

高浓度高氨氮鸡粪沼气工程运行分析

陈智远, 宫亚斌, 詹偶如, 姚建刚

(杭州能源环境工程有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 培养驯化耐高氨氮厌氧菌种是解决厌氧消化过程氨抑制的一条非常有效的措施, 文章以杭州能源环境工程有限公司已建成并稳定运行多年的工程项目为例, 探讨分析鸡粪高浓度高氨氮厌氧消化的工艺流程及运行参数。工程采用耐高氨氮厌氧消化技术, 鸡粪厌氧进料 TS 浓度可达 8% ~ 12%, 沼液氨氮浓度超过 5500 mg·L⁻¹, 厌氧产沼气过程不受影响(鸡粪 TS 产气率仍能超过 500 m³·t⁻¹), 从而实现鸡场粪污的高效稳定化处理。

关键词: 鸡粪; 厌氧消化; 高氨氮

中图分类号: S216.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1166(2018)03-0078-05

畜牧业迅速发展的同时, 产生了大量的畜禽粪污。据测算, 全国规模化畜禽养殖场每年产生畜禽粪污 20.5 亿吨, 仍有 56% 未得到有效利用^[1]。畜禽养殖废弃物具有高含固率、高有机物、高氮磷以及含有大量的病原微生物和寄生虫卵等特点, 远超过了自然界的自净分解能力, 若不科学处理, 将严重污染大气、水体及土壤等环境, 并会传播疾病, 同时也会影响畜牧业自身的可持续发展。因此, 将畜禽废弃物进行无害化和资源化利用对降低环境污染有着重要的意义^[2-3]。

厌氧消化技术是处理畜禽粪便的有效途径之一, 不仅能实现畜禽养殖废弃物的无害化处理与多层次资源化的利用^[4-5], 也能产生沼气用于热电联产或生产生物质天然气维持畜禽养殖行业的可持续发展。鸡粪作为占据重要比例的畜禽废弃物, 其厌氧处理技术与其他畜禽废弃物有着显著不同。鸡的消化道仅为体长的 7 倍, 饲料在消化道内的停留时间较短(4 h), 因此对摄入的饲料消化吸收率很低, 约 70% 的营养物被直接排出体外, 是所有禽畜粪便当中养分是最高的^[6], 其含粗蛋白 28.7%, 粗纤维 2.8%, 粗脂肪 12.5%, 粗灰分 21.4%, 有机质 68.2%^[7]。鸡粪 C/N 较低, 高浓度厌氧消化过程中易造成氨氮富集从而导致消化过程的抑制作用出现^[8]。Calli^[9]等曾报道, pH 值为 7.4, 总氨氮超过 3000 mg·L⁻¹时就会对发酵微生物产生毒抑制作用。

Adderley^[10]等研究表明总固体含量为 2.5% 的鸡粪发酵时其挥发酸量最大化且产甲烷细菌活性最强。

氨抑制是影响厌氧消化稳定性的重要因素, 而游离氨起主要抑制作用, 抑制浓度受 pH 值、温度、底物、微生物等多方面因素影响。目前关于氨抑制解除方法的研究主要集中在调节工艺参数控制游离氨浓度和通过驯化提高微生物对氨的耐受能力^[11]。通过调节工艺参数来控制氨浓度, 必然会引起其他因素的变化, 例如通过降低温度降低氨抑制时会降低污泥活性, 降低 pH 值时会增加 VFA 浓度引起 VFA 积累抑制等问题; 因而通过驯化耐高氨氮的微生物是解决厌氧消化氨抑制的重要措施。本文采用工程案例的方式分析高氨氮甲烷菌的培养驯化, 探讨高浓度高氨氮鸡粪的厌氧消化技术, 以期对我国规模化鸡粪沼气工程的设计与运行提供参考。

1 高浓度厌氧的工艺流程

高浓度纯鸡粪工程需要有适应超高氨氮浓度的甲烷菌进行厌氧消化协同作用, 需要采用特定驯化的方式进行培养以应对高浓度鸡粪的厌氧消化。

大型鸡粪沼气工程的工艺图如 1 所示。沼气工程一般分为 4 大阶段: 1) 鸡粪运输与废水输送阶段; 2) 预处理阶段; 3) 厌氧产沼与沼气净化贮存气阶段; 4) 产品高效利用阶段; 产品利用主要分为沼气与沼液两方面。

