

组配改良剂对重金属污染土壤理化性质及有效养分的影响

邱琼瑶, 周航, 曾卉, 王英杰, 廖柏寒*

(中南林业科技大学环境科学与工程研究所, 长沙 410004)

摘要:采用水稻盆栽实验,对施用组配改良剂(石灰石+海泡石)前后盆栽土壤的酸碱性、有机质含量和营养元素有效态含量,盆栽水稻糙米 Pb、Cd 含量进行分析和评价。结果显示:施用组配改良剂能够降低水稻糙米 Pb、Cd 含量,显著提高土壤 pH 值(从 5.57 到 7.34)和土壤 CEC(添加量达到 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,比对照提高 217%);但是施用组配改良剂对土壤有机质含量影响未达显著水平,其变化率在-2%到 7%之间。另一方面,施用组配改良剂对土壤中营养元素(Ca、Mg)有效态含量有提高作用,最多比对照分别提高 293%和 22%;组配改良剂添加量与土壤中碱解 N、有效 P、速效 K 含量无显著相关性;施用组配改良剂会降低微量营养元素 Fe 有效态的含量,但添加量与有效态含量并无显著相关性。因此,本研究表明,施用这种组配改良剂到重金属污染土壤,能够有效改善土壤环境,提高保肥能力,降低糙米 Pb 和 Cd 的含量。

关键词:组配改良剂;土壤;有效养分;重金属;土壤理化性质

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)05-0907-06 **doi:**10.11654/jaes.2014.05.012

Effects of Combined Amendments on Physicochemical Properties and Available Nutrients of Soil Contaminated with Heavy Metals

QIU Qiong-yao, ZHOU Hang, ZENG Hui, WANG Ying-jie, LIAO Bo-han*

(Institute of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Chemical fixation is one of remediation techniques for heavy metal contaminated soils. This study was designed to examine and evaluate the effects of combined amendments (calcium carbonate + sepiolite) on soil pH, organic matter content, available micronutrients in soil, and contents of Pb and Cd in brown rice. Compared to the control, application of combined amendments decreased contents of Pb and Cd in brown rice, and elevated soil pH (from 5.57 to 7.34) and CEC by 217% at $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ of combined amendments. No significant changes were observed in soil organic matter (range from -2% to 7%). Soil exchangeable Ca and Mg were enhanced by 293% and 22%, respectively, after application of combined amendments. Soil available N, P and K did not show significant correlation with amounts of combined amendments. Soil available Fe reduced in the amendment treatments, but had no relation with application rates. These results indicate that application of combined amendments (calcium carbonate + sepiolite) could increase soil pH, improve soil nutrient holding capacity, and decrease heavy metals in brown rice.

Keywords: combined amendments; soil; available nutrient; heavy metal; soil physicochemical properties

土壤重金属污染已成为普遍的环境问题,受到广泛关注。原位化学固定修复工艺方法能很好地满足治

理土壤中重金属污染的要求^[1]。在农业生产上,很早就开始在农田中施加石灰、有机质、磷酸盐等,这些改良剂可以有效降低有害元素的植物毒性,从而增加粮食产量和提高食品安全性^[2]。目前,常用于修复土壤重金属污染的黏土矿物有蒙脱石、凹凸棒石、沸石、高岭石、海泡石、蛭石和伊利石等^[3-4],这些黏土矿物作为改良剂对重金属污染土壤修复有很好的效果。国内外研究表明,石灰对 Cd 污染土壤的钝化修复效果很明显^[5-6],海

收稿日期:2013-09-12

基金项目:国家环保部公益性项目(201009047);湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介:邱琼瑶(1988—),女,湖南人,硕士研究生,主要从事土壤污染与防治研究。E-mail: qiuqiongyao1988@sina.com

