

DOI: 10.20103/j.stxb.202405121073

王新兴, 赵雪雁. 天山北坡经济带经济韧性与生态韧性的时空耦合. 生态学报, 2024, 44(21): 9670-9683.

Wang X X, Zhao X Y. Spatial and temporal coupling research of economic resilience and ecological resilience in The Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9670-9683.

天山北坡经济带经济韧性与生态韧性的时空耦合

王新兴, 赵雪雁*

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 如何平衡经济-生态间的关系, 以应对外部扰动和冲击, 成为促进区域可持续发展的关键。借鉴韧性理论, 构建了生态韧性和经济韧性评价指标体系, 基于多源数据, 利用耦合协调度模型和核密度方法分析了天山北坡经济带经济韧性与生态韧性的时空耦合特征, 并探索了各要素对二者耦合协调度的影响。结果发现: ①2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性总体以中等水平为主, 呈现天山北坡“中段>西段>南部>东段”的空间分异特征; ②生态韧性则总体处于低水平, 呈现“西北高东南低”“低值集聚、高值分散”的空间分布特征; ③经济韧性和生态韧性一直处于“失调”状态, 但逐渐由轻度失调向濒临失调转变, 且西段和中段的耦合协调度高于东段和南部; ④经济韧性与生态韧性各要素对耦合协调度的影响存在差异, 其中经济潜力韧性和生态系统抵抗力对经济韧性和生态韧性耦合协调关系的阻滞作用最强, 经济结构韧性和生态系统恢复力对经济韧性和生态韧性耦合协调关系的推动作用最强。通过时空动态分析和关键影响因素的识别, 本研究为可持续发展政策提供了综合视角。平衡这两个方面不仅对该地区当前的稳定至关重要, 也是确保其在未来挑战中长期生存的关键所在。

关键词: 经济韧性; 生态韧性; 耦合协调度; 时空特征; 天山北坡经济带

Spatial and temporal coupling research of economic resilience and ecological resilience in The Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains

WANG Xinxing, ZHAO Xueyan*

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: How to balance the relationship between economy and ecology to cope with external disturbance and impact has become the key to promote regional sustainable development. This study underscores the importance of understanding the intricate relationship between economic and ecological resilience in the Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains. By using the theory of resilience, this paper establishes a comprehensive framework that integrates both ecological resilience and economic resilience. Based on multi-source data, the study analyzes the spatio-temporal coupling characteristics of economic and ecological resilience using the coupling coordination degree model and kernel density method, and the influences of each element on the coupling coordination degree of the two were explored in the NSEBTM. The results show that (1) from 2000 to 2020, the economic resilience of the NSEBTM is generally at a medium level, showing the spatial trend of “the middle section > the west section > the south part > the east section”. (2) The overall level of ecological resilience remains low, demonstrating a spatial distribution pattern of “higher in the northwest and lower in the southeast” and “aggregation of low values and dispersion of high values”. (3) Economic resilience and ecological resilience have consistently been in a state of “dissonance”, gradually transitioning from a mild mismatch to an imminent mismatch. Furthermore, the coupling coordination degree is higher in the western and central section compared to the

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0905)

收稿日期: 2024-05-12; 网络出版日期: 2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxy@nwnu.edu.cn

eastern section and southern part. (4) The components related to ecological and economic resilience impact differently the degree of coupling coordination. Among them, ecological system resistance and economic potential resilience have the strongest inhibitory effects on the ecological-economic resilience coupling, whereas the ecological system recovery and economic structural resilience have the strongest driving effects. In conclusion, By analyzing the spatio-temporal dynamics and identifying key influencing factors, we provide a comprehensive perspective that can inform sustainable development policies. Balancing these two critical aspects is essential not only for the present stability of the region but also for ensuring its long-term viability in the face of future challenges.

Key Words: economic resilience; ecological resilience; coupling coordination degree; spatio-temporal characteristics; The Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains

2030 年可持续发展议程强调了经济和生态的可持续性^[1]。经济子系统在物质上植根于生态环境,将自然资本和生态资源转化为经济产品;生态子系统则是经济可持续发展的重要前提,为经济活动提供资源供给、环境调节和文化价值等方面的保障^[2]。然而,随着社会的发展,两者之间往往会出现脱钩。一方面,社会经济快速发展导致产业结构升级和资源利用效率提升,但同时也伴随着大量资源消耗、生态灾害频发以及生态系统功能退化等问题^[3]。另一方面,生态系统的退化引发了环境污染、全球变暖及极端灾害,并带来巨大的经济损失,严重影响了区域经济的可持续发展^[4]。改革开放以来,中国经济飞速发展,国内生产总值由 1978 年的 3678.7 亿元增加至 2022 年的 121.02 万亿元^[5]。然而,依靠要素和投资驱动的传统发展模式也导致了一系列环境问题,如生态退化、自然资源枯竭等。因此,经济与生态的协调发展已成为实现中国式现代化建设的重要战略任务。

“韧性”作为社会生态系统可持续发展的先决条件,能够通过消解和吸纳外界扰动提高其恢复及抗风险能力。韧性理论注重解决系统脆弱性和不确定性,以增加系统的稳定性和可持续性。具有良好韧性的区域受到冲击后能够快速适应并恢复到新的均衡状态,而缺乏韧性的区域则恢复较慢^[6]。最初韧性研究应用于工程领域,关注系统的单一稳态或者静态平衡,强调受到扰动后的复原速度^[7]。1973 年, Holling 将其引入到系统生态学领域,增加了多重平衡特点,用来定义生态系统稳定状态的特征^[8]。随着经济全球化对区域经济系统不断扰动和冲击,又将其引入经济学领域,通过调整经济各要素实现区域经济持续稳步增长。

生态韧性和经济韧性作为韧性研究的重要维度,已成为衡量一个区域平衡、稳定和高质量发展的关键依据。前者提供了理解生态系统如何响应外界干扰的理论框架,且其研究已较为成熟,涉及生态韧性指标体系构建与评估、时空格局与驱动机制、耦合协调关系与优化路径等多个方面^[9-10]。具体主要基于复合指标法^[11]、熵值法^[9]、熵权-Topsis 法^[12]、源-流-汇评价法^[13]等量化方法,结合空间自相关模型^[14]、核密度估计模型^[15]和马尔科夫链模型^[16]等研究方法分析生态韧性时空格局演变过程,评估生态系统在受到干扰或破坏后自我恢复以及生态系统缓冲和抵御外部影响的能力,并从水文、土壤、气候、植被、地形地貌等自然因素^[17]和土地开发、科技创新、城镇化等社会因素^[18]探讨了生态韧性驱动机制和形成机理,其研究尺度涉及县域、城市及城市群等。

经济韧性研究起步相对较晚,主要聚焦于概念辨析与理论框架构建、综合评估与影响因素、格局特征与演化机制等方面^[19-20],旨在强化区域经济面对外部环境剧烈变化时的应对和复原能力。当前学术界对经济韧性的概念界定仍未达成共识,其测量指标也具有差异性。大多学者从国民经济收入^[21]、地区就业指标^[22]及 GDP 增长率^[23]等出发开展经济韧性评价,而鲜有研究考虑当前经济运行、经济结构状况及未来经济发展潜力。在影响因素上,多关注人文活动对经济韧性的影响,如陈勤昌等^[19]为引导并助推跨省贫困区、革命老区经济发展,开展了国土开发强度对经济韧性影响机制探索;王新越等^[20]为实现跨省入境旅游振兴和高质量发展,剖析了旅游经济韧性的异质性;然而,生态保护是推动经济发展的重要保障,只有保持生态系统的健康和稳定,才能够保证资源的可再生和有序利用,从而提高区域经济抵抗外部风险冲击的能力,但目前关于生态环

