

生物有机肥和生物炭对 Cd 和 Pb 污染稻田土壤修复的研究

马铁铮, 马友华*, 付欢欢, 王 强, 徐露露, 聂静茹, 于倩倩

(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要:在田间试验条件下,研究施用生物有机肥和生物炭对稻田 Cd 和 Pb 污染的钝化修复效果。研究表明:施用生物有机肥和生物炭处理可以提高土壤 pH 值以及土壤养分含量,并显著降低土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量,且土壤 pH 值与土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量呈极显著负相关;生物有机肥和生物炭处理还可以降低水稻体内 Cd 和 Pb 的含量,其中水稻糙米 Cd 降幅达到了 22.00% 和 18.34%,水稻糙米 Pb 含量的降幅也达到了 33.46% 和 12.31%,且水稻糙米 Cd 和 Pb 的含量与土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量呈显著正相关。综合各处理对土壤 pH 值、土壤养分含量、土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量以及水稻 Cd 和 Pb 的影响,可以看出生物有机肥和生物炭处理对于 Cd 和 Pb 污染稻田土壤有较好的修复效果。

关键词: Cd; Pb; 生物有机肥; 生物炭; 钝化修复

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2015)01-0014-06 doi: 10.13254/j.jare.2014.0198

Remediation of Biological Organic Fertilizer and Biochar in Paddy Soil Contaminated by Cd and Pb

MA Tie-zheng, MA You-hua*, FU Huan-huan, WANG Qiang, XU Lu-lu, NIE Jing-ru, YU Qian-qian

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The effect of application of biological organic fertilizer and biochar on the immobilized remediation of paddy soil contaminated by Cd and Pb was studied under the field experiment. The results showed that biological organic fertilizer and biochar increased the soil pH and soil nutrient contents, and reduced the soil available Cd and Pb concentrations significantly. The soil pH had significantly negative correlation with the soil available Cd and Pb contents. The application of biological organic fertilizer and biochar decreased Cd and Pb concentration in all parts of the rice plant, with Cd concentration in brown rice decrease by 22.00% and 18.34% and Pb decrease in brown rice by 33.46% and 12.31%. The concentration of Cd and Pb in brown rice had significant positive correlation with the soil available Cd and Pb concentrations. It was observed that both biological organic fertilizer and biochar had a positive effect on the remediation of paddy soil contaminated by Cd and Pb.

Keywords: Cd; Pb; biological organic fertilizer; biochar; immobilized remediation

随着现代社会工业化进程的加快,土壤重金属污染问题已逐渐成为环境污染的突出问题,受到社会的广泛关注。钝化修复是指向土壤中施用钝化剂,通过钝化剂与土壤重金属发生络合、沉淀、吸附、离子交换以及氧化还原反应,以减少重金属的迁移性和生物有效性,达到修复目的^[1]。常用的钝化剂包括石灰性物质、有机肥、炭材料、粘土矿物、含磷材料和农业废弃

物等^[2]。已有的研究表明生物有机肥和生物炭可以提高土壤肥力,促进作物生长并降低土壤重金属的生物有效性,减少有机和无机污染物的生态风险,可以作为土壤重金属污染修复的材料^[3-4]。

本研究选取生物有机肥和生物炭这 2 种钝化剂在安徽省某矿区 Cd 和 Pb 复合污染的水稻田开展田间小区试验,研究钝化剂对土壤养分、土壤有效态重金属含量以及水稻重金属含量的影响,以筛选出有效的土壤重金属污染的修复措施。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2013 年 5 月在安徽省某矿区周边水稻田

收稿日期: 2014-08-03

基金项目: 农业部农业生态环境保护重大专项(农科教发[2012]3号)

作者简介: 马铁铮(1991—),男,安徽灵璧人,在读研究生,主要从事农业面源污染与土壤生态环境研究。

E-mail: matiezheng@126.com

* 通信作者: 马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

进行。供试土壤总 Cd 含量为 $2.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效态 Cd 含量为 $1.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤总 Pb 含量为 $168.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效态 Pb 含量为 $127.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical characteristics of the studied soil

pH 值	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
4.95	22.37	91.20	16.16	65.96

