

DOI: 10.5846/stxb201304230783

钟倩云, 曾敏, 廖柏寒, 李婧菲, 孔晓燕. 碳酸钙对水稻吸收重金属 (Pb、Cd、Zn) 和 As 的影响. 生态学报, 2015, 35(4): 1242-1248.

Zhong Q Y, Zeng M, Liao B H, Li J F, Kong X Y. Effects of CaCO_3 addition on uptake of heavy metals and arsenic in paddy fields. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1242-1248.

碳酸钙对水稻吸收重金属 (Pb、Cd、Zn) 和 As 的影响

钟倩云, 曾敏*, 廖柏寒, 李婧菲, 孔晓燕

中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

摘要: 选用重金属 (Pb、Cd、Zn) 和 As 复合污染土壤进行水稻盆栽试验, 结果表明, 碳酸钙的添加显著提高了土壤 pH 值, 显著降低了土壤中交换态 Pb、Cd、Zn 和 As 的含量, 与对照相比, 交换态 Pb、Cd、Zn 和 As 含量分别最多降低了 98.35%, 93.72%, 98.52% 和 69.48%。碳酸钙对水稻根、稻谷干重和总生物量没有显著影响, 添加量过高时显著降低了水稻分蘖数和茎叶干重, 说明过量施用碳酸钙对水稻生长会产生负面作用。因为碳酸钙的添加, 水稻植株各部位重金属 Zn 含量显著降低, 糙米中 Zn 含量最多减少了 34.95%; 根、谷壳中 Pb、Cd 含量显著降低, 但糙米中含量却未显著降低; 水稻各部位 As 含量均没有显著降低。参照《食品中污染物限量》(GB2762—2012), 试验糙米中 Pb、Cd、无机 As 含量均未达到限量标准。显然, 碳酸钙的添加降低了 Pb、Cd、Zn 的生物有效性 (水稻根系对 Pb、Cd、Zn 的吸收累积减少), 但并未有效地抑制 Pb、Cd 向糙米转运; 碳酸钙显著降低了土壤的交换态 As 含量, 但并未使土壤中 As 的生物有效性明显降低 (水稻植株各部位的 As 含量并未显著减少)。

关键词: 重金属 (Pb、Cd、Zn); 砷; 碳酸钙; 水稻

Effects of CaCO_3 addition on uptake of heavy metals and arsenic in paddy fields

ZHONG Qianyun, ZENG Min*, LIAO Bohan, LI Jingfei, KONG Xiaoyan

College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: We conducted a pot experiment of rice planting with a complex soil polluted with heavy metals (Pb, Cd, Zn) and arsenic (As) to study the effects of the addition of calcium carbonate (CaCO_3) on the contents of exchangeable heavy metals and arsenic in soil, on the agronomic features and biomass of rice plants, and on the contents of heavy metals and arsenic in different organs of rice plants such as roots, leaves, hulls and seeds. In addition, we studied the relationships between amount of CaCO_3 and soil pH values, soil exchangeable contents of heavy metals and arsenic, and concentrations of heavy metals and arsenic in different organs of rice plants. The results showed that soil pH values increased with increasing amounts of CaCO_3 , and were significantly related to the amount of CaCO_3 . The exchangeable heavy metal and arsenic content in the soils decreased significantly after the addition of CaCO_3 . Compared with the control group, the exchangeable Pb, Cd, Zn and As content decreased by up to 98.35%, 93.72%, 98.52% and 69.48%, respectively. The addition of CaCO_3 had no significant impact on the dry weight of rice roots, seeds and total biomass of the rice plants. Rice tiller weight and dry weights of stems and leaves decreased significantly at high CaCO_3 levels, indicating that excessive CaCO_3 addition might, to some extent, result in negative effects on rice growth. After the addition of CaCO_3 , the heavy metal and arsenic content in different organs of the rice plants showed a declining trend compared with that of the controls. The distribution of Pb, Cd, Zn and As in various organs of the rice plants varied; the amount of Pb, Cd and As in rice roots was significantly higher than that in the other organs. When the CaCO_3 addition was greater than 1.0 g/kg, the Pb, Cd and Zn content of

基金项目: 环保公益性行业科研专项 (201009047); 国家自然科学基金青年基金 (41201530); 长沙市科技计划重点项目 (K1109004); 湖南省重点学科建设项目

