

小麦秸秆生物炭对重金属污染土壤修复机制研究进展

李厚衡, 方城飞, 芦卓耀, 盛红坤*

南开大学滨海学院环境科学与工程系, 天津

收稿日期: 2023年5月2日; 录用日期: 2023年6月1日; 发布日期: 2023年6月9日

摘要

近年来由于工业、矿业等可能造成重金属污染的行业发展迅速, 加之对其生产废料的排放缺少严格管理, 以及农作物生产中化肥的过度使用, 土壤重金属污染问题已经严重影响到土壤质量以及粮食安全, 成为了当下环境治理中不可忽视的一个因素。而生物炭作为新兴的土壤重金属处理工艺, 凭借其对土壤中重金属离子的吸附作用, 以及低廉的制备价格等优势, 展现出了巨大的应用潜力和发展前景, 成为了土壤重金属污染问题治理和修复方面的研究热点。

关键词

土壤, 重金属, 生物炭

Research Progress on the Remediation Mechanism of Wheat Straw Biochar on Heavy Metal Contaminated Soil

Houheng Li, Chengfei Fang, Zhuoyao Lu, Hongkun Sheng*

Department of Environmental Science and Engineering, Nankai University Binhai College, Tianjin

Received: May 2nd, 2023; accepted: Jun. 1st, 2023; published: Jun. 9th, 2023

Abstract

In recent years, due to the rapid development of industries such as industry and mining that may cause heavy metal pollution, coupled with the lack of strict management of their production waste

*通讯作者。

文章引用: 李厚衡, 方城飞, 芦卓耀, 盛红坤. 小麦秸秆生物炭对重金属污染土壤修复机制研究进展[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(3): 559-565. DOI: 10.12677/aep.2023.133069

emissions, and the excessive use of fertilizers in crop production, the problem of soil heavy metal pollution has seriously affected soil quality and food security, becoming a factor that cannot be ignored in current environmental governance. As an emerging soil heavy metal treatment process, biochar has shown enormous application potential and development prospects due to its adsorption of heavy metal ions in the soil and its low preparation price. It has become a research hotspot in the treatment and remediation of soil heavy metal pollution.

Keywords

Soil, Heavy Metal, Biochar

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 由于工业和冶矿业等高污染行业的高速发展, 以及农作物生产过程中化肥的大量使用, 加之目前仍然缺少完善的污染物排放监测标准以及监督制度, 土壤重金属污染总超标率 16.1% [1], 土壤重金属污染问题已经成为近年来环境保护工作者工作进行的重点问题。土壤重金属污染问题一方面会通过农作物进入食物链从而在人体中积累, 长此以往势必会严重影响人民的身体健康和食品安全; 另一方面, 土壤重金属污染的长期积累也会进一步影响到作物的生长和产量, 并且会对土地肥力产生难以逆转的影响。据不完全统计, 截止至 2020 年我国已经有超过 2000 万 hm^2 土地受到重金属的污染[2], 解决土壤重金属污染问题已经成为一个刻不容缓的环保议题。

而生物炭作为近年来新兴的重金属污染防治技术, 具有种种传统重金属污染防治技术难以企及的优越性。其原料的易得性、制备过程的简便性以及其多孔、多表面官能团的化学特性使生物炭防治法有着极为广阔的应用前景和推广价值。生物炭根据来源主要可以分为三类: 植物来源生物炭、动物来源生物炭和污泥生物炭[3]。一般来讲小麦秸秆、坚果壳、农业废弃物以及粪便排泄物等因为其方便获得以及低廉的价格是目前比较常用的原料, 同时也解决了农村中一些如秸秆、坚果壳等农业废弃物的处置问题。本文着重介绍了小麦秸秆制备生物炭的制备工艺、生物炭的物理化学特征, 总结了生物炭对重金属污染土壤的修复机制以及修复效果的影响因素, 也对未来生物炭治理重金属污染的发展进行了展望, 以期对生物炭在金属污染土壤中的更多应用和发展提供一些思路和建议。

