

DOI: 10.5846/stxb201405100949

区惠平, 刘昔辉, 黄金生, 周柳强, 曾艳, 韦运兰, 谢如林, 谭宏伟. 广西典型红壤旱地施用钙镁磷肥对玉米产量及其镉累积的影响. 生态学报, 2014, 34(18): 5300-5305.

Ou H P, Liu X H, Huang J S, Zhou L Q, Zeng Y, Wei Y L, Xie R L, Tan H W. Effect of calcium-magnesia phosphate fertilizer on maize yield and its cadmium accumulation in upland red soil in Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5300-5305.

广西典型红壤旱地施用钙镁磷肥 对玉米产量及其镉累积的影响

区惠平¹, 刘昔辉², 黄金生¹, 周柳强¹, 曾艳¹, 韦运兰¹, 谢如林, 谭宏伟^{2,*}

(1. 广西农科院农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 2. 广西农科院甘蔗研究所, 南宁 530007)

摘要:在广西典型类型红壤旱地布置玉米磷肥施用量的田间试验, 研究不同钙镁磷肥施用量(磷肥 Cd 含量为 0.0651 mg/kg)对玉米产量及地上部 Cd 累积的影响。结果表明, 与不施磷肥处理(CK)相比, 施磷肥可分别显著提高春、秋玉米籽粒产量 8.2%—13.1% 和 13.7%—20.0%。高磷(600 kg P₂O₅/hm²)处理的春玉米秸秆产量比 CK 显著提高 11.4%; 施磷处理春、秋玉米秸秆 Cd 含量分别下降 2.7%—45.8% 和 11.0%—43.6%; 而籽粒 Cd 含量分别下降 13.0%—40.6% 和 9.9%—31.5%, 且秸秆和籽粒的 Cd 含量及累积量均随施磷量的增加而逐渐降低, 其中以高磷处理最为显著。玉米秸秆及籽粒 Cd 累积量在高磷处理下(600 kg P₂O₅/hm²)分别比低磷处理(75—300 kg P₂O₅/hm²)降低 13.6%—41.5% 和 8.8%—29.3%。相关分析表明, 玉米 Cd 含量与土壤 pH 呈显著负相关, 与土壤有效 Cd 含量呈显著正相关。施磷提高土壤 pH, 而降低土壤有效 Cd 含量。高量磷肥施用降低土壤 Cd 的有效性进而降低玉米对 Cd 的吸收累积。

关键词:磷肥施用量; 镉; 累积量; 玉米; 红壤

Effect of calcium-magnesia phosphate fertilizer on maize yield and its cadmium accumulation in upland red soil in Guangxi

OU Huiping¹, LIU Xihui², HUANG Jinsheng¹, ZHOU Liuqiang¹, ZENG Yan¹, WEI Yunlan¹, XIE Rulin¹, TAN Hongwei^{2,*}

1 Agricultural Resources and Environmental Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China

2 Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China

Abstract: A field experiment was carried out to evaluate effects of calcium-magnesia phosphate fertilizer application rate on maize yield and its cadmium accumulation in representative red soil of Guangxi province. Phosphate fertilizer with 0.0651 mg Cd/kg was applied at five rates (0, 75, 150, 300 and 600 kg P₂O₅/hm²). In comparison with CK, phosphate fertilizer significantly increased the grain yield by 8.2%—13.1% for spring maize and 13.7%—20.0% for autumn maize, and the straw biomass of spring maize increased by 11.4% under high phosphate treatment (600 kg P₂O₅/hm²). Phosphate fertilization decreased Cd contents in straw by 2.7%—45.8% and 11.0%—43.6%, while decreased Cd contents in grain by 13.0%—40.6% and 9.9%—31.5% for spring and autumn maize, respectively. Moreover, the Cd concentration and accumulation in straw and grain decreased with the increasing phosphate fertilizer. Compared with low phosphate treatments (75—300 kg P₂O₅/hm²), the Cd accumulation in straw and grain under high phosphate treatment (600 kg