境对经济韧性影响的探索较为匮乏。总体来看,经济韧性评价指标仍需进一步完善,且有必要深入研究其关键影响因素。

经济-生态协同发展是可持续发展战略的内在要求。既有研究虽基于 EKC 计量模型^[24]、耦合协调度模型^[25]及系统动力学模型^[26]等方法分析了经济发展和生态保护耦合协调状态,但这些较少深入挖掘影响耦合协调性的关键因素,限制了对耦合协调机制的全面理解;同时,较少着眼于不确定性、长期适应性分析经济系统-生态系统间的关系。从韧性角度出发,考察二者的耦合匹配状况决定着社会生态系统能否可持续发展,可为实现“高速增长”向“高质量发展”转变提供重要借鉴。

天山北坡经济带地处西北干旱区,生态环境脆弱、水资源紧缺,虽凭借丰富的资源能源、优越的区位条件成为西部大开发战略的增长极和丝绸之路经济带的核心枢纽,但快速的经济发展与城市化进程加剧了人地矛盾,使其可持续发展面临严峻挑战。当前,急需探明经济系统与生态系统之间的关系,并探索经济发展与生态保护的协同路径。基于此,本文在构建生态韧性和经济韧性评价体系的基础上,利用多源数据,采用耦合协调度模型及核密度分析方法剖析了天山北坡经济带经济韧性与生态韧性耦合协调关系的时空动态,并分析了影响其耦合协调关系的障碍因素,旨在构建符合干旱区地域特色的指标体系,并揭示障碍因素对经济韧性和生态韧性耦合协调度的贡献,为推动天山北坡经济带生态保护与高质量发展提供科学支撑。

1 研究区、研究方法数据来源

1.1 研究区

天山北坡经济带地处准噶尔盆地南缘、天山北麓中段,是形成于山麓洪-冲积扇的条带状绿洲带,可将其划分为西段、中段、东段以及天山北坡南部(简称南部)^[27](图1)。该区从南到北海拔逐渐降低,自然景观由山区-绿洲-荒漠-沙漠过渡变化。气候为典型的温带大陆性干旱气候,气温年较差及日较差大,降雨少,年均降雨量仅为 220mm,蒸发量为 1817mm,生态环境脆弱,水资源紧缺。同时,天山北坡经济带也是新疆人口密度最高、城市化程度最高、经济最发达的地区,2020 年总人口为 859.7 万人,人均 GDP 为 13.18 万元,远高于全疆平均水平。

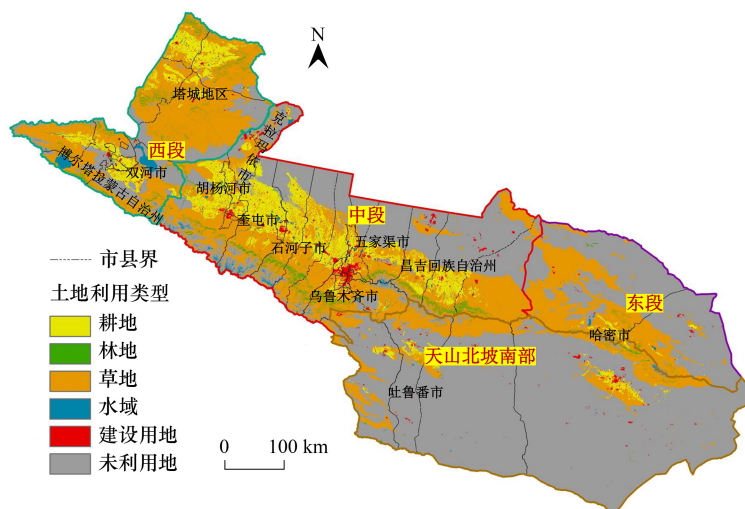


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据源

研究数据包括天山北坡经济带地区的土地利用数据、归一化植被指数(NDVI)、气象数据、土壤属性数据、数字高程模型(DEM)数据以及社会经济统计数据。其中,土地利用数据下载自中国科学院资源环境科学数据

据平台 (<https://www.resdc.cn/>),分辨率为 30m×30m;归一化植被指数 (NDVI) 下载自国家生态科学数据中心 (<http://www.nesdc.org.cn/>),分辨率为 30m×30m;降水数据下载自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>)、蒸散发数据下载自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>);土壤属性数据下载自世界土壤数据库 (<https://www.fao.org/soils-portal>),其中,根系限制层深度数据参考燕玲玲等人^[28]的文献;DEM 数据下载自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30m×30m;粮食产量和社会经济统计数据来自《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》《新疆统计年鉴》以及各市、县域国民经济和社会发展统计公报。

1.3 研究方法

1.3.1 经济韧性评估模型

经济韧性是指经济系统在应对外部冲击或挑战时,能够通过调整经济结构和发展模式,实现经济可持续发展的能力^[29]。与单一指标法相比,综合指数法更能反映经济韧性的总体特征和水平。因此,本文根据天山北坡经济带区情和数据的可获得性,从经济运行韧性、经济结构韧性和经济潜力韧性 3 方面出发构建经济韧性评价指标体系,并采用加权求和法评估经济韧性。其中,经济运行韧性反映了经济体在外部冲击或变化条件下维持其正常运行并保证居民生活的能力,选取人均 GDP、城镇居民人均可支配收入、农村居民人均可支配收入和人均社会消费品零售总额来测度^[30];良好的经济结构韧性意味着经济体在外部冲击下能够有效地进行结构性调整,以适应新的经济环境,采用一、二、三产比重测度其结构的稳定性和调整能力;经济潜力韧性通常指一个经济体在发展过程中所具有的潜在增长和发展能力,利用进出口总额、科技支出、旅游收入来表征经济体未来的发展潜力^[31]。本文采用熵权法^[32]确定各指标权重,具体评价指标及其权重见表 1。

表 1 经济韧性指标权重
Table 1 Weights of indicators of economic resilience

系统层 System layer	准则层(权重) Criterion layer (weight)	指标层 Indicator layer	权重 Weight
经济韧性 Economic resilience	经济运行韧性(0.308)	人均 GDP(元/人)	0.516
		城镇居民人均可支配收入/元	0.07
		农村居民人均可支配收入/元	0.064
		人均社会消费品零售总额/元	0.350
	经济结构韧性(0.166)	第一产业比重/%	0.434
		第二产业比重/%	0.303
		第三产业比重/%	0.263
	经济潜力韧性(0.526)	进出口总额/万元	0.281
		科技支出/万元	0.433
		旅游收入/万元	0.286

1.3.2 生态韧性评估模型

生态韧性指城市生态系统对外界压力的抵抗能力、适应干扰并成功地从干扰中恢复的能力。基于已有研究^[14,17],从抵抗力、恢复力和适应力三个维度出发,采用加权求和法评估生态韧性。其中,抵抗力 (RES) 指生态系统抵御外部干扰并保持其稳定性的能力,取决于系统自身的生态背景^[12];由于生境质量可为个体和种群生存提供适宜的自然生态条件,是有效表征抵抗力的重要手段,故选取生境质量指数 (HQI) 来测量抵抗力。恢复力 (REC) 是指生态系统在人类压力下保持其原有功能和结构的能力^[33];通常,生态系统越稳定,其恢复力就越高,故采用生态系统景观指数 (ELI) 来表征恢复力。适应力 (ADA) 是指生态系统在解决外部风险干扰后进行转变并支持人类可持续发展的能力^[34];通常,强大的生态系统功能更有利于系统的转变以更好地适应冲击后的生态环境,从而支持人类生存和区域发展,故选取生态系统功能指数 (EFI) 来测量适应力。

