

# 养猪粪污厌氧消化重金属变化特征及影响

胡修韧<sup>1</sup>, 杨东海<sup>2</sup>, 边博<sup>1\*</sup>

(1. 南京师范大学环境学院, 江苏 南京 210023, 2. 同济大学环境学院, 上海 200092)

**摘要:**对太湖流域某典型养猪区域粪污收集后集中厌氧消化处理, 分析猪饲料、猪粪和沼肥中重金属总量和形态变化特征, 探讨厌氧消化过程重金属形态变化及其影响因素。结果表明, 不同养殖阶段中猪饲料重金属含量差异较大, 仔猪饲料和猪粪中 Cu、Zn 和 Cd 含量较高, 而 Cr 和 Ni 在生长肥育猪后期饲料和猪粪中含量最高。猪粪中 Cu 主要以有机结合态、Zn 主要以 Fe-Mn 氧化物结合态、Pb 和 Cr 主要以残渣态、Ni 主要以 Fe-Mn 氧化物态和碳酸盐结合态赋存, 沼液中 Cu 和 Zn 平均值为猪粪液中含量的 1.59 和 1.40 倍, 沼渣中 Cu 和 Zn 平均值为调节池猪粪的 1.58 和 1.37 倍, 厌氧消化后重金属存在“相对浓缩效应”, pH 值、DOC 和 OM 为厌氧消化过程影响重金属变化的主要因素。

**关键词:**猪饲料; 养猪粪污; 厌氧消化; 重金属; 形态变化; 太湖流域

中图分类号: X820

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2019)04-0048-06

## Distribution Characteristics and It's Influence of Heavy Metals in Raw and Anaerobically Digested Pig Slurry

HU Xiu-ren<sup>1</sup>, YANG Dong-hai<sup>2</sup>, BIAN Bo<sup>1\*</sup>

(1. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China, 2. School of Environment, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

**Abstract:** To study the morphological changes of heavy metals in anaerobic digestion process and its influencing factors, centralized anaerobic digestion treatment was carried out on the manure collected from a typical pig farming area in the Taihu Lake Basin, and the total and morphological characteristics of heavy metals in pig feed, pig manure and biogas fertilizer were analyzed. The results showed that the content of heavy metals in pig feed was different in different breeding stages. The contents of Cu, Zn and Cd in piglet feed and pig manure were higher, while Cr and Ni were the highest in feed and pig manure in the late stage of growth and fattening pig. In pig manure, Cu is mainly in organically bound state, Zn is mainly in Fe-Mn oxide-bound state, Pb and Cr are mainly in residual state, and Ni is mainly in Fe-Mn oxide-bound state and carbonate-bound state. The average values of Cu and Zn in biogas slurry were 1.59 and 1.40 times of that in pig manure, and the average values of Cu and Zn in biogas residue were 1.58 and 1.37 times of that in pig manure in regulating pond. The concentration of heavy metals in biogas slurry appeared a relative concentration effect. pH, DOC and organic matter were the main factors affecting the change of heavy metals in anaerobic digestion process.

**Key words:** Pig feed; Pig slurry; Anaerobically digestion; Heavy metals; Morphological change; Taihu Lake Basin

畜禽养殖饲料中普遍含有重金属添加剂, 畜禽对重金属利用率低, 绝大部分残留于粪污, 粪污厌氧消化处理方式为太湖流域大中型养殖场畜禽粪便无害化、资源化处理的主要方式之一<sup>[1]</sup>, 产生沼液和沼渣大部分回用农田, 存在重金属的环境风险。因此, 研究养猪粪污厌氧消化处理过程中重金属变化及其影响因素, 对实现畜禽养殖污染防控及沼液综合利用具有重要意义。

Cang<sup>[2]</sup>对江苏省规模化养猪场调查发现, 猪

粪中重金属铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)质量比分别为 35.7~1 726.3, 113.6~1505.6 和 4~78 mg/kg, 比东北和湖南地区的含量都高<sup>[3-4]</sup>。厌氧消化处理方式对猪粪处理具有较好的效果, 但厌氧消化过

