

秸秆基生物天然气工程的温室气体减排估算

周珂¹ 孔维涛² 冯新新¹ 王环¹ SEGLAH Afi Patience¹ 谢杰¹ 孙宁¹ 高春雨^{1*}

(1. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所,北京 100081;

2. 必奥新能源科技有限公司,北京 102400)

摘要 为准确定量秸秆基生物天然气工程的温室气体减排量,首先参考 UNFCCC 方法学和 IPCC 国家温室气体清单指南,基于农作物秸秆自然腐解基准线,构建秸秆基生物天然气工程的温室气体减排量计量方法;后以河北省临漳县秸秆基生物天然气工程为例,采用构建的温室气体减排量计量方法进行实证研究。结果表明:基于农作物秸秆自然腐解基准线,利用 CDM 方法学和排放因子法构建了秸秆基生物天然气工程温室气体的基准线排放量、项目运行排放量、工程泄漏排放量及净减排量计量方法。运用该计量方法计算出 2019 年河北省临漳县秸秆基生物天然气工程基准线排放量(以 CO₂ 计)1.25×10⁵ t,项目排放量 1.21×10⁴ t,泄露排放量为 10.24 t,净减排量 1.13×10⁵ t,相当于约 4.19×10⁴ t 标准煤的 CO₂ 排放量。因此,本研究构建的以秸秆自然腐解为基准线的秸秆基生物天然气工程温室气体减排量体系,对于完善生物天然气工程的温室气体减排估算方法学体系,全面评价生物天然气工程温室气体减排效果具有重要意义。

关键词 秸秆; 自然腐解; 生物天然气; 温室气体; 碳减排

中图分类号 S216.4

文章编号 1007-4333(2022)12-0078-12

文献标志码 A

Estimation of greenhouse gas emission reduction from straw-based bio-natural gas project

ZHOU Ke¹, KONG Weitao², FENG Xinxin¹, WANG Huan¹, SEGLAH Afi Patience¹,
XIE Jie¹, SUN Ning¹, GAO Chunyu^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Biao New Energy Technology Co., Ltd., Beijing 102400, China)

Abstract To accurately quantify the greenhouse gas (GHG) emission reduction of straw-based bio-natural gas (BNG) project, the GHG emission reduction measurement method of straw-based BNG project was firstly established based on the natural decomposition baseline of crop straws by referring to UNFCCC methodology and IPCC guidelines for national GHG inventory. The straw-based BNG project in Linzhang County, Hebei Province was taken as an example, the GHG emission reduction measurement method established was adopted to conduct an empirical study. The results show that: Based on the baseline of natural decomposition of crop straw, CDM methodology and emission factor method were used to construct the measurement methods of baseline emission, project operation emission, project leakage emission and net emission reduction of GHG from straw-based BNG project. Using this measurement method, the CO₂ emission of the baseline of the straw-based BNG project in Linzhang County, Hebei Province in 2019 was 1.25×10⁵ t, the project emission (CO₂) was 1.21×10⁴ t, the leakage emission is 10.24 t, and the net emission reduction is 1.13×10⁵ t, which was equivalent to about 4.19×10⁴ t of standard coal CO₂ emissions. Therefore, the GHG emission reduction measurement system of straw-based BNG project based on natural decomposition of straw constructed in this

收稿日期: 2022-03-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771569)

第一作者: 周珂, 硕士研究生, E-mail:zhoukechn@sina.com

通讯作者: 高春雨, 副研究员, 主要从事农业资源管理与利用研究, E-mail:gaochunyu@caas.cn

study is of great significance for improving the GHG emission reduction estimation methodology system of BNG project and comprehensively evaluating the GHG emission reduction effect of BNG project.

Keywords crop straw; natural decomposition; BHG; GHG; carbon reduction

全球变暖是当前全球普遍关注的热点问题。联合国政府间气候变化专业委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)自 1990 起发布的历次气候变化评估报告均将当前的气候变暖问题归结于人类活动,尤其是温室气体的排放导致^[1]。IPCC 第 4 次评估报告表明,农业生产活动是全球温室气体的重要排放源,排放的 CH₄ 和 N₂O 分别占人类活动排放的 CH₄ 和 N₂O 总量的 50% 和 60%^[2]。据统计,2005 年我国温室气体排放总量为 76.67×10⁸ t,其中 10.28% 的温室气体排放量源于农业生产活动,但在 CH₄ 和 N₂O 排放量中,农业生产活动分别占 56.66% 和 74.02%^[3]。

《京都议定书》签订后,世界各国都在积极进行技术创新,利用可再生能源(生物质能、核能等)逐步替代化石能源,以实现碳减排的目标^[4]。我国作为负责任的大国,采取积极主动的有效方式逐步实现碳减排的目标,推动绿色能源的发展,完善可再生资源的配置,以期在 2030 年前实现碳达峰,力争在 2060 年前实现碳中和^[5]。以生物质能为代表的可再生能源是增速最快的能源,约占总能源增量的一半。生物质能作为最稳定的可再生能源,自带化学储能属性,便于储存、运输及转化,是未来唯一的可以作为燃料的零碳能源;同时可以通过技术手段转化为可燃气等产品,利用途径多样^[6]。我国是世界上的能源消费大国之一,并且预计将会成为最大的能源消费市场,为了应对全球气候变暖,亟待进行能源结构的转型调整^[7]。

生物天然气(Bio-Natural Gas, BNG)是指以农作物秸秆(简称秸秆)、畜禽粪污、餐厨垃圾、农副产品加工废水等各类城乡有机废弃物为原料,经厌氧发酵和净化提纯产生的绿色低碳清洁可再生的生物甲烷(Bio-methane)^[8-10]。生物天然气与压缩天然气的甲烷含量相当,可通过管道输送或压缩用于生活燃料和车用燃料,还可以用于发电,被称为代替汽油、天然气、石油液化气和煤炭最好的生物质可再生能源^[11]。我国是农业大国,农业生产带来的大量的生物质废弃物如秸秆、畜禽粪污等,为我国能源结构的转型升级提供了新思路,即生物天然气工程项目的开发,其中秸秆基生物天然气工程颇受关注。我

