

大型秸秆沼气集中供气工程温室气体减排估算

王磊, 高春雨^{*}, 毕于运, 王亚静, 王红彦, 孙宁, 余婧婧

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 发展秸秆沼气工程可有效地减少农业温室气体排放, 科学核算温室气体减排量为管理和监督温室气体排放状况提供数据支撑。该文以河北省沧州市耿官屯大型秸秆沼气集中供气工程为研究对象, 参考和借鉴了自愿减排项目方法学、CDM方法学, 构建了大型秸秆沼气集中供气工程温室气体减排计量方法, 包括项目边界、基准线排放量、项目排放量、泄漏量、减排量5个方面, 计算了2014年耿官屯大型秸秆沼气集中供气工程温室气体减排量。研究结果表明: 项目基准线排放量包括秸秆处理产生的温室气体排放、未建秸秆沼气工程情况下农村居民生活用能及农田施用化肥生产耗能产生的温室气体排放。项目排放量包括秸秆与沼肥运输过程耗能排放、工程运行过程耗能排放及沼气处理温室气体排放, 项目泄漏量即沼气生产、储存、管网供气和利用过程中产生的因物理泄漏所造成的排放。2014年耿官屯大型秸秆沼气集中供气工程基准线CO₂排放量为5 776.15 t, 项目排放量为57.53 t, 泄漏量为136.59 t, 减排量为5 582.03 t, 约相当于2 100 t标准煤CO₂排放量, 每消耗1 t(干质量)秸秆可净减排3.56 t, 每利用1 m³沼气可净减排11.50 kg。同时, 在工程设计、管道设计、工程管理、工艺技术改良升级等方面提出了提升大型秸秆沼气工程温室气体减排能力的策略。

关键词: 温室气体; 排放控制; 秸秆; 沼气集中供气工程

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.031

中图分类号: S216.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-14-0223-06

王磊, 高春雨, 毕于运, 王亚静, 王红彦, 孙宁, 余婧婧. 大型秸秆沼气集中供气工程温室气体减排估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 223-228. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.031 http://www.tcsae.org

Wang Lei, Gao Chunyu, Bi Yuyun, Wang Yajing, Wang Hongyan, Sun Ning, Yu Jingjing. Greenhouse gas emission mitigation calculation of large scale straw biogas centralized supply project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 223-228. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.031 http://www.tcsae.org

0 引言

当前中国秸秆随意丢弃和浪费乃至焚烧现象仍较为突出, 秸秆焚烧会产生大量氮氧化物、二氧化硫、碳氢化合物及烟尘, 是农田生态系统重要的温室气体排放源。大型秸秆沼气工程以秸秆作为主要厌氧发酵原料, 利用生物发酵技术, 生产的沼气可以作为农村生活清洁能源用于炊事, 减少了农田废弃秸秆无控焚烧CO₂排放、农村生活燃煤CO₂排放、沼渣沼液可替代化肥减少CO₂排放。中国规模化秸秆沼气集中供气工程由2006年年初的17座到2014年年末的458座, 9 a间数量翻了25倍多^[1], 推广了完全混合式厌氧发酵器、竖向推流式厌氧反应器、序批式固态厌氧反应器等多项工艺^[2], 成为农村节能减排的重要措施之一^[3]。

目前关于沼气工程温室气体排放量核算主要围绕户用沼气工程^[4-8]、养殖场畜禽粪便沼气工程^[9-14]及以畜禽粪

便为主要原料的规模化沼气工程^[15-17]开展。专门针对秸秆沼气工程温室气体减排开展研究的文献, 仅有白洁瑞等^[18]以金坛市直溪镇汀湘村秸秆沼气集中供气工程为案例, 计算了猪粪的温室气体排放、农作物秸秆无控焚烧时温室气体排放与工程产生的沼气替代煤炭使用产生的排放。但事实上, 秸秆沼气的减排量计算要扣除由工程运行和工程带来的泄漏量, 此外, 沼肥替代化肥将减少化肥生产中CO₂排放也应计算在内。

本研究以位于河北省沧州市青县耿官屯的大型秸秆沼气集中供气工程为例, 选取2014年1月1日到2014年12月31日为一个监测期, 对该工程2014年温室气体减排量进行了案例分析, 分别计算了基准线排放量、工程排放量与泄漏量, 在此基础上得出了该工程温室气体减排量。

1 耿官屯秸秆沼气集中供气工程概况

耿官屯秸秆沼气集中供气工程, 占地面积0.53 hm², 总投资约700万元, 共建有发酵罐3个、储气罐8个, 发酵池容共计1 650 m³, 日产气量为1 330 m³, 供气户数1 900户。工程年消耗青贮玉米秸秆3 924 t(含水率60%左右), 年产沼渣2 731.84 t(固液分离后的沼渣, 含水率60%, 下同), 干物质质量1 092.74 t, 沼液全部回流。工程配备有完整的发酵原料的预处理(收集、除砂、粉碎、调节、计量等)系统, 进出料系统, 回流、搅拌系

