

徐庆贤,官雪芳,黄菊青,等. 规模化养猪场上流式沼气池发酵液养分变化分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(11):281-287.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.11.054

规模化养猪场上流式沼气池发酵液养分变化分析

徐庆贤,官雪芳,黄菊青,钱 蕾,林 斌

(福建省农业科学院农业工程技术研究所,福建福州 350003)

摘要:为实现沼液的有效利用、上流式沼气池运行参数优化调整,以及为沼液深度处理奠定基础,以福建省新星种猪育种有限公司上流式沼气池为例,测定不同发酵时间(0、24、48 h)、不同发酵层(0~9 m)沼液的养分含量,并对其变化规律进行探讨。结果表明:相同发酵时间、不同发酵层的沼液乙酸含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、有机质含量差异均不显著;相同发酵层、不同发酵时间沼液的乙酸含量、有效钾含量、有机质含量均存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)差异;相同发酵层、不同发酵时间沼液的碱解氮含量、有效磷含量差异均不显著。

关键词:规模化养猪场;上流式沼气池;沼液;发酵时间;发酵层;养分

中图分类号: S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)11-0281-07

养猪场粪便污水是一种高浓度有机废水^[1-2],我国养猪场集约化快速发展以及养猪场粪便污水处理技术相对滞后,导致猪场污水成为重要的污染源^[3]。在环境持续恶化的同时,国家对于能源的需求又急剧增加,这促使国家大力发展沼气事业^[4]。

规模化沼气技术是可再生能源和环境保护领域关注的重点^[5]。利用沼气技术处理规模化养猪场粪污,不但能够有效处理养殖废弃物,避免环境污染,而且还可以通过沼气生产向周围用户提供清洁能源,对开发可再生能源及发展农业循环经济都具有重要意义^[6-7]。

沼气工程可持续发展的重要因素就是沼液处理问题^[8]。沼液是粪便污水通过厌氧发酵后的产物,富含多种氨基酸、吡啶乙酸等能够提高农作物产量的营养物质^[9-10],是一种兼备速效与长效的微生物有机肥^[11],能有效改良土壤^[12]。张媛等的研究表明,在施用沼液后,土壤速效养分在一定阶段会随沼液施入量的增加而有所增加^[13]。农作物吸

收稿日期:2019-06-25

基金项目:福建省科技公益类科研院所专项(编号:2014R1015-12、2018R1014-4);福建省农业科学院科技服务团队项目(编号:kjfw15)。

作者简介:徐庆贤(1979—),男,福建宁德人,硕士,副研究员,从事农村能源和农业环保研究与推广工作。E-mail:xqx591@126.com。
通信作者:林 斌,博士,研究员,从事农村能源和农业环保研究与推广工作。E-mail:linbin591@126.com。

[2]中国社会科学院. 能源蓝皮书——世界能源发展报告(2015)[R]. 北京:2015.

[3]刘晶森,马金玉,李世奎,等. 华北平原北部太阳辐射及地表辐射平衡特征[J]. 太阳能学报,2009,30(5):577-585.

[4]申彦波,赵宗慈,石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. 地球科学进展,2008,23(9):915-923.

[5]Lorenz E, Hurka J, Heinemann D, et al. Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2009, 2(1):2-10.

[6]Collares - Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values[J]. Solar Energy, 1979, 22(2):155-164.

[7]孙朋杰,陈正洪,成 驰,等. 一种改进的太阳辐射 MOS 预报模

型研究[J]. 太阳能学报,2015,36(12):3048-3053.

[8]王 佳,刘寿东,刘爱霞,等. 天津地区地面逐时太阳辐射的模拟计算[J]. 科学技术与工程,2012,12(36):9805-9809,9832.

[9]高绍凤. 应用气候学[M]. 北京:气象出版社,2001.

[10]翁笃鸣. 中国太阳直接辐射的气候计算及分布特征[J]. 太阳能学报,1986,7(2):121-130.

[11]徐州市人民政府. 徐州市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[R]. 2016.