国的农作物秸秆的产量巨大,是生物天然气工程的重要原料来源,2020 年,我国秸秆产量约为 8.56 亿元,综合利用率为 86%。2009—2018 年,我国秸秆产量增加 1.27×10⁴ 万 t,年增长率为 2.01%,在 2018 年全国秸秆收集量中玉米秸秆贡献最大,占全国秸秆总产量的 32.34%^[12]。同时,未得到充分利用的农作物秸秆大部分被露天燃烧或随意堆放自然腐解,导致大量 CO₂、氮氧化物及多环芳烃等有害气体的产生,不仅危害人体健康,污染环境,更会加剧全球变暖的趋势^[13]。以作物秸秆为发酵原料来生产天然气的工程项目,即秸秆基生物天然气工程,既能实现化石能源替代,又能实现秸秆的资源化利用,同时有助于能源和农业领域的碳减排。发展生物天然气产业,不仅可有效处置农业废弃物,促进新农村建设,还能缓解化石能源短缺,保障能源安全,助力实现碳达峰及碳中和。生物天然气工程的副产品如沼渣沼液还可用于生产有机肥,能够带来直接的经济效益和节能效益^[11]。随着能源危机和全球变暖问题的不断加剧,大力发展可再生能源,减少碳排放的绿色发展道路已成为世界各国的共识。

目前,我国的生物天然气工程主要分为以农村家庭、农业和工业为基础的 3 类,其中秸秆基生物天然气工程主要是以农村家庭和农业为基础,二者均以农业废弃物如秸秆或动物粪便为原料进行加工生产,主要包括秸秆收集、秸秆预处理和发酵、产物的分离和提纯、产物的运输和利用 4 个过程。农村家庭用生物天然气工程具有鲜明的地区特色,以球形水压式厌氧发酵罐为基础进行了多次修改,如江西省的回流式发酵罐、云南省的“蜿蜒分布式发酵罐”、湖南省的气液分离的发酵罐等,并且还根据如厨房、农场、厕所、水果等不同的原料采集模式设计了不同的生物天然气生产流程。总的来说,农村家庭用生物天然气工程在全国各地均有分布,其中华北地区和西南地区的分布密度最大,产量最高^[14]。以农业为基础的生物天然气工程系统主要包括气体储存、发酵罐、生物液体储存空间、气体净化系统、沼气发电机和沼气运输系统^[14],其中秸秆类发酵原料的发酵装置宜采用完全混合式厌氧反应器(CSTR)、竖向推流式厌氧反应器(VPF)^[14-15]。生物天然气工程

集中分布在我国华北华中地区,其中四川省,山东省,广东省,浙江省,河南省的生物天然气工程主要以农业废弃物作为主要原材料,是秸秆基生物天然气工程的主要分布区域^[16]。

据农业农村部统计^[17],截至2019年,全国以农业废弃物为主要原料的沼气工程达到 10.265×10^4 处。其中,生物天然气工程44处,年产生物天然气 $1.965 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。生物天然气作为一项战略性新兴产业^[18],越来越受到研究者的关注。国内现有研究主要包括生物天然气制备技术^[8,19-21]、产业发展现状与政策^[9,20,22]、国际发展经验^[21,23-25]、温室气体(Greenhouse Gas, GHG)减排潜力^[17,26,27]等方面内容。少数研究者利用生命周期评估法(Life Cycle Assessment, LCA)对不同原料(秸秆,秸秆与畜禽粪污混合等)生物天然气工程不同环节的环境排放情况进行了分析^[28-30],郝丽娟等^[31]则采用自愿减排方法学对北京某垃圾填埋气提纯生物天然气项目的CO₂减排效益进行了评价。总体来看,在秸秆基生物天然气工程的环境评价方面,现有研究基本采用LCA法分析项目不同阶段的环境排放情况。综合考虑基准线排放情况以构建秸秆生物天然气工程温室气体减排定量估算方法,并结合典型案例开展秸秆基生物天然气工程温室气体减排实证研究还较为少见。随着我国秸秆禁烧政策的强力推进,各地秸秆焚烧现象逐渐减少,但秸秆被随意丢弃在村道、地头、沟渠及晒场等场所任其自然腐解的现象却相对较为严重^[32-33]。秸秆自然腐解的温室气体排放虽然未被《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》纳入温室气体排放清单中,但该过程的温室气体(CO₂、N₂O为主)排放量不可忽视,并且随着进一步政策监管和秸秆废弃问题的日趋严重,秸秆自然腐解将逐渐接近甚至取代秸秆焚烧成为秸秆处理过程中温室气体排放的主要贡献者。但是并没有足够的研究探讨在农作物秸秆自然腐解曲线的基础上秸秆基生物天然气工程的减排效果,现有的方法学中并没有形成完整的秸秆基生物天然气工程温室气体减排量计算方法体系。因此,本研究拟采用GHG自愿减排方法学,在前期开展模拟试验的基础上,构建以秸秆废弃自然腐解温室气体排放为基准线的秸秆基生物天然气工程温室气体减排计量方法,定量分析典型秸秆基生物天然气工程的温室气体减排效果,并以河北省临漳县中环新威绿色科技有限公司秸秆基生物天然气工程(以下简称临漳县秸秆基生物天

然气工程)为研究对象,以期为我国秸秆基生物天然气工程减排量的估算提供理论依据与方法支撑。

1 秸秆基生物天然气工程温室气体减排计量方法的建立

本研究中的温室气体减排量计算方法参照了国家发改委发布的关于GHG自愿减排方法学,以及《联合国气候变化框架公约》的清洁发展机制(Clean Development Mechanism)方法学和IPCC的《国家温室气体清单编制指南》,以秸秆废弃自然腐解情景下的温室气体排放为基准线,在确定秸秆基生物天然气工程项目边界的基础上,通过计算秸秆基生物天然气工程的基准线排放量、项目排放量及泄漏量,从而得出整个工程的温室气体净减排量。秸秆基生物天然气工程本质上是生物质能工程中的一种。秸秆基生物天然气工程的生产 and 利用过程遵循物质守恒,本质上没有固碳减碳的效应,但是秸秆资源若不充分利用,不管是焚烧还是自然腐解,最终都会产生碳排放,因此对秸秆资源的收集利用是属于源头减排;使用生物天然气可以减少化石能源的消耗,由生物天然气替代的使用量可算作终端替代减排量。因此,本研究中秸秆基生物天然气工程总的减排量,是由源头减排量和终端替代减排量之和减去生产环节的排放量共同决定。

1.1 项目边界确定

秸秆基生物天然气工程项目边界及主要温室气体排放源(表1)如下:

1) 秸秆基生物天然气工程不存在时秸秆废弃自然腐解排放。试验表明^[34],该环节排放的主要温室气体包括CH₄和N₂O;

2) 生物天然气、生物有机肥、食品级CO₂的替代排放。该环节排放的主要温室气体为CO₂;

3) 秸秆、生物天然气等物料和产品在运输过程中的消耗。该环节排放的主要温室气体为CO₂;

4) 生物天然气生产过程中的化石能源、工程用电等消耗。该环节排放的主要温室气体同样为CO₂;

