



DOI: 10.20103/j.stxb.202304270881

马程伟, 文超祥. 适应气候变化的海岸带韧性研究综述——基于文献计量分析. 生态学报, 2024, 44(5): 2173-2186.

适应气候变化的海岸带韧性研究综述 ——基于文献计量分析

马程伟, 文超祥*

厦门大学建筑与土木工程学院, 厦门 361005

摘要: 海岸带是人口经济高度集聚且生态敏感区域, 提升其适应气候变化扰动的韧性能力是促进沿海地区可持续治理的重要手段。研究从适应气候变化风险出发, 在辨析海岸带韧性概念、内涵及特征的基础上, 运用软件分析法和归纳总结法梳理海岸带韧性相关研究的热点结构分布、演进脉络特征和热词主题类别, 指出当前海岸带韧性研究聚焦于韧性作用机制解析、韧性表征测度、韧性提升路径和韧性管理策略 4 大方面。研究表明灾害影响范围界定、多灾耦合的链式演变、复杂系统时空韧性测度和人-地-海弹性匹配尚存薄弱之处, 提出我国海岸带气候韧性未来研究需关注理论体系建构、空间规划实践和多学科交叉融合。依据“原则-目标-路径”逻辑从治理对象、治理主体、治理空间和治理机制 4 个维度展望海岸带气候韧性治理框架, 即辨识治理对象, 以风险链评估为韧性治理起点; 协同治理主体, 探索跨权益治理的韧性平衡; 统筹治理空间, 建构韧性空间优化治理模式; 创新治理机制, 完善韧性治理能级长效路径。

关键词: 气候变化; 海岸带韧性; CiteSpace; 文献综述; 韧性治理

应对气候变化成为人类命运共同体持续面临的困境与挑战, 海洋在调节地球气候系统的同时, 也承受着气候变化带来的显著干扰^[1]。海岸带作为陆海交互作用和资源经济集聚的高敏感地带^[2], 在气候变暖诱发的海平面上升、高温热浪袭击、风暴潮加剧、赤潮爆发和海水酸化的冲击下, 其灾害的产生频次、影响范围和破坏程度要远远高于其他地域。随着海岸线侵蚀加速、建成区洪涝威胁扩大、渔业资源锐减和生物系统生产力下降^[3]等效应累积致使海岸带环境风险亟待整治。我国“十四五”规划提出“坚持陆海统筹、人海和谐”与“建设韧性城市”为沿海现代化治理提出更高要求, 海岸带如何应对气候变化成为助力我国海洋强国建设的重大命题。

目前来看, 应对气候变化包括减缓和适应两大策略, 减缓是指通过一系列减排手段放缓温室气体增速, 强调源头把控的临时效用。适应是基于气候变化风险评估及时调整措施减轻气候变化带来的威胁及潜在扰动, 凸显实时调控的长效机制。在气候风险不确定性增加的背景下, 灾源抵抗的静态防范和单一工程防治技术已不能应对灾害链的动态变化。韧性理念旨在运用复杂动态系统思维来抵御、吸收、恢复、适应不确定性风险持续的负面影响, “韧性”与“适应气候”均指出运用动态管控消解风险, 二者理念高度吻合, 本研究聚焦适应气候变化视角展开海岸带韧性探讨。海岸带具备海洋流动性、陆海交错性及空间一体化等特点, 其韧性建设挑战与实施具有鲜明地域特色, 厘清陆海环境背景及风险扰动的差异, 识别多维冲击下海岸带复杂系统与韧性进阶的适配程度, 总结现阶段海岸带韧性研究中存在的不足具有指导价值。研究采取定性结合定量的方法基于气候变化的现实背景, 对海岸带韧性相关研究进展进行归纳总结, 系统梳理海岸带韧性的内涵特征、作用机制、测度技术和提升管理策略, 探讨当前研究存在的薄弱环节展望未来韧性治理, 以期助力海岸带可持续发展。

基金项目: 国家社科基金重大研究专项研究成果(22VHQ009); 国家自然科学基金面上项目(52078445)

收稿日期: 2023-04-27; **网络出版日期:** 2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 2476191940@qq.com

