

Doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2024.03.012

人地复合生态系统韧性研究进展及其对 海岸带生态系统韧性研究的启示

刘永超^{1,2,3,4}, 张海涛³, 应超³, 李加林^{1,3,4}

(1. 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211; 2. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室,

江苏 南京 210017; 3. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211;

4. 陆海国土空间利用与治理浙江省协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 在全球气候变化与人类高强度开发的双重影响下, 人地复合生态系统和受陆海系统交互影响的海岸带地区生态脆弱性更加明显。如何有效把握人地复合生态系统发展动向, 合理规划与调控社会经济活动、促进人地关系协调发展一直是可持续发展领域研究的重点课题。韧性作为系统的内在特征, 在防范化解灾害风险、维护区域生态安全中发挥着重要作用, 是人地复合生态系统可持续发展能力的重要表现。然而, 目前关于人地复合生态系统韧性的内涵、评估方法等方面尚未形成统一的范式, 韧性的量化评估方法存在较大差异。通过梳理和归纳现有研究成果认为, 韧性经历了从工程韧性、生态韧性到演进韧性的转变, 其概念及内涵仍在不断拓展与深化; 总结对比了基于过程形成性和状态总结性的韧性评估方法发现, 将韧性作为过程与结果的综合评估研究仍较为缺乏; 在抵抗扰动、维持稳定和协调发展的韧性理念下, 生态系统的保护与修复等将是区域可持续发展应用中人地复合生态系统安全的重要保障。根据人地复合生态系统韧性研究进展的分析结果, 结合海岸带生态系统韧性研究的现状及不足, 认为未来需要在加强海岸带生态系统韧性内涵挖掘、完善海岸带生态系统韧性评价体系、提高海岸带生态系统韧性监测精度、促进学科融合推动海岸带生态系统韧性有效修复实践等方面深入研究。

关键词: 人地复合生态系统; 韧性; 可持续发展; 评估方法; 启示

中图分类号: P748; K90 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6932(2024)03-0415-11

Review on resilience of human–environment composite ecosystems and its implications for research on the resilience of coastal ecosystems

LIU Yongchao^{1,2,3,4}, ZHANG Haitao³, YING Chao³, LI Jialin^{1,3,4}

(1. Donghai Academy, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources of China, Nanjing 210017; 3. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 4. Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Zhejiang, Ningbo 315211, China)

Abstract: Under the dual influence of global climate change and high-intensity human development, the ecological vulnerability of the man–land composite ecosystem and coastal areas affected by the interaction between land and sea systems has become more obvious. How to effectively grasp the development trend of the man–land composite ecosystem, rationally plan and regulate social and economic activities, and promote the coordinated development of man–land relations has always been a key topic in the field of sustainable development. Resilience, as an inherent characteristic of the system, plays an important role in preventing and resolving disaster risks and maintaining regional ecological security. It is an important

收稿日期: 2023-12-30; 修订日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金 (42206236; 42276234); 宁波市哲学社会科学规划项目 (G2023-2-59); 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金 (2023CZEPK04)

作者简介: 刘永超, 博士, 副研究员, 主要从事海岸带资源环境管理研究, 电子邮箱: liuyongchao@nbu.edu.cn

通信作者: 李加林, 博士, 教授, 主要从事海岸带资源开发与管理研究, 电子邮箱: nbnj2001@163.com

manifestation of the sustainable development capabilities of composite ecosystems. However, there is currently no unified paradigm regarding the connotation and assessment methods of resilience of composite ecosystems, and there are large differences in quantitative assessment methods of resilience. By sorting out and summarizing existing research results, it is believed that resilience has experienced a transformation from engineering resilience, ecological resilience to evolutionary resilience, and its concept and connotation are still expanding and deepening; A summary and comparison of resilience assessment methods based on process formativeness and state summativeness found that research on comprehensive assessment of resilience as a process and outcome is still lacking; Under the concept of resilience to resist disturbance, maintain stability and coordinate development, ecosystem protection and restoration will be an important guarantee for the safety of the man-land composite ecosystem in the application of regional sustainable development. According to the analysis results of the research progress on the resilience of human-land composite ecosystems, combined with the current status and deficiencies of coastal ecosystem resilience research, it is believed that in the future it is necessary to strengthen the exploration of the connotation of coastal ecosystem resilience, improve the coastal ecosystem resilience evaluation system, and improve the coastal ecosystem resilience. In-depth research will be carried out on the accuracy of resilience monitoring, promoting the integration of disciplines, and promoting the practice of effective restoration of coastal ecosystem resilience.

Keywords: human-environment composite ecosystems; resilience; sustainable development; evaluation method; enlightenment

深入理解现代环境变化机理、准确预测未来变化趋势是地球系统科学研究的前沿领域^[1-3],这就需要探讨环境变化下人地关系地域系统的演化过程与动力机制,为区域可持续发展提供科学基础^[4-5]。在全球气候变化和人类活动加剧等背景下^[6],生态系统结构与功能不断变化,生态系统的冗余性、多样性逐渐降低,对演化过程中受到的扰动与冲击更加敏感。随着人地关系理论研究的深入,发现人类发展面临的许多重大问题都直接或间接关系到自然环境与社会经济发展的状态。生态学理论被认为是人类寻求解决当代社会可持续问题的科学基础之一^[7],通过统筹规划与生态治理等方式降低不合理的人类活动胁迫导致的负面环境影响^[8]。然而,传统的治理方法在日益复杂的社会、经济、自然耦合的人地复合生态系统中作用有限,重视系统动态演变的韧性思维,为分析与有效解决复合生态系统可持续发展问题提供了思路与框架^[9],逐渐成为国内外研究的热点。

