

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

砂壤土贮存池中沼液入渗及氮磷迁移特征

孙国峰,宗焦,盛婧,周炜,张丽萍,王子臣

引用本文:

孙国峰, 宗焦, 盛婧, 周炜, 张丽萍, 王子臣. 砂壤土贮存池中沼液入渗及氮磷迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 209-215.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0361

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响

王敏锋,严正娟,陈硕,高杰云,李吉进,许俊香,陈清 农业环境科学学报.2016,35(7):1351-1359 https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.018

基于不同湿润速度下PAM水解过程对砂壤土入渗的影响

韩冬,魏占民,于健,宋日权 农业环境科学学报.2015(6):1174-1180 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.022

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润,孙钦平,赵海燕,邹国元,刘本生,李恋卿 农业环境科学学报.2017,36(8):1566-1572 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1617

基于水培技术的沼液净化及生菜品质提升

梁飞虹, 崔秋芳, 涂特, 余歌, 王文超, 晏水平 农业环境科学学报. 2018, 37(4): 788-795 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1261

长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率

孙国峰, 王鑫, 盛婧, 张丽萍, 王子臣, 周炜 农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2521-2527 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1023



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

孙国峰,宗焦,盛婧,等.砂壤土贮存池中沼液入渗及氮磷迁移特征[J].农业环境科学学报,2023,42(1):209-215.
SUN G F, ZONG J, SHENG J, et al. Characteristics of biogas slurry infiltration and nitrogen and phosphorus transfer in sandy loam tank[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1): 209-215.



砂壤土贮存池中沼液入渗及氮磷迁移特征

孙国峰1,2, 宗焦1, 盛靖1,2*, 周炜1, 张丽萍1,2, 王子臣1,2

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,南京 210014; 2.农业农村部种养结合重点实验室,南京 210014)

摘 要:为探讨猪场沼液在砂壤土贮存池中入渗率及其影响因子、氮磷迁移特征,采用间歇供水方式,设置沼液(BS)、井水(W)、1/3 沼液+2/3 井水(1/3BS)共3个处理,开展3个贮存周期的入渗率、累积入渗量、氮磷水平与垂直迁移特征研究。结果表明:各处理入 渗率、累积入渗量均呈现 BS < 1/3BS < W 处理的规律,且沼液入渗率随间歇供水次数增加而大幅下降,这主要与沼液的水质特性 及间歇供水方式有关。砂壤土贮存沼液过程中,存在明显的氮磷水平与垂直迁移趋势。在1.2 m 贮存深度条件下,沼液氮磷垂直 迁移深度达10~20 cm;而沼液氮磷水平迁移相对较弱,其中氮水平迁移深度达5~10 cm,磷主要附着于贮存池侧面的表层土壤。 与井水相比,砂壤土贮存池中沼液会显著降低入渗率和累积入渗量,且沼液中氮磷损失均以垂直迁移为主。 关键词:沼液;入渗率;累积入渗量;水平迁移;垂直迁移

中图分类号:S216.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)01-0209-07 doi:10.11654/jaes.2022-0361

Characteristics of biogas slurry infiltration and nitrogen and phosphorus transfer in sandy loam tank

SUN Guofeng^{1,2}, ZONG Jiao¹, SHENG Jing^{1,2*}, ZHOU Wei¹, ZHANG Liping^{1,2}, WANG Zichen^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory for Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: This study aimed to investigate the infiltration rate of pig farm biogas slurry in sandy loam storage tanks and the influencing elements, as well as nitrogen and phosphorus transfer characteristics. Intermittent water supply, biogas slurry (BS), water(W), and 1/3 BS +2/3 water(1/3BS) were employed to study the infiltration rate, accumulation infiltration amount, and the lateral and vertical transfer characteristics of nitrogen and phosphorus in three storage periods. The findings revealed that the infiltration rate and accumulation infiltration amount followed the rule of BS<1/3BS<W treatments, and the infiltration rate of the biogas slurry decreased significantly with an increase of intermittent water supply times. This was primarily due to the water quality of the biogas slurry and the intermittent water supply method. In the process of storing biogas slurry in sandy loam, there was an obvious trend of nitrogen and phosphorus transfer in lateral and vertical directions. The vertical transfer depth of nitrogen and phosphorus in biogas slurry was 10–20 cm under the 1.2 m storage depth. However, the lateral transfer was relatively weak, with the depth of the nitrogen lateral transfer being between 5–10 cm, and most of the phosphorus was adhered to the soil surface on the side of the storage tank. In comparison with the W treatment, the BS treatment greatly decreased the infiltration rate and accumulation infiltration amount in sandy loam storage tanks, and vertical transfer was the main loss of nitrogen and phosphorus.

