



太原理工大学
TAIYUAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

资源型地区焦化行业 提前平稳退出可行性研究 (以山西为例)

UNLOCKING THE CHOKE:
HOW AN EARLY METALLURGICAL COAL PHASE-OUT
IN SHANXI COULD PAVE THE WAY

2025.12



晋青可持续发展公益服务中心
山西省太原市小店区清控创新基地A座4层
greensx@qq.com
欢迎关注“晋青”

〔 执行摘要 〕

在全球加速推进气候变化应对、能源结构向清洁低碳转型的宏观背景下，高耗能、高排放的传统工业部门正面临前所未有的转型与退出压力。焦化行业作为钢铁产业链的关键一环，因其突出的碳排放与环境影响，已成为全球减排的重点领域。中国是全球最大的焦炭生产与消费国，其焦化行业的转型路径不仅是国内“双碳”目标实现的关键组成部分，也对全球冶金产业链的低碳化发展具有重要意义。

山西省依托丰富的炼焦煤资源和雄厚的产业规模，长期位居全国焦炭生产的核心地位，也因此成为研究中国典型资源型地区焦化行业平稳转型的关键样本。本报告旨在系统探究山西省焦化行业平稳转型的可行性，通过深入剖析产业现状、贡献价值、面临压力及转型实践，并结合不同退出情景的测算分析，最终提出相应的实施路线图与政策建议。

长期以来，山西省焦化产业为区域经济发展、就业保障及全国钢铁工业体系支撑作出了巨大贡献，但该产业当前面临多重压力。从内部看，其固有的高能耗、高污染特性与绿色发展要求存在严重冲突，行业对全省经济的贡献度持续下降，利润空间也受到上下游挤压；从外部看，国家环保规制不断升级，“双碳”目标约束日益趋紧，下游钢铁行业因产能控制与技术替代，对焦炭的长期需求出现结构性下降，叠加国际碳约束政策影响，山西焦化行业已难以延续传统发展模式，主动谋划平稳转型直至“退出”成为势在必行的战略选择。

本报告构建了基于TIMES模型的量化分析框架，设定了基准情景及“60退出”“50退出”“40退出”三种主动转型情景。分析显示，在不同时间框架内实施退出具备技术可行性与经济可承受性。在产量与碳排放方面，无论何种情景，山西焦炭产量和行业碳排放均呈下降趋势，而主动退出情景能更早、更大幅度

地实现碳减排；在经济影响方面，尽管行业转型会导致产业增加值下降，但其2024年占山西省GDP的比重已不足6%，且通过培育替代产业与有效的区域协同，相关冲击整体可控。换言之，主动转型虽可能加剧短期阵痛，却能避免长期低效锁定风险，为新兴产业发展腾出空间与资源。

本报告从上述系统性研究中提炼出四点核心经验。其一，国内外复杂形势均要求转型应对必须大幅前置，被动等待将导致主动权旁落。其二，2030年前是宝贵的转型窗口期，需充分把握以完成技术储备与模式探索。其三，唯有加速实践探索，方能高效突破技术、资金与就业等发展瓶颈。其四，焦化行业因体量相对较小、灵活性较强，可作为能源“公正转型”的有效示范，为后续动力煤等行业更大规模的转型积累经验。

在此基础上，报告提出了一套层次分明、循序渐进的策略体系。即近期应强化政府、企业、科研机构与社会资本的多元协同，合理配置转型资金，确保政策协同一致。“十五五”期间，以行业协会为抓手推动产能兼并重组与优化整合，遏制行业内卷。从中期看，应推动与河北、江苏等钢铁大省构建区域协同机制，携手应对转型挑战。长远而言，则需将焦化行业退出的经验系统性应用于支持动力煤行业的多元化、原料化转型，为国家能源安全保障前提下的煤炭产业整体升级“打头阵”。

总而言之，这是一项需通过科学规划、系统推进、多方协同方可实现的复杂系统工程。其成功实施不仅能为山西自身的绿色低碳高质量发展开辟新路径，也能为全国其他资源型地区 and 传统工业部门的转型，提供一套可分析、可设计、可操作的“山西方案”与借鉴范式。

报告撰写:

太原理工大学 经济与管理学院 寇静娜 副教授/博导
太原理工大学 经济与管理学院 韩云菲 博士研究生
太原理工大学 经济与管理学院 刘 琪 硕士研究生
太原理工大学 经济与管理学院 李凯翔 硕士研究生

项目支持:晋青可持续发展公益服务中心

特别致谢:王晓军 赵沛 白娟

图片提供:晋青 绿行太行

[引言]

煤炭资源按照用途可以大致分为冶金煤（焦煤）与动力煤两大核心品类，两类长期并行开发，从生产与消费总量来看，前者少后者多。其中，冶金煤作为炼焦原料，自工业革命以来支撑全球钢铁工业的持续发展，其高温干馏产生的焦炭是炼铁的必要还原剂，炼焦过程除二氧化碳排放外，还会释放苯系物、硫化物等污染物。动力煤则主要用于发电、供热等直接燃烧场景，刚性需求量大，热值高但碳排放强度也高。

正因如此，随着全球应对气候变化压力增大以及随之而来迈向清洁能源转型的加速，全球范围内逐渐削减并最终退出燃煤使用，在包括联合国气候大会等不同的国际舞台和场合上已得到不断重申甚至加强。其中，焦化行业由于其高碳排放和环境污染问题，面临比其他化石能源更大压力。许多国家和地区都在加强对焦化的环保监管，推动其进行技术改造升级，逐步淘汰落后焦化产能，推动产业向更加绿色、低碳、循环的方向发展。

当前，焦化行业主要集中于发展中国家，欧美等西方国家由于较早推进工业化和能源清洁化，且在数轮应对气候变化中扮演先锋者角色，均在不同程度的推动转型发展中退焦退煤的改革浪潮。即曾经发达的焦炭生产大国为了保护资源和环境，一方面普遍限制焦炭工业的发展，减少供给；另一方面鼓励采用新技术、新工艺替代焦炭，压缩需求。欧洲作为绿色能源积极倡导者尤为积极，目前当地钢铁行业已步入低碳转型的关键期，传统高炉—转炉模式正在大规模被电弧炉炼钢技术所替代。比如，塔塔钢铁英国公司在2024年3月和7月分别关闭了年产能100万吨的焦化厂和250万吨的5号高炉；安赛乐米塔尔在波斯尼亚和黑塞哥维那的泽尼察工厂也关停了焦化设施；奥地利奥

钢联也计划于2027年前关闭多纳维茨工厂的75万吨年产能4号高炉，并预计同年投产电弧炉^[1]。

中国是全球焦炭生产消费以及基础出口最大国，焦炭产量长期占据世界总量的六成以上^[2]，其中，国内的焦化行业主要集中于华北、华东及西北地区，尤其是山西、河北、陕西、山东、内蒙古等省（区），贡献了全国近四分之三的焦炭产量，产能布局既涵盖炼焦煤大省，也贴近钢铁主产区，形成了相对稳定平衡的供需市场与富有经济成本优势的商业环境。换言之，长期以来，焦炭行业与钢铁、化工等基础工业深度绑定，其原料供应直接影响整个产业链运行的稳定性，但与此同时，高排放、低附加值的结构性矛盾与全球减碳趋势形成了事实上的冲突。

山西省凭借丰富的煤炭资源、毗邻钢铁大省河北的地理优势以及发达的交通运输网络，聚集了众多焦化领军企业，是国内焦化生产的核心区域。2014至2023年间，山西年均焦炭产量超9000万吨，稳居全国首位；作为“煤焦电冶”支柱产业之一，焦化长期以来对山西经济社会发展与稳定发挥着重要作用，本地产业对其依赖性较高。除产量优势外，山西焦化产业在规模、工艺及设备方面均处于全国领先水平，产业链正从“煤—焦—钢”向“煤—焦—化”持续拓展延伸。然而，面对国内外高碳产业转型的增长压力与目标、日益严格的环保要求以及自身产业升级需求，焦化产业必须未雨绸缪，在国家及本省各级政策引导、资金扶持与技术创新的助力下，及早探索并逐步实现平稳转型的有效路径。与此同时，焦化行业的退出机制与路径创新，也将为动力煤产业链的低碳化改造提供经验借鉴——两者均需破解“去煤化”进程中能源保供、产业替代与就业承接的复合型难题。

捣固焦炉炉体全貌及停产的氢基竖炉

CONTENTS 目录

1

第一章 山西焦化产业概况

1.1 自然资源和储量	03
1.2 焦化的开采生产历史	05
1.3 焦化的开采生产现状	06

2

第二章 不可否认的贡献

2.1 经济贡献	11
2.2 社会贡献	16
2.3 焦化与钢铁的紧密关联	17

3

第三章 势在必行的转型

3.1 不容忽视的压力	19
3.2 势在必行的转型	23

4

第四章 山西焦化“退出”的可行性路线图

4.1 山西焦化“退出”的情景分析	29
4.2 山西焦化“退出”的路线图	36
4.3 山西焦化“退出”的路径分析	38
4.4 转型案例	41

5

第五章 从焦煤“退出”获得的经验

5.1 宏观形势迫使转型应对大幅提前	43
5.2 化石能源转型窗口期前的时空红利	44
5.3 加速探索方能更高效突破发展瓶颈	44
5.4 成为能源公正转型的有效示范路径	45

6

第六章 结论与政策建议

6.1 从当前来看，合理运用有效政策与转型资金	47
6.2 短期来看，“十五五”期间优化整合焦化项目	48
6.3 中期来看，与国内钢铁大省区域间协同联动	48
6.4 长远期来看，为动力煤的多元化转型打头阵	49

参考文献

01

山西焦化产业概况

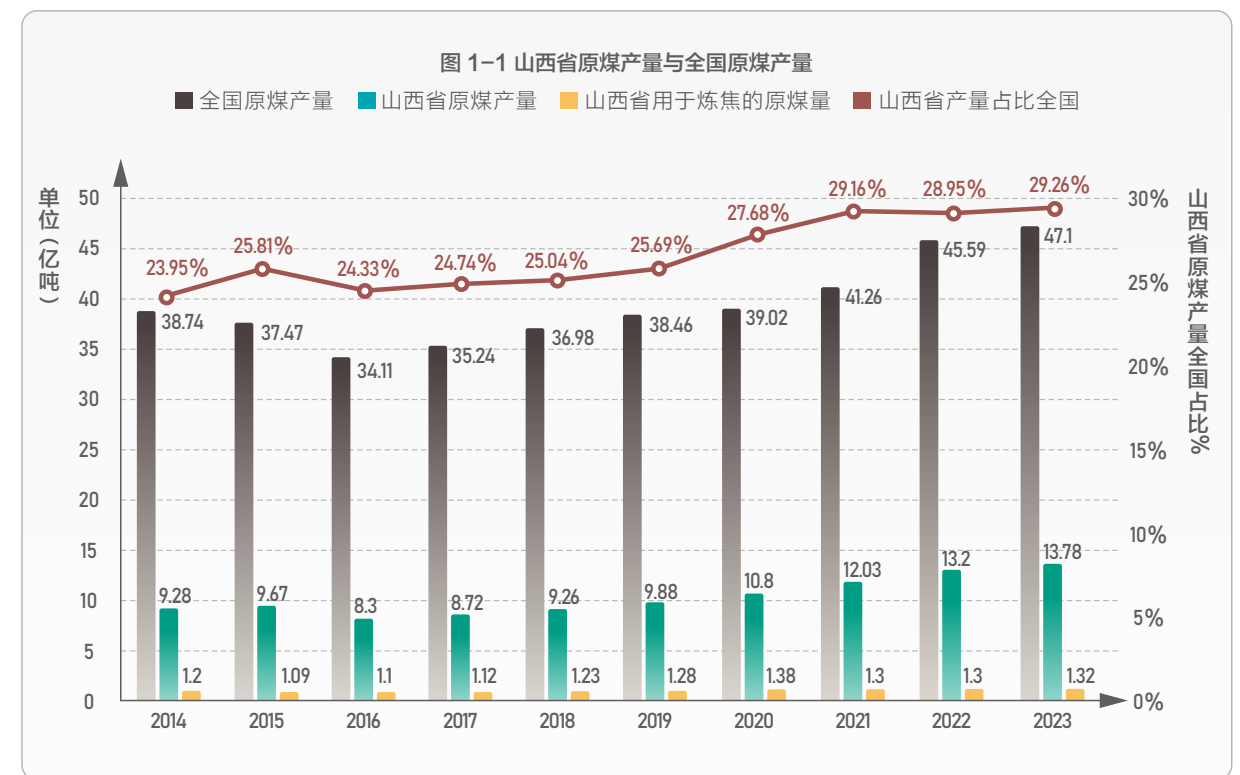
- 1.1 自然资源和储量
- 1.2 焦化的开采生产历史
- 1.3 焦化的开采生产现状

第一章 山西焦化产业概况

1.1 自然资源和储量

自“十四五”规划实施以来，全国煤炭产能新增近6亿吨。同期，原煤产量持续攀升，2021年突破41亿吨，2022年再创新高至45亿吨，2023年进一步增至47.1亿吨，年均增长率达4.5%。山西省作为中国煤炭大省，煤炭资源丰富，产业结构呈现“一煤独大”的特点，其煤炭资源覆盖从长焰煤到无烟煤的完整变质序列，煤种齐全且煤质优良。据统计，山西省含煤地层面

积达61050平方公里，占全省总面积的39.1%；全省118个县、市、区行政单元中，94个分布有煤炭资源，占比高达80%^[3]。根据山西省政府2024年工作报告，2023年该省煤炭产量在连续两年每年增产超1亿吨的基础上，再增产5743万吨，总量达13.78亿吨^[4]（产量对比如图1-1所示）。如此丰富的煤炭资源，为山西省焦化产业的发展提供了得天独厚的条件。



数据来源：《中国统计年鉴（2015—2024年）》

山西省的煤炭资源不仅储量庞大，更以得天独厚的禀赋与上乘的品质著称。省内炼焦煤煤种齐全，涵盖主焦煤、肥煤、气煤、瘦煤等多个品类，各煤种特性鲜明，可适配不同的焦炭生产需求。其中，主焦煤与肥煤结焦性能优良，是生产一级焦、二级焦及铸造焦的核心原料；气煤和瘦煤则适用于配煤炼焦、配型煤炼焦、捣

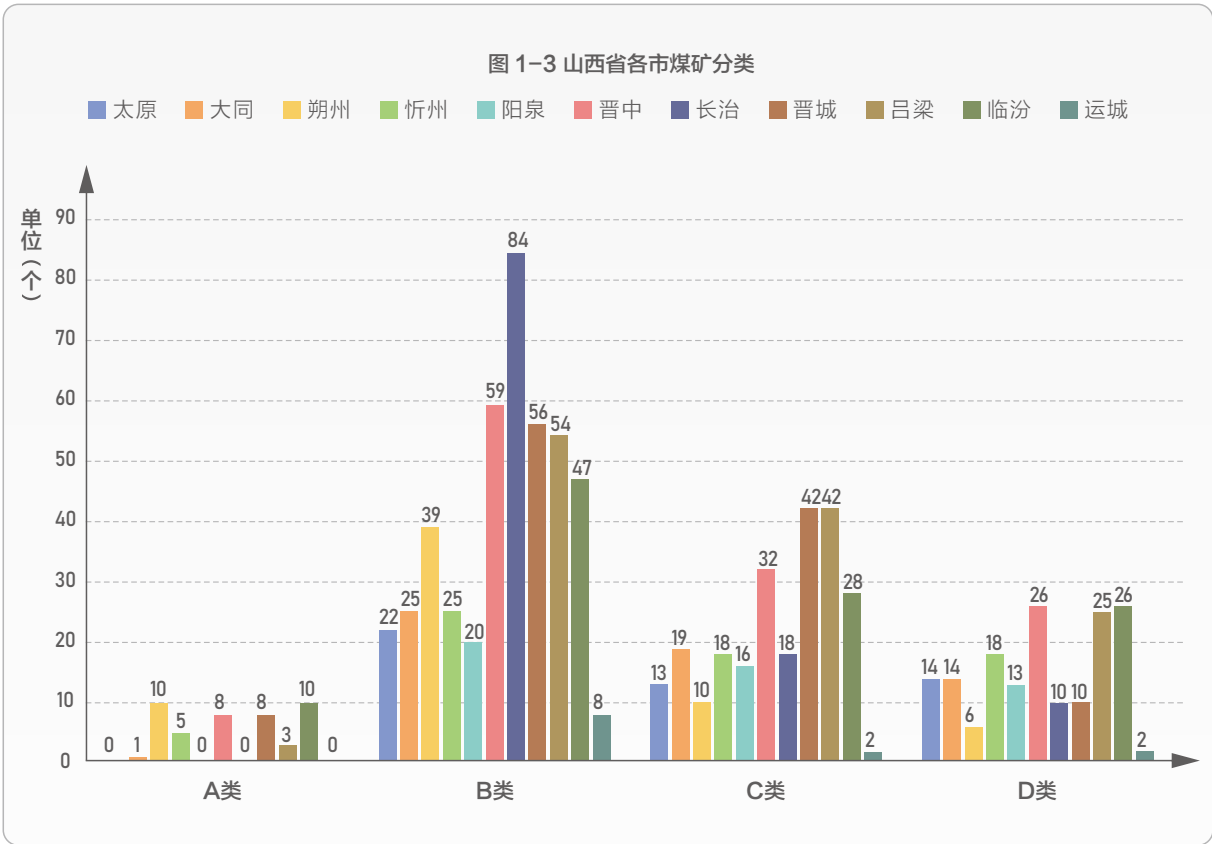
固炼焦等^[3]多种工艺场景。山西省煤炭资源分布广泛，从北至南、自西向东依次分布着大同、宁武、河东、西山、霍西、沁水六大煤田（地理位置如图1-2所示），这些煤田不仅储量丰富，而且煤质优异，为省内焦化产业的发展提供了稳定可靠的原料保障。

截至2024年，山西省共有煤矿888座，其中安全保障程度较高的A类煤矿45座、安全保障程度一般的B类煤矿439座、安全保障程度较低的C类煤矿240座、长期停产停建的D类煤矿164座^[5]。全省已累计建成118座智能化煤矿与1491处智能化采掘工作面，所有重要作业地点均实现“无监控不作业”，先进产能占比超80%，位居全国第一梯队。在资源禀赋方面，山西拥有790亿吨全国稀缺的炼焦煤资源，其中作为炼焦骨架煤种的优质焦煤产量占全国总产量的57.8%，是进口煤及国内其他省份焦煤难以替代的核心资源。炼焦煤生产直接关联冶金、煤化工等重工业部门，以及部分电力、城市煤气等行业，对国家工业体系的长远发展与人民生活均具有重要意义。据统计，2023年山西省炼焦煤产量达7.3亿吨，占全国炼焦煤总产量的55%。

除先天丰富的煤炭资源外，山西省的焦化产业还受益于优越的地理位置——地处华北地区中心地带，与多个消费省份相邻，跨区域交通便利，为焦炭产品的外运和销售提供了有利条件。



图 1-2 山西省六大煤田分布



数据来源: 山西省安全生产委员会办公室

1.2 焦化的开采生产历史

山西省焦化行业的开采生产历史源远流长，其发展历程见证了山西乃至中国工业化的进程。从古代的土法炼焦到现代的机械化生产，再到新时代的绿色发展与创新，山西焦化产业不断升级改造，已基本跻身行业领先行列。

炼焦煤是焦炭的重要原材料。山西用煤炼焦的历史可追溯至唐宋时期，当时人们已掌握初步的焦化技术。据考古发现，1978年在稷山县马村林今墓中出土的焦炭，与现代炼焦产品无异，证明古代山西人至迟在宋代就已普遍使用煤进行炼焦，主要用于取暖、烹饪及简单的金属冶炼^[6]。到了近代，山西的“土法炼焦”技术已相当普遍，当地人利用简陋设备对煤进行高温处理，生产出俗称“蓝炭”的焦炭。这种焦炭虽质量不高，但已能满足当时钢铁冶炼和化工生产的基本需求。

20世纪初，随着工业革命的推进和钢铁工业的兴起，焦炭需求量急剧增加。山西作为中国煤炭资源最丰富的省份之一，自然成为焦化产业的重要基地。1932年，阎锡山创办的西北实业公司开始筹建西北钢铁厂，并成立炼焦部；1937年秋，该公司建成恒塞尔曼式36孔炼焦炉一座，这是山西第一座机械化焦炉。然而，由于日本侵略者的霸占，这座焦炉未能及时投产，直到1940年10月，日本侵略者为扩大侵略战争，才将这一焦炉投入生产。抗战胜利后，这一机焦炉被西北实业公司钢铁厂接收，并于1946年开始生产焦炭。

新中国成立至改革开放初期，随着国民经济的恢复和发展，在国家政策支持与市场需求增长的推动下，山西焦化产业进入快速发展期。20世纪50年代，太钢、临汾钢铁等大型国企配套焦化厂相继建立，引入红旗焦炉等机械化设备，初步形成规模化生产体系。其中，1958年“大跃进”时期，为满足全国钢铁产能扩张需求，山西焦炭产量激增，但粗放式生产导致资源浪费与环境污染问题初现，为后续生态治理埋下隐患。1969年，山西焦化正式启动筹建，成为当时省内最大的开工项目之一；1979年1月，第一座焦炉成功出焦；1981年10月，第二座焦炉投产；1982年1月，化肥系统进入试生产，同年12月通过竣工验收^[6]。这些项目的成功投产，标志着山西焦化产业进入新的发展阶段。

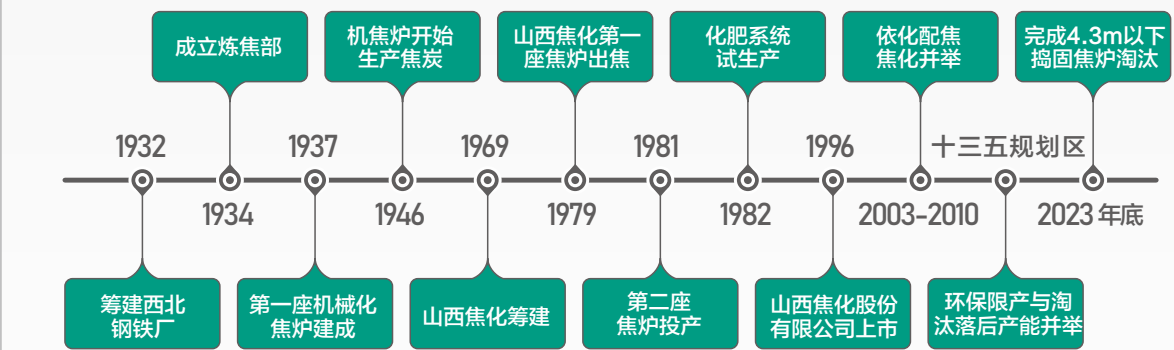
改革开放后，政策放宽催生了乡镇焦化厂的爆发式增长。20世纪80年代起，省内各地涌现出大量中小型民营焦化企业，普遍采用萍乡炉等改良型焦炉，产能快速

扩张却伴生技术落后、管理粗放等问题。焦化厂密集分布于汾河流域，废水、废气无组织排放导致区域空气质量、土壤与水质急速恶化，环保事件频发，生态环境压力急剧上升。与此同时，焦炭出口成为山西外汇创收支柱，但“挖煤—炼焦—卖焦”的低附加值模式使产业陷入路径依赖，未能形成高价值产业链。

进入21世纪，山西焦化行业迎来政策强监管时代。2004年启动的“焦化行业专项清理整顿”大规模淘汰土焦炉、改良焦炉，推动机焦炉占比提升至80%以上；2008年北京奥运会前夕，环保压力倒逼汾河沿线数百家不达标焦化厂关停，行业首次系统性加装脱硫、除尘设施；2011年《山西省焦化行业兼并重组实施方案》出台后，部分焦化龙头企业通过兼并重组扩大规模，产业集中度显著提升，但环保技术升级仍滞后于产能扩张速度；2016年中央环保督察组进驻山西，焦化行业超低排放改造（脱硫脱硝、VOCs治理）全面铺开；2018年实施《山西省焦化产业打好污染防治攻坚战推动转型升级实施方案》，新建项目需通过淘汰旧产能实现置换；2020年后，部分企业开始探索焦炉煤气制氢技术，尝试向新能源领域转型。

此后，为落实国家焦化行业产能结构调整任务，山西省持续出台针对性去产能政策，但初期落后产能政策执行力度未达预期。2021年12月，中央生态环境保护督察组在对山西省贯彻落实中央生态环境保护督察报告整改方案的反馈中指出，涉及山西省晋中、吕梁、太原、运城、长治、临汾六地区的新建产能因审查未通过需进行整改，未来新产能投产进度因此放缓。党的十八大以来，山西省加大焦化行业整改力度，在优化产业布局的同时着力提升装备水平，推动本省焦化产业持续转型升级。整体来看，“十三五”规划期间，焦化产业环保限产与淘汰落后产能同步推进，但落后产能淘汰任务未完成；“十四五”规划期间，尚未完成落后产能淘汰的山西省将继续推进产能结构升级，以环保限产为抓手，引领焦化产业转型发展。

