

“双碳”目标和能源安全下中国油气资源开发利用的战略选择

陈洪波 杨 来

摘要 统筹推进“双碳”目标的实现和保障能源安全是中国今后相当长时期的重要战略任务。煤炭减量替代是实现“双碳”目标的必然选择，而可再生能源在短期内难以成为主体能源，且大规模发展也受诸多因素制约，油气资源（尤其是天然气）作为相对清洁的化石能源，能够为实现“双碳”目标和保障能源安全发挥重要作用。然而，中国油气资源开发利用也面临常规油气资源贫乏、海外进口受地缘政治风险影响较大、非常规油气资源开发的科技支撑不足和油气资源利用效率较低且排放强度较高等困难与挑战。为此，应充分认识油气资源开发利用在我国能源转型过程中和未来现代能源体系中的战略地位，全面布局非常规油气资源开发利用，关注地缘政治形势变化并推进油气资源多元化开发，应用数字技术提升油气开发利用效率，探索“油气+清洁能源”多能融合新模式。

关键词 “双碳”目标 能源安全 油气资源

[中图分类号] F426 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2022) -03-0056-14

“双碳”目标对我国能源低碳转型的质量和进程都提出了更高的要求。合理控制化石能源消费，加快构建以新能源为主体的新型电力系统，是能源转型和实现“双碳”目标的必由之路。然而，一些地方在落实“双碳”目标时，搞“运动式减碳”，盲目控制煤炭消费，力度过大、配套措施准备不足，影响到正常的工业生产和居民生活。俄乌冲突爆发后，国际能源市场剧烈震荡，能源价格飙升，德国甚至重新启用燃

【基金项目】中国社会科学院研究所创新工程项目“资源枯竭型城市转型发展绩效评估及对策研究”（批准号：2020STSB02）；中国社会科学院重点项目“碳中和的经济分析与政策研究”（批准号：STWM-ZS-2021-001）。

【作者简介】陈洪波，中国社会科学院大学应用经济学院副院长、教授、博士生导师，邮政编码：102488，电子邮箱：hbc_w@hotmail.com；杨来，中国社会科学院生态文明研究所博士后，邮政编码：100710，电子邮箱：yang_lai@126.com。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

煤发电项目。这些问题使能源安全再度成为国际国内广泛关注的热门话题。如何统筹实现“双碳”目标和保障能源安全，是我国当前和未来长时期需要面对的战略问题。2022年1月24日，习近平总书记在主持中共中央政治局第三十六次集体学习时指出：“要立足我国能源资源禀赋，坚持先立后破、通盘谋划，传统能源逐步退出必须建立在新能源安全可靠的替代基础上。……要坚决控制化石能源消费，尤其是严格合理控制煤炭消费增长，有序减量替代”。^①因此，在现阶段，我国既要认识到实现“双碳”目标的必要性和紧迫性，合理控制化石能源消费；同时也要认识到，实现“双碳”目标必须在保障能源安全的前提下，合理布局新型能源体系建设，在可再生能源尚不能成为主体能源时，要有选择性地、分步骤地统筹安排不同品种化石能源的退出。石油、天然气作为相对清洁低碳的能源品种，可在替代煤炭和稳产保供方面发挥重要作用，能为统筹“双碳”目标的实现和保障能源安全提供必要支撑。本文拟就优化我国油气资源开发利用战略进行探讨，以期为实现“双碳”目标和保障能源安全提供参考。

一、背景与意义

截至2021年底，全球已有130多个国家提出了“净零排放”或碳中和目标，碳中和已成为世界各国的广泛共识和共同行动。实现碳中和是一项系统工程，需要能源结构、产业结构、生产方式和生活方式的全面转型，但核心是能源转型。能源是人类一切经济社会活动的物质基础和动力，关乎国计民生和国家安全。如何在保障能源安全的前提下，有序推进能源转型，实现“双碳”目标，是我国当前面临的重大现实问题。

（一）煤炭减量替代是实现“双碳”目标的必然选择

煤炭是全球能源部门最大的碳排放源，2019年全球煤炭消费产生的碳排放约占能源部门碳排放总量的44%（IEA，2021a）。我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，碳排放总量、单位GDP碳排放强度和单位电力碳排放强度均远高于发达国家和世界平均水平。2020年我国二氧化碳排放量约占全球总量的四分之一，单位GDP碳排放强度约为8.8t/万美元，远高于6.1t/万美元的全球平均碳排放水平（IEA，2021b）。在电力部门，2021年，我国电力碳排放强度为581g CO₂/(kW·h)^②，高于2017年美国的420g CO₂/(kW·h)和全球平均的450g CO₂/(kW·h)^③。其主要原因

① 《深入分析推进碳达峰碳中和工作面临的形势任务 扎扎实实把党中央决策部署落到实处》，《人民日报》2022年1月26日，第1版。

② 生态环境部办公厅（2022）：《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》，http://www.mee.gov.cn/xgk2018/xgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html [2022-08-17]。

③ 国际能源小数据（2018）：《全球电力平均碳排放强度》，<https://mp.weixin.qq.com/s/loliOPB8GF5mRlhXls9kMg> [2022-08-17]。

