

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.032

我国规模化养猪场粪便重金属污染特征与农用风险评价

薄录吉^{1,2} 李彦^{1,2} LUO Jiafa^{1,3} 张英鹏^{1,2} 井永苹^{1,2} 刘兆辉^{2,4}

(1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 2. 农业部黄淮海平原农业环境重点实验室, 济南 250100; 3. 新西兰农业科学院鲁亚库拉研究中心, 哈密尔顿 3240; 4. 山东省农业科学院, 济南 250100)

摘要: 系统收集了我国 21 省市规模化养猪场粪便和 11 省市猪饲料重金属浓度数据, 分析了其污染特征, 同时对各省市猪粪总量及其重金属总含量、猪粪安全农用年限进行了估算。结果表明: 在 21 省市中, 猪粪中 Cu、Zn、As、Cd、Cr 平均含量超标省市分别占到 95.2%、85.7%、33.3%、20% 和 5.26%。在其中有猪饲料数据的 11 省市中, 猪饲料 Cu 含量超标的样品数量占到 100% (四川除外, 为 75%), 超标倍数在 13.2~49.0 之间; 猪饲料 Zn 含量超标的样品数量占到 60.0%~100%, 超标倍数在 1.3~9.5 之间。猪粪和饲料间 Cu、Zn 达到极显著相关水平 ($p < 0.01$)。猪粪安全农用估算结果表明, 限制我国规模化养殖场猪粪农用的主要因素是 Cu、Zn 和 Cd。吉林省、辽宁省和山东省分别连续施用猪粪 16、23、91 a, 土壤中 Cd 含量超过国家土壤质量二级标准 (GB 15618—2008)。北京连续施用猪粪 65、51 a 而天津连续施用猪粪 53、91 a, 土壤 Cu 和 Zn 含量分别超过国家土壤环境质量二级标准。建议在生猪养殖及其粪便农用过程中, 不仅要源头严格控制饲料中 Cu、Zn 等微量元素添加量, 还应按照标准严格控制猪粪农田施用量。

关键词: 规模化养猪场; 猪粪; 重金属; 农用风险; 安全年限

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)01-0258-10

Characteristics of Heavy Metals Pollution in Pig Manures and Environmental Risks Evaluation in Intensive Pig Farming Areas in China

BO Luji^{1,2} LI Yan^{1,2} LUO Jiafa^{1,3} ZHANG Yingpeng^{1,2} JING Yongping^{1,2} LIU Zhaohui^{2,4}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China

2. Key Laboratory of Agro-Environment in Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture, Ji'nan 250100, China

3. AgResearch, Ruakura Research Centre, Hamilton 3240, New Zealand

4. Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100, China)

Abstract: Information about the concentrations of heavy metals in pig manure from large-scale pig farms was collected from 21 provinces and cities in China, and information about the concentrations of heavy metals in pig feeds was collected from 11 provinces and cities. The data were analyzed systematically to evaluate the total amount of pig manure and heavy metals produced in each province. The period over which the pig manure could safely be applied to agricultural land was assessed by calculating the total amount of heavy metals found in the manure produced and the total land available for application in each province and city. The results indicated that in the 21 provinces and cities, 20 of them had pig manure samples that were over the recommended concentration limit for Cu, 18 of them were over the limit for Zn, six of them were over the limit for As, four of them were over the limit for Cd and one of them was over the limit for Cr. Moreover, in 10 provinces 100% of the pig feed samples were over the national standard for Cu (13.2~49.0 times of the standard) and in one province 75% were over the standard. On average, for Zn concentrations the pig feeds were 1.3~9.5 times of the national standard. There were significant positive correlations for Cu and Zn between pig manures and feeds ($p < 0.01$). The main limitations to the land application of the pig manure were due to the amounts of Cu, Zn and Cd. For

收稿日期: 2017-05-15 修回日期: 2017-06-05

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2016DB28)、山东省农业科学院青年科研基金项目 (2016YQN40)、山东省重点研发计划项目 (2016CYJS05A01-3)、山东省农业科学院科技创新重点项目 (2014CXZ01)、山东省农业科学院农业科技创新工程项目 (CXGC2016B09) 和“海外泰山学者”建设工程专项

作者简介: 薄录吉 (1985—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事重金属污染土壤修复研究, E-mail: boluji@126.com

通信作者: 李彦 (1970—), 女, 研究员, 博士, 主要从事农业面源污染防治研究, E-mail: nkyliyan@126.com

example, in Jilin, Liaoning and Shandong Provinces, the concentrations of Cd in soils would exceed the environmental quality standards for soils after 16, 23 and 91 years, respectively, if the manure was applied to land in these provinces at the current rate. Additionally, the concentrations of Cu and Zn in soils in Beijing would exceed the standards in 65 and 51 years, respectively, while in Tianjin the soil standards for Cu and Zn would be exceeded in 53 and 91 years, respectively. This analysis suggested that it was important to control the rates of pig manure application in agriculture and reduce the amounts of Cu and Zn in pig feeds.

Key words: intensive pig farming; pig manure; heavy metals; agricultural utilization risk; safe use period

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来,我国规模化养猪业迅速发展,规模不断扩大,2015 年底,生猪存栏量达到了 45 112.5 万头^[1],由此产生了巨大数量的粪便并引起一系列环境问题。由于猪粪中含有大量的养分,其农田应用已成为处置猪粪的重要途径。然而在养猪过程中,为了预防疾病和促进生长,Cu、Zn 等重金属元素往往作为饲料添加剂大量使用且添加量多超正常饲养标准^[2-4]。此外,由于肉猪对饲料中 Cu、Zn 等元素吸收率较低^[5],致使大部分 Cu、Zn 等元素积累在猪粪中,导致猪粪和以其作为主要原料生产的有机肥料中重金属含量显著提高^[6],增加了农田应用的环境风险。

