

天然气行业甲烷排放机理及管控路径研究

李 孳¹, 王建良^{2,3,4,*}

1. 中国地质大学(北京) 自然资源战略发展研究院, 北京, 100083;
2. 中国石油大学(北京) 经济管理学院, 北京, 102249;
3. 中国石油大学(北京) 中国油气产业发展研究中心, 北京, 102249;
4. 中国石油大学(北京) 碳中和与创新能源发展研究院, 北京, 102249



摘 要 : 甲烷是仅次于二氧化碳的全球第二大温室气体, 天然气行业是其最主要的人为排放源之一。为有效应对气候变化、推动天然气行业高质量与可持续发展, 本文系统研究了天然气全产业链甲烷排放机理及管控路径。首先, 识别天然气产业链各环节典型工艺和设备导致的排放源并阐释其原理, 发现甲烷排放源存在“单一环节专属”与“跨环节贯穿”两种类型。然后, 按照“三范围”理论分析甲烷排放路径, 指出全产业链五大环节排放属于范围一(直接排放), 外购环节属于范围二(间接排放)。在此基础上, 将甲烷排放形态分为工艺放空、设备泄漏和火炬燃烧3类, 除设备泄漏外, 其他排放均覆盖直接排放的所有环节。最后根据排放源识别、排放路径分析和排放形态分类结果, 形成天然气行业甲烷排放机理认识链。并基于对排放机理的系统认知, 从研究、政策、企业和国际层面, 构建多元化的甲烷排放管控路径。

关 键 词 : 天然气; 甲烷; 排放机理; 管控路径

中图分类号 : TE991; X37 **文献标志码** : A **文章编号** : 2097-4981(出版年)0期-fpage-12

DOI : 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2025-0020

Study on Methane Emission Mechanisms and Control Pathways in the Natural Gas Industry

LI Nu¹, WANG Jianliang^{2,3,4,*}

1. Institute of Natural Resources Strategic Development, China University of Geosciences Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Economics and Management, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China;
3. Research Center for China's Oil and Gas Industry Development, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China;
4. Institute of Carbon Neutrality and Innovative Energy Development, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China

Abstract : Methane is the second-largest greenhouse gas after carbon dioxide, and the natural gas industry is one of its primary anthropogenic emission sources. To effectively address climate change and promote the high-quality and sustainable development of the natural gas industry, this study systematically investigates methane emission mechanisms and control pathways across the entire natural gas supply chain. This study identifies typical methane emission sources caused by processes and equipment at each stage of the natural gas industry chain and elucidates their underlying mechanisms. The findings reveal two distinct types of emission sources: “segment-

收稿日期 : 2025-05-06; **接受日期** : 2025-06-19

基金项目 : 国家自然科学基金面上项目(72274213); 中央高校基本科研业务费(590125051)

作者介绍 : 李 孳(1994—), 女, 助理研究员, 主要研究方向为资源经济与政策分析。E-mail: linu@cugb.edu.cn

通讯作者 : 王建良(1987—), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为油气资源系统工程与管理。E-mail: wangjianliang305@163.com

specific” and “cross-segment pervasive”. Following the “three scopes” framework, the study analyzes methane emission pathways, demonstrating that emissions from the five main industry chain processes fall under Scope 1 (direct emissions), while emissions from outsourced activities belong to Scope 2 (indirect emissions). Furthermore, methane emission patterns are categorized into three types: process venting, equipment leaks, and flare combustion. Notably, with the exception of equipment leaks, the other patterns are present across all direct emission processes. By integrating the results of emission source identification, pathway analysis, and pattern classification, this research establishes a comprehensive methane emission mechanism framework for the natural gas industry. Building upon this systematic understanding of emission mechanisms, the study proposes diversified methane control pathways spanning four dimensions: research, policy, corporate implementation and international collaboration.

Key Words : natural gas; methane; emission mechanism; control pathway

0 引言

甲烷作为重要的温室气体，其全球增温潜势在100年时间尺度上是二氧化碳的28~36倍^[1]，对气候变化具有显著影响。天然气行业作为人为甲烷排放的主要来源之一，其全产业链各环节存在的甲烷逃逸问题日益受到国际社会的关注。2024年5月，欧盟通过新法规，要求对进口天然气实施甲烷排放限制，并建立全球监测工具以提高透明度，标志着甲烷管控已从自愿行动转向基于国际标准的强制性行动^[2]。与此同时，美国国家环境保护局于2024年11月发布新规，对油气行业超额甲烷排放处以900美元/吨的罚款，进一步增加了行业减排压力^[3]。

我国作为全球能源消费大国和天然气进口大国，天然气产业链规模庞大且持续扩张。随着全球碳中和进程加速，甲烷排放管控已成为我国天然气行业高质量发展的关键环节。2023年11月，我国发布了第一份全面、专门的甲烷排放控制的政策性文件《甲烷排放控制行动方案》，对未来一段时期我国甲烷排放控制工作进行了顶层设计和系统部署^[4]。2024年11月，生态环境部在《联合国气候变化框架公约》第二十九次缔约方大会的“中国甲烷控排积极行动”边会上强调，我国通过完善监测、报告与核查（Monitoring, Reporting and Verification, MRV）体系、修订排放标准及推动市场化减排机制，已在甲烷控排领域取得积极成效^[5]。

然而，面对天然气产业链规模扩张与碳中和目标的双重压力，我国甲烷排放管控仍面临系统性挑战。一方面，天然气产业链涵盖勘探开发、生产处

理、储运分销等多个环节，各环节工艺复杂、设备繁多，甲烷排放源分布广泛且形态多样；另一方面，现有监测技术难以全面覆盖分散式排放源，政策标准体系尚不完善，企业减排动力不足等问题制约着甲烷管控效能的提升。

在此背景下，系统识别天然气行业甲烷排放源，构建系统化管控路径具有重要的理论和实践意义。目前，国内外学者普遍采用“自下而上”和“自上而下”两种互补的方法体系进行排放源识别和研究。这两种方法各具优势，也各有不足，共同构成了甲烷排放研究的方法论基础。

