

引文:梁永图,涂仁福,张昊,等.油气管道在多能融合新型能源体系建设中的作用[J].油气储运,2025,44(4):361–378.

LIANG Yongtu, TU Renfu, ZHANG Hao, et al. Role of oil and gas pipelines in the construction of a new energy system with multi-energy integration[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(4): 361–378.

油气管道在多能融合新型能源体系建设中的作用

梁永图¹ 涂仁福¹ 张昊¹ 刘春颖¹ 付广涛¹ 邱睿¹ 廖绮¹ 徐宁^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·城市油气输配技术北京市重点实验室·油气管道输送安全国家工程研究中心;

2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院

摘要:【目的】为实现“双碳”战略目标,中国正积极推进多能融合新型能源体系建设。油气管道在传统能源的供应保障中起到了关键性作用,如何在新型能源体系中继续发挥其连续性、经济性、安全性、环保性优势,成为亟需探讨的问题。【方法】以油气管道的内涵不断延伸作为出发点,全面剖析了油气管道在多能融合新型能源体系建设中的作用。首先,综合梳理了中国多能融合与油气管道的发展政策;其次,系统阐述了多能融合新型能源体系的概念,并结合能源消费结构的演变过程,提出了新型能源体系的发展方向及建设意义;进一步从油气资源优化配置、油气能源供应保障、油气市场新格局的形成以及综合立体交通体系建设 4 个方面,探讨了油气管道在能源资源配置中的影响及其重要地位;并在此基础上,重点回顾了 21 世纪以来油气管道的建设概况,从新介质、新工艺、新管理方法、新建设方案、新运输体系 5 个方面,诠释了油气管道灵活赋能发展的内涵;最后,以油气资源、生物燃料、氢能、二氧化碳、LNG 与冷能为讨论对象,深刻描述了油气管道在多能融合新型能源体系建设中所扮演的关键角色,包括参与多网融合、多能协同、多式联运等新体系建设。【结果】油气管道仍是中国政府能源规划管理的重要对象,其对多能融合新型能源体系建设具有重要的推进作用,不仅能够保障能源大规模、长距离供应,还能提高中国能源储运网络的韧性与可靠性水平。【结论】油气管道在过去至未来较长时间内都是能源运输环节的关键纽带,在推动经济社会发展、保障国家能源安全等方面扮演着重要角色。在时代的发展大潮中,油气管道的内涵必将不断延伸,未来将朝着多元融合、协同发展的方向持续迈进。(图 3, 参 84)

关键词: 多能融合; 油气管道; 新型能源体系; 能源结构; 灵活赋能; 多元协同; 生物燃料; LNG 与冷能

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)04-0361-18

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.04.001

Role of oil and gas pipelines in the construction of a new energy system with multi-energy integration

LIANG Yongtu¹, TU Renfu¹, ZHANG Hao¹, LIU Chunying¹, FU Guangtao¹, QIU Rui¹, LIAO Qi¹, XU Ning^{1,2}

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)//Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology//National Engineering Research Center for Pipeline Safety; 2. Engineering School, China University of Petroleum-Beijing at Karamay

Abstract: [Objective] To achieve the strategic goals of “carbon peaking and carbon neutrality”, China is actively advancing the development of a new energy system with multi-energy integration. Oil and gas pipelines are crucial for ensuring the supply of traditional energy. It is essential to explore how to leverage their advantages of continuity, cost-effectiveness, safety, and environmental protection within this new energy framework. [Methods] Starting from the evolving connotation of oil and gas pipelines, the role of these pipelines in the construction of the new energy system with multi-energy integration was comprehensively analyzed. First, the development policies related to China’s multi-energy integration and oil and gas pipelines were thoroughly reviewed. Second, the concept of the new energy system with multi-energy integration was systematically elaborated. By examining the evolution of the energy consumption structure, the development direction and significance of this new energy system were discussed. The influence and critical position of oil and gas pipelines in energy resource allocation were explored across four dimensions: optimal allocation of oil and gas resources, supply guarantee, the formation of a new oil and

gas market pattern, and the construction of a comprehensive three-dimensional transportation system. Building on this, a review of the status of oil and gas pipeline construction since the early 21st century was conducted, and the concept of flexible, empowered development of these pipelines was interpreted across five aspects: new media, new processes, new management methods, new construction schemes, and new transportation systems. Finally, the key role of oil and gas pipelines in constructing the new energy system with multi-energy integration was outlined, highlighting their participation in emerging frameworks such as multi-network integration, multi-energy coordination, and multimodal transport. **[Results]** Oil and gas pipelines remain a crucial focus of the Chinese government's energy planning and management, significantly contributing to the development of the new energy system with multi-energy integration. They ensure large-scale, long-distance energy supply while enhancing the resilience and reliability of China's energy storage and transportation network. **[Conclusion]** Oil and gas pipelines have been, and will continue to be, a vital link in energy transportation, significantly contributing to economic and social development while ensuring national energy security. As development progresses, the role of oil and gas pipelines will expand, evolving toward diversified integration and coordinated development in the future. (3 Figures, 84 References)

Key words: multi-energy integration, oil and gas pipelines, new energy system, energy structure, flexible empowerment, diversified coordination, biofuel, LNG and cold energy

能源是推动社会与经济发展的基础动力。从工业革命时期煤炭发挥了重要作用,到 19 世纪末电力普及,再到 20 世纪初石油、天然气的兴起,能源的发展不断驱动社会进步。进入 21 世纪以来,一方面,传统石油、天然气资源的开采正朝着深地深海发展,挑战日益加剧^[1];另一方面,全球气候变化与环境污染问题愈发严峻,世界各国对保护生态环境的意识日益增强^[2]。在此契机下,可再生能源开始登上历史舞台,掀起了新一轮能源革命。风能、太阳能、地热能、生物质能等可再生能源建设、利用项目大量涌现,尤其以可再生电能、氢能等二次能源为代表,在各行各业发挥效能,一定程度上起到了传统化石能源的替代作用。可见,能源革命与产业升级密切相关,是实现“双碳”战略目标的重要途径^[3]。传统油气管道在过去对大规模石油、天然气的资源优化配置中起到了重要作用,如西气东输、川气东送、西油东送等工程均实现了中国东西部能源的均衡供给,推动了跨区域经济发展。2025 年是中国深入实施“四个革命、一个合作”能源安全新战略的第 11 年。当前,在构建多能融合新型能源体系的迫切需求下,如何促使传统油气管道积极融入并在其中发挥更大的作用成为亟需探讨的重要议题。

1 政策导向

2022 年 1 月,国家发展改革委、国家能源局联合印发《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》,强调“完善油气与地热能以及风能、太阳

能等能源资源协同开发机制”“在油气田区域内建设多能融合的区域供能系统”“支持生物燃料乙醇、生物柴油、生物天然气等清洁燃料接入油气管网,探索输气管道掺氢输送、纯氢管道输送、液氢运输等高效输氢方式”,为油气管道融入多能融合新型能源体系建设奠定了基调^[4]。2023 年 2 月,国家能源局印发了《加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案(2023—2025 年)》,强调了“多元迭代、系统观念及生态优先”的原则,旨在推动油气上游领域与新能源新产业的融合,促进新能源与低碳负碳产业的发展;2024 年 3 月,国家能源局印发了《2024 年能源工作指导意见》,指出“持续巩固‘电力稳定可靠、油气底线可保、煤炭压舱兜底、新能源高质量跃升’良好态势”;2024 年 8 月 29 日,国务院新闻办公室发布《中国的能源转型》白皮书,全面介绍了中国推动形成能源绿色消费新模式、构建新型能源体系、发展能源新质生产力、推进能源治理现代化取得的积极成效。由此可见,建设多能融合新型能源体系已成为中国落实绿色发展与能源安全战略的必经途径,是《“十四五”现代能源体系规划》的具体实践与创新方向^[5]。国家管网集团西部管道有限责任公司已成立新疆多介质管道安全输送重点实验室,正在开展氢气、二氧化碳、液氨、甲醇等管道输送实验,将来可提供更多新型能源的管输服务。

为探讨油气管道在多能融合新型能源体系建设中的作用(图 1),立足政策导向,从政府规划与管理视角阐明多能融合新型能源体系建设与管道灵活赋能的必要性,并从全国干线管道运营商——国家石油天然气

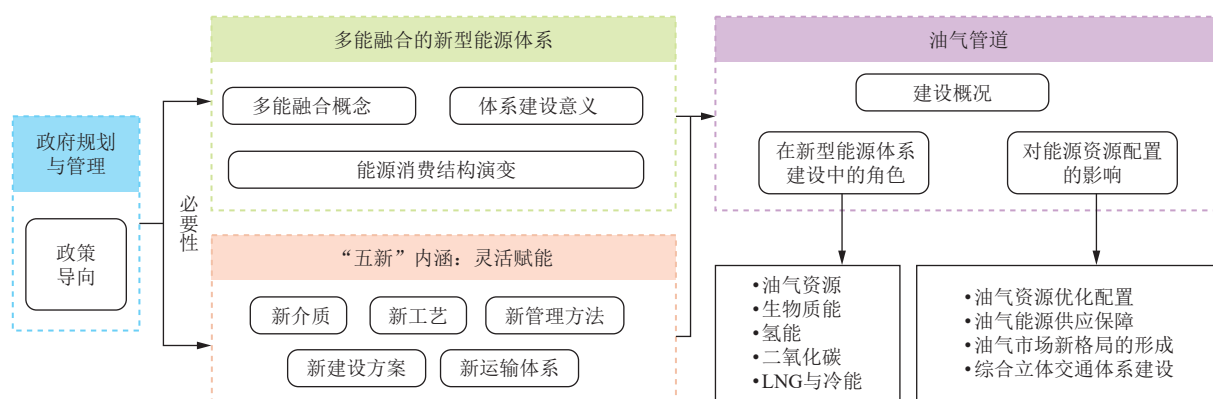


图1 油气管道在多能融合新型能源体系建设中的作用研究框架图

Fig. 1 Research framework for the role of oil and gas pipelines in the construction of a new energy system with multi-energy integration

管网集团有限公司(简称国家管网集团)的角度,提出油气管道灵活赋能的发展方向与绿色管道发展目标。基于多能融合概念,归纳能源供需结构演变进程,从演变趋势中可看出:一方面,传统化石能源仍是当下能源消费结构的主体;另一方面,多类新能源齐头并进的发展前景也极为广阔,充分体现了建设多能融合新型能源体系的重大战略意义。从油气资源优化配置、油气能源供应保障以及近年来油气市场新格局的形成等方面剖析油气管道的影响态势,分析其对于国家战略实施的积极推动作用。此外,结合21世纪以来油气管道建设概况,从新介质、新工艺、新管理方法、新建设方案、新运输体系的“五新”角度出发,阐释油气管道灵活赋能的内涵。最后,围绕油气资源、生物质能(生物燃料)、氢能及其衍生物(如绿色甲醇、绿氨等)、二氧化碳、LNG与冷能的高效输送需求,探究油气管道在多能融合新型能源体系建设中的重要角色。