收稿日期: 2017-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(31200337, 41301626); 河北省社会科学基金项目(HB14YJ031)

作者简介: 王磊, 男, 主要从事农村生物质能源开发与利用研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。

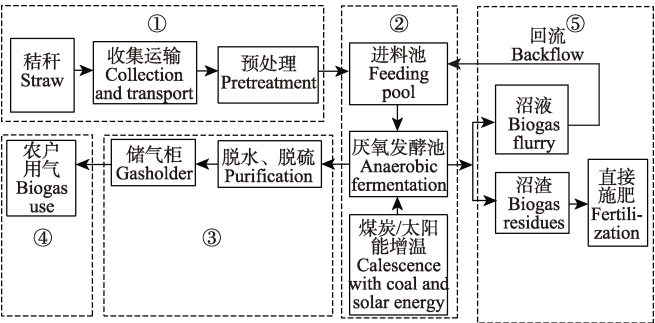
Email: 15311292662@163.com

^{*}通信作者: 高春雨, 男, 博士, 副研究员, 主要从事生态农业与农业碳交易研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。

Email: gaochunyu@caas.cn.

统,沼气的净化、储存、输配和利用系统,计量系统,安全保护系统,沼渣、沼液后处理系统。

耿官屯秸秆沼气集中供气工程以玉米秸秆为主要发酵原料,采取中温高浓度发酵工艺,使用秸秆粉碎机将除砂后的秸秆粉碎成 8 mm 左右粗粉状,将秸秆同畜禽粪便、秸秆发酵剂等辅料按照一定比例混合均匀,调节 pH 值(6.8~7.5),调节 C/N,加一定量的热水,以搅拌机、泵为动力,将发酵混合原料打入沼气发酵罐,顶部进料底部出料,在 30~55℃的环境下进行发酵,进料时同时把流出的沼液回流到反应装置。发酵装置采用聚氨酯发泡保温,保温效果好。同时,该工程采用热水锅炉与太阳能热水器联合增温,太阳能集热器真空管数量为 570 根($\phi 58$ mm,长度 1 800 mm),热水锅炉主要用于冬季增温,运行期为 2 个月。具体工艺技术方案流程如图 1 所示:



①秸秆收集与处理子系统 ②厌氧发酵子系统 ③净化贮存子系统 ④管网供气子系统 ⑤沼液利用子系统
①Straw collection and treatment subsystem ②Anaerobic fermentation subsystem ③Purification storage subsystem ④Pipe network gas supply subsystem ⑤Biogas utilization subsystem

图 1 秸秆沼气集中供气工程工艺流程图

Fig.1 Process of straw biogas project for central gas supply

2 秸秆沼气集中供气工程温室气体减排量计算方法

本研究在构建大型秸秆沼气集中供气工程温室气体减排量计量方法学过程中,主要参考和借鉴了国家发改委办公厅备案的自愿减排项目方法学、《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)有关清洁发展机制(CDM)下的方法学、工具、方式和程序和政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)《国家温室气体清单编制指南》,结合中国大型秸秆沼气工程的发展现状,力求计量方法科学、可操作,贴近生产实际。

2.1 项目边界确定

大型秸秆沼气工程项目边界主要包括:大型秸秆沼气工程、沼气燃烧/焚烧或者有偿使用、项目活动不存在时秸秆废弃物弃置/无控焚烧的地点;秸秆运输、沼渣沼液运输过程;工程电力消耗、化石燃料消耗、燃油消耗以及产生热能的设施;该地区所施肥料生产企业的生产过程,详见表 1。需要说明的是,本研究在确定项目边界内排放源及排放气体时,参考政府间气候变化专门委员会《国家温室气体清单编制指南》(IPCC 2006)简化、方便原则,主要考虑的是对项目影响比较明显、数据可获得可测算的排放源。所以,在基准线情景下,CH₄

是主要排放气体,在项目活动情景中(除泄露外),CO₂是主要排放气体。

表 1 项目边界内的排放源和排放气体
Table 1 Emission sources and gases included within project boundary

