

外源抗生素对厌氧发酵产气的影响研究

郑德华¹, 赵胜楠¹, 徐春雨杭², 崔彦如¹, 张 颀¹, 高 海^{1*}

(1. 吉林省农业科学院, 长春 130033; 2. 吉林农业大学, 长春 130118)

摘要:以牛粪和玉米秸秆为原料进行序批式厌氧发酵, 研究添加外源抗生素对牛粪厌氧发酵过程中理化参数的影响, 同时探索三种抗生素在厌氧发酵过程中的降解规律。结果表明: 分别添加浓度为 10、30、60、120、240 mg/L 的三种抗生素对厌氧发酵过程中甲烷产气量、pH 值、ORP 和电导率都具有不同程度的影响。环丙沙星对甲烷累计产气量抑制最强, 其次是诺氟沙星, 恩诺沙星抑制最不明显; 抗生素的浓度越高, 对累积产气量的抑制越强, 添加 10 mg/L 恩诺沙星后, 甲烷产气量减少 51%; 添加 240 mg/L 环丙沙星, 甲烷产气量减少 90%。在厌氧发酵过程中, 三种抗生素也逐渐降解, 添加 10 mg/L 恩诺沙星、诺氟沙星、环丙沙星, 经过厌氧发酵周期 (50 d) 后, 三种抗生素降解率分别为 75.39%、56.40%、44.45%。

关键词:厌氧发酵; 产气效率; 抗生素; 降解

中图分类号: X71

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)05-0132-05

Effect of Exogenous Antibiotics on Gas Production during Anaerobic Digestion

ZHENG Dehua¹, ZHAO Shengnan¹, XU Chunyuhan², CUI Yanru¹, ZHANG Di¹, GAO Hai^{1*}

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 2. Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: The effects of exogenous antibiotics on the physical and chemical parameters of cow dung anaerobic fermentation was studied, with cow dung and straw as raw materials during sequencing batch anaerobic fermentation. Meanwhile, the degradation rates of three antibiotics in anaerobic fermentation were explored. The results showed that the addition of the three antibiotics of 10, 30, 60, 120, 240 mg/L had different effects on the methane yield, pH, ORP and conductivity. Ciprofloxacin had the strongest effect on the inhibition of methane, followed by norfloxacin, enrofloxacin is the least obvious. The higher the concentration of antibiotics, the stronger the inhibition of cumulative gas production. For example, after adding 10 mg/L enrofloxacin, the methane production decreased by 51%; when adding 240 mg/L ciprofloxacin, its production was reduced by 90%. In the process of anaerobic fermentation, the three antibiotics were also gradually degraded. For example, with the addition of 10 mg/L enrofloxacin, norfloxacin and ciprofloxacin, their degradation rates were 75.39%, 56.40% and 44.45%, respectively in 50 days.

Key words: Anaerobic digestion; Methane yield; Antibiotics; Degradation

随着我国集约化、规模化养殖的快速发展, 畜禽养殖业已成为国内仅次于钢铁、煤炭的第三大污染行业^[1]。抗生素被用作动物感染性疾病的治疗和饲料添加剂^[2-5], 其在中国的使用量已突破 16 万吨/年^[6]。由于畜禽消化系统的问题, 大部分抗生素不能被畜禽完全吸收利用, 致使畜禽粪便中含有较高浓度的兽用抗生素残留, 最终进入到外界环境中^[7-9]。厌氧发酵技术可以有效地实现畜

禽粪便的资源化利用, 将发酵体系内的复杂有机物分解成简单的有机物^[10], 同时降解粪便中残留的部分抗生素, 有效去除畜禽粪便中的抗性基因^[11-14]。厌氧发酵过程是系统内微生物种群不断演替的复杂过程, 粪便中残留的抗生素会抑制厌氧发酵系统中微生物的活动, 影响厌氧发酵系统的性能, 从而影响沼气发酵产量^[15-20]。土霉素和金霉素浓度为 100 mg/L 时, 甲烷产量降低 62%^[21]; 氟苯尼考、泰乐菌素、磺胺甲噁唑三种抗生素的 5% 抑制作用浓度分别大于 6.4、91、280 mg/L^[22]; 随着罗红霉素浓度的不断增加, 厌氧发酵过程甲烷产气量下降, 同时严重抑制酸化过程^[23]; 经过厌氧发酵后, 猪粪中的环丙沙星和恩诺沙星去除率分

