

Research Progress of Biochar in Soil Restoration of Lead and Cadmium Composite Contaminated Soil

Ling Chen, Qingwei Zhang, Xiucan Yang, Xiaoli Wang*

College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang Guizhou
Email: 960550862@qq.com, *xlwang@gzu.edu.cn

Received: Sep. 19th, 2018; accepted: Oct. 8th, 2018; published: Oct. 15th, 2018

Abstract

Biochar is a kind of highly aromatic refractory solid material which is formed by carbonization of organic materials under anaerobic conditions. It has good structure, large specific surface area and adsorption capacity. Numerous studies had shown that biochar, as a new passivating agent, can reduce the acid extractable lead (Cd) and cadmium (Pb) in soil by a series of reactions such as complexation, precipitation, adsorption and ion exchange with heavy metals. This paper summarized the researches of biochar in soil remediation of Cd and Pb pollution in recent years, and explored the difference between the effect of biochar remediation of Cd and Pb combined pollution and single contaminated soil from the aspects of curing heavy metals, repairing effect and influencing factors in order to provide the basis for the research on heavy metal combined pollution remediation of biochar. The long-term effect of biochar on heavy metal combined pollution should be strengthened in the future.

Keywords

Biochar, Cd, Pb, Soil Recovery

生物炭在铅、镉污染土壤修复中的研究进展

陈 颖, 张青伟, 杨秀才, 王小利*

贵州大学农学院, 贵州 贵阳
Email: 960550862@qq.com, *xlwang@gzu.edu.cn

收稿日期: 2018年9月19日; 录用日期: 2018年10月8日; 发布日期: 2018年10月15日

*通讯作者。

摘要

生物炭是有机材料在厌氧或绝氧条件下经高温裂解炭化而成的一类高度芳香难溶性固态物质,具有良好的结构、巨大的比表面积以及吸附力。众多研究表明,生物炭作为新型的钝化剂,可通过与土壤重金属发生络合、沉淀、吸附以及离子交换等一系列反应,降低土壤中酸可提取态铅(Cd)、镉(Pb)的含量。本文综述了近年来生物质炭在Cd、Pb污染土壤修复中的研究情况,分别从生物炭修复重金属的固化机理、修复效果及影响因素等方面,探究生物质炭修复Cd、Pb复合污染与单一污染土壤的效果差异,为生物炭修复重金属复合污染研究提供依据,今后应加强生物炭对重金属复合污染修复的长期效应研究。

关键词

生物炭, 镉, 铅, 土壤修复

Copyright © 2018 by authors 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

随着矿产开采、燃煤和汽车排放、冶炼等工业活动以及污水灌溉、施用污泥和劣质化肥等农业活动的进行,大量Cd、Pb等有害重金属不断进入农业环境中,对农田、菜地等造成污染[1]。2014年全国土壤污染状况调查公报显示我国土壤镉含量点位超标(0.3 mg/kg) 7%,是无机污染物点位超标率中最严重的;铅污染点位超标(250 mg/kg) 1.5% [2]。土壤中Cd、Pb等重金属通过作物生长富集在作物中,对食品安全产生严重的影响,并借由食物链转移到人体,危害人类健康[3]。

现已有研究证明,生物炭有良好的结构基础、较大的比表面积以及吸附力,是一种良好化学钝化修复剂,可用于土壤重金属污染修复[4]。生物炭可通过与土壤重金属发生络合、沉淀、吸附、离子交换等一系列反应,以减少重金属的迁移性和生物有效性,达到修复目的[5]。众多研究结果表明,生物炭能降低酸可提取态Cd、Pb的含量,从而降低重金属的生物有效性,作为改良剂修复重金属污染土壤具有可行性。本文综述生物炭在铅、镉污染土壤修复中的研究,探究生物炭在Cd、Pb复合污染与Cd、Pb单一污染的效果差异,为生物炭修复重金属复合污染研究提供依据。

