

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20230916001

赵雪, 赵欣鑫, 赵佐平, 等. 秸秆生物质炭处理重金属废水研究现状及展望[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(1): 31-39

Zhao X, Zhao X X, Zhao Z P, et al. Treatment of heavy metal wastewater by straw biochar: Current knowledge and future perspectives [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(1): 31-39 (in Chinese)

秸秆生物质炭处理重金属废水研究现状及展望

赵雪¹, 赵欣鑫^{1,2,*}, 赵佐平^{1,2,#}, 杨超¹, 邱若琪¹, 丁聪¹, 杨乐¹, 陈旭杰¹

1. 陕西理工大学化学与环境科学学院, 汉中 723001

2. 陕西省催化基础与应用重点实验室, 汉中 723001

收稿日期: 2023-09-16 录用日期: 2023-11-14

摘要: 秸秆生物质炭作为一种新型吸附剂, 具有原料丰富、可再生、低成本等优势, 在重金属废水处理领域具有广阔的应用前景。本文综述了秸秆生物质炭材料制备, 分析了秸秆生物质炭对重金属吸附机制, 讨论了秸秆生物质炭在重金属废水处理中的应用, 并结合生物质炭材料的制备和应用中存在的问题, 提出吸附机理、吸附容量和再生性能等有待进一步深入研究的展望。该综述加深了对重金属废水处理中秸秆生物质炭的作用机制的科学认识, 为秸秆生物质炭材料的开发及其在重金属废水净化领域的应用提供了重要参考。

关键词: 秸秆生物炭; 重金属; 吸附; 废水处理

文章编号: 1673-5897(2024)1-031-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Treatment of Heavy Metal Wastewater by Straw Biochar: Current Knowledge and Future Perspectives

Zhao Xue¹, Zhao Xinxin^{1,2,*}, Zhao Zuoping^{1,2,#}, Yang Chao¹, Qiu Ruoyi¹, Ding Cong¹, Yang Le¹, Chen Xujie¹

1. School of Chemical & Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Catalysis, Hanzhong 723001, China

Received 16 September 2023 accepted 14 November 2023

Abstract: Straw biochar, as an emerging adsorbent, boasts advantages such as abundant availability, renewability, and cost-effectiveness, making it highly promising in treating heavy metal wastewater. This paper presents a comprehensive review of the preparation methods for straw biochar materials, delves into the adsorption mechanism of straw biochar for heavy metals, discusses its application in heavy metal wastewater treatment, and also highlights areas for further in-depth research, including the adsorption mechanism, adsorption capacity, and regeneration performance, in lights of existing challenges in their preparation and application. This paper deepens the scientific un-

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0255); 陕西省秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2023-062); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBNY-272); 陕西省教育厅科研计划项目(23JK0364); 陕西理工大学人才启动项目(SLGRCQD2309); 陕西理工大学大学生创新创业训练计划项目(SLGHX202301-04)

第一作者: 赵雪(2002—), 女, 学士, 研究方向为水环境污染与修复, E-mail: 17391829063@163.com

* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: zhaoxinxin@sntu.edu.cn; zhaoxx618@163.com

共同通信作者 (Co-corresponding author), E-mail: zhaozuoping@126.com

derstanding of the action mechanism of straw biochar in heavy metal wastewater treatment, and provides an important reference for the development of straw biochar materials and application of straw biochar materials in the purification of heavy metal wastewater.

Keywords: straw biochar; heavy metals; adsorption; wastewater treatment

城市工业的发展及人口的急剧增长,诱导了较多环境污染问题。工业废水中重金属等有毒有害、难降解污染物向河流的排放,导致地下水、植被等沿岸生态环境损害问题日益突出,严重威胁着生态系统的稳定和人类的生命健康。秸秆生物质炭作为一种高效吸附剂,具有比表面积较大、多孔特质、官能团丰富等优良特性,在土壤及水体重金属污染修复领域逐步得到广泛关注。中国作为世界农业大国之一,秸秆等农业副产物储量巨大。利用废弃秸秆制备生物质炭,具有原料来源广泛、成本低等优势,不仅有助于解决农业废弃物处理难题,还可实现农业废弃物的高效资源化利用^[1]。因此,秸秆生物质炭的高效利用对重金属污染的治理及人类生命安全的保障具有重大意义。

秸秆生物质炭材料在重金属废水处理中极具潜力,可基于其强吸附性能对废水中多种重金属去除,也可通过离子交换作用完成废水中重金属污染物的去除,还可充当催化剂氧化废水中重金属离子。以往研究通过制备比表面积大、孔隙率高、结构稳定的生物质炭材料、利用生物质炭表面活性作为载体制备复合材料等途径强化生物质炭的重金属去除效率。然而,由于秸秆生物质炭吸附性能的局限性及可能的环境问题,其在重金属废水处理的大规模应用上还存在一些挑战。本文介绍了秸秆生物质炭材料制备原理,综述了秸秆生物质炭对重金属的吸附机制,阐述了秸秆生物质炭在重金属废水处理中的应用。此外,基于现有研究,系统分析了秸秆生物质炭材料存在的问题及其发展趋势,发现秸秆生物质炭材料在土壤及水体重金属污染修复领域具有广阔前景,而秸秆生物质炭处理重金属废水研究仍有待进一步深入探索。

1 秸秆生物质炭材料制备 (Preparation of straw biochar materials)

