

生物炭对水中重金属离子的去除研究进展



潘素娟^{1,3,*}, 康春霞¹, 王长青^{1,3}, 汪之波^{2,3}, 王弋博^{2,3}

¹天水师范学院化学工程与技术学院, 甘肃天水 741000

²天水师范学院生物工程与技术学院, 甘肃天水 741000

³甘肃省农业固体废弃物资源化利用重点实验室, 甘肃天水 741000

摘要: 随着工业的快速发展, 重金属通过采矿、冶炼、电池制造等行业排放的污水进入水体中, 导致水体污染问题日益突出, 给人类健康和生态环境造成严重威胁。生物炭因其成本低、比表面积大、表面官能团丰富、吸附能力优良等优点, 在重金属吸附领域受到广泛关注。本文在介绍生物炭的原料来源、制备技术、改性方法的基础之上, 对近年来水环境修复与治理领域中, 生物炭对水中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 等重金属离子去除的研究工作做了较为详细的综述, 并总结了可能的吸附机理, 以期生物炭在环境修复与治理领域水体重金属去除的应用提供理论基础。

关键词: 生物炭; 水污染; 重金属离子; 吸附机理; 环境修复

DOI: 10.57237/j.wjese.2023.03.001

Research Progress on Removal of Heavy Metal Ions from Water by Biochar

Pan Sujuan^{1,3,*}, Kang Chunxia¹, Wang Changqing^{1,3}, Wang Zhibo^{2,3}, Wang Yibo^{2,3}

¹School of Chemical Engineering and Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China

²School of Bioengineering and Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China

³Key Laboratory of Utilization of Agricultural Solid Waste Resource, Tianshui 741000, China

Abstract: With the rapid development of urbanization and industrialization, the problem of heavy metal pollution has become increasingly prominent. Heavy metal elements are migratory and undegradable. They could enter the water with the industry discharge, and course the serious threat to human health and ecological environment. It is urgent to develop economic and efficient technology on heavy metal removal. Biochar has been widely used in heavy metal removal from water process, due to its advantages such as low cost, large specific surface area, abundant surface functional groups and excellent adsorption capacity. In this paper, preparation, modification, and application of biochar in recent years are reviewed. Especially the removal of Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} and other heavy metal ions in water are summarized. And the possible adsorption mechanisms are summarized. It will provide a theoretical basis for the application of biochar on removal heavy metals in water of environmental remediation and treatment.

基金项目: 天水师范学院 2021 年麦积山专项项目 (MJS2021-05); 甘肃省高校青年博士支持项目 (2023QB-009); 甘肃省科技计划资助项目 (23CXGE0005); 甘肃省高等学校创新能力提升项目 (2021B-201).

*通信作者: 潘素娟, pansujuan_002@163.com

收稿日期: 2023-11-13; 接受日期: 2023-12-06; 在线出版日期: 2023-12-27

<http://www.wjese.com>

Keywords: Biochar; Water Pollution; Heavy Metal Ions; Adsorption Mechanism; Environmental Remediation

1 前言

随着工业的快速发展由重金属引起的水资源污染的问题愈发突出,大量含重金属废水未经处理排入河流中,严重污染了水资源[1]。重金属污染事件频繁发生,对城乡居民的饮用水安全和食品安全造成了严重的威胁,危害到人类健康,儿童体内的重金属一旦超标,就会出现免疫力低下、智力下降、身体发育迟缓等症状[2]。对水体重金属污染进行治理已迫在眉睫。

当前,治理重金属水体污染的主要方法有物理法、化学法和生物法等[3]。吸附法是一种经济环保的治理重金属的方法,它是利用多孔吸附材料吸附废水中重金属的一种方法[4],常用的吸附材料有活性炭[5]、离子交换树脂[4]、凹凸棒[6]等,由于活性炭具有较高的比表面积、发达的孔隙结构、优异的表面化学特性[7]以及作为制备原料的农业固体废弃物的可再生性和来源的广泛性等特点,被认为是理想的吸附剂之一[8],将生物质转化为活性生物炭是优化废弃物管理和环境保护的“双赢”策略。

