

## 不同施磷量对土壤-玉米系统中镉生物有效性的影响

区惠平<sup>1</sup>, 周柳强<sup>1</sup>, 刘昔辉<sup>2</sup>, 谢如林<sup>1</sup>,  
黄金生<sup>1</sup>, 曾艳<sup>1</sup>, 黄美福<sup>1</sup>, 谭宏伟<sup>2\*</sup>

1. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西 南宁 530007; 2. 广西农业科学院甘蔗研究所, 广西 南宁 530007

**摘要:** 以玉米 (*Zea mays* ssp. *mays* L.) 为供试作物, 研究不同施磷量[0、75、150、300、600 kg·hm<sup>-2</sup> (以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)]对未污染玉米地土壤中有效 Cd 含量和玉米 Cd 含量的影响, 并探讨磷肥的安全施用量。结果表明: 与 CK 相比, 施磷玉米秸秆生物量增幅 6.04%~11.39% (春玉米) 和 5.74%~8.01% (秋玉米); 籽粒产量增幅 8.2%~13.1% (春玉米) 和 13.7%~20.0% (秋玉米), 秸秆 Cd 质量分数下降 2.7%~45.8% (春玉米) 和 11.0%~43.6% (秋玉米); 籽粒 Cd 质量分数下降 13.0%~40.6% (春玉米) 和 9.9%~31.5% (秋玉米)。不同施磷量间玉米籽粒、秸秆产量差异不显著, 但秸秆、籽粒 Cd 含量均随施磷量的增加而降低, 其中以 P<sub>4</sub> [600 kg·hm<sup>-2</sup> (以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)]处理最为显著; 施磷对土壤全 Cd 含量影响不大, 但土壤 pH、有效磷含量随施磷量的增加而提高, 有效 Cd 含量随施磷量的增加而下降。综合玉米产量和有效降低土壤磷、Cd 风险的最佳施磷水平为 150 kg·hm<sup>-2</sup>。

**关键词:** 磷肥; 镉; 土壤; 生物有效性; 玉米

**中图分类号:** X52

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2013) 07-1220-06

引用格式: 区惠平, 周柳强, 刘昔辉, 谢如林, 黄金生, 曾艳, 黄美福, 谭宏伟. 不同施磷量对土壤-玉米系统中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1220-1225.

OU Huiping, ZHOU Liuqiang, LIU Xihui, XIE Rulin, HUANG Jinsheng, ZENG Yan, HUANG Meifu, TANG Hongwei. Effect of phosphate fertilizer on phytoavailability of cadmium in soil-corn system [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1220-1225.

镉 (Cd) 是一种极具生物毒性的重金属元素, 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物质之首。土壤 Cd 污染在世界范围内广泛存在并日趋严重。Cd 为作物非必需元素, 进入农田后被作物吸收, 通过食物链进入动物及人体内而危害人畜健康, 严重时可导致高血压、骨痛病、肾功能紊乱、肝损害、肺水肿、贫血等疾病。弄清土壤 Cd 污染的来源、去向, 探寻从源头上有效切断 Cd 的食物链传递的技术措施, 改善土壤环境质量, 确保农产品安全一直是环境科学的研究热点。

研究发现磷矿中伴生大量的 Cd, 其 60%~80% 的 Cd 会在磷肥的生产过程中转移到肥料中去<sup>[1]</sup>。据报道, 新西兰国家在 1983—1989 年的 6 年间, 以过磷酸钙作为磷源, 年施 50 和 100 kg·hm<sup>-2</sup> (以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计), 土壤 Cd 以 0.036~0.045 mg·kg<sup>-1</sup> 的年速率增长, 1989 年后改施重过磷酸钙, 土壤 Cd 以 0.005~0.015 mg·kg<sup>-1</sup> 的年速率增长<sup>[2]</sup>。我国农田土壤中, 长期施用磷肥作物 Cd 含量超出食品安全范

