 生态安全

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2025)08-0058-10

DOI: [10.19998/j.cnki.2095-1795.202508311](https://doi.org/10.19998/j.cnki.2095-1795.202508311)

Research progress on biochar preparation modification and applications

WANG Xiuqing^{1,2}, WANG Ying^{2,3}, WANG Wei^{2,4}, LI Yining^{2,3}

(1. School of Finance, Economics and Tourism, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang Shaanxi 712000, China; 2. Xianyang Key Laboratory of Solar Thermal Conversion Materials, Xianyang Shaanxi 712000, China; 3. School of Mechanical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang Shaanxi 712000, China; 4. School of Aeronautical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang Shaanxi 712000, China)

Abstract: As a renewable and environmentally friendly multifunctional carbon material, biochar exhibits excellent adsorption capacity, well-developed pore structure, and chemical stability, making it highly promising in pollution control, soil improvement, and sustainable agricultural development. Biochar's major preparation methods, including pyrolysis, gasification, and hydrothermal carbonization, and effects of key parameters on its material properties were reviewed systematically. And role of chemical, physical, and composite modification techniques in optimizing biochar performance was explored. Additionally, biochar application in water pollution control, heavy metal removal, soil improvement, agricultural efficiency enhancement, and other emerging fields were analyzed in detail, along with an overview of technical research bottlenecks, such as long-term environmental impact, large-scale production costs, and industrialization promotion issues. Proposals were also put forward for biochar future development, focusing on low-carbon and efficient preparation technologies, multifunctional modification strategies, long-term ecological safety assessments, and market promotion models optimization, to facilitate biochar broader application in environmental governance and green low-carbon development.

Keywords: biochar, preparation process, modification technologies, pollution control, soil improvement, sustainable development, agricultural efficiency enhancement, ecological safety

收稿日期: 2025-01-13 修回日期: 2025-04-06

基金项目: 陕西工业职业技术学院科技创新团队项目(KCTD2024-01)

作者简介: 王秀青, 博士, 讲师, 主要从事生物质和水资源管理、生态足迹研究 E-mail: wangxiuqing_work@163.com

李翊宁, 通信作者, 博士, 副教授, 主要从事生物质资源综合利用、生命周期评价研究

E-mail: liyining@sxpi.edu.cn

在线投稿
www.d1ae.com

0 引言

近年来,随着全球化与城市化进程加速,环境污染问题日益严峻,不仅直接影响人民生活质量,也对生态系统稳定性造成严重威胁^[1-2]。传统污水处理^[1,3-4]与土壤改良^[5-6]方法逐渐出现局限性,如难以有效应对复杂污染物,处理成本高^[7-9]及可能引发二次污染等问题^[10]。在此背景下,生物炭作为一种新兴可再生材料,因优异的吸附能力和土壤性能改善潜力,逐步成为环境科学与农业领域的研究热点。

生物炭通常由生物质在低氧环境中经过热解等工艺制备而成^[11],具有比表面积大、孔隙结构丰富及化学稳定性强等特点^[7,12]。研究表明,生物炭不仅能高效去除水体中重金属、有机染料等污染物^[13-14],还能显著提高土壤养分保持能力^[5],改善土壤结构^[6],促进农作物生长^[5-6,15]。同时,生物炭制备工艺中如原料种类^[16]、热解温度^[17]和反应气氛^[18]等关键参数直接决定其结构和性能,通过物理或化学改性,如添加金属氧化物或调整制备条件^[19],可进一步增强其吸附能力及在特定应用场景的适应性^[20]。

近年来,生物炭在去除水中污染物(如氮、磷、重金属和微量有机物^[21-24])、提升土壤肥力和微生物活性方面展现出巨大潜力^[14-15]。然而,对生物炭长期环境影响及其在不同土壤环境中作用机制的系统性评估尚不充分,并且高昂成本、生产效率和再生利用等问题制约生物炭大规模推广与应用^[25]。

基于此,综合近几年生物炭制备与应用领域研究文献,系统梳理生物炭主要制备方法,探讨不同改性技术对生物炭性能的具体影响,分析生物炭在污水处理、重金属去除及土壤改良等领域的典型应用案例,评估实际应用效果与局限性^[26]。分析当前研究中存在的不足,提出未来可能的发展方向,以期生物炭相关技术进一步发展提供理论依据和技术指导,实现环境保护、资源高效利用及农业可持续发展的多重目标,为应对全球环境挑战、促进绿色低碳发展提供借鉴。

1 生物炭制备工艺

生物炭作为一种环境友好型吸附材料,其制备方法一直是环境科学领域研究热点。随着技术不断进步,生物炭制备工艺逐渐呈现多样化趋势,不同工艺参数不仅影响比表面积、孔隙结构和化学稳定性,也影响其在污染治理、土壤改良等领域应用效果^[27]。因此,探讨生物炭制备方法、原料选择与预处理方法,明确制备工艺的优劣势,对推动规模化应用具有重要意义。

1.1 制备方法

目前,生物炭的主要制备方法包括热解法、气化

法及水热碳化法等。

1.1.1 热解法

热解法是当前应用最广泛的生物炭制备方法,通过在缺氧或低氧环境中对有机材料进行加热,分解生成生物炭、气体和液体。该方法具有较高碳固存率,可在一定程度上保留部分有机物的活性成分,为生物炭优异的吸附性能奠定基础^[8,28]。热解过程中的关键参数包括热解温度、加热速率和反应时间,会直接影响生物炭物理化学性质^[29]。研究发现,随着热解温度升高,生物炭碳化程度增加,其比表面积和孔隙率显著提升,增强对污染物的吸附能力^[30]。韩春风等^[31]试验发现,以700℃、升温速率12.5℃/min制备的荞麦秸秆生物炭在炭得率、比表面积、分形维数等方面展现良好理化性质,不仅证明热解条件优化的重要性,也为后续在污水处理领域的应用提供新的技术思路。总体而言,热解法因其操作简便、设备成熟、制炭效率高及环保优势明显,成为最常用的生物炭制备方法。然而,热解法仍面临一定挑战,如高温热解需要较大能耗,实际应用中优化热解工艺、进一步提升生物炭性能及降低生产成本,仍是当前研究的重要方向。

1.1.2 气化法

气化法是在高温、缺氧条件下,通过部分氧化反应生成合成气和生物炭。与热解法相比,气化法制得的生物炭碳含量较高,孔隙发达。但因反应条件较为复杂、工艺控制难度较大且适用性相对较窄,限制其大规模应用^[4]。尽管如此,气化法仍可用于特定工业场景,尤其适用于对生物炭碳含量和导电性要求较高的应用领域。