Keywords: biogas slurry; infiltration rate; accumulation infiltration amount; lateral transfer; vertical transfer

2023年1月

收稿日期:2022-04-14 录用日期:2022-08-15

作者简介:孙国峰(1982—),男,江苏泗洪人,博士,副研究员,主要从事绿色种养循环农业方面的研究。E-mail:sgf515@163.com *通信作者:盛靖 E-mail:nkysj@hotmail.com

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)2014);国家重点研发计划项目(2018YFD0800105)

Project supported: Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund(CX(20)2014); The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800105)

农业环境科学学报 第42卷第1期

我国畜禽粪污年产生量约38亿t,其中养殖过程 中产生的粪水量约20亿t,已成为农业面源污染的重 要来源印。固体粪污可通过堆肥得到有效处理,而粪 水处理成为养殖场污染防治的关键,将其厌氧发酵无 害化处理后,产物沼液作为粪肥还田是一种最为经济 有效的处理与利用方式[2]。但养殖场沼液具有产生 量大、连续性等特点,与农田作物水肥需求季节性之 间往往不同步,故沼液贮存是其还田前的必备环节。 关于沼液贮存条件及其营养物质、重金属、大肠杆菌、 气体排放等方面已有较多报道^[3-8]。已有研究表明, 贮存过程中沼液氮磷含量的主要影响因素依次为贮 存温度、氧气含量、贮存时间等,且随着贮存温度升 高、氧气含量增加、贮存时间延长整体呈下降趋 势^[8-9]。例如露天贮存90d条件下,不同发酵原料(猪 粪、鸡粪和牛粪)的沼液总氮浓度受气温影响较大,损 失率在16.4%~59.5%之间;而沼液总磷浓度受气温影 响较小,损失率在61.3%~71.3%之间¹⁹。也有研究指 出,在短期(<60 d)内,加盖贮存的沼液氮磷损失较 少,优于敞口贮存,但随着贮存时间延长(60~90 d), 贮存方式对沼液氮磷含量影响较小100。现有沼液贮 存时间多在90~180 d之间, 沼液氮、磷损失率分别为 16.4%~84.3%、61.3%~93.5%[9-11]。 据 2018—2019 年 畜禽粪污第三方评估数据报道,我国养殖场粪水采用 自然贮存等简易方式处理仍占83.34%¹¹,而未做防渗 处理的砂壤土贮存池中沼液入渗及其氮磷迁移特征 尚未见报道。本研究分析猪场沼液在砂壤土贮存池 中入渗率、氮磷水平与垂直迁移特征,并探讨影响沼 液入渗的限制因子,为定量评估沼液在自然贮存过程 中引发的二次污染风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2019年11月22日至12月24日,在江苏省淮 安市淮阴区五里镇镇南村(33°42′21″N,118°50′11″E) 开展猪场粪污水厌氧发酵产生的沼液贮存试验。该 区属暖温带半湿润季风气候,年均温度14.8℃,年均 降雨量945.5 mm,年均日照时数2080.6 h,年均无霜 期216 d。试验开始前砂壤土贮存池的不同深度土壤 理化性质见表1。

1.2 试验设计

沼液贮存试验设置3个处理,即沼液处理(BS)、 1/3 沼液+2/3 井水处理(1/3BS)和井水处理(W),贮存 试验周期为5 d,贮存周期3次重复(15 d)内均无降雨 事件发生。试验沼液和井水均来自于淮阴区诚实生 猪养殖场,起始沼液的全氮、铵态氮、硝态氮和总磷含 量分别为392、301、3.97、60.7 mg·L⁻¹,总固体(TS)含 量为3%;井水的全氮、铵态氮、硝态氮和总磷含量分 别为4.68、4.25、0.09、0.08 mg·L⁻¹。采用机械挖掘与 人工修整相结合的方式建造地下式贮存池(长2 m、 宽2 m、深1.5 m),初始液面深度为1.2 m。

