

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

袁凯, 熊苏雅, 梁静, 李彦明, 乔玉辉, 李花粉, 陈清

引用本文:

袁凯,熊苏雅,梁静,等. 畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1837-1842.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0142

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国部分城市畜禽粪便中重金属含量及形态分布

贾武霞, 文炯, 许望龙, 段然, 曾希柏, 白玲玉 农业环境科学学报. 2016, 35(4): 764-773 https://doi.org/10.11654/jaes.2016.04.022

畜禽粪便生物炭固碳量、养分量的估算及田间施用潜在风险预测

李飞跃, 吴旋, 李俊锁, 谢越, 范行军, 蔡永兵, 赵建荣 农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2202-2209 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0025

猪粪--秸秆还田对土壤、作物重金属铜锌积累及环境容量影响研究

王琼瑶, 李森, 周玲, 王贵胤, 张楚儿, 张世熔 农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1764-1772 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0336

EDTA、皂素及其混剂淋洗去除猪粪中Cu、Zn的研究

李振东, 刘东方, 黄文力, 魏孝承, 孙瑜 农业环境科学学报. 2019, 38(1): 220-228 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0309

汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价

宋凤敏,岳晓丽,刘智峰,葛红光,李琛,赵佐平 农业环境科学学报.2020,39(7):1576-1584 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0143



关注微信公众号,获得更多资讯信息

袁凯,熊苏雅,梁静,等.畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1837-1842. YUAN Kai, XIONG Su-ya, LIANG Jing, et al. Status and risk analysis of copper and zinc pollution in livestock manure[J]. *Journal of Agro-*Environment Science, 2020, 39(8): 1837-1842.



畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

袁凯1,熊苏雅1,梁静2,李彦明1,乔玉辉1*,李花粉1,陈清1

(1.中国农业大学资源与环境学院,北京 100193;2.山东威海市土壤与固体废物污染防治中心,山东 威海 264200)

摘 要:为研究我国畜禽粪便中重金属 Cu和 Zn的现状及对土壤的污染风险,对数据库和课题组已有的数据进行整理,分析了我 国畜禽粪便中 Cu、Zn的现状,建立土壤中畜禽粪便重金属 Cu和 Zn的风险评估模型,预测施用畜禽粪便后土壤 Cu、Zn的污染情况,并推算畜禽粪便 Cu、Zn的阈值。研究发现,不同畜禽粪便中 Cu、Zn含量差异较大,且 Zn的含量均高于 Cu含量。猪粪中 Cu、Zn 含量最高,中位值分别为406.9 mg·kg⁻¹和671.3 mg·kg⁻¹,羊粪中 Cu、Zn含量最低,中位值分别为28.7 mg·kg⁻¹和101.1 mg·kg⁻¹。施 用猪粪的土壤中 Cu和 Zn的积累速率分别为12 080.0 g·hm⁻²·a⁻¹和18 928.4 g·hm⁻²·a⁻¹;家禽粪的影响其次,Cu和 Zn的积累速率分别为1 396.4 g·hm⁻²·a⁻¹和7 978.1 g·hm⁻²·a⁻¹;牛粪和羊粪的污染风险较低。根据模型计算的阈值中,粪肥中 Cu和 Zn的阈值范围分别为 80.8~2 256.6 mg·kg⁻¹和1 322.4~20 040.9 mg·kg⁻¹;粪肥污染风险与阈值呈负相关,污染风险最高的猪粪,阈值最低,其 Cu和 Zn的阈值范围分别为 80.8~163.2 mg·kg⁻¹和1 322.4~1 972.8 mg·kg⁻¹。

关键词:畜禽粪便;Cu;Zn;风险;阈值

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)08-1837-06 doi:10.11654/jaes.2020-0142

Status and risk analysis of copper and zinc pollution in livestock manure

YUAN Kai¹, XIONG Su-ya¹, LIANG Jing², LI Yan-ming¹, QIAO Yu-hui^{1*}, LI Hua-fen¹, CHEN Qing¹

