

报告摘要

2025 年 11 月

山东中长期低碳转型路径研究 ——基于 EPS 模型



■ 关于绿色创新发展研究院 (iGDP)

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress, iGDP)，2014 年成立于北京，是专注绿色低碳发展的公益性国际化智库。iGDP 自成立以来，根植我国绿色低碳实践，面向全球应对气候变化进程，服务决策者、实践者、投资者，通过跨学科、系统性、实证性的研究，推动能源和气候变化解决方案的科学化和精细化，与多方合作推动绿色低碳议题的多元化和国际化的沟通，提供有国际视野和前瞻思考的解决方案及公共知识产品，为全球可持续发展做出贡献。

■ 关于山东财经大学中国国际低碳学院

中国国际低碳学院，作为全国第二所、山东第一所国际低碳学院，是由山东财经大学、中国电子节能技术协会、中国低碳经济发展促进会、ZEW 等多家国内外高校和机构共建的创新型、产业型、开放型学院。该学院以培养具有国际视野、科学素养与人文关怀、思辨精神与交叉学科能力的低碳经济与管理人才为目标。学院依托全国低碳技术交易综合服务平台，建设山东低碳城，着力打造成服务山东高质量发展、推进中国“双碳”目标实现的特色学院。学院下设研究中心采用“8+1+1”结构。其中“8”包括：低碳战略与政策研究中心、碳足迹与碳标签研究中心、消费碳普惠研究与服务中心、绿色低碳转型研究中心、碳金融与碳管理研究中心、适应气候变化与组织韧性研究中心、碳汇管理与项目开发中心、ESG 创新发展研究中心。“1”即金钥匙低碳行动中心，负责将七大中心实践工作中优秀企业做法进行教学与研究案例转化，反哺低碳人才教育。另一个“1”代表国际可持续发展人才培训中心 (iSUSTAIN)。学院将始终紧跟国家政策方向、紧贴企业及社会需求，研究行业难点及痛点问题，以权威研究为相关政府部门和行业参与者提供参考，助推低碳经济发展。

■ 报告编写团队

绿色创新发展研究院 (iGDP)：宋曼娇、杨鹂、李鑫迪、袁雅婷、刘晶宁

山东财经大学中国国际低碳学院：王璟珉、宋策、王震、李成龙、王菲、姚晟、罗珺文、刘喆

■ 联系方式

绿色创新发展研究院（iGDP）：igdpoffice@igdp.cn

山东财经大学中国国际低碳学院：islcs@sdufe.edu.cn

■ 致 谢

衷心感谢济南圣泉集团股份有限公司项目发展部白建元总经理、伊莱特能源装备股份有限公司品质管理中心杨明副总经理、魏桥集团环境保护监督管理公司综合管理处刘维红处长、济南工程咨询院许伟工程师在本报告编写内容的修改方面提供的宝贵建议和意见。由于时间和资源的限制，目前报告未能充分采纳各位专家的每一项宝贵意见，我们将在后续的研究工作中不断修正和完善不足之处。

■ 免责声明

本报告编写所采用的数据均来自公开的信息和渠道，我们力求准确和完整，但难免偶有疏漏。报告基于初步成果撰写，用于讨论和交流，内容会随下一阶段研究成果进行修正、更新或增减。本报告仅属于作者的研究成果，不代表所在机构、咨询专家的立场和观点。

■ 引用建议

绿色创新发展研究院，山东财经大学中国国际低碳学院（2025）. 山东中长期低碳转型路径研究——基于 EPS 模型 . 北京：绿色创新发展研究院，山东财经大学中国国际低碳学院 .

执行摘要

山东省是我国工业体系最完整、能源消费规模最大的省份之一，在保障国家制造业和能源安全方面具有基础性地位，同时面临高碳存量、结构调整难与资源环境约束趋紧等多重挑战。本研究依托能源政策模拟模型（Energy Policy Simulator, EPS），构建 2020 政策冻结情景、政策情景、双碳情景三种情景，对 2020—2060 年间的能源消费、部门排放、技术替代与宏观影响进行系统模拟，并围绕电力、工业、建筑、交通及非二氧化碳温室气体治理提出针对性政策安排，旨在为山东中长期低碳转型提供可验证的量化依据。

情景对比表明，政策力度将显著改变山东省中长期排放路径。双碳情景下，全社会能源相关二氧化碳排放将在 2030 年前后开始稳定下降，并于 2060 年降至 0.4 亿吨以下；政策情景结果显示，2060 年能源相关二氧化碳排放不足 2 亿吨；2020 政策冻结情景结果显示，2060 年能源相关二氧化碳排放约为 6 亿吨，难以满足碳中和目标要求。比较三种情景可以发现，实现深度减排的关键在于终端用能电气化与电力清洁化的协同推进。到 2060 年，双碳情景下工业、交通、建筑及全社会用能电气化率分别为 64%、75%、98% 和 64%，显著高于政策冻结情景和政策情景，对全社会排放达峰后快速下降起到决定性作用。

从部门结构看，电力部门的低碳转型在很大程度上决定了终端部门减排的进程和空间。

“十四五”以来，山东风电和光伏装机规模快速增长，非化石能源发电装机占比已由约三分之一提高到超过一半。双碳情景测算结果显示，到 2060 年全省非化石能源发电装机占比约为 83%，其中风电约 47%、光伏约 23%；煤电和气电由主体电源逐步转向主要承担系统安全和调峰任务，新增用电需求优先由清洁电力满足，电力行业碳排放在 2030 年后明显下降，并在 2060 年降至峰值水平的约 5%。工业部门是全省温室气体减排的重点领域，双碳情景下，若仅核算直接排放，工业部门碳排放到 2060 年可降至约 4200 万吨；在电网持续清洁化的带动下，若将外购电纳入核算，工业部门整体减排幅度将进一步扩大。这一变化主要来源于终端用能环节加快“以电代煤、以电代油”，在高温工艺环节逐步引入氢能等新型能源，并在减排空间有限的关键工序上实施 CCUS 等减碳技术。

建筑和交通部门承担着长期稳步降碳的任务。双碳情景下，建筑运行能耗将在 2030—2045 年间显著下降，至 2050 年前后建筑运行能耗中电力消费占比接近九成，2060 年基本

实现全面电气化，建筑领域碳排放约 600 万吨，显著低于政策情景下约 0.3 亿吨的水平。交通领域单位周转碳排放强度持续下降，双碳情景下 2060 年交通部门直接排放约 230 万吨，2040 年前后纯电动乘用车在乘用车保有量中的占比超过九成。在交通系统内部，重载公路运输和航空成为后期减排的重点和难点，通过推广电动重卡、扩大氢能燃料应用，并优化运输组织模式和线路结构等措施，可进一步推动运输工具电动化和运输方式绿色化，从而支撑交通系统在中长期实现更大幅度的减排。

非二氧化碳温室气体是影响长期减排成效的重要因素。到 2060 年，双碳情景下非二氧化碳温室气体排放总量约为 5600 万吨二氧化碳当量，明显低于政策情景下约 9400 万吨的水平。政策情景中，含氟温室气体排放在 2035 年前后达到约 9000 万吨二氧化碳当量的峰值，占当年二氧化碳排放量的约十分之一，此后下降速度相对较缓。模拟结果表明，如若缺乏系统性的含氟气体治理安排，非二氧化碳温室气体将削弱总体减排成效，因此有必要建立覆盖替代、回收、再生和销毁的全链条治理体系和台账核证机制，形成与二氧化碳减排相配套的长期减排框架。

从宏观层面看，深度减排与经济增长总体兼容。2020—2060 年，政策情景与双碳情景的累计 GDP 增量分别约为 23 万亿元和 22 万亿元，经济增长轨迹总体平稳，未出现显著的“减排拖累增长”效应。相比 2020 政策冻结情景，双碳情景下净增就业约 40 万人，新增岗位主要集中在房屋建筑业、电力与热力生产供应业、科学研究与技术服务等领域，累计新增就业约 660 万人；同时，化石能源相关岗位在中长期内呈缩减趋势，需要配套推进就业影响评估、职业技能再培训和社区支持等公正转型安排，以降低结构性冲击风险。

综上，研究结论表明：若保持当前政策力度，山东省有望在“十四五”期间实现能源相关二氧化碳排放达峰并稳中有降，但距离 2060 年碳中和目标仍存在差距；构建以非化石能源发电为主体、以储能和需求响应为支撑的现代电力系统，是支撑终端部门加快电气化并实现全社会深度减排的关键前提；以工业电气化、氢能替代和 CCUS 为抓手的深度减排工程，将决定高耗能行业的长期减排空间，是工业部门由“碳达峰”走向“碳中和”的重要路径；以建筑与交通电气化为主线，叠加建筑能效提升、清洁供暖和运输结构优化，可以实现生活质量提升与长期稳步减排统筹兼顾；加强含氟温室气体等非二氧化碳温室气体治理以及就业与产业结构调整的统筹安排，是确保长期减排路径可持续、公平和可操作的必要条件。



CONTENT 目录

山东省社会经济发展和低碳转型现状与目标	08
---------------------	----

模型工具和情景分析	19
-----------	----

山东省“双碳”实现路径	22
-------------	----

研究结论	39
------	----

政策建议	44
------	----

附录	48
----	----

参考文献	59
------	----

山东省社会经济发展 和低碳转型现状与目标

山东省居太行山以东，地处华东沿海、黄河下游、京杭大运河中北段，介于北纬 $34^{\circ}25'$ ～ $38^{\circ}23'$ ，东经 $114^{\circ}36'$ ～ $122^{\circ}43'$ 之间，是华东地区的最北端省份，西部连接内陆，从北向南分别与河北、河南、安徽、江苏四省接壤；中部高突，泰山是全境最高山；东部山东半岛伸入黄海，北隔渤海海峡与辽东半岛相对，东隔黄海与朝鲜半岛相望，东南则临靠较宽阔的黄海。山东省东西长 721.03 千米，南北长 437.28 千米。濒临渤海和黄海，管辖海域面积约 4.65 万平方千米，大陆海岸线全长 3504.74 千米，管辖海域中有海岛 589 个。截至 2024 年 12 月 31 日，山东省共有设区的市 16 个；县级政区 136 个，其中市辖区 58 个、县级市 26 个、县 52 个；乡镇级政区 1825 个，其中街道 698 个、镇 1071 个、乡 56 个。

山东省作为东部沿海经济大省与人口大省，正通过深化新旧动能转换破解产业结构偏重与能源高碳依赖的核心矛盾。依托国家级战略平台，率先推动能耗双控向碳排放双控转型，建立覆盖高耗能行业的动态监测体系，实施严格的碳排放源头替代机制。强化济南、青岛双核驱动功能，协同推进近零碳示范区建设，构建多节点突破的空间布局。在国际合作维度，通过跨国技术合作项目，引入先进技术和管理经验。在北方经济发展战略支点定位下，山东通过制度创新、产业结构调整与区域协同推进，探索重工业地区深度减排与高质量发展相协调的路径。

（一）社会经济发展现状

2024 年，山东省经济社会发展呈现总量领先、结构偏重、稳中有进的总体格局（表 1）。全年生产总值 98566 亿元，占全国 7.3%，在全国排名第 3 位，按不变价格计算同比增长 5.7%，高于全国 5.0% 的平均增速，位居全国第 8 位。从产业结构看，三次产业增加值占比分别为 6.7%、40.2% 和 53.1%，与全国 6.8%、36.5%、56.7% 的结构相比，第二产业比重高 3.7 个百分点，第三产业比重低 3.6 个百分点，显示出以工业和制造业为主体的特征。其中，第一产业增加值 6617 亿元，同比增长 3.7%；第二产业增加值 39609 亿元，同比增长 6.6%；第三产业增加值 52340 亿元，同比增长 5.4%。人口方面，2024 年末常住人口 10080 万人，

占全国总人口的 7.2%，数量居全国第 2 位。常住人口城镇化率为 66.48%，较上年提高 0.95 个百分点，但仍低于全国 67.00% 的平均水平，在全国排名第 13 位。居民收入与发展水平方面，山东省人均 GDP 为 97368 元，略高于全国 95749 元的平均水平，在全国排名第 11 位；人均可支配收入 42077 元，高于全国平均 41314 元，位居全国第 8 位。

表 1 2024 年山东省社会经济发展水平

指标	山东省	全国	占全国总量比例	全国排名
GDP（亿元）	98566	1349084	7.3%	3
GDP 增速（%）	5.7%	5.0%	/	8
年末常住人口（万人）	10080	140828	7.2%	2
人均 GDP（万元）	97368	95749	/	11
人均可支配收入（元）	42077	41314	/	8
三产结构	6.7：40.2：53.1	6.8：36.5：56.7	/	/
常住人口城镇化率（%）	66.48	67.00	/	13

注：收入和生产总值均按现价计算，全国数据和排名均不含港澳台地区。
数据来源：

- 1. 《中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报》；
- 2. 《2024 年山东省国民经济和社会发展统计公报》。

2005—2023 年，山东省社会经济发展、能源消费与碳排放水平呈现多维动态变化。经济总量持续扩张，能源消费和碳排放总量稳步增加，而能源强度和碳排放强度显著下降，显示经济增长与资源环境压力的关系逐步优化。以 2005 年为基年，2023 年 GDP 总量是 2005 年的 4.13 倍，年均增长约 7.8%；人均 GDP 是 2005 年的 5.24 倍，年均增长约 8.9%，表明经济规模和人均产出均大幅提升。能源消费总量保持增长，2023 年是 2005 年的 2.05 倍，年均增长约 4.1%，低于 GDP 增速，表现出阶段性特征：2010 年为 2005 年的 1.18 倍，2020 年为 1.70 倍，2023 年达到 2.05 倍。碳排放总量增长相对平缓，2023 年是 2005 年的 1.75 倍。从效率指标看，2023 年能源强度较 2005 年下降至 0.42 倍，累计降幅 58.0%，年均降幅约 3.8%；碳排放强度下降至 0.30 倍，累计降幅 70.0%，年均降幅约 5.4%，表明单位产出能耗和排放水平持续降低。脱钩关系方面，2005—2023 年 GDP 总量增长 313%，能源消费总量增长 105%，碳排放总量增长 75%，能源强度和碳排放强度持续下降，显示经济增长对能源与碳的依赖度显著减弱。特别是 2022 年，碳排放总量较 2005 年增长 70%，低于 2021 年同期的 75%，而 GDP 仍由 2005 年的 3.75 倍增至 3.90 倍，呈现阶段性绝对脱钩特征。

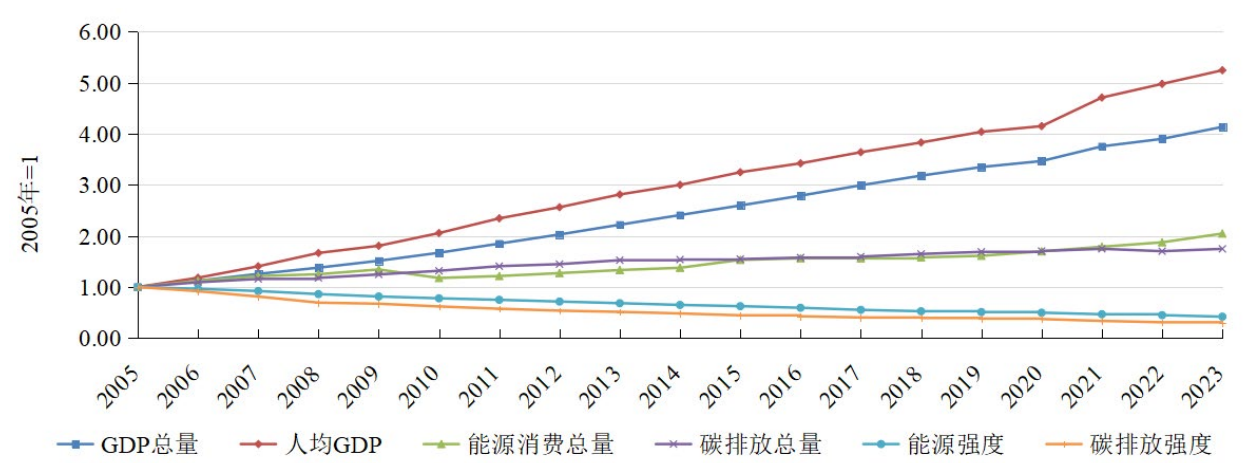


图 1 山东省社会经济发展、能源消费与碳排放水平（2005-2023 年）

数据来源：

1. 经济和人口数据来自国家统计局（<https://data.stats.gov.cn/>）；
2. 能源数据来自《山东省统计年鉴》；
3. 碳排放数据来自全球大气排放数据库（Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR）

（二）能源与低碳转型现状

2023 年，山东省能源消费总量为 52589.3 万吨标煤，占全国总量的 9.2%，是全国能源消费最大的省份。2024 年数据显示，山东省能源生产与加工规模位居全国前列，能源消费结构呈现显著的工业主导特征，非化石能源发展取得一定进展但仍滞后于全国平均水平（表 2）。从能源生产与加工看，山东省原油产量 2200 万吨，占全国总产量的 9.7%，排名全国第 5 位；原油加工量达 12567 万吨，占全国总量的 17.7%，规模居全国首位，显示其在全国石化产业中的重要地位。电力消费方面，全社会用电量 8319.7 亿千瓦时，占全国总量的 8.4%，排名全国第 3 位。三次产业用电结构呈现“二产独大”特征，第一、二、三产业用电占比分别为 2.1%、83.3%、14.6%，其中第二产业用电占比显著高于全国 64.8% 的平均水平，反映工业生产仍是能源消费的主要领域。发电装机容量达 23933 万千瓦，占全国总量的 7.1%，排名全国第 2 位。其中非化石能源发电装机 11560 万千瓦，占全国非化石能源装机总量的 6.1%，排名全国第 4 位；非化石能源发电装机占比 48.3%，低于全国 56.9% 的平均水平，显示清洁能源替代仍有提升空间。发电量方面，全省发电量 6760 亿千瓦时，占全国总量的 6.7%，排名全国第 4 位；非化石

能源发电量 1859 亿千瓦时，占全国非化石能源发电量的 5.0%，其占比与非化石能源装机占比的匹配度基本合理，反映非化石能源发电利用效率保持稳定。

表 2 2024 年山东省能源与低碳发展水平

指标	山东省	全国	占全国总量比例	全国排名
原油产量（万吨）	2200	21289	9.7%	5
原油加工量（万吨）	12567	70843	17.7%	1
全社会用电量（亿千瓦时）	8319.7	98521	8.4%	3
三次产业用电结构（%）	2.1：83.3：14.6	1.4：64.8：18.6	/	/
发电装机容量（万千瓦）	23229	334862	7.1%	2
非化石能源发电装机（万千瓦）	11560	190417	6.1%	4
累计光伏装机容量（万千瓦）	7613	88666	8.6%	1
累计风电装机容量（万千瓦）	2669	52068	5.1%	5
发电量（亿千瓦时）	6760	100869	6.7%	4
非化石能源发电量（亿千瓦时）	1859	37126	5.0%	5

注：全国数据和排名均不含港澳台地区。

数据来源：

- 1. 《中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报》
- 2. 国家能源局（<http://www.nea.gov.cn/20250120/4f7f249bac714e7693adecac996d742f/c.html>）
- 3. 山东省统计局（http://tjj.shandong.gov.cn/art/2025/1/22/art_104037_10316092.html）；
- 4. 《2024 年山东省国民经济和社会发展统计公报》。

山东省能源与低碳转型呈现鲜明的结构性特征，整体表现为化石能源主导性强、消费集中于工业领域、电力生产依赖传统火电，非化石能源在能源体系中的占比仍处于较低水平（图 2）。

从按类别分能源消费结构看，山东省能源消费以煤品为主导，占比达 53.44%，为各类能源中占比最高的类别；油品消费占比次之，达 22.97%，两者合计占比 76.41%，构成能源消费的主体部分。天然气消费占比 4.90%，在化石能源中占比相对较低。一次电力消费占比 7.51%，电力净调入占比 8.02%，两者合计占比 15.53%，反映清洁能源及外部调入电力在能源消费中的补充作用。其他能源消费占比 3.16%，占比相对有限。

