中国环境与发展国际合作委员会

前期研究报告

中国传统能源地区低碳转型路径与政策
——以煤炭三角区为例

中国环境与发展国际合作委员会 2024 年年会

2024 年 10 月

前期研究项目组成员

（中外组长、成员、支持专家及协调员姓名、单位、职务/职称）

项目组成员*

姓名	**单位**
中外组长	
王金南	生态环境部环境规划院
Pete Harrison	美国环保协会
中外成员	
蔡博峰	生态环境部环境规划院
张立	清华大学
张佳丽	生态环境部环境规划院
侯琳静	生态环境部环境规划院
郭静	生态环境部环境规划院
臧宏宽	生态环境部环境规划院
吴赟龙	生态环境部环境规划院
贾敏	生态环境部环境规划院
秦虎	美国环保协会
高霁	美国环保协会
甘奕维	美国环保协会
高剑峰	山西省社科院（山西省政府发展研究中心）
姚西龙	太原理工大学
李慧	太原科技大学
王建新	太原理工大学

寇静娜	太原理工大学
赵文婷	太原理工大学
李静	太原理工大学
王文熹	太原师范学院
王香增	陕西延长石油（集团）有限责任公司
王苏健	西安科技大学
王宏	陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院
杭栓柱	内蒙古大学创业学院战略与规划研究中心
杨帆	内蒙古自治区生态环境低碳发展中心
尹伟康	宁夏自治区生态环境厅
程志	宁夏清洁发展机制环保服务中心
刘硕	宁夏电力设计院能源规划研究中心
陈琳	宁夏电力设计院能源规划研究中心
杨丽蓉	宁夏自治区生态环境厅
周霞	宁夏清洁发展机制环保服务中心
闫吉春	宁夏清洁发展机制环保服务中心

支持专家

Mandy Rambharos	美国环保协会
Béla Galgóczi	European Trade Union Institute
刘世锦	国务院发展研究中心
黄少中	中国能源研究会
郭敬	“一带一路”绿色发展国际联盟
韩文科	国家发展和改革委员会能源研究所

胡秀莲	国家发展和改革委员会能源研究所
姜克隽	国家发展和改革委员会能源研究所
中方协调员	
蔡博峰	生态环境部环境规划院
外方协调员	
高霁	美国环保协会

***** 本前期研究项目组联合组长、成员以其个人身份参加研究工作，不代表其所在单位，亦不代表国合会观点。

执行摘要

一、转型摆脱化石能源已成为各国政府和国际社会共同的责任，能源分布区域性差异是实现能源转型的重要影响因素。化石燃料的使用是导致全球气候变化加剧的主要原因之一，实现《巴黎协定》1.5℃长期温控目标需要持续的减排努力。联合国气候变化框架公约第 28 次缔约方大会（COP28）明确提出各国要“以公正、有序和公平的方式，在能源系统中转型摆脱化石燃料”，并且提出到 2030 年全球可再生能源装机容量相对于 2022 年提高三倍，加速从化石燃料向可再生能源的转型。同时，COP28 指出能源分布区域性差异是实现能源转型的重要影响因素。

二、本项目首次提出中国煤炭三角区概念，研究该地区低碳转型对于推动我国乃至世界能源转型具有重要意义。首次提出中国煤炭三角区概念，包括内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区。煤炭三角区是中国重要的能源和煤炭基地，煤炭资源丰富。2023 年四省区煤炭产量分别达到 12.1 亿吨、1 亿吨、7.6 亿吨和 13.8 亿吨，占全国原煤产量的 74%。煤炭三角区是中国典型的、甚至是唯一一个大型煤炭能源聚集区，长期以来形成了对煤炭资源过度依赖的经济发展和产业模式，内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区二氧化碳排放总量、人均碳排放和碳强度均处于全国前列。煤炭三角区在中国碳达峰碳中和战略下，面临巨大挑战，也迎来了千载难逢的战略机遇。针对煤炭三角区开展能源转型和产业升级相关研究，可以为全国乃至全球传统能源地区提供非常宝贵的经验。

三、煤炭三角区的能源转型研究对于改变区域可持续协调发展和推动公正转型发挥重要作用。煤炭三角区长期以来对煤炭资源过度开采和依赖，面临着环境污染和资源枯竭等问题，转型过程中公平问题没有得到足够重视。因此本项目对煤炭三角区能源转型进行研究，制定相关战略规划、配套政策和资金支持，为促进煤炭三角区能源转型与产业转型、区域经济、社会发展，实现煤炭三角区区域公平、生态公平和就业公平提供可行路径。

四、基于中国中长期排放路径模型（CAEP-CP 2.0），建立煤炭三角区“黑色能源—蓝色能源—绿色能源”能源转型路径。基于项目组建立的中国中长期排放路径模型（CAEP-CP 2.0），充分考虑三角区内资源禀赋、能源生产、能源消费、跨省电力交换、电网规划等数据，科学评估煤炭三角区可再生能源潜力，建立在二氧化碳排放目标约束下的煤炭三角区能源转型路径，推动煤炭三角区实现“黑色能源（现状）—蓝色能源（2035 年）—绿色能源（2060

年）”的转型之路。

五、提出煤炭三角区在传统煤炭产业退出和新能源一体化发展下的产业转型方向。在“双碳”目标约束下，基于产业现状、国际国内经验和最新研究进展，研判煤炭三角区煤炭相关产业绿色低碳转型和新能源产业一体化发展转型方向，挖掘产业能源一体化发展模式，并依托新能源资源和制造业要素等区域优势资源，综合新能源装备制造、新能源电力消纳、氢能—存储、CCUS等维度进行分析，提出区域内“风光+”产业链的上下游产业体系，为煤炭三角区能源转型提供技术指导。

六、识别煤炭三角区能源转型路径下区域、就业和生态公平协同发展新机遇。研究基于实现区域经济和区域协调发展理念，分析能源转型与煤炭三角区产业转型带来的区域经济发展机遇，结合能源转型与煤炭三角区产业转型、乡村振兴的关系，识别区域公平、就业公平、生态公平等公正转型视角下的发展新机遇，并提出保障公正转型的决策建议。

七、建立煤炭三角区低碳转型的国家级协调机制，以全国一盘棋的大局，为中国化石能源聚集区的低碳转型开辟道路、建章立制。建议成立煤炭三角区低碳转型领导小组，建立煤炭三角区一体化转型协作机制。合理确定煤炭三角区在全国一盘棋下梯次达峰的功能定位，充分考虑国家能源安全和能源需求，明确全国对煤炭三角区的煤炭和煤电外送需求，建立煤炭产能储备制度，制定鼓励新能源发电的优惠政策，建立电网消纳的绿色通道，激励非化石能源发电出力。优化煤炭三角区碳达峰时间表、路线图和考核办法。同时，充分考虑传统能源低碳转型对于弱势人群、就业、生态等造成的冲击和影响，探索建立公正转型机制。鼓励煤炭三角区与国际煤炭地区建立交流渠道，引领全球煤炭地区低碳转型。

八、举煤炭三角区全区之力建立“零碳电力产业和贸易特区”，为面向出口的企业提供“零碳电力”认证，以特区的外溢效应带动煤炭三角区产业突破性转型。建议煤炭三角区依托自身资源禀赋，全面建立“零碳电力产业和贸易特区”（简称“零碳特区”）机制，发挥土地广阔、新能源装机量大且与化石能源灵活互补潜力优势，利用区域微电网新业态，以全区电力系统保障特区的零碳电力长期连续供应，并提供优惠的进出口税收政策，面向全球大力吸引出口型企业入驻“零碳特区”。“零碳特区”内部建设零碳数字认证体系，对产品提供全生命周期碳足迹认证，赋予园区内产品可追溯、符合国际标准的“零碳认证”标识。建立“零碳电力产业和贸易特区”有望突破煤炭三角区新能源消纳和产业转型困境，有助于我国探索有效应对国际贸易碳规

锁。

九、设立煤炭三角区低碳转型基金，撬动全区低碳转型技术升级和保障公平公正。建议采取“政府引导基金+风险投资/股权投资机构+企业投资者”的混合融资模式，通过公共资本和国际开发资本以优惠价格提供资本，驱动以市场价格提供资金的私营资本进场。其中，由煤炭三角区各省国资控股集团及各类绿色产业资金等组成催化资本，由来自煤炭税收和政府一般公共预算投资组成公共资本，吸引私营资本。可由煤炭三角区省级金融控股集团共同组建基金管理公司，负责转型基金的专职管理。

关键词：煤炭三角区；中国；低碳转型；新能源；碳达峰碳中和

术语表

缩略词	注释
CAEP-CP 2.0	中国中长期排放路径模型
CCUS（Carbon Capture Utilization and Storage）	二氧化碳捕集利用与封存
CGE（Computable General Equilibrium）	可计算的一般均衡模型
Coal Triangle Area	煤炭三角区
COP28（28th Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change）	《联合国气候变化框架公约》第二十八次缔约方大会
ETS（Emissions Trading System）	碳排放交易系统
EGD（European Green Deal）	欧洲绿色协议
ESR（Effort Sharing Regulation）	《努力分担条例》
GIS（Geographic Information System）	地理信息系统
IEA（International Energy Agency）	国际能源署
GDP（Gross Domestic Product）	国内生产总值
IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）	联合国政府间气候变化专门委员会
JTF（Just Transition Fund）	公正转型基金
LMDI（Logarithmic Mean Divisia Index）	对数平均迪式指数法
UNFCCC（United Nations Framework Convention on Climate Change）	《联合国气候变化框架公约》
SCF（Social Climate Fund）	社会气候资金

目录

执行摘要 **1**
1. 引言 **2**
2. 研究背景和意义 **2**
2.1. 研究背景 2
2.2. 研究区域概况 3
3. 国际国内能源转型经验与启示 **4**
3.1. 国际能源转型案例分析 5
3.2. 国际公正转型案例分析 7
4. 煤炭三角区现状分析和达峰路径 **9**
4.1. 现状分析 10
4.2. 煤炭三角区 2010—2023 年历史转型效果评估 14
5. 煤炭三角区转型面临的问题与挑战 **16**
5.1. 煤炭三角区在近 15 年的能源转型中动力不足，未能推动整体取得明显成效 16
5.2. 煤炭三角区过度依赖煤炭相关产业并形成路径依赖，未来面临碳锁定风险 16
5.3. 重点地区转型取得良好突破，已催生一批新兴产业 17
6. 转型路径分析 **17**
6.1. 煤炭三角区碳排放路径 18
6.2. 能源转型路径 20
6.3. 技术转型路径 22
6.4. 产业转型路径 22
7. 公正转型 **23**
8. 政策建议 **24**
8.1. 建立煤炭三角区低碳转型的国家级协调机制 24
8.2. 建立“零碳电力产业和贸易特区” 25
8.3. 设立煤炭三角区低碳转型基金 25
参考文献 **26**
附录 A 研究方法与技术路线 **31**
1. 研究技术路线 31
2. 中国中长期排放路径模型 CAEP-CP 2.0 32
3. 开展现场调研和会议研讨 35

1. 引言

中国环境与发展国际合作委员会设立“中国传统能源地区低碳转型研究项目”专题政策研究项目，生态环境部环境规划院和美国环保协会作为该项目的中外课题组长单位。本项目聚焦煤炭三角区的绿色低碳转型，兼顾转型过程中面临的公平公正和能源安全等问题，构建因地制宜的发展战略，制定全面的产业转型升级方案，为传统能源地区的绿色低碳转型提供气候变化的综合解决方案，助力中国双碳目标的尽早尽快实现。

2. 研究背景和意义

2.1. 研究背景

2.1.1.第 28 届联合国气候变化大会（COP28）明确提出全球各国应逐步淘汰化石燃料的使用，国际上已达成一系列关于退煤的倡议

2023 年 11 月 30 日至 12 月 12 日在阿拉伯联合酋长国迪拜世博城举办的 COP28 上达成的《阿联酋共识》，被普遍视为是一个历史性的里程碑。这一协议首次明确提出了一个关键性目标：各国要以公正、有序和公平的方式，在能源系统中实现摆脱化石燃料的转型。除了提出摆脱化石能源的目标外，《阿联酋共识》还明确了到 2030 年将全球可再生能源的装机容量增加三倍的具体目标。国际上已经有大量关于退煤和脱碳的相关研究。联合国气候变化大会（COP28）成为了一个重要的平台，旨在评估和讨论全球气候变化问题，以及各国在减少温室气体排放、适应气候变化影响、提供资金支持和技术转移等方面所采取的行动。

2.1.2.党中央高度重视双碳目标下的经济全面绿色低碳转型，但面临传统行业高碳锁定风险

2024 年 8 月 11 日《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》强调，推动经济社会发展绿色化、低碳化，是实现高质量发展的关键环节，是解决我国资源环境生态问题的基础之策。2024 年 7 月 30 日国务院办公厅关于印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》的通知，标志碳排放双控制度走向执行阶段。中国实现碳达峰碳中和时间紧任务重，是全世界从碳达峰到碳中和时间最短、减碳规模最大、降幅速度最快的国家。根据项目组相关研究，2020 年中国重点行业（包括电力、钢铁、水泥和石化行业）

碳锁定为 1960 亿吨，为全球各国最高，占中国碳预算比例高达 65%，对双碳目标的实现构成巨大挑战。亟需提前管理能源基础设施，避免高碳锁定，降低或避免资产搁浅造成的损失，逐渐摆脱对煤炭的路径依赖。

2.1.3.中国煤炭三角区（内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区）是世界上最大的煤炭能源聚集区，面临着严峻的转型挑战

中国的化石能源和非化石能源在地理分布上存在明显差异，其中煤炭三角区（包括内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区）煤炭和新能源资源丰富，2023 年四省区的煤炭产量分别达到 12.1 亿吨、1 亿吨、7.6 亿吨和 13.8 亿吨，占全国原煤产量的 74.4%。同时该区域国土面积仅占全国约 16.8%，且分布了高达 28%的风电装机和 15%的太阳能装机，风光资源潜力很大。在严峻的转型挑战形势下，有必要采取有效的措施，减少煤炭资源的过度开采，推动清洁能源的发展，减少温室气体排放，提升区域发展的整体水平和实现化石能源清洁化、清洁能源规模化、多种能源综合化、终端能源电气化、产业能源一体化等目标，实现能源生产的可持续发展。