[12]徐州市人民政府. 徐州市“十三五”新能源(可再生能源)发展专项规划[R]. 2016.

[13]黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,2004.

[14]Ren L, Glasure Y. Applicability of the revised mean absolute percentage errors (MAPE) approach to some popular normal and non-normal Independent time series[J]. International Advances in Economic Research, 2009, 15(4):409-420.

收利用的是土壤速效养分,它们的含量决定了土壤的肥力水平^[14]。本试验通过研究上流式沼气池中不同发酵层和不同发酵时间沼液的养分含量变化,旨在为合理施用沼液和培肥土壤提供依据,同时对上流式沼气池运行参数进行优化调整以及后续沼液深度处理与利用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 上流式沼气池

上流式沼气池建于福建省新星种猪育种有限公司(建瓯市徐墩镇山边村)规模化养猪场内,有效容积 670 m³,主体结构为钢筋混凝土,沼气池内外涂刷有机玻璃钢,安装 300 m² 的太阳能真空面板用于加热循环水为沼气池发酵液加温,水力滞留期(HRT)10 d。

1.2 样品采集

沼液样品采集于福建省新星种猪育种有限公司上流式沼气池不同发酵层,从下到上 1、2、3、4、5、6、7、8 层(1 代表离池底 1 m,2 代表离池底 2 m,3 代表离池底 3 m,以此类推),另外 0 为进料口、9 为出料口。2017 年 10 月 13 日进料 67 m³ 后,分别于 0、24、48 h 取样,样品为相同发酵时间、相同发酵层 3 点采集后混合为 1 个样品,采集样品装入干净塑料瓶中 4 ℃ 厌氧保存。

1.3 测试方法

碱解氮含量的测定采用碱解扩散法;乙酸含量的测定采用气相色谱法;有效钾含量的测定采用 1.0 mol/L NH₄OAc 浸提-火焰光度法^[15];有机质含量的测定参照 NY/T 1976—2010《水溶肥料有机质含量的测定》;有效磷含量的测定采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法;总氮含量的测定采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;总有机碳含量的测定采用 HJ 501—2009 燃烧氧化-非色散红外吸

收法。
1.4 数据处理
采用 SPSS 17.0 数据处理系统对数据进行方差及均数比较分析。

2 结果与分析

2.1 沼液中乙酸含量分析

有机物在厌氧发酵过程中,一般分为 3 个阶段:发酵水解、产氢产乙酸和产甲烷阶段^[16-17]。产生甲烷的主要原料是乙酸、CO₂、H₂ 及甲醇^[18],其中乙酸分解产生的甲烷占甲烷总量的 70%^[19],因而厌氧水解酸化产物中乙酸占总挥发性脂肪酸的比例,可以有效反映厌氧发酵是否稳定以及是否发酵完全。对不同层、不同发酵时间沼液中乙酸含量进行检测,结果详见图 1。

从图 1 可以看出,进水口和出水口沼液乙酸含量分别为 4.45、25.50 mg/L,经沼气池发酵后,沼液乙酸含量增加,沼气池中的乙酸含量基本上高于进样中的含量。对不同层、不同发酵时间沼液的乙酸含量进行方差分析(表 1),可以看出,不同发酵时间沼液乙酸含量呈极显著差异($P=0.006<0.01$);不同层间沼液乙酸含量差异不显著($P=0.626>0.05$)。