2 多能融合新型能源体系

2.1 多能融合的概念

多能融合是指通过特定方式与手段,将多种不同形式的能源有效整合并协同利用。其核心出发点是提升能效,降低成本,增加可再生能源消费占比,减轻环境负担,确保能源供应清洁、高效及可持续^[6]。多能融合通常涉及能源品种的融合、供能方式的融合、技术融合以及系统融合^[7-8]。其中,能源品种的融合是指将风能、太阳能、水能、生物燃料等多种可再生能源与煤、石油、天然气等传统能源相结合;供能方式的融合是指集中式与分布式供能相结合,长距离与本地能源供应相协调;技术融合是指运用信息技术、智能控制技

术等,实现能源生产、存储、传输及消费的智能化管理;系统融合是指构建集电力、热力、气体等多种能源形式于一体的综合能源系统,实现各类能源之间的优化配置。多能融合对推动能源结构的优化升级、支持经济社会持续健康发展具有重要意义。在经济效益方面,通过优化资源配置,能够降低能源消费成本;在环境效益方面,有利于减少污染物的排放,促进环境保护与生态平衡;在社会效益方面,有利于提升能源供应的稳定性与可靠性,保障国家能源安全。

2.2 能源消费结构的演变进程

能源作为一个国家强盛的动力与安全的基石,是国家繁荣、经济可持续发展的基础与支撑。中国能源消费总量由2000年的 14.7×10^8 t标准煤连续攀升至2023年的 57.2×10^8 t标准煤,年均增长率为6.09%。随着能源工业发展,中国能源结构由以煤炭为主加速向多元化、清洁化转变,发展动力由传统能源加速向新能源转变^[9]。2006年,随着《可再生能源法》的颁布并实施,可再生能源制度建设逐步完善,通过引进一批国外先进技术,风电、光伏等逐步产业化,成为重要的补充能源^[10]。为了更好地分析能源消费结构的演变进程,基于国家统计局公布的数据^[11],统计了中国2000—2023年4类能源消费占比情况(图2)。可见,2013年,中国处于高质量发展转型的初期,煤炭在能源消费中占比虽相较2000年下降了3.8%,但仍高达67.4%,原油、天然气、非化石能源占比分别为17.1%、5.3%、10.2%,突显了“富煤、贫油、少气”的特征;进入新常态下高质量平稳发展阶段后,2023年,煤炭占比进一步下降至55.3%,原油与天然气占比分别提高了1.2%、3.2%,非化石能源占比增至17.9%。整体上看,能源消费结构中煤炭占比持续下降,原油占比先

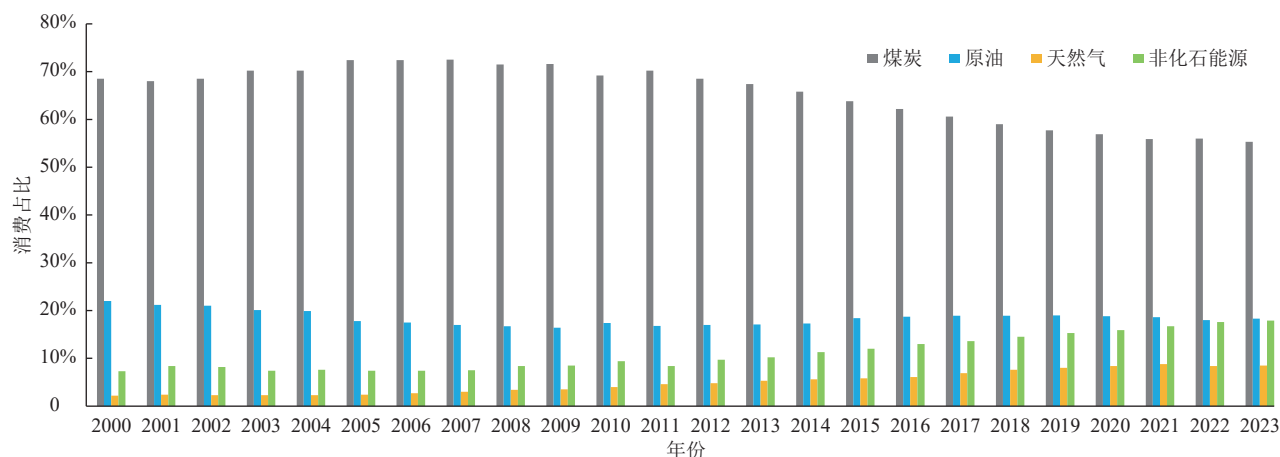


图 2 中国 2000—2023 年 4 类主要能源消费占比情况图

Fig. 2 Consumption proportions of four major energy types in China (2000–2023)

稳中有升，再在 2019 年之后有所下降，天然气与非化石能源占比快速升高。这一趋势与《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》所提出的“降低煤炭消费比重，提高天然气消费比重，安全发展核电，大力发展可再生能源”战略任务的实施密切相关。在此背景下，中国构建起涵盖煤、油、气、核、水、风、光等全面发展的能源供给体系^[12]。

近年来，中国在非化石能源消费领域取得了显著进展，包括风电、太阳能发电、水电、核电及生物质能等多个方面。根据《中国的能源转型》白皮书可知，截至 2023 年底，中国风电、光伏发电装机规模在 10 年内激增 10 倍，可再生能源发电装机占总装机的 58.2%，新增可再生能源发电量占全社会用电增量的 50% 以上。尽管中国在可再生能源发电技术方面进步迅猛，但风、光能源供应不稳定，加之电力系统调峰能力欠缺、跨区域输电能力受限，导致“弃风弃光”问题较为严重^[13]。为此，2022 年 3 月，国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》，明确了氢能是未来国家能源体系的重要组成部分，且是实现“双碳”战略目标的重要载体^[14]。利用可再生能源电解水制氢，进而生产绿色甲醇、绿氨等，可为公路运输、航海、航空及冶金行业提供脱碳方案，同时提高不稳定能源消纳比例^[15]。其中，绿色甲醇与绿氨既是能源终端产品也可作为储氢载体。在东北、西北地区，多个“风光氢氨醇一体化”项目正在落地建设^[10]。截至 2022 年底，中国氢燃料电池汽车市场占全球份额的 18.2%，保有量超过了 1×10^4 辆，预计截至 2025 年将达到 5×10^4 辆，主要面向大巴车、冷藏车、快递车、矿卡、重载货运等商用场景开展应用。此外，

国家工业和信息化部在《“十四五”工业绿色发展规划》中已将“促进甲醇汽车等替代燃料汽车的推广”纳入了“绿色产品和节能环保装备供给工程”，并将“二氧化碳耦合制甲醇”列入了“绿色低碳技术推广应用工程”。随着用能条件与用能水平提高，甲醇、氨动力船舶将成为航海业响应脱碳号召的积极实践^[16]。2023 年全球甲醇燃料运输船的新船订单已达 120 艘，逐渐向多种船型应用发展，如集装箱船、散货船、化学品船及汽车运输船等。根据中国能源报报道^[17]，全球已有数十家船舶制造企业宣布将新建氨动力船舶或预留氨燃料空间。生物燃料是利用生物质能的一种有效方式，主要包括生物乙醇、生物柴油、可持续性航空煤油(Sustainable Aviation Fuel, SAF)及生物燃气，可广泛应用于交通运输、热力发电及工业生产等领域，作为部分化石燃料的替代品^[18]。2000 年以后，生物乙醇开始进入规模化发展阶段，中国开始推广使用生物燃料乙醇与车用乙醇汽油。《“十四五”生物经济发展规划》中提出，在条件适宜的地区开展生物柴油推广试点。目前，中国的 SAF 年产能已达 35×10^4 t，规划年产能可为 353×10^4 t，中国国际航空、中国南方航空、中国东方航空等航空公司均已启用 SAF 进行商业飞行^[19]。

3 油气管道在能源资源配置中的影响

3.1 油气资源优化配置

中国油气资源分布与能源消费市场的空间错位现象较为突出，需依赖远距离调运^[20]。在自产资源方面，主要集中在渤海湾、松辽、塔里木、鄂尔多斯、准噶尔、珠江口、柴达木、东海陆架、四川、莺歌海、琼东南 11 个

盆地。然而,消费端则主要集中在华东、华北、华南及华中经济发展水平较高区域。中国遵循“通道多元、海陆并举、均衡发展”的原则,在海上、东北、西南、西北4大能源战略通道建设上成果显著。随着远洋进口资源规模扩大,东部与南部沿海地区的海上通道不断扩建,在原油方面,大连港、青岛港、宁波港、湛江港等大型原油港口持续发挥作用;在天然气方面,截至2024年9月,以中国海油、中国石油、中国石化、国家管网集团等为代表的能源企业已建成31座LNG接收站,另有15座在建。为完成集中性资源向多元市场转移、缓解“能源贫困”,需寻求稳定、连续且安全的运输方式,油气管道作为连接油气产业链上下游的关键环节,为优化油气资源配置,促进跨区域经济发展作出了重大贡献^[21]。如根据国家管网集团公布的数据^[22]显示,截至2022年,兰成渝成品油管道已累计向川渝地区输送成品油 1.2×10^8 t,有效平衡了西部能源结构,成为西部能源大动脉;截至2024年,西气东输管道系统已累计向长三角地区供气突破 5000×10^8 m³,甬沪宁管网已累计输送进口原油超过 7×10^8 t,为长三角地区一体化高质量发展不断赋能。

此外,东北、西南以及西北通道主要采用跨国管道(中俄油气管道、中缅油气管道、中哈原油管道、中亚天然气管道)的方式执行油气资源进口任务。跨国管道连接了全球主要油气出口国与进口国,是能源全球化的高效途径,也是国际能源合作的纽带,具有重大的政治与经济意义^[23]。如中亚天然气管道是“一带一路”建设的重要内容之一,其为沿线国家与地区提供清洁、高效的天然气资源,促进了区域经济合作、助推可持续发展,推动命运共同体建设,维护周边地区的和平与稳定,并有助于建立国际能源新秩序^[24]。

3.2 油气能源供应保障

中国油气工业经历快速发展后,油气资源的开发与利用效率不断提升,原油年产量从改革开放初期的 1.06×10^8 t增至2023年的 2.08×10^8 t,天然气年产量从无到有,2023年达到 2353×10^8 m³。其中,油气管道不仅是能源供应链的关键环节,更是国家能源战略布局的重要组成部分^[25-28]。21世纪以来,中国不断优化油气管道网络规划,并提升管道建设、运行技术水平,总里程已达到 18×10^4 km,位居世界第3^[4]。在应对地缘政治、供需失衡、通货膨胀等全球性能源市场挑战中,提高了能源供应链的安全性,从而实现对能

