

生物质炭对土壤—水稻系统中 Cd 迁移累积的影响

刘巍, 陈效民, 景峰, 郭碧林, 杨之江, 李恋卿

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 探究生物质炭添加对 Cd 污染土壤中 Cd 形态、植株对 Cd 的吸收分配及土壤肥力的影响, 为污染稻田粮食安全提供科学依据。在湖南省长沙市 Cd 污染稻田进行田间定位试验, 设置 5 个生物质炭添加量处理(0, 10, 20, 30, 40 t/hm²), 分析生物质炭对 Cd 在土壤中形态转化和水稻器官中分配的影响。结果表明: 生物质炭通过将土壤中酸溶态 Cd 钝化为可还原态 Cd 以减少在水稻器官中的累积, 钝化量随着生物质炭增加而增加, 土壤酸溶态 Cd 较 CK 降低 3.83%~19.08%; 且茎对根和糙米对茎的转运系数随生物质炭的添加分别降低 4.23%~9.30% 和 1.39%~8.33%; 土壤酸溶态 Cd 含量直接影响糙米中 Cd 含量, 且受土壤 pH 和土壤有机碳的调控。Cd 污染稻田添加生物质炭可以提高土壤肥力, 降低土壤 Cd 生物有效性, 20 t/hm² 生物质炭添加量可以作为研究区周边 Cd 污染稻田修复的参考标准。

关键词: 生物质炭; 水稻; 镉污染; 原位修复

中图分类号: X53; S153

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0323-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.050

Effects of Biochar Amendment on Translocation and Accumulation of Cd in Soil-Rice System

LIU Wei, CHEN Xiaomin, JING Feng, GUO Bilin, YANG Zhijiang, LI Lianqing

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

Abstract: In order to provide scientific basis for food safety in rice fields, a field trial was conducted in Changsha, Hunan Province to investigate the effects of biochar amendment on the form of cadmium (Cd), the uptake and distribution of Cd and soil fertility of rice field polluted by Cd. Five biochar application treatments (0, 10, 20, 30 and 40 t/hm²) were set to analysis the effects of the biochar amendment on the migration of Cd in the soil and the distribution of Cd in the rice organs. The results showed that the biochar reduced the accumulation of Cd in the rice organs by passivating the acid-soluble Cd into the reducible Cd in the soil, and the amount of passivation increased with the increasing of biochar, the acid-soluble Cd decreased by 3.83%~19.08% in biochar treatments compared with CK. After the biochar applying, the translocation coefficient of Cd for stem to root and brown rice to stem were decreased by 4.23%~9.30% and 1.39%~8.33%, respectively. The decision analysis showed that the content of the acid-soluble Cd in soil directly affected the Cd content in the brown rice, and was regulated by soil pH and organic carbon in the soil. In conclusion, biochar amendment could improve the soil fertility and decrease the Cd bioavailability in the Cd polluted rice field. The addition of 20 t/hm² biochar could be taken as a reference standard for remediation of the rice field polluted by Cd around the research area.

Keywords: biochar; rice; cadmium contamination; in-situ remediation

水稻作为我国三大主粮之一, 全国近 1/2 人口以大米为主食。湖南省作为我国重要的稻米主产地和有色金属开采地, 矿冶区周边的土壤成为重金属污染的直接受体, 使得矿区附近稻田土壤重金属严重超标, 尤其是

Cd。水稻中的 Cd 含量高低直接关系到当地人民的饮食健康^[1]。近年来随着城市化的快速发展, 优质的耕地不断被侵占而减少, 湖南省粮食生产压力越来越大, 再加上土壤 Cd 污染造成的水稻安全问题, 严重影响了当

地的粮食生产和农业可持续发展^[2]。长期食用受 Cd 污染的水稻籽粒会造成人体慢性 Cd 中毒,严重影响国民身体健康。如何治理重金属污染稻田和减少重金属 Cd 向水稻中迁移再分配,保障稻米安全生产,已经成为社会各界广泛关注的问题。

