



移动扫码阅读

杨晶,李丽,季必霄,等.生物炭吸附废水中重金属研究进展[J].能源环境保护,2020,34(6):1-7.

YANG Jing, Li Li, Ji Bixiao, et al. Research progress on absorption of heavy metals in wastewater by biochar[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(6): 1-7.

生物炭吸附废水中重金属研究进展

杨晶^{1,2}, 李丽², 季必霄², 杜成渝²

(1.河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心,河北 邯郸 056038;

2.河北工程大学 能源与环境工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:基于生物炭在废水重金属吸附领域的研究现状,论述了影响生物炭吸附性能的主要因素,总结了提高吸附能力的方法。分析认为:原材料、制备方式和外界因素(溶液 pH、生物炭投加量和吸附时间)均会对生物炭吸附性能产生显著影响,优化外界因素的控制可进一步提高生物炭的吸附能力。未来研究可以探索更为绿色、高效的制备工艺,加强混合生物炭吸附性能的研究,促进该技术在自然水体中的应用。

关键词:生物炭;重金属;吸附;改性;影响因素

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)06-0001-07

Research progress on absorption of heavy metals in wastewater by biochar

YANG Jing^{1,2}, LI Li², JI Bixiao², DU Chengyu²

(1. Hebei Technology Innovation Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation,

Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. College of Energy and Environmental

Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Based on the research status of biochar in the field of adsorption of heavy metal in wastewater, the main factors affecting the adsorption performance of biochar were discussed, and the methods to improve the adsorption capacity were summarized. Analysis showed that the adsorption performance of biochar was affected by raw materials, preparation methods and external factors (solution pH, biochar dosage and adsorption time). The adsorption capacity of biochar could be further improved by optimizing external factors. The future research may focus on developing green and efficient preparation processes, improving the adsorption performance of mixed biochar, and promote the application of this technology in natural water treatment.

Key Words: Biochar; Heavy metal; Adsorption; Modification; Influencing factors

0 引言

工业领域迅速崛起,带动了采矿、冶炼等行业的发展,大量高浓度重金属废水日益增加。与有机污染物不同,水体中的重金属很难被生物降解并且会在动植物体内富集,最终危害人类的身体

健康^[1],常见的重金属污染物有镉、铅、锌、铬、铜等。通过岩石风化和废水排放进入水体的重金属^[2]很难依靠环境自净能力去除。通过化学沉淀^[3-4]、离子交换^[5]、膜过滤^[6-7]等处理方法可以有效降低重金属浓度,达到削减其毒害性的目的,但以上方法往往存在处理成本过高、二次污染等

收稿日期:2020-09-22;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:河北省教育厅课题(QN2016259);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-002);河北省重点研发计划项目(18273806D)

第一作者简介:杨晶(1982-),女,河北邯郸人,硕士,副教授,主要研究方向为微生物处理重金属废水的机理研究和微生物-植物联合修复技术在重金属污染土壤修复中的应用研究。E-mail:360084863@qq.com

通讯作者简介:李丽(1995-),女,贵州毕节人,硕士研究生在读,主要研究方向为微生物处理重金属废水的机理研究。E-mail:li2020cama@163.com

弊端。吸附^[8-9]因其吸附剂对环境无害并且很容易大量获得,成为最常见、最有效的去除方式。常见的吸附剂有硅胶、分子筛、活性炭、生物炭等,其中生物炭作为新型吸附剂具有土壤改良^[10-11]、固碳^[12-13]、吸附重金属等多重效益,高温下形成的多孔结构使其具备良好的吸附性能。此外,生物炭还具有原料丰富、价格低廉、可循环利用等多项优点,在吸附废水中重金属方面拥有巨大的应用

前景。

1 生物炭在处理含重金属废水中的应用

生物炭是生物质热解的固态产物,碳元素含量可达60%以上,富含生物炭的材料均可作为原料。从表1可以看出,生物炭原料有植物废料、生活垃圾、牲畜粪便等,各类生物炭对废水中Pb、Cd、Cr、Cu、Zn等均具有较高的去除效果。

