

DOI: 10.20103/j.stxb.202312132719

耿艺伟, 李效顺, 陈姜全, 刘希朝, 张金鑫, 成菊美. 中国国土空间韧性及效率的耦合关系及跃迁机制. 生态学报, 2024, 44(14): 6003-6019.

Geng Y W, Li X S, Chen J Q, Liu X Z, Zhang J X, Cheng J M. Coupling relationship and transition mechanism between resilience and efficiency in China's territorial space. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6003-6019.

中国国土空间韧性及效率的耦合关系及跃迁机制

耿艺伟^{1,2}, 李效顺^{1,2,*}, 陈姜全^{1,2}, 刘希朝^{1,2}, 张金鑫³, 成菊美^{1,4}

1 中国矿业大学公共管理学院, 徐州 221116

2 中国矿业大学中国资源型城市转型发展及乡村振兴研究中心, 徐州 221116

3 南京农业大学公共管理学院, 南京 210000

4 宜兴市自然资源和规划局, 无锡 214200

摘要: 在中国国土空间面临结构转型和“蓝图”重塑的关键时期, 探究韧性与效率的耦合关系及跃迁驱动机制, 对于破解国土空间路径依赖与低效利用困境具有重要意义。基于多种空间分析方法, 从时空交互视角研究中国国土空间韧性与效率耦合关系的差异格局、动态演化及跃迁机制。结果表明: (1) 考察期内, 中国国土空间韧性和效率均符合区域发展菱形结构板块分异的共性特征, 在数值指数与动态演进方面, 国土空间韧性呈路径依赖与锁定, 效率呈波动式增长等个性特征。(2) 全国耦合关系与中部地区演化轨迹相似, 呈现缓慢增长态势, 四大区域呈东部(0.832) > 中部(0.661) > 东北(0.623) > 西部(0.427)的梯度分异特征, 东南省份与西北省份相比呈协作态势强于竞争态势。(3) 跃迁模式的驱动机制表明二者耦合关系发展方向呈自西北向东南的“同向制约-反向发展-同向发展”梯度格局, 并存在“产业-经济驱动、经济-产业-城镇化驱动、政府-科技-人口制约、科技-政府制约”4种跃迁模式。因此, 国土空间高质量发展不仅需要权衡韧性或效率的单一增长方式, 还需要考虑二者耦合过程中不同跃迁模式的驱动机制, 以期实现“共性兼具个性”的协同优化方案。

关键词: 国土空间韧性; 国土空间效率; 跃迁机制

Coupling relationship and transition mechanism between resilience and efficiency in China's territorial space

GENG Yiwei^{1,2}, LI Xiaoshun^{1,2,*}, CHEN Jiangquan^{1,2}, LIU Xizhao^{1,2}, ZHANG Jinxin³, CHENG Jumei^{1,4}

1 School of Public Policy and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 Research Center for Transition Development and Rural Revitalization of Resource-based Cities in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

3 School of public administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210000, China

4 Natural Resources and Planning Bureau of Yixing, Wuxi 214200, China

Abstract: In the critical period of structural transformation and blueprint reshaping of China's territorial space, exploring the coupling relationship between territorial space resilience and efficiency is crucial for addressing the challenges of path dependence and inefficient utilization. Utilizing various spatial analysis methods, this study investigates the differential patterns, dynamic evolution, and transition mechanisms of the coupling relationship between resilience and efficiency in China's territorial space from a spatiotemporal interaction perspective. The results showed that: (1) During the study period, both resilience and efficiency of China's territorial space exhibited common regional differentiation characteristics consistent with the regional development diamond structure. Territorial space resilience showed path dependency, while

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874192); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助(KYCX24_2966); 中国矿业大学研究生创新计划项目(2024WLKXJ122); 中央高校基本科研业务费专项资金

收稿日期: 2023-12-13; **采用日期:** 2024-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixiaoshun1983@163.com

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

territorial space efficiency exhibited fluctuating growth. (2) The evolutionary trajectory of the coupling relationship between territorial space resilience and efficiency of China was similar to that of the central region, exhibiting a trend of slow growth. The four major regions of China showed a gradient differentiation in the coupling of resilience and efficiency, ranked as Eastern China (0.832) > Central China (0.661) > Northeast China (0.623) > Western China (0.427). Compared to the northwestern provinces, the southeastern provinces of China demonstrated a stronger collaborative stance over a competitive one. (3) The spatiotemporal transition patterns of the coupling coordination level between resilience and efficiency in China's territorial space were based on the differences in driving/restraining mechanisms at high and low quantiles, collectively forming four types of transition modes: industry-economic driven, economic-industry-urbanization driven, government-technology-population constraint, and technology-government constraint. Moreover, these transition modes progressively displayed a concurrent constraint-reverse development-concurrent development ladder-like pattern from northwest to southeast China. Therefore, achieving high-quality development of territorial space requires balancing the growth of resilience and efficiency while considering the driving mechanisms of different transition modes during their coupling process. The study aims to achieve a synergistic optimization scheme that integrates both commonality and individuality.

Key Words: territorial space resilience; territorial space efficiency; transition mechanism

中国自改革开放后的四十年间,社会正在以前所未有的速度、规模和深度持续变革和进步,城镇化率由 17.95% (1978 年) 增长至 66.16% (2023 年),城镇建成区面积从 0.74 万 km² (1981 年) 扩张至 6.37 万 km² (2022 年),扩张近 9 倍。但是长期“重量轻质”的粗放式发展模式和“先富带后富”引致的区域不均和结构失衡等问题,亟需通过全面提高国土资源利用效率来破解用地瓶颈。提高国土利用效率不是可持续发展的终极目标,还应当加快推动国土空间资源“合理”利用^[1]。《2022 年全球自然灾害评估报告》^[2]显示,中国自然灾害发生的频次、直接经济损失在全球分别高居第 4 位、第 6 位 (高达 66 亿美金)。在 2023 年,中国华北、东北遭遇极端强降雨,局地山洪地质灾害突发造成直接经济损失 2393 亿元,偶发性不确定冲击已经严重威胁到国土空间安全与人民生活福祉,亟需多元韧性思考^[3-4]。党的十九届五中全会明确指出“把安全发展贯穿国家发展各领域和全过程”的底层要求,与“全面提高资源利用效率”的国民经济和社会发展第十四个五年规划、2035 年远景目标的国家战略要求。如何在满足国土空间效率增长的同时规避其负外部性? 协调韧性与效率的适应关系,成为中国式现代化治理路径的重要问题。

国土空间韧性强调“鲁棒平衡、动态适应、稳态转型”,国土空间效率强调“要素低投、高效产出、最优占比”,但这并不意味着二者相互矛盾^[5],二者协同提升系统可持续和变革转型能力,以推进系统由无序到有序,由初级到高级的动态转换过程。目前,针对韧性和效率的研究,国内外学者多把二者作为独立对象。首先,韧性理论由加拿大生态学家 Holling 引入系统生态学,表征系统在遭受扰动后恢复到原有状态并保持其结构和功能的能力^[6]。随着对系统认知深化与拓展,韧性研究正处于由均衡论向演化论转变的过渡阶段^[7]。国外学者持续挖掘韧性内涵,例如针对系统韧性与韧性系统展开辩证^[8],同时与复杂网络的联系日益紧密^[9],且将韧性的复杂系统思维应用于生态修复^[10]。国内学者一方面基于韧性理论,从解构内涵^[11]、适应循环^[12]到体制转换^[13]逐渐深化;另一方面以现代地理学为基础,探索生态修复^[14]、生态韧性优化^[15]与国土空间治理^[16]等的理论方法与实践路径。针对国土空间韧性研究,国外学者已经立足区域规划及相关决策模型展开定量评估^[17],国内国土空间韧性概念源于《省级国土空间规划编制指南》,并明确“将提升国土空间韧性”作为指导性要求之一,形成从国土空间的灾害管理和规划引导^[18-19]逐渐拓展至不同区域国土空间韧性的内涵机理^[20-21]的探究过程。其次,国土空间效率研究相对成熟,国外已针对城镇空间^[22]、农业空间^[23]和生态空间^[24]开展了丰富的理论探索与实证分析。国内在数理层面,从差异视角^[25]、用地类型^[26]和空间异质^[27]等方面定量探究时空特征规律;在机理层面,从系统性、阶段性全局/局部探究效率与城镇化、经济增长、环境规制等要素的互动机理与影响机制^[28-29]。最后,针对二者关系的研究,国外学者从集成电路^[30]和交通网络^[31]等工科领域探究韧性与效率协同提升的实施路径,国内学者则针对水系统^[32]、海洋渔业^[5]、生态系统^[33]、农业系统^[34]和经济增长^[35]等视角展开二者动态平衡研究。多位学者研究结论共同表明韧性与效率

存在紧密的耦合关系,为本研究奠定坚实基础,但还存在以下不足:在研究视角上,第一,国土空间韧性研究尚且停留在理论认知层面,缺少定量分析。第二,国土空间系统作为承载人类社会活动的主要载体,缺乏对“发展与安全”战略视角下国土空间韧性及效率耦合关系的把握。在特征挖掘上,无论是韧性还是效率研究,目前多从时间序列和空间分布分别展开时空特征分析,较少将时间和空间结合细化探究研究目标的时空关联动态性特征,难以洞悉区域局部空间结构的时空交互特征。

鉴于此,本文首先构建了从国土空间韧性及效率的差异格局,到时空交互视角下二者耦合关系动态演化及跃迁机制的完整框架;其次,同时细化考量了时间序列和空间维度双重因素,深化了二者耦合关系的时空关联动态性特征认知;最后,从全局考虑了中国省域国土空间韧性及效率演变差异与耦合驱动机制,为制定“共性兼具个性”的国土空间优化政策提供定量参考和决策依据。