化学改良技术作为一种土壤原位修复技术,是现阶段治理土壤污染的有效手段之一^[3],通过向土壤中添加改良剂,改善土壤的 pH、阳离子交换量、有机碳含量等理化性质,从而降低土壤中重金属的生物有效性^[4]。生物质炭作为秸秆限氧条件下热解而成的产品,具有丰富的孔隙结构、高 pH、含有机无机养分等特性,加入土壤后可以吸附重金属元素,改善土壤酸碱度及增加土壤有机碳等,在改良土壤理化性质的同时还改变了土壤微生物的生态环境,促进土壤中有害物质的变性和降解。土壤中重金属的生物有效性大小决定了其毒性强弱,因此,降低土壤重金属的生物有效性对于保障粮食安全至关重要^[5]。刘源等^[6]研究表明,通过向土壤添加生物质炭可以减少污水灌溉下盆栽水稻籽粒中 Cd 含量;肖瑶等^[7]研究表明,由 550 °C 限氧烧制的生物质炭对 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 吸附钝化效果最好。近年来,有关生物质炭治理土壤重金属污染的研究,大多集中于生物质炭对土壤中重金属离子的吸附和土壤微生物活性等方面,且多为盆栽试验。但在探究生物质炭对大田重金属在土壤—水稻系统中迁移机理,以及为重金属污染稻田提供安全生产指导、保障稻米安全方面相关研究较少。

因此,本研究通过对 Cd 污染稻田开展田间试验,探究水稻各器官的 Cd 迁移累积与生物质炭用量间关系、土壤 Cd 形态变化及土壤肥力变化特征,试图为 Cd 污染稻田提供合理的治理方案,同时为实现当地水稻的安全生产和生物质炭对重金属 Cd 污染稻田修复治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本试验地位于湖南省长沙市长沙县(113°03′33″ E, 28°26′12″ N),该地位于我国亚热带季风性气候区,气候温暖潮湿,全年平均气温为 16.7~17.4 °C,水稻生育期内最高气温 40.6 °C,最低气温 19.3 °C,全年降水量 1 357.9~1 551.4 mm,全年日照时间 1 677 h,无霜期 275 d。试验地土壤类型为红壤,由新生代第四纪红色黏土发育而来。

1.2 试验设计与供试材料

试验地小区共设置 5 个处理,包括 1 组对照(CK),4 个生物质炭添加量梯度处理,分别为 10(A10),20(A20),30(A30),40(A40) t/hm²。每个

处理 3 次重复,小区面积 4 m×3 m=12 m²,以泥埂覆膜隔开,各小区随机区组排列并设置保护行。水稻移栽前施入基肥 375 kg/hm²,基肥和生物质炭均一次性人工撒施入每个小区中,进行人工翻耕混匀,水稻统一培育 28 天时移栽入田。2017 年 6 月 7 日插秧,9 月 24 日收获。期间日常的水肥管理与当地农户田间管理措施相同。

耕作层土壤 pH 为 4.6,全 N、全 P 和有机碳含量分别为 0.97,0.58,8.20 g/kg,阳离子交换量 15.1 cmol/kg,土壤容重 1.22 g/cm³,速效磷 18.37 mg/kg,Cd 含量 0.76 mg/kg。生物质炭购买自商丘市三利新能源有限公司,550 °C 烧制的秸秆炭,pH 为 10.2,总 N、总 P、总 K 和有机碳含量为 5.1,0.8,44.2,468.3 g/kg,阳离子交换量为 32.4 cmol/kg,Cd 未检出。试验地基肥采用江西开子肥业股份有限公司生产的掺混肥,总氮、P₂O₅、K₂O 分别为 22%,5%和 13%。本试验地水稻品种为深优 9519,属于籼型三系杂交中稻,全生育期 138 天,栽培管理为一年一季。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集 在水稻的收获期,分批采集小区内的整株水稻(包括根、茎、叶和糙米)和土壤样品。采集的土壤经自然风干后除去土壤中的杂物,研磨过筛用于土壤基本理化性质测定,用玛瑙研钵研磨后过 0.15 mm 尼龙网筛用于测定 Cd 含量。此外,植株样品按照根、茎、叶和糙米分离,分别粉碎过筛后备用。

1.3.2 测定指标与方法 土壤全量 Cd 采用 HCl-HNO₃ 湿消解法提取^[8];土壤中 Cd 的形态分析采用改进 BCR 法分级提取^[9];土壤有机碳、阳离子交换量和有效磷等基本理化性质测定参考《土壤农化分析》^[8];水稻植株各器官中 Cd 含量用 HNO₃-H₂O₂ 消解,土壤和水稻重金属 Cd 提取液均用 ICP-MS 测定。