本文拟从生物炭的原料来源、制备技术、改性、生物炭对水中的 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 等重金属的吸附以及生物炭对水中重金属离子的去除机理等方面,对生物炭在重金属离子去除领域的研究工作做以综述,以期对制备高吸附性能的生物炭和水中重金属污染治理问题提供理论依据。

2 生物炭的制备技术

生物炭是由固体废弃生物质经过洗涤、干燥、粉碎后放在缺氧的条件下热裂解干馏形成一类性质稳定、纹理细腻、表面官能团丰富、比表面大、孔隙结构发达的固态产物[9]。它的制备技术有传统制备技术和新型制备技术[8],下面将分类来介绍。

传统的生物炭技术一般指将秸秆、甘蔗渣、松子壳、枯草、玉米芯、落叶等集中在一起,先用泥土覆盖隔绝氧气,然后用火熏烟,使其燃烧热解而生成生物炭[10],这种制备技术相对比较落后,耗能大、污染高,原子利用率低。另外,传统技术制备的生物炭,因生物质原料的特征及产生的副产物的影响,其比表面小,表面官能团少。为了得到具有高吸附性能的生

物炭,研究者们通常会对生物炭进行改性,生物炭的改性过程可以在热解前进行,亦可在热解后进行,也可以同时进行[11]。生物炭改性可分为物理法改性和化学法改性[12]:物理法改性指在生物质热解过程中通入活化气体,表位碳与气体分子发生一系列复杂反应使生物炭得以活化的方法[13];化学改性指利用化学试剂处理生物炭使其得以活化的方法,用酸、碱、盐处理生物炭,常见的酸有 H_2SO_4 、 H_3PO_4 、 HCl 、 HNO_3 ,碱有 NaOH 、 KOH ,盐类有 K_2CO_3 、 ZnCl_2 等[14]。酸改性是将生物炭浸泡在酸溶液中,其作用是使生物炭产生多孔结构,更易于吸附阳离子污染物[15]。

随着绿色化学理念的提出,无污染、低能耗的新型生物炭制备技术被人们所青睐。新型生物炭制备技术有水热碳化技术和干裂解技术[16],应用相对比较广泛的是干裂解技术,可分为快速热解、烘焙、微波热解、慢速热解等。慢速热解是在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下在较长时间内热解生成生物炭的技术方法[17],该方法的优点是操作技术要求较低,生物炭产率较高,是目前最理想的生物炭制备技术之一。

3 生物炭对水中重金属离子的吸附

重金属废水具有极强的致毒性、易在人体富集,对社会环境和人类健康带来了严重的危害[18]。目前处理重金属废水的污染去除方法有多种,其中吸附法因其成本低、易操作、可再生等优点被认为是去除重金属的优选方法[19]。下面将分类介绍近年来的生物炭对水中常见的 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 等金属离子的去除研究工作。

3.1 生物炭对水中 Pb^{2+} 的去除

Pb^{2+} 对人类健康的危害很大,可引起婴幼儿多动症和生长迟缓[20];导致肾损伤、神经系统紊乱、癌症[21];孕妇饮用含铅量过高的水可能会导致流产[22]。因此,对水中 Pb^{2+} 的去除具有现实意义。

常帅等[23]制备了松木和楠木木屑生物炭研究其对水中 Pb^{2+} 的吸附量,两种生物炭的比表面积分别

为 311.4 m^2/g 和 210.6 m^2/g , 对 Pb^{2+} 的吸附量分别为 77.12 mg/g 和 62.79 mg/g 。张连科等[24]用油菜和胡麻秸秆制备生物炭, 其比表面积分别为 172.61 m^2/g 和 84.44 m^2/g , 对水中 Pb^{2+} 的吸附量分别为 307.59 mg/g 和 220.07 mg/g 。朱晓晓等[25]研究了芹菜源生物炭对 Pb^{2+} 的吸附性能, 结果显示芹菜源生物炭对水中 Pb^{2+} 的吸附量可达 300 mg/g 。秦婷婷等[26]用花椰菜根基和叶基为原料制备生物炭, 其比表面积分别为 9.035 m^2/g 和 232.200 m^2/g , 对水中 Pb^{2+} 的吸附量分别为 500.00 mg/g 和 476.19 mg/g 。