5) 秸秆基生物天然气工程中的项目泄露。该环节排放的主要温室气体包括CH₄和CO₂。

1.2 基准线排放量计算方法

基准线排放量包括农作物秸秆自然腐解温室气体排放量,以及不存在秸秆基生物天然气工程的情景下,生物天然气替代化石能源的排放量、生物有机

表 1 秸秆基生物天然气工程项目边界内的主要温室气体排放源

Table 1 Main greenhouse gas emission sources within the boundary of straw BNG project

情景 Scene	排放源 Emission source	温室气体 GHG	计入/排除 Counting/Excluding	解释说明 Explanation		
基准线 Baseline	秸秆废弃 Straw discarded	CO ₂	排除 Excluding			
		CH ₄	计入 Counting	主要排放源		
		N ₂ O	计入 Counting	主要排放源		
	天然气替代 Natural gas substitution		CO ₂	计入 Counting	主要排放源	
			CH ₄	排除 Excluding		
			N ₂ O	排除 Excluding		
	化学肥料替代 Chemical fertilizer substitution		CO ₂	计入 Counting	主要排放源	
			CH ₄	排除 Excluding		
			N ₂ O	排除 Excluding		
		食品级 CO ₂ Food-grade CO ₂		CO ₂	计入 Counting	主要排放源
				CH ₄	排除 Excluding	
				N ₂ O	排除 Excluding	
运输能耗 Transport energy consumption		CO ₂	计入 Counting	主要排放源		
		CH ₄	排除 Excluding			
		N ₂ O	排除 Excluding			
	工程运行化石燃料消耗 Fossil fuel consumption for project		CO ₂	计入 Counting	主要排放源	
			CH ₄	排除 Excluding		
			N ₂ O	排除 Excluding		
工程运行电力消耗 Power consumption for project		CO ₂	计入 Counting	主要排放源		
		CH ₄	排除 Excluding			
		N ₂ O	排除 Excluding			
泄露排放 Leakage emission	工程运行泄露排放 Project operation leakage emission	CO ₂	计入 Counting	主要排放源		
		CH ₄	计入 Counting	主要排放源		
		N ₂ O	排除 Excluding			

肥与食品级 CO₂ 生产温室气体排放量。该项目中的基准线排放量计算式如下：

$$BE = BE_{\text{straw}} + BE_{\text{biogas}} + BE_{\text{fertilizer}} + BE_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

式中：BE 为基准线排放量，t；BE_{straw} 为秸秆自然腐解温室气体排放量，t；BE_{biogas} 为生物天然气替代化石能源温室气体排放量，t；BE_{fertilizer} 为生物有机肥替代化肥温室气体排放量，t；BE_{CO₂} 为生产食品级 CO₂ 温室气体排放量，t。

1.2.1 秸秆自然腐解温室气体排放量计算方法

本研究采用农作物秸秆自然腐解的温室气体排

放量作为秸秆基生物天然气工程的原料基准线排放量，式为：

$$BE_{\text{straw}} = (25EF_{\text{CH}_4, \text{straw}} + 298EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{straw}}) \times (1 - W_{\text{straw}}) \times F_{\text{straw}} \quad (2)$$

式中：EF_{CH₄, straw} 为秸秆自然腐解 CH₄ 排放系数，t/t；EF_{N₂O, straw} 为秸秆自然腐解 N₂O 排放系数，t/t；W_{straw}，秸秆含水率，%；F_{straw} 为工程秸秆消耗量，t。

1.2.2 生物天然气替代排放量

生物天然气替代排放量是指与秸秆基生物天然气工程产生的天然气同等热值的化石燃料燃烧产生

的温室气体排放量,计算方法如下:

$$BE_{\text{biogas}} = F_{\text{biogas}} \times NCV_b \times EF_n \quad (3)$$

式中: F_{biogas} 为工程生物天然气产量, m^3 ; NCV_b 为生物天然气净热值, GJ/m^3 ; EF_n 为标准煤排放因子,即每产生1 GJ热量的温室气体 CO_2 排放量, t/GJ 。

1.2.3 沼渣沼液替代排放量与固碳量计算

沼渣沼液替代排放量是指与生产沼渣沼液等量的氮、磷、钾化肥需要消耗煤炭、天然气、石油等化石能源的温室气体排放量,计算式如下:

$$BE_{\text{fertilizer}} = FN \times EF_N + FP \times EF_P + FK \times EF_K + F_{\text{straw}} \times \frac{44C_{\text{straw}}}{12} \quad (4)$$

式中: FN 为生物有机肥中氮肥含量, t ; EF_N 为氮肥生产的温室气体排放系数,即每生产1 t氮肥的温室气体 CO_2 排放量; FP 为生物有机肥中磷肥含量, t ; EF_P 为磷肥生产温室气体排放系数,即每生产1 t磷肥的温室气体 CO_2 排放量, t/t ; FK 为生物有机肥中钾肥含量, t ; EF_K 为钾肥生产温室气体排放系数,即每生产1 t钾肥的温室气体 CO_2 排放量, t/t ; C_{straw} 为秸秆含碳量, $\%$ 。

1.2.4 食品级 CO_2 替代排放量

食品级 CO_2 替代排放量是指生产同等质量的食品级 CO_2 消耗的化石能源所排放的温室气体排放量,计算式如下:

$$BE_{\text{CO}_2} = FS \times EF_c + FS \quad (5)$$

式中: FS 为食品级 CO_2 的生产量, t ; EF_c 为生产食品级 CO_2 的温室气体排放系数, t/t 。

1.3 项目运行排放量计算方法

秸秆基生物天然气工程生产过程中温室气体的排放主要包括运输过程中(包括秸秆、生物天然气等的运输过程)的排放,工程运行过程中(包括原料预处理、沼气发酵、沼气提纯、生物有机肥生产等过程)消耗化石燃料和电力的排放。计算式为:

$$PE = PE_{\text{trs}} + PE_{\text{fossil}} + PE_{\text{electric}} \quad (6)$$

式中: PE 为生物天然气生产过程温室气体排放量, t ; PE_{trs} 为运输过程中的温室气体排放量, t ; PE_{fossil} 为工程运行过程中消耗化石燃料所排放的温室气体量, t ; PE_{electric} 为工程运行中所耗电能的温室气体排放量, t 。

1.3.1 运输过程排放量计算方法

运输过程排放量指的是秸秆、生物天然气等运输环节消耗燃料产生的温室气体排放量。借鉴CDM方法学“工具12”,运输过程中的温室气体排

放量为运输活动的燃料消耗、燃料净热值以及化石燃料的 CO_2 排放因子三者的乘积^[35],计算式如下:

$$PE_{\text{trs}} = \sum_i FT_{\text{trs},i} \times NCV_i \times EF_i \quad (7)$$

