

# An Overview of Heavy-Metal Removal from Water with Biochar

Yunchun Zhang

College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong Sichuan  
Email: yunchunzhang@163.com

Received: Aug. 4<sup>th</sup>, 2017; accepted: Aug. 31<sup>st</sup>, 2017; published: Sep. 5<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Biochar is a stable carbon-rich product synthesized through pyrolysis/carbonization of plant- and animal-based biomass. Due to its abundant pore structure, unique chemical properties, adsorption capacities, cheap cost and easy processing, biochar has been widely applied to heavy-metal wastewater treatment. This review focused on the concept and properties of biochar, mechanisms and affecting factors of biochar interactions with metals and discussed the future research direction in waste water treatment.

## Keywords

Biochar, Water Pollution, Heavy Metal

---

## 生物炭在去除废水中重金属的应用现状

张运春

西华师范大学 环境科学与工程学院, 四川 南充  
Email: yunchunzhang@163.com

收稿日期: 2017年8月4日; 录用日期: 2017年8月31日; 发布日期: 2017年9月5日

---

## 摘 要

生物炭(Biochar)是动植物材料经厌氧限温裂解制备而成的一种碳含量丰富的稳定性多孔炭。由于其丰富的孔隙结构和独特的表面化学性质而具有良好的吸附性,且廉价易加工,被广泛应用于废水重金属处理中。本文对生物炭的概念、基本特性、生物炭吸附废水中重金属的机理与影响吸附的因素等进行了综述,并探讨了生物炭在重金属废水处理中未来的研究方向。

## 关键词

生物炭, 水污染, 重金属

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

重金属通常以不同形态存在于大气、水体、土壤等自然环境中,有些重金属(或其化合物)即使在痕量水平也能对生物产生毒害作用。重金属在环境中不能被生物降解,而且能在生物体内富集并随着食物链逐级放大,被生物体摄入后,可能引发急性中毒,也对生物体具有慢性致畸、致癌、致突变作用[1]。随着工农业生产的发展,重金属通过矿山开采、金属冶炼加工、化工废水的排放、农药和化肥的滥用以及各类垃圾的弃置等人为污染及地质侵蚀、风化等天然源形式进入环境中[2],使得环境中重金属积累逐年加剧,重金属污染引发的人类健康危机频频发生,更为严重的是重金属污染具有隐蔽性、长期性、不可逆性及后果严重性等特点,因此重金属废水的治理已受到国内外科研工作者的高度重视,如何消除重金属的危害并有效地回收重金属是当今环境保护工作面临的突出问题。目前去除污染水体中重金属的方法主要有[3]:化学法,包括沉淀法、还原法和高分子重金属捕集法等;物理法,包括吸附、溶剂萃取、蒸发和凝固法、离子交换法和膜分离等;生物方法,包括植物净化和微生物处理技术。

吸附法作为去除污染水体中重金属的一种有效环保的方法,受到了广泛关注。生物炭作为一种新型高效廉价的吸附剂,近年来逐渐成为环境、能源等诸多领域的关注焦点。生物炭(Biochar)是废弃生物材料通过高温热裂解的方法在缺氧或少氧的条件下形成的一类高度难溶的、稳定的、高度芳香化的、富含碳素的黑色蓬松状固态物质,是属于黑炭范畴的一种,组成元素主要是碳、氢、氧、氮等,含碳量在70%以上[4]。根据原料不同,还含有钾、钙、铁、镁、钠、锌、铜等元素[5]。生物炭作为一种新型吸附剂,由于具有孔隙度好、比表面积大、吸附能力强且来源广泛的特点,这些特性使得生物炭在吸附废水中的重金属等污染物方面具有巨大的潜力,现已广泛应用于吸附菲[6]、西维因[7]、多环芳烃[8]、重金属[9][10]等多种污染物。本文对生物炭作为重金属吸附剂在重金属废水处理中应用的国内外研究现状进行总结,希望为生物炭在我国的研究与推广应用提供参考。