1.4 转运系数的计算方法

为研究水稻吸收转运土壤重金属的能力,引入转运系数。转运系数(TC)的定义为植物某器官的重金属浓度[C]_A与另一器官重金属浓度[C]_B的比值,转运系数的大小表示植物体内转移重金属的能力^[10]。

1.5 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析与通径分析,Excel 2016 软件对试验数据进行处理并绘图。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对 Cd 在水稻器官中积累与转运的影响

2.1.1 生物质炭对 Cd 在水稻根、茎、叶与糙米中积累的影响 由表 1 可知,CK 处理中水稻根系吸收的 Cd 含量达到了(9.57±0.38)mg/kg,在糙米中的 Cd

含量也高达(0.245±0.01)mg/kg,且在水稻茎和叶中的 Cd 含量分别为(3.40±0.16)mg/kg 和(1.34±0.06)mg/kg,由此说明 Cd 在水稻中主要集中在根系中,其次是茎、叶和糙米。而该水稻糙米中的 Cd 含量高于我国食品安全国家标准^[11]。可见在当地的 Cd 污染土壤中,若要保证水稻糙米中输出的 Cd 在安全的范围之内,就需要降低籽粒中的 Cd 含量。由表 1 可知,在田间小区中添加生物质炭可以显著降低水稻根系中 Cd 的吸收含量,随着生物质炭添加量的增加,水稻体中各部位的 Cd 含量均呈现下降的趋势,当稻田中生物质炭添加量达到 20 t/hm² 时,水稻糙米中的 Cd 含量为(0.184±0.01)mg/kg,低于水稻籽粒 Cd 含量国家标准限定值(0.200 mg/kg);当生物质炭添加量为 40 t/hm² 时,水稻中根、茎、叶和糙米各部位中的 Cd 含量相对于 CK 分别下降了 24.84%,31.90%,30.16%,37.15%。总的来说,在本试验设计的生物质炭添加量范围内,水稻各部位 Cd 含量均随生物质炭添加量的增加而降低,表明稻田土壤添加生物质炭能显著降低水稻各部位 Cd 的含量。

表 1 生物质炭对水稻根、茎、叶和糙米中 Cd 含量的影响

单位:mg/kg

处理	根 Cd	茎 Cd	叶 Cd	糙米 Cd
CK	9.57±0.38a	3.40±0.16a	1.34±0.06a	0.245±0.01a
A10	8.49±0.13b	2.89±0.05b	1.14±0.02b	0.205±0.01b
A20	8.14±0.29b	2.67±0.08b	1.07±0.03bc	0.184±0.01bc
A30	7.49±0.03c	2.43±0.22cd	0.973±0.09c	0.167±0.02cd
A40	7.19±0.19c	2.31±0.25d	0.934±0.13c	0.154±0.02d

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示不同生物质炭添加量间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.1.2 生物质炭对水稻植株体内 Cd 转运的影响 转运系数可表征植物组织或者器官内的元素运输和富集能力^[10]。由表 2 可知,CK 中糙米/茎、叶/茎和茎/根的 Cd 转运系数分别为 0.072,0.393,0.355,即叶对茎大于茎对根且明显大于糙米对茎中的 Cd 的转运积累。在 4 种生物质炭添加量处理中,茎对根和糙米对茎中 Cd 的转运系数随着生物质炭添加量增加而减小,相反叶对茎中的 Cd 的转运系数随着生物质炭施用量的增加而逐渐增大,这说明重金属 Cd 在水稻茎中的转运主要是集中在叶片,Cd²⁺ 与水分在受到水稻叶片蒸腾的作用下水稻茎中的 Cd²⁺ 主要向水稻叶片中运输,而生物质炭的添加会强化这一作用。生物质炭添加量为 40 t/hm² 时,相对于对照组来说,水稻中茎对根 Cd 的转运系数下降了 9.30%,糙米对茎中 Cd 的转运系数降低了 8.33%,叶对茎中 Cd 的转运系数上升了 2.54%。生物质炭的施用可以降低当地中稻根系对 Cd 的吸收,并且减少了茎中的 Cd 向

糙米中转运,从而降低糙米中的 Cd 含量。保障当地水稻籽粒的安全输出。

表 2 生物质炭对水稻 Cd 转运系数的影响

处理	茎/根	叶/茎	糙米/茎
CK	0.355	0.393	0.072
A10	0.340	0.396	0.071
A20	0.328	0.400	0.069
A30	0.324	0.401	0.069
A40	0.322	0.403	0.066