收稿日期: 2019-11-14

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20210508015RQ)

作者简介: 郑德华 (1980-), 男, 助理研究员, 从事农业信息化技术研究。

通讯作者: 高 海, 男, 副研究员, E-mail: gaohai118@163.com

别为 60.3%~70.4% 和 48.4%~77.1%^[24]。不同种类的抗生素分子结构和抑制机理不同^[25],对厌氧发酵过程的抑制作用存在一定的差异。

本试验以新鲜牛粪和玉米秸秆作为厌氧发酵材料,分别添加不同浓度的恩诺沙星(Enrofloxacin)、诺氟沙星(Norfloxacin)和环丙沙星(Ciprofloxacin)进行序批式厌氧发酵试验,通过测定厌氧过程甲烷产气量、pH值、氧化还原电位(ORP)以及抗生素含量等变化,探究外源抗生素对牛粪厌氧发酵的产气影响规律,明确厌氧发酵过程中抗生素的降解效率,为厌氧发酵对畜禽粪便的无害化处理提供理论依据。

1 材料与方 法

试验选用的新鲜牛粪取自吉林省农业科学院畜牧分院养牛场,玉米秸秆采自吉林省农业科学院科研试验基地,接种物为牛粪厌氧发酵产生的沼液(TS=8%),恩诺沙星、诺氟沙星和环丙沙星均为分析纯试剂。

试验装置主要由恒温箱、厌氧发酵反应器、排水集气装置组成。厌氧发酵反应器使用 1 000 mL 的血清瓶,每个反应器的工作体积为 800 mL,置于 35 °C 恒温条件下进行厌氧发酵。牛粪与玉米秸秆混合干物质质量比为牛粪:秸秆=1:2,每个反应器的总固体含量均为 8%,水浴温度控制在(35±0.5)°C。试验共设置五个处理,一个对照,每组处理三次重复。恩诺沙星、诺氟沙星和环丙沙星添加量分别为 0、10、30、60、120、240 mg/L(表 1),CK 为牛粪玉米秸秆混合,不含抗生素。

厌氧发酵体系预发酵 3 d,将产气第一天作为第 0 天。每天取 2.5 mL 气体进行成分分析。为防

表 1 试验处理 mg/L

序号	恩诺沙星		环丙沙星		诺氟沙星	
	组别	浓度	组别	浓度	组别	浓度
1	E ₀	0	H ₀	0	N ₀	0
2	E ₁	10	H ₁	10	N ₁	10
3	E ₂	30	H ₂	30	N ₂	30
4	E ₃	60	H ₃	60	N ₃	60
5	E ₄	120	H ₄	120	N ₄	120
6	E ₅	240	H ₅	240	N ₅	240

止原料堆积影响厌氧发酵过程,每天 9 时和 16 时各摇 1 次,待所有厌氧发酵反应器沼气产量低于累积产气量 5% 时终止厌氧发酵,分析项目和检测方法见表 2。

表 2 指标测定方法

分析项目	检测方法
产气量	排水收集法
气体成分	气相色谱法(GC-2014C)
pH	便携式 pH 计
氧化还原电位	ORP 计
电导率	DZS-708 多参数分析仪
含水率	烘干法
抗生素含量	高效液相色谱法

2 结果与分析

2.1 抗生素对厌氧发酵甲烷产气量的影响

甲烷是厌氧发酵过程中微生物通过一系列水解、酸化、发酵反应之后释放的气体能量,甲烷产气量是厌氧发酵进程的重要标志之一,有机物厌氧消化过程^[26]见图 1。三组试验的甲烷产气量整体上均呈先升高后降低的趋势,随着厌氧发酵过

