

迈向“双碳”研究系列报告

《长输管道企业甲烷减排目标及策略研究》
(C系列-2024C01)

中国石油大学（北京）中国油气产业发展研究中心
中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院

2024年12月28日



中国油气产业发展研究中心

Research Center for China's Oil and Gas Industry Development

中国石油大学（北京）中国油气产业发展研究中心成立于 2010 年，并挂靠在经济管理学院。中心定位为“国际知名、国内一流的油气产业发展研究基地”，围绕五大研究方向和五大应用领域，重点承担和开展一批基础理论与实践应用研究课题。自成立以来，中心学术影响力和社会影响力在不断提升，已经累计承担课题 100 多项，其中国家社科基金重大项目 1 项、教育部人文社科基金重大项目 1 项、国家自然科学基金/社会科学基金项目 9 项、国际合作基金 2 项、国家部委项目 31 项、企业项目 75 项；出版了学术专著 19 部、教材 4 部。近 5 年，中心发表学术论文 100 多篇，多数被 SCI/SSCI/CSSCI/CSCD 收录；获得国家能源局、商务部、中国石油和化学工业联合会等省部级科技奖励 16 项。目前中心有研究人员 12 名，其中教授 5 名，博士生导师 5 人。



中石大碳能院

ICED-CUPB

中国石油大学(北京)碳中和与能源创新发展研究院(简称“中石大碳能院”)是在国家碳达峰和碳中和目标(简称“双碳”目标)下,中国石油大学(北京)主动服务国家需求,积极响应国家建设高校特色智库的要求,结合学校自身优势,于2021年9月成立的智库性质的研究机构,也是支持中国石油大学(北京)“一带一路”能源合作伙伴关系合作网络高校(青年)工作组组长单位业务开展的主要研究机构。中石大碳能院为应对气候变化和“双碳”目标下的国际、国家、行业、企业在能源与油气领域的发展提供第三方分析、评价与政策建议。通过每年向社会公众发布指数类、研究类、专题类系列报告,并向国家决策部门和行业决策者提供政策建议,定期举办相关特色论坛等,逐步打造“立足中国、面向世界”、“聚焦油气、辐射能源”的特色鲜明的能源类高校“双碳”政策类研究智库。

长输管道企业甲烷减排目标及策略研究

核心摘要

在全球温室气体排放中，甲烷作为一种强效温室气体，其在大气中的滞留时间虽短，但单位质量产生的温室效应远超二氧化碳，对全球气候变暖的贡献显著。因此，甲烷减排不仅是减缓气候变化的关键一环，也是实现全球气候治理目标的重要途径。主要结果表明：（1）欧洲长输管道企业，以意大利 SNAM 和西班牙燃气公司为代表。两家公司都计划在 2040 年达到 0 排放。并将采取 ESG 计分卡测量和监控，多个相关领域设置 KPI，对设备进行更新改造，关注可再生气体开发等减排策略。（2）北美长输管道企业，以加拿大恩桥和加拿大 TC 能源公司为代表。前者计划到 2025 年将甲烷排放量减少到 1% 或更低；后者计划到 2050 年实现温室气体净零排放。并将通过运营可再生的“自发电”设施，使用航空红外成像和实施泄漏检测和修复计划（LDAR）来检测和减少甲烷排放。（3）构建了面向长输管道企业的甲烷减排策略库和成本效益模型，为长输管道企业以成本最优形式在 2050 年前将甲烷排放强度下降至 0.005 提出了合理化建议。

1. 研究背景与目的

放眼全球，甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体，在增温潜势方面，甲烷对温室效应的影响远高于二氧化碳，由此，近年来世界各国对甲烷减排的重视度与日俱增。在 2021 年的联合国气候大会（COP26）期间，中美两国发布《中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》。其中明确提到，两国特别认识到，甲烷排放对于升温的显著影响，认为加大行动控制和减少甲烷排放是 21 世纪 20 年代的必要事项。COP28 首次对《巴黎协定》签署以来的气候行动进展进行了“全球盘点”，从而了解全球气候行动进展，并持续推动各国气候行动取得进展。会议中指出，对于全球减排承诺，各国仍需继续努力。根据联合国气候变化框架公约今年 9 月 8 日发布的全球盘点综合报告，目前全球的减排承诺和努力还远远不足以应对气候危机。到本世纪末，全球气温预计升温幅度为 2.4—2.6℃，远超“控温在 2℃、并努力控温在 1.5℃之内”这一全球目标。

2021 年 5 月 18 日，由中石油、中石化、中海油等 7 家中国油气企业联合发起的“中国油气企业甲烷控排联盟”正式成立，该联盟旨在推进全产业链甲烷控排行动，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。2023 年 11 月 7 日我国生态环境部等 11 部门印发《甲烷排放控制行动方案》，积极稳妥有序控制甲烷排放，兼具减缓全球温升的气候效益、能源资源化利用的经济效益、协同控制污染物的环境效益和减少生产事故的安全效益。由此可以看出，甲烷减排已经成为全球的一个重大议题。

