

# 迈向“双碳”研究系列报告

《“双碳”目标下能源结构清洁低碳转型的协同  
路径》

(S 系列-2023S01)

中国石油大学（北京）中国油气产业发展研究中心  
中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院

2023 年 10 月 21 日



中国油气产业发展研究中心

Research Center for China's Oil and Gas Industry Development

中国石油大学（北京）中国油气产业发展研究中心成立于 2010 年，并挂靠在经济管理学院。中心定位为“国际知名、国内一流的油气产业发展研究基地”，围绕五大研究方向和五大应用领域，重点承担和开展一批基础理论与实践应用研究课题。自成立以来，中心学术影响力和社会影响力在不断提升，已经累计承担课题 100 多项，其中国家社科基金重大项目 1 项、教育部人文社科基金重大项目 1 项、国家自然科学基金/社会科学基金项目 9 项、国际合作基金 2 项、国家部委项目 31 项、企业项目 75 项；出版了学术专著 19 部、教材 4 部。近 5 年，中心发表学术论文 100 多篇，多数被 SCI/SSCI/CSSCI/CSCD 收录；获得国家能源局、商务部、中国石油和化学工业联合会等省部级科技奖励 16 项。目前中心有研究人员 12 名，其中教授 5 名，博士生导师 5 人。



中国石油大学(北京)碳中和与能源创新发展研究院(简称“中石大碳能院”)是在国家碳达峰和碳中和目标(简称“双碳”目标)下,中国石油大学(北京)主动服务国家需求,积极响应国家建设高校特色智库的要求,结合学校自身优势,于2021年9月成立的智库性质的研究机构,也是支持中国石油大学(北京)“一带一路”能源合作伙伴关系合作网络高校(青年)工作组组长单位业务开展的主要研究机构。中石大碳能院为应对气候变化和“双碳”目标下的国际、国家、行业、企业在能源与油气领域的发展提供第三方分析、评价与政策建议。通过每年向社会公众发布指数类、研究类、专题类系列报告,并向国家决策部门和行业决策者提供政策建议,定期举办相关特色论坛等,逐步打造“立足中国、面向世界”、“聚焦油气、辐射能源”的特色鲜明的能源类高校“双碳”政策类研究智库。

---

# “双碳”目标下能源结构清洁低碳转型的协同路径

## 核心摘要

全球气候变暖严重威胁人类的生存和健康，能源活动是导致温室气体排放增加的重要因素。因此，为实现中国政府确定的“双碳”目标，需要促进中国目前以煤炭为主导的能源结构向以可再生能源等新能源为主导的清洁低碳的能源结构转型。但是，能源结构转型是一个需要考虑系统性、协同性、平衡性的复杂的系统工程问题，这种复杂的系统性问题首先体现在可再生能源的发展与传统化石能源、储能等其他类型能源供给侧的协同发展关系；其次，体现在能源结构供给侧和需求侧清洁低碳转型的协同发展关系；最后，体现在能源结构的清洁低碳转型与产业结构、尤其是高耗能产业结构升级的协同发展关系。本研究围绕上述主题，主要开展了以下三方面的研究：第一，可再生能源与电动汽车、储能的协同发展转型路径；第二，可再生能源与供热行业、交通行业的协同转型路径；第三，内蒙古、山西煤炭重点地区能源结构与产业结构协同绿色转型路径。

通过构建分布式光伏电站的容量优化模型，并基于混合整数非线性规划方法，遗传算法、EnergyPlan 模型、计量经济学等方法对上述问题展开了相关研究，研究认为：第一，仅考虑经济效益：光储充一体化电站应优先考虑的建设地点是：医院、商场、教学楼；第二，仅考虑环境效益：光储充一体化电站应优先考虑的建设地点是：医院、



---

教学楼、商场；第三，促进储能技术进步，提高峰谷差电价对推动光储充一体化的发展具有重要意义；第四，通过电力系统与热力部门协同，可以使部分地区（比如，北京）满足本地将近 100%的可再生能源供电和供热需求。第五，可再生能源电力通过低温熔盐塔与传统化石能源发电及供热部门耦合，具有最低的碳减排效应，并可有效促进可再生能源消纳。第六，多部门协同转型路径在电力、供热、交通部门能源供应中可完全实现可再生能源对化石能源替代，并可降低能源消耗，且不会增加能源系统总成本。第七，内蒙古、山西煤炭重点地区在逐渐减少煤炭开采的过程中如果增加可再生能源的生产，则不仅不会对经济发展产生不利影响，还会使 GDP 增长 0.33%。第八，能源转型需要与钢铁行业新生产工艺技术转型协同，包括将高炉设备的焦煤炼钢工艺改造为短流程的电锅炉炼钢工艺，或者改造为氢还原铁的生产工艺；同时，需要增加太空钢、高铁钢轨、耐候钢、耐蚀钢等钢铁行业的高端产品，降低能源转型中可能产生的能源价格上涨对高耗能产业带来的不利影响。

## 1. 研究背景与目的

作为世界上最大的能源消费国和二氧化碳排放国，以化石能源为主的能源结构使中国面临着巨大的环境减排的压力。为应对气候变化带来的挑战，2020年9月中国提出“双碳”目标：CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达峰、2060年前实现碳中和。之后中国加快了能源结构转型进程，这为“双碳”目标实现提供了有力保障；但2020年以来中国部分地区开始出现电力供应短缺现象，2021年电力供应短缺问题加剧，从广东、

---

浙江、江苏等东南沿海一直扩展到东北三省和西部内蒙古、贵州等24个省市自治区，东北三省还出现了对居民拉闸限电情况。2022年在国家大力解决煤炭增产保供情况下，仍有14个省市出现了不同程度的电力供应短缺。这些问题表明如果不考虑经济发展的现实，忽略能源系统与经济系统的内在关联关系，盲目追求过快削减化石能源，就有可能产生能源系统运行失衡、能源供应不足，甚至会发生类似于英国（Beatty et al. 2007; Elliot, 2016）和美国（Jolley et al., 2019）在去煤过程中所产生的高失业率、频繁的救济金申请以及工作岗位不足等结构性问题。

为此，本课题将主要围绕“双碳”目标下能源结构清洁低碳转型的协同路径问题展开研究。通过研究可再生能源与电动汽车、储能的协同发展转型路径，可再生能源与供热行业、交通行业的协同转型路径，以及内蒙古、山西煤炭重点地区能源结构与产业结构协同绿色转型的路径，拟解决“双碳”目标下中国能源结构清洁低碳转型进程中可能出现的能源供应不稳定、能源供需结构不匹配、煤炭重点地区由于转型使其经济发展产生不利影响等问题，提出能源结构清洁低碳转型的更合理发展路径，从而为中国能源结构清洁低碳转型提供可持续的、明确的规划，保障并助力中国“双碳”目标的实现。