从按行业分能源消费结构看，山东省能源消费呈现显著的工业主导特征。其中，制造业能源消费占比最高，达 69.08%，成为能源消耗的核心领域；居民生活用能占比 10.07%，位居第二，反映城乡居民生活用能需求的重要性；电力、热力、燃气及水生产和供应业占比 5.98%，交通运输、仓储和邮政业占比 4.68%，两类行业合计占比 10.66%，属于能源消费的重点支撑领域。采矿业占比 2.03%，批发和零售业、住宿和餐饮业占比 2.27%，农林牧渔业占比 1.30%，

建筑业占比 1.08%，其他行业占比 3.51%，上述行业能源消费占比均处于较低水平。整体来看，山东省能源消费主要集中于制造业，工业领域能源消耗占比合计达 77.09%（制造业 + 采矿业 + 电力等行业）。

从发电结构看，山东省电力生产以火电为主导，占比达 78.57%，构成发电总量的核心组成部分。非化石能源发电中，太阳能发电占比 9.67%，风电占比 8.12%，两者合计占比 17.79%，成为非化石能源发电的主要组成部分；核电占比 3.06%，水电占比 0.57%，两类清洁能源发电占比相对较低。整体来看，化石能源发电在电力结构中仍占据绝对主导地位，非化石能源发电虽已形成一定规模，但占比仍处于较低水平。

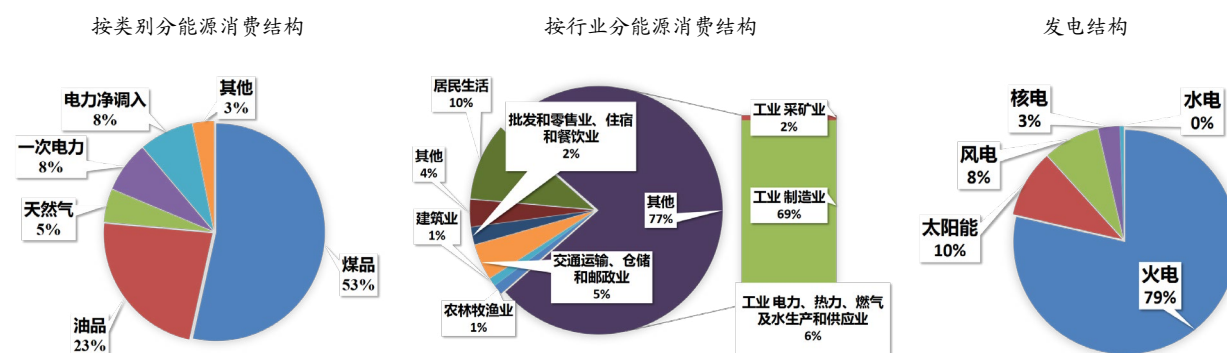


图 2 2023 年山东省能源消费和发电结构

数据来源:

1. 能源消费结构来自《山东省统计年鉴（2024）》；
2. 发电结构来自《电力工业统计资料汇编（2023）》。

节能降碳政策

在制度层面，山东省相继出台了《山东省“十四五”节能减排实施方案》《贯彻落实〈中共中央、国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见〉的若干措施》《山东省碳达峰实施方案》等文件，明确节能降碳主要工作任务。2024 年，山东省发改委发布《山东省推动能耗双控逐步转向碳排放双控实施方案》^[1]，率先推动能耗双控向碳排放双控的机制转型，建立覆盖钢铁、化工等高耗能行业的动态监测体系，山东省生态环境厅也发布了《山东省“两高”建设项目碳排放减量替代办法》，对碳排放减量替代政策进行了更新^[2]，要求新建项目通过等量或减量替代削减碳排放，累计审核项目实现碳减排成效显著。同时，山东省不断完善政策工具箱^[3]，包括省级能耗指标收储交易制度、单位能耗产出效益综合评价机制，以及财政约束，推动能耗要素科学配置。

在成效方面，“十四五”前三年，全省单位 GDP 能耗已累计下降 15.8%，提前完成国家激励目标^[4]，经济年均增长 6% 以上，以更少的能耗支撑了经济高速增长。2024 年，全省能源强度、碳排放强度进一步降低，体现了节能降碳与经济增长的协同优化。

能源结构优化

山东省正加速摆脱“一煤独大”的能源依赖，转向清洁低碳导向的能源体系。在政策方面，以《山东省绿色低碳高质量发展促进条例》^[5] 为法治保障，要求县级以上政府调整能源产业结构，实行化石能源消费替代，并重点发展非化石能源，目标增量能源消费主要依靠可再生能源提供。

在结构优化方面，山东省通过“四减四增”^[6] 行动，大幅压减传统煤电产能，同时提升可再生能源装机规模，风电、光伏发电成为重点发展领域，推广就地就近消纳新模式。

在成效方面，山东省非化石能源比重不断提升。“十四五”以来，山东新能源和可再生能源装机以年均 25.2% 的速度增长，装机规模和发电量三年实现“双翻番”。目前，山东的光伏、生物质、风电装机规模分别居全国第一、第二、第五位。2024 年 2 月，全省煤电装机占发电总装机的比重首次降至 50% 以下。2024 年 10 月下旬，全省新能源和可再生能源发电累计装机 10642.6 万千瓦，历史性首次超过煤电，成为全省第一大电力来源^[7]，且核电、地热能等多能融合项目加速布局。

重点部门减排

作为重工业大省，山东省的工业部门是能耗的主要来源。通过严控“两高”行业能源消费，实现了工业能耗低速增长、能源消费结构持续优化。2021 年，规模以上工业能耗占全省能耗总量的 75.7%，比重降低 2.7 个百分点。从规模以上工业能耗结构看，炼化焦化、化工、建材、钢铁、有色金属等五大高耗能行业占比，由 2012 年的 57.5% 升至 2017 年的 61.7%，随后回落至 2022 年的 59.4%，先升后降，回落态势明显。特别是钢铁、有色金属两大行业，能耗占比由 2012 年的 30.0% 升至 2017 年的 34.0%，随后大幅回落，到 2022 年降至 24.5%^[8]。2025 年第一季度，山东省工业节能水平实现新提升。全省聚焦钢铁、石化等重点行业，着力抓好生产过程节能增效，一季度规模以上工业单位增加值能耗同比下降 6.6%，降幅比上年同期扩大 1.2 个百分点。六大高耗能行业单位增加值能耗同比下降 4.3%，其中石化、钢铁、建材、电力、化工行业分别下降 16.2%、6.9%、5.0%、3.2%、1.7%。装备工业、高技术制造业和消费品工业单位增加值能耗分别下降 4.3%、6.2%、9.2%，表明重点行业能效水平持续提升，为工业经

济结构优化和发展方式转变奠定了基础^[9]。

山东省城镇新建建筑节能降碳水平不断提高。“十四五”以来，山东新建建筑全面执行绿色建筑设计标准，政府投资或以政府投资为主的大型公共建筑普遍执行二星级及以上标准；全省累计新增绿色建筑面积 4.44 亿平方米，2022 年绿色建筑占城镇新竣工民用建筑面积比例超过 99%。同时，严格落实建筑节能规范，推动建筑围护结构保温改造和高效机电设备应用，“十四五”以来全省建成节能建筑 4.57 亿平方米，完成既有建筑节能改造约 2845 万平方米，在济南、青岛等城市带动了公共建筑能效整体提升。配合冬季清洁取暖工程、屋顶分布式光伏试点和建筑用能电气化行动，建筑运行能耗增速得到有效控制，为后续加快推进建筑领域高比例电气化和可再生能源利用奠定了良好基础^[10]。

近年来，山东在绿色低碳交通领域取得显著成效。新能源汽车推广持续加速，截至 2025 年 4 月，全省新能源汽车保有量突破 270 万辆^[11]。基础设施方面，全省各类充电基础设施保有量达到 117.35 万台，其中农村地区 31.72 万台，提前一年实现公共充电设施“乡乡全覆盖”，高速公路服务区充电站基本实现全覆盖^[12]。氢能示范方面，截至 2024 年 7 月，全省累计推广氢燃料电池汽车 2041 辆，建成加氢站 38 座^[13]。在港口与航运环节，青岛港 2024 年岸电接电量突破 1000 万千瓦时，折算减排二氧化碳约 8000 吨，实现了港口岸电覆盖率 100% 的目标^[14]。与此同时，多式联运加快发展，2024 年山东港口海铁联运量达到 420 万标箱，连续十年居全国首位，进一步推动了运输结构的绿色优化。山东还在高速公路和服务区推进“光储充换”一体化示范工程，全省高速服务区已建成充电站 368 座、换电站 50 座，并发布了《高速公路边坡光伏发电工程技术规范》等标准，探索形成可复制的零碳交通基础设施模式^[15]。在公共交通领域，“十四五”以来，全省新增和更新的公交车辆（除应急车辆外）已全部采用新能源车型，新能源公交车占比超过 80%，氢能公交超过 600 辆^[16]。

（三）碳达峰碳中和政策清单与目标规划

山东省已初步建立碳达峰碳中和“1+1+N”双碳政策体系。2022 年 12 月，中共山东省委和山东省人民政府联合出台《关于完整准确全面贯彻新发展理念 切实做好碳达峰碳中和工作的实施意见》，对全省碳达峰碳中和的工作进行了系统性的部署。截至 2024 年 10 月底，作为“N”部分的配套政策，已陆续公布了《山东省碳达峰实施方案》以及针对能源、工业、建筑、交通、科技等分领域配套方案。

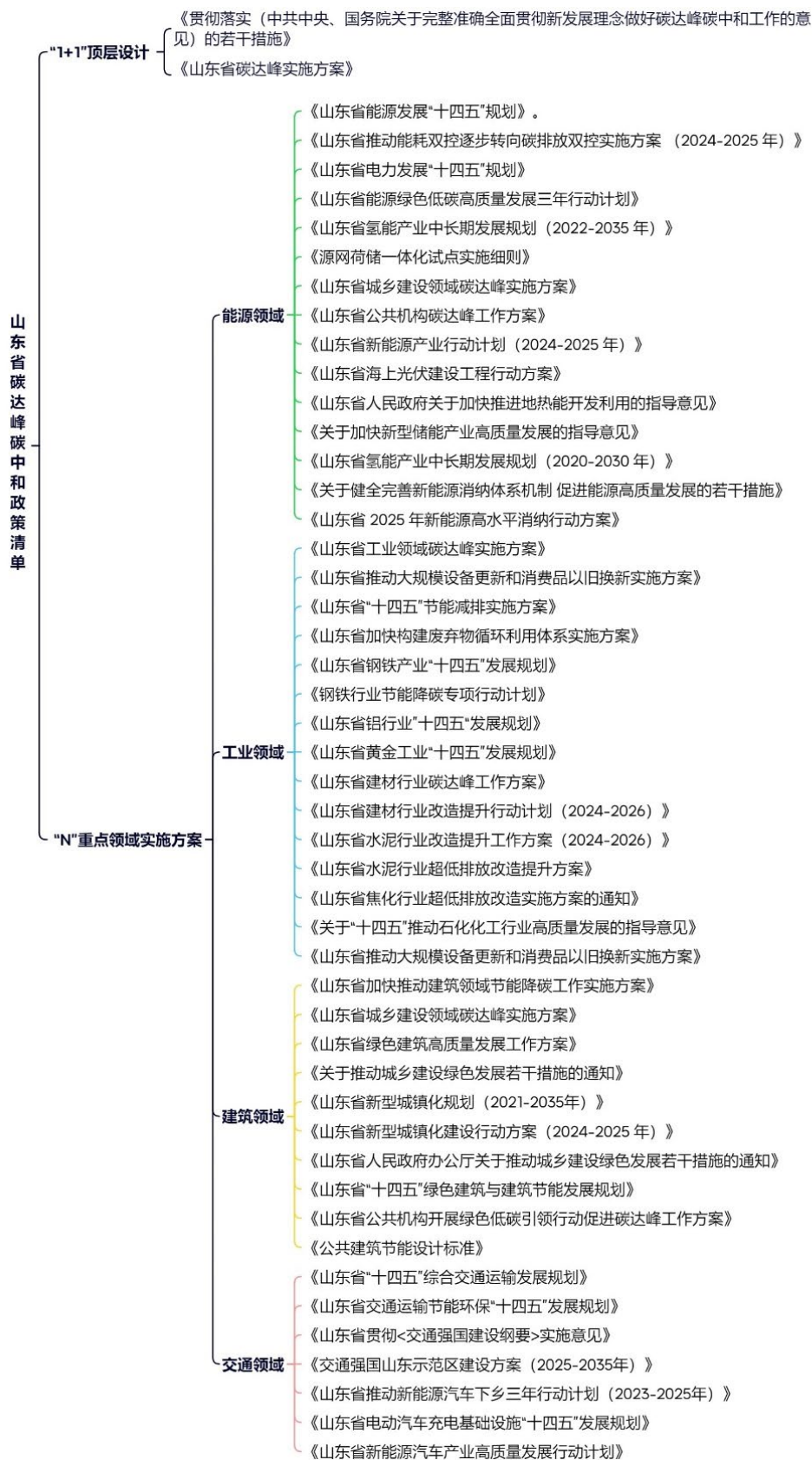


图3 山东省碳达峰碳中和政策清单

碳达峰碳中和目标规划

山东省在确保国家能源安全的基础上，提出了力争实现二氧化碳排放达到峰值，并在全国一盘棋中奋力实现碳中和的目标。结合本身的资源禀赋、发展阶段和发展特征，山东省将碳达峰碳中和战略目标细化为部门和行业低碳转型目标及行动计划（表 3、表 4）。一方面，作为国家重要的能源消费大省与工业门类最全的制造强省，山东必须充分发挥清洁高效煤电的兜底保障作用，确保国家能源安全，同时充分利用海上风电、光伏发电、核电等多元化清洁能源优势，有序推进化石能源清洁化利用与非化石能源规模化替代的协同发展。另一方面，针对山东省工业碳排放占比高的排放特征，重点聚焦高碳行业的深度减排，同步强化煤炭清洁高效利用技术推广和石化行业甲烷控排监管，形成符合山东工业结构特点的降碳路径。

表 3 山东省低碳发展综合目标

	2025	2030	2060	政策文件
二氧化碳排放量达峰	/	二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降	/	《贯彻落实〈中共中央、国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见〉的若干措施》
碳中和	/	/	助力全国如期实现碳中和目标，开创人与自然和谐共生新境界。	
单位地区生产总值能源消耗下降率	比 2020 年下降 14.5%	在 2025 年基础上大幅下降	/	
单位地区生产总值二氧化碳排放下降率	比 2020 年下降 20.5%	比 2025 年下降 68% 以上	/	
非化石能源消费比重	13%	20%	80% 以上	
森林覆盖率	完成国家下达目标任务	完成国家下达目标任务	/	
整体能源利用效率	/	/	达到国际先进水平	

能源领域：

山东省能源领域呈现出“控总量、调结构、提比例、强支撑”的多元协同格局。总体来看，山东聚焦能源系统的高质量发展，推动传统高碳能源压降与清洁能源加速替代同步推进，逐步构建绿色、安全、低碳、高效的新型能源体系。

2025 年是山东能源转型的攻坚期，重在控制总量、优化结构、打牢基础。全省能源消费总量将控制在 4.5 亿吨标准煤以内，重点区域煤炭消费比 2020 年下降 10%，煤电装机占比降至 55% 以内，清洁能源发电量占比达到 35% 以上。新能源装机规模力争达到 1.2 亿千瓦，重点发展光伏、风电，同时推动核电、生物质、氢能多元布局。储能方面，建设 500 万千瓦

新型储能和 400 万千瓦抽水蓄能，强化系统灵活性与安全性。在提高绿电消纳能力方面，山东启动“源网荷储一体化”试点，试点项目年消纳量不低于 2 亿千瓦时，新能源占比超过 50%。

到 2030 年，山东将进入能源系统重塑与全面低碳化阶段。这一阶段将重点提升绿电比例和系统承载能力：光伏和风电装机分别提升至 9500 万和 4500 万千瓦，清洁能源成为能源增量主体。新型储能和抽水蓄能装机均达 1000 万千瓦，为高比例新能源并网提供支撑；绿氢产能与应用体系进一步完善，初步形成“电—氢—热—储”多能互补的新型格局。

工业领域：

山东省工业领域作为碳排放重点区域，正稳步推进结构优化与低碳转型，构建以能效提升、工艺改造、循环利用为核心的绿色制造体系。总体上，山东正从传统高耗能、高排放路径，迈向数字化、绿色化、集约化的新工业格局。

2025 年是打基础、控增量的关键阶段。山东将推动规模以上工业单位增加值能耗比 2020 年降低约 17%，重点行业单位碳排放强度明显下降，确保工业领域整体碳排放实现阶段性趋稳。钢铁、水泥、焦化等高耗能行业启动节能降碳专项行动：如钢铁行业计划节能 2000 万吨标准煤、减排二氧化碳 5300 万吨；吨钢综合能耗降至 535 千克标准煤以下。与此同时，重点推动大宗固废循环利用，综合利用率提升至 60%，并大力淘汰能效基准以下产能，确保“两高”行业能效标杆达标率超过 30%。多个重点行业推进超低排放改造和绿色工艺替代，工业领域碳排放逐步达峰前收敛。

到 2030 年，山东工业将全面进入碳排放达峰期，重点转向深度治理与结构重塑。钢铁、电解铝、水泥等行业核心工序能效全面提升，高端精品钢、再生铝、绿色建材等占比显著提高，工业用能结构实现清洁替代突破；例如废钢在钢铁原料中占比提升至 30%，建材原料替代率达到 5% 以上。全省大宗工业固废年利用量达 2 亿吨，产业循环化水平显著提升。

建筑领域：

山东省建筑领域正加快从高耗能向绿色低碳体系转型，构建以能效提升、绿色建造、可再生能源替代为核心的建筑碳达峰路径。总体战略明确以“控能耗、提电比、强改造、建绿色”为导向，逐步实现建筑全生命周期绿色化。

到 2025 年，山东建筑领域处于能效提升与基础夯实阶段。建筑运行一次与二次能源消费总量将控制在 0.95 亿吨标准煤以内，建筑能耗中电力消费比例提升至 55% 以上。在新建

建筑方面，实现绿色建筑全覆盖，新增绿色建筑面积超过 5 亿平方米，星级绿色建筑项目绿色建材使用率不低于 40%。既有建筑方面，完成 3000 万平方米居住建筑节能改造，公共建筑节能提升改造面积达 2000 万平方米以上。清洁供暖比例达 80% 以上，并推动屋顶光伏与公共机构协同建设，提升建筑能源自给能力。同时，推动可再生能源在城镇民用建筑中的替代率达到 10%，为后续大规模低碳建筑体系打下基础。

到 2030 年，山东将全面进入建筑领域碳达峰的攻坚期，重点转向深度低碳化与系统集成优化。电力消费占建筑能耗比重提升至 65% 以上，公共建筑整体能效提升超过 20%；绿色建材在新建绿色建筑中的应用比例将达 70%，具备改造价值的既有建筑实现“应改尽改”。

交通领域：

交通领域作为山东省能源消费和碳排放的重要领域之一，正经历由“油转电”“路转轨”到系统绿色化的深度变革。全省正以“电动化替代、运输结构优化、基础设施绿色升级”为主线，推动交通体系从高碳向低碳高效转型。

到 2025 年，山东交通领域进入绿色替代关键起步期。城市建成区新增和更新的公共汽车 100% 为新能源车，出租车新能源与清洁能源车辆比例不低于 80%；新能源汽车新车渗透率将达 45%，保有量提升至 240 万辆，全年产量达 100 万辆，形成以“乘用车电动化”为主的规模化基础。营运车辆和船舶单位碳排放强度在 2020 年基础上分别下降 4% 和 3.5%。绿色出行比例达到 70%，配套设施方面，全省充电基础设施显著扩容，乡镇公共充电站实现全覆盖，城区平均充电服务半径小于 3 公里，重点区域高速快充站覆盖率超 90%。

