

基于 LCA 的秸秆沼气集中供气工程环境影响评价

王红彦, 王亚静, 高春雨, 王道龙, 覃 诚, 毕于运[※]

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 为进一步研究秸秆沼气工程生命周期的环境影响, 采用生命周期评价方法对秸秆沼气集中供气利用模式的环境影响进行分析, 系统比较沼气系统不同单元的环境影响。将秸秆沼气工程建设单元的物质和能量投入及其环境排放纳入生命周期边界, 以河南省安阳县西街村秸秆沼气工程为例进行实证分析, 对秸秆沼气集中供气工程建设单元、运行单元和产物利用单元进行清单分析和环境影响评价。结果表明, 该沼气工程运行 1 a 产出 13.60 万 m³ 沼气, 系统环境影响综合值为 129.94 标准人当量。从沼气系统各阶段看, 沼气工程建设单元、运行单元和产物利用单元的环境影响潜值分别占沼气系统生命周期环境影响的 65.62%、32.76% 和 1.62%。从能源替代角度看, 该秸秆沼气集中供气工程替代煤炭的全球环境影响负荷为-132.48 标准人当量。与煤炭作为炊事用能相比, 该沼气工程的环境影响负荷可降低 50.50%, 秸秆沼气作为可再生的清洁能源可以有效替代煤炭燃烧从而改善环境质量。沼气工程建设阶段的环境影响对秸秆沼气集中供气系统总环境影响的贡献最大, 而产物利用阶段环境排放影响最小。秸秆沼气工程运行单元的煤炭增温和电力消耗是影响沼气工程环境排放的重要因素, 选择低碳环保的沼气增保温方式和降低工程运行电耗是未来秸秆沼气集中供气工程工艺改进的重要内容。

关键词: 秸秆; 环境影响; 温室气体; 沼气集中供气工程; 生命周期评价

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.029

中图分类号: S216.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-21-0237-07

王红彦, 王亚静, 高春雨, 王道龙, 覃 诚, 毕于运. 基于 LCA 的秸秆沼气集中供气工程环境影响评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 237-243. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.029 <http://www.tcsae.org>

Wang Hongyan, Wang Yajing, Gao Chunyu, Wang Daolong, Qin Cheng, Bi Yuyun. Environment impact evaluation of straw biogas project for central gas supply based on LCA [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 237-243. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.21.029 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

近年来, 随着秸秆厌氧发酵工艺技术的不断发展和成熟, 秸秆沼气开发利用初具规模。2015 年底全国建成秸秆沼气集中供气工程 458 处, 供气户数达到 8.14 万户^[1]。大中型秸秆沼气工程在能源替代、减排温室气体, 以及在减少秸秆焚烧和废弃造成的面源污染, 保护环境等方面发挥重要作用^[2-4]。但是秸秆沼气在工程建设、原料运输、沼肥利用的过程也会产生污染物排放^[5]。采用生命周期评价方法对秸秆沼气集中供气工程生命周期环境排放进行量化分析, 对于指导秸秆沼气工程清洁生产和工艺优化具有重要现实意义。

国内外不少学者开展了关于沼气工程生命周期评价的研究, 主要体现在对沼气系统生命周期内能量投入产出和温室气体排放^[6-8]、不同发酵原料沼气工程生命周期内能效^[9-12]和经济效益比较分析^[13], 以及沼气不同利用方式^[14-15]的生态环境影响评价。如 Rehl 和 Müller^[16]从温室气体减排和经济成本的角度, 利用生命周期评价方法

对沼气发电、供热、供气、车用燃料等 8 种沼气利用方式进行比较分析, 以明确沼气利用的最优方式。从原料看, 以畜禽粪便为原料的沼气工程的生命周期评价研究居多^[13,17-19]。刘畅等^[20]对畜禽粪便沼气发酵及使用的全生命周期进行建模仿真, 认为工程建设、原料运输及污染处理会产生大量的能源消耗, 是未来沼气工程发展中可优化的环节。此外, 研究者还关注了能源作物为原料的沼气工程生命周期评价, 认为能源作物沼气发电系统环境效益显著^[21-22]。

针对秸秆为原料的规模化沼气工程生命周期评价研究相对较少。王俏丽等^[23-24]基于生命周期评价方法对秸秆沼气工程的生态指数和全球变暖潜值的研究表明, 秸秆沼气工程能减少化石能源消耗改善生态环境, 但秸秆沼气工程的全球变暖潜值的不利影响随着年限的增加而增加。赵兰等^[25]运用 LCA 方法对山东大型秸秆沼气集中供气工程的环境影响分析表明, 该工程对全球环境的影响负荷为-47.4 标准人当量, 是有效的秸秆资源化利用环保工程。现有研究中较少有学者将工程建设过程的投入和环境排放纳入秸秆沼气工程生命周期边界。

本研究尝试将工程建设单元纳入秸秆沼气系统生命周期边界, 并以河南省安阳县西街村秸秆沼气工程为例开展实证分析, 综合评估秸秆沼气集中供气工程建设单元、运行单元和产物利用单元的环境影响, 更全面和系统地对比秸秆沼气系统的环境影响进行分析, 将为后续研

收稿日期: 2017-07-31 修订日期: 2017-10-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41301626)

作者简介: 王红彦, 博士后, 研究方向为农业废弃物资源化利用。

Email: redswallow@126.com.