## **2. 主要研究思路**

### **2.1 研究思路**

#### **2.1.1 可再生能源与电动汽车、储能协同发展路径的研究思路**

首先，对分布式光伏发电量预测。根据长短时记忆网络（Long

---

Short Term Memory networks, LSTM) 模型, 使用 2017 年 1 月 1 日 0 时-2020 年 1 月 31 日 24 时共 27024 小时的北京市小时太阳辐射数据, 在 Matlab 2020a 中对北京市太阳辐射量进行回归与预测, 以 70% 的数据训练模型, 间隔 100 数据点, 以 30% 数据量进行验证。

其次, 对电动汽车充电负荷进行预测。常规的电动汽车充电桩负荷分析, 一般通过《家庭出行调查报告》等方式对电动汽车充放电行为进行仿真, 自底向上累积充电桩的总负荷。但中国缺乏此类调查, 而通过问卷调查等方式难以全面覆盖北京市电动汽车充放电行为。同时, 已有研究表明, 电动汽车驶入充电桩时的剩余电量具有随机性(罗卓伟等, 2011), 即充电电量与充电起始时间点独立。基于此, 本文通过与国家电网电动汽车的项目合作, 获得了北京市 2019-2020 年 21 个公共电动汽车充电站的每小时充放电数据, 该数据涵盖北京市所有行政区及所有建筑类型, 每个充电站约有 3-20 个充电桩, 剔除原始数据存在的电动汽车插上电源未充电、即插即拔数据异常等数据, 剩余有效数据 650255 条。对位于各建筑类型充电桩每小时内的充电数据进行累加, 分类型计算每小时充电量, 并用离散事件仿真软件 Arena 生成每小时充电量服从的分布函数, 可以得到单个位于不同类型建筑物充电桩的用电负荷特征。进一步结合典型日不同建筑类型用户用电特征 (Sun et al.2022) 可计算得到光储充一体化电站的发展路径。

### 2.1.2 可再生能源与供热、交通行业的协同转型路径研究思路

主要基于 EnergyPlan 模型对相关问题展开研究, 作为自底向上的能源系统分析平台, EnergyPLAN 具有非常显著的特征: ①模型适

用于各种空间尺度下能源系统的模拟；②模型可以逐小时的模拟能源系统的技术运行状况；③EnergyPLAN模型的分析可以突破现有制度框架的约束，通过不同运行策略的调整来降低现行制度对未来高比例可再生能源情况的外生性影响；④EnergyPLAN模型具有极高的运行效率，可以快速对比多种能源系统的技术替代方案，及时调整能源系统的运行策略。EnergyPLAN模型可以通过对不同技术组合的技术经济分析实现大型能源系统的战略设计，主要被应用于以下4个方面的研究，①高比例可再生能源系统的转型路径的确定；②某种技术的普及对完整能源系统运行的影响；③不同能源政策与发展战略的评估；④不同能源系统间的相互关联。考虑到可再生能源的间歇性与不稳定性，模型中还需要输入小时分辨率的能源需求，包括电力负荷、热力负荷和交通部门电力消耗三个方面，以及可再生电力生产的小时时间序列数据。模型结构如图1所示。

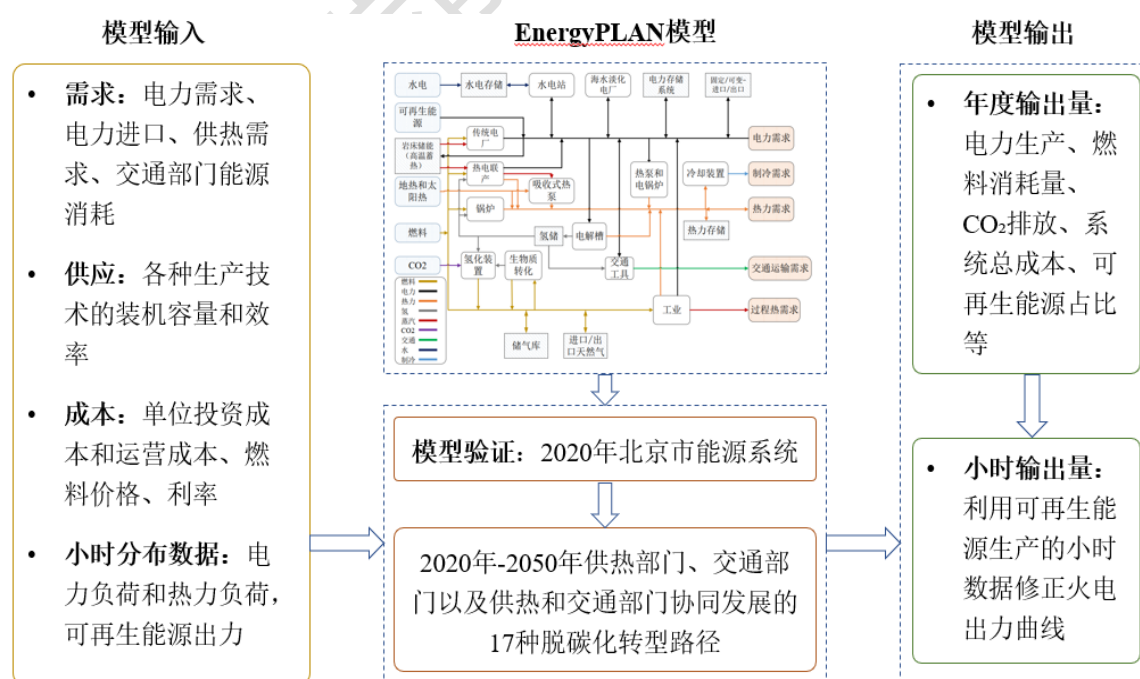


图1 EnergyPLAN模型示意图以及北京电力、供暖和交通部门的结构

---

### 2.1.3 内蒙古、山西煤炭重点地区能源结构与产业结构协同绿色转型路径研究思路

本研究采用 2011-2020 年内蒙古自治区 9 个地级市和山西省 11 个地级市层面数据作为研究样本，构建包含城市和年份双向固定效应的多元回归模型，定量分析煤炭重点地区绿色转型对经济发展的影响。基于可获得的数据，具体采用各城市实际 GDP 衡量经济发展水平，以城市原煤产量和可再生能源发电量为主要解释变量，研究煤炭重点地区煤炭逐渐退出和可再生能源发展对地区经济发展的影响，从而识别以可再生能源逐渐替代传统化石能源为主要特征的绿色转型如何影响地区经济发展。其中，可再生能源发电量主要通过以 2021 年煤炭重点地区各城市发电量占比作为权重，并基于 2011-2020 年内蒙古自治区和山西省包含水电、风力发电和光伏发电在内的可再生能源发电量数据进行计算得到。此外，回归模型中还控制了产业结构、人口规模、居民消费、技术进步和政府税收等因素对经济发展的影响，研究对所有非比值型变量均做对数化处理，以缓解潜在异方差问题的影响。

### 2.2 研究对象

本报告分别以北京市的光储充一体化电站和北京市的交通行业、供热行业、可再生能源发电行业，以及内蒙古、山西的煤炭企业、钢铁企业等高耗能企业和这些地区的经济发展为研究对象。北京已于 2019 年建设了世界上最大的光储充一体化发电系统，同时，北京是中国的首都，在北京建设新的项目具有更大的影响力，有利于光伏发电

