

张丽萍,刘红江,盛 婧,等.发酵周期、贮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.

ZHAGN Li-ping, LIU Hong-jiang, SHEGN 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.

发酵周期、贮存时间和过滤对沼液养分和理化性状变化的影响

张丽萍^{1,2,3},刘红江^{1,2,3},盛 婧^{1,2,3},陈留根^{1,2,3},郑建初^{1,2,3*}

(1.江苏省农业科学院循环农业研究中心,江苏 南京 210014;2.农业部种养结合重点实验室,江苏 南京 210014;3.农业部农村可再生能源开发利用华东科学观测实验站,江苏 南京 210014)

摘 要 针对实际生产中中小型养殖场不规范和粗放式厌氧发酵模式以及沼液需要长时间贮存的问题,为实现沼液养分有效利用与管理,根据沼液厌氧发酵实际生产状况,进行模拟发酵实验。设置2、4、6、8、10 d等5个不同的发酵周期处理并分别在该时间点进料出料,研究出料沼液在贮存过程中COD、pH、TN、TP和TK等养分和理化特性变化以及网筛过滤对养分和理化性状的影响。结果表明:随着发酵周期与贮存时间的延长,28 d后5种沼液中TN和TP含量分别减少了40.9%~46.31%、35.62%~53.61%;TK的含量呈现随时间延长有小幅增加的趋势,基本维持稳定。贮存期内铵态氮含量逐渐降低,贮存14 d各降幅接近62%;与之相反,硝态氮的含量则呈现逐渐增高的趋势。所有处理沼液在贮存过程中COD下降了69.97%~85.86%,pH值变化均呈现逐渐升高的趋势,从7.6~7.9变为8.2~8.7。经过不同孔径网筛过滤后,沼液的养分含量、COD和pH值变化不具有显著性差异,因此过滤不会对沼液的养分存储造成影响。

关键词 猪粪沼液 贮存 养分变化 过滤

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2018)01-0032-08 doi:10.13254/j.jare.2017.0186

Influence of Anaerobic Fermentation Periods, Storage Time and Filtration on the Changes of Nutrients and Physical and Chemical Properties of Biogas Slurry

ZHAGN Li-ping^{1,2,3}, LIU Hong-jiang^{1,2,3}, SHEGN Jing^{1,2,3}, CHEN Liu-gen^{1,2,3}, ZHENG Jian-chu^{1,2,3*}

(1.Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Province Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Key Laboratory of Crops and Livestock Intergration, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 3.East China Scientific Observing and Experimental Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy, Nanjing 210014, China)

Abstract In order to realize the effective utilization and management of biogas slurry, according to the actual production situation of biogas slurry anaerobic fermentation, the simulated fermentation experiment was carried out in view of the extensive anaerobic fermentation mode and the long-term storage of biogas slurry in actual production. The treatments were carried out in five different fermentation cycles (at 2, 4, 6, 8, 10 d respectively) and the pig manure raw materials were discharged at this time point for producing biogas slurry. Then the nutrient contents and physical and chemical property varieties such as COD, pH, TN, TP and TK were studied during storage, as well as the impact of screen filter on nutrients and physical and chemical properties of biogas slurry. The results showed that the contents of TN and TP in the five kinds of biogas slurry decreased by 40.9%~46.31% and 35.62%~53.61%, respectively with the increase of fermentation period and storage time, the content of TK showed a slight increase with time, but the increase remained stable. During the storage period, the contents of ammonium nitrogen decreased gradually which decreased by almost 62% after 14 days. In contrast, the nitrate nitrogen contents increased gradually. The COD decreased by 69.97%~85.86% and the pH value of all the biogas slurries were increasing from 7.6~7.9 to 8.2~8.7. The

收稿日期:2017-07-13 录用日期:2017-10-13

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(16)1003)

作者简介:张丽萍(1983—),女,山东淄博人,博士研究生,从事农业资源化研究。E-mail:lp.zhang@hotmail.com

*通信作者:郑建初 E-mail:zhengjianchu@hotmail.com

nutrient contents, COD and pH value of the biogas solution were not significantly different after filtering through different aperture screen, so the filtration would not affect the nutrient storage of biogas.

Keywords anaerobically digested pig slurry; storage; nutrient change; filtration

随着沼气工程的大量建设,沼液发酵废弃物沼渣沼液资源越来越丰富,其中沼液富含作物生长所必需的氮、磷、钾等营养元素,多种氨基酸、微量元素以及大量的有机质等,由于腐熟程度高,容易被作物吸收,是一种速、缓兼备的优质有机肥^[1-2]。然而沼液未经后续处理直接或间接超负荷排放将对周边环境的自净功能造成严重影响^[3-4]。特别是对于沼气池连续产生的数量巨大的沼液,远超农作物施肥规律的一次性消纳需求,因此沼液的后续存贮、管理和应用成为日渐关注的重点^[5-6]。另外,沼液管道化应用是目前沼液有机肥规模化、科学化利用的重要方式之一。但是,由于沼液中含有黏稠的沼渣颗粒,渣液往往混在一起,沼液在管道化运输过程中需要进行分级过滤,过滤对沼液的养分和理化性状变化的影响鲜有研究^[7-9]。

