

报告摘要

2024年12月

山西低碳转型中长期展望

——基于EPS模型建构“双碳”路径

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。

关于山西科城能源创新研究院

山西科城能源环境创新研究院 (Shanxi Coshare Innovation Institute of Energy & Environment, SCIEE) 于 2017 年 1 月在山西省民政厅登记成立, 是一家以推动区域可持续发展为目标的非营利研究机构和协同创新平台, 联合国气候变化框架公约观察员机构。自成立以来, 研究院围绕应对气候变化、能源绿色低碳转型、资源循环高效利用、低碳包容性转型、新质生产力培育、环境社会治理等领域开展研究, 从政策倡导、战略研究、技术建议、能力建设、策略传播等角度为政府、企业和公众提供绿色低碳转型解决方案。

报告编写团队

绿色创新发展研究院 (iGDP): 杨鹏、李鑫迪、袁雅婷、宋曼娇

山西科城能源环境创新研究院: 秦艳、赵跃华、刘宇、杨美艳、刘杰、许小静

联系方式

绿色创新发展研究院 (iGDP): igdpoffice@igdp.cn

山西科城能源环境创新研究院: sxkecheng@163.com

报告设计

包林洁

感谢

非常感谢能源创新公司对本研究提供的技术支持。

衷心感谢中国宏观经济研究院能源研究所 胡秀莲研究员、中国工业和信息化部赛迪研究院 冯相昭研究员、中国科学院广州能源研究所 廖翠萍研究员、浙江省发展规划研究院碳达峰碳中和研究室 吴君宏副主任, 以及世界资源研究所北京代表处可持续转型中心 奚文怡研究员等专家在分省 EPS 建模过程以及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。

引用建议: 杨鹏,秦艳,赵跃华,李鑫迪,袁雅婷,宋曼娇,刘宇,杨美艳,刘杰,许小静.(2024). 山西低碳转型中长期展望：基于 EPS 模型构建“双碳”路径. 北京：绿色创新发展研究院

免责声明: 本报告编写及建模所需要数据和信息均基于公开、可得的数据源, 报告内容是对所研究领域的初步探索, 旨在加强相关领域的讨论交流, 如有不足之处, 敬请谅解并指正。报告中主要结论及观点仅代表作者迄今为止的认识, 不反映作者所属机构以及研究支持方的立场。

目 录

研究背景与目标.....

4

山西低碳转型现状

5

研究工具及方法.....

10

山西能源消费和温室气体排放长期趋势

12

支持山西实现碳中和的关键领域及主要目标.....

13

山西实现碳中和应关注的重点减排政策

14

山西实现碳中和的潜在投资需求及对 GDP 和就业的影响

18

结论和未来政策重点建议

18



研究背景与目标

近年来，全球许多地区频繁遭遇极端天气，严重影响。到经济活动和公众健康。联合国环境规划署（United Nations Environment Programme, UNEP）呼吁各国，应采取更加有力的减排措施，以能源转型为重点，推动整体经济的低碳发展。这被认为是遏制全球持续变暖趋势的关键^[1]。我国已经明确提出“2030 年前碳达峰，2060 年前碳中和”的双碳目标，并正在加快构建碳排放总量和强度双控制度体系（简称：碳排放双控）。地方在国家“双碳”战略的实施和落地中扮演着关键角色。这要求地方政府不仅用望远镜远眺，寻找符合本地区实际情况的低碳转型长期路径，还要用显微镜透视，甄别本地区面临的机遇和挑战，确保本地区的经济社会发展、能源转型和产业转型与全球应对气候变化的趋势相融合。

山西是我国经济发展相对滞后的煤炭资源型地区，其能源低碳转型无疑面临着复杂性和挑战性。山西的经济增长与煤炭市场的变化高度相关，例如 2024 年第一季度，山西的 GDP 增速在全国 31 个省份中排名垫底，主要原因是煤炭产量同比下降 18.9%，煤炭工业增加值下降 2.8%^[2]。作为煤炭能源和重工业基地，山西肩负着保障国家能源安全的重要责任，而本地的电力和工业生产主要依赖于煤炭。同时，山西对于优化产业结构、提高人民生活水平有着强烈的愿望，预计在未来较长时间内能源需求将持续增长，低碳转型面临较大压力。

作为我国煤炭生产和消费大省之一，山西在中国实现“双碳”目标的过程中扮演着举足轻重的角色。本研究旨在通过构建山西能源政策模拟模型（Energy Policy Stimulator, EPS），系统量化模拟山西省面向碳中和的政策措施实施路径，及不同政策组合下能源消费、温室气体排放、投资需求和经济社会影响，为支持山西碳中和实现的政策评估提供科学支持工具。

本报告回顾了山西省低碳转型的进展情况。利用山西 EPS 模型和情景分析方法，报告进一步预测了山西省能源消费和温室气体排放的长期趋势，识别了在双碳情景下山西省需重点关注的关键领域、主要目标设定以及优先实施的减排政策。同时，报告评估了这些政策实施所需的投资规模，以及它们对 GDP 和就业产生的潜在影响。基于这些分析，报告为山西省低碳转型提供了方向性的政策建议。

☑ 山西低碳转型现状

山西作为传统的煤炭资源大省，其社会经济发展水平相对较低。在全国范围来看，山西的经济发展处于中下游水平，即使在同类资源型省份中也是并不处于领先地位。2023 年，山西省的 GDP 总量为 25698.18 亿元人民币；人均 GDP 73984 元人民币。这两项指标均低于全国平均水平。在与内蒙古、陕西、新疆等其他三个同类资源型省份的比较中，山西省的 GDP 总量低于陕西省，排名第二；人均 GDP 低于内蒙古和陕西，排名第三^[3]。

山西省面临更大的公正转型压力和挑战。煤炭行业的增长乏力不仅增加了本地就业的难度，也加剧了人口外流现象，进一步影响了人口规模的缩减。自 2010 年以来，山西省采矿业的就业人数呈逐年下降的趋势，但采矿业仍然是省内劳动力就业的主要领域。2022 年，煤炭开采和洗选行业用工人数占全省工业比重 45.28%，远高于全国平均水平（3.45%）^[5]。山西省常住人口的峰值同样出现在 2010 年，2010 至 2023 年间年均人口增长率为-0.24%，至 2023 年，常住人口相较于 2010 年减少了约 288 万人。

近年来，山西在经济增长与能源相关二氧化碳排放呈现弱脱钩趋势。数据显示，自 2010 年以来，山西省碳排放增速显著低于 GDP 增速（图 1）。通过 Tapio 脱钩指数分析，2005-2022 年期间，山西省脱钩指数由-0.11 增至 0.54，表明目前处于弱脱钩状态。但是，2022 年的山西单位 GDP 能耗强度和碳排放强度仍是全国平均水平的 2.3 倍和 3 倍。