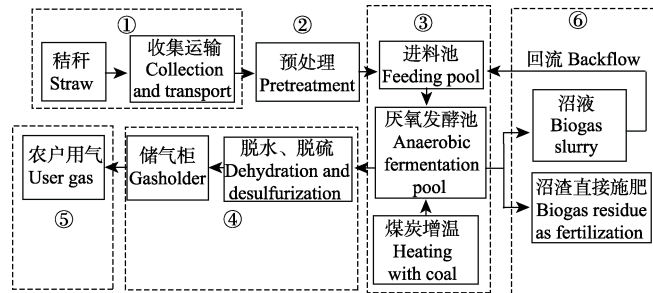
※通信作者: 毕于运, 研究员, 研究方向为秸秆资源及其新型资源化利用。

Email: biyuyun@caas.cn.

秸秆沼气工程减排管理提供决策支持, 为推进秸秆沼气产业化发展提供有益借鉴。

1 案例基本情况

河南省安阳县永和乡西街村 (114°57'E, 36°10'N) 秸秆沼气集中供气工程建于2009年, 总投资300万元。工程发酵总体池容1 100 m³, 设计供气户数为1 000户, 目前现实供气户数为465户, 尚未实现满负荷运行。该沼气工程以麦秸、麦糠等为主要发酵原料, 采用全混式发酵工艺, 中温发酵, 设计发酵浓度为8%。全年消耗秸秆490 t (含水率15%), 年产气量13.60万 m³。经过固液分离后, 沼液大部分用于回流, 沼渣用作有机肥供给附近生态园。该秸秆沼气集中供气工艺流程如图1所示, 具体分为秸秆收集、预处理、厌氧发酵、净化贮存、管网供气和沼肥利用6个子系统。该工程年产沼渣510 t (含水率60%), 年回流沼液量3 600 t (沼液干物质含量1.55%)。冬季采用热水锅炉为沼气池增温, 年消耗煤炭约9 t。



注: ① 秸秆收集, ② 预处理, ③ 厌氧发酵, ④ 净化贮存, ⑤ 管网供气, ⑥ 沼肥利用。

Note: ① Straw collection, ② Pretreatment, ③ Anaerobic fermentation, ④ Purification and storage, ⑤ Gas pipeline supply, ⑥ Marsh fertilizer use.

图1 河南省安阳县西街村秸秆沼气集中供气工程工艺流程
Fig.1 Process of straw biogas project for central gas supply in Xijie Village, Anyang County, Henan Province

2 目标与范围

2.1 研究目标

研究目标为明确秸秆沼气集中供气工程在工程建设单元、工程运行单元和产物利用单元以及整个生命周期过程的环境影响, 分析并确定造成严重环境影响的关键环节, 提出减小或消除某些环境影响的建议, 为农村沼气工程减排提供依据。本研究中秸秆沼气集中供气工程评价的功能单位设定为沼气工程运行1 a 沼气产量13.60万 m³。

2.2 范围确定

2.2.1 作物种植阶段是否纳入系统LCA边界

在秸秆为原料的生物质能源化利用系统生命周期评价研究中, 是否将作物种植阶段纳入生命周期评价范围, 主要存在以下2种观点: 1) 不将农业作物的种植阶段纳入秸秆能源化利用系统生命周期边界, 持此种观点的研究者认为, 秸秆是粮食生产过程的附属物和废弃物, 因此作物生长过程的能耗及环境排放不应计入能源生产系

统生命周期边界内^[26-28]。2) 将作物种植阶段纳入秸秆能源化利用系统生命周期边界范围, 如冯超^[29]等在秸秆直燃发电的生命周期(秸秆种植、运输、粉碎干燥、燃烧发电4个过程)评价中计算了作物种植阶段的能耗和环境排放; 霍丽丽等^[30]在生物质固化成型燃料生命周期评价中计算了玉米种植阶段的能耗和环境排放。

作物种植的主要目的是获得粮食, 而不是秸秆。能源作物种植的目的是为生物质能源产品的生产提供原料, 能源作物的种植阶段投入的物质、能量及排放的污染物均应计算到生物质能利用系统生命周期评价的环境影响^[31]。基于上述考虑, 本研究不将作物种植阶段纳入秸秆沼气集中供气系统生命周期范围, 而是从秸秆的收集阶段开始, 将秸秆收集、运输等过程的能耗及环境排放纳入系统边界。

2.2.2 工程建设单元是否纳入系统LCA边界

是否将工程建设单元纳入生物质能源系统的生命周期边界范围, 主要存在如下2种观点: 1) 将工程建设单元纳入生命周期评价边界范围。如刘黎娜等^[32]将沼气池建设阶段纳入沼气生态农业模式生命周期评价, 计算了投入的水泥、石子、红砖等物料及其环境排放; 田望等^[33]在玉米秸秆基纤维素乙醇生命周期评价中, 直接将工厂基础设施建设温室气体排放取值为产品乙醇利用排放的10%。2) 不将工程建设单元纳入生命周期评价边界范围, 主要基于厂房建设部分能耗数据获取难度大, 对最终结果影响小等因素, 未将生物质能源系统的厂房建设、设备等的能耗和环境排放计入生命周期边界^[30,34-35]。