是煤炭在我国的能源结构中占主导地位（2020年中国的煤炭消费占比为56.8%，而全球平均为27%），以及工业增加值在我国GDP中的高份额（2020年为37.8%，而全球平均为27.9%）。我国煤炭消费产生的碳排放占能源活动碳排放比重长期维持在70%左右，占温室气体排放总量的55%~60%。若考虑煤炭生产、运输和消费过程中的其他碳排放，煤炭在全生命周期的碳排放将会更高。1t煤炭全生命周期的温室气体排放约为2tCO₂eq，其中约96%发生在消费环节^①。因此，逐步减少煤炭消费总量对于实现“双碳”目标是无法回避的必然选择，且具有较强的紧迫性。

诚然，即使在碳中和的情境下，煤炭也不可能被完全淘汰，仍然需要其发挥电力调峰、煤质还原剂和保障能源供应安全的作用。很多学者和机构对我国碳中和情境下煤炭兜底调峰的需求量进行了预测（见表1），到2030年，煤炭需求量的最低预测值为21.2亿tce，最高预测值为29.6亿tce，二者均值为25.4亿tce；到2060年实现碳中和时，煤炭最低保障性需求为1.4亿tce，在最强化保障的情境下，煤炭保障性需求约8.57亿tce，二者均值约为5亿tce。2020年，我国煤炭消费量约为28.29亿tce，如果按照上述均值和消费量计算，到2030年和2060年，分别需要用其他品种能源替代煤炭约2.89亿tce和23.29亿tce。而且，我国2021年人均GDP刚刚突破1.2万美元，经济增长的空间和潜力依然很大，由此必然带来能源消费总量的进一步增长。根据匡立春等（2022）的预测，在不同情景下，我国2030年和2060年的能源需求分别是60.1亿tce~61亿tce和56亿tce~59亿tce，相比于2020年的49.8亿tce，分别增加了10.3亿tce~11.2亿tce和6.2亿tce~9.2亿tce。煤炭减量和能源需求增量之和将形成一个巨大的能源供应缺口，需要煤炭以外的能源品种来填补。

表1 不同机构和学者对“双碳”目标下中国煤炭保障性需求的预测结果

单位：亿tce

文献	情景	煤炭保障性需求	
		2030年	2060年
王兵等(2022)	基准情景	21.20~24.40	2.80~3.30
	保障情景	25.10~27.50	5.20~6.10
	强化保障情景	26.40~28.70	6.70~7.90
中国石油经济技术研究院(2021)	可持续转型情景	25.40~26.60	1.40~3.90
IEA(2021b)	承诺目标情景	29.60	5.50
谢和平等(2021)		约25.00	约8.57

资料来源：作者根据表中文献整理。

^① 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心（2015）：《气候变化与煤炭消费总量控制》，[http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=148\[2022-08-17\]](http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=148[2022-08-17])。

（二）非化石能源替代煤炭的前景与风险

要实现碳中和，非化石能源必须成为主体能源，应加快构建以新能源为主体的新型电力系统。过去十多年，可再生能源发电技术不断进步，发电成本不断降低。2019年光伏发电、光热发电、陆上风电和海上风电的平准化度电成本与2010年相比分别下降82%、47%、39%和29%，推动了可再生能源的高速发展，全球光伏发电量和风力发电量与2015年相比分别增长了170%和70%（IRENA，2021）。我国非化石能源也实现了持续快速增长，2010—2020年非化石能源消费量年均增速为8.0%，其中风电、光伏发电年均增速高达28.9%，其他非化石能源年均增速为4.9%；2020年我国非化石能源消费量约为7.92亿tce，约占能源消费总量的15.9%（国家统计局能源统计司，2021）。随着新能源技术的进一步发展，非化石能源必将在碳中和过程中发挥主导作用。

然而，非化石能源的发展也面临一些制约和挑战，过度依赖非化石能源（尤其是在短期和中期）将会导致能源安全风险。首先，由于风电、光伏发电具有间歇性、波动性的特征，如果风电、光伏发电新增容量扩张过快，电网将承受非常大的压力，短期内技术上难以支撑。储能是重要的解决方案，但也面临技术和成本的障碍，难以消纳大规模的“弃风弃光”。其次，可再生能源发电替代的主要是电力行业用煤，而在钢铁、水泥、化工等工业部门以及建筑供暖和部分交通领域，可再生能源只能发挥有限的替代作用。可再生能源电力制氢能弥补这一缺陷，但目前绿氢成本过高，氢存储、运输和加氢还存在技术、成本和安全性问题，短期内难以大规模市场化推广。再次，可再生能源发展也面临稀有矿产资源的约束。可再生能源发展需消耗更多种类的稀有矿产资源，且矿产资源类型和数量因技术发展路线不同而异。许多支撑清洁能源转型的关键矿产资源在空间分布上比石油和天然气更为集中，其加工业务的集中度同样很高。从主要供应国来看，关键矿产主要分布在俄罗斯、美国、法国、土耳其、巴西、中国、南非、刚果（金）、卢旺达，其控制权则由部分发达国家掌握，而关键矿产能否可持续供应将是影响可再生能源能否持续高速增长的重要因素。最后，核电虽然受上述因素影响较小，但核废料的环境影响和核安全问题一直受到质疑。福岛核泄漏事故发生之后，欧洲和日本都已限制核电发展，我国也不可能在短期内大规模发展核电。可见，煤炭减量和需求增量形成的能源供应缺口，不能仅仅依赖非化石能源的增量来填补。