目前针对规模养殖场大型发酵工程中不同发酵工艺、不同原料产生的沼液贮存过程中的养分和理化性状变化国内外研究报道较多^[10-11]。然而实际生产过程中,受制于资金、规模和场地的制约,依然存在很多小型发酵工程,并未采用罐式发酵和参数规范的操作方式,而是建造地下或地上式发酵池(沤粪池),采用粗放式发酵方法。发酵原料直接投放入发酵池(沤粪池)中,进料时间和出料时间不规范。沼液施用频率具有随机性,造成沼液发酵周期短、不固定,没有规律性,很多沼液甚至是不完全发酵产物,因而造成产生的沼液的养分和物理性状不尽相同。这些沼液产生后,不能一次性施用的沼液会进行储存,然而针对这种不规律发酵周期出料沼液其贮存过程中的养分变化和应用的涉及较少。这显然不利于沼液的合理配置使用,不仅制约了资源的合理循环利用,也不利于农村生态环境的可持续发展。因此本试验根据这些粗放式厌氧发酵实际生产状况,通过设置不同的发酵周期模拟猪粪厌氧发酵不同出料沼液状况,研究不同发酵周期和贮存时间对沼液贮存过程中养分和理化特性变化的影响以及分级过滤对沼液养分和理化特性的影响,以为沼液养分管理和合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本课题组在进行沼液的资源化利用研究过程中,

发现中小规模养殖场的厌氧发酵通常采用静态发酵方法,即猪粪尿直接入发酵池(沤粪池)进行发酵,发酵周期短。相比于规模化养殖场的大型沼气发酵工程,这种中小型发酵工程发酵工艺显然较为粗放,沼液发酵程度也不尽相同。根据这种实际情况,本试验采用模拟厌氧发酵的方法,用发酵罐进行批式发酵试验。试验用猪粪取自江苏省农业科学院六合基地养猪场,接种污泥为本研究室猪粪厌氧发酵后的消化液。试验设置2、4、6、8、10 d(样品分别标记为P2、P4、P6、P8、P10)等5个不同的发酵周期,保持进料TS%(干物质浓度)为8%,37℃恒温发酵,每次进料2 000 mL,出料2 000 mL。

1.2 样品采集与处理

每个发酵周期结束时在该时间点取样,取出的沼液室温贮存,每隔3 d测定COD和pH,每隔6 d测定养分含量,采样周期为28 d。每次测定时,每个处理沼液各取400 mL分别过40、60、80目筛。所取样品装入100 mL PVC瓶,每个样品取3瓶作为重复,密封保存,24 h内带至实验室测定pH值和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)等指标。养分指标无法一次性测完的样品加入浓硫酸酸化至pH值≤1,于0~4℃条件下保存。

1.3 样品分析

沼液pH值使用精密pH计(PHS-2F,上海精科-上海雷磁)测定;COD值使用COD多元速测仪(上海连华5B-3(B)型)测定;总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)以及铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用连续流动分析仪(SAN++ System, SKALAR, Netherlands)测定。

1.4 数据分析

采用SPSSV17.0和Excel软件分析数据。

2 结果与讨论

2.1 不同发酵周期出料沼液贮存过程中pH值和COD变化

试验结果表明(图1),所有出料沼液均呈弱碱性,在贮存过程中pH值变化均呈现逐渐升高的趋势,从刚出罐时的7.6~7.9变为8.2~8.7。这一结果与黄丹丹^[12]和Clemens等^[13]对猪粪和牛粪发酵后的沼液

存中 pH 值的研究结果一致。贮存 11 d 后各 P10 处理沼液的 pH 值显著高于其他周期处理 ($P < 0.05$), 平均值分别比 P2、P4、P6、P8 处理高 3%、4.9%、5.2%、3.6%。初步表明, 发酵时间和贮存时间越长对沼液的 pH 值影响越大。

图 2 表明, 不同的出料沼液的 COD 值变化趋势基本相似, 即随储存时间的延长逐渐降低, 并在某个时间节点后趋于平稳。P2 和 P4 均在 4 d 后 COD 值由 30 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右降至 10 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下并趋于平稳, P6、P8 和 P10 均在存放 1 d 后由 20 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右整体降至 10 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下并趋于平稳。从处理来看, 沼液储存 0~4 d 时, 不同发酵周期的出料沼液其 COD 值差异明显 ($P < 0.05$), 并随着发酵时间的延长逐渐减小, 发酵不完全的 P2 和 P4 其 COD 值显著高于其他处理。储存 11 d 后, 各处理沼液 COD 值差异不显著。由此可见, 发酵越完全的沼液其 COD 值相对较低, 更有利于后期农田利用; 出料沼液存放 7 d 之后可以适当稀释后应用于农田安全消纳, 不会对农作物造成损伤^[14]。

