

研究论文

沼液余热回收对高温发酵沼气工程净产气率的影响

花镜, 滕子言, 陆小华, 杨祝红, 王昌松

(南京工业大学材料化学工程国家重点实验室, 江苏 南京 210009)

摘要: 以瑞典 Alviksgården 养猪场高温发酵沼气工程为分析对象, 通过传热模型计算发酵罐加热负荷, 通过与江苏金坛永康农牧养猪场同等规模的中温发酵沼气工程对比, 讨论高温发酵的容积产气率和余热回收对沼气工程净产气率的影响。结果表明虽然瑞典 Alviksgården 养猪场高温发酵沼气工程的加热能耗是江苏金坛永康农牧养猪场中温发酵沼气工程的 2.1 倍, 但由于产气速率达到 $2.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 增产的沼气量远远大于增温的能耗; 若进一步在瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程中增加余热回收, 可将沼气净产气率从 82% 提高至 90%。相对于提高容积产气率, 采用余热回收技术对降低高温发酵沼气工程的增温能耗、提高净产气率效果更加显著。

关键词: 厌氧; 生物能源; 甲烷; 沼气; 高温发酵; 净产气率; 余热回收

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.05.047

中图分类号: S 216.4

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 05—1888—05

Effect of waste heat recovery on net biogas yield in thermophilic biogas plants

HUA Jing, TENG Ziyang, LU Xiaohua, YANG Zhuohong, WANG Changsong

(State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract: As a more productive process, thermophilic digestion has not been popularized in China for the possibility of negative net biogas yield. A heat demand model based on the biogas plant at Alviksgården, Sweden was established to calculate the heating load so as to investigate energy consumption and net biogas yield. By comparing to the mesophilic biogas plant with the same scale in Jintan, Jiangsu, the results showed that despite the energy consumption of the thermophilic biogas plant at Alviksgården 2.1 times of the mesophilic one in Jintan, with a much higher biogas volumetric productivity as $2.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, the biogas yield increment from increasing the digestion temperature from mesophilic to thermophilic was considerably larger than the energy consumption increment used for heating. Based on the current biogas productivity of the biogas plant at Alviksgården, if waste heat recovery was introduced to further decrease energy demand in substrate heating, net biogas yield could be increased from 82% to 90%. While without waste heat recovery, biogas productivity should be increased to $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ to reach the same net biogas yield, suggesting that waste heat recovery was more efficient and economical than increasing biogas productivity *via* improvement of digestion technology to further increase net biogas yield.

Key words: anaerobic; bioenergy; methane; biogas; thermophilic digestion; net yield ;waste heat recovery

2014-01-02收到初稿, 2014-04-21收到修改稿。

联系人: 王昌松。第一作者: 花镜 (1989—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2013CB733503); 江苏高校优势学科建设工程项目。

Received date: 2014-01-02.

Corresponding author: Dr. WANG Changsong, wcs@njtech.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2013CB733503) and the Project of Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD).

引言

温度是影响沼气发酵产气量的主要因素之一,从工艺角度一般分为常温发酵、中温发酵(35~37℃)和高温发酵(50~60℃)^[1]。“十一五”规划中重点发展了户用沼气和农村沼气,这类沼气发酵过程多数为常温发酵,存在产气率低以及寒冷季节停止产气等问题。在“十二五”规划中,“沼气工程”是生物质能源的一个重要发展方向,沼气工程因为具备标准化和先进的工程化设备,如加热器可以提供稳定的发酵温度,能够明显改善产气水平^[2]。

目前国内沼气工程大多数使用常温或中温厌氧技术,而欧洲沼气工程采用高温发酵已较为普遍,丹麦 65% 的沼气工程采用高温,德国大约 9% 的沼气工程使用高温发酵工艺^[3]。与中温发酵相比,高温发酵能够有效杀灭寄生虫和病原菌,具备更快的物料处理速度,更短的发酵周期和更高的容积产气率^[4]。

但高温发酵带来高产气量的同时还会导致高加热负荷,在运营过程中加热成本增高,这是高温发酵的沼气工程在国内还不普及的主要原因之一。以养猪场猪粪发酵为例,瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程采用高温发酵工艺,实际容积产气速率高达 $2.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[5],而江苏金坛永康农牧养猪场沼气工程的中温发酵实际容积产气率仅为 $0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。即采用高温发酵后虽然加热能耗增大,但随着容积产气率的增加,增产的沼气的量可能足以抵消增温能量消耗量,使得高温发酵沼气工程的沼气净产量高于中温发酵。值得关注的是,国外很多沼气工程的加热系统中包括了余热回收技术的应用,可进一步降低加热能耗,提高沼气净产率。

