

# 甘肃省大中型沼气集中供气系统 碳足迹分析及过程优化研究

仲 声

(兰州交通大学 经济管理学院, 兰州 730070)

**摘 要:** 大中型沼气集中供气系统是现阶段甘肃省农村地区重点推广的民用生物质能开发系统,它具有显著的环境正外部性,可以通过为农村居民集中供应沼气替代煤炭、秸秆等传统炊事能源,有效减少温室气体和环境污染物的排放。但调研发现,甘肃省许多试点项目并没有充分发挥这种正外部性,尤其是碳减排效应十分有限,其内在原因值得探究。文章通过调研甘肃省9个大中型沼气集中供气系统试点项目,结合生命周期清单分析梳理出各系统各环节的碳排放足迹,找出存在的问题和可优化的环节,并结合替代效益分析,提出碳足迹优化的解决方案,以期能够为大中型沼气集中供气系统碳减排效应的充分发挥提供一些参考建议。

**关键词:** 大中型沼气集中供气; 碳足迹; 环境正外部性; 农村炊事能源

**中图分类号:** F224; S216.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1166(2020)02-0052-08

**Process Optimization of Medium-and Large-scale Biogas Project Based on Carbon Footprint Analysis in Gansu Province / ZHONG Sheng / (School of Economics and Management, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)**

**Abstract:** Medium-and Large-scale biogas project (MLBP) has significant positive environmental externalities, which can effectively reduce the emission of greenhouse gases and environmental pollutants by supplying biogas for rural residents instead of coal, straw and other traditional cooking energy. However, the investigation found that many pilot projects in Gansu Province did not give full play to this positive externality, especially, the carbon emission reduction effect was very limited, and the internal reasons are worth exploring. By investigating 9 typical pilot projects of MLBP in Gansu province, this paper analyzed and sorted out the carbon emission footprints of each link of the system based on the life cycle inventory, and found out the existing problems and the links that could be optimized. Combined with the alternative benefit analysis, the solution of carbon footprint optimization was proposed so that to provide some reference and suggestions for the full play of carbon emission reduction effect of MLBP.

**Key words:** medium-and large-scale biogas projects; carbon footprint; environmental positive externality; rural cooking energy

目前,随着农业产业化水平的提升,集约化的产业化农场和畜牧场不断建设,产生了大量的农业有机废料亟待处理,这对农村生物质能的规模化集中开发创造了条件<sup>[1]</sup>。同时,中国农村地区开始大规模推进基础设施建设,对炊事能源的集中供应提出了强烈的需求,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比较优势<sup>[2]</sup>,因此沼气的应用模式发生了新的变化:大中型沼气集中供气<sup>[3]</sup>。大中型沼气集中供气系统具有显著的环境和社会正外部性,可以通过为农村居民集中供应沼气替代传统炊事能源有效减少温室气体和环境污染

物的排放<sup>[4]</sup>。但通过调研发现,甘肃省许多试点项目并没有充分发挥这种正外部性,尤其是碳减排效应十分有限,其内在原因值得探究。碳足迹的定义源自于生态足迹<sup>[5]</sup>,常被用来评价某一经济活动产生的温室气体对环境的影响程度。国外关于碳足迹的研究已经被广泛应用于环境评价领域,例如 Ching-Chih Chang<sup>[6]</sup>等人利用生命周期评价去分析台湾义竹乡生态水产农场的碳足迹分布;而 Treu H<sup>[7]</sup>等人则对德国传统食材和有机食材土地利用的碳足迹进行了全面研究。中国学者也进行了许多关于经济部门碳足迹的研究,例如王占彪<sup>[8]</sup>等人做了关于

