

# 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响

李本银<sup>1,2</sup>, 黄绍敏<sup>1</sup>, 张玉亭<sup>1</sup>, 周东美<sup>2\*</sup>, 吴晓晨<sup>2</sup>, 沈阿林<sup>1</sup>, 徐建明<sup>3</sup>, 李忠佩<sup>2</sup>

(1 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;

3 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

**摘要:** 设施氮、磷、钾肥(NPK)、施氮、磷、钾肥兼稻草还田(NPKS)、施氮、磷、钾肥兼2倍稻草还田(NPKS2)、施氮、磷、钾肥兼施紫云英(NPKG)和施氮、磷、钾肥兼施猪粪5个处理的长期定位试验, 探讨了长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉含量的影响。结果表明, 土壤全铜、全锌和全镉因秸秆还田或施用紫云英、猪粪有明显提高, 尤其是施用猪粪, 土壤全铜、全锌和全镉较仅施用氮、磷、钾肥分别增长53.6%、23.6%、406.2%, 达到极显著水平; 而全铁和全锰各处理间没有显著差异。长期施用有机肥增加了土壤有效态铜、锌和镉含量, 其中施用猪粪土壤有效铜、锌和镉含量增加最为显著, 分别比NPK处理增长了335.9%、320.8%、421.4%。长期施用猪粪明显地增加了糙米中镉含量, 并超过国家卫生标准。长期施用畜禽粪便类的有机肥对农产品的安全应予以足够的关注。

**关键词:** 长期施用有机肥; 土壤; 糙米; 微量元素

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)01-0129-07

## Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice

LI Ben-yin<sup>1,2</sup>, HUANG Shao-min<sup>1</sup>, ZHANG Yu-ting<sup>1</sup>, ZHOU Dong-mei<sup>2\*</sup>, WU Xiao-chen<sup>2</sup>,

SHEN A-lin<sup>1</sup>, XU Jian-ming<sup>3</sup>, LI Zhong-pe<sup>2</sup>

(1 Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences,

Zhengzhou 450002, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

3 College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** A long-term fertilization experiment, designed to have five application treatments of same rates of N, P, K, with or without incorporation of different organic fertilizers to the field, was carried out to determine the effects of these treatments on the concentrations of Cu, Zn, Fe, Mn, and Cd in soil and brown rice. Results showed that soil total Cu, Zn and Cd concentrations in the treatments with incorporation of rice straws (NPKS), 2 folds rice straws (NPKS2), Chinese milk vetch (NPKG) and pig manure (NPKM) were higher than those in the treatment with only application of N, P and K fertilizer (NPK). Compared with the treatment NPK, soil total Cu, Zn and Cd in the treatment NPKM increased by 53.6%, 23.6%, and 406.2%, respectively; however, no significant difference was observed from each other in total soil Fe and Mn concentrations. Likewise, long-term application of organic fertilizers increased available soil Cu, Zn and Cd in the treatments NPKS, NPKS2, NPKG and NPKM. Especially for the NPKM treatment, available soil Cu, Zn and Cd concentrations significantly increased by 335.9%, 320.8%, and 421.4%, respectively, compared with the treatment NPK. The Cd concentrations in brown rice in the treatments NPKS, NPKS2, NPKG and NPKM were higher than the upper limit (> 0.20 mg/kg) of the National Standard for Food Hygiene for Rice Cd concentration. In order to guarantee food safety, much attention should be paid to long-term application of organic fertilizer such as animal manure

收稿日期: 2009-01-07

接受日期: 2009-05-19

基金项目: 国家科技支撑计划 (No. 2006BAD05B04); 现代农业产业技术体系建设项目资助。

作者简介: 李本银 (1972—) 男, 河南信阳人, 博士, 主要从事环境与农产品安全方面的研究工作。E-mail: benyinli@foxmail.com

\* 通讯作者 Tel: 025-86881180; E-mail: dmzhou@issas.ac.cn

to the field.