情景 Scenes	排放源 Source of emissions	气体 Gases	计入/排除 Included/ excluded	解释说明 Explanation
基准线 Baseline	废弃秸秆无控燃烧 或腐烂	CO ₂	排除	秸秆废弃物的 CO ₂ 排 放不会导致 LULUCF ^① 碳库的变化
		CH ₄	计入	主要排放源
		N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大
	农户炊事用能	CO ₂	计入	主要排放源
		CH ₄	排除	基准线和项目排放差 别不大
		N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大
	化肥生产	CO ₂	计入	主要排放源
		CH ₄	排除	不排放
		N ₂ O	排除	不排放
	项目 Project	废弃秸秆的运输	CO ₂	计入
CH ₄			排除	基准线和项目排放差 别不大
N ₂ O			排除	基准线和项目排放差 别不大
秸秆在项目现场堆 放存储		CO ₂	排除	秸秆废弃物的 CO ₂ 排 放不会导致 LULUCF ^① 碳库的变化
		CH ₄	排除	储存时间不超过 1 年该 排放源非常小
		N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大
工程运行化石 燃料消耗		CO ₂	计入	主要排放源
		CH ₄	排除	基准线和项目排放差 别不大
		N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大
工程运行电力消耗		CO ₂	计入	主要排放源
		CH ₄	排除	基准线和项目排放差 别不大
		N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大
沼气管网供应过程 中产生的逃逸		CO ₂	排除	基准线和项目排放差 别不大
		CH ₄	计入	在泄漏部分中考虑
		N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大
沼渣沼液运输到田 地的排放		CO ₂	计入	主要排放源
		CH ₄	排除	基准线和项目排放差 别不大
		N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大
未使用沼气火炬燃 烧产生的排放	CO ₂	计入	主要排放源	
	CH ₄	排除	沼气中甲烷被消耗	
	N ₂ O	排除	基准线和项目排放差 别不大	

注: ① LULUCF, 英文全称: Land use, land use change and forestry, 即土地利用、土地利用变化及森林。根据《LULUCF 项目计量指南》, 植物在生长过程发挥碳汇作用, 故其在自然腐败过程中释放的碳不会对碳库总量造成影响, 可以不计入。
Note: ① LULUCF is land use, land use change and forest. According to the "LULUCF Project Metrics Guide", plants play a carbon sequestration role in the growth process, so the carbon released during natural corruption will not affect the total amount of carbon stocks.

2.2 基准线排放量计算方法

基准线是合理地代表一种在没有拟议项目活动时会出现的温室气体源人为排放量的情况^[19], 本文中基准线排放指的是不存在大型秸秆沼气工程的情景下, 与沼气工程对应的活动所产生的温室气体排放量, 主要包括秸秆处理产生的温室气体排放、未建秸秆沼气工程情况下农村居民生活用能及农田施用化肥生产耗能产生的温室气体排放。

大型秸秆沼气工程温室气体基准线排放量计算公式为

$$BE_y = BE_{SU,y} + BE_{HE,y} + BE_{FP,y} \quad (1)$$

式中 BE_y 为第 y 年基准线排放量, t; $BE_{SU,y}$ 为第 y 年秸秆处理的基准线排放量, t; $BE_{HE,y}$ 为第 y 年农村居民生活用能所产生的温室气体排放量, t; $BE_{FP,y}$ 为第 y 年农田施用化肥生产耗能产生的温室气体排放量, t。

1) 秸秆废弃物无控焚烧的基准线排放量

农作物秸秆无控焚烧的基准线排放量为秸秆废弃物数量、净热值和合适的排放因子的乘积^[20], 计算如下

$$BE_{SU,y} = GWP_{CH_4} \cdot \sum_n BR_{n,B1/B3,y} \cdot NCV_{n,y} \cdot EF_{BR,n,y} \quad (2)$$

式中 $BE_{SU,y}$ 为第 y 年秸秆废弃物无控焚烧的基准线排放量, t; GWP_{CH_4} 为甲烷的全球温升潜势值, t/t; $BR_{n,B1/B3,y}$ 为第 y 年秸秆沼气工程活动所对应的基准线情景 B1 或 B3 的类别 n 的秸秆废弃物的数量, t (以干基计), 即为第 y 年大型秸秆沼气工程利用的废弃秸秆数量; $NCV_{n,y}$ 为第 y 年类别 n 的秸秆废弃物的净热值, GJ/t (以干基计); $EF_{BR,n,y}$ 为第 y 年类别 n 的秸秆废弃物无控燃烧的甲烷排放因子, t/GJ。

2) 农村居民生活用能所产生的温室气体排放

通过计算第 y 年大型秸秆沼气工程为农户提供的净热量等值时所消耗的化石燃料的数量来计算该基准线下温室气体排放量^[21], 计算如下

$$BE_{HE,y} = BE_{thermal,CO_2,y} = \frac{EG_{thermal,y}}{\eta_{BL,thermal}} \cdot EF_{FF,CO_2} \cdot N \quad (3)$$

式中 $BE_{thermal,CO_2,y}$ 为第 y 年沼气工程供能所对应的基准线排放量, t; $EG_{thermal,y}$ 为第 y 年单个农户使用来自沼气工程供气产生的净热量, GJ; $\eta_{BL,thermal}$ 为基准线炉灶的效率, %; EF_{FF,CO_2} 为基准线情景农户所用化石燃料的 CO_2 排放因子, t/GJ; N 为秸秆沼气工程供气户数。

第 y 年单个农户使用来自沼气工程供气产生的净热量为户用沼气灶第 y 年内燃烧沼气释放的热量, 计算如下

$$EG_{thermal,y} = KW_{thermal} \cdot H_{stove} \cdot DI \times 3.6 \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中 $KW_{thermal}$ 为户用沼气灶的额定功率, kW; H_{stove} 为第 y 年户用沼气灶的平均使用时间, h; DI 为户用沼气灶的热效率, %。

