

于桥库区周边农村 CDM 项目对生物质能利用的效能分析

张 涛¹, 马建立², 邓小文², 孙贻超², 赵 杰²

(1.天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2.天津市环境保护科学研究院, 天津 300191)

摘 要: 于桥库区周边农村有机废弃物的无组织排放对水库的 TN、TP 的贡献率较高, 分别占外部输入的 44.8% 和 19.5%, 同时也是温室气体排放源。以蓟县姚白庄村为实验基地, 利用清洁生产机制(Clean Development Mechanism, CDM)项目, 采用有机质厌氧消化的工艺, 进行了日处理规模为 55 t 的农村生物质能利用工程的效能分析。结果表明, 姚白庄区内污染物 COD 减排量为 $62.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, BOD 减排量为 $27.8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 减排量为 $37.0 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, TP 减排量为 $1.8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, TN 减排量为 $15.6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 3 种温室气体的监测结果, 得出该项目可以使农村地区温室气体减排效率提高到 68%。

关键词: 清洁生产机制; 有机质污染; 厌氧消化; 温室气体; 生物质能; 减排效能

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)07-1541-04

Potential of Biomass Energy CDM Project in Rural Areas Surrounding Yuqiao Reservoir

ZHANG Tao¹, MA Jian-li², DENG Xiao-wen², SUN Yi-chao², ZHAO Jie²

(1.College of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2.Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China)

Abstract Organic wastes, e.g. manure, night soil and straw, produced in rural areas are main pollution resources of Yuqiao Reservoir. The investigation shows that 44.8% of TN and 19.5% of TP in Yuqiao Reservoir is contributed by unorganized emissions of the waste. The demonstration Clean Development Mechanism(CDM) project of biomass energy was built to control the organic wastes in Yaobaizhuang village. The anaerobic digestion process was used and treatment capacity was 55 ton per day in this project. The potential of CDM project was evaluated by the pollution control, green house gas(GHG) reduction and methane generation. The results showed that the pollution was controlled by waste treatment and $62.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ COD, $27.8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ BOD, $37.0 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ $\text{NH}_3\text{-N}$, $1.8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ TP and $15.6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ TN in organic waste were reduced to spread to Yuqiao Reservoir. The data showed that the CDM project could control emission of GHG(e.g. CO_2 , CH_4 and N_2O) efficiently. The reduction of GHG was more than 68% in this project. Meanwhile, the methane generation was $381.3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, which could meet the demand of energy and heat of families in this village. The biogas residues and slurry were also excellent organic fertilizer.

Keywords CDM; organic matter pollution; anaerobic digestion; greenhouse gas; biomass energy; emission reduction

于桥水库是天津市唯一的水源地。近年来, 库区水体富营养化程度日趋严重, 已达到地表水Ⅲ类水质^[1]。据调查^[2], 于桥库区周边农村产生的有机污染物(如人畜粪便、生活垃圾、污水等)是库区水体的主要污染源, 对库区水体 TN 的贡献率约占外部总输入的 44.8%, TP 的贡献率约占外部总输入的 19.5%, 特别是水库中的病原菌主要源于人类和动物粪便的无组织排放。因此, 对库区周边农村产生的有机质进行控

制与利用是从源头上控制库区水体污染的方法之一。

CDM 是国际清洁发展机制的简称, 农村有机质厌氧产沼是 CDM 重点支持的农村项目之一。根据 CDM 的规定, 一个合格的 CDM 项目至少要满足 3 个方面的要求: 可以带来真实的、长期的和可测量的温室气体减排效益; 可以促进该国的可持续发展; 具有额外性。因此, 本文以于桥库区姚白庄村生物质厌氧产沼工程为例, 考察了 CDM 项目对库区水体有机质污染的控制和对温室气体的减排效能。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料来源为于桥水库保护区内的姚白庄村