2. 生物炭的制备工艺及理化性质

2.1. 生物炭的制备工艺

比较常见的生物炭制备方法主要包括热解法、水热碳化法和气化法[4]。其中, 热解法可以根据其反应速度分为快速热解法和慢速热解法; 但是由于快速热解法热反应速度过快, 其固态产率较低, 所以较少用于生物炭的制备, 而慢速热解法热解反应时间长, 其固态产率较高多用于生物炭等有机质产物制备; 水热碳化法主要是在较低温度下对密闭空间内的含水生物质进行热解碳化, 具有成本低、能耗小、不易造成环境污染等优点, 多用于含水量较多的生物质处理[5]; 气化法是指高温密闭的条件下将生物质转化为气态混合物过程中会产生的副产物, 其不但固态物产率极低, 而且其气化过程中也可能产生有毒气体和温室气体, 所以很少采用本方法。

目前主流的小麦秸秆生物炭制备工艺主要是慢速热解法，将预处理后的小麦秸秆置于缺氧高温的环境下，使其充分热裂解，得到热解富碳固体小麦秸秆生物炭。

2.2. 生物炭的理化性质

生物炭具有较大的比表面积、高孔隙度，具有易于吸附重金属污染物的物理特性，使重金属污染离子吸附在生物炭表面或进入生物炭的孔隙内，从而可以将土壤中游离的重金属离子吸附固定，使重金属离子由游离态向稳定态转变[6]从而降低土壤中重金属离子的迁移率，减少重金属污染所造成的危害。

生物炭的特点之一是其高度富碳性，其组成元素主要包括碳、氮、氧、氢等，灰分也是其重要组成部分之一，而秸秆等植物来源生物炭的碳含量是最高的(60%~80%)远高于污泥生物炭(约为10%) [7]。这也赋予了它稳定的碳结构和在重金属污染处理问题中的优越性。

生物炭的表面也具有极其丰富的含氧官能团，使其表面带有电负性，从而可以与重金属离子通过静电作用结合。并且生物炭的 pH 一般呈碱性，也可以在一定程度上改善土壤的酸碱度，将生物炭加入重金属污染土壤后，也可以与带有正电荷的重金属离子发生氧化还原反应使其络合在生物炭大分子表面降低其转移性[8]。

同时，生物炭所含有的灰分以及其表面的高孔隙度和较大的比表面积可以为土壤中有益细菌和微生物的生长繁殖提供所需营养和环境[9]，增加土壤中有益菌和微生物的种群数量，达到改善土壤环境、提升土壤肥力的目的。

综上，生物炭对土壤重金属污染处理问题具有其他方法难以替代的优越性，所以利用生物炭修复重金属污染土壤受到了越来越多的关注和研究。

3. 生物炭对重金属污染土壤修复机制

生物炭所具有的复杂的结构特征确定了它对土壤重金属的固定是多重吸附机理共同作用所产生的结果。根据实验中的观察、测量与分析，得出多重吸附机理的主要形式有以下几种：矿物共沉淀作用(Q_P)、可溶性有机质吸附作用(Q_{DOM})、离子交换(Q_i)以及表面络合作用(Q_C) [10]。

另一方面，在重金属土壤中加入生物炭后，观察并测量土壤的各种理化性质，如 pH 值、电导率。根据实验数据显示，土壤的 pH 值和电导率受生物炭的影响而升高，因能土壤中重金属的化学形态也发生变化[11]。生物炭将重金属以沉淀或者离子交换的形式固定并吸附，以此来降低其可移动性，这就达到了生物炭修复重金属污染土壤的目的。

此外，小麦秸秆粉末在加热制炭的过程中，其表面的酸性官能团大幅减少导致生物炭呈现碱性，因此小麦秸秆生物炭也能够作为一种土壤 pH 改良剂来使用[12]，可以根据土壤 pH 的大小来选择投药量的多少。

生物炭对土壤重金属的固定作用还与加入生物炭量的多少以及制炭时的温度有关，研究表明在一定程度增加生物炭的量，重金属被固定地越多，并且在 300℃下制成的生物炭对土壤重金属的修复效果最好[13]。

3.1. 生物炭通过物理吸附作用的修复机制(直接作用)