2.2. 研究区域概况

煤炭三角区占据全国 16.8%的土地面积，占全国 7.48%的人口（2023 年），创造了全国 7.1%的 GDP（2023 年）。2023 年全国人均 GDP 为 8.9 万元，煤炭三角区除内蒙古人均 GDP 高于平均水平外，山西、宁夏、陕西人均 GDP 分别为 7.4 万元、7.3 万元、8.5 万元，均低于全国平均水平，且山西和宁夏人均 GDP 比全国平均水平低 18%。

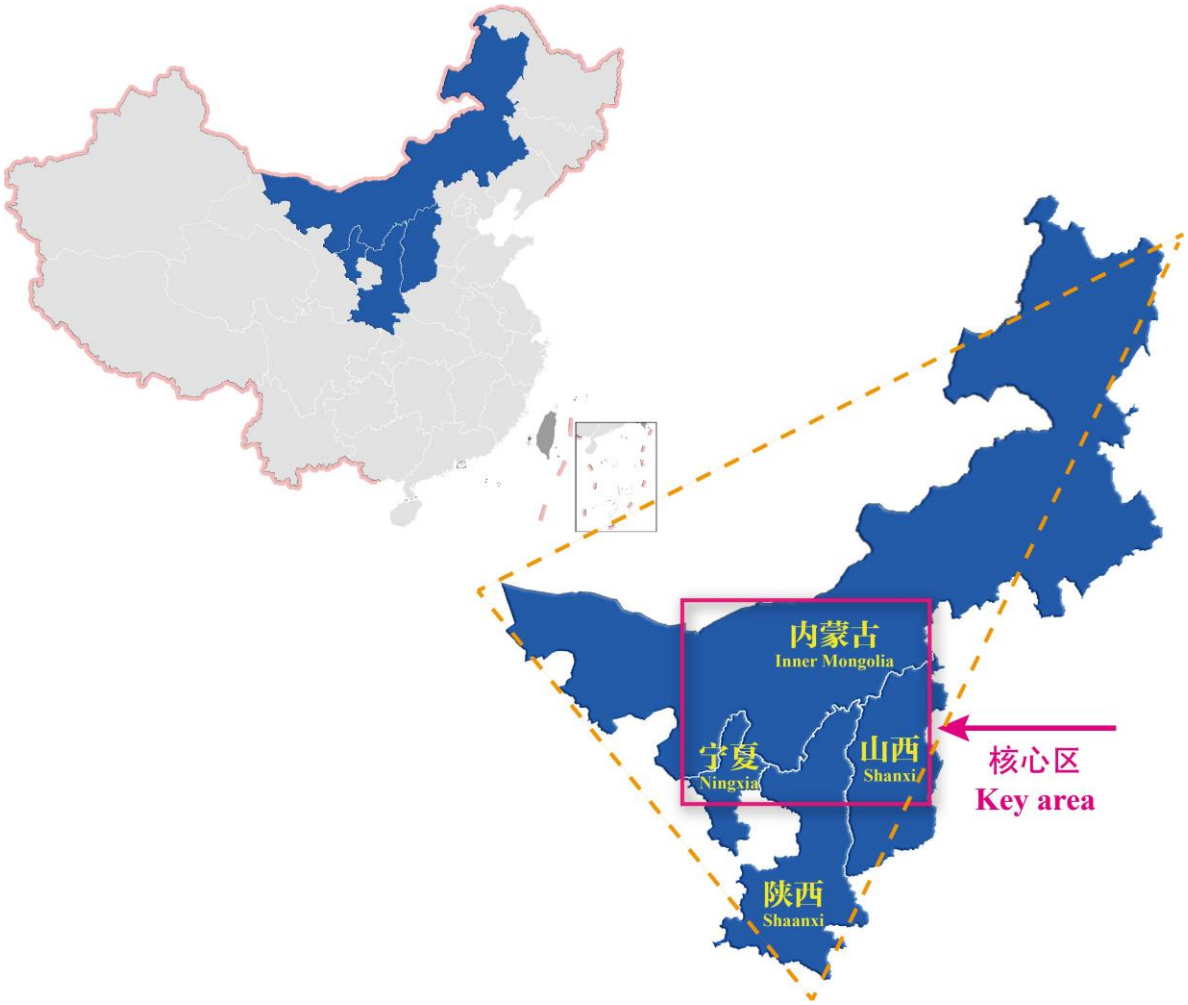


图 2-1 煤炭三角区地理位置图

3. 国际国内能源转型经验与启示

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，因此与煤炭相关的温室气体排放量最高。煤炭产量仍在增长，预计将在 2027 年达到峰值。与此同时，中国在可再生能源生产和电力移动性方面处于世界领导者位置。这意味着，到目前为止，无论是从经济还是就业的影响来看，中国的绿色转型都是大有裨益的。绿色经济的动态发展是在仍在增长的煤炭（或更广泛意义上的化石燃料）驱动的经济之上出现的。中国尚未面临能源转型潜在的负面就业或社会影响。与欧洲相比，这是一个主要的区别，因此，来自欧洲的经验和实践——包括积极的和消极的——将有助于中国顺利渡过即将到来的能源转型的新阶段。

3.1. 国际能源转型案例分析

在欧洲绿色协议和相关法律实施方案的保护伞下，欧盟对绿色转型拥有最全面的监管框架。该框架结合了市场机制（如欧洲碳排放交易系统）、法规、标准、激励措施、补贴和税收。所有这些都需要由 27 个成员国转化为国家立法。欧盟和国家层面之间也在进行着很多政策协调。欧盟在温室气体减排方面的表现是令人信服的，它已经实现了排放与 GDP 增长的绝对脱钩。

专栏 3-1 欧盟能源转型

问题：

财政政策：欧盟需要加快绿色投资，不仅要满足自身的气候目标，还要面临绿色制造业国际竞争日益加剧的挑战。在 2021 年，欧盟委员会计算出，为了实现欧洲绿色协议 EGD（European Green Deal）的目标，每年将需要 5200 亿欧元的额外投资。如果要达到 2030 年的欧盟气候目标，平均每年的投资需求至少为 8130 亿欧元。基于目前的投资水平，欧洲每年的气候投资赤字估计为 4060 亿欧元。

扩大可再生能源发电的进展缓慢：IEA 关于可再生能源容量增加和能源组成的数据也显示了欧盟在可再生能源发展方面的进展相对缓慢。在 2020 年停滞之后，2021 年可再生能源发电能力提高了 20%。与此同时，欧盟的可再生能源比率从 2020 年的 22%增长到 2022 年的 23%。IEA 指出，2020 年是非同寻常的一年，在这一年中，由于新冠疫情导致的能源需求下降，非可再生能源的消耗显著减少，从而提高了可再生能源的比率。然而，在 2021 年，尽管可再生能源的增长保持稳定，非可再生能源的消耗却经历了快速反弹。

欧盟与国家层面之间碎片化、复杂的治理机制：作为一个政治联盟，欧盟也是一个特殊的结构，而不是一个民族国家，没有联邦结构，欧盟层面的政策和目标都是通过复杂的协调机制来实现的。气候和能源政策的治理是复杂的，而且并不总是透明的。各成员国之间存在着很大的差异。

解决方案：

欧盟自视为气候政策的领导者，是全球其他地区的榜样，并且是一个拥有最高气候雄心的地区。2019 年推出的欧洲绿色协议（EGD）中也明确表示，欧盟致力于成为世界上第一个到 2050 年实现气候中和的地区。这一目标也植根于欧洲气候法，这是 EGD 的一部分。虽然欧盟并未正式承认其作为全球排放累积量最大贡献者的责任，不愿意为追溯性的法律损失和损害赔偿提供依据，但在背后，这是其采纳高雄心脱碳战略的一个动机。

欧盟是世界上唯一一个为其脱碳议程制定了全面和非常详细的立法框架的地区。EGD 不仅设定了目标，而且有一个非常详细和部分绑定的实施框架，称为“Fit for 55”立法包。欧洲的气候雄心根植在对《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）巴黎目标的坚定承诺以及欧洲绿色协议的立法方案中。脱碳议程并不是气候狂热精英的模糊愿景，而是一个政治和经济现实。这一由政策驱动的过程从根本上重塑了经济活动（生产、消费、流动性、贸易和投资）。政策工具包括市场机制、监管、标准设定、激励措施、税收、征税和关税之间的微妙平衡。

根据欧洲绿色协议和“Fit for 55”立法方案，到 2030 年，欧盟 27 国的温室气体排放将比 1990 年的水平减少 55%：这将使气候中和目标能够在 2050 年实现，正如欧洲气候法所规定的。成员国没有统一的温室气体减排目标，但《努力分担条例》（ESR）为每个成员国设定了具有约束力的目标，要求在不包括在排放交易体系（ETS）中的部门减少温室气体排放，例如交通、农业、建筑和废物处理——这些部门加起来占欧盟温室气体排放量的 60%。

效果：

根据欧盟统计局的数据，以追踪各个成员国在 2021 年之前是如何减少其温室气体排放的，考虑到联合国气候变化框架公约报告中的温室气体排放总量，包括土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF[1]）。在欧盟 27 国中，2021 年的净排放量比 1990 年水平下降了 30.4%。然而，数据显示成员国之间存在显著差异。

1 LULUCEF 代表“土地使用、土地使用变化和林业”：这包括了农田、草地、湿地、森林和定居点的管理，以及包括植树造林等土地使用变化。目前，欧盟的土地使用部门吸收的温室气体比排放的要多，但在欧盟 27 国水平上，有或没有 LULUCEF 的温室气体减排差异并不显著。LULUCEF 在许多成员国的排放减少中发挥了重要作用，例如瑞典、立陶宛和拉脱维亚。

表现最好的三个国家是瑞典、罗马尼亚和立陶宛，它们的温室气体排放量分别减少了 76%、71%和 67%。

在世界主要地区中，欧盟成功地最大程度地减少了温室气体排放，并实现了排放与 GDP 增长的绝对脱钩。欧盟 27 国的温室气体排放和 GDP 趋势数据说明有可能将温室气体排放的趋势与 GDP 脱钩。在这 26 年间，欧盟 27 国的 GDP 增长了 50%，而温室气体排放量下降了 23.6%。当考虑到这种下降的各种驱动因素时，需要注意的是，燃料燃烧占 2021 年欧盟 27 国排放总量的 75.4%。欧盟统计局指出了减排背后的两个主要因素：能源效率的提高和能源结构的变化。

欧盟成员国正在逐步淘汰煤炭行业，在整个欧洲，能源生产方面的煤炭正在逐步淘汰。大多数欧盟成员国已经制定了一项计划，并在最后期限前实现无煤生产。在能源生产中逐步淘汰煤炭是大多数成员国明确的政策目标。除德国以外，所有西欧的欧盟成员国都计划最迟在 2030 年前逐步淘汰煤炭，德国宣布将在 2038 年结束。这些“逐步淘汰国家”几乎是过去十年硬煤产量下降的原因。因此，虽然西欧正在逐步淘汰煤炭，但对中欧和东欧的新成员国来说，情况却更加复杂。斯洛伐克计划在 2023 年退出煤炭，但将在 2024 年完成，匈牙利将在 2025 年逐步淘汰煤炭。波兰在 2020 年 9 月迈出了重要的第一步，同意在 2049 年之前逐步淘汰煤炭开采，逐步淘汰煤炭进行能源生产目前还不在议程上。与此同时，保加利亚（2040 年）、捷克、克罗地亚和斯洛文尼亚设定淘汰煤炭的时间为 2033 年，罗马尼亚时间为 2032 年。

3.2. 国际公正转型案例分析

欧盟的经验对中国最有用的地方在于，欧盟试图从社会和劳动力的角度来管理绿色转型。当中国进入煤炭经济转型的阶段，煤炭经济将开始萎缩，地区和企业的经济重组成为一个巨大的挑战时，欧洲的“公正转型”的做法可能会有所帮助。即使是绿色转型（服务于人类的共同利益）也不能违背人民的意愿被强制通过。他们宣称的目标是“任何人都不应该落在后面”。详细的政策配合可用资源，例如，动用公正转型基金和社会气候基金来支持和促进就业转型，为碳密集型地区的经济多元化做出贡献，并解决气候政策的分配效应。欧盟也非常强调绿色转型的参与性层面。公众、利益攸关方、工会和工人需要参与政

策制定过程、政策的执行和监测。欧盟还认识到，采取公正的转型方式也是整个转型成功的关键。

专栏 3-2 国际公正转型

问题：

脱碳将对世界产生深远的影响。在未来几十年里，相关的重组过程将是一个决定性因素，会产生巨大的就业和社会影响。

欧盟气候政策方法的另一个优势是认识到这一整个经济的划时代转型需要考虑到就业和分配效应，换句话说，这一转型是需要公正的。从功能的角度来看，仅仅是转型就可以被解释为两个主要维度："结果"和"过程"。结果应该是一个零碳世界中的包容性社会，其中不平等现象较少，且有质量的工作，凭借联合国可持续发展目标的监督。从"过程"的角度来看，转型有两个主要支柱：一是处理气候政策的分布效应，另一个是处理就业转型的管理。欧盟的公正转型方法侧重于解决脱碳相关的劳动力市场变化的影响，包括失业、就业转变和技能发展。第二个重点是处理气候政策的分配效应，包括能源和交通，同时努力使低碳技术对所有人都是可获取和可使用的。欧盟还承认绿色转型过程中强烈参与维度的必要性，包括在所有层面上形成、实施和监测转型过程中，社会伙伴和民间社会的参与。