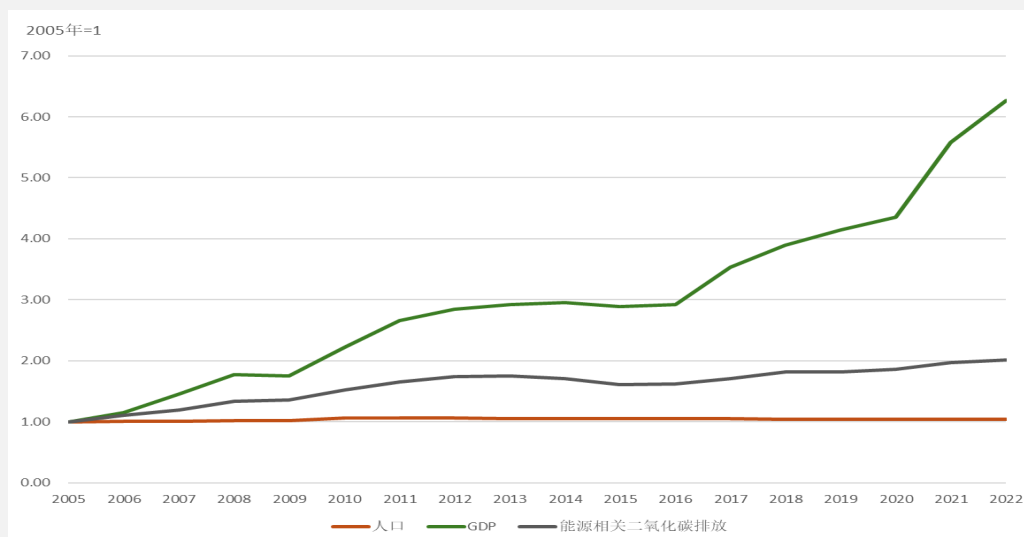


图 1 山西省经济发展与碳排放相关指标变化（2005-2022）

数据来源：根据历年山西统计年鉴整理和计算

同全国水平相比，山西省的经济发展对煤炭消费依赖度较高，且对非化石能源的利用相对较低。2022 年，山西煤炭消费占一次能源消费总量的比重高达 80.56%，这一比例显著高于全国平均水平 24.36 个百分点。非化石能源消费量占能源消费总量的比重仅为 9.8%，比全国平均水平低了 7.68 个百分点（图 2）。

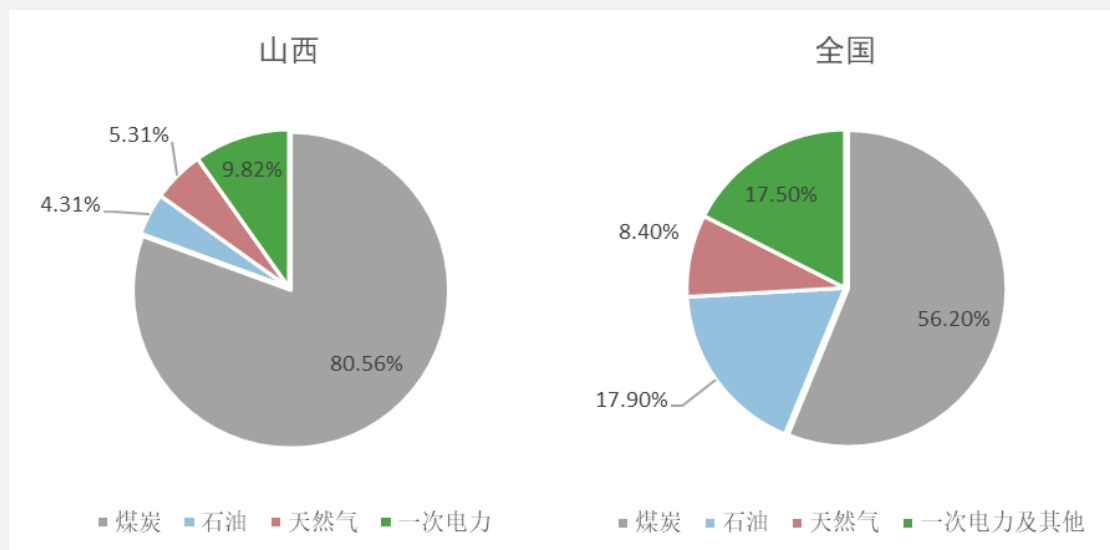


图 2 2022 年能源消费结构

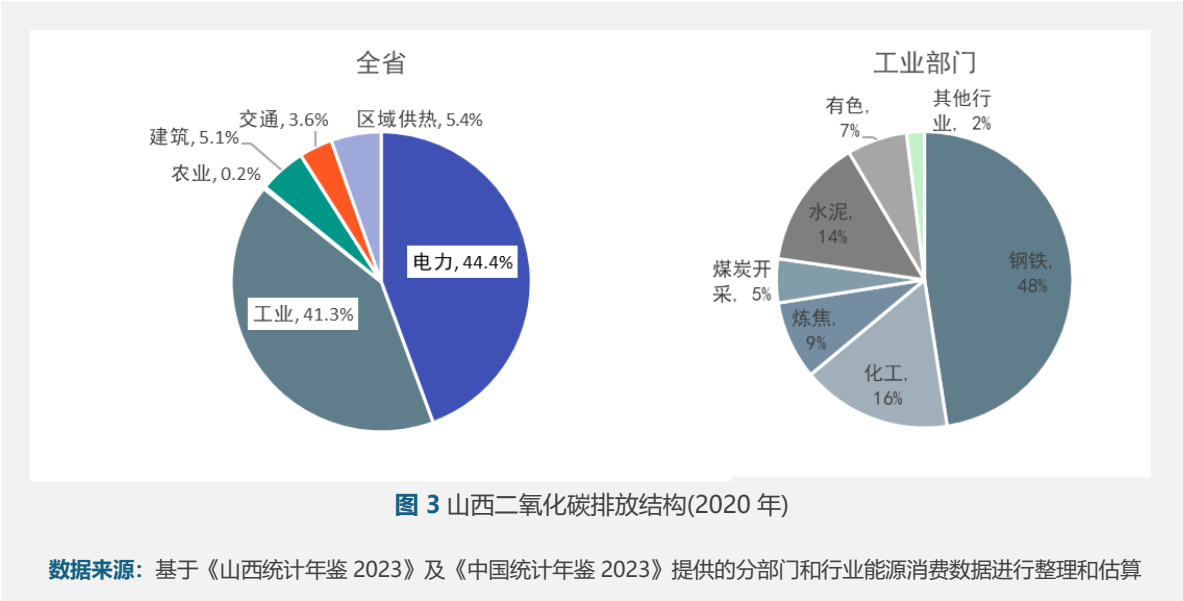
数据来源：山西省能源消费结构采用发电煤耗算法，根据《山西统计年鉴 2023》相关数据测算；全国能源消费结构来源于《中国统计年鉴 2023》

山西省是电力外送大省，2023 年外送电量占全省发电量的 35.3%。山西省电力供应结构以煤电为主，但近些年来风电和太阳能光伏发电发展迅速。尽管如此，与全国平均水平相比，山西省在可再生能源发电方面仍有较大的提升空间。2023 年，山西省可再生能源发电¹装机容量占全省发电装机的 40.14%、发电量占全省发电量的 20.00%，这两个比例分别低于全国平均水平 11.83 个百分点和 13 个百分点。与此同时，山西煤电装机容量和发电量分别占全省的 54.5%和 74.8%。

基于可得数据分析，山西省二氧化碳排放量约占全国排放总量为 4%左右²。主要排放部门集中在电力及热力供应行业、以及以钢铁、化工、炼焦和煤炭开采为代表的工业部门。这两个部门的排放量约占全省总排放的 85%左右（见图 3）。