收稿日期: 2017-07-13 修回日期: 2017-09-26

项目来源: 成套生物燃气工程装备系列模块化研制(2014BAD24B02)

作者简介: 陈智远(1987-), 男, 江西赣州人, 工程师, 主要从事生物质厌氧发酵方面的研究等工作, E-mail: chenzyuan2004@163.com

通信作者: 宫亚斌, E-mail: gongyabin@heee-biogas.com

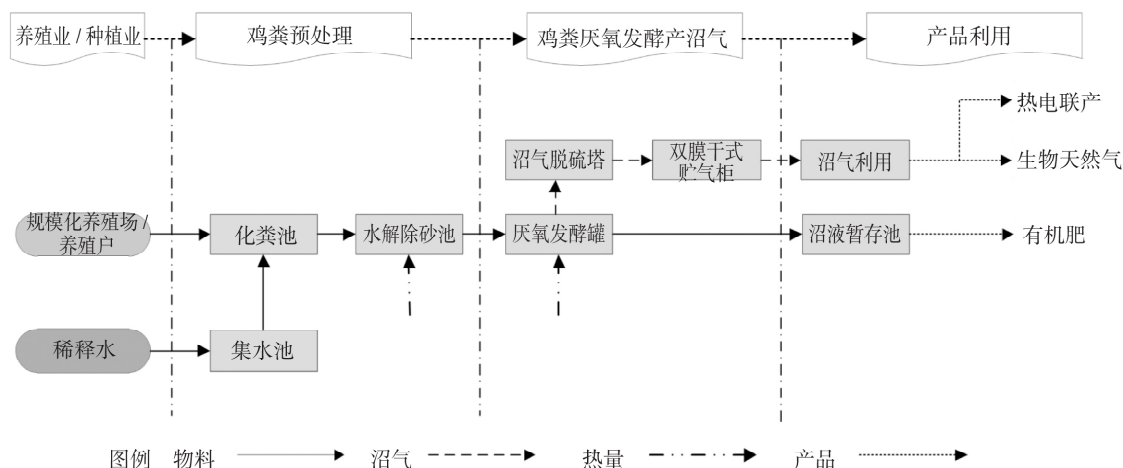


图1 工艺流程图

养殖场产生的鸡粪和污水通过车辆或管道输送至水解除砂池和集水池,鸡粪经污水稀释调配 TS 浓度为 8% ~ 12% 后,在水解停留时间 2 d,经水解除砂后鸡粪物料 TS 浓度为 7% ~ 10%,通过螺杆泵泵入两级厌氧消化系统。厌氧消化采用 CSTR 厌氧反应器两级发酵,设置停留时间 20 ~ 25 d。同时,在一二级发酵罐之间设置回流泵,将二级厌氧罐的污泥部分回流至一级罐,提升一级罐内污泥含量,缓冲一级罐内高负荷,提高沼气生产效率^[12],同时,减少了污泥流失。发酵产生的沼气进入脱硫系统脱硫后发电上网或脱碳提纯制备生物天然气,沼液沼渣则用于周边果园及农业种植使用。

在厌氧调试运行初期时,通过调控水解温度、物料 pH 值及 TS 浓度、进料负荷、罐内温度等逐步驯化培养耐高氨氮厌氧污泥,其培养驯化周期需要半年左右。

2 工程案例

2.1 山东民和牧业 3 MW 热电肥联产沼气工程

山东民和牧业大型热电肥联产沼气工程是于 2007 年 12 月投资建设,2008 年 10 月调试运行的大型沼气发电工程,2009 年 2 月并网发电,位于山东省蓬莱市北沟镇曲家沟村。工程将山东民和牧业股份有限公司下属的 23 处肉鸡场,每天产生的鸡粪 (TS 20%) 500 吨和污水 500 方作为原料进行厌氧消化,产生的沼气用于沼气发电并网,发电机组余热用于发酵系统自身增温。该项目日产沼气 30000 m³,日发电 60000 kW·h,并入电网,年发电量 2000 万 kW·h,每年可获发电收益 1300 万元,发酵后的沼液部分直接施用于周围葡萄、苹果和玉米等农田,另

有 300 t·d⁻¹ 的沼液用于沼液资源化利用项目生产高端叶面肥,既减少了化肥的使用量,又实现了资源的循环利用和污染物的零排放。该项目实现年减排温室气体 6.7 万吨 CO₂ 当量,是国内首个在联合国完成清洁发展机制 (Clean Development Mechanism, CDM) 碳交易的农业领域沼气项目^[13-14]。