为了厘清天山北坡经济带生态韧性的时空动态,采用渔网对其进行分割计算。利用渔网工具选择 9km×

9km 的网格尺度,将研究区分割为 5152 个评价单元(划分 5、9、10、15km 网格进行对比后,发现 9km×9km 的网格尺度划分更为合理)。对各指标进行归一化处理并利用熵权法确定各指标权重。计算各评价单元的抵抗力、恢复力、适应力以及生态韧性水平。具体评价指标及其权重见表 2。

表 2 生态韧性指标权重
Table 2 Weights of ecological resilience indicators

系统层 System layer	准则层(权重) Criterion layer (weight)	一级指标层 Primary indicator layer	二级指标层 Secondary indicator layer	权重 Weight
生态韧性 Ecological resilience	抵抗力(0.574)	生境质量	生境质量	1
		景观连通性	整体连通度	0.2
	恢复力(0.140)	景观异质性	草地连通度	0.15
			林地连通度	0.15
			Shannon 多样性指数	0.3
			平均斑块分维数	0.2
		生态系统功能	粮食供应服务	0.25
			水源涵养服务	0.25
			碳储存服务	0.25
			土壤保持服务	0.25
	适应力(0.286)			

(1) 生境质量指数(HQI)

生境质量提供了对整体环境健康状况和生态系统性能的评估,是衡量生态系统可持续性和人类福祉的重要指标。利用 InVEST 模型中 Habitat Quality 模块计算生境质量。模型中参数设置参考了类似领域的研究成果^[17, 35],其中,威胁因子的设置主要考虑土地利用类型对生境的干扰程度,土地利用强度越高,对生境的威胁程度越大。因此,选取耕地、城市用地、农村宅基地和其他建设用地作为威胁因子,具体计算方法见表 3。

(2) 生态系统景观指数(ELI)

生态系统景观指由景观本底在自然干扰和人类活动改造后形成的空间异质性分布状况。生态系统景观的稳定性从景观连通性(LC)和景观异质性(LH)两个方面来衡量^[36]。其中,景观连通性反映的是景观组分之间功能、结构的连接性,通过整体景观与具有重要生态功能的斑块(森林和草地斑块)的连通性来表征。而景观异质性反映了区域景观多样性和空间形态复杂性,一般采用 Shannon 多样性指数(SHDI)和平均斑块分维数(MPFD)两个指标进行测度,具体计算方法见表 3。

(3) 生态系统功能指数(EFI)

生态系统功能是生物量生产的基础,调节资源、能源和生物的储存和流动,并形成生态系统对环境变化适应性响应。基于天山北坡经济带的资源禀赋及功能定位,从供给功能(即粮食供给和产水)和调节功能(即碳储存和土壤保持)入手评估其生态系统服务功能,它们对维持天山北坡经济带生态稳定至关重要,具体计算方法见表 3。

1.3.3 核密度估计模型

核密度分析是一种利用概率密度曲线描绘变量的分布形态和动态性演进规律的非参数估计方法^[38]。采用该方法刻画经济韧性和生态韧性耦合协调度的时序演变特征。具体公式如下:

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

式中,F(x)是点 x 处的密度估计;n 是样本个数;h 是带宽;x_i为样本观测值;x 为样本均值;K()为核函数,具体采用高斯函数进行估计。

表 3 生态韧性计算方法
Table 3 Calculation method of ecological resilience

指标层 Indicator layer	计算公式 Calculation formula	公式说明 Formula specification	参考文献 References
生境质量指数 Habitat quality index	$HQI_{sj} = H_j [1 - (D_{sj}^z / (D_{sj}^z + K^z))]]$	式中, HQI_{sj} 为生境类型 j 中网格 x 的生境质量; H_j 为生境类型 j 的生境适宜性; D_{sj} 为生境类型 j 中网格 x 的生境退化度; k 为半饱和常数; z 是归一化常数。	Zhang S B 等 ^[17]
生态系统景观指数 Ecosystem landscape index	$ELI = LH + LC$ $LH = 0.3SHDI + 0.2MPFD$ $LC = 0.2 \times CON + 0.15 \times CON_1 + 0.15 \times CON_2$	式中, LH 为景观异质性、 LC 为景观连通性; $SHDI$ 为 Shannon 多样性指数、 $MPFD$ 为平均斑块分维数; CON 表示整体景观连通度, 利用蔓延度指数 (CONTIG) 表征; CON_1 、 CON_2 分别表示森林和草地的景观连通度, 采用连接度指数 (CONNECT) 衡量。	薛飞等 ^[14]
生态系统功能指数 Ecosystem function index	$EFI = \sum_{k=1}^m ef_k \times \omega_{efk}$	式中, ef_k 和 ω_{efk} 分别为第 k 个生态系统功能的标准化值和权重, m 为生态系统功能个数。	Pan Z Z 等 ^[37]
粮食供应服务 Food supply service	$G_i = (NDVI_i / NDVI_{sum}) \times G_{sum}$	式中: G_i 为 i 栅格中的粮食产量 (t); G_{sum} 为研究区粮食总产量 (t); $NDVI_i$ 为 i 栅格的归一化植被指数; $NDVI_{sum}$ 为研究区耕地 $NDVI$ 之和。	赵雪雁等 ^[30]
水源涵养服务 Water conservation service	$Y(x) = (1 - AET(x) / P(x)) \times P(x)$	式中: $Y(x)$ 为年产水量 (mm); $P(x)$ 为年平均降雨量 (mm); $AET(x)$ 为年平均蒸散量 (mm)。	
碳储存服务 Carbon storage service	$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	式中: C_{total} 、 C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别表示总碳储量、地上部分、地下部分、土壤以及枯落物碳储量 (t)。	
土壤保持服务 Soil conservation service	$SEDRET_x = RKLS_x - USLE_x$ $USLE_x = R \times K \times LS \times C \times P$	式中: $SEDRET_x$ 为栅格 x 的土壤保持量 (t), $RKLS_x$ 、 $USLE_x$ 分别表示栅格 x 的土壤潜在侵蚀量 (t) 和土壤实际侵蚀量 (t)。 R 为降雨侵蚀因子; K 为土壤侵蚀因子; LS 为坡长-坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持因子。	燕玲玲等 ^[28]

1.3.4 耦合协调度模型

耦合协调用来描述不同系统之间相互作用、调节和协调关系。经济韧性和生态韧性是相互依存、相互影响的, 两者间的关系不是孤立的, 而是互相耦合的。因此, 本文利用耦合协调度模型探究两者间的交互关系和协调水平, 计算公式如下:

$$C_i = 2 \times \sqrt{\frac{U_1 \times U_2}{(U_1 + U_2)^2}}$$

(2)

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2$$

(3)

$$D = \sqrt{C \times T}$$

(4)

式中, U_1 、 U_2 分别代表经济韧性与生态韧性的综合评价; C 为两个系统的耦合度, T 为综合协调指数, D 为耦合协调度。 α 、 β 分别代表两个系统的权重, 由于经济韧性与生态韧性的发展同等重要, 因此将其均设定为 0.5。当 D 值较小时, 系统的协调性较低, 系统内部存在相互制约关系; 而 D 值较大时, 系统处于更理想的协调状态, 各部分间存在相互促进关系。参考王淑佳等人^[39] 研究, 并结合区域实际状况, 将耦合协调度划为极度 (0.0, 0.1]、严重 (0.1, 0.2]、中度 (0.2, 0.3]、轻度 (0.3, 0.4]、濒临 (0.4, 0.5] 5 个失调等级; 勉强 (0.5, 0.6]、初级