解决方案：

欧盟委员会最初设计了公正转型基金（JTF），为矿山或相关化石燃料发电厂关闭时被解雇的工人提供社会支持，但为了满足工业和区域政策目标，后来扩大了社会支持。鉴于欧洲理事会批准的基金规模较小（从最初提议的 400 亿欧元降至 175 亿欧元），JTF 显然不再是应对碳密集型地区所面临的重组挑战的一种令人满意的手段。相比之下，德国政府已拨款 400 亿欧元，仅作为对其煤炭地区的转型支持措施。同样明显的是，不仅对碳密集型地区（主要生产煤和泥炭），而且对受绿色转型影响的更广泛的经济部门也需要提供转型援助，如汽车和其他制造业部门。社会补偿基金（SCF）以有限的资源设立，旨在抵御第二轮排放交易系统（ETS2）对道路交通和建筑行业产生的社会影响，该系统将于 2026 年开始运作。最近，它被视为应对失控能源价格上涨带来的不利社会影响的通用工具。

2022 年的能源和生活成本危机也暴露了现有资源分配的不足，导致欧盟将其最具创新性的工具——复苏和韧性设施，作为下一代欧盟计划的一部分，重新定位以支持成员国应对其影响。面对新的地缘政治格局，欧盟还加大了工业政策的力度，启动了《绿色协议工业计划》和《净零工业法案》。

此外，以德国（欧洲第一燃煤国）为例，它选择了一种谨慎、渐进和协商一致的逐步淘汰煤炭的方式。德国的煤炭淘汰采用了公正转型方法的三个主要要素：缓慢而渐进的转型，并进行了高度的社会对话；积极的劳动力转型管理；以及参与工业和区域发展。德国西部的鲁尔地区曾经是欧洲最重要的工业区之一。几十年来，标志性的工业景观也成为去工业化和经济多样化的一个主要例子，在保持工业支柱的同时，该地区的主要优势变成了以知识为基础的服务经济。鲁尔的经历也从“公正转型”的角度提供了一个教训。曾经依赖采矿业的鲁尔地区的经济多样化一直由联邦和地区政府积极管理，重组过程植根于以工人参与的强大作用为特征的劳资关系文化中。此外，2018 年，联邦政府成立了增长、结构变化和就业委员会，就逐步减少德国现有燃煤发电厂的产能提出建议。

效果：

JTF 将实施的地区在与欧盟委员会进行谈判时通过的“地区公正转型计划”中有所定义，共批准了涵盖 93 个地区的 67 个计划。每个计划都包括对绿色转型的预期经济和社会影响的分析，如失业以及如何减少生产过程造成的污染。为了有资格获得在公正转型机制下分配的资金，欧盟成员国被要求就被确定为在向碳中和经济转型过程中可能遭受负面社会经济影响的地区的公正转型计划进行谈判。除德国外，主要受益者大多是中欧成员国，它们的人均国内生产总值水平相对较低，碳强度较高，受影响地区的集中程度较高。

总的来说，鲁尔区的结构调整经验也表明，从资源密集型工业基地向绿色资源材料和节能经济转型的复杂过程需要一个全面的政策框架。结构和区域政策不仅包括产业政策、区域发展、城市娱乐政策，还包括教育、劳动力市场政策。此外，煤炭转型政策的前瞻性要素是在煤炭淘汰后振兴煤炭地区的区域和产业政策举措；这些构成了德国案例的主要优势。

4. 煤炭三角区现状分析和达峰路径

4.1. 现状分析

4.1.1.二氧化碳排放

能源活动占据了二氧化碳排放总量的 93%，工业过程占比 7%。在能源活动中，电力行业的贡献最大，占到了 58%，紧随其后的是工业过程，占比 30%。细分到工业领域，钢铁、石化化工、炼焦和供热等行业也都有显著的排放贡献。此外，交通和建筑领域也分别贡献了能源活动碳排放的 3%和 2%。总体来看，工业领域的排放占据了 30%的比例，而交通和建筑等其他领域的排放也占据了不可忽视的一部分。

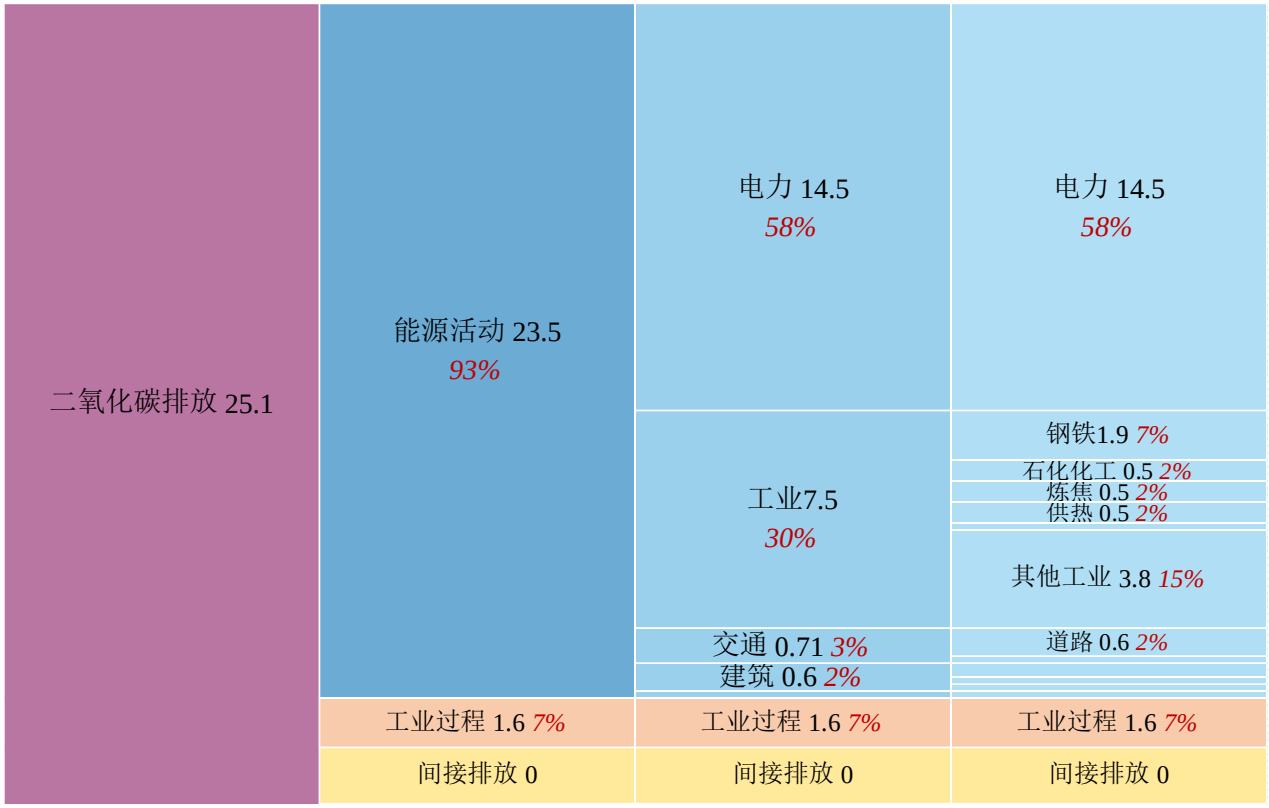


图 4-1 煤炭三角区 2023 年二氧化碳排放清单（亿吨）

4.1.2.煤炭生产

2010 年至 2023 年，煤炭三角区的煤炭产量总体呈上升趋势。到 2023 年煤炭三角区产量已达到 34.5 亿吨，其中内蒙、山西、陕西的煤炭产量分别为 12.1 亿吨、13.78 亿吨、7.61 亿吨，内蒙、山西煤炭产量分别占全国煤炭产量的 26%、29%，陕西煤炭产量占全国煤炭产量的 16%，宁夏煤炭产量占全国煤炭产量的 2%，共计占全国煤炭产量的 74%，煤炭三角区作为全国能源保供基地的重要性不言而喻。

4.1.3.新能源发展

2023 年全国太阳能发电装机量为 6.1 亿千瓦，煤炭三角区太阳能发电装机量为 0.9 亿千瓦；2023 年全国太阳能发电量为 2940 亿千瓦时，煤炭三角区太阳能发电量为 823 亿千瓦时；2023 年全国风电装机量为 4.4 亿千瓦，煤炭三角区风电装机量为 1.2 亿千瓦；2023 年全国风电发电量为 8090 亿千瓦时，煤炭三角区风电发电量为 2198 亿千瓦时。2023 年全国总发电量为 94564 亿千瓦时，煤炭三角区总发电量为 17019 亿千瓦时。总体来说，煤炭三角区风光发电占全国的约 27%。

表 4-1 2023 年煤炭三角区太阳能发电装机量及发电量

省份	装机量（万 kW）	发电量（亿 kWh）	总发电量（亿 kWh）	全社会用电量（亿 kWh）
山西	2491	275	4376	2885
内蒙古	2296	205	7451	4823
陕西	2292	111	2946	2450
宁夏	2137	232	2246	1387
煤炭三角区	9216	823	17019	11545
全国	60949	2940	94564	92241

表 4-2 2023 年煤炭三角区风电装机量及发电量

省份	装机量（万 kW）	发电量（亿 kWh）	总发电量（亿 kWh）	全社会用电量（亿 kWh）
山西	2500	477	4376	2885
内蒙古	6961	1271	7451	4823
陕西	1285	171	2946	2450
宁夏	1464	279	2246	1387
煤炭三角区	12210	2198	17019	11545
全国	44134	8090	94564	92241

注：数据来源于国家能源局、国家统计局、中国电力企业联合会、国家电网有限公司、Wind 数据库。总发电量为该省区化石能源与非化石能源发电量总和。

4.1.4.能源流通图

数据显示，2023 年，煤炭三角区的煤炭生产量折合为标煤高达 24.3 亿吨标准煤。在这 24.3 亿吨标准煤的生产量中，有 16.8 亿吨标准煤被调出，调出比例高达 69%。

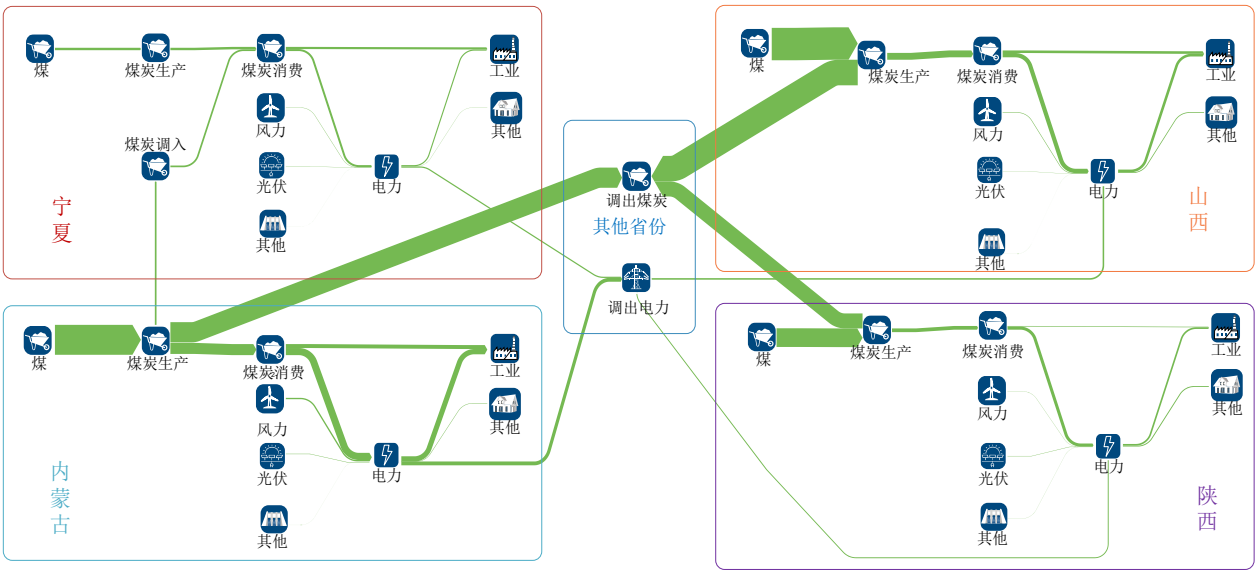


图 4-2 煤炭三角区 2023 年煤炭和新能源生产流通图

4.1.5.排放驱动分析

运用对数平均迪氏指数法（LMDI），对煤炭三角区总体及内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区 2010 年至 2023 年碳排放量变化进行定量分解。具体结果如下表，其中橙黄色代表正效应，绿色代表负效应，且颜色越深效应越大。

表 4-3 2010-2023 年煤炭三角区及四省区碳排放驱动 LMDI 分解结果（亿吨）

LMDI 分解	煤炭三角区总体	山西	陕西	内蒙古	宁夏
碳排放	12.64	4.20	2.27	5.16	1.01
人口	0.21	-0.16	0.16	-0.23	0.25
人均 GDP	14.83	4.25	2.58	6.47	1.39
产业结构	-0.60	-0.59	-0.14	0.79	0.01
能源强度	-3.55	-1.25	-1.16	-1.59	0.13
能源结构	-0.17	-0.09	-0.03	-0.05	0.02
	碳排放增长促进因素				碳排放增长抑制因素

