

美国油气行业国家温室气体清单和报送体系

杨罕玲¹ 赵一炜^{2,3}

(1. 美国环保协会纽约办公室; 2. 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室;

3. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司)

摘要 甲烷是由人类活动造成的仅次于二氧化碳的第二大温室气体,大幅度减少甲烷排放有助于降低近期温升,是实现巴黎协定目标的必要手段,也是中国实现“碳中和”目标的重要抓手。相比其他排放源,油气行业的甲烷减排最快、最有经济性。而有效的减排政策和监管必须建立在完整、准确的甲烷排放清单基础上。文章以甲烷为重点,概述了美国国家温室气体清单和油气行业的报送制度,介绍了两个报送体系的覆盖范围、要求等相关差异,说明了设施界定、排放因子和活动水平来源、监测方法以及有待改进之处,并针对中国油气行业甲烷排放数据的质量改善提出了建议。

关键词 全球变暖; 甲烷减排; 石油和天然气; 温室气体清单; 碳中和

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2022.01.001

文章编号: 1005-3158(2022)01-0001-08

National Greenhouse Gas Inventory and Reporting System for U. S. Oil and Gas Industry

Yang Hanling¹ Zhao Yiwei^{2,3}

(1. *Environmental Defense Fund New York Office*;

2. *State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control and Treatment*;

3. *CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology*)

ABSTRACT Methane is the second largest anthropogenic greenhouse gas next to carbon dioxide. Significantly reducing methane emissions will help avert near-term temperature rise and meet the Paris climate goals. Also, it provides an important anchor for China to achieve carbon neutrality target. Compared with other emission sources, reducing methane emissions from the oil and gas industry is the fastest and most economical way to slow the speed of warming. Effective emission reduction policies and regulations must be based upon comprehensive and accurate methane emission inventory. With a focus on methane, this paper provides an overview of U. S. national greenhouse gas inventory system and the reporting system in oil-gas industry, describes the differences in coverage and requirements between the two reporting systems, explains the facility definitions, and sources for emission factors and activity data. The paper concludes by proposing recommendations for the improvement of monitoring methods and quality of methane emission data in China's oil and gas industry.

KEY WORDS global warming; methane emissions reduction; oil and gas; greenhouse gas inventory; carbon neutrality

0 引言

甲烷是一种强势的短寿命温室气体,其 100 年尺度下的全球增温潜势(GWP100)是二氧化碳的 25 倍,而其 20 年尺度下的全球增温潜势(GWP20)是二氧化碳的 84 倍。目前,大气中的甲烷浓度已升至 80 万

年以来最高水平^[1],对全球变暖贡献率高达 25%^[2]。2021 年 8 月,政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第六次评估报告第一工作组报告首次强调了甲烷减排对减缓全球升温速率的重要性^[3]。在第 26 届联合国气候变化大会上,近 110 个国家加入甲烷减排承诺,中美气候联合宣言也将甲烷减排作为双边合作的

杨罕玲,2001 年毕业于美国路易斯·克拉克法学院(Lewis and Clark Law School),法律博士,美国环保协会纽约办公室能源转型-亚洲,高级总监,主要研究方向为气候环境能源政策。E-mail:hyang@edf.org。

重点领域。

美国是世界上主要的甲烷排放国之一。2019 年甲烷占美国全年温室气体排放总量的 10%(约 6.6 亿 t 二氧化碳当量)^[4]。石油和天然气行业是最大的工业甲烷排放源,约占人为排放总量的 30%^[4]。美国温室气体排放数据主要集中于由联邦环境保护署(U. S. EPA)负责管理的两个报告系统:①国家温室气体清单和碳汇(U. S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks,以下简称“国家清单”);②大型设施温室气体强制报送制度(Greenhouse Gas Reporting Program,“GHGRP”,以下简称“报送制度”)^[4]。国家清单描述了温室气体排放趋势,为宏观减排政策制定提供参考。报送制度则提供了大型污染源(如油气设施)的标准化排放数据,便于公众理解,为州、地方政府和企业减排提供支持,也为更新国家清单排放因子和水平数据提供依据。