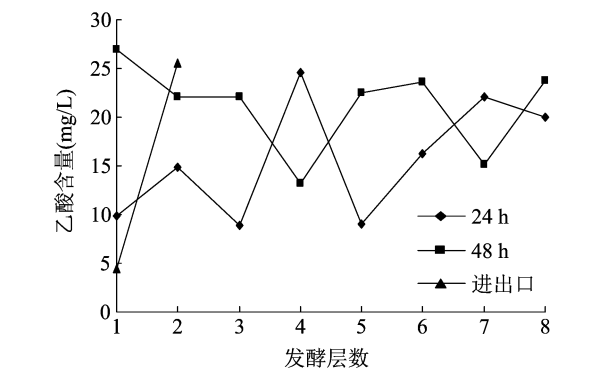


图1 不同层、不同发酵时间对沼液中乙酸含量的影响

表 1 不同层、不同发酵时间对沼液中乙酸含量影响的方差分析结果

方差来源	Ⅲ型平方和	df	均方	F 值	P 值
校正模型	1 548.007	17	91.059	3.761	0.004
截距	7 145.622	1	7 145.622	295.134	0.000
发酵时间	236.640	1	236.640	9.774	0.006
不同层	151.066	8	18.883	0.780	0.626
发酵时间×不同层	707.808	7	101.115	4.176	0.007
误差	435.806	18	24.211		
总计	13 716.675	36			
校正的总计	1 983.813	35			

注:模型的 R² = 0.780(调整 R² = 0.573)。

表 2 为不同发酵时间沼液的乙酸含量均数两两比较结果,可以看出,发酵 0 h(进样口)样品中沼液乙酸含量与其他发酵时间中的在不同子集内,说明沼液在沼气池发酵后其乙酸含量明显增加。

表 2 不同发酵时间沼液乙酸含量均数的
两两比较(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

发酵时间 (h)	n (个)	乙酸含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
0	2	4.445	
24	16		15.719
48	18		21.640
P 值		1.000	0.077

注:n 表示样本数量。

表 3 为不同取样口中沼液乙酸含量均数两两比较结果,可以看出,进样口样品中沼液乙酸含量与其他不同层取样口中沼液乙酸含量在不同子集内,说明进样口中沼液乙酸含量低于其他取样口。

表 3 不同层沼液乙酸含量均数的两两比较(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

发酵时间 (h)	n (个)	乙酸含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
0	2	4.445	
3	4		15.543
5	4		15.808
1	4		18.378
2	4		18.510
7	4		18.580
4	4		18.925
6	4		19.913
8	4		21.850
9	2		25.500
P 值		1.000	0.247

2.2 沼液中碱解氮含量分析

土壤碱解氮含量是反映土壤供氮能力的重要指标之一^[20]。张媛等的研究表明,沼液能有效增加土壤碱解氮含量^[13]。对不同层、不同发酵时间沼液中的碱解氮含量进行检测,结果详见图 2。可以看出,进水口和出水口沼液碱解氮含量分别为 331.00、230.00 mg/L,经沼气池发酵后,沼液中碱解氮减少,而沼气池中的碱解氮含量也低于进口沼液。

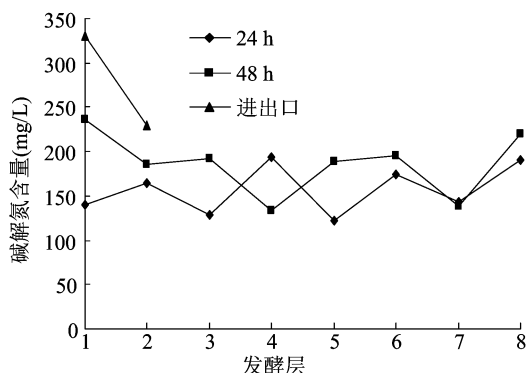


图2 不同层、不同发酵时间下的沼液碱解氮含量

对不同层、不同发酵时间沼液中的碱解氮含量进行方差分析(表 4),可以看出,不同发酵时间和不同层间沼液碱解氮含量差异不显著,其对应 P 值分别为 0.082、0.517,均大于 0.05。

表 5 为不同发酵时间沼液的碱解氮含量均数两两比较结果,可以看出,发酵 0 h(进样口)样品中沼液碱解氮含量与其他发酵时间处理在不同子集内,说明沼液在沼气池发酵后其碱解氮含量降低。

表 6 为不同取样口中沼液的碱解氮含量均数两两比较结果,进样口样品中沼液碱解氮含量与其他不同层取样口中沼液碱解氮含量在不同的子集内,说明进样口中沼液碱解氮含量高于其他取样口。