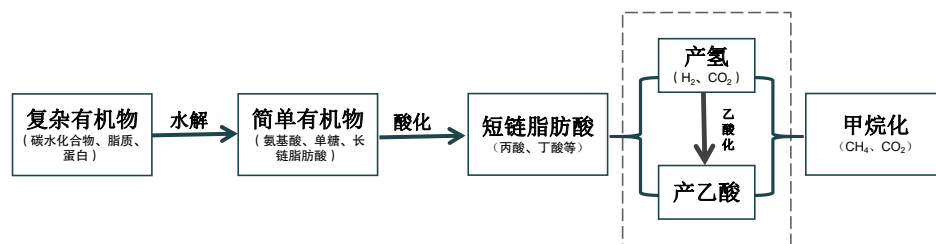


图 1 有机物厌氧消化过程示意图

程的进行,体系内的微生物对厌氧发酵的环境逐渐适应,生长繁殖活动不断增强,进一步促进含碳有机物的分解,使甲烷产气量快速增加^[4]。随发酵时间延长,甲烷的产量逐渐增加,发酵 15~18 d 甲烷产量达到最高,随后产气量逐渐降低。三种抗生素的添加,对甲烷产气量均显示出抑制作用,随抗生素浓度增加,抑制作用增强。

添加恩诺沙星对照组(图 2)E₀在发酵 15 d 浓度最高,甲烷产量达到 195 mL,占沼气总产气量 59.67%,添加组 E₁在发酵 18 d 达到最高,产气量为 101 mL,甲烷含量为 52.62%;添加诺氟沙星(图 3)N₁发酵 18 d 甲烷浓度最高为 45.14%,N₂和 N₃在发酵 21 d、23 d 浓度最高,分别为 43.90%、42.24%;添加环丙沙星组(图 4)发酵 6~9 d 时迅速增加,H₁

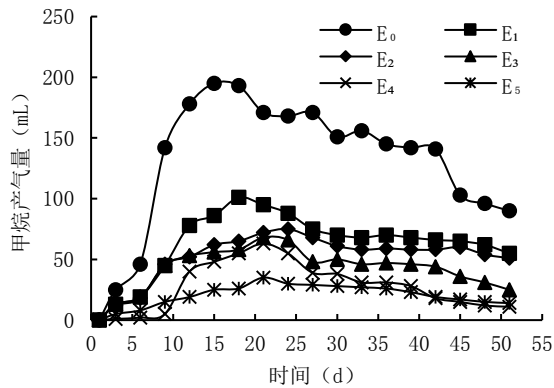


图2 添加恩诺沙星对甲烷产气量的影响

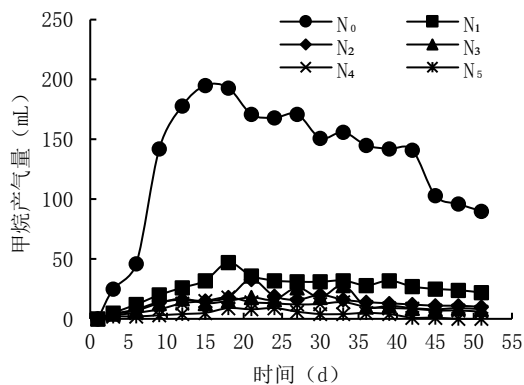


图3 添加诺氟沙星对甲烷产气量的影响

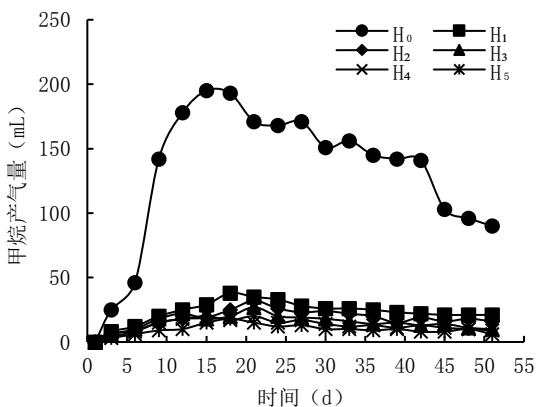


图4 添加环丙沙星对甲烷产气量的影响

处理的产气量在发酵18 d时甲烷产气量最高, 占总产气量46.79%, 明显低于其他两种抗生素处理, 环丙沙星10 mg/L的处理(H_1)产气量均高于其他浓度的处理; 环丙沙星在厌氧发酵初期影响较大, 表现在初期发酵产气量不稳, 可能是由于抗生素分解或者对微生物活动的影响低浓度处理产气量高于高浓度处理。

