

# 施用鸡粪和猪粪对 2 种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响

姚丽贤<sup>1,2</sup>, 李国良<sup>2</sup>, 党志<sup>1\*</sup>, 何兆桓<sup>2</sup>, 周昌敏<sup>2</sup>, 杨苞梅<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学环境科学与工程学院 广州大学城 510006; 2. 广东省农业科学院土壤肥料研究所广东省养分循环利用与耕地保育重点实验室 广州 510640)

**摘要** 在水稻土和赤红壤中分别以质量分数 2% 和 4% 施入含 As、Cu 和 Zn 的鸡粪和猪粪, 以不施肥为对照 (CK) 进行通菜盆栽试验, 研究施入鸡、猪粪对土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响。结果表明, 施用鸡、猪粪几乎均比 CK 显著提高通菜地上部生物量, 而且水稻土中生物量显著高于赤红壤。施用粪肥显著提高通菜 As 含量和 As 吸收量, 呈高量处理 > 低量处理、猪粪 > 鸡粪处理且在水稻土 > 赤红壤的规律。除水稻土中 Cu 含量外, 施用粪肥也显著提高通菜 Cu、Zn 含量及吸收量。通菜收获后, 所有处理土壤总 As 含量比试验前稍微降低、有效 As 含量及有效 As 占总 As 质量分数则大幅下降, 但几乎所有粪肥处理土壤 Cu 和 Zn 的总含量、有效含量及有效质量分数均提高。与 CK 相比, 粪肥处理土壤总 As、有效 As 分别提高 0.3 ~ 3.0 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.011 ~ 0.034 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效 As 质量分数增加 0.033 ~ 0.178 个百分点; 总 Cu、有效 Cu 提高 3.1 ~ 30.4 mg·kg<sup>-1</sup> 和 5.2 ~ 19.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效 Cu 质量分数增加 1.2 ~ 34.1 个百分点; 土壤总 Zn、有效 Zn 提高 10.6 ~ 79.6 mg·kg<sup>-1</sup> 和 4.0 ~ 65.9 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效 Zn 质量分数增加 1.0 ~ 64.2 个百分点。如以土壤重金属有效含量增量及有效质量分数提高来评价其有效性变化, 则粪肥提高土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的作用为高量处理 > 低量处理且在赤红壤中作用大于水稻土。

**关键词** 禽畜粪; 砷; 铜; 锌; 通菜; 植物有效性

中图分类号: X131.3; X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)09-2592-07

## Bioavailability of As, Cu and Zn in Two Soils as Affected by Application of Chicken Manure and Pig Manure

YAO Li-xian<sup>1,2</sup>, LI Guo-liang<sup>2</sup>, DANG Zhi<sup>1</sup>, HE Zhao-huan<sup>2</sup>, ZHOU Chang-min<sup>2</sup>, YANG Bao-mei<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou High Education Mega Center, Guangzhou 510006, China; 2. Soil & Fertilizer Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** Animal manures contain higher As, Cu and Zn since organoarsenicals, copper and zinc additives are widely used in modern intensive animal production. A pot experiment in water spinach was conducted to investigate As, Cu and Zn bioavailability in a paddy soil (PS) and a lateritic red soil (LRS) applied with 2% and 4% (mass fraction) chicken manure (CM) and pig manure (PM), respectively. Soils without any fertilizer were included as the checks (CK). The results show that nearly all treatments with manures significantly increase the biomass of the above-ground part of water spinach compared to the CK. The biomass in PS is significantly greater than that in LRS. The As concentrations and uptake rates of water spinach are significantly enhanced by manure application, showing the rule of higher rates > lower rates, PM > CM and in PS > in LRS. Except for the Cu concentrations in PS, manure application significantly increases the Cu, Zn concentrations and uptake rates as well. Soil total As in all treatments slightly reduce, available As and percents of available As over total As (PAs) considerably decrease after the harvest of water spinach, but total Cu, Zn and available Cu, Zn and percents of available Cu and Zn over total Cu and Zn (PCu and PZn) nearly in all manure-amended treatments increase. Soil total As increases by 0.3-3.0 mg·kg<sup>-1</sup>, available As by 0.011-0.034 mg·kg<sup>-1</sup>, the PAs by 0.033-0.178 percentage points in all treatments with manures, as compared to the CK. Soil total Cu, available Cu and the PCu increases by 3.1-30.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 5.2-19.4 mg·kg<sup>-1</sup> and 1.2-34.1 percentage points, respectively. Those of Zn increase by 10.6-79.6 mg·kg<sup>-1</sup>, 4.0-65.9 mg·kg<sup>-1</sup> and 1.0-64.2 percentage points. We assume that the bioavailability of soil heavy metals be evaluated by the increment of available concentration and percent available concentration over total concentration, higher rate manure application improves the bioavailability of soil As, Cu and Zn than lower rate one and in LRS than in PS.

