

董颐玮, 梁 栋, 李丹阳, 等. 沼液主要养分含量特征分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1206-1214.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.016

## 沼液主要养分含量特征分析

董颐玮<sup>1,2</sup>, 梁 栋<sup>1,3,4</sup>, 李丹阳<sup>1,3</sup>, 靳红梅<sup>1,2,3,4</sup>

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2.江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 3.江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 江苏 南京 210095; 4.农业农村部种养结合重点实验室, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 农村沼气发展是推进农业有机废弃物资源化利用的重要途径。沼液具有资源属性, 为全面掌握沼液全国尺度的主要养分含量特征, 本研究收集了近二十年来在中国发表的关于沼液还田的研究论文, 挖掘了以猪粪、牛粪、鸡粪等为发酵原料的沼气工程及农村户用沼气池所产生的沼液样本的主要养分(TN、TP 和 TK)含量与其速效养分含量等理化指标, 进一步分析了全国不同区域、不同发酵原料的沼液的主要养分含量特征。研究发现, 全国范围内猪粪沼液中 TN、TP 和 TK 平均含量为 1 166.71 mg/L、291.60 mg/L 和 1 144.26 mg/L; 牛粪沼液中 TN、TP 和 TK 平均含量分别为 1 488.59 mg/L、561.67 mg/L 和 1 679.10 mg/L; 鸡粪沼液中 TN、TP 和 TK 平均含量分别为 3 226.13 mg/L、959.71 mg/L 和 2 858.31 mg/L; 户用沼气池沼液中 TN、TP 和 TK 平均含量分别为 1 369.31 mg/L、665.90 mg/L、1 240.21 mg/L。猪粪沼液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量分别占 TN 含量的 51.2% 和 5.8%, DP 含量占 TP 含量的 89.6%, DK 含量占 TK 含量的 86.2%, 分析结果表明沼液中氮、磷和钾的总量与其速效养分含量间存在显著 ( $P < 0.05$ ) 的正相关关系。不同地区沼液中的养分含量存在明显差异, 在区域尺度上分析土地承载力和环境风险评价时, 应充分考虑地区间不同沼液中养分含量的差异性。本研究结果对推动沼液合理资源化, 准确评估区域环境承载力, 有效防控区域环境污染具有重要意义。

**关键词:** 沼液; 养分含量; 特征分析

中图分类号: S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)05-1206-09

## Characteristic analysis of main nutrient content in biogas slurry

DONG Yi-wei<sup>1,2</sup>, LIANG Dong<sup>1,3,4</sup>, LI Dan-yang<sup>1,3</sup>, JIN Hong-mei<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 4. Key Laboratory of Crop and Livestock Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The development of rural biogas is an important way to promote the resource utilization of agricultural organic waste. Biogas slurry has resource attributes. In order to fully grasp the characteristics of main nutrient content in biogas slurry at the national scale, this study collected domestic research papers on the return of biogas slurry to the field in the past two decades, and excavated the use of pig manure, cow manure, and chicken manure. The contents of main nutrients (TN, TP and TK) in biogas slurry samples produced by biogas projects and rural household biogas digesters were explored, and the main nutrient content characteristics of biogas slurry with different fermentation raw materials in different regions of China were further analyzed. It was found that the average contents of TN, TP and TK in pig manure biogas slurry were 1 166.71 mg/L, 291.60 mg/L and 1 144.26 mg/L. The average contents of TN, TP and TK in cow manure biogas slurry were 1 488.59 mg/L, 561.67 mg/L and 1 679.10 mg/L. The average contents of TN, TP and TK

收稿日期: 2020-01-09

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(20)1011 ]; 农业农村部种养结合重点实验室开放课题(202006)

作者简介: 董颐玮(1995-), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 研究方向: 农业废弃资源管理及开发利用研究。

通讯作者: 靳红梅, (E-mail) hmjin@jaas.ac.cn

in chicken manure biogas slurry were 3 226.13 mg/L, 959.71 mg/L and 2 858.31 mg/L. The average contents of TN, TP and TK in the household biogas digesters were 1 369.31 mg/L, 665.90 mg/L and 1 240.21 mg/L. The contents of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in the pig manure biogas slurry accounted for 51.2% and 5.8% of the TN content, respectively, the DP content accounted for 89.6% of the TP content, and the DK content accounted for 86.2% of the TK content. The results showed that the total contents of nitrogen, phosphorus and potassium in biogas slurry were positively correlated with their available nutrient contents. The nutrient content of biogas slurry in different regions was significantly different. When analyzing land carrying capacity and environmental risk assessment at regional scale, the differences of nutrient content in different biogas slurry should be fully considered. The results of this study are of great significance for promoting the rational utilization of biogas slurry, accurately assessing the regional environmental carrying capacity, and effectively preventing and controlling regional environmental pollution.

**Key words:** biogas slurry; nutrient content; characteristic analysis

农村沼气发展是推进各类农业有机废弃物资源化利用的有效途径,也是推进生态循环农业发展,建设美丽乡村的重要抓手<sup>[1]</sup>。2016年以来,农业农村部结合农业绿色发展行动、有机肥替代化肥行动,不断推动农村沼气转型升级,重点支持建设了1 423处规模化大型沼气工程和64处生物天然气工程<sup>[2-3]</sup>。截至2017年底,全国建设的沼气工程达 $1.13 \times 10^5$ 处,总沼池容积为 $2.07 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,年产沼气为 $2.61 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,供气户数达到 $1.98 \times 10^7$ 户,年发电量为 $7.6 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ <sup>[4]</sup>。这对优化国家能源结构、增强国家能源安全保障能力发挥了积极作用。畜禽粪便、作物秸秆、尾菜、农产品加工剩余物和农村生活垃圾及污水等有机废弃物是沼气发酵原料的主要来源。十三五期间,全国每年可用于沼气生产的农业废弃物资源总量超过 $1.4 \times 10^9 \text{ t}$ ,可产生天然气 $7.36 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,可替代约 $8.76 \times 10^7 \text{ t}$ 标准煤<sup>[2]</sup>。

