

大型秸秆沼气工程温室气体减排计量研究

◎ 高春雨 毕于运 王磊 著

中国农业科学技术出版社

大型秸秆沼气工程温室气体减排计量研究

◎ 高春雨 毕于运 王磊 著

图书在版编目 (CIP) 数据

大型秸秆沼气工程温室气体减排计量研究 / 高春雨, 毕于运, 王磊著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-5116-3348-4

I. ①大… II. ①高…②毕…③王… III. ①秸秆-沼气工程-有害气体-大气扩散-污染防治-计量管理 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 267227 号

责任编辑 徐定娜

责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电话 (010) 82109707 82105169 (编辑室)

(010) 82109702 (发行部) (010) 82109709 (读者服务部)

传真 (010) 82109707

网址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京建宏印刷有限公司

开本 787mm×1 092mm 1/16

印张 5.75

字数 114 千字

版次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

定价 36.00 元

摘 要

大型秸秆沼气工程是我国秸秆资源新型能源化利用的重要方式,对促进资源节约型、环境友好型社会建设、缓减气候变化具有重要意义。本研究采取文献调研、定点监测与定量分析相结合的研究方法,分析了我国大型秸秆沼气工程发展现状,依据工程规模、发酵工艺、发酵原料、发酵温度和增保温方式的不同,对秸秆沼气工程进行了系统分类,论述了覆膜槽秸秆厌氧消化等七大工艺的工艺流程和技术特点,指出我国大型秸秆沼气工程面临的资金、管理、政策支持等方面的问题;参考和借鉴自愿减排项目方法学和清洁发展机制(CDM)方法学,构建了适用于大型秸秆沼气工程温室气体减排量计量方法体系;以河北省沧州市青县耿官屯秸秆沼气工程作为典型案例,定量评价了该工程减排能力,以数据为支撑,提出提升大型秸秆沼气工程减排能力的策略。主要研究结论如下。

(1) 大型秸秆沼气工程温室气体减排计量方法主要包括项目边界、基准线排放量计算、工程排放量计算、泄漏量计算、减排量计算、项目监测六部分内容。基准线排放是指不存在大型秸秆沼气工程的情景下秸秆处理、农村居民生活用能、农田施用化肥生产耗能产生的温室气体排放。工程排放量指的是工程运输活动、电耗、化石燃料消耗以及多余沼气火炬燃烧产生的排放。

(2) 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;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标准煤的 CO_2 排放量。项目减排量相当于工程总排放(工程排放量与泄漏量之和)的28.76倍。根据《NY/T 2142—2012 秸秆沼气工程工艺设计规范》要求,秸秆沼气工程的设计使用年限不低于25年,则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。2014年耿官屯秸秆沼气集中供气工程每消耗1 t(干重)秸秆可净减排 CO_2 3.56 t,每利用1 m^3 沼气可净减排11.50 kg。

(3) 提出了提升大型秸秆沼气工程温室气体减排能力的策略。在耿官屯秸秆沼气工程总排放方面,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。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（燃油）排放占 2.52%。提升工程减排能力，在设计方面要优化秸秆沼气工程布局，优先选用耐腐蚀、抗压好、环境适宜性强的材料；在管理方面，加强日常巡检、维护和管理，加强对密封处检查；在降耗方面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。同时，国家应加大对大型秸秆沼气工程的补贴力度，加强技术研究和推广。

本书系中国农业科学院科技创新工程项目研究成果。

目 录

第1章 引言	(1)
1.1 研究背景	(2)
1.2 研究目的与意义	(3)
1.3 国内外研究现状	(3)
第2章 我国大型秸秆沼气工程发展现状	(11)
2.1 我国大型秸秆沼气工程产业发展概况	(12)
2.2 我国秸秆沼气工程分类	(14)
2.3 我国大型秸秆沼气工程发酵工艺	(17)
2.4 我国大型秸秆沼气工程发展障碍	(22)
第3章 清洁发展机制及其方法学	(25)
3.1 清洁发展机制概述	(26)
3.2 清洁发展机制在中国	(30)
3.3 清洁发展机制方法学	(34)
第4章 大型秸秆沼气工程温室气体减排计量方法	(39)
4.1 项目边界	(40)
4.2 基准线排放量计算方法	(42)
4.3 项目排放量计算方法	(47)
4.4 泄漏量计算方法	(49)
4.5 减排量计算方法	(49)
4.6 项目监测	(49)
第5章 大型秸秆沼气工程温室气体减排量计算	
——以河北青县耿官屯秸秆沼气集中供气工程为例	(53)
5.1 研究对象简介	(54)
5.2 基准线排放量计算	(55)