（三）合理开发利用油气资源对统筹“双碳”目标和能源安全的现实意义

碳中和是急不得也等不得的战略目标。一方面，减煤势在必行；另一方面，能源安全关乎国计民生和国家安全，保障能源安全须臾不可松懈，过度依赖非化石能源在短期和长期都存在不同程度的风险。要统筹推进碳中和与能源安全，有必要充分认识合理开发利用油气资源的战略意义。首先，油气资源是相对清洁低碳的化石能源，替代煤炭有助于碳中和目标的实现。根据Hao等（2017）的研究，煤炭、石油和天然气三种能源的生命周期温室气体排放分别为97.5g CO₂eq/MJ、87.7g CO₂eq/MJ和64.8g CO₂eq/MJ。也就是说，石油和天然气生命周期碳排放比煤炭分别低10.1%和

30.7%。Yang等(2020)的研究也表明,煤炭发电的碳排放因子比天然气发电高118%。2022年2月,欧盟委员会公布的一项提案将天然气规定为“可持续”能源,说明欧盟认同天然气相对清洁低碳的特性。天然气可以广泛用于发电、工业燃料、建筑供暖和交通等各个领域;石油除了用于交通领域,在技术上也可用于发电、工业燃料、建筑供暖等(只是由于经济性问题而不常用),还可以通过制氢广泛应用在各个领域。可见,以石油和天然气(尤其是天然气)替代煤炭将在一定程度上减少碳排放。其次,石油和天然气是高度灵活性能源,储运技术成熟,基础设施齐全。在短期,石油和天然气可以替代煤炭承担“兜底保供”的特殊使命;在中长期,天然气发电可以作为调峰电源,与可再生能源发电相互配合,保障能源安全和可再生能源的大规模发展。因此,在我国由以化石能源为主体向以新能源为主体的能源转型过程中,以及在我国未来构建的现代能源体系中,天然气都有其重要的战略地位,石油则由能源属性逐步转化为原料属性,为我国供应链安全发挥重要作用。

二、中国油气资源开发利用面临的困难与挑战

我国油气资源开发利用现状与其要统筹推进“双碳”目标实现和保障能源安全的战略地位尚不匹配,其自身发展仍然面临诸多困难与挑战。

(一) 常规油气资源贫乏,开采难度大、成本高,原油稳产增储潜力有限

我国常规油气资源贫乏,人均储量和储采比较低,开采难度大、成本高。2020年,我国石油可开采储量为35亿t,人均可开采储量为2.48t,仅为世界平均水平的7.7%。而且,油田小而分散,油田单井平均日产量仅为2t,不到中东地区平均日产量的0.3%。新增储量中80%是低渗透、超低渗透的难采油藏,开采条件差,生产成本高,2018年的平均开采成本达50美元/桶,是中东地区的10倍。2020年,我国天然气可采储量为8.4万亿 m^3 ,人均可采储量为6000 m^3 ,是世界平均水平的24.2%。此外,天然气也存在气田规模小、地质构造复杂、开采难度大和开采成本高等问题(王庆一,2021)。

经过半个多世纪的开发,我国大部分主力油田已经进入开发的中后期阶段。例如,胜利油田已进入开发后期;辽河油田投入开发50余年,产量递减快,吨油成本高,稳产难度大。新增探明储量中,低品位、难动用资源占比很高,勘探开发成本不断增加。此外,我国油气资源勘探开发科技水平总体上无法满足增储上产的需要,尤其表现在海洋油气开发方面,例如,海洋钻井平台自动化、智能技术水平普遍较低,自动化控制系统技术落后,维护难度较大;海洋钻井装备在一些关键核心技术上不够成熟,特别是适用于深水和超深水钻井作业的关键设备、高端金属材料、工程材料等(赵涛等,2022)。总之,我国油气资源开发已经整体进入高勘探程度、特高含水开发阶段,动用难度大,开发成本高,剩余油藏流场更加复杂,传统的开发技术在兼顾大幅度提高采收率与降本增效方面面临严峻挑战(杨勇,2022)。

（二）油气资源对外依存度过高，战略储备能力不足，面临较大的地缘政治风险

多年来，我国石油产量增长缓慢，天然气产量的增长速度远低于消费量的增长速度，导致石油和天然气对外依存度长期居高不下（见图1）。2018年之后中国的原油对外依存度一直处于70%以上，超过国际能源署划定的警戒线（国家统计局能源统计司，2021；周庆凡，2020）。而且，我国油气资源进口来源地集中度较高。2021年，我国进口原油约为5.13亿t^①。从地区看，中国超过90%的原油进口量来自中东、欧洲、非洲和南美地区，亚太、北美和其他地区的占比不足10%（见图2）；从国别看，我国原油进口贸易伙伴共计46个，排名前十五的贸易伙伴的占比为92.6%，而排名前三的沙特、俄罗斯、伊拉克的占比分别为17.1%、15.5%、10.5%（桑潇，2022）。