2.2 不同发酵周期出料沼液贮存过程中沼液养分含量变化

2.2.1 不同出料沼液贮存过程中沼液全 N 含量变化

图 3 表明, 不同发酵周期处理的沼液在同一时间点(0 d)出料时, TN 含量随发酵时间的延长而减少, 未发酵完全的 P2 其 TN 含量比发酵完全的 P10 高 37% 左右。由此可见发酵越完全的沼液有机质降解比较完全, TN 含量因此相对较低。5 种处理的出料沼液 TN 含量随时间延长变化趋势基本一致, 即随时间延长逐渐降低。该结果与吴华山等^[15]和李祎雯等^[16]的研究结果相似。以 P2 与 P10 出料沼液为例(图 4), 在出料时 TN 含量分别是 1 736 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2)、1 088 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P10), 在贮存过程中 TN 的含量随时间延长呈现逐渐降低的趋势, 两个处理 TN 下降趋势基本一致, 在 28 d 分别降至 932 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2) 和 643 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P10)。其中 7 d 到 14 d 之间降幅最大, 从 1 329 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2)、981 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P10) 分别降至 1 012 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2)、798 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P10), 降幅分别达到 24% 和 19%。14 d 后 TN 含量基本保持平稳下降且降幅不大, 明显 P10 的变化

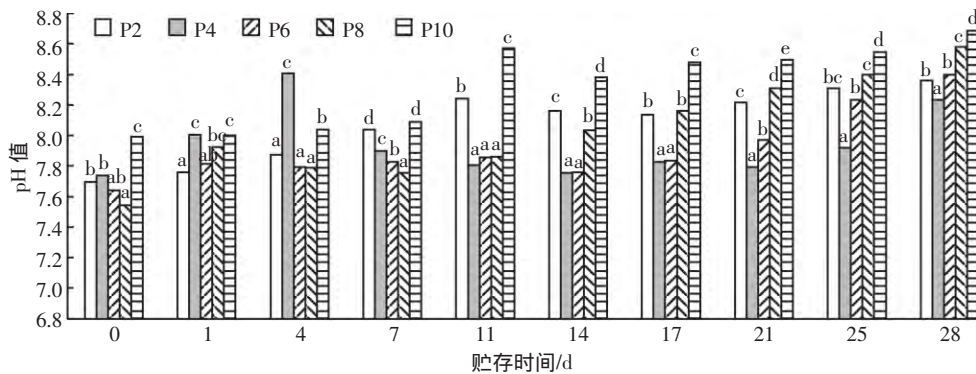


图 1 不同发酵周期出料沼液 pH 值变化对比

Figure 1 The contrast of pH value changes of discharged biogas slurry in different fermentation periods

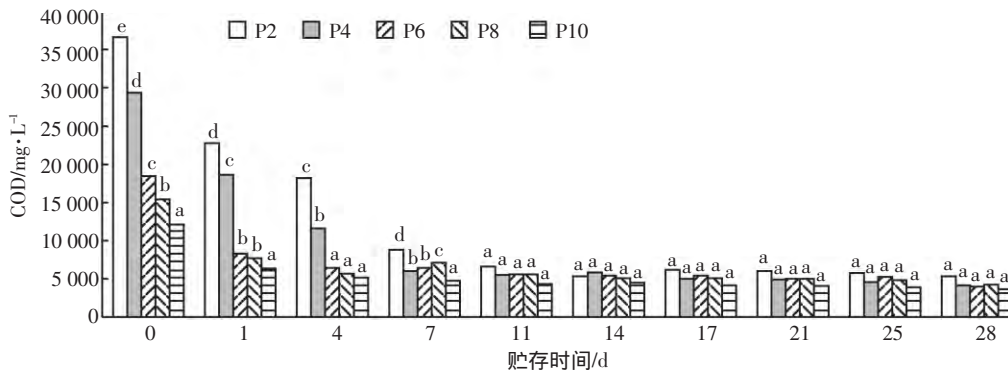


图 2 不同发酵周期出料沼液 COD 值变化对比

Figure 2 The contrast of COD changes of discharged biogas slurry in different fermentation periods

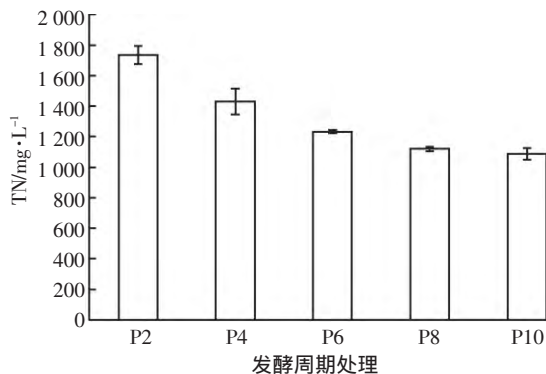


图3 不同发酵周期新鲜出料沼液(0 d)TN 含量对比
Figure 3 The contrast of TN contents of discharged biogas slurry(0 d) in different fermentation periods

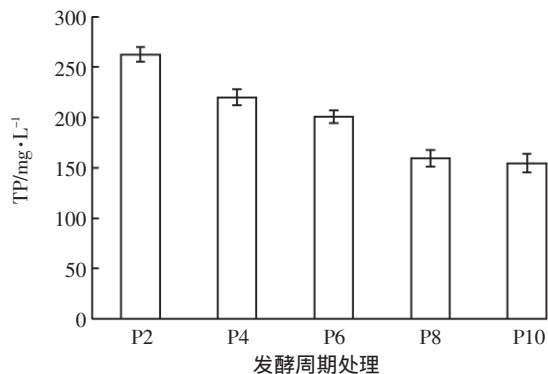


图5 不同发酵周期新鲜出料沼液(0 d)TP 含量对比
Figure 5 The contrast of TP contents of discharged biogas slurry (0 d) in different fermentation periods

