

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
铜-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和铜、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)	

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性

王红, 夏雯, 卢平*, 布雨薇, 杨浩

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京 210042)

摘要: 利用固定床热解实验装置在不同热解温度(300~700℃)下制备了3种生物炭[杨树枝炭(PBC)、水葫芦炭(WHC)和玉米秸秆炭(CSC)],以南京市铅锌银矿区周边的菜园土为对象,研究了生物炭种类、热解温度和生物炭添加量对土壤重金属(Pb和Zn)吸附特性的影响,并结合生物炭的孔隙度、XRD和FTIR等分析,初步探讨了生物炭对土壤重金属的吸附机制。结果表明,生物炭的添加均不同程度地降低了土壤中Zn和Pb的浸出含量,水葫芦炭对土壤重金属的吸附效果最佳,在热解温度为500℃和生物炭添加量为5%的条件下,水葫芦炭对土壤中Zn和Pb的吸附率分别为21.83%和44.57%,相应的单位吸附量分别为227.65 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和363.76 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。随着热解温度的升高,生物炭对土壤中Zn和Pb的吸附率逐渐增大,且在热解温度为500℃和700℃下制备的水葫芦炭对土壤中Zn和Pb的吸附能力相差不大,这表明中等温度热解有利于水葫芦炭形成较好的理化特性。随着生物炭添加量的增加,水葫芦炭对土壤中Zn和Pb的吸附率逐渐增大,但单位吸附量却逐渐减小,当水葫芦炭添加量为10%时,其对土壤中Pb的吸附率可达93.93%。结合生物炭的理化结构和土壤重金属吸附实验的结果,可以推测离子交换和络合作用是水葫芦炭修复重金属污染土壤的主要作用机制。

关键词: 生物炭; 土壤; Pb; Zn; 吸附特性

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3944-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701171

Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil

WANG Hong, XIA Wen, LU Ping*, BU Yu-wei, YANG Hao

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Three types of biochars, poplar branch biochar (PBC), water hyacinth biochar (WHC), and corn straw biochar (CSC), were prepared in a fixed-bed pyrolyzer at different pyrolysis temperatures (300-700℃). The effects of biochar species, pyrolysis temperature, and biochar addition on adsorption characteristics of typical heavy metals (HMs) such as Pb and Zn in vegetable soil (collected from a lead-zinc-silver mining area, Nanjing, China) were investigated. The adsorption mechanism of biochar on HMs was discussed based on the analyses of pore structure, XRD, and FTIR of biochars. WHC biochar showed the best adsorption ability at the same experimental conditions with adsorption efficiencies on Zn and Pb of 21.83% and 44.57%, respectively. The relative adsorption capacities of Zn and Pb were 227.65 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and 363.76 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ at the pyrolysis temperature of 500℃ and biochar addition of 5%. The adsorption efficiency of biochar on HMs in soil increased gradually with increasing pyrolysis temperature. WHC biochars prepared at 500℃ and 700℃ had similar adsorption capacities on Zn and Pb in soil indicating that the moderate pyrolysis may be a good choice for WHC with better physicochemical properties. Increasing the amount of WHC addition benefits the adsorption efficiency of HMs in soil, but does not increase the adsorption capacity. The adsorption efficiency of Pb in soil reaches 93.93% by adding 10% of WHC into the soil sample. The combined analyses based on the physicochemical properties of biochar and the results of soil HMs adsorption experiments suggest that ion exchange and complexation are prevailing mechanisms of the remediation of HM-contaminated soil by WHC biochars.

Key words: biochar; soil; Pb; Zn; adsorption characteristics

土壤重金属污染状况日益严重,不仅使土壤肥力退化,作物产量和品质降低,而且通过食物链最终危及人类健康,治理土壤重金属污染刻不容缓^[1]。施加改良剂是目前最具应用前景的土壤重金属修复方法之一,常用的改良剂有石灰、磷酸盐和硅酸盐等,但这些改良剂都不同程度地存在重金属固定效果不稳定或新重金属引入等问题^[2]。生物炭(biochar)是由废弃生物质在缺氧或无氧条件下热解得到的固态产物,具有孔隙结构好、比表面积大以及表面含氧官能团丰富等特性,可以有效地降低

土壤中重金属的生物有效性,因而是一种极具发展和应用前景的土壤改良剂^[3,4]。生物炭的理化结构特性受到生物质种类和制备条件(热解温度、停留时间和热解氛围等)的影响,进而直接影响其对重

收稿日期: 2017-01-19; 修订日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51476079); 江苏省前瞻性联合研究项目(BY2015001-01); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_1287)

作者简介: 王红(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为生物质和固体废弃物资源化与资源化利用技术, E-mail: 20110103@stu.njnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: luping@njnu.edu.cn

金属污染土壤的修复效果。

生物质种类对生物炭的元素组成和理化结构具有重要影响。Xu 等^[5]研究了添加农作物秸秆炭对中国南方 3 种可变电荷土壤中 Cu(II)、Pb(II) 和 Cd(II) 的吸附性能,结果表明,花生秸秆炭比油菜秸秆炭具有更好的吸附能力。Lu 等^[6]研究了不同种类生物炭对重金属污染土壤的修复效果,结果表明在重金属(Cd、Cu、Pb 和 Zn)复合污染水稻土中添加生物炭,稻草炭比竹炭降低 TCLP(美国环保署推荐的标准毒性浸出方法)可提取态 Pb 含量的效果更佳,同时发现生物炭对土壤重金属生物有效性的影响不仅与生物炭种类有关,还与重金属种类密切相关。Beesley 等^[7]研究发现施加硬木制备的生物炭可以有效地固定土壤中的 Cd 和 Pb,却不能有效固定土壤中的 Cu 和 As,这表明不同种类生物炭具有对不同重金属的专性吸附性能。