研究表明,畜禽粪便中 Cu、Zn 对土壤 Cu 和 Zn 积累的年贡献率分别为 37% ~ 40% 和 8% ~ 17%^[3]。杨定清等^[7]研究发现,长期施用高 Zn 猪粪,黄壤、冲积土和紫色土中 Zn 含量分别在 12、16、28 a 后超过国家土壤环境质量二级标准;施用高 Cu 猪粪同样会引起土壤 Cu 积累^[8],并且直接影响土壤的安全使用年限^[9]。刘景等^[10-12]研究表明,红壤中连续施用猪粪,土壤中 Cd 含量超过国家土壤环境质量二级标准。潮土中连续施用 25 a 猪粪后,土壤中 Cu 含量增加 35.1% ~ 119%^[13],但未超过国家土壤环境质量标准。湖南 7 个涉及 5 种土壤类型的稻田长期定位试验研究表明,长期施用猪厩肥后土壤中 Zn、Cu、Cd 含量分别增加了 6.1%、8.7% 和 8.3%,其中 Cd 超出国家土壤质量标准^[14]。棕壤长期定位试验研究表明,连续施用猪粪不仅增加土壤中 Cd 含量^[15],而且其有效性即潜在环境风险也同样增加^[16]。

长期施用猪粪会引起土壤中部分重金属含量增加并引起潜在的环境风险,这种风险受到土壤类型、施肥年限和猪粪来源等因素的影响。而其中猪粪来源、总排放量及其重金属含量和农田施用量直接决定土壤中重金属的积累程度和潜在环境风险。目前国内学者虽然针对猪粪农用引起的潜在环境安全及

食品安全问题开展了一系列研究,但通常是针对单一土壤类型的单一田块,缺乏全方位面向区域范围内的猪粪农田应用安全评价研究。因此,本文通过文献调研的方式系统收集并梳理我国各省市规模化养猪场粪便和饲料中重金属含量数据,探讨对比不同地区猪粪中重金属污染特征,估算各省市猪粪年总排泄量及其重金属总量,并对部分省市猪饲料中 Cu、Zn、As 超标情况进行分析,同时结合各省市土壤背景值^[17]和国家土壤环境质量标准^[18]对猪粪农用风险进行评价,估算猪粪安全农用年限,对充分了解我国规模化养猪场粪便生产现状并为安全合理使用猪粪、防控土壤重金属污染提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

通过知网、万方、维普、Elsevier Science Direct 和 Springer 等数据库进行检索,收集和整理了 2005—2017 年间发表的有关我国规模化养猪场猪粪重金属研究的有关文献。依据文献不重复、样本数可查证、样本采集地点为规模化养猪场的标准(年出栏量 10 000 头以上肉猪的为大型规模化猪场,年出栏量 3 000 ~ 5 000 头肉猪的为中型规模化猪场,年出栏量 3 000 头以下的为小型规模化猪场),人工进行研究实例筛选。依据前期文献综述的结果,选取 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 8 种重金属元素作为研究对象,同时记录对应的统计数据(包括数据采集的年份、样本数、平均值等)。其中,数据采集的年份以取样年份为准,若未有取样年份则以收稿日期为准,如两者均未提及则以发表日期为准。由于部分文献只列出了猪粪中重金属含量的平均值,未列出其含量范围和中值等相关信息,故采用算数平均值法计算各省市规模化养猪场猪粪中重金属含量。

各省市猪粪样品详细信息如表 1 所示。本研究获取的 1 412 个猪粪样品覆盖我国 21 个省级行政区,而这 21 省市中所采集的猪粪样本各有不同,最多的为浙江,达到 287 个猪粪样本,最少的仅有 1 个

猪粪样本(为了从整体上进行对比,未剔除样本量少的文献数据),虽然各省市在数量上有差异,但总体上代表了我国主要养猪区的布局。

除采集猪粪样品外,还从文献中获取了 11 省市的 465 个猪饲料样品(以产地猪饲料为主,饲料来自养猪场仓库),具体信息见表 2。

表 1 我国各省市规模化养猪场猪粪样品信息

Tab. 1 Information of pig manure samples in intensive farming area in China

序号	采集时间	采集地点	样品数量	测定元素	文献序号
1	2012—2013	四川	4	As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn	[19]
2	2013	河南	46	As, Cr, Cu, Pb, Zn	[20—21]
3	2013	湖南	69	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[22—23]
4	2003—2014	山东	137	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[22, 24—25]
5	2009	湖北	10	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[26]
6	2004	广东	17	As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn	[27]
7	2007	河北	2	As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn	[28]
8	2007—2011	广西	59	Cd, Cr, Cu, Zn	[29—30]
9	2008	江西	76	Cd, Cu, Pb, Zn	[31]
10	2011	安徽	12	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn	[32]
11	2003—2013	江苏	126	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[25, 33—36]
12	2011	辽宁	33	As, Cd, Cr, Cu, Zn	[37]
13	2008—2013	福建	58	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn	[38—39]
14	2003—2014	浙江	287	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[25, 40—45]
15	2003	吉林	15	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[25]
16	2008—2014	陕西	96	As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	[46—48]
17	2004	天津	2	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn	[49]
18	2003—2013	北京	68	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[22, 25, 50]
19	2012	上海	198	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[51]
20	2013	青海	96	Cd, Cr, Cu, Pb, Zn	[52]
21	2003	宁夏	1	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	[25]

表 2 我国部分地区猪饲料基本信息及猪粪与饲料中 Cu、Zn、As 相关性

Tab. 2 Information of pig feed and correlation of Cu, Zn and As in pig feed and manures in China

地区	样本数	Cu 超标率/%	Zn 超标率/%	As 超标率/%	文献序号
广西	35	100(26.5)**	94.3(2.2)**		[29]
广东	5	100(13.2)**	100(1.3)**	33.3(2.4)**	[5]
河南	21	100(17.4)**	60.0(2.3)	77.3(1.6)**	[20—21]
江苏	6	100(25.2)	60.0(1.8)	12.3(0.6)	[34—35]
江西	77	100(22.3)**	100(3.5)**		[31]
青海	103	100(20.6)**	100(4.3)**		[52]
山东	18	100(20.6)	100(9.5)	100(22.9)	[24]
四川	4	75(15.4)	0	100(2.6)	[19]
浙江	18	100(49.0)**	100(2.9)	27.8(3.0)	[41]
陕西	25	100(28.5)**	100(2.7)**	81.8(10.4)**	[46]
北京	107		95.3(3.2)**		[53]

注:括号内数字为重金属超标倍数,**表示猪饲料与猪粪中重金属呈极显著相关($p < 0.01$)。

1.2 猪粪农用潜在重金属污染风险评价方法

1.2.1 各省市猪粪及其重金属总量估算

各省市猪粪产量采用国家环保部推荐的方法估算^[54],各省市猪粪排泄量及其重金属总含量(重金属含量以干基计)为

$$Q = NTP \quad (1)$$

$$M = Q\omega \quad (2)$$

式中 Q ——猪粪年排泄总量,万 t

N ——饲养量,万头,采用 2014—2016 年中国统计年鉴数据^[1,55-56],为 3 年平均存栏量

T ——饲养周期,平均饲养周期 199 d^[57]

