植物营养与肥料学报 2014,20(6):1517-1524
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0622

沼液灌溉中的重金属潜在风险评估

刘思辰[1], 王莉玮[2], 李希希[1], 陈玉成[1*], 付茂梅[3]
(1 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学资源环境学院, 重庆 400716;
2 重庆市农业环境监测站,重庆 401121; 3 四川省宜宾市辐射环境监测站, 四川宜宾 644000)

摘要:【目的】沼液含有丰富养分元素和生理活性物质,沼液灌溉不仅能消纳沼液,同时也可促进植物生长。但是在经济利益的驱使下,某些重金属元素由于人为的添加,不可避免地通过饲料—畜禽—粪便途径进入沼气发酵池,导致用沼液灌溉后土壤中重金属含量的超标。本文通过对不同沼气发酵规模和不同地区的沼液中重金属元素含量的分析,并对其污染风险进行评估,探索沼液灌溉的风险等级,以期为选择灌溉前对沼液的处理方法提供依据。**【方法】**采用文献调研与样品分析,对比分析全国部分地区户用沼气池沼液和沼气工程沼液中的重金属元素含量,收集和监测了全国部分地区户用沼气池和沼气工程近100个沼液样品的重金属含量数据,其中镉(Cd)、铬(Cr)和铅(Pb)采用原子吸收分光光度法,砷(As)采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法,汞(Hg)采用冷原子吸收光谱法测定。采用不同风险表征指数(算术均值指数、几何均值指数、Nemerrow指数、单位向量指数)评估重金属的风险等级。**【结果】**1)搜集的户用沼液和沼气工程沼液中重金属数据均不符合正态分布,户用沼液中As、Cd、Cr、Hg和Pb含量的中位值分别为0.312、0.0195、0.183、0.025和0.330 mg/L,沼气工程沼液分别为0.110、0.009、0.218、0.004和0.131 mg/L。除As外,后者平均含量明显高于前者。户用沼液中Cd、Hg属高强度变异,As、Cr和Pb属中度变异,而工程沼液中各重金属变异系数均属高强度变异。2)不同原料沼液重金属含量差异较大,其中猪场沼液重金属含量均高于牛场,风险相对较大。3)采用综合风险指数评价,户用沼液中Pb、As的单位向量指数评价,属于低风险,其余重金属的各指标均小于0.2,无风险。工程沼液中Hg的算术均值指数、几何均值指数、Nemerrow指数、单位向量指数均最高,按Nemerrow指数计算,工程沼液中Hg属较高风险,按均值指数和单位向量指数计算,Hg属于低风险等级。Cd的Nemerrow指数评价,属低风险,其余重金属的综合风险指数虽然随计算方法不同而变化,但其风险等级一致,均属于无风险。4)调查地区中,河南、安徽的工程沼液中重金属的Nemerrow风险指数最大,属于较高风险,因此其沼液除了必要的物理处理外,还需利用化学方法进行处理,降低风险后才可进行灌溉;其次湖南、浙江,属于低风险,这些地区沼液只需物理处理和简单化学处理后便可灌溉;其余地区Nemerrow风险指数评价,属于无风险等级。此外,内蒙古、辽宁、福建、四川和重庆5个地区的户用沼液中重金属的Nemerrow风险指数均低于0.2,属于无风险状态,只需经过简单的物理处理便可直接进行灌溉。**【结论】**统计分析表明,沼液灌溉存在一定风险,主要发酵原料对沼液中重金属含量的影响较大,地域对沼液灌溉风险虽有一定影响,但南方片区与北方片区工程沼液重金属风险等级并没有显著性差异。户用沼气池沼液和沼气工程沼液中,含量相对较低的Hg、Cd风险反而较大,建议在灌溉前通过化学方法予以去除。

关键词: 沼液; 重金属; 风险分析
中图分类号: X53; S141.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)06-1517-08

Potential risk assessment of heavy metal in biogas slurry irrigation

LIU Si-chen[1], WANG Li-wei[2], LI Xi-xi[1], CHEN Yu-cheng[1*], FU Mao-mei[3]
(*1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education/College of Resources & Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2 Chongqing Station of Agricultural Environment Monitoring, Chongqing 401121, China; 3 Yibin Radiation Environment Monitoring Station, Yibin, Sichuan 644000, China*)

Abstract:【Objectives】The biogas slurry contains abundant nutrients and physiological activators. Irrigation with biogas slurry is a cost-effective and environmental friendly way for biogas slurry disposing. However, there is always

