

新型农村绿色建筑的构建与能耗分析

李金平, 马思聪, 刁荣丹, 冷小超, 王春龙

(兰州理工大学 太阳能与气体水合物研究中心, 兰州 730050)

摘要: 为了利用可再生能源满足农民燃气、生活热水和冬季采暖等多层次用能需求, 结合农民冬季生活习惯, 构建了集成太阳能恒温沼气池系统、低温辐射床等供能系统的 30 m² 农村绿色建筑。研究了冬季不同环境温度下绿色建筑的能量收支平衡及其经济性, 研究结果表明: 该绿色建筑能够利用农村可再生能源满足农民燃气、生活热水和冬季采暖的用能需求, 环境温度为 -20℃ 时室内温度高于 15℃; 与传统砖混结构的农村建筑相比, 新型农村绿色建筑年节约标准煤 2.8 吨, 节省费用 3275 元, 增加的系统投资回报期为 3.9 年。

关键词: 农村绿色建筑; 太阳能恒温沼气池; 低温辐射床; 能耗分析; 投资回收期

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1166(2012)06-0028-05

Construction and Energy Consumption Analysis of A New Rural Green Building / LI Jin-ping, MA Si-cong, DIAO Rong-dan, LENG Xiao-chao, WANG Chun-long / (Research Center of Solar Energy & Gas Hydrate, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to meet farmers' energy demands of gas, domestic hot water and winter heating with renewable energy, according to farmers' living habits in winter, a 30 m² insulated rural green building made of brick and concrete, was designed integrating with thermostatic digester heated by solar energy and low-temperature radiant bed. Energy expenditure and thermal economy of the green building were studied at different winter ambient temperature. The results show that the consumer's energy demands of gas, hot water and winter heating can be met in the green building even in winter. When the outdoor temperature was -20℃, the indoor's was higher than 15℃. Compared with the traditional rural buildings made of brick and concrete, the new one saves 2.8 tons of standard coal and RMB ¥3275 every year and the payback period of the green building could be 3.9 years.

Key words: rural green building; thermostatic digester heated by solar energy; low-temperature radiant bed; energy consumption analysis; payback period of investment

随着我国社会主义新农村建设步伐的加快, 农民人居环境虽然有了较大改善, 但农民依靠柴薪或煤炭来烧水做饭、冬季采暖的状况基本没有改变^[1]。新农村建设中大力推广的传统沼气池虽然能满足农民 6 个月的沼气需求, 但产气不稳定、冬季不产气等问题的存在, 使得它的使用和推广受到了严重制约^[2]。为了实现沼气池全年连续稳定产气, 根据太阳能热水器集热温度与生物质高效恒温发酵温度相匹配的特点, 兰州理工大学研发了性能稳定的太阳能恒温沼气池, 由 18 支 DN 58mm × 1800mm 真空管太阳能集热器和 2.2 m³ 恒温沼气池组成的系统在甘肃省皋兰县、景泰县、东乡县等地方均达到了年平均日产沼气 1.5 m³ 和 60℃ 生活热水 180 L,

满足了农民燃气和生活热水的需求^[3]。尽管如此, 由于现有农村住宅普遍没有保温措施, 冬季漏风损失严重, 因此示范推广的太阳能恒温沼气池系统不能满足冬季采暖的能源需求, 冬季农民仍然使用煤炉烧水、做饭和取暖。

鉴于农民冬季通常在 20 ~ 30 m² 房间内生活的普遍情况, 为了利用农村可再生能源满足农民燃气、生活热水和冬季采暖的用能需求, 结合农民冬季生活习惯, 本文介绍了集成太阳能恒温沼气池、低温辐射床等供能系统的 30 m² 农村绿色建筑, 研究冬季不同环境温度下绿色建筑的能量收支平衡及其经济性。

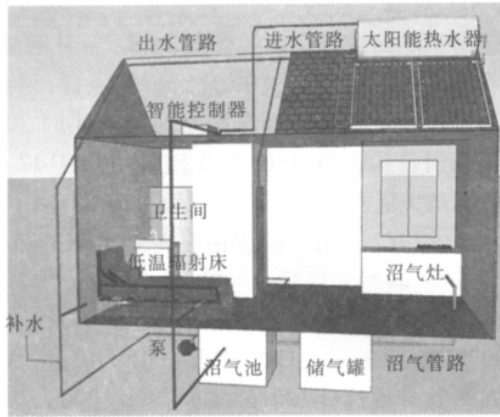
收稿日期: 2012-07-27 修回日期: 2012-08-07

项目来源: 国家科技支撑计划课题(2011BAD15B03); “陇原青年创新人才扶持计划”项目(09-0165); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2010-29); 兰州理工大学“红柳杰出人才计划”(Q201101)