生物炭表面的高孔隙度、较大的比表面积和孔容为土壤中的重金属提供了良好的附着条件[14] [15]，另外它的芳香结构也为吸附重金属提供了很大的便捷[16]。经过观察生物炭吸附前后的表面图，从中得知吸附前的生物炭表面存在着大量的孔隙结构，而在吸附后，生物炭表面有了许多颗粒物质附着，生物炭表面相较吸附前也更为平整。在后续对吸附后生物炭的成分分析中，发现表面吸附的物质中含有重金属

盐,这说明生物炭的各种吸附机理共同作用使重金属固定,将产生的重金属盐吸附在了表面,从而达到了对污染土壤的修复作用。

但由于生物炭的性质、使用量以及土壤的各种属性各不相同,所以生物炭对土壤重金属修复作用的进展也有各种程度上的差别[17]。

3.2. 生物炭对土壤重金属的固定作用(间接作用)

生物炭能够改变土壤的理化性质,一般来说主要作用于土壤的 pH 值、CEC (cation exchange capacity) 以及土壤有机碳这几方面[18],从而对土壤中的重金属产生间接作用,使其固定。溶液的 pH 值对生物炭吸附重金属起到了重要作用,生物炭一般具有较高的 pH 值和高电负性,所以使用后能够提高土壤的 pH,并且增强土壤胶体表面的电负性,增强对正电重金属阳离子的静电吸引,从而达到对土壤中重金属的固定。研究表明,在 pH 较低的情况下,生物炭对重金属的吸附能力相对较弱,这种现象的主要是由正负电荷转移能力的大小造成的[19]。另一方面,生物炭的施用能改变土壤的有机碳环境。生物炭中含有可溶性小分子有机质,可以进入土壤溶液与重金属相互作用从而降低土壤重金属的迁移能力和生物有效性[20]。

另外,通过实验还发现了络合作用是生物炭对土壤重金属固定的一个重要作用。生物炭表面的大量含氧官能团与重金属离子相互作用结合,并将产生的络合物吸附在生物炭表面使其固定,降低土壤对重金属的解吸[21]。

3.3. 生物炭对土壤中微生物群落的修复作用

撒入土壤中的生物炭会与真菌相结合,形成一个共生体,它不但能将土壤中的碳暂时隔绝,减少碳元素的循环,以此来缓解气候变化对人类生活带来的压力,还能对受到破坏的生态环境提供有效的帮助,能提升土壤的活力,从而通过可持续作用提升作物的生产率[22],此外还有研究表明生物炭还能有效地控制土壤中氨的挥发。

在对生物炭成分的分析中,发现生物炭最主要的成分是大量芳香族化合物和部分不稳定的脂肪族化合物,因此能作为一种有机肥料使用来提高土壤的肥力。另一方面,生物炭还能帮助土壤中的颗粒形成团聚体并提高其稳定性[23]。还有研究表明,土壤中添加了生物炭后土壤阳离子的交换能力得到了显著提升,促进了有机质的积累[24],而且酶活性和微生物量等也受到了相当的影响。

生物炭表面的孔隙结构和较大的比表面积还能为微生物提供一个良好的庇护所,不仅能改善土壤的通气性,还能增强土壤的保水能力[25]。

4. 生物炭对重金属污染土壤修复效果影响因素

4.1. 制备生物炭的生物质原料

生物质是一个广泛的概念,所有的直接或间接利用绿色植物光合作用获得的有机质都称为生物质,包括植物、动物、微生物,以及它们所产生的废弃物,如动物粪便等。制备生物炭的原料大致可以分为植物源、动物源、污泥、工业废料源四大类[26]。

盘丽珍等[27]通过盆栽试验发现,以大豆秸秆为原料制备而成的生物炭能明显降低重金属在土壤中的含量。陈楠等[28]采用限氧升温碳法以椰壳为原材料制备而成的生物炭,发现这种生物炭对土壤中的 Cr(IV)有良好的吸附效果。叶沁晖等[29]通过以废弃生物质沼渣为原料制备的沼渣生物炭可以维持土壤的肥力,提高养分的利用效率。孟艳等[30]发现以农作物秸秆为原料制备而成的生物炭可显著提高土壤团聚体的碳含量和土壤有机碳含量。尹微琴[31]以垫料为原材料制备而成的生物炭和牛晓丛等[32]用酵素渣为