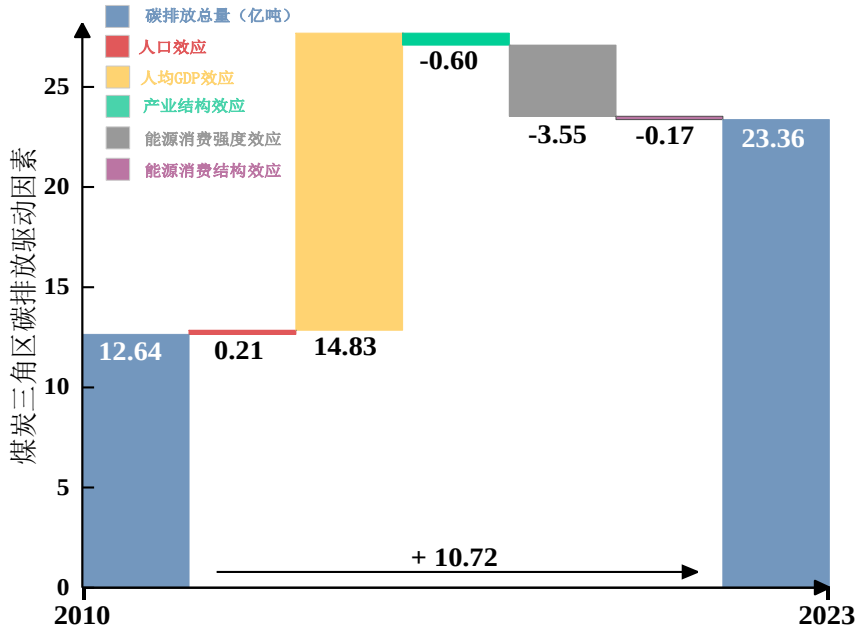


图 4-4 煤炭三角区 2010—2023 年碳排放量驱动因素分解

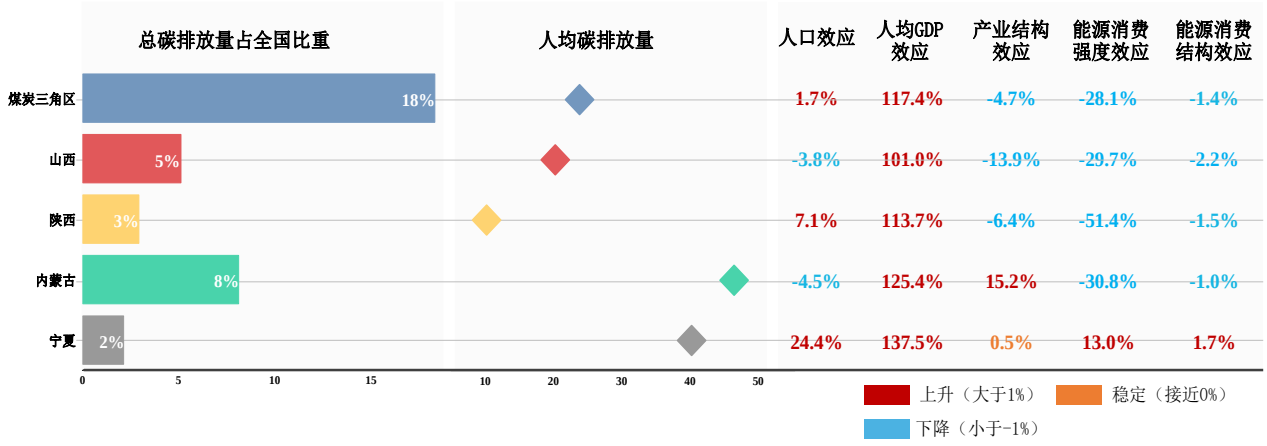


图 4-5 煤炭三角区 2010—2023 年碳排放及驱动因素效应特征

对煤炭三角区总体及内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区 2010 年至 2023 年碳排放量变化进行驱动因素分解可以看出，经济发展是煤炭三角区整体及四省区碳排放量增长的决定因素，能源消费强度是煤炭三角区整体及四省区碳排放下降的主要因素，产业结构的促降效应次之，人口和能源消费结构的影响效果较小：

（1）经济发展是碳排放量增长的决定因素，煤炭三角区整体人均 GDP 效应带动碳排放增量为 14.83 亿吨。2010—2023 年间，煤炭三角区 GDP 从 28521 亿元增长到 68324 亿元（2010 年不变价）。而人口数量则相对稳定，由 1.04 亿人增长到 1.05 亿人，人均 GDP 从 2010 年的 2.74 万元/人上升到 6.48 万元/人。具体来看，基于 2010—2023 年共 14 年数

据分析，煤炭三角区 GDP 每增加 1%，排放增加 269 万吨，而由于人口数量相对稳定，人口效应贡献相对较小，占比 2%。

（2）能源消费强度是煤炭三角区碳排放的最主要促降因素，累计带来 3.55 亿吨减排量。煤炭三角区在 2010—2023 年期间的能源消费强度不断下降。且对于能源消费强度变化导致碳排放变化而言，除宁夏以外，其余省区变动效应均为负值。

（3）产业结构调整降低碳排放成效较为显著，煤炭三角区产业结构效应总计贡献了 0.60 亿吨减排量。2010—2023 年，煤炭三角区产业结构中第三产业占比逐步增加，电力和工业等第二产业的占比下降。产业结构 2010—2023 年合计带动煤炭三角区整体碳排放量减少贡献度为 4.7%。

（4）能源消费结构优化对碳排放下降作用明显，但实际能源结构调整降低碳排放量较低，煤炭三角区整体而言，有 1718 万吨减排量。这主要是因为煤炭三角区尤其宁夏的能源结构改善的程度还不明显，因此，未来必定要进一步调整能源占比，优化能源结构，以降低煤炭三角区人均碳排放。

4.2. 煤炭三角区 2010—2023 年历史转型效果评估

2010—2023 年，煤炭三角区火电装机容量、非化石能源装机容量年均增速均高于全国水平，煤炭三角区非化石能源消费占一次能源消费比重、非化石能源发电量占总发电量比重均低于全国水平，但非化石能源消费比重年均增速高于全国。煤炭三角区火电装机容量 2010—2023 年年均增速为 5.8%，高于全国火电装机容量年均增速 5.3%。非化石能源装机容量 2010—2023 年年均增速 22.4%，为全国年均增速 1.5 倍。煤炭三角区非化石能源消费占一次能源消费比重从 2010 年的 3.0%增加至 2023 年的 12.5%，但其占比仍远低于全国水平，而煤炭三角区非化石能源消费占比年均增速为 11.6%是全国的 2.3 倍。煤炭三角区非化石能源发电量占全区总发电量的比重也在增加，2023 年达到 18.2%，但也仍低于全国水平 30.0%。

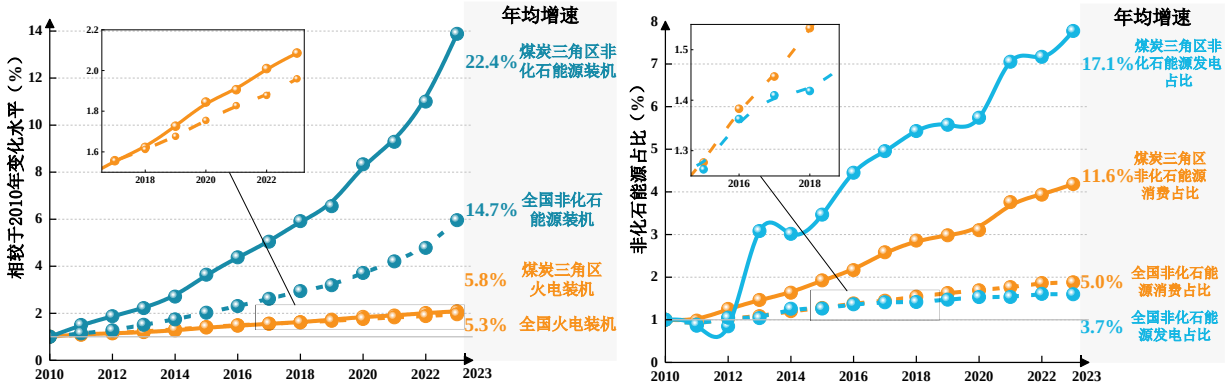


图 4-6 2010—2023 年煤炭三角区与全国能源结构变化情况

2010—2023 年，煤炭三角区碳排放量、人均碳排放量、煤炭产量年均增速均高于全国水平，碳排放强度年均降速低于全国水平。煤炭三角区 2010—2023 年碳排放量年均增速 4.7%、为全国水平的 1.6 倍，人均碳排放量年均增速为 4.6%、为全国水平的 1.7 倍，煤炭产量年均增速 4.4%、为全国水平的 1.8 倍，然而，碳排放强度年均降速 2.1%，低于全国水平 3.3%，为全国碳排放强度年均降速的 0.6 倍。

2010—2023 年，煤炭三角区 GDP 增速与全国 GDP 增速呈现相同变化趋势，煤炭相关产业占 GDP 比重呈现下降趋势但远高于全国水平。2010—2023 年，煤炭三角区整体 GDP 与全国 GDP 变化趋势基本一致，但从煤炭相关产业占 GDP 比重看，煤炭三角区煤炭相关产业比重虽然整体为下降趋势，但比例高于全国水平，煤炭三角区 2010 年煤炭相关产业占 GDP 比重 36.78%、为全国水平的 1.3 倍，2023 年煤炭三角区煤炭相关产业占 GDP 比重 25.02%、为全国水平的 1.4 倍，年均降速 0.6%、远低于全国水平的 3.7%、仅为全国的 0.16 倍。

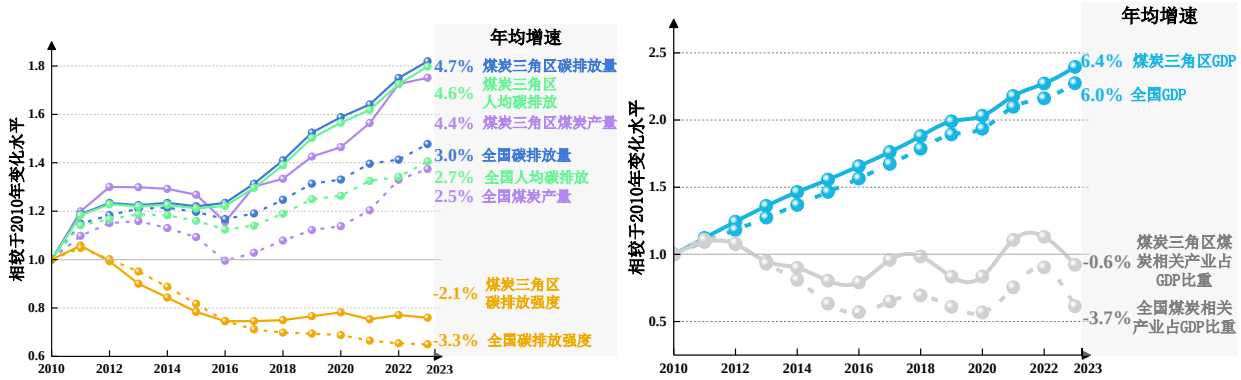


图 4-7 2010—2023 年煤炭三角区与全国碳排放（左）和煤炭三角区与全国煤炭相关产业占 GDP 比重（右）

注：本项目综合应用 CAEP-CP 2.0 中 M3C-CGE 模块测算全国和煤炭三角区煤炭相关产业不同年份增加值占 GDP 比重，其中煤炭相关产业具体包括电力、热力的生产和供应、石油、炼焦产品和核燃料加工品、化学产品制造等行业。

5. 煤炭三角区转型面临的问题与挑战

5.1. 煤炭三角区在近 15 年的能源转型中动力不足，未能推动整体取得明显成效

从 2010 年到 2023 年，煤炭三角区火电装机容量增量为 1.4 亿千瓦，火力发电量增量为 7390 亿千瓦时，年均增速分别为全国水平的 1.1 倍和 1.3 倍。从 2010 年到 2023 年，煤炭三角区的煤炭产量增加了 14.7 亿吨，年均增速为 4.4%，为全国煤炭产量年均增速的 1.8 倍，年均增速远高于全国水平。煤炭三角区人均碳排放量和碳排放量年均增速分别为全国水平的 1.7 倍和 1.6 倍，远高于全国水平。虽然煤炭三角区的碳排放强度有所降低，但降速 2.1%低于全国水平 3.3%。因此，煤炭三角区能源转型成果不显著的原因主要在于能源结构单一、依赖煤炭和火电、碳排放量高且增速快以及减排努力不足等方面。当前，随着碳达峰碳中和目标的提出，煤炭三角区的能源转型路径变得更加清晰和明确。这一目标约束为其能源转型升级和产业结构优化提供了重要的指导。

5.2. 煤炭三角区过度依赖煤炭相关产业并形成路径依赖，未来面临碳锁定风险

煤炭资源型地区因拥有丰富的煤炭资源而大力发展资源型产业，这使其经济的发展在很大的程度上依赖于煤炭，逐渐形成了依托煤炭开采和加工的优势产业，进而影响着整个区域经济的发展。当基于碳的稳定的技术制度系统成型后，系统就会保持稳定并抵制变化的发生。因此，受益于长期递增报酬的以碳为基础的能源系统可能会产生“锁定效应”，妨碍低碳、可再生能源等技术创新。同时，受益于现有制度的参与者将试图维持该种制度，这就进一步强化了现存技术系统的锁定。目前工业化国家以碳为基础的能源和运输系统形成了锁定的技术—制度复合体，相应地也是碳锁定。

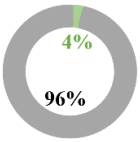
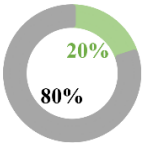
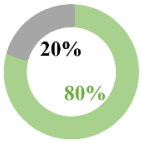
5.3. 重点地区转型取得良好突破，已催生一批新兴产业

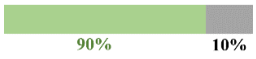
煤炭三角区作为我国经济转型的重要区域，近年来在重点地区的转型工作中取得了显著的突破。根据课题组调研，煤炭三角区已经逐渐探索当地资源禀赋和自然资源特征，因地制宜开展创新示范工程，转型曙光初现。煤炭三角区能源转型不断探索新兴产业模式，例如鄂尔多斯远景零碳产业园通过为园区企业输送绿电，提升了产品的低碳竞争力，同时也吸引了一大批高精尖企业入驻，一定程度上刺激了经济发展。又比如能源转型与生态环境治理结合，标杆项目有鄂尔多斯库布奇光伏治沙项目、宁夏腾格里沙漠新能源基地项目等，发展光伏的同时，实现了对当地沙漠环境的治理。再如能源转型与乡村振兴结合，标杆工程有陕西克坊村光伏助农项目、临汾浮山县“沐光行动”16MW 分布式光伏试点项目，实现了“企业—村集体—零碳能源”的三方共赢。零碳产业园区、光伏治沙项目、光伏农业项目的成功实施，不仅推动了当地经济的绿色发展，也为全国乃至全球的能源转型和可持续发展提供了有益的借鉴。