围<sup>[3-5]</sup>, 表明施用磷肥将可能引发土壤和农产品 Cd 安全风险。

磷肥不但是土壤 Cd 的主要来源, 而且可以改变土壤中 Cd 的活性。然而, 针对磷肥施用是否促进土壤 Cd 的有效性, 进而增加作物吸收 Cd, 各研究结果尚不一致。部分研究认为, 在 Cd 污染土壤上, 施用钙镁磷、磷酸二氢钾和磷酸氢钙分别降低土壤 DTPA 提取态 Cd 含量达 11.8%、9.8% 和 11.8%, 水稻 Cd 含量下降 24.9%~50.8%, 以含钙磷肥 (钙镁磷和过磷酸钙) 降低水稻 Cd 累积效果较好<sup>[6]</sup>。施用 0~1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 磷降低土壤中水溶性和交换态 Cd 含量, 促进芥菜型油菜生长, 降低植株的 Cd 含量<sup>[7]</sup>。重过磷酸钙显著降低锌、Cd、铅和铜复合污染土壤中伏生臂形草地上部对 Cd 的累积<sup>[8]</sup>。但也有研究表明, 磷肥引起土壤 pH 小幅降低, 提高土壤 Cd 活性<sup>[9]</sup>, 促进水稻秸秆和籽粒对 Cd 的吸收累积<sup>[10]</sup>, 且随磷肥施用浓度的增加而增加<sup>[4]</sup>。土壤-植物系统对 Cd 的吸收、累积受土壤类型、pH、共

**基金项目:** 广西农业科学院基金 (2012YZ20; 2013YQ01; 2013YQ02); 农业部科技专项 (201203030; 201003014); 国家自然科学基金 (U1033004); 广西自然科学基金 (2012GXNSFBA053062; 2013GXNSFBA019057; IPNI)

**作者简介:** 区惠平 (1983 年生), 女, 助理研究员, 研究方向: 作物营养与生态环境。E-mail: ouhuiping2006@163.com

\*通信作者

**收稿日期:** 2013-04-22

存元素等<sup>[6-7,11]</sup>因素影响, 尤其受土壤 pH 影响最为显著。磷肥种类和数量均会使这些影响因素发生一定的变化, 从而影响 Cd 形态的变化及植物对 Cd 的吸收、累积。目前, 国内外关于磷肥对土壤 Cd 生物有效性的研究主要集中于污染土壤, 且侧重于不同磷肥种类, 对未污染农田下尤其不同磷肥施用量下土壤-玉米系统中 Cd 的生物有效性报道较少。本试验采用田间试验和室内分析测定相结合的方法, 研究不同施磷量对土壤磷、Cd 有效性及玉米秸秆、籽粒 Cd 含量的影响, 探寻兼顾产量效应及环境效应的磷肥施用量, 为农业生产中高效、安全施磷提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2011 年 2-11 月在广西南宁中部的南宁市武鸣县里建英才村 (N 23°14'51", E 108°3'31") 进行, 该区属南方平原亚热带季风湿润气候区, 年平均气温 21.7 °C, 年均降水量 1300 mm。供试土壤为砂页岩发育的赤红土。其基本理化性质: w(有机质)为 27.8 g·kg<sup>-1</sup>, w(全氮)为 1.10 g·kg<sup>-1</sup>, w(碱解氮)为 134 mg·kg<sup>-1</sup>, w(速效磷)为 14 mg·kg<sup>-1</sup>, w(速效钾)为 112 mg·kg<sup>-1</sup>, w(全 Cd)为 0.150 4 mg·kg<sup>-1</sup>, pH(H<sub>2</sub>O)6.06。供试春、秋玉米 (*Zea mays* ssp. *mays* L.) 品种均为迪卡 008。供试磷肥为钙镁磷肥, 其中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数为 18%, Cd 质量分数为 0.065 1 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

采用大田试验, 设置 4 个施 P 水平 (kg·hm<sup>-2</sup> (以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计)): P<sub>1</sub>, 75、P<sub>2</sub>, 150、P<sub>3</sub>, 300 和 P<sub>4</sub>, 600, 以不施磷肥为对照 (P<sub>0</sub>), 共 5 个处理。3 次重复, 随机区组排列。小区面积 25.2 m<sup>2</sup>[8.5 m(宽) × 3 m(长)], 小区间以田间小沟隔开。氮、钾肥分别施用尿素和氯化钾, 按 240 kg·hm<sup>-2</sup> (以 N 计), 225 kg·hm<sup>-2</sup> (以 K<sub>2</sub>O 计) 量施用。氮、磷、钾肥分

