# 牛粪与秸秆配施对棕壤镉赋存形态及玉米吸收镉的影响

陈 璐，刘宇斌，党秀丽，丛源欣，吕金朔，张 兴，胡艳美

（沈阳农业大学土地与环境学院，土壤肥料资源高效利用国家工程实验室，农业部东北耕地保育重点实验室，沈阳 110866）

**摘要**：以受镉(Cd)污染的棕壤为供试土壤，采用盆栽方法，研究牛粪与秸秆不同配比对土壤 Cd 形态及作物吸收 Cd 的影响。结果表明：(1)与对照相比，牛粪与秸秆氮含量比 1∶1,3∶1,5∶1 的 3 个处理分别使可交换态 Cd 含量下降 34.39%，28.04%，20.11%，使有机结合态和残渣态 Cd 含量显著增加。土壤中可交换态 Cd 含量与 pH 呈极显著负相关关系，而残渣态 Cd 含量与 pH 呈极显著正相关关系。(2)与对照相比，牛粪与秸秆氮含量比 1∶1,3∶1,5∶1 的 3 个处理使土壤 pH 分别提高 0.36，0.17，0.16 个单位。(3)牛粪与秸秆配施降低了玉米各部位对镉的吸收，并使 Cd 主要积累在玉米的根、茎、叶部位，降低了籽粒中 Cd 含量。牛粪与秸秆氮含量比 1∶1,3∶1,5∶1 的 3 个处理使籽粒 Cd 含量浓度分别减少 79.64%，72.70%，56.38%。

**关键词**：牛粪与秸秆配施；镉；赋存形态；富集系数

**中图分类号**：X53 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2018)05-0313-05

**DOI**：10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.048

# Effect of Combined Application of Cow Manure and Corn Straw on Cadmium Spcies in Brown Soil and Its Uptake by Maize

CHEN Lu, LIU Yubin, DANG Xiuli, CONG Yuanxin, LÜ Jinshuo, ZHANG Xing, HU Yanmei

(*College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Northeast Key Laboratory of Conservation and Improvement of Cultivated Land, Ministry of Agriculture, Shenyang* 110866)

**Abstract**: In this paper, taking a cadmium (Cd) contaminated brown soil as the test soil, the pot experiments were conducted to study the effects of cow manure and straw application on Cd species and Cd uptake by maize. The results showed that: (1) Compared with no cow manure and straw addition, the three treatments with cow manure and straw nitrogen ratios of 1∶1, 3∶1 and 5∶1 reduced the exchangeable Cd content by 34.39%, 28.04% and 20.11%, respectively. The bound and residual Cd contents increased significantly. The organic-bound Cd and residual Cd extensively increased with the combined application of cow manure and straw. There was a significant negative correlation between the exchangeable Cd contents and soil pH values, and a highly significant positive correlation between residual Cd contents and soil pH. (2) Compared with no cow manure and straw addition, soil pH increased by 0.36, 0.17 and 0.16 units, respectively, for nitrogen ratio of cow manure to straw being 1∶1, 3∶1 and 5∶1. (3) Compared with no cow manure and straw addition, the Cd uptake by different parts of maize decreased for the combined application of cow manure and straw. The unptaken Cd accumulated mainly in root, stem and leaf of maize, and Cd contents in grain reduced by 79.64%, 72.70% and 56.38% for the nitrogen ratio of cow manure to straw being 1∶1, 3∶1 and 5∶1, respectively.

**Keywords**: combined application of cow manure and straw; Cd; species; bioaccumulation factor

我国面临的农田土壤重金属污染问题日益严重，受重金属污染的耕地约占耕地总面积的 10%以上。根据《全国土壤污染状况调查公报》，我国土壤中总的超标率为 16.1%，镉(Cd)的点位超标率为7.0%[1]，明显高于其他污染因子。土壤中重金属 Cd 会通过土壤—作物迁移，极易在植物体内造成累积，从而通过食物链威胁人体健康[2]。我国耕地重金属超标问题虽十分严峻，但大多数耕地属于中度或轻度污染，为了保证粮

**收稿日期**：2018-05-13

**资助项目**：国家重点研发计划项目(2017YFD0801103-3)；国家自然科学基金项目(41301530)；农业部东北耕地保育重点实验室开放基金项目

**第一作者**：陈璐(1994—)，女，硕士研究生，主要从事土壤重金属的生态修复研究。E-mail：602672057@qq.com

**通信作者**：党秀丽(1976—)，女，博士，副教授，主要从事土壤改良研究。E-mail：dangxiuli@163.com

食产量，不可能将这些农田弃耕或改变其种植农作物的属性，这就为农产品安全生产留下了重大隐患。因此，如何在不改变这些耕地利用现状的前提下，通过控制土壤条件等手段，修复中轻度 Cd 污染农田，是当前研究所要解决的关键问题。

