

生物炭去除土壤中重金属效果主要影响因素的研究进展

平森文 朱政 盛又聪 谢芷怡 李勇超*

(湖南科技大学土木工程学院,湖南湘潭 411201)

摘要 我国土壤重金属污染严重,生物炭因其特殊的理化性质逐渐成为研究的热点。本文介绍了生物炭的基本特性,综述了影响生物炭修复效果的主要因素,如生物炭种类、制备温度、改性方法、添加量及配合施用材料等。最后,对今后生物炭在土壤重金属修复工作的研究方向进行了展望。

关键词 生物炭;重金属污染;去除效果;影响因素;影响机制

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 1007-5739(2019)12-0153-03

Research Progress on Main Factors Affecting Removal of Heavy Metals in Soil by Biochar

PING Sen-wen ZHU Zheng SHENG You-cong XIE Zhi-yi LI Yong-chao*

(Faculty of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201)

Abstract China's soil heavy metal pollution is serious, and biochar has gradually become a research hotspot due to its special physical and chemical properties. This paper introduced the basic characteristics of biochar, and summarized the main factors affecting the biochar restoration effect, such as biochar type, preparation temperature, modification method, addition amount and compounding materials. Finally, the future research directions of biochar in soil heavy metal remediation work were prospected.

Key words biochar; heavy metal pollution; removal efficiency; factor; influencing mechanism

随着我国现代化进程的加快,土壤重金属污染日益加剧。其中,湖南湘江等流域土壤重金属污染最严重且超标种类最多^[1]。政府高度重视土壤重金属污染的防治,已发布实施《土壤污染防治行动计划》^[2]。

目前,国际上常用的重金属污染土壤修复技术主要包括物理、化学、生物、农业生态、联合修复技术^[3]。物理、化学修复技术成本较高且易造成二次污染,不适宜广泛利用^[4-5]。生物修复技术存在受环境影响显著、修复周期长、生物死亡后重金属去向未明等问题^[6-7]。农业生态修复技术修复时间长,且大田试验的效果有待探究^[8]。联合修复技术的各个技术之间缺乏交融性,使得其实用性较差^[9-10]。大量研究表明,在重金属污染土壤中添加钝化剂可以显著降低土壤中重金属的有效性,达到修复土壤的目的^[11-16]。寻找经济、环保、高效的钝化剂成为重金属污染土壤修复技术的发展方向。研究表明,生物炭因其物理化学性能独特、原料来源广泛、生产成本低廉,在修复重金属污染土壤领域具有积极的应用前景^[17]。

虽然生物炭具有诸多优点,但对土壤中重金属的去除效果受其原料、制备温度与改性、施用量与配合施用材料等因素影响。现基于现有研究,分析这些因素的影响机制,以期得出最佳生物炭原料、制备方法及使用方法。

1 生物炭的理化性质及作用机理

1.1 生物炭的理化性质

生物炭是指含碳量高的生物质材料在缺氧或无氧条件下经热解产生的一种多功能材料,被定义为“用于土壤中的木炭”^[18]。生物炭除含有碳、氢、氧等主要元素外,还含有氮、磷、钾、钙、镁等植物生长所需的矿物质营养元素^[19]。生物炭表面含有丰富的羟基、羧基等含氧官能团,又因含有碳酸盐,所以一般呈现碱性^[20]。生物炭表面带负电荷,所以其具有较高的阳离子交换能力^[21]。此外,生物炭还具有复杂的孔隙结

构和较大的比表面积^[22],优良的稳定性^[23]。

1.2 生物炭对重金属污染土壤的修复机理

大量研究表明,生物炭对重金属污染的修复机理主要有表面吸附作用、络合作用、沉淀作用、静电作用等^[24-25]。生物炭具有巨大的比表面积、较高的表面能,对土壤中的重金属具有较强的吸附性能,可以通过吸附土壤中的重金属离子修复受其污染的土壤;重金属离子易于与生物炭表面丰富的含氧官能团结合形成金属络合物,从而降低土壤中重金属有效性;生物炭的pH值都较高,施加至土壤中可以提高土壤pH值,使土壤中重金属离子生成沉淀物,从而去除土壤中重金属;生物炭的静电吸附作用源于其表面携带的负电荷^[26-30]。

