

统筹发展和安全视角下区域能源低碳转型的 内在逻辑与实现路径*

方洁 易佳慧 严珑婷

摘要:在“双碳”目标持续推进和能源安全问题日益凸显的背景下,区域能源低碳转型已成为中国推进高质量发展和维护经济安全的重要任务。本文从统筹发展和安全的视角出发,构建区域能源低碳转型分析框架,并从理论逻辑、历史演进和现实挑战三个方面展开分析。研究发现,近年来中国能源低碳转型持续推进,主要表现为可再生能源装机规模快速扩大、能源利用效率不断提升、非化石能源消费比重稳步提高。但受资源禀赋、产业结构和能源系统运行条件等因素影响,能源转型过程仍面临一系列约束,主要表现为煤炭依赖的路径惯性较强、能源资源与负荷需求空间错配、电力系统灵活调节能力不足、能源市场机制尚不健全、关键技术和储能支撑能力水平偏低,以及转型成本分担和社会公平问题尚未充分解决。基于此,本文提出,应在保障能源安全的前提下,进一步深化能源市场化改革,因地制宜推进区域转型,强化绿色低碳技术创新,并完善社会保障和公正转型机制,为推进能源革命、实现“双碳”目标和服务中国式现代化建设提供政策参考。

关键词:能源低碳转型;统筹发展和安全;区域协调发展

一、引言与文献综述

全球气候风险加剧、地缘政治冲突频发和能源市场波动加大,能源转型日益成为国际竞争与全球治理的重要议题。中国是世界主要的能源生产国和消费国,推进能源低碳转型不仅关系“双碳”目标实现,也关系能源安全和现代化产业体系建设。党的二十大报告提出“积极

*方洁,湖北经济学院碳排放权交易省部共建协同创新中心,邮政编码:430205,电子信箱:fangji@hbue.edu.cn;易佳慧,中国地质大学(武汉)珠宝学院,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,电子信箱:yijia-hui@cug.edu.cn;严珑婷,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,电子信箱:yltingg.16@gmail.com。

本文系国家社会科学基金项目“‘双碳’目标下新型基础设施影响企业碳减排的机理与政策研究”(22BTJ051)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

稳妥推进碳达峰碳中和”“深入推进能源革命”“确保能源安全”。近年来,我国围绕扩大新能源供给、推动化石能源有序替代和建设新型电力系统,不断完善政策体系。2025年,习近平主席在联合国气候大会上宣布新一轮国家自主贡献目标,提出到2035年,中国全经济范围温室气体净排放量较峰值下降7%~10%,非化石能源消费占能源消费总量的比重达到30%以上,风电和太阳能发电总装机容量达到36亿千瓦。2026年4月12日,中共中央办公厅、国务院办公厅发布《碳达峰碳中和综合评价考核办法》,将“双碳”目标完成情况纳入综合评价考核体系,通过明确评价指标、责任分工和结果运用,进一步强化政策实施。由此,能源低碳转型正由目标引领逐步转向全过程监测、评价和问责。在中国式现代化进程中,如何协调能源清洁低碳转型、经济社会平稳发展与能源安全,已经成为增强外部冲击应对能力、夯实高质量发展基础和提升全球气候治理能力的重要课题。

能源低碳转型是实现“双碳”目标的关键环节,随着能源转型持续推进,中国在可再生能源发展、能源结构优化和能效提升等方面取得明显进展。2024年,全国可再生能源新增装机达到3.73亿千瓦,占全球新增装机的一半以上;发电量达到3.46万亿千瓦时,约占全国发电量的35%;非化石能源消费比重提高至19.8%，“十四五”前四年能源消费强度累计下降约11.6%。但能源转型面临的结构性矛盾日益突出。一方面,以煤为主的能源结构短期内难以根本改变,2024年煤炭消费仍占能源消费总量的53.2%,另一方面,新能源大规模并网也对电力系统灵活调节和稳定运行提出了更高要求,能源资源与负荷中心空间错配也日益突出,随着产业链调整、就业转移和能源成本波动可能对经济社会平稳运行带来压力。

围绕能源低碳转型,现有研究主要集中在三个方面。第一类研究侧重于能源转型路径模拟与优化,重点分析不同能源技术组合、能源结构调整和减排情景下的成本与效果(马丽梅等,2018;黄震等,2022;Zhang & Chen, 2022;罗仕华等,2024;侯迅杰等,2025;蔡东等,2026)。第二类研究主要分析能源转型的影响因素和现实障碍,重点研究资源禀赋、制度环境、技术条件和政策工具对能源转型进程的作用(范英、衣博文,2021;刘平阔、卢存禹,2022;周艳晶、王高尚,2024;金之钧、张川,2024)。第三类研究则关注能源转型的经济社会影响,涉及产业结构调整、区域发展差异、就业变化和居民福利等方面(Carley & Konisky, 2020;李永武等,2023;梁栋等,2024;郑梓若等,2025)。现有研究已对能源转型的发展路径、影响因素与实施效应进行了相关分析,但是对能源安全、能源系统稳定和区域转型成本关注较少,因而较难充分解释低碳转型过程中效率提升、供给保障和经济稳定之间的关系。而且部分研究多围绕单一政策工具或单一目标展开,较少考虑对发展与安全、效率与公平、短期约束与长期目标之间的综合权衡,特别是在区域差异明显、外部环境不确定性增强的背景下,不同地区能源低碳转型面临的约束条件并不相同,亟需在识别区域差异和主要风险的基础上,形成更具针对性和可操作性的政策路径。基于此,本文从资源环境经济

学视角出发,构建以发展与安全为核心的区域能源低碳转型分析框架,系统梳理其发展逻辑和现实约束。本文的区域能源转型是指在多重目标约束下,统筹经济可行性、能源可靠性与社会可接受性的动态调整过程,而非单纯以减排为导向的能源替代,并重点考察发展目标与安全约束在区域层面的相互作用。

本文主要从四个方面展开分析。首先,界定统筹发展和安全视角下区域能源低碳转型的基本内涵,明确其目标约束、运行逻辑和分析边界。其次,从理论、历史和现实三个层面梳理中国区域能源低碳转型的发展逻辑,再次,结合中国能源转型实践,总结区域能源低碳转型的主要进展,并分析能源结构惯性、区域发展差异、市场机制不完善等现实障碍。最后,提出面向“十五五”时期推进能源低碳转型的政策建议。本文可能贡献主要体现在两个方面:第一,将发展和安全纳入统一分析框架,研究区域能源低碳转型的多目标协调,弥补既有研究偏重减排与效率。第二,立足中国不同区域的资源禀赋、产业基础和能源功能,识别能源低碳转型面临的主要障碍及其政策含义,为制定差异化政策提供依据。