该项目于 2008 年 10 月开始投料调试运行,至今已稳定运行 9 年以上,其工艺运行可靠、管理方便、发酵正常,沼气脱硫净化效果良好。2009 年 6 月底至 7 月底对工程进行监测,数据见图 2 ~ 图 5。在此期间项目平均每日进料 210 吨鸡粪,厌氧进料浓度 TS 6.1% ~ 8.1%,一级发酵罐平均浓度 TS 3.9%,二级发酵罐平均浓度 TS 4.1%,沼液罐出水平均浓度 TS 3.4%;各级发酵物料 pH 值 8.0 ~ 8.2;一级发酵罐挥发酸平均 4760 mg·L⁻¹,二级发酵罐挥发酸平均 3823 mg·L⁻¹,沼液罐出水挥发酸平均 2912 mg·L⁻¹;各级发酵罐总碱度 (以 CaCO₃ 计) 在 9500 mg·L⁻¹ ~ 1100 mg·L⁻¹ 之间,氨氮浓度均达到 5000 mg·L⁻¹ 以上,平均日产沼气 22594 m³,平均日发电 46550 kW·h,项目沼气产量未受氨氮影响,通过核算该项目实际运行中鸡粪 TS 产气率大于 500 m³·t⁻¹。沼气经过生物脱硫塔脱硫处理后,其甲烷浓度 60% ~ 70%,沼气脱硫前 5000 ppm ~ 6000 ppm,脱硫后 200 ppm 以下,硫化氢去除率超过 96%。

根据监测结果,鸡粪原料中挥发性固体 (volatile solid, VS) 占 TS 比例为 67%,总氮占 VS 比例为 8.3%。厌氧消化所能承受的最大游离氨为 0.5 kg·m⁻³^[15]。McCarty 和 McKinney 报道,150 mg·L⁻¹ 非离子化氨具有抑制作用;根据 Koster 和 Lettings