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Weihai Soil and Solid Waste Pollution Prevention and Control Center, Shandong Province, Weihai 264200, China)

Abstract: To study the current situation regarding heavy metal Cu and Zn in livestock manure and the risk of soil pollution from the application thereof in China, data from previously published work and our own study was collected and used to analyze the content of Cu and Zn in livestock manure. A risk assessment model was established to predict the potential of soil Cu and Zn pollution with the application of livestock manure and estimate thresholds for Cu and Zn in livestock manure. The study indicated that the content of Cu and Zn in different livestock manure is quite different, and the content of Zn is higher than that of Cu. Pig manure has the highest Cu and Zn content, with median values of 406.9 mg \cdot kg⁻¹ and 671.3 mg \cdot kg⁻¹; sheep manure has the lowest Cu and Zn content, with median values of 406.9 mg \cdot kg⁻¹ and 671.3 mg \cdot kg⁻¹; sheep manure has the lowest Cu and Zn content, with median values of $28.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $101.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The accumulation rate of Cu and Zn in soil is 12 080.0 g \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ and 18 928.4 g \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ respectively with the application of pig manure. The accumulation rate of Cu and Zn in soil with the application of poultry manure was 1 396.4 g \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹ and 7 978.1 g \cdot hm⁻² \cdot a⁻¹, respectively. The risk of contamination from cow and sheep manure is low. According to the threshold calculated using our model, the threshold range of Cu is $80.8 \sim 256.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the threshold range of Zn is 1 322.4 \sim 20 040.9 mg \cdot kg⁻¹. The risk of pollution from manure is negatively related to its threshold; pig manure has the lowest threshold with the highest pollution risk, with threshold ranges for Cu and Zn of $80.8 \sim 163.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 1 322.4 \sim 1 972.8 mg \cdot kg⁻¹, respectively.

Keywords: livestock manure; copper; zinc; risk; threshold

2020年8月

收稿日期:2020-02-20 录用日期:2020-04-10

作者简介:袁凯(1996—),男,安徽人,硕士研究生,研究方向为有机农业与有机废弃物处理。E-mail:yuank@cau.edu.cn

^{*}通信作者:乔玉辉 E-mail:qiaoyh@cau.edu.cn

基金项目:现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-23-B16)

Project supported : China Agriculture Research System(CARS-23-B16)

农业环境科学学报 第39卷第8期

我国畜禽养殖量较大,每年有大量畜禽粪便产 生,据统计,2013年中国畜禽粪便的总量约为14.59 亿t,其中育肥猪粪6.70亿t(45.9%),肉牛粪3.71亿t (25.5%),奶牛粪2.25亿t(15.4%),家禽(母鸡和鸭) 粪1.32亿t(9.0%),肉鸡粪0.6亿t(4.1%)^{III}。随着我国 畜禽养殖规模化程度的提高,畜禽粪污排放大量增 加,给环境造成了很大的压力^{I2I}。这些畜禽粪便若不 经过合理的处理,其中的重金属将会对土壤环境造成 污染^{I3I}。

近年来土壤污染受到世界广泛关注^[4],其中农业 土壤重金属污染是我国最受关注的话题之一^[5]。根 据2014年4月17日原环境保护部和国土资源部发布 的《全国土壤污染状况调查公报》显示,镉、汞、砷、铜、 铅、铬、锌、镍8种无机污染物点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%。土 壤重金属污染会影响植物的代谢和生长,降低植物的 生物量,造成植物的重金属积累^[6]。并且重金属污染 与人体和生态系统的潜在毒性有关^[7],重金属通过食 物链进入动物和人体,使人体产生慢性中毒,从而对 人类的生存和健康构成威胁^[8]。