¹ 包括风电、太阳能发电、水电和生物质发电

² 根据中国能源统计年鉴 2021 提供 2020 年山西能源平衡表估算



山西正致力于将碳达峰和碳中和战略目标与本地资源和产业特征相结合，以实现低碳转型。在“十四五”期间，山西相继发布了《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》《山西省碳达峰实施方案》以及一系列不同领域碳达峰实施方案（简称：“1+X”方案），对实现碳达峰目标的发展方向、重点任务进行部署。这些政策文件体现了山西省在推动低碳转型达成的共识。

作为能源大省，山西在确保国家能源安全的同时，推动煤炭与新能源的优化组合，重点在煤炭开采、钢铁、建材、焦化、化工、有色金属等行业实施减排，同时强化煤炭清洁利用和甲烷控排。通过这些措施，山西省努力在国家整体战略中实现碳达峰和碳中和，同时也在探索和实施符合自身实际的碳减排路径(表 1 和表 2)。

表 1 山西省低碳发展的综合目标

指标	2025	2030	2060	政策文件
二氧化碳排放量达峰	在保障国家能源安全的前提下 2030 年前二氧化碳排放量力争达到峰值			《中共山西省委 山西省人民政府 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》
碳中和	2060 年前在全国一盘棋中奋力实现			
单位地区生产总值能源消耗下降率	完成国家下达目标	持续下降	/	
单位地区生产总值二氧化碳排放下降率	完成国家下达目标	持续下降	/	
非化石能源消费比重	12%	18%	大幅提升	
森林覆盖率(与 2020 年相比)	提高 2.5 个百分点	稳步增长	/	
能源利用效率	重点行业能源利用效率大幅提升	重点耗能行业能源利用效率达到国内先进水平	整体能源利用效率达到国内先进水平	

注：“/”代表未提及

表 2 山西省重点行业和领域低碳发展的细分目标

部门/领域	指标	2025 年	2030 年	政策文件
电力				
新能源电力	风电、光伏发电总装机量	8000 万千瓦	1.2 亿千瓦左右	《山西省可再生能源发展“十四五”规划》晋能源新能源发〔2022〕369 号、《中共山西省委 山西省人民政府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》
	新能源和清洁能源装机容量占比	50%	60%	
	新能源和清洁能源发电量占比	30%	/	
煤电	关停容量	有序淘汰落后煤电机组	/	《山西省电力工业“十四五”发展规划》晋能源规发〔2023〕44 号
	装机容量	8300-8900 万千瓦, 合理建设大型清洁高效先进煤电项目	/	
	煤电机组平均供电煤耗	300 克标煤/千瓦时	/	
灵活性资源	火电灵活性改造	新增完成约 2500 万千瓦; 累计改造完成 4000 万千瓦左右	/	《山西省电力工业“十四五”发展规划》晋能源规发〔2023〕44 号
	需求响应能力	省级电网基本具备 5% 以上的尖峰负荷响应能力	/	
	新型储能装机	600 万千瓦	/	
工业				
总体	单位工业增加值二氧化碳排放下降率	大于全社会下降幅度, 重点行业二氧化碳排放强度明显下降	2030 年前达峰	《山西省工业领域碳达峰实施方案》晋工信节能字〔2023〕86 号
	规模以上工业单位增加值能耗下降率	达到国家设定目标	/	
煤炭开采	煤矿瓦斯抽采利用率	50%	60%	《山西省煤炭行业碳达峰实施方案》晋能源规发〔2023〕251 号
	矿井吨原煤生产综合能耗	比 2020 年下降 10% 以上	在 2025 年的基础上持续下降	
钢铁	能效水平	达到能效标杆水平的产能比例超过 30%	/	《山西省碳达峰实施方案》晋政发〔2022〕29 号
	短流程炼钢占比	5%以上	10%以上	

部门/领域	指标	2025 年	2030 年	政策文件
	氢能应用	/	富氢碳循环高炉冶炼、氢基竖炉直接还原铁技术取得突破应用	《山西省工业领域碳达峰实施方案》晋工信节能字〔2023〕86号
	碳捕集/碳捕集利用CCS/CCUS	/	取得突破应用	
焦化	先进焦炉占比	炭化室高度 5.5 米及以上先进焦炉产能占比达到 95%以上	/	《山西省碳达峰实施方案》晋政发〔2022〕29 号
	能效水平	现有已建成的大型焦炉达到单位产品能耗先进值	/	
建材	能效水平	水泥熟料能效达到标杆水平的产能比例超过 30%	/	《山西省碳达峰实施方案》晋政发〔2022〕29 号
	水泥原燃料替代率	/	大幅提高	《山西省工业领域碳达峰实施方案》晋工信节能字〔2023〕86号
	CCS/CCUS	/	示范试点	
有色金属	能效水平	铝冶炼（电解铝）、铜冶炼行业能效达到标杆水平的产能比例超过 30%	/	《山西省碳达峰实施方案》晋政发〔2022〕29 号
	电解铝使用可再生能源比例	/	30%以上	《山西省工业领域碳达峰实施方案》晋工信节能字〔2023〕86号
	再生金属供应	50 万吨以上	/	
天然气	非常规天然气产量	200 亿立方米/年	持续保持高产稳定	《山西省非常规天然气行业碳达峰实施方案》晋能源规发〔2023〕250 号
	全省天然气管网输气能力	超过 400 亿立方米/年	/	
	储气调峰能力	4.81 亿立方米	充分满足省内储气调峰需求	
	天然气占工业领域能源消费的比重	/	明显上升	
建筑				
建筑	城镇绿色建筑占新建建筑比例	100%	/	《山西省建筑节能、绿色建筑与科技标准“十四五”规划》晋建科字〔2022〕114 号、《山西省城乡建设领域碳达峰实施方案》晋建科字〔2023〕36 号
	城镇新建居住建筑节能标准	/	83%	
	城镇新建公共建筑节能标准	72%	78%	
	新建公共机构、新建厂房屋顶光伏覆盖率	50%	/	《山西省城乡建设领域碳达峰实施方案》晋建科字〔2023〕36 号

