

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.01.006

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:左喜梅,吴凡荣.跨区域能源调度与生态韧性——基于西气东输工程的准自然实验[J].西安理工大学学报,2026,42(1):59-68.

Zuo Ximei, Wu Fanrong. Transboundary energy dispatch and ecological resilience: a quasi-natural experiment based on the West-East Gas Pipeline Project[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(1): 59-68.

跨区域能源调度与生态韧性

——基于西气东输工程的准自然实验

左喜梅, 吴凡荣

(新疆财经大学 金融学院, 新疆 乌鲁木齐 830012)

摘要: 作为我国横跨多生态区的能源通道,西气东输工程通过实现能源供给与生态承载力的空间匹配,为提高生态韧性创造了条件。基于2000—2021年中国301个地级市生态韧性面板数据,运用多期双重差分模型,系统评估了西气东输工程对沿线地区生态韧性的影响及其作用机制。实证结果表明,跨区域能源调度显著提升了沿线地区的生态韧性水平,且这一政策效应在经过一系列稳健性检验后依然成立;机制分析显示,跨区域能源调度通过降低企业排污强度有效提升了沿线地区的生态韧性,同时绿色技术创新的发展与政府生态环境治理意志的增强在这一过程中发挥了显著的正向调节作用;异质性分析发现,跨区域能源调度对生态韧性的影响程度随着西气东输工程一期至三期建设的推进逐期增加,其对不同地区生态韧性的影响存在差异,且对东、中部地区生态韧性具有更为显著的正向影响;进一步研究发现,跨区域能源调度具有显著的空间溢出效应,不仅对工程沿线地区产生直接影响,还通过区域协同机制对周边地区形成辐射效应,最终形成了跨区域生态协同改善的新格局。研究揭示了跨区域能源调度在提升生态韧性中的重要作用,为优化国家能源战略布局、推动区域生态协同治理提供了重要的理论依据与实践指导,为实现“双碳”目标与生态文明建设提供了新思路。

关键词: 跨区域能源调度; 西气东输工程; 生态韧性

中图分类号: F832.0

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)01-0059-10

Transboundary energy dispatch and ecological resilience: a quasi-natural experiment based on the West-East Gas Pipeline Project

Zuo Ximei, Wu Fanrong

(School of Finance, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China)

Abstract: As China's energy corridor spanning multiple ecological zones, the West-East Gas Pipeline Project has created conditions for enhancing ecological resilience by achieving spatial matching between energy supply and ecological carrying capacity. Based on the panel data of ecological resilience from 301 prefecture-level cities in China from 2000 to 2021, this study uses a multi-period difference-in-differences model to systematically evaluate the impact of the project on the ecological resilience in regions along the pipeline and its mechanism. Empirical results show that the cross-regional energy dispatch significantly improves the ecological resilience of the affected areas, and that this effect remains robust after a series of sensitivity tests. Mechanism

收稿日期: 2025-06-05; 网络首发日期: 2025-10-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20251016.0927.002>

基金项目: 新疆维吾尔自治区社科基金资助项目(2025BYJ055)

第一作者: 左喜梅,女,博士,副教授,研究方向为普惠金融、绿色金融。E-mail: 929704969@qq.com

通信作者: 吴凡荣,男,硕士生,研究方向为绿色金融。E-mail: 2694670084@qq.com

analysis reveals that the project enhances ecological resilience by reducing industrial pollution intensity, while the green technology innovation and strengthened government environmental governance play significant positive moderating roles. Heterogeneity analysis indicates that the impact increases progressively from Phase I to Phase III of the project, with more pronounced effects in central and eastern regions. Further research finds significant spatial spillover effects, as the project not only affects pipeline regions directly but also radiates positive impacts to neighboring areas through regional coordination, ultimately fostering a new pattern of cross-regional ecological collaboration. This research highlights the critical role of cross-regional energy dispatch in enhancing ecological resilience, providing a theoretical and practical guidance for optimizing China's energy strategy, promoting regional ecological governance and advancing the goals for carbon neutrality and ecological civilization.

Key words: transboundary energy dispatch; West-East Gas Pipeline Project; ecological resilience

增强生态韧性在统筹发展与安全中占有重要地位。Holling^[1]认为,作为衡量生态系统应对外部冲击并维持关键功能的核心指标,生态韧性已被纳入全球可持续发展议程。李海东等^[2]研究发现,生态韧性的提升不仅能有效缓解气候变化、环境污染等外部冲击对区域经济社会的负面影响,还能通过优化资源配置促进区域协同发展。李慧等^[3]发现跨区域能源调度作为优化能源资源配置的关键举措,能通过直接减排效应、空间溢出效应和技术创新中介作用,系统性提升生态韧性,对增强区域生态系统的适应性与恢复力具有重要战略意义。虽然跨区域能源调度的经济价值与减排效益已得到充分论证,但其生态韧性的影响机制尚未形成系统认知,特别是在空间溢出效应背景下,能源要素的跨区域流动如何重构生态韧性网络,进而增强生态系统对复合环境压力的适应与恢复能力,仍是一个亟待探讨的重要议题。

跨区域能源调度通过能源结构优化和环境压力转移对生态韧性产生不同(正向或负向)的影响效应。首先,从正向影响效应看,能源结构优化被视为关键机制。西气东输工程通过清洁能源替代显著改善了东部地区的能源结构^[4],其减排效益与西部生态修复投入共同构建了区域间生态补偿闭环。此外,多能互补系统有效降低了调峰需求,间接减少了对化石能源的依赖。其次,从负向影响效应看,环境压力转移现象显著。能源输出地因发电量增加导致污染物排放量上升^[5],输电走廊建设则加剧了栖息地碎片化。进一步,技术锁定风险同样突出,基础设施可能锁定高碳路径,而生态影响的滞后效应在现有评估中常被低估。另外,异质性特征使影响效应有所差异。能源输出地面临经济收益与生态退化的权衡困境,短期经济收益与长期生态退化并存^[6];生态脆弱区阈值效应显著,系统恢复力受水资源约束和土地利用强度的非线性影响^[7];而城市群则因