收稿日期: 2013-11-09 **接受日期:** 2014-02-15
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2010BAD03B03);重庆市环境保护科技项目(2011-08);科技部公益专项(2005DIB3J030)资助。
作者简介: 刘思辰(1989—),女,重庆南岸人,硕士研究生,主要从事水污染控制方面的研究。E-mail: 247102770@qq.com
* 通信作者 E-mail: chenyucheng@swu.edu.cn

concern about the residual heavy metals brought through forage or animal feces, the contents of which sometimes exceed the up limit of standards. The risk of biogas slurry for irrigation is assessed to provide the basis for the selection of proper treatment methods. 【**Methods**】 One hundred samples of biogas slurry, from household marsh gas tank and biogas engineering in northern and southern parts of China were selected, the contents of total Cd, Cr and Pb are determined by atomic absorption spectrometry, Hg by cold atomic absorption spectrometry. The risk degree of heavy metal from different source of biogas slurry is evaluated using Geometric mean index, Nemerrow index and the unit vector index. 【**Results**】 1) The heavy metal contents from both of household marsh gas tanks and biogas engineerings are not conforming the normal distribution. The mid-value contents of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb and Zn from household biogas slurry are 0.312, 0.0195, 0.183, 0.75, 0.025, 0.33 and 1.15 mg/L, respectively; from engineering biogas slurry are 0.110, 0.009, 0.218, 0.985, 0.004, 0.131 and 0.857 mg/L, respectively The average contents of the latter are higher than the former, except for As. In household biogas slurry, the Cd and Hg contents are varied strongly, As, Cr and Pb contents are less strong. All of heavy metal contents in the engineering biogas slurry are varied strongly. 2) The contents of heavy metals in the biogas slurry from different sources are different. The heavy metal contents from piggery are generally higher than from cattle farms, showing higher risk. 3) Evaluated by comprehensive risk index, the unit vector index of Pb and As in household biogas slurry is low in risk potential, and other ones are less than 0.2, indicating no risk. The Arithmetic Average Index, the Geometric Mean Index, Nemerrow Index and the Unit Vector Index of Hg in engineering biogas slurry are the highest. The content of Hg in engineering biogas slurry assessed by the Nemerrow Index is high in risk potential, however, it is low while assessed with the Arithmetic Average Index and the Unit Vector Index. The content of Cd in engineering biogas slurry assessed by the Nemerrow Index is low in risk. All the risk index values of other heavy metals are different when assessed with different methods, they are all in low degree of risk. 4) The risk of the biogas slurry among the investigated provinces is different for irrigation. The Nemerrow Index from Henan and Anhui Provinces is the highest (high risk), suggesting that physical and chemistry treatments are needed before the biogas slurry is used for irrigation. Those from Zhejiang and Hunan Provinces are low in risk, and from other provinces have no risk. In addition, the Nemerrow Indexes of the household biogas slurry form Inner Mongolia, Liaoning, Fujian, Sichuan Provinces are lower than 0.2, means only simple physical methods are needed before the biogas slurry irrigation. 【**Conclusions**】 The heavy metal contents in the biogas slurry are mainly influenced by the sources of the raw materials. Although there are some differences in the risks of heavy metal among different areas, the difference between the northern and the southern China is not existed in the engineering biogas slurry. The Hg and Cd contents in the biogas slurry are low in concentration but still higher in risk, suggesting that they should be removed before application.

Key words: biogas slurry; heavy metal; risk assessment

沼液是有机废弃物厌氧发酵产生沼气后的副产物,含有植物所需要的养分元素和多种生理活性物质[1],具有速效、营养、抑菌、刺激、抗逆等功效[2-5]。但受经济利益的驱使,某些重金属元素通过人为添加的形式,不可避免地通过饲料—畜禽—粪便途径进入沼气发酵池,可能导致沼液灌溉后土壤中重金属元素的超标。因此,沼液作为肥料进行灌溉,具有一定程度的重金属污染风险[6]。在户用沼气与沼气工程蓬勃发展的今天,沼液灌溉是一种消纳沼液的最主要方式,但到底沼液中重金属含量如何?其风险又应如何表征?目前尚无实质性的报道。为此,本文拟通过文献调研与样品采集,对比分析全国部分地区户用沼气池沼液(以下简称"户用沼液")和沼气工程沼液(以下简称"工程沼液")中的重金属元素含量,并采用不同风险表征指数对重金属污染的风险进行评估,以期为安全利用沼液灌溉、最大限度地降低重金属污染风险提供科学依据。

1 研究方法

1.1 信息获取

1.1.1 文献调研 从1995～2013年国内公开发表的文献中,收集全国部分地区户用和工程沼液中重

金属元素的原始数据。共获得有效样本91个,分布地区为吉林、辽宁[7]、黑龙江[8]、重庆[9-10]、江苏[11-12]、北京[13-17]、四川[18-20]、福建[21-24]、浙江[25-30]、山西[31]、陕西、宁夏、河北、河南、安徽[32]、湖南、广西、海南、山东、云南、内蒙古[33],其中66个工程沼液样本,25个户用沼液样本。

