

改性膨润土钝化土壤 Cd 对不同水稻品种安全生产研究

朱鳳榕, 陈亚刚, 李媛媛, 赵秋香*, 刘文华 (广东省地质实验测试中心, 广东广州 510080)

摘要 [目的] 在 Cd 污染土壤修复的同时, 实现水稻的安全生产。[方法] 以钙基膨润土为基本材料, 通过特殊改性后制备了氨基磺酸改性膨润土与巯基化改性膨润土, 不考虑离子浓度影响时两种修复材料对 Cd 的饱和吸附容量分别可达 40.35、69.13 mg/g。通过盆栽试验种植不同品种水稻, 探讨两种材料对 Cd 污染土壤的钝化效果。[结果] 巯基化改性膨润土对 Cd 的钝化效果明显优于氨基磺酸改性膨润土。在 Cd 10 mg/kg 左右污染土壤上施加巯基化改性膨润土后, 土壤中 Cd 的弱酸提取态含量降低了 8.39% ~ 16.22%, 可还原态含量增加了 9.91% ~ 18.60%, 有效地固定了土壤中的 Cd, 降低了 Cd 在土壤中的活性。供试的 6 个品种水稻糙米 Cd 含量在 0.08 ~ 0.29 mg/kg, 分别比对照降低了 82.37%、80.18%、84.85%、86.90%、90.95%、83.88%, 其中有 4 个水稻品种糙米中 Cd 含量达到《食品安全国家标准》(GB2762-2012)。[结论] 巯基改性膨润土对种植水稻的重金属污染土壤有着强大的修复能力, 且可不间断农业生产。

关键词 土壤; 镉; 改性膨润土; 钝化; 水稻品种

中图分类号 S158.4 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2015)16-096-04

Study on Thiol-functionalized Bentonite for Reducing Cadmium Uptake by Rice in Contaminated Soils

ZHU Huang-rong, CHEN Ya-gang, LI Yuan-yuan, ZHAO Qiu-xiang* et al (Guangdong Province Research Center for Geoanalysis, Guangzhou, Guangdong 510080)

Abstract [Objective] The research aimed to achieve safe production of rice and the remediation of Cd contaminated soil. [Method] Based on Ca-bentonite, aminoacid-modified bentonite and thiol-functionalized bentonite were obtained in the lab. The adsorption capacities for cadmium were up to 40.35 and 69.13 mg/g in water. In this study, a pot experiment was conducted to investigate the immobilization effects and the mechanism of the functionalized bentonite for reducing cadmium uptake by different rice cultivars in contaminated soils. [Result] The effect of thiol-functionalized bentonite was better than that of aminoacid-modified bentonite on reducing cadmium. After thiol-functionalized bentonite was added to the soil, the acid-extractable and reducible cadmium reduced 8.39% - 16.22% and increased 9.91% - 18.60% respectively, which inhibited the absorption and accumulation of cadmium in rice. The cadmium content of the brown rice was 0.08 - 0.29 mg/g in 6 kinds of rice cultivars, reduced 82.37%, 80.18%, 84.85%, 86.90%, 90.95%, 83.88% compared to the control, and the cadmium content of the brown rice in 4 kinds of rice cultivars were complied with food standard of China. [Conclusion] Thiol-modified bentonite could effectively remediate Cd contaminated soil, and uninterrupted agricultural production.

Key words Soil; Cadmium; Functionalized bentonite; Immobilization; Rice cultivar

近年来,随着中国经济社会的快速发展,对资源的大量消耗和不合理开发利用给土壤生态环境带来严重的影响。据调查,我国受到重金属污染的耕地近 2 000 万 hm^2 , 约占总耕地面积的 1/5, 4 000 多万人长期生活在重金属污灌区内, 约 2.5 亿人受到污染耕地的直接威胁^[1-2]。目前我国重金属污染农田面积大且人口基数大, 粮食生产压力大。为快速解决重金属污染农用的安全利用问题, 重金属污染土壤的修复迫在眉睫。

Cd 在土壤-植物(作物)-食品-人中的迁移是环境 Cd 污染及其人类健康风险研究的重点问题和热点问题之一。不同种类的作物对土壤中 Cd 的吸收及其在可食部分的积累存在较大的差异。水稻被认为是 Cd 吸收最强的大宗谷类作物^[3]。曾有研究表明, 土壤-品种交互作用可以使常规水稻对 Cd 的吸收、积累达到严重安全风险程度^[4], 而杂交稻、超级稻具有更高的 Cd 累积风险^[5]。我国约 60% 以上的人口以稻米为主食, 因此 Cd 在南方稻区土壤-水稻系统中的迁移与我国人群健康有着十分密切的关系。

