

重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究

姜萍^{1,2}, 金盛杨², 郝秀珍², 周东美², 李连祯², 吕家珑¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:本文调查分析了江西省余江县 39 个大型养猪场的饲料、猪粪、以及长期施用这些猪粪的菜地土壤及蔬菜的 Cu、Zn、Pb、Cd 含量, 并对饲料、猪粪、土壤和蔬菜重金属含量进行了相关分析。结果表明, 大猪和小猪饲料 Cu 含量超标率分别达 81.6% 和 30.8%, Zn 含量超标率分别达 89.5% 和 94.9%, 而 Pb、Cd 未超标。猪粪 Cu、Zn 含量亦严重超标, 且饲料和猪粪中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量呈显著正相关关系。土壤总 Zn 和总 Cd 含量分别有 7.8% 和 5.2% 的样品超过三级标准, 污染较为严重。所有蔬菜样品 Cu、Zn、Pb 含量均未超过我国食品卫生质量标准, 空心菜和芋头 Cd 含量超标。土壤总 Cu、Zn、Cd 含量与提取态呈显著正相关。

关键词:红壤; 饲料; 猪粪; 蔬菜; 重金属

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0942-06

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Feeds, Pig Manures, Soils and Vegetables

JIANG Ping^{1,2}, JIN Sheng-yang², HAO Xiu-zhen², ZHOU Dong-mei², LI Lian-zhen², LV Jia-long¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Shanxi Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Serious environmental problems caused by livestock and poultry manures are attracting increasing interests because large amounts of additives are added in feeds during intensive farming. This study investigated the concentrations of Cu, Zn, Pb and Cd in feeds, pig manures, soils and vegetables sampled from 39 intensive farming plants in Yujiang County, Jiangxi Province. The results showed that the rate of exceeding allowable limit of Cu in big pig feed and piglet feed were 81.6% and 30.8%, respectively. Meanwhile, the rate of exceeding allowable limit of Zn in big pig feed and piglet feed were 89.5% and 94.9%, respectively. In addition, Cu and Zn concentrations in some pig manures were also above the Pollutant Emission Standard for Livestock and Breeding Industry (In China). Furthermore, there were significant positive correlations between the heavy metal concentrations in feeds and pig manures. Total Zn concentration in 7.8% of soil samples and total Cd concentration in 5.2% of soil samples exceeded the Chinese Soil Environmental Quality Standard III, which means they have been heavily polluted. The survey also showed that the concentrations of Cu, Zn, and Pb in all vegetable samples were lower than the National Food Hygiene Standard, while Cd concentrations in *Ipomoea Aquatica* and *Colocasia Esculenta* exceeded the standard. The significant positive correlations were found between the total Cu, Zn, Cd concentrations and the extractable heavy metal concentrations in soils.

Keywords: red soil; feed; pig manures; vegetables; heavy metals

我国畜牧养殖业经过 20 多年的持续发展, 已走上规模化、集约化的道路。随着养殖规模的扩大, 畜禽粪产量亦随之增加。王方浩等^[1]调查表明, 2003 年我国畜禽养殖业共产生 31.90 亿 t 粪便, 是当年工业产生固体废物

物的 3.2 倍。另外, 为了防治畜禽疾病、促进生长和提高饲料利用率, 一些微量元素如 Cu、Zn 等被广泛添加到畜禽饲料中。这些饲料添加剂的使用大大改善了畜禽生长的物质条件, 也给养殖户带来巨大收益^[2-3]。但是, 由于 Cu、Zn 等重金属元素很难被畜禽完全吸收利用, 导致大量重金属(95%以上)随粪尿排出体外^[4-5]。

Cang 等^[6-9]的调查结果表明, 畜禽粪中重金属以 Zn 和 Cu 污染最为严重, 这可能与饲料添加剂种类有关。此类重金属含量较高的畜禽粪便作为有机肥施入

收稿日期: 2009-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(30700480); 公益性行业(农业)专项(200903015)

作者简介: 姜萍(1983—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染研究。E-mail: jiangping029@163.com