产业聚集不同导致生态韧性存在空间差异。

现有研究从理论建构、效应评估及政策干预与技术应用三个维度,全面揭示了跨区域能源调度对生态韧性的阶段性影响路径。首先,理论建构层面,冯漪等^[8]基于“压力-响应-适应”框架,揭示了能源工程中施工扰动作为初始压力源,经由生态修复技术触发系统响应,最终通过长期适应性管理形成新生态韧性的传导路径。张华等^[9]的“空间让渡”理念强调通过低地表扰动设计与生态廊道保留,实现能源输送与生态保护的平衡,为线性工程生态修复提供了新范式。其次,效应评估层面,王田野等^[10]发现,能源结构优化路径以碳排放强度为中介,依托跨区域新能源消纳降低化石能源依赖,缓解气候胁迫效应,从而增强生态系统碳汇功能与抗干扰能力。再次,政策干预层面,动态监测技术与“生态银行”模式为修复效果评估与资金可持续运作提供了创新工具。气候变化预测模型与生物多样性核算凸显了能源工程生态风险评估的复杂性,强调需将气候韧性纳入工程规划的全生命周期管理。

本文可能的边际贡献:①构建了跨区域能源调度与生态韧性的整合分析框架,系统揭示了能源调度对生态韧性的影响机制,深化了能源调度作为能源压力传导与转型前端的关键作用机理;②基于西气东输工程三期建设进程和区域区位特征的双重视角,实证检验了工程对生态韧性的差异化影响,为工程的进一步优化拓展提供了理论依据和决策参考;③从绿色技术创新、工业企业排放控制和政府生态环境治理这三条传导路径,全面解析了跨区域能源调度影响生态韧性的作用机制,为环境风险治理提供了多元化的政策路径。

1 政策背景与理论分析

1.1 政策背景

西气东输工程以“优化能源结构、保障能源安

全、促进区域协调发展”为核心目标,历经三期建设,逐步建成了覆盖全国的天然气骨干管网体系。

一期工程(2002—2004年):首次实现新疆塔里木气田与东部市场的跨区域联通,年输气能力达170亿 m^3 ,2004—2013年累计输气量超过1800亿 m^3 。一期工程建设的意义在于破解“西气东输、北煤南运”的资源错配困局,为后续工程奠定技术基础和生态保护经验。二期工程(2008—2012年):引入中亚进口天然气,构建多元化能源供应网络,年输气能力增至300亿 m^3 ,2013年进口天然气占全国天然气消费量的16.5%,年输气量可替代1.5亿t标煤,显著缓解了东部能源短缺问题。二期工程建设的意义在于不仅构建了多元化的能源通道,也为能源调度、生态修复及调度能力的提升提供了重要实践支撑,进一步巩固了中国天然气跨区域调度体系的战略地位,推动了“一带一路”能源合作与国际技术国产化。三期工程(2012—2016年):以中亚气源为主、新疆煤制气为辅,管线延伸至东南沿海,年输气能力维持300亿 m^3 ,输气效率提升20%。在生态修复方面,工程在新疆果子沟采用“施工+恢复+管护”模式,使植被成活率超85%,并通过分层回填绿洲区表土,恢复耕地超10万亩。三期工程建设的意义在于推动了能源结构优化,为“美丽中国”建设提供了重要支撑,同时实现了能源调度、生态修复及调度能力的全面飞跃。

基于上述背景,本文将西气东输工程(一期、二期及三期)作为准自然实验,考察了跨区域能源调度对生态韧性的影响,并探究其潜在影响机制,以期为后续能源政策的制定和实施提供参考。本研究未纳入四期工程数据,主要由于四期工程尚处于建设末期,配套生态监测体系运行不足3年,无法满足生态韧性指标观测的时序完整性要求。

1.2 理论分析

1.2.1 跨区域能源调度与生态韧性

跨区域能源调度通过清洁能源替代、管网互联与生态补偿机制的多维协同,构建了生态韧性跃升的复合路径。首先,清洁能源替代通过能源结构转型与风险规避的双重路径实现生态效益跃升。其核心不仅在于减少化石能源依赖,更在于通过智能电网与储能技术协同降低生态风险^[11];同时,清洁能源设施选址需优先利用已开发土地以规避生物多样性威胁,而技术经济协同则通过智能电网降低可再生能源波动对电网的影响^[12]。其次,管网互联通过技术革新与空间布局优化驱动能源系统韧性提升。管网互联通过能源传输网络优化增强系统韧性,借

助特高压输电与数字孪生技术实现跨区域灵活调度,既降低了碳排放又增强了极端气候应对能力,使得地区供电可靠性有所提升^[13];此外,多区域互补性调度可释放地理平滑效应,减少储能需求并降低矿产开采压力,而动态增容与微电网协同则进一步减少了极端气候导致的停电损失^[14]。再次,生态补偿机制通过利益再分配与多主体协同实现生态韧性提升。在这个过程中,需建立第三方协调框架令能源开发收益反哺生态保护^[15],如可利用碳汇交易实现西部生态服务货币化;同时,多能源协同运输与植被恢复结合可提升生态系统服务价值,最终通过自然资本核算与市场化交易构建能源与生态闭环协同^[16]。基于此,本文提出假设:

H₁:跨区域能源调度对生态韧性具有显著正向影响。

1.2.2 企业污染排放的中介作用

跨区域能源调度通过清洁能源替代与技术升级的协同作用,深度重构工业企业污染排放格局。在能源结构层面,清洁能源跨区域配置可直接减少输入地化石能源依赖,天然气输送与可再生能源并网通过替代煤炭消费降低污染物生成系数^[3];技术升级则通过智能电网与虚拟电厂优化需求响应,间接降低火电调峰带来的边际污染。在区域协同层面,Ye等^[16]提出清洁能源外送可能引发输出地煤电装机扩张,形成污染排放的空间转移效应,这要求政策设计突破单一减排指标框架,而通过生态补偿机制平衡区域环境权益政策与技术协同成为破局关键,碳约束与碳交易体系融合倒逼企业改造用能结构,分布式能源与电氢耦合技术则为高耗能行业提供低碳转型路径^[17],最终推动形成清洁能源消费到低碳技术升级再到环境成本内化的可持续模式。

