

廖雄辉, 龙 琴, 王惠群, 等. 南荻炭与镉钝化剂互作对水稻镉含量和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1818–1826.

LIAO Xiong-hui, LONG Qin, WANG Hui-qun, et al. Interaction effects of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar and cadmium passivators on rice cadmium content and yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1818–1826.

南荻炭与镉钝化剂互作对水稻镉含量和产量的影响

廖雄辉¹, 龙 琴¹, 王惠群^{1,2}, 易自力^{1,2}, 薛 帅^{1,2*}

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 2. 芒属植物生态应用技术湖南省工程实验室, 长沙 410128)

摘要:为探索一种具有降镉效应的南荻炭基土壤调理剂以缓解湖南省稻田镉污染现状,并为洞庭湖区南荻资源的利用提供新途径。试验以深两优5814为材料,将南荻炭与五种镉钝化剂按L25(5⁶)正交表进行复配,通过模拟镉污染土壤盆栽试验,研究各复配因素施用对水稻镉含量的影响,进而确定南荻炭基降镉土壤调理剂的最佳配伍。结果表明:南荻炭与五种镉钝化剂互作可显著降低($P<0.05$)水稻茎叶和稻谷籽粒的镉含量,尤其以南荻炭:腐植酸:硅酸钾:钙镁磷:硫酸锌:熟石灰=200:60:3:30:4:120互作比例下效果最显著,且相应最佳施用量为6.25 t·hm⁻²。三组最接近理论配比的土调剂施用后,水稻植株的平均镉含量可降至0.88~1.65 mg·kg⁻¹,与空白处理相比,降镉率达54.4%~75.7%;籽粒的平均镉含量可降至0.13~0.17 mg·kg⁻¹,降镉率为45.2%~58.1%。三组土调剂施用还可显著增加稻谷产量,其中最高增产率达34.8%(相当于1.89 t·hm⁻²)。南荻炭与镉钝化剂互作可优化南荻炭的降镉潜力,复配施用后能显著降低水稻镉含量,并能显著提高稻谷产量,具有广阔的市场开发利用潜力。

关键词:南荻生物炭;土壤调理剂;镉钝化剂;降镉潜力

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)09-1818-09 doi:10.11654/jaes.2018-0477

Interaction effects of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar and cadmium passivators on rice cadmium content and yield

LIAO Xiong-hui¹, LONG Qin¹, WANG Hui-qun^{1,2}, YI Zi-li^{1,2}, XUE Shuai^{1,2*}

(1. College of Bioscience & Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Engineering Laboratory of *Miscanthus* Ecological Applications, Changsha 410128, China)

Abstract: This study was designed to explore the interaction effects of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar with five cadmium (Cd) passivators on rice Cd content and yield. Based on the results, it was expected to determine their optimum application rates and develop a *M. lutarioriparius* biochar-based soil conditioner. The L25(5⁶) orthogonal test was firstly used to determine the experimental treatments and then 25 treatments with three replications were conducted in a pot trial. Results showed that the interaction of the six tested factors could both reduce the Cd content of rice plants and grains, and improve the rice yield significantly ($P<0.05$). The optimum interaction ratio of *M. lutarioriparius*-derived biochar:humid acid:potassium silicate:calcium magnesium phosphate:zinc sulfate:slaked lime was 200:60:3:30:4:120; therefore, the recommended application rate of the *M. lutarioriparius* soil conditioner was 6.25 t·hm⁻². Three experimental treatments, whose compositions were close to the above optimum interaction ratio, were used to determine the application effect of *M. lutarioriparius* soil conditioner on rice yield. Results showed that application of the three tested treatments could decrease the Cd content of rice plants to 0.88~1.65

收稿日期:2018-04-11 录用日期:2018-06-20

作者简介:廖雄辉(1995—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,从事水稻降镉研究。E-mail: hmydxlxh@163.com

*通信作者:薛 帅 E-mail: xue_shuai@hunau.edu.cn

基金项目:湖南省“青年百人计划”项目(5404921);湖南农业大学青年自然科学基金项目(16QN21);国家级大学生创新创业训练计划项目[(G)SCX1603]

Project supported: Hundred-Youth Scheme of Hunan, China (5404921); Natural Science Foundation for Youths of Hunan Agricultural University (16QN21); National Training Programs of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates[(G)SCX1603]

mg·kg⁻¹ with a Cd reduction potential of 54.4% ~ 75.7%, and of rice grains with husk to 0.13 ~ 0.17 mg·kg⁻¹ with a Cd reduction potential of 45.2% ~ 58.1%. Additionally, applications of all three treatments could increase the rice grain yields with the highest potential of 1.89 t·hm⁻² (i.e., increasing rate of 34.8%). These results proved that the *M. lutarioriparius* biochar-based soil conditioner could decrease the rice Cd content and enhance the rice yield simultaneously, indicating a huge market potential.

