

# 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究

叶小梅, 常志州<sup>\*</sup>, 钱玉婷, 潘君才, 朱 谨

(江苏省农业科学院 江苏省农业废弃物资源化工程技术中心, 南京 210014)

**摘 要:** 近年来, 中国大中型沼气工程发展迅速, 然而有关沼气工程运行情况的研究甚少。为探索沼气工程运行中存在的问题, 该文对江苏省 21 家畜禽养殖场大中型沼气工程进行了实地调查, 并采集发酵料液以及出料样品, 分析了进出料液 COD (化学需氧量) 质量浓度、沼液产气潜力、粪大肠菌群数等指标。结果表明: 江苏省沼气工程设计施工规范, 配套设施较完备, 但运行效率低, 沼气、沼液处理或利用能力低。大多数沼气工程以处理养殖废水为主, 发酵料液固体质量分数 < 3%, 62% 的出料沼液的 COD 质量浓度达到 5 000 mg/L 以上; 沼液残余产气潜力较大, 在 35℃ 条件下, 有 12 家沼气工程的沼液残余产甲烷量达 100 mL/L 以上。沼气发酵处理可以显著降低粪大肠菌群含量, 平均可减少 92.9%, 但厌氧消化后的沼液中仍含有较高浓度粪大肠菌群, 不能达到无害化要求。该调查结果可为畜禽养殖场沼气工程的健康稳定运行与管理提供科学依据。

**关键词:** 沼气, 大肠菌群, 生物学, 大中型沼气工程, 残余产气潜力

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.036

中图分类号: S216.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-06-0222-06

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, 28(6): 222-227.

Ye Xiaomei, Chang Zhizhou, Qian Yuting, et al. Investigation on large and medium scale biogas plants and biological properties of digestate in Jiangsu province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 222-227. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

沼气工程作为集约化畜禽养殖场粪便及养殖污水处理与资源化利用的重要途径, 近几年来发展迅速。自 2004 年起, 中国大中型沼气工程数量每年均以 40% 以上速度快速增加, 2008 年增速更是达到了 82.19%。规模化畜禽养殖场建设大中型沼气工程的比例也由 2004 年的 8.56% 上升到 2008 年的 26.82%。截止 2009 年, 中国已建成并运行的大中型沼气工程已达 3 800 个, 每年可处理数亿立方米动物排泄物与养殖场污水<sup>[1]</sup>。2007 年, 国家发布的《可再生能源中长期发展规划》以及农业部编制出台的《全国农村沼气工程建设规划》, 提出: 到 2010 年全国农村户用沼气总数达到 4 000 万户, 新建大中型沼气工程 4 000 处, 年产沼气 190 亿 m<sup>3</sup>; 到 2020 年, 全国农村户用沼气用户达 8 000 万户, 大中型沼气工程达 8 000 处, 年利用沼气总量达 440 亿 m<sup>3</sup>。可以预见, 随着公众对环境保护意识的提高与国家财政继续支持, 养殖场沼气工程建设还将得到更进一步的发展。然而, 在沼气工程得到快速发展的同时, 对已建沼

气工程的跟踪研究较少, 中国的沼气工程运行管理滞后。徐庆贤等<sup>[2]</sup>、马亚南等<sup>[3]</sup>、王宇欣等<sup>[4]</sup>对相关的一些省市现有的沼气工程进行了调研分析, 但调研内容主要集中在沼气工程的规模与工艺, 以及三沼 (沼气、沼液、沼渣) 的利用方式, 缺乏沼气工程实际运行状况的研究。为进一步探索沼气工程运行管理中存在的问题, 笔者对江苏省 21 个大中型沼气工程进行了调查与采样分析, 旨在分析现有沼气工程运行状况, 初步评估沼气工程实际运行效果, 以便及时发现问题并提出解决问题的途径与方法, 对中国沼气工程建设与运行及健康稳定发展提供借鉴与参考。

## 1 调查与研究方法

### 1.1 调查方法

从 2009 年 9 月 10 日至 2010 年 3 月 24 日, 分 6 次对江苏省 21 个规模化养殖场内的大中型沼气工程进行调查取样, 所调查的沼气工程均为 2010 年前建成, 且规模在 800 m<sup>3</sup> 以上, 其中有 14 个在苏南地区, 苏北 (包括苏中) 地区 7 个, 调查内容主要包括: 沼气工程建设情况、产气发电情况、以及沼液沼渣的处置方式, 同时, 在进料池、出料池 (沼液) 取样, 分析进出料液的浓度、沼液的产气潜力以及病原微生物的数量。