1 美国国家温室气体清单和碳汇

美国自 20 世纪 90 年代初开始编制国家清单,覆盖二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟氯碳化物(HFCs、CFCs)、全氟碳化物(PFC)、六氟化硫(SF₆)和三氟化氮(NF₃)七种温室气体,涵盖了所有的人为排放源和通过碳汇(森林、植被和土壤中的碳存储)从大气中移除的二氧化碳。根据《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)的要求,1994 年美国向联合国提交了第一份国家清单(1990—1993 年),随后每年都提交更新报告^[4]。2021 年 4 月公布的清单包含了 1990—2019 年的排放信息^[5]。

国家清单的编制和更新由 U. S. EPA 牵头多个部门、研究机构和专家共同完成。清单草案在定稿前须经过 30 天公示,根据公众意见进一步完善修改。清单主要采用 IPCC2006 年指南的排放估算方法,同时参考 IPCC 后续增补指南、官方经济统计数据、设施报送数据、科研文献和专家评判等,对排放量进行自下而上的汇总和估算。IPCC 2006 年指南将能源行业排放的计算方法分为三级,层级越高对数据的要求越高。层级 1 采用国际默认排放因子,层级 2 采用国家级的排放因子,层级 3 采用组件级(component-level)排放因子或设施级(facility-level)排放估算和直接测量^[6]。针对油气系统,清单主要涵盖三种温室气体(CO₂、CH₄ 和 N₂O),并采用层级 2、3 方法进行排放统计^[7]。通过公开会议和文件,U. S. EPA 及时向公众说明排放因子和方法学的更新进展^[8]。参照国家清单框架,U. S. EPA 还开发了“州清单工具”(State

Inventory Tool)^[9]供各州自愿使用,各州自行决定是否编制州级温室气体清单。美国国家清单覆盖的油气系统环节^[7]见表 1。

表 1 美国国家清单覆盖的油气系统环节

天然气	石油
陆上、海上生产	陆上、海上生产
天然气加工	石油运输
天然气长输	炼油
地下储气库	
LNG 储罐	
LNG 接收站	
地方天然气输配	

2 大型设施温室气体强制报送制度

2009 年,按照联邦《综合拨款法案》(Consolidated Appropriations Act)的要求,U. S. EPA 制定了温室气体报送制度,主要适用于年排放超过(含)25 000 t 二氧化碳当量的大型设施^[10]。报送制度涵盖了 41 种固定排放源类别,共计 8 000 余个设施,其中包括油气设施 2 000 余个,燃料和工业气体供应商 900 余个以及二氧化碳捕获/供应和地下注入设施 200 余个^[10-12]。自 2010 年起,受控设施每年通过“温室气体线上报告平台”(e-GGRT)提交数据,U. S. EPA 则通过“设施级温室气体信息”(FLIGHT)等网站公开相关排放信息^[10]。

3 国家清单和报送制度之间的差异

尽管国家清单和报送制度互为补充,但两者之间仍然存在一定的差异^[13]。

1)覆盖范围的差异:清单覆盖所有的人为排放源和碳汇。报送制度涵盖的主要是年排放超过 25 000 t 二氧化碳当量的设施,占清单排放总量的 85%~90%,不包括小型排放源、农业/土地利用和碳汇。

2)燃料划分类别的差异:清单依据美国能源信息管理局(U. S. Energy Information Administration)的燃料分类和消耗数据计算燃料排放。而报送制度关注的是具体设施的燃料排放。设施的燃料分类可能异于清单,导致该类设施在两个体系中的排放总量存在差异。

3)能源和生产工艺排放划分的差异:清单中燃料燃烧排放归属能源章节,工艺排放则另设章节。工艺排放包括非燃料燃烧排放或制造和终端消费使用温

室气体所造成的排放^[14]。而在报送制度中,燃料燃烧和工艺排放均被纳入设施的排放总量。

4)估算方法学的差异:清单针对小型排放源通常使用 IPCC 缺省数据,而报送制度则采用更加细化的设施级或组件级的排放因子和活动数据。

国家清单与报送制度的比较^[15]见表 2。

表 2 国家清单与报送制度的比较

	国家清单	报送制度
数据来源	U. S. EPA 牵头联合其他部门和行业协会等汇总	8 000 多个设施报送数据
排放源覆盖范围	所有人为排放源和碳汇	大型排放设施、二氧化碳地下注入设施、炼化产品和工业气体供应商
覆盖美国排放总量的百分比/%	100	85~90
数据如何划分、归类	在国家层面按行业划分	可按国家、州、地方、行业、设施分级统计
数据收集起始年	1990	2010