图 1-4 山西焦化产业发展历史



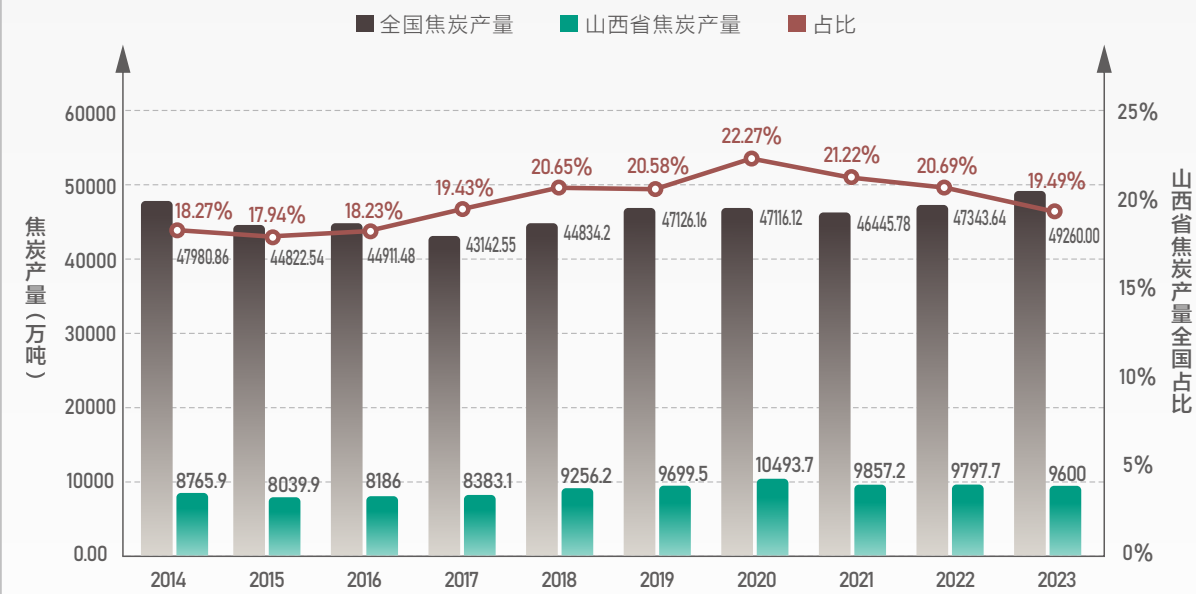
1.3 焦化的开采生产现状

1.3.1 焦炭产量、产能与产业结构

依托丰富的优质炼焦煤资源，山西省长期以来一直是全国最大的焦炭生产供应基地。根据国家统计局及行业报告数据，尽管近年来焦炭产量略有波动，但山西省始终保持着较高的产量水平。2014至2023年，该省焦炭年均产量达9516万吨，位居全国第一^[7]。其中，产量

自2015年起逐年攀升，2020年达到近期峰值10493.7万吨，此后逐年回落。2023年，全国焦炭总产量约为4.93亿吨，山西焦炭产量约9572万吨，占比约20%，其重要地位由此凸显^[8]（如图1-5所示）。

图 1-5 山西省焦炭产量与全国焦炭产量



数据来源：《中国统计年鉴（2015—2024年）》

从焦炭产能分布来看，山西省的焦炭产量主要集中于晋南与晋西南地区，但产能整体较为分散。其中，吕梁是全省最主要的焦炭生产地区，焦炭产量居全省首位，2024年吕梁焦炭产量达2199.8万吨，占全省总产量的23.9%。长治和运城的焦炭产量分别为1671.8万吨和1402.2万吨，临汾、太原等地的焦炭产量也均超过1000万吨。总体而言，省内焦炭产能分布零散，难以形成集聚优势，具体分布情况如图1-6所示。

山西焦化行业以独立焦化企业为主，产业结构相对

图 1-6 山西省焦化产能分布图
(个数仅表示多少，不精确代表产量)



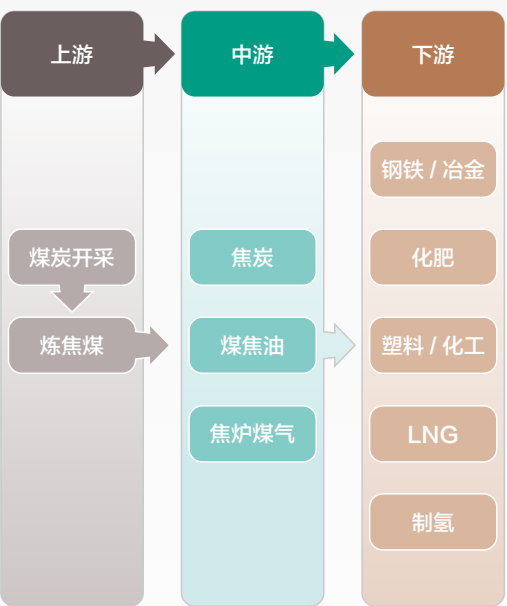
1.3.2 焦化产业的主要参与方

山西省焦化产业是山西经济版图中的支柱产业之一，其核心参与方涵盖焦化产业链上下游企业、行业协会、地方政府及相关职能部门，各方在政策执行、技术升级与市场协同中形成相互影响的动态平衡：焦钢企业与行业协会作为“市场参与者”，依托长协机制稳定产业链供需关系，搭建煤焦钢协同供需平台以促进资源高效配置；地方政府作为“转型推动者”，主导产业结构的优化与绿色升级；职能部门与环保机构则担任“政策调控者”，通过推广干熄焦、氢冶金等低碳技术并强化超低排放监管，驱动行业提质革新。

具体而言，焦化产业链上的企业是产业协同的执行主体。该产业链主要由上游原料供应、中游焦化生产及

单一，目前已基本形成“煤—焦—钢”完整产业链条，且正朝着多元化、绿色化方向延伸。依托山西丰富的煤炭资源优势，焦化企业拥有充足的原材料供应，部分企业煤焦业务协同发展，钢焦联合企业产能占比达14.9%。该行业下游需求主要来自钢铁企业，山西省内钢铁需求较为旺盛；同时，随着焦化副产品精深加工水平的提升，焦化企业的下游用户持续增加，“煤—焦—化”产业链条逐步延伸，产业结构如图1-7所示。

图 1-7 山西省焦化产业链



下游产品应用等环节构成：上游包括煤矿开采与焦煤供应，中游为焦化厂开展焦炭及其他化工产品的生产，下游则覆盖钢铁、有色、化工等多个行业。

产业链上游以山西焦煤集团、美锦能源等国有及民营龙头企业为核心，形成稳定的原料供给体系。这些企业通过长协机制锁定焦煤供应量与价格，年供应优质炼焦煤超亿吨，其原料质量直接决定焦炭强度、热反应性等关键指标。例如，山西焦煤集团借助智能化配煤技术，将焦炭质量波动率控制在3%以内，显著提升了下游钢厂的生产效率。

中游焦化企业是产业转型的主体实施者。以吕梁、临汾等产业集聚区为代表，企业通过技术迭代实现环保

与效益的兼顾。截至2023年，全省先进焦化产能占比达72%，环保设施投入年均增长15%，推动行业从“黑笨粗”向“绿智精”转变。

下游钢铁、化工企业通过需求升级反向驱动产业革新。太原钢铁集团等特钢企业对焦炭热强度（CSR≥65%）、硫分（≤0.7%）的严苛标准，倒逼焦化企业建立全流程质量管控体系；同时，氢能、石墨电极等新兴领域催生了焦化副产品高值化利用需求，如焦油深加工制备针状焦的附加值提升超5倍。下游客户通过订单绑定、技术合作等方式，与焦化企业形成深度利益共同体，构建起“需求定制-技术响应价值共享”的闭环链条。

此外，山西省各级政府是推动产业发展的主导力

1.3.3 焦化产业的升级改造

为落实《打赢蓝天保卫战三年行动计划》及国家焦化行业高质量发展要求，作为全国焦炭产量第一大省的山西省，亟需破解产业集中度低、装备水平落后、环境污染重等结构性矛盾。国家发展改革委明确要求：2019年底前淘汰4.3米及以下焦炉，2021年5.5米以上先进产能占比需达60%以上，以实现污染物排放量较2018年下降40%的目标。2018年，山西省承诺“三年内全面淘汰落后焦炉”，但实际执行初期，落后产能政

量。近年来，面对中央政府对环境保护的严格要求与巨大压力，政府承担起推动焦化产业整改的重任。相关厅局机构作为落实环保政策的关键部门，在执行环保指标、加速淘汰落后焦化产能的同时，还需竭力保障全省经济社会的稳定运行，压力巨大。例如，省生态环境厅通过制定严苛的污染物排放标准、开展常态化环保督查，倒逼落后产能退出；省能源局聚焦能源结构优化，推动焦化企业实施干熄焦、余热回收等节能技术改造；省工信厅主导产业升级规划，通过产能置换政策引导企业向大型化、集约化方向转型。地方政府也通过“关小上大”等政策工具，在淘汰4.3米以下焦炉的同时，统筹保障区域经济平稳过渡。

策的执行力度相对不及预期。2019年，该省将4.3米焦炉淘汰时间延后至2020年至2021年，5.5米以上焦炉产能占比达60%的时间节点由2021年调整至2022年。截至2023年10月底，山西省已全部完成4.3米捣固焦炉淘汰工作，在产及新建焦炉炉型均为5.5米及以上大型焦炉，污染物排放全面达到特别排放限值标准。相关政策如表1-1所示。

表 1-1 焦化产业升级调整相关政策

	发布日期	发布部门	政策名称	内容要点
国家	2021年1月	中国炼焦协会	《焦化行业“十四五”规划》	进一步化解过剩产能，到2025年焦化废水产生量减少30%，氮氧化物和二氧化硫产生量分别减少20%；优化固体废弃物处理工艺，固体废弃物资源化利用率提高10%以上
	2021年12月	工信部、科技部 自然资源部	《“十四五”原材料工业发展规划》	研究推动焦化等重点行业实施超低排放
	2022年2月	工信部、发改委 生态环境部	《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》	“十四五”时期，继续统筹焦化行业与钢铁等行业发展，引导焦化行业加大绿色环保改造力度
	2022年8月	生态环境部	《黄河生态保护治理攻坚战行动方案》	要推动焦化、钢铁等重点行业实施清洁生产改造，实施“双高双优高耗能”企业强制性清洁生产审核
	2023年11月	国务院	《空气质量持续改善行动计划》	到2025年全国地级及以上城市PM2.5浓度下降10%，焦化行业作为重点行业之一，需推进实施超低排放改造

国家	2024年1月	工信部、发改委 生态环境部	《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》	到2025年底前，重点区域力争60%焦化产能完成改造；到2028年底前，重点区域焦化企业基本完成改造，全国力争80%焦化产能完成改造
	2024年12月	生态环境部 国家市场监督管理总局	《炼焦化学工业大气污染物排放标准》	大幅收紧了颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等有组织排放限值；首次系统性地增加了对无组织排放（如VOCs逸散）的控制要求；规范了污染物监测和达标判定方法
山西省	2017年9月	省委、省政府	《山西省焦化行业中央环境保护督查问题整改工作方案》	2020年底前，炭化室高度5.5米以上焦化产能产比达50%以上
	2018年9月	省政府	《山西省焦化产业打好污染防治攻坚战推动转型升级升级实施方案》	自2019年10月1日起，全省焦化企业全部达到环保特别排放限值标准，主要污染排放物指标较2015年下降40%以上；到2020年，炭化室高度5.5米以上焦炉产能占比达到50%以上
	2019年4月	省工业和信息化厅	关于印发山西省焦化产业高质量绿色发展三年行动计划的通知》	2019年10月1日起，全省焦化企业全部达到环保特别排放限值标准
	2020年4月	省政府	《山西省焦化行业压减过剩产能大气污染防治攻坚战行动方案》	2019—2020年压减4027万吨产能，确保全省焦化总产能降至14768万吨以下，实施焦化行业三年升级改造行动，力争到2022年，先进产能占比达60%以上
	2021年4月	省政府	《山西省“十四五”14个战略性新兴产业规划》	加快构建煤—焦—煤焦油沥青—沥青基碳纤维—碳纤维复合材料等具有全国比较发展优势的产业链条，打造晋东南、晋中、晋北碳基新材料集聚区，建设国家级碳基新材料产业研发制造基地
	2022年7月	省政府	《关于推动焦化行业高质量发展的意见》	2023年底前，全面实现干法熄焦，完成超低排放改造，全面关停4.3米焦炉以及不达标超低排放标准的其他焦炉；新建焦化升级改造项目；各设区市城市建成区及周边20里范围内的现有焦化企业按规定时限实施环保深度治理；2025年，全行业能耗总量和能耗强度较2020年实现“双下降”，焦化企业全面迈过“生存线”，力争30%以上企业达到“发展线”
	2022年10月	省政府	《关于进一步释放消费潜力促进服务业加快发展若干措施的通知》	推广纯电动、甲醇和氢燃料电池重卡在矿山、钢铁、焦化、工业园区等相关领域应用
	2022年12月	省人大常委会	《山西省数字经济促进条例》	围绕煤炭、焦化、煤化工、钢铁、装备制造等传统优势产业，推广数字技术融合应用，提升工业企业数字化水平
	2023年6月	省发改委 省工信厅 省能源局	《推进煤炭和煤化工一体化发展的指导意见》	依托清徐经济开发区、安泽经济技术开发区、孝义经济开发区等焦化相对集中的园区，加快发展高纯氢、合成氨、LNG、己二酸、锦纶纤维、聚甲氧基二甲醚等产品
	2024年5月	省生态环境厅	《关于推动焦化行业水污染治理提质增效的通知》	严格落实焦化废水零排放规定，采用先进的废水处理工艺，实现废水的全循环利用

02

不可否认的贡献

- 2.1 经济贡献
- 2.2 社会贡献
- 2.3 焦化与钢铁的紧密关联

第二章 不可否认的贡献

山西作为中国煤炭资源的核心产区，煤炭市场主要分为动力煤与冶金煤两大类，二者因煤种特性与加工用途的差异分属不同领域：动力煤是支撑电力、化工等行业稳定运行的基础能源，而作为冶金工业“粮食”的焦炭（即冶金煤），则是钢铁行业生产不可或缺的必需品。尽管同属煤炭范畴，但由于使用目的与市场需求不同，两者的价格机制并不完全一致，却共同推动并支撑着山西区域经济向规模化、集群化方向发展。

具体而言，动力煤是用作动力原料的煤炭，利用其燃烧发热的特性，主要满足火力发电、机车牵引、锅炉

燃烧等动力需求，其次也应用于水泥生产等建材制造领域，是目前煤炭最主要的用途。焦煤则是煤化度较高、结焦性优良的烟煤，在炼焦过程中能形成热稳定性出色的胶质体，进而生产出块度大、裂纹少、抗碎强度高的焦炭。焦炭主要用于高炉炼铁和有色金属冶炼，充当还原剂、发热剂与料柱骨架，此外还应用于电石生产、气化及合成化学等领域。据统计，全球90%以上的焦炭产量用于高炉炼铁，冶金焦炭已成为现代高炉炼铁技术必备的原料之一^[9]。山西省焦化行业的重要地位与贡献，主要体现在对地方经济、社会发展及产业链延伸等方面。

表 2-1 动力煤与焦炭对比

资料来源: 笔者自行整理

项目	动力煤	焦炭
定义	用作动力原料的煤炭	经炼焦煤高温干馏转化而成
形成过程	经地质作用自然形成	人工加工，煤高温干馏
外观	多种形态，如褐煤、长焰煤等	质硬、多孔、银灰色，具金属光泽
热值	较低，通常17~27MJ/kg	高发热量，一般26380~31400kJ/kg
用途	发电、锅炉燃烧、机车推进等	炼铁、炼钢、铸造、化工等

2.1经济贡献

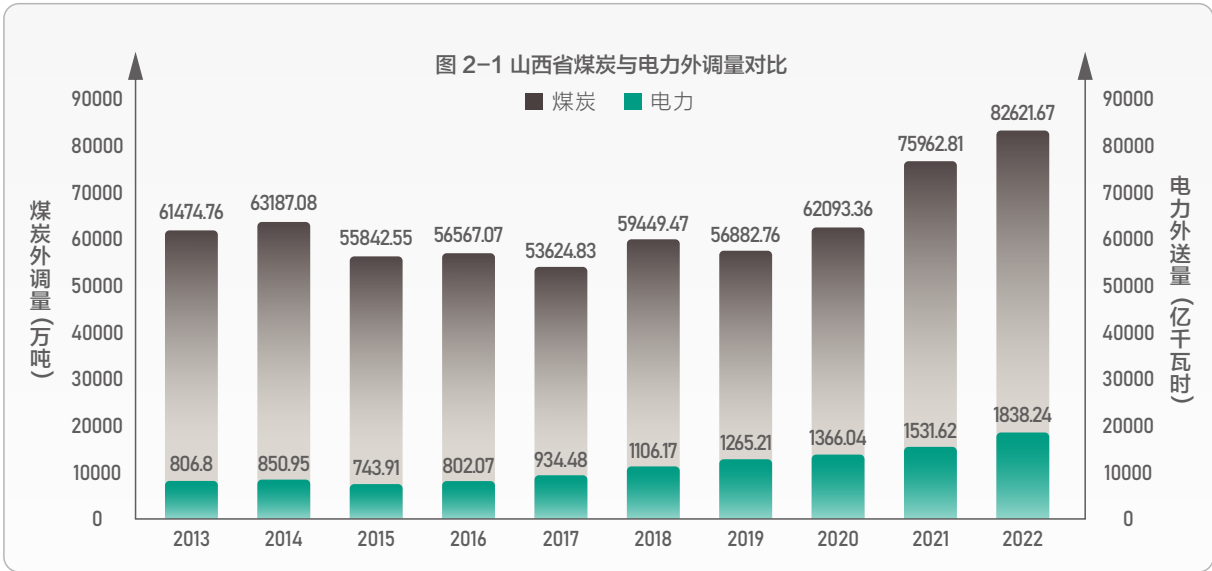
2.1.1 动力煤的贡献

山西省是动力煤的重要产区，动力煤产量远高于焦炭产量。以2023年为例，山西省原煤总产量约13.7亿吨，其中超六成被用作动力煤，从开采、加工到运输、销售，每一个环节都直接或间接拉动了经济增长。例如，加工过程中的洗选、配煤等环节，不仅提升了煤炭质量，还通过延伸产业链，带动了相关机械制造、化工原料生产等产业发展；在运输和销售环节，既推动了物流业发展，又通过市场交易为地方经济注入了活力。

同时，动力煤出口，尤其是外送业务，也在一定程度上增加了山西的相关收入。具体来看，山西的煤炭铁路运输通道可分为北、中、南三大通道及南北向主要集运干线——南北同蒲线，形成了“丰”字型铁路煤炭运

输网络。其中，北通道以动力煤运输为主，晋北地区的大部分煤炭通过北通道运往京津冀、东北、华东地区，以及秦皇岛、京唐、天津、黄骅等港口，是山西煤炭外运的主要通道^[10]。



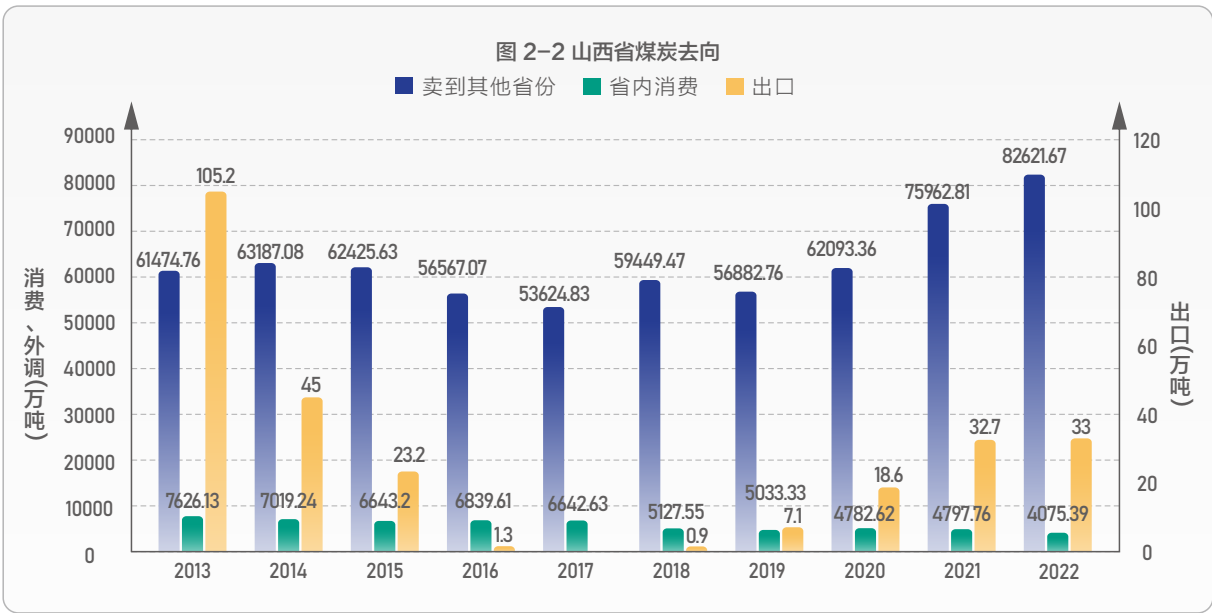


数据来源:《山西省统计年鉴(2014—2023年)》

煤从空中走,电送远方去。除煤炭直接外送外,电力外送是山西省能源外送的另一重要形式。近年来,山西电网实现高速发展,不仅规模位居全国前列,技术装备与安全运行水平也跻身国际先进行列。电力可直接输送至用户端,无需先将煤炭运往用户端再燃烧发电。目前,山西省已建成投运晋北、晋中交流特高压及晋北±800千伏直流特高压,全线贯通500千伏外送通道,基本形成“三交一直特高压+14回500千伏外送通道”的格局,成为连接华北、华东、华中三大区域的省级电网,也是国家“西电东送”“北电南送”与特高压“三交四直”输电通道的汇集点。其年外送电量占全省发电量的

三分之一,外送能力超3000万千瓦。2023年,晋电外送省份扩展至23个,全年外送电量再创新高,达1576亿千瓦时,同比增长7.67%,相当于输送标煤4869万吨,减排二氧化碳1亿多吨,可满足5300万户居民一年的用电需求^[11]。

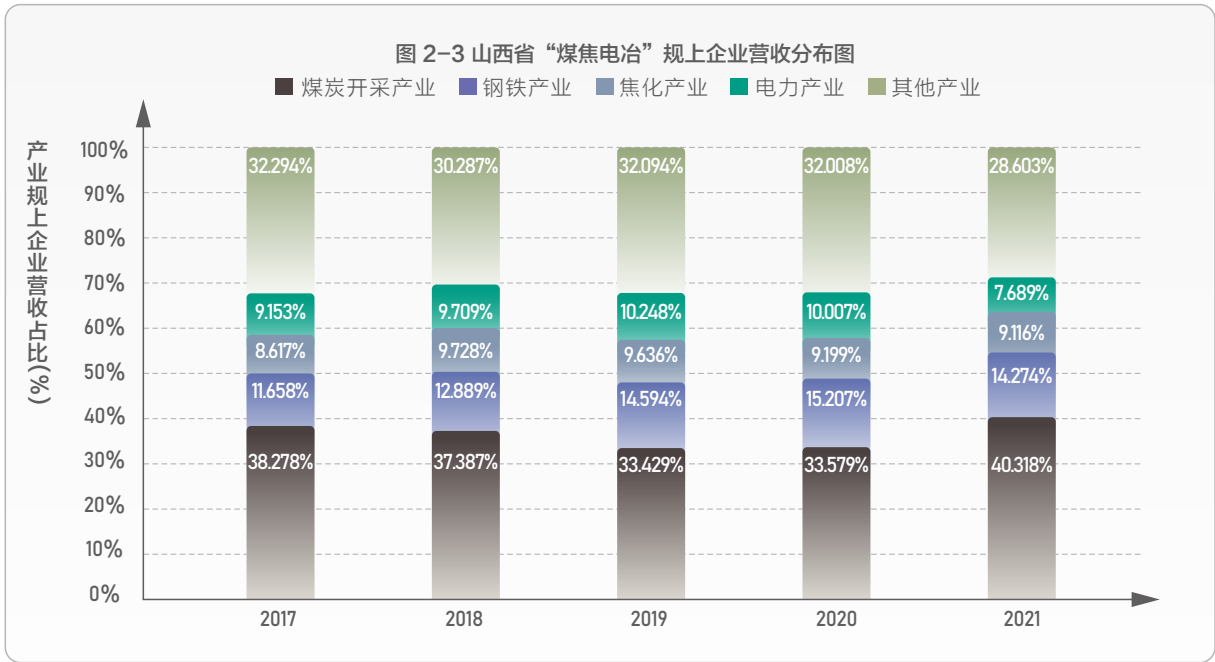
除供应国内市场外,山西动力煤还出口至国际市场。凭借丰富的煤炭资源与优良的品质,山西动力煤在国际市场具备较强竞争力,主要销往东南亚、南亚、中东等煤炭需求旺盛的国家和地区。此外,山西积极与国外煤炭进口商、港口运营商等开展合作,共同推动煤炭贸易发展,以满足更多国家和地区的能源需求。