Keywords: *Miscanthus lutarioriparius* biochar; soil conditioner; cadmium passivator; cadmium reduction potential

湖南是我国的水稻主产区同时也是“有色金属之乡”,具有丰富的矿产资源。过去几十年由于矿产的过度开采与粗犷的冶炼方式造成了严重的重金属农田面源污染^[1]。稻田镉污染造成的“毒大米”事件对湖南农业经济发展造成了严重的负面影响^[2]。稻米降镉技术已成为“湘米振兴”工程的战略需求。目前,农户接受程度最高的降镉技术就是施加石灰,利用石灰的强碱性钝化土壤中镉离子的活性来降低水稻植株对其吸收^[3],最终达到稻谷降镉的目的。此措施效果好、成本低,已经在农业生产中推广应用。笔者对湖南地区进行实地考察发现,长时间施用石灰会导致土壤石灰化,板结情况越来越严重,在一定程度上限制了水稻的生长及产量的提高。鉴于此,“湘米振兴”工程的实现亟需开发生态友好型的降镉新技术。

生物炭是生物质经热裂解而成的多孔状炭化物^[4],其施入土壤后可快速增加土壤有机质含量^[5],增强土壤保水性能,提高土壤孔隙度和通气性,促进土壤团聚体的形成,进而改善土壤容重^[6]和土壤pH^[7]等物理化学性状。另外,生物炭还可通过改变污染物(如重金属、除草剂和农药等)的形态降低其可迁移性和生物有效性,进而减小污染物在作物中的积累,最终可实现农产品品质的提高^[8]。基于生物炭的土壤改良和降镉双重效应,其已被视为生态友好型农田降镉技术的重要构成。理论上我国有约7.3亿t农业废弃物可用于生产生物炭,但现有的废弃资源可收获性差^[9-10](收获时间短,收获、运输、贮存成本高),且整体上其加工出来的生物炭出炭率低、品质差,限制了农业废弃物制备生物炭的可行性。此外,重金属污染农田产生的农业废弃物其重金属含量高,制备成生物炭施入土壤后还有“二次污染”的风险。因此,未来生物炭基降镉技术的发展需要寻找高品质制炭材料。

南荻(*Miscanthus lutarioriparius*)是禾本科芒属的一种多年生、生物量大(年产干物质30~36 t·hm⁻²)的草本植物,是我国的特有种,同时也是世界上生长面积最大的芒属植物种类。据不完全统计,仅洞庭湖区

处于半栽培、半野生状态的南荻就有10万hm²之多^[11]。近年来,随着洞庭湖生态经济区建设的实施,以南荻为原料的传统造纸产业因为其污染严重而大幅衰退,南荻的商业化利用也陷入了停滞。因此,发掘南荻新的高附加值利用方式是解决整个产业可持续发展的关键途径。南荻生物质作为一种木质纤维素含量高、纤维结构均匀的材料,其制备的炭孔径可达2~9 μm,比表面积可达100~200 m²·g⁻¹,而且孔隙的内表面含有大量的带电基团(如羟基和羧基),是制备生物炭的理想材料。基于此,通过收获洞庭湖区南荻并热解其生物质生产南荻炭,进而再深加工出附加值高的炭基土壤调理产品,既可以保证南荻产业的可持续发展,又可促进生物炭产业的进步,还可以实现稻田降镉。开发南荻炭基土壤调理剂可同时实现环境、经济和农业效益的最大化,具有巨大的市场潜力与发展前景。

施用南荻炭可通过其多级孔的物理吸附及带电吸附而降低土壤中镉离子的移动性。单一施加南荻炭会随着应用时间的推移存在吸附镉的解吸附^[12],而导致其长期降镉效应不稳定。若将南荻炭与不同类型镉钝化剂复配,理论上可利用其间的协同效应和互补作用达到高效、稳定的降镉效果。基于此,本研究拟通过探索南荻炭与不同类型镉钝化剂复配对水稻植株镉吸收与累积的影响,进而筛选出降镉潜力大的复配南荻炭基降镉土壤调理剂配方。实际生产中,土壤调理剂对农作物产量的作用是影响其被农户接受度的重要影响因素。因此,本研究还拟对筛选出的南荻炭基降镉土壤调理剂施用对水稻产量及产量构成因子的影响进行初步探索,为评价其推广前景提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试水稻:深两优5814属籼型两系杂交水稻,在长江中下游地区全生育期115~120 d,作一季中稻种植。

供试土壤: 试验设在湖南农业大学耘园实验基地大棚, 土壤类型为酸性(pH=5.32)黏性红壤, 有机质含量 $1.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $0.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷含量 $0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾含量 $15.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 镉含量 $0.072 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试南荻炭: 以12月份收获于沅江洞庭湖区的南荻秆为原材料, 粉碎至3~5 cm后, 采用湖南谷力新能源科技有限公司的热裂解多联产技术装置烧制。炭化过程为: 粉碎后的南荻秆在400~500 °C条件下先限氧热裂解2~3 h, 添加水作为气化剂后再在500~600 °C下氧化, 最后在600~800 °C条件下还原得到供试南荻炭。

供试镉钝化剂: 腐植酸(含量 $\geq 70\%$, 淄博华亭化工有限公司)、熟石灰(浏阳永和石灰厂)、钙镁磷肥(P_2O_5 含量 $\geq 20\%$, CaO含量 $\geq 35\%$, MgO含量 $\geq 13\%$, 湖