2. 土壤中铅、镉的赋存形态及影响因素

土壤中重金属的毒性在很大程度上取决于重金属在土壤中存在的形态,而不仅仅是其含量。在众多的土壤重金属形态分级方法中,欧盟提出的BCR连续提取法被认为是评价重金属生物有效性的有效方法,它将土壤中重金属的形态分为酸可提取态(交换态和碳酸盐结合态)、Fe-Mn氧化结合态(可还原态)、有机结合态(可氧化态)和残渣态;酸可提取态迁移性强,可直接被生物利用;Fe-Mn氧化结合态和有机结合态在适当的环境条件下可转化为酸可提取态,可间接被生物利用;残渣态迁移性最弱,不能被生物利用[1] [6]。

土壤中铅、镉的迁移与土壤的种类、性质、pH值等因素有关,还直接受氧化还原条件的影响。土壤对镉的吸附同pH值呈正相关;土壤中 PO_4^{3-} 等离子均能影响镉的迁移转化;如 Cd^{2+} 和 PO_4^{3-} 形成难溶的、植物难吸收的 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ [7]。土壤中的 Pb^{2+} 容易被有机质和粘土矿物所吸附;腐殖质高的土壤对铅的吸

附能力强；铅也和配位体形成稳定的金属配合物和螯合物；当土壤 pH 降低时，铅的迁移能力提高，生物有效性增加[8]。前人研究显示当土壤中同时存在 Cd 和 Pb 时，Pb 会提高 Cd 的生物活性，同等 Cd 污染程度下，弱酸提取态 Cd 含量随 Pb 加入量的增加而略有增加。陈怀满等[9]动力学试验发现，Pb-Cd 混合流出液中的 Cd 很快就达到了平衡，且在一定时间区段内超过了起始浓度，这是由于后来吸附的 Pb 替代了原已吸附的 Cd，增加了 Cd 的活性。因此，土壤中的重金属活性变化是复杂的。

3. 生物质炭及其结构与性质

生物质炭广义上被认为是黑碳的一种类型，是生物有机材料(生物质)在厌氧或绝氧条件下，经高温(240°C~700°C)裂解炭化产生的一类高度芳香难溶性固态物质[10] [11] [12] [13]。生物炭的元素主要包括碳(一般 > 600 g/kg)、氢、氧等，其次是钾、钙、钠、镁、硅等矿质元素以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中，灰分溶于水后呈碱性，施于土壤中能提高土壤 pH，改善土壤养分供应状况[14] [15]。生物炭具有良好的孔隙结构，巨大的比表面积，且表面存在大量的-OH、-COOH 等含氧官能团，增加土壤阳离子交换量(CEC) [16] [17]，可以提高土壤对养分离子钙、钾、镁和 NH_4^+ 等的吸持能力，提高土壤的肥力[18]。使生物炭可以与重金属离子产生络合、静电吸附等作用，或改变土壤的持水量、pH 值、阳离子交换量等理化性质，使重金属固定或活性降低以降低其有效含量，从而减少土壤中重金属对作物生长的影响[19]。

4. 生物质炭对镉 - 铅复合污染土壤的修复

4.1. 修复机理

以 Pb 为例，生物炭对 Pb 污染土壤的修复可分为 4 个过程(图 1) [20]：

1) Pb^{2+} 与生物炭的含氧官能团发生表面络合作用。与矿物氧化物的游离 OH 发生内层络合作用，-OH、C=O、Si-O-Si 和 C-H 等表面官能团对 Cd (II) 的吸附也起重要作用[1] [21]。

2) Pb^{2+} 与生物炭表面的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等阳离子发生交换，促进金属与生物炭中的腐殖质、矿物氧化物的共沉淀和内层络合作用。生物炭具有较高的阳离子交换能力，强酸性含氧官能团的羧基可电离出 H^+ 与重金属进行离子交换[22]，可促进 Cd, Pb 形成金属氢氧化物。

3) 物理吸附和表面沉淀。生物炭因具有较大的比表面积，也能通过物理吸附来实现对重金属的钝化。在生物炭表面，多种重金属存在竞争性吸附。由于 Pb^{2+} 具有比其他重金属离子更高的电负性，使得生物炭对 Pb^{2+} 的吸附远大于对其他重金属离子的吸附[23]。

