科技创新

跨区域电网建设对可再生能源技术进步的影响

刘思彤

（中共宝鸡市委党校，宝鸡 721000）

摘要：随着中国能源需求持续增长与“碳达峰、碳中和”目标的推进，能源生产与技术进步面临迫切要求。作为跨区域大规模清洁能源输送的重要基础设施，特高压输电工程在推动能源要素高效流动与绿色转型中具有关键作用。以特高压输电工程建设作为外生冲击，采用 2006—2023 年 273 个中国地级及以上城市的面板数据，运用交错双重差分模型实证分析了特高压输电工程对可再生能源技术进步的影响，进行实证检验。研究发现，特高压输电工程建设显著促进了可再生能源技术进步。这一结论经过一系列稳健性检验后仍然成立。机制分析发现，特高压输电工程通过促进地区能源结构优化、降低能源强度、提高环境绩效三种渠道促进可再生能源技术进步。

关键词：特高压输电；技术进步；可再生能源

中图分类号：F426.61 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)12－0226－09

作为全球最大的发展中国家，中国的能源结构调整与绿色低碳转型正处于关键的战略转折期，面临严峻的资源禀赋约束与路径依赖挑战[1]。为响应日益趋紧的生态环境硬约束，并落实“双碳”目标的战略要求，中国通过政策逆引领，持续强化可再生能源的规模化消纳与系统集成能力，旨在实现传统能源的结构性优化与存量升级[2]。然而，现阶段中国能源消费结构仍呈现明显的高碳锁定特征。根据国家能源集团数据，2022 年煤炭消费在中国能源消费总量中的占比约为 56.2%，而可再生能源占比仅为 17.5%左右[3]。尽管可再生能源的边际替代效应逐年增强，但受限于时空错位及消纳瓶颈，其规模化替代作用尚未充分显现，传统能源消耗总量仍处于高位平台期，清洁能源的渗透率提升与系统性转型任务依然艰巨。能源技术进步被视为驱动能源转型与结构重构的核心引擎[4]。当前，中国在可再生能源领域已实现显著的阶段性技术跨越，主要体现为光伏电池光电转换效率的持续攀升、风电机组单机容量的规模化增长，以及智能电网与储能技术的协同突破。在此背景下，如何通过技术创新驱动诱导能源结构实现由“高碳依赖”向“低碳集约”的范式演进，已成为中国经济社会高质量发展进程中的核心逻辑命题[5]。

在此背景下，特高压输电工程的规划与建设已成为驱动中国能源技术进步与结构转型的战略性举措。特高压输电技术凭借其跨区域、大规模、低损耗的显著技术优势，能够有效缓解中国资源禀赋与用电负荷之间的空间失衡矛盾，尤其在提升可再生能源的规模化消纳水平、促进绿色电力跨省跨区通达方面发挥了核心支撑作用。自 2009 年中国首个特高压交流输电示范工程投运以来，随着一系列特高压项目的相继落地，中国已初步构建起覆盖华北、华东、华中等核心负荷中心的特高压骨干网架，极大提升了电网对波动性可再生能源的接入与承载能力。截至 2024 年 4 月，中国已建成“二十交二十二直”等共计 40 余条特高压线路，累计输电里程及装机规模均稳居世界首位。2023 年数据显示，特高压线路输送的清洁能源功率已突破 1 亿 kW，通过输配电技术的迭代优化，显著抑制了可再生能源的弃风弃光率，实现了能源跨时空配置效率的实质性跃升。

特高压输电工程被视为驱动中国能源转型与结构重构的战略性引擎。然而，尽管特高压建设在加速能源清洁化进程与支撑宏观经济增长方面的作用已获公认，其对能源技术进步的深层影响及内在机理仍有待系统性挖掘。尤其是如何科学测度这一大型基础设施建设对可再生能源技术创新的诱导效应与溢出路径，仍是当前政策制定者与学术

收稿日期：2026-02-21

作者简介：刘思彤(2000—)，女，陕西咸阳人，硕士，助教，研究方向为绿色经济。

界关注的焦点命题。本文的研究成果不仅为中国跨区域电力资源配置的优化提供了坚实的实证支撑,也为全球范围内通过跨区域联网实现能源技术协同演进提供经验借鉴。本文的边际贡献主要体现在以下三个维度:构建了一个跨区域电网建设驱动可再生能源技术进步的一体化分析框架,揭示了基础设施连通性与技术创新动力之间的内在关联逻辑;丰富了对大规模空间干预政策效果的实证评估,为探究区域性能源技术进步的动力机制提供了来自微观层面的稳健证据。在现实层面,研究结论为培育新质生产力、加速能源结构由"增量替代"向"存量优化"转型提供了政策基准,并为未来城市绿色发展战略的精准设计与协同实施提供了重要的决策启示。