别按基肥: 秆肥为 1: 1、1: 0、1: 1 的比例施用。基肥采用穴施的方法施于两株玉米之间, 施肥后盖土。秆肥采用沟施的方法, 施肥后盖土。基肥和秆肥春玉米分别于 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 55 545 株·hm<sup>-2</sup>, 于 7 月 20 日和 11 月 25 日收获。

### 1.3 样品采集和测定

玉米收获时全区采集秸秆和籽粒测产。另采集地上部秸秆、籽粒和土壤耕层样。秸秆 105 °C 杀青后烘干, 粉碎, 过 100 目筛。籽粒、土样经自然风干后, 粉碎, 过 100 目筛。玉米秸秆、籽粒 Cd 采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> (体积比例为 2: 1) 湿法消煮<sup>[12]478</sup>。土壤有效态 Cd 采用 NH<sub>4</sub>OAc 提取<sup>[13]</sup>。土壤全 Cd 采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> (体积比例为 5: 5: 4: 2) 消煮<sup>[12]478</sup>。Cd 含量测定采用石墨炉原子吸收光谱法测定<sup>[14]</sup>。土壤速效磷采用钼蓝比色法<sup>[12]180</sup>, pH 按水: 土比 2.5: 1 浸提, 电位法测定<sup>[12]126</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 和 DPS 软件对数据进行分析统计, 多重比较采用 LSD 法, 显著性水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施磷量对玉米生长及 Cd 含量的影响

由表 1 可知, 磷肥施用促进玉米秸秆生物量和籽粒产量。增施 75~600 kg·hm<sup>-2</sup> (以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计), 春、秋玉米秸秆生物量增幅分别达 6.04%~11.39% 和 5.74%~8.01%; 籽粒产量分别增幅 8.18%~13.12% 和 13.65%~20.05%。然而, 不同施磷量间玉米秸秆生物量和籽粒产量无显著差异。

不同施磷量对玉米秸秆和籽粒 Cd 含量有显著影响。所有处理中, Cd 含量玉米秸秆高于籽粒。磷肥施用降低玉米秸秆、籽粒 Cd 含量, 且玉米秸秆、籽粒 Cd 含量随施磷量的增加而降低。当施磷量等

表 1 不同施磷量对玉米生物量和 Cd 含量的影响

Table 1 Effect of different rate of phosphate fertilizer on corn biomass and its Cd content

Treatment	Grain yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	Biomass/(kg·hm <sup>-2</sup> )	Cd content in straw/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd content in grain/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
Spring corn	CK	4449.65±139.40b	6262.50±278.06b	0.0841±0.0008 a	0.0146±0.0008a
	P <sub>1</sub>	4813.65±200.98ab	6640.72±83.84ab	0.0818±0.0002 a	0.0127±0.0004ab
	P <sub>2</sub>	4985.10±138.63a	6794.84±206.07ab	0.0749±0.0010 b	0.0115±0.0004bc
	P <sub>3</sub>	5033.50±145.46a	6814.94±175.01ab	0.0711±0.0005 c	0.0095±0.0007cd
	P <sub>4</sub>	4951.55±219.95a	6975.60±66.59a	0.0456±0.0012 d	0.0087±0.0007d
Autumn corn	CK	3013.50±64.45b	4953.10±45.65a	0.1003±0.0020a	0.0524±0.0008 a
	P <sub>1</sub>	3424.97±44.09a	5237.35±200.75a	0.0893±0.0023b	0.0472±0.0020ab
	P <sub>2</sub>	3555.50±30.83a	5269.06±116.72a	0.0736±0.0020c	0.0453±0.0022ab
	P <sub>3</sub>	3617.64±97.87a	5349.61±94.95a	0.0651±0.0069cd	0.0426±0.0026 bc
	P <sub>4</sub>	3502.70±66.79 a	5306.09±92.83 a	0.0566±0.0020 d	0.0359±0.0030 c