“自下而上”方法主要通过现场检测技术对特定设备或设施进行直接测量，其技术手段日趋多样化。例如，红外热成像技术能够可视化甲烷泄漏，检测灵敏度可低至19g/h，特别适用于阀门、法兰等连接部件的泄漏检测^[6]；大流量采样器通过“吸附-脱附-色谱”分析流程，能够精确量化泄漏速率^[7]；可调谐半导体激光吸收光谱技术可实现对甲烷排放的实时在线监测，响应时间极短，适合连续监测高风险点位^[8]；新一代传感器网络技术可通过布设低成本的分分布式传感器，实现对场站的全天候监控，此外，还可与无人机、卫星等远程监测手段结合，实现更广泛的泄漏监测覆盖^[9]。以上技术手段的共同特点为能够对局部排放源进行精准识别和量化，空间分辨率可达设备级，特别适用于生产工艺环节的排放检测。然而，“自下而上”方法也存在明显局限：检测范围有限，人力物力投入大，难以覆盖全产业链；对间歇性排放（如设备启停时的泄漏排放）捕捉不足；检测结果受操作人员技能水平影响较大^[10]。

相比之下,“自上而下”方法则从宏观角度提供补充视角。例如,高分辨率遥感卫星可用于测量洲际及全球级别的甲烷浓度;大气反演模型可通过结合气象数据和卫星监测的甲烷浓度,估算区域尺度的排放总量,为政策制定提供宏观依据^[11];飞机和无人机搭载传感器可在监测中等规模排放源方面发挥重要作用,填补卫星和地面监测之间的尺度空白^[12]。该类方法的优势在于能够发现“自下而上”方法可能遗漏的异常排放,适用于大范围排放浓度分析。但其空间分辨率相对较低,对分布式小排放源的识别能力有限,且受云层覆盖等气象条件制约^[10]。

然而,当前两类研究多是依据排放量进行的源点判断,缺乏对甲烷排放路径的详细分析以及排放形态的系统性归纳,对甲烷排放机理的认识链条不清晰、不成体系,且大多数研究仅关注直接排放,忽略了因外购电力或热力而产生的间接排放^[13]。

为此,本文拟从天然气产业链全生命周期视角出发,对天然气产业链各环节典型工艺流程及设备所产生的排放源进行系统识别,并分析其排放路径,归纳其排放形态,由此形成“源点-路径-形态”为基本脉络的甲烷排放机理认识链,最后基于机理认识,提出覆盖研究、政策、企业和国际4个层面的系统化甲烷排放管控路径。研究结果能够为我国天然气行业制定科学减排策略、完善甲烷管控体系提供理论支撑,同时为全球天然气行业甲烷减排提供有益的中国实践参考。

1 天然气行业甲烷排放源系统识别

天然气行业的甲烷排放贯穿天然气产业链自勘

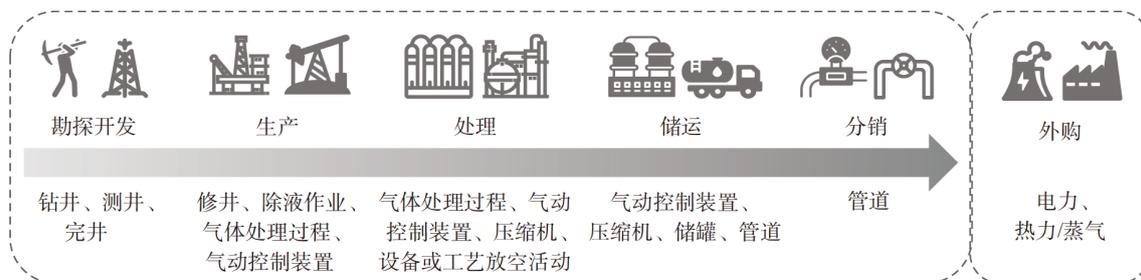


图1 天然气行业甲烷排放环节及主要设备

Fig.1 Methane emission processes and major equipment in the natural gas industry

探开发到终端利用的全过程,涉及复杂的工艺系统和设备体系。精准识别全产业链的甲烷排放源是实施有效管控的前提和基础。

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[14]和《IPCC2006年国家温室气体清单指南2019修订版》界定了天然气行业甲烷排放涉及的环节,包括勘探开发、生产、处理、储运以及分销五大环节^[15]。勘探开发环节指通过地球物理勘探和地质勘探,在存在天然气资源的地区建设生产井和处理设施等,实现对天然气的开发;生产环节指从地下储层中开采天然气;处理环节指从气井收集天然气,并对其进行处理、脱水等一系列处理,最后输送到天然气集输管道或其他设备;储运环节指将天然气从集输系统分配到输送系统,并在输送期间利用储存站对天然气进行加压,补充天然气因在管道中流动而损失的压力;分销环节指将天然气通过大型输气管道干线和服务管线输送到终端用户。除此之外,外购环节也涉及一定的甲烷排放,天然气全产业链需外购电力和热力/蒸气等能源维持其正常运转。

天然气行业甲烷排放环节及主要设备如图1所示。

1.1 勘探开发环节甲烷排放源识别

天然气勘探开发环节的甲烷排放主要来自钻井、测井及完井活动过程。

1.1.1 钻井

钻井活动期间的甲烷排放主要来自钻井液。钻井液(钻井泥浆)用于润滑和冷却钻头、将钻屑带离钻头以及保持井内所需的压力。在钻井过程中,来自井筒的气体可能会夹带在钻井液中。为去除夹

带的气体，钻井液会在井筒外进行再循环和脱气，由此将气体从钻井液中分离出来并直接排放到大气中。排放气体中主要包括甲烷以及部分可能存在的二氧化碳。钻井过程的甲烷排放具有较高的不确定性，Caulton等^[16]在宾夕法尼亚州西南部马塞勒斯地层的7个井场观测到，钻井阶段每口气井平均每秒排放34g甲烷，该数值较美国国家环境保护局对此操作阶段的估计结果高2~3个数量级。