秸秆生物质炭,是以作物秸秆为原料,在限氧条件下经过热裂解作用产生的固体炭材料。秸秆生物质炭原料主要包括以禾谷类、豆类、薯类为主的粮食作物秸秆,以纤维类、油料类、糖料类为主的经济作物秸秆。其中,水稻、小麦、玉米等作物在中国种植

面积大、产量高,是制备秸秆生物质炭的典型原料,在水处理、土壤修复、碳封存等领域具有广阔的应用潜力^[1-2]。

秸秆炭化技术是作物秸秆在高温(400 ~ 700 ℃)限制性供氧条件下热解制备技术。根据热解终温、升温速度及反应停留时间的不同,可将秸秆炭化技术分为慢速热解、中速热解、快速热裂解和闪速热解等^[2]。按照设备技术特征,生物质炭化设备可分为固定床式和移动床式等^[3-4]。根据可燃气炉内的流动方向,固定床气化可分为上吸式、下吸式和横吸式3种。移动床式生物质炭化设备通常由两部分组成:气化炉和气-固分离器。在气化炉中,生物质与制气剂混合,形成流化床,使生物质均匀地分解。流化床内的物料不停地上下翻动,以保持气体和物料的充分混合。移动床生物炭化技术具有生产连续性和生产率较高等优点。近年来,秸秆生物质炭化设备开发逐步取得重要进展,尤其是移动床生物质炭化设备,具有生产连续性和生产率较高等优点,成为该领域研究热点。

秸秆生物质炭的常用制备方法为限氧热解法和水热炭化法。用质量分数为10%的KOH溶液将粉碎好的秸秆浸渍24 h,用清水冲洗调至中性;在125 ℃的条件下恒温干燥24 h后,放入瓷舟中;置于氮气(350 mL·min⁻¹)保护的管式炉内,以10 ℃·min⁻¹的升温速率从室温加热至350 ℃或410 ℃,保温1.5 h;热分解后,随炉冷却至室温;使用蒸馏水洗涤至中性,放入真空干燥箱(125 ℃)干燥24 h,收集生物质炭备用(图1)^[4]。

生物质炭原料来源广泛,主要包括农林废弃物(作物秸秆、枯枝落叶等),畜牧养殖废弃物(动物粪便等),工业生产废弃物(市政污泥、木屑、甘蔗渣等),生活废弃物(厨余垃圾、生活垃圾等)。生物质炭对重金属吸附性能的影响因素较多,如生物质炭种类、制备温度、pH、重金属种类、生物质炭添加量、污染物浓度等。以往研究发现^[5],玉米秸秆生物质炭对镉、铅2种金属的去除效率达到90%以上,且最大吸附量远大于小麦秸秆炭和花生壳炭。姚顺宇等^[6]在500 ℃下制备了水稻生物质炭和玉米生物质炭,研

究表明,在 pH 为 7~8 时,2 种秸秆生物质炭对镉的去除效果最好;此外,生物质炭添加量显著影响生物质炭的可利用吸附位点,生物质炭对镉的去除效率随生物质炭量的增加迅速上升,直至吸附位点饱和后,吸附效率缓慢下降。因此,生物质炭材料在实际应用

中,应选择最佳制备条件和最佳应用场景。热解温度是生物炭结构性质的一个重要影响因素之一。在 400~800 °C 时,随着热解温度的升高,生物质炭空隙数量增加,孔结构发育更加完全,比表面积也有所增大^[7]。在 800 °C 以上时,生物质炭结构变得更加稳定(图 2)。

