植物营养与肥料学报 2013,19(2):361-369
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi:10.11674/zwyf.2013.0212

活化磷矿粉对重金属污染土壤上莴苣生长与品质的影响

许学慧,姜冠杰,付庆灵,刘永红,胡红青*
(华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070)

摘要:用0.5 mol/L草酸与南漳和保康两地的两种低品位磷矿粉在一定条件下混合培养后,施于重金属污染的土壤,通过盆栽试验,研究草酸活化磷矿粉对重金属污染土壤上莴苣生长和品质的影响。结果表明,盆栽试验中,与对照相比,施加磷矿粉和活化磷矿粉后,莴苣的株高、叶片叶绿素SPAD值、叶片和茎的维生素C含量都有不同程度的提高,其效果为活化磷矿粉>磷矿粉>对照,而叶和茎的硝酸盐含量则降低。同时,施加磷矿粉和活化磷矿粉可以提高土壤有效磷、交换性钙、镁含量,降低交换态重金属含量,进而降低莴苣各部分对重金属元素的吸收,如施加活化磷矿粉后莴苣根中Cd、Cu的含量比对照最高可降低55.1%、55.24%,地上部分中Cd、Cu的含量比对照最高可降低59.3%、53.4%,降低重金属含量的效果依次为活化磷矿粉>磷矿粉>对照。

关键词:草酸;活化;磷矿粉;莴苣
中图分类号:S143.2+1;S636.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)02-0361-09

Effect of activated phosphate rocks on growth and quality of lettuce in heavy metal contaminated soils

XU Xue-hui, JIANG Guan-jie, FU Qing-ling, LIU Yong-hong, HU Hong-qing*
(*College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*)

Abstract: Two kinds of low-grade phosphate rock collected from Nanzhang and Baokang were mixed with 0.5 mol/L oxalic acid and cultured under certain conditions. A pot experiment was conducted to study the effect of oxalic acid activated phosphate rocks on the quality of lettuce grown in heavy metal contaminated soils. The results show that compared with the control, the plant heights, chlorophyll SPAD values and vitamin C contents of lettuce are increased after applying the phosphate rocks and the activated phosphate rocks and the effect order is: the activated phosphate rocks > the phosphate rocks > the control, while the nitrate contents are reduced. At the same time, the contents of soil available phosphorus, exchangeable calcium and magnesium are increased, and the exchangeable heavy metal contents are decreased under the applications of the phosphate rocks and the activated phosphate rocks. The absorptions of heavy metals in various parts of lettuce are reduced, for example, compared with the control, applying activated phosphate rocks can reduce the Cd and Cu contents mostly by 55.1% and 55.24% in lettuce roots, and 59.3% and 53.4% in the shoots of lettuce, respectively. The order of the reduced effects of heavy metals is: the activated phosphate rocks > the phosphate rocks > the control. These results indicate that the oxalic acid activated phosphate rocks have better effect for decreasing heavy metals uptake compared with the raw phosphate rocks.

Key words: oxalic acid; activation; phosphate rock; lettuce

收稿日期:2012-07-04 **接受日期**:2012-09-06
基金项目:教育部博士点基金(20090146110003);国家自然科学基金(41071165)资助。
作者简介:许学慧(1983—),男,内蒙古包头人,硕士研究生,主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:xuxuehui721816@163.com
*通信作者 E-mail:hqhu@mail.hzau.edu.cn

随着我国工业化和农业现代化的快速推进,农田重金属污染及其对粮食安全的影响已成为备受关注的重要环境问题之一。据统计,目前我国受重金属污染的耕地面积近2000万公顷,约占全国耕地面积的1/5[1]。受重金属污染的土壤农业生产力下降,农作物品质受到严重影响,而且农作物中累积的重金属会通过食物链危害人类健康。

磷矿粉是一种磷酸盐重金属钝化剂,既能固定重金属,又可以提供植物生长所需的磷素[2],改善土壤理化性质,提高农产品品质。我国的磷矿资源丰富,储量大,但以中低品位为主[3]。因此,如何提高中低品位磷矿粉中磷的有效性和利用率,对充分利用我国磷矿资源和提高粮食产量有着重要意义[4]。

大量研究表明,有机酸会影响土壤中磷的吸附与解吸,并通过与金属离子的络合作用提高难溶性磷的有效性,因此向磷矿粉中添加有机酸后施于土壤可提高土壤的有效磷含量[5-7]。

草酸在有机酸中酸性较强,作为一种化学萃取剂已经广泛应用于重金属污染土壤的治理中[8-9],与磷矿粉等难溶性磷肥混合施用其强酸性和含有的游离羧基功能团可能会增强磷的释放,因此在磷矿粉中添加草酸是否可提高磷矿粉的释磷能力,且释放的磷还能起到钝化重金属的作用,目前这方面的研究报道还较少。本试验对保康、南漳两地的两种低品位磷矿粉与一定浓度的草酸在适宜条件下混合后,施用于重金属污染的土壤,对其效果进行了初步研究,旨在为草酸活化磷矿粉施入重金属污染的土壤后提高污染土壤上蔬菜的品质和安全性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自湖北省大冶市下陆有色金属公司铜矿区菜地,采集旱地表层0—20 cm土壤,质地为壤土,其土壤颗粒组成为含粘粒(< 0.002 mm)22.1%,粉粒(0.02～0.002 mm)39.2%,砂粒(2.0～0.02 mm)38.7%。其基本理化性质为:有机质30.34 g/kg,全氮1.26 g/kg,碱解氮44.59 mg/kg,全磷0.92 g/kg,速效磷38.50 mg/kg,CEC 12.60 cmol/kg,全量镉4.47 mg/kg,全量铜337.5 mg/kg,pH 5.85。