2 生物炭修复效果的主要影响因素

2.1 生物炭原料

2.1.1 不同原料生物炭的修复效果。生物炭的制备材料多种多样,不同材料制成的生物炭对重金属元素有着不同的去除机理,去除效果往往也有差异,如表1所示。盘丽珍等^[31]通过盆栽试验发现,大豆秸秆生物炭可显著降低重金属在空心菜根部的含量;王丽敏等^[32]用花生壳制备的生物炭具有较大的比表面积,对Pb²⁺具有较大的吸附容量;陈楠等^[33]用椰壳为原材料制成生物炭,发现椰壳生物质炭对Cr⁶⁺有良好的吸附效果;张倩等^[34]利用黍糠和菜籽饼制得生物炭,可通过表面沉淀、与官能团络合和阳离子吸引等方式吸附固定Cd²⁺;用鸡粪制得的生物炭呈碱性^[35],牛粪制得的生物炭含有多种元素^[36],皆对重金属含量有降低作用;牛晓丛等^[37]用酵素渣等制成生物炭对重金属有钝化作用;谢伟雪等^[38]用废毛发制得的生物炭呈碱性,表面多孔,对重金属有较好的吸附能力;市政污泥制成的生物炭^[39],能给土壤增肥且农产品的重金属含量低于国家卫生标准;尹微琴^[40]用垫料制成的生物炭同样对重金属有钝化作用。

2.1.2 原料种类对生物炭修复效果的影响机制。制备生物炭的原料可分为4类。第一类为植物源,如农作物废料、椰壳

基金项目 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划项目(143275)。

* 通信作者

收稿日期 2019-01-30

表1 不同原料生物炭对重金属去除率

原料	重金属	pH 值	温度/℃	去除率/%	参考文献
大豆秸秆	Cd	6.5	25	54.0	[31]
花生壳	Pb	5.0	25	54.0	[32]
椰壳	Cr	5.0	30	81.0	[33]
黍糠和菜籽饼	Cd	4.0	25	48.0	[34]
鸡粪	Cu	6.4	25	57.0	[35]
牛粪	Cd	5.0	25	31.0	[36]
酵素渣	Cd	7.5	25	45.0	[37]
废毛发	Zn	8.1	20	6.3	[38]
垫料	Cd	6.3	25	37.0	[40]

等。植物源所制成的生物炭多孔、比表面积大,对重金属有吸附固定作用,且偏碱性,可调节土壤 pH 值,使重金属离子易于沉淀。第二类为动物源,如鸡粪、牛粪和废毛发等。动物源制成的生物炭能提高重金属的酸溶态和还原态以及残渣态,降低植物根部的富集系数,从而有效抑制重金属向植物根部转移,降低重金属进入人体的含量。动物源生物炭能增加土壤中硝态氮的含量,让根部分泌出较多的 HCO_3^- 与 OH^- , 导致 pH 值升高,使重金属形成氢氧化物和碳酸盐沉淀。动物源生物炭表面有丰富的有机基团,对重金属有着较好的吸附作用。第三类为污泥,如市政污泥等。利用污泥制成的生物炭内含多种元素,结构较为复杂,有很大比例的矿物质,能更好地吸附重金属。第四类为工业废料源,如垫料等。这一类生物炭有着许多碱性物质和含氧官能团,碱性物质能中和土壤的酸度,含氧官能团使生物炭表现为亲水性与疏水性,能提高土壤的酸碱缓冲能力和阳离子交换能力,从而降低土壤中重金属的含量。

2.1.3 最佳生物炭原料。农作物废料制成的生物炭,具有较大的比表面积,为多孔结构,显碱性,具有较大 CEC,制作过程中产生较多的灰分,且材料易得,可结合不同的原料场地选择实现废物利用。因此,农作物废料能作为制作生物炭的最佳材料。