1 理论框架与研究假设

1.1 直接作用分析

特高压输电工程作为能源领域的重大基础设施创新,对可再生能源技术进步具有显著的"需求拉动"与"供给端引领"作用。首先,中国可再生能源(风、光)资源分布地域与集中用电负荷区域具有较差的重叠性。特高压技术凭借其跨区域、大容量、低损耗的物理特性,构建了跨区域电力输送的战略骨干通道,为大规模清洁能源的高比例消纳提供了坚实的物理基础。市场准入空间的内生性扩张,直接诱导上游可再生能源发电设备、先进储能技术及高精度并网预测技术的持续迭代创新。其次,特高压工程对电力系统的运行稳定性具有极高的技术约束。为匹配特高压的输送标准与电网安全要求,具有随机性、波动性特征的风能与太阳能必须在发电端实现更精准的电力调控与更高水平的能量转换效率。这种基于系统兼容性的技术对接,对能源企业产生了显著的"逆引领"效应,迫使其加大研发投入以提升核心竞争力,从而推动了逆变器技术、智能微电网技术等关键领域的跨越式演进。由此提出以下研究假设。

H1:特高压输电工程建设显著促进了可再生能源技术进步。

1.2 传导机制分析

特高压工程的投运显著重构了流入地与流出地的能源供给体系。在流出地,特高压建设显著抑制了弃风弃光率,提升了可再生能源在一次能源消费中的占比;在流入地,清洁电力对化石能源的边际替代效应日益显现。这种"减煤增绿"的结构性演变引发了深层的"干中学"效应:随着可再生能源装机容量的规模化扩张,相关产业链配套趋于成熟,技术创新的规模不经济得以克服,从而加速了可再生能源技术的系统性迭代。

特高压输电通过强化能源配置效率,驱动了单位GDP能耗的实质性下降。一方面,特高压输电损耗远低于传统输电范式,直接赋能终端能源的使用效率;另一方面,特高压引致的低成本清洁能源降低了企业的能源投入成本,产生"成本节约效应",促使微观主体将资本冗余流向技术改造与工艺优化。能源强度的下降表征生产流程的低碳化转型,这一过程伴随着对高效、节能型可再生能源技术的深度吸收与二次创新,形成了"效率红利—技术反馈"的正向演进循环。

特高压工程建设具有显著的"环境偏向性"特征。通过压减化石能源燃烧占比,该工程显著改善了区域空气质量与减排表现。在环境绩效目标的硬约束下,地方政府与企业更倾向于采纳清洁能源方案。这种环境规制下的"波特补偿效应"迫使微观主体摒弃传统高碳技术路径,转向研发并应用更先进的可再生能源技术,以匹配日益严苛的环境质量标准。环境绩效的提升不仅是治理结果,更是驱动技术向绿色、低碳维度深化的内生催化剂。由此提出以下研究假设。

H2:特高压输电通过促进地区能源结构优化、降低能源强度、提高环境绩效三种渠道促进可再生能源技术进步。

2 研究设计

2.1 研究样本

样本选择特高压输电工程中的14条交流电线路的起落点城市以及16条直流电线路中的起落点和中间落点城市作为处理组城市,30条线路如表1所示。对照组城市来自未参与特高压输电工程的城市,由于部分城市数据缺失严重所以在剔除这部分城市后最终形成了273个城市的面板数据。选择2006—2023年作为研究的时间窗口,因为在这些线路中最早开通年份为2009年,最晚年份为2020年,为了更好地观察工程的实施效果,同时考虑到数据的可得性选择2006—2023年为观测区间。

2.2 模型设定

选取交错双重差分模型(staggered DID)作为基准识别策略,主要基于以下三点理由:①匹配特高压建设的时间异质性特征。特高压输电工程并非在全国范围内统一开展,而是呈现明显的"分批次建设、跨年度投运"特征。样本城市接入特高压网

表 1　线路说明

线路类别	直流线路	交流线路
线路名称	向家坝—上海±800 kV	晋东南—南阳—荆门 1000 kV
	锦屏—苏南±800 kV	淮南—上海南环 1000 kV
	哈密南—郑州±800 kV	蒙西—晋中 1000 kV
	溪洛渡—浙江金华±800 kV	张北—雄安 1000 kV
	宁夏灵州—浙江绍兴±800 kV	浙北—福州 1000 kV
	酒泉—湖南±800 kV	淮南—南京—上海 1000 kV
	晋北—江苏±800 kV	锡盟—山东 1000 kV
	上海庙—山东临沂±800 kV	蒙西—天津南 1000 kV
	锡盟—江苏泰州±800 kV	榆横—潍坊南 1000 kV
	扎鲁特—山东±800 kV	锡盟—胜利 1000 kV
	淮东—皖南±1100 kV	北京西—石家庄 1000 kV
	云南—广东±800 kV	苏通 1000 kV GIL 综合管廊
	糯扎渡—广东±800 kV	山东—河北环网 1000 kV
	滇西北—深圳±800 kV	驻马店—南阳 1000 kV
	青海—河南±800 kV	
	乌东德—广东、广西±800 kV	

