

引用格式:李睿倩,徐成磊,李永富,等. 国外海岸带韧性研究进展及其对中国的启示[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 232-246. [Li R Q, Xu C L, Li Y F, et al. Progress of international research on coastal resilience and implications for China[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 232-246.] DOI: 10.18402/resci.2022.02.02

国外海岸带韧性研究进展及其对中国的启示

李睿倩^{1,2}, 徐成磊¹, 李永富³, 胡恒⁴

(1. 中国海洋大学国际事务与公共管理学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋发展研究院, 青岛 266100; 3. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 4. 国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要:海岸带韧性可为沿海地区应对全球气候变化与人类活动压力的复合风险提供新的理论源泉和分析视角,对保障沿海地区可持续发展安全具有重要意义。本文在解析海岸带韧性概念内涵的基础上,剖析了以社会生态系统、复杂适应系统等理论为支撑的海岸带韧性理论框架,比较了现有4类评价方法,进而厘清了要素型、过程型和复合型3类评价指标体系的特点,阐释了影响海岸带韧性的社会、自然等多维因素及其作用机制,明确了提升海岸带韧性的抵御型、预防型和适应型3类基本策略。基于现有国外研究成果发现,不同学科和理论视角下海岸带韧性要素关系和韧性能力方面的内涵界定有待厘清,从人地耦合与多维时空视角挖掘海岸带韧性过程与作用机制尚存薄弱之处,多重扰动下海岸带韧性的尺度效应和影响机理分析仍存挑战。最后,本文明确了中国海岸带综合风险防范、区域可持续发展的现实诉求,探讨了以概念内涵为引领、系统评价为支撑、机理解析为重点的本土化理论框架构建内容,提出海岸带韧性理论方法在中国海岸带安全预警、政策精细化制定、国土空间规划与海岸带社会治理等方面的应用路径。

关键词:海岸带韧性;理论框架;可持续发展;韧性机制;复杂适应系统;风险治理;韧性评价;脆弱性

DOI: 10.18402/resci.2022.02.02

1 引言

海岸带位于陆海交界的特殊地带,受陆海双重作用影响,是岸线侵蚀、水资源退化、区域发展失衡等问题集中激化的高度敏感区。目前,全球气候变化和海平面上升对各国沿海地区形成了严峻挑战。同时,人口向沿海地区的持续集聚及其经济活动伴生的高强度干扰,继续加剧海岸带系统所面临的压力。如何使海岸带区域有效应对多源、不确定性风险,由被动应急响应转变为积极预防、抵御、恢复,并通过自我调适向更可持续、更安全的发展方向演进,从而保障沿海区域发展安全、提高区域发展能力,成为国际社会所关注的重要议题。

改革开放以来,中国沿海地区以占全国13%的陆域国土,滋养了45%的人口,创造了近60%的GDP^[1],在经济社会发展和生态文明建设全局中具

有重要战略地位。当前,海平面上升、风暴潮、石油泄漏、赤潮等多灾耦合已对中国沿海地区发展形成严峻挑战。“十四五”规划中明确了“自然灾害防御水平明显提升,发展安全保障更加有力”的目标,为新时代沿海地区可持续发展提出了要求。中国沿海灾害研究早期将海岸带风暴潮、洪水、海平面上升和人类活动等致灾因子作为主要对象,揭示了灾害的分布、成因及其危害,提出了以防灾工程和减灾规划为主的防御性对策^[2,3]。随后,国内研究视角开始转向承灾体自身的脆弱性,分别针对自然灾害风险下海岸带“固有脆弱性”(即生态环境要素的敏感性和易损性)和社会经济因素扰动所致的海岸带“特殊脆弱性”展开研究,开始探索系统内、外部驱动要素的共同作用及影响^[4,5]。由此,脆弱性研究提供了一种主动识别区域关键致脆因子并积极降低

收稿日期:2021-07-02, 修订日期:2021-11-04

基金项目:山东省社会科学规划研究项目(19DZZJ03);青岛市哲学社会科学规划项目(QDSKL2101018)。

作者简介:李睿倩,女,山东济南人,副教授,博士,主要从事海岸带管理研究。E-mail: liruiqian@ouc.edu.cn

2022年2月

脆弱性的灾害风险调控型思路,在强调修复和重建工程的同时,明确了管控沿海人类活动的重要性。近年来,在“暴露性—敏感性—适应性”理论框架指导下,国内少量学者对海岸带脆弱性的结构认知发生变化,将灾害风险冲击下沿海社会生态系统面向灾害的适应性纳入考量^[6,7],适应性被视为降低脆弱性的途径。然而,脆弱性理论对系统的抵御、恢复和适应能力的理论阐释尚为乏力,难以深入揭示不确定扰动下人地系统的相互作用关系,无法很好地回答海岸带系统是否能够以及如何提升自身发展的内生动力以化解内外环境冲击这一核心问题。因此,面向区域可持续发展的长远目标,中国沿海灾害风险管理亟待注入新的理论源泉、探索更为有效的应对之策。

全球气候变化和沿海经济快速集聚背景下,海岸带韧性受到国际社会的广泛关注。不同于传统灾害学对致灾因子、承灾体脆弱性和灾害后果的关注,国外海岸带韧性研究强调沿海发展安全的关键在于海岸带系统能否吸收扰动、迅速恢复,并能通过自身调试与不确定扰动之间形成一种动态平衡,使海岸带系统向人海关系更加和谐、区域发展更可持续的方向演进。可见,海岸带韧性理念为沿海地区发展及安全保障提供了一种新的策略指引。目前,国内就海岸带韧性的研究处于萌芽阶段,仅李扬帆等^[8,9]提出将海岸带韧性视为陆海统筹生态管理的核心机制及沿海生态修复的关键目标,尝试将韧性理论方法应用于海岸带生态管理实践。可见,国内对海岸带韧性的理解和应用具有较强的局限性,主要原因之一是缺少对该领域研究进展的整体把握。本文围绕国外海岸带韧性的概念内涵、研究内容、研究进展和未来挑战进行梳理,并立足中国提出3点启示,以期探索海岸带安全管理新的策略应对和增强沿海地区可持续发展提供有益借鉴。

2 海岸带韧性的概念内涵

2.1 韧性的概念演化

“Resilience”起源于拉丁语“resilio/resiliere”,本意为“回复到原始状态”,国内译作韧性、弹性、韧弹性、恢复力、复原力等^[10]。语义上,“韧性”是社会生态系统语境下最接近“Resilience”学术内涵的主流认知^[11],强调了系统经受灾害扰动后的抵御与恢复

能力,也彰显了面向未来扰动系统更具适应性、更强大的特点。1973年,韧性由生态学家Holling用于描述生态系统遭受扰动后快速恢复原状并保持其结构和功能的特征,随后由自然学科延伸至人文社会学科,经历了工程韧性(强调恢复速度和程度,追求单一平衡)、生态韧性(侧重系统的坚持与稳定,追求多重平衡)、演进韧性(注重主动抵御、适应和持续不断的演化,追求适应性循环)3个发展阶段^[12]。韧性研究联盟(Resilience Alliance)^[13,14]进一步提出了系统韧性的3个本质特征:系统能够承受一系列改变并且仍然保持功能和结构的控制力;系统有能力进行自组织;系统具有能够建立和促进学习自适应的能力。同期,还有脆弱性(Vulnerability)、适应性(Adaptability)、转变性(Transformability)等概念,与韧性的内涵范畴相互交融,呈现出多样化的关系结构(图1)。其中,脆弱性关注灾害风险对人类产生负面影响的程度,适应性侧重于人类对灾害风险扰动的响应,转变性强调原有系统难以承受扰动影响后进行创新和改变的能力^[15,16]。至今,韧性与这些相关概念的关系尚未取得统一认知。部分学者强调,融合了脆弱性、适应性等概念后,理解不同尺度下社会生态系统韧性的维持、衰退和创造是实现其可持续发展的关键^[17]。整体上,韧性理论经历了从解释自然生态系统向分析耦合社会生态系统的过程^[18],对诠释人与自然之间的相互作用机制起到了推动作用,且突破了线性思维,实现了在系统结构功能和关联互动层面的理论创新。基于以上优点,韧性成为一种主动识变、应变、转变的发展理念,为实现可持续发展目标提供了新途径^[19]。