(0.6,0.7]、中级(0.7,0.8]、良好(0.8,0.9]、优质(0.9,1.0]5个协调等级。

1.3.5 协调影响力指标

经济韧性和生态韧性各要素对总体耦合协调度的影响存在差异性,本文参考王少剑等^[9]的协调影响力 CI 指标,对其进行了具体分析。协调影响力 CI 能够衡量子类协调对总体协调的影响,其数值正负分别代表推动和阻滞效应,数值大小代表了影响程度,计算公式如下:

$$CI_x = W_x(D_t - D_y) \quad (5)$$

$$CI_y = v_y(D_i - D_y) \quad (6)$$

式中, CI_x 、 CI_y 分别代表生态韧性和经济韧性各要素的协调影响力指数, $D_t(t=1,2,3)$ 表示经济韧性与抵抗力、恢复力和适应力的耦合协调度, $D_i(i=1,2,3)$ 表示生态韧性与经济运行韧性、经济结构韧性和经济潜力韧性的耦合协调度, D_y 表示经济韧性与生态韧性的耦合协调度, W_x 、 V_y 分别为3类生态韧性和经济韧性指标对应的权重系数。

2 结果

2.1 经济韧性时空特征

2000—2020年天山北坡经济带经济韧性总体呈波动上升趋势,增幅为1.70%(图2)。具体来看,2000—2010、2015—2020年经济韧性略有下降,2010—2015年则显著增加,增幅高达25.15%。在此期间,天山北坡经济带经济韧性的区域差异呈缩小态势,变异系数由0.618降至0.473。从经济韧性不同要素维度来看,经济结构韧性水平>经济运行韧性水平>经济潜力韧性水平,其中,经济结构韧性水平相对较高,但呈波动下降趋势;经济运行韧性变化幅度最大,且于2015年达到峰值;经济潜力韧性较低,但呈波动上升趋势,增幅达17.01%。

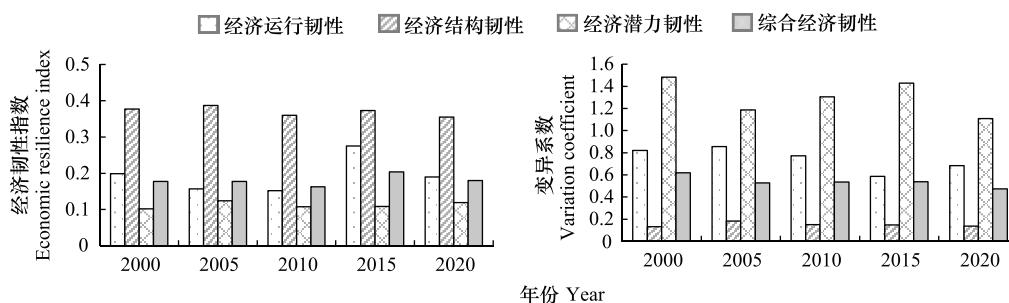


图2 天山北坡经济带经济韧性指数和变异系数

Fig.2 Economic Resilience Index and variation coefficient of the NSEBTM

采用自然断点法可将经济韧性分为低水平(0.000—0.107)、较低水平(0.108—0.134)、中等水平(0.135—0.208)、较高水平(0.209—0.447)及高水平(0.448—1.000)5个等级。结果显示,天山北坡经济带以中等水平经济韧性县区为主,其占比达35.50%。2000—2020年经济韧性表现为低水平向较低和中等水平转变态势(图3),且呈“天山北坡中段>西段>南部>东段”的分布格局。具体来看,较高和高水平区在2000—2010年呈现由西向东扩张趋势,尤以中段最为显著,而2010年后逐渐收缩,以南部变化最为突出;中等水平区在2000—2020年间连片集中在天山北坡经济带西段和中段区域,且呈扩张趋势,而南部则大致表现为由西向东收缩、由中等水平向较高水平转变的态势;低水平区在2000—2010年间稳定分布在西、中和东段,之后东段区域逐渐转为较低和中等水平。总之,2000—2020年天山北坡经济带经济韧性在动态演进的过程中形成了中段整体较高且较为稳定的空间格局。

2.2 生态韧性时空特征

2000—2020年天山北坡经济带生态韧性总体处于低水平,且以2010年为转折点呈现先下降后上升的变

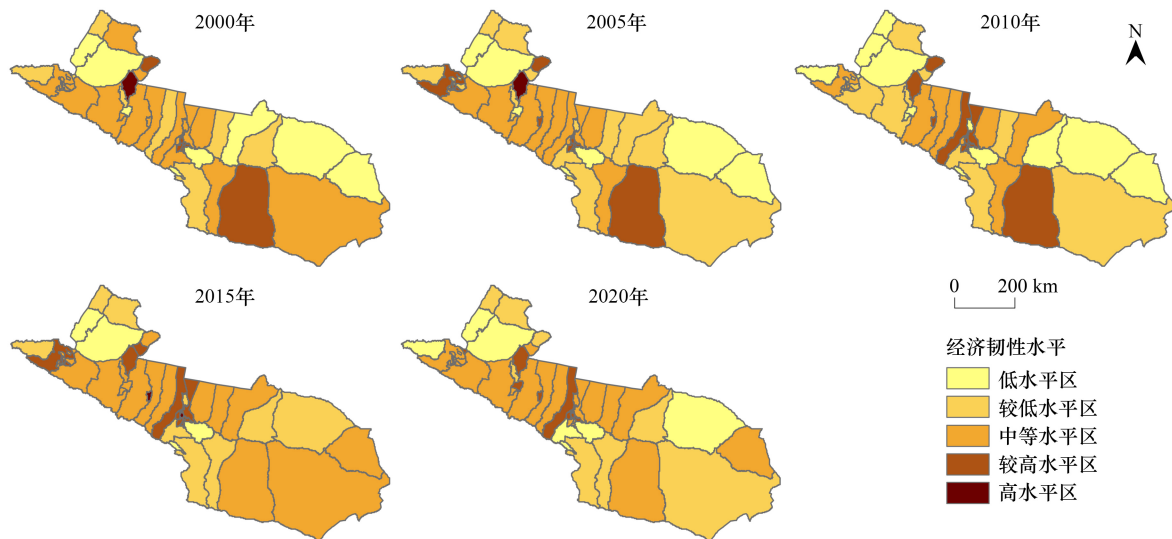


图3 2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性的时空变化

Fig.3 Spatial and temporal changes of economic resilience in the NSEBTM from 2000 to 2020

化趋势(图4)。具体来看,2000—2010 年生态韧性略有下降,降幅为 0.40%,2010—2020 年缓慢升高,增幅为 0.80%。在此期间,天山北坡经济带生态韧性的区域差异趋于缩小,变异系数由 0.759 降至 0.743。从生态韧性不同要素维度来看,恢复力水平>抵抗力水平>适应力水平;其中,恢复力水平相对较高,是抵抗力和适应力的 1.3—2.0 倍,但呈波动下降趋势;适应力水平较低,但变化幅度最大,且呈波动上升趋势,增幅为 12.12%。