1.1.3 水热碳化法

不同于热解法与气化法,水热碳化法是在较低温度(180~300℃)和高压条件下,使有机物在水相介质中发生碳化反应,形成富含氧官能团的生物炭^[32]。水热碳化法具有温和、低能耗优势,能改善生物炭分散性和持水能力,因此在特定的环境治理和农业应用中表现出良好适应性。与热解法相比,水热碳化法所得生物炭孔隙结构较为均匀,官能团含量丰富,有利于提高其对重金属和有机污染物的吸附能力,适用于对生物炭结构调控及环境友好性要求较高的应用场景。然而,水热碳化法仍存在较高的水资源消耗和反应产物复杂等问题,有待进一步优化。

1.2 原材料选择

原材料选择是决定生物炭性能的关键因素^[33]。不同种类的生物质材料,如稻壳、玉米秸秆、豆腐渣等,其化学成分、纤维结构、含水率等均会直接影响生物炭比表面积、孔隙率和吸附性能^[16,34]。如以豆腐渣为原料,采用液氮冷冻后的冰模板与微波加热快速制备

分级孔生物炭, 不仅实现高效制备, 还改善材料微观结构和化学组成, 显著提高其吸附能力^[35]; 以波斯菊秸秆为原料, 经高温煅烧制备的 Fe_3O_4 负载生物炭表现出优异的催化降解性能, 表明原材料特性与预处理工艺优化相结合, 可显著提升生物炭应用潜力^[36]。此外, 原料的选择还需综合考虑资源可得性、经济成本及环境影响。农业废弃物(如秸秆、果壳)来源广泛, 具有较好的可再生性, 而城市固体废弃物(如污泥)虽可利用, 但可能含有有害成分, 需经过严格的预处理以减少环境风险。

1.3 原料预处理方法

在制备生物炭前, 适当的预处理工艺可改善原料热分解特性, 提高生物炭产率和质量。常见预处理方法包括物理粉碎、干燥和浸渍等。物理粉碎可提高原料比表面积, 促进热解反应均匀性; 干燥处理可降低原料含水率, 减少热解过程中能量损耗; 浸渍预处理(如酸碱处理)可去除杂质或引入特定官能团, 以优化生物炭结构和吸附性能。实际应用中选择合理的原材料与预处理不仅能提升生物炭产品稳定性和功能性, 还能有效降低制备成本, 提高资源利用效率。

2 生物炭改性技术研究

生物炭改性技术是提升其吸附性能、催化活性及生态功能的重要手段, 在环境治理与农业应用中日益受到关注^[12,37]。近年来, 随着科学技术的不断进步, 各类改性技术不断涌现, 为生物炭功能优化提供多种可能性, 主要包括化学改性、物理改性和复合改性技术^[25]。改性技术通过增加生物炭表面官能团、优化孔隙结构及改善物理形态^[27], 显著提升生物炭对重金属、有机污染物等的吸附能力, 拓宽其在农业、储能及环境修复等领域的应用。因此, 深入探讨不同改性技术的原理及应用, 有助于推动生物炭技术进一步发展。

2.1 化学改性技术

化学改性技术主要利用酸、碱、金属氧化物等化学试剂对生物炭表面进行功能化处理, 增加其表面官能团数量, 优化孔隙结构, 提高吸附效率, 对于进一步拓宽生物炭在环境治理和农业生产领域适用场景具有重要意义^[29,38-39]。孙兆楠等^[40]研究发现, 化学处理后的玉米秸秆制备生物炭对苯酚的吸附能力显著提升, 优化条件下苯酚去除率可达 99.5%。通过单种或多种化学改性方法结合制备的生物炭, 对于特定污染物的去除能力展现出显著差异^[41-42]。如采用 FeSO_4 改性的生物炭对六价铬吸附率高达 97%^[43]。类似地, 化学改性生物炭在污泥处理领域的应用研究发现, 利用 FeCl_3 、 CaO 和稻壳生物炭协同调理剩余污泥, 可将污泥泥饼含水率从 60%~70% 降低至 44.08%, 随后通过 400 °C

热解法制备的污泥基生物炭, 由于比表面积大和氧官能团丰富的特性, 显著提升对污染物的吸附能力^[44]。在农业领域, 化学改性技术也展现出重要应用价值。苏杨等^[45]对不同形式铁改性生物炭进行研究发现, 该类改性生物炭可显著提高土壤中磷的固储能力, 有助于促进植物养分吸收和作物生长。

化学改性技术在大规模应用中仍面临一定挑战, 如化学试剂成本与环境风险, 未来仍需进一步优化改性工艺, 以提高其经济性和环保性。

2.2 物理改性技术

物理改性技术主要依靠热处理、机械粉碎、微波辐照等物理手段, 调整生物炭物理结构, 改善其吸附性能。调节热解温度、反应时间等参数, 不仅能够优化生物炭比表面积和孔隙结构, 还能增强物理稳定性。如较高的热解温度有助于增加孔隙度和比表面积, 从而增强对污染物的物理吸附能力^[30]。通过负载金属氧化物(如 Fe_3O_4 、 TiO_2 等)制备金属-生物炭复合材料, 可以进一步提高生物炭对污染物的去除效果, 增强环境适应性^[46]。

近年来, 研究人员针对物理改性技术进行多项技术创新融合并逐步应用。韩亚杰等^[47]采用酸法改性核桃壳生物炭, 显著提升其对植物根际促生细菌的固定化能力, 并改善微生物存活率, 提升生物炭生态功能的同时, 使其更好地适应农业和环境修复的需求。微波辅助改性作为新型物理改性技术, 能在短时间内提升生物炭的孔隙结构和表面活性, 有效改善其对有机污染物和重金属离子的吸附性能。这些创新技术的应用, 为生物炭在环境修复和农业可持续发展提供新思路。

2.3 复合改性技术

随着纳米技术与生物技术的显著进步, 复合改性技术作为一种新兴方法, 通常结合多种改性手段, 为生物炭赋予复杂的功能特性, 拓宽其在环境治理、农业、能源存储等领域的应用前景^[48]。如纳米复合改性技术可提高生物炭的电子传导能力和催化活性, 特别在处理难降解有机污染物方面展现出重要应用价值^[25]。此外, 将铁、铜、银金属纳米颗粒负载在生物炭表面, 可以有效增强其催化降解能力, 拓展在废水处理、气体净化等领域的应用^[49]。

除纳米改性技术外, 生物改性技术也是近年新兴研究热点。将特定微生物固定于生物炭表面, 在增强其吸附性能的同时, 实现污染物的生物降解与持续转化, 从而提高整个系统处理效率^[48]。在污水处理领域, 利用生物改性生物炭作为微生物载体, 不仅能提升污染物降解速率, 还能改善污水处理系统稳定性和耐久性^[50]。在农业应用中, 结合生物炭与微生物菌剂, 可显著改善土壤微生物群落结构, 增强作物抗逆性和养

分吸收能力^[51]。

新兴改性技术通过纳米材料、生物催化、金属氧化物复合等手段，进一步拓宽生物炭的应用范围^[52]。然而，多数技术仍处于实验室研究阶段，其工业化生产和大规模应用仍需进一步探索。未来研究应聚焦于提升改性技术的稳定性、降低生产成本，并探索更加环保、可持续的改性策略，以推动生物炭在环境修复、农业增效及能源存储等领域的广泛应用。