从目前获得文献看, 在生物质能源系统生命周期评价中, 多数研究未将厂房建设能耗及排放纳入生命周期边界。本研究将秸秆沼气集中供气工程的建设单元纳入系统边界, 将系统分为工程建设单元、运行单元和产物利用单元, 分析从沼气工程建设开始, 经过发酵产气及运行管理, 最终到用户供气和沼渣、沼液的处理的环境排放(图2)。

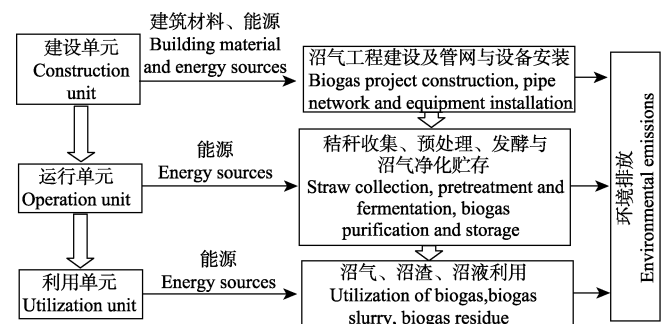


图2 秸秆沼气集中供气工程生命周期单元框架
Fig.2 LCA framework of straw biogas project for central gas supply

2.3 基本假设

在该工程生命周期环境影响评价中, 主要考虑厂房建设、秸秆运输、厌氧发酵、沼气利用、沼渣运输等环节的污染物排放及其环境影响。受数据获取等因素的影响, 为了更简便地分析秸秆沼气集中供气工程各阶段产生的环境影响, 进行如下假设: 1) 秸秆原料属于农作物生产过程产生的废弃物, 本研究不考虑农作物秸秆生长

过程的能耗和环境排放；2) 沼气工程的运行时间为 20 a，基础设施建设折旧不考虑沼气工程拆除产生的环境影响；3) 工程建设单元未考虑建筑材料运输和建设过程的能耗和环境排放；4) 未考虑发酵产气过程气体泄漏产生的环境影响。

3 清单分析及参数选择

分析秸秆沼气集中供气系统建设单元、运行单元、产物利用单元的主要物质和能耗投入以及污染物排放系数。

本研究数据来源主要包括实地调研数据和公共数据。实地调研数据来源于对秸秆沼气系统实地的调查和监测数据，主要包括沼气生产工艺参数及物质、能量、经济投入产出等技术经济参数。由于条件限制无法通过调研获取的数据，则采用国内同类技术的相关数据。公共数据，如相关物料和能源的能量折算系数和污染物排放系数，主要来源于国家权威部门发布的年鉴、行业标准，以及已发表的文献资料。

3.1 清单分析

3.1.1 工程建设单元

沼气工程建设单元的能耗与污染排放主要来自建筑材料。秸秆沼气集中供气工程建设单元的环境排放主要根据所投入建设材料的数量与相应的污染物排放系数相乘计算得出。秸秆沼气集中供气工程建设单元考虑的主要建筑材料包括钢材、水泥、石子、砖、PVC 管和沙子。调研获取河南省安阳县永和乡西街村秸秆沼气工程建设单元所用物料及其数量详见表 1。

表 1 西街村秸秆沼气集中供气工程建设主要物料

Table 1 Main construction materials of straw biogas project for central gas supply in Xijie Village

项目 Item	钢材 Steel/t	水泥 Cement/t	聚氯乙烯 PVC/t	砖/块 Brick/piece	石子 Pebble/t	沙子 Sand/t
数量 Amount	350	300	3.5	650 000	1 000	600

3.1.2 工程运行单元

工程运行阶段主要考虑秸秆收储运、发酵池增温和工程运行电耗 3 方面的环境排放，根据原料收集过程的柴油能耗、原料预处理和发酵过程的电耗以及沼渣沼液运输过程的柴油消耗数量，乘以相对应的污染物排放

系数，获得沼气工程运行单元的污染物排放量。

1) 原料收集运输阶段。该沼气工程年消耗秸秆 490 t。假设秸秆的主要运输工具为柴油拖拉机，运输半径为 10 km，油耗为 0.08 L/(t·km)。秸秆运输过程的柴油消耗量为 392 L/a。

2) 厌氧发酵阶段。该阶段主要考虑秸秆沼气集中供气工程运行消耗的电力和煤炭造成的环境影响。根据调研获取该秸秆沼气集中供气工程年耗电量为 15 000 kWh/a。目前中国电力来源仍是以火力发电为主，本研究根据火力发电的主要污染排放系数计算工程运行耗电量的污染物排放量。工程在冬季采用热水锅炉对发酵池进行增温，年消耗煤炭 9 t。