供试化肥为尿素(N 46%)、磷酸氢二铵(P_2O_5 45%, N 17%)和氯化钾(K_2O 60%),均从当地市场购买;生物有机肥为北京世纪阿姆斯生物技术股份有限公司生产,主要菌种为枯草芽孢杆菌,活菌数为 $3.26 \text{ 亿}\cdot\text{g}^{-1}$,有机质含量为 53.8%;生物炭购自河南省商丘三利新能源有限公司,有机碳含量为 $460 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试水稻品种为 Y 两优 1 号,从当地市场购买。

1.2 试验处理

以生物有机肥和生物炭为钝化剂进行种植水稻的田间小区试验,试验设置 3 个处理:

(1)空白对照处理:CK,不施用钝化剂;

(2)生物有机肥处理:SWYJ,每 667 m^2 施用生物有机肥 100 kg;

(3)生物炭处理:SWT,每 667 m^2 施用生物炭 150 kg。

按照田间试验要求布置小区试验,每个处理设置 3 次重复,共计 9 个小区,按随机区组排列,每个小区面积为 24 m^2 ,且各小区之间田埂用塑料薄膜隔开,防止生育期内串水。

小区试验于 2013 年 6 月 16 日施基肥和钝化剂,对照处理和生物炭处理小区基肥用量为尿素 0.37 kg,磷酸二铵 0.48 kg,氯化钾 0.27 kg;生物有机肥处理小区基肥用量为尿素 0.24 kg,磷酸二铵 0.40 kg,氯化钾 0.21 kg。小区水稻于 2013 年 6 月 30 日移栽,7 月上旬分蘖肥追施尿素 0.23 kg,8 月上旬孕穗肥追施尿素 0.31 kg、氯化钾 0.27 kg。10 月 12 号水稻收获,其他按当地水稻高产优质栽培措施进行。

1.3 样品采集与处理

2013 年 10 月 9 日采取成熟期的水稻和土壤样品,每小区采集 1 个样品。

采集的土样及时放于晾土架上自然风干,研磨后过 10 目、60 目筛分别储存,用于检测土样中有效态 Cd 和 Pb 含量、pH 值和有机质含量等指标。

采集的水稻样品用自来水清洗,并用超纯水冲洗,分糙米、茎和叶于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内烘干,然后研磨测定其 Cd 和 Pb 含量。

1.4 分析方法

土壤有效态 Cd 和 Pb 的测定采用 $0.005 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ DTPA- $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ TEA- $0.001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 浸提,原子吸收分光光度计火焰法测定;水稻糙米、茎和叶片采用硝酸消解,使用原子吸收分光光度计石墨炉法进行水稻 Cd 和 Pb 的测定;土壤常规指标的测定按照国标方法和《土壤农化分析》进行^[5]。

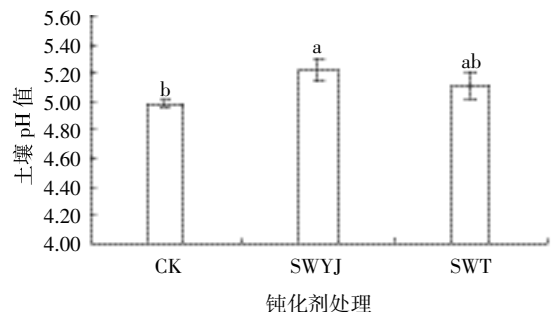
1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行论文数据的处理,并采用 SPSS 19 统计分析软件单因素 ANOVA 和 Duncan 多重比较进行各处理之间的差异显著性分析,以及 SPSS 19 统计分析软件 Pearson 法进行指标间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 钝化剂对土壤 pH 值的影响

通过对采集土样的 pH 值进行测定,得出不同钝化剂处理下土壤 pH 值变化如图 1 所示。



图中直方柱上方小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

图 1 不同钝化剂处理土壤 pH 值的变化

Figure 1 Variation of soil pH under different immobilization treatments

从图 1 可以看出,相对于对照处理,生物有机肥和生物炭处理均可以提高土壤 pH 值,其中生物有机肥处理较空白处理达到显著性差异($P<0.05$),土壤 pH 值由 4.98 提升到 5.22,生物炭处理较空白处理土壤 pH 值提高了 0.13 个单位,但并未达到显著性差异($P>0.05$)。pH 值是影响土壤重金属污染钝化修复效果的一个重要因素,在酸性土壤上,土壤 pH 值的提高能增加土壤对重金属的固定,从而降低其生物有效性^[6]。