试验结束后,采集贮存池3个侧面土壤样品,每 个侧面采集地面下90 cm处2个水平点混合土壤样 品,水平取样深度为0~5、5~10、10~20、20~40、40~60 cm,同时,按"品"字形分别采集贮存池底部土壤样 品,垂直取样深度为0~10、10~20、20~40、40~60、60~ 80 cm,测定有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、总磷、有效 磷含量等指标。采集贮存池侧面、底部0~10 cm土壤 结构样品,测定土壤容重,重复3次。

1.3 测定方法

无降雨条件下,入渗率为每日液面下降深度与蒸 发量之差,其中,液面下降深度采用水尺观测法测定, 蒸发量采用差量法测定。累积入渗量为各贮存周期 内累计天数的入渗率之和。土壤全氮、总磷、铵态氮 和硝态氮采用连续流动化学分析仪(SAN⁺⁺ System, SKALAR,荷兰)测定。土壤有效磷采用碳酸氢钠法 测定。土壤有机质采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化外加 热法(LY/T 1237—1999)测定。土壤容重采用环刀法 测定。

1.4 数据分析

沼液氮(磷)残留量=终止沼液体积×终止沼液总

	Table 1 Initial	values of soil phy	sical and chemical	properties at diffe	erent depths	
容重	有机质	全氮	铵态氮	硝态氮	总磷	
1 . /		(m] (an 1 1 1	,

表1 初始不同深度土壤理化性质

土壤深度	容重	有机质	全氮	铵态氮	硝态氮	总磷	有效磷
Soil depth/	Bulk density/	Organic matter/	Total nitrogen/	Ammonium nitrogen/	Nitrate nitrogen/	Total phosphorus/	Available phosphorus/
cm	$(g \cdot cm^{-3})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	(mg•kg ⁻¹)	$(mg \cdot kg^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$
20~30	1.41	5.71	0.93	5.73	9.84	0.50	2.03
80~90	1.45	1.58	0.21	6.99	5.25	0.32	1.74
150~160	1.44	1.41	0.20	7.33	5.89	0.46	1.25

氮(磷)含量

沼液氮(磷)水平迁移量=池侧土壤容重×池侧面 积×水平迁移深度×[沼液池测土壤氮(磷)含量−清水 池测土壤氮(磷)含量]

沼液氮(磷)垂直迁移量=池底土壤容重×贮存池 面积×垂直迁移深度×[沼液池底土壤氮(磷)含量−清 水池底土壤氮(磷)含量]

沼液氮其他损失=沼液累积用量×初始沼液总氮 含量-氮水平迁移量-氮垂直迁移量-氮残留量

采用 Excel 2016 和 SPSS17.0 软件进行数据处理 与制图,处理间多重比较用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 贮存过程中入渗特征

各处理入渗率见图1。不同处理入渗率均呈现 随贮存深度降低、间歇供水次数增加而下降的趋势, 且整体呈现BS<1/3BS<W处理的规律。具体来看,BS 处理各贮存周期的平均入渗率依次为11.0、8.4、5.2 cm·d⁻¹,降低幅度在2.6~3.2 cm·d⁻¹之间;1/3BS处理各 贮存周期的平均入渗率依次为16.8、15.6、13.2 cm· d⁻¹,降低幅度在1.2~2.4 cm·d⁻¹之间;W处理各贮存周 期的平均入渗率依次为19.0、16.4、16.4 cm·d⁻¹,减少 幅度在0~2.6 cm·d⁻¹之间。

各处理累积入渗量见图 2。不同处理累积入渗量 也呈现 BS<1/3BS<W 处理的规律,并随间歇供水次数 增加而下降,其中 BS处理累积入渗量降幅最大。具体 来看,BS处理各贮存周期的累积入渗量依次为55、42、 26 cm,较W处理分别降低了 42.1%、48.8% 和 68.3%, 较 1/3BS处理分别降低了 34.5%、46.2% 和 60.6%。

