



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院
碳中和与能源创新发展研究院

迈向“双碳” 研究系列报告

(C系列-2021C03)

《双碳目标下中国能源中长期走势评估》





双碳目标下中国能源中长期走势评估 (摘要性报告)

核心结论

- 碳达峰，碳中和情景下一次能源消费量将在 2060 年分别达到 49 亿吨标煤和 48.5 亿吨标煤，较照常情景一次能源消费量降低 3.4-3.9 亿吨标煤(6.5-7.4%)。
- 碳达峰，碳中和情景下的碳排放量将在 2060 年分别达到 50 亿吨和 15 亿吨 CO₂，较照常情景碳排放量降低 42-77 亿吨 CO₂ (45.7-83.7%)。
- 碳中和目标下，能源系统转型路径将分为：化石能源结构调整；可再生能源接替；高比例可再生能源消费主导三个阶段。
- 碳中和目标下，低碳化石能源将在中短期扮演重要角色，天然气发展潜力巨大，天然气消费将在未来 15 年间持续攀升。
- 科技创新与技术进步可支撑我国能源系统更好度过三个阶段，且其角色将随着距离碳中和目标年的临近而愈发关键。
- 我国未来能源发展规划应注重能源安全和能源系统低碳化转型关系的合理权衡，并重视对不确定性因素的考量。

1. 研究背景与目的

2020 年 9 月 22 日，我国庄严承诺二氧化碳排放力争于 2030 年前达峰，并力争于 2060 年前实现碳中和。化石燃料使用所造成的碳排放占全球碳排放总量的 86%左右。在此背景下，探索我国实现能源系统“碳达峰”、“碳中和”的终端能源需求趋势、潜在转型路径以及减排路径具有重要意义。本展望报告拟构建照常情景、碳达峰情景与碳中和情景，采用部门分析与目标优化相结合的综合分析方法，模拟不同能源转型目标要求（无碳约束、碳达峰约束、碳中和约束）下我国终端能源消费、一次能源消费、二氧化碳排放量的演变趋势，探讨实现碳达峰、碳中和的路径与应对策略，为我国能源系统转型及油气资源发展提供参考依据。

2. 主要研究思路与方法

2.1 模型原理

本展望报告基于碳中和与能源创新发展研究院自主开发的中国经济-能源-环境综合集成系统模型 IAME3C (Integrated assessment model of economic, energy and environment system for China)中的能源子系统 IAME3C-ENERGY。该能源子系统的时间步长为 5 年。模型共分为三个核心子模块,包括:能源需求测算模块、能源供应优化求解模块、能源消费(碳排放)核算模块,各模块间关系如图 1 所示。