我国是一个农作物秸秆资源和牛粪资源十分丰富的国家，但目前秸秆和牛粪通常当作废料处理，会造成环境污染和严重浪费。由于牛粪与秸秆存在丰富的养分物质，越来越多的学者将其应用在修复污染土壤方面。研究[3-5]表明，施用牛粪明显提高了土壤 pH 和土壤有机质含量，显著降低了土壤提取态重金属的含量，促进重金属从可交换态转变为碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和残渣态。已有研究[6-7]发现，将农作物秸秆还田可以提高土壤有机质含量，使土壤中重金属 Cd 从可交换态转变为铁锰氧化物结合态、有机结合态等，从而降低土壤中有效态 Cd 含量，减少作物对其吸收。

目前，关于利用畜禽粪便与秸秆改善土壤结构、提高土壤有机质含量等方面已见报道，部分研究也表明畜禽粪便或者秸秆单施或与无机改良剂配施可以影响重金属 Cd 的赋存形态。但是，关于二者配施对土壤重金属 Cd 赋存形态和 Cd 在作物体内吸收及转运的影响还鲜有报道。因此，本文采用盆栽试验的方法，通过测定土壤重金属 Cd 赋存形态及玉米不同部位 Cd 含量，研究牛粪配施秸秆对土壤 Cd 活性及玉米积累 Cd 的影响，并探讨土壤 pH 与土壤 Cd 赋存形态的相关性，为合理利用牛粪与秸秆修复重金属 Cd 污染土壤提供科学依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 供试材料

供试土壤采自沈阳农业大学科研基地未种植过作物的土壤，供试土壤 pH 为 7.0，有机质含量为 9.5 g/kg，速效磷、速效钾、碱解氮含量分别为 26.3，59.9，12.7 mg/kg，未检测出 Cd。供试有机肥为腐熟牛粪，pH 为 7.1，氮含量为 1.5%，碳含量为 19.1%，Cd 含量为 0.3 mg/kg；供试秸秆为腐熟后的玉米秸秆，pH 为 5.4，氮含量为 1.4%，碳含量为 38.4%，未检测出 Cd。供试作物为玉米，品种为沈峰 48。

## 1.2 试验设计

试验于 2017 年 5 月 10 日至 8 月 20 日在沈阳农业大学后山试验基地进行。将风干的土壤过 2 mm 筛后装入陶瓷桶中，每桶装入 15 kg 干土(按照土壤容重 1.3 g/cm$^3$ 计)。将 Cd 以 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ 的形式加入土壤中，使 Cd 的浓度达到 5.0 mg/kg。以总氮量 225 kg/hm$^2$ 为定值向上述土壤中施加有机物料和尿素，磷肥和钾肥根据生产中的常规用量进行施入，其中磷肥($P_2O_5$)用量为 108 kg/hm$^2$，钾肥($K_2O$)用量为 90 kg/hm$^2$。试验设 6 个处理：(1)CK 只施用常规化肥(尿素、磷酸二铵、硫酸钾)；(2)M 牛粪；(3)S 秸秆；(4)SM1 牛粪氮量与秸秆氮量比值为 1∶1；(5)SM3 牛粪氮量与秸秆氮量比值为 3∶1；(6)SM5 牛粪氮量与秸秆氮量比值为 5∶1，每个处理 3 次重复。以对照的总氮量为基准，其余 5 个处理添加的有机物料的总氮量为对照组的 25%。将常规化肥、腐熟后的玉米秸秆和腐熟牛粪按表 1 的施用量混匀施入土壤中，并将土壤含水量调节至田间持水量的 60%。将上述土壤平衡 14 天后进行播种，每盆播种 3 颗玉米种子，间苗后每盆留 1 株幼苗。种植与管理方式同当地普通大田。玉米成熟后将每个处理的土壤混合均匀，取土壤及植株样品进行测定。

**表 1 不同处理有机物料及氮磷钾肥施用量**

单位：kg/hm$^2$

| 处理 | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | 牛粪 | 秸秆 |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 225.00 | 108 | 90 | 0 | 0 |
| M | 168.75 | 108 | 90 | 3892.73 | 0 |
| S | 168.75 | 108 | 90 | 0 | 4014.99 |
| SM1 | 168.75 | 108 | 90 | 1946.37 | 2007.49 |
| SM3 | 168.75 | 108 | 90 | 2919.55 | 1003.75 |
| SM5 | 168.75 | 108 | 90 | 3243.94 | 669.16 |