5.3	项目排放量计算	(59)
5.4	泄漏量计算	(62)
5.5	减排量计算	(63)
5.6	结 论	(64)
第 6 章	大型秸秆沼气工程参与碳交易市场建议	(65)
6.1	大型秸秆沼气工程参与碳交易市场意义重大	(66)
6.2	大型秸秆沼气工程提升自身减排能力对策	(67)
6.3	大型秸秆沼气工程参与碳交易市场探索	(69)
第 7 章	结论与展望	(71)
7.1	主要研究结论	(72)
7.2	主要创新点	(73)
7.3	研究展望	(74)
参考文献		(75)
附录		(85)

第1章 引言

1.1 研究背景

1988 年, 由世界气象组织 (WMO) 和联合国环境规划署 (UNEP) 联合成立了政府间气候变化专门委员会 (IPCC)。2014 年 11 月 2 日, IPCC 在丹麦哥本哈根发布了 IPCC 第五次评估报告, 报告更为肯定地指出温室气体排放以及其他人为驱动因子已成为自 20 世纪中期以来气候变暖的主要原因 (IPCC, 2014)。根据 IPCC 第五次评估报告显示, 截至 2011 年, 全球大气中 CO_2 当量浓度为 430 mg/L。如果不加大减排力度, 到 2030 年, CO_2 当量浓度将超过 450 mg/L, 到 21 世纪末将超过 750 mg/L, 并造成全球地表平均温度比工业化前高 3.7~4.8 $^{\circ}\text{C}$, 这种升温水平将引发灾难性影响, 出现诸如生物多样性降低、冰川面积缩小、海平面上升、土地荒漠化、水土流失加剧、灾害性天气频发等诸多问题。如何减少人为温室气体排放或增加对温室气体的吸收, 稳定大气中温室气体浓度, 降低气候变暖幅度, 有效减缓气候变化, 成为众多专家学者关注的重点。中国政府高度关注气候变化问题, 努力探索适合中国国情的应对气候变化机制, 以全面、迅速、有效地支持国内应对气候变化行动。2015 年 9 月 25 日, 中美联合发布《气候变化联合声明》, 中方宣布将于 2017 年启动全国碳排放交易体系。中国是农业源温室气体排放最多的国家, 农业源温室气体排放占全国总的温室气体排放的 17%, 已经超过了我国交通的温室气体排放 (蔡松锋、黄德林, 2011)。据预测, 2017 年我国将建成较为完善的碳排放交易市场, 主要交易项目涵盖 6 个工业部门 (电力、钢铁、水泥、化工、有色、石化), 鉴于农业源温室气体排放量大, 实施农业减排项目对增加农民收入、减少温室气体排放、改善农村生态环境意义重大, 农业源的碳减排一定会在未来的市场中占据一席之地。

农业废弃物是农业温室气体重要排放源 (潘根兴等, 2011)。农作物秸秆是农业废弃物的主要组成部分。我国秸秆总产量居世界首位 (毕于运, 2010), 呈现出分布广、种类多、产量大的特点。秸秆随意丢弃和浪费乃至焚烧现象仍较为突出, 不仅浪费了宝贵的自然资源, 还造成了环境污染, 严重危害人类健康和安全。作为“另一半农业”, 秸秆资源化利用得到社会的广泛关注。大型秸秆沼气工程是秸秆能源化利用的重要途径。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, 在达到农业秸秆废弃物资源化利用、无害化处理目标的同时, 生产的沼气可以作为农村生活清洁能源, 沼肥可以部分替代化肥, 减少化石能源的消耗。大型秸秆沼气工程既有效利用了秸秆资源, 又发展了低碳经济, 带动农村能源消费结构改革, 减少了以 CO_2 、 CH_4 为主的温室气体排放, 具有显著的生态效益。