作者简介: 李金平(1977-), 男, 副教授, 主要从事先进可再生能源系统研究, E-mail: lijinp77@163.com

1 农村绿色建筑的构建

构建的新型农村绿色建筑建筑面积为 30 m², 分为卫生间、厨房、卧室三部分, 可提供洗浴、炊事、居住、冬季采暖等功能。新型农村绿色建筑示意图如图 1 所示, 主要由带保温的建筑及其围护结构、低温辐射床、恒温沼气池系统、太阳能热水器等构成。1.8 m × 2.0 m 的低温辐射床兼具床和低温辐射散



热器的特点。带保温的 2.2 m³ 的沼气池处在卫生间的下方, 内部尺寸为 1.3 m × 1.3 m × 1.3 m, 沼气池各面均覆盖 10 mm 厚的聚苯板。这样不仅方便卫生间的污物入池, 而且冬季时沼气池向上的散热有效抵消了建筑通过地面的热损失。太阳能热水器安装在建筑顶部。太阳能热水器集取的太阳能一方面保证沼气池的恒温发酵, 另外通过低温辐射床散热, 满足采暖的需求, 同时为农民提供生活热水。

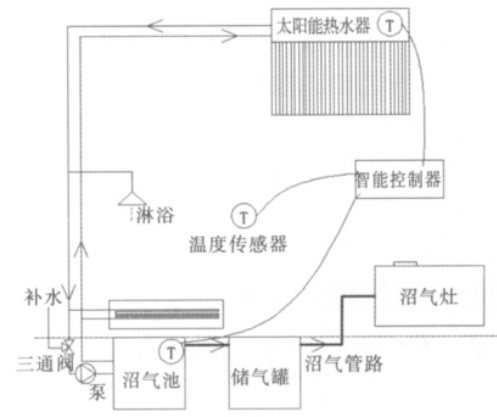


图 1 新型农村绿色建筑示意图

2 绿色建筑的能量分析

为了衡量该农村绿色建筑能否满足工作要求, 对其能量收支进行了理论计算。

2.1 绿色建筑的能量输出

2.1.1 建筑物耗热量

根据《太阳能供热采暖工程技术规范》GB 50495-2009, 《居民建筑节能设计标准》JGJ26-2010 及《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ26-2010 对建筑物的耗热量^[4-7]进行计算:

$$Q_H = Q_{HT} + Q_{INF} - Q_{IH} \quad (1)$$

式中 Q_H : 建筑物耗热量, W; Q_{HT} : 通过维护结构的传热耗热量, W; Q_{INF} : 空气渗透耗热量, W; Q_{IH} : 建筑物内部得热量(包括照明、电器、炊事和人体散热等), 住宅建筑取 $3.80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

其中 通过维护结构的传热耗热量

$$Q_{HT} = (t_i - t_e) (\sum \varepsilon_i K_i F_i) \quad (2)$$

式中 Q_{HT} : 通过围护结构的传热耗热量, W; t_i : 室内空气计算温度, 18℃; t_e : 采暖期室外平均温度, 按《居民建筑节能设计标准》JGJ26-2010 中规定取 -2.8℃; ε_i : 各围护结构传热系数的修正系数; K_i : 各围护结构的传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$; F_i : 各围护结

构的面积, m²。

$$Q_{INF} = C_p \rho N V (t_i - t_e) \quad (3)$$

式中 Q_{INF} : 空气渗透耗热量, W; C_p : 空气比热容, 取 $0.28 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{℃}^{-1}$; ρ : 空气密度, 取 t_e 条件下的值, $1.307 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; N : 换气次数, 取每小时 0.5 次; V : 换气体积, 取每次 50.4 m^3 。

由式(1) ~ (3) 计算得, 建筑物耗热量 Q_H 为 $85.00 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$

2.1.2 生活热水日平均耗热量^[4]

$$Q_w = \frac{mq_r C_w \rho_w (t_r - t_f)}{86400} \quad (4)$$

式中 Q_w : 生活热水日平均耗热量, W; m : 用水计算单位数 3 人; q_r : 热水用水定额 $40 \text{ L} \cdot \text{人}^{-1} \text{d}^{-1}$; C_w : 水的比热容, 取 $4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{℃}^{-1}$; ρ_w : 热水密度, $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$; t_r : 设计热水温度, 60℃; t_f : 设计冷水温度, 年平均 10℃。

经计算得 生活热水日平均耗热量 $Q_w = 24.70 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.1.3 沼气池的热损失计算