式中: $FT_{\text{trs},i}$ 为第 i 种燃料运输活动的燃料消耗, t ; NCV_i 为第 i 种燃料的净热值, GJ/t ; EF_i 为第 i 种燃料的 CO_2 排放因子,即每产生1 GJ热量的温室气体 CO_2 排放量, t/GJ 。

1.3.2 工程运行消耗化石燃料的温室气体排放量计算方法

工程运行消耗化石燃料的温室气体排放量是指工程运行过程中消耗的所有化石燃料温室气体排放总和,包括原料预处理、沼气发酵、沼气提纯、生物有机肥生产等过程。借鉴CDM方法学“工具03”工程运行消耗化石能源的温室气体排放量为该工程所使用化石能源的净热值及其 CO_2 排放因子与该工程所消耗的化石能源数量的乘积^[36],计算式如下:

$$PE_{\text{fossil}} = \sum_m FF_m \times NCV_m \times EF_m \quad (8)$$

式中: FF_m 为工程运行消耗的第 m 种类型化石燃料的数量, t ; NCV_m 为第 m 种类型化石燃料的净热值, GJ/t ; EF_m 为第 m 种类型化石燃料的 CO_2 排放因子,即每产生1 GJ热量的温室气体 CO_2 排放量, t/GJ 。

1.3.3 工程运行消耗电能温室气体排放量计算方法

工程运行消耗电能温室气体排放量是指该区域生产同等电能而产生的温室气体排放量。借鉴CDM方法学“工具07”电力消耗温室气体排放量为秸秆基生物天然气工程所在区域电网的 CO_2 排放因子与该工程消耗的电网电力乘积^[37],计算式如下:

$$PE_{\text{electric}} = FE_e \times EF_e \quad (9)$$

式中: FE_e 为工程运行消耗的总电量, MWh ; EF_e 为该区域电网的 CO_2 排放因子,即每产生1 MWh电能的温室气体 CO_2 排放量, t/MWh 。

1.4 工程泄漏排放量计算方法

本研究将秸秆生物天然气生产、储存、供气 and 利用过程中因物理泄漏引起的温室气体排放作为泄漏排放量,包括秸秆生物天然气泄漏及食品级 CO_2 的泄露。计算方法如下:

$$LE = FW_w \times W_{\text{CH}_4} \times D_{\text{CH}_4} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} + LE_{\text{CO}_2} \quad (10)$$

式中: LE 为工程泄漏排放量, t ; FW_w 为生物天然气

泄露总量, m^3 ; W_{CH_4} 为泄露生物天然气甲烷含量, %; D_{CH_4} 为生物天然气甲烷密度, t/m^3 ; GWP_{CH_4} 为甲烷的全球增温潜势, t/t ; LE_{CO_2} 为秸秆基生物天然气工程食品级 CO_2 泄漏量, t 。

1.5 秸秆基生物天然气工程温室气体净减排计算方法

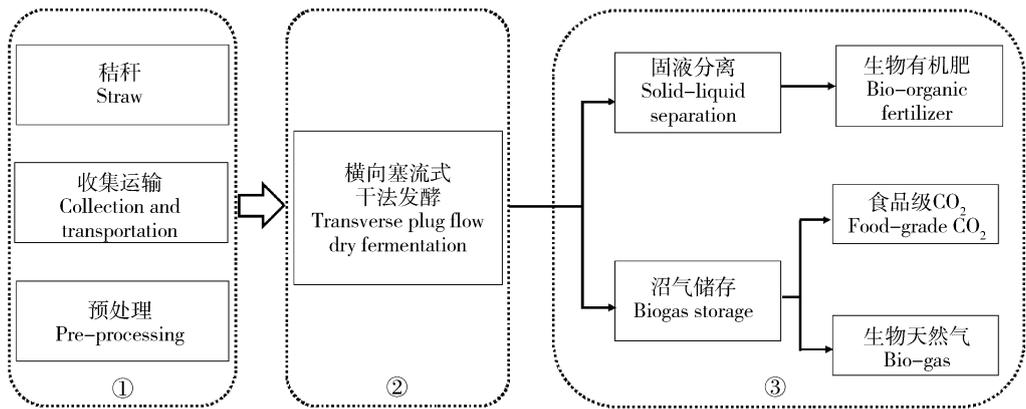
秸秆基生物天然气工程温室气体净减排量等于基准线排放量减去项目排放量及工程泄露排放量。计算式如下:

$$E = BE - PE - LE \quad (11)$$

式中: E 为秸秆基生物天然气工程温室气体净减排量, t ; BE 为基准线排放量, t ; PE 为生物天然气生产过程温室气体排放量, t ; LE 为工程泄漏排放量, t 。

2 对河北省临漳县秸秆基生物天然气工程温室气体减排量测算

以河北省临漳县秸秆基生物天然气工程为例, 运用本研究中构建的秸秆基生物天然气工程温室气体排放计量方法开展实证研究。



①原材料供应单元;②干法发酵单元;③沼气净化提纯和生物有机肥加工单元。

① Straw supply unit; ② Dry fermentation unit; ③ Biogas purification and bio organic fertilizer production unit.

图 1 河北省临漳县秸秆基生物天然气工程流程图

Fig. 1 Process flow chart of straw bio-natural gas project in Linzhang County, Hebei Province

2.2 数据获取

计算过程中所需的参数和数据主要通过工程监测、文献查阅等方式获取。工程监测数据包括秸秆基生物天然气工程生产的生物天然气含量、热值, 生物有机肥氮磷钾养分含量、秸秆含水率, 工程运行过程中化石能源消耗量、电力消耗量、工程运行泄漏量以及农作物秸秆消耗量等; 文献查阅获取的数据主要有生物有机肥生产的排放系数、地区电网发电的

2.1 工程概况

临漳县秸秆基生物天然气工程以玉米秸秆为原料生产生物天然气、有机肥料、食品级 CO_2 等产品。项目采用横向塞流式干法发酵工艺, 配套建设原料储存库、集装箱式厌氧反应器、沼气净化提纯设备、有机肥加工车间等设施。每年可生产生物天然气 $1.346 \times 10^7 m^3$ (CH_4 含量 85%, 高位发热量 $34 MJ/m^3$)、食品级 CO_2 $2.1 \times 10^4 t$, 生物有机肥 $7 \times 10^4 t$, 年处理玉米秸秆(含水率 65%) $13 \times 10^4 t$, 冬季可满足 5 000 户居民炊事取暖耗能。