2.2 生物质炭对稻田土壤中 Cd 形态分配的影响

由图 1 可知,试验地经过一季的水稻种植后,土壤全量 Cd 无明显变化,说明水稻种植期间稻田土壤中重金属 Cd 的输入和输出量有限。随着生物质炭添加量的增加,土壤中酸溶态和可氧化态 Cd 含量降低,可还原态 Cd 含量上升,残渣态 Cd 无显著变化。当生物质炭添加量为 40 t/hm² 时,酸溶态和可氧化态 Cd 占总 Cd 含量分别较对照组分别降低 19.08%和 7.05%;可还原态 Cd 含量上升 37.76%;土壤中残渣态 Cd 含量无明显变化。这表明,稻田土壤添加生物质炭可以使移动性强的酸溶态 Cd 向可还原态 Cd 转化,提高可还原态 Cd 在土壤全量 Cd 中的质量分数,从而降低土壤中 Cd 的生物有效性。

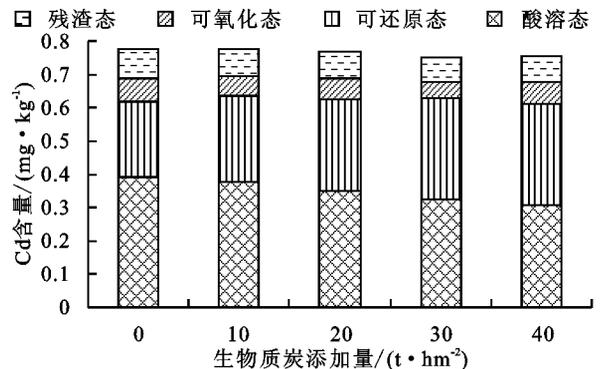


图 1 生物质炭对供试稻田土壤 Cd 形态的影响

2.3 糙米 Cd 含量和影响因子间相关性分析与途径分析

添加生物质炭会影响土壤理化性质(表 3),进而对水稻糙米中 Cd 含量产生影响,通过相关性分析,可以建立起土壤中各影响因子与糙米 Cd 含量间的关系,进而判断某因子对糙米中 Cd 含量影响大小。由表 4 可知,土壤 pH 和有机碳含量均与糙米 Cd 含量呈显著相关,相关系数分别为-0.838 和-0.741 ($p<0.01$),表明土壤 pH 和土壤有机碳含量升高,可以减少土壤中 Cd 的移动性,从而减少 Cd 在水稻籽粒中的富集。土壤中酸溶态与可还原态 Cd 呈现显著负相关($p<0.05$),说明生物质炭的添加可以使土壤中酸溶态等易被作物利用的 Cd 向可氧化态等生物有效性弱的结合态 Cd 转换,这一过程有利于水稻糙米中 Cd 含量的降低。

表 3 生物质炭对土壤理化性质的影响

处理	pH	CEC/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	4.60±0.12e	16.04±0.25e	1.14±0.16b	20.74±0.59d	9.03±0.60b
A10	4.96±0.02d	17.71±0.28d	1.28±0.06ab	23.01±1.17c	9.07±0.38b
A20	5.31±0.10c	18.79±0.42c	1.31±0.05a	23.22±1.39c	9.36±0.53b
A30	5.65±0.17b	20.29±0.59b	1.32±0.05a	25.31±0.42b	12.43±0.63a
A40	6.13±0.31a	22.74±0.74a	1.30±0.05a	29.91±0.95a	12.79±0.60a

表 4 糙米 Cd 含量与影响因子间相关性分析

影响因子	糙米 Cd	pH	SOC	酸溶态 Cd	可还原态 Cd	可氧化态 Cd	残渣态 Cd
糙米 Cd	1	-0.838**	-0.741**	0.919**	-0.681*	0.388	0.276
pH		1	0.828**	-0.802**	0.727**	-0.261	-0.286
SOC			1	-0.814**	0.719**	-0.322	-0.419
酸溶态 Cd				1	-0.655*	0.441	0.186
可还原态 Cd					1	-0.348	-0.464
可氧化态 Cd						1	0.384
残渣态 Cd							1

