

迈向“双碳”研究系列报告

《双碳目标下中国天然气产业发展路径与
对策建议》
(C系列-2022C01)

中国石油大学（北京）
中国油气产业发展研究中心
碳中和与能源创新发展研究院

2022年5月10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。

一、引言

（一）研究背景

2020年9月22日，习近平主席向世界庄严宣示中国气候应对承诺，即2030年碳达峰、2060年碳中和（以下简称“双碳目标”）。中国成为目前唯一承诺碳中和的发展中大国。由于中国的贡献，预计全球碳中和时间将提前5-10年。中国要在未来40年内完成从碳排放达峰到碳中和的转型，就需要建立起以新能源和可再生能源为主体的可持续能源体系。这需要全社会经济体系、能源体系、技术体系等方面做出巨大的改变，这其中最重要的是能源系统的深度转型与革命性变革。中国的能源转型与变革不是别国的照搬与复制，而是深入结合中国国情之后的创造性选择。

（二）双碳目标下天然气产业定位

与世界其他国家相比，中国现有的能源结构仍以煤炭等化石能源为主，化石能源占一次能源消费的85%以上。即使中国同样拥有世界上最快的可再生能源发展速度，但其发展规模仍不足以满足中国巨大的能源需求。这意味着，必须在可再生能源规模化之前，寻求可堪大任的过渡性能源。

天然气的碳排放量要远远低于煤炭和石油，是最为清洁的化石能源。天然气的相对低碳性、资源丰富性、技术成熟

性等决定了其无疑是双碳目标实现下中短期内中国的重要选择。然而相比可再生能源，天然气全产业链碳足迹强度仍然不低，这使得其发展路径也将面临着高度的不确定性。因此，面向双碳目标的天然气产业发展路径研究就显得尤为必要。

二、研究内容

主要研究内容包括三部分，一是通过对世界代表性机构最新研究的总结分析来讨论加速转型背景下全球能源消费发展趋势分析，从国际视角研究天然气可能的发展大势，并作为判断中国与国际天然气发展期的重要比较对象；二是通过量化模型来直接预测不同情境下中国能源消费量及天然气在其中作用等的变化，该分析思路是目前主流的研究思路；三是与上一部分对天然气分析的思路有所不同，从碳中和目标的基本要求，即碳源与碳汇相等的角度出发，通过分析2060年潜在碳汇能力，倒推反算可能天然气未来发展情况。后两部分都是对天然气未来走势的判断，但是是从两个不同的视角，以实现天然气未来发展的全面理解。

（一）加速转型背景下全球能源消费发展趋势分析

能源作为二氧化碳等温室气体排放的绝对主因，可以预期，世界主要经济体碳中和目标的提出，将催生全球能源系

统从“一般转型”情景向“加速转型”情景实现。随之将带来能源消费结构的深度调整。为充分了解碳中和目标对全球能源消费趋势的影响，课题组分析研究了国际能源署（IEA）、美国能源信息署（EIA）、欧佩克（OPEC）、挪威船级社（DNV）、国际可再生能源署（IRENA）、埃克森美孚（ExxonMobil）、英国石油（BP）、挪威国家石油（Equinor）、壳牌（Shell）、中国石油（CNPC）、清华大学、国家电网等国内外代表性研究机构建立的应对气候变化不同情景模型下全球能源消费及结构等趋势预测结果，并将其总结概括为一般转型情景和加速转型情景，通过对比两种情景来分析碳中和对全球能源变革的深度影响。

1. 一般转型情景

这种情景考虑了那些已经宣布的应对气候变化的相关政策，但是对于未来可能出现的更强有力的气候应对政策则没有考虑，比如没有考虑中国的 2060 碳中和目标。在此情景下，到 2040 年，全球煤炭消费将从 2019 年的 37.7 亿吨标油下降到 32.5 亿吨标油，在一次能源消费中的比重从 27% 下降至 19%；石油消费将从 2019 年的 46.1 亿吨标油下降到 45.12 亿吨标油，在一次能源消费中的比重从 33% 下降至 27%；天然气消费将从 2019 年的 33.78 亿吨标油增长至 43.47 亿吨标油，在一次能源中的比重从 24% 增加到 26%；可再生能源或非化石能源将从 2019 年的 21.86 亿吨标油增长至 46.97 亿吨

标油,增长一倍多,在一次能源中的比重从16%增长至28%。
具体结果见图1。

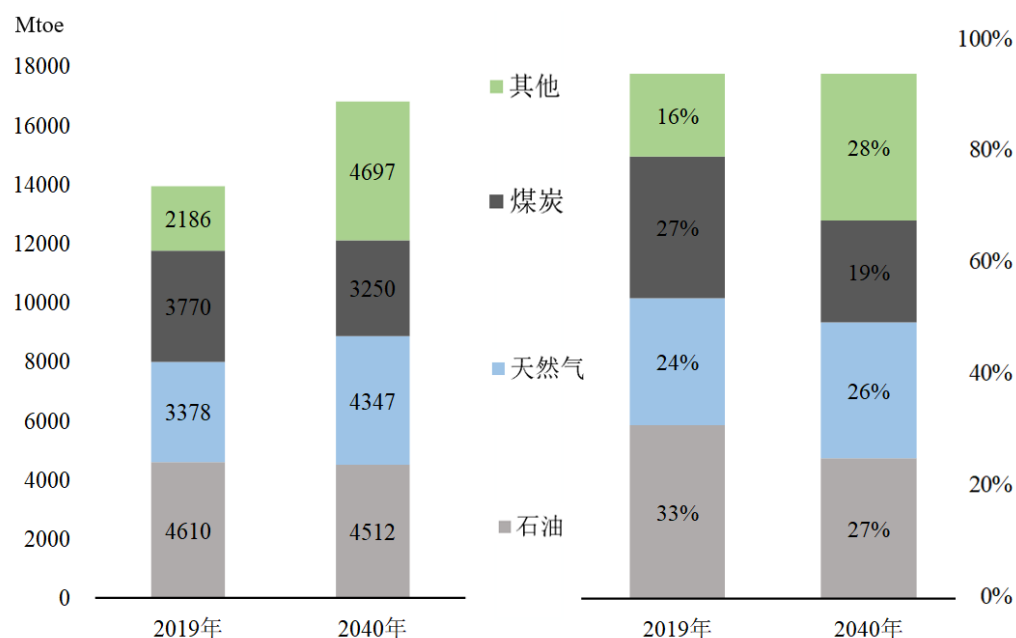


图1 一般转型情景下主要机构的全球能源消费预测均值

2. 加速转型情景

该情景与一般转型情景不同,考虑了更强有力的气候变化应对政策。这些政策有些是面向可持续发展目标,有些是面向1.5°C温控目标。这些政策对未来能源转型的影响更大、更深刻。预测结果显示,到2040年,全球煤炭消费将从2019年的37.7亿吨标油下降到15.58亿吨标油,在一次能源消费中的比重从27%下降至11%;石油消费将从2019年的46.1亿吨标油下降到29.89亿吨标油,在一次能源消费中的比重从33%下降到22%;天然气消费将从2019年的33.78亿吨标油下降至27.51亿吨标油,在一次能源中的比重从24%下