## 2. 生物炭去除废水中重金属

废水中重金属的处理方法很多,传统的方法主要包括化学沉淀法、离子交换法、电化学法、膜过滤法等。近年来,吸附法由于操作简单、吸附能力强、尤其适用于对低浓度污染的废水等特点,已经引起了人们的广泛关注。制备生物炭的原料一般为工农业废弃物,这为现今废弃物变废为宝、资源化利用提供了新的方向,符合可持续发展战略,并已经有了大量的研究。目前对生物炭去除废水中重金属的研究主要集中在生物炭制备的原料和制备反应条件。

生物炭的原料一般为植物及其废弃物,通过过热裂解的方式制备而成,常见的生物炭包括木炭、竹炭、秸秆炭、稻壳炭等。生物炭主要由碳组分和矿质成分组成,通常研究认为碳组分决定着生物炭的吸附能力,近期研究表明其中的矿质成分也对生物炭的吸附作用有着显著的贡献[11]。不同生物质材料的碳组分和矿质成分不同,从而制备的生物炭的吸附能力也不同,如:不同生物炭类型对  $Pb^{2+}$  的吸附能力有

显著的差异(表 1)。

生物炭的制备的反应条件不仅影响生物炭的产量,也影响其结构和元素组成。其中温度是影响生物炭结构和性质的重要因素,温度对生物炭孔隙结构、比表面积及吸附特性。例如,猪粪在 600℃下产生的生物炭表面积大于 400℃下产生的生物炭[23]。不同温度下制备的生物炭由于结构的不同对废水中同种金属的吸附能力有所不同,如:不同温度下同种材料制备的生物炭对  $Pb^{2+}$  的吸附能力有显著的差异(表 2)。

**Table 1.** Adsorption capacity of different types of biochar for  $Pb^{2+}$

**表 1.** 不同类型生物炭对  $Pb^{2+}$  的吸附能力

生物炭类型	最大吸附量(mg/g)	数据来源
牛粪生物炭	140.9	[12]
亚麻纤维生物炭	147.0	[13]
玉米生物炭	270.0	[14]
水稻秸秆生物炭	104.2	[15]
松木生物炭	279.7	[16]
小麦秸秆生物炭	50.0	[17]
玉米秸秆生物炭	76.9	[17]
花生壳生物炭	45.5	[17]
核桃青皮生物炭	476.2	[18]
大米皮生物炭	2.4	[19]
消解甘蔗渣生物炭	135.4	[20]
未处理甘蔗渣生物炭	81.9	[20]
污泥生物炭	30.9	[21]
巴西阔叶硬木生物炭	47.7	[22]
猪粪生物炭	230.7	[23]

**Table 2.** Adsorption capacity of biochar for  $Pb^{2+}$  at different temperatures

**表 2.** 不同制备温度下生物炭对  $Pb^{2+}$  的吸附能力

生物炭类型	制备温度(°C)	最大吸附量(mg/g)	数据来源
水稻秸秆生物炭	100	12.8	[24]
	350	65.3	
	500	85.7	
	700	76.3	
玉米秸秆生物炭	250	23.6	[25]
	350	17.7	
	400	16.9	
	450	15.0	
杨树枝生物炭	700	52.9	[25]
	250	25.4	
	350	35.7	
	400	24.1	
污泥生物炭	450	15.5	[26]
	300	189.5	
	400	194.2	
	500	211.8	

### 3. 生物炭去除废水中重金属的机制

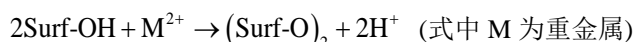
与活性炭不同, 不经过活化处理生物炭对于铅、铜、锌等众多重金属就具有良好的吸附效果。研究表明, 不同的生物炭废水中同种重金属的吸附去除机理不同, 同种生物炭对废水中不同重金属的吸附去除机理也不尽相同, 其去除机理主要包括以下几种: 物理吸附; 金属阳离子与生物炭表面负电荷之间的静电作用; 金属阳离子与酸性炭表面的电离质子的离子交换作用; 金属离子与生物炭上的矿物质或官能团(羧基、醇、羟基、内酯、羰基等)作用生成沉淀或络合物等[27]。