**Key words** animal manure; arsenic; copper; zinc; water spinach; phytoavailability

现代集约化养殖禽畜日粮中普遍添加有机砷和铜、锌等添加剂, 而禽畜对这些添加剂的吸收率较低, 大部分 As、Cu 和 Zn 随粪便排出<sup>[1,2]</sup>, 禽畜粪中往往含有较高含量的 As、Cu 和 Zn。国内外报道禽畜粪中 As 含量在未测出至 315.1 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, Cu 含量在未测出至 1 776.6 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, Zn 含量在未测出

至 8 710 mg·kg<sup>-1</sup> 之间<sup>[3-9]</sup>。国内养殖业存在滥用有

收稿日期 2007-09-06 修订日期 2007-10-23

基金项目 广东省自然科学基金项目 (06025382); 广东省科技攻关项目 (2005B20801008)

作者简介 姚丽贤 (1971 ~ ) 女, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为施肥与生态, E-mail: lyaox@yahoo.com.cn

\* 通讯联系人, E-mail: chzhang@scut.edu.cn

机肿、铜和锌添加剂现象,禽畜粪中 As、Cu 和 Zn 含量有超标现象<sup>[7,9]</sup>,而且,已有调查显示国内禽畜粪重金属平均含量整体高于国外水平.国际上通常把禽畜粪作为肥料施入农田,其用量一直按传统用量或含氮量来计算.由于近年来考虑到磷污染发生的危险,有研究指出应按其含磷量来计算其用量<sup>[10]</sup>.然而,在目前禽畜粪的合理安全施用研究中,对禽畜粪中重金属含量、尤其是重金属的有效性考虑较少.华南地区禽畜粪主要用于蔬菜和水果生产.因此,研究施用含 As、Cu 和 Zn 鸡粪和猪粪对土壤 As、Cu 和

Zn 有效性的影响,可为禽畜粪的合理安全施用提供多方面的参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

2 种供试土壤分别为水稻土和赤红壤.水稻土采自广州市番禺区水稻-蔬菜轮作水稻田,为三角洲冲积物发育而成,赤红壤采自广东省农科院作物研究所作物试验站.土壤经风干、磨碎、过 2 mm 筛作盆栽试验用.2 种土壤基本性状见表 1.

表 1 2 种供试土壤基本性状

Table 1 Selected properties of two soils used

土壤类型	质地	砂粒 /g·kg <sup>-1</sup>	粉粒 /g·kg <sup>-1</sup>	粘粒 /g·kg <sup>-1</sup>	pH	CEC /cmol·kg <sup>-1</sup>	OM /g·kg <sup>-1</sup>	全 N /g·kg <sup>-1</sup>	全 P /g·kg <sup>-1</sup>	碱解 N /mg·kg <sup>-1</sup>
水稻土	壤质粘土	326	380	294	6.77	13.71	23.9	1.53	1.24	74.2
赤红壤	砂质壤土	726	220	54	6.44	8.42	20.2	1.25	0.83	67.2
土壤类型	质地	有效 P /mg·kg <sup>-1</sup>	速效 K /mg·kg <sup>-1</sup>	总 As /mg·kg <sup>-1</sup>	总 Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	总 Zn /mg·kg <sup>-1</sup>	有效 As /mg·kg <sup>-1</sup>	有效 Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	有效 Zn /mg·kg <sup>-1</sup>	
水稻土	壤质粘土	63.2	161.7	33.1	51.7	154.0	0.607	8.5	8.5	
赤红壤	砂质壤土	41.3	113.3	23.9	34.3	70.2	0.546	4.0	7.6	

### 1.2 供试禽畜粪

在广东省惠州市集约化鸡场和猪场采集试验用鸡粪和猪粪,并调查养殖场生产情况.鸡、猪粪经风干、磨碎后测定基本性状.鸡粪 pH 6.17,有机质含量为 63.56%,全氮、磷、钾含量分别为 19.0、5.9 和 8.1 g·kg<sup>-1</sup>,总盐分含量 36.5 g·kg<sup>-1</sup>,总 As、Cu 和 Zn 含量分别为 32.0、108.7 和 170.2 mg·kg<sup>-1</sup>,有效 As、Cu 和 Zn 含量分别为 10.3、61.5 和 160.8 mg·kg<sup>-1</sup>.猪粪 pH 6.23,有机质含量为 59.34%,全氮、磷、钾含量分别为 24.0、5.9 和 8.5 g·kg<sup>-1</sup>,总盐分含量 22.1 g·kg<sup>-1</sup>,总 As、Cu 和 Zn 含量分别为 31.8、94.5 和 171.0 mg·kg<sup>-1</sup>,有效 As、Cu 和 Zn 含量分别为 10.5、94.0 和 155.3 mg·kg<sup>-1</sup>.鸡粪和猪粪还被送至广州市农业标准与监测中心,用 GB/T 5009.116-2003 法及农业部颁标准分别测定四环素、土霉素、金霉素和喹乙醇含量,结果均为未检出.

### 1.3 供试蔬菜品种

供试蔬菜品种为青梗柳叶通菜(*Ipomoea aquatica* Forsk),是华南常见叶菜品种.种子购自广州市蔬菜研究所.