(1) 沼气池加热原料所需的热量^[8]

$$Q_1 = cm(T_D - T_S) \quad (5)$$

式中 c : 料液的比热容(新鲜料液质量分数约为

8% ,可近似取水的比热) $A \cdot 2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$; m : 每天进入沼气池的新鲜料液量; T_D : 沼气发酵罐内料液的温度 37°C ; T_S : 新鲜料液的温度 20°C 。

所以,计算得 $Q_1 = 0.071 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(2) 沼气池输热管道热损失^[9]

$$Q_2 = 2\pi \cdot \frac{T_D - T_A}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{4a}{d_o}} \cdot L \cdot (1 + \beta) \quad (6)$$

式中: L : 根管道的长度, m ; T_A : 罐外介质温度, $^\circ\text{C}$; β : 局部热损失系数, 取 2.2; λ_1 : 绝热层的导热系数, 当采用聚苯乙烯时, 取 $0.047 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; λ_2 : 土壤的导热系数, 取 $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; d_i : 输热管内径, m ; d_o : 输热管的绝热层外径, m ; a : 输热管中心到地面的高度, 即埋设深度, m 。

所以,计算得 $Q_2 = 10.36 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(3) 沼气池围护结构耗热量^[9]

$$Q_3 = F \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (T_D - T_A) \quad (7)$$

式中 α_1 : 沼气传到池壁介质的导热系数, 取钢筋混凝土 $1.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; α_2 : 沼气池壁传到池外介质的导热系数, 取砖(夯实粘土) $1.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; δ : 沼气池厚度, m ; λ : 沼气池池壁导热系数, 取钢筋混凝土 $1.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

由公式 7 计算沼气池围护结构的耗热量为:

$$Q_3 = 18.26 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$$

每天沼气池总的能量损失为:

$$Q_m = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 28.69 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$$

由上述计算可得,该绿色建筑每天能量输出为

$$Q_o = Q_H + Q_w + Q_m = 138.39 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$$

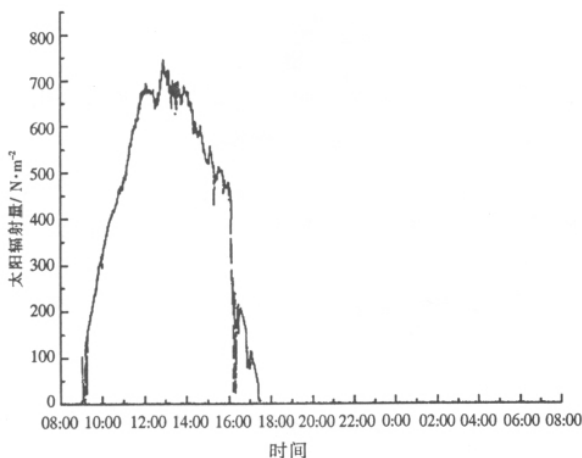


图 2 冬季太阳辐射随时间变化曲线

2.2 绿色建筑的能量输入

2.2.1 太阳能加热系统提供的热量

太阳能加热系统日均集热量按下式^[10]计算:

$$Q_s = AI\eta_i(1 - \eta_s) \quad (8)$$

式中: A : 集热器采光面积, m^2 ; I : 集热面上日平均辐射强度, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; η_i : 集热器全日集热效率, 取 0.7; η_s : 管路及储水箱热损失率, 取 0.2。

在 2011 年 12 月 27 日早上 8:00 到 28 日早上 8:00, 对皋兰县的太阳辐射量进行了测试实验, 太阳辐射量随时间变化曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出日照辐射量从 9:00 开始测量到 17:30 结束, 在当地冬季日照下接受日照时间为 8 小时 30 分。太阳辐射量从 9:00 开始大幅上升, 在中午 12:50 达到全天最大辐射量, 全天总辐射量为 $13.94 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

本设计选用 3 组伊诺雷特牌太阳能热水器, 并联合安装, 各组集热管型号均为 $\varphi 58 \text{ mm} \times 2100 \text{ mm}$, 集热管规格为 40 支, 采光面积为 5.96 m^2 , 保温层厚度为 55~65 mm, 日产热水 400L。因此, 太阳能集热器共有集热管 120 支, 日产热水 1200 L, 集热器总采光面积 17.88 m^2 。

所以, 代入公式 (8) 可得 $Q_s = 139.58 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2.2 剩余沼气产热量

根据在皋兰县阳洼窑村冬季测试结果, 系统稳定运行时, 太阳能恒温沼气池每日可产气 1.5 m^3 左右, 一家三口每日炊事用沼气 0.5 m^3 , 剩余 1 m^3 也可用来为室内供热。 1 m^3 沼气产热量^[11]为 $Q_g = 27 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