沼气发酵后的液体和固体残留物分别称为沼液和沼渣<sup>[5]</sup>。据测算,截至2019年,中国年产沼液及沼渣已超过 $4 \times 10^8 \text{ t}$ 。沼液占发酵残留物总量的90%以上,由于其产生数量大、储运成本高、达标处理难、商品化价值低等特点,存在严重的二次污染等问题,沼液的处理和利用一直以来都是国内外研究的重点与难点<sup>[6-8]</sup>。沼液具有资源属性,含有大量的氮、磷和钾等营养元素、丰富的微量元素及对作物有益的物质,因此可用于生产有机肥,适时适量还田利用有利于保障农田可持续生产能力<sup>[9]</sup>。国内外大量研究结果表明,沼液还田可提升农产品品质,改善土壤条件<sup>[10]</sup>,部分或全量替代无机肥料<sup>[11]</sup>,是实现种养结合循环农业的重要桥梁。尽管近年来有关中国沼液农田利用的研究逐年增加,但现有沼气工程面临着原料保障难、工程科技含量不高、资源综合利用率低等瓶

颈<sup>[12]</sup>,导致各地区沼气发酵原料种类、发酵工艺及沼液贮存方式多样,入田沼液的理化性质(特别是养分含量)差异巨大。因此,全面掌握全国尺度的沼液主要养分含量特征,对于准确评估区域环境承载力、有效防控区域环境污染具有重要意义。

近年来,国内在地区尺度上对沼液理化特性开展了一些研究。例如,靳红梅等<sup>[13]</sup>对江苏省21个规模化养猪场和奶牛场内大型沼气工程的沼液样本进行了基本理化特性分析,发现沼液中总氮(TN)含量分别集中在400~900 mg/L和200~400 mg/L,其中铵态氮占总氮量的70%以上,总磷(TP)含量分别集中在30~100 mg/L和300 mg/L以上,可溶性磷含量变异较大;总钾(TK)含量分别集中在100~500 mg/L和500 mg/L以上,且速效养分占比较大。钟攀等<sup>[14]</sup>发现重庆地区沼液中TN、TP和TK含量的均值分别为448.1 mg/L、120.0 mg/L和630.3 mg/L,其中水溶性氮、磷和钾的含量分别占其全量的69.4%~95.1%、6.1%~91.8%和60.8%~99.7%。吕锦萍等<sup>[15]</sup>研究新疆博州地区猪粪和牛羊粪为发酵原料的沼液,发现沼液中TN为687~705 mg/kg,TP为43~98 mg/kg,TK为417~3 540 mg/kg。倪中应等<sup>[16]</sup>发现华东地区畜禽粪便沼液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占TN的46.42%~92.86%;前人研究普遍发现,发酵原料、沼气工程运行状况等对沼液理化性状影响显著,但目前尚未有全国范围内沼液养分特征的研究。基于此,本研究收集了近二十年国内发表的关于沼液还田的研究论文,以猪粪、牛粪、鸡粪等不同发酵原料的沼气工程及农村户用沼气池所产生的沼液样本作为数据来源,挖掘沼液中主要养分含量(TN、TP和TK)及其速效养分含量等理化指标,进一步分析全国不同区域、不同发酵原料沼液的主要养分含量

特征,旨在推动沼液资源化,减少化肥施用<sup>[17]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

本研究以中文文献报道的入田沼液为研究对象,以其中的总氮、铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )、总磷、溶解性磷(DP)、总钾和速效钾(DK)等养分含量为主要分析指标。

### 1.2 数据来源及筛选

本研究以中国知网(CNKI)作为研究数据来源,对中国近 20 年有关沼液还田的文献进行检索。以“沼液”+“农业废弃物”为关键字和主题进行检索,检索范围为全部期刊,时间范围为 2000 年 1 月—2019 年 12 月,共检索出文献 750 篇。在此基础上,删除与主题不相关或无沼液养分含量信息的文献后,共获得有效文献 282 篇。其中,分析以猪粪、牛

粪和鸡粪等畜禽粪便为主要发酵原料的沼液的文献,分别有 185 篇、41 篇和 19 篇;少数发酵原料为农作物秸秆和人粪尿等户用生活垃圾,它们通常作为混合发酵原料进入户用沼气池,此类文献共 37 篇。本研究将沼液划分为 4 类,即以猪粪为发酵原料的沼液(PM)、以牛粪为发酵原料的沼液(DM)、以鸡粪为发酵原料的沼液(CM)和以秸秆、人粪尿等户用生活垃圾混合物为发酵原料的沼液(MM)。

由于沼液主要来源于湿发酵或半干发酵工艺,发酵浓度(TS)一般在 20% 以内<sup>[18-19]</sup>,因此,沼液中 TN、TP 和 TK 的总量不应高于发酵原料自身 TN、TP 和 TK 含量的 20%,否则视为异常值。在对文献中相关数据提取和整理的过程中,首先对超过阈值的数值进行剔除。猪粪、牛粪和鸡粪的养分含量参考李书田等<sup>[20]</sup>的研究数据,户用混合发酵原料的养分含量以人粪尿为标准<sup>[21]</sup>,详见表 1。

表 1 不同发酵原料的养分阈值

Table 1 The nutrient thresholds of different fermentation raw materials

养分指标	PM		DM		CM		MM	
	原料	沼液	原料	沼液	原料	沼液	原料	沼液
TN(%)	5.19	1.04	4.13	0.83	4.85	0.97	1.00	1.00
TP(%)	9.05	1.81	8.74	1.75	6.75	1.35	0.50	0.50
TK(%)	6.65	1.33	5.17	1.03	4.63	0.48	0.37	0.37