收稿日期: 2013-04-23; **网络出版日期:** 2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: emailzm@163.com

brown rice decreased by 62.68%, 40.2% and 34.95%, respectively. Meanwhile, the total arsenic content in different organs of the rice plants declined slightly, and the inorganic arsenic content reduced by 18.33%, but these decreases were not significant. Therefore, the biological effectiveness of arsenic was not effectively reduced by CaCO_3 in this study. The Pb, Cd and inorganic As content in the brown rice was still higher than that stipulated in the national standard GB 2762—2012, Maximum Levels of Contaminants in Food (Fruit). The addition of CaCO_3 reduced the biological effectiveness of Pb, Cd and Zn, resulting in decreases in Pb, Cd and Zn content in the rice roots, but and did not effectively prevent the leaching of Pb and Cd from the roots of brown rice. The exchangeable arsenic content in the soils decreased significantly by adding CaCO_3 . However, the arsenic content in different rice organs did not significantly decrease, indicating that the biological effectiveness of arsenic did not significantly decrease in the soils.

Key Words: heavy metals (Pb、Cd、Zn); As; CaCO_3 ; rice plant

土壤重金属污染及其治理已经成为我国当前的热点环境问题之一^[1]。湖南矿产资源丰富,且种类较多,享有“有色金属之乡”之称。矿产开发促进了当地的经济的发展,但相关行业排放的工业“三废”排放导致湖南一些地区的土壤受到了不同程度的重金属和 As 的复合污染。湖南也是我国的水稻主产区,污染土壤中的重金属元素和 As 向水稻地上部分尤其是稻谷的转移给居民的健康带来了严重的威胁。因此,重金属和 As 复合污染稻田的修复是一个亟待解决的问题。

近年来,关于重金属污染土壤化学固定修复的研究得到大量开展,而重金属和 As 复合污染土壤的现状和危害也有较多的研究,但对其修复的研究还鲜有报道。As 属于类金属元素,在土壤中通常以含氧酸根的形态存在。碳酸钙作为有效的重金属污染土壤修复材料被广泛地研究和应用,但碳酸钙能否修复重金属和 As 复合污染土壤,目前还没有明确答案。本研究采用盆栽试验的方法,探讨在重金属(Pb、Cd、Zn)和 As 复合污染土壤中添加碳酸钙对水稻吸收重金属和 As 的影响,以期复合污染土壤的安全利用和修复提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自湘南某矿区冶炼厂周围抛荒水稻田的耕作层(0—30 cm),成土母质为第四纪红土发育的红壤。土壤取回后,去除石块、杂质和植物根系等,自然风干,用非金属器具磨碎后过 5 mm 尼龙筛,混合均匀用于盆栽。供试土壤的重金属含量:Pb 965.84 mg/kg、Cd 13.24 mg/kg、Zn 1167.4 mg/kg、As 67.09 mg/kg,其中 Pb、Cd、Zn 和 As 的含量分别超过《国家土壤环境质量标准》(GB15618—1995)Ⅲ级标准值 1.93、13.24、2.33、2.34 倍。土壤 pH 值 5.48,有机质含量 3.38%,碱解氮 0.97 g/kg,有效磷 12.64 mg/kg,速效钾 9.19 mg/kg。供试作物选用湘南地区广泛栽培的杂交水稻,品种为丰优 210,购于隆平种业有限公司。试验所用碳酸钙为分析纯,其他试剂均为优级纯或分析纯。

1.2 试验方法

盆栽试验采用塑料桶,直径 22 cm,高 23 cm。将供试土壤装入一系列上述塑料桶中,每盆装土 4.5 kg,添加尿素、磷酸铵和氯化钾作为基肥(N 0.15 g/kg, P_2O_5 0.10 g/kg, K_2O 0.15 g/kg),同时添加碳酸钙。碳酸钙设置 7 个添加水平:0、0.25、0.5、1、2、4、8 g/kg,每个水平设置 3 个平行。添加碳酸钙后,使其与土壤混合均匀,在田间持水率下稳定 15 d。然后将培育好的水稻秧苗移栽至塑料桶中,每盆 1 株,各处理按随机区组排列,置于日光温室栽培。在水稻生长过程中,定期用去离子水进行灌溉。

在水稻收获期采集植株,用去离子水冲洗干净,杀青后在 70 ℃烘箱内烘干,分根、茎叶、壳、糙米称量各部位干重,粉碎备用,分析各部位中重金属(Pb、Cd、Zn)和 As 的含量。同时采集种植水稻后的盆栽土壤,测定土壤 pH 值、土壤交换态 Pb、Cd、Zn 和 As 的含量。