基金项目:国家自然科学基金(U1033004); 广西自然科学基金(2012GXNSFBA053062, 2013GXNSFBA019057); 广西农科院基金(2012YZ20, 2013YQ01, 2013YQ02, 2013YF06, 2014JZ18); 农业部科技专项(201003014)

收稿日期: 2014-05-09; 修订日期: 2014-08-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hwtan@gxaas.net

P_2O_5/hm^2) reduced by 13.6%—41.5% and 8.8%—29.3%, respectively. Correlation analysis showed that there was a negative linear relationship between Cd concentration in maize and soil pH, but positive linear relationship between Cd concentration and soil available Cd. High phosphate fertilizer could reduce the Cd phytoavailability, thus attributed to the lower Cd accumulation in maize.

Key Words: phosphate fertilizer rate; cadmium; accumulation; maize; red soil

镉(Cd)是一种重金属元素,位列联合国环境规划署提出的 12 种具有全球性意义的危险化学品之首。土壤 Cd 通过植物吸收经食物链进入人体,是危害人类健康的主要途径。因此,查明土壤中 Cd 污染源,并从源头上加以控制,对改善土壤环境质量,确保农产品安全具有重要意义。

由于磷矿中伴生大量的 Cd,其 60%—80%的 Cd 会在磷肥的生产过程中转移到肥料中去^[1],磷肥施用成了 Cd 在土壤中累积的主要原因,占人类活动对土壤 Cd 总贡献的 54%—58%^[2]。人们对磷肥施用的关注已超出原来单纯的农学效应,其潜在 Cd 的环境风险更加备受关注。国外研究表明,长期施用含 Cd 磷肥显著增加土壤 Cd 全量^[3-5]及有效含量^[5],两者间呈显著的剂量效应^[6];施用高 Cd 磷肥或增施含 Cd 磷肥均可促进作物 Cd 累积量增加^[7-8]。说明磷肥中的 Cd 可对土壤环境以及农产品的 Cd 安全产生显著影响。

近年来,我国学者在污染农田上开展了磷肥施用对作物 Cd 累积的影响研究,但主要侧重于磷肥的修复效应^[9-11],而忽视磷肥中的 Cd 对作物 Cd 累积的影响。针对赤红壤上由于低 Cd 磷肥不同施用量诱发的玉米 Cd 累积及生物有效性更是未见报道。本实验采用田间试验,研究低 Cd 钙镁磷肥不同施用量下土壤 Cd 的有效性及其玉米地上部秸秆和籽粒对

土壤 Cd 的吸收、累积特征,以期磷肥的合理施用以及玉米生产中控制和减少玉米对土壤 Cd 的吸收提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

采用大田试验,于 2011 年在广西武鸣里建英才村进行。该区属亚热带湿润季风气候区,年平均气温 21.7℃,年均降水量 1300 mm。供试春、秋玉米 (*Zea mays*) 品种均为迪卡 008。供试土壤为砂页岩发育的铁质湿润锥形土,有机质 27.8 g/kg,全氮 1.10g/kg,碱解氮 134 mg/kg,速效磷 14 mg/kg,速效钾 112 mg/kg,全 Cd 0.1504 mg/kg, pH(H_2O) 5.40。供试磷肥为钙镁磷肥,其中 P_2O_5 含量为 180 g/kg, Cd 含量为 0.0651 mg/kg。

1.2 试验设计

磷肥施用量以 P_2O_5 计,以农民习惯磷肥施用量为基础,采用翻倍施用量效仿多年连续累积施用量。共设 4 个施 P_2O_5 水平,分别用 P1、P2、P3 和 P4 表示,其中 P1 处理为单造当地农民习惯磷肥施用量, P2、P3 和 P4 处理分别为 1a、2a 和 4a 累计施用量,以不施磷肥作为对照(CK 处理)。氮、磷、钾肥具体施用量和伴随钙镁磷肥施用进入农田的 Cd 含量见表 1。每处理 3 次重复,随机区组排列。小区面积

表 1 玉米 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用量及伴随磷肥施用进入土壤的 Cd 含量

Table 1 Application rate of N, P_2O_5 , K_2O for maize and cadmium input with phosphate application