由此可见, 随着抗生素浓度的提高, 产气量逐渐降低, 随着发酵时间的延长, 各处理的产气量都呈先增加后降低的趋势, 产气量大小依次为恩诺沙星>诺氟沙星>环丙沙星。其中添加10 mg/L恩诺沙星对沼气产气量影响最小, 产气量比对照

组降低47%, 添加10 mg/L环丙沙星对沼气产气量影响最大, 产气量比对照组降低82%。

2.2 抗生素对厌氧发酵累积产气量的影响

累积产气量是厌氧发酵试验结束后整个发酵过程产气量的总和。试验结果表明, 三种抗生素直接影响厌氧发酵的累积产气量, 且影响作用不同。随三种抗生素浓度的增加, 累积产气量明显降低, 其中, 恩诺沙星对累积产气量影响低于诺氟沙星和环丙沙星处理。如图5所示, 经过恩诺沙星处理的 E_1 、 E_2 组累积产气量比 E_3 高41.46%、28.44%, E_3 累积产气量比 E_4 、 E_5 高24.77%、37.89%; 经过诺氟沙星处理的 N_1 分别高于 N_4 、 N_5 处理组47.51%、54.88%; H_1 处理组比 H_2 处理组高55.44%, H_2 处理组高于 H_3 处理组142.38%。综上所述, 发酵50 d, 各处理累积产气量在结束发酵后均低于对照处理组(对照处理组累积产气量5 185 mL), 且同一个处理组内累积产气量均为降低趋势。

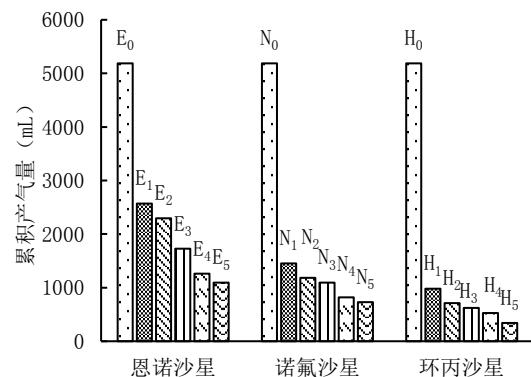


图5 不同抗生素对厌氧发酵累积产气量的影响

2.3 抗生素对厌氧发酵料液理化性质的影响

2.3.1 抗生素对厌氧发酵料液pH的影响

发酵料液的pH(酸碱度)是观察厌氧发酵程度的重要参数之一, 料液中微生物的活动给整个发酵体系带来一定的pH变化。经过不同抗生素处理后的发酵料液pH会在厌氧发酵时出现一定的上下浮动, 经过40 d厌氧发酵, 发酵料液pH会由中性逐渐变为碱性, 在厌氧发酵终止时, 发酵料液pH将呈现偏碱性的状态。如图6所示, 添加恩诺沙星 E_2 处理的发酵料液pH最低为6.5, 发酵50 d后, pH达7.9, 表明抗生素引起发酵系统中挥发酸的积累, 导致pH值降低, 随厌氧发酵的进行, pH逐渐升高。如图7所示, 添加诺氟沙星的处理中, 发酵至30 d料液pH大小依次为 $N_1 > N_5 > N_3 > N_4 > N_2$; 添加环丙沙星(图8)各处理料液发酵40 d后pH提高。三种抗生素处理的大部分处理组都呈现偏碱性状态。