2.2 海岸带韧性的多维内涵

Meerow等^[23]和Jabareen^[24]认为,“韧性”是具有多维内涵的词语,取决于不同学科视角下的认知与界定。相应地,学界对海岸带及海岸带韧性的理解亦具有多维性(表1)。地貌学视角下,海岸带是陆海灾害风险的集中作用对象,其形态、结构和功能受气象灾害、生态灾害和地质灾害等直接影响。大量研究以三角洲、湿地、沙丘、泻湖、潮滩等沿海特定地形地貌为韧性分析对象^[25,26],将海岸带韧性视为海岸带地区在遭受海岸侵蚀等干扰后恢复原海岸地形的能力,强调地貌系统恢复稳定和平衡状态

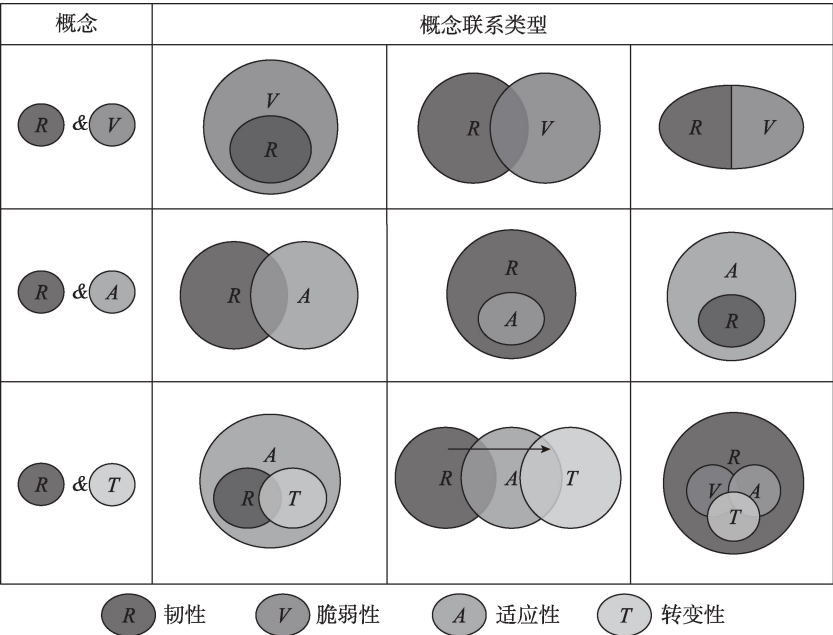


图1 韧性及相关概念关系(根据文献[20-22]绘制)

Figure 1 Relationship between resilience and related concepts (based on studies[20-22])

表1 不同学科视角下海岸带韧性多维内涵

Table 1 Multidimensional connotation of coastal resilience from the perspectives of different disciplines

学科视角	海岸带韧性内涵解读	来源
地貌学	海岸带区域遭受外界扰动后吸收、抵御、恢复海岸地貌的能力,关注海岸带地形地貌与水文、地质等驱动因素间的相互作用	Piégay等 ^[27]
生态学	海岸带生态系统受扰动影响下维持系统功能的自组织能力,其判断标准往往和当地生物多样性、生态系统结构与功能等相关联	Klein等 ^[28]
社会学	海岸带社区预防、计划、吸收、恢复和适应负面影响事件的能力	Lam等 ^[33]
	沿海社区基于区域基础设施与资源可持续管理来响应气候变化的适应能力	The Nature Conservancy ^[34]
	沿海家庭、社区、城市适应和响应环境、社会、经济变化的能力,其韧性由社区发展程度、灾害管理与海岸带管理三部分构成	US Indian Ocean Tsunami Warning System Program ^[29]
灾害学	海岸带系统抵御扰动、在扰动发生时快速吸收与恢复的能力,研究侧重于特定灾害事件对海岸带社会生态系统的情景模拟与预测	Song等 ^[30]
	海岸带系统减少灾害风险,在灾害期间与灾后迅速恢复的能力	Almutairi等 ^[35]
	海岸带韧性是海岸带系统的内在能力,是海岸带系统适应海平面上升、突发事件及人类影响等扰动的同时维持系统功能的长期能力	EUROSION ^[36]
规划学	海岸带系统在各种缓发性扰动和突发性冲击下预防、抵御、恢复与转型的能力,提倡将海岸带韧性作为设计和规划的主要原则	Beatley等 ^[32]

的能力^[27]。生态学视角下,海岸带是自然资源与生态环境要素的复合集成,红树林、珊瑚礁、海草床等典型生态系统的韧性能力与系统结构、物质能量流动和生态系统服务供给联系紧密,可为区域发展提供重要的物质支撑和生态保障。生态学者认为海岸带韧性是海岸带生态系统在水文和地貌改变的状态下维持生物多样性及生态网络结构与功能的

自组织能力,该能力来源于生态和社会经济过程的动态性^[28]。社会学视角下,作为人类社会经济活动的空间载体,海岸带应聚焦以人为中心的韧性研究,关注沿海城市、沿海社区和个体等中、微观对象。在此语境下,海岸带韧性指沿海地区的个人、社区和社会经济系统面对海岸带灾害等风险影响时,吸收、恢复并适应未来变化的能力,突出社会认

2022年2月

知、知识建构、组织应对等要素^[29]。灾害学视角下,海岸带是受气候扰动、人为干扰等陆海灾害风险的高度敏感区。海岸带韧性是海岸带系统在抵御灾害扰动的同时恢复、维持系统功能的能力,其研究侧重台风、洪水等特定灾害事件对海岸带社会生态系统的影响,分析海岸带韧性动态过程及沿海系统的稳健性、冗余性等^[30]。规划管理视角下,海岸带对应着多部门事权关系,是相关政策和治理手段的表达空间。分散化、静态化的海岸带管理思路和控制导向型的传统手段难以应对陆海复杂扰动。相关研究开始关注多部门、跨层级的灾害防治协作机制和提高治理主体学习适应能力的制度安排^[31]。规划学者往往将海岸带韧性作为设计和规划的主要原则,用于海岸带未来发展、区域增长和基础设施建设决策,以增强系统和区域对不确定扰动的准备、缓冲和应对能力^[32]。

综合来看,海岸带系统自身的复杂性决定了海岸带韧性内涵的多维性(如地貌、生态、社会、灾害韧性),韧性思维发展的多样性形成了海岸带韧性认知的多结构化(如抵御、恢复、自组织、适应)。提升海岸带韧性不仅要关注系统应对短期和长期风险的保持与恢复能力,还应从海岸带区域安全管理和区域可持续发展视角出发,综合分析海岸带韧性的演化进程及各类因素对该进程的作用强度,把握关键因素和系统发展状态,增强海岸带应对未来不确定性变化、持续发展的能力。由此,本文认为海岸带可视为社会生态耦合系统,海岸带韧性是系统在面对时空尺度上自然灾害和人为活动等不确定性扰动时,展现出来的当前和未来时期的抵御、恢复和适应能力。相应地,海岸带韧性研究可开展多维分析和过程分析。

3 海岸带韧性的研究内容

3.1 海岸带韧性的理论框架

对海岸带韧性的理解,因研究视角不同而存在差异,相应地开展海岸带韧性研究的理论框架不尽相同。本文主要针对几种典型视角及理论框架进行总结:①特定灾害风险视角的框架以海平面上升、风暴潮等单一灾害的风险防控为目的,关注灾害强度和海岸带系统维持能力和自我恢复能力的响应模拟和过程分析(如英国学者针对海岸带洪涝