该工程流程分为原材料供应单元、干法发酵单元、沼气净化提纯和生物有机肥加工单元 3 个部分。首先对农作物秸秆进行收集集中后进行预处理; 经过预处理之后的发酵原材料会通过横向塞流式干法发酵方式完成发酵过程; 最后根据发酵产物的用途不同进行收集储存, 其中发酵残渣和发酵液会被用作生物有机肥参与到下一轮的物质循环过程, 发酵产生的气体主要是由 CH_4 和 CO_2 组成, 经过变压吸附后生产出食品级的 CO_2 和生物天然气。

排放因子、玉米秸秆自然腐解 GHG 排放系数等。获取的相关参数如表 2 所示。

2.3 对河北省临漳县秸秆基生物天然气工程温室气体减排测算的结果与分析

本研究中构建的秸秆基生物天然气工程温室气体减排量计算方法参照国家发改委发布的关于 GHG 自愿减排方法学, CDM 方法学及 IPCC 的《国家温室气体清单编制指南》, 结合当下我国农作物秸秆主要

表2 河北省临漳县秸秆基生物天然气工程 GHG 减排量计算参数

Table 2 Calculation parameters of greenhouse gas emission reduction in straw bio-nature gas project in Linzhang County, Hebei Province

参数 Parameter	参数描述 Parameter description	数据 Data	单位 Unit	数据来源 Data source
F_{straw}	工程消纳秸秆量	1.3×10^5	t	工程监测
$EF_{\text{CH}_4, \text{straw}}$	秸秆自然腐解 CH_4 排放系数	0.232×10^{-3}	t/t	[34]
$EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{straw}}$	秸秆自然腐解 N_2O 排放系数	0.136×10^{-3}	t/t	[34]
EF_n	标煤排放因子	0.056	t/GJ	[38]
F_{biogas}	项目生产生物天然气总量	1.346×10^7	m^3	工程监测
NCV_b	生物天然气净热值	0.034	GJ/m^3	工程监测
FN	生物有机肥中氮肥产量	1 253	t	工程监测
FP	生物有机肥中磷肥产量	679	t	工程监测
FK	生物有机肥中钾肥产量	1 750	t	工程监测
EF_N	氮肥生产 GHG 排放系数	4.85	t/t	[39]
EF_P	磷肥生产 GHG 排放系数	0.71	t/t	[39]
EF_K	钾肥生产 GHG 排放系数	0.36	t/t	[39]
FS	食品级 CO_2 生产量	21 000	t	工程监测
EF_c	食品级 CO_2 GHG 排放系数	0.23	t/t	[40]
$FT_{\text{trs}, i}$	工程运输活动柴油消耗	165.54	t	工程监测
NCV_i	运输燃料的净热值	43	GJ/t	[38]
EF_i	运输燃料的 CO_2 排放因子	0.074	t/GJ	[38]
FE_e	工程运行消耗的总电量	11 537.14	MWh	工程监测
EF_e	区域电网的 CO_2 排放因子	1.000	t/MWh	[41]
FW_w	泄露生物天然气总量	673	m^3	工程监测
D_{CH_4}	生物天然气中的甲烷密度	0.716	t/m^3	[38]
W_{CH_4}	泄露生物天然气中甲烷的含量	85	%	工程监测
GWP_{CH_4}	甲烷的全球增温潜势	25	t/t	[38]
W_{straw}	秸秆含水率	65	%	工程监测

以堆放自然腐解为主,通过计算秸秆自然腐解排放量、天然气和生物有机肥替代排放量以及 CO_2 生产排放量确定临漳县秸秆基生物天然气工程基准线排放量,通过文献查阅和实测数据计算秸秆基天然气工程的项目排放量,泄露排放量。通过计算基准线排放量、项目排放量和泄露排放量确定临漳县秸秆

基生物天然气工程温室气体减排量。

2.3.1 基准线排放量

据式(1)计算可知,临漳县秸秆基生物天然气工程 2019 年基准线排放量(以 CO_2 计)为 125 325.58 t。其中秸秆自然腐解基准线排放量 2 083.65 t,占基准线排放的 1.66%;生物天然气替代排放量

25 673.60 t,占基准线排放的 20.49%;生物有机肥替代和食品级 CO₂ 替代排放量(CO₂)分别为 71 738.33 和 25 830 t,分别占基准线排放的 57.24%和 20.61%。

2.3.2 项目排放量

临漳县秸秆基生物天然气工程项目排放主要包括 2 个方面:一方面是项目运行运输过程化石燃料排放;另一方面是项目运行消耗电能排放。根据式(7)和(9)计算可知,2019年,该工程因运输产生的温室气体排放量(以 CO₂ 计)527.46 t,工程运行中因耗电产生的温室气体排放量为 11 537.14 t。根据式(6)计算可知,该工程运行过程温室气体排放量为 12 064.60 t。其中,因用电产生的温室气体排放占工程运行总排放量的 95.68%,是工程运行过程中主要的温室气体排放源。

2.3.3 泄露排放量

工程泄露主要发生在提纯设备油气分离后,排污时可能带走部分生物天然气。在生产食品级 CO₂ 及生物天然气的其他环节,也会有微量泄露,在本研究中忽略不计。工程监测数据表明,2019年临漳县

秸秆基生物天然气工程生物天然气泄漏量 673 m³ (CH₄ 含量为 85%)。根据式(10)计算可知,该工程泄露排放量(CO₂)10.24 t,占项目排放量的 0.08%。

2.3.4 温室气体减排量

综上所述,2019年临漳县秸秆基生物天然气工程基准线排放量(CO₂)125 325.58 t,约相当 46 416.88 t 标准煤的 CO₂ 排放量;项目排放量 12 064.60 t,约相当于 4 468.37 t 标准煤的 CO₂ 排放量;泄露排放量 10.24 t,约相当于 3.79 t 标准煤的 CO₂ 排放量。临漳县秸秆基生物天然气工程温室气体排放量见表 3,其中 CH₄ 的 CO₂ 转化当量为 25,N₂O 的 CO₂ 转化当量为 298^[32]。

根据式(11)计算,2019年临漳县秸秆基生物天然气工程净减排量 113 250.74 t,约相当于 41 944.72 t 标准煤的 CO₂ 排放量,温室气体减排优势明显。该工程年消耗秸秆 13 万 t,年产生生物天然气 1 346 万 m³。据此计算,该工程每消耗 1 t 秸秆(含水率 65%),将会减少 871.16 kg 的 CO₂ 排放,每生产利用 1 m³ 的生物天然气,将会减少 8.41 kg CO₂ 排放。

