王 强, 刘银秀, 边武英, 等. 浙江省规模养猪场沼渣液养分特征和农田利用适宜性分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1158-1164.
WANG Qiang, LIU Yin-xiu, BIAN Wu-ying, et al. Nutrient characteristics and cropland utilization suitability of biogas slurry from large-scale pig farms in Zhejiang Province,China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1158-1164.

浙江省规模养猪场沼渣液养分特征和农田利用适宜性分析

王 强[1], 刘银秀[2], 边武英[3], 聂新军[2], 金 娟[2], 陈照明[1]

(1.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2.浙江省农业生态与能源办公室, 杭州 310012; 3.浙江省耕地质量与肥料管理局, 杭州 310020)

摘 要: 为明确浙江省规模养猪场沼渣液养分含量特征,为沼渣液农田合理利用提供指导,分别在2016年5月和8月采集全省62个规模养猪场的沼渣液样品,测定沼渣液养分含量指标。结果表明,5月和8月采集的沼渣液样品平均pH分别为7.39和7.47,总有机碳平均含量分别为5.01 g·L^{-1}和4.79 g·L^{-1},全磷平均含量分别为0.34 g·L^{-1}和0.47 g·L^{-1},全钾平均含量分别为0.57 g·L^{-1}和0.81 g·L^{-1},全盐平均含量分别为3.06 g·L^{-1}和1.76 g·L^{-1}。铵态氮是沼渣液中主要的氮素形态,5月和8月沼渣液样品的铵态氮平均含量分别为689.2 mg·L^{-1}和1 235.5 mg·L^{-1},占沼渣液全氮含量的69.6%和81.2%。2次取样的沼渣液样品总有机碳变异幅度分别为126.2%和182.1%,全磷的变异幅度分别为86.7%和222.6%,全氮、全钾、铵态氮和全盐的变异幅度在44.5%~87.8%。不同区域沼渣液养分含量间没有明显差异,但5月和8月2次取样时间沼渣液样品含量差异极显著。沼渣液中铵态氮含量与全氮、总有机碳、全磷、全钾、含盐量等指标间都表现为显著线性相关。5月和8月全省沼渣液总养分含量($N+P_2O_5+K_2O$)分别为1.91 g·L^{-1}和2.81 g·L^{-1},$N:P_2O_5:K_2O$分别为1:0.31:0.6和1:0.35:0.59。沼渣液养分指标间存在明显的相关性,氮、磷、钾的比例和作物需肥比例相似,农田利用时可以根据沼渣液铵态氮含量测定结果确定沼渣液施用量。

关键词: 规模养猪场;沼渣液;养分

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2019)05-1158-07 doi:10.11654/jaes.2018-0963

Nutrient characteristics and cropland utilization suitability of biogas slurry from large-scale pig farms in Zhejiang Province,China

WANG Qiang[1], LIU Yin-xiu[2], BIAN Wu-ying[3], NIE Xin-jun[2], JIN Juan[2], CHEN Zhao-ming[1]

(1.Institute of Environmental Resources and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences,Hangzhou 310021, China; 2.Office of Zhejiang Provincial Agriculture Ecology and Energy, Hangzhou 310012, China; 3.Cultivated Land Quality and Fertilizer Administration of Zhejiang, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The aim of this study is to clarify the nutrient characteristics of biogas slurry(BS) from large-scale pig farms and to promote the rational use of BS in farming systems. BS samples were collected from 62 large-scale pig farms in Zhejiang Province in May and August 2016, and their pH, total organic carbon(TOC), total phosphorus(TP), total potassium(TK), total salt(TS), and ammonium-N levels were measured. The results showed that the average pH, TOC, TP, TK, and TS of the pig BS were 7.39 and 7.47, 5.01 and 4.79 g·L^{-1}, 0.34 and 0.47 g·L^{-1}, 0.57 and 0.81 g·L^{-1}, and 3.06 and 1.76 g·L^{-1} in May and August, respectively. Ammonium-N was the main form of N in the BS. The mean ammonium-N was 689.2 and 1 235.5 mg·L^{-1} in May and August, respectively, which accounted for 69.6% and 81.2% of total nitrogen in the BS. The variable coefficient of TOC was 126.2% and 182.1% in May and August, respectively, and those of TP were 86.7%

