

不同改良剂对镉污染土壤的改良效果 和对水稻光合特性的影响

范美蓉^{1a,2}, 罗琳^{1a*}, 廖育林^{1a,3}, 魏建宏^{1b}, 孙玉桃³, 汤海涛³

(1.湖南农业大学 a.资源环境学院; b.生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2.长沙环境保护职业技术学院, 湖南 长沙 410004; 3.湖南省农业科学院 土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要:采用盆栽试验,研究赤泥、石灰和海泡石对 Cd 污染土壤的改良效果和水稻光合特性的影响。结果表明:施赤泥、石灰和海泡石均能有效促进土壤交换态 Cd 的稳定,有利于 Cd 的固定,其中以赤泥对 Cd 的钝化效果最佳;与对照相比,赤泥处理的水稻增产幅度较大,为 11.41%,海泡石处理的水稻产量略有提高,石灰处理的水稻产量略有下降;不同改良剂均能增加水稻剑叶的叶绿素含量(SPAD 值)、气孔导度、净光合速率、胞间 CO₂ 浓度及蒸腾速率,其中以施赤泥处理效果最好,分别比对照提高 6.63%、8.59%、6.93%、11.95%、5.42%;不同改良剂处理水稻剑叶面积均有不同程度的上升,添加赤泥更能缓解 Cd 污染对水稻生长的影响。

关键词:水稻;赤泥;石灰;海泡石;镉污染土壤;光合特性

中图分类号: S147.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2012)04-0430-05

Effects of different soil amendments on the remediation of Cd-contaminated soil and the photosynthetic characteristics of rice plant

FAN Mei-rong^{1a,2}, LUO Lin^{1a*}, LIAO Yu-lin^{1a,3}, WEI Jian-hong^{1b}, SUN Yu-tao³, TANG Hai-tao³

(1.a.College of Resources and Environment; b.College of Bioscience and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Changsha Environmental Protection College, Changsha 410004, China; 3. Soil and Fertilizer Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of three amendments (red mud, lime and sepiolite) on remediation of Cd in Cd-contaminated paddy soil and photosynthetic characteristics of rice plant. The results indicated that application of red mud, lime and sepiolite could effectively promote the stabilization of soil exchangeable Cd and the immobilization of Cd with the red mud shown the best immobilization effect. Compared with the control, the application of red mud increased yield dramatically, by 11.41%, and the application of sepiolite slightly increased the yield, while the application of lime decreased the yield slightly. The application of soil amendments could improve chlorophyll content (SPAD value), the rice stomatal conductance (Gs), the net photosynthetic rate (Pn), intercellular CO₂ concentration (Ci) and transpiration rate (Tr) of flag leaf of rice. Among the three amendments, the effect of application of red mud was most obvious, with which the SPAD value, Gs, Pn, Ci and Tr was respectively increased by 6.63%, 8.59%, 6.93%, 11.95% and 5.42%. Three amendments all increased the flag leaf area, but the degree of increase varied. Compared with lime and sepiolite, red mud application could better alleviate the effect of Cd on rice growth.

Key words: rice; red mud; lime; sepiolite; Cd-contaminated paddy soil; photosynthetic characteristics

目前,中国受镉、砷、铬、铅等重金属污染的耕地面积近 2 000 万 hm², 约占总耕地面积的 1/5,

收稿日期: 2011-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874046); 国家“863”计划重点项目(2010AA065203); 湖南省教育厅项目(08A032)

作者简介: 范美蓉(1977—), 女, 湖南安乡人, 博士, 副教授, 主要从事农业环境科学与工程研究, fanmeirong123456@126.com;