供试磷矿粉购自湖北南漳县和保康县。其基本理化性质见表1。

表1 供试磷矿粉的基本理化性质

Table 1 Some basic chemical properties of the tested phosphate rocks

地点 Site	全磷 Total P (P_2O_5%)	有效磷 Available P (P_2O_5%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	Al_2O_3 (%)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)
南漳 Nanzhang	24.2	2.9	40.5	35.1	4.6	0.10	2.70	42.6
保康 Baokang	26.1	2.2	45.4	3.5	6.4	0.04	nd	4.04

注(Note):nd表示低于仪器检出限,未测出 nd means the value is lower than the instrument detection limit.

活化磷矿粉的制备:将0.5 mol/L草酸溶液按液固比10∶1加于磷矿粉中,混匀,28 ℃下培养6 d,然后在60 ℃下烘干,过0.154 mm筛,备用[10]。测定活化后磷矿粉中有效磷和全磷的含量(表2)。表2显示,活化磷矿粉的全磷含量低于未活化磷矿粉,但有效磷含量与未活化磷矿粉相比显著提高。

供试作物为东坡青王莴苣(Lettuce),由四川眉山市东坡种业有限公司生产。该品种株高45～50 cm,开展度45 cm,茎皮和茎肉均为绿色,茎叶有清香,生熟食皆宜,单茎重0.5～0.6 kg;较抗寒,耐高温,较抗霜霉病和病毒病,适合在长江流域春秋两季栽培。

1.2 试验方法

盆栽试验在华中农业大学温室大棚中进行,保康和南漳的2种磷矿粉分别设6个处理,另设一个不施加磷矿粉的处理作为对照(CK),其中3个处理为低、中、高量未活化的磷矿粉,用PR-L、PR-M、PR-H表示,3个处理为施加低、中、高量活化的磷矿粉,用PA-L、PA-M、PA-H表示。施入磷矿粉的量以满足作物生长需磷量(P_2O_5 0.15 g/kg,土)换算为未活化磷矿粉的量(以全量P_2O_5计)为最低值,然后设中等用量和高用量。保证施用于每盆同一浓度水平的活化磷矿粉所含的全磷量与未活化磷矿粉的完全一致。磷矿粉和活化磷矿粉的实际施加量见表3。

表 2　供试活化磷矿粉的基本化学性质

Table 2　Some basic chemical properties of the tested activated phosphate rocks

地点 Site	全磷 Total P (P_2O_5%)	有效磷 Available P (P_2O_5%)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	pH
南漳 Nanzhang	15.25	6.82	2.56	33.2	2.14
保康 Baokang	15.57	8.78	nd	2.75	2.87

注(Note): nd 表示低于仪器检出限,未测出 nd means the value is lower than the instrument detection limit.

表 3　磷矿粉和活化磷矿粉的施加量 (g/kg)

Table 3　The application amounts of raw and activated phosphate rocks

地点 Site	磷矿粉 Raw phosphate rock			活化磷矿粉 Activated phosphate rock		
	低 Low	中 Medium	高 High	低 Low	中 Medium	高 High
南漳 Nanzhang	0.62	1.24	2.48	0.87	1.74	3.48
保康 Baokang	0.58	1.16	2.32	0.97	1.94	3.88

在 20 ×30 cm 的塑料花盆中装过 0.771 mm 筛的风干土 2 kg,按比例加入磷矿粉及活化磷矿粉。同时每盆中施入氮、钾肥(每盆 0.9 g 尿素,0.8 g KCl),混匀。为防止重金属淋失,将土放入塑料袋后装盆,每个处理设 4 次重复,随机排列。莴苣种子育苗一个月,幼苗为四叶一心时移栽到塑料盆内,每盆 2 株。1 ～2 d 浇蒸馏水 1 次,每次每盆浇水量相同,适时进行杀虫、除草。莴苣生长 90 d 收获,分地上部分(茎和叶)和根取样,留取鲜样测定生长品质指标,然后用去离子水洗净后在 105 ℃杀青,65℃烘干,研碎待用;并将盆中的土混匀后取样,将取回的土样风干,研磨后密封待测。

1.3　测定方法

莴苣收获前用直尺测定株高,用 SPAD - 502 型叶绿素计(Minolta,日本)测定叶片叶绿素 SPAD 值;用 2,6-二氯靛酚滴定法测定莴苣叶片和茎部的维生素 C 含量,用水杨酸 - 硫酸比色法测定莴苣叶片和茎部的硝酸盐含量[11];莴苣地上部分和根部的重金属含量用 HNO_3 - $HClO_4$ 消化,火焰原子吸收分光光度法(FAAS - 240)测定,同时用 pH 计测定土壤 pH 值(水土比为 2.5∶1); 钼锑抗比色法测定土壤全磷和有效磷; 交换性钙、镁经 1 mol/L 乙酸铵溶液浸提,原子吸收火焰分光光度法(FAAS - 240)测定; 土壤交换态重金属采用 Tessier 连续浸提法[12]提取(1 mol/L $MgCl_2$, pH 7.0),原子吸收火焰分光光度法(FAAS - 240)测定[13]。