络的时间节点存在显著先后差异，这一特征构成了一个理想的准自然实验，而交错 DID 模型正是处理此类“多时点冲击”效应的标准范式。②满足模型适用条件并提升识别效力。相较于传统单一时点的 DID，交错 DID 能够利用处理组内部的时间差，将“尚未实施工程”的城市作为“已实施工程”城市的动态对照组。这不仅解决了每个城市工程实施时间不同的困扰，还能更有效地排除不随时间变化的个体固定效应和全样本共有的时间趋势干扰，极大程度上克服了遗漏变量导致的内生性问题。③精准识别政策实施的动态效果。特高压建设对区域能源结构优化和绿色转型的影响具有持续性和累积性。采用交错 DID 能够更科学地捕捉政策实施后的平均处理效应，并为进一步检验政策的时空异质性提供稳健的基础。具体模型设定如下。

$$RE_{it} = \beta_0 + \beta_1 did_{it} + \theta X_{it} + \gamma_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中：被解释变量 RE_{it} 为城市 i 在 t 年的可再生能源的技术进步程度；核心解释变量 did_{it} 为政策虚拟变量；β_1 为本文关注的核心系数，用来衡量特高压输电对可再生能源技术进步的整体影响；X_{it} 为一组城市层面控制变量；γ_t 为时间固定效应；μ_i 为城市固定效应；ε_{it} 为随机扰动项。此外，回归标准误在城市层面聚类。

2.3　变量说明

核心解释变量：可再生能源技术进步的数据收集依托于 incoPat 全球专利分析平台，以各城市的可再生能源的专利申请量为能源技术进步水平的代理变量。借鉴其他学者常用的高频词统计方法，对能源技术专利注册中的主要技术方向进行分析，以识别两种能源的核心技术。具体步骤如下：首先，在中国期刊网搜索与能源技术创新相关的高频词汇，然后在国家知识产权局网站上检索相关内容，对实用新型专利和发明专利进行筛选，初步获得样本城市中可再生能源相关专利申请数据。通过数据库中的系统分析，基于国际专利分类号（IPC），识别具体技术的 IPC 分类号，可再生能源技术创新的分类号如表 2 所示。明确了相关专利的分类号后，利用 incoPat 全球专利数据库获取各类专利技术的量化指标，避免专利重复计数，最终得到 273 个城市在 2006—2023 年可再生能源技术方面的专利数据，作为本文的研究基础。此外，在指标衡量上，以样本中各城市当年申请的专利数量加一取对数来表示。

表 2　两种能源技术创新 IPC 分类号

可再生能源	IPC 分类号
风能	F03D
潮汐能	E02B9/08；F03B13/10-26；F03G7/05
水能	E02B9；F03B3；F03B7；F03B13/06-08；F03B15
太阳能	F03G6；F24J2；F26B3/28；H01L27/142；H01L31/042-058
生物质能	C10L5/42-44；F02B43/08
储能	H01M10/06-18；H01M10/24-32；H01M10/34；H01M10/36-40

核心解释变量：交错双重差分模型中核心解释变量为虚拟变量，若样本城市当年位于特高压输电工程的起落点或者中间节点，则赋值为 1，否则为 0。

控制变量：参考邵帅等[6]的做法，选择第二产业生产总值占比（secind）、第三产业生产总值占比（thirdind）、人口增长率（peogrowth）、GDP 增长率（growth）、研发投入（rd）、财政压力（press）、人口密度（density）、外商投资（invest）。其中，研发投入以内部经费支出与地区生产总值之比衡量，财政压力以地方财政一般预算内支出与预算内收入之比衡量，人口密度用每平方千米的人口对数值衡量，外商投资以外商投资企业数的对数值衡量。相关数据来源于《中国城市统计年鉴》。

3　实证分析

3.1　描述性统计

表 3 展示了各变量定义及描述性统计，其中小部分缺失值采用自回归移动平均法（ARMA）补齐，处理软件为 Stata17 和 Excel。由表 3 可以看出不同城市可再生能源技术进步变化幅度较大，样本方差较大，表明样本城市能源技术进步之间存在较大差异，样本的信息量较大，其余变量均处于合理的取值区间。

表 3　描述性统计

变量	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
RE	4 914	1.595	1.462	0.000	7.936
did	4 914	0.062	0.241	0.000	1.000
secind	4 914	46.000	11.192	11.597	85.649
thirdind	4 914	41.374	10.293	11.225	84.857
peogrowth	4 914	5.626	5.115	−16.604	39.208
growth	4 914	9.319	4.754	−20.636	32.901
rd	4 914	0.020	0.036	0.000	0.934
press	4 914	2.904	1.953	0.647	18.887
density	4 914	5.768	0.903	1.792	8.008
invest	4 914	3.137	1.593	0.000	8.471

3.2　基础回归

表 4 报告了特高压输电建设影响可再生能源技术进步的基础回归结果。列(1)为仅包含核心解释变量并严格控制了城市与年份双向固定效应的基准模型。结果显示,双重差分估计量 did 的系数为 0.359 82,且在 1% 的统计水平上显著为正。为了进一步缓解遗漏变量带来的内生性偏误,列(2)在基准模型的基础上引入一系列城市层面的控制变量。结果表明,在控制了相关干扰因素后,did 的估计系数虽略微下降至 0.318 00,但依然在 1% 的水平上保持显著正相关。这一核心发现有力地验证了本文的研究假设,即特高压输电建设对地区可再生能源技术进步具有显著的促进作用。由此,H1 得证。