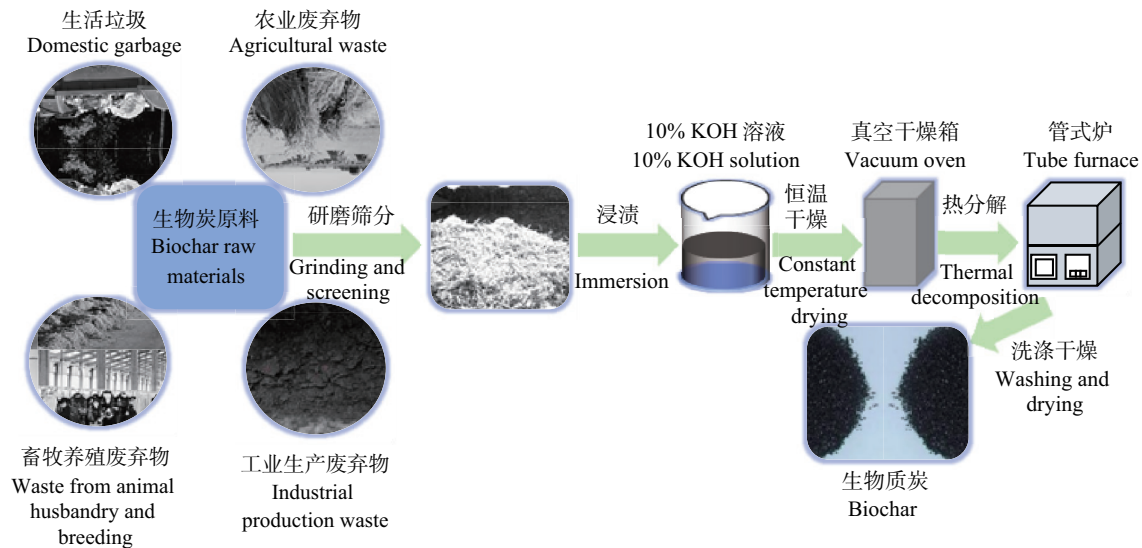


图 1 生物质炭制备示意图
Fig. 1 Diagram of biochar preparation

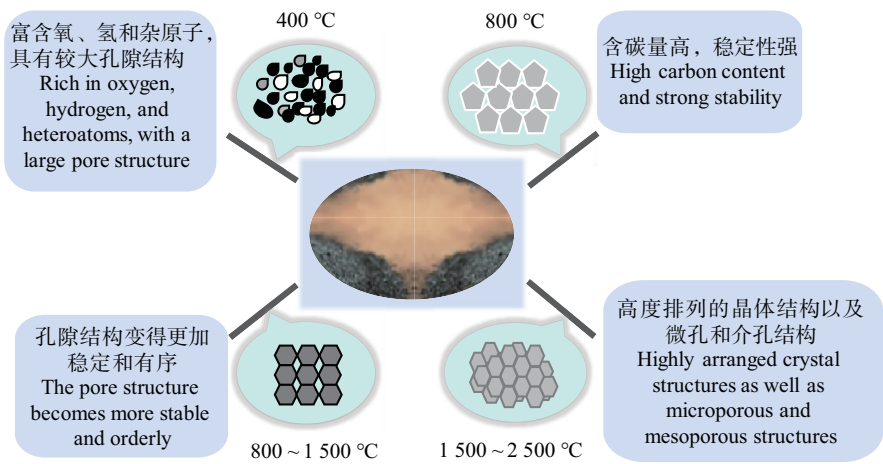


图 2 不同温度下生物质炭结构示意图
Fig. 2 Structure of biomass char at different temperatures

2 秸秆生物质炭对重金属吸附机制 (Mechanism of heavy metal adsorption by straw biochar)

秸秆生物质炭为高孔隙率、大比表面积吸附剂,对重金属具有良好的吸附性能。秸秆生物质炭对重金属吸附机制主要包括表面吸附、离子交换、沉淀作用、吸附竞争等^[7]。(1)表面吸附:生物质炭表面分子与重金属离子间形成范德华力作用。表面吸附作用

对重金属的吸附通常仅游离在生物质炭表层,结合力较小,具有可逆性。(2)离子交换:生物质炭材料表面官能团可与重金属离子进行离子交换反应,将重金属离子吸附在炭材料表面,并释放出其他非重金属离子。离子交换作用可促进重金属离子的吸附速率^[8]。(3)沉淀作用:生物质炭中矿物组分可与重金属离子发生共沉淀作用,生成难溶化合物。(4)吸附竞

争;生物质炭表面官能团可与溶液中其他阴离子发生竞争吸附,从而抑制重金属离子的吸附^[9]。生物质炭的比表面积、孔径结构和分布状况是影响其物理吸附的主要因素,微观表面的官能团的活性决定其化学吸附性能。其中,不同放大倍数下不同生物质炭表面的扫描电镜图可指示出吸附材料的表面形貌特征,为吸附剂的吸附活性提供重要参考^[10]。

秸秆生物质炭表面通常含有丰富的羟基、羧基和氨基等官能团,可与重金属离子发生化学反应,形成键合或络合结构,从而固定重金属离子。在不同pH条件下,重金属离子和生物质炭表面的电荷状态会发生变化,从而影响重金属的吸附行为^[11]。姚顺宇等^[6]研究发现,随着pH的不断升高,水稻秸秆和玉米秸秆对 Cd^{2+} 的吸附能力先上升后下降,当pH为8时,吸附能力最佳。在不同热解温度和热解时间下,生物质炭中H、N、S等含量会随热解温度升高和热解时间增加而降低,导致生物质炭中含氧/含氮官能团降低,从而削弱生物质炭对重金属的吸附能力。生物质炭原料来源广、种类多、成本低、环境稳定性高。尽管大多秸秆生物质炭对重金属均有良好的吸附效果,但秸秆种类、目标重金属种类和含量、以及吸附机理会对生物质炭的重金属吸附效率产生影响。以往研究报道,小麦秸秆生物质炭含有较高磷酸盐与碳酸盐等无机矿物及相对较高的阳离子交换量,可与一些重金属离子发生沉淀,从而有效去除 Pd^{2+} 与 Cd^{2+} ,其主要机制为沉淀作用和离子交换作用。生物质炭中磷酸根离子、碳酸根离子会诱导反应环境pH升高,导致环境中 OH^- 浓度升高,从而阴离子与重金属离子反应生成难溶性沉淀^[12]。玉米秸秆生物质炭含有较高有机碳和含氧官能团,比表面积较大,具有较多的表面结合位点和较好的孔隙结构,玉米秸秆生物质炭对重金属的固定化主要通过表面结构对重金属的吸附作用及含氧官能团与重金属的络合作用完成^[13]。阳离子- π 键作用也是生物质炭吸附重金属的重要吸附机制之一,阳离子型重金属空缺d轨道为 π 电子提供位置,形成紧密结构^[14],进而有效吸附重金属离子。此外,生物质炭对重金属吸附机制中,物理性吸附作用是基于吸附材料与重金属之间的带电差异性,诱导其产生静电作用,利用异性相吸性质,基于静电引力产生的表面吸附能力,增强生物质炭对重金属的吸附效率。

秸秆生物质炭吸附重金属主要分为3个阶段。(1)秸秆生物质炭通过表面吸附作用吸附废水中重

金属离子,与秸秆生物质炭中含有的可溶性碳酸盐,磷酸盐结合生成沉淀并且发生离子交换作用,另一方面,秸秆生物质炭的添加会提高废水中pH值,促使游离态的重金属离子形成沉淀;(2)重金属离子被材料表面活性位点吸附,与生物炭表面含氧官能团发生络合作用;(3)重金属离子经过孔道被秸秆生物质炭内部活性位点吸附,生物质炭的芳香结构($\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{O}$)与重金属离子发生阳离子- π 作用,这一阶段是生物质炭吸附重金属的主要过程。