4 油气行业大型设施温室气体报送制度

4.1 油气行业的温室气体报告编制说明

报送制度针对油气行业制定了一系列的报送编制说明(如表 3^[15]所示),其中 Subpart W 章节详细介绍了油气供应链三种温室气体的排放核算要求。

表 3 油气行业温室气体报送编制说明分类

报告编制说明各章节 (Subpart) 编号	受控对象和气体
W	油气供应链的温室气体排放
Y	炼化企业的温室气体排放
MM	炼化设施、石油产品进出口商针对相关产品交付给用户后燃烧产生的二氧化碳排放
NN	地方燃气输配公司、天然气凝液分馏公司针对天然气、天然气凝液交付给用户后燃烧产生的二氧化碳排放

4.2 Subpart W 章节覆盖的油气供应链环节

油气行业温室气体报送的相关环节^[16]见图 1。

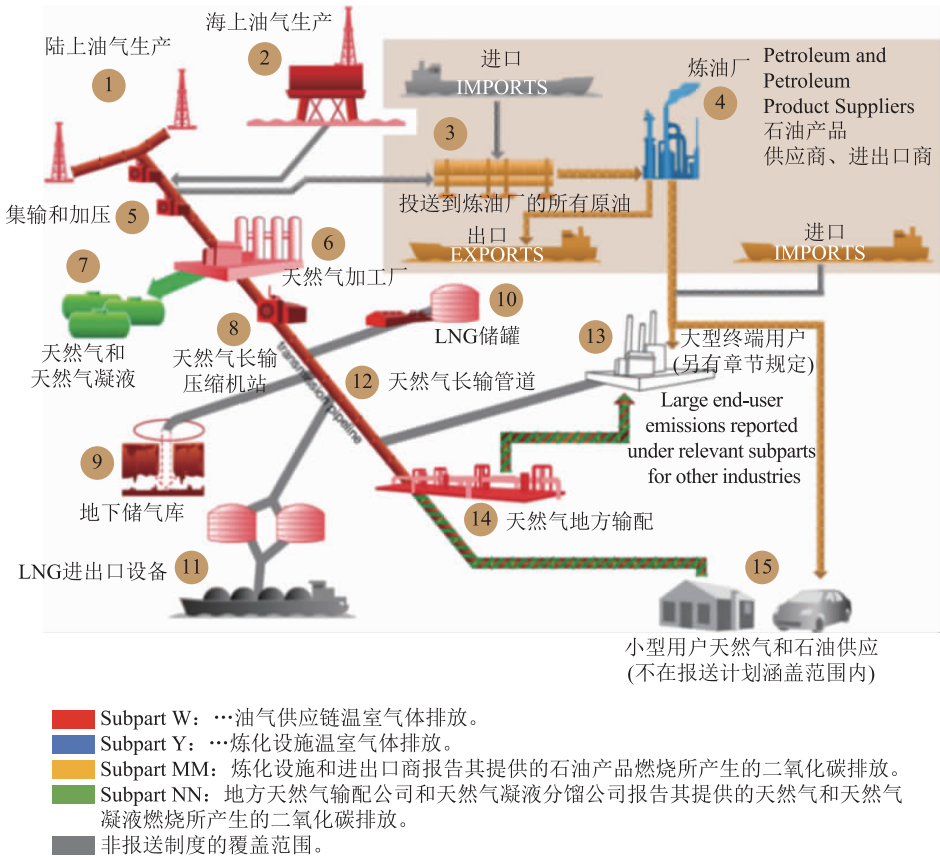


图 1 规范中涉及油气行业温室气体排放报送的相关环节

Subpart W 章节规定了油气供应链 10 个环节的温室气体报告要求。2019 年相关报送设施总计 2 300 余个。由于石油运输环节排放相对较小,未被纳入排名前 80% 的排放源,因此不受 Subpart W 约束。另外,住宅和商业用户燃气表及调压器也不在强制报告范围内。2019 年 Subpart W 覆盖的油气供应链设施数量见表 4^[17]。

表 4 2019 年 Subpart W 覆盖的油气供应链设施数量

油气供应链环节	报送设施/个
陆上油气生产	478
海上油气生产	141
陆上油气集输和加压	354
陆上天然气加工	454
陆上天然气长输压缩站	619
陆上天然气长输管道	43
地下储气库	49
LNG 储罐	11
LNG 进出口接收站设备	5
天然气地方输配	163
其他油气环节(没有被报送制度其他章节涵盖的固定排放源的燃烧排放)	56
总计	2 373