3.1.3 产物利用单元

秸秆沼气集中供气工程产出物为沼气、沼渣和沼液。沼气燃烧过程基本不产生微粒和 SO₂，发展沼气替代农村居民煤炭消费可有效避免煤炭在燃烧时产生的有毒气体和尘埃的污染。沼液回流，沼渣作为有机肥运输到附近农田。

1) 沼气燃烧排放。通过沼气的热值与煤炭的热值，计算出沼气替代煤炭（折标煤）数量。根据《中国能源统计年鉴 2015》给出的能源折标准煤参考系数，秸秆沼气工程平均年产沼气 13.60 万 m³，可替代 9.71 万 t 标准煤。

2) 沼渣运输。该沼气工程年产沼渣 510 t，沼渣运输半径为 6 km，吨公里耗油 0.08 L/(t·km)。沼渣运输过程的柴油消耗量为 241 L/a。

3.2 排放系数

排放系数是指消耗单位质量的能量或原材料所产生的污染物的质量。排放系数是核算秸秆沼气集中供气工程系统生命周期环境排放量的关键。建设单元主要考虑建材生产过程的环境影响，投入物料主要包括水泥、钢材、沙子、砖、聚氯乙烯（polyvinyl chloride, PVC）等。污染物排放量根据物料和能源的投入量和对应的排放系数相乘计算得出。各投入物料和能源的污染物排放系数详见表 2。

3.3 排放清单

根据秸秆沼气集中供气系统各生命周期阶段的清单数据和污染物排放系数，可计算出秸秆沼气系统在工程建设单元、工程运行单元、产物利用单元的环境排放清单，以及沼气替代煤炭燃烧的环境排放清单（表 3）。

表 2 各种物料和能源的污染物排放系数

Table 2 Pollutant emission factors of materials and energy

项目 Item	单位 Unit	CO ₂	SO ₂	CH ₄	NO _x	CO	HC*	VOC**	PM10	文献 Reference
水泥 Cement	g·kg ⁻¹	920.03	0.254 1	/	1.434 6	0.356 1	/	/	2.017	[36]
块砖 Brick	g·块 ⁻¹	130	1.49	/	0.669	0.201	/	/	0.189	[37]
钢筋 Rebar	g·kg ⁻¹	1 270	51	18	16	110	/	/	45	[38]
中砂 Medium sand	mg·kg ⁻¹	70	0.05	0.000 38	0.6	0.07	0.04	/	/	[39]
碎石 Gravel	mg·kg ⁻¹	1 600	0.78	1.7	14	0.81	0.9	/	/	[39]
聚氯乙烯 PVC	g·kg ⁻¹	8 870	/	13.0	0.17	/	/	/	/	[38]
燃煤 Coal	g·kg ⁻¹	2 596	28	/	/	1.5	1.5	/	2.8	[40]
电 Electricity	g·(k·Wh) ⁻¹	1 070	9.93	2.6	6.46	1.55	/	0.487	20.2	[41]
柴油 Biodiesel	g·MJ ⁻¹	74.037	0.016	0.004 18	0.284 34	0.473 91	/	0.085 3	0.041 25	[39]
沼气 Biogas	mg·m ⁻³	20 700	/	/	400	500	/	400	/	[42]

注：HC*表示碳氢化合物，VOC**表示挥发性有机化合物，下同。

Note: HC* represents hydrocarbon compounds, VOC** represents volatile organic compounds, the same below.

表3 秸秆沼气集中供气工程系统各阶段环境排放清单

Table 3 Inventory of environmental emission at each stage of straw biogas project system (g·a⁻¹)

项目 Item	建设单元 Construction unit	运行单元 Operation unit			利用单元 Utilization unit		沼气系统总排放 Emission of biogas system	煤炭燃烧排放 Emission of coal burning
		秸秆运输 Straw transport	煤炭增温 Coal heating	电力消耗 Electricity consumption	沼气燃烧 Biogas burning	沼渣运输 Biogas residue transport		
CO ₂	4.18×10 ⁷	2.90×10 ⁴	2.34×10 ⁷	1.61×10 ⁷	2.91×10 ⁶	1.78×10 ⁴	8.43×10 ⁷	2.52×10 ⁸
SO ₂	9.45×10 ⁵	6.27×10 ⁰	2.52×10 ⁵	1.49×10 ⁵	-	3.86×10 ⁰	1.35×10 ⁶	2.72×10 ⁶
CH ₄	3.17×10 ⁵	1.64×10 ⁰	-	3.90×10 ⁴	-	1.01×10 ⁰	3.56×10 ⁵	-
NO _x	3.08×10 ⁵	1.11×10 ²	1.13×10 ⁵	9.69×10 ⁴	4.21×10 ⁴	6.85×10 ¹	5.60×10 ⁵	1.22×10 ⁶
CO	1.94×10 ⁶	1.86×10 ²	1.35×10 ⁴	2.33×10 ⁴	6.80×10 ⁴	1.14×10 ²	2.05×10 ⁶	1.46×10 ⁵
HC*	1.20×10 ⁰	-	1.35×10 ⁴	-	-	-	1.35×10 ⁴	1.46×10 ⁵
VOC**	-	3.34×10 ¹	-	7.31×10 ³	5.51×10 ⁴	2.06×10 ¹	6.25×10 ⁴	-
PM10	6.14×10 ³	1.62×10 ¹	2.52×10 ⁴	3.03×10 ⁵	-	9.94×10 ⁰	3.34×10 ⁵	2.72×10 ⁵

注：“-”表示没有此类污染物排放或数值很小。

Note:“-” represents that there is no pollution discharge or the value is low.

