

## 沼液施用对土壤及农产品中重金属含量的影响

陈芬<sup>1</sup>, 陈莎莎<sup>2</sup>, 万里平<sup>1</sup>, 王乐<sup>1</sup>, 陈柳萌<sup>2\*</sup>

(1. 江西正合生态农业有限公司, 江西新余 338000; 2. 江西省农业科学院农业应用微生物研究所, 江西南昌 330200)

**摘要** 为研究沼液施用对土壤和农产品重金属累积的影响, 以水稻和皇竹草为供试材料, 在江西省不同地区设计试验, 分析沼液施用对土壤和农产品中重金属的影响。结果表明, Hg 未被检出, Zn、Cu、Cd、Cr、Pb 和 As 均被检出, 其中 Zn、Cu 含量最高, 且均未超出 NY/T 2596—2014 中相应的限量值。土壤和农产品重金属结果表明, 水稻种植土壤中, Hg 潜在风险最高, 其次是 Cd、As、Cu、Zn, 而 Cr、Pb 的潜在风险最低; 需监测沼液长期施用对土壤中 Cd、As、Cu、Zn 的累积情况; 皇竹草种植土壤中, Pb 和 Zn 的潜在风险较高, 其次是 As 和 Cd, 而 Hg、Cr 和 Cu 的潜在风险较低; 沼液中 Zn 含量较高, 需监测沼液长期施用对土壤中 Zn 的影响; 对于糙米和皇竹草, Hg 未被检出, Zn、Cu、Cd、Cr、Pb 和 As 均被检出, 其中 Zn 含量最高分别为 17.844~23.073 和 9.665~35.913 mg/kg; 其次是 Cu 分别是 2.638~3.323 和 2.816~9.392 mg/kg; Cr、As、Pb 和 Cd 的含量相对偏低; 皇竹草中重金属受沼液施用的影响, 且与土壤重金属含量存在正相关性。

**关键词** 沼液; 重金属; 土壤; 水稻; 皇竹草

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)17-0069-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.17.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Effect of Application of Biogas Slurry on Heavy Metals in Soil and Agricultural Products**CHEN Fen<sup>1</sup>, CHEN Sha-sha<sup>2</sup>, WAN Li-ping<sup>1</sup> et al (1. Jiangxi Zhenghe Ecological Agriculture Co., Ltd., Xinyu, Jiangxi 338000; 2. Institute of Applied Agricultural Microbiology, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang, Jiangxi 330200)

**Abstract** To study the impacts of biogas slurry application on the accumulation of heavy metals in soil and crops, experiments were designed in Jiangxi Province with rice and *Pennisetum sinense*, and the effects of biogas slurry on heavy metal content of soil and crops was analyzed. Hg was not detected, and Zn, Cu, Cd, Cr, Pb and As were detected in biogas, none of them exceeded the limit value of heavy metals in NY/T 2596-2014. The results of heavy metals in soil and agricultural products showed that in soil of the rice planting area, Hg had the highest potential risk, followed by Cd, As, Cu, Zn, and Cr and Pb had the lowest potential risk. Hg in the biogas slurry was not detected, therefore the application of biogas slurry had no effect on the accumulation of Hg in the soil; but should monitor the accumulation of Cd, As, Cu, and Zn in the soil; in soil of *Pennisetum sinense* planting area, the potential risks of Pb and Zn were highest, followed by As and Cd, while the potential risks of Hg, Cr and Cu were lowest; the content of Zn in G-BS was highest, requiring pay attention to the effect of long-term application of biogas slurry on Zn in soil; in rice and *Pennisetum sinense*, Hg was not detected, Zn, Cu, Cd, Cr, Pb and As was detected, and the highest content was Zn (17.844-23.073 and 9.665-35.913 mg/kg respectively); followed by Cu (2.638-3.323 and 2.816-9.392 mg/kg respectively); the content of Cr, As, Pb and Cd was lowest; heavy metals were affected by the biogas slurry, and there was a positive correlation with soil heavy metal content.

