

大中型沼气集中供气系统优化模拟及经济环境效益评估

仲 声, 牛叔文*, 邱 欣, 王义鹏

(1. 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘 要: 大中型沼气集中供气系统能够为农村居民集中供应稳定清洁的炊事能源, 是中国农村能源发展的方向。该文首先对大中型沼气集中供气系统经济环境效益进行核算, 然后根据各系统经济效益内部收益率的大小将原始系统分层。结果显示, 原始状态下, 系统的环境效益普遍较好且具有规模效应, 但经济效益差异较大, 体现出规模越大越不经济的情况。以贴现率 0.08 和原点 0 为分层点, 依据各系统的内部收益率将原始系统分为 3 层进行优化。根据不同层级系统的规模、效益、条件和优化必要性, 从替换发酵罐恒温燃料、配置沼气发电设备为沼气系统供电、建设循环农业系统 3 个方面灵活选择制定符合不同层级现实需求的优化措施。优化后各系统的综合效益均得到不同程度的提升。系统优化后, 一级系统的 2 个项目经济效益变化不大, 环境效益提升显著, 分别提升了 112.88% 和 134.43%。二级系统的 4 个项目在优化后内部收益率都达到或超过了贴现率 8%, 经济效益由一般升级为良好; 同时, 环境效益分别提升了 88.16%、100.02%、103.22% 和 109.09%。三级系统的 3 个项目内部收益率都为负值, 属于不具备经济效益的项目, 优化之后, 其中的 2 个项目内部收益率已经转正, 经济效益由无升级为一般, 同时, 环境效益分别提升了 116.36%、123.92% 和 101.19%。优化的主要措施是削减运营成本, 但现实情况更为复杂, 各地应该因地制宜, 灵活选择优化措施。大型系统需要在建设时积极参考国家大中型沼气工程建设规划, 严格控制成本。

关键词: 沼气; 环境控制; 大中型沼气集中供气系统; 炊事能源; 多层次优化; 综合效益

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.04.029

中图分类号: S216

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-04-0232-09

仲 声, 牛叔文, 邱 欣, 王义鹏. 大中型沼气集中供气系统优化模拟及经济环境效益评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 232—240. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.04.029 <http://www.tcsae.org>

Zhong Sheng, Niu Shuwen, Qiu Xin, Wang Yipeng. Optimization simulation of medium- and large-scale biogas projects and its evaluation of economic and environmental efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 232—240. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.04.029 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

目前, 农村家庭能源消费和可再生能源发展是能源领域的研究热点^[1-2]。其中沼气作为农村可再生能源推广、利用和消费的重要内容^[3-4], 已经引起了广泛关注。中国农村户用沼气的建设始于 20 个世纪 50 年代末期, 但建设步伐缓慢, 几近停滞。直到 1979 年以后, 随着国家经济状况的好转和技术水平的成熟, 户用沼气稳步发展, 年均增长率达到 4%。到 2000 年底, 农村户用沼气池已达到了 848 万户^[5-6]。2000 年以后, 随着中国政府对“三农”问题的重视, 中国农村沼气建设事业进入了快速发展期, 到 2010 年底, 中国农村户用沼气池保有量已超过 4 000 万户。但此时, 由于农业机械化水平的提升和农村劳动力的外流, 导致户用型沼气发展受阻。与此同时, 中国农业产业化的不断推进, 产生了大量的农业有机废料亟待处理和利用, 这对沼气规模化的集中生产创造了

条件^[7]。同时, 随着国家“建设社会主义新农村”运动的推广, 中国农村地区开始大规模推进基础设施建设。这对能源项目的集中供应提出了要求。在天然气还无法覆盖农村地区的前提下, 沼气具有集中化供应的相对优势^[8]。因此, 沼气发展的模式发生了新的变化和新的趋势——大中型沼气集中供气^[9]。

虽然近年来大中型沼气集中供气系统取得了长足的发展, 但在实际推广过程中还出现了很多问题。其中最大的问题是经济效益较差, 这个问题也引起了许多国内外学者的关注。Markus 等^[10]分析评估了使用奶牛粪便进行农业生产和利用沼气发电和供热的经济可行性, 认为一个经济上可行的厌氧消化工厂至少需要每个农场 3 000 头奶牛, 这在无形之中就限制了很多大中型沼气系统经济效益的稳定; 而 Rácz 等^[11]在丹麦沼气集中供气项目生产率 and 效率的研究结果中认为, 沼气集中产气系统没有经济效益, 因此对其进行推广是不划算的。Wang 等^[12]则从政府补贴的角度得出结论, 认为没有任何补贴政策的沼气项目是不可行的, 而即便是政府对其进行补贴和政策优惠, 其经济效益也十分微弱。沼气集中供气系统微弱的经济效益是限制它进一步推广的主要原因, 但从另一个角度来说, 其又具有良好的环境效益和社会效益, 这是它相对于传统生物质能和化石能源的优势。而这方

收稿日期: 2018-11-13 修订日期: 2019-01-28

基金项目: 兰州大学“一带一路”专项项目(2018ldbryb031)

作者简介: 仲 声, 博士生, 主要从事能源经济与可持续发展方向研究。

Email: wywybz@163.com

※通信作者: 牛叔文, 研究员, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事人地关系地域系统分析方向研究。Email: shuwenn@lzu.edu.cn