4 结果分析与评价

秸秆沼气集中供气工程的生命周期环境影响评价 (life cycle impact assessment, LCIA) 依据国际标准化组织 (international organization for standardization, ISO) 和国际环境毒理学和化学学会 (the society of environmental toxicology and chemistry, SETAC) 建立的框架进行, 根据清单分析涉及的物质和能源消耗数据及各种污染物排放数据, 对秸秆沼气集中供气系统的环境影响进行评价, 基本步骤包括分类、特征化和评估。

4.1 分类

将秸秆沼气集中供气系统生命周期清单分析中的输入和输出数据, 归入不同的环境影响类型 (图3)。借鉴沼气工程生命周期评价已有研究成果, 结合本研究设定的系统边界, 重点考虑秸秆沼气集中供气系统在全球变暖、酸化、光化烟雾、气溶胶和人体毒性 5 个方面的环境影响。

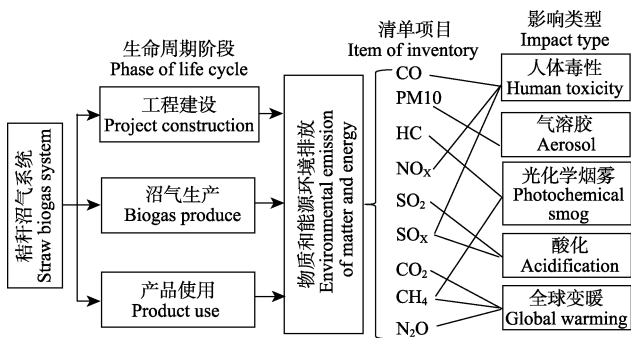


图3 秸秆沼气集中供气工程生命周期清单数据分类

Fig.3 Life cycle inventory classification of straw biogas project for central gas supply

4.2 特征化与评估

根据污染物排放量与对应环境影响类型的当量因子计算得出每种环境影响类型的影响潜值, 进而对其进行标准化和加权赋值。本文主要采用中国 1990 年的环境影响负荷作为计算的基准值, 国内数据缺失的采用全球 2000 年环境影响基准。秸秆沼气工程系统的环境影响标准化潜值可通过公式 (1) 计算:

$$NEP(M)=EP(M)/ER(M) \quad (1)$$

式中 NEP(M)为第 M 种环境影响潜值标准化后的值; EP(M)为秸秆沼气集中供气系统中第 M 种环境影响潜值; ER(M)为第 M 种环境影响潜值基准值^[43]。

通过标准化后的环境影响潜值和权重因子, 将环境影响类型潜值进行综合。常见的权重确定有目标距离法、专家组评议法和层次分析法。各学者根据研究范围和研究对象, 对同一环境影响类型给出的权重不同, 以全球变暖影响类型的权重为例, 杨建新等^[43]采用目标距离法在中国产品环境影响研究中给出的权重为 0.83, 而王明新等^[42]采用专家组评议方法在对小麦生命周期环境影响评价研究中给出的权重为 0.12。夏训峰^[44]采用层次分析法确定了燃料乙醇生命周期各环境影响类型的权重。考虑到秸秆沼气与生物质燃料乙醇工程类型较为接近, 同属于生物质资源化利用工程, 因此本文采用夏训峰等^[44]给出的权重因子。环境影响类型标准化基准值与权重因子详见表 4。

表4 不同环境影响类型标准化基准值与权重因子

Table 4 Standardization criteria and weight factor of environmental impact types

影响类型 Impact category	影响因子 Impact factor	当量值 Equivalent value	标准化基准值 ^① Standardization criteria	权重因子 ^② Weight factor
全球变暖 Global warming	CO ₂	1	8 700 kg CO ₂	0.208
	CH ₄	21		
	N ₂ O	310		
酸化影响 Acidification	SO ₂	1	36 kg SO ₂	0.138
	SO _x	2		
	NO _x	0.7		
光化学烟雾 Photochemical smog	C ₂ H ₄	1	25 kg C ₂ H ₄	0.158
	HC	0.416		
	CH ₄	0.007		
	汽油	0.398		
气溶胶影响 Aerosol	PM10	1	18 kg	0.148
人体毒性 Human toxicity	CO	0.012	6.11 kg 1,4-DCB	0.348
	NO _x	0.78		
	SO _x	1.2		

注: ①标准化基准数据引自文献[39], [43]。②权重因子数据引自文献[44]。
Note: ① Data of standardization criteria are quoted from literature [39] and [43]. ② Data of weight factors are quoted from literature [44].