**Key words** : long-term application of organic fertilizer ; soil ; rice ; micronutrient

有机肥料曾是农业生产的重要肥源之一,在粮食生产中发挥了重要的作用。长期以来,许多学者在施用有机肥改良土壤物理化学性质、培肥地力、提高土壤微生物活性方面做了许多研究,并认为有机肥在提高作物产量和改善品质等方面具有重要作用<sup>[1-4]</sup>。有机肥种类主要有农家肥(厩肥)、农作物秸秆、绿肥和商品有机肥、生物废弃物、污泥和畜禽粪便等,它主要含有机质、氮、磷、钾、钙、镁以及微量元素等,既能为作物提供氮、磷、钾大量元素,也能补充作物必需的 Cu、Zn、Fe、Mn、Mo、B 等微量元素,所以一些企业将其经过一系列处理作为商用有机肥。施用有机肥符合国内外学者提出的“有机农业”或“生态农业”,强调有机肥在物质循环和环境保护上具有不可替代的作用。

目前由于农村青壮年劳力向非农业领域转移,农家肥、农作物秸秆和绿肥等传统有机物施用量有明显减少趋势,秸秆的直接还田有可能影响播种育苗、滋生病虫害,同时由于大众生活水平的提高和膳食结构变化,需要家畜家禽养殖规模化和集约化,于是产生的大量畜禽粪便会直接或间接地作为有机肥施入农田。另外随着工业化和城市化进程的推进,生物废弃物、城市污泥的产量也越来越高,这些物质均有可能作为有机肥施入农田土壤。所以从 20 世纪 90 年代以来,越来越多的学者将有机肥研究的关注点转移到大量施用有机肥对温室气体排放的影响<sup>[5]</sup>,有机肥中氮、磷在土壤中的积累、迁移、淋溶风险以及有机肥对水体富营养化贡献等领域<sup>[6-7]</sup>。现在的有机肥已不同与传统意义的有机肥,研究表明,施用有机肥会增加土壤重金属含量,大量施用导致发生土壤次生盐渍化<sup>[8]</sup>,增加作物特别是蔬菜对重金属吸收积累的风险<sup>[9]</sup>,影响土壤微生物的多样性等<sup>[10]</sup>。相对上述研究,大田作物如水稻施用有机肥

研究相对薄弱,特别是施用有机肥对糙米的影响研究较少。所以本研究借助长期肥料定位试验,分析长期施用不同种类有机肥对水稻耕层土壤微量元素全量、有效态以及对糙米、稻草中微量元素和重金属吸收积累的影响,为合理施用有机肥提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

长期定位试验位于江西省鹰潭市余江县,隶属于中国科学院生态试验站,始于 1989 年。该地年降雨量 1785 mm,年均温 17.8℃, > 10℃ 积温 5528℃。每年种双季稻即早稻和晚稻 (*Oryza sativa* L.),冬季休耕。本试验的取样为 2006 年晚稻,试验共有 5 个处理:1)施氮、磷、钾肥(对照, NPK); 2)施氮、磷、钾肥和本小区稻草全部还田( NPKS); 3)施氮、磷、钾肥和 2 倍于该小区稻草量还田( NPKS2); 4)施氮、磷、钾肥和紫云英( NPKG); 5)施氮、磷、钾肥和猪粪( NPKM)。3 个重复,小区面积 30 m<sup>2</sup>。氮肥为尿素,施肥量为 N 120 kg/hm<sup>2</sup>,其中基肥施用量为 61.6 kg/hm<sup>2</sup>,剩余作为追肥施用;磷肥为钙镁磷肥,用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 172 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥为氯化钾,用量为 K<sub>2</sub>O 180 kg/hm<sup>2</sup>,磷、钾肥在水田翻耕时作为基肥全部施入。紫云英施用量为 25000 kg/hm<sup>2</sup>(以鲜重计),猪粪施用量为 2500 kg/hm<sup>2</sup>(以干重计),NPKS 和 NPKS2 稻草还田量每年分别约为 3800 kg/hm<sup>2</sup> 或 7600 kg/hm<sup>2</sup>,具体施用量随该处理小区的稻草实际生物量。猪粪、紫云英(仅在早稻施入)和稻草均在稻田翻耕时以基肥形式一次性施入。稻草、紫云英和猪粪微量元素含量如表 1。