1 理论剖析:国土空间韧性及效率的耦合互馈机制

国土空间效率是发展的指示要素,国土空间韧性是系统安全的靶向前提,准确识变国土空间韧性及效率耦合关系是国土空间科学应变不确定性风险和主动求变高效机遇期的逻辑本质(图1)。

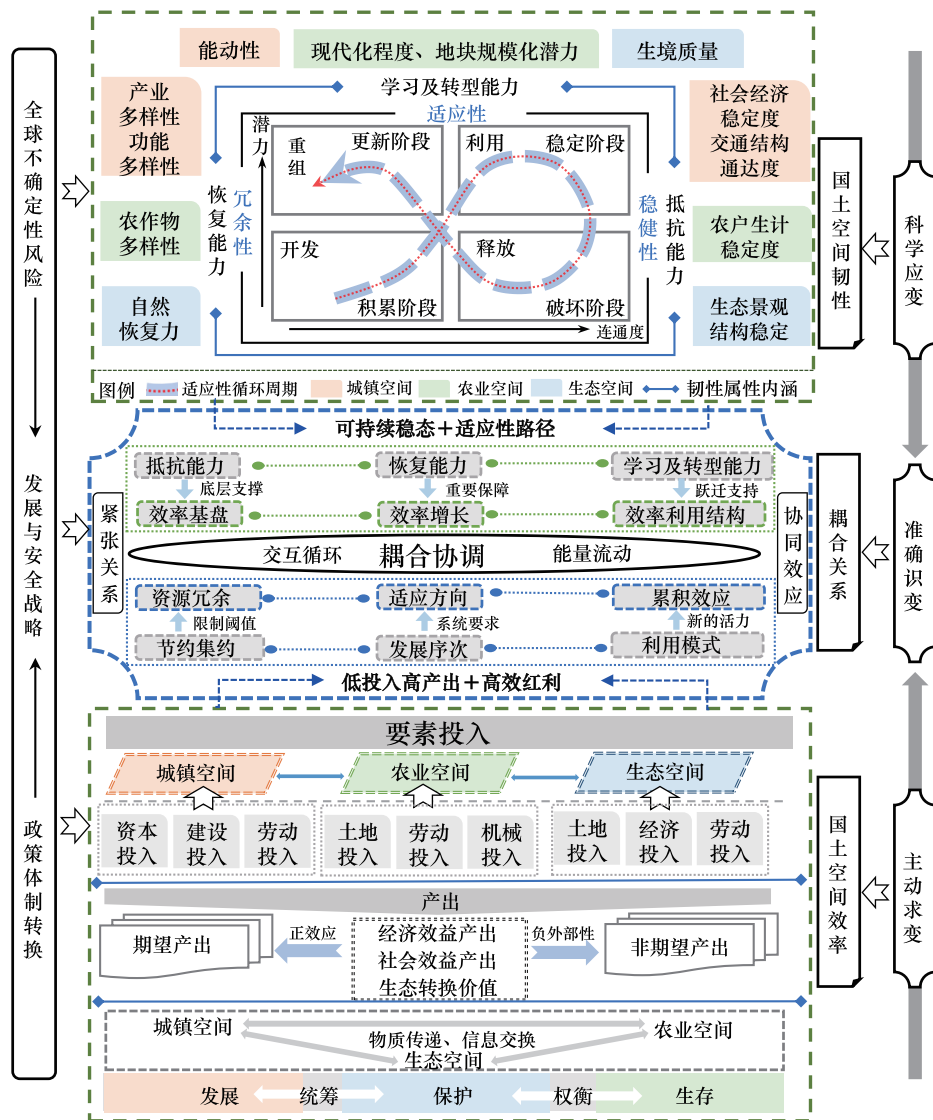


图1 国土空间韧性及效率的相互作用机理

Fig.1 The interaction mechanism of territorial space resilience and efficiency

国土空间韧性是指在应对外源复杂结构性干扰和不确定性风险等影响时,通过系统稳健性、冗余性和适应性向应对突发危机输送抵抗和恢复的“能量”,及为实现国土资源长期可持续利用提供学习和转型的适应能力,三种特征交互、相扣、递进,共同推进国土空间的螺旋式动态发展。首先,国土空间韧性的抵抗能力为效率基盘提供底层支撑,稳健性是韧性的前提(抵抗能力),是指国土空间的基本状况和功能保持稳定的特性,要求基于空间规划和合理布局的土地利用、空间配置,提高资源利用效率。其次,国土空间韧性的恢复能力为效率增长提供保障,冗余性是韧性的基础(恢复能力)。冗余并不代表着资源闲置浪费,而是指具备迅速恢复和修复的能力,包括自然生态恢复、基础设施重建以及社会经济恢复能力,要求尽可能短时间内重新配置资源,使其得到有效利用。最后,国土空间韧性的学习和转型能力为效率利用结构提供跃迁支持。本文将适应性内涵拓展至人的能动性,能动性使个体或群体更有能力采取灵活策略来应对复杂变化和危机,实现资源最大化利用和碰撞效应,提升竞争力和适应能力。

国土空间效率是以具有资源支撑互馈功能的国土空间系统运行为基础,在满足日益丰富的物质财富与生态财富前提下,各功能类型空间(城镇空间、农业空间和生态空间)资源要素所产生的投入与产出的占比关系,强调如何以最小的要素投入获得最大化综合效益的资源利用方式。首先,国土空间的资源节约集约为国土空间韧性的资源冗余提供限制阈值。这些限制阈值根据资源状况、环境条件、社会经济需求等因素进行制定,防止资源的过度开发和消耗。其次,各功能类型空间(城镇空间、农业空间和生态空间)通过差异化发展需求(发展、保障和保护)为国土空间韧性提供方向要求。最后,国土空间效率的利用模式为国土空间韧性的累积效应提供动力引擎。通过鼓励创新技术和经营模式提高生产效率和资源利用效率,优化生产流程和供应链,为国土空间韧性的累积效应注入新的活力。

2 样本选择与数据来源

本文研究区为中国 31 个省份,数据主要包括社会经济、土地利用和其他数据。①社会经济属性数据来源于 2000—2020 年《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》和 31 个省份统计年鉴。②土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的土地利用遥感监测数据集,主要涉及 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年与 2020 年 5 期数据。③道路交通数据来源于 Open Street Map;人口密度数据来源于 World Pop 数据集;夜间灯光数据来源于高分湖北中心 LJ1-01 产品,空间分辨率为 1km,以上数据均进行了数据清洗及预处理,个别缺失或异常数据进行线性插值处理。

3 指标体系的构建与研究方法

3.1 国土空间韧性和效率的指标体系构建

国土空间韧性指标体系的构建包括 3 个维度,具体来说:①稳健性,土地、经济和交通等具有社会经济和交通结构属性的关键要素运行逻辑是使城镇空间保持稳健的基础;农业空间稳健性事关生计根本,其农业产值和垦殖程度是关键变量,农业产值影响收入水平与就业机会,垦殖程度过高会破坏土壤结构、影响系统稳健。生态空间稳健性通过景观格局的多样性与连通性表征。②冗余性,城镇空间的冗余性主要以产业多样性和具有同一功能的要素丰度为标准。农作物多样性通过种植多种不同类型的农作物减少对特定农作物依赖。自然恢复力指的是自然系统恢复其原有或近似原有状态的能力。③适应性,本文将城镇空间适应性拓宽至人的能动性。农业技术可以提高生产效率、减少资源消耗等使其更具学习和转型能力。生境质量通过维持物理、化学条件和生物多样性水平,增强生态空间适应性能力,具体测度指标体系见表 1。

国土空间效率评价体系已较为成熟,为本文研究奠定坚实基础^[36]。①城镇空间作为开发强度最高地理空间,强调非农活动的高效集约利用。以第二三产业从业人员数和建设用地面积作为劳动力和土地的投入指标,以二三产业增加产值作为实际产出;以二氧化硫排放量作为非期望产出。②农业空间是以农业生产活动为主的地域空间,强调农户生计可持续发展。以耕地面积和农业从业人数作为土地和劳动力的实际投入,以

农业年产值作为实际经济产出,以农业碳排放量作为非期望产出。③生态空间多通过转换成经济/社会效益测算得到其利用效率。以审批建设项目环保投资总额和生态用地面积作为生态空间的实际资本和土地投入,生态系统服务价值作为期望产出,取生态环境质量指数的倒数作为非期望产出。

表 1 国土空间韧性和效率耦合评估指标体系

Table 1 Coupling evaluation index system of territorial space resilience and efficiency

类别 Category	准则层 Rule layer	要素层 Feature layer	指标层 Index layer	计算方式/内涵阐释 Calculation method/Connotation explanation	权重 Weights
国土空间韧性 Territorial space resilience	稳健性	城镇空间	社会经济稳定度	国内生产总值增长率×0.5+城乡居民储蓄年末余额增长率×0.5	0.0761
			交通结构通达度	道路密度×0.5+高等级道路丰富度×0.5	0.0621
			农业生计稳定度	农业产值增长率	0.0598
		农业空间	垦殖系数	耕地面积/土地总面积×100%	0.0575
			生态景观多样性	香农多样性指数×0.5+面积加权平均斑块分形维数×0.5	0.0596
			景观连通性	蔓延度指数×0.5+斑块凝聚度指数×0.5	0.0618
		生态空间	产业结构多样性	具体参考文献 ^[37]	0.0623
			功能集聚辐射度	夜间灯光集聚核密度	0.0554
			农作物多样性指数	Shannon-Wiener 指数 ^[38]	0.0595
	冗余性	城镇空间	自然恢复力指数	具体参考文献 ^[39—40]	0.0621
			生物丰度	具体参考文献 ^[41—42]	0.0647
			人力创新动能	高等在校生人数/区域总人口	0.0597
		农业空间	政府投入强度	全社会固定资产投资总额增长率	0.0549
			农业现代化程度	农业机械总动力/耕地面积×0.5+农业科技投入水平×0.5	0.0678
			地块规模化潜力	1/(耕地破碎度×0.5+居民点用地破碎度×0.5)	0.0673
		生态空间	生境质量	具体参考文献 ^[43]	0.0694
			投入	劳动力要素投入	0.395
			建设用地面积	土地要素投入	
国土空间效率 Territorial space efficiency	城镇空间效率	期望产出	第二三产业增加值	经济效益产出	
			非期望产出	二氧化硫排放量	
		农业空间效率	投入	耕地面积	0.312
			农业从业人数	劳动力要素投入	
	生态空间效率	期望产出	农业年产值	经济效益产出	0.293
			非期望产出	农业碳排放量	
		投入	审批建设项目环保投资总额	环保资本投入	
			生态用地面积	土地要素投入	
		期望产出	生态系统服务价值	生态效应产出	
			非期望产出	生态环境质量指数	