1 适应气候变化的海岸带韧性概念辨析

1.1 适应气候变化的政策导向

不加以控制温室气体排放,全球气候会迅速发生根本性改变^[4]和持续变暖。国际首个应对气候温升文件——《联合国气候变化框架公约》(1994 年)虽未明确各国减排目标,但为适应未来气候变化制定了减排计划、合作原则和响应措施。此后《巴黎协定》(2016 年)设立“全球平均气温较工业化时期上升幅度控制在 2℃ 以内,努力争取控制在 1.5℃ 以内”的长期目标,在“共同响应但区别适应”原则的基础上进一步明确各国减排任务和缔约机制。2020 年我国在第 75 届联合国大会上郑重提出 2030 年达到碳达峰和 2060 年实现碳中和的愿景,为全球气候一体化治理注入新动力。随后,2021 年发布的《中国应对气候变化的政策与行动》从行政组织、目标疏解、产业调整等为管控温室气体排放和探索碳市场机制协同增效提出方向引领和战略框架。面对海岸带灾害频发和环境严峻问题,《第四次气候变化国家评估报告》(2022 年)对我国海岸带气候变化的驱动因素、风险演变和适应策略进行了分析,《国家适应气候变化战略 2035》(2022 年)提出强化海岸带预测-预警-评估-提升综合防灾能力和推进建设陆海统筹生态修复的适应气候变化路径。

1.2 海岸带韧性内涵解析

1.2.1 韧性理论的发展演进

韧性意为“复原”^[5],19 世纪 50 年代工程界用其描述物体受外力冲击形变后复原的态势,20 世纪 70 年代生态学家 Holling 将其引入生态学界表征生态系统受到外界干扰保持稳定的能力^[6],之后韧性研究扩及心理学、社会学、经济学和城乡规划学等多领域。2009 年联合国减灾署将韧性定义为“一个系统、社区或社会应对危险时通过自身快速有效地抵抗、吸收、适应风险以恢复系统稳定的能力”^[7]。迄今,韧性理论发展历经“工程-生态-演进(社会-生态)韧性”三个阶段^[8],形成“单一稳态向多元平衡再向适应循环”的目标演变。其中,工程韧性强调系统仅存一个稳态,其韧性度由受扰动后恢复至初始稳态的速率反映;生态韧性认为系统存在多个平稳状态,强调系统整体的生存能力;演进韧性则强调系统应对扰动呈现出的动态适应能力,韧性是在外力施压下进行内部自组织、自改变和自适应的表现,其理论基础来源于复杂适应系统理论,表现为系统存在吸引子导致因变量追随自变量呈现非线性演变,如果突破自变量的临界点(阈值)会致使因变量突变^[5]或逼近临界点时因变量恢复力趋弱(临界减速)^[9]。

1.2.2 海岸带韧性的目标指向

海岸带因其独特的地理环境属性,在陆海流体交互、沉积物迁移、生态景观演化和空间形态反馈^[10]的作用下,海岸带某个系统状态变化会传导并影响相邻系统,这种跨系统风险耦合会诱发海岸带环境状态大规模转变^[11],海岸带开放性与整体性特征尤为显著。结合前文所述三个韧性发展阶段,工程韧性局限在一种稳态的维持,对快速发展的海岸带来说,并不适合其动态变化的场景治理。同时,工程韧性将风暴潮等风险视为危害,提出运用堤坝等结构性设施来防控可能来临的威胁^[12]。生态韧性强调多个稳态共存,契合海岸带开发与保护平衡的目标,通常采取软硬兼具的设施稳固风险扰动下的多维稳态。演进韧性则更加关注适应与变革能力,强调系统自主学习过程,与工程和生态韧性不同的是,演进韧性将风险视为机遇,随着风险的累积效应会激发系统结构的自我调试以创新适应力的多样化,符合海岸带快速变化的开放情景。通过梳理三种韧性的概念内涵(表 1),结合海岸带发展实际及不确定性诉求,本研究认为演进韧性的内涵更加契合海岸带复杂系统的动态适应机制,其韧性治理的目标是维持系统功能和变革系统至新稳态来持续适应不确定性冲击。