2.2 生物炭制备温度与改性方式

2.2.1 不同温度条件或改性方式制备的生物炭的修复效果。生物炭包括易降解炭、难降解炭和灰分,不同的热解温度对这3种成分比例有影响^[41],生物炭的理化性质及结构特性也受热解条件的影响^[42]。热解温度越高,酸性基团越少,而碱性基团含量增多,使生物炭 zeta 电位升高,进而增强吸附能力^[43]。但是温度不能持续增加,过高的温度会导致官能团的减少^[44]。黄惠群等^[45]以牛粪热解制得生物炭,随着炭化温度升高,制得生物炭的形貌特征更有规律并且孔隙更加紧密,有利于吸附作用。刘杰等^[46]用稻壳和棉花秸秆在 300~700℃下制备生物炭,结果表明,热解温度越高,达到同样的去除效果所需生物炭越少。李长欣等^[47]用泡饮过的茶叶渣制备生物炭,在 600℃时,有机碳和可溶性有机碳含量较高,对重金属的钝化作用较好。戴亮等^[48]发现,用市政污泥制成的生物炭温度越高,产率越低,700℃时去除 Cd^{2+} 效果较好。郜礼阳等^[49]用桉树叶制备的生物炭在 700℃时电荷量和 pH 值均较高,对 Cd^{2+} 的吸附效果较佳。邓金环等^[50]用香草根制备生物炭,发现在 700℃时,生物炭表面积较大,对重金属吸附效果较佳。

改性处理后的生物炭,其官能团种类和数量大大增加,

对重金属的吸附固定能力也随之增强。不同改性方式对生物炭去除重金属效果的影响不同。车晓东等^[51]分别利用微波加热氧化活化、水浴加热硝酸氧化制备改性生物炭,改性处理后的生物炭对重金属的吸附量明显增加,微波加热处理改性能显著提高生物炭的吸附量。范家俊等^[52]研究发现,巯基乙醇改性可以增强生物炭对重金属的去除效果。杨兰等^[53]通过培养试验发现,硝酸改性、氢氧化钠改性、高锰酸钾改性都能够显著增强生物炭对重金属的去除效果。李佳霜等^[54]分别利用氯化铝、高锰酸钾改性生物炭来吸附重金属,结果表明,高锰酸钾改性方式使得生物炭对重金属 Sb 的吸附量增长了 163.7%。

2.2.2 制备温度、改性方式对生物炭修复效果的影响机制。原材料在不同裂解温度下,所制备的生物炭有着不同的作用机理,不同的裂解温度可以改变生物炭的 pH 值、比表面积和孔隙结构、官能团、灰分,且产率也不同,随着温度的增加碱性基团增多,pH 值与灰分升高,所得产物的形貌特征更有规律且孔隙紧密,比表面积增大,更有利于吸附等综合作用,但达到一定温度时继续升高,生物炭官能团会减少,产率会下降并且能耗较高,不利于生产。

应用较为广泛的生物炭改性方法有硝酸改性、氢氧化钠改性、高锰酸钾改性、氯化铁改性、氯化铝改性、微波加热硝酸改性、巯基改性等。硝酸、氢氧化钠、高锰酸钾、氯化铝改性处理扩大了原炭的比表面积和总孔体积。微波硝酸改性处理增加了生物炭上的羟基等多种官能团的数量,而氯化铁改性与硝酸改性的生物炭中酸性官能团数量较多。高锰酸钾处理后的比表面积和总孔体积最大,同时增加了大量的含氧官能团,使其与重金属的络合作用也大大增强。巯基改性处理为生物炭嫁接巯基,使得生物炭在酸性条件下仍能有效地吸附重金属镉,但是巯基改性处理会减少生物炭孔隙。

2.2.3 最佳制备温度范围和改性方式。制备生物炭的热解温度宜高,但又不宜过高,宜控制在 600~700℃范围内^[51-54]。相比其他改性方法,高锰酸钾改性的生物炭表面会附着上一些二氧化锰、氢氧化钾或硅酸钾等晶体,这些晶体会在一定程度上加大吸附能力,因为高锰酸钾的强氧化性,改性后的生物炭更加细碎,粒径更小。吸附粒径越小,颗粒分散更加均匀,同所吸附的重金属粒子碰撞的可能性也就越大,吸附能力也就越强。高锰酸钾改性生物炭具有更高的固定重金属的能力。