热解温度是影响生物炭理化特性最主要的因素之一,它不仅会显著影响生物炭的产率以及成分含量,而且还会影响生物炭的孔隙结构、pH 以及表面官能团种类和数量^[8-10]。何绪生等^[11]认为高温热裂解保留的原生物质中的碳要比低温热裂解要少,而生物炭的孔隙度、比表面积及 CEC 只有在一定温度范围内热裂解才可获得最大值。Chen 等^[12]研究发现,当热解温度由 300℃ 提高到 700℃ 时,松针炭的比表面积由 $19.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $490.8 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。Ding 等^[13]研究了不同热解温度下制备的甘蔗渣炭对 Pb 的吸附效果,结果表明,250℃ 和 400℃ 下制得的生物炭对 Pb 的吸附效果明显优于 500℃ 和 600℃ 下制成的生物炭。李明遥等^[14]研究了不同热解温度(300~600℃)下水稻秸秆炭对土壤中 Cd 形态的影响,结果表明,随着热解温度的升高,土壤中有效态 Cd 含量先降低后升高,在 400℃ 条件下制备的水稻秸秆炭对 Cd 的固定效果最佳。大多数生物炭对重金属的吸附效果是随热解温度的升高而升高的,但是考虑到不同种类生物炭制备的经济性,其最佳的热解温度也需要进一步地研究。

生物炭的添加量也是影响土壤重金属吸附效果的重要因素。刘晶晶等^[15]添加不同粒径(<1 mm 和 <0.25 mm)和不同施用量(0、1%、5%)的稻草炭进行了为期一年的恒温土培实验,结果发现,对细粒径(<0.25 mm)稻草炭,随着施用量的增加土壤中 Cd、Cu 和 Zn 有效态含量显著降低。Jiang 等^[16]利用稻草秸秆炭进行了为期 30d 的土培实验,结果表明,随着添加量的增加,稻草秸秆炭对土壤

Pb(II) 的吸附力逐渐增强。Houben 等^[17]采用芒草秸秆制成生物炭,研究了质量分数分别为 1%、5% 和 10% 的生物炭对土壤中 Cd、Pb、Zn 的修复效果,并与石灰进行了修复效果的比较。实验结果表明,施加 10% 生物炭对重金属的固化效果与石灰相似,且 Cd 和 Pb 的生物利用率分别降低了 71% 和 92%。已有的研究表明,增大生物炭的施加量显然会增大其对土壤重金属的吸附能力,但是,过量施加生物炭不仅降低了经济性,而且也可能导致作物产量降低和对动植物的毒害^[3,18]。唐行灿的研究发现^[19],添加少量生物炭(0.5%、1% 和 2%)可以缓解重金属对蚯蚓的氧化胁迫,但当土壤中施加大量生物炭(5%)时,就会导致对蚯蚓的毒性。因此为了获得最佳的土壤改良效果,生物炭的添加量需要谨慎考虑。

生物炭修复重金属污染土壤的机制很复杂,主要涉及离子交换、静电吸附和沉淀作用等^[20]。Park 等^[21]考察了不同生物炭(鸡粪炭、商用活性炭和实验室自制炭黑等)对土壤中 Pb 和 Cd 的吸附能力,认为生物炭对 Pb 优良的吸附能力可归因于 Pb 与生物炭中碳酸盐、磷酸盐和硫酸盐等所释放离子的吸附-沉淀作用。唐行灿^[19]发现 350℃ 生物炭的表现吸附能力显著强于 700℃ 生物炭,并认为这与生物炭的阳离子交换量(CEC)的大小有密切关系,具有较高 CEC 的生物炭能够更有效地通过静电吸附固定金属离子,而通过沉淀作用固定重金属离子的量不是主要部分。Jiang 等^[16]认为 Pb(II) 主要是通过生物炭表面含氧官能团(—COOH 和 —OH)的离子交换与络合作用而被吸附固定在生物炭表面。目前,国内外关于土壤重金属吸附特性的研究主要集中于农作物秸秆炭的研究^[17,22,23],而对诸如水生植物、林产废弃物等生物炭的研究相对较少,且对不同种类生物质及其热解温度和施用量对土壤重金属吸附性能与吸附机制的研究还有待于进一步深入。

本文选用杨树枝(PB)、水葫芦(WH)和玉米秸秆(CS)这 3 种典型的生物质,利用固定床热解实验装置制备生物炭,以南京市铅锌银矿区周边的菜园土为对象,研究生物炭种类、热解温度和添加量对土壤重金属(Pb 和 Zn)吸附特性的影响,初步探讨生物炭对土壤重金属的吸附机制,旨在为重金属污染土壤的改良提供参考。

1 材料与方法

1.1 生物炭的制备与表征

实验用杨树枝(PB)、水葫芦(WH)和玉米

秸秆(CS)的工业分析和元素分析结果如表 1 所示. 实验前将其风干并剪切至粒径小于 10 mm; 然后, 利用固定床热解实验装置, 在不同热解温度 T_p (300、500 和 700℃) 和连续供应 N_2 的条件下对生物质原料热解 30 min, 得到不同的生

物炭; 最后, 将其破碎至粒径小于 0. 177 mm, 并在 45℃ 下干燥 2 h 后备用. 不同种类生物炭分别记作 PBC300、WHC500 和 CSC700 等, 如 PBC300 表示在 300℃ 热解温度下制备的杨树枝炭.