二、能源低碳转型的内涵及逻辑

(一)统筹发展和安全视角的能源低碳转型的内涵

能源低碳转型并非简单的能源品种替代或结构调整,而是现代化进程中能源供给、产业发展和治理方式的深层变革。从统筹发展和安全的视角看,能源低碳转型不仅要实现节能减排和生态环境改善,还要兼顾经济稳定发展、能源产业链供应链稳定和社会公平。因此,能源结构优化和发展方式转变必须立足现实条件,并关注不同地区和群体在转型成本承担上的差异。相较于侧重技术经济可行性或环境效益的研究,能源低碳转型是强调在发展需求和安全约束的多重目标下持续调整和优化的动态过程。

从发展维度看,能源低碳转型是推动经济发展方式绿色转型的重要内容。其目标不仅是降低单位产出的能源消耗和碳排放强度,更在于通过技术创新、产业升级和制度完善,推动经济增长由高耗能、高排放模式转向创新驱动和效率提升。能源低碳转型旨在改变工业化进程中过度依赖资源消耗的粗放型增长方式,形成更加集约、高效和可持续的发展路径(孙博文, 2023)。这一过程既包括高耗能、高排放产业的绿色化和智能化改造,也包括新能源、储能、智能电网、节能环保等新兴产业的发展,同时还涉及绿色消费和公正转型机制的完善。因而,能源低碳转型的意义不仅体现在能源结构优化和碳排放下降,也体现在培育新的经济增长点、创造就业机会和形成新的竞争优势。

从安全维度看,能源低碳转型扩展了传统能源安全的内涵。传统能源安全主要关注煤炭、石油、天然气等能源供给是否充足、价格是否可承受。随着可再生能源比重提高,能源安全进一步延伸至电力系统稳定、转型成本承受能力、关键技术自主可控和产业链供应链

韧性等方面。其中,既要保障极端情景下的能源供应,也要应对波动性电源大规模接入对电力系统调节能力提出的新要求,同时防范能源转型成本过高以及核心装备、关键技术和关键矿产受制于人的风险。风能、太阳能等可再生能源的发展有助于减少对外部化石能源的依赖,但也可能增加对风电设备、光伏组件、储能电池及锂、钴、稀土等关键矿产的需求(Nijssse等,2023)。因此,能源低碳转型并不意味着传统能源迅速退出。在新能源尚未形成稳定可靠的替代能源之前,还需要发挥煤炭等传统能源在调峰、保供和应急保障中的作用,并通过源网荷储协同、新型储能、智能调度和跨区域优化配置,增强能源系统的稳定性与韧性(谢克昌,2022)。统筹发展和安全的核心是协调能源低碳转型中的发展目标与安全要求。化石能源过快退出可能削弱能源保供能力,较高的减排成本也会增加企业负担,影响经济平稳运行。但从长期看,发展和安全并非相互排斥。新能源技术进步、储能成本下降、电网投资扩大和产业链竞争力提升,有助于增强能源系统的可靠性、自主性和韧性;稳定的能源供应和安全的系统运行,也为经济发展与绿色转型提供了基本保障。因此,统筹发展和安全不是在增长、减排和安全之间作简单取舍,而是通过技术进步、制度完善和区域协调实现动态平衡。

在区域层面,统筹发展和安全要求根据资源禀赋、发展阶段和能源功能定位实施差异化政策。对于西部资源富集地区,应将资源优势转化为清洁能源供给优势,同时解决新能源基地开发过程中外送通道不足、储能和调峰能力滞后以及地方收益有限等问题。因此,需要统筹推进大型风电光伏基地、特高压输电通道、储能和调峰设施建设,并完善跨省电力交易、生态补偿和收益共享机制。对于东部负荷中心地区,应在保障电力稳定供应的基础上,提高本地清洁能源供给和消纳能力,发展分布式光伏、海上风电、智能电网、虚拟电厂和用户侧储能,并通过产业结构调整 and 节能改造降低转型成本。对于西部地区,应更加注重能源开发、输送和利益协调,东部地区则应着重提升能源消纳、系统调节和利用效率。二者通过区域协同,共同促进低碳发展与能源安全。因此,统筹发展和安全既是理解中国区域能源低碳转型的重要视角,也是制定差异化区域能源政策的基本依据。

(二) 新时代中国区域能源低碳转型的发展逻辑

1. 理论逻辑

从资源环境经济学视角看,中国区域能源低碳转型旨在缓解资源稀缺与环境外部性的双重约束,实现资源优化配置和社会福利提升。习近平新时代中国特色社会主义思想,特别是其中关于高质量发展、总体国家安全观和生态文明建设的重要论述,为中国区域能源低碳转型提供了根本指引。在此基础上,综合运用可持续发展理论和外部性理论揭示了能源低碳转型的内在动力与作用机制。习近平新时代中国特色社会主义思想为中国区域能源低碳转型提供了中国特色的理论基础和制度逻辑。高质量发展理念和生态文明思想将绿色低碳纳入

现代化建设全过程,要求通过生产生活方式转变、技术进步和制度创新,推动经济社会发展全面绿色转型,培育新的增长动能,实现人与自然和谐共生。在这一过程中,能源低碳转型不仅承担节能减排和环境改善任务,也为提升全要素生产率、发展新质生产力提供重要支撑。总体国家安全观则强调统筹发展和安全,将能源安全和生态安全纳入国家安全体系,要求在提高非化石能源比重的同时,增强能源保供能力、自主可控水平以及电力系统调节能力,稳步推进“双碳”目标。因此,中国区域能源低碳转型形成了绿色发展、创新驱动与安全保障相协调的基本逻辑,既遵循矫正环境外部性和提高资源配置效率的一般规律,也体现了统筹长期目标与现实约束、协调多重发展目标的中国特色发展路径。

可持续发展理论为能源低碳转型提供了价值导向。该理论强调经济、社会与环境协调发展,并兼顾代内公平和代际公平。以化石能源为主的能源体系虽然支撑了工业化进程,但也受到资源有限性和环境承载力的制约。过度消耗不可再生能源会压缩后代的发展空间,化石能源使用产生的碳排放和污染物还会造成气候变化、健康损害和生态破坏(严飞等,2025)。因此,能源低碳转型旨在通过发展清洁能源、提高能源利用效率,缓解经济增长与资源环境约束之间的矛盾。外部性理论从市场失灵角度说明了能源低碳转型的必要性。由于碳排放和环境污染造成的社会成本未能充分计入能源价格,市场主体容易过度使用高碳能源,而清洁能源和低碳技术投资则可能不足,进而造成资源错配和社会福利损失。碳税、碳排放权交易等政策工具通过将环境成本内部化,促使企业减少高碳能源使用、增加低碳投资,引导资源向清洁高效领域流动。因此,能源低碳转型不仅关系环境改善,也是纠正市场失灵、提高资源配置效率的重要途径。