本文拟以瑞典 Alviksgården 养猪场高温发酵沼气工程为对象,通过传热模型计算发酵罐加热负荷,与江苏金坛永康农牧养猪场同等规模的中温发酵沼气工程对比,讨论高温发酵的容积产气率和余热回收对沼气工程净产气率的影响。

1 计算模型

目前已有的厌氧发酵反应器传热模型可以分析地上、地下、半地下发酵罐甚至塑料大棚内的沼气池在不同温度下发酵过程的加热能耗^[6-9]。此外利用太阳能集热加热发酵料液也一直是研究热点,该研究过程经常会出现通过传热计算模型预测加热负

荷^[10-13]。

在使用模型计算加热负荷时,不同研究背景下模型的复杂程度也有所不同,如 Chen 等^[14]指出发酵过程中主要热量消耗包括了厌氧发酵罐壁面、底部和顶部的热散失,蒸发导致的热量损失,离开发酵罐的沼气带走的热量损失,以及将进料加热至发酵温度所需的热量,而反应自身的反应热可以忽略不计;而 Gebremedhin 等^[7]在塞流厌氧发酵罐传热计算模型中还进一步考虑了发酵罐罐顶受太阳能辐射所获得的热量等。

在上述文献基础上,本文模型热损失包括进出料热损及罐体(罐壁、罐顶和罐底)热损,模型如图 1 所示。

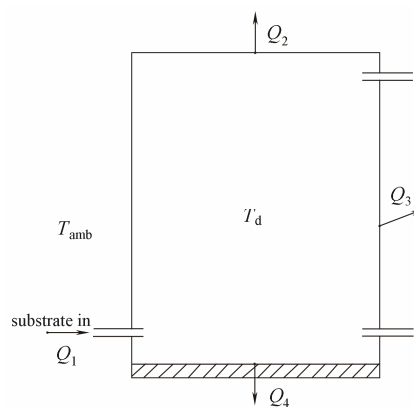


图 1 反应器传热模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of reactor model configuration showing heat transfer processes

1.1 加热原料的热量消耗

假设发酵罐内温度 T_{dig} 为一稳定值,进料的温度等于外界环境温度 T_{∞} ,每日进料质量流率为 m ,则加热原料所需要的热量 Q_1 为

$$Q_1 = c_p m (T_{\text{dig}} - T_{\infty}) \quad (1)$$

1.2 罐体的热散失

罐体主要的热散失主要由罐顶、罐壁和罐底三部分组成。

1.2.1 罐顶 当罐顶温度 T_{surf} 高于空气温度 T_{∞} 时,罐顶热量散失 Q_2 主要为罐顶和空气之间的对流散失热量。

$$Q_2 = \frac{T_{\text{dig}} - T_{\infty}}{\frac{1}{h_{c1}} + \sum R_{\text{cover}} + \frac{1}{h_{c2}}} A_{\text{cover}} \quad (2)$$

其中, A_{cover} 为罐顶与空气接触面积, h_{c1} 为罐内沼气的对流传热系数, h_{c2} 为罐外空气的对流传热系数。

1.2.2 罐壁 当发酵罐位于地面上方时,罐壁的散热主要为罐壁与空气之间的热散失,若不计辐射散热,假设罐壁温度与料液温度相同,可通过式(3)计算罐壁的散热。

$$Q_3 = q_{\text{walls}} A_{\text{walls}} = \frac{(T_{\text{walls}} - T_{\infty})}{\sum R_{\text{walls}} + \frac{1}{h_{c2}}} A_{\text{walls}} \quad (3)$$

其中, T_{walls} 为罐壁内侧温度, A_{walls} 为罐壁与空气接触的面积, $\sum R_{\text{walls}}$ 为罐壁材料的热阻之和。

1.2.3 罐底 罐底的散热主要为罐底与土壤之间的热散失,假设罐底温度与料液温度相同,可通过式(4)计算罐底的散热。

$$Q_4 = q_{\text{floor}} A_{\text{floor}} = \frac{(T_{\text{floor}} - T_{\text{soil}})}{\sum R_{\text{floor}}} A_{\text{floor}} \quad (4)$$