2.3 施用量和配合施用材料

2.3.1 不同施用量和配合施用材料对生物炭的修复效果的影响。不同质量分数的生物炭在土壤中表现出的理化性质不同,对土壤中重金属的去除效果也存在差异。刘晶晶等^[55]通过恒温培养试验发现,土壤中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 有效态含量均随着生物炭施用量的增加而显著降低。吴萍萍等^[56]通过室内培养试验发现,2%和5%的生物炭施用量能显著增加残渣态 Cu、Cd、Zn、Pb 比例,且5%的生物炭施用量土壤中残渣态 Cu 增加比例明显高于2%的生物炭施用量。王凤等^[57]通过培养试验发现,3%、5%的生物炭施用量显著降低了油菜地上部 Cd 含量和地下部 Cd 含量,且这2种施用量对土壤

中 Cd 含量的降低效果差别不大。

生物炭与其他材料配合施用于土壤,对土壤物理化学性质的影响可能不同于单独施用生物炭^[58-59]。段然等^[60]通过室内培养试验发现,生物炭和草酸活化磷矿粉配合施用于土壤重金属镉镍复合污染的修复效果优于单施。杜彩艳等^[61]将硅藻土、生物炭、沸石粉、石灰及其组合施用于 Cd、Zn 污染土壤中进行田间试验,结果表明,生物炭、沸石粉与硅藻土配合施用方式对土壤中重金属有效态含量降低效果最明显。郭文娟^[62]设置 10 组生物炭施用方案进行田间试验,发现在减少菜地上可食部位 Cd 的积累和降低土壤中 Cd 有效性方面,生物炭与发酵鸡粪配合施用效果优于生物炭单施效果,生物炭与氮磷钾复合肥配合施用效果与生物炭单施效果差别不大。王期凯等^[63]也进行相似的试验,结果基本相同。陈璇等^[64]通过盆栽试验发现,猪粪肥与生物炭联合施用显著提高了蔬菜含铜量。

2.3.2 施用量、配合施用材料对生物炭修复效果的影响机制。随着生物炭施用量的增加,土壤 pH 值逐渐增大,从而增强了生物炭对土壤重金属的沉淀作用;土壤中的生物炭含量增大,从而增强了生物炭对土壤重金属表面吸附作用、络合作用和静电作用。然而,生物炭的施用不能过量,过量添加会导致单位生物炭的施用效果下降,造成浪费。

前述矿物材料^[60-61]都属于碱性材料,施入土壤中都可以通过一定机制提高土壤 pH 值。土壤 pH 值的升高可以增强带负电荷的土壤胶体对带正电荷的重金属离子吸附能力。碱性矿物材料除了具有提高土壤 pH 值外,还具有表面效应和孔道效应。矿物材料具有众多孔道和大量活性基团,重金属离子可进入其孔道内部并与其内部基团发生综合吸附,且由于孔道效应,重金属离子能够被有效固定。然而,石灰由于碱性太强,很可能对农作物根系造成一定伤害,从而抑制农作物生长。

前述发酵鸡粪^[62-63]和猪粪肥^[64]都属于畜禽粪便类有机肥。畜禽粪便类有机肥中含有大量的腐植酸,其中包含各种羧基和羟基官能团。该类有机肥料施用于重金属污染土壤中可与有效态重金属离子发生专性吸附、离子交换、络合反应以及共沉淀等作用,从而降低土壤中重金属的有效性。由于猪粪肥本身含有一定量的 Cu,且能提高土壤中水溶性物质含量,从而引起重金属离子解吸,施用猪粪肥会提高铜的有效性。氮磷钾复合肥与生物炭的配合施用对土壤中重金属有效性的影响也受到肥料品种、成分等多种因素影响,所以氮磷钾复合肥的添加效果并不确定。

2.3.3 最佳施用量和配合材料。通过前述研究发现,施加量在 5%以内时,5%的生物炭施加量对土壤中重金属的去除效果最好,但与 3%的施用量的效果相差不大。施用量大于 5%,生物炭对重金属污染土壤的修复效果很可能更为显著^[65]。然而,过量施加生物炭可能导致作物产量降低和产生动植物毒性^[66-67]。唐行灿^[68]通过研究发现,5%的生物炭施加量会对蚯蚓产生毒性。综合考虑各方面因素,生物炭的最佳施用量为 3%。