1.4　数据处理

所有试验数据均采用 Excel、DPS 数据处理软件和 Origin8.0 作图软件处理,LSD 检验法检验差异显著性。

2　结果分析与讨论

2.1　磷矿粉处理对重金属污染土壤上莴苣生长和品质的影响

2.1.1 不同磷矿粉处理对莴苣株高的影响　土壤重金属污染影响植物的生长发育,常常体现在影响植物的株高、根长、生物量、叶片数、出苗率等方面[14]。由表 4 可以看出,与对照相比,施加不同量的南漳磷矿粉后,莴苣株高有不同程度的增加,随着磷矿粉施加量增加,莴苣株高呈先增加后减少的趋势。施加活化的南漳磷矿粉后,莴苣的株高变化也有类似的规律。施入保康的磷矿粉和活化磷矿粉的处理与对照相比,莴苣的株高也随着施加量增加有不同程度的增加,由此看出,施加磷矿粉和活化磷矿粉都有益于莴苣株高的增加,活化磷矿粉的效果更显著。

2.1.2 不同磷矿粉处理对莴苣叶绿素 SPAD 值的影响　表 4 还可以看出,施加南漳磷矿粉后,与对照相比,莴苣叶片 SPAD 值显著提高,最多比对照高 30.23%。随着磷矿粉施加量的增加,各处理 SPAD 值之间的差异不明显。施加活化的南漳磷矿粉后,随着施加量的增加,各处理莴苣叶片 SPAD 值变化呈先增加后降低的规律,但与对照相比,活化磷矿粉处理的莴苣叶片 SPAD 值均有了显著的提高。施加不同量的保康磷矿粉或活化保康磷矿粉后,与对照相比,莴苣叶片 SPAD 值也均有显著的提高。不同

表4 施加磷矿粉和活化磷矿粉对莴苣生长和品质指标的影响

Table 4 The influences of raw and activated phosphate rocks on growth and quality of lettuce

磷矿粉种类 Phosphate rock type	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	SPAD值 SPAD value	维生素C Vitamin C (mg/kg)		硝酸盐 Nitrate (mg/kg)	
				叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem
南漳磷矿粉 Nanzhang phosphate rock	CK	23.9 e	34.4 b	168 c	9.2 b	105.2 bcd	383.8 a
	PR-L	31.0 bc	42.5 a	174 c	8.8 b	163.0 b	327.7 ab
	PR-M	33.5 ab	44.8 a	161 c	11.0 a	357.9 a	107.9 c
	PR-H	27.8 cd	44.1 a	297 a	12.5 a	145.6 bc	157.5 bc
	PA-L	25.5 de	46.1 a	235 b	11.4 a	169.0 b	323.3 abc
	PA-M	35.0 a	49.3 a	180 c	9.1 b	25.5 cd	220.6 abc
	PA-H	30.3 bc	42.7 a	137 c	9.1 b	5.3 d	156.0 bc
保康磷矿粉 Baokang phosphate rock	CK	23.9 c	34.4 c	168 bc	9.2 b	105.2 b	383.8 a
	PR-L	27.9 abc	38.4 bc	147 c	10.0 ab	236.0 a	256.1 ab
	PR-M	27.7 bc	42.4 ab	160 c	11.4 ab	110.4 b	280.5 ab
	PR-H	27.0 c	40.3 abc	231 a	11.3 ab	126.8 ab	210.0 ab
	PA-L	31.0 ab	45.8 a	191 b	12.7 a	69.6 b	298.8 ab
	PA-M	32.5 a	47.1 a	221 a	9.3 ab	38.3 b	164.9 b
	PA-H	33.3 a	48.2 a	143 c	9.8 ab	nd	129.0 b

注(Note): PR-L、PR-M和PR-H分别代表施加低、中和高量的磷矿粉 The PR-L, PR-M and PR-H indicated low, medium and high amounts of raw phosphate rocks respectively; PA-L、PA-M和PA-H分别代表施加低、中和高量的活化的磷矿粉 The PA-L, PA-M and PA-H indicated low, medium and high amounts of activated phosphate rocks respectively. 同列数据后不同字母表示同种磷矿粉不同处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters are significantly different among different treatments of the same phosphate rock type at the 5% level. nd表示低于仪器检出限,未测出 nd means the value is lower than the instrument detection limit.