2.历史逻辑

从改革开放以来的现代化进程看,中国区域能源低碳转型经历了由供给保障、效率提升到绿色低碳与安全协同的发展阶段。从改革开放到20世纪末,能源发展的主要任务是支撑工业化和经济增长,政策重点在于扩大煤炭、石油等常规能源供给,并依托山西、东北等资源富集地区建设大型能源基地,逐步形成跨区域能源配置格局。这一阶段形成的能源供给模式支撑了工业扩张和区域开发,但也强化了以煤为主的能源结构,带来了能源利用粗放、环境压力加剧和区域分工路径依赖等问题。

进入21世纪后,随着工业化和城镇化加快推进,能源需求持续增长,资源环境约束与能源安全压力不断上升,能源政策开始由供给扩张转向供给保障、效率提升和污染治理并重。“十一五”时期,单位国内生产总值能耗下降和主要污染物减排被确立为约束性指标,节能减排成为转变经济发展方式和调整经济结构的重要抓手。因此,中国能源治理改变以增长为主要导向,将资源环境约束、技术进步和可持续发展要求纳入政策体系,为低碳转型奠定了制度和实践基础。

党的十八大以来,中国能源发展进入以高质量发展为导向的新阶段。2014年提出的“四个革命、一个合作”能源安全新战略,将能源治理由侧重供给保障扩展为消费、供给、技术、体制改革和国际合作协同推进的系统框架。2021年,碳达峰、碳中和纳入经济社会发展全局,能源绿色低碳发展被列为实现“双碳”目标的关键任务。2022年印发的《“十四五”现代能源体系规划》明确了大型风电光伏基地、新型电力系统、新型储能和氢能等重点发展方向。2024年,《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》和《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》相继出台,绿色转型由能源领域拓展到经济社会发展全过程,可再生能源安全可靠替代的重要性进一步提升。自2025年1月1日起施行的《中华人民共和国能源法》,从法律层面确立了保障能源安全、促进绿色低碳转型、推动科技创新、完善能源市场和健全储备应急制度的基本框架。由此,区域能源低碳转型已从应对资源环境约束的政策选择,逐步上升为推动高质量发展、增强能源安全保障能力和提升国际竞争力的重要战略。

3.现实逻辑

进入新发展阶段,中国区域能源低碳转型面临更加复杂的内外部环境,主要来自能源安全约束、国际竞争压力和民生改善需求三个方面。首先,保障国家能源安全对能源低碳转型提出了现实要求。地缘政治冲突、大国博弈和贸易保护主义加剧了全球能源市场波动,国际油气供应的不确定性明显上升。中国油气资源对外依存度较高,海上运输通道也面临潜在风险,传统能源供应格局在一定程度上制约了能源自主保障能力。因此,加快开发风能、太阳能等国内可再生能源,构建新能源与传统能源协同互补的新型能源体系,有助于降低对进口化石能源的依赖,增强能源供应的自主性和抗风险能力。其次,能源低碳转型是把握新一轮科技革命和产业变革机遇的重要途径。新能源、新材料、人工智能和大数据等技术加快与能源系统融合,正在重塑全球产业链、供应链和价值链。新型储能、智能电网、数字化调度、氢能和需求响应等技术,不仅能够缓解风电、光伏需求波动带来的消纳压力,还能提高电力系统应对极端天气、负荷变化和外部冲击的能力。随着绿色规则日益融入国际贸易和产业竞争,中国需要发挥超大规模市场、完整产业体系以及光伏、风电和动力电池等产业优势,以技术创新推动产业升级,将低碳转型转化为新的国际竞争优势。因此,能源低碳转型既是履行国际减排责任的需要,也是提升能源保障能力和产业竞争力的重要路径(韩超、崔敏,2022)。

满足人民群众对优美生态环境和健康生活的需求,为能源低碳转型提供了持续动力。传统的高耗能、高污染发展方式带来了空气污染、生态破坏等问题,对居民健康和生活质量造成不利影响。能源低碳转型通过减少化石能源消费和污染物排放,可以协同推进应对气候变化与环境治理。散煤治理、清洁供暖和新能源汽车推广等措施,也与居民日常生活和健康福祉

密切相关。因此,能源低碳转型既是国家战略任务,也是改善民生的重要内容,有助于推动生态文明建设成果更多更公平地惠及全体人民,体现以人民为中心的发展导向(成金华等, 2024)。

三、中国区域能源低碳转型的实践与挑战

(一) 中国区域能源低碳转型的实践

在全球能源转型加速推进的背景下,中国区域能源低碳转型既体现出可再生能源扩张、电气化提升、储能发展和电网升级等国际共性趋势,也形成了符合自身发展阶段、资源禀赋和能源安全要求的实现路径。不同于欧盟依赖能源目标约束、碳市场和跨境基础设施建设,美国采用税收激励和产业政策带动清洁能源投资,中国在“双碳”目标引领下,逐步形成了顶层规划、基础设施建设、产业政策支持和区域差异化实施相结合的能源转型模式。

从区域能源低碳转型的实践看,中国能源转型主要表现为新能源规模扩张、产业链能力提升和分区推进的特征。到2025年,中国可再生能源装机量达到23.4亿千瓦,约占全国电力总装机的60%;风电和太阳能发电合计装机量达到18.4亿千瓦^①,首次超过火电装机规模,说明新能源在能源体系中的地位正在由补充性能源向主体性能源转变。区域层面,西北、华北等资源富集地区主要承担大型风电光伏基地建设和清洁能源外送功能;东部沿海负荷中心地区更注重提高本地清洁能源供给能力和终端消纳水平;西南地区则依靠水电基础设施推进水风光一体化开发。这种分区推进格局,反映出中国能源资源空间分布不均、资源基地与负荷中心错位以及区域发展水平差异等现实问题。

同时,中国能源转型并未采取简单的“去传统能源化”的路径,而是将能源安全贯穿低碳转型全过程。一方面,通过煤电清洁高效利用和灵活性改造,维持电力系统调峰和能源保障能力;另一方面,依托跨省跨区输电通道、区域主网架、新型储能、数字化调度和绿证交易等措施,提升能源优化配置能力和能源系统韧性。截至2025年,全国新型储能装机达到1.36亿千瓦^②,较2024年底增长84%,为新能源消纳、顶峰保供和系统稳定运行提供了支撑。总体而言,中国区域能源低碳转型并不是对国际经验的简单移植,而是在资源禀赋、发展阶段和安全要求约束下,依靠新能源规模化发展、系统调节能力建设和区域协同配置,在保障能源安全和经济平稳运行的基础上推进低碳发展。