#### 3.1. 物理吸附

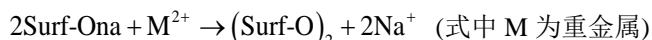
有研究认为, 物理吸附在生物炭去除废水中重金属离子起着重要作用[28]。生物炭的物理结构与活性炭类似, 都是由许多无序的小单元构成的[29]。从而, 生物炭具有较大的比表面积, 这些无序的结构具有较高表面能, 能很好的吸附废水中的金属离子, 因此能够较好地去除废水中的重金属。吴成等[14]研究玉米秸秆生物炭对  $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{As}^{3+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 和  $\text{Cd}^{2+}$ 的吸附表明其吸附过程是可逆的, 认为生物炭对重金属离子的吸附为亲合力极弱的非静电物理吸附; Inyang 和 Gao [20]等人用甘蔗渣吸附  $\text{Pb}^{2+}$ 时发现, 生物炭吸附重金属离子的作用机理除了沉淀反应外还有物理吸附的作用; Kołodyńska 等人用猪粪生物炭吸附  $\text{Cu}^{2+}$ 和  $\text{Pb}^{2+}$ 时发现, 生物炭对重金属离子的吸附是一个复杂的离子内扩散的物理吸附过程[23]; Cao 等[12]研究奶牛粪生物炭去除  $\text{Pb}^{2+}$ 时, Dinesh Mohan 等[4]研究木材和树皮生物炭去除  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{As}^{3+}$ 时, 也发现物理吸附对生物炭吸附重金属离子有一定的作用。

#### 3.2. 离子交换

重金属离子在生物炭表面的离子交换吸附被认为生物炭对重金属离子的吸附另一主要方式[30]。离子交换的本质是生物炭表面带负电荷基团与溶液中正电荷的金属离子的静电作用, 属于非专性吸附, 吸附能较低。金属离子与表面酸性官能团交换的反应通式可表达为[30]:



碱金属或碱土金属与表面盐基离子交换的反应通式可表达为[20]:



Liu 和 Zhang [19]研究发现, 松木生物炭和稻壳生物炭含有大量的含氧官能团, 这些官能团对于吸附去除  $\text{Pb}^{2+}$ 起着至关重要的作用。在适宜的 pH 值下, 官能团上失去质子与金属阳离子发生作用使吸附量增大。Dinesh Mohan 等[4]用木材或树皮快速热解制得的生物炭吸附  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{As}^{3+}$ , 实验表明生物炭对金属离子的吸附主要是离子交换作用。亚麻纤维束生物炭对重金属离子的吸附机理主要是在生物炭表面发生离子交换作用, 随着金属离子被吸附的过程水中质子数有所增加[13]。

#### 3.3. 络合或化学沉淀

某些金属离子能与生物炭表面官能团形成了特定的金属配合物, 从而被生物炭吸附。甘蔗渣生物炭对  $\text{Cr}^{3+}$ 的吸附主要是  $\text{Cr}^{3+}$ 与生物炭上官能团发生络合反应[31]。Gilbert 等[32]研究脱脂番木瓜种子去除重金属离子时发现, 生物炭吸附重金属离子主要是因为生物炭表面的官能团的作用, 从而重金属离子与生物炭结合在一起形成络合物。徐楠楠等[10]认为玉米秸秆生物炭对  $\text{Cd}^{2+}$ 的化学吸附机制主要为表面羟基和羰基与  $\text{Cd}^{2+}$ 发生络合化学反应作用。Cao 等[12]比较了动物粪肥在 200℃和 350℃下烧制的生物炭与商品活性炭对  $\text{Pb}^{2+}$ 的吸附效果, 认为牛粪制成的生物炭对铅具有很强的吸附能力, 主要是因为  $\text{Pb}^{2+}$ 和生物炭中的 P 和碳酸根发生沉淀作用, 84%~87%的  $\text{Pb}^{2+}$ 通过与生物炭中富含的磷酸盐和碳酸盐发生沉淀作

用而被吸附, 仅 13%~16%的  $\text{Pb}^{2+}$  通过表面配合吸附作用被吸附。Inyang 等[20]对  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附研究也证明生物炭吸附重金属离子主要是基于表面沉淀机理。 $\text{Hg}^{2+}$  在碱性生物炭表面可以形成好  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  或  $\text{HgCl}_2$  沉淀[33]。