3 生物炭吸附性能及机制

生物炭因优异的吸附性能，在污染物去除过程中发挥重要作用，成为环境治理中的关键材料之一^[37]。其高效吸附能力不仅体现在对水体和土壤中重金属、有机污染物及氮、磷等营养物质的去除，同时在农业、废水处理和土壤修复等领域均展现出良好的应用潜力。生物炭吸附性能主要受其比表面积、孔隙结构、表面官能团种类及分布等特性影响^[53-54]。吸附机制主要涉及物理吸附和化学吸附，也可利用微生物协同作用进一步提高对目标物的去除效率。因此，深入研究生物炭吸附性能及其作用机理，对于优化应用效果、拓展应用范围具有重要意义。

3.1 吸附性能表征

大量研究表明，生物炭的孔隙结构越发达、比表面积越大，其吸附能力越强^[39]。李兴发等^[53]对制备核桃壳生物炭的研究结果表明，孔隙结构多样性显著增强生物炭对目标物的捕获能力。田玲等^[54]探究白菜秸秆生物炭制备工艺，发现 250 °C、煅烧 3 h 可以获得颗粒小、多孔的生物炭，而且在 pH 值 2、时间 160 min 吸附条件下对 Cr⁶⁺吸附效果最佳。张春媛等^[55]通过优化污泥基生物炭制备条件，发现对碘吸附能力可提高至 516.68 mg/g。然而，不同原料制备的生物炭在吸附性能上也存在显著差异。如农作物残余物与城市有机垃圾制备的生物炭在比表面积和孔隙结构差异较大，秸秆、锯末等木质材料制备的生物炭比表面积较大，通常在去除有机污染物和重金属时表现更优^[56]。

生物炭表面的官能团（如羧基、羟基、酚羟基），能通过静电吸引、络合作用等机制提高对目标物的吸附^[3]。利用化学改性引入更多活性基团或增强生物炭表面的静电吸附位点，可进一步提升生物炭吸附性能，显著增强在重金属去除、氮磷吸附及污染物降解等方面的作用效果。生物炭不仅可以直接吸附环境中的污染物，还可以为微生物提供适宜栖息环境，通过微生物协同作用加速污染物降解^[28]。

3.2 吸附机制解析

生物炭吸附过程主要包括物理吸附和化学吸附两大机制。物理吸附主要依赖范德华力、静电相互作用

等较弱的非共价键力，过程通常可逆，受温度、pH 值等环境因素影响^[37,41]，并且生物炭比表面积和孔隙结构发挥决定性作用。生物炭的孔径分布和孔隙结构直接影响其对污染物的捕获能力，孔隙越丰富，提供的吸附位点越多，吸附容量越大^[27,29]。然而，物理吸附的作用力较弱，受环境因素的影响较大，因此在长期应用中可能导致污染物二次释放^[29,54]。

相比之下，化学吸附主要依赖于生物炭表面的官能团，与污染物发生化学反应或络合作用，过程一般不可逆，具有更高稳定性和专一性^[31,54]。生物炭中的羧基、羟基、酚羟基等功能基团能够与金属离子或有机污染物形成稳定的化学键。而富含羧基的生物炭对重金属离子的去除可依靠静电吸引和络合作用牢固固定污染物，显著提升吸附效率^[29,38]。此外，通过化学改性增加生物炭表面活性基团等官能团数量，能有效提高对污染物的化学吸附能力。

生物炭吸附过程中还可能利用生物协同作用。如在污水处理系统中，作为微生物载体，促进微生物降解污染物，从而提高整个系统的污染物去除效率^[28]。生物炭与氧化剂的协同作用也被证明可进一步提高其对有机污染物的去除能力。如香蒲根富铁生物炭在 H₂O₂ 协同作用下，可利用产生的羟基自由基，提高对磺酰罗丹明 B 的降解率（可达 90%），并在多次循环使用后仍保持较高的处理效率^[57]。

4 生物炭应用领域

生物炭作为环保材料，凭借比表面积大、孔隙结构丰富和吸附性能优异特性，应用范围已逐渐从环境污染治理、土壤改良和农业增效等领域拓展到能源存储、建筑材料等新兴领域^[26]。

4.1 环境污染治理

与传统污水处理技术相比，生物炭因成本低、吸附能力强、环境友好等特点，在提升污染物去除效率的同时，兼具较高的经济效益。如在污水处理中，生物炭能够有效去除氮^[21]、磷^[17]等无机污染物，去除率可达 70.5%~92.3%，显著提升水处理系统的运行效率。当与污水处理相关微生物联合使用时，去除效率可进一步提高至 95% 以上，充分体现其在缓解水体富营养化方面的生态价值和经济效益^[41,58]。在重金属污染治理方面，生物炭同样展现出优异的吸附性能。试验数据显示，采用硫酸盐还原剩余污泥制备的生物炭较普通生物炭对 Cr⁶⁺的吸附量高达 8.22 mg/g，去除效果显著^[37,43,59]。

在实际应用中，生物炭的再生能力和规模化生产仍面临挑战，如何提高生物炭的使用寿命、优化再生技术，是大规模推广应用的关键^[25]。染料污染治理是

工业废水处理中亟待解决的问题。因此,生物炭凭借其优异的吸附能力、经济性及可持续性,成为水污染治理领域的重要材料。经改性处理后的生物炭逐步替代或辅助传统处理方法,为水污染治理、构建清洁可持续的水环境提供更多技术选择^[14,24,60]。

4.2 土壤改良与农业增效

在农业生产中,生物炭因其改善土壤结构、增强养分保持能力、促进微生物活性等特点,逐渐成为土壤修复与农业可持续发展的重要手段。研究表明,生物炭可以优化土壤理化性质,显著提高作物产量,为农业可持续发展提供技术支撑^[61]。如采用甘蔗渣或污泥制备的生物炭,在氨、氮吸附方面优于其他材料,有效捕获氨氮并减少流失,优化微生物群落结构,从而提高土壤生物肥力,促进作物产量^[62-64]。这主要是因为经过高温裂解或微波处理的生物炭,其吸附和持水能力更强,能更有效地保持水分和养分,促进作物健康生长^[65-66]。生物炭在缓解土壤退化方面亦表现出独特优势。生物炭可通过增强土壤的阴离子和阳离子交换能力,提升钾、钙、镁等关键养分的保持效果,或利用化学稳定性形成长期稳定的碳结构,有效延缓碳的流失,在调节土壤酸碱性、提高 pH 值和贫瘠土壤改良等方面发挥重要作用^[67]。

生物炭作为环境友好的土壤修复材料,还能提高作物的抗逆性。如针对市政污泥、药厂污泥和鸡粪制备的生物炭,在老化过程中与矿物元素(如钙和镁)协同作用有利于土壤碳库的稳定,对于增强作物耐盐碱性和耐旱性,应对全球气候变化导致的农业挑战具有重要意义^[34,68]。