## 1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤指标及 Cd 赋存形态 玉米收获后的土样自然风干，研磨过筛后保存备用。土壤全 Cd 采用 $HCl—HNO_3—HClO_4$ 体系消化；土壤 Cd 赋存形态采用连续提取法[8]，利用 VISTA-MPX 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定 Cd 全量及各形态 Cd 含量，其中残渣态含量通过差减法求得。土壤 pH 利用 pH 计进行测定，$V$(水)∶$V$(土)=2.5∶1。

1.3.2 玉米产量及各部位 Cd 含量 采集成熟期玉米。将玉米植株样品分为根、茎、叶和籽粒 4 部分，用自来水和去离子水洗净，分别装入纸质信封，并进行编号，置于 105 ℃烘箱内，杀青 30 min，再调节温度至 65 ℃，烘至恒重并称重，此为各部位生物量。将烘干后的根、茎、叶和籽粒分别粉碎，并保存备用。植株各部位 Cd 含量采用 $HNO_3—HClO_4$ 体系消化[9]，利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定植株各部位重金属 Cd 含量。

## 1.4 统计分析

应用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件进行有关数据的计算、统计与处理，统计方法运用 Duncan 多重比较法进行显著性检验。

植株体内 Cd 迁移系数的计算[10]：

富集系数＝植物体内各部位重金属含量(mg/

kg)/土壤中重金属含量(mg/kg)

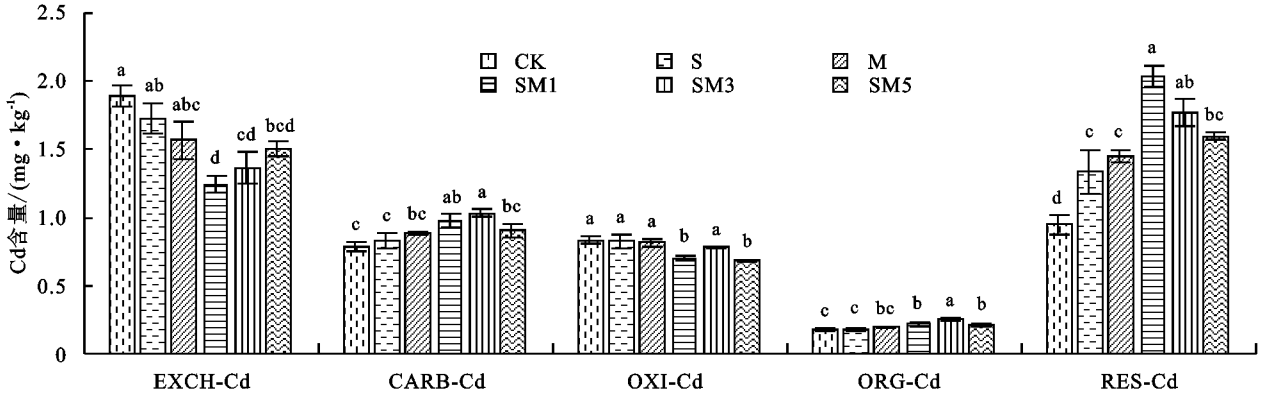
茎叶转运系数=(茎生物量(mg)×茎 Cd 含量(mg/kg)+叶生物量(mg)×叶 Cd 含量(mg/kg))/(根生物量(mg)×根 Cd 含量(mg/kg))

籽粒转运系数=(籽粒生物量(mg)×籽粒 Cd 含量(mg/kg))/(茎生物量(mg)×茎 Cd 含量(mg/kg)+叶生物量(mg)×叶 Cd 含量(mg/kg))