灾害和海水侵蚀构建的韧性评价模型^[37]),但难以适应面向多重灾害扰动的复杂性研究。②社会生态系统(Social-ecological System)理论框架是深入把握海岸带韧性建设中人地关系的重要基础。例如,Merrill等^[38]提出区域海岸带生态系统与社会系统在长期相互作用下能够形成稳定的反馈回路以应对外在扰动,发展了敏感性、恢复潜力、生产功能、社会适应力、政策规划干扰等多因素构成的海岸带韧性框架,用于把握缓发型灾害下系统韧性方面的优劣势,有利于协调人与自然的相互关系、增强响应内外扰动的综合能力。③复杂适应系统(Complex Adaptive Systems)框架强调海岸带系统具有动态、不确定、不可预测的典型特征^[12],面对灾害扰动可能出现“快速增长—保存—释放—重组”的自适应周期过程,科学阐释了各阶段的韧性特征,具有转危为机的理念。该框架强调系统可持续性的产生机制、转变阈值和周期特征,为理解海岸带系统处于哪个阶段、向哪个阶段演进以及如何干预提供理论指引^[39]。④韧性治理视角下,以Folke等^[40]为代表提出的适应性治理(Adaptive Governance)为如何建立社会结构以调整海岸带社会生态系统的状态提供了理论支撑。该框架主张通过设定治理目标、保护自然资本、发展协作网络、转变制度结构等手段,调节、维持或主动改变复杂适应系统的状态,从而适应难以预测的、非线性的扰动,最终实现系统长期的可持续发展能力^[41]。

3.2 海岸带韧性的评价方法与指标体系

3.2.1 海岸带韧性的评价方法

迄今,海岸带韧性评价方法可分为综合指数法、韧性计分卡法、模型法和工具集4类^[42](表2)。综合指数法以海岸带韧性内涵为基础,选取核心构成要素,并构建表征指标体系及韧性指数。通过层次分析法(AHP)、专家打分法等对表征指标进行权重赋值,以计算韧性指数大小,反映韧性水平^[43]。韧性计分卡法以质性分析为基础,通过组织海岸带地区代表性评价人员,识别海岸带系统的韧性要素、并依据统一的评估标准开展韧性计分卡评分及数量分析,以测算海岸带韧性指数。相较于以上两种方法,模型法通过函数、矩阵及统计分析表征各风险与海岸带韧性之间的复杂关系,如韧性推理测量

表2 海岸带韧性评价方法

Table 2 Evaluation methods of coastal resilience

评价方法	基本原理	优点	缺陷
综合指数法	对海岸带韧性要素进行拆解,建立海岸带韧性指标体系,进行定性与定量分析得到韧性指数	计算过程相对简单	权重赋值和指标选取具有一定的主观性
韧性计分卡法	识别海岸带韧性系统各要素,建立韧性评分表计分卡,确定海岸带韧性指数	可以评估绩效、目标进展,有效反映利益相关人员对海岸带韧性的认识	存在信息误差,难以统一要素关联
模型法	用数学公式或矩阵简化风险与韧性等相关因素的关系	便于预估和理解各要素之间的关系和相互作用	联系不真实,易忽略要素突变
工具集	上述3种方法中一种或多种方法的组合	兼具上述3种方法优点	兼具上述3种方法缺陷,同时方法选择难以统一

模型(RIM)^[44]、贝叶斯网络分析^[45]等。工具集在海岸带韧性评价中使用范围最广,多将以上一种或多种方法进行组合,综合数据获取、模型模拟等提升评估准确性^[42]。

3.2.2 海岸带韧性评价指标体系

表3汇总了当前研究中涉及的海岸带韧性评价指标体系。体系主要基于3种思路展开。

(1)以系统的基本构成要素为核心构建,包含生态系统要素型、社会系统要素型和社会生态系统要素型等类型。其中,生态系统要素型聚焦于植被状况、地形、生态系统服务丰富度等海岸带生态环境要素^[46],表征其在气候变化、岸线侵蚀等自然灾害下的能力。社会系统要素型包含经济水平、社会资本、规划管理、信息技术、财政投入等人文社会指标,测度在人为扰动和突发灾害影响下,海岸带社会经济系统的韧性水平。在人地耦合视角下,社会生态系统要素型指标体系日益增多,多考虑人与自然的三重扰动下海岸带社会生态系统韧性的综合表现,一般涵盖自然、社会、经济、基建、制度等维度,在印度金奈^[47]、沙特阿拉伯^[48]等沿海地区或国家的海岸带韧性评价中有所应用。

(2)以系统遭受扰动的阶段过程为核心构建,侧重表征海岸带遭受扰动的动态变化及其韧性状态。该类指标体系的构建往往基于整体系统方法,反映系统受到扰动的因果关系和变化过程,关注各阶段的特征和关联,以此评判海岸带韧性。例如,有学者运用“驱动—压力—状态—影响—响应”(DPSIR)等过程模型构建韧性评价指标体系,注重时间过程动态序列要素的选取和表征^[49]。Rumson等^[50]应用“源头—途径—接收者—结果”(SPRC)模

型,确立危险源头、途径、接收者、风险降低措施、影响/结果、恢复6个过程指标维度,评价了英国东安格利亚的海岸带韧性。

(3)基于系统要素、韧性过程和空间尺度建构的复合型指标矩阵。单一目标、单一维度的指标体系难以有效测度复杂、动态的韧性能力,不同要素、过程和尺度相结合的指标矩阵成为量化海岸带韧性的新趋势。如研究将系统要素模块与“暴露—损害—恢复”^[44]、“预防—缓冲—恢复—适应”^[9]等过程模块组合,揭示不同阶段系统韧性各要素的指标维度,学者已在加勒比沿海区域^[44]、中国深圳大鹏新区^[9]等地开展了实证研究;部分学者从社会经济、物质、环境、制度、气候变化危害五要素出发,与地方尺度、区域网络尺度的系统特征相结合,发展了沿海地区韧性测度的复合指标体系^[51]。

3.3 海岸带韧性的影响因素及作用机制

海岸带系统受陆海共同作用,外部灾害干扰与系统内部响应存在复杂非线性关系。厘清外部扰动、系统响应因素及机制,有助于明晰各影响因素对海岸带韧性的作用机理,进而把脉关键节点,提高系统韧性。影响海岸带韧性的因素多样,主要有灾害扰动、生物物理条件、社会经济水平、基础设施、科学技术、治理能力等社会、生态因素^[28,53],通过各因素间相互作用,进而影响海岸带韧性(图2)。

①自然因素方面:Wang等^[54]认为土地、水、生物多样性作为海岸带生态系统3种核心要素,影响着系统结构的稳定性,基于突变理论定量解析了海岸带生态系统韧性的阈值和稳态转变机制。Bernhardt等^[55]提出生物结构和功能对海岸带生态韧性产生影响的主要因素是生物多样性、繁殖率、生态连通性等,

表3 海岸带韧性指标体系分类及举例

Table 3 Classification and examples of coastal resilience indicator systems

指标体系分类		指标维度	方法	研究地区	灾害类型	尺度	文献来源
要素型评价体系	生态系统要素	植被状况、地形、空间变化、沉积物	GIS空间分析、卫星数据、沉积物分析与滩涂调查	基里巴斯共和国	海平面上升(SLR)、海涂侵蚀	国家	[52]
	社会系统要素	社会资本、经济资本、物质资本和人力资本	气候灾害韧性框架(CDRI)模型、GIS空间分析	墨西哥湾沿岸县	洪水、飓风、热带风暴等气候灾害	县	[43]
	社会生态要素	社会经济、资源环境、风险知识、规划管理、治理能力	焦点小组讨论、访谈、参与式绘图、基准评估方法	泰国、斯里兰卡、印度尼西亚、印度和马尔代夫	包括人类行为和自然事件引起的缓发型和突发型灾害	国际	[29]
过程型评价体系	过程型评价体系	驱动、压力、状态、影响、响应(DPSIR)	驱动—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型、生态网络分析方法	中国27个沿海城市	未来气候变化下的威胁	城市	[49]
	过程型评价体系	确立危险源头、途径、接收者、风险降低措施、影响/结果、恢复	快速范围审查(QSR)、源头—途径—接收者—结果(SPRC)模型	英国东安格利亚	洪水、海水侵蚀	区域	[50]
复合型评价体系	过程型+社会生态要素	4个阶段(预防、恢复、缓冲、适应)和3个领域(社会经济、自然资源、生态环境)	海岸带城市韧性评估矩阵	中国深圳大鹏新区	无特定灾害类型	城市	[9]
	过程型+社会生态要素	3个阶段(暴露、破坏、恢复)和居住于海平面6 m以下人口、人口密度、人类发展指数、贫困线以下人口百分比、基尼系数、人均用电量、道路密度、通信	韧性推测量(RIM)模型、制图和GIS分析	加勒比海地区	飓风和相关的气候变化灾害	区域	[44]
	尺度型+社会生态要素	4个尺度(城市、城郊、城市网络和周边农村地区)和社会经济背景、物质环境、环境背景、制度背景、气候变化危害	海岸带城市韧性综合框架、GIS分析	尼罗河三角洲	海平面上升(SLR)	区域	[51]