本研究以大型秸秆沼气工程为基本研究对象,分析了我国大型秸秆沼气工程发展现状、主要模式及存在的主要问题,构建了大型秸秆沼气工程温室气体减排量计量方法,计量了河北省沧州市青县耿官屯秸秆沼气集中供气工程温室气体减排量,最后提出了大型秸秆沼气工程节能降耗发展方向。

1.2 研究目的与意义

(1) 构建大型秸秆沼气工程温室气体减排量计量方法。目前,大型秸秆沼气工程温室气体减排量研究尚处于起步阶段,尤其是综合考虑“三沼”利用减排的分析研究更为薄弱。本研究参考清洁发展机制(CDM)方法学与国家发展委员会发布的《国家温室气体自愿减排方法学》,确定大型秸秆沼气工程温室气体减排基准线,综合考虑产前、产中、产后环节的温室气体排放源以及泄漏量,分别估算基准线排放量、项目排放量、泄漏量以及沼渣沼液替代化肥减排量,从而构建起适用于大型秸秆沼气工程温室气体减排量测算方法体系。这是对大型秸秆沼气工程温室气体减排量计量方法的有益探索,同时,可作为大型秸秆沼气工程未来参与碳贸易的方法学尝试提供借鉴帮助。

(2) 定量估算典型大型秸秆沼气工程温室气体减排量。以河北省沧州市青县耿官屯秸秆沼气工程作为典型案例,以秸秆收集为起点,以沼气、沼渣、沼液综合利用为终点,系统考虑无大型秸秆沼气工程情况下与沼气工程对应的活动的排放情况和大型秸秆沼气工程在运行过程中的温室气体排放情景以及由于工程活动引起的泄漏量,分别测算了大型秸秆沼气工程运行能耗排放、运输活动温室气体排放、沼气替代炊事用能、沼肥替代化肥等减排效益,估算了大型秸秆沼气工程的温室气体减排量。

(3) 提出大型秸秆沼气工程温室气体减排策略。本研究分析了大型秸秆沼气工程运行耗电、化石燃料消耗、运输活动以及工程泄漏量对大型秸秆沼气工程温室气体排放的贡献,分别从减少泄漏和降低能耗两个方面提出了提升大型秸秆沼气工程减排能力的策略,为充分发掘大型秸秆沼气温室气体减排潜力指明发展路径,指出大型秸秆沼气工程提升温室气体减排能力的重点研究方向。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 温室气体减排计量方法综述

科学核算温室气体的减排量为温室气体排放状况的管理和监督提供了数据支撑(郝千婷等,2011)。通过对国内外相关文献的检索和资料学习,目前关于温室气体排

放量核算的方法主要有实测法、物料衡算法、政府间气候变化专门委员会（IPCC）清单法、碳足迹计算法、CDM 方法学和国家温室气体自愿减排方法学等。

1.3.1.1 实测法

实测法，也称为监测数据法，主要是通过实际监测的方式对现场的排放源或设备进行相关参数的测量，并利用环保部门认可的数据来进行碳平衡计算（郭悦娇，2011）。气体的流量、浓度和单位换算系数的乘积，计算如公式 1.1 所示：

$$G = Q \cdot K \cdot C \quad (\text{公式 1.1})$$

其中： G ——气体排放量； Q ——介质（空气）流量； K ——介质中气体浓度； C ——单位换算系数，即 CO_2 当量换算系数。

环境监测站监测的数据是实测法计算所用数据的主要来源，而环境监测站监测的数据基于样品的采集和分析，虽然样本选取需要遵循科学、合理的原则和程序，但由于监测对象所在环境处于动态的变化，以选取的某个时段的样品代表处于连续动态变化的整体，存在样品测试分析准确但整体代表性较差的缺陷（郭悦娇，2011）。为了提高检测的准确性，我国采用了连续监测法，虽然改进后的监测方法提高了监测的精度与准确度，但同时提升了成本，尤其是对二氧化碳进行单独连续监测时成本很高。