4.3 其他应用

随着新材料、新工艺不断涌现,生物炭在能源存储、建筑材料及其他新兴应用方面的研究逐渐深入。在能源存储领域,生物炭因良好导电性和孔隙结构,成为超级电容器电极材料的重要研究对象。通过优化制备工艺和表面功能化处理,生物炭不仅能够提高储能性能,还可提供可持续储能材料解决方案^[69]。随着废弃物资源化技术的发展,生物炭广泛用于制备建筑陶粒、生态建材等新型材料。通过采用脱水剩余污泥、粉煤灰和钢渣混合制粒与烧结技术,实现废弃物资源化利用,有效降低建筑材料中的重金属生态风险^[70]。这一技术的应用,不仅提升生物炭的附加值,也推动建筑行业的绿色发展。生物炭也可作为碳捕集和封存技术的辅助材料,帮助降低大气中 CO₂ 浓度,充分展现生物炭在减少大气污染方面的潜在应用价值。未来,仍需进一步探索生物炭的创新应用,以推动其在资源回收、碳中和及环境治理等领域的产业化应用。

5 生物炭技术瓶颈

尽管生物炭凭借优异的物理化学特性、环境友好性及多功能应用,在多领域展现出巨大潜力,但其商业化推广和大规模应用仍面临多重技术与经济挑战^[26]。主要瓶颈体现在生产成本与规模化应用、长期环境影响与生态安全性,以及改性技术的稳定性与产业化转化等方面。深入分析瓶颈问题,对于提出可行性解决方案、推动生物炭技术的工业化发展和可持续应用具有重要意义。

5.1 生产成本与规模化应用难题

生物炭制备方法虽然多样化,但高昂的生产成本和复杂的工艺流程依然是制约其大规模应用的主要问题之一。首先,原材料虽来源广泛(如农作物废弃物、污泥、城市有机垃圾等),但不同原料的预处理、热解或碳化工艺需要精细的参数控制,不仅增加设备和能源投入成本,还提高生产复杂性^[9]。其次,虽然实验室条件下改性生物炭性能优异,但高精度、高成本改性工艺在大规模生产时面临经济压力^[26]。

生物炭技术仍缺乏成熟的集成化生产流程,制约产业化进程。如何在保证生物炭吸附性能和环境友好性的前提下,实现低能耗、低成本的规模化生产,仍是亟待解决的难题。生物炭再生利用问题也是影响经济性的关键因素。尽管生物炭在污水处理、重金属吸附等领域应用广泛,但多次循环使用后吸附性能衰减,难以经济有效地再生,影响其长期应用价值^[43]。因此,未来研究应重点优化制备工艺、降低生产成本、提高再生利用效率,以实现生物炭的可持续应用和商业化推广。

5.2 长期环境影响与生态安全性问题

虽然生物炭在短期内展现出良好的污染物去除、土壤改良和碳封存效果,但在环境中的长期行为及生态安全性仍缺乏系统评估^[33]。目前的研究大多集中于生物炭初期效用,对其长期稳定性、分解机制和对微生物生态系统的影响等方面的研究较为有限^[7,38]。在农业应用中,自然环境变化对于作物生长及土壤健康至关重要,而不同环境条件(如土壤 pH 值、微生物活性、降水条件)也会对生物炭老化和降解速率、与环境组分相互作用产物产生影响,导致面临长期效应不确定性、化学成分释出引发二次污染的风险^[31]。同时,生物炭在土壤环境中的滞留时间和分解特性因原材料类型和制备工艺的不同而表现出较大差异。因此,生物炭长期积累对土壤养分循环、微生物群落和土壤结构变化的影响有待进一步探索。未来应加强长期环境监测,通过多季节、多年生田间试验,全面揭示生物炭在不同生态系统中的老化过程、降解机制及生态影响,

确保大规模应用过程不会对环境和生态系统造成潜在风险。同时，应制定生物炭环境安全标准，明确其在不同应用场景下的适用性和长期影响，以确保其可持续发展。

5.3 改性技术稳定性与转化问题

改性技术是提升生物炭吸附性能和功能性的核心手段，但实验室条件下获得的改性生物炭，在大规模生产和应用时难以保持性能一致性。首先，化学改性和物理改性技术（如酸碱活化、金属氧化物负载）虽能显著增强生物炭的吸附能力，但通常需要严格控制反应条件，依赖高纯度试剂，这也导致工业化生产中成本激增，影响经济可行性^[28-29]。其次，改性生物炭的长期稳定性也是产业化应用的关键挑战之一^[39]。改性生物炭通常在初期表现出较高的吸附效率，但长期使用过程中，其表面活性位点可能发生损耗，改性效果可能衰减，进而影响其再生利用和长期性能^[42,44]。此外，由于实验室环境和实际应用环境的差异，改性生物炭可能在不同温度、pH值、湿度条件下表现出不同的化学稳定性和物理结构，进一步加大改性技术向工业化转化的难度。

6 生物炭发展趋势

随着全球环境问题的加剧及可持续发展需求的提升，生物炭因资源再利用、污染治理、土壤改良和碳封存等多重优势，正成为环境科学与农业工程领域的研究热点。然而，在规模化生产、改性技术突破及经济性评估方面仍存在诸多挑战。未来生物炭的研究与应用趋势将主要体现在制备工艺优化与低能耗目标、改性技术多功能化与复合应用，以及规模化应用经济性与政策支持等方面。通过不断优化技术指标、提升经济可行性，生物炭有望在环境治理和农业可持续发展领域发挥更大作用。

6.1 制备工艺优化与低能耗目标

生物炭的制备工艺决定其物理化学性质、吸附性能及环境适应性，未来的发展应以降低生产能耗为目标，重点关注原材料选择、热解条件优化及生产流程集成化，提高生物炭的经济性和可持续性^[26]。在原材料选择方面，未来研究应深入分析不同原料在热解过程中的反应机理，明确其最佳热解温度、产率及孔隙结构，确保生物炭具备更大的比表面积和更丰富的官能团。在热解工艺优化方面，未来研究需要在优化生物炭吸附性能的同时，通过调整热解参数、开发低温热解及催化热解等新工艺，实现低能耗运行^[9]。集成化生产流程的构建也是未来生物炭产业化的关键。当前生物炭制备主要依赖间歇式小规模生产，难以实现工业化推广。未来应通过开发连续式生产技术，如流