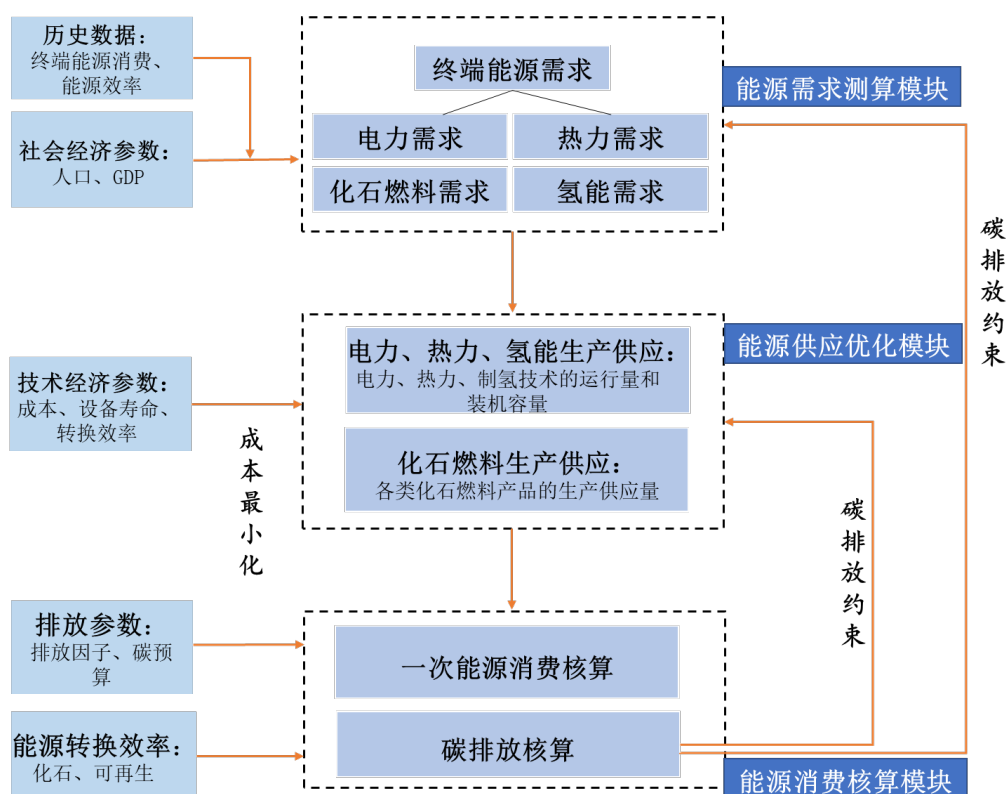


图 1. IAME3C-ENERGY 模型框架

能源需求测算模块将影响终端能源需求的核心要素(包括经济水平、人口规模、能源使用效率等)作为模型输入,并将终端能源需求分为四大类:电力、热力、氢能和化石燃料需求。其中,化石燃料产品包括煤、石油、天然气的产品共 18 类。能源供应优化模块重点关注能源供应上游及中间转化环节,考虑发电、供热、制氢的各类二次能源加工转换技术。目前模型涵盖了煤发电、天然气发电、水利发电、核能发电、太阳能发电、风能发电共六类发电技术,生物质供热、煤供热、石油供热、地热能供热、天然气供热共五类供热技术以及生物质制氢、煤



制氢、电解制氢、天然气制氢共四类制氢技术。输入各类技术的技术经济参数(投资成本、固定成本、设备寿命、转换效率等),在满足终端能源需求约束的前提下,以系统成本最小作为目标函数,优化能源供应量和中间转化技术的活动水平及部署规划。能源消费核算模块包括化石能源消费和可再生能源消费两部分。化石能源消费方面,输入能源转化效率值,分别核算终端化石能源消费(第一类)和中间转化的化石能源消费(第二类),加总第一类和第二类化石能源消费,得到化石能源消费总量(第三类)。可再生能源消费方面,由于我国能源统计中不包含终端可再生能源消费数据,在开展核算时主要考虑中间转化所需的可再生能源消费。能源系统碳排放主要来自化石燃料产品直接燃烧(如汽油、煤油、柴油在发动机中的燃烧等)和电力、热力、氢能中间转化过程的化石燃料使用(如煤发电、天然气供热、煤制氢等)。输入排放参数,得到能源系统碳排放量。

当对能源系统施加碳排放约束时,约束将同时作用于三个子模块。首先,将能源系统碳排放总量约束依照历史排放比例趋势,进一步划分为针对第一类化石能源消费碳排放的约束值(约束1)和针对第二类化石能源消费碳排放的约束值(约束2)。其次,将约束1输入能源消费(碳排放)核算模块作为碳排放上限值约束,通过反馈调整进而确定碳约束下能源需求测算模块输出的化石燃料需求。然后,将约束2输入能源供应优化模块,借助能源供应优化模块中的碳上限约束单元,确定碳约束下的能源供应生产。

2.2 研究情景与模型参数设置

本报告共设置三类能源发展情景,分别是:照常情景、碳达峰情景、碳中和情景。照常情景是指为满足我国未来能源需求,且不考虑碳排放约束,允许能源系统按照系统总成本最小照常发展的能源情景。碳达峰情景是指为满足我国未来能源需求,且考虑能源系统碳排放于2030年前达峰,所对应的系统总成本最优能源情景;碳中和情景是指为满足我国未来能源需求,且考虑能源系统于2060年实现碳中和,所对应的系统总成本最优能源情景。以碳排放约束严格程度而言,三个情景下的碳排放约束强度是递增的,也意味着更加剧烈的转型过程。

情景设置中涉及的宏观参数包括经济发展水平、人口规模变化和碳排放量约束上限。经济、人口指标直接影响能源需求规模。碳排放量约束上限则影响化石

能源供给的规模和结构。为使得能源转型过程既不损害经济可持续发展、人口正常增长趋势，又能如期实现碳减排任务，采用控制变量的思路，对不同情景下的经济、人口参数选取相同的标准，视情景差异变动碳排放量约束上限。

本报告研究的三个情景均采用中等人口规模下的我国人口数据和 GDP 中等增速假定。SSP (Shared Socioeconomic Pathways) 1-5 是 IIASA (国际应用系统研究所) 提出的一套评估未来全球气候变化的共享社会经济路径情景，为全球提供了具有一致性的综合评估分析框架基础，已被广泛应用于 IPCC 的评估报告和各类全球、国家尺度的综合评估研究中。本报告使用的人口数据取自清华大学地学系构建的共享社会经济路径下中国 2010-2100 年分省人口及高分辨率网格化人口数据库中的 SSP2 (共享社会经济路径中的现有政策路径) 情景^①，可以更精细准确的反映我国未来人口的变动趋势且适用于综合评估模型。人口数据为年度数据，简便起见，这里每 10 年进行一次展示。GDP 数据来自中国能源报告(2018)：能源密集型部门绿色转型研究。