1.3 分析方法

土壤 pH 值采用酸度计(雷磁 pH-3C,上海精密科学仪器有限公司)测定,固液比为 1:2.5^[2]。土壤有机质用重铬酸钾外加热法测定,有效磷用碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法测定,速效钾用乙酸铵提取法测定,土壤重金属总量采用王水-高氯酸消解,火焰原子吸收分光光度计(日立 Z-2000)测定^[3]。总 As 采用《国家土壤质量标准(GB/T 22105—2008)》中的水浴消解法^[4]。土壤交换态重金属根据相关的报道采用修正的 Tessier 连续提取法第一步(1 mol/L MgCl₂(pH=7))溶液提取^[5],交换态 As 采用 1 mol/L NH₄Cl 提取^[6]。植物样品重金属和砷采用干灰化法^[7-8]消解,重金属含量采用原子吸收分光光度计(日立 Z-2000)测定,As 含量用原子荧光光度计(东西 AFS-7500)测定。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 软件进行数据整理及相关的计算。用 SPSS.PASW Statistics 18.0 进行统计分析,用 Microsoft Excel 和 Origin 8.5 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 碳酸钙对复合污染土壤中重金属和 As 的固定效果

2.1.1 碳酸钙对土壤 pH 值的影响

由图 1 可看出,土壤 pH 值随着碳酸钙添加量的增加而显著升高,碳酸钙使土壤 pH 值最大提高至 7.75。相关性分析表明,土壤 pH 值与碳酸钙添加量呈极显著正相关关系($R^2=0.936$, $R^2_{0.01}=0.766$; $n=7$)。土壤 pH 值的变化可能会对其中重金属的赋存形态产生影响。

2.1.2 碳酸钙对土壤交换态重金属和 As 含量的影响

从表 1 看出,不同碳酸钙添加量均显著降低了土壤中交换态重金属和 As 的含量,且随着碳酸钙添加量的增加而呈降低趋势。交换态 Pb、Cd、Zn 和 As 含量分别最多降低了 98.35%、93.72%、98.52% 和 69.48%。交换态 Pb、Cd、Zn 和 As 含量均与碳酸钙添加量呈极显著负相关($R^2_{Pb}=0.951$, $R^2_{Cd}=0.931$, $R^2_{Zn}=0.960$, $R^2_{As}=0.941$; $n=7$, $R^2_{0.01}=0.766$)。复合污染土壤中施用碳酸钙使土壤 pH 值升高,一方面使土壤颗粒表面负电荷增加,对 Pb、Cd 等重金属离子吸附增强;另一方面,土壤 pH 值升高有利于重金属离子形成氢氧化物或碳酸盐结合态沉淀或共沉淀^[9-10]。土壤中的离子环境对 As 的吸附固定有明显影响,Ca 能与 As 生成难溶性沉淀,有利于土壤对 As 的吸附固定^[11]。也有研究表明,土壤中添加钙

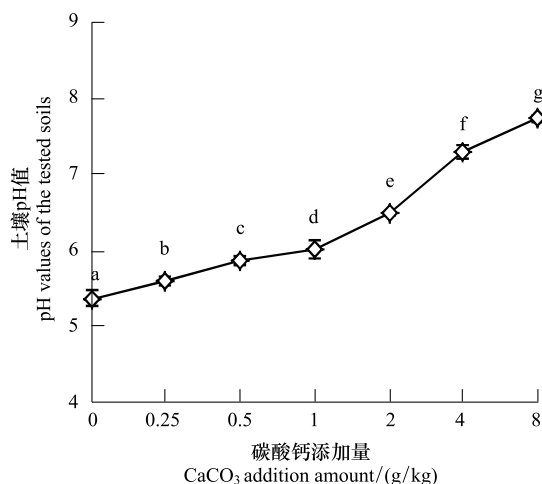


图 1 碳酸钙对土壤 pH 值的影响
Fig.1 Effects of CaCO₃ on pH values of the tested soils

表 1 添加碳酸钙对土壤交换态重金属和 As 含量的影响

Table 1 Effects of CaCO₃ on exchangeable contents of heavy metals and As in the tested soils