### 1.2 样品采集与制备

土壤样品在晚稻收割时,每小区取耕层(0—15 cm)土壤 9 个样点,混匀为一个土壤样品。土样经自

表 1 试验在 1989—2006 年期间施用的有机肥中铜、锌、铁、锰、镉的平均含量(mg/kg)

Table 1 Mean contents of Cu, Zn, Fe, Mn, and Cd in organic fertilizers applied in this experiment during 1989—2006

有机肥 Organic fertilizer	Cu	Zn	Fe	Mn	Cd
稻草 Rice straw	3.7	49.6	225.0	467.0	0.97
紫云英 Chinese milk vetch	26.7	112.0	267.0	183.0	1.79
猪粪 Pig manure	502.0	563.0	1416.0	367.0	4.65

然风干后研磨先过 2 mm 筛,供分析土壤微量元素和重金属有效态用,然后取部分土样过 0.149 mm 筛供土壤全量分析。水稻分秸秆和子粒两部分称重计产。秸秆先用自来水冲洗,再用去离子水冲洗干净,放置于烘箱于 70℃ 烘干,剪碎用不锈钢粉碎机粉碎。稻谷用砻谷机脱去稻谷外壳,所得糙米用高速粉碎机粉碎,过 0.25 mm 筛备用。

### 1.3 样品分析、质量控制及数据处理

土壤 pH 值、有机质(OM)、速效磷、速效钾和碱解氮含量等按常规方法<sup>[11]</sup>测定。土壤 Cu、Zn、Fe、Mn、Pb、Cd 全量用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-HF 消化,而水稻样品采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消化<sup>[11]</sup>。土壤微量元素和重金属有效态含量采用 0.1 mol/L HCl 按水土比 10:1 连续浸提 2 h 后离心过滤<sup>[12]</sup>。土壤或植物样品的待测液用 Hitachi 180—80 原子吸收仪测定 Cu、Zn、Fe、Mn、Cd 含量。如果 Cd 含量低于检测限,则在待测液加入 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 并使其浓度为 0.3% 后用石墨炉法测定。

本试验分析微量元素用的所有试验试剂均为优级纯,定容所用的水为去离子重蒸水。所用的器皿都在 2% 的洗涤剂中浸泡过夜,用自来水冲净后放入 15%(V/V)HNO<sub>3</sub> 溶液中浸泡过夜,再用去离子水冲洗干净,晾干后放保鲜袋中待用。每一批样品均加入相应土壤或植株标样(GBW07401, GBW07402, GBW10010, GBW10015)做质量控制,在标样符合推荐值范围内,其结果可采用,否则重做。

所有数据用 SPSS 11.5 软件,在  $p < 0.05$  水平下进行统计分析。图表中有关氮、磷、钾、生物产量和土壤-作物中的微量元素等数据,均在  $p < 0.05$  的置信水平下比较(除特别注明外),以不同字母表示达到显著差异水平。用 Word 软件制表。

## 2 结果分析

### 2.1 长期施用有机肥对土壤基本理化性质的影响

长期不同施肥处理对土壤基本理化性质的影响(表 2)看出,在施等量的氮、磷、钾肥的基础上,配合施用不同量的水稻稻草、紫云英和猪粪,与 NPK 处理相比,施用稻草、紫云英和猪粪,土壤 pH 值有下降趋势,尤其施紫云英的处理, pH 下降最多,达 0.32 个单位,并与 NPK 处理存在显著差异。其次,稻草还田也能降低土壤 pH 值,并且稻草还田量越大,土壤 pH 下降就越多。这与在白浆土上稻草还田土壤 pH 下降最多的结果相同<sup>[13]</sup>。有研究指出,施用紫云英比施用稻草更能提高土壤 pH 值<sup>[14]</sup>,与本研究施用紫云英更易降低土壤的 pH 值的结果不同。其原因可能是紫云英分解过程中释放出较多的质子,导致土壤 pH 降低。