表 1 人口、GDP 设定

	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
人口 (百万)	1332.9	1428.8	1460.5	1440	1394.8	1313.2
	2021- 2025 年	2026- 2030 年	2031- 2035 年	2036- 2040 年	2041- 2050 年	2051- 2060 年
GDP 增 速(%)	5.6	5.5	4.5	4.5	3.4	2.4

电能替代化石燃料、提高可再生能源使用是控制碳排放的有效举措。而可再生能源大规模使用的前提是终端电气化率的大幅提升。照常情景、碳达峰情景、碳中和情景下 2060 年终端电气化率分别为 40%、60%和 70%。照常情景不考虑氢能在终端的使用。碳达峰情景和碳中和情景下氢能在 2060 年终端使用占比达到 10%。中间转换环节涉及到的技术经济参数在三个情景下保持一致，主要包

① 资料来源：Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100.



括技术成本、技术设施寿命和使用效率，具体数值确定是综合已有研究模型假设基础上，做了适当的修订。能源核算环节需要的能源转换效率采用电热当量计算方式。化石燃料的碳排放因子取自中国碳核算数据库（CEADs）。

碳中和意味着全社会二氧化碳吸收和排放过程整体实现净零。然而，在现有技术预期下，能源系统仍存在不得不排放的环节。另一方面，能源消费的碳排放量还取决于碳汇的规模。碳汇包括陆地碳汇、海洋碳汇和 CCS 碳汇三部分。我国陆地、海洋碳汇量分别为 11.1 和 2.4 亿吨，这两部分之和为 13.5 亿吨。争议较大的是 CCS 技术可实现的碳汇量。已有研究认为 CCS 碳汇量最大可达到 16 亿吨。综合上述事实，本报告认为实现碳中和所对应的我国能源系统 2060 年碳排放水平大约应在 15-30 亿吨。根据 2060 年我国能源系统实现碳中和所对应的碳排放规模大小，可将我国未来的碳中和规划细分为“严格”碳中和（2060 年碳排放 15 亿吨以下）、“基准”碳中和（25 亿吨以下）以及“宽松”碳中和（2060 年碳排放 30 亿吨以下）。本报告中的碳中和情景考虑更加“严格”的碳中和假设，将 2060 年碳排放限制在 15 亿吨以下。

3. 主要研究结果

3.1 终端能源需求结果

照常情景、碳达峰情景、碳中和情景下终端能源需求总量如表 2 所示。

表 2 终端能源需求总量（亿吨标煤）情景

情景	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
照常情景	34.7	42.41	41.57	37.13	32.61
碳达峰情景	34.7	39.74	36.83	33.41	30.39
碳中和情景	34.7	35.88	33.45	31.73	29.72

模型结果显示，三种情景下我国终端能源需求在未来 40 年都将经历先逐渐增加达到峰值，后逐渐下降的趋势。碳达峰情景下，我国终端能源需求将从 2020 年的 34.7 亿吨标煤上升到 2030 年的 39.74 亿吨标煤，之后再降为 2060 年的 30.39 亿吨标煤。照常情景和碳中和情景下，终端能源需求应分别在 2035 年和 2025 年达到饱和水平。

3.2 一次能源消费结果

照常情景下，我国到 2060 年的一次能源消费总量为 52.4 亿吨标煤。一次能源消费结构中化石能源占主导地位，但化石能源内部结构开始出现变化。天然气开始大幅度地接替煤炭，石油消费趋势保持相对稳定。煤炭消费从 2030 年的 25.5 亿吨标煤降到 2060 年的 9.6 亿吨标煤。煤炭消费占比持续下降，在 2050 年左右首次低于 30%，并在 2060 年降至 18.4%。该情景是石油和天然气消费最乐观的情景。在 2025-2040 年间，石油消费为 10.2-12.1 亿吨标煤，消费占比在 18.1-19.3% 附近小幅波动。到 2060 年，石油消费降为 8.96 亿吨标煤。石油消费峰值为 2040 年的 12 亿吨标煤。天然气消费在研究期初期经历大幅上升，从 2020 年的 4 亿吨标煤上升到 2045 年的 12.4 亿吨标煤。天然气消费占比在 2045 年为 20% 左右，并在 2060 年降为 17.5%。可再生能源消费也持续上升，在研究期内增长了 8 倍，从 2020 年的 2.6 亿吨标煤上升到了 2060 年的 19 亿吨标煤。此外，在研究期内，水能消费保持相对稳定水平，消费量在 5.6 亿吨左右。