### 1.2 取样方法

进料池样品, 取自调节池, 采样前开机搅拌 5 min, 用水样采集器采样, 每次采集样品量为 500 mL, 沼液样

收稿日期: 2011-06-27 修订日期: 2011-11-27

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (200903011-01);

作者简介: 叶小梅 (1976-), 女, 福建长汀, 副研究员, 博士, 研究方向为农业废弃物资源化。江苏省农科院农业资源与环境研究所, 210014。

Email: yexiaomei610@126.com

※通信作者: 常志州 (1957-), 男, 江苏句容人, 研究员, 研究方向为农业废弃物资源化。江苏省农科院农业资源与环境研究所, 210014。

Email: czhizhou@hotmail.com

品为厌氧发酵罐直接排放出的沼液, 每次采集样品量同样为 500 mL, 采集后的样品放入带有冰块的样品箱中, 带回实验室, 立即进行分析, 未能当日完成分析的样品, 放入冰箱冷藏, 待用。

### 1.3 分析测试方法

总固体 (total solid, TS): 105℃ 恒温箱 (DHG-9023A 型, 上海精宏实验设备有限公司) 中烘至恒定质量进行测定; 挥发性固体 (volatile solid, VS): 550℃ 马弗炉 (4-10 型, 上海圣科仪器设备有限公司) 中灼烧至恒定质量进行测定;

化学需氧量 COD (chemical oxygen demand, COD) 测定: 采用 HCA—100 标准 COD (Cr) 消解器 (姜堰市华晨仪器有限公司), 采用国家标准 GB 11914-89 方法测定, 取试样 10 mL, 加入 0.25 mol/L 重铬酸钾 5.0 mL、硫酸银—硫酸 (1:10) 15 mL, 沸腾后回流消解 2 h, 冷却后用 0.10 mol/L 硫酸亚铁铵标准液滴定至终点, 指示剂为邻菲罗啉。

五日生物耗氧量 (5-day biochemical oxygen demand, BOD<sub>5</sub>) 测定: 使用 250 mL 带有水封、磨口玻璃塞的培养瓶在 20℃ 的恒温培养箱中, 按照国标 GB7488-1987 (五日稀释法) 的方法进行测定。

气体组分: 采用带有开关阀的气密性注射器取沼液气体 0.5 mL, GC9890A/T 气相色谱仪 (南京仁华色谱科技应用开发中心) 进行检测, 柱箱温度 150℃, 检测器温度 160℃, 载气为高纯氢。

粪大肠菌群数测定: 采用多管发酵法, 参照国标 GB 5750-1985 方法进行。

沼液产甲烷潜力试验: 参照 Angelidaki and Sanders<sup>[5]</sup> 方法进行, 采用有效容积为 180 mL 的血清瓶测定, 按混合液挥发性悬浮固体质量浓度 (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS) 15 g/L 的量接种厌氧污泥, 加入一定量的取样沼液, 使装料总体积为 50 mL, 设 15、25、35℃ 3 个温度梯度, 在恒温水浴锅 (HH-2 型, 国华电器有限公司) 中培养, 试验周期为 2 个月。

## 2 结果与分析

### 2.1 沼气工程建设状况及装备

所调查的 21 家沼气工程基本情况如表 1 所示。从表 1 可以看出, 所调查的沼气工程在养猪场 16 个, 奶牛场 5 个, 17 家已经连续运行半年以上, 另有 4 家未常态运行或试运行。所调研的沼气工程均由专业资质部门设计和施工完成, 均配有完整的发酵原料、沼气净化处理系统, 建设水平较高。

#### 2.1.1 建设规模

在所调查 21 家沼气工程中, 总体装置容积都在 800 m<sup>3</sup> 以上, 其中 1 000 m<sup>3</sup> 以上的沼气工程有 16 家, 占总调查数的 76%, 说明江苏省沼气工程规模以大型为主。沼气工程均配备了发电机组, 其中, 800~1 000 m<sup>3</sup> 沼气工程配备的发电机装机容量一般为

80 kW, 超过 1 000 m<sup>3</sup> 发电机装机容量则大于 100 kW。

#### 2.1.2 工艺类型

所调研的沼气工程厌氧消化反应器类型为全混式厌氧反应器 (CSTR) 和升流式厌氧固体反应器 (USR) 两种, 其中, 以带有机机械搅拌 CSTR 工艺为主, 占 67%; 这两种工艺类型均适宜高悬浮物浓度有机物料的厌氧发酵, 适用于畜禽粪便的厌氧发酵<sup>[6]</sup>。所调研的沼气工程中的沼气储气方式有一半以上 (11 家) 采用了产气、贮气一体化池型。即将厌氧罐与沼气贮气柜合二为一, 在厌氧罐上方安装有双层柔性膜, 用于沼气贮气, 贮气膜柜通过调整内外膜之间夹层的空气压力, 以外膜保护并维持贮气柜的形态和结构, 并将内膜内的沼气送入输气管道。该池型是目前德国规模化沼气工程的主流池型<sup>[7]</sup>。该池型的优点是减少了分体式气柜, 具有造价低、用地省、工期短的优点, 其缺点是低压贮气, 一旦贮气膜里沼气没有及时利用而造成贮气压力过大时, 会自动释放沼气, 造成沼气空排, 不但浪费能源, 而且加剧了温室效应。