收稿日期 2008-10-21

基金项目 中美清洁水源项目资助

作者简介 张 涛(1971—), 男, 天津人, 主要从事环保科技管理工作与研究。E-mail: ztglk@sina.com

内产生的有机质废物,有机质废弃物产生量为 $13\ 000\ \text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$,污水产生量 $30\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$,主要污染物指标如表 1 所示。

表 1 姚白庄村有机质废弃物主要污染物指标

Table 1 Production and components of organic waste in Yaobaizhuang

类别	产生量/ $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$	$\text{COD}_\text{Cr}/$ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	$\text{BOD}/$ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	$\text{NH}_3\text{-N}/$ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	$\text{TP}/$ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	$\text{TN}/$ $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$
猪 粪	4 000	52.0	57.03	3.08	3.41	5.88
尿	5 590	9.0	5.0	1.43	0.52	3.3
人 粪	735	31.0	24.53	1.71	1.18	4.73
尿	1 155	6.0	4.0	3.47	0.40	8.0
鸡粪	1 200	45.0	47.87	4.78	5.37	9.84
畜禽废水	30 000	8.16	2.71	6.32	0.12	1.75
其他	320	46.3	30.0	0.80	6.20	11.0

1.2 试验设计

1.2.1 工艺流程

生物质能利用工程采用典型的能源生态型厌氧发酵工艺,流程如图 1 所示。粪水比为 1:10,为保证发酵料液浓度合适以及足够的产气量,需要适当补充秸秆,秸秆的补充量为 $1\ 500\ \text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 。将人畜粪便、畜禽废水、秸秆和驯化好的接种物等,按一定比例进入预处理仓中进行低压蒸汽加热预处理 3 d,然后配制总固形物(total solid,TS)浓度在 3%~10%左右的发酵液,进入到厌氧消化器内在 $(45\pm 2)^\circ\text{C}$ 的条件下停留 30 d。为保证厌氧消化器的发酵温度,需提供热源进行保温加热。

1.2.2 设计参数

生物质能利用工程设计规模为 $55\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ 厌氧消化反应器体积为 $300\ \text{m}^3$,具体设计运行参数如表 2 所示。

1.2.3 气体成分测定

采用气相色谱仪,分别测定 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 等气

表 2 厌氧消化系统设计运行参数

Table 2 Design parameters of anaerobic digestive system

项目	处理(产生)量
厌氧反应器类型	塞流式
TS	$4.5\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$
停留时间(HRT)	30 d
COD_Cr 负荷	$5\sim 7\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$
反应温度	$(45\pm 2)^\circ\text{C}$
投配率	12%
pH	6.8~7.2
沼气 ^[3]	$146\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$
沼渣	$28\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$
沼液	$2\ 300\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$
沼气加热蒸汽发生器	$36\ 500\sim 43\ 800\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (约占沼气产量的 25%~30%)

体。仪器型号为安捷伦 6890 N,配有十通阀反吹装置和 Ni 电子捕获器(ECD)。测试条件: TDX01 柱,柱温 60°C ,TCD 检测器, N_2 作载气,桥流 100~120 mA,热丝温度 280°C ,检测器温度 150°C ,进样器温度 100°C 。

2 结果与讨论

2.1 农村有机质污染调查

由图 2 可知,现场监测结果表明,由于随意堆放贮存引起的人畜粪便各项污染物进入水体的流失率在 2.22%~8.59%。其中鸡粪的各项污染物的流失率最高,COD、TN、TP 的流失率分别为 8.60%、8.48%、8.42%。根据人畜粪便的产生量计算可得,姚白庄区内污染物对于桥水库的贡献量为:COD 为 $62.1\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,BOD 为 $27.8\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $37.0\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,TP 为 $1.8\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,TN 为 $15.6\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.2 CO_2 和 CH_4 的气体产量

