

“双碳”目标下天然气生产工业碳计量方法优化

刘小楠^{1*}, 周强¹, 黄勇¹, 冯晶晶^{2,3#}, 高国辉³

¹四川轻化工大学化学工程学院, 四川 自贡

²华南理工大学环境与能源学院, 广东 广州

³广东埃文低碳科技股份有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2025年7月9日; 录用日期: 2025年8月20日; 发布日期: 2025年8月28日

摘要

在全球能源低碳转型与国内“双碳”目标驱动下, 天然气作为过渡能源的环境影响评估亟需精准碳计量方法支撑。本研究系统剖析天然气生产全生命周期(勘探开采、处理加工、输送储存)的碳排放特征, 识别设备耗能、火炬燃烧、甲烷逸散等关键排放源, 揭示传统排放因子法、质量平衡法等动态排放捕捉、核算边界覆盖及数据适应性方面的局限性。研究创新性构建数据驱动的增量碳计量模型与空天地一体化监测反演模型, 通过融合物联网传感器数据、工艺参数及卫星/无人机遥感数据, 形成“数据采集-动态建模-实时修正”的闭环计量体系, 并指出了多源数据融合精度、甲烷逸散量化、模型自适应优化及监测成本控制等技术瓶颈。研究成果为构建精准高效的天然气生产碳计量技术体系提供理论与方法参考, 对推动能源行业绿色转型具有重要实践意义。

关键词

天然气生产, 碳计量, 甲烷逸散, 数据驱动模型, 天地空一体化

Optimisation of Carbon Measurement Methodology for the Natural Gas Production Industry under the “Dual Carbon” Target

Xiaonan Liu^{1*}, Qiang Zhou¹, Yong Huang¹, Jingjing Feng^{2,3#}, Guohui Gao³

¹College of Chemical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong Sichuan

²School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

³Guangdong Avi Low Carbon Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘小楠, 周强, 黄勇, 冯晶晶, 高国辉. “双碳”目标下天然气生产工业碳计量方法优化[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(5): 246-253. DOI: 10.12677/hjct.2025.155024

Received: Jul. 9th, 2025; accepted: Aug. 20th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

Driven by the global low-carbon energy transition and domestic “dual-carbon” targets, the environmental impact assessment of natural gas as a transitional energy source needs to be supported by accurate carbon measurement methods. This study systematically analyses the carbon emission characteristics of natural gas production throughout its life cycle (exploration and extraction, treatment and processing, transmission and storage), identifies the key emission sources such as energy consumption of equipment, flaring and methane fugitive emissions, and reveals the limitations of the traditional emission factor method and mass balance method in terms of dynamic emission capture, accounting boundary coverage and data adaptability. The study innovatively constructs a data-driven incremental carbon measurement model and an integrated air and space monitoring and inversion model, forming a closed-loop measurement system of “data collection-dynamic modelling-real-time correction” by integrating Internet of Things (IoT) sensor data, process parameters, and remote sensing data from satellites and drones. Also, it points out the technical bottlenecks such as multi-source data fusion accuracy, methane fugitive quantification, model adaptive optimisation and monitoring cost control were also identified. The research provides theoretical and methodological references for the construction of an accurate and efficient carbon metering technology system for natural gas production, which is of great practical significance for promoting the green transformation of the energy industry.

Keywords

Natural Gas Production, Carbon Emission Metering, Methane Fugitive, Data-Driven Modelling, Space-Air Integration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球应对气候变化严峻挑战、推动能源利用低碳转型的背景下，天然气作为一种相对清洁的化石能源，在能源结构中的地位愈发凸显[1][2]。国际能源署(IEA)指出，天然气是实现向低碳、零碳能源转型最重要和最现实的过渡能源，其碳排放相较于煤炭、石油等传统化石能源更低，在减少温室气体排放方面具有显著优势[3]。然而天然气的主要成分(甲烷)是全球第二大温室气体，其百年尺度的温室效应是二氧化碳的 28~36 倍，且在天然气生产全生命周期中存在显著的无组织排放风险[4]。特别是近年来，随着各国对气候变化问题的重视程度不断提高，天然气在能源消费中的占比稳步上升[5]。据统计，2023 年我国天然气消费量达到 3945 亿立方米，在一次能源消费总量中占比 8.5%，预计到 2030 年这一比例将进一步提高[6]。构建能够精准量化包含甲烷等非二氧化碳温室气体排放的碳计量方法体系，对于评估其对环境的影响、制定合理的减排策略以及推动能源行业的可持续发展具有基础性意义。