面也得到了许多学者的关注。Rana 等^[13]认为大中型沼气集中供气项目能够减少温室气体排放和环境污染排放，显著改善农村地区的室内环境和室外环境；得到同样结论的还有瑞典学者 Olsson，他在关于瑞典沼气生产与利用的社会技术分析的研究中指出，大规模利用沼气可使瑞典公路运输产生的温室气体排放量减少 25%，显著改善空气质量^[14]；而 Subedi 等^[15-16]则分别得出结论，认为利用沼气产生的环境效益不仅体现在对温室气体的减排上，还体现在通过替代化肥而提升土壤土质和通过替代传统生物质能对生态环境的保护上。从国内外研究现状可以看出，现有研究对大中型沼气集中供气系统技术、经济、环境、社会及综合效益都有了较为丰富的研究成果。例如，丁京涛等^[17]以实地调研和问卷调查的形式，通过采样分析发酵原料、沼渣和沼液样品的养分含量、粪大肠菌群数、铜、锌、砷、铅等指标，从技术层面了解了北京市大中型沼气工程冬季运行情况及发酵剩余理化特性；李金平等^[18]以生命周期评价法为基础，对发酵出料直接排放及固液分离后排放 2 种情况进行对比，在此基础上从经济、能效和环境影响 3 个方面评价了大型沼气工程不同沼液处理方式造成的综合性能差异。其中，也有一些研究对沼气系统未来的发展和优化提出了一些构思，但也仅限于一些政策性建议和措施。

目前还没有对现有大中型沼气集中供气系统进行全面优化，针对不同规模、效益和现实条件提出相应解决方案的相关研究。

此次研究的目的是，基于上述背景，通过对大中型沼气集中供气系统经济环境效益的核算，综合考量不同层级系统的规模、效益、条件和优化必要性，制定符合不同层级现实需求的优化措施，并追踪系统在优化过程中经济环境效益的变动，以此来确定系统优化的有效性和可操作性。在持续发挥系统环境优势的同时，致力于系统经济效益这个最大短板的提升，使其实现综合效益最大化，为沼气集中供气系统的优化和市场化推广提供有力支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

为了获取研究所需数据和资料，分别于 2016 年 7 月和 2016 年 8 月实地访谈了甘肃省平凉市庄浪县和武威市凉州区 2 个地区的 5 个农村大中型沼气集中供气项目。除此之外，还远程访谈了凉州区柏树庄社区、天马社区，庄浪县上寨村、连王村 4 个沼气集中供气项目。在访谈过程中，对项目的生产过程、投入产出的相关参数进行了逐项的清查，收集到了各项目物质投入、人力消耗、生产经营等的全部数据和信息资料（表 1）。

表 1 各系统基本参数
Table 1 Basic parameters of each system

地区 Areas	供气规模 Supply households/户	项目总投资 Total investment/ 万元	日产沼气 Biogas production/ (m ³ ·d ⁻¹)	年产沼渣 Biogas residue yield/(t·a ⁻¹)	年处理粪便 Raw material dosage/(t·a ⁻¹)	原料种类 Raw material species	建成年份 Year of completion
柏树庄 Baishuzhuang community	1 249	1 411	1 350	19 800	15 900	牛粪	2016
南安社区 Nanan community	1 136	1 000	1 200	18 200	14 600	猪粪	2015
天马社区 Tianma community	800	815	1 100	12 700	10 600	鸡粪	2016
上寨村 Shangzhai village	620	380	800	10 500	9 400	猪粪	2016
石阳村 Shiyang village	480	230	500	6 820	6 200	牛粪	2016
连王村 Lianwang village	320	200	400	6 000	5 400	猪粪	2016
岳堡村 Yuepu village	360	180	400	5 800	5 000	猪粪	2016
野赵村 Yezhao village	316	139	400	5 500	4 800	猪粪	2014
小果园村 Xiaoguoyuan village	150	59	150	2 600	2 200	猪粪	2015

目前这几个项目都是新建的，处于试验阶段的项目。目的是通过这些项目对大中型沼气集中供气项目的建设和运营进行试验参考和过程优化。

1.2 研究方法

此文在研究的过程中使用了成本效益分析方法。成本效益分析方法是通过对各系统的全部成本和效益来评估系统运营价值的方法，主要包含的经济效益、环境效益和社会效益 3 个方面的量化评估。由于社会效益难以量化，文章在研究过程中只量化了项目的经济效益和环境效益。

1) 经济效益量化

经济效益通过净现值（NPV）、内部收益率（IRR）和投资回收期（Pt）进行量化。净现值为^[19]

$$NPV = \sum_{t=1}^n (CI - CO)_t (1 + i_c)^{-t} \quad (1)$$

式中 CI 为现金流入量，CO 为现金流出量， i_c 为贴现率，

$(CI - CO)_t$ 为第 t 年的净现金流量， n 为项目年限，按照中国现阶段的贴现率， i_c 取值为 0.08。

内部收益率为^[19]

$$\sum_{t=1}^n (CI - CO)_t (1 + IRR)^{-t} = 0 \quad (2)$$

式中 IRR 为内部收益率，其将作为分层优化的依据。

投资回收期为^[19]

$$P_t = T - 1 + \frac{(CI - CO)_{t-1}}{(CI - CO)_t} \quad (3)$$

式中 T 为项目各年累计净现金流量出现正值或零的年数，从投产当年开始计算。

2) 环境效益量化

环境效益通过计算环境影响因子的减排量来进行量化，具体是通过核算替代能源（沼气）和被替代能源（传统能源结构）之间环境影响因子排放量的差额来实现，公式模拟如下

$$EB = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n (EC_i \times f_{ij} \times \eta_i) - BG \times f_j \right] \quad (4)$$

式中 EB 是环境效益量化值, EC_i 是 i 种被替代能源的消耗量, f_{ij} 是 i 种被替代能源 j 排放因子的排放系数, η_i 是 i 种被替代能源在传统能源结构中的比例; BG 是替代能源的消耗量, f_j 是替代能源 j 排放因子的排放系数; m 表示排放因子的数量, n 表示传统能源结构中的能源数量。

