胡西武,李中昊,张 倩.我国省域碳锁定时空格局及演进特征 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1694-1709.
Hu X W, Li Z H, Zhang Q. Spatio-temporal patterns and evolutionary characteristics of provincial carbon lock-in in China [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1694-1709.

我国省域碳锁定时空格局及演进特征

胡西武[1,2],李中昊[1],张 倩[3*] (1.青海民族大学经济与管理学院,青海 西宁 810007;2.天津大学-青海民族大学双碳研究院,青海 西宁 810007；3.青海民族大学财务处,青海 西宁 810007)

摘要：本文在以改进的碳锁定评价指标体系对 2002~2022 年我国省域碳锁定水平进行测度的基础上,以时空分析方法刻画了其时空格局及演进规律,并探讨其空间关联机制和演进趋势.结果显示:全国碳锁定水平在时间上呈现缓慢下降、加速解锁和平缓波动三阶段变动趋势,在空间格局上呈现“东部率先解锁、中部快速转型、西部持续跟进”分布演化特征,且离散化程度加深、区域差异扩大且多极化趋势明显;碳锁定具有显著正向空间溢出效应,固定资产投资增长率、城镇化率、劳动者报酬比重对周边地区碳锁定影响显著,前者影响为正,后二者影响为负;省际碳锁定网络互动关系呈现以胡焕庸线为界的三阶段演化趋势和“省际关联持续深化、枢纽节点极化显著、区域传导路径显化”的传导特点,以秦岭淮河线为界的南北板块功能互动演进分异特征明显;预测结果显示,碳锁定水平面临边际效益递减压力,存在局部反弹风险,破解碳锁定网络的关键点在于高中介中心度省份.

关键词：碳锁定；时空格局；空间关联；溢出效应；趋势预测
中图分类号：X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1694-16

Spatio-temporal patterns and evolutionary characteristics of provincial carbon lock-in in China.

HU Xi-wu[1,2], LI Zhong-hao[1], ZHANG Qian[3*] (1.School of Economics and Management, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China；2.Institute for Carbon Peaking and Carbon Neutrality, Tianjin University-Qinghai Minzu University, Xining 810007, China；3.Finance Office, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1694~1709

Abstract：The carbon lock-in effect represents a systematic challenge to achieve the goal of carbon peaking and carbon neutrality. Identifying its spatio-temporal evolution patterns and regional transmission mechanisms is of great significance for facilitating China's low-carbon transformation. Based on an improved evaluation system, the study measured the carbon lock-in levels of 30 provinces in China from 2002 to 2022. Spatio-temporal analysis method was employed to depict their spatial patterns and evolutionary laws, and further explore their spatial association mechanisms and evolutionary trends. The results show that: The national carbon lock-in level exhibits a three-stage trend overall: a slow decline, accelerated unlocking, and gentle fluctuation. It also demonstrates an evolutionary characteristic of "eastern regions taking the lead in unlocking, central regions undergoing rapid transformation, and western regions following suit continuously" in spatial patterns. Moreover, a comprehensive spatio-temporal analysis indicates that the degree of national carbon lock-in discretization has increased, regional disparities have expanded, and a multi-polarization tendency is evident. Carbon lock-in demonstrates a significant positive spatial spillover effect. The growth rate of fixed asset investment has a positive influence on carbon lock-in in adjacent areas, while the urbanization rate and the proportion of labor compensation have substantial negative impacts. The inter-provincial carbon lock-in network interaction shows a three-stage evolutionary trend bounded by the Hu Huanyong Line and transmission characteristics of "continuous deepening of inter-provincial connections, significant polarization of hub nodes, and explicit regional transmission paths". The differentiated evolution of functional interactions between northern and southern blocks bounded by the Qinling-Huaihe Line is obvious. The prediction results indicate that the carbon lock-in level is under pressure from diminishing marginal returns and faces risks of local rebound. The key to breaking the carbon lock-in network lies in the provinces with high betweenness centrality.

Key words：carbon lock-in；spatio-temporal pattern；spatial association；spillover effect；trend prediction

碳锁定作为工业化和技术路径依赖的产物,已成为能源转型和低碳经济发展中的重要难题.碳锁定是指社会经济系统因环境负外部性无法通过市场机制有效矫正,导致高碳技术体制持续排斥低碳替代的路径依赖状态[1],是工业化进程中技术路径依赖、制度惰性与社会行为惯性交互作用的系统性现象[2-3].这一概念脱胎于早期的技术锁定理论,其本

收稿日期：2025-07-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42461034)
* 责任作者, 高级会计师, 596449863@qq.com

质在于揭示环境成本转嫁如何强化系统惯性的机制.当减排成本与社会环境收益的背离超过临界阈值时,即使存在更优低碳技术,系统仍将自我维持于高碳均衡[4].碳锁定现象既包含传统路径依赖的技术-制度-行为锁定,更叠加市场定价缺失与政策干预滞后的协同失效.

现有碳锁定测度方法主要包括投入产出法、碳超载率法和指标体系法[5-7],其中指标体系法因理论覆盖更全面和可比性更强等优势而更具科学性.早期研究基于“历史性投资-技术路径-制度结构”三维框架构建碳锁定体系[1],后续学者逐步纳入政策规制、市场反馈及社会行为维度[4].随着折旧等指标层面持续细化,跨维度协同重要性凸显[8],碳锁定评价指标体系逐渐趋于成熟.但仍存在协同观测不足、数据静态化等问题.

碳锁定的空间分异是揭示区域低碳转型规律的核心议题.现有研究主要围绕空间分布特征和空间溢出机制展开.一些学者在早期研究中通过 Moran's I 指数证实了我国碳锁定水平的空间集聚性[5],验证我国碳锁定“西高东低”的梯度格局[9-10].随后,学者采用空间自相关模型、空间误差模型和空间杜宾模型等方法,探讨了碳锁定的空间溢出效应,关注地理邻接性下碳锁定的空间特征及其可能的驱动因素[5,11].在碳排放等关联领域复杂网络理论已逐步应用于解析跨区域传导路径[12-13].总体而言,现有研究多停留于碳锁定空间分异的表象刻画,对深层次跨区域传导机制,尤其是网络化路径依赖缺乏系统性解析.

碳锁定的演进预测研究是破解碳锁定政策制定的关键依据.就预测而言,环境科学领域已有多类较成熟的方法.一是选用结构化模型,如 STIRPAT 模型,通过解构经济规模、能源强度等驱动因子实现机制化预测[14-15];二是运用均衡分析框架,如基于 Kaya 恒等式,捕捉碳排放与宏观变量的长期协整关系[16-17];三是采取多情景模拟,结合空间显式模型量化不同发展路径下的差异格局[18-20];四是构建统计时序模型,运用以 ARIMA 为代表的差分自回归方法,处理非平稳序列的短期动态[21];五是应用机器学习范式,依托数据驱动框架,实现从传统算法到深度学习的多维度建模[22-23].这些方法在能源经济系统预测中具有广泛适用性,但在碳锁定预测场景中却难以解析碳锁定系统的核心矛盾,技术体制更替中的非线性断点跃迁与空间网络阻滞效应,导致其既无法预警反弹风险,亦难识别关键治理节点.

综上,本研究以我国 2002~2022 年省域数据为研究样本,在构建多维度碳锁定评价指标体系的基础上,综合运用核密度估计、空间杜宾模型、修正引力模型、复杂网络分析以及灰色马尔可夫模型等方法,系统刻画我国省域碳锁定水平的时序演化特征与空间分异格局,分析碳锁定的空间溢出效应、网络关联结构及其传导机制,并从时间与空间两个维度对碳锁定演进趋势进行预测,旨在深化对我国省域碳锁定时空演进规律及其区域联动特征的认识,为制定差异化、协同化的治理政策提供分析依据.

1　研究方法与数据

1.1　指标体系构建

碳锁定作为一种复杂的多维现象,其测度需系统整合技术路径依赖、固定投入刚性、制度执行惰性和社会行为惯性的交互影响.本文构建的“固定投入-技术发展-制度影响-社会行为”四维框架系统整合了碳锁定理论的核心维度:固定投入维度以碳基技术综合体[1]和设备寿命[8]理论为基础,体现高碳资产刚性;技术发展维度融合技术锁定[4]和技术路径依赖[24]捕捉技术体制迭代;制度影响维度借鉴制度机制[25]和政策壁垒[26]的研究,量化政策滞后性;社会行为维度参考行为锁定理论[4],补充微观行为惯性.这一框架既继承了主流研究的技术-制度-行为三分法,又通过细分固定投入和社会行为维度,更完整地揭示了碳锁定作为复杂系统的交互机制,为实证分析提供了全面理论基础.同时采用主客观组合赋权方法确定权重,首先基于投影寻踪模型提取数据驱动的客观权重[27],然后通过层次分析法生成主观权重[28],最终以极差最大化法组合赋权形成组合权重[29],有效规避了单一赋权法的局限性(表 1).

碳锁定各维度的划分遵循“锁定机制主导性”原则:固定投入维度刻画资产存量刚性,技术发展维度聚焦生产系统效率,制度影响维度衡量政策干预成果,社会行为维度侧重消费模式惯性.这种分类确保技术相关指标与行为相关指标在作用机制上互斥且完备.需要说明的是,部分指标可能具有跨维度特征,但本文基于其主导作用机制进行维度归属.