*通信作者, luolinwei0@163.com

其中工业“三废”污染耕地约1 000万 hm^2 ，污水灌溉的农田面积已超过330万 hm^2 ^[1]。镉(Cd)是一种毒性极强的环境污染元素，通过食物链等途径进入人体，严重危害人体健康。在重金属污染土壤修复技术中，利用改良剂对Cd污染土壤进行修复被认为是一种有效的技术。近年来，改良剂原位修复重金属污染土壤因其成本低廉、易于实施，已得到广泛应用。以往对土壤修复剂作用效果的研究多集中在土壤中重金属含量和形态的变化，对添加土壤修复剂后水稻剑叶生长、叶绿素含量和光合作用效果的研究较少。笔者研究石灰、海泡石和赤泥在镉污染稻田中的镉污染修复效果及对水稻剑叶生长和光合作用的影响，探索赤泥农用的可行性，现将结果报道如下。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试水稻为湘早籼31号。供试土壤采自湘潭市

岳塘区竹埠港村，为河流冲积物发育的潮泥土，其基本理化性状及重金属含量为：pH值5.3，有机质31.4 g/kg，碱解氮374.6 mg/kg，速效磷7.3 mg/kg，速效钾104.4 mg/kg，阳离子交换量(CEC)15.50 cmol/kg，全量镉含量1.397 mg/kg，可交换态镉(EXC)含量0.431 mg/kg，碳酸盐结合态镉(CA)含量0.141 mg/kg，铁锰氧化物结合态镉(FeMnO_x)含量0.289 mg/kg，有机结合态镉(OM)含量0.098 mg/kg，残渣态镉(RES)含量0.438 mg/kg。

供试石灰和海泡石由长沙裕丰化工有限公司提供；赤泥由中国长城铝业集团提供，为拜耳-烧结联合法赤泥，pH值为12.5，烧失量24.6%，二氧化硅20.5%，三氧化二铁8.1%，氧化铝6.9%，氧化钙43.1%，有机质含量5.0 g/kg，碱解氮含量4.0 mg/kg，速效钾含量3.53 mg/kg。改良剂的用量选用日常生产中的常用量，均采用4 g/kg。3种改良剂的基本理化性状见表1。

表1 3种改良剂的基本理化性状

Table 1 Basic properties of different modifiers

改良剂	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	全 K/ (g·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	Pb/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Ni/ (mg·kg ⁻¹)
赤泥			3.48	0.750	73.80	117.50	5.298	7.934
石灰	0.026	0.003		0.161	1.26	0.545	0.022	0.922
海泡石	0.023	0.066			2.65		2.718	3.325

“ ”表示该元素测量值为痕量。

1.2 试验设计

盆栽试验在湖南农业大学资源环境学院玻璃房进行。试验用陶瓷钵钵高32.0 cm，直径20.0 cm，每钵装土10.0 kg。盆栽土壤过5 mm筛，混合均匀装钵，浸水2 d使土壤完全湿润后再施基肥。

试验设4个处理：T₁，不添加土壤改良剂(CK)；T₂，添加赤泥40 g/盆；T₃，添加石灰40 g/盆；T₄，添加海泡石40 g/盆。土壤改良剂于移栽前1周均匀施入土壤，每处理重复10次。每盆均施用尿素2.17 g、过磷酸钙4.17 g、氯化钾1.00 g，氮肥按基肥追肥(7-3)施，基肥于秧苗移栽前1 d施入，追肥于移栽后10 d施入，磷肥、钾肥均作基肥施。试验于2009年3月25日播种，4月28日插秧，7月10日收获，插秧时每盆3穴，每穴插6苗，自来水浇灌，其他管理同大田管理。

1.3 测定项目与方法

土壤和3种改良剂的基本理化性状采用文献[2]中的方法进行测定。土壤和赤泥中的Cd全量采用HNO₃-HClO₄-HF消解，糙米中的Cd全量采用HNO₃-HClO₄湿法消解，并以杨树叶(GB W07604)为内标进行质量控制，Cd含量使用原子吸收分光光度计(GTA120，美国瓦里安)测定。