1.1.2 测井

测井的目的是确定特定储层的物理和经济可行性。大多数测井活动期间是没有甲烷排放的，原因在于该阶段产生的气体会被回收用于销售或送往火炬进行燃烧。如果气体被排放到大气中，那么就会产生甲烷排放以及部分可能存在的二氧化碳排放。

1.1.3 完井

在完井活动期间，钻井液会从井筒中排出，这一过程称为回流。在回流过程中，气体可能会溶解或夹带在钻井液中，并被释放到大气中，由此造成甲烷排放^[17]。在低渗透储层中钻探，需要使用高压流体对岩层进行水力压裂。水力压裂过程由于需要使用大量的水和支撑剂（主要为砂），夹杂在回流液中的甲烷会排放到大气中，因此使用水力压裂法完井的回流率要高于大多数不使用水力压裂法完井的回流率^[18]。水力压裂回流排放是天然气上游最重要的排放来源^[19]。美国自然资源保护委员会估计，对水力压裂完井的甲烷排放进行有效控制可减少美国油气行业约40%的甲烷排放^[20]。在不使用水力压裂法的完井过程中，回流期通常比使用水力压裂法所需的时间短，因此，释放的甲烷量通常也较低，可能会在收集液体的露天坑或储罐中产生甲烷排放。

1.2 生产环节甲烷排放源识别

天然气生产环节的甲烷排放主要来自修井、除液作业、气体处理过程及气动控制装置。

1.2.1 修井

修井指为恢复或增加产量而进行的活动。修复油管腐蚀或其他井下设备问题是典型的修井活动，在修复时需将管道从露天套管中取出，该过程会排放少量气体，造成甲烷排放。水力压裂修井需要通过注入气体、水和支撑剂在现有的低渗透气藏中重

新压裂打开新裂缝。在水力压裂修井作业的返排期间，夹带在返排液体中的气体会排放到大气中。

1.2.2 除液作业

除液作业的目的是去除积聚在井筒中的液体。非柱塞举升井的除液通常采用人工方式，即操作员将气体转移到大气罐，并远离生产分离器，压力梯度的增加会使气体流量增加，从而将液体从井中提升上来，夹带在液体中的气体会排放到大气中。在柱塞举升井操作时，需要先关闭气井，然后释放柱塞，使柱塞下降到井底，随后重新打开气井，气体将柱塞推至井顶。如果柱塞到达井筒顶部，气体和液体会被输送到生产分离器，不会产生气体排放；如果柱塞没有达到预期的井顶，气流会被导入大气罐，在压力梯度的作用下将液体从井中提升上来，夹带在液体中的气体会排放到大气中，造成甲烷排放^[21]。是否安装柱塞举升装置，对于气井除液次数影响极大。Allen等^[22]对美国天然气生产地区的107口气井进行了采样，结果表明非柱塞举升井每年除液作业次数少于10次，每次导致的甲烷排放为21000~35000标准立方英尺，柱塞举升井每年会自动触发除液作业数千次，每次导致的甲烷排放为1000~10000标准立方英尺。

1.2.3 气体处理过程

气体处理过程主要包括气体的脱水过程及去酸过程。乙二醇脱水机通过使气体和液态乙二醇接触从而去除气流中的水分。液态乙二醇吸收气流中的水分后，会被再沸器加热排出水分。在乙二醇再生步骤中，少量甲烷会被乙二醇吸收并排放到大气中。乙二醇泵用于在脱水机系统中循环乙二醇，低压乙二醇会被离开吸收器的高压乙二醇驱动的活塞泵入吸收器；高压乙二醇含有一些来自吸收器的气体，该气体会排放到大气中，从而造成甲烷排放。酸性气体去除装置通过将酸性气体与液体溶液（通常为胺）接触从而去除硫化氢和二氧化碳，该装置拥有与脱水装置类似的设备，同样会造成一定的甲烷排放^[23]。气体处理过程的减排潜力较大，加拿大艾伯塔省能源监管局在其第60号指令中明确要求，在2022年1月1日之后安装的乙二醇脱水机的甲烷排放不得高于68kg/d，而之前该装置的排放限制标准为109kg/d^[24]。

1.2.4 气动控制装置

气动控制装置包括气动控制器及气动泵。气动控制器主要用于维持工艺条件，通常使用天然气运行，也可使用压缩空气操作，从而不造成甲烷排放。气动控制器被设计为连续排气控制器和间歇排气控制器。连续排气控制器从阀门控制器中连续释放气体；间歇排气控制器可间歇性排放控制器中的全部或部分气体。若使用天然气为驱动气体，控制器的排气过程会导致大量的甲烷排放。天然气驱动的化学注射泵为重要的甲烷排放源，在活塞或隔膜将化学品泵入工艺设备管线的过程中会有气体被排出，从而造成甲烷排放^[25]。气动控制器为天然气产业链的重要排放源，但此类排放源的排放量很容易被低估。Allen等^[26]对美国65个井场的377个气动控制器进行了采样，其实测结果显示每个控制器的平均甲烷排放量较国家温室气体清单报告的排放量高出17%。

1.3 处理环节甲烷排放源识别

天然气处理环节的甲烷排放主要来自气体处理过程、气动控制装置、压缩机以及设备或工艺放空活动。气体处理过程和气动控制装置的排放原理同生产环节。需要强调的是，虽然天然气产业链不同环节会有相同的排放工艺或设备，但在不同环节其承担的功能或者处理的气体成分及压力可能有所不同，所以排放强度也会相应不同。

1.3.1 压缩机

压缩机通常在天然气的上游和中游用于提高管道和生产作业中的天然气压力。压缩机的甲烷排放来自离心式压缩机中的湿密封和干密封或往复式压缩机中的活塞杆填料，在正常运行和待机模式下，当压缩机加压时，气体会通过密封件泄漏，造成甲烷排放。另外，若压缩机由天然气驱动启动，当压缩机停机进行减压时，就会发生压缩机排气，造成大量甲烷排放^[21]。

在湿密封离心式压缩机中，高压油会在套管中循环，形成一个屏障防止天然气排出。当对密封油进行脱气时，密封油会被输送到大气罐中，其中夹带的甲烷气体将会不受控制的排放到大气中。在干密封离心式压缩机中，干式密封以固定在压缩机轴上的环与高压气体之间产生反作用力的机械方式运