表 1 生物质的工业分析和元素分析¹⁾

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of the test biomass

生物质	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{net, ad}$ /MJ·kg ⁻¹
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}^*	N_{ad}	S_{ad}	
PB	8. 22	1. 50	77. 19	13. 19	45. 00	4. 11	39. 99	0. 60	0. 58	16. 81
WH	10. 79	27. 47	57. 66	4. 08	30. 99	4. 84	23. 26	2. 43	0. 22	16. 77
CS	3. 79	4. 60	70. 11	21. 50	40. 73	6. 22	44. 57	—	0. 09	15. 68

1) 下标 ad 表示空气干燥基; O_{ad}^* 由差减法得到

采用比表面积与孔隙率测定仪(美国 Quanta chrome 公司, NOVA1000e 型)测定生物质及生物炭的比表面积与孔隙结构参数. 其工作原理是在 77. 35 K 下, 以 N_2 (99. 999%) 为吸附质, 在相对压力为 0. 01 ~ 0. 995 条件下, 测定氮在固体表面的等温吸附和脱附曲线, 进而得到样品的 BET 比表面积 (S_{BET})、总孔容积 (V_T) 和平均孔径 (D_a)^[24, 25]. 采用 X 射线衍射仪 (X-ray Diffractometer, XRD, 日本理学公司, D/max 2500/PC 型转靶 X 射线衍射仪) 测定生物质及生物炭中所含的结晶性物质. 采用傅里叶红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR, 美国尼高力公司, NEXUS670 型) 测定生物炭样品表面官能团 (KBr 压片法)^[26].

1. 2 供试土壤

供试土壤取自南京市栖霞区铅锌银矿周边的菜园, 土壤取样深度为 0 ~ 20 cm. 使用前经风干、破碎和筛分等处理, 制成粒径小于 0. 105mm 的土壤样品, 并在 45℃ 条件下干燥 2 h, 装入广口瓶密封备用. 土壤中重金属的总量用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消煮法消解^[27], 采用电感耦合原子发射光谱分析仪 (inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES, 美国 Leeman Labs 公司, Prodigy 型) 测定土壤中重金属的含量. 土壤样品中 Pb、Zn、Cu、As 和 Cd 的含量分别为 434、353、50、447 和 1. 2 μg·g⁻¹, 分别是土壤环境质量标准 (GB 15618-2008) 二级标准限值^[28] 的 8. 68、1. 41、0. 50、17. 88 和 3. 0 倍. 采用 0. 01 mol·L⁻¹ HCl 浸提土壤样品中的重金属, 发现浸出液中 Cu、As 和 Cd 的含量都比较低, 浸出率仅为 16. 0%、0. 12% 和 15. 8%. 考虑到土壤中 Cu 未超标, 而 As 和 Cd 的浸出率太低, 因此, 本文着重研究生物炭对土壤样品中

Pb 和 Zn 的吸附特性.

1. 3 土壤重金属吸附实验及评价方法

称取 5 g 土壤试样, 添加一定质量分数 (1%、5%、10%) 的生物炭, 取 50 mL 盐酸 (0. 01 mol·L⁻¹) 作为浸提剂, 一并加入 200 mL 振荡瓶中, 混合均匀后放入恒温振荡器, 以 180 r·min⁻¹ 旋转频率恒温 (22℃) 振荡 12 h, 再将混合液离心过滤, 收集滤液并采用 ICP-AES 测定其中的 Pb 和 Zn 含量. 对无生物炭添加的土壤样品也做相同的处理. 每个处理重复 3 次, 取其算数平均作为最终的分析结果. 采用吸附率 (η_s , %) 和单位吸附量 (Q_s , μg·g⁻¹) 来表征生物炭对土壤重金属的吸附性能. 吸附率是指添加生物炭后土壤重金属浸出含量的减少值 ($C_0 - C_t$) 与不添加生物炭土壤重金属浸出含量 C_0 的比值, 单位吸附量是指从吸附开始到结束, 单位生物炭所吸附土壤重金属的量, 分别按式 (1) 和式 (2) 计算.

$$\eta_s = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$Q_s = (C_0 - C_t) \times m_0 / m_t \tag{2}$$

式中, C_0 和 C_t 分别表示不添加和添加生物炭条件下土壤中重金属的浸出含量, μg·g⁻¹; m_0 表示实验用土壤的质量, g; m_t 表示实验时生物炭的添加量, g.

2 结果与讨论

2. 1 生物炭的理化特性分析

表 2 为生物质及生物炭的孔隙结构参数. 从中可以看出, 3 种生物炭的比表面积和孔隙结构均发生了明显的变化, 且随着热解温度的升高, 水葫芦炭和杨树枝炭的 S_{BET} 和 V_T 快速增大, 而玉米秸秆炭则呈现先快速增加然后迅速减小的趋势. 在相同的热

解温度下,杨树枝炭表现出最佳的孔隙结构,在 700℃ 下,其 S_{BET} 最大,为 $256.86 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, V_{T} 最大,为 $131.80 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, D_{a} 最小,为 2.05 nm . 水葫芦炭的孔隙结构较差,在 700℃ 下,其 S_{BET} 最大,但仅为 $36.16 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, V_{T} 最大,为 $47.10 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, D_{a} 最小,为 5.21 nm . 玉米秸秆炭在 500℃ 下的 S_{BET} 最大,为 $102.43 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, V_{T} 最大,为 $67.28 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, D_{a} 最小,为 2.63 nm . 在 500℃ 条件下水葫芦炭的 S_{BET} 远小于杨树枝炭和玉米秸秆炭.