本报告通过对期刊论文，国内外主要长输管道公司以及石油生产运输企业的可持续发展报告、ESG 报告等进行系统调研，深入分析了国内外油气管道公司及减排组织的甲烷排控情况，运用对标分析法和大数据词云图分析对这些文献进行梳理和归纳，深入分析国内外长输管道公司及减排组织的甲烷排控现状以及甲烷管控策略，提出了适合大型长输管道企业的甲烷减排措施库。梳理并分析了大型长输管道企业的甲烷排放源和排放数量，了解各类排放源的排放强度、分布情况和具体原因，对各类排放源进行综合评价。在此基础上，进一步构建了线性优化模型、最小二乘支持向量机模型、LSTM、成本效益等多个分析模型，对公司未来的甲烷排放情况进行预测，进而提出大型长输管道企业甲烷排放的总体目标、分阶段目标以及甲烷排放总量和强度“双控”目标。

2. 研究思路与方法

首先，本报告对国内外油气管道相关公司及减排组织的甲烷排控策略进行调研；其次，对国内外油气管道相关公司及减排组织的甲烷排控策略进行对标和适用性分析；最后，根据大型长输管道企业实际和甲烷减排进程，提出甲烷减排行动计划建议和保障措施。

2.1 文献及企业调研

报告对 3 家国内油公司、5 家国外油公司、8 家国外管道公司和 7 个全球甲烷排控相关国际组织进行文献调研，并对美国环保协会、意大利 SNAM 公司、西班牙燃气公司和科罗拉多州立大学进行访谈调研，内容涉及减排目标、技术、措施、减排策略、管理体系、标准

以及应用情况七个方面。

2.2 建模分析

梳理并分析了大型长输管道企业的甲烷排放源和排放数量，了解各类排放源的排放强度、分布情况和具体原因，对各类排放源进行综合评价。在此基础上利用机器学习算法构建甲烷排放量、甲烷减排量、天然气回收量和参与碳交易总量等指标的预测模型；构建成本效益模型来规划甲烷排放总量及强度的总体和分阶段目标；利用“自上而下”与“自下而上”相结合的方法构建了甲烷减排策略库，并提出了对应的甲烷管控策略。分析框架如图 1。

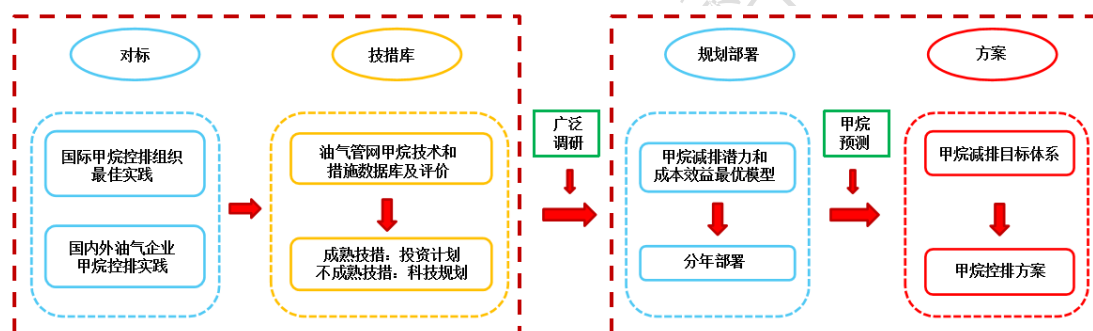


图 1 报告的研究框架

3. 主要研究结果与结论

3.1 甲烷减排路径策略

本报告构建了成本效益分析模型、排放预测模型、天然气价格预测模型、甲烷排放强度预测模型等。针对甲烷控排目标制订了由“自上而下”和“自下而上”相结合的减排方案，双管齐下高效完成甲烷减排工作。自上而下减排方案的核心原则是在保证减排效果的前提下，利用线性优化方案使甲烷减排的成本最小化。具体减排优化方案选

择依据如下公式：

$$\begin{aligned} \min & \sum_i C_i \times T_i \quad \forall i \\ \text{s. t.} & \sum_i e_i \times T_i \geq E \\ & T_i \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 i 代表技术措施库中每一种技术方案； C_i 代表每一种技术方案的减排成本； e_i 代表每一种技术方案的减排量； E 代表计划减排总量； T_i 代表每一种技术方案需要使用的总次数。根据“自上而下”减排方案可以确认各减排技术的总减排次数，进一步结合“自下而上”减排方案进行减排技术的选择与编排，接着分析不同类型地区相关技术部署时间，从而得出完整的甲烷减排策略。