对生物质厌氧消化系统进行序批次间歇性中试

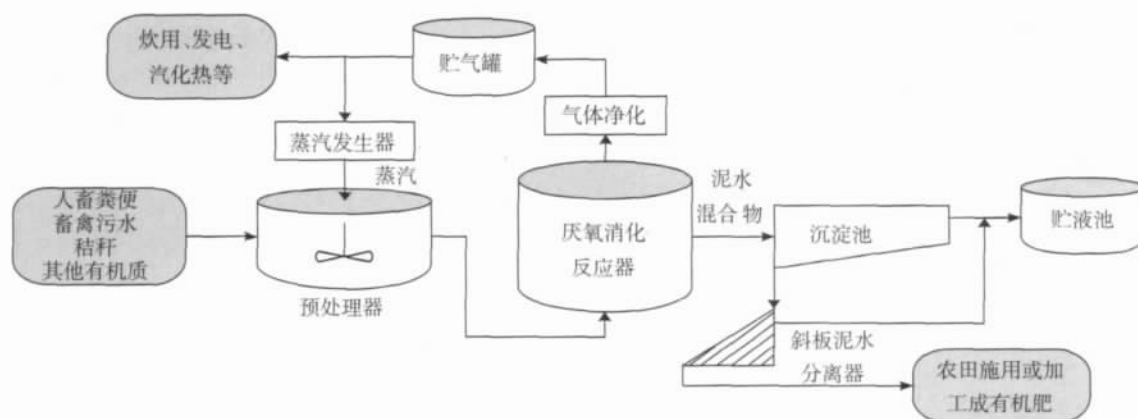


图 1 生物质厌氧消化系统

Figure 1 Biomass anaerobic digestive system

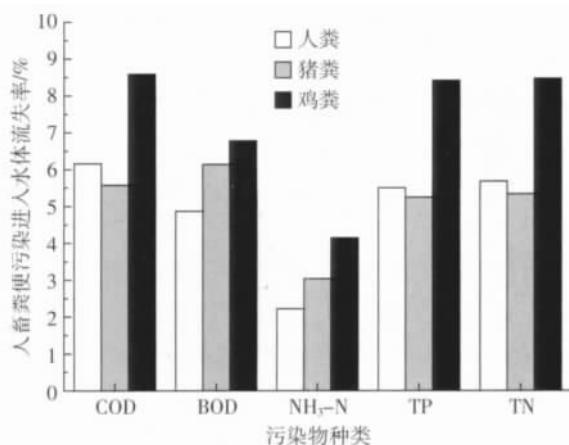
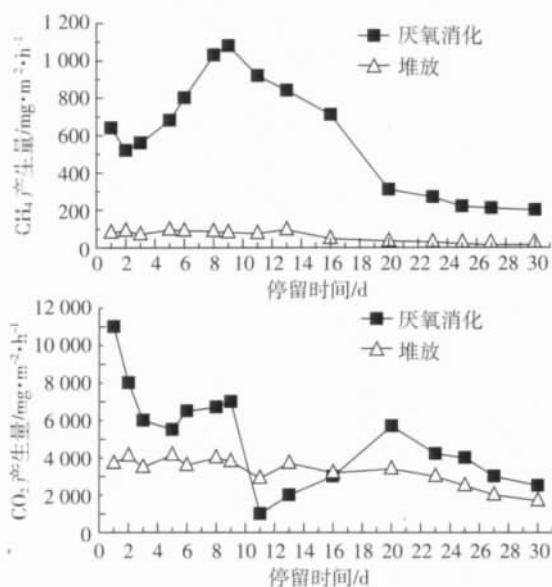