通讯联系人: 吕家珑 E-mail: ljll@nwsuaf.edu.cn

土壤,导致土壤中的重金属和有机质含量升高,从而影响到重金属在土壤-作物系统中的迁移。Chary 等^[10]研究表明,在污染土壤上种植作物时,重金属对作物以及食用这些作物的人和动物存在潜在威胁。以往研究重点关注畜禽粪中的重金属含量及形态或者畜禽粪农用影响植物吸收方面^[11-18],很少见到将饲料、畜禽粪、土壤、植物相结合的系统报道。因此有必要从源头对饲料-猪粪-土壤-蔬菜进行系统调查,为红壤区猪粪农用提供基础资料和指导。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

2008 年 9 月调查分析了江西省余江县 39 个大型养猪场的饲料样品 77 个(大猪 38,小猪 39),粪便鲜样 76 个(大猪 38,小猪 38),长期施用这些粪肥的菜地土壤样品 39 个,长期生长在粪肥污染土壤上的蔬菜样品 39 个。其中养猪场的养殖规模最大达 2 000 头,占地 26.6 hm²,成年猪、仔猪以体重 70 kg 为界划分。蔬菜样品分为果菜类辣椒、茄子、苦瓜、芋头、刀豆及叶菜类空心菜、红薯藤和小青菜。土样取回后风干磨细,过 10 目或 100 目筛,分别供测定重金属提取态和全量用。蔬菜样品采回后杀青,烘干,将蔬菜、饲料及猪粪样品粉碎,备用。

1.2 样品测定

土壤有机质、pH 均采用常规方法,重金属总量采用 HNO₃-HClO₄-HF 消煮,原子吸收分光光度法测

定。土壤重金属提取态分别采用 RHIZO^[19]及 BCR^[20]两种方法测定。

饲料、猪粪和蔬菜样品重金属全量采用 HNO₃-HClO₄ 消煮,原子吸收分光光度法测定^[21]。

1.3 污染评价及统计分析

数据处理与分析采用 Excel 及 SPSS15.0 软件,制图使用 Excel 软件,各因素之间的相关分析采用 Pearson 双因素分析,* 表示显著性差异($P \leq 0.05$),** 表示极显著差异($P \leq 0.01$)。土壤评价参照中国土壤环境质量标准^[22],饲料和畜禽粪的重金属含量上限参照我国饲料质量标准和畜禽养殖业污染物排放标准,同时参考俄罗斯饲料^[23]重金属含量标准及我国有机肥有害物质限量标准^[24]。

2 结果与分析

2.1 饲料和猪粪中重金属状况

饲料和猪粪中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量如表 1 所示。可以看出,饲料和粪便中 Cu、Zn 的含量较高,这可能与饲料中微量元素添加剂的大量施用有关。徐伟朴等^[25]认为在养殖过程中微量元素添加到饲料中后,在畜禽体内的消化吸收利用率极低,大量微量元素未被动物吸收而排出体外,导致在排放的粪便中含量相当高。且为防御疾病,人为添加使小猪饲料及粪便中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均高于同一采样点大猪饲料和粪便,这一结论通过累积系数也得到验证。

我国最新饲料添加剂使用规范^[26]规定,大猪和小

表 1 饲料和猪粪中总 Cu、Zn、Pb、Cd 含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Cu, Zn, Pb and Cd concentrations in the feeds and manures(mg·kg⁻¹)

元素		饲料		猪粪		累积系数	
		大猪(n=38)	小猪(n=39)	大猪(n=38)	小猪(n=38)	大猪(n=38)	小猪(n=38)
Cu	均值±标准差	96.5±56.8	171±73.9	679±382	892±345		
	范围	17.2~268	31.6~425	98~1 410	179~1 430	2.38~10.25	3.36~11.14
	超标率/%	81.6	30.8	81.6	97.4		
Zn	均值±标准差	197±38.7	573±74.8	1570±154	3200±350		
	范围	116~281	124~298	714~9 750	790~14 100	3.62~11.94	4.21~13.57
	超标率/%	89.5	94.9	100	100		
Pb	均值±标准差	0.25±0.20	0.74±0.73	1.15±0.81	3.19±2.31		
	范围	0.03~0.91	0.09~3.70	0.17~3.14	0.43~9.83	1.38~7.83	1.71~9.12
	超标率/%	0	0	0	0		
Cd	均值±标准差	0.07±0.13	0.09±0.16	0.37±0.29	1.54±0.06		
	范围	0.02~0.84	0.02~0.98	0.06~1.20	0.06~1.60	2.24~10.33	2.40~11.83
	超标率/%	2.63	2.56	0	0		