2 研究过程与结果分析

2.1 系统原始状态

优化前, 各项目的系统运营状况处于最原始的状况,

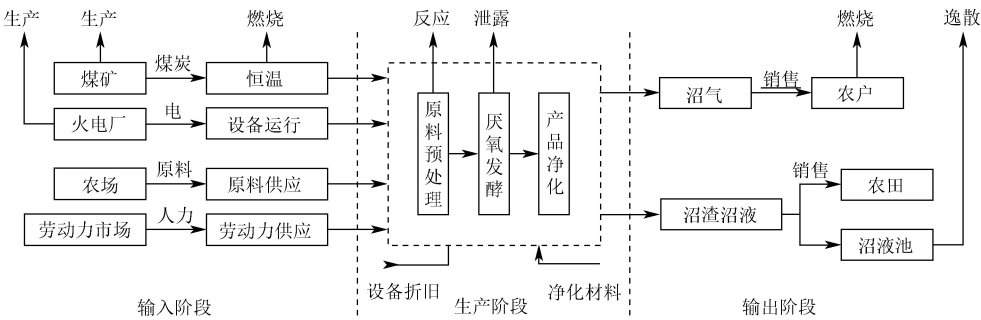


图 1 原始系统的系统边界和基本状况

Fig.1 System boundary and basic condition of primitive system

优化前沼气系统的主要特征有: 运营周期成本支出点较多, 特别是输入阶段和生产阶段存在多个成本支出点; 运营周期收益点较少, 只存在于输出阶段; 运营周期会产生一定的环境影响, 部分环节会排放环境影响因子(温室气体和环境污染物), 其中输入阶段的恒温燃料使用和设备用电环节, 以及输出阶段的沼气燃烧环节都是主要的排放源。

2.2 原始状态效益核算

2.2.1 经济效益

系统优化前, 成本支出点主要有 6 处, 其中原料支

在此情境下, 系统的边界设定为:

- 1) 忽略沼气项目建设阶段的环境影响;
- 2) 发酵原料就地取材, 沼渣沼液就地使用, 忽略关于原料和产品运输的环境影响;
- 3) 所用发酵工艺采用 CSTR (Continuous stirred-tank reactor) 发酵工艺;
- 4) 恒温所用燃料为煤炭, 设备运行所用电能为火电;
- 5) 沼气仅作为炊事能源供应农户燃烧;
- 6) 沼渣沼液仅作为有机肥施用在农田中。

基于此, 优化前沼气的成本支出点、收益点和环境污染物排放点分布状况如图 1。

出是最大的成本支出点。目前收益点只有 2 个, 分别为沼气和沼渣沼液的销售。沼气系统虽然收益点较少, 但都具有一定的盈利能力, 可以维持系统的日常运营。

由成本支出额和收益额(表 2), 并以设备运营期 20 a 为周期, 列出现金流量表, 以此计算出各项目的内部收益率(IRR)和投资回收期(Pt)。

从结果可以看出, 系统优化前, 中小规模的系统具有较好的经济效益(表 3), 普遍能在有效运行期内收回初始投资, 但规模较大的系统经济效益则相对越差, 难以收回投资。

表 2 优化前各系统主要成本和收入情况

Table 2 Main costs and revenues of each system before optimization

万元								
地区 Areas	成本支出 Cost						收益 Income	
	煤炭 Coal	电 Electric energy	原料 ^{*1} Raw material	人力 Manpower	净化材料 Scavenging material	折旧 Depreciation	沼气 ^{*2*3} Biogas	沼渣沼液 Biogas residues
柏树庄 Baishuzhuang community	5.44	5.10	50.54	10.00	7.00	40.00	98.55	75.73
南安社区 Nanan community	4.94	4.67	53.10	10.00	6.60	35.00	87.60	79.56
天马社区 Tianma community	4.25	3.82	26.77	8.00	5.80	30.00	80.30	40.11
上寨村 Shangzhai village	3.77	3.09	44.25	8.00	5.00	25.00	73.00	66.30
石阳村 Shiyang village	2.67	1.85	18.72	6.00	2.70	11.50	36.50	28.05
连王村 Lianwang village	2.22	1.55	17.70	4.00	1.90	10.00	29.20	22.44
岳堡村 Yuepu village	2.22	1.70	17.70	4.00	1.80	9.00	29.20	22.44
野赵村 Yezhao village	2.12	1.47	17.70	4.00	1.60	6.95	29.20	22.44
小果园村 Xiaoguoyuan village	0.84	0.58	6.64	0.80	0.50	2.95	10.95	8.41

注: *1 牛粪的单位产气量为 26 m³·t⁻¹, 猪粪为 22 m³·t⁻¹, 鸡粪为 40 m³·t⁻¹; *2 沼气和沼渣沼液的产量按照理论最大产量计算; *3 沼气和沼渣沼液的价格按照调研当地的实际销售价格计算(沼气 2.00 元·m⁻³, 沼渣沼液 40.00 元·m⁻³)。Note: *1. The unit biogas production of raw material: cow dung is 26 m³·t⁻¹, pig dung is 22 m³·t⁻¹, chicken dung is 40 m³·t⁻¹; *2. The output of biogas and biogas residues is calculated according to the maximum theoretical yield; *3. The prices of biogas and biogas residues are calculated on the basis of the actual local sales prices (biogas 2.00 yuan·m⁻³, biogas residues 40.00 yuan·m⁻³).

表 3 优化前各系统经济效益

Table 3 Economic benefits of each system before optimization

地区 Areas	成本总额 Total cost/万元	收益总额 Total income/万元	纯收益额 Net income/万元	内部收益率 Internal rate of return/%	投资回收期 Pay back period/a
柏树庄 Baishuzhuang community	117.17	174.28	57.11	-7	59
南安社区 Nanan community	106.06	167.16	61.10	-3	36
天马社区 Tianma community	70.33	120.41	50.08	-3	33
上寨村 Shangzhai village	63.88	111.44	47.55	7	10
石阳村 Shiyang village	36.81	64.55	27.73	6	11
连王村 Lianwang village	29.19	51.64	22.45	5	12
岳堡村 Yuepu village	28.75	51.64	22.89	7	10
野赵村 Yezhao village	27.12	51.64	24.52	14	7
小果园村 Xiaoguoyuan village	9.62	19.36	9.74	12	8