### 1.4 试验方法

用塑料盆每盆装土 7 kg,分别施入质量分数为 2% 和 4% 的鸡粪(CM1、CM2)和猪粪(PM1、PM2),以不施肥处理为对照(CK).每个处理重复 4 次.土壤

分别与各种肥料充分混匀后装盆,加入去离子水至约田间持水量的 70%,土壤平衡 10 d 后播种.在种子出苗后间苗至每盆通菜各保留 7 株.

### 1.5 采样和分析

蔬菜生长 49 d 后在成熟期收获.分别收取地上部和根系,称鲜重,然后烘干、粉碎待用.收获植株后马上采集土壤样本,风干、磨碎、分别过 1 mm 和 0.149 mm 筛后待用.植株砷含量采用氢化物-原子荧光光度法(GB/T 5009.11-2003)测定,土壤砷含量用氢化物-非色散原子荧光法测定.植株和土壤样本的测定分别用标准物质 GBW07602(GSV-1)和 GBW-07408 进行质量控制.所用原子荧光分光光度计为北京吉天仪器有限公司 AFS930 型产品.土壤总 As 氢化物-非色散原子荧光法测定,总 Cu 和总 Zn 用 GB/T 17138-1997 原子吸收分光光度法测定.土壤有效 As 含量按照 Száková 等<sup>[11]</sup>的方法用去离子水浸提,浸提液用氢化物-非色散原子荧光法测定,有效 Cu 和 Zn 用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 浸提,浸提液用原子吸收分光光度法测定<sup>[12]</sup>.

### 1.6 统计分析

试验数据用 Excel 进行整理分析,用 SAS(1989 ~ 1996 by SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)软件进行两因素和单因素 LSD 统计,用 SPSS 软件(1989 ~ 1999 by SPSS Inc., Chicago, USA)进行 t 检验和相关

分析(Spearman系数)。

## 2 结果与分析

### 2.1 通菜地上部生物量

对通菜地上部生物量进行两因素方差分析,土壤类型、施肥处理及两者间交互作用对通菜的地上部生物量有极显著影响( $p < 0.0002$ )。从表2通菜地上部生物量来看,除赤红壤中CM2处理通菜产量稍低于CK外,2种土壤中施用鸡粪和猪粪均显著提高生物量。然而,虽然CM2处理比CM1处理带入更多的养分供通菜生长发育所需,但在水稻土中2个用量处理生物量相当,在赤红壤中高量处理甚至比低量处理显著降低生物量。这可能与鸡粪组分复杂及2种土壤特性有关。鸡粪除含有氮磷钾等养分外,尚含有盐分、重金属和其它未知组分<sup>[9]</sup>。已有研究表明,连续施用鸡粪、鸽粪导致土壤次生盐渍化而明显降低菜心产量<sup>[13]</sup>。然而,本试验仅进行1茬,所用鸡粪和猪粪盐分含量在禽畜粪中含量并不高<sup>[9]</sup>,由此推断本试验中盐分并不是高量鸡粪造成生物量显著下降的主要原因。有报道指出禽畜粪中通常含有抗氧化剂、霉菌抑制剂、抗生素等有机物质<sup>[8,14]</sup>,而这些组分对土壤多数微生物具有毒性<sup>[15]</sup>,对土壤质量有不利影响,从而抑制作物生长。但是,本试验用鸡粪和猪粪经检测,未检出4种常见抗生素。根据对通菜发芽的观察,CM2处理种子发芽迟缓,发芽后植株生长差。这意味着可能鸡粪中含有某种未明物质对通菜的发芽和生长有不良影响,但具体原因尚需深入研究。另外,水稻土粘粒和有机质含量及阳离子交

换量均高于赤红壤,对鸡粪中不利通菜生长物质的缓冲能力更强,故CM2处理通菜在水稻土的生长要优于赤红壤。对于施用猪粪处理,2种土壤中高量处理由于比低量处理带入更多的养分而显著提高生物量。此外,通菜在水稻土中的生物量极显著高于赤红壤,主要由水稻土背景肥力高于赤红壤造成。

表2 2种土壤中不同处理通菜地上部生物量(以鲜重计) $(g \cdot \text{盆}^{-1})$

Table 2 Biomass of the above-ground part of water spinach in various treatments in two soils (Fresh weight)  $(g \cdot \text{pot}^{-1})$

处理	水稻土	赤红壤
CK	55.4 ± 4.1d <sup>1)</sup>	45.5 ± 2.6c
CM1	94.0 ± 10.0c	93.2 ± 5.7b
CM2	93.9 ± 15.9c	38.4 ± 8.4c
PM1	114.8 ± 8.7b	103.2 ± 7.7b
PM2	139.9 ± 18.1a	130.3 ± 16.7a
平均	99.6 ± 31.1	82.1 ± 35.7
显著性	$t = 3.274^{**}$	