不同小写字母表示不同处理间在 P=0.05 水平上差异显著。以下同

于或超过  $P_2$  水平 ( $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 时, 秸秆、籽粒 Cd 含量显著低于 CK 和  $P_1$  处理; 虽然与  $P_3$  处理的差异不显著, 但显著高于  $P_4$  处理的。国家食品卫生标准中允许粮食中 Cd 质量分数上限为  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[15]</sup>, 各个处理中玉米秸秆和籽粒 Cd 质量分数均在允许范围内。因而, 磷肥施用不会造成玉米 Cd 质量分数超标。

### 2.2 不同施磷量对土壤 pH、有效磷及 Cd 含量的影响

#### 2.2.1 不同施磷量对土壤 pH 的影响

从图 1 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  $600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 春玉米土壤 pH 分别比 CK、 $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  处理分别提高 0.31、0.24、0.22 和 0.05 个 pH 单

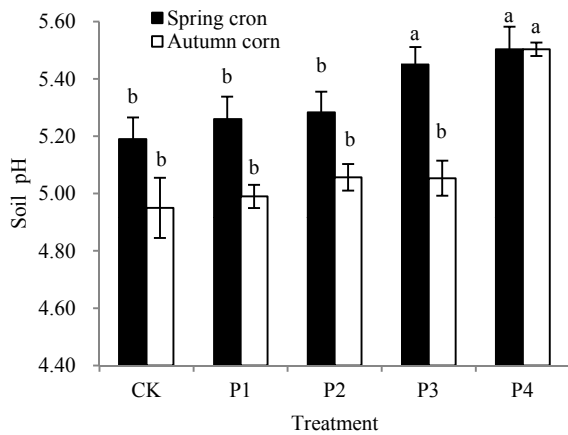


图 1 不同磷肥量下土壤 pH 的变化

Fig.1 Changes of soil pH under different rate of phosphate fertilizer

位, 秋玉米分别提高 0.55、0.51、0.45 和 0.45 个 pH 单位, 各处理间差异显著。

#### 2.2.2 不同施磷量对土壤速效磷含量的影响

由图 2 可知, 施磷显著增加土壤速效磷质量分

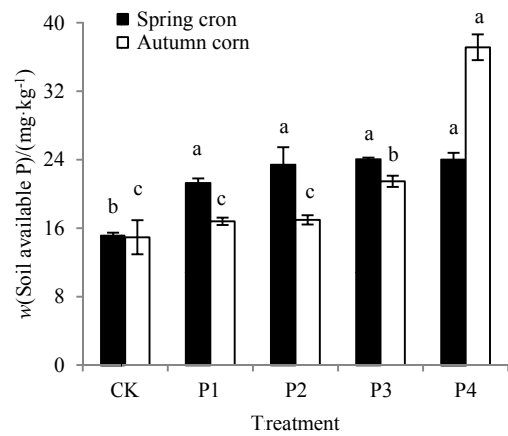


图 2 不同施磷量下土壤速效磷含量变化

Fig.2 Changes of soil available P under different rate of phosphate fertilizer

数, 且土壤速效磷质量分数随施磷量的增加而提高。与 CK 相比, 增施  $75\sim 600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (以  $P_2O_5$  计), 土壤速效磷质量分数增幅分别达 40.6%~58.8% (春玉米) 和 12.5%~148.7% (秋玉米)。其中, 春玉米施磷处理均与 CK 处理差异显著, 但不同施磷处理间差异不显著; 而秋玉米施磷处理中  $P_3$  和  $P_4$  处理均显著高于 CK、 $P_1$  和  $P_2$  处理。

#### 2.2.3 不同施磷量对土壤全 Cd 和有效态 Cd 含量的影响

图 3 显示, 磷肥施用虽然对土壤全 Cd 质量分数的影响无显著差异, 但显著影响了土壤 Cd 的有效性。与 CK 处理相比, 磷肥施用不同程度降低土壤有效 Cd 质量分数, 其中, 春玉米中的  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  处理土壤有效 Cd 质量分数分别降低 4.58%、7.15% 和 7.29%, 秋玉米分别降低 2.75%、5.55% 和 12.76%。