天然气生产全生命周期涉及勘探、开采、加工、运输等多个环节，每个环节都伴随着一定的能源消耗和碳排放。欧盟委员会发布的《能源系统一体化战略》强调，精确的碳排放计量(碳计量)是实现能源系统低碳化转型的关键前提，只有全面掌握碳排放情况，才能有针对性地采取措施，降低能源生产过程中

的碳排放强度[7]。本研究旨在全面、系统地探究天然气生产工业碳计量方法,对已有研究成果进行系统梳理与分析,明确碳计量方法的发展脉络、应用实践、面临挑战及优化方向,为构建精准高效的天然气生产碳计量体系提供支撑。

2. 天然气生产工艺与碳排放源识别

天然气从气井采出后,经井场降压、除尘、除液后,由集气支线、集气干线送至处理厂,在处理厂中经脱硫、脱水等环节成为合格的天然气商品,输送至长输管道,进而送至用户[8]。这涵盖从地下资源勘探开发到最终产品输送至用户的完整链条,主要包括勘探开采、处理加工和输送储存三大核心环节。每个环节采用特定的工艺技术,并伴随着显著的能源消耗与温室气体排放。精准识别各环节的碳排放源是构建可靠碳计量模型的基础。本节将系统梳理主要生产工艺流程及其对应的关键碳排放源。

开采环节是天然气生产的起点,是将天然气经气井采到地面的整套工艺技术,涉及钻井、完井、采气、集输等作业。从天然气开采的作业链上看,该环节的碳排放主要来源于钻井作业的钻井机、压缩机,采气作业的电伴热装置、水套炉装置、提升泵、加注泵、转水泵以及集输气作业的增压机组、脱水装置、空压机、长明火等。从排放源梳理可知,天然气开采环节的碳排放源可归为设备运行的燃料燃烧排放、电力隐含排放,安全或应急操作中的火炬燃烧排放,以及不可避免的逸散排放等。

天然气处理加工环节,需将从井口采出的原料天然气中含有的 H_2O 、 H_2S 、 CO_2 、 N_2 、凝析油等杂质经过处理加工达到管输标准或转化为压缩天然气、液化天然气等产品,包括脱水、脱酸、脱凝液及脱固体颗粒等杂质,以及硫黄回收和尾气处理等作业。此环节能耗密集,是重要碳排放源。从天然气处理加工环节的作业链上看,碳排放源主要为加热装置、泵运行系统、尾气处理,脱水装置以及长明火等。从排放源上看,天然气处理加工环节的碳排放源可归为化石燃料燃烧、火炬燃烧、工艺放空、电力隐含以及不可避免的逸散排放等。

天然气输送与储存环节需要通过管道、LNG 船或 CNG 槽车等方式输送至用户,并依赖储气库进行调峰保供,同样是碳排放的重要来源。从天然气输送与储存环节的作业链上看,碳排放源主要为计量站、增压站、配气站的耗能设备以及应急火炬系统。从排放源上看,天然气输送与储存环节的碳排放源可归为化石燃料燃烧、火炬燃烧、电力隐含以及不可避免的逸散排放等。

3. 传统碳计量方法在天然气生产中的应用

3.1. 排放因子法

排放因子法,又称排放系数法,主要依据政府间应对气候变化委员会(IPCC)的《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》及 2019 年修订版进行核算,是目前广泛应用于碳排放核算领域的传统方法。根据排放因子法,天然气生产的活动水平数据与相应的排放因子相乘,累计能源消耗、火炬燃烧、工艺放空、逸散排放及隐含电力等各种碳排放源的计算结果,从而得出天然气生产中相应的碳排放量。在天然气生产工业中,该方法无需复杂的实时监测设备与技术,操作简便易行,具有较强的实用性与可操作性。Qin 等对中国的常规气和四川地区的页岩气开发进行了从开采、加工、储存、运输到终端消费完整供应链的温室气体排放核算[9]。胡俊坤等系统梳理了天然气各环节的碳排放特征,基于排放因子法对四川盆地典型常规气、页岩气和高含硫气开发进行碳排放核算[10]。