其中, T_{floor} 为罐底内侧温度, T_{soil} 为与罐底接触的土壤温度, A_{floor} 为罐底与土壤接触的面积, $\sum R_{\text{floor}}$ 为罐底材料的热阻之和。

2 结果与分析

2.1 增温能耗的计算

瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程发酵罐总体积为 2300 m³, 两个发酵罐体积分别为 1000 m³ 和 1300 m³, 江苏金坛永康农牧养猪场沼气工程发酵罐体积约为 1000 m³。因此本文以体积为 1000 m³ 的发酵罐作为模型简化的参考对象, 下文比较过程中瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程仅考虑 1000 m³ 发酵罐部分, 计算参数如表 1 所示。

瑞典 Alviksgården 养猪场 2300 m³ 沼气工程总处理量为 100 t · d⁻¹, 其中 1000 m³ 发酵罐处理量约 45 t · d⁻¹, 发酵温度为 50℃。江苏金坛永康农牧养猪场沼气工程日进料量约为 50 t · d⁻¹, 发酵温度 30℃。外界气温假设为 15℃, 土壤温度按 10℃计。计算结果如表 2 所示。

表 2 计算结果表明, 瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程和江苏金坛永康农牧养猪场沼气工程中加

表 1 模型计算参数

Table 1 Parameter values for model simulations

Parameter	Value
V/m^3	1000
D/m	12
H/m	9
δ_1/mm	6
$\lambda_1/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	10
δ_2/mm	120
$\lambda_2/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.047
δ_3/mm	50
$\lambda_3/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1.5
$h_{c1}^{[15]}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	8.7
$h_{c2}^{[16]}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	23.6

热原料消耗的能量均占总加热负荷 90%以上, 此结论与文献[17]报道一致。在日处理量接近的情况下, Alviksgården 养猪场高温发酵沼气工程的加热能耗是金坛永康农牧养猪场沼气工程的 2.1 倍, 每天多消耗 3837 MJ 用于提高发酵温度。

2.2 高温发酵容积产气率

虽然瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程增温能耗比江苏金坛永康农牧养猪场沼气工程高, 但产气水平也大幅提高。

江苏金坛永康农牧养猪场沼气工程的中温发酵实际容积产气率约为 0.7 m³ · m⁻³ · d⁻¹, 瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程相比江苏金坛永康农牧养猪场沼气工程增加的产气量随高温发酵时容积产气率变化的关系如图 2 所示。

由图 2 可见, 若瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程高温发酵的容积产气率大于 0.9 m³ · m⁻³ · d⁻¹, 增加的产气量即可抵消增温的能耗; 而瑞典 Alviksgården 养猪场的沼气工程高温发酵的实际产气水平为 2.3 m³ · m⁻³ · d⁻¹, 即增产的沼气的量远远大于增温的能耗, 这是该高温发酵沼气工程得以自负盈亏的直接原因之一。这也说明, 在沼气工程原

表 2 发酵罐加热负荷

Table 2 Heating load of digester

Item	Heat loss/MJ	Total heat loss/MJ	Influent heating/MJ	Heating load/MJ
Yongkang	cover	54	291	3150
	walls	169		
	floor	68		
Alviksgården	cover	126	6615	7278
	walls	400		
	floor	137		

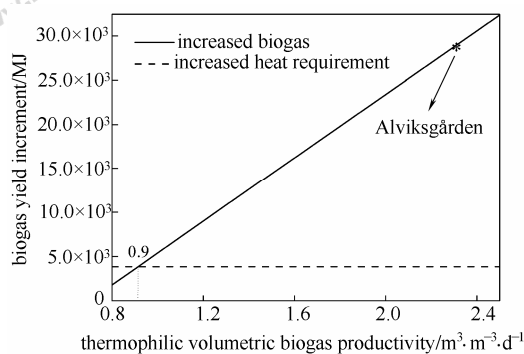


图2 沼气增产量随高温发酵容积产气率的变化

Fig.2 Relation between increase of biogas yield and thermophilic volumetric biogas productivity

料、C/N 比和 pH 值等相关因素满足条件的前提下, 高温发酵带来的沼气增产量可以满足系统增温能耗需求。

2.3 净产气率

沼气工程的沼气净产气率为扣除加热消耗沼气温量的净输出量占沼气总产量的比例, 沼气净产气率越高表明用于增温消耗的沼气占总产量的比例越小, 越经济。

提高容积产气率和沼液余热回收工艺能有效地提高沼气工程高温发酵的沼气净产气率。提高沼气工程容积产气率的方法众多, 沼气工程的产气水平除与温度相关外, 还跟原料、pH 值、管理水平等很多因素相关。以原料为例, 位于瑞典 Linköping 的一个中温发酵沼气工程以屠宰场废弃物和食物残渣为原料发酵, 容积产气率高达 $7.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ [5]。