(二) 中国区域能源低碳转型的挑战

尽管中国区域能源低碳转型已取得显著进展,但在统筹发展和安全的背景下,仍面临

①数据来源于国家能源局。

②数据来源于国家能源局, <https://www.nea.gov.cn/20260212/742b8c6a078347b0b39de676c05c5d58/c.html>。

能源结构调整、系统安全保障、区域协调和转型成本分担等多重挑战。这些挑战与中国的资源禀赋、发展阶段和区域差异密切相关,也是进一步深化能源转型的关键制约。煤炭依赖与新能源稳定性不足是能源绿色低碳转型的核心矛盾。中国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋决定了煤炭在较长时期内仍具有能源安全保障作用。虽然煤炭消费占比持续下降,但仍保持在较高水平,高碳锁定效应使能源结构调整面临较大压力。与此同时,风电、光伏等新能源具有间歇性、波动性和随机性,大规模并网对电力系统实时平衡、灵活调节和安全运行提出更高要求。当前,抽水蓄能、燃气电站和新型储能等灵活性资源仍需提升,部分地区和时段仍存在新能源消纳能力不足的问题。因此,如何在保障电力可靠供应的前提下逐步降低煤电依赖,并构建适应高比例新能源接入的新型电力系统,是当前亟需解决的技术和体制难题。

区域发展不平衡加大了能源转型的协调难度。中国能源资源与负荷中心呈现明显逆向分布格局,西北地区风光资源丰富,但经济规模较小、本地消纳能力有限;东部沿海地区能源需求集中,却缺乏充足的本地清洁能源资源(赵守国、徐仪嘉,2022)。由此形成的大规模跨区域电力输送,不仅需要较高的基础设施投资,也引发电价形成、成本分摊、责任划分和利益补偿等复杂问题。同时,山西、内蒙古等传统能源大省在转型过程中面临产业重塑、财政收入下降和就业调整压力,其能源转型负担明显高于新兴产业基础较好的地区(董秋霞等,2022)。因此,建立合理的区域协调机制和利益补偿机制,防止转型成本在地区之间不均衡分布,是实现全国能源转型协同推进的关键。

能源低碳转型增加了能源安全风险复杂性。传统能源安全主要关注化石能源供应中断和价格波动,随着新能源和储能产业快速发展,风险来源逐步转向关键技术、产业链供应链、关键矿产和网络安全等领域。在新能源和储能技术环节,高端轴承、控制芯片、催化剂等关键零部件和材料仍存在较高的对外依赖,可能引发新的技术风险。而且风机、动力电池等产品制造又高度依赖稀土、锂、钴、镍等关键矿产,全球关键矿产竞争加剧进一步增加了供应链不确定性(成金华等,2021)。此外,新型电力系统的智能化和网络化水平不断提高,系统运行对数据、通信和调度平台的依赖增强,网络安全风险也随之上升。因此,能源低碳转型不能仅关注清洁能源替代,还需要同时提升能源供给保障、关键技术攻关、产业链供应链稳定、关键矿产安全和网络安全防护能力。

转型成本及其公平分担,是区域能源低碳转型中难以回避的问题。能源生产、输配和消费体系的全面改造需要长期、大规模投入,但资金来源以及政府、企业和居民之间的分担机制尚不完善(Markard,2018)。转型成本过快传导至能源价格,会加重居民和中小企业负担,影响经济平稳运行。同时,煤炭、钢铁等高碳行业调整会带来就业转移、收入下降和地方财政压力,低收入群体也会因清洁能源设备购置费用较高或能源价格上涨而陷入能源贫困。因此,

应完善公正转型政策、社会保障和再就业支持机制,合理分担转型成本,推动转型收益公平共享。总体而言,区域能源低碳转型不仅要保障能源系统平稳运行,还需妥善处理成本分担、就业调整和社会公平等问题。

四、统筹发展和安全视角下的区域能源低碳转型的成效评估

(一)区域能源低碳转型的成效

在统筹发展和安全的框架下,中国区域能源低碳转型已经在经济动能培育、能源消费结构优化、能源技术创新等方面取得明显成效。从经济发展的角度,绿色低碳产业逐渐成为经济高质量发展的重要支撑。在产业政策的持续支持下,中国在光伏、风电、新能源汽车和动力电池等领域形成了较为完整的产业链,不仅降低了清洁能源应用成本,也带动了新材料、高端装备制造和信息技术等新兴产业发展,形成了新的经济增长点,例如:长三角地区由于具有较好的制造业基础和创新能力,形成了新能源汽车产业集聚优势,内蒙古、新疆等新能源资源富集地区将新能源产业作为地方经济转型的重要支撑。由此可见,能源低碳转型不仅仅是环境约束下的被动调整,也逐渐成为推动产业升级和培育新增长点的重要力量。

在区域能源消费结构方面,各地区普遍呈现煤炭占比下降、电力占比上升的趋势,但能源转型速度和幅度存在明显差异^①。其中,东部和中部能源消费结构转型增速较快,煤炭消费比重分别由2000年的49%和38%降至2022年的18%和19%,电力消费占比则由2000年的17%升至49%,电力逐步成为主要终端能源。在城市层面,北京的能源消费变化突出,煤炭消费量由2000年的2719.78万吨降至2019年的182.8万吨,降幅达到93.279%。体现了超大城市在减少燃煤和推进终端用能电气化方面的显著成效。相比之下,东北和西部煤炭占比分别下降约10%和8%,电力占比分别提升约12%和10%,但煤炭仍是主要能源类型,说明其能源转型仍受资源禀赋、产业结构和供能体系惯性的制约。总体来看,中国能源消费结构正由以化石能源为主导,逐步转向更加多元、均衡和低碳的格局。

在区域电力消费结构方面,各地区可再生能源电力规模不断增长。图1反映的是各地区可再生能源发电量。从图中数据可以看出^②,近10年来,全国各地区可再生能源电力平均增长了1.79倍,其中太阳能发电增长117倍,风电增长6.4倍,水电增长77.4%。可再生能源发电量占比也由2012年的19.3%提高至2022年的28.8%。从空间分布来看,西部地区具有风光水资源优势,可再生能源发电量长期保持领先,2022年发电量达到5.596亿千瓦时,其次是东部、中部和东北地区。在2000—2009年各地区可再生能源发电主要依赖水电,2010年后风电和

^①数据来源:根据《中国能源统计年鉴》数据测算。

^②数据来源:基于《中国电力统计年鉴》数据测算。

光伏进入快速发展阶段。其中,东部地区年均增速最快,达到18.92%,并于2021年超过西部,成为可再生能源发电量最高的地区,反映出负荷中心地区在分布式光伏、海上风电开发和消纳体系完善方面具有较强的发展优势。