于水稻孕穗期采用CI-203手持式激光叶面积仪测定剑叶长、宽、长/宽、面积和周长。采用SPAD-502型叶绿素计在晴天8:30—11:30测定水稻剑叶叶绿素相对含量(SPAD值)。采用LI-6400型便携式光合测定仪(美国LI-COR公司生产)在无风晴天9:00—11:00测定剑叶中部(正面)的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率，测定时光强为1 000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。

水稻成熟后,每个处理随机取5盆进行考种,测定株高、穗数、每穗总粒数、结实率、千粒重和实际产量。

水稻收获后,每个处理随机取5盆采集土壤样品,研磨过0.28 cm孔径筛,采用文献[3]方法进行土壤镉形态(可交换态镉、碳酸盐结合态镉、铁锰氧化物结合态镉、有机结合态镉和残渣态镉)分级测定。

1.4 数据处理

采用SPSS 13.0软件进行方差分析;采用Duncan新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对水稻株高、产量和产量构成因子的影响

由表2可知,水稻株高、有效穗和稻谷产量以

T₂最高,显著高于其他处理;结实率、千粒重以T₂最高,与其他处理间差异不显著;每穗实粒数以T₂最低,与对照差异显著。与T₁、T₃、T₄相比,T₂株高分别提高了5.60%、6.13%和5.47%,有效穗分别提高了12.43%、11.20%和9.41%,结实率分别提高了3.45%、3.33%和1.70%,千粒重分别提高了2.43%、3.27%和1.61%,每穗实粒数分别降低了4.65%、3.05%和2.16%,水稻籽粒产量分别增加9.92%、11.41%和8.82%。由此可见,施用赤泥、石灰和海泡石对水稻植株生长和水稻产量及产量构成因子均有不同程度的影响,其中,以赤泥处理水稻的各项生长指标较好。

表2 不同处理水稻的产量和产量构成因子

Table 2 Effect of different soil amendments on rice yield and yield components of rice plant

处理	株高/cm	每株有效穗/个	每穗实粒数/粒	结实率/%	千粒重/g	产量/g
T ₁	(80.4±3.3)b	(36.2±1.2)b	(66.6±1.8)a	81.1±2.7	24.7±0.3	(59.5±3.9)b
T ₂	(84.9±1.5)a	(40.7±0.8)a	(63.5±0.6)b	83.9±1.2	25.3±0.5	(65.4±2.0)a
T ₃	(80.0±0.8)b	(36.6±1.3)b	(65.5±0.6)ab	81.2±2.9	24.5±0.4	(58.7±1.1)b
T ₄	(80.5±2.8)b	(37.2±1.0)b	(64.9±1.6)ab	82.5±2.2	24.9±0.5	(60.1±0.7)b

2.2 不同改良剂处理对水稻剑叶的影响

由表3可知,不同处理的水稻剑叶平均长度和宽度均以T₂最高,各处理间差异不显著;叶片平均长宽比以T₄处理最高,各处理间差异不显著。与

T₁相比,T₂、T₃、T₄叶片叶面积分别提高了17.14%、14.91%和2.08%,叶片周长分别提高了10.19%、7.01%和1.23%,T₂显著高于T₁。

表3 不同处理水稻剑叶的形态指标

Table 3 Effect of different soil amendments on growth of flag leaf of rice

处理	长度/cm	宽度/cm	长/宽	叶面积/cm ²	周长/cm
T ₁	30.51±1.21	1.77±0.15	17.25±1.30	(38.91±2.87)b	(68.19±2.51)b
T ₂	32.58±3.60	1.85±0.28	17.67±1.44	(45.58±7.20)a	(75.14±6.74)a
T ₃	31.82±3.44	1.82±0.17	17.55±2.10	(44.71±9.52)ab	(72.97±6.86)ab
T ₄	31.72±2.65	1.78±0.42	18.13±2.50	(39.72±4.89)ab	(69.03±3.38)b