行，该反作用力会抑制气体的泄漏。通常情况下，由于湿密封需要脱气过程，因此湿密封压缩机的甲烷排放要高于干密封压缩机。往复式压缩机所排放的气体主要来自活塞杆填料的逸出。活塞杆填料是活塞杆周围的柔性环，起到密封作用，限制压缩机中气体的释放。但当压缩机在活塞移动的工作模式下或在加压的待机模式下时，少量气体会从填料周围逸出，造成甲烷排放。

压缩机导致的甲烷排在天然气系统中占据很大比例，甚至在一些产业链环节以“超级排放源”的形式存在^[27]，但近年来得到了较好地控制。Zimmerle等^[28]对美国180个集气压缩机站进行实地观测后，发现尽管研究期内的站点数量较《2017年国家温室气体清单》中的站点数量多17%，但其排放量却为清单估算值的66%。与大部分排放源不同，压缩机的实测排放数据小于国家温室气体清单中的估算数据。

1.3.2 设备或工艺放空活动

设备或工艺放空通常发生在维护活动之前或紧急情况下，需要对设备进行减压，以排出积聚的气体，从而进行维护或其他活动。在处理阶段通常需要进行放空的设备包括但不限于压缩机、工艺容器（包括分离器、脱水器和加热器）以及管道等。

1.4 储运和分销环节甲烷排放源识别

天然气储运环节的甲烷排放主要来自气动控制装置、压缩机、储罐以及管道。气动控制装置和压缩机的排放原理同生产和处理环节。天然气分销环节的甲烷排放主要来自管道。

1.4.1 储罐

储罐是最常见的非燃烧排放源。在传输阶段，储罐可用于收集在传输管线中积聚的残留液体，其甲烷排放主要来自冷凝水储罐的闪蒸，即高压饱和液体在进入低压容器的过程中，由于压力的突然降低，饱和液体的一部分会变成容器压力下的饱和蒸气，该蒸气挥发到大气中会造成一定的甲烷排放。另外，某些状况下的工作损失（主要指储罐排放阀的泄漏）也会造成甲烷排放^[29]。但由于传输管线中累计的液体量很少，因此，该过程通常是一个可以忽略的甲烷排放来源。

除此之外，储罐导致的甲烷排放不仅仅由闪蒸

引起,连接储罐的设施同样会造成甲烷排放。Mitchell等^[30]对美国天然气系统的114个收集设施和16个加工场进行了实地观测,结果表明在48个带有收集设施的储罐中,23个存在大量甲烷泄漏,通过示踪剂确定出排放速率达到10~650kg/h。

1.4.2 管道

在储运环节,管道的甲烷排放主要来自非日常活动的放空与排气。例如,在维修保养之前,需将管道中的气体降压排出,由此造成甲烷排放。分销环节的甲烷排放同样来自管道的非日常活动,包括管道的维护、吹扫与试运行以及意外事故等,在进行这些活动之前,均需进行管道排气^[31]。事故排放的发生频率较低,占总排放的比例较小,但是此类排放具有极高的不确定性。例如,2022年9月“北溪1号”和“北溪2号”天然气管道事故导致的甲烷排放高达47.8万吨^[32]。分销环节的甲烷排放设备主要为泄压阀,一般安装于封闭系统的设备或管路上,用于保护系统安全,当设备或管道内压力超过设定压力时,就会开启泄压阀进行泄压,将压力降低到设定范围内。

管道排放同样具备极高的减排潜力,Vogel等^[33]通过对8个国家的12个城市的天然气分配系统进行移动测量,发现甲烷排放率遵循重尾分布,前10%排放源的排放量占总排放量的60%~80%,意味着对其进行修复计划可以快速减少排放。

1.5 外购环节甲烷排放源识别

天然气产业链外购环节的甲烷排放主要来自外购的电力和热力/蒸气。上述五大环节的甲烷排放主要由天然气行业自身所控制,而外购环节的甲烷排放由其他运营主体所控制。

1.5.1 外购电力

外购电力指在天然气产业链中外购的来自天然气发电部分的电力,其甲烷排放来自天然气发电过程。Hajny等^[34]利用机载质量平衡技术对美国14个天然气发电厂的甲烷排放进行了23次测量,结果表明在测量的不确定性范围内,所有观测到的甲烷排放均来自于烟囱排出的未燃烧天然气燃料,而不是逃逸源。由此基本可以确定,天然气发电厂的不完全燃烧是天然气行业外购电力的甲烷排放源。另外,

该研究结果显示,烟囱的甲烷排放强度在发电启动期间远大于日常运行期间,约为日常运行期间的81倍(440/5.4);天然气发电导致的甲烷排放规模一定程度上取决于设备的启动情况。日常运行情况下,美国天然气发电厂的甲烷排放占天然气系统总排放量的0.7%~2.6%(2016年数据)。由于中国天然气发电在电力结构中占比较小^[35],故中国天然气产业链外购电力所造成的甲烷排放可以忽略不计。

1.5.2 外购热力/蒸气

外购热力/蒸气指天然气产业链外购的以天然气为燃料产生的热力/蒸气,其甲烷排放主要来自以天然气为燃料的锅炉等设备,当天然气燃料不完全燃烧时,会造成一定的甲烷排放。在以天然气为主要供热燃料的地区,天然气锅炉运行导致的甲烷排放是重要的温室气体来源。Chamberlain等^[36]通过对美国纽约州伊萨卡市的甲烷泄漏和燃烧情况进行分析得出,该城市源自天然气集中燃烧设施的甲烷排放甚至高于管道泄漏,且该城市的甲烷浓度呈现显著季节性差异,表明来自天然气供热系统的甲烷排放发挥了重要影响。中国自2017年“煤改气”工程兴起后,天然气锅炉在工业领域中的应用占比不断升高,成为天然气行业甲烷间接排放的重要来源^[37]。