2.2.2 环境效益

沼气系统具有正的环境外部性，但其是否能弥补经济效益的不足，主要取决于它所取代的燃料的种类和数量。大中型沼气系统建成后，原有的炊事能源结构，包括一些分散的户用型沼气，将被集中供应的大中型沼气

所替代。此处利用 IPCC（联合国气候变化国家间专家委员会）公布的气候变化因子及其排放系数^[20-22]（表 4），分别计算出传统能源结构下和沼气替代结构下环境影响因子（温室气体和环境污染物）的排放量，并将二者之差作为沼气的环境替代效益，即系统的环境效益。

表 4 主要炊事能源的气候变化因子及排放系数

Table 4 Climate change factors and emission factors for main household energy

能源类型 Energy types	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	SO ₂	NO _x	PM(10,2.5)
秸秆 Straw	2 634.00	10.63	0.14	1.63	0.50	15.43
薪柴 Fuel wood	2 539.40	4.73	0.14	2.03	1.10	4.39
动物粪便 Excrement	2 768.00	4.08	0.04	2.63	22.40	3.22
煤炭 Coal	1 847.00	0.03	0.02	1.37	0.32	0.18
火电 Thermal power	3 900.00	5.72	0.06	2.12	25.79	2.55
沼气 Biogas	748.00	0.03	0.05	0.94	0.88	0.01
天然气 Natural gas	1 642.00	0.02	0	0.39	0.01	0.01
太阳能 Solar energy	0	0	0	0	0	0

注：单位为千克每吨标煤。
Note: Unit is kg per ton coal equivalent.

在传统能源结构下，煤炭和秸秆是农村地区最主要的炊事能源，这种能源结构会排放大量的温室气体和环境污染物，沼气正是由于替代了这种传统的能源结构，所以产生了较强的环境正外部性。

表 5 显示了传统能源结构组合的多样性。

假设调研中各系统服务范围内的农户使用传统的炊事用能结构，按照调研中的各气站供应的农村家庭总户数，得出各气站服务范围内一年炊事活动所用的各种能源用量，并基于此计算出传统能源结构下温室气体和环境污染物的排放量（表 6）。

表 5 传统炊事能源结构

Table 5 Traditional structure of cooking energy

地区 Region	项目 Item	秸秆 Straw	薪柴 Fuel wood	电能 Electric energy	煤炭 Coal	液化石油气 LPG	沼气 Biogas	太阳能 Solar energy	合计 Sum
庄浪 Zhuanglang	消费/kg	370	28	22.6	282	7.5	60.5	45.4	816
	比例/%	45.34	3.43	2.77	34.56	0.92	7.41	5.56	100.00
凉州 Liangzhou	消费/kg	380	36	37.6	330	11.4	48	40	883
	比例/%	43.04	4.08	4.26	37.37	1.29	5.44	4.53	100.00
平均 Mean	比例/%	44.19	3.76	3.52	35.97	1.11	6.43	5.05	100.00

表 6 传统能源结构下的环境影响因子及排放量
Table 6 Environmental impact factors and emissions in traditional energy structure

地区 Areas	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	S ₂ O	NO _x	PM(10,2.5)
柏树庄 Baishuzhuang community	866 000	2 300	30.1	666	3 270	2 900
南安社区 Nanan community	769 000	2 050	26.7	592	2 900	2 570
天马社区 Tianma community	705 000	1 880	24.5	543	2 660	2 360
上寨村 Shangzhai village	641 000	1 710	22.3	493	2 420	2 150
石阳村 Shiyang village	321 000	853	11.1	247	1 210	1 070
连王村 Lianwang village	256 000	682	8.91	197	968	858
岳堡村 Yuepu village	256 000	682	8.91	197	968	858
野赵村 Yezhao village	256 000	682	8.91	197	968	858
小果园村 Xiaoguooyuan village	96 200	256	3.34	74.0	363	322

沼气替代结构也会产生一定的环境影响，主要存在于发酵罐恒温所用燃料的燃烧、沼气燃烧、沼肥施用等环节。沼气结构下的环境影响因子排放情况如表 7。

表 7 沼气替代结构下的环境影响因子及排放量
Table 7 Environmental impact factors and emissions under alternative biogas structure

地区 Areas	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	S ₂ O	NO _x	PM(10,2.5)
柏树庄 Baishuzhuang community	635 000	22.4	556	3 100	625	363
南安社区 Nanan community	573 000	20.0	507	2 820	562	331
天马社区 Tianma community	500 000	18.0	428	2 400	497	281
上寨村 Shangzhai village	440 000	16.1	367	2 080	442	244
石阳村 Shiyang village	232 000	8.23	201	1 120	228	131
连王村 Lianwang village	187 000	6.61	163	909	184	106
岳堡村 Yuepu village	191 000	6.67	170	938	186	109
野赵村 Yezhao village	178 000	6.48	150	839	176	96.4
小果园村 Xiaoguooyuan village	64 200	2.39	52.3	292	63.2	32.7

通过比较传统和现在的炊事能源结构，可以核算出大中型沼气集中供气系统相对于传统能源结构的环境影响因子减排量，即原始状态下沼气系统的环境效益（表 8）。

表 8 优化前各系统的环境效益
Table 8 Environmental benefits of original system

地区 Areas	碳减排* Carbon emission reduction	SO ₂ 减排 SO ₂ emission reduction	NO _x 减排 NO _x emission reduction	PM 减排 PM emission reduction
柏树庄 Baishuzhuang community	269 427.94	162.62	40.83	2 533.49
南安社区 Nanan community	230 788.18	82.52	29.95	2 244.29
天马社区 Tianma community	237 299.61	257.38	45.73	2 079.46
上寨村 Shangzhai village	231 344.26	339.70	51.41	1 902.33
石阳村 Shiyang village	103 604.36	88.61	18.23	942.12
连王村 Lianwang village	81 050.29	59.17	13.62	752.54
岳堡村 Yuepu village	79 047.68	50.06	13.58	752.54
野赵村 Yezhao village	90 434.88	129.25	21.34	761.95
小果园村 Xiaoguooyuan village	36 584.20	70.57	10.79	289.16

注：* CO₂ 当量，CH₄ 为 21，N₂O 为 298。
Note: * CO₂ equivalent, CH₄ is 21, N₂O is 298.