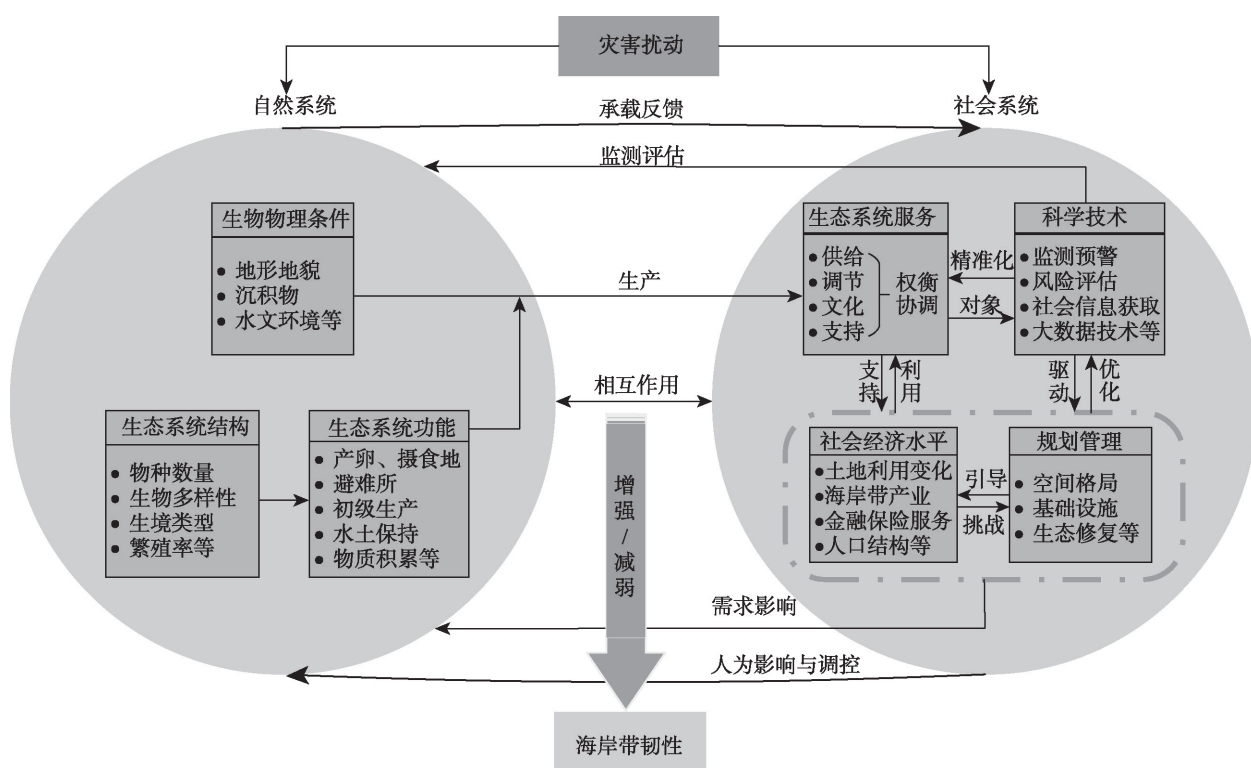


图2 海岸带韧性影响因素及作用机制

Figure 2 Influencing factors of coastal resilience and mechanisms of impact

通过保障海岸带生态系统的健康运行和生态系统服务的生产来提升海岸带生态韧性。②人文社会因素方面:针对经济结构、土地利用、社会学习等因素,相关研究定性阐明了各因子对系统韧性的作用过程与效应^[56]。例如,研究发现大数据挖掘、遥感监测等科学技术,是增强海岸带社会系统灾害响应能力的关键因素^[57],通过对多源数据的整合分析和应用,可有效提升社会保险部门服务的精准化、规划布局的合理性及居民风险防范意识,从而促进海岸带社会韧性的提升。再如,Arkema等^[58]考察了治理制度方面的因素对海岸带韧性的影响,通过对墨西哥湾漏油事件、美国东海岸飓风“桑迪”和旧金山湾区洪灾的实证研究,指出灾害治理机制的转型和政策支持可有效降低海岸带灾害防护系统的建设规模和成本,提高人工环境建设,由此推进海岸带基础设施建设以保障沿海基本安全。③近年来,研究开始由社会、自然单一维度向多维度综合考察转变,如Nathwani等^[49]借助物质和能量流的冗余性特征,通过网络分析揭示环境、社会、制度等因素之间的相互作用及其对海岸带韧性的影响机理。Bianco

等^[59]以意大利海岸带为例,通过函数模型揭示了沿海地貌形态变化和生态系统服务的市场价值影响着海岸带沉积存量的保持,这对抵御海岸侵蚀、支撑海岸带社会生态韧性十分关键。

3.4 海岸带韧性提升策略研究

早期韧性提升策略研究聚焦于维系海岸带现状、恢复扰动影响的抵御型策略。伴随海岸带韧性理论框架的丰富,扰动对策研究^[60]由抵御型策略转向以规划为核心、防控灾害扰动的预防型策略,以及提升沿海地区主体学习能力的适应型策略,并强调三者的有机结合(图3)。

(1)为抵御风暴潮、海啸、海冰等突发灾害带来的各种风险意外,传统韧性提升策略研究大多奉行工程学思维,讲究如何通过硬件工程防护设施来提升海岸带有效抵御外部风险的冲击,侧重于应对短期突发灾害,往往在扰动发生前后较短时间跨度内采取抵御型策略,如修建防洪堤、引流等防灾抗灾工程、制定建筑标准等。该类策略可有效应对已经出现或者近期较大概率会出现的灾害,具备便于执行、维稳的优点,但是其以现状抵御为主,难以防范

2022年2月

未来潜在扰动,替代成本较高。

(2)伴随海岸带地区社会经济活动加剧,抵御型策略的弊端凸显,韧性提升策略研究转向如何通过规划决策、数据监测等手段识别未来一定时间内的灾害风险,进而采取相应的预防型策略。这类策略研究侧重生态修复工程建设规划、发展数据监测和分析技术,以提高规划设计的精准性,在规划期内可以有效提升沿海地区韧性水平。但是,预防型策略在面对决策方案之外的风险扰动存在明显缺陷。相关研究^[61]指出,加大规划资金投入、减少决策间隔等手段可有效提升规划的适应性和稳健性,是应对潜在不确定灾害影响的有效手段。

(3)21世纪以来,全球气候变化加剧与自然灾害频发,确定性规划决策在应对不确定性扰动时出现了效用不足的问题,学者意识到人类抵御风险能力的有限性,由此提出了适应型策略,侧重如何将韧性思维融入日常决策与社会生活,实现与外部不确定性风险的共存。适应型策略倡导通过多主体参与式协同治理,推进治理体系、政策过程、生活习惯的变革,来提高海岸带地区组织机构的学习能力^[62],