长期施用稻草、紫云英和猪粪,均能提高土壤有机质的含量,与 NPK 相比,NPKS、NPKS2、NPKG 和 NPKM 处理的土壤有机质分别提高 9.1%、13.6%、14.6% 和 16.3%;其中 NPKG 和 NPKM 处理有机质显著高于 NPK 处理( $p < 0.05$ )。

碱解氮的含量因施用稻草、紫云英、猪粪而增长。相对于 NPK 处理,NPKS、NPKS2、NPKG 和 NPKM 处理碱解氮含量分别增长 8.8%、18.5%、20.9% 和 16.3%,并且均显著高于 NPK 处理( $p < 0.05$ )。

长期施用氮、磷、钾肥,以及氮、磷、钾肥与有机物料配合施用,土壤有效磷含量均较高。鲁如坤等<sup>[15]</sup>研究表明,除 NPK 处理外,其他处理有效磷含量都大于 12 mg/kg,对于水稻来说,土壤有效磷含量属于高水平。在这种情况下,施用磷肥对水稻产量没有影响。

表 2 不同处理对土壤养分含量的影响

Table 2 Effect of treatments on nutrient contents of soil

处理 Treatment	pH (1 mol/L KCl)	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Avail. N	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K
NPK	4.38 a	13.90 b	72.36 b	10.56 c	123.37 a
NPKS	4.36 ab	15.17 ab	78.75 a	13.64 bc	125.02 a
NPKS2	4.13 ab	15.79 ab	85.75 a	19.06 ab	128.69 a
NPKG	4.06 b	15.93 a	87.50 a	14.89 bc	125.02 a
NPKM	4.30 ab	16.17 a	84.00 a	24.42 a	139.72 a

注( Note ): S—稻草 Rice straw ;S2—2 倍的稻草量 Double amounts of rice straw ;G—紫云英 Chinese milk vetch( *Astragalus sinicus* L. );M—猪粪 Pig manure. 数据后不同字母表示在  $p < 0.05$  水平下差异显著 Different letters followed by values in a column mean significant difference at  $p < 0.05$ .

在不同施肥处理中,土壤速效钾含量均大于120 mg/kg。据胡霏堂等<sup>[16]</sup>总结的速效钾与肥效的关系,可以得出本试验土壤钾含量较高,施用钾肥一般无效。

## 2.2 不同施肥处理对土壤中铜、锌、铁、锰、镉全量的影响

不同施肥处理,土壤中铜、锌、铁、锰、镉全量含量如表3。因为试验所施化学肥料是等量的氮、磷、钾肥,如果忽略大气沉降、灌溉水等因素的影响,有机肥施用量及其来源将是影响铜、锌、铁、锰、镉含量的主要因子。

相对于NPK处理,施用稻草、紫云英和猪粪均

能显著提高土壤铜含量,尤其是长期施用猪粪,土壤铜含量增加了54.9%。适当增加土壤铜含量能提高作物产量和品质,但同时应关注长期施用猪粪可能带来的潜在环境问题。

施用不同有机肥能改变土壤锌含量。与NPK处理比较,NPKS、NPKS2、NPKG和NPKM处理土壤锌含量分别增长了1.7%、4.7%、4.0%和23.4%,特别是施用猪粪处理土壤锌含量增长最多(表3)。如果以100 mg/kg含锌量作为红壤水稻土锌污染临界值<sup>[17]</sup>,应警惕长期施用含有高浓度锌的家禽粪便所带来的农田污染问题。

表3 不同施肥处理土壤全量铜、锌、铁、锰、镉的含量(mg/kg)