从结果可以看出，原始系统的环境效益较为理想，特别是对温室气体和 PM 的减排效应十分显著，而且体现出规模效应，规模越大的系统环境效益越显著。

2.2.3 小节

系统原始状态下，经济效益随系统规模的增大有急剧下降的趋势。中小规模的系统具有较好的经济效益，普遍能在有效运行期内快速收回初始投资，但规模较大的系统经济效益则相对较差，甚至不具备经济效益，很难收回投资。环境效益则普遍较为理想，特别是对温室气体和 PM 的减排效应十分显著，而且体现出规模效应，规模越大的系统环境效益越显著。总体来看，原始系统经济效益差异较大，但环境效益普遍较好且具有规模效应，由于其良好的环境效益带来的社会效应也比较显著，因此多数原始系统的综合效益还是比较理想的。但对于一个自负盈亏的项目而言，具有一定的经济效益是这些项目得以稳定运营的前提，也是这些得以最大化地发挥它的综合效益的必要条件。因此，需要对现有大中型沼气系统项目进行优化，致力于提升它们的经济效益，以确保它们能够稳定运营。

2.3 优化情景模拟及分析

2.3.1 划分优化层级

不同层级的系统有不同的规模、效益、条件和优化必要性，因此需要制定符合不同层级现实需求的优化措施，并追踪系统在优化过程中经济环境效益的变动，以此来确定系统优化的有效性和可操作性。

此处根据系统内部收益率，以贴现率 0.08 和原点 0 为分层点，将系统分为 3 层：

- 1) 一级系统：内部收益率≥8%，共有野赵村和小果园村 2 个项目。
- 2) 二级系统：0≤内部收益率<8%，共有石阳村、岳堡村、连王村和上寨村 4 个项目。
- 3) 三级系统：内部收益率<0，共有天马社区、南安社区、柏树庄社区 3 个项目。

各层根据其经济效益表现的差异，采取不同的优化措施。

2.3.2 一级系统的优化情景

该情景下的野赵村和小果园村 2 个沼气集中供气系统经济效益较好，不仅能够在有效运行期内回收投资，还能够产生较为可观的收益；但这 2 个系统由于规模较小，环境效益不十分显著。因此，该情景下的优化原则和优化措施如下：

- 1) 优化原则：保持经济效益稳定的前提下，持续提升系统环境效益。

- 2) 优化措施：将恒温燃料由煤炭替换为生物质固体成型燃料。

优化后，一级系统 2 个项目的经济效益和环境效益都发生了变化，如表 9 所示。

首先，可以看出优化后一级系统的经济效益有略微下降，相比原始系统，2 个项目纯收益分别下降了 1.50%和 1.51%，这是由于生物质固体成型燃料单价比煤炭略高，导

致成本有小幅上升。但总体上下降幅度很小，基本保持稳定，对于经济效益较高的野赵村和小果园村的沼气集中供气系统几乎不会产生影响。相比之下，优化后环境效益得

到了较大程度的提升，特别是碳减排量分别提升 112.88%和 134.43%，环境效益显著提升。综上，优化后系统经济效益保持稳定，环境效益显著提升，达成了优化目的。

表 9 优化后一级系统的环境和经济效益变动

Table 9 Changes in economic and environmental benefits of first-level system after optimization

项目 Item	经济效益 Economic benefits			环境效益 Environmental benefits			
	纯收益 Net income/ 万元	投资回收期 Pt/a	内部收益率 Internal rate of return /%	碳减排 Carbon emission reduction/(kg·a ⁻¹)	SO ₂ 减排 SO ₂ emission reduction/(kg·a ⁻¹)	NO _x 减排 NO _x emission reduction/(kg·a ⁻¹)	PM 减排 PM emission reduction/(kg·a ⁻¹)
野赵村 Yezhao village	23.44	7	14	126518.53	602.22	77.11	825.00
小果园村 Xiaoguoyuan village	9.21	8	12	46037.11	220.33	28.38	308.75

2.3.3 二级系统的优化情景

该情景下石阳村、岳堡村、连王村、上寨村都属于经济效益一般的系统，勉强能在有效运行期内回收投资，但盈利能力较低，抗市场风险能力较弱。因此，该情景下的优化原则和优化措施如下：

- 1) 优化原则：保持系统环境优势的前提下，提升系统经济效益。
- 2) 优化措施：保持一级优化的措施；配置发电机组利用剩余沼气发电满足用电需求。

原始状态下，沼气系统普遍对外购电，所购电能中火电占比在 7 成以上，而火电在其生命周期中会产生大量的温室气体和环境污染物质，会实际影响系统的环境效益。因此，在二级优化情景下，建议配置发电机组利用所产沼气内部供电，以取代对外购电。这样，一方面节省了购电支出，一方面可以进一步提升系统的环境效益。配置发电设备后，按照 2 kWh/m³ 的单位发电量，满足系统的用电需求，而配置发电机组的支出算作系统设备投资，并计入折旧。优化后，二级系统的经济效益和环境效益都发生了变化（表 10）。

表 10 优化后二级系统的环境和经济效益变动

Table 10 Changes in economic and environmental benefits of second-level system after optimization

项目 Item	经济效益 Economic benefits			环境效益 Environmental benefits			
	纯收益 Net income/ 万元	投资回收期 Pt/a	内部收益率 Internal rate of return/%	碳减排 Carbon emission reduction/(kg·a ⁻¹)	SO ₂ 减排 SO ₂ emission reduction/(kg·a ⁻¹)	NO _x 减排 NO _x emission reduction/(kg·a ⁻¹)	PM 减排 PM emission reduction/(kg·a ⁻¹)
上寨村 Shangzhai village	49.72	10	8	435287.35	2189.73	240.71	2134.18
石阳村 Shiyang village	29.06	8	11	207236.18	1094.73	118.78	1065.45
连王村 Lianwang village	23.53	10	9	164714.62	875.77	94.86	852.19
岳堡村 Yuepu village	24.18	8	12	165278.87	875.78	94.95	852.28