2 天然气行业甲烷排放路径及形态分析

2.1 天然气行业甲烷排放路径分析

明确天然气行业各环节甲烷排放源的排放路径,是深入了解甲烷排放机理,开展合理的甲烷排放管控的重要过程。温室气体的排放路径一般包括直接排放与间接排放。温室气体核算体系《企业核算与报告标准》为温室气体的直接与间接排放设定了运营边界,对温室气体的核算与报告设定了3个范围,即范围一、范围二和范围三^[38]。该三范围有助于更好地区分温室气体并管理不同排放所带来的风险和机会,为不同类型的机构、气候政策与商业目标提供服务。温室气体三范围的定义及包含的主要排放活动如图2所示。

2.1.1 范围一

范围一核算直接温室气体排放,即企业或运营主体拥有或控制排放源的直接排放。直接温室气体

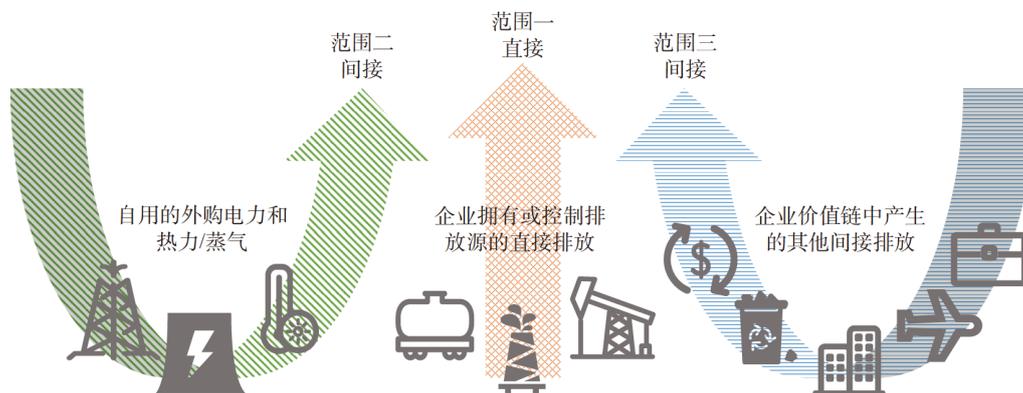


图2 温室气体三范围的定义及包含的主要排放活动

Fig.2 Definitions and major greenhouse gas emission sources covered by Scopes 1, 2 and 3

排放主要由以下4个领域产生：①固定排放源的燃料燃烧，例如锅炉、燃气炉和涡轮机等；②移动排放源的燃料燃烧，例如拥有或租赁的运输工具；③有意或无意泄漏导致的无组织排放，例如设备的密封件、包装和接缝等泄漏；④在工业过程和现场制造过程中的排放，例如在水泥制造过程中产生的二氧化碳和工厂烟雾等。

天然气行业范围一的甲烷排放主要包括由于工艺流程或生产活动导致的冷放空、由于火炬燃烧不完全导致的热放空以及由于设备泄漏导致的无组织排放。天然气产业链勘探开发、生产、处理、储运和分销五大环节所识别的甲烷排放源均属于范围一。

2.1.2 范围二

范围二核算间接温室气体排放，主要包括通过采购或以其他方式进入企业组织边界内的电力或热力/蒸气所产生的温室气体排放。范围二的排放是一类特殊的间接排放，是许多非工业企业最大的温室气体排放源之一，因此控制范围二的排放也成为温室气体控排的最主要途径。

天然气行业范围二的甲烷排放来自外购的燃气产生电力或热力/蒸气的过程，天然气产业链外购环节所识别的甲烷排放源属于范围二。

2.1.3 范围三

范围三核算的是除范围二以外的所有其他间接排放，但并不是产生于该企业直接拥有或控制的排放源。例如，外购原料与燃料的开采和生产、运输外购的原料或商品、职员差旅和通勤、处理运营过程中产生的废弃物以及使用售出的产品和服务等^[39]。

核算范围三的排放时，不必全面分析所有产品和业务的温室气体寿命周期，通常关注一到两项产生温室气体的主要活动即具备一定意义。由于实体企业有权决定选择哪类信息进行核算和报告，因此不能使用范围三对不同企业进行比较，难以核算行业的整体排放。

2.2 天然气行业甲烷排放形态分类

参照《IPCC2006年国家温室气体清单指南2019修订版》界定，天然气行业的甲烷直接排放可分为工艺放空、设备泄漏以及火炬燃烧3类，也是甲烷排放源所呈现的3类形态。在天然气产业链中，大多数设备涉及多类形态的甲烷排放。例如气动控制装置和压缩机等，其甲烷排放包括工艺放空和设备泄漏两类。但由于不同类甲烷排放的原理不同，其识别方法和管控措施都应有所不同。天然气行业各环节涉及的甲烷排放形态类型如图3所示。

2.2.1 工艺放空排放

工艺放空排放指按照相关工艺流程或生产活动设计进行的人为放空，也可能是因设备故障或操作不当导致的意外排放。甲烷排放可能来自各种非燃烧的烟囱、工艺装置泄放口以及安全阀门，这些排放源往往与作业类型密切相关。工艺放空排放具体可分为3类：①常规操作排放，指由于某种形式的化学转化或加工步骤而产生的排放，例如气体脱水、气体脱硫等；②定期操作排放，指由于设备维护、启动和周转活动的减压或加压吹扫操作而产生的排放，例如修井、除液作业等；③意外作业排放，指



图3 天然气行业各环节涉及的甲烷排放形态类型

Fig.3 Types of methane emission patterns involved in the natural gas industry processes

设备紧急情况下的非例行压力释放，例如紧急安全排气、释放压力阀等。天然气产业链范围一排放的五大环节所识别的甲烷排放源均涉及工艺放空排放，且由于此类排放源较为固定，故具备较高的工艺或设备层面的减排条件。