注:39 个采样点中 1 个养猪场无大猪饲料和猪粪样品,故大猪饲料及猪粪样品数为 38;1 个小猪粪便样品丢失,故小猪猪粪样品数为 38。累积系数=猪粪中重金属含量/对应饲料中重金属含量

猪饲料 Cu 添加量上限分别为 35 mg·kg⁻¹ 和 200 mg·kg⁻¹,Zn 添加量上限为 150 mg·kg⁻¹。我们的调查表明大猪和小猪饲料 Cu 含量超标率分别为 81.6%和 30.8%,Zn 含量超标率分别为 89.5%和 94.9%。我国饲料卫生标准规定 Pb、Cd 浓度上限分别为 5.0 mg·kg⁻¹和 0.5 mg·kg⁻¹, 我们所采集的饲料样品 Pb 含量均低于此限,但大猪和小猪饲料各有一个样品 Cd 含量高于 0.5 mg·kg⁻¹,占调查采样的 2.6%。同样,董占荣等^[27]对杭州市郊规模化养殖场饲料进行过调查,结果显示饲料 Cu、Zn、Cd 超标率分别为 100%、100%和 11.1%。

根据我国有机肥有害物质限量标准,Cu、Zn、Pb、Cd 含量上限分别为 250、500、60、3 mg·kg⁻¹。本次调查采集到的猪粪样品 Pb、Cd 含量均未超标,而 Cu、Zn 含量超标严重。其中大猪和小猪粪便中 Cu 超标率分别为 81.6%和 97.4%,Zn 含量全部超标。本地区养殖场所产生的粪肥 Cu、Zn 污染严重,参照我国农用污泥中污染物控制标准^[28]已不适合作为有机肥使用。

饲料和猪粪中 Cu、Zn、Pb、Cd 的相关关系如表 2 所示。无论大猪还是小猪,饲料和猪粪 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均呈显著正相关,说明饲料添加是猪粪重金属的最主要来源。饲料中添加 Cu、Zn、Pb、Cd 后,只有少部分被动物吸收,其余都随粪便排出体外。受到污染的有机肥连续多年施用必然会对土壤质量及作物生长造成一定威胁,最终将危害人类健康。

表 2 饲料和猪粪中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量相关分析(n=38)

Table 2 Pearson correlation coefficients between heavy metal concentrations in pig feeds and those in pig manures(n=38)

类型	Cu	Zn	Pb	Cd
大猪	0.561**	0.775**	0.631**	0.692**
小猪	0.339*	0.917**	0.511**	0.854**

2.2 土壤 pH、有机质及 Cu、Zn、Pb、Cd 含量状况

对江西省余江县 39 个采样点采集的土壤样品进行 pH、有机质及 Cu、Zn、Pb、Cd 含量分析,结果如表 3 所示。39 个菜地土壤 pH 值从 4.96~6.89 变化范围较大,这与不同采样点的耕作历史有关。土壤有机质含量范围从 13.2~59.6 g·kg⁻¹,有一个很大跨度,这可能与采样点施肥频率跟施肥量有关。土壤 Cu 含量在 15.4~174 mg·kg⁻¹ 之间,变异系数为 0.61。土壤 Zn 含量在 54.4~743 mg·kg⁻¹ 之间,平均含量为 216 mg·kg⁻¹, Pb 含量在 15.2~36.9 mg·kg⁻¹ 之间,平均含量为 23.8 mg·kg⁻¹,Cd 含量在 0.01~9.36 mg·kg⁻¹ 之间,变异系数为 1.79,变异程度最大。

表 3 土壤 pH、有机质及总 Cu、Zn、Pb、Cd 含量

Table 3 Soil pH, organic matter content and Cu, Zn, Pb and Cd concentrations

项目 (n=39)	pH	OM/ g·kg ⁻¹	Cu/ mg·kg ⁻¹	Zn/ mg·kg ⁻¹	Pb/ mg·kg ⁻¹	Cd/ mg·kg ⁻¹
平均值	6.21	31.1	72.5	216	23.8	1.27
标准差	0.45	11.3	44.2	156	5.32	2.27
变异系数	0.07	0.36	0.61	0.72	0.22	1.79
最小值	4.96	13.2	15.4	54.4	15.2	0.01
最大值	6.89	59.6	174	743	36.9	9.36