3.3　稳健性检验

平行趋势检验。运用交错双重差分模型的重要前提是处理组城市与对照组城市在政策发生前具有平行趋势。如果处理组城市没有建设特高压输电工程,那么处理组城市与对照组城市的变化趋势应该是一致的。为验证这一假设并分析政策冲击的动态效应,参考 Jacobson 等[7]的事件研究法对动态效应做进一步考查,政策发生在 5 年前和 5 年后的政策虚拟变量统一归为 pre_5、$post_5$,政策发生当期为 current,为排除共线性影响剔除政策发生前一期 pre1,其余变量设定同上文,构建如下模型。

$$RE_{it} = \beta_0 + \sum_{-5\leqslant j\leqslant 5} \delta_j did_{it-j} + \theta X_{it} + \gamma_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

将回归中 pre_5、pre_4、pre_3、pre_2、current、$post_1$、$post_2$、$post_3$、$post_4$、$post_5$ 的系数以置信区间的形式直观展现在图 1 中,显示了实验组与控制组之间的平行趋势,特高压输电工程实施后处理组城市中 did 系数均显著异于 0,工程实施前均不显著,说明处理组和对照组具有良好的平行趋势。

表 4　基础回归

变量	(1)	(2)
	RE	RE
did	0.359 82***	0.318 00***
	(4.180 35)	(3.749 53)
secind		−0.008 72
		(−1.200 55)
thirdind		−0.013 35
		(−1.502 01)
peogrowth		0.007 85**
		(2.224 94)
growth		0.005 64
		(1.447 54)
rd		−0.893 53
		(−1.611 60)
press		−0.074 97***
		(−3.816 35)
density		0.769 18**
		(2.183 61)
invest		0.099 54*
		(1.822 14)
常数项	1.572 60***	−2.081 85
	(294.360 67)	(−0.949 29)
观测值	4 914	4 914
R^2	0.821 00	0.824 21
城市固定	YES	YES
年份固定	YES	YES

注:***、**、* 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平;括号内为 t 值。

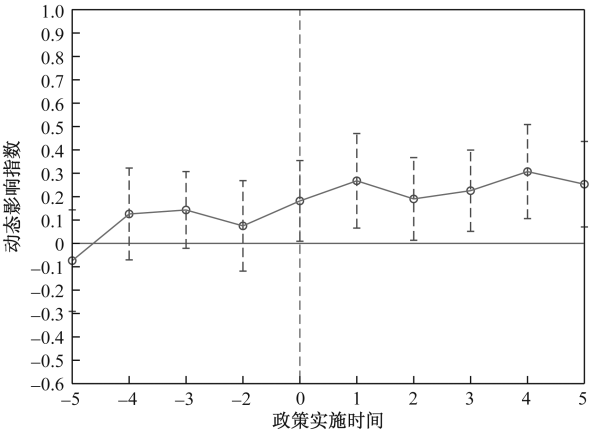


图 1　平行趋势检验

安慰剂检验。安慰剂检验是进行双重差分模型经常使用的一种稳健性检验手段,尽管在基础回归中控制了年份与城市双向固定效应以尽量减少变量遗落问题,但某些随时间与个体变化的因素仍难以控制。参考 Ferrara 等[8]的方法,参照基础回归中 did 的分布,通过随机抽样的方法构造“伪政策”变量,重新进行估计,检验 did 系数和其 P 值的分布情况,重复这一过程 500 次。检验结果如图 2 所示,可再生能源技术进步对伪政策变量回归的系

数均值趋近于 0，分布上接近于正态分布，这表明特高压输电工程的实施对地区可再生能源技术进步的影响并非其他因素所致，安慰剂检验通过。

异质性处理效应检验。交错 DID 估计的本质是多个不同处理效应的加权平均，权重可能存在为负的情形。在权重为负的情况下，不同处理效应加权平均后得到的平均处理效应，可能会与真实的平均处理效应方向相反。参考 Callaway 和 Sant' Anna[9] 的做法，绘制动态平均处理效应（dynamic ATT）的系数图，得出距离首次被处理时间分组加权求和的平均处理效应。图 3 展示了系数的回归结果，再次印证了结论的稳健性。

敏感性分析。考虑到传统的事前趋势检验（即处理前系数不显著）无法构成严格的平行趋势假设验证，进一步引入平行趋势敏感性检验以增强政策效应识别的说服力。该方法参考 Biasi 和 Sarsons[10] 提出的框架，通过设置处理前趋势偏离的最大容忍度 Mbar=1×标准误，构建一个“容忍性界限”下的敏感性分析窗口。该方法核心思想在于：即便潜在的平行趋势存在一定程度的偏离，只要政策效应在此偏离容忍度内仍显著存在，即可说明识别结果具备反事实稳健性。