1.3.1.2 物料衡算法

物料衡算法是环境统计规定的污染物排放量核算主要方法之一，是对生产过程中使用的物料变化情况进行定量分析的一种方法（李贵林等，2012）。该方法也可应用于温室气体排放量核算。根据物质质量守恒原理，任一生产过程中系统或设备投入的物料质量必然等于该系统或设备产出的物料质量。计算如公式 1.2 所示：

$$\sum G_{\text{投入}} = \sum G_{\text{产品}} + \sum G_{\text{损失}} \quad (\text{公式 1.2})$$

其中： $\sum G_{\text{投入}}$ ——投入物料总和； $\sum G_{\text{产品}}$ ——主副产品和回收及综合利用的物质质量总和； $\sum G_{\text{损失}}$ ——排出系统外的废弃物损失量。

物料衡算法综合考虑生产过程中原料、工艺技术、产物、副产品回收、处理装备、排放情况等诸多因素，主要包括总量法或定额法。总量法，从总体把控，通过原材料总量、主副产品和回收产品总量来计算温室气体的排放量。定额法是以调查期原材料消耗定额为基础，先计算单位产品的物料流失量，再求调查期内物料流失总量（于秀玲等，2011）。完备的基础数据是物料衡算法的基本前提，虽然完备的数据有助于降低计算结果的不确定性，有助于掌握原材料转变为产品和损失的情况，但是严苛的基础数据要求，加大了核算的实施难度和工作量，不适用于较为复杂的过程。

1.3.1.3 IPCC 清单法

IPCC 编制的《国家温室气体清单指南》旨在指导政府、企业等以自身为单位计算

其社会和生产活动中各环节直接或者间接的温室气体排放量。目前为各国广泛使用的是《2006年IPCC国家温室气体清单指南》（郑洁，2011）。IPCC清单法主要参考IPCC技术报告和方法指南，具体计算流程如下：确定涉及排放源；将排放源分类，分为直接排放、能源使用间接排放、其他间接排放等（贾悦，2015）；选取排放计算标准；温室气体排放计算；计算结果分析；核查机关核查清单。

但技术水平、地域分布和工艺水平的不同，导致了即使是同一部门在计算碳排放量的时候选取的方法可能存在不同。不同国家不同物质排放因子也存在着差异，直接选取默认值会降低计算结果的准确性。此外，IPCC清单的编制更倾向于计算一个整体系统的温室气体排放，而整个系统内所有产生温室气体的因素和环节众多，且链接复杂。通过清单估算，难以避免重复计算情况的存在。

1.3.1.4 碳足迹算法

碳足迹分析是一种评价碳排放影响的全新测度方法（王微等，2010）。Wiedmann & Minx（2008）将碳足迹定义为一方面是某一产品或服务系统在其全生命周期所排放的CO₂总量；另一方面是某一活动过程中所直接和间接排放的CO₂总量，活动的主体包括个人、组织、政府以及工业部门等。目前研究中的碳足迹方法有两类：一是以生命周期模型为基础的过程分析；二是以“输入—输出”模型为基础投入产出分析。

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA），又称为“从摇篮到坟墓”分析、“资源和环境状况分析”等（王红彦，2014）。国际标准化组织在国际标准ISO 14040中将生命周期评估定义为“对一个产品系统的生命周期中输入、输出以及潜在的环境影响的汇编和评价”。LCA在国际各个层次与领域的应用较为广泛（彭洁等，2013），主要用于定量分析资源和物质利用状况及废弃物的环境排放，评估某产品生产过程造成的环境负载。生命周期模型下的碳足迹计算过程主要包括：产品制造流程图，系统边界确定，数据收集与整理，碳足迹计算，结果检验。生命周期模型下的碳足迹计算方法的局限在于：①当出现原始数据无法获取的情况，准许采用次级数据，影响结果可信度；②未对原料及产品供应链中非重要环节进行更深入思考；③产品零售阶段的碳排放只能取平均值（施洪涛，2014）。