表 4 不同层、不同发酵时间沼液的碱解氮含量方差分析结果

方差来源	Ⅲ型平方和	df	均方	F 值	P 值
校正模型	86 617.889	17	5 095.170	2.541	0.029
截距	1 130 380.469	1	1 130 380.469	563.671	0.000
发酵时间	6 815.281	1	6 815.281	3.398	0.082
不同层	14 903.142	8	1 862.893	0.929	0.517
发酵时间×不同层	16 012.969	7	2 287.567	1.141	0.382
误差	36 097.000	18	2 005.389		
总计	1 335 650.000	36			
校正的总计	122 714.889	35			

注:模型的 $R^2=0.876$ (调整 $R^2=0.759$)

表 5 不同发酵时间沼液碱解氮含量均数的
两两比较(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

发酵时间 (h)	n (个)	碱解氮含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
24	16	157.000	
48	18	190.778	
0	2		331.000
P 值		0.255	1.000

表 6 不同层沼液碱解氮含量均数的
两两比较(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

取样口	n (个)	碱解氮含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
7	4	141.250	
5	4	155.250	
3	4	160.250	
4	4	163.500	
2	4	174.500	
6	4	184.500	
1	4	188.250	
8	4	205.250	
9	2	227.500	
0	2		331.000
P 值		0.300	1.000

2.3 沼液中有效磷含量分析

对不同层、不同发酵时间沼液中有效磷含量进行检测(图 3),可以看出,进水口和出水口沼液有效磷含量分别为 87.05、40.70 mg/L,经沼气池发酵后,沼液有效磷含量下降,沼气池中的有效磷含量基本上低于进样口。

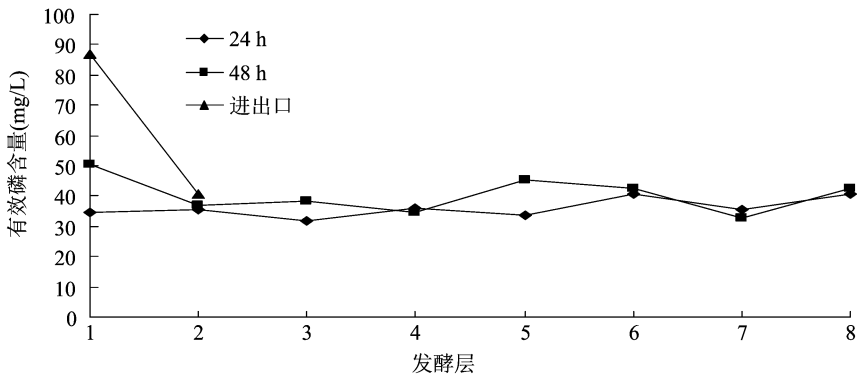


图3 不同层、不同发酵时间沼液的有效磷含量

对不同层、不同发酵时间沼液的有效磷含量进行方差分析(表 7),可以看出,不同发酵时间和不同

层沼液的有效磷含量差异均不显著,其 P 值分别为 0.108、0.613,均大于 0.05。

表 7 不同层、不同发酵时间对沼液中有效磷含量影响的方差分析结果

方差来源	Ⅲ型平方和	df	均方	F 值	P 值
校正模型	5 254.190	17	309.070	5.957	0.000
截距	60 741.707	1	60 741.707	1 170.774	0.000
发酵时间	148.350	1	148.350	2.859	0.108
取样口	330.706	8	41.338	0.797	0.613
发酵时间×取样口	292.812	7	41.830	0.806	0.593
误差	933.870	18	51.882		
总计	66 999.620	36			
校正的总计	6 188.060	35			

注:模型的 $R^2=0.849$ (调整 $R^2=0.707$)。

表 8 为不同发酵时间沼液有效磷含量均数两两比较结果,可以看出,发酵 0 h(进样口)样品中沼液有效磷含量与其他发酵时间处理在不同子集内,说明沼液经沼气池发酵后其有效磷含量下降。

表 9 为不同取样口中沼液有效磷含量均数两两比较结果,进样口(即取样口为 0)中沼液有效磷含量与其他不同层取样口沼液的有效磷含量在不同的子集内,说明进样口中沼液有效磷含量高于其他