北御龙化肥有限责任公司), 硫酸锌和硅酸钾为无定形分析纯试剂。

1.2 试验设计

本研究采用模拟镉污染土壤盆栽试验法(表1), 共包含南荻炭、腐植酸、硅酸钾、钙镁磷肥、硫酸锌和熟石灰6个试验因素, 每个因素设5个水平。采用L25(5⁶)正交设计后, 本试验共包含25个供试处理。在2016年试验季开始前(6月上旬), 按照表1的设计剂量将各供试处理与57 mg $\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (模拟土壤镉含量 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、20 g 水稻专用肥(N:P₂O₅:K₂O=21:7:12)、35 kg 供试土壤(过8目网筛)均匀混合后装入不漏水盆栽塑料盆中(盆面积约为0.2 m², 高为50 cm)。以不施加南荻炭和镉钝化剂的试验组为空白对照(CK), 每个处理重复3次。所有供试盆加入等

表1 南荻炭与镉钝化剂交互正交设计表($\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$)

Table 1 The orthogonal test designing table of interaction of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar based soil amendment and cadmium passivatos($\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$)

处理 Treatments	南荻炭 <i>Miscanthus lutarioriparius</i> biochar	腐植酸 Humid acid	硅酸钾 Potassium silicate	钙镁磷 Calcium magnesium phosphate	硫酸锌 Zinc sulfate	熟石灰 Slaked lime
T1	30(1)	0(1)	0(1)	0(1)	0(1)	0(1)
T2	30(1)	9(2)	0.9(2)	9(2)	0.3(2)	9(2)
T3	30(1)	18(3)	1.8(3)	18(3)	0.6(3)	18(3)
T4	30(1)	27(4)	2.7(4)	27(4)	0.9(4)	27(4)
T5	30(1)	36(5)	3.6(5)	36(5)	1.2(5)	36(5)
T6	60(2)	0(1)	0.9(2)	18(3)	0.9(4)	36(5)
T7	60(2)	9(2)	1.8(3)	27(4)	1.2(5)	0(1)
T8	60(2)	18(3)	2.7(4)	36(5)	0(1)	9(2)
T9	60(2)	27(4)	3.6(5)	0(1)	0.3(2)	18(3)
T10	60(2)	36(5)	0(1)	9(2)	0.6(3)	27(4)
T11	90(3)	0(1)	1.8(3)	36(5)	0.3(2)	27(4)
T12	90(3)	9(2)	2.7(4)	0(1)	0.6(3)	36(5)
T13	90(3)	18(3)	3.6(5)	9(2)	0.9(4)	0(1)
T14	90(3)	27(4)	0(1)	18(3)	1.2(5)	9(2)
T15	90(3)	36(5)	0.9(2)	27(4)	0(1)	18(3)
T16	120(4)	0(1)	2.7(4)	9(2)	1.2(5)	18(3)
T17	120(4)	9(2)	3.6(5)	18(3)	0(1)	27(4)
T18	120(4)	18(3)	0(1)	27(4)	0.3(2)	36(5)
T19	120(4)	27(4)	0.9(2)	36(5)	0.6(3)	0(1)
T20	120(4)	36(5)	1.8(3)	0(1)	0.9(4)	9(2)
T21	150(5)	0(1)	3.6(5)	27(4)	0.6(3)	9(2)
T22	150(5)	9(2)	0(1)	36(5)	0.9(4)	18(3)
T23	150(5)	18(3)	0.9(2)	0(1)	1.2(5)	27(4)
T24	150(5)	27(4)	1.8(3)	9(2)	0(1)	36(5)
T25	150(5)	36(5)	2.7(4)	18(3)	0.3(2)	0(1)

注: ()内数字1~5代表各供试因素添加量的对应水平。

Note: Number 1 to 5 in brackets indicates the corresponding addition levels of test factors application rates.

量自来水使水液面高约2 cm,泡田10 d。于2016年6月下旬将25 d秧龄的秧苗移栽至各处理土壤中,每盆7穴,每穴1株。水稻全生育期按水稻标准生产规程进行,所有处理的栽培管理措施一致。

1.3 测定指标及方法

水稻收获前每盆选取长势一致的3株水稻植株测定分蘖数和有效穗数:测定并记录每丛水稻的总体茎蘖数和结穗的茎蘖数。

水稻收获后每盆中依然选取3株测定地上部干质量:将选取植株的穗从穗节处与植株分离,分别在65℃条件下烘干至恒质量,冷却至室温后用天平(精确度为0.1 g)分别称取穗质量和茎秆质量。

考种指标:每株水稻选取3个大小一致的穗分别脱粒,然后分离出每穗籽粒的饱粒和瘪粒并进行计数。再从中分离出3组100粒饱粒用万分之一天平称质量,计为饱粒百粒重。

将每盆收集的所有籽粒集中称质量,计每盆水稻的实际产量。

将从每盆3株样株粉碎后的稻谷籽粒和茎叶粉样分别过100目筛,留样待测镉离子含量。镉离子的测定采用微波消煮-ICP法。

1.4 数据处理

成穗率(%)=有效穗数/总分蘖数×100%

结实率(%)=单穗饱粒数/单穗总粒数×100%

本试验采用SAS 9.2对分析指标进行多因素方差分析(Multi-Way ANOVA)和多重比较分析(Duncan法)。每个处理组共设计3组重复,每组重复选定3株样株测定的分析指标(茎叶镉含量、稻谷籽粒镉含量、分蘖数、成穗率、穗粒数、结实率、百粒重和实际产量)的平均值作为分析数据。结果中不同大写字母表示