处理(施肥水平) Treatments	春玉米 Spring corn				秋玉米 Autumn corn			
	$P_2O_5/$ (kg/hm ²)	Cd/ (mg/hm ²)	N/ (kg/hm ²)	$K_2O/$ (kg/hm ²)	$P_2O_5/$ (kg/hm ²)	Cd/ (mg/hm ²)	N/ (kg/hm ²)	$K_2O/$ (kg/hm ²)
CK	0	0	240	225	0	0	240	225
P1	75	27.13			75	27.13		
P2	150	54.25			150	54.25		
P3	300	108.50			300	108.50		
P4	600	217.00			600	217.00		

25.2 m²,小区间以田间小沟隔开。氮、磷、钾肥分别按基肥:追肥为 1:1、1:0、1:1 的比例施用。基肥采用沟施的方法,施肥后盖土。追肥采用穴施的方法施于两株玉米之间,施肥后盖土。基肥和追肥春玉米分别于 2 月 28 日和 6 月 21 日施入,秋玉米于 7 月 30 日和 9 月 14 日施用。春、秋玉米分别于 2 月 23 日和 7 月 30 日播种,采用单行种植,行距为 60 cm,株距为 30 cm,种植密度 55545 株/hm²,于 7 月 20 日和 11 月 25 日收获。

1.3 取样及分析

玉米收获时,全小区分秸秆及籽粒测产。同时,每小区取生长均匀的 6 兜平地收获地上部和采集耕层土壤样品。地上部分秸秆和籽粒两个部位,其中秸秆切短为 2—3 cm 混合均匀,于 105℃ 杀青 30 min,60℃ 烘干粉碎,过 60 目筛备用,籽粒 60℃ 烘干粉碎,过 60 目筛。用 HNO₃-HClO₄ (2:1) 湿法消化^[12],石墨炉原子吸收法^[13]测定 Cd 含量。土壤自然风干,粉碎,过 18 目,采用 NH₄OAc 提取^[14],石墨炉原子吸收法^[13]测定土壤有效 Cd 含量,1:2.5 的土水比浸提,电位法^[12]测定土壤 pH。

1.4 数据处理

数据处理、作图、方差分析等采用 Excel 2007 和 DPS 7.05 等软件完成,采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施磷量对玉米产量的影响

由表 2 可以看出,施磷显著增加玉米籽粒产量。与 CK 相比,春、秋玉米籽粒产量施磷处理分别提高 8.2%—13.1% 和 13.6%—20.0%,差异达到显著水平 ($P<0.05$);然而,不同施磷量间玉米籽粒产量差异不显著。春玉米秸秆产量以 P4 处理最高,显著高于对照 11.4%。春、秋玉米秸秆产量 P1—P3 处理均与对照相当。

2.2 施磷量对玉米秸秆和籽粒 Cd 含量的影响

由表 3 可看出,茎叶和籽粒 Cd 含量均低于国家粮食卫生控制标准 0.2 mg/kg¹ 的规定 (GB2762—2005)。施磷降低玉米秸秆和籽粒对 Cd 的吸收,且玉米秸秆和籽粒 Cd 含量随施磷量的增加而减少。增施 75—600 kg P₂O₅/hm²,春、秋玉米秸秆 Cd 含量降幅分别达 2.7%—45.8% 和 11.0%—43.6%,籽粒 Cd 含量降幅达 13.0%—40.6% 和 9.9%—31.5%。其

中,P3 和 P4 处理显著低于对照和 P1 处理。

表 2 不同施磷量对玉米生物量的影响

Table 2 Effect of different phosphate fertilization rate on maize biomass

	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/ (kg/hm ²)	秸秆产量 Biomass/ (kg/hm ²)
春玉米 Spring corn	CK	4449.6±139.4 b	6262.5±278.0 b
	P1	4813.6±201.0 a	6640.7±83.8 ab
	P2	4985.1±138.6 a	6794.8±206.1 ab
	P3	5033.5±145.4 a	6814.9±175.0 ab
	P4	4951.5±219.9 a	6975.6±66.6 a
秋玉米 Autumn corn	CK	3013.5±64.4 b	4953.1±45.6 a
	P1	3425.0±44.1 a	5237.3±200.7 a
	P2	3555.5±30.8 a	5269.1±116.7 a
	P3	3617.6±97.9 a	5349.6±94.9 a
	P4	3502.7±66.8 a	5306.1±92.8 a