土壤 Cd 的有效性随磷肥施用量的不同呈现不同程度差异。施用量  $75\sim 600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (以  $P_2O_5$  计) 范围内, 随着施磷量的增加, 土壤有效 Cd 质量分

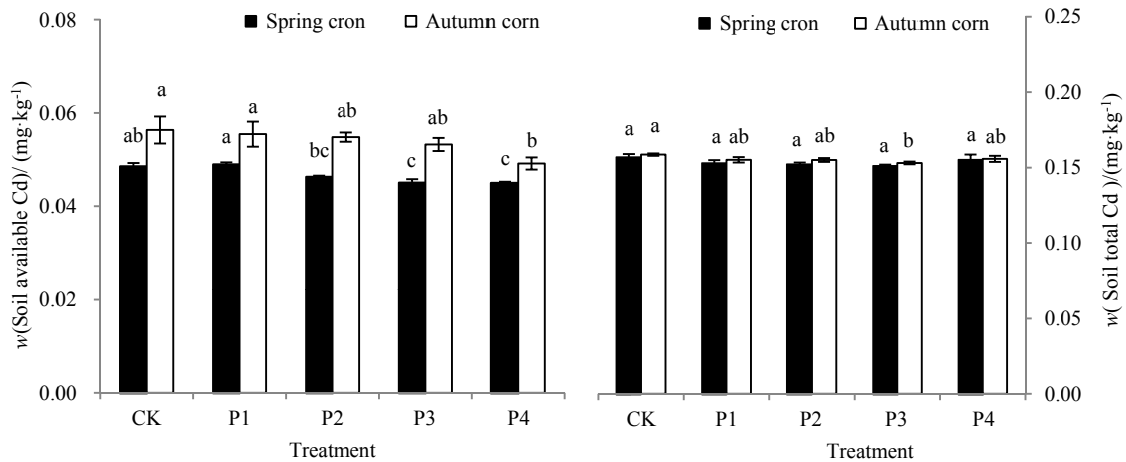


图 3 不同施磷量下土壤有效 Cd 和全 Cd 质量分数变化

Fig.3 Changes of soil available Cd and total Cd under different rate of phosphate fertilizer

表 2 玉米 Cd 含量与土壤 pH、有效磷、Cd 含量的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients (*r*) between Cd content in corn and soil pH, available P and Cd content

		Soil pH	Soil total Cd	Soil available Cd	Soil available P
Spring corn	Cd content in straw	-0.8757**	-0.0784	0.7744*	-0.6107
	Cd content in grains	-0.9745**	0.4399	0.9148**	-0.8893**
	Phosphate application rate	0.9464**	-0.0508	-0.8302*	0.6856
Autumn corn	Cd content in straw	-0.7768*	0.6574	0.8832**	-0.7959*
	Cd content in grains	-0.9008**	0.5288	0.9644**	-0.9172**
	Phosphate application rate	0.9469**	-0.3693	-0.9972**	0.9726**

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

数下降。春玉米中,  $P_1$  处理的土壤有效 Cd 质量分数比  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  处理分别提高 5.75%、8.68%和 8.83%, 差异显著; 但  $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  处理间差异不显著; 秋玉米中, 土壤有效 Cd 质量分数除了  $P_1$  与  $P_4$  处理间差异显著外, 其他处理间差异不显著。

### 2.3 玉米 Cd 含量和磷肥施用量、土壤 pH、有效磷及 Cd 含量的关系

将玉米 Cd 含量与土壤 pH、有效磷、Cd 含量

作相关性分析(表 2)发现, 土壤全 Cd 含量与玉米秸秆、籽粒中 Cd 的含量之间无显著相关, 相关系数均未达到显著差异水平; 土壤 pH、有效磷含量与玉米秸秆、籽粒 Cd 含量之间呈显著或极显著负相关, 土壤有效 Cd 与玉米秸秆、籽粒 Cd 含量均达到显著正相关。磷肥施用量与土壤 pH、有效 Cd 含量达到显著相关。表明磷肥通过调控土壤 pH、有效 Cd 含量影响玉米对 Cd 的吸收累积。