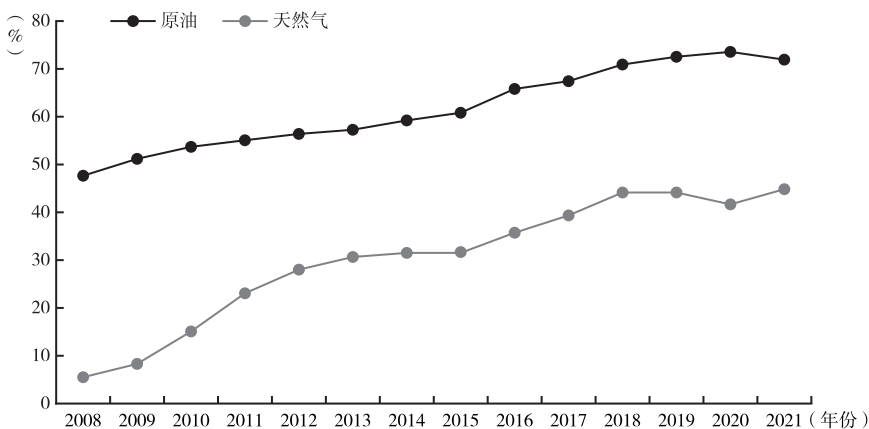


图1 2008—2021年中国原油、天然气的对外依存度

资料来源：作者根据国家统计局能源统计司（2021）和《2021年国民经济和社会发展统计公报》的数据整理绘制。

我国油气资源战略储备能力严重不足，天然气管网、储运等基础设施建设规模与发达国家差距较大。截至2020年底，我国天然气长输管道总里程为11万km，仅为美国的20%、俄罗斯的65%（国家能源局石油天然气司等，2021）。中国已建成地下储气库27座，调峰能力约145亿m³，占当年天然气消费总量的4.4%，远低于20%的世界平均水平（冯志强等，2019）。目前，中国的石油战略储备能力远低于国际能源署建议的90天和《国家石油储备中长期规划》规定的100天的安全线，而美国、俄罗斯、英国和法国的石油战略储备天数分别达到175天、125天、232天和110天。

对外依存度高、进口来源地集中和战略储备能力不足使中国油气资源的供应安

^① 国家统计局（2022）：《2021年国民经济和社会发展统计公报》，http://www.gov.cn/shuju/2022-02/28/content_5676015.htm [2022-08-17]。

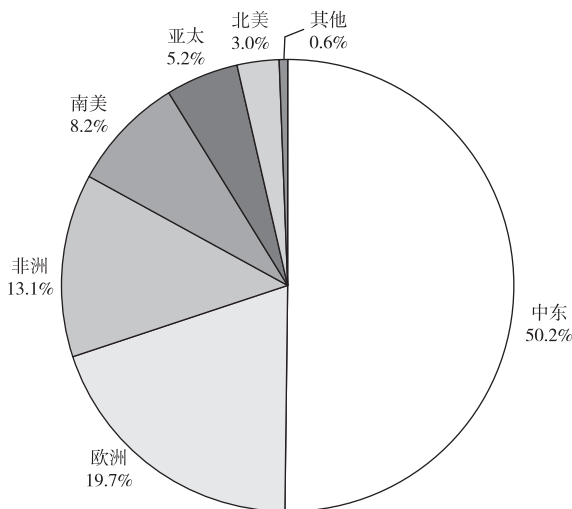


图2 我国原油进口来源地区结构

资料来源：作者根据桑潇（2022）的数据整理绘制。

全、运输安全和价格稳定性存在较大隐患和地缘政治风险。当今世界正经历百年未有之大变局，新旧国际体系和国际秩序加速演变，地缘政治形势错综复杂，大国战略博弈日趋加剧。在这个过程中，能源问题无论是作为“因”还是作为“果”，都是国际社会关注的焦点。美国五十年前制定能源独立战略，近年来已基本实现，天然气可以大量出口。能源独立使美国更有能力干预国际能源市场，并从中东地区“战略收缩”，实施“重返亚太”战略，对国际地缘政治造成重大影响，对我国的能源安全、经济安全和地缘政治安全构成潜在威胁。俄乌冲突导致欧洲国家能源供应紧张，能源价格暴涨，通货膨胀率达到数十年来的高位，经济社会不稳定因素剧增，更凸显了地缘政治与能源安全、国家安全高度相关。

（三）非常规油气资源开发起步较晚，基础理论和关键技术薄弱，开发规模有限

非常规油气资源开发是世界能源发展一个重要的新领域。美国率先开启“页岩气革命”，依靠非常规油气资源开发，在2017年成为天然气净出口国，2019年成为原油净出口国，实现了其“能源独立”的目标。2020年，美国页岩气产量达到7330亿 m^3 ，占其天然气总产量的比例超过80%，而致密油（页岩油）产量为3.5亿t。加拿大紧跟美国，2020年的致密油（页岩油）产量也达到了2500万t（邹才能等，2021）。

中国的非常规油气资源非常丰富。近10年来，通过学习北美技术和经验，中国非常规油气资源的勘探开发也取得了战略性突破，致密气、页岩气和煤层气已经进入商业化大规模开发阶段，致密油（页岩油）和油砂油正在进入商业化阶段，天然气水合物实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越。但总体来看，我国非常规油气资源开发起步较晚，基础科学理论薄弱，主要关键技术和设备依赖国外，与北美