表 1 我国省域碳锁定水平测度评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for measuring provincial carbon lock-in levels in China

准则层	指标层	指标释义	指标属性	客观权重	主观权重	综合权重
固定投入锁定	*高碳能源固定资产投入比重 = 煤炭采选业、石油和天然气开采业、石油加工及炼焦业、煤气生产和供应业固定资产投资额/能源工业总投资额(%)	反映高碳产业投资水平	正	0.059	0.055	0.057
	*科研固定资产投入比重 = 科学研究和技术服务业固定资产/全社会固定资产投资额(%)	反映固定资产创新投入水平	负	0.010	0.047	0.019
	固定资产折旧占比 = 固定资产折旧额/GDP(%)	反映通过资产更新促进低碳替代的潜力	负	0.012	0.059	0.022
	*第二产业固定资产投入比重 = 第二产业固定资产投资额/全社会固定资产投资额(%)	反映第二产业固定资产集中程度	正	0.053	0.065	0.057
	固定资产碳排放强度 = 碳排放总量/全社会固定资产投资额(t/万元)	反映固定资产投入碳排放效率	正	0.047	0.060	0.051
技术发展锁定	碳排放强度 = 碳排放总量/GDP(t/万元)	反映碳排放总体水平	正	0.097	0.034	0.090
	能源强度 = 能源消耗总量/GDP(t 标准煤/万元)	反映能源消费碳排放水平	正	0.056	0.043	0.048
	*技术市场活跃度 = 技术市场成交额/GDP(%)	反映科技市场活跃度	负	0.105	0.123	0.123
	*研发强度 = 研究与试验发展经费内部支出/GDP(%)	反映科技投入水平	负	0.113	0.091	0.111
	*专利授予水平 = 万人专利授权量(项/万人)	反映区域科技发展水平	负	0.095	0.062	0.089
制度影响锁定	*低碳治理力度 = 政府报告低碳发展相关词频统计(次)	反映政府环境规制力度	负	0.028	0.038	0.032
	*违法案件处理 = 环保处罚案件数(件)	反映违法行为处罚力度	负	0.026	0.031	0.028
	*人才支持力度 = 公有经济企事业单位科学研究人员数/公有经济企事业单位专业技术人员数(%)	反映区域科研重视程度	负	0.073	0.027	0.038
	*环境保护治理 = 工业污染治理投资额/地方财政支出(%)	反映政府环境规制力度	负	0.011	0.033	0.018
	*能源结构调整 = 清洁能源发电占比(%)	反映政策驱动的清洁能源使用效率	负	0.004	0.022	0.010
社会行为锁定	*社会关注力度 = 媒体报道低碳发展相关词频统计(次)	反映公众环境关注度	负	0.034	0.033	0.034
	家庭规模特征 = 平均家庭户规模(人/户)	反映家庭人口规模内在影响	负	0.000	0.024	0.007
	*能源低碳化水平 = 能源消费结构低碳化指数	反映绿色能源消费行为影响	负	0.082	0.018	0.037
	*公交运营密度 = 地区公共交通运营线路总长度/城区面积(km/km^2)	反映公共交通行为影响	负	0.008	0.048	0.018
	清洁能源使用率 = 城市天然气普及率(%)	反映家居清洁用能行为影响	负	0.087	0.013	0.080
	*私家车普及水平 = 人均汽车拥有量(辆/人)	反映私人交通行为影响	正	0.001	0.073	0.032

注:正向属性表示该指标对碳锁定的正向贡献,*为新增或调整的指标.

该评价指标体系的主要特点有:(1)动态性:新增政策文本词频统计、环保处罚案件等实时监测指标[30-32],弥补以往测度中静态数据的不足,增强指标体系的及时响应性;(2)科学性:更多采用技术市场活跃度等相对指标,有效缓解省域间经济规模差异带来的量级偏差,确保跨区域比较的科学客观;(3)新颖性:尝试将最新的研究成果纳入评价体系,如采用能源消费结构低碳化指数量化评价用能的高碳惯性[33].

1.2 研究方法

1.2.1 Kernel 核密度估计 本文采用核密度估计方法,分析其动态分布变化.核密度估计是一种非参数方法,通过计算不同时间截面上的碳锁定分布情况刻画其演进趋势.其计算公式如下:

$$f(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中:$f(x)$为变量 x 在特定时间截面上的核密度函数;n 为样本数;h 为带宽;决定平滑程度;K 为核函数.

1.2.2 空间溢出 本文采用空间杜宾模型(SDM)分析省域碳锁定的空间溢出效应,基本模型设定如下:

$$Y=\rho \boldsymbol{W}Y+\boldsymbol{X}\beta+\boldsymbol{W}\boldsymbol{X}\theta+\varepsilon \quad (2)$$

式中:Y 表示各省碳锁定水平向量;$\boldsymbol{X}$ 为解释变量矩阵;$\boldsymbol{W}$ 是空间权重矩阵;ρ度量空间自相关强度;β和θ分别表示解释变量的直接效应和空间滞后效应;ε为随机误差项.空间权重矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的元素定义为 $W_{ij}=1/d_{ij}^2$ $(i\neq j)$,其中 d_{ij} 表示省份 i 与 j 之间的地理距离.通过极大似然估计方法求解模型参数后,进一步采用效应分解技术将总效应分解为直接效应和间接效应两部分.直接效应反映解释变量对本地碳锁定的影响,间接效应则表征其通过空间关联对邻近地区产生的溢出作用.

1.2.3 空间关联网络 本文基于修正的引力模型[34],通过整合空间杜宾模型的溢出效应系数与局

部 Moran's I 指数的空间集聚特征,构建省际碳锁定关联网络,完整刻画碳锁定空间传导的网络拓扑结构.计算方法如下:

$$T_{ij}=k_{ij}\cdot\frac{L_i\cdot L_j}{[D_{ij}/(g_i-g_j)]^2},k_{ij}=\frac{L_i}{L_i+L_j} \tag{3}$$

式中:T_{ij}为省份 i 和省份 j 之间的碳锁定关联程度;D_{ij}为省份 i 和省份 j 之间的中心地理距离;L 和 g 分别为各省的碳锁定水平和人均 GDP;调节因子 k_{ij} 体现了碳锁定水平的非对称传导特性,采用“均数原则法”对连续型关联矩阵进行二值化处理:对于矩阵中任意元素 T_{ij},若其值大于第 i 行所有关联强度的均值,则令二值化矩阵元素 A_{ij}=1,否则 A_{ij}=0.通过计算网络密度量化整体关联强度,采用度中心度、中介中心度和接近中心度识别关键枢纽省份,进一步运用凝聚子群分析揭示碳锁定的空间集聚模式,并通过块模型分析解析子群间的交互特征,识别“净辐射板块”与“净接收板块”等[35].

1.2.4　灰色马尔可夫预测　为有效解决小样本数据下预测的稳定性与灵敏度平衡问题,本文采用灰色马尔科夫预测模型对碳锁定趋势进行预测.首先利用灰色预测模型 GM(1,1)进行趋势分析.计算公式为:

$$\frac{\mathrm{d}X^{(1)}}{\mathrm{d}t}+aX^{(1)}=b \tag{4}$$

式中:a 为发展系数;b 为灰色作用量.通过累加生成和最小二乘估计求解参数,得到预测序列 $X^{(1)}(t)$,经累减还原后获得基础预测值 $X^{(o)}(t)$.

之后引入马尔科夫链进行状态修正.首先将历史数据划分为 n 个状态区间,状态区间 $E_j=(Q_j,H_j)$,其中 Q_j,H_j 分别为状态区间的下限和上限,如果预测对象下一步转移到状态 E_j,取区间中点对灰色预测值进行修正,具体公式为:

$$\hat{Y}(k)=\frac{\hat{X}^{(0)}}{1-0.5(Q_j+H_j)} \tag{5}$$

最后统计各状态的转移概率,构建状态转移矩阵 $\boldsymbol{P}$:

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}p_{11}&p_{12}&\cdots&p_{1n}\\p_{21}&p_{22}&\cdots&p_{2n}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\p_{n1}&p_{n2}&\cdots&p_{nn}\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:P_{ij} 表示系统从状态 S_i 转移到状态 S_j 的概率.结合预测值所在的状态分布及其转移规律,修正原始 GM(1,1)预测结果,使其更加符合短期内的实际变化趋势.这一方法既能在有限数据情况下揭示趋势变化,又能通过状态转移特征优化预测结果,更符合碳锁定的动态演化规律.

1.2.5　网络空间脆弱性预测识别　本研究采用复杂网络分析方法评估碳锁定空间结构脆弱性.基于修正引力模型构建的省际关联网络,定义网络全局效率指标:

$$E_{\mathrm{carbon}}=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{1}{d_{ij}} \tag{7}$$

式中:d_{ij}=1/T_{ij} 为碳流动阻力;T_{ij} 为省际关联强度.网络连通稳定性通过最大连通子图相对大小表征:

$$S=\frac{|V_d'|}{|V_d|} \tag{8}$$

式中:$|V_d|$为初始网络节点总数;$|V'_d|$为节点删除后的最大连通子图省份数量;$S\in[0,1]$值越小表明网络破坏越严重.

模拟两类攻击场景:①随机攻击:均匀随机删除节点;②蓄意攻击:按中介中心度、接近中心度、度数中心度降序依次删除节点.当 E_{carbon}<0.05 或 S<0.1 时判定网络崩溃.本方法通过识别关键脆弱节点和临界失效阈值,为预测区域碳锁定风险传导路径提供空间维度依据,与灰色马尔可夫模型共同构成“时序−空间”双维预测框架.

1.3　数据来源

基于数据可得性与有效性,本文选取 2002~2022 年我国除西藏和港澳台地区外的 30 个省、自治区和直辖市作为研究对象.数据来源包括历年《中国统计年鉴》及各省域统计年鉴、《中国绿色发展指数报告》《中国能源统计年鉴》《中国固定资产统计年鉴》《中国社会统计年鉴》《中国科技统计年鉴》和 Wind 经济数据库及中国企业联合会.个别缺失值以插值法补齐.

2　结果与讨论

2.1　我国碳锁定水平时空演化趋势

2.1.1　整体时间趋势　从发展态势看,我国碳锁定水平下降趋势明显,整体从 2002 年的 0.676 降至 2022 年的 0.508,累计降幅 24.8%,在时间上呈现明显的 3 阶段特征.第一阶段(2002~2012 年)为缓慢下降

期,全国碳锁定水平以年均 0.4%的速度缓慢下降.第二阶段(2012~2018 年)为加速解锁期,全国碳锁定水平下降趋势加快,年均降幅为 2.3%.第三阶段(2018~2022 年)为平缓波动期,年均降幅为 0.3%(图 1).

阶段演化特征体现了碳锁定理论中的典型动态:初期缓慢下降符合技术系统转型的滞后期特征;中期加速解锁与政策干预的累积效应预期一致;后期的波动平缓则反映了高碳资产刚性导致的转型阻力.