工业企业污染排放通过多维度机制对生态韧性产生复杂影响,其作用路径呈现显著的结构特征。孙鹏等^[18]提出环境规制作为核心驱动因素,在初期可能因合规成本上升对企业形成短期抑制,但长期来看,它能通过技术创新激励推动清洁产业集聚,进而增强生态系统的自组织能力。产业集聚的外部性效应具有双重性:专业化集聚通过知识溢出降低单位产出污染强度,而过度集聚引发的“拥挤效应”则可能抵消环境效益,形成倒U型调节关系。此外,企业异质性特征会显著影响排放强度,大型企业与外资企业凭借技术优势能实现更低的污染密度,而企业生命周期与利润率差异导致污染管控能力分化,老旧企业与低利润企业面临更大的生态韧性压力。Fan等^[19]发现,绿色金融工具通过资本配置引

导减排行为,绿色信贷政策虽能降低高风险企业的排放总量,但需警惕规模扩张导致的排放强度反弹。供应链管理成为污染转移的新渠道,跨国企业通过供应商选择将环境成本外部化,削弱了区域生态韧性,因此应建立全生命周期碳排放追踪机制。基于以上分析,提出以下假设:

H₂:工业企业排放在跨区域能源调度与生态韧性之间发挥正向中介作用。

1.2.3 绿色技术创新的调节作用

绿色技术创新通过提升能源利用效率、优化工艺创新和增强韧性机制,在跨区域能源调度对生态韧性的作用中发挥着关键调节作用。首先,智能电网技术通过供需动态匹配机制实现了清洁能源系统效率跃升。智能电网技术通过动态平衡清洁能源供需,显著增强了跨区域能源配置的精准性^[20]。在电力-氢耦合系统中将过剩新能源转化为甲醇等储能载体,既降低了传输损耗,又通过多能互补提升了整体利用效率。其次,工艺创新通过技术突破重构了能源调度与生态保护的耦合关系。多能源协同运输技术突破了传统能源输送的时空限制,电力-甲醇协同运输模型在降低经济成本的同时,实现了碳排放的跨区域补偿。清洁能源互补调度技术则通过水电、风电与光伏的梯级利用,显著提升了电网对波动性电源的消纳能力。再次,韧性增强机制通过技术集成强化了系统应对极端挑战的能力。产业链与能源系统的协同创新通过提升技术兼容性,提高了跨区域基础设施的抗风险阈值^[21]。将智能预警系统与通用人工智能技术结合,可提前识别设备故障与供需失衡风险,并通过动态调整策略维持系统稳定性。基于以上分析,提出以下假设:

H₃:绿色技术创新在跨区域能源调度与生态韧性之间起正向调节作用。

1.2.4 政府生态环境治理意志的调节作用

政府生态环境治理意志通过政策工具创新、跨层级协同与动态适应性管理三条路径,系统强化了区域能源调度对生态韧性的调节效能。首先,政策工具创新通过制度激励与技术激励的协同设计,构建了能源系统转型的驱动机制。通过制度激励与技术激励的协同设计,政策工具创新不仅能引导能源企业优化生产结构,还加速了清洁技术的迭代进程^[22]。在环境税与碳交易政策中构建了动态成本约束机制,促使企业主动将生态创新融入能源调度决策,从而降低化石能源依赖并增强系统抗风险能力。其次,跨层级协同路径通过优化资源配置增强了能源系统的整体韧性。纵向权责整合与横向资源

互补的协同模式,既提升了系统冗余度,又改善了应急响应效率。省级电网与微电网的协同优化实践表明,跨区域电力互济机制可有效缓解局部能源短缺压力,而设备冗余配置与多能融合策略则显著增强了极端事件下的能源恢复能力。再次,动态适应性管理路径通过构建实时反馈机制强化了系统的风险应对能力。基于 AI 的动态测度模型与生态系统适应性管理框架的融合应用,实现了能源消费与生态承载力的精准匹配。气象预测与氢能调度的集成系统使微电网在极端天气事件中的韧性损失降低,而动态电价机制与生态补偿政策的联动则有效减少了能源系统的生态足迹^[1]。基于以上分析,提出以下假设:

H₄:政府生态环境治理意志在跨区域能源调度与生态韧性之间起正向调节作用。

图 1 为跨区域能源调度影响生态韧性的机制图。

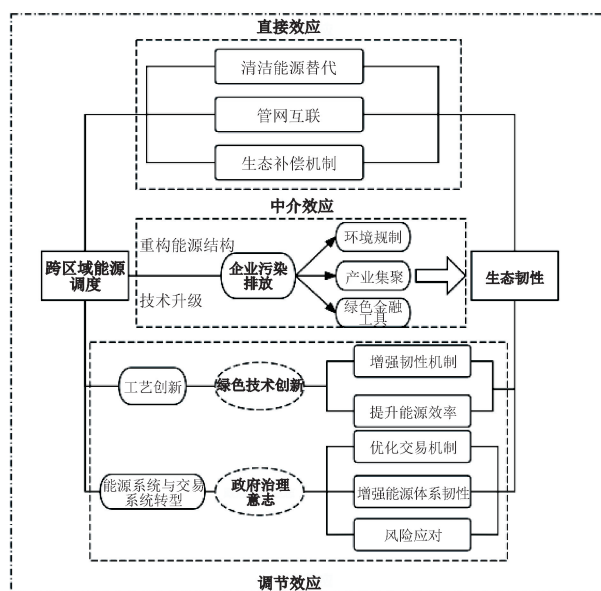


图 1 跨区域能源调度影响生态韧性的机制
Fig. 1 Mechanism for cross-regional energy dispatching affecting ecological resilience

2 研究设计

2.1 数据来源

本文选取 2000—2021 年我国 301 个地级市的面板数据来评估西气东输工程对城市生态韧性的影响,相关数据来源于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》以及各地方政府统计公报等。

在剔除数据缺失较多、异常的样本后,最终保留了 6 622 个样本数据。

2.2 变量说明

2.2.1 被解释变量

本文的被解释变量是生态韧性 (E_i)。基于楚尔鸣等^[23]构建的生态环境韧性评估框架,本文构建了生态环境韧性的测度指标体系,分为状态韧性指数、压力韧性指数以及响应韧性指数(见表1)。通过熵值法构建数据驱动的客观赋权模型,经标准化处理消除量纲影响,通过多维度稳健性检验确保结果可靠,并创新结合多期双重差分(DID)模型,精准验证了智慧城市政策对韧性指数的因果效应及区域差异规律,全面展现了方法体系的科学性与解释力。