## 2　结果与分析

### 2.1　牛粪与秸秆配施对棕壤 Cd 赋存形态的影响

由图 1 可知,与对照相比,牛粪与秸秆不同比例配施可以使土壤可交换态和铁锰氧化物结合态 Cd 含量显著降低,碳酸盐结合态、有机结合态和残渣态 Cd 含量则显著升高($P<0.05$)。与对照相比,M、SM1、SM3 和 SM5 处理使可交换态 Cd 含量分别下降了 16.93%,34.39%,28.04%,20.11%,SM1 和 SM3 处理使碳酸盐结合态 Cd 含量分别增加了 32.05% 和 25.64%,SM1 和 SM5 处理使铁锰氧化物结合态 Cd 含量分别降低了 15.48%和 17.86%,S、M、SM1、SM3 和 SM5 处理使有机结合态 Cd 含量分别增加了 35.29%,23.53%,52.94%,29.41%,47.06%,S、M、SM1、SM3 和 SM5 处理使残渣态 Cd 含量分别增加了 40.00%,52.63%,114.74%,86.32%,68.42%。由此可知,在棕壤中施加牛粪与秸秆可使土壤 Cd 由活性较强的可交换态向活性较低的碳酸盐结合态、有机结合态和残渣态转化,其中 SM1 处理对土壤镉的钝化效果最显著。




注:EXCH 为可交换态;CARB 为碳酸盐结合态;OXI 为铁锰氧化物结合态;ORG 为有机结合态;RES 为残渣态;不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

**图 1　牛粪与秸秆配施对土壤中 Cd 赋存形态的影响**

### 2.2　牛粪与秸秆配施对土壤 pH 的影响

由图 2 可知,与对照处理相比,SM1、SM3 和 SM5 处理分别使土壤 pH 提高了 0.36,0.17,0.16 个单位,其中 SM1 处理对土壤 pH 的影响最大。与未施改良剂的处理相比,单施牛粪提高了土壤 pH,而单施秸秆对土壤 pH 的影响不显著,这主要是因为本试验所用的腐熟牛粪的 pH 为 7.1,而腐熟的玉米秸秆的 pH 为 5.4,因此单施牛粪提高了土壤 pH。

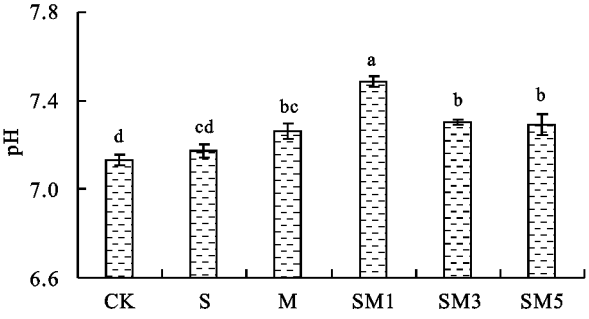



**图 2　牛粪与秸秆配施对土壤 pH 的影响**

### 2.3　土壤重金属 Cd 赋存形态与土壤 pH 相关性分析

由表 2 可知,土壤重金属 Cd 赋存形态与 pH 之间存在一定的相关关系,土壤中可交换态 Cd 含量与 pH 呈极显著负相关关系($P<0.01$);碳酸盐结合态 Cd 含量与 pH 呈显著正相关关系($P<0.05$);铁锰氧化物结合态和有机结合态 Cd 含量与 pH 无相关性;残渣态 Cd 含量与 pH 呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

**表 2　土壤 pH 与镉赋存形态的相关系数及回归方程**

| 赋存形态 | 相关系数 | 回归方程 | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 可交换态 | −0.965** | $y=-1.789x+14.570$ | 0.894 |
| 碳酸盐结合态 | 0.874* | $y=0.567x-3.222$ | 0.595 |
| 铁锰氧化物结合态 | −0.763 | $y=-0.409x+3.750$ | 0.582 |
| 有机结合态 | 0.613 | $y=0.152x-0.899$ | 0.376 |
| 残渣态 | 0.946** | $y=2.841x-19.147$ | 0.895 |

注:$x$ 为 pH;$y$ 为 Cd 含量(mg/kg);* 表示处理间存在显著相关关系($P<0.05$);* * 表示处理间存在极显著相关关系($P<0.01$)。

### 2.4　牛粪与秸秆配施对玉米产量的影响

由图 3 可知,与未施改良剂处理相比,牛粪与秸秆不同比例配施使玉米产量显著增加。本试验中对照处理的单盆产量为 27.65 g,牛粪与秸秆配施均显著增加了玉米的产量。与对照处理相比,SM1、SM3 和 SM5 的处理分别使玉米产量增加了 72.41%,48.93%,43.51%,其中 SM1 的处理对玉米增产效果最显著。