收稿日期: 2018-07-25 **录用日期:** 2018-10-08

作者简介: 王 强(1979—),男,浙江江山人,博士,副研究员,主要研究方向为植物营养与施肥。E-mail:qwang0571@126.com

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2016YFD0200800);浙江省科技厅重大项目(2015C02013)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0200800); The Major Scientific and Technological Project of Zhejiang Province(2015C02013)

and 222.6%. The variable extents of TN, TK, ammonium, and TS ranged from 44.5%~87.8%. No significant differences in the nutrients were observed among the regions. However, there were significant differences between sampling times. Ammonium of BS was significantly correlated with TN,TOC, TP, TK, and TS. The main nutrient concentrations($N + P_2O_5 + K_2O$) were 1.91 and 2.81 $g \cdot L^{-1}$ in May and August, respectively. The $N:P_2O_5:K_2O$ was 1:0.31:0.60 and 1:0.35:0.59 in May and August, respectively. Significant relationships were observed among the nutrients in the slurry. The N:P:K ratio in the BS was similar to the crop demand in the field. The application rate of BS could be confirmed according to the ammonium-N concentration in the BS when it was applied in farming systems.

Keywords: large-scale pig farm; biogas residues and slurry; nutrients

沼液是沼气工程发酵的产物,含有丰富的有机物和营养元素,以及各种氨基酸、有机酸等生物活性物质[1]。沼液中的营养物质可利用率高,平均约3/4的氮为生物有效态氮,生物有效态磷含量占全磷含量的85%左右,生物有效态钾含量占全钾含量的81%[2]。沼液所含的有机质和小分子腐殖质还可以起到改良土壤、提高土壤肥力的作用,并且减少农作物的病虫害[3-6]。因此农田利用成为沼液利用和消纳的重要方式。

沼液养分含量是农田利用中沼液施用量的依据。沼液具有氮、磷、钾等大量元素含量偏低,不同沼气工程间养分含量变异大等特点。由于农田利用中难以做到实时检测,经常存在沼液施用量不足或过量等问题,影响作物产量或导致二次污染。研究表明沼液养分含量受到发酵原料、沼气工程类型和运行时间等多种因素的影响[7-8]。以牛粪、鸡粪和猪粪作为发酵原料的沼液中养分含量有明显的差异[9-10]。不同进料浓度、不同发酵池池型、发酵时间以及发酵温度都会影响沼液的养分含量[7]。沼液养分含量还受到沼气工程运行时间的影响,运行时间越长,系统稳定性越好,沼液养分变异越小[11]。已有沼液调查普遍存在样本数量偏少的特点,对于调查结果的分析主要以养分含量特征以及影响因素为主,缺少从农田利用角度的分析结果,对于区域沼液农田利用难以提出合理性的建议。另一方面,由于养殖场和农田匹配性较差,沼液农田利用经常通过槽罐车运输实行异地还田。由于槽罐车抽取沼液过程中的扰动,沼液中通常含有一定的沼渣,增加了沼液养分的变异性[12]。因此现有研究结果中沼液养分含量与农田实际应用时仍有较大的差异。

为此,本研究室针对浙江省11个市共62家规模养猪场的沼气工程进行调查,包括养猪场规模、发酵工艺、运行时间等参数,并针对原液、沼液和沼渣的养分及重金属含量进行了分析。本文作为调查工作的一部分,从农田利用的角度对沼液营养成分含量和变异特征进行分析,拟为沼液农田利用和养分管理提供依据。为了准确反应沼液农田利用时的状况,沼液样品取自氧化塘或沼气工程排放口,含有一定的沼渣,本文中称为沼渣液。

1 材料与方法

1.1 调查采样方法

调查取样的规模养猪场来自于浙江省的11个地级市(表1)。不同养猪场的沼气工程有一定的差异(表2),其中清粪工艺基本以干清粪和水泡粪为主,沼气工程发酵工艺包括了CSTR、UASB和USR等不

表2 浙江省规模养猪场沼气工程主要技术指标

Table 2 The main technical specifications of biogas projects

参数	范围	养殖场数量
养殖规模/头	<5000	36
	5000~10 000	20
	>10 000	6
清粪工艺	干清粪	24
	水泡粪	38
发酵工艺	CSTR	39
	UASB	19
	USR	4
运行年限/a	1~3	19
	4~9	34
	>10	9
发酵容积/m^3	<500	23
	500~1000	23
	>1000	16