数据来源:《山西省统计年鉴(2014—2023年)》

2.1.2 焦煤的贡献

山西省的焦化企业合计焦炭产能约1.14亿吨,占全国焦化总产能的20.48%,位居全国第一。换言之,作为山西省的传统产业,焦化产业是山西省经济发展的重要组成部分,从对GDP的贡献来看,不仅通过直接的产值增加GDP,还通过上下游产业链的延伸,如煤炭开采、钢铁冶炼、化工原料生产等,间接促进GDP的增长,但近年来实际支撑作用在持续降低。根据统计数据,“煤焦电冶”规上企业营收占据山西省规上工业企业营收的70%,2021年山西省焦化产业规上企业营业收入达到307亿元,占全省规上工业企业营业收入的9.1%,仅次于煤炭和钢铁产业,虽然常年位居全省工业营收前四,与电力产业相差不大(如图2-3所示),不过相比较煤炭等其他工业仍占比较小^[8]。

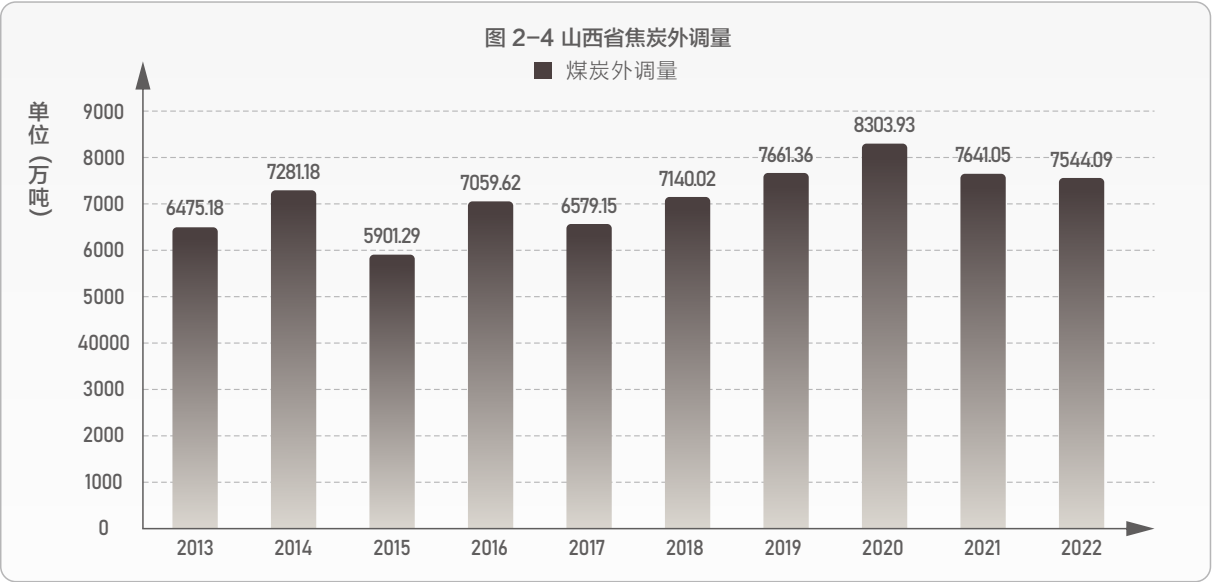


数据来源:《山西省统计年鉴(2018—2022年)》

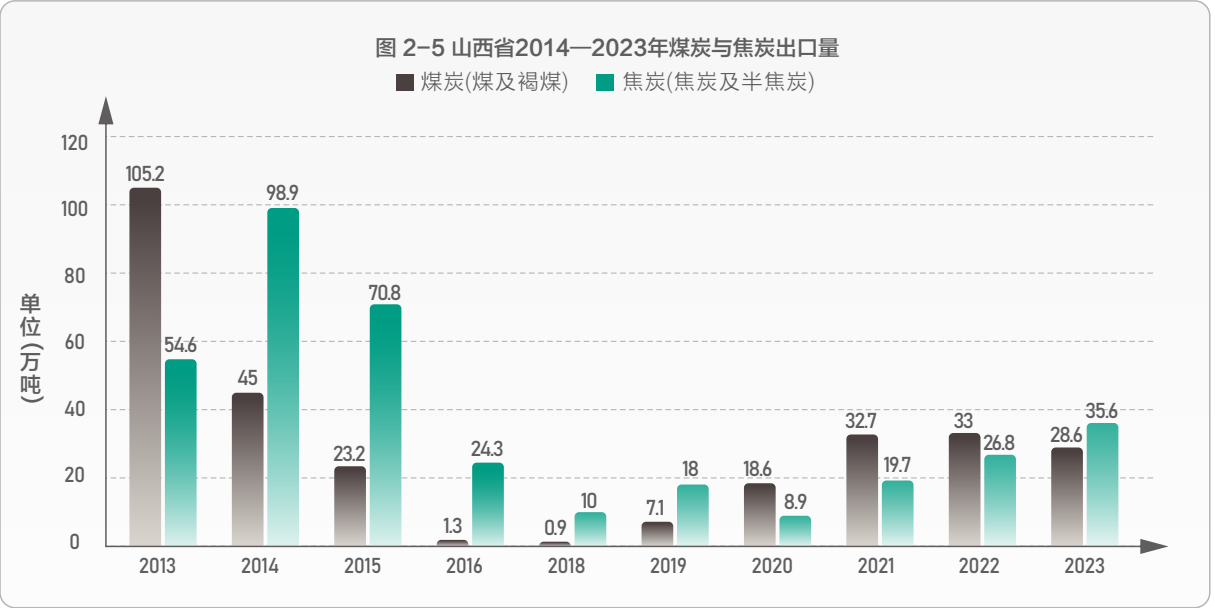
除部分自用外,山西焦化产品主要销往国内外钢铁产业发达地区。在国内市场,其产品销售集中于华北、华东和东北地区,山西省焦炭外送量详见图2-4。作为中国钢铁大省,河北拥有众多大型钢铁企业,对焦炭需求旺盛;同时,山西与河北地理位置相邻,运输便利,这使得山西焦炭在河北市场占据重要地位。据《山西焦化行业高质量发展专报》显示,2024年山西省销往河北的焦炭约3000万吨,占河北需求量的57.7%,占山西焦炭产量的32.6%,河北是山西焦炭的最大省外需求地。北京和天津的钢企数量虽相对较少,但两地工业基

础雄厚,对焦炭仍有一定需求,依托便捷的交通网络,山西焦炭可快速响应这些地区的市场需求。此外,山东、辽宁同样是中国钢铁工业的重要基地,对焦炭需求较大。

在国际市场上,山西焦化产品尤其在印度尼西亚、日本、印度等国家获得认可,特别是特级冶金焦,凭借高强度、低灰分、低硫分等特性,已成为国际钢铁工业的重要原料^[12]。统计数据显示,2023年全省出口煤及褐煤28.6万吨,较上年下降13.4%;出口焦炭及半焦炭35.6万吨,同比增长32.7%^[13],具体数据见图2-5。



数据来源：《中国统计年鉴（2014—2023年）》

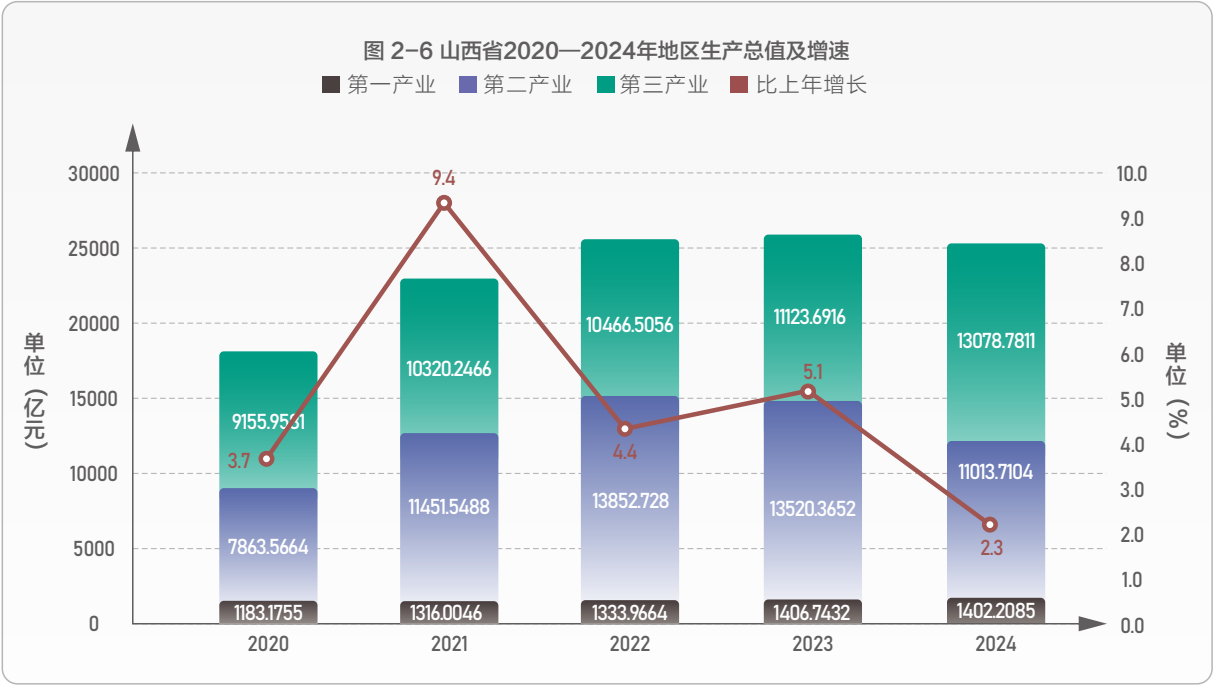


数据来源：山西省2013—2023年国民经济和社会发展统计公报（由于官网缺乏2017年公报，故未统计）

由上可知，焦化产业在山西地方经济中始终占有一席之地，不仅如此，2023年，山西省地区生产总值达2.57万亿元，比上年增长5%。其中，焦化行业作为钢铁工业的核心上游，焦炭年产量超1亿吨（占全国约20%），保障了本省及周边钢铁企业原料供应，为装备制造等制造业8.1%的增长奠定基础。同时，焦化行业还衍生出甲醇、苯、焦炉煤气等化工原料，支撑合成纤维、新能源电池材料等战略性新兴产业发展，直接关联新兴产业10.9%的增速。

但必须意识到，整体形势并不乐观，近几年山西省GDP增速在持续下降（如图2-6），工业产业呈低迷态

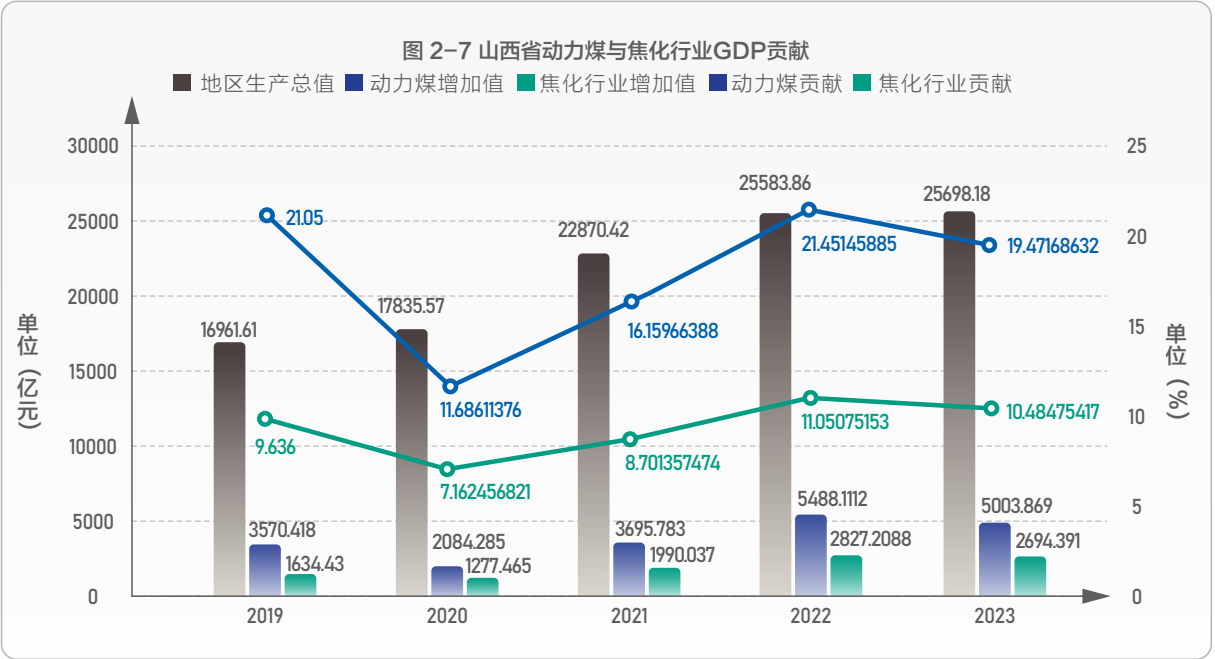
势，焦化也不例外。据山西省统计局发布的数据，2024年全省地区生产总值为25494.69亿元，按不变价格算，比上年增长2.3%，其中，第一产业（农业、林业、牧业、渔业等）增加值为1392.48亿元，增长4.0%；第二产业（煤炭、焦化、电力等能源产业）增加值为11021.46亿元，增长1.8%，占地区生产总值比重为43.2%；第三产业（服务业、金融业、旅游业等）增加值为13078.74亿元，增长2.4%，占地区生产总值比重为51.3%，由此看出，第三产业占比已经超过一半，第二产业虽然仍是山西省的支柱产业，但增幅和占比均已低于第三产业。



数据来源：《山西省国民经济和社会发展统计公报（2020—2024年）》

更进一步来看，2024年，山西省地区生产总值（GDP）为25494.69亿元，焦化行业工业增加值增速全年累计下降0.4%，全行业实现营收2356亿元，同比下降约12%，实现利润负69.3亿元，同比增亏约31亿元。基于此，笔者通过统计年鉴，以地区生产总值与分行业增加值为基础，粗略计算得出山西省动力煤与焦化

行业GDP贡献（如图2-7），可以看出，焦化行业GDP贡献在10%上下浮动，仅为动力煤的一半。总的来说，焦煤虽然经济贡献不小，但仍然远低于动力煤的贡献，逐步削减产量并不会造成剧烈冲击或负面影响。



数据来源：基于《山西省统计年鉴（2020—2024年）》综合测算

2.2 社会贡献

在数十年的发展历程中，山西省焦化行业为社会的和谐稳定发展作出了积极贡献，不仅为当地居民提供了大量就业机会，缓解了就业压力，还在参与社会公益事业方面发挥了重要作用。山西省焦化行业属于劳动密集型产业，企业主要分布在吕梁、临汾等地。据2023年7月最新统计数据，全省焦化行业企业数量约63家，相关行业直接就业员工数经初步估算已超30万人。

除直接就业岗位外，焦化行业还涵盖了规模可观的生产工人、技术人员、管理人员，以及维修、质检、销售等辅助岗位。通过深加工转化，煤焦油、粗苯等化工副产品的生产过程进一步催生了衍生岗位，有效扩大了就业规模。这些焦化企业各具特色、规模不一，从大型现代化工厂到中小型专业生产企业，共同构成了山西省焦化行业多元化的发展格局。其中，重点焦化企业在经济发展、环境保护、转型升级及社会责任等多方面发挥着关键示范作用，值得重点关注。

其一，山西焦煤集团（简称山西焦煤）。该集团组建于2001年，是省属国有独资企业，也是全国最大的炼焦煤生产与市场供应商。2020年，山西焦煤与山煤集团实施联合重组，下设西山煤电、汾西矿业、霍州煤电、山煤国际等23个子分公司。截至2023年底，集团资产总额达5204亿元，净资产1437亿元，拥有山西焦煤、山煤国际、山西焦化3家A股上市公司，业务覆盖炼焦煤、焦化、现代物流、民爆、金融等多个产业板块，年均焦炭产能约700万吨^[14]。作为山西焦煤集团的全资子公司，山西焦化集团有限公司是焦炭全产业链的龙头企业，位于临汾洪洞赵城煤焦化产业园区，主要生产焦炭、硫酸铵、工业萘、沥青等45种产品。2021年，公司焦炭业务实现营业收入87.43亿元，占总营收的78.16%^[15]。在环保领域，集团同样积极布局，目前正试点建设“零碳”矿山。

其二，山西美锦能源集团。该企业创建于1981年，是全省重点焦化企业，同时位列全国民营企业500强，拥有A股上市公司“美锦能源”，总资产超600亿元，职工人数达2万余人，主要生产基地分布在晋中市、吕梁市等地。自成立以来，集团逐步建成吕梁交城万亩循环经济工业园、吕梁临县锦源工业园、太原阳曲隆辉工业园、太原清徐精细化工循环产业园、山西综改区晋中开发区美锦氢能产业园等园区^[16]，形成了“煤炭焦炭钢铁电力”与“煤炭气体化工—氢能”两条循环经济产业链。在环保实践中，美锦能源积极参与太原

清徐经济开发区的循环经济体系建设，推动构建“焦炉煤气—高纯氢—加氢站—氢能汽车运输”产业链，致力于实现资源的高效循环利用。此外，集团还与园区内其他企业合作，将生产废水统一送至专业污水处理厂处理，处理后的中水全部回用于生产，实现了焦化废水的“零排放”。

其三，山西安泰集团股份有限公司（简称安泰集团）。该企业成立于1993年，生产基地位于山西省介休市安泰工业区，拥有国内先进的JN60-6A型焦炉，并配套完善的化产回收与干熄焦装置，可年产优质冶金焦220万吨，以及焦油、粗苯、硫铵、硫膏等化工产品。同时，集团向下游延伸产业链，打造煤焦钢一体化布局，致力于成为中西部地区最大的型钢生产基地。不过，从2022年、2023年的年度报告来看，公司因累计可供分配利润为负值，连续两年未进行利润分配；截至2024年第三季度，营收及归属于上市公司股东的净利润均呈下降趋势，企业经营状况可能面临一定挑战^[17]。

相较于焦化行业，山西省动力煤产业在社会贡献方面的体量更大、影响更广。就业层面，动力煤产业链（包括开采、洗选、运输、发电等环节）涉及90万名煤矿工人，其背后关联人口近300万，规模是焦化行业的3倍以上^[18]；社会公益层面，晋能控股、大同煤矿等大型煤企常年承担矿区改造、生态修复、教育支持等社会责任，持续助力地方医疗、发展等社会责任项目。在环保治理方面，山西焦煤山煤国际、长治中能煤业等企业积极推动绿色转型，通过实施充填开采、保水开采等绿色开采技术，从源头保护生态环境；大力开展矿区生态修复，将排矸场改造为绿地公园，实现土地复垦利用。同时，行业持续推进污染防治与资源循环利用，完成燃煤机组超低排放改造，将矿井水处理后循环利用，并利用煤矿瓦斯发电。此外，通过智能化建设提升能效，推广“公转铁”清洁运输模式，全面构建绿色低碳发展体系，为区域环境质量改善做出了积极贡献。

整体来看，山西省焦化企业，特别是重点企业和上市公司，依托核心业务与地区布局，对地方经济社会发展有所贡献，在提供就业岗位、创造经济收益等方面发挥了一定作用，促进了相关产业链延伸与地区经济增长，但相较于动力煤产业的就业吸纳能力和社会贡献度，其占比仍然较小，且受行业低迷影响，整体发展前景并不乐观。

2.3 焦化与钢铁的紧密关联

钢铁与焦化行业在生产链中紧密依存，焦炭作为高炉炼铁的核心燃料和还原剂，占钢铁生产成本约30%，钢铁行业是焦炭产能的主要需求方，双方供需联动性极强，钢铁价格波动直接影响焦炭需求，反之，焦煤资源及环保政策共同制约两大产业发展。

具体来看，一方面，焦化行业主要为钢铁行业提供原材料。焦炭是当前长流程高炉炼钢主要使用的还原剂和燃料，根据钢铁之家资料，一般大中型高炉的钢焦比（高炉炼铁过程中每冶炼一吨合格生铁所消耗的焦炭量）在0.6至0.8之间，即每冶炼一吨生铁大约消耗600至800千克的焦炭。世界先进水平的高炉钢焦比接近400千克，个别高炉的焦比甚至达到350千克^[19]。而山西省焦炭产量和净外调量均位居全国首位，2023年全省焦炭产量超9000万吨，占全国焦炭产量近20%，除满足了国内钢铁企业的需求之外，还大量出口到印度、

日本、马来西亚等其他国家用于钢铁冶炼。

另一方面，焦化行业探索的新技术和新工艺的应用，如干熄焦技术和焦炉煤气制高纯氢技术等，提升了焦炭生产效率与品质，促进了资源的循环利用和节能减排。特别是焦炉煤气制高纯氢项目，成功提纯焦炉煤气中的氢气，应用于氢能产业，为钢铁行业提供了氢冶金等能源替代方案。同时，山西焦化行业还与钢铁行业通过钢焦化联产、氢冶金等模式，探索联产联营和协同发展。事实上，由于先天的地理位置与成本优势，焦化与钢铁两个行业已经形成深度绑定，尤其是对河北等周边省份，山西向河北等地供应焦炭具有交通物流成本优势，为河北等周边省份的钢铁企业提供了稳定的焦炭供应，经过长期发展，在此基础上，山西焦化产业已经与河北等地的钢铁产业形成了紧密耦合的关联模式。



山西晋南钢铁工业园区图 ©晋南钢铁集团

03

势在必行的转型

3.1 不容忽视的压力

3.2 势在必行的转型

第三章 势在必行的转型

近年来，我国焦化行业持续发展，技术研发不断突破，创新步伐稳步迈进，衍生产品日益丰富。然而，环境治理、社会责任及“双碳”目标的多重要求，国际气候协议对冶金炼钢等高碳排放工业的强约束，叠加钢

铁市场需求下行压力，使焦化行业面临巨大挑战。这倒逼行业必须通过清洁化、低碳化转型重构发展路径，以更好地应对能源转型浪潮下的时代变革，实现环境效益与经济可持续性的平衡。

3.1 不容忽视的压力

焦化行业推动势在必行的转型，主要是由其内外交织的复杂因素导致，具体如下：

3.1.1 内部原因

3.1.1.1 焦化行业对经济的贡献持续下降

焦化产业链涵盖焦煤采选、焦炭生产、焦化产品深加工及下游应用等多个环节，各环节协同影响行业整体发展。在上游环节，焦化行业高度依赖煤炭资源，尤其是炼焦煤的开采与供应。然而，随着煤炭资源日益枯竭及开采成本上升，行业原材料供应面临挑战；同时，国家对煤炭开采利用提出更高环保要求，进一步推高了焦化企业的运营成本。部分规模较小、环保标准不达标的独立焦化厂，因难以承担高昂的环保投入与运营成本，已面临退出市场的风险。

在中游环节，焦化企业是产业链的核心。市场价格内卷竞争加剧，进一步压缩了传统焦化企业的生存空间。受国内外煤炭市场与钢铁产业变化、煤化工产品单位设备产量增长等因素影响，相关市场趋向饱和，产品同质化问题突出。山西省焦化产业面临的市场竞争日趋激烈，甚至出现恶性竞争，企业盈利空间不断收窄，生存压力持续增大^[20]。

在下游环节，焦化行业主要服务于钢铁、化工、电力等行业。我国焦化产能总体执行“以钢定焦”政策，焦炭产能围绕钢铁产能核定。近年来，下游行业尤其是钢铁行业的盈利状况与生产积极性均出现下滑，一旦进入淡季或盈利不佳，钢铁行业对焦炭的需求将大幅减少。此外，海外焦煤进口持续放量，进一步加剧了市场竞争，导致焦化企业订单数量下滑，生产经营压力加大。据统计，2023年1—10月我国累计进口焦煤8071万吨，较2022年和2021年分别同比增长56.29%和104.49%，进口量处于历史高位^[21]。不仅如此，氢冶金技术、电炉短流程炼钢技术等替代焦化产品的材料与技术逐渐兴起，降低了钢铁产业对焦炭的需

求，倒逼焦化产业去产能、提质效，进一步加剧了焦炭需求下降与产能过剩的状况^[22,23]。同时，高炉大型化发展意味着钢铁企业对焦炭质量的要求将越来越高，炼焦设备也随之向科技化方向升级。

综上，受全球经济形势持续低迷、对下游高度依赖及上游原料价格高位运行等因素制约，焦化产业将长期处于低利润状态。由于90%的焦炭需求来自钢铁产业，钢铁产量变化直接影响焦炭需求与焦化产业景气程度；同时，焦炭利润空间也受上游炼焦煤价格直接影响。近五年来，供需失衡与环保政策趋严推动炼焦煤价格上涨（如图3-1），焦炭盈利空间持续收窄。尤其是在后疫情时代，国内房地产市场下滑引发基建建材行业全面萎缩，导致焦化产业终端需求持续低迷，制约了整个产业的发展，企业利润可能进一步压缩^[2]。