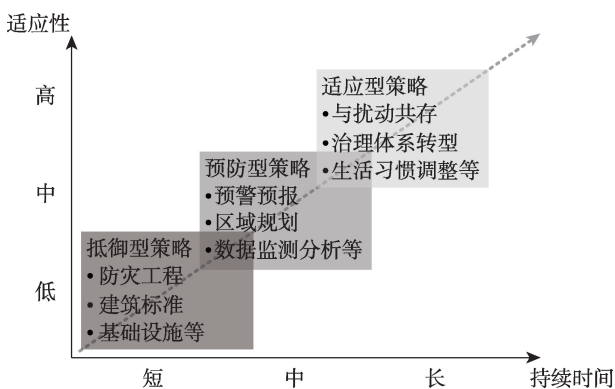


图3 海岸带韧性提升策略

Figure 3 Strategies for improving coastal resilience

提升扰动响应的灵活性。相关研究发现,不同层级政府机构在海岸带管理过程的协调度越高,公民参与越强,灾害扰动所带来的损失就越小,适应气候变化的能力也越强^[63]。然而,该类策略往往需要对现有执行办法、规章制度进行较大改动,需克服初始成本高的阻碍。

3.5 国外海岸带韧性研究阶段

国外海岸带韧性研究呈3个发展阶段(表4)。1995年,政府间气候变化专门委员会的第二份报告中,提出了韧性与气候变化适应性及海岸带管理的相关性^[64]。随后,欧美学者以海岸带灾害防治工程建设为切入点,反思传统人工基础设施的不足,以海岸带地貌和生态系统为主要对象,关注其在特定灾害冲击下的响应^[28],探索如何通过“自然建设策略”(Building with Nature Strategies)防灾减灾^[65]。2002年,欧盟委员会环境总局启动了国际项目EU-ROSION,将提高海岸带韧性作为项目的核心目标和海岸带管理的重要愿景,致力于提出防治海岸带侵蚀的有效行动和可行策略^[36]。

2005—2015年,随着对海岸带人地系统认知的深入,海岸带韧性的社会属性得到广泛关注,强调自然扰动下社会经济的适应能力。海岸带韧性研究从单一灾害下的自然系统韧性评估转向自然人文系统的综合评估。例如,面向2004年的印度洋海啸灾害,泰国、斯里兰卡、印度尼西亚、印度和马尔代夫五国于2007年共同提出,从社会经济、资源环境、风险知识、规划管理、治理能力等方面系统研判社区有效应对海啸的能力。2009年,东京大学着手研究气候变化引起的飓风、干旱和暴雨等影响下的海岸带韧性,认为系统恢复的目标应兼顾物质状况、社会、经济、制度和自然条件。2015年,美国、沙

表4 国外海岸带韧性研究阶段与演进

Table 4 Stages and evolution of international research on coastal resilience

年代	主要理论框架	内容侧重	指标体系	技术方法	策略选择
1990s—2005年	特定灾害框架	生态、地貌等自然维度	系统要素型	模型模拟、阈值分析	防灾抗灾工程建设等抵御型策略
2005—2015年	社会生态系统、复杂适应系统	社会、基础设施、规划等社会维度	系统要素型和阶段过程型	综合评价指数、韧性计分卡法、情境分析	海岸带规划、自然基础设施、生态修复等预防型策略
2016年至今	社会生态系统、复杂适应系统、适应性治理	多维度韧性及作用机制,开展韧性治理	阶段过程型和复合型	工具集、机器学习、大数据分析、时空分析技术	抵御型策略、预防型策略与适应型策略相结合

特阿拉伯和印度等国陆续提出了海岸带韧性研究框架,同样强调了环境、社会资本、经济、健康福祉、制度等维度的韧性建设,并开展了地方、区域和全国等多尺度实证研究。英国环境、食品与农村事务部和美国海岸带管理办公室等机构也纷纷在海岸带的规划、基础设施建设、社区发展等政策中将海岸带韧性作为理论参考^[66]。

2016年后,海岸带韧性研究开始面向多重不确定扰动的韧性建设问题,在复杂适应系统、适应性治理理论指导下,强调海岸带社会生态系统的变化过程和机理阐释,以及对利益主体适应能力和区域海岸带转变情况的分析。一方面,动态实时数据的可获性提高,海岸带韧性评估模型精度与遥感地理信息系统等技术也随之更迭,贝叶斯网络^[67]、GIS空间建模^[30]等多种技术方法的综合应用不断强化;另一方面,区域经济学、公共政策科学、社会学、规划学等知识不断融合,丰富了海岸带韧性治理研究。

4 海岸带韧性研究面临的挑战

4.1 理论内涵与评价体系的深化

由于海岸带系统的复杂性和韧性概念的交叉性,不同学科对海岸带韧性的分析视角和理解侧重存在较大差异,认知难以统一。当前,来自气候变化和人类活动的扰动日益增长且变幻莫测,面对强化海岸带安全管理、保障区域可持续性的迫切需求,亟待对海岸带韧性开展更为系统的理论研究。然而,学者多从地貌、生态、社会、规划等单一视角进行分析,通过细化研究对象以拓展海岸带韧性的内容范畴,对海岸带区域人地系统的要素合成与过程认知并不系统,缺乏在海岸带韧性能力维度方面的辨析和深化。一方面,单一视角下缺乏对海岸带系统要素的综合考量,导致海岸带韧性概念不清,无法准确把握海岸带要素及要素间的内在关系,形成差异较大的韧性分析框架;另一方面,对不同韧性能力的辨析不足,直接导致了海岸带韧性评价指标之间的逻辑不清,影响评价结果的合理性和准确性。未来需进一步深化海岸带韧性的内涵研究与评价。

4.2 海岸带韧性过程与作用机制的挖掘

海岸带由多个子系统组成,各子系统间存在着复杂的动态联系、结构演化和耦合效应^[68],容易模糊

海岸带韧性的动力机制,影响社会、资源、经济、生态等多维阈值的确定,从而导致海岸带韧性阈值与过程方面的研究进展相对缓慢。当前研究大多从某一时间截面及特定空间尺度开展海岸带韧性的特征分析。时间尺度上看,多层次、多维度、多情境下海岸带社会生态系统的动态适应性轨迹分析尚未开展,亟待吸纳多学科理论方法拓展模拟量化研究,揭示海岸带韧性演化机制,探索具体区域海岸带韧性的制约因素、阶段特点,研究相应的调控举措和沿海风险适应性管理。从空间上看,韧性随海岸带区域差异而不同,多尺度视角下海岸带韧性的空间异质性及可视化研究较为有限,同尺度不同区域间海岸带韧性互动研究也较为鲜见,异质性产生机制多局限于定性研究。因此,需要厘清不同空间尺度下海岸带韧性的内容侧重,开展跨尺度海岸带韧性协调机制研究,实现风险防范和韧性演化的精准分析。

4.3 多重扰动对海岸带韧性的影响阐释

不同尺度的海岸带所面临的主要扰动存在差异,如全球尺度,海岸带主要面临气候变化、海平面上升、海水酸化等影响;国家尺度,主要面临海岸带区域发展水平不均、陆海发展不协调所带来的经济、科技风险;区域尺度,风暴潮、海冰、岸线侵蚀等各类扰动是制约区域海岸带可持续发展的重要因素;社区尺度,海岸带面临生态服务结构功能退化等问题。同时,风险扰动的类型、持续时间及作用频率对海岸带韧性的影响程度不同,不同类型的扰动相互交织可能产生风险放大效应。可见,海岸带面临的扰动具有多重性与多尺度性。学界开始反思单一尺度下海岸带韧性的响应分析对现实过程及复杂影响解释力不足的问题,尝试探索双重扰动下(如风暴潮和强降雨^[69])的韧性模拟研究,评价不同减灾政策的有效性。未来,在识别多重扰动源和掌握地方特点的基础上,需进一步辨析多重扰动引致海岸带韧性变化的内在作用机制,注意揭示其跨尺度影响过程和多反馈特征。

5 启示

借鉴国外经验,面向中国沿海地区发展的现实挑战和需求,厘清中国海岸带安全管理转向海岸带

2022年2月

韧性治理的重点,构建适于中国国情的海岸带韧性本土化理论框架,因地制宜地提出多样化实践路径(图4),是中国海岸带可持续发展中的重要科学命题,也是实现以高水平安全保障海岸带高质量发展的关键环节。