表1 浙江省规模养猪场沼气工程调查区域分布

Table 1 Locations of investigative large-scale pig farms in Zhejiang Province

区域	衢州	杭州	湖州	嘉兴	宁波	绍兴	台州	温州	丽水	金华	舟山
样点数量	7	6	3	6	8	6	8	5	5	5	3

同方式。沼气工程发酵原料都为猪粪尿加冲洗水。供试样品取自厌氧反应罐排放的沼液或氧化塘内的沼渣液。每个采样点分别在取样当天的9:00—10:00、11:30—12:30、14:00—15:00分别采集3份样品，每次取样量基本相等，经混合均匀后，取500 mL，装入PVC瓶中，所有样品的采样均在1周内完成。各区域采样人员将样品预先冷冻后，统一寄往检测单位，测定沼液pH、总有机碳、全氮、全磷、全钾、全盐和铵态氮等指标。养分指标无法一次性测完的样品加入浓硫酸酸化，并于0~4 ℃条件下保存。

1.2 测定方法

沼渣液样品在室温下解冻，pH采用精密pH计（PHS-2F，上海精科-上海雷磁）进行原液测定。铵态氮和含盐量的测定取上清液，参照《废水监测分析方法》[13]。测定其他指标时将样品摇匀，取均匀的沼液、沼渣混合液进行分析测试。其中总有机碳测定采用重铬酸钾容量法测定[14]，沼渣液总氮、总磷和总钾的测定参照有机-无机复混肥料的测定方法（GB/T 17767—2008）。沼液总养分含量（$N+P_2O_5+K_2O$）为沼液中全氮、全磷和全钾含量的总和，其中全磷和全钾含量分别乘以系数2.291和1.205，换算成P_2O_5和K_2O的含量。

1.3 箱式图

采用Origin 8绘制各养分指标的箱式图。将单个养分指标的含量按从小到大的数据排列，处于所有样本中间的数值为中位数，最小值和中位值中间的数据根据同样方法计算中位值，为上四分位值（Q1），最大值和中位值之间的中位值为下四分位（Q3），Q1和Q3之间的差值为四分位间距（IQR），不在（Q1-1.5IQR ~ Q3+1.5IQR）范围内的数为异常值。

1.4 数据分析

数据经Excel处理后，采用SPSS 19.0进行数据分析。不同区域间沼渣液养分含量的差异采用单因素分析方法，均值比较采用最小显著差法，显著性水平P=0.05。不同取样时间沼渣液中变量的差异采用配对样本t检验。

2 结果与分析

2.1 浙江省规模养猪场沼渣液养分含量

浙江省规模养猪场沼渣液养分含量见表3。5月和8月沼渣液样品平均pH值分别为7.39和7.47，都呈中性至微碱性。5月和8月沼渣液样品总有机碳平均含量分别为5.01 g·L^{-1}和4.79 g·L^{-1}，全氮平均含量分别为0.99 g·L^{-1}和1.52 g·L^{-1}，全磷平均含量分别为0.34 g·L^{-1}和0.47 g·L^{-1}，全钾平均含量分别为0.57 g·L^{-1}和0.81 g·L^{-1}。2个批次供试沼渣液样品中总氮、总磷、总钾含量都为全氮>全钾>全磷。铵态氮是沼渣液中主要的氮形态，5月和8月沼渣液样品铵态氮平均含量分别为689.2 mg·L^{-1}和1 235.5 mg·L^{-1}，分别占沼渣液全氮含量的69.6%和81.2%。2批样品全盐含量分别为3.06 g·L^{-1}和1.76 g·L^{-1}。

2.2 浙江省规模养猪场沼渣液养分变异特征

全省沼渣液样品pH值的变异幅度较小，2个批次沼渣液样品的变异系数分别为4.6%和4.8%（表3）。全省沼渣液样品养分指标中总有机碳含量变异幅度最大，5月和8月样品的总有机碳含量分别为1.1~38.9 mg·L^{-1}和0.1~43.0 mg·L^{-1}，变异系数分别为126.2%和182.1%。由于沼渣液测定时采用的是混合均匀的沼液、沼渣混合物，样品中沼渣含量的差异可能是造成总有机碳含量变异大的主要原因。沼渣液全磷含量的变异幅度在2个批次间有明显的差异，5月份沼渣液样品全磷的变异幅度为86.7%，而8月份则达到了244.0%，主要是部分沼渣液样品全磷含量较低，有14.5%的样品全磷含量低于检测限。沼渣液全氮、全钾、铵态氮和全盐的变异幅度比较接近，为

表3 浙江省规模养猪场沼渣液养分含量描述性统计

Table 3 Statistical parameters of nutrient contents in biogas slurry of large-scale pig farms in Zhejiang Province