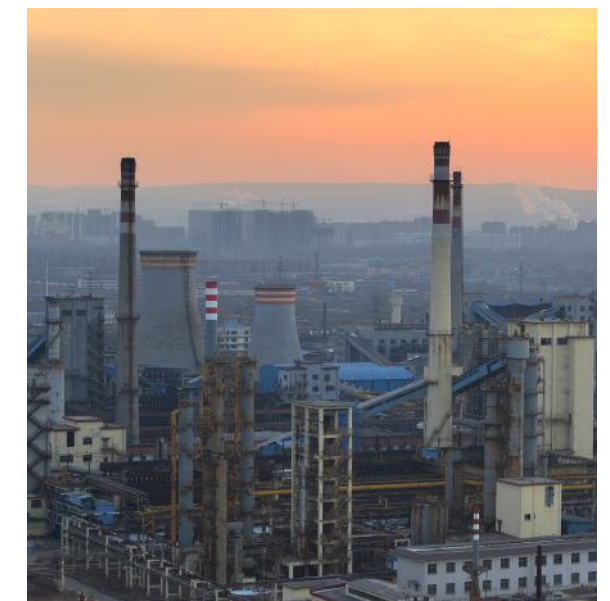
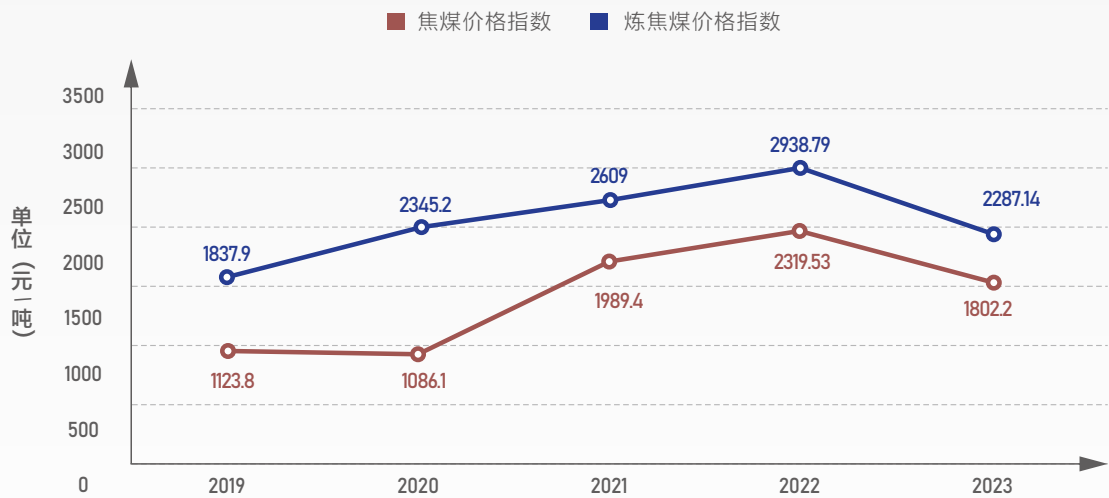


图 3-1 华北炼焦煤与焦炭价格指数



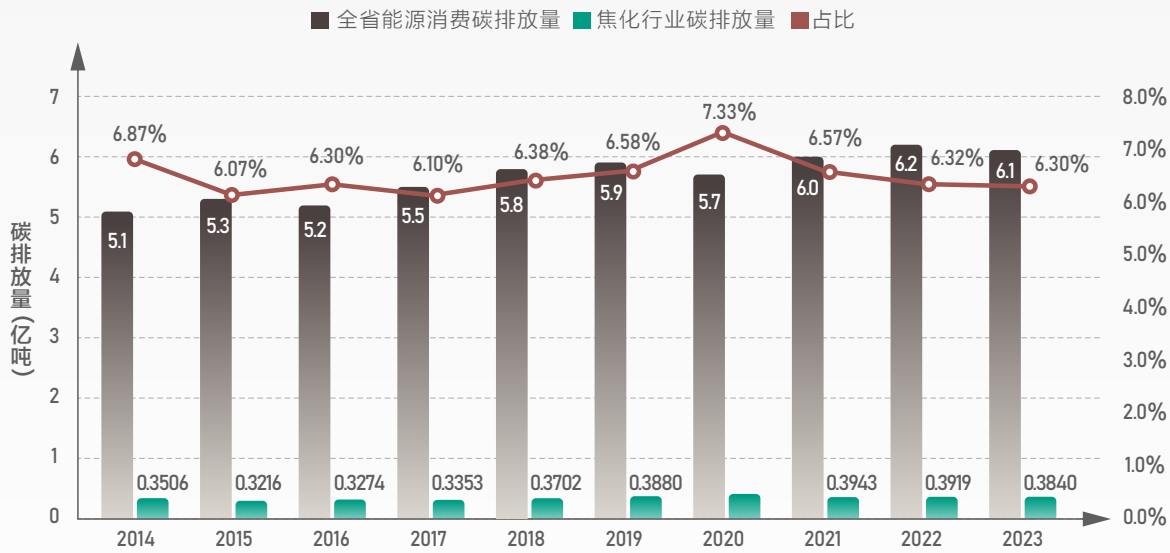
数据来源：山西省传统产业非煤转型研究报告

3.1.1.2 焦化行业对环境的影响始终存在

长期以来，焦化产业对地区经济发展起到了极大地推动作用。然而，焦化生产以炼焦煤为原料，以煤气为燃料，以焦炭为产品，副产焦炉煤气，能源投入与产出规模较大，是典型的能源转换工序，污染物生成量也极大，属于高能耗、高排放产业。不少落后产能往往伴随着高能耗、高污染、低效率的问题，不仅制约了行业的

可持续发展，还对环境造成了污染。据笔者粗略计算（焦化行业二氧化碳排放量的估算公式如下：年CO₂排放量=年焦炭产量×排放因子），焦化行业每年的碳排放量占全省能源消费碳排放量的7%—9%，具体数据如图3-2所示。随着环保政策的日益收紧以及公众对环境质量的关注度不断提高，焦化行业面临的污染问题日益凸显。

图 3-2 山西焦化行业2014—2023年碳排放量



数据来源：笔者基于统计年鉴及相关数据测算

一方面，焦化生产过程中产生的污染物种类繁多，包括二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等，对空气质量造成严重影响^[24]。过去十多年间，山西省多地空气质量指数频繁爆表，引发社会各界广泛关注。不仅如此，焦化行业的废水处理问题同样严峻。焦化废水含有大量有毒有害物质，若处理不当，将对周边水体和土壤造成严重污染。部分焦化企业因污水处理设施不完善导致污染物排放超标，面临停业整顿甚至关闭的风险^[25]。再者，焦化行业的固体废物处理也是一大难题。焦化过程中产生的焦炉煤气、煤焦油等副产品，若处理不当会对环境造成二次污染。例如，煤焦油中含有大量挥发性有机物（VOCs），这类化合物在常温下易挥发，进入大气后可参与光化学反应形成光化学烟雾^[26]；若泄漏至土壤，还会破坏土壤结构，降低其透气性与水分保持能力，影响植物生长。

另一方面，焦化行业生产过程中产生的苯、焦油、二氧化硫等大量有害物质，会危害工人身体健康。长期暴露于这些有害气体、粉尘及高温环境中，工人极易患上职业病。据中国职业卫生监测数据，焦化作业区域苯系物浓度普遍超标2至8倍，长期暴露工人的呼吸系统疾

病发病率为普通人群的4.3倍，尘肺病检出率高达17.8%。2021年，山西省职业病防治院接诊的焦化工人中，63%存在慢性阻塞性肺病症状，皮肤癌发病率较全省平均水平高出210%。

此外，行业性历史积累问题较多。党的十八大以来，自上而下整治了诸多焦化行业引发的系统性风险问题。例如，省内多地曾出现政府违规审批焦化项目的案例，揭示出政企利益捆绑的深层矛盾——部分项目在未完成水资源论证和环评的情况下违规上马，其中平遥煤化集团134万吨/年项目投产后将新增年耗水260万吨。这种“先上车后补票”的审批模式直接导致产能过剩与资源错配，加剧了行业低水平重复建设。利益输送链条还会严重扭曲市场竞争机制。部分焦化企业通过伪造环保数据逃避监管与检查的案例，折射出“劣币驱逐良币”的恶性生态：合规企业因高昂环保成本陷入竞争劣势，而违规企业则通过“关系网”获取产能指标、煤炭资源等生产要素。这种逆向淘汰机制造成行业技术升级停滞，使行业长期陷入“高污染—低效益—难治理”的治理困境，成为制约行业高质量发展与转型的桎梏。

3.1.2 外部压力

3.1.2.1 环境规制不断升级

我国对焦化行业空气污染的监控可追溯至2013年《大气污染防治行动计划》（“大气十条”），该计划首次将焦化列为重点治理行业，要求京津冀及周边地区焦化企业安装脱硫、脱硝设施；2018年《打赢蓝天保卫战三年行动计划》进一步收紧焦炉烟气排放标准，明确颗粒物、二氧化硫、氮氧化物限值分别为10mg/m³、30mg/m³、150mg/m³；2020年《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南》创新建立焦化企业环保绩效分级制度，对未达A级的企业实施秋冬季差异化限产，以此倒逼企业开展技术改造。

水环境治理方面，2015年“水十条”出台后，生态环境部修订《焦化行业规范条件》，规定吨焦废水产生量需低于0.3m³，推动干熄焦技术普及率从2016年的35%提升至2022年的85%；2019年《排污许可证申请与核发技术规范炼焦化学工业》实施后，全国焦化企业被强制要求建立废水在线监测系统，山西临汾、吕梁等地多家未达标企业因废水COD超标被依法实施按日计罚；2021年黄河流域生态保护规划明确要求焦化园区实现废水“零排放”，促使山西孝义经济开发区投资

7.2亿元建设全盐分质结晶项目。

土壤污染防治领域，2016年“土十条”首次将焦化场地纳入重点监管范围，山西省于2017年率先启动焦化企业用地土壤污染状况调查，完成217家焦化企业的采样检测工作；2019年《焦化行业绿色工厂评价要求》规定厂区土壤重金属年沉降量需低于0.5kg/hm²，推动山西美锦能源等企业投入4.3亿元改造煤场封闭设施；2022年《危险废物转移管理办法》实施后，焦油渣等危险废物转移审批周期延长50%，倒逼企业建设年处理能力超10万吨的焦化危废资源化利用装置。

全球应对气候变化的行动对中国焦化行业产生了深远影响。中国承诺2030年实现碳达峰，焦化行业作为高碳排放领域，面临严格的减排约束。尽管“双碳”目标于2020年提出，但焦化行业碳管控可追溯至2012年《焦炭单位产品能源消耗限额》，该标准将准入值设定为155kgce/t；2019年《工业能效提升行动计划》要求焦化工序能耗下降5%，山西省通过淘汰4.3米以下焦炉，压减落后产能1200万吨；2021年《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》划定焦化行业

能效标杆水平为110kgce/t，要求到2025年能效低于基准水平的产能全面退出，直接推动山西焦化行业投资200亿元实施干熄焦余热发电等节能改造项目。

3.1.2.2 钢铁行业政策调整

钢铁行业作为焦炭的主要下游领域，其政策调整直接关系到焦化行业的生存与发展前景。中国钢铁行业政策调整对焦化行业的传导压力始于2016年供给侧改革，国务院《关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》要求五年内压减粗钢产能1.5亿吨，这直接导致焦炭年需求量减少约6000万吨；2017年，山西省焦炭产量同比下降9.3%，部分独立焦化企业被迫关停；2020年《钢铁产能置换实施办法》升级，明确重点区域置换比例不低于1.5:1，河北、山东等地钢铁企业完成产能置换后焦比下降10%—15%，倒逼山西焦化企业转向高附加值特种焦生产；2022年，工信部等部门在《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》中明确提出，到2025年电炉钢产量占粗钢总产量比例提升至15%以上，并推动氢冶金、低碳冶金等先进工艺取得实质性进展。在全国粗钢产量保持约10亿吨的背景下，电炉钢产量占比每提高1个百分点，短流程炼钢对高炉炼铁的替代规模约为1000万吨粗钢，对应焦炭需求减少约450—500万吨。据此推算，在2025年达到15%的前提下，若2030年电炉钢产量占比进一步提升至20%，全国焦炭需求预计减少约2250—2500万吨。

尤其进入2025年下半年后，针对钢铁行业无序竞争、价格战及区域性低效率扩张等问题，国家密集出台“反内卷”与“压产稳价”的政策组合拳，进一步加大了焦化产业面临的外部收缩压力。工信部和发改委发布的《钢铁行业产能置换实施办法（征求意见稿）》明确指出：严禁新增高炉产能，继续提高减量置换比例，并对电炉短流程、氢冶金等低碳发展路线给予差异化支持。这意味着以长流程为主的粗钢产能未来将进一步收缩，而“以钢定焦”模式下的焦炭需求也将同步下降。

与此同时，行业协会组织多轮“反内卷”座谈，提出“三定三不要”等自律倡议，要求企业合理安排生产节奏，避免抢产、抢销量。多地钢铁企业也开始建立区域性产量协同约束机制，例如河北、云南等地的钢企已形成定期控产共识。从产业逻辑分析，这些政策与行业自律机制将直接降低粗钢产量波动幅度，压缩焦炭需求弹性，进一步收窄焦化行业的市场空间。

整体而言，钢铁行业“反内卷—压产量—严置换”的政策体系正在逐步形成，焦炭作为高炉炼铁的核心燃料，其需求端将呈现结构性下行趋势。无论是受市场萎缩影响，还是迫于政策压力，焦化行业未来都将进入

“存量调整—加速退出”阶段，这也从政策层面为焦化行业提前平稳退出提供了强有力的约束背景。

3.1.3 国际影响

随着全球应对气候变化的形势日益严峻，各国政府纷纷采取措施以减少温室气体排放，碳关税作为一种新型贸易政策工具应运而生。2022年3月15日，欧盟碳边境调节机制（CBAM，亦称“碳关税”）在欧盟理事会获得通过。2023年5月16日，该机制法规案文正式发布于《欧盟官方公报》，标志着CBAM已走完所有立法程序并成为欧盟法律，于2023年10月启动试运行，明确将焦炭纳入首批征税范围^[27]。欧盟宣布2023年10月1日至2025年12月31日为过渡期，其间企业仅需履行报告义务，即每年提交进口产品的隐含碳排放数据，无需缴纳相关费用；但自2026年1月1日起，企业不仅要报告每年进口产品的碳排放数据，还需支付对应的碳排放费用。

对山西省焦化行业而言，未来碳关税政策一旦实施，省内焦化产品的出口成本将大幅上升，国际竞争力势必受到冲击。山西焦化企业平均吨焦碳排放强度为1.8吨CO₂，较欧盟本土焦化厂的1.2吨CO₂高出50%。按2026年全面实施后每吨碳价90欧元测算，出口成本将增加54欧元/吨。在碳关税的压力下，国外部分低碳排放的焦化产品将更具竞争优势，山西省焦化产品则面临市场份额流失的风险。长期来看，若不及时推进改革创新，国内焦化企业可能逐步退出国际市场。

不仅如此，2023年欧盟还更新了《工业最佳可用技术（BAT）参考文件》，要求焦化企业获得ISO 14064碳排放认证方可进入其供应链。山西焦化企业单厂认证成本达200万至300万元，全省行业因此年增支出超2亿元。2024年，日本钢铁联盟将焦炭全生命周期碳足迹（LCA）纳入采购标准，山西焦炭因煤炭运输距离较长（平均运距600公里），导致LCA值比澳大利亚焦炭高15%，进而失去新日铁等核心客户年度订单约50万吨。

此外，印度、印尼作为山西焦炭的主要出口地，2021至2024年期间，印度、印尼、巴西等国对华焦炭发起7起反倾销调查。其中，印度2023年裁定征收35.2%的反倾销税，致使山西对印焦炭出口量从2020年的87万吨锐减至2023年的12万吨。美国商务部2024年重新启动对华焦炭“双反”调查，初步裁定倾销幅度达42.7%。为规避风险，山西焦化企业被迫采取转口贸易，经马来西亚再加工出口的成本增加8至12美元/吨，利润率压缩至不足3%。

3.2 势在必行的转型

从当前到未来一段时间，影响行业发展的宏观形势不仅未见缓和，反而将进一步严峻，转型已势在必行。焦化行业“高耗能、高排放”的特征导致碳排放量居高不下，与国家“双碳”目标及生态环境治理要求的矛盾日益凸显；同时，钢铁行业产能过剩导致对焦炭需求减弱，而新能源、新材料领域对高端炭材料的需求却激增，这双重压力倒逼行业向精细化、绿色化方向升级。此外，产业附加值低、同质化竞争严重等问题，也使得传统焦化盈利模式难以为继。更关键的是，国家政策缺乏有效引导是焦化行业转型未能真正成功的重要原因——我国焦化行业调控政策长期以限制和淘汰落后产能为主，对企业转型升级的引导与支持相对不足，导致焦化企业在面临市场压力与政策约束时，难以找到明确的转型方向和路径，实现稳步退出。

转型之路确实充满挑战，首要瓶颈在于技术壁垒与资金压力。高端炭材料研发需突破催化剂、工艺控制等核心技术，但山西焦化企业普遍缺乏创新能力与人才储备；设备改造与环保投入成本高昂，中小型企业面临资

金链断裂风险。劳动力再就业安置难题也较为突出，传统岗位缩减可能引发社会稳定风险；区域经济对煤炭焦化产业链依赖较深，短期内难以培育替代性支柱产业，转型阵痛期或将拉长经济调整周期。

企业作为产业的基本单位，其转型与发展直接影响整个产业的方向与速度。山西省焦化产业中，约70%的企业处于转型期^[2]。现阶段，本地焦化企业的转型方向主要是从“以焦为主”转向“焦化并行”，另有部分企业尝试向高端煤化工领域探索。受环境政策压力影响，焦化行业正全面推进落后产能淘汰、技术升级与产业链延伸——截至2023年底，4.3米以下焦炉已全部退出，“技术—市场”逻辑仍是当前山西省焦化产业发展的主基调。在转型探索过程中，部分企业如盛隆泰达被动调整，践行政府“关小上大、退川入谷”政策；部分企业如晋南钢铁等推进“煤—焦—钢”产业链协同发展；还有吕梁市内的美锦能源、鹏飞集团等企业，以氢能为能源载体中介，推动“煤—焦—氢”路线转型。



山西焦煤大型料仓与传送带设施

3.2.1 被动做法：“关小上大，退川入谷”

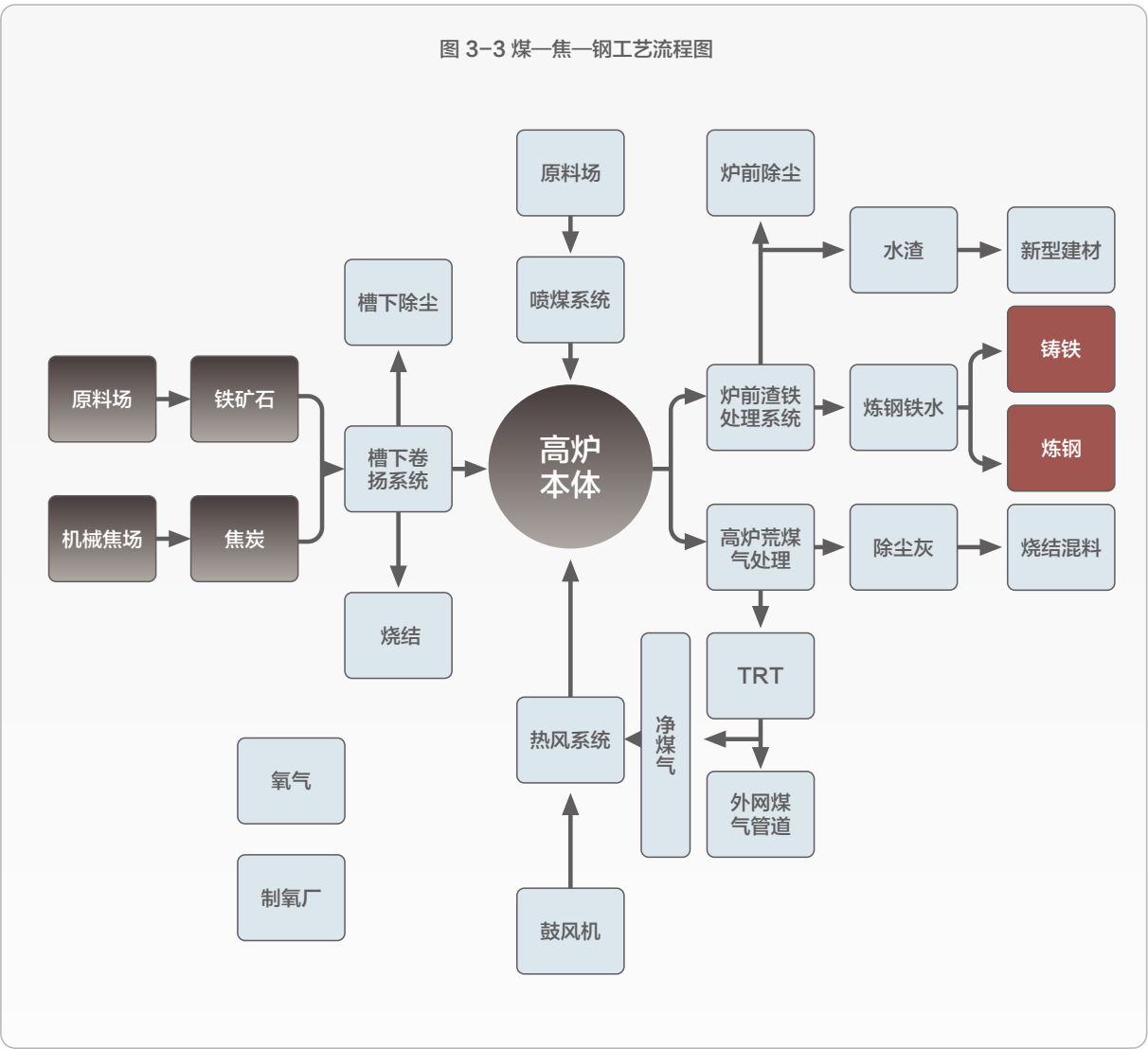
为响应国家《黄河流域高质量发展规划纲要》，临汾市针对工业结构提出“关小上大、退川入谷”的调整措施，核心在于优化产业结构与提升环保标准。具体而言，“关小上大”即通过兼并重组、产能整合，以大规模、低污染企业替代小规模、高污染企业，减少工业污染排放^[28]；“退川入谷”则是将重污染企业从汾河谷地等平原区域转移至环境容量更大的山区。

此次调整重点布局两大焦化园区：其一为位于安泽县唐城镇的安泽县焦化园区，该园区以煤焦产业为核心，突出“煤—焦—化”特色，目标打造“千万吨级大机焦基地”与绿色焦化示范区，园内龙头企业为山西永鑫煤焦化有限责任公司；二是古县经济技术开发区，自2020年成立以来，作为其重要组成部分的涧河工业园区已吸引盛隆泰达新能源、宏源新能源等21家企业入

驻，致力于成为煤化工转型与新材料产业的新高地^[29]。其中，山西盛隆泰达新能源有限公司（简称“盛隆泰达”）于2020年响应政策进行改制，将原有生产设施从山区迁至工业园区，淘汰4座60万吨级4.3米焦炉，新建2座7.6米大容积单热式多段加热顶装焦炉，投资32亿元实施92万吨焦化升级改造项目^[30]，实现年产焦炭192万吨。