表1 生物炭对废水中各重金属的吸附效果

重金属	初始浓度/ (mg · L ⁻¹)	生物炭种类	制备方式	吸附量/ (mg · g ⁻¹)	吸附机理	参考文献	
Pb	1 000	鱼骨炭	500 °C,热解	1 206.13	离子交换、共沉淀、基团络合	[14]	
	200	香蕉皮炭	230 °C,水热炭化	359.00	离子交换、表面络合	[15]	
	100	松木炭	600 °C,热解	62.79	表面络合、共沉淀、离子交换	[16]	
		楠木炭		77.12			
	100	稻壳炭	700 °C,热解	49.21	共沉淀、基团络合	[17]	
		棉花秸秆炭		49.67			
		麦秸炭		99.65			
	400	稻秆炭	450 °C,热解	110.31	表面沉淀、基团络合	[18]	
			玉米秸秆炭		88.82		
Cd	200	金鱼藻炭	500 °C,热解	78.93	阳离子- π 作用、离子交换、沉淀、络合反应	[19]	
	10	鸡粪炭	650 °C,热解	41.53 ± 3.66	阳离子- π 作用和共沉淀	[20]	
		麦秸炭		39.65 ± 1.72			
	80	稻秆炭	500 °C,热解	30.19	离子交换、共沉淀、基团络合、阳离子- π 作用	[21]	
		木屑炭		7.51			
	200	水稻炭	600 °C,热解	59.84	离子交换、阳离子- π 作用	[22]	
		猪粪炭		45.95			
	200	牛粪炭	300 °C,热解	69.26	共沉淀、基团络合	[23]	
	10	玉米芯炭	500~600 °C,热解	17.21	基团络合	[24]	
Cr	500	木屑生物炭	700 °C,热解	1.72	/	[25]	
	100	核桃壳炭	180 °C,水热炭化	20.17	基团络合、还原	[26]	
	50	柚子皮炭	190 °C,水热炭化	6.19	基团络合、还原	[27]	
	250	烟草叶柄炭	300 °C,热解	99.43	基团络合、还原	[28]	
	50	菠萝皮炭	350 °C,热解	41.67	基团络合	[29]	
		茶渣炭		197.50			
	120	稻壳炭	450 °C,热解	195.24	基团络合	[30]	
	Cu	50	银杏叶炭	800 °C,热解	138.90	基团络合、离子交换	[31]
		200	香蕉皮炭	600 °C,热解	147.00	基团络合、离子交换	[32]
50		稻秸	700 °C,热解	50.10	离子交换、共沉淀、基团络合、阳离子- π 作用	[33]	
65		苹果枝	500 °C,热解	9.86	离子交换、共沉淀、基团络合	[34]	
100		骨头炭	500~700 °C,热解	45.45	离子交换、共沉淀、基团络合	[35]	
200		水葫芦炭	400 °C,热解	39.50	离子交换、静电吸附	[36]	

续表

重金属	初始浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	生物炭种类	制备方式	吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	吸附机理	参考文献
Zn	150	龙虾壳炭	600 °C, 热解	462.50	离子交换、共沉淀、基团络合、阳离子- π 作用	[37]
	30	花生壳炭	700 °C, 热解	25.93	离子交换、共沉淀	[38]
	60	毛发炭	250~450 °C, 热解	3.81	基团络合、表面沉淀	[39]
	200	羊粪炭	700 °C, 热解	5.90	离子交换、基团络合	[40]