排放因子的选择和测算直接影响碳排放核算值,是影响核算准确性的主要原因。一方面,排放因子多参考 IPCC 指南中的缺省值,在企业层面难以精准反映不同企业在生产工艺、设备性能、能源品质等方面的差异,致使碳排放核算结果的精准度受限。另一方面,排放因子的时效性较差,随着技术进步与能源结构调整,如天然气开采中新型节能设备的推广应用、电网中火电占比的变化,若不及时更新排放因

子,会使核算结果与实际碳排放偏差愈发显著。仲佳爱等[11]比较了用排放因子法与实测法进行天然气开采过程碳排放核算研究结果,发现用排放因子法的估算结果是实测法的 19 倍,严重高估了天然气开采过程的温室气体排放量。

3.2. 质量平衡法

质量平衡法,也称物料衡算法,其基于质量和能量守恒的基本原理,为在一个封闭或稳定的系统中,输入物质的质量等于输出物质的质量。在天然气生产工业领域,该方法不对生产设备进行细分,只注重生产过程中各项能源的消费总量;通过对进入和离开某一生产环节或整个生产系统的碳元素质量进行追踪与核算,来确定碳排放量。

杜祥忠等在估算油田联合站生产运行过程的碳排放特征时,采用质量平衡法计算天然气直接燃烧所导致的碳排放量[12]。崔亚蕾等并结合质量平衡法、排放因子法等方法核算煤制天然气全生命周期碳排放量[13]。该核算方法较为简单且测算结果具有一定准确性。但由于中间过程繁琐,需全面掌握天然气生产工艺和生产全程,否则容易出现系统误差,数据获取也相对困难,因此该方法当前的应用范围还比较窄,通常被用于生产活动中,如脱水、脱硫过程的碳排放以及其他非化石燃料燃烧过程的排放等。

3.3. 生命周期评价法

生命周期评价法专注于评估天然气生产过程的整个生命周期(即从天然气开采、处理加工、储存运输直至废弃处理等)内各阶段的碳排放分析,也称“碳足迹”。在天然气开采及加工阶段,评估天然气开采、处理加工和管道运输中的碳排放;其次,在天然气设施建设及运营阶段,核算站场建设中的能源消耗、原材料使用,以及设备生产运输所产生的排放;再次,天然气运输及分配阶段涉及管道或运输车辆运行,以及天然气压缩或液化等环节的排放量测算;最后,在废弃处理阶段,分析设备报废、站场拆除和废料处理对碳排放的影响。每个环节的排放均采用对应的碳排放因子进行核算,以实现全生命周期的系统性覆盖。付子航等[14]应用生命周期评价法,研究管输天然气、液化天然气及煤制天然气等全生命周期过程的碳排放清单,并提出了天然气发展的“低碳”路径。崔亚蕾等[13]从全生命周期角度分析并构建煤制天然气全生命周期碳排放核算模型,为煤制天然气产业发展提供政策参考和决策依据。

3.4. 实测法

实测法,即实地测量法,依赖专业的连续计量仪器测量 CO_2 的浓度、流速及流量进行碳排放核算的方法。该法中间环节少,结果精确[15]。仲佳爱等采用实测法,利用甲烷泄漏浓度检测仪对该气矿井口、集气站、配气站等场站的所有元件的潜在泄漏点进行了逐一检测,同时采集油田水和天然气样品,在实验室对油田水露天放置过程和天然气火炬燃烧过程的温室气体排放,估算 2011 年四川盆地某天然气气田的 CH_4 和 CO_2 排放量分别为 1033.32 t 和 1295.56 t,折合 CO_2 当量为 27128.56 t [11]。