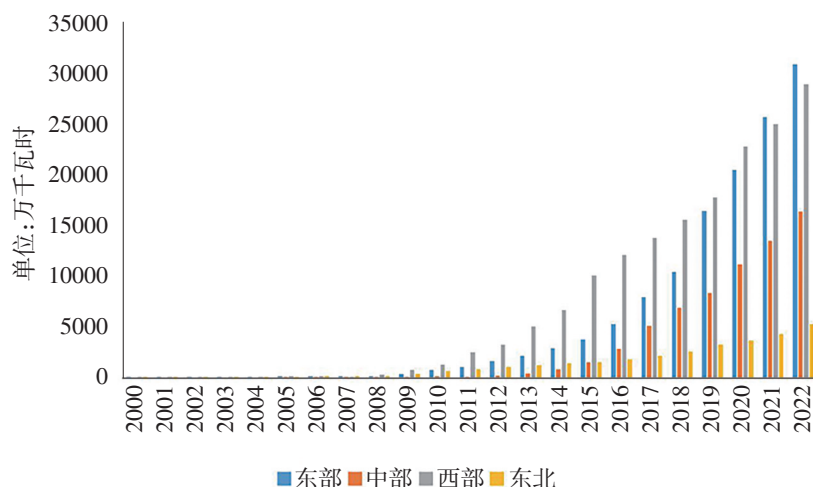


图1 2000—2022年各地区可再生能源发电量

在区域能源转型技术创新方面,我国持续加强能源科技创新,围绕清洁高效能源利用部署重大科技项目,并在太阳能、风能、氢能和储能等领域推进技术试验与应用模式探索,逐步形成覆盖水电、风电、光伏等领域的清洁能源装备制造体系。近20年来,能源转型相关专利数量整体增长明显,其中发明专利增速较快,实用新型专利增长相对平缓^①。以重庆为例,能源转型相关专利数量由2000年的7项增至2024年的3226项,增长459.86倍,反映出地方能源技术创新能力的快速提升。从专利类型看,2000年除北京和海南外,多数省份的发明专利数量低于实用新型专利,说明能源技术创新初期主要集中于投入较少、风险较低的渐进式创新。随着国家科技政策导向由“十五”时期强调技术进步和机制创新,逐步转向“十四五”时期面向绿色低碳转型强化基础性、原创性和颠覆性研究,地方能源技术创新也从数量扩张逐渐转向质量提升。到2024年,所有省市的发明专利数量均超过实用新型专利,说明突破性创新在地方能源转型中的地位进一步提升。从区域差异看,2005年以前各地区能源转型相关专利数量普遍较低,此后发明专利和实用新型专利均进入较快增长阶段。其中,发明专利的区域分化更为明显,东部地区保持领先,其专利数量为中部地区的3.86倍,西部和东北地区相对滞后,东北地区仅相当于东部地区的5.714%。实用新型专利在2020年达到峰值后逐步回落,但西部地区长期保持较高水平,说明在资金和技术能力相对受限的情况下,西部地区更倾向于选择研发门槛较低、风险较可控的实用新型创

^①数据来源:基于国家知识产权局的数据进行汇总测算。

新路径。

从能源安全的角度来说,能源转型是国家能源自主保障能力提升和能源供应体系韧性增强的重要体现。通过大力发展非化石能源,中国在很大程度上降低了对进口油气资源的依赖程度,在电力部门中,风电、光伏发电的迅速发展替代了部分燃煤发电和天然气发电,使能源供应具有更强的内生性和稳定性。尤其在地缘政治冲突加剧和国际能源市场剧烈波动的情况下,能源转型的战略意义就显得至关重要。通过促进能源基础设施现代化升级和完善全国统一电网布局,大大提高了能源资源在全国范围内优化配置的能力,实现了西电东送、北电南送的规模化和常态化运营,有效缓解了东部地区能源供需矛盾,提升了整个国家能源系统的互济互保能力。储能设施和智能电网技术的迅速发展,正在逐步解决新能源发电的波动性问题,提高了电网接纳高比例可再生能源的能力。相比于传统的单一能源体系,多元化、智能化、网络化的新型能源供应体系更有利于抵御局部供应中断、极端天气事件等外部冲击,为国家经济社会发展提供更加坚实可靠的能源保障。

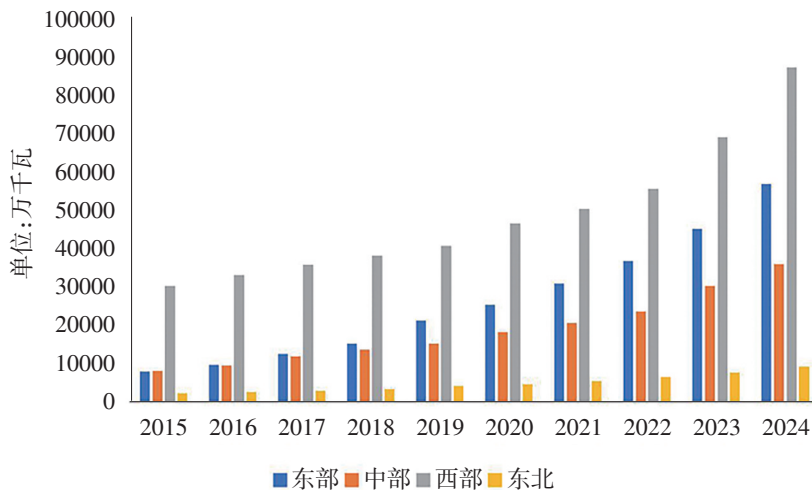
从区域协调发展角度看,能源低碳转型正在改变中国的区域经济发展,成为促进区域优势互补、协同发展的重要纽带。传统能源流动模式固化了资源产地和消费地的分工,新能源转型又带来了更多的区域互动关系。西部地区通过向东部输送绿色电力,既能培育新的经济增长动能,也能为生态保护和可持续发展提供资金支持,推动生态优势转化为发展优势。东部地区通过使用西部绿电,在满足能源需求的同时分担减排责任,并将技术、资本和管理优势向西部辐射,形成区域间的良性互动。能源转型也催生了新的跨区域产业合作模式。“东数西算”工程依托西部丰富的绿色能源,为东部提供算力服务,既有助于降低数据处理成本和碳排放,也为西部数字经济发展开辟了新的空间。以能源流为纽带,信息流、资金流和技术流加快在区域间优化配置,有助于打破行政区划壁垒,促进全国统一大市场建设,并为构建新发展格局提供有力支撑。