磷矿粉处理的莴苣叶片SPAD值表现为活化磷矿粉>磷矿粉>对照。

2.1.3 不同磷矿粉处理对莴苣Vc含量的影响 表4显示了南漳磷矿粉不同处理对莴苣各部分Vc含量的影响。与对照相比,施加不同量的南漳磷矿粉后,莴苣叶片、茎中Vc含量增高;施加活化的南漳磷矿粉后,莴苣叶片和茎中Vc含量都随着施加量的增加而降低。施加保康磷矿粉处理后,莴苣叶片中Vc含量随着施加量的增加而增加。当施加量达到2.32 g/kg土时,叶片Vc含量比对照提高了37.5%。莴苣茎中Vc含量随着磷矿粉施加量的增加也呈现同样的变化规律。施加保康活化磷矿粉后,莴苣叶片中的Vc含量随着活化磷矿粉的施加量先增加后降低,而莴苣茎中的Vc含量随磷矿粉施加量的增加而降低。

综上所述,施加磷矿粉和活化磷矿粉都可以一定程度地提高莴苣各部分Vc的含量。但是随着施加浓度的增加,磷矿粉和活化磷矿粉提供磷的能力不同,当施加的活化磷矿粉达到较高浓度时,莴苣各部分的Vc含量随着施加浓度的增加而降低,这可能是由于土壤中磷供应过量所致,作用机理目前尚不清楚,有待进一步研究。

2.1.4 不同磷矿粉处理对莴苣硝酸盐含量的影响 由表4可知,施加未活化磷矿粉后,莴苣叶片中硝酸盐含量随着磷矿粉施加量的增加而先增加后降低,但均比对照高。这可能是因为在植物代谢中,磷和氮以不同方式互相影响所致。土壤有效态磷酸盐含量低时,植物迅速吸收无机氮化物,并在体内累积。当有效态磷酸盐丰富时,对无机氮化物吸收降低[15]。莴苣茎中的硝酸盐含量随着磷矿粉的施加量增加而降低。施加草酸活化磷矿粉同样可以降低莴苣各部分中硝酸盐含量,并且随着活化磷矿粉施加量的增加,各部分中硝酸盐含量逐渐降低。由试验结果可知,活化磷矿粉降低莴苣各部分硝酸盐含量的效果要显著强于未活化磷矿粉。研究表明,植物体内硝酸盐的累积量很大程度取决于土壤氮磷

比[16]。等氮条件下,增施磷肥,有降低植株体内硝酸盐含量的作用[17]。也有研究[18]指出,磷不足时,硝态氮的吸收下降,从而降低硝态氮的积累;磷充足时,磷对作物氮素代谢的影响具有双重性,它既能促进作物对硝态氮的吸收,也增强硝酸盐还原同化。

综上所述,磷矿粉和活化磷矿粉对莴苣硝酸盐累积影响的大小在很大程度上决定于土壤有效磷含量。

2.2　磷矿粉处理对污染土壤上莴苣重金属含量的影响

2.2.1 不同磷矿粉处理对莴苣根部镉含量的影响

图 1 显示,在对照处理中,莴苣根部鲜样中镉含量为 1.41 mg/kg,施加南漳磷矿粉后,镉的含量比对照明显下降,最高降幅为 29.5%;施加活化的南漳磷矿粉后,镉的含量最大降幅为 55.1%。可见施加磷矿粉和活化磷矿粉都可降低莴苣根对镉的吸收,活化磷矿粉效果更显著。施加不同量的保康磷矿粉和保康活化磷矿粉后,莴苣根中镉的含量表现出与南漳磷矿粉相同的变化规律。

不同处理莴苣地上部镉含量的变化见图 2。由图 2 可以看出, CK 处理莴苣地上部镉含量为 0.63 mg/kg(鲜样),施加南漳磷矿粉后,随着施加量的增

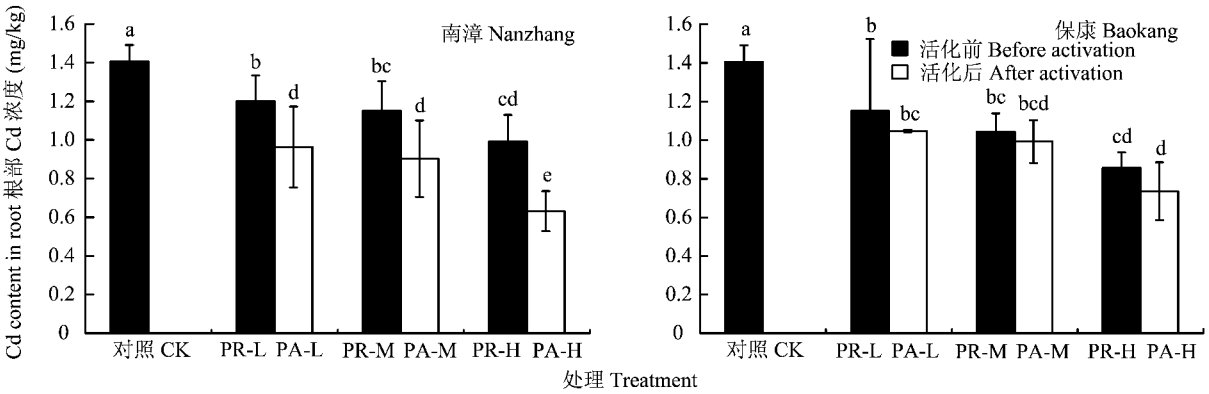

图 1　施加磷矿粉和活化磷矿粉后莴苣根部镉含量的变化

Fig. 1　The Cd content in roots of lettuce after applying raw and activated phosphate rocks

[注(Note): PR – L、PR – M 和 PR – H 分别代表施加低、中和高量的磷矿粉 The PR – L, PR – M and PR – H indicated low, medium and high amounts of raw phosphate rocks respectively; PA – L、PA – M 和 PA – H 分别代表施加低、中和高量的活化的磷矿粉 The PA – L, PA – M and PA – H indicated low, medium and high amounts of activated phosphate rocks respectively. 柱上不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among different treatments at the 5% level.]