1.1.2 采样分析　在重庆市采集24个户用沼液样品(分别采自重庆沙坪坝区、合川区、涪陵区)和13个工程沼液样品(采自重庆某奶牛场),从国家标准物质中心购买标准样品,测定重金属元素砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)和铅(Pb)的含量,其中Cd、Cr和Pb采用原子吸收分光光度法,As采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法,Hg采用冷原子吸收光谱法。

1.2　风险评价方法

1.2.1 评价标准　沼液灌溉的重金属风险评价标准采用沼肥施用技术规范(NY/T2065-2011),其中As、Cd、Cr、Hg和Pb限值分别为70、3、300、5和100 mg/L。风险分级参照基于污染指数(P)的安全分级标准[34],并予以适当调整(表1)。

表1　沼液灌溉重金属的潜在风险分级及其风险对策

Table 1　The potential risk classification standard of the heavy metal in biogas slurry irrigation

潜在风险指数 Potential risk index	$P\leqslant0.2$	$0.2<P\leqslant0.5$	$0.5<P\leqslant1$	$1<P\leqslant3$	$P>3$
风险等级 Risk degree	无风险 No risk	低风险 Low risk	较高风险 Higher risk	高风险 High risk	极高风险 The highest risk
处理对策 Countermeasures	简单物理处理 Simple physical treatment	物理、简单化学处理 Physical and simple chemical treatment	物理、化学处理 Physical and chemical treatment	物理、化学、简单生物处理 Physical, chemical and simple biological treatment	物理、化学和生物综合处理 Physical, chemical and biological treatment
利用对策 Use strategy	适量施用 Adequate use	控制施用 Control use	限制施用 Limit use	禁止施用 Prohibit use	严禁施用 No use

1.2.2 评价方法　采用综合风险指数法,表征户用沼液和工程沼液中重金属的绝对风险。

首先确定单项风险指数 P_i:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中:C_i 为第 i 重金属的实测值;S_i 为第 i 重金属的标准值。

然后按照不同方法,计算算术均值风险指数(PI_1)、几何均值风险指数(PI_2)、Nemerrow风险指数(PI_3)、单位向量风险指数(PI_4):

$$PI_1(i) = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} P_i = \frac{1}{m}PI_1(i) \tag{2}$$

$$PI_2(i) = \sqrt{P_{i\max} \times P_{i\,ave}} \tag{3}$$

$$PI_3(i) = \sqrt{\frac{P_{i\,max}^2 + P_{i\,ave}^2}{2}} \tag{4}$$

$$PI_4(i) = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(P_i)^2} \tag{5}$$

2　结果与讨论

2.1　不同沼液中重金属赋存量的差异分析

考虑到篇幅,略去沼液中重金属含量的原始数据,仅列出其基本统计参数(表2)。从表2可以看出,我国户用沼液中As、Cd、Cr、Hg和Pb的平均含量分别为0.286、0.028、0.187、0.049和0.424 mg/L,中位值分别为0.312、0.0195、0.183、0.025和0.330 mg/L;工程沼液平均含量分别为0.278、0.200、1.576、0.301和0.883 mg/L;中位值分别为0.110、0.009、0.218、0.004和0.131 mg/L。

随着我国规模化畜禽养殖业的发展,养殖业主为了改善猪、牛的生长性能大量使用了含有重金属的添加剂,而大部分重金属元素会直接通过猪、牛体内排出,高剂量的添加剂可导致畜禽粪污中重金属元素含量的提高[35],因此工程沼气重金属平均含量均大于户用沼液。一般地,变异系数大于100%属于高强度变异,介于10%～100%之间的属于中等变异,小于10%的属于弱变异,因此,我国户用沼液中Cd、Hg属高强度变异,As、Cr和Pb属中度变异,而工程沼液中各重金属变异系数均属高强度变异。

表2 沼液重金属含量的描述性统计

Table 2 The statistics parameters of heavy metal in biogas slurry

沼液 Biogas slurry	元素 Element	样本数 Sample (No.)	最小值 Min. (mg/L)	最大值 Max. (mg/L)	中位值 Median (mg/L)	平均值 Average (mg/L)	标准差 *SD* (mg/L)	变异系数 *CV* (%)	偏度系数 Skewness	峰态系数 Kurtosis
户用沼液 Household biogas slurry	As	36	0.0230	0.843	0.3120	0.286	0.17	60	0.69	1.71
	Cd	36	0.0001	0.105	0.0195	0.028	0.03	101	0.93	0.17
	Cr	34	0.0102	0.680	0.183	0.187	0.13	70	1.58	5.00
	Hg	35	0.0003	0.152	0.025	0.049	0.05	106	0.66	-1.17
	Pb	34	0.0017	1.060	0.330	0.424	0.36	86	0.34	-1.45
工程沼液 Engineering biogas slurry	As	51	0.0008	3.820	0.110	0.278	0.56	201	5.35	33.46
	Cd	48	0.0001	7.510	0.009	0.200	1.09	544	6.76	46.34
	Cr	47	0.0010	21.210	0.218	1.576	4.16	264	3.79	14.04
	Hg	41	0.00004	4.177	0.004	0.301	0.95	316	3.34	10.32
	Pb	56	0.0006	24.100	0.131	0.883	3.44	390	6.10	39.78