图 2 人畜粪便各项污染物的流失率

Figure 2 Wastage rates of animal and human waste

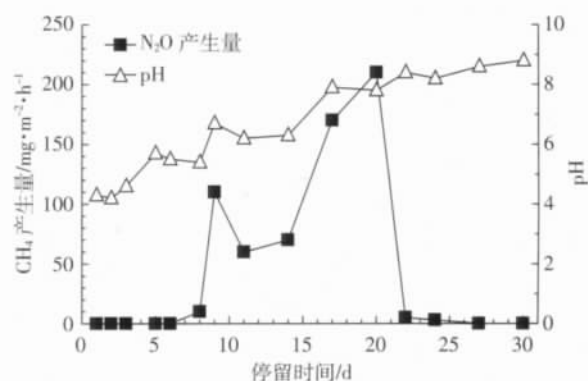
实验, CO_2 和 CH_4 的产气量分别为 $8\,990$ 和 $91\,100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 3)。在有机质厌氧消化过程中, CO_2 在反应初期产生量很高, 然后呈阶段性下降的趋势。 CH_4 含量在最初 2 d 里受到 CO_2 的抑制, 产生量有所下降, 随着发酵时间的延长, 在产甲烷菌的作用下, 部分 CO_2 被转化为 CH_4 , 使 CO_2 出现下降的趋势, 到 11 d 时降到最低, 而 CH_4 呈明显升高的趋势, 到 9 d 时达到峰值, 产气高峰集中在 6~16 d, 均维持在 $700\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上, 但到了发酵后期又明显下降, 此时 CO_2 和 CH_4 产气量已降至很低。 CO_2 和 CH_4 在厌氧消化中的产气量均高于堆放过程的产气量, 但是 CO_2 两种方式的产气量差异变化比较平缓, 厌氧消化产气量最高仅比堆放产气量高出 2 倍多, 说明厌氧消化对 CH_4 产

图 3 不同条件下 CH_4 和 CO_2 的产生情况Figure 3 Production of CH_4 and CO_2 in different conditions

气量的促进作用更大。

2.3 N_2O 气体产生量与 pH 的关系

无机铵态 N 可在硝化菌作用下变成硝态 N, 而硝态 N 在反硝化菌作用下转换成多种状态的氮氧化合物, N_2O 就是中间产物之一^[4]。进行序批次间歇性运行实验时, 对 N_2O 和厌氧消化过程中的 pH 变化进行了连续监测。由图 4 可知, 在厌氧消化条件下, N_2O 的产生量为 $638\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, N_2O 产生量在第 8 d 开始急剧升高, 到 21 d 时, 到达峰值 $232\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 随后迅速下降, 到 25 d 时, 产气量几乎为零。在这一过程中, pH 值的变化呈逐渐上升的趋势, 产气高峰主要集中在 pH 为 6.7~7.8 之间。这与黄耀等^[5]研究的 pH 在 5.6~8.6 范围内 N_2O 排放与土壤 pH 呈显著正相关的结论比较接近。

图 4 N_2O 产生量与 pH 之间的关系Figure 4 Relation of N_2O production and pH value

2.4 沼气产量分析

由表 3 可知, 在本研究中, 序批次间歇性中试实验产气量明显高于工程运行后的实测值, 一方面是由于中试规模较小, 消化反应充分, 另一方面是由于中试实验中, 基质的流动性较小, 热量流失较少, 使内部温度始终维持在理想的反应温度。但是, 工程采用的连续塞流式反应器, 易于操作, 管理方便, 具有实际推广价值。

表 3 沼气产量数据对比

Table 3 Data of methane generation in different conditions

指标	中试值/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	百分比/%	实测值/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	百分比/%
CH_4	374.8	70.6	251.6	65.9
CO_2	131.4	24.8	114.7	30.1
N_2O	18.4	3.5	12.4	3.3
其他	6.1	1.1	2.6	0.7
合计	530.7	100	381.3	100

注: 中试值和实测值均为 3 次测试结果的平均值。

2.5 生物质能利用对温室气体的减排效能的讨论

从碳循环的角度来看^[6],根据对碳的吸收、固定、排放和转移等过程,将碳库划分为碳汇区(Carbon Sink)和碳源区(Carbon Source)。农村有机质的碳循环处于负平衡状态^[7]而被视为农业碳源区。减少碳源区排放量,也即减缓农村有机质对温室气体排放的对策^[8],一是减少现有的源排放量,二是加强汇的吸收量和创造新的汇。根据农村厌氧产沼工程的 CH₄ 和 N₂O 气体产生量计算减排量如表 4 所示,通过生物质能利用可以人为地增加对农村有机质废物碳汇的吸收量,也即提高温室气体减排效率到 68%。