* 通信作者:廖柏寒 E-mail: liaobh1020@163.com

泡石比表面积大,孔隙率高,具有较高的吸附容量和离子交换能力,能钝化土壤中的重金属^[7]。这些改良材料控制土壤中重金属的机理主要有吸附作用、络合作用以及共沉淀作用等,它们通过改变土壤理化性质,降低土壤中交换态重金属的含量。土壤理化性质的改变必定会对土壤中的其他元素造成一定的影响。孟赐福等^[8]研究了施用石灰石粉后红壤化学性质的变化,发现施用石灰能降低土壤酸度,增加土壤中交换性Ca、Mg含量。孙约兵等^[9]研究了海泡石对Cd污染红壤的钝化修复效应,在Cd污染土壤中,投加海泡石能够显著提高土壤pH值。本课题组前期研究结果表明,在重金属污染土壤中施用组配改良剂能显著降低土壤中重金属含量^[10],但组配改良剂在有效控制重金属迁移能力的同时,对土壤中有效养分的影响暂未进行过相关研究。因此,本研究通过分别施用不同浓度的组配改良剂对土壤pH值、有机质含量(OM)、阳离子交换量(CEC)以及土壤中有效态营养元素含量的影响,以期为重金属污染农田合理使用原位固定修复技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻田土壤来源于湘南某冶炼厂周围700~1000 m范围内的农田耕作层土(0~30 cm)。土壤基本理化性质如下:土壤类型为红壤,pH值5.58,有机质含量 $14.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,CEC值 $2.25 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$,交换性Ca、Mg含量分别为 72.6 、 $46.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解N、有效P、速效K含量分别为 743.52 、 12.64 、 $9.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态Fe、Mn、Cu、Zn含量分别为 837.43 、 22.12 、 30.69 、 $9.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Pb、Cd总量分别为 965.84 、 $9.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤理化性质分析方法同样品分析方法)。

供试改良剂:石灰石(CaCO_3),由天津市大茂化学试剂厂提供;海泡石 $\{\text{Mg}_8(\text{H}_2\text{O})[\text{Si}_6\text{O}_{15}]_2(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}\}$,由湖南省宁乡县道林镇尚杰矿石粉厂提供。

供试水稻品种为隆平种业有限公司的杂交水稻(Ⅱ优93)。

1.2 实验方法

盆栽实验在室外进行,该地为中亚热带季风湿润气候,年均气温在 $16.6 \sim 19.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,年平均降水量在 $1223 \sim 1421 \text{ mm}$ 之间。将供试土壤自然风干后去除石块、植物残渣,捶碎。装入一系列塑料盆(直径18 cm,高25 cm)中,每盆4.5 kg,施入底肥磷酸铵、磷酸钾和尿素,施用量为 $\text{P } 0.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (P_2O_5)、 $\text{N } 0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (N),

$\text{K } 0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (K_2O)。添加石灰石和海泡石,质量比2:1。设6个添加水平:0、1、2、4、8、 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别添加在盆栽土壤中,混匀,均设置3次重复。2012年5月,在每个盆中移入1株水稻秧苗,所选秧苗形态相近且均长势良好。整个实验过程盆内保持高出土壤2 cm的水层。9月水稻成熟,按盆采集土壤和水稻样品,采用常规方法测定土壤pH值,有机质含量,CEC,交换性Ca、Mg,碱解N,有效P,速效K含量,有效Fe、Mn、Cu、Zn含量,糙米Pb、Cd含量。

1.3 分析方法

土壤pH值用酸度计(pHs-3C,上海精密科学仪器)测定,固液比为1:2.5;有机质含量采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定;CEC用乙酸铵离心交换法测定;土壤交换性Ca、Mg用乙酸铵交换法分析,原子吸收分光光度计(日立Z-2000)测定;碱解N用碱解扩散法测定;有效P用碳酸氢钠-钼锑抗比色法分析,紫外可见分光光度计测定(岛津,UV-1700型);速效K用乙酸铵提取,原子吸收分光光度计(日立Z-2000)测定;有效Fe、Mn、Cu、Zn含量用盐酸浸提,原子吸收分光光度计(日立Z-2000)测定^[11]。水稻糙米Pb、Cd含量采用干灰化法消解,原子吸收分光光度计(日立Z-2000)测定^[19-20]。