取样时间		pH	总有机碳/g·L^{-1}	全氮/g·L^{-1}	全磷/g·L^{-1}	全钾/g·L^{-1}	铵态氮/mg·L^{-1}	全盐/g·L^{-1}
5月	平均值（n=62）	7.39±0.34a	5.01±6.32a	0.99±0.44B	0.34±0.30a	0.57±0.28B	689.2±348.7B	3.06±2.04A
	范围	6.19~8.37	1.1~38.9	0.28~2.35	0.09~2.03	0.16~1.76	99.7~2 489.3	1.25~14.46
	变异系数/%	4.6	126.2	44.6	86.7	49.2	50.6	66.6
8月	平均值（n=62）	7.47±0.36a	4.79±8.72a	1.52±0.90A	0.47±1.15a	0.81±0.71A	1 235.5±568.3A	1.76±1.04B
	范围	6.75~8.68	0.1~43.0	0.2~5.5	0.01~6.50	0.08~5.7	200~3200	0.63~6.97
	变异系数/%	4.8	182.1	59.1	244.0	87.8	46.0	58.7

注：2个取样批次间采用独立样本t检验；同列数据后的不同小写字母表示在P<0.05水平差异有统计学意义，不同大写字母表示在P<0.01水平差异有统计学意义。

44.5%~87.8%。

图1中各养分指标的中位值总体偏下,表明调查样品中养分含量较低的样本居多。各养分指标中都有一定数量的异常值,而且异常值基本表现为数据偏高。异常值的存在不但增加了沼渣液养分指标变异幅度,而且使平均养分指标结果偏高。以总有机碳为例,5月沼渣液样品总有机碳含量的上四分位(Q1)和下四分位(Q3)分别为2.37 g·L^{-1}和4.98 g·L^{-1},8月份沼渣液样品总有机碳含量的上四分位(Q1)和下四分位(Q3)分别为1.00 g·L^{-1}和3.00 g·L^{-1},表明5月和8月沼渣液样品中75%的样本总有机碳含量为2.37~4.98 g·L^{-1}和1.00~3.00 g·L^{-1},远小于总样本1.1~38.9 g·L^{-1}和0.1~43.0 g·L^{-1}的范围。5月和8月沼渣液样品总有机碳含量的四分位间距分别为2.83 g·L^{-1}和2.00 g·L^{-1},也远低于总样本的极差。

2.3 取样时间对沼渣液养分含量的影响

8月沼渣液样品的全氮、全磷、全钾和铵态氮的四分位距和最大值都大于5月样品,除了全磷外,其他养分指标中值也大于5月样品(图1),表明8月沼渣液样品的变异幅度大于5月样品。8月沼渣液样品的全氮、全钾和铵态氮含量明显高于5月样品,全盐含量则低于5月样品(表3)。2个批次间沼渣液pH、总有机碳含量和全磷含量间没有显著性差异。不同批次间沼渣液样品养分含量的差异表明不同取样时间主要影响沼渣液全氮、全磷、全钾、铵态氮和全盐含量,这可能是由于不同季节沼气工程运行状况的