#### 2.1.3 三沼 (沼气、沼液、沼渣) 的综合利用方式

尽管所调研的以大型沼气工程为主, 且有 3 家规模超过了 3 000 m<sup>3</sup> 以上, 但由于上网发电困难, 国家也无相应鼓励政策, 沼气用途单一, 所产沼气均用于养殖场自身的生产生活用能, 大量多余的沼气被白白浪费。徐庆贤等<sup>[2]</sup>对福建省养殖场沼气工程调查中发现, 有近 82% 沼气工程所产沼气实际利用率低于 30%, 其余沼气均排空, 增加了温室气体排放。

农田回用是沼气工程沼液、沼渣普遍采用的利用方式 (表 1)。而沼气工程自有的农田配套的面积普遍不够, 沼液的农田使用主要是依赖周边农户。张国治<sup>[8]</sup>等对四川、安徽 6 省进行了大中型沼气工程沼液沼渣利用意愿现状调研, 调研结果发现, 由于沼液浓度低、肥效不好, 加之施用不如固体肥料便利, 农户使用沼液的意愿并不高, 同时, 沼液每天连续产生与作物施肥季节性存在矛盾, 因此, 相当一部分畜禽场沼气工程的沼液还是需要处理后达标排放。根据调查情况, 仅有一家建设了污水处理系统, 大部分进行粗放的氧化塘处理, 其中采取三级氧化塘处理的仅有 3 家, 仅占 14%, 单级氧化塘处理的有 8 家, 占 38%。靳红梅等<sup>[9]</sup>调研了氧化塘对沼液处理效果, 结果发现, 氧化塘对颗粒物有沉淀拦截作用, 同时对沼液中大量营养元素有明显的削减作用, 特别是 N 和 P 都显著降低 ( $P < 0.05$ )。其中, 三级氧化塘内沼液的 MLSS、COD、总氮 (TN)、氨态氮 (NH<sub>4</sub>-N) 和总磷 (TP) 削减率分别达 81.1%、83.3%、96.2%、98.2% 和 96.8%, 达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB18596-2001) 排放标准; 而猪场的单级氧化塘这 5 项指标的削减率只有 63.4%、40.9%、31.9%、27.7% 和 89.1%, 牛场则为 99.2%、77.6%、53.4%、59.0% 和 39.2%, 未能达标排放。由此可以看出氧化塘对沼液有较好的净化效果, 但要达标排放, 还需建立多级氧化塘

处理系统。

表 1 江苏省 21 家沼气工程基本情况

Table 1 Basic information of 21 biogas plant in Jiangsu province

序号	地点	运行时间/月	养殖类型	沼气池容积/m <sup>3</sup>	工艺类型	储气方式	发电功率/kW	日发电量/(kW·h·d <sup>-1</sup> )	沼液利用方式
1	金坛	26	生猪	800	CSTR	发酵贮气一体化	80	夏季约 1120, 冬季约 640	农田回用
2	金坛	14	生猪	1000	CSTR	低压湿式贮气	200	夏季约 1400, 冬季约 700	一级稳定塘存储, 部分回流至进料池
3	金坛	未常态运行	生猪	1000	USR	发酵贮气一体化	80	—	三级稳定塘处理后浇灌山地
4	宜兴	31	生猪	800	USR	低压湿式贮气	36	夏季约 400, 冬季约 100	农田回用
5	宜兴	26	生猪	1000	CSTR	发酵贮气一体化	200	夏季约 400~480, 冬季约 200~300	三级稳定塘处理后排入荒地
6	宜兴	48	生猪	1000	CSTR	低压湿式贮气	80	不详	农田回用
7	溧阳	19	生猪	1000	CSTR	发酵贮气一体化	82	夏季约 800, 冬季约 200	农田回用
8	武进	20	生猪	3700	CSTR	低压湿式贮气	500	夏季约 3000, 冬季约 900	农田回用
9	无锡	25	生猪	5500	CSTR	低压湿式贮气	400	夏季约 4500~5300, 冬季约 2500	农田回用
10	张家港	6	生猪	2200	CSTR	低压湿式贮气	150	夏季约 1500, 冬季约 250	一级稳定塘处理
11	太仓	6	生猪	800	USR	低压湿式贮气	82	夏季约 640, 冬季约 320	通过污水处理系统
12	海丰	6	母猪	1300	CSTR	发酵贮气一体化	150	夏季约 1650, 冬季约 400	农田回用
13	东台	12	生猪	800	USR	发酵贮气一体化	80	夏季约 600, 冬季约 300	农田回用
14	如皋	6	种猪	1200	USR	发酵贮气一体化	150	夏季约 1200, 冬季约 900	三级稳定塘加农田回用
15	姜堰	17	种猪	1000	USR	发酵贮气一体化	82	不详	农田回用
16	宿城	18	生猪	1000	CSTR	发酵贮气一体化	82	夏季约 480, 冬季不详	农田回用
17	江宁	31	奶牛	1000	CSTR	低压湿式贮气	80	夏季约 780, 冬季约 300	一级稳定塘处理
18	常州	未常态运行	奶牛	800	USR	发酵贮气一体化	82	—	一级稳定塘处理
19	昆山	未运行	奶牛	1000	CSTR	发酵贮气一体化	120	—	—
20	亭湖	7	奶牛	1200	CSTR	发酵贮气一体化	150	不详	一级稳定塘处理
21	铜山	试运行	奶牛	5000	CSTR	低压湿式贮气	500	不详	农田回用