畜禽粪便富含氮、磷和有机物质,可以改善土壤 的物理和化学性质,并提供农业生产所必需的养 分^[9],主要被用作有机肥原料^[10]。在作为有机肥原料 的过程中,其所含有的重金属也随之进入土壤。有研 究表明土壤中Cu、Zn和As有54%~85%来自于畜禽 粪便^[11],Nicholson等^[12-13]在其研究中发现,农田土壤中 40%的Cu和37%的Zn均来自畜禽粪便,Bai等^[14]的研 究中也发现了相似的结果。Zhang等^[15]在2012年对 我国东北地区的研究中发现动物粪便是环境中重金 属的主要来源之一。可见畜禽粪便是土壤重金属的 主要来源之一,其重金属污染问题不容忽视。

朱建春等^[16]在2014年的研究中分析了我国畜禽 粪便的来源结构,结果表明:我国的畜禽粪便主要来 源于牛、猪、羊和家禽,其中重金属超标以Cu和Zn为 主^[10,17]。本文通过分析牛、猪、羊和家禽的粪便重金 属含量,研究我国畜禽粪便重金属Cu和Zn含量的现 状,以为畜禽粪便重金属的研究提供可靠的数据结 果;同时建立土壤中畜禽粪便重金属Cu和Zn的风险 模型,预测土壤中畜禽粪便重金属污染情况,推算畜 禽粪便重金属的安全阈值,为土壤重金属污染的研究 提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

畜禽粪便重金属数据来源主要有3个:(1)对以 中国知网和万方数据库为主的中文数据库和以Web of Science 数据库为主的英文数据库进行检索,收集 相关数据;(2)调研取样测定;(3)课题组已有的相关 数据。文献筛选原则:(1)筛选时间为2000—2018 年;(2)采样点远离工矿企业等污染源,符合我国农用 地土壤污染标准;(3)试验具有明确的重复数。

1.2 重金属平衡流模型

本研究用物质守恒计算重金属平衡流,即重金属 积累量(A)=输入总量(I_{rotal})-输出总量(O_{rotal}),其中输 入总量(I_{rotal})=粪肥带入量(Im)+化肥带入量(If)+灌 溉水带入量(Iw)+大气沉降带入量(Ia),由于氮肥和 钾肥重金属带入量较小,所以化肥带入量以磷肥为 主;输出量(O_{rotal})=作物带出量(Oveg),作物带出量包 括可使用部分和残余部分带出量,选取叶菜类蔬菜作 为输出重金属的作物。由于淋溶带出的重金属量很 低,只有约0.3%的Cu和Zn浸出,并在表层土壤(0~20 cm)保留数年^[18],因此不考虑淋溶带出。重金属平衡流 模型的计算模块见表1。根据收集的数据和实验室已 有的数据,经过计算得出输入、输出各部分的量。

1.3 重金属积累速率的计算

蔬菜生产中肥料用量多,重金属检出率较高,所 以综合来看重金属污染风险较高,如果能对其进行 预测和阈值控制,则对其他作物的污染风险基本也

	Table 1 The calculat	non module of model
类别Categories	项目Projects	重金属含量计算公式Heavy metal content calculation formula
重金属输入项	大气沉降带入量Ia	大气沉降通量
	畜禽有机肥带入量Im	畜禽有机肥使用量×畜禽有机肥重金属含量
	化肥带入量(以磷肥为主)If	磷肥使用量×磷肥重金属含量
	灌溉水带入量Iw	灌溉水使用量×灌溉水重金属含量
重金属输出项	蔬菜带出量Oveg	蔬菜年产量×蔬菜重金属含量

表1 模型计算模块

可控制。所以本研究以叶菜类蔬菜生产为情景进行 分析。

土壤重金属Cu和Zn的积累速率计算过程:(1) 输入途径中的粪肥采用猪粪、鸡粪、牛粪和羊粪的重 金属含量中位值进行计算,数据来自文献和课题组已 有数据,其中Cu的数据有398组来自文献,348组来 自课题组已有数据,Zn的数据有361组来自文献,348 组来自课题组已有数据;(2)本研究只考虑远离交通 要道和工厂的种植地区,所以大气沉降量采用最小值 计算:(3)磷肥占重金属总输入量的百分比较低,采用 中位值计算,磷肥数据为课题组2010-2017年采样 数据:(4)灌溉水带入量采用中位值计算,灌溉水量根 据中国知网和万方数据库的文献确定;(5)输出量采 用蔬菜重金属含量中位值计算。