3.2 研究方法

3.2.1 国土空间韧性指数测度方法

通过借鉴已有的相关研究成果^[46],利用极差标准化进行指标标准化处理,熵权法确定指标权重,通过加权求和法构建国土空间韧性指数,具体公式为:

$$X'_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{正向指标}) \quad (1)$$

$$X'_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{逆向指标}) \quad (2)$$

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (3)$$

$$e_j = -1/\ln(n) \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$W_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^n (-e_j)} \quad (5)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n X'_{ij} \times W_j \quad (6)$$

式中:(1)一(2)为指标数据标准化,(3)一(5)为熵权法确定权重,(6)为加权求和确定指数。 X'_i 是标准化数值, X_i 是实际值, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 是指标最大和最小数值。 P_{ij} 为第 i 个对象第 j 个指标比重; e_j 为信息熵; W_j 为权重; X_{ij} 为第 i 个对象第 j 个指标分值; n 为指标个数。

3.2.2 国土空间(利用)效率指数测度方法

非期望产出的超效率 SBM 模型是国土空间效率评价研究中应用最为广泛的方法之一。与传统 SBM 模型相比,该模型不仅可以区别处理期望产出和非期望产出,同时可以将有效决策单元进行再分解以充分比较^[36]。本文构建非期望产出超效率 SBM 模型具体如下:

$$\text{Min } \varphi = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_i}{x_{ik}} \right)}{\frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{p=1}^{s_1} \frac{y_p^d}{y_{pk}^d} + \sum_{q=1}^{s_2} \frac{y_p^u}{y_{qk}^u} \right)} \quad (7)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} x_{ik} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - \bar{x}_i \\ y_{pk}^d \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{pj}^d \lambda_j - \bar{y}_p^d \\ y_{qk}^u \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{qj}^u \lambda_j - \bar{y}_p^u \\ \bar{x}, \bar{y}^d, \bar{y}^u, \lambda_j \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

式中: ψ 为国土空间效率; n 为决策个数; m 是投入个数; S_1 是期望产出个数; S_2 是非期望产出个数; $\bar{x}_i, \bar{y}_p^u, \bar{y}_p^d$ 为松弛变量; $x_{ik}, y_{pk}^d, y_{qk}^u$ 是 i 投入量、 p 期望产出量和 q 非期望产出量; λ_j 为权重向量。

3.2.3 耦合协调度模型

本文通过构建耦合协调度模型^[47]以定量评价国土空间韧性与效率协同发展效应关系,公式如下:

$$P = \sqrt{\left[\frac{4u_1 u_2}{(u_1 + u_2)^2} \right]^{1/2}} \times (W_1 u_1 + W_2 u_2) \quad (9)$$

式中: u_1 和 u_2 分别为国土空间韧性和效率指数,其中,效率为标准化指数; W_1 和 W_2 为分别为国土空间韧性和效率的权重系数, $W_1 = W_2 = 0.5$, P 为耦合协调度,取值区间为 $[0, 1]$ 。

3.2.4 探索性时空数据分析

厘清中国国土空间韧性与效率耦合关系的时空交互特征是探究区域协同均衡与可持续发展议题的重要前提。本文引入探索性时空数据分析(Exploratory Time-Space Data Analysis, ESTDA)方法^[48],通过整合时间和空间描述二者地理现象特征,以填补传统空间分析在历时测度的缺陷,具体如下:

①LISA 时间路径:表征空间变量的 LISA 移动特征,本文通过二者耦合水平属性值与空间滞后值迁移判

断二者时空协同变化与动态轨迹特征。

$$T = \frac{n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (10)$$

$$Q = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,1}, L_{i,T})} \quad (11)$$

式中: T 表示相对长度; Q 表示弯曲度; n 表示数量; $d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$ 表示研究单元 i 移动距离在 t 年和 $t+1$ 年间。若 T 、 Q 均大于 1, 表明研究单元具有动态局部空间结构与方向, 反之, 则情况相反。

②时空跃迁: 本文将 LISA 时间路径与 Markov 链结合形成时空跃迁矩阵, 探究区域自身与相邻单元间二者耦合关系强度局部空间关系的动态轨迹特征, 包括四种空间形态, 分别为 HH、HL、LH 和 LL^[49], 并依据研究基期(t)与末期($t+1$)空间形态的变化将其划分为四种时空跃迁类型, 如表 2 所示。

③时空交互可视化: 本文通过计算各单元与邻域间 LISA 时空移动轨迹协方差系数, 揭示二者耦合动态演化网络流特征, 包含强正向关联、弱正向关联、强负向关联与弱负向关联 4 种类型。

表 2 时空跃迁类型
Table 2 Spatiotemporal transition type

类型 Type	内涵 Connotation	表达式 Expression formulas
I 类	仅单元本身发生跃迁	$HH_t \rightarrow LH_{t+1}, HL_t \rightarrow LL_{t+1}, LL_t \rightarrow HL_{t+1}, LH_t \rightarrow HH_{t+1}$
II 类	仅相邻单元发生跃迁	$HH_t \rightarrow HL_{t+1}, HL_t \rightarrow HH_{t+1}, LL_t \rightarrow LH_{t+1}, LH_t \rightarrow LL_{t+1}$
III 类	单元及其相邻单元均发生跃迁	$HH_t \rightarrow LL_{t+1}, LH_t \rightarrow HL_{t+1}, HL_t \rightarrow LH_{t+1}, LL_t \rightarrow LH_{t+1}$
IV 类	单元与相邻单元均保持稳定	$HH_t \rightarrow HH_{t+1}, LL_t \rightarrow LL_{t+1}, LH_t \rightarrow LH_{t+1}, HL_t \rightarrow HL_{t+1}$

HH、HL、LH 和 LL 表示高高、高低、低高和低低; t 和 $t+1$ 表示研究基期和末期

3.2.5 分位数回归

分位数回归用于多个分位数求解被解释变量的条件分布的回归方程, 不受分布假设约束与异常值影响, 同时能够观察变量随分位数变化的趋势^[50]。本文借助分位数回归与时空跃迁类型的深度嵌套, 判断国土空间韧性和效率耦合水平的时空跃迁驱动机制。

假设连续随机变量 Y 的累积分布函数为:

$$F(y) = \text{Prob}(Y \leq y) \quad (12)$$

式中: Y 为连续随机变量, $F(y)$ 为变量 y 的累积分布函数, $\text{Prob}()$ 表示概率。

τ 的分位数定义为:

$$q(\tau) = \inf \{ y : F(y) \geq \tau \}, 0 < \tau < 1 \quad (13)$$

式中: τ 为分位数, 本研究共选取 $\tau = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 0.9$ 五个分位点。

则 $F(y)$ 的分位数 $q(\tau)$ 的最小化目标函数为:

$$q(\tau) = \arg \min_{\zeta} \{ \tau \int_{y > \zeta} |y - \zeta| dF(y) + (1 - \tau) \int_{y < \zeta} |y - \zeta| dF(y) \} = \arg \min_{\zeta} \{ \int \tau (y - \zeta) dF(y) \} \quad (14)$$

式中: $\arg \min_{\zeta}$ 指在设定 ζ 取值下目标函数取得最小值, $|y - \zeta|$ 为样本 y 分位数最小化残差的绝对值。

4 结果与分析

4.1 中国国土空间韧性和效率演进的时空差异

4.1.1 国土空间韧性特征

①中国省际国土空间韧性平均水平稳定、区域差距明显且动态演进缺少增长能力。基于自然断点法将国土空间韧性指数由低到高分五级(一级、二级、三级、四级和五级), 如图 2 所示。进入 21 世纪以来, 中国省际国土空间韧性平均水平从 0.366 路径锁定式极缓增长至 0.413, 阶段增长率不足 0.8%, 距江苏($0.595 \leq u_1 \leq$

0.704)、上海($0.618 \leq u_1 \leq 0.667$)等处于高等级省份差距较大,整体具有较大提升空间。②空间格局符合社会发展区域特征,与樊杰等提出的中国区域发展格局菱形结构板块划分结果相吻合,空间分布呈现出以胡焕庸线为界线,由东部沿海向西部内陆递减,以北京、上海、广东和重庆四大省份为顶点,长江中游省份为中心的菱形结构的空分布格局。③分布动态呈现“峰高下降、峰顶拓宽、中线右移”特征,核密度估计结果从绝对差距视角揭示了省际区域差异加剧,韧性发展结构失衡的态势,呈现“东部(0.527) > 中部(0.441) > 东北部(0.379) > 西部(0.273)”的区域分级特征。这与我国自改革开放以来陆续实施区域梯度、统筹区域协调、主体功能区、“四三二一”决策和新型城镇化等五大战略的空间溢出效应和资源禀赋具有极大关系,使稳健性、冗余性和适应性的抵抗能力、恢复能力和学习转型能力呈现层级特征。