注: CSTR 为全混式厌氧反应器; USR 为升流式厌氧反应器。

## 2.2 沼气工程运行状况

### 2.2.1 沼气工程发酵浓度及产气量

图 1、2 显示了沼气工程发酵物的 TS、COD 浓度。由图 1、2 可以看出, 86% 沼气工程的发酵原料 COD 质量浓度低于 50 000 mg/L, 90% 的沼气工程进料 TS 质量分数 < 5%, 76% 进料 TS 质量分数 < 3%, 43% 的沼气工程进料浓度 TS 质量分数 < 1%, 说明江苏省沼气工程以低浓度发酵为主。这主要是因为养殖场沼气工程是以处理养殖场废水为主, 而不是以销售能源为目的, 同时为了减轻后续处理的难度, 养殖场的干清粪一般不进入厌氧消化装置。

发酵浓度低, 也就导致沼气工程容积产气率低。根据所了解的发电情况(表 1), 以每 m<sup>3</sup> 沼气可产 1.5 kW·h 电折算<sup>[10]</sup>, 所调研沼气工程夏天(120d)的容积产气率仅在 0.3~0.6 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 冬天(90 d)的容积产气率则是低于 0.3 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 全桂香<sup>[11]</sup>对江苏宜兴一家大型沼气工程进行了 1 个月的运行监测, 结果也表明该沼气工程平均容积产气率仅为 0.25 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)。而在沼气工程发展成熟的欧洲, 大多数的沼气工程采用高浓度厌氧发酵, 发酵液 TS 质量分数为 8%~15%, 容积产气率可达 1.0~5.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)<sup>[12]</sup>。此外, 产气量偏低的另一个主要原因是沼气工程均采用常温发酵, 大部分的沼气工程未配有发电余热利用系统, 或是利用效率低, 从而造成夏、冬两

季产气不均衡, 冬季产气量仅达到夏季的 50%。

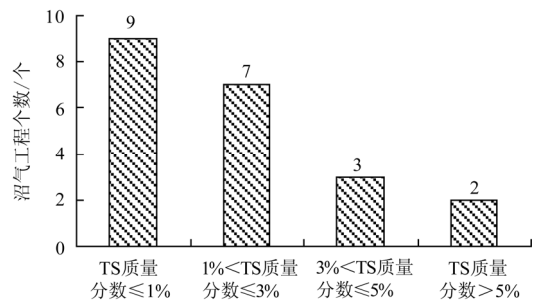


图 1 沼气工程进料总固体 (TS) 质量分数  
Fig.1 Concentration of TS in influent of biogas plant

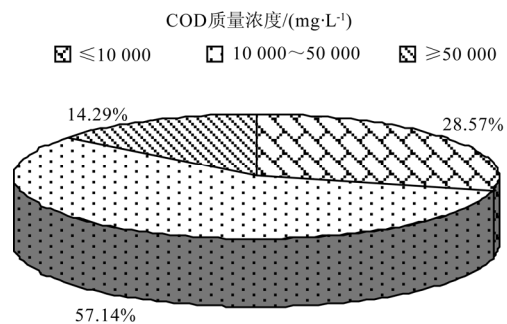


图 2 沼气工程进料 COD 质量浓度  
Fig.2 Concentration of COD in influent of biogas plant

2.2.2 出料沼液的生化特性

沼气工程每天有大量的沼液产生，对新鲜沼液进行了取样分析。图 3 显示出料沼液的 COD 质量浓度分布情况，图 4 显示出料沼液 BOD<sub>5</sub>/COD 比例，表 2 显示了出料沼液不同温度下的残余产气潜力。