6. 转型路径分析

本研究在煤炭三角区二氧化碳排放强化路径约束下，充分考虑四省区资源禀赋、能源生产、能源消费、跨省电力交换、电网规划等数据，结合文献分析、专家研讨和实地调研等多种形式，基于中国中长期排放路径模型（CAEP-CP 2.0）、包括 M3C-CGE 和新能源潜力评估等模块，建立煤炭三角区能源转型路径，推动煤炭三角区实现黑色能源（现状）—蓝色能源（2035 年）—绿色能源（2060 年）的转型之路，三角区能源转型路径发展目标如下表所示。

表 6-1 煤炭三角区能源转型路径发展目标

发展目标		2023	2035	2060
		黑色能源	蓝色能源	绿色能源
能源生产	化石 非化石			
	氢能	小试	灰氢：绿氢 1.2:1	绿氢

能源消费	化石: 非化石			
	氢能	少量灰氢	氢能占能源消费比重 达 12%	绿氢
碳移除	移除量	<100 万吨 	>1000 万吨 	5~8 亿吨
产业	煤炭产业对 GDP 的贡献	45% 	32% 	5%
	新能源产业对 GDP 的贡献	0.50% 	2.00% 	5.00%
	煤炭产业对就业的贡献	29% 	21% 	3%
	新能源产业对就业的贡献	0.10% 	0.20% 	0.60%

6.1. 煤炭三角区碳排放路径

社会经济发展参数是模型开展模拟的基础，项目组结合国内重要机构研究结果和国际最新权威报告，并与内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区的发展和改革委员会、生态环境厅、环境科学研究院、环境规划研究院、能源研究所、高校科研院所等机构充分沟通，充分咨询相关专家意见，并结合现场调研、政府座谈等形式，通过反复迭代优化后进行综合研判，形成煤炭三角区社会经济发展基础参数。

表 6-2 煤炭三角区社会经济发展基础参数

	GDP/亿元	GDP 增速			人口/万人			
	2020 年	2020—2025	2025—2030	2030—2035	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
山西	17836	5.5% (5.2%,5.8%)	4.0% (3.5%,4.5%)	3.2% (2.7%,3.7%)	3490	3452 (3383,3521)	3420 (3317,3523)	3394 (3224,3564)
内蒙古	17360	5.0% (4.7%,5.3%)	4.0% (3.5%,4.5%)	3.3% (2.8%,3.8%)	2403	2432 (2383,2481)	2424 (2351,2497)	2392 (2272,2512)
陕西	26014	6.0% (5.7%,6.3%)	4.5% (4.0%,5.0%)	4.1% (3.6%,4.6%)	3955	4002 (3922,4082)	3977 (3858,3096)	3910 (3715,4106)
宁夏	3956	6.0% (5.7%,6.3%)	4.5% (4.0%,5.0%)	4.4% (3.9%,4.9%)	721	756 (741,771)	781 (758,804)	798 (758,838)

基于中国工程院《我国碳达峰碳中和战略及路径研究》（2021）和《我国碳达峰碳中和若干重大问题研究》（2024 年）的中国分省排放情景（政策情景和强化情景[2]），建立煤炭三角区二氧化碳排放的政策情景和强化情景。

在煤炭三角区二氧化碳排放政策情景中，2023 年煤炭的二氧化碳排放量达到 23 亿吨，为当前碳排放量的现实状况。从 2023 年到 2030 年碳排放量一直呈增长趋势，在 2030 年煤炭三角区的二氧化碳排放量达到峰值，控制在 26 亿吨。在达峰之后，从 2030 年到 2035 年为平缓下降的路径，到 2035 年煤炭的二氧化碳排放量将达到 24.9 亿吨，较 2030 年下降 5%。

在煤炭三角区二氧化碳排放强化情景中，碳排放的峰值在 2027 年出现，达到 26 亿吨，相较于 2030 年提前达峰，从 2023 年到 2027 年为平缓增长路径。在达峰之后，从 2027 年到 2035 年碳排放量下降较快，到 2035 年煤炭的二氧化碳排放量将达到 20 亿吨，较 2027 年的峰值下降 23%。

2 政策情景：综合考虑碳达峰碳中和目标、国家自主贡献目标（2030 年碳强度比 2005 年下降 65%）、各省碳达峰实施方案等约束，结合对省份最新排放形势研判，形成全国碳达峰目标下政策情景；强化情景：在政策情景的基础上，考虑到国家和区域对高质量达峰和大力推动节能减排的要求、区域新能源快速增长等因素，构建实现高质量碳达峰目标下的排放情景。

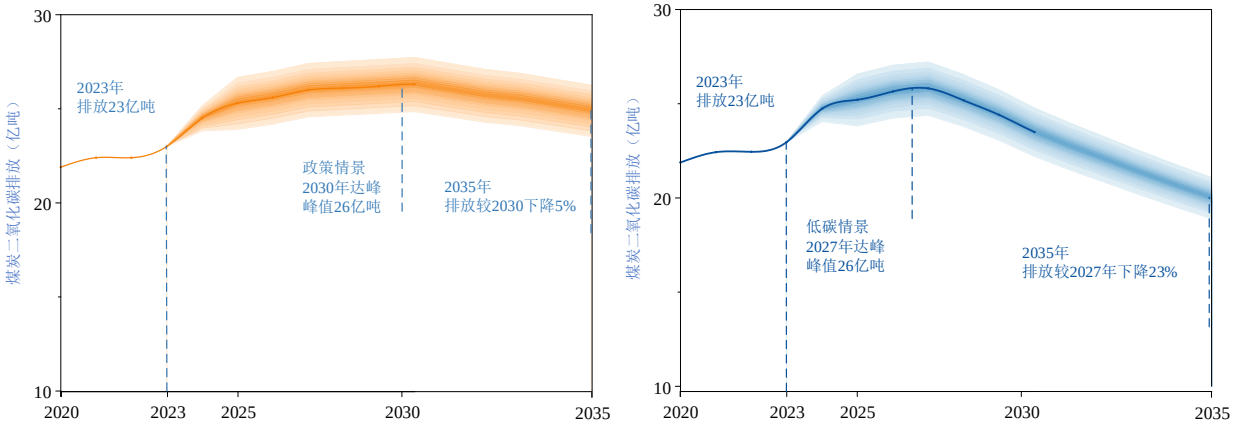


图 6-1 煤炭三角区二氧化碳排放政策情景（左）和强化情景（右）

6.2. 能源转型路径

6.2.1. 能源转型

2023 年煤炭三角区能源生产主要依赖化石能源，化石能源与非化石能源比例为 96:4，能源消费也主要为化石能源，化石能源与非化石能源比例为 92:8，能源消费中很少量为灰氢，碳移除量小于 100 万吨。

基于中国中长期排放路径模型（CAEP-CP 2.0），预计到 2035 年能源生产量总量为 22 亿吨，其中化石能源占比 77%，非化石能源占比 18%，氢能占比 5%，氢能产量中灰氢与绿氢的比例为 1.2:1。到 2035 年，煤炭三角区的煤炭产量相较于 2023 年将出现大幅减少。具体而言，2035 年煤炭三角区的煤炭生产量折合为标煤将达到 17.2 亿吨标准煤，

到 2035 年，煤炭三角区能源消费中化石能源占比将降低到 40%，氢能比重达到 12%，碳移除量大于 1000 万吨。到 2060 年实现绿色能源的转型，非化石能源占能源生产和消费的 80%和 90%，氢能的生产和消费全部为绿氢，碳移除量约为 5~8 亿吨。在煤炭调出方面，煤炭三角区也表现出明显的特征。预计到 2035 年，该区域将调出煤炭 11.1 亿吨标准煤，调出比例高达 65%。除了煤炭调出外，煤炭三角区各省区在电力调出方面，内蒙古自治区以高达 1.3 亿吨标准煤的电力调出量领跑煤炭三角区各省区。

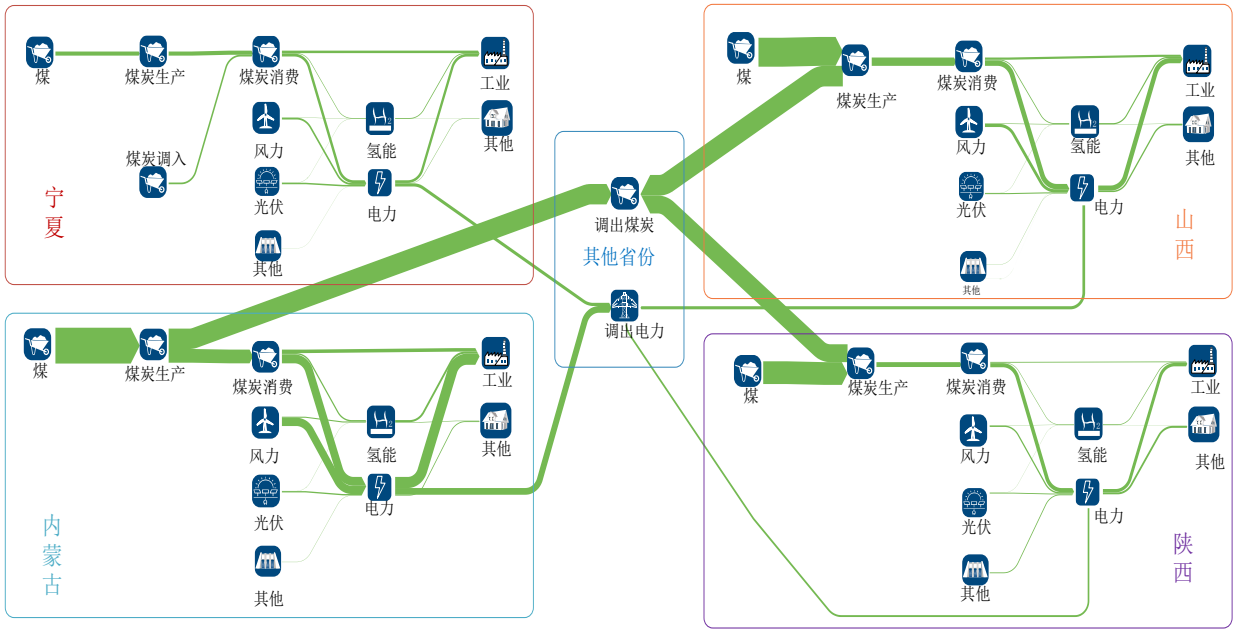


图 6-2 煤炭三角区 2035 年煤炭和新能源生产流通图

6.2.2.新能源发展潜力评估

煤炭三角区是中国风电和太阳能发电最快的区域之一，也是未来发展潜力最为巨大的区域之一。根据《中国风电和太阳能发电潜力评估（2024）》研究报告，预计在 2025 年煤炭三角区太阳能装机量将达到 1.1 亿千瓦，2030 年将达到 1.8 亿千瓦。根据《中国风电和太阳能发电潜力评估（2024）》研究报告，预计在 2025 年煤炭三角区风电装机量将达到 1.5 亿千瓦，2030 年将达到 2.3 亿千瓦。

6.2.3.新能源消纳与电网建设

煤炭三角区域能源转型在于新能源的大力发展与消纳，关键在于新能源的消纳，确保区域消费的能源逐步向以新能源为主过渡。具体包括：（1）科学确定煤炭三角区新能源消纳目标。定期开展煤炭三角区电网新能源消纳能力分析，保持新能源利用率在合理水平，提出新能源可接网消纳规模；（2）推动新能源更大范围优化配置。全面落实国家重大战略部署，建成保障煤炭三角区新能源外送特高压直流输电工程，全面形成向华北、华东、华中直流送电格局，进一步扩大煤炭三角区新能源开发和电力外送规模，促进新能源更大范围优化消纳，加快能源资源优势向经济优势转化；（3）持续提升电源侧调节能力。利用大数据、人工智能等先进技术提高风况、光照的预测精度，提升功率预测准确度；（4）优化完善电网基础设施。加强新能源富集地区配套电网规划和建设，有针对性地补强电网薄弱环节；（5）推动电力需求侧相应规模化发展。加快实施电能替代工程，推广电采暖、电动

汽车、电制氢等应用，扩大煤炭三角区新能源消纳空间。加强需求侧管理和响应体系建设，培育需求侧响应聚合服务商等新兴市场主体。

6.3. 技术转型路径

煤炭三角区能源转型在保障安全生产、稳定能源供应的前提下，需要不断强化科技创新，着力推进煤炭产业转型升级、实现高效清洁化利用。煤炭产业转型的关键是燃料煤向原料煤的转型、燃煤发电向新能源发电的转型，重点需要突破电解水制氢技术、先进高效燃煤发电技术、氢储能技术和 CCUS 托底技术等关键技术。最终，打通煤炭三角区新能源、新型现代煤化工与 CCUS 托底技术耦合发展的技术链条，2030 年有望实现绿氢占比超 50%、煤炭相关产业近零排放。