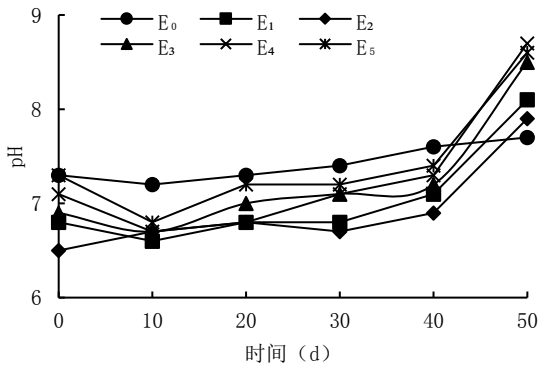


图6 添加恩诺沙星对发酵料液 pH变化的影响

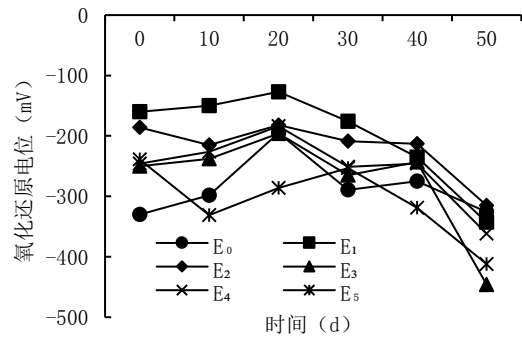


图9 添加恩诺沙星对发酵料液 ORP 的影响

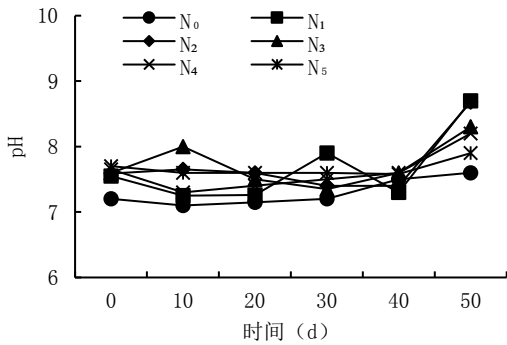


图7 添加诺氟沙星对发酵料液 pH变化的影响

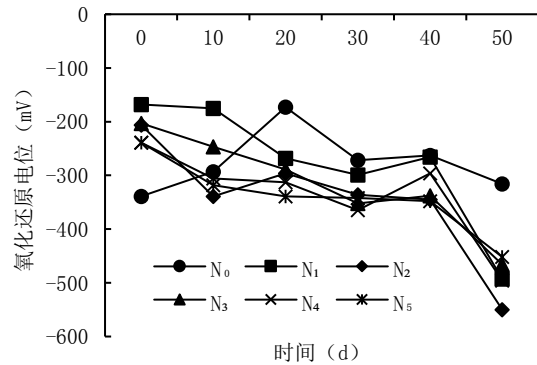


图10 添加诺氟沙星对发酵料液 ORP 的影响

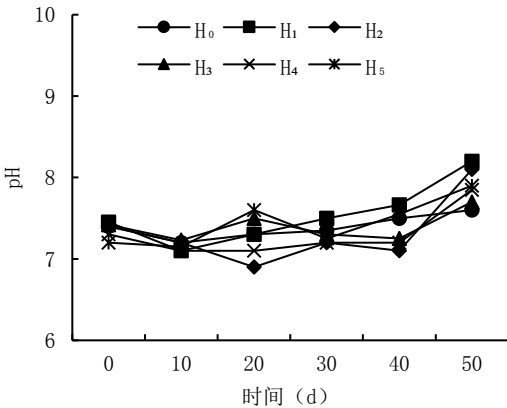


图8 添加环丙沙星对发酵料液 pH变化的影响

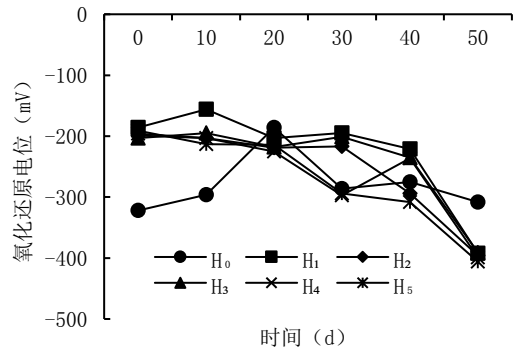


图11 添加环丙沙星对发酵料液 ORP 的影响

2.3.2 抗生素对厌氧发酵料液 ORP 的影响

氧化还原电位简称 ORP, 是任何反应形式下氧化失去电子和还原得到电子并伴有电子得失变化的标志。发酵 20 d 时, 经过恩诺沙星处理的 E₁、E₃、E₄ 组 ORP 均分别增加至 -127、-196、-184 mV (图 9); 诺氟沙星处理发酵料液的 ORP 整体趋于逐渐下降趋势 (图 10), 通过厌氧发酵 10 d 时经诺氟沙星处理的 N₁ 组发酵料液 ORP 增加 13 mV, 厌氧发酵 40 d 时, 经过诺氟沙星处理的 N₄ 组的发酵料液 ORP 增加 41 mV; 经过环丙沙星处理后 H₄ 与 H₅ 组发酵料液 ORP 在厌氧发酵的 30 d 前呈明

显降低趋势, 在厌氧发酵 50 d 后, 除对照组 H₂ 外, 各处理组 ORP 均呈现降低趋势 (图 11)。

在厌氧发酵料液中添加抗生素对发酵系统中的氧化还原电位变化有影响, 各处理所得的 ORP 均为负数, 说明其料液还原性强, 氧化性较弱。

2.3.3 抗生素对厌氧发酵料液电导率的影响