除了增加沼气的容积产气率外, 降低加热能耗的方式也能实现增大沼气净产率的目的。而通过表 2 的计算结果可知, Alviksgården 养猪场高温发酵沼气工程的加热能耗是金坛永康农牧养猪场沼气工程的 2.1 倍, 其中加热原料部分占 90%, 因此应重点考虑如何减少该部分热负荷。除了传统保温措施外, 也可通过回收高温出料的部分余热用于加热进料, 实现减少热量浪费、进而提高净产气率的目的 [18-19]。出料余热回收的厌氧发酵工艺流程图如图 3 所示。一般而言, 高温发酵时通过回收 55°C 的出料的余热, 能够将 11°C 进料加热至 32°C , 大约减少加热原料部分约 50% 的热量消耗 [19]。如果采用低温差换热的高效换热器, 还可进一步提高余热回收能力, 降低增温的能量消耗, 提高沼气工程净产气率。

图 4 为沼气净输出比例与高温发酵容积产气率和工艺的关系。假设余热回收工艺可回收沼液中 50% 热量。

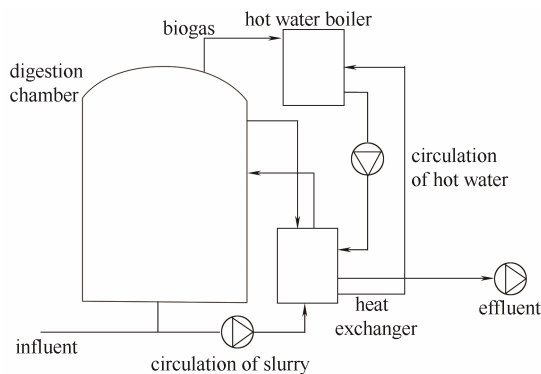


图3 沼气工程余热回收工艺示意图

Fig.3 Influent/effluent heat recovery in biogas plant

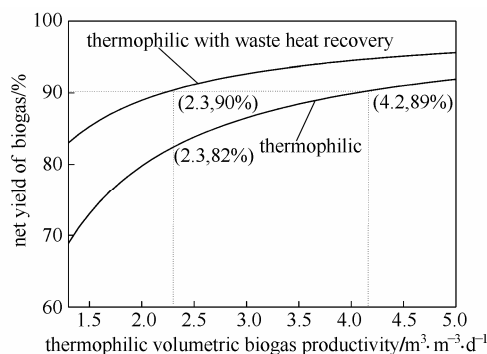


图4 净输出率与高温容积产气率的关系

Fig.4 Net yield of biogas as a function of thermophilic volumetric production rate

一般高温发酵的容积产气率为 $2.0 \sim 2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ [20], 瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程高温发酵容积产气率为 $2.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 从图 4 中可以看出, 若增加余热回收可将沼气净产气率从 82% 提高至 90%, 每年可增产 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 沼气。

若无余热回收, 容积产气率须达到 $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 净产气率才能达到同等水平。但沼气温度的产气水平与温度、原料、pH 值、管理水平等很多因素相关, 提高容积产气率的工艺要求复杂, 代价十分高昂。显然, 相比大幅提高容积产气率, 通过回收出料余热提高高温发酵沼气净产气率更为可行。

若将沼气工程所产沼气经过提纯、压缩等工艺制成生物甲烷、用作交通燃气, 增加余热回收工艺减少增温过程的能耗量、提高沼气净产气率对提高沼气工程的生物甲烷净产量意义重大。

3 结 论

Alviksgården 养猪场高温发酵沼气工程的加热能耗是金坛永康农牧养猪场沼气工程的 2.1 倍; 但

瑞典 Alviksgården 养猪场的沼气工程的高温发酵的容积产气率为 $2.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 产气速率的大幅提升使得增产的沼气体远远大于增温的能耗需求。

瑞典 Alviksgården 养猪场沼气工程若增加余热回收, 沼气净产气率将从 82% 提高至 90%, 每年可增产 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 沼气。