1)表中数据为4个重复的平均值,每列数据具相同字母者为差异不显著( $p < 0.05$ ),下同

### 2.2 通菜地上部As、Cu和Zn含量及吸收量

本试验用鸡粪和猪粪含有较高含量的As、Cu和Zn,与2个养殖场使用有机胂、铜和锌添加剂的生产实践吻合。从表3来看,施用2种粪肥均比CK显著提高2种土壤中通菜As含量和As吸收量,整体上具有高量比低量处理提高As含量及吸收量,而且猪粪处理通菜As吸收量高于鸡粪处理。赤红壤中CM2处理主要由于产量显著下降而导致As吸收量低于CM1处理。 $t$ 检验结果表明,通菜在水稻土中As含量和As吸收量均显著高于赤红壤。

表3 2种土壤中不同处理通菜As、Cu和Zn含量<sup>1)</sup>及吸收量

Table 3 As, Cu and Zn concentrations and uptake rates of water spinach in various treatments in two soils

处理	As 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		Cu 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		Zn 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	水稻土	赤红壤	水稻土	赤红壤	水稻土	赤红壤
CK	0.074 ± 0.006c	0.052 ± 0.006c	2.528 ± 0.097a	2.063 ± 0.147c	15.1 ± 0.6a	15.0 ± 1.1b
CM1	0.100 ± 0.006b	0.085 ± 0.011b	2.521 ± 0.216a	2.558 ± 0.102a	13.4 ± 1.8ab	17.8 ± 0.9a
CM2	0.119 ± 0.007ab	0.122 ± 0.014a	2.085 ± 0.111b	2.548 ± 0.123a	12.1 ± 0.7b	17.4 ± 1.6a
PM1	0.105 ± 0.014b	0.101 ± 0.018b	2.622 ± 0.048a	2.237 ± 0.282bc	13.5 ± 0.3ab	15.9 ± 1.6ab
PM2	0.127 ± 0.022a	0.100 ± 0.006b	2.152 ± 0.129b	2.332 ± 0.093ab	13.4 ± 1.6ab	15.1 ± 0.3b
平均	0.105 ± 0.022	0.092 ± 0.026	2.382 ± 0.253	2.347 ± 0.253	13.5 ± 1.4	16.2 ± 1.6
显著性	$t = 2.534^{*}$		$t = 0.379$		$t = -4.754^{**}$	
处理	As 吸收量/ $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$		Cu 吸收量/ $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$		Zn 吸收量/ $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$	
	水稻土	赤红壤	水稻土	赤红壤	水稻土	赤红壤
CK	4.10 ± 0.61c	2.38 ± 0.24d	140.5 ± 15.5d	93.6 ± 3.0d	840.9 ± 94.7c	678.8 ± 35.8c
CM1	9.43 ± 1.40b	7.95 ± 0.91bc	236.3 ± 26.2b	238.1 ± 9.6b	1251.6 ± 161.2b	1659.7 ± 185.6b
CM2	12.10 ± 2.68b	5.43 ± 1.43c	188.1 ± 17.8c	124.5 ± 18.1c	1149.4 ± 140.0b	743.9 ± 49.4c
PM1	11.96 ± 1.85b	10.48 ± 2.43b	313.4 ± 24.6a	242.1 ± 14.3b	1670.5 ± 119.6a	1644.3 ± 102.9b
PM2	19.16 ± 4.05a	13.13 ± 2.37a	296.0 ± 19.7a	304.8 ± 14.2a	1848.8 ± 89.2a	1960.8 ± 131.0a
平均	11.35 ± 5.43	7.87 ± 4.14	234.9 ± 69.1	200.6 ± 81.9	1352.3 ± 388.8	1337.5 ± 547.2
显著性	$t = 3.976^{**}$		$t = 3.866^{**}$		$t = 0.197$	

1)以鲜重计

水稻土中施用2%的鸡、猪粪对通菜 Cu 含量影响不大,但用量提高到4%时则显著降低通菜 Cu 含量.然而,2种粪肥在赤红壤中几乎均显著提高通菜 Cu 含量,但2个用量间没有显著差异.2种土壤中的所有粪肥处理 Cu 吸收量均显著高于CK,CM1处理 Cu 吸收量显著高于CM2处理,但猪粪处理没有类似规律.另外,通菜在2种土壤中的 Cu 含量整体差别不大,但在水稻土中 Cu 吸收量极显著高于赤红壤.

在水稻土中施用2种粪肥均降低通菜 Zn 含量,2种粪肥及用量间差异不大.在赤红壤中施用鸡粪提高通菜 Zn 含量,施用猪粪则影响不大.由于产量显著提高,2种土壤中施用粪肥处理(赤红壤中CM2处理除外)均显著提高通菜 Zn 吸收量.在水稻土中施用猪粪比鸡粪显著提高通菜 Zn 吸收量,粪肥用量间差别不大.在赤红壤中CM1处理 Zn 吸收量显著高于CM2,PM2处理则显著高于PM1,与赤红壤中 Cu 吸收量变化规律相同.总的来看,通菜在赤红壤中 Zn 含量显著高于水稻土,但2种土壤间 Zn 吸收量则差别不大.