收稿日期: 2018-12-27; 修订日期: 2019-01-24

基金项目: 江苏省环境监测科研基金资助项目(1705); 江苏省科技支撑-社会发展基金资助项目(BK2018735; BE201763)

作者简介: 胡修韧(1996—), 男, 在读硕士。

\* 通讯作者: 边博 E-mail: bianbo1@163.com

程中重金属浓度会发生变化,且沼渣中重金属含量大于沼液中重金属含量<sup>[5]</sup>。江苏省畜禽厌氧消化处理工程沼液和沼渣中 Zn、Cu、As 质量比分别为 20.66,477.08,16.34 和 204.02,0.26,2.19 mg/kg,超过中国农田灌溉水质标准和德国堆肥质量标准<sup>[6]</sup>。研究表明<sup>[7]</sup>,厌氧消化指标如 pH 值、碱度、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、挥发性固体(VS)/总固体(TS)和重金属特定形态具有很好的相关性。

现针对太湖流域某典型养猪区域粪污收集后集中厌氧消化处理工程,通过分析猪饲料、猪粪和沼肥中重金属总量和形态变化特征,研究厌氧消化全过程中的重金属变化,探讨厌氧消化过程重金属形态变化及其影响因素,为沼肥中重金属污染控制和安全农用提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区共有 74 户不同规模养猪场,规模存栏 15 000 头猪,其中大多是散小养殖户,年存栏量 <500 头的有 63 家,占养殖场总数的 85%,粪污量为 42.516 t/d,占总粪污量的 48.6%。不同规模不同饲养周期的猪粪液统一收集后经调节池混合均匀,进入 1 500 m<sup>3</sup>连续搅拌反应器进行厌氧发酵;厌氧消化温度为 35~37℃,液体水力停留时间为 17 d,发酵罐底部固体物滞留期为 60 d。

### 1.2 样品采集

选取几个具有代表性的养猪场,采集不同的养殖周期的配合饲料和浓缩料,并收集相应的猪粪样品。每种饲料采集 5 个样品,共采集 20 份饲料样品。每份猪粪至少收集 5 个不同猪圈的新鲜猪粪,共采集 12 份猪粪样品。

调节池猪粪液样品用自制采样器从底部不同时间采集 5 份子样品混合后至 30 L,沼液从发酵罐出水口每隔 0.5 h 采集 3 份子样品混合至 30 L,共采集 6 份混合液,沼渣从发酵罐出水井采集,分别采集 3 份,每份大约 30 kg,采集的样品在 4℃ 条件下保存,以备分析。

### 1.3 样品预处理和分析

沼液 pH 值、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、电导率均采用便携式多参数数字化分析仪(美国哈希 HQd 系列)测定,猪粪和沼渣有机质(OM)采用 SRJX-4-13 型高温箱式电炉控制箱 550℃ 烧失量法测定,TN、TP 分别根据《水质 总氮

的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)和《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89),采用 UV-1801 紫外/可见分光光度计测定,化学需氧量(COD)参照《水和废水监测分析方法》(四版)中快速密闭催化消解法测定<sup>[8]</sup>。沼液过 0.45 μm 滤膜后分析,沼渣按土、水比 1:5 混合震荡,上清液过滤,滤液中溶解性有机碳(DOC)用总有机碳(TOC)仪测定,猪粪和沼渣粒径分布测定使用 Malvern 全自动激光粒度仪。

饲料中重金属的测定方法参照动物饲料中重金属测定方法<sup>[9]</sup>,重金属总量的测定方法参照文献[10],重金属形态采用 Tessier 5 步改进法分步提取测定。采用 7700 电感耦合等离子体质谱仪测定样品中 Cu、Zn、铅(Pb)、镍(Ni)、铬(Cd)、镉(Cr)6 种重金属。所有样品均做 3 个平行样,并做分析空白,要求平行样之间相对标准偏差 <10%,所有的数据处理和分析均采用 spss 软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 养猪饲料中重金属含量