表 2 生物质和生物炭的孔隙结构参数

Table 2 Pore structure parameters of the biomass and their biochars			
项目	S_{BET} / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	V_{T} / $\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	D_{a} /nm
WH	3.46	10.77	12.45
WHC300	4.77	20.05	16.83
WHC500	7.34	22.95	12.50
WHC700	36.16	47.10	5.21
PB	2.17	5.32	9.83
PBC300	—	—	—
PBC500	219.38	114.8	2.09
PBC700	256.86	131.80	2.05
CS	1.88	3.44	7.32
CSC300	8.81	9.33	6.25
CSC500	102.43	67.28	2.63
CSC700	8.38	11.01	5.25

图 1 为 3 种生物质原料及生物炭的 XRD 图谱. 从中可以看出,水葫芦炭中含有较多的 KCl、 CaCO_3 和 MgCl_2 等物质,玉米秸秆炭次之,杨树枝炭最少. 随着热解温度的升高,KCl、 CaCO_3 和 MgCl_2 等物质的峰值越来越明显,这是由于热解过程中某些成分发生了气化蒸发,进而在生物炭表面富集,使得生物炭中 K、Ca、Mg 等元素的含量高于原料^[29].

图 2 为生物质及生物炭的 FTIR 图谱,其中生物质为杨树枝和水葫芦,热解温度为 300、500 和 700℃. 从中可以看出,生物质原料及生物炭在波数为 $3\,390$ 、 $2\,928$ 、 $1\,416$ 、 $1\,635$ 、 $1\,315$ 、 877 和 784 cm^{-1} 处存在较强的红外吸收峰,这说明样品表面含有羟基 ($-\text{OH}$)、羧基 ($-\text{COOH}$)、内酯基 ($-\text{COO}-$) 和羰基 ($-\text{CO}-$) 等含氧官能团. 杨树枝炭红外吸收峰的数量和强度随着热解温度的增加而逐渐减小,且在热解温度为 700℃ 条件下减少极为明显. 这与 Li 等^[30]的研究结果基本一致,他们认为生物质热解条件下水分蒸发和小分子气体释放是造成含氧官能团数量减少和吸收峰强度下降的主要原因. 进一步分析可以发现,随着热解温度的提高,水葫芦炭也呈现类似的趋势,但其红外吸收峰的数

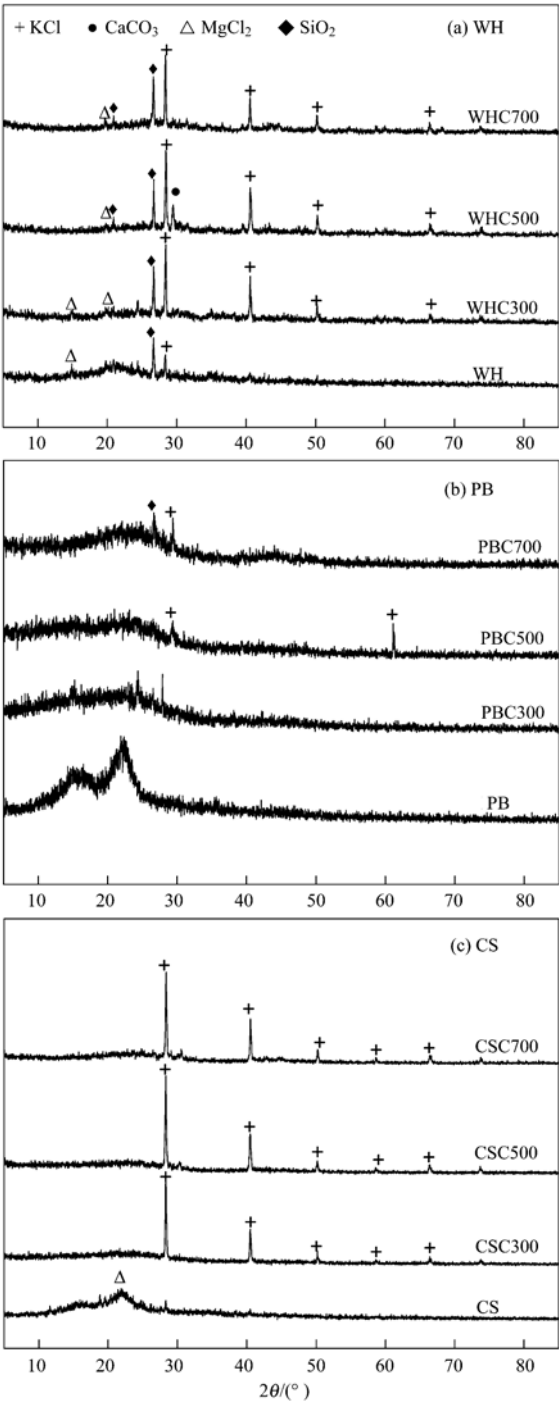


图 1 生物质和生物炭的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD curves of the biomass and their biochars

量和强度减小程度有较大的缓解,且在 500℃ 和 700℃ 条件下仍保留较多的红外吸收峰以及较大峰强,这表明水葫芦炭表面仍保留较多的含氧官能团.

2.2 生物炭种类对土壤重金属吸附特性的影响

图 3 为 3 种生物炭对土壤重金属吸附特性的影响,其中热解温度为 500℃,生物炭添加量为 5%. 由图 3(a) 可以看出,添加生物炭均不同程度地降低了土壤中 Zn 和 Pb 浸出含量,添加水葫芦炭时土壤