4.3 Subpart W 章节对油气供应链设施的定义

鉴于企业报送以设施为单位,如何界定“设施”直接关系到排放源的覆盖范围和控排绩效比较。对于边界清晰的作业区,例如海上油气生产、陆上天然气加工、陆上天然气长输和压缩、地下储气库以及 LNG 进出口设备,Subpart W 采用美国清洁空气法案(Clean Air Act)对“设施”的定义,即相邻区域内受同一业主(包括运营商)控制的一组排放源为一个设施^[18]。但针对陆上油气生产环节以及集输和加压环节,同一家公司的运营活动可能跨越若干彼此毗邻的盆地,涉及多个油气井和集输站点。

如果将“设施”定义为业主公司,则可能无法体现不同盆地的排放差异。将“设施”定义为单个井场和集输站也不理想,因为很多单个站点的年排放量低于 25 000 t 二氧化碳当量的门槛,由此可能会导致大量排放源不受报送制度的约束。基于以上考虑,Subpart W 以“盆地”(basin)为范围对生产、集输环节的设施进行定义。油气盆地的划分参照美国石油地质学家协会(American Association of Petroleum Geologists)

对地质省(geological province)的划分^[19]。同一盆地中由同一业主运营的多口生产井被视为一个“设施”;同一盆地中由同一业主运营的集输、加压设备和管道(无论管道是否连通)都属于同一个设施。基于“盆地”范围的生产设施定义有助于比较因地域和公司运营差异造成的排放差异,而且可以覆盖小型排放源。

Subpart W 中天然气输配“设施”指的是一州内本地输配公司运营的所有输配管道和调压计量站的集合^[20]。

5 国家清单和 Subpart W 报送系统的油气供应链甲烷排放因子和活动数据

国家清单和报送制度对甲烷排放的估算均采用排放因子(设备/组件或活动的排放速率)与活动水平(设备/组件数量或活动频率)的乘积。美国于 1990 年代开展的早期油气排放因子研究奠定了国家清单的数据基础。之后,油气企业的报送数据和甲烷科研文献也成为因子更新的重要来源^[5]。

5.1 国家清单中油气供应链的甲烷排放因子和活动数据

国家清单天然气供应链的甲烷排放因子的一个早期主要来源是 1996 年 U. S. EPA/天然气技术研究院(Gas Research Institute, 现称 Gas Technology Institute)开展的天然气行业甲烷排放研究(简称 GRI/EPA 研究)。通过工程估算和对少数代表性设施的测量,该研究开发了 80 多个排放因子,并为后期的一系列项目所借鉴,例如 U. S. EPA“天然气之星”计划(Natural Gas STAR Program)、“国际甲烷市场化合作”计划(Methane to Market Partnership)、州的天然气甲烷排放清单、美国石油学会(API)纲要、美国州际天然气协会(INGAA)长输和输配环节甲烷排放计算方法学等。GRI/EPA 研究也是 IPCC 指南中多个排放因子的来源^[5]。

石油系统的早期因子来源于 1992 年 API 的全球石油行业甲烷排放数据(简称 API1992)和 1999 年 U. S. EPA 和 Radian 公司开展的石油行业甲烷排放研究(简称 EPA1999)^[5]。随着 2010 年设施报送制度的建立,Subpart W 的甲烷数据成为清单因子更新的重要依据。另外,甲烷科学研究的拓展也为因子更新提供了参考。为提高数据的准确性,国家清单针对油气井完井和修井分设了常规和非常规水力压裂排放因子。同时也针对重质原油和轻质原油的生产和处理分设了不同的因子^[21-22]。

油气系统活动数据的来源主要包括上述提到的早期研究、Subpart W 报送系统、海洋能源管理局、联

邦能源监管委员会(FERC)、能源信息局、交通部的管道和有害材料安全管理局(PHMSA)、美国陆军工程兵团(Army Corps of Engineers)、州际油气协定委员会(IOGCC)、“天然气之星计划”、Enverus 公司数据和《油气杂志》(Oil and Gas Journal)等^[5]。

清单中油气行业三种温室气体(含甲烷)的历年排放因子和活动数据可在网上下载^[21-22]。国家清单天然气供应链甲烷年排放量示例^[23]见表 5,国家清单石油系统甲烷年排放量示例^[24]见表 6。