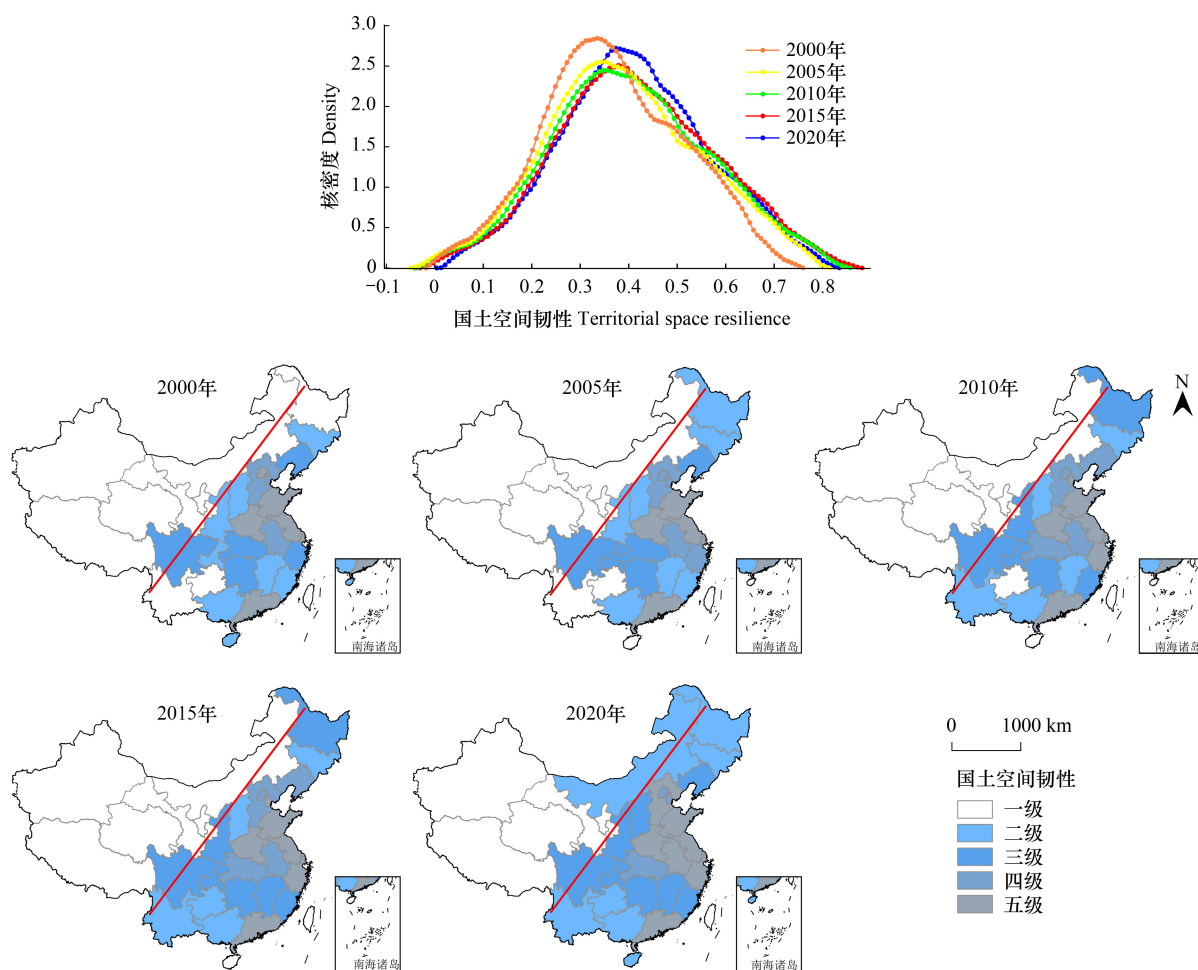


图2 中国国土空间韧性空间分异格局及核密度曲线图

Fig.2 The spatial differentiation pattern of China's territorial space resilience

4.1.2 国土空间效率特征

基于自然断点法将国土空间效率指数由低到高分五级(一级、二级、三级、四级和五级),如图3所示。①中国省际国土空间效率平均水平路径波动式增长,动态性显著。从0.386增长至0.585,阶段增长率为3.98%,远高于韧性增长率,但距离北京($0.783 \leq u_2 \leq 1.663$)、广东($0.749 \leq u_2 \leq 0.921$)等处于高等级省份同样差距较大。②中国国土空间效率空间格局同样符合社会发展区域特征,但相对于韧性分布格局,高值区扩张进程明显,更偏向于南部珠三角和沿海省域(表3)。③中国国土空间效率分布动态呈现“双峰变单峰”特征,两极分化现象正在减弱,主峰明显右移,其峰值变化表现出“上升-下降”的趋势,且波峰形态由“陡峭”逐渐演变为“扁平”。分布延展性呈现向右拖尾现象,有较大拓宽特征,即中国国土空间效率增长与动态性明显,离

散程度不断扩大。具体来看,呈现“东部(0.689)>东北部(0.495)>中部(0.445)>西部(0.347)”的区域分级特征,年均增长率最高的省份依次是北京、吉林和黑龙江,依靠国家战略倾斜、重工业技术优势,其年均增长率平均超过了 7.00%;而宁夏、新疆和西藏等省份增长率落后于全国平均水平,其年均增速不足 0.32%,这主要是由于生产技术水平、“梯度发展”战略和地理环境的约束限制。

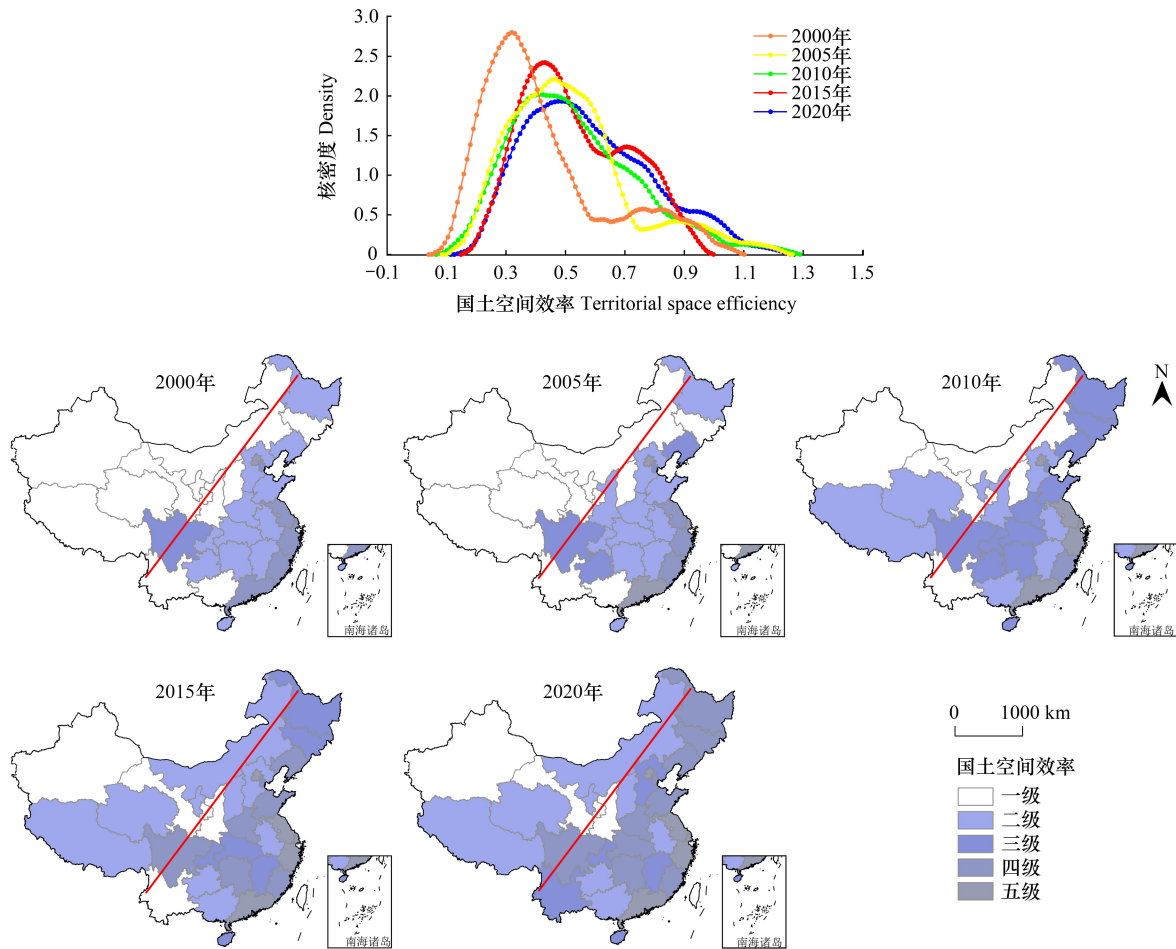


图 3 中国国土空间效率空间分异格局及核密度曲线图

Fig.3 The spatial differentiation pattern of China's territorial space efficiency

表 3 中国国土空间韧性与效率动态演进进程中的共性与个性特征

Table 3 Commonality and individual characteristics of China's territorial space resilience and efficiency

共性特征 Commonality characteristic	国土空间韧性 Territorial space resilience		国土空间效率 Territorial space efficiency
	均符合中国区域发展格局菱形结构板块的空间分异,区域差异明显		
个性特征 Individual characteristic	数值指数	路径锁定式极缓增长,高值区位于东部	路径波动式增长,高值区位于东南沿海
	空间扩张	方向有序、幅度较小、强度低	方向有序、幅度较大、强度较高
	分布动态	峰高下降、峰顶拓宽、中线右移	双峰变单峰、峰值上升-下降、形态陡峭-扁平