不同小写字母分别代表处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)

表 3 不同施磷量对玉米秸秆和籽粒 Cd 含量的影响

Table 3 Effect of phosphate fertilization rate on Cd concentrations in maize straw and grain

	处理 Treatment	秸秆 Cd 含量 Cd concentration in straw/ (mg/kg)	籽粒 Cd 含量 Cd concentration in grain/ (mg/kg)
春玉米 Spring corn	CK	0.084±0.001 a	0.014±0.001 a
	P1	0.082±0.000a	0.013±0.000 ab
	P2	0.075±0.001b	0.011±0.000 bc
	P3	0.071±0.000 c	0.009±0.001 cd
	P4	0.045±0.001 d	0.009±0.001 d
秋玉米 Autumn corn	CK	0.100±0.002 a	0.052±0.001 a
	P1	0.089±0.002 b	0.047±0.002 ab
	P2	0.074±0.002 c	0.045±0.002 ab
	P3	0.065±0.007 cd	0.043±0.003 bc
	P4	0.057±0.002 d	0.036±0.003 c

2.3 施磷量对玉米 Cd 累积量的影响

由表 4 可以看出,与对照相比,施入 75 kg P₂O₅/hm²对玉米秸秆及籽粒 Cd 累积量无显著影响;当施磷量大于 300 kg P₂O₅/hm²时,玉米秸秆和籽粒 Cd 累积量显著下降。随施磷量的增加,玉米秸秆及籽粒 Cd 累积量逐渐下降,以 P4 处理最低,分别低于 P1、P2 和 P3 处理 13.6%—41.5% 和 8.8%—29.3%。

2.4 不同施磷量对土壤有效态 Cd 含量的影响

由图 1 可以看出,与 CK 处理相比,磷肥施用不同程度地降低土壤有效 Cd 含量,其中,春玉米中 P₂、P₃ 和 P₄ 处理土壤有效 Cd 含量分别降低 4.6%、7.1% 和 7.3%;秋玉米分别降低 2.7%、5.6% 和 12.8%。

表 4 施磷量对玉米秸秆和籽粒 Cd 累积量的影响

Table 4 Effect of phosphate fertilization rate on Cd accumulation in maize straw and grain

	处理 Treatment	Cd 累积量 Cd accumulation amount/(mg/hm ²)		
		籽粒 Grain	秸秆 Residue	合计 Total
春玉米 Spring corn	CK	65.4±9.8 a	526.5±41.8 a	591.9±50.9 a
	P1	61.4±4.4 a	543.4±10.7 a	604.7±6.5 a
	P2	57.5±5.2 ab	508.5±21.1 ab	566.0±19.5 ab
	P3	47.6±5.9 bc	484.6±15.6 b	532.2±20.7 b
	P4	43.4±10.1 c	318.0±12.4 c	361.4±22.5 c
秋玉米 Autumn corn	CK	157.8±4.2 a	497.1±25.3 a	654.9±29.1 a
	P1	161.6±10.6 a	466.9±15.7 a	628.5±11.4 a
	P2	161.1±15.7 a	387.5±4.5 b	548.6±13.9 b
	P3	153.8±11.9 a	347.5±60.9 bc	501.4±72.6 b
	P4	125.3±15.4 b	300.3±24.9 c	425.6±39.8 c

土壤 Cd 的有效性随磷肥施用量的不同呈现不同程度的差异。施用量 75—600 kg P₂O₅/hm² 范围内,随着施磷量的增加,土壤有效 Cd 含量下降。春玉米栽培季节,P1 处理中土壤有效 Cd 含量比 P2、P3、P4 处理分别提高 5.7%、8.7% 和 8.8%,差异显著;但 P2、P3、P4 处理间差异不显著;秋玉米栽培季节,土壤有效 Cd 含量除了 P1 与 P4 处理间差异显著外,其他处理间差异不显著。