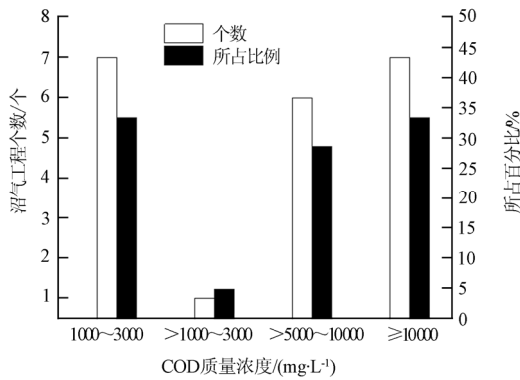


图 3 出料沼液 COD 质量浓度

Fig.3 Concentration of COD in digestate of biogas plant

由图 3 可见，经过厌氧发酵，发酵物的 COD 有所降解，COD 的质量浓度均大于 1 000 mg/L，未达到 GB18596-2001《畜禽养殖业污染物排放标准》规定污水 COD 质量浓度 ≤ 400 mg/L 的排放标准。其中 62% 出料沼液的 COD 质量浓度达到 5 000 mg/L 以上，33% 出料沼液的 COD 质量浓度达到 10 000 mg/L 以上，甚至有一家沼气的出料 COD 质量浓度达到了 110 400 mg/L，悬浮物 (MLSS) 质量浓度达到了 54 g/L，说明有相当部分的发酵原料未得到充分降解。BOD<sub>5</sub>/COD 比值可用于评价废水可生化降解性：若 BOD<sub>5</sub>/COD > 0.45，则生化降解性较好；若 BOD<sub>5</sub>/COD > 0.3~0.45，则可进行生化降解；BOD<sub>5</sub>/COD 为 0.25~0.3，则较难进行生化降解；BOD<sub>5</sub>/COD < 0.25，则不宜生化降解 [13]。由图 4 可见，在调查的沼气工程中，有 66.7% 的沼气工程沼液的 BOD<sub>5</sub>/COD > 0.3，说明大部分厌氧发酵后的沼液生化降解性仍然较好。

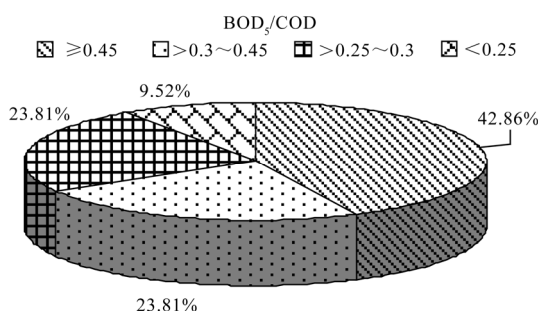


图 4 出料沼液 BOD<sub>5</sub>/COD 值

Fig.4 Value of BOD<sub>5</sub> / COD in digestate of biogas plant

对 18 家正常运行的沼气工程所排放的沼液进行了不同温度下 (15、25、35℃) 产甲烷潜力测定，由表 2 可见，所调查的沼液都具有一定的产甲烷的潜力，且温度对沼液的残余产甲烷潜力影响显著，随着温度的升高，

沼液的产气潜力也随着升高。调查发现，在 35℃ 条件下，有 12 家 (占 67%) 沼气的沼液残余产甲烷潜力达 100 mL/L 以上，有 4 家 (22%) 沼液残余产甲烷潜力达到 1 000 mL/L 以上。因此，沼气工程沼液残余产甲烷量不容忽视。Angelidaki 等 [14] 对丹麦 18 家大型沼气工程调研结果表明，沼气工程沼液的残余产甲烷量可占到整个沼气工程沼气产量的 6%~33%。为了防止沼液残余产甲烷量向大气排放，欧洲国家一般在厌氧发酵罐后再串联一个二级发酵罐，即厌氧发酵罐的出料进入二级发酵罐储存并在其中继续产气，同时收集后消化产生的沼气 [15]。

表 2 沼液在不同温度下的残余产甲烷潜力

Table 2 Residual methane production of digestate slurry at different temperatures

采样点	mL/L		
	15℃	25℃	35℃
金坛 1	0	65	70
金坛 2	0	147	298
宜兴 1	0	20	30
宜兴 2	31	6	49
宜兴 3	0	24	85
溧阳	0	34	66
无锡	0	24	134
武进	106	663	548
张家港	116	121	334
太仓	0	171	225
如皋	39	897	1359
姜堰	23	38	116
东台	0	269	880
亭湖	702	1111	1252
如皋	201	216	265
宿城	136	178	228
铜山	593	993	1039
江宁	3	68	76