5.1 积极转向海岸带韧性治理思维

当前,中国处于社会经济转型的关键阶段,前期沿海快速城镇化、产业集聚、资源消耗、空间错配、环境污染导致海岸带慢性压力和危机持续积累。近40年来,中国沿海海平面上升速率高于同时段全球平均水平,风暴潮、台风、海冰、赤潮灾害频发,加之长期以来相对滞后的基础设施、社区基层治理和海岸带生态环境固有的脆弱性等现实情景,对中国海岸带可持续发展形成严峻挑战。当前,在外源—内生性冲击及其复合扰动的倒逼作用下,中国的防灾减灾战略开始由单灾种、被动式、防御型的应对战略,向“以防为主,防抗救相结合”和“综合风险防范”的方向发展^[10]。联合国减灾署在减灾战略中强调,必须建立与风险共存的社会体系,以增强区域抵抗风险的能力为抓手,提高区域可持续性。相应地,中国海岸带安全管理的对象需由自然灾害转向多元风险;目标需从解决现存风险转向应对未来不确定变化,通过海岸带系统与扰动的共生和动态平衡实现区域可持续发展;策略上工程

学思维下的被动防御手段也亟待向更宽泛的区域综合治理延展^[70]。应该意识到,区域海岸带能够抵抗冲击和压力固然重要,但不能替代区域发展的能力。海岸带韧性代表着一种面向未来的思维,是系统自身面向即将或尚未发生的风险能够主动识变、应变和转变的理念,可成为中国海岸带区域发展及综合治理方案的理想选择。

5.2 从本土化框架入手开展系统研究

目前,海岸带韧性分析的方法论在面对全球尺度扰动时具备一定的普适性,而中国海岸带独特的自然属性、区域发展水平、价值文化环境和研究现状使国外现有理论不能进行简单套用。为将海岸带韧性前沿理论结合中国实际进行转化,以下几方面尚需加强:

(1)结合演进的韧性内涵和中国海岸带社会生态系统的特征,明确海岸带韧性的基本概念,以准确把握研究对象和主要内容。

(2)构建适于中国国情的多目标、多维度、多尺度、多情境的系统评价框架。其中,可根据不同地区海岸带韧性的目标、要求、关键问题和评估方向有所侧重,构建科学的表征指标和测度指数。例如,针对海岸侵蚀作用强、环境脆弱性高、经济发展水平偏低的黄河口区域,可侧重湿地脆弱性、产业结构、旅游资源等开展韧性评价。

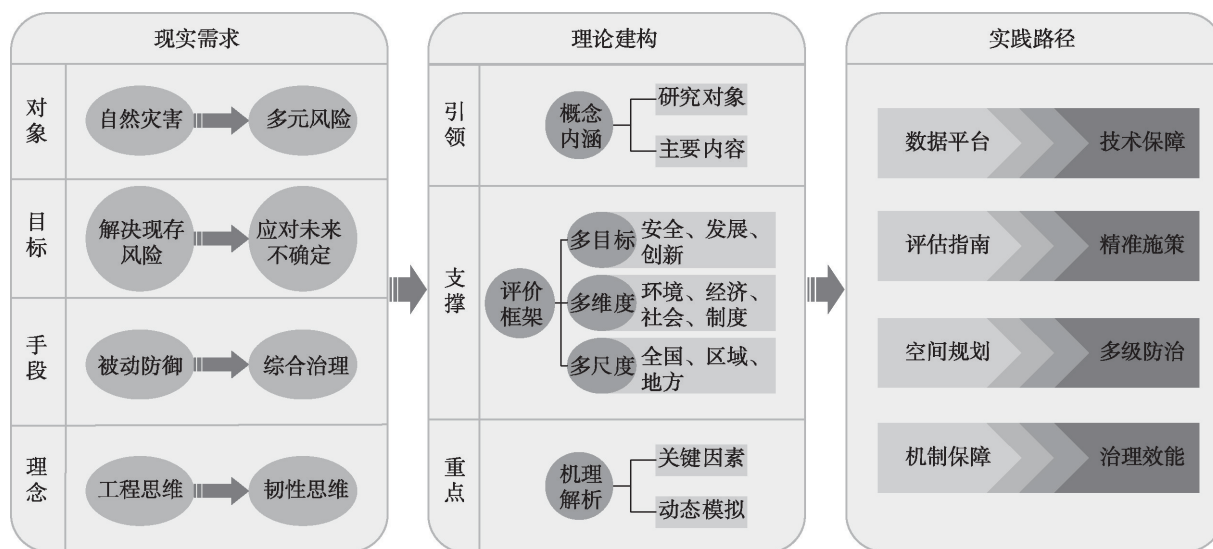


图4 海岸带韧性研究在中国的应用展望

Figure 4 Application prospects of coastal resilience research in China

(3)融合多学科的理论方法优势,系统识别影响中国海岸带韧性内外因素,深刻剖析多因素扰动下海岸带系统的非线性交互过程和作用机理,结合系统化模拟、空间可视化和大数据分析等技术,预测海岸带韧性演化趋势,测算关键阈值和建立韧性基准线,为海岸带风险预警和区域发展决策提供重要依据。

(4)因地制宜地研究中国面向未来不确定扰动的海岸带韧性提升策略。例如,通过适应性治理调节海岸带系统状态,结合海岸带空间规划、沿海地区社会经济发展战略等制定统一的韧性管理目标,以渔民、港口企业、湿地保护管理部门等利益相关者的竞合关系和决策行为入手,明确不同主体在区域海岸带抗扰动过程中的角色,通过制度、政策等协调多主体的响应行为及其与陆海环境之间的良好关系。

5.3 因地制宜探索多样化实践路径

重视研究成果的应用转化,借鉴国外在海岸带韧性治理方面的有益经验,结合中国沿海地区的改革实践和特色举措,探索提高海岸带韧性、实现沿海地区可持续发展的多样化路径。可行路径包括:首先,提供有力的信息技术保障,借助人工智能、大数据、物联网、云计算等智能技术,追踪监测海岸带地区资本流、信息流、人流、生态流、资源流等数据,形成中国海岸带地区的动态数据平台,助力海岸带风险的监测预警和韧性演进趋势预测。其次,制定评估技术指南,开展多尺度、多情境的海岸带韧性评估,形成科学可行的海岸带韧性分级分类体系,指导气候适应型城市建设、海岸带蓝碳增汇等韧性提升政策的精细化制定与绩效考核。再次,推动海岸带韧性在国土空间规划中的落实。总体规划中融入海岸带韧性理念,增加应对海平面上升、风暴潮等复合扰动的战略目标;专项规划中转变传统工程防险的设计思路,把握关键扰动因子及其作用触发关系开展综合影响评估,编制海岸带韧性专项规划;详细规划中,基于海岸带社会、经济、生态等多维韧性阈值的研究成果,设置海岸带用途管制指标及韧性基线,保障海岸带发展安全。此外,构建海岸带韧性治理体制机制。明确政府、企业、公民在

海岸带抗扰动过程中的角色定位,厘清多主体互动、学习与决策过程,完善政府主导、多主体合作的海岸带韧性治理体系,完善地方联合预警机制、信息联动机制、规划协同机制等保障措施,探索海岸带治理转型道路。

6 结论

韧性理论所提供的适应性视角可有效解决不确定性扰动与海岸带可持续发展之间的矛盾。本文着眼于国外海岸带韧性研究进展,梳理了海岸带韧性的缘起与多维内涵,对海岸带韧性研究的主要理论框架、评价方法、指标体系、韧性影响因素与作用机制以及韧性提升策略进行了分析,进而反思国外成果对中国的启示,得出以下主要结论:

(1)国外学者普遍认同“韧性”是海岸带安全管理理念转变的主要方向,为实现沿海地区可持续发展提供了新途径。当前,海岸带系统自身的复杂性和韧性思维发展的多样性决定了海岸带韧性内涵理解的学科差异,研究视角不一也使理论框架的选用和评价体系的构建思路不尽相同。本文认为可将海岸带视为社会生态耦合系统,立足区域可持续发展视角界定海岸带韧性内涵,厘清研究对象和内容体系,多目标、多层次、多维度地开展系统分析,实现由静态转向动态、单一转向交叉、分散转向综合的研究递进。