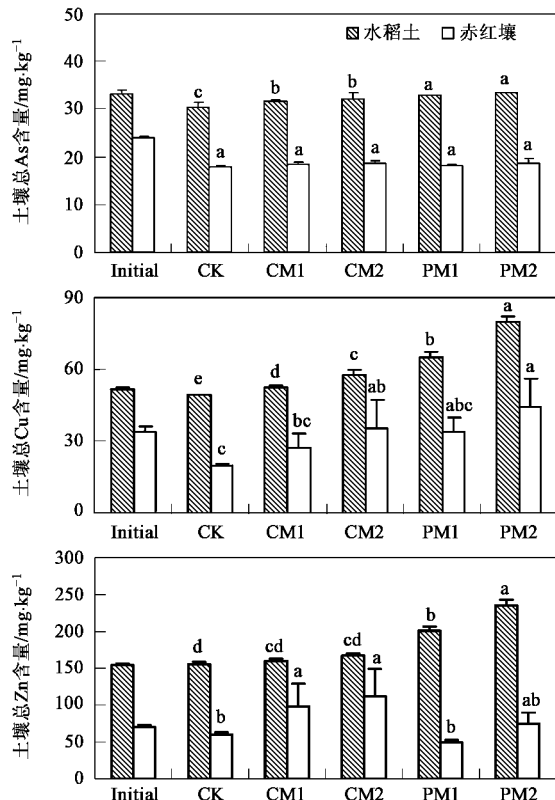
### 2.3 土壤总 As、Cu 和 Zn 含量变化

图1为通菜收获后不同处理间土壤总 As、Cu 和 Zn 含量变化情况.通菜收获后,2种土壤中总 As 含量几乎均低于试验前土壤总 As 含量,这是由通菜收获 As 带走量大于输入量所致.然而,与CK相比,在水稻土中施用粪肥处理土壤总 As 含量比CK显著提高,含量增量为 $1.2 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而且猪粪处理增量大于鸡粪处理.赤红壤中总 As 含量提高 $0.3 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,2种粪肥间没有明显差别.高量粪肥提高总 As 含量作用大于低量粪肥,同一用量粪肥处理水稻土中含量增量则大于赤红壤.

通菜收获后水稻土中所有施用粪肥处理及赤红壤中高量粪肥处理总 Cu 含量比试验前提高,表明 Cu 在土壤产生累积.与CK相比,施用粪肥使水稻土中总 Cu 含量提高 $3.1 \sim 30.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,赤红壤中提高 $7.1 \sim 24.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而且含量增量提高均具有猪粪处理 > 鸡粪处理、高量处理 > 低量处理的规律.鸡粪处理在水稻土中的总 Cu 含量增量低于赤红壤,猪粪处理则相反.

与试验前相比,通菜收获后水稻土中所有施用粪肥处理及赤红壤中高量粪肥处理也出现了总 Zn 的累积.施用粪肥使水稻土中总 Zn 含量提高 $4.6 \sim 79.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,赤红壤中提高 $-10.6 \sim 78.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .水稻土中含量增量为猪粪处理 > 鸡粪处理,赤红壤中则相反,2种土壤中均为高量处理 > 低量处理.2

种粪肥在2种土壤中的总 Zn 含量增量变化规律与总 Cu 一致.



图中相同小写字母表示差异不显著( $p < 0.05$ ),下同

图1 试验前及通菜收获后土壤总 As、Cu 和 Zn 含量变化

Fig.1 Change of soil total As, Cu and Zn concentrations after the harvest of water spinach and prior to the experiment

### 2.4 土壤有效 As、Cu 和 Zn 含量变化

通菜收获后,所有处理土壤有效 As 含量远低于试验前含量(图2).然而,与CK相比,施用粪肥处理通菜收获后有效 As 含量在水稻土中提高 $0.011 \sim 0.029 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在赤红壤中提高 $0.011 \sim 0.034 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .2种粪肥提高有效 As 含量作用为高量处理 > 低量处理.

与土壤有效 As 不同,通菜收获后所有施用粪肥处理土壤有效 Cu 含量比试验前提高 $1.4 \sim 17.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .与CK相比,在水稻土中施用粪肥,有效 Cu 含量增量为 $3.2 \sim 19.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,赤红壤中为 $5.2 \sim 19.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .2种土壤中有有效 Cu 含量增量均为猪粪处理 > 鸡粪处理且高量处理 > 低量处理,但2种土壤间差异没有明显规律.