由上述计算可得, 该绿色建筑每天能量输入为 $Q_i = Q_s + Q_g = 166.58 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

综上所述, $Q_i > Q_o$, 可知该绿色建筑能完成每天的加热任务, 满足用户用能需求。

由于该绿色建筑的设计是依照国家《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ26-2010, 取冬季室外温度为皋兰地区采暖期室外平均温度 -2.8°C 。因此为了验证该设计是否能满足当地冬季最低环境温度下的用能需求, 以保证建筑在冬季正常运行, 对皋兰县阳洼窑村冬季最低环境温度进行了实测, 测试期为 2011 年 12 月 6 日至 2012 年 1 月 9 日, 最低环境温度变化如图 3 所示。从该曲线图中可以看出, 皋兰地区冬季最低环境温度接近 -20°C , 因此分别对室外环境温度为 -5°C , -10°C , -15°C , -20°C 时, 设计系统能够达到的室内温度进行了计算, 结果如表 1 所示。从表 1 中可看出, 在室外温度为 -20°C

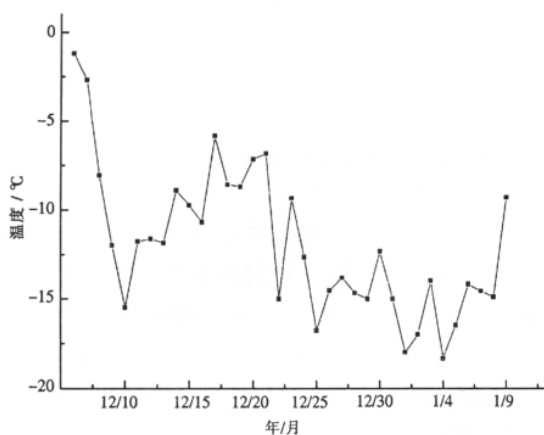


图3 冬季测试期间兰县最低温度变化曲线

表1 不同环境温度下建筑室内温度

环境温度	-2.8℃	-5℃	-10℃	-15℃	-20℃
室内温度	24℃	21℃	19℃	17℃	15℃

时,建筑室内温度仍可达到15℃,因此该加热系统完全可以完成每天的加热任务,保障该绿色建筑在冬季正常运行。

3 绿色建筑的效益分析和评价

3.1 绿色建筑的经济效益评价

3.1.1 投入的生产费用

该绿色建筑投入的生产费用包括设备成本费,原料费,维修管理费,运行费等,结果如表2所示。

表2 投入的生产费用

太阳能集热器	沼气罐	配套装置	外墙保温	玉米秸秆、猪粪原料费用	每年管理费和维修费	总投资费用
6000元	1400元	500元	2000元	与沼肥收益相抵	100元	10000元

表3 产出收益

沼气收益	采暖期供暖、供热水收益	非采暖期供热水收益	沼肥收益	年净收益
640元	2400元	235元	与原料费相抵	3275元

表4 新型农村绿色建筑经济效益分析计算表

年份	成本 (1) 元	效益 (2) 元	净效益 (3) = (2) - (1) 元	折现因子 (4)	成本现值 (5) = (1) × (4) 元	效益现值 (6) = (2) × (4) 元	净效益现值 (7) = (3) × (4) 元	累计净效益 (8) 元
0	10000	-10000	-10000	1	10000	-10000	-10000	-10000
1	100	3275	3175	0.9091	90.91	2977.303	2886.393	-7113.61
2	100	3275	3175	0.8264	82.64	2706.46	2623.82	-4489.79
3	100	3275	3175	0.7513	75.13	2460.508	2385.378	-2104.41
4	100	3275	3175	0.683	68.3	2236.825	2168.525	64.115
5	100	3275	3175	0.6209	62.09	2033.448	1971.358	2035.473
6	100	3275	3175	0.5645	56.45	1848.738	1792.288	3827.76
7	100	3275	3175	0.5132	51.32	1680.73	1629.41	5457.17
8	100	3275	3175	0.4665	46.65	1527.788	1481.138	6938.308
9	100	3275	3175	0.4241	42.41	1388.928	1346.518	8284.825
10	100	3275	3175	0.3856	38.56	1262.84	1224.28	9509.105
11	100	3275	3175	0.3505	35.05	1147.888	1112.838	10621.94
12	100	3275	3175	0.3186	31.86	1043.415	1011.555	11633.5
13	100	3275	3175	0.2897	28.97	948.7675	919.7975	12553.3
14	100	3275	3175	0.2633	26.33	862.3075	835.9775	13389.27
15	100	3275	3175	0.2394	23.94	784.035	760.095	14149.37