不同养殖阶段的猪饲料中重金属平均值见表 1。由表 1 可见,浓缩料中重金属平均值约为配合饲料中对应重金属的 1.08~5.99 倍。配合饲料中重金属平均值顺序为:Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd,其中,Cu 和 Zn 值较高,可能与动物生长发育需要有关;Cr 值相对较高,与其可提高饲料利用率和改善畜禽肤色等作用有关。饲料中重金属平均值变化范围与其他大多数养猪饲料重金属平均值调查结果基本一致<sup>[11-12]</sup>。不同养殖阶段中猪饲料重金属平均值差异较大,且不同饲养阶段配合饲料和浓缩饲料中重金属平均值变化保持一致,仔猪(<30 kg)饲料中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 明显高于肥育猪前后期 2 个阶段饲料中重金属平均值,而 Cr 和 Ni 生长肥育猪后期(>60 kg)饲料中平均值最高。

### 2.2 猪粪中重金属含量及形态

重金属在不同养殖阶段猪粪中分布特征和饲料中分布基本相同,相比于配合饲料中重金属含量,猪粪中重金属明显存在“相对浓缩效应”。不同养殖阶段猪粪中重金属质量比见表 2。由表 2 可见,其中 3 个养殖阶段猪粪中 Cu 和 Zn 的质量比分别为对应阶段配合饲料中相应重金属质量比的 3.43~5.34 和 7.11~16.49 倍,与相关研究结果

表 1 不同养殖阶段的猪饲料中重金属平均值<sup>①</sup>

重金属		Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
浓缩料	仔猪	391.89	1 112.28	3.48	1.98	4.06	1.81
	肥育猪前期	215.95	582.37	2.81	1.50	12.58	3.63
	肥育猪后期	81.50	461.72	2.77	1.07	18.76	4.24
	文献[13]			13			
配合饲料	仔猪	205.69	522.19	3.23	1.51	2.01	1.46
	肥育猪前期	118.19	247.83	1.48	1.00	10.54	1.99
	肥育猪后期	61.73	184.71	0.46	0.68	15.67	2.23
	文献[13]			5	0.5		
农业部 1224 号公告 <sup>②</sup>		200 <sup>③</sup>	150			10	
		150 <sup>④</sup>					
		35 <sup>⑤</sup>					

①仔猪指质量 < 30 kg, 生长肥育猪前期指质量为 30 ~ 60 kg, 生长肥育猪后期指质量 > 60 kg; ②我国农业部公告第 1224 号中的《饲料添加剂安全使用规范》; ③仔猪 (< 30 kg) 配合饲料最高限量; ④生长肥育猪前期 (30 ~ 60 kg) 饲料最高限量; ⑤生长肥育猪后期 (> 60 kg) 饲料最高限量。

一致<sup>[14-15]</sup>。目前国内外没有关于猪粪农田利用过程重金属控制标准, 根据文献[16]中重金属限量标准, 各养殖阶段猪粪中  $\omega$  (Cd) 超标倍数为 0.50 ~ 4.26 倍, 参照文献[17]中最低限量,  $\omega$  (Cu) 和  $\omega$  (Zn) 超标倍数为 2.33 ~ 16.10 和 1.63 ~ 16.22。Zn 最大值与江苏 (39.5 ~ 11 378.9 mg/kg)

以及山东 (151.1 ~ 14 679.8 mg/kg) 畜禽粪便中重金属调查结果相似<sup>[12,18]</sup>。仔猪粪中 Cu、Zn 和 Cd 超标较高, Cr 和 Ni 在生长肥育猪后期猪粪中值最高, 与不同养殖阶段饲料中重金属质量比特征一致, 研究表明, 猪粪和饲料中重金属相关性较好, 饲料添加剂是畜禽粪便中重金属主要来源<sup>[9-10,19]</sup>。