2.2.2 设备泄漏排放

设备泄漏排放指天然气行业各业务环节由设备组件的密封表面泄漏以及管道泄漏造成的无组织甲烷排放，如阀门、法兰、减压阀、套管、储罐泄漏及未被定义为工艺放空的其他压力设备泄漏。设备泄漏主要由于密封接触面的缺陷或正常磨损引起，安装不当也会导致泄漏，此外，容器或管道壁受腐蚀或损坏也可能导致泄漏^[40]。设备泄漏发生在天然气生产、处理、储运和分销的各个站点，每个站点均由成千上万个设备部件所构成，这些部件均有可能成为甲烷逃逸的源头。尽管设备泄漏单个甲烷逃逸的量级往往较小，但所有设备泄漏的总和却是甲烷排放的主要来源之一。除勘探开发环节外，天然气产业链范围一排放的其他四大环节所识别的甲烷排放源均涉及设备泄漏类排放。

设备泄漏类排放一般需通过光学气体成像技术和手持式火焰离子化检测器测量。Pacsi等^[41]结合这两类技术，对美国西部4个油气产区的67个地点的生产和处理环节的设备泄漏甲烷排放进行了测量，结果显示，实测甲烷泄漏率为0.39%，较“自下而上”的清单核算结果低22%~36%，原因可能与本次实地测量部件的泄漏频率较低有关。该结果说明设备泄漏类甲烷排放具有较高的不确定性。

2.2.3 火炬燃烧排放

火炬是可燃气体在排放到大气之前进行燃烧的

排放控制装置。火炬燃烧可分为3类：一是常规火炬燃烧，用于天然气量超过基础设施容量时的优化生产；二是非日常火炬燃烧，用于维护活动和气井清理时的废气处理；三是安全火炬燃烧，用于设备故障或发生爆炸时的气体处理^[42]。据世界银行估计，全球每年通过火炬燃烧的天然气超过1380亿立方米。目前，受世界银行“2030年零常规燃烧”倡议的影响^[43]，天然气行业已显著减少了火炬燃烧，但出于安全考虑，在维护和紧急情况下仍需要进行必要的火炬燃烧。这表明在未来一段时间内，火炬燃烧仍将是天然气行业重要的甲烷排放来源。

当天然气在火炬中没有被完全燃烧时，甲烷就会排放到大气中。在油气行业中，火炬不完全燃烧时会有2%的甲烷排放到大气中，即形成了98%的焚毁去除率。在一些国家，这一数值是甲烷排放报告中规定的一部分^[44]。

火炬燃烧排放与上述两类排放不同，其不发生在上述所识别的工艺或设备排放源上，而是作为一类单独的排放源。天然气产业链的各个环节均可能设置火炬，此类排放会相应地发生在天然气全产业链上。

3 天然气行业甲烷排放机理认识链构建

排放机理本质上指剖析某种物质从产生源头向环境释放的内在过程及驱动原因。在天然气产业链复杂的生产场景中，甲烷排放机理涉及多环节、多因素的交互作用。鉴于此，本节在前文对天然气行业甲烷排放源点识别（明确哪里产生排放）、排放路径分析（厘清排放如何传播）及排放形态分类（界

定排放呈现形式)的研究基础上,系统构建天然气行业甲烷排放机理认识链,具体结果如图4所示。

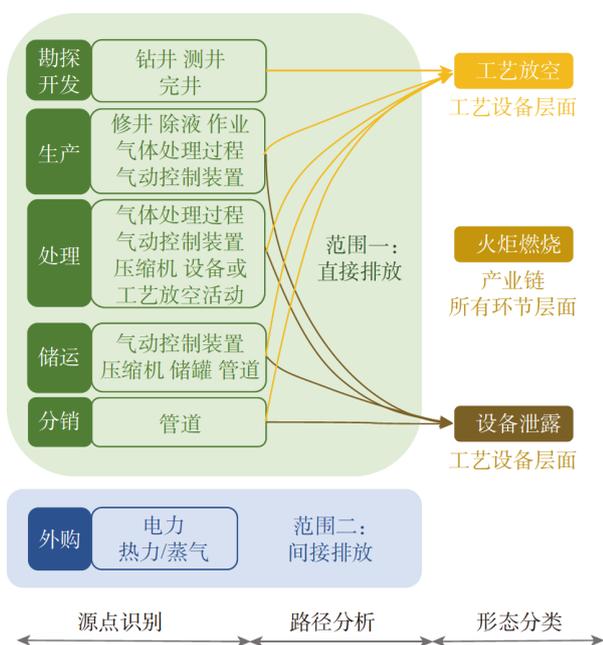


图4 天然气行业甲烷排放机理认识链

Fig.4 Causal chain of methane emission mechanisms in the natural gas sector

图4从源点识别、路径分析和形态分类3方面完整地展示了天然气行业甲烷排放机理认识链,该认识链以“源点-路径-形态”为基本脉络,形成了一套完整的天然气行业甲烷排放认识体系。具体而言,来自天然气产业链勘探开发、生产、处理、储运和分销环节,由相关工艺和设备导致的甲烷排放,通过范围一的排放路径排放到大气中,并展现出工艺放空和设备泄露两种排放形态(设备泄露甲烷排放不在勘探开发环节产生);来自产业链所有环节不完全燃烧的甲烷同样通过范围一的排放路径排放到大气中,最后呈现为火炬燃烧的排放形态;来自外购的电力和热力/蒸气导致的甲烷通过范围二的排放路径排放到大气中,根据其排放原理可知此类排放主要来源于燃料的不完全燃烧,但不具备形态归纳的条件。

该认识链构建起较为完整的系统体系,通过清晰界定“边界”与“要素”,整合多环节、多路径,推动天然气行业甲烷排放核算与减排研究从零散走向集成,为排放核算模型优化、管控策略理论深化

提供底层逻辑支撑,使核算与减排措施更具针对性与准确性,弥补过往因机理不清导致的源点漏判、路径错算等问题,促使研究从“知其然”迈向“知其所以然”,助力天然气行业在甲烷排放核算精准化、管控策略科学化方面实现突破。

4 天然气行业甲烷排放管控路径

天然气行业甲烷排放的高度分散性、非连续性和隐蔽性决定了其减排路径不能一刀切,应在厘清排放机理的前提下,遵循“先易后难、抓大放小、标本兼治”的原则,结合不同排放环节特征与减排潜力,从研究、政策、企业和国际层面,逐步构建起多元化的甲烷排放管控路径。