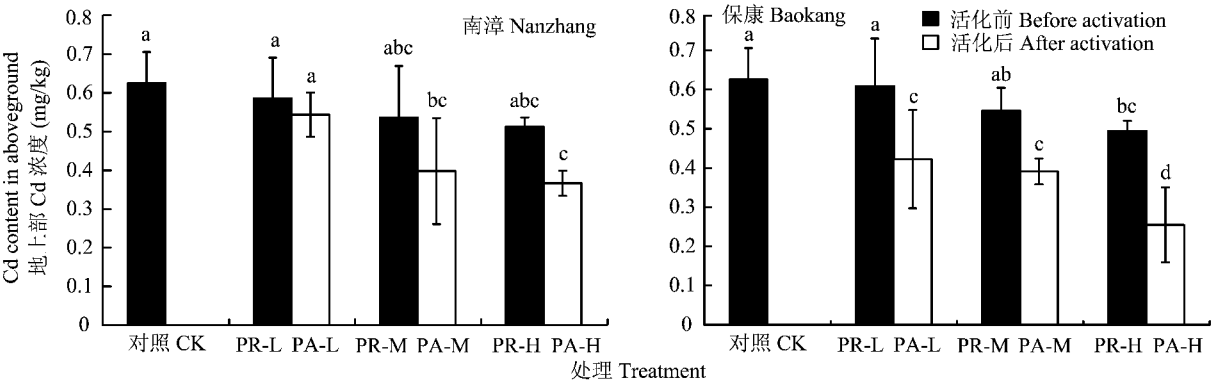

图 2　施加磷矿粉和活化磷矿粉后莴苣地上部镉含量的变化

Fig. 2　The Cd content in shoots of lettuce after applying raw and activated phosphate rocks

[注(Note): PR – L、PR – M 和 PR – H 分别代表施加低、中和高量的磷矿粉 The PR – L, PR – M and PR – H indicated low, medium and high amounts of raw phosphate rocks respectively; PA – L、PA – M 和 PA – H 分别代表施加低、中和高量的活化的磷矿粉 The PA – L, PA – M and PA – H indicated low, medium and high amounts of activated phosphate rocks respectively. 柱上不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among different treatments at the 5% level.]

加地上部镉含量由0.59 mg/kg降低到0.51 mg/kg，呈逐渐降低的趋势；施加活化的南漳磷矿粉莴苣地上部镉含量的变化趋势与施加磷矿粉一致，也表现为逐渐降低的趋势，但施加活化磷矿粉的降低效果更显著。施加保康磷矿粉和活化磷矿粉后，莴苣地上部镉含量的变化规律与施加南漳磷矿粉基本一致。

2.2.2 不同磷矿粉处理对莴苣中铜含量的影响　图3显示，不同磷矿粉处理后，莴苣根部铜含量的变化，可以看出，不经磷矿粉处理时，莴苣根部鲜样中铜含量为22.43 mg/kg。施加南漳磷矿粉后，与对照相比，莴苣根部铜含量最高降低了31.3%。施加活化南漳磷矿粉后，随着活化磷矿粉施加量的增加，莴苣根部铜含量比对照降低了29.3%～42.7%。施加不同浓度保康磷矿粉、活化磷矿粉后，莴苣根部铜含量的变化规律和施加南漳磷矿粉、活化磷矿粉基本一致。由此可见，施加磷矿粉和活化磷矿粉都可以降低莴苣根部铜含量，施加活化磷矿粉的效果更好。

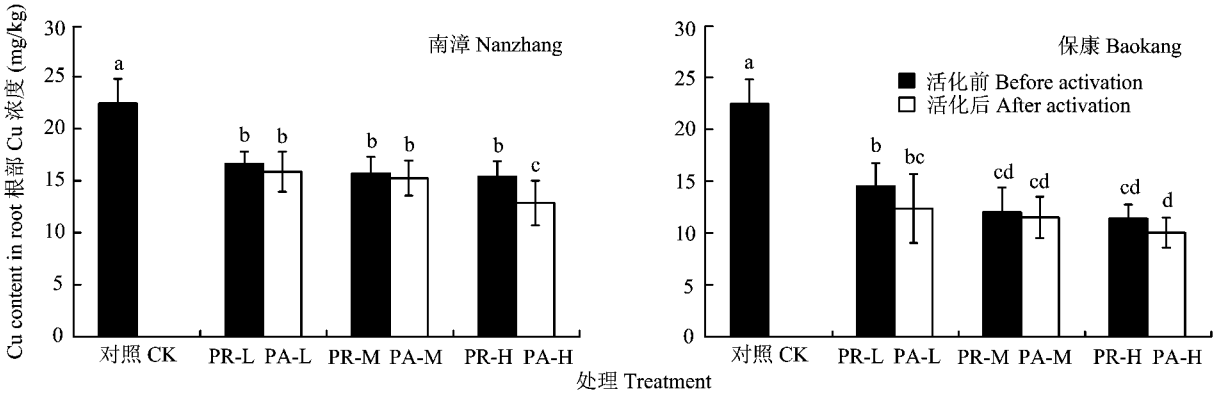

图3　施加磷矿粉和活化磷矿粉后莴苣根部铜含量变化

Fig. 3　Changes of the Cu content in roots of lettuce after applying phosphate rocks and activated phosphate rocks