表 5 国家清单天然气供应链甲烷年排放量示例 万 t 甲烷

活动	1990 年	2005 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
勘探	16.7	41.2	4.2	2.8	4.9	3.3	2.1
生产	235	322.7	357.2	346.6	357.4	363.1	374.8
—陆上生产	144.1	219.7	208.5	198.1	202.6	206.8	208.1
—集输	73.9	95.7	146.3	145.3	152.1	153.2	163.6
—海上生产	17	7.3	2.4	3.2	2.6	3.1	3.1
加工	85.3	46.3	44	44.8	46	48.3	49.7
长输和储运	228.8	144.3	136.6	137.9	129.8	139	147.8
输配	181.9	102.3	57.4	57.3	56.9	56.5	56
合计	747.8	656.7	599.4	589.4	594.9	610.1	630.5

表 6 国家清单石油系统甲烷年排放量示例 万 t 甲烷

活动	1990 年	2005 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
勘探	11.9	18.2	8.3	1.9	1.4	1.5	1.1
生产	180.2	136.1	153.5	150.8	151.9	143.8	150.7
—气动控制器	79.2	67.3	75	78.5	79.9	69.4	69.9
—海上生产	37.4	26.1	22.1	20.6	20.5	19.9	20.1
—燃气发动机	8.8	7.4	9.9	9.5	9.4	9.6	9.8
—设备泄漏	8.2	8.1	10.1	9.7	9.6	9.5	9.4
—采出水	9.1	6.2	8.2	7.7	7.9	8.3	8.5
—伴生气火炬燃烧	2	1.5	4.9	2.9	3.8	6.8	8.2
—其他排放源	35.5	19.6	23.3	21.9	20.7	20.3	24.9
原油运输	0.7	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
炼化	2.7	3.1	3.3	3.3	3.3	3.1	3.6
合计	195.5	157.9	165.9	156.8	157.4	149.2	156.3

5.2 Subpart W 油气设施报送系统的甲烷排放因子和活动数据

与国家清单设立的设备级(例如压缩机、分离器)排放因子不同,Subpart W 依据美国东部和西部产区的区域条件和运营特征,制定了更细化的组件级(如法兰、阀门)排放因子和设备的组件缺省参数。同时针对不同的监测方法和泄漏定义(10 000 $\mu\text{g/g}$ 和 500 $\mu\text{g/g}$),增设了相应的组件级泄漏因子。这些因子及组件数据最初来源于 U. S. EPA、美国石油学会、天然气研究院和加拿大 Clearstone 工程公司的相关研究^[25-35],并随着科研进步得到更新。Subpart W 油气设施温室气体排放核算表^[36]和数据报送表^[37]可在网上下载。

6 质量保证/控制及验证(QA/QC and Verification)

U. S. EPA 负责国家清单和设施数据的审查和评估,对数据收集、输入、记录和计算进行 QA/QC 分析,通过电脑程序自动检查以及开展人工审核。如发现问题,U. S. EPA 须联系相关设施纠正错误。同时,根据最新数据和信息,U. S. EPA 对排放因子和活动数据的假设是否符合当前行业惯例进行评估和更新。出于对清单时效性和经费的考虑,U. S. EPA 尚未采用第三方核证^[38],但设施报告的签字人须对填报信息的合规性负法律责任。

然而,近年来众多的科学研究表明基于排放因子估算的清单数据存在很大的不准确。2012—2018 年,美国环保协会(Environmental Defense Fund)针对美国天然气供应链的甲烷排放组织开展了大量的实测研究,得出的排放量超过国家清单数据的 60%^[39]。斯坦福大学的最新科学研究认为排放差异主要来源于天然气凝液和液化石油气储罐的泄漏和闪蒸、设备泄漏、火炬不完全燃烧排放和返排液卸载排放,进一步说明了开展实测并结合“自上而下”和“自下而上”的估算方法^[4](见表 7)对改进排放因子和清单质量的重要性^[40]。

表 7 “自上而下”和“自下而上”的甲烷排放估算方法

覆盖范围	“自上而下”(例如卫星、飞机、无人机、车载、高塔监测等)	“自下而上”(例如排放因子法、手持监测等)
空间维度	设施至全球	组件及全球(加权)
时间维度	实时/年度或多年平均	依据不同有限时段测量数据得出的年均值,供清单使用
溯源	采用模型和假设以及分子和同位素示踪剂	具体排放源测量
遗漏排放源的可能性	大气监测浓度反映所有的排放源	可能无法体现区域内的所有排放源