等可再生能源发电系统的推广。因此，本文主要选择北京作为研究对象。

其次，近年来，作为煤炭重点地区的内蒙古、山西原煤产量在中国始终排名前二，2021年，内蒙古、山西原煤产量占全国原煤产量的一半以上，2022年这两个城市的煤炭产量达到了全国煤炭产量的近55%。因此，本报告主要以内蒙古、山西煤炭重点地区作为研究对象，分析其绿色转型中如何保障能源的稳定供应，保障能源转型和经济发展的协同关系。

### 3. 研究结果

#### 3.1 可再生能源与电动汽车、储能协同发展路径的研究结果

基于分布式光伏电站、光伏储能电站与光储充一体化电站的建设地点，对不同规模下的电站投资回报率进行计算，求得屋顶分布式电站的投资回报如表1所示；光伏储能电站中的容量分布如表2所示；光储充一体化电站中的最大投资回报率时分布式光伏、储能、电动汽车充电桩配比如表3所示。

表1 屋顶分布式光伏电站在不同建筑处最大投资回报率时的投资情况

	工厂	教学楼	酒店	商场	医院	住宅	办公楼
最大投资回报率	56.26	54.13	56.26	56.26	56.26%	30.72	56.26
	%	%	%	%		%	%
对应投资额 (万元)	25	125	125	125	245	35	25
净现值 (万元)	147.62	746.17	746.17	746.17	1464.03	99.20	147.62
弃光率	0	0	0	0	0	0	0
二氧化碳减排量 (万吨)	0.36	1.81	1.81	1.81	3.55	0.51	0.36
分布式光伏装机容量 $a$ (千瓦)	73	369	369	369	724	103	73

表 2 光伏储能电站在不同建筑处最大投资回报率的投资情况

	工厂	教学楼	酒店	商场	医院	住宅	办公楼
最大投资回报率	5.07%	14.31%	14.70%	14.63%	14.64%	-1.23%	14.52%
对应投资额 (万元)	1000	1850	900	1600	3750	750	300
净现值 (万元)	139.18	2112.19	1053.12	1863.97	4368.09	-433.51	346.23
弃光率	25.37%	18.71%	17.28%	16.98%	18.07%	46.48%	19.27%
二氧化碳减排量 (万吨)	4.20	7.60	3.82	6.72	15.78	3.06	1.24
分布式光伏装机容量 $a$ (千瓦)	1144.94	1904.08	941.56	1649.57	3922.45	1164.20	312.17
储能容量 $b$ (千瓦时)	2137	4125	2028	3634	8451	1343	678

表 3 光储充一体化电站在不同建筑处的最大投资回报率投资情况

	工厂	教学楼	酒店	商场	医院	住宅	办公楼
最大投资回报率	4.29%	12.58%	11.23%	12.81%	13.92%	1.26%	9.81%
对应投资额 (万元)	1350	2600	1600	3900	4150	150	1300
净现值 (万元)	53.01	2439.60	1259.10	3795.57	4495.47	-74.63	836.36
弃光率	29.20%	21.92%	27.39%	26.50%	18.68%	31.55%	31.70%
二氧化碳减排量 (万吨)	4.46	9.36	5.33	13.66	16.30	0.34	3.67
分布式光伏装机容量 $a$ (千瓦)	1282.69	2440.91	1493.87	3785.68	4082.30	101.59	1095.02
储能容量 $b$ (千瓦时)	2246.25	5258.67	2888.29	8206.03	8728.05	162.85	2312.60
充电桩数量 $c$ (个)	5	5	5	5	5	3	5

对不同地点、不同规模下的电站进行容量配置优化，可以得到如下结果：

(1) 在屋顶资源无约束的前提下，分布式光伏电站的投资回报率优于光伏储能电站与光储充一体化电站，光伏储能电站与光储充一体化电站投资回报率接近。

---

不考虑屋顶可获得性时，相比生命周期只有十年的储能设备与昂贵的土地成本，分布式光伏电站投资较少，同时电能是同质的，分布式光伏电站的电能与光伏储能电站及光储充一体化电站并无区别，甚至在消费侧价格一致，因此分布式光伏电站的投资回报率最高，经济效益最好。分布式光伏电站建设于任意建筑类型附近，均能获得较高收益。从环境效益角度看，在经济效益最高时，分布式光伏电站的弃光率通常为零，但是光伏储能电站及光储充一体化电站由于有储能设备，储能在谷电时期自大电网购买电能的费用，低于日间光伏发电成本，因此光伏储能电站与光储充一体化电站均存在弃光现象，导致分布式光伏电站的环境效益优于光伏储能电站与光储充一体化电站。

(2) 光储充一体化电站投资回报率在医院场景下最高，在住宅场景下最低。

当投资额低于三百万元时，光储充一体化电站投资回报率均为负值，当高于五千万元时，受到用电负荷的限制，投资已达到饱和，因此仅展示三百万至五千万之间的投资回报率，如图 2 所示。在每种不同建筑类型的场景中，随着投资额增加，光储充一体化模式的投资回报率均呈先增加后下降最终稳定的趋势。当投资额充足时，不同地点光储充一体化电站的投资回报率自高到低分别为医院、商场、教学楼、酒店、办公楼、工厂、住宅。按照投资回报率大小，可以将不同建筑类型地点下的光储充一体化电站分为高中低三个等级，第一级投资回报率最高，分别为医院、商场（日间用电特征接近分布式光伏发电曲线、夜间高峰时段用电量高、夜间低谷时段用电量低）；第二级为酒



店、教学楼、办公楼（日间用电特征接近分布式光伏发电曲线、夜间用电量低）；第三级为工厂与住宅，投资回报率最低（日间、夜间用电量差距小，波动不明显），其中住宅附近建设光储充一体化电站的投资回报率低于中国银行活期存款利率，目前不具有投资价值。