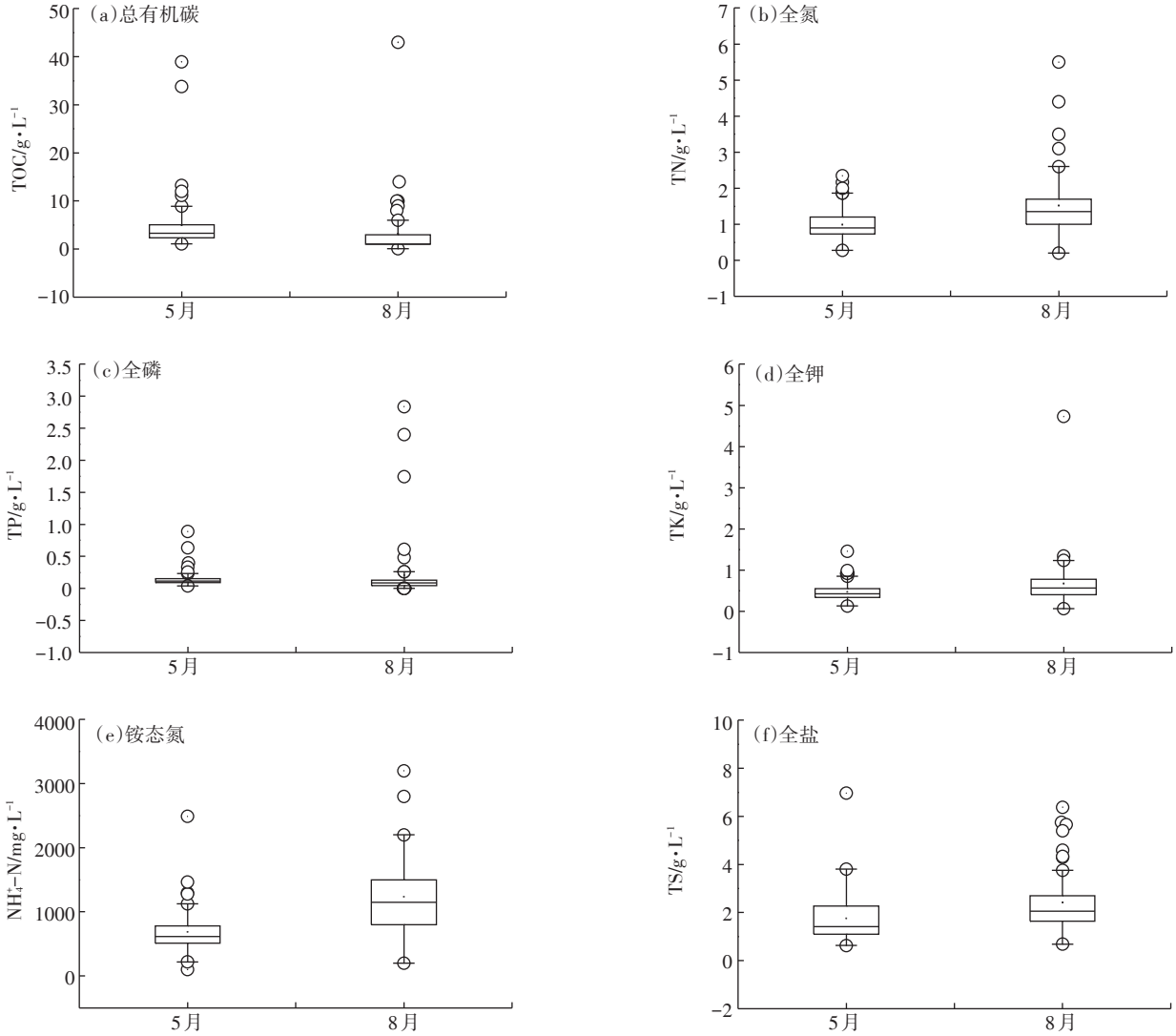

图1 浙江省规模养猪场沼渣液养分汇总统计图

Figure 1 TOC, TN, TP, TK, ammonium-N and TS concentrations in BS from 62 large-scale pig farms in Zhejiang Province

差异所造成的。

2.4 养殖区域对沼渣液养分含量的影响

分区域沼渣液样品含量差异的显著性统计分析结果见表4。各养分指标中除了8月份全钾含量在不同区域间有明显差异外，其他养分指标在不同区域间都没有显著性差异，而且5月和8月沼渣液样品的统计结果一致。表明沼渣液养分含量的差异主要受养猪场沼气工程的影响，与取样区域间没有明显的相关性。

2.5 沼渣液养分指标相关性分析

不同养分指标间相关性分析表明（表5），各沼渣液养分指标间具有一定的相关性，但部分指标在2个批次间相关性差异较大。5月份沼渣液样品pH与全氮、全钾、铵态氮含量间都具有显著的相关性，但8月份沼渣液样品中pH与全氮、全钾的相关性则不显著。总有机碳与全氮、全磷、全钾、铵态氮、全盐等指标间基本都呈极显著线性相关。而全盐含量除了与pH相关性不显著外，与其他指标间都表现出明显的相关性。作为沼渣液农田利用中主要的养分指标，铵态氮含量与全氮、总有机碳、全磷、全钾、含盐量等指标间都表现出极显著线性相关。

沼渣液氮、磷、钾等养分指标间的比例特征见表6。5月和8月沼渣液样品的总养分含量（$N+P_2O_5+K_2O$）分别为1.91 g·L^{-1}和2.81 g·L^{-1}，差异极显著。5月和8月沼渣液中磷含量分别为氮含量的31%和35%，钾含量分别为氮含量的60%和59%，2个批次间没有显著性差异。$N:P_2O_5:K_2O$分别为1:0.31:0.6和1:0.35:0.59。