“自上而下”方法覆盖所有排放源(自然源和人为源),但可能难以溯源。而“自下而上”方法可以提供某些排放源的信息,但可能无法做到全覆盖,并且采用的排放因子和活动数据也许不准确。因此,协调两种估算方法对改善数据质量至关重要。越来越多的企业和政府利益相关方意识到了这一点。2014年,联合国环境规划署(UNEP)、欧盟委员会(European Commission)和美国环保协会牵头发起油气甲烷伙伴关系(OGMP),目前成员公司已超过70多家,公司资产覆盖五大洲,油气产量占全球总量的50%^[41]。新出台的OGMP2.0框架被视为当前最佳甲烷排放报告框架,制定了五个层级的数据估算标准。其中第五层级(最高级)要求企业提供每个排放源的特定排放因子和活动数据,并开展场站实测。欧盟委员会计划参考OGMP2.0框架,制定能源甲烷强制性监测、报告和核查(MRV)的立法^[41]。

7 结论及建议

在中国,甲烷也是仅次于二氧化碳的第二大温室气体。中国“十四五”规划首次将甲烷管控写入五年规划,2060年碳中和是指所有温室气体的中和。目前,七家中国油气企业已联手创建甲烷控排联盟,力争实现2025年天然气生产过程甲烷平均排放强度降到0.25%以下^[42]。十家城市燃气企业也签署了甲烷倡议,推动行业排放数据的标准化、透明化^[43]。在中美格拉斯哥气候联合宣言中,中国宣布将制定国家甲烷行动计划。生态环境部明确表示未来的工作重点之一是完善重点领域甲烷数据的报告制度和加强MRV的国家合作^[44]。

结合美国国家清单编制和设施排放数据管理制度,本文对中国油气甲烷数据完善工作提出以下建议:

一是加快建立常态化的温室气体报送制度。美国自1994年以来每年发布国家清单,通过设施报送制度和大量的油气甲烷排放研究,积累了丰富的数据和经验。中国作为《气候公约》非附件一国家不承担年度报告的义务,目前清单核算的是2014年数据。建立连续年份的国家清单有助于及时反映温室气体排放趋势,对减排政策制定至关重要。

二是完善油气供应链的甲烷数据报送机制。2015年《中国石油和天然气生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[45]制定了上游设施的甲烷排放核算方法,但目前对下游城市燃气行业的排放报送不设要求。上游排放也未区分常规和非常规

生产、没有纳入火炬排放和废弃油气井排放等^[46]。因此,有必要扩大报送机制的覆盖范围,提高数据完整性。

三是开展实测,细化排放因子和活动数据。中国基础排放因子采用加拿大油气排放因子(2005)^[46],难以反映真实情况。并且设施报送以场站为单位^[45],数据颗粒度大,比较粗糙。建议开发组件级和设备级的排放因子,更新活动数据。同时结合“自上而下”和“自下而上”方法对排放进行估算。

四是建立数据公开制度,提高透明度。美国各油气设施的甲烷报送信息均可在U.S.EPA的网站上查阅。中国目前尚未建立数据公布平台,企业的温室气体披露以二氧化碳当量为单位,并没有单独列出甲烷的排放量。推动数据发布可以激发公众参与和监督减排政策的制定及实施。

五是在甲烷减排法规制定、排放监测和泄漏检测等方面加强国际合作。美国已经发布甲烷减排行动计划,U.S.EPA也出台了油气新建和现有排放源的甲烷法规修订草案。鉴于美国在油气甲烷管控方面已经积累了丰富的经验,中美可以在排放标准、甲烷测量和减排等领域加强合作,探索大尺度卫星遥感甲烷监测,建立天地空一体化监测体系,支持国家清单编制工作。

参考文献

- [1] LOULERGUE L, SCHILT A, SPAHNI R, et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years[J]. *Nature*, 2008, 453: 383-386.
- [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [EB/OL]. (2013-09-26) [2021-10-19]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf.
- [3] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [EB/OL]. (2021-08-01) [2021-09-28]. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.
- [4] National academies of sciences, Engineering and medicine. Improving characterization of anthropogenic methane emissions in the United States[R]. National academies press, 2018.
- [5] U.S.EPA. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions

- and sinks:1990—2019. U. S. environmental protection agency[EB/OL]. (2021-04-14) [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-04/documents/us-ghg-inventory-2021-main-text.pdf>.
- [6] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories:volume 2 energy[EB/OL]. (2016-04-13) [2021-08-26]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf.
- [7] U.S.EPA. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks:1990—2019. 1. 4 methodology and data sources[EB/OL]. (2020-04-13) [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-04/documents/us-ghg-inventory-2020-main-text.pdf>.
- [8] U.S.EPA. Natural gas and petroleum systems[EB/OL]. [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/natural-gas-and-petroleum-systems>.
- [9] U.S.EPA. Download the state inventory and projection tool[EB/OL]. [2021-09-28] <https://www.epa.gov/statelocalenergy/state-inventory-and-projection-tool>.
- [10] U.S.EPA. Learn about the greenhouse gas reporting program(GHGRP)[EB/OL]. [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/natural-gas-and-petroleum-systems>.
- [11] U.S.EPA. GHGRP supplier highlights[EB/OL]. [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/natural-gas-and-petroleum-systems>.
- [12] U.S.EPA. Capture, supply, and underground injection of carbon dioxide[EB/OL]. (2021-05-01) [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/natural-gas-and-petroleum-systems>.
- [13] U.S.EPA. GHG emissions by industry-GHGRP vs US GHGI[EB/OL]. (2015-07-01) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/ghgrp_inventory_emissions_comparison.pdf.
- [14] U.S.EPA. Industrial processes and product use[EB/OL]. (2021-04-01) [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-04/documents/us-ghg-inventory-2020-chapter-4-industrial-processes-and-product-use.pdf>.
- [15] U.S.EPA. GHGRP and the oil and gas industry[EB/OL]. (2021-04-01) [2021-08-26]. <https://www.epa.gov/ghgreporting/ghgrp-and-oil-and-gas-industry>.
- [16] U.S.EPA. 2011-2012-2013-2014 GHGRP industrial profiles petroleum and natural gas Systems[EB/OL]. (2015-10-01) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/subpart_w_2014_data_summary_10-05-2015_final.pdf.
- [17] U.S.EPA. GHGRP petroleum and natural gas systems[EB/OL]. (2020-09-26) [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/ghgreporting/ghgrp-petroleum-and-natural-gas-systems#2019-subsector>.
- [18] U.S.EPA. Definition of “facility”[EB/OL]. (2021-04-01) [2021-09-28]. https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-ead-caap-facilitydefinition_314022_7.pdf.
- [19] AACS. National geologic map database[EB/OL]. (2021-08-26) [2021-09-28]. <https://ngmdb.usgs.gov/Geolex/stratres/provinces>.
- [20] CORNELL LAW SCHOOL. Subpart W-petroleum and natural gas systems[EB/OL]. (2010-11-30) [2021-09-28]. <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-98/subpart-W>.
- [21] U.S.EPA. Methodology for estimating CH₄, CO₂, and N₂O emissions from petroleum systems. annex 3.5 electronic tables[EB/OL]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/2021_ghgi_petroleum_systems_annex35_tables.xlsx.
- [22] U.S.EPA. Methodology for Estimating CH₄, CO₂, and N₂O emissions from natural gas systems(xlsx)annex 3.6 electronic tables[EB/OL]. (2021-05-15) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2021-02/2021_ghgi_natural_gas_systems_annex36_tables.xlsx.
- [23] U.S.EPA. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks:1990—2019. Methane emissions from US natural gas system. energy 3-92[EB/OL]. (2021-04-14) [2021-09-28] <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-04/documents/us-ghg-inventory-2021-main-text.pdf>.
- [24] U.S.EPA. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks:1990—2019. Methane emissions from US petroleum system. energy 3-73[EB/OL]. (2021-04-14) [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-04/documents/us-ghg-inventory-2021-main-text.pdf>.
- [25] U.S.EPA. Protocol for equipment leak emission estimates. Emission standards division[EB/OL]. (1995-11-01) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/protocol_for_equipment_leak_emission_estimates.pdf.
- [26] U.S.EPA. Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks:1990—2006[EB/OL]. (2008-05-15) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/08_cr.pdf.
- [27] U.S.EPA. Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks:1990-2007[EB/OL]. (2009-05-15) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/08_cr.pdf.