实验数据用Excel和SPSS18.0进行分析。

2 结果与分析

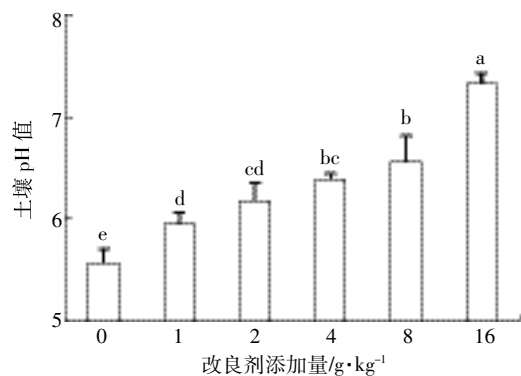
2.1 组配改良剂对土壤基本性质的影响

2.1.1 对土壤pH值的影响

图1为添加组配改良剂对盆栽土壤pH值的影响,可以看出施用组配改良剂能提高土壤pH值。关于这两种改良剂成分的研究也表明,它们均能不同程度地提高土壤pH值^[12-15]。图中显示,随着组配改良剂施用量的增加,土壤pH值逐渐升高,组配改良剂施用量从 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (对照)增加到 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤pH值从5.57升高到7.34。线性相关分析结果显示,改良剂添加量与土壤pH值呈极显著正相关($R^2=0.891$; $n=6$, $R_{0.01}^2=0.841$, $R_{0.05}^2=0.657$)。多重比较显示,组配改良剂各添加浓度下存在显著的差异性($P<0.05$)。

2.1.2 对土壤有机质含量的影响

土壤有机质是土壤肥力的重要指标之一,图2为组配改良剂对盆栽土壤有机质的影响。与对照($0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比,施用不同添加量的组配改良剂对土壤中有机质含量影响不大,其变化率在-2%到7%之间,没有明显变化规律。同时多重比较分析显示,组配改良剂



图中每组数据中无相同字母者表示在 0.05 水平上差异显著。以下同
Bars with different letters indicate significant difference at $P < 0.05$. The same below

图 1 组配改良剂对土壤 pH 值的影响

Figure 1 Effects of combined amendments on soil pH values

各添加水平之间,有机质含量均无显著性差异($P > 0.05$)。这说明,添加一定量的组配改良剂基本不会对土壤有机质含量造成影响。

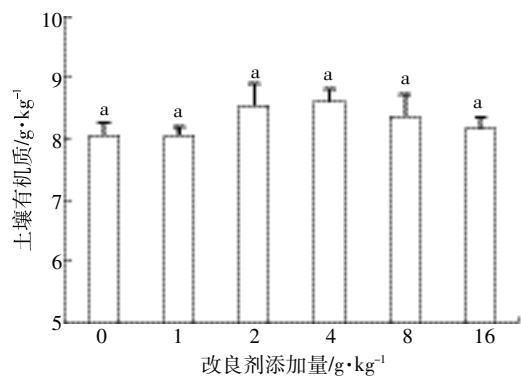


图 2 组配改良剂对土壤有机质含量的影响

Figure 2 Effects of combined amendments on soil organic matter contents

2.2 组配改良剂对土壤交换性能的影响

2.2.1 对土壤 CEC 的影响

土壤 CEC 的大小,基本上代表了土壤可能保持的养分含量,是评价土壤保肥能力的重要依据。图 3 为组配改良剂施用对土壤 CEC 的影响。可以看出,添加组配改良剂能提高土壤 CEC,当添加量从 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,添加组配改良剂使土壤 CEC 提高 35%~217%。线性相关分析表明,组配改良剂的添加量和土壤 CEC 呈极显著正相关, ($R^2=0.925; n=6, R_{0.01}^2=0.841, R_{0.05}^2=0.657$)。因此,添加组配改良剂使土壤 CEC 明显提高,从而提高土壤保肥能力。