原位修复中的土壤重金属钝化固定技术是一种十分行之有效且适合我国国情的重金属污染土壤治理方法^[6-9]。一些通过多种材料合成得到的钝化修复剂已得到验证, 在修

复重金属污染土壤中发挥着显著的钝化效果^[10-12]。我国膨润土资源丰富, 价廉易得, 具有较大的比表面积, 且对重金属有良好的吸附性能^[13], 因此在黏土矿物对重金属的吸附研究中关于膨润土的研究最多, 且多数是对其进行改性研究^[14-17]。笔者以天然黏土矿物膨润土为基体, 经特殊改性后制得对 Cd 具有良好吸附性能的改性材料作为钝化剂, 通过盆栽试验种植 Cd 敏感植物水稻, 监测改性材料修复剂作用下不同品种水稻对土壤中 Cd 的吸收和积累, 并且对其钝化效果进行研究, 为 Cd 污染水田土壤的安全农业生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤。取自广东省东莞市某工业区附近菜地表层土(0 ~ 20 cm), 风干, 过 6 mm 筛。土壤基本理化性质为 Cd 全量 0.63 mg/kg, pH 5.86, 有机质 2.80%, 阳离子交换量(CEC) 16.7 cmol/kg, 全氮 0.7%, 全磷 0.21%, 全钾 2.09%。该工作区土壤中 Cd 的单因子污染指数为 1.44, 属于 Cd 中轻度污染。

1.1.2 供试膨润土。取自广东省四会市飞来峰膨润土厂。膨润土为钙基膨润土, 其蒙脱石含量为 90%, pH 为 8.68 (水:土 = 10:1)。

1.1.3 巯基改性膨润土材料。天然钙基蒙脱石经酸活化后, 再加入在水溶性溶剂中高度分散的巯基试剂, 制得性能优良的重金属(Cd)吸附剂。

基金项目 广东省地质实验测试中心科技发展基金项目。

作者简介 朱鳳榕(1985-), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤重金属污染修复。* 通讯作者, 博士研究生, 研究方向: 土壤、水环境污染修复。

收稿日期 2015-04-15

1.1.4 氨基磺酸改性膨润土材料。天然钙基蒙脱石经酸活化后,加入 1.2 倍膨润土阳离子交换量的氨基磺酸,以溶剂分散法制备得到。

1.1.5 供试植物。珠三角地区常种晚稻品种,有博优 998、博优 368、秋优 998、天优 390、金稻优 998、金稻优 368 共 6 个品种,购于广东省农业科学院。

1.2 盆栽试验设计与处理

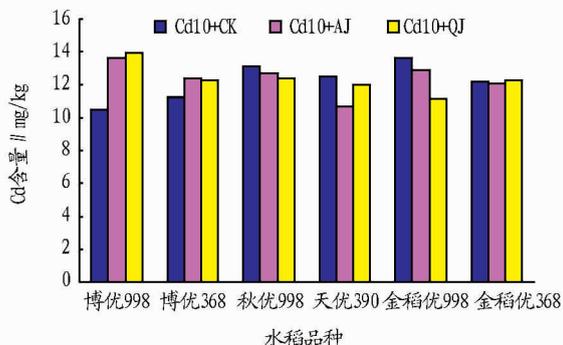
1.2.1 试验方案。每盆装 5 kg 干土,人为添加 Cd 至 10 mg/kg 左右(将 $\text{CdCl}_2 \cdot (2 + 1/2)\text{H}_2\text{O}$ 配成溶液,均匀投加混入土中)。搅拌均匀后,将修复材料分别按 1.0% 的添加量添加至土壤中,同时施底肥(硅肥 10 mg/kg、N 肥 150 mg/kg、 P_2O_5 肥 100 mg/kg 和 K_2O 肥 150 mg/kg),加水至土壤表层 4~6 cm,平衡 7 d,同时设置不施加修复材料的空白对照。每个处理设 3 个平行,共计 72 盆。具体试验处理方案见表 1、表 2。待水稻收获后,测得各个处理下土壤 Cd 的实际含量(图 1)。