4.2 中国国土空间韧性和效率的耦合协调关系

4.2.1 数值指数特征

利用 SPSS 软件对中国国土空间韧性和效率的相关性进行分析发现,相关性指数为 0.680, P 值小于 0.01, 表明二者呈正相关,因此研究两者间耦合协调关系对中国国土空间国土空间可持续发展发展具有重要意义。如图 4 所示,全国耦合协调水平呈现由平稳到增长的趋势,耦合协调值由 0.579 升到 0.621,二者有序协调关系随时间推移缓慢增长。从区域尺度来看,中部地区与平均水平演变轨迹较为相似,整体均呈上升趋势,四大

区域呈现东部(0.832)>中部(0.661)>东北(0.623)>西部(0.427)的特征。其中,东部地区耦合协调水平远高于其他区域,这是由于东部地区高效灵活的资源配置模式和流动路径,同时在政策支持、地理区位和经济实力等方面极具优势。从省域尺度来看,前3位的省份分别为上海(0.962)、北京(0.946)与广东(0.934),西藏(0.213)、青海(0.166)与甘肃(0.208)位于后三位。位居首位的上海和末位的青海均值相差0.796。因此,二者耦合协调水平存在明显的省际差异。

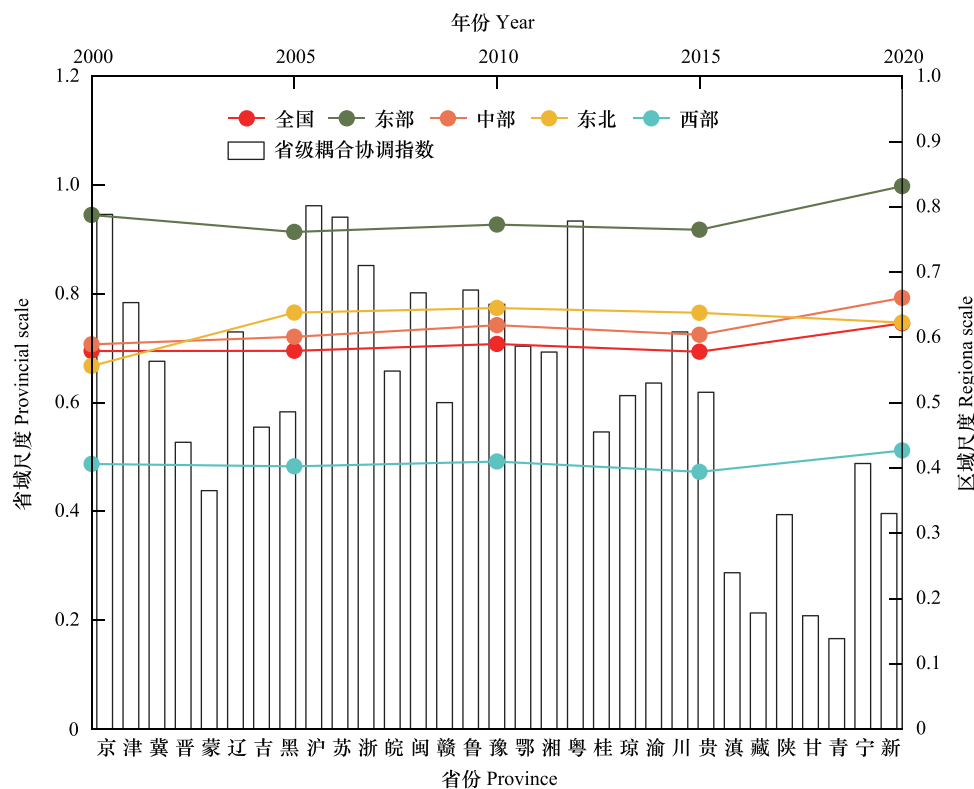


图4 中国国土空间韧性和效率耦合协调的整体性关系

Fig.4 The relationship between the coordination of China's territorial space resilience and efficiency

4.2.2 时空动态交互性特征

(1) LISA 时间路径特征

研究期内,国土空间韧性和效率耦合协调指数的时间路径大于1的省域占比33.33%,全国省域LISA相对长度较短,整体呈现出较为稳定的局部空间格局(0.311—1.250)。如图5所示,2000—2020年四大区域特征为中部(0.125)>东北(0.104)>西部(0.065)>东部(0.058),中部和东北地区耦合协调水平的局部空间结构更为动态,主要因为中部和东北地区国土空间利用逐渐由粗放型向集约型转变,需要不断进行结构转型以支持自身发展模式的优化,局部空间结构的变化更为频繁。而西部和东部虽然局部空间结构均较为稳定,但成因却大有不同,西部国土资源利用率一直低于其他地区,变化较慢;东部是由于国土空间利用与资源禀赋远高于其他地区,进步空间较小所以呈现稳定结构。LISA弯曲度具有明显的区域差异(1.227—6.812),中部(3.606)>东部(3.436)>西部(3.062)>东北(2.275),即中部和东部地区耦合关系具有较为动态空间变迁过程,这与当前东部与中部间资源流动、物质运输等交互程度比西部与东北地区强的现状相吻合。从移动方向看前后阶段协同增长的区域单元数量为26个(83.87%)且集中于东南省份,即东南省份局部空间结构整合性较强,协作态势强于竞争态势。

(2) LISA 时空跃迁特征

据表4所知,2000—2020年二者耦合协调水平的空间关联格局相对稳定,整体呈现具有显著的转移惰性

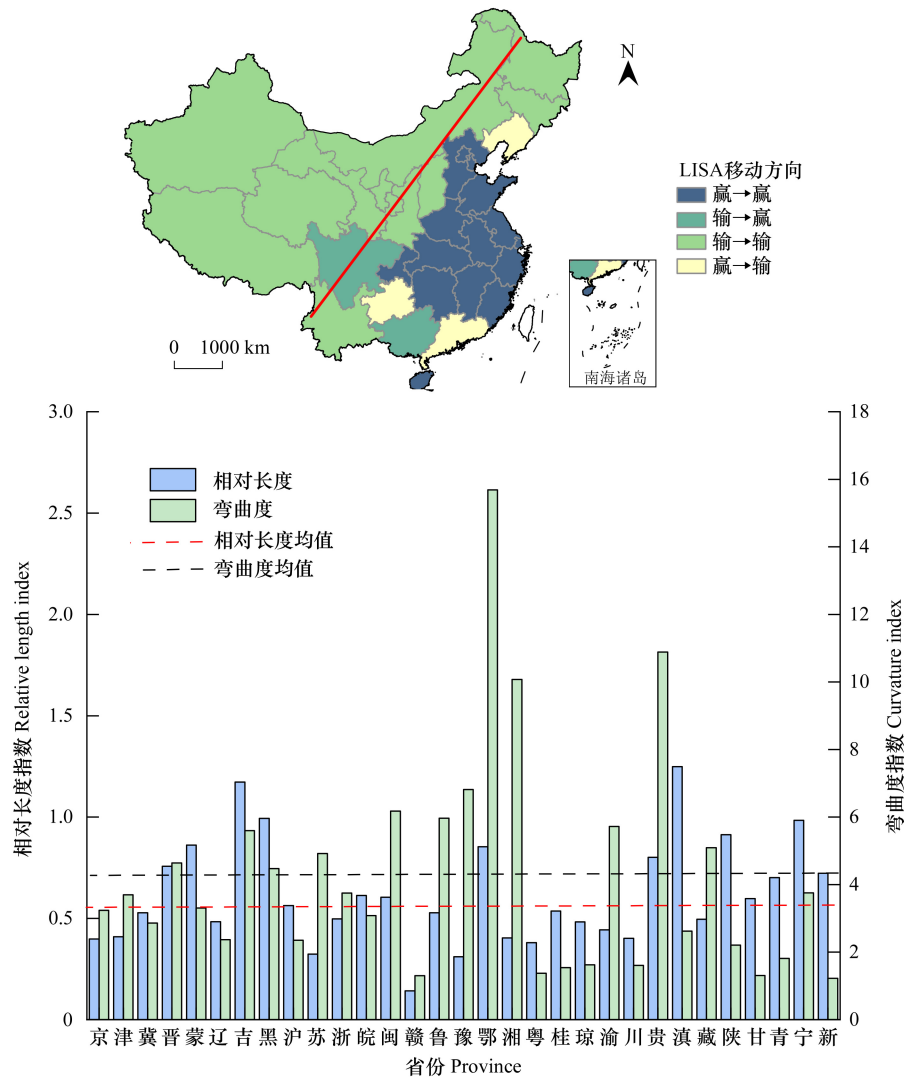


图5 LISA 时间路径的几何特征

Fig.5 Geometric characteristics of LISA time path

和路径依赖特征。其中,中国约 2/3 的省份均属于 IV 类型,具有较高的空间聚集度,即二者耦合协调水平的局部空间结构具有明显的路径依赖和路径锁定特征。京津冀沪苏浙皖闽鲁豫鄂湘渝等省份都属于 HH_t - HH_{t+1} 类型,表明这些地区的耦合协调水平较高且非常稳定,是促进韧性和效率协同发展的重点省份。属于 II 跃迁类型的省份仅有贵州省,是驱动协调水平跃迁重点省区,应提供更多政策支持。晋蒙古黑藏陕甘青宁新等省份都属于 LL_t - LL_{t+1} 类型,始终处于耦合协调低水平限值内,无发生时空跃迁,路径相对锁定。

表4 时空跃迁矩阵

Table 4 Spatiotemporal transition matrix

类型 Type	HH_{t+1}	HL_{t+1}	LH_{t+1}	LL_{t+1}
HH_t	IV 类(京津冀沪苏浙皖闽鲁豫鄂湘渝)	II 类(贵)	I 类	III 类
HL_t	II 类	IV 类(辽粤)	III 类(川)	I 类(滇)
LH_t	I 类(赣琼)	III 类	IV 类(桂)	II 类
LL_t	III 类	I 类	II 类	IV 类(晋蒙古黑藏陕甘青宁新)