表 2 不同养殖阶段猪粪中重金属质量比<sup>①</sup>

不同饲养阶段		Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
仔猪 (< 30 kg)	最小值	945.18	5 601.43	16.79	10.26	38.92	9.10
	最大值	1 913.99	11 342.90	34.01	20.79	78.81	18.44
	平均值	1 453.22	8 612.20	25.82	15.78	59.84	14.00
	标准偏差	351.68	2 084.14	6.25	3.82	14.48	3.39
肥育猪前期 (30 ~ 60 kg)	最小值	149.44	666.57	4.10	1.26	28.17	3.86
	最大值	896.61	3 999.44	24.63	7.54	169.02	23.15
	平均值	641.33	2 860.71	17.62	5.40	120.89	16.56
	标准偏差	306.63	1 367.76	8.42	2.58	57.80	7.92
肥育猪后期 (> 60 kg)	最小值	65.05	301.76	3.06	1.04	44.27	11.03
	最大值	422.84	1 961.41	19.88	6.75	287.73	71.68
	平均值	282.98	1 312.64	13.30	4.51	192.56	47.97
	标准偏差	138.23	641.19	6.50	2.21	94.06	23.43
Nicholson <sup>[20]</sup>	英国	360	500			2.8	
Cang <sup>[2]</sup>	江苏	399	505.9				
Zhang <sup>[3]</sup>	东北	642.1			15.1		
文献[16]				50	3	150	
文献[17]		85 ~ 350	500 ~ 1 500				
德国腐熟堆肥标准 <sup>[21]</sup>		100	400	150	1.5	100	

①干物质量。

猪粪中重金属的迁移性并不是由总量决定, 主要取决于其赋存形态。猪粪中重金属不同形态质量浓度和占总量的百分比见图 1 (a) (b) (c) (d)

(e) (f), 其中, F1: 可交换态; F2: 碳酸盐结合态; F3: Fe-锰 (Mn) 氧化物结合态; F4: 有机结合态; F5: 残渣态;  $\rho$  (Cu)、 $\rho$  (Zn) 单位为  $10^2$  mg/L。