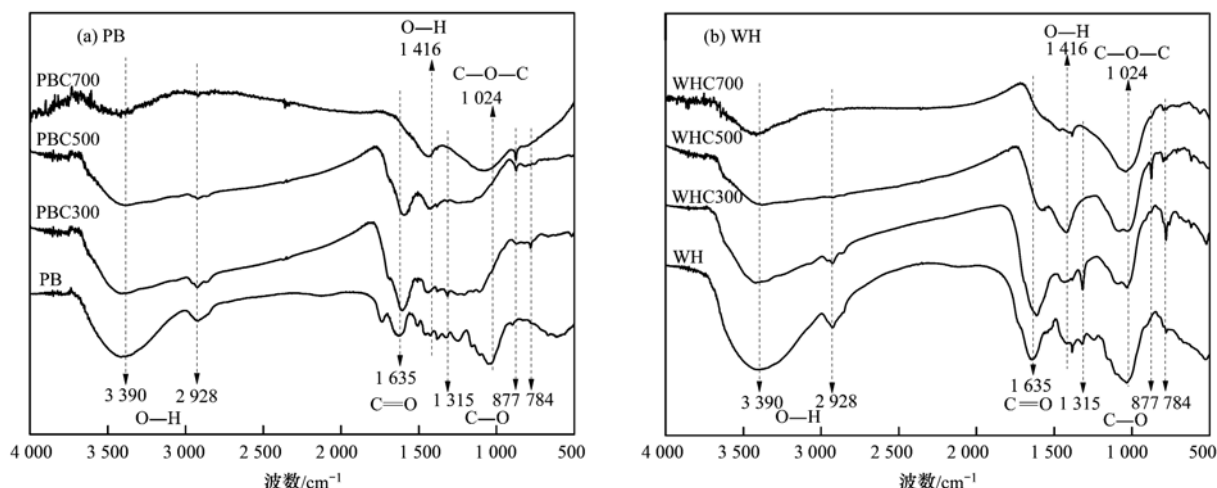


图2 生物质和生物炭的 FTIR 图谱

Fig. 2 FTIR curves of biomass and their biochars

中 Zn 和 Pb 浸出含量最低,其值分别由 $83.30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $25.54 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (不添加生物炭)下降到 $65.11 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $14.16 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由图 3(b)~3(c) 可以看出,水葫芦炭和玉米秸秆炭对土壤中 Zn 的吸附率相差不大,为 $20.01\% \sim 21.83\%$,相应的单位吸附量为 $333.3 \sim 363.8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;而杨树枝炭对土壤中 Zn 的吸附率最小,为 13.02% ,相应的单位吸附量为 $216.94 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。水葫芦炭对土壤中 Pb 的吸附率最高,为 44.57% ,相应的单位吸附量为 $227.65 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而杨树枝炭和玉米秸秆炭对土壤中 Pb 的吸附率较低,小于 1.74% ,相应的单位吸附量小于 $8.89 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

总体而言,添加生物炭对土壤中不同种类重金属(Zn 和 Pb)的吸附能力存在着较大的差异。水葫芦炭对土壤重金属 Zn 和 Pb 均表现出最佳的吸附性能,杨树枝炭和玉米秸秆炭仅对重金属 Zn 有一定的吸附能力,而对土壤中的 Pb 基本无吸附能力,这表明不同种类生物炭对土壤重金属具有选择性吸附能力^[31]。Xu 等^[5]也发现,生物质秸秆炭对 Cd(II) 的吸附率远大于其对 Cu(II) 和 Pb(II) 的吸附率,同时花生秸秆炭对 Cd(II) 的吸附能力显著大于油菜秸秆炭,这与本文的研究结果基本一致。Chen 等^[32]认为土壤中重金属很少单独存在,多种重金属间相互作用以及土壤中其它组分的存在都会影响重金属的形态和迁移特性。由图 3(a)可知,未添加生物炭时,土壤样品浸出液中 Zn 含量($83.31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)明显高于 Pb 含量($25.54 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),较高的 Zn 浸出含量表明 Zn 具有较强的移动性,这将有助于生物炭对 Zn 的吸附,从而导致生物炭对土壤中 Zn 具有较高的吸附率和单位吸附量。Ahmad 等^[20]认为生物炭

对无机污染物修复的主要机制包括离子交换、静电吸附和沉淀作用,并指出生物炭富含的含氧官能团和大量释放的阳离子是其高效吸附固定重金属的主要原因。当生物炭施入土壤后,生物炭中盐基离子(K、Ca 和 Mg 等)能够提高土壤的盐基离子的饱和度,进而通过离子交换吸附并固定土壤中的重金属,最终达到降低土壤有效态重金属含量的目的。由图 1 可以看出,与玉米秸秆炭和杨树枝炭相比,水葫芦炭中含有较多的 KCl、CaCO₃ 和 MgCl₂ 等物质,即水葫芦炭中富含较多的盐基离子,将其施加到土壤中将大大提高土壤盐基离子的饱和度,促进土壤重金属(Zn 和 Pb)与盐基离子进行离子交换,进而使得水葫芦炭对土壤重金属(Zn 和 Pb)表现出较强的吸附能力。

2.3 热解温度对生物炭土壤重金属吸附特性的影响

图 4 为不同热解温度下制备的生物炭对土壤重金属吸附特性的影响,其中热解温度为 300、500 和 700℃,生物炭为杨树枝炭和水葫芦炭,生物炭添加量为 5%。由图 4(a)可以看出,当向土壤中添加不同热解温度下制备的生物炭时,土壤中 Zn 和 Pb 浸出含量呈下降趋势,浸出液中 Zn 和 Pb 含量的最小值分别为 $62.92 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $13.65 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,分别降低 $20.39 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $11.89 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。图 4(b)~4(c)的结果表明,随着热解温度的提高,生物炭对土壤中 Zn 和 Pb 的吸附率和单位吸附量均逐渐增大,其中, Zn 的最大吸附率为 24.46% ,相应的单位吸附量为 $407.58 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Pb 的最大吸附率为 46.56% ,相应的单位吸附量为 $237.79 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这表明热解温度的提高有利于生物炭对土壤重金属的吸附。这与丁文川等^[33]的研究结果基本一致,他们通过不同热解