Table 3 Total soil Cu, Zn, Fe, Mn and Cd concentrations in various fertilization treatments

处理 Treatment	Cu	Zn	Fe	Mn	Cd
NPK	24.8 c	64.2 c	$3.52 \times 10^4$ a	121 a	0.16 d
NPKS	27.0 b	65.3 c	$3.44 \times 10^4$ a	122 a	0.18 cd
NPKS2	28.4 b	67.2 b	$3.30 \times 10^4$ a	122 a	0.22 c
NPKG	27.5 b	66.8 bc	$3.43 \times 10^4$ a	118 a	0.31 b
NPKM	38.1 a	79.2 a	$3.46 \times 10^4$ a	121 a	0.81 a

在一定范围内,土壤铜、锌含量的增加可促进作物生长,有利于品质改善,但对于镉来说,土壤镉含量增高则可通过食物链对人畜产生危害。从表3还可看出,稻草还田、施用紫云英和猪粪,土壤镉含量均较NPK处理有了明显增加,分别增长了12.5%、37.5%、53.8%和406%。稻草还田增加土壤镉含量的原因是因为磷肥中含有一定镉,稻草吸收积累大量镉,还田后镉不断积累起来。紫云英有较强积累镉的能力,长期施用紫云英也能显著增加土壤镉含量。猪粪中含量较高浓度镉,施用猪粪显著增加了土壤镉含量。长期不同施肥处理对土壤全量铁、锰影响不大,且在不同施肥处理中土壤全铁、全锰差异未达到显著水平。

随着社会经济的发展,我国畜牧养殖业发展迅速,特别是集约化养殖的高速发展,畜禽养殖由过去的分散经营(主要分布在农区)转变为现在的集中经营,其主要分布在城郊或新城,畜禽粪便类有机肥有逐年增长趋势<sup>[18]</sup>。但是一些企业为了片面追求经济效益,往往向饲料中加入超过限量的铜、锌、铁、锰、钴、硒、碘等微量元素<sup>[19]</sup>,由于所添加的硫酸铜、硫酸锌或氧化锌中铅、镉等重金属超过国家标准<sup>[20]</sup>,因而禽畜粪便中重金属含量远高于饲料本身

的重金属含量<sup>[19, 21-22]</sup>。从本试验施用猪粪处理,造成其耕层土壤铜、锌和镉含量远高于对照的结果,证实了长期施用有机肥可能对土壤重金属积累有大的影响<sup>[23]</sup>,而且,畜禽粪类有机肥大多用于回报率高的蔬菜地上,这也就造成了有些蔬菜重金属含量的超标。这提醒我们,应关注高含量重金属的有机肥长期施用所造成的土壤和农产品污染的问题。

## 2.3 不同施肥处理对土壤铜、锌、铁、锰和镉有效态含量的影响

表4看出,不同施肥处理土壤有效铜含量由低到的顺序为NPK < NPKS < NPKS2 < NPKG < NPKM。与NPK相比,NPKS、NPKS2、NPKG和NPKM处理土壤有效铜含量分别增加了15%、23%、46%和335%,说明有机肥与化学肥料配合施用能增加土壤有效铜含量;尤其是施用猪粪,能显著增加土壤有效铜含量,这与因施用猪粪增加土壤铜全量相一致。根据酸性土壤有效铜的分级与评价指标<sup>[16]</sup>,NPK、NPKS、NPKS2和NPKG 4个处理土壤有效铜含量在2.1~4.0 mg/kg范围内,属中等水平。NPKM处理土壤有效铜含量大于6 mg/kg,含量很高。

长期施用有机肥改变了土壤有效锌含量(表4)。与NPK相比,NPKS、NPKS2、NPKG和NPKM处

表4 不同处理土壤有效态铜、锌、铁、锰和镉的含量(mg/kg)

Table 4 Available soil Cu, Zn, Fe, Mn, Cd concentrations in various fertilization treatments