碳酸钙添加量/(g/kg) CaCO ₃ addition amount	交换态 Pb/(mg/kg) Exch-Pb	交换态 Cd/(mg/kg) Exch-Cd	交换态 Zn/(mg/kg) Exch-Zn	交换态 As/(mg/kg) Exch-As
0	130.0±11.7a	5.34±0.58a	118.3±8.74a	0.37±0.04a
0.25	99.72±17.6b	3.86±0.67b	99.82±10.3b	0.27±0.03b
0.5	64.39±14.2c	3.0±0.6bc	75.52±9.1c	0.25±0.03b
1	59.86±7.2c	3.55±0.70b	77.08±13.2c	0.24±0.02b
2	19.83±7.6d	2.10±0.46c	41.73±0.94d	0.18±0.01c
4	1.54±0.55d	0.95±0.28d	7.81±3.0e	0.13±0.02d
8	2.15±1.6d	0.34±0.05d	1.75±0.41e	0.11±0.01d

能有效降低砷的交换态含量,使土壤砷向铝结合态和残渣态转移^[12]。交换态含量被广泛认为在一定程度上能够反映土壤重金属和 As 的生物有效性,从交换态含量这个指标可以看出碳酸钙的添加可能降低了土壤重金属和 As 的生物有效性。

2.2 碳酸钙对水稻吸收重金属和 As 的影响

土壤中的重金属可通过作物根系代谢被吸收进入根细胞内,一部分滞留在根中,还有一部分可随原生质的流动及细胞间的运输至导管中,随作物蒸腾作用向地上部移动,并富集在作物茎叶、籽实中^[13]。这样重金属(如 Pb、Cd、Zn)和 As 等元素进入水稻后在其不同部位进行了再分配。

图 2 表明,供试土壤中添加碳酸钙后,水稻根中重金属含量有降低趋势,As 含量总体上略有降低。根中 Pb、Cd、Zn 含量在低碳酸钙添加量(小于 1 g/kg)时先略有增加,随着添加量的增加,Pb、Cd、Zn 含量呈降低趋势且均显著低于对照。与对照相比,根中 Pb 含量最多减少了 30.26%,Cd 含量最多降低了 55.86%,Zn 含量最多降低了 61.37%。随着碳酸钙添加量的增加,根中 As 含量比对照略有减少,减少了 3.08%—26.30%,但差异不显著。

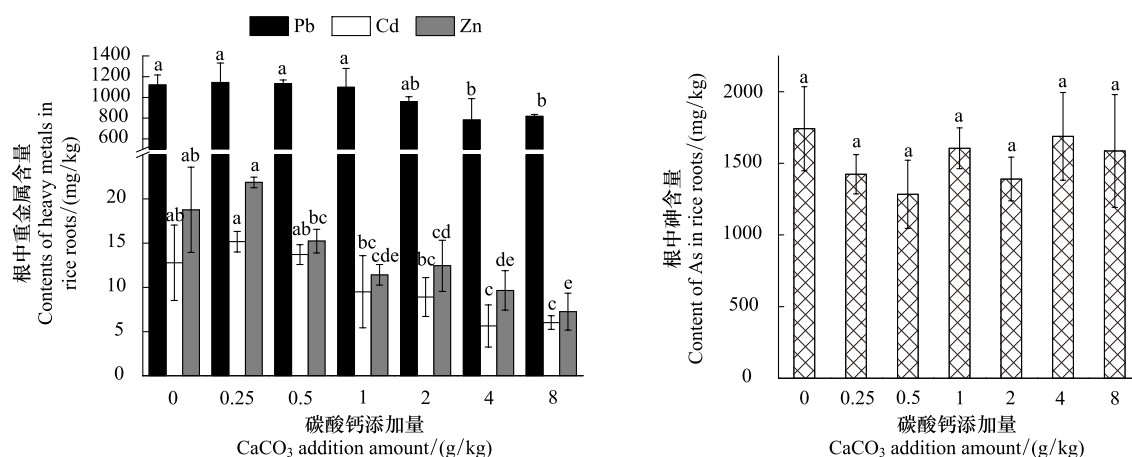


图 2 不同碳酸钙添加量对水稻根中重金属和 As 含量的影响

Fig.2 Effects of CaCO₃ addition on contents of heavy metals and As in rice roots

由图 3 可以看出,添加碳酸钙后,水稻茎叶中重金属含量呈降低趋势,As 含量总体上略有降低。茎叶中 Pb、Cd 含量随着碳酸钙添加量的增加而逐步减少,分别降低了 29.8%—73.94%和 1.48%—34.22%,但与对照相比差异均不显著。茎叶中 Zn 含量虽在碳酸钙添加量为 0.25 g/kg 时略有增加,但随着碳酸钙添加量的增加 Zn 含量下降明显,与对照相比茎叶中 Zn 含量最多降低了 61.64%。随着碳酸钙的添加量的增加,茎叶中 As 含量比对照略有减少,减少了 2.84%—26.50%,差异不显著。