P ——产污系数^[58](指在典型的正常生产和管理条件下,生猪每天所产生的原始污染量),kg/(头·d)

M ——猪粪中重金属总量,t

ω ——猪粪中重金属含量, mg/kg

1.2.2 猪粪安全农用年限估算

猪粪安全农用年限采用 LI 等^[59]提出的方法进行估算(该方法已成功用于福建、北京^[59]和陕西^[48]地区猪粪安全农用的评价),各地猪粪输入农田的理论值指某年猪粪总量除以当年耕地总量,具体公式为

$$L_j = C_j M_j \times 10^{-6} / A_j \quad (3)$$

$$T_j = [(C_k - C_{ok}) m \times 10^{-6}] / (PL_j) \quad (4)$$

式中 C_j —— j 地区猪粪中某种重金属含量, mg/kg
 M_j —— j 地区当年的猪粪产量, kg
 A_j —— j 地区农田面积, 为我国 2014—2016 年耕地面积平均值^[1, 55-56], hm^2
 T_j —— j 地区农田土壤某种重金属含量达到国家土壤质量二级标准所用时间, a
 C_k ——国家土壤质量二级标准规定某种重金属含量^[18], mg/kg
 C_{ok} ——农田某种重金属含量背景值^[17], mg/kg

m ——农田表层 0 ~ 20 cm 土壤质量, $2.3 \times 10^6 \text{ kg/hm}^2$

P ——农田猪粪输入系数, 取 1

L_j ——每年进入 j 地区农田土壤的某种重金属量, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$

2 结果与分析

2.1 不同省市间猪粪中重金属含量差异

各省市间猪粪中重金属平均含量及其限量标准^[60-61]如图 1 所示, 无数值省市表示未检索到相关数据。从图 1a 中可以看出: 除宁夏外, 各省市规模化养猪场粪便中 Cu 平均含量均超过其限量标准 (100 mg/kg), 是限量标准的 2.25 ~ 11.1 倍, Cu 含量超标省市达到 95.2%。其中, 广西养猪场粪便中 Cu 平均含量最高, 达到 1 107 mg/kg, 其次是天津和湖南, 分别为 1 065、857 mg/kg。

各省市规模化养猪场粪便中 Zn 平均含量结果同 Cu 类似, 有 18 省市猪粪中 Zn 平均含量超过其限

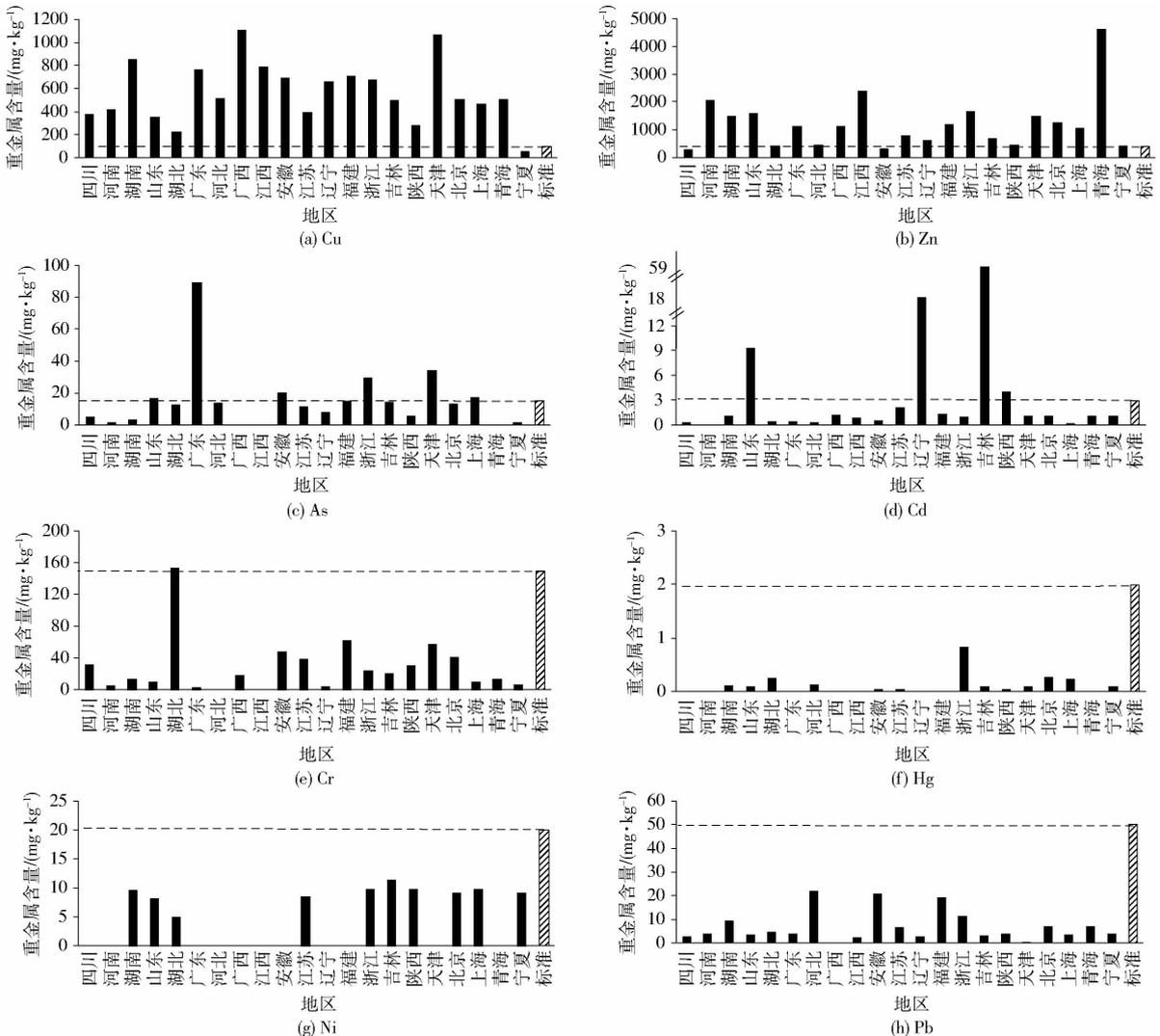


图 1 各省市规模化养殖场猪粪重金属含量及其相关标准

Fig. 1 Heavy metal concentrations and corresponding standard in intensive farming areas in China