源供给的主动控制,保障经济社会的高质量发展与现代化建设。此外,油气管道在提升能源供应韧性方面也发挥了积极作用,如“5·12”汶川大地震中,作为西部大开发重点工程的兰成渝成品油管道仅停输22 h便恢复作业,为灾区抗震救灾油料的供应提供了重要保证^[26-27]。该管道自2011年以来历经2次增输改造,其年输量从 500×10^4 t跃升至近 800×10^4 t,曾一度承担川渝地区80%以上的成品油供应,为区域经济腾飞做出了重要贡献。过去,冬季天然气保供往往采取“压非保民”,即通过大规模压减可中断的工业用户用气量来保障民生需求,但有些年份仍出现“气荒”现象。随着西气东输管道系统、陕京天然气管道系统、中俄东线的建设与完善,2020年以来即使面对大面积寒潮导致的各地区天然气需求激增,管道仍能高效发挥跨区资源调配潜能,提升资源配置效率,为冬季保供奠定坚实基础^[29]。其中,陕京天然气管道系统被誉为首都的“城市供气生命线”,保障了北京市超过95%的天然气消费需求,为“煤改气”政策实施提供了坚实支撑。同时,根据国家管网集团提供的预测数据^[28],到2030年管道将累计输送天然气 2.8×10^{12} m³,相当于替代煤炭 38×10^8 t,减少二氧化碳排放 41×10^8 t。这一趋势也符合《新时代的中国能源发展》白皮书所提出的“全面推进能源消费方式变革,构建多元清洁的能源供应体系”要求。

油品资源的供应保障也是国防安全的重要组成部分,输油管道在军事油料快速供应方面的作用不容忽视^[30]。军事油料作为战争机器的“血液”,其供应的及时性、稳定性及安全性直接关系到国防力量的发挥与战争胜负。国防安全要求军事油料储备布局合理,以应对可能出现的紧急情况。管道运输网络有助于实现军事油料储备的分散化、多点化,提高油料储备的抗风险能力^[31]。在现代战争中,油料供应的稳定性与供应速度对于军事行动成败至关重要,且在运输过程中易受到敌对势力的攻击^[32]。管道运输具有连续性强、输送速度快的特点,同时隐蔽性、安全性高,抗干扰能力强,能够在复杂多变的战争环境中迅速将油料输送到前线与战略要地。此外,军用可拆卸管道具备布局灵活的特点,可根据战场态势调整油料输送方向与流量,确保关键区域的油料供应不受影响。

3.3 油气市场新格局的形成

长期以来,中国油气市场体系为“3+X”范式,即

市场主体由中国石油、中国石化、中国海油及少数其他能源企业组成,而油气产业链的中游管输与下游销售存在业务捆绑,油气管道由市场参与主体自行建设。在“3+X”市场体系下,由于下游市场主体间存在销售竞争,管道作为企业内部储运设施,未向第三方开放,导致管道基础设施利用率低,产业发展活力不足^[33]。2014年起,中国政府部门逐步探索油气管网设施公平开放的实施路径与方式。2019年5月,国家发展改革委同国家能源局、住房城乡建设部、市场监管总局联合印发《油气管网设施公平开发监管办法》(下称《办法》),此为落实《关于深化石油天然气改革的若干意见》的重要举措。《办法》为推动油气管网设施公平开放奠定了制度基础,要求运营企业“公开开放服务的条件、程序及剩余能力等信息,公平、公正地为所有用户提供油气管网设施服务”,并“推进油气管网设施独立运营,实现和其他油气业务的分离”。

国家管网集团的成立旨在从产业链中间环节入手,通过“管住中间,放开两头”,撬动油气产业发展格局大调整,加快形成上游油气资源多主体多渠道供应、中间统一管网高效集输、下游销售市场充分竞争的“X+1+X”新市场格局^[34]。此举不仅有助于管道运输价格的统一监管,维持平稳、有序的油气销售市场,还能够充分结合现有通道的输送能力与利用率进行能源基础设施规划,有利于进一步统筹规划煤炭、油气、电力流向,避免能源迂回、错配,极大地提高能源配置效率与效益^[35]。

2022年4月,国家管网集团开放服务及交易平台正式上线,进一步推动了现有管道互联互通,完善落实公平开放、管容分配及客户服务制度。2023年,交易平台准入241家天然气托运商,新增服务量约 $45 \times 10^8 \text{ m}^3$,促进油气产业上下游开放市场和更多经营主体进入;同年12月,中国天然气管网日输气量突破 $9 \times 10^8 \text{ m}^3$,创历史新高,显现出对天然气市场需求增长的适应力。可见,油气管道作为能源储运基础设施的重要组成部分,其发展状况对市场新格局的形成有着深远影响。此外,跨国油气管道项目往往涉及多个国家的外交与经济,将影响全球能源市场的格局^[36]。如在乌克兰危机、北溪管道断供背景下,欧洲天然气价格大幅波动,两次冲高并维持高位,成为溢价市场^[37]。

3.4 综合立体交通体系建设

综合立体交通体系是指铁路、公路、水路、航空、

管道等各种运输方式按其技术经济特点组成的分工协作、有机结合、连接贯通、布局合理的交通运输综合体^[38]。管道运输作为5种现代运输方式之一,早在《1991—2000年科学技术发展十年规划和“八五”计划纲要》中就被首次纳入科技规划布局。从经济性方面考虑,最具优势的货运方式是水运,其后依次是管道(液态)、铁路、管道(气态)、公路,航空运输的经济费用最高^[39]。

2019年9月,中共中央、国务院印发的《交通强国建设纲要》中要求“构建互联互通、面向全球的交通网络”,其中,油气管道互联互通与传统铁路、公路及航道等运输方式并举。为响应交通强国战略,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,增设交通与运载工程学科,其涉及道路、轨道、水路、航空、航天、管道运输、作业运输、综合与新型交通等交通运输方式,鼓励开展以需求为导向的多学科交叉研究^[40]。《国家综合立体交通网规划纲要》要求推进交通基础设施网与能源网融合发展,构建多式联运网络,提高设施利用效率;《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》指出,“加快全国干线天然气管道建设,完善原油、成品油管网布局”。在各种运输方式中,单位周转量二氧化碳排放量最低的是管道,主要得益于管道运输90%以上依靠电力驱动;此外,以单位周转量的大气污染程度为评价指标,管道仍为最优方式,主要得益于管道能够实现全程密闭输送^[39]。以多能融合、多网融合作为综合交通体系建设的重要内容,有利于资源配置优化与高效协同,提升资源集约利用效能。如油气资源调配过程中,在铁路网发达地区利用管-铁两用油库,在沿海、沿江地区利用管-水两用油库。基于此类枢纽节点,管道与铁路、水路、公路成功构建起协同、联程的输送系统,为油气能源的经济、稳定供应提供现实条件^[33]。

4 油气管道建设概况及灵活赋能发展

4.1 油气管道建设概况

纵观中国油气管道建设发展历程,虽然创业维艰,但也取得了巨大成就。1971年11月7日,“八三”管道成功投产开始输送原油,标志着中国第一条埋地大口径长距离输油管道的建成;1997年9月10日,陕京一线投运,标志着中国第一条长距离、大口径、高度自

动化的输气管道建成; 2002 年 9 月, 有西北西南地区“能源大动脉”之称的兰成渝管道投产, 是中国首条大口径、高压、长距离成品油输送管道^[41]。此后, 随着经济发展水平与能源需求的不断提高, 油气管道建设取得了高速发展。“十三·五”期间, 中国建成原油管道约 5 000 km, 新增一次年输油能力 1.2×10^8 t; 建成成品油管道 1.2×10^4 km, 新增一次年输油能力 0.9×10^8 t; 建成天然气管道 4.6×10^4 km, 实现主干管网与区域管网同步发展^[42]。

根据国家统计局公布的数据(图 3)显示, 2013—2023 年管道货运量由 6.52×10^8 t 升至 9.59×10^8 t, 货运周转量由 $3\,496 \times 10^8$ t·km 升至 $7\,100 \times 10^8$ t·km, 分别增长了 1.47 倍、2.03 倍, 且仍处于上升趋势。管道货运周转量增速高于货运量增速, 可见, 油气管道数量与里程在同时增长, 并向着大口径、长距离发展。从货运量与周转量市场占比上看, 管道货运量占比在 1.5%~1.9% 之间浮动, 管道货运周转量占比则在 1.6%~2.1% 范围内波动。在 2019 年之前, 管道货运量、货运周转量及其在各运输方式中的占比总体上均处于缓慢上升的趋势, 至 2019 年达到最高, 分别为 1.90%、2.11%, 但在 2016 年出现下降趋势, 其原因是能源需求变化受多方面因素影响, 如经济增速放缓、能源结构调整加速、国际油价下跌等^[43]。2019 年之后, 受新冠疫情、新能源高速发展等因素影响, 管道货运量有所降低, 至 2022 年后得到恢复并转为上升趋势。

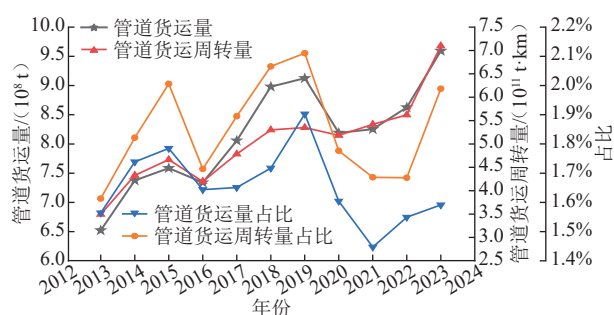


图 3 2013—2023 年中国管道货运量、周转量变化趋势及其在各运输方式中的占比图

Fig. 3 Trends in China's pipeline freight volume and turnover and their proportions among various transportation modes (2013-2023)

《“十四五”现代能源体系规划》要求完善原油、成品油长输管道建设, 优化东部沿海地区炼厂原油供应, 完善成品油管道布局, 提高成品油管输比例; 加快天然气长输管道及区域天然气管网建设, 推进管网互联互通, 完善 LNG 储运体系。近年来, 油气

管网基础设施加速建设: ①在天然气管道方面, “主干互联、区域成网”的管网格局逐步形成, 包括西气东输系统、陕京系统、川气东送系统等, “全国一张网”不断完善; ②在原油管道方面, 形成了西北与西南相连、东北与华北华东贯通、沿海向内陆适当延伸的“东西半环、海油登陆”格局, 包括西部管道、兰成渝管道、日东原油管道、鲁宁管道等; ③在成品油管道方面, 以主干管道、炼化基地为中心, 建设区域性管道支线, 基本形成“北油南运、沿海内送”的成品油运输格局, 如西南成品油管网、华北成品油管网、西部成品油管网等。根据《中国的能源转型》可知, 截至 2023 年底, 中国油气管道总里程约 19×10^4 km, 约占全球 9%, 其中原油管道 3.3×10^4 km、成品油管道 3.3×10^4 km、天然气管道 12.4×10^4 km。2024 年 12 月 2 日, 中国单管输气量最大的天然气管道——中俄东线全线贯通, 全长 5 111 km, 年输气能力增至 380×10^8 m³, 助力中国现代能源产业创新升级。“十四·五”期间, 国家管网集团计划新建油气管道超过 2.5×10^4 km, 其中 2024 年新建油气管道累计里程已超过 4 000 km。预计到 2025 年, 全国油气管网规模将达到 21×10^4 km。