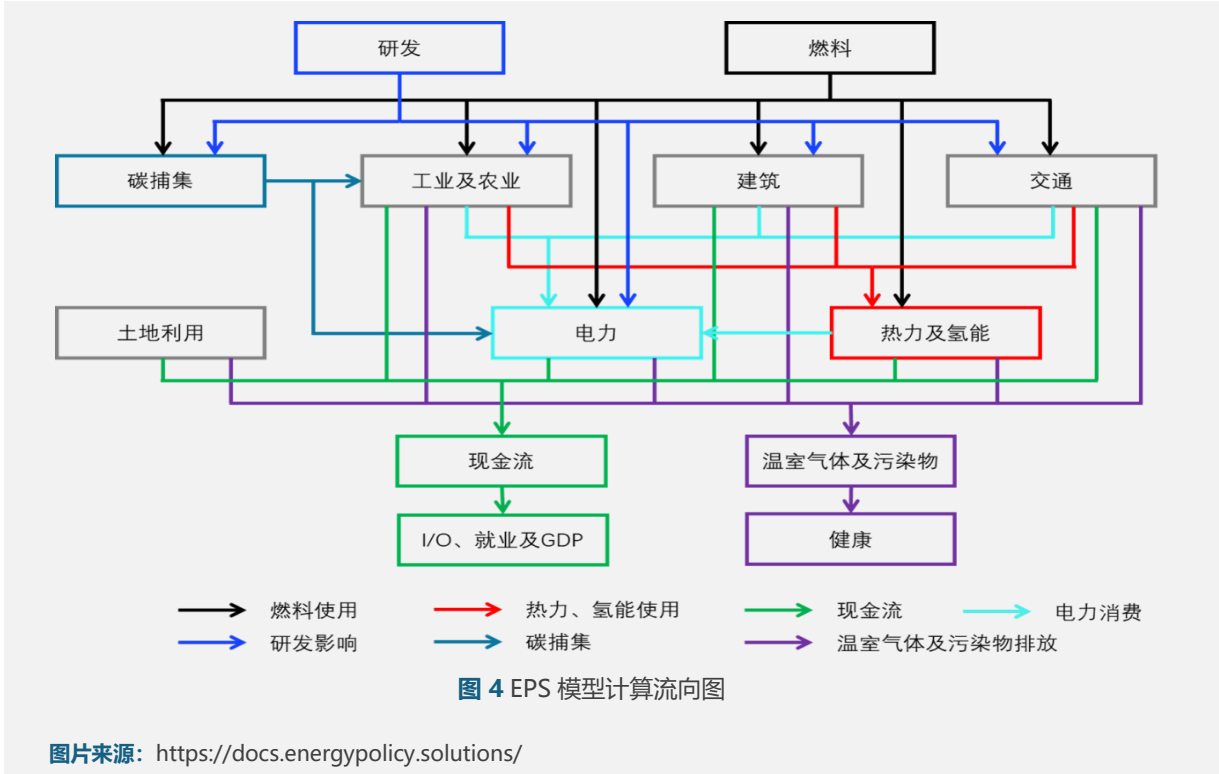
部门/领域	指标	2025 年	2030 年	政策文件
	全省城镇建筑可再生能源替代率	8%	/	
交通				
道路交通	当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例	/	40%左右	《山西省碳达峰实施方案》晋政发〔2022〕29 号
	公共充电桩与电动汽车比例	不低于 1:8，力争达到 1:6	/	《山西省电动汽车充（换）电基础设施建设“十四五”规划和三年行动计划》晋政办发〔2023〕38 号
	乘用车和商用车新车二氧化碳排放强度	/	分别比 2020 年下降 25%和 20%以上	《山西省工业领域碳达峰实施方案》晋工信节能字〔2023〕86 号

注：“/”代表未提及

✓

研究工具及方法

iGDP 和山西科城能源环境创新研究院（Coshare）基于公开数据来源，采用能源创新政策与技术公司（Energy Innovation，EI）开发的能源政策模拟模型（Energy Policy Stimulator, EPS）作为分析工具，联合构建了山西 EPS 模型。EPS 是一个基于系统动力学的免费和开源分析工具，用于模拟和评估能源与气候政策调整对能源消费、温室气体排放、污染物排放、投资需求及相关宏观社会经济指标的影响（图 4）。



模型研究基年为 2020 年，预测年份为 2021-2060 年，设置了三个情景，分别为 2020 政策冻结情景、政策情景、双碳情景（表 3）。

表 3 情景说明

情景	基准年	目标年	情景描述
2020 政策冻结情景	2020	2060	2020 年以前我国和山西政策措施和力度的自然延续，未考虑 2020 年后出台的最新政策
政策情景			反映“双碳”目标提出后，我国和山西已经出台影响 2030 年前碳排放的关键目标和政策措施，并且假定 2030 年后这些政策措施和力度自然延续，未考虑 2060 年碳中和目标的实现
双碳情景			在政策情景基础上，2030 年后的政策措施和力度参考全国和全球最佳实践，确保山西在 2060 年前实现碳中和

我们通过山西 EPS 建模研究和情景分析，量化模拟了山西低碳转型的中长期路径，识别不同时间阶段下应关注的重点减排领域和政策，估算了潜在的投资需求规模，以及山西实现碳中和为导向的低碳转型对 GDP 和就业的可能潜在影响。



☑ 山西能源消费和温室气体长期趋势

模型结果显示，山西省在 2030 年前有望实现二氧化碳和温室气体排放达峰。在双碳情景下，山西省温室气体排放有望在 2025 左右达到峰值并进入平台期。到 2035 年，山西省的温室气体排放相对于其峰值水平有望实现较为明显的下降，预计下降幅度在 35%左右（图 5）。展望到 2060 年，温室气体和二氧化碳排放量分别为 8300 万吨 CO₂e 和 1200 万吨 CO₂。

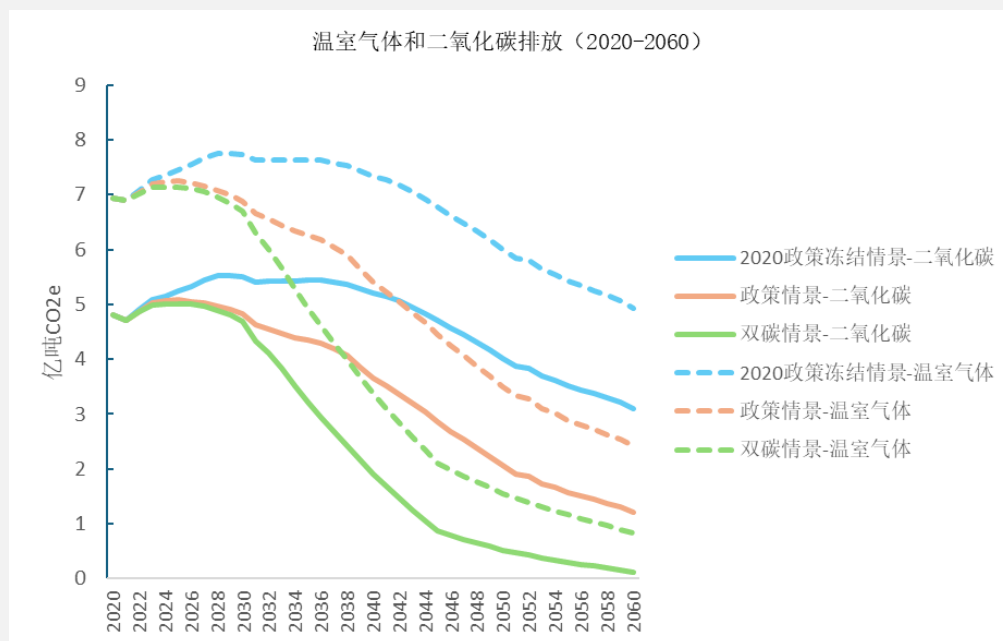


图 5 三个情景下温室气体和二氧化碳排放（2020-2060）

数据来源：山西 EPS 模型结果

注：考虑 CCUS 等碳捕集及利用等技术，未考虑碳汇

在政策情景和双碳情景下，山西省的能源消费总量预计将保持增长趋势，直至 2035 年达到峰值。达峰年份比 2020 政策冻结情景提前了五年，峰值水平较 2020 年水平分别再增加 5800 万吨标准煤和 6800 万吨标准煤。2035 年之后，在双碳情景下，能源消费的下降趋势相对政策情景更为显著。到 2060 年，双碳情景下相对于政策情景，能源需求预计将减少约 3370 万吨标准煤，总量约为 2.7 亿吨标准煤，接近“十四五”期间能源消费水平。在双碳情景下，煤炭消费呈现较为明显的下降趋势，到 2035 年，煤炭消费占能源消费比例为 54%，到 2060 年这一比例为 7%（图 5）。