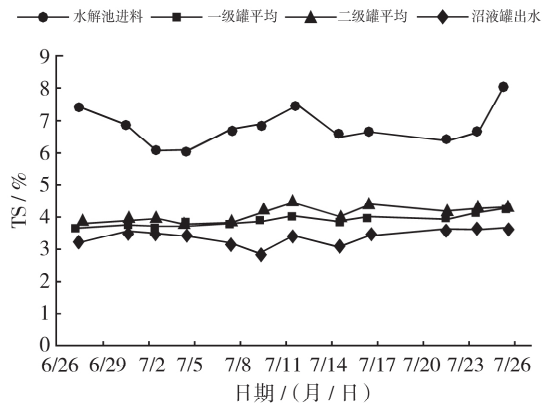


图2 山东民和沼气工程厌氧发酵 TS 浓度

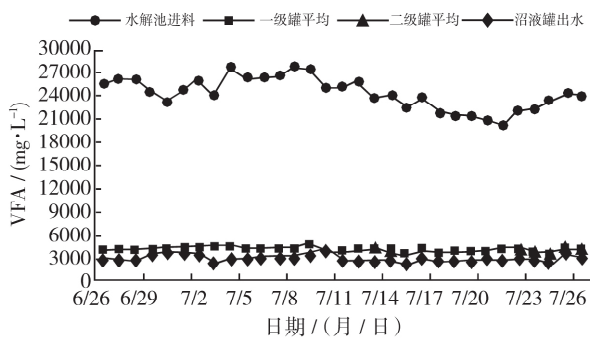


图3 山东民和沼气工程挥发酸 VFA 浓度

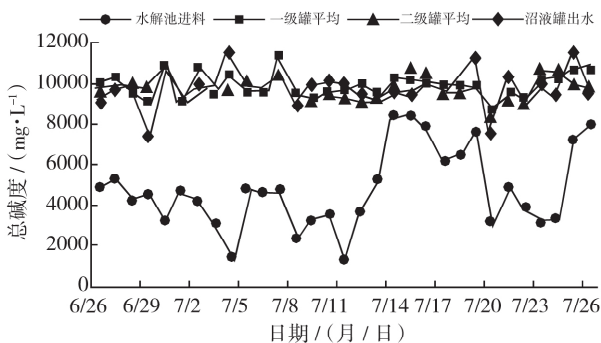


图4 山东民和沼气工程总碱度

的研究,当 NH_4^+-N 为 $2323 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,观察不到任何影响,当 NH_4^+-N 为 $4050 \sim 5730 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,甲烷菌丧失 56% 的活性;Soubes 等研究 NH_4^+-N 毒性,发现 pH 值为中性时 IC_{50} 为 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。蒋彬^[16] 的研究则表明在氨氮抑制甲烷化过程中离子态 NH_4^+-N 是主要的抑制剂,而非大多数学者所认同的游离氨氮,其与细胞内其它阳离子的交换是导致产甲烷菌代谢失调的主因。何仕均^[17] 等研究发现当氨氮浓度小于 $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对体系表现为促进产甲烷作用;当氨氮浓度大于 $0.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,开始表现为抑制产甲烷作用,并且随着氨氮浓度的继续提

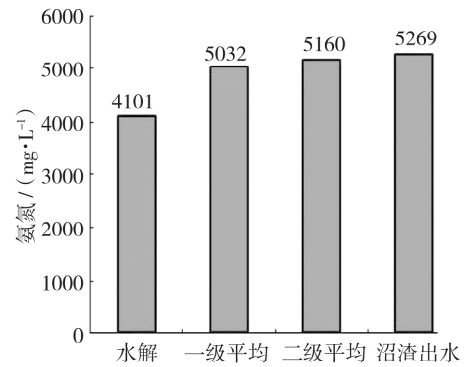


图5 山东民和沼气工程氨氮浓度

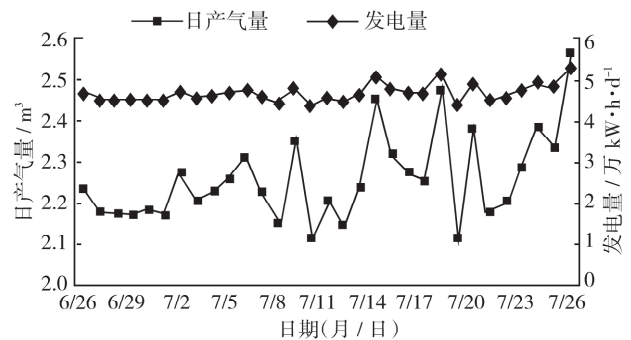


图6 山东民和沼气工程日产气量和日发电量

高,厌氧颗粒污泥的产甲烷活性显著下降。同时,研究表明氨氮对厌氧污泥产甲烷活性的影响与反应体系的碱度及污泥浓度等有关,在一定范围内提高反应体系的碱度或污泥浓度可以提高反应器对氨氮产甲烷毒性的忍耐能力。于芳芳^[18] 等,研究表明,当 COD 为 $6000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氨氮对产甲烷菌产生毒害作用的浓度为 $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, IC_{50} 为 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,毒性周期的最大产甲烷速率为 $92 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$,氨氮的平均去除率为 13.17%;去除高浓度氨氮废水后,厌氧颗粒污泥产甲烷活性有不同程度的恢复,在毒性实验中受到的抑制作用越小,产甲烷活性恢复得就越快、越完全。

实际表明经一定周期的工程驯化调试,可以缓慢提高菌种的氨氮耐受能力。

2.2 江苏省大丰市畜禽粪污集中处理综合利用项目

江苏省大丰市畜禽粪污集中处理综合利用项目为通过处理大丰市大丰港及周边区镇 $220 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的鸡粪并生产生物质燃气。鸡粪通过厌氧消化每天可生产沼气约 20000 m^3 ,其中平均每天约 18% 的沼气用于发酵系统自身增温,剩余沼气经提纯后生产生物天然气,平均每天生物天然气的产量约为 10000 m^3 ,年产生生物天然气约 350 万 m^3 ;发酵后的沼液、沼渣分别进入有机肥厂进行深度加工。

该项目综合利用周边养殖粪污,既开发了生物质能源,有效利用了资源,又减少了周边养殖生产带来的环境污染,改善了当地的生态环境,实现现代养殖业的绿色可持续发展。项目建成后,实现年减排

温室气体 4.5 万吨 CO_2 当量。该项目于 2014 年开工建设,2015 年 6 月开始投料调试运行,至今已稳定运行近 2 年,表 1 是项目调试完成后从 2015 年 9 月至 2016 年 12 月期间各工艺段运行监测的数据。