秸秆生物质炭材料对重金属的吸附过程,通常不仅仅为单一吸附机制,而是多种机制共同作用(图3)。此外,特定的秸秆生物质炭材料在吸附不同目标重金属时,吸附机制也存在较大差异。秸秆生物质炭的改性可通过强化吸附机制,增加吸附材料对重金属的吸附容量和吸附选择性。

3 秸秆生物质炭在重金属废水处理中应用 (Application of straw biochar in the treatment of heavy metal wastewater)

秸秆生物质炭具有良好的吸附性能和环境友好性,在废水处理中通常表现出较好的去除效果,特别是对于一些常见的重金属,如铅、镉、铬等(图4)。秸秆生物质炭对重金属的吸附性能主要取决于吸附剂表面的化学性质、孔隙结构以及与重金属之间的亲和性等。秸秆生物质炭的孔隙结构和丰富的官能团通常可为污染物吸附提供良好的吸附位点,有利于重金属的吸附去除。不同重金属在秸秆生物质炭上的吸附效率可能有所不同,这主要与重金属的理化性质有关,包括电荷、离子半径和形态等。对于带正电荷的重金属离子,如铅和镉,秸秆生物质炭通常表现出较好的吸附效果。

秸秆生物质炭在重金属废水处理中的应用,主要涉及吸附、离子交换和催化氧化等作用机制。在重金属废水处理中,秸秆生物质炭通过对重金属的吸附固定化,降低废水中重金属离子浓度,以达到净化废水的目的^[11]。秸秆生物质炭拥有较大比表面积、多孔结构、丰富的表面活性基团、含多种矿物盐等优良特性。因此,秸秆生物质炭具有较大的吸附容量和较高的吸附速率,在重金属废水处理中具有重要应用前景。有研究报道,秸秆生物质炭的孔隙结构和表面官能团,对废水中铅离子的吸附去除具有重要贡献,铅离子被物理捕获并储存在生物质炭的孔隙中^[15]。赵欢欢等^[16]的研究表明,生物质炭对土壤中铅具有固定化作用,施加生物质炭可有效降

低小白菜组织中的铅含量,且小白菜组织中铅含量随生物质炭施加比例的增加而降低。秸秆生物质炭通常能够在较低的铅浓度下,表现出较高的吸附效率,去除效率可达到 60% ~ 90%。但在高浓度含铅废水中,去除效率可能会降低。生物质炭的多孔结构和丰富的氧化物基团,为重金属离子的吸附提供了丰富的反应活性位点,在物理和化学吸附作用下可降低重金属废水中污染物浓度,实现重金属废水的净化^[17]。秸秆生物质炭作为极具潜力的吸附材料,其吸附机制和效果在不同重金属之间可能存在

一些普适性规律。通常,秸秆生物质炭含有丰富的表面官能团,如羟基、羧基等,具有良好的重金属亲和性,可以吸附诸多带正电荷的重金属离子。然而,不同重金属的电荷、形态和溶解度等因素仍会对吸附效率具有一定影响。

生物质热解制备生物质炭过程中,会形成丰富的含氧官能团、持久性自由基和氧化还原活性基团,这些组分能够将电子转移给溶解氧、 H_2O_2 和过硫酸盐,形成活性氧自由基和硫酸根自由基。在适宜的 pH 环境条件下,官能团上失去质子并且与金属阳离

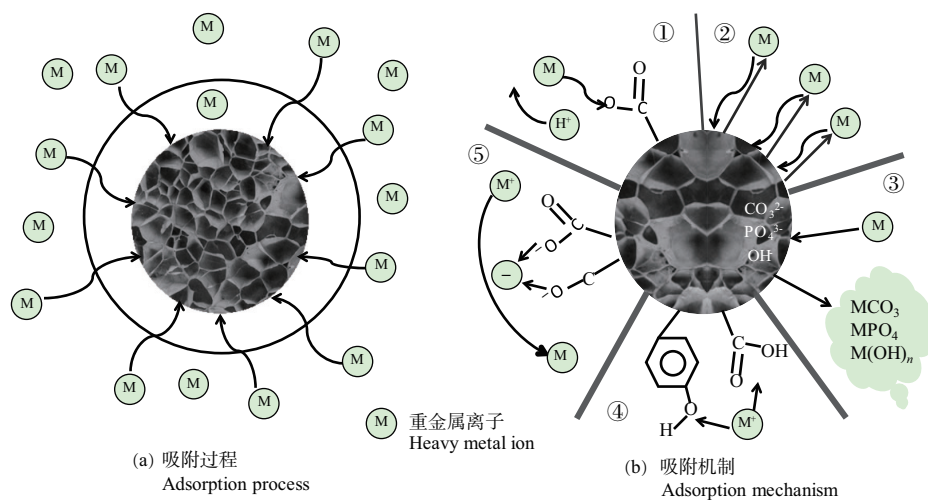


图 3 秸秆生物质炭对重金属的吸附过程 (a) 和吸附机制 (b)
注:图(b)中,①离子交换;②物理吸附;③沉淀作用;④络合作用;⑤化学还原。
Fig. 3 The adsorption process (a) and adsorption mechanism (b) of heavy metals by straw biochar
Note: in Figure 3(b), ① Ion exchange; ② Physical adsorption; ③ Precipitation; ④ Complexation; ⑤ Chemical reduction.