从分布形态来看,经过偏度系数与峰态系数的联合检验,所有重金属元素的含量不符合正态分布。就偏度而言,两类沼液中重金属均属于右偏(正值),即向右侧拖尾,数据主要分布在低值范围内。就峰态而言,户用沼液中Cr与工程沼液中重金属属于尖峰态,数据分布域较窄。户用沼液中As、Cd、Hg和Pb属于缓峰态,数据分布域较宽。因此可以看出,户用沼液与工程沼液中重金属的含量以及分布都有较大的差异。

按照发酵原料将数据整理后可以看出,全国大部分地区沼气发酵原料多采用猪粪尿和牛粪尿。牛场沼液中各重金属含量为Pb > As > Cr > Cd > Hg,猪场沼液为Cr > Cd > Pb > As > Hg,猪场沼液中重金属含量均大于牛场沼液(表3),且两种原料沼液中重金属均属于强变异。猪场在养殖过程中饲料中加入了许多添加剂,增加了猪粪尿的重金属含量,而

表3 不同原料沼液重金属含量的描述性统计

Table 3 The statistics parameters of heavy metal in biogas slurry from different raw material

原料 Raw material	元素 Element	样本数 Sample (No.)	最小值 Min. (mg/L)	最大值 Max. (mg/L)	中位值 Median (mg/L)	平均值 Average (mg/L)	标准差 *SD* (mg/L)	变异系数 *CV* (%)	偏度系数 Skewness	峰态系数 Kurtosis
牛场 Herads	As	17	0.00081	0.401	0.033	0.066	0.095	144	3.01	10.21
	Cd	17	0.000081	0.053	0.00812	0.011	0.013	122	2.23	5.94
	Cr	14	0.001	0.269	0.0133	0.046	0.080	172	2.30	4.67
	Hg	15	0.00005	0.112	0.00042	0.009	0.029	322	3.84	14.81
	Pb	17	0.016	0.356	0.028	0.085	0.098	115	1.60	2.32
猪场 Piggery	As	10	0.018	3.82	0.035	0.465	1.189	256	3.07	9.52
	Cd	12	0.000095	7.51	0.0175	0.687	2.155	314	3.43	11.83
	Cr	10	0.0025	15.32	0.1485	2.047	4.736	231	2.99	9.17
	Hg	6	0.00015	0.032	0.00071	0.010	0.014	149	1.10	-1.09
	Pb	12	0.0053	9.54	0.0505	0.993	2.726	274	3.32	11.20

牛场饲料添加剂加入量较少，因而导致猪场沼液中重金属含量均大于牛场沼液。

就偏度而言，两种原料的沼液中重金属均属于右偏，即数据分布在低值范围。就峰态而言，牛场沼液 Pb，猪场沼液 Hg 属于缓峰态，其余重金属均属于尖峰态。不同原料沼液中重金属元素的含量差异较大。

2.2　沼液灌溉的重金属风险评价

由于所有重金属元素的含量不符合正态分布，地区之间差异较大，因此选用户用和工程沼液中重金属的中位值作为监测值，代替公式(1)～(3)中的平均含量。

分别计算 5 个地区户用沼液和 20 个地区工程沼液中重金属的 Nemerrow 风险指数(图 1)。参考分级标准表 1，看出河南和安徽的工程沼液中重金属的 Nemerrow 风险指数最大，为 0.603 和 0.511，属于较高风险，意味着这些地区的沼液除进行物理处理外，还要利用化学方法进行处理，降低风险后才可进行灌溉；其次湖南、浙江为 0.328、0.208，属于低风险，只需物理处理和简单化学处理后便可灌溉；其余地区 Nemerrow 风险指数均小于 0.2，属于无风险等级。此外，内蒙古、辽宁、福建、四川和重庆 5 个地区的户用沼液中重金属的 Nemerrow 风险指数均低于 0.2，属无风险。风险指数低于 0.2 的地区只需经过简单的物理处理便可直接进行灌溉。