可以看出，二级系统经过优化后，经济效益得到了较大幅度的提升。4 个项目的内部收益率已经达到或者超过 8%，意味着不仅能够在有效运行期内回收投资，还具有相当的盈利能力，市场竞争力和抗风险能力都相应提高。这主要是由于配置发电机组内部供电，节省了购电支出，虽然同时会产生发电机组的设备支出，但是这部分支出计入折旧之后对成本总额提升的影响很小。因此，二级系统的 4 个项目经济效益都得到了提升。环境上，延续一级系统的优化措施，将恒温燃料替换为生物质固体成型燃料，同时取消了对外购电（火电为主），使二级系统在优化之后的环境效益也得到了显著提升，环境效益分别提升 88.16%、100.02%、103.22%、109.09%。综上，优化后二级系统经济效益有较大幅度的提升，具有一定的盈利能力和抗风险能力。此外，环境效益也显著提升，达成了优化目标。

2.3.4 三级系统的优化情景

该情景下柏树庄、南安社区、天马社区的沼气集中供气系统都属于大型系统，规模大、成本高、收入低，不具备经济效益，不能在有效运行期内回收投资，盈利能力和抗市场风险能力都很差。因此，对于三级系统的

优化，重点在于提升经济效益：

- 1) 优化原则：尽力提升经济效益，使其综合效益最大化。
- 2) 优化措施：保持一级和二级优化的措施；建设循环农业系统，稳定系统原料供应和产品销售。

原始状态下，大中型沼气系统都是独立运营的，原料需要从外收购，沼渣沼液也必须投入市场销售。这种状态下，一方面大幅提高了沼气的成本负担（主要有原料支出和运输支出），另一方面无法确保沼渣沼液的稳定销售，进而影响系统的经济效益。而这个不足，对规模较大的系统尤为突出。因此，对于那些规模比较大的系统，建议建设循环农业系统，配合畜牧养殖场和果蔬农场。畜牧养殖场为大中型沼气系统供应原料，节省系统的原料支出和运输成本；大中型沼气的沼渣沼液则为果蔬农场免费提供新鲜优质的有机肥料；同时养殖场和农场的部分运营收益用来补贴大中型沼气系统，提升大中型沼气的经济效益。在此研究中，假设养殖场和农场各自每年能够为大中型沼气系统补贴 10 万元，则此情景下三级系统的环境和经济效益变动情况如表 11。

表 11 优化后三级系统的环境和经济效益变动

Table 11 Changes in economic and environmental benefits of third-level system after optimization

项目 Item	经济效益 Economic benefits			环境效益 Environmental benefits			
	纯收益 Net income/ 万元	投资回收期 Pt/a	内部收益率 Internal rate of return/%	碳减排 Carbon emission reduction/(kg·a ⁻¹)	SO ₂ 减排 SO ₂ emission reduction/(kg·a ⁻¹)	NO _x 减排 NO _x emission reduction/(kg·a ⁻¹)	PM 减排 PM emission reduction/(kg·a ⁻¹)
柏树庄 Baishuzhuang community	79.03	29	-3	582 923.94	2 956.07	324.24	2 880.40
南安社区 Nanan community	78.88	16	2	516 775.73	2 627.60	288.01	2 560.14
天马社区 Tianma community	77.74	13	5	477 413.94	2 408.68	264.57	2 347.38

三级系统优化后,经济效益得到了相当程度的提升。南安社区和天马社区的沼气系统已经从没有经济效益升级为低经济效益。也就是说,这 2 个系统在经过优化后,具有了一定的盈利能力,可以勉强在有效运行期内回收投资,但抗风险能力仍旧很弱,易受政策和市场风险的影响。而柏树庄的沼气系统由于规模过大,投资过高,虽然经过优化收入水平有了提升,但仍旧属于不具备经济效益的系统,对于这类系统必须在优化前就做好规划,控制成本。环境上,继续延续之前的优化措施,使三级系统在优化之后的环境效益也得到了显著提升,环境效益分别提升了 116.36%、123.92%和 101.19%。综上,三级系统在优化之后,经济效益和环境效益都得到了提升,综合效益也更为显著,基本达成了优化目标。

2.3.5 建议

针对现阶段大中型沼气建设与推广中存在的突出问题,提出一些建议如下:

1) 因地制宜,灵活选择优化措施

在此研究中,假设了一种理想状态,设定所有的系统都能够满负荷运行,所有的产品都能全部销售转化为运营收益。因此,优化系统经济效益就完全依靠削减运营成本来实现。但实际上,对于大中型沼气系统而言,沼气的销售相对稳定,而沼渣沼液的销售并不稳定。调研中的多数项目沼渣沼液的销售都不理想,这个收益点并没有完全发挥作用。因此,在实际的优化中应该考虑扩宽沼渣沼液的销售渠道,例如可以进行风干压缩的初级加工,并进行简单包装对外销售,一方面使用户易于接受,另一方面也能大幅减少运输成本,确保沼渣沼液的稳定销售,充分获得沼渣沼液的销售收入。此外,现有的优化措施中,更换恒温燃料和配置发电机组对于多数沼气系统都较容易实现,但建设循环农业系统则难度相对较大,不仅前期投入更多,而且日常管护更为复杂。因此,各地应该根据本地的现实需求,灵活地选择优化措施。发展基础较好,市场前景相对广阔的地区可以采取程度较深的三级优化措施;而发展基础较弱,市场前景不佳的地区则建议采取一、二级优化措施。