从表 1 可以看出, 各类炭之间的吸附性能存在较大的差异, 如鱼骨炭对 Pb 的吸附量可达 1 206.13 mg/g, 而稻壳炭的吸附量只占鱼骨炭吸附量的 4.1%。秸秆类、木材类生物炭对 Pb 的吸附量在 69~111 mg/g 之间, 低温秸秆炭吸附效果优于高温秸秆炭, 较低的制备温度保留了大量的基团, 利于重金属的去除。水热炭对 Pb 吸附能力明显高于热解炭, 吸附量上可达到秸秆炭的 3 倍。金鱼藻炭对 Cd 的吸附量高达 78.93 mg/g, 而木屑炭的吸附量最低只有 7.51 mg/g。烟草叶柄炭、菠萝皮炭、茶渣炭、稻壳炭对 Cr 吸附量均在 40 mg/g 以上, 其中茶渣炭和稻壳炭的吸附量最高, 分别为 197.50 mg/g 和 195.24 mg/g。银杏叶炭、香蕉皮炭对 Cu 的吸附效果最佳, 银杏叶炭的吸附量可达到 138.90 mg/g。龙虾壳炭对 Zn 表现出超强的吸附能力, 吸附量高达 462.50 mg/g。

2 不同原料、制备方式对生物炭吸附性能的影响

生物炭的吸附能力与理化性质密切相关, 高比表面积与发达孔隙结构能够提供较多的吸附位点; 含氧基团和矿物组分能与重金属发生络合、共沉淀等化学吸附, 提升吸附效果。原料和制备方式是影响吸附能力的两大因素, 如龙虾壳炭对 Zn 的吸附量达到了 462.50 mg/g, 是玉米秸秆炭的 68 倍, 热解炭对 Cr 的吸附量明显高于水热炭。

2.1 制备原料的影响

不同原料在成分组成之间的差异是造成理化性质和吸附能力不同的主要原因。秸秆炭在产率上明显低于木材炭。富含纤维素的秸秆会在制备温度位于 220~400 °C 时严重失重, 而木材炭热解温度跨度较大且很难分解, 固体产物含量在 40% 以上^[41], 致使木材炭产率更高。对于秸秆炭, 木材炭拥有更高比表面积, 经过高温后木材炭部分微孔被保留下来, 而秸秆炭孔壁较薄易在高温下坍塌成中孔或大孔导致比表面积下降^[42]。但比表面积与生物炭吸附能力并不成正比, 戴静^[43]等

在 700 °C 下制备的木屑炭比表面积是秸秆炭的 4~5 倍, 但秸秆炭对 Pb、Cd 的吸附量更高, 所以不同生物炭应用于重金属的吸附还需要大量的实验研究。骨肉炭拥有更高的灰分和 P 含量。张政^[44]等以病死猪和玉米秸秆为原料时, 骨肉炭的灰分含量约为秸秆炭的 2 倍。申磊^[20]等以鸡粪、麦秸为原料制备生物炭, 灰分含量高的鸡粪炭对 Cd^{2+} 的吸附能力明显优于麦秸炭。鸡粪炭对 Cd^{2+} 的最大吸附量可达到 37.78 mg/g, 而秸秆炭的吸附量只有 30.95 mg/g。因此, 灰分含量高更利于吸附的发生。

2.2 制备方式的影响

制备方式对吸附能力的影响同样突出。在常用的制备方法中热解可分为慢速热解与快速热解, 慢速热解即传统制炭法, 制备温度跨度较大, 停留时间较长, 产炭率在 40%~80% 之间。而快速热解产物以生物油为主, 生物炭产率较低。水热炭化制备环境温和, 适用于水分含量高的原料, 生物炭产率最高可达 90%。水热炭制备过程中形成大量含氧基团, 在基团含量上优于热解炭, 但比表面积低于热解炭^[45]。向天勇^[46]等发现稻秸水热炭对 Cu^{2+} 的吸附量是热解稻秸炭的 7.5 倍, 这主要是水热炭上丰富的含氧官能团与 Cu^{2+} 发生反应, 增加了吸附量。