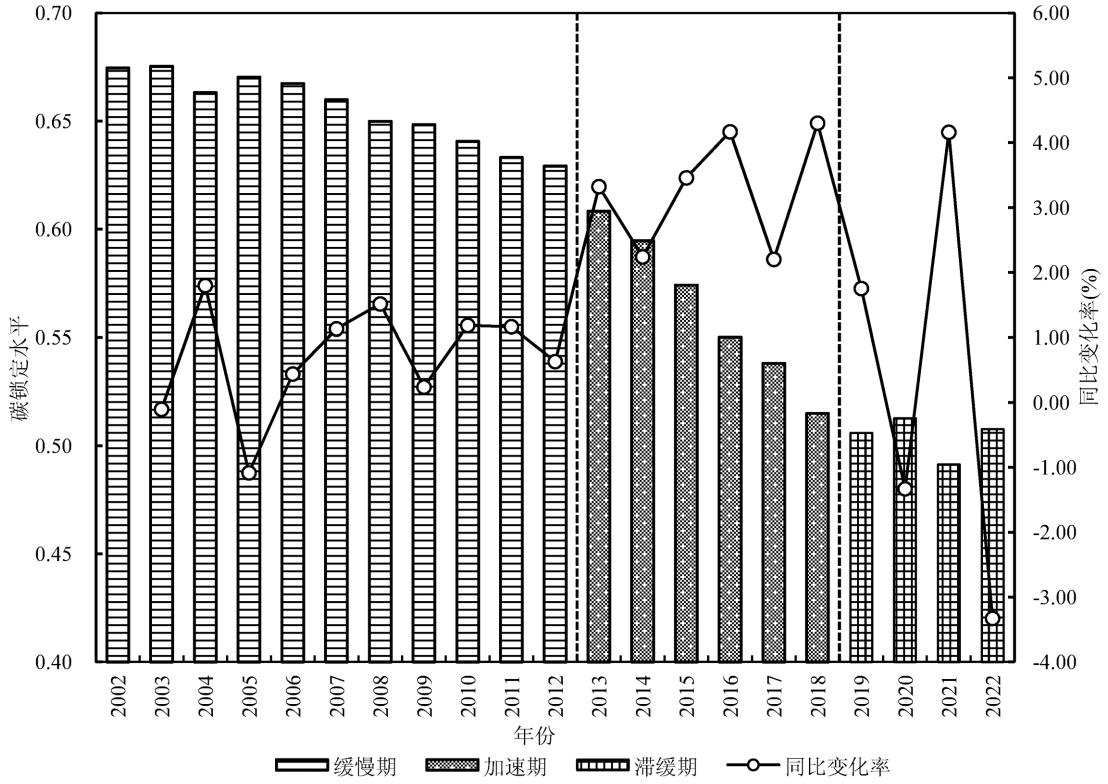


图 1 2002~2022 年我国碳锁定水平变化趋势

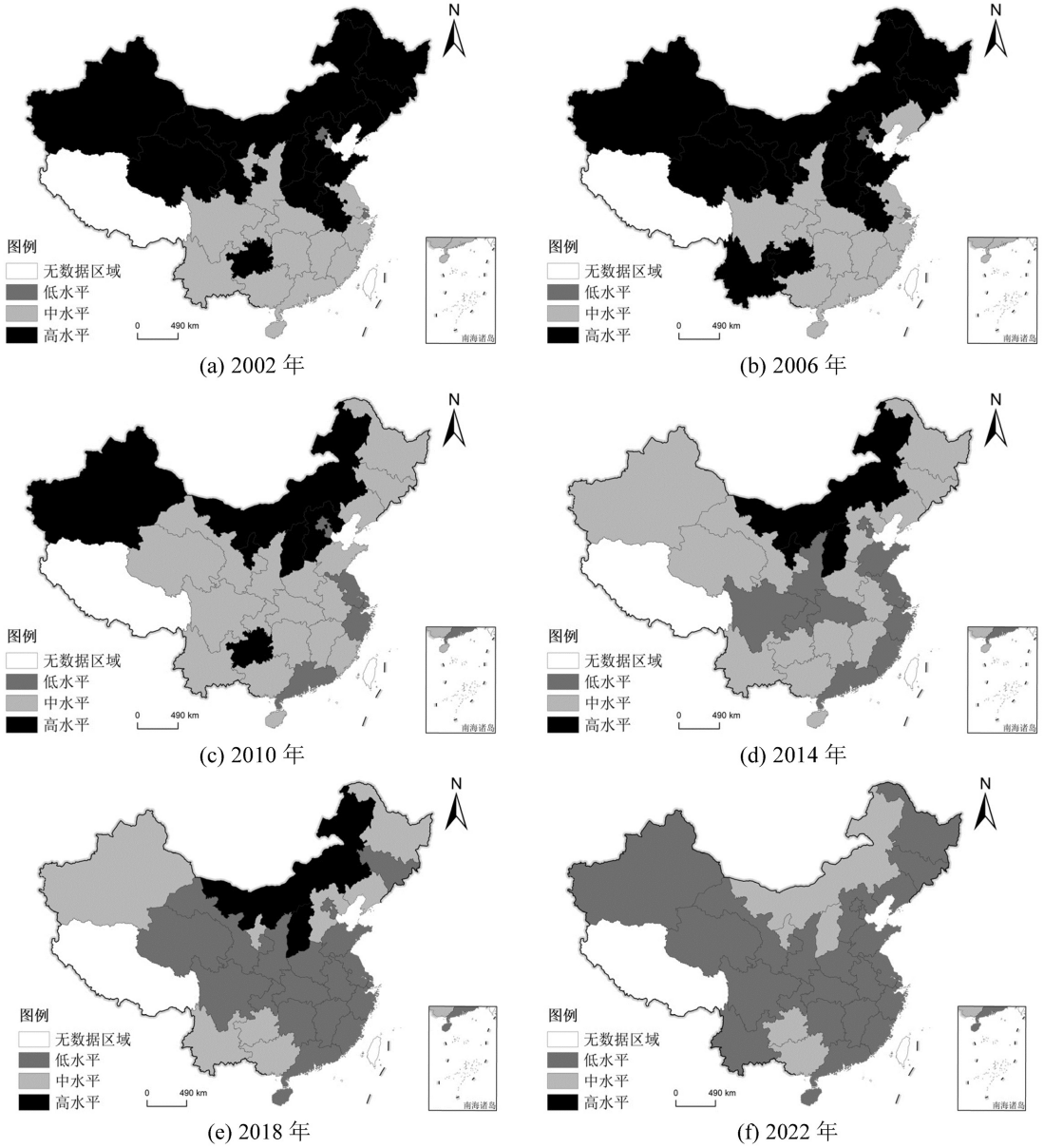
Fig.1 Evolution trend of carbon lock-in level in China from 2002 to 2022

2.1.2 空间分异格局 选择 2002、2006、2010、2014、2018 及 2022 年等 6 个时间节点,采用自然断点法将碳锁定水平分为 3 个不同等级,分别为低水平(0.0001~0.6350)、中水平(0.6351~0.7053)和高水平(0.7054~0.8578),分析我国省域碳锁定水平的空间分布格局及演化趋势(图 2).

由图 2 可以看出,2002~2022 年我国高碳锁定省份数量从 12 个减少至 0 个,中碳锁定省份从 18 个减少至 6 个,低碳锁定省份从 3 个增加至 24 个.从区域差异来看,东部地区率先完成转型,其高碳锁定省份在 2014 年已全部消失;中部地区转型速度最快,2010~2018 年间碳锁定水平年均降幅为 2.1%;西部地区起步较晚,但 2018 年后转型加速,碳锁定水平年均降幅从此前的 0.8%提升至 1.3%,整体呈现“东部率先解锁、中部快速转型、西部持续跟进”的分异特征.

这种区域分异格局反映了经济发展梯度与技术扩散的基本规律:东部地区凭借其市场机制完善和创新能力强的优势,率先突破碳锁定状态;中部地区通过承接产业转移和技术模仿实现快速转型;西部地区的后续加速则受益于基础设施改善带来的后发优势.这种空间演变模式与经典的区域经济增长理论和技术扩散模型相一致.

2.1.3 基于核密度的演进动态时空分布 整体趋势中的时间序列数据揭示了碳锁定水平的阶段性变化,但总体变化可能掩盖内部结构演进的复杂性.借助 MATLAB Release 2024a 平台以 Kernel 核密度估计法刻画 2002~2022 年全国及东、中、西部地区碳锁定分布形态的动态变迁(图 3),从时空耦合视角深化演进规律分析.



(a) 2002 年　(b) 2006 年　(c) 2010 年　(d) 2014 年　(e) 2018 年　(f) 2022 年

图 2　2002~2022 年我国省域碳锁定水平空间分布

Fig.2　Spatial distribution of provincial carbon lock-in levels in China from 2002 to 2022

审图号:GS(2023)2767

从分布位置来看,全国碳锁定核密度曲线分布中心持续左移,表明全国整体及各区域的碳锁定水平呈现持续下降的趋势,高碳锁定区域正逐步减少.同时不同区域降幅表现不一,验证了前文“东部率先解锁、中部快速转型、西部持续跟进”的结论.

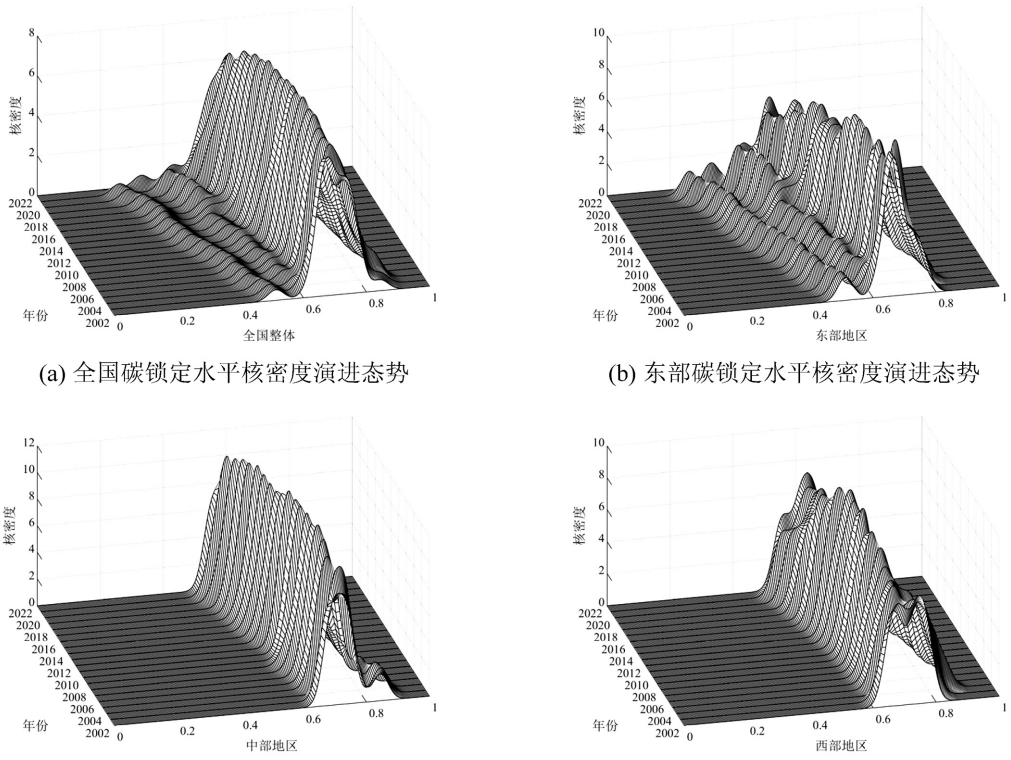
从主峰演进形态来看,全国碳锁定核密度曲线峰值持续下降、延展性逐渐拓宽,表明碳锁定水平离散化程度加深,碳锁定聚集区逐步减少.分区域而言,虽然中东西部碳锁定离散化水平都呈现加深态势,但表现出显著的梯度差异:东部地区峰值下降幅度最大、延展性拓宽最广,表明其离散程度最高;中部地区次之,呈现过渡特征;西部地区则相对集中,分布最为收敛.