原材料制备而成生物炭对土壤中的重金属都有钝化作用。房献宝等[33]发现污泥生物炭能有效地固定土壤中不稳定态重金属 Cr 和 Cd, 使土壤中重金属的有效态含量显著下降。

4.2. 制备生物炭的不同温度条件

在不同的热解温度下制备出来的生物炭因为热解程度不同, 其所得到的生物炭微粒结构不同, 加入土壤后会产生不同的影响。热解温度对生物炭基本性能的影响主要表现在比表面积、阳离子交换量 CEC、pH、灰分含量和保水能力等方面[17]。在大多数情况下, 温度越高, 生物炭对重金属污染土壤的修复效果越明显。根据制备生物炭时的热解温度及其速率可以分为快速、中速、慢速三种裂解方法。

丁文川等[34]的实验结果表明生物炭在三种不同温度条件下的重金属吸附制备温度与生物炭的制备温度成正比, 生物炭对降低重金属的迁移能力 $700^{\circ}\text{C} > 500^{\circ}\text{C} > 300^{\circ}\text{C}$, 温度越高, 生物炭降低效果越好。来张汇等[35]利用缺氧热解法在马弗炉中制备的秸秆生物炭表明当热解温度从 300°C 到 500°C 再到 700°C 时, $(\text{N} + \text{O})/\text{C}$ 的比会降低, 表明生物炭的疏水性增加和极性降低, 进一步提升了生物炭稳定性。因此对于生物炭制备的热解最佳温度要高, 但又不能太高, 温度应该控制在 $600^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ [36] [37] [38] [39] 范围内, 高锰酸钾改性的生物炭表面会粘附一些晶体, 如二氧化锰、氢氧化钾或硅酸钾等晶体, 这些晶体在一定程度上增加了吸附能力, 由于高锰酸钾的强氧化, 改性生物炭被粉碎得更细, 原始粒径更小。吸附颗粒尺寸越小, 颗粒分散越均匀, 吸附重金属颗粒碰撞的概率越高, 吸附能力越强, 它具有更高的固定重金属的能力。

4.3. 生物炭的制备工艺

生物炭的制备是生物质从大分子向小分子进行热分解转化, 其中伴随着有脂肪烃脱水缩聚形成芳香环、羟基、羧基等极性官能团的过程[40]。不同制备条件下制备出来的生物炭, 其表面结构、比表面积、孔径大小、孔容积等理化性质均有明显差异。同时, 生物炭表面官能团、表面活性基团也不同, 进而影响到其对重金属离子的吸附特性。不同制作方法制备的生物炭在不同程度上均能降低重金属污染土壤中有效态重金属含量。由于制得方法不同, 从而导致了生物炭与土壤溶液中重金属作用强度不同。从污染土壤修复效果来看, 采用微波制备的生物炭能显著增加重金属 Cd、Zn 含量。与活性炭相比, 微波制备的生物炭能显著增加土壤中 Ni 含量。占国艳等[41]采用管式炉利用正交实验设计方法制备的芦苇秸秆生物炭(LWC)和玉米秸秆生物炭(YMC)都可以使土壤中可溶性盐基离子提高, 促进土壤中离子对重金属的吸附及沉淀作用。张瑞卿等[42]通过管式电炉 CO_2 活化法和马弗炉高温热解炭化两种方法制备的生物炭对比发现在相同温度下, 采用管式电炉 CO_2 活化法制备出来的生物炭中的灰分和挥发分含量要比马弗炉高温热解炭化制备出来的生物炭中的灰分和挥发分含量高, 对重金属污染土壤的修复效果更明显。