(3) 时空交互可视化

本文利用时空交互可视化方法,基于时空地理网络和拓扑网络图揭示邻接省域之间的空间关联特征,探究在韧性安全与效率增长过程中相邻省域间的时空竞争或协作关系。二者耦合协调水平的时空网络格局以正向关联为主,负向关联仅有 6 对(图 6),表明时空变迁过程中具有较强空间整合性。西藏和青海、宁夏和陕西等区域呈现出强负向关联状态,反映出在耦合协调演化过程中存在一定程度的时空竞争,这一现象揭示着西部地区的区域发展政策的封闭性和长期空间不均衡。上海与江苏、北京与天津、重庆与湖南等地区显示出强烈正向关联。总之,在韧性安全与效率增长过程中,相邻省域间的时空竞争/协作关系呈现以胡焕庸线为界限,西北呈竞争态势紧张关系,东南呈良性协作关系。

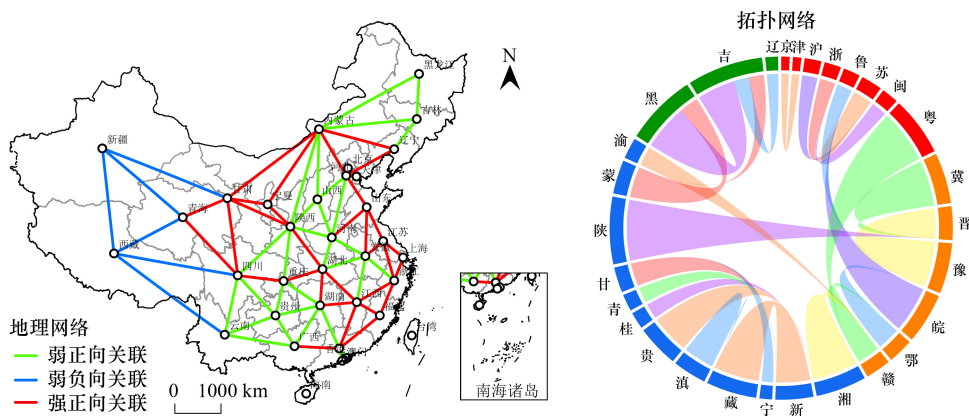


图 6 中国国土空间韧性和效率耦合协调水平的时空交互可视化特征

Fig.6 Spatiotemporal visualization characteristics of the coupling coordination level of China's territorial space resilience and efficiency

4.3 中国国土空间韧性和效率耦合协调水平的时空跃迁模式

4.3.1 分位数回归结果

据相关研究^[53],本文分位数回归模型选取城镇化(UB)、科技-R&D 强度(TE)、地方财政支出(GO)、区域生产总值(A)、产业结构高级化指数(IN)和人口密度(P)等变量,平稳性检验采用了 Fisher-ADF 单位根检验方法,结果通过 5%的显著性检验,可以进行参数估计(表 5),分位数回归与 OLS 估计结果如表 6 所示。

表 5 变量单位根检验

Table 5 Unit root test of variables

变量 Variable	$\ln UB$	$\ln TE$	$\ln GO$	$\ln A$	$\ln IN$	$\ln P$
ADF 检验值 ADF test value	-5.3374	-4.9199	-3.2213	-3.013	-6.2838	-3.8026

ADF 表示单位根检验; $\ln UB$ 表示城镇化指数的对数; $\ln TE$ 表示科技-R&D 强度指数的对数; $\ln GO$ 表示地方财政支出指数的对数; $\ln A$ 表示区域生产总值指数的对数; $\ln IN$ 表示产业结构高级化指数的对数; $\ln P$ 表示人口密度指数的对数

表 6 分位数回归与 OLS 估计结果

Table 6 Quantile regression and OLS estimates

变量 Variable	分位数 Quantile point					OLS
	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	
$\ln UB$	0.491	0.135	0.436	0.237	0.388	0.341
$\ln TE$	-0.214	-0.045	-0.016	-0.065	-0.054	-0.041
$\ln GO$	-0.561	-0.221	0.064	-0.018	-0.232	-0.163
$\ln A$	0.413	0.337	0.169	0.170	0.184	0.242
$\ln IN$	3.806	1.804	0.425	0.407	1.364	1.282
$\ln P$	0.116	-0.015	-0.006	-0.107	-0.090	-0.011
Cons	-7.106	-2.987	-2.503	0.010	-3.707	-2.930

Cons 表示常数项;OLS 表示普通最小二乘法模型

4.3.2 嵌套模型构建

将分位数回归按照分位点的大小划分为高分位(0.5—0.9)与低分位(0.1—0.5)两个阶段,结合发展/制约的驱动导向构建得到高分位制约、高分位驱动、低分位制约与低分位驱动四种分位响应类型,并与时空跃迁类型深层次嵌套,结果如表 7 所示。

表 7 时空跃迁与分位响应类型的嵌套

Table 7 The nesting of spatiotemporal transition and response type of quantile regression

类型 Type	驱动类型 Drive type	内涵 Connotation	省份 Province
低分位制约	同向制约($LH_t \rightarrow LL_{t+1}$, $LL_t \rightarrow LL_{t+1}$)	耦合水平处于低值区,邻近省域受到制约	晋蒙古黑藏陕甘青宁新
	反向发展($LH_t \rightarrow LH_{t+1}$, $LL_t \rightarrow LH_{t+1}$)	耦合水平处于低值区,邻近省域跃迁/维持高值区	桂
低分位驱动	同向发展($LH_t \rightarrow HH_{t+1}$, $LL_t \rightarrow HH_{t+1}$)	促进区域向上跃迁,邻近省域跃迁或维持高值区	赣琼
	反向发展($LH_t \rightarrow HL_{t+1}$, $LL_t \rightarrow HL_{t+1}$)	促进区域向上跃迁,邻近省域未充分发挥驱动效应	无
高分位制约	同向制约($HL_t \rightarrow LL_{t+1}$, $HH_t \rightarrow LL_{t+1}$)	抑制高耦合区域增长,邻近省域也受到限制	滇
	反向发展($HL_t \rightarrow LH_{t+1}$, $HH_t \rightarrow LH_{t+1}$)	抑制高耦合区域增长,邻近省域跃迁或维持高值区	川
高分位驱动	同向发展($HH_t \rightarrow HH_{t+1}$, $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$)	耦合水平保持高值区,驱动邻近省域耦合水平增长	京津冀沪苏浙皖闽鲁豫鄂渝
	反向发展($HL_t \rightarrow HL_{t+1}$, $HH_t \rightarrow HL_{t+1}$)	耦合水平保持高值区,未受到明显驱动效应影响	辽粤贵

4.3.3 时空跃迁机制模式

通过分析分位点影响因素与不同类型时空跃迁之间的关系,本研究共形成产业-经济驱动、政府-科技-人口制约、科技-政府制约、经济-产业-城镇化驱动的四种耦合协调水平的时空跃迁驱动/制约模式(图 7)。

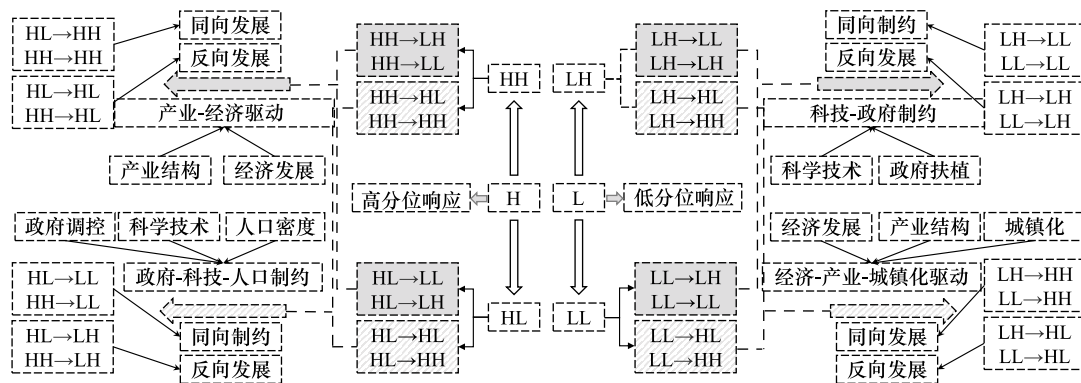


图 7 中国国土空间韧性和效率耦合协调水平的时空跃迁驱动机制模式

Fig.7 Spatiotemporal transition driving mechanism model of the coupling coordination level of territorial space resilience and efficiency in China

HH→HH、HL→HH: 高分位驱动中的同向发展; HL→HL、HH→HL: 高分位驱动中的反向发展; HL→LL、HH→LL: 高分位制约中的同向制约; HL→LH、HH→LH: 高分位制约中的反向发展; LH→HH、LL→HH: 低分位驱动中的同向发展; LH→HL、LL→HL: 低分位驱动中的反向发展; LH→LL、LL→LL: 低分位制约中的同向制约; LH→LH、LL→LH: 低分位制约中的反向发展

产业-经济驱动模式,高分位驱动适用于此种模式,在此驱动模式下,产业结构与经济发展水平对于促进二者耦合增长有显著作用。产业结构的资源合理配置最大化的带动了集聚效应和规模经济,使适应能力和效率在区域间均衡发展,从本文实证结果看,产业结构高级化、合理化与经济水平对于耦合水平起到正向驱动效应。东部、中部省份受此模式影响,特别是东部地区呈同向发展,带动邻域耦合协调水平提升。

经济-产业-城镇化驱动模式,低分位驱动适用于此种模式。经济水平、产业结构与城镇化水平是驱动耦合协调水平低值聚集区跃迁的主要因素,产业结构促进作用显著,通过内部优化调整逐渐向高技术和高知识密集性发展模式转变,不断提高利用效率和应对风险的抵抗能力,从而增强稳定结构,提升耦合协调水平。受此模式驱动影响省份较少,仅有赣和琼两个省份,属于同向发展地区。