海岸带是陆地向海洋延伸的频繁变动的复杂地表区域,也是陆海相互作用的生态交错带和支持经济社会可持续发展的“黄金地带”^[10-11]。然而,海平面上升和陆海相互作用背景下,本就脆弱、敏感的海岸带区域在开发活动干扰加剧的影响下,面临着人工岸线增长、湿地大幅萎缩、渔业资源损害、自然灾害频发、生态系统衰退等问题^[12],迫使传统的海岸带治理方式被深刻反思。1993年世界海岸大会开始关注“海岸带综合管理”,次年我国建立了厦门海岸带综合管理实验

区,并于2005年提出“陆海统筹”的概念^[13]。此后,海岸带综合管理逐渐受到人类活动、环境变化和可持续发展等领域的关注。2007年大自然保护协会(TNC)牵头的“海岸带韧性计划”推行以来,韧性机制逐渐在调控沿海人地关系、提高海岸海洋综合管理能力时能够发挥重要作用而受到重视。目前,复合生态系统韧性研究在概念内涵、理论框架、模型构建等方面不断发展,特别是在城市韧性的评估方法与指标体系等方面不断完善,但海岸带生态系统韧性研究仍较为缺乏。因此,本研究在分析人地复合生态系统韧性概念与内涵、评估方法以及区域可持续发展中韧性研究的基础上,探讨对海岸带生态系统韧性研究的启示,以丰富陆海统筹背景下的海岸海洋科学研究内容与理论体系,促进沿海地区人海关系和谐发展。

1 韧性概念及内涵研究进展

Resilience起源于拉丁文“*Resiliere*”,其最早定义是1824年的《大英百科全书》指出的应变体在由压缩应力引起变形之后恢复其大小和形状的能力^[14],也被译为弹回,后又译为恢复力、弹性、韧性^[15]。由于韧性概念涵盖弹性以及不借助外力、仅靠系统自身恢复的能力等基本含义,且体现了系统所具有的可持续发展特征,韧性研究逐渐从物理学、工程领域扩展到心理学、组织管理、灾害管理及生态系统、社会经济复合生态系

统等领域^[16-18]。其中，物理学领域韧性指物体受力形变位移后恢复到原来平衡状态的速度，体现材料在塑性变形或破裂过程中吸收能量的能力^[19]；工程领域韧性是指感知、识别、适应和吸收变化、改变、干扰、中断和突然打击的能力，体现工程项目对外力干扰的耐受力；心理学领域韧性是指个体在遭遇风险或处于逆境中时表现出努力适应不利环境的能力与方式^[20-21]；组织管理领域韧性是指组织所具有的应对与适应内外部环境变化并管理环境变化的能力，强调组织对环境变化回应或重建^[22]；灾害管理领域韧性是指社会组织在遭受灾害影响时表现出应对灾害的能力，包括减少灾害破坏、开展灾后救援和恢复灾后秩序等内容^[23-24]。

生态系统韧性被描述为生态系统承受干扰并克服干扰影响，维持系统变量间相互关系的能力^[25]，即生态系统遭受干扰时，通过改变变量和过程的控制行为来吸收干扰，并维持原有系统特征、结构、功能以及反馈的能力^[26]。生态保护政策和实践中的韧性强调了动态变化环境中保持系统进化的能力，保护系统免受管理失误的损害，允许管理者以可承受的代价学习和改变^[27]。韧性水平可用生态系统在受干扰后返回到生态平衡点的速度来衡量^[28]。应用生态学中，韧性用于衡量生态系统面临压力、干扰或物种入侵的情况下恢复其基本结构、过程和功能的能力^[29-30]。社会经济复合生态系统韧性基于生态系统概念而发展起来，既可阐述为人地复合生态系统被干扰时所表现出来的维持自身功能的能力，也被认为是复合系统由不同过程控制改变了系统结构与功能时，更新系统要素^[26]和容忍干扰大小^[31]的能力。众所周知，生态系统众多过程发生在景观尺度上^[32]，

空间韧性关注景观支持生态系统和生物多样性的能力，表现在空间属性、过程和反馈等随时间变化、响应干扰以及调控生态系统等方面^[33]。生态韧性受演化论的影响而发展为演进韧性，强调系统在受到外界扰动后具备学习、适应、自组织的能力，通过调整自身适应环境变化，不再强调恢复至稳态，更注重系统与外界扰动相互作用的耦合机制^[34-35]。

综上，由于“韧性”一词的多角度解释，加上不同学科对韧性理念的应用与发展，经历了从工程韧性、生态韧性到演进韧性的转变^[36]，韧性概念及内涵仍在不断拓展与深化，但恢复力、弹性、韧性的概念在具体的应用中仍然较为模糊。其中，工程韧性注重系统受损后恢复至原始状态（如胡克定律描述的固体材料受力后在弹性极限内的形变原理），生态韧性强调维持系统结构和功能的稳定及稳态转换（如滨海地区盐沼湿地空间自组织斑图对海岸带生态系统的维持机制），演进韧性关注系统自身的自组织、自适应与系统内要素的耦合协调与可持续发展（如乡村振兴战略中主体的适应性治理）；韧性研究重点由突发冲击转至系统长期动态演化（图1），韧性内涵日趋丰富，评估过程也愈渐复杂。

2 韧性评估方法

韧性的表现形式是评估韧性的重要参考基础之一，其内涵在不同学科和研究对象中侧重不同，使得评估思路与方法有较大差异。从系统韧性表现的角度，将韧性划分为三种类型，即系统的一种过程、能力、过程与结果^[37]，表征与量化时通常分为基于过程的形成性韧性评估和基于状态的