3) 化肥生产耗能产生的温室气体排放

化肥的生产需要消耗煤炭、天然气、石油、电力等化石能源^[22]。用沼肥替代化肥, 降低了氮肥、磷肥、钾肥、复合肥等施用量, 减少了化肥生产环节产生的温室气体排放^[23]。化肥生产过程耗能温室气体排放的计算公式如下^[24]

$$BE_{fertilizer,y} = \sum_{d=1}^n FN_d EF_{N,CO_2} + FP_d EF_{P,CO_2} + FK_d EF_{K,CO_2} \quad (5)$$

式中 $BE_{fertilizer,y}$ 为沼肥所替代的化肥在生产过程中生产耗能温室气体排放量, t; FN_d 为沼渣中氮肥的含量, t; FP_d 为沼渣中磷肥的含量, t; FK_d 为沼渣中钾肥的含量, t; EF_{N,CO_2} 为氮肥生产的排放系数, t/GJ; EF_{P,CO_2} 为磷肥生产的排放系数, t/GJ; EF_{K,CO_2} 为钾肥生产的排放系数, t/GJ。

2.3 项目排放量计算方法

项目温室气体排放源主要存在于秸秆与沼肥运输过程耗能排放、工程运行过程耗能排放及沼气处理温室气体排放, 其计算公式为:

$$PE_y = PE_{TR,y} + PE_{fossil,y} + PE_{electric,y} + PE_{flare,y} \quad (6)$$

式中 PE_y 为第 y 年项目排放量, t; $PE_{fossil,y}$ 为第 y 年工程运行化石燃料消耗产生的排放, t; $PE_{electric,y}$ 为第 y 年工程运行所耗电网电量产生的排放, t; $PE_{flare,y}$ 为第 y 年沼气和火炬焚烧排放量 t; $PE_{TR,y}$ 为第 y 年内工程运输活动的排放, t/a。

1) 工程运输活动的排放量计算方法

有 2 个工程运输活动的排放量计算方法供选择^[25]。

选项 1: 基于距离和车辆类型计算排放

$$PE_{TR,y} = N_{AW,y} \cdot AVD_{AW,y} \cdot EF_{km,CO_2,y} \quad (7)$$

或

$$PE_{TR,y} = \sum_k BF_{PJ,K,y} / TL_{AW,y} \cdot AVD_{AW,y} \cdot EF_{km,CO_2,y} \quad (8)$$

式中 $PE_{TR,y}$ 为第 y 年内工程运输活动的排放, t/a; $N_{AW,y}$ 为第 y 年运输活动的往返次数; $AVD_{AW,y}$ 为第 y 年运输活动平均往返距离, km; $EF_{km,CO_2,y}$ 为第 y 年货车平均 CO_2 排放因子, t/km; $BF_{PJ,K,y}$ 为第 y 年运输活动运输物品的总质量, t; $TL_{AW,y}$ 为所用货车的平均载荷, t。

选项 2: 基于燃料消耗计算排放

$$PE_{TR,y} = \sum_f FC_{TR,i,y} \cdot NCV_i \cdot EF_{CO_2,FF,i} \quad (9)$$

式中 $FC_{TR,i,y}$ 为第 y 年货车运输活动的燃料消耗, t; NCV_i 为燃料的净热值, GJ/t; $EF_{CO_2,FF,i}$ 为化石燃料的 CO_2 排放因子, t/GJ。

2) 工程运行化石燃料消耗排放量计算方法

第 y 年工程现场所消耗化石燃料的排放量为工程在第 y 年内所消耗的化石燃料数量与该种类型化石燃料净热值以及其 CO_2 排放因子的乘积^[26], 计算如下

$$PE_{fossil,y} = \sum_m FF_{m,y} \cdot NCV_m \cdot EF_{CO_2,m,y} \quad (10)$$

式中 $PE_{fossil,y}$ 为第 y 年工程运行化石燃料消耗产生的排放, t; $FF_{m,y}$ 为工程运行消耗的 m 种类型化石燃料的数量, t/a; NCV_m 为第 m 种类型化石燃料的净热值, GJ/t (以干基计); $EF_{CO_2,m,y}$ 为第 m 种类型化石燃料的 CO_2 排放因子, t/GJ。

3) 工程运行电力消耗排放量计算方法

第 y 年工程电力消耗排放量为秸秆沼气工程在第 y 年内所消耗的来自于国家电网电力与该沼气工程所在区域电网的 CO_2 排放因子的乘积^[27], 计算如下

$$PE_{electric,y} = \sum_e EF_{e,y} \cdot EF_e \quad (11)$$

式中 $PE_{electric,y}$ 为第 y 年工程运行所耗电网电量产生的排放, t; EF_e 为工程运行消耗的电能量, MWh/a; $EF_{e,y}$ 为第 y 年区域电网的 CO_2 排放因子, t/MWh。