从拖尾特征来看,全国呈现显著的左拖尾及延展性拓宽态势,左拖尾说明存在低碳锁定异常群体,凸显碳锁定发展不均衡,而延展性拓宽表明碳锁定水平绝对差异增大,区域差异扩大.具体而言,东部地区的延展性拓宽明显表明其碳锁定水平的区域迅速拉大,但中西部地区的区域差异扩大速度相对较慢.

从波峰数目来看,全国多峰结构显著,表明多极化趋势明显.东部与全国整体类似存在显著的多极

化趋势,而中西部地区则呈现两极化发展态势.

核密度曲线的动态特征揭示了碳锁定演变的深层规律:曲线左移反映整体解锁趋势,符合经济发展与环境质量的倒 U 型关系预期;离散化程度加深表明区域政策响应存在显著差异,这与转型经济中常见的区域分化现象一致;多峰结构则显示不同地区可能处于技术转型的不同阶段,体现了技术替代过程中的典型非均衡特征.



(a) 全国碳锁定水平核密度演进态势 (b) 东部碳锁定水平核密度演进态势

(c) 中部碳锁定水平核密度演进态势 (d) 西部碳锁定水平核密度演进态势

图 3 2002~2022 年我国省域碳锁定水平核密度演进态势

Fig.3 Kernel density evolutionary trends of provincial carbon lock-in level in China from 2002 to 2022

2.2 我国碳锁定空间关联机制

2.2.1 空间溢出效应 首先通过 LM 检验、LR 检验和 Wald 检验确定合适的模型形式.LM 检验结果显示,LM(error)和 LM(lag)检验均显著,但稳健 LM(error)检验未通过显著性检验;进一步通过 LR 检验和 Wald 检验发现,LR(sdm sar)、LR(sdm sem)、Wald(sdm sar)和 Wald(sdm sem)检验均在 1%的水平上显著,表明空间杜宾模型(SDM)优于空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM).此外,LR(both time)和 LR(both ind)检验均显著,支持采用双固定效应模型.因此,本文最终采用双固定效应空间杜宾模型(SDM)进行分析(表 2).

基于已有研究[11],结合《2030 年前碳达峰行动方案》要求,选取以下变量检验碳锁定的空间溢出效应.

(1)固定资产投资增长率(FAI).固定资产投资增长对碳锁定具有双重影响.高碳行业的投资可能延续既有技术路径,延缓低碳转型进程,同时通过区域产业链关联向外扩散,形成跨区域的碳锁定传导效应.

表 2 我国碳锁定水平空间计量模型检验结果

Table 2 Test results of spatial econometric model for carbon lock-in level in China

检验	统计量	检验	统计量
LM(error)test	15.161***	LR(sdm sar)test	18.69***
Robust LM(error)test	1.244	Wald(sdm sar)test	37.88***
LM(lag)test	44.260***	LR(sdm sem)test	30.76***
Robust LM(lag)test	30.343***	Wald(sdm sem)test	29.24***
LR(both time)	1229.49***	LR(both ind)	57.23***

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著.

(2)产业结构(IS),以第三产业产值占 GDP 的比重表征.第三产业比重的提升能有效降低能源消费强度,是缓解碳锁定的重要途径.发达地区的产业升

级可能会将高碳产业挤压至周边地区,形成碳锁定的区域梯度转移.

(3)城乡结构(URB),以城镇化率表征.城镇化对碳锁定的影响较为复杂.快速城镇化带来的基建扩张和能源需求激增会推高碳排放,城市群发展既可能促进低碳技术扩散,也可能因发展竞争导致高碳模式的区域趋同.

(4)劳动者报酬水平(WS),以劳动者报酬占 GDP 的比重表征.劳动者报酬的增长能够刺激绿色消费需求,推动生产端低碳转型.劳动力跨区域流动会带动低碳生活方式的传播,形成区域协同减排效应.

(5)外商投资水平(FDI),以外商投资总额占 GDP 的比重表征.外商投资一方面可能带来先进生产技术,另一方面也可能承接高碳产业转型并通过示范效应影响周边地区,形成特定的产业布局模式,进而影响区域碳锁定程度.

空间杜宾模型估计结果显示:空间自回归系数在时空双固定效应模型中为 0.4511,显著为正,表明各省碳锁定水平存在空间依赖性,即本地区碳锁定水平会受到邻近地区碳锁定水平的正向反馈影响.在时空双固定效应模型中,固定资产投资增长率的本地系数为−0.0004,空间滞后项系数为 0.0004,表明本地固定资产投资能降低本地碳锁定水平,邻近地区固定资产投资增长会对本地产生微弱正向影响;城乡结构的本地系数为 0.3869,空间滞后项的系数为−0.5512,表明本地城镇化率提升会加剧本地碳锁定,邻近地区城镇化率上升会导致本地碳锁定水平降低;劳动者报酬比重的本地系数为−0.1476,空间滞后项系数为−0.2377,表明提高本地居民收入可抑制本地碳锁定,邻近地区劳动者报酬提升对本地碳锁定产生负向影响;外商投资比重的本地系数为−0.0113,表明外资引入会降低本地碳锁定.固定资产投资增长率、城乡结构和外商投资比重的直接效应显著,但间接效应不显著.劳动者报酬比重和产业结构的直接与间接效应均显著,体现本地与跨区域影响的双重系统性作用(表 3).

空间计量结果揭示了碳锁定传导的复杂机制:显著的空间自回归系数验证了区域环境问题的空间溢出特性.不同要素的影响也存在明显差异:固定资产投资虽然能促进本地减排,但可能通过产业转移等渠道对周边地区产生轻微反弹效应;城镇化进程在提升本地碳锁定的同时,却通过技术扩散等机制推动周边地区解锁,这种双向作用反映了城市化不同阶段的特征演变;劳动者报酬的跨区域减排效应尤为显著,说明居民收入增长带来的绿色消费偏好和技术进步可能具有区域性外溢特征.

表 3　我国碳锁定水平空间杜宾模型回归结果

Table 3　Regression results of spatial dubin model for carbon lock−in level in China

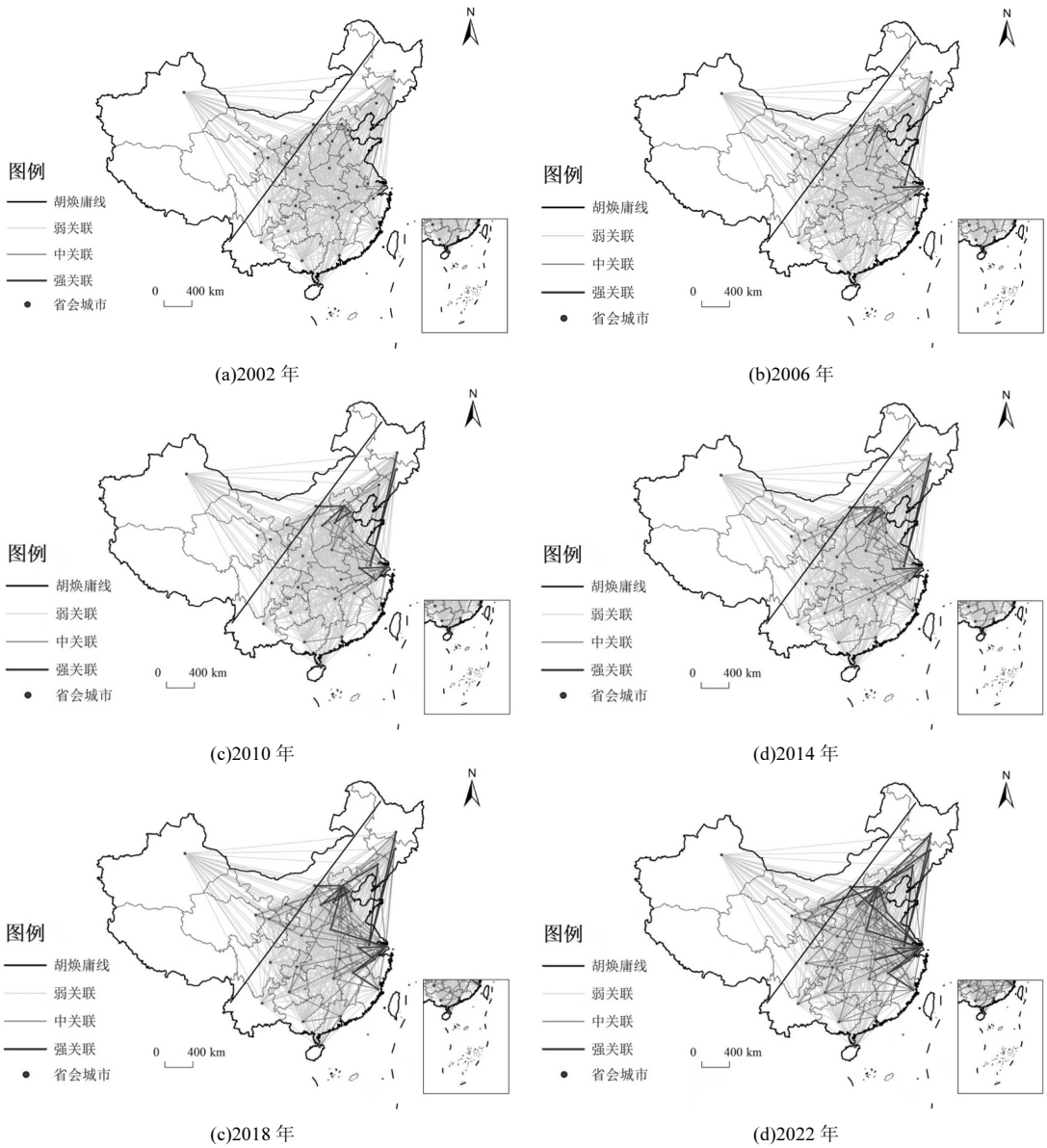
变量	主效应	*Wx*	直接效应	间接效应	总效应
FAI	−0.0004**(0.0002)	0.0004*(0.0002)	−0.0004*(0.0002)	0.0004(0.0005)	0.0001(0.0002)
IS	−0.0018(0.0012)	−0.0055*(0.0031)	−0.0026**(0.0012)	−0.0107**(0.0046)	−0.0116***(0.0051)
URB	0.3869***(0.1229)	−0.5512**(0.2616)	0.3494***(0.1099)	−0.6393(0.4010)	−0.2898(0.4069)
WS	−0.1476**(0.0627)	−0.2377***(0.0924)	−0.1963***(0.0751)	−0.5447**(0.2402)	−0.7409**(0.3047)
lnFDI	−0.0113*(0.0066)	−0.0281(0.0239)	−0.0169*(0.0093)	−0.0642(0.0566)	−0.0812(0.0643)
rho			0.4511***(0.0928)		
sigma			0.0007***(0.0002)		
R^2			0.321		
N			630		

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著.