表 1 对照试验部分处理方案

编号	处理	处理说明	编号	处理	处理说明
1	C1-1	原土 + 博优 998	7	C2-1	Cd10 + 博优 998
2	C1-2	原土 + 博优 368	8	C2-2	Cd10 + 博优 368
3	C1-3	原土 + 秋优 998	9	C2-3	Cd10 + 秋优 998
4	C1-4	原土 + 天优 390	10	C2-4	Cd10 + 天优 390
5	C1-5	原土 + 金稻优 998	11	C2-5	Cd10 + 金稻优 998
6	C1-6	原土 + 金稻优 368	12	C2-6	Cd10 + 金稻优 368

表 2 添加材料试验部分处理方案

编号	处理	处理说明	编号	处理	处理说明
13	C3-1	Cd10 + 氨基磺酸土 + 博优 998	19	C4-1	Cd10 + 巯基化土 + 博优 998
14	C3-2	Cd10 + 氨基磺酸土 + 博优 368	20	C4-2	Cd10 + 巯基化土 + 博优 368
15	C3-3	Cd10 + 氨基磺酸土 + 秋优 998	21	C4-3	Cd10 + 巯基化土 + 秋优 998
16	C3-4	Cd10 + 氨基磺酸土 + 天优 390	22	C4-4	Cd10 + 巯基化土 + 天优 390
17	C3-5	Cd10 + 氨基磺酸土 + 金稻优 998	23	C4-5	Cd10 + 巯基化土 + 金稻优 998
18	C3-6	Cd10 + 氨基磺酸土 + 金稻优 368	24	C4-6	Cd10 + 巯基化土 + 金稻优 368



注:CK,不添加材料的空白对照;AJ,氨基磺酸改性膨润土;QJ,巯基改性膨润土。

图 1 各个处理土壤中 Cd 实际含量

1.2.2 水稻育苗。采用育苗盘和育苗基质进行育苗,20 d 后移栽。

1.2.3 管理方法。移栽水稻后 3~5 d,秧苗返青,此时立即撤浅水层,保持 1.5~3.0 cm 水层,并且立即施加蘖肥。在水稻倒二叶开始出叶,幼穗长约 1 cm 时施加穗肥。在孕穗到抽穗期间保持 3 cm 左右水层。在水稻抽穗后施加粒肥,并且采取“干干湿湿,以湿为主”的水管理方法。

1.3 测定方法

1.3.1 改性膨润土材料吸附试验。称取改性膨润土材料 0.25 g, Cd^{2+} 初始浓度依次为 20、50、100、200、400、600、800、1 000、1 100、1 200、1 300、1 400 mg/L,固液比为 1:200,调节体系 pH 为 6.0,25 °C 恒温 200 r/min 振荡 2 h。在振荡结束后,离心 5 min,测定上清液 Cd^{2+} 浓度。考虑离子强度,用 1 mol/L KNO_3 调节体系离子强度至硝酸钾浓度为 0.1 mol/L。

1.3.2 土壤总 Cd 的测定。称取一定量的土壤以盐酸、硝酸、高氯酸和氢氟酸高温处理样品,直至样品冒烟,以冒净为止,用浓度 5% 硝酸溶液溶解残渣,放置一定时间,上清液中 Cd 含量用 ICP-MS 测定。

1.3.3 土壤中 Cd 的形态分析。对于收获水稻后的土壤中 Cd 各个形态的含量,采用欧盟 BCR 顺序提取法(四步法)进行测定。Cd 水溶态、离子结合态含量分别用蒸馏水与氯化镁溶液进行提取。

1.3.4 稻米 Cd 含量的测定。在稻谷脱壳后将稻米粉碎,然后用微波消解进行前处理,最后用 ICP-MS 测定 Cd 含量。

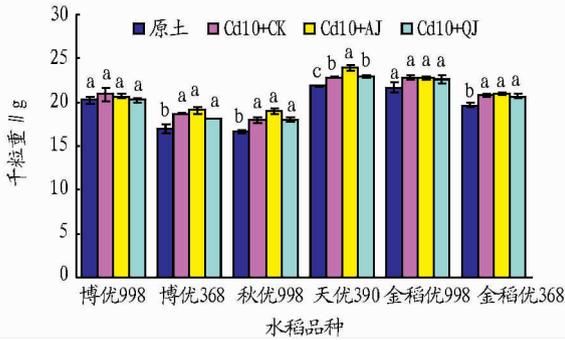
1.4 数据处理 数据用 Excel2003 整理和作图。用 SAS9.0 软件对数据进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 改性膨润土材料对 Cd 的饱和吸附容量 通过系统的试验,发现氨基磺酸改性材料对 Cd^{2+} 的吸附容量为 40.35 mg/g。巯基改性膨润土材料对 Cd^{2+} 的饱和吸附容量为 39.82 mg/kg(0.1 mol/L KNO_3 体系)和 69.3 mg/g(不考虑离子强度)。