3 讨论

沼液养分含量差异大是影响沼液农田利用的重要因素。靳红梅等[11]对江苏21个规模养殖场沼气工程的调查表明，沼液总有机碳、总氮、总磷和总钾的变

表4 取样时间对沼渣液理化性状影响的统计分析

Table 4 Effects of sampling time on characteristics of biogas slurry in large-scale pig farms in Zhejiang Province

养分指标	5月		8月	
	*F*值	*P*值	*F*值	*P*值
总有机碳	0.870	0.566 1	1.152	0.344 1
全氮	0.710	0.710 4	0.878	0.559 5
全磷	0.557	0.840 8	0.821	0.610 6
全钾	1.465	0.180 1	2.648	0.011 1**
铵态氮	0.700	0.719 6	0.800	0.629
全盐	0.858	0.576 7	1.020	0.440 5

注：不同取样区域间的养分指标采用LSD法比较，**表示$P<0.01$水平差异有统计学意义。

表6 浙江省规模养猪场沼渣液养分比例特征

Table 6 Characteristics of nutrients ratio in large-scale pig farms in Zhejiang Province

取样时间	总养分/g·L^{-1}	(P_2O_5/N)/%	(K_2O/N)/%	$N:P_2O_5:K_2O$
5月	1.91±0.89B	31.2±79.3a	60.1±57.0a	1:0.31:0.6
8月	2.81±2.04A	35.3±16.2a	59.3±20.2a	1:0.35:0.59

注：不同取样区域间的养分指标采用LSD法比较，同列数据后的不同小写字母表示在$P<0.05$水平差异有统计学意义，不同大写字母表示在$P<0.01$水平差异有统计学意义。

表5 沼渣液养分指标间相关性分析

Table 5 Pearson′ correlation analysis among nutrient indexes in biogas slurry

Pearson相关系数	pH	总有机碳	全氮	全磷	全钾	铵态氮	全盐
pH	1.000	0.034 (0.016)	0.091* (0.045)	0.001 (0.010)	0.152** (0.014)	0.138** (0.141**)	0.041 (0.009)
总有机碳	0.034 (0.016)	1.000	0.381** (0.598**)	0.852** (0.545**)	0.088* (0.014)	0.469** (0.348**)	0.651** (0.408**)
全氮	0.091* (0.045)	0.381** (0.598**)	1.000	0.388** (0.327**)	0.708** (0.079*)	0.790** (0.836**)	0.613** (0.439**)
全磷	0.001 (0.010)	0.852** (0.545**)	0.388** (0.327**)	1.000	0.108** (0.001)	0.538** (0.178**)	0.678** (0.259**)
全钾	0.152** (0.014)	0.088* (0.014)	0.708** (0.079*)	0.108** (0.001)	1.000	0.539** (0.104*)	0.340** (0.033)
铵态氮	0.138** (0.141**)	0.469** (0.348**)	0.790** (0.836**)	0.538** (0.178**)	0.539** (0.104*)	1.000	0.843** (0.413**)
全盐	0.041 (0.009)	0.651** (0.408**)	0.613** (0.439**)	0.678** (0.259**)	0.340** (0.033)	0.843** (0.413**)	1.000

注：括号外为5月份沼渣液样品的相关性系数，括号内为8月沼渣液样品的相关性系数，*表示在$P<0.05$水平相关性显著，**表示在$P<0.01$水平相关性显著。

异系数在44.8%~94.3%。柯蓝婷等[15]的调查结果表明不同原料的家庭户用沼气池的沼液铵态氮含量在450~1800 mg·L^{-1}。本文中2次沼液样品全氮和全钾含量的变异系数在44.6%~87.8%,与靳红梅等的研究结果相似,但总有机碳含量变异系数达到126.6%~182.1%,全磷含量变异幅度也较大。由箱式图中可以看出,沼液样品中各养分指标均存在一定数量的异常值,是增加沼液养分变异系数的主要原因。沼液取样方式可能也是影响沼液养分含量的重要因素。曲明山等[16]的研究表明沼液经模拟过滤粉粒后,有机碳和全磷含量降幅较大,全氮和全钾含量变化不大。沼液实际应用时受到沼液抽取扰动的影响,实际养分含量与研究结果间存在一定的偏差,本研究中在沼液池自然存储状态时取样,样品中沼渣含量的差异可能是造成总有机碳和全磷含量差异较大的原因。