参照中国土壤环境质量标准,重金属全量超标情况如表 4 所示。土壤总 Cu、Zn、Pb、Cd 含量未受污染样品数占调查采样总数比例分别是 20.5%、20.5%、97.4%和 53.9%。Pb 污染程度最低,均低于二级标准。Cu 污染程度次之,51.3%采样点土壤全 Cu 含量高于二级标准 100 mg·kg⁻¹,但均低于三级标准。Zn 和 Cd 分别有 46.2%和 43.7%的土壤高于国家农田二级标准。此外,分别有 7.8%和 5.2%的土壤样品 Zn 和 Cd 含量高于中国土壤环境质量三级标准,污染较为严重。

表 4 土壤总 Cu、Zn、Pb、Cd 含量跟土壤环境质量标准对比

Table 4 Comparison between Cu, Zn, Pb and Cd concentrations in soil samples and those in the Soil Environmental Quality Criteria of China

指标 n=39	低于背景值		高于一级		高于二级		高于三级	
	个数	百分比	个数	百分比	个数	百分比	个数	百分比
Cu	8	20.5	31	79.5	20	51.3	0	0
Zn	8	20.5	31	79.5	18	46.2	3	7.8
Pb	38	97.4	1	2.6	0	0	0	0
Cd	21	53.9	18	46.2	17	43.7	2	5.2

研究表明^[29-31],畜禽粪不管是单独施用还是混合其他无机肥施用都会明显提高土壤有机质含量。同一地区 1988 年旱地红壤有机质含量为 5.8~6.4 g·kg⁻¹, pH 4.6~4.7^[32]。此次调查土壤的有机质含量和 pH 有所增加,而采样地区土壤并没有绿肥和秸秆等有机质物质的施用,因此连续多年施用猪粪可能是一个主要原因。孔宏敏等^[33]在旱地红壤上进行 14 a 定位试验研究有机质积累规律,结果表明猪粪能增加红壤旱地有机质的积累,且增加速度高于绿肥和秸秆。

2.3 蔬菜样品中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量分析

对江西省余江县的 39 个采样点蔬菜样品(叶菜类红薯藤 6 个,空心菜 10 个,小青菜 2 个;果菜类辣椒 5 个,茄子 12 个,苦瓜 2 个,刀豆 1 个,芋头 1 个)

Cu、Zn、Pb、Cd 含量进行分析,结果以鲜重计,见表 5。重金属含量的差异反映了不同种类蔬菜吸收富集重金属能力的不同,叶菜中 Cu、Zn 和 Pb 含量明显高于果菜类,其中空心菜吸收重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 能力最强,辣椒吸收 Cu 能力最弱,茄子吸收 Zn 和 Pb 能力最弱,红薯藤吸收 Cd 能力也很弱。所有蔬菜 Cu、Zn、Pb 含量均低于我国蔬菜食品卫生标准^[4],说明土壤重金属 Cu、Zn、Pb 未对蔬菜造成污染,从而未对人类健康构成威胁。Li 等^[35]报道我国土壤 Cd 污染较严重,并且 Cd 对植物有效性高于其他重金属元素,这在我们的调查中也得到了验证。空心菜 Cd 含量均超标($\text{Cd}:0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),芋头 Cd 含量超标,表明该采样点土壤 Cd 可通过食物链进入人体,有损人类健康。

对于同一品种蔬菜来说,Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量变化很大,这可能与采样点土壤 pH 值以及蔬菜基因型有关。郝秀珍等^[36]研究表明,同一作物不同基因型对重金属吸收能力不同,可能对某种重金属高吸收,但对某种重金属却表现出低吸收的特点。由于采样时不能确定所采蔬菜基因类型,故出现如表 4 所示含量的

较大差异。

2.4 提取态重金属与蔬菜重金属含量和土壤性质之间的相关分析

本文用两种提取剂来评估土壤中重金属的生物有效性。提取态重金属与蔬菜重金属含量和土壤性质之间的相关系数列于表 6。茄子 Cd 含量、辣椒 Zn 含量与土壤提取态 Cd、Zn 含量分别达极显著和显著正相关。红薯藤 Cu 含量与土壤 Cu 提取态达极显著负相关。其他植株样品 Cu、Zn、Pb、Cd 含量与土壤提取态含量的相关性均不显著。同样,在对苏南农田土壤和蔬菜进行重金属调查时,也未发现植株重金属含量与土壤重金属提取态含量有相关关系^[37]。重金属有效性受土壤物理(土壤结构和渗透性)和化学(Eh、pH 和化学形态)及生物因素的影响(植物通过释放氧气、质子、有机酸以及与菌根真菌结合)^[38]。本次调查所采集蔬菜品种包括叶菜类和果实类,且蔬菜对重金属吸收还受大气颗粒中重金属沉降和含 Cu 制剂使用等因素的影响。土壤样品具有较宽 pH(4.96~6.89)和有机质范围($13.2\sim59.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这可能影响到土壤重金属