4) Pb^{2+} 在生物炭颗粒中的粒内扩散。

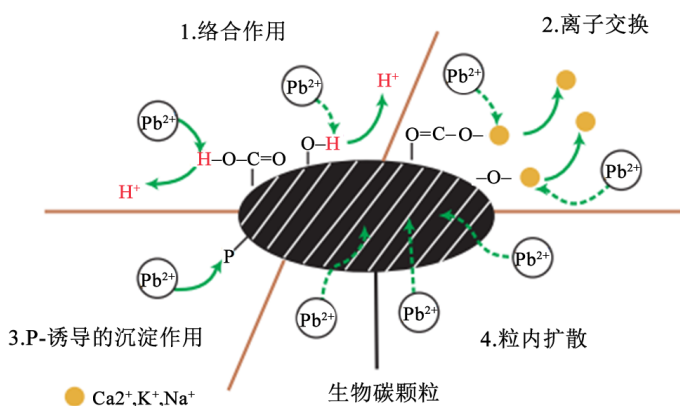


Figure 1. Curing mechanism of biochar to Pb
图 1. 生物炭对 Pb 的固化机理

有研究表明, Pb 与生物炭的含氧官能团形成络合物是生物炭吸附 Pb 的主要机理, 而阳离子交换是生物炭吸附 Cd^{2+} 主要机制[24] [25]。生物炭对重金属污染土壤理化性质的影响, 并不是单独由某一机制引起的, 而是多种机制共同发生作用。生物炭的添加除了改变土壤的 pH 值、有机质含量、阳离子交换量和氧化还原电位以外, 还会影响土壤中微生物的数量和活性、调控土壤中营养元素的循环等, 从而对土壤重金属的赋存形态产生影响。

4.2. 修复效果

重金属形态不同, 其有效性也不同, 植物可以吸收的主要是有效态重金属。大量研究表明, 生物炭的施用能影响土壤中 Cd 和 Pb 的形态分布及迁移性, 使易迁移的酸可提取态重金属转化为迁移性较弱的可还原态和残渣态[26], 从而实现重金属的固化, 使其生物有效性降低, 减少在农作物中的积累。

4.2.1. 减少 Pb、Cd 毒害形态

在 Pb 单一污染土壤中, 生物炭对 Pb^{2+} 具有较强的吸附能力。此外, 施入生物炭可提高土壤 pH, 使土壤有效态 Pb 含量降低, 铅、镉向更稳定的形态转化[27] [28] [29]。生物炭可以提高土壤养分, 改善土壤肥力状况。而土壤养分特别是土壤有机质对土壤中重金属的活性有很大影响。土壤腐殖质含有的一些功能型基团对重金属离子有很强的络合和富集能力, 这对土壤中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的固定和迁移有极其重要的影响[8]。马铁铮等[30]研究表明施用生物炭后土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量明显提高, 土壤有效态 Cd 和 Pb 降幅分别为 13.03%和 16.90%。

马铁铮[30]、李蕊蕊[31]、李海丽[32]研究发现添加生物炭后, 土壤中有效态 Cd、Pb 含量降低, 且生物炭对 Pb 的固定效果比单一污染更为明显。而周贵宇[33]的研究显示, 单一污染中 Pb 有效态含量明显降低, 但在复合污染中生物炭对 Cd 有效态有较好的固定效果。以上研究结果的不同主要由供试土壤 pH 值的差异所致, 前者 pH 值在 4.95~6.47, 后者 pH 值为 7.25。由于土壤的酸碱性会影响 Cd、Pb 的移动性, 所以会影响生物炭对 Cd、Pb 的固化效果。

4.2.2. 降低 Pb、Cd 生物有效性

生物炭可通过直接或间接的作用, 降低土壤中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的有效性, 减少作物对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的富集。生物炭可改变土壤性质, 影响重金属在植物体内的转运能力和积累。徐继敏等[34]研究发现施用玉米秸秆炭后, 土壤 pH 值、有机质和 CEC 均有所提高, 土壤 Pb 的毒性浸出量降低; Pb 的富集系数、转运系数及糙米中 Pb 的累积量均与土壤 pH 值、有机质和 CEC 呈负相关关系, 与土壤 Pb 的毒性浸出量呈正相关关系。生物炭通过吸附、络合和转化作用, 显著降低了土壤中交换态 Cd、Pb 含量, 减少植物体内 Cd、Pb 的含量, 有研究显示水稻糙米、小麦籽粒 Cd、Pb 的含量与土壤交换态 Cd、Pb 的含量呈显著正相关关系($P < 0.05$) [32] [35]。Cd、Pb 单一污染和复合污染中, 施用生物炭均可不同程度降低小青菜[36]、番茄[33]地上部和地下部、糙米[30] [32]中的 Cd、Pb 的含量。