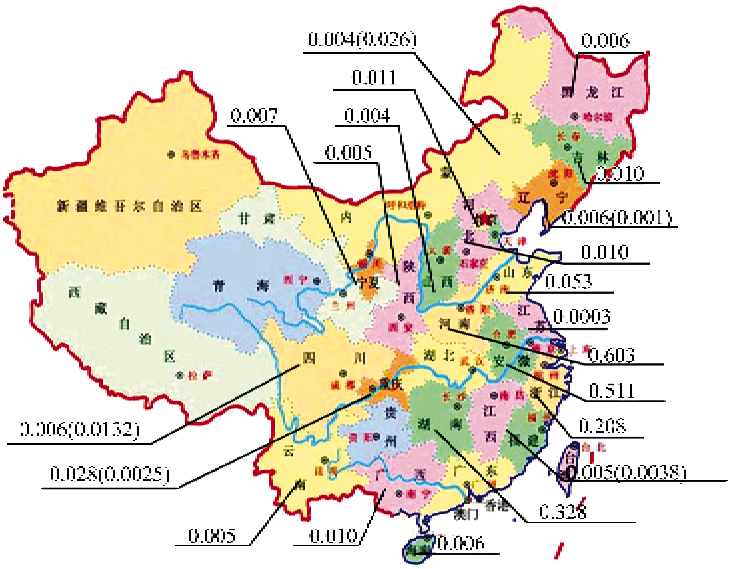

图 1　不同地区的 Nemerrow 指数

Fig. 1　The Nemerrow index in different district

[注(Note)：图中括号外、括号内分别为工程沼液、户用沼液的 Nemerrow 指数

The outer and inner data of the brackets is the Nemerrow of engineering biogas slurry and household biogas slurry, respectively.]

通过比较北方 11 个地区和南方 10 个地区沼液中重金属的 Nemerrow 风险指数，可以看出，北方片区仅河南的沼液具有风险，而南方片区安徽、浙江和湖南的沼液均具风险，假设南北片区沼液的风险程度无差异，通过 t 检验显著性比较，t 检验(北方、南方为 2、2) = 0.567 > 0.05，接受原假设，即南方片区与北方片区沼液在风险程度上没有较大的差异。

对不同发酵原料的工程沼液重金属含量用 Nemerrow 指数评估(表 4)，由于猪场沼液中各种重金属元素含量均高于牛场沼液，猪场沼液中各重金属的风险也均高于牛场，通过 t 检验表明，t 检验(牛场、猪场为 2、2) = 0.023 < 0.05，因此猪场沼液风险与牛场沼液有明显差异，即猪场沼液风险比牛场大，因而可以看出沼液中重金属的风险受原料的影响很大。减少原料中重金属的添加可以减低沼液灌溉的风险。

采用综合风险指数评价，户用沼液中 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 在用不同的评价指数描述时，Pb、As 的单位向量指数(PI_4)为 0.454、0.214，属于低风险，其余重金属元素的各指标均小于 0.2，无风险。工程沼液中 Hg 的算术均值指数(PI_1)、几何均值指数(PI_2)、Nemerrow 指数(PI_3)、单位向量指数(PI_4)

表4 不同原料工程沼液重金属的 Nemerrow 风险指数

Table 4 The Nemerrow risk index in biogas slurry from different raw material

原料 Raw material	As	Cd	Cr	Hg	Pb
牛场 Herads	0.019	0.004	0.009	0.001	0.021
猪场 Piggery	2.74	5.34	10.83	0.073	6.78

均最高,分别为0.125、0.323、0.597和0.289(表5),可以看出,按 Nemerrow 指数(PI_3)计算,工程沼液中 Hg 属较高风险,若以均值指数(PI_2)和单位向量指数(PI_4)计算,Hg 则属于低风险等级。Cd 的 Nemerrow 指数(PI_3)为0.202,属低风险,其余重金属元素的综合风险指数虽然随计算方法不同而变化,但其风险等级一致,均属于无风险。

表5 沼液中不同重金属的潜在风险指数

Table 5 The risk index of different heavy metals in biogas slurry

沼液 Biogas slurry	重金属 Heavy metal	PI_1	PI_2	PI_3	PI_4
户用沼液 Household biogas slurry	As	0.002	0.004	0.004	0.214
	Cd	0.010	0.019	0.026	0.050
	Cr	0.001	0.001	0.001	0.192
	Hg	0.005	0.009	0.012	0.043
	Pb	0.004	0.005	0.005	0.454
工程沼液 Engineering biogas slurry	As	0.005	0.008	0.010	0.006
	Cd	0.031	0.094	0.202	0.080
	Cr	0.006	0.021	0.050	0.016
	Hg	0.125	0.323	0.597	0.289
	Pb	0.005	0.012	0.021	0.010