4.2 油气管道灵活赋能

油气管道是国家能源大动脉, 承担了中国约 85% 原油、30% 成品油以及 99% 天然气的陆上运输任务^[44]。此外, 还有少部分管道用于运输矿浆、煤浆等浆体。随着能源转型的深度推进, 油气管道中“油气”的含义将不断延伸, 二氧化碳、氢气、甲醇、液氨等都将成为管道的重要承运介质^[45]。因此, 发展油气储运行业的新方向, 如流动安全保障、融合协同输送、新型介质输送、智慧管道建设、能源互联网建设等, 可增强多能融合新型能源体系的适应性与韧性, 对于能源供应的安全保障至关重要^[46-48]。

油气管道灵活赋能的总体目标是通过降低输送能耗、保障输送安全、提高输送质量、降低环境影响, 实现管道输送系统的安全、高效、环保、可持续发展, 其内涵可概括为“五新”, 即新介质、新工艺、新管理方法、新建设方案、新运输体系^[44]。新介质是指油气管道在承运原油、成品油、天然气等传统介质的基础上, 拓展承运范畴至液化化工品、二氧化碳、氢气及其衍生产品、生物燃料等, 为油气管道赋予新生命。新工艺依托各项技术的发展, 主要涵盖 3 个方面: ①改

变介质特性以提高管道输送效率与安全性,如原油降黏、天然气脱水;②提高管道本体的设计水平,包括内涂层工艺、焊接工艺、防腐工艺等;③拓展或改善管道运行工艺,如天然气掺氢输送、成品油小批量顺序输送、成品油-生物燃料-液氨-甲醇顺序输送等。新管理办法是指随着管道市场化运营的深化改革,多托运方引发的多注入、多分输操作将使运行管理复杂化,可能制约管道运输能力的有效利用,因此需要制定适应“X+1+X”模式的科学管理方法,实行油气管道灵活调度。新建设方案是指结合已有管道布局,增加互联互通建设,同时兼顾新增介质的发展趋势,融合或新建不同介质运输路径,涵盖“全国一张网”建设、氢气管道规划等内容,并提升管道智能化水平,降低管道失效带来的能源供应风险,增强能源供应链的韧性与可靠性。新运输体系是指管道与铁路、水路、公路等方式联合运输,优势互补、分工协作,如建设大型枢纽库、打通联程运输通道,打造高效融合的运输体系,优化能源产品物流成本,提高供应链经济效益^[49]。

中国的能源企业在油气管道灵活赋能方面已经迈出了步伐。中国石化旗下已建有金陵—扬子氢气管道、巴陵—长岭氢气管道、济源—洛阳氢气管道,最长投运时间约 17 年,积累了较为丰富的输氢管道运行经验。近期,中国石化正在加速推进乌兰察布—北京输氢管道项目,其依托乌兰察布丰富的太阳能与风能资源生产绿氢,计划年供氢能力达到 50×10^4 t,其中一期工程年产绿氢 10×10^4 t。该管道全长超过 400 km,属于“西氢东送”输氢管道示范工程,已纳入《石油天然气“全国一张网”建设实施方案》,标志着中国氢气长距离输送管道进入新发展阶段^[42]。同时,2023 年 7 月,中国石化投产齐鲁石化—胜利油田中国首条百万吨级高压常温密相二氧化碳管道,全长达到 109 km,首次实现二氧化碳长距离密相管输,对推动中国碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)产业链规模化发展具有里程碑意义。2021 年 5 月,由中国石油管道局设计的中煤甲醇项目配套管道工程成功投产,管道全长 52 km,是中国首条甲醇长输管道。国家管网集团为推动公平开放大平台的构建,全方位展开了新介质管输试验工作。在输油管道方面,正有序开展成品油管道顺序输送甲醇、液氨等新介质可行性研究,有望提高成品油管输

负荷率^[50-51]。在输气管道方面,2023 年 5 月,国家管网集团完成了二氧化碳管道全尺寸爆破试验,为掌握百万吨级二氧化碳输送管材研制、管道设计及建设技术提供了重要的数据支撑。同年 11 月,成功实施全尺寸掺氢天然气管道封闭空间泄漏燃爆试验,最大掺氢比例达 30%,促进了中国天然气掺氢技术水平与国际接轨。

5 油气管道在多能融合新型能源体系建设中的角色扮演

5.1 油气资源

5.1.1 原油与成品油

自 2018 年以来,中国原油产量持续保持增长态势,2022 年产量重回 2×10^8 t。按国家能源局《2024 年能源工作指导意见》要求,原油产量继续稳定在 2×10^8 t 以上。国家统计局数据^[11]显示,2023 年,原油产量排名前 3 的省级行政区依次为天津、新疆、黑龙江;按区域统计,西北区域占比最大,约 35%,其次是华北区域,占比 21%。此外,中国原油年消费总量已超过 7×10^8 t,进口资源比例超 70%。当前的进口方式以海运、管道输送为主,其中海运进口原油有两种消费方式,一是在沿海地区炼化成相应产品后配送,二是直接将原油输送至内陆炼厂炼化,二者的运输方式均是以管道、铁路为主。其输送管道主要包括以中哈原油管道、中俄原油管道、中缅原油管道为代表的西北、东北、西南 3 大通道。随着“双碳”战略目标的推进,中国成品油需求增速已逐步放缓,基本进入平稳期^[52]。中国石油经济技术研究院发布的《2023 年油气行业发展报告》显示,预计 2024 年的需求量在 4×10^8 t 左右,将于 2025 年达峰,相对于国际能源署(International Energy Agency, IEA)的预测时间有所提前。

对于原油与成品油而言,长距离的资源调配在未来较长时间内仍会继续存在,管道作为“西油东送”“北油南运”“沿海内送”的高效、经济运输方式,仍占有一席之地。同时,随着绿色物流意识的提高,为了缓解铁路运输压力,降低运输能耗,“以管代铁”“以管代公”将成为有效发展模式。在管输技术层面,以采用顺序输送工艺的成品油管道为例,随着西部管道、西南管道等里程超过 1 500 km 的长距离管道建成与运营,顺序输送技术已取得了显著进步,为未来的发展

奠定了坚实基础^[53]。目前, 中国全年成品油管输量约为 $9\,900 \times 10^4$ t, 成品油管道整体平均负荷率为 51%, 其中兰郑长管道、荆襄管道、甬台温管道及福建管道均不超过 20%^[54]。在管输能力富余度较高的基础上继续完善管网拓扑结构, 优化运输路径, 可为包括输送非传统油品介质在内的管道增量提供物理潜能^[55]。

5.1.2 天然气

近 10 年来, 中国天然气行业不断完善产供储销体系, 扎实推进机制改革与市场建设, 实现了翻番式增长。2023 年, 中国天然气消费量 $3\,945 \times 10^8$ m³, 同比增长 7.6%, 在一次能源消费总量中占比 8.5%, 较上一年提高 0.1%。在进口资源方面, 管道气进口量为 671×10^8 m³, 同比增长 6.2%; LNG 进口量达到 984×10^8 m³, 同比增长 12.6%。2024 年, 天然气行业深入践行能源安全新战略, 继续加大增储上产力度。根据《中国天然气发展报告(2024)》的预测, 天然气消费量在 $4\,200 \times 10^8 \sim 4\,250 \times 10^8$ m³ 范围内, 同比增长 6.5%~7.7%, 展示出持续上升趋势, 同时也对天然气资源配置能力提出了更高要求。国家管网集团公布数据^[56]显示, 2021 年, 中国石油、中国石化、中国海油通过共享基础设施扩大了天然气供应, 新增服务气量 334×10^8 m³、LNG 接卸量 415×10^4 t, 管网平均负荷率、LNG 接收站平均利用率同比分别提高 9%、16%, 天然气管输平均运距同比下降 3%, 节约管输成本超过 20×10^8 元。天然气管道建设依然势头强劲, 区域管网供气韧性显著增强^[57]。2023 年, 蒙西管道一期、潜江—韶关输气管道广西支干线、西气东输三线中段(枣阳—仙桃段)等工程顺利投产; 古浪—河口等互联互通项目如期投产。此外, 西气东输四线(吐鲁番—中卫段)、川气东送二线等重大工程均已开工建设。

天然气作为一种清洁能源, 是过渡完成“双碳”目标的有效能源介质, 未来一段时间的需求量仍会以较高速度增长^[58]。但不可忽略的是, 资源的不平衡分布始终存在, 为满足消费需求, 西气东输、川气东送、海气登陆、管道气贸易的规模也将持续扩大。近几年, 广东、浙江等省网相继成功融入“全国一张网”建设, 对于打通天然气管道至终端用户“最后一公里”具有积极意义, 能减少供气层级, 降低下游用户用能成本^[59]。以浙江省为例, 预计截至 2025 年, 全省的天然气消费量将增至 315×10^8 m³, 届时天然气在该省一次能源消费结构中的占比将提高至 13%。在“十四五”期间, 国家管网集

团将在浙江新建省级天然气管道 1 600 km、LNG 接收站 1 座, 同步实施互联互通工程。在此背景下, 管道在天然气供应链中的存在价值将随之上升。同时, 随着可燃冰开采、深海油气田开发等技术的创新发展, 海底管道将在海洋能源运输任务中发挥重要作用^[60]。此外, 加速天然气管道与新能源输送的融合发展, 如天然气掺氢输送^[61], 能更好统筹高质量发展与高水平安全。

5.2 生物燃料

在 2030 碳达峰目标推动下, 生物燃料再次得到重点关注, 并已成为能源安全战略储备技术之一。生物燃料可全方位应用于海陆空, 是全球最大的可再生能源来源, 由于其含有植物通过光合作用吸收的碳, 被认为是一种近乎零排放的燃料^[62]。当生物质能与 CCUS 技术相结合时, 也可以促进负排放^[63]。在交通领域, 虽然电气化发展迅速并向低碳氢能跨越, 但暂时无法满足长途重载运输、航空、海运领域所需的高能量密度与热值要求。因此, 生物燃料被当作化石燃料向电气化、氢能燃料过渡的理想替代燃料。根据 IEA 数据显示, 生物燃料占可再生能源的 55%, 占全球能源供应的 6% 以上。生物乙醇作为 4 代生物燃料的代表产品, 是使用量最大的液体生物燃料。中国正在加速第 2 代生物乙醇的研发与应用, 2023 年产量约 340×10^4 t, 同比增长 2.5%, 产量占全球 3.8%。中国已在 13 个省级行政区推广使用 E10 乙醇汽油, 约占汽油消费量的 20%。2022 年, 国投生物科技投资有限公司年产量 3×10^4 t/a 的纤维素乙醇示范装置竣工投产, 并于 2023 年实现稳定运行。由于生物柴油具有较低的碳排放量, 燃烧性能更好, 是一种具有很大发展潜力的新型绿色能源^[64], 因此, 中国正在积极探索生物柴油碳减排方法, 推动将生物柴油纳入国家核证自愿减排量机制, 加快实现生物柴油的绿色价值。在中国主要以废弃油脂生产生物柴油, 2023 年产量达到 215×10^4 t, 是 2019 年的 2.6 倍。随着航空运输业的复苏, 航空煤油需求不断上涨, 航空运输减排成为关注点。目前已有 7 种技术路线生产生物航煤, 且已通过 ASTM-7566-2023《含合成烃的航空涡轮燃料标准规范》认证并完成燃料试飞^[65]。按照国际民航组织的国际航空碳抵消与减排计划, 2021—2035 年间, 仅中国的生物航煤累计需求总量可达 $1.6 \times 10^8 \sim 1.8 \times 10^8$ t, 这极大刺激了 SAF 的开发应用, 市场需求量迅速增长。2022 年 9 月, 中国石化镇海炼化获得了中国民航局适