首先是减排技术筛选原则，对于存在互斥选择的技术选择依据是单位成本效率最高的技术优先选择，效率较低的次之。

其次，对于入选备用技术库的技术措施，将根据技术的成熟度来选择其实施阶段。在 2028 年之前，选用完全成熟与成熟技术，而在 2035 年前加入比较成熟的技术，到 2040 年，所有技术都将纳入减排方案。

最后，在确定了技术实施阶段后，便可以确定技术实施地点。针对各个关键甲烷减排技术节点都规划了完整的甲烷技术实施方案，以保证及时完成甲烷减排任务。

本文构建了未来排放量，减排量，回收量，相关成本以及排放强度的机器学习预测模型。针对其中部分变量还将设置未采取减排措施和采取减排措施两个情景进行对比研究。

例如甲烷排放强度变化，实施减排措施情景下强度下降趋势更加稳定，波动程度大幅减少。相比未实施情景下，各关键节点的排放强度均提前达到。并且最终甲烷排放强度累计下降比率强于未实施情景。

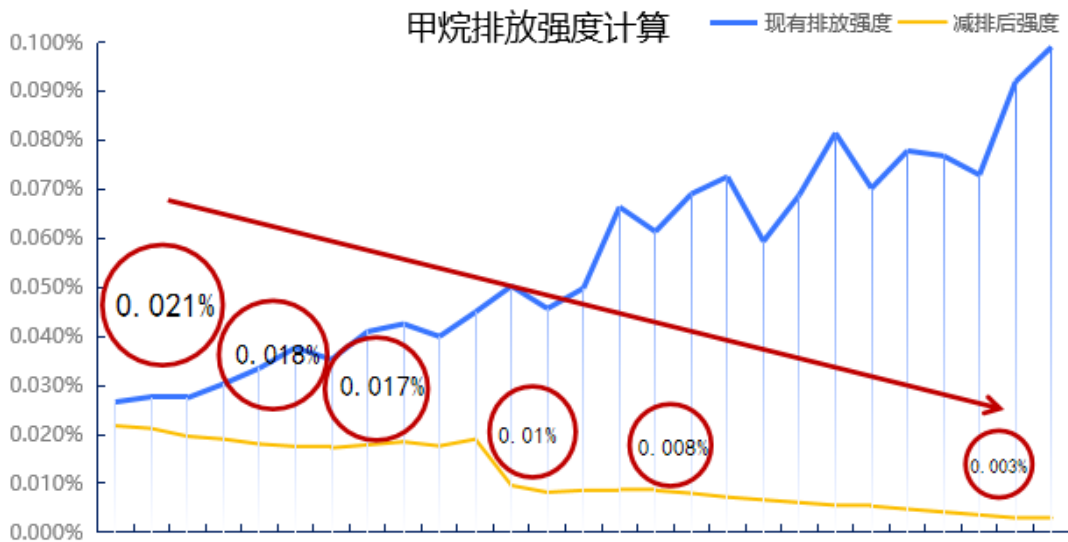


图 2 到 2050 年两种情景下甲烷排放强度变化趋势

在实施减排措施情景下，排放总量未来趋势实现了先增后减，并且各场景的排放量都在下降。2028 年目标排放总量直线上升至 1000 0 万方；2040 年随着减排压力增大，且是前期不成熟先进技术攻关关键期，因此目标减排总量保持在到 11700 万方水平；2050 年随着各类减排技术日渐成熟，大量减排设备规模化铺开，目标排放总量将持续下降至 3300 万方。