通过对前述试验研究及其结论的分析,可以推断,碱性矿物材料(强碱性矿物质材料除外)和畜禽粪便类有机肥(猪

粪肥除外)可作为生物炭的最佳配合材料。

3 展望

生物炭的在去除土壤中重金属方面的具体实用性受许多因素影响。生物炭的具体使用方案应当结合当地常见的农业废弃物种类、制备得到的生物炭的理化性质、当地土壤性质、准备种植的作物性质、经济效益和环境效益等因素,并通过必要的试验确定。

(1)在选用生物炭原料时,应当因地制宜,根据当地资源种类和资源量特点,结合经济条件综合考虑,优先选用农作物废料。

(2)在确定生物炭的制备温度和改性方式过程中,应主要从效果和经济 2 个方面考虑。制备温度最好控制在 600~700 °C 范围内,优先采用高锰酸钾改性。

(3)生物炭的施用量不宜过高,最好控制在 5%以内,考虑到施用效果,施用量以 3%为最佳。可以选用碱性矿物材料和畜禽粪便类有机肥与生物炭配合施用,但应避免施用强碱性矿物材料和猪粪肥。

4 参考文献

- [1] 骆永明,滕应.我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J].中国科学院院刊,2018,33(2):45-152.
- [2] 《中国环境年鉴》编辑委员会.中国环境年鉴[M].北京:中国环境年鉴社,2017.
- [3] 师艳丽,陈明,李凤果,等.土壤重金属污染修复技术研究进展[J].有色金属科学与工程,2018,9(5):66-71.
- [4] 李双双.污染土壤修复技术及研究前沿与展望[J].吉林农业,2018(3):79.
- [5] 李亚娇,温猛,李家科,等.土壤污染修复技术研究进展[J].环境监测管理与技术,2018,30(5):8-14.
- [6] 刘海华,吴奇.重金属污染土壤生物修复技术及研究进展[J].中国锰业,2017,35(5):154-157.
- [7] 刘少文,焦如珍,董玉红,等.土壤重金属污染的生物修复研究进展[J].林业科学,2017,53(5):146-155.
- [8] 马铁铮,马友华,徐露露,等.农田土壤重金属污染的农业生态修复技术[J].农业资源与环境学报,2013,30(5):39-43.
- [9] 陆伟.重金属污染土壤修复技术的发展现状和趋势[C]//《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册).北京:《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司,2018.
- [10] 周际海,黄荣霞,樊后保,等.污染土壤修复技术研究进展[J].水土保持研究,2016,23(3):366-372.
- [11] 赵乾程,杨欣,曹田,等.土壤重金属污染原位钝化修复及效果评价进展研究[J].环境科学与管理,2016,41(12):98-102.
- [12] 吴余金.几种钝化剂对铜镉污染土壤的修复[D].南昌:南昌航空大学,2016:54-55.
- [13] 武成辉,李亮,雷畅,等.硅酸盐钝化剂在土壤重金属污染修复中的研究与应用[J].土壤,2017,49(3):446-452.
- [14] 王陈丝丝,马友华,于倩倩,等.钝化剂对农田土壤重金属形态与其稳定性影响研究[J].中国农学通报,2016,32(1):172-177.
- [15] 殷飞,王海娟,李燕燕,等.不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J].农业环境科学学报,2015,34(3):438-448.
- [16] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等.钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J].农业环境科学学报,2014,33(5):890-897.
- [17] 陈志良,袁志辉,黄玲,等.生物炭来源、性质及其在重金属污染土壤修复中的研究进展[J].生态环境学报,2016,25(11):1879-1884.
- [18] JEFFERY S.The way forward in biochar research:Targeting trade-offs between the potential wins[J].GCB Bioenergy,2015,7(1):1-13.
- [19] 何选明,冯东征,敖福祿,等.生物炭的特性及其应用研究进展[J].燃料与化工,2015,46(4):1-3.
- [20] 孔丝丝,姚兴成,张江勇,等.生物质炭的特性及其应用的研究进展[J].生态环境学报,2015,24(4):716-723.
- [21] 袁帅,赵立欣,孟海波,等.生物炭主要类型、理化性质及其研究展