由图 4 可知,土壤中添加碳酸钙后,谷壳中重金属含量均显著减少,As 含量略有减少。谷壳中 Pb、Zn 含量随着碳酸钙添加量的增加而逐渐减少,与对照相比,谷壳中 Pb 含量降低了 5.71%—81.28%,Zn 含量最多降低了 44.11%。谷壳中 Cd 含量在低碳酸钙添加量(0.25 g/kg)时,较对照略有增加,随着碳酸钙添加量的增加 Cd 含量又呈降低趋势,且均低于对照,最多降低了 86.39%。谷壳中总 As 含量随着碳酸钙添加量的增加呈减少趋势,与对照相比减幅为 4.57%—25.68%,但差异不显著。

由图 5 可看出,糙米中 Pb、Cd、Zn 含量均先略有增加,后随着碳酸钙添加量的增加而降低,其中 Pb 含量各处理间差异不显著,Cd 含量在碳酸钙低添加量和高添加量之间差异显著,Zn 含量在高碳酸钙添加量时与对照间差异显著。当碳酸钙添加量大于 1 g/kg 时,糙米中 Pb、Cd、Zn 含量呈降低趋势,分别比对照最多减少了 62.68%、40.2%和 34.95%。王凯荣等^[14]的研究结果表明,污染土壤中施用石灰性改良剂能有效抑制水稻对 Pb、Cd 的吸收,这与本试验研究结果一致。添加碳酸钙后,糙米中总 As 含量和无机 As 含量没有明显降低,二者各处理间差异均不显著。

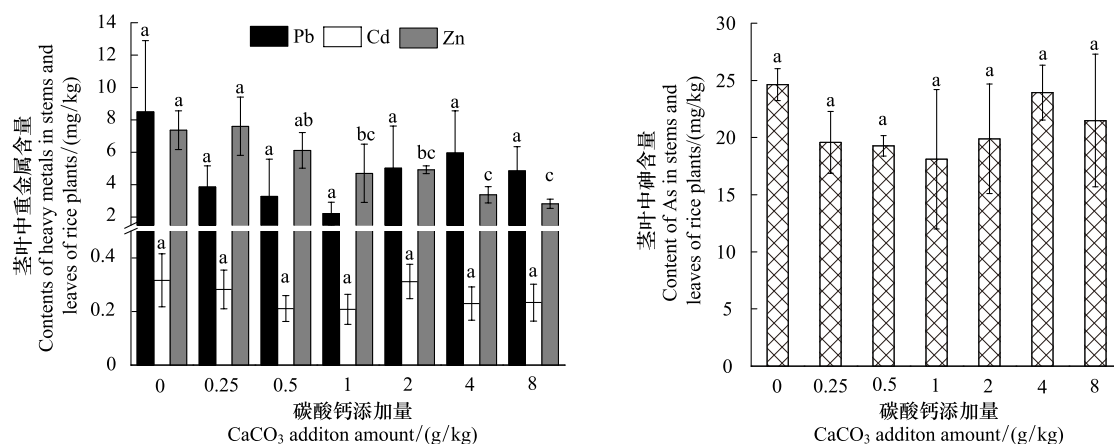


图3 不同碳酸钙添加量对水稻茎叶中重金属和As含量的影响

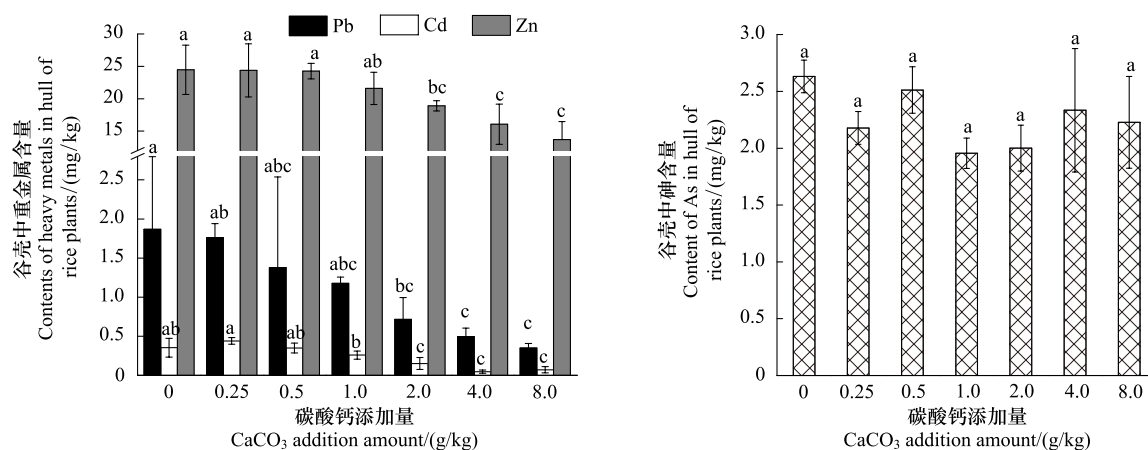
Fig.3 Effects of CaCO_3 addition on contents of heavy metals and As in stems and leaves of rice plants