相比差距甚大。页岩气、致密气和煤层气的产量加总也仅为美国页岩气产量的8%；到2020年底，累计建成的致密油及页岩油的产能和产量分别为450万t和200万t；油砂油的开采尚处于起步阶段；天然气水合物还处于资源探勘和试验开采阶段。2020年，我国非常规天然气总产量为73.2亿m³，占天然气总产量的38%，非常规油产量则占原油产量的10%左右。非常规油气资源开发的产业化程度和开发成熟度如表2所示，按目前进展，非常规油气资源开采在2030年前还不能成为中国油气资源开发的主力。

表2 中国非常规油气资源可采储量、2020年产量和开发阶段

非常规油气资源	可采储量	2020年产量	开发阶段
致密气 ^a	5 万亿 m ³	465 亿 m ³	已经商业化
页岩气	4026.17 亿 m ³	200 亿 m ³	
煤层气	3315.54 亿 m ³	102 亿 m ³	
致密油(页岩油)	55 亿 t~62 亿 t	200 万 t	正在商业化
油砂油	100 亿 t		
天然气水合物 ^b	85 万亿 m ³		尚未商业化

注：a 表示探明地质储量，b 表示中国南海资源量。

资料来源：作者根据邹才能等（2021）、纪玉山（2016）和中华人民共和国自然资源部（2021）的相关资料整理而得。

（四）油气资源开发利用效率较低，温室气体排放强度较高

虽然相对于煤炭较为清洁低碳，但油气资源从勘探开发、加工、储运到能源使用全生命周期都有温室气体排放，其中包括二氧化碳和甲烷。根据国际油气生产者协会的数据，2020年，参与该协会的世界主要油气公司每千吨标准化的碳氢化合物平均产生125tCO₂eq，比2019年降低10%，其中66%来自能源使用，18%来自火炬燃放，8%来自排气或通风口（包括排气、船舶装载、储罐、气动装置等），2%来自气体逃逸^①。

我国油气资源开发环节和利用环节的温室气体排放强度都较高。从开发环节来看，2020年，我国石化行业和化工行业能源消费总量为6.85亿tce，其中石油和天然气开采业的能源消费量占比约为5.3%，而电力消耗占原油和天然气开采能耗总量的比重分别为40.61%和26.02%（庞凌云等，2022）。油气勘探开发过程中，油气处理和生产环节的碳排放量占总排放量的53%（常毓文、冯乃超，2022）。在油气储运环节，由于油气管网尚未覆盖所有的区域，部分地区仍然以油罐车进行运输，石油产品的挥发特性使其在装卸和储运时极易泄漏。此外，油罐车通常为敞口式结构，加大了成品油在储运过程中的蒸发量，进而产生较大的损耗。据估计，储运环节的油气损耗大约相当于油气产量的3%，并且这一数字还有持续增长的趋势（孙雅倩等，2021；

^① IOGP (2022), *Environmental Performance Indicators - 2020 Data*, <https://data.iogp.org/Environment/Download> [2022-09-09]。

金欣, 2022)。根据中石油、中石化披露的数据, 我国油气上游业务温室气体排放强度为 $45\text{kgCO}_2\text{e}/\text{boe}$, 为国际平均水平的 2 倍 (刘殊呈等, 2021)。

在油气资源利用环节, 由于交通运输部门的石油消费占比接近 60%, 本文以交通运输部门为例说明油气利用环节存在的问题。2019 年, 中国交通运输行业的能源消费总量为 5.73 亿 tce, 占终端能源消费总量的 17.3%; 而其物理能源效率仅为 35%, 排在建筑、工业和农业之后。我国新的乘用车油耗标准为 $5\text{L}/100\text{km}$, 比欧盟 ($4.2\text{L}/100\text{km}$) 和日本 ($4.1\text{L}/100\text{km}$) 高出约 20% (王庆一, 2021)。由于重型货车和老旧汽车数量多, 中国商用车的碳排放强度更高。2019 年, 我国重型货车以 3% 的保有量产生了高达 39.7% 的汽车碳排放量 (黄志辉等, 2022)。尽管中国从 2021 年开始已经在全国范围内全面实施重型柴油车国六排放标准, 禁止生产、销售和进口不符合国六排放标准的大型柴油车, 但在很多地区, 尤其是欠发达地区, 老旧车辆存量较大、占比较高, 严重影响了交通运输部门的油气资源利用效率。

三、优化我国油气资源开发利用的战略选择

基于上述分析, 石油在能源转型过程中对于保障交通运输领域的能源供应安全不可或缺, 在新能源汽车普及之后仍可以以其原料属性保障化工行业供应链安全; 天然气在能源转型过程中具有“稳定器”和“转化器”的功能, 在未来构建现代能源体系中仍有一席之地, 甚至战略地位更加突出。为此, 我国应在战略高度上更加重视和布局油气资源开发利用, 统筹推进实现“双碳”目标和保障能源安全。

(一) 全面布局非常规油气资源开发利用

在认识上应跳出“贫油少气”的传统思维, 要认识到美国实现能源独立并非依靠其丰富的常规油气资源, 而是依靠科技进步, 大力开发非常规油气资源。我国非常规油气资源非常丰富, 如页岩气已探明可采储量是天然气可采储量的 5 倍以上, 位居世界第一。我国油气资源开发的重点应转向非常规油气资源, 并及早全面部署。