政府-科技-人口制约模式,高分位制约适用于此种模式。政府调控、科学技术和人口密度对于二者耦合协调水平高的省份呈现抑制作用。人口密度对二者耦合协调水平产生双向影响。一方面,人口密度的增长可以提升资源的利用效率,而过量的人口会产生较多的边际成本,增加各类资源的竞争成本,有扰韧性稳定。对受此模式驱动影响的省份较少,仅有云南和四川省份,分别属于同向制约和反向发展地区。

科技-政府制约模式,低分位制约适用于此种模式。科学技术和政府扶持力度是抑制低省份跃迁的主要因素,对于此模式的制约效应更多是以二种方向综合驱动、相互抑制。在低分位阶段区域发展相对处于初始阶段,国土空间稳健性不足,过度投入科学技术和政府扶持力度,会造成发展要求与适应阶段失配问题。晋、蒙、吉、黑、藏、陕、甘、青、宁和新等省份属于同向制约地区,邻域水平下降对自身产生抑制。

在空间上,中国国土空间韧性和效率耦合协调水平的跃迁模式自西北向东南逐渐形成了阶梯递变格局:同向制约-反向发展-同向发展。西北和东北多数省份主要呈现同向制约,受到邻域国土空间韧性和效率耦合协调水平的抑制;东部表现为同向发展,其耦合协调水平得到了邻域间相互推动,不断取得良性增长。从分位响应类型来看,低分位制约主要分布在西北、东南和东北地区,高分位驱动主要集中在东部沿海地区(图8)。

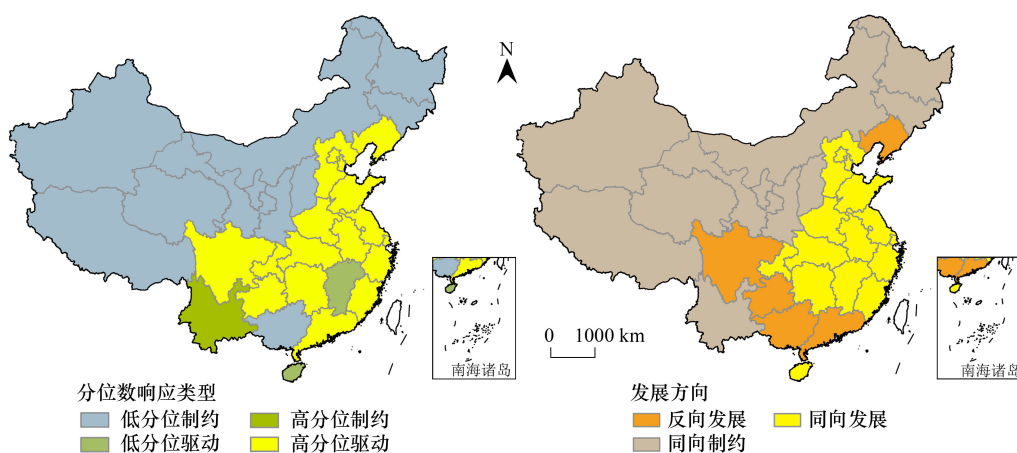


图8 中国国土空间韧性和效率耦合协调水平的分位响应类型及发展方向空间格局

Fig.8 Quantile response types and development directions, spatial patterns of China's space resilience and efficiency coupling coordination level

5 讨论与结论

5.1 讨论

(1) 国土空间韧性与效率的博弈与协同:国土空间是具有自然要素与社会经济等多要素耦合形成具有结构和功能属性的复杂开放巨系统。在不同时期,人类因社会发展和生态文明建设目标对国土空间需求与利用的不同,造成国土空间韧性与效率的差异化演进趋势(图9)。溯源历史发现,国土空间韧性与效率自原始文明至生态文明形成不同的博弈逻辑。首先,在原始文明时期人类对自然资源开发利用程度极低,国土空间依靠自身物质循环维持原有平衡,保持基本韧性稳态,此阶段韧性高于效率。伴随农耕社会兴起进入农业文明时期兴起,人类开始耕种作物以满足基本物质需求,此阶段国土空间效率缓慢提高,但韧性仍高于效率。伴随工业文明兴起,社会生产力的大幅提高与机械化模式繁殖,人类对资源环境的利用效率大幅增长以致打破自然生态平衡,国土空间韧性急剧减弱,造成大量生态福祉损失,忽视生态环境而摊大饼式的国土空间利用模式难以为继,使生态文明建设成为必然选择。现今,人类社会逐渐意识到不可一味追求国土空间利用效率,同时应当注重“合理利用”,亟需思考韧性与效率的协同平衡路径,从而支撑实现国土空间系统可持续发展。另一方面应当注重不同区域间国土空间利用模式差异,考虑利用结构适度冗余,并减少资源环境利用的外部性,从

而拓高国土空间韧性上限。此外,针对国土空间韧性和效率研究,可借助适应性循环理论识别国土空间韧性演化的“开发-利用-释放-重组”的演化阶段,在此基础上测度不同阶段间效率演进差异,挖掘二者更深层次的作用关系。

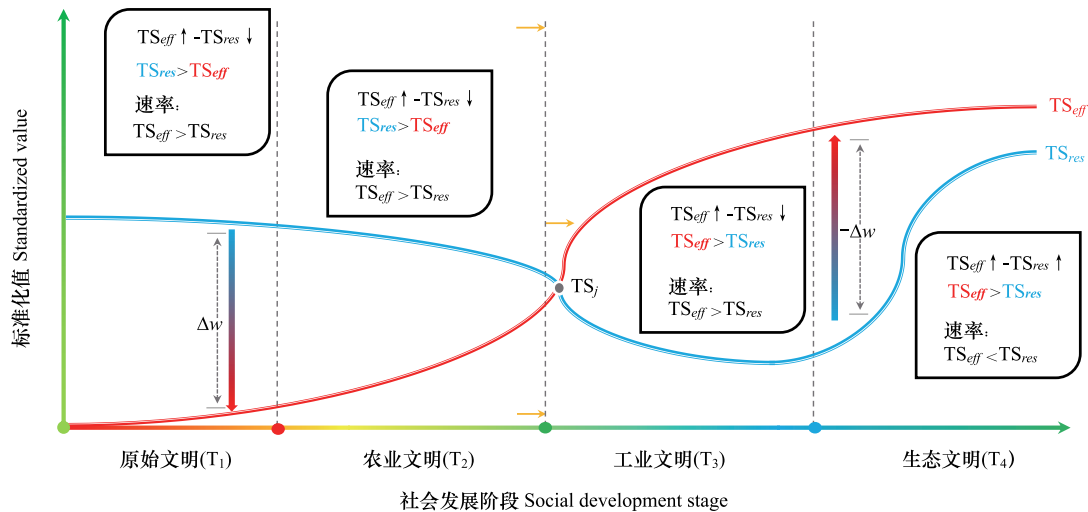


图9 国土空间韧性与效率的博弈与协同

Fig.9 Game and synergy of territorial space resilience and efficiency

TS_{eff}: 国土空间效率; TS_{res}: 国土空间韧性; Δw: 指数数值差; Rate: 速率

(2) 时空交互视角下区域协同发展路径: 国土空间韧性与效率局部空间结构受到省域单元自身与邻域单元的双重影响, 但区域自身具有主观能动性, 占据主导地位^[51], 如何寻求共性兼具个性的差异化协同路径成为未来的研究重点。本文基于时空跃迁特征与分位数回归嵌套, 得到城镇化因素是高分位与低分位驱动的关键因子, 二者耦合关系低分位驱动的省份应当加快城镇化进程, 通过基础配套服务完善, 实现由生产向生产方式的转变, 促进二者协同关系。人口与政府因素是高分位与低分位制约的差异化影响因子, 高分位制约省份应当解决由人口集聚带来的碳排放强度与密度增多等问题造成的生态环境问题。低分位制约省份受政府限制作用较强, 政府应当以开放协同态度, 倾斜政策促进国土空间开发利用模式的多元化。总之, 要依据时空跃迁模式的差异性, 分地区针对性提升, 实现国土空间高质量发展。

(3) 不足与展望: 本研究参考国内外领域众多研究, 针对国土空间韧性和效率的测定多采用指标测定, 具有一定局限性。另一方面, 针对二者耦合关系驱动分析未完全考虑指标滞后效应, 有待在后续研究中进行探讨。同时应当更关注多尺度、多时段二者耦合关系稳态与失配特征, 实现国土空间高质量发展。

5.2 结论

本文分析了国土空间韧性与效率的耦合互馈逻辑, 探究了中国国土空间韧性与效率的时空差异、耦合协调关系的时空交互特征和要素驱动模式, 主要研究结论如下:

(1) 演进时空差异表明: 中国国土空间韧性和效率存在较大悬殊, 韧性水平明显滞后于效率水平, 均具有符合中国区域发展格局菱形结构板块空间分异的共性特征; 在数值指数、空间扩张和动态演进上具有显著个性特征, 其中数值指数呈现韧性指数低于效率指数特征、效率空间扩张较于韧性呈现幅度大、强大高的特征。动态演进上, 韧性与效率分别呈现路径依赖与波动增长的分异特征。

(2) 耦合协调水平表明: ①数值指数特征表明中国国土空间韧性和效率的耦合协调水平呈现缓慢增长趋势, 呈现东部(0.832) > 中部(0.661) > 东北(0.623) > 西部(0.427) 的区域分异及明显省际差异。②基于 ESTDA 的时空交互特征表明, 中国国土空间韧性与效率的局部空间结构呈现中部和东北部地区较为动态, 弯曲度表明中部和东部空间变迁更为动态, 移动方向表明东南地区较西北地区协作态势高于竞争态势; 时空跃迁表明