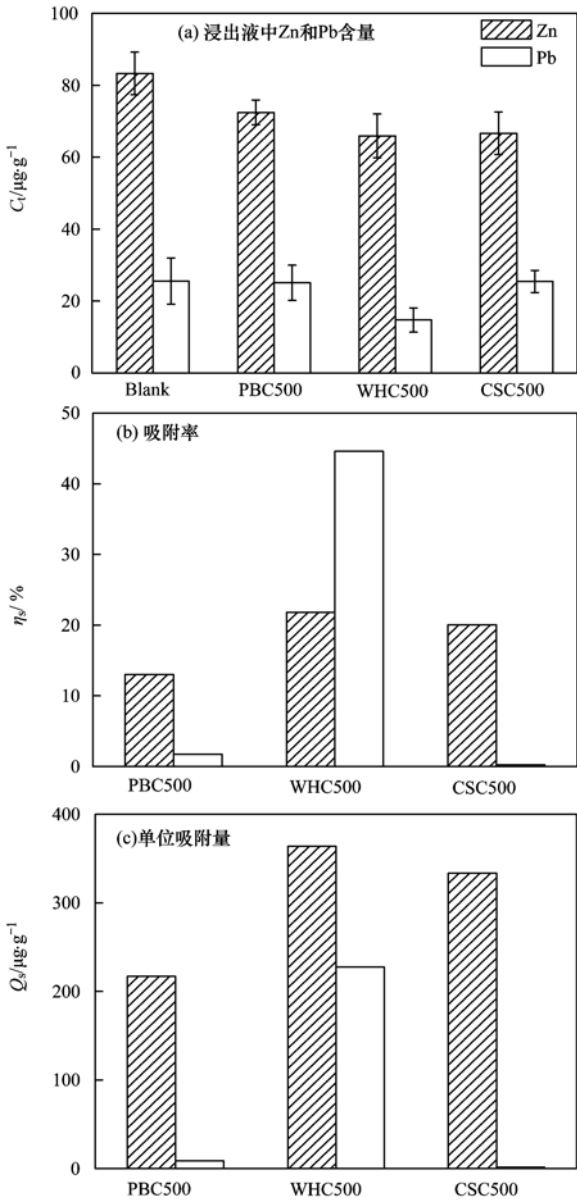


图3 生物炭种类对土壤重金属吸附特性的影响

Fig. 3 Effect of biochar species on the adsorption of heavy metals in soils

温度(300、500 和 700℃)生物炭改良 Pb 和 Cd 污染土壤的实验发现,热解温度对目标重金属生物有效性降低的改良效果为 700℃ > 500℃ > 300℃. 进一步分析可以发现,500℃ 和 700℃ 热解温度下制备的水葫芦炭对土壤中 Zn 和 Pb 的吸附率和单位吸附量相差不大,这表明过高的热解温度并不一定能够有效提高水葫芦炭对土壤重金属吸附固定能力,因此,从节约能源的角度出发,可以考虑采用较低热解温度来制备用于土壤重金属修复的生物炭.

结合图 3(b) 和图 4(b) 可知,与其他两种生物炭相比,500℃ 条件下的水葫芦炭具有更好的土壤重金属吸附性能. 由表 2 可以看出,在 500℃ 条件下水

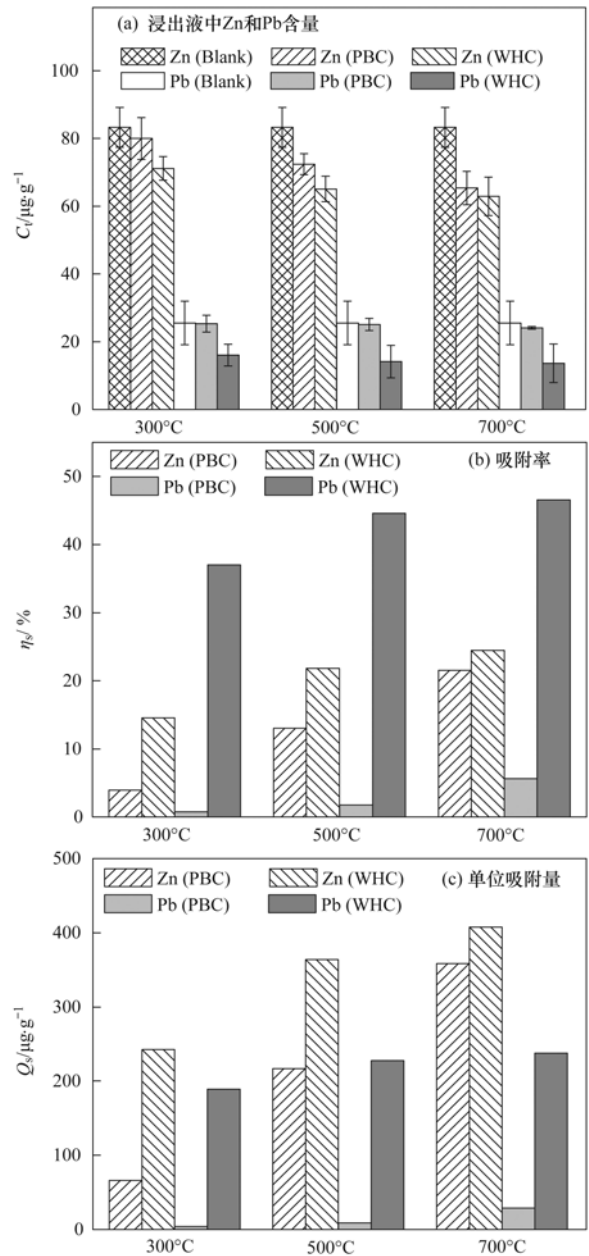


图4 热解温度对生物炭土壤重金属吸附特性的影响

Fig. 4 Effect of pyrolysis temperature on the adsorption of heavy metals in soil

葫芦炭的 S_{BET} 远小于杨树枝炭和玉米秸秆炭. 这表明由比表面积和孔容引起的物理吸附可能并不是生物炭修复重金属污染土壤的主要作用机制. Jiang 等^[16] 用水稻秸秆制成的生物炭进行土培实验,分析了生物炭对土壤 pH 和 CEC 等性质的影响及吸附机制. 实验结果表明,Pb(II) 主要是通过与生物炭的含氧官能团(—COOH 和 —OH)形成表面络合物被吸附于生物炭表面而使 Pb 固化. 由图 2 可以看出,在 500℃ 和 700℃ 条件下水葫芦炭仍保留较多的红外吸收峰以及较大峰强,这表明水葫芦炭表面仍保

留较多的含氧官能团,可与金属离子发生络合,形成金属络合物,降低金属离子的迁移率,进而使得水葫芦炭具有较好的土壤重金属吸附固定性能,为吸附并固定土壤重金属创造了有利条件. 综上分析可以认为,水葫芦炭具有较好的土壤重金属吸附性能主要是离子交换和络合作用的共同结果.