5. 结语与展望

土地作为我国极为重要的战略、经济资源, 优质的土壤环境是保证农作物高产的基础, 是民生之根本, 生物炭作为近年来新兴的重金属污染土壤修复技术, 不但可以有效地对有害重金属进行吸附、处理, 极大地减少了重金属离子的迁移速率, 为重金属污染防治提供了一个更为经济环保、更为高效的优质方案。并且其生物质原料经过裂解所带有的灰分等物质还可以为土壤的微生物群落的繁殖提供营养成分, 使土壤形成健康的内循环, 逐步修复提升土壤肥力, 是着眼未来的可持续发展选项。

但是, 目前的生物炭修复技术仍存在一些方面的不足:

1) 生物炭修复技术大多数还只是在实验室内进行, 其受体以及影响因素较为单一, 使得生物炭在土壤中的长期作用认知较为有限。所以未来的方向之一应当是尽可能地将生物炭带出实验室, 进行田间

长期试验, 以确定生物炭长期施用对土体产生的影响以及生物炭随着时间在土壤中的衰减和迁移规律[43];

2) 生物炭目前的制备仍然没有比较标准的操作方式, 并且对于制备无污染的清洁生物炭, 仍然需要在原料预处理以及制备工艺上进行进一步的研究。

虽然目前生物炭技术仍处在发展阶段, 但是其制备原料的易得性、制备过程的易操作性等特性, 注定使其拥有其他方式无法比拟的低投入高回报并且风险极低的巨大优势, 生物炭技术可能将会是未来解决土壤问题的一个主要考虑和发展方向。

基金项目

2022 年大学生创新创业训练计划项目, 项目编号: 202213663014。

参考文献

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
- [2] 李先锋, 艾绥龙, 牛玉德. 烤烟直播漂浮育苗综合配套技术研究[J]. 吉林农业, 2010(12): 93-94
- [3] Wang, S.G., Xu, Y., Norbu, N. and Wang, Z. (2018) Remediation of Biochar on Heavy Metal Polluted Soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **108**, Article ID: 042113. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042113>
- [4] 刘青松, 白国敏. 生物炭及其改性技术修复土壤重金属污染研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(11): 3285-3291+3299. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20221101.009>
- [5] 孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 等. 不同原料生物炭理化性质的对比分析[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 543-549.
- [6] 王宏胜, 唐朝生, 巩学鹏, 等. 生物炭修复重金属污染土研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1064-1077.
- [7] 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 沈玉君. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [8] Xu, X., Zhao, Y., Sima, J., et al. (2017) Indispensable Role of Biochar-Inherent Mineral Constituents in Its Environmental Applications: A Review. *Bioresource Technology*, **241**, 887-899. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.023>
- [9] 谭春玲, 刘洋, 黄雪刚, 等. 生物炭对土壤微生物代谢活动的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 333-342.
- [10] 陈龙, 李凯, 涂智等. 微波制备碱木质素生物炭对 Zn^{2+} 的吸附性能及机理[J/OL]. 环境工程: 1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.x.20230223.1926.010.html>, 2023-04-18.
- [11] 张瑞钢, 钱家忠, 陈钰辉, 等. 玉米和小麦秸秆生物炭对土壤重金属污染修复实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(3): 347-355.
- [12] 熊竹楠. 浅谈生物炭修复重金属污染土壤的机理与注意事项[J]. 山西农经, 2020(10): 74-75.
- [13] 何振嘉. 生物炭对土壤重金属污染修复研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(21): 12-13+27.
- [14] 郭炳跃, 杨鲲鹏, 张璟, 等. 二氧化锰/氨基改性生物炭对铅、镉复合污染土壤的钝化修复研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(3): 422-428.
- [15] 张春鑫, 魏勇, 钟卫红, 吴毕元. 生物炭在农业土壤重金属污染修复中的应用研究[J]. 农业技术与装备, 2022(11): 65-67.
- [16] 吴伟健, 陈艺杰, 李高洋, 等. 水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 492-503.
- [17] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075-2081.
- [18] 宗大鹏, 田稳, 李韦钰, 等. 农林废弃物生物炭钝化典型土壤重金属的机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(1): 232-245.
- [19] 周振扬. 改性生物炭对几种金属离子的吸附及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [20] 王苗苗, 陈明, 郑小俊, 等. 生物炭在土壤重金属污染修复的应用研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(6): 1729-1735+1740.
- [21] 武今巾. 核桃壳生物炭的制备及其对水与土壤中镉的去除与修复实验研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通