航器审定司颁发的生物航煤适航证书,为航空运输减排提供了有力保障。

中国遵循“不与粮争地、不与人争粮”的原则,生物燃料正在从第 1 代向第 2 代转型,促进多元化、产业化发展。由于不受可再生电力分布的影响,生物燃料产地与消费地均主要集中在广东、浙江、山东、江苏及安徽等原材料丰富的省份,结合各地方政策,存在中短途运输的需求。利用成品油管道输送液体生物燃料已成为降低生物燃料供应成本、维持管道负荷率的有效手段^[66]。中国西南管道南线、兰郑长管道等均已成功实践了不同比例的液体生物燃料掺混产品与成品油共同输送。此外,航空煤油管输技术也在不断探索中^[67],包括单介质长距离管道、成品油顺序输送管道,这些均为 SAF 的长距离管道调配提供了前置条件。

5.3 氢能

5.3.1 氢气

根据 IEA 发布的《全球氢能评论 2024》,氢能已在技术突破、产业链构建、政策支持等方面取得了显著进展,同时在多个领域得到了广泛应用,展现出巨大的发展潜力与广阔的市场前景。根据国际氢能委员会的预测,从 2030 年起,全球将迈入大规模使用氢能的时代。2023 年,全球氢气需求量超过 $9\,700\times 10^4\text{ t}$,到 2030 年绿氢年产量可能达 $4\,900\times 10^4\text{ t/a}$ 。炼油化工行业是当前氢气需求的集中领域,在重工业、长途运输及储能等其他领域的需求均呈现较快增速^[68]。中国是全球最大的氢气需求国,占全球需求量的 29%,当前年产能超过 $4\,900\times 10^4\text{ t}$ 。根据《绿色氢能产业发展白皮书(2024)》,截至 2023 年底,中国已建成电解水制氢项目 58 个,年产能达到 $7.8\times 10^4\text{ t}$,较上年增长了 $3.7\times 10^4\text{ t}$,占全球已建成产能的 60%。氢气主要是通过高压储罐、液态槽罐、管道 3 种方式进行输送,依据输氢距离、用氢需求及终端用户分布情况,考虑到经济性与环保性,利用管道长距离、大规模输送氢气是较为高效且经济的方式^[69]。中国正在推进“西氢东送”管网规划工作,积极开展掺氢天然气管道、纯氢管道等试点示范。然而,受氢气理化特性限制,纯氢输送的成本较高,难以满足氢能规模化发展。因此,利用天然气管道掺氢输送是一种低成本的方式,可以提高能源系统的整体利用率^[70]。目前,中国“朝阳可再生能源掺氢示范项目第一阶段工程”和“陕宁一线掺氢示范项目”的掺氢比均约为 5%,在包头市正式开工的固阳—

白云鄂博输气管道具备掺氢能力 20%,宁夏银川宁东天然气掺氢管道的掺氢比已逐步达到 24%。上述这些项目初步验证了天然气管道掺氢输送的可行性,有效解决了氢气规模化输送的难题。

随着氢气需求量的快速增长、绿氢项目数量与规模的持续扩大,现有氢气运输方式及能力已难以满足。一方面,纯氢管道建设正成为绿氢项目基地与化工厂、炼厂间运输氢气的经济化途径,助力工业领域氢能替代化石能源,推动合成氨、合成甲醇、炼化、煤制油气等行业由高碳工艺向低碳工艺转变;另一方面,利用现有天然气管网进行掺氢输送具有输送容量大、覆盖范围广、传输距离远、成本较低等诸多优势,可为实现氢能的低成本、规模化供应提供有力支持。完善的输氢管道网络是破除绿氢消纳瓶颈、实现可再生能源跨地域调配的必要支撑。2024 年已有超过 10 个输氢管道项目取得了立项进展。据中国产业发展促进会氢能分会预测,到 2030 年,中国各类输氢管道建成总里程将突破 5 000 km。除传统钢制管道外,国家管网集团正开展非金属管道纯氢输送可行性研究,其在 2023 年 6 月首次完成了 9.45 MPa 全尺寸非金属管道纯氢爆破试验^[71],为中国实现大规模、低成本的远距离纯氢运输提供了技术支撑。

5.3.2 氢能载体

在氢气管输发展的同时,为进一步提高储运过程安全性、便捷性及经济性,将甲醇、氨作为氢能载体的“液态阳光”和“氨-氢”能源路线受到了广泛关注^[72]。随着高效合成氨、低温氨分解及二氧化碳加氢气合成醇等核心技术的成熟,可开发出氨/醇-氢燃料电池发电站、分布式移动电源、氨/醇现场制氢-加氢一体化装置、氨-氢燃料电池载重卡车、氨/醇-氢燃烧内燃机与远洋船舶系统等,这些应用场景为甲醇与氨储运提出了需求^[73]。国际海事组织通过《2023 年船舶温室气体减排战略》明确指出,截至 2030 年,国际航运单次运输任务的二氧化碳排放量要比 2008 年平均减少 40% 以上;到 2050 年前后,实现温室气体净零排放,绿色甲醇、绿氨将成为潜在解决方案。绿色甲醇以生物质或绿氢加可再生二氧化碳为原料,作为低碳燃料,成为短期内最具潜力的需求增长点^[74]。中国绿色甲醇规划的产能已超过 $1\,000\times 10^4\text{ t}$,预计 2026 年将进入绿色甲醇量产到使用的快速增长期。《“十四五”新型储能发展实施方案》强调了氨的氢基储能属性,将可再生

能源制氢(氨)作为“十四·五”新型储能技术试点示范。对于新兴的绿色甲醇、绿氨, 根据规划布局, 资源端主要分布在风光资源较好的西北、东北等地区, 应用端主要分布在经济发达的华南、华东、西南等地区, 产业资源与消费市场空间错位。甲醇、液氨长输管道具有运输成本与损耗低、节能安全、稳定性高等特点, 是解决甲醇、液氨运输矛盾的极佳选择^[75]。

2060年前, “双碳”目标要求中国非化石能源占比提高到80%以上, 新能源不稳定性带来的消纳难题也有望通过制取绿色甲醇、绿氨缓解。当前氢能产业发展的关键掣肘为中间的运输环节, 运输成本约占整体成本的1/3, 导致终端用氢价格偏高。依托“西氢东送”网络规划, 绿色甲醇、绿氨运输呈现由西向东、由北向南走向, 通过新型能源管输体系的构建, 可实现规模化管道输送, 降低运输成本。一方面, 绿色甲醇、绿氨的资源流向与油品流向高度契合, 融合已有管道储运设施输送甲醇、液氨具有较大潜力^[51]; 另一方面, 东北地区绿色甲醇、绿氨资源同样可由海路运输至华东、华南地区, 借由“沿海内送”油品管道输送至消费地^[76]。国家管网集团所辖多家单位正联合开展成品油管道顺序输送甲醇工业性试验, 以期进一步激发油气管道在多能融合新型能源体系建设中的作用。

5.4 二氧化碳

减缓全球气候变化进程、推动低碳发展已成为全球各个国家的重要任务之一^[77]。通过从工业生产或者煤/电厂中将二氧化碳分离, 并在其他生产过程中进行利用, 是降碳减排最高效的方法^[78]。这已经得到了国际可再生能源机构(International Renewable Energy Agency, IRENA)发布的《Global renewables outlook: Energy transformation 2050》、IEA发布的《Transforming industry through CCUS》的证实。CCUS作为实现碳中和目标的重要技术, 不仅是化石能源低碳利用的技术选择、保持电力系统灵活性的重要手段, 也是钢铁、水泥、化工等碳减排难度较大行业的可行性技术方案^[79]。2022年, 中国首个百万吨级CCUS项目——“齐鲁石化-胜利油田百万吨级CCUS项目”正式注气运行, 标志着中国CCUS产业开始进入成熟的商业化运营。2023年, 总投资 102×10^8 元、年产量 300×10^4 t/a的CCUS示范项目在宁夏宁东基地全面开工建设。该项目在全球首次实现了现代煤化工与大型油气田开采之间的绿色减碳合作, 建成后将作为中国最大CCUS全

产业链示范基地。根据《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)》, 中国已投运、规划建设中的CCUS示范项目规模明显扩大, 10×10^4 t级及以上项目超过40个, 其中 50×10^4 t级及以上项目超过10个, 现有年捕集能力超过 700×10^4 t。中国石油、华能集团、中国石化是建设主力企业。《中国CCUS技术发展路线图》显示, 到2025年, 中国CCUS技术二氧化碳年利用封存量将达到 900×10^4 t以上, 有望在2030年后成为中国由传统能源结构向低碳多元供能体系转变的重要技术保障, 可为构建化石能源与可再生能源协同互补的多元供能体系发挥重要作用。

二氧化碳运输作为CCUS产业链的重要环节, 长距离二氧化碳管道的建设、超临界及密相输送技术的发展能够为其提供运输保障与技术基石^[80-81]。2050年中国将建成 2×10^4 km以上的陆上二氧化碳管道, 年输送能力超过 10×10^8 t。预计2060年中国陆上二氧化碳管道将满足主要工业产业聚集地区与封存靶区之间的运输需求。结合全球能源互联网发展合作组织的预测, 中国二氧化碳管道以南北纵向分布为主, 主要路径包括广东—江西、云南—四川—重庆、上海—浙江—江西—湖南—广西、陕西—山西—内蒙古、山东—河北—北京、河北—辽宁—吉林—黑龙江等^[82]。此外, 伴随着老油田驱油增产、绿色甲醇制备的需求增长, 二氧化碳管道与传统油气管道、甲醇管道之间协同发展的愿景也将逐步实现。