美国著名经济学家瓦·列昂捷夫（W. Leontief）最早提出“输入—输出”方法，用于研究一个经济系统各部门间的“投入”与“产出”关系，是目前比较成熟的经济分析方法（卓德保、蔡国庆，2014）。应用于环境效益评价下的“输入—输出”模型碳足迹计算具体包括：在投入—产出分析基础上建立矩阵，计算总产出；其次依据研究的需要分别计算各层面碳足迹（闵惜琳、张启人，2013）。“输入—输出”模型碳足迹

计算方法的局限在于：①模型建立在货币价值与物质单元间联系基础上，忽略了相同价值量产品在生产过程碳排放情况差别大的现状；②采用平均化方法分部门计算 CO_2 排放量，但实际上即使同一部门内不同的产品排放情况千差万别，容易产生误差；③无法从核算结果获取产品的情况，只能用于评价某部门或产业的碳足迹。

1.3.1.5 CDM 方法学与国家温室气体自愿减排方法学

CDM, Clean Development Mechanism 的缩写，中文译为清洁发展机制。根据《京都议定书》第十二条，就发达国家如何与发展中国家合作进行温室气体减排建立了灵活机制，即 CDM 机制。CDM 机制允许发达国家提供资金和技术在发展中国家实施温室气体减排项目，获得由项目产生的“核证的温室气体减排量”（CERs），以履行发达国家在《京都议定书》中所承诺的限排或减排义务。CDM 机制在帮助发达国家以较低减排成本实现减排义务的同时，也为发展中国家输入技术和资金，控制温室气体的排放，是一种双赢机制。

为确保 CDM 能正常有序实施，实现《京都议定书》设立的目标，联合国清洁发展机制执行理事会（Executive Board, EB）建立了一套有效的、透明的、可操作的标准和依据（程传玉，2011），对 CDM 项目温室气体减排量进行计算，实现对其合格性审查。这套标准和依据即是 CDM 方法学。截至目前，CDM 执行理事会（EB）批准的方法学共 249 项，涉及 15 个领域。农业 CDM 项目发展相对滞后。目前，在 CDM 执行理事会注册的农业 CDM 项目仅为 132 个，占项目总数的 1.66%，这主要由于农业 CDM 项目方法学不完善、市场主体缺失、交易成本大等原因造成的。与农业相关的经执行理事会批准的方法学共 8 项，仅占方法学总量的 3.2%，涉及畜禽粪便管理、生物质发电、酸性土壤农田大豆玉米轮作系统、豆科作物牧草轮作系统接种剂替代尿素，以及调整水稻种植水肥管理措施减排甲烷等几个方面（FCCC，2015）。

CDM 方法学关键要素如下：①基准线情景设定。CDM 方法学将基准线情景设定作为核心内容，因为只有在基准线确定的情况下才能开展项目减排量评估；②额外性评价与论证。需要阐明所采用的额外性论证方法；③确定项目边界。阐明项目的物理边界和地理边界，列出项目的排放源和泄漏源；④计算减排量。项目减排量等于基准线排放量减去项目排放量以及泄漏排放量；⑤项目监测。包括需要的目标、数据、监测单位、工具和范围等。

CDM 方法学的计算减排量的步骤如下：一是基准线情景温室气体排放量估算公式及结果 E_1 ；二是项目边界内工程活动温室气体排放量估算公式和结果 E_2 ；三是项目活动引起的温室气体排放量的净变化（即泄漏）估算公式和结果 E_3 ；四是该项目减排量