但由于实测法对监测技术的要求较高,且监测成本也较高,采用这一方法的行业和企业并不多,该方法适用于有条件实地检测的单一行业和部分企业的碳排放测度。此外,实测法在实际应用和推广中还存在 2 个局限性:一是该方法主要是监测生产环节的碳排放,无法监测产品全生命周期的碳排放;二是想测算出某一行业总体或某一产业总体碳排放量,则需要运用统计分析的方法,通过样本结果推算整体结果。这就意味着样本的选择极为重要,如若样本不具备代表性,其测算结果就算再精准也不具备参考意义。

3.5. 小结

传统碳排放核算依赖人工统计与静态排放因子,在天然气生产行业应用中面临三重核心挑战。其一,

动态排放捕捉失效。天然气生产具有强工况波动性(如开采、处理、输送等环节中生产波动及设备异常导致的甲烷逸散),但传统方法依赖月/季度报表,无法捕捉分钟级瞬时排放。其二,核算边界模糊导致间接排放(如钻井设备制造、管材运输等供应链碳足迹)未被纳入核算边界,且缺乏对长输管道上的阀门微泄漏无法动态追踪。其三,数据质量与排放因子适用性较差。活动数据主要源于企业能源计量系统,但部分中小型井场燃料消耗依赖估算而非实测。排放因子静态化,选择则依赖《省级温室气体清单编制指南》等政策文件,但实际应用中,工艺参数差异、天然气热值波动、排放因子漂移等因素均会影响核算结果。

4. 面向动态生产的天然气行业碳计量模型构建

国家碳中和目标及天然气行业绿色转型需求对企业层面的碳核算提出了动态化、智能化、可信监测的要求。面向动态生产的碳计量模型构建正从技术工具上升为支撑国家战略落地的核心基础设施,更深度耦合了产业转型、国际协同与政策调控的系统性需求[16]。

4.1. 数据驱动的增量碳计量模型

随着数据通信技术的快速发展,以数据传感、云计算、大数据和物联网等技术为代表的数字技术有望重塑能源系统。数据驱动在碳足迹、碳汇等领域的深度融合可以促进能源行业的数字化监测、排放精准计量与预测、规划与实施效率提升,从而大幅提升能源使用效率,直接或间接减少能源行业碳排放量。数据驱动的增量碳计量模型以整合物联网监测数据、工艺参数数据等多源异构数据为基础,构建覆盖全生命周期的数据链,形成“数据采集-特征提取-动态建模-实时修正”的闭环体系。该模型的核心在于利用基于机器学习(如神经网络、决策树、随机森林、关联规则等)的算法,自动挖掘企业工况参数、历史能耗与碳排放间的非线性时序关联,并通过特征工程提取设备负荷率、催化剂活性等关键变量,构建小时级排放预测模型。这使其能够动态追踪天然气生产各环节的碳排放,量化工艺参数(如反应温度、压力)对排放强度的边际影响,实现生产优化与碳排放控制的协同决策,显著优于依赖静态排放因子的核算方法。

为实现精准核算,模型通过多源数据融合平台将物联网传感器数据、工艺参数、能源消耗数据进行时空对齐,形成动态数据集;在数据治理层面,引入区块链技术构建碳数据账本,实现从传感器采集到核算结果输出的全流程不可篡改存证。针对传统核算的滞后性与孤岛化缺陷,模型利用流式计算引擎联动分析在线监测数据与历史数据库,自动识别排放异常(如设备故障导致的甲烷瞬时泄漏)并触发分级预警。在碳足迹溯源层面,构建基于知识图谱的供应链追踪模型,以化工产品物料清单(BOM)为核心,关联上下游能源数据与运输日志,利用图计算算法识别高碳环节。在技术应用上,神经网络[17][18]、p-中值[19]、尖峰检测算法[20]、混合整数线性规划[21]、随机规划[22]等技术已被用于在线检测传感器的立体部署、优化及泄漏溯源,但上述模型的尺度、精度和分辨还需结合实际应用验证、优化和改进。传感器布设及泄漏溯源算法需充分考虑构筑物特征(设备类型及空间分布、介质分布及操作条件、设备使用时间等)、排放特征(泄漏概率、泄漏排放速率、VOCs组成、工况等)、迁移扩散条件(风场、大气稳定度、表面粗糙度、障碍物分布等)、检测条件(传感器位置、检测限、响应时间、灵敏度、选择性等)以及减排优化(传感器组合优化、与CWP等效减排优化、投资、运维成本等)等复杂因素,并在实际应用迭代优化。此外,传感器、在线检测、溯源及修复管理需要集成模型或算法优化、数据可视化、大数据分析、机器学习和深度学习的智能化平台;应用中常见的假阳性误报警或假阴性漏检等问题需要结合传感器基线漂移、生产或排放工况、气象条件、外部输入等因素智能分析,并控制到较低水平。