由于单一生物炭对水中 Pb^{2+} 的吸附能力较低[27], 因此研究者开始研究生物炭复合材料的制备, 将生物炭与其他材料组合, 利用物理、化学方法合成具有新性能, 新结构的生物炭材料[28], 从而提高生物炭吸附性能和达到易于分离的效果。鲁秀国[29]等以核桃壳为原料制备生物炭, 改性得负载了壳聚糖的磁性纳米 Fe_3O_4 生物炭, 其比表面积和孔体积大幅减小, 但孔径变大, 对水中 Pb^{2+} 的去除率提高了 27.21%。赵明静等[30]以柳木屑和花生壳为原料制备生物炭, 用 CaCl_2 改性后对 Pb^{2+} 的吸附量可达到 54.32 mg/g 。毕景望[31]等以西瓜皮为原料, 用硫化铵改性制备生物炭, 吸附时间 5 h, pH 为 6, Pb^{2+} 初始质量浓度 1000 mg/L , 改性后对 Pb^{2+} 的吸附量可达 97.63 mg/g 。曹玮等[32]将谷壳生物炭用酸改性后负载磁性 Fe_3O_4 得到改性生物炭, 在 Pb^{2+} 初始浓度为 100 mg/L , pH 为 5.0, 温度为 25 $^\circ\text{C}$, 添加 0.15 g, 对溶液中 Pb^{2+} 的吸附量为 33.2 mg/g , 去除率达 99.9%。徐大勇等[33]以剩余污泥球粒为原料制备污泥生物炭, 用氢氧化铝溶胶改性, 改性前后对水中 Pb^{2+} 的吸附量分别为 626.73 mg/g 和 663.97 mg/g 。

3.2 生物炭对水中 Cu^{2+} 的去除

重金属 Cu^{2+} 对人体细胞生长、内分泌腺功能均有影响, 若用含有铜的水灌溉农田, 将使农作物受到损害[22]。如何有效除去水体中的 Cu^{2+} 的成为环境修复的一个重点课题。

朱晓丽等[34]以核桃青皮为原料, 在 500 $^\circ\text{C}$ 的条件下制备生物炭, 生物炭的比表面积为 51.463 m^2/g , 对 Cu^{2+} 的去除率为 99.78%。刘烨等[35]以杉木木屑作为原材料, 在 600 $^\circ\text{C}$ 制备生物炭, 用过磷酸钙对其进行改性, 改性后对 Cu^{2+} 的最佳去除率达到了 98.97%。李楠等[36]制备了高锰酸钾改性的生物炭, 改性前后对 Cu^{2+} 的最大吸附量分别为 97.38 mg/g 和 26.21 mg/g 。吕贵芬

等[37]以水稻和芝麻为原料在 700 $^\circ\text{C}$ 下热解制备生物炭, 所得两种生物炭对水中 Cu^{2+} 的去除率可达 100%。李美萍等[38]以辣木籽壳为原料, 1000 $^\circ\text{C}$ 热解、KOH 改性制备生物炭, 改性前后生物炭的比表面积分别为 32.33 m^2/g 和 1276 m^2/g , 孔隙体积分别为 0.02045 cm^3/g 和 0.7219 cm^3/g , 吸附时间为 300 min 时, 对 Cu^{2+} 的去除率接近 100%。李微等[39]以鸡蛋壳作为原料, 在热解温度 850 $^\circ\text{C}$ 、1% KMnO_4 改性 12 h、固液比 1:2 条件下, 制备出磁性鸡蛋壳生物炭, 改性后比表面积显著提升, 对 Cu^{2+} 的去除率达到了 100%。

李杰等[18]以松树枝为原料制备生物炭, 用 Fe_3O_4 和壳聚糖对其改性, 改性后的吸附剂颗粒分布均匀, 表面粗糙, 对 Cu^{2+} 的吸附量为 74.83 mg/g 。彭碧媛等[40]以椰壳为原材料, 在 700 $^\circ\text{C}$ 条件下制备生物炭, 添加 0.2 g 生物炭, Cu^{2+} 的初始浓度为 60 mg/L , pH 为 4, 吸附时间为 3 h 时, 其吸附量达 8.6833 mg/g 。肖芳芳等[41]以丝瓜络为原料, 用 FeCl_3 、壳聚糖对生物炭进行改性, 改性前后生物炭对 Cu^{2+} 的吸附量分别为 54.68 mg/g 和 19.12 mg/g 。