[注(Note)：PR－L、PR－M和PR－H分别代表施加低、中和高量的磷矿粉 The PR－L, PR－M and PR－H indicated low, medium and high amounts of raw phosphate rocks respectively; PA－L、PA－M和PA－H分别代表施加低、中和高量的活化的磷矿粉 The PA－L, PA－M and PA－H indicated low, medium and high amounts of activated phosphate rocks respectively. 柱上不同字母表示处理间在5%水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among different treatments at the 5% level.]

从图4可以看出，对照处理的莴苣地上部铜含量为1.16 mg/kg，施加不同量的南漳磷矿粉后，莴苣地上部铜含量显著降低，施加活化磷矿粉后，莴苣地上部铜含量比对照明显降低，最大降幅为53.0%；施加保康磷矿粉后，随着施加量的增加，莴苣地上部铜含量与对照相比也有不同程度的降低，最大降幅29.1%；施加活化保康磷矿粉后，与对照相比，莴苣地上部铜含量随着施加量的增加逐渐降低，最大降低幅度53.4%。可见，施加磷矿粉和活化磷矿粉都可以降低莴苣地上部的铜含量，相比而言，活化磷矿粉的降低幅度更大。

磷矿粉经草酸活化后，一方面草酸的强酸性和螯合作用增加磷矿粉中难溶性磷的释放[19]，提高土壤有效磷含量(见表5)；另一方面，施加磷矿粉后，通过沉淀作用和吸附作用改变了土壤中重金属的形态[20-22]，降低了交换态重金属含量，进而可引起作物吸收重金属的量下降。同时，磷矿粉中所含的Ca^{2+}、Mg^{2+}在经草酸活化后被溶出，对重金属离子具有拮抗作用，参与竞争植物根系上的吸收点位，抑制植物对重金属的吸收[23]。因此，经草酸活化的磷矿粉能更有效地提高土壤中有效磷和碱金属离子，降低莴苣对重金属的吸收。土壤pH的变化能改变土壤中磷酸盐的形态：低pH(< 6.0)下磷主要以$H_2PO_4^-$形态存在；而在高pH(> 7.2)下则主要以HPO_4^{2-}形态为主[24]。由表5还可以看出，随着磷矿粉施加量的增加，土壤的pH值逐渐增加，但变化不显著；施加草酸活化的磷矿粉后，随着施加量的增加土壤pH值显著增加，这可能是因为磷矿粉经草酸活化后Ca^{2+}溶出所致。总体来讲，施加磷矿粉和活化磷矿粉后，土壤中的有效磷(主要含$H_2PO_4^-$和HPO_4^{2-}形态)含量增加。土壤中的交换态Cd、Cu离子容易与$H_2PO_4^-$和HPO_4^{2-}离子发生共沉淀或形成难溶的络合物[25]，从而降低交换态重金属的含量。

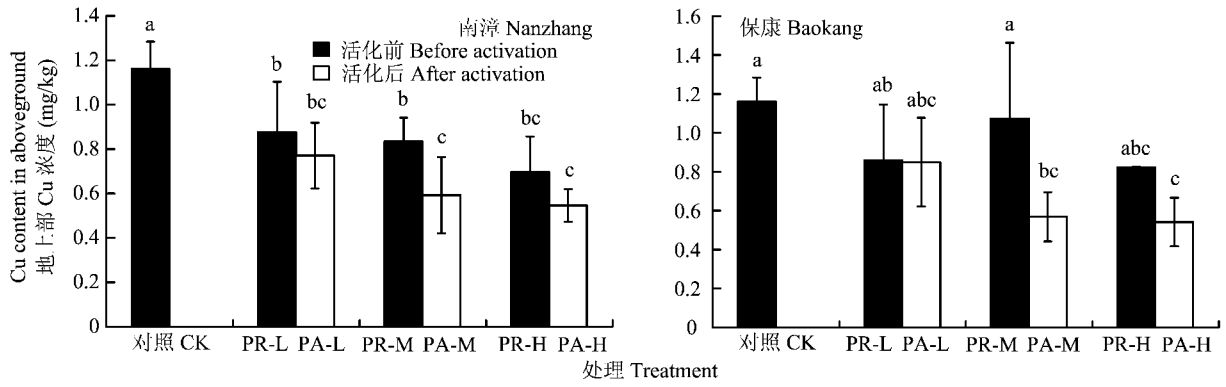

图 4　施加磷矿粉和活化磷矿粉后莴苣地上部铜含量的变化

Fig. 4　The changes of Cu content in the shoot of the lettuce after applying phosphate rocks and activated phosphate rocks

[注(Note): PR – L、PR – M 和 PR – H 分别代表施加低、中和高量的磷矿粉 The PR – L, PR – M and PR – H indicated low, medium and high amounts of raw phosphate rocks respectively; PA – L、PA – M 和 PA – H 分别代表施加低、中和高量的活化的磷矿粉 The PA – L, PA – M and PA – H indicated low, medium and high amounts of activated phosphate rocks respectively. 柱上不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among different treatments at the 5% level.]