2.4 生物炭添加量对土壤重金属吸附特性的影响

图5为生物炭添加量对土壤重金属吸附特性的影响,其中生物炭为水葫芦炭,热解温度为700℃,生物炭添加量为1%、5%和10%. 由图5(a)可以看出,随着水葫芦炭添加量的增加,土壤浸出液中Zn和Pb含量逐渐降低,当添加10%水葫芦炭时,浸出液中Pb含量下降极为显著,为 $1.55 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 这

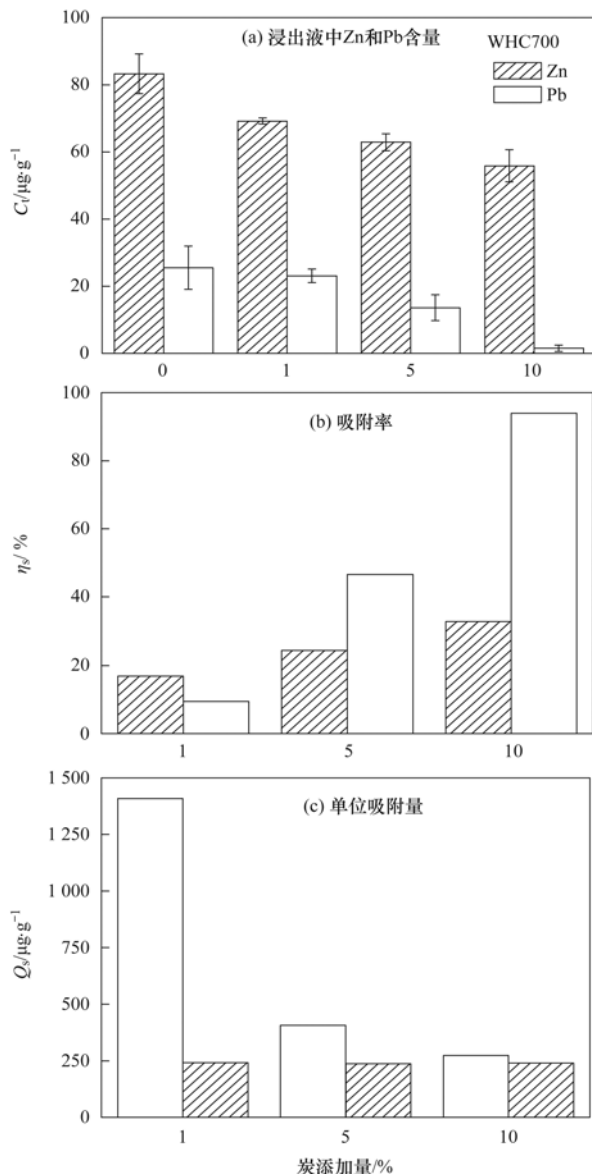


图5 水葫芦炭添加量对土壤重金属吸附特性的影响

Fig. 5 Effect of WHC biochar addition on the adsorption of heavy metals in soil

与刘晶晶等^[15]的研究结果较为一致,他们认为竹炭和稻草炭的施用改变了土壤中上述重金属各形态的分配,且5%用量比1%用量效果更明显. 图5(b)~5(c)的结果表明,随着水葫芦炭添加量的增加,其对土壤中Zn和Pb的吸附率逐渐增大,相应的最大吸附率分别为32.92%和93.93%,且水葫芦炭对Pb吸附率上升速率远远大于Zn. 倪柳芳等^[34]通过盆栽方式研究了磁性黑炭对人工模拟污染土壤中重金属Pb和Cd的吸附效果,结果表明,随着磁性黑炭添加量由2%增加到8%,其对重金属Pb和Cd的吸附率逐渐增加,其最大可分别达到67.45%和73.27%,这与本文的研究结果较为一致. 与此同时,随着水葫芦炭添加量的增加,其对土壤中Zn的单位吸附量迅速减小,即由 $1408.70 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降到 $274.26 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而其对Pb的单位吸附量影响不大,其值约为 $240 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 这表明,增加生物炭的施用量可以在一定程度上提高其对土壤重金属的吸附率,但是并不能有效提高生物炭施用的经济性,因此,在实际应用时,应根据目标重金属的不同合理确定生物炭的施用量,以实现生物炭的高效经济利用.

3 结论

(1)生物炭对土壤重金属Zn和Pb具有一定的吸附固定作用,但生物炭和重金属种类对其有较大影响. 水葫芦炭对土壤重金属Zn和Pb均表现出最佳的吸附性能,杨树枝炭和玉米秸秆炭对土壤重金属Zn有一定的吸附能力,而对重金属Pb基本无吸附能力.

(2)随着热解温度的升高,生物炭对土壤中重金属Zn和Pb的吸附率和单位吸附量均呈现逐渐增大的趋势,热解温度为500℃和700℃条件下制备的水葫芦炭对土壤中Zn和Pb的吸附能力差异不大;单纯通过改善生物炭的孔隙结构并不能有效提升其对土壤重金属的吸附效果;水葫芦炭具有较好的土壤重金属吸附性能主要是离子交换和络合作用的共同结果.