3.3 生物炭对水中 Cd^{2+} 的去除

随着金属矿开采和机械制造等行业的快速发展, 大量含 Cd^{2+} 废水被排入水环境中, Cd^{2+} 在自然环境中具有不可降解性, 并能在生物体积累, 对生态系统的威胁严重[22]。因此, 对含 Cd^{2+} 废水进行有效处理是非常有必要的。

赵建兵等[42]以玉米秸秆为原料制备生物炭, 其比表面积、吸附平均孔径、微孔体积分别为 376.04 m^2/g 、2.58 nm、0.15 cm^3/g , 对 Cd^{2+} 吸附量为 24.47 mg/g 。杨康[43]等以水稻秸秆为原料, 在不同温度条件下制备生物炭, 对废水中 Cd^{2+} 进行吸附, 发现 600 $^\circ\text{C}$ 下制备生物炭比表面积可达 177.1 m^2/g , 对废水中 Cd^{2+} 的去除率接近 90%。金冠宇等[44]以污泥为原材料, 在不同温度条件下制备生物炭。SEM 结果表明随着炭化温度上升, 生物炭表面形态结构杂乱度增加, 在 800 $^\circ\text{C}$ 制备的生物炭的吸附效果最好, 对 Cd^{2+} 吸附量为 35.47 mg/g 。

张凤智等[45]以椰壳作为原料, 用 KMnO_4 改性制备生物炭, 改性后生物炭的比表面积为 509.8 m^2/g , 对水中 Cd^{2+} 的吸附量为 33.14 mg/g , 去除率可达 99%。王泽亚等[46]以梧桐叶为原料, 用 β -环糊精负载改性生物炭, 改性后的生物炭比表面积、总孔体积和平均孔径均稍有下降, 但其对水中的 Cd^{2+} 的去除率高达 99.2%,

比原始生物炭高出 14%。白马等[47]以水稻为原料制备生物炭,并用尖晶石型双金属改性生物炭,改性后比表面积和孔体积分别增大了近 20 倍和近 8 倍,对 Cd^{2+} 的吸附量达 109.2 mg/g。夏广洁等[48]用牛粪和杉木在 700 °C 热解条件下制备生物炭,两种生物炭的表面总酸度分别为 0.70 mmol/g 和 0.34 mmol/g,表面总酸度高的生物炭对水中 Cd^{2+} 的去除率高。孔德花等[49]以新疆棉杆为原料热解制备生物炭,用于废水中重金属 Cd^{2+} 的去除,当 pH 大于 5.0 时,对水中 Cd^{2+} 的去除率可达到 100%。戴静等[50]用稻杆在 700 °C 下制备的生物炭的比表面积为 73.40 m^2/g ,对 Cd^{2+} 吸附量为 60.61 mg/g。周建花等[51]用椰壳生物炭/粉煤灰为吸附剂,在 pH 为 9、温度为 30 °C、初始浓度为 20 mg/L 的条件下,其对 Cd^{2+} 的去除率达 95% 以上。卢向阳课题组以微波辅助 500 °C 热解条件下制备木质素生物炭,比表面积为 1.32 m^2/g ,表面含有丰富的类石墨结构和含氧官能团,对水体中的 Cd^{2+} 最大吸附量达到 635.44 mg/g [52]。

4 生物炭对水中重金属离子的去除机理

重金属溶液与生物炭的原料不同,去除重金属离子的机理也不尽相同。根据现有研究成果,其去除机理主要有物理吸附[18]、离子交换[53]、静电吸附、沉淀络合等[54]作用机制,具体取决于生物炭的性质、重金属离子特性、pH 等。

4.1 物理吸附

物理吸附是靠物质之间的范德华力产生的[55],生物炭与重金属能发生物理吸附是因为生物炭比表面积大,孔隙结构发达。当重金属离子直径小于生物炭孔隙的直径时,这些重金属离子就会很容易的进入生物炭的孔隙之中,发生物理吸附。李杰等[18]用松树枝、 Fe_3O_4 和壳聚糖制备复合吸附剂,研究其对 Cu^{2+} 的吸附机理,通过测定不同温度的吸附平衡常数 K,计算出 ΔH 、 ΔS 和 ΔG 的值,推断吸附过程主要是物理吸附。