4.1 研究层面

研究层面需构建“多尺度、可验证、可追踪”的新型排放核算系统,核心在于充分融合机理认识链的“源点-路径-形态”分析框架,实现从宏观行业层面到微观设备级别的全层级覆盖。具体研究重点包括以下4个关键方面。

一是按照天然气产业链各环节(勘探开发、生产、处理、储运、分销)的工艺特点,构建基于子环节排放过程的核算模型,形成“自下而上”、逐级聚合的“设备-设施-场站-企业-行业”五级核算架构,确保排放量核算既具备整体性又保持颗粒度。

二是针对我国特殊的地质条件、设备标准和运维水平,开发本土化的排放因子清单,重点修正国际通用因子在高压管网、非常规气田等场景的适用偏差。例如,页岩气压裂返排环节的排放因子需考虑我国典型的地层压力和返排周期特征。

三是整合多源监测数据(卫星遥感、无人机航测、地面传感网络)与人工智能分析技术,构建动态溯源与归因系统,实现从小时级排放波动识别到超级排放源的快速定位,推动排放核算从静态“总量报告”向动态“过程追踪”转变。

四是建立多维度综合评估模型,以排放量贡献度、单位减排成本、技术改造难度和协同减排潜力为评估指标,对全产业链各排放节点进行优先级排序,形成“近期强制改造重点源(如压缩机密封),

中期优化管控一般源（如阀门、法兰），远期技术攻关难点源（如液化天然气蒸发气）”的分阶段实施策略，确保以有限资源投入获得最优减排效益。

4.2 政策层面

政策层面需构建“阶段式、差异化、可问责”的政策制度体系，核心在于推动甲烷减排政策从粗放统一向精准靶向转变。具体实施重点包括以下4个关键方面。

一是制定清晰的阶段式减排路线图，在天然气行业明确“2030年实现重点设施级监测全覆盖，2035年达到行业排放峰值，2040年完成系统治理体系建设”的递进目标，并分阶段细化监测技术标准、排放核算方法和治理成效评估指标，确保各节点目标可量化、可考核。

二是实施差异化管控措施，针对压缩机密封、气动装置、脱水设备等关键排放设施，依据其排放特征和减排潜力制定分类标准，在新疆、陕西、四川等重点产区率先推行排放许可管理。

三是完善经济激励机制，将甲烷减排量纳入碳市场交易体系，建立基于严格MRV机制的甲烷碳减排量信用制度，对技术升级改造和智能监测系统建设给予财政补贴与税收优惠。

四是强化责任落实，建立覆盖全行业的甲烷排放强制性披露制度，明确企业年度排放报告义务和第三方核查要求，强化监管部门的数据审计职责，形成“监测-报告-核查-问责”的完整闭环。

4.3 企业层面

企业层面需构建“阶段化、智能化、标准化”的企业治理框架，核心在于通过短期突破、中期建设和长期完善，实现企业甲烷防控从被动治理到主动防控转变。具体实施重点包括以下3个关键方面。

一是短期（1~3年）聚焦“低成本-高效益”项目突破，重点实施气动设备电动化改造、泄漏检测与修复专项巡检以及闪蒸气和放空气回收利用系统建设，优先治理贡献率超过60%的超级排放源，快速取得减排成效。

二是中期（3~5年）着力构建数字化管控体系，

开发覆盖井场、处理厂和管网的智能监控平台，运用智能传感网络和数字孪生技术建立甲烷排放动态管理系统，实现从数据采集到治理成效验证的全流程智能化管控，提升治理精准性。

三是长期（5~10年）完善标准体系与示范引领，在新疆、陕西、四川等重点气田建设3~5个集成智能监测、低排放工艺和数字管理的国家级示范工程，形成可复制推广的技术模式，基于实践经验推动建立行业技术标准和管理规范，并积极参与国际甲烷治理规则制定，将中国技术方案和实践经验贡献于全球甲烷治理体系。

4.4 国际层面

国际层面需构建“多边化、本土化、协同化”的治理协作机制，核心在于推动形成兼顾各方利益、符合发展中国家实际需求的全球减排合力。具体实施重点包括以下三个关键方面。

一是平台共建，依托“一带一路”能源合作伙伴关系，建立区域性甲烷监测与减排合作中心，打造具备国际公信力的第三方核查认证体系，实现治理资源的优化配置。

二是标准协同，在参与全球甲烷减排治理架构建设过程中，充分考虑发展中国家国情特点，推动建立兼顾科学性和可行性的差异化标准体系，包括适合不同发展阶段的监测方法学、渐进式核算规则和灵活减排量认证机制，促进全球治理框架的包容性发展。

三是技术共研，重点通过南南合作机制和“一带一路”绿色发展伙伴关系，优先引进适用于发展中国家的低成本监测技术；积极参与联合国环境规划署主导的甲烷减排技术援助项目，建立技术需求清单与对接平台；鼓励国内企业通过技术许可、联合研发等方式，逐步消化吸收国际先进经验，重点突破天然气行业甲烷减排相关的关键技术难题。

参考文献

- [1] 牛雨蕾. 回收简单 成本较低 有效控温 中美共同对付甲烷[N]. 生命时报, 2021-12-07(11).
- [2] 欧盟批准对天然气进口实施甲烷排放限制的法规[EB/OL]. [2025-02-24]. <https://esgnews.com/zh-CN/amp/eu-approves-regulation-imposing-methane-emissions-limit-on-gas-imports/>.