$$E_4 = E_1 - E_2 - E_3。$$

国家发改委在2012年6月印发了《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》(发改气候〔2012〕1668号),旨在鼓励基于项目的温室气体减排交易和保障有关交易活动有序开展。《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》第二部分对自愿减排方法学和项目申请备案的要求、程序作出规定(周泓、郭洪泽,2013)。规定的方法学主要有两种来源:一种是在对EB批准的CDM方法学系统梳理基础上,选择使用频率较高、在国内适用性较好的方法学进行了转化;另一种是国内项目开发者向国家主管部门申请备案和批准的新方法学,例如国家林业局报送的“碳汇造林项目方法学”“竹子造林碳汇项目方法学”和“森林经营碳汇项目方法学”,中国农业科学院环境与可持续发展研究所申报的“可持续草地管理温室气体减排量计算与监测方法学”,沈阳华德海泰电器有限公司和北京市科吉咨询服务有限公司联合申报的“气体绝缘金属封闭组合电器SF₆减排计量与监测方法学”等。截至2016年11月18日,国家发改委气候司在对联合国清洁发展机制执行理事会已有清洁发展机制方法梳理转化和对内新申报方法学科学论证的基础上分12批备案国家温室气体减排方法学200个,其中常规项目自愿减排方法学109个,小型项目自愿减排方法学86个,农林项目自愿减排方法学5个,建立了符合我国国情的温室气体减排计算方法体系。

1.3.2 沼气工程减排计量参数指标研究

围绕沼气工程减排计量研究,现有研究基本集中于农村户用沼气工程和畜禽粪便沼气工程方面。在计算过程中,参数方面研究还较为缺乏,选取的参数大都来自于IPCC。依据每立方米沼气替代2 kg的煤炭(王革华,1999;段茂盛、王革华,2003;张培栋,王刚,2005;张培栋等,2008),采用无烟煤的热值为24 493 TJ/Mt(IPCC,1996;1TJ=10¹²J,Mt为公吨)、无烟煤碳排放系数26.39 tC/TJ、民用部门的碳氧化率为80%(郭李萍、林而达,1998)为参数,计算了沼气替代煤炭产生的减排量。朱立志、赵鱼(2012)采用计量分析的方法,在计算历年农村消费的沼气能源量的基础上,采用0.714 kg标准煤/m³作为沼气的折标煤系数、1.22 kg/m³作为沼气密度、0.714 kg标准煤/kg作为煤炭折标煤系数,依次换算标煤当量、沼气质量、替代煤炭量,之后对沼气减排效果进行分析,表明2000—2009年农村年平均沼气消费相当于替代标准煤的煤炭消费602.20万t,折算成煤炭,则相当于替代843.4238万t的煤炭消费量。吴国林、张薪(2012)以安阳市内黄县上乡户用秸秆沼气池为例,指出池容10 m³、年消耗秸秆2 t的户用沼气池减排CO₂ 1.95 t,并以此为计算系数,计算出全村70户共减排

CO₂ 136.5 t。上述研究的碳减排量核算都使用 IPCC 提供的通用参数。鉴于我国经济技术的发展,参数也需根据我国实际情况进行调整。

目前,对秸秆沼肥减排定量分析的研究较为缺乏,现有研究认为秸秆沼肥主要是通过替代化肥实现减排。对化肥生产能耗及温室气体排放的研究较为丰富,王亚静(2010)、陈舜(2014)、高春雨(2014)都曾开展过系统性的研究。王亚静(2010)系统性地开展了农田生态系统能量投入产出折能指标体系研究,对化肥的生产能耗进行了折算,结果表明:尿素的平均综合能耗折能系数为 30 530 MJ/t,碳酸氢铵的生产能耗为 16 080 MJ/t,磷肥的综合生产能耗水平为 8 390 MJ/t,钾肥的综合生产能耗水平为 4 220 MJ/t,复合肥折能系数为 27 740 MJ/t。陈舜(2014)结合目前我国的氮肥、磷肥和钾肥生产水平,给出主要化肥的温室气体排放系数:尿素 2.041 tce/(t·N),碳铵 1.928 tce/(t·N),硝酸铵 4.202 tce/(t·N),氯化铵 2.220 tce/(t·N),氮肥综合系数为 2.116 tce/(t·N),重钙 0.467 tce/(t·P₂O₅),磷酸二铵 1.109 tce/(t·P₂O₅),磷酸一铵 0.740 tce/(t·P₂O₅),普钙 0.195 tce/(t·P₂O₅),钙镁磷肥 2.105 tce/(t·P₂O₅),磷肥综合系数为 0.636 tce/(t·P₂O₅),氯化钾 0.168 tce/(t·K₂O),硫酸钾 0.409 tce/(t·K₂O),其中罗钾法硫酸钾 0.443 tce/(t·K₂O)、曼海姆法硫酸钾 0.375 tce/(t·K₂O),钾肥综合系数为 0.180 tce/(t·K₂O)。高春雨(2014)对桓台县农田 N₂O 排放量测算中,采用 4.85 t CO₂/(t·N)、0.71 t CO₂/(t·P₂O₅)、0.36 t CO₂/(t·K₂O)作为系数,计算化肥在生产过程中的温室气体排放量。