化床热解、微波辅助碳化等，提高生产效率，并结合废弃物综合利用（如农林废弃物、城市固体废弃物等），降低原材料成本，提高环境效益。

6.2 改性技术多功能化与复合应用

改性技术是提升生物炭吸附能力、催化性能及生态适应性的重要手段，未来的发展趋势将侧重于新型复合改性技术和多功能生物炭材料的开发，以进一步拓宽其应用领域^[38]。化学改性和物理改性技术各具优势，但也存在局限性，未来改性技术趋势需融合多种技术，实现生物炭的功能多样化和应用拓展。首先，纳米催化剂、金属氧化物（如 Fe_3O_4 、 TiO_2 ）或碳纳米管等纳米材料或技术与生物炭改性技术相结合，可显著提高其电子传导能力、催化降解性能和重金属去除能力，使其在水处理、气体净化和能源存储等领域具有更广泛的应用潜力^[29]。其次，以生物炭为微生物载体，将生物技术与生物炭相结合，利用微生物降解有机污染物，或通过生物改性技术提高生物炭的养分释放能力，或与有机肥料、微生物制剂等农业投入品协同应用，在改善土壤理化性质、提高作物生长效率和实现农业增效等方面具有发展空间^[28]。改性技术还应注重工艺稳定性与环境友好性的平衡，需要开发更环保的改性策略，如绿色化学改性、生物催化改性、低温等离子体改性技术，以确保改性效果的稳定性和可持续性。此外，建立标准化改性流程，确保改性生物炭在长期应用中的一致性和耐久性，也是推动其在环境治理、农业应用及能源转换等领域规模化推广的关键。

6.3 规模化应用与经济性评估

尽管生物炭在实验室研究和小规模应用中表现出显著的污染治理和农业增效能力，但其商业化推广仍面临经济性评估和市场化推广挑战。因此，关注生物炭经济可行性分析、政策扶持及市场推广策略，可加快生物炭产业化进程^[33]。在经济性评估方面，生物炭规模化生产仍受高成本、低效益影响，急需量化包括生物炭原材料获取、生产工艺、改性处理、应用回收及再生利用在内的全生命周期成本，以明确其经济回报率和市场竞争力^[25]。同时，优化生物炭产业链布局，有利于推动其在农业、环保、能源等多领域综合利用，实现资源价值最大化，提高商业化可行性。在政策支持方面，政府应通过税收减免、补贴激励、技术扶持等方式，引导企业和科研机构加大对生物炭技术的开发和应用，将生物炭纳入碳市场交易体系，提高其经济价值。在污染治理和农业可持续发展政策下，政府可以设立专项资金，推动生物炭在农村污水处理、土壤修复、农业增效等领域的应用推广。通过政府支持与市场调控的有机结合，加快生物炭从科学研究向规模化、产业化生产转化，提高社会认可度和市场接受度。

7 结束语

本研究详细探讨生物炭的制备工艺、改性技术及吸附性能和机理,系统阐述生物炭在应用领域、技术瓶颈及发展趋势等方面研究进展,充分展现生物炭作为一种可再生环保材料在各领域的广阔应用潜力。生物炭因比表面积大、孔隙结构丰富及表面官能团多样等物理化学特性,不仅能够高效去除水体中的重金属、氮、磷和有机污染物,还可改善土壤结构、提升土壤肥力、促进作物生长,甚至在碳封存及温室气体减排等方面均展现出良好的应用效果,使其成为推动环境保护、资源循环利用及农业可持续发展的重要工具。

生物炭在商业化和规模化应用过程仍面临诸多问题:在保持优异吸附性能的同时,实现低能耗、低成本和集成化生产;生物炭长期积累对环境影响、在不同生态系统中的作用机制及再生利用等方面系统性评估尚不充分;缩小科学研究与规模化生产差距,保障改性后生物炭在长期使用中稳定性和持续性等。

针对存在问题,建议从4个方面进一步深化研究。一是优化制备工艺,在原材料选择、热解参数控制和集成化生产流程方面,深入开展系统性研究,以实现高效、低能耗和经济可行的规模化生产。二是加强长期环境影响评估,结合不同土壤类型和气候条件,通过设计多季节、连续性田间试验,探讨生物炭在生态系统滞留时间、分解特性及其对土壤微生物群落和植物生长的长效作用,确保其在实际应用中的稳定性和安全性。三是推动改性技术的产业化和标准化,着重开发稳定性更高、易于规模化应用的新型复合改性技术,阐明改性机理,明确改性方法对生物炭性能提升的内在机制,为其定向设计提供理论依据。四是重视经济性与政策推动,开展生物炭成本效益分析,明确投资回报率,借助政府和市场力量,通过优惠政策和补贴措施,提升公众对生物炭技术的认知和接受度。

生物炭作为一种兼具多功能应用潜力的环境友好型材料,在环境治理、土壤改良及农业可持续发展方面展现出日益显著的应用价值。通过不断完善制备工艺、深化长期生态效应评估、推动改性技术标准化及加强跨学科合作和政策支持,探索创新技术和应用模式,生物炭有望尽快实现从实验室到产业化的转化,进一步推动全球生态环境保护与农业可持续发展目标的实现,为解决复杂环境问题和实现“双碳”目标贡献更多智慧和力量。

参考文献

[1] 杨添名,王超.生物炭制备及其在水环境修复中的应用现状

[J]. 延边大学农学报, 2023, 45(3): 95-104.

YANG Tianming, WANG Chao. Current status of biochar preparation and its application in water remediation[J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2023, 45(3): 95-104.

[2] 魏思洁,王寿兵.生物炭制备技术及生物炭在生态环境领域的应用新进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2022, 61(3): 365-374.

WEI Sijie, WANG Shoubing. Biochar preparation technology and the new application progress of biochar in ecological environment [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2022, 61(3): 365-374.

[3] 李斌,梅杨璐,范世锁.茶渣生物炭制备及其在环境领域的应用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(9): 67-78.

LI Bin, MEI Yanglu, FAN Shisuo. Preparation of biochar from tea waste and its application in the field of environment[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(9): 67-78.

[4] 汪佳玥,凌茜,张云豪,等.生物炭制备方法及其在环境污染治理中的应用研究[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2022, 21(4): 1-14.

WANG Jiayue, LING Qian, ZHANG Yunhao, et al. Preparation of biochar and its application in environmental pollution management [J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition), 2022, 21(4): 1-14.

[5] 郭少鹏.生物炭制备及物性特征用于土壤修复的研究进展[J]. 化学世界, 2022, 63(2): 123-128.

GUO Shaopeng. Progress in preparation and properties of biochar for soil remediation[J]. Chemical World, 2022, 63(2): 123-128.

[6] 曹秀芹,刘丰,柴莲莲,等.污泥生物炭制备及其对土壤环境影响的研究进展[J]. 环境工程, 2022, 40(3): 203-211.

CAO Xiuqin, LIU Feng, CHAI Lianlian, et al. Research progress on preparation of sludge based biochar and its effect on soil environment [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(3): 203-211.

[7] 罗景阳,李依,李涵,等.基于城市固体废弃物的生物炭制备及其在垃圾填埋场和土壤改良中的应用研究进展[J]. 环境工程, 2022, 40(3): 194-202.

LUO Jingyang, LI Yi, LI Han, et al. Research progress on biochar production derived from municipal solid waste and its application in landfills treatment and soil improvement[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(3): 194-202.