2.2 氮磷水平迁移特征

各处理氮磷水平迁移特征见图3。 沼液贮存过







different treatments

程中,氮存在水平迁移趋势,且水平迁移深度达5~10 cm;而磷主要吸附于池侧表层土壤0~5 cm。整体来 看,池侧0~5 cm和5~10 cm土壤全氮和铵态氮含量呈 现BS>1/3BS>W处理的规律,其中BS处理显著(P< 0.05)高于W处理;而各处理10~20、20~40、40~60 cm 土壤全氮和铵态氮含量差异均不显著。另外,池侧 0~5 cm土壤总磷和有效磷含量均以BS处理最高,显 著(P<0.05)高于1/3BS和W处理;而BS处理除0~5 cm外,其他层次土壤有效磷含量较W处理均未出现 增加现象。

2.3 氮磷垂直迁移特征

各处理氮磷垂直迁移特征见图4。沼液贮存过 程中,氮磷存在明显的垂直迁移趋势,且垂直迁移深 度达10~20 cm。具体来看,池底0~10 cm和10~20 cm 土壤全氮、铵态氮、总磷和有效磷含量均呈现 BS> 1/3BS>W处理的规律,且各处理池底0~10 cm和10~ 20 cm土壤全氮、铵态氮含量及0~10 cm土壤总磷和 有效磷含量差异均达到5%显著水平,同时,BS处理 10~20 cm土壤总磷和有效磷含量也显著(P<0.05)高 于W处理;而各处理20~40、40~60、60~80 cm土壤全 氮、铵态氮、总磷和有效磷含量差异均不显著,但BS 处理土壤有效磷含量较W处理有增加趋势。

2.4 贮存沼液的氮磷去向分析

贮存过程中, 沼液氮磷损失均以垂直迁移为主。 具体来看, 贮存过程中, 沼液氮去向中垂直迁移、水平 迁移、残留量和其他损失分别占比为 25.1%、9.4%、 50.6% 和 14.8%; 沼液磷去向中垂直迁移、水平迁移和 残留量分别占比为 56.9%、15.3% 和 27.7%, 这与贮存 过程中颗粒态磷沉降有关。

211

www.aer.org.cn



同列图例旁不同小写字母表示处理间在 P<0.05 水平差异显著。下同 Different letters in the same column indicate significant differences among different treatments at P<0.05 level. The same below

图 3 不同处理氮磷水平迁移特征

Figure 3 Lateral transfer characteristics of nitrogen and phosphorus under different treatments

3 讨论

3.1 贮存沼液入渗率的影响因子分析

影响土壤入渗特性的主要因素有土壤理化性质 (初始含水量、质地、有机质等),供水强度,供水方式, 水质及水温等^[12-13]。本研究在同一田块同时开展试 验,各处理土壤容重、孔隙度和环境温度差异均不显 著。通过入渗率与贮存深度的相关性分析(图5)发 现,第3个贮存周期W处理入渗率与贮存深度呈极显 著(P<0.01)的线性正相关关系,可用线性方程 y= 0.157 9x+3.515(r=0.986,n=5)来拟合,说明W处理入渗 率随着贮存深度的增大而增加,可能是供水强度(贮存 深度1.2 m以内)小于砂壤土入渗能力的缘故^[12],但也有 研究指出积水深度在1~10 cm之间对紫色土入渗特性基 本没有影响,这可能与水深及土壤性质等因素有关^[14];而 BS处理入渗率与贮存深度间相关性未达到5%显著水 平,说明本试验条件下贮存深度对沼液入渗率的影响相 对较小,这可能与沼液的水质特性有关^[12]。

沼液是一种色度较深的黏稠液体,具有固形物含

量高、腐殖质等有机物含量高、可溶性盐含量高等特点^[15]。本研究发现沼液贮存过程中有机物存在水平与垂直迁移趋势,其迁移深度分别达5~10 cm和10~20 cm(图6~图7),分析沼液中固形物、有机物会随水入渗附着于贮存池表层土壤,堵塞土壤入渗通道,可能是降低贮存沼液入渗率的主要原因。同时,沼液中低价可溶性盐(如Na⁺)会置换土壤胶体颗粒上Ca²⁺和Mg²⁺,改变土壤孔隙特性,影响土壤水入渗通道,进一步降低贮存沼液入渗率^[12]。另外,本研究采用间歇供水方式,发现各处理入渗率随间歇次数增加而下降,这与前人研究结论一致^[14],其中BS处理入渗率的降幅明显高于1/3BS处理,说明间歇供水方式也可降低贮存沼液入渗率。由此推测,采用物理或化学方法改变沼液自然贮存池表层土壤结构特性可以有效减少 沼液入渗损失。