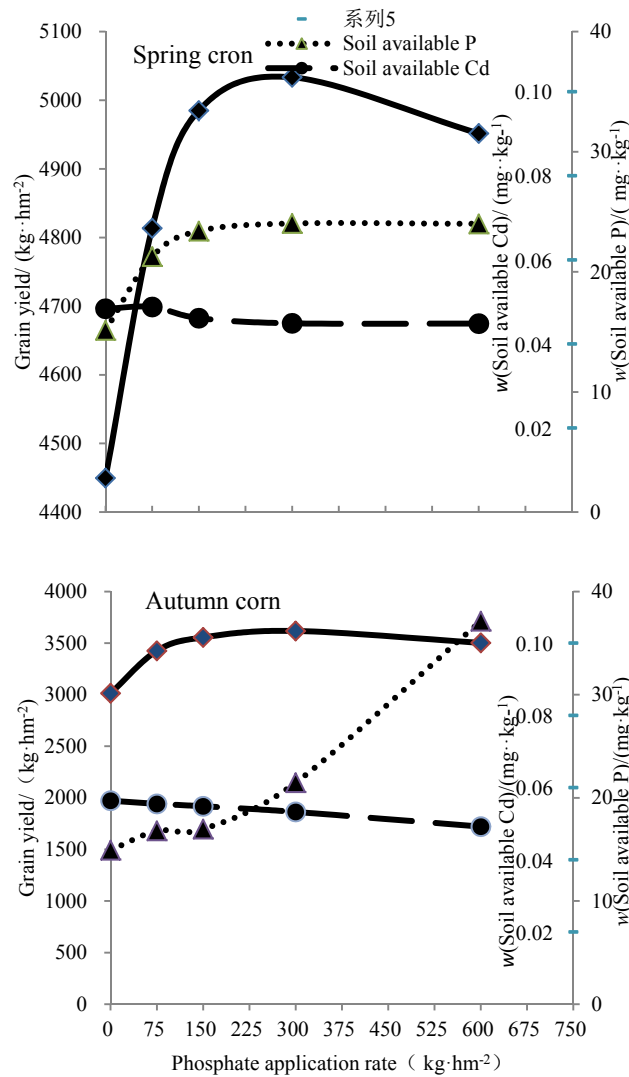


图 4 不同施磷量下玉米籽粒产量、土壤有效磷、有效 Cd 含量的三线图

Fig.4 Three line chart of corn grain yield, soil available P and available Cd under different phosphate fertilizer

## 2.4 兼顾产量效应及磷、Cd 安全的磷肥施用量

从图2、图3、图4和表1可知, P<sub>2</sub>处理较CK处理既显著提高春玉米产量和土壤有效磷含量, 又有效降低土壤有效Cd含量; 对于秋玉米, 当施磷水平大于P<sub>2</sub>处理时, 虽然能降低土壤有效Cd含量, 但玉米产量无显著提高, 且土壤有效磷急剧增加, 磷流失风险增加。因而, 兼顾玉米产量效应及磷、Cd安全的磷肥施用量为P<sub>2</sub>处理(150 kg·hm<sup>-2</sup>)。

## 3 讨论

磷是植物生长发育中三大必需元素之一, 对提高作物的产量及抗逆性有重要的作用。与CK相比, 增施75~600 kg·hm<sup>-2</sup>(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计), 玉米秸秆和籽粒产量增加, 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); 籽粒中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的。Dheri等<sup>[16]</sup>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·kg<sup>-1</sup>(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计)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<sup>[17]</sup>。Wang等<sup>[18]</sup>发现, 磷矿粉、钙镁磷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, 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。

Tan等<sup>[19]</sup>研究表明, 磷肥降低蔬菜对Cd的吸收在很大程度上是通过降低Cd的生物有效性实现的。一方面, 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<sup>[7]</sup>; 另一方面, 磷肥本身与Cd形成磷酸Cd沉淀从而降低土壤Cd的生物有效性<sup>[20]</sup>。刘昭兵等<sup>[6]</sup>研究则认为, 含钙磷肥可提高土壤中交换性钙含量, 钙与Cd的竞争吸收也是植物吸收累积Cd降低的主要原因之一。本试验中, 与CK相比, 磷肥施用后土壤全Cd含量无显著变化, pH上升(图1), 有效Cd含量下降(图3), 玉米秸秆、籽粒Cd含量与土壤全Cd相关不显著, 与pH显著负相关, 与有效Cd含量显著正相关(表2), 而磷肥与土壤pH显著正相关, 与有效Cd显著负相关。说明磷肥通过土壤pH调控土壤Cd的有效性从而降低玉米吸收累积Cd。土壤有效Cd作为植物可利用态, 可作为表征影响玉米秸秆、籽粒Cd累积的直观因子。