制备的关键条件温度影响着生物质的热解程度, 温度越高热解越彻底, 失重越大, 产率越低。生物质的热解失重过程可分为三个阶段: 第一阶段(室温~200 °C)失重主要是水分的挥发, 失重率较低, 在 3% 左右; 第二阶段(200~380 °C), 此阶段挥发分与有机物大量挥发, 失重率在 55% 以上; 第三阶段(380~800 °C), 此阶段主要是热稳定性强的物质如木质素热解^[47]。随着温度上升, 炭化程度升高 C 元素含量上升, H、O、N 含量随着挥发分的挥发不断下降。高温热解后的生物炭芳香性升高, 芳香结构能有效的提高生物炭的吸附能力。

3 影响因素

吸附是含有重金属离子的溶液与生物炭固体接触时,在生物炭表面积蓄的现象。除了原料与制备方法能对生物炭吸附性能产生影响外,外界因素对吸附能力的影响同样关键,尤其 pH、投加量、吸附时间对吸附影响最为明显。对最佳吸附条件进行控制是实现生物炭发挥最大吸附能力的有效办法,改性也可显著提高生物炭吸附性能。

3.1 pH

pH 值是影响吸附效果最明显的因素之一,主要通过影响生物炭表面的带电性和重金属的存在形态,进而影响重金属的去除。研究表明,生物炭的吸附能力随着 pH 的波动较大。pH 较低时,生物炭表面去质子化产生的 H^+ 和矿物组分溶解产生的碱性金属阳离子与目标重金属一起竞争吸附位点,此时去除率较低。随着 pH 值上升,去质子化得到抑制,去除效果显著增加。但当 pH 过高时,重金属离子会形成难溶于水的氢氧化物,去除效果明显减弱。因此,pH 过高或过低都会影响吸附发生。研究表明^[48-49],大部分重金属的最佳吸附 pH 值在 5~8 之间,随着 pH 值的上升,吸附量上升,但 Cr 与大部分重金属正好相反,最佳吸附环境呈酸性。严云^[50]等发现在 pH=1 时,鱼腥草生物炭对 Cr^{6+} 的去除率高达 99.2%,但随着 pH 值的升高吸附量呈现下降趋势。谢好^[51]、刘延湘^[52]、李必才^[53]等均得到了相同的结果。

3.2 生物炭投加量与吸附时间

投加量是影响吸附效果的关键因素,投加量过低达不到理想的去除效果,投加量过高即产生了生物炭的浪费,也为后续吸附剂去除增加处理成本。因此,在实际研究中同时考虑投加量与去除效果,一般选择最佳投加量作为实验条件。郭海艳^[54]等研究了蚯蚓粪便生物炭投加量对 Cu^{2+} 的去除率与吸附量的影响。投加量为 5 g/L 时, Cu^{2+} 去除率达到了 98.50%,继续投加生物炭去除率保持稳定,但投加量增加后生物炭颗粒会发生团聚沉降导致吸附量下降。充足的接触时间是保证达到吸附平衡的必要前提。生物炭的吸附过程可分为两个阶段^[55-56]:第一阶段溶液中的重金属快速与吸附位点结合,此时吸附速率较快,吸附主要发生在生物炭表面;第二阶段生物炭表面的结合位点趋于饱和,重金属离子向内部扩散,最终达到吸附平衡。不同重金属的吸附平衡时间存在较

大差异。王棋^[57]等利用牛粪炭吸附 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Cd^{2+} 四种离子,对 Pb^{2+} 的吸附在 20 min 即可达到吸附平衡,但 Cu^{2+} 的吸附平衡时间长达 10 h。