由于沼肥施用技术规范(NY/T2065-2011)中对于 Hg、Cd 的要求均较高,因此 Hg、Cd 在沼液中含量虽不大,但其作为肥料施用时的风险较高。因此对于 As、Cr 只需简单物理处理,但对于沼液中的 Hg、Cd 和 Pb 则需进行物理化学的综合处理。

综合风险指数一般因方法不同而在数值上存在差异,造成这几种评价方法的评价结论之间存在差异的主要原因是其定义和侧重点的不同,Nemerrow 风险指数法不仅考虑到影响参数的平均状况,还特别强调了其最大值的影响,在 Nemerow 指数中,P_{imax} 与 P_{iave} 对指数的重要性被认为是同等的,即 P_{imax} 的影响没有很好地突出,为此我国学者姚志麒建议 P_{imax} 与 P_{iave} 进行几何平均。总体来说,Nemerow 指数对于沼液作为肥料施用的风险等级评价的效果较好,比较能代表真实情况。

综合上述几种方法,无论户用沼液还是工程沼液作为肥料灌溉,Hg 的绝对风险都最大,其次是 Cd,造成此现象的原因是所引用的标准对这两种重金属要求较高。几个统计地区中,河南、安徽和湖南的工程沼液属于较高风险,浙江的风险较低。其他地区的户用和工程沼液虽均属于无风险,但在施用前,均应根据当地土壤状况,经过适当处理后再作为肥料施用到土壤中。

3 结论

1)全国大部分地区,沼气工程沼液和户用沼液中重金属元素含量的数据均不符合正态分布。沼气工程沼液中除 As 外,Cd、Cr、Hg 和 Pb 的平均含量均大于户用沼液,且重金属含量的变异程度也均大于户用沼液。

2)沼气发酵原料对沼液中重金属含量的影响较大,不同原料沼气发酵的沼液其重金属元素含量存在显著性差异,猪场沼液中 As、Cd、Cr、Hg、Pb 重金属元素含量均大于牛场沼液,且风险也较高。

3)采用综合风险指数进行评价,户用沼液中 Pb、As 的单位向量指数评价结果属于低风险,其余重金属的各指标均无风险。工程沼液中 Hg 的各种指数评价结果其风险均最高,按 Nemerrow 指数计算,工程沼液中 Hg 属较高风险,按均值指数和单位向量指数计算,Hg 属于低风险等级。Cd 的

Nemerrow 指数评价，属低风险，其余重金属的综合风险指数虽然随计算方法不同而变化，但其风险等级一致，均属于无风险。两种类型沼液中，Hg、Cd 含量较低但其风险较大，建议在灌溉前通过物理化学方法予以去除。

4）调查地区中，河南、安徽的工程沼液中重金属含量的风险较高，其沼液除了必要的物理处理外，还需利用化学方法进行处理，降低风险后才可进行灌溉；湖南、浙江的沼液存在低风险，这些地区沼液只需物理处理和简单化学处理后便可灌溉；其余地区沼液均无风险。此外，内蒙古、辽宁、福建、四川和重庆 5 个地区的户用沼液中重金属元素含量均无污染风险，只需经过简单的物理处理便可直接进行灌溉。

参 考 文 献：

[1] 郭月玲，张磊，曹金留. 沼液在农业生产中的应用研究现状及前景[J]. 江西农业学报，2011，23(5)：154-156.
Guo Y L, Zhang L, Cao J L. Research actuality and prospect of biogas slurry application in agricultural production [J]. Jiangxi Journal of Agricultural Sciences, 2011, 23(5): 154-156.

[2] 王伟楠，杨改河，任广鑫，等. 叶面喷施沼肥对杏树果实品质的影响研究[J]. 西北农业学报，2008，17(2)：132-136.
Wang W N, Yang G H, Ren G X *et al.* Effect of anaerobic fermentation slurry on fruit quality of apricot [J]. Northwest Journal of Agricultural Science, 2008, 17(2): 132-136.

[3] 周孟津. 沼气实用技术[M]. 北京：化学工业出版社，2004. 28-342.
Zhou M J. Biogas technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 28-342.

[4] 王金花. 沼气发酵生态系统与发酵残留物综合利用技术研究[D]. 北京：中国农业大学硕士学位论文，2005.
Wang J H. Research on the biogas fermentation ecosystem and the comprehensive utilization of biogas residues [D]: Beijing: Ms thesis of China Agriculture University, 2005.

[5] 赵伟. 沼气发酵残余物的综合利用[J]. 农村能源，2003，(8)：58-59.
Zhao W. The comprehensive utilization of biogas residues [J]. Rural Energy, 2003, (8): 58-59.