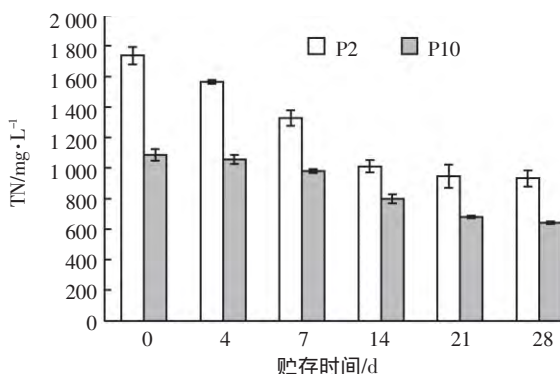


图4 P2 和 P10 沼液 TN 随贮存时间变化特征
Figure 4 TN variation characteristics of biogas slurry of P2 and P10 with storage time

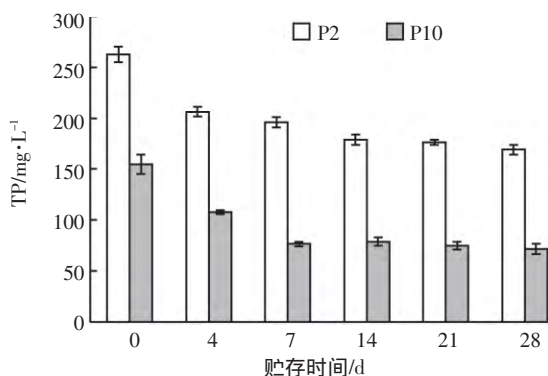


图6 P2 和 P10 处理沼液 TP 随贮存时间变化特征
Figure 6 TP variation characteristics of biogas slurry of P2 and P10 with storage time

幅度显著小于 P2 结果表明,发酵越完全的沼液储存过程中 TN 含量越稳定,这也与有机质降解趋于平稳有关。

2.2.2 不同发酵周期沼液贮存过程中总 P 和总 K 含量变化

不同发酵周期处理的新鲜沼液(0 d)TP 含量随发酵时间的延长而减少(图 5),未发酵完全的 P2 其 TP 含量比发酵完全的 P10 高 41%左右。同样发酵越完全的沼液 TP 含量相对较低。5 种出料沼液 TP 含量随时间延长逐渐降低,与相关研究结果一致^[15](图 6)。以 P2 与 P10 出料沼液为例,在出料时 TP 含量分别是 $262 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2)、 $155 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P10),在贮存过程中 TP 的含量随时间延长呈现逐渐降低的趋势,两个处理 TP 下降趋势基本一致,在 28 d 分别降至 $169 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,降幅分别为 35%和 53%。P2 贮存 4 d 后降幅最大,从 $262 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $206 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2),降幅达 21%左右,之后平稳下降。P10 贮存 7 d 后降幅达 51%,之后 TP 含量下降不明显,保持平稳。由此可见,发酵越完全的沼液其 TP 含量在贮存过程中降幅

越大,造成这种现象的原因是由于磷酸根离子被颗粒物吸附下沉或与其他离子反应形成沉淀,不断沉降到沼渣中。

5 种处理的新鲜沼液(0 d)TK 含量同样随发酵周期的延长而减少(图 7),但 5 个处理之间差别不显著,未发酵完全的 P2 其 TK 含量仅比发酵完全的 P10 高 17%左右。同样发酵越完全的沼液 TK 含量相对较低。相对于 TP 含量,TK 的浓度变化幅度较小(图 8),在新鲜沼液贮存的一个月内,P2 处理和 P10 处理的 TK 含量随贮存时间延长略有升高,但在第 28 d 有小幅下降,分别从出料时的 $1257 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2)和 $1036 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P10)增加到 28 d 的 $1299 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P2)、 $1102 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (P10)。有研究表明,沼液贮存一个月后 TK 含量会逐步降低^[15],也有研究显示,沼液总钾含量在储存 2 个月后无显著变化^[16],基本可以确定,新鲜出料沼液贮存一个月内 TK 含量基本保持稳定。

2.2.3 不同发酵周期出料沼液贮存过程中沼液铵态氮和硝态氮含量变化

由图 9 可知,发酵越完全沼液的 NH_4^+-N 含量越

低, P2 的 NH_4^+-N 含量比 P10 高 41% 左右。与之相反, 发酵越完全的沼液 NO_3^--N 的含量越高, 与 P2 相比, P10 的 NO_3^--N 的含量提高了 25% 左右。由此初步推测, 发酵越完全的沼液其氨挥发的速率相对会较低, 有利于存储和农田利用时减少氮损失。