量标准(400 mg/kg),比例达85.7%,其中,青海养猪场粪便中Zn含量达到4 639 mg/kg,是限量标准11.6倍,其次是江西(2 385 mg/kg)和河南(2 074 mg/kg),分别是限量标准的6.0和5.2倍。四川(283 mg/kg)、安徽(298 mg/kg)和宁夏(397 mg/kg)3省养猪场粪便中Zn平均含量未超过限量标准。

广东省规模化养猪场粪便中As平均含量高于其他省市,达到89.3 mg/kg,是限量标准(15.0 mg/kg)的5.95倍。此外,超出限量标准的省市还有天津(33.9 mg/kg)、浙江(29.3 mg/kg)、安徽(19.8 mg/kg)、上海(17.0 mg/kg)和山东(16.3 mg/kg)。除去部分省市未有As测定数据外,猪粪中As含量超过限量标准的省市比例达到33.3%。

吉林省规模化养猪场粪便中Cd平均含量达到59.7 mg/kg,其次是辽宁(18.2 mg/kg)、山东(9.44 mg/kg)和陕西(4.06 mg/kg),分别超过限量标准的19.9、6.07、3.15、1.35倍。除去河南外,各省市规模化养猪场粪便中Cd含量超过限量标准的比例为20.0%。

各省市规模化养猪场粪便中Cr平均含量保持

在一个较低水平,除湖北(153 mg/kg)外,其他省市猪粪中Cr平均含量均低于限量标准(150 mg/kg)。各省市养猪场猪粪中Hg、Ni和Pb平均含量均未超过其限量标准(Hg: 2 mg/kg; Ni: 20 mg/kg; Pb: 50 mg/kg)。

2.2 各省市猪粪及其重金属排放总量估算

2014—2016年各省市年均肉猪出栏量、猪粪总排泄量及其重金属含量如表3所示,从中可以看出,各省猪粪总量与其肉猪出栏量基本保持一致,但是各省市猪粪中重金属总量差别较大。从猪粪中重金属总量看,同一省市不同种类重金属总量差异较大,以Cu和Zn为例,除河北、辽宁、安徽和四川规模化养殖场猪粪中Cu总量超过Zn外,其它17省市均是猪粪中Zn总量超过Cu。在21省市中,多数养殖场猪粪中As、Cd、Cr、Hg、Ni和Pb总量大致从大到小顺序是Cr、As、Ni、Pb、Cd、Hg。此外,各省市间猪粪中重金属总量差别较大,以Cd为例,山东、辽宁和吉林养殖场猪粪中Cd总量分别达到了102、144、288 t,而其它各省市养殖场猪粪中Cd总量在0.1~15.7 t。

表3 2014—2016年各省市年均肉猪出栏数量、猪粪总排泄量及其重金属总量

Tab.3 Number of slaughter pigs, total pig manures and total heavy metal contents during 2014—2016

地区	出栏量/ 万头	猪粪总量/ 万 t	猪粪中重金属总量/t							
			As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
四川	7 332	1 955	95.6	6.3	610.0	7 429.0	—	—	50.6	5 533
河南	6 159	1 446	17.4	—	78.5	6 075.0	—	—	58.4	29 997
湖南	6 067	1 424	39.2	15.7	196.0	12 208.0	1.57	136.4	135.0	20 998
山东	4 863	1 084	177.0	102.0	112.0	3 815.0	0.87	88.3	39.9	17 064
湖北	4 398	1 033	129.0	5.2	1 580.0	2 324.0	2.58	51.6	47.1	4 131
广东	3 733	876	783.0	4.4	31.6	6 706.0	—	—	35.1	9 888
河北	3 547	1 278	172.0	4.3	—	6 593.0	1.53	—	281.0	5 456
广西	3 464	813	—	10.6	154.0	9 000.0	—	—	—	9 163
江西	3 240	722	—	6.9	—	5 671.0	—	—	15.7	17 220
安徽	3 013	672	133.0	3.8	324.0	4 627.0	0.27	—	138.0	2 001
江苏	2 974	663	74.0	14.3	256.0	2 627.0	0.27	56.2	45.2	5 044
辽宁	2 767	793	59.6	144.0	35.7	5 265.0	—	—	20.4	4 868
福建	1 930	430	63.3	5.9	268.0	3 044.0	—	—	83.0	5 143
浙江	1 645	367	107.0	3.8	91.1	2 490.0	3.00	35.6	41.4	6 016
吉林	1 685	483	69.0	288.0	101.0	2 424.0	0.39	55.0	15.4	3 293
陕西	1 208	375	20.5	15.2	115.0	1 044.0	0.15	36.5	14.6	1 696
天津	382	138	46.7	1.6	78.2	1 466.0	0.12	—	0.6	2 048
北京	302	109	13.9	1.2	44.1	555.0	0.29	10.0	7.8	1 367
上海	230	51	8.7	0.1	5.3	239.0	0.10	5.0	1.8	540
青海	139	43	—	0.5	6.0	218.0	—	—	3.0	1 996
宁夏	96	30	0.4	0.3	2.2	17.8	0.02	2.7	1.2	118

注:由于肉猪年际间波动较大,故肉猪出栏量为2013—2015年平均值;—表示没有相关数据,下同。

2.3 猪粪农用风险及施用年限估算

表4列出了各省市猪粪安全农用估算年限,可

以发现,猪粪中As、Cr、Hg、Ni和Pb的输入对土壤使用年限影响较小,影响土壤正常使用年限的主要

限制因子是 Cd、Cu 和 Zn。如果猪粪中 Cd 含量一直保持在现有水平(理论施用水平指 2014—2016 年猪粪年均总产量除以年均耕地总量),吉林省农田土壤中 Cd 含量在 16 a 内可超过土壤二级质量标准,辽宁省 23 a,山东省 91 a。除 Cd 外,猪粪中 Cu 和 Zn 的输入也影响土壤正常使用年限,以北京和天津为例,连续输入猪粪 65、53 a,北京和天津农田土壤

Cu 含量将分别超过土壤二级质量标准,而连续输入猪粪 51、91 a,农田土壤 Zn 含量也将分别超过土壤二级质量标准。此外,其他各省市农田土壤 Cu 含量超出土壤二级质量标准的时间在 112 ~ 740 a 之间(宁夏除外),而各省市农田土壤 Zn 含量也将在猪粪连续输入 109 ~ 746 a 后超过土壤二级质量标准(安徽、陕西和宁夏除外)。