[6] 谢涛. 农村沼气发酵及其残余物的主要化学成分评价[D]. 重庆：西南大学硕士学位论文，2007.
Xie T. Biogas fermentation in rural and primary chemical component evaluation of the residual products [D]. Chongqing: Ms thesis of Southwest University, 2007.

[7] 段然，王刚，杨世琦，等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析[J]. 吉林农业大学学报，2008，30(3)：310-315.
Duan R, Wang G, Yang S Q *et al.* Preliminary research of potential pollution on farmland soil after using biogas fertilizer[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(3): 310-315.

[8] 解晶钧，徐凤花，齐婧媛，等. 除臭菌系对沼液和尿污处理中 NH_3、H_2S 释放量和重金属含量变化的影响[J]. 中国沼气，2012，30(5)：14-18.
Xie J J, Xu F H, Qi J Y *et al.* Effect of deodorization microorganisms on release of NH_3, H_2S and heavy metal metals in biogas slurry and urine sewage treatment [J]. China Biogas, 2012, 30(5): 14-18.

[9] 李尧琴，杨丽军，张乃华. 养猪场沼液重金属含量及安全性分析[J]. 农业环境与发展，2012，(3)：106-108.
Li X Q, Yang L J, Zhang N H. Analysis of content and safety of heavy metal from piggery biogas slurry[J]. Agricultural Environment and Development, 2012, (3): 106-108.

[10] 高智席，吴艳红，赵华俊，等. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定沼液中重金属元素[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2013，35(1)：104-108.
Gao Z X, Wu Y H, Zhao H J *et al.* Determination of heavy metal elements in biogas slurry with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(1): 104-108.

[11] 吴红，贾书果，刘争，等. 沼液灌溉对园林树木土壤重金属含量的影响[J]. 林业科技开发，2013，27(1)：67-69.
Wu H, Jia S G, Liu Z *et al.* Effects on soil heavy metal contents under garden trees irrigated by biogas slurry from livestock manure[J]. Forestry Science and Technology, 2013, 27(1): 67-69.

[12] 高威，王远玲，陶晓婷，等. 规模化养猪场处理废水对水稻中微量及重金属元素含量的影响[J]. 农业环境科学学报，2013，32(8)：1639-1647.
Gao W, WANG Y L, TAO X T *et al.* Effects of pig slurry from large-scale pig farm on medium, micro and heavy elements contents of rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(8): 1639-1647.

[13] 刘文科. 镉污染土壤上施用沼液对生菜生长和土壤质量的影响[J]. 中国沼气，2010，28(4)：19-20，30.
Liu W K. Effects of biogas slurry on lettuce growth and Cd polluted soil quality [J]. China Biogas, 2010, 28(4): 19-20, 30.

[14] 史稚娟，杨林书，李国学，等. 沼气发酵残余物对减少叶菜硝酸盐积累的影响研究[J]. 中国生态农业学报，2002，10(4)：58-61.
Shi Z J, Yang L S, Li G Y *et al.* Effect of anaerobic fermentation residues on nitrate accumulation in leaf vegetables[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(4): 58-61.

[15] 张继方，袁海荣，邹德勋，等. 沼液养分和重金属农用安全风险分析[J]. 安徽农业科学，2012，40(19)：10246-10250.
Zhang J F, Yuan H R, Zou D X *et al.* Security risk analysis on the nutrients and heavy metals of biogas slurry in agricultural application[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2012, 40(19): 10246-10250.

[16] 陈永杏. 猪场沼液农用生态环境效应研究[D]. 北京：中国农业科学院博士学位论文，2012.
Chen Y X. Study on the ecological and environmental impacts of liquid digestate from swine farm applied on cropland [D]. Beijing: PhD dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.

[17] 李远瞩，李国学，刁剑雄，等. 麦秆黄原酸酯的合成条件优化及其在去除沼液中重金属的应用[J]. 农业环境科学学

报, 2012, 31(9): 1848-1853.
Li Y Z, Li G X, Diao J X *et al*. The optimization of straw xanthates synthesis condition and the application in elimination of heavy metal ions from biogas slurry [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(9): 1848-1853.

[18] 赵麒淋, 伍钧, 陈璧瑕, 等. 施用沼液对土壤和玉米重金属累积的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 251-255.
Zhao Q L, Wu J, Chen B X *et al*. Effect of biogas slurry on heavy metal accumulation of soil and maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 251-255.

[19] 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]. 四川雅安: 四川农业大学硕士学位论文, 2010.
Chen B X. Effect of the agricultural usage of biogas slurry on maize yield, quality and environmental quality[D]. Sichuan: Ms thesis of Sichuan Agricultural University, 2010.

[20] 李健, 郑时选. 沼肥中重金属含量初步研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(1): 62-64.
Li J, Zheng S X. Preliminary study on the heavy metal content in biogas manure [J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(1): 62-64.