2.2 钝化剂对土壤养分的影响

通过对成熟期土壤养分指标的测定表明,施用生物炭和生物有机肥这两种钝化剂可以明显提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量(表 2)。

表 2 不同钝化剂处理土壤养分变化

Table 2 Variation of amount of soil nutrients under different immobilization treatments

处理	有机质 / g·kg ⁻¹	碱解氮 / mg·kg ⁻¹	有效磷 / mg·kg ⁻¹	速效钾 / mg·kg ⁻¹
CK	22.76 ± 0.35b	76.62 ± 2.23c	16.76 ± 2.03a	49.96 ± 4.36b
SWYJ	23.08 ± 0.69b	88.04 ± 2.43a	19.79 ± 0.91a	65.43 ± 6.16a
SWT	24.67 ± 0.54a	82.40 ± 3.01b	18.48 ± 2.02a	55.21 ± 6.18ab

注: 同列小写字母不同表示各处理之间某一指标差异显著($P < 0.05$)。下同。

由表 2 可知,相对于对照处理,生物有机肥处理土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别提高了 1.41%、14.90%、18.08%和 30.96%,其中土壤碱解氮和速效钾含量提高显著($P < 0.05$);生物炭处理土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别提高了 8.39%、7.54%、10.26%和 10.51%,其中土壤有机质和碱解氮含量提高显著($P < 0.05$)。可以看出生物有机肥和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,因为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,这对土壤中重金属离子的固定和迁移有极其重要的影响^[7]。

2.3 钝化剂对土壤有效态 Cd 和 Pb 含量的影响

通过对成熟期土样进行有效态 Cd 和 Pb 进行测定,得出钝化剂对土壤有效态重金属含量影响如图 2 和图 3 所示。

从图 2~图 3 中可以看出,生物有机肥和生物炭两种处理均可以降低土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量,

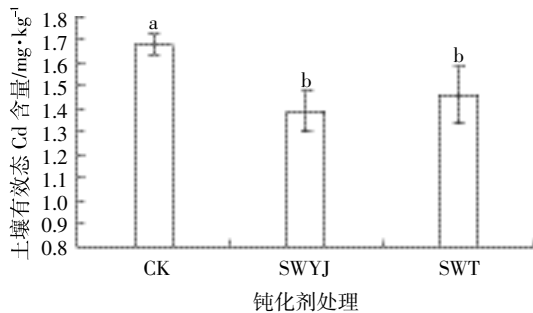


图 2 不同钝化剂处理土壤有效态 Cd 含量的变化

Figure 2 Variation of amount of soil available Cd under different immobilization treatments

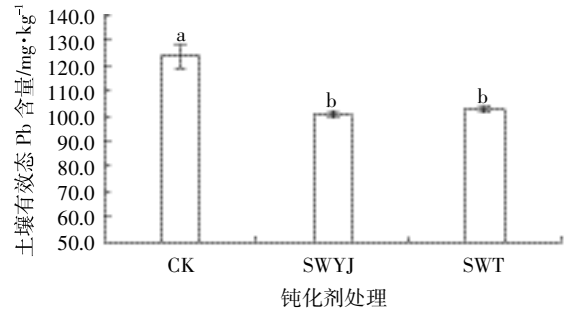


图 3 不同钝化剂处理土壤有效态 Pb 含量的变化

Figure 3 Variation of amount of soil available Pb under different immobilization treatments

且较对照处理均达到显著性差异($P < 0.05$)。相对于对照处理,生物有机肥处理可使土壤有效态 Cd 和 Pb 分别降低 17.36%和 18.45%,而生物炭处理土壤有效态 Cd 和 Pb 降幅分别为 13.03%和 16.90%。这说明可以通过施用生物有机肥和生物炭降低土壤 Cd 和 Pb 的生物有效性,增强土壤对 Cd 和 Pb 的吸附固定^[8-10]。这与侯艳伟等^[11]和孙文博等^[12]的研究成果一致。