图4 不同碳酸钙添加量对谷壳中重金属和As含量的影响

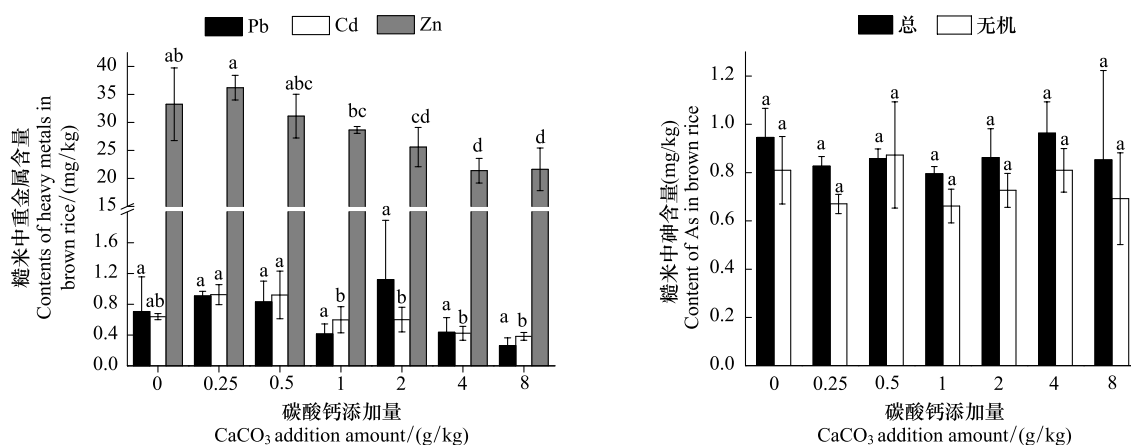
Fig.4 Effects of CaCO_3 addition on contents of heavy metals and As in hull of rice plants

图5 不同碳酸钙添加量对糙米中重金属和As含量的影响

Fig.5 Effects of CaCO_3 addition on contents of heavy metals and As in brown rice

综合图2—图5可看出,Pb在水稻植株中含量分布为根>>茎叶>谷壳>糙米;Cd在水稻植株中含量分布为根>>糙米>茎叶>谷壳,这与丁凌云^[15]等人的研究结果一致;Zn在水稻植株中含量分布为糙米>谷壳>根>

茎叶。As 在水稻植株中含量分布为根>>茎叶>谷壳>糙米,这与仲维功^[16]、康立娟^[17]等人的报道相符。显然,Pb、Cd、Zn 和 As 在水稻各器官的分布存在一定的差异,根中 Pb、Cd 和 As 的含量明显高于其他部位,Cd 和 Zn 向糙米中的迁移能力较强。

2.3 碳酸钙对水稻农艺性状的影响

由表 2 可以看出,在供试土壤中添加碳酸钙,对水稻植株生长状况影响较显著,随着碳酸钙添加量的增加,水稻的分蘖数有减少的趋势,但在碳酸钙添加量小于 2 g/kg 时不显著。碳酸钙的添加对水稻株高、根重、稻谷干重和总生物量也没有明显影响,但使茎叶干重略有降低。统计分析表明,只有当碳酸钙添加量 ≥ 4 g/kg 时,与对照相比差异才显著。碳酸钙添加量 >4 g/kg 时分蘖数显著减少的现象说明过量施用碳酸钙对水稻生长会产生负面作用。

表 2 碳酸钙对水稻生长及生物量的影响

Table 2 Effects of CaCO_3 addition on the agronomic characters and biomass of rice plants