修和除草、土壤清理修补、硬化渠维修及疏通;三是休耕期间加强农田基础设施管理,配套实施高标准农田建设项目。

采取适合的复耕模式。复耕工作以村委会为主体、农户为辅的实施模式,田埂维护整修和除草由农户实施,土壤清理修补、硬化渠维修及疏通工作由村委会组织实施。

总之,湘中丘陵区休耕普遍采取早休、田间管理粗放等措施,加速了土壤有机质矿化分解和土壤酸化,导致土壤微生物及农田杂草种群改变;休耕地只耕不种,沟渠长期不利用、不灌水,农田长期不淹水,会导致沟渠、田埂毁损严重,农田生态系统破坏严重,水田的稻作功能和湿地功能退化;

(上接第155页)

- 望[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1402-1417.
- [22] 孙宁川,唐光木,刘会芳,等.生物炭对风沙土理化性质及玉米生长的影响[J].西北农业学报,2016,25(2):209-214.
- [23] WANG J, XIONG, et al. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8(3): 512-523.
- [24] 许妍哲,方战强.生物炭修复土壤重金属的研究进展[J].环境工程,2015,33(2):156-159.
- [25] 戴静,刘阳生.生物炭的性质及其在土壤环境中应用的研究进展[J].土壤通报,2013,44(6):1520-1525.
- [26] 徐东昱,周怀东,高博.生物炭吸附重金属污染物的研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(1):7-15.
- [27] 陈昱,钱云,梁媛,等.生物炭对Cd污染土壤的修复效果与机理[J].环境工程学报,2017,11(4):2528-2534.
- [28] 李建宏.化学改性椰纤维生物炭对水溶液中铅(Pb²⁺)修复及机理研究[D].海南:海南大学,2015:41-55.
- [29] 梁媛,李飞跃,杨帆,等.含磷材料及生物炭对复合重金属污染土壤修复效果与修复机理[J].农业环境科学学报,2013,32(12):2377-2383.
- [30] 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.
- [31] 盘丽珍,许中坚,伍泽广,等.大豆秸秆生物炭对铅锌尾矿污染土壤的修复作用[J].水土保持学报,2018,32(5):325-329.
- [32] 王丽敏,王红,魏薇,等.花生壳生物炭对水中Pb(II)的吸附[J].吉林化工学院学报,2018,35(11):53-57.
- [33] 陈楠,康蒙蒙,江璇,等.椰壳生物炭对水中Cr(VI)的吸附机制研究[J].环境科学与管理,2017,42(12):66-69.
- [34] 张倩,柳超颖,范子哲,等.黍糠、菜籽饼生物炭的制备及其对重金属镉(Cd²⁺)的吸附[J].安全与环境学报,2018,18(2):664-670.
- [35] 张艺腾,范禹博,徐笑天,等.鸡粪生物炭对土壤铜和锌形态及植物吸收的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(11):2514-2521.
- [36] 吴来荣,刘永德.牛粪生物炭的研究进展与展望[J].绿色科技,2018(14):243-244.
- [37] 牛晓丛,何益,金晓丹,等.酵素渣和秸秆生物炭钝化修复重金属污染土壤[J].环境工程,2018,36(10):118-123.
- [38] 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.
- [39] 王静,范云慧,高丽丽,等.市政污泥生物炭对大豆生长及重金属积累的影响[J].农产品质量与安全,2018(3):30-34.
- [40] 尹微琴,孟莉蓉,郁彬琦,等.垫料生物炭对土壤镉的钝化作用[J].江苏农业学报,2018,34(1):62-67.
- [41] 王晓洁,陈冠虹,张仁铨.不同热解温度的生物炭在土壤中的矿化作用研究[J].环境科学学报,2018,38(1):320-327.
- [42] 王宏燕,王晓晨,张瑜洁,等.几种生物质热解炭基本理化性质比较[J].东北农业大学学报,2016,47(5):83-90.
- [43] 彭成法,肖汀璇,李志建.热解温度对污泥基生物炭结构特性及对重金属吸附性能的影响[J].环境科学研究,2017,30(10):1637-1644.
- [44] 李玉奇,李磊,朱艳,等.热解温度对米糠与麦麸生物炭理化性质及硒等温吸附的影响[J].黑龙江农业科学,2018(11):32-37.
- [45] 黄惠群,蔡文昌,张健瑜,等.炭化温度对牛粪生物炭结构性质的影响[J].浙江农业学报,2018,30(9):1561-1568.
- [46] 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.
- [47] 李长欣,吕严凤,张梦迪,等.热解条件对茶叶渣生物炭特性及镉污