(2)自然因素和人文社会因素的复合扰动作用下,海岸带系统的内部响应和变化具有非线性复杂关系,多重扰动的跨尺度性(时间尺度和空间尺度)增加了海岸带韧性过程与作用机制的分析难点。尽管当前研究开始由社会、自然单一维度向多维度的韧性机制研究转变,但在确定关键要素阈值、揭示系统动态适应性轨迹、测度不同扰动的复合效应、探索多尺度韧性协调机制等方面仍有待深化。未来有赖于强化新技术手段的集成应用,针对典型地区精准识别关键因素,整体刻画作用过程并科学揭示复杂的韧性机理,同时加强对比分析,对海岸带韧性治理模式给予关注。

(3)国外海岸带韧性研究的演进历程表明,人们对区域发展的现实诉求和对人地系统认知的深入是海岸带韧性研究的逻辑起点,同时学者对实证

2022年2月

成果和提升策略的注重有利于推进海岸带韧性治理的实现。由此,亟待分析中国沿海地区陆海复合扰动的特征,明确区域社会经济在向更高质量、更可持续、更为安全等方向发展的诉求,把握海岸带安全管理的现状与突出问题。以此为基础,转变中国传统灾害研究范式,综合考量韧性内涵、评价体系、时空演进机理等要素,发展海岸带韧性本土化理论框架、明确总体研究思路;同时以数字化转型、国土空间优化和应急管理体制机制改革等为契机,丰富实证研究,探索实现海岸带韧性治理的中国特色之路。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.]
- [2] 施雅风. 中国海岸带灾害的加剧发展及其防御方略[J]. 自然灾害学报, 1994, 3(2): 3-15. [Shi Y F. Exacerbating coastal hazards and defensive countermeasures in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1994, 3(2): 3-15.]
- [3] 杨桂山, 施雅风. 中国海岸带面临的重大环境变化与灾害及其防御对策[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(2): 13-20. [Yang G S, Shi Y F. Major environmental changes and hazards and strategy of damage-mitigation in the coastal area of China[J]. Journal of Natural Disasters, 1999, 8(2): 13-20.]
- [4] 李博, 韩增林, 孙才志, 等. 环渤海地区人海资源环境系统脆弱性的时空分析[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2214-2221. [Li B, Han Z L, Sun C Z, et al. Spatial and temporal vulnerability analysis of the human-sea resource environment of the Bohai Rim region[J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2214-2221.]
- [5] 刘小喜, 陈沈良, 蒋超, 等. 苏北废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性评估[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 607-618. [Liu X X, Chen S L, Jiang C, et al. Vulnerability assessment of coastal erosion along the Abandoned Yellow River Delta of northern Jiangsu, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 607-618.]
- [6] 秦伟山, 孙剑锋, 张义丰, 等. 中国县级海岛经济体脆弱性综合评价及空间分异研究[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1692-1701. [Qin W S, Sun J F, Zhang Y F, et al. Research on vulnerability and spatial differentiation on island economies on county level of China[J]. Resources Science, 2017, 39(9): 1692-1701.]
- [7] 吴文菁, 陈佳颖, 叶润宇, 等. 台风灾害下海岸带城市社会-生态系统脆弱性评估: 大数据视角[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7079-7086. [Wu W J, Chen J Y, Ye R Y, et al. Vulnerability assessment of urban socio-ecological systems in coastal zones under the influence of typhoons: Big data perspective[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7079-7086.]
- [8] 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. [Li Y F, Xiang Z Y, Li Y. Coastal resilience: Core mechanism of integrated land-sea eco-management[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(10): 3-7.]
- [9] Liang J J, Li Y F. Resilience and sustainable development goals based social-ecological indicators and assessment of coastal urban areas: A case study of Dapeng New District, Shenzhen, China [J]. Watershed Ecology and the Environment, 2020, (2): 6-15.
- [10] 吴绍洪, 高江波, 韦炳干, 等. 自然灾害韧性社会的理论范式[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1136-1147. [Wu S H, Gao J B, Wei B G, et al. Theoretical paradigm for natural disaster-resilient society [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1136-1147.]
- [11] 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. [Wang H, Xu Y X, Lu S Q, et al. A comparative study of Chinese translation of resilience terminology in socio-ecological system and its related research fields[J]. Urban Planning International, 2017, 32(4): 29-39.]
- [12] Folke C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [13] Resilience Alliance. Resilience[R/OL]. (2013-01-14) [2021-11-10]. <https://www.resalliance.org/resilience>.
- [14] Resilience Alliance. Assessing Resilience in Social-Ecological Systems: Workbook for Practitioners[R/OL]. (2010-01-01) [2021-11-10]. https://www.resalliance.org/files/ResilienceAssessmentV2_2.pdf.
- [15] Janssen M A, Ostrom E. Resilience, vulnerability, and adaptation: A cross-cutting theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change[J]. Global Environmental Change, 2006, 3(16): 235-316.
- [16] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2004, DOI: 10.5751/ES-00650-090205.
- [17] Walker B H, Anderies J M, Kinzig A P, et al. Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development: Introduction to the special issue[J]. Ecology and Society, 2006, DOI: 10.5751/ES-01573-110112.
- [18] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 等. 社会-生态系统适应性治理研究进展与展望[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2401-2410. [Song S, Wang S, Fu B J, et al. Study on adaptive governance of social-ecological system: Progress and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,

- 74(11): 2401–2410.]
- [19] 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. [Shao Y W, Xu J. Understanding urban resilience: A conceptual analysis based on integrated international literature review[J]. Urban Planning International, 2015, 30(2): 48–54.]
- [20] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 598–606.
- [21] Yoon D K, Kang J E, Brody S D. A measurement of community disaster resilience in Korea[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2016, 59(3): 436–460.
- [22] May C K. Resilience, vulnerability, & transformation: Exploring community adaptability in coastal north Carolina[J]. Ocean & Coastal Management, 2019, 169: 86–95.
- [23] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38–49.
- [24] Jabareen Y. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk[J]. Cities, 2013, 31: 220–229.
- [25] Goldstein E B, Moore L J. Stability and bistability in a one-dimensional model of coastal foredune height[J]. Journal of Geophysical Research, 2016, 121(5): 964–977.
- [26] Ganju N K, Defne Z, Kirwan M L, et al. Spatially integrative metrics reveal hidden vulnerability of microtidal salt marshes[J]. Nature Communications, 2017, DOI: 10.1038/ncomms14156.
- [27] Piégay H, Chabot A, Le Lay Y F. Some comments about resilience: From cyclicity to trajectory, a shift in living and nonliving system theory[J]. Geomorphology, 2020, DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.09.018.
- [28] Klein R J T, Smit M J, Goosen H, et al. Resilience and vulnerability: Coastal dynamics or Dutch dikes?[J]. Geographical Journal, 1998, 164(3): 259–268.
- [29] US Indian Ocean Tsunami Warning System Program. How Resilient Is Your Coastal Community? A Guide for Evaluating Coastal Community Resilience to Tsunamis and Other Coastal Hazards [R/OL]. (2007–07–16) [2021–11–10]. https://www.preventionweb.net/files/2389_CCRGuidelowresatq.pdf.
- [30] Song K W, You S J, Chon J Y. Simulation modeling for a resilience improvement plan for natural disasters in a coastal area[J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 1970–1980.
- [31] Jozaei J, Mitchell M, Clement S. Using a resilience thinking approach to improve coastal governance responses to complexity and uncertainty: A Tasmanian case study, Australia[J]. Journal of Environmental Management, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109662.
- [32] Beatley T. Planning for Coastal Resilience: Best Practices for Calamitous Times[M]. Washington, DC: Island Press, 2012.
- [33] Lam N S N, Reams M, Li K, et al. Measuring community resilience to coastal hazards along the Northern Gulf of Mexico[J]. Natural Hazards Review, 2016, DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000193.
- [34] Coastal Resilience. About Coastal Resilience[R/OL]. (2018–08–01) [2021–11–10]. <https://coastalresilience.org/about/>.
- [35] Almutairi A, Mourshed M, Ameen R F M. Coastal community resilience frameworks for disaster risk management[J]. Natural Hazards, 2020, 101(2): 595–630.
- [36] Environment Directorate General of the European Commission. EUROSION Project[N/OL]. (2001–03–26) [2020–11–30]. <http://www.eurosion.org/project/index.html>.
- [37] Townend I H, French J R, Nicholls R J, et al. Operationalising coastal resilience to flood and erosion hazard: A demonstration for England[J]. Science of the Total Environment, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146880.
- [38] Merrill N H, Mulvaney K K, Martin D M, et al. A resilience framework for chronic exposures: Water quality and ecosystem services in coastal social–ecological systems[J]. Coastal Management, 2018, 46(4): 242–258.
- [39] Kombiadou K, Costas S, Carrasco A R, et al. Bridging the gap between resilience and geomorphology of complex coastal systems[J]. Earth–Science Reviews, 2019, DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102934.
- [40] Folke C, Hahn T, Olsson P, et al. Adaptive governance of social–ecological systems[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2005, 30(1): 441–473.
- [41] Olsson P, Folke C, Hahn T. Social–ecological transformation for ecosystem management: The development of adaptive co-management of a wetland landscape in southern Sweden[J]. Ecology and Society, 2004, DOI: 10.5751/ES-00683-090402.
- [42] Cutter S L. The landscape of disaster resilience indicators in the USA[J]. Natural Hazards, 2016, 80(2): 741–758.
- [43] Peacock W G, Brody S D, Seitz W A, et al. Advancing Resilience of Coastal Localities: Developing, Implementing, and Sustaining the Use of Coastal Resilience Indicators: A Final Report[R]. Texas: Hazard Reduction and Recovery Center, 2010.
- [44] 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.
- [45] Schultz M T, Smith E R. Assessing the resilience of coastal systems: A probabilistic approach[J]. Journal of Coastal Research, 2016, 32(5): 1032–1050.
- [46] Caro C, Marques J C, Cunha P P, et al. Ecosystem services as a re-