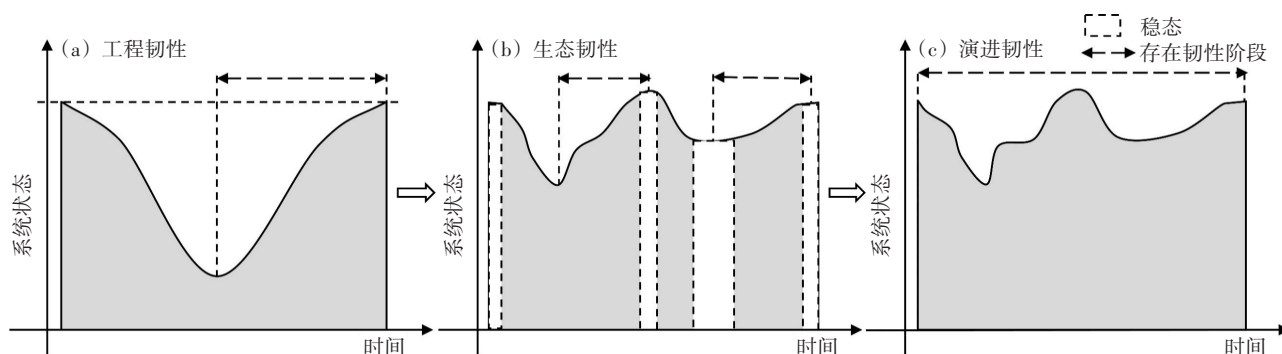
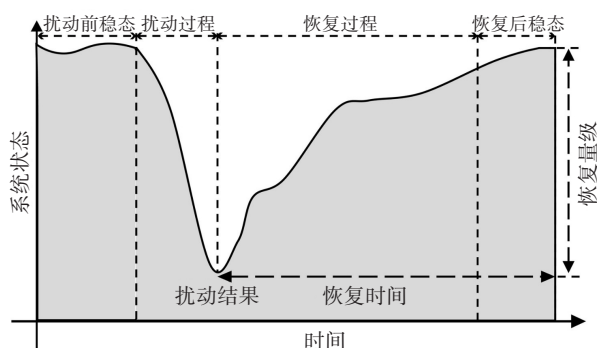


图1 韧性发展的各个阶段示意图

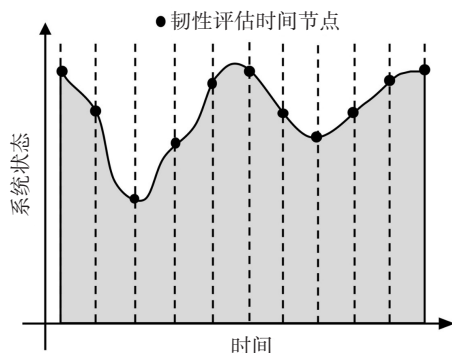
总结性韧性评估。其中,作为系统过程特征时表示系统遭受外界扰动后,适应及恢复的动态过程,将系统功能连续变化中的恢复量级与恢复时间作为测度韧性的指标;作为系统状态特征时表示系统所具备抵抗扰动的能力,这种能力不因系统恢复过程结束而消失,重点评估系统在某时刻的抵抗力、恢复力、适应力等;韧性是过程与结果的综合研究目前较为缺乏^[37]。

2.1 基于过程的形成性韧性评估进展

生态系统具有多稳态的特点^[16],受到扰动后会引起要素、结构、过程、功能变化,通过适应、学习、自组织过程维持系统持续发展。当扰动较小时仅引起系统波动,但受到一定量级破坏时,系统会在一段时间内表现出与被破坏前不同的状态,甚至发生不可逆的状态转变,这一变化节点是拐点也是临界点。因此,基于过程的韧性评估认为韧性是系统的恢复能力,强调对系统进行长时序密集监测,从变化曲线中捕捉识别变化的突变点和拐点作为系统状态转变的节点^[38-39];将系统过程分为扰动前稳态、扰动过程、扰动结果、恢复过程、恢复后稳态^[39],用系统恢复至新稳态的恢复量级、恢复时间来评价系统韧性(图2(a))。



(a) 基于过程的形成性韧性评估



(b) 基于状态的总结性韧性评估

图2 韧性评估方法

基于过程的韧性评估对系统特征的采集频度要求较高,研究对象以自然生态系统为主,根据密集监测要素的差异,可分为基于过程的单要素和多要素评估(表1)。韧性是系统的综合属性,受到多种因素影响^[40-41],单要素韧性评估可以反映某种因素对系统的影响,但仍缺乏对系统整体性的考量。基于过程的多要素韧性评估非常必要^[42],其主要研究灾害或扰动发生前后,系统综合指标变化情况。与基于过程的单一要素韧性研究相比,监测指标是多个因素综合结果,即从每个时间节点的各要素综合状态组合成的长时序变化曲线中提取韧性特征。

综上,基于过程的韧性评估通常以系统从稳态遭遇冲击后恢复至稳态的阶段为研究周期,体现系统具备的弹性及恢复力,评价过程围绕超出系统抵抗干扰能力的扰动展开;其韧性大小与系统破坏程度相关,是系统的纵向特征且具有时间维度,使得基于过程的形成性韧性评估对监测要素的时间分辨率要求较高;但对复合生态系统而言,社会经济方面的数据采集周期较长,时间分辨率低,因而基于过程评估系统韧性仍不够全面。

2.2 基于状态的总结性韧性评估进展

基于状态的总结性韧性评估对象往往以复合生态系统为主,并将韧性作为系统的普遍性特征,认为韧性是维持系统自身发展的能力^[53-54],存在于系统发展的全过程^[55-56],且可在系统过程的任意时刻评估(图2(b))。复合生态系统包括自然、经济、社会等要素,受社会经济数据获取周期的影响,通常以年为单位评估系统韧性。自然与人文要素耦合分析中,多源数据的融合相对困难,但能够反映区域复合生态系统的综合属性,通常构建指标体系进行评价^[57]。