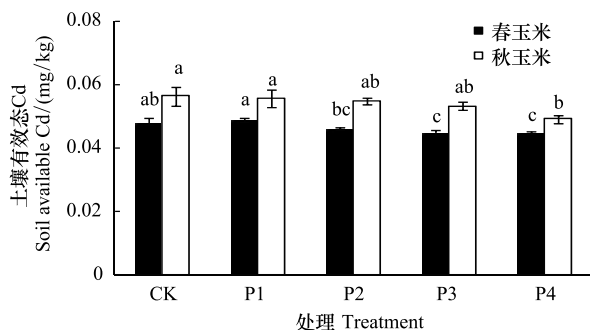


图 1 不同施磷施用量下土壤有效 Cd 含量变化

Fig.1 Changes of soil available Cd content under different phosphate fertilization rate

CK, P₁—P₄ 为施肥水平

2.5 不同施磷量对土壤 pH 的影响

从图 2 可以看出,施用磷肥提高玉米地土壤 pH,且土壤 pH 随施磷量的增加而升高。当施磷量为 600kg/hm²时,春玉米土壤 pH 分别比 CK、P₁、P₂ 和 P₃ 处理分别提高 0.31、0.24、0.22 和 0.05 个 pH 单位,秋玉米分别提高 0.55、0.51、0.45 和 0.45 个 pH 单位,间差异显著。

2.6 玉米 Cd 含量与土壤有效 Cd 含量的关系

将玉米 Cd 含量与土壤 pH 和有效 Cd 含量作相

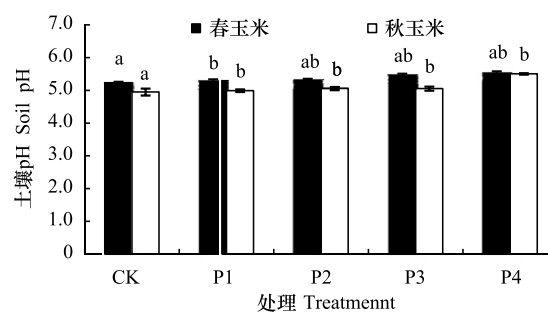


图 2 不同磷肥施用量下土壤 pH 的变化

Fig. 2 Changes of soil pH under different phosphate fertilization rate

关性分析(表 5)发现,玉米秸秆、籽粒 Cd 含量与土壤有效 Cd 呈显著正相关,与 pH 值呈显著负相关。而磷肥施用量与土壤有效 Cd 含量呈显著负相关,与 pH 值呈显著正相关。表明磷肥通过提高土壤 pH 和降低土壤有效 Cd 含量影响玉米对 Cd 的吸收累积。

3 讨论

研究指出,Cd 是生物迁移性极强的重金属,极易被植物吸收并在体内积累,超过一定限度可能会产生毒害而影响正常产量^[15]。本研究中,施磷显著增加玉米籽粒产量。说明磷肥中虽然含有一定的 Cd 含量,但这对玉米并无减产作用。试验在田间观察中也并没有发现玉米 Cd 毒害的症状。这可能与随磷肥进入土壤的 Cd 含量较低有关。众多研究表明,低浓度 Cd 对植物生长有积极的“刺激作用”,而较高的 Cd 含量才会对作物产生毒害作用^[16-17]。由玉米籽粒产量在不同的施磷处理间差异不显著,推断 P1 水平(75 kg P₂O₅/hm²)是玉米适宜的施磷量。

表 5 玉米 Cd 含量与土壤有效 Cd 含量的相关系数

Table 5 Correlation coefficients (*r*) between Cd content in corn and soil available Cd content

项目 Item	土壤 pH Soil pH	有效态 Cd Soil available Cd
春玉米 Spring corn		
秸秆 Cd 含量 Cd content in straw	-0.8757 **	0.7744 *
籽粒 Cd 含量 Cd content in grains	-0.9745 **	0.9148 **
磷肥施用量 Phosphate application rate	0.9464 **	-0.8302 *
秋玉米 Autumn corn		
秸秆 Cd 含量 Cd content in straw	-0.7768 *	0.8832 **
籽粒 Cd 含量 Cd content in grains	-0.9008 **	0.9644 **
磷肥施用量 Phosphate application rate	0.9469 **	-0.9972 **