(3)随着水葫芦炭添加量的增加,其对土壤重金属Zn和Pb的吸附率逐渐增大,而单位吸附量逐渐减小;当添加10%水葫芦炭时,其对土壤中Pb吸附率可达93.93%,而单位吸附量几乎没有变化,约为 $240 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;在实际应用时,应根据目标重金属的不同合理确定生物炭的施用量,以实现生物炭的高效经济利用.

参考文献:

- [1] Rötting T S, Mercado M, García M E, *et al.* Environmental distribution and health impacts of As and Pb in crops and soils near Vinto smelter, Oruro, Bolivia[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, **11**(4): 935-948.
- [2] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(12): 2075-2081.
Li J X, Wu L C, Zhang J, *et al.* Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(12): 2075-2081.
- [3] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L, *et al.* A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(12): 3269-3282.
- [4] 高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 等. 生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 361-367.
Gao R L, Tang M, Fu Q L, *et al.* Fractions transformation of heavy metals in compound contaminated soil treated with biochar, montmorillonite and mixed addition[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 361-367.
- [5] Xu R K, Zhao A Z. Effect of biochars on adsorption of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by three variable charge soils from southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8491-8501.
- [6] Lu K P, Yang X, Shen J J, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to *Sedum plumbizincicola* [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 124-132.
- [7] Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 474-480.
- [8] 孙文红. 生物炭与环境[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [9] Yuan H R, Lu T, Zhao D D, *et al.* Influence of temperature on product distribution and biochar properties by municipal sludge pyrolysis[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2013, **15**(3): 357-361.
- [10] Zhang W H, Mao S Y, Chen H, *et al.* Pb(II) and Cr(VI) sorption by biochars pyrolyzed from the municipal wastewater sludge under different heating conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **147**: 545-552.
- [11] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. *中国农学通报*, 2011, **27**(15): 16-25.
He X S, Zhang S Q, She D, *et al.* Effects of biochar on soil and fertilizer and future research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(15): 16-25.
- [12] Chen B L, Yuan M X. Enhanced sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by soil amended with biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(1): 62-71.
- [13] Ding W C, Dong X L, Ime I M, *et al.* Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars [J]. *Chemosphere*, 2014, **105**: 68-74.
- [14] 李明遥, 杜立字, 张妍, 等. 不同裂解温度水稻秸秆生物炭对土壤 Cd 形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(6): 261-264.
- Li M Y, Du L Y, Zhang Y, *et al.* Influence of pyrolysis temperatures of biochar obtained from the rice straw on cadmium forms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(6): 261-264.
- [15] 刘晶晶, 杨兴, 陆扣萍, 等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3679-3687.
Liu J J, Yang X, Lu K P, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the transformation and bioavailability of heavy metals in soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3679-3687.
- [16] Jiang T Y, Jiang J, Xu R K, *et al.* Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar [J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(3): 249-256.
- [17] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, **57**: 196-204.
- [18] Li D, Hockaday W C, Masiello C A, *et al.* Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(8): 1732-1737.
- [19] 唐行灿. 生物炭修复重金属污染土壤的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
Tang X C. Amelioration effect of biochar on heavy metal contaminated soil [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2013.
- [20] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, *et al.* Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review [J]. *Chemosphere*, 2014, **99**: 19-33.
- [21] Park J H, Choppala G, Lee S J, *et al.* Comparative sorption of Pb and Cd by biochars and its implication for metal immobilization in soils[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, **224**: 1711.
- [22] Moon D H, Park J W, Chang Y Y, *et al.* Immobilization of lead in contaminated firing range soil using biochar [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8464-8471.
- [23] Park J H, Choppala G K, Bolan N S, *et al.* Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals [J]. *Plant and Soil*, 2011, **348**(1-2): 439-451.
- [24] Choi J H, Kim S S, Suh D J, *et al.* Characterization of the bio-oil and bio-char produced by fixed bed pyrolysis of the brown alga *Saccharina japonica* [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, **33**(9): 2691-2698.
- [25] Shu T, Lu P, He N. Mercury adsorption of modified mulberry twig chars in a simulated flue gas[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **136**: 182-187.
- [26] Li H, Ye X, Geng Z, *et al.* The influence of biochar type on long-term stabilization for Cd and Cu in contaminated paddy soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **304**: 40-48.
- [27] 刘忠敏. 现代分析仪器分析方法通则及计量检定规程[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1997.
- [28] GB 15618-2008 土壤环境质量标准(修订)[S].
- [29] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, *et al.* Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use [J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, **51**(6): 2061-2069.
- [30] Li G T, Zhu W Y, Zhu L F, *et al.* Effect of pyrolytic

- temperature on the adsorptive removal of p-benzoquinone, tetracycline, and polyvinyl alcohol by the biochars from sugarcane bagasse[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016, **33**(7): 2215-2221.
- [31] Park J H, Ok Y S, Kim S H, *et al.* Competitive adsorption of heavy metals onto sesame straw biochar in aqueous solutions[J]. Chemosphere, 2016, **142**: 77-83.
- [32] Chen X C, Chen G C, Chen L G, *et al.* Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(19): 8877-8884.
- [33] 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.
- Ding W C, Zhu Q X, Zeng X L, *et al.* Biochars from different pyrolytic temperature amending lead and cadmium contaminated soil[J]. Science & Technology Review, 2011, **29**(14): 22-25.
- [34] 倪柳芳, 翁仁贵. 磁性黑炭的制备及其对土壤中重金属 Pb 和 Cd 的吸附[J]. 环境工程技术学报, 2015, **5**(1): 59-63.
- Ni L F, Weng R G. Preparation of magnetic black carbon and its adsorption of heavy metals Pb and Cd in soil [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, **5**(1): 59-63.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3451)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)