降至 20%；可再生能源或非化石能源将从 2019 年的 21.86 亿吨标油增长至 66.58 亿吨标油，在一次能源中的比重从 16% 增长到 47%，与化石能源占比几乎持平。具体结果见图 2。

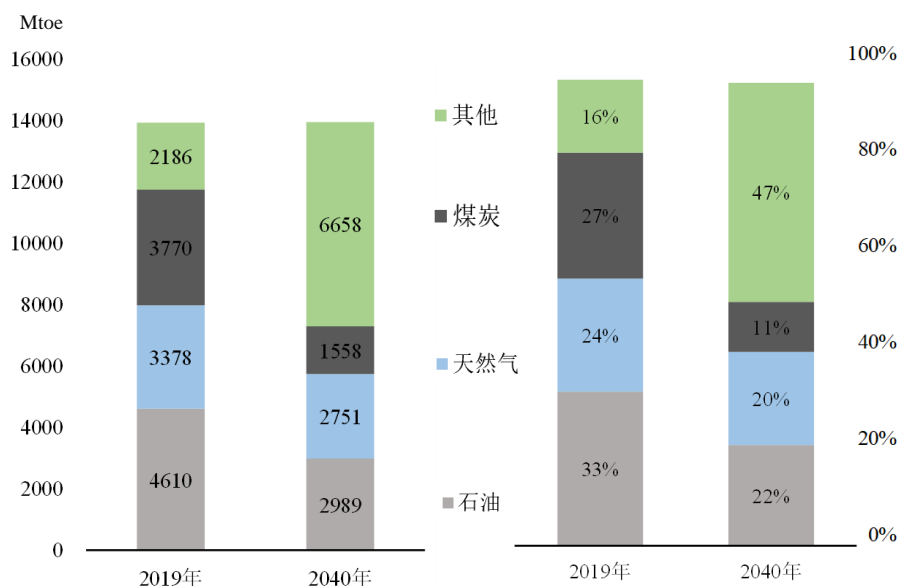


图 2 加速转型情景下主要机构的全球能源消费预测均值

通过对比两种情景下的预测结果可知，在一般转型情景中，能源消费中碳排放最高的煤炭，无论是消费量还是所占比例都将在未来呈现缓慢下降趋势，非化石能源的消费量和占比都将呈现快速增长趋势。对于天然气而言，由于碳中和目标在一般转型中尚没有完全体现，全球天然气消费规模在一般转型情景中稳定增长，其一次能源消费占比也相对稳定，在 2040 年仍能达到 26%。在加速转型情景中，由于考虑了各国更强有力的气候应对政策，煤炭消费量和占比均加速下降，非化石能源的消费量和占比将以更快的速度上涨；作为含碳能源的天然气，无论是消费规模还是一次能源消费占比

在 2040 年都低于当前水平。

（二）双碳目标下中国能源消费发展趋势分析

双碳背景下，需重新审视中国天然气消费的中长期发展趋势及其在能源消费结构中的比重，这既是能源系统深度低碳的必然要求，也是认清天然气地位、保障天然气产业自身可持续发展的重要前提。课题组选取 8 个代表性的综合评估模型构建多模型比较框架，对多情景下中国未来的能源消费总量、天然气消费及其占比进行跨模型比较分析。

1. 模型介绍

课题组构建的多模型对比框架包括 CE3METL、DNE21+、IPAC、AIM/CGE、IMAGE、REMIND、WITCH、POLES，模型全称见表 1。模型开发的国家有所区别，具体的区域划分也有所不同。针对全球尺度开展评价分析的有日本地球环境产业技术研究院（RITES）开发的 DNE21+模型，日本国立环境研究所（NIES）开发的 AIM/CGE 模型，荷兰环境评估署（PBL）开发的 IMAGE 模型，德国波茨坦气候影响研究所开发的 REMIND 模型，意大利 Fondazione Eni Enrico Mattei（FEEM）研究所开发的 WITCH 模型，法国格勒诺布尔大学（University of Grenoble）最初开发、现由欧盟委员会联合研究中心（JRC）开发维护的 POLES 模型；针对中国开展评价

分析的是中国科学院开发的 CE3METL 模型、国家发展和改革委员会能源研究所开发的 IPAC 模型。

表1 模型全称表

缩写	全称
DNE21+	Dynamic New Earth 21 model
IPAC	Integrated Policy Assessment model for China
AIM/CGE	Asia-Pacific Integrated Model/ Computable General Equilibrium
IMAGE	Integrated Model to Assess the Global Environment
REMIND	REgional Model of INvestments and Development
WITCH	The World Induced Technical Change Hybrid model
POLES	Prospective Outlook on Long-term Energy Systems
CE3METL	China Energy-Economy-Environment Model with Endogenous Technological change by employing Logistic curves

虽然各模型均包含能源系统或经济系统子模块，并以此为基础往外扩展延伸到环境、大气、土地等其他子系统，但侧重点有所不同。CE3METL 模型是技术驱动的全球能源—经济—环境（3E）系统集成评估模型的中国化版本。CE3METL 是基于经典的自顶向下 IAM 框架的中国单部门模型，由能源、经济和排放三个子模块构成，其特点主要体现在两大方面：①引入了 Logistic 技术扩散机制，以替代传统的常弹性替代函数方法（CES），在刻画多重能源技术演替方面具有较好的表现，为自顶向下模型框架中丰富自底向上的技术细节提供了切实可能；②较早发展了多因素技术学习曲线，以内生刻画非化石能源技术进步过程，继而减少传统纯

外生技术描述方式引起的对技术发展水平的低估。DNE21+模型的本质是同时优化多时点的动态线性规划模型。通过自底向上的方式刻画能源供应（电力生产等）和 CCS 技术。因此，在既定的减排目标下，可以使用自底向上的方式单独评价高耗能部门如钢铁、水泥等的节能和减碳潜力；同时，可通过自顶向下的方式评价能源需求侧技术。AIM/CGE 是 AIM 综合评估模型体系的核心部分，本质上是递归动态的可计算一般均衡（CGE）模型。IMAGE 模型旨在研究人类与自然系统间的动态交互关系，适用于大规模（主要是全球）和长时期（直到 2100 年）尺度上评估人类活动对生态系统与自然资源的影响，以及这些影响如何阻碍维持人类发展的生态系统服务。REMIND 模型使用 Ramsey-type 宏观经济内生增长模型原理构建能源—经济一般均衡模型，同时链接了自底向上的能源系统模型，在分析气候政策冲击下的能源经济系统反应方面具有特定的优势。WITCH 模型本质是自顶向下的新古典主义最优增长模型，通过在模型中嵌套自底向上的能源投入变量，在博弈论框架中分析能源技术替代和内生技术进步对最优气候应对策略的影响。POLES 模型本质上是能源系统局部均衡模型，在不考虑与经济部门的反馈影响背景下，通过迭代模拟，实现对能源系统的长期优化。IPAC 模型最初是基于中国实际的能源环境综合评价模型，后来在区域尺度上逐渐扩展加入亚洲及世界其他地区，同时硬耦合了多能源