PM:以猪粪为发酵原料的沼液;DM:以牛粪为发酵原料的沼液;CM:以鸡粪为发酵原料的沼液;MM:以秸秆、人粪尿等户用生活垃圾混合物为发酵原料的沼液。TN:全氮;TP:全磷;TK:全钾。

### 1.3 数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2019 软件进行数据统计;利用 IBM SPSS 26 v. 软件对不同类型沼液及不同地区沼液的各指标的差异进行单因素方差分析(One-way ANOVA),均值比较采用 Duncan's 新复极差法,显著性水平  $P=0.05$ ;沼液中 TN 与铵态氮和硝态氮间的关系、TP 与可溶性磷间的关系、TK 与速效钾间的关系采用线性回归分析;采用 Origin 2018 软件(OriginLab, Northampton, USA)进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区域

研究区域为全国范围,其中香港特别行政区、台湾地区和澳门特别行政区缺少相关数据,因此,研究区域主要分布在 31 个省(直辖市、自治区)<sup>[22]</sup>。按地理区划分为:东北区,包括黑龙江省、吉林省、辽宁省;华北区,包括河北省、山西省、北京市、天津市和

内蒙古自治区;华东区,包括江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、山东省和上海市;华南区,包括广东省、海南省和广西壮族自治区;华中区,包括湖北省、湖南省、河南省;西北区,包括陕西省、甘肃省、青海省、新疆维吾尔自治区和宁夏回族自治区;西南区,包括重庆市、四川省、贵州省、云南省和西藏自治区。全国各地区沼液文献来源分布如图 1 所示。对于 PM,华东区研究数量最多,占比为 42.16%,华中区次之,占比为 16.22%,东北区最少,占比为 3.78%;对于 DM,西南区和西北区研究数量最多,占比均为 21.95%,华北区和华东区次之,占比均为 19.51%,华中区最少,占比为 4.88%,华南区无相关文献;对于 CM,华东区研究数量最多,占比为 36.84%,华北区和华中区次之,占比均为 21.05%,西北区和西南区最少,占比均为 10.53%,东北区和华南区无相关文献。对于 MM,西北区研究数量最多,占比为 37.84%,华北区次之,占比为 18.92%,

华中区和西南区最少,占比均为 5.41%,东北区无相关文献。全国范围内沼液研究的地区分布特征与区域养殖格局、气候条件、经济发展水平和居民生产生活方式等密切相关。华东区和华中区是生猪和禽类养殖的重点区域,西南区和西北区是肉牛和奶牛养殖的重点区域,沼气工程是畜禽养殖场粪污处理

的重要环节<sup>[13]</sup>,因此这些地区有关 PM、DM 和 CM 的研究最多;西北区能源紧缺,户用沼气池推广较早,因此有关 MM 的研究较多;而东北区关于沼液的研究相对较少,主要是由于该区域气候寒冷,难以达到沼气发酵所需的反应温度,因此应用受到限制。

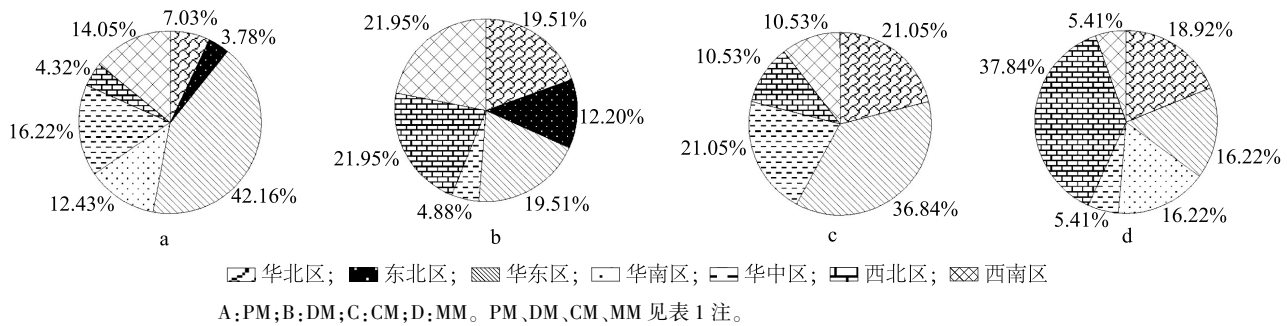


图1 全国沼液数据来源分布图  
Fig.1 The data source distribution map of digestate collected from different regions of China

2.2 不同类型沼液的特性

2.2.1 pH 值 由表 2 可知,全国范围内,PM 的 pH 范围为 4.23~9.20,均值为 7.46;DM 的 pH 范围为 6.10~9.20,均值为 7.72;CM 的 pH 范围为 7.36~8.50,均值为 8.01;MM 的 pH 范围为 6.15~8.20,均值为 7.37。所有沼液均呈弱碱性,与前人的研究结果相一致<sup>[13-15]</sup>,厌氧消化过程中体系中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量

较高导致沼液偏碱性<sup>[23]</sup>。不同类型沼液的 pH 由高到低依次为:CM>DM>PM>MM。以鸡粪为发酵原料的沼液 pH 最高,显著高于 PM 和 MM( $P<0.05$ ),这主要与原料自身特性有关。鸡粪中的氮素含量高于其他动物粪便,厌氧消化过程中产生更多的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ <sup>[23]</sup>,因此 CM 的 pH 高于其他类型沼液。

表 2 不同类型沼液的基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of different types of biogas slurry