- [28] API. Emission factors for oil and gas production operations [EB/OL]. (1995-01-01) [2021-09-28]. <https://www.apiwebstore.org/publications/preview.cgi?57b4eb1a-29ec-4d24-9d12-be8cff5fa1af>.
- [29] API. Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the Oil and Gas Industry [EB/OL]. (2009-08-01) [2021-09-28]. https://www.api.org/~media/files/ehs/climate-change/2009_ghg_compendium.ashx.
- [30] GRI. Methane emissions from the natural gas industry. Volume 9. Tables 8-9 and 9-4. June 1996 [EB/OL]. (1996-06-01) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/9_underground.pdf.
- [31] GRI. Methane emissions from the natural gas industry. Volume 10. Table 7-1. June 1996 [EB/OL]. (1996-06-01) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/gasstar/documents/emissions_report/10_metering.pdf.
- [32] Clearstone. Handbook for estimating methane emissions from canadian natural gas systems [M]. Clearstone engineering Ltd., enerco engineering Ltd., radian international, 1998.
- [33] U.S.EPA. Identification and evaluation of opportunities to reduce methane losses at four gas processing plants [EB/OL]. (2002-06-20) [2021-08-27]. <https://www.epa.gov/natural-gas-star-program>.
- [34] NATIONAL GAS MACHINERY LABORATORY, KANSAS STATE UNIVERSITY, CLEARSTONE ENGINEERING LTD. Cost-effective directed inspection and maintenance control opportunities at five gas processing plants and upstream gathering compressor stations and well sites [EB/OL]. (2006-03-01) [2021-09-28]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/clearstone_ii_03_2006.pdf.
- [35] CLEARSTONE. Measurement of natural gas emissions from the canadian natural gas transmission and distribution industry [M]. Clearstone engineering Ltd., canadian energy partnership for environmental innovation (CEPEI), 2007.
- [36] U.S.EPA. Subpart W oil and gas supply chain GHGs emissions caculation table [EB/OL]. [2021-09-28]. <https://ccdsupport.com/confluence/download/attachments/63996073/Subpart%20W%20Calculation%20Tool%20for%20RY17%20and%20Later%20-%202008Oct2020.xlsx?version=1&modificationDate=1608241621000&api=v2>.
- [37] U.S.EPA. Subpart W oil and gas supply chain GHGs emissions reporting form [EB/OL]. [2021-09-28]. <https://ccdsupport.com/confluence/display/help/Reporting+Form+Instructions>.
- [38] U.S.EPA. Alternative verification methods evaluation [EB/OL]. (2013-08-01) [2021-09-28]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/step4-alternative-verification-methods-evaluation.pdf>.
- [39] ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND. Methane research series:16 studies [EB/OL]. (2018-01-23) [2018-07-19]. <https://www.edf.org/climate/methane-research-series-16-studies>.
- [40] RUTHERFORD J S, SHERWIN E D, RAVIKUMAR A P, et al. Closing the methane gap in US oil and natural gas production emissions inventories [J]. Nature communications, 2021, 12(1):1-12.
- [41] UNEP, EUROPEAN COMISSION, EDF. Oil & gas methane partnership 2.0 [EB/OL]. (2020-10-23) [2022-02-20]. <https://www.ogmpartnership.com/>.
- [42] 新华网.中国油气企业甲烷控排联盟成立搭建“产运销”一体甲烷管控平台 [EB/OL]. (2021-05-18) [2021-09-28]. http://www.xinhuanet.com/energy/2021-05/19/c_1127464269.htm.
- [43] 北京燃气微 e 平台.倡导甲烷控排,北京燃气集团携手城燃企业,推动能源绿色低碳发展 [EB/OL]. (2021-10-15) [2021-10-18]. <https://mp.weixin.qq.com/s/AJc22BKXT9BxEsXAHJro5g>.
- [44] 生态环境部.2021 年 11 月例行新闻发布会 [EB/OL]. (2021-11-25) [2021-12-06]. http://mee.gov.cn/ywdt/zbft/202111/t20211125_961825.shtml.
- [45] 国家发展和改革委员会.中国石油天然气生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [EB/OL]. (2015-02-11) [2021-12-06]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/W020190905507323097054.pdf>.
- [46] 薛明,翁艺斌,刘光全,等.石油与天然气生产过程甲烷逃逸排放检测与核算研究现状及建议 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(2):85-93.

(收稿日期 2021-12-19)

(编辑 王蕊)