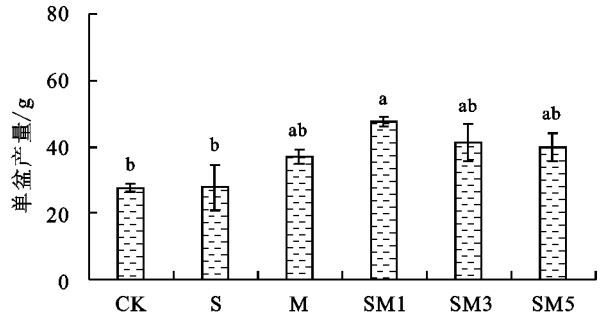



图 3 牛粪与秸秆配施对玉米产量的影响

### 2.5 牛粪与秸秆配施对玉米吸收 Cd 的影响

由表 3 可知，与对照相比，SM1 处理使根部 Cd 含量降低了 46.24%，SM1 和 SM3 处理使茎部 Cd 含量分别降低了 62.59%和 50.36%，SM1 和 SM3 处理使叶 Cd 含量分别降低了 69.79%和 60.98%，S、M、SM1、SM3 和 SM5 处理使籽粒 Cd 含量分别减少了 41.22%，51.89%，79.64%，72.70%，56.38%，说明施加牛粪与秸秆可以降低玉米根、茎、叶和籽粒的 Cd 含量，其中 SM1 处理对降低玉米各部位 Cd 含量效果最显著。本试验中对照处理的玉米籽粒 Cd 含量接近于国家食品卫生标准[11]（GB 2762－2012）（Cd≤0.2 mg/kg），而施入牛粪、秸秆后玉米籽粒 Cd 含量均未超过国家食品卫生标准，说明有机物料的施用降低了 Cd 污染土壤的种植风险。

**表 3 牛粪与秸秆配施对玉米不同部位 Cd 含量的影响**

单位：mg/kg

| 处理 | 根 | 茎 | 叶 | 籽粒 |
|---|---|---|---|---|
| CK | 17.56±0.69a | 1.39±0.28a | 7.15±0.66a | 0.20±0.02a |
| S | 16.35±0.82a | 1.09±0.19abc | 5.47±1.49ab | 0.12±0.03b |
| M | 16.76±1.23a | 1.33±0.24ab | 6.66±0.90a | 0.09±0.01bc |
| SM1 | 9.44±0.01b | 0.52±0.10c | 2.16±0.11b | 0.04±0.01d |
| SM3 | 14.67±0.57a | 0.69±0.07bc | 2.79±0.54b | 0.05±0.003cd |
| SM5 | 15.85±2.91a | 1.07±0.20abc | 4.35±1.50ab | 0.09±0.01bcd |

注：表中数据为平均值±标准误差；不同小写字母表示处理间差异显著。下同。

### 2.6 玉米不同部位 Cd 富集系数分析

由表 4 可知，玉米根部 Cd 富集系数范围为 1.89～3.51，与对照处理相比，牛粪与秸秆氮含量比 1∶1 的处理使根富集系数显著降低，说明牛粪与秸秆氮含量比 1∶1 的处理使玉米根从土壤中富集 Cd 的能力降低。与对照处理相比，S、M、SM3 和 SM5 处理对根富集系数无显著影响（$P>0.05$）。玉米茎部 Cd 富集系数范围为 0.10～0.28，与对照处理相比，SM1 和 SM3 处理分别使茎 Cd 富集系数降低 0.18，0.14 个单位，说明在这 2 个处理下茎部富集 Cd 能力较低。玉米叶 Cd 富集系数范围为 0.43～1.43，与对照处理相比，SM1 和 SM3 处理分别使叶 Cd 富集系数降低 1.00，0.87 个单位，说明牛粪与秸秆氮含量比 1∶1 和牛粪与秸秆氮含量比 3∶1 处理的叶部富集 Cd 能力较弱。玉米籽粒 Cd 富集系数最高的是 CK 处理，富集系数为 0.04，说明对照处理的籽粒富集 Cd 能力最强，与对照处理相比，S、M、SM1、SM3 和 SM5 的处理分别使籽粒 Cd 富集系数降低了 0.016，0.020，0.031，0.028，0.022 个单位，说明施加改良剂显著降低了籽粒对 Cd 的富集。

**表 4 玉米不同部位 Cd 富集系数**

| 处理 | 根 | 茎 | 叶 | 籽粒 |
|---|---|---|---|---|
| CK | 3.51±0.14a | 0.28±0.06a | 1.43±0.13a | 0.04±0.004a |
| S | 3.27±0.16a | 0.22±0.04abc | 1.09±0.30ab | 0.02±0.006b |
| M | 3.35±0.25a | 0.27±0.05ab | 1.33±0.18a | 0.02±0.003bc |
| SM1 | 1.89±0.20b | 0.10±0.002c | 0.43±0.02b | 0.01±0.002d |
| SM3 | 2.93±0.11a | 0.14±0.01bc | 0.56±0.11b | 0.01±0.0004cd |
| SM5 | 3.17±0.58a | 0.21±0.04abc | 0.87±0.30ab | 0.02±0.001bcd |