**Key words** Biogas slurry; Heavy metal; Soil; Rice; *Pennisetum sinense*

江西作为我国重要的畜禽生产基地和主要供港生猪产地, 其畜牧业产值约为农业总量的 25%, 生猪养殖占比最重, 牛、羊、禽次之。据统计, 每年粪污排放总量约 1.27 亿 t, 其中生猪粪污占比 65%, 约 0.83 亿 t, 粪污治理形势严峻。自 2016 年以来, 随着我国畜禽粪污治理整县推进政策的不断深入, 以大型沼气工程为核心的畜禽粪污第三方集中治理模式日趋广泛。而我国大型沼气工程多采用 CSTR 工艺, 其发酵原料的进料浓度 (total solid, TS) 为 6% 左右, 为此, 后续沼液的规模化处置和资源化利用正逐渐成为畜禽养殖粪污第三方集中处理的关键。

目前, 沼液的达标排放不符合资源节约利用的可持续发展战略, 这在国内外已经达成共识; 因此, 将其作为有机肥就近还田已成为最普遍的资源化利用途径。研究表明, 沼液合理施用, 可显著提升作物制种效率<sup>[1]</sup>, 增加作物产量<sup>[2-3]</sup>, 提高农产品品质<sup>[2,4-5]</sup>; 而且无论是单独施用<sup>[6]</sup> 或与化肥配施<sup>[7]</sup>, 其促生效果明显优于化肥。同时, 也有研究发现, 由于

畜禽饲养环节的不规范或过量投入的重金属<sup>[8]</sup>, 会随沼液施用进入土壤和农产品, 进而导致土壤重金属累积和农产品质量安全<sup>[9]</sup>。

目前, 沼液在农业生产中的循环利用研究多数集中在其对作物产量、病虫害防治等方面<sup>[10]</sup>, 而对于沼液回施对土壤、农产品中的重金属累积相关的研究相对偏少。为此, 笔者在江西省新余市和赣州市各选择 1 个畜禽养殖粪污第三方集中处理中心, 以其沼液规模化回施的种植地及农产品为研究对象, 分析沼液、种植地土壤与农产品中的重金属 (Cu、Zn、Cr、Cd、Hg、As、Pb) 组成特征, 探讨重金属在沼液回施过程中的潜在风险, 以期在沼液在农作物种植中安全应用提供理论依据和数据支撑。

**1 材料与方法**

**1.1 样品采集** 2 个样品采样监测点分别位于江西省赣州市和新余市畜禽养殖粪污第三方集中处理中心周边的沼液还田区域。其中, 新余采样点为沼液替代化肥的水稻种植试验区, 共计采样点 4 个; 近 3 年的水稻种植试验发现沼液作为追肥 (化肥替代为 45%~55%) 时, 稻谷产量最高; 赣州采样点为沼液回施皇竹草种植区, 该区域为 2019 年新开垦的皇竹草种植区, 采样点为该种植区内的不同地块, 共计采样点 4 个。采样点具体情况见表 1。

**基金项目** 江西省重大研发专项 (20182ABC28006); 国家农产品质量安全风险评估专性 (GJFP2019037)。**作者简介** 陈芬 (1994—), 女, 江西丰城人, 硕士, 从事农业废弃物资源化研究。\* 通信作者, 副研究员, 从事农业废弃物资源化研究。**收稿日期** 2020-12-08

表1 采样点基本情况

Table 1 Basic situation of sampling points

序号 No.	监测区域 Monitoring area	采样点信息 Sampling point information	土壤样品编号 Soil sample No.	农产品样品编号 Agricultural product sample No.	施肥情况 Fertilization condition
1	新余市渝水区罗坊镇水稻田种植区	水稻田-1	XT-CK	XR-CK	未施肥
		水稻田-2	XT-CF	XR-CF	施用化肥
		水稻田-3	XT-45	XR-45	沼液替代追肥 45%
		水稻田-4	XT-55	XR-55	沼液替代追肥 55%
2	赣州市定南县岭北镇稀土尾矿修复区的皇竹草种植地	皇竹草-1	GT-CK	GH-CK	未施肥
		皇竹草-2	GT-PZ	GH-PZ	沼液年施肥量为 300 t/hm <sup>2</sup>
		皇竹草-3	GT-PD	GH-PD	沼液年施肥量为 300 t/hm <sup>2</sup>
		皇竹草-4	GT-YT	GH-YT	沼液年施肥量为 300 t/hm <sup>2</sup>