2.2.2　空间关联网络与传播特征　基于 2002~2022 间六期空间网络数据, 采用复杂网络分析方法,通过计算网络密度、度数中心度、接近中心度和中介中心度等指标,动态追踪碳锁定传播路径的时空演变规律,识别关键传播节点和脆弱区域.采用动态阈值法将各省域的碳锁定关联网络强度分为 3 个不同等级,分别为弱关联(0.0001~503.2091)、中关联(503.2092~2012.9799)和强关联(2012.9780~86078.3352),追踪碳锁定核心关联的演变路径(图 4).

从图 4 可以看出,2002~2022 年我国省域碳锁定空间关联网络呈现以胡焕庸线为界的东西分异与 3 阶段演化趋势.(1)关键节点形成期(2002~2006 年):

网络呈现典型的“核心-边缘”结构,北京、上海作为绝对核心节点,依托胡焕庸线以东的经济集聚优势,与西部省份形成稀疏的放射状连接,初步显现碳锁定效应的东西梯度差.(2)关联网络形成期(2010~2014 年):网络密度显著提升,胡焕庸线以东的广东、福建等沿海省份发展为次级枢纽,形成多中心联动格局;胡焕庸线以西的省份开始出现区域性连接簇,但仍依赖东部节点的辐射传导.(3)关联网络强化期(2018~2022 年):空间层级分化加剧,第一层级形成了以北京、上海作为全国性低碳调控核心;胡焕庸线以东形成高密度的网络联结片区;胡焕庸线以西形成了以新疆、青海、宁夏为轴线的向东传导路径.



(a)2002 年 (b)2006 年

(c)2010 年 (d)2014 年

(c)2018 年 (d)2022 年

图 4 2002~2022 我国省域碳锁定水平空间关联网络

Fig.4 Spatial association network of provincial carbon lock-in level in China from 2002 to 2022

审图号:GS(2023)2767

这一网络演化特征揭示了我国碳锁定空间传导的深层规律:胡焕庸线的分界作用不仅体现了经济发展水平的差异,更反映了低碳技术扩散的梯度传递特征.在关键节点形成期,核心-边缘结构凸显了技术、资本等要素从东部中心向西部边缘的单向流动模式;随着网络密度提升,多中心格局的形成表明低碳转型正在从点状突破向区域协同转变;而最终形成的东-西传导路径,则揭示了碳锁定效应在区域间的复杂互动关系,特别是西部省份作为能源输出地的特殊地位,使其在承担碳压力转移的同时,也

面临着低碳转型的独特挑战.

整体上看,省际碳锁定空间传导呈现 3 个特征:(1)省际碳锁定关联程度正在持续深化.网络密度从 0.1736 上升至 0.2218,省份间连接紧密性明显提升.(2)枢纽节点的极化效应显著.在胡焕庸线以东地区形成连片的高强度关联区,北京、上海的中介中心度超过 150,控制着 80%的跨省关联路径;在胡焕庸线以西表现为离散的星型结构,高碳省份如宁夏、内蒙古虽具有活跃的碳要素输出(出度中心度 5~10),但中介中心度不足 100.(3)区域传导路径显化.西部省份在 2002~2022 年间呈现显著的碳锁定单向扩散特征,逐步形成以新疆、青海、宁夏三省份为核心的东向传导走廊.三个省份出度中心度均值从 4.1 增至 9.3,远超全国均值;入度中心度仅从 1.2 升至 1.4,始终低于东部均值,单向扩散外溢特征明显.

2.2.3　空间板块互动与区域传导　在空间网络分析基础上,采用 CONCOR 迭代分析法[35],利用碳锁定空间关系矩阵,设定最大分割深度为 2、收敛标准为 0.2 进行板块划分,将 30 省份划分为双向溢出板块、净溢出板块、净收益板块和经纪人板块四大板块,揭示我国省域碳锁定网络的聚类特征(图 5).

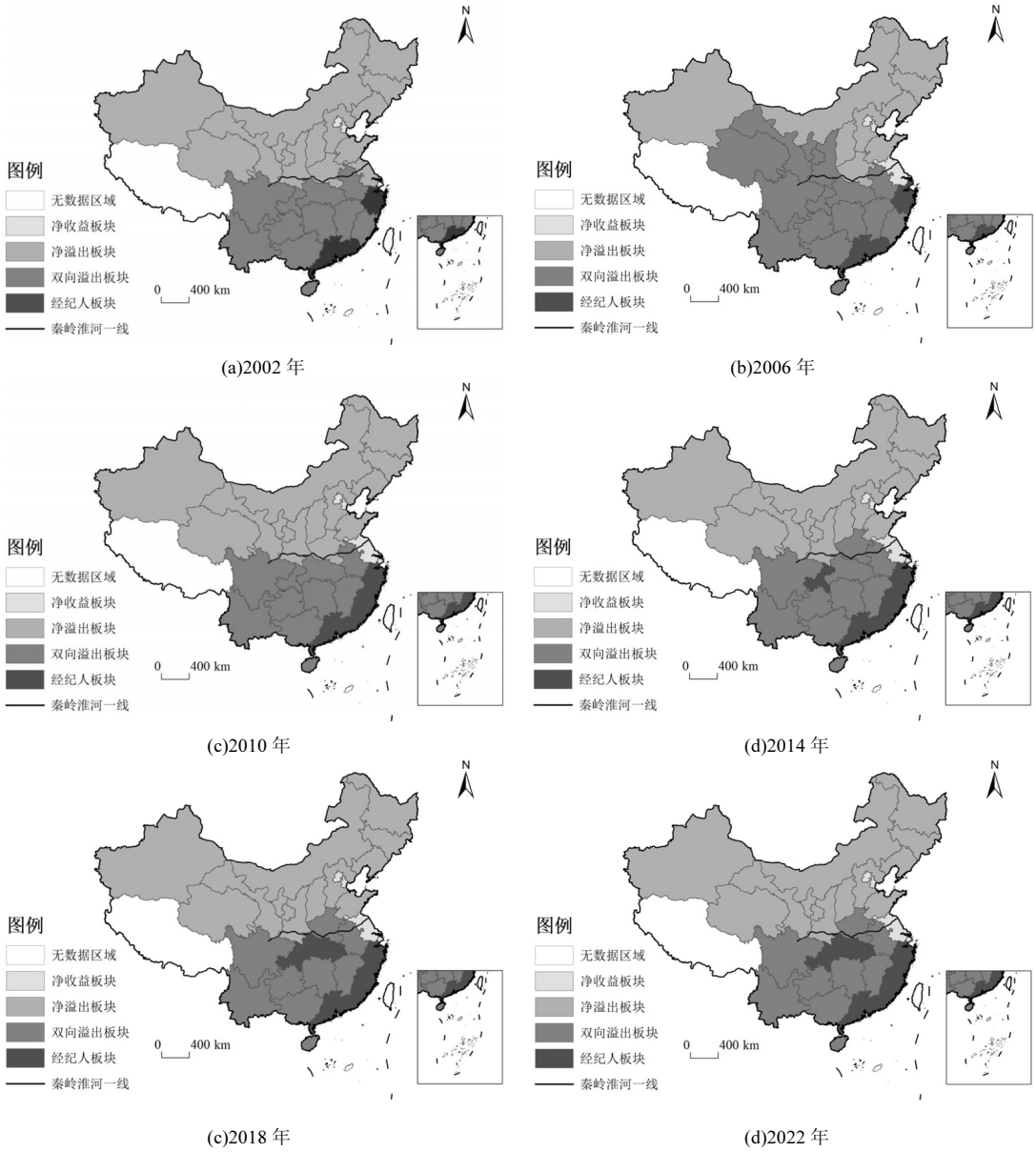


图 5　2002~2022 我国省域碳锁定水平关联网络板块

Fig.5　Blocks of provincial carbon lock−in level association network in China from 2002 to 2022

审图号:GS(2023)2767

由图 5 可以看出,省际碳锁定板块演进呈现以下特征:(1)南北功能分化固化.秦岭淮河线的北部地区绝大部分稳定处于净溢出板块,以南地区的变动情况相对多样.(2)核心节点稳固强化.北京、上海等净收益板块成员长期稳定,形成“核心-放射”吸收网络.(3)中部过渡带功能复杂化.安徽、江西等持续为双向溢出板块,而湖北、重庆显示中部省份角色分化.(4)东部沿海省份经纪人板块协同作用突出.东南沿海省份长期稳定于经纪人板块,在东部形成连续调节带,与内陆板块形成功能互补.

我国碳锁定板块演化呈现显著的空间层级特征:以秦岭-淮河为界,北部作为能源基地持续净溢出,南部则呈现多样化转型路径;北京、上海形成稳定的碳调控核心,发挥“核心-放射”辐射作用;中部省份分化为双向溢出与传导枢纽,东部沿海则形成协调区域碳流动的关键中介带.这种“南北分化-核心调控-中介协调”的三元结构,深刻反映了区域发展模式差异对碳锁定传导的塑造作用.

基于 2022 年的截面数据,进一步通过板块溢出效应分析量化碳流强度差异,解析板块划分的依据(表 4),并借助板块互动关系图可视化关键传导路径(图 6).