沼液养分含量虽然变异较大,但不同养分指标间具有明显的相关性,特别是总养分含量和全钾含量、全钾含量与电导率尤为显著[12]。因此根据沼液养分含量特征指导沼液农田利用具有重要意义。本文研究表明铵态氮是沼液中主要的氮素形态,与全氮含量具有良好的相关性,沼液中全氮含量与全磷、全钾之间也具有明显的线性相关,与前人的研究基本一致[2,11]。沼液农田利用中氮素损失是重要的环境污染源,而氨挥发是主要的氮素损失形态,可占沼液中氮素的16.4%[17],因此可以将沼液中铵态氮含量作为沼液推荐施用量的依据,从而减少农田利用中沼液检测的工作量。本研究中2个批次样品中养分含量有一定的差异,但氮、磷、钾的养分比例基本一致,在1∶0.3∶0.6左右,与作物养分需求特性基本吻合。但调查结果表明沼液全磷含量变异较大,因此农田利用中应在沼液养分检测基础上适当增加磷肥的投入。

本研究中沼液样品全盐含量较高,长期施用后可能会增加土壤盐渍化风险。以往沼液调查结果均表明沼液中存在重金属和抗生素成分[18-19],虽然重金属潜在风险评估均属于较低水平[20-21],但沼液农田利用时的农产品安全和环境污染风险仍然值得关注。基于盆栽试验的研究结果表明沼液农田利用时土壤和作物中重金属有增加的趋势[22-23],但水稻定位试验中以常规施肥的氮素投入量为基准,以2倍氮投入量的沼液连续施用3年后,没有增加稻谷中镉、铅、汞、砷等重金属的含量[24]。可见沼液农田利用的环境风险同时受到沼液中污染物含量、施用量和作物类型等因素的影响,应加强沼液农田利用长期定位试验的研究,明确不同作物的适宜沼液施用量,降低沼液农田利用的环境风险。

4 结论

(1)浙江省规模养猪场沼渣液养分含量变异较大,5月份和8月份沼液总养分含量($N+P_2O_5+K_2O$)分别为1.91 g·L^{-1}和2.81 g·L^{-1},差异极显著。但2次取样的沼渣液样品$N:P_2O_5:K_2O$分别为1∶0.31∶0.6和1∶0.35∶0.59,差异不显著。

(2)沼渣液养分含量受到取样时间的影响,不同区域间沼渣液养分含量没有明显差异。

(3)铵态氮是沼液中主要的氮素形态,占全氮的70%以上,与沼渣液全氮、总有机碳、全磷、全钾、含盐量等指标间都表现为显著线性相关,可以作为沼渣液农田利用时的施用量控制指标。

参考文献:

[1] 沈其林, 单胜道, 周健驹, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气, 2014, 32(3):83-86.
SHEN Qi-lin, SHAN Sheng-dao, ZHOU Jian-ju, et al. Determination and analysis of compositions in biogas slurry produced by swine manure digestion[J]. *China Biogas*, 2014, 32(3):83-86.

[2] 倪中应, 章明奎. 沼液中氮磷钾化学形态组成及其生物有效性评价[J]. 土壤通报, 2017, 48(5):1114-1118.
NI Zhong-ying, ZHANG Ming-kui. Chemical composition of nitrogen, phosphorus, and potassium in biogas slurry and their bio-availability[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(5):1114-1118.

[3] 杨 润, 孙钦平, 赵海燕, 等. 沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8):1566-1572.
YANG Run, SUN Qin-ping, ZHAO Hai-yan, et al. Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1566-1572.

[4] Zhang J, Wang M Y, Cao Y C, et al. Replacement of mineral fertilizers with anaerobically digested pig slurry in paddy fields: Assessment of plant growth and grain quality[J]. *Environmental Sciences & Pollution Research*, 2017, 24(10):8916-8923.

[5] Chen G, Zhao G H, Zhang H M, et al. Biogas slurry use as N fertilizer for two-season *Zizania aquatic* Turcz. in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107:303-320.

[6] 姜丽娜, 王 强, 李艾芬, 等. 休闲稻田消解沼液生态效应及其对水稻安全生产影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2483-2490.
JIANG Li-na, WANG Qiang, LI Ai-fen, et al. The ecological effects of fallow paddy field disposal biogas slurry and its impact on the following rice safety production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2483-2490.