处理 Treatment	Cu	Zn	Fe	Mn	Cd
NPK	2.23 d	1.78 d	803 b	13.70 a	0.14 c
NPKS	2.56 bc	2.00 cd	919 a	14.36 a	0.16 bc
NPKS2	2.75 bc	2.88 b	916 a	13.50 a	0.19 b
NPKG	3.26 b	2.34 c	940 a	9.41 b	0.31 b
NPKM	9.72 a	7.49 a	933 a	13.03 a	0.73 a

理土壤有效锌含量分别增加了 12.4%、61.8%、31.5%、31.5% 和 320.8%。说明稻草还田、施用紫云英和猪粪都能提高土壤有效锌含量,尤其是施用猪粪对提高土壤有效锌含量有明显效果。根据土壤有效锌分级与评价<sup>[16]</sup>,NPK、NPKS、NPKS2 和 NPKG 等 4 个处理土壤有效锌含量在 1.6~3.0 mg/kg 范围内,属于中等水平;NPKM 处理土壤有效锌含量很高,> 5.0 mg/kg。

从表 4 还看出,与 NPK 相比,NPKS、NPKS2、NPKG 和 NPKM 处理土壤有效铁含量分别增长了 14.4%、14.1%、17.1% 和 16%,施有机肥显著提高了土壤有效铁的含量( $p < 0.05$ )。与 NPK 相比,施用有机肥处理土壤有效锰含量有降低趋势(除 NPKS 外),尤其是 NPKG 处理,土壤有效锰含量减少了 31%。这可能与 NPKG 处理施用紫云英导致 pH 下降有关,低 pH 能促进有效锰向耕层以下淋溶,进而影响了耕层有效锰的含量。

土壤有效镉含量随施用有机肥不同而有所变化(表 4)。5 个处理土壤有效镉含量大小的顺序为:NPKM > NPKG > NPKS2 > NPKS > NPK。与 NPK 处理相比,NPKS、NPKS2、NPKG 和 NPKM 处理有效镉含量分别增长了 14.2%、35.7%、122.4% 和

421.4% 这说明稻草还田、施用紫云英和猪粪,尤其是施用猪粪能显著提高土壤有效镉含量。

## 2.4 不同施肥处理糙米中微量元素和镉的含量

不同施肥处理糙米中微量元素和镉的含量见表 5。从表 5 可以看出,在全部处理中,糙米中铜含量为 4.85~5.72 mg/kg,铁含量为 6.32~7.61 mg/kg,处理间也没有达到显著差异水平。糙米中锌含量变化不大(21.57~23.65 mg/kg)除 NPK 和 NPKG 处理间有显著差异外,NPK、NPKS、NPKS2 和 NPKM 处理间没有显著差异。与 NPK 处理相比,施用有机肥有增加糙米中锰含量的趋势,其他没有明显差异。

施用有机肥对糙米中镉含量有较大影响。NPKS、NPKS2、NPKG 和 NPKM 4 个处理糙米镉含量分别为 0.29、0.40、0.64 和 1.44 mg/kg,均超过了国家食品卫生标准( $> 0.2$  mg/kg)。与 NPK 相比,NPKS、NPKS2、NPKG 和 NPKM 处理糙米镉含量分别增长了 81.3%、150%、300% 和 800%。这是因为施用有机肥能够增加土壤镉全量和有效态含量(表 3 和表 4)。其中,土壤有效态镉基本上占土壤全镉的 86% 左右,即绝大部分是有效态镉,易被水稻吸收利用。另外镉从茎秆向子粒迁移率也是很高,所以糙米中镉含量很高。

表5 不同施肥处理糙米中铜、锌、铁、锰、镉的含量(mg/kg)

Table 5 Concentrations of Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in brown rice in various fertilization treatments