收稿日期: 2019-11-15 修回日期: 2019-12-11

作者简介: 仲 声(1990-),男,甘肃张掖人,博士,主要研究方向为能源经济与能源政策, E-mail: wywybz@163.com

华北平原农业生产碳足迹的研究;侯彩霞<sup>[9]</sup>等人则以张掖市为例,做了不同升级方式农户的碳足迹研究。关于生物质能开发、沼气及沼气系统应用的碳足迹,也有少量学者进行了相关研究,例如 Okoko A<sup>[10]</sup>等人对肯尼亚和坦桑尼亚利用生物质能进行炊事活动的碳足迹进行了研究;王艺鹏等人则对我国1995年~2014年农作物秸秆沼气化碳足迹进行了全面分析,研究结果显示1995年~2014年秸秆沼气燃烧的碳足迹年均减少2.08亿t,较秸秆直接燃烧减排46.8%,并认为秸秆沼气化能显著减少温室气体排放量,发展潜力巨大<sup>[11]</sup>;此外,邓舟<sup>[5]</sup>等人重点关注了沼气利用技术的碳足迹分布,认为采用PSA(Pressure Swing Adsorption)沼气提纯工艺技术,不仅能极大地降低温室气体排放,还能通过能量的回收替代传统能源,具有理想的碳减排效益。

总的来看,关于碳足迹的研究虽多,但大中型集

中供气系统作为农村地区沼气发展的新趋势,相关研究较少;此外,研究内容上结合替代效益进行碳足迹分析的研究鲜有涉及。该文通过生命周期梳理出各系统各环节的碳排放足迹,找出存在问题和可优化的环节,并结合比较优势分析和替代效益分析,提出碳足迹优化的解决方案,以期能够为大中型沼气集中供气系统正外部性的充分发挥提供一些参考建议,促进农村大中型沼气项目的有效推广。

## 1 研究基础

### 1.1 资料来源

为了获取研究所需数据和资料,团队分别实地调研了甘肃省平凉市庄浪县和武威市凉州区两个地方共9个大中型沼气集中供气试点项目。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,收集到研究所需的数据和信息资料(见表1)。

表1 调研区各项目基本调研参数

地区	供气规模 户	沼气产量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ )	年产沼渣 ( $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	年处理粪便 ( $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	年耗电量 ( $\text{kWh} \cdot \text{a}^{-1}$ )	年耗煤量 t
柏树庄	1249	468375	19800	15900	92725	91
南安社区	1136	426000	18200	14600	84998	82
天马社区	815	300000	12700	10600	69543	71
上寨村	620	232500	10500	9400	56198	63
石阳村	480	180000	6820	6200	33719	45
连王村	320	120000	6000	5400	28099	37
岳堡村	360	135000	5800	5000	30908	37
野赵村	316	118500	5500	4800	26694	35
小果园村	150	56250	2600	2200	10537	14

目前这些项目都是处于试验阶段的项目,目的是进行项目推广的试验参考和过程优化。

### 1.2 基本原理与系统边界

#### 1.2.1 基本原理

大中型沼气集中供气系统的基本原理(见图1)是:集中收集畜禽粪便或者农作物秸秆作为原料,在经过预处理之后输入发酵池(罐)内进行发酵<sup>[12-13]</sup>。产生沼气之后,通过脱硫脱水等净化设备进行净化,之后输入储气罐,由储气罐通过管道将沼气输送到用户的使用设备中,供应作为农户的炊事能源。如果输送距离较远,还需要增压风机进行增压输送<sup>[12]</sup>。除此之外,在北方,特别是西北地区,为了保障全年稳定供应,还需要配置恒温设备对发酵罐进行保温<sup>[14]</sup>。而系统的发酵残留物沼渣沼液,则

经过风干压缩之后,可作为有机肥施入农田,或者进一步提纯作为商业有机肥出售,获得利润<sup>[12-13]</sup>。

#### 1.2.2 边界条件与系统组成

该文研究大中型沼气系统原始状态下的碳足迹分布及过程优化,因此研究的边界条件设定为:

- (1) 忽略大中型沼气项目建设阶段的环境影响;
- (2) 发酵原料就地取材,忽略关于存储和运输的环境影响;
- (3) 沼渣沼液就地使用,忽略关于运输的环境影响;
- (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全部出售给当地农户