2) 做好规划,建立严格的成本控制机制

规模较大的沼气集中供气系统,由于其本身就没有经济效益,而在优化之后,虽然收益能力有所提升,但经济效益仍旧十分微弱,一旦政策和市场发生不利于大中型沼气集中供气系统发展和推广的变动,这些系统就会受到严重影响,导致无法在有效运行期内回收投资。

此外,还有一些大型系统在项目建设期间,由于可行性论证不够深入,没有控制好成本,导致投资过高,虽然经过深入优化,收入水平有了提升,但仍旧没有经济效益。按照国家《全国农村沼气发展“十三五”规划》制定的投资预算参考,发酵容量 1 000 m³ 的沼气系统工程,投资应该控制在 450 万人民币左右。三级系统均是发酵容量在 1000 m³ 左右的项目,但投资均远远超过《全国农村沼气发展“十三五”规划》的参考预算,因此这类系统必须在建设的时候积极参考国家沼气发展规划和标准,在规划建设之前就做好设计方案,建立严格的成本控制机制,保证大型系统的可持续发展和推广。

3 结论

基于上述分析,此次研究得出如下结论:

1) 系统原始的经济效益有很大差异,随项目规模从大到小,各项目的内部收益率分别为-7%、-3%、-3%、7%、6%、5%、7%、14%、12%,体现出规模越大越不经济的趋势。环境效益则普遍较为理想,特别是对温室气体的减排效应十分显著,随项目规模从大到小,温室气体减排量分别可为 269 427.94、230 788.18、237 299.61、231 344.26、103 604.36、81 050.29、79 047.68、90 434.88、36 584.20 kg/a,体现出规模效应,规模越大的系统环境效益越显著。

2) 根据系统内部收益率,以贴现率 0.08 和原点 0 为分层点,将系统分为 3 层。根据不同层级系统的规模、效益、条件和优化必要性,从替换发酵罐恒温燃料、配置沼气发电设备为沼气系统供电、建设循环农业系统 3 个方面灵活选择制定符合不同层级现实需求的优化措施,并追踪系统在优化过程中经济环境效益的变动,以此来确定系统优化的有效性和可操作性。

3) 系统优化后,一级系统的 2 个项目经济效益分别下降了 1.50%和 1.51%,但这 2 个项目本身经济效益就较好(内部收益率分别为 14%和 12%),因此对其经济效益影响不大;其环境效益提升显著,分别提升了 112.88%和 134.43%,整体的优化结果十分显著。二级系统的 4 个项目在优化后内部收益率都达到或超过了贴现率 8%,经济效益由一般升级为良好;同时,环境效益分别提升了 88.16%、100.02%、103.22%和 109.09%,优化结果同样较为显著。三级系统的 3 个项目内部收益率都为负值,属于不具备经济效益的项目。优化之后,其中的 2 个项目内部收益率已经转正,经济效益由无升级为一般。同时,环境效益分别提升了 116.36%、123.92%和 101.19%,

整体的优化结果相对显著。值得注意的是规模最大的柏树庄社区项目,经过了程度最深的三级优化,经济效益还是无法转正,对于这类项目,必须在建设之前就做好规划,严格控制成本和规模。

[参 考 文 献]

- [1] Zhao X, Luo D. Driving force of rising renewable energy in China: Environment, regulation and employment[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 48—56.
- [2] Wang X, Li K, Li H, et al. Research on China's rural household energy consumption-household investigation of typical counties in 8 economic zones[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 28—32.
- [3] Damira K, Davor M, Željko L. Deployment of renewable energy: Economic effects on the Croatian economy[J]. *Energy Policy*, 2019, 126: 402—410.
- [4] Yin D, Liu W, Zhai N, et al. Regional differentiation of rural household biogas development and related driving factors in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 1008—1018.
- [5] He G Z, Bluemling B, Mol A P J, et al. Comparing centralized and decentralized bio-energy systems in rural China[J]. *Energy Policy*, 2013, 63(6): 34—43.
- [6] Song Z, Zhang C, Yang G, et al. Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33(2): 204—213.
- [7] 吴进, 闵师界, 朱立志, 等. 养殖场沼气工程商业化集中供气补贴分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 269—273.
Wu Jing, Min Shijie, Zhu Lizhi, et al. Analysis of subsidy for biogas plants' commercialized concentrated biogas supply on breeding farms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(24): 269—273. (in Chinese with English abstract)
- [8] 汪兴东, 熊彦龄. 农户绿色能源消费行为影响因素研究: 基于户用沼气和大中型沼气的比较分析[J]. *南京工业大学学报: 社会科学版*, 2018, 17(5): 69—78.
Wang Xingdong, Xiong Yanling. Study on the influencing factors of Farmers' Green Energy consumption behavior-A Comparative Analysis based on Household Biogas and large-and medium-sized biogas[J]. *Journal of Nanjing University of Technology: Social Science Edition*, 2018, 17(5): 69—78. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘科, 唐宁, 高立洪, 等. 重庆丘陵区沼气集中供气运行与管理模式探讨[J]. *中国沼气*, 2017, 35(1): 100—104.
Liu Ke, Tang Ning, Gao Libo, et al. Discussion on operation and management mode of centralized biogas supply in hilly and mountainous area of Chongqing[J]. *China Biogas*, 2017, 35(1): 100—104. (in Chinese with English abstract)
- [10] Markus L, Jason K. H, Patrick L, Daniela T. Making money from waste: The economic viability of producing biogas and biomethane in the Idaho dairy industry[J]. *Applied Energy*, 2018, 222: 621—636.
- [11] Rác V J, Vestergaard N. Productivity and efficiency measurement of the Danish centralized biogas power sector[J]. *Renewable Energy*, 2016, 92: 397—404.
- [12] Wang C, Zhang Y, Zhang L, Pang M. Alternative policies to subsidize rural household biogas digesters[J]. *Energy Policy*, 2016, 93: 187—195.
- [13] Rana R, Ingrao C, Lombardi M, et al. Greenhouse gas emissions of an agro-biogas energy system: Estimation under the renewable energy directive[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 1182—1195.
- [14] Olsson L, Fallde M. Waste(d) potential: A socio-technical analysis of biogas production and use in Sweden[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 98: 107—115.
- [15] Subedi M, Matthews R B, Pogson M, et al. Can biogas digesters help to reduce deforestation in Africa?[J]. *Biomass and Bioenergy* 2014, 70: 87—98.
- [16] Chang I S, Wu J, Zhou C, et al. A time-geographical approach to biogas potential analysis of China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 37: 318—333.
- [17] 丁京涛, 张朋月, 华冠林, 等. 北京大中型沼气工程冬季运行状况及发酵前后物料理化生物特性[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 213—220.
Ding Jingtao, Zhang Pengyue, Hua Guanlin, et al. Running status of large and medium scale biogas project and physical, chemical and biological characteristics of materials before and after fermentation in winter of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(23): 213—220. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李金平, 吴文君, 张涵, 等. 基于生命周期分析的禽畜养殖厂沼气工程性能评[J]. *中国沼气*, 2018, 36(5): 93—99.
Li Jinping, Wu Wenjun, Zhang Han, et al. Performance evaluation of biogas engineering in livestock breeding plant based on life cycle analysis[J]. *China Biogas*, 2018, 36(5): 93—99. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈豫, 杨改河, 冯永忠, 等. 沼气生态农业模式综合评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 274—279.
Chen Yu, Yang Gaihe, Feng Yongzhong, et al. Comprehensive evaluation of biogas ecological agriculture model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(2): 274—279. (in Chinese with English abstract)
- [20] 衣瑞建, 张万钦, 周捷, 等. 基于 LCA 方法沼渣沼液生产利用过程的环境影响分析[J]. *可再生能源*, 2015(2): 301—307.
Yi Ruijian, Zhang Wanqin, Zhou Jie, et al. Environmental impact Analysis of Biogas residue production and utilization process based on the LCA method[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015(2): 301—307. (in Chinese with English abstract)