2.4 钝化剂对水稻糙米产量的影响

对各小区收割的水稻糙米进行单独称重,得出不同钝化剂处理对水稻糙米产量的影响如图 4 所示。

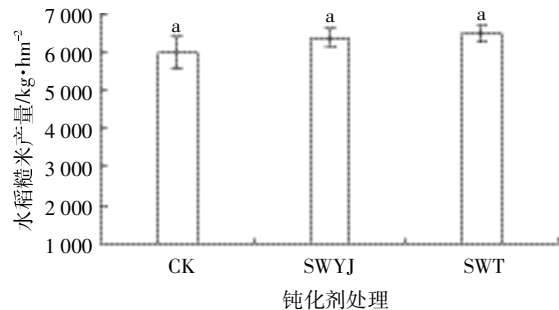


图 4 不同钝化剂处理对水稻糙米产量的影响

Figure 4 Variation of grain rice yield under different immobilization treatments

从图 4 可以看出,生物有机肥和生物炭处理均可以在一定程度上提高水稻糙米的产量,换算成每公顷的产量为 6 389 kg·hm⁻²和 6 459 kg·hm⁻²,相对于对照处理分别提高了 6.98%和 8.15%。王显等^[13]研究不同生物有机肥对水稻产量和构成因子的影响,结果表明几种生物有机肥均可使水稻增产,且增产幅度为 4.74%~13.62%,这与本研究的结果相似。但从图 4 中还可以看出,3 个处理之间并未达到显著性差异($P > 0.05$),即生物有机肥和生物炭增产作用不显著,这可能与土壤类型、生物有机肥和生物炭种类有关。

2.5 钝化剂对水稻 Cd 和 Pb 含量的影响

通过对成熟期水稻糙米、茎秆和叶片的 Cd 和 Pb 进行测定,得出不同钝化剂处理下水稻重金属含量变化如表 3 所示。

由表 3 可以看出,相对于对照处理,生物有机肥处理可以降低水稻 Cd 含量,水稻糙米、茎秆和叶片 Cd 含量分别降低了 22.00%、3.83% 和 1.88%,其中水稻糙米 Cd 含量与对照处理相比差异显著($P<0.05$),水稻茎秆和叶片 Cd 含量降幅很小,与对照处理差异不显著($P>0.05$);生物炭处理也可以明显降低水稻 Cd 的含量,水稻糙米、茎秆和叶片 Cd 含量分别降低了 18.34%、5.95% 和 10.16%,其中水稻糙米 Cd 含量相对于对照处理达到了显著性差异($P<0.05$),水稻茎秆和叶片 Cd 含量差异不显著($P>0.05$)。

钝化剂对水稻 Pb 的影响与 Cd 类似,即生物有机肥和生物炭处理均可以降低水稻 Pb 含量。但是除了生物有机肥处理糙米 Pb 含量与对照处理差异显著以外($P<0.05$),其余均没有达到显著性差异($P<0.05$)。生物有机肥处理水稻糙米、茎秆和叶片 Pb 含量分别降低了 33.46%、4.83% 和 14.04%;生物炭处理水稻糙米、茎秆和叶片 Pb 含量降幅分别为 12.31%、8.82% 和 5.60%。

综上所述可以看出生物有机肥和生物炭均可以降低水稻 Cd 和 Pb 的含量,而生物有机肥和生物炭处理并没有显著提高水稻糙米产量,因此,生物有机肥和生物炭处理可能主要是通过提高土壤 pH 值、降低土壤 Cd 和 Pb 的生物有效性和迁移能力、以及其富含

的有机质增强土壤对 Cd 和 Pb 的吸附固定等方式,降低水稻对重金属的吸收,从而降低水稻体内重金属的含量,尤其是降低水稻糙米重金属的含量。

2.6 土壤 pH 值、土壤有效态重金属含量与水稻糙米重金属含量相关性的研究

对土壤 pH 值、土壤有效态 Cd 和 Pb 含量与水稻糙米 Cd 和 Pb 含量进行相关性分析,结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量与土壤 pH 值呈极显著的负相关($P<0.01$)。施用生物有机肥和生物炭钝化剂可以提高土壤 pH 值,降低土壤重金属的活性和生物有效性,这与黄霁霞等^[14]采用盆栽试验研究赤泥对重金属污染红壤修复效果得出的结果一致。

从表 4 还可以看出,水稻糙米 Cd 和 Pb 含量与土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量呈显著的正相关($P<0.05$),水稻糙米 Cd 和 Pb 的含量与土壤 pH 值之间存在一定的相关性,但并不显著($P>0.05$)。朱奇宏等^[15]研究改良剂对 Cd 污染酸性水稻土的修复研究中也发现水稻地上各部分 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量存在显著正相关,这和本文的研究结果一致。