表 3 临漳县秸秆基生物天然气工程温室气体排放量

Table 3 Greenhouse gas emissions in Linzhang straw bio-nature gas project t

情景 Scene	排放源 Emission source	排放量 (以 CO ₂ 计) Emission load	总排放量 (以 CO ₂ 计) Total emission
基准线 Baseline	秸秆自然腐解 Natural decomposition of straw	2 083.65	125 325.58
	生物天然气替代 Natural gas substitution	25 673.60	
	生物有机肥替代 Bio-organic fertilizer replacement	71 738.33	
	食品级 CO ₂ 替代 Food-grade CO ₂ replacement	25 830.00	
项目排放 Project emission	工程运输消耗 Transport energy consumption for project	527.46	12 064.60
	工程电力消耗 Power consumption for project	11 537.14	
泄露排放 Leakage emission	工程运行泄露排放 Project operation leakage emission	10.24	10.24

3 讨论

3.1 生物天然气工程项目排放

本研究构建的秸秆基生物天然气工程温室气体减排估算方法是结合我国对于农作物秸秆利用的现状,创新性地选择了农作物秸秆自然腐解温室气体排放量作为基准线,并采用 CDM 方法学计算排放量的步骤和排放因子法构建的。随着我国对于秸秆禁烧力度的加大,农作物秸秆在未能完成充分利用时,最大可能将会被堆积废弃,采用秸秆自然腐解基准线更符合我国国情,能够更精确的核算秸秆基生物天然气工程的温室气体减排量。

本研究选取的秸秆基生物天然气工程 95% 以上的项目排放来自电力消耗,这与 Liu 等以我国内蒙古自治区科尔沁旗的玉米秸秆基生物天然气工程为例研究结果类似,该研究运用 LCA 法对该工程全生命周期的温室气体排放情况进行了分析,结果显示项目电力消耗在全生命周期排放中起主导作用^[29]。在河北省临漳县秸秆基生物天然气工程中电力消耗主要集中在沼气发酵和沼气提纯阶段,在不考虑农作物秸秆自然腐解温室气体基准线排放的情况下,秸秆基生物天然气工程每生产 1 m³ 的生物天然气(CH₄ 含量 ≥ 85%) CO₂ 排放量为 0.90 kg。在项目排放各环节中,沼气提纯过程对环境排放影响最大,CO₂ 排放量约占项目排放量的 53.4%;其次为沼气发酵阶段,CO₂ 排放量约占项目排放量的 34.4%;沼渣沼液有机肥生产阶段和工程运输阶段(包括秸秆运输与生物天然气运输) CO₂ 排放量约占项目排放量的 7.9% 和 4.4%。吴媛媛等^[28] 研究河北省、年产生生物天然气 3.95 × 10⁶ m³ (CH₄ 含量 ≥ 95%) 的玉米秸秆沼气生物天然气工程发现,在项目运行阶段,每生产 1 m³ 生物天然气,CO₂ 排放量约 0.82 kg,该数值略低于本研究估算结果(0.90 kg/m³)。吴媛媛等^[28] 研究案例在生产天然气过程中 CO₂ 排放量略低于本研究估算结果的原因可能是由于本研究中运输阶段耗油量较高,且考虑了沼渣沼液生产有机肥多次运输所致。与本研究结果相似,吴媛媛等^[28] 的研究发现在项目排放各环节中,对环境排放影响最大的单元也是沼气提纯过程,但其沼气提纯过程的 CO₂ 排放量约占项目排放量的 72.7%,高于本研究估算的比例(53.4%)。这可能与甲烷提取纯度高低等因素有关;该研究中沼气发酵阶段 CO₂ 排放量约占整个项目排放量的

19.4%,低于本研究估算的项目排放比例(34.4%),可能与其选取的沼气发酵工艺有关;此外,该研究的生物天然气工程采用了传统的全混湿法发酵工艺,而本研究案例中采用的则为横向塞流式干法发酵工艺。与本研究 and 上述研究结果不一致的是,许海朋等^[42] 研究发现传统的湿法发酵工艺与干法发酵工艺相比,具有用水多、能耗高的缺点^[42]。究其原因分析如下:吴媛媛等^[28] 和许海朋等^[42] 分别研究的案例中的生物天然气工程均位于北方地区(河北省),在冬季低温情况下,湿法发酵工艺前期加温用能可能较高,由于含水量较高,传热可能会更均匀;当发酵罐加温到一定温度后,湿法发酵与干法发酵相比,更容易保持温度,后期加温用能反而有降低的可能性。

3.2 生物天然气工程温室气体减排

本研究估算出河北省临漳县秸秆基生物天然气工程的净减排量达到 113 250.74 t CO₂,相当于近 41 944.72 t 标准煤的 CO₂ 排放量,具有很好的温室气体减排潜力。该工程每生产利用 1 m³ 生物天然气(CH₄ 含量 ≥ 85%),将减少 8.41 kg CO₂ 排放;每消耗 1 t 干秸秆,将减少 2.49 t 的 CO₂ 排放。该值远高于吴媛媛等^[28] 的研究结果(每消耗 1 t 干秸秆,减少约 397.83 kg 的 CO₂ 排放)。造成这种差异的主要原因是本研究利用排放因子法计算本案例中的基准线排放量及利用 CDM 方法学中的计算减排量的步骤对临漳县的天然气工程进行减排计算,而吴媛媛等^[28] 的研究结果是基于生命周期评价方法计算对应案例的减排量。不同的碳核算方法得到的减排量会有偏差,排放因子法具有成熟的核算式和活动数据、排放因子数据库等优势,计算出的基准线更具有代表性。

综上,本研究在分析生物天然气工程项目运行阶段温室气体排放环节,重点考虑了运输阶段、工程运行阶段的化石能源消耗,并据此从整体上对项目运行阶段温室气体排放进行了估算。然而,并未按照原料预处理、厌氧发酵、沼气提纯等不同环节进行逐项核算。在后续研究中应再进行细化研究;玉米秸秆自然腐解温室气体排放因子测定试验中,仅考虑了陆地堆放的情景,暂未考虑水体淹育情景;另外,在选取参数方面,本研究部分采用了 IPCC 的默认值,为使秸秆基生物天然气工程温室气体减排量计算更为准确,今后还应进一步加强参数研究。最后,可考虑开展不同地区、不同农作物秸秆、不同工

艺模式的秸秆基生物天然气工程减排量定量估算, 加强农作物秸秆基生物天然气工程生态补偿、综合效益评估等方面的研究。

4 结 论

本研究主要结论如下:

1) 本研究参考 UNFCCC 方法学和 IPCC 国家温室气体清单指南, 以试验监测为基础, 基于农作物秸秆自然腐解基准线, 建立了秸秆基生物天然气工程温室气体减排计量方法。该方法包括项目边界、基准线排放、项目排放、泄露排放等指标。基准线包括秸秆基生物天然气工程不存在时的秸秆自然腐解排放基准线, 生物天然气和食品级 CO₂ 替代排放基准线, 生物有机肥固碳和化肥替代排放基准线; 项目排放包括运输过程化石燃料排放、项目运行过程电力消耗排放等; 泄露量包括秸秆生物天然气泄漏及食品级 CO₂ 的泄露。

2) 以河北省邯郸市临漳县秸秆基生物天然气工程为例, 运用本研究构建的秸秆基生物天然气工程温室气体减排计量方法进行估算, 该工程温室气体年减排量(以 CO₂ 计)达到 113 250.74 t, 约相当于 41 944.72 t 标准煤的 CO₂ 排放量。这表明实施规模化秸秆基生物天然气工程具有明显的减排效果。在基准线排放、项目排放和泄露排放中, 基准线排放量最高, 达到 125 325.58 t; 项目排放量次之, 年排放量 12 064.60 t。项目排放以电力耗能排放为主, 占项目排放总量的 95% 以上; 泄露排放量最少, 相当于项目排放量的 0.08%。

参考文献 References

[1] Choi E J, Jeong H C, Kim G Y, Lee S I, Lee J S. Estimation of national greenhouse gas emissions in agricultural sector from 1990 to 2013: focusing on the crop cultivation[J]. *Journal of Climate Change Research*, 2016, 7(4): 443

[2] IPCC, Core Writing Team. *Climate Change 2007: Synthesis Report*[M]. Geneva: IPCC, 2007

[3] 苏伟. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013

Su W. *Second National Communication on Climate Change of the People's Republic of China*[M]. Beijing: China Economic Press, 2013 (in Chinese)

[4] Kim Y. Technological innovation, the Kyoto Protocol, and open innovation[J]. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2021, 7(3): 198

[5] 谭显春, 郭雯, 樊杰, 郭建新, 汪明月, 曾桢, 苏利阳, 孙翊. 碳达峰. 碳中和政策框架与技术创新政策研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 435-443

Tan X C, Guo W, Fan J, Guo J X, Wang M Y, Zeng A, Su L Y, Sun Y. Research on carbon dumping, carbon neutral policy framework and technological innovation policy[J]. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 435-443 (in Chinese)

[6] 单明. 生物质能开发利用现状及挑战[J]. 可持续发展经济导刊, 2022(4): 48-49

Shan M. Current status and challenges of biomass energy development and utilization [J]. *Journal of Sustainable Development Economics*, 2022(4): 48-49 (in Chinese)

[7] Ruelh C, Giljum J. BP energy outlook 2030[EB/OL]. (2022-01-05). <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2011.pdf>

[8] 郑戈, 张全国. 沼气提纯生物天然气技术研究进展[J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2013, 29(17): 1-8

Zheng G, Zhang Q G. Review on biogas upgrading technologies for producing biomethane [J]. *Agricultural Engineering Technology: New Energy Industry*, 2013, 29(17): 1-8 (in Chinese)

[9] 邱灶杨, 张超, 陈海平, 宋涛, 范嘉堃. 现阶段我国生物天然气产业发展现状及建议[J]. 中国沼气, 2019, 37(6): 50-54

Qiu Z Y, Zhang C, Chen H P, Song T, Fan J K. The present development situation of bio-natural gas industry in China[J]. *China Biogas*, 2019, 37(6): 50-54 (in Chinese)

[10] Zheng G, Zhang Q. Review on biogas upgrading technologies for producing biomethane [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17): 1-8

[11] 欧阳平凯, 贾红华, 韦萍. 绿色可再生能源: 生物天然气[C]. 北京: 第四届建设创新型国家大会: 首届中国农资分论坛, 2012

Ouyang P K, Jia H H, Wei P. Green renewable energy: biogas[C]// *The Fourth Conference on Building an Innovative Country-The First China Agricultural Capital Forum*, Beijing: 2012 (in Chinese)

[12] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 白海花, 塔娜. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 30-41

Zhang X Q, Wang Z F, Canmuyou, Bai H H, Tana. Analysis of yield and current comprehensive utilization of crop straws in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(9): 30-41 (in Chinese)

[13] 赵建宁, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 812-816

Zhao J N, Zhang G L, Yang D L. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 812-816 (in Chinese)