城市是社会、经济、自然系统的综合体,是在多个尺度上运行的社会经济和生物物理过程之间动态相互作用的结果^[58],复杂的城市系统会持续受到自身和外界的冲击和扰动^[59],是人类对陆地自然生态系统影响最强烈的区域。城市韧性是指跨越时空尺度的社会生态系统及社会技术网络构成的城市系统,在受到干扰时具有保持或迅速恢复预期功能、适应变化的能力,包括改造当前和未来以适应干扰的系统能力^[60]。城市韧性是城市应对灾害风险的重要能力,基于状态的城市韧性研究受到了较

表1 基于过程的形成性韧性评估相关研究领域

韧性评估	韧性类型	内涵及评估方法举例
基于过程的 单要素韧性 评估	植被生长过程受火灾、干旱、洪涝、采伐、病虫害、土地利用变化等影响，具有扰动和恢复的生态过程 ^[43]	时序遥感变化检测法对植被光谱特征指数分析，反映植被受扰动的频率和幅度的动态变化 ^[44] ，对植被受扰动至恢复的过程分析，提取恢复量级与恢复时间以描述韧性特征 ^[39] 。结合气温、降水等对植被韧性的影响因素分析 ^[38] ，如厄尔尼诺现象引起玻利维亚高原干旱，对植被群落扰动后在干旱中的韧性 ^[45]
	陆地生态系统对干旱和火灾事件的韧性 ^[46]	长时序叶面积指数（LAI）产品用于评估陆地生态系统对干旱和火灾事件的韧性，LAI最大应力（最低LAI与正常LAI范围差）与恢复时间表征韧性大小
	泥炭沼泽应对干旱的韧性 ^[47]	通过合成孔径雷达（SAR）数据反演地下水位深度并估算土壤水分，用土壤表面水分从干旱中恢复时间，评估泥炭沼泽对干旱的韧性
	海滩韧性 ^[48]	运用长时序、高精度、高频率视频监控技术，从速率、幅度和形态角度，监测海滩系统在变化水文条件下保持其功能的能力
基于过程的 多要素评估	社区应对飓风灾害的韧性 ^[49]	用夜光数据与经济数据拟合发现GDP与夜间灯光数据拟合结果较好，用夜间灯光数据反映飓风发生前后区域GDP的变化，用恢复率、恢复量表征应对飓风的韧性，从飓风强度、自然环境、社会经济角度选取指标，与GDP曲线恢复速率和恢复量进行回归分析影响韧性的因素
	流域生态环境系统韧性 ^[50]	从地下水位埋深、地下水矿化度和地表植被覆盖度方面选取指标，基于主成分分析法确定因子权重，建立生态环境综合指数，用不同时期年均值的线性拟合方程的斜率表示韧性，探究治理后流域生态环境恢复状况并提出对策
	土壤生态系统韧性 ^[51]	遥感植被数据与实测土壤数据结合，通过结构方程模型，评估土壤受外来物种互花米草影响后退化过程（肥力、酸化、碱化、侵蚀等）中的韧性
	矿山土地生态系统韧性 ^[52]	根据扰动强度将恢复力分为特定和一般恢复力，从这两个角度出发，以时间为自变量、系统表现为因变量，建立平面坐标系，揭示矿山土地生态系统的韧性

多关注^[61]。目前关于城市韧性的量化评估方法缺乏统一框架。面向灾害的社区韧性评价中，把复合生态系统理论与城市社区适灾韧性度量结合，识别影响因素、选取评价指标，通过仿真模拟评价城市社区灾后适灾韧性与灾前韧性^[62]；Lam等^[63]从脆弱性和适应性方面定义城市韧性，认为暴露（飓风出现次数与强度）与破坏（飓风造成的生命、财产损失）的关系是脆弱性，破坏与恢复（灾后人口与经济的增长）的关系是适应性。

生态网络分析用于量化城市系统中社会、技术和经济等网络中的脆弱性和相互作用，认为系统韧性主要来源于能量、信息和材料流路径的拓扑结构和大小^[64]，能分析城市系统组成部分间直接和间接的相互作用，识别系统内流的效率和冗余，将两个变量之间的平衡作为韧性^[65-66]。可从抵抗力、适应力和恢复力中的经济、社会、生态三个子系统构建指标体系，探究城市受到不确定性扰动时的抵抗、恢复及适应能力，并结合土地利用变化模拟未来不同情景下的城市韧性^[67]。修春亮等^[68]构建基于“规模-密度-形态”的城市

韧性评估框架，对大连市进行了韧性评估，该评估方法可有效识别城市的韧性特征，是建立城市规划与城市韧性研究之间有效联系的纽带。在此基础上，王少剑等^[69]借鉴物理学耦合模型测算了2000—2015年珠三角城市城镇化与生态韧性的耦合协调关系；杨玉竹^[70]在三维矢量模型中构建协调度、韧性发展指数、综合韧性发展指数，评价了京津冀城市韧性及其影响因素；Huang等^[71]从稳健、快速、冗余和资源方面选取指标构建韧性评价框架，用决策试验和评价试验法与解释结构模型分析影响因素间相互作用机制，探讨了城市韧性的影响因子。可以看出，基于状态的韧性评估过于依赖指标体系，且评估涉及众多自然与社会经济要素，多源数据存在时空分辨率的差异，如何更好地实现数据融合值得深入研究。

3 人地复合生态系统可持续发展中的韧性研究

2021—2030年为联合国十年生态系统恢复计划实施年份^[72]，研究生态系统韧性有助于掌握系

统退化、受损或被破坏的特征,了解其适应性及可持续发展能力^[73],对国土空间优化与生态修复工程实践具有指导作用^[74]。结构是构成系统各要素间相互联系、相互作用的方式和秩序,人地复合生态系统中景观组分和要素的分布与组合会影响区域内物质、能量、信息的流动与传递^[32],进而影响生态系统组分、结构、过程、功能、服务的演化与发展^[75]。