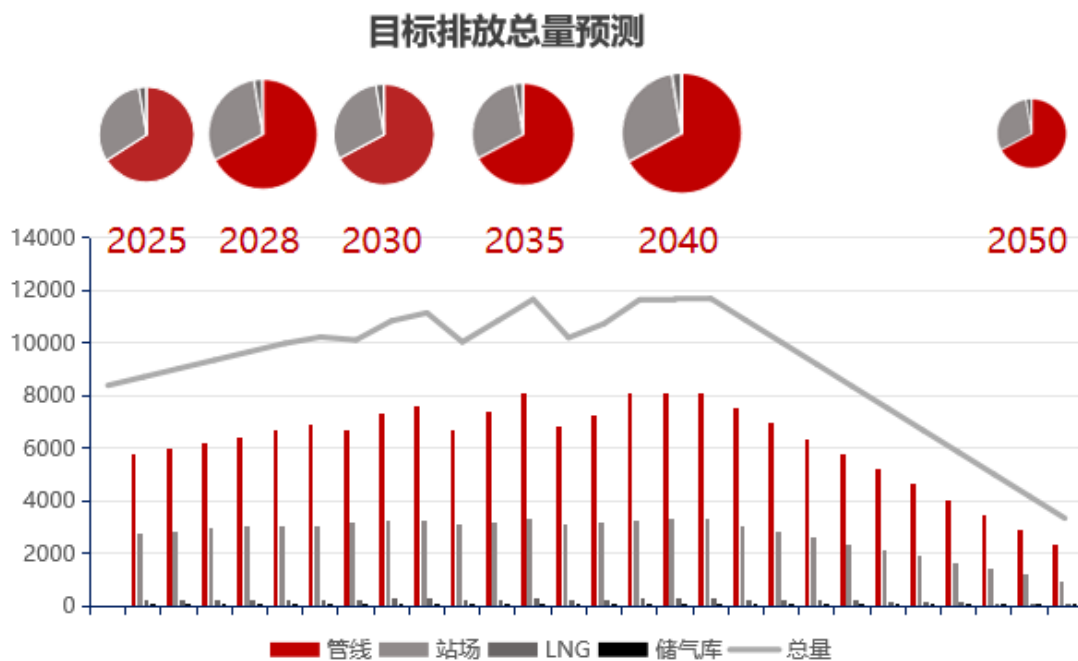


图3 到2050年使用减排措施情景下甲烷目标排放总量变化趋势

作为最清洁的化石燃料，天然气在能源转型过程中扮演了兼顾低碳和经济性的重要角色，因此天然气的价格预计将会保持上升态势。

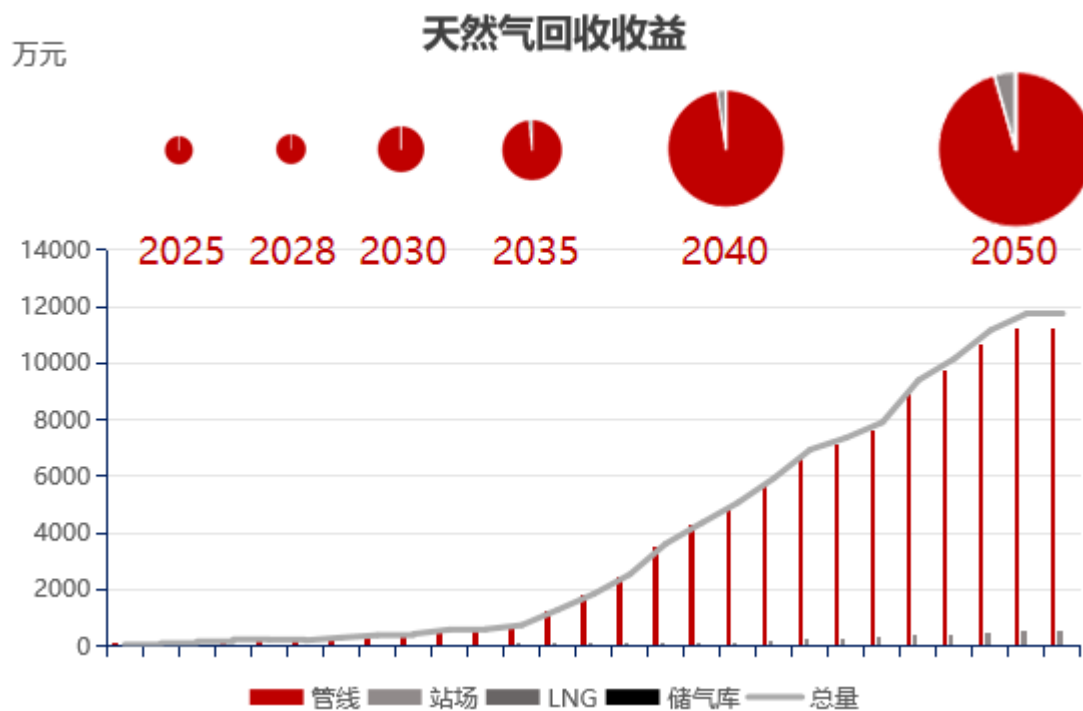


图4 到2050年天然气回收收益变化趋势

3.2 国内外油气公司甲烷减排分析

本报告调研对比了国内外 10 个国家 16 家油气公司及 7 个减排组织的甲烷排放管控的策略、目标、技术、措施、管理体系、标准以及应用情况。从减排目标、甲烷减排投资力度、甲烷排放强度变化率、基础设施四个层面对国内外油气公司在甲烷排控方面进行调研分析，其中基础设施包括管道长度、储存单元、液化气站三个方面。

在本报告中基于减排目标指标的评分主要来源于五个依据：是否有中期目标（定性）；是否有长期目标（定性）；是否明确提出净零排放的年限（定性）；是否有减排量（或强度）的具体数值目标（定性）以及具体数值目标大小（定量）。定性指标根据有无赋值为 1 或 0，具体数值目标大小主要衡量甲烷目标减排强度，利用熵值法对数据进行归一化处理，目标最高的公司赋值为 1，目标最低的公司赋值为 0，其余公司根据目标具体数值与极大极小值的相对大小进行赋值，计算公式为：

$$\text{Score}_{\text{target}} = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (2)$$