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。下同。

为了进一步探究添加生物质炭对糙米 Cd 累积的直接影响和间接影响,将各因子与水稻糙米 Cd 含量的相关系数划分为直接作用与间接作用,进行途径分析。由表 5 可知,酸溶态 Cd 与糙米中 Cd 含量直接途径系数为 0.897,其余按直接途径系数绝对值大小排列依次为土壤有机碳、pH、残渣态 Cd、可氧化态 Cd 和可还原态 Cd,其中酸溶态 Cd 直接途径系数大于间接途径系数之和,且间接途径系数总和较小,这说明酸溶态 Cd 主要对糙米 Cd 含量起直接作用,其他因子对糙米 Cd 含量影响主要

是间接作用,即随着土壤酸溶态 Cd 含量的增加,糙米 Cd 含量显著增加。而其他因子对糙米 Cd 含量主要以间接作用为主,这 5 个因子对酸溶 Cd 的间接途径系数分别为 -0.719, -0.730, -0.588, 0.395, 0.167;酸溶态 Cd 对这 5 个因子的间接途径系数总和贡献较大,表明这 5 个因子通过影响土壤中酸溶态 Cd 含量,进而对糙米 Cd 含量产生影响。通过决策分析表明,若要降低糙米 Cd 含量,就要降低土壤酸溶态 Cd 含量,提高土壤 pH 和土壤有机碳含量。

表 5 糙米 Cd 含量与影响因子间途径分析

影响因子	相关系数	直接途径 系数	间接途径 系数总和	间接途径系数					决策 系数	
				pH	SOC	酸溶态 Cd	可还原态 Cd	可氧化态 Cd		残渣态 Cd
pH	-0.838**	0.364	-0.474		0.303	-0.719	-0.027	0.016	-0.047	-0.213
SOC	-0.741**	0.366	-1.108	-0.301		-0.730	-0.027	0.019	-0.069	-0.677
酸溶态 Cd	0.919**	0.897	0.023	0.292	-0.298		0.024	-0.026	0.031	0.846
可还原态 Cd	-0.681*	-0.037	-0.644	-0.264	0.263	-0.588		0.021	-0.076	0.049
可氧化态 Cd	0.389	-0.060	0.448	0.095	-0.118	0.395	0.013		0.063	-0.050
残渣态 Cd	0.276	0.164	0.111	0.104	-0.154	0.167	0.017	-0.023		0.063

3 讨论

3.1 生物质炭对水稻中 Cd 的转运和累积变化的影响

水稻作为一种典型的富集重金属 Cd 的作物,植株吸收的 Cd 容易累积在籽粒中,即使在低污染土壤上,水稻籽粒依旧容易超过限量标准。周健等^[12]对城市周边污染麦田土壤添加生物质炭发现,生物质炭可以有效减少小麦根系对土壤重金属的富集。本研究表明,水稻器官中 Cd 的富集量为根系>茎>叶>糙米,这与左静等^[13]对旱地土壤小麦、玉米器官中 Cd 累积的研究结果相似。在水稻地上部分中,叶片 Cd 含量高于糙米 Cd 含量,这是由于土壤中 Cd^{2+} 主要与水稻根部表层细胞的通道蛋白结合进入根系,大

部分结合物受水稻蒸腾作用影响,经茎秆木质部转入叶片并在叶片细胞中逐渐累积^[14]。添加生物质炭可以降低土壤酸溶态 Cd 含量和水稻根、茎、叶和籽粒各器官中 Cd 的累积,并且相应地影响了水稻地上部分 Cd 的分配,促进了水稻茎秆中 Cd 由茎向叶中的转运,减少了向糙米中转运的 Cd 含量。一方面是由于 pH 上升会显著减少土壤中移动性强的 Cd 含量,减少水稻根系的吸收,进而降低 Cd 在水稻中的累积量^[15];另一方面是生物质炭自身的多孔结构和巨大比表面积,对重金属离子产生了强烈的吸附作用^[16],生物质炭中的有机碳表面官能团与重金属阳离子发生络合作用与共沉淀作用,直接降低土壤中重金属离子的生物有效性,降低水稻重金属 Cd 向籽粒中的转