到 2030 年，山东交通领域将迈入深度脱碳与系统协同阶段。营运车辆与船舶的单位碳排放强度将在 2020 年基础上分别降低 10% 和 5%，清洁能源与新能源交通工具全面普及。

模型工具和情景分析

（一）模型工具（EPS Shandong 2025）

我们对山东“双碳”路径的量化分析主要采用能源政策模拟模型（Energy Policy Simulator, EPS）。EPS 模型工具由能源创新政策与技术公司（Energy Innovation, EI）开发,是一个基于系统动力学的免费开源分析工具,用于模拟和评估能源与气候政策对能源消费、温室气体排放、投资需求及相关宏观社会经济指标的影响。

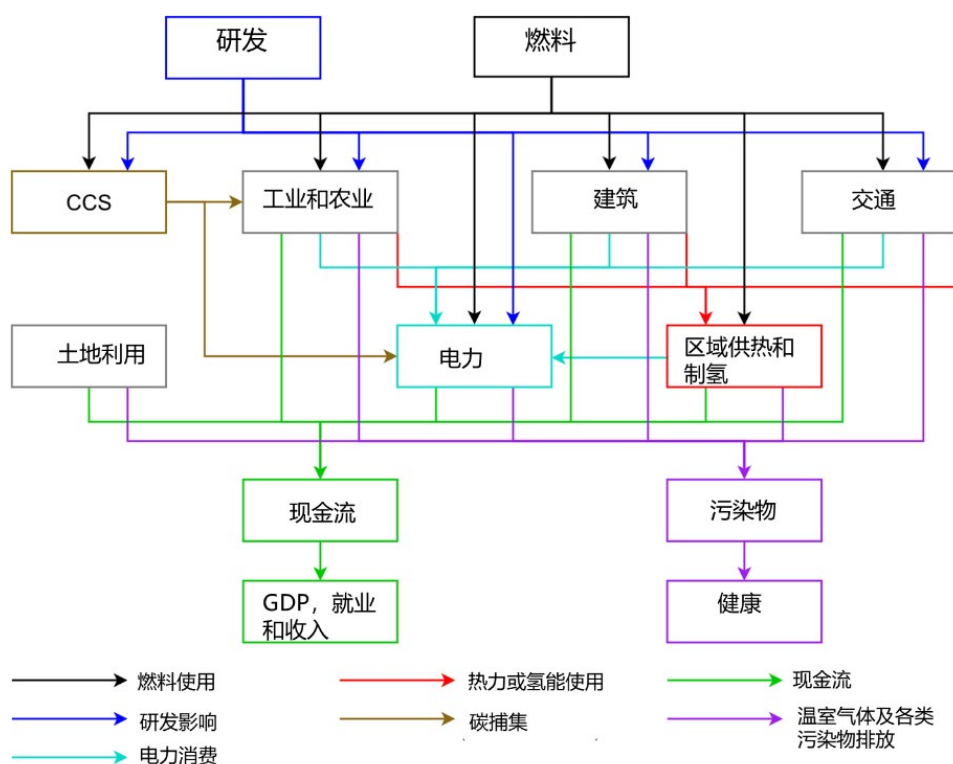


图 4 EPS 模型计算流向图

图片来源: <https://docs.energypolicy.solutions/>

EPS 模型主体由 5 大部门 / 行业模块构成,分别是交通、电力供应、建筑运行、工业（包括建筑业、农业）、土地利用和林业。其中,交通模块包含道路交通、航空、水运、铁路和摩托,建筑建筑业和农业被划入工业模块。每个模块是由相互关联影响的变量和政策参数按照特定

函数关系构成。此外，EPS 模型也设置了其他与碳排放源或汇相关的模块，如区域供热和制氢、碳捕集与封存（CCS）、研发（R&D）、燃料、地球工程、投入产出（I/O）模块等。

绿色创新发展研究院（iGDP）致力于推动 EPS 工具在省份层面的应用工作，为区域层面的碳达峰碳中和路径编制、政策和技术方案选择、投资需求分析等方面提供量化支持。山东 EPS 模型（EPS Shandong 2025）是由 iGDP 在 EPS China-iGDP 2024 基础上开发的免费开源工具，旨在帮助决策者、研究者及相关从业人员采用情景分析方法，评估不同能源和低碳相关政策组合的影响以及识别山东潜在的双碳路径。

（二）数据需求及来源

EPS 建模数据需求量较大，共计 241 个变量指标，考虑到国家和省份有一部分通用的变量指标，针对山东省我们更新了 55 个变量指标，其中包括优先级划分为非常高的所有变量指标（5 个）、划分为高的绝大多数变量指标（29 个），划分为中的部分变量指标（8 个）以及其他具有本地化特征的变量指标。

概括而言，支持省份 EPS 工具开发所需数据包括能源系统和社会经济相关的两大类数据。这些数据来源包括国家统计局、中国能源统计年鉴、省统计年鉴等官方统计资料、政策文件以及研究文献等公开数据（表 4）。

表 4 数据需求及主要来源

部门	主要数据需求	来源
社会经济	人口 GDP 各部门 / 产品投入产出关系	国家和山东省统计局 山东省统计年鉴 山东省投入产出表 山东省中长期社会经济发展目标 研究文献
电力	基年电源装机量 不同电源利用小时数 跨省调入调出	电力工业统计资料汇编 中国能源统计年鉴
建筑	分建筑类型分用能设备能源消费及结构 分布式光伏装机和发电量	中国能源统计年鉴 研究文献
工业	工业分行业终端能源消费及能源结构	中国能源统计年鉴 山东省统计年鉴和历年社会经济统计公报
交通	周转量、交通车辆拥有量 (细分到货物、燃料类型)	中国能源统计年鉴 山东统计年鉴 全国交通统计年鉴

（三）情景分析

本研究选择基年为 2020 年，预测年份为 2021-2060 年，并设置了三个情景模拟山东省在不同政策参数设置下的能源和碳排放可能路径（见表 5）。

表 5 情景说明

情景	开始年份	结束年份	定义	功能
2020 政策冻结情景	2020	2060	仅考虑 2020 年及之前发布政策	基准情景（用于基准比较）
政策情景			强化 NDC，双碳“1+N”政策体系	评估现有政策减排效果
双碳情景			2030 年前：政策情景 2031-2060 年：实现 2060 年碳中和的政策力度（国内外最佳实践）	识别实现碳中和的政策差距

山东省“双碳”实现路径

（一）低碳发展目标

能耗双控与碳排放双控

2023 年，山东省能源消费总量占全国消费总量的近十分之一。作为能源消费大省，山东提出将能源消费控制和结构优化贯穿经济社会各领域，并设定了 2025 年非化石能源消费比重达到 13% 的目标^[17]。模型显示，政策情景下，山东省一次能源消费总量在 2023 年达到约 4 亿吨后平稳下降，2060 年总量相较于峰值减少 26%。得益于煤炭消费迅速减少，2025 年一次电力及其他能源消费占比（包含电力净调入）将达到 17%，2060 年达到 78%。双碳情景下，2060 年这一比重预计可达到 85%，煤炭消费占比仅余 10%（图 5），总量也减少至 2.6 亿吨标准煤。

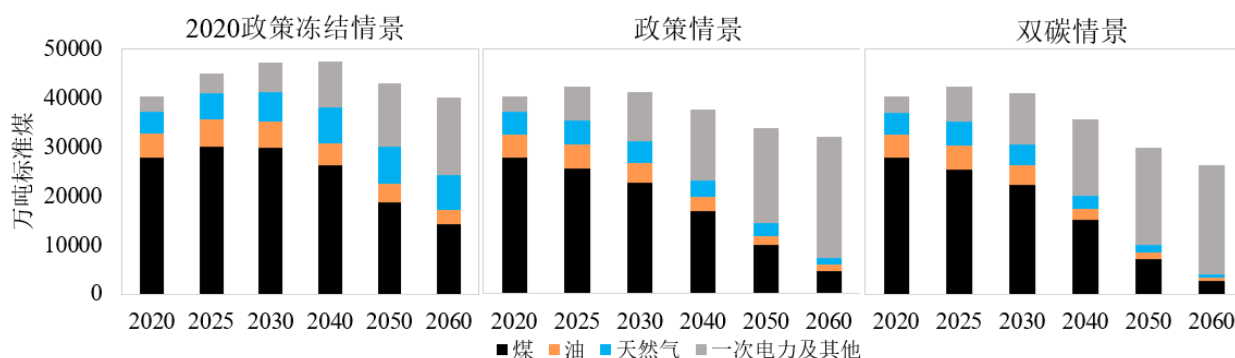


图 5 山东省一次能源消费结构

随着节能和消费结构优化工作的深入，全省排放也明显减少（表 6）。2020 政策冻结情景下，能源相关二氧化碳排放预计到 2029 年达到峰值约 11 亿吨，其后伴随较长的平台期，温室气体排放则持续增长至 2034 年；而在现有政策影响下，山东省能源相关二氧化碳排放应在 2021 年达峰，2060 年不足 2 亿吨；双碳情景下，2060 年能源相关二氧化碳排放将减少至 0.4 亿吨。

表 6 山东省能源相关二氧化碳排放情况

情景	达峰年份	2030 年 相对于峰值下降	2035 年 相对于峰值下降	2050 年 相对于峰值下降	2060 年 相对于峰值下降
2020 政策冻结情景	2029	2%	3%	29%	42%
政策情景	2021	19%	28%	62%	80%
双碳情景	2021	20%	43%	89%	96%

注：不含土地利用、土地利用变化与林业（LULUCF）

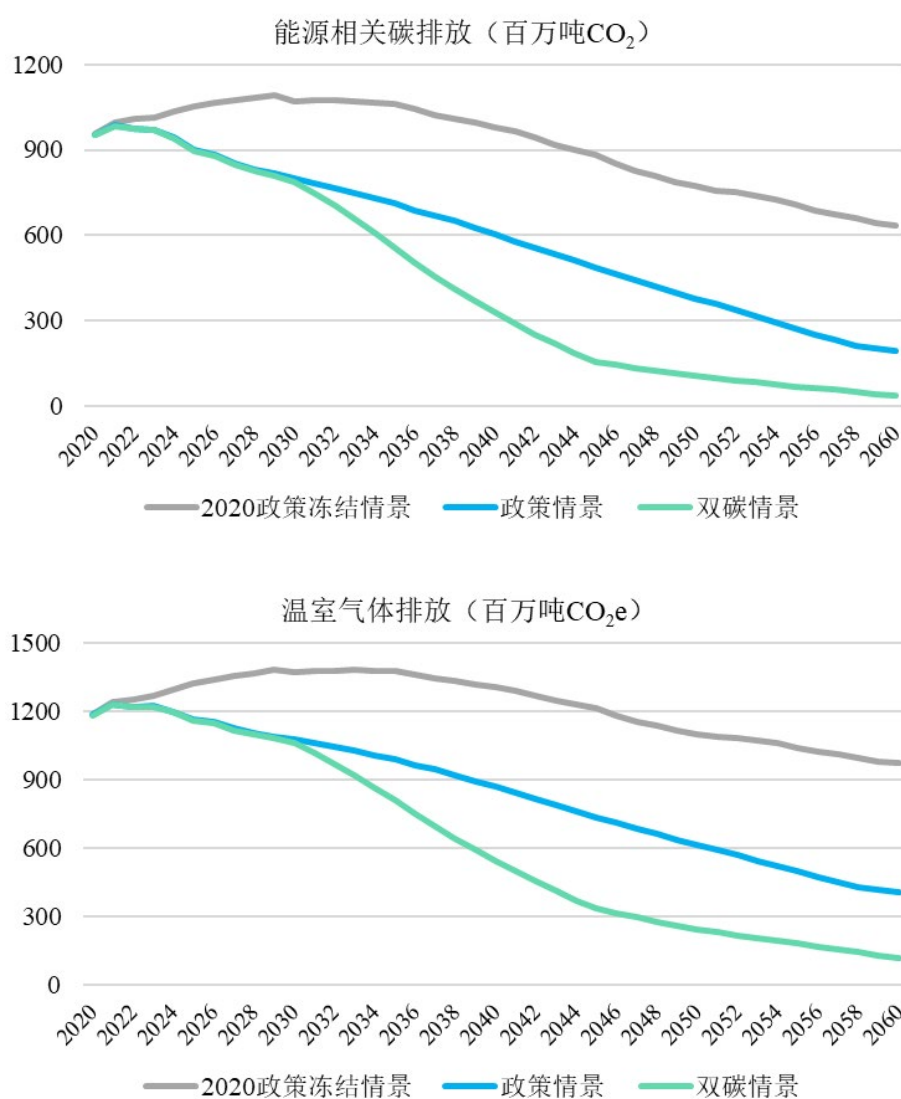


图 6 山东省能源相关二氧化碳和温室气体排放路径

注：不含 LULUCF

现有政策力度下，山东省有望顺利完成“十四五”期间单位生产总值能耗和碳排放的控制任务。政策情景下，“十四五”期间，山东省单位 GDP¹ 能耗和碳排放下降率均为 28%（图 7），明显高于省内下降率要求。“十五五”期间，单位 GDP 能耗和碳排放下降率预计可以达到 30% 左右。政策情景和双碳情景下，非化石能源消费占比（含调入调出电）在 2025 年和 2030 年预计分别达到 18% 和 27%，有望完成“十五五”末超过 20% 的目标，而 2060 年分别可以达到 76% 和 84%。

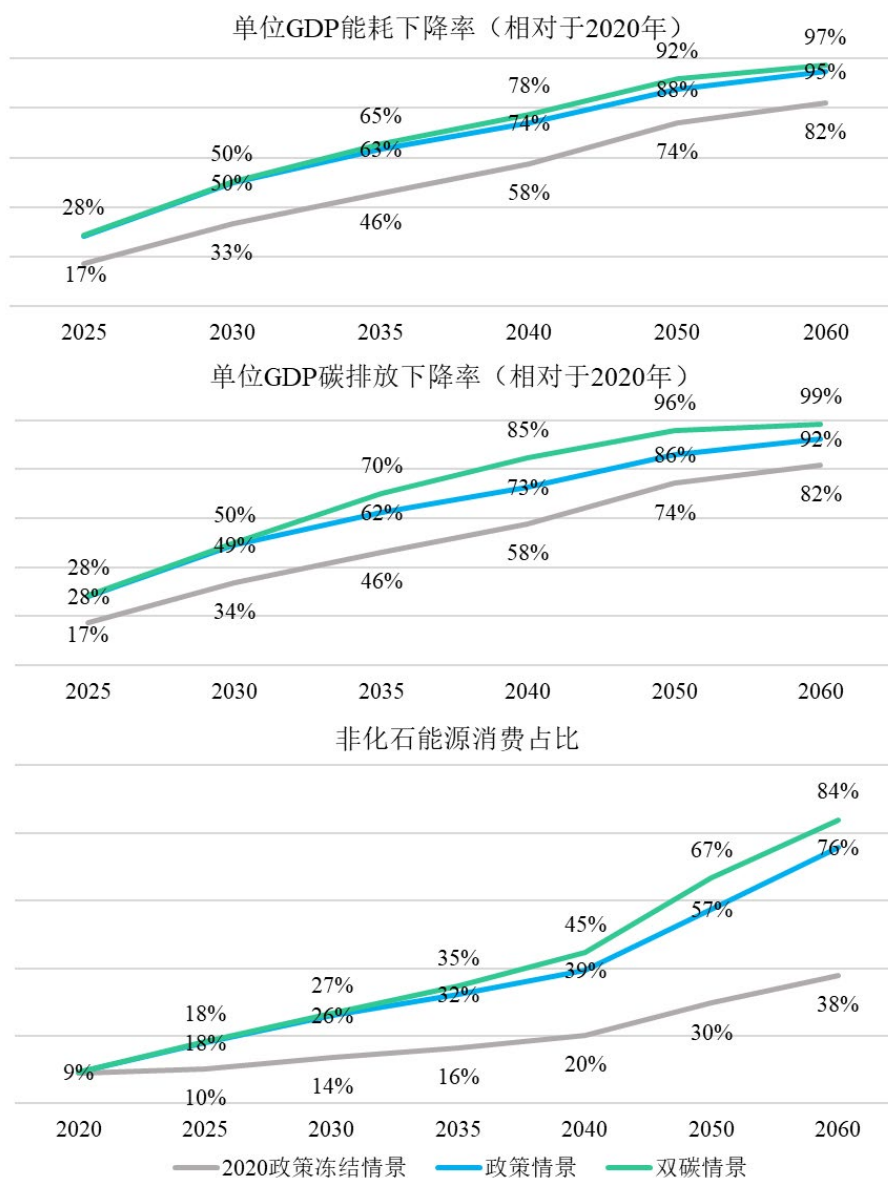


图 7 山东省能源强度与碳排放强度下降情况

1. 除特别说明外，本报告中所涉及的地区生产总值均为 2020 年不变价。

终端部门电气化率

山东省终端部门需加速电气化进程。山东省提出积极推广实施电能替代。提升能源利用效率，到 2025 年，电能占终端能源消费比重达到 30% 以上^[18]。根据模型结果，政策和双碳情景下 2025 年终端部门电力消费占比为 29% 左右，基本可以顺利完成“十四五”目标（表 7）。各终端部门电气化水平目前仍存在较大的提升空间，双碳情景下，到 2060 年，工业、交通、建筑和终端部门整体电气化率分别可以提升至 64%、75%、98% 和 64%。

表 7 山东省各终端部门电气化率

情景	部门	2025	2030	2060
2020 政策 冻结情景	工业	30%	31%	33%
	交通	4%	9%	41%
	建筑	42%	45%	51%
	终端部门	27%	28%	35%
政策情景	工业	33%	37%	53%
	交通	6%	17%	68%
	建筑	43%	50%	93%
	终端部门	29%	33%	57%
双碳情景	工业	33%	37%	64%
	交通	6%	18%	75%
	建筑	43%	50%	98%
	终端部门	29%	34%	64%

注：工业电气化率不包括原料，终端部门包括工业、交通、建筑、农业和废弃物。电力折标采用电热当量法。

（二）电力部门

电力是山东省最大的碳排放部门，在终端部门快速电气化的同时实现电力部门碳中和要求加速发展非化石能源发电。如图 8 所示，2020 政策冻结情景下，山东电力部门碳排放将在 2029 年前后达峰，峰值水平约为 6.4 亿吨。政策和双碳情景下，电力部门碳排放将于 2025 年前后达峰，峰值水平在 5.6 亿吨左右。若延续“十四五”政策力度，随着煤电机组退出和风光发电量稳定增加，电力部门排放稳定减少，但 2060 年仍将剩余相当于峰值水平 1/5 的碳排放。而双碳情景下，2030 年后发电排放加速下降，2060 年碳排放仅余峰值水平的 5%。

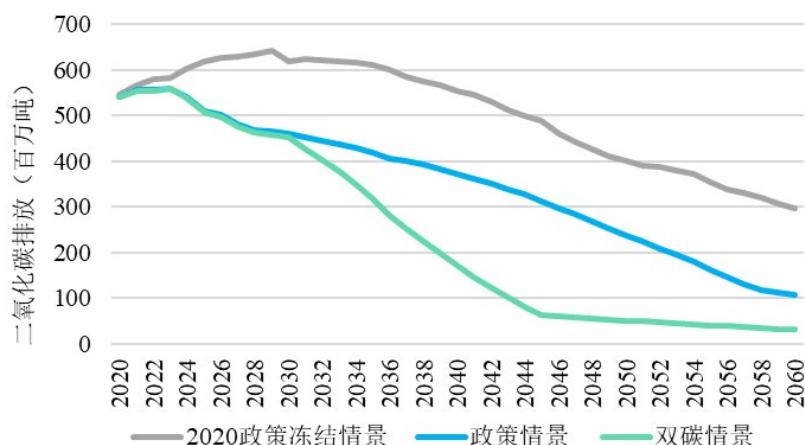


图 8 山东省电力部门排放趋势

注：不含 LULUCF

电力部门排放的变化趋势主要取决于清洁电力扩增能否满足重点用电需求。2020 政策冻结情景下，山东省用电需求在 2040 年达到峰值——约 1 万亿千瓦时，此后平稳减少。而政策情景和双碳情景下，用电需求在预测期内保持增长态势，2060 年发电量均仍保持在 1 万亿千瓦左右。这说明，深度减排要求在推进终端部门电气化的同时加紧落实能效提升。从模型预测的发电结构来看（图 9），政策情景和双碳情景下，新增的电力需求和淘汰的煤电主要由风电和废弃物发电支撑，2060 年全省风电发电量预计达到 4400 亿千瓦时，可满足全省近一半的用电需求。