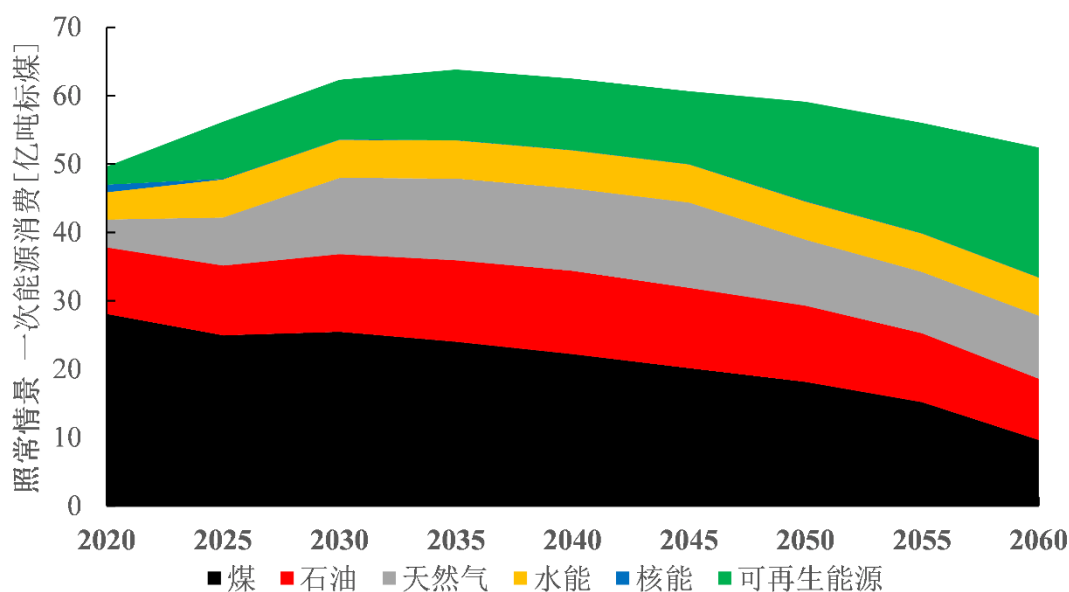


图 2. 照常情景下我国一次能源消费

碳达峰情景下，我国到 2060 年的一次能源消费总量为 49 亿吨标煤。低碳化逐渐成为一次能源消费的核心特征。从 2060 年一次能源消费占比看，煤炭、石油将逐渐让位于天然气和可再生能源消费，从而实现能源系统的低碳化转型。未来 40 年，煤炭、石油消费持续下降。到 2040 年，煤炭、石油消费量分别为 19.8



亿吨标煤和 7 亿吨标煤。到 2060 年，煤炭消费在一次能源中的占比为 11.5%。同期，石油消费占比为 6.2%。天然气消费经历快速上升，其消费占比在 2035 年达到 15.4%，此后直到 2060 年，天然气消费占比稳定在 15%左右。该情景下，天然气消费仍较为乐观。可再生能源消费占比在 2045 年超过 28%，在 2060 年达到 53%。太阳能与风能是发展最迅猛的可再生能源，到 2060 年，两者消费之和在一次能源消费中占比将达到 45.8%。