由表 5 可见, 对各项具体影响类型进行标准化和加权计算后得出, 该沼气工程运行 1 a 产出 13.60 万 m^3 沼气的总环境影响综合值为 129.94 标准人当量。从阶段划分看, 沼气工程建设单元的环境影响潜值占沼气系统生命周期环境影响的 65.62%, 工程运行单元的环境排放占沼气系统环境影响综合值的 32.76%, 产物利用单元占 1.62%。工程运行单元的环境影响主要是煤炭增保温和工程运行电耗带来的环境影响, 分别占沼气系统运行单元环境影响的 57.15% 和 42.84%。

表 5 秸秆沼气集中供气系统生命周期环境影响及其替代煤炭的环境影响

Table 5 Life cycle environmental impact of straw biogas for central gas supply and its substitution for coal

影响类型 Impact category	沼气系统 biogas system				煤炭 燃烧 Coal burning	替代 燃煤 Substi- tution for coal
	建设单元 Construction unit	运行单元 Operation unit	产物利 用单元 Product utilization unit	小计 Subtotal		
全球变暖 Global warming	1.16	0.97	0.007	2.19	6.02	-3.84
酸化影响 Acidification	4.45	2.10	0.113	6.66	13.70	-7.03
光化学烟雾 Photochemical smog	1.4×10^{-2}	3.72×10^{-2}	4.47×10^{-8}	5.12×10^{-2}	0.38	-0.33
气溶胶影响 Aerosol	5.05×10^{-2}	2.70	8.17×10^{-5}	2.75	2.24	0.51
人体毒性 Human toxicity	79.60	36.76	1.92	118.28	240.20	-121.79
合计 Total	85.27	42.56	2.10	129.94	262.55	-132.48

该沼气工程年产沼气可替代 9.71 万 t 标准煤, 其作为炊事用能的环境影响为 262.55 标准人当量。考虑沼气工程替代煤炭燃烧减排的环境影响, 该秸秆沼气集中供气工程的总环境影响负荷为-132.48 标准人当量。与煤炭燃烧相比, 秸秆沼气工程对环境的影响负荷每年可减少 50.50%。如果不将沼气工程建设投入物料, 如钢筋、水泥、PVC、石子和沙子等的污染物排放计算在内, 仅考虑运行过程和产物利用过程的污染物排放, 则该秸秆沼气集中供气工程对全球环境的总环境影响负荷为-217.75 标准人当量。由此可见, 秸秆沼气集中供气替代燃煤的使用能有效的降低对环境影响的负荷。

5 结论与讨论

1) 将沼气工程建设单元消耗物料和能耗的环境排放纳入秸秆沼气系统生命周期边界, 建立了秸秆沼气集中供气系统生命周期评价环境影响分析模型, 有利于提高环境评价结果的全面性和准确性。

2) 从能源替代角度看, 该秸秆沼气集中供气工程替代燃煤使用的总环境影响负荷为-132.48 标准人当量。与煤炭使用相比, 该秸秆沼气工程每年可减少 50.50% 的环境影响负荷。之前的研究中秸秆直发电系统消耗 562.5 t 秸秆总环境影响潜值为 141.4 标准人当量, 秸秆沼气工

程运行 1 a 的环境影响明显小于秸秆直发电模式。

3) 该秸秆沼气工程建设单元的环境排放影响占沼气系统总环境影响的 65.62%, 产物利用阶段环境排放影响潜值最小。煤炭增温和电力消耗是影响沼气工程环境排放的重要环节, 选择低碳环保的沼气增保温方式和降低工程运行电耗是秸秆沼气集中供气工程工艺改进的重要内容。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2016[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [2] Wang Xiaolong, Chen Yuanquan, Sui Peng, et al. Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: An emergy evaluation based on LCA [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65(4): 234-235.
- [3] Poeschl M, Ward S, Owende P. Environmental impacts of biogas deployment-Part I: Life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 24(3): 168-183.
- [4] 段娜, 林聪, 刘晓东, 等. 以沼气为纽带的生态村循环系统能值分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31, (S1): 261-268. Duan Na, Lin Cong, Liu Xiaodong, et al. Energy analysis of biogas-linked eco-village circulating system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 261-268. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吴小芳, 王贤华, 杨海平, 等. 农村生物质沼气系统的生命周期分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1550-1555.
- [6] Ishikawa S, Hoshihara S, Hinata T, et al. Evaluation of a biogas plant from life cycle assessment (LCA) [J]. International Congress Series, 2006, 1293(6): 230-233.
- [7] Soam S, Borjesson P, Sharma P K, et al. Life cycle assessment of rice straw utilization practices in India [J]. Bioresour Technol, 2017, 228(3): 89-98.
- [8] Hou J, Zhang W, Wang P, et al. Greenhouse gas mitigation of rural household biogas systems in China: A life cycle assessment [J]. Energies, 2017, 10 (2): 1-14.
- [9] Berglund Maria, Pål Börjesson. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(3): 254-266.
- [10] Lijó L, Lorenzo-Toja Y, González-García S, et al. Eco-efficiency assessment of farm-scaled biogas plants[J]. Bioresour Technol, 2017, 237(8): 146-155.
- [11] Hijazi O, Munro S, Zerhusen B, et al. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54(2): 1291-1300.
- [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, 33(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, 33(6): 908-914. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张艳丽, 任昌山, 王爱华, 等. 基于 LCA 原理的国内典型沼气工程能效和经济评价[J]. 可再生能源, 2011, 29(2): 119-124. Zhang Yanli, Ren Changshan, Wang Aihua, et al. Energy efficiency and economic assessment based on life-cycle methodology for China's large-medium biogas project [J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29 (2): 119-124. (in Chinese with English abstract)
- [14] Betzabet M, Rodriguez M B, Campanella E A. Environmental impact assessment as a complement of life