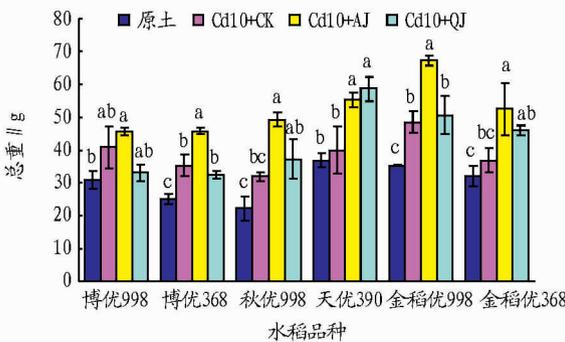
2.2 水稻稻谷千粒重及产量情况 通过分析收获的稻谷千粒重、总重,可知土壤 Cd 污染及添加改性修复材料对稻谷产量的影响较大。从图 2、3 可以看出,在添加 Cd 污染后,与原土相比,稻谷的千粒重、总重均明显增加,且大部分品种稻谷千粒重及总重能明显增加。同时,在添加 Cd 至 10 mg/kg 污染土壤中,添加改性修复材料与否对稻谷的千粒重的影响并不明显;但是,添加氨基磺酸改性膨润土后稻谷总重与对照相比均显著增加,而添加巯基改性膨润土后稻谷总重与对照相比除天优 390 以外其他品种并没有显著增加。

2.3 水稻糙米中 Cd 含量 研究表明,采回的原土中 Cd 含量超出国家土壤环境质量标准值 0.3 mg/kg(GB 15618-1995)的 6 倍,然而种植出的 6 个品种水稻糙米 Cd 含量在 0.016~0.047 mg/kg,全都远低于《食品安全国家标准》(GB2762-2012)中对糙米的限量值(0.2 mg/kg)。由图 4 可知,添加 Cd 至 10 mg/kg 污染土壤中,不添加改性修复材料的空白对照土壤上 6 个品种水稻糙米 Cd 含量为 0.60~2.55



注:CK.不添加材料的空白对照;AJ.氨基磺酸改性膨润土;QJ. 硫基改性膨润土。不同小写字母表示差异在0.05水平显著。

图2 土壤Cd污染及添加改性材料对稻谷干粒重的影响



注:CK.不添加材料的空白对照;AJ.氨基磺酸改性膨润土;QJ. 硫基改性膨润土。不同小写字母表示差异在0.05水平显著。

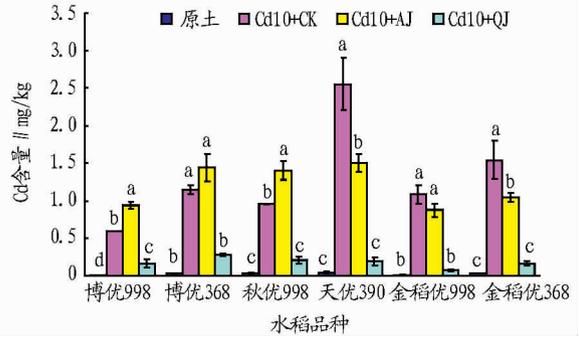
图3 土壤Cd污染及添加改性材料对稻谷总重的影响

mg/kg,全都超出《食品安全国家标准》中对糙米的限量值,其中糙米Cd含量最高的水稻品种天优390超标12.75倍,最低的博优998超标3倍。

在Cd10 mg/kg左右的污染土中添加氨基磺酸改性膨润土后,6个品种水稻糙米Cd含量为0.88~1.51 mg/kg,只有天优390、金稻优368品种糙米中Cd含量与对照相比在0.05水平显著降低,金稻优998品种糙米中Cd含量与对照相比有所降低但不显著;但是,博优998、秋优998品种糙米中Cd含量与对照相比在0.05水平显著升高,博优368品种糙米中Cd含量与对照相比也有所升高但不显著。而水稻品种天优390、金稻优368糙米中Cd含量与对照相比在0.05水平显著降低,金稻优998也有所降低但不显著。这说明氨基磺酸改性膨润土只是对某些水稻品种起一定的阻隔Cd进入水稻的作用。