符 号 说 明

- D —— 发酵罐直径, m
 H —— 罐壁高度, m
 h_{c1} —— 罐顶内侧沼气的对流系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 h_{c2} —— 罐外空气对流系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 V —— 发酵罐体积, m^3
 δ_1 —— 罐顶、罐壁、罐底碳钢板厚度, mm
 δ_2 —— 苯板保温层厚度, mm
 δ_3 —— 罐底地基混凝土厚度, mm
 λ_1 —— Q235 碳钢板热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 λ_2 —— 苯板保温层热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 λ_3 —— 罐底地基混凝土热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

References

- [1] Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, Ben Cheikh R, Marouani L, Hamdi M. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste[J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(12): 2143-2148
- [2] Jiang X, Sommer S G, Christensen K V. A review of the biogas industry in China[J]. *Energy Policy*, 2011, **39**(10): 6073-6081
- [3] Deng Liangwei(邓良伟), Chen Zi'ai(陈子爱), Gong Jianjun(龚建军). Comparison of biogas plant between China and Germany[J]. *Renewable Energy Resources*, 2008, **26**(1): 110-114
- [4] El-Mashad H M, Zeeman G, van Loon W K, Bot G, Lettinga G. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure[J]. *Bioresource Technology*, 2004, **95**(2): 191-201
- [5] Swedish Gas Association. Biogas from manure and waste products[R]. 2012
- [6] Wu B, Bibeau E L. Development of 3-D anaerobic digester heat transfer model for cold weather applications[J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, **49**(3): 749-757
- [7] Gebremedhin K G, Wu B, Gooch C, Wright P, Inglis S. Heat transfer model for plug-flow anaerobic digesters[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, **48**(2): 777-785
- [8] Merlin G, Kohler F, Bouvier M, Lissolo T, Boileau H. Importance of heat transfer in an anaerobic digestion plant in a continental climate context[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**: 59-67
- [9] Perrigault T, Weatherford V, Marti-Herrero J, Poggio D. Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: a heat transfer model[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**: 259-268
- [10] Yiannopoulos A C, Manariotis I D, Chrysikopoulos C V. Design and analysis of a solar reactor for anaerobic wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(16): 7742-7749
- [11] El-Mashad H M, van Loon W K P, Zeeman G, Bot G P A, Lettinga G. Design of a solar thermophilic anaerobic reactor for small farms[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, **87**(3): 345-353
- [12] Alkhamis T M, El-khazali R, Kablan M M, Alhusein M A. Heating of a biogas reactor using a solar energy system with temperature control unit[J]. *Solar Energy*, 2000, **69**(3): 239-247
- [13] Axaopoulos P, Panagakis P, Tsavdaris A, Georgakakis D. Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester[J]. *Solar Energy*, 2001, **70**(2): 155-164
- [14] Chen Y, Hashimoto A. Energy requirements for anaerobic fermentation of livestock wastes[J]. *Livestock Waste: A Renewable Resource*, 1981: 117-121
- [15] Sha Wei(沙微), Liu Jianyu(刘建禹), Chen Zexing(陈泽兴), Li Wentao(李文涛). Study on the insulation thickness of biogas anaerobic fermentation reactor under the limit the temperature drop and time in the cold regions[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research(农机化研究)*, 2013, **35**(1): 228-231
- [16] Shi Huixian(石惠娴), Huang Chao(黄超), Zhu Hongguang(朱洪光), Pei Xiaomei(裴晓梅), Hu Meiqin(胡美琴), Guo Changcheng(郭长城). Determination of economical insulation thickness for fordigester based on heat pump heating system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2012, **28**(22): 215-221
- [17] Zupancic G D, Ros M. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion[J]. *Renewable Energy*, 2003, **28**(14): 2255-2267
- [18] Pei Xiaomei(裴晓梅), Shi Huixian(石惠娴), Zhu Hongguang(朱洪光), Long Weiding(龙惟定). Heating system of high temperature biogas digester by solar energy and methane liquid heat recovery heat pump [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science (同济大学学报: 自然科学版)*, 2012, **40**(2): 292-296
- [19] Zupančič G D, Roš M. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion[J]. *Renewable Energy*, 2003, **28**(14): 2255-2267
- [20] Lü Tao(吕涛), Shi Huixian(石惠娴), Zhu Hongguang(朱洪光), Xu Kai(徐凯), Fan Min(范旻), Ma Jieqiong(马洁琼). Comparison and selection analysis of heating system of mesophilic and thermophilic anaerobic fermentation by ground-source heat pump[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences (安徽农业科学)*, 2013, **41**(14): 6565-6568