从模型预测的装机结构（图 10）来看，煤电和气电不会彻底退出，燃气电厂稳定出力。

双碳情景和政策情景下装机结构变化基本一致，“十四五”期间，得益于风、光超出预期的装机速度，非化石能源装机占比从 35% 提升至 55%。2060 年，非化石能源装机比重也随之提升到 83%，其中风、光装机占比分别为 47% 和 23%。其中，风电装机持续增长，而“十五五”后基本没有新增光伏装机。

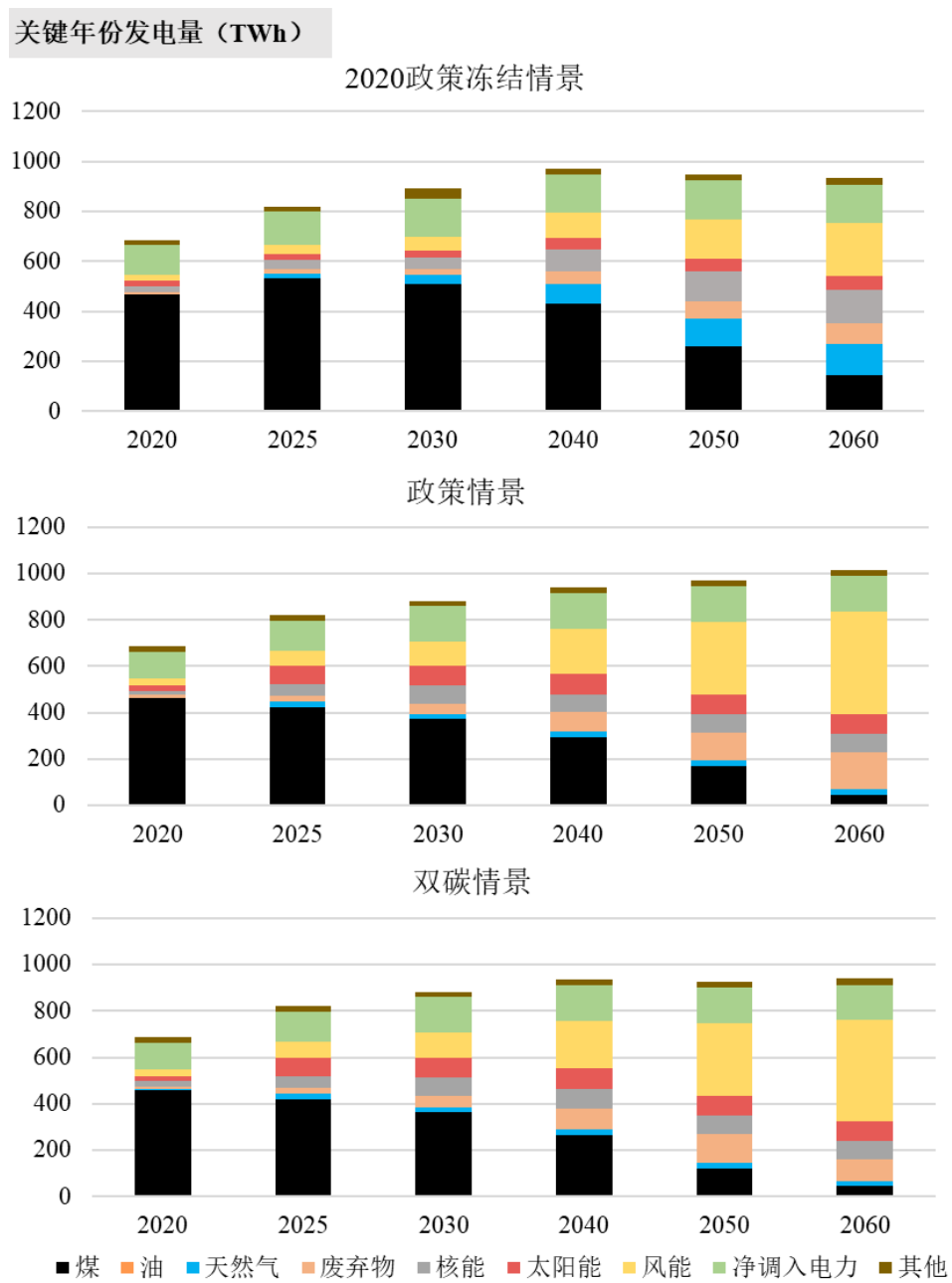


图 9 山东省关键年份发电结构

注：其他包括地热能、生物质能和水能。

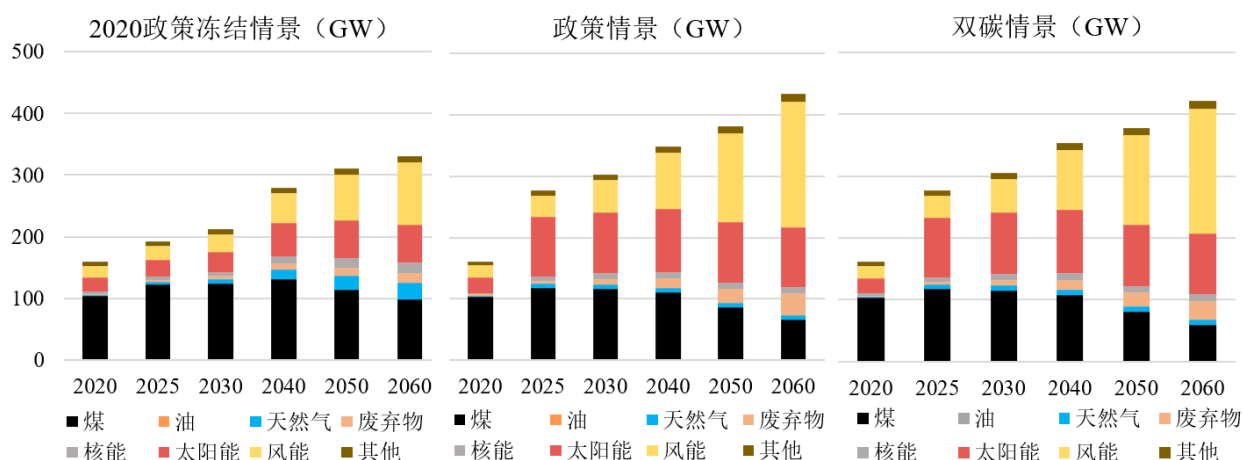


图 10 山东省关键年份装机结构

注：其他包括地热能、生物质能和水能。

(三) 工业部门

工业部门是山东省排放量最大的终端消费部门，其深度减排需用能结构清洁化。模型显示，政策情景与双碳情景下工业部门直接排放（含过程排放）均在 2021 年达峰（3.4 亿吨）。政策力度显著影响减排速度：政策情景下 2060 年排放量降至 2 亿吨（较峰值下降 73%），而双碳情景下通过加速减排，2060 年降至 4200 万吨（下降 95%），趋近近零排放。这表明工业部门必须强化节能降碳措施，才能实现深度脱碳目标。

纳入外购电力产生的间接排放后，工业碳排放峰值接近 8 亿吨（2021 年），是直接排放峰值的 2.3 倍。研究发现，含间接排放的政策冻结情景达峰时间比仅直接排放情景提前 4 年，印证电力消费带来的间接排放主导排放趋势。因此，山东应大幅提升可再生能源消纳比例并推动工业电气化。

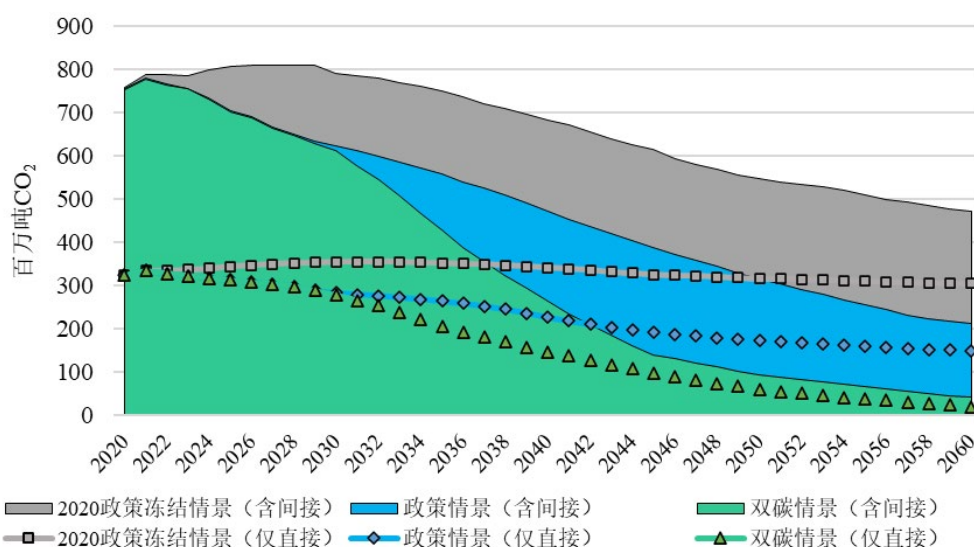


图 11 山东省工业部门碳排放趋势

注：面积图为各情景下工业直接加间接碳排放，上边界为排放总量；点线图为工业部门的直接碳排放。

在工业用能结构方面，政策情景下，“十四五”期间山东省工业部门用能将达峰，在工业节能政策措施作用下，煤、油、气和热力消费量和占比稳步下降，2060 年工业用能 1.2 亿吨标煤，相对于 2020 年下降了近 47%。双碳情景下，节能力度进一步加大，2060 年工业用能不到 1 亿吨标煤，相对于 2020 年下降了近 56%。

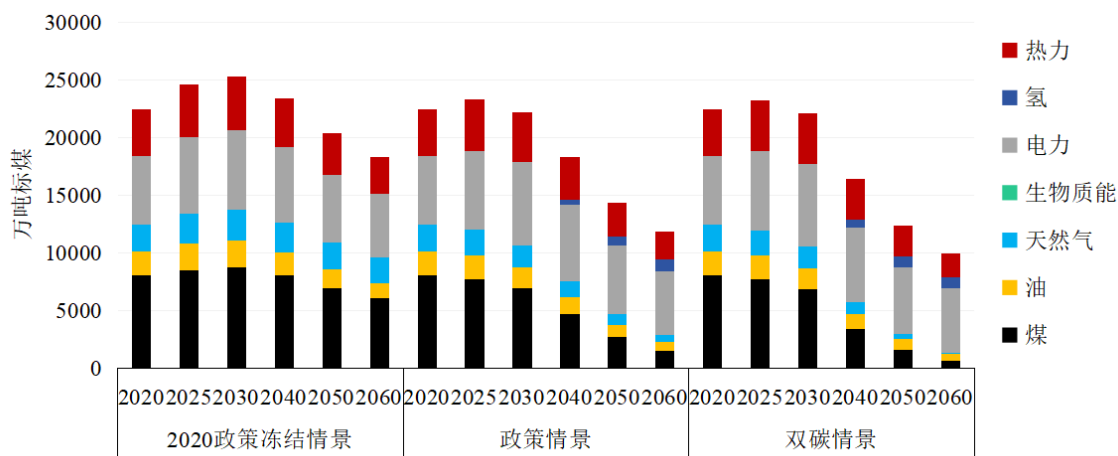


图 12 山东省关键年份工业用能结构

注：含原料，未考虑农业和废弃物。

分行业来看，山东省工业部门重点排放行业为水泥、化工和钢铁，2020 年这三个行业构成了工业部门碳排放的近 66%。其中，钢铁行业的碳排放居首位，其排放量相当于其他两个高排放行业碳排放之和。

对于山东省实现碳中和目标而言，钢铁行业在达峰后的快速减排尤为关键。在双碳情景下，钢铁行业碳排放在 2021 年达峰，预计到 2035 年，行业碳排放量将比峰值下降约 45%，到 2060 年，排放量将降至约 350 万吨 CO₂。水泥行业碳排放在双碳情景下也在 2021 年达峰，到 2035 年，行业碳排放量预计比峰值下降约 40%，到 2060 年碳排放量将约为 330 万吨。化工行业在双碳情景下将在 2029 年达峰，到 2035 年碳排放量将比峰值下降约 13%，到 2060 年仍有较为显著的碳排放量（超 1000 万吨）。

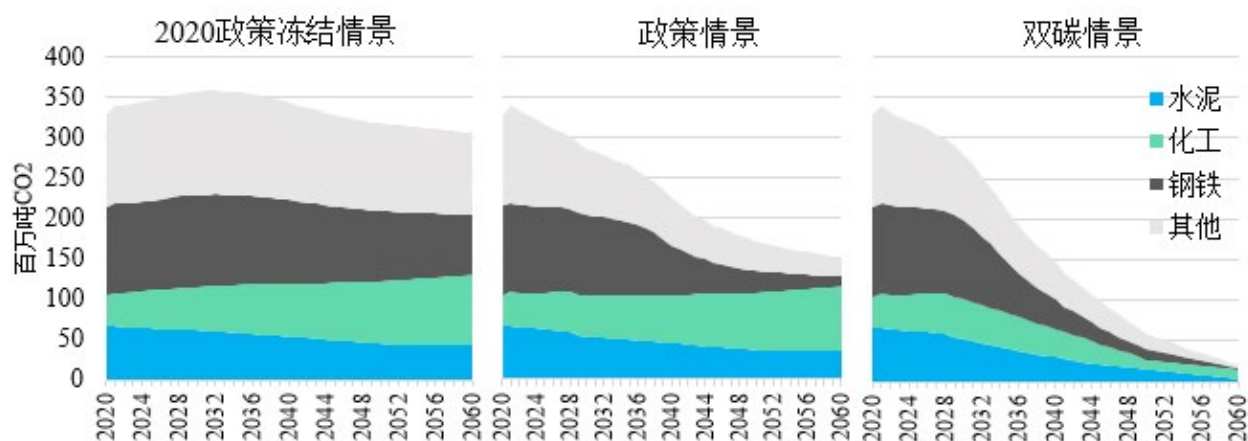


图 13 山东省主要工业行业 CO₂ 排放

注：含过程排放

加快高耗能行业的电气化进程是山东省实现碳中和目标的关键领域之一。在政策情景下，预计到 2060 年，山东省钢铁、水泥、化工行业的电气化水平（不考虑原料）分别达到 20%、49% 和 46%。在双碳情景下，这些行业的能源消费将主要以电力和氢能为主，预计到 2060 年，钢铁、水泥和化工的电力消费占比将分别提升至 30%、59% 和 56%。氢能的使用将主要集中在钢铁和水泥行业，预计到 2060 年，氢能在这两个行业的能源消费占比将分别达到 68% 和 35%。

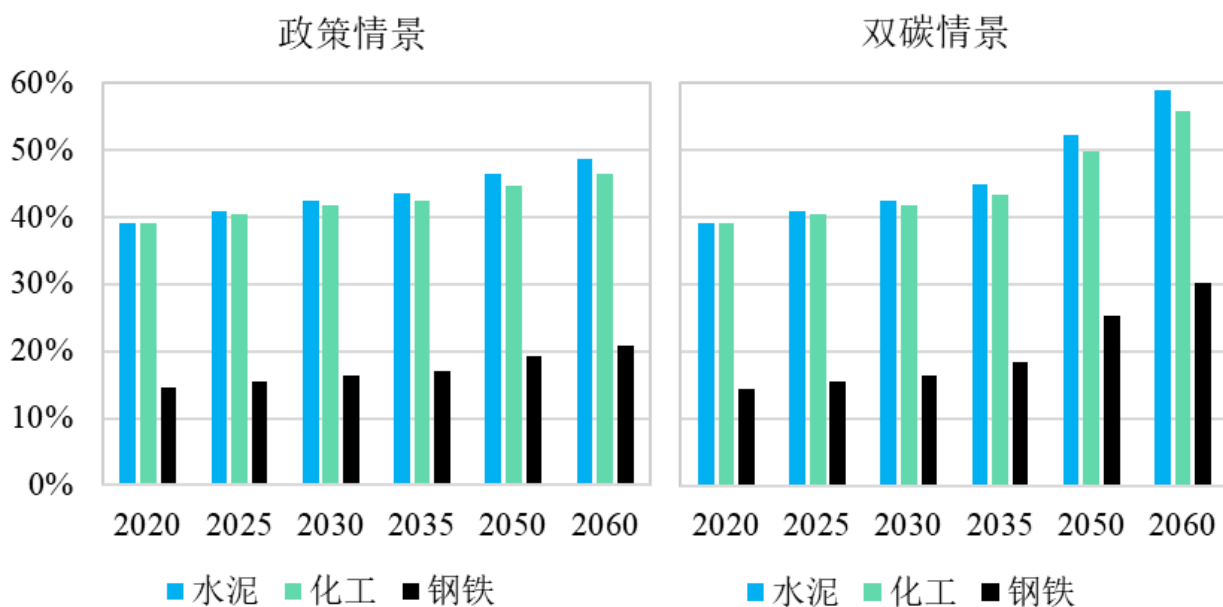


图 14 山东省主要行业电力消费占比

注：工业部门包括农业、林业和废弃物，能源消费不含原料，电力折标采用电热当量法。

(四) 建筑部门

山东省属于寒冷气候区，存在稳定的供暖需求，建筑运行能源消费结构中热力、电力和煤炭占主导地位。模型结果显示（图 15），2020 政策冻结情景下，山东省建筑运行直接排放到 2040 年才达峰，2060 年排放水平仍有峰值的 80%。得益于建筑部门电气化的稳步推进，政策和双碳情景的直接排放预计在“十四五”末达峰，2060 年排放水平仅余峰值的 7% 和 1%。如果考虑间接排放，2020 政策冻结情景下，建筑部门排放到 2035 年才达峰，而另外两个情景下达峰将提前 10 年。若维持现有政策力度，到 2060 年仍余碳排放 0.3 亿吨。双碳情景下，2060 年建筑运行碳排放仅余约 600 万吨。2045 年后，间接排放贡献了政策情景和双碳情景的排放差距的 90% 左右，说明山东省建筑部门的深度脱碳高度依赖电力部门的清洁化。

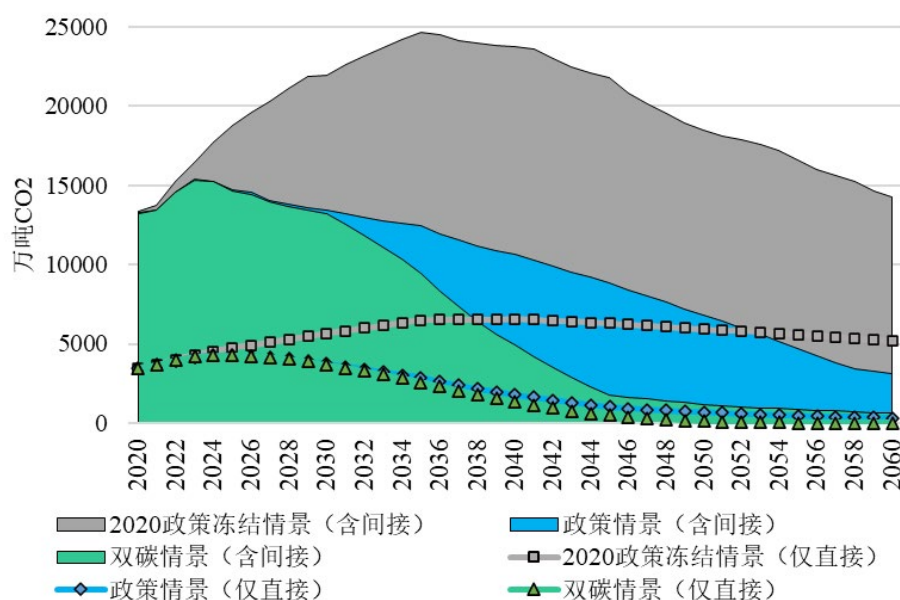


图 15 山东省建筑运行碳排放趋势

注：面积图为各情景下建筑运行直接加间接碳排放，上边界为排放总量；点线图为建筑运行直接碳排放。

2020 政策冻结情景下，建筑用能总量到 2040 年才达到峰值 0.8 亿吨，而其他两情景逐步实施了更为严格的节能政策，总量预计在“十四五”末达到峰值 0.5 亿吨。双碳情景下，2060 年建筑运行能耗减少至峰值的 1/3。从能源消费结构（图 16）来看，由于强劲的供暖用能需求，2020 年山东省建筑部门电气化率仅为 35%，此后持续上升。政策和双碳情景下，“十四五”末建筑运行电力消费占比达到 43%，这一比例 2050 年预计达到约 90%，2060 年山东省建筑运行阶段基本实现全电气化。