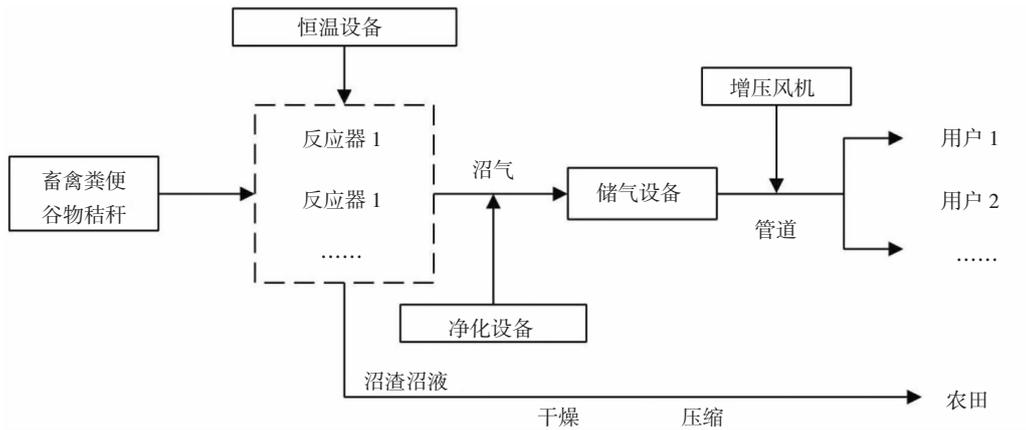


图1 大中型沼气集中供气系统原理简图

使用;

户。

(6) 沼渣沼液仅作为有机肥全部出售给当地农

基于上述条件设定系统边界如图2。

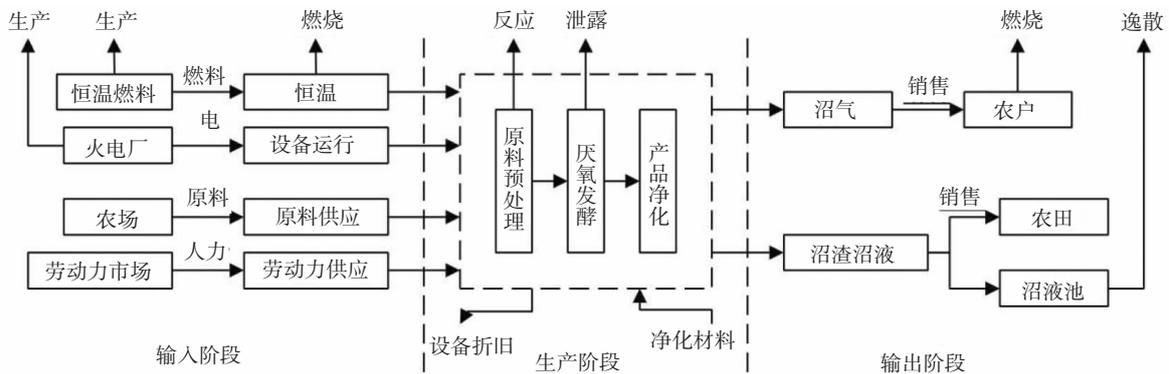


图2 大中型沼气系统的原始系统边界

大中型沼气系统的生产过程可分为3个阶段：输入阶段、生产阶段和输出阶段。输入阶段也可被称为预备发酵阶段，主要进行发酵生产之前原料、能源和劳动力的准备，这一阶段主要的碳排放源有恒温燃料全生命周期碳排放、设备用电全生命周期碳排放2处<sup>[12-13]</sup>。生产阶段即发酵阶段，主要的碳排放源有原材料预处理、发酵和沼气储存过程中的物理泄露1处。输出阶段是产品使用及废料处理阶段，这一阶段的碳排放源有沼气燃烧、沼渣沼液存贮二次反应2处<sup>[13]</sup>。

## 2 数据处理与结果分析

### 2.1 碳足迹清单分析

对大中型沼气系统3个阶段的碳足迹进行清单分析。

在此之前，首先根据联合国气候变化国家间专家委员会(IPCC)公布的参数<sup>[15]</sup>，确定研究所涉及能源的碳排放系数(见表2)：

表2 各能源的排放系数 (kg·tce<sup>-1</sup>)

项目	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
秸秆	2634.00	10.63	0.14
薪柴	2539.40	4.73	0.14
动物粪便	1584.70	7.50	0.10
煤炭	2768.00	4.08	0.04
LPG	1847.00	0.03	0.02
火电	3900.00	5.73	0.06
沼气	748.00	0.03	0.05
生物质固体成型燃料	727.71	0.00	0.50