4.2. 空天地一体化监测反演模型

遥感估算法凭借其大范围、高频次、多尺度观测优势,已成为油气行业动态碳计量技术体系的核心

组成部分。以遥感技术为核心的空天地一体化监测反演碳排放核算模型以自上而下的监测方式，可更全面、快速、直观地获得天然气生产碳排放源信息，在天然气行业里无组织排放监测、生产活动追踪和跨区域数据校准等传统方法难以覆盖的碳排放核算领域发挥关键作用。

空天地一体化监测反演模型通过卫星[23] [24]、无人机[25] [26]、走航车[27]等平台搭载光谱传感器获取天然气生产、集输区域的 CH₄、CO₂ 等温室气体浓度相关信息，结合大气化学传输模式，通过四维变分、卡尔曼波等数据同化方法反演得到区域碳排放通量的方法。各单元功能概况见表 1。它是目前获取碳排放数据最先进的手段之一，被 IPCC 明确列入排放清单的校验方法。

Table 1. Overview of the functions of the natural gas production space-ground integrated three-dimensional monitoring and protection system units (reference Liang Jinlu *et al.*) [28]

表 1. 天然气生产空天地一体化立体监控防护系统单元功能概况(参考梁金禄等) [28]

立体空间监测手段	搭建监测技术系统平台	监测功能及用途概述
卫星遥感、 北斗卫星导航系统	卫星遥感搭载激光雷达检测 CH ₄ /CO ₂ 系统、 北斗卫星定位天然气管网路径 GIS	监测管道路径的海拔高度、经纬度； 监测沿线周边的 CH ₄ /CO ₂ (或其他燃气组分) 排放或泄漏浓度。
无人机	搭载 CH ₄ /CO ₂ 遥测系统、 红外测温系统、高清摄像系统、 扬声器广播系统	日常例行巡线巡检，可测量管道周边温度异常状况。当出现异常状况，无人机可抵近检查，获得更精准的数据信息；高清摄像可实时回传到调度中心服务器平台及屏幕显现；广播系统可自动播放报警音，或接收播放远程讲话警告驱离，也可拾音回传对讲。
地面巡检 (巡检车、人工手持式巡检)	搭载甲烷遥测系统 (车载、人工手持)、 搭载红外测温系统(人工手持)	在车辆可通行的条件下，沿着管网走向，可检测主干道上绿化带、人行道下面埋地天然气管网或阀井等重点区域部位的甲烷浓度异常状况； 人工手持检测仪面向楼栋立管、架空层管道等检测泄漏状况，包括温度异常。
光纤	沿线铺设分布式光纤感知预警系统 (可测温、测形变、测震动)	分布式光纤可测量感应到的温度异常； 分布式光纤可感应测量形变、震动等异常状况。
管道内部温度、压力、 流量检测； 管道爬行机器检测	管道内温度、压力、 流量等运行参数、 爬行机器人巡检	通过管道内部温度、压力传感器或流量计，分别测量天然气管输的流动参数； 通过爬行机器人可测量管道厚度变化、管道腐蚀状况、裂纹裂缝状况等。

5. 结论与展望

5.1. 结论

本研究聚焦天然气生产工业全生命周期碳计量方法，系统分析了勘探开采、处理加工、输送储存环节的碳排放特征，揭示了传统排放因子法、质量平衡法、生命周期评价法在动态排放捕捉、核算边界覆盖、数据适应性等方面的局限性。研究创新性地构建了数据驱动的增量碳计量模型与空天地一体化监测反演模型，通过融合物联网传感器数据、工艺参数、遥感监测数据，形成“数据采集 - 特征提取 - 动态建模 - 实时修正”的闭环体系。研究同时指出，当前碳计量实践面临数据质量不确定性、模型复杂性、政策标准不统一等挑战，通过提出多源数据融合、动态模型优化、低成本传感器部署等关键技术突破路径，为构建精准高效的天然气生产碳计量体系提供了理论支撑与方法参考，对推动能源行业绿色低碳转