表 4 猪粪持续投入造成农田土壤重金属超标的年限估算

Tab.4 Time scale needed to increase heavy metal content in soils from current level to maximum permissible limit in different regions in China

地区	年限							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
四川	2 236	1 320	4 416	206	—	—	21 589	658
河南	16 383	—	57 340	437	—	—	34 177	209
湖南	2 199	414	13 153	119	2 352	10 002	7 486	148
山东	1 532	91	30 220	505	8 209	21 291	34 391	277
湖北	1 105	998	1 337	553	1 579	22 500	20 972	746
广东	155	981	51 676	135	—	—	13 688	224
河北	745	1 646	—	238	3 459	—	4 181	632
广西	—	242	10 702	112	—	—	—	266
江西	—	635	—	180	—	—	38 984	134
安徽	1 702	1 898	8 487	354	20 453	—	7 943	1 933
江苏	2 393	402	8 456	524	754	23 090	21 077	658
辽宁	1 813	23	38 450	147	—	—	27 763	370
福建	1 149	341	3 681	135	—	—	2 476	169
浙江	810	806	13 006	267	574	17 059	10 952	240
吉林	2 226	16	19 460	438	8 722	18 292	42 449	660
陕西	4 271	230	11 761	740	17 687	19 164	39 439	1 046
天津	243	250	1 615	53	1 901	—	103 830	91
北京	347	142	1 405	65	377	3 334	3 279	51
上海	1 031	2 390	20 272	251	1499	11 542	25 870	257
青海	—	802	27 582	457	—	—	24 955	109
宁夏	66 164	2 987	181 690	12 684	33 900	67 311	148 812	4 681

3 讨论

从本研究结果来看,我国规模化养猪场猪粪重金属超标元素以 Cu、Zn、As、Cd 为主,其中 Cu 和 Zn 超标最严重,其次是 As,这是因为在肉猪养殖过程中,为了预防疾病和促进猪生长,饲料中往往添加大量的 Cu、Zn 和 As 等微量元素,虽然《猪饲养标准》和《饲料卫生标准》中明确规定了 Cu、Zn 和 As 的含量,但在实际生产过程中,饲料中 Cu、Zn 和 As 的添加量远远超出标准(表 2),这说明多数饲料生产厂家甚至知名品牌厂家并未严格执行标准^[24],需要加强饲料添加剂的监管力度。另外,由于猪对饲料中 Cu、Zn 和 As 的利用率并不高^[62],导致大量 Cu、Zn 和 As 进入猪粪中,猪饲料和猪粪中 Cu、Zn 和 As 的相关性也说明这一点(表 2)。此外,猪粪中 Cd 也有

一定量的超标,这主要是因为 Cd 和 Zn 为同族元素,性质相似,常常伴生存在且不易分离^[63],故用含镉锌矿或铜镉渣制成含 Zn 添加剂的饲料中含有一定量的 Cd,最终导致 Cd 在猪粪中积累。

如果按照规模化养猪场的标准进行饲养,且从饲料源头控制重金属的投入,应该不会出现猪粪中重金属过量的现象,但事实是部分省市猪粪中重金属不但过量,而且不同地区猪粪中重金属含量差异较大,这一方面是因为高铜、高锌饲料可促进猪的快速生长^[64]的传统喂养观念促使饲料生产厂家或农户为追逐利益往往过量添加 Cu、Zn 等微量元素,另一方面可能是地区差异导致 Cu、Zn 等微量元素的添加水平不同所致,有研究表明,经济发达地区的 Cu、Zn 添加水平明显高于欠发达地区^[19]。上述因素协同影响导致了部分省市养猪场猪粪中重金属超

标且超标范围不一致的现象出现。

猪粪中因含有过量重金属残留限制了其农田利用,且带来了很大的潜在环境风险。本文的研究结果表明猪粪农用过程中影响土壤正常使用年限的主要限制因子是 Cd、Cu 和 Zn,这与朱建春等^[48]的研究结果一致。本研究结果同时表明,Cd、Cu、Zn 是限制吉林、辽宁、山东、北京和天津养猪场粪便安全农用年限的主要元素。然而,在实际生产中,各省市农田土壤的重金属实际输入量可能要大于本研究结果,土壤安全农用年限可能更低,这是因为本文仅考察了猪粪向农田的输入,未涉及其他畜禽养殖业的粪便,也未考虑大气沉降、污水灌溉和化肥等方式带入重金属。作物生长过程中可能带走一部分重金属,但很难影响土壤不断积累重金属的大趋势。综合各种重金属的输入和输出,土壤重金属实际累积速率可能有所波动,但长期施用重金属超标的猪粪必然会引起土壤重金属污染风险。

本文中猪粪安全农用年限的结果虽然在估算的基础上得出,但是现有的研究结果已经证实长期施用猪粪等有机肥可导致农田土壤重金属含量过量积累^[10-12, 65-66]。研究表明,湖南红壤经过 16 a 的连续施用猪粪,土壤中 Cu 含量已超过国家土壤环境质量二级标准,Cd 含量超过国家土壤环境质量三级标准^[10-11],并且致使糙米 Cd 含量超过国家食品卫生标准^[12]。此外,棕壤和黑土连续施用猪粪同样导致土壤中 Cd 含量显著增加^[11, 65-66],而在褐潮土连续施用 15 a 猪厩肥后土壤中 Zn 含量也超过国家土壤环境质量二级标准^[67]。可见,在连续施用猪粪的情况下,土壤中 Cu 和 Cd 含量超过国家土壤环境质量二级标准的年限明显快于估算年限。柳开楼等^[68]进一步的研究表明,在江西红壤上连续每年每公顷施用 22.5 t 鲜猪粪,土壤中 Cu、Zn、Cr 和 As

含量超过土壤环境质量二级标准的时间分别为 21.6、66.5、43.8、14.2 a,远远低于本研究中计算的时间。

上述不同地区均出现连续施用猪粪后土壤重金属含量超过国家土壤环境质量二级标准的现象,当然不排除大气沉降和污水灌溉等方式带入重金属的可能,但是就同一地区同一土壤类型而言,长期定位试验中未施猪粪处理土壤重金属含量显著低于猪粪处理,虽然土壤重金属积累受到土壤类型、猪粪来源等诸多因素的影响,但总体从长远看来,长期施用受重金属污染的猪粪导致土壤重金属污染问题已日益突出,应引起高度重视,建议适当控制重金属含量高的猪粪农用,同时从源头上控制猪饲料中重金属的添加量,从而实现猪粪高效安全资源化利用。