通菜收获前后所有施用粪肥处理土壤有效 Zn 含量变化与有效 Cu 含量类似,含量增量为 $5.6 \sim 54.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .在水稻土中粪肥处理有效 Zn 含量增量为 $4.0 \sim 53.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,赤红壤中为 $14.1 \sim 65.9$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 2种土壤含量增量均具有猪粪处理 > 鸡粪处理、高量处理 > 低量处理的规律,而2种粪肥处理在水稻土中的含量增量小于赤红壤。

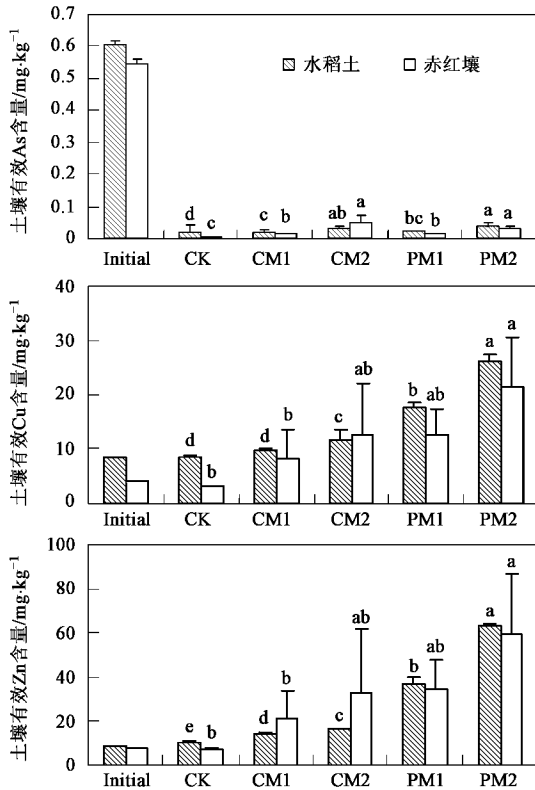


图2 试验前及通菜收获后土壤有效 As、Cu 和 Zn 含量变化  
Fig.2 Change of soil available As, Cu and Zn concentrations after the harvest of water spinach and prior to the experiment

### 2.5 土壤有效 As、Cu 和 Zn 占总 As、Cu 和 Zn 的质量分数变化

试验前水稻土和赤红壤中有效 As 占总 As 质量分数分别为 1.83% 和 2.28%。通菜收获后,所有处理土壤有效 As 百分数均比试验前大幅下降,仅为 0.004% ~ 0.038%(图3)。Szaková 等<sup>[16]</sup>报道土壤水溶性 As 一般仅占总 As 的 0.017% ~ 1.22%。本试验结果进一步证实土壤 As 的低有效性。然而,通菜收获后,水稻土中所有施用粪肥处理有效 As 质量分数比 CK 提高 0.033 ~ 0.099 个百分点,赤红壤中提高 0.063 ~ 0.147 个百分点。在水稻土中有效质量分数增量为猪粪处理 > 鸡粪处理,在赤红壤中则相反。粪肥 2 种用量提高有效质量分数作用为高量处理 > 低量处理。赤红壤中 As 有效质量分数增加大于水稻土。

与土壤有效 As 质量分数不同,通菜收获后所有处理有效 Cu 质量分数比试验前(水稻土和赤红壤分

别为 16.4% 和 11.7%)提高 1.2 ~ 34.1 个百分点。与 CK 相比,在水稻土中施用粪肥使有效 Cu 质量分数提高 1.2 ~ 15.2 个百分点,赤红壤中提高 13.4 ~ 30.4 个百分点。2 种土壤有效 Cu 质量分数增加均为猪粪处理 > 鸡粪处理且高量处理 > 低量处理,而粪肥处理在赤红壤中的质量分数增加均大于水稻土。

与土壤 Cu 有效性变化类似,通菜收获后所有处理土壤有效 Zn 质量分数比试验前(2 种土壤分别为 5.5% 和 10.8%)提高 1.0 ~ 64.2 个百分点。而且,所有粪肥处理有效 Zn 质量分数增幅明显大于有效 Cu,主要由 2 种粪肥中有效 Zn 含量明显高于有效 Cu 含量造成。在水稻土中粪肥处理有效 Zn 质量分数比 CK 增加 2.3 ~ 20.4 个百分点,在赤红壤中增加 7.5 ~ 63.1 个百分点。处理间及土壤间有效 Zn 质量分数增加变化规律均与有效 Cu 一致。