2.3 不同改良剂对水稻光合特性的影响

由表4可知,与对照相比,T₂、T₃、T₄剑叶叶绿素含量分别提高了6.63%、4.59%和3.48%,净光合速率分别提高了8.59%、6.70%和1.93%,气孔导度分别提高了6.93%、3.29%和2.08%,胞间二氧化碳浓度分别提高了11.95%、5.36%和4.49%,蒸腾

速率分别提高了5.42%、3.14%和2.71%,其中,以T₂提高幅度最大,显著高于对照。添加改良剂对提高水稻叶片的叶绿素含量,增加水稻的气孔导度、净光合速率、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率均具有较好的效果,其中以赤泥处理的效果较好。

表 4 不同处理水稻剑叶的叶绿素相对含量 (SPAD 值) 和光合特性

Table 4 Effect of different soil amendments on Chl and photosynthetic characteristics of the flag leaves

处理	SPAD 值	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
T ₁	(42.22±1.61)b	(24.34±2.06)b	(0.577±0.014)b	(341.34±9.69)c	(21.02±0.70)b
T ₂	(45.02±1.53)a	(26.43±0.64)a	(0.617±0.010)a	(382.13±5.53)a	(22.16±1.63)a
T ₃	(44.16±1.32)ab	(25.97±0.51)ab	(0.596±0.012)ab	(359.62±4.88)b	(21.68±1.55)ab
T ₄	(43.69±1.85)ab	(24.81±1.64)ab	(0.589±0.008)b	(356.67±8.81)bc	(21.59±1.15)ab

2.4 不同改良剂对稻田土壤 Cd 钝化的影响

由表 5 可知,施用不同改良剂稻田土壤 Cd 发生了一定转化。与对照相比,赤泥、石灰和海泡石处理土壤中可交换态 Cd(EXC)的降幅为 20.09%~22.93%,碳酸盐结合态 Cd(CA)的增幅为 9.86%~14.08%,铁锰结合态 Cd(FeMnO_x)的增幅为 9.62%~12.82%,有机态 Cd(OM)的增幅为 2.41%~7.23%,残渣态 Cd(RES)的

增幅为 6.62%~9.13%,其中以赤泥钝化重金属 Cd 的效果最明显,与石灰、海泡石相比,土壤中可交换态 Cd 分别降低了 1.81%和 3.55%,但处理间差异不显著。赤泥、石灰和海泡石的施用均能有效促进土壤交换态 Cd 的稳定,有利于土壤重金属 Cd 的化学固定,其中又以赤泥对 Cd 的钝化效果较好。

表 5 不同处理土壤中各化学形态 Cd 的含量

Table 5 Effect of different soil amendments on the content of different forms of Cd in soil

处理	含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
	EXC	CA	FeMnO _x	OM	RES
T ₁	0.423 a	0.142 c	0.312 b	0.083	0.438 b
T ₂	0.326 b	0.158 ab	0.352 a	0.089	0.467 a
T ₃	0.332 b	0.162 a	0.342 a	0.085	0.478 a
T ₄	0.338 b	0.156 b	0.343 a	0.088	0.473 a

2.5 不同改良剂对糙米中 Cd 含量的影响

T₂、T₃、T₄ 处理糙米中 Cd 的含量分别为 0.19、0.22 和 0.24 mg/kg,分别比对照处理(0.33 mg/kg)降低 42.42%、33.33%和 27.27%,差异达极显著水平;T₂ 糙米 Cd 含量较 T₃、T₄ 分别下降了 17.39%和 26.32%,差异分别达显著和极显著水平。

与对照相比,施改良剂处理均能提高水稻剑叶的长度和宽度,各处理间差异不显著;各改良剂处理剑叶面积都有不同程度的增加。与对照相比,施用赤泥能显著提高剑叶的叶面积和周长,而海泡石和石灰处理的差异不显著,说明添加赤泥能更好的缓解 Cd 对水稻生长的影响,降低 Cd 对水稻的伤害。