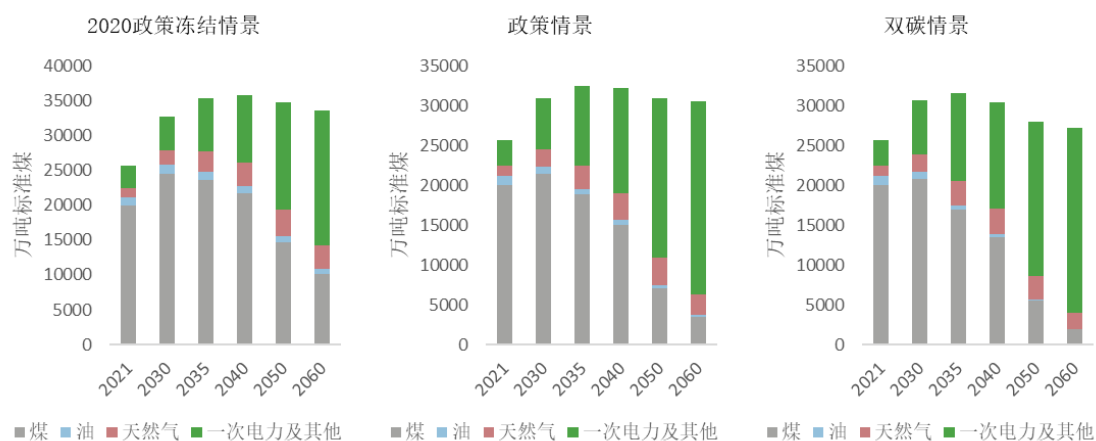


图 5 三个情景的山西能源消费变化（2021-2060 年）

数据来源：山西 EPS 模型结果

支持山西实现碳中和的关键领域及主要目标

电力、制造业、煤矿开采作为山西省最主要的三个重点温室气体排放行业和领域，其减排路径的选择对于 2060 年实现碳中和目标具有关键性作用。基于模型量化结果，表 3 展现了双碳情景下主要行业及领域的关键指标的表现情况。

在双碳情景下，山西电力部门预计 2030 年左右达到碳排放峰值。2030 至 2045 年，风电和太阳能光伏发电将逐步替代煤电成为主体能源；2045 至 2060 年，风电和太阳能光伏将成为发电量结构的主体能源。到 2060 年，山西预计仍保留少量煤电机组，煤电装机和发电量占比都会降至 4% 左右，而可再生能源装机和发电量占比分别上升为 90% 和 86%。此外，鉴于山西非常规天然气资源丰富，预计到 2050 年前，燃气发电装机规模和发电量会持续增加，并替代部分煤电，发挥灵活调峰电源的作用。

山西工业部门碳排放预计 2025 年左右达峰，钢铁、水泥、有色、食品等基本进入峰值平台期。2035 年工业部门温室气体和二氧化碳排放量应相对于峰值水平分别下降约 32% 和 41%。可见，山西工业领域实现达峰难度不大，但是实现碳中和面临巨大的挑战，需要在加大产业结构优化调整的基础上，进一步建立和完善有关工业电气化及氢能替代、工业节能和能效、水泥熟料替代、CCS/CCUS 等方面的政策体系。其中，高耗能行业电气化水平的提升和氢能替代是推动山西工业实现碳中和目标的关键之一。

山西甲烷排放减排基数大（约 2 亿吨 CO₂e，占比约 28%），对山西碳中和目标的实现具有关键作用。山西甲烷排放主要来自于煤炭开采行业。通过强化低浓度瓦斯综合利用和废

弃矿井瓦斯治理和利用等相关政策措施，煤矿甲烷排放呈下降趋势，到 2060 年剩余 6200 万吨 CO₂e。

表 3 双碳情景下关键部门或领域的政策模拟分析结果

		单位	2030	2035	2040	2050	2060
综合目标	二氧化碳排放相对于 2020 年下降	%	-2%	-33%	-60%	-89%	-97%
	温室气体排放相对于 2020 年下降	%	-4%	-29%	-51%	-78%	-88%
	非化石能源消费占能源消费总量的比重	%	22%	35%	44%	69%	85%
	风电、光伏发电总装机量	GW	104	172	211	307	378
电力	煤电发电量占比	%	54%	37%	29%	10%	4%
	煤电装机容量占比	%	38%	28%	24%	12%	4%
	可再生能源发电量占比	%	34%	46%	54%	74%	86%
	可再生能源装机容量占比	%	56%	66%	71%	82%	90%
工业	煤炭消费占工业终端消费比例	%	62%	50%	39%	18%	0%
	电力消费占工业终端消费比例	%	27%	35%	42%	58%	73%
建筑	电力消费占工业终端消费比例	%	47%	60%	74%	94%	95%
交通	电力消费占工业终端消费比例	%	22%	43%	61%	83%	85%
	单位周转量碳强度（客运）累计下降率（相对于 2020 年）	%	61%	81%	91%	96%	97%
	单位周转量碳强度（货运）累计下降率（相对于 2020 年）	%	16%	38%	57%	86%	98%
甲烷控排	甲烷排放相对于 2020 年下降	%	13%	26%	37%	54%	67%

注：终端能源消费不包含原料用能



山西实现碳中和应关注的重点减排政策

为支持山西“双碳”目标的实现，电力、工业、建筑、交通等部门绿色低碳转型需要继续完善和落实节能和能效提升、能源结构调整、产品需求结构调整、CCS/CCUS 等低碳技术应用等相关领域的政策体系和落实机制。在双碳路径下，相对于 2020 政策冻结情景，从 2021 年到 2060 年的 40 年间，累计减排量可达 120 亿吨 CO₂e，略高于全国目前的碳排放水平。双碳情景的重点部门及领域的政策实施设定目标如表 4 所示。

表 4 双碳情景下重点行业及领域下关键政策的设定目标

行业	减排政策	政策类型	2025	2030	2035	2060
电力	提高非化石能源发电装机占比	清洁电力	45%	56%	65%	90%
	提高非化石能源发电量占比	清洁电力	24%	34%	45%	85%
	提前退役煤电机组	清洁电力	2030 年开始，87MW/年			
	停止新建常规煤电机组	清洁电力	2030 年开始			
	停止增加调峰煤电机组	清洁电力	2040 年开始			