休养耕地虽然能培肥土壤、改善土壤结构、提高耕地质量等级水平,但是目前采用的休耕技术措施无法减轻重金属污染^[4]。

6 参考文献

- [1] 张子叶,谢运河,黄伯军,等.镉污染稻田水分调控与石灰耦合的季节性休耕修复效应[J].湖南农业科学,2017(12):47-51.
- [2] 曹俏,周清,李志明,等.宁乡市治理式休耕对稻田耕层土壤肥力水平的影响[J].湖南农业科学,2018(8):37-39.
- [3] 雷超凡,李铜山.论实施轮作休耕的制约因素和对策[J].农村经济与科技,2018(17):53-54.
- [4] 黄国勤,赵其国.江西省耕地轮作休耕现状、问题及对策[J].中国生态农业学报,2017,25(7):1002-1007.
- [5] 戴静,刘阳生.生物炭钝化效果的影响[J].环境工程学报,2017,11(12):6504-6510.
- [48] 戴亮,任瑶,陶玲,等.不同热解温度下污泥基生物炭的性质及对Cd²⁺的吸附特性[J].环境工程学报,2017,11(7):4029-4035.
- [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] 邓金环,郜礼阳,周皖婉,等.不同温度制备香根草生物炭对Cd²⁺的吸附特性与机制[J].农业环境科学学报,2018,37(2):340-349.
- [51] 车晓冬,丁竹红,胡忻,等.微波加热硝酸氧化改性稻壳基生物炭对Pb(II)和亚甲基蓝的吸附作用[J].农业环境科学学报,2016,35(9):1773-1780.
- [52] 范家俊.巯基改性生物炭吸附水中的镉[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二十次会议暨农田土壤污染与修复研讨会摘要集.北京:中国土壤学会土壤环境专业委员会,2018.
- [53] 杨兰,李冰,王昌全,等.改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土壤钝化效应[J].环境科学,2016,37(9):3562-3574.
- [54] 李佳霜,冒国龙,赵松炎,等.改性生物炭对Sb(III)的吸附行为及机理[J].化工环保,2018,38(5):546-551.
- [55] 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.
- [56] 吴萍萍,李录久,王家嘉,等.秸秆生物炭对矿区污染土壤重金属形态转化的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(5):453-459.
- [57] 王凤,王梦露,许莹,等.生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(5):907-914.
- [58] HARDY S, BRUNO G. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(3): 410-422.
- [59] AGEGNEHU G, ADRIAN M B, PAUL N, et al. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 295-306.
- [60] 段然,胡红青,付庆灵,等.生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果[J].环境科学,2017,38(11):4836-4843.
- [61] 杜彩艳,木霖,王红华,等.不同钝化剂及其组合对玉米(*Zea mays*)生长和吸收Pb Cd As Zn影响研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1515-1522.
- [62] 郭文娟.生物炭对镉污染土壤的修复效应及其环境影响行为[D].北京:中国农业科学院,2013:56-57.
- [63] 王期凯,郭文娟,孙国红,等.生物炭与肥料复配对土壤重金属镉污染钝化修复效应[J].农业资源与环境学报,2015,32(6):583-589.
- [64] 陈璇,郭雄飞,陈桂葵,等.生物炭和猪粪肥对铜污染土壤中蔬菜生长及铜形态的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(5):913-918.
- [65] 王红,夏雯,卢平,等.生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性[J].环境科学,2017,38(9):3944-3952.
- [66] LUKE B, EDUARDO M J, JOSE 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.
- [67] LI, D, WILLIAM C H, CAROLINE A M, et al. Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(8): 1732-1737.
- [68] 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.