另一方面, 在Chen等<sup>[17]</sup>的研究中, 磷肥施用量在50 mg·kg<sup>-1</sup>(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计)土以下, 磷肥降低污染土壤中Cd的有效性, 及小麦根、茎、籽粒对Cd

的吸收, 然而, 超过该施用量时, 磷肥反而促进土壤Cd的有效性, 及小麦对Cd的吸收。而在Hong等(2008)的研究中, w(过磷酸盐)(以P计)施用量在400 mg·kg<sup>-1</sup>以下时, 污染土壤中乙酸铵提取态Cd随过磷酸盐施用量的增加而略有增加, 当w(过磷酸盐)(以P计)超过400 mg·kg<sup>-1</sup>时, 磷肥才能起到降低土壤有效Cd的作用。可见, 不同磷肥施用量对土壤-作物Cd的生物有效性影响不同。造成这种差异的原因可能与供试土壤的理化性质、所施的磷肥的种类等有关。在本试验中, 磷肥施用量在75~600 kg·hm<sup>-2</sup>范围内, 土壤有效Cd含量和玉米秸秆、籽粒Cd含量均随磷肥施用量的增加而降低。结合玉米籽粒的产量, P<sub>2</sub>处理既显著提高春玉米产量、土壤有效磷含量, 又有效降低土壤有效Cd含量(图4); P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub>处理虽然能降低秋玉米土壤有效Cd含量, 但对秋玉米产量无显著提高, 且土壤有效磷急剧增加, 磷流失风险增加。因而, 兼顾春、秋玉米产量效应及土壤环境磷、Cd安全的磷肥施用量为P<sub>2</sub>处理(150 kg·hm<sup>-2</sup>)。

## 4 结论

施用磷肥可降低玉米地上部对Cd的吸收累积, 且随施磷量的增加而下降。增施75~600 kg·hm<sup>-2</sup>(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计), 秸秆中Cd含量下降2.7%~45.8%(春玉米)和11.0%~43.6%(秋玉米), 籽粒中Cd含量下降13.0%~40.6%(春玉米)和9.9%~31.5%(秋玉米)。土壤pH升高、有效Cd含量下降是磷肥施用下玉米Cd吸收量下降的主要原因。综合玉米产量和有效减少土壤磷、Cd风险的最佳施磷水平为150 kg·hm<sup>-2</sup>。

## 参考文献:

- [1] TORBERT H A, DANIEL T C, LEMUNYON J L, et al. Relationship of soil test phosphorus and sampling depth to runoff phosphorus in calcareous and noncalcareous soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31:1380-1387.
- [2] SCHIPPER L A, SPARLING G P, FISK L M, et al. Rates of accumulation of cadmium and uranium in a New Zealand hill farm soil as a result of long-term use of phosphate fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 144(1): 95-101.
- [3] 温明霞, 高焕梅, 石孝均. 长期施肥对作物铜、铅、铬、镉含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 119-122.
- [4] 陈宝玉, 王洪君, 曹铁华, 等. 不同磷肥浓度下土壤-水稻系统重金属的时空累积特征[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2274-2280.
- [5] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同磷、钾肥对小麦产量及吸收镉的影响[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(3): 690-696.
- [6] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1585-1590.
- [7] BOLAN N S, ADRIANO D C, DURAISAMY P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils: I. Effect of phosphate addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(1):83-94.
- [8] SOARES C, SIQUEIRA J. Mycorrhiza and phosphate protection of