1.4 重金属源头阈值演算

粪肥重金属Cu和Zn的阈值计算公式如下:

 $Q_t = Q_0 K^t + Q K^t + Q K^{t-1} + \dots + Q K = Q_0 K^t + Q K (1 - K^t) / Q K (1 - K^t) / Q K (1 - K^t) / Q K^t + Q K (1 - K^t) / Q K (1 - K^t) / Q K^t + Q K (1 - K^t) / Q K$ (1-K)

式中:Q,为土壤环境质量农用地土壤污染风险管控 标准(GB 15618—2018); Q₀为本底值; t为时间; K为 残留率,残留率根据重金属输入和输出量计算。土 壤本底值参考表2119的中位值,重金属输入量中磷 肥、大气沉降和灌溉水的输入量按现有输入量中位 值计算,设定粪肥施用量不变,计算畜禽粪便重金属

Table 2 Soil heavy metal content background value $(mg \cdot kg^{-1})$

香 公屋 山	分位值Quantile						
里 玉 禹 neavy metals	10%	50%	75%	90%			
Cu	8.8	20.7	27.3	36.6			
Zn	35	68	89.2	116			

含量的阈值。

结果与分析 2

2.1 畜禽粪便重金属含量

表3为畜禽粪便重金属Cu和Zn的含量,畜禽粪 便中Zn含量普遍高于Cu,两种重金属的含量变化范 围较大,且平均值均高于中位值。从粪肥种类来看, 猪粪的重金属含量最高,猪粪中Cu含量最大值为 1742.1 mg·kg⁻¹,其0~90%含量范围为10.2~1024.0 mg·kg⁻¹, 中位值为406.9 mg·kg⁻¹, 平均值为485.2 mg·kg⁻¹; 猪粪中Zn含量范围为40.5~11 547.8 mg· kg⁻¹, 中位值为671.3 mg·kg⁻¹, 平均值为1 220.2 mg· kg⁻¹,但90%的猪粪样品Zn含量在2138.5 mg·kg⁻¹以 下。家禽粪、牛粪和羊粪Cu含量的最大值分别为 835.3、437.2 mg·kg⁻¹和415.4 mg·kg⁻¹,虽然最大值较 高,但其90%分位值分别为126.4、89.1 mg·kg⁻¹和 58.0 mg·kg⁻¹; Zn 含量最大值分别为7 318.6、634.7 mg·kg⁻¹和1799.8 mg·kg⁻¹,90%分位值分别为712.9、 308.5 mg·kg⁻¹和354.8 mg·kg⁻¹,这两部分含量明显低 于猪粪。

我国《畜禽粪便安全使用准则》(NY/T 1334-2007)中规定:制作肥料的畜禽粪便中Cu含量限值为 800 mg·kg⁻¹,Zn为3 400 mg·kg⁻¹(准则中规定的最宽松 的限值),按照此限值,目前畜禽粪便中只有猪粪和家 禽粪有超标,猪粪Cu、Zn的超标率分别为21.21%和 6.82%,家禽粪Cu、Zn的超标率均为0.75%,牛粪和羊 粪没有超标。若按照蔬菜生产施用的畜禽粪便最严 格的标准(Cu 170 mg·kg⁻¹, Zn 900 mg·kg⁻¹), 猪粪、家 禽粪、牛粪和羊粪中Cu超标率分别为70.45%、7.46%、 3.61%和4.08%;Zn超标率分别为28.79%、4.48%、0和 6.12%;猪粪中Cu和Zn含量超标严重。

表3 畜禽粪便 Cu 和 Zn 含量 $(mg \cdot kg^{-1})$ Table 2 Connon and sine content in livesteel manue (marks⁻¹)