- [3] 美国EPA发布油气行业甲烷减排新规：超额排放将面临900美元/吨罚款[EB/OL]. (2024-11-15)[2025-04-20]. https://www.sohu.com/a/827099298_121492573.
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 甲烷排放控制行动方案[R]. 北京, 2023.
- [5] 代睿. 生态环境部：我国推动甲烷等温室气体排放控制取得积极效果[EB/OL]. (2024-11-24)[2025-04-20]. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/1496814565/593793e502001n7iw>.
- [6] FLIR OGI热像仪：20年持续创新，引领气体泄漏检测新时代！[EB/OL]. (2025-02-20)[2025-04-20]. <https://www.instrument.com.cn/news/20250220/768670.shtml>.
- [7] Vinkovic K. Quantifying methane emissions from the energy and agriculture sectors using vehicle and UAV-based atmospheric observations[D]. Groningen: University of Groningen. 2023.
- [8] 闫格, 张磊, 于玲, 等. 面向天然气泄漏检测的中红外甲烷传感系统与应用[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1810001.
- [9] Iwaszenko S, Kalisz P, Słota M, et al. Detection of natural gas leakages using a laser-based methane sensor and UAV[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 510.
- [10] 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): 187–195.
- [11] Shen L, Gautam R, Omara M, et al. Satellite quantification of oil and natural gas methane emissions in the US and Canada including contributions from individual basins[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(17): 11203–11215.
- [12] Karion A, Sweeney C, Pétron G, et al. Methane emissions estimate from airborne measurements over a western United States natural gas field[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(16): 4393–4397.
- [13] 李孛, 孙齐, 王建良, 等. 天然气行业甲烷排放及其减排应对现状：基于文献调研的分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(1): 23–32+51.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva, 2006.
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Geneva, 2019.
- [16] Caulton D R, Shepson P B, Santoro R L, et al. Toward a better understanding and quantification of methane emissions from shale gas development[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(17): 6237–6242.
- [17] 徐博, 冯连勇, 王建良, 等. 美国页岩气开发甲烷排放控制措施及对我国的启示[J]. 生态经济, 2016, 32(2): 106–110+121.
- [18] Umeozor E C, Jordaan S M, Gates I D. On methane emissions from shale gas development[J]. Energy, 2018, 152: 594–600.
- [19] Hultman N, Rebois D, Scholten M, et al. The greenhouse impact of unconventional gas for electricity generation[J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): 044008.
- [20] Natural Resources Defense Council. Leaking profits: The U.S. oil and gas industry can reduce pollution, conserve resources, and make money by preventing methane waste[R]. New York, 2019.
- [21] 刘均荣, 姚军. 油气系统甲烷排放源及减排技术[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(7): 55–56.
- [22] Allen D T, Sullivan D W, Zavala-Araiza D, et al. Methane emissions from process equipment at natural gas production sites in the United States: Liquid unloadings[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(1): 641–648.
- [23] 王颖凡, 徐先港, 董建锴, 等. 美国油气行业甲烷减排立法及技术[J]. 煤气与热力, 2020, 40(11): 35–41+43.
- [24] Alva S. Methane emissions reduction methods and technologies in dehydration facilities [EB/OL]. (2023-12-03)[2025-04-20]. <https://processecology.com/articles/methane-emissions-reduction-methods-and-technologies-in-dehydration-facilities>.
- [25] 王颖凡, 吕胜, 徐先港, 等. 美国气动控制器甲烷排放及控制措施[J]. 煤气与热力, 2021, 41(11): 20–24.
- [26] Allen D T, Pacsi A P, Sullivan D W, et al. Methane emissions from process equipment at natural gas production sites in the United States: Pneumatic controllers[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(1): 633–640.
- [27] Vaughn T L, Luck B, Williams L, et al. Methane exhaust measurements at gathering compressor stations in the United States [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(2): 1190–1196.
- [28] Zimmerle D J, Williams L L, Vaughn T L, et al. Methane emissions from the natural gas transmission and storage system in the United States[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(15): 9374–9383.
- [29] 曹冬冬, 薛明, 白德豪, 等. 油气处理场站温室气体甲烷排放特征与量化[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 4088–4095.
- [30] Mitchell A L, Tkacik D S, Roscioli J R, et al. Measurements of methane emissions from natural gas gathering facilities and processing plants: Measurement results[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(5): 3219–3227.
- [31] 杨硕, 苗艳姝, 董建锴, 等. 天然气输配系统甲烷排放量量化方法[J]. 煤气与热力, 2021, 41(6): 28–33+46.
- [32] Poursanidis K, Sharanik J, Hadjistassou C. World's largest natural gas leak from Nord Stream pipeline estimated at 478,000 tonnes[J]. iScience, 2024, 27(1): 108772.
- [33] Vogel F, Ars S, Wunch D, et al. Ground-based mobile measurements to track urban methane emissions from natural gas in 12 cities across eight countries[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(5): 2271–2281.
- [34] Hajny K D, Salmon O E, Rudek J, et al. Observations of methane emissions from natural gas-fired power plants[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(15): 8976–8984.
- [35] 国家能源局. 中国天然气发展报告(2023) [R]. 北京, 2023.
- [36] Chamberlain S D, Ingraffea A R, Sparks J P. Sourcing methane and carbon dioxide emissions from a small city: Influence of nat-

- ural gas leakage and combustion[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 102–110.
- [37] 渠沛然. 多地工业“煤改气”提速[N]. *中国能源报*, 2021-09-06(14).
- [38] Greenhouse Gas Protocol. Survey on need for GHG protocol corporate standards and guidance updates[R]. Washington, DC, 2015.
- [39] Greenhouse Gas Protocol. Technical guidance for calculating scope 3 emissions[R]. Washington, 2013.
- [40] Environmental Defense Fund. The reducing methane emissions best practice guides: Equipment[R]. New York, 2019.
- [41] Pacsi A P, Ferrara T, Schwan K, et al. Equipment leak detection and quantification at 67 oil and gas sites in the Western United States[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2019, 7: 29.
- [42] Evans P, Newman D, Venuturumilli R, et al. Full-size experimental measurement of combustion and destruction efficiency in upstream flares and the implications for control of methane emissions from oil and gas production[J]. *Atmosphere*, 2024, 15(3): 333.
- [43] World Bank Group. Zero routine flaring by 2030 (ZRF) initiative [EB/OL]. [2025-02-24]. <https://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030/initiative-text>.
- [44] UK Department of Energy & Climate Change. EEMS-Atmospheric emissions calculations[R]. London, 2008.