- cycle assessment. Case study: Upgrading of biogas [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 190(8): 402-407.
- [15] 黄伟, 张欣. 城市客车燃用沼气的生命周期分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(2): 44-48.
Huang Wei, Zhang Xin. Life cycle analysis of vehicle biogas for city bus [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(2): 44-48. (in Chinese with English abstract)
- [16] Rehl T, Müller J. CO₂ abatement costs of greenhouse gas (GHG) mitigation by different biogas conversion pathways [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114(1): 13-25.
- [17] 陈佳澜. 大中型沼气综合利用系统生命周期评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
Chen Jialan. Life Cycle Assessment of Large and Medium Scale Biogas Plant [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张颖, 夏训峰, 李中和, 等. 规模化养牛场粪便处理生命周期评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1423-1427.
Zhang Ying, Xia Xunfeng, Li Zhonghe, et al. Life cycle assessment of manure treatment in scaled cattle farms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1423-1427. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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, 22(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, Resource and Environment*, 2012, 22(8): 76-83. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘畅, 涂国平. 农村沼气工程能源消耗及环境影响的LCA分析[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(6): 47-53.
Liu Chang, Tu Guoping. On LCA analysis of environmental impact and energy consumption of biogas project in rural areas of China[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(6): 47-53. (in Chinese with English abstract)
- [21] Blengini G, Brizio E, Cibrario M, et al. LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 57(12): 36-47.
- [22] Colin J, Enrico B, Daniel K, et al. Life Cycle Assessment of biogas production by mono fermentation of energy crops and injection into the natural gas grid [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(1): 54-66.
- [23] 王俏丽. 秸秆制沼气过程生命周期评价及其敏感性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
Wang Qiaoli. Life Cycle Assessment on Straw Biogas Project and Its Sensitivity Analysis[J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [24] Wang Qiaoli, Li Wei, Gao Xiang, et al. Life cycle assessment on biogas production from straw and its sensitivity analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2016(201): 208-214.
- [25] 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, 38(34): 19462-19464.
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, 38(34): 19462-19464. (in Chinese with English abstract)
- [26] 毛燎原, 李爱民. 基于生命周期评价的糠醛生产污染综合治理问题[J]. *化工进展*, 2010, 29(S1): 226-231.
- [27] 朱金陵, 王志伟, 师新广, 等. 玉米秸秆成型燃料生命周期评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 262-266.
Zhu Jinling, Wang Zhiwei, Shi Xinguang, et al. Life cycle assessment of corn straw pellet fuel [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(6): 262-266. (in Chinese with English abstract)
- [28] 林琳, 赵黛青, 李莉. 基于生命周期评价的生物质发电系统环境影响分析[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(5): 618-623.
Lin Lin, Zhao Daiqing, Li Li. Environmental impact analysis of biomass power generation system based on life cycle assessment [J]. *ACTA Energetica Solar Sinica*, 2008, 29(5): 618-623. (in Chinese with English abstract)
- [29] 冯超, 马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(6): 711-715.
Feng Chao, Ma Xiaoqian. Life cycle assessment of the straw generation by direct combustion[J]. *ACTA Energetica Solar Sinica*, 2008, 29(6): 711-715. (in Chinese with English abstract)
- [30] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等. 生物质固体成型燃料全生命周期评价[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(12): 1875-1880.
Huo Lili, Tian Yishui, Meng Haibo, et al. Life cycle assessment analysis for densified biofuel[J]. *ACTA Energetica Solar Sinica*, 2011, 32(12): 1875-1880. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王伟, 赵黛青, 杨浩林, 等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法探讨[J]. *太阳能学报*, 2005, 26(6): 752-759.
Wang wei, Zhao Daiqing, Yang Haolin, et al. Life cycle analysis on biomass gasification & power generation system and inquiry to assessment method [J]. *ACTA Energetica Solar Sinica*, 2005, 26(6): 752-759. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘黎娜, 王效华. 沼气生态农业模式的生命周期评价[J]. *中国沼气*, 2008, 26(2): 17-20, 24.
Liu Lina, Wang Xiaohua. Life cycle assessment of biogas eco-agricultural mode [J]. *China Biogas*, 2008, 26(2): 17-20, 24. (in Chinese with English abstract)
- [33] 田望, 廖翠萍, 李莉, 等. 玉米秸秆基纤维素乙醇生命周期能耗与温室气体排放分析[J]. *生物工程学报*, 2011, 27(3): 516-525.
Tian Wang, Liao Cuiping, Li Li, et al. Life cycle assessment of energy consumption and greenhouse gas emissions of cellulosic ethanol from corn stover [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2011, 27(3): 516-525. (in Chinese with English abstract)
- [34] 戴杜, 刘荣厚, 浦耿强, 等. 中国生物质燃料乙醇项目能量生产效率评估[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(11): 121-123.
Dai Du, Liu Ronghou, Pu Gengqiang, et al. Evaluation of energy production efficiency of biomass based fuel ethanol program[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(11): 121-123. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 等. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价[J]. *可再生能源*, 2009, 27(5): 102-106.
Liu Junwei, Tian Binghui, Zhang Peidong, et al. Life cycle assessment on straw directly combustion for power generation system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(5): 102-106. (in Chinese with English abstract)
- [36] 龚志起, 张智慧. 水泥生命周期中物化环境状况的研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(5): 86-91.
Gong Zhiqi, Zhang Zhihui. A study on embodied environmental profile during the life cycle of cement [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(5): 86-91. (in Chinese with English abstract)