沼液中氮主要以铵态氮形式存在^[10]。沼液贮存过程中, 铵态氮含量持续下降(图 10), 其变化趋势与全

氮变化趋势相似, 但铵态氮下降速度要高于全氮, 初始沼液铵态氮浓度占全氮的 92%(P2)和 86%(P10), 28 d 时占 49.84(P2)和 59.56%(P10), 表明有部分铵态氮转化为其他形式的氮。与之相反, 硝态氮含量随贮存时间的延长而逐渐缓慢升高。P2 从 $37.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $50.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 增幅达 33.73%, P10 从 $50.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $61.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 增幅达 22.72%。此结果

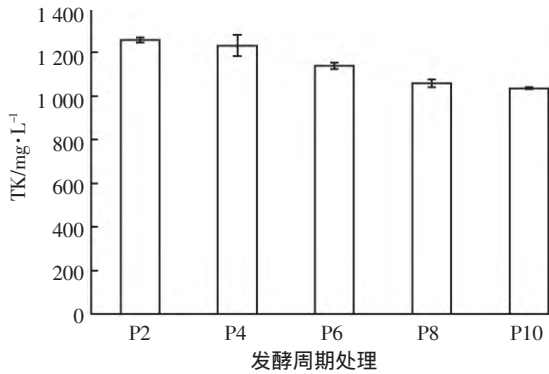


图 7 不同发酵周期新鲜出料沼液(0 d)TK 含量对比

Figure 7 The contrast of TK contents of discharged biogas slurry (0 d) in different fermentation periods

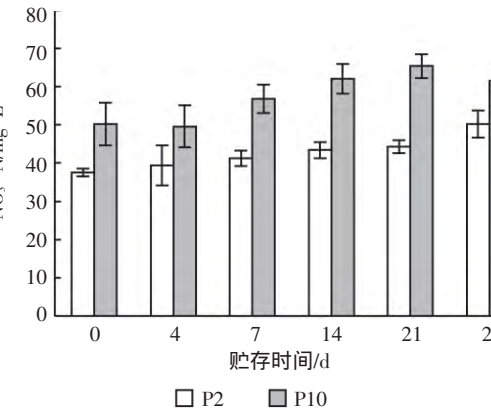
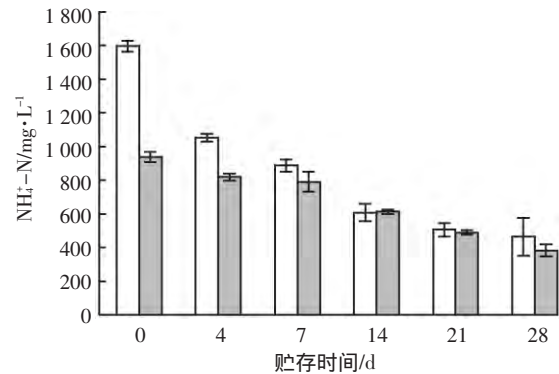


图 10 P2 与 P10 处理 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量随贮存时间变化特征

Figure 10 NH_4^+-N and NO_3^--N variations of biogas slurry of P2 and P10 with storage time

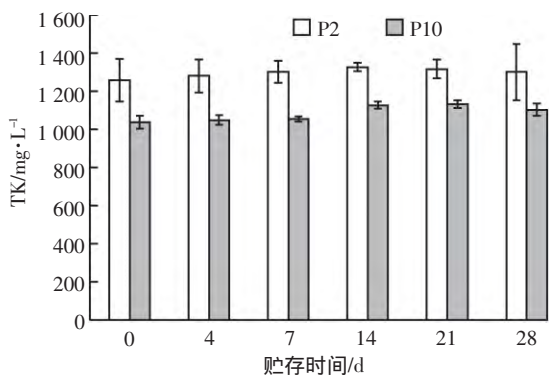


图 8 P2 和 P10 处理沼液 TK 随贮存时间变化特征

Figure 8 TK variation characteristics of biogas slurry of P2 and P10 with storage time

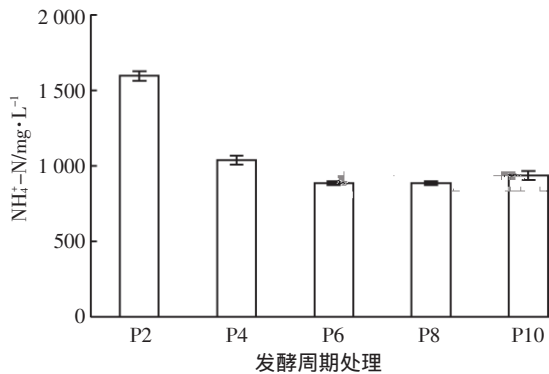
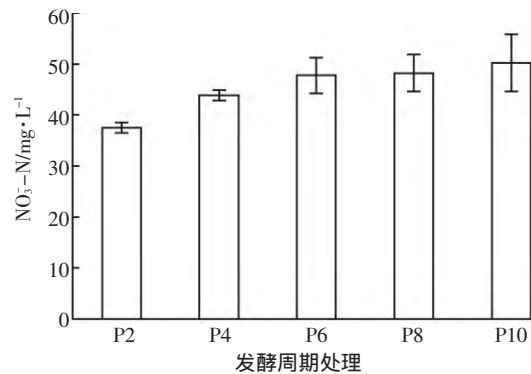