表 8 不同发酵时间沼液有效磷含量均数的
两两比较(S-N-K法,α=0.05)

发酵时间 (h)	n (个)	有效磷含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
24	16	36.100	
48	18	40.439	
0	2		87.050
P 值		0.360	1.000

取样口。

2.4 沼液中有效钾含量分析

土壤中全钾测定可以反映出土壤含钾量,有效钾含量的测定可以反映出土壤实际供钾状况^[21]。祝延立等利用沼液种植玉米研究沼液对土壤理化性质的影响,结果表明,在一定施用量范围内,沼液能够有效增加土壤全钾、速效钾含量^[22]。对不同层、不同发酵时间沼液中有效钾含量进行检测,结

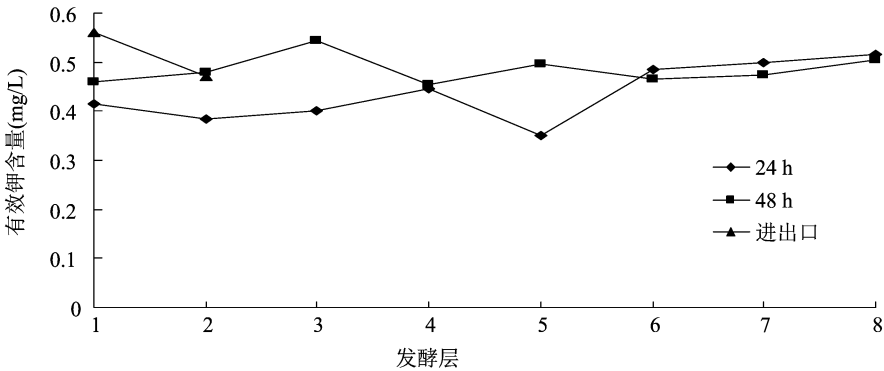


图4 不同层、不同发酵时间沼液的有效钾含量

对其进行方差分析(表 10),可以看出,不同发酵时间沼液有效钾含量呈极显著差异($P=0.005 <$

表 9 不同层沼液有效磷含量均数的
两两比较(S-N-K法,α=0.05)

取样口	n (个)	有效磷含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
7	4	34.025	
3	4	35.200	
4	4	35.275	
2	4	36.275	
5	4	39.425	
9	2	40.700	
8	4	41.650	
6	4	41.675	
1	4	42.500	
0	2		87.050
P 值		0.833	1.00

果如图 4 所示。可以看出,各样品中有效钾含量在 0.35 ~ 0.55 mg/L 之间。

0.01);不同层间沼液有效钾含量差异不显著($P=0.146 > 0.05$)。

表 10 不同层、不同发酵时间沼液的有效钾含量方差分析结果

方差来源	Ⅲ型平方和	df	均方	F 值	P 值
校正模型	0.098	17	0.006	3.182	0.010
截距	6.231	1	6.231	3 424.475	0.000
发酵时间	0.019	1	0.019	10.183	0.005
不同层	0.026	8	0.003	1.786	0.146
发酵时间 × 取样口	0.036	7	0.005	2.811	0.037
误差	0.033	18	0.002		
总计	7.981	36			
校正的总计	0.131	35			

注:模型的 $R^2=0.750$ (调整 $R^2=0.514$)。

表 11 为不同发酵时间沼液乙酸含量均数两两比较结果,可以看出,发酵 0 h(进样口)样品中沼液有效钾含量与其他发酵时间处理在不同子集内,说明沼液在沼气池发酵后其有效钾含量明显降低。

表 12 为不同取样口中沼液有效钾含量均数两两比较结果,进样口(取样口为 0)与取样层 3、6、7、8、出样口在同一子集,但 1 ~ 8 层及出样口同在另一子集,说明除了进样口,各取样口沼液中有效钾含