表 4 2022 年我国碳锁定水平空间关联网络板块间溢出效应

Table 4 Spillover effects of spatial association network blocks of carbon lock-in level in China in 2022

板块	板块 I	板块 II	板块III	板块IV	城市数量	溢出关系数	接收关系数	期望内部关系比例	实际内部关系比例	板块类型
I	4	3	24	33	9	60	35	0.2759	0.0625	双向溢出板块
II	3	23	37	6	12	46	16	0.3793	0.3333	净溢出板块
III	5	12	2	2	4	19	69	0.1034	0.0952	净收益板块
IV	27	1	8	3	5	36	41	0.1379	0.0769	经纪人板块

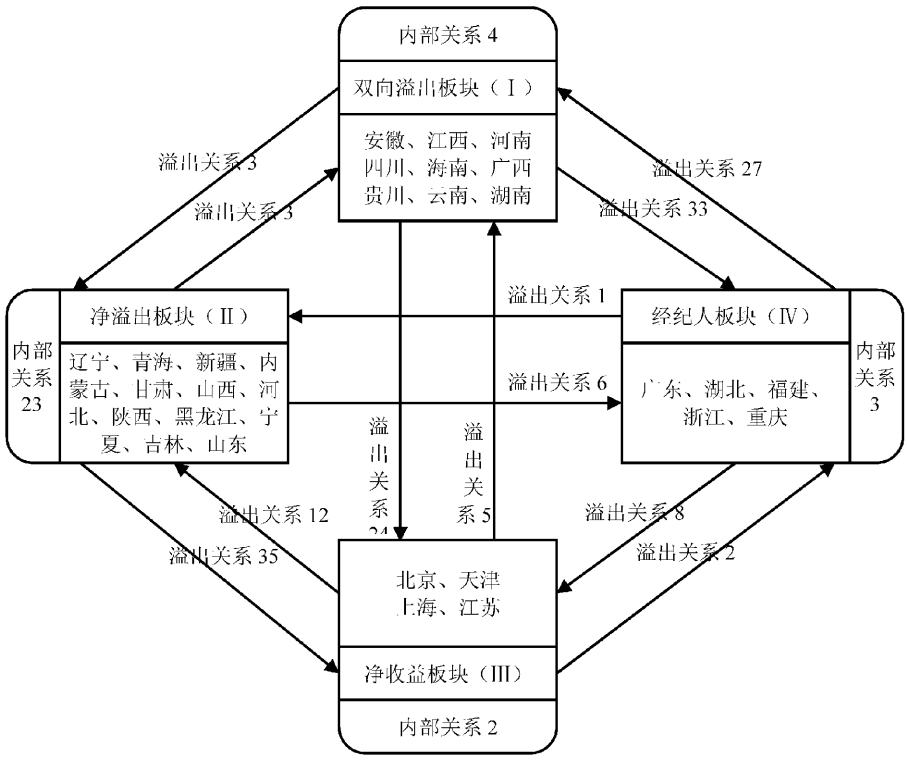


图 6 2022 年我国省域碳锁定水平板块间互动关系

Fig.6 Interaction between blocks of provincial carbon lock-in level in China in 2022

由表 4 可以看出,2022 年碳锁定关联网络关联关系总数为 193 个,其中 32 个位于板块内部,占总关系数的 16.58%,161 个位于板块外部,占总关系数的 83.42%.这一分布表明,板块间碳锁定关联占据主导

地位,跨区域传导效应显著强于板块内部互动.板块Ⅰ双向溢出板块,实际内部关系比例(6.25%)显著低于期望值(27.59%),表明其功能以跨板块交互为主,溢出关系数(60)与接收关系数(35)均较高,涵盖安徽、江西等 9 个中西部省份,体现其“枢纽”作用.板块Ⅱ净溢出板块,实际内部关系比例(33.33%)接近期望值(37.93%),接近均衡但外溢主导,溢出关系数(46)远超接收关系数(16),包含辽宁、山东等 12 个能源大省.板块Ⅲ净收益板块,实际内部关系比例(9.52%)略低于期望值(10.34%),但接收关系数(69)远大于溢出关系数(19),北京、上海等经济强省通过外部关联获取碳转移收益.板块Ⅳ经纪人板块,实际内部关系比例(7.69%)低于期望值(13.79%),但均衡的溢出(36)小于接收关系数(41),表明广东、浙江等沿海省份在跨板块碳流动中起关键中介作用.

基于板块间关联关系数据构建密度矩阵和像矩阵,量化板块间碳流动强度并识别关键传导路径.密度矩阵揭示交互强度,像矩阵凸显显著溢出关系(表 5).

表 5　2022 年我国碳锁定水平空间关联网络板块的密度矩阵和像矩阵

Table 5　Density matrix and image matrix of blocks in spatial association network of carbon lock-in level in China in 2022

板块	密度矩阵				像矩阵			
	板块Ⅰ	板块Ⅱ	板块Ⅲ	板块Ⅳ	板块Ⅰ	板块Ⅱ	板块Ⅲ	板块Ⅳ
Ⅰ	0.056	0.028	0.667	0.733	0	0	1	1
Ⅱ	0.028	0.174	0.771	0.1	0	0	1	0
Ⅲ	0.139	0.25	0.167	0.1	0	1	0	0
Ⅳ	0.6	0.017	0.4	0.15	1	0	1	0

由表 5 可知,各板块呈现差异化特征:板块Ⅰ(双向溢出板块)与板块Ⅳ(经纪人板块)形成显著的双向关联(密度 0.733);板块Ⅱ(净溢出板块)表现出较强的内部关联性(密度 0.174);而板块Ⅲ(净收益板块)主要接收来自板块Ⅱ的碳锁定影响(密度 0.771).显示双向溢出板块与经纪人板块之间存在紧密的相互作用;净溢出板块内部保持相对稳定的关联状态;净收益板块主要承担碳锁定的接收方角色;经纪人板块在板块间关系中发挥重要连接作用.

2.3　我国碳锁定时空演进预测

2.3.1　基于灰色马尔可夫模型的碳锁定演进趋势预测

为系统把握我国碳锁定水平的时间演变规律,采用灰色马尔可夫模型,从动态演化视角预测全国碳锁定概率分布特征.该模型通过耦合 GM(1,1)趋势预测与马尔可夫状态转移修正,重点解决小样本数据下的非线性跃迁模拟问题,为研判“双碳”目标实现路径中的反弹风险提供时序维度依据.

表 6　全国碳锁定水平模拟值及相对误差对比

Table 6　Comparison of simulated values and relative errors of national carbon lock-in level

年份	全国碳锁定水平	GM(1,1)模型(1)		GM-Markov 模型(2)	
		模拟值	相对误差(%)	模拟值	相对误差(%)
2002	0.67455	0.67455	0.00	0.67380	−0.11
2003	0.67526	0.70277	4.07	0.68075	0.81
2004	0.66313	0.69041	4.11	0.66878	0.85
2005	0.67033	0.67826	1.18	0.67751	1.07
2006	0.66739	0.66633	−0.16	0.66559	−0.27
2007	0.65984	0.65461	−0.79	0.65389	−0.90
2008	0.64985	0.64309	−1.04	0.64238	−1.15
2009	0.64831	0.63178	−2.55	0.65141	0.48
2010	0.64063	0.62066	−3.12	0.63994	−0.11
2011	0.63318	0.60974	−3.70	0.62868	−0.71
2012	0.62920	0.59902	−4.80	0.61763	−1.84
2013	0.60830	0.58848	−3.26	0.60676	−0.25
2014	0.59467	0.57812	−2.78	0.59608	0.24
2015	0.57411	0.56795	−1.07	0.55015	−4.17
2016	0.55019	0.55796	1.41	0.55734	1.30
2017	0.53808	0.54815	1.87	0.54754	1.76
2018	0.51494	0.53850	4.58	0.52163	1.30
2019	0.50592	0.52903	4.57	0.51245	1.29
2020	0.51266	0.51972	1.38	0.51915	1.27
2021	0.49133	0.51058	3.92	0.49458	0.66
2022	0.50769	0.50160	−1.20	0.50105	−1.31

采用两阶段分析方法分步进行.第一阶段基于 2002~2022 年数据进行回溯性预测,旨在验证灰色马尔科夫模型对碳锁定动态的捕捉能力.基于 GM(1,1)模型对全国碳锁定水平进行模拟,结果显示模拟值与实际值之间存在一定偏差,部分年份的相对误差超过 4%,表明单一灰色模型在捕捉数据波动性方面存在局限.为提高预测精度,按照组间距将碳锁定水平划分为下降[−0.0480, −0.0167]、稳定[−0.0167, 0.0145]、上升(0.0145, 0.0458) 3 种状态,并以此对 GM(1,1)预测值进行修正,得到灰色马尔科夫预测结果(表 6).选取平均相对误差的绝对值测定指标对比 GM(1,1)模型和灰色马尔科夫模型的预测效果,灰色马尔科夫模型的误差为 0.95%,远低于 GM(1,1)模型

的 2.27%,灰色马尔科夫模型的精度较 GM(1,1)模型更高.

在模型验证基础上,第二阶段通过状态转移概率矩阵对未来演变趋势进行推演,综合考虑和体现碳锁定系统的历史演变规律、当前状态分布及马尔科夫过程的转移特性(表 7).

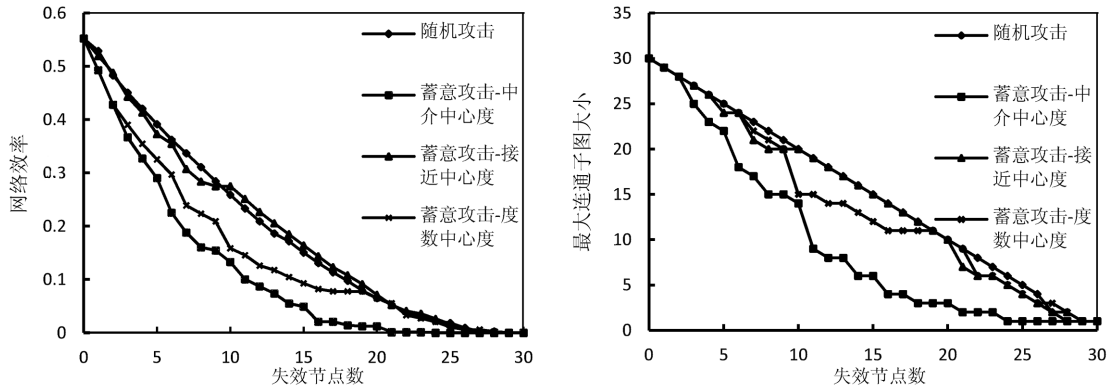
表 7 2002~2022 年全国碳锁定水平的演进趋势预测概率

Table 7 Prediction probability of evolution trend of national carbon lock-in level from 2002 to 2022

项目		1	2	3
初始状态		0.2857	0.4286	0.2857
终极状态	1	0.8333	0.1667	0.0000
	2	0.1250	0.5000	0.3750
	3	0.0000	0.5000	0.5000

表 7 显示,全国碳锁定水平的状态转移呈现显著规律性特征.当处于低碳状态时,系统有 83.33%的概率维持当前状态,同时存在 16.67%的概率向中碳状态转换.对于中碳状态,系统表现出 50.00%的维持概率,向高碳状态转换的概率达到 37.50%,而向低碳状态回转的概率为 12.50%.高碳状态则显示出 50.00%的维持概率和 50.00%的向中碳状态改善可能.显示出碳锁定水平进一步下降面临的边际效益递减趋势,以及不容忽视的局部反弹风险.