1.3 适应气候变化的海岸带韧性概念界定

气候变化带来的不仅是极端天气等短期冲击,还包括海平面持续上升等长期扰动,其对海岸带的影响作用在物理、化学和生物三个维度^[18],不同维度的影响通过跨系统、跨尺度和跨层级的交互反馈加剧了陆海空间的暴露性与脆弱性(图 1)。适应是指通过自我学习、创新知识、管理风险、协调资源和研发策略等方式来迎接未知挑战^[19],强调系统的自主更新和综合协调。面对不确定性扰动时,了解海岸带系统吸收冲击的大小、

崩溃的临界点、恢复稳态的效率、自我更新和保持循环的能力变化与时空演变的关系,是阐释海岸带韧性特征的关键。同时,与应对只解决当前问题不同,适应则更加关注问题的趋势研判来缓解灾害全生命周期的累积影响。因此,综合相关研究,本文将“适应气候变化的海岸带韧性”定义为:海岸带复杂系统在气候变化冲击下,通过系统自身鲁棒性、灵活性、多样性、变革性等特性在时空尺度上动态重组内部结构适应外界不确定性扰动的一种能力。

表 1 不同韧性发展阶段下海岸带韧性内涵解析
Table 1 Analysis of coastal resilience under different stages of resilience development

发展阶段 Development stages	基本概念 Basic concepts	韧性目标 Resilience goals	韧性特征 Resilience characteristics	侧重点 Side focus	应用举例 Application examples
工程韧性 Engineering resilience	拥有准备、抵御和恢复的能力,通过时间脉络维持海岸带系统成功运转	维持特定功能或迅速调整资源配置	抵御性、稳健性、恢复性、高效性	效率维持、系统恒定和单一稳态	沿海流域水资源、生态、社区基础设施的综合规划设计与管理运维 ^[13]
生态韧性 Ecological resilience	维持在一个稳定域内和维持多个稳定域之间平衡的能力	恢复原有功能或达到新的稳态	鲁棒性、多样性、连通性、冗余性	内在适应和多态平衡	识别海岸带生态功能丧失的物种,系统化管理生态资源和制定规划决策 ^[14—15]
演进韧性 Evolutionary resilience	海岸带面对不确定性扰动时维持、适应及变革的能力	不确定性干扰下系统适应与转变	灵活性、适应性、变革性、学习力、自组织	强调自我学习的动态循环适应	通过海岸带立法管理提升社区的社会-生态韧性 ^[16—17]

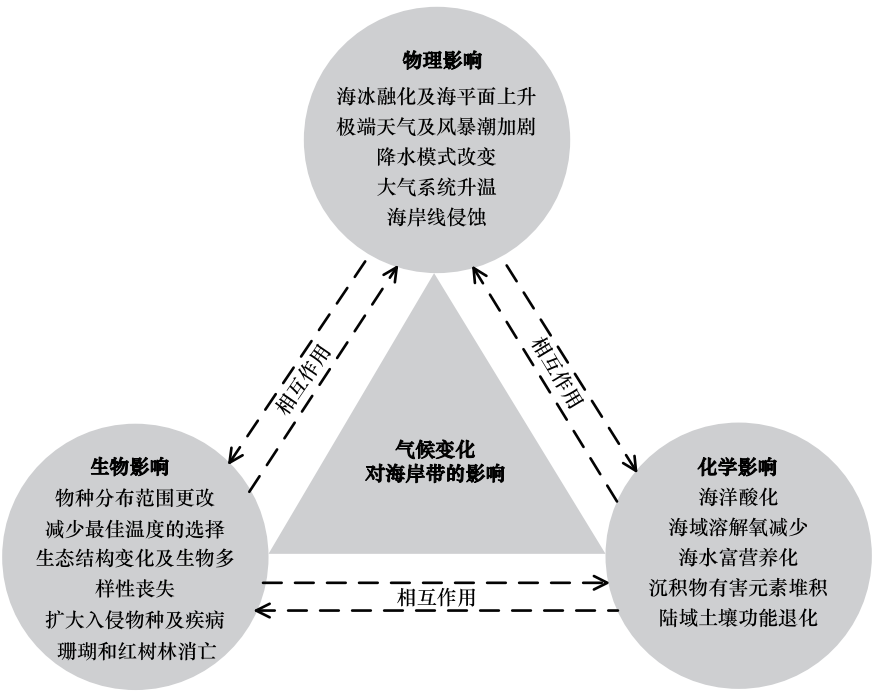


图 1 气候变化对海岸带的多维影响(根据文献[18]改绘)