(二)区域能源低碳转型的障碍

尽管区域能源低碳转型已取得阶段性进展,但在统筹发展和安全、效率与公平、减排与增长等多重目标约束下,其深入推进仍面临市场、技术、制度与社会等多方面障碍。这些发展障碍并非孤立存在,而是在实践过程中相互交织、相互强化,进而构成制约能源转型深化的重要因素。与此同时,区域差异日益凸显,新疆新能源装机达到1.61亿千瓦,占总装机比重接近60%;甘肃新能源装机达到8041.56万千瓦,占比超过64%;广东新能源装机达到7973万千瓦,占比超过30%^①。西部地区已成为新能源规模化开发和跨区域输送的主要地区,东部地区则侧重高负荷消纳、系统调节和终端用能绿色转型。由于功能定位不同,各地区面临的能源转

^①数据来源于《中国电力统计年鉴》和各省份的能源局。

型约束也存在明显差异。



注：数据来源于《中国电力统计年鉴》。

图2 2015—2024年各地区可再生能源发电装机容量

第一,能源市场机制尚不完善,价格信号扭曲削弱了低碳转型的经济激励。近年来,我国能源市场化改革持续推进,但部分关键环节仍有待完善。当前,电力中长期交易机制已基本建立,但能够反映实时供需变化、系统调节需求和灵活性价值的现货市场、辅助服务市场仍处于完善过程中,全国统一、规则清晰、衔接顺畅、运行高效的能源市场体系尚未完全形成。同时,风电、光伏等可再生能源的优先消纳机制和收益形成机制仍不健全,火电灵活性改造、储能等调节性资源在容量支撑、调峰调频等方面的服务价值尚未得到合理定价和补偿,影响了资本和要素向绿色低碳领域流动。

从区域差异看,西部能源输出地区的市场约束主要表现为外送通道、跨区域交易规则和收益实现机制不匹配。2025年,新疆外送电量达到1412.99亿千瓦时,其中新能源外送443.82亿千瓦时,占外送总量的31.41%。截至2025年10月底,甘肃外送电量达到645亿千瓦时,新能源外送比例为54%。这说明,西部地区新能源项目收益高度依赖跨区域市场规则、外送通道利用率和辅助服务补偿机制。相比之下,东部地区的市场约束更多表现为分布式资源大规模接入后的市场化消纳不足,以及灵活性价值补偿不到位。截至2025年5月底,江苏分布式光伏装机达到5800.03万千瓦,已成为新能源快速增长的主体。广东新能源装机占比达到30%的同时,海上风电、分布式光伏和用户侧资源加快扩张,对需求响应、虚拟电厂和辅助服务市场提出了更高要求。总体来看,西部地区的主要约束在于外送能力、市场衔接和收益实现机制不匹配,东部地区则面临能源系统调节成本上升和灵活性价值补偿不足的问题。

第二,关键技术瓶颈与能源基础设施适配不足,已成为能源转型深化的重要制约。虽然

我国在光伏、风电等可再生能源领域已形成较强国际竞争力,但在长时储能、重型燃气轮机、氢能、核能、碳捕集利用与封存低成本化等领域仍存在技术短板。这些技术不仅关系到新能源大规模并网消纳,也关系到电力系统长期稳定运行和工业等难以减排部门的深度脱碳。同时,现有能源基础设施特别是电网系统,主要适应传统集中式和可预测电源,难以充分匹配新能源分布式、波动性和互动性增强的运行特征。

从区域实践看,西部地区的技术障碍主要表现为新能源基地开发进度与外送、储能和调峰能力建设不匹配。截至2025年11月底,甘肃风光装机达到7763万千瓦,占总装机的64%。与此相对应,甘肃省间电力交换能力虽已达到4630万千瓦,但新能源规模快速增长仍对外送通道和系统调节能力形成较大压力。东部地区的主要问题则是终端接入规模扩张与配电网、调度能力建设不协调。江苏新能源装机已超过1亿千瓦,广东新能源装机占比达到30%,表明配电网承载能力、分布式资源调节能力以及需求侧协同能力,正在成为新的技术瓶颈。总体而言,西部地区突出表现为新能源基地开发与调峰、外送能力建设衔接不足,东部地区则表现为终端接入扩张与配电网改造、系统调度升级不匹配。

第三,体制机制壁垒和地区利益固化,是影响能源转型协同推进的重要制度障碍。当前,能源管理体制仍存在一定程度的“条块分割”问题,电力、煤炭、油气等不同能源品种分属不同部门管理,跨能源品种的协同规划和综合优化难度较大。中央与地方在能源项目审批、规划布局、税收分配和责任承担等方面的权责边界仍需进一步理顺,政策碎片化和执行衔接不畅问题依然存在。尤其在煤炭依赖地区,煤炭不仅是资源禀赋优势,也是地方财政收入、工业增加值、就业体系和国有企业运行的重要支柱。由此形成的地方政治经济结构,使地方政府在能源转型过程中需要承担稳增长、保就业、保供给和防风险等多重压力。

从区域比较看,西部送端地区的制度性障碍主要体现在跨区域利益分配和调峰责任分担机制不健全。2025年,新疆外送电量连续六年突破千亿千瓦时,甘肃绿电已输送至全国26个省份。西部地区在承担资源开发和生态环境成本的同时,也为跨区域清洁能源供应提供了重要支撑,但收益回流、生态补偿和跨省电力交易机制尚不完善。相比之下,煤炭依赖地区面临的转型约束更为突出。2025年,内蒙古能源领域重大项目计划完成投资3600亿元,能源行业税收收入占全区工业税收的44.5%,表明能源产业仍是地方经济和财政收入的重要支柱。煤炭依赖地区需要在新能源发展与传统能源稳产保供之间保持平衡,因而更倾向于采取渐进式转型路径,也提高了跨区域协同推进能源转型的制度成本。

第四,社会观念惯性和公正转型的复杂性构成能源低碳转型的重要社会障碍。长期以来,社会公众已习惯稳定、低成本的化石能源供应,对能源转型带来的电价波动、就业调整 and 生活方式变化认识不足,接受程度也有待提高。绿色低碳消费理念尚未充分转化为社会共识和自觉行动,需求侧转型动力仍显不足。更深层的矛盾在于,能源转型涉及不同地区和群体

之间的利益调整。煤炭依赖地区在推动能源结构转型的同时,还需重构地方产业、财政和就业体系(甘行琼等,2022);东部负荷中心地区则主要面临终端用能成本上升、需求侧管理加强以及绿色生活方式转变带来的社会适应问题。

由此可见,区域能源低碳转型的社会障碍具有明显的空间差异。西部地区主要表现为能源替代产业培育不足和就业转移困难,东部地区则主要表现为成本传导压力和公众接受问题。若缺乏有效的社会保障、再就业培训和替代产业培育,低碳转型可能在部分地区演变为就业收缩和发展机会减少,并形成新的能源转型脆弱群体。因此,能源转型能否获得持续而广泛的社会支持,不仅取决于技术进步和制度优化,也取决于公正转型治理能力和利益协调能力。