3.2 贮存沼液的氮磷迁移特征

养殖场沼液富含氮磷等营养元素,其中氮主要以 铵态氮形式存在^[16]。余薇薇等^[17]采用蒸馏水预饱和 模拟土柱法研究紫色土灌溉沼液过程中铵态氮垂直





图4 不同处理氮磷垂直迁移特征

Figure 4 Vertical transfer characteristics of nitrogen and phosphorus under different treatments

的迁移风险,指出其风险较大,显著高于有效磷迁移风险。本研究通过测定贮存后池侧、池底土壤氮磷含量,明确贮存沼液过程中存在明显的氮磷水平、垂直迁移趋势,其中铵态氮水平、垂直迁移深度分别达5~10 cm(25.0 mg·kg⁻¹)和10~20 cm(41.8 mg·kg⁻¹),均低于砂壤土的铵态氮吸附量(约54 mg·kg⁻¹),均低于砂壤土的铵态氮吸附量(约54 mg·kg⁻¹)^{118]}。同时,由于土壤中硝态氮具有易随水动的特性,但本研究沼液中硝态氮含量为3.97 mg·L⁻¹,而且沼液贮存后水平、垂直土壤的硝态氮含量分别在1.86~4.64、1.72~2.35 mg·kg⁻¹之间,均低于初始土壤背景值(5.25、5.89 mg·kg⁻¹),可能是沼液贮存池周围土壤硝态氮存在部分随水入渗而流失的风险。另外,发现BS处理池底20~80 cm 土壤有效磷含量较 W 处理有增加趋势,但池底不同层次土壤有效磷含量在 2.0~13.0 mg·kg⁻¹之

间,这远低于土壤有效磷淋溶临界值(74.6~82.0 mg·kg⁻¹)^[19],且土壤总磷含量并未增加,可能与沼液中活性物质随水入渗提高了下层土壤磷酸酶活性有关^[20]。 综上所述,铵态氮迁移特征是沼液在自然贮存过程中 二次污染风险评估的重要依据之一。然而,本研究未 考虑到沼液贮存过程中渗漏液的氮磷含量,有待进一 步研究。

4 结论

(1)与井水相比,砂壤土贮存池中沼液会显著降低入渗率和累积入渗量,且沼液入渗率随间歇次数增加而大幅下降。井水入渗率与贮存深度呈极显著(P<0.01)的线性正相关关系,而第3个贮存周期的沼液入 渗率与贮存深度间相关性未达到5%显著水平,这主

www.aer.org.cn









图6 不同处理池侧土壤有机质水平分布特征







Figure 7 Vertical distribution characteristics of pool bottom soil organic matter under different treatments

要与沼液中有机物浓度高的水质特性及间歇供水方 式有关。

农业环境科学学报 第42卷第1期

(2)砂壤土贮存沼液过程中,存在明显的氮磷水 平、垂直迁移趋势,且沼液氮磷损失均以垂直迁移为 主。本研究1.2 m贮存深度条件下,沼液氮磷垂直迁 移土壤深度达10~20 cm;而沼液氮磷水平迁移趋势 相对较弱,其中氮水平迁移深度达5~10 cm,磷主要 附着于贮存池侧面的表层土壤。

参考文献:

- [1] 丁京涛,张朋月,赵立欣,等.养殖粪水长期贮存过程理化特性变化规律[J]. 农业工程学报,2020,36(14):220-225. DING J T, ZHANG P Y, ZHAO L X, et al. Change rule of physical and chemical properties of slurry in the process of long-term storage[J]. *Transactions* of the CSAE, 2020, 36(14):220-225.
- [2]张克强,杜连柱,杜会英,等.国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2472-2481. ZHANG KQ, DU L Z, DU H Y, et al. Application of livestock and poultry waste to agricultural land: A review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021,40(11):2472-2481.
- [3] 盛婧,周炜,王子臣,等.畜禽养殖粪污工程化处理对污水理化性状的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(6):877-883. SHENG J, ZHOU W, WANG Z C, et al. Effect of engineering treatment on the physical and chemical properties of livestock slurry[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6):877-883.
- [4] 吴华山, 郭德杰, 靳红梅, 等. 贮存过程中猪粪沼液重金属量及大肠 杆菌数量变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊1):128-132.
 WUHS, GUODJ, JINHM, et al. Effects of storage on contents of heavy metals and *E. coli* in digested pig slurry[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(Supp. 1):128-132.
- [5] 王悦, 刘婧怡, 张佳男, 等. 改性膨胀蛭石覆盖对沼液贮存氨气和温室气体排放影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4):902-912. WANG Y, LIU J Y, ZHANG J N, et al. Ammonia and greenhouse gas mitigation from biogas slurry storage using a modified expanded vermiculite cover[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(4):902-912.
- [6] QI X, WU S, WANG Z, et al. Seasonal and daily emissions of methane and carbon dioxide from a pig wastewater storage system and the use of artificial vermiculite crusts[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 131:15– 22.
- [7] WANG Y, DONG H M, ZHU Z P, et al. CH₄, NH₃, N₂O and NO emissions from stored biogas digester effluent of pig manure at different temperatures[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 217: 1–12.
- [8] 刘庆玉,李晓娟,翟建宇,等.不同贮存条件对沼液成分的影响[J]. 中国沼气,2017,35(1):63-64. LIU Q Y, LI X J, ZHAI J Y, et al. Influence of different storage conditions on biogas slurry composition [J]. China Biogas, 2017, 35(1):63-64.
- [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):139-146. DING J T, SHEN Y J, MENG H B, et al. Nutrition contents and its stability analysis of biogas residue and slurry[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,

中文核心期刊

215

2016, 18(4):139-146.

- [10] 吴华山, 郭德杰, 马艳, 等. 猪粪沼液贮存过程中养分变化[J]. 农业 环境科学学报, 2012, 31(12):2493-2499. WU H S, GUO D J, MA Y, et al. Changes of nutrients in anaerobically digested slurry of pig manure during storage[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(12):2493-2499.
- [11] 姜晨润, 孙靖博, 李华. 规模化养猪场粪便贮存方式及土壤承载力 [J]. 农业工程, 2019, 9(1):35-37. JIANG C R, SUN J B, LI H. Fecal storage mode and soil bearing capacity of large-scale pig farm[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(1):35-37.
- [12] 邵明安, 王全九, 黄明斌, 等. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版 社, 2006:128-129. SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B, et al. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:128-129.
- [13] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499. LÜG, WUXY. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7): 494-499.
- [14] 龙天渝, 王延青, 安强. 积水条件下连续和间歇供水对土壤入渗特性的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3):7-10, 22. LONG TY, WANG Y Q, AN Q. Effects of continuous and intermittent water supply on infiltration characteristics of a purple soil under ponding condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3):7-10, 22.
- [15] 肖华, 徐杏, 周昕, 等. 膜技术在沼气工程沼液减量化处理中的应用[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 226-236. XIAO H, XU X, ZHOU X, et al. Application of membrane technology for volume reduction of biogas slurry[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(14): 226-236.

- [16] 靳红梅,常志州,叶小梅,等.江苏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 H M, CHANG Z Z, YE X M, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 27(1):291-296.
- [17] 余薇薇,闻昌智,陈垚,等. 沼液回灌紫色土的负荷变化对氮磷吸附迁移行为的影响[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(5):779-784, 817. YU W W, WEN C Z, CHEN Y, et al. Effects of purple soil under varying biogas slurry irrigation load on adsorption and migration of nitrogen and phosphorus[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(5):779-784, 817.
- [18] 吴德丰,王春颖,韩宇平,等.不同质地土壤铵态氮吸附/解吸特征
 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(6):18-25.
 WU D F, WANG C Y, HAN Y P, et al. Adsorption and desorption characteristics of ammonium nitrogen in different texture soils[J].
 Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2020, 41(6):18-25.
- [19] 王月立, 马强, 姜春明, 等. 潮棕壤速效磷产量临界值和淋溶临界值的计算[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2):171-176. WANG Y L, MA Q, JIANG C M, et al. Calculating the critical value for yield and leaching of olsen-P in aquic brown soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2):171-176.
- [20] 余薇薇, 谢明扬, 朱家悦, 等. 沼灌负荷对紫色土土壤酶活性及氮、 磷迁移的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(5):48-52. YU W W, XIE M Y, ZHU J Y, et al. Effects of biogas slurry irrigation loading on purple soil enzyme activities and migration of nitrogen and phosphorus [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(5):48-52.

(责任编辑:叶飞)