表 5 植株样品中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量(鲜重计, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 Cu, Zn, Pb and Cd concentrations(fresh weight based)of plant samples($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目	Cu		Zn		Pb		Cd	
	Mean $\pm$ SD	Range	Mean $\pm$ SD	Range	Mean $\pm$ SD	Range	Mean $\pm$ SD	Range
辣椒($n=5$)	0.94 $\pm$ 0.21	0.66~1.19	2.75 $\pm$ 0.72	1.78~3.66	0.053 $\pm$ 0.022	0.025~0.083	0.030 $\pm$ 0.035	0.003~0.096
茄子($n=12$)	1.00 $\pm$ 0.28	0.47~1.38	1.95 $\pm$ 0.34	1.52~2.39	0.029 $\pm$ 0.011	0.017~0.059	0.064 $\pm$ 0.059	0.019~0.237
红薯藤($n=6$)	1.61 $\pm$ 0.07	1.52~1.70	3.27 $\pm$ 0.60	2.26~3.87	0.084 $\pm$ 0.048	0.042~0.168	0.017 $\pm$ 0.012	0.004~0.036
空心菜($n=10$)	2.10 $\pm$ 0.86	1.20~4.16	7.83 $\pm$ 5.37	2.62~17.6	0.103 $\pm$ 0.046	0.050~0.187	0.185 $\pm$ 0.180	0.058~0.683
小青菜($n=2$)	0.79 $\pm$ 0.29	0.58~1.00	4.14 $\pm$ 0.58	3.02~5.26	0.089 $\pm$ 0.005	0.085~0.092	0.024 $\pm$ 0.000 1	0.023~0.024
苦瓜($n=2$)	0.81 $\pm$ 0.18	0.68~0.94	3.19 $\pm$ 0.64	2.74~3.65	0.025 $\pm$ 0.01	0.018~0.032	0.004 $\pm$ 0.000 6	0.003~0.004
刀豆($n=1$)	0.083		4.84		0.032		0.029	
芋头($n=1$)	1.74		16.12		0.039		0.906	

表 6 土壤重金属提取态与植物重金属含量、土壤重金属全量以及土壤 pH 和有机质之间的相关关系

Table 6 Pearson correlation coefficients of extractable soil heavy metal concentrations and heavy metal concentrations in vegetables or total soil heavy metal concentrations, soil pH and OM, respectively

项目	RHIZO 提取态重金属				BCR 提取态重金属			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
辣椒($n=5$)	0.146	0.856*	-0.225	0.132	0.017	0.834*	0.031	0.138
茄子($n=12$)	-0.236	0.134	0.112	0.797**	-0.238	-0.211	0.383	0.87**
红薯藤($n=6$)	-0.974**	0.723	0.745	0.633	-0.966**	-0.325	-0.046	0.480
空心菜($n=10$)	-0.332	0.145	0.266	-0.237	-0.288	-0.309	0.399	0.051
土壤全量($n=39$)	0.350*	0.794**	-0.130	0.648**	0.372*	0.797**	0.037	0.459**
土壤 pH($n=39$)	-0.251	-0.283	0.223	-0.071	-0.231	-0.007	0.058	0.227
土壤有机质($n=39$)	0.005	-0.026	-0.185	-0.138	0.045	0.519	-0.115	0.113

的提取和蔬菜吸收^[39]。土壤提取态 Cu、Zn、Cd 含量与土壤总含量显著正相关,而土壤提取态 Pb 含量与全 Pb 含量无相关性。

3 结论

研究表明,猪粪 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均大于对应饲料中的含量,并且小猪饲料及粪便中的 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均高于大猪饲料和粪便。大猪和小猪饲料 Cu 超标率分别为 81.6%和 30.8%,Zn 含量超标率分别达 89.5%和 94.9%。猪粪样品 Pb、Cd 量均未超标,而 Cu、Zn 含量严重超标。相关分析表明,无论大猪还是小猪,饲料和猪粪 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均呈显著正相关,可见粪便中重金属主要来源于饲料添加。