4) 沼气火炬燃烧排放量计算方法^[28]

$$PE_{flare,y} = BG_{burnt,y} \cdot W_{CH_4,y} \cdot D_{CH_4} \cdot FE \cdot GWP_{CH_4} \quad (12)$$

式中 $PE_{flare,y}$ 为第 y 年沼气火炬燃烧排放量, t; $BG_{burnt,y}$ 为第 y 年通过火炬燃烧的沼气, m^3 。

2.4 泄漏量计算方法

泄漏定义为项目边界之外出现的并且是可测量的和可归因于清洁发展机制项目活动的温室气体 (GHG) 源人为排放量的净变化^[29]。本研究将沼气生产、储存、管网供气和利用过程中产生的因物理泄漏所造成的排放考虑为泄漏, 计算方法如下^[30]

$$LE_y = BG_{LEAK,y} \cdot W_{CH_4,y} \cdot D_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} \quad (13)$$

式中 LE_y 为第 y 年项目泄漏排放量, t; $BG_{LEAK,y}$ 为第 y 年沼气的泄漏量, m^3 ; $W_{CH_4,y}$ 为第 y 年沼气中甲烷的含量, %; D_{CH_4} 为第 y 年在沼气的温度和压力条件下甲烷的密度, t/ m^3 ; GWP_{CH_4} 为甲烷的全球温升潜势值, t/t。

2.5 减排量计算方法

大型秸秆沼气工程温室气体减排量等于基准线排放量减去工程温室气体排放量和泄漏量如式 (14)。

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (14)$$

式中 ER_y 为第 y 年大型秸秆沼气工程温室气体减排量, t; BE_y 为第 y 年基准线排放量, t; PE_y 为第 y 年项目排放量, t; LE_y 为第 y 年项目泄漏排放量, t。

2.6 数据获取

计算过程中所需数据主要通过文献查阅、实验室测定和实地调研 3 种途径获取。其中需要查阅文献获取的数据主要包括甲烷的全球温升潜势值、秸秆废弃物的净热值、燃料的净热值、甲烷排放因子、 CO_2 排放因子、钾肥生产的排放系数、氮肥生产的排放系数、磷肥生产的排放系数等; 需要实验室测定的数据主要包括沼气中甲烷的含量、密度, 沼渣中氮肥、磷肥、钾肥的含量; 需要实地调研获取的数据包括农作物秸秆使用量、工程运行过程中能源消耗量、农户炊事用能情况、工程泄漏量。调研方式主要包括对工程负责人的访问、对大型秸秆沼气工程连续周期的监测、对气体流量表的读取、对周边农户的访问等。

3 计算结果与分析

3.1 耿官屯秸秆沼气集中供气工程基准线排放量

根据式 (1) 计算, 2014 年耿官屯秸秆沼气集中供气工程基准线 CO_2 排放量为 5 776.15 t, 其中: 秸秆无控焚烧 CO_2 排放量为 889.66 t, 占 15.40%; 农户炊事用能产生的 CO_2 排放量为 4 769.32 t, 占 82.57%; 沼渣沼液替代的化肥生产产生的 CO_2 排放量为 117.17 t, 占 2.03% (表 2)。

3.2 耿官屯秸秆沼气集中供气工程项目排放量

耿官屯秸秆沼气集中供气工程日产沼气 1 330 m^3 , 年产沼气 48.54 万 m^3 , 供 1 900 农户家庭炊事燃用, 多余的沼气由 8 个储气罐储存。在监测期内未发现有多余沼气火炬燃烧现象, 故 2014 年沼气火炬燃烧排放量为 0。

表 2 2014 年耿官屯秸秆沼气工程温室气体排放情况

Table 2 Greenhouse gas emission of Gengguan village straw biogas project in 2014

情景 Scenes	排放源 Source of emissions	排放数量 Quantity of emissions/t	排放总量 Total emissions/t
基准线 Baseline	废弃秸秆无控燃烧或腐烂	889.66	5 776.15
	农户炊事用能	4769.32	
	化肥生产	117.17	
工程运行 Project operation	工程运输活动	4.89	57.53
	工程运行化石燃料消耗	9.14	
	工程运行电力消耗	43.50	
	沼气火炬燃烧	0	
工程泄露 Project emission	沼气生产、储存、管网供气和利用过程中产生的物理泄漏	136.59	136.59

根据式 (6), 2014 年耿官屯秸秆沼气集中供气工程项目排放量为 57.53 t, 其中: 工程运输活动产生的温室气体排放量为 4.89 t, 占 8.50%; 工程运行化石燃料消耗的温室气体排放量为 9.14 t, 占 15.89%; 工程运行电力消耗产生的温室气体排放量为 43.50 t, 占 75.61%。