**1.2 样品处理** 沼液样品:2组沼液样品分别为江西新余南英沼气站和赣州定南锐源沼气站经固液分离后的沼液(X-BS和G-BS)样品。

土壤样品:土壤样品采用多点采样法混匀,分别采集水稻、皇竹草种植区土壤(0~20 cm),将土壤样品剔除砾石、碎根和生物残骸后自然晾干用四分法混匀后取约20 g样品放于玛瑙研钵磨碎,并过100目尼龙筛,装入8号自封袋中,预处理后的样品于干燥器中保存待分析。

农产品样品:样品均为沼液回施种植的农作物,经烘干、粉碎后装入8号自封袋中于干燥器中保存。

**1.3 样品分析** 用土壤环境质量标准(GB15618—1995)中重金属的检测方法进行重金属含量测定;农产品重金属选用食品安全国家标准食品(GB5009.268—2016)对重金属的检测方法进行测定;沼液重金属按照沼肥(NY/T 2596—2014)进行测定。

**1.4 数据分析** 用Excel 2016、SPSS 26.0软件分别进行数据处理、图片绘制和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 沼液中重金属含量分析

对南英沼气站沼液(X-BS)

和锐源沼气站沼液(G-BS)的重金属含量进行检测,其结果见表2,除Hg元素因含量低于检测方法下限而未被检出外,其余6种重金属(Zn、Cu、Cd、Cr、Pb和As)均被检出,其中,X-BS沼液中Zn含量最高,达87.017 mg/kg;随后依次是Cu、Cr,其含量分别为23.265、9.350 mg/kg;而As、Pb和Cd的含量相对较低,分别为0.259、0.196和0.037 mg/kg;在G-BS沼液中,Zn和Cu的含量最高,分别为114.205、96.859 mg/kg;其余Cd、Pb、Cr和As的含量较低,分别为0.034、0.154、1.938和0.579 mg/kg。采用t检验对2组沼液样品中的重金属含量分析可知,沼液样品间的重金属含量存在显著差异(相关系数为0.862,显著性为0.013小于0.05),这表明地域差异对沼液重金属的组成特征及含量存在较大影响,具体需要视当地养殖规模、饲喂习惯及饲料来源而定。

对比我国《沼肥》(NY/T 2596—2014)标准可知,2组沼液样品的重金属含量均未超出标准中的重金属限量,但Cu和Zn含量相对较高。这与我国猪饲料添加剂中普遍含有Cu、Zn等重金属元素的现状有关。沼液作为猪粪厌氧发酵的剩余物,其所含Cu、Zn含量与猪粪<sup>[11]</sup>、饲料<sup>[12]</sup>中Cu、Zn含量高有直接联系。

表2 我国沼肥中重金属限量标准

Table 2 The limit standard of heavy metals in China's biogas fertilizer

沼液 Biogas slurry	铅 Pb	镉 Cd	总砷 As	铬 Cr	汞 Hg	铜 Cu	锌 Zn
X-BS	0.196±0.027	0.037±0.015	0.259±0.027	9.350±1.910	ND	23.265±0.994	87.017±1.490
G-BS	0.154±0.032	0.034±0.018	0.154±0.032	1.938±0.738	ND	96.859±44.412	114.246±14.215
《沼肥》标准限量值“Bog Fertilizer” standard limit value	≤50	≤10	≤10	≤50	≤5	—	—

注:ND表示低于检测方法的检测下限

Note:ND means lower than the lower limit of the test method

**2.2 沼液施用对土壤重金属含量的影响** 由表3可知,水稻田种植区土壤样品整体偏酸性(pH为5.23~6.03),其样品中Zn含量整体最高,为61.157~113.486 mg/kg;随后依次是Cr、Pb、Cu、As、Hg和Cd,其含量分别为53.648~82.260、20.318~32.36、16.314~25.235、11.776~16.856、0.318~0.434和0.123~0.213 mg/kg。而皇竹草种植区域为当地稀土尾矿修复区,酸性浸提采矿工艺导致尾矿区修复土壤酸化严重(pH为4.17~5.16),其样品中的Zn含量最高,为

68.131~133.545 mg/kg;随后依次是Pb、As、Cu、Cr、Hg和Cd,其含量分别为25.236~53.058、6.182~11.698、3.296~7.878、3.448~6.404、0.026~0.156和0.016~0.126 mg/kg。对比国家标准《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15168—2018)可知,在农作物种植前后,各土壤样品中重金属含量均低于标准中的农用地重金属污染风险筛选值,这表明农用地土壤的重金属污染风险低,施用沼液种植农作物暂不会引起土壤中重金属安全问题。