3.3 改性

改性是提高生物炭吸附性能的有效措施。可通过酸碱改性、金属氧化物负载、有机物改性、复合改性等措施达到改性的目的。经过改性后生物炭比表面积、孔体积增加,基团种类和数量上升。陈佼^[58]等发现相对于未改性生物炭,经硫酸加超声波复合改性后的猪粪生物炭基团含量、比表面积、孔体积分别提高了 2.7、15.5、6.1 倍。徐大勇^[59]等发现污泥生物炭经氢氧化铝溶胶改性后比表面积和孔容分别增加了 142.42% 和 167.80%。经过氢氧化钾改性后的豆饼生物炭对 Pb^{2+} 吸附量显著增加达到 711.0 mg/g,是未改性生物炭的 2.4 倍^[60]。李静^[61]等制备的负载 Fe_3O_4 复合硝酸改性后的椰壳炭对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的最大吸附量分别为 42.54 和 25.79 mg/g,相对未改性生物炭提高了 1.87 倍和 2.23 倍,生物炭改性后对重金属的吸附量显著增加。因此改性能有效提高生物炭的吸附能力。

3.4 其他影响因素

吸附反应为自发的吸热过程,金属离子需要足够的能量克服扩散层进入孔隙内部,适当升高吸附温度能有效提升其吸附能力。但过高的温度会加剧离子的热运动导致生物炭解吸反而导致去除率下降。在实际应用中,四季温差较大,对温度的适当调节是生物炭发挥最佳吸附性能的重点。温度升高,重金属去除率上升。Shi X Z^[34]、Zhen G L^[62]、Saima B^[63]均得到相同的结果。但温度过高并不利于吸附,刘延湘^[52]等以花生壳炭作为吸附剂研究温度对其吸附 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 的影响。结果显示, Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 的最佳吸附温度分别为 30 °C、40 °C。随着温度的进一步升高,去除率反而下降,高温下生物炭出现了解吸。实际的重金属废水往往是各类污染物的混合体系,各类污染物会与重金属离子竞争吸附位点,尤其是具有相同吸附机理的重金属之间的竞争最为明显。王棋^[57]等研究各类重金属离子在秸秆炭上的竞争吸附发现,对 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 影响最大的是 Cu^{2+} ,其次是 Pb^{2+} ,而 Cu^{2+} 对 Pb^{2+} 的吸附影响最大, Cd^{2+} 和 Ni^{2+} 对其基本没有影响。

4 结论与展望

生物炭因其原料丰富、廉价、可再生和绿色等优点成为高效的环保吸附材料,在对废水中有毒重金属的吸附方面具有广阔的应用前景。原料与制备方式、外界因素(溶液 pH、生物炭投加量和吸附时间)均会对其吸附性能产生明显的影响。对最佳吸附 pH 进行控制,把握最佳投加量和吸附时间是使生物炭发挥最大吸附性能的有效途径。改性从提升生物炭自身理化性质出发增强其吸附能力。在今后的研究工作中,可从以下几个方面推进:

(1) 制备工艺方面:目前,主流的制备方式都是以电能作为热解源的热解为主,在不同程度上造成了能源的消耗。需要对节能和可再生的热解源进行探索开发出更绿色、高效的制备工艺,如太阳能热解等。

(2) 原料方面:生物炭研究以植物秸秆、果皮、木材、牲畜骨肉或粪便废料等废弃物为原料,部分以市政污泥、菌糠为原料,主要集中在单一生物炭吸附特性方面的研究,对于多种生物质制备的混合生物炭吸附性能研究较少。

(3) 实际应用:生物炭的最佳吸附量还停留在实验室对最佳吸附条件的控制下,关于生物炭在自然水体中吸附的研究较缺乏,对生物炭在自然水体中吸附性能进行探究,为生物炭在实际废水中的应用提供有效的参考数据。

参考文献

[1] Monu A, Bala K, Shweta R, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources [J]. Food Chemistry, 2008, 111 (4): 811-815.

[2] Bradl H B. Chapter 1 Sources and origins of heavy metals [J]. Interface Science and Technology, 2005, 6: 1-27.