在Cd10 mg/kg左右的污染土中添加硫基改性膨润土后,6个品种水稻糙米Cd含量为0.08~0.29 mg/kg。试验博优998、博优368、秋优998、天优390、金稻优998、金稻优368糙米中Cd含量与对照相比均在0.05水平显著降低,降低率分别达到82.37%、80.8%、84.85%、86.90%、90.95%、83.88%。除了博优368、秋优998以外的4个水稻品种糙米中Cd含量都远低于《食品安全国家标准》(GB2762-2012)中对糙米的限量值(0.2 mg/kg);同时,除了博优998以外的5个水稻品种糙米中Cd含量都与原土中种植无差异性。该

结果表明,硫基改性膨润土修复材料对水稻吸收污染土壤中的Cd有相当明显的阻隔能力。



注:CK.不添加材料的空白对照;AJ.氨基磺酸改性膨润土;QJ. 硫基改性膨润土。不同小写字母表示差异在0.05水平显著。

图4 土壤Cd污染及添加改性材料对糙米Cd含量的影响

2.4 水稻土壤中Cd各形态含量 为了进一步探讨改性修复材料对重金属污染土壤中Cd的作用,对收获水稻后的土壤进行Cd各形态含量进行测定。

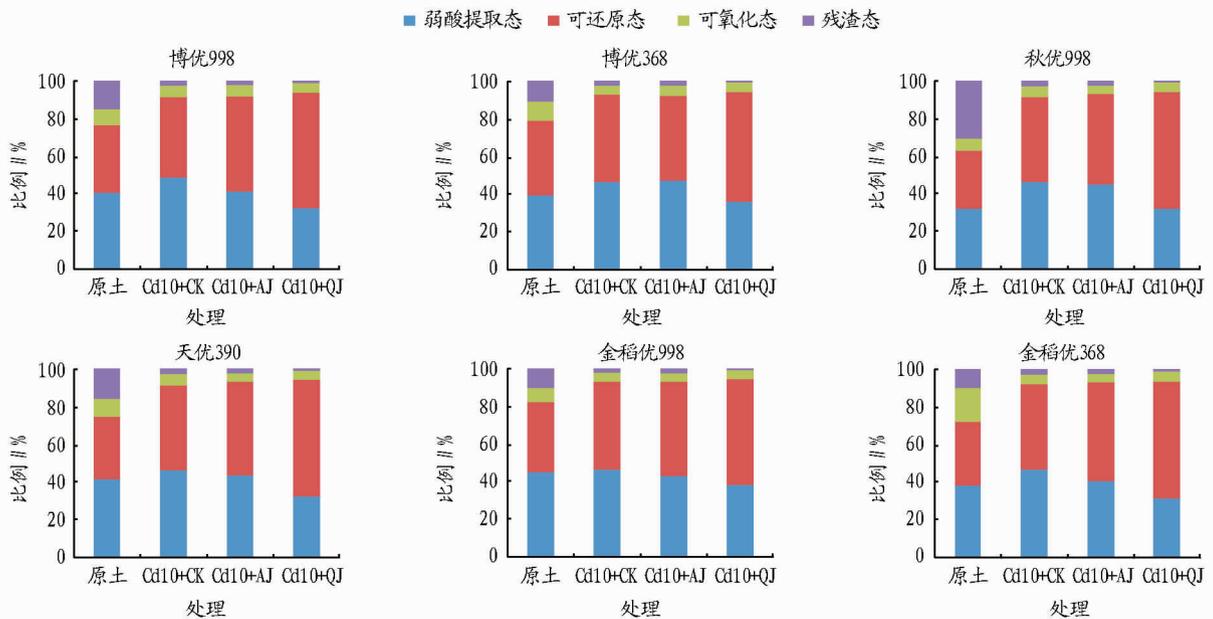
由图5可知,原土中Cd的弱酸提取态含量占31.98%~44.24%,残渣态含量占10.08%~30.74%;同时,原土中Cd的水溶态含量为0.001~0.002 mg/kg,离子结合态含量为0.8~0.9 mg/kg。这说明原土中Cd并不活跃,因此虽然超标2倍,所种植出的糙米仍然符合标准。而在土壤中添加Cd至10 mg/kg污染水平后,Cd的弱酸提取态含量占45.96%~48.48%,可还原态含量占42.71%~46.53%;Cd的水溶态含量为0.024~0.045 mg/kg,离子结合态含量为3.09~6.44 mg/kg。因此,Cd活性态含量相当高,直接造成水稻糙米中Cd含量的严重超标。