图 9 不同发酵周期新鲜出料沼液(0 d) NH_4^+-N (左)和 NO_3^--N (右)含量对比

Figure 9 The contrast of NH_4^+-N (left) and NO_3^--N (right) contents of discharged biogas slurry(0 d) in different fermentation periods



与吴华山等^[15]的研究结果相同。在厌氧环境中,沼液中硝态氮含量低,出料时初始铵态氮/硝态氮比值为42.49(P2)、18.68(P10),铵态氮含量占绝对优势;沼液排出后,在有氧环境下,到第28 d 2个处理铵态氮/硝态氮比值就迅速降为9.25(P2)、6.21(P10),表明沼液中的硝化作用相当强烈。

2.3 过滤对沼液养分和理化性状的影响

沼液的管道化利用是沼液农田利用的一种模式,然而由于沼液中含有大量未降解颗粒物,很容易使管道堵塞甚至爆裂,因此滤除沼液中的残留颗粒物尤为重要^[7]。滤除颗粒物后对沼液的养分含量和理化性状会不会造成严重影响是本试验关注的重点。

2.3.1 过滤对养分含量的影响

以P2为例,由图11可知,在贮存时间相同的条件下,通过4种不同孔径筛网(20、40、60目和80目)的沼液,其TN、TP和TK含量差异不显著,表明粒径大于178 μm的颗粒物去除后对沼液的养分含量变化影响较小,此结果与刘本生等^[7]的研究结果相似。因此,过滤并不会显著减少沼液养分含量;为减少沼液管道化利用过程中管道堵塞和爆裂的风险,农田施用前有必要对沼液进行初步过滤。

2.3.2 过滤对沼液pH和COD的影响

以P10处理沼液为例,出料沼液通过不同孔径的筛网过滤后,沼液pH值均随网筛孔径的减小而升高,虽不具有显著性差异,但通过80目筛沼液的pH值明显高于通过20目筛沼液的pH值(图12)。由此可见,颗粒物的去除会使沼液pH值略微升高,过滤对沼液的酸碱度仅具有微弱的影响,但不具备显著差异。

图13a表明,P2处理沼液通过不同孔径的筛网过滤后,0~4 d内COD随着孔径的减小而升高,虽不

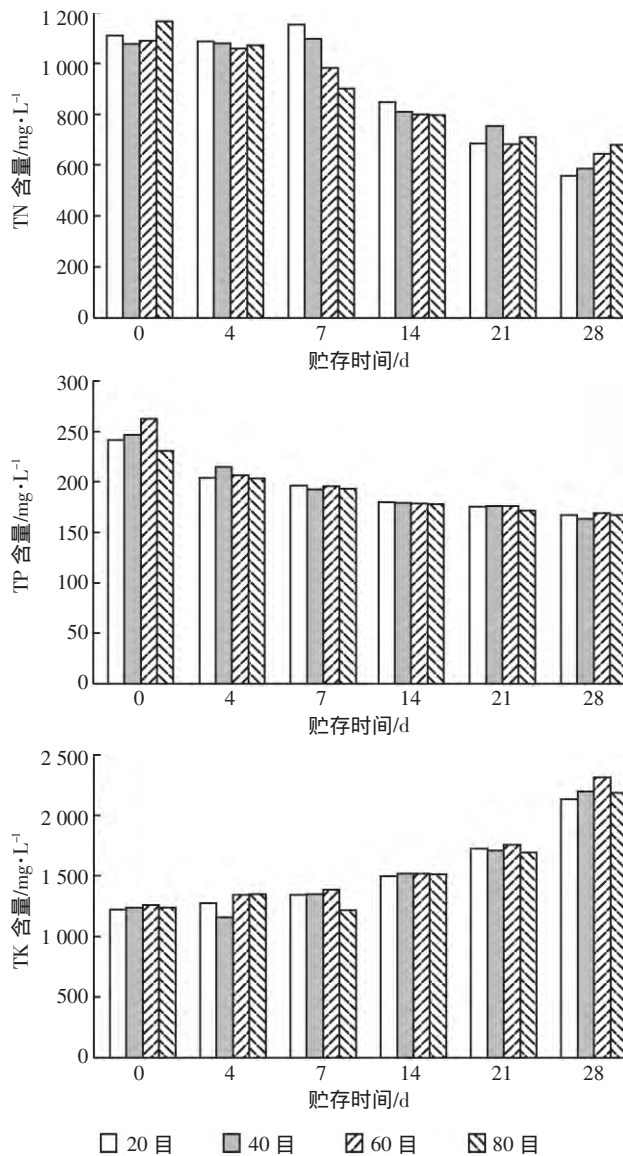


图11 过滤对P2处理沼液养分(TN、TP、TK)含量的影响
Figure 11 Effects of filtration on the contents of nutrients (TN, TP, TK) in biogas slurry of P2