2.3.2 基于网络结构脆弱性的碳锁定空间诊断 为弥补时间预测在空间异质性刻画上的不足,引入复杂网络理论方法[36],通过构建网络效率与最大连通子图指标[37],从结构韧性视角评估省域碳锁定系统的空间脆弱性,形成“时间-空间”双维互补:灰色马尔可夫模型揭示全国趋势性风险,而网络分析则识别区域关键干预路径,共同支撑精准政策组合的制定(图 7).



(a) 省域碳锁定网络效率随节点删除的变化趋势 (b) 省域碳锁定网络最大连通子图大小随节点删除的变化趋势

图 7 碳锁定网络结构脆弱性评估:效率与连通性响应特征

Fig.7 Vulnerability assessment of carbon lock-in network structure: response characteristics of efficiency and connectivity

如图 7(a)所示,3 种攻击模式下的网络效率呈现显著差异.在以中介中心度为标靶蓄意攻击情境下,网络效率下降最为迅速,仅需删除 6 个节点即可使效率降至 0.2 水平.相比之下,随机攻击需要删除 22 个节点才能达到同等破坏效果.印证了碳锁定网络对枢纽节点的高度依赖性,与前文“枢纽节点极化”特征相互验证.蓄意攻击下的效率曲线在删除 3~6 个节点阶段出现明显陡降,表明网络中存在关键节点群,其失效会引发系统性效率损失.

图 7(b)显示,不同攻击模式对网络连通性的破坏程度存在显著差异.以中介中心度为标靶蓄意攻击对网络结构的破坏最为剧烈,仅删除 9 个节点就导致最大连通子图规模缩减 70%.而随机攻击下,网络表现出较强的鲁棒性,需要删除 28 个节点才会完全崩溃.进一步证实了碳锁定网络的结构异质性,即少数关键节点的失效会极大加速碳锁定网络的破坏.

2.4 讨论

2.4.1 全国范围内碳锁定空间相互作用复杂 一方面,碳锁定可以通过多个因素对周边地区产生显著的溢出效应,进而形成“西高东低”的空间分布格局,并通过空间网络进行板块固化.另一方面,不同板块之间产生碳锁定的流动,进而形成“北碳南流”的空间传导路径,并通过碳锁定溢出和碳锁定收益对

其他地区的碳锁定产生重要影响.碳锁定的空间传导与演进是资源禀赋、经济结构、技术水平、区位条件的综合反映.西北高碳传导走廊的形成显示,作为碳压力承接者[38],其传导依赖可能源于能源供应链的单向输出与低碳技术回流的缺失;北方地区为碳锁定的净溢出板块,可能与其资源型经济结构、环保政策执行效率滞后密切相关;东部沿海省份凭借技术与市场枢纽地位,成为碳要素跨区域配置的关键中介.针对上述碳锁定复杂的空间关联,政策设计可考虑从“重构互动关系、促进责任共担”入手.对于西北高碳传导走廊,其政策焦点在于扭转“能源单向输出、技术回流受阻”的失衡格局.可行的路径包括探索建立基于碳锁定流量的区域横向补偿机制,由在能源消费中受益较多、碳责任关联度较高的地区(如东部板块),提供定向资金与技术援助,支持能源输出地区发展可再生能源与低碳产业,逐步降低对高碳路径的依赖.对于北方净溢出板块,重点在于推动其资源型经济结构转型,通过严格的生态环境标准与绿色产业政策,引导投资流向低碳领域,抑制高碳产业的外部性溢出.对于东部技术市场枢纽,则应引导其发挥资本与技术优势,将跨区域投资与低碳技术扩散相结合,成为突破碳锁定的积极力量,发挥其破解高碳模式的传导节点作用.

2.4.2　我国碳锁定空间演进中地理分界线作用明显　突出表现为空间联络的东西差异和空间传导的南北分异显著.作为我国人口分布地理分界的胡焕庸线,其东部碳锁定空间联系密集,西部空间联系稀疏,成为碳锁定空间关联网络东西差异的重要分水岭.作为我国南北地区地理分界的秦岭-淮河线,其北部碳锁定长期处于净溢出板块,南部长期处于双向溢出、经纪人和净收益板块,形成碳锁定空间传播南北差异的重要边界.由此反映出地理分界线对“人口分布—产业结构—技术扩散—碳锁定”空间分布的深刻影响和“自然—人口—产业—技术”协同机制的内在作用.地理分界线标识了碳锁定空间格局的断层,也为实施“分区瓦解、阻断传导”的精准打击提供了战略依据.因此,需要针对空间异质性进行政策设计和有效实施.对于胡焕庸线以东的高密度碳锁定关联网络,治理重点在于稀释和拆解,通过推行区域性差异化碳定价,如更高的碳税或更严格的配额分配等,显著提高高碳经济活动的关联成本,促使生产要素从高碳链条中剥离,弱化网络连接强度.对于胡焕庸线以西的稀疏但关键的网络结构,重点在于预防高碳网络的复制与强化,对新上的重大项目必须进行“碳锁定风险”评估,确保其不会成为新的高碳锁定节点或强化现有传导路径.针对秦岭-淮河线南北的板块功能分异,重点约束各板块在碳锁定网络中的负面效应.对北部“净溢出板块”,核心是内化其外部成本,建立碳锁定溢出费制度;对南部“净收益板块”,要弱化其“搭便车”效应,将其获取的碳转移收益定向用于自身的深度脱碳;对“双向溢出”和“经纪人”板块,则要规范其交互行为,明确其在跨区域经济活动中负有阻断碳锁定传导的法定义务,引导建设低碳要素流动通道.

2.4.3　破解我国碳锁定困境需要跨区域协同发力　鉴于碳锁定网络联结和空间演进的多因素、多路径、多机制的影响,需要在全国建立基于网络关联度的跨区域协同治理机制,实施梯度化的治理策略,也需完善动态风险防控体系,并激发多元主体治理合力.为此,构建一个“监测预警、分级干预、多元参与”的碳解锁治理体系显得尤为重要.该体系的构建可遵循以下路径:首先,建立国家层面的碳锁定动态监测与预警平台,识别高风险路径与关键节点,为精准干预提供依据.其次,推行区域差异化的干预策略,东部地区可侧重于制度创新与深化市场机制,巩固解锁成果;中部地区着眼于产业升级与技术应用,保持转型动能;西部地区则需强化资金与政策支持,建立化解资源依赖的缓冲机制.最后,积极引导多元主体参与,将碳锁定风险纳入企业环境信息披露框架,鼓励发展跨区域低碳创新联盟,并通过绿色消费激励引导公众参与,共同形成破解碳锁定困境的社会合力.

3　结论

3.1　我国碳锁定水平整体呈下降趋势.全国碳锁定水平从 2002 年的 0.676 降至 2022 年的 0.508,累计降幅 24.8%,总体上呈现“缓慢下降—加速解锁—平缓波动”的三阶段特征,空间维度呈现“东部率先解锁、中部快速转型、西部持续跟进”分异特征.时空演化分析进一步显示,全国范围碳锁定离散程度加深但呈现“东部最高、中部次之、西部最低”的梯度差异,区域差异扩大且多极化趋势明显.

3.2 我国省域碳锁定空间溢出效应显著.产业结构能显著降低本地碳锁定水平(直接效应−0.0024,),并缓解邻近地区锁定(间接效应−0.0092);劳动者报酬比重能显著降低本地碳锁定(直接效应−0.2007),并抑制邻近地区锁定(间接效应−0.5602),是区域协同减排的关键路径;城乡结构能显著加剧本地碳锁定(直接效应 0.3890),但其对邻近地区的碳锁定影响不显著.

3.3 我国碳锁定空间传导区域分异明显.碳锁定网络传导呈现“省际关联持续深化、枢纽节点极化显著、区域传导路径显化”的演进特点,胡焕庸线以东形成“低碳枢纽−高密度关联”网络,以西表现为离散的星型结构.板块互动呈现秦岭−淮河线南北功能分化固化,核心节点稳固强化,中部过渡带功能复杂化,东部沿海省份经纪人板块协同作用突出的特点.

3.4 我国碳锁定未来演进呈现时空异质性.时间维度存在边际递减与局部反弹风险,空间维度表现出关键节点依赖性.预测结果显示,低碳状态维持概率 83.33%,但存在 16.67%回调风险;中碳状态维持概率 50%,且向高碳转移概率达 37.5%;高碳状态维持概率 50%.网络脆弱性分析表明,在以中介中心度为标靶蓄意攻击情境下,网络效率降幅和最大连通子图规模缩小最为高效,验证了碳锁定空间传导的节点依赖性,并标示了破坏碳锁定网络的政策靶向.

3.5 本文的不足之处主要有:碳锁定空间演进基于省级层面的宏观分析,未能涉及产业或企业之间微观传导;初步揭示了省际碳锁定空间演进的特征,背后的深层原因有待进一步挖掘.

参考文献:

[1] Unruh G C. Understanding carbon lock−in [J]. Energy Policy, 2000, 28(12):817−830.

[2] Mitchell C. The Political Economy of Sustainable Energy [M]. Palgrave Macmillan, 2009:1−236.

[3] 梁 中,徐 蓓.“碳锁定”研究:一个文献综述 [J]. 经济体制改革, 2016,(2):35−40.
Liang Z, Xu B. "Carbon Lock−in" research: a literature review [J]. Reform of Economic System, 2016,(2):35−40.

[4] Seto C K, Davis J S, Mitchell B R, et al. Carbon lock−in: types, causes, and policy implications [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2016,41(1):425−452.