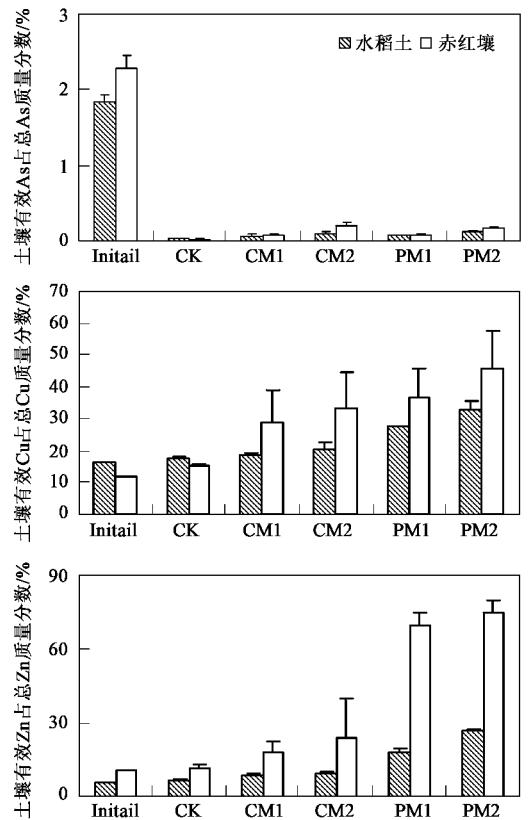


图3 土壤有效 As、Cu 和 Zn 占总 As、Cu 和 Zn 的质量分数变化  
Fig.3 Change of percent soil available As, Cu and Zn over total As, Cu and Zn after the harvest of amaranth and prior to the experiment

### 3 讨论

本试验用鸡粪和猪粪由于在饲料中添加有机肿、铜和锌制剂而含有较高的 As、Cu 和 Zn,但同时

也含有较高含量养分,施用粪肥显著提高了通菜在 2 种土壤中的生物量.对通菜 As、Cu 和 Zn 含量与其生物量进行回归分析,发现通菜 As 含量与其生物量、赤红壤中 Cu 含量与其生物量间具正相关关系,但仅有水稻土中 As 含量与生物量为显著正相关,水稻土中 Zn 含量与生物量呈负相关.这表明 2 种粪肥提高通菜生物量的同时也促进对 As 与 Cu 的吸收.通菜对 Zn 的吸收机制可能与 As 和 Cu 不同.粪肥由于提高通菜生物量,一定程度上稀释了其 Zn 含量.整体上所有处理通菜 As 和 Zn 含量均未超过我国食品卫生标准中的 As 和 Zn 限值(分别为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).然而,几乎所有施用粪肥处理通菜 As、Cu 和 Zn 吸收量均显著高于 CK.另外,粪肥处理通菜在水稻土的 As 和 Cu 吸收量均大于赤红壤,这与水稻土背景养分肥力高于赤红壤而提高通菜生物量有关.

对通菜收获后 2 种土壤中 As、Cu 和 Zn 的累积进行比较,2 种粪肥处理在 2 种土壤中 As、Cu 和 Zn 总含量及有效含量增量的变化均没有表现出明显规律.然而,所有粪肥处理有效 As、Cu 和 Zn 质量分数增加均为赤红壤 > 水稻土.主要原因为:首先,2 种粪肥中 As、Cu 和 Zn 的有效性均远高于土壤中原有 As、Cu 和 Zn 有效性.鸡粪中有效 As、Cu 和 Zn 质量分数分别为 32.2%、56.6% 和 94.5%,猪粪中分别为 33.0%、99.5% 和 90.8%(2 种粪肥有效 Cu 质量分数差别较大可能与 2 个养殖场添加了不同性质的铜制剂,而不同性质铜源对粪铜含量有影响<sup>[17]</sup>有关).施用这 2 种粪肥可提高土壤 As、Cu 和 Zn 有效性.其次,禽畜粪进入土壤后,由于其含有丰富有机碳,其中的可溶性有机碳通过对土壤矿物表面的竞争吸附与复合作用及与重金属的螯合作用,提高土壤中 As、Cu 和 Zn 的溶解性<sup>[18-20]</sup>.另外,鸡粪中磷含量通常远高于砷含量<sup>[9]</sup>.土壤中 As 主要以  $\text{As(V)}$  和  $\text{As(III)}$  形式存在. $\text{PO}_4$  由于与  $\text{As(V)}$  化学特性相似而在土壤矿物表面发生竞争吸附,而  $\text{As(V)}$  往往易被解吸<sup>[21]</sup>,也有利于提高土壤中 As 的溶解性.这种竞争作用在吸附点位少的土壤上表现得更为明显<sup>[22]</sup>.由于本试验赤红壤粘粒和有机质含量明显低于水稻土而砂粒含量远高于水稻土,阳离子代换量低,吸附点位少,因此,在赤红壤中施用含 As、Cu 和 Zn 粪肥比水稻土更有利于提高土壤 As、Cu 和 Zn 的有效性.然而,粪肥处理通菜在水稻土的 As 和 Cu 吸收量均显著大于赤红壤,这说明粪肥通过提高通菜生物量促进对 As、Cu 吸收累积的作用要大于通过提

高土壤 As、Cu 有效性这一方式.

另外,本试验通菜地上部 As、Cu 和 Zn 含量及吸收量并不能完全反映出土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的变化.这是由于通菜具有发达须根系,尤其对 Cu 和 Zn 也具有较高吸收量.而部分处理由于根系干物重不足而未能计算根系的吸收量,故未能完全反映出土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的变化.

#### 4 结论

(1) 在 2 种土壤中施用鸡粪和猪粪几乎均显著提高通菜生物量,生物量均表现出低量鸡粪处理 > 高量处理、高量猪粪处理 > 低量处理且猪粪处理 > 鸡粪处理的规律.通菜在水稻土中生物量显著高于赤红壤.