型具有重要实践意义。

5.2. 展望

1) 多源异构数据融合与动态校准技术

面向动态生产的天然气行业碳计量涉及管道压力、温度等物联网传感器数据、工艺参数、遥感监测数据等多源异构数据,当前面临数据时空对齐精度不足、传输延迟、协议不统一等挑战,且存在噪声干扰(如气象条件对甲烷浓度监测的影响),需突破基于边缘计算的实时数据清洗算法,研发基于卡尔曼滤波的时空对齐动态校准算法,结合区块链构建可信碳数据链,实现从井口到管输全链条数据的实时校验与溯源。

2) 甲烷逸散动态量化与溯源技术

天然气生产中的甲烷逸散(如阀门微泄漏、火炬燃烧不完全)具有瞬时性、低浓度特征,传统传感器检测限难以满足需求。需突破基于量子级联激光器的 TDLAS 光谱技术,结合无人机搭载的高光谱成像仪提高泄漏源定位精度。同时,开发基于图神经网络的泄漏溯源模型,关联设备运行状态、气象参数与历史泄漏数据,构建“泄漏概率-扩散路径-影响范围”三维溯源体系,提高溯源准确率。

3) 动态计量模型自适应优化技术

现有数据驱动模型在工艺参数剧变(如气井压裂作业)时易出现预测偏,需构建“工艺-排放响应”的基于迁移学习的模型自适应算法。通过构建跨工况特征迁移模块,将正常生产数据的知识迁移至异常工况,结合在线学习机制实时修正模型参数,动态生成企业专属排放因子库。

4) 低成本传感器网络部署与协同优化技术

空天地一体化监测体系中,卫星遥感与无人机巡检的高成本限制了高频次监测,且成本高昂、难以覆盖中小型企业。应加强基于超材料的微型光谱传感器制备技术,将单点监测成本降低。开发多尺度遥感数据融合模型,以低轨卫星(如 TROPOMI)大范围筛查结合无人机重点区域验证。结合 p-中值算法或集合覆盖模型优化传感器布设密度,在保证监测精度的同时降低系统成本。此外,开发传感器协同感知协议,通过分布式边缘计算实现节点间数据互补,提升网络鲁棒性。

基金项目

四川省自然科学基金青年基金项目(2025ZNSFSC1264);四川轻化工大学“652”科研创新团队(SUSE652A003);广西重点研发计划项目(桂科 AB24010156)。

参考文献

- [1] Gürsan, C. and de Gooyert, V. (2021) The Systemic Impact of a Transition Fuel: Does Natural Gas Help or Hinder the Energy Transition? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **138**, Article ID: 110552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110552>
- [2] Delborne, J.A., Hasala, D., Wigner, A. and Kinchy, A. (2020) Dueling Metaphors, Fueling Futures: “Bridge Fuel” Visions of Coal and Natural Gas in the United States. *Energy Research & Social Science*, **61**, Article ID: 101350. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101350>
- [3] International Energy Agency (2019) The Role of Gas in Today’s Energy Transitions. IEA.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [5] International Energy Agency (2024) World Energy Outlook 2024. IEA.
- [6] 国家能源局. 中国天然气发展报告(2024) [R]. 北京: 石油工业出版社, 2024.
- [7] European Commission (2020) EU Strategy for Energy System Integration.