具体技术转型路径：（1）高质量的智能化煤炭开采技术，以大数据、人工智能、区块链、物联网等现代信息技术与煤炭产业深度融合，推动煤炭行业向数字化、智能化转型，在这样做的同时，应注意即使是最高效的煤炭资产也可能因其他能源技术的进步而造成搁浅风险；（2）先进高效燃煤发电技术，推进燃煤发电向高参数、大容量、智能化发展，推进超高参数燃煤发电、新型动力循环系统、高灵活智能燃煤发电、燃煤高效低成本多污染物联合控制，及资源化利用的成套技术与装备实现自主产业化，促进电力装备技术升级和结构转型；（3）通过优化组合煤、油、气三种资源，打破传统煤化工和石油化工的单一加工模式，可有效解决煤制甲醇“碳多氢少”和天然气制甲醇“氢多碳少”的难题，实现“碳氢互补”，开创能源化工产业绿色低碳循环发展的新模式；（4）绿电制绿氢技术，耦合新型现代煤化工低碳清洁发展；（5）氢储能技术，推进燃煤发电向新能源发电全面转型；（6）CCUS（碳捕集利用与封存）技术能够从发电和工业过程相关的排放源中分离 CO_2，并将其转化为有用产品或永久性封存，是煤炭三角区煤炭产业转型过程中实现碳减排的托底技术；（7）国家与地方共同出资，成立“煤炭三角区能源转型创新技术研究中心”。

6.4. 产业转型路径

煤炭三角地区产业转型过程中，煤炭产量的下降会导致相关部门对 GDP 增量和就业的贡献下降。以煤炭采选部门为例，2023 年煤炭采选对 GDP 增量的贡献为 12.81%，2035 年贡献率下降为 9.11%，随着煤炭三角区产业转型的持续推进，到 2060 年，煤炭采选对

GDP 增量的贡献仅为 1.42%。煤炭采选部门对就业的贡献从 2023 年的 15.66%降为 2060 年的 1.62%，下降率高达 89%。另一方面，新能源产业发展会对煤炭三角地区整体经济增长和就业带来一定的促进作用。新能源产业带来的整体经济提升可以提高大部分行业的产出，影响行业的产值。获利最大的行业包括与可再生能源设备制造和安装相关的建筑、制造和工程行业。2023 年建筑、制造和工程行业对 GDP 增量的贡献为 7.04%，2035 年和 2060 年分别上升为 8.36%和 8.80%。2023 年建筑、制造和工程行业对就业的贡献是 3.52%，2060 年提高到 5.72%。

传统煤炭产业面临巨大的转型压力，煤炭产量的下降会引发煤电、煤焦、钢铁等传统产业增加值的下降，使行业整体生产经营活动和状况更趋恶化，对经济发展带来不利的影响，也会对煤炭相关行业从业人员产生直接的就业冲击。在煤炭三角区碳排放强化路径约束和能源转型驱动下，将产业与能源生产、分配和消费紧密结合起来，形成一个高效、互动、可持续的系统，形成能源吸引产业、产业优化能源、产业能源一体化模式，旨在通过产业和能源系统的深度融合，实现能源效率的最大化和环境影响的最小化。煤炭三角区应依托区域内的风光、制造业要素等区域优势资源，完善区域内“风光+”产业链的上下游产业体系，打造“风光+农业+食品加工业”、“风光+储能+制造业”、“风光+氢+传统行业”、“风光+新能源汽车”、“风光+设备和组件回收”产业链等区域内低碳产业共生体系。

7. 公正转型

在煤炭三角区这一重要能源基地的转型过程中，区域公平问题日益凸显，成为转型过程中的一大挑战。能源转型不仅涉及能源的替代与更新，更是一个复杂的社会经济过程，它往往伴随着大量的资金投入、资源重新分配以及产业结构的调整。首先，在转型过程中，新的能源项目、技术研发和基础设施建设等都需要大量的资金投入。然而，这些资源往往难以在各区域之间实现均匀分配。其次，区域间的发展差距可能引发一系列社会公平性问题。一方面，经济差距的扩大可能导致人口流动加剧，使得一些地区出现人口空心化现象，而另一些地区则可能因人口过度聚集而面临资源紧张、环境压力增大等问题。另一方面，区域间的发展不平衡还可能影响社会稳定和民族团结。

煤炭三角区的能源转型对就业市场产生了深远的影响。随着传统煤炭产业的衰退，大量从业人员面临失业的风险，尤其是那些技能单一、难以适应新产业要求的工人。这种就业结构的变化可能导致社会阶层的固化，使得原本依赖煤炭产业的工人难以获得新的就业机会，从而加剧社会不平等。此外，新能源产业的兴起虽然创造了新的就业机会，但这些岗位往往需要更高的技能水平，对于原有煤炭产业工人来说，转型的门槛较高，这进一步加剧了就业公平问题。

能源转型过程中的生态公平问题同样不容忽视。传统能源开采的生态修复会涉及到环境、经济和社会等多个方面。对于因煤炭开采而受到影响的当地居民和社区，需要建立公正的补偿机制，确保他们因生态恢复而可能遭受的损失得到合理的补偿。新能源项目的开发，如风电、光伏等，在选址、建设和运营过程中也可能对当地生态环境产生影响。例如，风电场的建设可能会破坏鸟类的栖息地，光伏发电设施的建设可能会改变地表的生态结构。这些影响往往由当地社区承担，而经济利益则可能被项目投资者所获取，这种利益与成本的不匹配可能导致生态公平问题。此外，新能源项目的环境影响评估和监管也需要公平地考虑所有利益相关者，确保生态保护措施得到有效执行，避免对生态环境造成不公平的损害。

8. 政策建议

8.1. 建立煤炭三角区低碳转型的国家级协调机制

建议成立煤炭三角区低碳转型领导小组，建立煤炭三角区一体化转型协作机制。合理确定煤炭三角区在全国一盘棋下梯次达峰的功能定位，充分考虑国家能源安全和能源需求，明确全国对煤炭三角区的煤炭和煤电外送需求，建立煤炭产能储备制度，制定鼓励新能源发电的优惠政策，建立电网消纳的绿色通道，激励非化石能源发电出力。优化煤炭三角区碳达峰时间表、路线图和考核办法。同时，充分考虑传统能源低碳转型对于弱势人群、就业、生态等造成的冲击和影响，探索建立公正转型机制。鼓励煤炭三角区与国际煤炭地区建立交流渠道，引领全球煤炭地区低碳转型。

8.2. 建立“零碳电力产业和贸易特区”

建议煤炭三角区依托自身资源禀赋，全面建立“零碳电力产业和贸易特区”（简称“零碳特区”）机制，发挥土地广阔、新能源装机量大且与化石能源灵活互补潜力优势，利用区域微电网新业态，以全区电力系统保障特区的零碳电力长期连续供应，并提供优惠的进出口税收政策，面向全球大力吸引出口型企业入驻“零碳特区”。“零碳特区”内部建设零碳数字认证体系，对产品提供全生命周期碳足迹认证，赋予园区内产品可追溯、符合国际标准的“零碳认证”标识。建立“零碳电力产业和贸易特区”有望突破煤炭三角区新能源消纳和产业转型困境，有助于我国探索有效应对国际贸易碳规锁。

8.3. 设立煤炭三角区低碳转型基金

建议采取“政府引导基金+风险投资/股权投资机构+企业投资者”的混合融资模式，通过公共资本和国际开发资本以优惠价格提供资本，驱动以市场价格提供资金的私营资本进场。其中，由煤炭三角区各省国资控股集团及各类绿色产业资金等组成催化资本，由来自煤炭税收和政府一般公共预算投资组成公共资本，吸引私营资本。可由煤炭三角区省级金融控股集团共同组建基金管理公司，负责转型基金的专职管理。融资模式采取混合融资模式，基金管理人作为普通合伙人出资 1%。转型基金主要用于支持煤炭三角区转型过程中的关键技术突破，例如绿氢与储能技术、新型现代煤化工技术、CCUS 技术等，以及转型中生态修复和各类补偿机制。

参考文献

[1] Agora Energiewende (2020) The European power sector in 2019 The European power sector in 2019 (agora-energiewende.org)

[2] Akgüç M., Arabadjieva K. and Galgóczi B. (2022) Why the EU's patchy 'just transition' framework is not up to meeting its climate ambitions, Policy Brief 2022.06, ETUI. https://www.etui.org/publications/why-eus-patchy-just-transition-framework-not-meeting-its-climate-ambitions

[3] Ang B W, 2015. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. Energy Policy, 86: 233-238.

[4] Betts K, 2010. Can the US phase out coal's greenhouse gas emissions by 2030?[J]. Environmental Science & Technology, 44(11): 4035-4036.

[5] Chen L, Xie J, Zhang X, et al., 2023. Mining 5.0: Concept and framework for intelligent mining systems in CPSS[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 8(6): 3533-3536.

[6] Chen Q, Kang C, Ming H, et al., 2014. Assessing the low-carbon effects of inter-regional energy delivery in China's electricity sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32: 671-683.

[7] Chen W, Wu F, Geng W, et al., 2017. Carbon emissions in China's industrial sectors[J]. Resources, Conservation and Recycling, 117: 264-273.

[8] Conley S, Konisky D M, Mullin M, 2023. Delivering on environmental justice? US state implementation of the Justice40 initiative[J]. Publius-the Journal of Federalism, 53(3): 349-377.

[9] Dou L, Sun L, Lyu W, et al., 2023. Trend of global carbon dioxide capture, utilization and storage industry and challenges and countermeasures in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 50(5): 1246-1260.

[10] Du Z, Lin B, 2018. Analysis of carbon emissions reduction of China's metallurgical industry[J]. Journal of Cleaner Production, 176: 1177-1184.

[11] European Commission (2022) REPowerEU: Affordable, secure and sustainable energy. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en

[12] Feng K, Song K, Viteri A, et al., 2023. National and local labor impacts of coal phase-out scenarios in chile[J]. Journal of Cleaner Production, 414: 137399.

[13] Galgóczi B. (2018) Just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all, ILO Actrav policy brief, 2018, The International Labour Office. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---actrav/documents/publication/wcms_647648.pdf.

[14] Galgóczi B. (2020) The path to 'zero carbon' in a post-Covid-19 world, in ETUC/ETUI (2020) Benchmarking Working Europe 2020, ETUI, 75-94. The path to zero carbon in a post-Covid-19 world_2020.pdf (etui.org)

[15] Gong J W, Li Y P, Lv J, et al., 2022. Development of an integrated bi-level model for China's multi-regional energy system planning under uncertainty[J]. Applied Energy, 308: 118299.

[16] Graf K, 2021. EU-climate package "fit for 55"[J]. WOCHENBLATT FUR PAPIERFABRIKATION, 149(7): 371-371.

[17] He B, Shao Y, Wang S, et al., 2019. Product environmental footprints assessment for product life cycle[J]. Journal of Cleaner Production, 233: 446-460.
[18] Hill C A, Such M C, Chen D, et al., 2012. Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 3(2): 850-857.
[19] Calipel C, Antoine B, Thomas P C.(2024) European climate investment deficit report, An investment pathway for Europe’s future, 2024.02, I4CE. https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2024/02/20240222-i4ce3859-Panorama-EU_VA-40p.pdf.
[20] ILO (2015) Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all, ILO. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_ent/documents/publication/wcms_432859.pdf
[21] Jia Z, Liu Y, Lin B, 2024. The impossible triangle of carbon mitigation policy[J]. Energy Policy, 189: 114107.
[22] Johansson N, 2021. Does the EU’s action plan for a circular economy challenge the linear economy?[J]. Environmental Science & Technology, 55(22): 15001-15003.
[23] Keles D, Yilmaz H U, 2020. Decarbonisation through coal phase-out in germany and europe - impact on emissions, electricity prices and power production[J]. Energy Policy, 141: 111472.
[24] Li H, Wu L, 2014. Analysis of hubei province industry’s carbon emissions based on the LMDI[C]//Zhang L. Environmental Technology And Resource Utilization II: Vols. 675-677. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications Ltd: 1865-,.
[25] Liu B, Ding C J, Hu J, et al., 2023. Carbon trading and regional carbon productivity[J]. Journal of Cleaner Production, 420: 138395.
[26] Liu F, Lv T, 2019. Assessment of geographical distribution of photovoltaic generation in China for a low carbon electricity transition[J]. Journal of Cleaner Production, 212: 655-665.
[27] Ning, S Z, , Cao, D Y. Coal resources in shanxi, shaanxi and western inner mongolia region and its exploration and exploitation strategy-all databases[EB/OL]. (2010-01-01) [2024-08-09]. https://webofscience.clarivate.cn/wos/alldb/full-record/WOS:000392561100026.
[28] Oei P Y, Hermann H, Herpich P, et al., 2020. Coal phase-out in germany - implications and policies for affected regions[J]. Energy, 196: 117004.
[29] Ren K, Zhang T, Bai Y, et al., 2022. Environmental and economical assessment of high-value utilization routes for coke oven gas in China[J]. Journal of Cleaner Production, 353: 131668.
[30] Rinscheid A, Wustenhagen R, 2019. ENERGY POLICY german voters would prefer a more ambitious timeline to phase out coal[J]. Nature Energy, 4(12): 1016-1017.
[31] Sanderson K, 2023. COP28 climate summit signals the end of fossil fuels - but is it enough?[J]. NATURE, 624(7992): 484-485.
[32] Schulz F. (2020) Germany begins allocating 40 billion Euros to coal regions to start phase-out, Euractiv, 31.08.2020. https://www.euractiv.com/section/energy/news/germany-begins-allocating-e40-billion-to-coal-regions-to-start-phase-out/
[33] Singh G K, 2013. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review[J]. Energy, 53: 1-13.
[34] Song M, Wang J, Zhao J, 2018. Coal endowment, resource curse, and high coal-consuming industries location: Analysis based on large-scale data[J]. Resources, Conservation and Recycling, 129: 333-344.