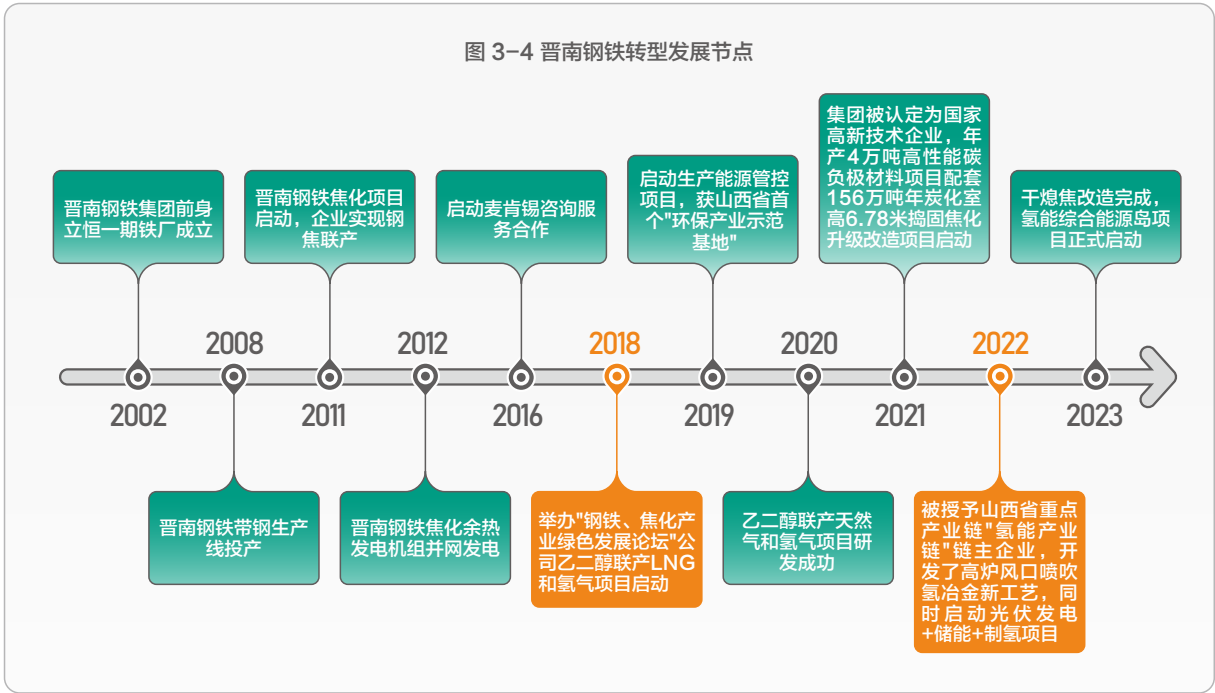
3.2.2 主动做法1：“煤—焦—钢”转型路线

煤—焦—钢是钢铁工业的核心链条。首先，炼焦煤在焦炉中经1000–1100℃高温干馏，生成焦炭及煤气、焦油等副产品；焦炭作为高炉炼铁的关键原料，与铁矿石在高温下发生还原反应，生成铁水并排出炉渣；铁水随后经转炉或电炉冶炼，通过去除杂质、调整成分形成钢水，最终经连铸连轧工艺制成钢材。



一些企业正尝试延伸煤炭—焦化—化工—钢铁的上下游产业链。截至2022年，临汾地区的晋南钢铁已形成年产800万吨铁、1000万吨钢材、315万吨焦炭、45万吨高端化工产品、1300MW光伏发电的生产规模。然而，三年前该企业还没有氢能和光伏产业，仅是一家单纯的钢铁及化工企业。作为民营企业，其决策相对灵活，为应对能源转型压力、保护现有产能与企业利润，晋南钢铁开始探索氢冶金和光伏发电业务。

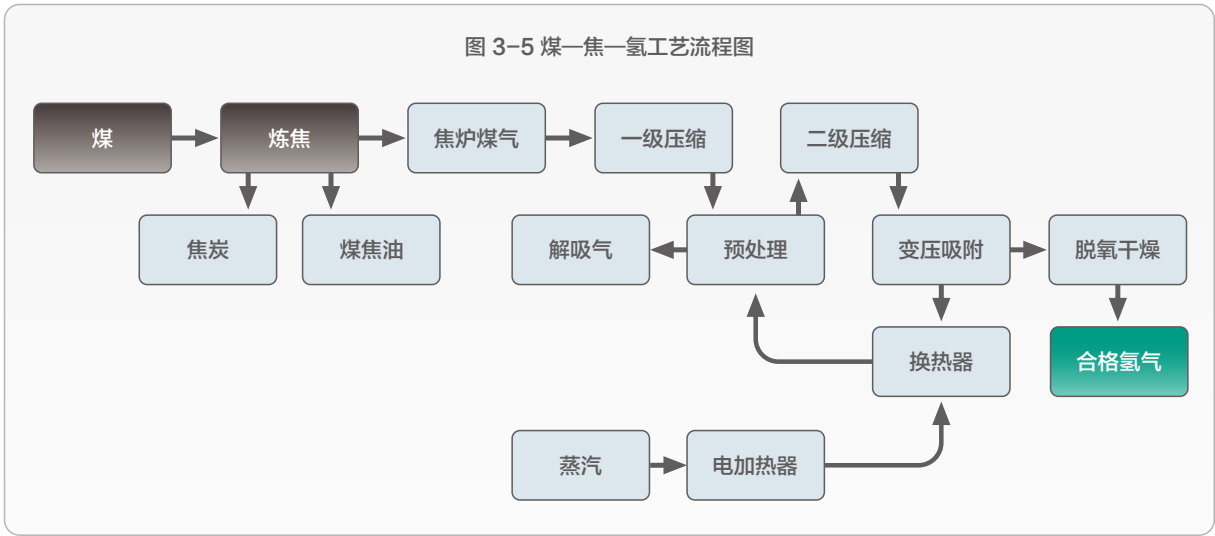
目前，该企业通过自身化工产业生产的乙二醇副产氢气进行提纯，并将提纯后的氢气应用于钢铁冶炼高炉。冶炼过程中，铁矿石颗粒以氢气为还原剂完成还原反应，单座高炉富氢能力达1.5万立方米/小时，3座高炉合计富氢4.5万立方米/小时。这项技术使每吨铁的焦炭消耗量降低30公斤，全年可减少二氧化碳排放50万吨；同时推动富氢烧结技术的应用，进一步减少二氧化碳年排放量约2.3万吨^[31]（如图3-4所示）。



3.2.3 主动做法2：“煤—焦—氢”转型路线

煤—焦—氢工艺聚焦于焦化副产氢的高效利用。炼焦煤经焦炉干馏生成焦炭与焦炉煤气（其中氢气含量达

55%—60%），煤气经脱硫、脱苯等净化处理后，通过变压吸附（PSA）技术提纯为纯度99.9%以上的工业氢，可用于氢冶金、燃料电池或化工合成领域。

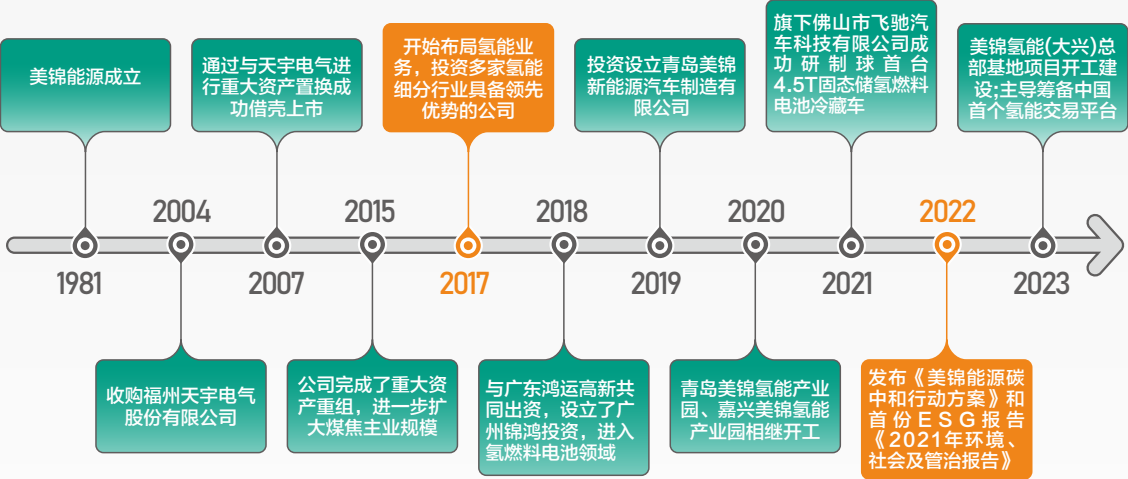


氢能作为全球公认可实现深度、快速去碳化的能源媒介，在交通领域的应用最为成熟，但受安全问题影响，其推广重点并非小型乘用车，而主要集中于氢能重卡、公交车、环保物流车等大型功能用车领域。山西省依托自身具备煤炭开采运输基础的矿区及区域性大型工业园区特征，正积极推动氢能重卡等运输车辆的清洁绿色应用场景建设。

美锦能源是全国最大的独立商品焦炭生产企业之一，主要探索“煤—焦—氢”的转型路径。该企业拥有上游煤矿资源，旗下汾西太岳、东于煤业、锦富煤业、

锦辉煤业四大煤矿年产能达630万吨，凭借丰富的煤炭资源，逐步成长为全国领先的商品焦炭生产企业之一。面对“两高”产业转型的巨大压力，2017年，美锦能源依托焦化产业产生的富氢焦炉尾气，正式切入氢能产业。例如，其旗下的华盛化工园区作为山西省中部最大的煤焦钢铁一体化工业园区，已建成年产2万吨高纯氢的项目，通过管道将氢气输送至内部加氢站，为300余辆氢能重卡、通勤车及接驳车提供能源支持，目前已基本形成涵盖制氢、储运、加氢站基础设施建设及氢燃料电池汽车整车制造的全产业链布局（如图3-6所示）。

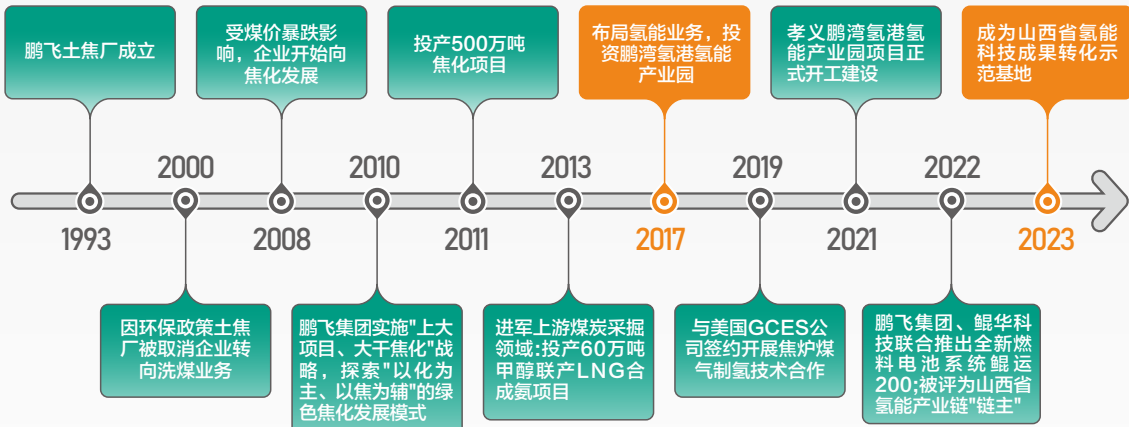
图 3-6 美锦能源转型发展节点



山西鹏飞集团有限公司（简称“鹏飞集团”）是以煤炭、焦化为核心业务的传统能源企业，其转型之路始于煤炭领域。2000年，面对日益严格的环保政策要求，鹏飞集团主动淘汰落后的土焦炉，转而布局洗煤业务。随着环保政策持续收紧与碳减排压力不断增大，鹏飞集团依托自身焦化业务优势，逐步涉足氢能产业，现已构建起覆盖制氢、储运、加氢站基础设施建设及氢燃料电池汽车整车制造的全产业链体系。鹏飞工业园区是山西省内氢能投资规模最大、应用场景最广的大型产业园区，目前园区内已有500余辆氢能重卡、数十辆通勤大巴及接待用车投入使用，3座加氢站正式运营；同时，近千辆氢燃料重卡及10座加氢站的引进建设工作正有序推进，计划5年内建成全球最大的“万辆氢能重卡物流园”^[9]，且已开通鹏飞工业园区至天津港的中远距离氢能重卡零碳物流运输通道（如图3-7所示）。



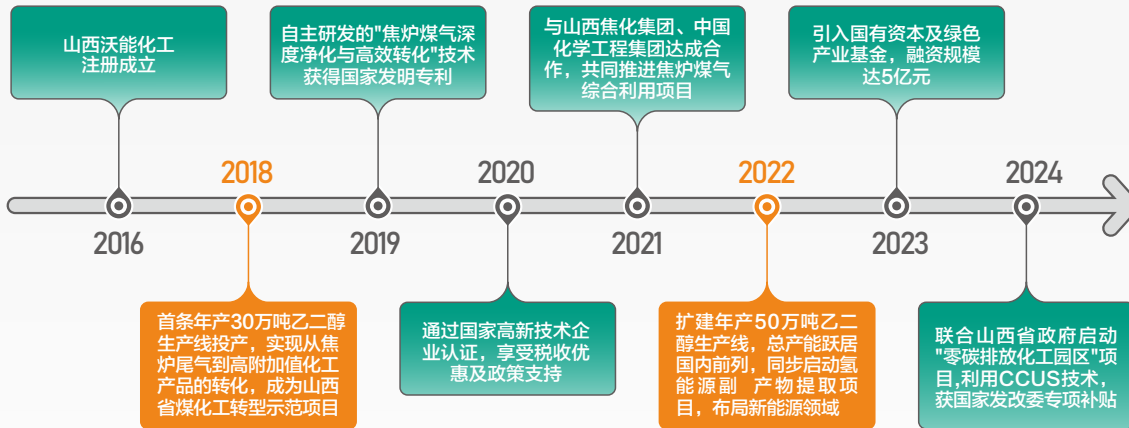
图 3-7 鹏飞集团转型发展节点



山西沃能化工科技有限公司是晋南钢铁集团的全资子公司。依托集团内部的煤炭与焦化资源，该企业推动传统“煤—焦—钢”产业链向绿色低碳、高效利用方向转型。在曲沃县生态工业区内，沃能化工30万吨/年乙二醇项目借助转炉煤气碳多氢少、焦炉煤气碳少氢多的互补特性，生产高附加值乙二醇产品；同时，焦炉煤气中富含的甲烷（CH₄）通过深冷技术制备液化天然气

（LNG），相较其他气体利用方式，每年可减少碳排放56万吨、氮氧化物排放700吨以上^[32]。此外，沃能化工将化工过程中产生的富氢气体回输至钢铁企业，用于高炉富氢冶炼，进一步降低碳排放。为充分利用本地资源并配套支撑晋南钢铁的绿色运输需求，沃能化工园区通过购置与租赁相结合的方式，配备300辆以上氢能重卡，实现园区物流运输全覆盖（如图3-8所示）。

图 3-8 沃能化工发展节点



整体来看，尽管政府已通过产能置换、碳排放交易等政策工具引导行业变革，企业也在积极探索清洁生产技术与产业链延伸路径，焦化行业在转型升级道路上取得了一定成果，但现有转型措施多聚焦于末端治理与局部优化，本质上仍属于行业内部的自我调整，尚未推动实质性变革，也未能从根本上破解行业高碳排属性与低

碳经济模式之间的结构性矛盾。无论是被动应对监管压力的适应性调整，还是主动布局的战略性转型，都难以触及问题核心，治标而不治本。但必须明确的是，面对内外部多重压力与国内外发展态势，山西省焦化行业进一步深化转型已势在必行。

04

山西焦化“退出”的可行性路线图

- 4.1 山西焦化“退出”的情景分析
- 4.2 山西焦化“退出”的路线图
- 4.3 山西焦化“退出”的路径分析
- 4.4 转型案例

第四章 山西焦化“退出”的可行性路线图

无论国内钢铁需求下行引发的市场萎缩，还是国际碳约束与国家“双碳”目标带来的政策压力，焦煤及以其为核心的焦化行业均将面临不可逆的全面性逐步淘汰趋势。随着中国钢铁行业长流程比重持续下降、电炉短流程占比不断提升，氢冶金、绿电炼钢等技术路线逐步成熟并推广，焦炭结构性需求收缩已成为行业共识。国际经验同样表明，焦炭生产在先进经济体中已实现规模化退出，例如2024—2027年欧盟与英国的焦炉关闭计划，将进一步推动全球冶金煤削减进程。因此，无论退出节奏偏早（约2040年前后）或偏晚（约2060年全面退出），冶金煤（焦煤）行业的终局均指向“逐步消失而非阶段性收缩”，核心差异仅在于退出速度，而非方向是否改变。

基于此，本报告所指的焦化“退出”，是以绝对产量压减为基础，在保障区域能源安全与产业链稳定的前提下，通过产业结构调整与技术升级，系统性降低焦化产能供给强度，实现供需关系动态适配，最终为达成国家碳中和目标逐步转型、退出乃至淘汰的过程。作为我国焦化产业重要基地，山西省焦化行业的转型与退出不仅关系区域经济结构的优化升级，更是实现“双碳”目标的关键环节。本章结合全国钢铁行业发展趋势与山西省焦化产业现状，通过情景分析、路线图设计与路径研究，系统探讨山西焦化行业逐步退出的可行性与实施策略。



4.1 山西焦化“退出”的情景分析

根据上文的论述分析，本报告关于焦化“退出”的核心内涵包含三个维度：一是产能供给的“柔性收缩”，即通过淘汰落后产能、限制新增产能，将焦化供给规模逐步调减至与钢铁低碳转型需求相匹配的安全托底水平；二是供给结构的“提质保供”，在压缩总量的同时推动清洁化改造，保留技术先进、超低排放的优质产能作为战略储备；三是退出进程的“时序管控”，基于钢铁行业氢冶金、短流程炼钢等技术替代路径的成熟度曲线，分阶段设定产能退出目标值域，在防范断供风

险的前提下实现产业有序收缩。

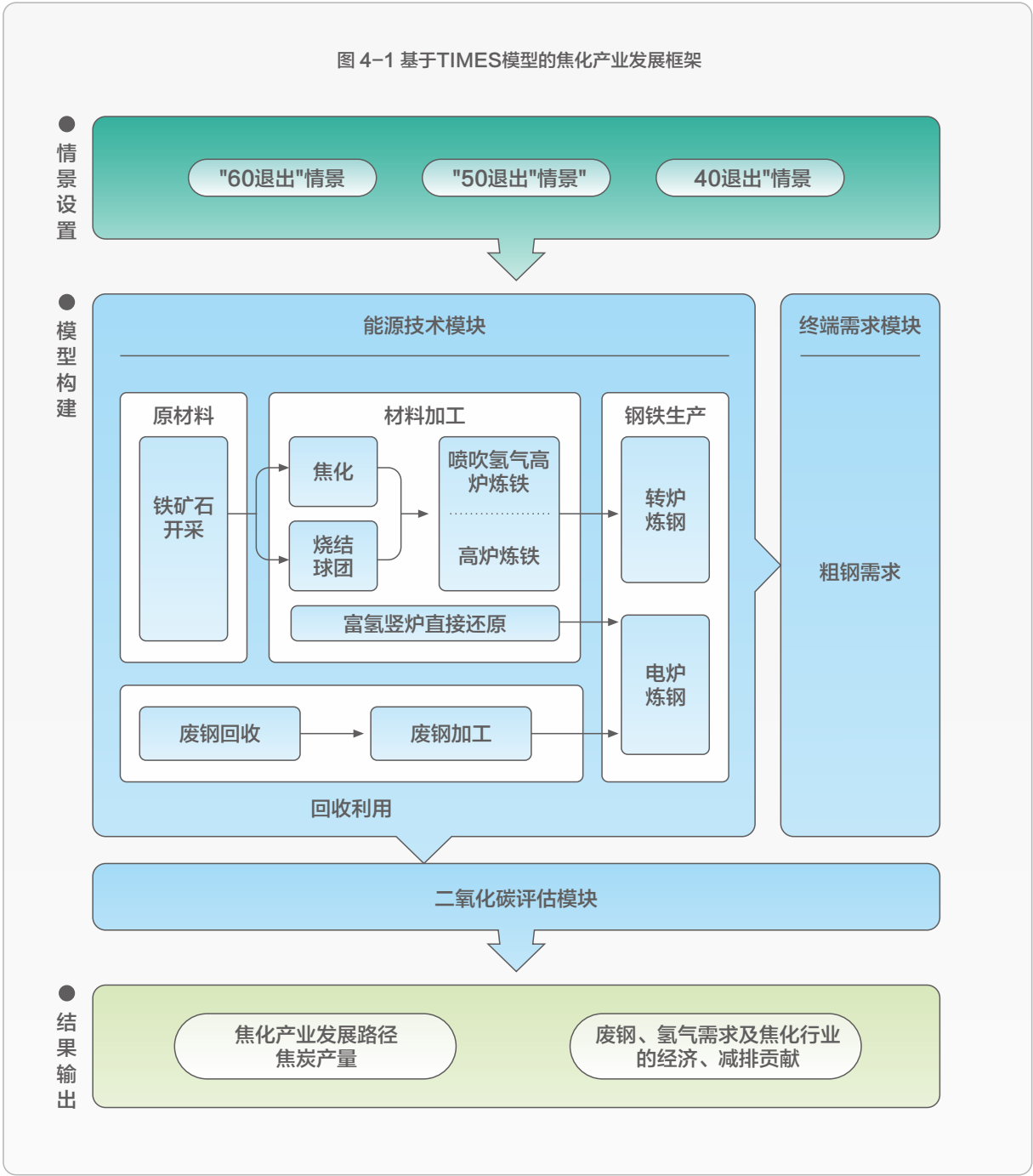
全国钢铁行业低碳转型直接决定焦炭市场需求总量及技术替代路径。据国家统计局数据，2024年全国焦炭产量达48927.25万吨，其中80%以上用于钢铁行业；山西省焦炭产量为9211.59万吨，占全国总量的18.83%。因此，山西省焦化产业退出的可行性高度依赖全国钢铁行业的低碳转型趋势，需基于全国钢铁行业的发展态势展开分析。

以环保促生产 以新质谋发展 构建清洁能源新格局

4.1.1 分析方法

TIMES模型是典型的“自下而上”能源系统模型，可对能源开采、加工、转换、分配及终端使用的全环节进行细致刻画。借助该模型开展能源系统分析，能够精准呈现系统特性、复杂内部关联与多元外部约束，进而在满足终端能源需求的前提下，筛选出成本最优的技术组合，具备模拟技术演变的显著优势^[33]，被广泛应用于多技术融合场景下的能源-经济-环境系统微观分析，

以及能源系统二氧化碳减排路径等领域的研究^[34,35,36,37]。本报告以TIMES模型为基础，将焦化产业与钢铁产业结合开展分析，构建焦化产业发展模型。该模型以2020年为基准年，规划期为2020年至2060年，其优化过程涵盖模型构建、情景设置、结果输出三个环节。基于TIMES模型的焦化产业发展框架如图4-1所示。



4.1.1.1 模型构建

TIMES模型的结构大致可分为三大模块：终端需求模块、能源技术模块和碳排放模块。

TIMES模型系统成本最小化目标函数为：
$$\text{cost} = \sum_{y \in \text{years}} (1+z)^{2020-y} \times [\text{Inv cost}(y) + \text{Fix cost}(y) + \text{Var cost}(y) - \text{Salvage}(y)]$$

式中： z 表示贴现率； y 表示年份； Inv cost 、 Fix cost 和 Var cost 分别表示能源系统中描述的各种技术的总投资成本、运营维护成本和可变成本； Salvage 代表相关技术装置淘汰时的残值。

4.1.1.2 终端需求模块

TIMES模型的原理为在满足给定的终端需求和其他限制条件下，对一次能源供应结构和用能技术结构进行优化，使能源系统成本最小。

终端需求模块的约束方程为： $E_i X_i \geq DEM$

式中： X_i 表示从一次能源产品供应到终端粗钢需求之间各环节的能流向量， E_i 表示能源转换效率矩阵， DEM 表示终端粗钢需求向量。

4.1.1.3 钢铁生产技术模块

钢铁生产技术模块通过描述钢铁生产过程中各技术的经济、技术参数构建钢铁生产技术链条。

模型钢铁生产技术模块的约束方程包括：

一次能源供应总量约束（一次能源供应量不应大于一次能源的资源开采量）： $X_i \leq SUP$

各技术环节的能源载体平衡（各技术环节的能源转换应大于等于下一环节的能源消费）： $E_i X_i - X_{i+1} \geq 0$

技术容量限制和生产运行限制（能源的生产应在技术容量或生产运行限制内进行）： $E_i X_i \leq CAP_i$

式中： SUP 表示能源资源向量， CAP_i 表示工艺容量向量。

4.1.1.4 二氧化碳评估模块

二氧化碳评估模块通过设置钢铁生产技术过程中各技术的二氧化碳排放系数，对不同情景下优化得到的钢铁行业技术路径二氧化碳排放进行评估。二氧化碳评估模块的评估方程为：

各环节的二氧化碳排放量之和等于系统二氧化碳排放总量： $ENV_i X_i = ENV$

式中： ENV_i 表示各环节的二氧化碳排放量， ENV 表示系统二氧化碳排放总量。

4.1.2 情景设置

本报告采用情景分析法，结合全国钢铁产业未来发展趋势与山西省焦化产业未来政策规划，设置了基准情景、“60退出”情景、“50退出”情景及“40退出”情景，具体情景设置详见表4-1。

情景1：基准情景。该情景延续当前政策惯性，假设技术环境维持现状（即暂不考虑全国氢冶金技术突破的影响），全国电炉钢发展规模、山西焦化行业单位产品能耗水平均按现有政策目标或趋势推进，无强制退出时间表。

情景2：“60退出”情景。该情景提出分阶段淘汰焦化产能，中期推广焦化-化工联产与富氢煤气高值化利用模式；远期开展绿氢冶金试点，保留少量焦化产能

作为过渡，力争2060年实现焦化行业“退出”。

情景3：“50退出”情景。该情景结合全国钢铁行业发展特点，假设氢冶金技术取得突破性进展，电炉钢规模发展超出现有规划水平；焦化行业主动整合氢能产业链，通过技术互补构建新生态，推动焦炭逐步淘汰，2050年实现焦化行业“退出”。