### 2.7 玉米不同部位 Cd 转运系数分析

由表 5 可知，玉米茎叶 Cd 转运系数范围为 0.50～0.87，与对照处理相比，SM1 处理使茎叶 Cd 转运系数显著降低，说明牛粪与秸秆氮含量比 1∶1 处理下将 Cd 从根部转运到茎叶的能力最弱。玉米籽粒 Cd 转运系数范围是 0.004～0.018，与对照处理相比，SM1、SM3 和 SM5 的处理分别使籽粒 Cd 转运系数降低了 0.014，0.012，0.010 个单位，说明牛粪与秸秆配施降低了 Cd 从茎叶转运到籽粒的能力。

**表 5 玉米不同部位 Cd 转运系数**

| 处理 | 茎叶 | 籽粒 |
|---|---|---|
| CK | 0.87±0.15a | 0.018±0.002a |
| S | 0.80±0.01a | 0.017±0.004ab |
| M | 0.73±0.02ab | 0.012±0.004abc |
| SM1 | 0.50±0.17b | 0.004±0.001c |
| SM3 | 0.66±0.03ab | 0.006±0.003c |
| SM5 | 0.70±0.10ab | 0.008±0.002bc |

## 3 讨 论

本文通过盆栽试验发现，牛粪与秸秆配施可以显著降低土壤可交换态 Cd 含量，并促使可交换态 Cd 向碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态转化，从而降低重金属 Cd 的生物有效性。李影等[3]研究结果与本试验相似，即牛粪和秸秆单施或与化肥配施均能显著降低土壤可交换态 Cd 含量，并促使其向碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和残渣态转变。已有研究[12]表明，在土壤中施用改良剂可以影响土壤理化性质，从而影响土壤重金属赋存形态和迁移活性，进而影响生物有效性。土壤 pH 是直接影响土壤重金属形态分布的重要因素[13]。本文通过分析土壤重金属 Cd 赋存形态与土壤 pH 的相关性发现，可交换态 Cd 含量与 pH 呈极显著负相关关系，碳酸盐结合态 Cd、残渣态 Cd 含量与 pH 呈显著正相关关系（表 3）。随着土壤 pH 的升高，土壤的碳酸盐结合态和残渣态 Cd 含量会随之增加，而可交换态 Cd

含量会减少。土壤 pH 的提高会增强土壤胶体及土壤颗粒对重金属离子的吸附,从而降低重金属的移动性,减少植物对其的吸收[14-15]。

本研究表明,牛粪单施或与秸秆配施均能显著增加玉米产量,徐大兵等[16]研究结果与本试验相似,即在土壤中施加牛粪可以显著增加玉米产量,这是因为牛粪与秸秆可以提高土壤有机质含量并促进土壤养分有效化,而有机质含有植物生长所需的各种营养元素,所以在土壤中施加牛粪与秸秆可以增加玉米产量。本研究结果表明,牛粪与秸秆配施显著降低了玉米根、茎、叶部的 Cd 含量,牛粪与秸秆单施或配施均降低了玉米籽粒中的 Cd 含量,这与前人研究结果相似。贾乐等[7]研究表明,秸秆还田显著降低了作物体内 Cd 含量;杨兰等[17]研究表明,单施牛粪可以显著降低水稻糙米中 Cd 含量。在土壤中施加牛粪和秸秆能降低玉米对 Cd 的吸收,这主要是因为牛粪与秸秆配施降低了土壤可交换态 Cd 含量,从而抑制 Cd 在玉米中的迁移转化,进而降低玉米各部位 Cd 含量。

富集系数是衡量植物积累重金属能力的重要指标,它是指植物中某种金属含量与土壤中该种重金属含量的比值,富集系数通常能直观地表示植物积累重金属能力[18],富集系数越大,说明富集能力越强[19]。由表 4 可知,牛粪与秸秆配施降低了玉米根、茎、叶、籽粒的 Cd 富集系数,4 个部位的 Cd 富集系数大小依次为根>叶>茎>籽粒,说明镉主要积累在根、茎、叶中以减轻对籽粒的毒害[20]。转运系数表示重金属由根转运、分配到地上部的能力,转运系数越高,表明重金属从根部转运到地上部的能力就越强[17]。由表 5 可知,牛粪与秸秆配施降低了茎叶 Cd 转运系数和籽粒 Cd 转运系数,且茎叶 Cd 转运系数>籽粒 Cd 转运系数,说明 Cd 从根向茎叶转运 Cd 的能力较强而从茎叶向籽粒转运能力较弱。