4.2.3. 土壤中 Pb、Cd 的交互作用

Pb 和 Cd 同为带正电荷的离子, 存在对生物炭吸附点位的竞争, 生物炭对 Pb 的吸附速率和吸附亲和力均大于 Cd, 在两种金属共存的体系中 Pb 被更快更多地吸附, 优先占据活性点位。在 Pb、Cd 复合污染土壤中, 添加生物炭后 Pb 有效态含量、植株各部位 Pb 含量的降幅均比单一污染大, Cd 含量则相反[30] [31] [32] [33]。Pb 的弱酸提取态、可还原态和可氧化态向残渣态的转化; 使 Cd 的弱酸提取态和可还原态向可氧化态的转化, 残渣态 Cd 无明显变化。丁文川等[37]研究也发现, Pb 的存在增加了土壤中 Cd 的溶解性, Pb、Cd 复合污染土壤中加入生物炭后, 土壤中 Pb 的 Fe-Mn 氧化结合态含量明显低于单一污染土壤中的含量, 而有机结合态和残渣态含量较单一污染的上升; 而 Cd 的多数形态含量差别不大, 酸可提取

态含量增加。说明生物质炭对复合污染土壤中 Pb、Cd 有效态和生物有效性的影响区别于单一污染,对 Pb 的效果优于 Cd。

4.3. 影响修复效果的主要因素

4.3.1. 生物炭的制备原料

不同原料在同等条件下热解制成的生物炭,其比表面积、孔隙结构、表面官能团及元素组成和含量等理化性质具有一定的差异,这些因素影响着生物炭对污染物的修复效果。Xu 等[26]研究发现,在受污染的水稻土中,花生壳生物炭比麦秸生物炭能更有效地固定 Cd 和 Pb。Ahmad 等[38]对比了大豆秸秆生物炭和松针生物炭的钝化效果,发现大豆秸秆生物炭对 Pb 和 Cu 的固定化效果优于松针生物炭。Xu 等[39]研究了猪粪生物炭和小麦秸秆生物炭对砂壤中 Cd 的钝化作用,发现猪粪生物炭的最大吸附量大约是小麦秸秆生物炭的 10~15 倍。Cao 等[40]发现牛粪烧制的生物炭中含有 PO_4^{3-} 、 CO_3^{2-} ,与重金属 Pb^{2+} 生成磷酸盐沉淀,是牛粪生物炭对 Pb^{2+} 产生吸附的主要原因。夏广洁等[41]在 700℃ 热解条件下制得牛粪源生物炭(DMBC)和木源生物炭(WC),前者的去除效率远高于后者,经分析表明 DMBC 中含有大量矿物组分(如磷等),易与重金属离子生成沉淀。以上研究表明生物炭的制备原料是影响其对重金属污染土壤修复效果的最主要因素之一。

4.3.2. 生物炭的裂解温度

热解温度对生物炭性质有显著影响,对生物炭控制重金属的吸附特性起着关键作用。随着裂解温度的升高,芳香化程度增强,极性减弱,比表面积和总孔隙体积增大,含氧官能团数目下降[42];阳离子交换能力(CEC)值下降[43]。朱庆祥[44]的研究显示添加的生物炭制备温度越高,重金属污染土壤 pH 值增幅越大。添加 300℃、500℃ 和 700℃ 制成的生物炭,土壤 pH 值在 Pb 单一污染中较不添加生物炭对照升高了 0.35、0.59 和 0.77,在 Cd 单一污染中升高了 0.36、0.55 和 0.86。丁文川等[37]发现生物质炭对 Pb 和 Cd 污染土壤修复效果从大到小依次为 700℃、500℃、300℃。由于土壤 pH 值升高会影响 Pb、Cd 的水解平衡,使 Pb、Cd 通过络合、沉淀等作用被固定下来。与低温(300℃)热解的生物炭相比,高温(700℃)热解的生物炭吸附容量和最大不可逆吸附量增大,所以修复效果较好[45] [46]。