碳酸钙添加量/(g/kg) CaCO_3 addition amount	分蘖数 Tillers	株高/cm Plant height	根干重/(g/盆) Dry weight of rice roots	茎叶干重/(g/盆) Dry weight of stems and leaves	稻谷干重/(g/盆) Dry weight of seeds	总生物量 干重/(g/盆) Dry weight of total biomass
0.00	21 $\pm$ 2a	90.33 $\pm$ 1.15a	9.99 $\pm$ 1.45a	48.73 $\pm$ 6.7a	23.30 $\pm$ 8.2a	82.03 $\pm$ 7.6ab
0.25	19 $\pm$ 2abc	89.33 $\pm$ 1.15a	9.31 $\pm$ 0.73a	45.87 $\pm$ 4.4ab	24.40 $\pm$ 7.4a	79.57 $\pm$ 6.1ab
0.5	23 $\pm$ 1a	91.00 $\pm$ 3.90a	9.56 $\pm$ 0.93a	48.27 $\pm$ 4.2a	31.63 $\pm$ 3.6a	89.46 $\pm$ 0.5a
1	21 $\pm$ 4ab	91.17 $\pm$ 2.84a	9.95 $\pm$ 0.35a	47.03 $\pm$ 2.97a	31.97 $\pm$ 3.6a	88.95 $\pm$ 2.1a
2	19 $\pm$ 3abc	92.50 $\pm$ 1.32a	10.72 $\pm$ 0.44a	45.00 $\pm$ 6.9abc	39.55 $\pm$ 1.8a	87.95 $\pm$ 13a
4	17 $\pm$ 2bc	86.33 $\pm$ 5.50a	10.15 $\pm$ 1.09a	37.87 $\pm$ 1.9bc	32.83 $\pm$ 3.3a	80.85 $\pm$ 0.9ab
8	15 $\pm$ 2c	91.17 $\pm$ 2.25a	9.21 $\pm$ 1.25a	36.90 $\pm$ 3.6c	28.57 $\pm$ 3.3a	74.68 $\pm$ 2.5b

3 讨论

碳酸钙的添加显著降低了土壤交换态 Pb、Cd、Zn 的含量。由表 3 可看出,水稻根系中 Pb、Cd、Zn 的含量与土壤中交换态 Pb、Cd、Zn 含量均呈显著或极显著正相关($R_{Pb}^2 = 0.752$, $R_{Cd}^2 = 0.657$, $R_{Zn}^2 = 0.774$, $R_{As}^2 = 0.003$; $n = 7$, $R_{0.01}^2 = 0.766$, $R_{0.05}^2 = 0.569$)。显然,碳酸钙通过降低土壤中重金属的交换态含量达到了降低重金属生物有效性的目的。然而糙米中 Pb、Cd 含量与土壤交换态 Pb、Cd 含量没有显著相关性($R_{Pb}^2 = 0.117$, $R_{Cd}^2 = 0.383$, $R_{Zn}^2 = 0.904$, $R_{As}^2 = 0.048$; $n = 7$, $R_{0.01}^2 = 0.766$, $R_{0.05}^2 = 0.569$)。部分结果与竺朝娜等^[18]的研究相符。这说明,碳酸钙降低了水稻根部对 Pb、Cd 的吸收累积,但并未有效地抑制 Pb、Cd 向糙米转运。这种现象可能是由于影响重金属从根部转运到糙米的因素较复杂,既与根部吸收重金属的量有关系,也受植物体内生理生化特性的影响。参照《食品中污染物限量》(GB2762—2012),本试验中糙米 Pb、Cd 含量均未达到限量标准(Zn 未列入本标准的限量指标)。

表 3 重金属和砷在土壤中交换态含量与水稻根和糙米中含量的相关方程

Table 3 Related equations of contents of exchangeable heavy metals and As in tested soils and each element in rice roots or in the brown rice plants

部位 Different parts	元素 Elements	方程 Related equations	R^2
根 Roots	Pb	$y = 2.7462x + 859.32$	0.867
	Cd	$y = 1.7446x + 5.4736$	0.8104
	Zn	$y = 0.1015x + 7.6821$	0.8796
糙米 Brown rice	As	$y = 110.26x + 1507.3$	0.058
	Pb	$y = 0.0022x + 0.5518$	0.117
	Cd	$y = 0.0766x + 0.4319$	0.383
	Zn	$y = 0.1214x + 20.957$	0.904
	As	$y = 0.2035x + 0.7037$	0.048