指标	PM		DM		CM		MM	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
pH	4.23~9.20	7.46b	6.10~9.20	7.72ab	7.36~8.50	8.01a	6.15~8.20	7.37b
TN(mg/L)	0.80~7 280.00	1 166.71b	32.00~6 500.00	1 488.59b	400.00~5 700.00	3 226.13a	0.04~5 900.00	1 369.31b
TP(mg/L)	0.54~2 220.50	291.60b	10.00~3 700.00	561.67ab	49.00~4 650.00	959.71a	0.03~3 900.00	665.90ab
TK(mg/L)	0.33~8 880.00	1 144.26b	11.00~9 650.00	1 679.10b	390.00~4 400.00	2 858.31a	0.12~3 200.00	1 240.21b
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	66.53~1 800.00	597.53a	80.35~1 098.00	493.47a	ND	ND	250.50~787.80	519.15a
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/L)	0.19~472.16	67.84a	0.70~223.70	71.53a	ND	ND	ND	ND
DP(mg/L)	0.16~1 730.00	261.40a	80.00~1 860.00	416.88a	ND	ND	0.16~201.10	76.68a
DK(mg/L)	0.86~5 010.00	986.47a	263.20~2 500.00	1 418.33a	ND	ND	0.84~2 316.70	764.73a

ND 代表无数据;同一行数据后不同的小写字母表示各类型沼液间养分差异显著( $P<0.05$ )。PM、DM、CM、MM 见表 1 注。TN:全氮;TP:全磷;TK:全钾。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ :铵态氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ :硝态氮;DP:速效磷;DK:速效钾。

2.2.2 总氮及其各形态氮含量 如表 2 所示,PM 的 TN 含量范围为 0.80~7 280.00 mg/L,均值为 1 166.71 mg/L;DM 的 TN 含量范围为 32.00~6 500.00 mg/L,均值为 1 488.59 mg/L;CM 的 TN 含

量范围为 400.00~5 700.00 mg/L,均值为 3 226.13 mg/L;MM 的 TN 含量范围为 0.04~5 900.00 mg/L,均值为 1 369.31 mg/L。可见,全国范围内沼液中 TN 含量差异较大。不同类型沼液的 TN 含量由高到低



依次为:CM>DM>MM>PM。CM 中 TN 含量显著高于 PM、DM 和 MM ( $P<0.05$ ), 主要原因是鸡粪中 TN 含量明显高于猪粪、牛粪和人粪尿<sup>[24]</sup>。

沼液中的总氮主要由  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  组成, 它们也是作物生长需要的氮源<sup>[25]</sup>。全国范围内, 沼液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的含量均值稳定在 490~600 mg/L。其中, PM 中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量最高, 为 597.53 mg/L, 占其 TN 含量的 51.2%; MM 次之, 为 519.15 mg/L, 占其 TN 含量的 33.1%; DM 最低, 为 493.47 mg/L, 占其 TN 含量的 37.9%。倪中应等<sup>[16]</sup> 发现华东区畜禽粪便沼液中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量占 TN 含量的 46.4%~92.9%; 靳红梅等<sup>[13]</sup> 发现江苏省大型沼气工程猪粪沼液和牛粪沼液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量分别占 TN 含量的 71.8%~98.8% 和 73.3%~92.6%。可见, 大型沼气工程发酵工艺较为先进, 运行操作规范, 发酵原料消化充分, 氮元素转化完全, 因此产生的沼液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量占比大。本研究与已有研究相比,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量占 TN 含量的比例普遍偏低, 这可能是由于全国范围内沼液来源较为复杂, 各地区间发酵原料特性、发酵工艺和运行条件等差别较大, 部分中小型沼气工程对原料的消化不完全, 因此  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量占比较低。

沼液中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的占比较低, 已有的研究结果表明其含量占 TN 含量的比例不超过 1%<sup>[16]</sup>。本研究的整理结果发现, PM、DM 中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的平均含量分别为 67.84 mg/L 和 71.53 mg/L, 占其 TN 含量的比例分别为 5.8% 和 4.8%, 与前人的研究结果相比, 整体数值偏高。这是由于相当数量的沼液样本来自于露天的沼液贮存池, 沼液长期暴露在空气中易发生氧化反应, 同时其中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  可能通过硝化细菌的作用转化成  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ <sup>[26]</sup>, 因此导致  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量占比增加。

**2.2.3 总磷及速效磷(DP)含量** 如表 2 所示, PM 的 TP 含量范围为 0.54~2 220.50 mg/L, 均值为 291.60 mg/L; DM 的 TP 含量范围为 10.00~3 700.00 mg/L, 均值为 561.67 mg/L; CM 的 TP 含量范围为 49.00~4 650.00 mg/L, 均值为 959.71 mg/L; MM 的 TP 含量范围为 0.03~3 900.00 mg/L, 均值为 665.90 mg/L。可见, 全国范围内沼液中 TP 含量差异极大, 这可能是由于沼液贮存及前处理条件的差异所致。沼液中的磷元素与钙、镁、铁等离子结合生成磷酸盐沉淀, 极易由液相向固相转移<sup>[27-28]</sup>, 在后续沉淀过

程中会因颗粒沉降作用而导致沼液中 TP 含量的大幅削减<sup>[29]</sup>。因此, 不同取样时间和处理过程会导致沼液中 TP 含量的巨大差异。不同类型沼液中 TP 含量依次为: CM>MM>DM>PM。CM 中 TP 含量最高, 主要原因是鸡粪中 TP 含量高<sup>[30]</sup>。CM 中 TP 含量显著高于 PM ( $P<0.05$ )。

可溶性无机磷<sup>[31]</sup> 是植物可吸收的磷的主要形态。由表 2 可知, 全国范围内, PM、DM 和 MM 中 DP 含量的平均值分别为 261.40 mg/L、416.88 mg/L 和 76.68 mg/L, 其中, PM 的 DP 含量占其 TP 含量的 89.6%, DM 的 DP 含量占其 TP 含量的 74.2%, 说明沼液可以为作物生长提供较多有效的磷资源。但同时, DP 具有较大的移动性, 在沼液施用过程中要防止其流失造成水体污染<sup>[32]</sup>。DP 数据差异较大, 这主要是由于磷素转化较为复杂, 前期研究发现, DP 在吸附到固相的同时, 也发生着固相中水溶态磷转化为难溶态磷的过程<sup>[28]</sup>。