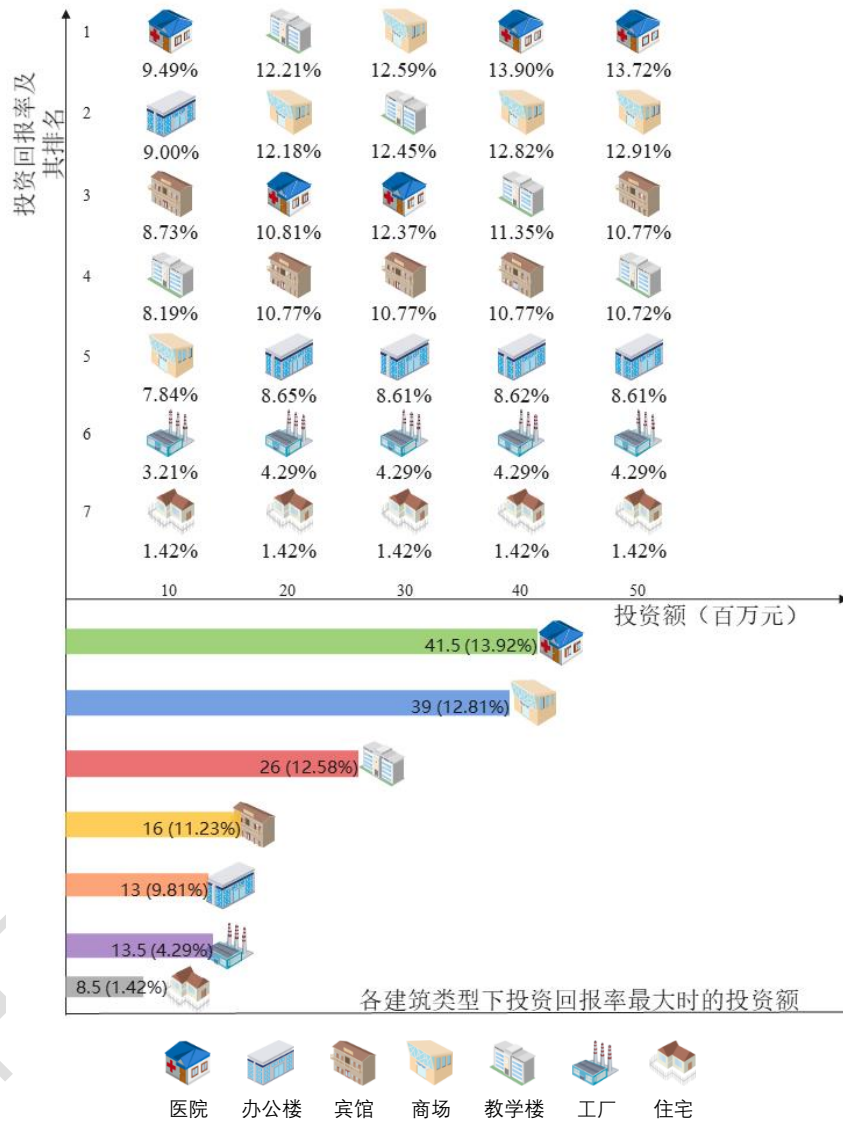


图 2 不同投资额下各类型光储充一体化电站投资回报率

(3) 光储充一体化电站在医院、商场、教学楼附近推广更有利于碳减排目标达成。

光储充一体化发展模式的碳减排量与分布式光伏弃光率相关，在

相同的投资水平下，弃光率越低，二氧化碳减排量越大。当投资额充足时，不同场景下的光储充一体化电站单位投资二氧化碳减排量由高到低分别为医院（3.87 千克/元）、商场（3.46 千克/元）、工厂（3.30 千克/元）、酒店（3.24 千克/元）、教学楼（3.18 千克/元）、办公楼（2.61 千克/元）、住宅（0.57 千克/元）（图 3），与经济性排序基本一致。

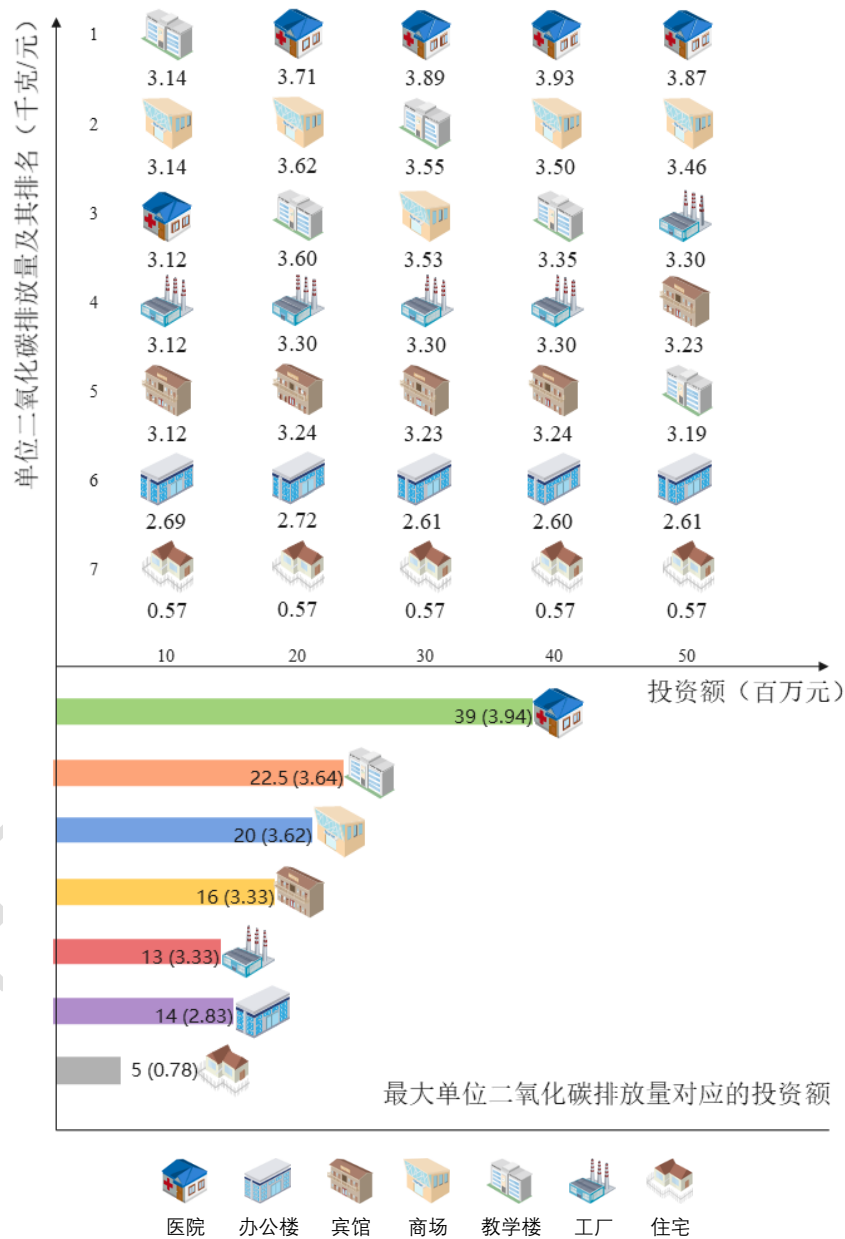


图 3 不同投资额下各类型光储充一体化电站单位投资二氧化碳减排量

---

建筑物白天用电负荷越接近分布式光伏发电曲线、夜间用电量越高时，光储充一体化电站的二氧化碳减排量越大。这是因为当弃光率越低时，光伏发电量越大，二氧化碳减排量越大。建筑物一方面夜间大量使用储能中的电量，为白天消纳分布式光伏留出了足够空间，降低弃光率；另一方面，白天建筑物负荷曲线越接近分布式光伏发电曲线，弃光率越低；医院则具有夜间用电量高、白天用电负荷接近分布式光伏发电曲线的特征，因此在医院附近建设光储充一体化电站能够最大限度利用分布式光伏发电，减少大电网的二氧化碳排放。