其中 T 代表目标设定值。五个指标各赋权重 20% 进行加权，可以得到“甲烷减排目标设定”评分。

本报告将各公司设置的 2030 年减排目标的具体数值作为衡量各公司甲烷排控水平的指标之一。各公司设定的 2030 年甲烷减排目标如下图所示。

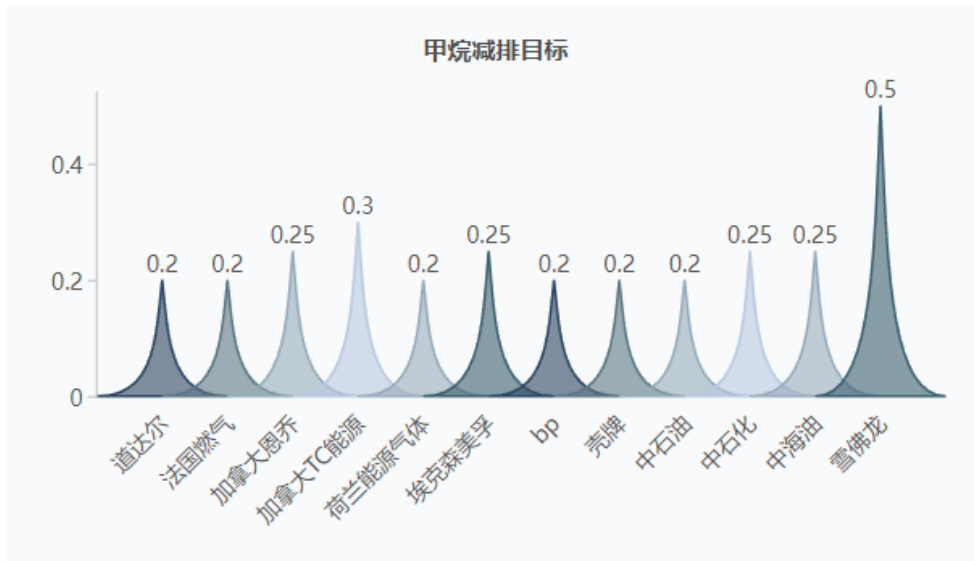


图 5 各公司 2030 年甲烷减排目标（数据来源：各公司年报、可持续发展报告等）

由图 5 可知，在 2030 年，道达尔、法国燃气、荷兰能源气体、BP、壳牌以及中石油等公司的甲烷排放强度目标设定在了 0.2% 以下，说明这些公司对自己的甲烷减排效果有充足的信心；加拿大恩乔、埃克森美孚、中石化、中海油等公司的甲烷排放强度目标设定在了 0.25% 以下，说明这些公司对自己的甲烷减排效果有一定的信心，也说明近年来这些公司的甲烷减排行动取得了一定的成效；加拿大 TC 能源和雪佛龙的甲烷排放强度目标分别为 0.3% 和 0.5%，说明相对来说这两个公司在短期内甲烷减排行动还存在着些许阻力，亦或是现阶段甲烷排放强度过大，无法在短期内使甲烷排放强度降低至较低水平。

在本报告中基于甲烷减排投资力度指标的评分计算方法如下：依据各公司在甲烷减排方面的投资额，以熵值法对数据进行归一化处理，投资额最多的公司赋值为 1，投资额最少的公司赋值为 0，其余公司根据与投资额极大值极小值的相对大小进行赋值，计算公式为：

$$\text{Score}_{\text{investment}} = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (3)$$

其中I代表公司在甲烷减排方面的投资额。

该甲烷减排投资力度指标以 2021 年为标准年，统计了标准年内各公司投资于甲烷减排方面的金额总和，并以此作为甲烷减排指数的量化指标之一。2021 年各公司的甲烷减排方面的投资力度如下图 6 所示。