4.2 离子交换

离子交换是指水中的重金属离子与生物炭表面负载的重金属之间发生离子交换的过程[56],发生离子交换的主要离子有 Mg^{2+} 、 Si^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等。此外,

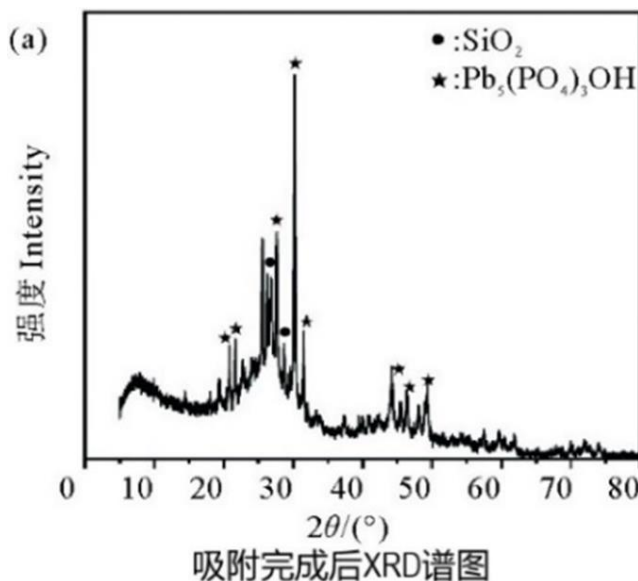
张连科等[57]研究了 $\text{HAP}/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BC}$ 磁性生物炭吸附水中 Pb^{2+} 的机理,也可能是 Pb^{2+} 与 $-\text{OH}$ 中的 H^+ 发生了离子交换。

4.3 静电吸附

在生物炭对重金属进行吸附的过程中,静电相互作用力大小主要由生物炭的零电荷点和溶液 pH 决定。电荷密度高的重金属离子与生物炭之间的库仑引力更大,更易发生静电吸附。Su 等[58]制备杨树枝生物质炭,研究其去除 Cr^{6+} 的吸附机理发现,由于静电吸引, Cr^{6+} 先被吸附到磁性生物质炭表面,然后在磁性生物质炭中被 Fe 或 Fe^{2+} 还原。LYU 等[59]研究发现,改性甘蔗渣生物炭表面的酸性官能团增加,增强了静电作用,促进了生物炭对水中 Ni^{2+} 的吸附。

4.4 络合或化学沉淀

络合反应指生物炭表面的有机官能团与金属离子形成具有特定金属-配体相互作用的多原子结构络合物的过程,这种络合物可以去除水中对特定配位体有强亲和力的重金属离子[60]。刘爽等[61]制备磷酸活化茶渣生物炭,探究其对 Pb^{2+} 的吸附机理,发现吸附完成后 XRD 图谱(图 1-a)中出现了 $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ 晶体的信号峰,并且在 SEM 图(如图 1-b)中可以清晰地观察到吸附材料表面有晶体沉淀产生,证明吸附过程中生物炭与 Pb^{2+} 发生沉淀反应。



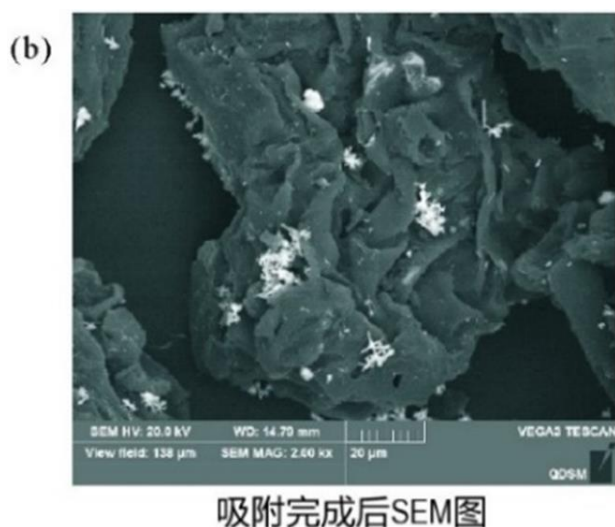


图1 吸附完成后材料 XRD 图谱(a)、SEM(b)图[61]