#### 4. 生物炭去除废水中重金属的影响因素

生物炭对废水中重金属离子的吸附会受到诸多因素的影响。其中生物炭性状(如比表面积、表面活性基团的数目、表面电荷等)以及重金属离子的理化性质是两个较为重要的影响因素, 此外, 吸附过程中的外界环境条件(pH、温度、污染物初始浓度、离子强度等)也会在一定程度上影响生物炭对重金属离子的吸附行为。

##### 4.1. 吸附剂的性质

生物炭吸附剂的性质是影响其吸附重金属的重要因素之一。生物炭的制备方式和材料极大的影响着生物炭的比表面积、孔隙结构、表面官能团和元素组成等性状, 这些都与其对重金属的吸附能力息息相关。

制备材料生物炭的制备材料来源广泛, 如城市污泥、木本植物、草本植物、作物秸秆、甘蔗渣、猪粪等, 许多原料制备的生物炭都已经用于重金属吸附研究中。不同来源制备材料和不同制备条件获得的生物炭的理化性质迥然不同, 化学组成也有所差异, 吸附能力也不尽相同。这主要是因为原料的不同, 影响了生物炭的元素组成和生物炭表面官能团种类和丰度。如, 在小麦秸秆、玉米秸秆和花生壳制成的生物炭对水溶液中  $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附研究显示玉米秸秆炭的最大吸附量远大于小麦秸秆炭和花生壳炭[17]。

生物炭的制备方式生物炭的结构、元素组成和表面官能团都有极大影响。其中温度是影响生物炭结构和性质的重要因素, 温度对生物炭孔隙结构、比表面积及吸附特性。不同制备方式得到的生物炭对废水中重金属离子的吸附能力也不相同, 如在 200℃、300℃、400℃、500℃下制备的小麦秸秆生物炭对污水中铜离子的吸附性能研究表明, 随着炭化温度升高, 秸秆的微孔变形程度加剧, 表面粗糙程度增加, 孔道效应更易发挥, 增加了生物炭对铜离子的吸附量[34]。

##### 4.2. 废水的 pH 值

溶液 pH 不仅会影响重金属离子的存在形态, 而且决定了生物炭表面的电荷密度, 改变生物炭表面物理化学性质, 从而影响溶液中重金属离子和生物炭的结合, 进而改变生物炭对废水中重金属的去除效果。例如, 在 0.01 mol/L 的  $\text{NaNO}_3$  溶液中, pH > 7.01 时, 溶液中的二价铅主要以  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{PbNO}_3^+$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{PbOH}^+$  的形式存在[35]。pH 值在 2.50~6.50 范围内, 随着溶液 pH 升高, 生物炭对铅的吸附量迅速增加[10]。在不同 pH 值下, 生物炭的表面物理化学性质也影响着生物炭对废水中重金属的去除效果。Liu 和 Zhang [19]研究表明, 当 pH 值较低时, 生物炭表面的官能团都和  $\text{H}^+$  结合在一起, 无法与金属阳离子发生络合; 随 pH 值的升高, 官能团失去质子与金属离子络合, 金属去除率升高; 然而当 pH 值大于 5 时, 去除率又开始下降, 这主要是由于金属离子生成水溶性羟基络合物的缘故。安增莉等[9]用酸碱位点和零电荷点解释溶液酸度对金属离子吸附的影响, 当溶液  $\text{pH} < \text{pHpzc}$  ( $\text{pHpzc}$  为表面电荷为零时溶液对应的 pH 值)时, 生物炭表面带正电荷, 生物炭表面的金属离子与溶液中的金属离子发生交换, 从而吸附废水中的金属离子减少溶液中重金属含量; 当溶液  $\text{pH} > \text{pHpzc}$  时, 生物炭表面带负电荷, 生物炭依靠静电作用吸附溶液中的重金属。pH 值较低时,  $\text{H}^+$  与金属离子的竞争, 降低了生物炭对金属离子的吸附; pH 值过高时, 氢氧化物阴离子络合物的形成, 减小了金属离子的自由度, 故而, 过高或过低的 pH 值都不利于废水中金