应制定非常规油气开发的国家战略和实施方案, 针对不同品种的非常规油气资源, 从基础科学研究、技术研发、装备制造、产业化推广、市场建设、投融资和环境保护等方面进行详细规划, 并给予相应政策支持。对于技术成熟度较高、已经量产的页岩气、致密气和煤层气等, 应加大投资, 支持其扩产增产、降低成本、改善市场条件、提高开发效率、减少环境影响。对于致密油 (页岩油) 和油砂油, 其目前在北美已经大规模生产, 在我国因基础理论和工程技术所限而未能实现大规模商业化开采, 我国应加强科学研究, 做好资源的勘探调查, 摸清家底; 同时, 应加强国际合作, 引进、消化、吸收美国和加拿大的先进开发技术和装备, 吸引国外资本投资, 尽快建立适合我国地质条件和基本国情的商业化模式, 实现大规模开采。对于天然气水合物, 国外没有成功案例, 无技术可以模仿、无经验可以借鉴, 我国虽试采成功并走在世界前列, 但尚处在试验性阶段。中国应以我为主, 组建国际天然气水合物开发利用

用合作机构，联合世界各国共同攻克天然气水合物技术难题，推动早日实现产业化发展。此外，我国应着力推动常规-非常规油气协调发展（杨智、邹才能，2022），加快常规-非常规共生资源的基础理论研究、勘探和开发，最大化发掘油气资源开发潜力，提高整体开发效率。

（二）关注地缘政治形势变化，推进油气资源多元化开发

我国陆地常规油气资源较为贫乏，非常规油气资源短期内难以形成大规模的现实产能，加强海上油气资源开发和海外进口是重要选项。当前世界正面临百年未有之大变局，地缘政治形势复杂多变，俄乌冲突又加剧了国际局势动荡，对我国南海资源开发和油气资源海外进口也造成现实冲击和潜在影响。为此，我国应妥善应对国际局势，积极推动油气来源多元化布局，保障油气资源供应安全。

一是以中菲合作为突破口开发南海油气资源。我国南海拥有丰富的油气资源，石油资源储量约为200亿toe~300亿toe，天然气储量约为20万亿 m^3 ，是世界上最大的待开发油气矿藏之一（康霖、罗传钰，2018）。我国南海油气资源开发受到越南、马来西亚、文莱、印度尼西亚、菲律宾等的高度关注，而以美国、日本、印度等为代表的域外大国不断采取各种手段干预南海问题，使得南海油气资源开发难以取得进展。俄乌冲突导致国际油价不断攀升，使得南海油气资源开发变得有实际经济利益可图。我国应抓住时机加快推进与南海邻国的油气资源开发合作。第一，在坚持主权领土完整的前提下，秉承“搁置争议，共同开发”的合作理念，灵活施行“主权上不让步，经济上可让利”策略，选择争议较小的区域，加快推进中菲南海油气共同开发进程，并以中菲合作形成示范效应，树立我国公正、公平、正面的国际形象，带动与其他南海邻国的合作。第二，对于资源丰富但开采难度较大的深海区域，我国应充分发挥深海油田开采的技术优势，弥补南海邻国深海技术落后、产量较低的不足，加强深海技术和装备的合作，带领相关国家进行深海油气资源的勘探和开发，以技术赢得尊重，不断增进互信。

二是择机推进中俄、中挪北极油气资源开发。北极蕴藏着丰富的石油和天然气资源，据美国地质调查局估算，北极地区油气资源总储量约为4120亿boe（天然气占比超过80%），其中，俄罗斯北极海域占58.3%（李泽红等，2021）。俄罗斯是北极圈内领土面积最大、油气资源开发最早和开采量最多的国家，拥有丰富的北极开发经验和先进的破冰船技术，但受限于国内经济不景气、资金周转困难的现实，有寻求战略合作伙伴参与北极油气开发的需求。俄罗斯曾多次邀请我国一同开发北极油气田，并已与我国在北极开发方面达成多项协议，但目前进展较为缓慢。俄乌冲突爆发之后，国际地缘政治形势加速演变，加上气候变暖使得北极开发条件趋好，北极域内的俄罗斯、美国、挪威和加拿大等国有可能会展开激烈竞争。中国是俄罗斯在能源领域的重要合作伙伴，并且拥有俄罗斯急需的资金实力，是俄罗斯开发北极最理想的潜在合作方。中国应冷静观察国际地缘政治局势演变，在适当的时机，着力深入推进中俄北极开发合作，积极参与航道建设、联合勘探与开发、技术研发和装备制造等全方位合作，以资源锁定代替油气商品买卖，保障油气资源的长久持续供应。同时，还应加

强与挪威的北极开发合作，分散投资风险，多元化合作开发北极油气资源。

三是深入推进“一带一路”沿线国家油气合作。“一带一路”沿线国家油气地质条件优越，资源极为丰富。经过多年努力，“一带一路”沿线已经成为我国海外油气合作的核心区域，油气权益产量逐年增加，输油气管线和港口等基础设施建设取得较大进展。俄乌冲突持续或升级，有可能对俄罗斯的油气生产、输出造成较大影响，甚至会波及中亚国家，从而至少在短期内会影响其对我国的油气出口。从中长期来看，俄乌冲突的影响存在诸多的不确定性，潜在的有利因素和不利因素都有，我国应及早制定应对预案，巩固与“一带一路”沿线国家的友好合作关系，深化与中亚、西亚等地区的油气合作，充分利用我国资金实力和技术优势，与相关国家建立从勘探、开采、储运到炼制等全产业链的油气资源开发、生产、贸易联合体，完善互联互通基础设施建设，构建持久的互利共赢的油气合作机制。