技术优化模型，其优势体现在参数设置更贴合发展中国家的实际情况。

2. 情景介绍

课题组选取 NDC（国家自主减排）情景、基准情景和碳中和情景分别开展情景分析，从而综合研究不同气候目标下的中国能源消费总量及天然气消费量趋势。各情景的基本描述如下：①NDC 是 National Determined Contributions（国家自主贡献）的简称，是各国在《巴黎协定》框架下根据自身情况确定本国在应对气候变化过程中可贡献的减排目标。该情景模型将中国在 2015 年 6 月提出的国家自主贡献目标的落实和延伸作为减排政策的基础。该情景的主要目标是中国二氧化碳排放在 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰、单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%；②基准情景假设全球在 2020 年前执行国家政策，2020 年后执行经济最优的减排方式来控制 2011—2100 年间全球碳预算在 1000Gt（1Gt=10 亿吨）二氧化碳当量，从而确保相比工业化水平至少有 66%以上概率温度上升小于 2.0°C；③碳中和情景假设全球在 2020 年前执行国家政策，2020 年后执行经济最优的减排方式来控制 2011—2100 年间全球碳预算在 400Gt 二氧化碳当量，从而确保相比工业化水平至少有 66%以上概率温度上升小于 1.5°C。

3. 中国一次能源消费预测

三种情景下，2020—2060年中国一次能源消费总量如图3和表2所示。NDC情景下，2060年中国一次能源消费总量在40~68亿吨标准煤范围内。除WITCH和POLES模型中一次能源消费总量持续上涨外，多数模型结果显示在2030—2050年间，中国一次能源消费总量达到峰值，之后逐年下降。

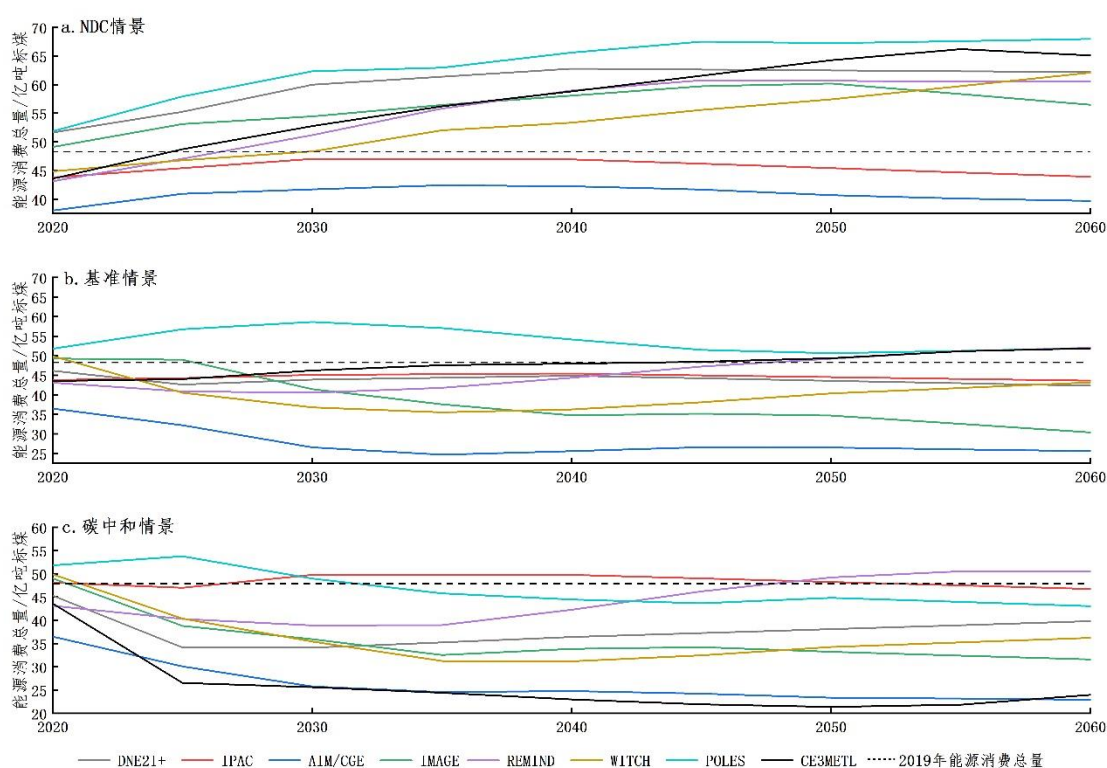


图3 不同情景下中国能源消费总量的中长期预测

表2 中国一次能源消费总量模拟 单位：亿吨标准煤

情景	年份	CE3METL	DNE21+	IPAC	AIM/CGE	IMAGE	REMIND	WITCH	POLES	均值
NDC	2030	52.8	60.0	47.0	41.7	54.5	51.2	48.4	62.4	52.3
	2045	61.6	62.6	46.2	41.7	59.7	60.8	55.6	67.5	57.0
	2060	65.1	62.2	44.0	39.7	56.5	60.6	62.1	68.0	57.3
2.0 °C	2030	46.6	43.9	45.1	26.6	41.5	40.6	36.8	58.6	42.5
	2045	48.5	44.3	45.0	26.6	35.2	47.2	38.2	51.5	42.1

	2060	51.9	42.4	43.6	25.6	30.4	52.0	43.2	51.9	42.6
	2030	25.6	34.1	50.0	25.8	36.0	38.9	35.4	49.0	36.9
1.5 °C	2045	21.9	37.3	49.0	24.2	34.2	46.2	32.5	43.7	36.1
	2060	24.0	39.9	46.8	23.0	31.6	50.5	36.2	43.0	36.9

基准情景下，到 2060 年中国一次能源消费总量介于 25.6 ~ 52.0 亿吨标准煤。仅在 REMIND 模型中，一次能源消费总量保持上升趋势。POLES 和 AIM/CGE 模型下，一次能源消费总量分别在 2030 和 2040 年达到峰值，之后逐年下降。除 REMIND 模型外，其他模型 2060 年结果小于 2019 年一次能源消费总量。除 POLES 模型外，其他模型 2060 年结果小于 2019 年一次能源消费总量。

碳中和情景下，2060 年中国一次能源消费总量介于 22.9 ~ 46.8 亿吨标准煤，除 REMIND 模型外，其他模型 2060 年的一次能源消费总量均小于 2019 年。

NDC 情景下，一次能源消费总量在 2030 年将持续上升，均值水平为 52.3 亿吨标准煤。除 IPAC 模型外，其余模型显示一次能源消费总量在 2045 年达到峰值，均值水平为 57.0 亿吨标准煤。除 CE3METL、WITCH、POLES 模型之外，其余模型结果显示一次能源消费总量在 2060 年开始下降回落，均值水平为 57.3 亿吨标准煤。

碳中和情景下，除 CE3METL、POLES 模型外，多数模型结果显示一次能源消费总量在 2030 年呈下降趋势，均值水平为 42.5 亿吨标准煤。CE3METL、DNE21+、REMIND、