2022年2月

- silience descriptor in habitat risk assessment using the InVEST-model[J]. *Ecological Indicators*, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106426.
- [47] Joerin J, Shaw R, Takeuchi Y, et al. The adoption of a climate disaster resilience index in Chennai, India[J]. *Disasters*, 2014, 38(3): 540–561.
- [48] Alshehri S A, Rezgui Y, Li H. Disaster community resilience assessment method: A consensus-based Delphi and AHP approach[J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(1): 395–416.
- [49] 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.
- [50] 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, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.105004.
- [51] Abdrabo M A, Hassaan M A. An integrated framework for urban resilience to climate change: Case study: Sea level rise impacts on the Nile Delta coastal urban areas[J]. *Urban Climate*, 2015, 14: 554–565.
- [52] Ellison J C, Mosley A, Helman M. Assessing atoll shoreline condition to guide community management[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 321–330.
- [53] 黄暄皓, 梁佳丽, 黄昕, 等. 沙滩-社区系统健康韧性评价: 以深圳市大鹏半岛为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(22): 8794–8806. [Huang X H, Liang J L, Huang X, et al. Evaluation of the health-resilience of beach-community system: A case study of Dapeng Peninsula, Shenzhen City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22): 8794–8806.]
- [54] Wang Q L, Li Y F, Li Y. Realizing a new resilience paradigm on the basis of land-water-biodiversity nexus in a coastal city[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.09.004.
- [55] Bernhardt J R, Leslie H M. Resilience to climate change in coastal marine ecosystems[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 371–392.
- [56] Lloyd M G, Peel D, Duck R W. Towards a social-ecological resilience framework for coastal planning[J]. *Land Use Policy*, 2013, 30(1): 925–933.
- [57] Rumson A G, Hallett S H. Innovations in the use of data facilitating insurance as a resilience mechanism for coastal flood risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 598–612.
- [58] Arkema K, Bennett R, Dausman A, et al. United States: Blending Finance Mechanisms for Coastal Resilience and Climate Adaptation[M]. Washington, DC: Island Press, 2019.
- [59] Bianco F, García-Ayllón S. Coastal resilience potential as an indicator of social and morphological vulnerability to beach management[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, DOI: 10.1016/j.ecss.2021.107290.
- [60] Wiwandari H, Hapsari S P I, Mega A, et al. Community-based disaster management: Assessing Local Preparedness Groups (LPGs) to build a resilient community in Semarang City, Indonesia[J]. *Disaster Advances*, 2019, 12(5): 23–36.
- [61] Rasoulkhani K, Mostafavi A, Reyes M P, et al. Resilience planning in hazards-humans-infrastructure nexus: A multi-agent simulation for exploratory assessment of coastal water supply infrastructure adaptation to sea-level rise[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2020, DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104636.
- [62] Pelling M. *Adaptation to Climate Change: From Resilience to Transformation*[M]. London: Routledge, 2010.
- [63] Kim H, Marcouiller D W, Woosnam K M. Coordinated planning effort as multilevel climate governance: Insights from coastal resilience and climate adaptation[J]. *Geoforum*, 2020, 114: 77–88.
- [64] Bijlsma L, Ehler C N, Klein R J T, et al. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [65] Van Slobbe E, De Vriend H J, Aarninkhof S, et al. Building with nature: In search of resilient storm surge protection strategies[J]. *Natural Hazards*, 2013, 66(3): 1461–1480.
- [66] NOAA Office for Coastal Management. Coastal Community Resilience Indicators and Rating Systems[R/OL]. (2015–10–01) [2021–11–10]. <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/resilience-indicators.pdf>.
- [67] Cai H, Lam N S N, Zou L, et al. Modeling the dynamics of community resilience to coastal hazards using a Bayesian network[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2018, 108(5): 1260–1279.
- [68] Cumming G S, Peterson G D. Unifying research on social-ecological resilience and collapse[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(9): 695–713.
- [69] Shen Y, Morsy M M, Huxley C, et al. Flood risk assessment and increased resilience for coastal urban watersheds under the combined impact of storm tide and heavy rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124159.
- [70] 吕悦风, 项铭涛, 王梦婧, 等. 从安全防灾到韧性建设: 国土空间治理背景下韧性规划的探索与展望[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(9): 2281–2293. [Lv Y F, Xiang M T, Wang M J, et al. From disaster prevention to resilience construction: Exploration and prospect of resilience planning under the background of territorial governance[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(9): 2281–2293.]

Progress of international research on coastal resilience and implications for China

LI Ruiqian^{1,2}, XU Chenglei¹, LI Yongfu³, HU Heng⁴

(1. School of International Affairs and Public Administration, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Ocean Development, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China; 4. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: Coastal resilience provides a new theoretical and analytical perspective for coastal governance to deal with the compound risks of climate change and anthropogenic environmental pressures, which is of great significance to ensure the sustainable development and security of coastal regions. This study first clarified the connotation of the “coastal resilience” concept. On this basis, the main theoretical frameworks, such as the social-ecological system and the complex adaptive system theories that support coastal resilience research, were analyzed. Then, this research focused on four kinds of evaluation methods relevant to coastal resilience, and further clarified three types of indicator systems (element-based, process-based, and composite type), as well as their characteristics. This was followed by an examination of the mechanisms of impact of natural and socioeconomic factors on coastal resilience. Three basic strategies for enhancing coastal resilience, including resistance, prevention, and adaptation, were analyzed and compared. Drawing on the existing international research findings, we found that the definition of coastal resilience in terms of factor-related relationship and resilience ability calls for more attention from different disciplines and theoretical perspectives. From the human-environmental system coupling perspective and the multiple spatiotemporal dimension perspective, it seems that current investigations on the process and mechanism of coastal resilience is still weak, particularly with regards to the scale effect and the mechanism of influence under multiple disturbances. Finally, this study revealed the realistic demands of comprehensive risk prevention and regional sustainable development in coastal areas of China. A localization of theoretical framework was proposed, which should take the connotation of the concept as guidance, the evaluation of the system as a support, and the analysis of mechanisms as the focus. Applications of coastal resilience theories and methods were also proposed, including in coastal safety warning, policy refinement, spatial planning, and coastal risk governance.

Key words: coastal resilience; theoretical framework; sustainable development; resilience mechanism; complex adaptive system; risk governance; resilience assessment; vulnerability