#### (4) 储能成本下降对光储充一体化电站投资收益的影响

储能成本下降幅度在 5% 以下时，光储充一体化电站投资回报率和单位投资二氧化碳减排量基本没有发生变化；当储能成本下降幅度在 10% 以上时，光储充一体化电站投资回报率和单位投资二氧化碳减排量才明显提高。在不同地点，储能成本下降引起的光储充一体化电站经济及环境效益变化幅度不同。医院附近的光储充电站经济及环境效益对储能成本的变化更加敏感。当储能成本降低 25% 时，医院地点建设的光储充一体化电站最大投资回报率由 13.92% 提高为 17.32%，最大单位投资二氧化碳减排量由 3.88 千克/元提高至 4.45 千克/元；相对而言，办公楼附近的光储充电站经济效益对储能成本的变化敏感性要弱一些。

#### (5) 电价峰谷差变化对光储充一体化电站收益的影响

研究显示，当电价峰谷差加大 50% 时，医院附近的光储充一体化电站的投资回报率将由 13.92% 提高为 15.40%，提高 1.48%；而办公

---

楼附近的光储充一体化电站的投资回报率由 9.81%提高至 11.51%，增加 1.7%；当电价峰谷差减少 50%时，医院场景的光储充一体化电站的投资回报率下降至 12.58%，减少 1.34%，办公楼下降至 8.12%，减少 1.69%。

### 3.2 可再生能源与供热、交通行业的协同转型路径研究结果

(1) 可再生能源发电与热电联产技术的协同发展可以使电力和供热部门在能源供应中实现可再生能源对化石能源的完全替代。然而，在电力和供热部门中实施的可再生能源大规模利用策略虽然可以降低电力和供热部门的 CO<sub>2</sub>排放，但是会增加能源系统总成本。

图 4 和表 4 显示，在供热部门脱碳化转型路径中，可再生能源发电与热电联产技术的协同发展，可以使电力和供热部门有效地利用可再生能源并从根源上消除能源供给侧的化石能源燃烧。但是，这种协同发展的模式不具备能源节约效果而电热泵替代燃气供热技术的转型路径虽然无法实现可再生能源对化石能源的完全替代，但是却可以最大程度的降低电力和供热部门的一次能源消耗。而在未来电力和供热部门大规模发展可再生能源的背景下，影响未来能源系统经济性的主要因素已经由燃料消耗和电力交易所产生的成本转变成为大规模部署可再生能源技术的基础设施投资成本，导致了可再生能源发电与热电联产技术的协同发展模式和电热泵替代燃气技术的发展模式均会增加能源系统总成本。

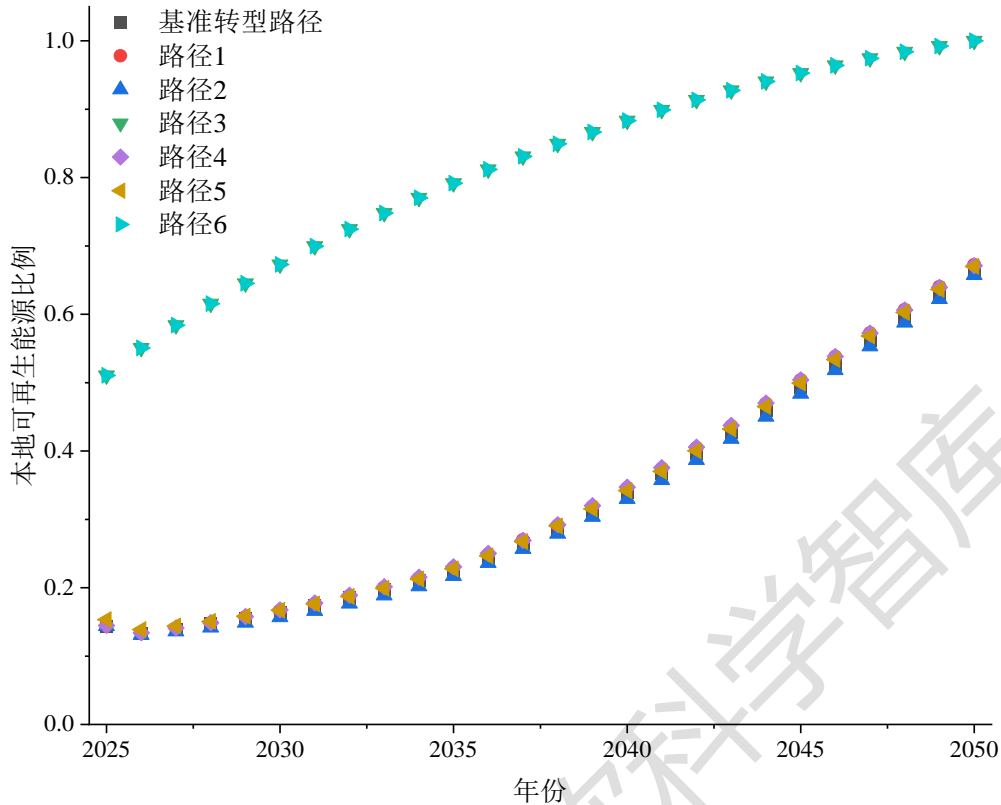


图 4 基准转型路径和供热部门脱碳化转型路径的本地可再生能源电力供应比重  
注：路径 1：能源节约；路径 2：电热泵替代；路径 3：协同发展；路径 4：技术效率提升；  
路径 5：电热泵替代组合；路径 6：协同发展组合。

表 4 基准转型路径和供热部门脱碳化转型路径下的一次能源消耗量 (TWh)

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050
基准转型路径	181.03	197.74	200.41	198.74	204.94	229.31
路径 1	177.82	192.52	193.08	189.57	194.19	217.28
路径 2	181.03	193.06	187.96	179.43	180.29	198.97
路径 3	194.37	219.50	227.69	226.72	230.85	250.44
路径 4	180.84	196.18	198.22	195.99	202	226.56
路径 5	177.62	186.29	180.97	173.05	174.31	194.64
路径 6	191.55	212.69	219.23	217.34	217.55	243.17

注：路径 1：能源节约；路径 2：电热泵替代；路径 3：协同发展；路径 4：技术效率提升；路径 5：电热泵替代组合；路径 6：协同发展组合。

(2) 新能源汽车对燃油汽车的替代可以实现交通部门可再生能源对化石能源的完全替代,但是会引起电力部门天然气等化石能源消耗量的增加。尽管如此,这种可再生能源发电与交通部门的协同发展

模式依旧可以降低电力和交通部门的一次能源消耗量和能源系统总成本。

通过对交通部门 4 种电气化转型路径的分析发现（图 5），新能源汽车对燃油汽车的替代路径可以实现交通部门化石能源的零消耗，然而，从能源供需实时匹配的角度考虑，交通部门石油消耗量的减少并未全部转换成电力部门可再生能源发电量的增加，导致了可再生能源利用效果相较于基础路径没有产生明显变化。然而，交通部门石油消耗量的减少大于电力部门天然气消耗量的增加使得 4 种交通部门电气化转型路径相较于基准路径产生了节能减排的效果，并且会降低由于燃料使用而产生的可变运维成本，改善了能源系统的经济效益。