1.3.3 秸秆沼气工程效益评价

围绕秸秆沼气工程技术效益评价,众多专家学者从发酵原料的不同(Lehtomäki, 2007; 白洁瑞等, 2009; Cuetos 等, 2012; 刘德江等, 2012; 樊婷婷等, 2012; 蒋滔等, 2015; 赵玲等, 2015; 韩娅新等, 2016)、发酵温度的不同(Bousková 等, 2005; 郭欧燕等, 2009; 宋籽霖等, 2013)、秸秆预处理方式不同(刘德江等, 2012; 王健等, 2014; 楚莉莉等, 2014; 董丽丽等, 2014; 熊霞, 2015; 王芳, 2016)、进料方式不同(吴楠, 2013; 杜静等, 2015)、接种物不同(庞云芝, 2010; 张昌爱, 2010; Suwannopadol 等, 2011; Quintero 等, 2012; 韩梦龙等, 2014)、发酵工艺不同(李轶等, 2014; 徐泽敏等, 2014; 张重等, 2015)、所处区域的不同(张铎、邱凌, 2010; 邱桃玉, 2011; 王大蔚, 2012)等影响因素对秸秆沼气工程产气状况进行分析,此外,有学者(林妮娜等, 2011; 韩芳、林聪, 2014)用能值分析方法进行了评价。

围绕秸秆沼气工程经济效益评价研究, Adeoti 等 (2000) 建立了净现值、投资回收期等经济评价指标对规模化秸秆沼气工程进行了经济评估; 闵师界等 (2012) 以四川成都新津县秸秆沼气工程为研究案例, 分析了影响秸秆沼气工程经济效益的因素; 王红彦等 (2014) 采用财务评价方法对河南、山东和江苏 3 省 6 个秸秆沼气集中供气工程的经济可行性进行比较分析; 马放等 (2015) 从秸秆运输半径为出发点, 计算出秸秆沼气工程经济效益最优原料运输半径为 37km。

国外围绕秸秆沼气工程环境效益评价研究, 主要采用 LCA 评价方法研究了畜禽粪便原料沼气工程 (Berglund and Börjesson, 2006; Ishikawa *et al.*, 2006)、能源作物沼气工程 (Blengini *et al.*, 2011; Colin *et al.*, 2010) 和固体垃圾填埋沼气工程 (Martina *et al.*, 2012a; 2012b) 生命周期内温室气体排放、污染物排放及其对环境的影响评价。赵兰等 (2010) 运用 LCA 评价法, 对山东德州前仓村大型秸秆沼气集中供气示范工程进行了全球变暖、酸化、光化学烟雾、富营养化和气溶胶的环境影响分析; 温晴等 (2011) 针对江苏省农业沼气项目规划, 开展了沼气工程环境影响评价指标体系研究; 研究李刚等 (2011) 分析了秸秆沼气工程在储存和使用沼渣沼液过程对周围环境的影响, 提出减少秸秆沼气工程环境负影响的技术途径; 王俏丽 (2015) 基于 LCA 理论, 根据 Eco. Indicator 99 和 IPCC 2007 GWP 方法, 分别评价了规模化秸秆沼气工程的生态指数和全球变暖潜值。