5.5 LNG与冷能

LNG凭借其清洁低碳、便于储存运输等特点, 在降碳减排、加速能源转型及保障能源安全方面具有重要战略意义, 其使用量正以每年约10%的增长率高速增长, 快于天然气的消费增长速度, 成为全球增长最迅猛的能源行业之一。近年来, 地缘政治格局的深刻变化与能源转型的迫切需求使得LNG在能源市场中的作用日趋凸显。据《壳牌液化天然气(LNG)前景报告2024》预测, 全球LNG市场仍将持续增长至2040年。中国高速增长的天然气用能需求, 促使资源供应企业大量采购进口LNG资源弥补国内局部及高峰期用气缺口。国家管网集团成立以来, LNG接收站建设速度进一步加快。2023年, 中国新建LNG接收站投产运行4座、扩建2座, 新增LNG年接收能力 $1\,880\times 10^4$ t, 总年接收能力达 1.23×10^8 t^[83]。LNG需经气化后供给用户, 每吨LNG释放冷能约240 kW·h。

然而,目前中国 LNG 通常在接收站内与海水进行换热气化,再利用站外天然气管道输送至需求地,该方式不仅破坏海洋生态环境,还造成了大量高品位冷能资源的浪费。2023 年中国进口 LNG 蕴含的冷能超过 1.15×10^{11} MJ,最大理论发电量可达 1.68×10^{10} kW·h,但 LNG 接收站冷能利用率不到 10%。中国冷能需求存在地理分布广且规模不一的问题,导致 LNG 气化与冷能利用时空错位严重^[84]。与气态管输相比,液态输送具有能量密度高、运输成本低等优势。因此,发展以 LNG 管道运输为主体的综合输送网络对于实现大规模天然气运输、冷能的高效利用具有重要意义^[42]。

2023 年,国家自然科学基金委设立了“双碳”专项项目“融合 LNG 管输的多网系统协同优化与冷能梯级利用研究”,将对 LNG 管输进行前瞻性探索,为多能协同的管网规划、管道设计奠定了基础,以全面发挥 LNG 在“双碳”中的作用。此外,LNG 管网可与天然气管网、城市冷网、电网等深度耦合,促进多能融合新型能源体系的跨越式发展。

6 结束语

在多能融合新型能源体系建设过程中,油气管道的内涵不断延伸,仍将是能源运输环节的关键纽带,在维持能源供应韧性与可靠性的基础上助力“双碳”目标实现。通过综合梳理中国多能融合与油气管道发展政策,从油气资源优化配置、油气能源供应保障、油气市场新格局的形成及综合立体交通体系建设等方面,全面分析了油气管道对能源资源配置的关键作用。通过“五新”内涵展望油气管道的灵活赋能发展,并分别从油气资源、生物燃料、氢能、二氧化碳、LNG 与冷能 5 个方面全面厘清了油气管道在多能融合新型能源体系建设中所扮演的角色。油气管道对于构建多能融合新型能源体系有着积极的促进作用,多元、协同的管道网络能够加快新型能源体系的建设,未来应持续推进传统能源与新能源的融合储运技术研究,催生油气管道未来新业态。

参考文献:

- [1] 李阳,薛兆杰,程喆,蒋海军,王濡岳.中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J].中国石油勘探,2020,25(1):45-57. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2020.01.005.
- [2] LIN Y Y, CHEUNG A W K. Climate policy uncertainty and energy transition: Evidence from prefecture-level cities in China[J]. Energy Economics, 2024, 139: 107938. DOI: 10.1016/j.eneco.2024.107938.
- [3] 章姝,马培博,郑馨竺,朱潜挺,唐旭.绿色低碳转型背景下能源安全评估体系重构与启示[J].中国工程科学,2024,26(4):28-39. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.04.016.
- [4] 王震,孔盈皓.油气管网服务新型能源体系建设的创新路径[J].油气储运,2024,43(10):1081-1088. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.10.001.
- [5] 李金铠,刘守临,张瑾.加快新型能源体系建设,以绿色化、低碳化、生态化推进中国式现代化[J].生态经济,2023,39(6):13-17.
- [6] 王国荣,周莉,周守为,刘清友,张政,钟林,等.多种能源融合发展战略研究[J].中国工程科学,2024,26(4):84-95. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.04.002.
- [7] 蔡睿,朱汉雄,李婉君,肖宇,刘中民.“双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究[J].中国科学院院刊,2022,37(4):502-510. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220215001.
- [8] 李承周,王宁玲,窦潇潇,杨志平,王利刚,杨勇平.多能源互补

- 分布式能源系统集成研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7127–7149. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.220667](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220667).
- LI C Z, WANG N L, DOU X X, YANG Z P, WANG L G, YANG Y P. Review and prospect on the system integration of distributed energy system with the complementation of multiple energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7127–7149.
- [9] 孙文文, 何国庆. 基于能流图和碳流图的我国能源结构转型分析及展望[J]. 分布式能源, 2022, 7(4): 10–17. DOI: [10.16513/j.2096-2185.DE.2207402](https://doi.org/10.16513/j.2096-2185.DE.2207402).
- SUN W W, HE G Q. Analysis and prospect of China's energy structure transformation based on energy flow chart and carbon flow chart[J]. Distributed Energy, 2022, 7(4): 10–17.
- [10] 马华, 方叶兵, 贝亦明, 刘琪, 方显唯, 曹卫东. 中国可再生能源发展水平时空分异特征及影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(6): 1131–1142. DOI: [10.13209/j.0479-8023.2024.079](https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2024.079).
- MA H, FANG Y B, BEI Y M, LIU Q, FANG X W, CAO W D. Spatio-temporal differentiation characteristics and influencing factors of China's renewable energy development level[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2024, 60(6): 1131–1142.
- [11] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. (2025-01-01)[2025-04-14]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- National Bureau of Statistics. National data[EB/OL]. (2025-01-01)[2025-04-14]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [12] JIE D F, XU X Y, GUO F. The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies[J]. Energy, 2021, 220: 119644. DOI: [10.1016/j.energy.2020.119644](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119644).
- [13] LIU J Z, WANG Q H, SONG Z Q, FANG F. Bottlenecks and countermeasures of high-penetration renewable energy development in China[J]. Engineering, 2021, 7(11): 1611–1622. DOI: [10.1016/j.eng.2020.08.016](https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.016).
- [14] 宋鹏飞, 张超, 肖立, 侯建国, 王修康, 王秀林. 对天然气产业与氢能产业融合发展的战略思考[J]. 油气与新能源, 2023, 35(2): 37–45. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2023.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2023.02.005).
- SONG P F, ZHANG C, XIAO L, HOU J G, WANG X K, WANG X L. Strategic thinking of the integrated development of natural gas industry and hydrogen industry[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(2): 37–45.
- [15] HOSSEINI S E, WAHID M A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: promising green energy carrier for clean development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 850–866. DOI: [10.1016/j.rser.2015.12.112](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112).
- [16] 吴显法. 绿色甲醇作为航运脱碳燃料的现状与供应链分析[J]. 天津航海, 2023(3): 74–78. DOI: [10.3969/j.issn.1005-9660.2023.03.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9660.2023.03.024).
- WU X F. Status and supply chain analysis of green methanol as a decarbonized fuel for shipping[J]. Tianjin of Navigation, 2023(3): 74–78.
- [17] 李丽旻. 低零碳趋势催热氨动力船[N/OL]. 中国能源报, 2023-04-01[2025-04-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1761952872129894283&wfr=spider&for=pc>.
- LI L M. Low-zero-carbon trend fuelling ammonia-powered vessels[N/OL]. China Energy News, 2023-04-01[2025-04-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1761952872129894283&wfr=spider&for=pc>.
- [18] CHERWOO L, GUPTA I, FLORA G, VERMA R, KAPIL M, ARYA S K, et al. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 60: 103503. DOI: [10.1016/j.seta.2023.103503](https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503).
- [19] HASSAN Q, VIKTOR P, AL-MUSAWI T J, MAHMOOD ALI B, ALGBURI S, ALZOUBI H M, et al. The renewable energy role in the global energy Transformations[J]. Renewable Energy Focus, 2024, 48: 100545. DOI: [10.1016/j.ref.2024.100545](https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545).
- [20] 李彦斐, 于宏源. 构建中国新能源战略通道安全: 基于大国竞争视角[J]. 国际关系研究, 2023(6): 60–80.
- LI Y F, YU H Y. Building international strategic corridors of renewable electricity and hydrogen energy for security: in the perspective of great power competition[J]. Journal of International Relations, 2023(6): 60–80.
- [21] YUAN M, ZHANG H R, WANG B H, ZHANG Y, ZHOU X Y, LIANG Y T. Future scenario of China's downstream oil reform: Improving the energy-environmental efficiency of the pipeline networks through interconnectivity[J]. Energy Policy, 2020, 140: 111403. DOI: [10.1016/j.enpol.2020.111403](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111403).
- [22] 国家管网. 20年坚守践初心[EB/OL]. (2022-10-02)[2025-04-14]. https://mp.weixin.qq.com/s/9qQwqgTIXiCQ_fJIGZJ7rA.
- PipeChina. 20 years of perseverance and practice[EB/OL]. (2022-