[3] Chen Q Y, Yao Y, Xin Y L, et al. Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates [J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, 26: 289-300.

[4] Zhang Y, Duan X M. Chemical precipitation of heavy metals from wastewater by using the synthetical magnesium hydroxy carbonate [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2020, 81 (6): 1130-1136.

[5] James P B, Laura R R, Robert D, et al. Ion exchange removal of Cu (II), Fe (II), Pb (II) and Zn (II) from acid extracted sewage sludge-resin screening in weak acid media [J]. Water Research, 2019, 158: 257-267.

[6] Ali A, Ahmed A, Gad A. Chemical and microstructural analyses for heavy metals removal from water media by ceramic membrane filtration [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2017, 75 (2): 439-450.

[7] Mohd S F, Ahmad N, Khattak M A, et al. Application of sayong ball clay membrane filtration for Ni (II) removal from industrial wastewater [J]. Journal of Taibah University for Science, 2017, 11 (6): 949-954.

[8] Ibrahim A, Adel A I, Fathy A S, et al. Biosorption of heavy metals ions in real industrial wastewater using peanut husk as efficient and cost effective adsorbent [J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2016, 6: 176-183.

[9] Naz T, Khan M D, Ahmed I, et al. Biosorption of heavy metals by Pseudomonas species isolated from sugar industry [J]. Toxicology and Industrial Health, 2016, 32 (9): 1619-1627.

[10] Chan K Y, Van Z L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments [J]. Australian Journal of Soil Research, 2008, 46 (5): 437-444.

[11] Yeboah E, Ofori P, Quansah G W, et al. Improving soil productivity through biochar amendments to soils [J]. African Journal of Environmental Science and Technology, 2009, 3: 34-41.

[12] Windeatt J H, Ross A B, Williams P T, et al. Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 146: 189-197.

[13] Tenenbaum D J. Biochar: Carbon mitigation from the ground up [J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117 (2): A70-A73.

[14] Wei W, Yan Y L, Shao X S, et al. Facile pyrolysis of fish-bone charcoal with remarkable adsorption performance towards aqueous Pb (II) [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5 (5): 4621-4629.

[15] Zhou N, Chen H G, Xi J T, et al. Biochars with excellent Pb (II) adsorption property produced from fresh and dehydrated banana peels via hydrothermal carbonization [J]. Biorenewable Technology, 2017, 232: 204-210.

[16] 常帅帅, 张学杨, 王洪波, 等. 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 (3): 37-44.

[17] 刘杰, 施胜利, 贾月慧, 等. 不同热解温度生物炭对 Pb (II) 的吸附研究 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (11): 2586-2593.

[18] 李瑞月, 陈德, 李恋卿, 等. 不同作物秸秆生物炭对溶液中 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (5): 1001-1008.

[19] 李旭, 季宏兵, 张言, 等. 不同制备温度下水生植物生物炭吸附 Cd²⁺ 研究 [J]. 水处理技术, 2019, 45 (9): 68-73+77.