围绕秸秆沼气工程综合效益评价, 美国特拉华大学能源环境政策中心 (2005) 结合社会、环境影响因素, 构建了以经济、卫生、能源和生态效益为主的多层次综合评价指标体系, 针对沼气生态系统进行了全面系统评价; 田芯 (2008) 结合包络分析法、层次分析法、模糊分析法和频度分析法构建了以经济效益、环境效益和社会效益为主体的大中型沼气工程综合评价指标体系, 并利用该指标体系对北京地区 4 处大中型沼气工程进行了实证研究; Balasubramanian (2008) 运用蒙特卡洛模型对沼气系统的效益进行了综合评价。孙森、王效华 (2011) 以扬州某畜禽养殖场大中型沼气工程为例, 进行了大中型沼气工程沼气产出的能源替代效益分析。

在沼气工程减排效用评价方面, Li X *et al.* (2011) 指出大中型沼气工程不仅可以解决清洁能源的使用问题, 而且可以减少空气污染, 减少面源污染, 减少地下水的污染, 对于促进农业方面的节能减排具有非常重要的意义。在评价方法方面, IPCC 清单法 (王革华, 1999; 张培栋, 王刚, 2005; 张培栋等, 2008; 白洁瑞等, 2011; 朱立志、叶晗, 2013;)、CDM 方法学 (段茂盛、王革华, 2003; 马展, 2006; 李玉娥等, 2009; 董红敏等, 2009; 赵立祥、郭轶杰, 2009; 周捷等, 2012)、生命周期评价 (刘

黎娜、王效华, 2008; 王明新等, 2010; 张艳丽等, 2011; 陈绍晴等, 2012; 衣瑞建等, 2015; 靳红梅等, 2015; 阚士亮等, 2015)、监测数据法(张成虎, 2011; 甘福丁等, 2012)都有所应用。此外, 杨艳丽等(2013)利用复合回归模型对中国沼气行业的CO₂减排量与生物质资源、农村用能结构以及沼气利用现状等指标之间的数值关系进行模拟分析。但现有沼气工程减排效用评价, 主要围绕户用沼气工程(张培栋、王刚, 2005; 刘尚余等, 2006; 王明新等, 2010; 朱立志、叶晗, 2013; 陈绍晴等, 2012)、养殖场畜禽粪便沼气工程(段茂盛、王革华, 2003; 李玉娥等, 2009; 蔡梅等, 2011; 甘福丁等, 2012; 衣瑞建等, 2015; 靳红梅等, 2015; 阚士亮等, 2015)开展。苏明山等(2002)以大中型沼气工程为研究对象, 建立基准线, 明确系统边界, 以此为基础构造了估算大中型沼气工程温室气体减排量及减排成本的方法, 但其在计算时候只考虑了炊事用户使用了沼气之后不再使用液化气或煤炭而引起的温室气体减排。截至目前, 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(2011)以金坛市直溪镇汀湘村秸秆沼气集中供气工程为案例, 通过计算无该沼气工程时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, 得出该工程年减排CO₂ 8 605 t。但事实上, 秸秆沼气工程的减排量计算要除去由工程运行和工程带来的泄漏量, 此外, 秸秆沼气工程的产出不仅有沼气, 还有沼肥。沼肥有替代化肥的作用, 而化肥生产也是一个能耗和排放的过程。

综上所述, 国内外专家与学者已对秸秆沼气工程的技术评价、经济评价、环境评价以及综合效益评价开展了大量的研究。在沼气工程减排效用分析方面, 也有不少方法的应用。但现有的沼气工程减排效用分析基本集中于农村户用沼气工程和畜禽粪便沼气工程, 针对秸秆沼气工程减排效用分析的目前仅有一篇, 而专门针对大型秸秆沼气工程这一特定沼气工程类别的研究尚属空白。此外, 现有研究在计算沼气工程减排效用的时候, 多是考虑畜禽粪便资源化利用减排、沼气的替代减排, 对于沼渣沼液利用的减排效果以及沼气工程运行能耗排放未作考虑。