情景4：“40退出”情景。该情景假设氢冶金技术实现突破性进展并规模化应用，电炉钢规模发展达到先进水平，直接还原铁+绿氢工艺成为主流；叠加政策强力推动碳中和，焦化需求出现断崖式下降，焦化企业被迫关停或转向煤化工副产品领域，2040年实现焦化行业“退出”。

表 4-1 不同情景下山西焦化行业退出分析的主要参数设定 数据来源：[34][38]

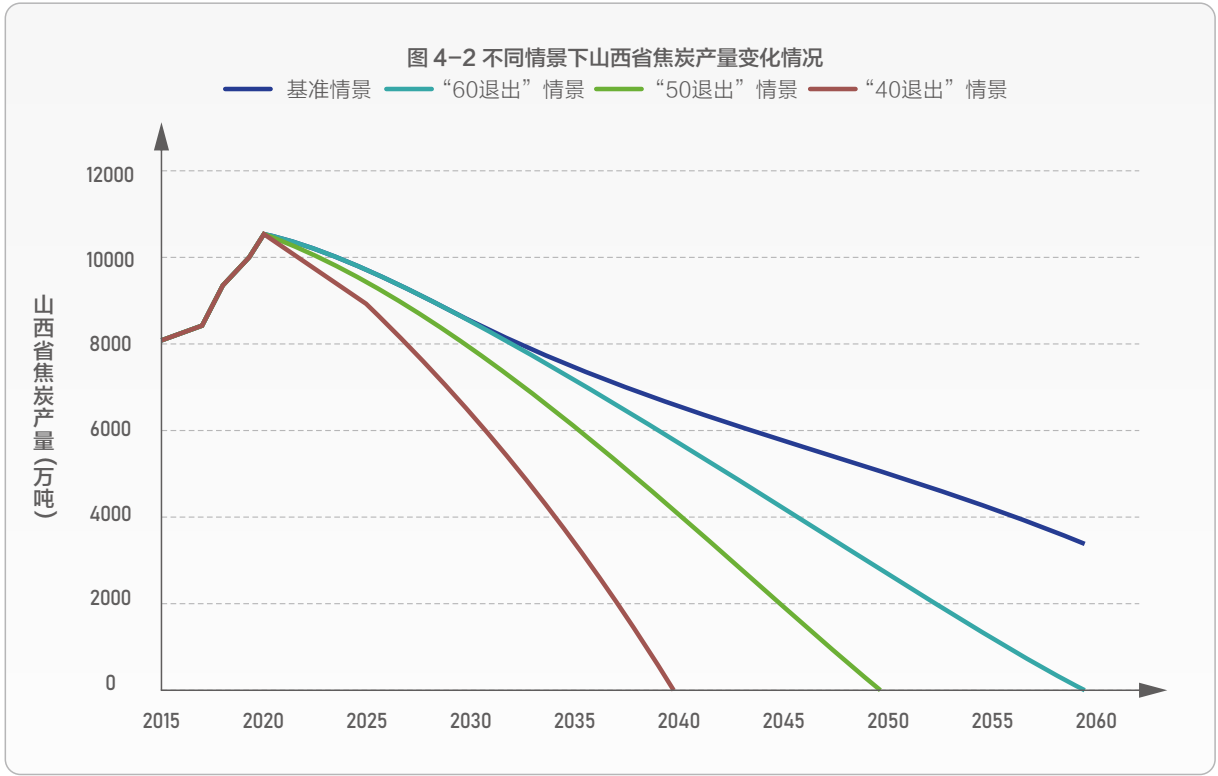
情景一：基准情景	参数名称		参数设置				
			2021	2030	2040	2050	2060
	全国	全国粗钢产量（亿吨）	10.35	9	8	7	5.5
		氢冶金与碳冶金	延续当前政策惯性				
		高炉－转炉	89.4%	80%	70%	60%	50%
		钢铁行业焦炭消费量比重	84%	85%	85%	85%	85%
山西	山西焦炭产量比重		21.2%	23%	24%	25%	25%
情景二：60退出情景	参数名称		参数设置				
			2021	2030	2040	2050	2060
	全国	全国粗钢产量（亿吨）	10.35	9	8	7	5.5
		氢冶金与碳冶金	2060年焦化行业退出，氢冶金取代碳冶金				
		高炉－转炉	89.4%	70%	47%	23%	2060年退出
		钢铁行业焦炭消费量比重	84%	85%	85%	85%	—
山西	山西焦炭产量比重		21.2%	23%	24%	25%	—
情景三：50退出情景	参数名称		参数设置				
			2021	2030	2040	2050	2060
	全国	全国粗钢产量（亿吨）	10.35	9	8	7	5.5
		氢冶金与碳冶金	2050年焦化行业退出，氢冶金取代碳冶金				
		高炉－转炉	89.4%	61%	31%	2050年退出	
		钢铁行业焦炭消费量比重	84%	85%	85%	—	—
山西	山西焦炭产量比重		21.2%	23%	23%	—	—
情景四：40退出情景	参数名称		参数设置				
			2021	2030	2040	2050	2060
	全国	全国粗钢产量（亿吨）	10.35	9	8	7	5.5
		氢冶金与碳冶金	2040年焦化行业退出，氢冶金取代碳冶金				
		高炉－转炉	89.4%	46%	2040年退出		
		钢铁行业焦炭消费量比重	84%	85%	—	—	—
山西	山西焦炭产量比重		21.2%	23%	—	—	—

4.1.3 情景研判

4.1.3.1 山西省焦炭产量分析

综合考虑全国电炉钢及氢冶金技术的发展规模、钢铁行业焦炭消费量占比、山西焦炭产量在全国焦炭产量

中的占比等因素，山西省焦炭产量的变化情况如图4-2所示。在不同情景下，受下游钢铁行业需求下降与工艺变革的影响，山西省焦炭产量整体呈现下降趋势。



基准情景下，焦炭行业发展主要依赖钢铁市场需求，焦炭需求保持稳定。2030年、2040年、2050年、2060年山西省焦炭产量分别为8085万吨、6562万吨、5126万吨、3357万吨，较2024年分别削减1127万吨、2650万吨、4086万吨、5855万吨，降幅为12.23%、28.76%、44.35%、63.56%。

“60退出”情景下，氢冶金技术逐步发展，焦炭需求缓慢下降，政策以温和减排为导向。2030年、2040年、2050年山西省焦炭产量分别控制在7461万吨、4962万吨、2390万吨，较2024年分别削减1751万吨、4249万吨、6822万吨，降幅为19.01%、46.13%、74.06%；2060年焦炭产业将完全退出。

“50退出”情景下，焦化产业与氢能、化工产业链实现深度协同，焦炭需求得到部分替代。2030年、2040年山西省焦炭产量分别控制在6916万吨、3558万吨，较2024年分别削减2296万吨、5653万吨，降幅为24.92%、61.37%；2050年焦炭产业将完

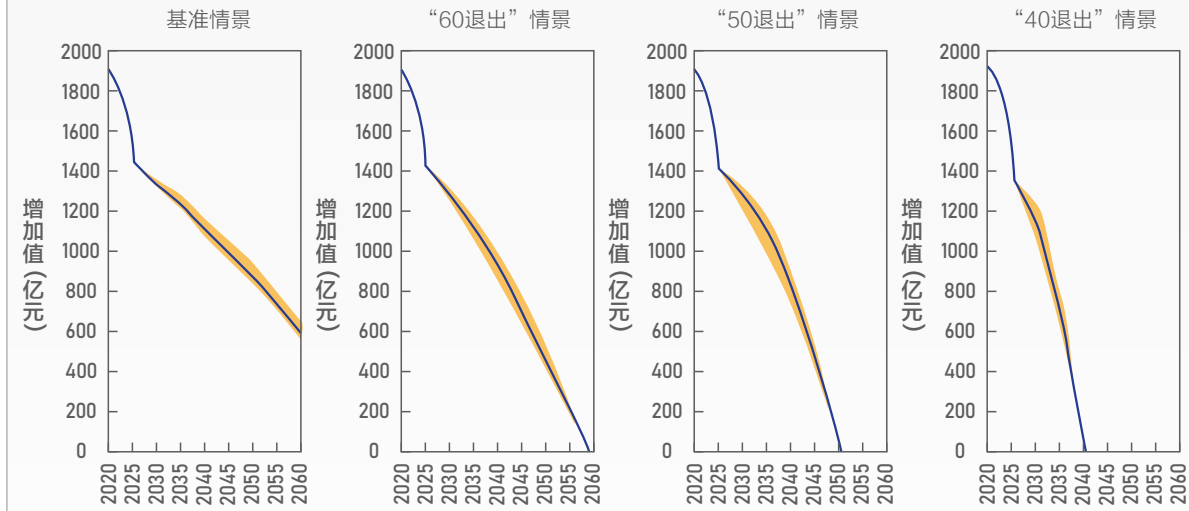
全退出。

“40退出”情景下，绿氢成本大幅下降，DRI技术广泛普及，焦炭需求出现断崖式下跌。2030年山西省焦炭行业快速退出，产量控制在5640万吨，较2024年削减3572万吨，降幅达38.77%；2040年焦炭产业将完全退出。

4.1.3.2 山西省焦化行业经济贡献分析

山西省焦化行业作为传统支柱产业，虽在历史上对经济贡献显著，但当前其对GDP的贡献已相对有限，且面临环境约束、技术替代等多重压力。2024年，该行业工业增加值约为1483.07亿元，占全省GDP的5.82%[焦化产业的工业增加值由课题组根据生产法进行测算]。随着行业逐步退出，其经济贡献将进一步减弱，产业定位也将从经济支柱产业逐步转变为基础产业，最终成为低经济贡献产业。不同情景下山西省焦化行业的增加值变化情况如图4-3所示，受焦炭产量下降影响，行业增加值呈现持续下降趋势。

图 4-3 不同情景下山西省焦化产业的增加值测算



基准情景下，焦化行业内部技术优化空间有限，在无政策倒逼或产业链延伸压力的情况下，焦炭产量逐年下降，产业增加值持续萎缩：2030年将降至1301.69—1341.23亿元，较2024年减少16.69%—19.15%；2040年降至1057.79—1144.25亿元，较2024年减少28.93%—34.30%；2050年降至827.34—939.55亿元，较2024年减少41.64%—48.61%；2060年降至542.49—647.78亿元，较2024年减少59.83%—66.30%。

“60退出”情景下，单位增加值虽因技术升级缓慢提升，但受产量削减幅度较大影响，焦化行业增加值温和下降，技术逐步替代使其经济贡献相对减弱：2030年增加值为1237.67—1313.43亿元，较2024年减少18.42%—23.13%；2040年降至865.32—1013.85亿元，较2024年减少37.03%—46.25%——作为钢铁的重要原材料，焦炭在电炉钢、氢冶金发展支撑不足时仍承担重要过渡作用，在山西经济贡献中占据一定比重；2050年增加值降至438.01—566.61亿元，较2024年减少64.81%—72.79%；2060年焦化行业退出。

“50退出”情景下，焦化与氢能、化工产业链协同深化带来较大附加值提升空间，但因退出时间提前至2050年，产业链延伸仅能部分对冲产量下降影响，焦化行业增加值快速下降：2030年增加值为1117.48—1229.50亿元，较2024年减少

23.63%—30.59%，行业经济贡献相对减弱；2040年增加值降至726.99—919.32亿元，较2024年减少42.90%—54.85%；2050年焦化行业退出。

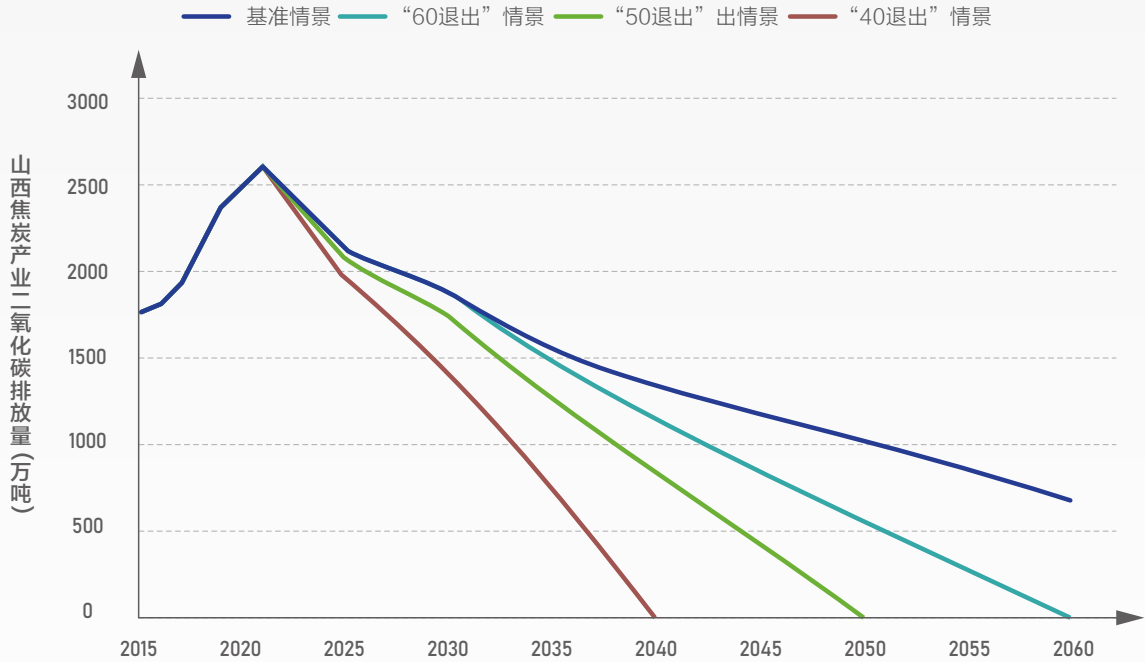
“40退出”情景下，绿氢、直接还原铁（DRI）等技术突破倒逼高效生产，单位附加值增速加快，但产量断崖式下降导致行业增加值短期骤降：2030年降至1022.57—1216.82亿元，较2024年减少24.42%—36.49%；2040年焦化行业完全退出。

山西省焦化产业退出在不同情景下均会对经济形成冲击，但若能通过政策引导，将退出的要素有效转向氢能、高端碳材料等规划中的战略性新兴产业，形成新的增长动能，则冲击整体可控。长期来看，主动退出有助于打破对传统高碳产业的依赖，为多元化、高韧性的经济结构提供发展空间与资源。尽管技术突破延迟可能延长阵痛期，但通过强化技术攻关与跨省协同（如“京津冀氢走廊”等），山西能够实现新旧动能的平稳转换。

4.1.3.3 山西省焦化行业二氧化碳排放分析

基于公开趋势的测算^[38]，2024年山西省焦化行业的二氧化碳排放约为2245.50万吨。在此背景下，不同情景下山西省焦化行业退出的碳减排贡献存在显著差异：基准情景依赖自然优化路径，减排速度最慢，长期仍有碳排放留存；“60退出”情景以技术渐进替代为核心，虽周期较长，但可实现深度减排；“50退出”情景依托产业链协同，减排效果突出；“40退出”情景通过激进技术驱动，短期内减排效率最高。不同情景下山西省焦化行业碳排放情况如图4-4所示。

图 4-4 不同情景下山西省焦化行业碳排放情况



基准情景下

由于缺乏强制退出政策，焦炭行业以自然减排为主，减排速度较缓，效率低于主动退出情景。2030年、2040年、2050年和2060年山西省焦化行业二氧化碳排放量分别为1874.89万吨、1323.00万吨、1025.00万吨和673.00万吨；与2024年相比，分别减少370.61万吨、922.50万吨、1220.50万吨、1572.50万吨，降幅为16.50%、41.08%、54.35%、70.03%。

“60退出”情景下

焦炭行业长期减排效果显著。2030年、2040年山西省焦化行业二氧化碳排放量分别为1869.85万吨、1150.57万吨；与2024年相比，分别减少375.65万吨、1094.93万吨，降幅为16.73%、48.76%，减排效果略优于基准情景，但因技术替代尚未规模化，差异较小。2050年山西省焦化行业二氧化碳排放量为549.52万吨，与2024年相比减少1695.98万吨，降幅达75.53%，此时氢冶金技术逐步替代焦炭需求，减排效果显著高于基准情景。

“50退出”情景下

焦化与氢能产业链协同加速去碳化进程，中期减排表现突出。2030年、2040年山西省焦化行业二氧化碳排放量分别为1733.26万吨、825.02万吨；与2024年相比，分别减少512.24万吨、1420.48万吨，降幅为22.81%、63.26%。

“40退出”情景下

绿氢成本骤降倒逼直接还原铁（DRI）技术普及，短期减排效率最高。2030年山西省焦化行业二氧化碳排放量为1413.48万吨，与2024年相比减少832.02万吨，降幅达37.05%，减排贡献远超其他情景同期水平。但这会对社会整体发展惯性造成一定冲击，尤其需要相关企业大力调整以适应变化。

4.2 山西焦化“退出”的路线图

本节路线图旨在将前述情景分析得出的焦炭产量控制目标，转化为可操作、可监管的产能退出步骤。在政策实践中，控制产能是调节产量、达成远期目标的关键前置手段。考虑到生产波动性及为淘汰落后产能提供置

换空间，产能管控目标需适当宽于产量目标。本路线图以行业实际产能规模为基础进行设计，确保任一情景下的产能约束，都能为对应年份的产量控制目标提供充分保障，从而将宏观转型路径落实为微观管理行动。

4.2.1 “60退出” 路线图
山西焦化行业2060年“退出” 进程大致分为以下三个阶段：

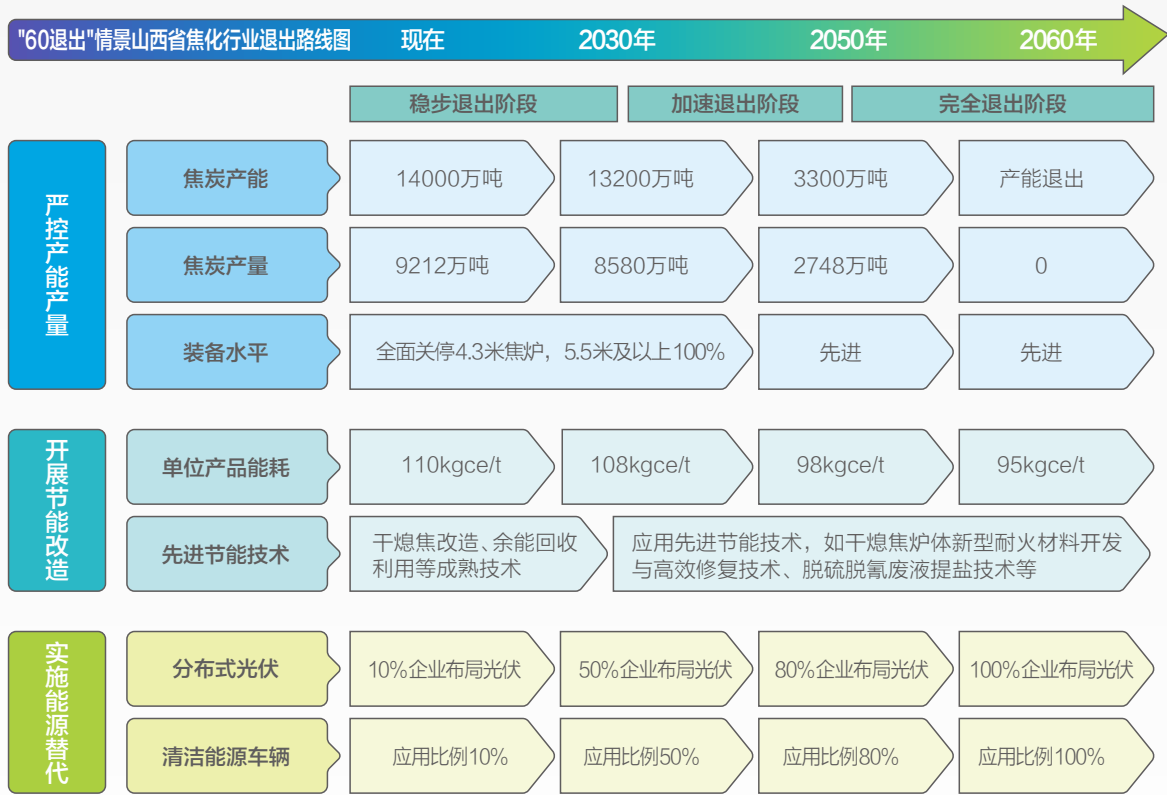
第一阶段（当前-2030年）为稳步“退出”阶段。
目标是到2030年将焦化产能规模严控在1.32亿吨，同时实现炭化室高度5.5米及以上焦炉产能占比100%，通过推进“上大关小”项目建设提升装备水平；此外，需实施节能技术改造、超低排放改造和安全标准化改造“三改造”，到2030年将单位产品能耗控制在108kgce/t，达成超低排放目标，打造国家绿色焦化产业基地。

第二阶段（2031-2050年）为加速“退出”阶段。

通过严格的产能配额与整合政策，确保保留的先进产能以高负荷运行，保障产业链基础供应，同时最大化利用存量资产效益。到2050年保留焦炉产能规模约3300万吨，单位产品能耗控制在98kgce/t，在装备水平、能耗水平、环保水平等方面保持领先地位。

第三阶段（2051-2060年）为完全“退出”阶段。
将有序推进焦化产能退出，到2060年实现焦化产能完全退出。

图 4-5 山西省焦化行业“60退出” 路线图



4.2.2 “50退出” 路线图

山西焦化行业2050年的退出进程大致分为以下三个阶段：

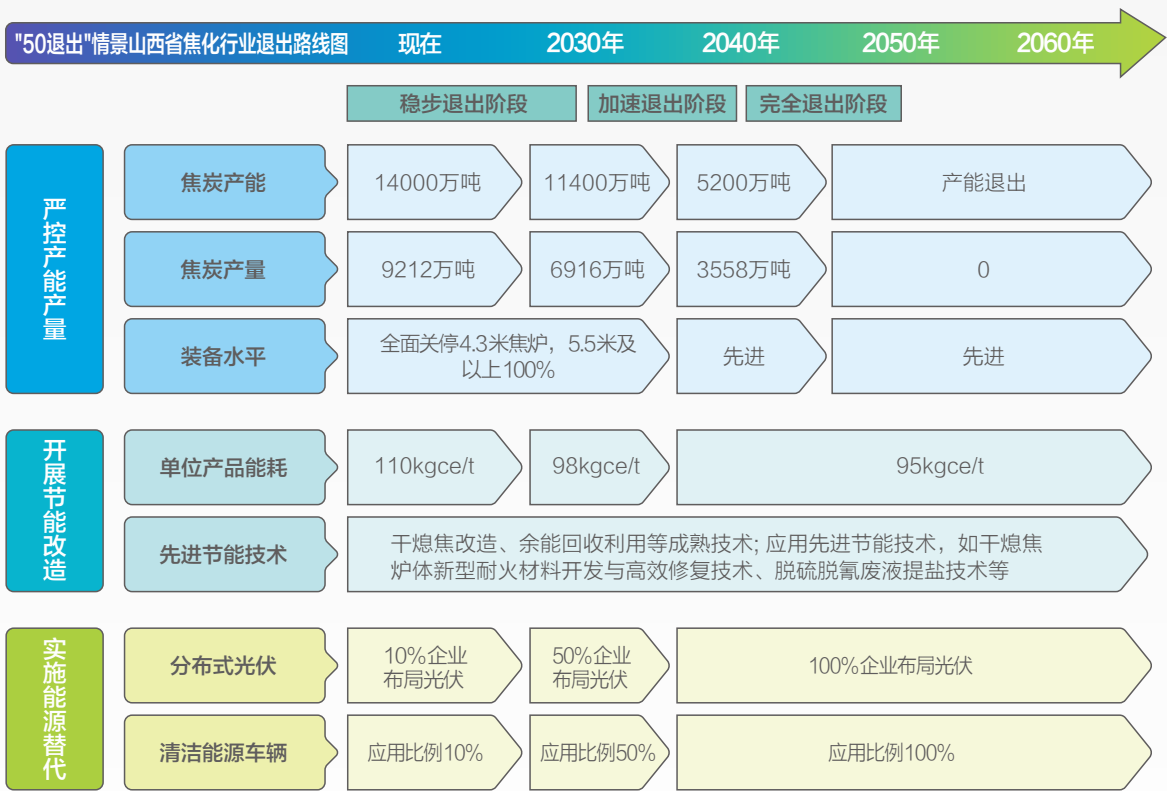
第一阶段（当前至2030年）为稳步退出阶段。
到2030年，需将焦化产能规模严格控制在1.14亿吨，炭化室高度5.5米及以上的焦炉产能占比达到100%；单位产品能耗控制在98千克标准煤/吨，实现超低排放，打造国家绿色焦化产业基地。

第二阶段（2031—2040年）为加速退出阶段。
通过严格的产能总量控制与整合，推动存量产能向

高效率集中，确保先进产能负荷率稳步提升。到2040年，保留焦炉产能规模约5200万吨，单位产品能耗控制在95千克标准煤/吨，装备水平、能耗水平、环保水平等均达到先进标准。