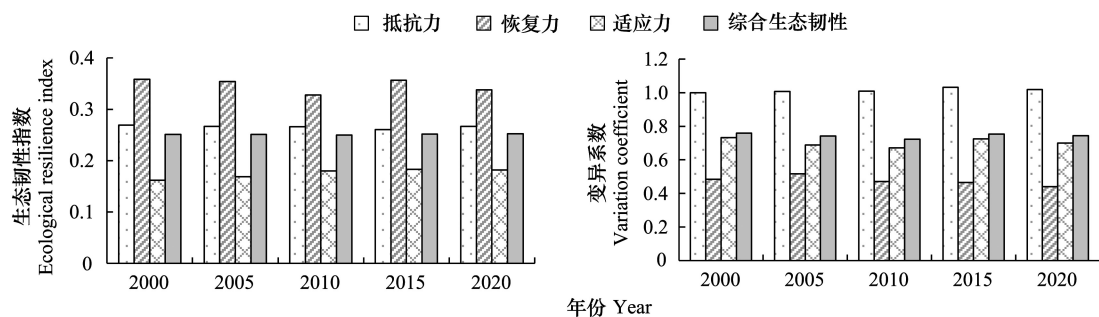


图4 天山北坡经济带生态韧性指数和变异系数

Fig.4 Ecological Resilience Index and variation coefficient of the NSEBTM

本文采用自然断点法,可将生态韧性分为低水平(0.000—0.153)、较低水平(0.154—0.262)、中等水平(0.263—0.312)、较高水平(0.313—0.423)及高水平(0.424—1.000)5个等级。研究结果显示,天山北坡经济带生态韧性以低水平区域为主,其占比达 47.85%。2000—2020 年天山北坡经济带生态韧性整体表现为较低水平区扩张、低水平向高水平转变的态势(图5)。具体来看,生态韧性高水平区由西向东呈条带状分布,且在 2000—2010 年间趋于收缩(降幅 5.05%),分散在西北部、中部、西南部边缘的山脉区域,2010 年后逐渐扩张(增幅 6.84%),以低、较低水平区向高水平区跨越、从中部向北部转移为主;较低水平区在 2000—2010 年间扩张显著(增幅 20.67%),主要集中在准格尔盆地以南、博罗科努山以东的沙漠区域,2010 年后趋于收缩(降幅 11.16%),以较低水平区向低水平区转变为主;低水平区在 2000—2010 年趋于收缩(降幅 6.17%),而后略有扩张(增幅 2.85%),呈面状分布在天山山脉南北两侧。总体而言,2000—2020 年天山北坡经济带生态韧性表现出“西北高东南低”“低值集聚、高值分散”的空间分布特征。

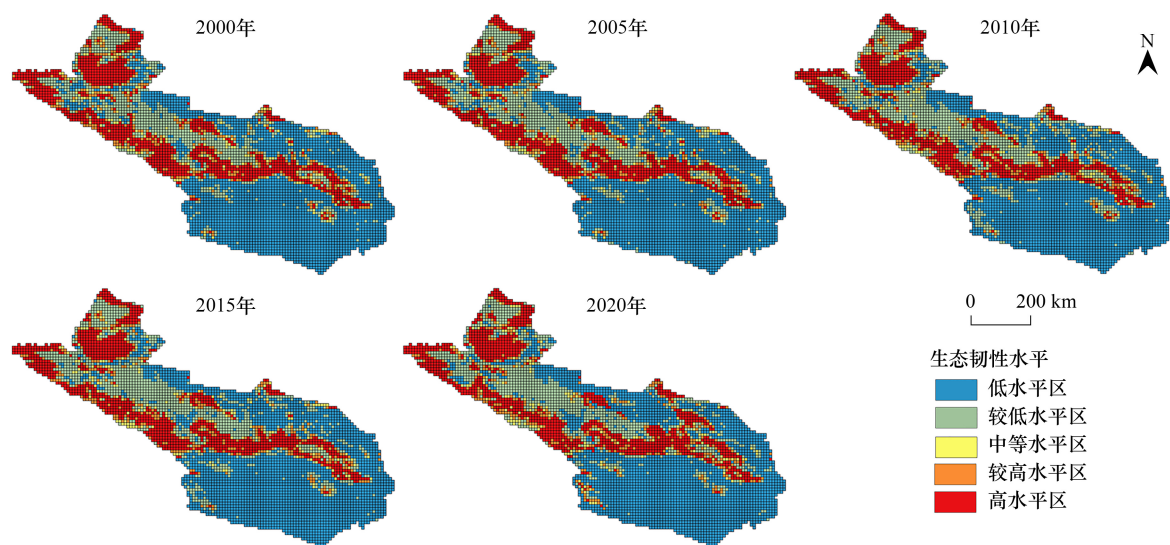


图5 2000—2020 年天山北坡经济带生态韧性的时空变化

Fig.5 Spatial and temporal changes of ecological resilience in the NSEBTM from 2000 to 2020

2.3 经济韧性和生态韧性的耦合协调度

2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性和生态韧性耦合协调度主要介于 0.3—0.5 之间,总体处于“失调”状态,其中,尤以“濒临失调”最为显著。核密度曲线图显示(图 6),天山北坡经济带经济—生态韧性耦合协调度分布曲线中心位置以 2010 年为节点呈现先右移后左移的变化趋势,表明耦合协调度经历了“增长—下降”过程;分布形态上,波峰高度大致呈现“下降—上升”的 V 型演变态势,且主峰宽度随时间推移逐渐变窄,表明耦合协调度区域差异呈先扩大后缩小的趋势,同时研究区内部差异性也表现为收缩状态;极化现象上,2000—2010 年耦合协调度的分布主要以单峰为主,2010 年后耦合协调度的分布由单峰转变为双峰,这说明耦合协调度由单极化局面向两极分化转变。

2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性和生态韧性的耦合协调度从轻度失调转向濒临失调状态,期末耦合协调度呈“天山北坡中段>西段>东段>南部”的分布格局(图 7)。整体来看,大部分区域处于失调状态,其中,西段和中段主要以濒临失调为主,而东段和南部以轻度失调为主。具体来看,濒临失调区域占据主导地位,平均占比高达 71.5%,以面状分布在天山北坡西段和中段区域,且沿西段→中段→东段路径呈扩张的态势;轻度失调区域次之,平均县区占比为 16%,呈片状分布于天山北坡东段和南部,其中,东段逐渐收缩,南部则呈现先收缩后扩张变化趋势;而勉强协调县区平均占比为 12%,点状分散在天山北坡西段和中段区域,呈现先收缩后扩张的演变态势。此外,从 2000—2010—2020 年间耦合协调度转变路径来看,濒临失调→轻度失调→濒临失调转变区域占比达 30%,轻度失调→濒临失调转变区域占比为 25%,勉强协调—濒临失调—勉强协调转变区域占比仅为 5%,表明天山北坡经济带经济韧性和生态韧性的耦合协调状态近期有所改善,但协调区域仍然较少,其耦合协调度有待进一步提升。

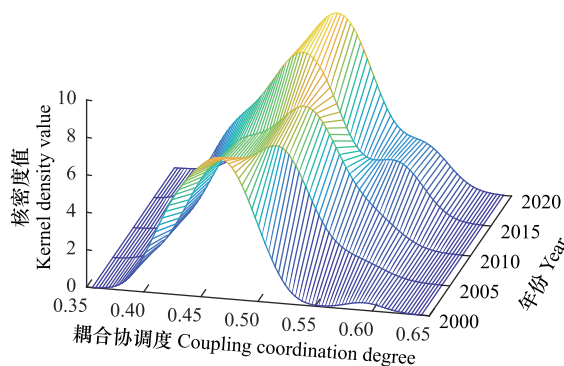


图6 2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性和生态韧性耦合协调度的核密度图

Fig.6 Kernel density map of coupling coordination degree of economic resilience and ecological resilience in the NSEBTM from 2000 to 2020