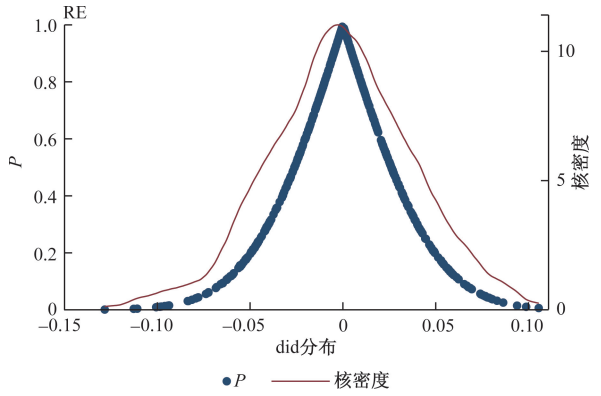


图 2　安慰剂检验

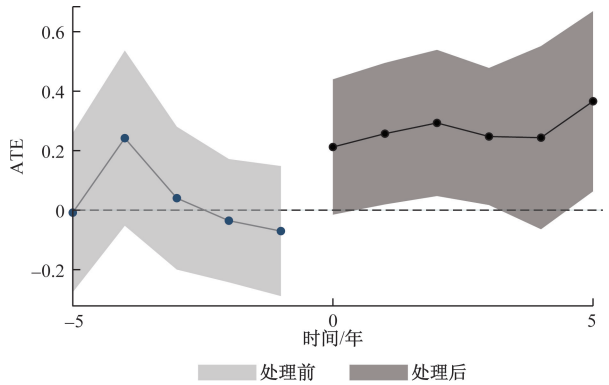
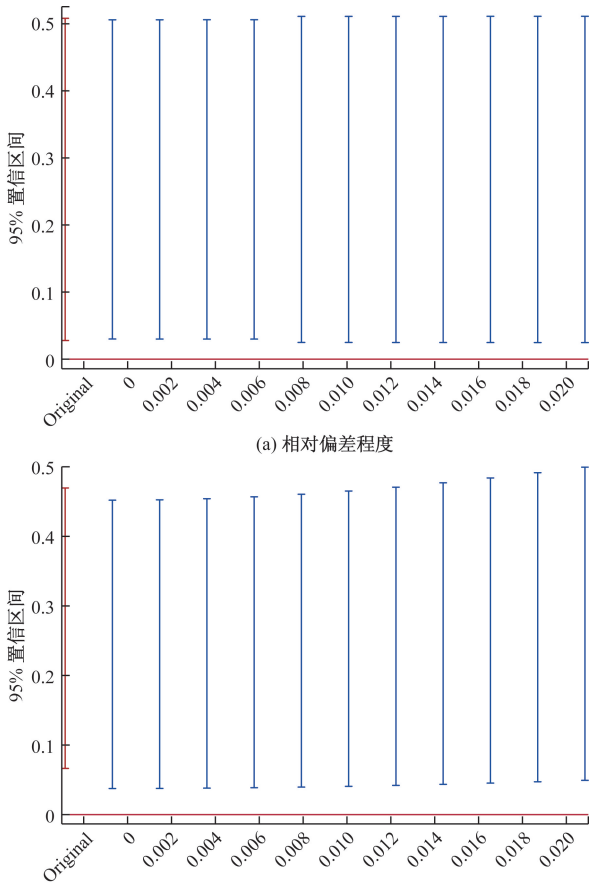


图 3　异质性多期 DID 检验

图 4 展示了在相对偏离程度限制和平滑限制下的敏感性检验结果，即使存在一定程度的趋势偏离，特高压输电工程对可再生能源技术进步的促进效应依然成立。

PSM-DID（倾向得分匹配双重差分）。PSM 能够很好地解决样本选择偏误的问题，并且能够很好地解决缺少共同趋势假设的问题，双重差分虽然可以解决内生性问题，但是并不能完全解决样本选择的内生性问题。所以考虑将两种方法结合起来，运用 PSM 构建与处理组相似的城市为对照组，以控制变量作为协变量进行匹配，剔除未匹配的观测值然后再进行 DID 方法估计政策效果。图 5 展示了匹配后各变量具有良好的相似程度，PSM-DID 回归结果如表 5 列（1）所示，其中 did 系数显著为正，表明原模型不存在严重的样本选择偏误问题，与基础回归中结论一致。

GMM 估计。为进一步有效识别工程建设对可再生能源技术进步的真实影响，接下来采用系统 GMM（system generalized method of moments）方法进行估计。系统 GMM 在差分 GMM 基础上引



(a) 相对偏差程度

(b) 平行趋势不成立的相对程度

图 4　敏感性分析

入水平特征方程,使用滞后项作为工具变量,不仅能有效控制个体固定效应,还能增强工具变量的相关性与识别强度。回归结果如表 5 列(2)所示,AR(2)大于 0.1 确保了工具变量的有效性与模型设定的合理性,其中 did 系数显著为正,与基础回归中结论一致。

替换被解释变量。在基础回归部分采用专利数量加一取对数来衡量能源技术进步水平,这样的衡量指标被广泛采用具有较高的合理性,但是 Cao 等[11]指出能源技术创新应该考虑其扩散效应与专利