WITCH 模型显示一次能源消费总量在 2045 年将小幅上涨，其余模型显示一次能源消费总量下降或基本不变，均值水平为 42.1 亿吨标准煤。DNE21+、IPAC、AIM/CGE、REMIND 模型结果显示一次能源消费总量在 2060 年将下降，其余模型显示一次能源消费总量将微涨，均值水平为 42.6 亿吨标准煤。

碳中和情景下，除 IPAC 模型外，其余模型结果显示一次能源消费总量在 2030 年呈下降趋势，均值水平为 38.5 亿吨标准煤。DNE21+、REMIND 模型显示一次能源消费总量在 2045 年将增加，其余模型显示一次能源消费总量将下降，均值水平为 38.2 亿吨标准煤。IPAC、AIM/CGE、IMAGE、POLES 模型显示一次能源消费总量将在 2060 年下降，其余模型显示一次能源消费总量将微涨，均值水平为 38.7 亿吨标准煤。

到“碳中和”目标年，中国一次能源消费总量到底将处于何种水平是实现碳中和过程中各界关注的焦点问题，结合 8 个模型结果，对中国 2060 年一次能源消费总量模拟结果梳理如下：受到技术、经济不确定性及模型具体参数设置差异的影响，即使在相同气候目标情景下，不同模型仍给出了差异化的结果，如表 3 所示。将 2060 年的一次能源消费总量预期分为高、中、低三种水平，NDC 情景、基准情景和碳中和情景下，中等能源消费水平范围分别为：56.5 亿吨、42.3 ~

43.6 亿吨和 31.6 ~ 36.2 亿吨标准煤。

表3 2060年不同气候目标情景下中国一次能源消费总量模拟表

消费总量水平	NDC 情景		基准情景		碳中和情景	
	消费总量/ 亿吨标准煤	模型	消费总量/ 亿吨标准煤	模型	消费总量/ 亿吨标准煤	模型
高	60.6 ~ 68.0	CE3METL、 REMIND、 WITCH、 DNE+21、 POLES	51.9 ~ 52.0	CE3METL、 REMIND、 POLES	40.0 ~ 46.8	DNE+21、 POLES、 IPAC、 REMIND
中	56.5	IMAGE	42.3 ~ 43.6	DNE+21、 IPAC、 WITCH	31.6 ~ 36.2	IMAGE、 WITCH
低	39.7 ~ 43.9	IPAC、 AIM/CGE	25.6 ~ 30.4	IMAGE、 AIM/CGE	23.0 ~ 24.0	CE3METL、 AIM/CGE

另一个焦点问题是中国一次能源消费将在何时达峰。本文结合模拟结果发现，更加严格的气候情景不仅有利于控制一次能源消费总量的峰值水平，而且促使达到峰值的时间更加提前。NDC 情景下，WITCH 和 POLES 模型的结果显示消费峰值为 2060 年，最早的达峰年份是 2030 年，消费量峰值水平介于 42.4 ~ 68.0 亿吨标准煤。基准情景下，DNE21+、REMIND、AIM/CGE 和 IMAGE 模型结果显示消费峰值在 2020 年就已达到，但仍有模型结果显示将在 2060 年达到峰值，消费量峰值水平介于 36.5 ~ 58.6 亿吨标准煤。碳中和情景下，DNE21+、WITCH、AIM/CGE 和 IMAGE 模型结果显示消费峰值在 2020 年就已经达到，且最迟达到峰值的年份提前到了 2055 年，消费量峰值水平介于 36.5 ~ 53.8 亿吨标准煤。

4. 中国天然气消费及占比预测

(1) 天然气消费量

三种情景下，2020—2060 年中国天然气消费量如图 4、表 4 所示。

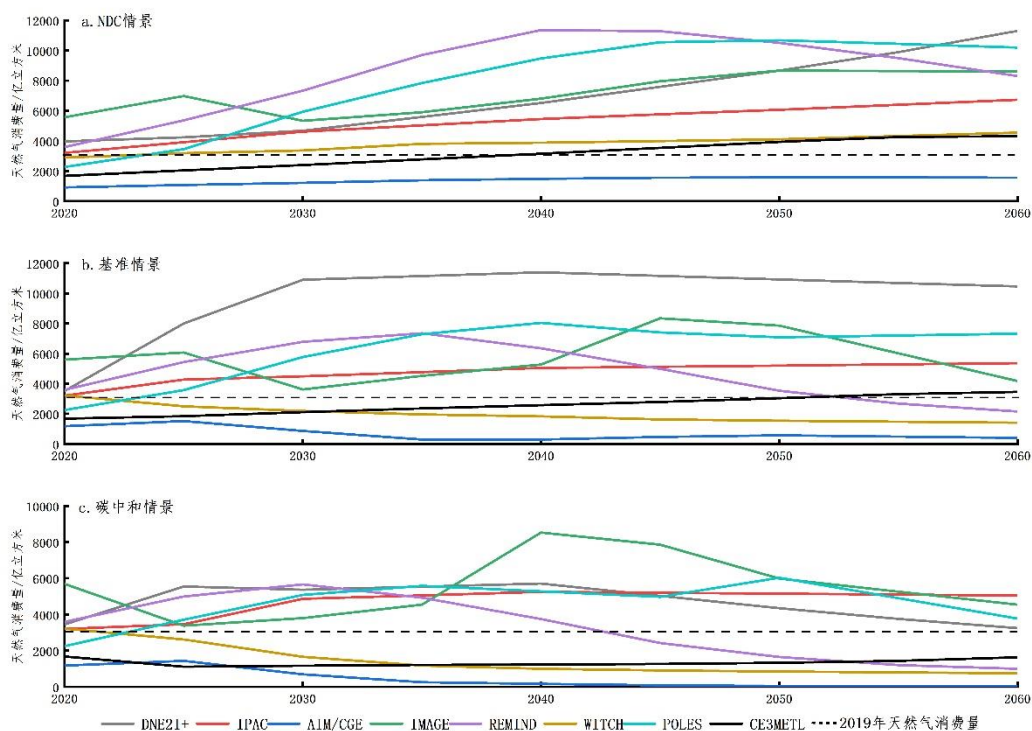


图4 不同情景下中国天然气消费的中长期预测

表4 关键年份天然气消费量表

单位：亿立方米

情景	年份	CE3METL	DNE21+	IPAC	AIM/CGE	IMAGE	REMIND	WITCH	POLES	均值
NDC 情景	2030	2 401.6	4 674.0	4 616.6	1 218.8	5 329.2	7 331.4	3 365.9	5 939.9	4 359.7
	2045	3 539.5	7 591.5	5 761.8	1 557.6	7 962.0	11 278.6	3 993.7	10 550.8	6 529.4
	2060	4 307.1	11 297.4	6 736.3	1 561.1	8 606.5	8 296.9	4 544.7	10 193.8	6 943.0
基准 情景	2030	2 105.0	10 899.8	4 496.1	865.1	3 613.0	6 789.8	2 187.3	5 778.5	4 591.8
	2045	2 790.0	11 160.7	5 131.5	466.7	8 340.5	4 990.9	1 619.8	7 404.1	5 238.0
	2060	3 455.0	10 460.8	5 367.5	401.0	4 171.0	2 145.2	1 411.0	7 327.4	4 342.4
碳中和 情景	2030	1 166.6	5 366.6	4 866.3	690.6	3 795.5	5 665.9	1 659.3	5 080.4	3 536.4
	2045	1 267.7	5 025.2	5 198.0	77.0	7 861.8	2 421.2	905.1	4 973.9	3 466.2
	2060	1 633.0	3 246.3	5 049.9	33.3	4 539.3	995.7	747.8	3 772.8	2 502.3