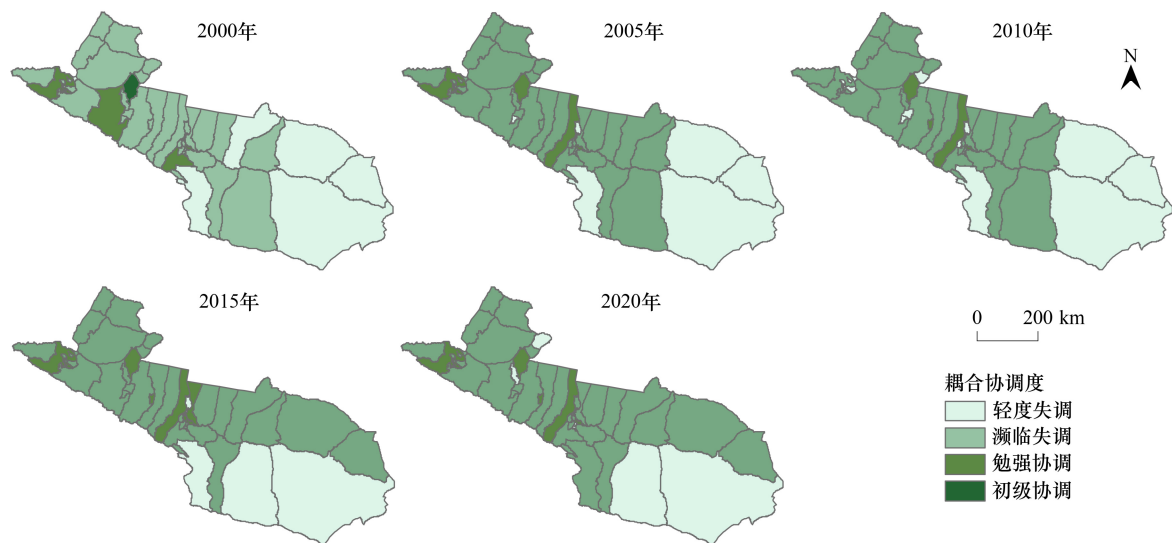


图 7 2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性和生态韧性耦合协调度的时空变化

Fig.7 Spatial and temporal changes of coupling coordination degree of economic resilience and ecological resilience in the NSEBTM from 2000 to 2020

2.4 经济韧性与生态韧性耦合协调度的障碍因素

2.4.1 经济韧性不同维度对耦合协调度的影响

2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性各要素对经济韧性与生态韧性耦合协调度的影响存在差异(图 8)。从经济韧性各要素对耦合协调度的作用方向来看,经济潜力韧性在东、中、西段及南部的协调影响力均为负值,表明其对各区域的经济韧性与生态韧性耦合协调度起到反向阻滞作用;与之相反,经济结构韧性在不同区域的协调影响力均为正值,表明其对各区域的经济韧性与生态韧性耦合协调度均起到正向推动效果;而经济运行韧性对耦合协调度的作用发生了方向变化(除南部外),主要以 2010 年为节点,大致表现为先反向阻滞后正向推动的变化状态。从经济韧性各要素对耦合协调度的作用大小来看,经济潜力韧性对耦合协调度的影响最大,尤以东段的反向阻滞作用最为显著,且呈现增长趋势;经济结构韧性对耦合协调度的影响次之,但其对耦合协调度正向推动作用的区间差异最小,区内差异也最为均衡;经济运行韧性对耦合协调度的影响最低,其中,南部区域的影响力略高其他区域。

2.4.2 生态韧性不同维度对耦合协调度的影响

2000—2020 年天山北坡经济带各生态韧性要素也对经济韧性与生态韧性耦合协调度的影响存在差异性(图 9)。从生态韧性各要素对耦合协调度的作用方向来看,适应力在东、中、西段(除 2010 年)以及南部的协调影响力均为负值,表明其对各区域经济韧性和生态韧性耦合协调度起到反向阻滞作用;恢复力除天山北坡东段外,其协调影响力均为正值,表明恢复力对除东段外的其他区域耦合协调度起到正向促进作用;而抵抗力在不同区域的协调影响力既有正值又有负值,表明其对耦合协调度的作用呈现区域差异性,其中,天山北坡经济带中段、西段(除 2010 年)的抵抗力对耦合协调度起到反向阻滞作用,南部抵抗力对耦合协调度的作用则与之相反,东段在 2010 年前对耦合协调度起到推动作用,之后其协调影响力转为负值,表现为阻滞作用。从生态韧性要素对耦合协调度的作用大小来看,抵抗力对耦合协调度的影响最大,尤以中段的反向阻滞作用最为显著,且呈波动上升趋势;适应力对耦合协调度的影响次之,但其对耦合协调度的负向阻滞作用的区域差异最大,其中,对东段的影响最强,而对中段的影响最弱;恢复力对耦合协调度的影响则最低,但除东段外均表现为正向推动作用,且其区间差异最小,区内变化最为均衡。

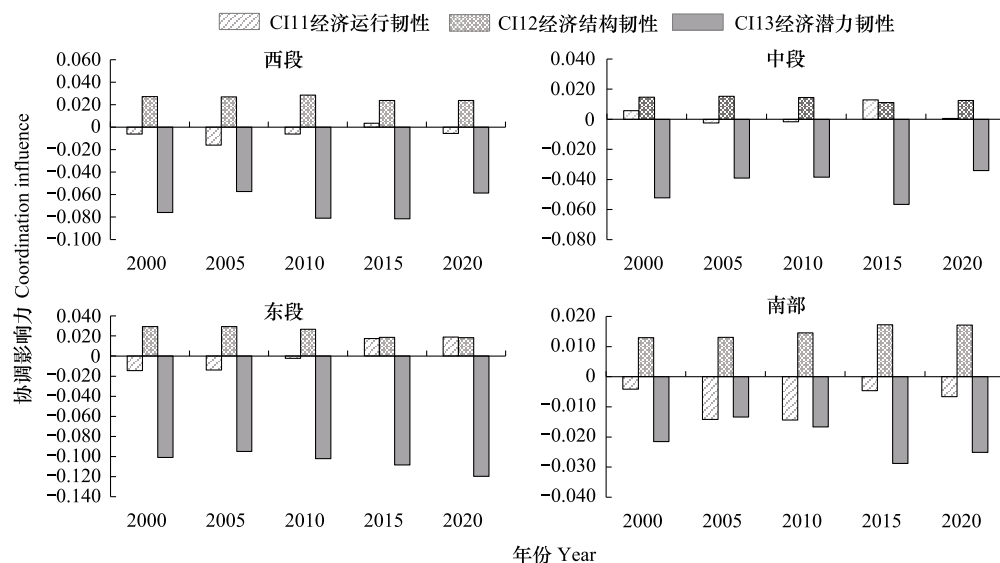


图 8 2000—2020 年天山北坡经济带各区域经济韧性要素的协调影响力

Fig.8 Coordination influence of economic resilience factors in various regions of the NSEBTM from 2000 to 2020