2.6 经济效益分析

姚白庄村有机质厌氧产沼工程投资概算见表 5,项目总投资 410 万元,工程设计寿命为 20 a。工程维修和运行费用为 15 万元·a⁻¹。

沼气的直接经济收益包括:出售沼气的收益 10.95 万元·a⁻¹(以 1 元·m⁻³ 计),出售沼液和沼渣制作的有机肥收益 10.6 万元·a⁻¹(沼渣以 500 元·m⁻³ 计,

沼液以 40 元·m⁻³ 计)。目前,国际市场上温室气体减排权交易价格约为 \$10·t⁻¹。该工程出售温室气体减排权所获得的额外收益约为 2.5 万元·a⁻¹。直接收益总计 24.05 万元。扣除运行费用,工程的净经济收益为 9.05 万元·a⁻¹。可以看出,该项目的直接经济效益较差。

间接经济收益则是指,经过厌氧产沼工程,一方面对农村畜禽养殖废水和人畜粪便进行了有效的管理,改善了农村的卫生环境状况;另一方面,减少了农村有机质废物对于桥水库富营养化的贡献率。

3 结论

CDM 项目的核心内容是允许发达国家与发展中国家合作,在发展中国家实施温室气体减排项目。姚白庄厌氧产沼项目的实施,不但可以优化农村生态环境,解决农村能源短缺,具有良好的环境和社会效益,而且也可以产生较好的全球温室气体减排效益,将产生的减排量在国际市场上出售,可以使沼气工程获得额外的经济收益。同时,可以减少对于桥水库有机污染物的贡献率,符合 CDM 项目额外性的要求。

参考文献:

- [1] 2007 年天津市环境状况公报[R]. 天津:天津市环保局,2007:3-5.
2007 Report on the state of environment in Tianjin[R]. Tianjin:Environmental Protection Bureau, 2007:3-5.
- [2] 金丹越,黄艳菊. 天津市桥水库主要环境问题及其防治对策[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1):77-81.
JIN Dan-yue, HUANG Yan-ju. The environmental problems and controlling countermeasures of Tianjin Yuqiao Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(1):77-81.
- [3] Barker, James. Methane fuel gas from livestock wastes a summary[R]. North Carolina State University, 2001:31-42.
- [4] Kurt M, Walter S. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses(ammonia, nitrous oxides)[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 6(3):101-116.
- [5] 黄耀,焦燕. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5):598-602.
HUANG Yao, JIAO Yan. N₂O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physicochemical properties[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5):598-602.
- [6] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(4):185-190.
- [7] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change[J]. *Climatic Change*, 2001, 49(13):339-358.
- [8] Tans P, Fung I P, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget[J]. *Science*, 1990, 247(4949):1431-1438.

表 4 温室气体减排估算

Table 4 Estimates of GHG emission reduction

来源	温室气体排放基准线 ¹		温室气体减排量 ²
	kg·a ⁻¹	/tCO ₂ 当量·a ⁻¹	tCO ₂ 当量·a ⁻¹
肠内发酵 CH ₄	4 000	100	0
粪便处理			
CH ₄	8 300	208	170
N ₂ O 直接排放量	154	46	37
N ₂ O 间接排放量	270	81	65
农田			
N ₂ O 直接排放量	292	87	78
N ₂ O 间接排放量	66	20	18
温室气体排放总量/ tCO ₂ 当量·a ⁻¹		541	368

注: ¹IPCC 推荐值; ²由实验结果计算得出。

表 5 55 t 规模的农村厌氧产沼投资概算

Table 5 Initial investment of 55 tons-scale biogas project

项目	中方投资/万元	美方投资/万元
农村有机废物管理建设与培训		25.00
粪便收集贮存设施	15.00	
厌氧消化系统	55.00	200.00
好氧水处理系统	20.00	
沼气利用系统	35.00	
沼渣利用	20.00	
附属设施	7.00	
其他费用	3.00	
合计	155	225