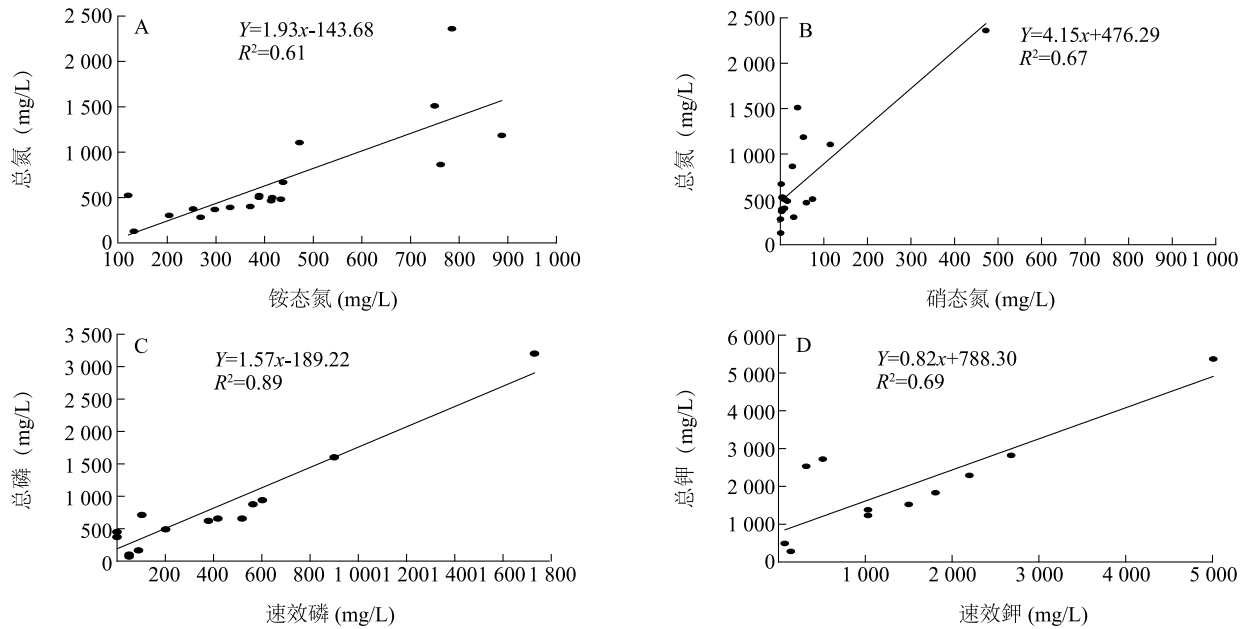
**2.2.4 总钾及速效钾(DK)含量** 如表 2 所示, 全国范围内, PM、DM、CM 和 MM 中 TK 的含量平均值分别为 1 144.26 mg/L、1 679.10 mg/L、2 858.31 mg/L 和 1 240.21 mg/L。以鸡粪为发酵原料的沼液 TK 含量最高, 显著高于 PM、DM 和 MM ( $P<0.05$ )。这主要是由于鸡粪中的钾元素含量远高于其他粪便<sup>[21]</sup>。

钾的溶解性较大, PM 中 DK 的含量平均值为 986.47 mg/L, 占其 TK 含量的 86.2%; DM 中 DK 的含量平均值为 1 418.33 mg/L, 占其 TK 含量的 84.5%; MM 中 DK 的含量平均值为 764.73 mg/L, 占其 TK 含量的 61.7%。这与倪中应等<sup>[16]</sup> 的研究结果基本一致, 他们发现 DK 含量占 TK 含量的比例为 63.14%~95.48%。可见, 沼液中的钾具有较高的生物有效性, 是农田良好的钾肥来源。

**2.2.5 沼液中主要养分总含量与其速效养分含量间的关系** 以 PM 为例, 从统计文献中提取氮、磷和钾的总量及其各形态含量的完整数据串进行相关性分析, 以指示变量间的相互关系及其紧密程度<sup>[33]</sup>。结果表明, TN 含量与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量之间均呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), Pearson 相关系数分别为 0.798 和 0.832。TN 含量与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量之间的预测回归模型分别为:  $Y=1.93x-143.68$  (图 2A) 和  $Y=4.15x+476.29$  (图 2B)。TP 含量和 DP 含量之间呈极显著 ( $P<0.01$ ) 正相关, Pear-

son 相关系数为 0.949, 预测回归方程为  $Y=1.57x+189.22$  (图 2C)。TK 含量和 DK 含量之间呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), Pearson 相关系数为 0.846, 预测回归方程为  $Y=0.82x+788.30$  (图 2D)。这表明以猪