3.3 耿官屯秸秆沼气集中供气工程泄漏排放量

秸秆沼气集中供气工程沼气泄漏环节主要包括沼渣沼液出料池、储气袋、净化设备、压缩机、压力表、法兰、开关等。按照耿官屯秸秆沼气集中供气工程多年的供气记录, 沼气工程仪表记录的产气量与根据沼气用户仪表记录汇总的用气量之间的差额, 最高年份为 5.7% (2010 年), 最低年份为 2.1% (2012 年), 平均为 3% 左右。本研究在不考虑仪表计量误差的情况下, 将产气量与用气量之间的误差作为沼气泄漏量看待, 取值为 3%。

根据式 (13) 计算, 2014 年耿官屯秸秆沼气集中供气工程泄漏导致的温室气体排放量为 136.59 t。

为减少大型秸秆沼气集中供气工程运行及泄漏排放量, 应将秸秆沼气工程布局在农户居住较集中地区, 优先选用耐腐蚀、抗压好、环境适宜性强的材料, 改法兰连接、螺纹连接为焊接, 加强日常巡检、维护和管理, 加强秸秆预处理 (粉碎) 工艺技术改良升级, 推广应用太阳能增温、生物质炉加温、沼气增温等清洁能源增温技术以及大棚温室保温技术措施, 合理布局秸秆收储点以及沼肥处理中心, 降低运输能耗。

3.4 耿官屯秸秆沼气集中供气工程温室气体减排量

根据公式 (14) 计算, 2014 年耿官屯秸秆沼气集中供气工程基准线排放量为 5 776.15 t, 项目排放量为 57.53 t, 相当于基准线排放量的 1.00%; 泄漏量为 136.59 t, 相当于基准线排放量的 2.36%; 减排量为 5 582.03 t, 相当于基准线排放量的 96.64%。项目减排量相当于项目生产能耗和泄漏排放量的 28.76 倍。

耿官屯秸秆沼气集中供气工程年消耗青贮秸秆 3 924 t (含水率 60% 左右), 折干质量约 1 570 t, 年产沼气 48.54 万 m^3 。据此计算, 2014 年, 耿官屯秸秆沼气集中供气工程年减排 CO_2 5 582.03 t, 约相当于 2 100 t 标准煤的 CO_2 排放量, 该沼气工程每消耗 1 t (干质量) 秸秆可净减排 3.56 t, 每利用 1 m^3 沼气可净减排 11.50 kg。按最低设计使用年限 25 a 计算, 耿官屯秸秆沼气集中供气工程至少可实现 CO_2 减排 13.96 万 t。

4 结论与讨论

1) 在工程总排放方面, 温室气体排放贡献排序依次

是: 泄漏量>工程运行电耗排放>工程运行燃煤能耗排放>工程运输活动排放。其中, 泄漏量占到了工程总排放的 70.36%, 工程运行电耗排放占 22.41%, 燃煤能耗排放占 4.71%, 运输活动能耗排放占 2.52%。

2) 2014 年, 耿官屯秸秆沼气集中供气工程年减排 CO₂ 5 582.03 t, 约相当于 2 100 t 标准煤的 CO₂ 排放量, 每消耗 1 t (干质量) 秸秆可净减排 3.56 t, 每利用 1 m³ 沼气可净减排 11.50 kg。按最低设计使用年限 25 a 计算, 耿官屯秸秆沼气集中供气工程至少可实现 CO₂ 减排 13.96 万 t。