从分设施能源消费结构变化不难发现，2020 年，供暖能耗占能源消费总量的 56%。政策情景下，得益于供暖能耗强度的不断下降，供暖能耗稳定快速地减少，从 2040 年开始，炊事和热水等其他能耗超过了供暖需求，照明和家电的能源需求也未见减少。在双碳情景更为严格的减排政策作用下，照明、家电和炊事等用能需求逐渐减少，2060 年预计能源需求总量不到 0.2 亿吨标准煤，其中炊事和热水占比接近 40%。建议山东省进一步推广炊事电气化和节能家电换新以促进建筑运行阶段的能源结构优化和深度减排。2025 年初，山东省发布了升级版家电以旧换新实施方案^[19]，主要任务包括全链条推进“去旧换新”、扩大家电以旧换新补贴范围和加强平台管理和资格核验等。

2020 年，山东省城镇、农村居民人均住宅面积分别为 37.3m² 和 43.4m²。假设各类型建筑人均面积恒速增至发达国家水平，预计到 2060 年，全省城镇住宅和公建面积相对于

2020 年将增加约 20% 和 50%，而农村住宅面积由于持续城镇化将减少一半。考虑到人均建筑面积和居住用能需求随经济发展持续增加，“十四五”期间各情景下各类型建筑运行用能（图 13）均呈增长态势，这在一定程度上反映了山东省未来一段时间内经济增长和居民生活水平稳步提高。各情景下，公共建筑用能占比均逐渐提高，其减排对于整个建筑部门深度减排影响较大，政策情景下，公建能源消费量到 2035 年达峰，此后缓慢下降；而双碳情景下，公建能源消费量在 2029 年左右达峰，此后迅速减少，2060 年不足 800 万吨标准煤。

根据模型结果，若想实现深度减排，山东省应在到 2025 年新建公共建筑均实行 78% 的节能标准的政策基础上，每十年适度提高建筑节能标准水平。同时，山东省还应加速普及超低能耗（低碳）建筑，创建零碳建筑试点，落实既有建筑的能效提升改造，大力推行公共建筑绿色供暖、绿色照明和节能家电。

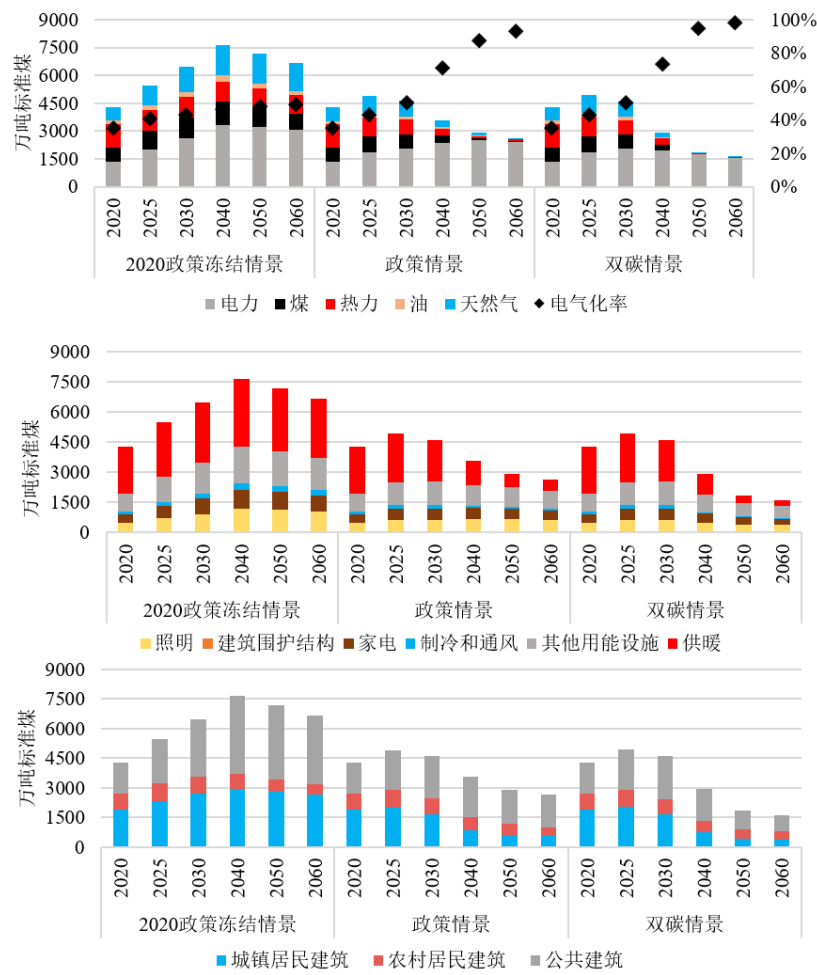


图 16 山东省建筑部门能源消费结构

注：其他用能设施包括炊事和热水，电力折标采用电热当量法。

（五）交通部门

在全省排放结构中，交通部门排放占比相对较低，但 2020 年交通部门整体电气化率（包含道路交通、铁路、航空、船运和摩托车）不足 2%，仍具有较大的减排潜力。2020 政策冻结情景下，直接碳排放在 2027 年达到峰值水平约 6000 万吨，若考虑间接排放，达峰推迟到 2045 年。政策情景和双碳情景下直接碳排放均在 2021 年达峰，峰值水平约为 5500 万吨，此后稳定下降，2060 年分别余 1000 万吨和 200 万吨左右。若考虑间接排放，政策情景 2060 年仍有超 3000 万吨碳排放，而双碳情景下仅余不到 900 万吨，这说明政策情景下电网的清洁化进程限制了交通部门脱碳。

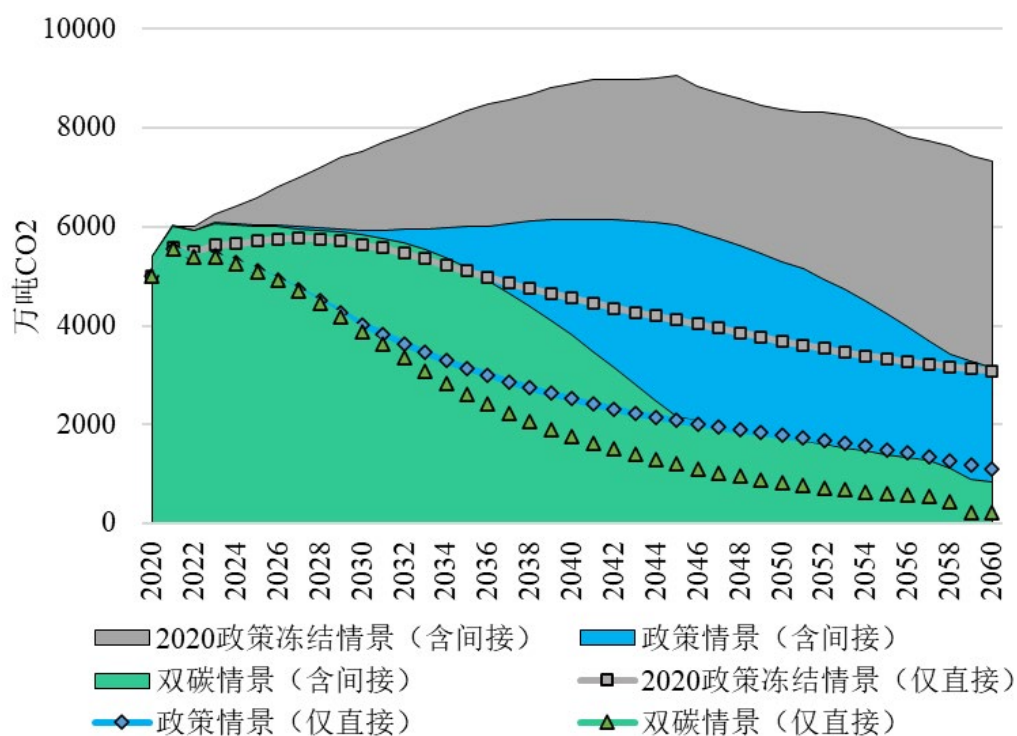


图 17 山东省交通部门碳排放趋势

注：面积图为各情景下交通部门直接加间接碳排放，上边界为排放总量；点线图为交通部门直接碳排放。

表 8 山东省单位周转量碳排放强度下降情况（相对于 2020 年）

情景	类型	2025	2030	2035	2040	2050	2060
2020 政策冻结情景	客运	17%	32%	41%	47%	60%	74%
	货运	13%	31%	52%	67%	82%	85%
政策情景	客运	28%	57%	72%	80%	89%	96%
	货运	20%	44%	63%	75%	85%	92%
双碳情景	客运	28%	62%	84%	94%	96%	99%
	货运	20%	43%	63%	76%	92%	99%

情景间碳排放的区别主要是由于单位周转量碳排放强度的下降（表 8）和电动交通工具的推广，前者可以通过交通结构优化和燃油经济性的提升实现。政策情景下，2060 年相对于 2020 年的客运、货运单位周转量碳排放强度下降分别为 96% 和 92%，而双碳情景下进一步提升到了 99%。从交通部门燃料消费（图 18）来看，政策情景下，能源消费总量只有细微波动，电力逐渐替代了汽油和柴油，2020 年~2060 年，电气化率从不足 2% 提升至近 70%，2060 年仍然保留约 20% 的油品消费占比，主要为货运用柴油和航空用喷气煤油。双碳情景下，能源消费总量呈现较为明显的下降，2060 年电气化率提升至 75%，其余能源主要是氢能和生物柴油。电气化率的提升得益于纯电动汽车的快速渗透，双碳情景下，纯电动汽车的保有量在 2040 年前后将提升到 90% 以上（表 9），而 2060 年基本可以淘汰燃油车和混合动力汽车。

表 9 山东省分情景纯电动汽车保有量占比

情景	2020	2025	2030	2040	2050	2060
2020 政策冻结情景	3%	12%	26%	45%	57%	69%
政策情景	3%	17%	39%	65%	80%	93%
双碳情景	3%	16%	43%	91%	99%	99%

分类型碳排放结构显示，2020 年山东省的道路交通碳排放几乎贡献了 80% 的碳排放，也构成了减排重难点。政策情景下，得益于轻型电动车的加速渗透，轻型道路碳排放稳定减少，但重型道路和航空的排放到 2060 年分别剩余 460 万吨和 230 万吨左右，合计构成 64% 的排放。而双碳情景下，轻型道路排放在 2050 年前减至 0，随着更为强劲的“公转铁”“公转水”结构调整和重型电动车的渗透，2060 年，重型道路排放可以忽略不计，航空排放仅余不足 100

万吨。这说明，在现有政策基础上，山东省需要加强针对货运的结构调整和电动 / 氢能重卡的推广。《山东省交通运输绿色低碳高质量发展典型案例（2025 年度）》^[20] 中大部分案例都涉及物流园“公转水”联运、内陆港海铁联运和应用新能源重卡和绿色甲醇船舶，且减排节能效果显著，但目前均为个别城市试点阶段，有待将成功经验推广至全省。

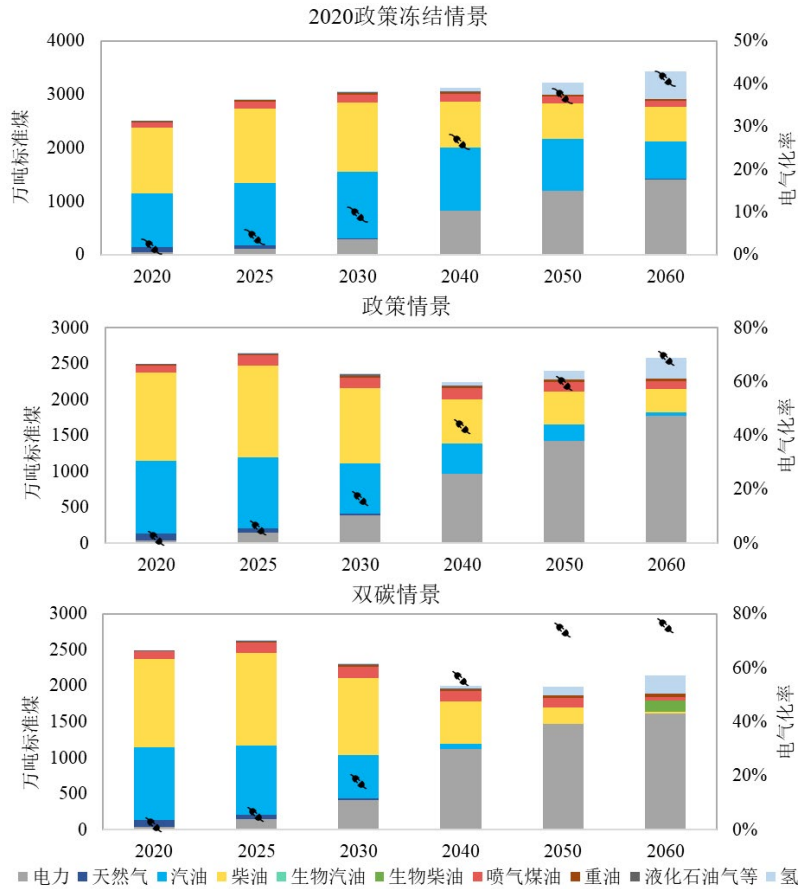


图 18 山东省交通部门分情景燃料消费结构

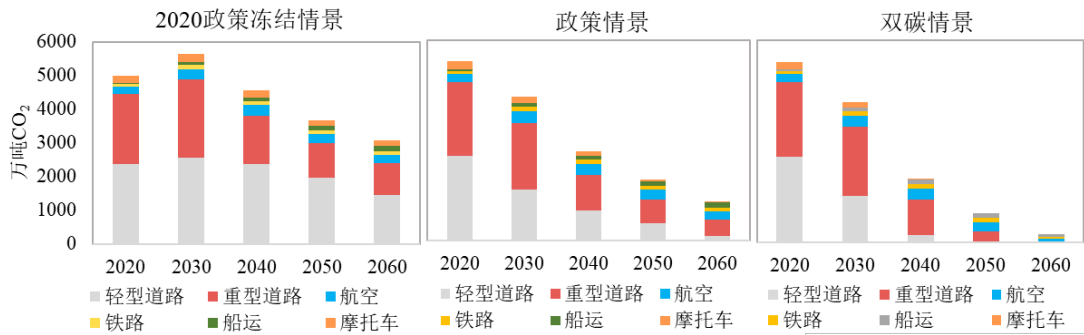


图 19 山东省交通部门碳排放结构

注：含直接和间接排放

（六）非二氧化碳温室气体

2020 年，甲烷、含氟气体和氧化亚氮排放约占山东省非二氧化碳温室气体（以下简称“非二气体”，本节仅考虑甲烷、含氟气体、氧化亚氮）的 44%、28% 和 28%。2020 政策冻结情景下，非二气体排放（图 20）直到 2040 年前后才达峰，在现有政策和双碳情景下，达峰时间提前至 2030 年，2060 年主要非二气体排放量分别降至 9400 万吨 CO₂e 和 5600 万吨 CO₂e。

分气体而言，政策情景下，含氟气体排放量在 2030 年前明显上升，在 2035 年达峰，峰值水平约为 9000 万吨 CO₂e，为同年 CO₂ 排放量的 11%，对全省温室气体减排格局具有重要影响。含氟气体排放基本来自于化工行业，“化工第一省”山东到 2023 年化工规上企业主营业务收入近 3 万亿元，化工经济总量连续 32 年居全国首位^[21]。为了响应绿色低碳高质量发展，这一传统优势产业必须从“资源型”转向“创新型”加快转型升级。省内提出通过推进新旧动能转换，精准管控“两高”行业，并持续推进技术改造和提级升级，打造世界级高端化工产业基地^[22]，但暂无含氟气体管控和减排等相关政策或措施。建议山东省针对含氟气体，尤其是含氟电子特种气体全生命周期减排出台行动方案，包含低排放替代品研发、工艺改善以及循环利用和销毁^[23]。

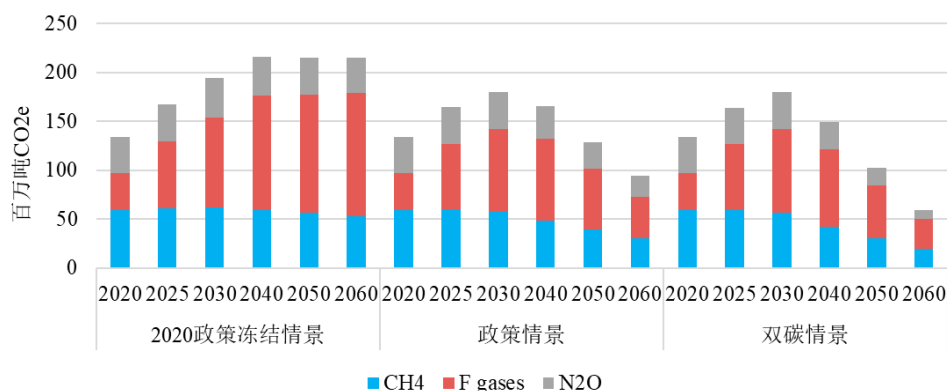


图 20 山东省非二氧化碳温室气体排放结构

（七）GDP 增长和就业影响

各情景下，山东省的 GDP 均稳定增长（图 21）。政策情景下，全省 GDP 在 2020—2060 年期间预计累计新增约 23 万亿元（2020 年不变价，下同）。从模型结果来看，全面实

施深度减排政策对经济增长的影响较为有限，双碳情景下 2020—2060 年累计新增 GDP 约为 22 万亿元，数量级约相当于 2020 年全省 GDP 的 2—3 倍。

另一方面，2020~2060 年期间，全省就业人数总数变化情景间差别较小。分行业而言，各情景下，煤炭开采和洗选业和油气开采业到 2060 年从业人数已减少至 0，石油、煤炭及其他燃料加工业和电力、热力生产和供应业的就业规模也迅速萎缩，而燃气生产和供应就业岗位数有所增加。情景间对比结果（图 22）显示，相较于 2020 政策冻结情景，双碳情景下深度减排政策的全面实施促使就业人数在 2020~2060 年累计增加了 40 万。其中，房屋建筑业和电力、热力生产和供应业以及科学研究与技术服务行业相对于 2020 政策冻结情景额外创造了约 660 万个就业岗位。