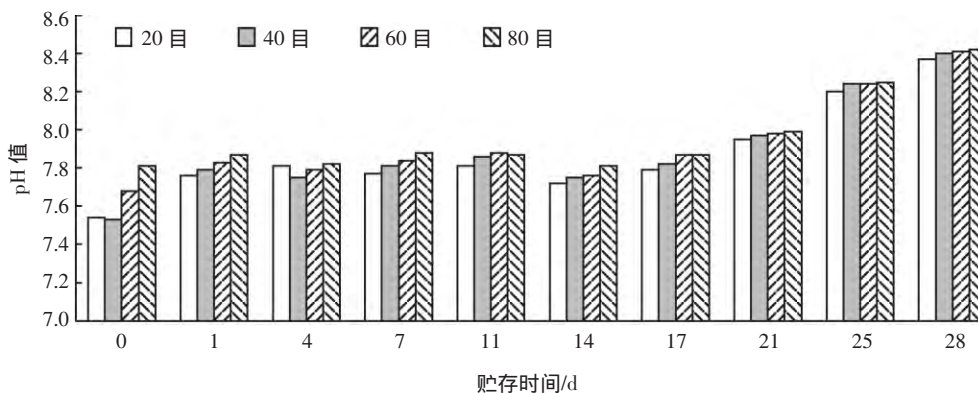


图12 过滤后P10 pH值变化特征
Figure 12 pH variation characteristics of P10 after filtration

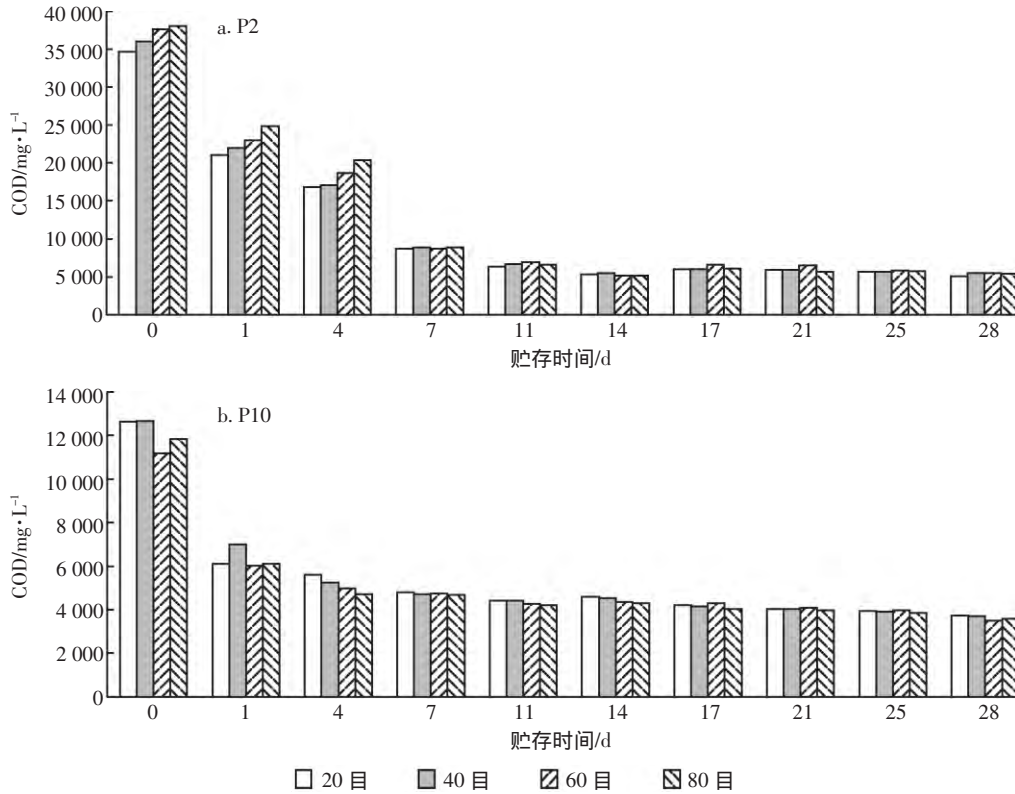


图 13 过滤后 2 种不同沼液 COD 变化特征

Figure 13 COD changes in two different biogas slurry after filtration

具备显著性差异,但筛网孔径大小对 P2 的 COD 值影响比较明显,7 d 之后, P2 的 COD 值降到 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下趋于平稳,过滤并不会对其造成影响。而 P10 处理沼液通过不同孔径的筛网过滤后(图 13b), COD 基本没有变化。由此可以推测过滤对沼液 COD 值的影响与发酵的状况有一定的相关性,发酵越不完全, COD 值越高,过滤对 COD 的影响越大。

3 结论

(1)随着发酵周期与贮存时间的延长,28 d 后 5 种沼液中 TN 和 TP 含量分别减少了 40.9%~46.31%、35.62%~53.61% ;

(2)TK 的含量呈现随时间延长有小幅增加,基本维持稳定。贮存期内铵态氮含量逐渐降低,贮存 14 d 各降幅接近 62% ;与之相反,硝态氮的含量则呈现逐渐增高的趋势。

(3)所有处理沼液在贮存过程中 COD 下降了 69.97%~85.86% ,pH 值变化均呈现逐渐升高的趋势,从偏中性(7.6~7.9)变为弱碱性(8.2~8.7)。