- [14] Giwa A S, Ali N, Ahmad I, Asif M, Guo R B, Li F L, Lu M. Prospects of China's biogas: fundamentals, challenges and considerations[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 2973-2987
- [15] 张洪岩, 杨小平, 卞琦, 何伟男. 生物质项目厌氧发酵工艺选型研究[J]. 河南科技, 2021, 40(7): 103-105
Zhang H Y, Yang X P, Bian Q, He W N. Study on selection of anaerobic fermentation process for biomass project [J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(7): 103-105 (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准. 大中型沼气工程技术规范[M]. 中国建筑工业出版社, 2015
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National Standard of the People's Republic of China. *Technical Specifications for Large and Medium-sized Biogas Projects* [M]. China Construction Industry Press, 2015 (in Chinese)
- [17] 霍丽丽, 赵立欣, 姚宗路, 罗娟, 张沛祯, 谢腾, 贾吉秀, 邓云, 魏欣宇. 农业生物质能温室气体减排潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 179-187
Huo L L, Zhao L X, Yao Z L, Luo J, Zhang P Z, Xie T, Jia J X, Deng Y, Wei X Y. Potentiality of agricultural biomass energy for greenhouse gas emission reduction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 179-187 (in Chinese)
- [18] 程序, 崔宗均, 朱万斌. 呼之欲出的中国生物天然气战略性新兴产业[J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 141-148
Cheng X, Cui Z J, Zhu W B. The upcoming bio-natural gas in China: A strategic emerging industry [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(9): 141-148 (in Chinese)
- [19] 包海军. 我国沼气提纯技术及生物天然气产业发展情况[J]. 中国沼气, 2021, 39(1): 54-58
Bao H J. Biogas purification technology and development of biogas industry in China[J]. *China Biogas*, 2021, 39(1): 54-58 (in Chinese)
- [20] 李文涛, 韩晓峰, 高丽娟, 牛天祥. 基于定州市规模化生物天然气示范项目的生物制气技术[J]. 西北水电, 2019(2): 90-94
Li W T, Han X F, Gao L J, Niu T X. Biogas production technology based on Dingzhou large-scale bio-natural gas demonstration project[J]. *Northwest Hydropower*, 2019(2): 90-94 (in Chinese)
- [21] 冉毅, 蔡萍, 黄家鹤, 王超, 汤晓玉, 王斌. 国内外沼气提纯生物天然气技术研究及应用[J]. 中国沼气, 2016, 34(5): 61-66
Ran Y, Cai P, Huang J H, Wang C, Tang X Y, Wang B. A review on research and application of biogas upgrading technologies in China and abroad[J]. *China Biogas*, 2016, 34(5): 61-66 (in Chinese)
- [22] Zheng L, Cheng S K, Han Y Z, Wang M, Xiang Y, Guo J L, Cai D, Mang H P, Dong T L, Li Z F, Yan Z X, Men Y. Bio-natural gas industry in China: Current status and development [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 128: 109925
- [23] 王波, 王超, 于光林, 窦克军. 欧洲生物天然气产业发展的思考[J]. 中国能源, 2019, 41(12): 40-44
Wang B, Wang C, Yu G L, Dou K J. Thoughts on the development of European biogas industry [J]. *Energy of China*, 2019, 41(12): 40-44 (in Chinese)
- [24] 王雅菲, 赵博渊. 德国生物天然气发展现状及对我国的经验借鉴[J]. 再生资源与循环经济, 2020, 13(4): 42-44
Wang Y F, Zhao B Y. The development of biogas in Germany and its reference to China [J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2020, 13(4): 42-44 (in Chinese)
- [25] 程序, 郑恒受, 梁近光, 朱万斌, 崔宗均. 开发产业沼气实现生物天然气对天然气的替代: 有机废弃物厌氧处理从“环保主导”向“能源-环保双赢”的转型[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 29-34, 56
Cheng X, Zheng H S, Liang J G, Zhu W B, Cui Z J. Tapping biogas industry, substituting biomethane to natural gas—transition of organic wastes disposal from “environment-center” model to “win-win” one of producing bioenergy and degrading pollutants[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(2): 29-34, 56 (in Chinese)
- [26] 郭瑞琦, 张雅聪, 桑明娟, 万濛, 徐霞. 江苏省农作物秸秆的生物天然气潜力及其温室气体减排估算[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(34): 111-114, 181
Guo R Q, Zhang Y C, Sang M J, Wan M, Xu X. Biogas potential of crop straw and the estimation of reduction for its greenhouse gas emission in Jiangsu Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(34): 111-114, 181 (in Chinese)
- [27] Sun H, Wang E Z, Li X, Cui X, Guo J B, Dong R J. Potential biomethane production from crop residues in China: Contributions to carbon neutrality[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 148: 111360
- [28] 吴媛媛, 常旭宁, 张佳维. 基于LCA方法的秸秆沼气发电和制备生物天然气的环境排放评价[J]. 中国沼气, 2020, 38(1): 59-65
Wu Y Y, Chang X N, Zhang J W. Environmental emission evaluation for straw biogas power generation and bio-natural gas preparation based on LCA method [J]. *China Biogas*, 2020, 38(1): 59-65 (in Chinese)
- [29] Liu H S, Ou X M, Yuan J H, Yan X Y. Experience of producing natural gas from corn straw in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 135: 216-224
- [30] Yang Y, Ni J Q, Zhu W B, Xie G H. Life cycle assessment of large-scale compressed bio-natural gas production in China: A case study on manure co-digestion with corn stover [J]. *Energies*, 2019, 12(3): 429
- [31] 郝丽娟, 孙明焯, 常旭宁. 垃圾填埋气提纯生物天然气的碳减排效益分析[J]. 煤气与热力, 2018, 38(12): 26-31
Hao L J, Sun M Y, Chang X N. Analysis of carbon emission

- reduction benefits of bio-natural gas purified from landfill gas [J]. *Gas & Heat*, 2018, 38(12): 26-31 (in Chinese)
- [32] 王瑞波, 姜茜, 孙伟琳, 刘丽萍. 我国秸秆焚烧管理和综合利用的法律法规研究及建议[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 245-252
- Wang R B, Jiang Q, Sun W L, Liu L P. Research and proposals on laws and regulations of crop straw burning control and comprehensive utilization in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 245-252 (in Chinese)
- [33] 覃诚, 毕于运, 高春雨, 王亚静, 周珂, 王莹. 中国农作物秸秆焚烧管理与效果[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 181-189
- Qin C, Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, Zhou K, Wang Y. Management and effect of straw burning prohibition in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(7): 181-189 (in Chinese)
- [34] 周珂. 基于秸秆自然腐解基准线的生物天然气工程生态价值估算方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020
- Zhou K. Study on estimation method of ecological value of bio-nature gas project based on straw natural decomposition baseline[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese)
- [35] UNFCCC, Project and leakage emissions from transportation of freight[EB/OL]. (2020-07-15). <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-12-v1.1.0.pdf>
- [36] UNFCCC, Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion[EB/OL]. (2020-07-15). <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-03-v3.pdf>
- [37] UNFCCC, Tool to calculate the emission factor for an electricity system [EB/OL]. (2020-07-15). <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-07-v7.0.pdf>
- [38] Change I. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[J]. *Institute for Global Environmental Strategies*, Hayama, Kanagawa, Japan, 2006
- [39] 高春雨. 县域农田 N₂O 排放量估算及其减排碳贸易案例研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2011
- Gao C Y. Case study on estimation of N₂O emissions from cropland and its carbon trade at County scale [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011 (in Chinese)
- [40] 杨涛. 5 万吨/年食品级二氧化碳工程设计及优化[D]. 西安: 西北大学, 2016
- Yang T. The engineering design and optimization of fifty thousand tons of yearly food grade carbon dioxide [D]. Xian: Northwest University, 2016 (in Chinese)
- [41] 中华人民共和国生态环境部. 2016 年度减排项目中国区电网基准线排放因子 [EB/OL]. (2020-07-15) <http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/201812/W020181220585206630748.pdf>
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Baseline Emission Factors of China's Regional Power Grid for the 2016 Emission Reduction Project [EB/OL]. (2020-07-15). <http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/201812/W020181220585206630748.pdf> (in Chinese)
- [42] 许海朋, 张杰, 梁晓辉. 秸秆干发酵制沼气技术的研究进展 [C]. 北京: 全国农作物秸秆综合利用研讨会暨新技术新产品交流会, 2010: 86-89
- Xu H P, Zhang J, Liang X H. Research progress of straw dry fermentation technology for biogas production [C]. Beijing: National Symposium on Comprehensive Utilization of Crop Straw and Exchange Conference of New Technology and New Products, 2010: 86-89 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东