2.2.3 进、出料粪大肠菌群的变化

据报道，畜禽粪便废弃物中含有 150 多种人畜共患病的潜在致病源 [16]，一旦进入适宜的环境，便会大量生长繁殖，造成疾病的爆发和流行 [17]。规模养殖场动物排泄物中病原生物污染是公共关心的最重要问题之一。沼气工程所产的沼液沼渣作为肥料大量用于农田，其安全性不容忽视。在《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001) 中规定，养殖场排放的污水中粪大肠菌群数应 ≤ 1 000 cfu / 100 mL，在农业行业标准《畜禽粪便无害化处理技术规范》(NY/T 1168-2006) 中规定，常温中温型沼气工程沼液中，粪大肠菌群数应 ≤ 1 000 cfu / 100 mL，高温型沼液中粪大肠菌群数应 ≤ 10 cfu / 100 mL。

我们对 18 家正在运行的沼气工程的进出料液进行了抽样分析，结果如表 3 所示。调查的 18 个沼气工程进料中，粪大肠菌群数均在 1 × 10<sup>5</sup> ~ 1 × 10<sup>8</sup> cfu / 100 mL，略低于作者 2007 年 [18] 对畜禽养殖场排放废水病原微生物污染调查的结果。经过厌氧发酵，沼液中粪大肠菌群数均有所降低，所采样分析的 18 个沼气工程的粪大肠菌群数平均减少 92.9%，但厌氧消化后的沼液中仍含有较高浓度粪大

肠菌群, 仅有 3 家沼气工程沼液粪大肠菌群数达到国家及行业标准规定的限定值, 有 72% 沼液粪大肠菌群数超过了 1 000 cfu/mL, 50% 沼液粪大肠菌群数超过了 10 000 cfu/mL, 比较奶牛场与养猪场沼气工程进料粪大肠菌群数, 两者之间同为  $10^6$  的数量级, 但奶牛场沼气工程粪大肠菌群数去除率明显好于猪场, 平均去除率分别为 98.12%、85.43%, 奶牛场沼气工程明显优于猪场。比较不同运行年限沼气工程粪大肠菌群去除率, 发现它并不受工程运行年限影响, 运行时间 1 a 以下的工程其去除率为 91.5%, 而运行 2 a 以上仅为 83.8%, 表明沼气工程运行管理水平可能是决定粪大肠菌群数去除率高低的关键因素。

除管理水平外, 粪大肠菌群数去除率可能与沼气工程均为常温发酵有关。Leena Sahlstrom<sup>[19]</sup>认为, 厌氧发酵过程对致病生物去除率受到发酵温度、水力停留时间 (HTR)、pH 值、挥发性脂肪酸 (VFA)、厌氧发酵工艺 (序批式发酵工艺、连续发酵工艺) 以及致病生物种类、有效养分等因素影响, 而最重要的影响因素是发酵温度与 HTR。Salminen 等<sup>[20]</sup>认为厌氧消化能够杀灭病原菌, 高温厌氧消化与中温更有效, 高温型的厌氧消化能使粪大肠菌与沙门氏菌 100% 的杀灭, 而中温型的消化池仅能使部分粪大肠菌与沙门氏菌杀灭。为保证沼气工程的安全性, 澳大利亚、丹麦、德国以及瑞典规定畜禽粪便在进入厌氧发酵罐之前需先进行 70℃ 消毒 30 或 60 min<sup>[16]</sup>。

表 3 各沼气工程进/出料中粪大肠菌群最大概率可能数量 (MPN)  
Table 3 Fecal coliform value of MPN in digestate of different biogas plant