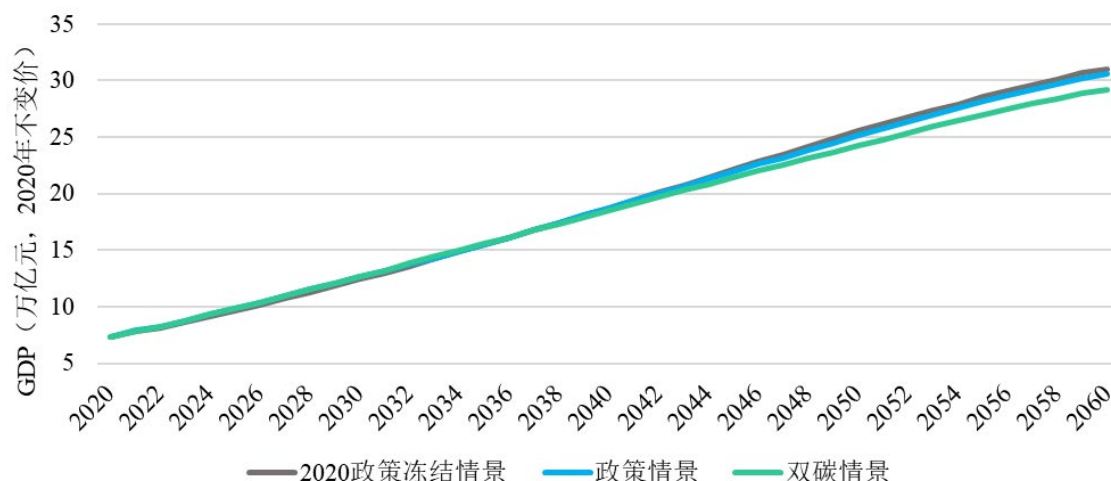


图 21 山东省分情景 GDP 变化

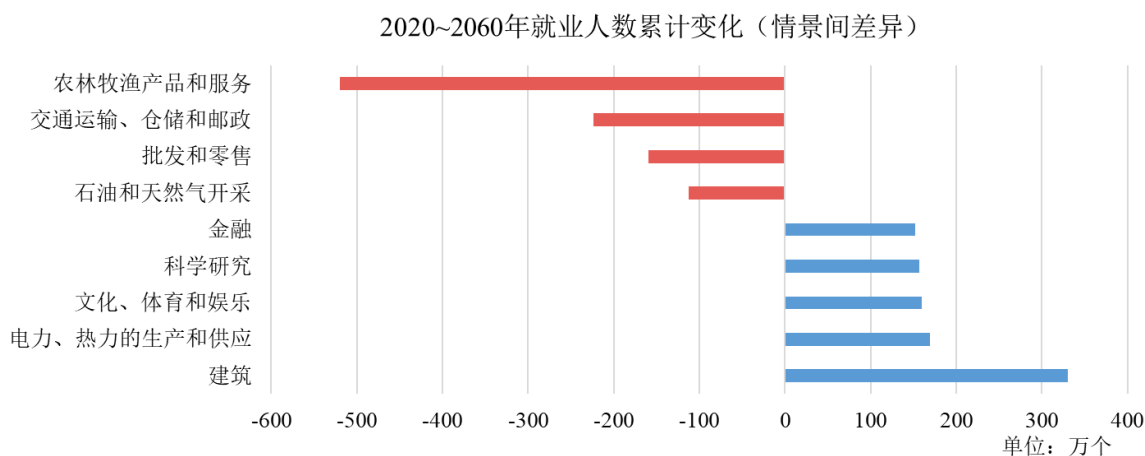


图 22 山东省主要行业就业人数累计变化（双碳情景 vs. 2020 政策冻结情景）

研究结论

（一）双碳情景显著降低长期排放，更接近碳中和目标要求

在双碳情景下，山东省二氧化碳排放较早实现峰值，达峰后总体呈持续下降趋势，到2060年降至约0.4亿吨。与其他情景相比，这一情景下的长期排放水平最低，减排幅度最大。其主要动力来自更严格的能效标准、更快的终端部门电气化推进以及更高比例的非化石能源供给。这三大动力一方面推动碳排放强度加快下降，另一方面使排放总量在中长期保持明显的下降趋势。与此相比，政策情景虽然同样实现相对较早的达峰，峰值约为10亿吨，但由于能效要求、电价与碳价信号以及绿色投资均弱于双碳情景，减排速度和深度明显不足，到2060年排放量仅降至约2亿吨。在政策冻结情景下，碳达峰时间推迟到约2029年，峰值规模约11亿吨，其后经历较长时间的高位平台期，到2060年排放量仍约6亿吨，与全国碳中和目标存在较大差距。三种情景的差异主要源于结构调整力度和启动时间不同。双碳情景在“十四五”到“十五五”期间集中发力，通过提高强制性节能标准、完善碳价与电力市场机制、建立绿色投资通道，推动终端“以电代煤、以电代油”的结构性变化等关键措施，到2035年，该情景下排放量较峰值下降约20%，为之后进一步减排打下了基础。同时，非化石能源占比持续提高，到2060年非化石装机占比约83%，煤电与气电更多转向保障电力安全供应和调峰，有助于控制减排成本，提升整体路径的可执行性和稳定性。

（二）非化石电力将成主体，风电占比持续上升

在双碳情景下，电力部门被定位为全社会深度减排的主引擎。模型结果显示，“十四五”期间，得益于风电和光伏快速发展，非化石能源装机占比由约35%提高到约55%；到2060年，非化石能源装机占比进一步提高到约83%，其中风电约占47%、光伏约占23%，水电和核电提供相对稳定的电力供应，燃气和煤电更多承担保供和调峰任务，电力装机结构由以化石能源为主逐步转向以非化石能源为主。在用电结构上，双碳情景遵循“清洁电量优先满

足新增用电需求”的思路，新增用电主要由风电、光伏等非化石能源提供，同时配套抽水蓄能、新型储能以及需求响应等灵活性资源，并逐步提高跨区输电能力和配电网改造水平。综合上述措施，在终端部门电气化水平不断提高的情况下，电力行业碳排放在 2030 年以后加快下降，并在 2060 年前后下降至峰值水平的 5% 左右，为工业、建筑和交通等部门的间接减排创造条件。与之相比，政策情景虽然同样推动非化石能源和储能项目建设，但推进节奏相对缓慢，非化石装机占比和电网灵活性提升幅度均低于双碳情景，清洁电与新增用电在时间和空间上的匹配程度有所欠缺，导致电力排放下降速度明显偏慢。政策冻结情景下，风电和光伏大规模开发受到体制和技术条件的制约，煤电和气电长期保持较高占比，电力排放在中长期维持在较高水平。综合比较可以看出，尽早大规模提高非化石能源比重，并同步完善储能、调峰和跨区输电等配套能力，是山东在电力领域形成稳定减排趋势、支持终端用能电气化的关键前提。

（三）工业减排将主要依赖电气化和电力清洁化双重驱动

在双碳情景下，工业部门减排主要依托终端用能电气化和电网清洁化两个方面共同发力。模型测算显示，工业直接排放已于 2021 年前后达到峰值，峰值规模约为 3.4 亿吨；此后排放逐步下降，到 2060 年降至约 0.4 亿吨，若将工业外购电对应的排放一并计入，峰值规模约为 8 亿吨，表明电力系统的低碳转型对工业总排放具有决定性影响。从行业结构看，钢铁、水泥和化工三大行业合计贡献了工业排放的近三分之二。双碳情景下，到 2060 年钢铁行业 and 水泥行业排放超 300 万吨，化工行业约 1000 万吨，其余排放主要集中在难以替代的过程排放和副产气体环节。在能源消费结构方面，双碳情景将工业电气化率在 2060 年提高到约 64%，明显高于政策情景约 53% 的水平。此外，钢铁、水泥等高耗能行业将在高温工序中逐步引入氢能，到 2060 年相关能源消费中，氢能在钢铁行业的占比约为 68%，在水泥行业的占比约为 35%。与政策情景相比，双碳情景在工业领域额外形成的减排主要来自几个方面：一是能效标准和产能结构约束更严格，淘汰落后产能的力度更大；二是工业用电中绿电占比提高更快，电网清洁化水平更高；三是钢铁、水泥等行业的氢能应用规模更大；四是针对化工和水泥过程 CCUS 部署更充分。相比之下，政策冻结情景在工艺升级和设备更新方面相对滞后，工业排放在短期略有下降后长期保持在较高水平。综合来看，工业领域能否实现深度减排，关键在于电力清洁化、终端用能电气化和氢能应用推进的速度。

（四）建筑与通电气化将成为终端减排的关键动力

在双碳情景下，建筑部门通过新建建筑执行更高的节能标准、推进既有建筑节能改造、加快清洁供暖替代以及高效设备普及等一系列措施，逐步降低运行能耗。模型结果显示，建筑运行能耗在约 2030—2045 年这一阶段明显下降，2050 年前后运行能耗中电力消费占比接近九成，2060 年基本实现高度电气化，运行能耗约为 0.2 亿吨标准煤。若考虑间接排放，双碳情景依托电力结构持续向清洁化方向调整，到 2060 年建筑领域总排放约为 600 万吨；而在政策情景下，同期建筑总排放仍约为 0.3 亿吨。情景比较表明，2045 年以后两种情景在建筑排放上的差距中，超过九成来源于能源结构不同，特别是电力清洁化程度的差异。在交通部门，双碳情景以交通工具电动化为主线，同时推进运输方式调整，例如提高铁路、水运在中长距离货运中的比重，并通过车辆能效提升等措施持续降低单位周转量的排放强度。测算结果显示，交通部门直接排放约在 2021 年达到峰值，峰值规模约为 5500 万吨；此后逐步下降，到 2060 年降至约 200 万吨。如果将间接排放计入，2060 年交通领域总排放也不足 900 万吨。从结构看，轻型道路交通在车辆电动化和能效提升带动下较早接近接近零排放水平，重载公路运输和航空则是后期减排的重点领域，需要依托清洁燃料、加氢基础设施建设以及在干线运输场景推广电动重型车辆等措施，推动排放进一步降低。与政策情景相比，双碳情景在建筑和交通领域提出了更积极的假设：在既有建筑深度改造的进度、公共建筑节能标准的覆盖范围、炊事和生活热水等用能环节的电气化比例，以及车—桩—网一体化推进和重载交通替代燃料应用等方面均有更高要求。政策冻结情景由于缺乏持续的节能改造规模和配套基础设施投入，建筑间接排放长期受制于电力结构调整缓慢，交通单位周转量的排放强度下降也较为有限，导致中长期排放水平居高不下。

（五）含氟气体将成为非二氧化碳减排的主要难点

在双碳情景下，非二氧化碳温室气体通过系统性举措实现达峰后稳步下降。甲烷方面，主要依托煤矿瓦斯抽采利用标准提高，以及污水、厨余垃圾、畜禽粪污等有机废弃物的厌氧处理水平提升，稳定降低排放；氧化亚氮主要通过优化化肥施用结构、改进相关工艺来降低单位排放强度；含氟温室气体则以替代高排放产品、加强回收和再生利用以及规范销毁为主线，

逐步提高全流程管理水平。模型结果显示，到 2060 年，双碳情景下非二氧化碳温室气体排放总量约为 5600 万吨二氧化碳当量，明显低于政策情景下约 9400 万吨二氧化碳当量的水平。政策情景虽然总体上也可以在 2030 年前后实现非二氧化碳温室气体的达峰，但在含氟替代品推广、回收再生体系建设以及副产气体规范销毁等方面力度不足，导致峰值更高、下降更慢。尤其是在含氟气体方面，政策情景下其排放在 2035 年前后达到约 9000 万吨二氧化碳当量的高位峰值，占当年二氧化碳排放量的约十一分之一，且下降较为缓慢，主要集中在化工产业链以及制冷、空调等用能设备更替环节。政策冻结情景由于相关制度推进有限，难以形成持续的治理和投入安排，非二氧化碳特别是含氟气体在中长期仍保持较高排放水平。山东作为化工大省，若要同步推进二氧化碳和非二氧化碳减排，必须对接国家 HFCs 配额与进出口管理，落实副产 HFC-23 全量销毁，发布面向商超冷链、数据中心、汽车空调等场景的低 GWP 替代时间表，建设区域回收—集中再生与销毁网络，并将回收量与企业资质年审、政府与国企绿色采购挂钩。

（六）深度减排与经济增长总体兼容并将重塑就业结构

模型结果表明，在双碳情景下，2020—2060 年山东省累计 GDP 增量约为 22 万亿元，经济增长路径总体平稳，未出现明显的波动加剧或长期减速现象。这说明，在更高强度的节能减排约束下，只要同时加大清洁投资力度、推动终端部门电气化和相关技术进步，整体转型成本可以在较大程度上被新的投资和生产活动所吸收，宏观经济运行具有一定的适应能力。与之相比，政策情景下同期累计 GDP 增量约为 23 万亿元，长期增长趋势大体接近，但产业和能源结构调整力度相对较弱，中后期的减排和效率改善效果不及双碳情景。再与“2020 政策冻结”情景比较，由于缺乏明确的价格信号和制度预期，相关成本更多在情景后段集中显现，积累了更高的转型风险。在就业方面，双碳情景相较于“2020 政策冻结”情景净增就业约 40 万人。新增就业岗位主要集中在房屋建筑业、电力和热力生产与供应业以及科学研究和技术服务等绿色和技术密集型行业，这三类行业累计就业规模约为 660 万人，成为吸纳转岗劳动力和新增劳动力的重要领域。相应地，煤炭、油气等化石能源相关行业就业呈净减少，需要通过再培训、转岗安置等方式确保平稳过渡。从时间节奏看，双碳情景中，由于相关投资和需求安排相对提前，新增岗位的形成与传统岗位的减少在时间上更为接近，就业调整过程相对平缓；政策情景下，岗位减少更集中于某些阶段，调整节奏偏紧；政策冻结情景在中

后期出现被动性岗位流失，对资源型地区 and 行业集中的地区带来更大压力。综合来看，深度减排与经济增长在中长期具有一定的兼容性，就业总量变化总体可控，但岗位结构将由高碳产业逐步向绿色产业和高技术服务业转移，需要通过教育培训、社会保障等配套政策，引导和支持这一结构性调整过程。

政策建议

（一）明确“十五五”碳达峰阶段性目标，强化指标考核与责任落实

第一，建立“十五五”时期省—市两级约束性目标组合，将终端用能电气化率、非化石能源发电占比、单位地区生产总值二氧化碳排放等指标纳入年度考核和期中评估，并与全国碳排放双控制度保持衔接。第二，健全固定资产投资项目碳排放评价制度，在项目审批环节全面执行“碳排放强度+电气化水平”双重门槛，明确定量边界、评价方法与第三方核查流程，对不符合标准的项目实行“退回—优化—复评”的闭环管理，从源头上防止新增排放反弹。第三，加快建设全省统一的能源和碳排放数据平台。推动电力、热力、燃气、交通等领域相关数据按统一口径归集和校验，定期形成市域和重点行业的碳排放强度指标和用能情况，建立可追溯的“能源—碳排放台账”，并在此基础上为预算安排、要素配置、绩效奖补提供依据。第四，完善中长期绿电直供机制，推动可再生能源与重点用能企业签订多年度购电合同，明确最低绿电比例、价格约束与违约责任，并将执行情况纳入市域年度评价，形成企业使用清洁能源的稳定约束和长期激励。第五，将目标分解至市县与省属国有企业，开展年度考核并纳入中长期规划与干部和企业负责人业绩评价，强化结果运用。

（二）构建以非化石能源为主体的电力结构，突出风电发展优势

第一，统筹推进海上风电规划、并网和外送通道建设。在渤海海域和胶东半岛南北等已规划风电基地基础上，结合“十五五”发展安排，滚动编制海上风电开发与并网方案，明确各基地的海域整备计划、并网时序和年度送出通道、接入节点建设清单。第二，建立与新能源发展相匹配的储能和可中断负荷配置要求。对新增风电、光伏项目和重点产业园区，提出最低储能装机比例和时长要求，引导抽水蓄能和新型储能按照可提供的有效容量获得合理补

偿。同时，推动工业、商业等用户发展可中断负荷和可调节负荷，提高在电力高峰时段的响应能力，增强系统调节水平。第三，依托核电基地探索多元供热模式。在烟台都市圈和威海等区域，推进核能供热与城市热网、电采暖相结合的示范工程，研究跨区域热网互联和应急热源切换的可行性，在保障冬季供暖安全的同时，减少散煤和燃气供热占比，形成兼顾安全、经济和低碳的供热方案。第四，推动沿海港口地区开展“风电—制氢—用氢”一体化试点。在港口和临港产业园布局风电制氢示范项目，重点面向交通燃料和化工原料替代等应用场景，开展成本和减排效果评估。第五，提升配电网承载能力和系统灵活性。组织实施配电网改造提升专项行动，重点加强新能源集中接入区域的网架结构和设备能力建设。

（三）推动重点行业绿色转型，建设零碳园区与近零碳产业集群

第一，实施重点行业电气化提升行动。围绕钢铁、有色、建材、化工等高耗能行业，研究制定分行业的终端用能电气化最低比例和年度提升目标，将电气化水平与能效奖补、绿电合同履约、用能价格等政策工具挂钩。第二，推进园区能源系统改造，提升“源—网—荷—储”协同水平。在钢铁、建材、化工等产业集聚区，推动建设园区级能源与碳排放管理平台，推进绿电直供、共享储能和需求响应等机制落地。第三，统筹规划鲁北—鲁中—鲁东区域二氧化碳捕集利用与封存工程。依托胜利油田等地区的地质封存条件，开展二氧化碳干线和支线管网建设的前期研究和示范工程，优先连接淄博、潍坊、青岛等高排放园区内的典型排放源，逐步形成覆盖主要工业集群的“排放源—输送管网—封存或利用场地”一体化布局。第四，建立绿色电力与原料替代协同推进机制。在化工、建材等行业开展以“绿电+清洁蒸汽/热+低碳原料”为重点的替代试点工程，鼓励企业在同一项目中同步推进用电清洁化和原料低碳化。完善产品碳足迹核算方法，探索建立低碳产品标识制度，并将符合条件的低碳产品纳入政府采购和大型国有企业采购目录，引导上下游企业共同降低供应链碳排放。第五，完善园区碳排放监测和投融资支持政策。健全园区层面的能源和碳排放监测、报告与核查制度，建立“一园一区、一账一本”的年度碳排放预算和信息披露机制。将符合条件的园区近零碳改造项目纳入地方政府专项债、超长期特别国债、转型债以及碳减排支持工具等投融资渠道，统筹利用容量补偿、绿色电力证书等收益，提高园区绿色改造的资金可获得性和项目可持续性。

（四）推进建筑和交通电气化，推动终端用能低碳转型

第一，编制覆盖全市域的建筑电气化三年滚动实施计划，对公共建筑、医院、学校和老旧小区等不同类型建筑分类制定改造清单和技术路径，重点推广热泵、分布式光伏与储能协同应用。第二，完善新建建筑电气化的政策，在设计、施工、验收等环节落实对采暖、炊事、热水等用能环节的电气化要求；同步编制既有建筑“以电代气、以电代煤”技术指引，明确分散式燃煤和燃气采暖设备的淘汰时间表及过渡扶持政策，引导相关用户有序完成更新改造。第三，推进绿色交通基础设施建设。在沿海港口群与内陆产业走廊之间，规划建设服务于重型货运车辆的换电、加氢补给网络和配套停车、调度设施，形成覆盖“港口—物流园区—产业园区”的标准化运输组织模式。第四，稳妥推进城市清洁供热方式优化。依托既有核电机组和热源条件，在都市圈范围内开展核能供热扩容和备用热源布局研究，探索“主干清洁热源+再生热回收+电锅炉应急”的城市供热系统组合模式。第五，开展车网互动和电动重卡示范应用。选择具备条件的城市和交通走廊，开展车网互动试点，将公共充电站、换电站和大型车队纳入统一调度，探索电动汽车在削峰填谷中的应用模式。同步推进电动重卡示范线路建设，落实充换电站和加氢站的并联审批和用地保障。

（五）加强含氟气体全过程治理，控制非二氧化碳排放

第一，建立省级含氟产品全流程管理台账。围绕生产、使用和报废各环节，建立包含主要企业和重点设备的台账，提出分行业的强制回收率目标。在家电、冷链、汽车空调、电子等行业推行“二维码可追溯+回收凭证”制度，对含氟制冷剂的充装、维修和报废环节实现来源可查、去向可追。第二，制定低温室效应潜能制冷剂替代路线。结合国家相关标准，发布适用于山东的制冷剂替代技术路线和时间表，对商超冷链、数据中心、冷库等重点应用场景明确替代优先顺序和改造时间窗口，提出改造验收的技术指标和评估办法。第三，完善含氟气体泄漏检测和修复管理。完善六氟化硫、三氟化氮、四氟化碳等气体的泄漏检测规范，提出年泄漏率控制目标和最低检测频次要求。在电力设备制造和运行、电解铝等重点行业开展全氟碳化物减排试点，将检测结果纳入园区和企业的日常监管。第四，推动区域回收和再