[21] 黄惠珠. 沼肥营养成分与污染物分析研究[J]. 福建农业学报, 2010, 25(1): 86-89.
Huang H Z. Composition of nutrients and contaminants in anaerobic fermentation residues[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2010, 25(1): 86-89.

[22] 叶美锋, 吴飞龙, 林代炎. 规模化养猪场粪污重金属动态流向分析研究[J]. 能源与环境, 2010, (4): 15-16.
Ye M F, Wu F L, Lin D Y. Dynamic flow analysis of heavy metal from piggery[J]. Energy and Environment, 2010, (4): 15-16.

[23] 王卫平, 朱凤香, 陈晓旸, 等. 沼液农灌对土壤质量和青菜产量品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(1): 73-76.
Wang W P, Zhu F X, Chen X Y *et al*. Effect of biogas slurry irrigation on soil quality and yield, quality of green vegetables [J]. Zhejiang Journal of Agricultural Sciences, 2010, 22(1): 73-76.

[24] 张进, 张妙仙, 单胜道, 等. 沼液对水稻生长产量及其重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2005-2009.
Zhang J, Zang M X, Shan S D *et al*. Growth status, grain yield and heavy metals content of rice as affected by biogas slurry application[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(10): 2005-2009.

[25] 姜丽娜, 王强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1328-1336.
Jiang L N, Wang Q, Chen D J *et al*. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(7): 1328-1336.

[26] 陆新苗, 王卫平, 魏章焕, 等. 沼液不同施用量对水稻产量及土壤环境的影响[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(17): 76-77.
Lu X M, Wang W P, Wei Z H *et a*l. Influence of biogas slurry irrigating on the soil environment and production of rice [J]. Anhui Agriculture Science Bulletin, 2010, 16(17): 76-77.

[27] 朱凤香, 王卫平, 陈晓旸, 等. 利用人工湿地栽种水生作物对沼液进行无害化消解[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(2): 364-368.
Zhu F X, Wang W P, Chen X Y *et a*l. Preliminary study on harmless digestion of biogas slurry using aquatic plants grown on artificial wetland [J]. Zhengjiang Journal of Agricultural Sciences, 2011, 23(2): 364-368.

[28] 王卫平, 陆新苗, 魏章焕, 等. 施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2300-2305.
Wang W P, Lu X M, Wei Z H *et a*l. Influence of applying biogas slurry on yield and quality of citrus and soil environment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(11): 2300-2305.

[29] 黄栋栋, 王俞薇, 王建波, 等. 施用沼液对无土栽培小白菜产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1782-1785.
Huang D D, Wang Y W, Wang J B *et al*. Effect of application of biogas slurry on the Chinese cabbage yield and quality under soilless cultivation[J], Journal of Anhui Agriculture Science, 2010, 38(4): 1782-1785.

[30] 覃舟. 施用沼液对紫甘蓝产量、营养品质及土壤质量的影响[J]. 江西农业学报, 2009, 21(7): 83-86.
Qin Z. Effect of biogas slurry application on yield, nutrition quality of purple cabbage and soil quality[J]. Journal of Jiangxi Agriculture, 2009, 21(7): 83-86.

[31] 樊文华, 刘晋峰, 王志伟, 等. 施用沼肥对温室土壤养分和重金属含量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2011, (3): 1-4.
Fan W H, Liu J F, Wang Z W *et al*. Effects of biogas fertilizer on the contents of nutrients and heavy metal elements in soil of greenhouse [J]. Journal of Shangxi Agricultural University (Natural Scienc Edition), 2011, (3): 1-4.

[32] 黄界颖, 伍震威, 高连芬, 等. 沼液对土壤质量及小白菜产量品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(3): 1-5.
Huang J Y, Wu Z W, Gao L F *et al*. Effects of biogas slurry on soil quality and yield, quality of Chinese cabbage[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2013, 40(3): 1-5.

[33] 王琳, 吴珊, 李春林. 粪便、沼液、沼渣中重金属检测及安全性分析[J]. 内蒙古农业科技, 2010, (6): 56-57.
Wang L, Wu S, Li C L. The safety analysis of heavy metal from feces, biogas slurry and biogas residue [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2010, (6): 56-57.

[34] 周振民, 黄永奇, 王娟, 等. 污水灌溉安全性评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (2): 67-70.
Zhou Z M, Huang Y Q, Wang J *et al*. Safety assessment of sewage water irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (2): 67-70.

[35] 黄治平, 张克强, 徐斌, 等. 猪场废水灌溉农田土壤重金属污染及风险研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(9): 132-137.
Huang Z P, Zhang K Q, Xu B *et al*. Heavy metal pollution and risk assessment of swine wastewater irrigation[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(9): 132-137.