5 结语与展望

本文综述了近年来国内外生物炭对重金属离子去除的研究工作，主要分类总结了生物炭的制备及改性，及其对水中 Pd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 几种常见重金属离子的去除，并列举了研究的比较成熟的去除机理。

通过对上述文献的归纳总结，可得出以下几点结论：

- (1) 生物炭原料多种多样，尤其是各种废弃物为原料，其改性方法千差万别，总的来说，制备空间广阔。
- (2) 对重金属离子去除机理的研究难度较大，吸附过程并不是单一机制，而是多种机制共同作用，存在着竞争吸附，每种机制影响程度不同，吸附效果也不同。
- (3) 生物炭的表面官能团对重金属离子的吸附有着重要的影响，有机物中含氧官能团对于金属阳离子最具亲和力，但将有机高分子负载在生物炭来增加表面官能团的时候会牺牲其比表面积，导致改性生物炭的综合吸附性能提升幅度并不高。

因此，寻找既能增加其表面官能团又具有较大比表面积的优良改性材料依然是未来研究工作的焦点。

参考文献

[1] 孙家森, 郭瑶. 水环境质量影响因素及水生态环境保护措施分析 [J]. 资源节约与环保, 2022(08): 13-16.

- [2] 陈军, 丁聪. 基于重金属污染治理的环境保护管理措施 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(02): 103-105.
- [3] 于天宇, 胡思雨. 水体重金属污染现状及治理方法概述 [J]. 建筑与预算, 2019(06): 75-78.
- [4] 周秀英, 韩晓燕, 罗欢. 水体重金属污染概况及其治理技术研究进展 [J]. 广东化工, 2021, 48(19): 128+141.
- [5] 高飞飞. 活性炭纤维对水中重金属离子的吸附分析 [J]. 世界有色金属, 2019(09): 221-222.
- [6] 陈俊, 郑福辉, 冯薪润, 伍健健, 许佳峰, 汤涵, 周崇松, 蒋建宏, 邓斌, 李家元. 废水中重金属离子脱除方法研究现状及展望 [J]. 湘南学院学报, 2019, 40(05): 21-28.
- [7] 刘旭静, 李明飞. 农业废弃物制备活性炭的研究进展 [J]. 高分子通报, 2021(07): 33-42.
- [8] 宋少花, 徐金兰, 宋晓乔, 于媛. 磁性生物炭的制备及在污染水体中的应用 [J]. 化工进展, 2022, 41(12): 6586-6605.
- [9] 夏美玲, 王允圃, 张淑梅, 曾媛, 刘玉环, RUAN Roger. 油茶壳综合利用研究进展 [J]. 生物质化学工程, 2021, 55(06): 26-38.
- [10] 陈温福, 张伟明, 孟军等. 生物炭应用技术研究 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
- [11] 任雷. 生物炭技术在废水处理中的应用 [J]. 广东化工, 2023, 50(09): 172-174.
- [12] 孙家婉, 张振华, 赵玉萍, 樊广萍, 高岩, 卢信. 生物炭改性及其在农田土壤重金属修复中的应用研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50(10): 9-15.
- [13] 曲衍桦. 三峡消落带狗牙根氮磷释放及生物炭减控技术研究 [D]. 重庆三峡学院, 2019.
- [14] Xue Y. W., Gao B., Yao Y., et al. Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: Batch and column tests [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 200–202, 673–680.
- [15] 刘彩玲, 徐慧娴, 曹诗颖, 许辉, 祝林斌, 廉晶晶, 黄巍. 改性污泥基生物炭吸附废水中无机污染物的研究进展 [J]. 湖北理工学院学报, 2023, 39(02): 15-20+68.
- [16] 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(03): 365-374.
- [17] 赵明静. 改性生物炭的制备及其对 Pb^{2+} 的吸附作用 [D]. 河北师范大学, 2017.
- [18] 李杰, 高洪涛. 壳聚糖复合磁性生物炭吸附去除水中 Cu(II) 的性能和机理 [J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(02): 16-20.