生体系建设。统筹布局区域性含氟制冷剂回收和再生设施，研究制定合理的成本分担机制和标准化设备目录，通过政府采购和国有企业采购，将符合标准的再生产品纳入优先采购范围，稳定再生产品的需求，分摊治理成本。第五，建立省级非二氧化碳温室气体年度清单和信息披露制度。建立涵盖回收、再生、销毁和泄漏控制等环节的年度数据报送和核查机制，定期发布非二氧化碳温室气体排放清单和重点行业控制进展。

（六）以绿色产业带动就业转型，提升经济韧性和社会包容水平

第一，编制“十五五”绿色投资项目清单。围绕海上风电装备制造、储能系统集成、能源与碳排放数字化服务、CCUS工程、城市建筑电气化改造等重点领域，明确项目规模和用工需求。在项目遴选和开工安排中，将吸纳本地就业情况作为重要条件之一，引导新增投资更多转化为本地就业岗位。第二，建立绿色就业岗位清单和相关职业标准。结合产业发展需要，梳理风电运维、储能运维、能源与碳管理、建筑电气化改造等重点岗位，明确岗位要求和培训标准。在高校设置相应专业或方向，与重点企业开展校企合作，推广“入职即培训、培训即取证”的用工模式。第三，设立省级公正转型专项资金。统筹财政资金、绿色金融工具和碳市场相关收益，重点支持受影响行业和地区的转岗培训、以工代赈项目、社区环境改善和基本公共服务提升。第四，在零碳园区和重大绿色项目周边建立社区共益机制。依托园区和项目单位设立社区共益基金，重点用于周边老旧小区能效提升、清洁取暖改造和居民电价阶段性缓冲等事项。对中高龄劳动者、低收入家庭等就业脆弱群体，探索设立定向岗位池，提供适合其特点的辅助性岗位和灵活工时安排，使当地居民能够分享绿色项目带来的发展机会。第五，健全就业风险预警和区域支持机制。建立高碳行业 and 资源型地区就业风险监测指标体系，定期发布公正转型年度报告，对面临较大调整压力的市县实行差异化转移支付和专项债券支持，用于就业服务、社会保障和产业转型配套支出。将相关政策措施纳入省级和市县中长期发展规划，确保绿色转型过程中的就业和民生风险得到及时识别和有序应对。

附录

附录 1 山东省重点行业和领域低碳转型目标

附表 1 山东省重点行业和领域目标

部门		指标	2025 年	2030 年	政策文件
能源		能源消费总量	4.5 亿吨标准煤以内		《山东省能源发展“十四五”规划》
		煤炭消费量	较 2020 年下降 10%（重点区域）、控制在 3.5 亿吨左	完成国家下达目标任务	《山东省能源发展“十四五”规划》
		能源消费比重	煤炭 56% 天然气 9% 油品 14%		《山东省能源发展“十四五”规划》
		发电装机	煤电装机占比 ≤ 55%，控制在 1 亿千瓦左右 清洁能源发电量占比 ≥ 35% 新能源和可再生能源装机达 1.2 亿千瓦以上 光伏 6500 万千瓦 （海上光伏装机规模 1200 万千瓦左右） 风电 2800 万千瓦 （海上风电并网规模 600 万千瓦） 核电 570 万千瓦 生物质 400 万千瓦	光伏 9500 万千瓦 风电 4500 万千瓦 核电 1000 万千瓦 生物质 500 万千瓦	《山东省推动能耗双控逐步转向碳排放双控实施方案（2024 - 2025 年）》 《山东省新能源产业行动计划（2024 - 2025 年）》 《山东省海上光伏建设工程行动方案》 《山东省能源发展“十四五”规划》
		用电量占比	煤电发电量占全社会用电量比重 60% 清洁能源电量占全社会用电量比重 20%		《山东省能源发展“十四五”规划》
		储能	新型储能装机规模 500 万千瓦 海上新能源 + 储能 100 万千瓦 抽水蓄能装机规模 400 万千瓦 储能 ≥ 能 ≥ 能 风电装机 ≥ 电装机 ≥ 光伏装机 ≥ 伏装机 ≥ 核电装机 ≥ 电装机 ≥ 机	新型储能装机规模 1000 万千瓦 抽水蓄能装机规模 1000 万千瓦	《山东省碳达峰实施方案》 《山东省新型储能工程发展行动方案》
			年消纳 ≥ 2 亿千瓦时，新能源占比 ≥ 50%		《源网荷储一体化试点实施细则》
工业	综合	氢能	绿氢产能 ≥ 10 万吨 / 年 氢能产业规模 ≥ 能产业规模亿元 加氢站 ≥ 氢站 ≥ 座	产业规模 ≥ 业规模 ≥ 模亿元	《山东省氢能产业中长期发展规划（2022 - 2035 年）》 《山东省氢能产业发展工程行动方案》
		单位工业增加值碳排放下降率	大于全社会下降幅度，重点行业二氧化碳碳排放强度明显下降	2030 年前达峰	《山东省工业领域碳达峰实施方案》
		规模以上工业单位增加值能耗下降率	比 2020 年降低 17% 左右		《山东省工业领域碳达峰实施方案》

工业	钢铁	节能降碳改造	2024 改造领域碳达年，通过节能降碳改造和用能设备更新节能约 2000 万吨标准煤、减排二氧化碳约 5300 万吨		《钢铁行业节能降碳专项行动计划》
		吨钢指标	行业平均吨钢综合能耗降至 535 千克标准煤以下，吨钢耗新水量降至 2.85 立方米。		《山东省钢铁产业“十四五”发展规划》
		工序指标	钢铁行业高炉、转炉工序单位产品能耗分别比 2023 年降低 1% 以上，电弧炉冶炼单位产品能耗比 2023 年降低 2% 以上，吨钢综合能耗比 2023 年降低 2% 以上，余热余压余能自发电率比 2023 年提高 3% 以上。	工序能效进一步提升，主要用能设备能效基本达到先进水平，吨钢综合能耗和碳排放明显降低，用能结构持续优化，高炉富氧技术、氢冶金技术等节能降碳先进技术取得突破	《钢铁行业节能降碳专项行动计划》 《山东省钢铁产业“十四五”发展规划》
		节能技改	电炉钢占比达到 7% 左右，新建钢铁项目严格按照全面超低排放要求建设，能源消耗总量和强度均降低 5% 以上		《山东省空气质量持续改善暨第三轮“四减四增”行动实施方案》 《山东省钢铁产业“十四五”发展规划》
	有色金属	铝冶炼	再生铝产量达到 250 万吨左右 铝材产量与电解铝产量比率高于全国平均水平，达到 2.5:1 控制电解铝、氧化铝产能规模，电解槽达到 400 千安及以上产能水平，电解铝吨铝（直流）电耗下降至 12500 千瓦时左右	用能结构得到明显改善	《山东省工业领域碳达峰实施方案》 《山东省铝行业”十四五“发展规划》
	建材	水泥	除特种水泥熟料和化工配套水泥熟料生产线外，2500 吨 / 日及以下的水泥熟料生产线全部整合退出 原料替代比例提升到 3%，水泥熟料单位产品能耗水平降低 3% 以上，水泥熟料达到能效标杆水平的产能比例达到 30%，低于能效基准水平的全部完成更新改造，不能按期完成节能改造或改造后能效仍低于基准水平的生产线淘汰退出。	水泥产能只减不增，全省水泥行业原料替代比例提升到 5% 左右，对全省 50% 以上的水泥生产线进行以节能减排、协同处置、燃料替代为目标的技术改造。 行业原燃料替代水平大幅提高，建设一批减污降碳协同增效的绿色低碳生产线。 建材行业工业固废利用率达到 70%	《山东省工业领域碳达峰实施方案》 《山东省建材行业碳达峰工作方案》 《山东省水泥行业超低排放改造提升方案》 《山东省空气质量持续改善暨第三轮“四减四增”行动实施方案》 《山东省水泥行业改造提升工作方案（2024-2026）》
		综合	提升能效水平，水泥、陶瓷行业能效标杆水平以上产能占比达到 30%，平板玻璃行业能效标杆水平以上产能占比达到 20%，建材行业能效基准水平以下产能完成技术改造或淘汰退出。		《山东省建材行业改造提升行动计划（2024-2026）》

工业	石化化工	焦化	60% 的焦化产能完成节能改造 6 月底前, 济南、枣庄、潍坊、泰安、日照、德州 6 市完成焦化退出装置关停, 全省焦化装置产能压减至 3300 万吨左右。	2028 年底前, 重点区域焦化企业基本完成改造, 其他区域力争 80% 焦化产能完成改造	《山东省工业领域碳达峰实施方案》鲁工信发〔2023〕4 号 《山东省焦化行业超低排放改造实施方案的通知》鲁环发〔2022〕8 号 《山东省空气质量持续改善暨第三轮“四减四增”行动实施方案》
		化工	大宗化工产品产能利用率达到 80% 以上		《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》
建筑		建筑运行一次二次能源消费总量	0.95 亿吨标准煤以内		《山东省“十四五”绿色建筑与建筑节能发展规划》
		建筑能耗中电力消费比例	超过 55%	超过 65%	《山东省城乡建设领域碳达峰实施方案》
		能效水平	城镇新建居住建筑能效比 2020 年提升 30%、 新建公共建筑能效比 2020 年提升 20% 且均达到超低能耗建筑基本能效水平 公共建筑能效提升改造面积 2000 万平方米以上	公共建筑整体能效提升 20% 以上	《山东省加快推动建筑领域节能降碳工作实施方案》 《山东省城乡建设领域碳达峰实施方案》
		节能改造及绿色化改造	城镇民用建筑可再生能源替代常规能源比重达 10% 既有居住建筑达到 3000 万平方米 星级绿色建筑项目绿色建材应用比例不低于 40%	城镇民用建筑可再生能源替代常规能源比重达 12% 具备节能改造价值和条件的既有居住建筑实现应改尽改 绿色建筑项目绿色建材应用比例达 70%	《山东省加快推动建筑领域节能降碳工作实施方案》 《山东省城乡建设领域碳达峰实施方案》
		新建建筑	新增绿色建筑 5 亿平方米以上 (绿色建筑标识项目面积 1 亿平方米) 绿色建筑占城镇新建民用建筑比例达到 100% 新建公共机构、新建厂房屋顶光伏覆盖率 50% 新建超低能耗、低碳建筑及近零能耗、近零碳建筑 200 万平方米	星级绿色建筑面积占新建建筑比例达到 50% 以上 建成一批绿色低碳农房试点示范项目	《山东省城乡建设领域碳达峰实施方案》 《山东省绿色建筑高质量发展工作方案》
			37.5%	39%	《山东省城乡建设领域碳达峰实施方案》
			17.5 平方米	17.7 平方米	《山东省城乡建设领域碳达峰实施方案》
			居住建筑清洁取暖率达到 80% 以上, 支持有条件的地区打造“核能零碳”供暖城市。	85% 以上	《山东省城乡建设领域碳达峰实施方案》 《山东省“十四五”节能减排实施方案》

建筑		新建燃气管网 22000 公里 改造老旧燃气管网 2100 公里，改造老 旧供热管网 10000 公里		《城市市政公用设施网建 设行动计划》 《山东省绿色低碳高质量 发展重点项目管理暂行办 法》
		建成各类充换电站 8000 座 充电桩 15 万个		《关于推动城乡建设绿色 发展若干措施的通知》 《山东省新型城镇化规划 (2021-2035 年)》
			45%	《山东省城乡建设领域碳 达峰实施方案》
		5000 公里		《山东省人民政府办公厅 关于推动城乡建设绿色发 展若干措施的通知》
交通	新增车辆	城市建成区每年新增和更新的城市公共 汽车新能源车车辆比例达到 100% 新增和更新的出租新能源和清洁能源车 辆比例≥ 80% 新能源汽车新车市场渗透率达 45% 左 右，保有量达 240 万辆 全省新能源汽车产量达 100 万辆左右 燃料电池车≥料电池车≥车辆 打通首条氢能高速 4 市示范应用链条全覆盖		《山东省“十四五”综合 交通运输发展规划》 《山东省交通运输节能环 保“十四五”发展规划》 《山东省推动新能源汽车 下乡三年行动计划(2023- 2025 年)》 《山东省新能源汽车产业 高质量发展行动计划》 《“氢进万家”科技示范 工程实施协议》续报
	营运车辆、船舶换 算周转量碳排放强 度	比 2020 年分别降低 4%、3.5% 左右	比 2020 年分别降低 10%、5% 左右	《山东省交通运输节能环 保“十四五”发展规划》
	城市绿色出行比例	≥市绿色		《山东省交通运输节能环 保“十四五”发展规划》
		≥海主要		《关于印发山东省贯彻落 实“十四五”全国清洁生 产推行方案的若干措施的 通知》
		95%		《山东省综合立体交通 网规划纲要(2023-2035 年)》
	充电站及充电桩	全省公共充电基础设施增长 30%、居民 充电基础设施增长 100% 乡镇公共充电站覆盖率提高至 100% 公共、专用充换电桩保有量> 8000 座 城市城区中心平均充电设施服务半径 < 3 公里 大气污染防治重点区域的高速公路快充 站覆盖率≥气污染 公共充电设施接入省级平台比例≥共充 电		《山东省推动新能源汽车 下乡三年行动计划(2023 推动新能源年)》 《山东省电动汽车充电基 础设施“十四五”发展规 划》

交通	研发与技术	培育绿色低碳高新技术企业达 1 000 家 构建 5-8 个绿色技术产业集群 引进国家级“高精尖缺”团队 3-5 个 培养重大核心技术团队 8-10 个 万人高价值发明专利拥有量翻番 全社会 R&D 投入强度 2.6% 基础研究占比 8% 全国重点实验室 30 家、省重点实验室 300 家左右 新型研发机构 1 000 家（省级 >500 家） 高新技术企业 3.3 万家，省级以上制造业“单项冠军”项冠军”家左右 企业创新中心 2 150 家 省级创业投资集聚区≥级创个。	形成支撑能源产业结构优化的重大成果体系	《山东省科技支撑碳达峰工作方案》 《山东省建设绿色低碳高质量发展先行区三年行动计划（2023-2025 年）》
	绿色制造	省级绿色工厂累计≥级绿色家		《绿色低碳转型行动计划（2024-2025）》
	CCUS/ 负碳 / 碳汇	形成工业 CCUS 示范链 生态碳汇森林蓄积量达到 1.4 亿立方米 修复滨海湿地 1 万公顷	完成 CCUS 规模化推广路径 生态碳汇森林蓄积量达到 1.6 亿立方米 累计修复 3 万公顷湿地	《低碳零碳技术重大创新工程》专项（方案内） 《山东省国土空间生态修复规划（2021-2035 年）》
	绿色金融	绿贷余额突破 2.5 万亿元 绿色金融专业部门、特色分支机构数量超过 100 家 新增转型融资规模达 3000 亿元以上 碳债券融资规模达 100 亿元 碳减排支持工具使用规模累计投放不低于 500 亿元 绿色债券发行规模年均增长 15% 以上		《关于印发 <关于进一步完善绿色金融体系推动能源和产业转型的若干措施> 的通知》 《山东省碳金融发展三年行动方案（2023 - 2025 年）》
	试点建设	“全省能源绿色低碳转型十强县（市、区）”择优确定 10 个 试点平台接入公共充电桩比例力争不低于 90%		《山东省能源局关于开展能源绿色低碳转型试点示范建设工作的通知》
	碳普惠	碳普惠平台用户规模覆盖 100 万常住人口 碳减排量累计消纳量达到 100 万吨 CO 当量	碳普惠平台用户规模覆盖 500 万常住人口 碳减排量累计消纳量达到 500 万吨 CO 当量	《山东省碳普惠体系建设工作方案（2023-2025 年）》
	减污降碳协同	重点行业如钢铁、水泥等行业减污降碳协同控制率达 80% 挥发性有机物（VOCs）减排与碳减排：VOCs 减排比例与单位 GDP 碳排放下降比例协同达 1:1.5	扩展至全部高耗能行业	《山东省减污降碳协同增效实施方案》

附录 2 宏观社会经济假设

山东省三个情景设置都采用了统一的宏观经济假设（附表 2）。

附表 2 山东省 EPS 模型宏观社会经济假设

指标	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2050	2051-2060
人口年均年化率（%）	-0.29	-0.52	-0.49	-0.61	-0.99
地区 GDP 年均增速（%）	5.26	4.48	3.93	3.11	2.01
指标	2030	2035	2040	2050	2060
常住人口（万人）	9965	9762	9524	8959	8110
人均 GDP (元，2020 年不变价)	124731	158514	197012	284311	383037
第一产业占比（%）	4.26	3.19	2.12	1.06	1.06
第二产业占比（%）	35.14	33.11	31.07	28.17	26.44
第三产业占比（%）	60.61	63.71	66.81	70.77	72.51
城镇化率（%）	71	73	76	79	82

附录 3 针对山东更新的相关变量及来源

附表 3 山东模型变量更新及数据来源

部门	变量缩写	变量全称	参考来源
建筑	BCEU	BAU Components Energy Use	中国能源统计年鉴；研究文献
	BDEQ	BAU Distributed Electricity Quantities	《电力统计年鉴 2019》，《中国风电产业地图 2021》；参考文献等
	DSCF	Distributed Solar Capacity Factor	《电力工业统计资料汇编 2020》
	SoCEUtINTY	Share of Components Energy Use that is New This Year	参考 BCEU
	SYCEU	Start Year Components Energy Use	参考 BCEU
	SYDEC	Start Year Distributed Electricity Capacity	参考 BDEQ
供热	BFoHfC	BAU Fraction of Heat from CHP	中国能源统计年鉴
	BFoHPbF	BAU Fraction of Heat Provided by Fuel	中国能源统计年鉴
	HDL	Heat Distribution Losses	中国能源统计年鉴
	BCRbQ	BAU Capacity Retirements before Quantization	Global Energy Monitor, 2023; 电力工业统计资料汇编；中国海洋经济年鉴

电力	BDPbES	BAU Dispatch Priority by Electricity Source	\
	BEFC	BAU Expected Capacity Factors	电力工业统计资料汇编, 2020
	BPHC	BAU Pumped Hydro Capacity	Global Energy Monitor, 2023 等
	BPMCCS	BAU Policy Mandated Capacity Construction Schedule	Global Energy Monitor, 电力工业统计资料汇编, 十四五能源和电力规划, 国家能源局发布会等
	BRPSPTY	BAU RPS Percentage This Year	山东省可再生消纳责任权重历年目标
	BTaDLP	BAU Transmission and Distribution Loss Percentage	电力工业统计资料汇编, 2020
	BTC	BAU Transmission Capacity	电力统计年鉴, 2005-2021
	DRC	Demand Response Capacities	模型结果修正; 相关研究文献
	ElaE	Electricity Imports and Exports	电力工业统计资料汇编, 分析、文献及专家建议
	GBSC	Grid Battery Storage Capacities	BNEF, IEA, 模型结果修正
	MPCbS	Max Potential Capacity by Source	可再生能源数据手册
	RM	Reserve Margin	山东省电力规划文件
	SYC	Start Year Capacities	电力工业统计资料汇编
	TCAMRB	Transmission Capacity Across Modeled Region Border	电力工业统计资料汇编; 《“十四五”现代能源体系规划》
工业	BIFUbC	BAU Industrial Fuel Use before CCS	山东省统计年鉴; 中国能源统计年鉴
	BPE	BAU Process Emissions	工业统计年鉴; 畜牧兽医年鉴; 城乡建设统计年鉴; 山东省统计年鉴; 中国省级温室气体清单编制指南
	BPOlFUfE	BAU Proportion of Industrial Fuel Used for Energy	中国能源统计年鉴
	PERAC	Process Emissions Reductions and Costs	工业统计年鉴; 畜牧兽医年鉴; 城乡建设统计年鉴; 山东省统计年鉴; 中国省级温室气体清单编制指南
投入产出	BDCSoCaESoPbIC	BAU Domestic Content Share of Consumption and Export Share of Production by ISIC Code	国家统计局提供中国 2017 年 149 部门投入产出表、中国 2017 年 42 部门非竞争性投入产出表、2017 年山东省投入产出表; 李善同, 潘晨, 何建武, 陈杰等. 2017 年中国省际间投入产出表: 编制与应用 [M]. 北京: 经济科学出版社;
	BEbIC	BAU Employment by ISIC Code	2017 年山东省投入产出表; 中国人口普查年鉴; 山东省统计年鉴
	BEcbIC	BAU Employee Compensation by ISIC Code	2017 年山东省投入产出表; 山东省统计年鉴
	BGDP	BAU Gross Domestic Product	山东省统计年鉴