表 3 采样点土壤中重金属含量

Table 3 Heavy metal content in the soil at the sampling point

样品编号 Sample number	采样批次 Sampling batch	pH	Cd mg/kg	Hg mg/kg	As mg/kg	Pb mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg
X-CK	1 <sup>st</sup>	5.57	0.177	0.382	14.457	24.096	68.388	18.518	65.079
	2 <sup>nd</sup>	5.23	0.213	0.434	16.856	32.360	78.378	25.235	83.313
X-CF	1 <sup>st</sup>	5.76	0.123	0.320	13.227	21.297	55.559	16.314	61.157
	2 <sup>nd</sup>	5.77	0.172	0.341	11.776	22.531	54.337	18.169	62.871
X-44	1 <sup>st</sup>	6.02	0.149	0.318	12.674	20.318	53.648	16.704	67.763
	2 <sup>nd</sup>	5.88	0.147	0.340	13.000	22.029	54.797	18.642	65.095
X-55	1 <sup>st</sup>	6.03	0.128	0.397	14.717	22.588	82.260	18.479	68.081
	2 <sup>nd</sup>	5.87	0.189	0.345	13.788	25.855	78.744	22.502	72.086
G-CK	1 <sup>st</sup>	4.63	0.042	0.094	10.004	53.058	5.669	4.986	113.489
	2 <sup>nd</sup>	4.81	0.027	0.156	6.182	43.564	4.465	3.296	75.395
G-PZ	1 <sup>st</sup>	4.43	0.042	0.094	10.004	53.058	5.669	4.986	113.489
	2 <sup>nd</sup>	4.60	0.016	0.100	7.523	41.195	3.448	3.355	68.131
G-YT	1 <sup>st</sup>	4.53	0.038	0.088	9.690	25.236	4.716	7.380	129.542
	2 <sup>nd</sup>	4.96	0.035	0.071	6.782	28.735	4.833	6.681	133.545
G-PD	1 <sup>st</sup>	4.53	0.058	0.026	11.698	25.607	6.404	7.878	130.076
	2 <sup>nd</sup>	5.16	0.126	0.028	10.804	28.532	4.001	6.985	111.390

注:1<sup>st</sup> 为农作物种植前采样;2<sup>nd</sup> 为农作物种植后采样

Note:1<sup>st</sup> is for sampling before planting;2<sup>nd</sup> is sampled after planting of crops

采用单因素指数法对土壤样品中重金属含量做进一步分析,其结果见图 1 和图 2,在沼液施用后,土壤样品中 7 种重金属含量未超过重金属污染筛选值,但仍存在潜在风险。在水稻种植区(图 1),Hg 超出筛选值的潜在风险最高,其单因素指数为 0.636~0.868;随后是 Cd、As、Cu、Zn,其单因素指数分别为 0.308~0.710、0.393~0.562、0.326~0.505、0.306~0.417;而 Cr 和 Pb 的超标风险相对较低,单因素指数分别为 0.215~0.329 和 0.203~0.405。结合沼液(X-BS)中重金属的组成特征及含量可知,因沼液中 Hg 元素未被检出,为此,可暂不考虑沼液施用引入 Hg 的累积;但仍需继续监测 Cd、As、Cu 和 Zn 随沼液施用在土壤中的迁移情况,尤其是 Cu 和 Zn 在土壤中的累积情况需要进一步研究。在皇竹草种植区(图 2),因稀土尾矿堆放与土地平整等外部因素,不同地块间的重金属组成与含量存在一定差异;但整体上表现:Pb 和 Zn 超出风险筛选值的潜在风险相对较高,单因素指数分别为 0.361~0.758、0.341~0.668;随后是 As 和 Cd,单因素指数分别为 0.170~0.292、0.090~0.420,Hg、Cr 和 Cu 的潜在风险相对较低,单因素指数分别为 0.020~0.120、0.023~0.038 和 0.066~0.158。鉴于沼液(G-BS)中 Zn 元素含量较高的基本特点,为此,继续施用沼液,土壤中 Zn 元素超出筛选值的潜在风险较高。