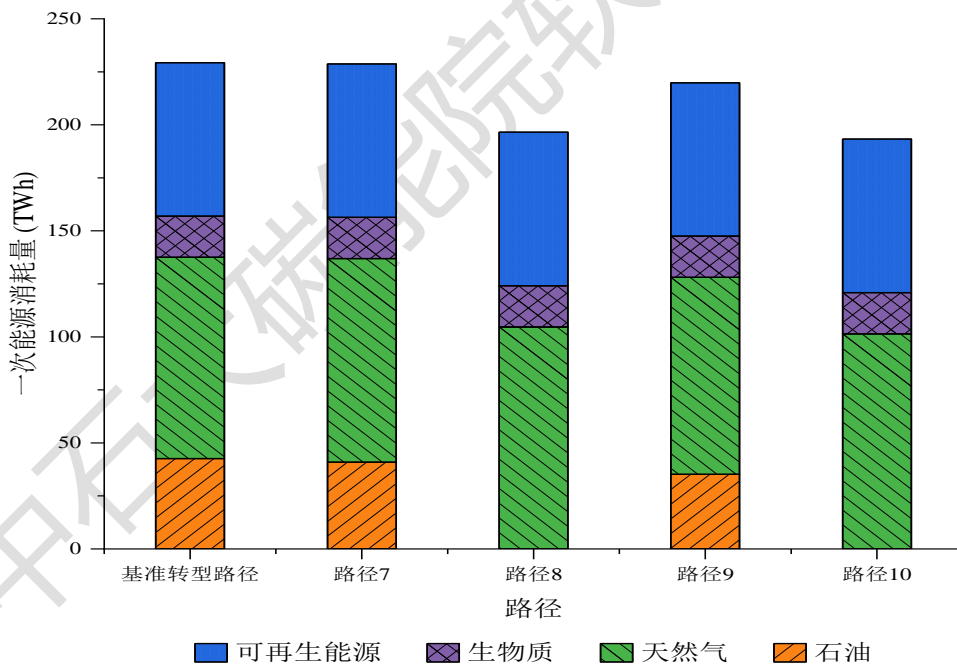


图 5 基准转型路径和交通部门电气化转型路径的能源消耗结构

注：路径 7：出行方式改变；路径 8：新能源汽车替代；路径 9：汽车能效提高；路径 10：交通部门组合。

(3) 可再生能源发电与供热部门的协同和可再生能源发电与交通部门的协同相比，可以产生更好的 CO<sub>2</sub>减排效果，而可再生能源发

---

电与交通部门的协同则可以产生更好的能源节约效果和更低的能源系统总成本。

将供热部门脱碳化的转型路径与交通部门电气化的转型路径进行对比可以看出，可再生能源发电与热电联产技术的协同发展可以从根源上消除电力和供热两个部门的 CO<sub>2</sub>排放量，而交通部门新能源汽车对燃油汽车的替代仅是将交通部门的石油消耗转移成为电力部门的天然气消耗使其 CO<sub>2</sub>减排效果十分有限。因此，供热部门脱碳化转型路径具备更好的环境减排效果。然而，可再生能源发电与热电联产的协同发展技术中由于熔盐加热的技术效率问题导致在热电联产电厂改造的过程中需要大量的可再生能源装机容量，导致可再生能源发电与热电联产协同发展的模式不具备一次能源节约效果并且还会增加能源系统的总成本。而在交通部门新能源汽车对燃油汽车替代的发展模式中，交通部门石油消耗的减少量大于电力部门天然气消耗的增加量，降低了电力和交通部门的一次能源消耗量以及由于化石燃料消耗产生的可变运维成本。因此，交通部门电气化转型路径比供热部门脱碳化转型路径更加具备能源节约和成本节约的特性。

(4) 多部门协同转型路径在电力、供热和交通部门的能源供应中可以完全实现可再生能源对化石能源的替代并且可以使电力、供热和交通部门产生能源节约效果，并且不会增加能源系统总成本。

图 6、图 7 显示，通过对比可再生能源发电与供热部门的协同转型路径、可再生能源发电与交通部门的协同转型路径以及同时考虑电力、供热和交通部门的多部门协同转型路径可以看出，可再生能源发