在Cd10 mg/kg左右的污染土中博优998、博优368、秋优998品种对应的不添加修复材料的空白对照土壤中Cd的弱酸提取态含量分别为4.02、4.17、4.71 mg/kg;在添加氨基磺酸改性膨润土后,相对应的土壤中Cd的弱酸提取态含量分别为4.2、4.21、4.73 mg/kg,与对照相比均有所升高,因此即使弱酸提取态含量占比有所降低,但同样造成这3个品种的糙米Cd含量出现比对照要高的情况。另外,天优390、金稻优998、金稻优368品种对应的土壤中Cd的弱酸提取态含量分别比不添加修复材料的空白对照降低了2.60%、3.67%、5.72%,进一步说明氨基磺酸改性膨润土对这3种水稻吸收Cd有一定的阻隔作用。由图6~7可知,秋优998品种对应的土壤中Cd水溶态与离子结合态含量与对照相比均有0.05水平显著降低,金稻优368品种对应的土壤中Cd水溶态与离子结合态含量与对照相比均有0.05水平显著升高。这其中的原因还有待进一步的研究。其他的品种均与土壤中Cd的弱酸提取态含量及糙米中Cd含量表现出一致的相关性。

在Cd10 mg/kg左右的污染土中添加硫基改性膨润土后,6个品种水稻对应的土壤中Cd的弱酸提取态含量分别比不添加修复材料的空白对照降低了16.22%、10.62%、14.50%、13.76%、8.39%、15.04%,同时可还原态含量分别

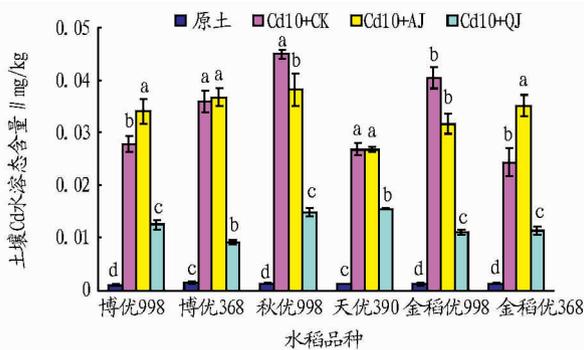
比空白对照增加了 18.60%、12.23%、17.21%、16.69%、9.91%、16.7%，说明巯基改性膨润土与土壤中的 Cd 结合形成类似于可还原态的专性结合态。由图 6、7 可知，6 个品种水稻对应的土壤中 Cd 水溶态与离子结合态含量与对照相比均在 0.05 水平显著降低。这与巯基改性膨润土对 Cd²⁺ 有专性吸附有关，巯基基团中的硫可与 Cd²⁺ 以共价键的形式形

成稳定的配合结构^[18-19]，从而钝化土壤中的活性态 Cd，有效阻隔 Cd 进入水稻，因此水稻糙米中 Cd 含量大幅度降低。这进一步说明巯基改性膨润土对种植水稻的重金属污染土壤有着强大的修复能力，而且能在 Cd 污染土壤修复的同时为实现水稻的安全生产打下基础。



注:CK. 不添加材料的空白对照;AJ. 氨基磺酸改性膨润土;QJ. 巯基改性膨润土。

图 5 改性修复材料对土壤中 Cd 存在形态的影响

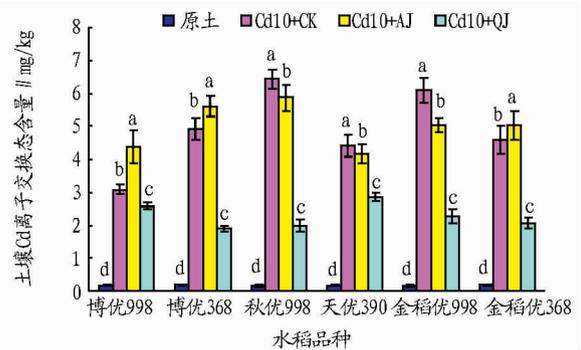


注:CK. 不添加材料的空白对照;AJ. 氨基磺酸改性膨润土;QJ. 巯基改性膨润土。不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著。