4 结 论

(1) 在 21 省市规模化养猪场中,猪粪中 Cu、Zn、As、Cd、Cr 平均含量超标省市分别占到 95.2%、85.7%、33.3%、20.0% 和 5.26%。在其中的 11 省市中(四川除外),猪饲料中 Cu 含量超标的样品数量占到 100%,超标倍数在 13.2~49.0;猪饲料中 Zn 含量超标的样品数量占到 60.0%~100%,超标倍数在 1.3~9.5 之间。猪饲料中重金属含量高是导致猪粪重金属含量高的主要原因,应从源头严格控制饲料中 Cu、Zn 等元素添加量。

(2) 限制我国规模化养殖场猪粪农用的主要因素是 Cu、Zn 和 Cd,吉林省、辽宁省和山东省分别连续施用猪粪 16、23、91 a,土壤中 Cd 含量可超过国家土壤质量二级标准。北京连续施用猪粪 65、51 a 而天津连续施用猪粪 53、91 a,土壤 Cu 和 Zn 含量分别超过国家土壤环境质量二级标准,应按照标准严格控制猪粪农田施用量。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家统计局. 2016 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- 2 JACKSON B P, BERTSCH P, CABRERA M, et al. Trace element speciation in poultry litter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(2): 535-540.
- 3 NICHOLSON F A, SMITH S R, ALLOWAY B J, et al. An inventory of heavy metal inputs to agricultural soil in England and Wales[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311(1-3): 205-209.
- 4 王飞, 邱凌, 沈玉君, 等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 261-267.
WANG Fei, QIU Ling, SHEN Yujun, et al. Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in North China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(5): 261-267. (in Chinese)
- 5 袁云丽. 猪饲料和粪便中重金属的土壤累积效应及其环境影响研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- 6 王飞, 赵立欣, 沈玉君, 等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 202-208.
WANG Fei, ZHAO Lixin, SHEN Yujun, et al. Analysis of heavy metal contents and source tracing in organic fertilizer from livestock manure in North China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 202-208. (in Chinese)
- 7 杨定清, 傅绍清. 施用高锌猪粪对土壤环境污染的影响[J]. *四川环境*, 2000, 19(2): 30-31.
YANG Dingqing, FU Shaoqing. Effect of high zinc pig manure on soil environmental pollution[J]. *Sichuan Environment*, 2000, 19(2): 30-31. (in Chinese)
- 8 ZHANG F S, LI Y X, YANG M, et al. Copper residue in animal manures and the potential pollution risk in Northeast China[J].

- Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(1): 91–96.
- 9 孙国峰, 陈虞雯, 盛婧, 等. 稻麦农田土壤 Cu 累积条件下猪粪安全施用量[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2361–2366.
SUN Guofeng, CHEN Yuwen, SHENG Jing, et al. Safety dosage of pig manure based on soil copper accumulation on rice and wheat rotated farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(12): 2361–2366. (in Chinese)
- 10 刘景, 吕家珑, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对红壤 Cu 和 Cd 含量及活化率的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 914–919.
LIU Jing, LÜ Jialong, XU Minggang, et al. Effect of long-term fertilization on content and activity index of Cu and Cd in red soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 914–919. (in Chinese)
- 11 徐明岗, 武海雯, 刘景. 长期不同施肥下我国 3 种典型土壤重金属的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2319–2324.
XU Minggang, WU Haiwen, LIU Jing. Evolution of heavy metal contents of three soils under long-term fertilizations[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2319–2324. (in Chinese)
- 12 李本银, 汪鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 281–288.
LI Benyin, WANG Peng, WU Xiaochen, et al. Effects of long-term fertilization experiment on concentration of micronutrients and heavy metals in soils and brown rice[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 281–288. (in Chinese)
- 13 刘树堂, 赵永厚, 孙玉林, 等. 25 年长期定位施肥对非石灰性潮土重金属状况的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 164–167.
LIU Shutang, ZHAO Yonghou, SUN Yulin, et al. Effects of 25 years long-term located fertilization on status of heavy metals in non-calcareous fluoro-aquic soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 164–167. (in Chinese)
- 14 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 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 Kaifeng, PENG Na, WANG Kairong, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 105–108. (in Chinese)
- 15 王颖, 韩晓日, 孙杉杉, 等. 长期定位施肥对棕壤重金属的影响及其环境质量评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(4): 442–446.
WANG Ying, HAN Xiaori, SUN Shanshan, et al. Effects of long term fertilization on the heavy metals in brown soils and environmental quality evaluation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008, 39(4): 442–446. (in Chinese)
- 16 李双异, 刘赫, 汪景宽. 长期定位施肥对棕壤重金属含量及其有效性影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1125–1129.
LI Shuangyi, LIU He, WANG Jingkuan. Effects of long-term located fertilization on heavy metals and their availability in brown earth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(6): 1125–1129. (in Chinese)
- 17 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- 18 土壤环境质量标准: GB 15618—2008[S]. 2008.
- 19 杨柳, 雍毅, 叶宏, 等. 四川典型养殖区猪粪和饲料中重金属分布特征[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 99–103.
YANG Liu, YONG Yi, YE Hong, et al. Characteristics of heavy metals in swine excrement and feeds from typical livestock farms of Sichuan[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(9): 99–103. (in Chinese)
- 20 陈玲丽, 葛亚明, 何函, 等. 猪场饲料和粪便中重金属含量的测定[J]. 河南科技学院学报, 2013, 41(3): 79–82.
CHEN Lingli, GE Yaming, HE Han, et al. Content determination of heavy metals in pig feed and feces[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 2013, 41(3): 79–82. (in Chinese)
- 21 陈玲丽, 阮涛, 李冲, 等. 猪不同生长时期饲料和粪便中重金属元素含量的测定[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(7): 183–185.
CHEN Lingli, RUAN Tao, LI Chong, et al. Determination of heavy metals in feeds and feces in different growth stages of pig[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2014(7): 183–185. (in Chinese)
- 22 贾武霞, 文炯, 许望龙, 等. 我国部分城市畜禽粪便中重金属含量及形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 764–773.
JIA Wuxia, WEN Jiong, XU Wanglong, et al. Content and fractionation of heavy metals in livestock manures in some urban areas of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(4): 764–773. (in Chinese)
- 23 闵岳灵, 旷碧峰, 黄绍文, 等. 衡阳市菜园使用的商品有机肥和有机废弃物中重金属含量状况调查[J]. 湖南生态科学学报, 2014, 1(1): 1–4.
MIN Yueling, KUANG Bifeng, HUANG Shaowen, et al. Investigation of heavy metals contents in commercial organic fertilizer and organic wastes used by vegetable garden in Hengyang City[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2014, 1(1): 1–4. (in Chinese)
- 24 潘寻, 韩哲, 贲伟伟. 山东省规模化猪场猪粪及配合饲料中重金属含量研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 160–165.
PAN Xun, HAN Zhe, BEN Weiwei. Heavy metal contents in pig manure and pig feeds from intensive pig farms in Shandong Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(1): 160–165. (in Chinese)
- 25 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.
ZHANG Shuqing, ZHANG Fudao, LIU Xiumei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 822–829. (in Chinese)
- 26 程旭艳, 王定美, 乔玉辉, 等. 中国商品有机肥重金属分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(2): 72–76.
CHEN Xuyan, WANG Dingmei, QIAO Yuhui, et al. Analyze on the heavy metals content in China commodity organic fertilizer [J]. Environmental Pollution & Control, 2012, 34(2): 72–76. (in Chinese)
- 27 姚丽贤, 李国良, 党志. 集约化养殖禽畜粪中主要化学物质调查[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1989–1992.