- [21] 王明新, 夏训峰, 柴育红, 等. 农村户用沼气工程生命周期节能减排效益[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 245—250.
Wang Mingxin, Xia Xunfeng, Chai Yuhong, et al. Energy saving and emission reduction benefit of household biogas project in rural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 245—250. (in Chinese with English abstract)
- [22] 安英莉. 煤炭全生命周期环境行为及其对土地资源的影响[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
An Yingli. Environmental behavior in the whole Life cycle of Coal and its influence on Land Resources[D]. Beijing: China Mining University, 2017. (in Chinese with English abstract)

Optimization simulation of medium- and large-scale biogas projects and its evaluation of economic and environmental efficiency

Zhong Sheng, Niu Shuwen^{*}, Qiu Xin, Wang Yipeng

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou 730000, China;
2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: At present, with the continuous development of Chinese agricultural industrialization and rural urbanization, the traditional household biogas has been gradually replaced by more efficient medium and large-scale biogas system. Medium and large-scale biogas system can provide biogas as stable and clean cooking energy for rural residents depending on centralized utilization of agricultural organic wastes. It has a good impact on the indoor and outdoor environment in rural areas, and is in line with the requirements of the transformation of China's rural energy structure. Further, it is a new trend for the development of rural energy in China. In this paper, the cost-benefit analysis method is used to quantify the economic and environmental benefits of these medium and large-scale biogas systems investigated by the author. Then, according to the internal rate of return (IRR) of each original system, these original systems is divided into three levels: the first level system-the better economic benefit (the IRR is greater than the discount rate 0.08), the second level system-the general economic benefit (the IRR is less than the discount rate 0.08, but more than 0), the tertiary level system-poor economic benefits (the IRR is less than 0). After considering the scale, benefits, conditions and the necessity of optimization of different levels of systems, the optimization measures are formulated to meet the needs of reality in different levels. The results show that: 1) The environmental benefit of the original system before optimization is generally good. Among them, carbon emission reduction is the most significant. In order of project scale from large to small (Baishuzhuang community, Nanan community, Tianma community, Shangzhai village, Shiyang village, Lianwang village, Yuepu village, Yezhao village, Xiaoguoyuan village), carbon emission reduction can reach 269 427.94, 230 788.18, 237 299.61, 231 344.26, 103 604.36, 81 050.29, 79 047.68, 90 434.88, 36 584.20 kg per year, respectively. 2) There are great differences in economic benefits before optimization, and the internal rates of return are as follows:-7%, -3%, -3%, 7%, 6%, 5%, 7%, 14%, 12%, which shows that the larger the scale is, the more uneconomical it is. 3) With the discount rate of 0.08 and the 0 as the stratified points, the original system is divided into three levels to optimize according to the internal rates of return of each system. 4) In the first-level system, the economic benefits of the two projects (Yezhao village and Xiaoguoyuan village) are already good. After optimization, the economic benefits decreased by 1.50% and 1.51%, respectively, but the carbon emission reduction increased by 112.88% and 134.43%, respectively. The overall optimization results are remarkable. 5) In the four projects (Shangzhai village, Shiyang village, Lianwang village, Yuepu village) of the second-level system, because the internal rate of return is more than 8%, the economic benefits are upgraded from general to good. In addition, the environmental benefit increased by 88.16%, 100.02%, 103.22%, 109.09%, respectively. The optimization effect is also remarkable. 6) In the third-level system (Baishuzhuang community, Nanan community, Tianma community), the internal rate of return of most projects becomes positive after optimization, and the economic benefits are upgraded from no to general, while the environmental benefit increases by 116.36%, 123.92% and 101.19%, respectively. The overall optimization results are good. 7) The main measure of optimization is to cut down the operating cost, but the reality is more complicated, so the local conditions should be adapted to local conditions, and the optimization measures should be chosen flexibly. 8) Those large-scale systems need to actively refer to the national biogas project construction plan and strictly control the cost when building it.

Keywords: biogas; environmental control; medium- and large-scale biogas projects; cooking energy; multi-level optimization; comprehensive benefit