第三阶段（2041—2050年）为完全退出阶段。
此阶段将有序推进焦化产能退出，到2050年实现全行业完全退出。

图 4-6 山西省焦化行业“50退出” 路线图



4.2.3 “40退出” 路线图

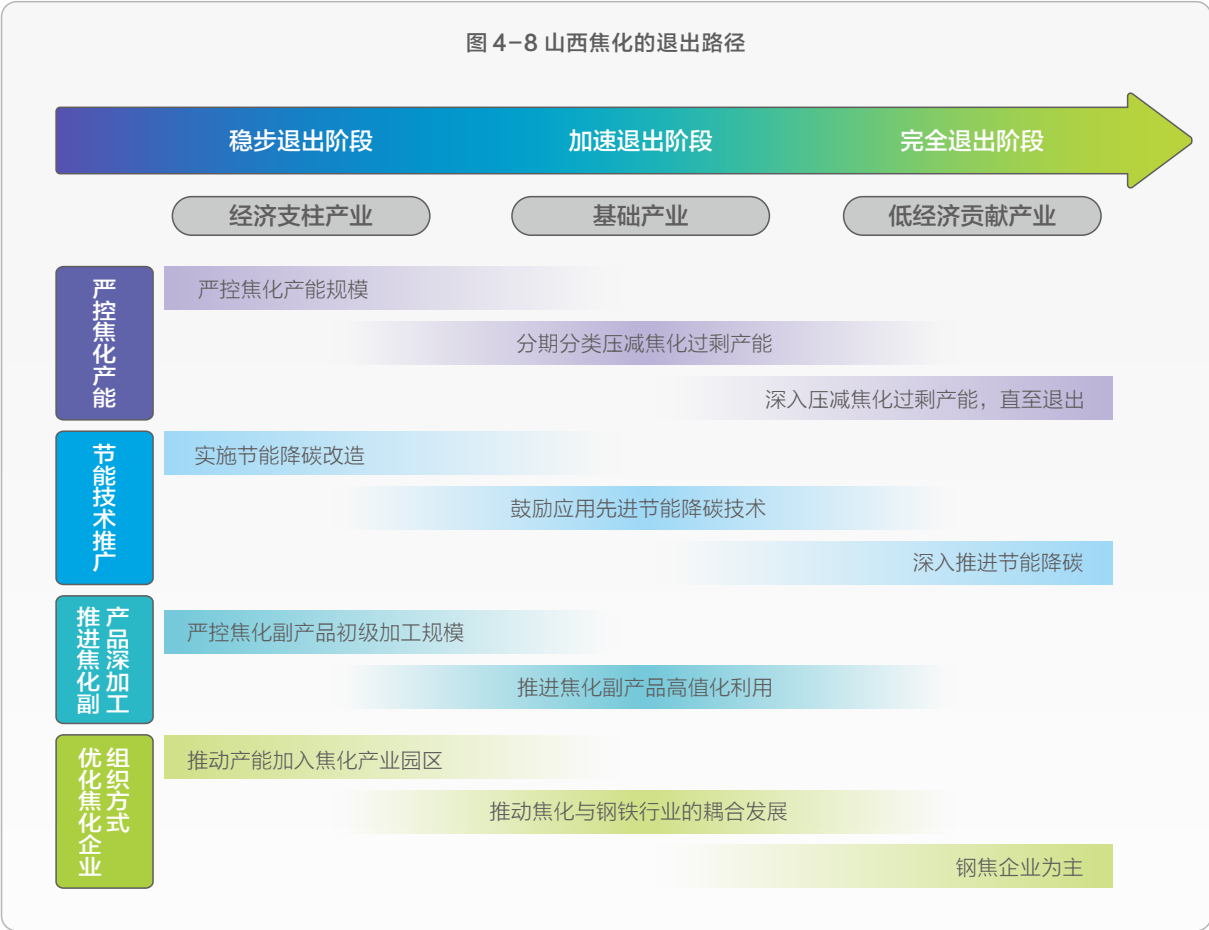
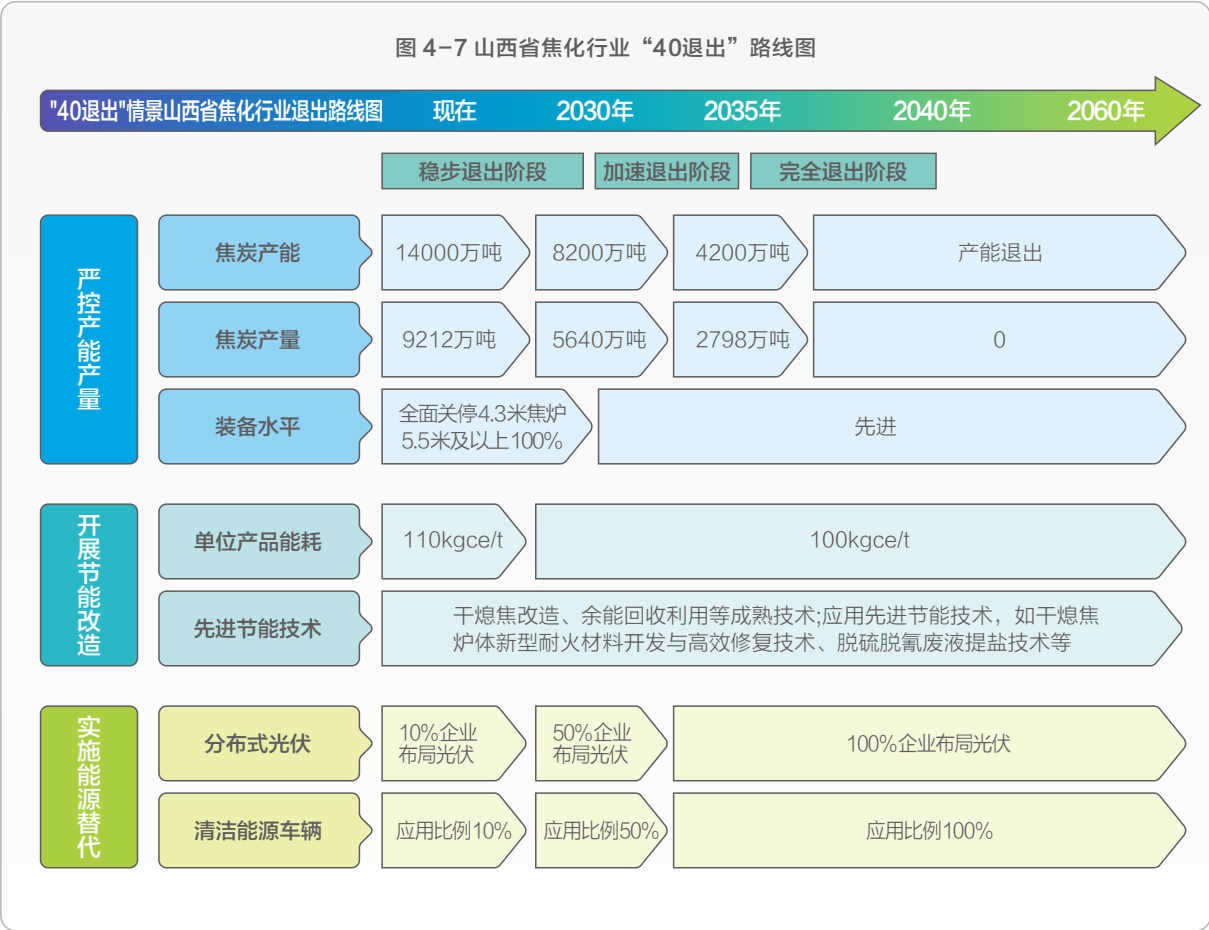
山西焦化行业2040年的退出进程大致分为以下三个阶段：

第一阶段（当前至2030年）为稳步退出阶段。
2030年需将焦化产能规模严格控制在8200万吨，炭化室高度5.5米及以上的焦炉产能占比达100%；单位产品能耗控制在100kgce/t，实现超低排放，完成产业绿色化改造，并在装备水平、能耗水平、环保水平等方面保持领先地位。

第二阶段（2031—2035年）为加速退出阶段。
通过严格执行产能总量控制与淘汰政策，确保在产

量快速下降的同时，保留先进产能得以维持较高的生产负荷，以优化资源配置。到2035年，焦炉产能规模保留在4200万吨左右，单位产品能耗控制在100kgce/t，装备水平、能耗水平、环保水平等方面达到先进标准。

第三阶段（2036—2040年）为完全退出阶段。
通过有序推进焦化产能退出，确保到2040年实现全行业完全退出。



4.3 山西焦化“退出”的路径分析

为进一步推动山西省焦化行业有序退出并提出切实有效的实施路径,本研究依据山西省焦化退出路线图,从严控焦化产能、推广节能技术、推进焦化副产品深加工、优化焦化企业组织方式四个维度,分别提出行业稳步退出阶段、加速退出阶段及完全退出阶段的具体路径。需要说明的是,以下针对“稳步退出”“加速退出”与“完全退出”三阶段的路径设计,是一个普适性的行动框架。当应用于“40退出”“50退出”或“60退出”等不同紧迫程度的特定情景时,各阶段的持续时间、控制目标的绝对值以及政策调控的力度需进行相应缩放。具体而言,退出目标年份越早(如“40退出”),则各阶段行动节奏需越快,产能压减、能耗下降等目标值需越严格,技术推广与产能退出的强制力也需越强。本节的路径描述将着重阐明各阶段的行动方向与关键举措。



4.3.1 稳步退出阶段路径

本阶段是全省焦化行业退出进程的启动与产能优化期,核心任务是在保障供应链安全与区域经济平稳的前提下,通过提升标准、淘汰落后、优化布局,为后续实质性压减产能奠定坚实的产业组织与技术基础。在不同退出情景下,退出目标越早(如“40退出”),则本阶段的产能总量控制目标需越严格,技术升级要求需越紧迫,政策倒逼力度也需越强。

4.3.1.1 严控焦化产能规模

加快推进大机焦建设,严格控制焦化产能规模。加快推进在建、拟建大机焦项目建设,同时严格把控在建、拟建焦化项目的准入门槛。推动焦化行业淘汰落后产能、实现产业升级,鼓励具备条件的高炉—转炉长流程企业适度发展电炉短流程炼钢与氢冶金。对于炉龄较长、节能环保设施设备配套水平较低的5.5米焦炉,通过产能等量置换的方式,升级改造为炭化室高度6米以上捣固或7米以上顶装的大型焦化项目。

4.3.1.2 实施节能降碳改造

推广应用成熟节能技术,重点推进干熄焦改造。以“生存线”“发展线”为导向,倒逼山西省焦化企业开展节能技术改造。针对炭化室高度5.5米及以上的大机焦,推动应用干熄焦、上升管荒煤气余热回收、循环氨水及初冷器余热回收、烟道气余热回收等技术,研究焦化系统多余热的耦合优化方案,提升余热回收效率;采用煤调湿、焦炉自动加热等技术,减少回炉煤气消费量;应用高效节能型电机、电机变频技术等,降低电力消耗;推广自动化配煤技术,优化配煤结构,降低吨焦煤耗。全面实现干法熄焦会增加企业投资成本、延长资金回收周期,还会加大独立焦化企业酚氰废水的处理难度。基于经济效益原则,建议推进钢焦联合企业全面实现干熄焦;独立焦化企业需全部开展干熄焦改造,但可适当保留部分湿熄焦装置作为备用^[38]。

鼓励具备焦炉煤气制氢项目条件的焦化企业,依托焦炉煤气制氢的成本优势,开展氢燃料电池汽车示范项目,率先推动重卡实施“柴改氢”,构建短途氢能物流

运输体系；鼓励先进焦化企业在厂区内建设充电桩，推动汽油车、柴油车更换为新能源汽车，减少油品消费带来的碳排放。

4.3.1.3 严控焦化副产品初级加工规模

严格控制焦化副产品初级加工项目建设，若确需新建，需满足产能减量置换、统筹布局及配套高端化、精细化项目的要求。鼓励已建成甲醇、合成氨、乙二醇产能的企业继续向下游延伸，发展技术成熟、市场前景良好的精细高端化学品；鼓励钢焦联合企业探索焦炉煤气与钢铁行业的高炉尾气、转炉尾气、铁合金尾气的耦合发展模式，实现氢碳互补。瞄准煤焦油深加工的中高端市场，充分结合加氢、分离和深加工等工艺技术，制取高端医药、化工中间体和炭基新材料等产品，实现焦油的多元化、分级分质利用。推

4.3.2 加速退出阶段路径

本阶段是区分不同退出情景节奏与强度的关键阶段。在“40退出”情景下，此阶段高度紧凑（约5年）；在“60退出”情景下，则时间窗口较长（约20年），可更依赖市场出清。因此，实施本阶段路径时，必须根据情景紧迫性，制定相应强度的强制性产能退出清单、时间表与配套支持政策，确保压减进程不可逆且社会风险可控。

4.3.2.1 分期分类压减焦化过剩产能

有序推进焦化产能的分期分类压减工作，优先重点压减以下类型的焦炉产能：严重违反安全生产、环境保护等法律法规的；炉龄较长、炉况较差且规模较小的；未按规定备案“上新压旧”焦化项目的；不在最新规划的焦化园区内且产业链条较短的；装备水平落后的。

实施焦化产能减量置换建设。依托“上新压旧”的契机，打破区域发展障碍，优化焦化产能布局。遵循适度集中、科学布局的原则，推动焦化项目向靠近炼焦煤资源、靠近钢铁企业、清洁运输便利、环境承载能力强的区域转移或布局建设。新建焦化项目必须严格执行产能减量置换政策，其装备水平、能效水平、环保水平均需达到国内先进水平。

4.3.2.2 鼓励应用先进节能降碳技术

鼓励焦化企业推广应用捣固炉码垛炼焦技术、干熄焦炉体新型耐火材料开发与高效修复技术、焦炉烟气分解酚盐技术、脱硫废液——低品质硫磺制酸技术、脱硫脱氰废液提盐技术、焦化厂机器人巡检技术

动现有粗苯精制及下游己内酰胺生产的龙头企业延伸发展精细化工产品，如尼龙纤维、工程塑料、薄膜材料等；依托现有苯胺产能向MDI（二苯基甲烷二异氰酸酯）及其下游氨纶产业拓展。

4.3.1.4 推动先进产能加入焦化产业园区

以《山西省焦化产业布局意见》为指导，引导产能较为先进的焦化企业就近融入大型焦化产业园区。以吕梁市、长治市、临汾市、晋中市、运城市已建立的6个产能规模1000万吨以上的焦化园区和6个500万吨以上的焦化园区为基础，吸纳周边产能较小的焦化企业入园，组织专家和科研院所指导焦化企业结合自身实际选择适合的化产品深加工方向，完善化产加工方案，发挥协同效应，形成区域循环经济优势。

等，推动焦化企业开展低碳化、绿色化、智能化“三化改造”^[38]。同时，鼓励焦化企业加大节能降碳技术的研发投入，并开展示范应用。

鼓励钢焦联合企业探索高炉喷吹焦炉煤气技术，充分发挥焦炉煤气的氢系还原剂特性，实现直接节约焦炭用量与减少碳排放的双重效益；鼓励大型钢铁联合企业开展高炉应用新型喷吹燃料的示范项目，如废塑料、废轮胎、生物质等，从源头减少高炉煤气的产生量^[39]。

推动焦炉煤气、焦油、粗苯深加工产业的工艺装备和能效水平达到先进标准；加强焦化行业二氧化碳捕集与资源化利用技术的研究，重点推进钢焦联合企业开展碳捕集利用技术的研发及示范应用，探索将捕集的二氧化碳直接应用于炼钢过程的技术创新，例如利用二氧化碳替代氮气或氩气用于转炉的顶吹/底吹，或用于钢包内的钢液混合；用于CO₂-O₂混合喷射炼钢，减少氧气与铁水直接碰撞造成的挥发和氧化损失；部分替代氮气作为炼钢的保护气；将CO₂与甲烷通过干燥重整反应生产的合成气（一氧化碳和氢气），用于直接还原炼铁或生产化学品。

4.3.2.3 推进焦化副产品高值化利用

随着焦化产能的不断集中，下游产品持续向高端化、多元化、固碳化方向发展。焦化副产品的精深加工应与焦化产业发展的客观规律相适配，充分发挥焦化副产品的特点。在山西省现有焦化副产品深加工产业的基础上，进一步提升焦化副产品的加工利用水

平，推动焦炉煤气、煤焦油、粗苯及下游产品精深加工产业链向高端化延伸，逐步建立产业优势和竞争力。

4.3.2.4 推进焦化与钢铁行业的耦合发展

研究开发适用于富氢高炉的高强度反应性焦炭产品。鼓励钢焦联合企业或与焦化企业距离较近的钢铁企

4.3.3 完全退出阶段路径

本阶段是行业退出的最终收尾与系统转换期。核心任务已从“压减”转向“清零”与“转化”，即有序完成剩余产能的关停，并妥善处理资产、人员安置、土地转型及供应链重塑等系统性收尾工作。在此阶段，除为保障国家重大战略需求可能暂时保留的极少数顶尖产能

4.4 转型案例

焦化行业跳出本行业的多元转型尝试早已存在，只是仍处于起步探索阶段，以下为本报告梳理的真实案例。

4.4.1 “焦化+文旅”的转型实践

蒲县宏源煤业集团有限公司作为山西省传统焦煤生产企业，依托政策引导与资源优势，推动向文旅产业的转型布局，其旗下企业运营的壶口瀑布景区已成为区域经济绿色发展的典型案例。壶口瀑布作为国家级风景名胜区，兼具自然与文化双重价值。宏源煤业借助原有工业管理经验，统筹推进景区基础设施建设、安全管理与服务标准化，并引入生态保护技术，有效平衡了开发与保护的需求。目前，壶口瀑布年接待游客超百万人次，门票及衍生收入稳步增长，为企业构建了多元化收益渠道。

4.4.2 “工业+旅游”的跨界融合

2019年，山西光大焦化气源有限公司通过“工业+旅游”跨界融合模式，成为全国焦化行业首家国家AAA级旅游景区，开创了传统重工业绿色转型的新路径。面对行业升级需求，企业投资2000万元实施厂区生态化改造，将生产场景转化为旅游资源——通过硬化景区道路、增设绿化景观、建设煤化工科普馆、打造能源转化工艺参观动线等举措，形成了“环保生产+科普研学+文化体验”的复合业态。游客可直观了解焦炭生产、环境治理及能源转化全流程，景区年均接待量超2万人次。转型后，厂区颗粒物排放下降35%，旅游收入反哺环保技术升级，景区品牌也重塑了企业形象，破

业对高炉进行技术改造，应用高炉喷吹焦炉煤气技术。推动大型钢铁集团充分利用焦炉煤气高氢低碳的特点，将焦炉煤气与转炉煤气等进行耦合，通过氢碳互补生产化学品；同时制备氢气，开展氨基竖炉直接还原铁的试点示范项目^[40]。

外，产业活动的重心应全面转向既有化工副产链条的独立可持续发展，或产能退出后的生态修复与土地再利用。不同情景下，此阶段的挑战在于社会维系的深度与转型知识经验的总结，为更大范围的工业转型提供借鉴。

解了“高污染”的行业认知困境，实现了生态、经济与社会效益的协同提升。

4.4.3 人员安置与平稳过渡机制

在产业转型与产能压减进程中，人员的平稳过渡是衡量转型是否“公正”的关键指标。山西省主要焦化企业在实践中探索出各具特色的人员安置路径，为行业有序转型提供了重要的社会稳定保障。

4.4.3.1 山西焦煤运城盐化——“双主体”运营实现分流软着陆

作为大型国有企业代表，山西焦煤运城盐化创新性实施了人力资源“双主体”运营模式。该模式由组织人事部与人力资源中心分工协作：前者专注于在岗职工的效能提升，后者专责分流职工的安置与再就业。通过系统性的“五个一批”路径——内部安置、组织转移、劳务输出、双创扶持与退岗休养——企业为分流职工搭建了多元化过渡通道，实现了人员结构优化与“软着陆”，有效化解了转型期的社会稳定风险。

4.4.3.2 美锦能源——产能置换带动员工内部消化大型民营企业美锦能源探索了“产能置换、内部消化”的市场化安置模式。在其子公司关停落后产能的同时，集团新建的华盛化工等先进项目同步规划、接续投产。通过将关停子公司的员工成建制分流至新建项目，美锦能源充分利用了新项目对熟练劳动力的需求，实现了“新旧产能无缝衔接，员工岗位平稳转移”，既保障了员工就业稳定性，也为新项目快速投产达效提供了宝贵的人力资源支撑。

05

从焦煤“退出”获得的经验

- 5.1 宏观形势迫使转型应对大幅提前
- 5.2 化石能源转型窗口期前的时空红利
- 5.3 加速探索方能更高效突破发展瓶颈
- 5.4 成为能源公正转型的有效示范路径

第五章 从焦煤“退出”获得的经验

通过第四章的系统分析与测算可知，焦煤“退出”并非绝无可能，甚至存在科学合理的“退出”路径，且不会对全社会与经济运行造成较大冲击或负面影响。本报告通过设定不同年份的可行性“退出”路径，归纳总结出以下经验，为当前乃至下一阶段山西本土焦化行业的逐步转型提供有效建议与思路。

5.1 宏观形势迫使转型应对大幅提前

从宏观层面来看，焦化行业正置身于全球能源格局剧烈变动与国内外能源竞争压力持续加剧的时代背景之下，这些外部环境的剧烈变动，正以前所未有的力度推动焦化行业必须以更快速度响应未来的转型要求，以“未雨绸缪”的主动态度对全行业与产业链各环节进行再研判、再部署。

此前，世界各国此起彼伏发布的“退煤”宣言便是典型的行业借鉴案例。需要明确的是，“退煤”主要指退出煤炭发电领域，而非彻底全方位退出煤炭相关产业。很长一段时间里，中国也承受着较大的“退煤”压力，直至2022年俄乌冲突爆发引发能源供应危机，这一态势才得以缓解。焦化行业的发展也存在类似特征，甚至相较于煤电领域，由于与钢铁行业存在强绑定关系，焦化行业更需意识到整体规模被压缩是必然趋势。

目前钢铁行业尚未出现完美的替代品，且钢铁潜在需求预计将保持强劲，加之国内市场承接国际市场需求，中国仍将是钢铁生产大国。因此，降低钢铁生产的二氧化碳强度将成为中国应对气候变化的关键举措，而剔除原材料中的焦炭、转向零排碳原料，则是实现二氧化碳排放与钢铁生产脱钩的可行且最有效的方法之一^[41]。党的十八大以来，中央政府已自上而下实施转型约束，对焦化行业等污染密集型产业的监管力度不断加强，一系列环保法规的出台与实施，使焦化行业在环保治理、节能减排等方面的投入成本大幅增加，企业利润空间受到严重挤压，这无疑是行业必须转型减产的明确信号。与此同时，国内氢能等战略新兴能源产业的快速崛起，也对焦化行业形成了有效的替代威胁^[42]。在这些因素的共同作用下，焦化行业不得不提前审视传统的战略定位与发展路径，考虑下一阶段“功成身退”的可能性。

事实上，全球传统化石能源逐步退出与可再生能源不断壮大崛起已成为不可逆转的趋势。一方面，随着可再生能源技术的持续突破与成本的不断下降，氢能、

太阳能等清洁能源在全球能源结构中的比重正迅速提升，全方位冲击包括煤炭及其深加工产品——焦炭在内的传统化石能源的市场地位^[43]；另一方面，国际社会对气候变化的关注程度只增不减，各国纷纷出台更为严格的环保法规与减排目标。例如，欧盟近期发布的碳边境调节机制（CBAM）将于2026年正式实施，中国作为欧盟最大的钢铁和焦炭进口国，2023年山西焦炭出口欧盟占比达15%，若未能实现低碳转型，以2026年约90欧元/吨的碳价、吨焦碳排放强度1.8吨测算，每吨焦炭的潜在碳成本约为162欧元，参照近年山西焦炭对欧离岸均价约800-900美元/吨，此项成本将导致出口总成本增加约18%-22%^[44,45]。换言之，国内焦化行业若继续沿用传统生产模式，不仅将面临国际出口市场份额的削减，还可能遭遇国际贸易壁垒与绿色壁垒的双重打击^[46]。

正因如此，作为全国焦化行业典型代表的山西，对国内外宏观形势与技术创新变革的认知需更进一步，而非在非化石能源行业转型浪潮中一轮又一轮被动等待。唯有通过提前研判、主动谋划，才能最大限度减少外部冲击对行业的影响。



山西某焦化厂厂区外景图

5.2 化石能源转型窗口期前的时空红利

2023年联合国气候变化大会（COP28）上，各国达成共识，明确将以公正、有序、公平的方式“逐步摆脱”煤炭、石油、天然气等化石燃料，推动能源系统向无化石能源方向转型。但这一目标的实现需要长期努力，在各国推进碳中和的进程中，2030年前成为焦化行业抓紧实现转型突破的关键窗口期^[47]——“双碳”目标要求2030年前实现碳达峰（即中国二氧化碳排放达到峰值后逐步下降），而焦化行业“高耗能、高排放”的特性，决定了它必然是实现碳达峰目标的核心领域。