人地复合生态系统中区域的自然环境反映了生态系统的敏感性与稳定性,是脆弱性与抵抗力的基本组成要素^[67]。经济发展水平既反映区域生产、流通、资源调动的能力,也反映了扰动中减少损失、重新组织系统内部结构与功能的能力,是恢复力的重要体现;社会发展状况包括科技发展水平、体制与文化等,是稳定性的重要表现,能反映系统的主动适应能力,通过适应性保持韧性是确保人与环境长期可持续发展的重要前提^[67]。景观生态学中的“斑块—廊道—矩阵”理论与韧性理念结合可以构建区域生态安全格局^[76],以提升区域生态功能和生态恢复力,对维护生态安全具有重要作用^[77]。结合社会—生态韧性与城乡治理理念^[78],将耦合、自组织和学习引入城乡规划、个体参与和政策制定,为促进城乡融合和可持续发展提供了参考。还有研究将韧性评估与保险价值结合,调动经济力量以实现精准生态环境恢复与管理^[79]。

韧性与社会生态系统耦合对生态修复具有重要作用^[72],为生态修复工程的空间布局与修复效果评价提供了度量标准^[74],借助系统韧性在各要素之间的因果反馈与动态相互作用机制,模拟未来政策情景变化为应对危机、保持系统可持续发展提供辅助决策依据^[80]。一方面,可以从自然生态和社会经济恢复力方面构建恢复力评价体系^[81],采用熵值法确定各指标权重,探讨国家尺度上各生态功能区的恢复力水平。另一方面,也可从生态、社会和生产系统方面选取指标^[82],采用有序加权平均法确定权重并构建指标体系,从宏观(县域)和微观(典型乡镇)角度分析生态景观恢复力的时空演变特征;在抵抗扰动、维持稳定和协调发展的韧性理念下,区域人地复合生态系统的保护与修复研究成为未来保障生态安全的热点^[83]。

4 海岸带生态系统韧性研究不足及未来研究启示

4.1 海岸带生态系统韧性研究及其不足

海岸带兼有陆地生态系统与海洋生态系统双重属性,是自然环境与人类活动交互影响最显著的地区,脆弱的环境与巨大的人口压力减弱了海岸带生态系统韧性。传统的环境治理方法在自然、社会、经济耦合的复合系统中作用有限,韧性思维为分析与解决海岸带系统可持续发展问题提供了框架,且有助于提高海岸带系统抵抗、恢复及适应负面影响能力的提升^[9]。随着经济发展、先进的科技与管理手段能够提升海岸带系统的主动适应能力^[84],通过构筑人工海堤、防波堤与沿海湿地等自然和人工基础设施,增强沿海社区经济和生态系统韧性^[85]。然而,由于“韧性”一词的多重解释,加上不同学科对海岸带生态系统韧性理念的发展应用,其概念及内涵仍在不断拓展与深化。在海岸带生态系统韧性评估方面,基于过程的韧性评估方法通常以海岸带生态系统相邻稳态的间隔为研究周期,可突出体现海岸带生态系统的弹性及恢复力;基于状态的海岸带生态系统韧性评估方法耦合了自然与人文因素,可在任意时刻评估海岸带生态系统韧性,对不同发展阶段和不同地区的海岸带生态系统韧性进行对比分析。

随着韧性理念在区域经济、城市发展等区域可持续发展中得到广泛应用,在城市社会—生态系统韧性、社区与开放空间韧性及沿海灾害风险与生态承载力等韧性相关或相近的实证方面开展了较多的工作,极大地推动了海岸带生态系统韧性机制在陆海统筹生态管理研究中的发展。目前,与海岸带生态系统韧性相近的研究工作从自然、社会、经济等方面选取指标,结合模型进行基于状态的多要素评估,包括发展SPRC(危险源—路径—受体—后果)模型优化危险源、路径、受体、防护措施、结果、恢复模型^[86]、构建沿海社区灾害韧性指数用于量化海岸保护措施的经济、环境和社会文化价值,评估生态保护计划对沿海社区韧性的影响^[87]。基于土地、水、生物多样性等海岸带综合管理要素,构成沿海城市生态韧性分析框架,可探讨海岸带生态系统状态转变的驱动因素,进而为海岸带生态系统管理提供辅助决策^[88]。

空间数据和GIS技术为海岸带社区韧性应用提供了多种机会，也为社区的灾害响应提供了决策支持工具^[89]。通过空间权重插值等方法，对社会经济数据空间化处理并与自然数据进行耦合，在韧性理念下基于沙化脆弱性与生态系统服务空间耦合提出了海岸带生态修复方案^[83]。此外，通过岸线变化识别栖息地变化特征，借助生态系统综合估值和权衡模型（InVEST）评估系统在自然灾害中的暴露程度，耦合脆弱性与恢复力^[90]，分析沿海自然栖息地抵御自然灾害的能力。

以上评价方法与模型的发展为海岸带生态系统韧性评估提供了框架，但在实际评估中客观上会受到多源数据类型和分辨率融合、自然要素和社会经济要素耦合受限的影响，这种影响在海岸带地区也不例外，一定程度上影响空间化效果。作为非线性复杂系统的海岸带生态系统，韧性评价多以社会与生态统计数据选取相应替代指标进行，集中在某些系统要素的描述上，缺乏对系统的综合评价，难以实现定量的空间化表达，阻碍了陆海统筹生态管理机制研究走向应用。亟须加强海岸带生态系统韧性的量化表征、韧性演化过程及韧性状态、韧性演化的影响机理、海岸带城市韧性与生态系统韧性耦合以及海岸带生态系统韧性时空可视化和提升等方面的研究，为海岸带地区精准生态修复与环境管理，监测评估海岸带开发的生态效益，模拟、预测未来情景下的海岸带开发环境效应提供理论依据与技术手段。