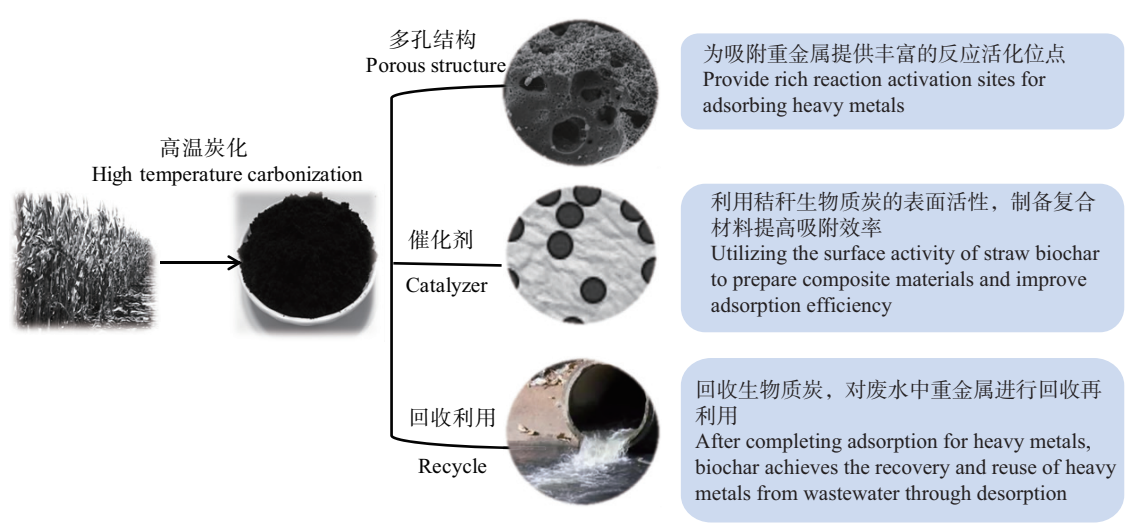


图 4 生物质炭对重金属废水净化特性
Fig. 4 Purification characteristics of biochar for heavy metal wastewater

子发生作用,从而增大吸附量。生物质炭官能团包括酸性、碱性和氧化还原性等,可以与废水中的离子发生交换反应,将重金属离子从废水中去除。离子交换是一种高效的重金属废水处理方法,通过改变废水中离子的浓度和组成,实现废水的净化。如在一个含有铅离子(Pb^{2+})的废水系统中,将秸秆生物质炭添加到废水中。酸性条件下,秸秆生物质炭表面的羟基($-\text{OH}$)会脱去质子(H^+),形成负电荷的位点。这些负电荷位点可以与铅离子发生化学吸附作用,将铅离子从废水中吸附到炭表面上。

此外,秸秆生物质炭还可作为催化剂催化氧化废水中的重金属离子^[18]。通过表面催化反应,秸秆生物质炭能够促使重金属离子发生氧化或还原反应,从而改变污染物理化性质。如在催化作用下,汞离子可能会发生表面还原或氧化反应,转化为较不溶于水的形态,从而有效去除。这种方法利用了秸秆生物质炭的表面活性,提高了重金属离子的催化氧化效率。利用这一特性,可以将过渡金属、杂原子、半导体等负载到生物质炭上,制备复合材料从而进一步提升生物质炭催化去除废水中重金属的能力。汤施展等^[19]在生物质炭钝化养猪废水重金属研究中,发现随着生物质炭含量增加,有效态重金属浓度升高,并且生物质炭本底含量对 Fe、Cu、Se 影响较大。

秸秆作为农作物副产物,秸秆生物质炭的应用不仅可实现农业废弃物资源的有效利用,还可治理环境污染,具有环境友好性^[20]。而且,秸秆生物质炭经过高温炭化和处理,不易分解,具有较高的化学稳定性和热稳定性,减少了处理过程中的风险。秸秆生物质炭在完成重金属离子吸附过程后,可以通过热解等方法重新处理,使其脱附重金属,从而实现废水中重金属资源的回收再利用,无二次污染的隐患。然而,生物质炭材料在废水处理的应用中,可能会受到共存物质和环境因素的干扰,这些因素(如共存离子、pH 值、有机物、温度、溶解氧、废水流速和接触时间等)可能会显著影响其性能和去除效果。其中,温度是一个重要而复杂的因素,温度会影响吸附过程的速率和平衡吸附量,并且较高温度可能会导致反向吸附反应的增加,即已吸附的重金属离子从生物质炭表面解吸回到废水中,这可能会影响废水处理系统的稳定性和重金属的再循环;pH 值会直接影响重金属的形态和生物质炭的表面电荷,从而影响吸附效果,是秸秆生物质炭净化重金属废水的另一个

重要影响因素;共存物质可能会与目标重金属竞争吸附位点,或与秸秆生物质炭表面发生反应,从而影响材料吸附性能。

4 存在问题 (Existing problems)

秸秆生物质炭材料作为吸附剂和催化剂处理重金属废水,逐渐成为水污染控制领域的研究热点。秸秆生物质炭能够同时实现固体废物资源化、水污染处理、固碳等多重效益,是绿色友好、低价化、高效化的重要新型环境友好材料。秸秆生物质炭的研发在重金属废水处理领域具有广阔的应用前景,但仍需要进一步研究和发展以攻关现存问题。存在问题如下。