当前，国内钢铁行业仍以长流程炼钢为主，尽管生产流程中的钢焦比有所波动，但焦炭在高炉冶炼中的作用不可替代，因此不宜过早放弃仍具潜力与价值的焦化产业。尽管环保政策日益严格，全球钢铁需求并未减少，只是更倾向于绿色低碳的钢铁产品；2021年全球第五大钢铁企业日本制铁甚至因中国限产实现扭亏为盈^[48]。基于钢铁与焦化行业的强绑定关系，未来一段时间内，焦化行业将随钢铁行业的持续发展保持生产。在此过程中，如何实现更清洁、低碳、绿色的生产成为核心问题。由此反向分析，当前至2030年前，正是焦化行业加大力度探索有效转型方向、为后续稳定退出或淘汰奠定基础的宝贵机遇期。

一方面，焦化行业在技术进步领域仍有潜力可挖。若焦化企业持续加大技术与装备投入，主动吸纳相关行业尖端技术，推动清洁、低碳、智能生产，有望实现行业的再次突破。另一方面，政策与行业导向为焦化

行业提供了明确转型方向：从国家到省级政府，再到吕梁、临汾等地市，均陆续发布《氢能产业发展中长期规划》，强调在推进绿氢目标的过程中，需充分发挥工业副产氢的过渡作用。这意味着焦化企业可借助焦炉煤气制氢的切入口，依托氢源优势逐步拓展氢能产业链各环节，推动行业有效转型。

事实上，欧洲早已启动焦化产业转型，核心路径为“脱碳+高附加值”^[40]：通过技术升级将传统焦化厂改造为氢能枢纽与碳材料基地，推动低碳化与氢能经济发展，应用焦炉煤气制氢、碳捕集与封存等技术^[49]；同时探索循环经济与资源高效利用新模式，如煤焦油深加工生产碳纤维、针状焦、石墨烯等高附加值化学品，以及废弃物资源化利用，并尝试拓展生物基原料以降低碳足迹。不过，转型过程中仍面临生物基焦炭技术不成熟、数字化升级成本高、政策与市场风险等瓶颈——这些恰恰是国内焦化企业可以重点突破的方向。

总之，2030年是包括焦化行业在内的化石能源转型关键节点。在此之前，行业仍有相对充裕的时间与空间探索转型，但需清醒认识到：一旦超过2030年，随着政策收紧与技术突破加速，焦化行业将面临严峻考验。因此，行业必须抓住这一窗口期，顺应时代发展趋势，遵循市场竞争规律，优化产业布局，通过与相关产业融合实现产业链延伸与多元化拓展，为后期实现碳中和目标的“功成身退”筑牢基础。

业寻求更环保的生产路径，降低对焦化业务的依赖。

其次，技术创新始终是产业高质量发展的核心关键。企业长远发展往往受限于技术瓶颈，尽管当前干熄焦技术为焦化行业高效发展提供了可能，但从长远来看，技术迭代升级的速度或难以完全抵消行业固有的环境负担。特别是在清洁能源、新材料等领域快速发展的背景下，更环保、高效的替代技术不断涌现，而国家对这些领域的投资与研发支持力度，远高于对焦化等传统污染行业的治理投入，这使得焦化行业在市场竞争中的地位逐渐边缘化。例如，传统焦化企业吨焦利润约

100元，而氢能重卡运营、焦炉煤气制甲醇等新业务毛利率超25%。鹏飞集团通过“煤-焦-氢”转型，2023年氢能板块营收占比提升至18%，反哺焦化主业技术改造。若延迟退出，按产能过剩30%、价格下跌10%测算，山西省焦化行业2040年累计亏损或将超过500亿元。因此，从经济效益与市场竞争力角度考量，焦化行业也必须在2030年以后加速探索，向更具发展前景的领域转型。

再者，政策导向的转变也为焦化行业的“有序退出”提供了契机。“十四五”规划末期，国家已明确展现出向新质生产力迈进的决心，大力鼓励新能源、智能制造、生物科技、数字经济等新兴产业发展；对于高污

染、高能耗的传统产业如焦化行业，则逐步实施更严格的环保标准与产能限制，推动其有序退出或转型升级^[50]。在即将到来的“十五五”规划及更长远的未来，新兴产业的主导地位将进一步巩固，成为推动社会经济高质量发展的核心力量。

因此，面对这一趋势，无论是通过技术创新实现绿色化、智能化改造，还是依托自身资源向新材料、新能源等领域跨界转型，都是焦化企业顺应时代潮流、稳步退出的关键路径。从“被动调整”转向“主动转型退出”，不仅是应对当前困境的务实之举，更是其在新时代背景下迈向广阔未来的必由之路。

5.4 成为能源公正转型的有效示范路径

公正转型是旨在平衡经济发展、社会公平与环境保护关系，推动社会、经济和生态机会最大化、成本最小化的重要理念。这一概念早期聚焦微观层面，尤其关注就业群体的发展与福利；而在国内，特别是资源型地区，其视角已拓宽至宏观转型层面，强调通过产业的有效调整与发展，实现经济的多元化与可持续发展。

2024年，山西省在全省两会报告中首次明确提出公正转型的概念，指出公正转型既要实现绿色低碳发展，又要兼顾社会公平正义，确保转型成果惠及全体人民。这意味着山西在推动产业转型升级的同时，需重点解决转型过程中产生的社会问题。焦化行业因典型的“两高”特性及在部分地区较大的经济占比，成为公正转型的重点领域。

相较于动力煤在全国能源供应安全中的托底作用，煤炭领域的焦煤体量更小、灵活性更强，使得焦化

行业能够成为推动公正转型的有效示范路径——焦化行业的转型不仅关乎自身可持续发展，更是山西省实现能源产业公正转型的关键举措。一方面，从转型资金角度看，焦化产业的公正转型可吸引更多资金流入，通过推动行业在技术、装备及多元领域的转型升级，为其他行业注入信心，进而撬动更多转型资金支持，助力社会经济整体绿色发展^[51]。另一方面，从环保角度看，焦化产业碳排放量约占全省碳排放的9%，其公正转型对山西实现阶段性碳减排目标具有积极示范效应：无论是绿色节碳技术的升级，还是焦炭产量的逐步控制与削减，都能大幅降低全省碳排放，有效改善环境质量。此外，从微观层面看，对相关产业就业群体而言，公正转型意味着在淘汰落后产能的同时，为受影响工人提供再教育与职业培训，保障其在高质量新兴产业经济结构中的就业机会，维护社会稳定。



06

结论与政策建议

- 6.1 从当前来看，合理运用有效政策与转型资金
- 6.2 短期来看，“十五五”期间优化整合焦化项目
- 6.3 中期来看，与国内钢铁大省区域间协同联动
- 6.4 长期来看，为动力煤的多元化转型打头阵

第六章 结论与政策建议

根据上文系统分析，本报告认为山西可以将焦化行业的提前平稳“退出”作为实现“双碳”目标的优先战略。在此过程中，政府需早做谋划，充分考量平稳、和谐、公正转型的稳妥路径及转型可能引发的各类社会影响。同时，这一过程中积累的经验与方法，也将为未来动力煤在发电领域实现一定比例的稳定退出、更好发挥国家能源供应安全体系“压舱石”的作用提供参考。

进一步而言，结合焦煤行业整体发展态势、钢铁需求情景、能耗强度与碳排放约束等因素综合研判，报告认为，在明确政策制定者、钢铁企业、焦炭行业及相关从业人员等各利益相关方具体行动的基础上，我国焦化行业有望在本世纪中叶完成主体产能退出。这一时间窗口既与钢铁行业短流程替代速度相适配，也能为地方经

济、财政与就业转型提供可承受的过渡期。围绕该时间节点，各利益相关方需采取差异化行动：政策制定者（国家与省级层面）需提前明确退出路径与进度安排，设立“焦化产能年度削减线”“焦炭约束性消费总量”等硬约束指标，同时配套设计财政专项基金、绿色信贷与就业保障计划；钢铁制造商应加快推进电炉短流程改造、氢冶金示范及绿电采购机制建设，逐步降低焦炭使用量，按计划构建“无焦化依赖”的技术体系；焦化企业需在窗口期内集中推进资产转型；相关从业人员则应在政府与企业的协同推动下，积极开展职业转换与技能培训，优先向装备制造、氢能、储能、新材料及现代服务业等领域转移。

6.1 从当前来看，合理运用有效政策与转型资金

“十四五”期间，山西已全面完成4.3米捣固焦炉的淘汰工作，现存5.5米焦炉仅6家，产能860万吨，占比7.28%，而6米以上先进焦炉占比达92%。这意味着从2024年至2040年左右，全省焦化企业将进入新设备建设与使用周期，这15年左右的新周期既是焦化行业加速转型升级的关键阶段，也是探索行业提前“退出”的重要窗口期。因为若此期间清洁能源技术取得突破且转型持续推进，很可能无需再开展新一轮大规模焦化设备改造。

在此期间，为有效应对“双碳”挑战并合理利用转型资金，山西省政府需与企业紧密协作，强化焦化行业宏观政策取向的一致性，将经济政策与环保、科技等非经济性政策统一纳入宏观政策取向一致性评估，建立跨部门政策协调机制，及时修订完善不符合一致性要求的政策，确保各项政策协同发力。建议构建由政府主导、企业积极参与、行业协会协调、社会公众监督的多元化协同机制，保障转型过程的安全平稳与责任落实。同时，政府应成立省级协同领导小组，统筹协调工信、能源等相关部门，明确各司其职并实施联合监管：一方面摸清省内焦化行业产能底数，建立数据库，制定“一企一策”退出清单，为未来转型奠定基础；另一方面保障安全生产与环保措施的有效执行。此外，应鼓励民间组织和行业协会参与，建立信息共享与反馈机制，增强

政策透明度与公众参与度，并对失职行为进行问责，确保转型过程安全平稳、责任落实到位。

针对中央审批的“双碳”政策与资金，合理利用是核心问题。一方面，中央“双碳”目标作为国家战略的总引领，为地方发展指明了方向。山西省需深度解读这一目标，结合自身煤炭资源大省的实际，制定切实可行的环保措施，包括优化能源结构，发展氢能、太阳能等可再生能源，推动煤炭等化石能源逐步退出；聚焦源头减碳、过程降碳、末端固碳，促进低碳技术研发与应用。另一方面，政府应建立专门的政策资金管理机制，资金可按“6:3:1”比例分配（60%用于技术升级、30%用于职工安置、10%用于环境修复），通过设立专项基金、提供贷款贴息、税收减免等措施，鼓励企业主动退出或转型升级。此外，政府可引导社会资本参与转型项目，通过公私合营（PPP）模式、产业投资基金等方式，为转型提供多元化资金来源。同时，加强政策资金的监管与评估，邀请行业专家、学者及利益相关者参与论证评估，广泛听取各方意见建议，持续完善优化行动计划。

不仅如此，高校与科研机构应发挥技术研发与人才培养的核心作用，通过校企联合实验室、产业研究院等平台，推动氢能制储、碳捕集利用等焦化行业低碳技术的突破与产业化应用。民间智库、行业协会及环保组

织的作用也不容忽视，可承担社会监督与公众参与职能，通过第三方评估、社区对话等方式，为转型政策提供科学依据与社会支持。此外，鼓励高校联合职业院校

开展焦化产业工人再培训计划，助力劳动力向新能源、新材料等领域平稳过渡，形成“政产学研用”协同的创新生态，为行业转型注入持续动力。

6.2 短期来看，“十五五”期间优化整合焦化项目

短期即“十五五”期间，针对山西省焦化行业产能分散的现状，应以行业协会为抓手，通过兼并重组、技术升级等方式积极推动焦化项目优化整合。例如吕梁市通过兼并重组，将企业数量从63家压缩至20家以内，产能集中度提升至90%。具体而言，需综合考虑焦化炉运行效率、污染物排放水平、能耗指标及设备老化程度等因素，结合地理分布、产业链影响和社会稳定风险开展综合评估，建立“白名单”与“黑名单”制度：白名单企业可优先获得技改资金支持，黑名单企业则需强制退出，以此推动行业整体优化。

同时，为避免退出过程中出现行业内卷与过度竞争，一方面，焦化行业应借鉴光伏产业近期的成功经验，鼓励龙头企业发挥引领作用，主动实施“限产”，通过兼并重组提高产业集中度，实现资源优化配置；另

一方面，行业协会需进一步强化对焦化行业的约束力度，建立健全行业规范与自律机制，加大对违规行为的处罚力度，推动行业完成从分散到集中的结构转变、从无序到有序的发展模式升级，进而减少内卷现象，实现平稳过渡。具体到企业层面：一是晋南钢铁等钢焦一体化联合企业，应密切跟踪国家钢铁产业政策，严格遵循“以钢定焦”原则，科学部署钢铁与焦炭产能，最大限度减少产能过剩；同时加快绿色低碳改造升级，有序退出落后焦化产能，实现降本增效。二是阳光焦化等独立焦化企业，短期内需适时调整产能布局与产品销售区域，灵活拓展华北、华东、华南等地的焦炭市场，以缓解河北钢铁低碳发展带来的焦炭需求减量影响。

6.3 中期来看，与国内钢铁大省区域间协同联动

除练好内功之外，从“十五五”到2040年之前，山西还应与周边钢铁生产大省开展协同行动。山西在高质量能源转型中的对外突破，核心在于提升自身在能源转型领域的影响力，并拓展外部合作空间。特别是在“十五五”这一我国经济迈向高质量发展的关键阶段，山西的焦化转型战略尤为关键。

为此，建议构建“公正能源转型兄弟关系”（Just Energy Transition Brotherhood, JETB），即通过加强山西与河北、江苏等周边钢铁大省在能源政策、技术创新、市场开拓等领域的沟通协作，共同推动能源结构优化升级^[52]。这一合作模式能够汇聚多方智慧与力量，有效应对转型过程中可能面临的技术瓶颈、资金短缺、市场波动等挑战，从而加速转型进程、提升转型成效。同时，该模式充分考量各参与省份的资源禀赋、产业基础与发展需求，具备广泛的合作基础和共同利益。通过建立定期沟通机制、共享信息平台、联合技术研发、市场拓展合作等方式，可有效促进资源共享、优势互补，形成互利共赢的发展格局。

具体而言，一方面，应建立区域协同工作机制与共享信息平台，例如“晋冀苏焦钢协同平台”——山西可提供灰分 $\leq 12.5\%$ 的低碳焦炭，河北承接氢冶金试点，江苏输出短流程炼钢技术；同时不定期召开会议分享钢一焦生产现状，根据钢铁生产实际需求合理规划焦炭产量，确保产能与市场需求精准匹配，在避免资源浪费的同时保障市场供应稳定^[53,54]。此外，还需实施跨省产能置换政策，引导焦化产能从零散地区有序转移至条件更优越的山西，集中优势产能，为焦化行业高质量发展提供保障。另一方面，各省份应在技术创新与产业链优化领域协同发力，推动企业、科研机构和社会团体在产业转型、技术升级、低碳发展等方面的深度合作。通过技术交流、联合研发等途径，有效防范资产资源搁浅风险；同时聚焦焦化行业数字化、智慧化技术研发，例如开发焦炉无人智能巡检、AI配煤优化等技术，逐步实现“一键智慧化炼焦”，大幅提升生产效率与环保监控水平，实现降本增效，为山西省焦化行业的有序退出筑牢基础。

6.4 长远期来看，为动力煤的多元化转型打头阵

2040年及更长远的未来，山西焦化行业的“退出”并非终点，而是资源型地区全面绿色转型的起点。需要明确的是，尽管化石能源逐步退出各国能源系统已成为时代趋势，但煤炭在短期内仍无法彻底淘汰；作为国家能源安全的压舱石，动力煤行业应在保障国家能源安全的基础上，积极探索多元化转型路径。为此，在焦化退出过程中，及早邀请动力煤行业代表与政策制定者共同参与，是推动动力煤多元化转型的关键。

一方面，在碳达峰碳中和背景下，煤炭不再局限于单一燃料用途，而是作为原料和材料迎来更广阔的发展空间。现代煤化工技术显著提升了煤炭清洁高效利用水平，是实现煤炭从单一燃料属性向原料和材料属性转变的有效途径。充分认识到动力煤与焦炭在生产流程、市场需求及能源政策等方面的高度相关性，推动煤炭从燃料向原料转变，既能提升行业盈利能力与技术门槛，也

有助于行业向更高附加值领域迈进。另一方面，需大力支持科研院所、高校与煤炭行业重点企业开展创新合作，协同攻关清洁高效大型煤气化、能源化工耦合等共性关键技术，着力突破煤化工产业“卡脖子”技术瓶颈；积极建设国内现代煤化工示范基地，打造新型高端碳材料转型升级示范区，推动甲醇汽车等煤化工材料的终端应用，并拓展科技创新融资渠道^[55]。在此基础上，结合各方意见形成具有前瞻性与可操作性的动力煤转型建议报告，为政策制定与行业实践提供有力支撑，共同促进煤炭行业向更环保、高效、多元的方向发展。

总之，通过“焦化退出一动力煤转型”的战略衔接、区域协同与技术共享，山西有望从“煤炭依赖”转向“氢能高地”与“材料强省”，为全国资源型地区可持续高质量发展提供可借鉴的“山西方案”。



山西某焦化厂厂区外景图

REFERENCES

参考文献

► [1]世界金属导报. 欧洲钢企低碳转型项目进展 [EB/OL]. (2024-12-20).
http://www.worldmetals.com.cn/viscms/bianjituijianxinwen1277/20241203/266253.html.

► [2]自然资源协会. 山西省传统产业非煤转型研究报告[R]. 2023.

► [3]中国煤炭经济网. 我国煤炭资源储量概况及地域分布情况 [EB/OL]. (2024-11-25).
https://www.ccera.com.cn/web/113/202406/2863.html.

► [4]山西省人民政府. 山西省2024年政府工作报告[R]. 山西省政府办公厅, 2024.

► [5]山西省安全生产委员会办公室. 山西省煤矿分类统计报告[R]. 山西省政府, 2024.

► [6]宋延军. 山西焦化技术进步与可持续发展[D]. 山西大学, 2006.

► [7]国家统计局. 中国统计年鉴（2015-2024年）[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015-2024.

► [8]山西省统计局. 山西省统计年鉴（2014-2023年）[M]. 山西人民出版社, 2014-2023.

► [9]山西省能源低碳发展研究中心. 山西省能源低碳发展数据报告（2023）[R]. 山西科技出版社, 2023.

► [10]Mysteel. 中国煤炭供应保障基地——山西概况 [EB/OL]. (2024-11-25).
https://cj.sina.com.cn/articles/view/2299163722/890a744a0270142cc.

► [11]中国新闻网. 2023年“晋电外送”电量破1500亿千瓦时，外送省份扩至23个 [EB/OL]. (2024-12-25).
https://cpnn.com.cn/news/dianli2023/202401/t20240112_1668771.html.

► [12]周雷. 钢铁业创新供给拓市场[N]. 经济日报, 2025-02-17 (006).

► [13]山西省人民政府门户网站. 山西省国民经济和社会发展统计公报（2014-2023）[EB/OL]. (2025-02-26).
http://www.shanxi.gov.cn.

► [14]山西焦煤集团官网. 企业社会责任 [EB/OL]. (2024-12-25).http://www.sxcc.com.cn.

► [15]前瞻网. 2022年中国焦炭行业龙头企业分析——山西焦化：焦炭全产业链龙头企业 [EB/OL]. (2024-12-25).
https://www.163.com/dy/article/HK75J21Q051480KF.html.

► [16]美锦能源集团官网. 氢能产业布局 [EB/OL]. (2024-12-25). http://www.meijinenergy.com.

► [17]山西安泰集团股份有限公司. 安泰集团年度报告（2021-2023）[R]. 介休: 安泰集团, 2023.

► [18]中国太原煤炭交易网. 让存量工人与增量产业在绿色跑道上精准对接 [EB/OL]. (2025-03-15).
https://www.ctctc.cn/info/248068.jspx.

► [19]李文华,刘倬榕,黄微微,等. 低碳背景下山西省钢铁产业高质量发展路径研究[J]. 老字号品牌营销, 2024, (24): 56-58.

► [20]谭亚敏. 焦化行业低利润成常态，企业利用期货工具破局[N]. 期货日报, 2024-07-02(004).

► [21]光大期货. 《光期黑色：2024年炼焦煤进口情况分析》[R]. 光大期货, 2023.

► [22]Wang F H , Qiu J , Ping D X , et al. Roadmap, current situation, and prospects of low-carbon development technologies in Chinese steel industry [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(12): 1-14.

► [23]Yuancheng L ,Honghua Y ,Linwei M , et al. Low-Carbon Development for the Iron and Steel Industry in China and the World: Status Quo, Future Vision, and Key Actions [J]. Sustainability, 2021, 13(22): 12548.

► [24]孙艺硕. 基于职业暴露矩阵的焦炉逸散物对钢铁行业焦化工人健康风险研究[D]. 中国医科大学, 2024.

► [25]国务院. 《空气质量持续改善行动计划》[R]. 北京: 国务院, 2023.

► [26]焦化行业新大气污染物排放标准发布[J]. 中国石油和化工, 2025, (02):10.

► [27]European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) Regulation [EB/OL]. (2024-05-16). https://ec.europa.eu.

► [28]临汾市人民政府. 《临汾市焦化产业园区规划（2020-2035）》[R]. 临汾市政府, 2020.

► [29]刘超. 隐于山间的焦化“明星”[N]. 临汾日报, 2024-08-12 (004).

► [30]贺军泽, 孙哲峰, 杨全. 焦化业绿色发展“新标杆”[N]. 临汾日报, 2024-11-13 (002).

► [31]晋南钢铁集团. 布局千亿级氢能产业链 打造绿色低碳靓丽名片[N]. 中国冶金报, 2022-07-28(16).

► [32]现代煤化工. 山西沃能化工30万吨/年乙二醇项目投产！ [EB/OL]. (2024-12-25). https://www.sohu.com.

► [33]Hugues P, Assoumou E, Maizi N. Assessing GHG mitigation and associated cost of French biofuel sector: Insights from a TIMES model [J]. Energy, 2016, 113: 288-300.

► [34]马丁, 陈文颖. 基于中国TIMES模型的碳排放达峰路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(10): 1070-1075.

► [35]赵立祥, 王宇奇. 基于TIMES模型的客运交通低碳化研究——以北京市为例[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2015, 17(05): 50-55.

► [36]Lu LW, Preckel PV, Gotham D, Liu AL. An assessment of alternative carbon mitigation policies for achieving the emissions reduction of the Clean Power Plan: Case study for the state of Indiana [J]. Energy Policy, 2016, 96: 661-672.

► [37]Aitken ML, Loughlin DH, Dodder RS, Yelverton WH. Economic and environmental evaluation of coal-and-biomass-to-liquids-and-electricity plants equipped with carbon capture and storage [J]. Clean technologies and environmental policy, 2016, 18(2): 573-581.

► [38]自然资源保护协会. 碳中和目标下山西省焦化产业转型发展和定位研究[R/OL]. 2023.
http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2023-07-10/64aba8faad838.pdf.

► [39]王艳珍. 煤化工生产技术路线及产品现状[J]. 广东化工, 2024, 51 (17): 90–91.

► [40]European Steel Association (EUROFER). Low–Carbon Roadmap for the European Steel Industry [R]. Brussels: EUROFER, 2022.

► [41]林水静. 钢铁行业迎低碳转型新机遇[N]. 中国能源报, 2024–12–23 (010).

► [42]中国氢能联盟. 中国氢能产业发展报告（2023）[EB/OL]. (2024–02–26). <http://www.h2cn.org>.

► [43]王媛. 太原: 能源产业加速向“绿”转型[N]. 山西经济日报, 2023–12–07 (001).

► [44]European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism: Detailed Rules [R]. Brussels, 2023.

► [45]World Bank. Carbon Pricing and Competitiveness: A Case Study of China’ s Steel Sector [R]. Washington, D.C., 2023.

► [46]International Energy Agency (IEA). Global Energy Review 2023 [R]. Paris: OECD/IEA, 2023.

► [47]United Nations. COP28 Final Resolution on Fossil Fuel Transition [R]. Dubai, 2023.

► [48]金融见闻录. 日本制铁：中国限产让全球钢铁业迎来顺风 [EB/OL]. (2024–12–25). https://www.sohu.com/a/486891549_313737.

► [49]Smith J, Brown T. The Role of Carbon Capture in Heavy Industry Decarbonization [J]. Nature Energy, 2021, 6(8): 789–798.

► [50]中国炼焦协会. 《焦化行业“十四五”发展规划》[R]. 中国炼焦协会, 2021.

► [51]赵敏, 刘洋. 山西省焦化产业退出机制的经济社会影响分析[J]. 资源科学, 2024, 46(1): 89–97.

► [52]寇静娜. 山西高质量能源转型的探索行动与思考[R/OL]. 2025.

► [53]王海霞. “晋煤冀钢”如何携手实现低碳转型[N]. 中国能源报, 2025–01–20 (016).

► [54]马志超,李祺,赵学存. “双碳”目标下河北省钢铁行业数字化供应链转型升级研究[J]. 河北冶金, 2024, (12): 80–84.

► [55]山西省发展和改革委员会. 《推进煤炭和煤化工一体化发展的指导意见》[R]. 山西省政府, 2023.