表 5　施加磷矿粉和活化磷矿粉后土壤化学性质的变化

Table 5　Changes of the chemical properties of the soils after applying raw and oxalic acid activated phosphate rocks

磷矿粉种类 Phosphate rock type	处理 Treatment	交换态 Cd Ex-Cd (mg/kg)	交换态 Cu Ex-Cu (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	交换性 Ca^{2+} Ex-Ca^{2+} (cmol/kg)	交换性 Mg^{2+} Ex-Mg^{2+} (cmol/kg)	pH
南漳磷矿粉 Nanzhang phosphate rock	CK	1.90 a	3.57 a	44.8 d	10.6 c	1.34 e	5.64 d
	PR – L	1.66 b	2.69 b	54.4 c	11.0 c	1.43 d	5.88 cd
	PR – M	1.53 c	2.43 b	44.1 d	10.7 c	1.55 bc	5.92 c
	PR – H	1.51 c	1.89 c	45.0 d	11.3 bc	1.70 a	6.29 b
	PA – L	1.51 c	1.95 c	57.9 bc	11.2 c	1.47 cd	6.41 b
	PA – M	1.15 d	1.21 d	64.5 b	12.2 a	1.59 b	7.26 a
	PA – H	1.19 d	1.10 d	84.3 a	12.2 a	1.79 a	7.36 a
保康磷矿粉 Baokang phosphate rock	CK	1.90 a	3.57 a	44.8 d	10.6 d	1.33 d	5.64 d
	PR – L	1.89 a	2.90 b	49.8 d	10.6 d	1.41 cd	5.90 d
	PR – M	1.97 a	1.98 c	50.7 d	11.1 cd	1.56 c	6.29 c
	PR – H	1.88 a	1.83 cd	50.6 d	11.1 cd	1.74 b	6.41 c
	PA – L	1.69 b	1.57 d	71.8 c	12.1 bc	1.55 c	6.82 b
	PA – M	1.51 c	1.56 d	106.6 b	12.9 b	1.71 b	7.32 a
	PA – H	1.49 c	1.66 cd	163.3 a	15.0 a	1.99 a	7.51 a

注(Note): PR – L、PR – M 和 PR – H 分别代表施加低、中和高量的磷矿粉 The PR – L, PR – M and PR – H indicated low, medium and high amounts of raw phosphate rocks respectively; PA – L、PA – M 和 PA – H 分别代表施加低、中和高量的活化的磷矿粉 The PA – L, PA – M and PA – H indicated low, medium and high amounts of activated phosphate rocks respectively. 同列数据后不同字母表示同种磷矿粉不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significantly different among different treatments of the same phosphate rock type at the 5% level .

3 结论

1）施加磷矿粉和活化磷矿粉可有效促进莴苣的生长，提高其品质。与对照相比，随着磷矿粉和活化磷矿粉施加量的增加，莴苣的株高、叶绿素 SPAD 值、Vc 含量均有所提高，表现为活化磷矿粉 > 磷矿粉 > 对照；硝酸盐含量则随磷矿粉和活化磷矿粉施加量的增加而降低。

2）施加磷矿粉和活化磷矿粉后，可显著降低莴苣地上部和根的镉、铜的含量，其中莴苣地上部镉、铜的含量比对照的最大降幅达 59.3%、53.4%，根中镉、铜的含量比对照最大可降低 55.1%、55.24%，降低效果表现为活化磷矿粉 > 磷矿粉 > 对照。

参 考 文 献：

[1] 韦朝阳，陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报，2001，21(7)：1197-1203.
Wei C Y，Chen T B. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil：a review of studies in China and abroad[J]. Acta Ecol. Sin.，2001，21(7)：1197-1203.

[2] 王庆仁，李继云，李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究[J]. 生态学报，1999，19(3)：417-421.
Wang Q R，Li J Y，Li Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus[J]. Acta Ecol. Sin.，1999，19(3)：417-421.

[3] 李庆逵，蒋柏藩，鲁如坤. 中国磷矿的农业利用[M]. 南京：江苏科学技术出版社，1992. 12.
Li Q K，Jiang B F，Lu R K. Agriculture utility of Chinese phosphate rock[M]. Nanjing：Jiangsu Science and Technology Press，1992. 12.

[4] 李俊艳，胡红青，李荣纪，等. 改性磷矿粉对油菜幼苗生长和土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(2)：441-446.
Li J Y，Hu H Q，Li R J *et al*. Modified phosphate rock by γ-poly glutamic acid and its effects on the growth of rapeseed seedlings and soil properties[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.，2009，15(2)：441-446.

[5] Kpomblekou A K，Tabatabai M A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils[J]. Agric. Ecosyst. Environ.，2003，100：275-284.

[6] 王光华，周德瑞，杨谦，等. 低分子量有机酸对磷矿粉的释磷效应[J]. 农业环境科学学报，2004，23(1)：80-84.
Wang G H，Zhou D R，Yang Q *et al* . Effects of low weight organic acids on release of phosphorus form rock phosphate[J]. J. Agro-Environ. Sci.，2004，23(1)：80-84.