[5] 刘宏笪,张济建,张 茜.全球供应链视角下的中国碳排放责任与形象 [J]. 资源科学, 2021,43(4):652−668.
Liu H D, Zhang J J, Zhang Q. China's carbon emission responsibility and image from the perspective of global supply chain [J]. Resources Science, 2021,43(4):652−668.

[6] 蔡海亚,何彬斌,李 静.中国碳锁定的时空演化、驱动因素及溢出效应分析 [J]. 统计与决策, 2025,41(1): 92−97.
Cai H Y, He B B, Li J. Analysis of spatiotemporal evolution, driving factors and spillover effects of carbon lock−in in China [J]. Statistics & Decision, 2025,41(1):92−97.

[7] 牛鸿蕾,刘志勇.中国碳锁定效应的测度指标体系构建与实证分析 [J]. 生态经济, 2021,37(2):22−27.
Niu H L, Liu Z Y. Construction of measurement indicator system of China's carbon lock−in effect and its empirical analysis [J]. Ecological Economy, 2021,37(2):22−27.

[8] Erickson P, Kartha S, Lazarus M, et al. Assessing carbon lock−in [J]. Environmental Research Letters, 2015,10(8):1−7.

[9] 牛鸿蕾.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, 2023,39(8):153−157.
Niu H L. Study on the measurement and spatiotemporal evolution characteristics of carbon lock−in in China's manufacturing industry [J]. Statistics & Decision, 2023,39(8):153−157.

[10] 蔡海亚,徐盈之,双家鹏.区域碳锁定的时空演变特征与影响机理 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2016,18(6):23−31.
Cai H Y, Xu Y Z, Shuang J P. The study of temporal and spatial evolution characteristics and the effect mechanism of regional carbon lock−in [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2016,18(6):23−31.

[11] 徐盈之,陈 艳.中国省际碳锁定的空间溢出效应——基于空间自回归模型的实证研究 [J]. 华南师范大学学报(社会科学版), 2018,(2):126−134.
Xu Y Z, Chen Y. Spatial spillover effects of interprovincial carbon lock−in in China: An empirical study based on spatial autoregressive model [J]. Journal of South China Normal University (Social Science Edition), 2018,(2):126−134.

[12] 方大春,王琳琳.我国碳排放空间关联的网络特征及其影响因素研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2023,32(3):571−581.
Fang D C, Wang L L. Network characteristics and influencing factors of spatial correlation of carbon emissions in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(3):571−581.

[13] 刘华军,刘传明,孙亚男.中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究 [J]. 中国工业经济, 2015,(5):83−95.
Liu H J, Liu C M, Sun Y N. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China [J]. China Industrial Economics, 2015,(5):83−95.

[14] 王 勇,毕 莹,王恩东.中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估 [J]. 中国人口·资源与环境, 2017,27(10):131−140.
Wang Y, Bi Y, Wang E D. Scene prediction of carbon emission peak and emission reduction potential estimation in Chinese industry [J]. China Population, Resources and Environment, 2017,27(10):131−140.

[15] 王雪亭,郑非凡,许 野,等.双碳目标背景下宁夏地区碳达峰预测 [J]. 中国环境科学, 2023,43(S1):347−356.
Wang X T, Zheng F F, Xu Y, et al. Carbon peak prediction in Ningxia under the Dual Carbon Background [J]. China Environmental Science, 2023,43(S1):347−356.

[16] 林伯强,刘希颖.中国城市化阶段的碳排放:影响因素和减排策略 [J]. 经济研究, 2010,45(8):66−78.
Lin B Q, Liu X Y. China's carbon dioxide emissions under the urbanization process: Influence factors and abatement policies [J]. Economic Research Journal, 2010,45(8):66−78.

[17] 刘合林,徐 颖,唐永伟,等.长江经济带省级行政单元碳达峰的多情景预测 [J]. 长江流域资源与环境, 2025,34(3):467−478.

Liu H L, Xu Y, Tang Y W, et al. Prediction of carbon peak under multiple scenarios for provincial administrative units in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025,34(3):467−478.

[18] 许　静,刘　慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1863−1874.
Xu J, Liu H. Assessment and prediction of ecosystem services trade−offs and synergies relationships in Gansu province [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1863−1874.

[19] 王　旭,马伯文,李　丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测 [J]. 自然资源学报, 2020,35(1):230−242.
Wang X, Ma B W, Li D, et al. Multi−scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei province based on FLUS model [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(1):230−242.

[20] 王志远,吴　凡,万　鼎,等.多情景模拟区域土地利用变化对碳储量的影响 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):6063− 6078.
Wang Z Y, Wu F, Wan D, et al. Multi−scenario simulation of the impact of regional land use change on carbon reserve [J]. China Environmental Science, 2023,43(11):6063−6078.

[21] 胡剑波,罗志鹏,李　峰.“碳达峰”目标下中国碳排放强度预测——基于 LSTM 和 ARIMA−BP 模型的分析 [J]. 财经科学, 2022,(2):89−101.
Hu J B, Luo Z P, Li F. Prediction of China's carbon emission intensity under the goal of carbon peak: Analysis based on LSTM and ARIMA−BP model [J]. Finance & Economics, 2022,(2):89−101.

[22] 史新杰,谭雪勤,周　茹,等.基于机器学习的河南省农业碳排放驱动因素分析和情景预测 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5885−5893.
Shi X J, Tan X Q, Zhou R, et al. Machine learning−based analysis and scenario prediction of agricultural carbon emission drivers in Henan province [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5885−5893.

[23] 汪晓春,熊　峰,王振伟,等.基于 POI 大数据与机器学习的养老设施规划布局——以武汉市为例 [J]. 经济地理, 2021,41(6):49−56.
Wang X C, Xiong F, Wang Z W, et al. Planning and layout of facilities for the elders based on POI and machine learning: A case study of wuhan [J]. Economic Geography, 2021,41(6):49−56.

[24] Unruh C G, Carrillo−Hermosilla J. Globalizing carbon lock−in [J]. Energy Policy, 2004,34(10):1185−1197.

[25] 孙丽文,任相伟.我国“碳锁定”治理过程中的诸方博弈研究——基于制度解锁视角 [J]. 企业经济, 2019,(8):53−59.
Sun L W, Ren X W. Study on the game among parties in the governance process of carbon lock−in in China: From the perspective of institutional unlocking [J]. Enterprise Economy, 2019,(8):53−59.

[26] Kline D. Positive Feedback, Lock−In, and Environmental Policy [J]. Policy Sciences, 2001,34(1):95−107.

[27] 曹　霞,于　娟.绿色低碳视角下中国区域创新效率研究 [J]. 中国人口・资源与环境, 2015,25(5):10−19.
Cao X, Yu J. Regional innovation efficiency in China from the green low−carbon perspective [J]. China Population, Resources and Environment, 2015,25(5):10−19.

[28] 胡西武,耿强艳,尹国泰.共同富裕背景下三江源国家公园原住民可持续脱贫能力测度及作用机理研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6):8−14.
Hu X W, Geng Q Y, Yin G T. Measurement and mechanism of sustainable poverty alleviation capability of native herdsmen in Sanjiangyuan National Park under the background of common prosperity [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6):8−14.

[29] 李　刚,李建平,孙晓蕾,等.主客观权重的组合方式及其合理性研究 [J]. 管理评论, 2017,29(12):17−26,61.
Li G, Li J P, Sun X L, et al. Empirical study on the influencing factors of high technology industrial security [J]. Management Review, 2017,29(12):17−26,61.

[30] 陈诗一,陈登科.雾霾污染、政府治理与经济高质量发展 [J]. 经济研究, 2018,53(2):20−34.
Chen S Y, Chen D K. Air pollution, government regulations and high−quality economic development [J]. Economic Research Journal, 2018, 53(2):20−34.

[31] 王贤彬,钟夏洋.中央垂直监管如何影响企业环境绩效?——基于《环境空气质量标准》的准自然实验 [J]. 产业经济研究, 2022,(6):29−42.
Wang X B, Zhong X Y. How does central vertical supervision affect enterprise environmental performance? Quasi−experimental evidence from China's "Ambient air quality standards" [J]. Industrial Economics Research, 2022,(6):29−42.

[32] 张建鹏,陈诗一.金融发展、环境规制与经济绿色转型 [J]. 财经研究, 2021,47(11):78−93.
Zhang J P, Chen S Y. Financial development, environmental regulations and green economic transition [J]. Journal of Finance and Economics, 2021,47(11):78−93.

[33] 柳亚琴,孙　薇,朱治双.碳市场对能源结构低碳转型的影响及作用路径 [J]. 中国环境科学, 2022,42(9):4369−4379.
Liu Y Q, Sun W, Zhu Z S. The impact of carbon market on the low−carbon transition of energy mix and its action path [J]. China Environmental Science, 2022,42(9):4369−4379.

[34] 张　玥,代亚强,柯新利.中国新型城镇化空间关联网络及其对土地利用生态效率的影响——基于网络节点中心度视角 [J]. 中国土地科学, 2023,37(9):117−129.
Zhang Y, Dai Y Q, Ke X L. Spatial correlation network characteristics of new−type urbanization and its cmpact on the land use eco−efficiency in China: A perspective of network centrality [J]. China Land Science, 2023,37(9):117−129.

[35] 郭文强,史瑞雪,雷　明,等.中国省际碳排放空间关联网络结构特征及碳平衡分区 [J]. 生态学报, 2024,44(18):8003−8020.
Guo W Q, Shi R X, Lei M, et al. Structural characteristics and carbon−balanced zoning of spatial correlation network of inter−provincial carbon emissions in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(18):8003−8020.

[36] Zhang Y J, Ayyub B M, Saadat Y, et al.A double−weighted vulnerability assessment model for metrorail transit networks and its application in Shanghai metro [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2020,29:100358.

[37] Ma Z, Yang X, Wu J J, et al.Measuring the resilience of an urban rail transit network: A multi−dimensional evaluation model [J]. Transport Policy, 2022,129:38−50.

[38] 梁　中,徐　蓓.中国省域碳压力空间分布及其重心迁移 [J]. 经济地理, 2017,37(2):179−186.
Liang Z, Xu B. The spatial distribution of the migration of carbon pressure gravity center of provinces in China [J]. Economic Geography, 2017,37(2):179−186.

作者简介：胡西武(1973−),男,湖北荆州人,教授,博士,主要研究方向为生态经济学与气候变化经济学等.发表论文 100 余篇.2827617701@qq.com.