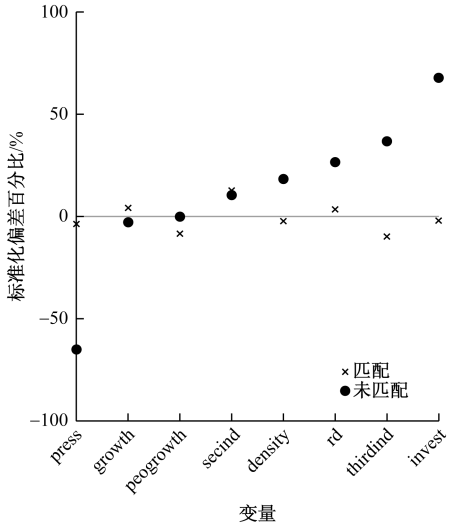


图 5　平衡性检验

表 5　稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	PSM-DID	GMM 估计	替换被解释变量	
did	0.142 22** (2.165 51)	0.259 59*** (3.880 97)	2.420 55*** (4.297 72)	1.486 25** (2.335 67)
观测值	1 090	4 641	4 914	4 914
R^2	0.902 23		0.860 33	0.740 25
控制变量	YES	YES	YES	YES
城市固定	YES	YES	YES	YES
年份固定	YES	YES	YES	YES

注:***、**、* 分别表示 1%、5%、10%的显著性水平;括号内为 t 值。

折旧。因此考虑将核心解释变量替换为式(3)中的指标重新进行估计,其中 e 为自然对数,s 为第 s 年,参考 Lin 等[12]的做法将 β_1、β_2 分别赋值为 0.36、0.03。替换变量后的结果如表 5 列(3)所示,其中 did 的系数显著为正,与基础回归中的结论一致。

$$RE_{it} = \sum_{s=0}^{t} e^{-\beta_1(t-s)}[1 - e^{\beta_2(t-s)}]RE_{it} \tag{3}$$

此外,为了进一步验证基准回归结果的稳健性,采用可再生能源投资额作为可再生能源技术进步的替代变量进行重新估计。其合理性逻辑如下:首先,根据内生增长理论,技术进步并非凭空产生,而是资本与劳动投入的产出结果。研发投入与设备更新投资是技术创新的物质基础。在可再生能源领域,更大规模的资金投入通常意味研发活动的增加、先进生产线的引进以及专利成果的产业化转化,因此投资水平能够灵敏地反映该地区技术发展的活跃度与潜力。其次,虽然专利申请数是衡量技术进步的常用指标,但其往往存在“策略性创新”或转化周期长等局限。相比之下,投资额反映市场主体对绿色技术进步的实质性支持和真实需求。使用投资指标作为替代,可以有效排除因专利统计标准差异带来的测量误差,从而验证原结论在不同维度下的可靠性。可再生能源的数据来源为中国经济金融数据库(CCER 数据库),替换指标后的回归结果如表 5 列(4)所示,其中 did 的系数仍显著为正,保持了结论的一致性。

4　机制分析

上文得到了特高压输电工程对地区可再生能源技术进步的经验性证据,接下来基于理论分析,从能源结构优化、降低能源消费强度和提高环境绩效三个维度来阐释其作用机制。参考江艇[13]的做法,构建以下模型。

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 did_{it} + \theta X_{it} + \gamma_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \tag{4}$$

式中:M_{it} 为机制变量。三种机制变量的衡量方式,数据来源如表 6 所示。

表 6　机制变量说明

变量名称	变量符号	变量衡量	数据来源
能源结构优化	structure	参考 Babayomi 等[14]的做法,以城市当年可再生能源的消费总量与非可再生能源消费总量之比表示,由于地方统计年鉴并未直接公布各种能源消耗量,因此参考 Yang 等[15]的数据,采用其团队测算出的各地级市可再生能源消耗量之和与非再生能源消耗量之和的比值来衡量	《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》
能源消费强度	intensity	参考史丹和李少林[16]的做法,以地区灯光数据测算出地区能源消耗量,再将能源消费总量除以地区生产总值计算得出	DMSP 夜间灯光数据、《中国城市统计年鉴》
环境绩效	$lnco_2$	二氧化碳排放总量对数值	EDGAR 数据库
	$lnso_2$	工业二氧化硫排放量对数值	《中国城市统计年鉴》
	pm2.5	PM2.5 浓度取对数	《中国城市统计年鉴》

4.1　能源结构优化

根据模型(4)对可再生能源技术进步的影响机制进行考察，机制分析结果如表 7 列(1)所示，其中核心解释变量 did 的系数显著为正，表明特高压输电工程可以通过促进能源结构优化来提高地区可再生能源技术进步。

特高压输电技术在驱动能源结构优化与诱导能源技术进步进程中发挥战略性支撑作用。首先，特高压技术通过实现跨区域、高效率的电能远距离输送，有效缓解了中国能源资源禀赋与用电负荷之间的空间错位矛盾。特别是该技术将西部、北部地区丰富的清洁能源外送至东部、南部负荷中心，从根本上优化了资源时空配置效率，进而为可再生能源技术的规模化演进提供动力源泉[17]。其次，特高压工程不仅显著提升电网对波动性电力的消纳承载力，还产生一系列关联技术溢出效应。随着特高压网架的完善，智能电网调度、先进储能集成等前沿技术的迭代升级，反向赋能于可再生能源的能源转换效率，形成“基础设施联动—核心技术升级”的耦合发展态势。此外，制度环境的优化进一步强化这一技术进步路径。政府通过财政补贴与税收优惠等政策工具包，降低绿色技术创新的外部成本，产生显著的诱导创新效应，从而加速可再生能源领域研发成果的产业化转化与市场应用。