本研究在计算参数选取方面, 采用了较多 IPCC 的默认值, 为使秸秆沼气集中供气工程温室气体减排计量更为精确, 应进一步加强相关参数的研究。为了构建适用于中国不同区域的秸秆沼气工艺模式和减排措施, 完善农业碳贸易方法学体系, 应着重加强大型秸秆沼气工程温室气体减排工艺模式优化、温室气体减排碳交易与生态补偿、温室气体减排配套政策等方面的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国农业部编. 中国农业统计资料(2006-2014) [M]. 中国农业出版社, 2011—2015.
- [2] 中华人民共和国农业部. NY/T 2142-2012 秸秆沼气工程工艺设计规范[S]. 2012-03-01.
- [3] 崔文文, 梁军锋, 杜连柱, 等. 中国规模化秸秆沼气工程现状及存在问题[J]. 中国农学通报, 2013(11): 121—125.
Cui Wenwen, Liang Junfeng, Du Lianzhu, et al. The current situation and problems of the large-scale biogas plants for straw in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013 (11): 121—125. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈绍晴, 宋丹, 杨谨, 等. 户用沼气模式生命周期减排清单与环境效益分析[J]. 中国人口. 资源与环境, 2012(8): 76—83.
Chen Shaoqing, Song Dan, Yang Jin, et al. Life-cycle emission mitigation inventory and environmental benefit of household biogas mode[J]. China Population, Resources and Environment, 2012(8): 76—83. (in Chinese with English abstract)
- [5] 董红敏, 李玉娥, 朱志平, 等. 农村户用沼气 CDM 项目温室气体减排潜力[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 293—296.
Dong Hongmin, Li Yu'e, Zhu Zhiping, et al. Greenhouse gas emission reduction potential of rural household biogas CDM project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 293—296. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张培栋, 王刚. 中国农村户用沼气工程建设对减排 CO₂、SO₂ 的贡献: 分析与预测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 147—151.
Zhang Peidong, Wang Gang. Contribution to reduction of CO₂ and SO₂ emission by household biogas construction in rural China: analysis and prediction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(12): 147—151. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王革华. 农村能源建设对减排 SO₂ 和 CO₂ 贡献分析方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 175—178.
Wang Gehua. Analysis method on reducing emission of SO₂ and CO₂ by rural energy construction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(1): 175—178. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘尚余, 骆志刚, 赵黛青. 农村沼气工程温室气体减排分析[J]. 太阳能学报, 2006(7): 652—655.
Liu Shangyu, Luo Zhigang, Zhao Daiqing. Greenhouse gas reduction and CDM analysis on countryside biogas engineering[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006(7): 652—655. (in Chinese with English abstract)
- [9] 段茂盛, 王革华. 畜禽养殖场沼气的温室气体减排效益及利用清洁发展机制(CDM)的影响分析[J]. 太阳能学报, 2003(3): 386—389.
Duan Maosheng, Wang Gehua. Greenhouse gas mitigation benefits of biogas projece in livestock farms[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003(3): 386—389. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李玉娥, 董红敏, 万运帆, 等. 规模化猪场沼气工程 CDM 项目的减排及经济效益分析[J]. 农业环境科学学报, 2009(12): 2580—2583.
Li Yu'e, Dong Hongmin, Wan Yunfan, et al. Emission reduction and financial analysis of intensive swine farm using biogas digester to treat manure and developed as a CDM projects[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009(12): 2580—2583. (in Chinese with English abstract)
- [11] 甘福丁, 伍琪, 谢列先, 等. 广西养殖场沼气工程节能减排效果分析[J]. 现代农业科技, 2012(22): 192—193.
Gan Fuding, Wu Qi, Xie Liexian, et al. The effect analysis of biogas project energy saving and emission reduction of Guangxi breeding farm[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(22): 192—193. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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(6): 908—914.
Kan Shiliang, Zhang Peidong, Sun Quan, et al. Assessment of energy efficiency for the life cycle of large and medium-sized methane project[J]. Renewable Energy Resources, 2015(6): 908—914. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韩芳, 林聪. 畜禽养殖场沼气工程技术模式能值评价[J]. 中国沼气, 2014(1): 70—74.
Han Fang, Lin Cong. Energy evaluation of biogas engineering mode on livestock and poultry farm[J]. China Biogas, 2014(1): 70—74. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周捷, 张万钦, 董仁杰, 等. 沼气发酵猪粪管理系统对温室气体排放的影响[J]. 可再生能源, 2012(8): 59—63.
Zhou Jie, Zhang Wanqin, Dong Renjie, et al. The influence of biogas fermentation management system on greenhouse gas emission[J]. Renewable Energy Resources, 2012(8): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张培栋, 李新荣, 杨艳丽, 等. 中国大中型沼气工程温室气体减排效益分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 239—243.
Zhang Peidong, Li Xinrong, Yang Yanli, et al. Greenhouse gas mitigation benefits of large and middle-scale biogas project in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(9): 239—243. (in Chinese with English abstract)
- [16] 苏明山, 何建坤, 顾树华. 大中型沼气的 CO₂ 减排量和减排成本的估计方法[J]. 中国沼气, 2002(1): 26—28.
Su Mingshan, He Jiankun, Gu Shuhua. Approach to estimate CO₂ reduction and increment cost for large biogas systems[J]. China Biogas, 2002(1): 26—28. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵兰, 冷云伟, 任恒星, 等. 大型秸秆沼气集中供气工程生命周期评价[J]. 安徽农业科学, 2010(34): 19462—19495.
Zhao Lan, Leng Yunwei, Ren Hengxing, et al. Life cycle assessment for large-scale centralized straw gas supply project[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010 (34): 19462—19495. (in Chinese with English abstract)
- [18] 白洁瑞, 贺春强, 王虎琴, 等. 秸秆沼气集中供气工程温室气体减排效益分析[J]. 农业工程技术, 2011(6): 21—22.
Bai Jierui, He Chunqiang, Wang Huqin, et al. The benefit