[8] 彭昌盛,魏茜茜,赵婷婷,等.太阳能热解技术制备生物炭的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(2): 61-67.

PENG Changsheng, WEI Xixi, ZHAO Tingting, et al. Advances in production of biochar by solar pyrolysis technology[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(2): 61-67.

[9] 王红霞,张治伟,徐品,等.农作物废弃物生物炭制备及改性的研究进展[J]. 广东化工, 2024, 51(7): 95-97.

WANG Hongxia, ZHANG Zhiwei, XU Pin, et al. Research update on preparation and modification of biochar from crop residues[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(7): 95-97.

[10] 姜晶,陈霄宇,张瑞妍,等.载锰生物炭制备及其在环境修复中应用研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(8): 4385-4397.

JIANG Jing, CHEN Xiaoyu, ZHANG Ruiyan, et al. Research progress of manganese-loaded biochar preparation and its application in environmental remediation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(8): 4385-4397.

- [11] 盛竹, 邓兵杰, 孙洋, 等. 生物炭制备及其吸附应用研究进展[J]. *现代农业科技*, 2022(9): 133-140.
SHENG Zhu, DENG Bingjie, SUN Yang, et al. Advances on biochar preparation and its adsorption applications[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2022(9): 133-140.
- [12] 徐恺, 唐克, 常春, 等. 芹菜籽源药渣生物炭制备及对苯酚的吸附性能[J]. *工业水处理*, 2020, 40(6): 36-39.
XU Kai, TANG Ke, CHANG Chun, et al. Preparation of biochar from celery seed residue and its adsorption performance for phenol[J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(6): 36-39.
- [13] 朱建龙, 郭硕斌, 徐伟杰, 等. 纳米铁改性生物炭制备及其对含铬废水的吸附性能[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(9): 2891-2898.
ZHU Jianlong, GUO Shuocheng, XU Weijie, et al. Preparation of nano iron-modified biochar and its adsorption performance on chromium-containing wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(9): 2891-2898.
- [14] 徐嘉, 冯文, 刘沛豪, 等. 磁性海藻生物炭制备及高效去除水中甲基橙的应用[J]. *工业水处理*, 2023, 43(1): 76-82.
XU Jia, FENG Wen, LIU Peihao, et al. Preparation of magnetic seaweed biochar and its application for efficient removal of methyl orange from aqueous solutions[J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(1): 76-82.
- [15] 宋大刚, 唐雪, 龙玲. 猪粪沼渣生物炭制备及其植物毒性评价[J]. *中国沼气*, 2023, 41(3): 49-54.
SONG Dagang, TANG Xue, LONG Ling. Preparation of biochar from swine manure digestate residue and its ecotoxicological evaluation[J]. *China Biogas*, 2023, 41(3): 49-54.
- [16] 陈一川, 曹培丽, 胡文华, 等. 农业废弃物生物炭制备及其对 Cd^{2+} 的吸附特征[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(6): 129-140.
CHEN Yichuan, CAO Peili, HU Wenhua, et al. Preparation of biochar from different agricultural wastes and its adsorption characteristics for Cd^{2+} [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 44(6): 129-140.
- [17] 朱艳, 肖清波, 奚永兰, 等. 改性生物炭制备条件对磷吸附性能的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1897-1903.
ZHU Yan, XIAO Qingbo, XI Yonglan, et al. Effect of preparation conditions on the phosphorus adsorption capacities of modified biochar[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9): 1897-1903.
- [18] 廖承茵. 基于火焰幕热解窑的生物炭制备方法研究综述[J]. *材料导报*, 2024, 38(S2): 85-88.
LIAO Chengjun. Review of biochar preparation methods based on flame curtain pyrolysis kilns[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(S2): 85-88.
- [19] 田青柏, 杨关运, 李晓强, 等. 磁性咖啡渣生物炭制备及其对金霉素的吸附特性研究[J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(8): 33-36.
TIAN Qingbai, YANG Guanyun, LI Xiaoqiang, et al. Study on preparation of magnetic coffee grounds biochar and its adsorption properties for chlortetracycline[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(8): 33-36.
- [20] 王烽圣, 许晓毅, 时和敏, 等. Fe^{2+} 改性菖蒲生物炭制备及对水中磷的吸附特性[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3493-3503.
WANG Fengsheng, XU Xiaoyi, SHI Hemin, et al. Preparation of Fe^{2+} modified calamus biochar and its adsorption characteristics towards phosphorus from aqueous solutions[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3493-3503.
- [21] 徐清艳. 不同种类生物炭制备及其吸附氨氮的研究[J]. *山东化工*, 2021, 50(24): 283-287.
XU Qingyan. Study on preparation of different kinds of biochar and its adsorption of ammonia nitrogen[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021, 50(24): 283-287.
- [22] 王虹茜, 吕思璐, 黄婧琪, 等. 厌氧发酵对废弃钙基生物炭制备温度的影响及对水体中除磷研究[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(4): 298-307.
WANG Hongqian, LYU Silu, HUANG Jingqi, et al. Effect of anaerobic fermentation on the preparation of calcium-contained biochar and its phosphate removal performance[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(4): 298-307.
- [23] 李绥昌, 杜国勇, 胡智红, 等. 氮掺杂生物炭制备及其对水中重金属铅的吸附特性研究[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(10): 214-220.
LI Suichang, DU Guoyong, HU Zhihong, et al. Preparation of nitrogen-doped biochar and its adsorption characteristics for heavy metal lead in water[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(10): 214-220.
- [24] 许攀, 巩伟, 程琛. 小麦秸秆生物炭制备及其对甲基橙的吸附性能研究[J]. *宁夏师范学院学报*, 2024, 45(4): 72-77.
XU Pan, GONG Wei, CHENG Chen. Preparation of wheat straw biochar and its adsorption performance for methyl orange[J]. *Journal of Ningxia Normal University*, 2024, 45(4): 72-77.
- [25] 李培岭, 李转玲. 磁性生物炭制备及治理电镀废水金属离子应用研究[J]. *当代化工研究*, 2021(24): 55-57.
LI Peiling, LI Zhuanling. Preparation of magnetic biochar and its application in electroplating wastewater treatment[J]. *Modern Chemical Research*, 2021(24): 55-57.
- [26] 杨洁, 刘芳, 袁宗胜. 生物炭制备及其在污染环境修复中的应用[J]. *亚热带农业研究*, 2023, 19(1): 64-70.
YANG Jie, LIU Fang, YUAN Zongsheng. Preparation of biochar and its application in the remediation of contaminated environment[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2023, 19(1): 64-70.
- [27] 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 等. 茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1308-1318.
FAN Shisuo, LIU Wenpu, WANG Jintao, et al. Preparation of tea waste biochar and its application in tetracycline removal from aqueous solution[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1308-1318.
- [28] 吕贤喆, 常国立, 李传鹏, 等. 枇杷籽生物炭制备、表征及其微生物吸附性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(10): 1374-1379.
LYU Xianzhe, CHANG Guoli, LI Chuanpeng, et al. Preparation, characterization of loquat seed biochar and its microbial adsorption performance[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(10): 1374-1379.
- [29] 罗元, 谢坤, 冯弋洋, 等. 镧改性核桃壳生物炭制备及吸附水体磷酸盐性能[J]. *化工进展*, 2021, 40(2): 1121-1129.
LUO Yuan, XIE Kun, FENG Yiyang, et al. Preparation of lanthanum modified walnut shell biochar and adsorption of phosphate from aqueous solutions[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*,