$\alpha=0.01$ 水平上差异显著,不同小写字母表示 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著。

2 结果与分析

2.1 南荻炭与镉钝化剂互作对水稻茎叶镉含量的影响

南荻炭、腐植酸、硫酸锌、硅酸钾、钙镁磷和熟石灰对水稻茎叶镉含量均有极显著影响($P<0.01$)。其中,南荻炭对水稻茎秆镉含量影响最显著($F=32.10$),其他依次是腐植酸($F=24.77$)、硫酸锌($F=15.79$)、熟石灰($F=14.36$)、硅酸钾($F=9.42$)和钙镁磷($F=6.65$)。

由表2可知,水稻茎叶镉含量随着南荻炭添加量的增加呈现先减少再增加的趋势。尤其在150.0 g·盆⁻¹南荻炭(水平5)的添加水平下,其水稻茎叶镉含量(4.12 mg·kg⁻¹)显著高于其他施加水平下的含量。在南荻炭施加60.0 g·盆⁻¹(水平2)下,水稻茎秆镉含量最低为1.38 mg·kg⁻¹,仅为最高(水平5)含量的33.5%。添加腐植酸后,水稻茎叶镉含量均低于未施加腐植酸的处理。随着腐植酸添加量的增大相应水稻茎叶镉含量大体呈现先减小后增加的趋势,其在18.0 g·盆⁻¹施加量下(水平3)含量最低(1.41 mg·kg⁻¹),比不施加腐植酸处理(3.52 mg·kg⁻¹)相比镉含量降低了59.9%。硅酸钾的施加效应却有所不同,随着添加量的增大其对应茎秆镉含量也呈现增加趋势,但同样均低于不施加硅酸钾的处理(水平1)。硅酸钾施加量为0.9 g·盆⁻¹(水平2)时对应水稻茎秆镉含量最低(1.98 mg·kg⁻¹)。与南荻炭施加效应相似,钙镁磷在27.0 g·盆(水平4)的施加水平下,其水稻茎叶镉含量(3.33 mg·kg⁻¹)显著高于其他施加水平下的含量。在钙镁磷施加9.0 g·盆⁻¹(水平2)下,水稻茎秆镉含量最低为2.14 mg·kg⁻¹,仅为最高(水平4)含量的

表2 南荻炭与镉钝化剂互作对茎叶镉含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 2 Interaction effects of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar, cadmium passivators on the cadmium content of rice plants(mg·kg⁻¹)

水平 Levels	因素 Factors					
	南荻炭 <i>Miscanthus lutarioriparius</i> biochar	腐植酸 Humid acid	硅酸钾 Potassium silicate	钙镁磷 Calcium magnesium phosphate	硫酸锌 Zinc sulfate	熟石灰 Slaked lime
1	2.72B	3.52A	3.40A	2.58BC	2.89BC	2.61B
2	1.38C	3.41A	1.98C	2.14C	2.40C	3.55A
3	2.83B	1.41C	2.57B	2.95AB	3.47A	3.21A
4	2.66B	2.87B	2.75B	3.33A	3.22AB	2.44B
5	4.12A	2.50B	3.01AB	2.72B	1.76D	1.90C

注:南荻炭与镉钝化剂添加水平所代表的添加量见表1;平均数($n=9$)后的同一列内不同大写字母表示数值间差异显著($P<0.01$)。下同。

Note: Number 1 to 5 in the first column represents the application levels of each factor with detail application rates shown in Table 1. Different capital letters($n=9$) in the same column indicate significant differences at 1%. The same below.

64.3%。硫酸锌与熟石灰的施加效应一致,随着两者施加量的增大茎叶镉含量大体上先增加再减少,且均在最大添加量(水平5)下镉含量最低。经分析确定南荻炭与不同类型的镉钝化剂最佳施加量:南荻炭 $60.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($3.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、腐植酸 $18.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.90\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、硅酸钾 $0.9\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.05\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、钙镁磷 $9.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、硫酸锌 $1.2\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.06\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、熟石灰 $36.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($1.8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

2.2 南荻炭与镉钝化剂互配对水稻籽粒镉含量的影响

南荻炭、腐植酸、硫酸锌、硅酸钾、钙镁磷和熟石灰对水稻籽粒镉含量均有极显著影响($P<0.01$)。其中腐植酸对水稻籽粒镉含量影响最显著($F=78.92$),其次是南荻炭($F=26.78$)、硅酸钾($F=20.15$)、钙镁磷($F=17.50$)、熟石灰($F=14.10$)和硫酸锌($F=12.94$)。