处理 Treatment	Cu	Zn	Fe	Mn	Cd
NPK	4.85 a	23.65 a	7.41 a	7.50 b	0.16 d
NPKS	5.72 a	22.50 ab	7.61 a	8.94 a	0.29 c
NPKS2	4.93 a	22.29 ab	6.32 a	9.07 a	0.40 c
NPKG	5.51 a	21.57 b	6.95 a	8.64 a	0.64 b
NPKM	5.33 a	22.03 ab	6.46 a	8.22 ab	1.44 a

## 3 讨论与结论

微量元素的吸收转移受到很多因素的影响,如作物品种、土壤类型、土壤物化性质。本试验仅考虑

土壤理化性质如 pH、土壤有机质含量,土壤微量元素全量及有效态含量与糙米的关系,经逐步回归分析,发现微量元素有效态含量与糙米 Cd 含量有如下关系:  $Y = 1.865X + 0.068$  ( $R^2_{adj} = 0.902$ ,  $SE =$

0.148),其中Y为糙米Cd含量(mg/kg),X为有效态Cd含量(mg/kg), $R^2_{adj}$ 为调整后相关系数的平方,SE为标准误。可以看出,pH、有机质等土壤理化性质没有显著提高糙米Cd含量的预测能力,而土壤有效态Cd浓度能较好地预测糙米Cd含量。

把土壤有机质、pH、土壤锌、铜、铁含量及其有效态含量和糙米中锌含量作逐步回归相关分析发现,含量或有效态量、pH值、有机质含量等与糙米铜、锌、铁含量间无直线相关关系,即本试验含量或有效态含量的提高,并不显著提高糙米中铜、锌、铁含量,这可能与这些元素在水稻体内再次分配有关,需要进一步深入研究。

结论:1)长期施用有机肥造成了土壤全铜、全锌和全镉明显提高,尤其施用猪粪,土壤全铜、全锌和全镉较仅施用氮、磷、钾肥有极显著的增长;而全铁和全锰各处理间无显著差异。2)长期施用有机肥增加了土壤有效态铜、锌和镉含量,其中施用猪粪土壤有效铜、锌和镉含量增加最为显著。3)长期施用养殖场的猪粪导致糙米中镉含量明显增加,并超过国家卫生标准。