表 11 不同发酵时间沼液有效钾含量均数的
两两比较(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

发酵时间 (h)	n (个)	有效钾含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
24	16	0.437	
48	18	0.483	
0	2		0.560
P 值		0.107	1.000

表 12 不同层沼液的有效钾含量均数
两两比较(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

取样口	n (个)	有效钾含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
5	4	0.423	
2	4	0.433	
1	4	0.438	
4	4	0.450	
9	2	0.470	0.470
3	4	0.473	0.473
6	4	0.475	0.475
7	4	0.488	0.488
8	4	0.510	0.510
0	2		0.560
P 值		0.234	0.119

量变化不明显。

2.5 沼液中有机质含量分析

对不同层、不同发酵时间沼液有机质含量进行检测(图 5),可以看出,进水口和出水口沼液有机质含量分别为 35.60%、19.57%,经沼气池发酵后,沼液有机质含量降低,沼气池中的有机质含量基本上低于进样口。

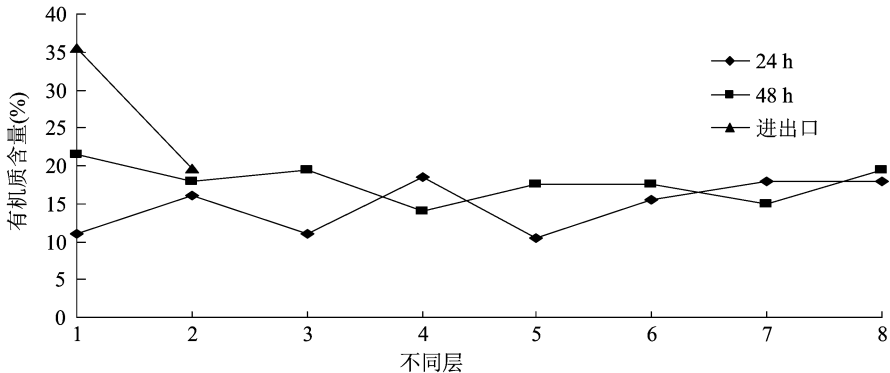


图5 不同层、不同发酵时间沼液的有机质含量

对不同层、不同发酵时间沼液的有机质含量进行方差分析(表 13),可以看出,不同发酵时间沼液

有机质含量差异显著($P=0.031 < 0.05$),不同层间沼液有机质含量差异不显著($P=0.788 > 0.05$)。

表 13 不同层、不同发酵时间对沼液有机质含量方差分析结果

方差来源	Ⅲ型平方和	df	均方	F 值	P 值
校正模型	0.099	17	0.006	4.417	0.002
截距	1.078	1	1.078	815.361	0.000
发酵时间	0.007	1	0.007	5.445	0.031
取样口	0.006	8	0.001	0.571	0.788
发酵时间×取样口	0.020	7	0.003	2.150	0.090
误差	0.024	18	0.001		
总计	1.233	36			
校正的总计	0.123	35			

注:模型的 $R^2=0.807$ (调整 $R^2=0.624$)。

表 14 为不同发酵时间沼液有机质含量均数两两比较结果,可以看出,发酵 0 h(进样口)样品中沼液有机质含量与其他发酵时间处理在不同子集内,

说明沼液在沼气池发酵后其有机质含量明显下降。
表 15 为不同取样口中沼液有机质含量均数两两比较结果,进样口中沼液有机质含量与其他不同

表 14 不同发酵时间沼液有机质含量均数的
两两比较(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

发酵时间 (h)	n (个)	有机质含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
24 h	16	14.80	
48 h	18	18.10	
0 h	2		35.00
P 值		0.182	1.000

表 15 不同层沼液有机质含量均数
两两比较结果(S-N-K 法, $\alpha=0.05$)

发酵时间 (h)	n (个)	有机质含量(mg/L)	
		子集 1	子集 2
5	4	14.00	
3	4	15.30	
4	4	16.30	
1	4	16.30	
6	4	16.53	
7	4	16.53	
2	4	17.03	
8	4	18.80	
9	2	20.00	
0	2		35.00
P 值		0.485	1.000