[35] Sun X, Li J, Qiao H, et al., 2017. Energy implications of China's regional development: New insights from multi-regional input-output analysis[J]. Applied Energy, 196: 118-131.
[36] Sun Z, Liu Y, Yu Y, 2019. China's carbon emission peak pre-2030: Exploring multi-scenario optimal low-carbon behaviors for China's regions[J]. Journal of Cleaner Production, 231: 963-979.
[37] Tian JY, Yao W. Research on the Ecological Restoration of Coal Mining Subsidence Area in Shanxi Province. Advanced Materials Research, 2013;827:384-8. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.827.384.
[38] Unruh G C, Carrillo-Hermosilla J, 2006. Globalizing carbon lock-in[J]. Energy Policy, 34(10): 1185-1197.
[39] Wang G, Xu Y, Ren H, 2019. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 29(2): 161-169.
[40] Wang J, Huang Z, 2017. The recent technological development of intelligent mining in China[J]. Engineering, 3(4): 439-444.
[41] Wang W, Liu X, Zhang M, et al., 2014. Using a new generalized LMDI (logarithmic mean divisia index) method to analyze china's energy consumption[J]. Energy, 67: 617-622.
[42] WRI (2024) World's top emitters World's Top Emitters Interactive Chart I World Resources Institute (wri.org)
[43] Xiao K, Yu B, Cheng L, et al., 2022. The effects of CCUS combined with renewable energy penetration under the carbon peak by an SD-CGE model: Evidence from China[J]. Applied Energy, 321: 119396.
[44] Xie Z, Wu R, Wang S, 2021. How technological progress affects the carbon emission efficiency? Evidence from national panel quantile regression[J]. Journal of Cleaner Production, 307: 127133.
[45] Xu B, Lin B, 2016. Assessing CO2 emissions in China's iron and steel industry: A dynamic vector autoregression model[J]. Applied Energy, 161: 375-386.
[46] Xu B, Lin B, 2024. How can green finance effectively promote low-carbon cities? Evidence from 237 cities in China[J]. Journal of Environmental Management, 365: 121641.
[47] Yan Q, Wang Y, Balezentis T, et al., 2019. Analysis of China's regional thermal electricity generation and CO2 emissions: Decomposition based on the generalized divisia index[J]. Science of the Total Environment, 682: 737-755.
[48] Yan Y, Borhani T N, Subraveti S G, et al., 2021. Harnessing the power of machine learning for carbon capture, utilisation, and storage (CCUS) - a state-of-the-art review[J]. Energy & Environmental Science, 14(12): 6122-6157.
[49] Yang L, Lin B, 2016. Carbon dioxide-emission in China's power industry: Evidence and policy implications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60: 258-267.
[50] Yuan J, Na C, Lei Q, et al., 2018. Coal use for power generation in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 129: 443-453.
[51] Zhang H, Shen L, Zhong S, et al., 2020. Economic structure transformation and low-carbon development in energy-rich cities: The case of the contiguous area of shanxi and shaanxi provinces, and inner mongolia autonomous region of China[J]. Sustainability, 12(5): 1875.

[52] Zhang J, Liu L, Xie Y, et al., 2022. An integrated optimization and multi-scale input-output model for interaction mechanism analysis of energy-economic-environmental policy in a typical fossil-energy-dependent region[J]. Energy Strategy Reviews, 44: 100947.
[53] Zhao C, Dong K, Lee C C, 2024. Carbon lock-in endgame: Can energy trilemma eradication contribute to decarbonization?[J]. Energy, 293: 130662.
[54] Zhao C, Ma X, Che S, et al., 2024. Does climate aid alleviate carbon lock-in? A global perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 449: 141782.
[55] Zhou S, Tong Q, Yu S, et al., 2012. Role of non-fossil energy in meeting China's energy and climate target for 2020[J]. Energy Policy, 51: 14-19.
[56] Zitek V, Klimova V, 2023. Just transformation as a way to sustainable development of regions[C]//Klimova V, Zitek V. 26th International Colloquium On Regional Sciences. Brno: Masarykova Univ: 84-92.
[57] 黄武靖, 司方远, 张宁, 等, 2023. 面向韧性的城市能源系统安全规则提取及优化运行[J]. 电力系统自动化, 47(12): 1-8.
[58] 贾佳, 田世民, 江恩慧, 等, 2023. 黄河流域碳排放状况及"双碳"目标实现路径研究[J]. 人民黄河, 45(12): 8-13.
[59] 刘佳颖, 张柏杨, 朱睿博, 2023. 公正转型：概念、实践与启示[J]. 海南金融(5): 53-65.
[60] 刘立涛, 沈镭, 高天明, 等, 2012. 中国能源安全评价及时空演进特征[J]. 地理学报, 67(12): 1634-1644.
[61] 牛鸿蕾, 2023. 中国制造业碳锁定测度及时空演变特征研究[J]. 统计与决策, 39(8): 153-157.
[62] 齐慧, 2023. 资源型城市经济高质量发展研究——基于鄂尔多斯市零碳产业园的样本研究[J]. 内蒙古统计(3): 67-69.
[63] 王芳, 2024. 鄂尔多斯为何能建成零碳产业园？[J]. 风能(1): 14-17.
[64] 国家能源局：关于印发 2018 年各省（区、市）煤电超低排放和节能改造目标任务的通知_部门政务_中国政府网[EB/OL]. (2018-08-27) [2024-08-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2018-08/28/content_5317088.htm.
[65] 杨博文, 2024. 我国实施碳排放"双控"的渐进逻辑、转型部署及制度取向[J]. 当代经济研究(7): 105-116.
[66] 中国 21 世纪议程管理中心. 中国二氧化碳捕集利用与封存（ccus）年度报告（2023）[EB/OL]. (2023-12-29) [2024-08-09]. http://m.tsjinquan.com/apollo/dongshow-450619.html.
[67] 生态环境部环境规划院. 《中国风电和太阳能发电潜力评估》（2024）报告发布[EB/OL]. (2024-6-14) [2024-08-09]. http://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202406/t20240614_1075803.shtml.
[68] 袁家海, 王媛, 杨晓文, 等, 2023. "双碳"目标下省级煤电退出的就业影响与脆弱性评估[J]. 中国人口·资源与环境, 33(7): 67-80.
[69] 张沈习, 宋琪, 程浩忠, 等, 2024. 考虑能流-物流耦合的港口综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 中国电机工程学报: 1-20.
[70] 张万洪, 宋毅仁, 2024. 中国式现代化背景下能源正义与公正能源转型的新思考[J]. 江汉论坛(3): 36-43.
[71] 张为荣, 袁家海, 2021. 全球 2℃温升碳约束下中国煤电搁浅资产研究[J]. 气候变化研究进展, 17(1): 36-44.

[72] 张莹, 姬潇然, 王谋, 2021. 国际气候治理中的公正转型议题：概念辨析与治理进展[J]. 气候变化研究进展, 17(2): 245-254.
[73] 赵江燕, 朱宇恩, 马建超, 等, 2022. 山西省能源消费碳排放清单和影响因素研究[J]. 太原理工大学学报, 53(6): 989-996.
[74] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等, 2024. 基于分布式新能源集群的微能源网优化调度综述[J]. 中国电机工程学报: 1-22.

附录 A 研究方法与技术路线

1. 研究技术路线

研究方法包括文献和现场调研、专家咨询和政府座谈等形式。具体来说：

文献调研：系统梳理传统产业绿色低碳转型国际国内最新研究和典型案例，归纳总结国际国内传统产业绿色低碳转型经验。

现场调研：在煤炭三角区开展现场调研，组织国际国内能源领域权威专家和项目研究团队深入实地调研，系统评估煤炭三角区能源消费和生产底数，准确摸清煤炭发展与可再生能源发展现状。

专家咨询：针对煤炭三角区未来产业发展方向、新能源一体化产业配套建设路径等问题召开系列专家咨询会议，提出发展建议和战略路径。

政府座谈：全面开展煤炭三角区内蒙古、宁夏、陕西和山西四省区发改委、生态环境厅等政府职能机构和科研机构座谈会，深入探讨煤炭三角区能源转型路径及其对区域经济发展和乡村振兴等区域社会经济方面的重要影响，为未来转型提供科学性政策建议。

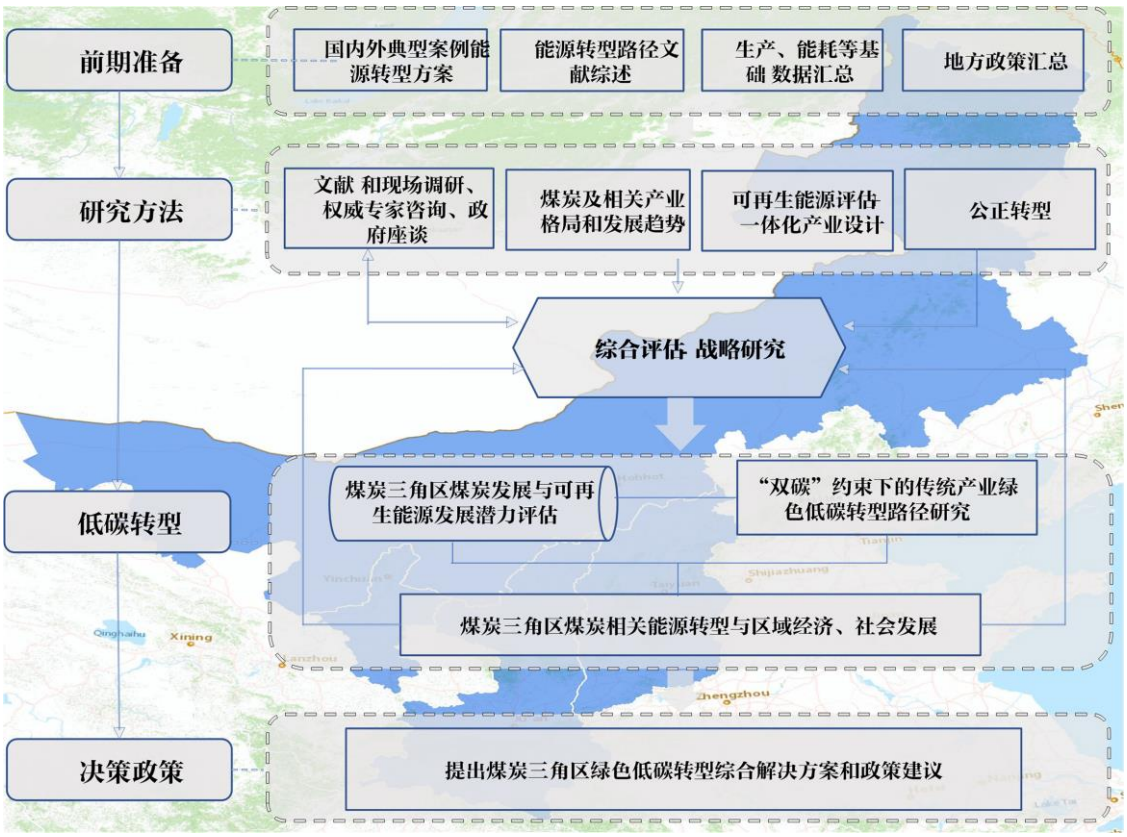


图 A-1 研究技术路线

2. 中国中长期排放路径模型 CAEP-CP 2.0

中国中长期排放路径模型 CAEP-CP 2.0 是生态环境部环境规划院王金南院士牵头建立的中国排放路径综合模型。CAEP-CP 2.0 模型基于自上而下宏观模型和自下而上的演化模型，主要包括高空间分辨率排放网格化模块、中长期能源模块、M3C-CGE 模型、空间化新能源潜力评估模块、减排技术评估模块、碳移除模块和关键产业预测模块等。其中，自上而下宏观模型充分考虑社会经济发展、中国 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和等目标约束，同时考虑技术可达性、措施可行性等因素，通过反复迭代优化，形成基于行业/领域的排放路径；自下而上方法是在空间排放网格层面，以年为单位，通过特定规则和约束，演化出不同阶段的排放格局。

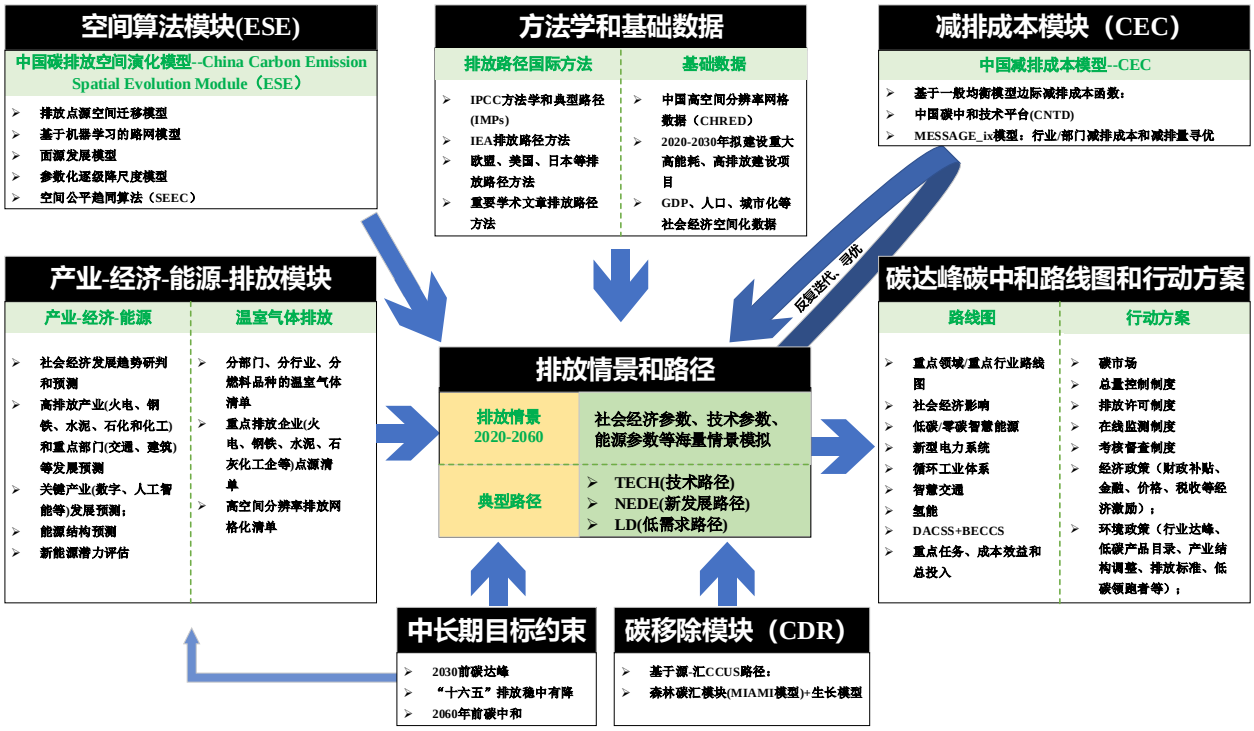


图 A-2 CAEP-CP 2.0 模型

CAEP-CP 2.0 模型结果已经在中共中央政治局第二十九次集体学习会议、中国工程院高层会议、生态环境部高层会议等重要会议多次汇报。该模型当前作为中国工程院《我国碳达峰碳中和战略及路径研究》重大咨询项目的综合模型，统筹 40 多位院士和 300 多位专家的基础数据和研究成果，持续完善和迭代升级。