3 讨论

生物有机肥是指特定功能微生物与有机物料复合而成的一类兼具微生物肥料和有机肥效应的肥料,不仅含有较高的有机质,还含有大量的有益微生物,对重金属离子有很强的吸附和螯合作用,减少作物对重金属的吸收,因此施用生物有机肥可以作为土壤重

表 3 不同钝化剂处理水稻重金属含量变化

Table 3 Variation of amount of heavy metal concentrations in rice under different immobilization treatments

处理	Cd 含量 /mg·kg ⁻¹			Pb 含量 /mg·kg ⁻¹		
	糙米	茎	叶	糙米	茎	叶
CK	0.409 ± 0.031a	3.444 ± 0.561a	2.176 ± 0.323a	0.260 ± 0.022a	2.630 ± 0.148a	4.018 ± 0.263a
SWYJ	0.319 ± 0.026b	3.312 ± 0.419a	2.135 ± 0.595a	0.173 ± 0.020b	2.503 ± 0.477a	3.454 ± 0.252a
SWT	0.334 ± 0.021b	3.239 ± 0.625a	1.955 ± 0.161a	0.228 ± 0.023a	2.398 ± 0.364a	3.793 ± 0.422a

表 4 土壤 pH 值、土壤有效态重金属含量与水稻糙米重金属含量的相关性

Table 4 Correlation among soil pH, soil available heavy metal concentrations and concentrations of heavy metal in brown rice

项目	土壤 pH 值	土壤有效态 Cd	土壤有效态 Pb	水稻糙米 Cd
土壤有效态 Cd	-0.956**	1		
土壤有效态 Pb	-0.819**	0.876**	1	
水稻糙米 Cd	-0.613	0.717*	0.777*	1
水稻糙米 Pb	-0.559	0.518	0.701*	0.730*

注:“**”表示在 0.01 水平上显著相关;“*”表示在 0.05 水平上显著相关。

金属污染钝化修复的有效措施之一。郑少玲等^[16]采用土培试验和盆栽试验研究施用生物有机肥对芥蓝和土壤重金属含量的影响,结果表明施用生物有机肥可以降低芥蓝体内重金属的含量。

生物炭是生物质在无氧环境条件下缓慢高温分解得到的富含碳的有机物质,它具有孔隙结构发达、比表面积巨大、强吸附性等特点,可以改善土壤结构,能将土壤中的重金属离子有效固持,进而降低重金属的有效态含量。刘阿梅等^[17]的研究表明,添加生物炭可以明显降低蔬菜体内重金属 Cd 的积累,并在一定程度上促进蔬菜食用部分的产量。除此之外,施用生物炭还可以通过影响土壤的 pH 值和 CEC 等理化性质减少土壤中重金属向植物体系的迁移,如 Uchimiya 等^[18]的研究表明,生物炭的输入会引起土壤 pH 值的升高,促进土壤中 Cd 的固定。

从本文研究中也可以看出,生物炭与生物有机肥处理可以提高土壤 pH 值,显著提高土壤有机质等养分指标,降低土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量,并减少水稻体内 Cd 和 Pb 的含量。但从表 3 中还是可以看出,这 2 种处理水稻糙米 Cd 含量仍然高于 GB 2762—2012《食品安全标准》食品中 Cd 限量指标的要求(糙米 Cd 含量不高于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这可能是由于试验田土壤 Cd 超标程度较为严重,仅仅通过一年的修复还不足以使水稻糙米 Cd 含量达标,因此在接下来的工作中,还需要探索修复技术的集成,提高修复工作的效率。而且,考虑到大田环境的复杂性,修复试验结果的稳定性还需要进一步的探究和评估。

4 结论

(1)施用生物有机肥和生物炭处理可以提高土壤 pH 值,并显著降低土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量,土壤 pH 值与土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量呈极显著负相关。

(2)生物有机肥和生物炭可以提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾等养分指标,改善土壤肥力状况。

(3)生物有机肥和生物炭处理可明显降低水稻体内 Cd 和 Pb 的含量,其中水稻糙米 Cd 降幅达到了 22.00% 和 18.34%,水稻糙米 Pb 含量的降幅也达到了 33.46% 和 12.31%,且水稻糙米 Cd 和 Pb 的含量与土壤有效态 Cd 和 Pb 的含量呈显著正相关,但并未显著提高糙米产量。