- [19] 孙梦临. 重金属离子吸附材料的研究进展 [J]. 现代盐化工, 2022, 49(02): 3-4.
- [20] 张园, 耿春女, 蔡超. 铅暴露对人体健康风险评价的模型综述 [J]. 环境化学, 2013, 32(06): 943-951.
- [21] 高永强, 马燕. 铅对人体的危害 [J]. 内蒙古环境科学, 2007(03): 115-117.
- [22] 郭婷, 何忠俊, 李冬雪, 李昕悦, 梁社往, 熊俊芬, 洪常青. 三七各器官 Cu、Cr、Cd、Pb 含量特征及其健康风险评价 [J]. 广东农业科学, 2022, 49(01): 22-29.
- [23] 常帅帅, 张学杨, 王洪波, 李梅, 谭珍珍. 木屑生物炭的制备及其对 Pb²⁺的吸附特性研究 [J]. 生物质化学工程, 2020, 54(03): 37-44.
- [24] 张连科, 刘心宇, 王维大, 李玉梅, 孙鹏, 尚少鹏, 姜庆宏. 油料作物秸秆生物炭对水体中铅离子的吸附特性与机制 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(07): 218-226.
- [25] 朱晓晓, 张涛, 李赛君等. 芹菜源生物炭对水中重金属离子的高吸附性能 [C]//中国环境科学学会. 第六届重金属污染防治及风险评价研讨会暨重金属污染防治专业委员会 2016 年学术年会论文集, 2016: 344-347.
- [26] 秦婷婷, 王兆炜, 朱俊民, 谢超然, 李艳, 谢晓芸. 花椰菜基生物炭对水中 Pb(II)的吸附性能 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(08): 2977-2988.
- [27] 石晓磊, 安焱, 王章鸿, 杨成, 王雅洁, 范百龄. 两种生物炭对铅离子的吸附特性及其机制 [J]. 有色金属工程, 2023, 13(04): 127-135.
- [28] 张震, 田追, 杨斌, 杨金辉, 周书葵, 于秀明, 朱文韬. 生物炭改性技术及其对重金属去除研究进展 [J]. 煤炭与化工, 2023, 46(03): 154-160.
- [29] 鲁秀国, 郑宇佳, 武今巾. 改性核桃壳生物炭对模拟水样中 Pb(II)的吸附性能研究 [J]. 离子交换与吸附, 2021, 37(01): 26-41.
- [30] 赵明静, 杜霞, 郭萌. CaCl₂ 改性生物炭的制备及其对 Pb²⁺的吸附作用 [J]. 环境污染与防治, 2016, 38(10): 84-88.
- [31] 毕景望, 单锐, 韩静, 等. 改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II)的吸附特性 [J]. 环境科学, 2020, 41(4): 9.
- [32] 曹玮, 周航, 邓贵友. 改性谷壳生物炭负载磁性 Fe 去除废水中 Pb²⁺的效果及机制 [J]. 环境工程学报, 2017, 011(003): 1437-1444.
- [33] 徐大勇, 张苗, 杨伟伟. 氧化铝改性污泥生物炭粒制备及其对 Pb(II)的吸附特性 [J]. 化工进展, 2020, 39(3): 14.
- [34] 朱晓丽, 程燕萍, 申烨华, 张子夜, 王军强, 尚小清. 核桃青皮生物炭对重金属的吸附效应分析 [J/OL]. 环境科学: 1-20 [2023-05-22].
- [35] 刘焯, 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(09): 2105-2109+2113.
- [36] 李楠. 一种磁性生物炭材料对水中 Cu²⁺的吸附机理研究 [J]. 山西化工, 2016, 36(6): 4.
- [37] 吕贵芬, 杨涛, 李建国. 热解温度对制备不同类型秸秆生物炭及其吸附去除 Cu²⁺的影响 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(7): 3.
- [38] 李美萍, 董程, 王微, 张生万, 张金才. 辣木籽壳生物炭对溶液中 Cu²⁺的吸附性能研究 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(34): 84-89.
- [39] 李微, 张冀, 朱心雨, 潘文浩, 祝雷. 鸡蛋壳生物炭制备及其对 Cu(II)和苯胺吸附研究 [J/OL]. 环境工程: 1-13 [2023-05-22].
- [40] 彭碧媛, 高良敏. 不同温度下制备的椰壳生物炭对水中 Cu(II)的吸附研究 [J]. 环境保护前沿, 2022, 12(1): 11.
- [41] 肖芳芳, 张莹莹, 程建华. 壳聚糖 / 磁性生物炭对重金属 Cu(II)的吸附性能 [J]. 环境工程学报, 2019, 13(05): 1048-1055.
- [42] 赵建兵, 朱俊波, 庄长福, 郑志锋, 李双庆, 李雪梅. 玉米秸秆生物炭对水中铅、镉的去除性能及作用机理研究 [J]. 生物质化学工程, 2022, 56(04): 15-24.
- [43] 杨康, 许艳红, 刘佳梁, 梁薇. 水稻秸秆生物炭对水中 Cd²⁺的吸附性能 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 22(05): 695-700.
- [44] 金冠宇, 李卫华, 杨厚云. 污泥基生物炭对重金属 Cd²⁺的吸附性能 [J]. 安徽建筑大学学报, 2020, 28(04): 21-27+116.
- [45] 张凤智, 王敦球, 曹星沅, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒. 高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II)和 Ni(II)的去除性能及机制 [J/OL]. 环境科学: 1-13 [2023-05-31].
- [46] 王泽亚, 龚香宜, 任大军, 孟德康, 吴凤英. β-环糊精改性梧桐叶基生物炭对水中镉离子的去除研究 [J]. 功能材料, 2022, 53(08): 8092-8098.
- [47] 白马, 柴友正, 陈安伟, 袁佳仪, 彭程, 王雪芹. 尖晶石型双金属修饰生物炭对水中镉的去除 [J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(07): 1544-1554.
- [48] 夏广洁, 宋萍, 邱宇平. 牛粪源和木源生物炭对 Pb(II)和 Cd(II)的吸附机理研究 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 569-575.
- [49] 孔德花, 魏育东. 生物炭对重金属离子 Pb²⁺和 Cd²⁺的吸附作用研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(01): 11-13.
- [50] 戴静, 刘阳生. 四种原料热解产生的生物炭对 Pb²⁺和 Cd²⁺的吸附特性研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(06): 1075-1082.