投入产出	BObIC	BAU Output by ISIC Code	2017 年山东省投入产出表
	BPCiObIC	BAU Percent Change in Output by ISIC Code	2002、2007、2012、2017 年山东省投入产出表
	BPEaCP	BAU Population Employment and Compensation Projections	2017 年山东省投入产出表；山东省统计年鉴
	BPEaCP	BAU Population Employment and Compensation Projections	2017 年山东省投入产出表；山东省统计年鉴
	BVAbIC	BAU Value Added by ISIC Code	2017 年山东省投入产出表
	DLIM	Domestic Leontief Inverse Matrix	国家统计局提供中国 2017 年 149 部门投入产出表、中国 2017 年 42 部门非竞争性投入产出表、2017 年山东省投入产出表；李善同，潘晨，何建武，陈杰等. 2017 年中国省际间投入产出表：编制与应用 [M]. 北京：经济科学出版社；
	FoGPbEaIC	Frac of Goods Purchased by Entity and ISIC Code	2017 年山东省投入产出表
	GaHEbIC	Government and Household Expenditures by ISIC Code	2017 年山东省投入产出表
	LPGRbIC	Labor Productivity Growth Rate by ISIC Code	2017 年山东省投入产出表
	PoNDHbE	Percent of National Debt Held by Entity	山东省统计年鉴；山东省财政预算决算报告等
	TLIM	Total Leontief Inverse Matrix	2017 年山东省投入产出表
	WMITR	Worker Marginal Income Tax Rate	2017 年山东省投入产出表；山东省统计年鉴
土地	BLAPE	BAU LULUCF Anthropogenic Pollutant Emissions	第九次全国森林资源清查 (2014-2018) 资料
交通	AVLo	Average Vehicle Loading	山东统计年鉴；中国交通年鉴；参考 SYVbT
	BAADTbVT	BAU Average Annual Dist Traveled by Vehicle Type	参考 SYVbT
	BCDTRtSY	BAU Cargo Distance Transported Relative to Start Year	山东统计年鉴；中国交通年鉴以及相关研究文献
	RTMF	Recipient Transportation Mode Fractions	四大世界城市都市圈层面出行特征分析
	SYVbT	Start Year Vehicles by Technology	山东统计年鉴；中国交通年鉴
	TTS	Transportation Technology Shareweights	参考 SYVbT

附录 4 部门能源消费调整方法及基年能耗和排放水平

我国能源统计是按照行业所属企业法人统计能源消费量，而国际通行方法是最终用途划分。我们在建模过程中对山东能源消费数据的统计口径和部门划分按照国际通行惯例进行调整。我国能源统计按照独立法人企业划分，将终端消费范围分为农林牧渔业、工业、建筑业、交通运输、仓储和邮政业、批发、零售业和住宿、餐饮业、其他、生活消费 7 大类划分。国家通行方法是划分农林牧渔业、工业、交通、公共建筑、居民建筑、非能源利用、能源工业自用能等部门和领域。本报告参考王庆一、发改委能源研究所和中国建筑节能协会等学者和研究机构提出的能源品种调整的经验比例，将山东省能源平衡表调整为具有国际可比较性的能源平衡表（具体方法见附表 5）。

附表 5 能源平衡表终端消费部门调整方法

能源平衡表	调整国际通行分类	调整方法
1. 农、林、牧、渔业	1. 农、林、牧、渔业	全部煤炭和热力划入居民建筑部门，99% 汽油和 10% 柴油划入交通部门；
2. 工业	2. 工业	工业消费扣除用作原料、材料的消费量； 工业消费扣除 3% 的原煤消费量划入公共建筑部门； 工业扣除 80% 汽油和 26% 柴油划入交通部门； 建筑业能源消费量纳入工业消费总量，同时扣除石油沥青消费量划入非能源利用类别， 扣除全部建筑业煤炭和热力划入公共建筑部门； 建筑业扣除 98% 汽油和 30% 柴油划入交通部门。
3. 建筑业		
4. 交通运输、仓储和邮政业	4. 交通	交通运输、仓储和邮政业扣除 100% 煤炭、30% 液化石油气，65% 天然气 100% 热力、28% 的电力划入公共建筑部门； 工业扣除用作原料材料后 80% 汽油和 26% 柴油划入交通部门； 建筑业 98% 汽油和 30% 柴油划入交通部门； 批发、零售业和住宿、餐饮业 98% 汽油、30% 柴油和 3.7% 电力划入交通部门； 其他 98% 汽油和 30% 柴油划入交通部门； 生活能源消费 100% 汽油和 96% 柴油划入交通部门。
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	5. 公共建筑	工业消费 3% 的原煤消费量划入公共建筑部门； 建筑业 100% 煤炭和 100% 热力划入公共建筑部门； 交通运输、仓储和邮政业 100% 煤炭、30% 液化石油气，65% 天然气 100% 热力、28% 的电力划入公共建筑部门； 批发、零售业和住宿、餐饮业 98% 汽油、30% 柴油和 3.7% 电力划入交通部门； 其他消费量扣除 98% 汽油和 30% 柴油划入交通部门。
6. 其他		
7. 生活消费	6. 居民建筑	生活能源消费扣除 100% 汽油和 96% 柴油划入交通部门； 纳入农林牧渔业全部煤炭和热力。
城镇	城镇	城镇生活能源消费扣除 100% 汽油和 96% 柴油划入交通部门。
农村	农村	农村生活能源消费扣除 100% 汽油和 96% 柴油划入交通部门 纳入农林牧渔业全部煤炭和热力。

附表 6 山东省重点能源品种折标系数

能源品种	原煤	洗精煤	其他洗煤	原油	汽油	煤油	柴油	天然气
折标系数 (万吨标准煤 / 实物量)	0.71	0.90	0.29	1.43	1.47	1.47	1.46	11.70

附录 5 政策和双碳情景下主要政策设置

附表 7 政策和双碳情景下分行业减排政策设置

部门	政策	政策情景	双碳情景
交通 [24,25]	电动车新车销量占比	LDVs: 客运 - 2025: 50%, 2030: 59%, 2060: 100% 货运 - 2030: 57%, 2060: 100% HDVs: 客运 - 2030: 40%, 2060: 100% 货运 - 2030: 25%, 2060: 100%	LDVs: 客运 - 2025: 49%, 2035: 100% 货运 - 2030: 32%, 2040: 100% HDVs: 客运 - 2030: 100% 货运 - 2030: 25%, 2045: 100%
	提高燃油经济性	LDVs: 相较 BAU 提高 客运 - 2030 年 69%, 2035 年 86% 货运 - 2030 年 42% HDVs: 相较 BAU 提高 客运 - 2030 年 38% 货运 - 2030 年 40%	LDVs: 相较 BAU 提高 客运 - 2030 年 69%, 2035 年 86% 货运 - 2030 年 42% HDVs: 相较 BAU 提高 客运 - 2030 年 38% 货运 - 2030 年 40%
	优化交通结构	个人出行（小轿车）- 2030 年周转量相较 BAU 减少 8% 道路货运 - 2030 年周转量相较 BAU 减少 10%	个人出行（小轿车）- 2050 年周转量相较 BAU 减少 20% 道路货运 - 2050 年周转量相较 BAU 减少 20%， 2060 年减少 30%
建筑 [10-12] [26-28]	建筑节能	2025 年，新建居民建筑、公共建筑分别执行节能 83%、78% 地方标准，之后保持不变	在政策情景基础上，每 10 年再提升 30%，2045 年后保持不变
	建筑电气化	新建居民建筑 2030 年 100% 电气化 新建商业建筑 2060 年 100% 电气化 新建农村住宅 2060 年 100% 电气化	新建居民建筑 2030 年 100% 电气化 新建商业建筑 2030 年 100% 电气化 新建农村住宅 2030 年 100% 电气化
	既有建筑改造	每年 1%	每年 2%
	分布式光伏推广	2025 年分布式光伏发电提供全社会用电量的 4%，此后不变	2025 年分布式光伏发电提供全社会用电量的 4%，此后不变

工业 [13-16] [29-32]	工业能效提升	相较 BAU 能耗降低 (2030 年) 造纸 5% 化工 4% 水泥 4% 钢铁 8% 有色 7% 其他行业 8%	相较 BAU 能耗降低 (2030 年, 2060 年) 造纸 5%, 36% 化工 4%, 42% 水泥 4%, 30% 钢铁 7%, 55% 有色 7%, 40% 其他行业 3%, 29%
工业 [13-16] [29-32]	工业电气化	2030 年达到 37% 2060 年达到 53% (不包含原料)	2030 年达到 37% 2060 年达到 64% (不包含原料)
	工业氢能应用	到 2060 年, 钢铁行业 81% 的中高温热转为由氢能提供	以下行业部分高温热由氢能提供 水泥: 2030: 0, 2060: 73%; 化工、石化和炼焦: 2030: 0, 2060: 19%; 钢铁: 2030: 0, 2060: 81%; 橡胶和塑料: 2030: 0, 2060: 53%
	减少产品需求 (循环经济)	\	2050 年相较 BAU 水泥、钢铁需求分别减少 37% 和 20%
	工业过程 CCS	\	从 2030 年起开始实施, 化工、水泥及钢铁行业过程 CO ₂ 在 2060 年通过 CCS 减排 95%、90% 和 60%
	水泥熟料替代	水泥熟料替代比例 2030 年 25%, 2060 年达到 50%	水泥熟料替代比例 2030 年 30%, 2060 年达到 100%
非二 [17-21] [33-37]	含氟气体减排措施	2050 年通过替代及销毁减少含氟气体排放潜力达到 100%	2050 年通过替代及销毁减少含氟气体排放潜力达到 100%
	农业畜禽管理	2025 年畜禽粪污利用率达 89% 以上	2025 年畜禽粪污利用率达 89% 以上
	膳食结构调整	2060 年肉制品占比减少 42%	2060 年肉制品占比减少 69%
	氧化亚氮减排措施	工业 - 通过安装减排设施, 2060 年减少 50% 的氧化亚氮排放	工业 - 通过安装减排设施, 2060 年 100% 消除氧化亚氮排放
电力 [14, 22-24] [30, 38-40]	可再生能源发电量占本地发电量比重	2030 年达到 25% 左右, 2060 年 88% 左右	2030 年达到 25% 左右, 2060 年 93% 左右
	发展储能	2060 年达到 170 吉瓦	2060 年达到 170 吉瓦
	需求响应	2060 年大于 17 吉瓦	2060 年大于 17 吉瓦
	电厂配备 CCS	\	2030 年起实施, 到 2045 年所有化石燃料火电厂 100% 配置 CCS

参考文献

- [1] 山东省发展和改革委员会 . 山东省推动能耗双控逐步转向碳排放双控实施方案 (2024-2025 年) [EB/OL].(2024-05-23)[2025-06-06].http://fgw.shandong.gov.cn/art/2024/5/23/art_91532_10440229.html
- [2] 山东省生态环境厅 . 山东省 “两高” 建设项目碳排放减量替代办法 [EB/OL].(2024-07-30)[2025-06-06].http://xxgk.sdein.gov.cn/zfwj/lhf/202407/t20240731_4747058.html
- [3] 山东省发展和改革委员会 . 山东省：坚持系统观念 树牢有解思维 深入推进节能降碳工作 [EB/OL].(2023-07-07)[2025-06-06].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/2023qhjnxcz/dfjncx/202307/t20230707_1358220.html
- [4] 山东省发展和改革委员会 . 山东加快建设绿色低碳高质量发展先行区 .[EB/OL].(2024-06-21)[2025-06-06].http://fgw.shandong.gov.cn/art/2024/6/21/art_91548_10439149.html
- [5] 山东省发展和改革委员会 . 山东省绿色低碳高质量发展促进条例 .[EB/OL].(2025-1-18)[2025-06-06].<http://119.148.161.16:9001/web/#/details/a0ff391747ae4bd30ef5e2c9f7649269>
- [6] 山东省人民政府 . 山东省空气质量持续改善暨第三轮 “四减四增” 行动实施方案 .[EB/OL].(2024-7-11)[2025-06-06].http://www.shandong.gov.cn/art/2024/7/12/art_267492_68762.html
- [7] 山东省能源局 . 山东：干字当头，坚定扛牢能源 “走在前、挑大梁” 使命担当 .[EB/OL].(2024-11-25)[2025-06-06].http://nyj.shandong.gov.cn/art/2024/11/25/art_59966_10306537.html
- [8] 山东省统计局 . 加快能源转型 谱写绿色低碳发展新篇章 .[EB/OL].(2023-1-6)[2025-06-06].http://tjj.shandong.gov.cn/art/2023/1/6/art_312291_10302335.html
- [9] 山东省统计局 . 2025 年一季度全省经济运行情况解读 .[EB/OL].(2025-4-30)[2025-06-06].http://tjj.shandong.gov.cn/art/2025/4/30/art_6109_10318031.html
- [10] 山东省住房和城乡建设厅 . 我省将推动绿色建筑地方立法，组织创建绿色城市试点 .[EB/OL].(2023-7-11)[2025-06-06].<https://mp.weixin.qq.com/s/RcoCwgU50QN0KSZOQ0Qneg>
- [11] 山东省人民政府 . 关于印发山东省新能源汽车产业高质量发展行动计划的通知” .[EB/OL].(2023-12-26)[2025-06-06].<http://www.shandong.gov.cn/art/2023/12/26/>

art_267492_62861.html

[12] 山东省能源局 . 山东公共充电设施提前一年 “乡乡全覆盖” . [EB/OL]. (2025-4-15) [2025-06-06]. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2025/4/15/art_59979_10308354.html

[13] 山东省能源局 . 山东建成加氢站 38 座, 已有 2041 辆氢燃料电池汽车上路 . [EB/OL]. (2024-7-16) [2025-06-06]. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2024/7/16/art_59979_10305016.html

[14] 青岛港岸电总接电量突破 1000 万千瓦时, 居北方港口首位 . [EB/OL]. (2025-1-18) [2025-06-06]. <https://news.qq.com/rain/a/20250118A06O9R00>

[15] 交通运输部 . 探索交能融合新路径 培育壮大交通运输新质生产力 . [EB/OL]. (2024-5-15) [2025-06-06]. https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202405/t20240515_4139226.html

[16] 山东省工业和信息化厅 . 解读《山东省新能源汽车产业高质量发展行动计划》. [EB/OL]. (2024-1-8) [2025-06-06]. http://gxt.shandong.gov.cn/art/2024/1/8/art_299272_10339678.html

[17] 山东省人民政府 . 关于印发山东省能源发展 “十四五” 规划的通知 [EB/OL]. (2021-08-09) [2025-06-06]. http://www.shandong.gov.cn/art/2021/9/6/art_100623_39080.html.

[18] 山东省能源局 . 构建新型电力系统助力 “双碳” 目标实现 [EB/OL]. (2022-05-31) [2025-06-06]. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2022/5/31/art_253733_10292493.html.

[19] 山东省商务厅, 山东省发改委, 山东省财政厅, 等 . 关于印发《山东省 2025 年家电以旧换新实施方案》的通知 [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-06-09]. http://commerce.shandong.gov.cn/art/2025/1/21/art_16257_10349127.html.

[20] 山东省交通运输厅 . 关于公布 2025 年度山东省交通运输绿色低碳高质量发展典型案例的通知 [EB/OL]. (2025-05-15) [2025-08-01]. https://jtt.shandong.gov.cn/art/2025/5/15/art_16285_10324288.html.

[21] 中国化工信息杂志 . 山东: 化工经济总量连续 32 年全国居首 [EB/OL]. (2024-12-11) [2025-07-16]. <https://www.chemnews.com.cn/c/2024-12-11/749438.shtml>.

[22] 国家发展和改革委员会 . 山东省建设绿色低碳高质量发展先行区三年行动计划 (2023-2025 年) [EB/OL]. (2023-03-03) [2025-07-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/ghnhyjnjdgzsj/zcwj/202303/t20230303_1350605.html?eqid=cfd899530004976d000000002645df508&eqid=82552a30001c08e7000000002647daad8.

-
- [23] 马越. NDC 系列简报: 中国含氟温室气体减排努力与前景展望 [R/OL]. 北京: 绿色创新发展研究院, 2024. <https://www.igdp.cn/wp-content/uploads/2024/11/2024-11-19-IGDP-Policy-Brief-CN-F-Gases-Reduction-Efforts-and-Perspectives-in-China.pdf>.
- [24] 中国汽车工程学会, 中国汽车技术研究中心有限公司. 汽车产业绿色低碳发展路线图 1.0[Z/OL]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbys/qcgy/art/2023/art_d81533fcc5aa4748a68c7e232bf12a5e.html.
- [25] 国家发展和改革委员会能源研究所课题组. “十三五”及 2030 年交通部门节能目标研究 [R/OL]. (2017). <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-20170301-1-zh>.
- [26] 住建部科技与产业化发展中心. 建筑领域碳达峰碳中和实施路径研究 [M]. 中国建筑工业出版社, 2021.
- [27] 住建部. 城乡建设领域碳达峰实施方案 [Z/OL]. (2022)[2024-06-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm.
- [28] 住建部. “十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划 [Z/OL]. (2022). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/12/content_5678698.htm.
- [29] 清华大学气候变化与可持续发展研究院等. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [30] 科技部等. 科技支撑碳达峰碳中和实施方案 (2022—2030 年) [Z/OL]. (2022-06). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm.
- [31] 工业和信息化部等. 工业能效提升行动计划 [Z/OL]. (2022). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/29/content_5698410.htm.
- [32] LYNN PRICE, NINA KHANNA, NAN ZHOU, 等. Reinventing Fire: China – the Role of Energy Efficiency in China’s Roadmap to 2050[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [33] 国家发展和改革委员会. 关于推进污水资源化利用的指导意见 [Z/OL]. (2021-01-11). https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111_1264795.html.
- [34] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 2022[M]. 人民卫生出版社, 2022.
- [35] YAO BO, KATERINE ROSS, JINGJING ZHU, 等. Opportunities to Enhance Non-CO₂ GHG mitigation in China[R/OL]. World Resources Institute, 2022. <https://wri.org.cn/sites/default/files/2022-01/opportunities-enhance-non-co2-ghg-mitigation-china-EN.pdf>.
- [36] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的粮食安全 [M]. 人民出版社, 2019.

[37] 煤层气（煤矿瓦斯）开发利用“十三五”规划 [Z/OL]. (2016-12-04). https://www.gov.cn/xinwen/2016-12/04/content_5142853.htm.

[38] 国家能源局. 国家能源局关于征求 2021 年可再生能源电力消纳责任权重和 2022—2030 年预期目标建议的函 [Z]. 2021.

[39] 国家发展与改革委员会, 能源局. 关于加快推动新型储能发展的指导意见 [Z/OL]. (2021). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/24/content_5627088.htm.

[40] 国务院. 2030 年前碳达峰行动方案 [Z]. 2021.

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress)，简称：研究院 (iGDP)，是专注绿色低碳发展的战略咨询平台，2014 年成立于北京，旨在成为具领先专业素养和独立影响力的国际化智库。研究院根植我国地方绿色低碳实践，面向全球应对气候变化进程，为决策者、投资者和社区提供具有国际视野和前瞻思考的解决方案及公益性知识产品。

联系方式：

电话：86-10-8532 3096

邮箱：igdpooffice@igdp.cn

网站：www.igdp.cn

地址：中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