空间关联具有转移惰性和路径依赖特征,时空交互可视化表现出较强空间整合性特征。

(3) 中国国土空间韧性和效率耦合协调水平时空跃迁模式依据高分位和低分位的驱动/制约机制差异,形成“产业-经济驱动、经济-产业-城镇化驱动、政府-科技-人口制约、科技-政府制约”等四种跃迁模式,且跃迁模式自西北向东南逐渐呈现出“同向制约-反向发展-同向发展”的阶梯递变格局。

参考文献 (References):

- [1] 严金明,董立宽. 全面提高国土资源利用效率:战略背景、理论支撑与路径选择. 公共管理与政策评论, 2022, 11(1): 120-130.
- [2] 应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院,北京师范大学国家安全与应急管理学院,应急管理部国家减灾中心,等. 2022 年全球自然灾害评估报告[EB/OL]. <https://www.gddat.cn/newGlobalWeb/#/riskAssessment>.
- [3] 史晨辰,朱小平,王辰星. 韧性城市研究综述——基于城市复杂系统视角. 生态学报, 2023, 43(4): 1726-1737.
- [4] Callahan C W, Mankin J S. Persistent effect of El Niño on global economic growth. Science, 2023, 380(6649): 1064-1069.
- [5] 韩增林,朱文超,李博. 中国海洋渔业经济韧性与效率协同演化研究. 地理研究, 2022, 41(2): 406-419.
- [6] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [7] Folke C. Resilience; the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [8] Rodríguez-Izquierdo E, Cid A, García-Meneses P M, Peña-Sanabria K A, Lerner A M, Matus-Kramer A, Escalante A E. From resilience attributes to city resilience. Landscape and Urban Planning, 2022, 226: 104485.
- [9] Artime O, Grassia M, De Domenico M, Gleeson J P, Makse H A, Mangioni G, Perc M, Radicchi F. Robustness and resilience of complex networks. Nature Reviews Physics, 2024, 6: 114-131.
- [10] Maes S L, Perring M, Cohen R, Akinnifesi F K, Bargaúes - Tobella A, Bastin J, Bauters M, Bernardino P N, Brancalion P, Bullock J M, Ellison D, Fayolle A, Fremout T, Gann G D, Hishe H, Holmgren M, Ilstedt U, Mahy G, Messier C, Parr C, Ryan C, Sacande M, Sankaran M, Scheffer M S, Suding K, Van Meerbeek K, Verbeeck H, Verbist B, Verheyen K, Winowiecki L, Muys B. Explore before you restore: incorporating complex systems thinking in ecosystem restoration. Journal of Applied Ecology, 2024, 61(5): 922-939.
- [11] 鲍海君,章笑艺,蒋明利,章鸣. 韧性视角下城市国土空间安全体检评估指标体系研究. 中国土地科学, 2022, 36(5): 21-30.
- [12] 耿艺伟,李效顺,陈伟强,刘希朝,陈姜全,季海涛. 乡村地域系统韧性类型识别与驱动机制研究——以豫东平原区商丘市睢阳区为例. 地理科学进展, 2023, 42(9): 1755-1768.
- [13] 鲁大铭,杨新军,石育中,王子侨. 黄土高原乡村体制转换与转型发展. 地理学报, 2020, 75(2): 348-364.
- [14] 杨庆媛,张浩哲,唐强. 基于适应性循环模型的重庆市国土空间生态修复分区. 地理学报, 2022, 77(10): 2583-2598.
- [15] 冯一凡,冯君明,李翊. 生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展. 生态学报, 2023, 43(14): 5648-5661.
- [16] 王威,朱峻佚,费智涛,马东辉,杜修力. 国土空间韧性规划建设整体框架与发展路径研究. 中国工程科学, 2023, 25(3): 209-218.
- [17] Assumma V, Bottero M, Ishizaka A. Enhancing territorial resilience assessment with a decision-aiding model in regional planning of Socio-Ecological Systems. Environmental Science & Policy, 2024, 154: 103691.
- [18] 曾坚,田健,王倩雯,孙柯柯. 国土空间规划体系中的气候韧性及适灾承洪理论——以闽三角地区为例. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(10): 1713-1727.
- [19] 夏陈红,马东辉,郭小东,王志涛,王威. 适应性循环视角下的国土空间适灾韧性机理与规划响应研究. 城市发展研究, 2024, 31(2): 44-52.
- [20] 林坚,张瑜. 从空间规划体系到国土空间体系——兼析国土空间体系构建下的国土空间治理趋向. 中国土地科学, 2024, 38(1): 1-8.
- [21] 邓楚雄,刘唱唱,李忠武. 生态修复背景下流域国土空间韧性研究思路. 中国土地科学, 2022, 36(5): 11-20.
- [22] Park J, Kim J. Does industrial land sprawl matter in land productivity? A case study of industrial parks of South Korea. Journal of Cleaner Production, 2022, 334: 130209.
- [23] Mergoni A, Dipierro A R, Colamartino C. European agricultural sector: the tortuous path across efficiency, sustainability and environmental risk. Socio-Economic Planning Sciences, 2024, 92: 101848.
- [24] Moutinho V, Madaleno M, Macedo P. The effect of urban air pollutants in Germany: eco-efficiency analysis through fractional regression models applied after DEA and SFA efficiency predictions. Sustainable Cities and Society, 2020, 59: 102204.
- [25] 杜昱东,刘恋,王佳斌,白羽萍,回文颖,李嘉劲,张帆. 基于碳排放约束的北京市社区生态效率评价. 生态学报, 2023, 43(2): 590-602.
- [26] 邓宗兵,李莉萍,王炬,曹宇芙. 技术异质下中国工业生态效率地区差异及驱动因素. 资源科学, 2022, 44(5): 1009-1021.
- [27] 张可云,张江. 城市群多中心性与绿色发展效率——基于异质性的城镇化空间布局分析. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(2): 107-117.

- [28] 及添正, 邓宏兵, 张天铃. 生产性服务业集聚对碳排放效率的影响——基于长江经济带 108 个城市企业数据的分析. 资源科学, 2023, 45(1): 31-47.
- [29] 肖小东, 刘耀彬, 李汝资. 中国资源型城市经济高质量发展水平识别与转换规律——以 30 个煤炭城市为例. 自然资源学报, 2023, 38(3): 563-575.
- [30] Umaz R. A single inductor self-startup energy combiner circuit with bioturbation resilience in multiple microbial fuel cells. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(12): 3227-3231.
- [31] Wu Y Y, Hou G Y, Chen S R. Post-earthquake resilience assessment and long-term restoration prioritization of transportation network. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 211: 107612.
- [32] 孙才志, 孟程. 中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价. 地理科学, 2020, 40(12): 2094-2104.
- [33] 牛建广, 辛伯雄, 王明琪. 城市生态效率与生态韧性的协调发展评价与障碍因子识别. 统计与决策, 2024, 40(4): 79-84.
- [34] Tao T M, Ma L B, Wang X, Wu S S, Shi Z H, Cui X J. Resilience or efficiency? Strategic options for sustainable development of agricultural systems in ecologically fragile areas of China. Science of The Total Environment, 2023, 881: 163411.
- [35] 吴小妮, 管卫华, 张惠, 吴连霞. 中国省域经济效率与经济韧性耦合特征及驱动因素. 地理与地理信息科学, 2024, 40(2): 116-125.
- [36] 李强, 魏建飞. 皖江城市带国土空间利用效率与高质量发展的时空耦合. 自然资源学报, 2022, 37(11): 2867-2883.
- [37] 张行, 梁小英, 刘迪, 史琴琴, 陈海. 生态脆弱区社会—生态景观恢复力时空演变及情景模拟. 地理学报, 2019, 74(7): 1450-1466.
- [38] 马江浩, 陈佳, 杨新军, 张小文. 土地利用变化对干旱区乡村社会恢复力的影响——以民勤绿洲为例. 资源科学, 2021, 43(8): 1615-1627.
- [39] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China. Landscape and Urban Planning, 2015, 143: 56-68.
- [40] 薛飞, 张念慈, 夏楚瑜, 张健, 王楚玥, 李淞, 周珺. 城市生态韧性水平空间评估及其驱动力——以北京市通州区为例. 生态学报, 2023, 43(16): 6810-6823.
- [41] 周炯, 王佳琳. 中原城市群乡村“三生”功能分区识别及调控路径. 地理科学, 2023, 43(7): 1227-1238.
- [42] 中华人民共和国环境保护部. 生态环境状况评价技术规范: HJ 192—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [43] 陈慧敏, 赵宇, 付晓, 吴钢. 西辽河上游生境质量时空演变特征与影响机制. 生态学报, 2023, 43(3): 948-961.
- [44] 董寅, 金贵, 邓祥征. 中国国土空间布局优化研究. 地理学报, 2024, 79(3): 672-687.
- [45] 董寅. 基于资源效率的中国国土空间布局优化研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- [46] 刘晓曼, 吕娜, 侯鹏, 黄艳, 高吉喜, 袁静芳. 生态文明建设与社会经济发展耦合协调关系的定量测度——以浙江省安吉县为例. 生态学报, 2023, 43(21): 8973-8984.
- [47] 孔凡斌, 杨文才, 徐彩瑶. 环杭州湾城市群生态环境与社会经济耦合协调关系及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(6): 2287-2297.
- [48] 孔旻蔚, 胡宏, 张宏韞, 杜思涵. 2000—2020 年长三角地区城市低碳竞争力时空演化. 地理研究, 2023, 42(10): 2713-2737.
- [49] Fang C L, Ren Y F. Analysis of energy-based metabolic efficiency and environmental pressure on the local coupling and telecoupling between urbanization and the eco-environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Science China Earth Sciences, 2017, 60(6): 1083-1097.
- [50] 王峥, 程占红. “双碳”目标下中国服务业碳强度时空交互特征及跃迁机制. 地理学报, 2023, 78(1): 54-70.
- [51] 方世敏, 黄琰. 长江经济带旅游效率与规模的时空演化及耦合协调. 地理学报, 2020, 75(8): 1757-1772.