4.2　降低能源消费强度

根据模型(4)对可再生能源技术进步的影响机制进行考察，机制分析结果如表 7 列(2)所示，其中核心解释变量 did 的系数显著为负，表明特高压输电工程可以通过降低能源消费强度来提高地区可再生能源技术进步。

在驱动可再生能源技术演进的过程中，特高压输电(UHV)通过抑制能源消费强度，为可再生能源的规模化应用提供了关键的要素支撑。随着可再生能源实现高比例、高效率并网，风能与太阳能利用技术在更广阔的地理维度内实现了时空配置优化，进而诱发了技术创新的正向反馈与加速效应。特高压输电不仅强化了可再生能源的物理接入能力，更显著带动了智能电网调度、先进储能集成等互补性技术的协同演进，系统性地提升了可再生能源电力的调度灵活性与运行稳定性[18]。例如，特高压输电凭借其强大的跨区域调节能力，有效缓解了可再生能源发电固有的随机性与间歇性特征。这种调节需求在客观上驱动了储能技术的商业化应用与技术迭代，进而增强了电力系统对可再生能源的消纳韧性。此类技术层面的跨越式进步，不仅显著降低了中国的能源消费强度，更从根本上优化了能源系统的整体全要素生产率与宏观经济性。

4.3　提高环境绩效

根据模型(4)对可再生能源技术进步的影响机制进行考察，机制分析结果如表 7 列(3)～列(5)所示，其中核心解释变量 did 的系数显著为负，表明特高压输电工程可以通过提高环境绩效来提高地区可再生能源技术进步，由此 H2 得证。

特高压输电的一项核心优势在于其凭借跨区域、高效率、长距离的输电特性，大幅压减了电能在远距离传输过程中的线损率，进而显著优化了电力系统的整体环境绩效。依托这种高效的能源外送模式，特高压技术实现了可再生能源供给与需求在时空维度上的深度解耦。具体而言，中国西部与北部地区丰富的风能、太阳能等可再生资源得以突破地理屏障，跨区域接入东部及南部的高负荷需求中心。这一过程有效规避了传统输电模式下的高额能耗，在实现资源跨省区优化配置的同时，显著降低了全社会的能源消费强度，从而在宏观层面抑制了污染排放水平，驱动了环境绩效的边际改善[19]。此外，随着可再生能源并网比例的持续攀升，相关领域产生了一系列诱导性技术创新。智能电网调度、先进储能集成等配套技术的协同演进，增强了随

表 7　机制分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	structure	intensity	$\ln CO_2$	$\ln SO_2$	pm2.5
did	0.040 10**	−0.053 47**	−0.048 67**	−0.014 84***	−0.007 47***
	(2.378 90)	(−2.028 56)	(−2.028 56)	(−2.819 54)	(−3.073 13)
观测值	4 914	4 914	4 914	4 914	4 914
R^2	0.991 34	0.97035	0.970 35	0.968 57	0.967 13
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES
城市固定	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定	YES	YES	YES	YES	YES

注：***、**、* 分别表示 1%、5%、10%的显著性水平；括号内为 t 值。

机性电源在电力系统中的调峰能力与运行可靠性。综上所述,特高压工程不仅充当了清洁能源消纳的物理载体,更通过技术外溢效应激发了低碳领域的原创性技术创新,实现了能源系统环境效益与技术进步的协同耦合。

5 结论与建议

5.1 结论

本文基于中国推动“双碳”目标与能源转型的现实背景,将特高压输电工程建设视为一项准自然实验,利用 2006—2023 年中国 273 个地级及以上城市的面板数据,构建交错双重差分模型实证考察了其对可再生能源技术进步的影响效应。研究结果表明:特高压输电工程建设显著促进了可再生能源技术进步,在控制了一系列城市特征变量并经过多重稳健性检验后,该结论依然成立,充分证明了跨区域电力基础设施建设对绿色创新具有强劲的驱动作用。机制分析进一步揭示,特高压输电工程主要通过优化地区能源结构、降低能源强度及提升环境绩效三大渠道产生技术溢出效应。这一发现不仅证实了特高压工程在解决能源资源错配、推动能源要素高效流动方面的关键支撑作用,也为通过重大基础设施建设驱动能源电力系统实现高质量转型提供了重要的理论依据与政策启示。

5.2 建议

强化特高压骨干网架的战略布局,构建跨区域绿色电力消纳的长效驱动机制。持续加大对特高压输电工程的基建投入与战略规划,重点强化西部能源基地与东部负荷中心之间的时空耦合与互联互补。通过破除能源要素流动的空间壁垒与行政阻滞,进一步放大特高压基础设施对可再生能源技术创新的正向溢出效应。通过构建全国统一的电力大市场,确保清洁能源在跨区域调度中实现高效消纳,从物理基础层面支撑中国“双碳”战略目标的实质性落地。