* 和 ** 分别代表 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ ($n = 5$, $r_{0.05} = 0.751$, $r_{0.01} = 0.874$)

玉米籽粒 Cd 含量的多少直接关系人类的健康。本试验所有处理中玉米籽粒 Cd 含量均低于国家粮食卫生控制标准,说明施低 Cd 钙镁磷肥施用不会造成玉米 Cd 超标。相反,与 CK 相比,增施 75—600 kg P_2O_5/hm^2 ,玉米对 Cd 的吸收累积量随施磷量的增加而降低。其中,秸秆中 Cd 含量降幅达 2.7—45.8% (春玉米)和 11.0—43.6% (秋玉米);籽粒 Cd 含量降幅达 13.0—40.4% (春玉米)和 9.9—31.5% (秋玉米)。以上结果表明:施用磷肥既能提高作物产量,又能降低作物 Cd 污染。这一结果与国内外许多研究结论是相类似。Dheri 等^[18]的盆栽试验中,磷肥的施用不仅使得供试菠菜的生物量增加 34% (壤土)和 45% (沙土),而且减少了菠菜中 Cd 的含量。在 50 mg P_2O_5/kg 土的磷肥施用量下,磷肥增加小麦干物质重,同时减缓作物 Cd、Pb 毒害^[19]。Wang 等^[20]发现,磷矿粉、钙镁磷肥和过磷酸钙均可显著减少污染土壤中小白菜对 Cd 的吸收累积量。因而,钙镁磷肥施用可作为一个经济、有效地降低作物 Cd 吸收量的措施。

研究表明,pH 对 Cd 的生物有效性有重要影响。一方面,pH 值影响土壤对 Cd 的吸附容量,pH 值在 4.0—7.7 之间每上升 1 个 pH 值单位,土壤对 Cd 的吸附容量增加 3 倍,大大降低 Cd 向植物的迁移能力^[21]。另一方面,在碱性条件下,会生产 $CdCO_3$ 、 $Cd(OH)_2$ 沉淀。磷肥诱导土壤 pH 和表面电荷的提高从而提高土壤 Cd 的固定^[22];同时,磷肥本身与 Cd 形成磷酸 Cd 沉淀和含钙磷肥施用引起的植物钙与 Cd 的竞争吸收也可降低土壤 Cd 的生物有效性^[9,23]。本试验中,与 CK 相比,磷肥施用后土壤 pH 值上升,有效 Cd 含量下降(图 1,图 2),玉米秸秆、籽粒 Cd 含量与有效 Cd 含量显著正相关,与 pH 值显著负相关(表 5)。说明磷肥降低玉米吸收累积 Cd

是通过 pH 值的上升,有效 Cd 含量的下降实现的。

References:

- [1] Torbert H A, Daniel T C, Lemunyon J L, Jones R M. Relationship of soil test phosphorus and sampling depth to runoff phosphorus in calcareous and noncalcareous soils. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(4): 1380-1387.
- [2] He Z L. *Pollution and Soil Chemical Balance of the Beneficial Elements*. Beijing: China Environment Science Press, 1998: 129-130.
- [3] McGrath D, Tunney H. Accumulation of cadmium, fluorine, magnesium, and zinc in soil after application of phosphate fertilizer for 31 years in a grazing trial. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(4): 548-553.
- [4] Rochayati S, Verloo M, DuLaing G. Availability of cadmium and zinc as affected by the use of reactive phosphate rock, lime, and chicken manure on an Indonesian acidic upland soil under field conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(16): 1986-2003.
- [5] Lambert R, Grant C, Sauvé S. Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers. *Science of the Total Environment*, 2007, 378(3): 293-305.
- [6] Jafarnejadi A R, Sayyad G, Homaee M, Davamei A H. Spatial variability of soil total and DTPA-extractable cadmium caused by long-term application of phosphate fertilizers, crop rotation, and soil characteristics. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(5): 4087-4096.
- [7] Gonçalves V C, Meurer E J, Tatsch F R P, Carvalho S A, dos Santos Neto OA. Cadmium bioavailability in phosphate fertilizers. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2008, 32: 2871-2875.
- [8] Pérez A L, Anderson K A. DGT estimates cadmium accumulation in wheat and potato from phosphate fertilizer applications. *The Science of the Total Environment*, 2009, 407(18): 5096-5103.
- [9] Liu Z B, Ji X H, Peng H, Tian F X, Wu J M, Shi L H. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1585-1590.