表1 生态韧性指标体系

Tab.1 Ecological resilience indicator system

一级指标	二级指标	三级指标	方向
生态环境韧性指数	状态韧性指数	人均水资源拥有量	正向
		建成区绿化覆盖率	正向
		人均公园绿地面积_市辖区	正向
		人均建成区面积_市辖区	正向
	压力韧性指数	人均工业废水排放量	负向
		人均工业二氧化硫排放量	负向
		人均工业烟尘排放量	负向
		人均工业氮氧化物	负向
	响应韧性指数	PM _{2.5} 年均浓度	负向
		工业二氧化硫去除量	正向
		工业烟尘去除量	正向
		生活垃圾无害化处理率	正向
		污水处理厂集中处理率	正向
		工业固体废物综合利用率	正向

2.2.2 核心解释变量

本文的核心解释变量为西气东输一、二、三线工程,若地级市为工程沿线城市,政策虚拟变量赋值为1,否则为0。政策实施时间为2004年、2011年和2012

年,故时间虚拟变量以2004年、2011年和2012年为分界点,政策实施之前取0,之后取1,若一个地区存在工程覆盖则取第一个政策实施年份。通过政策虚拟变量与时间虚拟变量的交互项来衡量政策实施效果。

2.2.3 控制变量

本文的控制变量包括:建成区绿化覆盖率(G)、城镇居民生活用电(U)、工业二氧化硫去除量(I)、一般工业固体废物综合利用率(C)。其中,建成区绿化覆盖率,用建成区植被垂直投影面积除以建成区总面积表示;城镇居民生活用电,用城市居民用电总和表示;工业二氧化硫去除量,用二氧化硫产生量乘以脱硫效率表示;固体废物综合利用率,用综合利用率除以当年产生量表示。

2.2.4 机制变量

企业污染排放量(V)。借鉴李鹏升等^[24]的研究,企业污染物排放量测算数据来源于全国税收调查数据,该数据集由税务主管部门基于分层随机抽样方法获取,覆盖国内31个省份、293个地级市的制造业企业,包含详尽的生产经营、税费缴纳及污染排放信息,聚焦工业污染排放的核心表征指标。

绿色技术创新(T)。绿色技术创新以企业绿色创新专利数来衡量。根据楚尔鸣等^[23]的研究,智慧城市建设通过技术创新的机制效应显著提升了城市生态环境韧性。技术创新在路径分解中表现为降低环境治理成本和增强环境监测能力,从而优化了城市环境系统的抗风险能力,这也验证了“技术赋能”在现代城市生态治理中的地位。

政府生态环境治理意志(R)。参考滕祥河等^[25]的定义与设计,政府生态环境治理意志意向度通过文本词频统计技术量化,并构建了绝对指数和相对指数两类指标。绝对指数基于政府工作报告中生态环境相关关键词的净频次计算,反映了政府意志的绝对强度。

相关变量的描述性统计见表2。

表2 描述性统计

Tab.2 Descriptive statistic

变量名称	变量符号	样本量	平均数	标准差	最小值	中间值	最大值
生态韧性	E	6 622	0.258 9	0.012 1	0.002 7	0.025 5	0.323 1
建成区绿化覆盖率	G	5 901	36.375	13.192	0.18	38.49	386.64
城镇居民生活用电	U	1 416	9.260 2	2.142 6	2.890 4	5.320 1	14.086 5
工业二氧化硫去除量	I	2 208	9.548 8	2.039 6	1.791 8	6.397 1	16.727 8
一般工业固体废物综合利用率	C	4 633	77.870	23.520	0.21	100	87.352
绿色技术创新	T	29 074	8.627 6	50.868	0	0	1 577
政府生态环境治理意志	R	1 457	65.821	37.677	0	71	190
企业污染排放量	V	31 513	0.142 1	0.006 1	0.123 4	0.143 6	0.152 3

2.3 模型设定

本文以 2004 年、2011 年和 2012 年的西气东输一、二、三期工程为外生政策冲击,构建多期双重差分模型来评估跨区域能源调度对生态韧性的影响。模型设定如下:

$$E_{it} = \alpha + \beta D_{it} + \delta X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

式中: i 和 t 分别表示城市和年份;被解释变量 E_{it} 表示第 t 年 i 城市的生态韧性; D_{it} 表示第 i 个地区在第 t 年是否为西气东输工程沿线城市,是则赋值 1,不是则赋值 0; X_{it} 表示一系列控制变量; α 为常数项; β 为待估计的系数; δ 为控制变量的系数; μ_i 和 λ_t 分别为城市和年份固定效应; ϵ_{it} 为随机误差项。为消除回归中可能存在的异方差和自相关问题,将标准误差聚类到城市层面。

关于跨区域能源调度所产生的溢出效应详见本文电子版附录 A1。

3 实证结果与分析

3.1 基准回归

基准回归结果如表 3 所示,西气东输政策对区域生态韧性具有显著促进效应,且估计结果在不同固定效应与控制变量组合下均保持稳健。

表 3 基准回归结果
Tab. 3 Benchmark regression results

变量	(1) E_{it}	(2) E_{it}	(3) E_{it}	(4) E_{it}
D_{it}	2.78*** (7.42)	7.05*** (6.24)	3.96*** (2.86)	2.71* (1.73)
常数项	25.34*** (125.3)	24.51*** (110.5)	8.39*** (2.81)	12.68*** (5.05)
控制变量	否	否	是	是
固定效应	否	是	是	是

注:括号内数字表示标准误;*、**、*** 分别表示 10%、5%和 1%的显著性水平。下同。

表 3 中,列(1)未加入控制变量与固定效应,体现了西气东输工程对生态韧性的直接效应,结果显示为正向显著,这也佐证了 H_1 ;列(2)较列(1)加入了城市固定效应,这一“系数放大”现象表明,未控制城市个体效应时,模型存在向下偏误,这可能源于某些城市固有特征同时影响其是否被纳入管线规划与生态韧性水平。引入城市固定效应后,估计结果更加准确地识别了政策的净效应;列(3)在列(2)基础上进一步控制了一系列随时间变化的协变量,以吸收共同时间趋势。此时,核心系数下降至 3.96,这