- 10-02)[2025-04-14]. https://mp.weixin.qq.com/s/9qQwqgTIXiCQ_fJIGZJ7rA.
- [23] 李秋扬, 赵明华, 张斌, 温文, 王乐乐, 张雪琴, 等. 2020 年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1330–1337, 1348. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.002).
- LI Q Y, ZHAO M H, ZHANG B, WEN W, WANG L L, ZHANG X Q, et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(12): 1330–1337, 1348.
- [24] 李琪. “丝绸之路”的新使命: 能源战略通道: 我国西北与中亚国家的能源合作与安全[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2007, 27(2): 77–83. DOI: [10.3969/j.issn.1008-245X.2007.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-245X.2007.02.012).
- LI Q. New mission of the “Silk Road”: an energy strategy channel: energy cooperation and security of northwestern China with central Asian countries[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2007, 27(2): 77–83.
- [25] 陈朋超, 马云宾, 张斌, 关中原, 刘啸奔, 陈锋. 现代管道运输系统构建与发展[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 8–18. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.001](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.001).
- CHEN P C, MA Y B, ZHANG B, GUAN Z Y, LIU X B, CHEN F. Construction and development of modern pipeline transportation system[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(2): 8–18.
- [26] 严斌, 付晓东, 张鹏, 孙鸿玲, 甄国君. 汶川地震后兰成渝成品油管道桥梁的检测与评估[J]. 工程科学与技术, 2009, 41(增刊 1): 32–36. DOI: [10.15961/j.jsuese.2009.s1.013](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.2009.s1.013).
- YAN B, FU X D, ZHANG P, SUN H L, ZHEN G J. Inspection and evaluation of bridges on “Lanzhou–Chengdu–Chongqing” oil pipeline after Wenchuan earthquake[J]. Advanced Engineering Sciences, 2009, 41(S1): 32–36.
- [27] 张昊, 涂仁福, 张旭, 杨心怡, 苏艺薇, 夏玉恒. 运输市场竞争下成品油管道效能评价[J]. 油气储运, 2024, 43(10): 1180–1188. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.10.011](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.10.011).
- ZHANG H, TU R F, ZHANG X, YANG X Y, SU Y W, XIA Y H. Efficiency evaluation of product oil pipeline under transportation market competition[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(10): 1180–1188.
- [28] 张伟. 发挥油气管网作用保障国家能源安全[J]. 求是, 2022(20): 58–62.
- ZHANG W. Playing the role of oil and gas pipeline network to ensure national energy security[J]. QIUSHI, 2022(20): 58–62.
- [29] 杨宏伟, 刘方, 韩银杉. 天然气管网互联互通用户侧供需平衡仿真分析[J]. 油气储运, 2023, 42(4): 473–480. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.04.013](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.04.013).
- YANG H W, LIU F, HAN Y S. Simulation analysis of supply-demand balance on users side by natural gas pipeline network interconnection[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(4): 473–480.
- [30] 丁玲, 罗炜. 当前军队油料供应安全面临的问题及应对策略[J]. 军事经济研究, 2013, 34(2): 69–72.
- DING L, LUO W. Problems facing the current security of the army’s fuel supply and strategies for coping with them[J]. Military Economic Research, 2013, 34(2): 69–72.
- [31] 黄军, 宋志强, 张莹. 军用油料运输安全风险分析与管控探析[J]. 中国储运, 2017(5): 109–110. DOI: [10.16301/j.cnki.cn12-1204/f.2017.05.043](https://doi.org/10.16301/j.cnki.cn12-1204/f.2017.05.043).
- HUANG J, SONG Z Q, ZHANG Y. Exploration of security risk analysis and control of military oil transportation[J]. China Storage & Transport, 2017(5): 109–110.
- [32] 李炬董. 外军军事能源保障技术研究及启示[J]. 中国储运, 2021(8): 205–206. DOI: [10.16301/j.cnki.cn12-1204/f.2021.08.106](https://doi.org/10.16301/j.cnki.cn12-1204/f.2021.08.106).
- LI X D. Research on foreign military energy security technology and revelation[J]. China Storage & Transport, 2021(8): 205–206.
- [33] 梁永图, 廖绮, 邱睿, 涂仁福, 邵奇, 沈亮. 市场化改革背景下成品油管网运营关键技术及展望[J]. 油气储运, 2023, 42(9): 978–987, 1008. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.003).
- LIANG Y T, LIAO Q, QIU R, TU R F, SHAO Q, SHEN L. Key operation technologies and prospects to product oil pipeline network under market-oriented reform[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 978–987, 1008.
- [34] 宫敬, 于达. 国家管网公司旗下成品油管道运营模式探讨[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(4): 87–91. DOI: [10.3969/j.issn.1672-6952.2020.04.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6952.2020.04.012).
- GONG J, YU D. To our country products pipeline construction of what time thinking[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2020, 40(4): 87–91.
- [35] 唐云霓, 闫如雪, 周艳玲. 碳中和愿景下能源政策的结构表征与优化路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(1): 1–14. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.21.036](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.21.036).
- TANG Y N, YAN R X, ZHOU Y L. Structural representation and optimization path of energy policy under the carbon neutral vision[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(1): 1–14.

- [36] CARDINALE R. The profitability of transnational energy infrastructure: a comparative analysis of the Greenstream and Galsi gas pipelines[J]. *Energy Policy*, 2019, 131: 347–357. DOI: [10.1016/j.enpol.2019.03.040](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.040).
- [37] 冯陈玥. 北溪管道断供后的全球液化天然气市场及贸易格局[J]. *国际石油经济*, 2023, 31(12): 67–73. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2023.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2023.12.009).
- FENG C Y. Global LNG market and trade landscape after Nord Stream pipeline shut-down[J]. *International Petroleum Economics*, 2023, 31(12): 67–73.
- [38] 卢春房, 卢炜. 综合立体交通运输体系发展策略[J]. *铁道学报*, 2022, 44(1): 1–7. DOI: [10.3969/j.issn.1001-8360.2022.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2022.01.001).
- LU C F, LU W. Development strategies of comprehensive stereoscopic transportation system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(1): 1–7.
- [39] 刘洋, 欧阳斌, 杨雪英, 费文鹏, 王雪成, 苏昊通. 综合交通各种运输方式技术经济特征与比较优势研究[J]. *交通运输研究*, 2023, 9(4): 32–45. DOI: [10.16503/j.cnki.2095-9931.2023.04.003](https://doi.org/10.16503/j.cnki.2095-9931.2023.04.003).
- LIU Y, OUYANG B, YANG X Y, FEI W P, WANG X C, SU H T. Technical and economic characteristics and comparative advantages of various transportation modes in comprehensive transportation[J]. *Transport Research*, 2023, 9(4): 32–45.
- [40] 王之中, 皮大伟, 吴兵. 交通与运载工程学科践行板块改革侧记[J]. *中国科学基金*, 2023, 37(1): 115–119. DOI: [10.16262/j.cnki.1000-8217.20221020.004](https://doi.org/10.16262/j.cnki.1000-8217.20221020.004).
- WANG Z Z, PI D W, WU B. Sidelights on the reform of transportation and vehicle engineering discipline[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(1): 115–119.
- [41] 宫敬. 从旁接油罐到管网联运再到智能调控: 中国输油管道工艺技术 50 年发展回顾与展望[J]. *油气储运*, 2020, 39(8): 841–850. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2020.08.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2020.08.001).
- GONG J. Review and outlook for development of oil pipeline technology in the past 50 years in China, from floating tank process to joint operation of pipeline network and further to intelligent control[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(8): 841–850.
- [42] 梁永图, 邱睿, 涂仁福, 杜渐, 廖绮, 邵奇. 中国油气管网运行关键技术及展望[J]. *石油科学通报*, 2024, 9(2): 213–223. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016).
- LIANG Y T, QIU R, TU R F, DU J, LIAO Q, SHAO Q. Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(2): 213–223.
- [43] 郝宇, 张宗勇, 廖华. 中国能源“新常态”: “十三五”及 2030 年能源经济展望[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2016, 18(2): 1–7. DOI: [10.15918/j.jbitss1009-3370.2016.0201](https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2016.0201).
- HAO Y, ZHANG Z Y, LIAO H. China's energy “new normal”: the forecasts for energy economy during the “13th Five-Year plan” and by 2030[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2016, 18(2): 1–7.
- [44] 张浩然, 邱睿, 杜渐, 魏雪梅, 温凯, 涂仁福. 管网灵活运输关键技术与展望[J]. *前瞻科技*, 2024, 3(2): 30–38. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.003](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.003).
- ZHANG H R, QIU R, DU J, WEI X M, WEN K, TU R F. Key technologies and prospects for flexible pipeline network transportation[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(2): 30–38.
- [45] 陈朋超. “双碳”愿景下管网多介质灵活输运与智能化高效利用发展战略思考[J]. *油气储运*, 2023, 42(7): 721–730. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.07.001).
- CHEN P C. Strategic thinking on pipeline network development for flexible multi-media transport and intelligent efficient utilization under dual carbon vision[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(7): 721–730.
- [46] 黄维和, 宫敬, 王军. 碳中和愿景下油气储运学科的任务[J]. *油气储运*, 2022, 41(6): 607–613. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.002).
- HUANG W H, GONG J, WANG J. Tasks of oil & gas storage and transportation discipline under the vision of carbon neutrality[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(6): 607–613.
- [47] 黄维和, 沈鑫, 郝迎鹏. 中国油气管网与能源互联网发展前景[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2019, 21(1): 1–6. DOI: [10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.3518](https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.3518).
- HUANG W H, SHEN X, HAO Y P. Prospects of China's oil and gas pipeline network and energy Internet development[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2019, 21(1): 1–6.
- [48] 宫敬, 宋尚飞, 魏生远, 史博会, 张引弟. 管道运输对能源供应链韧性和安全性的关键作用[J]. *前瞻科技*, 2024, 3(2): 19–29. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.002](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.002).
- GONG J, SONG S F, WEI S Y, SHI B H, ZHANG Y D. Key role

- of pipeline transportation in resilience and security of energy supply chain[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(2): 19–29.
- [49] 涂仁福, 张雪琴, 邱睿, 许丹, 廖绮, 徐宁, 等. 成品油一次物流优化与协调方法研究进展[J]. *油气储运*, 2023, 42(11): 1228–1241. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.11.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.11.003).
TU R F, ZHANG X Q, QIU R, XU D, LIAO Q, XU N, et al. Research progress on optimization and coordination methods for primary distribution of refined oil[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(11): 1228–1241.
- [50] 黄鑫, 滕霖, 聂超飞, 刘罗茜, 闫锋, 邱姝娟, 等. 液氨/甲醇/成品油顺序输送技术研究进展[J]. *油气储运*, 2023, 42(12): 1337–1351. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.003).
HUANG X, TENG L, NIE C F, LIU L Q, YAN F, QIU S J, et al. Research progress on batch transportation technology of liquid ammonia/methanol/product oil[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(12): 1337–1351.
- [51] TU R F, LIU C Y, SHAO Q, LIAO Q, QIU R, LIANG Y T. Pipeline sharing: optimal design of downstream green ammonia supply systems integrating with multi-product pipelines[J]. *Renewable Energy*, 2024, 223: 120024. DOI: [10.1016/j.renene.2024.120024](https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120024).
- [52] 程晓龙, 刘垂祥, 况新亮, 罗玉婷, 杨志威. “碳中和”背景下的中国成品油消费现状及未来发展分析[J]. *化工管理*, 2022(10): 11–13. DOI: [10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2022.10.004](https://doi.org/10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2022.10.004).
CHENG X L, LIU C X, KUANG X L, LUO Y T, YANG Z W. Analysis on the current situation and development trend of China's refined oil consumption under the background of “carbon neutralization” [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2022(10): 11–13.
- [53] 涂仁福, 徐宁, 刘静, 黄晓茵, 廖绮, 梁永图. 考虑运行平稳性的成品油管道调度方法[J]. *石油科学通报*, 2022, 7(3): 447–456. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.039).
TU R F, XU N, LIU J, HUANG X Y, LIAO Q, LIANG Y T. A scheduling method for products pipeline considering operation stability[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(3): 447–456.
- [54] TU R F, ZHANG H, XU B, HUANG X Y, CHE Y Y, DU J, et al. Machine learning application in batch scheduling for multi-product pipelines: a review[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2024, 4(3): 100180. DOI: [10.1016/j.jpse.2024.100180](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100180).
- [55] TU R F, ZHANG H, XU S Y, FU G T, LI Z B, LIAO Q, et al. Pipeline sharing: boosting multi-product pipeline transport biofuels in the shift to low-carbon energy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 437: 140663.
- [56] 国家管网. 做大一张网 做实一中心 做强一公司 国家管网集团着力深化油气管网运营机制改革“下半篇文章” [EB/OL]. (2022-05-27)[2025-04-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/UgZYkeGHTIVrqU25I4vK9Q>.
PipeChina. Make a network bigger, make a centre stronger, make a company stronger, PipeChina focuses on deepening the reform of oil and gas pipeline network operation mechanism “the second half of the article” [EB/OL]. (2022-05-27)[2025-04-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/UgZYkeGHTIVrqU25I4vK9Q>.
- [57] 段天宇, 徐博, 张愉. “十四五”中国天然气管网发展趋势分析[J]. *世界石油工业*, 2020, 27(3): 5–12. DOI: [10.20114/j.issn.1006-0030.2020.03.002](https://doi.org/10.20114/j.issn.1006-0030.2020.03.002).
DUAN T Y, XU B, ZHANG Y. Analysis of the development trend of natural gas pipeline network in China during the 14th Five-Year Plan[J]. *World Petroleum Industry*, 2020, 27(3): 5–12.
- [58] GÜRSAN C, DE GOOYERT V. The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition?[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110552. DOI: [10.1016/j.rser.2020.110552](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110552).
- [59] 高振宇, 张慧宇, 高鹏. 2022 年中国油气管道建设新进展[J]. *国际石油经济*, 2023, 31(3): 16–23. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2023.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2023.03.003).
GAO Z Y, ZHANG H Y, GAO P. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2022[J]. *International Petroleum Economics*, 2023, 31(3): 16–23.
- [60] LIU W Y, LI X F, HU J Q, WU K L, SUN F R, SUN Z, et al. Research on flow assurance of deepwater submarine natural gas pipelines: hydrate prediction and prevention[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 61: 130–146. DOI: [10.1016/j.jlp.2019.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.06.007).
- [61] 张博, 梁永图, 魏雪梅, 徐宁, 廖绮, 邱睿. 不同边界条件下掺氢对天然气管网运行工况的影响分析[J]. *石油科学通报*, 2024, 9(5): 808–818. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.062](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2024.05.062).
ZHANG B, LIANG Y T, WEI X M, XU N, LIAO Q, QIU R. Analysis of the influence of hydrogen blending on the operation of natural gas pipeline network under different boundary conditions[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(5): 808–818.