### 2.3 沼液施用对农作物重金属含量的影响

**2.3.1 沼液施用对糙米重金属含量的影响。**糙米中 7 种重金属含量的检测结果见表 4。除 Hg 元素因含量低于检测方法下限而未被检出外,其余 6 种重金属(Zn、Cu、Cd、Cr、Pb 和 As)均被检出,其中,Zn 元素的含量最高,为 17.844~23.073 mg/kg;其次是 Cu,含量为 2.638~3.323 mg/kg;Cr、As、Pb 和 Cd 的含量相对偏低,依次为 0.128~0.511、0.104~0.141、0.051~0.122 和 0.045~0.086 mg/kg。参照国家标准《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)发

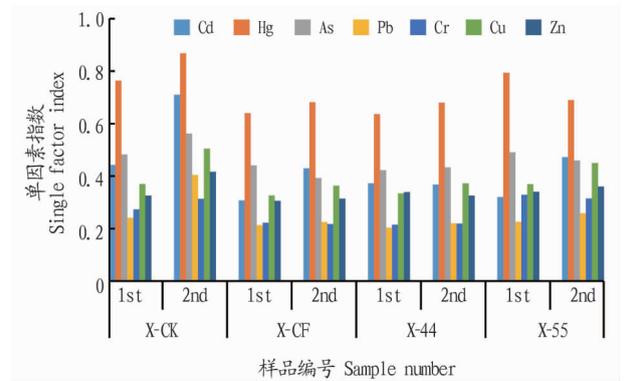


图 1 水稻种植区土壤样品重金属单因素指数分析结果

Fig. 1 Single factor index analysis results of heavy metals in soil samples from rice planting areas

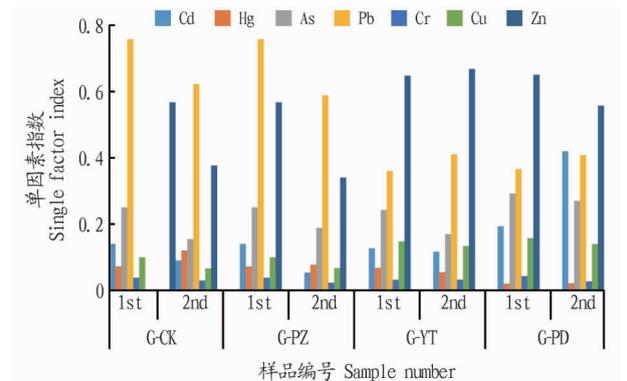


图 2 皇竹草种植区土壤样品重金属单因素指数分析结果

Fig. 2 Single factor index analysis results of heavy metals in soil samples from Pennisetum sinense planting area

现,所有糙米样品中的 Cd、Pb、Cr、As 和 Hg 5 种重金属均未超出限量值,这表明沼液回施水稻种植暂未引起重金属超标的现象发生。此外,尽管国家标准未对农产品中 Zn 和 Cu 作出限定,但糙米中高含量的 Zn、Cu 是否会随食物链传递进而

对人体产生影响有待进一步研究。

进一步对比分析不同采样点的糙米样品重金属含量可知,沼液施用对6种重金属在糙米中的累积情况存在明显差异。其中,4组样品中的总As和Cu含量无显著差异,这表明沼液回施不会引起As、Cu在糙米中的积累;Pb、Cd和Zn在4组糙米样品中的含量有差异。在沼液作为追肥替代45%的化肥时,Pb、Cd和Zn的含量显著高于XR-CK;在沼液替代55%化肥时,糙米样品中的3种重金属与XR-CK无显

著差异。这与陈佳芮等<sup>[12]</sup>通过沼液施用对土壤Cd形态及水稻吸收Cd的研究结果相似,发现随沼液施用量增加,稻米中Cd含量呈减少趋势,均小于常规化肥组Cd含量。Cr在4组样品中的含量依次为XR-55>XR-45>XR-CF>XR-CK,这表明施用沼液和化肥可促使糙米中Cr的累积,且在相同养分下随沼液占比增加呈递增趋势;该监测点所施用的沼液中Cr含量相对较高,达9.350 mg/kg,为此,在沼液施用过程中,需要密切监测Cr元素在水稻种植中的累积情况。