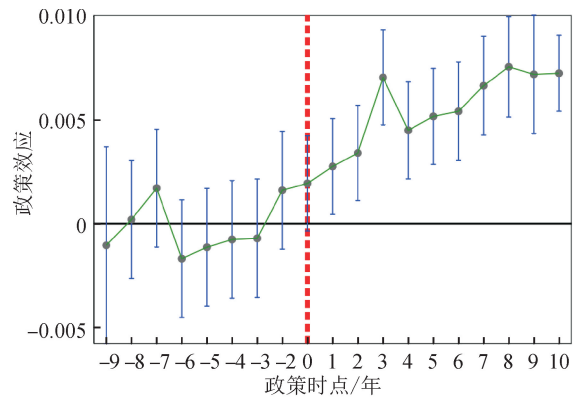
表明,在控制了可观测的时变混杂因素后,西气东输工程的正向效应依然稳健,但部分原始效应被协变量所吸收,说明经济发展、环境治理等机制在政策传导中扮演重要角色。列(4)同时加入了控制变量与城市时间固定效应,结果依然显著,较列(3)只加入城市固定效应,系数相对下降,这表明西气东输工程的动态效应相对减弱。

3.2 平行趋势检验

为科学评估西气东输政策对生态韧性的动态影响,本文采用事件研究法对 2000—2021 年政策覆盖区域进行平行趋势检验(见图 2)。具体模型为:

$$E_{it} = \alpha + \sum_{k=-9}^{10} L_k D_{ik} + \delta X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (2)$$

式中: D_{ik} 为一系列虚拟变量,表示低碳试点城市 i 政策开始实施的第 k 年; L_k 表示西气东输工程实施的第 k 年,处理组和控制组的生态韧性差异;其余变量含义同前。



注:蓝色竖线为对应的95%置信区间;红色虚线标记政策实施时点;绿线表示政策实施前后各年份的平均处理效应估计值。

图 2 平行趋势检验

Fig. 2 Parallel trend test

图 2 的平行趋势检验结果表明,政策实施前政策效应不显著,政策实施后政策效应显著。这意味着跨区域能源调度显著提升了生态韧性,同时也证明了西气东输工程的有效性。

3.3 稳健性检验

为进一步验证基准回归结果的可靠性,进行如下稳健性检验:①更换被解释变量的测算方式,更换了其中三级指标的部分数据,再通过熵值合成新的生态韧性衡量指标对样本数据进行回归分析;②剔除其他政策干扰,针对原分析中存在的政策混叠问题,在回归中剔除了存在政策重叠的部分地级市;③为克服传统 DID 方法因样本选择偏差导致的估计偏误,采用倾向得分匹配-双重差分法(PSM-DID)开展政策效应评估。稳健性检验结果如表 4 所示,与前文保持一致,由此认为基准回归的结论是稳健的。

表4 稳健性检验
Tab.4 Robustness test

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	更换被解释变量 E_{it}	剔除川电东送 E_{it}	剔除陕京二线 E_{it}	PSM-DID E_{it}
D_{it}	0.42* (1.77)	4.15*** (2.92)	4.12*** (2.89)	3.43** (2.04)
常数项	1 997.583*** (702.51)	8.41*** (2.84)	8.33*** (2.78)	-6.44*** (-0.38)
控制变量	是	是	是	是
固定效应	否	是	是	是

3.4 安慰剂检验

为强化政策效应估计的因果推断可靠性,本文构建了反事实框架下的时空混合安慰剂检验(见图3)。通过双重维度随机化生成政策冲击的虚拟场景:在时间维度将真实政策时点随机前移或后推5年,形成10个非真实政策窗口;在空间维度随机抽取3个非试点城市作为伪处理组,重复抽样1000次构建Bootstrap模拟。该检验揭示,当政策时点或空间布局偏离真实场景时,生态韧性提升效应随即消失,进一步证伪了历史趋势延续、区域政策协同等竞争性假设,为跨区域能源调度与生态韧性间的因果关系提供了更为稳健的实证依据。

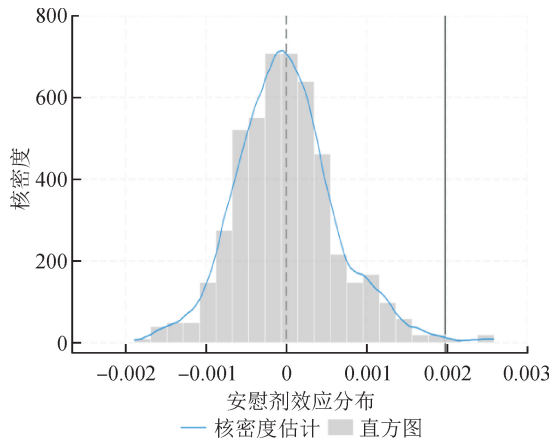


图3 时空混合安慰剂检验

Fig.3 Joint spatial-temporal placebo test

关于内生性问题的讨论与识别策略详见本文电子版附录A2。

4 机制检验与异质性分析

4.1 机制检验

4.1.1 企业污染排放

企业污染排放量作为中介变量,在西气东输工

程与生态韧性之间起到了关键作用。表5显示,企业污染排放量的间接效应为1.09,表明通过化石能源替代,西气东输工程能够有效减少企业的污染排放,从而改善生态环境。这一路径的核心在于长期超标排放会破坏生态系统功能并增加开采成本,而生态修复反哺机制则有助于恢复这些功能。供应链绿色化通过龙头企业带动供应商减排,形成产业链级联效应;环境信息披露提升企业透明度,降低融资成本,绿色债券利率低于普通债券。这些机制共同作用,形成企业污染排放与生态韧性之间的动态平衡。

表5 机制检验

Tab.5 Mechanism checking

变量	(1)	(2)	(3)
	企业污染排放量 E_{it}	绿色技术创新 E_{it}	政府生态环境治理意志 E_{it}
D_{it}	1.09*** (3.08)		
$D_{it} \times T$		0.01*** (6.17)	
$D_{it} \times R$			0.07*** (9.29)
常数项	3.83 (0.53)	25.08*** (68.60)	10.29*** (6.13)
控制变量	是	是	是
固定效应	是	是	是