(2) 施用 2 种粪肥均比 CK 显著提高 2 种土壤中通菜 As 含量和 As 吸收量,具有高量处理 > 低量处理、猪粪 > 鸡粪处理且在水稻土中大于赤红壤的规律.除水稻土中 Cu 含量外,施用粪肥均显著提高通菜 Cu、Zn 含量及吸收量,但 2 种粪肥及用量处理间差异没有表现出某种明显规律.

(3) 通菜收获后,所有处理土壤总 As 含量比试验前稍下降、有效 As 含量及有效 As 质量分数均大幅下降,但所有粪肥处理土壤 Cu、Zn 总含量、有效含量及有效质量分数均提高.所有施用粪肥处理 3 种重金属总含量、有效含量及有效质量分数均比 CK 提高.如以土壤重金属有效含量增量及有效质量分数增加来评价其有效性变化,则施用含 As、Cu 和 Zn 粪肥提高土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的作用具有高量粪肥处理 > 低量处理及赤红壤 > 水稻土的规律.

参考文献:

- [1] Morrison J L. Distribution of arsenic from poultry litter in broiler chickens, soil and crops [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1969, **17**: 1288-1290.
- [2] Sims J T, Wolf D C. Poultry waste management: Agricultural and environmental issue [J]. *Advance of Agronomy*, 1994, **52**: 31-82.
- [3] 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 [J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, **16** (3): 371-374.
- [4] Jackson B P, Bertsch P M, Cabrera M L, et al. Trace element speciation in poultry litter [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32**: 535-540.
- [5] Kingery W L, Wood C W, Delaney D P, et al. Impact of long-term application of broiler litter on environmentally related soil properties [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**: 139-147.
- [6] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales

- [ J ]. *Bioresource Technology* , 1999 , **70** :23-31.
- [ 7 ] 刘荣乐,李书田,王秀彬,等.我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J].*农业环境科学学报*,2005,**24**(2):392-397.
- [ 8 ] 张树清,张夫道,刘秀梅,等.规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J].*植物营养与肥料学报*,2005,**11**(6):822-829.
- [ 9 ] 姚丽贤,李国良,党志.集约化养殖畜禽粪中主要化学物质调查[J].*应用生态学报*,2006,**17**(10):1989-1992.
- [ 10 ] Eghball B. Soil properties as influenced by phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications[J]. *Soil Science Society of America Journal* , 2002 , **94** :128-135.
- [ 11 ] Száková J, Tlustoš P, Goessler W , *et al.* Comparison of mild extraction procedures for determination of plant-available arsenic compounds in soil [ J ]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* , 2005 , **382** :142-148.
- [ 12 ] 鲁如坤主编.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.212,214.
- [ 13 ] 姚丽贤,李国良,何兆桓,等.连续施用鸡粪对菜心产量和重金属含量的影响[J].*环境科学*,2007,**28**(5):1113-1120.
- [ 14 ] Gupta G, Gardner W. Use of clay mineral ( montmorillonite ) for reducing poultry litter leachate toxicity ( EC<sub>50</sub> ) [ J ]. *Journal of Hazardous Materials* , 2005 , **118** ( 1-3 ) 81-83.
- [ 15 ] Plaza C , Hernández D , García-Gil J C , *et al.* Microbial activity in pig slurry-amended soils under semiarid conditions [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry* , 2004 , **36** ( 10 ) :1577-1585.
- [ 16 ] Száková J, Tlustoš P, Balík J , *et al.* Comparison of suitability of mild extraction procedures for determination of available portion of As , Cd , and Zn in soil [ J ]. *Chemické listy* , 2001 , **95** :179-183.
- [ 17 ] 黄志坚,陈强,李清禄,等.不同形态铜源对仔猪生长性能、血液生化指标和粪铜排出量的影响[J].*家畜生态学报*,2007,**28**(1):32-35.
- [ 18 ] Almas A R , McBride M B , Siagh R R. Solubility and lability of cadmium and zinc in two soils treated with organic matter [ J ]. *Soil Science* , 2000 , **165** :250-259.
- [ 19 ] Del Castillo P , Chardon W J , Satomons W. Influence of cattle-manure slurry application on the solubility of cadmium , copper , and zinc in a manured acidic loamy-sand soil [ J ]. *Journal of Environmental Quality* , 1993 , **22** :689-697.
- [ 20 ] Jackson B P , Seaman J C , Bertsch P M. Fate of arsenic compounds in poultry litter upon land application [ J ]. *Chemosphere* , 2006 , **65** ( 11 ) :2028-2034.
- [ 21 ] Jackson B P , Miller W P. Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides [ J ]. *Soil Science Society of American Journal* , 2000 , **64** :1616-1622.
- [ 22 ] Smith E , Naidu R , Alston A M. Chemistry of inorganic arsenic in soils : II . Effect of phosphorus , sodium , and calcium on arsenic sorption [ J ]. *Journal of Environmental Quality* , 2002 , **31** :557-563.