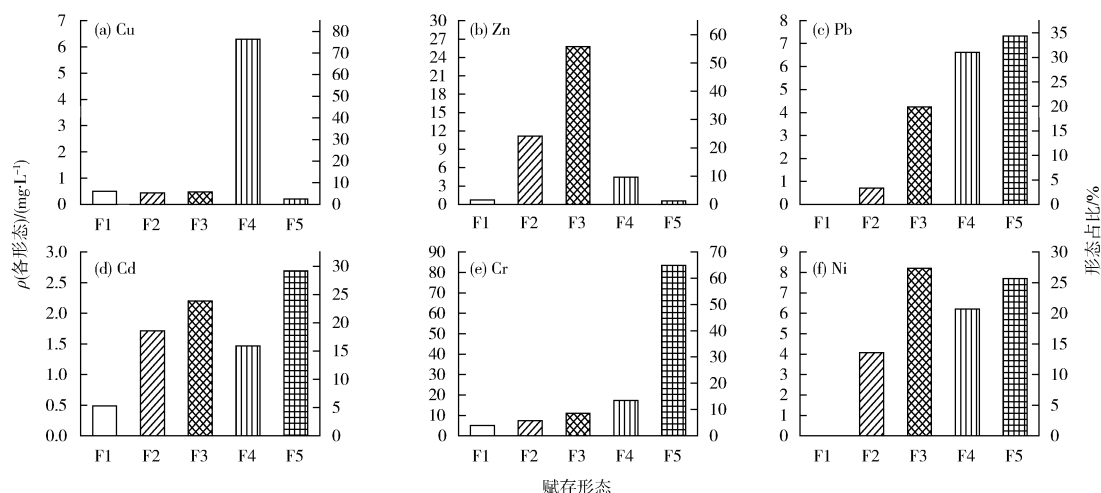


图 1 猪粪中重金属不同形态质量浓度和占总量的百分比

由图 1 可见,Cu 主要以有机结合态存在,占总量 79.5% ,Zn 主要以 Fe - Mn 氧化物结合态和碳酸盐结合态存在,分别占总量 60.4% 和 26.1% ,猪粪中 Cu 和 Zn 形态分布和大多数研究结果一致<sup>[22]</sup>。

Pb 和 Cr 主要以残渣态赋存,生物可利用性相对较弱,Ni 的 Fe - Mn 氧化物态和碳酸盐结合态约占 40% ,有一定生物有效性,猪粪施用于农田后,猪粪中可交换态、碳酸盐结合态和 Fe - Mn 氧化物重金属可能会在自然条件下迁移到土壤或被植物吸收利用,具有一定环境风险。

### 2.3 厌氧消化前后液相中重金属总量和溶解态

厌氧消化前粪污混合液和厌氧消化后沼液中重金属总量及溶解态质量浓度见表 3。由表 3 可见,沼液中 Cu 溶解态重金属平均值超过文献[23] 1.79 倍,厌氧消化过程重金属存在“相对浓缩效应”,除了 Zn 溶解态浓度减小外,其他重金属溶解态浓度均增大,厌氧消化后沼液中 Cu 和 Zn 平均值为厌氧消化前原猪粪液中含量 1.59 和 1.40 倍,数值高于陈璧瑕<sup>[24]</sup> 研究结果。溶解态重金属可以随地表径流迁移,易被植物等吸收,厌氧消化后溶解态重金属数值的增加,具有较大潜在的环境风险。

表 3 混合液和沼液中重金属总量及溶解态质量浓度

			mg/L					
重金属			Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
溶解态	混合液	平均值	1.63	5.58	0.51	0.05	0.02	0.38
		标准偏差	0.02	1.67	0.07	0.01	0.00	0.08
	沼液	平均值	1.64	4.48	0.63	0.07	0.02	0.47
		标准偏差	0.12	0.27	0.08	0.01	0.00	0.04
总量	混合液	平均值	9.29	22.07	2.64	0.39	0.37	3.88
		标准偏差	1.60	4.22	0.45	0.15	0.12	1.07
	沼液	平均值	14.77	30.86	3.57	0.76	0.73	5.85
		标准偏差	4.81	5.14	0.72	0.19	0.06	1.11
文献[23]			1	2	0.2	0.01	0.1	

溶解态重金属占总量百分比与厌氧消化过程沼液理化指标相关性见表 4。由表 4 可见,厌氧消化过程中 Cu 和 Zn 可溶态与 DOC 显著相关,Cr 和 Ni 可溶态与 COD、TP 均显著正相关;Ni 可溶态与 TN 相关,Cu 和 Zn 溶解态与 pH 值负相关,Cu、Zn 可溶态和 TS 和悬浮物(SS)正相关,可知 DOC 是

影响沼液中重金属可溶态的主要因子,pH 值、SS 与重金属可溶态有较好相关性。研究发现<sup>[25]</sup>,溶解态重金属与 DOC 显著相关,ORP、pH 值、营养元素与重金属可溶态有较好相关性。pH 值主要通过改变沼液中重金属的吸附位点、吸附表面的稳定性、存在形态和配位性能等影响沼液中重金属的

变化。

ORP 降低使得沼液重金属有效性下降主要是因为厌氧沉积物 ORP 升高可以氧化重金属硫化物结合态,导致 Zn、Cu、Pb 从主要存在形态 Fe - Mn 氧化物结合态、硫化物和有机结合态向其他形态转