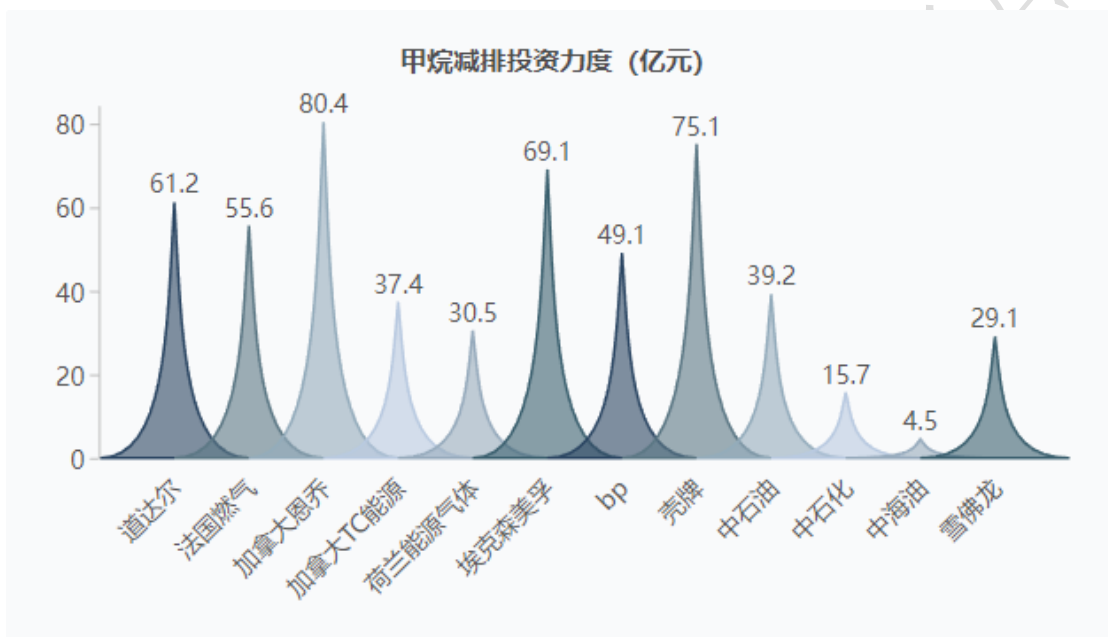


图 6 各公司甲烷减排投资力度（数据来源：各公司年报、可持续发展报告等）

由图 6 可知，加拿大恩乔、壳牌和埃克森美孚的投资力度最大，这些数据背后也反映出这些公司对甲烷减排行动极为重视；道达尔、法国燃气、bp 也都在甲烷减排领域有着可观的投资量；中石油、加拿大 TC 能源、荷兰能源气体和雪佛龙在甲烷减排领域同样有着颇具规模的投资力度；中石化、中海油在甲烷减排领域的投资力度明显低于这些公司的甲烷减排投资平均水平，应该提起对甲烷减排的重视，可以根据实际情况适当加大投资力度。

在本报告中基于甲烷排放强度变化率指标的评分计算方法如下：取 2017-2021 年这五年的各公司甲烷排放强度变化率的平均数值，以熵值法对数据进行归一化处理，变化率最大的公司赋值为 1，变化率最小的公司赋值为 0，其余公司根据与极大极小值的相对大小进行赋值，计算公式为：

$$\text{Score}_{\Delta} = \frac{\Delta - \Delta_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \quad (4)$$

其中 Δ 为甲烷排放强度变化率。

该甲烷减排投资力度指标以 2021 年为标准年，统计了标准年内各个公司的甲烷排放强度变化率水平，如下图 7 所示。

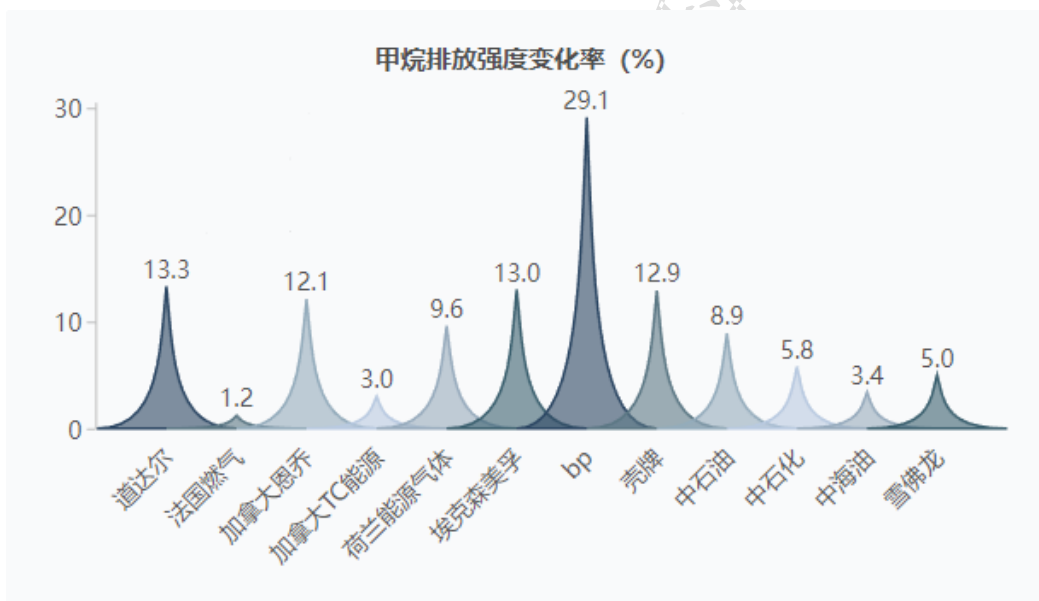


图 7 公司 2021 年甲烷排放强度变化率（数据来源：各公司年报、可持续发展报告等）

由图 7 可知，bp 在 2021 年甲烷排放强度下降了 29.1%，是 2021 年这些公司中甲烷排放强度下降最多的，说明在 2021 年 bp 公司的甲烷减排行动非常有效，明显降低了甲烷排放量；道达尔、加拿大恩乔、埃克森美孚和壳牌等公司的甲烷排放强度下降率均超过了 10%，说