- [62] MAHAPATRA S, KUMAR D, SINGH B, SACHAN P K. Biofuels and their sources of production: a review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus[J]. *Energy Nexus*, 2021, 4: 100036. DOI: [10.1016/j.nexus.2021.100036](https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100036).
- [63] LOMBARDELLI G, SCACCABAROZZI R, CONVERSANO A, GATTI M. Bio-methanol with negative CO₂ emissions from residual forestry biomass gasification: modelling and techno-economic assessment of different process configurations[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 188: 107315. DOI: [10.1016/j.biombioe.2024.107315](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107315).
- [64] MAHMUDUL H M, HAGOS F Y, MAMAT R, ADAM A A, ISHAK W F W, ALENEZI R. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 497–509. DOI: [10.1016/j.rser.2017.01.001](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001).
- [65] JOHNSON A, SMITH J, WILLIAMS P. Sustainable aviation fuels from biomass and biowaste: Catalytic conversion and process challenges[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 358: 132589. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.132589](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.132589).
- [66] TU R F, LIAO Q, XU N, WEI X M, WANG Y, LIANG Y T, et al. Pipeline sharing: potential capacity analysis of biofuel transportation through existing pipelines[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 398: 136507. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.136507](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136507).
- [67] 杨智超, 曹祎展. 成品油管道顺序输送航煤及混油界面检测技术的研究进展[J]. *当代化工研究*, 2024(18): 27–29. DOI: [10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.18.009](https://doi.org/10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.18.009).
- YANG Z C, CAO Y Z. Development status of aviation kerosene transportation technology in finished oil pipeline[J]. *Modern Chemical Research*, 2024(18): 27–29.
- [68] 朱旭敏, 冯连勇. 中国炼化行业氢能利用绿色化发展前景分析[J]. *国际石油经济*, 2024, 32(7): 69–75, 112. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2024.07.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2024.07.008).
- ZHU X M, FENG L Y. Prospect of greening hydrogen energy utilization in China's refining and chemical industry[J]. *International Petroleum Economics*, 2024, 32(7): 69–75, 112.
- [69] 杨静, 王晓霖, 李遵照, 董经发, 冯灿. 氢气长距离管输技术现状与探讨[J]. *压力容器*, 2021, 38(2): 80–86. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4837.2021.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4837.2021.02.012).
- YANG J, WANG X L, LI Z Z, DONG J F, FENG C. Present status and discussion of long-distance pipeline hydrogen transportation technology[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2021, 38(2): 80–86.
- [70] 李敬法, 苏越, 张衡, 宇波. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. *天然气工业*, 2021, 41(4): 137–152. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2021.04.015](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2021.04.015).
- LI J F, SU Y, ZHANG H, YU B. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(4): 137–152.
- [71] 王佳宁. 我国首次高压多管材纯氢试验取得成功[N/OL]. 新华网, 2023-06-27[2025-04-14]. https://www.xinhuanet.com/2023-06/27/c_1129718475.htm.
- WANG J N. China's first high-pressure multi-pipe pure hydrogen test succeeds[N/OL]. *Xinhua News*, 2023-06-27[2025-04-14]. https://www.xinhuanet.com/2023-06/27/c_1129718475.htm.
- [72] 郑可昕, 高啸天, 范永春, 罗志斌, 李震, 郑赞, 等. 支撑绿氢大规模发展的氨、甲醇技术对比及应用发展研究[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 63–73. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.007).
- ZHENG K X, GAO X T, FAN Y C, LUO Z B, LI Z, ZHENG Y, et al. Comparison and application prospects of ammonia and methanol technologies supporting large-scale development of green hydrogen energy[J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(3): 63–73.
- [73] 白建明, 张弛. 氢氨醇产业现状及发展前景[J]. *石油石化绿色低碳*, 2024, 9(5): 1–6, 84. DOI: [10.20131/j.cnki.syshlsdt.2024.05.003](https://doi.org/10.20131/j.cnki.syshlsdt.2024.05.003).
- BAI J M, ZHANG C. Current situation and development prospects of hydrogen, ammonia and methanol industry energy[J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2024, 9(5): 1–6, 84.
- [74] 杨一方, 欧训民, 刘建喆. 绿色甲醇的技术进展与应用前景[J]. *科技中国*, 2024(8): 60–66.
- YANG Y F, OU X M, LIU J Z. Technical progress and application prospects of green methanol[J]. *Scitech in China*, 2024(8): 60–66.
- [75] 聂超飞, 姜子涛, 刘罗茜, 左丽丽, 苗青, 李博生, 等. 甲醇管道输送技术发展现状及挑战[J]. *油气储运*, 2024, 43(2): 153–162. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.02.004](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.02.004).
- NIE C F, JIANG Z T, LIU L Q, ZUO L L, MIAO Q, LI B S, et al. Current status and challenges in technology development for methanol pipeline transmission[J]. *Oil & Gas Storage and*

- Transportation, 2024, 43(2): 153–162.
- [76] 涂仁福, 梁永图, 邵奇, 廖绮, 邱睿, 张昊, 等. 绿氨-成品油综合运输系统适应性分析与规划[J]. 油气储运, 2024, 43(4): 361–372. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.001).
- TU R F, LIANG Y T, SHAO Q, LIAO Q, QIU R, ZHANG H, et al. Adaptability analysis and planning of green ammonia and product oil integrated transmission system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(4): 361–372.
- [77] AFIFA, ARSHAD K, HUSSAIN N, ASHRAF M H, SALEEM M Z. Air pollution and climate change as grand challenges to sustainability[J]. Science of the Total Environment, 2024, 928: 172370. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.172370](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172370).
- [78] 张力为, 甘满光, 王燕, 付晓娟, 刘思楠, 李小春. 二氧化碳捕集利用-可再生能源发电调峰耦合技术[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 24–32. DOI: [10.19666/j.rld.202008224](https://doi.org/10.19666/j.rld.202008224).
- ZHANG L W, GAN M G, WANG Y, FU X J, LIU S N, LI X C. Coupled technology of carbon dioxide capture and utilization and renewable power peak shaving[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 24–32.
- [79] 栗楠, 周朝阳, 司纪朋, 李江华. 国内外 CCUS 发展对比分析与启示建议[J]. 中国电力企业管理, 2021(34): 54–56. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3361.2021.34.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3361.2021.34.015).
- LI N, ZHOU C Y, SI J P, LI J H. Comparative analysis of CCUS development at home and abroad and inspirational suggestions[J]. China Power Enterprise Management, 2021(34): 54–56.
- [80] 黄维和, 李玉星, 陈朋超. 碳中和愿景下中国二氧化碳管道发展战略[J]. 天然气工业, 2023, 43(7): 1–9. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2023.07.001](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2023.07.001).
- HUANG W H, LI Y X, CHEN P C. China's CO₂ pipeline development strategy under the strategy of carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(7): 1–9.
- [81] 马赞, 赵黎. 双碳背景下二氧化碳输送管道智能化技术应用及探索[J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(4): 87–94. DOI: [10.12388/j.issn.1673-2677.2024.04.011](https://doi.org/10.12388/j.issn.1673-2677.2024.04.011).
- MA Y, ZHAO L. Applications and exploration of intelligence technology for CO₂ transportation pipelines in the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(4): 87–94.
- [82] 赵小令, 肖晋宇, 侯金鸣, 吴佳玮, 吕循岩, 张瑾轩, 等. 中国二氧化碳捕集利用和封存技术经济性与规模预测[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 657–668. DOI: [10.11698/PED.2022.0793](https://doi.org/10.11698/PED.2022.0793).
- ZHAO X L, XIAO J Y, HOU J M, WU J W, LYU X Y, ZHANG J X, et al. Economic and scale prediction of CO₂ capture, utilization and storage technologies in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 657–668.
- [83] 武艺, 李然, 张丹迪. 中国 LNG 接收站发展趋势及利用效率提升思考[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 721–729. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.001).
- WU Y, LI R, ZHANG D D. Discussion on development trends and utilization efficiency enhancement of LNG terminals in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(7): 721–729.
- [84] 梁永图, 张博, 徐斌, 赵延兴, 韩辉, 安峰辰. 液化天然气长距离低温管网运输与冷能梯级利用[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 50–58. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.005](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.005).
- LIANG Y T, ZHANG B, XU B, ZHAO Y X, HAN H, AN F C. Liquefied natural gas long-distance cryogenic pipeline transportation and cold energy cascade utilization[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(2): 50–58.

(编辑: 张雪琴)

基金项目:国家自然科学基金资助项目“融合 LNG 管输的多网系统协同优化与冷能梯级利用研究”, 52341203; 新疆天山创新团队“油气高效管输技术研究与应用创新团队”, 2022TSYCTD0002; 中国博士后科学基金第 76 批面上资助项目“液态清洁燃料综合管网协同调度优化理论与方法研究”, 2024M763640。

作者简介:梁永图, 男, 1971 年生, 教授, 2009 年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气供应链优化、油气管道运行优化、油气田地面工程系统优化相关技术的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 13910970411。Email: liangyt21st@163.com

- Received: 2024-12-16
- Revised: 2025-02-12
- Online: 2025-02-26