- analysis of greenhouse gas emission reduction in the straw biogas centralized supply project[J]. Agriculture Engineering Technology, 2011(6): 21—22. (in Chinese with English abstract)
- [19] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[S]. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Institute of Global Environmental Strategies (IGES), Kanagawa, Japan. 2006(4).
- [20] CM-092-V01 纯发电厂利用生物废弃物发电[S/OL]. [2016-08-01]. <http://cdm.ccchina.gov.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20140123143855908182.pdf>.
- [21] CMS-001-V02 用户使用的热能, 可包括或不包括电能[S/OL]. [2016-08-01] <http://www.ccchina.gov.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20130312110242540787.pdf>.
- [22] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6371—6383. Chen Shun, Lu Fei, Wang Xiaoke. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6371—6383. (in Chinese with English abstract)
- [23] 高春雨, 王立刚, 李虎, 等. 区域尺度农田 N₂O 排放量估算研究进展[J]. 中国农业科学, 2011(2): 316—324. Gao Chunyu, Wang Ligang, Li Hu, et al. Advances and prospects of N₂O emission from cropland at regional scale[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011(2): 316—324. (in Chinese with English abstract)
- [24] 高春雨. 县域农田 N₂O 排放量估算及其减排碳贸易案例研究[M]. 北京: 农业科技出版社, 2014.
- [25] 公路货运导致的项目和泄漏排放计算工具[S/OL]. [2016-08-01] http://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/meth_booklet.pdf#AR_AM0014.
- [26] 化石燃料燃烧导致的项目或泄漏 CO₂ 排放计算工具[S/OL]. [2016-08-01]. <http://cdm.unfccc.int/methodologies/Pamethodologies/tools/am-tool-03-v2.pdf>.
- [27] 电力消耗导致的基准线、项目和/或泄漏排放计算工具[S/OL]. [2016-08-01]. <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-05-v2.0.pdf>.
- [28] 火炬燃烧含甲烷气体导致的项目排放计算工具[S/OL]. [2016-08-01]. <http://cdm.unfccc.int/methodologies/Pamethodologies/tools/am-tool-06-v2.0.pdf>.
- [29] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [30] 厌氧沼气池项目和泄漏排放的计算工具[S/OL]. [2016-08-01]. <http://cdm.unfccc.int/methodologies/Pamethodologies/tools/am-tool-16-v7.0.pdf>.

Greenhouse gas emission mitigation calculation of large scale straw biogas centralized supply project

Wang Lei, Gao Chunyu^{*}, Bi Yuyun, Wang Yajing, Wang Hongyan, Sun Ning, Yu Jingjing
(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The large straw biogas project is an important way of new energy utilization of straw resource in China. It has great meaning to facilitate the construction of a resource-saving and environment-friendly society and mitigation of climate change. The methods of literature research, fixed point monitoring and quantitative analysis were adopted. Taking the straw biogas project in Gengguan Village of Cangzhou City in Hebei Province of China as an example, this paper establishes a methodology of greenhouse gas emission reduction for large scale straw biogas project. The greenhouse gas emission reduction measures include project boundary, calculation of baseline emissions, project emissions calculation, leakage calculation, emission reduction and project monitoring. Calculation of baseline emissions refer to the greenhouse gas emission by straw stalk treating, rural resident daily used energy, and fertilizer production in farmland under no large straw biogas project. Project emissions calculation refers to the emissions produced by engineering transportation, power consumption, fossil fuel consumption and extra biogas torch combustion. We calculate the greenhouse gas emission reduction of the straw biogas project in 2014. The results show that the baseline CO₂ emissions are 5 776.15 t, the project CO₂ emissions are 57.53 t, the leakage of CO₂ is 136.59 t and the CO₂ emission reduction is 5 582.03 t, which is approximately equal to CO₂ emissions by 2 100 t standard coal combustion. As required in NY/T 2142-2012 *Specification for Process Design of Straw Biogas Engineering*, the design working life of straw biogas engineering is no less than 25 a, the Gengguan Village straw biogas centralized gas supply project can at least achieve CO₂ emissions of 139 600 t. For every 1 t straw (dry weight) consumed, a net reduction of 3.56 t CO₂ emission can be got, and for every 1 m³ methane used, 11.50 kg CO₂ emission can be reduced. Through the construction of greenhouse gas emission reduction measurement method of large scale straw biogas centralized gas supply projects, it is helpful to understand the emission reduction utility of large scale straw biogas centralized gas supply projects scientifically, analyze the main greenhouse gas emission sources during the project operation quantitatively, and further enhance the straw emission reduction capacity of biogas centralized gas supply projects. The order of the contribution of greenhouse gas emission is: Leakage > engineering operating power consumption emission > energy consumption emission of coal combustion in engineering operation > engineering transport activity emission. Leakage accounts for 70.36% of the total emissions, engineering operating power consumption emission accounts for 22.41%, energy consumption of coal combustion in engineering operation accounts for 4.71%, and engineering transport accounts for 2.52%. To reduce the operation and leakage emissions, the straw biogas projects should be located in the more concentrated areas of farmers, choose the material with corrosion resistance, good pressure resistance and strong environmental suitability, and change the flange connection and threaded connection to welding. In the meantime, we should strengthen the daily inspection, maintenance and management, upgrade the straw pretreatment (crushing) process technology, promote and use the solar heating, biomass furnace heating, biogas warming and other clean energy warming technology and greenhouse thermal insulation technology measures, and layout the straw storage sites and biogas fertilizer treatment center reasonably to reduce the energy consumption in the transportation. In view of the shortcomings of this study in the parameter selection, regional application and other aspects, we will strengthen the studies on relevant parameters and different regional case further.

Keywords: greenhouse gases; emission control; straw; straw biogas centralized supply project