(4)经过不同孔径网筛过滤后,沼液的养分含量、COD 含量和 pH 值变化不具有显著性差异,因此过滤

不会对沼液的养分存储造成影响。

(5)在农业生产过程中,为有效合理地将沼液作为液体有机肥利用,减少沼液对周围环境的负面影响,如 COD 值过高、氨挥发过量、氮磷流失增加面源污染等,建议粗放型厌氧发酵池中猪粪沼液的发酵周期不少于 8 d。新鲜出料沼液放置一个月后氮、磷、钾等养分含量仍然能够满足农业施肥灌溉的需求。

参考文献 :

- [1] 苏有勇, 卢 怡, 施卫省. 沼肥对无土栽培生菜产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(1) :60-62, 72.
SU You-yong, LU Yi, SHI Wei-sheng. Effect of biogas fertilizer on yield and quality of lettuce in soilless culture[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2008(1) :60-62, 72. (in Chinese)
- [2] 张无敌, 尹 芳, 李建昌, 等. 沼液对土壤有机质含量和肥效的影响[J]. 可再生能源, 2008, 26(6) :45-47.
ZHANG Wu-di, YIN Fang, LI Jian-chang, et al. Influence of biogas fluid on the organic matter content in soil and its fertilization effect[J]. *Renewable Energy Resources*, 2008, 26(6) :45-47. (in Chinese)
- [3] 叶小梅, 常志州, 钱玉婷, 等. 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究[J]. 农业工程学报, 2012(6) :222-227.
YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou, QIAN Yu-ting, et al. Investigation on large and medium scale biogas plants and biological properties of diges-

- tate in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012(6) :222-227. (in Chinese)
- [4] 王子臣, 吴昊, 管永祥, 等. 养殖场粪污“三分离一净化”综合处理技术集成研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2013(5) :63-67.
WANG Zi-chen, WU Hao, GUAN Yong-xiang, et al. Integrated technology of three separations and one purification treatment on livestock and poultry farm fecal sewage[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013(5) :63-67. (in Chinese)
- [5] 靳红梅, 叶小梅, 常志州, 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.
JIN Hong-mei, YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou, et al. Analysis on physicochemical properties on large and medium scale biogas plants of digestate in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1) :291-296. (in Chinese)
- [6] Akinbami J F K, Ilori M O, Oyebisi T O, et al. Biogas energy use in Nigeria: Current status, future prospects and policy implications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2001, 5(1) :97-112.
- [7] 刘本生, 孙钦平, 李吉进, 等. 沼液精细过滤后沼液养分的变化研究[J]. *蔬菜*, 2009(12) :40-41.
LIU Ben-sheng, SUN Qin-ping, LI Ji-jin, et al. Study on the nutrient change of biogas slurry after fine filtration[J]. *Vegetables*, 2009(12) :40-41. (in Chinese)
- [8] 盛婧, 徐乔, 朱普平, 等. 基于分级过滤的喷灌用沼液颗粒物组成分析[J]. *农业工程学报*, 2016(8) :212-216.
SHENG Jing, XU Qiao, ZHU Pu-ping, et al. Composition analysis of particles filtered from biogas slurry by sieves with different mesh for sprinkling irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016(8) :212-216. (in Chinese)
- [9] Marcató C E, Pinelli E, Pouech P, et al. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7) :2340-2348.
- [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(4) :139-146.
DING Jing-tao, SHEN Yu-jun, MENG Hai-bo, et al. Nutrient contents and its stability analysis of biogas residue and slurry[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016 (4) :139-146. (in Chinese)
- [11] 秦方锦, 齐琳, 王飞, 等. 3种不同发酵原料沼液的养分含量分析[J]. *浙江农业科学*, 2015(7) :1097-1099.
QIN Fang-jin, QI Lin, WANG Fei, et al. Analysis of nutrient content in biogas slurry with 3 different fermentation materials[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2015(7) :1097-1099. (in Chinese)
- [12] 黄丹丹. 猪场沼液贮存中的气体排放研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
HUANG Dan-dan. Gas emissions from anaerobically digested pig slurry during storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [13] Clemens J, Trimborn M, Weiland P, et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(2) :171-177.
- [14] 王子臣, 梁永红, 盛婧, 等. 稻田消解沼液工程措施的水环境风险分析[J]. *农业工程学报*, 2016(5) :213-220.
WANG Zi-chen, LIANG Yong-hong, SHENG Jing, et al. Analysis of water environment risk on biogas slurry disposal in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016 (5) :213-220. (in Chinese)
- [15] 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 Hua-shan, GUO De-jie, MA Yan, 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. (in Chinese)
- [16] 李祎雯, 曲英华, 徐奕琳, 等. 不同发酵原料沼液的养分含量及变化[J]. *中国沼气*, 2012(3) :17-20, 24.
LI Yi-wen, QU Ying-hua, XU Yi-lin, et al. Change of nutrition contents of biogas slurry with different fermentation raw materials[J]. *China Biogas*, 2012(3) :17-20, 24. (in Chinese)
- [17] 孙钦平, 李吉进, 刘本生, 等. 沼液滴灌技术的工艺探索与研究[J]. *中国沼气*, 2011, 29(3) :24-27.
SUN Qin-ping, LI Ji-jin, LIU Ben-sheng, et al. Study on biogas slurry drip fertigation technics[J]. *China Biogas*, 2011, 29(3) :24-27. (in Chinese)