4.2 对海岸带生态系统韧性研究的启示

近几十年韧性研究在概念及内涵、基于过程的韧性评估、基于状态的韧性评估、区域可持续发展中的韧性研究等方面取得不少研究成果，并处于不断发展过程中。此外，无论是从早期国际地圈和生物圈计划（IGBP）、国际海岸带陆海相互作用计划（LOICZ）看，还是国际全球环境变化人文因素计划（IHDP）、联合国人类发展报告（UNHD）到未来地球海岸计划（FEC），再到当前的可持续发展框架（SDG）来看，海岸带生态系统韧性相关研究，逐渐成为国际上生态保护和社会经济发展的热点领域，未来加强海岸带生态系统韧性的研究显得尤为重要^[54]。

一是加强海岸带生态系统韧性内涵挖掘。海岸带生态系统韧性的内涵与特征挖掘是其评价的

前提，虽然复合生态系统韧性的研究在这方面已经取得一定的进展，但由于“韧性”的多重解释，海岸带生态系统韧性与恢复力、弹性的概念仍较为模糊。需进一步结合系统论的方法，立足海岸带生态系统的组成特征、开放特征、时间特征、功能特征、空间特征和可持续性特征，结合人地复合系统韧性的理论研究成果，优化海岸带生态系统韧性的定义，探讨更为精确的海岸带生态系统韧性评价模型，以促进海岸带人地复合生态系统的可持续发展。

二是完善海岸带生态系统韧性评价体系。海岸带系统耦合了陆海自然、社会、经济三个子系统，子系统中各要素对环境变化的敏感性不同；面对冲击与扰动的响应速度不一、“快变量”与“慢变量”时空分辨率差异，使得建模评估与数据耦合分析难，需推动涉海多源异构数据融合，促进模型与多源数据匹配，以增强海岸带生态系统的可观测性。韧性是系统的整体性特征，指标及权重是韧性评价的基础，韧性包含的鲁棒性、多样性、适应性、连通性及自组织性等特征通常不易量化，需加强从韧性的特征中选择指标构建评价体系，从规模、结构、尺度、空间流等方面，多要素、多过程、多尺度地探究海岸带生态系统韧性的空间分布特征。

三是提高海岸带生态系统韧性监测精度。海岸带生态系统的演化过程中面临着全局缓慢扰动与局部突然冲击，突然冲击对系统的影响最为显著，可能导致系统内部组分、结构、功能改变。海岸带生态系统韧性作为系统内部属性，贯穿于系统发展全过程，能够进行长时序与高频率的监测，便于展现海岸带生态系统退化、受损或被破坏的状态，利于准确把握海岸带生态系统的演化态势，探究海岸带人地复合生态系统的演变规律，趋利避害，进一步有效降低生态风险。此外，针对海岸带生态系统极端冲击事件的监测为寻找系统发展的阈值与极限提供了可能，对研究海岸带生态系统的耐受限度有重要意义。

四是促进学科融合推动海岸带生态系统韧性有效修复实践走深走实。韧性是海岸带生态系统可持续发展的重要特征，在生态优先、绿色发展的背景下，决策、规划、实施等各个环节都应把生态效应置于首要位置。实践证明，管理中的韧

性理念增强了海岸带生态系统在可能出现意外的环境变化中维持持续发展的能力^[91]。同时,海岸带生态系统自身的复杂性决定了要实现区域精准的生态修复与环境管理,就要促进多学科融合,在沿海生态保护、城市规划、经济发展、社会发展等方面落实韧性理念。因此,认清海岸带生态系统韧性的时空特征,能够有效监测评估沿海地区既有保护措施生态效益,模拟预测未来情景的开发活动影响,也能够为海岸带国土空间优化与生态环境管理提供科学依据。

5 结论

全球变化背景下的人类社会适应是我们面临的共同问题,有效地把握人地复合生态系统发展动向对促进人地关系协调发展具有重要意义。从人地复合系统的韧性出发提出应对方案是这一问题的解决思路之一,可在防范化解灾害风险、维护区域生态安全中发挥重要作用。海岸带是人类社会与经济高密度存在的主要区域,在全球气候变化与人类开发的双重影响下,海岸带地区生态脆弱性更加明显,亟需借鉴人地复合系统韧性的一般理论和方法为海岸带的可持续发展提供思路。研究在梳理了国内外研究进展的基础上对韧性内涵、发展阶段进行综述,总结对比了基于过程形成性与基于状态总结性的韧性评估方法,分析了韧性在区域可持续发展相关研究中的应用。在此基础上,总结了海岸带生态系统韧性研究的不足,并提出了未来海岸带生态系统韧性研究需要在进一步挖掘内涵、完善韧性评价体系、提高韧性监测精度以及推动韧性有效修复实践等方面深入研究。