y 表示水稻根或糙米中元素总量, x 表示土壤中交换态元素含量

土壤对 As 的吸持固定与土壤 pH 值有关,土壤 pH 值越高,对 As 的固定作用越差^[19]。在本试验中,碳酸

钙的添加使土壤 pH 值提高了 0.23—2.37 个单位,但反而使土壤的交换态 As 降低了 28.39%—69.48%。其原因应当是碳酸钙的添加带入土壤中的 Ca 能与 As 生成难溶性沉淀,有利于土壤对 As 的吸持固定。从表 4 可以看出,根中 As 的含量与土壤中交换态 As 含量无显著相关性,这说明土壤中 As 的生物有效性还受其他形态 As 含量的影响,仅交换态含量不能表征 As 的生物有效性。虽然碳酸钙降低了土壤的交换态 As 含量,但这不能说明碳酸钙降低了土壤中 As 的生物有效性。参照《食品中污染物限量》(GB2762—2012)中的规定,糙米中无机 As 含量也未达到限量标准,且均超标 3 倍以上。显然,对于重金属和 As 复合污染的稻田土壤,碳酸钙仅能在一定程度上减少水稻对重金属的吸收,并没有明显减少水稻对 As 的吸收。

4 结论

(1) 重金属和 As 复合污染土壤中,添加碳酸钙能显著提高土壤 pH 值,显著降低土壤中交换态重金属(Pb、Cd、Zn)和 As 的含量。

(2) 添加碳酸钙对水稻根、茎叶干重、稻谷干重和总生物量没有显著影响,但施用量过高时显著降低了分蘖数和茎叶干重。说明过量施用碳酸钙对水稻生长会产生负面作用。

(3) 添加碳酸钙后水稻植株各部位 Zn 含量显著降低,水稻根、谷壳中 Pb、Cd 含量显著降低。显然,碳酸钙通过降低土壤中重金属的交换态含量,降低其生物有效性(水稻根系对重金属的吸收累积减少),但并未有效地抑制 Pb、Cd 向糙米转运。虽然碳酸钙显著降低了土壤的交换态 As 含量,但水稻植株各部位的 As 含量并未显著减少,说明碳酸钙并未使土壤中 As 的生物有效性明显降低。

参考文献(References):

- [1] Chen H M, Zheng C R, Tu C, Zhu Y G. Heavy metal pollution in soils in China: Status and countermeasures. *AMBIO*, 1999, 28(2): 130-134.
- [2] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业科学技术出版,2000:228-247.
- [3] 鲍士旦.土壤农化分析.北京:中国农业出版社,2005:30-35.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会 GB/T 22105-2008.土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法,2008.
- [5] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the Speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [6] 武斌,廖晓勇,陈同斌,阎秀兰.石灰性土壤中砷形态分级方法的比较及其最佳方案. *环境科学学报*, 2006, 26(9): 1467-1473.
- [7] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.12-2003 食品中 Pb 的测定.北京:中国标准出版社,2003.
- [8] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.11-2003 食品中总砷及无机砷的测定.北京:中国标准出版社,2003.
- [9] Lombi E, Hamon R E, McGrath S P, McLaughlin M J. Lability of Cd, Cu, and Zn in polluted soils treated with lime beringite, and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(5): 979-984.
- [10] Illera V, Garrido F, Serrano S, Garcia-Gonzalez M T. Immobilization of the heavy metals Cd, Cu and Pb in an acid soil amended with gypsum-and lime-rich industrial by-products. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55: 135-145.
- [11] 谢正苗,黄昌勇,何振立.土壤中砷的化学平衡. *环境科学进展*, 1998, 6(1): 22-37.
- [12] 韦璐阳,陈晓明,刘丽君.钙镁铁肥降低小白菜对土壤砷吸收的研究. *广西热带农业*, 2007, (6): 18-20.
- [13] 王新,梁仁禄,周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究. *农村生态环境*, 2001, 17(2): 41-44.
- [14] 王凯荣,张玉烛,胡荣桂.不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 476-481.
- [15] 丁凌云,蓝崇钰,林建平,束文圣.不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响. *生态环境*, 2006, 15(6): 1204-1208.
- [16] 仲维功,杨杰,陈志德,王才林,张永春,常志州,周益军.水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异. *江苏农业学报*, 2006, 22(4): 331-338.
- [17] 康立娟,李香丹,刘景华,张秀燕.砂壤水稻土添加砷对水稻生长发育和残留的研究. *吉林农业大学学报*, 1996, 18(3): 58-61.
- [18] 竺朝娜,冯英,胡桂仙,朱凤珍,王林友,张礼霞,金庆生,王建军.水稻糙米砷含量及其与土壤砷含量的关系. *核农学报*, 2010, 24(2): 355-359.
- [19] Tokunaga S, Hakuta T. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil. *Chemosphere*, 2002, 46(1): 31-38.