- tropical grass species against heavy metal toxicity in multi-contaminated soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(6): 833-841.
- [9] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5):953-961.
- [10] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 不同磷、钾肥对水稻产量和吸收镉的影响研究[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(4):990-995.
- [11] 邱静, 李凝玉, 胡群群, 等. 石灰与磷肥对籽粒宽吸收镉的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 187-192.
- [12] 鲁如坤. *土壤农业化学常规分析方法*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [13] ANDREWS P, TOWN R M, HEDLEY M J, et al. Measurement of plant-available cadmium in New Zealand soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34:441-452.
- [14] WANG T S, FANG F X, YANG Y X, et al. Determination of cadmium and lead in sugarcane by graphite furnace atomic absorption spectrometer with zeeman correction [J]. *Agricultural Science and Technology*, 2011, 12(5):630-631, 638.
- [15] Ministry of Health and State Standardization Committee(国家卫生部/国家标准化委员会). Hygienic Standard for Grains (GB2715-2005) [EB/OL]. (2005-01-25) [2013-4-17]. [http:// www. Ct 12365. Cn/bz/GB% 202715-2005.pdf](http://www.Ct12365.Cn/bz/GB%202715-2005.pdf).
- [16] 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 [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170(4): 495-499.
- [17] CHEN S, SUN T H, SUN L N, et al. Influence of phosphate nutritional level on the phytoavailability and speciation distribution of cadmium and lead in soil[J]. *Journal of Environmental Sciences (Elsevier)*, 2006, 18(6):1247-1253.
- [18] WANG B, XIE Z, CHEN J, et al. Effects of field application of phosphate fertilizers on the availability and uptake of lead, zinc and cadmium by cabbage (*Brassica chinensis* L.) in a mining tailing contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(9): 1109-1117.
- [19] TAN W N, LI Z A, QIU J, et al. Lime and phosphate could reduce cadmium uptake by five vegetables commonly grown in south China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 223-229.
- [20] MATUSIK J, BAJDA T, MANECKI M. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(3): 1332-1339.
- [21] HONG C O, LEE D K, KIM P J. Feasibility of phosphate fertilizer to immobilize cadmium in a field[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(11): 2009-2015.

## Effect of phosphate fertilizer on phytoavailability of cadmium in soil-corn system

OU Huiping<sup>1</sup>, ZHOU Liuqiang<sup>1</sup>, LIU Xihui<sup>2</sup>, XIE Rulin<sup>1</sup>, HUANG Jinsheng<sup>1</sup>,  
ZENG Yan<sup>1</sup>, HUANG Meifu<sup>1</sup>, TANG Hongwei<sup>2\*</sup>

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 experiments were carried out to evaluate the available Cd in soil and Cd content in corn (*Zea mays* ssp. *mays* L.) with various application rate of phosphate fertilizer (0, 75, 150, 300 and 600 kg P·hm<sup>-2</sup>). The results showed that phosphate fertilizer could significantly increase the straw biomass and grain yield compared with CK. Meanwhile, the straw biomass and grain yield increased in a scope of 6.04%-11.39% (Spring corn) and 5.74%-8.01%(Autumn corn), 8.2%-13.1% (Spring corn) and 13.7%-20.0%(Autumn corn), respectively. In addition, phosphate fertilizer also decreased the Cd content in straw and grain with a scope of 2.7%-45.8% (Spring corn) and 11.0%-43.6%(Autumn corn), 13.0%-40.6% (Spring corn) and 9.9%-31.5%(Autumn corn), respectively. However, even though the grain and straw yield had not significantly changed under the increasing phosphate fertilizer conditions, the Cd concentration decreased both in straw and in grain especially at the P<sub>4</sub> level was significant lower than those at the P<sub>1</sub> and P<sub>2</sub> level. Total Cd content in soil had not significantly changed after application of phosphate fertilizer, but soil pH and available P content increased with the increasing phosphate fertilizer. On the contrary, soil available Cd content decreased with the increasing phosphate fertilizer. Correlation analysis revealed that Cd accumulation in corn could be attributed primarily to immobilization of Cd by enhanced soil pH. Base on above result, the best application rate of phosphate fertilizer is P<sub>2</sub> level (150 kg P·hm<sup>-2</sup>).

**Key words:** phosphate fertilizer; cadmium; soil; phytoavailability; corn