表 1 江苏和顺项目各工艺段监测数据

项 目	pH 值	TS	总碱度	VFA	氨氮
		%	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
水解沉砂池	5.00 ~ 6.70	6.50 ~ 10.2	1550 ~ 10216	19980 ~ 27956	3500 ~ 4100
一级厌氧罐	7.86 ~ 8.16	3.22 ~ 4.32	8333 ~ 11955	3410 ~ 4766	5200 ~ 5400
后发酵罐	8.06 ~ 8.26	3.12 ~ 4.00	9016 ~ 13908	2195 ~ 4198	5500 ~ 5700

从表 1 可以看出,该项目鸡粪水解除砂后原料 TS 浓度平均 8.35%,最高到 10.2%;发酵物料 pH 值 7.8 ~ 8.2, VFA 平均 $4100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总碱度(以 CaCO_3 计)平均 $10100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮维持在 $5200 \sim 5700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其 TS 产气率维持在 $460 \sim 510 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,其波动受周边各养殖场原料影响。

2.3 台湾石安牧场日处理 80 t 鸡粪沼气发电项目

台湾石安牧场日处理 80 t 鸡粪沼气发电项目采用 CSTR 发酵工艺,设计处理鸡粪 $80 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,生产沼气 $8000 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。沼气全部用来发电,每天可产 $16800 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 电,所发电量除少量用于养殖场鸡舍自用外,剩余全部上网供市电使用,发电机余热为发酵系统本身供热。发酵后的沼液全部被用作台湾高雄市阿莲乡周边果园及蔬菜等种植过程中的有机肥施用于农田中。

该项目于 2014 年年初开工建设,2014 年 10 月开始投料调试运行,现已稳定运行接近 3 年时间。2016 年 8 月对工程进行监测,数据见图 7 ~ 图 10。项目厌氧消化系统每日鸡粪投加量在 $50 \sim 60 \text{ t}$,经稀释调配及除砂后厌氧罐进料 TS 浓度维持在 7% ~ 8%,发酵物料 pH 值 7.9 ~ 8.1,挥发酸浓度平均 $5720 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总碱度(以 CaCO_3 计)平均 $29860 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮浓度维持在 $5100 \sim 5600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其特有的发酵环境使得该系统可在高挥发酸和高氨氮下稳定运行,每日沼气产量 $6000 \sim 7000 \text{ m}^3$,其原料产气率达到 $110 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ 以上。所产沼气经生物脱硫塔脱硫处理后,甲烷含量高达 65% ~ 70%,硫化氢含量小于 50 ppm,去除率高达 99% 以上。