		Table 5 Co	pper and zind	content in i	IVESTOCK IIIa	nure(ing Kg)		
种类	重金属	分位值Quantile							均值
Categories	Heavy metals	0	10%	25%	50%	75%	90%	100%	Mean
猪粪	Cu	10.2	51.8	144.3	406.9	749.3	1 024.0	1 742.1	485.2
	Zn	40.5	182.7	416.1	671.3	1 033.1	2 138.5	11 547.8	1 220.2
家禽粪	Cu	16.4	25.0	35.5	50.8	86.5	126.4	835.3	80.9
	Zn	NA	96.8	153.7	306.3	459.7	712.9	7 318.6	405.0
牛粪	Cu	8.8	19.4	22.8	34.9	53.3	89.1	437.2	53.9
	Zn	39.2	61.9	81.5	111.6	199.5	308.5	634.7	155.8
羊粪	Cu	13.1	17.5	21.5	28.7	36.6	58.0	415.4	45.7
	Zn	20.8	39.5	68.8	101.1	146.2	354.8	1 799.8	203.8

农业环境科学学报 第39卷第8期

2.2 模型应用

2.2.1 重金属输入、输出项分析

表4为土壤-蔬菜系统中各输入、输出项的使用 量和蔬菜产量。粪肥重金属Cu和Zn的输入量采用 重金属含量的中位值带入计算,猪粪、家禽粪、牛粪和 羊粪的Cu带入量分别为406.9、50.8、34.9 mg·kg⁻¹和 28.7 mg·kg⁻¹,Zn带入量分别为671.3、306.3、111.6 mg·kg⁻¹和101.1 mg·kg⁻¹。为便于比较,不同粪肥的施 肥量统一为每茬10 000 kg·hm⁻²²⁰¹,本研究按每年种 植三茬叶菜进行相关计算。

对全国采集的159个磷肥样品进行重金属测定, Cu含量范围为痕量~4 882.3 mg·kg⁻¹,中位值为99.8 mg·kg⁻¹;Zn含量范围为痕量~16 115.6 mg·kg⁻¹,中位 值为341.1 mg·kg⁻¹。

Luo 等^[21]对我国 1996—2006 年大气沉降向农田 中带入的重金属进行了统计, Cu的样本数为 148, 最 小值为 2.3 g·hm⁻²·a⁻¹, 最大值为 409.1 g·hm⁻²·a⁻¹; Zn 的样本数为 148, 最小值为 29.1 g·hm⁻²·a⁻¹, 最大值为 1 484.2 g·hm⁻²·a⁻¹。

地下水是主要的农业用水来源^[22],以"地下水" "重金属"为关键词,在中国知网数据库已经发表的期 刊论文中检索,数据经统计分析,共125个灌溉水样 品,Cu含量范围为0.01~990 μg·L⁻¹,中位值为3.4 μg· L⁻¹;Zn含量范围为0.01~1 136 μg·L⁻¹,中位值为14.4 μg·L⁻¹。

选取蔬菜作为输出重金属的作物,在中国知网中

每茬用量戓产量[20]

表4 土壤-蔬菜系统中各输入、输出项使用量和产量

Table 4 Usage and output of various input and output items in the soil-vegetable system

项目

以"蔬菜""重金属"为关键词进行检索,选取远离交通 要道、工矿企业等污染源,无污水污灌,种植土壤符合 我国农用地土壤质量标准,蔬菜品种为广泛种植的叶 菜类,且均为成熟期采样的数据进行统计分析,共96 组叶菜数据,Cu含量范围为0.01~17.5 mg·kg⁻¹,中位 值为0.8 mg·kg⁻¹;Zn含量范围为0.1~59.8 mg·kg⁻¹,中 位值为5.9 mg·kg⁻¹。

通过各项输入、输出重金属的含量和每年各项输入、输出量,计算得出各项重金属输入、输出速率,见表5。从表中可以看出,土壤中重金属Cu和Zn的积累主要来自畜禽粪便,磷肥、灌溉水和大气沉降的Cu和Zn输入速率远低于畜禽粪便的输入速率,叶菜Zn 年输出速率大于磷肥、灌溉水和大气沉降三者的年总输入速率。