#### (1) 输入阶段碳排放

输入阶段的碳足迹源为设备运行用电和恒温用煤全生命周期内的碳排放。

结合表1中各系统的电能消耗量和表2中火电的排放系数，核算出各系统所用电能生命周期碳排放情况如表3。

表3 各系统用电生命周期碳排放 ( $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ )

地区	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
柏树庄社区	146097.87	214.28	2.25
南安社区	133923.04	196.42	2.06
天马社区	109573.40	160.71	1.69
上寨村	88546.12	129.87	1.36
石阳村	53127.67	77.92	0.82
连王村	44273.05	64.93	0.68
岳堡村	48699.29	71.43	0.75
野赵村	42059.41	61.69	0.65
小果园村	16602.40	24.35	0.26

设备运行所用电能全生命周期碳排放以 CO<sub>2</sub> 为主, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 相对较少, 以柏树庄社区气站为例, 用电环节的碳足迹总量为每年 15.21 万 CO<sub>2</sub>-eq.。

大中型沼气集中供气系统要求全年稳定产气, 因此需要配备恒温设备, 目前各系统恒温设备的主要利用能源为煤炭, 结合表 1 中各系统的煤炭消耗量和表 2 中煤炭的排放系数, 在整个系统内煤炭生命周期的碳排放情况如下表 4:

表4 各系统恒温所用煤炭生命周期碳排放 ( $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ )

地区	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
柏树庄社区	225902.02	332.98	1.63
南安社区	205150.32	302.39	1.48
天马社区	176376.96	259.98	1.27
上寨村	156322.80	230.42	1.13
石阳村	110982.96	163.59	0.80
连王村	92174.40	135.86	0.67
岳堡村	92174.40	135.86	0.67
野赵村	87864.62	129.51	0.63
小果园村	34677.50	51.11	0.25

恒温设备所用煤炭全生命周期内 CO<sub>2</sub> 的排放量更大, 仍以柏树庄社区气站为例, 恒温环节的碳足迹总量为每年 23.47 万 CO<sub>2</sub>-eq.。

### (2) 生产阶段碳排放

由于系统存在物理泄露, 因此在生产阶段还存在多个碳排放源, 其中主要有: 原料预处理环节、厌氧发酵环节和储存环节。根据联合国气候变化框架公约(UNFCCC) 清洁发展机制(CDM) 的 AMS III. D (Methane recovery in animal manure management systems) 方法学, 系统在预处理、生产、储存及输送过程

中的物理泄露量为沼气总产量(见表 1) 的 1%<sup>[16-17]</sup>, 泄露到空气中的沼气, 其主要成分为 CH<sub>4</sub> (50% ~ 70%) 和 CO<sub>2</sub> (30% ~ 50%), 分别取 60% 和 35% (沼气气体中含有约 5% 的 NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>S), 根据 CH<sub>4</sub> (16 g·mol<sup>-1</sup>) 和 CO<sub>2</sub> (44 g·mol<sup>-1</sup>) 的分子量, 计算出 1 m<sup>3</sup> 沼气的质量约为 1.15 kg, 因此生产阶段碳排放源的排放因子和排放系数也可以以此来确定, 分别为 CO<sub>2</sub> 0.69 kg·m<sup>-3</sup> 和 CH<sub>4</sub> 0.43 kg·m<sup>-3</sup>, 据此, 核算出生产阶段的碳排放情况(见表 5)。

表5 各系统生产阶段碳排放 ( $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ )

地区	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
柏树庄社区	3399.98	—	2118.83
南安社区	3022.20	—	1883.40
天马社区	2770.35	—	1726.45
上寨村	2014.80	—	1255.60
石阳村	1259.25	—	784.75
连王村	1007.40	—	627.80
岳堡村	1007.40	—	627.80
野赵村	1007.40	—	627.80
小果园村	377.78	—	235.43

生产阶段 CH<sub>4</sub> 的排放量较大, 柏树庄社区气站能达到每年 5.30 万 CO<sub>2</sub>-eq.。

### (3) 输出阶段碳排放

输出阶段的碳排放源主要为沼气的燃烧和沼渣沼液的存贮。

各系统所产沼气年总消耗量的碳排放情况如表 6。

表6 各系统沼气燃烧环节碳排放 ( $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ )

地区	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
柏树庄社区	263163.98	10.55	17.59
南安社区	233923.54	9.38	15.64
天马社区	214429.91	8.60	14.33
上寨村	155949.02	6.25	10.42
石阳村	97468.14	3.91	6.52
连王村	77974.51	3.13	5.21
岳堡村	77974.51	3.13	5.21
野赵村	77974.51	3.13	5.21
小果园村	29240.44	1.17	1.95

单纯来看, 整个系统中沼气燃烧环节的碳足迹总量是最大的, 柏树庄社区气站碳足迹总量可达到每年 26.87 万 CO<sub>2</sub>-eq.。

沼渣沼液储存到沼液池中会产生二次反应,产生少量沼气逸散到大气中,由于沼渣沼液的单位产气量十分有限,逸散量约为沼气总产量的0.5%左右<sup>[16-17]</sup>;而沼渣沼液作为有机肥施用到农田和果园中,或者作为杀虫剂喷洒到农作物上时主要会产生富营养化和环境酸化污染物,几乎不会产生碳排放(见表7)。

表7 沼渣沼液贮存的碳排放 (kg·a<sup>-1</sup>)

地区	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
柏树庄社区	1699.99	—	1059.41
南安社区	1511.10	—	941.70
天马社区	1385.18	—	863.23
上寨村	1007.40	—	627.80
石阳村	629.63	—	392.38
连王村	503.70	—	313.90
岳堡村	503.70	—	313.90
野赵村	503.70	—	313.90
小果园村	188.89	—	117.71

沼渣沼液存贮环节CH<sub>4</sub>的排放量亦较大,柏树庄社区气站CH<sub>4</sub>能达到每年2.65万CO<sub>2</sub>-eq.的排放总量。

## 2.2 碳足迹总量及分布

### (1) 碳排放总量

各系统3个阶段的碳排放总量,公式如下:

$$E_{CHC} = \sum_{i=1}^l IP_i + \sum_{i=1}^m PP_i + \sum_{i=1}^n OP_i$$

式中, $E_{CHC}$ 为碳足迹总量; $IP_i$ 为输入环节碳排放; $PP_i$ 为生产环节*i*排放因子的排放; $OP_i$ 为输出环节*i*排放因子的排放。碳排放总量以CO<sub>2</sub>为当量,CH<sub>4</sub>,N<sub>2</sub>O对CO<sub>2</sub>的当量系数分别为25,298<sup>[18]</sup>。

表8 各系统的碳排放总量 (kg·a<sup>-1</sup>)

地区	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	碳排放总量
柏树庄社区	640263.83	21.47	3736.05	740063.36
南安社区	577530.19	19.18	3333.29	666577.90
天马社区	504535.79	17.29	3018.96	585163.32
上寨村	403840.14	12.92	2249.94	463937.66
石阳村	263467.65	8.13	1422.54	301455.29
连王村	215933.06	6.56	1145.63	246528.37
岳堡村	220359.30	6.63	1152.12	251137.20
野赵村	209409.65	6.49	1136.03	239745.55
小果园村	81087.01	2.46	429.77	92564.62

各系统碳排放以CO<sub>2</sub>为主,等当量计算,CO<sub>2</sub>排放量平均能达到系统碳排放总量的87.12%;CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量要小得多,分别仅有系统碳排放总量的12.05%和0.83%(见表8)。

### (2) 碳足迹分布

各系统运营周期的碳足迹分布状况如表9。

表9 各系统碳足迹分布状况 (kgCO<sub>2</sub>·a<sup>-1</sup>)

地区	输入阶段碳排放	生产阶段碳排放	输出阶段碳排放	碳排放总量
柏树庄社区	386837.44	56370.60	296855.32	740063.36
南安社区	352599.31	50107.20	263871.39	666577.90
天马社区	297349.61	45931.60	241882.11	585163.32
上寨村	254618.60	33404.80	175914.26	463937.66
石阳村	170630.87	20878.00	109946.41	301455.29
连王村	141868.84	16702.40	87957.13	246528.37
岳堡村	146477.67	16702.40	87957.13	251137.20
野赵村	135086.02	16702.40	87957.13	239745.55
小果园村	53317.29	6263.40	32983.92	92564.62