4.1.2 绿色技术创新

绿色技术创新作为调节变量,其与西气东输政策的交互项系数为0.01,表明绿色技术创新每提升1个单位,生态韧性提高0.01个单位。绿色技术创新通过清洁生产工艺和循环经济转型直接降低了污染排放强度,提升了资源循环利用率,减少了能源成本和环境行政罚款,形成了环保投入和收益增长的正向循环。政府补贴和税收优惠推动技术突破,而企业环境声誉提升则会吸引ESG投资者和绿色消费者,由此形成了技术、政策与市场协同治理的生态韧性提升路径。

4.1.3 政府生态环境治理意志

政府生态环境治理意志的调节效应系数为0.07,反映了环保考核压力对政策效果的动态强化作用。这一系数表明,政府治理意志通过政策工具组合与动态适应性治理构建了生态韧性的制度保

障。规制性工具如强制合规措施,能够在短期内快速降低企业污染排放;经济性工具如碳排放权交易,则将环境成本内部化,引导企业主动参与生态修复,从而提升碳排放权交易试点地区的企业减排效率。动态调整与适应性治理路径则通过大数据和遥感技术构建生态风险监测平台来实现污染源精准识别和应急响应。

4.2 异质性分析

4.2.1 西气东输工程各期影响的异质性

跨区域能源调度对生态韧性的影响随着西气东输工程建设的深入不断扩大。为检验西气东输一二期工程的动态效应,本文对生态韧性与一二期工程进行普通双重差分检验,结果见表 6 第(1)~(3)列。可以看出随着时间的推移,西气东输工程的影响逐渐扩大,由一期政策系数的 1.11 上升至三期政策系数的 3.20,且在 1% 的水平上显著。这说明,跨区域能源调度对生态韧性的影响随着西气东输工程建设的推进而不断增加。可能的原因是:西气东输工程的多期实施为后续工程积累了丰富的经

验,对于更深层次的生态保护与修复能够趋利避害;而且工程基础设施水平的提升和科技的进步为实施西气东输工程提供了物质基础保障,从而增强了生态韧性。

4.2.2 区域异质性

空间位置的不同导致跨区域能源调度对生态韧性的影响不同。根据空间位置差异,本文分别对东部、中部和西部地区样本数据进行了回归。表 6 第(4)~(6)列分别展示了跨区域能源调度对不同地区生态韧性影响的估计结果。在东部地区,生态韧性的系数估计值为 4.25;在中部地区,生态韧性的系数估计值为 6.46;在西部地区,生态韧性的系数估计值为 5.61,但未通过 10% 的显著性检验。这说明跨区域能源调度对不同地区生态韧性的影响存在差异,它能够显著促进东、中部地区的生态韧性,但未能促进西部地区的生态韧性。这可能是由于西部地区为东、中部地区提供了天然气资源,在开发运输过程中损害了本地生态环境,从而印证了资源诅咒的存在。

表 6 异质性分析

Tab. 6 Heterogeneity analysis

变量	(1) 一期工程 E_{it}	(2) 二期工程 E_{it}	(3) 三期工程 E_{it}	(4) 东部 E_{it}	(5) 中部 E_{it}	(6) 西部 E_{it}
D_{it}	1.11*** (2.92)	2.86*** (5.19)	3.20*** (3.47)	4.25*** (4.75)	6.46*** (12.62)	5.61 (1)
常数项	10.64*** (15.56)	11.12*** (30.61)	10.86*** (14.98)	24.22*** (10.52)	10.37*** (8.24)	10.61*** (4.63)
控制变量	是	是	是	是	是	是
固定效应	否	否	否	是	是	是

5 结论及建议

5.1 结论

本文从理论和实证层面探究了跨区域能源调度对生态韧性的作用机理,得出以下结论:1)能源的跨区域调度能够通过改变能源消费结构等方式减少污染排放,显著提升生态韧性;2)西气东输工程对生态韧性的影响依赖于绿色创新技术、政府生态环境治理意志和企业污染排放三条机制路径发挥作用;3)西气东输工程的影响呈现出逐年递增的趋势,且该工程在全国的影响效果有所不同,对于西部地区体现了“资源诅咒”效应,中部地区因靠近资源区效果最为明显,东部地区效果明显但不及中部。这些结

论深化了对跨区域能源调度政策的理解,也为进一步实施和完善相关政策提供了理论支撑。

5.2 政策建议

1)以市场化与行政手段双轨推动能源低碳化,包括碳配额交易市场建设、绿色电力证书制度,设立能源转型基金支持清洁能源项目,并强化环保税调节与清洁能源消费考核。

2)通过环境税与碳交易政策构建动态成本约束机制引导企业生态创新,建立跨区域能源调度指挥中心以实现纵向权责整合与横向资源互补,并开发 AI 预测平台联动动态电价与生态补偿来实时调整能源调度策略。

3)实施技术突破与监管升级,建设低碳技术孵

化平台,研发天然气掺氢燃烧等技术,并搭建污染源智能追踪与排放数据披露系统,开放空气质量监测数据接口。

4) 推行区域差异化排放管理,基于主体功能区划定排放基准,对生态保护区企业实施动态绩效评估,建立清洁生产标杆案例库,并探索排放配额交易制度。

参考文献:

- [1] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [2] 李海东, 马伟波, 张龙江, 等. 美丽城市生态环境协同治理: 基于生态韧性与协同增效的考察[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(8): 1096-1102.
Li Haidong, Ma Weibo, Zhang Longjiang, et al. Synergistic governance of urban ecology and environment: from the perspectives of ecological resilience and synergistic efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(8): 1096-1102.
- [3] 李慧, 佟孟华, 张国建, 等. 跨区域能源调度促进企业减排效应研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2023, 40(7): 156-178.
Li Hui, Tong Menghua, Zhang Guojian, et al. Study on the effect of trans-regional energy dispatching promoting enterprise emission reduction[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2023, 40(7): 156-178.
- [4] Wang S, Cui Z, Lin J, et al. The coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(1): 44-64.
- [5] Zhai Y, Zhai G, Yu Z, et al. Coupling coordination between urbanization and ecosystem services value in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 113: 105715.
- [6] Kuang Y, Lin B. Natural gas resource utilization, environmental policy and green economic development: empirical evidence from China[J]. *Resources Policy*, 2022, 79: 102992.
- [7] Li Z, Wang J, Wang Z, et al. Multidimensional assessment of energy transition and policy implications [J]. *Renewable Energy*, 2025, 238: 121870.
- [8] 冯漪, 曹银贵, 耿冰瑾, 等. 生态系统适应性管理: 理论内涵与管理应用[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4): 545-557.
Feng Yi, Cao Yingui, Geng Bingjin, et al. Ecosystem adaptive management: theoretical connotations and management applications[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 545-557.
- [9] 张华, 韩广轩, 王德, 等. 基于生态工程的海岸带全球变化适应性防护策略[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(9): 996-1005.
Zhang Hua, Han Guangxuan, Wang De, et al. Ecological engineering based adaptive coastal defense strategy to global change[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(9): 996-1005.
- [10] 王田野, 王平, 吴泽宁, 等. 干旱胁迫下植被生态韧性研究进展[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(8): 790-801.
Wang Tianye, Wang Ping, Wu Zening, et al. Progress in the study of ecological resilience of vegetation under drought stress[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(8): 790-801.
- [11] 王维国, 付嘉为, 范丹. 清洁能源发展的健康效应——以西气东输工程为例[J]. *数量经济技术经济研究*, 2024, 41(10): 150-170.
Wang Weiguo, Fu Jiawei, Fan Dan. Health impacts of clean energy development: a case study of the west-east natural gas transmission project[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2024, 41(10): 150-170.
- [12] 赵伟, 骆佳玲. 三峡库区城镇化与生态韧性耦合协调的时空格局演变分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(9): 1888-1904.
Zhao Wei, Luo Jialing. Spatial-temporal pattern evolution of the coupling and coordination of urbanization and ecological resilience in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(9): 1888-1904.
- [13] 龚勤林, 万一孜. 数字技术应用与能源效率提升: 来自中国城市层面的经验证据[J]. *工程管理科技前沿*, 2024, 43(4): 62-68.
Gong Qinlin, Wan Yizi. Digital technology application and energy efficiency improvement: empirical evidence from China's urban level[J]. *Frontiers of Science and Technology of Engineering Management*, 2024, 43(4): 62-68.
- [14] 吴传清, 赵豪. “西气东输”工程建成以来中国区域能源安全测度与评价[J]. *生态文明研究*, 2023(1): 91-102.
Wu Chuanqing, Zhao Hao. Measurement and evaluation of China's regional energy security since the “West-East Gas Transmission” Project[J]. *Urban and Environmental Studies*, 2023(1): 91-102.
- [15] Dorber M, Arvesen A, Gernaat D, et al. Controlling biodiversity impacts of future global hydropower reservoirs by strategic site selection[J]. *Scientific Reports*,

- 2020, 10: 21777.
- [16] Ye X, Chen T, Zi Y, et al. Hygroscopic growth of urban aerosol particles during the 2009 Mirage-Shanghai Campaign[J]. Atmospheric Environment, 2013, 64: 263-269.
- [17] 马成元, 陈皓勇, 肖东亮. 考虑碳约束的新型电力系统跨区域优化调度研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 38-45.
Ma Chengyuan, Chen Haoyong, Xiao Dongliang. Cross-region optimal dispatch of new power system considering carbon constraints [J]. Smart Power, 2024, 52(6): 38-45.
- [18] 孙鹏, 黄锦辉, 李杰, 等. 中央环保督察、政商关系与企业绿色创新——影响机理与扩散路径[J]. 财经研究, 2024, 50(7): 95-110.
Sun Peng, Huang Jinhui, Li Jie, et al. Central environmental inspection, government-business relationship, and corporate green innovation: influence mechanisms and diffusion paths[J]. Journal of Finance and Economics, 2024, 50(7): 95-110.
- [19] Fan H C, Peng Y C, Wang H H, et al. Greening through finance? [J]. Journal of Development Economics, 2021, 152: 102683.
- [20] 程欢, 任洲洋, 孙志媛, 等. 电能-甲醇跨区协同输运下的电-氢耦合系统调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 731-744.
Cheng Huan, Ren Zhouyang, Sun Zhiyuan, et al. A dispatching for the electricity-hydrogen coupling systems considering the coordinated inter-region transportation of electricity and methanol[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 731-744.
- [21] 何晶彦, 李国平, 梁伟. 京津冀绿色技术创新对经济韧性的影响效应研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2024, 23(3): 76-88.
He Xiaoyan, Li Guoping, Liang Wei. On the influence effect of green technology innovation on economic resilience in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2024, 23(3): 76-88.
- [22] 宋跃刚, 高雯. 创新驱动政策能否提升可再生能源企业韧性? ——来自国家创新型城市试点政策的微观证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(1): 144-158.
Song Yuegang, Gao Wen. Can the innovation-driven policies enhance the resilience of renewable energy enterprises? Micro-evidence from China's national innovative pilot cities[J]. China Population, Resources and Environment, 2025, 35(1): 144-158.
- [23] 楚尔鸣, 孙红果, 李逸飞. 智慧城市建设对生态环境韧性的影响研究[J]. 管理学刊, 2023, 36(6): 21-37.
Chu Erming, Sun Hongguo, Li Yifei. Study on the impact of smart city construction on ecological environment resilience[J]. Journal of Management, 2023, 36(6): 21-37.
- [24] 李鹏升, 陈艳莹. 环境规制、企业议价能力和绿色全要素生产率[J]. 财贸经济, 2019, 40(11): 144-160.
Li Pengsheng, Chen Yanying. Environmental regulation, bargaining power of enterprises and green total factor productivity[J]. Finance & Trade Economics, 2019, 40(11): 144-160.
- [25] 滕祥河, 文传浩. 政府生态环境治理意志向度词频的引致效应研究[J]. 软科学, 2018, 32(6): 34-38.
Teng Xianghe, Wen Chuanhao. Research on effect of word frequency of government intention on environment management[J]. Soft Science, 2018, 32(6): 34-38.