所采 39 个菜地土壤 pH 值和有机质变化范围均较大。蔬菜调查显示,空心菜吸收 Cu、Zn、Pb、Cd 的能力最强,辣椒吸收 Cu 的能力最弱,所有蔬菜类 Cu、Zn、Pb 含量均低于我国蔬菜卫生标准,空心菜和芋头 Cd 含量均超标。

茄子 Cd、辣椒 Zn 含量与土壤提取态 Cd、Zn 含量分别达极显著和显著水平正相关。红薯藤 Cu 含量与土壤 Cu 提取态达极显著负相关。其他植株样品 Cu、Zn、Pb、Cd 含量与土壤提取态含量的相关性均不显著。

参考文献:

- [1] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 我国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617.
WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.
- [2] 王 辉, 董元华, 张绪美, 等. 江苏省集约化养殖畜禽粪便盐分含量及粪便特征分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 229-233.
WANG Hui, DONG Yuan-hua, ZHANG Xu-mei, et al. Salinity contents and distribution of dry animal manures on intensified-farms in Jiangsu Province [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 229-233.
- [3] 李 鹏, 齐光海. 饲料添加剂的使用安全研究进展[J]. 饲料工业, 2006, 27(18): 7-10.
LI Peng, QI Guang-hai. Progress in study of the safety of animal feed additives use[J]. *Feed Industry*, 2006, 27(18): 7-10.
- [4] 闫秋良, 刘福柱. 通过营养调控缓解畜禽生产对环境的污染[J]. 家禽生态, 2002, 23(3): 68-70.
YAN Qiu-liang, LIU Fu-zhu. Reduction environmental pollution of animal production by adjustment of nutrition[J]. *Ecology of Domestic Animal*, 2002, 23(3): 68-70.
- [5] Ren S R, Shao Y C, Wang Z X, Analyze on heavy metals content of merchandise compost produced by animal wastes[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(Sup): 216-318.
- [6] 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]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16(3): 371-374.
- [7] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量现状与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.
LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizer and organic waste[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(2): 392-397.
- [8] Bolan N S, Adriano D C, Mahimairaja S. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 34: 291-338.
- [9] Nicholson F A, Chamber B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales[J]. *Biore-sour Technol*, 1999, 23: 23-31.
- [10] Chary N S, Kamala C T, Raj D S S. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69: 513-524.
- [11] 朱亦君, 郑袁明, 贺纪正, 等. 猪粪中铜对东北黑土地污染风险评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2751-2756.
ZHU Yi-jun, ZHENG Yuan-ming, HE Ji-zheng, et al. Risk assessment of pig manure Cu-contamination of black soil in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2751-2756.
- [12] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 等. 施用畜禽粪对两种土壤 As、Cu、Zn 有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 127-135.
YAO Li-xian, LI Guo-liang, HE Zhao-huan, et al. Bioavailability of As, Cu and Zn in two soils as affected by application of two types of animal manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 127-135.
- [13] Li S T, Liu R L, Wang M, et al. Phytoavailability of cadmium to cherry-red radish in soils applied composted chicken or pig manure [J]. *Geoderma*, 2006, 136: 260-271.
- [14] Faridullah, Irshad M, Yamamoto S, et al. Characterization of trace elements in chicken and duck litter ash[J]. *Waste Management*, 2009, 29: 265-271.
- [15] Clemente R, Paredes C, Bernal M P. A field experiment investigating the effects of olive husk and cow manure on heavy metal availability in a contaminated calcareous soil from Murcia (Spain)[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 118: 319-326.
- [16] 程海翔, 贾秀英, 朱维琴, 等. 杭州地区猪粪重金属含量及形态分布的初步研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2008, 7(4): 294-297.
CHENG Hai-xiang, JIA Xiu-ying, ZHU Wei-qin, et al. The research on content and speciation of heavy metals in pig manures in Hangzhou [J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2008, 7(4): 294-297.
- [17] 李和国. 规模化猪场猪粪中的营养素分析研究[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(3): 77-81.
LI He-guo. The analysis and research of nutrients in pig manure in the