变,其中部分转化为可交换态和碳酸盐结合态<sup>[26]</sup>。DOC 含有大量羧基、羟基、羰基等活性基团,通过离子交换吸附、络合、螯合等作用与重金属结合,影响重金属在介质中吸附和解吸平衡,进一步使得重金属迁移转化<sup>[27]</sup>。

表 4 溶解态重金属占总量百分比与厌氧消化过程沼液理化指标相关性<sup>①</sup>

重金属	pH 值	DOC	ORP	TS	SS	COD	TN	TP
Cu	-0.982 *	0.957 *	0.481	0.987 **	0.978 *	0.738	0.624	0.764
Zn	-0.972 *	0.975 *	0.363	0.976 *	0.991 **	0.755	0.576	0.861
Pb	-0.621	0.256	0.813	0.735	0.931	0.887	0.896	0.845
Cd	-0.348	0.312	0.887	0.542	0.987 *	0.723	0.733	0.67
Cr	-0.912	0.704	0.894	0.802	0.923	0.984 *	0.902	0.986 *
Ni	-0.837	0.624	0.626	0.853	0.955	0.995 **	0.987 *	0.978 *

① \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

### 2.4 厌氧消化前后固相中重金属总量

厌氧消化前调节池中猪粪和厌氧消化后沼渣中重金属质量比见表 5。由表 5 可见,调节池猪粪和沼渣中 Cu 和 Zn 平均值都高于国内外大部分研究结果<sup>[28-33]</sup>。厌氧消化过程中沼渣中重金属普遍存在“相对浓缩效应”,Cu 和 Zn 平均值分别为调

节池猪粪的 1.58 和 1.37 倍。国内目前还没有沼渣施用于农田相关标准,参照文献[34]中重金属限量(pH 值 >6.5),沼渣中 Cu 和 Zn 平均超标倍数分别为 1.9 和 5.72;参照文献[16],沼渣中 Cd 平均超标倍数为 7,参考德国腐熟堆肥质量标准<sup>[21]</sup>,沼渣中重金属超标更为严重。

表 5 调节池混合猪粪和沼渣中重金属质量比

重金属	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	mg/kg
混合猪粪	平均值	920.07	4 920.24	23.86	10.86	147.54	39.35
	标准偏差	88.25	756.92	1.91	2.15	11.21	9.97
沼渣	平均值	1 451.49	6 722.47	48.35	24.63	190.36	62.86
	标准偏差	136.77	1 134.98	8.64	3.86	66.93	7.58
文献[34](pH 值 >6.5)		500	1 000	1 000	20	1 000	200
文献[16]				50	3	150	
德国堆肥标准值 <sup>[21]</sup>		100	400	150	1.5	100	

### 3 结论

(1) 不同养殖阶段中猪饲料重金属含量差异较大,仔猪(<30 kg)饲料中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 明显高于肥育猪前后两个阶段饲料中重金属含量,而 Cr 和 Ni 生长肥育猪后期(>60 kg)饲料中含量最高。

(2) 猪粪中 Cu 主要以有机结合态存在,占总量的 79.5%,Zn 主要以 Fe - Mn 氧化物结合态存在,占总量 60.4%,Pb 和 Cr 主要以残渣态,生物可利用性相对较弱,Ni 铁锰氧化物态和碳酸盐结合态约占 40%。

(3) 沼液中 Cu 溶解态最大值超出农田灌溉水质标准 1.34 倍,除了 Zn 溶解态浓度减小外,其他重金属溶解态浓度均增大,沼液中 Cu 和 Zn 含量

为原猪粪液含量 1.39 ~ 1.74 和 1.38 ~ 1.43 倍。沼渣中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 分别达到 1 348.20, 10 525.03, 1 254.45 和 57.36 mg/kg,普遍存在“相对浓缩效应”,pH 值、DOC 和 OM 为厌氧消化过程影响重金属变化的主要因素。