	提高尖峰负荷响应能力达到	需求响应	5%	8%	10%	20%
	提高集中供热化石能源替代占比	清洁供热	0%	0%	15%	90%
	扩大电力 CCS/CCUS 捕获碳排放比例	电力 CCS/CCUS	2030 年：30%；2045 年：100%			
工业	控制工业终端能源消费 (相当于 2020 水平的比例)	节能和能效提升	102%	98%	84%	45%
	其中，煤炭开采行业	节能和能效提升	83%	74%	67%	38%
	焦化行业	节能和能效提升	95%	82%	70%	37%
	钢铁行业	节能和能效提升	98%	95%	69%	21%
	建材行业	节能和能效提升	120%	126%	112%	60%
	有色行业	节能和能效提升	151%	154%	154%	90%
	减少水泥等建材需求比例	减小产品消费需求	0%	0%	11%	37%
	减少钢铁需求比例	减小产品消费需求	0%	1%	6%	20%
	提高电能占工业终端能耗比重	工业电气化	21.2%	24.5%	30.7%	63.3%
	加快水泥行业氢能利用	氢能利用	-	-	5%	27%
	加快钢铁行业氢能利用	氢能利用	-	-	11%	64%
	提高化工 CCS/CCUS 捕获碳排放比例	工业 CCS/CCUS			4%	24%
	提高水泥 CCS/CCUS 捕获碳排放比例	工业 CCS/CCUS			1%	5%
	提高钢铁 CCS/CCUS 捕获碳排放比例	工业 CCS/CCUS			3%	15%
	降低水泥熟料比	水泥熟料替代	2%	5%	7%	19%
建筑	加快建筑节能	建筑节能	2025 年，城镇新建居住建筑、公共建筑分别执行节能 83%、72%地方标准；2025 年-2035 年能效分别逐渐提升 30%，之后保持不变。			
	提高建筑节能更新改造比例	建筑节能	2%	2%	2%	2%
	提高建筑分布式光伏发电量占全社会用电量比例	建筑电气化	3%	3%	3%	4%
	提高电能占建筑终端能源消费比重	建筑电气化	34%	45%	58%	85%
交通	提高新能源小汽车渗透率-LDV	零排放交通工具渗透率	48%	74%	100%	100%
	提高新能源客车渗透率-HDV	零排放交通工具渗透率	62%	100%	100%	100%
	提高新能源小货车渗透率-LDV	零排放交通工具渗透率	27%	100%	100%	100%
	提高新能源中重型货车渗透率-HDV	零排放交通工具渗透率	14%	32%	66%	100%
	降低乘用车吨公里燃料消耗	交通燃油经济性	-29%	-51%	-59%	-64%
	降低商用车吨公里燃料消费	交通燃油经济性	-24%	-48%	-61%	-75%
	减少道路机动车出行-LDV 客运	交通结构优化	6%	14%	6%	20%
	减少道路机动车出行-LDV 货运	交通结构优化	3%	6%	10%	30%
	减少道路机动车出行-HDV 货运	交通结构优化	3%	6%	10%	30%
非二氧化碳排放	控制农业 CH ₄ 排放（相当于 2020 水平的比例）	甲烷减排	102%	98%	87%	41%
	控制农业 N ₂ O 排放（相当于 2020 水平的比例）	氧化亚氮减排	91%	84%	74%	35%

控制煤炭开采 CH ₄ 排放（相当于 2020 水平的比例）	甲烷减排	95%	85%	72%	31%
---	------	-----	-----	-----	-----

注：本表中所涉及减排政策以及目标设置来源于 EPS 模型政策库以及碳中和情景设置

为了实现碳中和目标，山西省在不同阶段的减排重点应有所区别，并应随着时间的推移出台新的措施和加强政策力度。2026-2030 年间，山西省温室气体排放处于达峰平台期，一方面应持续推动工业电气化、电力清洁能源发展、工业节能和能效提升、建筑节能以及甲烷排放控制（包括提高煤矿瓦斯抽采利用，控制种植业和养殖业的甲烷排放等措施）等，确保达峰不反弹；另一方面，也需要面向 2060 年碳中和，提前布局支持低碳技术和项目推广应用的政策措施（图 6）。

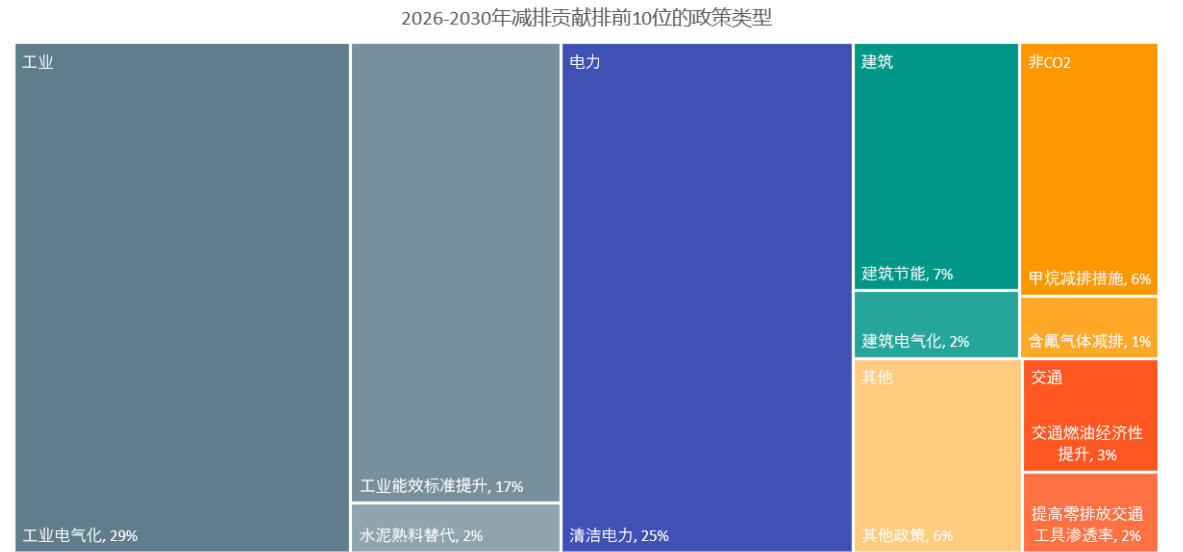


图 6 2026-2030 年减排贡献排前 10 位的政策类型

注：其他政策是指前 10 位政策之外的 34 个政策措施的贡献总和

数据来源：山西 EPS 模型结果

2031-2060 年间，需加强电力和工业 CCUS、工业电气化及氢能替代、工业能耗和节能、甲烷减排措施、建筑电气化、减少高耗能产品消费需求等政策实施，以及政策的系统性和协同性，同时需要重视含氟气体减排、氧化亚氮减排等非二氧化碳排放领域（图 7）