- 大学, 2020.
- [22] 左金龙, 袁思颖, 谭冲, 等. 水稻秸秆生物炭吸附土壤中重金属镉的研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(11): 3398-3403.
- [23] 莫爱丽, 唐惠娟, 刘俊, 杨飞. 生物炭-植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(1): 104-112.
- [24] 郑云珠, 田晓飞, 翟胜, 等. 小麦秸秆生物炭对冬小麦生长及土壤水分的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23): 84-88.
- [25] 司马小峰, 孟玉, 沈贤城, 等. 生物炭修复重金属污染土壤研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(12): 31-33.
- [26] 平森文, 朱政, 盛又聪, 等. 生物炭去除土壤中重金属效果主要影响因素的研究进展[J]. 现代农业科技, 2019(12): 153-155+160.
- [27] 盘丽珍, 许中坚, 伍泽广, 邱喜阳. 大豆秸秆生物炭对铅锌尾矿污染土壤的修复作用[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 325-329.
- [28] 陈楠, 康蒙蒙, 江璇, 等. 椰壳生物炭对水中 Cr(VI)的吸附机制研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(12): 66-69.
- [29] 叶沁辉, 陈红, 于鑫, 等. 沼渣生物炭的制备及资源化利用研究进展[J/OL]. 化工进展: 1-15.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1954.TQ.20230412.1410.002.html>, 2023-04-22.
- [30] 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 等. 生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析[J/OL]. 环境科学: 1-13.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20230316.0845.001.html>, 2023-04-22.
- [31] 尹微琴, 孟莉蓉, 郁彬琦, 等. 垫料生物炭对土壤镉的钝化作用[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 62-67.
- [32] 牛晓丛, 何益, 金晓丹, 梁媛. 酵素渣和秸秆生物炭钝化修复重金属污染土壤[J]. 环境工程, 2018, 36(10): 118-123.
- [33] 房献宝, 张智钧, 赖阳晴, 等. 新型污泥生物炭对土壤重金属 Cr 和 Cd 的修复研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1647-1656.
- [34] 丁文川, 朱庆祥, 曾晓岚, 等. 不同热解温度生物炭改良铅和镉污染土壤的研究[J]. 科技导报, 2011, 29(14): 22-25.
- [35] 来张汇, 吴山, 李涵, 吴代赦. 不同热解温度的秸秆源生物炭对 Cd(II)吸附机理[J]. 南昌大学学报(理科版), 2022, 46(4): 446-453.
- [36] 车晓冬, 丁竹红, 胡忻, 陈逸珺. 微波加热硝酸氧化改性稻壳基生物质炭对 Pb(II)和亚甲基蓝的吸附作用[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1773-1780.
- [37] 范家俊, 张又弛, 蔡超, 侯艳伟. 巯基改性生物炭吸附水中的镉[C]/中国土壤学会土壤环境专业委员会. 中国土壤学会土壤环境专业委员会第二十次会议暨农田土壤污染与修复研讨会摘要集: 2018 年卷. 北京: 中国土壤学会土壤环境专业委员会, 2018.
- [38] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3562-3574.
- [39] 李佳霜, 冒国龙, 赵松炎, 胥思勤. 改性生物炭对 Sb(III)的吸附行为及机理[J]. 化工环保, 2018, 38(5): 546-551.
- [40] 李佳燕, 陈兰, 喻婕, 等. 生物炭制备方法及其应用的研究进展[J]. 广州化工, 2019, 47(7): 22-24+33.
- [41] 占国艳, 陈振宁, 童非, 等. 不同秸秆材料与制备工艺下生物炭性质及对土壤重金属的钝化效应[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(1): 86-95.
- [42] 张瑞卿, 邢泽炳, 吴晓东, 等. 不同制备工艺中柠条生物炭的理化性质研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(11): 4-7.
- [43] 鲁秀国, 武今巾, 过依婷. 生物炭修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(5): 1172-1177.