Fig.1 Multidimensional impacts of climate change on coastal zones(drawn from reference[18])

2 基于知识图谱工具的文献分析

2.1 研究方法

引文空间(CiteSpace)作为当下热门的知识图谱可视化分析工具之一,通过搜索文献数据库的关键词、主题、作者、单位等信息,借助共现和聚类模块计量得到某一学科^[20]或知识领域在确定时期内的发展态势,对该

研究领域的热点解析、薄弱找寻、前沿探测、突变分析具有指引作用。共现分析旨在揭示关键词等形成的“点-线-网”组织架构,节点大小代表关键词等出现频率的高低,节点与节点之间连接线的粗细表示二者之间的紧密程度。聚类分析是对不同关键词的共性总结归类的过程,以色块界定类别。

2.2 数据获取

本研究以“气候变化(Climate change)”“海岸带韧性(Coastal resilience)”为主题进行检索。国外文献来源于 Web of Science(WOS)核心数据库,检索年限至 2023 年 3 月,筛选掉相关性弱的文献得到 2099 篇。国内文献来源于中国知网(CNKI)核心数据库,截止至 2023 年 3 月仅检索到 7 篇文献。由于国内相关研究起步晚、文献少,故本研究主要聚焦于国外文献,运用 CiteSpace 软件进行知识图谱解析并精读高被引及高相关文章,系统梳理适应气候变化的国外海岸带韧性研究进展。

2.3 结果分析

2.3.1 研究热点的结构分布

运用 CiteSpace 软件对 WOS 数据库的关键词进行共现分析,G 指数(G-index)设为 15,前高频节点(Top N)设为 100,时间切片设为 1 年,删除出现频次低及无中心性的文献可视化其共现网络图谱(图 2)。相关文献最早出现于 1996 年 Adam Markham 提出陆域生态保护理念不适用于海域^[21],强调海洋保护区划定应突出生态系统流动、陆海压力交互和多重功能叠加的特点。1996—2023 年文献去除“Climate change”“Resilience”“Adaption”研究词之外,关键词频次由高至低依次为“Sea level rise”“Vulnerability”“Impacts”“Management”“Community”(表 2)。涉及“Sea level rise”研究集中在情景预测和韧性评估,如模拟温室气体-海洋多情景演变^[22]和评估基础设施韧性度^[23],从系统运行背景、内在组织、外部扰动建构集暴露性-敏感性-恢复性-适应性的海岸带韧性测度框架。“Vulnerability”重点关注气候变化的层级传递效应,如温度变暖导致珊瑚白化进而造成沿海社会经济脆弱性增加^[24],通过建立脆弱性评估体系测度系统韧性和排序驱动因素,多应用于沿海城市、渔业资源、生态湿地等空间。“Impacts”重在揭示气候变化与人类活动双重影响,二者表现出协同、相加或拮抗关系^[25],协同与相加作用会导致海岸带韧性急剧下降,如 2100 年气候变暖将驱使全球沿海湿地最高损失 30%^[26]。拮抗则发挥相互对抗作用,如压力源可调节生物的易感性^[27]。“Management”从最初的部门割裂走向陆海一体化管理,海岸带管理理论与方法日趋完善,如运用地理信息系统(GIS)技术管理沿海灾害风险^[28]、建立淡水-海水协同管理范式和基于生态系统管理的决策^[29]等。“Community”聚焦社区居民年龄、职