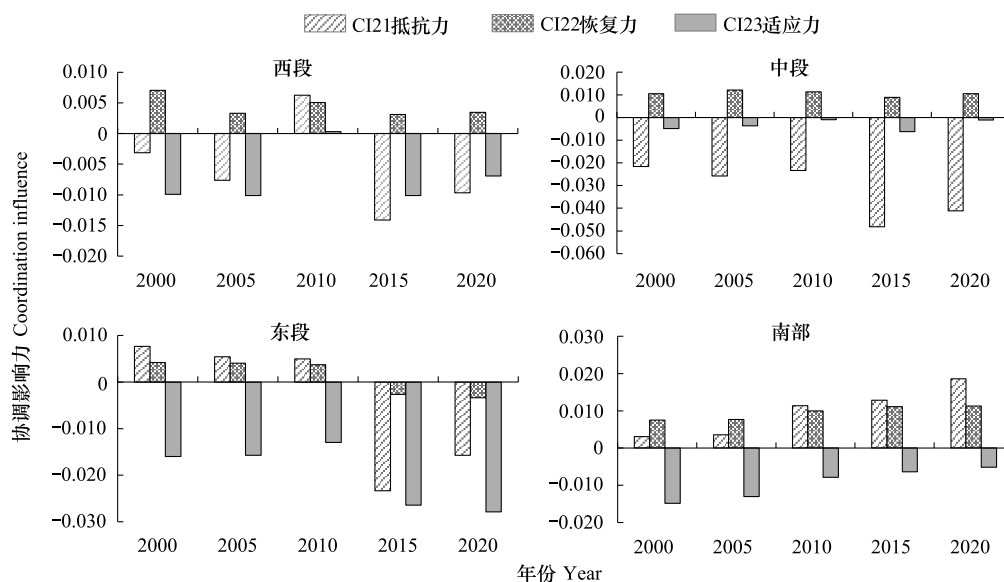


图 9 2000—2020 年天山北坡经济带各区域生态韧性要素的协调影响力

Fig.9 Coordination influence of ecological resilience factors in various regions of the NSEBTM from 2000 to 2020

3 讨论

2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性呈波动上升趋势,但增幅较为缓慢。这与邱思远等^[40]的研究结果一致,他们利用核密度分析发现,兰西城市群和天山北坡城市群等中西部城市群内部经济有所提高,但其发展缓慢。究其原因,其一,天山北坡经济带以“一红(红花、番茄、枸杞)、一白(棉花)、一黑(石油)”为主,形成了农业、矿产多样化产业优势潜力,提高了该区应对外部冲击的能力^[23];其二,天山北坡经济带以循环经济为主导,推动传统农业向现代工业和服务业转变,实现了从资源主导型向技术创新驱动型升级,同时,中欧班列的开通不仅开启了“通道经济”的新时代,也充分发挥了“产业经济”优势,这种内部产业优化效应和外向型经

济优势共同促使其经济结构优化,进而增强了经济韧性;其三,在“西北大开发战略”和“一带一路”倡议背景下,天山北坡经济带不断加大对中亚、西亚和欧洲的开放力度,并且建设了一批重要的基础设施项目,如乌鲁木齐铁路、阿拉山口口岸,实施以开放促开发策略,促进了跨境贸易和投资,加速了跨区、跨国间的联系与交流,吸引了大量的人才、资金和技术^[41],为该经济带提高抵抗经济风险能力创造了更多机遇与活力。

2000—2020 年天山北坡经济带生态韧性整体处于低水平状况,以 2010 年为转折点呈现先下降后上升的变化趋势。张树保等^[17]的研究结果也印证了这一点,其研究显示 2010—2020 年天山北坡经济带的生态韧性处于较低水平,且呈缓慢上升态势。期间,生态韧性水平偏低与生态本底条件脆弱和人类活动干扰密切相关,一方面,天山北坡经济带地处干旱半干旱区,干旱的气候使其长期面临缺水、植被稀疏的压力,导致生态环境脆弱^[42];另一方面,土地开垦、城市扩张、道路和基础设施建设等人类活动导致生态用地侵占、生境质量退化和生态服务功能下降^[43]。但是,随着十八大生态文明建设理念的提出,天山北坡经济带开始统筹推进山水林田湖草系统治理,采取国土绿化提速行动和生态系统保护修复工程等举措,加快生态廊道建设、推进绿色清洁生产,生态韧性有所改善^[10]。与此同时,2011 年农业部、财政部共同制定了《2011 年草原生态保护补助奖励机制政策实施指导意见》,国家在内蒙古、新疆、西藏、青海、四川、甘肃、宁夏和云南 8 个主要草原牧区省(区)及新疆生产建设兵团,全面建立草原生态保护补助奖励机制,环境保护政策和措施对生态环境的恢复能力发挥了积极效应,推动了生态韧性的提升。

2000—2020 年天山北坡经济带经济韧性和生态韧性总体仍处于“失调”阶段。这主要由于天山北坡经济带的经济发展得到了前所未有的重视,《新疆“十二五”发展规划(2011—2015)》、《新疆“十三五”发展规划(2016—2020)》和《天山北坡经济带发展规划》等相继出台,天山北坡作为典型的资源型经济带,经济发展对能源、资源的高需求和高投入促使区域生态破坏和环境污染等问题凸出,导致区域生态—经济朝着非协调方向发展,这与王振波等^[43]的研究结果“经济发展与生态安全呈负相关性”一致。虽然,十八大以来将生态文明建设纳入到国家发展总体布局,并强调以绿色发展理念引领经济高质量发展,但短期内其调整效果尚不明显,尤其是在天山北坡经济带这样干旱、少雨、生态环境脆弱的区域^[44]。此外,耦合协调度低值区主要分布在天山北坡南部,这里被大片的戈壁和裸岩石质地所覆盖,水资源极为匮乏,生态韧性本底状况低下;而在《全国主体功能区规划》中,吐鲁番—哈密经济区又被规划为建设国家级太阳能综合利用示范、煤电生产和外运以及石油天然气等高消耗、高污染产业的重工业基地,虽经济得到了发展,但也加剧了生态危机,最终导致了该区域生态—经济韧性耦合协调度较低。耦合协调度高值区锁定在天山北坡经济带的中、西段,这里拥有优越的区位条件、资源能源丰富且绿洲经济较发达,以商贸、物流和制造业为主,生态环境也相对较好。

4 结论

(1) 2000—2020 年间,天山北坡经济带经济韧性总体以中等水平为主,且呈波动上升趋势;其中,经济结构韧性水平最高、经济运行韧性次之、经济潜力韧性最低,且在空间上呈现“天山北坡中段>西段>南部>东段”的空间格局。

(2) 2000—2020 年间,天山北坡经济带生态韧性整体处于低水平状况,且以 2010 年为转折点呈现先下降后上升的变化趋势;其中,恢复力水平最高、抵抗力水平次之、适应力水平最低。空间上,生态韧性分异显著,表现出“西北部高于东南部”“低值集聚、高值分散”的空间分布特征。

(3) 2000—2020 年间,天山北坡经济带经济韧性和生态韧性整体处于“失调”状态,其耦合协调度由单极化转向“低低聚敛”和“高高聚敛”的两极分化。空间上,西段和中段主要以濒临失调为主,而东段和南部以轻度失调为主,期末耦合协调度呈“天山北坡中段>西段>东段>南部”的分布格局。

(4) 2000—2020 年间,天山北坡经济带经济韧性和生态韧性各要素对耦合协调度的影响均存在差异,其中经济潜力韧性和生态系统抵抗力对经济韧性和生态韧性耦合协调关系的阻滞作用最强,经济结构韧性和生态系统恢复力对经济韧性和生态韧性耦合协调关系的推动作用最强。