粪为发酵原料的沼液中氮、磷和钾的总量与其速效养分含量间存在显著的正相关关系, 对后续的资源化利用潜力和环境风险评估具有指导意义。



A: PM; B: DM; C: CM; D: MM。PM、DM、CM、MM 见表 1 注。

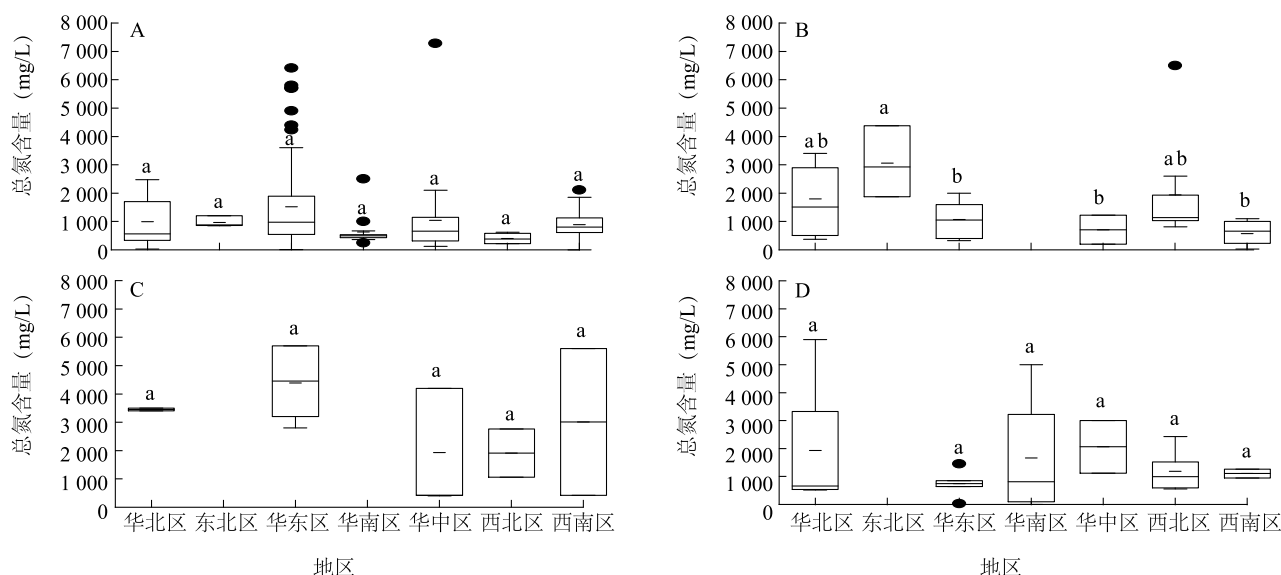
图 2 沼液中主要养分含量与其速效养分含量间的关系

Fig.2 The relationship between main nutrient content and available nutrient content in biogas slurry

### 2.3 不同区域沼液的养分特征

2.3.1 TN 含量特征 由图 3 可知, 各地区猪粪沼液中 TN 含量的中值和平均值均小于 1 500 mg/L, 且平均值大于中值, 说明各地区猪粪沼液中 TN 含量的数据中偏小的数据较多。各地区 TN 含量的数据较为集中, 虽然数据样本中存在个别离群的大值, 但总体上离散程度小, 各地区间无显著差异 (图 3A)。各地区牛粪沼液中 TN 含量波动较大, 东北区 TN 含量的平均值和中值均在 3 000 mg/L 左右, 显著高于华东区、华中区和西南区 ( $P<0.05$ ) (图 3B)。鸡粪沼液中 TN 含量的波动较 PM 和 DM 更大 (图 3C), 但各地区间无明显差异; 户用沼气池沼液中 TN 含量平均值和中值均处于 2 000 mg/L 以下 (图 3D)。虽然各地区间差异不显著, 但华北区和华南区 TN 含量平均值和中值有明显的数值差距, 其平均值远大于中值, 说明该地区户用沼气池沼液中 TN 含量的数值存在一些离群的大值。这说明, 在区域尺度上进行承载力估算时, 应充分考虑各地区沼液中养分含量的差异。

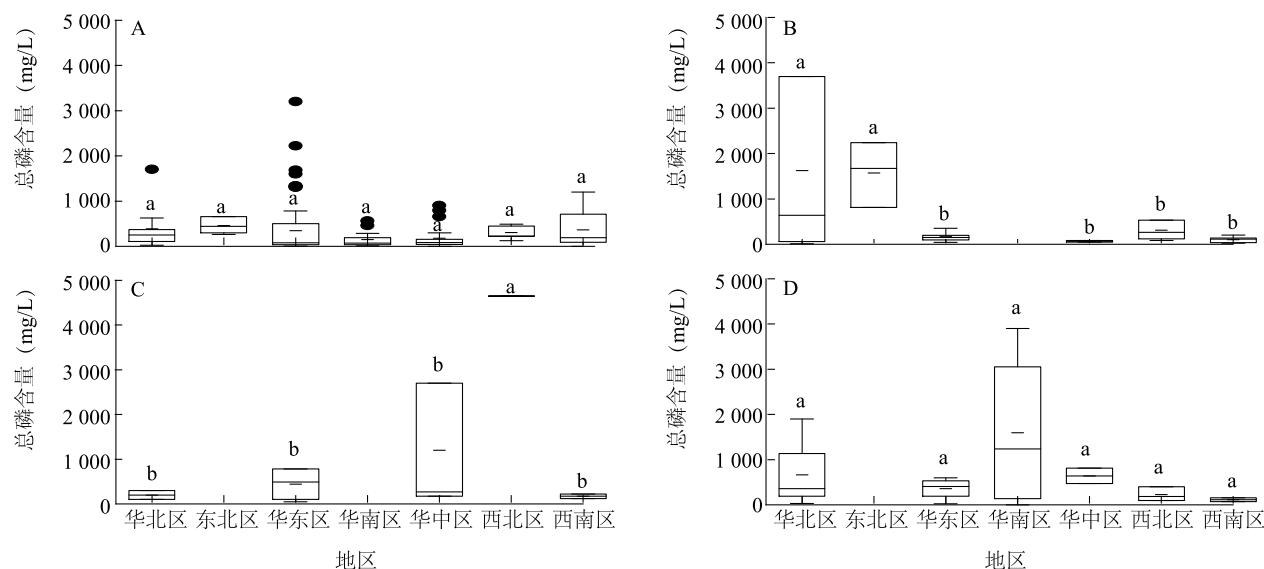
2.3.2 TP 含量特征 各地区猪粪沼液中 TP 含量的数据较为集中, 离散程度小。中值和平均值均小于 1 000 mg/L, 且均值大于中值, 说明虽然数据样本中存在个别离群的大值, 但由于各地区猪粪沼液中 TP 含量的数据中偏小的数据较多, 各地区间无显著差异 (图 4A)。各地区牛粪沼液中 TP 含量波动较大, 其中华北区和东北区数据离散程度大, 2 个地区 TP 含量的平均值在 1 500 mg/L 左右, 显著高于其他地区 ( $P<0.05$ ) (图 4B); 各地区鸡粪沼液中 TP 含量的波动较 PM 和 DM 大, 其中西北区 TP 含量的平均值和中值均在 4 500 mg/L 左右, 显著高于其他地区 ( $P<0.05$ ) (图 4C); 户用沼气池沼液中 TP 含量平均值和中值均处于 1 600 mg/L 以下 (图 4D), 虽然各地区之间不存在显著差异, 但华南区 TP 含量的平均值和中值略高于其他地区, 说明该地区 TP 含量数据样本极差最大, 户用沼液 TP 含量中存在个别离群值。因此, 在区域尺度上测算非点源磷污染负荷时, 应充分考虑各地区沼液中养分含量的差异性。