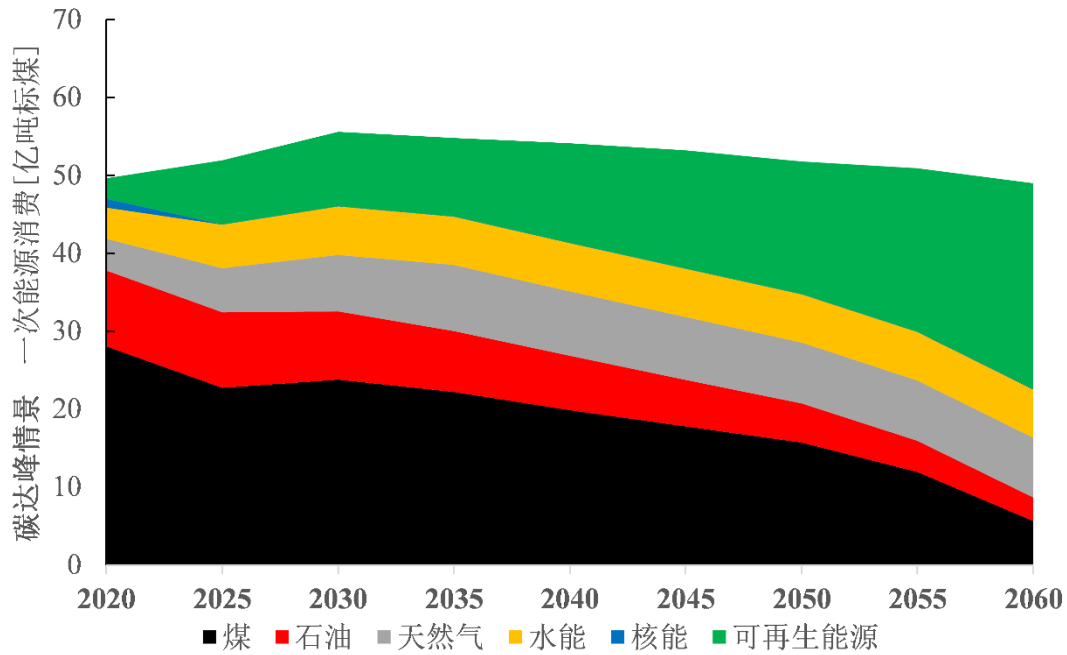


图 3. 碳达峰情景下我国一次能源消费

碳中和情景下，我国到 2060 年的一次能源消费总量为 48.5 亿吨标煤。高比例可再生能源是一次能源消费最显著的特征。可再生能源消费占比在 2050 和 2060 年分别达到 61%和 79%。到 2060 年，太阳能和风能消费是可再生能源发展的绝对主力，二者消费之和在一次能源消费占比为 72%。同期，地热能和生物质能在一次能源消费中占比分别为 3.4%和 3.3%。核能和水能在该情景下发展维持在稳定水平。到 2060 年，水能、核能消费占比分别为 4%和 2.5%。化石能源方面，天然气消费占比在 2020-2035 年间经历飞速增长，且在 2035 年附近占比最高为 14.5%。天然气消费峰值出现在 2035 年左右，约 7.5 亿吨标煤。天然气消费在 2050 年降为 5.6 亿吨标煤，在 2060 年降为 2.5 亿吨标煤。煤炭消费在 2030 年为 20 亿吨标煤，且其占比从 2045 年后一路骤降，从 2030 年的 37.5%降至 2050

年的9.6%。石油消费占比也迅速下降，在2030年、2050年和2060年分别降到12%，6.3%和3%。到2060年，煤、石油的消费量分别为0.3和1.5亿吨标煤。