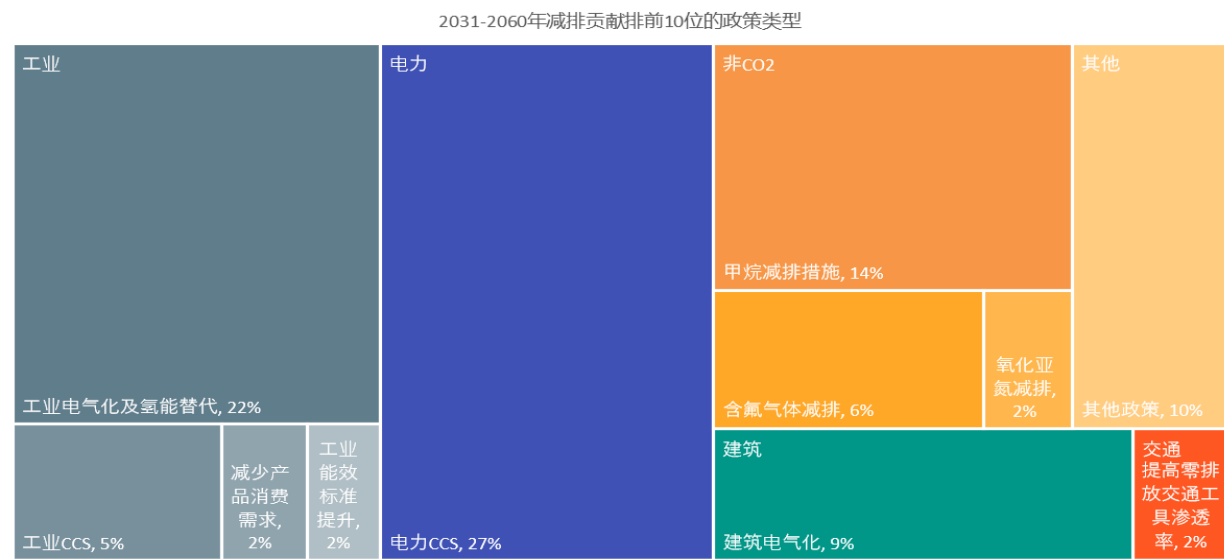


图 7 2031-2060 年减排贡献排名前 10 位的政策类型

注：其他政策是指前 10 位政策之外的 34 个政策措施的贡献总和
数据来源：山西 EPS 模型结果

特别是在进入“十六五”期间（2031-2035 年），山西省为实现碳中和目标，需更加重视综合运用多种政策工具，并采取多管齐下的措施以促进温室气体排放的快速下降。山西应聚焦工业电气化、电力 CCUS、甲烷减排、工业能效和节能、建筑电气化等政策，同时不可忽视其他非重点政策的减排贡献（图 8）。

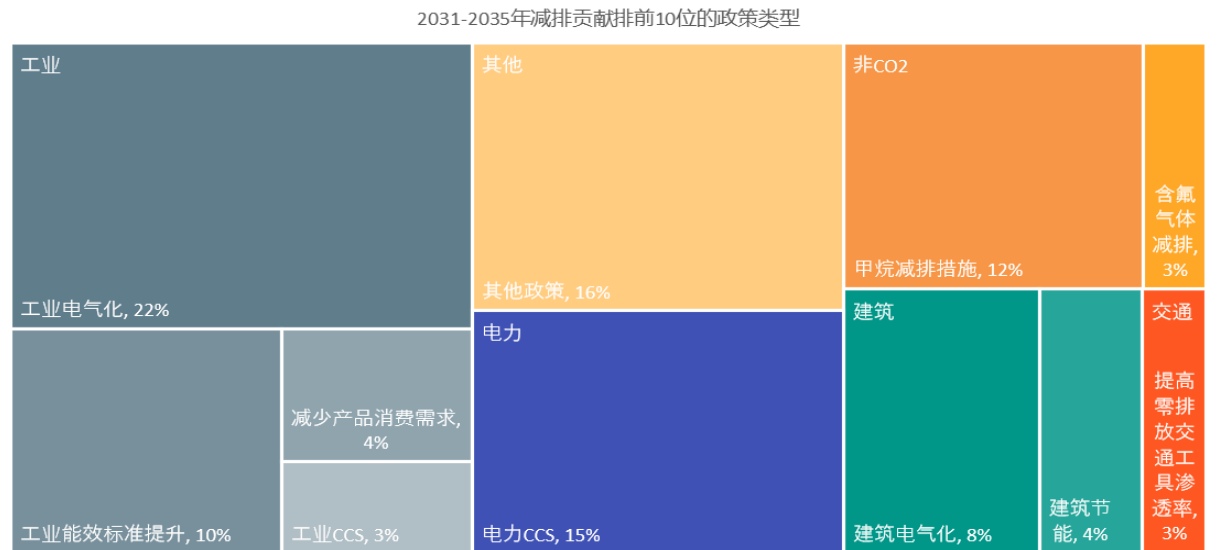


图 8 2031-2035 年减排贡献排名前 10 位的政策类型

注：其他政策是指前 10 位政策之外的 34 个政策措施的贡献总和
数据来源：山西 EPS 模型结果

☑ 山西实现碳中和的潜在投资需求及对 GDP 和就业的影响

模型估算显示，山西省为实现碳中和目标所需投资需求巨大。在未来 10 年（2025-2035 年）内，山西重点部门低碳发展投资累计需求约为 4.4 万亿元（以 2020 年不变价计算），而未来 35 年（2025-2060 年）的投资需求累计约为 15.3 万亿元。

与 2020 政策冻结情景相比，双碳情景对山西经济增长和就业更为有利。虽然在 2030 年之前，双碳情景的额外拉动效应并不显著，但在 2030-2050 年间，GDP 和就业岗位的增加将呈现显著的正效应。具体而言，2021-2035 年，山西省 GDP 将累计新增约 10358 亿元，年均 GDP 变化率为 2%；2036-2060 年，GDP 累计新增约 55110 亿元，年均 GDP 变化率 4.6%。在双碳情景下，2030-2050 年将累计新增就业岗位 1093 万个；2050 年后，就业市场将表现平稳，年均新增约 12 万个就业岗位。

在双碳情景下，山西省的煤炭、煤电、炼焦、水泥、钢铁和化工等重点工业行业将逐渐萎缩，对全省经济和就业的贡献下降，特别是 2035 年后，这一趋势将明显加速。未来 GDP 的增量主要来源于设备制造、金属制造、电力（新能源）、轻工业（食品、纺织服装和造纸等）等行业。预计到 2060 年，煤炭开采、焦化、煤电、水泥、钢铁和化工等行业的就业岗位将分别相当于 2020 年就业水平的 7%、42%、63%、58%、75% 和 78%。因此，山西省需要提前规划和布局，在煤炭和高碳产业逐步退出过程中，确保经济、社会和就业的平稳过渡。

☑ 结论和未来政策重点建议

自 2019 年开展能源革命综合改革试点，山西省积极探索在保障国家能源安全前提下，实现本地区社会经济低碳转型和经济高质量发展的路径。经过长期的不懈努力，山西在能源低碳转型已经取得显著成果。为进一步支持碳中和目标的实现，我们建议山西“双碳”政策应重点强化以下四个方向：

第一、制定山西省低碳转型中长期战略，确立更具雄心的减排目标，制定前瞻性政策，并确保措施的连贯性和稳定性

为实现碳中和目标，山西省需要更注重综合运用多种政策工具，制定低碳转型的中长期路线图。山西省应提出全经济范围以及电力、工业、建筑、交通等重点部门的绿色低碳发展目标以及政策措施，确保节能和能效提升、能源结构调整、产品需求结构调整、CCS/CCUS 等相关的措施及技术项目的落地和广泛应用。

“十五五”期间，山西省将实施以总量控制为主，强度控制为辅的碳排放双控制度。山西省可以提出二氧化碳排放总量控制目标（不超过 5.1 亿吨），并设定 2035 年相较于峰值水平的下降目标以强化减排行动；“十五五”期间单位 GDP 碳排放累计下降率的设定目标应高于“十四五”完成值；设定量化的终端电气化目标（达到 30%），控制终端的化石能源消费，提升能源效率。