电与热电联产的协同结合交通部门新能源汽车对燃油汽车的替代策略可以实现电力、供热和交通部门可再生能源对化石能源的完全替代。

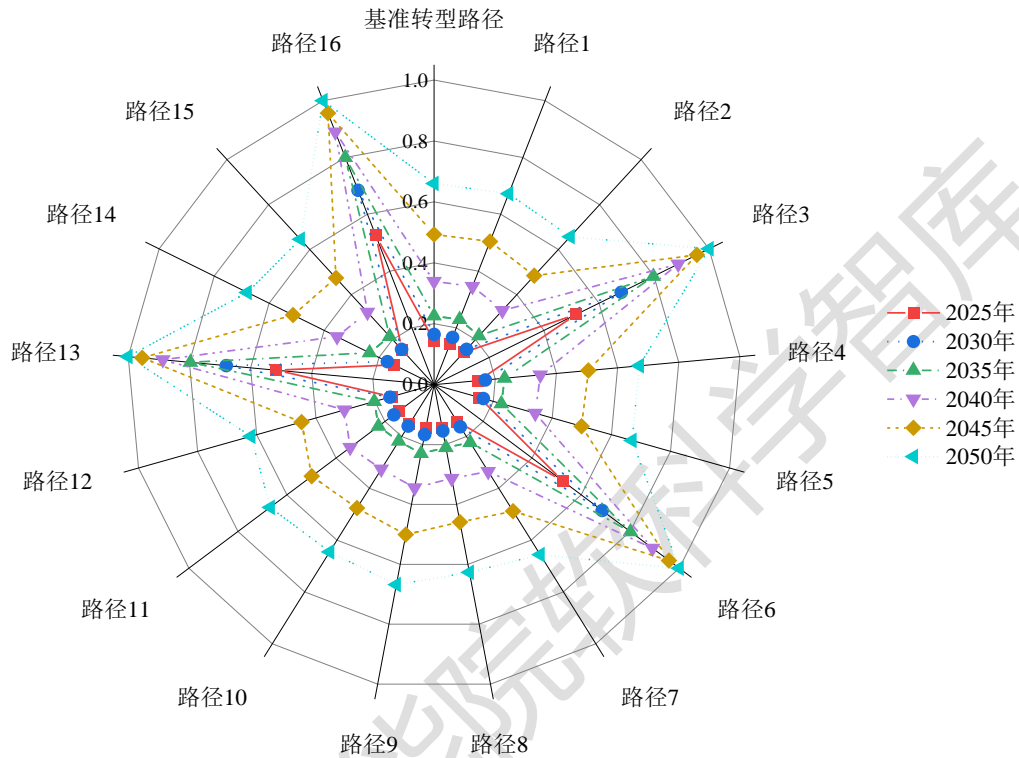


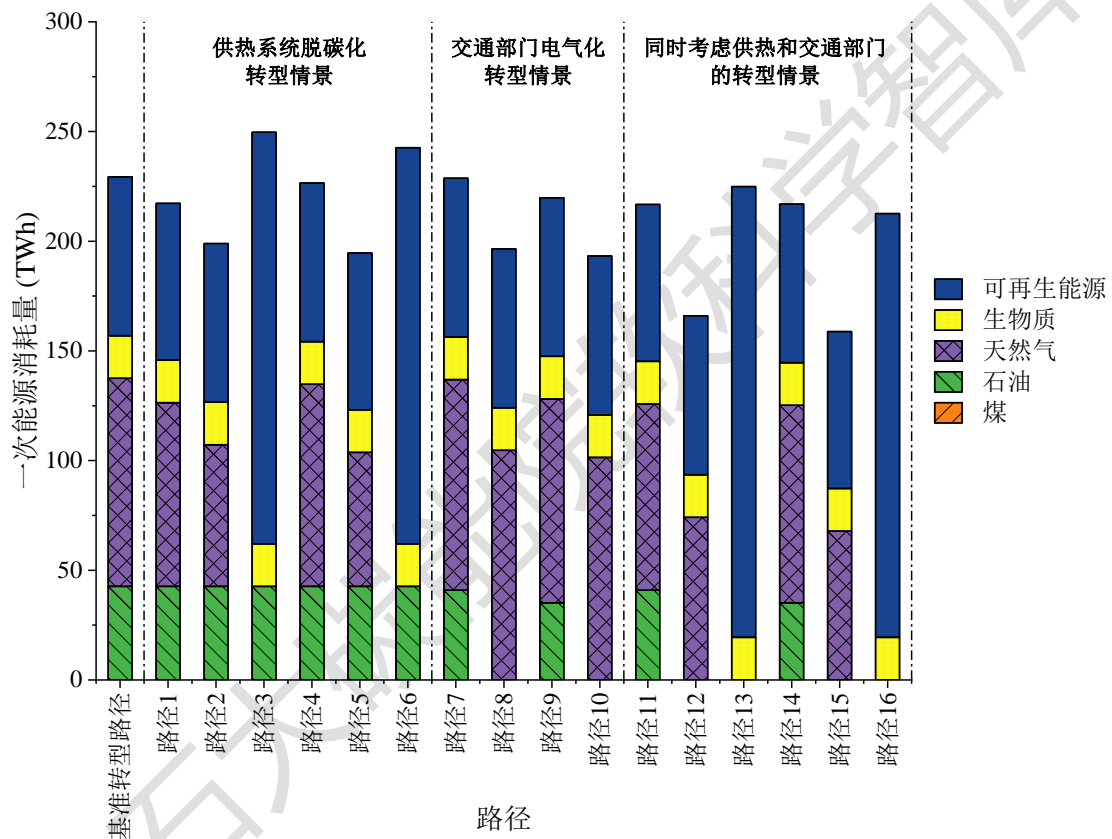
图 6 基准转型路径和 16 种转型路径的本地可再生能源电力供应比重

注：路径 1：能源节约；路径 2：电热泵替代；路径 3：协同发展；路径 4：技术效率提升；路径 5：电热泵替代组合；路径 6：协同发展组合；路径 7：出行方式改变；路径 8：新能源汽车替代；路径 9：汽车能效提高；路径 10：交通部门组合；路径 11：多部门能源节约组合；路径 12：电热泵与新能源汽车替代组合；路径 13：协同发展与新能源汽车替代组合；路径 14：多部门效率提升组合；路径 15：考虑电热泵替代的多部门协同组合；路径 16：考虑协同发展的多部门协同组合。

这种替代模式比部门间不协同的发展模式更具节能减排效果，从根源上消除电力、供热和交通部门 CO<sub>2</sub>排放的同时降低 7.27%的一次能源消耗量，并且对于多部门协同的转型路径来说，供热部门基础设施建设成本的增加以及交通部门可变运维成本的减少两方面因素导



致多部门转型路径不会显著增加能源系统总成本。而在其他转型路径中，从能源供需实时匹配的角度出发，由于供热和交通部门化石能源消耗量的减少并未全部转换成可再生能源电力的增加，而是部分转变成电力部门化石能源消耗的增加，导致其不能从根源上消除能源供给侧的化石能源消耗，无法产生理想的可再生能源利用效果。



**图7 基准转型路径和16种转型路径的一次能源消耗量及一次能源组成结构**  
 注：路径1：能源节约；路径2：电热泵替代；路径3：协同发展；路径4：技术效率提升；路径5：电热泵替代组合；路径6：协同发展组合；路径7：出行方式改变；路径8：新能源汽车替代；路径9：汽车能效提高；路径10：交通部门组合；路径11：多部门能源节约组合；路径12：电热泵与新能源汽车替代组合；路径13：协同发展与新能源汽车替代组合；路径14：多部门效率提升组合；路径15：考虑电热泵替代的多部门协同组合；路径16：考虑协同发展的多部门协同组合。

---

虽然本研究是以北京市为例进行促进可再生能源利用的多部门协同转型路径分析，但是，论文研究结论可以推广到其它地区的能源系统中。主要原因是：①多部门协同的转型路径具备一次能源节约效果，产生一次能源节约效果的主要原因是在化石能源被替代的过程中，供热和交通部门化石能源减少量少于电力部门化石能源增加量。②多部门的协同转型可以通过降低系统可变运维成本来改善能源系统经济性，主要原因是供热和交通化石能源消耗量减少引起的可变运维成本的减少量远大于由于电力部门天然气消耗量增加引起的可变运维成本的增加量。③可再生能源发电和热电联产技术的协同发展可以从根源上消除能源供给侧的化石能源消耗。这些研究发现不会因为研究范围的变化而发生改变。因此，本文的研究结论可以推广到其他地区不同空间尺度、包含更多能源部门的可再生能源转型路径制定中。

### 3.3 内蒙古、山西煤炭重点地区能源结构与产业结构协同绿色转型路径研究结果

(1) 煤炭产业逐渐退出对地区经济增长具有一定负面影响；但如果同时积极发展可再生能源等新兴产业，则以可再生能源逐步替代煤炭为主要特征的绿色转型将可以带动地区经济增长。

图 8 的回归结果显示，在控制了产业结构、人口规模、居民消费、技术进步和政府税收等因素的潜在影响后，可再生能源发电量增加对内蒙古、山西和煤炭重点地区整体经济增长均表现出明显的促进作用。对于可再生能源发展潜力相对更大的内蒙古而言，可再生能源发电量增加 1% 将带动地区 GDP 增长 0.45 个百分点，而原煤产量增加对 GDP

增长的促进作用不明显；对于煤炭行业开发时间更早、经济发展对煤炭产业依赖度相对更高的山西而言，原煤产量和可再生能源发电量均与地区 GDP 显著正相关，原煤产量和可再生能源发电量增长 1% 将分别促进地区 GDP 增长 0.22 和 0.3 个百分点。这一结果与已有相关研究得出中国煤炭消费量每增加 1%，GDP 会增加 0.145 个百分点的结论接近（Chen et al. 2022）。