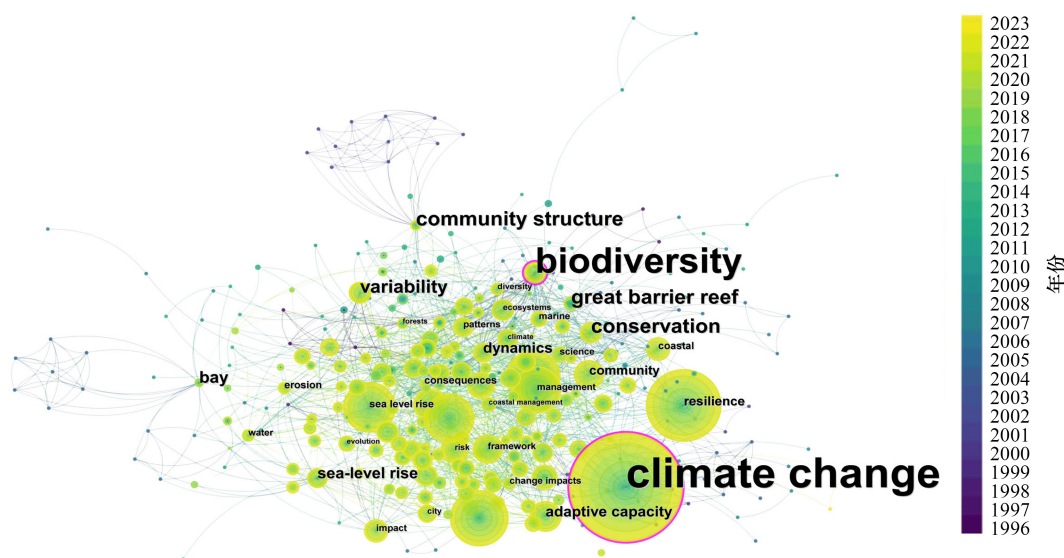


图 2 国外文献关键词共现网络图谱

Fig.2 Cooccurrence network mapping of keywords in foreign literature

业结构、价值文化等,提出适应未来气候变化的参与式韧性行动^[30],模拟了气候与政策的时空耦合评估不同情景下社区适应策略的优缺点^[31]等。

表 2 国外文献关键词频次前 10 排序表

Table 2 Top 10 ranking of keyword frequencies in foreign literature				
序号 No.	关键词 Keywords	频次 Frequencies	中心性 Centrality	出现年份/年 Year of occurrence
1	climate change	1193	0.19	2000
2	resilience	576	0.06	2007
3	sea level rise	316	0.05	1996
4	vulnerability	311	0.03	2010
5	impacts	308	0.03	2008
6	management	308	0.05	2006
7	adaptation	281	0.02	2008
8	community	149	0.06	2004
9	framework	137	0.04	2003
10	adaptive capacity	131	0.07	2006

基于共现网络图谱分析(图 2),“气候变化”“生物多样性”具有最高的中心度,代表二者文献量大,且与其他关键词联系最为紧密,是研究的热点前沿。中心度次之为“保护”“大堡礁”“社区结构”“变异性”“海湾”“适应能力”等,表示研究聚焦于海岸带社会生态系统的保护与适应。再次之排序为“动力学”“海平面上升”“韧性”代表基于复杂动态系统理论的演进韧性日渐成为研究热点。总体来看,目前研究围绕“气候变化”“生物多样性”呈树枝状网络结构,形成了完整的知识体系。

2.3.2 研究脉络的阶段分析

通过对 1996—2023 年文献发表情况进行统计划分(图 3),适应气候变化的海岸带韧性研究大致分为三个阶段。其中,1996—2009 年为萌芽起步阶段,文献占比为 3.43%,随着 1994 年《联合国气候变化框架公约》的实施,学者聚焦不同类型生态系统与气候变化的相互作用研究^[21],指出加强气候变化对生态群落的影响监测。同时,适应性管理资源配置可作为抵御气候变化的重要路径,包括提高长期性基础设施(如水资源管理设施)的稳健性^[32]、建立社区共同管理的社会网络^[33]和制定红树林韧性建设时序^[34]等。2010—2014 年为缓慢发展阶段,文献占比为 12.15%,主要探究气候变化下不同系统的脆弱性,涵盖国家-区域-局地洪涝^[35]、珊瑚礁渔业^[36]和海滩侵蚀^[37]的脆弱性等,此阶段不再局限于揭示气候变化对生态系统的负面影响,开始重视脆弱性的评估表达,从不同空间和视角提出气候适应战略与治理框架,并开展韧性规划实践,如爱尔兰、纽约韧性战略规划^[12]和澳大利亚搬迁适应计划^[38]等。2015—2023 年为快速增长阶段,文献占比为 84.42%,随着 2015 年第三次世界减灾大会发布《2015—2030 年仙台减灾框架》,此阶段的研究聚焦气候变化风险管理,文献呈爆发式多元增长,研究内容包括压力源及驱动机制分析、风险预测及韧性评估、适应性规划及综合治理、措施响应及政策行动等,涌现大量理论与实践相结合的研究,如从物理、社会、经济、环境和基础设施维度评估孟加拉国沿海社区的级联脆弱性^[39]。