序号	采样点	进料	出料	去除率 /%	备注
1	金坛 1	$1.6 \times 10^8$	$7.0 \times 10^5$	95.7	猪场、工程运行 2 a 以上
2	金坛 2	$2.1 \times 10^6$	$4.9 \times 10^2$	99.9	猪场、工程运行 1 a 以下
3	宜兴 1	$1.7 \times 10^6$	$1.1 \times 10^5$	94.5	猪场、工程运行 2 a 以上
4	宜兴 2	$9.0 \times 10^5$	$4.9 \times 10^5$	46.6	猪场、工程运行 2 a 以上
5	宜兴 3	$7.0 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$	84.3	猪场、工程运行 2 a 以上
6	溧阳	$1.3 \times 10^7$	$5.2 \times 10^6$	60	猪场、工程运行 1~2 a
7	太仓	$3.5 \times 10^7$	$5.4 \times 10^6$	84.6	猪场、工程运行 1 a 以下
8	无锡	$3.5 \times 10^8$	$7.9 \times 10^2$	99.9	猪场、工程运行 2 a 以上
9	张家港	$3.3 \times 10^6$	$2.2 \times 10^5$	93.3	猪场、工程运行 1 a 以下
10	武进	$1.3 \times 10^8$	$3.4 \times 10^6$	97.4	猪场、工程运行 1~2 a
10	姜堰	$1.1 \times 10^6$	$3.5 \times 10^5$	69.2	猪场、工程运行 2 a 以上
11	海丰	$9.4 \times 10^7$	$2.6 \times 10^6$	97.2	猪场、工程运行 1 a 以下
12	东台	$3.3 \times 10^6$	$4.9 \times 10^5$	85.2	猪场、工程运行 1 a 以下
13	如皋	$1.7 \times 10^5$	$5.4 \times 10^4$	68.2	猪场、工程运行 1 a 以下
14	宿城	$3.5 \times 10^5$	$2.6 \times 10^2$	99.3	猪场、工程运行 1~2 a
15	铜山	$8 \times 10^6$	$1.1 \times 10^4$	99.8	奶牛场、工程运行 1 a 以下
16	亭湖	$1.8 \times 10^8$	$9.0 \times 10^5$	99.5	奶牛场、工程运行 1 a 以下
17	江宁	$3.3 \times 10^6$	$1.4 \times 10^5$	95.8	奶牛场、工程运行 2 a 以上

### 3 结论与建议

所调查的 21 家江苏省畜禽养殖场大中型沼气工程设计施工规范, 工艺较先进, 但运行效率及管理水平较低,

容积产气率低。沼气利用途径单一, 利用率低; 沼液沼渣综合利用配套不足, 处理或利用能力低。大多数沼气工程发酵底物未能发酵完全, 出料沼液 COD 负荷仍然较高, 62% 出料沼液的 COD 质量浓度达到 5 000 mg/L 以上, 33% 出料沼液的 COD 质量浓度达到 10 000 mg/L 以上。刚排放出的沼液仍可产生相当量的甲烷, 在 35℃ 条件下, 有 12 家沼气工程的沼液残余产甲烷量达 100 mL/L 以上, 有 4 家沼液残余产甲烷量达到 1 000 mL/L 以上, 沼气发酵处理可以显著降低粪大肠菌群数量, 平均可减少 92.9%, 但厌氧消化后的沼液中仍含有较高浓度粪大肠菌群, 仅有 3 家沼气工程沼液粪大肠菌群数达到国家及行业标准规定的限定值。

根据调查中总结的江苏省大中型沼气工程的问题, 提出相关建议: 1) 提高发电余热利用效率, 以保证冬季正常产气, 配备沼气燃烧火炬, 防止多余沼气的空排; 2) 配备二级发酵罐, 对沼液进一步产气的沼气进行收集, 以减少沼气工程对大气环境可能产生的负面影响; 3) 沼气工程应配备与使用多级氧化塘技术, 减少沼液沼渣对环境的二次污染; 4) 为了进一步提高沼液作为有机肥施用于农田的安全性, 减少含有大量有害微生物对农田土壤及牧场环境的微生物污染, 在农田使用沼液时应进行消毒处理, 或是采取相关措施来提高厌氧消化的消毒效果, 并采取有效的监督管理方法。