5. 展望

国内外众多研究表明,生物炭在土壤改良、环境污染治理和固碳减排等领域具有广阔的前景,在重金属污染治理方面,生物炭也具有许多优势。但还有几个方面研究尚且不足,仍需深入开展。第一,生物炭制备原料种类多,在不同条件下热解的生物炭其结构和功能有所差异,对不同重金属的固化机理也不同,而重金属污染土壤中一般有两种以上的重金属,施入生物炭可能对某些重金属起固定作用,却对其他重金属起活化作用,因此,今后应重视不同类型生物炭对同一系统中多种重金属的吸附能力的研究;第二,现阶段多数研究采用的是室内培养或盆栽实验的方法,田间试验较少。未来可多开展大田试验,研究在田间条件下,生物炭施入土壤后对污染土壤的修复效果;第三,生物炭的性质决定功能,生物炭陈化后理化性质的变化必然会影响生物炭的修复效果[47]。要全面而深入地了解生物炭施入土壤后对重金属的吸附效果和吸附稳定性的变化,以及重金属是否可能再次活化,急需布置生物质炭修复重金属污染土壤的长期定位试验。

基金项目

贵州省普通高等学校特色重点实验室建设项目(黔教合 KY 字[2016]001);贵州大学研究生教育创新基地建设项目(贵大研 SJJJ[2015]004)。

参考文献

- [1] 杨璋梅, 方战强. 生物炭修复 Cd, Pb 污染土壤的研究进展[J]. 化工环保, 2014, 34(6): 525-531.
- [2] 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, 36(5): 1689-1692.
- [3] 姜洋, 罗远恒, 顾雪元. 农田土壤镉污染的原位钝化修复及持久性研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(2): 265-274.
- [4] 唐行灿, 陈金林, 张民. 生物炭对铜、铅、镉复合污染土壤的修复效果[J]. 广东农业科学, 2014, 41(12): 68-71.
- [5] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441-1453.
- [6] 郭素华, 邱喜阳, 李方文, 等. 生物炭对红壤中铅形态分布的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(3): 113-118.
- [7] 吕军. 土壤改良学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2011: 291-293.
- [8] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 243-244.
- [9] 陈怀满, 郑春荣. 交互作用对植物生长和元素循环的影响[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 47-49.
- [10] 王丽渊, 丁松爽, 刘国顺. 生物质炭土壤改良效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2014(3): 1-6.
- [11] 刘小宁, 蔡立群, 黄益宗, 等. 生物质炭对旱作农田土壤持水特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 112-117.
- [12] 刘玉学, 刘微, 吴伟祥, 等. 土壤生物质炭环境行为与环境效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 977-982.
- [13] 江秋菊, 刘京, 张跃强. 生物质炭改良土壤研究进展[J]. 甘肃农业科技, 2017(6): 68-71.
- [14] 窦森, 周桂玉, 杨翔宇, 等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 796-802.
- [15] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43(6): 857-861.
- [16] 孙敬国, 孙光伟, 王昌军, 等. 生物质炭对植烟土壤改良及烟叶品质的影响[J]. 山西农业科学, 2017, 45(9): 1557-1560.
- [17] 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 963-967.
- [18] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779-785.
- [19] 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.
- [20] Ding, W., Dong, X., Ime, I.M., et al. (2014) Pyrolytic Temperatures Impact Lead Sorption Mechanisms by Bagasse Biochars. *Chemosphere*, **105**, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.042>
- [21] 李金阳, 郭海燕, 沈飞, 等. 水稻秸秆及其厌氧消化残渣生物炭对 Cd(II)吸附性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 585-591.
- [22] Jia, Y.F. and Thomas, K.M. (2000) Adsorption of Cadmium Ions on Oxygen Surface Sites in Activated Carbon. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, **16**, 1114-1122.
- [23] Caporale, A.G., Pigna, M., Sommella, A., et al. (2014) Effect of Pruning-Derived Biochar on Heavy Metals Removal and Water Dynamics. *Biology and Fertility of Soils*, **50**, 1211-1222. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0960-5>
- [24] Jiang, T.Y., Jiang, J., Xu, R.K., et al. (2012) Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils Amended with Rice-Straw Derived Biochar. *Chemosphere*, **89**, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.028>
- [25] Harvey, O.R., Herbert, B.E., Rhue, R.D., et al. (2011) Metal Interactions at the Biochar-Water Interface: Energetics and Structure-Sorption Relationships Elucidated by Flow Adsorption Microcalorimetry. *Environmental Science & Technology*, **45**, 5550-5556. <https://doi.org/10.1021/es104401h>
- [26] Xu, C., Chen, H., Xiang, Q., et al. (2017) Effect of Peanut Shell and Wheat Straw Biochar on the Availability of Cd and Pb in a Soil-Rice (*Oryza sativa* L.) System. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 1147-1156. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0495-z>
- [27] 刘旻慧, 王震宇, 陈蕾, 等. 花生壳及中药渣混合生物炭对铅污染土壤的修复研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 101-107.
- [28] 朱佳文, 邹冬生, 向言词, 等. 钝化剂对铅锌尾矿砂中重金属的固化作用[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 920-925.