层取样口处理在不同的子集内,说明进样口中沼液有机质含量高于其他取样口。

3 结论与讨论

沼气池进水口沼液乙酸含量为 4.45 mg/L、碱解氮含量为 331.00 mg/L、有效磷含量为 87.05 mg/L、有效钾含量为 0.55 mg/L,有机质含量为 35.60%;经沼气池发酵后,沼液乙酸含量增加,沼液碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、有机质含量均减少;出水口沼液乙酸含量为 25.50 mg/L,沼液碱解氮含量为 230.00 mg/L,有效磷含量为 40.70 mg/L,有效钾含量为 0.47 mg/L,有机质含量为 19.57%。

相同发酵时间、不同发酵层的沼液乙酸含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、有机质含量差异均不显著。

相同发酵层、不同发酵时间的沼液乙酸含量、有效钾含量、有机质含量均存在显著或极显著差异;相同发酵层、不同发酵时间的沼液碱解氮含量、有效磷含量差异均不显著。

参考文献:

- [1]汪植三,汪俊三. 畜禽舍粪便污水及废气净化的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(4):90-95.
- [2]杜鸿章,尹承龙. 难降解高浓度有机废水催化湿式氧化技术[J]. 水处理技术,1994,23(2):16-18.
- [3]段妮娜,董滨,何群彪,等. 规模化养猪废水处理模式现状和发展趋势[J]. 净水技术,2008,27(4):9-15,39.
- [4]王飞,蔡亚庆,仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约性因素分析[J]. 农业工程学报,2012,28(1):184-189.
- [5]韩捷,向欣,李想. 干法发酵沼气工程无热源中温运行及效果[J]. 农业工程学报,2009,29(9):215-219.
- [6]林代炎,叶美锋,吴飞龙,等. 规模化养猪场粪污循环利用技术集成与模式构建研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(2):386-391.
- [7]林斌. 生物质能源沼气工程发展的理论与实践[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2010.
- [8]陈彪,黄婧,肖艳春. 基于净化剂处理畜禽厌氧消化液达标排放的滞留期实验研究[J]. 能源与环境,2015(6):63-65.
- [9]郑学博,樊剑波,周静,等. 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响[J]. 土壤学报,2016,53(3):675-684.
- [10]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):139-146.
- [11]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.
- [12]高红莉. 施用沼肥对青菜产量品质及土壤质量的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(增刊1):43-47.
- [13]张媛,洪坚平,王炜,等. 沼液对石灰性土壤速效养分含量的影响[J]. 中国沼气,2008,26(2):14-16.
- [14]王康,许玉超,戴辉,等. 沼液在土壤改良上的应用研究[J]. 江苏农业科学,2019,47(24):299-303.
- [15]陈亚恒,刘会玲,许隼,等. 土壤有效钾提取方法评价[J]. 土壤肥料,2003(6):3-7.
- [16]邱坚,刘和,许科伟,等. 调控 pH 促进污泥产酸及两相耦合系统定向产乙酸[J]. 中国给水排水,2009,25(13):1-6.
- [17]刘海燕,高尚,王晓玲. 污水厌氧生物处理系统中的产氢产乙酸过程[J]. 中国资源综合利用,2015,33(9):29-31.
- [18]薛超友,邱凌,郭俏,等. 沼液中乙酸含量比色测定法研究[J]. 农业资源与环境学报,2018,35(5):476-482.
- [19]李文哲,王忠江,王丽丽,等. 影响牛粪高浓度水解酸化过程中乙酸含量的因素研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):204-208.
- [20]李永富,邓小华,邹凯,等. 湖南邵阳烟区耕层土壤碱解氮含量分布及变化趋势[J]. 北京农学院学报,2013,28(4):22-25.
- [21]胡阳,张书泰,杨秋明,等. 离子色谱法测定福建南平地区植烟土壤中的全钾和有效钾含量[J]. 中国土壤与肥料,2017(3):152-156.
- [22]祝延立,那伟,郗登宝,等. 施用猪场粪污沼液对土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(31):15202-15203,15213.