运能力,从而减少糙米中重金属 Cd 的积累^[17]。

3.2 生物质炭对土壤 Cd 形态变化的影响

酸溶态重金属具有较强的移动性,可以被植物直接利用,一般来说,酸溶态质量分数越大其生物有效性就越大。本研究中,pH、土壤有机碳与酸溶态 Cd 相关系数为-0.802 和-0.814($p < 0.01$),且酸溶态与可还原态 Cd、水稻糙米 Cd 含量相关系数为-0.655 和 0.919,均达到显著水平($p < 0.05$)。这表明,生物质炭提高土壤 pH 和有机碳含量,促使酸溶态 Cd 向可还原态转化,降低了对水稻的生物有效性。从而减少了糙米中 Cd 的含量。这与陈少毅等^[18]向玉米田中添加钝化剂提高土壤 pH 后,土壤重金属 Cd 和 Pd 的有效态含量降低,玉米根系重金属富集量减少的研究结果相似。其机理一方面是生物质炭提高土壤 pH,促进酸溶态与可氧化态间形态转化,降低生物有效性;另一方面是 pH 升高促进土壤有机炭表面多种官能团与土壤 Cd^{2+} 发生离子交换,增强对 Cd^{2+} 的吸附,降低 Cd^{2+} 移动性。Bian 等^[19]发现生物质炭添加入土壤后对土壤 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附效果长达 3 年,具有长效吸附性。生物质炭这一性质避免了短时间内缓效态 Cd 再次向有效态 Cd 转化,增加土壤对重金属 Cd 的固持能力。

4 结论

(1)Cd 污染稻田中添加生物质炭可以显著降低水稻各器官中的 Cd 含量,且茎对根和糙米对茎中的 Cd 的转运系数降低。

(2)生物质炭阻控土壤 Cd 迁移的主要机制为:提高了土壤 pH 和有机碳含量,促使酸溶态 Cd 向可还原态转化,降低了 Cd 的生物有效性,进而降低糙米 Cd 含量。

(3)综合总体表现,在本研究区,20 t/hm² 生物质炭添加量可将当地稻米 Cd 含量降低至安全水平,可以作为当地 Cd 污染稻田修复参考标准。

参考文献:

[1] 胡雪芳,田志清,梁亮,等.不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J].环境科学,2018,39(7):3409-3417.

[2] Marrugo-Negrete J, Pinedo-Hernández J, Díez S. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia [J]. Environmental Research, 2017, 154: 380-388.

[3] O'Connor D, Peng T, Zhang J, et al. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials [J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 815-826.

[4] Coomes O T, Miltner B C. Indigenous charcoal and bio-

char production: Potential for soil improvement under shifting cultivation systems[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(3): 811-821.

- [5] 陈少毅,许超,张文静,等.生物质炭与氮肥配施降低水稻重金属含量的盆栽试验[J].农业工程学报,2014,30(14):189-197.
- [6] 刘源,崔二苹,李中阳,等.生物质炭和果胶对再生水灌溉下玉米生长及养分、重金属迁移的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):242-248.
- [7] 肖瑶,葛成军,张丽,等.木薯渣基生物质炭对水中 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附行为研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1587-1594.
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:42-50.
- [9] 陈召亚,刘会玲,张新星,等.不同种植年限温室土壤中铜、铅垂直分布特征[J].水土保持学报,2016,30(1):321-325.
- [10] 李志贤,向言词,李会东,等.施氮水平对玉米吸收和富集重金属 Cd、Pb 的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):143-147.
- [11] 谢晓梅,方至萍,廖敏,等.低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力[J].环境科学,2018,39(9):4348-4358.
- [12] 周健,李小琴,李虎,等.外源 Cd 在施污土壤中的形态变化及生物有效性[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):192-196.
- [13] 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.
- [14] Li H, Luo N, Li Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. Environmental Pollution, 2017, 224: 622-630.
- [15] 朱德强,梁成华,杜立宇,等.含方解石物质对土壤镉赋存形态的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):326-330.
- [16] Wang B, Li C, Liang H. Bioleaching of heavy metal from woody biochar using Acidithiobacillus ferrooxidans and activation for adsorption [J]. Bioresource Technology, 2013, 146(10): 803-806.
- [17] Cui L, Yan J, Li L, et al. Does Biochar Alter the Speciation of Cd and Pb in Aqueous Solution? [J]. Biore-sources, 2015, 10(1):88-104.
- [18] 陈少毅,许超,张文静,等.生物质炭与氮肥配施对污染稻田田面水中无机氮及 Cu、Zn、Cd 含量的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):253-258.
- [19] Bian R, Joseph S, Cui L, et al. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 272(4):121-128.