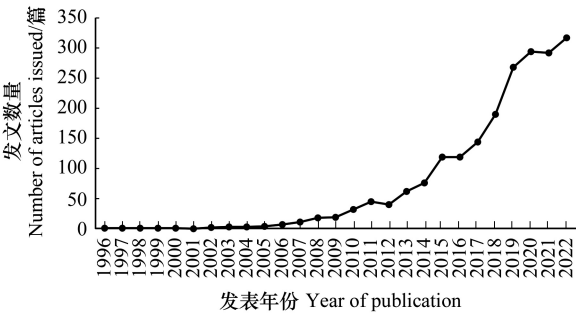


图 3 1996—2023 年国外文献数量统计

Fig.3 Statistics on the number of foreign literature from 1996—2023

至研究截止,2023 年文献量为 29 篇,为保证图示结构清晰,不在图中展示

至研究截止,2023 年文献量为 29 篇,为保证图示结构清晰,不在图中展示

2.3.3 研究现状的主题分类

基于关键词聚类分析得到以下 10 个聚类(图 4),网络聚类模块值 Q 为 0.44、聚类平均轮廓值 S 为 0.74,说明聚类同质性和可信度较高。结合“适应能力”“保护”“海洋酸化”“沿海韧性”“滨海湿地”“气候变化适应”“海平面上升”“气候变化”“热带气旋”“阿拉伯海”十大聚类关键词及其对应的文献阅读归纳如下:聚类 0 主要分析渔业资源、沿海社区等面对气候变化的脆弱性^[24]及适应性^[40],研究扰动风险评估、治理框架建构和海岸带管理等内容;聚类 1 重点关注沿海社会生态的保护理念及方法路径,突出规划策略动态性^[41]、提高生态系统服务性和促进社区共同管理协作性等;聚类 2 主要分析海洋酸化对生态系统、渔业资源、海岸线环境和栖息地多样性等负面影响;聚类 3 围绕海岸线侵蚀等风险构建海岸带韧性机制及评估模型,基于不同组合方式的自然解决方案制定风险管理决策等;聚类 4 聚焦滨海湿地生态系统研究,包括盐沼^[42]、互花米草^[43]、红树林等面对多重压力的响应及恢复能力;聚类 5 主要研究气候变化对社会经济、降雨分布、环境改变的不确定性影响,以及识别灾害风险区域、划定生物多样性保护区和计划性管理撤退^[44]等适应措施;聚类 6 重点关注海平面上升对基础设施^[45]、人口经济等冲击,采用地理信息技术预估盐水入侵速率及范围、对可能造成的人财损失增强水资源管理^[46];聚类 7 显示“气候变化”在文献网络中具有突出的中心性(图 4),与其他关键词联系紧密,比如“尺度”“规模”“累积”“影响”等,未来海岸带研究将继续以气候变化为焦点展开;聚类 8 主要评估热带气旋对沿海地区的风险影响,包括基础设施、城乡生计、保险索赔等多维度,针对沿海居民撤离风险区或就地适应进行辩证性思考^[38];聚类 9 表明在阿拉伯海域已开展大量实证研究,包括阿曼南部、印度西海岸等地。