图 6 不同材料处理后污染土壤 Cd 水溶态含量

3 结论

研究表明，与原土相比，在添加 Cd 至 10 mg/kg 左右后，稻谷产量显著增加，而在添加改性修复材料后与对照相比基本能显著增加稻谷产量。在轻度度污染的土壤中，只要选择 Cd 富集能力低的水稻品种，种植出的水稻糙米 Cd 含量就可以达到国家食品卫生标准。在添加 Cd 至 10 mg/kg 左右后，水稻糙米 Cd 含量超标严重；而添加氨基磺酸改性膨润土后 6 个品种水稻糙米 Cd 含量仍然严重超标，且只是对部分水稻品种起一定的阻隔 Cd 进入水稻的作用。在添加 Cd 至 10 mg/kg 左右的土壤中添加巯基改性膨润土后，土壤中 Cd 的弱酸提取态含量与空白对照相比降低 8.39% ~ 16.22%。同时，土壤中 Cd 水溶态



注:CK. 不添加材料的空白对照;AJ. 氨基磺酸改性膨润土;QJ. 巯基改性膨润土。不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著。

图 7 不同材料处理后污染 Cd 离子结合态含量

与离子结合态含量与对照相比均在 0.05 水平显著降低。种植出的水稻糙米 Cd 含量的降低率达 80.80% ~ 90.95%，其中，除了博优 368、秋优 998 以外的 4 个水稻品种糙米中 Cd 含量都远低于《食品安全国家标准》(GB2762-2012)中对糙米的限量值 (0.2 mg/kg)。该试验证明巯基改性膨润土对种植水稻的重金属污染土壤有着强大的修复能力，而且能在 Cd 污染土壤修复的同时实现水稻的安全生产。这为今后进一步进行田间试验打下基础。

参考文献

[1] 施婉君,靳治国,周培.上海市土壤重金属污染研究进展[J].上海环境科学,2009,28(2):72-75.

(下转第 123 页)

学产量所需的施氮量,再增施氮肥,其余经济学指标明显恶化,最终造成单位面积的产值下降。所以,抚州烟区种植 K326 品种的适宜施氮量应控制在 135 kg/hm² 范围以内,此时烤烟的生物学产量适宜,经济学性状最佳,品质较好,能够很好地达到优质、适产的目的。

3.2 施氮量对烤烟生长发育的影响 研究表明,施氮量明显影响烤烟的生育进程和叶片的生长发育进程。随着施氮量的增加,施入土壤的氮素能够促进烟苗早生快发,缩短烟株进入团棵期的时间,但减缓烟株的生育进程,明显延长进入现蕾期、成熟采收期的时间,降低烟株的着生叶片数及有效叶片数,明显增加叶长和叶宽。这与刘国顺等^[5]研究结果一致,即在一定范围内,施氮能够促进烟株生长和叶片发育,有效延长烟株的大田生育期,促进叶片的发育开片,增加叶面积,为提高烟叶产量与品质奠定基础。

3.3 施氮量对烤烟质量的影响 在一般情况下,烟株生长发育所需要的氮素主要来源于所施用的肥料氮,施氮量越多,土壤中可利用的氮越多,烟株吸收氮越多,植株体内氮代谢旺盛,合成的烟碱明显增多,导致烤烟积累的糖类物质不断被消耗^[1,6-9]。在该试验条件下,不同部位叶片内还原性糖、总糖及 K₂O 的平均含量随施氮量的增加而降低,Cl 平均吸收量呈小幅下降的趋势,总植物碱、总氮的平均含量明显增加;不同处理同一部位叶片还原性糖、总糖及 K₂O 含量随施氮量的增加而降低,总植物碱、总氮含量增加。这与郑仙霞等^[6]研究结果一致。在适宜的施氮量条件下,烟株能够吸

收适宜的氮素,积累的糖类物质和合成的烟碱适宜,内在化学成分协调,反之,施氮量过低或过高均会造成烤烟内在化学成分不协调,影响烤烟的品质。随着施氮量的增加,各部位烟叶成熟度下降,颜色加深,橘黄烟叶的比例增加,叶片结构趋于致密,身份变厚,油分先增后减,色度先变浓后渐清淡,综合质量呈现先增加后下降的趋势,烟叶香型由中间香型向浓香型转变,劲头、烟气浓度增加。这与秋标仁等^[10]研究结果一致,即适宜的施氮量能够促进烤烟外观质量的形成,有利于 K326 品种彰显浓香型的风格特色。