本文中牛粪与秸秆氮含量比 1∶1 的处理对土壤 Cd 赋存形态及削减玉米吸收 Cd 含量影响最显著,对玉米增产效果最佳。这是因为该处理对土壤 pH 的增加最显著,而 pH 是影响土壤镉形态的重要因素,随着土壤 pH 的升高,土壤可交换态 Cd 含量降低,而碳酸盐结合态和残渣态 Cd 含量升高,从而抑制了玉米对 Cd 的吸收,降低了玉米各部位 Cd 的含量,使籽粒镉含量低于国家食品卫生标准,保证了玉米的安全生产。

## 4　结 论

(1)与对照处理相比,牛粪与秸秆氮含量比 1∶1,3∶1,5∶1的 3 个处理分别使土壤可交换态 Cd 含量下降了 34.39%,28.04%,20.11%,并使土壤镉由活性较强的可交换态向活性较低的碳酸盐结合态、有机结合态和残渣态转化,其中牛粪与秸秆氮含量比1∶1对土壤镉的钝化效果最显著。

(2)与对照处理相比,牛粪与秸秆氮含量比 1∶1,3∶1,5∶1 的 3 个处理使土壤 pH 分别提高了0.36,0.17,0.16 个单位。土壤中可交换态 Cd 含量与 pH 呈极显著负相关关系,碳酸盐结合态 Cd、残渣态 Cd 含量与 pH 呈显著正相关关系。

(3)与对照处理相比,牛粪与秸秆氮含量比为 1∶1,3∶1,5∶1 的 3 个处理使玉米产量分别增加了 72.41%,48.93%,43.51%;牛粪与秸秆配施降低了玉米各部位对镉的吸收,并使 Cd 主要积累在玉米的根、茎、叶部位,降低了籽粒中 Cd 含量,其中牛粪与秸秆氮含量比 1∶1 的处理效果最佳。

**参考文献:**


[1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[N]. 中国国土资源报,2014.

[2] 陈玉梅,和苗苗,宁皎莹,等. 蔬菜地重金属 Cd 污染植物修复研究进展[J]. 上海农业学报,2015,31(1):110-117.

[3] 李影,吴景贵,陈猛. 不同有机物料与化肥配施对黑土重金属各形态的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):178-182.

[4] 王丹丹,林静雯,丁海涛,等. 牛粪生物炭对重金属 Cd 污染土壤的钝化修复研究[J]. 环境工程,2016(12):183-187.

[5] 袁志辉. 改性牛粪生物炭对重金属的吸附及稳定化研究[D]. 广东 江门:五邑大学,2016.

[6] Zwieten L V, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235-246.

[7] 贾乐,朱俊艳,苏德纯. 秸秆还田对 Cd 污染农田土壤中 Cd 生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(10):1992-1998.

[8] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.

[9] 中华人民共和国国家标准. GB 5009.15-2014 食品安全国家标准食品中镉的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[10] 吴传星,伍钧,杨刚,等. 重金属低积累玉米品种的筛选[C]. 第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 天津:中国农业生态环境保护协会,2009:363-370.

[11] 中华人民共和国卫生部. GB 2762—2012 食品中污染物限量[S]. 北京:中国标准出版社,2012.

[12] 张振宇. 生物炭对稻田土壤 Cd 生物有效性的影响研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2013,45.

[13] 李海涛,姚开,贾冬英,等. 我国稻秆资源利用及其木质素降解特性[J]. 安徽农业科学,2010,38(29):16377-16378.


(下转第 324 页)

无机磷盈余状态下，过量无机磷主要转化为 $Ca_8$－P（50%～70%）、Al/Fe－P（10%～23%）、O－P（8%）、$Ca_2$－P（0.2%～1.8%）。

（3）通径分析和逐步回归分析结果表明，$Ca_2$－P、Al－P 对3种方法浸提的有效磷均具有正向作用且贡献率较大。Olsen 法测定的主要是 $Ca_2$－P、$Ca_8$－P。Mehlich3 法浸提的主要是土壤 $Ca_2$－P、$Ca_8$－P、Al－P。阴离子交换树脂法浸提的无机磷主要是 $Ca_2$－P、Fe－P。

（4）Olsen 法、Mehlich3 法、树脂交换法均适于评价土壤有效磷水平，Olsen 法适用性更强。

**参考文献：**


[1] 展晓莹，任意，张淑香，等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学，2015，48(23)：4728-4737.