## 参考文献:

- [1] Clark M S, Horwath W R, Shennan C, Scow K M. Changes in soil chemical properties resulting from organic and low-input farming practices [J]. *Agron. J.*, 1998, 90(5): 662-671.
- [2] Carpenter-Boggs L, Kennedy A C, Reganold J P. Organic and biodynamic management: effects on soil biology [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64(5): 1651-1659.
- [3] Bolan N S, Adriano D C, Natesan R, Koo B J. Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil [J]. *J. Environ. Qual.*, 2003, 32(1): 120-128.
- [4] 杨丽娟,李天来,付时丰,邱忠祥. 长期施肥对菜田土壤微量元素有效性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 14(4): 549-553.  
Yang L J, Li T L, Fu S F, Qiu Z X. Effects of long-term fertilization on availability of micro-elements in vegetable soil [J]. *Plant Nutr. Fert.*, 2006, 14(4): 549-553.
- [5] Hao X Y, Chang C, Lamey F J, Travis G R. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting [J]. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30(2): 376-386.
- [6] Tong Y A, Ove E, Lu D Q, Harald G. Effect of organic manure and chemical fertilizer on nitrogen uptake and nitrate leaching in a Eumorphic anthrosols profile [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 1997, 48(3): 225-229.
- [7] 王建国,杨林章,单艳红,等. 长期施肥条件下水稻土磷素分布特征及对水环境的污染风险 [J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3): 88-92.  
Wang J G, Yang L Z, Shan Y H *et al.* Phosphorus distribution in paddy soil and its pollution risk to water body in long-term experiments [J]. *J. Ecol. Environ.*, 2006, 22(3): 88-92.
- [8] Hao X Y, Chang C. Does long-term heavy cattle manure application increase salinity of a clay loam soil in semi-arid southern Alberta [J]. *J. Agric., Ecosyst. Environ.*, 2003, 94(1): 89-103.
- [9] 李淑仪,郑惠典,廖新荣,等. 有机肥施用量与蔬菜硝酸盐和重金属关系初探 [J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 307-311.  
Li S Y, Zheng H D, Liao X R *et al.* Relationship between the application rate of organic manure and content nitrate and heavy metals in vegetable [J]. *J. Ecol. Environ.*, 2005, 14(6): 307-311.
- [10] 郑勇,高勇生,张丽梅,等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 316-321.  
Zheng Y, Gao Y S, Zhang L M *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2008, 14(2): 316-321.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社,1999. 106-107,146-193.  
Lu R K. Analytic methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. 106-107, 146-193.
- [12] Jung H B, Yun S T, Mayer B *et al.* Transport and sediment-water partitioning of trace metals in acid mine drainage: An example from the abandoned Kwangyang Au-Ag mine area, South Korea [J]. *Environ. Geol.*, 2005, 48: 437-444.
- [13] 田秀平,李玉梅,韩晓日. 大豆长期连作和施肥对白浆土pH和铁、锌、铜、锰形态的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 253-255.  
Tian X P, Li Y M, Han X R. Effect of long-term successive planting of soybean and fertilization on pH and forms of Fe, Zn, Cu and Mn in albic soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003, 9(2): 253-255.
- [14] 熊礼明,鲁如坤. 几种物质对水稻土吸收镉的影响和机理 [J]. *土壤*, 1992, 24(4): 197-200.  
Xiong L M, Lu R K. Effects of several substances on cadmium uptake by rice plants and the mechanisms [J]. *Soil*, 1992, 24: 197-200.
- [15] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥 [M]. 北京:化学工业出版社,1998. 433-443.  
Lu R K. Principle and fertilization of soil and plant nutrition [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 433-436.
- [16] 胡霭堂,周立祥. 植物营养学(下册) [M]. 北京:中国农业大学出版社,2003.  
Hu A T, Zhou L X. Science of plant nutrition (II) [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.
- [17] 夏增禄. 中国环境容量 [M]. 北京:地震出版社,1992. 178, 201.  
Xia Z L. China environmental capacity [M]. Beijing: Earthquake Press, 1992. 178, 201.
- [18] 黄鸿翔,李书田,李向林,等. 我国有机肥的现状与发展前景分析 [J]. *土壤肥料*, 2006(1): 3-8.  
Huang H X, Li S T, Li X L *et al.* Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China [J]. *Soils Fert.*, 2006(1): 3-8.

- [ 19 ] Cang L , Wang Y J , Zhou D M *et al* . Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province , China [ J ] . *J. Environ. Sci.* , 2004 , 16( 3 ) : 371 - 374 .
- [ 20 ] 钟宁,曾清如,姜洁凌. 环境和饲料中的镉对畜禽的毒性研究进展 [ J ] . *微量元素与健康研究* , 2005 , 22( 3 ) : 35 - 38 .  
Zhong N , Zeng Q R , Jiang J L . Advance of studies on the toxicology of trace element cadmium to livestock and poultry [ J ] . *Stud. Trace Elem. Health* , 2005 , 22( 3 ) : 35 - 38 .
- [ 21 ] Moral R , Perez-Murcia M D , Perez-Espinosa A *et al* . Salinity , organic content , micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain [ J ] . *Waste Manag.* , 2008 , 28( 2 ) : 367 - 371 .
- [ 22 ] Nicholson F A , Chambers B J , Williams J R , Unwin R J . Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales [ J ] . *Bioresource Tech.* , 1999 , 70 : 23 - 31 .
- [ 23 ] 王开峰,彭娜,王凯荣,谢小立. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响 [ J ] . *水土保持学报* , 2008 , 22( 1 ) : 105 - 108 .  
Wang K F , Peng N , Wang K R , Xie X L . Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils [ J ] . *J. Soil Water Conserv.* , 2008 , 22( 1 ) : 105 - 108 .