- 2021, 40(2): 1121-1129.
- [30] 骆美宇, 李音, 刘玉鹏, 等. 高温烟气活化生物炭制备活性炭及其Cu²⁺吸附性能[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(6): 98-106.
- LUO Meiyu, LI Yin, LIU Yupeng, et al. Preparation of activated carbon from high-temperature flue gas activated biochar and their Cu²⁺ adsorption performance[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 48(6): 98-106.
- [31] 韩春风, 桑梓繁, 尚楷林, 等. 不同制备方法对荞麦秸秆生物炭理化性质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(6): 231-240.
- HAN Chunfeng, SANG Zifan, SHANG Kailin, et al. Effects of different preparation methods on physicochemical properties of buckwheat straw biochar[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(6): 231-240.
- [32] 鲁瑶, 冯民权, 王毅博, 等. 污泥基生物炭制备及其对亚甲基蓝吸附性能研究[J]. 应用化工, 2023, 52(12): 3284-3288.
- LU Yao, FENG Minquan, WANG Yibo, et al. Preparation of sludge biochar and its methylene blue adsorption properties[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(12): 3284-3288.
- [33] 邵一如, 朱于红, 杜耀. 污泥基生物炭制备与改性[J]. 新型工业化, 2022, 12(8): 206-208, 212.
- [34] 吴汉福, 田玲, 王漪菴. 磁性波斯菊生物炭制备及降解二甲酚橙性能[J]. 云南化工, 2020, 47(11): 34-36, 41.
- WU Hanfu, TIAN Ling, WANG Lihong. Preparation of magnetic biochar from *Cosmos Bipinnata Cav* and degradation of xylenol orange[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(11): 34-36, 41.
- [35] 侯建华, 孟臻, 胡继娟, 等. 冰模板-微波法协同的用于吸附水中Cr(VI)的生物炭制备[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(2): 151-156.
- HOU Jianhua, MENG Zhen, HU Jijuan, et al. Ice template microwave synergistic preparation of biochar for adsorption of Cr(VI) in water[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(2): 151-156.
- [36] 梁宁, 莫福金, 周街荣, 等. 污泥生物炭制备及其对磷的吸附性能研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(6): 174-179.
- LIANG Ning, MO Fujin, ZHOU Jierong, et al. Study on preparation of sludge biochar and its adsorption performance for phosphorus[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(6): 174-179.
- [37] 董良飞, 郜飞, 刘会东, 等. 凹凸棒土/玉米秸秆生物炭制备及对四环素的吸附[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(2): 46-58.
- DONG Liangfei, GAO Fei, LIU Huidong, et al. Preparation of attapulgite/corn straw biochar and its adsorption on tetracycline[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2023, 35(2): 46-58.
- [38] 黄瑞卿, 熊健, 李伟, 等. 载镧生物炭制备及其在环境修复中的研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(3): 48-52.
- HUANG Ruiqing, XIONG Jian, LI Wei, et al. Preparation of lanthanide-carrying biochar and research progress on its application in environmental remediation[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(3): 48-52.
- [39] 李玲玉. 响应面法优化污泥生物炭制备工艺[J]. 海峡科学, 2021(2): 52-55.
- [40] 孙兆楠, 张永波, 赵鹏, 等. 玉米秸秆生物炭制备、表征及吸附性能研究[J]. 可再生能源, 2024, 42(12): 1587-1593.
- SUN Zhaonan, ZHANG Yongbo, ZHAO Peng, et al. Preparation, characterization and adsorption performance of corn straw biochar[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(12): 1587-1593.
- [41] 莫金恒, 韦思淇, 潘华锋, 等. 二氧化锰改性玄参根药渣生物炭制备及吸附四环素研究[J]. 化工管理, 2024(35): 83-88.
- MO Jinheng, WEI Siqu, PAN Huafeng, et al. Preparation of manganese dioxide modified *Scrophularia ningpoensis* root residue biochar and its adsorption of tetracycline[J]. Chemical Management, 2024(35): 83-88.
- [42] 尹旭冉, 姜维, 柴敏, 等. 固定化蟹壳生物炭制备及吸附Pb²⁺的研究[J]. 工业水处理, 2024, 44(1): 103-111.
- YIN Xuran, JIANG Wei, CHAI Min, et al. Preparation of immobilized crab shell biochar and its adsorption of Pb²⁺[J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(1): 103-111.
- [43] 桂超, 宋晨浩, 钱文敏, 等. 基于废弃茄科植物的纳米铁/生物炭制备及其对含铬(VI)废水的吸附净化研究[J]. 材料导报, 2024, 38(18): 253-261.
- GUI Chao, SONG Chenhao, QIAN Wenmin, et al. Preparation of nano-iron/biochar based on waste solanaceae plants and its adsorption and purification of Chromium(VI)-containing wastewater[J]. Materials Reports, 2024, 38(18): 253-261.
- [44] 矫洪铭, 付亮, 周盈盈, 等. 铁-钙-炭强化污泥深度脱水及污泥基生物炭制备[J]. 能源环境保护, 2024, 38(1): 101-108.
- JIAO Hongming, FU Liang, ZHOU Yingying, et al. Iron-calcium-biochar enhanced sludge deep dewatering and sludge-based biochar preparation[J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(1): 101-108.
- [45] 苏杨, 冼卓慧, 张俊涛. 铁改性生物炭制备及其对磷的吸附和有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(9): 1782-1793.
- SU Yang, XIAN Zhuohui, ZHANG Juntao. Preparation of iron-modified biochar and its adsorption and effectiveness of phosphorus[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(9): 1782-1793.
- [46] 李霖, 郭勇, 田夫, 等. 高铁酸钾/氢氧化钾改性竹基生物炭制备及吸附性能研究[J]. 当代化工, 2023, 52(8): 1799-1804.
- LI Ji, GUO Yong, TIAN Fu, et al. Preparation of K₂FeO₄/KOH modified bamboo biochar and its adsorption characteristics[J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(8): 1799-1804.
- [47] 韩亚杰, 时新强, 包慧芳. 改性核桃壳生物炭制备固定化PG-PR的研究[J]. 石河子科技, 2024(6): 9-11.
- [48] NOSRATABAD N A, YAN Q G, CAI Z Y, et al. Exploring nano-material-modified biochar for environmental remediation applications[J]. Heliyon, 2024, 10(18): e37123.
- [49] AHMAD A, KHAN Z U H, SABAHAT S, et al. Innovations in metal oxides-biochar nanoparticles for dye removal[J]. Nano-Structures & Nano-Objects, 2024, 39: 101269.
- [50] XU J C, XIE Y M, YAO Q D, et al. Advances in sustainable nano-biochar: precursors, synthesis methods and applications[J]. Nano-scale, 2024, 16(32): 15009-150032.
- [51] ZHANG S, HU X Y, SU J F, et al. Modified biochar improved simultaneous nitrate removal and soluble microbial products regulation in low carbon wastewater: insights from the biocarrier and community function[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 65: 105762.
- [52] KALLA A, MAYILSWAMY N, KANDASUBRAMANIAN B,