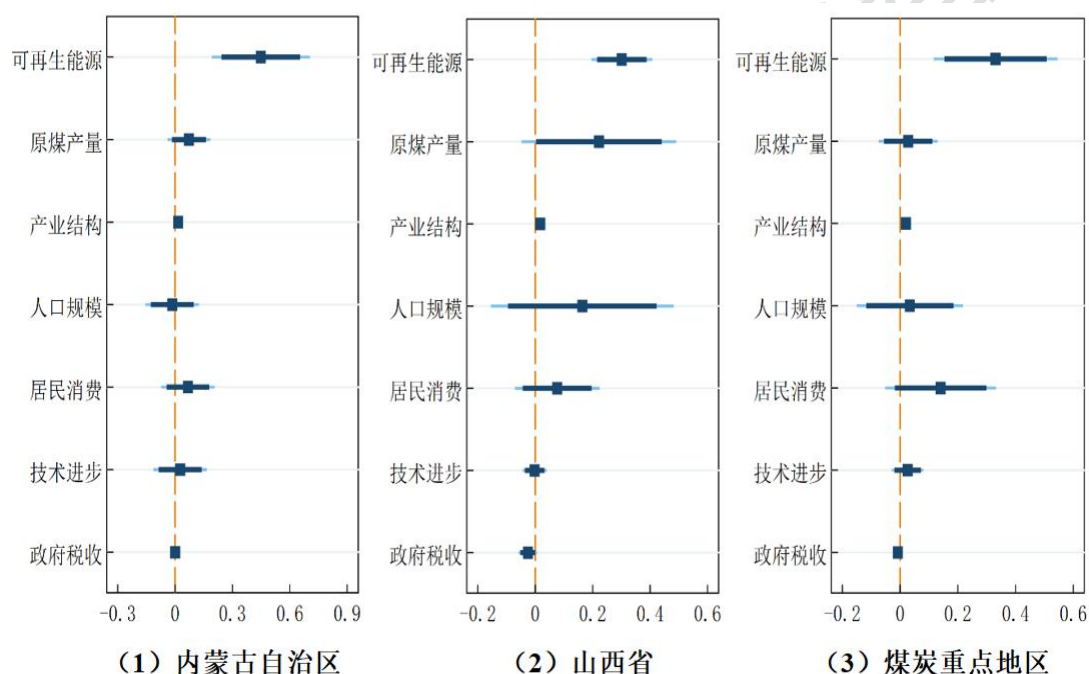


图 8 绿色转型对煤炭重点地区经济增长的影响

从内蒙古、山西煤炭重点地区整体来看，回归分析结果显示，可再生能源发电量与经济增长之间呈明显正相关关系，可再生能源发电量增长 1% 将导致 GDP 增长 0.33 个百分点，而煤炭产量对经济增长的影响虽为正但系数较小且不显著。这表明，可再生能源发展对经济增长具有明显促进作用，并可以有效缓解煤炭逐渐退出对经济增长的

---

潜在负面影响。

(2) 绿色转型背景下，煤炭企业继续经营煤炭开采业务将面临较大风险，煤炭企业向煤化工产业纵向延伸转型的风险也较高，而向可再生能源和氢能产业投资发展具有较强优势，可行性相对较高。

未来包括中国在内的世界各国煤炭需求预期将大幅度减少，研究发现，在煤炭重点地区保持较低的原煤年均产量增长速度、现存煤矿自然退出的保守估计情况下，内蒙古和山西 2025 年、2030 年、2035 年、2040 年的原煤产量预计仍将比原煤需求量上限高出 4.30 亿吨、3.65 亿吨、2.73 亿吨和 2.15 亿吨。因此，煤炭企业当前继续增加投资煤炭开采业务将在未来产生严重资源浪费风险和经济损失。

综合考虑煤炭企业投资发展煤化工产业进行纵向产业链延伸，以及发展可再生能源、氢能、储能等新能源行业进行横向产业链拓展这两条转型路径的优势和风险。研究发现，煤炭企业向煤化工产业纵向延伸的风险相对较高，投资发展可再生能源产业的转型路径相对最佳，氢能产业其次，而投资储能产业转型难度较大。因此，煤炭企业应大力发展可再生能源产业，并将氢能作为转型投资的过渡选择，利用当前煤制氢、焦炉煤气制氢的成本优势进入氢能行业，并在未来通过发展可再生能源电解水制绿氢的方式实现最终的绿色转型。

(3) 内蒙古、山西等重点煤炭地区应注重激励钢铁行业和电解铝等高耗能行业内部产业结构升级与能源结构转型的相协同。一方面，通过产业结构升级，可以使钢铁行业和电解铝等高耗能行业有更强的能力应对能源转型过程中可能产生的能源价格上涨风险；另一方面，

---

还可以通过产业结构升级使高耗能工业用能结构改变（比如，钢铁行业以用煤为主转为用电为主）适应能源供应结构（以可再生能源发电逐渐替代煤炭供应）的改变。此外，高耗能工业生产设备功率调节还可以提供潜力巨大的电力负荷灵活性。比如，研究发现，内蒙古钢铁行业和电解铝行业未来的电力需求灵活性响应能力可高达当前内蒙古高峰负荷的 9.22%。鉴于此，内蒙古、山西等重点煤炭地区应注重能源结构转型与产业结构转型的协同，并应建立鼓励工业用户参与电力需求响应的激励机制，以更好实现能源结构转型和产业结构转型的协同发展路径。

---

## 关于作者

系列报告总协调人：王建良

本报告主笔人：



赵晓丽（1970.10-），女，中国石油大学（北京）经济管理学院教授，博导，副院长，低碳经济与政策研究中心主任；国家社会科学基金重大项目首席专家，国家自然科学基金重点项目主持人，国家社会科学基金重点项目主持人。近三年连续获评斯坦福“全球前 2% 顶尖科学家”和爱思唯尔管理科学与工程领域“中国高被引学者”。研究领域：能源经济与管理，环境管制与可持续发展。以第一/通讯作者发表在 *iScience*、*Energy Economics*、系统工程理论与实践、中国管理科学等 SCI/SSCI 一区 and 中文 A 类期刊论文 40 余篇；以第一完成人获教育部、国家能源局科研奖项 3 项。



彭婧（1998.02-），女，中国石油大学（北京）经济管理学院管理科学与工程专业硕士研究生在读。兴趣领域为能源消费结构，甲烷的投入产出核算，天然气发展与天然气消费量。

本报告校对：朱潜挺

报告引用：赵晓丽，彭婧。“一带一路”倡议对沿线国家甲烷不平等情况影响分析 [R]. 中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院, 2023S01, 2023 年 10 月 21 日.



中石大碳能院

ICED-CUPB

中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院

Institute of Carbon Neutrality and Innovative Energy Development, China University of Petroleum,  
Beijing (ICED-CUPB)

联系电话：010-89733072

邮箱：[iced-cupb@cup.edu.cn](mailto:iced-cupb@cup.edu.cn)

微信公众号：ICED-CUPB

地址：北京市昌平区府学路 18 号

Add: No. 18, Fuxue Rd., Changping District, Beijing, 102249, China