电导率是描述厌氧发酵料液中电荷流动难易程度的参数, 各处理对厌氧发酵料液电导率有一定的影响。如图 12 所示, 添加抗生素的料液电导率比对照降低, 从整体趋势看添加不同浓度的诺氟沙星 (N₁、N₂、N₃、N₄、N₅), 对电导率的影响较小, 趋势比较平缓, 恩诺沙星 E₁、E₃ 料液电导率显著高

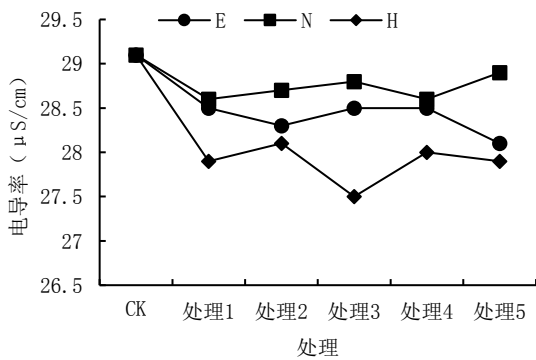


图12 不同抗生素对厌氧发酵料液电导率的影响

于E₅;环丙沙星H₂处理组电导率值比高于H₁、H₃、H₅高。

2.4 厌氧发酵对抗生素降解的影响

试验证明厌氧发酵对于抗生素有一定的消化降解作用,由表3可知,E₁处理厌氧发酵终止后抗生素降解效果最好,达75.39%,E₂次之,为58.59%,E₃为40.18%,与E₁相比E₂、E₃降低率分别为22.28%、46.70%,差异显著;N₁处理抗生素降解率达56.40%,N₄降解率次之,为34.62%,N₅最低,为18.01%。环丙沙星处理后的厌氧发酵组中H₁处理的抗生素降解效果最好,为44.45%,H₂处理次之,为21.74%,与H₁处理相比其他处理明显下降,差异显著。由此可见,经过三种抗生素厌氧处理后所得到的抗生素降解效果存在差异显著。厌氧发酵对于抗生素有一定的降解作用,尤其是

表3 不同抗生素在厌氧发酵中的降解

种类	处理	抗生素浓度(mg/L)	抗生素降解率(%)
恩诺沙星	E ₁	10	75.39±1.47a
	E ₂	30	58.59±3.56b
	E ₃	60	40.18±2.94c
	E ₄	120	30.56±1.46d
	E ₅	240	25.98±3.35d
诺氟沙星	N ₁	10	56.40±4.28a
	N ₂	30	23.10±0.49bc
	N ₃	60	30.81±5.91b
	N ₄	120	34.62±3.99b
	N ₅	240	18.01±2.29c
环丙沙星	H ₁	10	44.45±2.32a
	H ₂	30	15.36±1.61b
	H ₃	60	17.18±7.07b
	H ₄	120	21.74±4.77b
	H ₅	240	10.63±2.71b