（三）应用数字技术提升油气开发利用效率

当前，数字技术正在对油气行业的开采、储运和利用产生深远影响。根据国际能源署预测，数字技术的大规模应用，将使油气生产成本减少10%~20%，使全球油气技术可采储量提高5%，页岩气有望获得最大收益^①。近年来，我国数字技术和人工智能技术发展较快，应将数字技术与传统油气工程技术有机结合，全面提高油气资源勘探、开采、生产和储运效率，使有限的油气资源得到最高效的开发利用。

在油气勘探领域，通过运用大数据做高精度地质建模、高效油藏数值模拟，对地下油气藏进行精确的描述和预测，进行更加科学、合理、高效的决策。在油气生产运维中，运用人工智能、大数据、工业物联网等手段，提前预测油气田生产中可能发生的故障，在最少人为干预的情况下提升油气产量。在油气储运环节，依托大数据及物联网等技术，对管线进行数字化建设和智能升级，全面打造覆盖全国的“智慧管网”。使用无人机智能巡检搭配人工巡检，将获取的图像和信息通过大数据和人工智能技术进行分析，根据分析结果通过传感器进行远程操控，形成低成本、高效率、安全智能的管理新模式。在油气资源利用环节，针对重型货车排放较高的问题，通过大数据、互联网技术，减少车货匹配时间，降低货运车辆的运输空驶率、空载率、空置率，探索多式联运数字化场景。对于能耗和碳排放较高的产品，通过大数据方式制定最低能源性能标准和节能标签制度。

（四）探索“油气+清洁能源”多能融合新模式

在加强油气资源开发利用、保障能源安全的同时，也要着力降低油气资源作为化石能源在开发和利用全过程中的碳排放，通过油气全生命周期的清洁化、低碳化以及与清洁能源融合发展，使保障能源安全与实现“双碳”目标同步推进。

在油气资源开采环节，大力推广以电力或天然气代替柴油发电机或柴油机来驱动钻机的“电代油”或“气改”技术（张烈辉等，2022），并鼓励油气开采企业尽可

^① 惠春琳（2019）：《能源数字化：重塑全球能源发展态势》，《学习时报》6月21日，第2版。

能利用油气田的空地、废弃井场、屋顶等闲置区域开发分布式光伏发电项目和小型风电项目，采用自发自用模式接入油气公司内部电网，以“绿电”替代以煤电为主的电网电力，降低油气开采过程的碳排放，并提升可再生能源电力的消纳能力。此外，在油气田中每年有大量“采出水”需要处理，可以使用上述方式生产的“绿电”进行处理，甚至通过“绿电”电解“采出水”制取“绿氢”。获得的氢气可用作化工企业的生产原料，也可以在天然气中掺入 15% ~ 20% 的氢直接用作燃料以降低碳排放。与此同时，鼓励将开采出的油气资源就地深加工，以降低运输过程中的能耗和排放。在油气加工过程中，通过使用碳捕获、利用与封存技术捕获排出的二氧化碳，将其用于油田驱油作业以提升产油能力。

在油气资源利用环节，在汽油或柴油中掺入一定比例的乙醇（生物柴油）等低碳燃料，可以在一定程度上减少碳排放。当前，我国已在部分省份推广使用燃料乙醇汽油（乙醇和汽油混合而成的新型汽油，两者比例大约是 1:9）。普通汽油车使用乙醇汽油后能够有效降低碳排放，并提高发动机的热效率。未来可以借鉴巴西在燃料乙醇推广方面的成功经验，将燃料乙醇的比例进一步提高。此外，将氨与汽油、柴油混合后用于略微改动的“氨油”双燃料车，也是我国正在进行的一项有益探索。由于氨燃料不含碳元素，因此不会直接产生二氧化碳，可以有效降低碳排放。我国是世界上最大的合成氨生产国，产量占全球的 32%，拥有成熟的氨生产、储运及供给体系，为氨燃料的推广和应用提供了良好的基础。不仅如此，氨燃料也可以应用于装载内燃机的船舶、飞机、航空、航天等多个领域，按照适宜比例与汽油、柴油混合后，将对碳排放控制起到积极作用。

参考文献

- 常毓文、冯乃超（2022）：《“双碳”目标下油气行业发展对策》，《新疆石油地质》第 2 期，第 235—240 页。
- 冯志强、孔祥宇、褚王涛（2019）：《中国油气供应安全面临新挑战——新形势下中国石油企业“走出去”发展战略思考》，《国际石油经济》第 10 期，第 8—15 页。
- 国家能源局石油天然气司、国务院发展研究中心资源与环境政策研究所、自然资源部油气资源战略研究中心（2021）：《中国天然气发展报告 2021》，北京：石油工业出版社。
- 国家统计局能源统计司（2021）：《中国能源统计年鉴 2020》，北京：中国统计出版社。
- 黄志辉、纪亮、尹洁等（2022）：《中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究》，《环境科学研究》第 2 期，第 385—393 页。
- 纪玉山（2016）：《我国非常规油气资源的开发利用与能源安全的经济分析》，《社会科学家》第 10 期，第 10—16 页。
- 金欣（2022）：《油气储运环节分析及优化措施研究》，《化工设计通讯》第 2 期，第 13—15、29 页。
- 康霖、罗传钰（2018）：《中非南海油气资源共同开发：挑战与努力方向》，《国际问题研究》第 5 期，第 115—126 页。