A:PM;B:DM;C:CM;D:MM。PM、DM、CM、MM 见表 1 注。箱体上线、中线和下线分别表示第三四分位线、中值和第一四分位值;短线表示平均值;最上方和最下方的线段表示最大值和最小值;黑点表示异常值;不同小写字母表示各地区间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 不同地区沼液中总氮含量特征

Fig.3 The characteristics of total nitrogen content in biogas slurry collected from different regions of China



A:PM;B:DM;C:CM;D:MM。PM、DM、CM、MM 见表 1 注。箱体上线、中线和下线分别表示第三四分位线、中值和第一四分位值;短线表示平均值;最上方和最下方的线段表示最大值和最小值;黑点表示异常值;不同小写字母表示各地区间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 不同地区沼液中总磷含量特征

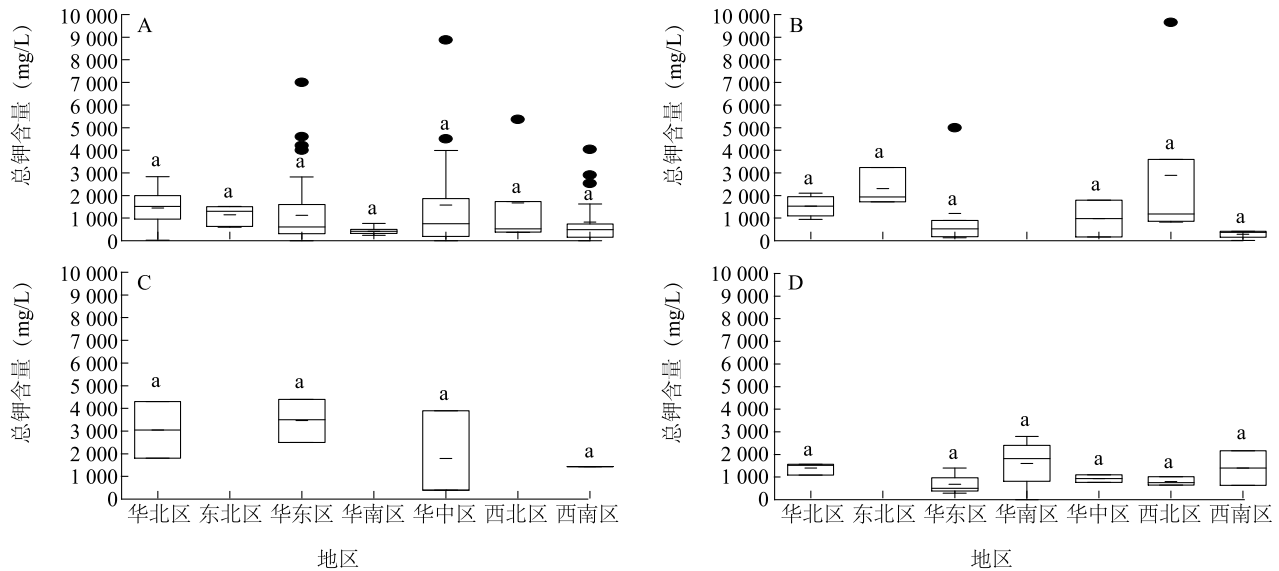
Fig.4 The characteristics of total phosphorus content in biogas slurry collected from different regions of China

2.3.3 TK 含量特征 各地区猪粪沼液中 TK 含量的中值和平均值均小于 1 500 mg/L,虽然各地区间的差异不显著,但华东区、华中区和西北区 TK 含量的数值有明显差距,其平均值远大于其中值,说明该地区猪粪沼液中 TK 含量存在较多离群值(图 5A);

各地区牛粪沼液中 TK 含量的中值和平均值均小于 3 000 mg/L,各地区牛粪沼液 TK 含量较猪粪沼液 TK 含量波动较大,但差异不显著,其中西北区 TK 含量平均值和中值较其他地区有着明显差距,其平均值远大于其中值,说明该地区牛粪沼液中 TK 含

量偏大的数值较多(图 5B);鸡粪沼液中 TK 含量的平均值和中值均小于 3 500 mg/L,其波动较 PM 和 DM 更大,但各地区间无显著差异(图 5C);户用沼气池沼液中 TK 含量平均值和中值均处于 2 000

mg/L 以下(图 5D),各地区平均值与中值差距甚小,无显著差异。这说明,在区域尺度上进行农用风险评价时,应充分考虑各地区沼液中养分含量的差异。



A:PM;B:DM;C:CM;D:MM。PM、DM、CM、MM 见表 1 注。箱体上线、中线和下线分别表示第三四分位线、中值和第一四分位值;短线表示平均值;最上方和最下方的线段表示最大值和最小值;黑点表示异常值;不同小写字母表示各地区间的差异显著( $P<0.05$ )。

图 5 不同地区沼液中总钾含量特征

Fig.5 The characteristics of total potassium content in biogas slurry collected from different regions of China