2.2.2 施用不同粪肥土壤Cu和Zn的积累

根据土壤重金属积累量(A)=粪肥带入量(Im)+ 磷肥带入量(If)+灌溉水带入量(Iw)+大气沉降带入 量(Ia)-作物带出量(Oveg),计算得到施用不同粪肥 情况下土壤重金属Cu和Zn的积累速率。

如表6所示,在本研究的模拟情景中发现,施用 猪粪的土壤重金属积累速率远高于其余3种粪便,施 用猪粪的土壤中Cu积累速率为12080.0g·hm⁻²·a⁻¹, Zn积累速率为18928.4g·hm⁻²·a⁻¹;施用家禽粪土壤 的Cu、Zn积累速率分别为1396.4g·hm⁻²·a⁻¹和7978.1 g·hm⁻²·a⁻¹。施用牛粪土壤的重金属Cu和Zn积累速 率分别为921.2g·hm⁻²·a⁻¹和2137.1g·hm⁻²·a⁻¹;土壤 积累速率最小的是羊粪,Cu和Zn的积累速率分别为 732.5g·hm⁻²·a⁻¹和1820.3g·hm⁻²·a⁻¹,只有施用猪粪

表6 施用不同粪便情况下土壤 Cu_Zn 积累速率 $(g \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$

Table 6	Soil	copper and	zinc	accumulation	rate	under	different
---------	------	------------	------	--------------	------	-------	-----------

	2111			rabie e	con coppor c	ind hime decounity.	iation rate an	aor annoronn	
Projects Usag		Usage or output per stubble		feces application $(g \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$					
输入	粪肥/(kg·hm ⁻²)	10 000	_	チトロ			/		
	磷肥(P ₂ O ₅)/(kg·hm ⁻²)	80	-	里金禹 Heavy	猪粪	家禽粪	牛粪	羊粪	
	灌溉水/(t•hm ⁻²)	6 000		metals	Pig manure	Poultry manure	Cow manure	Sheep manure	
	大气沉降/(g·hm ⁻² ·a ⁻¹)	29		Cu	12 080.0	1 396.4	921.2	732.5	
输出	叶菜/(kg·hm ⁻²)	90 000		Zn	18 928.4	7 978.1	2 137.1	1 820.3	

表5 各项重金属输入、输出速率(g•hm ⁻² •a ⁻¹)	
---	--

Table 5 Various heavy metal input and output rates (g • hm⁻² • a⁻¹)

重金属	输入 Iutput								
Heavy	猪粪	家禽粪	牛粪	羊粪	磷肥	大气沉降	灌溉水	蔬菜	
metals	Pig manure	Poultry manure	Cow manure	Sheep manure	Phosphate fertilizer	Atmospheric deposition	Irrigation water	Vegetables	
Cu	12 207.0	1 523.4	1 048.2	859.5	24.0	2.3	61.9	215.2	
Zn	20 140.5	9 190.2	3 349.2	3 032.4	81.8	29.1	259.2	1 582.2	

土壤积累速率的1/17和1/10。

2.2.3 畜禽粪肥中Cu和Zn含量阈值推算

根据我国《农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),计算不同pH情况下畜禽粪 肥重金属的安全阈值。如表7所示,总体来看,随着 pH的增高,畜禽粪肥重金属的安全阈值也不断增高, Zn的阈值较Cu更高,羊粪肥和牛粪肥的阈值远高于 猪粪肥和家禽粪肥。

当 pH<6.5 时, 粪肥中 Cu 的阈值范围在 80.8~ 1 130.4 mg·kg⁻¹, Zn 的阈值范围在 1 322.4~13 367.8 mg·kg⁻¹; 当 6.5<pH<7.5 时, Cu 的阈值范围在 163.2~ 2 256.6 mg·kg⁻¹, Zn 的阈值范围在 1 652.3~16 709.1 mg·kg⁻¹; 当 pH>7.5 时, Cu 的阈值范围在 1 63.2~ 2 256.6 mg·kg⁻¹, Zn 的阈值范围在 1 972.8~20 040.9 mg·kg⁻¹。Zn 的阈值高于 Cu 的阈值,这是因为叶菜对 土壤 Zn 的输出能力更强。