表5 经济性指标

累计成本现值	累计效益现值	益本比	投资回收期	净现值	内部收益率
10761 元	24910 元	2.3	3.9 年	14149 元	16%

3.1.2 产出效益

当系统稳定运行时,每天产 1.5 m^3 沼气,燃煤炉的效率为 60%,沼气灶的热效率为 75%,沼气的热值取其平均值 $22.935 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$,标准煤热值为 $29300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,标准煤价为 $1.2 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。按照皋兰地区计算,冬季采暖期为 132 天,采暖期供暖、供热水约需标准煤 2 吨。系统全年稳定连续的为住户提供生活热水、生活燃气,并在冬季供暖,一年按照 365 天计算,每年的产出效益如表 3 所示。

3.1.3 计算方法

根据上述计算及经济学相关公式^[12],得表 4 新型农村绿色建筑经济效益分析计算表,由该表计算得经济性指标如表 5 所示(设系统投资机会成本为 10%;系统使用寿命为 15 年)。由表 5 可知,该农村绿色建筑的益本比 > 1 ,净现值 > 0 ,内部收益率 $>$ 投资机会成本,理论上证明该系统在经济性上是可行的。

3.2 绿色建筑的环境效益及社会效益评价

该绿色建筑采用太阳能恒温沼气池、低温辐射床等技术。利用日常生活、生产中的废弃物产生沼气,使用方便,无污染,残余物可用来为农田施肥。沼气既替代了传统的生活燃料,又减少了 CO_2 气体的排放,对农村居住环境的改善起到了很好的作用。同时低温辐射床取代了过去的热炕等农村传统采暖设备,使用太阳能热水器供暖,减少了有害气体对室内环境及人体健康的危害。高效清洁能源的使用,使农户从传统的生活方式向健康、文明、卫生的生活方式转变,有利于我国社会主义新农村的建设。

4 总结

为了利用农村可再生能源满足农民生活燃气、生活热水和冬季采暖等用能需求,使农村生活水平提高,结合农民冬季生活习惯,构建了与太阳能恒温沼气池系统、低温辐射床等高度集成的 30 m^2 新型农村绿色建筑。通过对本系统的能量收支和经济性分析,得到如下结论。

(1) 太阳能恒温沼气池系统利用卫生间污物及生活、生产中的有机废弃物进行资源化利用,产生沼气为住户提供生活燃气,发酵后的沼渣、沼液用来肥

田,不但获得了能源,使种植物增产,还保持了农村周边环境的干净卫生。

(2) 低温辐射床利用太阳能热水器产生的热水在其内部换热,与除炊事外剩余沼气联合为室内供暖,解决了西北农村地区农民冬季采暖的问题。

(3) 通过对该绿色建筑的能量收支分析可知,该绿色建筑系统完全可以满足住户炊事、生活热水和冬季采暖对热量的需求,环境温度为 -20°C 时室内温度高于 15°C ,使得冬季室内温度可以维持在相对舒适的水平。

(4) 与传统砖混结构的农村建筑相比,新型农村绿色建筑年节约标准煤 2.8 吨,节省费用 3275 元,增加的系统投资回报期为 3.9 年,表明该系统有很好的节能性和经济性,同时对保护农村环境也有重大意义。

参考文献:

- [1] 田宜水. 中国农村能源发展现状及“十二五”展望[J]. 中国能源, 2011, 33(5): 13-16.
- [2] 包武, 李元钦, 钱午巧, 等. 浅谈冬季沼气池存在问题与对策[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(15): 25-26.
- [3] 柏建华. 太阳能加热的恒温沼气池产气性能实验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [4] GB 50495-2009 太阳能供热采暖工程技术规范[S].
- [5] JGJ26-2010 民用建筑节能设计标准[S].
- [6] JGJ26-2010 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S].
- [7] 王荣光, 沈天行. 可再生能源利用与建筑节能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [8] 王晓超, 贺光祥, 邱凌, 等. 太阳能热管加热系统在沼气工程中的应用[J]. 农机化研究, 2008, 7(30): 204-207.
- [9] 金其荣. 沼气能源发酵池的热量计算[J]. 化学世界, 1980, 4(21): 119-122.
- [10] 蒲小东, 邓良伟, 尹勇, 等. 大中型沼气工程不同加热方式的经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 281-284.
- [11] 胡纪琴. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [12] 张百良. 农村能源技术经济及管理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995, 92-119.