2.2.2 对土壤交换性 Ca、Mg 含量的影响

从图 4 可以看出,添加组配改良剂能提高土壤交

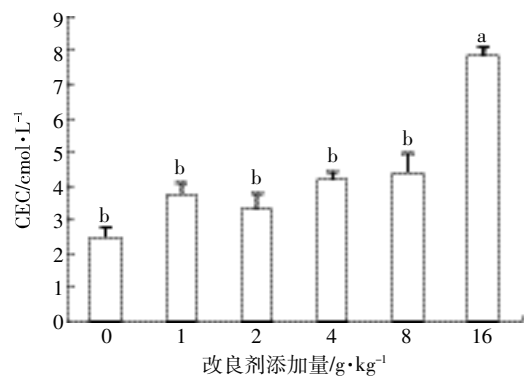


图 3 组配改良剂对土壤 CEC 的影响

Figure 3 Effects of combined amendments on soil cation exchange capacity (CEC)

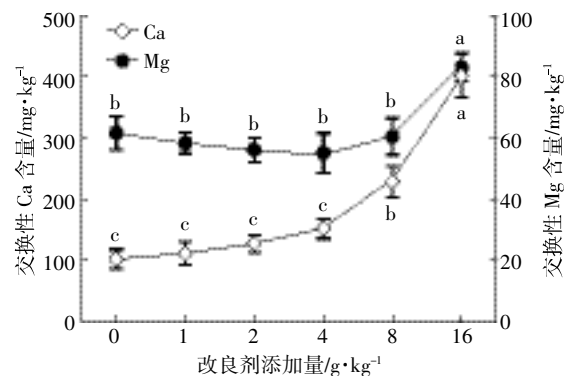


图 4 组配改良剂对土壤交换性 Ca、Mg 含量的影响

Figure 4 Effects of combined amendments on contents of soil exchangeable Ca and Mg

换性 Ca、Mg 的含量。对于盆栽土壤,添加组配改良剂对土壤交换性 Ca、Mg 含量的影响较为明显,总体上均呈上升趋势。添加量从 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,添加组配改良剂使土壤交换性 Ca 含量从 $102.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $403.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换性 Mg 含量从 $62.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $83.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。线性相关分析表明,组配改良剂添加量与土壤交换性 Ca、Mg 的含量分别呈极显著正相关和显著正相关 ($R_{Ca}^2=0.939, R_{Mg}^2=0.623; n=6, R_{0.01}^2=0.841, R_{0.05}^2=0.657$)。多重比较显示,组配改良剂各添加浓度下存在显著的差异性 ($P < 0.05$)。

2.3 组配改良剂对土壤有效养分的影响

2.3.1 对土壤碱解 N、有效 P、速效 K 含量的影响

由图 5 可知,对于盆栽土壤,碱解 N 含量与组配改良剂施用量之间无明显变化规律,而土壤有效 P 和速效 K 含量随着组配改良剂施用量的增加,大体呈上升趋势。对照土壤有效 P、速效 K 含量分别为 $5.04, 67.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。添加量为 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,组配改良

剂使土壤有效 P、速效 K 含量分别上升到 7.67、86.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但是,线性相关分析表明,组配改良剂添加量与碱解 N、有效 P、速效 K 含量不存在显著相关性。张杨珠等^[16]的研究显示,海泡石中缓效 K 相当高,远高于土壤的缓效 K 含量,可以作为钾肥资源直接使用。

2.3.2 两组组配改良剂对土壤有效 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的影响

与大量营养元素 N、P、K 等相比,微量营养元素 Fe、Mn、Cu、Zn 等在植物体内含量虽少,但它们具有与大量元素同等的重要性,是不可替代的^[17],有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 的含量分别代表了土壤中这些营养元素对作物的有效性^[18]。分析表明,组配改良剂添加量与有效 Fe、Mn、Cu、Zn 含量均不存在显著线性相关关系。但是,组配改良剂添加量对盆栽土壤中有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量均有不同程度的影响(表 1)。与对照(添加量 $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,随着组配改良剂施用量的增加,土壤有效 Fe 含量降低 8%~14%;有效 Mn、Cu、Zn 含量无明显变化规律。