- [10] Dong S H, Li J, Zhao M. Influence of phosphate application on rice absorbing and accumulation of Cd in Cd polluted paddy soil. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41 (9): 39-43.
- [11] Jiaka L T, Yu H, Feng W Q, Qin Y S, Zhao J, Liao M L, Wang C Q, Tu S H. Effects of different phosphate and potassium fertilizers on yields and cadmium uptake by paddy rice. *Southwest China Journal of Agricultural Science*, 2009, 22(4): 990-995.
- [12] Lu R K. *Routine Analysis Methods of Soil Agricultural Chemical*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] Wang T S, Fang F X, Yang Y X, Liang J, Mo L X, Fan Y G, Tang Z L. Determination of cadmium and lead in sugarcane by graphite furnace atomic absorption spectrometer with zeeman correction. *Agricultural Science and Technology*, 2011, 12(5): 630-631, 638-638.
- [14] Andrews P, Town R M, Hedley M J, Loganathan P. Measurement of plant-available cadmium in New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34(3): 441-452.
- [15] Xiong L M, Lu R K. Cadmium distribution in rice and its influencing factors. *Soils*, 1992, (3): 138-141, 145-145.
- [16] He J Y, Wang Y Y, Ren Y F, Zhou G Q, Yang L J. Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1863-1868.
- [17] Patra J, Lenka M, Panda B B. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barbata* Sw. to mercury, cadmium and zinc. *New Phytologist*, 1994, 128(1): 165-171.
- [18] Dheri G S, Brar M S, Malhi S S. Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmium-contaminated soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170(4): 495-499.
- [19] Chen S, Sun T H, Sun L N, Zhou Q X, Chao L. Influences of phosphate nutritional level on the phytoavailability and speciation distribution of cadmium and lead in soil. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(6): 1247-1253.
- [20] Wang B L, Xie Z M, Chen J J, Jiang J T, Su Q F. Effects of field application of phosphate fertilizers on the availability and uptake of lead, zinc and cadmium by cabbage (*Brassicachinensis* L.) in a mining tailing contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(9): 1109-1117.
- [21] Yang X E, Yang M J. Transfer of cadmium from agricultural soils to human food chain. *Trace Elements Science*, 1996, 3(7): 1-13.
- [22] Bolan N S, Adriano D C, Duraisamy P, Mani A, Arulmozhiselvan K. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils: I. Effect of phosphate addition. *Plant and Soil*, 2003, 250(1): 83-94.
- [23] Matusik J, Bajda T, Manecki M. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(3): 1332-1339.

参考文献:

- [2] 何振立. 污染及有益元素的土壤化学平衡. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 129-130.
- [9] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 田发祥, 吴家梅, 石丽红. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1585-1590.
- [10] 董善辉, 李军, 赵梅. 磷对镉污染土壤中水稻吸收积累镉的影响. *东北农业大学学报* 2010, 41(9): 39-43.
- [11] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 秦鱼生, 赵晶, 廖鸣兰, 王昌全, 涂仕华. 不同磷、钾肥对水稻产量和吸收镉的影响研究. *西南农业学报*, 2009, 22(4): 990-995.
- [12] 鲁如坤. *土壤农业化学常规分析方法*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 熊礼明, 鲁如坤. 镉在水稻体内的分布及其影响因素. *土壤*, 1992, (3): 138-141, 145-145.
- [16] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 周国强, 杨良静. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1863-1868.
- [21] 杨肖娥, 杨明杰. 镉从农业土壤向人类食物链的迁移. *广东微量元素科学*, 1996, 3(7): 1-13.