表4 糙米样品中的重金属限量标准

Table 4 Heavy metal limit standards in brown rice samples

mg/kg

样品编号 Sample number	铅 Pb	镉 Cd	总砷 As	铬 Cr	汞 Hg	铜 Cu	锌 Zn
XR-CK	0.051±0.008 a	0.067±0.016 b	0.104±0.016 a	0.128±0.004 a	ND	2.638±0.319 a	18.426±2.048 a
XR-CF	0.073±0.011 b	0.045±0.003 a	0.141±0.024 a	0.286±0.041 b	ND	3.323±0.365 a	23.073±0.283 b
XR-45	0.122±0.021 c	0.086±0.016 b	0.136±0.025 a	0.497±0.025 c	ND	3.187±0.286 a	22.437±1.470 b
XR-55	0.056±0.011 ab	0.046±0.004 a	0.108±0.015 a	0.511±0.101 c	ND	2.945±0.156 a	17.844±1.587 a
重金属限量值* Heavy metal limit value*	0.2	0.2	0.2**	1	0.02	—	—

注:同列不同小写字母表示不同样品间差异显著( $P<0.05$ )。ND表示低于检测方法的检测下限。“\*”表示重金属限量参照国家标准《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中的“谷物及其制品”。“\*\*”表示该值为无机砷限量值,对于制定无机砷限量的食品可先测定其总砷,当总砷水平不超过无机砷限量值时,不必测定无机砷;否则,需再测定无机砷

Note: Different lowercases in the same column indicated significant difference between different samples at 0.05 level. ND meant lower than the lower limit of the test method. “\*” meant that the heavy metal limit referred to the “grain and its products” in the national standard “Contaminant Limits in Food of the National Standard for Food Safety”(GB 2762—2017). “\*\*” indicated that this value was the limit value of inorganic arsenic. For the food with the limit value of inorganic arsenic, the total arsenic could be measured first. When the total arsenic level did not exceed the limit value of inorganic arsenic, the inorganic arsenic did not need to be measured. Otherwise, inorganic arsenic should be remeasured

2.3.2 沼液施用对皇竹草重金属含量的影响。皇竹草中7种重金属的含量检测结果见表5。除Hg元素因含量低于检测方法下限而未被检出外,其余6种重金属(Zn、Cu、Cd、Cr、Pb和As)均被检出,其中,Zn元素含量最高,为9.665~35.913 mg/kg;其次是Cu,含量为2.816~9.392 mg/kg;Pb、Cr、As和Cd的含量相对偏低,依次为0.668~3.080、1.206~

1.860、0.102~0.141和0.028~0.039 mg/kg。参照国家标准《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)中的“饲料原料”标准发现,所有皇竹草样品中的Cd、Pb、Cr、As和Hg 5种重金属均未超出限量值,这表明沼液回施皇竹草暂未引起重金属超标的情况发生。

表5 皇竹草样品中的重金属限量标准

Table 5 The limit standard of heavy metals in the samples of *Pennisetum sinense*

mg/kg

样品编号 Sample number	铅 Pb	镉 Cd	总砷 As	铬 Cr	汞 Hg	铜 Cu	锌 Zn
GH-CK	1.929±0.077 c	0.033±0.001 a	0.126±0.015 c	1.206±0.113 a	ND	2.816±0.114 a	9.665±0.957 a
GH-PZ	3.080±0.138 d	0.028±0.002 a	0.102±0.001 a	1.860±0.057 b	ND	4.252±0.326 b	28.737±1.141 b
GH-YT	0.668±0.040 b	0.027±0.008 a	0.141±0.089 c	1.860±0.238 b	ND	9.392±1.822 c	35.913±8.314 b
GH-PD	0.135±0.034 a	0.039±0.014 a	0.116±0.001 b	1.268±0.072 a	ND	6.719±1.808 c	30.327±0.484 b
重金属限量值* Heavy metal limit value*	30	1	2	5	0.1	—	—

注:同列不同小写字母表示不同样品间差异显著( $P<0.05$ )。ND表示低于检测方法的检测下限。“\*”表示重金属限量参照国家标准《饲料卫生标准》(GB13078—2017)中的“饲料-饲料原料”

Note: Different lowercases in the same column indicated significant difference between different samples at 0.05 level. ND meant lower than the lower limit of the test method. “\*” referred to the “feed-feed raw material” in the national standard “Feed Health Standard”(GB13078—2017) for the limit of heavy metals

进一步分析皇竹草中6种重金属检测数据可知,皇竹草中重金属的组成及含量不仅与沼液施用存在关联,而且与各种植区的重金属本底值关系密切。其中,3个不同地块产出的样品中Zn、Cu含量明显高于未施肥区域(GH-CK),这表明沼液能对皇竹草富集Zn和Cu的能力有明显的强化作用;而Pb、Cd、As和Cr 4种重金属在沼液施用区域中的变化缺乏规律性。为此,以皇竹草重金属含量为纵坐标,土壤样品(农作物种植前)重金属为横坐标,对4个不同地块的土壤与