明这些公司在 2021 年的甲烷减排措施有着非常良好的效果；荷兰能源气体和中石油的甲烷排放强度下降率分别为 9.6%和 8.9%，也有效控制了甲烷排放水平；中石化、中海油、雪佛龙、加拿大 TC 能源和法国燃气的甲烷排放强度变化率较低，说明相对来看这些公司现阶段的甲烷减排行动效果非常有限，甲烷减排方案仍然有待改进。

本报告将甲烷减排目标、甲烷减排投资力度、甲烷减排强度变化率这三项指标综合对比，绘制小提琴图和雷达图，以更直观清晰地展示出所调研油气公司的甲烷排控水平，如图 8 所示：

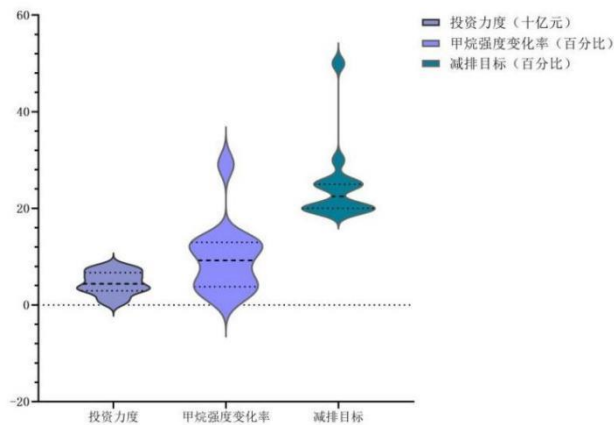


图 8 三项指标汇总柱状图（数据来源：各公司年报、可持续发展报告等）

由图 8 可知，在全球范围内，以上油气公司通过设定甲烷减排目标、加大甲烷减排投资力度等措施，在甲烷减排工作方面取得了大小不一的成果，其中 bp、法国燃气、道达尔、壳牌、埃克森美孚和加拿大恩乔等公司的甲烷排控力度相对较大。

本报告将管道长度、储存单元、液化气站这三项指标汇总对比，以更直观清晰地展示出所调研油气公司的基础设施建设水平，如下图 9 所示。

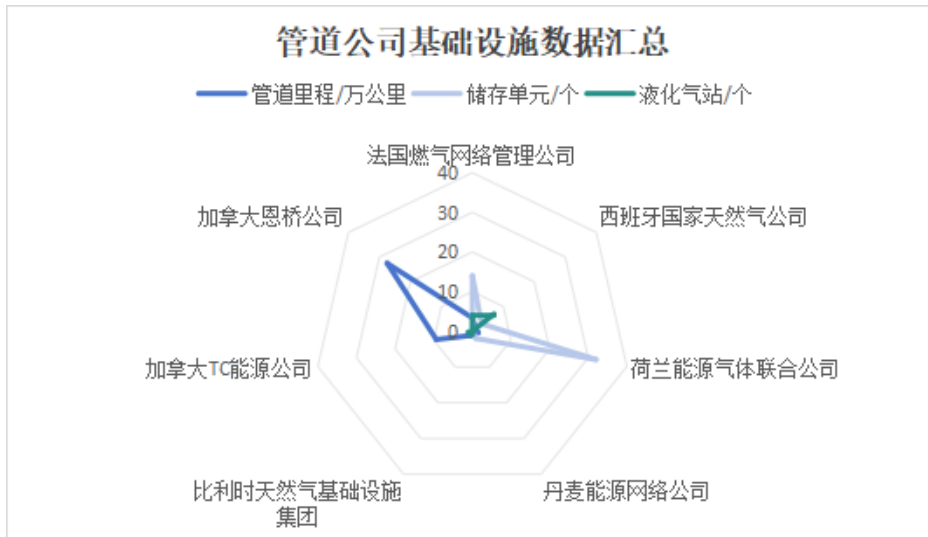


图 9 主要管道公司基础设施汇总指标 (数据来源: 各公司官网)