注:表中数值为“平均值±标准误”,不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

当恩诺沙星类抗生素浓度低于30 mg/L时,厌氧发酵对抗生素的降解效果比较显著。试验表明,对恩诺沙星来说,抗生素的降解率随浓度的增加而降低,最高可达到70%以上,诺氟沙星降解率也随抗生素浓度增加出现不同程度的降低,当诺氟沙星为10 mg/L时,抗生素降解率最高。这与王强锋等^[15]的研究结果一致。与恩诺沙星、诺氟沙星相比,环丙沙星的降解能力最弱,抗生素降解率受抗生素浓度变化的影响不显著。

3 结论与展望

恩诺沙星、诺氟沙星、环丙沙星三种抗生素对厌氧发酵中的甲烷产气量、累积产气量和发酵料液理化性质均有显著影响。三种抗生素对甲烷产气量和累积产气量呈明显抑制作用。随抗生素浓度增加,对于厌氧发酵产气过程中料液理化性质、产气效率影响越显著。厌氧发酵方法也对畜粪中的抗生素具有一定程度的降解作用,可有效降低抗生素随粪污排放到土壤和水体中带来的风险。本研究为抗生素污染畜禽粪便无害化处理和提高厌氧发酵效率提供数据参考。厌氧发酵是一种切实有效的能够降解外源抗生素的方法,厌氧发酵对抗生素的降解和抗性基因的迁移机理将是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] 孙良媛,刘涛,张乐.中国规模化畜禽养殖的现状及其对生态环境的影响[J].华南农业大学学报(社会科学版),2016,15(2):23-30.
- [2] 陈军.生活污水中抗生素和耐药基因的人工湿地去除机制与系统优化[D].广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),2017.
- [3] Martinez J L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(11): 2893-2902.
- [4] 钱金秋.兽用抗生素对猪粪厌氧发酵性能的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [5] 张鑫.抗生素对牛粪厌氧发酵功能微生物及抗性基因影响机理研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [6] Zhang Q Q, Ying G G, Pan C G, et al. Comprehensive Evaluation of Antibiotics Emission and Fate in the River Basins of China: Source Analysis, Multimedia Modeling, and Linkage to Bacterial Resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11):6772-6782.
- [7] 王瑞,魏源送,赵高峰,等.四环素类抗生素和铜复合污染对猪粪厌氧消化的影响[J].生态毒理学报,2015,10(5):108-114.

(下转第140页)

- 研究, 2019, 42(7): 117-120.
- [4] 王 鹏, 姜海龙, 谷琳琳. 玉米秸秆在饲料中应用研究进展[J]. 饲料研究, 2015(16): 19-22, 61.
- [5] 杨连玉, 高 阳. 玉米秸秆饲料化高效利用的瓶颈及解决策略[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(5): 634-638, 644.
- [6] 那 伟, 赵新颖, 祝延立, 等. 吉林省主要农作物秸秆综合利用现状、问题及对策分析[J]. 黑龙江农业科学, 2019(3): 169-173.
- [7] 杨慧敏. 黑龙江省秸秆资源时空分布特征及利用现状[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(9): 112-114.
- [8] 王 超, 金 海, 李长青, 等. 玉米秸秆饲料进牧区的可行性分析[J]. 畜牧与饲料科学, 2019, 40(8): 30-34.
- [9] 韩雅慧. 不同乳酸菌对低温下黄贮玉米秸秆发酵品质及饲料特性的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [10] 祁宏伟, 于 维, 闫晓刚, 等. 我国玉米秸秆饲料加工处理技术发展现状[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2016, 32(10): 217, 222.
- [11] 李 诚, 王 莉, 李永富, 等. 臭氧预处理对玉米秸秆酶解性能的影响[J]. 林产化学与工业, 2015, 35(6): 58-62.
- [12] 王 芳, 李 伟, 韩永胜, 等. 复合化学方法对玉米秸秆的处理效果研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(36): 74-77.
- [13] 刘海燕, 于 维, 祁宏伟, 等. 肉牛对玉米秸秆利用的探讨[J]. 饲料研究, 2013(3): 25-28.
- [14] 沙洪林, 佟 时, 张维友, 等. 我国农作物秸秆产生及综合利用现状分析[J]. 吉林农业科学, 2010, 35(4): 51-55.
- [15] 鲁宇瞳. 玉米秸秆专用复合微生物发酵剂的研制[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- [16] 经争辉, 娄宇飞, 张梦瑶, 等. 饲用复合菌剂对玉米秸秆青贮品质的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(10): 111-115.
- [17] 祁宏伟, 于 维, 吴 健, 等. 玉米秸秆膨化微贮加工技术简介[J]. 饲料研究, 2015(20): 68-69.
- [18] 徐生祥. 山毛豆和甜象草混合青贮饲料品质的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [19] 王玉婷, 于 维, 祁宏伟. 挤压膨化微贮玉米秸秆的瘤胃降解特性[J]. 中国畜牧杂志, 2018, 54(11): 75-78, 83.
- [20] 仲伟光, 王大广, 于 维, 等. 膨化玉米秸秆发酵饲料对肉羊育肥效果的影响[J]. 中国草食动物科学, 2019, 39(1): 29-32.