五、中国区域能源低碳转型的政策实现路径

中国区域能源低碳转型促进高质量发展与能源安全协调发展。其重点并不仅是调整能源结构,还涉及区域分工、利益关系和治理方式的调整。由于各地区在资源禀赋、能源基础设施、产业结构、财政能力和技术基础等方面存在差异,能源转型成本、收益分配和风险承担也呈现出明显的区域不均衡。如果政策协调不足,低碳转型在提升能源系统效率的同时,可能进一步加大能源输出地与输入地、资源型地区与消费型地区之间的发展差距。因此,政策制定应该更加关注区域利益的协调,在提高转型效率的基础上,合理处理成本分担、收益共享和能源安全之间的关系,推动区域能源转型更加平稳有序。

第一,构建多元协同的能源安全保障体系,是夯实区域低碳转型基础的前提。能源安全既是经济社会平稳运行的基本条件,也是低碳转型持续推进的重要支撑(孙即才 & 蒋庆哲, 2021),因此应将其嵌入区域能源转型全过程,统筹推进能源供给、跨区输送、系统调节、技术支撑和战略储备等环节建设。在供给方面,应坚持“先立后破”,在新能源替代能力逐步形成的基础上有序推进煤炭消费减量替代。在清洁能源富集地区应扩大风电、光伏、水电等开发规模,提升消纳能力、稳定能力和系统调节能力,并统筹发展核电、生物质能、地热能等多元清洁能源。在东中部负荷中心地区应加强调节性电源、储能设施和需求响应能力建设,提高本地消纳和负荷调节能力,降低对跨区域输入电力的单向依赖。在新能源尚未形成可靠替代能源的背景下,煤炭仍需发挥保供和调峰的基础性作用,因此应推动其清洁高效利用。同时,应完善跨省跨区输电通道、区域主网架和配电网建设,围绕新型储能、氢能利用、先进电网等关键领域加快技术攻关,并结合区域能源结构和风险特征,健全煤炭、石油、天然气和电力储备制度,以提升能源系统的韧性。

第二,深化能源市场化改革与碳定价机制建设,是提升能源转型效率并兼顾公平的重要制度基础。应以建设全国统一、规则透明、竞争有序的能源市场为重点,加快推进中长期

市场、现货市场和辅助服务市场衔接,完善容量补偿和灵活性资源市场化定价机制,使新能源、储能、灵活煤电和需求响应等主体能够获得与其系统价值相匹配的收益,更好发挥价格信号在资源配置中的引导作用。市场建设需要稳步扩大全国碳排放权交易市场的行业覆盖范围,逐步把钢铁、建材等高耗能行业纳入统一的监管及交易体系,持续推进配额分配、履约约束以及监管执法机制改革,增强碳市场中碳价信号作用(方洁,2023)。同时要稳妥推进能源价格改革,调整化石能源的显性及隐性补贴,让能源价格更真实地反映市场供求、资源稀缺程度和环境损害成本,逐步形成电力市场以及碳市场相协调的价格机制。还需要关注统一电价以及碳价信号对不同地区可能造成的非对称冲击,对煤炭依赖度较高、替代产业尚未成熟的地区实行阶段性过渡安排、差异化配额分配及设立专项能源转型扶持基金,对承担清洁能源供给和生态保护责任较重的地区,推进绿电交易、财政转移支付及生态补偿等机制以增强转型激励,同时采用税收优惠、绿色信贷和投资补贴等工具,促进资本持续流向绿色低碳领域。

第三,实行差异化区域转型战略,健全跨区域合作以及利益共享机制,是助推区域能源低碳转型协调发展的核心。不同地区在资源禀赋、发展阶段、产业结构、能源供给功能以及转型承压能力等方面都具有显著差异,能源低碳转型不能依赖同质化政策推进,而应在统一战略框架下坚持因地制宜和区域协同。从不同区域来看,西北、华北等可再生能源富集地区,应建设大型清洁能源基地,统筹推进风电、光伏、水电、火电与储能协同开发及跨区域外送,同步建立与清洁电力输送相配套的利益共享机制,使能源输出地可以通过电力收益分成、产业协作、基础设施共建、生态补偿以及财政转移支付等方式分享绿色转型收益。东部沿海等负荷中心地区,需要在推进本地能源清洁化水平的同时,承担更多绿色电力消费和转型成本分担责任,主动发展分布式能源、海上风电、核电等清洁能源,探究需求响应、虚拟电厂和综合能源服务等新形式,提升能源利用效率及清洁能源消纳能力。在山西、内蒙古等传统能源基地,应该在保障国家能源安全的前提下,推进从单一化石能源供给向综合性现代能源产业体系转变,重点开展煤电灵活性改造、煤炭清洁高效利用、新能源、储能、绿氢、碳汇以及替代性产业。同时,需要围绕输电通道建设、绿电交易规则、调峰责任分担、收益共享方式以及生态补偿标准等建立常态化跨区域合作机制,实现区域优势互补、分工协作和利益共享,防止因区域利益失衡造成新的发展差距。

第四,提升绿色低碳技术创新能力和产业升级水平,是提高能源转型质量的关键。能源低碳转型不仅取决于关键技术能否取得突破,也取决于产业能否形成有效承接和规模化应用。为此,需要把基础研究、技术研发、示范应用和产业化推广衔接起来,并结合不同地区的发展基础分类推进。对于创新资源较为集中、技术基础较好的地区,可围绕新型储能、氢能、先进电网装备和低碳工业技术等领域布局创新平台和示范工程,推动高校、科研院所和企业

联合攻关,增强绿色低碳技术自主供给能力。在储能领域,可进一步拓展电化学储能在调频、削峰填谷和分布式能源配套中的应用,探索氢能储存在长周期调节和多能协同中的应用场景,从而提高电网稳定性和可再生能源消纳能力。对于资源型地区和传统工业地区,政策重点则应放在成熟技术推广和替代产业培育上。通过专项补贴、税收优惠、绿色信贷、政府采购和示范项目等方式,降低企业采用低碳技术和更新设备的初始成本,推动煤炭、钢铁、建材等传统产业绿色化改造。同时,还需加强能源转型政策与产业政策的衔接,培育新能源汽车、绿色建筑、循环经济等下游绿色产业,以需求侧绿色转型带动能源供给结构优化,并通过数字技术与能源产业融合,提高能源系统调度、监测和协同配置能力。