2.4 组配改良剂对糙米 Pb 和 Cd 含量的影响

由图 6 可以看出,随着组配改良剂施用量的增

加,糙米中 Pb、Cd 含量呈下降趋势。对照组糙米中 Pb、Cd 含量分别为 $5.21、2.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,固化剂施用量为 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,Pb 含量降至最低 $4.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与对照相比下降 13.1%;当改良剂施用量为 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,Cd 含量降为最低的 $0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下降幅度为 79.3%。可见,组配改良剂对降低水稻糙米中重金属 Cd 的效果较好,改良剂施用量越大,降低越明显,但对水稻糙米中重金属 Pb 的降低效果一般。

3 讨论

石灰石+海泡石组配改良剂明显地提高了土壤 pH 值,这是因为石灰石的碱性强。 CaCO_3 能促进 Al^{3+} 的水解,中和水解过程产生的 H^+ ,从而有效中和土壤活性酸度和潜在酸度,提高土壤 pH 值^[13]。土壤 pH 值升高有利于土壤盐基离子的保持,使土壤 CEC 升高,保肥能力上升。同时,土壤 pH 值升高也是石灰石和海泡石钝化土壤中 Cd 的一个重要原因,从而降低了糙米对 Pb、Cd 的吸收,但是在几个施用量下,即使糙米 Pb、Cd 含量降为最低(分别为 $4.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时,仍没有达到食品中污染物限量标准(GB 2762—2012)中糙米 $\text{Pb}\leq 0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Cd}\leq 0.2$

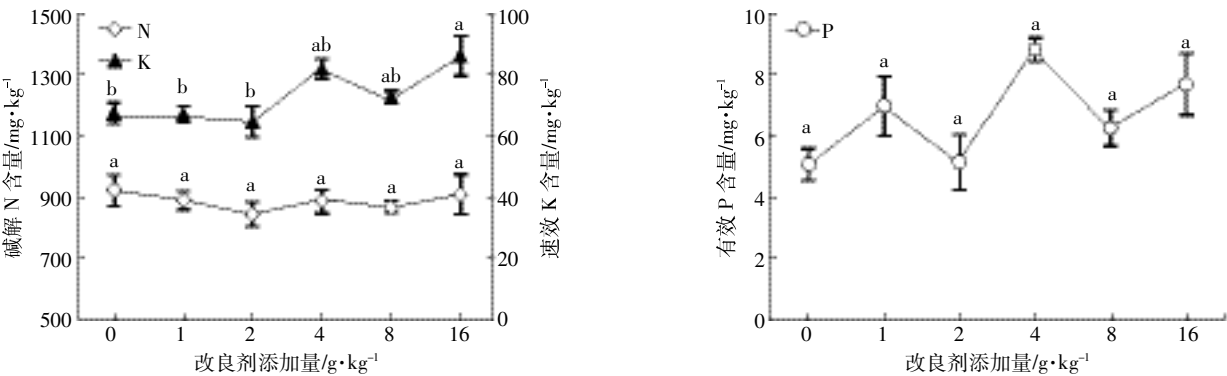


图 5 组配改良剂对土壤碱解 N、有效 P、速效 K 含量的影响

Figure 5 Effects of combined amendments on contents of soil available N, P and K

表 1 组配改良剂对土壤有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Effects of combined amendments on contents of available Fe, Mn, Cu, and Zn in soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

添加量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Fe	Mn	Cu	Zn
0	$1\ 329.25\pm 85.63\text{a}$	$19.57\pm 2.35\text{ab}$	$36.1\pm 2.35\text{ab}$	$12.59\pm 0.34\text{a}$
1	$1\ 046.71\pm 42.78\text{c}$	$19.22\pm 1.8\text{ab}$	$34.56\pm 1.8\text{ab}$	$13.05\pm 0.98\text{a}$
2	$1\ 219.32\pm 78.61\text{ab}$	$19.75\pm 1.89\text{ab}$	$37.45\pm 1.89\text{ab}$	$12.55\pm 0.67\text{a}$
4	$1\ 138.88\pm 10.8\text{bc}$	$16.7\pm 2.6\text{b}$	$37.87\pm 2.6\text{ab}$	$12.51\pm 0\text{a}$
8	$1\ 141.58\pm 3.82\text{bc}$	$24.15\pm 0.92\text{a}$	$39.29\pm 0.92\text{a}$	$12.72\pm 0.11\text{a}$
16	$1\ 139.9\pm 28.5\text{bc}$	$22.37\pm 0.43\text{ab}$	$35.62\pm 0.43\text{ab}$	$12.85\pm 0.03\text{a}$