(责任编辑: 王丝语)

(上接第 136 页)

- [8] 卢成洪, 牛冬杰, 付 钟, 等. 抗生素杆菌肽锌对鸡粪厌氧水解酸化的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5): 79-82.
- [9] 孙建平, 郑 平, 胡宝兰, 等. 抗生素对猪场废水厌氧生物处理的影响[J]. 太阳能学报, 2009, 30(6): 824-828.
- [10] Pramanik S K, Suja F B, Zain S M, et al. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints[J]. Bioresource Technology Reports, 2019, 8: 100310.
- [11] 杨晓洪, 王 娜, 叶波平. 畜禽养殖中的抗生素残留以及耐药菌和抗性基因研究进展[J]. 药物生物技术, 2014(6): 583-588.
- [12] 钱燕云, 郑 吉, 徐莉柯, 等. 温度对厌氧环境下污泥中抗生素抗性基因行为特征的影响[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(5): 56-65.
- [13] Zhang J, Wang Z, Wang Y, et al. Effects of graphene oxide on the performance, microbial community dynamics and antibiotic resistance genes reduction during anaerobic digestion of swine manure[J]. Bioresource Technology, 2017, 245: 850-859.
- [14] 孙 薇. 畜禽粪便厌氧发酵过程中抗生素抗性基因变化机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [15] 王强锋, 朱彭玲, 夏中梅, 等. 三种农用抗生素降解真菌的筛选及其降解性能[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 533-539.
- [16] 宋 雯. 不同原料比例对厌氧发酵过程中抗生素抗性基因及微生物群落结构的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [17] 范 超, 王 欣, 刘 伟, 等. 抗生素对鸡粪厌氧发酵过程影响的实验研究[J]. 黑龙江科学, 2016, 12(22): 1-3.
- [18] 汪少娜. 磺胺类抗生素对猪粪厌氧发酵的影响及其降解机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [19] 朱文博, 张秋萍, 许继飞, 等. 牛粪原料浓度对厌氧消化削减四环素类抗性基因的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1808-1817.
- [20] 王 瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1705-1719.
- [21] Alvarez J A, Otero L, Lema J M, et al. The effect and fate of antibiotics during the anaerobic digestion of pig manure[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(22): 8581-8586.
- [22] Mitchell S M, Ullman J L, Teel A L, et al. The effects of the antibiotics ampicillin, florfenicol, sulfamethazine, and tylosin on biogas production and their degradation efficiency during anaerobic digestion[J]. Bioresour Technol, 2013, 149: 244-252.
- [23] Ni B J, Zeng S, Wei W, et al. Impact of roxithromycin on waste activated sludge anaerobic digestion: Methane production, carbon transformation and antibiotic resistance genes[J]. Science of The Total Environment, 2019, 703(3): 134899.
- [24] 吴爽爽, 解诗雨, 李佳佳, 等. 畜禽粪便中常见抗生素去除的研究进展[J]. 天津农学院学报, 2019, 26(2): 89-92.
- [25] 朱孔云. 典型外源污染物对厌氧消化过程的抑制特性及缓解策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [26] Muyzer G, Stams A J M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria[J]. Nature Reviews. Microbiology, 2008, 6(6): 441-454.

(责任编辑: 王 昱)