(1)由于秸秆生物质炭的比表面积和微细孔容的限制,其吸附能力具有一定局限性。而且,秸秆生物质炭对重金属离子的吸附过程较慢,需要较长的接触时间来实现有效吸附,这可能导致处理效率较低。当处理大量重金属废水时,则需要较大量的生物质炭材料和较长吸附时间,增加了处理的成本^[21]。

(2)秸秆生物质炭对不同重金属的吸附性能存有差异,对部分重金属离子的吸附能力较弱。此外,秸秆生物质炭在重金属吸附过程中易受其他物质干扰,导致吸附效果下降。因此,需要进一步优化和改进材料的吸附性能,针对性地选择合适的吸附剂^[22]。

(3)秸秆生物质炭的吸附容量会受到孔隙容积的限制,对于高浓度重金属废水处理,吸附容量可能较低,需要进行频繁的更换或再生。秸秆生物质炭在废水处理后的再利用问题也需要得到有效解决。秸秆生物质炭的再生过程较为复杂,需要高温或化学方法,可能会造成耗能较多或产生其他环境问题,限制了实际应用^[23-24]。因此,秸秆生物质炭完成对重金属吸附后,如何有效地再生和回收尚需进一步研究。

(4)秸秆生物质炭在废水处理后可能会生成一定量的废弃物,如被吸附的重金属离子与炭材料的结合体,需要进行安全处置,以避免再次造成环境污染。而且,诸多未知领域仍需进一步深入探索,实践及实际应用尚不成熟^[25]。

尽管存在一些问题,但秸秆生物质炭作为一种环保、可再生的“以废治废”材料,在重金属废水处理领域仍具有巨大发展潜力。进一步的研究和技术改进,有望解决上述问题,提高秸秆生物质炭的废水处理效率和应用性^[26]。

5 结论与展望 (Conclusion and prospect)

生物质炭作为近年来一种新型的吸附剂和催化剂,对废水中诸多重金属都具有良好的去除效果,成为环境领域关注的热点。目前,许多科研人员通过大量研究,在生物质炭对污水中重金属的去除机理研究中取得了一定的进展。但是,生物质炭的性质会因制备方法的不同而改变,且水体中重金属污染情况复杂多样。因此,生物质炭对重金属污染处理的机制研究将是未来的一个关注热点和研究重点。此外,生物质炭在不同温度、pH 值下,对不同重金属的去除效果有所不同,诸多未知性质、功能以及影响因素有待进一步深入研究。

寻找更廉价高效的生物质炭、提高去除效率、强化生物质炭的再生利用性,是未来研究的重要方向^[27-28]。进一步通过调整改进生物质炭的制备工艺和调控材料的孔隙结构,改变炭化条件,选择最佳炭化剂,优化炭材料的孔结构和表面性质,提高其吸附性能、吸附容量和选择性,降低能源消耗和环境污染^[29]。此外,还可以将秸秆生物质炭与其他材料如纳米材料、金属氧化物、生物酶、功能化聚合物等相结合,形成多功能新型复合材料,实现对多种污染物的同时去除,进一步提高重金属离子的吸附效能和再生利用^[30]。同时,探索秸秆生物质炭的再生和回收技术,如电解法、萃取法等,通过热解或其他方法进行再生,以回收其中的重金属资源,实现废水处理中重金属资源的有效回收利用,有助于节约资源,促进经济循环发展^[31]。此外,还可以探索秸秆生物质炭在其他领域的应用,如电池、催化剂等,结合电化学、光催化、生物降解等新兴技术,形成新型的重金属废水处理技术^[32]。将秸秆生物质炭作为催化剂或载体,实现重金属废水的高效处理,提升废水处理效率、降低能耗,并使秸秆生物质炭的应用更加多样化^[33]。研究开发新的功能化秸秆生物质炭材料,提高其吸附和离子交换性能,将秸秆生物质炭与其他处理技术(如离子交换、膜分离等)相结合,构建高效的重金属废水处理系统,实现综合性能的最大化^[34]。秸秆生物质炭不仅可以用于重金属废水处理,还可以用于土壤改良、固体废物处理等方面,实现资源的综合利用^[35]。随着技术的成熟和推广,秸秆生物质炭还可以在工业和农业领域的重金属废水处理中得到广泛应用。例如冶金、电镀、化工等行业,以及农田水源治理、集中饮用水处理等领域^[36]。目前,大多研究局限于生物质炭对单一重金属的吸附去

除,而在实际的废水中大多为复合体污染物,多种金属被同时吸附时存在的相互作用以及更为复杂的吸附机理有待进一步考察。

综上,秸秆生物质炭作为一种环保、可再生的绿色材料,其未来展望是多元化、高效化和可持续化,具有广泛的应用前景。通过不断的研究和技术改进,提供更可靠的解决方案,秸秆生物质炭在重金属废水处理领域有望发挥更大的作用,为生态环境保护和绿色可持续发展做出更大贡献。但是,秸秆生物质炭的吸附机理、吸附容量和再生性能尚需进一步深入研究,以有效强化其应用效果。

通信作者简介:赵欣鑫(1992—),男,博士,讲师,主要研究方向为土壤及水环境污染与修复。

共同通信作者简介:赵佐平(1982—),男,博士,教授,主要研究方向为环境污染迁移及转化机理。

参考文献 (References):