CAEP-CP 2.0 模型已经在中国温室气体排放情景分析和碳达峰碳中和路径分析中得到了充分应用，为国家出台各类政策提供了技术支撑。同时该模型在宁夏、江西、福建、山

西等省区及烟台市、南平市、武夷山市等城市的碳达峰碳中和路径研究中发挥了重要作用，有力支撑了地方碳达峰方案的出台。

2.1 M3C-CGE 模块：宏微观多维—碳中和—CGE

该模块是 CAEP-CP 2.0 模型中解决区域能源、产业、经济关联影响的重要模块。M3C-CGE 模块基于 CGE 模型构建，考虑不同经济主体及不同市场之间联系的多部门、多区域动态模型。CGE 模型运用大量数学方程刻画不同经济主体（企业、居民、政府、投资者、进出口商等）的生产、消费、投资、进出口等行为，在居民效用最大化、企业利润最大化、成本最小化、资源与预算约束的情况下，得出市场均衡时生产要素或其他商品的供给与需求，从而得到均衡价格。生态环境部环境规划院联合中科院预测科学研究中心和中国科学院大学经济管理学院，基于 CGE 模型，综合考虑环境、经济、社会多个系统之间的相互联系，涵盖环境、能源类账户，分析不同区域不同经济主体之间的交互与反馈，从而得到“双碳”约束下，不同减排情景对经济、社会、环境等方面的影响。

以 2020 年省区投入产出表为社会经济基础数据，结合 2020 年省区能源平衡表、省份统计年鉴、省区碳排放等数据形成了基准年数据。模型涵盖 40 个部门，包括生产模块、国内外贸易市场模块、政府和居民的收支模块以及碳排放模块，以 1 年为步长，动态地模拟了不同碳排放约束情景下，2020—2060 年期间省区产业经济态势、产业结构变化、能源消费及其碳排放量的变化。

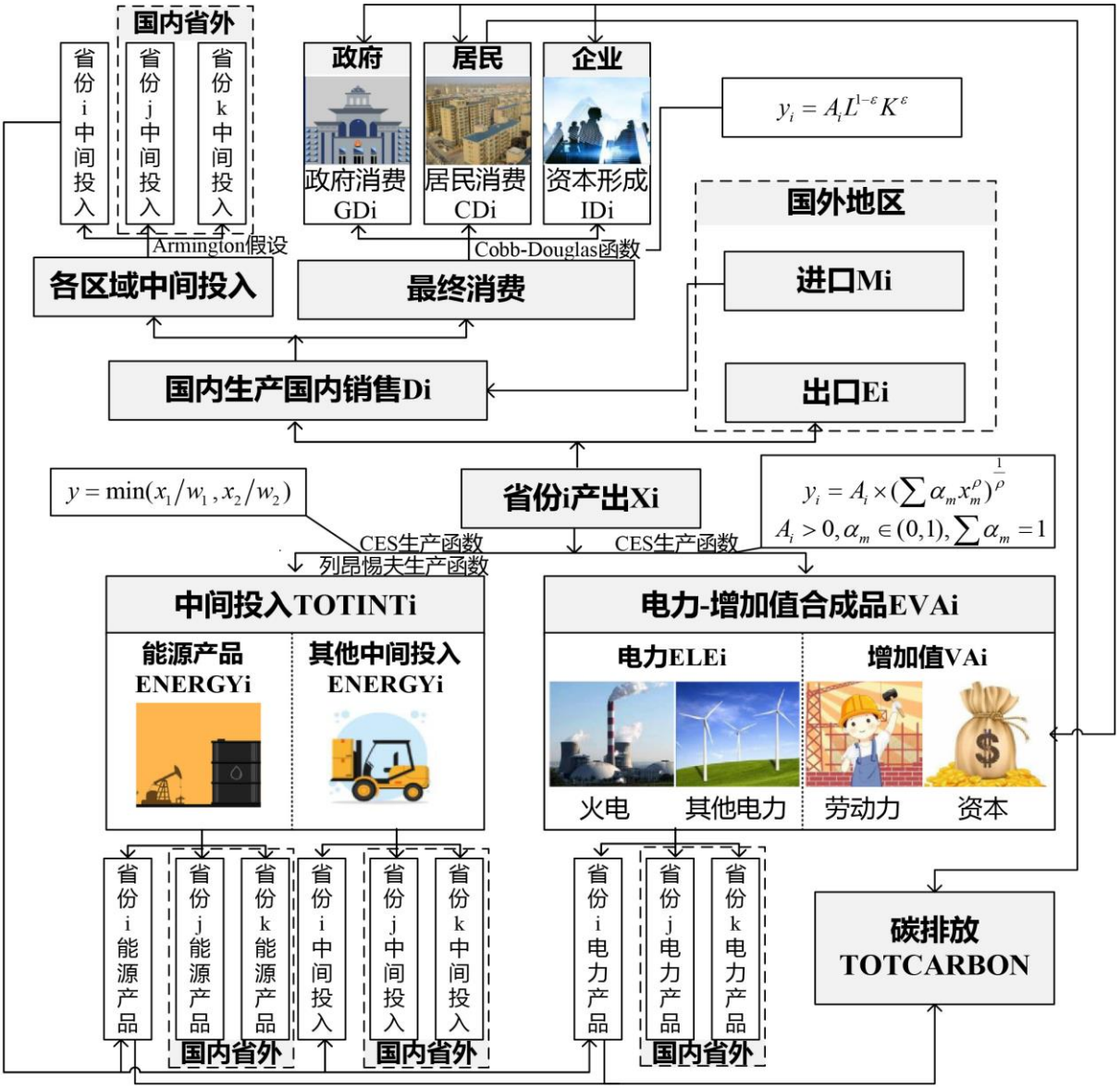


图 A-3 碳调节经济模型（CARBON-CGE）模块

2.2 新能源潜力评估模块

基于 GIS 空间分析平台，基于高分辨率风光资源图谱（风资源图谱（100 米高度）、地表总辐射、光伏发电潜力等效小时数据（等效小时数）），结合限制因素数据库（生态红线、水域、居民区、机场跑道等）、地形参数库（高程数据 SRTM、坡度、坡向）、地貌、设备数据库、区域特性参数等等，通过 GIS 空间分析、最优设备选型、运营期发电量评估等评估算法，评估区域风电、光伏可开发区域，并结合区域内地形、资源特性选取适配的设备，最终得到区域内的风电、光伏理论可开发容量以及发电小时数。最优发电设备根据潜在可供可再生资源开发的区域内资源特征匹配。特别对于风电开发，风电机组叶轮

扫风面积、发电机功率、塔筒高度等决定了风能转化效率。结合 80~140 m 高度风资源禀赋情况以实现度电成本最低。风资源数据来自依据风电行业长期历史实际测风数据订正的高分辨率风资源图谱。机组信息来自于行业主流机型技术参数数据库及对未来技术发展的预估。

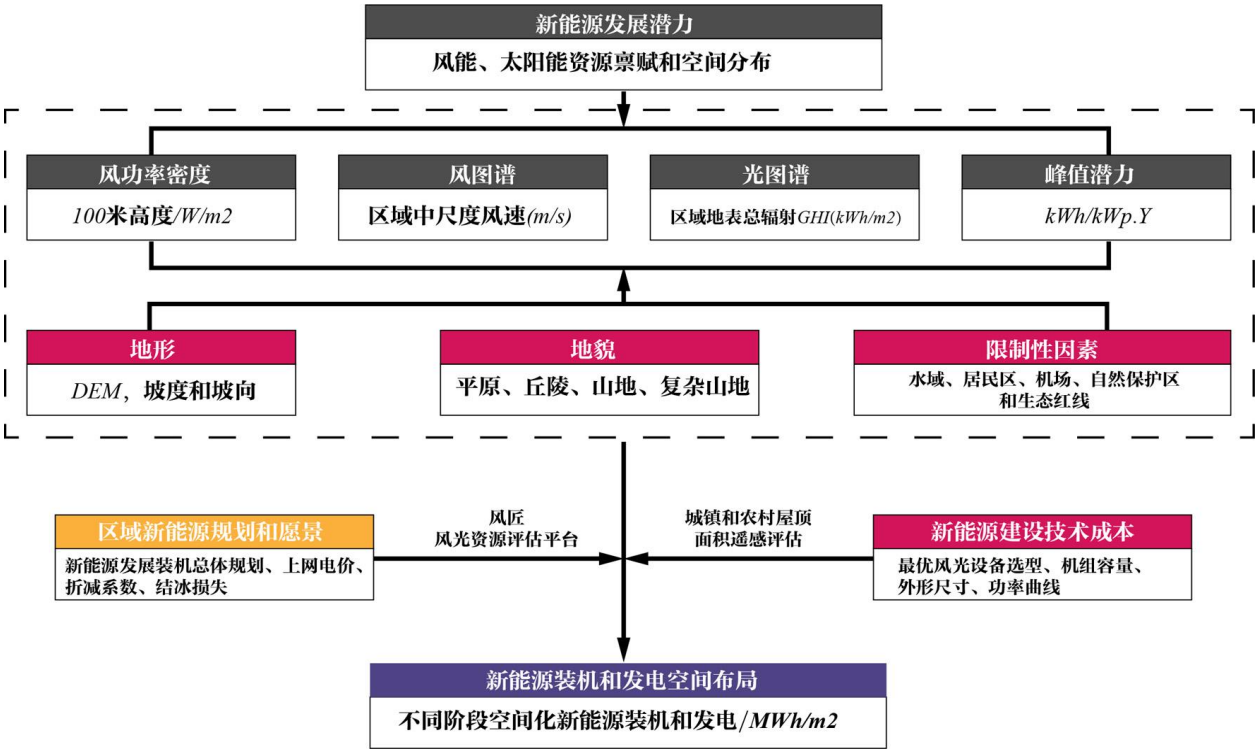


图 A-4 新能源潜力评估模块

3. 开展现场调研和会议研讨

基于 CAEP-CP 2.0 构建煤炭三角区转型路径后，课题组在研究过程中开展了大量的现场调研和会议研讨，保证与各省级行政主管部门、科研机构进行充分沟通，并得到及时反馈，从而动态调整转型路径研究结果。

一方面，本课题组深入内蒙古鄂尔多斯与陕西铜川地区，通过对多个新能源项目的实地考察与深入访谈，旨在探究煤炭三角区在新能源发展方面的创新实践与战略规划、转型过程中遇到的难点与问题。鄂尔多斯伊金霍洛旗的天骄绿能光伏发电示范项目，有效利用了采煤沉降区的土地资源，还通过光伏发电技术，为地区提供了清洁能源，实现了生态修复与能源生产的双重目标。中国神华煤制油项目则代表了煤炭资源深加工的前沿技术，通过将煤炭转化为清洁油品，该项目为煤炭资源的高效利用与保障国家能源安全提供了新的解决方案。远景零碳产业园项目则展示了能源转型在推动产业绿色转型方面的潜力。库布奇光伏治沙项目通过光伏发电与沙漠治理的结合，不仅有效遏制了沙漠化进程，还为地区

经济发展提供了新的动力。铜川克坊村的光伏助农项目则体现了新能源技术在促进乡村振兴、扩大村集体经济方面的积极作用。本次调研使我们对煤炭三角区在新能源发展模式、低碳产业布局等方面有了更为深刻的理解。这些地区的实践表明，结合当地自然资源禀赋发展新能源，可以有效促进地区经济的可持续发展。

另一方面，自 2024 年 1 月课题启动后，本项目组织了两次线上研讨和两次线下会议。2024 年 5 月线下会议在鄂尔多斯举行，汇聚了多位领域内的专家学者以及地方相关部门的负责人，包括刘世锦、黄庆学、Béla Galgóczi、Pete Harrison、郭敬、黄少中、胡秀莲等，他们分别从资源型地区的市场经济解决方案、技术创新在能源转型中的作用、煤炭三角区碳达峰碳中和的困难与挑战以及新型能源体系构建等多个维度，提出了深刻的见解和建议。地方参与单位包括生态环境局、能源局、工信局等，他们就资源能源输出地区的碳排放配额、新能源试点、能源外送线路容量、氢能政策扶持等问题进行了深入讨论，并提出了相应的政策建议。

2024 年 5 月研讨会在陕西西安召开，围绕煤炭三角区能源转型路径，项目负责人对现阶段成果进行展示后，内蒙古、宁夏、陕西和山西的研究专家对本省的能源转型情况进行了介绍，参会专家姜克隽、Béla Galgóczi、韩文科、黄少中、续大康、高丽娟等就电力成本、产业链安全、技术经济性、法律设定、国际贸易公平机制等议题，展开了深入的讨论，并提出了具体修改方向和实施策略。地方部门发改委、省生态环境厅、省社会科学院等，就风光项目对地方财政贡献、土地和环保政策对新能源开发的影响、CCUS 政策出台滞后等问题，进行了政策建议等相关内容讨论。两次研讨均进一步探讨了新能源发展的技术逻辑与市场逻辑，不仅为地方能源转型提供了理论支撑和政策建议，也为我国能源结构的优化和绿色低碳发展指明了方向。

图 A-5 课题组开展实地调研（左）和课题组举办研讨会（右）