表7 不同 pH条件下粪肥重金属含量阈值(mg·kg⁻¹) Table 7 Threshold of heavy metal content of manure under different pH conditions(mg·kg⁻¹)

		-	-	-	
项目 Items	重金属 Heavy metals	猪粪 Pig manure	家禽粪 Poultry manure	牛粪 Cow manure	羊粪 Sheep manure
pH≤6.5	Cu	80.8	595.0	899.7	1 130.4
	Zn	1 322.4	3 081.3	11 392.2	13 367.8
$6.5 < \mathrm{pH}{\leqslant}7.5$	Cu	163.2	1 185.7	1 795.2	2 256.6
	Zn	1 652.3	3 850.9	14 239.6	16 709.1
pH>7.5	Cu	163.2	1 185.7	1 795.2	2 256.6
	Zn	1 972.8	4 611.1	17 077.5	20 040.9

3 讨论

2015年对华北地区的调查研究发现,华北地区 畜禽粪便中重金属 Cd、Cr、Cu、Zn 的质量分数与饲料 中重金属质量分数呈极显著正相关(P<0.01),Pb、As 质量分数与饲料中重金属质量分数呈显著相关(P< 0.05)^[10]。Nicholson等^[23]发现,猪饲料和家禽鸡饲料 的重金属含量明显高于牛饲料,而猪粪和鸡粪中重金 属的含量也高于牛粪重金属含量。猪对饲料中的 Cu、Zn、Mn和Cd吸收甚少,有95%以上由生猪粪便及 尿液排出体外^[24]。可见饲料是畜禽粪便重金属的重 要来源之一。

在畜禽粪便中,猪粪的重金属Cu、Zn污染最为严重,土壤重金属积累速率最快,牛羊粪表现较好,这与前人的研究结果也相吻合^[10,17]。我国生猪养殖规模 巨大,如果粪便肥料化过程中重金属不能得到有效控

制,将对环境产生巨大威胁。目前在我国肥料重金属 指标(GB/T 23349-2009)、有机肥料(NY 525-2012) 和畜禽粪便堆肥技术规范(NY/T 3442-2019) 这三项 标准中,均无Cu和Zn的限量标准。《畜禽粪便安全使 用准则》(NY/T 1334-2007)中的规定为制作肥料的 畜禽粪便重金属限值,而不是畜禽粪肥产品的限值。 在山东省地方标准(DB37/T 3591-2019)中规定畜禽 粪便堆肥产品Cu含量≤300 mg·kg⁻¹、Zn含量≤600 mg· kg⁻¹,与计算阈值结果相比较,猪粪肥的Cu含量阈值 低于该标准,其余结果均高于该标准。将阈值结果与 德国腐熟堆肥标准(Cu 100 mg·kg⁻¹、Zn 400 mg·kg⁻¹) 进行比较,在pH<6.5时,Cu的最低阈值低于德国腐熟 堆肥标准。可以看出,模拟计算的阈值中,Cu的阈值 与已有的标准相差不大,但Zn的标准却相差较远,主 要是因为叶菜对Zn的输出能力强。若要更加准确获 取粪肥重金属阈值,还需要进行更细致的研究。在本 研究的阈值计算中,进行的情景模拟设定磷肥、灌溉 水、大气沉降和叶菜每年的输入、输出量不变,同时不 同的粪肥都采用了统一的施肥量,所以计算结果与实 际情况可能有一定的偏差,但鉴于我国目前并没有完 善的畜禽粪肥Cu和Zn的安全标准,此数据可为相关 研究提供参考。

4 结论

(1)不同畜禽粪便中重金属含量差异较大,Zn的 含量均高于Cu含量,不同粪便中猪粪的污染风险 最高,家禽粪其次,牛粪和羊粪的Cu和Zn污染风险 较低。

(2)施用不同粪肥的土壤重金属 Cu和 Zn 的积累 速率与粪肥 Cu和 Zn 的含量相似,粪肥中重金属含量 越高,土壤重金属的积累速率越快,且 Zn 的积累速率 高于 Cu。