(责任编辑 周 蓓)

附录

A1 进一步分析

前文已经讨论了跨区域能源调度对生态韧性的相关分析，但仅仅讨论了西气东输工程沿线的生态韧性的变化，忽略了周边的联动效应，因此本附录要讨论跨区域能源调度的空间溢出效应来分析跨区域西气东输工程对政策实施地区周边城市生态韧性的影响。本文选取二期西气东输工程来验证空间溢出。

正文式（1）主要探讨政策的平均处理效应，该研究假设不存在溢出效应，但是环境问题的外部性特征决定了在研究城市生态韧性问题时，必须重视溢出效应的存在性。

为了检验西气东输工程的空间溢出效应，通过构建新的哑变量 s_i ，建立新的模型，模型设定如下：

$$E_{it} = \alpha + \beta_1 D_{it} + \beta_2 D_{it} * s_{it} + \delta X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (A1)$$

在样本期内，如果城市 i 为沿线城市，则城市 i 的 s_i 取 1，否则为 0。系数 β_2 捕捉西气东输政策对周围城市生态韧性的溢出效应，系数 β_1 衡量了西气东输工程对周围城市生态韧性的直接政策效果， $\beta_1 + \beta_2$ 衡量西气东输工程的完整政策效果。

前文探讨了西气东输工程空间溢出效应的存在性，但是环境外部性产生的溢出效应受到空间距离的限制。为了进一步检验溢出效应在区域维度上的溢出范围，构建模型如下：

$$E_{it} = \alpha + \beta_1 D_{it} \sum_{s=100,200,\dots,600} \beta_s F_{it}^s + \delta X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (A2)$$

式（A2）在式（1）的基础上加入一组新的虚拟变量变量 F_{it}^s 。其中，参数 s 表示任意非西气东输沿线城市到西气东输沿线城市的球面距离（单位是 km， $s \geq 100$ ）。详细地，当城市 i 在 $(s - 100, s]$ 的空间范围内存在处理组城市时，那么 $F_{it}^s = 1$ ，否则 $F_{it}^s = 0$ 。系数估计值 β_s 衡量了西气东输工程的实施对周边邻近区域企业的污染减排效应，通过比较不同阈值下系数 β_s 的经济和统计显著性来检验西气东输工程空间溢出效应的辐射范围。

从表 A1 的回归结果来看，西气东输二期工程的直接政策效应和溢出效应均显著为正，表明工程实施不仅提升了沿线城市的生态韧性，还对周边城市产生了更强的环境改善作用。西气东输工程对沿线的溢出效应可能源于技术扩散与政策协同：沿线城市通过能源结构优化形成示范效应，倒逼邻近地区主动调整产业布局或强化环境规制，共享清洁能源基础设施。加入固定效应后溢出效应仍然稳健，说明结果不受城市个体异质性干扰，符合佟孟华等提出的“环境规制空间外溢”理论框架。

表 A1 空间溢出回归
Tab.A1 Spatial overflow returns

变量	(1) 二期工程 E_{it}	(2) 溢出效应 E_{it}
D_{it}	1.28*** (3.36)	0.01*** (2.75)
常数项	1.47*** (5.84)	0.05*** (6.74)
控制变量	Yes	Yes
固定效应	No	Yes

从图 A1 误差条图观察，溢出效应呈现显著的空间梯度衰减特征。在 500 km 以内政策的效应值为正，500 km 以上，效应值接近零，证实溢出效应存在明确的地理边界，这与佟孟华等（2022）提出的“环境外部性百公里级阈值”一致，但本研究进一步量化了衰减拐点，约 400 km 后效应不可持续，这一非线性特征提示单纯地理距离模型可能低估了复杂网络关系的影响，未来需引入经济-地理耦合权重深化分析。

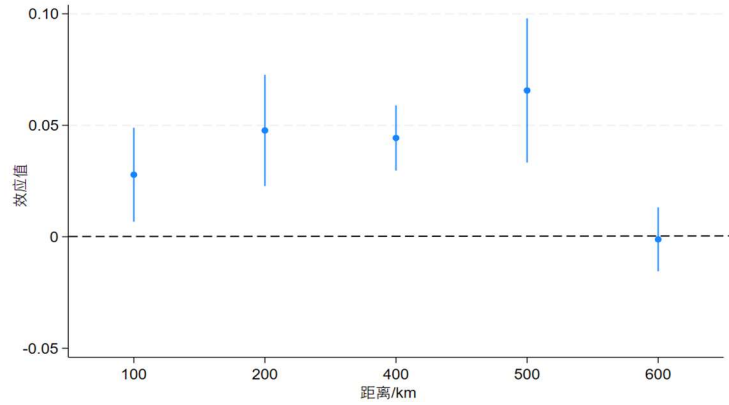


图 A1 空间溢出范围

Fig. A1 Space overflow extent

A2 内生性问题讨论与识别策略

尽管西气东输工程的分期推进为本文提供了良好的准自然实验条件，但其线路规划并非完全随机，可能存在因经济发展潜力、地理条件或生态战略地位等因素导致的选址偏差。此外，沿线城市可能同时受到其他环境政策的支持，从而引发混淆效应。为增强因果推断的可信度，本文采取了以下多重识别策略。

A2.1 平行趋势检验

采用事件研究法估计政策前后多期效应。结果显示，在西气东输各期工程实施前，处理组与对照组的生态韧性变化趋势无显著差异（系数不显著且置信区间包含零），满足 DID 的基本假设（正文图 2）。

A2.2 倾向匹配得分（PSM）

基于政策前的城市特征（区域经济发展水平、产业结构、能源消费结构）进行匹配，确保处理组与对照组在可观测变量上具有可比性。匹配后，标准化偏差显著降低，并在匹配样本中重新估计多期 DID 模型，主效应依然稳健（表 4 列（4））。

A2.3 控制混杂政策干扰

考虑到部分城市可能因被列为“川电东送”、“陕京二线”而获得额外政策支持，本文在基准回归中剔除了这些城市样本，并重新估计模型。结果显示，核心结论保持不变，表明结果并非由叠加政策驱动（表 4 列（2）~（3））。

综上所述，本文通过平行趋势检验、PSM-DID 和排除混杂政策样本等多种方法，系统缓解了潜在的内生性问题，增强了估计结果的稳健性与因果解释力。