[7] Beligh M，Faouzi A. Agronomic application of olive mill wastewaters with phosphate rock in a semi-arid Mediterranean soil modifies the soil properties and decreases the extractable soil phosphorus[J]. J. Environ. Manag.，2006，99(3)：245-251.

[8] Elliott H A，Shastri N L. Extractive decontamination of metal-polluted soils using oxalate[J]. Water Air Soil Poll.，1999，110：335-346.

[9] 杨海琳，廖柏寒. 低分子有机酸去除土壤中重金属条件的研究[J]. 农业环境科学学报，2010，29(12)：2330-2337.
Yang H L，Liao B H. Extraction condition for heavy metals from contaminated soil by using low molecular organic acids[J]. J. Agro-Environ. Sci.，2010，29(12)：2330-2337.

[10] 刘永红. 一种利用有机酸活化磷矿粉制备磷肥的方法：中国，200910272140.3[P]. 2009-09.
Liu Y H. A method of making phosphate fertilizer using phosphate rocks activated by organic acid：China，200910272140.3[P]. 2009-09.

[11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社，2005.
Li H S. Plant physiological and biochemical principles and experimental techniques [M]. Beijing：Higher Education Press，2005.

[12] Tessier A，Campbell P G C，Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace turkey[J]. Anal. Chem.，1979，51(7)：844-850.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000.30-107.
Bao S D. Soil agriculturalization analysis[M]. Beijing：China Agriculture Press，2000.30-107.

[14] 宋玉芳，周启星，许华夏，等. 重金属对土壤中小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒性[J]. 应用生态学报，2002，13(4)：459-462.
Song Y F，Zhou Q X，Xu H X *et al*. Eco-toxicology of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of wheat in soils[J]. Chin. J. Appl. Ecol.，2002，13(4)：459-462.

[15] 熊国华. 钾与尿素和有机肥配施对菜园土壤环境质量及蔬菜品质的影响[D]. 杭州：浙江大学硕士学位论文，2004.
Xiong G H. Effect of combined application of potassium fertilizer with urea and organic fertilizer on the garden soil quality and vegetables quality [D]. Hangzhou：Ms thesis，Zhejiang University，2004.

[16] 高祖明，张耀栋，张道勇，等. 氮磷钾对叶菜硝酸盐积累和硝酸盐还原酶、过氧化物酶活性的影响[J]. 园艺学报，1989，16(4)：293-298.
Gao Z M，Zhang Y D，Zhang D Y *et al*. Effect of N P K on nitrate accumulation and nitrate reductase，peroxidase activity in leaf vegetables[J]. Acta Hortic. Sin.，1989，16(4)：293-298.

[17] 周根娣，卢善玲. 磷钾肥、光照、贮藏加工对蔬菜硝酸盐含量的影响[J]. 上海农业学报，1991，7(2)：53-56.
Zhou G D，Lu S L. Effects of phosphorus and potassium fertilizers，shining，storage and processing on nitrate content in vegetable[J]. Acta Agric. Shanghai，1991，7(2)：53-56.

[18] 王朝辉, 宗志强, 李生秀, 陈宝明. 蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 79-83.
Wang C H, Zong Z Q, Li S X *et al*. Nitrate accumulation in vegetables and its residual in vegetable fields[J]. Environ. Sci., 2002, 23(3): 79-83.

[19] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 低分子量有机酸对不同磷酸盐的活化作用[J]. 华北农学报, 2001, 16(1): 99-104.
Lu W L, Cao Y P, Zhang F S. The effect of low-molecular-weight organic acids on phosphorus release from different phosphates[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2001, 16(1): 99-104.

[20] Ma Q Y, Traina S J, Logan T J, Ryan J A. In situ lead immobilization by apatite[J]. Environ. Sci. Technol., 1993, 27: 1803-1810.

[21] Ma Q Y, Logan T J, Traina S J, Ryan J A. Effects of NO_3^-, Cl^-, F^-, SO_4^{2-} and CO_3^{2-} on Pb^{2+} immobilization by hydroxyapatite[J]. Environ. Sci. Technol., 1994, 28: 408-418.

[22] 陈世宝, 李娜, 王萌, 韦东普. 利用磷进行铅污染土壤原位修复中需要考虑的几个问题[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 203-209.
Chen S B, Li N, Wang M, Wei D P. Factors needed to be reconsidered during *in situ* remediation practices of Pb-polluted soils with P[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(1): 203-209.

[23] 陈晓婷, 王果, 梁志超, 等. 钙镁磷肥和硅肥对 Cd、Pb、Zn 污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, 31(1): 109-112.
Chen X T, Wang G, Liang Z C *et al*. Effects of calcium magnesium phosphate and silicon fertilizer on the growth and element uptake of pakchoi in cadmium, lead and zinc contaminated soil[J]. J. Fujian Agric. For. Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2002, 31(1): 109-112.

[24] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. 199.
Huang C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. 199.

[25] 刘芳, 刘世亮, 介晓磊, 等. 石灰性土壤中磷镉交互作用对菠菜生长及其吸收磷镉的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 310-314.
Liu F, Liu S L, Jie X L *et al*. Influence of P and Cd interaction on *Spinach growth* and uptake P and Cd in calcareous soil[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2005, 21(4): 310-314.