4. 主要结论及政策建议

COP28 要求各国履行减排承诺以应对气候危机, 2023 年 11 月生态环境部等 11 部门印发《甲烷排放控制行动方案》, 积极稳妥有序控制甲烷排放, 兼具减缓全球温升的气候效益、能源资源化利用经济效益、协同控制污染物的环境效益和减少生产事故的安全效益。

做好甲烷减排工作, 顶层设计首当其冲。在全球绿色低碳发展趋势下, 为了更好应对甲烷减排挑战, 长输管道企业应在统筹方面开展多项重点保障措施, 进行深度优化。为此, 我们提出以下建议:

第一, 加强甲烷监测体系建设。制定完善甲烷监测管理制度和流程, 明确监测点、监测设备、数据采集、数据分析与报告等环节的责任和要求。采用先进的数据采集和传输技术, 如无线传输、物联网等, 提高数据传输的稳定性和安全性。加强数据分析与处理, 采用人工智能和大数据分析技术, 提高数据的处理效率和准确性。

第二，推进甲烷减排技术创新。加强不同领域甲烷排放特征规律研究，持续开展甲烷直接空气捕获利用技术、甲烷转化利用技术、天然气管道掺氢等关键技术的研发创新；加快组合回收技术、液氮法回收技术、带压维抢修、干气密封回收、自动点火、B型套筒、优化启停以及 LNG 储罐降压等技术的研发进度。

第三，持续推进设备智能化。持续加大技术改造力度，实行数字化甲烷排放检测，开发智能管线、智能站场、智能监测等系统。改造重点排放设备，推进设备数字化改造和智能并网。投资建设智能数字中心，力争实现公司生产、环保、安全、能源、设备管理等数据的可视化平台接入，促使公司智能化、数字化管理再上新台阶。

第四，多措并举优化生产流程，“精打细算”减少天然气放空。严格生产运行和作业管控，减少天然气放空。优化压缩机冷热备启停频率，减少天然气放空；优化站场检维修作业，最大程度减少天然气放空；加强管道泄漏监测与预警，减少应急放空；推广天然气管线在线（带压）排污，减少放空量。鼓励开展现场监测获取实测数据，推广应用 LDAR 技术，逐步探索完善油气领域泄漏检测与修复技术规范体系。

第五，优化生产与动火作业流程，形成联动机制减少甲烷排放。坚持以“最大程度减少生产运行影响、最大程度减少天然气排放”为底线原则，结合企业运行安排和资源侧检修窗口期，科学安排作业计划，分批次组织集中动火和集中维修，集中解决设备设施风险隐患，以此达到减少排放的目的。

第六，加强甲烷减排相关宣传及培训。普及甲烷排放清单编制相关知识，开展对甲烷排放监测、核算、报告和核查体系建立以及甲烷减排的相关培训。与高等学校及科研单位开展产学研合作，培养一批甲烷排放控制技术性人才。加强对甲烷排放控制的气候、经济、环境和安全效益的宣传。开展甲烷排放控制典型经验做法宣传。

第七，积极开展全球甲烷交流合作，积极参与全球甲烷治理。通过气候变化南南合作、“一带一路”绿色发展国际联盟等平台，共同推进全球甲烷交流合作。参与甲烷排放技术、设备和产品认定标准相关对话与合作。深入贯彻落实国家关于甲烷减排重大决策部署，探索加入国际甲烷减排组织，开展技术解决方案交流，共享先进甲烷减排项目管理经验。

关于作者

系列报告总协调人：王建良

本报告主笔人：

齐明，中国石油大学（北京）经济管理学院教授，博士生导师，MBA 中心副主任。中国石油流通协会专家委员会秘书长，中国高等教育学会碳中和与清洁能源教育专业委员会理事。主持国家社会科学基金，北京市自然科学基金以及北京市社会科学基金，以及国家发改委、上海期货交易所、中石油集团公司、国家管网集团多项研究课题。多年连续参编《中国石油流通行业发展蓝皮书》和《成品油与新能源发展报告蓝皮书》，在国内外期刊发表研究论文数十篇，获得北京市侨联理论与调查研究优秀成果二等奖、三等奖，石油石化企业管理现代化创新优秀著作奖。

马青天，中国石油大学（北京）经济管理学院博士生，研究方向为气候金融与能源金融。

本报告校对：王建良

报告引用：齐明，马青天. 长输管道企业甲烷减排目标及策略研究[R]. 中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院, 2024C01, 2024 年 12 月 28 日.



中石大碳能院

ICED-CUPB

中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院

Institute of Carbon Neutrality and Innovative Energy Development, China University of Petroleum,
Beijing (ICED-CUPB)

联系电话：010-89733072

邮箱：iced-cupb@cup.edu.cn

微信公众号：ICED-CUPB

地址：北京市昌平区府学路 18 号

Add: No. 18, Fuxue Rd., Changping District, Beijing, 102249, China