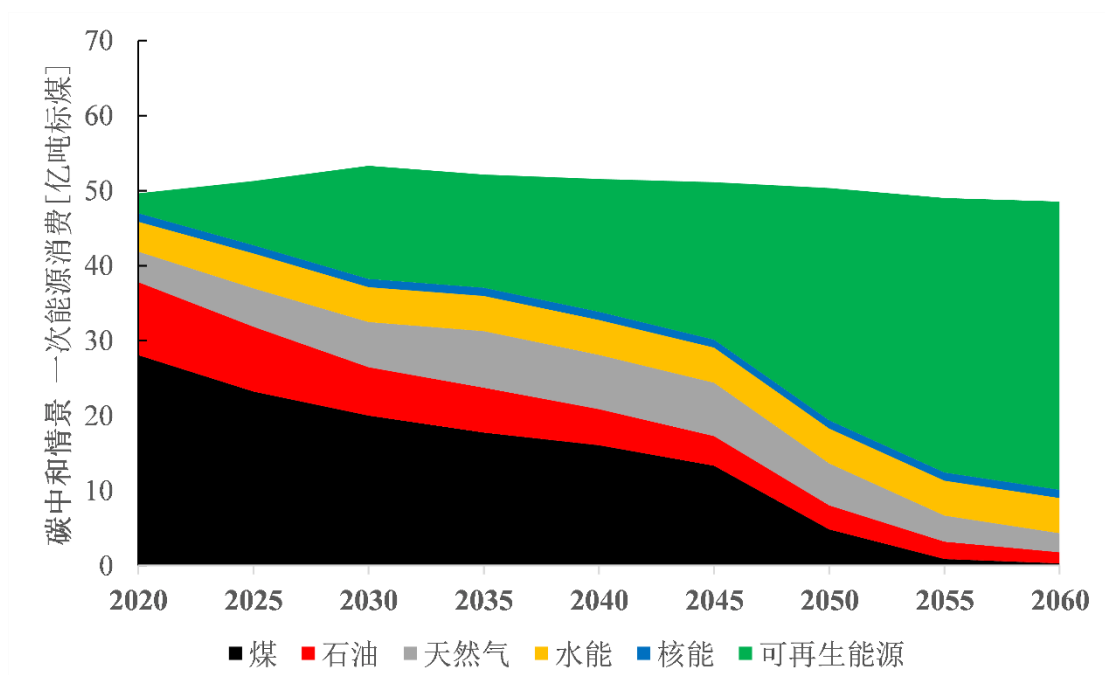


图4. 碳中和情景下我国一次能源消费

3.3 碳排放结果

除照常情景外，我国能源系统碳排放在2030年（包括2030年）之前都将实现达峰，且在2030-2060年间呈持续下降趋势。照常情景下，我国能源系统在2035年达峰，达峰排放量为121.8亿吨CO₂。碳达峰和碳中和情景下，我国能源系统碳排放在2025年起开始下降，达峰排放量分别为112亿吨和105亿吨。三个情景下，我国能源系统碳排放在2060年呈现高、中、低三种排放水平。照常情景、碳达峰情景、碳中和情景下，我国能源系统在2060年的碳排放分别为92、50和15亿吨。为实现2060年实现碳中和目标，我国在中远期需要更多地依赖能源技术进步，特别是碳去除技术来辅助已有的土地碳汇来抵消过多的碳排放。

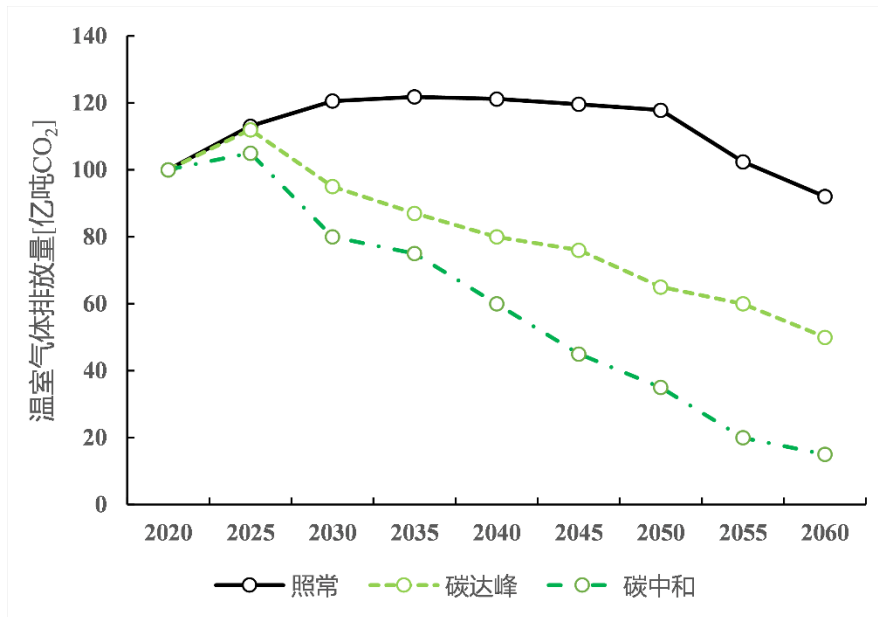


图 5. 能源系统碳排放（不考虑碳汇吸收）

目前，我国人均碳排放量（7 吨/人）高于全球平均水平（4.4 吨/人）。但与发达国家相比，我国人均碳排放量仍处于相对较低位置，低于韩国（11.3 吨/人）和日本（8.4 吨/人），远不及加拿大（15.2 吨/人）和美国（14.5 吨/人）。在人均碳排放量低于我国的国家中，印度（1.7 吨/人）尚处于发展初期，未来仍有人均碳排放量快速上升的潜力；英国（5 吨/人）则早在 20 世纪 80 年代前人均碳排放量就高达 10 吨/人，后历经了长达数十年的能源系统转型才实现了人均碳排放量的减半。不同情景下我国未来人均碳排放演变趋势如图 7 所示。照常情景下，我国人均碳排放从 2020 年起持续升高，到 2050 年达到 8.5 吨/人，之后开始下降。到 2060 年，我国人均碳排放量为 7 吨/人。碳达峰情景下，我国人均碳排放量在 2025 年达到最大值 7.7 吨/人。到 2060 年，我国人均碳排放量为 3.8 吨/人。碳中和情景下，我国人均碳排放下降趋势最显著。从 2020 年起，人均碳排放量持续下降。到 2060 年，人均碳排放量为 1.1 吨/人。