系统碳足迹分布量最大的是输入阶段,平均占总量的55.25%,主要来源于系统能源材料的输入;其次是输出阶段,平均占总量的37.61%,主要来源于沼气的燃烧;分布量最小的是生产阶段,平均仅占总量的7.14%,来源于系统在预处理、生产、储存及输送过程中的物理泄露量。

## 2.3 碳足迹替代效应分析

目前,甘肃省农村地区主要的炊事能源仍以煤炭和秸秆为主,此外还有部分薪柴、电能、LPG和沼气。以供应800户的天马社区气站为样本进行比较优势分析。天马社区气站800户居民年总耗气量为401500 m<sup>3</sup>,等热值折算标煤量为286 tce,根据折标量,结合各能源的碳排放系数(见表2),可计算出等热值条件下各能源结构的碳排放情况(见表10)。

表10 等热值条件下各炊事能源结构的碳排放比较

项目	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	碳排放总量
	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kgCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )
秸秆	753324.00	3040.18	40.04	841260.42
薪柴	726268.40	1352.78	40.04	772019.82
煤炭	791648.00	1166.88	11.44	824229.12
电能	1115400.00	1635.92	17.16	1161411.68
LPG	528242.00	9.15	5.15	530004.90
沼气	504535.79	3018.96	17.29	585163.32

可以看出,在各种炊事能源结构中,碳排放总量仅略高于 LPG,远低于其他各种炊事能源,且 LPG 在其全生命周期内的实际碳排放要远高于沼气,因此沼气具有碳足迹比较优势。

来源于大中型沼气集中供气系统的沼气炊事能源结构,实际上是替代了以秸秆薪柴和煤炭为主的传统炊事能源结构,因此理论上它应该产生十分显

著的碳减排替代效应。笔者团队于 2006 年对甘肃农村炊事能源消费结构进行了调研,以此确定甘肃省农村传统炊事能源的类型和比重。假设调研中各项目服务范围内的农户使用传统的用能结构,基于传统炊事能源结构比重,按照调研中的各气站供应的农村家庭总户数,得出范围内一年炊事活动所用的各种能源的用量(见表 11)。

表 11 传统炊事能源结构

地区	项目	秸秆	薪柴	电能	煤炭	液化石油气	沼气	太阳能	合计
庄浪	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	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	比例/%	44.19	3.76	3.52	35.97	1.11	6.43	5.05	100.00

结合比重和用量,计算出传统炊事能源结构下的碳足迹总量,并与来源于大中型集中供气系统的沼气替代结构进行对比(见表 12)。

表 12 沼气结构下的替代效益

项目	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	碳排放总量
	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kgCO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )
传统能源结构	713204.17	2097.20	25.29	773169.09
沼气替代结构	504535.79	3018.96	17.29	585163.32
减排量	208668.37	-921.76	7.99	188005.77

可以看出实际上大中型沼气替代结构相比传统能源结构的碳减排优势并不十分显著,碳足迹总量仅下降了 24.32%。分排放因子来看,CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 总体分别减排 29.26% 和 31.59%,而 CH<sub>4</sub> 则负减排,可见还有很大地优化空间。

#### 2.4 碳足迹过程优化分析

上述研究可知,现实情况下的沼气替代结构相比传统能源结构的碳减排优势并不十分显著,因此可以通过对部分碳排放源进行控制和处理来进行大中型沼气系统碳排放源的过程优化。

##### 2.4.1 确定优化点

由图 2 可知大中型沼气系统的碳排放源共有 5 处,分别为:输入阶段恒温燃料的全生命周期、设备用电的全生命周期 2 处;生产阶段原材料预处理、发酵和沼气储存过程中的物理泄露 1 处;输出阶段沼气燃烧、沼渣沼液存贮二次反应逸散 2 处。其中,设备运行所用电能要求较高,必须来自于稳定的电网供电,而电网电的来源相对固定,且短时期内不会发生太大变化,基本没有可优化的空间。此外,沼气燃

烧环节的碳减排也相对固定,没有优化空间。因此,可以进行优化的碳排放源仅有 3 处,分别为:

- (1) 输入阶段恒温燃料;
- (2) 生产阶段的物理泄露;
- (3) 输出阶段的沼渣沼液存贮。

##### 2.4.2 优化方案制定

根据各阶段不同的可优化碳排放源,制定优化方案。

###### 2.4.2.1 输入阶段恒温燃料替换为清洁能源

目前,系统碳足迹分布量最大的是输入阶段,因此该阶段需要首先优化,而优化的关键在于输入能源清洁化。具体方案是将系统恒温环节的燃料选择替换为更为清洁的燃料,例如自产沼气、生物质固体成型燃料等,特别是生物质固体成型燃料,具有价格较低、便于存储、环境友好等诸多优势,完全可以实现对煤炭恒温的替代,减少恒温环节的碳排放。此方案设定将恒温燃料替换为生物质固体成型燃料。

###### 2.4.2.2 生产阶段减少物理泄露

生产阶段的碳排放情况相对较好,只存在于少量的物理泄露和逸散过程,但这仅限于理想状态高精度成熟发酵系统的前提下,例如全封闭发酵罐和储气罐系统。而目前有很多系统的发酵过程在不封闭或半封闭的发酵池内进行,这不可避免会造成相当量的物理泄露和逸散,产生不良影响。因此从这个角度来说,建议大中型沼气系统在条件允许的情况下,尽量选择技术水准较高的发酵工艺和发酵设备,即尽量使用全封闭的发酵和储气设备,最大程度降低生产阶段的碳排放。此方案设定在进行技

术和设备更新升级之后,物理泄露量减少到 0.5%。

#### 2.4.2.3 输出阶段提升沼渣沼液的处理效率

输出阶段的碳排放总量仅次于输入环节,主要的碳排放源是沼气燃烧环节,而沼气燃烧环节的碳排放相对固定,几乎没有可优化的空间。因此,这一阶段只能通过解决沼渣沼液储存中产生二次反应的问题即可在此阶段进行最大程度的碳足迹优化。具体措施除技术层面的更新升级外,最重要的还是做好管理维护,及时处理发酵残渣;同时为沼渣沼液找好销售和使用的渠道,避免长时间存贮甚至随意弃置,降低系统二次污染带来的碳排放。此方案设定提升沼渣沼液处理效率之后,逸散量下降到 0.1%。

#### 2.4.3 优化结果分析

##### 2.4.3.1 系统碳排放情况

按照优化方案,计算优化后大中型沼气系统的碳排放情况如表 13。

表 13 优化后各系统的碳排放情况

地区	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	碳排放总量
	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	
柏树庄社区	470692.04	60.92	1496.13	526249.01
南安社区	423594.43	55.00	1335.84	473381.46
天马社区	372035.46	48.09	1205.18	416496.68
上寨村	286801.68	40.21	889.48	321022.43
石阳村	180529.06	27.51	552.68	202545.43
连王村	147084.88	22.66	444.74	164954.64
岳堡村	151511.12	22.72	451.23	169563.46
野赵村	143738.19	21.84	441.49	161283.08
小果园村	55186.31	8.52	166.78	61893.54

可以看出,优化后各系统 N<sub>2</sub>O 排放略有上升,而 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放量明显减少,平均下降幅度分别达 29.59% 和 60.66%,碳排放总量则平均下降了 31.31%。

##### 2.4.3.2 碳足迹替代效应

以天马社区气站为例,优化后来源于大中型集中供气系统的沼气结构与传统能源结构进行对比,结果如表 14。

表 14 优化后的碳足迹替代效益

项目	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	碳排放总量
	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	(kg·a <sup>-1</sup> )	
传统能源结构	713204.17	2097.20	25.29	773169.09
优化后的沼气结构	372035.46	1205.18	48.09	416496.68
减排量	341168.70	892.02	-22.81	341168.70

可见,优化后系统的碳足迹替代效应更加显著,CO<sub>2</sub> 的减排程度从 29.26% 上升到 47.84%;CH<sub>4</sub> 则更是从负减排,上升到减排 42.53%;而 N<sub>2</sub>O 则出现了负减排,但由于 N<sub>2</sub>O 的总排放量较小,因此对最终碳排放总量的影响很小。等当量计算,优化后系统的碳足迹替代效应从原始系统的 24.32%,上升到 44.13%。