第五,完善公正转型和社会保障政策,是提高区域能源转型社会承受能力的重要条件。区域能源低碳转型不仅改变能源结构,也会影响就业结构、地方财政和不同群体之间的利益分配。因此,公正转型不应停留在原则层面,而应嵌入政策制定和实施过程。对于资源型地区和受冲击群体,可建立专项帮扶机制,统筹中央转移支付、产业转型基金、就业培训和社会保障政策,重点支持煤炭依赖地区和传统能源产业集中地区平稳转型。对传统能源行业转岗劳动者,应完善职业技能培训、就业服务、失业保险和基本生活救助,并推动职业教育资源与区域新兴产业发展相衔接,提高劳动者再就业和职业转换能力。在推进能源价格改革时,也需要充分考虑低收入群体的承受能力,通过精准补贴、能源福利和公共服务支持等方式,防止能源贫困扩大。对于转型压力较大的地区,可综合运用财政奖补、税费减免和专项债支持等工具,引导地方培育替代性产业和就业吸纳能力较强的绿色产业,增强转型地区的内生发展能力。同时,还应加强能源转型宣传教育,提高公众对绿色低碳发展的理解和认同,逐步形成较为合理的成本分担机制和收益分享机制,为区域能源低碳转型提供持续的社会支持。

参考文献:

[1] 蔡东,张国兴,聂龔. 多维效用博弈视角下能源转型方案的执行与监管策略研究[J]. 系统工程理论与实践,2026,46(2):690-706.

[2] 董秋霞,董樊丽,耿涌,等. 碳达峰碳中和背景下内蒙古绿色低碳发展的路径和对策建议[J]. 科学管理研究2022,(6):77-83.

[3] 范英,衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界,2021,37(08):95-105.

[4] 甘行琼,许启凡,袁一杰. 区域工业绿色转型试点、财政压力与制造业低碳发展[J]. 财政研究,2022(09):104-119.

[5] 缙迅杰,徐鑫茹,徐泽水. 基于动态社会网络的能源转型路径评估多属性群决策建模研究[J]. 中国管理科学,2025,33(06):346-359.

[6] 韩超,崔敏. “双碳”目标约束下的高质量发展:内在冲突、机遇与应对[J]. 天津社会科学,2022(04):83-92.

- [7] 黄震,谢晓敏,张庭婷.“双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(06):8-18.
- [8] 金之钧,张川. 面向碳中和的中国能源转型路径思考[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(04): 767-774.
- [9] 李永武,王宝玲,王雅实,等. 能源转型的宏观经济效应——基于 DSGE 和面板模型的双重检验[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(11): 3069-3093.
- [10] 梁栋,刘宇,张硕. 低碳能源转型对收入不平等的影响——来自中国城市面板数据的证据[J]. 资源科学, 2024, 46(09): 1753-1767.
- [11] 刘平阔,卢存禹. 中国能源转型路径选择的影响因素:理论检验与实证分析[J]. 中国软科学, 2022 (06): 51-61.
- [12] 罗仕华,胡维昊,刘雯,等. 中国 2060 碳中和能源系统转型路径研究[J]. 中国科学:技术科学, 2024 (01): 43-64.
- [13] 马丽梅,史丹,裴庆冰. 中国能源低碳转型(2015—2050):可再生能源发展与可行路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(02): 8-18.
- [14] 孙博文. 加快发展方式绿色转型:内在逻辑、任务要求与政策取向[J]. 改革, 2023(10): 60-73.
- [15] 孙即才,蒋庆哲. 碳达峰碳中和视角下区域低碳经济一体化发展研究:战略意蕴与策略选择[J]. 求是学刊, 2021(05): 36-43+169.
- [16] 谢克昌. 面向 2035 年我国能源发展的思考与建议[J]. 中国工程科学, 2022, 24(06): 1-7.
- [17] 赵守国,徐仪嘉. 我国西北地区碳达峰碳中和实现路径研究[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2022(04): 87-97.
- [18] 郑梓若,朱镛达,王彦. 能源转型、技术升级与企业就业吸纳[J]. 技术经济与管理研究, 2025(12): 85-92.
- [19] 周艳晶,王高尚.“双碳”目标下中国光伏产业需求预测[J]. 地球学报, 2024, 45(06): 1033-1042.
- [20] 成金华,易佳慧,吴巧生. 碳中和、战略性新兴产业发展与关键矿产资源管理[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(09): 135-142.
- [21] 方洁. 建设全国碳市场核心枢纽的形势、挑战与对策[J]. 环境经济研究, 2023, 8(03): 156-166.
- [22] 严飞,王超,唐鹏程. 数字技术创新对城市生态韧性的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(12): 7590-7600.
- [23] 成金华,吴巧生,等. 加快生态文明体制改革,建设美丽中国研究[M]. 人民出版社, 2024.
- [24] Carley, S., D. M. Konisky. The Justice and Equity Implications of the Clean Energy Transition[J]. Nature Energy, 2020, 5(8): 569-577.
- [25] Markard, J. The Next Phase of the Nnergy Transition and Its Implications for Research and Policy[J]. Nature Energy, 2018, 3(8): 628-633.
- [26] Nijssse, F. J. M. M., J. F. Mercure, N. Ameli, et al. The Momentum of the Solar Energy Transition[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 6542.
- [27] Zhang, S., W. Chen. Assessing the Energy Transition in China towards Carbon Neutrality with a Probabilistic Ramework[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 87.s

The Theoretical Logic and Implementation Pathways of Regional Low-Carbon Energy Transition from the Perspective of Coordinating Development and Security

Fang Jie^a, Yi Jiahui^b, Yan Longting^c

(a: Collaborative Innovation Center for Emissions Trading System Co-constructed by the Province and Ministry, Hubei University of Economics; b: Gemmological Institute, China University of Geosciences; c: School of Economics and Management, China University of Geosciences)

Abstract: As China continues to pursue its carbon peaking and carbon neutrality targets while facing growing concerns over energy security, the regional transition toward low-carbon energy systems has become increasingly important for high-quality development and economic stability. This study develops an analytical framework for regional low-carbon energy transition based on the need to balance development and security and examines its theoretical foundations, historical evolution, and current challenges. China has made substantial progress in its low-carbon energy transition in recent years. This progress is reflected in the rapid expansion of renewable energy capacity, continued improvements in energy efficiency, and the growing share of non-fossil energy in total energy consumption. However, differences in resource endowments, industrial structures, and energy system conditions continue to constrain the transition across regions. The main challenges include persistent dependence on coal, spatial mismatches between energy resources and demand centers, insufficient flexibility in the power system, incomplete energy market reforms, limited technological and energy storage capabilities, and unresolved issues concerning the distribution of transition costs and social equity. To address these challenges, China should maintain energy security while deepening market-oriented reforms, pursuing region-specific transition strategies, promoting innovation in green and low-carbon technologies, and improving social protection and just transition mechanisms. These measures would contribute to the transformation of China's energy system, the achievement of its carbon targets, and the advancement of Chinese modernization.

Keywords: Low-carbon Energy Transition; Balance Between Development and Security; Coordinated Regional Development

JEL Classification: Q48, Q54, O13

(责任编辑:卢玲)