注:表中数据为平均值±标准差($n=3$),每列数据中无相同字母者表示在 0.05 水平上差异显著。

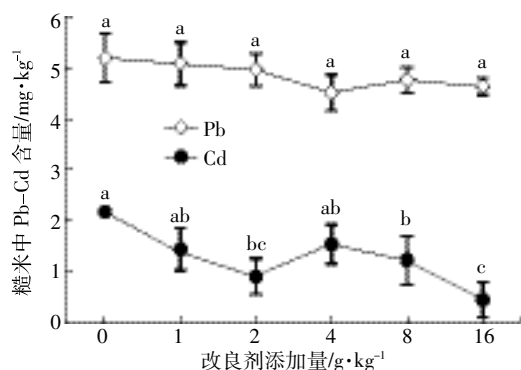


图6 组配改良剂对水稻糙米中重金属含量的影响

Figure 6 Effects of combined amendments on contents of Pb and Cd in brown rice

mg·kg⁻¹。因此,该组配改良剂最好应用于中、轻度重金属污染土壤。

组配改良剂对土壤 Ca、Mg 有效态含量有提高作用。可能由于石灰石主要成分为碳酸钙,部分碳酸钙可能在土壤溶液中释放、转化成交换性 Ca²⁺。而海泡石是一种纤维状多孔富镁质的硅酸盐黏土矿物材料,可能向土壤溶液中释放 Mg²⁺。

4 结论

石灰石+海泡石组配改良剂有效抑制了糙米对重金属的吸收。改良剂施用量为 4 g·kg⁻¹ 时,Pb 含量降至最低,与对照相比,下降 13.1%;改良剂施用量为 16 g·kg⁻¹ 时,Cd 含量降为最低,下降幅度为 79.3%。

组配改良剂对土壤有机质含量影响未达显著水平(变化率在-2%到 7%之间)。但是组配改良剂能够明显提高土壤 pH 值(从 5.57 到 7.34)和土壤 CEC(添加量达到 16 g·kg⁻¹ 时,比对照提高 217%),从而提高土壤的保肥能力。并且随着添加量的增加,组配改良剂提高土壤保肥能力的效果越好。

组配改良剂对土壤 Ca、Mg 有效态含量有提高作用,最多比对照分别提高 293%和 22%;组配改良剂添加量与有效态微量营养元素(Fe、Mn、Cu、Zn)的含量无显著相关性,但是会使 Fe 元素有效态降低 8%~14%(与对照相比)。因此,在采用这些材料作为改良剂时,应该关注微量营养元素 Fe 含量的保持。

参考文献:

- [1] 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.
- GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing, LI Xiu-ying. Advances in research on *in situ* chemo-immobilization of heavy metals in contaminated soils[J].

Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10):1990-1996.