### [参 考 文 献]

- [1] Lu Jianbo, Zhu Lei, Hu Guoliang, et al. Integrating animal manure-based bioenergy production with invasive species control: A case study at Tongren Pig Farm in China[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(6): 821-827.
- [2] 徐庆贤, 林斌, 郭祥冰, 等. 福建省养殖场大中型沼气工程问题分析及建议[J]. 中国能源, 2010, 32(1): 40-43. Xu Qingxian, Lin Bin, Guo Xiangbing, et al. Analysis and proposals on large and medium-sized farm biogas project in Fujian province[J]. Energy of China, 2010, 34 (1): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [3] 马亚男, 庞昌乐, 陈理, 等. 山东某地沼气工程建设现状及发展对策[J]. 可再生能源, 2011, 29(1): 144-147. Ma Yanan, Pang Changle, Chen Li, et al. Biogas plants construction status and development strategy for a city of Shandong province[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(1): 144-147. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王宇欣, 苏星, 唐艳芬, 等. 京郊农村大中型沼气工程发展现状分析与对策研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 291-295. Wang Yuxin, Su Xing, Tang Yanfen, et al. Status analysis and countermeasures of large and medium scale biogas plants in Beijing rural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 291-295. (in Chinese with English abstract)
- [5] 韩芳, 林聪. 畜禽养殖场沼气工程厌氧消化技术优化分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 41-46. Han Fang, Lin Cong. Optimization analysis of anaerobic digestion technologies of biogas engineering in livestock and poultry farms[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 41–46. (in Chinese with English abstract)
- [6] Irimi Angelidaki, Wendy Sanders. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2004, 3(2): 117–129.
- [7] 蔡卓宁, 蔡磊, 蔡昌达. 产气、贮气一体化沼气装置—规模化沼气工程的新池型[J]. 农业工程技术·新能源产业, 2009, (1): 31–33.
- [8] 张国治, 吴少斌, 王焕玲, 等. 大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿现状调研及问题分析[J]. 中国沼气, 2009, 28(1): 21–24. Zhang Guozhi, Wu Shaobin, Wang Huanling, et al. Survey and analysis on state quo of public intention for utilizing digestate from large and medium size biogas plants[J]. China Biogas, 2009, 28(1): 21–24. (in Chinese with English abstract)
- [9] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 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 Hongmei, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 291–296. (in Chinese with English abstract)
- [10] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 20–21.
- [11] 全桂香. 户用沼气池秸秆干发酵技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008. Quan Guixiang. Research on Dry Fermentation of Rice Straw in Household Digester[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王淑宝, 张国栋, 曹曼. 欧洲大型沼气工程技术国产化方法探讨[J]. 中国沼气, 2009, 27(2): 42–44.
- [13] 樊京春, 赵勇强, 秦世平. 中国畜禽养殖场与轻工业沼气技术指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 25.
- [14] Angelidaki I, Boe K, Ellegaard L. Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants[J]. Water Science and Technology, 2005, 52(1/2): 189–194.
- [15] 邓良伟, 陈子爱, 龚建军. 中德沼气工程比较[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 110–114. Deng Liangwei, Chen Ziai, Gong Jianjun. Comparison of biogas plant between China and Germany[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1): 110–114. (in Chinese with English abstract)
- [16] 江传杰, 王岩, 张玉震. 畜禽养殖业环境污染问题研究[J]. 河南畜牧兽医, 2005, 26(1): 28–31. Jiang Chuanjie, Wang Yan, Zhang Yuzhen. Studies on environmental pollution of the livestock industry[J]. Henan Journal of Husbandry and Veterinary Medicine, 2005, 26(1): 28–31. (in Chinese with English abstract)
- [17] Iranpour R, Cox H H. Recurrence of fecal coliforms and Salmonella species in biosolids following thermophilic anaerobic digestion[J]. Water Environment Research, 2006, 78(9): 1005–1012.
- [18] 叶小梅, 常志州, 陈欣, 等. 畜禽养殖场排放物病原微生物危险性调查[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 66–70. Ye Xiaomei, Chang Zhizhou, Chen Xin, et al. Hazard of pathogenic microorganisms in discharge from livestock and poultry breeding farms[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(2): 66–70. (in Chinese with English abstract)
- [19] Leena Sahlstrom. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants[J]. Bioresource Technology, 2003, 87(2): 161–166.
- [20] Salminen E, Rintala J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste a review[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1): 13–26.

## Investigation on large and medium scale biogas plants and biological properties of digestate in Jiangsu province

Ye Xiaomei, Chang Zhizhou<sup>\*</sup>, Qian Yuting, Pan Juncai, Zhu Jin

(Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Biogas plant construction has rapid development in recent years. However, studies on its operation and management were few, especially for large and medium-sized ones. To explore the problems existing in operation and management, a field investigation on 21 plants of large and medium-sized biogas was carried out in intensive pig and dairy farms in Jiangsu province. The investigation included the operation status of the plants and the raw materials and digestion slurry was sampled to analyze the content of COD, residual biogas production and the count of fecal coliform. Results showed that the design and construction of all the biogas plants was performed by professional company with well-appointed facilities, whereas the biogas volume produced and the utilization of biogas and digestion slurry were low. The main raw materials for anaerobic digestion were waste water from pig and dairy farms, with low content of total solid (i.e., TS < 3%). Most raw materials could not be digested completely. COD contents from 62% digestion slurry samples were more than 5 000 mg/L, which caused appreciable quantities of methane produced from digestion slurry. Twelve digestion slurry samples could produce methane more than 100 mL/L at 35°C. Anaerobic digestion could significantly reduce the survival of fecal coliform, reaching 92.9% on average. However, the digestion slurry still contained high concentrations of fecal coliform, which could not reach the requirement of sanitary. These results could provide a theoretical reference for the stable and healthy operation and management of large and medium-sized biogas plants.

**Key words:** biogas, coliform bacteria, biology, large and medium-sized biogas plant, residual methane production