NDC 情景下，多数模型结果显示 2020—2060 年期间天然气消费量呈现出持续增长的态势，但增长速度在 2045 年后放缓。

基准情景下，仅有 IPAC 模型显示 2020—2060 年期间天然气消费量持续增长，WITCH 模型则显示 2020—2060 年期间天然气消费量持续下降。多数模型结果显示 2025—2045 年间天然气消费量到达顶峰，之后天然气消费量逐渐下降。

碳中和情景下，WITCH 模型显示 2020—2060 年期间天然气消费量持续下降。多数模型结果显示 2020—2060 年期间天然气消费量会先上升，到达平台水平后再下降。相比基准情景，该情景下天然气消费量平台期更早来临。

NDC 情景下，除 IMAGE 模型外，其余模型结果显示天然气消费量在 2030 年前持续上涨，均值水平为 4359.7 亿立方米。除 CE3METL 模型外，其余模型结果显示在 2045 年天然气消费量到达峰值，均值水平为 6529.4 亿立方米。REMIND 和 POLES 模型结果显示 2060 年天然气消费量下降，其余模型结果显示 2060 年天然气消费量上升或维持不变，均值水平为 6943.0 亿立方米。

基准情景下，IMAGE、WITCH、AIM/CGE 模型显示天然气消费量在 2030 年下降，其余模型结果显示 2030 年天然气消费量上升，均值水平为 4591.8 亿立方米。IMAGE 模型显示天然气消费量在 2045 年达到峰值，CE3METL、IPAC 模

型显示天然气消费量继续上升，其余模型结果显示天然气消费量在 2045 年下降，2045 年天然气消费量均值水平为 5238.0 亿立方米。除 POLES、IPAC、DNE21+模型外，其余模型结果显示天然气消费量在 2060 年仍将上涨，均值水平为 4342.4 亿立方米。

碳中和情景下，WITCH、AIM/CGE 模型显示天然气消费量在 2030 年下降，其余模型结果显示 2030 年天然气消费量在上升或到达峰值，均值水平为 3536.4 亿立方米。除 POLES、IPAC、CE3METL 模型外，区域模型结果显示 2045 年天然气消费量下降，均值水平为 3466.2 亿立方米。除 CE3METL 模型外，其余模型结果显示 2060 年天然气消费量将进一步下降，均值水平为 2502.3 亿立方米。

天然气消费峰值出现时间较一次能源消费总量峰值出现时间更迟，但不同模型对峰值时间的预期结果差异较大。NDC 情景下，天然气消费量峰值在 2040 年后达到，AIM/CGE、IMAGE 和 POLES 模型支持峰值将在 2050 年达到，DNE21+、IPAC、WITCH 模型则支持峰值将在 2060 年达到。基准情景下，IPACH 和 CE3METL 模型结果显示天然气消费峰值最迟将在 2060 年达到，DNE21+、REMIND 和 POLES 模型则支持峰值将在 2040 年达到。碳中和情景下，CE3METL 模型结果显示天然气消费量峰值最迟将在 2060 年达到，DNE21+、IPAC、IMAGE 模型支持峰值将在 2040 年达到。

(2) 天然气消费占比

图 5 以天然气在一次能源消费中占比 (以下简称天然气消费占比) 的形式展示了 2060 年不同模型分别在 NDC 情景、基准情景和碳中和情景下的预测结果。NDC 情景下, 多模型预测结果介于 5.3%~24.1%, 均值为 16.0%。以 DNE21+ 模型预测结果最高, 天然气消费占比为 24.1%, AIM/CGE 模型预测结果最低, 天然气消费占比为 5.3%; REMIND、POLES、IPAC 和 IMAGE 模型的预测结果较为接近, 分别为 18.3%、20%、20.5%、20.4%。基准情景下, 多模型预测结果介于 2%~32.8%, 均值为 13.6%。以 DNE21+ 模型预测结果最高, 天然气消费占比达到 32.8%; AIM/CGE 模型预测结果最低, 天然气消费占比为 2%; IPAC、IMAGE 和 POLES 模型的预测结果较为接近, 分别为 16.5%、18.4%和 18.9%。碳中和情景下, 多模型预测结果在 0.6%~19.3%, 均值为 9%。以 IMAGE 模型预测结果最高, 天然气消费占比达到 19.3%; AIM/CGE 模型预测结果最低, 天然气消费占比为 0.6%; CE3METL、DNE21+、POLES 模型的预测结果较为接近, 分别为 9.2%、10.8%、11.6%。

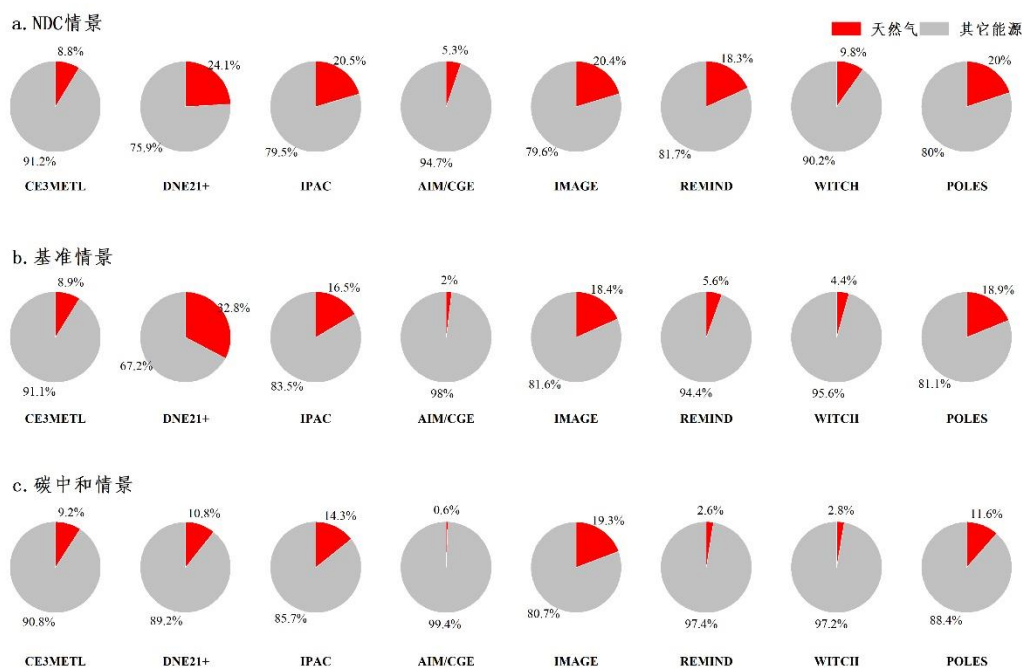


图5 2060年三种情景下不同模型的天然气消费占比

多情景对比而言，在 2.0 °C 温控目标下，2060 年天然气消费在一次能源结构中约占 13.6%。在更为严格的 1.5 °C 温控目标下，天然气消费占比要下降至 9%。