皇竹草重金属数据进行相关性分析,其结果见图3。由图3可知,皇竹草样品中重金属含量与其所在土壤中的重金属含量呈正相关性,且4组数据的相关性较高( $R^2$ 均大于0.8),这表明皇竹草的重金属富集效果与其所在种植地区的重金属本底情况关系密切。

### 3 结论

该研究所用沼液取自畜禽养殖粪污第三方集中处理中心的沼气工程,重金属检测结果表明,除Hg未被检出外,Zn、

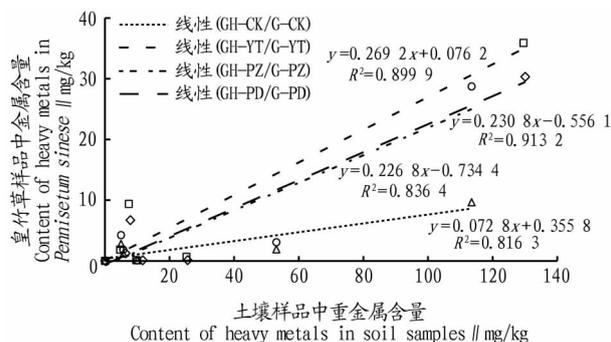


图3 不同地块皇竹草样品与土壤样品(农作物种植前)中的重金属相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of heavy metals in *Pennisetum sinese* samples from different plots and soil samples (before crops are planted)

Cu、Cd、Cr、Pb 和 As 均被检出,其中又以 Zn、Cu 的含量最高,但未超出 NY/T 2596—2014 对沼液肥重金属的限量值,故具备沼液安全还田的基本条件。 $t$  检验分析发现,沼液样品间的重金属组成及含量存在显著差异,这表明不同地域对重金属的组成特征存在较大影响,具体视当地养殖规模、饲喂习惯及饲料来源而定。

沼液还田土壤及农产品的重金属检测结果表明,沼液回施暂未引起土壤及农产品重金属超过国家标准规定的限量值,但由于监测区内土壤偏酸性,利于土壤重金属的迁移及在农作物中的富集,故长期施用沼液仍存在一定的潜在风险。

在新余市渝水区罗坊镇的水稻种植区,Hg 超出土壤重金属污染风险筛选值的潜在风险最高,随后是 Cd、As、Cu、Zn,而 Cr、Pb 的潜在风险最低;综合沼液(X-BS)重金属组成特征分析发现,由于沼液中 Hg 未被检出,为此,可暂不考虑沼液施用造成土壤 Hg 的累积;但需要监测 Cd、As、Cu、Zn 随沼液施用在土壤中的累积情况,尤其是 Cu、Zn 等沼液中高含量的重金属。对于该区域产生的农产品(糙米),除 Hg 未被检出外,其余 Zn、Cu、Cd、Cr、Pb 和 As 均被检出,其中, Zn 含量最高,为 17.844~23.073 mg/kg;其次是 Cu,其含量

为 2.638~3.323 mg/kg;Cr、As、Pb 和 Cd 的含量相对偏低。此外,尽管国家标准未对农产品中 Zn、Cu 作出限定,但糙米中高含量的 Zn、Cu 是否会对人体产生影响有待进一步研究。

在赣州市定南县皇竹草种植区,受稀土尾矿堆放与土地平整等因素的影响,不同地块间的重金属组成特征存在一定差异;但整体上,Pb 和 Zn 超出土壤重金属污染风险筛选值的潜在风险相对较高,随后是 As 和 Cd,而 Hg、Cr 和 Cu 的潜在风险相对较低。考虑到沼液(G-BS)中 Zn 元素含量较高的基本特点,为此,长期施用沼液需要密切关注土壤 Zn 元素的变化情况。对于该区域种植的皇竹草,除 Hg 未被检出外,其余 Zn、Cu、Cd、Cr、Pb 和 As 均被检出,其中,Zn 含量最高(9.665~35.913 mg/kg),其次是 Cu(2.816~9.392 mg/kg),Pb、Cr、As 和 Cd 的含量相对偏低。此外,皇竹草中重金属的组成特征不仅受沼液施用的影响,而且与其种植区的重金属本底值存在较高的正相关性。