由表3可知,南荻炭的添加对水稻籽粒镉含量的影响与其对茎叶镉含量的影响一致。在添加 $60.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平2)下,水稻籽粒镉含量最低为 $0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅为最高(水平5)含量的62.5%。与对水稻茎叶镉含量的影响一致,腐植酸添加后籽粒镉含量显著低于未添加腐植酸的对照处理,降镉率为20.0%~52.5%。随着腐植酸添加量的增加,其对水稻的降镉效应越显著。在最高添加量(水平5)下镉含量最低($0.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但与茎叶最低镉含量所对应的处理(水平3)间无显著差异。硅酸钾添加后,除水平3和水平5外,其他添加水平条件下,水稻籽粒镉含量均显著低于未添加的处理,且在 $2.7\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平4)下籽粒镉含量最低($0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且与水平5下籽粒镉含量差异显著。与不添加硅酸钾的对照处理相比,添加 $0.9\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平2)的硅酸钾后水稻籽粒镉含量降低了10.7%。不同于前三者,钙镁磷在 $18.0\sim 36.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平3~水平5)添加量下,籽粒镉含量显著高于空白对照和水平2下的籽粒镉含量。空白对照和 $9.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平2)钙镁磷添加量下的水稻籽粒镉含

量之间无显著差异,但在 $9.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 的添加量下茎叶镉含量最低。添加硫酸锌后,水稻籽粒镉含量在 $0.3\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平2~水平3)下与未施加硫酸锌的对照处理相比并没有显著差异,甚至在添加 $0.9\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平4)后,籽粒镉含量还比对照处理增高了14.3%。而硫酸锌在最高添加量 $1.2\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平5)下,籽粒含量与不添加对照处理相比降低了21.4%,达显著水平,同时在该添加水平下,茎叶镉含量也最低。与硫酸锌的效应相似,熟石灰在添加 $9.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平2)下,对水稻籽粒镉含量并无显著影响。而在添加 $18.0\sim 27.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ (水平3~水平4)下,籽粒镉含量较空白对照增加了22.6%~24.8%,但在最高添加量(水平5)下,水稻籽粒镉含量降低至空白对照的58.3%。基于不同因素不同水平对水稻茎叶和籽粒的综合影响,可确定最具降镉潜力的南荻炭与不同类型的镉钝化剂每盆最佳施入量:南荻炭 $60.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($3.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、腐植酸 $18.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.90\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、硅酸钾 $0.9\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.05\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、钙镁磷 $9.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、硫酸锌 $1.2\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($0.06\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、熟石灰 $36.0\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ($1.80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

2.3 南荻炭基降镉土壤调理剂施用对水稻产量和产量构成因子的影响

由于本试验未包含筛选出的最佳配比的试验处理,在此选取本试验最接近最佳配比的三组土壤调理剂,以探索南荻炭基土壤调理剂对水稻产量和产量构成因子的影响。如表4所示,不同处理组的水稻茎叶镉含量与籽粒镉含量呈正相关,其高低趋势均为 $\text{CK}>\text{T9}>\text{T10}>\text{T8}$ 。不加降镉土壤调理剂的空白对照处理(CK)茎叶镉含量($3.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)与籽粒镉含量($0.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均显著高于施加了南荻炭基土壤调理剂的处理组(T8、T9和T10)。其中T8处理的水稻茎叶镉含量($0.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)与籽粒镉含量($0.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)最低,T9与T10处理间的茎叶镉含量与籽粒镉含量比

表3 南荻炭与镉钝化剂互配对籽粒镉含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Interaction effects of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar, cadmium passivators on the cadmium content of rice grains($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

水平 Levels	因素 Factors						
	南荻炭 <i>Miscanthus lutarioriparius</i> biochar	腐植酸 Humid acid	硅酸钾 Potassium silicate	钙镁磷 Calcium magnesium phosphate	硫酸锌 Zinc sulfate	熟石灰 Slaked lime	
1	0.26B	0.40A	0.28B	0.22C	0.28B	0.24B	
2	0.20C	0.32B	0.25CD	0.24C	0.28B	0.25B	
3	0.32A	0.20D	0.34A	0.30A	0.26B	0.31A	
4	0.25B	0.25C	0.23D	0.27B	0.32A	0.32A	
5	0.32A	0.19D	0.26BC	0.32A	0.22C	0.14C	

T8处理略高且两者间差异不显著。与CK相比,施用T8、T9和T10土壤调理剂后水稻茎叶平均镉含量分别降低了75.7%、54.4%和55.8%,籽粒平均镉含量分别降低了58.1%、45.2%和48.4%。3组南荻炭基降镉土壤调理剂施用对水稻产量的影响如表5所示:与CK处理相比,施用南荻炭基降镉土壤调理剂后,水稻产量显著增加,增产率为1.2%~34.8%。在3组南荻炭基降镉土壤调理剂中,T9土壤调理剂的增产效应最显著,相对于CK每盆产量增加了37.8 g·盆⁻¹(折合约1.89 t·hm⁻²),其主要通过提高水稻的成穗率、穗粒数、结实率和百粒重得以实现增产。T8土壤调理剂降镉效果最佳,但其对水稻产量无显著影响。T8土壤调理剂的施用虽然提高了穗粒数和百粒重,但其对分蘖数、成穗率和结实率均有减小效应。总体上,施用南荻炭基降镉土壤调理剂后,水稻的分蘖数有所减少,但穗粒数和百粒重均显著增加。