基于上述结论,为促进天山北坡经济带经济韧性与生态韧性的协调发展,提出以下建议:①以绿色创新产业驱动经济高质量发展。通过可再生能源、环保设施建设、生态旅游等绿色产业,推动经济结构的转型升级,减少对资源的过度开发和环境的破坏,确保生态—经济的协同发展。②以开放促开发,缓解生态系统压力。合理利用天山北坡经济带地缘、资源和市场优势,扩大开放,改变传统资源要素投资模式,发挥“通道经济”转“产业经济”优势,建立跨境合作机制,促进贸易和投资便利化,提高其应对风险能力。③因地制宜,实施分区管理。根据不同区域的生态环境特点和经济发展需求,采取差异化的管理政策和措施,促进经济和生态的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Un D. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. General Assembly, 2015, 16301: 259-273.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] Ahmed Z, Zafar M W, Ali S, Danish. Linking urbanization, human capital, and the ecological footprint in G7 countries: an empirical analysis. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102064.
- [4] 钱方艳, 兰安军, 范泽孟, 朱娜, 陶倩, 邹永德. 贵州省北盘江流域经济贫困与生态脆弱性的空间耦合关系研究. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2024, 42(1): 36-44.
- [5] 王小华, 杨玉琪, 罗新雨, 温涛. 中国经济高质量发展的空间关联网络及其作用机制. *地理学报*, 2022, 77(8): 1920-1936.
- [6] 孙久文, 陈超君, 孙铮. 黄河流域城市经济韧性研究和影响因素分析——基于不同城市类型的视角. *经济地理*, 2022, 42(5): 1-10.
- [7] 李博, 曲艺. 中国沿海地区产业演化路径依赖及突破对区域经济韧性的影响. *地理学报*, 2023, 78(4): 824-839.
- [8] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [9] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
- [10] Wang K W, Ma H T, Fang C L. The relationship evolution between urbanization and urban ecological resilience in the Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains, China. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 97: 104783.
- [11] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(8): 151-158.
- [12] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析. *经济地理*, 2022, 42(8): 51-61.
- [13] 王思成, 运迎霞, 贾琦. 基于“源-流-汇”指数分析的天津市中心城区生态韧性评价. *西部人居环境学刊*, 2020, 35(1): 82-90.
- [14] 薛飞, 张念慈, 夏楚瑜, 张健, 王楚玥, 李淦, 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.
- [15] 赵领娣, 孙兆旭. 海岸带城市经济发展质量与生态韧性协同发展演化及空间收敛特征. *经济地理*, 2023, 43(7): 119-129, 240.
- [16] 王松茂, 牛金兰. 黄河流域城市生态韧性时空演变及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(20): 8309-8320.
- [17] Zhang S B, Lei J, Tong Y J, Zhang X L, Lu D N, Fan L Q, Duan Z L. Temporal and spatial responses of ecological resilience to climate change and human activities in the economic belt on the northern slope of the Tianshan Mountains, China. *Journal of Arid Land*, 2023, 15(10): 1245-1268.
- [18] Chen T, Li Y L. Urban design strategies of urban water environment orientation based on perspective of ecological resilience. *Science & Technology Review*, 2019, 37(8): 26-39.
- [19] 陈勤昌, 王兆峰. 武陵山片区国土开发强度与经济韧性时空耦合特征及互动效应. *经济地理*, 2023, 43(4): 41-50.
- [20] 王新越, 郭利贞. 中国省域入境旅游经济韧性时空特征与组态机制. *经济地理*, 2023, 43(5): 219-228.
- [21] Ormerod P. Corruption and economic resilience: recovery from the financial crisis in western economies. *Economic Affairs*, 2016, 36(3): 348-355.
- [22] Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks. *Journal of Economic Geography*, 2012, 12(1): 1-32.
- [23] 陈奕玮, 吴维库. 产业集聚、技术溢出与城市经济韧性. *统计与决策*, 2020, 36(23): 90-93.
- [24] Dinda S. Environmental kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological Economics*, 2004, 49(4): 431-455.
- [25] 马亚亚, 刘国彬, 张超, 王杰. 陕北安塞县生态与经济系统耦合协调发展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6840-6849.
- [26] 袁绪英, 曾菊新, 吴宜进. 渭水河流域经济环境协调发展系统动力学模拟. *地域研究与开发*, 2011, 30(6): 84-88, 101.
- [27] 周时杰, 董乙强, 阿斯太肯·居力海提, 聂婷婷, 姜安静, 安沙舟. 天山北坡蒿类荒漠植物群落数量特征及其多样性. *新疆农业科学*, 2023, 60(9): 2298-2305.
- [28] 燕玲玲, 巩杰, 徐彩仙, 曹二佳, 李红瑛, 高秉丽, 李焱. 子午岭地区水土保持服务时空变化及其影响因素. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 188-197.
- [29] 刘同超, 吴丹. 黄河流域城市经济韧性与生态韧性的耦合协调关系研究. *人民黄河*, 2024, 46(3): 6-11.

- [30] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 王伟军. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化. 自然资源学报, 2021, 36(1): 131-147.
- [31] 欧林之, 宋明星, 焦胜. 韧性视角下湖南省生态与区域发展时空演化及影响机制. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(5): 203-214.
- [32] 白立敏, 冯兴华, 孙瑞丰, 赵宏宇. 吉林省城镇韧性水平与城镇化质量耦合分析. 城市建筑, 2018(35): 19-23.
- [33] Turner M. Landscape ecology: the effect of pattern on process. Annual Review of Ecology and Systematics, 1989, 20: 171-197.
- [34] Peng C, Yuan M H, Gu C L, Peng Z R, Ming T Z. A review of the theory and practice of regional resilience. Sustainable Cities and Society, 2017, 29: 86-96.
- [35] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. Nature Communications, 2018, 9: 3034.
- [36] Minor E S, Urban D L. A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. Conservation Biology, 2008, 22(2): 297-307.
- [37] Pan Z Z, Gao G Y, Fu B J. Spatiotemporal changes and driving forces of ecosystem vulnerability in the Yangtze River Basin, China: Quantification using habitat-structure-function framework. Science of the Total Environment, 2022, 835, 155494.
- [38] 彭坤杰, 张萌, 许春晓. 科技创新与经济韧性耦合协调度及驱动因素分析——基于长三角地区的实证. 地理与地理信息科学, 2024, 1-8 [2024-07-18].
- [39] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 治丹丹, 戴彬婷. 国内耦合协调度模型的误区及修正. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- [40] 邱思远, 孙伟. 中国城市群一体化水平测度与辐射能力分析. 地理研究, 2024, 43(2): 303-321.
- [41] 李毓喆, 蒋惠园, 周蕤, 任梦洁. 国际枢纽城市交通区位优势与双循环优势耦合研究. 铁道运输与经济, 2023, 45(10): 1-9.
- [42] Pei H, Fang S F, Lin L, Qin Z H, Wang X Y. Methods and applications for ecological vulnerability evaluation in a hyper-arid oasis: a case study of the Turpan Oasis, China. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 1449-1461.
- [43] 王振波, 梁龙武, 方创琳, 庄汝龙. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(12): 4132-4144.
- [44] 李艳菊, 丁建丽, 张钧泳, 武鹏飞. 2001—2015 年天山北坡植被覆盖对干旱的响应——基于土地利用/土地覆盖分析. 生态学报, 2019, 39(17): 6206-6217.