(3)从模型计算的阈值来看,粪肥污染风险与阈 值呈负相关,污染风险最高的猪粪,阈值最低,其Cu和 Zn的阈值范围分别为80.8~163.2 mg·kg⁻¹和1322.4~ 1972.8 mg·kg⁻¹。

参考文献:

- Qian Y, Song K H, Hu T, et al. Environmental status of livestock and poultry sectors in China under current transformation stage[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622/623:702-709.
- [2] 郭晓. 规模化畜禽养殖业控制外部环境成本的补贴政策研究[D]. 重庆:西南大学, 2012.

GUO Xiao. Research on subsidy policy of external environment cost

control in scale livestock and poultry breeding[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.

- [3] 王瑞,魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9):1705-1719.
 WANG Rui, WEI Yuan-song. Pollution and control of tetracyclines and heavy metals residues in animal manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9):1705-1719.
- [4] Solgi E, Esmaili-Sari A, Riyahi-Bakhtiari A, et al. Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 88(4):634–638.
- [5] Huang Y, Wang L Y, Wang W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2018, 651:3034-3042.
- [6] Nagajyoti P C, Lee K D, Sreekanth T V M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2010, 8(3):199-216.
- [7] Hou D Y, O'Connor D, Nathanail P, et al. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231:1188–1200.
- [8] 秦普丰, 刘丽, 侯红, 等. 工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属 污染及其健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7):1668-1674. QIN Pu-feng, LIU Li, HOU Hong, et al. The pollution and health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from different function areas in industrial city[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7):1668-1674.
- [9] 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.
- [10] 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 Yu-jun, et al. Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5):261-267.
- [11]Shi T R, Ma J, Wu F Y, et al. Mass balance-based inventory of heavy metals inputs to and outputs from agricultural soils in Zhejiang Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 649: 1269– 1280.
- [12] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. Science of the Total Environment, 2003, 311(1/2/3):205-219.
- [13]Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. Quantifying heavy metal inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. Water and Environment Journal, 2006, 20(2):87–95.
- [14] Bai L Y, Zeng X B, Su S M, et al. Heavy metal accumulation and

source analysis in greenhouse soils of Wuwei District, Gansu Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 22(7):5359-5369.

- [15] 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.
- [16] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕 地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):435-445. ZHU Jian-chun, ZHANG Zeng-qiang, FAN Zhi-min, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3):435-445.
- [17] 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 Wu-xia, WEN Jiong, XU Wang-long, 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.
- [18] Barry G A, Chudek P J, Best E K, et al. Estimating sludge application rates to land based on heavy metals phosphorus sorption characteristics of soil[J]. Water Research, 1995, 29(9):2031–2034.
- [19] 成杰民, 于光金, 王明聪. 土壤重金属环境容量研究[M]. 北京:科学出版社, 2017.

CHENG Jie-min, YU Guang-jin, WANG Ming-cong. Study on environmental capacity of heavy metals in soil[M]. Beijing: Science Press, 2017.

- [20] 王婷, 张倩, 杨海雪, 等. 农田土壤中 Cu 的来源分析及控制阈值研究[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(4):774-784.
 WANG Ting, ZHANG Qian, YANG Hai-xue, et al. Analysis of copper in farmland soil and threshold study for soil pollution control[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(4):774-784.
- [21] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8):2524-2530.
- [22] 袁丽金, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 设施蔬菜土壤剖面氮磷钾积累及对 地下水的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):14-19.
 YUAN Li-jin, JU Xiao-tang, ZHANG Li-juan, et al. NPK accumulation in greenhouse soil and its effect on groundwater[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):14-19.
- [23] 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.
- [24] 王瑾. 饲料添加剂在土壤和蔬菜中的迁移及残留研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2009.

WANG Jin. Study on transfer and residue of feed additives in soil and vegetables[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2009.