通过各模型之间的对比可知，IMAGE 模型预测结果相对较高，NDC 情景、基准情景、碳中和情景下天然气消费占比分别为 18.8%、36.6%、33.2%；AIM/CGE 模型预测结果相对最低。另外，IMAGE 和 DNE21+模型的预测结果显示基准情景和碳中和情景下天然气消费占比高于 NDC 情景，其他 5 个模型的预测结果表现为 NDC 情景、基准情景和碳中和情景下天然气消费占比呈逐渐下降的态势。由此可见，在相同的情景设置下，利用同一套基础数据，不同模型的预测结果都会展示出明显差异。

综上所述，气候目标差异会对未来的天然气消费产生重要影响。相比 NDC 情景，基准情景下 2030 年天然气消费量增加了 5%，2045 年和 2060 年天然气消费量则分别减少了 20%和 37%。碳中和情景相对于 NDC 情景而言，2030 年、2045 年和 2060 年天然气消费量分别减少了 19%、47%和 64%。基于 1.5 °C 温控目标开展碳中和目标分析时，2060 年天然气消费占比为 9%，低于 NDC 情景(16%)和基准情景(13.6%)。这表明在碳中和目标下天然气发展会“减速”；但是即使在碳中和目标下，到 2060 年天然气消费对于满足能源消费仍具有重要作用。

（三）天然气产业发展前景及实现路径分析

在顺应全球发展趋势、把握双碳目标对中国能源系统量化约束性影响的基础上，课题组依据碳中和目标导向下能源转型的相关研究，总结能源发展的不同假设情景，并估算未来天然气的发展规模。根据所分析的天然气发展前景描绘其未来不同的发展路径，探知其在未来发展中可能面临的机遇与挑战，最后结合天然气开发利用现状，给出在双碳目标下天然气产业高质量发展的实施建议。

1. 碳中和目标下天然气发展前景探讨

大气中 CO₂ 浓度是碳源排放和碳汇吸收两者相平衡的结果。《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）将碳源定义为

向大气中释放 CO₂ 的过程、活动或机制，大气中的 CO₂ 主要由人为活动导致的化石燃料燃烧产生；UNFCCC 将碳汇定义为从大气中清除 CO₂ 的过程、活动或机制，碳汇主要包括森林碳汇和海洋碳汇。随着技术的发展，还可以通过捕获化石燃料和生物质能燃烧释放的 CO₂ 并将其存储在地下的负碳技术，即碳捕获封存（Carbon Capture and Storage, CCS）来完成碳汇。因此，未来的碳汇主要由三个部分组成，陆地碳汇、海洋碳汇以及 CCS。碳汇相比碳源更不易因人为因素的驱动而产生较大改变，更容易对其进行估算。因此，本报告通过估算碳汇的方式来得到 2060 年的碳源量，与现有的排放情形进行对比，由此分析中国碳减排的基本发展趋势，并结合碳中和目标导向下化石能源的消费结构，倒推预估 2060 年天然气消费量，由此量化探讨其发展前景。

（1）情景一：《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》
——清华大学气候变化与可持续发展研究院

该研究强调，中国 2060 年实现碳中和本质上就是实现 1.5 °C 目标为导向的长期深度脱碳转型路径。因而 2060 年碳中和情形下的能源发展情况可视作与实现 1.5 °C 能源转型的情况相同。该研究中 1.5 °C 目标导向下 CO₂ 净零排放情景的一次能源消费构成的基本情况为：到 2050 年，非化石能源占比超过 85%，煤炭比例将低于 5%。该情景下的碳汇量情况为：陆地碳汇量 7.8 亿吨，CCS 碳汇量 8.8 亿吨。

其他相关研究显示中国海洋每年可从大气中吸收约 2.4 亿吨 CO₂，由此可以估算 2060 年由陆地碳汇量、海洋碳汇量和 CCS 碳汇量组成的中国碳汇总量约为 19 亿吨。碳中和情形下，CO₂ 排放量同样为 19 亿吨。1.5 °C 目标导向下，2050 年一次能源消费比例构成显示，化石能源消费约占一次能源总量的 15%，其中煤炭占比为 5% 左右，石油与天然气则共占比 10%，假设石油与天然气消费量相同，则天然气消费量占比约为 5%。该一次能源消费结构可视为碳中和情景下的一次能源消费结构，并假设碳排放均由化石燃料燃烧产生，结合碳排放系数，通过计算可以预估得到 2060 年天然气消费量约为 2 200 亿立方米。

（2）情景二：《2060 年碳中和目标下的低碳能源转型情景分析》——清华大学能源环境经济研究所

该研究就 2060 年碳中和情景下的一次能源消费总量以及各能源消费量给出了较为明确的数值：一次能源消费总量约为 47 亿吨标准煤，非化石能源消费占一次能源消费的比例为 81%，煤炭消费占比 7%，石油消费占比 8%，天然气消费占比 4%。根据该预估值，计算该情景下 2060 年中国的 CO₂ 排放量约为 20 亿吨，天然气消费量约为 1 400 亿立方米。该研究中并未就陆地碳汇量与海洋碳汇量给出明确的数据，但就 2060 年碳中和情景下的 CCS 碳汇量给出了与情景一不同的假设，该研究预估 2060 年中国 CCS 碳汇量将达 16 亿吨。

由此可知该情景下的陆地碳汇量与海洋碳汇量的和约为 4 亿吨 CO₂。

（3）情景三：最大化碳汇量情景

为最大化地讨论碳中和情景下可容纳的碳排放量与天然气消费情况，在不同碳汇类型下取当前最大碳汇量，以组成情景三：最大化碳汇量情景，由此了解达成碳中和目标所允许的最宽松减排力度。

陆地碳汇量除情景一和情景二的值外，中国科学院大气物理研究所的相关研究结果显示：中国陆地生态系统年均吸收 CO₂ 约 11.1 亿吨，要大于上述两情景中的碳汇值，因此该情景中的陆地碳汇量取 11.1 亿吨，海洋碳汇量取情景一中的 2.4 亿吨，CCS 碳汇量取情景二中的 16 亿吨，最后组成情景三的碳汇总量为 29.5 亿吨。表 5 总结了不同情景下的碳汇量组成情况。

碳中和情景下，碳排放量同样为 29.5 亿吨。这是就当前研究资料和发展情况而言，碳中和所允许的最大碳排放。由于该情景下并无与 2060 年一次能源消费结构相关的支撑资料，所以分别利用情景一与情景二中的一次能源消费结构，结合碳排放系数来计算当达成碳中和，碳排放量达到 29.5 亿吨时，天然气的消费量情况，并得到以下结果。

1) 利用情景一中的一次能源消费结构：煤炭、石油和天然气占一次能源消费的比例均为 5%。经计算，最大化碳汇量

情景下，2060 年达成碳中和时天然气的消费量为 3 400 亿立方米；

2) 利用情景二中的一次能源消费结构：煤炭消费在一次能源消费中的占比为 7%，石油占比 8%，天然气占比 4%。经计算，最大化碳汇量情景下，2060 年达成碳中和时天然气的消费量为 2 000 亿立方米。