- [1] 潘根兴,李恋卿,刘晓雨,等.热裂解生物质炭产业化:秸秆禁烧与绿色农业新途径[J].科技导报,2015,33(13):92-101
Pan G X, Li L Q, Liu X Y, et al. Industrialization of biochar from biomass pyrolysis: A new option for straw burning ban and green agriculture of China [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(13): 92-101 (in Chinese)
- [2] Meng J, He T Y, Sanganyado E, et al. Development of the straw biochar returning concept in China [J]. Biochar, 2019, 1(2): 139-149
- [3] 周建斌,马欢欢,章一蒙.秸秆制备生物质炭技术及产业化进展[J].生物加工过程,2021,19(4):345-357
Zhou J B, Ma H H, Zhang Y M. Technology and industrialization progress of biochar preparation from straw [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2021, 19(4): 345-357 (in Chinese)
- [4] 鱼银虎,贺永强,贾李娟,等.小麦秸秆生物质炭制备及性质研究[J].环境科学导刊,2022,41(5):8-11
Yu Y H, He Y Q, Jia L J, et al. Preparation and properties of biochar from wheat straw [J]. Environmental Science Survey, 2022, 41(5): 8-11 (in Chinese)
- [5] 刘莹莹,秦海芝,李恋卿,等.不同作物原料热裂解生物质炭对溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附特性[J].生态环境学报,2012,21(1):146-152
Liu Y Y, Qin H Z, Li L Q, et al. Adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} in aqueous solution by biochars produced from the pyrolysis of different crop feedstock [J]. Ecology and En-

- vironmental Sciences, 2012, 21(1): 146-152 (in Chinese)
- [6] 姚顺宇, 赵平南, 王坤, 等. 两种生物质炭对水中镉离子吸附效果的研究[J]. 化学与粘合, 2020, 42(4): 253-256
- Yao S Y, Zhao P N, Wang S, et al. Study on the adsorption effect of two kinds of biochar on the cadmium ions in water [J]. Chemistry and Adhesion, 2020, 42(4): 253-256 (in Chinese)
- [7] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 1-18
- Zhang W M, Xiu L Q, Wu D, et al. Review of biochar structure and physicochemical properties [J]. Acta Agonomica Sinica, 2021, 47(1): 1-18 (in Chinese)
- [8] 郑楷丽, 刘玉真, 王铮, 等. 巯基生物质炭对水中重金属的吸附研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(21): 73-75
- Zheng K L, Liu Y Z, Wang Z, et al. Research progress on adsorption of heavy metals from water by sulfhydryl biochar [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(21): 73-75 (in Chinese)
- [9] 刘烨, 周佳浩. 生物炭对重金属离子的竞争吸附作用研究[J]. 当代化工, 2022, 51(9): 2105-2109, 2113
- Liu Y, Zhou J H. Competitive adsorption of heavy metal ions on biocarbon [J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(9): 2105-2109, 2113 (in Chinese)
- [10] 杨莉, 付婧, 文子伟, 等. 6种低温生物质炭的制备及结构表征[J]. 吉林农业大学学报, 2021, 43(5): 565-573
- Yang L, Fu J, Wen Z W, et al. Preparation and structure characterization of six kinds of low-temperature biochar [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021, 43(5): 565-573 (in Chinese)
- [11] 宋少花, 雷绒娟, 梁斌, 等. 生物质炭去除水中重金属Pb(II)的研究进展[J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(11): 19-21
- Song S H, Lei R J, Liang B, et al. Research progress on removal of heavy metal Pb(II) from water by biomass charcoal [J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2022, 51(11): 19-21 (in Chinese)
- [12] 张利亚, 王留成, 李心雨, 等. 小麦秸秆低温热解制备生物质炭的性能研究[J]. 磷肥与复肥, 2018, 33(6): 24-27
- Zhang L Y, Wang L C, Li X Y, et al. Study on properties and preparation of biochar from wheat straw by low-temperature pyrolysis [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 33(6): 24-27 (in Chinese)
- [13] 许端平, 苗丹, 吴瑶, 等. 玉米秸秆生物质炭对铅的吸附动力学特征[J]. 应用化工, 2017, 46(8): 1466-1471
- Xu D P, Miao D, Wu Y, et al. Adsorption kinetic characteristics of lead on biochars derived from corn straw [J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(8): 1466-1471 (in Chinese)
- [14] 周丹丹, 陶欢, 杨万鑫, 等. 磁性生物炭合成及其对重金属吸附机制的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42: 1672-2043
- Zhou D D, Tao H, Yang W X, et al. Review of synthetic methods for magnetic biochar and its adsorption mechanism for heavy metals [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42: 1672-2043 (in Chinese)
- [15] 蔡名旋, 朱小平, 黑亮, 等. 利用废弃物制备生物炭资源化研究与应用进展[J]. 广东农业科学, 2019, 46(3): 85-92
- Cai M X, Zhu X P, Hei L, et al. Research and application progress on the preparation of biological carbon from waste [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(3): 85-92 (in Chinese)
- [16] 赵欢欢, 宋香琳, 程灿, 等. 麦秸生物质炭对Pb(II)的吸附研究[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1112-1116
- Zhao H H, Song X L, Cheng C, et al. Adsorption of Pb(II) by wheat straw biochar [J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1112-1116 (in Chinese)
- [17] 刘凯楠, 李国峰, 云梁, 等. 农业废弃生物质在废水处理中的应用研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(3): 119-121
- Liu K N, Li G F, Yun L, et al. Research progress on the application of agricultural waste biomass in wastewater treatment [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52(3): 119-121 (in Chinese)
- [18] 马孟园, 钱欢, 贾露露, 等. 生物质炭对重金属的修复及机理研究进展[J]. 广州化工, 2018, 46(16): 23-26
- Ma M Y, Qian H, Jia L L, et al. Research progress on recovery and mechanism of biomass charcoal on heavy metals [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(16): 23-26 (in Chinese)
- [19] 汤施展, 陈中祥, 黄晓丽, 等. 水产品中砷形态分析研究进展[J]. 水产学杂志, 2019, 32(2): 49-55
- Tang S Z, Chen Z X, Huang X L, et al. Progress in analysis of arsenic speciation in fishery products [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2019, 32(2): 49-55 (in Chinese)
- [20] 华子砾, 张素玲, 张栋, 等. 生物质炭的制备及其在吸附方面的研究进展[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 69-75
- Hua Z L, Zhang S L, Zhang D, et al. Preparation method of biochar and its application for pollutants adsorption: A review [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2021, 41(1): 69-75 (in Chinese)
- [21] 陈思琪, 韩璐, 宁丹, 等. 生物炭吸附水体中重金属的机理及应用[J]. 上海化工, 2023, 48(2): 60-64