- YAO Lixian, LI Guoliang, DANG Zhi. Major chemical components of poultry and livestock manures under intensive breeding [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1989 - 1992. (in Chinese)
- 28 陈丽娜, 张晓芳, 赵全利, 等. 保定市郊养殖场畜禽粪中重金属含量调查分析[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(5): 357 - 362.
CHEN Lina, ZHANG Xiaofang, ZHAO Quanli, et al. Investigation of heavy metals in the excretions of the livestock and poultry in the suburbs of Baoding City[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(5): 357 - 362. (in Chinese)
- 29 黄玉溢, 陈桂芬, 刘斌, 等. 广西集约化养殖猪饲料 Cu 和 Zn 含量及粪便 Cu 和 Zn 残留特性研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(17): 9280 - 9281, 9284.
HUANG Yuyi, CHEN Guifen, LIU Bin, et al. Content of Cu and Zn in pig feeds and their residual character in pig manures from intensive piggery in Guangxi[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(17): 9280 - 9281, 9284. (in Chinese)
- 30 黄玉溢, 刘斌, 陈桂芬, 等. 规模化养殖场猪配合饲料和粪便中重金属含量研究[J]. *广西农业科学*, 2007, 38(5): 544 - 546.
HUANG Yuyi, LIU Bin, CHEN Guifen, et al. Contents of heavy metals in formulated feed for pig and pig manure of scaled piggery[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2007, 38(5): 544 - 546. (in Chinese)
- 31 姜萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 942 - 947.
JIANG Ping, JIN Shengyang, HAO Xiuzhen, et al. Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 942 - 947. (in Chinese)
- 32 李帆, 鲍先巡, 王文军, 等. 安徽省畜禽养殖业粪便成分调查及排放量估算[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(12): 7359 - 7361.
LI Fan, BAO Xianxun, WANG Wenjun, et al. Animal manure composts and production of the animal husbandry in Anhui Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(12): 7359 - 7361. (in Chinese)
- 33 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 Sciences*, 2004, 16(3): 371 - 374.
- 34 WANG H, DONG Y H, YANG Y N, et al. Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(12): 2435 - 2442.
- 35 吴大伟, 李亚学, 吴萍, 等. 规模化猪场育肥猪饲料、猪肉及粪便中重金属含量调查[J]. *畜牧与兽医*, 2012, 44(4): 38 - 40.
WU Dawei, LI Yaxue, WU Ping, et al. Investigation of heavy metal contents in feed, pork and feces in largescale pig farms[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2012, 44(4): 38 - 40. (in Chinese)
- 36 张绪美, 高蓓蕾, 李梅. 规模化养殖场畜禽粪便重金属含量评价研究[J]. *现代农业科技*, 2014(24): 190 - 191.
ZHANG Xumei, GAO Beilei, LI Mei. Study on evaluation of heavy metals in animal manure of large scale farm [J]. *Modern Agricultural Science & Technology*, 2014(24): 190 - 191. (in Chinese)
- 37 ZHANG F S, LI Y X, YANG M, et al. Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in northeast China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(8): 2658 - 2668.
- 38 何波澜, 黄勤楼, 钟珍梅, 等. 福建省猪场粪污及土壤重金属含量的调查研究[J]. *福建畜牧兽医*, 2015, 37(5): 13 - 17.
HE Bolan, HUANG Qinlou, ZHONG Zhenmei, et al. Research of contents of heavy metals in swine manure pollution and soil in Fujian Province[J]. *Fujian Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2015, 37(5): 13 - 17. (in Chinese)
- 39 吴凌云. 福建省商品有机肥肥料重金属含量的分析与研究[J]. *福建农业科技*, 2010(1): 67 - 69.
WU Lingyun. Analysis and research on heavy metal content of commodity organic fertilizer in Fujian Province [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2010(1): 67 - 69. (in Chinese)
- 40 QIAN M R, WU H Z, WANG J M, et al. Occurrence of trace elements and antibiotics in manure-based fertilizers from the Zhejiang Province of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 559: 174 - 181.
- 41 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 Zhanrong, CHEN Yiding, LIN Xianyong, 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 Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(1): 35 - 39. (in Chinese)
- 42 石艳平, 黄锦法, 倪雄伟, 等. 嘉兴市主要生猪规模化养殖饲料和粪便重金属污染特征[J]. *浙江农业科学*, 2015, 56(9): 1494 - 1497.
SHI Yanping, HUANG Jinfa, NI Xiongwei, et al. Characteristics of heavy metals pollution in feed and manure of largescale pig breeding in Jiaxing City[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2015, 56(9): 1494 - 1497. (in Chinese)
- 43 覃丽霞, 马军伟, 孙万春, 等. 浙江省畜禽有机肥重金属及养分含量特征研究[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(4): 604 - 610.
QIN Lixia, MA Junwei, SUN Wanchun, et al. Characteristics of heavy metal and nutrient contents in livestock manure in Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(4): 604 - 610. (in Chinese)
- 44 王丽, 陈光才, 宋秋华, 等. 杭州城郊养殖场畜禽粪便主要养分及有害物质分析[J]. *上海农业学报*, 2014, 30(2): 85 - 89.
WANG Li, CHEN Guangcai, SONG Qiuhua, et al. Analysis on main nutrients and hazardous substance of both pig and poultry manures from farms in Handzhou suburbs[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2014, 30(2): 85 - 89. (in Chinese)
- 45 王玉婷, 吕梦园, 韩新燕. 宁波地区不同规模猪场粪便中重金属含量分析[J]. *家畜生态学报*, 2016, 37(3): 55 - 58.
WANG Yuting, LÜ Mengyuan, HAN Xinyan. Content analysis of heavy metal in manure samples from different scales of pig farms in Ningbo City[J]. *Acta Ecologiae Animals Domastici*, 2016, 37(3): 55 - 58. (in Chinese)
- 46 庞妍, 唐希望, 吉普辉, 等. 关中平原畜禽粪便重金属农用风险估算[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3824 - 3832.
PANG Yan, TANG Xiwang, JI Puhui, et al. The agricultural pollution risk estimation of livestock manures on heavy metals in Guanzhong plain[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(12): 3824 - 3832. (in Chinese)
- 47 周博, 朱振国, 周建斌, 等. 杨凌地区不同畜禽有机肥养分及重金属含量研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 714 - 718.
ZHOU Bo, ZHU Zhenguo, ZHOU Jianbin, et al. Contents of nutrients and heavy metals in the different livestock and poultry

- manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 714–718. (in Chinese)
- 48 朱建春, 李荣华, 张增强, 等. 陕西规模化猪场猪粪与饲料重金属含量研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 98–104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.018.
- ZHU Jianchun, LI Ronghua, ZHANG Zengqiang, et al. Heavy metal contents in pig manure and feeds under intensive farming and potential hazard on farmlands in Shaanxi Province, China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 98–104. (in Chinese)
- 49 任顺荣, 邵玉翠, 王正祥. 利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊1): 216–218.
- REN Shunrong, SHAO Yucui, WANG Zhengxiang. Analyze on heavy metal contents of merchandise compost produced by animal wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Supp.1): 216–218. (in Chinese)
- 50 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 京郊有机肥料的质量状况分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(6): 79–83.
- LIANG Jinfeng, QI Qingzhen, JIA Xiaohong, et al. Investigation of quality in organic fertilizers in Beijing suburb[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2009(6): 79–83. (in Chinese)
- 51 朱恩, 王寓群, 林天杰, 等. 上海地区畜禽粪便重金属污染特征研究[J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(1): 90–93.
- ZHU En, WANG Yuqun, LIN Tianjie, et al. Characteristic of heavy metal pollution in livestock manure in Shanghai[J]. *Agro-Environment and Development*, 2013, 30(1): 90–93. (in Chinese)
- 52 谢云发, 汪生贵, 韩廷义. 青海省部分地区猪饲料和粪便中重金属含量调查[J]. *家畜生态学报*, 2014, 35(2): 75–78.
- XIE Yunfa, WANG Shenggui, HAN Tingyi. Investigation on heavy metal content in pig feed and feces in parts of Qinghai Province[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2014, 35(2): 75–78. (in Chinese)
- 53 索超, 李艳霞, 张增强, 等. 北京集约化养殖畜禽饲料 Zn 含量及粪便 Zn 残留特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10): 2173–2179.
- SUO Chao, LI Yanxia, ZHANG Zengqiang, et al. Residual character of Zn in feeds and their feces from intensive livestock and poultry farms in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2173–2179. (in Chinese)
- 54 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及其防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- 55 中华人民共和国国家统计局. 2014 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- 56 中华人民共和国国家统计局. 2015 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- 57 李志宏, 张云贵, 任天志. 太湖流域农业氮磷面源污染现状及防治对策[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(增刊): 24–29.
- LI Zhihong, ZHANG Yungui, REN Tianzhi. The loads and control suggestions of agricultural non-point nitrogen and phosphorus in Taihu basin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(Supp.): 24–29. (in Chinese)
- 58 农业部科技教育司, 第一次全国污染源普查领导小组办公室. 畜禽养殖业源排污系数手册[Z]. 农业部科技教育司, 2009.
- 59 LI Y X, XIONG X, LIN C Y, et al. Cadmium in animal production and its potential hazard on Beijing and Fuxin farmlands[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1): 475–480.
- 60 有机肥料: NY 525—2012[S]. 2012.
- 61 VERDONCK O. Compost specifications[J]. *Acta Horticulturae*, 1998, 469: 169–177.
- 62 MANTOVI P, BONAZZI G, MAESTRI E, et al. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(2): 249–257.
- 63 雷郑丽, 董小海, 任红. 饲料级硫酸锌中高含量镉的快速定性鉴别方法[J]. *中国饲料添加剂*, 2007(10): 44–46.
- LEI Zhengli, DONG Xiaohai, REN Hong. Rapid qualitative identification of high content cadmium in feed grade zinc sulfate[J]. *China Feed Additive*, 2007(10): 44–46. (in Chinese)
- 64 刘明美, 吕宗友, 戎婧, 等. 锌在养猪业中的研究进展[J]. *中国猪业*, 2011, 5(1): 48–50.
- LIU Mingmei, LÜ Zongyou, RONG Jing, et al. Research progress of zinc in swine industry[J]. *Chinese Pig Industry*, 2011, 5(1): 48–50. (in Chinese)
- 65 韩晓日, 王颖, 杨劲峰, 等. 长期定位施肥对土壤中镉含量的影响及其时空变异研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 107–110.
- HAN Xiaori, WANG Ying, YANG Jinfeng, et al. Effect of long term application of different fertilizers on the cadmium content in soil and the spatial and temporal variability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 107–110. (in Chinese)
- 66 李双异, 刘赫, 汪景宽. 长期定位施肥对棕壤重金属含量及其有效性影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(6): 1125–1129.
- LI Shuangyi, LIU He, WANG Jingkuan. Effects of long-term located fertilization on heavy metals and their availability in brown earth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1125–1129. (in Chinese)
- 67 李孟飞. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(14): 5959–5961.
- LI Mengfei. Effects of long-term located fertilization on heavy metal content in soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(14): 5959–5961. (in Chinese)
- 68 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 303–313.
- LIU Kailou, LI Daming, HUANG Qinghai, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 303–313. (in Chinese)