表5 不同情景下的碳汇量情况表（10亿吨 CO₂）

情景	不同类型碳汇量			碳汇总量
	陆地	海洋	CCS	
一	7.8	2.4	8.8	19.0
二		4.0	16.0	20.0
三	11.1	2.4	16.0	29.5

不同情景下碳排放量与天然气消费量变化趋势如图 6 所示。IEA 公布的 2019 年中国碳排放总量为 98 亿吨，由上述碳中和导向下不同能源消费情景的碳排放情况可知，中国需要在 40 年内减排 70 ~ 80 亿吨 CO₂，才可以在 2060 年实现碳中和，中国将面临前所未有的减排压力。2019 年，中国天然气表观消费量为 3064 亿立方米，由图 7 可知，在情景一、二和三中，2060 年碳中和情景下的天然气消费总量将比 2019 年下降 1/3 左右，而情景三中的天然气消费量则略高于 2019 年。在不同情景下，天然气消费量在达峰后的趋势变化存在较大差异，但整体呈现达峰后下降的变化趋势。这表明，在碳中和目标导向下以可再生能源为主体的新兴能源体系中，

天然气的发展空间将明显受限，其作为清洁能源的发展优势也得不到充分体现。因此，如何在有限的时间与空间内，发挥出其作为清洁能源的最大价值，积极助力碳中和目标的实现，是天然气行业务须关注的问题。

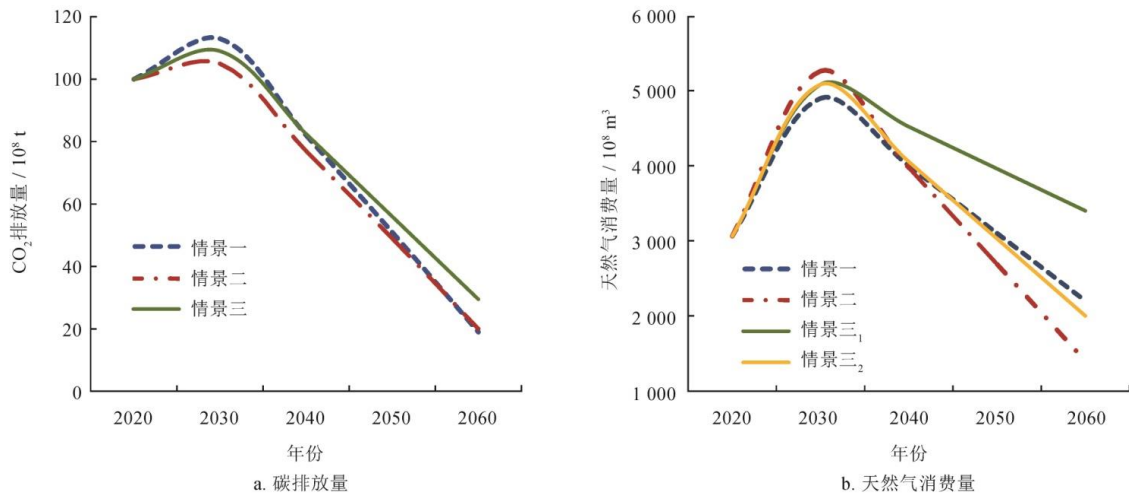


图6 碳中和目标导向下CO₂排放量和天然气消费量在不同情景下的发展趋势

2. 碳中和目标下天然气产业高质量发展路径

上述的研究表明，未来天然气面临着达峰后下降的变化趋势，其需求市场的发展空间也会有所萎缩。在碳中和目标导向下的能源改革进程中，天然气则需积极探索更为有效的低碳转型路径，寻求更高质量的发展，在并不宽裕的发展空间中发挥最大的效用，这就需要从全产业链的角度来思考减排。因此，天然气产业在碳中和目标导向下的实现路径在上游生产、贸易运输和下游消费三个方面都要涉及。碳中和即

为大气中碳源和碳汇达到均衡的一个状态。据 IEA 统计，2019 年世界能源活动导致的 CO₂ 排放量为 330 亿吨，远远高于碳汇量，由此导致大气中 CO₂ 过剩，引起气候变化等一系列问题。因此，在不同阶段，发展路径虽有所差异，但都应围绕降低碳源这一根本路径展开。

（1）上游生产

碳中和概念狭义上指的是 CO₂，更为宽泛的则指温室气体，据 IEA 的统计数据显示，世界温室气体排放的 73% 来自 CO₂，而占比 27% 的非 CO₂ 温室气体同样对大气产生着巨大影响，甲烷在非 CO₂ 温室气体中占据较大比例，是天然气的主要成分。空气中的甲烷主要来源于油气开采和储运过程中的泄露，甲烷在百年尺度上增温潜势是 CO₂ 的 21 倍左右，是实现有效减排需要着重控制的一类温室气体。对于天然气行业来说，仅天然气生产过程中排放的甲烷就超过全球油气行业的 50%。为实现天然气的高质量发展，需有效控制天然气开采过程中的甲烷排放，并将其作为天然气生产方面减碳措施的重点。这要求各参与主体共同努力：①政府应加大有关甲烷逃逸控制的政策与资金支持；②企业应积极探索科学有效的控制技术；③天然气开采过程中的用能也会产生碳排放，因此生产用能（主要为电力）应以可再生能源为主，以保证上游生产的全过程清洁化。

（2）贸易运输

天然气虽为清洁的化石能源，但其在开采、处理、储运及终端利用等方面仍然会有不少的碳排放产生。为实现天然气贸易全过程清洁化，碳中和 LNG 应运而生，成为天然气贸易碳中和的现实发展路径以及未来能源组合的重要组成部分。但由于碳中和 LNG 是能源市场的新兴事物，国内还未对碳中和 LNG 概念进行广泛的普及，外加碳中和 LNG 不能为下游买家带来有效的经济效益，导致目前国内市场对其接受度非常有限。但随着中国 2060 年实现碳中和目标的提出，国内能源终端消费者对绿色环保、节能减排的意识会逐渐提高，由此碳中和 LNG 为下游买家企业带来的社会效益也会逐步显现，会为其企业形象、信用评级等带来积极的社会联动效应。同时也会促进由多方参与的碳排放约束和交易机制的完善，包括政府对相关政策的引导和监管，上游供应商对核算信息的公开，下游买家对运营能力的提升等等。将碳中和 LNG 发展成为可持续业务，是碳中和目标导向下天然气高质量发展的重要组成部分，对加速中国能源结构转型，保障能源交易市场的积极健康发展具有重要的意义。