- [51] 周建花, 宋秋阳, 罗维, 吴光红. 生物炭/粉煤灰去除废水中 Hg^{2+} 和 Cd^{2+} [J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S2): 245-252.
- [52] Fangfang Wu, Long Chen, Peng Hu, Xia Zhou, Huoqiang Zhou, Duanhua Wang, Xiangyang Lu and Baobin Mi. Comparison of properties, adsorption performance and mechanisms to Cd(II) on lignin-derived biochars under different pyrolysis temperatures by microwave heating. Environmental Technology & Innovation, 2022, 25, 102196.
- [53] 李丹阳. 几种生物炭及改性材料对水中镉离子的吸附性能及机理研究 [D]. 湖南农业大学, 2019.
- [54] 纪钢, 沈喜洲, 沈陟, 陶士. 改性生物炭在含重金属废水处理中的应用 [J]. 武汉工程大学学报, 2023, 45(01): 1-8+75.
- [55] 韩鲁佳, 李彦霏, 刘贤, 韩娅红. 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.
- [56] 陈思琪, 韩璐, 宁丹, 杨文杰. 生物炭吸附水体中重金属的机理及应用 [J]. 上海化工, 2023, 48(02): 60-64.
- [57] 张连科, 王洋, 王维大. 磁性羟基磷材料的制备及对 Pb(II) 的吸附性能 [J]. 环境科学学报 2018. 38(11): 4360-4370.
- [58] Su C L, Wang S, Zhou Z Y, et al. Chemical processes of Cr(VI) removal by Fe-modified biochar under aerobic and anaerobic conditions and mechanism characterization under aerobic conditions using synchrotron-related techniques [J] Science of the Total Environment, 2021, 768, 144604.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 刘爽, 汪东风, 徐莹. 磷酸活化茶渣生物炭对铅的吸附性能影响和吸附机理研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2020, 52(1): 56-64.

作者简介

潘素娟

1978 年生, 博士, 副教授. 研究方向为固体废弃物资源化利用.

E-mail: pansujuan_002@163.com