3 小结

鸡粪高浓度高氨氮厌氧消化可以大大减少鸡粪调配水的使用量,从而减少了沼气工程中原料增温

对热量的需求以及后续沼液的处理消纳的数量,对沼气工程可持续、经济发展创造了技术基础。采用高浓度高氨氮鸡粪的厌氧消化技术,其厌氧进料 TS

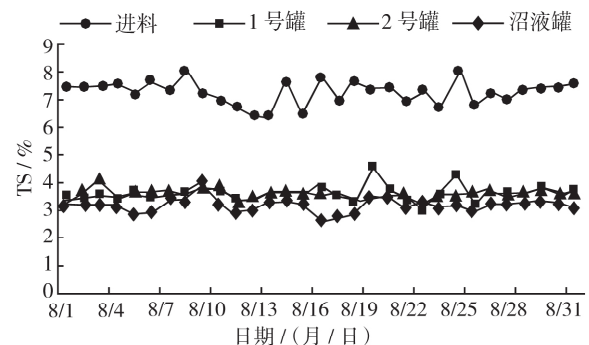


图 7 台湾石安牧场沼气工程厌氧发酵 TS 浓度

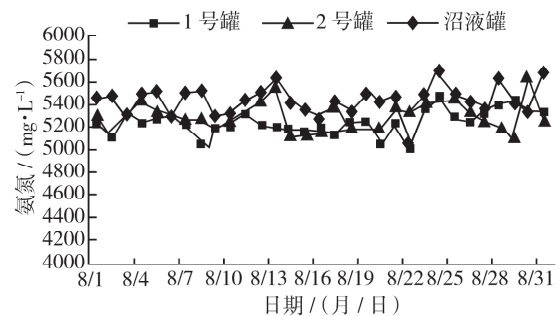


图 8 台湾石安牧场沼气工程氨氮浓度

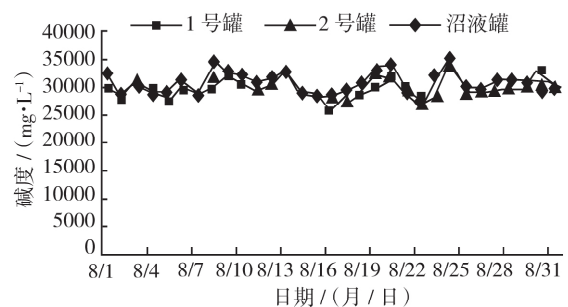


图 9 台湾石安牧场沼气工程碱度

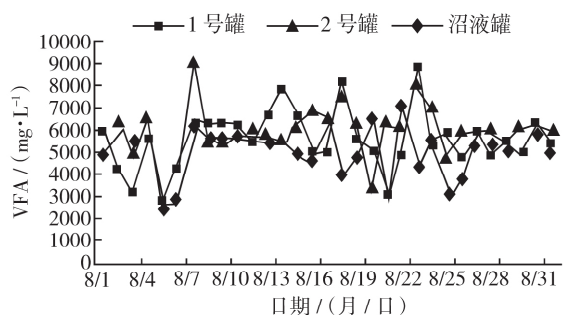


图 10 台湾石安牧场沼气工程挥发酸 VFA 浓度

浓度可达 8% ~ 12% ,大型沼气工程运行中氨氮耐受浓度高至 $5500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,厌氧产沼气过程不受影响。通过工程实例分析,鸡粪高氨氮浓度厌氧消化技术稳定可靠,值得推广应用,该技术将对规模化养殖场处理鸡粪粪污提供技术借鉴。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/jrzq/2010-02/10/content_1532174.htm 2010-02-10.
- [2] 王方浩,马文奇,奚争霞,等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学 2006 26(5): 614-617.
- [3] 李淑芹,胡玖坤. 畜禽粪便污染及治理技术[J]. 再生能源 2003(1): 21-23.
- [4] 涂德浴,董红敏,丁为民,等. 畜禽粪便热化学转换特性和可行性分析研究[J]. 中国农业科技导报 2007 9(1): 59-63.
- [5] 邓良伟. 规模化猪场粪污处理模式[J]. 中国沼气, 2001, 19(1): 29-33.
- [6] 李 跻,郭旭宏. 鸡粪的发酵处理方法与利用[J]. 农业科学研究 2007 28(3): 92-94.
- [7] 胡雪静. 鸡粪三级逆流厌氧发酵产沼气与磷回收工艺[D]. 合肥: 合肥工业大学 2015.
- [8] 赵云飞,刘晓玲,李十中,等. 有机成分比例对高固体浓度厌氧发酵产甲烷的影响[J]. 中国环境科学, 2012 32(6) 1110-1117.
- [9] Calli B, Mertoglu B, Inanc B, Yenigun O. Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors [J]. Process Biochemistry, 2005, 40: 1285-1292.
- [10] Adderley A E, Smith I E, Probert S D. Anaerobic fermentation of poultry manure [J]. Applied Energy, 1976, 2(3): 163-173.
- [11] 王 坤,田 颖,刘阳生,等. 厌氧消化过程氨抑制解除技术研究进展 [J]. 工业水处理 2015 35(5): 10-15.
- [12] 张希衡,等. 废水厌氧生物处理工程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [13] 陈智远,蔡昌达. 大型沼气工程运行分析[J]. 可再生能源 2009 27(6) 102-104.
- [14] 李 倩,蓝天,寿亦丰,等. 热电肥联产大型鸡场废弃物沼气工程技术[J]. 中国工程科学 2011 13(2) 35-39.
- [15] Irini Angelidaki, Lars Ellegaard, Brigitte Kioer Ahring. Applications of the anaerobic digestion process [J]. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 2003, 82: 1-33.
- [16] 蒋 彬. 餐厨垃圾中温厌氧消化工艺性能及特征影响因素研究[D]. 南京: 东南大学 2009.
- [17] 何仕均,王建龙,等. 氨氮对厌氧颗粒污泥产甲烷活性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版) 2005 45(9).
- [18] 于芳芳,伍健东. 氨氮对厌氧颗粒污泥产甲烷菌的毒性研究[J]. 化学与生物工程 2008 25(4): 75-78.