3 讨论

3.1 南荻炭与不同类型镉钝化剂对水稻镉含量的影响

南荻炭与不同类型镉钝化剂互作能显著降低水稻镉含量。前期研究表明,南荻炭具有大量孔隙结构,炭孔径可达2~9 μm,比表面积为100~200 m²·g⁻¹,具有很强的物理吸附性能。南荻炭表面的带电基团(羟基、羧基等)通过离子交换可与镉离子形成较为稳定的络合物和螯合物从而降低土壤中镉离子的移动性。另外南荻炭呈碱性,其表面正电荷密度低,碱性盐多,且暴露大量的氨基、磷酸基、羧基、有机羟基等吸附基团,有助于增强南荻炭沉淀和吸附镉离子的能力^[13-15]。本试验结果表明施加南荻炭,水稻茎叶和籽粒的镉含量都显著降低,这与南荻炭对活性镉离子的化学钝化和物理吸附作用有直接关系。此外,腐植酸表面含有羧基和酚羟基等含氧活性官能团,这些官能团能与镉离子发生络合作用从而使其形态和迁

移^[16]。本试验结果表明随着腐植酸施加量的增加,水稻茎叶和籽粒镉含量都有显著降低的趋势,这说明腐植酸能有效抑制水稻对土壤中镉的吸收与积累。研究表明,硅酸钾中的硅主要可与镉形成溶解性小、移动性差的Si-Cd共沉淀^[17-18],另外硅被植物吸收后可增强植株细胞壁的硅质化程度,进而减少镉的细胞通透性,达到减少水稻植株的镉吸收量^[19]。黄秋婵等^[20]证实硅可以改变根细胞中镉的分布,增加镉在细胞壁中沉积,减少镉在共质体中的比重。硫酸锌中的锌与镉有着相似的核外电子构型和化学性质,且在植物细胞中锌、镉传输系统相同,两者存在相互取代、竞争吸收的作用^[21-22]。因此,通过添加硫酸锌提高土壤中锌含量进而降低镉在竞争结合位点的优势,减少植株对镉的吸收与转运^[23]。另外,硫酸根离子还可以与镉离子结合形成CdSO₄,然后CdSO₄可被还原成不溶的CdS,降低了土壤中镉离子的活性。钙镁磷肥一方面可提供钙镁离子和镉离子形成竞争性,增强植株解

表4 施用南荻炭基土壤调理剂后水稻的镉含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 Cadmium content of rice plants and grains after the application of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar based soil conditioner(mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	茎叶镉含量 Cadmium content of rice plants	籽粒镉含量 Cadmium content of rice grains
T8	0.88±0.32c	0.13±0.03c
T9	1.65±0.34b	0.17±0.01b
T10	1.60±0.10b	0.16±0.05b
CK	3.62±0.10a	0.31±0.09a

注:T8、T9和T10的南荻炭和镉钝化剂的添加量见表1,CK为空白对照;平均数(n=9)后的同一列内不同小写字母表示数值间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: The composition of the soil conditioner of T8, T9 and T10 are shown in Table 1. CK represents the control group without application of the *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar-based soil conditioner. Different lowercase letters (n=9) in the same column indicate significant differences at 5%. The same below.

表5 不同类型南荻炭基土壤调理剂施用后对水稻产量与产量构成因子的影响

Table 5 Effects of the application of *Miscanthus lutarioriparius* derived biochar based soil conditioner on the rice yield and yield component factors

处理 Treatments	产量构成因子 Yield component factors					
	分蘖数 Tiller number	成穗率/% Spike rate	穗粒数 Grain number per spike	结实率/% Seed setting rate	百粒重/g 100-seed weight	实测产量/g·盆 ⁻¹ Harvested grain yield
T8	44.0c	77.3c	180.6a	71.1c	2.92ab	109.7c
T9	45.0c	100.0a	176.0b	88.0a	3.20a	146.2a
T10	51.0b	100.0a	145.0c	86.4b	2.64b	134.6b
CK	59.3a	95.0b	139.2d	85.9b	2.08c	108.4c

(镉)毒能力;另一方面其中的磷元素可促使根部的镉离子形成不溶性的磷酸盐沉淀,降低镉的生物有效性,镁可以增强植株的光合作用提高对镉的抗性^[24-26]。熟石灰中的 Ca^{2+} 可以通过形成草酸钙将 Cd^{2+} 包裹,由植物排出体外,增强植物自身的降镉作用。本试验结果表明,硅酸钾的施加对水稻茎叶镉含量降低的影响均极显著;钙镁磷、熟石灰的施加对水稻茎叶镉含量降低的影响极显著,但两者对籽粒镉含量降低的影响不显著。T9、T10试验组的茎叶和籽粒的镉含量都高于T8试验组,这有可能是缺少钙镁磷肥和硅酸钾或者腐植酸对重金属解吸附作用^[27]所造成的。