属离子的吸附去除。

### 4.3. 温度

吸附过程通常会受温度的调控,因此环境温度对生物炭吸附行为也起着重要作用。吸附温度能够生物炭表面基团吸附热动力和吸附热容等因素,进而影响吸附效果对于不同的生物炭吸附剂,温度对金属吸附量的影响有所不同,如果生物炭吸附是一个放热反应的过程,则生物炭对重金属的吸附能力一般随温度的下降而增大,若生物炭吸附是一个吸热反应的过程,则生物炭对重金属的吸附能力可能随温度的升高而增大[36]。研究表明污泥吸附剂对  $\text{Pb}^{2+}$  的去除率随温度的升高而增大,温度超过  $30^\circ\text{C}$ ,去除率提高不显著[37]。温度的上升能使吸附物在吸附剂孔内更快的扩散,升温还可能使得一些活性点位附近的内在化学键断裂,从而增加吸附点位,温度升高加快吸附剂的吸附速率;同时吸附过程还也包含化学吸附的吸热反应,温度升高,吸附反应相应加快。

### 4.4. 吸附时间

生物炭对废水中重金属离子的吸附过程是一个复杂的过程,既包括物理吸附作用又包括化学吸附作用,还受到金属离子扩散速度和生物炭附近微环境金属离子浓度的影响。随着时间的变化,生物炭对废水中金属离子的吸附状态发生变化,一般而言最初以物理吸附为主,金属离子在生物炭中的扩散速度影响着其最初吸附速度,继而以化学吸附为主;随时间变化附近微生境中金属离子的浓度也逐渐下降,从而最初吸附速度较快,随后减慢直至饱和。吸附能力和吸附速度是衡量吸附过程的主要指标,吸附速度是指单位重量的吸附剂在单位时间内所吸附的物质质量。在污水处理中,吸附速度决定了污水与吸附剂接触所需的时间。丁文川等[38]在研究城市污水污泥生物炭对水中  $\text{Pb}^{2+}$  的去除效果时发现,最初 90 分钟内,去除率随时间几乎呈直线上升,最高达到 94%;反应至 180 分钟,去除率达到 96%,再延长反应时间,去除率变化很小。李斌[31]也发现,吸附时间对活性生物炭吸附  $\text{Pb}^{2+}$  有很大的影响,随着吸附的进行,含  $\text{Pb}^{2+}$  溶液的浓度逐渐减小,生物炭的吸附容量逐渐增加,吸附过程经历了快速的吸附阶段,慢速的吸附阶段和平衡吸附阶段。

## 5. 展望

生物炭作为一种新型的吸附剂,对废水中大多数重金属如铅、铬、镉、锌等都具有良好的吸附效果,近年来,成为环境领域关注的热点。通过科研人员大量研究,在其对水体中重金属污染物的吸附机理的研究中取得了一定的进展。但是,目前已有的研究多为对一种重金属吸附的实验室研究工作,而水体中重金属污染情况复杂,通常存在多种重金属复合污染。近期少数生物炭对复合重金属废水吸附研究表明,多种重金属对生物炭的吸附存在竞争作用[39],水体中其它污染物对生物炭对重金属的吸附作用也可能存在竞争或抑制作用。因此,生物炭对重金属复合污染的机制研究是未来的一个研究重点。目前生物炭去除废水中重金属的研究仅停留在实验室的模拟与分析上,在重金属污染废水上的工程应用未见报道,实际重金属污染废水要比目前实验室所用的模拟废水复杂,生物炭大面积应用于重金属污染水体治理与修复的技术参数的探究已然成为今后研究的一个重要方向。虽然生物炭来源丰富、造价低廉,但在工程应用中生物炭的成本仍是一个不可忽视的因素,寻找更廉价高效去除重金属的生物炭、改性提高去除效率以及生物炭的再生利用也是未来研究的一个重要方向。