- [2] Bolan N S, Adriano D C, Curtin D, et al. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 78:215-272.
- [3] 杭小帅,周健民,王火焰,等. 粘土矿物修复重金属污染土壤[J]. 环境工程学报, 2007, 1(9):113-120.
- HANG Xiao-shuai, ZHOU Jian-min, WANG Huo-yan, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils using clay minerals[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(9):113-120.
- [4] 刘红,汪立今. 重视非金属矿物在土壤环境保护中应用[J]. 中国矿业, 2007, 16(8):71-73, 79.
- LIU Hong, WANG Li-jin. Emphasis on application of non-metallic mineral in soil environmental protection[J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(8):71-73, 79.
- [5] 荣湘民,宋海星,何增明,等. 几种重金属钝化剂及其不同添加比例对猪粪堆肥重金属(As、Cu、Zn)形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):136-141.
- SONG Xiang-min, SONG Hai-xing, HE Zeng-ming, et al. Effect of some heavy metal passivation and its appending proportion on form transformation of heavy(As, Cu and Zn) in pig manure composting[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4):136-141.
- [6] 杜彩艳,祖艳群,李元. 施用石灰对 Pb、Cd、Zn 在土壤中的形态及大白菜中累积的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(6):1710-1713.
- DU Cai-yan, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effect of liming and pig manure application on fractions of Cd, Pb and Zn in soil and their accumulation in Chinese cabbage[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1710-1713.
- [7] 林大松,刘尧,徐应明,等. 海泡石对污染土壤镉、锌有效态的影响及其机制[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(3):346-350.
- LIN Da-song, LIU Yao, XU Ying-ming, et al. Effects of sepiolite on the immobilization of cadmium and zinc in soil[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(3):346-350.
- [8] 孟赐福,傅庆林. 施石灰石粉后红壤化学性质的变化[J]. 土壤学报, 1995, 32(3):301-307.
- MENG Ci-fu, FU Qing-lin. Changes in chemical properties of red soil after surface application of powdered limestone[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(3):301-307.
- [9] 孙约兵,徐应明,史新,等. 海泡石对镉污染红壤的钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1465-1472.
- SUN Yue-bing, XU Ying-ming, SHI Xin, et al. The effect of sepiolite on immobilization remediation of Cd contaminated red soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(6):1465-1472.
- [10] 曾卉,徐超,周航,等. 几种固化剂组配修复重金属污染土壤[J]. 环境化学, 2012, 31(9):1368-1374.
- ZENG Hui, XU Chao, ZHOU Hang, et al. Effect of mixed curing agents on the remediation of soils with heavy metal pollution[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(9):1368-1374.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:146-226.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2005:146-226.
- [12] 陈杰华,王玉军,王汉卫,等. 基于 TCLP 法研究纳米羟基磷灰石对

- 污染土壤重金属的固定[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 645–648.
- CHEN Jie-hua, WANG Yu-jun, WANG Han-wei, et al. Assessment of remediation of soil heavy metals with nano-particle hydroxyapatite by toxicity characteristic leaching procedure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 645–648.
- [13] 廖柏寒, 曾敏, 张永, 等. CaCO_3 对 Cd 和几种营养元素在红壤-黄豆系统中的调控作用[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 58–61.
- LIAO Bo-han, ZENG Min, ZHANG Yong, et al. Modulation effect of CaCO_3 on Cd and some nutrient elements in the red soil-soybean system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 58–61.
- [14] 李华兴, 李长洪, 张新明, 等. 天然沸石对土壤保肥性能影响的研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 237–240.
- LI Hua-xing, LI Chang-hong, ZHANG Xin-ming, et al. Effect of natural zeolite on nutrient preserving capability of degraded slope soil in South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 237–240.
- [15] Barbarick K A, Lai T M, Eberl D D. Exchange fertilizer (phosphate rock plus ammonium-zeolite) effects on sorghum-sudangrass [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54: 911–916.
- [16] 张杨珠, 陈军文, 黄运湘, 等. 几种天然养分载体的保肥供肥特性研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, 29(4): 312–317.
- ZHANG Yang-zhu, CHEN Jun-wen, HUANG Yun-xiang, et al. On the nutrients-supplying and retaining properties of some natural nutrient carriers [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2003, 29(4): 312–317.
- [17] 曾敏, 廖柏寒, 曾清如, 等. 重金属污染土壤清洗导致几种营养元素流失的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 25–29.
- ZENG Min, LIAO Bo-han, ZENG Qing-ru, et al. Loss of several nutrient elements in heavy metals contaminated soil due to soil washing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 25–29.
- [18] 王东胜, 刘贯山, 李章海. 烟草栽培学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002: 106–109.
- WANG Dong-sheng, LIU Guan-shan, LI Zhang-hai. Tobacco growing [M]. Hefei: University of Science & Technology of China, 2002: 106–109.
- [19] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5005. 15—2003 食品中镉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Hygiene, Peoples' Republic of China. GB/T 5005. 15—2003 Determination of cadmium in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.
- [20] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5005. 12—2003 食品中铅的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Hygiene, Peoples' Republic of China. GB/T 5005. 12—2003 Determination of lead in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.