3.2 南荻炭与不同类型镉钝化剂、拮抗剂互作对水稻产量构成因子的影响

南荻炭与不同类型镉钝化剂互作对水稻产量构成因子的影响显著。南荻炭作为一种优质生物炭,不仅可以提高土壤的有机质^[5],缓释植物营养元素,促进植物吸收利用营养元素^[28-29],还有助于促进土壤中无效态的磷素和钾素向有效态转化,以提高土壤磷素和钾素的有效性^[30]。腐植酸既可以促进水稻剑叶光合速率,又有助于提高禾本科粮食作物氮素利用率及其产量^[31]。硅酸钾中的硅有助于植物体内的 Ca^{2+} 、 K^+ 和P含量的增加,促进水稻生长,进而提高其产量^[32]。本试验结果表明,施加T9和T10南荻炭基降镉土壤调理剂的处理组水稻成穗率、结实率、百粒重和产量都高于CK组,其中T9处理组各项产量构成因子最优。这与杨培权等^[33]的研究结果类似,硫肥和锌肥的混施可提高水稻产量,硅锌肥有利于提高水稻有效分蘖数、穗粒数和籽粒干质量^[34]。但T8土壤调理剂处理组的结实率低于T9和T10处理,有可能是缺少硫酸锌造成的。因为锌是植物必需微量元素,对叶绿素的合成具有重要作用,缺少锌元素势必会影响水稻的生长发育,进而影响结实率^[35]。

总体而言,南荻炭基土壤调理剂不仅能显著降低水稻镉含量,还可以显著促进水稻产量的增加。然而,南荻炭不易降解,在较长时间内仍具有肥效和降镉效应;镉钝化剂在一定时间内可以持续发挥其钝化土壤中镉的作用,导致南荻炭基土壤调理剂在大田中长期施加所产生的残留效应还不明确。另外过多南荻炭施用会导致土壤通透性增强(类似于砂质化效应),减小土壤的保水保肥能力。理论上,南荻炭基土壤调理剂的后续施加用量可能需要减少或者间隔数季施加。基于此,后续需要开展南荻炭基土壤调理剂在施加技术措施上的相关研究,以保障其在实际生产

中的可行性。

4 结论

(1)南荻炭与各类型的镉钝化剂互作对降低水稻茎叶和籽粒镉含量均有极显著影响,且不同配比的镉钝化剂的降镉潜能也存在很大的差异。南荻炭对降低水稻茎叶镉含量的影响最显著,而腐植酸对降低水稻籽粒镉含量的影响最显著。水稻茎叶镉含量的增加对籽粒镉含量的增加有促进作用。配比中缺少硅酸钾或者钙镁磷肥,或腐植酸过量均会影响降镉效果。南荻炭降镉土壤调理剂对提高水稻产量的影响达极显著水平,配比中缺少硫酸锌会导致水稻产量降低。

(2)南荻炭基土壤调理剂推荐施用量为 $6.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中南荻炭 $3.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、镉钝化剂 $3.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,镉钝化剂各成分比例为:腐植酸:硅酸钾:钙镁磷:硫酸锌:熟石灰=60:3:30:4:120。

参考文献:

- [1] 郭朝晖,肖细元,陈同斌,等.湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J].地理学报,2008,63(1):3-11.
GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 3-11.
- [2] 雷鸣,曾敏,王红利,等.湖南市场和污染区稻米中As、Pb、Cd污染及其健康风险评估[J].环境科学学报,2010,30(11):2314-2320.
LEI Ming, ZENG Min, WANG Hong-li, et al. Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2314-2320.
- [3] 李剑睿,徐应明,林大松,等.农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J].生态环境学报,2014,23(4):721-728.
LI Jian-rui, XU Ying-ming, LIN Da-song, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 721-728.
- [4] Peng X, Ye L L, Wang C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 159-166.
- [5] Koide R T, Nguyen B T, Skinner R H, et al. Biochar amendment of soil improves resilience to climate change[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2014, 5(7): 1084-1091.
- [6] Naidu R, Kookana R S, Sumner M E, et al. Cadmium sorption and transport in variable charge soils: A review[J]. *Environmental Quality*, 1997, 26(3): 602-617.
- [7] Oguntunde P G, Fosu M, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal produc-