综合各处理对土壤 pH 值、土壤养分含量、土壤

有效态 Cd 和 Pb 的含量以及水稻 Cd 和 Pb 含量的影响,可以看出生物有机肥和生物炭处理均可以在一定程度上实现对 Cd 和 Pb 复合污染土壤的钝化修复。

参考文献:

- [1] 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.
CAO Xin-de, WEI Xiao-xin, DAI Ge-lian, et al. Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: A review[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(7): 1441-1453. (in Chinese)
- [2] 徐露露,马友华,马铁铮,等.钝化剂对土壤重金属污染修复研究进展[J].农业资源与环境学报,2013,30(6):25-29.
XU Lu-lu, MA You-hua, MA Tie-zheng, et al. Passivating agents on remediation of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(6): 25-29. (in Chinese)
- [3] 刘秀春,高艳敏,范业宏,等.生物有机肥对重金属的吸附解吸作用的影响[J].土壤通报,2008,39(4):942-945.
LIU Xiu-chun, GAO Yan-min, FAN Ye-hong, et al. Adsorption and desorption of heavy metal ions by organic fertilizers[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 942-945. (in Chinese)
- [4] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7): 381-387.
- [5] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2011:25-114.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 25-114. (in Chinese)
- [6] 贾乐,朱俊艳,苏德纯.秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(10):1992-1998.
JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1992-1998. (in Chinese)
- [7] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2010:40.
HUANG Chang-yong, XU Jian-ming. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 40. (in Chinese)
- [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[J].农业资源与环境学报,2013,30(5):39-43.
MA Tie-zheng, MA You-hua, XU Lu-lu, et al. Agro-ecological remediation technologies on heavy metal contamination in cropland soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(5): 39-43. (in Chinese)
- [9] Fellet G, Marchiol L, Delle Vedove G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9): 1262-1267.
- [10] 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.
ZHU Jia-wen, ZOU Dong-sheng, XIANG Yan-ci, et al. Effects of passivators on stabilization of Pb, Zn and Cd in lead and zinc mine tailing [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 920-925. (in Chinese)
- [11] 侯艳伟,曾月芬,安增莉.生物炭施用对污染红壤中重金属化学形

- 态的影响[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 460-466.
HOU Yan-wei, ZENG Yue-fen, AN Zeng-li. Effects of the application of biochar on the chemical fraction of heavy metals in polluted red soil [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2011, 42(4): 460-466. (in Chinese)
- [12] 孙文博, 莫创荣, 安鸿雪, 等. 施用蔗渣对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1793-1799.
SUN Wen-bo, MO Chuang-rong, AN Hong-xue, et al. Effects of bagasse application on speciation and bioavailability of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9): 1793-1799. (in Chinese)
- [13] 王 显, 肖月成, 姚 义, 等. 不同生物有机肥对水稻产量及其构成因子的影响[J]. 中国稻米, 2010, 16(3): 50-52.
WANG Xian, XIAO Yue-cheng, YAO Yi, et al. Effects of different biological organic fertilizers on rice yield and its components factor [J]. *China Rice*, 2010, 16(3): 50-52. (in Chinese)
- [14] 黄霭霞, 许 超, 吴启堂, 等. 赤泥对重金属污染红壤修复效果及其评价[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 267-272.
HUANG Ai-xia, XU Chao, WU Qi-tang, et al. Remediation effects and their evaluation of red mud amendment in heavy metal polluted red soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 267-272. (in Chinese)
- [15] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 847-851.
ZHU Qi-hong, HUANG Dao-you, LIU Guo-sheng, et al. Effects and mechanisms of amendments on remediation of cadmium contaminated acid paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 847-851. (in Chinese)
- [16] 郑少玲, 陈琼贤, 马 磊, 等. 施用生物有机肥对芥蓝及土壤重金属含量影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 62-66.
ZHENG Shao-ling, CHEN Qiong-xian, MA Lei, et al. Effect of bioorganic fertilizer application on contents of heavy metals in Chinese lake and soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(suppl): 62-66. (in Chinese)
- [17] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 193-198, 204.
LIU A-mei, XIANG Yan-ci, TIAN Dai-ke, et al. Effects of biochar on plant growth and uptake of heavy metal cadmium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5): 193-198, 204. (in Chinese)
- [18] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, et al. Immobilization of heavy metal ions (CuII, CdII, NiII and PbII) by broiler litter-derived biochars in water and soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(9): 5538-5544.