- [37] 罗楠. 中国烧结砖制造过程的环境负荷研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
Luo Nan. Research on Environmental Impact of Sintered Brick Production in China [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [38] 蔡君巍. 中央空调系统的碳排放评估及低碳化对策研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
Cai Junwei. Research of Carbon Emissions Assessment and Low Carbon Countermeasures of Central Air Conditioning [D]. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [39] 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, 33(2): 301—307.
Yi Ruijian, Zhang Wanqin, Zhou Jie, et al. Environmental impact analysis on the production and utilization of digestate based on LCA method [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(2): 301—307. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王国栋. 刺参陆基养殖系统的能值分析和生命周期评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wang Guodong. Energy Analysis and Life Cycle Assessment of Land-Based Sea Cucumber Farming Systems [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [41] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 632—635.
Di Xianghua, Nie Zuoren, Zuo Tiejong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. China Environmental Science, 2005, 25 (5): 632—635. (in Chinese with English abstract)
- [42] 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. Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 245—250. (in Chinese with English abstract)
- [43] 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期评价方法与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [44] 夏训峰, 张军, 席北斗. 基于生命周期的燃料乙醇评价及政策研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

Environment impact evaluation of straw biogas project for central gas supply based on LCA

Wang Hongyan, Wang Yajing, Gao Chunyu, Wang Daolong, Qin Cheng, Bi Yuyun^{*}

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Chinese government has been encouraging the use of crop straw as energy sources in the latest decades. Straw biogas project can not only provide clean energy for rural household, but also make full use of crop residue and reduce air pollution caused by straw open burning. Straw biogas industry has developed fast in the latest decades, with a total number of 458 projects by 2015. Crop straw biogas project is environmental-friendly, but pollutants emission will be caused during the biogas project construction, the crop straw transportation and pretreatment, the products utilization processes. The research on the environment performance of straw biogas is a hot topic with the straw biogas industry development of China. Life cycle assessment (LCA) can be used to calculate a product's environment performance by building an integrated framework of processes. LCA is used to analyze overall inputs, outputs and potential synthetical environmental impacts throughout biogas's lifetime. Some researchers have been studying the environmental impact of straw biogas system by the method of LCA. However, the pollutants emission and energy and material input of construction unit of biogas project were seldom considered in the boundary of the system. The straw biogas system was divided into construction unit, operation unit and product utilization unit during the inventory analysis. This paper analyzed the environment impact of each unit and the whole system of straw biogas project for central gas supply by the LCA method, and it started to focus on the environment performance of construction unit, which is different from previous studies. Taking the straw biogas project of Xijie Village in Anyang County, Henan Province as a case for empirical analysis, this paper made inventory analysis and impact assessment for life cycle of the biogas project including construction unit, project operation unit and product utilization unit. All the raw data were obtained by survey. Data of energy coefficient, emission factor, standardization criteria, and weight factor were acquired from publications and literatures of previous study. Five types of impacts including global warming, acidification, photochemical smog, aerosol, human toxicity were assessed. The result showed that the straw biogas project of Xijie Village produced the biogas of $13.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ per year, and the total global environmental impact load was 129.94 equivalent/(person-year). The environmental impact load of construction unit, operation unit and product utilization unit accounted for 65.62%, 32.76% and 1.62%, respectively. The coal is used to warm the biogas digester in winter in order to increase the biogas yield. The biogas produced can replace the standard coal of $9.71 \times 10^4 \text{ t}$ in a year. The total global environmental impact load of coal burning was 262.55 equivalent/(person-year). In the view of energy substitution for coal consumption, the environmental impact load of the biogas project system was reduced by 132.48 equivalent/(person-year), that is to say, the biogas project in this study decreased the environment impact by 50.50% compared to standard coal burning as household fuel. Straw biogas as a clean renewable energy can reduce utilization of coal and improve the environment quality. Construction unit of the straw biogas project contributes the most and product utilization unit contributes the least to the biogas project environment impact. The coal and electricity consumption are 2 main contributors for the environment impact of the biogas project. It is significant to reduce coal and electricity consumption and find low-carbon and environmental-friendly way of straw biogas digester heating in the future.

Keywords: straw; environment impact; greenhouse gases; biogas project for central gas supply; life cycle assessment