- https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/energy-system-integration_en#what-is-energy-system-integration
- [8] 中国石油天然气集团公司. 天然气地面工程设计手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021.
- [9] Qin, Y., Edwards, R., Tong, F. and Mauzerall, D.L. (2017) Can Switching from Coal to Shale Gas Bring Net Carbon Reductions to China? *Environmental Science & Technology*, **51**, 2554-2562. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04072>
- [10] 胡俊坤, 敬兴胜, 刘海峰, 等. 天然气生产企业碳排放核算与预测方法研究——以四川盆地天然气开发为例[J]. 天然气技术与经济, 2024, 18(1): 53-58.
- [11] 仲佳爱, 陈国俊, 张中宁, 等. 四川盆地气矿天然气开发过程中温室气体的排放特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 355-360.
- [12] 杜祥忠, 杨连殿. 油田联合站碳排放计算及浅析[J]. 油气与新能源, 2024, 36(1): 48-53.
- [13] 崔亚蕾, 孙仁金, 赵亚南, 等. 煤制天然气全生命周期碳排放核算研究[J]. 资源与产业, 2018, 20(6): 52-60.
- [14] 付子航. 煤制天然气碳排放全生命周期分析及横向比较[J]. 天然气工业, 2010, 30(9): 100-104, 130.
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency (1996) Revised 1996 IPCC Guidelines Formational Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Program, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency.
- [16] 卢露. 碳中和背景下完善我国碳排放核算体系的思考[J]. 西南金融, 2021(12): 15-27.
- [17] Kim, H., Park, M., Kim, C.W. and Shin, D. (2019) Source Localization for Hazardous Material Release in an Outdoor Chemical Plant via a Combination of LSTM-RNN and CFD Simulation. *Computers & Chemical Engineering*, **125**, 476-489. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.03.012>
- [18] Travis, B., Dubey, M. and Sauer, J. (2020) Neural Networks to Locate and Quantify Fugitive Natural Gas Leaks for a MIR Detection System. *Atmospheric Environment: X*, **8**, Article ID: 100092. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2020.100092>
- [19] Klise, K.A., Nicholson, B.L., Laird, C.D., Ravikumar, A.P. and Brandt, A.R. (2020) Sensor Placement Optimization Software Applied to Site-Scale Methane-Emissions Monitoring. *Journal of Environmental Engineering*, **146**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001737](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001737)
- [20] Daniels, W.S., Jia, M. and Hammerling, D.M. (2024) Detection, Localization, and Quantification of Single-Source Methane Emissions on Oil and Gas Production Sites Using Point-In-Space Continuous Monitoring Systems. *Elementa: Science of the Anthropocene*, **12**, Article ID: 00110. <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00110>
- [21] Kwak, D., Jeong, J., Shin, Y., Lee, N. and Shin, D. (2022) Sensor Placement Optimization for Fenceline Monitoring of Toxic Gases Considering Spatiotemporal Risk of the Plant-Urban Interface. **130**, Article ID: 103858. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.069>
- [22] Zhou, C., Zhang, B., Mu, C., Chu, Z. and Sun, L. (2019) Multi-Objective Optimization Considering Cost-Benefit Ratio for the Placement of Gas Detectors in Oil Refinery Installations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **62**, Article ID: 103956. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103956>
- [23] 刘毅, 王婧, 车轲, 等. 温室气体的卫星遥感-进展与趋势. 遥感学报, 2021, 25(1): 53-64.
- [24] 曹保久, 曹兴涛, 谷广峰, 等. 石油天然气行业甲烷排放卫星监测技术进展及启示[J]. 天津科技, 2022, 49(8): 73-76.
- [25] Nathan, B.J., Golston, L.M., O'Brien, A.S., Ross, K., Harrison, W.A., Tao, L., et al. (2015) Near-field Characterization of Methane Emission Variability from a Compressor Station Using a Model Aircraft. *Environmental Science & Technology*, **49**, 7896-7903. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00705>
- [26] 达虹鞠, 许德刚, 王晨, 等. 基于无人机平台的甲烷监测技术及其在油气行业的应用[J]. 中国环境监测, 2024, 40(1): 1-11.
- [27] Brantley, H.L., Thoma, E.D., Squier, W.C., Guven, B.B. and Lyon, D. (2014) Assessment of Methane Emissions from Oil and Gas Production Pads Using Mobile Measurements. *Environmental Science & Technology*, **48**, 14508-14515. <https://doi.org/10.1021/es503070q>
- [28] 梁金禄, 王荣健, 周永革, 等. 天然气管网空天地一体化立体监控防护系统研发应用探究[J]. 大众科技, 2024, 26(4): 47-50, 54.