- et al. Biochar: a sustainable and an eco-friendly material for energy storage applications[J]. *International Journal of Green Energy*, 2024, 21(7): 1695-1709.
- [53] 李兴发, 潘寒风, 安小伟, 等. 核桃壳生物炭制备及其碘捕获性能[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(10): 5406-5414.
- LI Xingfa, PAN Hanfeng, AN Xiaowei, et al. Preparation of biochar from walnut shells and iodine capture[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(10): 5406-5414.
- [54] 田玲, 韦桂查. 白菜秸秆生物炭制备及其吸附 Cr⁶⁺性能[J]. *西部皮革*, 2020, 42(20): 7-10, 89.
- TIAN Ling, WEI Guicha. Preparation and adsorption of Cr⁶⁺ by biochar from cabbage straw[J]. *West Leather*, 2020, 42(20): 7-10, 89.
- [55] 张春媛, 骆灵喜, 李晨, 等. 基于正交试验设计的改性污泥基生物炭制备研究[J]. *绿色科技*, 2024, 26(4): 143-146, 151.
- ZHANG Chunyuan, LUO Lingxi, LI Chen, et al. Study on preparation conditions of modified sludge biochar based on orthogonal experimental design[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2024, 26(4): 143-146, 151.
- [56] 高阳, 李博, 蒲建业, 等. 玉米秸秆皮生物炭制备及其对亚甲基蓝吸附性能研究[J]. *现代农业科技*, 2024(19): 93-98.
- GAO Yang, LI Bo, PU Jianye, et al. Preparation of corn stalk rind biochar and its adsorption performance for methylene blue[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(19): 93-98.
- [57] 胡波, 周奥, 牛慧斌, 等. 香蒲根富 Fe 生物炭制备及其光催化降解有机污染物[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(15): 55-60.
- HU Bo, ZHOU Ao, NIU Huibin, et al. Preparation of Fe-enriched biochar from *Typha Orientalis Presl* root and its photocatalytic degradation of organic pollutants[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(15): 55-60.
- [58] 钟文晶, 符帝俊, 齐丹, 等. 生物炭制备及其在水处理中的应用[J]. *水处理技术*, 2023, 49(1): 26-30.
- ZHONG Wenjing, FU Dijun, QI Dan, et al. Preparation of biochar and its application in water treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2023, 49(1): 26-30.
- [59] 马蕊, 吴耀国, 张明宽, 等. 硫酸盐还原剩余污泥-生物炭制备及其对 Cr(VI) 去除[J]. *精细化工*, 2020, 37(12): 2578-2584, 2592.
- MA Rui, WU Yaoguo, ZHANG Mingkuan, et al. Preparation of sulfate reducing sludge-based biochar and its removal of Cr(VI)[J]. *Fine Chemicals*, 2020, 37(12): 2578-2584, 2592.
- [60] 周善磊, 徐雅兵, 张宇锡, 等. 污泥基生物炭制备及其对活性黑 5 染料的吸附研究[J]. *山东化工*, 2023, 52(17): 239-241, 244.
- ZHOU Shanlei, XU Yabing, ZHANG Yuxi, et al. Preparation of sludge-based biochar and its adsorption to reactive black 5 dye[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2023, 52(17): 239-241, 244.
- [61] 王宏燕, 邢宇, 段庆龙, 等. 水稻秸秆生物炭制备硅酸钠及白炭黑工艺研究[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(11): 37-46.
- WANG Hongyan, XING Yu, DUAN Qinglong, et al. Research on preparation of sodium silicate and silica technology from rice straw biochar[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(11): 37-46.
- [62] 刘明辉, 唐子君, 饶梓凌, 等. 高性能甘蔗基生物炭制备及其对 H₂S 和 NH₃ 吸附[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2023, 47(4): 374-382.
- LIU Minghui, TANG Zijun, RAO Ziling, et al. Preparation of high-performance sugarcane-based biochar and its adsorption of H₂S and NH₃[J]. *Journal of Nanchang University(Natural Science)*, 2023, 47(4): 374-382.
- [63] 姬江浩, 胥思勤. 污泥生物炭制备及应用研究进展[J]. *科技创新与生产力*, 2021(5): 41-46.
- Ji Jianghao, XU Siqin. Research on preparation and application of sludge biochar[J]. *Sci-tech Innovation and Productivity*, 2021(5): 41-46.
- [64] 徐艳, 张海欧, 曹婷婷. 磁改性生物炭制备及应用研究[J]. *农业与技术*, 2021, 41(23): 4-6.
- [65] 关体坤, 刘子璐, 李小玉, 等. 工厂化杏鲍菇菌渣生物炭制备及质量评价[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(3): 71-79.
- GUAN Tikun, LIU Zilu, LI Xiaoyu, et al. Biochar from spent mushroom substrate of industrial *Pleurotus eryngii*: preparation process and quality evaluation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(3): 71-79.
- [66] 王林, 陈杨武, 周后珍, 等. 微波生物炭制备影响因素及其环境应用进展[J]. *工业水处理*, 2022, 42(5): 50-57.
- WANG Lin, CHEN Yangwu, ZHOU Houzhen, et al. Research on effecting factors of microwave biochar preparation and its environmental application[J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(5): 50-57.
- [67] 孙学凯, 白洁, 徐成斌, 等. 城市绿地废弃物生物炭制备与应用前景[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(1): 72-76.
- SUN Xuekai, BAI Jie, XU Chengbin, et al. Preparation and application of biochar derived from urban green space waste[J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(1): 72-76.
- [68] 张滢, 张长浩, 张秀芳, 等. 污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失[J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4554-4564.
- ZHANG Ying, ZHANG Changhao, ZHANG Xiufang, et al. Carbon loss during preparation and aging of sludge livestock manure biochars[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4554-4564.
- [69] 陈浩宇, 邓兵杰, 孙洋, 等. 生物炭制备超级电容器电极材料研究进展[J]. *化学工程与装备*, 2022(1): 191-192.
- [70] 王玉, 余广炜, 林佳佳, 等. 沼渣、飞灰和污泥生物炭制备建筑陶粒[J]. *化工进展*, 2023, 42(2): 1039-1050.
- WANG Yu, YU Guangwei, LIN Jijia, et al. Preparation of building ceramsite from food waste digestate residues, incineration fly ash and sludge biochar[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(2): 1039-1050.