## 基金项目

教育部留学回国人员科研启动基金([2105]1098);西华师范大学基本科研业务费资金。

## 参考文献 (References)

- [1] 孔志明. 环境毒理学[M]. 第5版. 南京: 南京大学出版社, 2012.
- [2] 葛俊森, 梁渠. 水中重金属危害现状及处理方法[J]. 广州化工, 2007, 35(5): 69-70.
- [3] 张丽娜, 裴强, 安亚明, 陈媛华, 刘亮. 重金属污水处理的研究与发展[J]. 农业工程, 2012, 2(11): 30-32.
- [4] Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y.S. and Pittman Jr., C.U. (2014) Organic and Inorganic Contaminants Removal from Water with Biochar, a Renewable, Low Cost and Sustainable Adsorbent—A Critical Review. *Bioresource Technology*, **160**, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>
- [5] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 朱春悟. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43(6): 857-861.
- [6] 陈宁, 吴敏, 许菲, 陈会会, 王震宇, 宋秀丽, 张迪, 宁平, 潘波. 滇池底泥制备的生物炭对菲的吸附-解吸[J]. 环境化学, 2011, 30(12): 2026-2031.
- [7] 张鹏, 武健羽, 李力, 刘娅, 孙红文, 孙铁珩. 猪粪制备的生物炭对西维因的吸附与催化水解作用[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 416-421.
- [8] 花莉, 陈英旭, 吴伟祥, 马宏瑞. 生物质炭输入对污泥施用土壤-植物系统中多环芳烃迁移的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2419-2424.
- [9] 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 谢忠雷, 梁学峰, 郭文娟. 玉米秸秆生物炭对Cd<sup>2+</sup>的吸附特性及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014(5): 958-964.
- [10] 安增莉, 侯艳伟, 蔡超, 薛秀玲. 水稻秸秆生物炭对Pb(II)的吸附特性[J]. 环境化学, 2011, 30(11): 1851-1857.
- [11] Xu, X., Zhao, Y., Sima, J., Zhao, L., Mašek, O. and Cao, X. (2017) Indispensable Role of Biochar-Inherent Mineral Constituents in Its Environmental Applications: A Review. *Bioresource Technology*, **241**, 887-899.
- [12] Cao, X., Ma, L., Gao, B. and Harris, W. (2009) Dairy-Manure Derived Biochar Effectively Sorbs Lead and Atrazine. *Environmental Science & Technology*, **43**, 3285-3291. <https://doi.org/10.1021/es803092k>
- [13] El-Shafey, E., Cox, M., Pichugin, A.A. and Appleton, Q. (2002) Application of a Carbon Sorbent for the Removal of Cadmium and Other Heavy Metal Ions from Aqueous Solution. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **77**, 429-436. <https://doi.org/10.1002/jctb.577>
- [14] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 黑碳吸附汞砷铅镉离子的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007(2): 770-774.
- [15] 李瑞月, 陈德, 李恋卿, 潘根兴, 陈建清, 郭虎. 不同作物秸秆生物炭对溶液中Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>的吸附[J]. 农业环境科学学报, 2015(5): 1001-1008.
- [16] Gercel, O. and Gercel, H.F. (2007) Adsorption of Lead (II) Ions from Aqueous Solutions by Activated Carbon Prepared from Biomass Plant Material of *Euphorbia rigida*. *Chemical Engineering Journal*, **132**, 289-297.
- [17] 刘莹莹, 秦海芝, 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉, 郑金伟, 韩晓君, 俞欣研. 不同作物原料热裂解生物炭对溶液中Cd<sup>2+</sup>和Pb<sup>2+</sup>的吸附特性[J]. 生态环境学报, 2012(1): 146-152.
- [18] 谢超然, 王兆炜, 朱俊民, 高俊红, 张涵瑜, 谢晓芸, 金诚. 核桃青皮生物炭对重金属铅、铜的吸附特性研究[J]. 环境科学学报, 2016(4): 1190-1198.
- [19] Liu, Z. and Zhang, F. (2009) Removal of Lead from Water using Biochars Prepared from Hydrothermal Liquefaction of Biomass. *Journal of Hazardous Materials*, **167**, 933-939.
- [20] Inyang, M., Gao, B., Ding, W., Pullammanappallil, P., Zimmerman, A.R. and Cao, X. (2011) Enhanced Lead Sorption by Biochar Derived from Anaerobically Digested Sugarcane Bagasse. *Separation Science and Technology*, **46**, 1950-1956. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.584604>
- [21] Lu, H., Zhang, W., Yang, Y., Huang, X., Wang, S. and Qiu, R. (2012) Relative Distribution of Pb<sup>2+</sup> Sorption Mechanisms by Sludge-Derived Biochar. *Water Research*, **46**, 854-862.
- [22] Shen, Z., Jin, F., Wang, F., McMillan, O. and Al-Tabbaa, A. (2015) Sorption of Lead by Salisbury Biochar Produced from British Broadleaf Hardwood. *Bioresource Technology*, **193**, 553-556.
- [23] Kolodynska, D., Wnetrzak, R., Leahy, J.J., Hayes, M.H.B., Kwapinski, W. and Hubicki, Z. (2012) Kinetic and Adsorptive Characterization of Biochar in Metal Ions Removal. *Chemical Engineering Journal*, **197**, 295-305.
- [24] 陈再明, 方远, 徐义亮, 陈宝梁. 水稻秸秆生物炭对重金属Pb<sup>2+</sup>的吸附作用及影响因素[J]. 环境科学学报, 2012(4): 769-776.
- [25] 赵丽芳. 热解温度对生物炭性质及其重金属吸附特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [26] 卢欢亮, 叶向东, 汪永红, 仇荣亮. 热解温度对污泥生物炭的表面特性及重金属安全性的影响[J]. 环境工程学报, 2015(3): 1433-1439.