[7] 张丽萍, 刘红江, 盛 婧, 等. 发酵周期、储存时间和过滤对沼液养分和理化性状变化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1):

32-39.
ZHANG Li-ping, LIU Hong-jiang, SHENG Jing, et al. Influence of anaerobic fermentation periods, storage time and filtration on the changes of nutrients and physical and chemical properties of biogas slurry[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1):32-39.

[8] Marcato C E, Pinelli E, Pouech E, et al. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99:2340-2348.

[9] 丁京涛, 沈玉君, 孟海波, 等. 沼渣沼液养分含量及稳定性分析[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(4):136-146.
DING Jing-tao, SHEN Yu-jun, MENG Hai-bo, et al. Nutrition contents and its stability analysis of biogas residue and slurry[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(4):136-146.

[10] 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, 164:268-282.

[11] 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, 2010, 27(1):291-296.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 27(1):291-296.

[12] 范 旻, 朱洪光, 马洁琼. 养殖业沼渣液肥效与养分分布及影响因素初步研究[J]. 现代农业科技, 2014, 1:231-236.
FAN Min, ZHU Hong-guang, MA Jie-qiong. Preliminary study of the fertilizer efficiency, distribution of nutrients and the impact factors of livestock industry[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2014, 1:231-236.

[13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:223-281.
State Environmental Protection Administration Editorial Committee. Water and wastewater monitoring method[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:223-281.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:12-194.
LU Ru-kun. The soil agro-chemical analyses procedures[M]. Beijing: China Agricultural science and Technology Press, 2000:12-194.

[15] 柯蓝婷, 王海涛, 王远鹏, 等. 不同来源家庭户用沼气池沼液成分分析及风险评价[J]. 化工学报, 2014, 65(5):1840-1847.
KE Lan-ting, WANG Hai-tao, WANG Yuan-peng, et al. Component analysis and risk assessment of anaerobically digested slurry from households in China[J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(5):1840-1847.

[16] 曲明山, 郭 宁, 刘自飞, 等. 京郊大中型沼气工程沼液养分及重金属含量分析[J]. 中国沼气, 2013, 31(4):37-40.
QU Ming-shan, GUO Ning, LIU Zi-fei, et al. Nutrient and heavy metal contents in biogas slurry of large scaled biogas project in suburb of Beijing[J]. *China Biogas*, 2013, 31(4):37-40.

[17] Chen D J, Jiang L N, Huang H, et al. Nitrogen dynamics of anaerobically digested slurry used to fertilizer paddy fields[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49:647-659.

[18] 卫 丹, 万 梅, 刘 锐, 等. 嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7):2650-2657.
WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, et al. Study on the quality of digested piggery wastewater in large-scale farms in Jiaxing[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7):2650-2657.

[19] 黄红卫, 吴彦虎, 李晓梅, 等. 宁夏规模养猪场畜禽粪便养分含量和重金属、抗生素残留量测定及安全性评估[J]. 农业科学研究, 2018, 39(2):1-8.
HUANG Hong-wei, WU Yan-hu, LI Xiao-mei, et al. Measurement of nutrient content, heavy metal and antibiotic residue in livestock and poultry manure of Ningxia farm and safety evaluation analysis[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 39(2):1-8.

[20] 周 杨, 章明奎. 长三角城郊区沼液化学组分特点及其农用重金属污染风险评价[J]. 中国农学通报, 2016, 32(20):101-106.
ZHOU Yang, ZHANG Ming-kui. Characteristics of chemical component and agricultural potential risk assessment of heavy metals of biogas slurry in suburban areas of Yangtze Delta[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(20):101-106.

[21] 刘思辰, 王莉伟, 李希希, 等. 沼液灌溉中的重金属潜在风险评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6):1517-1524.
LIU Si-chen, WANG Li-wei, LI Xi-xi, et al. Potential risk assessment of heavy metal in biogas slurry irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6):1517-1524.

[22] 周灵君, 吕 琳. 沼液-土壤-蔬菜系统中重金属变化特征[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(3):63-69.
ZHOU Ling-jun, LÜ Lin. Characteristics of heavy metal in biogas slurry, soil and vegetable system[J]. *Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition)*, 2017, 39(3):63-69.

[23] 李 轶, 巩俊璐, 张 辉, 等. 不同施肥处理对污灌区土壤中Pb、Cu和Zn的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(6):731-736.
LI Yi, GONG Jun-lu, ZHANG Hui, et al. Effects of different fertilization treatments on Pb, Cu and Zn forms in soil from sewage irrigation area[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(6):731-736.

[24] 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 Li-na, WANG Qiang, CHEN Ding-jiang, 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.