[20] 申磊, 荆延德, 孙小银, 等. 动植物来源生物炭对水体

- 中 Cd²⁺ 的吸附特性 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (4): 363-370.
- [21] 曹健华, 刘凌沁, 黄亚继, 等. 原料种类和热解温度对生物炭吸附 Cd²⁺ 的影响 [J]. 化工进展, 2019, 38 (9): 4183-4190.
- [22] 孙达, 汪华, 孔燕, 等. 水稻秸秆生物炭和猪粪生物炭对镉的吸附性能 [J]. 浙江农业科学, 2020, 61 (2): 308-313.
- [23] Chen Z L, Zhang J Q, Huang Y, et al. Removal of Cd and Pb with biochar made from dairy manure at low temperature [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18 (1): 201-210.
- [24] Mambo M, Sikwila T L, Edith S, et al. Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies on biosorption of Cd (II) from aqueous solution by biochar [J]. Research on Chemical Intermediates, 2016, 42 (2): 1349-1362.
- [25] Hyder A H M G, Begum S A, Egiebor N O. Sorption studies of Cr (VI) from aqueous solution using bio-char as an adsorbent [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2014, 69 (11): 2265-2271.
- [26] 张双杰, 邢宝林, 黄光许, 等. 核桃壳水热炭对六价铬的吸附特性 [J]. 化工进展, 2016, 35 (3): 950-956.
- [27] 张双杰, 邢宝林, 黄光许, 等. 柚子皮水热炭对六价铬的吸附 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (5): 2731-2737.
- [28] Zhang X, Fu W J, Yin Y X, et al. Adsorption-reduction removal of Cr (VI) by tobacco petiole pyrolytic biochar: batch experiment, kinetic and mechanism studies [J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 149-157.
- [29] Amita S, Tripti A. Removal of Cr (VI) from water using pineapple peel derived biochars: Adsorption potential and re-usability assessment [J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 293: 111497.
- [30] Usman K, Muhammad B S, Shafaqat A, et al. Adsorption-reduction performance of tea waste and rice husk biochars for Cr (VI) elimination from wastewater [J/OL]. Journal of Saudi Chemical Society, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.07.001>.
- [31] Myoung E L, Jin H P, Jae W C. Comparison of the lead and copper adsorption capacities of plant source materials and their biochars [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 236: 118-124.
- [32] Amin M T, Alazba A A, Shafiq M. Removal of copper and lead using banana biochar in batch adsorption systems: Isotherms and kinetic studies [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43 (11): 5711-5722.
- [32] Pehlivan E, Kahraman H, Pehlivan E. Sorption equilibrium of Cr (VI) ions on oak wood charcoal (Carbo Ligni) and charcoal ash as low-cost adsorbents [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 92 (1): 65-70.
- [33] Mei Y L, Li B, Fan S S. Biochar from rice straw for Cu²⁺ removal from aqueous solutions: Mechanism and contribution made by acid-soluble minerals [J]. Water, Air & Soil Pollution: An International Journal of Environmental Pollution, 2020, 231: 420.
- [34] Shi X Z, Na T, Xu D W. Absorption of Cu (II) and Zn (II) from aqueous solutions onto biochars derived from apple tree branches [J]. Energies, 2020, 13 (13): 3498.
- [35] 王卓行, 周晓馨, 楼子墨, 等. 病死猪热解炭化物的特性及其对水中 Cu²⁺ 的去除 [J]. 环境科学学报, 2016, 36 (8): 2885-2892.
- [36] 王开峰, 彭娜, 曾令泽, 等. 水葫芦生物炭对水溶液中 Cu²⁺ 的吸附研究 [J]. 嘉应学院学报, 2016, 34 (11): 35-41.
- [37] 马洁晨, 汪新亮, 张学胜, 等. 不同热解温度龙虾壳生物炭特征及对 Zn²⁺ 的吸附机制 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35 (7): 900-908.
- [38] 郭素华, 许中坚, 李方文, 等. 生物炭对水中 Pb (II) 和 Zn (II) 的吸附特征 [J]. 环境工程学报, 2015, 9 (7): 3215-3222.
- [39] 谢伟雪, 刘孝敏, 李小东, 等. 废毛发生物炭的特性及其对 Ni (II) 和 Zn (II) 的吸附研究 [J]. 环境工程技术学报, 2018, 8 (6): 656-661.
- [40] 张杏锋, 聂小奇, 姚航, 等. 羊粪生物炭对 Pb、Zn、Cd 和 Cu 吸附特性及机制 [J]. 水处理技术, 2020, 46 (5): 24-29.
- [41] Yang H P, Yan R, Chen H P, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis [J]. Fuel, 2006, 86 (12-13): 1781-1788.
- [42] 林宁, 张晗, 贾珍珍, 等. 不同生物质来源生物炭对 Pb (II) 的吸附特性 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35 (5): 992-998.
- [43] 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 (6): 1075-1082.
- [44] 张政, 林匡飞, 崔长征, 等. 肉骨生物炭对重金属 Pb²⁺ 的吸附特性 [J]. 水处理技术, 2016, 42 (12): 50-54.
- [45] Liu Z G, Zhang F S, Wu J Z. Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment [J]. Fuel, 2010, 89 (2): 510-514.
- [46] 向天勇, 单胜道, 张正红, 等. 水热、热裂解制备稻秸炭的表征与吸附特性 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (1): 72-76.
- [47] Sun J K, Lian F, Liu Z Q, et al. Biochars derived from various crop straws: Characterization and Cd (II) removal potential [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 106: 226-231.
- [48] 贾丹, 王丽敏, 黄进文. 玉米芯生物炭对水中 Pb (II) 的吸附 [J]. 粮食与油脂, 2019, 32 (2): 41-45.
- [49] 郜礼阳, 邓金环, 唐国强, 等. 不同温度桉树叶生物炭对 Cd²⁺ 的吸附特性及机制 [J]. 中国环境科学, 2018, 38 (3): 1001-1009.
- [50] 严云, 余晓燕, 刘洪, 等. 一种鱼腥草生物炭对水中 Cr (VI) 吸附性能研究 [J]. 地球与环境, 2018, 46 (4): 396-402.