- [27] Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S. and Ok, Y.S. (2014) Biochar as a Sorbent for Contaminant Management in Soil and Water: A Review. *Chemosphere*, **99**, 19-33.
- [28] 李力, 刘娅, 陆宇超, 梁中耀, 张鹏, 孙红文. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011(8): 1411-1421.
- [29] Liu, P., Liu, W., Jiang, H., Chen, J., Li, W. and Yu, H. (2012) Modification of Bio-Char Derived from Fast Pyrolysis of Biomass and Its Application in Removal of Tetracycline from Aqueous Solution. *Bioresource Technology*, **121**, 235-240.
- [30] 李力, 陆宇超, 刘娅, 孙红文, 梁中耀. 玉米秸秆生物炭对 Cd(II)的吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2012(11): 2277-2283.
- [31] Dong, X., Ma, L.Q. and Li, Y. (2011) Characteristics and Mechanisms of Hexavalent Chromium Removal by Biochar from Sugar Beet Tailing. *Journal of Hazardous Materials*, **190**, 909-915.
- [32] Gilbert, U.A., Emmanuel, I.U., Adebajo, A.A. and Olalere, G.A. (2011) Biosorptive Removal of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> onto Novel Biosorbent: Defatted Carica Papaya Seeds. *Biomass & Bioenergy*, **35**, 2517-2525.
- [33] Kong, H., He, J., Gao, Y., Wu, H. and Zhu, X. (2011) Cosorption of Phenanthrene and Mercury (II) from Aqueous Solution by Soybean Stalk-Based Biochar. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **59**, 12116-12123.  
<https://doi.org/10.1021/jf202924a>
- [34] 张继义, 蒲丽君, 李根. 秸秆生物炭质吸附剂的制备及其吸附性能[J]. 农业工程学报, 2011(S2): 104-109.
- [35] Qiu, Y., Cheng, H., Xu, C. and Sheng, D. (2008) Surface Characteristics of Crop-Residue-Derived Black Carbon and Lead (II) Adsorption. *Water Research*, **42**, 567-574.
- [36] Gupta, V.K., Carrott, P.J.M., Carrott, R. and Suhas, M.M.L. (2009) Low-Cost Adsorbents: Growing Approach to Wastewater Treatment a Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **39**, 783-842.  
<https://doi.org/10.1080/10643380801977610>
- [37] 李斌. 利用造纸污泥制备活性生物炭及其对铅吸附性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [38] 丁文川, 杜勇, 曾晓岚, 刘任露. 富磷污泥生物炭去除水中 Pb(II)的特性研究[J]. 环境化学, 2012(9): 1375-1380.
- [39] Park, J.H., Ok, Y.S., Kim, S.H., Cho, J.S., Heo, J.S., Delaune, R.D. and Seo, D.C. (2016) Competitive Adsorption of Heavy Metals onto Sesame Straw Biochar in Aqueous Solutions. *Chemosphere*, **142**, 77-83.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [wpt@hanspub.org](mailto:wpt@hanspub.org)