- [29] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
- [30] 马铁铮, 马友华, 付欢欢, 等. 生物有机肥和生物炭对 Cd 和 Pb 污染稻田土壤修复的研究[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1): 14-19.
- [31] 李蕊蕊. 生物炭添加对镉、铅在土壤-水稻体系中迁移的影响[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十九次会议暨“农田土壤污染与修复研讨会”第二届山东省土壤污染防治与修复技术研讨会摘要集. 中国土壤学会土壤环境专业委员会, 2017: 1.
- [32] 李海丽. 生物质炭对铅镉复合污染稻田土壤修复效应研究[D]: [硕士学位论文]. 临安: 浙江农林大学, 2015.
- [33] 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 等. 几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 4011-4019.
- [34] 徐继敏, 张平, 廖柏寒, 等. 生物质炭对湘南矿区轻度 Pb 污染土壤性质及 Pb 的累积转运影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 259-267.
- [35] 左静, 陈德, 郭虎, 等. 小麦秸秆生物质炭对旱地土壤铅镉有效性及小麦、玉米吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1133-1140.
- [36] 郑凯琪. 污泥生物炭对环境中 Pb、Cd 固持的研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [37] 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.
- [38] Ahmad, M., OK, Y.S., Rajapaksha, A.U., et al. (2016) Lead and Copper Immobilization in a Shooting Range Soil Using Soybean Stover- and Pine Needle-Derived Biochars: Chemical, Microbial and Spectroscopic Assessments. *Journal of Hazardous Materials*, **301**, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.029>
- [39] Xu, D., Zhao, Y., Sun, K., et al. (2014) Cadmium Adsorption on Plant- and Manure-Derived Biochar and Biochar-Amended Sandy Soils: Impact of Bulk and Surface Properties. *Chemosphere*, **111**, 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.043>
- [40] Cao, X., Ma, L., Gao, B., et al. (2009) Dairy-Manure Derived Biochar Effectively Sorbs Lead and Atrazine. *Environmental Science & Technology*, **43**, 3285-3291. <https://doi.org/10.1021/es803092k>
- [41] 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.
- [42] 安增莉, 侯艳伟, 蔡超, 等. 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.
- [43] Lin, Y., Yan, W. and Sheng, K. (2016) Effect of Pyrolysis Conditions on the Characteristics of Biochar Produced from a Tobacco Stem. *Waste Management and Research*, **34**, 793-801. <https://doi.org/10.1177/0734242X16654977>
- [44] 朱庆祥. 生物炭对 Pb、Cd 污染土壤的修复试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [45] 杨基峰, 应光国, 赵建亮, 等. 黑碳对污染物环境地球化学过程的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1685-1689.
- [46] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 黑碳制备的不同热解温度对其吸收菲的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 125-128.
- [47] 鞠文亮, 荆延德, 刘兴. 生物炭陈化的研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 751-757.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

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

期刊邮箱: hjss@hanspub.org