[2] Richard J S，Astrid O，Richard A，et al. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus- use efficiency of farming systems [J]. Plant and Soil，2011，349(1/2)：89-120.

[3] 李想，刘艳霞，刘益仁，等. 无机有机肥磷配施对作物产量及土壤磷形态的影响[J]. 土壤，2013，45(4)：641-647.

[4] Xie C S，Tang J，Zhao J，et al. Comparison of phosphorus fractions and alkaline phosphatase activity in sludge，soils，and sediments [J]. Journal of Soils and Sediments，2011，11(8)：1432-1439.

[5] 杨小燕，范瑞英，王恩姮，等. 典型黑土区不同水土保持林表层土壤磷素形态及有效性[J]. 应用生态学报，2014，25(6)：1555-1560.

[6] 赵靓，侯振安，柴颖，等. 长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响[J]. 水土保持学报，2014，28(3)：236-242.

[7] 柴立涛，耿玉辉，宋引弟，等. 施磷对吉林省西部盐碱土水田土壤无机磷组分的影响[J]. 水土保持学报，2015，29(6)：197-201.

[8] 区惠平，周柳强，黄美福，等. 不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(1)：40-47.

[9] 卜玉山，Magdoff F R. 10种土壤有效磷测定方法的比较[J]. 土壤学报，2003，40(1)：140-146.

[10] 张永起，李淑仪，廖新荣，等. 基于几种土壤测试方法的华南菜田磷素丰缺指标研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(1)：231-239.

[11] 雷明江，杜昌文，杨玉华，等. 用3种浸提方法研究长期定位试验中土壤磷素有效性[J]. 水土保持学报，2007，21(2)：85-88，146.

[12] Zhu Q，Monica O H，Li Y C. Comparison of Mehlich-3 and Ammonium Bicarbonate- DTPA for the extraction of phosphorus and potassium in calcareous soils from Florida [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis，2016，47(20)：2315-2324.

[13] 韩秀英. Mehlich3 法测定石灰性土壤有效养分的适用性研究[J]. 中国农业大学学报，2009，14(1)：104-110.

[14] 鲁如坤. 土壤农化分析研究法[M]. 北京：中国农业科学出版社，2000.

[15] 顾益初，蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤，1990，22(2)：101-102，110.

[16] 屈凡柱，于君宝，孟灵，等. 黄河三角洲滨海湿地碱蓬群落土壤树脂磷测定及剖面分布特征[J]. 水土保持学报，2010，24(6)：150-152，203.

[17] Zhang M，Li C，Li Y C，et al. Phosphate minerals and solubility in native and agricultural calcareous soils [J]. Geoderma，2014，S232/234(12)：164-171.

[18] 赵玲玲，邢曼平，鲍琴书. 土壤有效磷浸提剂分类与分析[J]. 浙江农业科学，2014(8)：1250-1252.

[19] 廖超子. 离子交换树脂膜在农业和环境研究中的最新进展[J]. 植物营养与肥料学报，2000，6(3)：334-344.


（上接第317页）


[14] 范美蓉，罗琳，廖育林，等. 赤泥对重金属污染稻田土壤Pb、Zn和Cd的修复效应研究[J]. 安徽农业科学，2012，40(6)：3298-3300.

[15] 张庆沛，李冰，王昌全，等. 秸秆还田配施无机改良剂对稻田土壤Cd赋存形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报，2016，35(12)：2345-2352.

[16] 徐大兵，邓建强，彭五星，等. 施用牛粪和绿肥对土地整治区玉米产量和土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报，2017，28(3)：856-862.

[17] 杨兰，李冰，王昌全，等. 牛粪配合无机改良剂对稻田土壤Cd赋存形态及生物有效性的影响[J]. 生态与农村环境学报，2016，32(4)：651-658.

[18] 杜彩艳，张乃明，雷宝坤，等. 不同玉米（*Zea mays* L.）品种对Cd锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报，2017，36(1)：16-23.

[19] 宋波，唐丽嵘. 桂林市土壤和蔬菜Cd含量调查及食用安全性评估[J]. 生态与农村环境学报，2012，28(3)：238-242.

[20] Shakeel A A，Mohsin T，Saddam H，et al. Cadmium toxicity in Maize(*Zea msays* L.)：Consequences on antioxidative systems，reactive oxygen species and cadmium accumulation [J]. Plant Science，2015，161(6)：1135-1144.