- Chen S Q, Han L, Ning D, et al. Adsorption mechanism of heavy metals in water by biochar and its application [J]. Shanghai Chemical Industry, 2023, 48(2): 60-64 (in Chinese)
- [22] 韩鲁佳, 李彦霏, 刘贤, 等. 生物炭吸附水体中重金属机理与工艺研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 1-11
- Han L J, Li Y F, Liu X, et al. Review of biochar as adsorbent for aqueous heavy metal removal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 1-11 (in Chinese)
- [23] 李瑞月, 陈德, 李恋卿, 等. 不同作物秸秆生物炭对溶液中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 1001-1008
- Li R Y, Chen D, Li L Q, et al. Adsorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} in aqueous solution by biochars derived from different crop residues [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(5): 1001-1008 (in Chinese)
- [24] 常飞, 程文博, 张天旭. 生物炭吸附去除水中有机污染物的研究进展[J]. 能源研究与信息, 2018, 34(4): 187-194
- Chang F, Cheng W B, Zhang T X. Research progress on organic pollutants removal from water by adsorption of biochar [J]. Energy Research and Information, 2018, 34(4): 187-194 (in Chinese)
- [25] 刘蕊, 罗璇, 李松, 等. 生物炭在土壤中的老化及其吸附重金属的研究进展[J]. 环境监测管理和技术, 2020, 32(5): 1-5
- Liu R, Luo X, Li S, et al. Biochar aging in soils and its influence on adsorption of heavy metals: A review [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2020, 32(5): 1-5 (in Chinese)
- [26] 谭小飞, 刘云国, 曾光明, 等. 生物炭材料及其在水体中污染物去除领域的应用[J]. 科学观察, 2019, 14(6): 44-47
- [27] 孙康, 缪存标, 何跃. 生物质炭在重金属污染土壤修复中的应用研究现状[J]. 生物质化学工程, 2017, 51(4): 66-74
- Sun K, Miao C B, He Y. Prospects for the utilization of biochar on remediating soils polluted by heavy metal [J]. Biomass Chemical Engineering, 2017, 51(4): 66-74 (in Chinese)
- [28] 王磊, 苏本营, 香宝, 等. 生物质炭对土壤-植物系统重金属迁移转化的影响机制[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 66-72
- Wang L, Sun B Y, Xiang B, et al. The migration and transformation of heavy metal in crop-soil system affected by biochar: A review [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S2): 66-72 (in Chinese)
- [29] 姜禹奇, 都琳. 生物质炭修复重金属镉污染水体的研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(2): 201-204
- Jiang Y Q, Du L. Study on biomass charcoal remediation of heavy metal cadmium polluted water [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(2): 201-204 (in Chinese)
- [30] 连斌, 吴骥子, 赵科理, 等. 铁锰氧化物-微生物负载生物质炭材料对镉和砷的吸附机制[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1584-1595
- Lian B, Wu J Z, Zhao K L, et al. Novel insight into the adsorption mechanism of Fe-Mn oxide-microbe combined biochar for Cd(II) and As(III) [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1584-1595 (in Chinese)
- [31] Zhang Y, Luo Y, Cheng X, et al. Sustainable adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by agriculture residue: Biomass charcoal [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 221: 388-393
- [32] Sun Y, Zhao D, Shi X, et al. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution using modified wheat straw biochar: Adsorption kinetics, isotherms and mechanism [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 99: 220-229
- [33] Liu X, Zhang S. Preparation and characterization of biomass-derived activated carbon for heavy metal ions removal from wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 62-69
- [34] Wang B, Gao Y, Fang J, et al. Adsorption of heavy metal ions by different types of biochar: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 858-867
- [35] 宋少花, 宋晓乔, 梁斌, 等. 废弃物再生生物质炭改性方法及其在废水处理中的应用进展[J]. 当代化工, 2021, 50(10): 2418-2422
- Song S H, Song X Q, Liang B, et al. Modification methods of waste regenerated biochar and its application progress in wastewater treatment [J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(10): 2418-2422 (in Chinese)
- [36] 庞杰, 王赛珂, 杨一鸣, 等. 木质纤维素生物质磁性炭的水处理应用进展[J]. 精细化工, 2022, 39(1): 34-46
- Pang J, Wang S K, Yang Y M, et al. Application progress of magnetic lignocellulose biochars in water treatment [J]. Fine Chemicals, 2022, 39(1): 34-46 (in Chinese) ◆