协同优化能源供给结构与能效管理体系,激活特高压对绿色转型的多重赋能作用。在推进特高压建设进程中,配套实施差异化的能源准入与管控政策。一方面,依托特高压的跨时空消纳优势,诱导地区能源结构实现向低碳化的范式演进;另一方面,发挥其技术溢出效应,驱动高耗能工业部门实现能源强度剥离。结合多维度的环境绩效考核体系,将特高压引致的资源红利有效转化为内生性技术进步动力,最终实现生态环境效益与经济高质量增长的协同演变。

优化创新资源配置与产学研协同框架,提升特高压工程的技术转化效率。充分释放特高压建设带来的能源安全保障红利,引导人才、资本等创新要素向高端电力装备及可再生能源研发领域集聚。政府主导建立跨区域的绿色技术协同创新平台,强化特高压输电端与受电端城市在核心算法、关键材料等领域的联合攻关。通过完善知识产权转化与激励机制,将特高压的“物理连接”升华为“技术红利”的传导纽带,打破区域间的技术封锁,全面提升中国可再生能源产业的核心竞争力与技术自给率。

参考文献

[1] 易兰,田明甫,邹凡,等. 新能源汽车技术创新何以提升地区碳排放效率?——基于中国 274 个城市的实证分析[J]. 软科学,2025,39(7):89-96.

[2] 田明甫,曲信威. 极端气候对新能源汽车技术进步的影响及作用机制研究[J]. 干旱区资源与环境,2025,39(12):66-75.

[3] 国家能源集团技术经济研究院. 中国煤炭、电力和碳市场年度报告[M]. 北京:电子工业出版社,2024.

[4] 熊浩程,宋晓丽,张复宏. 绿色技术创新对碳生产率的空间效应分析[J]. 科技和产业,2025,25(24):180-189.

[5] 范宸瑄,曲波. 环境规制、绿色技术创新与制造业绿色转型[J]. 科技和产业,2026,26(3):106-112.

[6] 邵帅,范美婷,杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界,2022,38(2):46-69.

[7] JACOBSON L S, LALONDE R J, SULLIVAN D G. Earnings losses of displaced workers[J]. The American Economic Review, 1993, 83(4): 685-709.

[8] FERRARA E L, CHONG A, DURYEA S. Soap operas and fertility: evidence from Brazil[J]. American Economic Journal: Applied Economics, 2012, 4(4): 1-31.

[9] CALLAWAY B, SANTANNA P H. Difference-in-differences with multiple time periods[J]. Journal of Econometrics, 2021, 225(2): 200-230.

[10] BIASI B, SARSONS H. Flexible wages, bargaining and the gender gap[J]. The Quarterly Journal of Economics, 2022, 137(1): 215-266.

[11] CAO D, PENG C, YANG G. The pressure of political promotion and renewable energy technological innovation: a spatial econometric analysis from China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 183: 121888.

[12] LIN B, ZHU J. The role of renewable energy technological innovation on climate change: empirical evidence from China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 1505-1512.

[13] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济,2022(5):100-120.

[14] BABAYOMI O O, DAHORO D A, ZHANG Z. Affordable clean energy transition in developing countries: pathways and technologies[J]. iScience, 2022, 25: 33-43.

[15] YANG G, ZHANG G, CAO D, et al. A comprehensive city-level final energy consumption dataset including renewable energy for China, 2005—2021[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 738.

[16] 史丹，李少林. 排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J]. 中国工业经济，2020(9)：5-23.

[17] 蒙冰，张文飞，史怡涵，等. 绿色金融支持能源产业发展效率评价——基于超效率 SBM 模型的分析[J]. 科技和产业，2025，25(19)：170-176.

[18] 刘毅然，田明甫. 新型基础设施建设与地区碳排放效率——来自特高压输电工程的证据[J]. 生态经济，2026，42(3)：34-45.

[19] 张国兴，贾宇琪，保海旭，等. 环境规制与产业结构调整对能源消耗的影响[J]. 管理科学学报，2025，28(9)：1-12.

Impact of Cross-regional Power Grid Construction on Technological Progress in Renewable Energy

LIU Sitong

(Party School of Baoji Municipal Committee of CPC, Baoji 721000, China)

Abstract: With the continuous growth of China's energy demand and the advancement of "Carbon Peaking" and "Carbon Neutrality" goals, there is an urgent need for energy production and technological evolution. As a vital infrastructure for large-scale, cross-regional clean energy transmission, Ultra-High Voltage (UHV) power transmission projects play a key role in promoting the efficient flow of energy factors and green transformation. Taking the construction of UHV transmission projects as an exogenous shock, using panel data from 273 Chinese cities at the prefecture level and above from 2006 to 2023, a Staggered Difference-in-Differences (Staggered DID) model was employed to empirically analyze and verify the impact of UHV projects on technological progress in renewable energy. The results indicate that the construction of UHV transmission projects significantly promotes technological advancement in renewable energy, a conclusion remains valid after a series of robustness tests. Mechanism analysis reveals that UHV projects facilitate this progress through three primary channels including optimizing regional energy structures, reducing energy intensity and improving environmental performance.

Keywords: ultra-high voltage (UHV) transmission; technological progress; renewable energy