### 3 结论

(1)全国范围内沼液均呈弱碱性<sup>[34-35]</sup>,猪粪沼液中 TN、TP 和 TK 平均含量为 1 166.71 mg/L、291.60 mg/L 和 1 144.26 mg/L;牛粪沼液中分别为 1 488.59 mg/L、561.67 mg/L 和 1 679.10 mg/L;鸡粪沼液中分别为 3 226.13 mg/L、959.71 mg/L 和 2 858.31 mg/L;户用沼气池沼液中分别为 1 369.31 mg/L、665.90 mg/L、1 240.21 mg/L;

(2)猪粪沼液中,氮、磷和钾的总量与其速效养分含量间存在显著( $P<0.05$ )的正相关关系, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量分别占 TN 含量的 51.2% 和 5.8%,DP 含量占 TP 含量的 89.6%,DK 含量占 TK 含量的 86.2%;

(3)不同地区沼液中的养分含量存在明显差异,在区域尺度上分析土地承载力、非点源污染负荷和环境风险评价时,应充分考虑地区间不同沼液中养分含量的差异性。

### 参考文献:

- [1] 李景明,徐文勇,李冰峰,等.关于中国沼气行业发展困境和出路的思考[J]. 2020,38(12): 1563-1568.
- [2] 国家发展改革委和农业部.全国农村沼气发展“十三五”规划[R].北京:国家发展改革委和农业部,2017.
- [3] 屈安安,郑鑫,王阳,等.基于文献计量的沼渣沼液处理利用技术研究态势分析[J]. 中国沼气,2020,38(6): 86-94.
- [4] 田宜水,单明,孔庚,等.我国生物质经济发展战略研究[J]. 中国工程科学,2021,23(1): 133-140.
- [5] 中华人民共和国农业部.沼肥施用技术规范:NY/T 2065-2011[S].北京:中国农业出版社,2011.
- [6] ZHOU S Y, ZHANG B, CAI Z F. Emergy analysis of a farm biogas project in China: a biophysical perspective of agricultural ecological engineering[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(5): 1408-1418.
- [7] JIANG X Y, SOMMER S G, CHRISTENSEN K V. A review of the biogas industry in China[J]. Energy Policy, 2011, 39(10): 6073-6081.
- [8] HAGOS K, ZONG J P, LI D X, et al. Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives[J]. Re-



- newable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 1485-1496.
- [9] 陶秀萍,董红敏. 畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 37-42.
- [10] SHEN L, LIU L, YAO Z, et al. Development potentials and policy options of biomass in China [J]. Environmental Management, 2010, 46(4): 539-554.
- [11] 石 吕, 刘 建, 魏亚凤, 等. 沼液在农业领域的资源化利用现状[J]. 中国农学通报, 2019, 35(35): 109-117.
- [12] 袁艳文, 刘 昭, 赵立欣, 等. 生物质沼气工程发展现状分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(6): 28-33.
- [13] 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.
- [14] 钟 攀, 李泽碧, 李清荣, 等. 重庆沼气肥养分物质和重金属状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 30(S1): 165-171.
- [15] 吕锦萍, 李俊杰, 巴哈提古丽, 等. 博州地区沼气池沼液沼渣有机质及养分含量分析[J]. 中国沼气, 2008(5): 28-29.
- [16] 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.
- [17] 董红敏. 力推肥料化和能源化利用 破解畜禽粪污治理难题[J]. 北方牧业, 2017(16): 4, 8.
- [18] 钟志堂, 朱 虹. 有机固体废弃物干法厌氧发酵技术[J]. 农业装备技术, 2010, 36(3): 44-46.
- [19] BOLZONELLA D, INNOCENTI L, PAVAN P, et al. Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase [J]. Bioresource Technology, 2003, 86(2): 123-129.
- [20] 李书田, 刘荣乐, 陕 红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184.
- [21] 封勇涛, 张克勇. 人粪尿的理化性质及合理利用[J]. 南方农业, 2014, 8(9): 108-109.
- [22] 鞠昌华, 芮茜艺, 朱 琳, 等. 我国畜禽养殖污染分区治理研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(12): 62-69.
- [23] 黄丹丹, 罗皓杰, 应洪仓, 等. 沼液贮存中甲烷和氨气排放规律实验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 190-193.
- [24] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [25] ORSEL M, KRAPP A, DANIEL-VEDELE F. Analysis of the NRT2 nitrate transporter family in *Arabidopsis*. Structure and gene expression [J]. Plant Physiology, 2002, 129(2): 886-896.
- [26] 王小花. 不同氮代谢微生物对有机肥中氮形态转化的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [27] 付广青, 叶小梅, 靳红梅, 等. 厌氧发酵对猪与奶牛两种粪污固液相中磷含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 179-184.
- [28] 付广青, 靳红梅, 叶小梅, 等. 猪和奶牛粪污厌氧发酵中固相磷形态变化分析[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(2): 239-245.
- [29] 刘 威, 石金霞, 管益东, 等. 规模猪场沼液沉淀池底泥中磷形态变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 938-944.
- [30] LEYTEM A B, TURNER B L, THACKER P A. Phosphorus composition of manure from swine fed low-phytate grains: evidence for hydrolysis in the animal [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(6): 2380-2383.
- [31] MCDOWELL R W, CONDRON L M, STEWART I. An examination of potential extraction methods to assess plant-available organic phosphorus in soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44(5): 707-715.
- [32] 李 刚, 岳建芝, 郭前辉. 秸秆沼气工程化对环境的影响及应对措施[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 200-204.
- [33] 张苏江, 陈庆波. 数据统计分析软件 SPSS 的应用(五)——相关分析与回归分析[J]. 畜牧与兽医, 2003(9): 16-18.
- [34] 侯福银, 杨智青, 陈应江, 等. 猪粪沼液替代尿素对水稻生长性状、产量和饲用品质的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(6): 1197-1203.
- [35] 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.

(责任编辑: 陈海霞)