- [51] 谢好, 宋卫军. 薏米壳生物炭的制备及其对 Cr (VI) 的吸附性能 [J]. 化工环保, 2017, 37 (5): 525-532.
- [52] 刘延湘, 黄彪, 张丽. 花生壳生物炭对水中重金属 Cr⁶⁺、Cu²⁺的吸附研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (13): 81-85.
- [53] 李必才, 邓舒畅. 黑茶茶渣制备生物炭吸附废水中 Cr (VI) 研究 [J]. 科技创新与应用, 2019 (27): 75-77+80.
- [54] 郭海艳, 李雪琴, 王章鸿, 等. 蚯蚓粪生物炭对 Cu (II) 的吸附性能 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (7): 3811-3818.
- [55] 代兵, 谭长银, 曹雪莹, 等. 荷梗生物炭理化性质及其对水中 Cd 的吸附机制 [J]. 环境科学研究, 2019, 32 (3): 513-522.
- [56] 黄菲, 闫梦, 常建宁, 等. 不同菌糠生物炭对水体中 Cu²⁺、Cd²⁺的吸附性能 [J]. 环境化学, 2020, 39 (4): 1116-1128.
- [57] 王棋, 王斌伟, 谈广才, 等. 生物炭对 Cu (II)、Pb (II)、Ni (II) 和 Cd (II) 的单一及竞争吸附研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2017, 53 (6): 1122-1132.
- [58] 陈佼, 张建强, 陆一新, 等. 改性猪粪生物炭对水中 Cr (VI) 的吸附性能 [J]. 水处理技术, 2017, 43 (4): 31-35+41.
- [59] 徐大勇, 张苗, 杨伟伟, 等. 氧化铝改性污泥生物炭制备及其对 Pb (II) 的吸附特性 [J]. 化工进展, 2020, 39 (3): 1153-1166.
- [60] 孟莉蓉, 俞浩丹, 杨婷婷, 等. 改性豆饼生物质炭对铅的吸附特性 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (7): 643-650.
- [61] 李静, 邵孝候, 林锴, 等. 纳米 Fe₃O₄ 负载酸改性炭对水体中 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附 [J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37 (2): 241-251.
- [62] Zhen G L, Fu S Z. Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167 (1): 933-939.
- [63] Saima B, Muhammad I, Qaiser H, et al. Adsorption of copper (II) by using derived-farmyard and poultry manure biochars: Efficiency and mechanism [J]. Chemical Physics Letters, 2017, 689: 190-198.