- tion on maize yield, chemical properties and texture of soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(4): 295-299.
- [8] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota—A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [9] Wang X Y, Yang L, Steinberger Y, et al. Field crop residue estimate and availability for biofuel production in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27(6): 864-875.
- [10] Yang L, Wang X Y, Han L P, et al. A quantitative assessment of crop residue feedstocks for biofuel in North and Northeast China[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 7(1): 100-111.
- [11] 易自力. 芒属能源植物资源的开发与利用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学), 2012, 38(5): 455-463.
YI Zi-li. Exploitation and utilization of *Miscanthus* as energy plant[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2012, 38(5): 455-463.
- [12] 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对Cd(II)的吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2277-2283.
LI Li, LU Yu-chao, LIU Ya, et al. Adsorption mechanisms of cadmium(II) on biochars derived corn straw[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2012, 31(11): 2277-2283.
- [13] 杨侨, 赵龙, 孙在金, 等. 复合钝化剂对污灌区镉污染农田土壤的钝化效果研究[J]. 应用化工, 2017, 46(6): 1037-1041, 1050.
YANG Qiao, ZHAO Long, SUN Zai-jin, et al. Study on passivation effects of multi-passivators on the cadmium contaminated soils in sewage irrigation area[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(6): 1037-1041, 1050.
- [14] Donmez G C, Aksu Z, Ozturk A, et al. A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae[J]. *Process Biochemistry*, 1999, 34(9): 885-892.
- [15] Aksu Z. Equilibrium and kinetic modeling of cadmium(II) biosorption by *C. vulgaris* in a batch system: Effect of temperature[J]. *Separation and Purification Technology*, 2001, 21(3): 285-294.
- [16] 陈锴, 李义连, 杨国栋, 等. 腐植酸对As(V)在覆铁砂介质中吸附行为的影响[J]. 环境化学, 2010, 29(2): 231-236.
CHEN Kai, LI Yi-lian, YANG Guo-dong, et al. Influence of humic acid on the adsorption of arsenic(V) by sand covered iron[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(2): 231-236.
- [17] Wang L J, Wang Y H, Cheng L M, et al. Silicon induced cadmium tolerance of rice *Oryza sativa* L. seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23: 1397-1406.
- [18] Vaculik M, Lux A, Luxová M, et al. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(11): 52-58.
- [19] 史新慧, 王贺, 张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1112-1116.
SHI Xin-hui, WANG He, ZHANG Fu-suo. Research on the mechanism of silica improving the resistance of rice seedlings to Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1112-1116.
- [20] 黄秋婵, 黎晓峰, 沈方科, 等. 硅对水稻幼苗镉的解毒作用及其机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1307-1311.
HUANG Qiu-chan, LI Xiao-feng, SHEN Fang-ke, et al. Cadmium resistance improved by silicon and corresponding mechanisms in *Oryza sativa* L. seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1307-1311.
- [21] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Transport interaction between Ca and Zn in roots of bread wheat and durum wheat seedlings[J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 116(1): 73-78.
- [22] 李森林, 王焕校, 吴玉树. 凤眼莲中锌对镉的拮抗作用[J]. 环境科学学报, 1990, 10(2): 249-254.
LI Sen-lin, WANG Huan-jiao, WU Yu-shu. Antagonistic effects of zinc on cadmium in waterhyacinth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 10(2): 249-254.
- [23] Cherif J, Mediouni C, Ammar W B, et al. Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(5): 837-844.
- [24] 章明奎, 唐红娟, 常跃畅. 不同改良剂降低矿区土壤水溶态重金属的效果及其长效性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 144-148.
ZHANG Ming-kui, TANG Hong-juan, CHANG Yue-chang. Long-term effects of different amendments on reduction of water soluble heavy metal in a mine contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 144-148.
- [25] Zhou D M, Wang Y J, Wang H W, et al. Surface-modified nanoscale carbon black used as sorbents for Cu(II) and Cd(II) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3): 34-39.
- [26] 李造煌, 杨文毅, 邹佳玲, 等. 钙镁磷肥对土壤Cd生物有效性和糙米Cd含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2322-2330.
LI Zao-huang, YANG Wen-tao, ZOU Jia-ling, et al. Effects of cadmium magnesium phosphate fertilizer on Cd bioavailability in soil and Cd contents in rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6): 2322-2330.
- [27] 余贵芬, 青长乐, 牟树森, 等. 汞在腐植酸上的吸附与解吸特征[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5): 601-606.
YU Gui-fen, QING Chang-le, MOU Shu-sen, et al. Characteristics of mercury adsorption and desorption on humic acids[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(5): 601-606.
- [28] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 472-476.
YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Effects of rice-hull-based biochar regulating acidity of red soil and yellow brown soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(5): 472-476.
- [29] 方放, 周建斌, 杨继亮. 稻壳炭提取SiO₂及制备活性炭联产工艺[J]. 农业工程学报, 2013, 28(23): 184-191.
FANG Fang, ZHOU Jian-bin, YANG Ji-liang. Poly-generation of activated carbon and silica from rice husk charcoal[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 28(23): 184-191.
- [30] 刘赛男. 生物炭影响土壤磷素、钾素有效性的微生态机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
LIU Sai-nan. Effect of biochar on soil microflora associated with phosphorus and potassium[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.

- [31] 张沁怡, 李文蔚, 阳 晶, 等. 腐植酸对水稻剑叶光合特性、必需元素和产量的影响及其相关性研究[J]. 云南农业大学学报, 2015, 30(2): 185-191.
- ZHANG Qin-yi, LI Wen-wei, YANG Jing, et al. Effects of humic acid on the photosynthesis characteristics, essential elements and yield *Oryza sativa* L., and their correlation analysis[J]. *Journal of Yunan Agricultural University*, 2015, 30(2): 185-191.
- [32] Mehrabanjoubani P, Abdolzadeh A, Sadeghipour H R, et al. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes[J]. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2015, 27(1): 19-29.
- [33] 杨培权, 蒋毅敏, 朱华龙, 等. 锌硅肥对水稻生长和产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2012(7): 18-20.
- YANG Pei-quan, JIANG Yi-min, ZHU Hua-long, et al. Effects of zinc and silicon on growth and yield of rice[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2012(7): 18-20.
- [34] 韦燕燕. 水稻籽粒中锌生物有效性及调控机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- WEI Yan-yan. Zinc bioavailability in rice grain and regulation mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [35] Yin X Q, Wang G D, Sun H M, et al. Effects of zinc and manganese fertilizers on maize growth and chlorophyllous contents under drought condition[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(6): 196-199.