### 参考文献

- [1] 鲁天文,王勤礼,许耀照,等.沼液追肥对制种玉米产量与土壤化学性质的影响[J].中国沼气,2015,33(2):81-83.
- [2] 陈志龙,陈广银,李敬宜.沼液在我国农业生产中的应用研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(8):1-6.
- [3] 李建伟,李可富,李小龙,等.微喷带系统自动施沼液对西兰花产量和品质的影响[J].浙江农业科学,2016,57(11):1881-1884.
- [4] 谿泽春,张志芳,韩春叶,等.不同沼液与硼肥配合喷施对西瓜产量及品质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(11):100-103.
- [5] 孟清波,张谨薇,马万成,等.沼渣沼液肥对辣椒生长发育·果实品质及产量的影响[J].安徽农业科学,2020,48(23):190-193.
- [6] 李然,余雪标,高刘,等.灌溉畜禽粪便沼液肥对辣椒光合作用及产量的影响[J].热带生物学报,2017,8(1):37-41.
- [7] 隋好林,陈晓峰,秦娜,等.沼液滴灌对番茄产量、品质和土壤理化性状的影响[J].山东农业科学,2016,48(2):80-84.
- [8] 张辉,李文凤,赵盈盈,等.猪饲料中重金属对猪粪有机肥的影响[J].浙江农业科学,2018,59(11):2120-2122.
- [9] 宋三多,刘汉军,刘秩豪,等.沼液施用对成都平原稻麦轮作土壤及作物养分和重金属含量的影响[J].生态科学,2018,37(1):35-41.
- [10] 肖洋,田里,路运才,等.沼液和沼渣及化肥肥施对土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2016,32(11):78-81.
- [11] 沈丰菊,韩建华,赵润,等.猪粪中重金属元素含量及其变化特征分析[J].农业资源与环境学报,2021,38(3):466-474.
- [12] 陈佳芮,杨刚,石庆怡,等.沼液施用对土壤 Cd 形态及水稻吸收 Cd 的影响[J].中国沼气,2018,36(6):45-50.

(上接第 54 页)

- [10] 周兴本,郭修武.套袋对红地球葡萄果实色素形成及 PPO 和 PAL 活性的影响[J].中外葡萄与葡萄酒,2006(6):8-12.
- [11] CARREÑO J, MARTÍNEZ A, ALMELA L, et al. Measuring the color of table grapes[J]. Color research and application, 1996, 21(1): 50-54.
- [12] 程建徽,雷鸣,杨夫臣,等.欧亚种葡萄花色素苷的积累及 *UFGT* 基因的 RT-PCR 表达分析[J].果树学报,2009,26(6):808-812.
- [13] 王进.平衡施肥对设施葡萄生长及结果影响研究[D].雅安:四川大学,2013.
- [14] 黄明,廖云,钟厚,等.防草布在赣南脐橙水肥一体化中的应用[J].基层农技推广,2019,7(5):94-95.
- [15] 郑丽,徐绳武,夏文娟,等.苜蓿地膜覆盖防草的效果及对柑桔容器苗

- 生长的影响[J].中国南方果树,2019,48(2):15-17.
- [16] 程大伟,何莎莎,李明,等.不同花穗整形方式对‘郑艳无核’葡萄果实品质的影响[J].中国果树,2020(4):18-22.
- [17] 官磊,王珊,苏玲,陈迎春,等.不同花穗整形方式对红宝石无核葡萄果实品质的影响[J].安徽农业科学,2020,48(16):60-61,136.
- [18] 和雅妮,奚晓军,查倩,等.结果枝留叶量对‘巨玫瑰’葡萄果实品质的影响[J].中外葡萄与葡萄酒,2020(5):18-21.
- [19] 黄小云,陆娟,成果,等.根域限制下一年两收夏黑葡萄冬果结果枝生长势对果实品质的影响[J].中国南方果树,2020,49(5):99-102.
- [20] 沈甜,黄小晶,牛锐敏,等.不同灌水量对贺兰山东麓葡萄生长和品质的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(10):65-74.
- [21] 董灵江,吴韶辉,赖齐贤,等.不同反光膜对大棚巨峰葡萄果实品质的影响[J].浙江农业科学,2020,61(7):1282-1285.