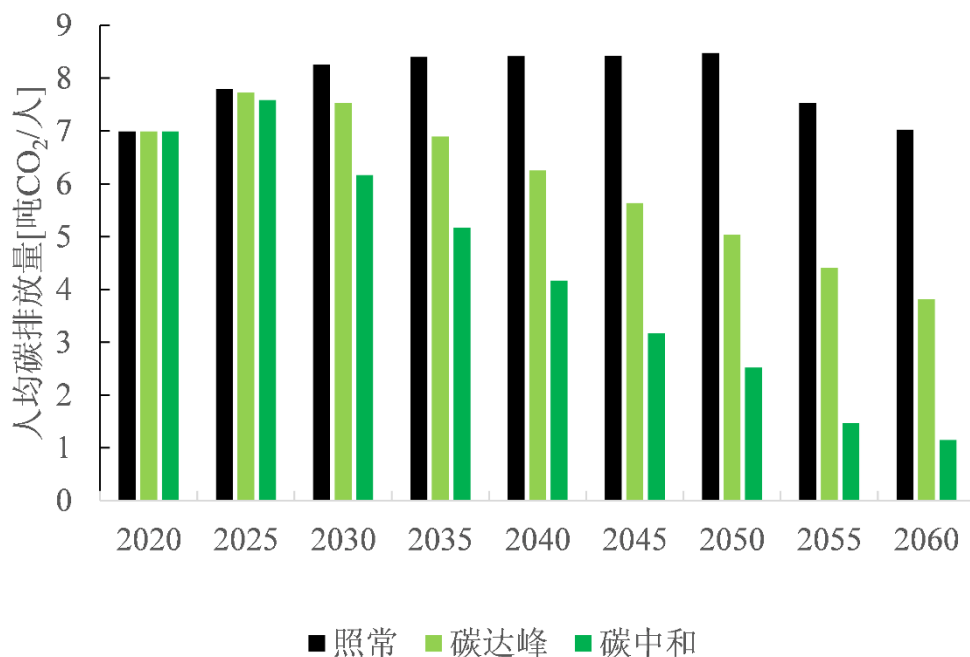


图 6. 不同情景下的人均碳排放

4. 研究结论与政策建议

本报告从终端能源需求、一次能源消费和碳排放三方面，探讨了我国“碳达峰、碳中和”目标实现路径的可达性。主要的研究结论为：

一是我国实现碳达峰、碳中和目标具有路径可达性，但面临巨大挑战

所有情景下，2030年前我国实现“碳达峰”目标是具备极大实现可能的。其次，到2060年，我国实现“碳中和”目标也是有极大可能性的。同时，实现碳中和目标与保障经济稳定发展态势并不矛盾。我国实现碳达峰的减排路径位于照常情景和碳中和情景对应的减排路径之间。就碳中和情景而言，其实现路径经历三个阶段：阶段一，天然气消费增长为主，煤、石油消费达峰，可再生能源稳步增长；阶段二，天然气消费达峰，煤、石油消费下降，可再生能源加速增长；阶段三，化石能源消费急剧下降，形成可再生能源为主导的能源系统。上述三个阶段目标清晰，但也分别存在巨大挑战：如何有效减碳而不损失能源安全保障？如何合理增加可再生能源避免陷入资源约束困局？如何维持存在间歇性特征的可再生能源系统稳定运行？这些关键科学与工程问题亟需在未来得到妥善解决。



二是系统工程思想有助于全面理解能源系统转型过程

鉴于能源系统本身涉及高化石能源、低化石能源、可再生能源、水能、核能等多种能源要素，又涉及生产者、消费者、政府等多参与主体，每个阶段都存在完全不同的挑战。运用系统工程思想，全面审视不同发展阶段的主要矛盾和矛盾的主要方面可以助力构建清洁低碳安全高效的新型能源体系。2021年10月24日国务院印发的“2030年前碳达峰行动方案”对“十四五”、“十五五”的重点领域、行业已经提出了明确要求。综合系统集成模型将在容纳多行业微观特征，体现能源系统复杂性方面发挥更大作用。而伴随着能源产业产生数据量的激增，需要更加重视从海量能源数据中发掘能源系统各环节运行机理和规律。

三是能源需求调控与能源供应侧优化是实现我国实现碳达峰、碳中和目标的关键

本报告结果显示，不管是实现碳达峰还是碳中和目标，都需要从调控终端能源需求、优化能源供应结构两方面同时发力。从终端能源需求调控措施看，降低能源强度，提高能源使用效率可以避免在控制能源需求的同时，对经济和人口增长造成负向影响。从能源供给侧优化看，大规模提高可再生能源比例是促进低碳化快速推进的最佳手段。而在降低化石能源消费上，碳达峰和碳中和情景存在细微差别。如果只需实现碳达峰，那么只需在化石能源内部开展较清洁低碳化石能源替代高化石能源即可。这意味着天然气将在未来快速发展，并最终取代煤炭的消费比例。但若以碳中和为目标，化石能源的大幅度退出将成为必然。