“十六五”期间，山西省加快电力部门转型，控制煤电发展，大力发展可再生能源，设定 2035 年煤电装机容量和发电量占比分别降至 28%和 37%，可再生能源分别增至 66%和 46%的目标。工业低碳转型重点关注重点行业的电能替代，设定 2030 年工业电气化率目标为 27%，2035 年为 35%的目标。建筑领域强化建筑节能政策，推广零能耗建筑标准，2030 年建筑领域电能消费比重达 47%，2035 年增至 60%。交通领域强化交通节能和低碳交通工具推广力度，2030 年交通部门电气化率达 22%，2035 年增至 43%。

山西省在实现碳中和目标的过程中，政策工具的多元化和综合实施尤为重要，包括山西煤电机组低碳转型、电力和工业 CCUS 应用、工业电气化及氢能替代、工业能耗和节能、煤矿甲烷控排措施、建筑全面电气化、减少高耗能产品的市场需求等政策的系统性和协同性，同时需要重视含氟气体减排、氧化亚氮减排等非二氧化碳排放领域的减排工作。

第二、制定中长期煤矿甲烷排放控制目标及专项行动方案，有效控制山西煤矿甲烷排放

山西作为煤炭和煤层气资源富集省份，面临低浓度瓦斯减排的挑战，其中 8% 以下瓦斯甲烷排放占比高达 71%。因此，山西应尽早出台中长期煤矿甲烷控制目标及专项行动方案，并与现有政策协同，推动甲烷排放在达峰后快速下降。

山西省应开展煤矿甲烷排放规律和特征的调查，建立本地化排放因子数据库和信息化管理平台，为减排决策提供科学依据。同时，根据省内煤矿特点和瓦斯利用技术经济性，设定中长期煤矿瓦斯利用率目标，提升利用率，加强甲烷减排。

第三、探索和建立多元化的低碳转型投融资机制，支持低碳技术的研发、推广和应用

山西在双碳目标下推动重点行业低碳转型，模型量化预计 2025-2035 年低碳转型投资约 4.4 万亿元，2025-2060 年则达到 15.3 万亿元。为了满足碳中和的投资需求，山西省应进一步加强绿色金融和转型金融路线图研究，推出支持绿色低碳转型的金融工具/产品包，并明确支持范围及条件。

山西应制定重点领域转型金融支持目录，解决高碳行业融资难题。例如，煤电机组绿色低碳改造，工业 CCUS 技术、高耗能行业电气化改造及氢能燃料替代，可持续航空燃料等技术推广应用。推进太原、长治等气候投融资试点城市建立数据共享平台，包括政策要求、金融产品、企业/项目能耗和碳排放信息，以促进金融机构与企业间的精准对接。

第四、构建公平的转型机制，确保在低碳转型过程中，各利益相关方的权益得到妥善保护，特别是对于那些受转型影响较大的群体

鉴于山西省经济和就业高度依赖传统行业，特别是煤炭行业，在“双碳”目标下这些行业预计将逐渐萎缩，进而对经济和就业产生影响。为了应对这一挑战，山西可以率先启动公正转型立法研究，构建相应的法律框架，提前识别受冲击的人群和地区，并制定行业公正转型规划，明确阶段目标和路线图，以减缓社会风险。

同时，山西应将公正转型纳入县域宏观社会经济发展监测和评估体系，对依赖煤炭资源的县域经济体进行持续跟踪与评估，并建立支持机制，为经济增长缓慢和财政收入不足的市县提供资金和政策支持。

此外，山西省内启动公正转型创新市县试点示范，选取资源枯竭型县域或与煤炭产业关联紧密的县域作为试点，将公正转型原则纳入市县发展规划，并提出具体规定性要求及政策支撑，明确转型策略、内容、重点工作和保障措施，争取国家和省级政策支持。这些措施旨在确保山西在低碳转型过程中实现社会经济的平稳过渡和公正发展。

参考文献

- [1] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)[R/OL]. Nairobi, 2023. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2023>.
- [2] 山西省统计局. 2024 年一季度全省经济稳定恢复[EB/OL]. (2024-05-06). https://tjj.shanxi.gov.cn/tjsj/sjxx/202404/t20240422_9542724.shtm.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴 (2023) [EB/OL]. (2024). <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [4] 韩淑娟, 柏婷. 资源型省份人口变动趋势及政策启示[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(9): 10-17.
- [5] 山西省统计局. 山西统计年鉴 2023[EB/OL]. (2024). <https://tjj.shanxi.gov.cn/tjsj/tjnj/nj2023/zk/indexch.htm>.
- [6] 山西省统计局. 山西省 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-03-20). https://sxjl.gov.cn/zwyw/szfyw/202403/t20240320_3962492.html.
- [7] 陈俊琦. 重点关注 | 山西代表团提交全团建议[J/OL]. 2024. <http://www.yunzhou.gov.cn/yzqrmzfz/sxyw/202403/a9a02592934643d0826d925ad55f199e.shtml>.
- [8] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2023[M]. 中国统计出版社, 2024.
- [9] 山西省人民政府办公厅. 山西省电动汽车充(换)电基础设施建设“十四五”规划[EB/OL]. (2023-06-02). http://xxgk.jccq.gov.cn/qzf/cqfgj/fdzdkgkr/sswgh/202310/t20231009_1864887.shtml.
- [10] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴 2023[R/OL]. (2023-12-07). <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/index.html>.
- [11] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴 2023[R/OL]. https://tj.nmg.gov.cn/files_pub/content/PAGEPACK/7f2e427b72bc45ec84f1773389947068/zk/indexce.htm.
- [12] ENERGY INNOVATION. Energy Policy Simulator Documentation.[EB/OL]. <https://docs.energypolicy.solutions/>.
- [13] 奚溪, 杨鹏. 能源政策模型 (EPS) 应用于区域“双碳”战略规划研究：入门工作手册[R]. 绿色创新发展研究院, 2023.
- [14] 绿色创新发展研究院. 报告摘要：支持碳中和实现的能源转型之路[R/OL]. 北京: 绿色创新发展研究院, 2024. <https://www.igdp.cn/wp-content/uploads/2024/11/2024-11-22-Energy-Transition-Pathways-Supporting-Chinas-Carbon-Neutrality-CN.pdf>.
- [15] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书[R/OL]. 北京: 国家能源局, 2023: 20. <https://www.nea.gov.cn/download/xxdlxtfzlpsgk.pdf>.

- [16] 中国电力企业联合会. 中国电气化年度发展报告 2021[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021.
- [17] 刘杰, 刘宇, 宋沛鑫等. 山西省煤炭开采甲烷减排政策研究[R]. 山西科城能源环境创新研究院, 2024.
- [18] 山西科城能源环境创新研究院项目研究组. “双碳”目标下山西省煤炭行业公正转型路径研究——煤炭采选行业专题（I 期）[R]. 能源基金会（中国），2024.
- [19] 山西省发展和改革委员会，山西省能源局. 山西省电力工业“十四五”发展规划[R/OL]. (2023-02). <https://nyj.shanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/ghjh/202303/P020230302645056166914.pdf>.