#### [参考文献]

[1] CHEN M, CUI Y S. A review on the resource and bioavailability of heavy metals in biogas fertilizer from the manure of livestock [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43 (1): 249 - 256.  
 [2] 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 Sci-

- ences, 2004, 16(3): 371-374.
- [3] ZHANG F, LI Y, YANG M, et al. Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in northeast china[J]. J. Environ. Res. Public Health. Int, 2012(9): 2658-2668.
- [4] SHI J C, YU X L, ZHANG M K. Potential risks of copper, zinc, and cadmium pollution due to pig manure application in a soil-rice system under intensive farming: A case study of nanhu, China[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(6): 1695-1704.
- [5] 冯春, 杨光, 杜俊, 等. 污水污泥堆肥重金属总量及形态变化[J]. 环境科学研究, 2008(1): 97-102.
- [6] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 291-296.
- [7] 刘晓光, 董滨, 戴翎翎, 等. 剩余污泥厌氧消化过程重金属形态转化及生物有效性分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1630-1638.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [9] 孙红霞, 张花菊, 徐亚铂, 等. 猪饲料、粪便、沼渣和沼液中重金属元素含量的测定分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(9): 285-287.
- [10] 张飞. 土壤中重金属测定方法探讨[J]. 上海环境科学, 2010(2): 74-77.
- [11] 姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 等. 动物饲料中砷、铜和锌调查及分析[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 732-739.
- [12] WANG H, DONG Y H, YANG Y Y, 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(12): 2435-2442.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 饲料卫生标准: GB 13078—2001[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 中华人民共和国农业部. 有机肥料: NY 525—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [17] 中华人民共和国农业部. 畜禽粪便安全使用准则: NY/T 1334—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [18] 潘寻, 韩哲, 贾伟伟. 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.
- [19] 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.
- [20] 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(1): 23-31.
- [21] 金杰, 孙世群, MICHAEL N, 等. 中德生物垃圾堆肥相关标准之比较[J]. 合肥学院学报(自然科学版), 2006(1): 29-33.
- [22] 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.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农田灌溉水质标准: GB 5048—2005[S]. 北京: 中国环科学出版社, 2005.
- [24] 陈璧瑕. 沼液农用对玉米产量、品质及土壤环境质量的影响研究[D]. 重庆: 四川农业大学, 2010.
- [25] JIN H M, CHANG Z Z. Distribution of heavy metal contents and chemical fractions in anaerobically digested manure slurry[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 164(3): 268-282.
- [26] KELDERMAN P, OSMAN A A. Effect of redox potential on heavy metal binding forms in polluted canal sediments in Delft (The Netherlands)[J]. Water Research, 2007, 41(18): 4251-4261.
- [27] 郭微, 戴九兰, 王仁卿. 溶解性有机质影响土壤吸附重金属的研究进展[J]. 土壤通报, 2012(3): 761-768.
- [28] MARCATO C E, PINELLI E, POUÉCH P. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry[J]. Bioresource technology, 2008, 99(7): 2340-2348.
- [29] 段然. 沼肥肥力和施用后潜在污染风险研究与土壤安全性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [30] 陈苗, 崔岩山. 畜禽固废沼肥中重金属来源及其生物有效性研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 249-256.
- [31] MAKAKDI M, TOMOCSIK A, OROSA V, et al. Effect of a biogas-digestate and bentonite on some enzyme activities of the amended soils[J]. Cereal Research Communications, 2007, 35(2): 741-744.
- [32] RAMIREZ W A, DOMENE X, ORTIZ O, et al. Toxic effects of digested, composted and thermally-dried sewage sludge on three plants[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 7168-7175.
- [33] MARCATO C, PINELLI E, CECCHI M, et al. Bioavailability of Cu and Zn in raw and anaerobically digested pig slurry[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2009, 72(5): 1538-1544.
- [34] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 农用污泥中污染物控制标准: GB 4284—84[S]. 北京: 中国标准出版社, 1984.

栏目编辑 李文峻