### 3 结论

基于上述分析和讨论,将结论总结如下:

(1) 各系统碳排放以 CO<sub>2</sub> 为主,等当量计算,CO<sub>2</sub> 排放量平均能达到系统碳排放总量的 87.12%;CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量要小得多,分别仅有系统碳排放总量的 12.05% 和 0.83%。

(2) 系统碳足迹分布量最大的是输入阶段,平均占总量的 55.25%,主要来源于系统运行所耗的非清洁能源;其次是输出阶段,平均占总量的 37.61%,主要来源于沼气的燃烧;分布量最小的是生产阶段,平均仅占总量的 7.14%,来源于系统在预处理、生产、储存及输送过程中的物理泄露。

(3) 沼气在碳排放上具有比较优势,来源于大中型集中供气系统的沼气炊事能源结构,实际上是替代了以秸秆薪柴和煤炭为主的传统炊事能源结构,沼气替代结构相比传统能源结构有更为显著的碳减排优势,但在原始系统下,这种优势没有被完全凸显,碳足迹总量仅下降了 24.32%,需要进行过程优化。

(4) 研究从输入阶段恒温燃料替换为清洁能源,生产阶段减少物理泄露,输出阶段提升沼渣沼液的处理效率 3 个方面制定优化方案。优化后各系统 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放量明显减少,平均下降幅度分别达 29.59% 和 60.66%,碳排放总量则平均下降了 31.31%。碳足迹替代效应也从 24.32% 上升到 44.13%。

### 参考文献:

- [1] Bond T, Templeton M R. History and future of domestic biogas plants in the developing world [J]. *Energy for Sustainable Development* 2011, 15(4): 347-354.
- [2] 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.
- [3] He G Z, Bluemling B, Mol A P J, et al. Comparing cen-

- tralized and decentralized bio-energy systems in rural China. [J]. *Energy Policy*, 2013, 63(6): 34 - 43.
- [4] 李金平, 吴文君, 张涵, 等. 基于生命周期分析的禽畜养殖场沼气工程性能评价 [J]. *中国沼气*, 2018, 36(05): 93 - 99.
- [5] 邓舟, 耿欣, 张丽颖, 等. 沼气利用方式的碳足迹分析 [J]. *环境卫生工程*, 2010, 18(05): 23 - 26.
- [6] Ching-Chih Chang, Kuei-Chao Chang, Wen-Chun Lin, et al. Carbon footprint analysis in the aquaculture industry: Assessment of an ecological shrimp farm [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, ISSN 0959 - 6526.
- [7] Treu H, Nordborg M, Cederberg C, et al. Carbon footprints and land use of conventional and organic diets in Germany [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 127 - 142.
- [8] 王占彪, 王猛, 陈阜. 华北平原作物生产碳足迹分析 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(01): 83 - 92.
- [9] 侯彩霞, 赵雪雁, 文岩, 等. 不同生计方式农户的碳足迹研究——以黑河流域中游张掖市为例 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(04): 587 - 597.
- [10] Okoko A, Reinhard J, Dach S W V, et al. The carbon footprints of alternative value chains for biomass energy for cooking in Kenya and Tanzania [J]. *Sustainable Energy Technologies & Assessments*, 2017.
- [11] 王艺鹏, 杨晓琳, 谢光辉, 等. 1995 ~ 2014 年中国农作物秸秆沼气化碳足迹分析 [J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(05): 1 - 14.
- [12] 赵立欣, 董保成, 田宜水. 大中型沼气工程技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [13] 唐艳芬, 王宇欣. 大中型沼气工程设计与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [14] 刘洋. 生物质加热系统在生态校园沼气工程中的应用研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [15] 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, 02: 301 - 307.
- [16] 阚士亮, 张培栋, 孙荃, 等. 大中型沼气工程生命周期能效评价 [J]. *可再生能源*, 2015, 06: 908 - 914.
- [17] 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.
- [18] Bond T, Templeton M R. History and future of domestic biogas plants in the developing world [J]. *Energy for Sustainable Development*, 2011, 15(4): 347 - 354.