- large-scale pig farms[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2009, 30(3):77-81.
- [18] 黄治平, 徐 斌, 张克强, 等. 连续四年施用规模化猪场猪粪温室土壤重金属积累研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11):239-244.
HUANG Zhi-ping, XU Bin, ZHANG Ke-qiang, et al. Accumulation of heavy metals in the four years continual swine manure-applied green-house soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11):239-244.
- [19] Feng M H, Shan X Q, Zhang S Z, et al. Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat[J]. *Chemosphere*, 2005, 59:939-949.
- [20] Ure A M, Quevauviller P H, Muntau H, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the European communities[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1993, 51:135-151.
- [21] 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.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [22] GB15618—1995, 土壤环境质量标准[S].
GB15618—1995, Environmental Quality Standard for Soils[S].
- [23] 谢敏康. 饲料和禽产品中的重金属含量[J]. 饲料广角, 2000, 6:20.
XIE Min-kang. Contents of animal feed and its productions[J]. *Feed China*, 2006, 6:20.
- [24] GB18596—2001, 畜禽养殖业污染物排放标准[S].
GB18596—2001, Pollutant Emission Standard for Livestock and Breeding Industry[S].
- [25] 徐伟朴, 陈同斌, 刘俊良, 等. 规模化畜禽养殖对环境的污染及防治策略[J]. 环境科学, 2004, 25(增刊):105-108.
XU Wei-pu, CHEN Tong-bin, LIU Jun-liang, et al. Environmental pollution comprehensive prevention and control tactics of the scale and intensify poultry farming[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(Sup):105-108.
- [26] 中华人民共和国农业部公告, 第 1224 号. 饲料添加剂安全使用规范.
Bulletin of the People's Republic of China, No. 1224. Standard of feed additive use.
- [27] 董占荣, 陈一定, 林咸永, 等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1):35-39.
DONG Zhan-rong, CHEN Yi-ding, LIN Xian-yong, et al. Investigation on the contents and fractionation of heavy metals in swine manures from intensive livestock farms in the suburb of Hangzhou[J]. *Acta Agricul-turae Zhejiangensis*, 2008, 20(1):35-39.
- [28] GB4284—84, 农用污泥中污染物控制标准[S].
GB4284—84, Control Standards for Pollutants in Sludge[S].
- [29] Yang C M, Yang L Z, Ouyang Z. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes[J]. *Geo-derma*, 2005, 124:133-142.
- [30] Blair N, Faulkner R D, Till A R, et al. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility Part I: Broadbalk experiment[J]. *Soil Tillage Research*, 2006, 91:30-38.
- [31] Rudrappa L, Purakayastha T J, Singh D, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid sub-tropical India[J]. *Soil Tillage Research*, 2006, 88:180-192.
- [32] 孔宏敏, 何圆球. 红壤旱地有机质的积累规律及其影响因素 [J]. 土壤, 2003, 35(5):401-407.
KONG Hong-min, HE Yuan-qiu. Accumulation of organic matter and affecting factors in upland of red soil[J]. *Soils*, 2003, 35(5):401-407.
- [33] 孔宏敏, 何圆球, 吴大付, 等. 长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5):782-786.
KONG Hong-min, HE Yuan-qiu, WU Da-fu, et al. Effect of long-term fertilization on crop yield and soil fertility of upland red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5):782-786.
- [34] GB2762—2005, 蔬菜食品卫生质量标准[S].
GB2762—2005, Quality Standard for Vegetable Food Hygiene[S].
- [35] Li Z W, Li L Q, Pan G X, et al. Bioavailability of Cd in a soil-rice system in China: Soil type versus genotype effects[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271:165-173.
- [36] 郝秀珍. 畜禽粪中铜、锌在土壤中的环境化学过程与蔬菜安全研究[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所博士学位论文, 2008.
HAO Xiu-zhen. Environmental chemical processes of poultry and livestock manures Cu and Zn and their effects on vegetables safety[D]. Nanjing: A Dissertation Submitted to the Graduate School of Chinese Academy of Sciences In Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy, 2008.
- [37] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, et al. Heavy metal transfer from soil to vegetable in southern Jiangsu Province, China[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(3):305-311.
- [38] Ernst W H O. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11:163-167.
- [39] Gupta A K, Sinha S. Chemical fraction and heavy metal accumulation in the plant of *Sesamum indicum*(L.)var. T55 grown on soil amended with tannery sludge: Selection of single extractants[J]. *Chemosphere*, 2006, 64:161-173.