匡立春、邹才能、黄维和等 (2022):《碳达峰碳中和愿景下中国能源需求预测与转型发展趋势》,《石油科技论坛》第1期,第9—17页。

李泽红、姜曙光、董锁成等 (2021):《俄罗斯北极地区资源优势与中俄北极资源合作对策》,《干旱区资源与环境》第5期,第169—174页。

刘殊呈、粟科华、李伟等 (2021):《油气上游业务温室气体排放现状与碳中和路径分析》,《国际石油经济》第11期,第22—33页。

庞凌云、翁慧、常靖等 (2022):《中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究》,《环境科学研究》第2期,第356—367页。

桑潇 (2022):《2021年中国原油进口量缩减 进口格局大体不变》, <https://oil.chem99.com/news/40595542.html> [2022-08-17]。

孙雅倩、李文、王爽等 (2021):《油气储运管道问题及相关对策》,《甘肃科技》第18期,第33—35页。

王兵、李璐、鲜玉娇等 (2022):《2060年碳中和目标下煤炭保障性需求预测》,《洁净煤技术》第5期,第1—13页。

王庆一 (2021):《2020能源数据》,北京:绿色发展创新中心。

谢和平、任世华、谢亚辰等 (2021):《碳中和目标下煤炭行业发展机遇》,《煤炭学报》第7期,第2197—2211页。

杨勇 (2022):《胜利油田勘探开发大数据及人工智能技术应用进展》,《油气地质与采收率》第1期,第1—10页。

杨智、邹才能 (2022):《论常规—非常规油气有序“共生富集”——兼论常规—非常规油气地质学理论技术》,《地质学报》第5期,第1635—1653页。

张烈辉、张安安、陈怡男等 (2022):《钻完井电气化“电代油”技术助力油气行业实现双碳目标》,《油气藏评价与开发》, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1825.TE.20220601.1232.002.html> [2022-08-17]。

赵涛、黄元元、贾向锋等 (2022):《我国海洋油气钻井装备技术现状及展望》,《石油机械》第4期,第56—62页。

中国石油经济技术研究院 (2021):《2060年世界与中国能源展望》, <http://www.szguanxia.cn/article/2745> [2022-08-17]。

中华人民共和国自然资源部 (2021):《中国矿产资源报告2021》,北京:地质出版社。

周庆凡 (2020):《近期中国天然气发展回顾与未来趋势展望》,《中外能源》第11期,第1—8页。

邹才能、赵群、王红岩等 (2021):《非常规油气勘探开发理论技术助力我国油气增储上产》,《石油科技论坛》第3期,第72—79页。

Hao, H., Q. Y. Qiao and Z. W. Liu, et al. (2017), “Impact of Recycling on Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Electric Vehicle Production: The China 2025 Case”, *Resources Conservation and Recycling*, 122, pp. 114–125.

IEA (2021a), *Global Energy Review 2021: Assessing the Effects of Economic Recoveries on Global Energy Demand and CO₂ Emissions in 2021*, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> [2022-08-17] .

IEA (2021b), *An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China*, <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china> [2022-08-17].

IRENA (2021), *Renewable Power Generation Costs in 2020*, <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020> [2022-08-17].

Yang, L., B. Yu and B. Yang, et al. (2020), “Life Cycle Environmental Assessment of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles in China”, *Journal of Cleaner Production*, 285 (8), 124899.

The Strategic Selection for the Exploitation and Utilization of Oil and Gas Resources under the Background of “Double Carbon” Goals and Energy Security in China

CHEN Hong-bo¹, YANG Lai²

(1 Faculty of Applied Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China;

2 Research Institute for Eco-civilization, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710, China)

Abstract: Synergistically promoting the realization of the “double carbon” goals and the energy security is an important strategic task for China in a long time to come. As the reduction and substitution of coal is an inevitable choice for realizing “double carbon” goals, and renewable energy in the short term is difficult to become the main energy, its large-scale development facing many challenges, the resources of oil and gas (especially natural gas), as relatively clean fossil energy, can play an important role in realizing the “double carbon” goals and the energy security. However, the exploitation and utilization of oil and gas resources is also in front of a lot of problems, such as poor conventional oil and gas resources, geopolitical risks to the import of overseas resources, insufficient scientific and technological support for the exploitation of unconventional oil and gas resources, low efficiency and high emission intensity of the utilization of oil and gas resources and so on. The authors suggest, therefore, we should fully understand the strategic position of the exploitation and utilization of oil and gas resources in the process of energy transformation and the construction of modern energy system in the future, to make comprehensive arrangements for the exploitation and utilization of unconventional oil and gas resources, to pay attention to the evolution of geopolitical situation to promote the diversified development of oil and gas resources, to apply digital technology to improving the efficiency of the exploitation and utilization of oil and gas resources, and to explore new models of multi-energy integration of “oil and gas + clean energy”.

Key Words: “double carbon” goals; energy security; oil and gas resources