四是保障碳达峰、碳中和目标如期实现需要技术创新和对不确定性因素的细致考量

实现碳达峰、碳中和需要能源系统技术的极大进步。这里的“技术”既涉及工程技术问题，也涉及理论核算技术，甚至还包括经济政策管理技术等方面。值得注意的是，本报告结果显示，所有情景下，生物质能在一次能源消费中占比都几乎可以忽略，其中主要原因是未来的成本性问题仍存在争议。除了生物质能源技术成本性问题以外，在储能灵活性、发电设施对关键物质依赖等方面，能源界还缺乏高效的解决方案。碳收支的核算规模也有待进一步清晰明确。相关的配套政策更是缺乏系统性和协调联动性。此外需要特别关注技术、经济、社会等多方面不确定性对能源规划路径的影响。这也意味着，我国实现“碳中和”的目标所

经历的路径绝不只有一条，具体采取何种转型路线取决于技术发展水平和碳汇吸收能力。

基于上述四点结论，提出四点政策建议：

①能源政策、规划的着力点应兼顾能源供应、需求两侧

我国应统筹兼顾控制能源需求总量和优化能源供应结构，确保能源供、需两侧转型处于同步水平，防止因能源供需发展水平阶段不同导致能源供需发生结构性失衡状况，进而危及能源安全。在能源需求侧大力推动节能技术的推广、电气化率的提升与节能意识的普及。在能源供给侧持续推动能源供应来源的清洁化。

②进一步加强“节能减碳”策略的系统性和准确性

我国应持续推出精准高效的节能减碳策略，注重“碳达峰”、“碳中和”的实施落地。我国幅员辽阔，各区域所处发展阶段不同，资源禀赋、经济、技术水平差异明显，需要在政策指定和目标设定环节充分考虑空间异质性。同时关注行业政策间的相容互斥分析，充分发挥政策间的协同作用。

③充分发挥科技创新与技术进步在能源转型中的重要助推作用

我国应广泛征集采取碳中和实施路径及实现技术，并重点加强对生物质能技术、储能设施、发电技术资源（土地、水、矿产等）依赖、发电效率等核心技术问题的研究。同时需要后续研究提供更多翔实可靠的数据对碳汇水平的精准核定与有效预测，力争尽快搞清搞透我国碳收支水平。

④全面考量确保能源系统转型步入安全“航道”并保持稳妥“航速”

我国应加强对经济、政治、技术等不确定性因素的定期动态核查与评价，特别加强对可再生能源、储能技术可行性的持续投入；重视并预警“黑天鹅”事件的出现，并将保障能源安全与提高能源系统韧性放在同等地位。同时要在对已有政策制定与管理模式进行升级的基础上，试点试行碳中和促进配套政策，助推碳中和进程高效有序发展。



关于作者

系列报告总协调人：王建良

本报告主笔人：



唐旭（1985.1-），男，中国石油大学（北京）经济管理学院院长，教授，博导，校青年拔尖人才。耶鲁大学、瑞典乌普萨拉大学访问学者。从事能源系统工程、能源经济管理等研究。主持国家自科、国际合作、教育部基金等项目，在国内外知名期刊发表文章 40 余篇。



任凯鹏（1993.12-），男，中国石油大学（北京）经管学院博士生。国家留学基金委资助公派留学-乌普萨拉大学联合培养博士生。从事能源系统建模与低碳能源转型等方面的研究工作。在国内外重要学术期刊发表论文 4 篇。



李明（1981.10-），男，中国石油大学（北京）经管学院学术委员会主任，教授，博导。从事大数据分析挖掘、信息管理与电子商务、智能决策与优化等研究。主持国家自科、教育部基金等项目，在国内外知名期刊发表论文数十篇。



王建良（1987.11-），男，中国石油大学（北京）教授，博导，校青年拔尖人才，瑞典乌普萨拉大学访问学者。从事油气行业低碳转型、油气系统工程等方面研究。主持国家自科、国际合作、教育部基金、国家能源局等项目，在国内外知名期刊发表文章 40 余篇。

本报告校对：王建良、朱金宏

报告引用：唐旭，任凯鹏，李明，王建良. 双碳目标下中国能源中长期走势评估 [R]. 中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院, 2021C03, 2021 年 11 月 20 日.



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院

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: 18910556924 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