3 结论与讨论

本研究结果表明,施用赤泥、石灰和海泡石对水稻植株的生长和产量及产量构成因子均有不同程度的影响。从产量上分析,3 种改良剂中施用赤泥的增产幅度较大,施用海泡石略有增产,施用石灰的产量略有下降。赤泥含有 Si、Ca、K、Fe 和 Zn 等营养元素,且硅元素含量较高。水稻是喜硅作物,施用赤泥能显著提高水稻产量,这与蔡德龙等^[4]的研究结果基本一致。

添加改良剂处理水稻剑叶 SPAD 值均高于不施用改良剂处理。较高的叶绿素含量提高了剑叶净光合速率,促进了光化学反应,有利于叶片更有效的捕获有限的光能,从而获得较高的光合速率。相比石灰和海泡石处理,赤泥处理叶绿素含量提高效果更明显,这与前人^[5]的研究结果基本一致。本研究结果还表明,与对照相比,改良剂处理的水稻剑叶叶片的净光合速率、胞间 CO₂ 浓度及蒸腾速率、气孔导度略有上升,说明此时的气孔导度在低浓度 Cd 下仍维持着正常的光合作用,其中以赤泥的处理效

果较好。

试验水稻土 pH 值呈弱酸性(pH=5.3),而赤泥和石灰是碱性物质。施用赤泥和石灰后,土壤 pH 值提高,土壤表面负电荷增加,从而使土壤对重金属的亲水性增加;pH 值升高也有利于 MOH^+ 的存在,从而提高 Cd 等重金属离子的吸附量,促进了交换态 Cd 转化成碳酸盐态 Cd、铁锰结合态 Cd,土壤中的交换态 Cd 含量降低,减弱了镉污染对水稻的胁迫程度^[6]。张强等^[7]认为,海泡石对 Cd 具有较大的吸附作用,其最大吸附值达 3 160 mg/g,红壤和耕型河潮土中施入海泡石,交换态 Cd 显著下降,残渣态 Cd 明显上升,植株体内的 Cd 含量明显降低。本研究结果表明,赤泥、石灰和海泡石的施用均能有效促进交换态 Cd 稳定化,有利于重金属 Cd 的固定。施用赤泥、石灰和海泡石均能显著降低水稻糙米中的镉含量,这与前人^[8-9]的研究结果基本一致。3 种改良剂又以赤泥的 Cd 钝化效果最佳。

参考文献:

- [1] 陈述彭. 节能降耗,任重道远—漫长的循环经济之路[J]. 地球信息科学, 2008, 10(4): 411-418.
- [2] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999.
- [3] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51 (7): 844-851.
- [4] 蔡德龙, 钱发军, 邓挺, 等. 硅肥在黄河冲积土上的水稻肥效试验研究[J]. 地域研究与开发, 1998(3): 62-64.
- [5] 蔡德龙, 钱发军, 邓挺, 等. 硅肥对花生增产作用试验研究——以黄河冲积平原土壤为例[J]. 地域研究与开发, 1995(4): 48-50.
- [6] Alloway B J, Morgan H. The behaviour and availability of Cd, Ni and Pb in polluted soils in contaminated soil[A]. Assink J W, Brink W J V D. First international TNO conference on contaminated soil, Utrecht[C]. Leiden: Martinus Nijhoff Publishers, 1986: 101-113.
- [7] 张强, 李支援. 海泡石对镉污染土壤的改良效果[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 1996, 22(4): 346-350.
- [8] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 不同钝化剂和培养时间对 Cd 污染土壤中可交换态 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 8(6): 1098-1105.
- [9] 张青, 徐明岗, 罗涛, 等. 3 种不同性质改良剂对镉锌污染水稻土的修复效果及评价[J]. 热带作物学报, 2010, 31(4): 541-546.

责任编辑: 杨盛强