参 考 文 献

- [1] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. The emergence and evolution of Earth System Science[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 54–63.
- [2] 刘昌明, 郑度, 崔鹏, 等. 自然地理学创新发展与展望[J]. *地理学报*, 2020, 75(12): 2547–2569.
- [3] 陈发虎, 吴绍洪, 刘鸿雁, 等. 自然地理学学科体系与发展战略要点[J]. *地理学报*, 2021, 76(9): 2074–2082.
- [4] 陆大道. 关于地理学的“人-地系统”理论研究[J]. *地理研究*, 2002, (2): 135–145.
- [5] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 等. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504–509.
- [6] FOLKE C, CARPENTER S, ELMQVIST T, et al. Resilience: Now more than ever[J]. *Ambio*, 2021, 50(10): 1774–1777.
- [7] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统[J]. *生态学报*, 1984, (1): 1–9.
- [8] DOBSON A P, BRADSHAW A, BAKER A G. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology[J]. *Science*, 1997, 277(5325): 515–522.
- [9] JOZAEI J, MITCHELL M. An assessment for developing resilience capacity of Tasmanian coastal governance[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 163: 130–140.
- [10] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1133–1142.
- [11] 侯西勇, 刘静, 宋洋, 等. 中国大陆海岸线开发利用的生态环境影响与政策建议[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1143–1150.
- [12] 周云轩, 田波, 黄颖, 等. 我国海岸带湿地生态系统退化成因及其对策[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1157–1166.
- [13] 张海峰. 海陆统筹兴海强国——实施海陆统筹战略, 树立科学的能源观[J]. *太平洋学报*, 2005, (3): 27–33.
- [14] PALEKIENE O, SIMANAVICIENE Z, BRUNECKIENE J. The application of resilience concept in the regional development context[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, 213: 179–184.
- [15] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 145: 47–61.
- [16] WALKER B, CARPENTER S, ANDERIES J, et al. Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach[J]. *Conservation ecology*, 2002, 6(1): 14.
- [17] BHAMRA R, DANI S, BURNARD K. Resilience: the concept, a literature review and future directions[J]. *International journal of production research*, 2011, 49(18): 5375–5393.
- [18] 汪辉, 徐蕴雪, 卢思琪, 等. 恢复力、弹性或韧性?——社会——生态系统及其相关研究领域“Resilience”一词翻译之辨析[J]. *国际城市规划*, 2017, 32(4): 29–39.
- [19] BODIN P, WIMAN B. Resilience and other stability concepts in ecology: Notes on their origin, validity, and usefulness[J]. *ESS bulletin*, 2004, 2(2): 33–43.
- [20] LUTHANS F, VOGELGESANG G R, LESTER P B. Developing the psychological capital of resiliency[J]. *Human resource development review*, 2006, 5(1): 25–44.
- [21] UNGAR M. Resilience across cultures[J]. *The British Journal of Social Work*, 2008, 38(2): 218–235.

- [22] HAMEL G, VALIKANGAS L. The quest for resilience[J]. *Revista de la Facultad de Derecho*, 2004, (62): 355–358.
- [23] PATON D, SMITH L, VIOLANTI J. Disaster response: risk, vulnerability and resilience[J]. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 2000, 9(3): 173–180.
- [24] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. *Earthquake spectra*, 2003, 19(4): 733–752.
- [25] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual review of ecology and systematics*, 1973: 1–23.
- [26] WALKER B, HOLLING C S, CARPENTER S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social – ecological systems[J]. *Ecology and society*, 2004, 9(2): 5.
- [27] GUNDERSON L H. Ecological resilience—in theory and application[J]. *Annual review of ecology and systematics*, 2000: 425–439.
- [28] TILMAN D, DOWNING J A. Biodiversity and stability in grasslands[J]. *Nature*, 1994, 367(6461): 363–365.
- [29] HIROTA M, HOLMGREN M, VAN NES E H, et al. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions[J]. *Science*, 2011, 334(6053): 232–235.
- [30] SEIDL R, SPIES T A, PETERSON D L, et al. Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services[J]. *Journal of applied ecology*, 2016, 53(1): 120–129.
- [31] CARPENTER S, WALKER B, ANDERIES J M, et al. From metaphor to measurement: resilience of what to what?[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(8): 765–781.
- [32] TURNER M G. Landscape ecology: the effect of pattern on process[J]. *Annual review of ecology and systematics*, 1989: 171–197.
- [33] RAPPAPORT D I, TAMBOSI L R, METZGER J P. A landscape triage approach: combining spatial and temporal dynamics to prioritize restoration and conservation [J]. *Journal of applied ecology*, 2015, 52(3): 590–601.
- [34] 欧阳虹彬, 叶强. 弹性城市理论演化述评: 概念、脉络与趋势[J]. *城市规划*, 2016, 40(3): 34–42.
- [35] 韩增林, 朱文超, 李博. 区域弹性研究热点与前沿的可视化[J]. *热带地理*, 2021, 41(1): 206–215.
- [36] 陈梦远. 国际区域经济韧性研究进展——基于演化论的理论分析框架介绍[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(11): 1435–1444.
- [37] 段怡嫣, 翟国方, 李文静. 城市韧性测度的国际研究进展[J]. *国际城市规划*, 2021, 36(6): 79–85.
- [38] DE MARZO T, PFLUGMACHER D, BAUMANN M, et al. Characterizing forest disturbances across the Argentine Dry Chaco based on Landsat time series[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 98: 102310.
- [39] LIU M, LIU X, WU L, et al. Establishing forest resilience indicators in the hilly red soil region of southern China from vegetation greenness and landscape metrics using dense Landsat time series[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 106985.
- [40] HATVANI-KOVACS G, BELUSKO M, SKINNER N, et al. Drivers and barriers to heat stress resilience[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 603–614.
- [41] YANG Y, GUO H, CHEN L, et al. Multiattribute decision making for the assessment of disaster resilience in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Ecology and society*, 2020, 25(2): 5.
- [42] ZHANG X, SONG J, PENG J, et al. Landslides-oriented urban disaster resilience assessment—A case study in ShenZhen, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 95–106.
- [43] NGUYEN T H, JONES S D, SOTO-BERELOV M, et al. A spatial and temporal analysis of forest dynamics using Landsat time-series[J]. *Remote sensing of environment*, 2018, 217: 461–475.
- [44] HARRIS A, CARR A S, DASH J. Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 28: 131–139.
- [45] WASHINGTON-ALLEN R A, RAMSEY R, WEST N E, et al. Quantification of the ecological resilience of drylands using digital remote sensing[J]. *Ecology and society*, 2008, 13(1): 33.
- [46] WU J, LIANG S. Assessing terrestrial ecosystem resilience using satellite leaf area index[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 595.
- [47] LEES K, ARTZ R, CHANDLER D, et al. Using remote sensing to assess peatland resilience by estimating soil surface moisture and drought recovery[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143312.
- [48] PARLAGRECO L, MELITO L, DEVOTI S, et al. Monitoring for coastal resilience: Preliminary data from five Italian sandy beaches[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1854.
- [49] QIANG Y, HUANG Q, XU J. Observing community resilience from space: Using nighttime lights to model economic disturbance and recovery pattern in natural disaster[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 57: 102115.
- [50] 郝媛媛. 基于 GIS/RS 的西北内陆河流域生态恢复效果评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [51] YANG R M, GUO W W. Invasive *Spartina* strengthens soil resilience in wetlands of the east-central China coast[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(9): 2846–2853.