参考文献

- [1] 韩锦峰,汪耀富,钱晓刚. 烟草栽培生理[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
 - [2] COURT W A. Effect of time of post-transplant nitrogen application on agronomic indices and certain chemical characteristics of flue-cured tobacco[J]. *Tob Sci*,1996(3):117-121.
 - [3] 李友鹏(译). 烟草肥料学[M]. 河南烟草研究所,1981.
 - [4] 韩锦峰,郭培国. 氮素用量、形态、种类对烤烟生长发育及产量品质影响的研究[J]. 河南农业大学学报,1990,28(3):275-285.
 - [5] 刘国顺,高致明,符云鹏,等. 氮用量对烤烟烟叶发育和结构影响的研究[J]. 河南农业大学学报,1994(S1):71-75.
 - [6] 郑仙霞,朴世领,刘丹,等. 不同氮用量对烤烟产量及内在品质的影响[J]. 吉林农业大学学报,2008,30(5):663-668.
 - [7] 谢会雅,朱列书,赵松义,等. 不同施氮量对烤烟干物质积累的影响[J]. 作物研究,2007(1):22-24.
 - [8] 崔保伟,陆引罡,张振中,等. 不同施氮量对烤烟生理特性生及化学品质的影响[J]. 山地农业生物学报,2008,27(5):377-381.
 - [9] 靳亚忠,焦玉生,王宁,等. 氮肥用量对暗棕壤烤烟氮素积累及分配的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2014(4):1-4.
 - [10] 秋标仁,周冀衡,郑开强,等. 施氮量对烤烟产质量和烟碱含量的影响[J]. 烟草科技,2003(11):41-43.
- (上接第 99 页)
- [2] 万凯,王富华,张冲,等. 东莞农田土壤重金属污染调查分析[J]. 广东农业科学,2010(6):198-200.
 - [3] CHANEY R L,REEVES P G,RYAN J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biomaterials*,2004,17:549-553.
 - [4] LI Z W,LI L Q,PAN G X. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects[J]. *Plant and Soil*,2005,271:165-173.
 - [5] 龚伟群,李恋卿,潘根兴. 杂交水稻对 Cd 的吸收与籽粒积累:土壤和品种的交互影响[J]. 环境科学,2006,27(8):1647-1653.
 - [6] BOLLAND M D A,POSNER A M,QUIRK J P. Zn adsorption by goethite in the absence and presence of phosphate[J]. *Australian Journal of Soil Research*,1977,15:279-286.
 - [7] DIELS L,VANDER LELIE N,BASTIAENS L. New developments in treatment of heavy metal contaminated soil[J]. *Review of Environmental Science and Bio/Technology*,2002,1:75-82.
 - [8] 郭观林,周启星,李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1990-1996.
 - [9] GUO G L,ZHOU Q X,MA L Q. Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soil:A review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,2006,116:513-528.
 - [10] MADRID F,ROMERO A S,MADRID L, et al. Reduction of availability of trace metals in urban soils using inorganic amendments[J]. *Environmental Geochemistry and Health*,2006,28:365-373.
 - [11] MADRID F,DIAZ-BARRIENTOS E,FLORIDO M C. Inorganic amendments to decrease metal availability in soils of recreational urban areas: Limitations to their efficiency and possible drawbacks[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*,2008,192:117-125.
 - [12] ZHANG Y S,SUN W,CHEN Q L, et al. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2007,143:206-213.
 - [13] YUAN P,FAN M D,YANG D, et al. Montmorillonite-supported magnetite nanoparticles for the removal of hexavalent chromium[Cr(VI)] from aqueous solutions[J]. *J Hazard Mater*,2009,166:821-829.
 - [14] 杨秀红,胡振琪,高爱林,等. 钠改性膨润土对 Cd²⁺ 的吸附研究[J]. 环境化学,2004,23(5):506-509.
 - [15] 彭荣华,李晓湘. 酸改性膨润土吸附去除镍镉的研究[J]. 材料保护,2006(1):65-67.
 - [16] 夏畅斌,何湘柱. 膨润土对 Zn(II)和 Cd(II) 离子的吸附作用研究[J]. 矿产综合利用,2000(4):38-40.
 - [17] 苏日娜,鲁安怀,刘泽容,等. 蒙脱石中性化改性实验研究[J]. 岩石矿物学杂志,2007,26(6):505-510.
 - [18] LAGADIC I L,MITCHELL M K,PAYNE B D. Highly effective adsorption of heavy metal ions by a thiol-functionalized magnesium phyllosilicate clay[J]. *Environmental Science and Technology*,2001,35:984-990.
 - [19] 郭飞波,张国平. 植物螯合肽及其在重金属耐性中的作用[J]. 应用生态学报,2003,14(4):632-636.