（3）下游消费

1) 发电终端

目前中国的电力结构仍以火力发电为主，2019 年，燃煤发电占火力发电总量的 90.24%，燃气发电占 4.61%，由此导

致电力行业成为碳排放的主要行业。因此，在目前中国以火力发电为主导的发电结构下，除了扩大非化石能源发电比例外，加快促进火力发电减排才是实现电力行业清洁化发展的重要路径，“以气代煤”应成为火力发电的主要发展趋势。但由于目前我国燃气发电得不到充足的资源支持，且未完全掌握燃气发电的核心技术，导致天然气发电发展受限。因此，我国应加大天然气自主开发力度，拓宽进口渠道，保障燃气资源供应，与此同时，还应加大科技创新力度，提升燃气轮机国产化水平，扩大天然气发电装机容量。同时还需大力发展 CCS 技术，将发电所产生的 CO₂ 收集储存起来，从而实现电力供应的全过程清洁化。

2) 工业燃料终端

工业是碳排放产生的主要行业，主要来源于高能耗产品如钢铁、水泥、玻璃、陶瓷等产品的制造过程。工业领域碳排放包括一次能源燃烧产生的碳排放和工业生产过程中通过化学或物理过程产生的碳排放两个部分。其中，工业化石能源燃烧的碳排放占工业领域碳排放总量的 80% 以上。因此，工业领域的减排路径同样是需要减少高碳化石能源的燃烧，提高天然气和可再生能源等清洁能源的使用比例。虽然目前工业占据天然气消费的较大比例，但由于天然气使用比例总体偏低，现有的工业用气改变不了工业碳排放的局面。所以，根本路径仍是需要加大天然气消费的市场占有率，大面积涵

盖高能耗制造业，并加快产业结构的调整，降低高耗能部门在工业整体中的占比，积极推动中国工业的清洁化发展。

3) 居民用气终端

中国与其他国家相比，居民用散煤量占煤炭总量的比例非常大，且散煤燃烧排放的污染物约为电煤的 10~20 倍，对空气质量的影响极大。近年来“煤改气”“煤改电”等政策的实施已有效改善了散煤燃烧的影响，居民用气也随之增加。但受到国内天然气供应不足、基础设施建设滞后及相关政策不健全等因素的影响，“煤改气”节奏开始放缓，散煤复烧的现象开始出现。碳中和目标的提出再一次强化了节能减排的决心，天然气行业需加强供应稳定，加快基础设施建设，加速天然气价格市场化，为“煤改气”政策的顺利实施、减碳目标的达成提供保障。

4) 化工终端

化工终端的用气需求主要是利用天然气做化工原料。随着 CCS 技术的普及和发展，CCS 与天然气化工的结合，由此发展出的“天然气制蓝氢”业务，将在提高天然气消费和减少碳排放方面发挥重要作用。氢能是世界上最干净的能源，资源丰富，可持续发展，是未来能源发展的新方向。氢气可由化石燃料产生，主要来源是天然气，其生产过程会伴生大量的 CO₂，通过 CCS 技术将其产生的 CO₂ 捕获封存，这样产生的氢气称为“蓝氢”。“蓝氢”的发展可极大拓宽天然气在

化工领域的发展渠道，提高制氢过程清洁化，并产生新能源氢能，可多方面促进碳中和目标的实现。

三、结论与建议

（一）结论

作为相对清洁但又是化石能源的天然气，未来的发展路径研究十分重要。研究发现，在加速转型情景下，全球天然气消费的增长期将缩减至少 10 年，预期天然气消费峰值将在 2030 年前到来。

由于中国目前的能源消费结构仍以高碳化石能源为主，中短期内很难依靠非化石能源实现碳中和目标，中国实现双碳目标所面临的形势则更为严峻。多模型模拟结果显示，到 2060 年，在 NDC 情景、基准情景、碳中和情景下中国一次能源消费总量均值分别为 57.3 亿吨标煤、38.8 亿吨标煤、33.7 亿吨标煤；天然气消费量均值分别为 6943.0 亿方、4342.4 亿方、2502.3 亿方；天然气消费占比均值分别为 18%、14.3%、8.8%。气候情景的选择对一次能源消费和天然气消费在 2020—2060 年间的趋势分化产生了明显影响，反映出中国天然气产业不同的潜在发展模式。模式一：天然气消费量在未来 40 年左右保持先快后慢的增长速度，发展前景最为乐观；模式二：天然气消费量在 2045 年之前稳步增加，2045 年左

右达峰后下降，发展前景较为中性；模式三：天然气消费量在 2040 年之前逐渐增加，2040 年左右达峰后下降。

相对于全球而言，中国把天然气作为桥梁能源的时间长度要远高于世界整体水平。即使在碳中和情景下，天然气消费在 2040 年前后才达峰，比相同情景下的世界平均水平晚 10 年。

从天然气上游生产、贸易运输和下游消费 3 个方面探讨了碳中和目标下天然气产业的实现路径，并根据未来天然气消费情况，将碳中和目标导向下的天然气发展前景分为消费量在达峰后下降和未达峰持续上升两种情景。在达峰后下降的情景中，强调天然气应以探索更为有效的低碳转型路径，寻求更高质量的发展为重点，实现路径主要侧重于在上游生产端降低碳源排放，在贸易运输端促进碳中和 LNG 等贸易行为的可持续发展；在未达峰持续上升的情景中，强调天然气发展应以提高其消费比例、释放发展潜能为重点，实现路径侧重于在主要用气行业加速提高用气量，以及在主要碳排放产生行业利用天然气进行高碳化石能源替代，以此降低碳源总量。

尽管天然气作为中国碳中和目标实现过程中的桥梁能源，较之于煤炭、石油有着相对乐观的发展前景，但其依然将面临 20 年左右消费达峰后的下降趋势。双碳目标下，天然气产业的发展面临巨大不确定性。这需要未雨绸缪，在能源

转型过程中积极探索中国天然气产业发展路径，在发展规模和时间匹配上发挥最大效用。

（二）建议

一是充分发挥碳中和目标下的天然气桥梁作用，在中短期内持续做大天然气规模。根据课题组分析，无论是何种情景下，天然气产业至少仍有 20 年的持续增长期，其作为过渡桥梁的时间显著高于全球水平，中国应坚定天然气产业发展信心，稳定行业发展预期和战略定位，紧抓这一关键增长期，多措并举提升天然气开发利用规模。

二是高度关注政策不确定性对行业发展的影响。根据课题组分析，NDC 情景下 2060 年天然气发展规模是碳中和情景的 2.8 倍，这充分体现了政策对天然气产业发展的重要性。然而当前天然气行业较多地关注与 NDC 一致的政策要求，对碳中和目标下潜在的重大变动研究较少。这要求行业充分考虑碳中和从承诺到未来政策重大调整的不确定性，树立风险运营和战略路径规划意识，避免因过度投资而导致的资产搁置风险。

三是充分认识到含碳能源的属性，确保天然气产业自身发展的环境高质量。天然气的开发、运输、终端利用过程都存在潜在的环境风险，例如上游开发和运输中潜在的甲烷泄漏、终端燃烧利用的二氧化碳排放等。天然气行业不仅要关

注下游消费的低碳化,还应在开发及贸易运输过程中推进“零碳”运营,实现天然气开发利用的全生命周期低碳化。

报告引用:唐旭,王建良,段宏波,刘明明,李明,李孛,丁聿,任凯鹏.双碳目标下中国天然气产业发展路径与对策建议[R].中国石油大学(北京)碳中和与能源创新发展研究院,2022C01,2022年5月10日。