- [52] 杨永均. 矿山土地生态系统恢复力及其测度与调控研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [53] LI G, KOU C, WANG Y, et al. System dynamics modeling for improving urban resilience in Beijing, China[J]. Resources, conservation and recycling, 2020, 161: 104954.
- [54] ZHANG H, LIU Y, LI J, et al. Evaluation and analysis of coastal complex ecological resilience based on multidimensional data: A case study of East China Sea[J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 110981.
- [55] ZAMPIERI M. Reconciling the ecological and engineering definitions of resilience[J]. Ecosphere, 2021, 12(2): e03375.
- [56] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [57] 邱明丽, 刘殿锋, 刘耀林. 乡村韧性理论框架与测度体系[J]. 中国土地科学, 2021, 35(8): 107-114.
- [58] ALBERTI M. Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1999, 26(4): 605-629.
- [59] 邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析[J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 48-54.
- [60] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: A review[J]. Landscape and urban planning, 2016, 147: 38-49.
- [61] 翟国方, 邹亮, 马东辉, 等. 城市如何韧性[J]. 城市规划, 2018, 42(2): 42-46+77.
- [62] 崔鹏. 我国城市社区复合生态系统适灾弹性的度量研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [63] LAM N S-N, QIANG Y, ARENAS H, et al. Mapping and assessing coastal resilience in the Caribbean region[J]. Cartography and Geographic Information Science, 2015, 42(4): 315-322.
- [64] ULANOWICZ R E, GOERNER S J, LIETAER B, et al. Quantifying sustainability: Resilience, efficiency and the return of information theory[J]. Ecological complexity, 2009, 6(1): 27-36.
- [65] NATHWANI J, LU X, WU C, et al. Quantifying security and resilience of Chinese coastal urban ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2019, 672: 51-60.
- [66] ZHAO R, FANG C, LIU H, et al. Evaluating urban ecosystem resilience using the DPSIR framework and the ENA model: A case study of 35 cities in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 102997.
- [67] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126.
- [68] 修春亮, 魏冶, 王绮. 基于“规模-密度-形态”的大连市城市韧性评估[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2315-2328.
- [69] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [70] 杨玉竹. 京津冀城市韧性测度与影响主因素研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2020.
- [71] HUANG G, LI D, ZHU X, et al. Influencing factors and their influencing mechanisms on urban resilience in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103210.
- [72] FISCHER J, RIECHERS M, LOOS J, et al. Making the UN decade on ecosystem restoration a social-ecological endeavour[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2021, 36(1): 20-28.
- [73] MARCHESE D, REYNOLDS E, BATES M E, et al. Resilience and sustainability: Similarities and differences in environmental management applications[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613: 1275-1283.
- [74] ZHANG Y, YANG Y, CHEN Z, et al. Multi-criteria assessment of the resilience of ecological function areas in China with a focus on ecological restoration[J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106862.
- [75] 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 等. 城市生态系统: 人与自然复合[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5093-5102.
- [76] ZHANG H, LI J, TIAN P, et al. Construction of ecological security patterns and ecological restoration zones in the city of Ningbo, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(4): 663-681.
- [77] KONG X, WANG L, CHEN G. Ecological Resilience Restoration in the Watershed of the Hancang River[J]. Open Journal of Ecology, 2020, 10(10): 651.
- [78] 刘志敏, 叶超. 社会—生态韧性视角下城乡治理的逻辑框架[J]. 地理科学进展, 2021, 40(1): 95-103.
- [79] TANNER S J, ESCOBEDO F J, SOTO J R. Recognizing the insurance value of resilience: Evidence from a forest restoration policy in the southeastern US[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112442.
- [80] LI T, DONG Y, LIU Z. A review of social-ecological system resilience: Mechanism, assessment and management[J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 138113.
- [81] 张艺严, 张绍良, 杨永均, 等. 基于生态功能区尺度的社会—生态恢复力评价研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1059-1068.
- [82] 张行. 生态脆弱区社会—生态景观恢复力演化机制及其适应性管理研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [83] 李杨帆, 向枝远, 杨奕, 等. 基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 130-140.
- [84] 李杨帆, 向枝远, 李艺. 海岸带韧性: 陆海统筹生态管理的核心机制[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(10): 3-7.
- [85] SUTTON-GRIER A E, WOVK K, BAMFORD H. Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal commu-

- nities, economies and ecosystems[J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 51: 137–148.
- [86] RUMSON A G, GARCIA A P, HALLETT S H. The role of data within coastal resilience assessments: an East Anglia, UK, case study[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 185: 105004.
- [87] EWING L C. Resilience from coastal protection[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2053): 20140383.
- [88] WANG Q, LI Y, LI Y. Realizing a new resilience paradigm on the basis of land–water–biodiversity nexus in a coastal city[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 207: 104603.
- [89] HUANG X, SONG Y, HU X. Deploying spatial data for coastal community resilience: A review from the managerial perspective[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(2): 830.
- [90] SAJJAD M, LI Y, TANG Z, et al. Assessing hazard vulnerability, habitat conservation, and restoration for the enhancement of mainland China's coastal resilience[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(3): 326–338.
- [91] FOLKE C. Resilience (republished)[J]. *Ecology and society*, 2016, 21(4): 44. <https://doi.org/10.5751/ES-09088-210444>.
- (本文编辑：袁泽轶)