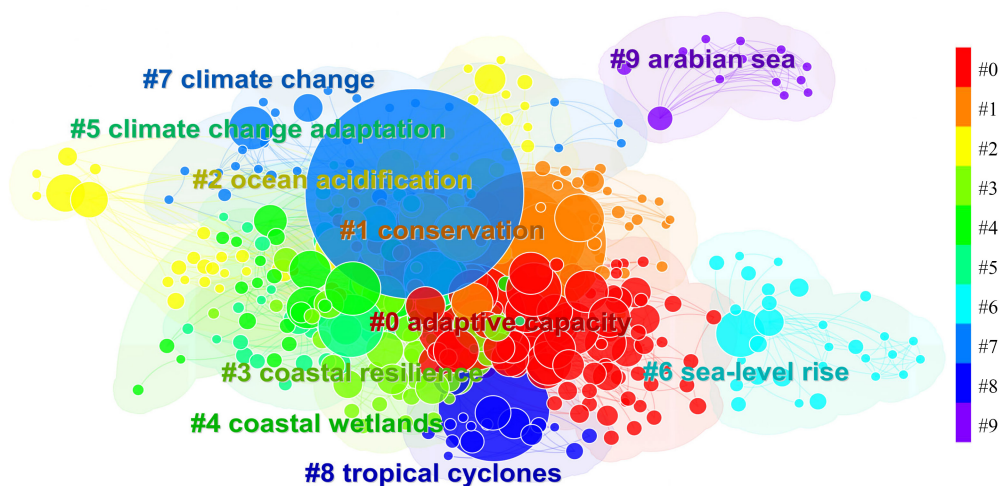


图 4 国外文献关键词聚类网络图谱

Fig.4 Clustering network mapping of keywords in foreign literature

图示中#0—9,表示关键词聚类 0—9

3 适应气候变化的海岸带韧性研究要点及思考

综上所述,适应气候变化的海岸带韧性研究大致可分为以下四大要点:气候变化与海岸带相互作用机制、气候变化扰动下海岸带韧性表征测度、适应气候变化的海岸带提升路径和海岸带韧性管理策略。

3.1 气候变化与海岸带相互作用机制

3.1.1 气候变化对海岸带的影响

气候变化对海岸带造成的不全是干扰,在一定程度上可发挥积极作用,其影响海岸带演化的方向包括负向和正向。其中,负向影响将气候变化视为一种威胁,加剧陆海灾害叠加、灾种多变且灾害链延伸等现象,常用脆弱性描述海岸带风险条件与暴露程度^[24],其受地理环境、空间活动、社会经济、政治文化等共同驱动,公

式为:脆弱性=暴露性+敏感性-适应性^[24]。正向影响揭示气候变化在一定阈值内能够发挥某种促进效应,比如海水适度升温促使部分鱼类(如红鲷鱼)资源丰度增长^[47],低强度飓风增加沉积物量提升湿地适应海平面上升的能力^[48]。阈值是气候变化正负效应的“分界点”,当海岸带系统跨越阈值时会产生巨大的突变,导致该系统从一个稳态走向不确定性,进入另一个平衡或不平衡状态,转变方向受外部冲击的频率、强度和持续时间以及自身内部功能结构共同决定^[49],提升阈值管理能力是实现海岸带可持续发展的关键。因此,气候变化对海岸带的影响取决于外部干扰时空作用与系统内部功能反馈之间的比较,常用阈值作为其影响程度的衡量标尺。

3.1.2 海岸带对气候变化的响应

海岸带由自然(生态)和人类(社会)两大系统构成,面对气候变化的影响形成跨系统和跨尺度的级联响应,厘清不同维度的响应要素及作用机理,便于适应气候变化时做出直接或间接的反应^[50]。(1)跨系统响应发生在不同生态子系统、不同社会子系统、生态与社会系统之间。生态子系统之间的响应取决于生物多样性^[51]和生态连通性^[52],如红树林驱动的放牧增加可能会提高临近珊瑚从干扰中恢复的速率^[52];社会子系统之间的响应是通过长期转变人类行为适应社会环境变化,通过调整实施人类活动方式、机构组织、政策技术和建设方案的计划来适应气候变化^[53];社会-生态系统的响应是通过改变海岸带复杂系统的属性组合降低其脆弱性达到高适应目的,比如优化资源配置、经济结构、社会资本、基础设施、已有的风险经验和可用的技术手段等^[50]。(2)跨尺度响应包括治理和空间尺度。治理响应是通过主体组织和规则管理实施“自上而下”传递式、“自下而上”反馈式以及“平级联动”运作式响应,如 Kim 研究了美国州县之间纵横向规划协调度对沿海社区适应气候变化的促进作用^[54];由于海岸带陆海要素动态交互,空间响应包括由陆至海和由海至陆两个方向,由陆至海响应的起点是土地利用变化,其导致栖息地服务、蓝碳封存、资源生产、防灾减灾等功能下降。由海至陆响应的起点是海洋生态系统变化,当气候变化改变多物种的性能时将产生较大的生态链式效应进而破坏海岸带复杂系统的稳态。监测表明,气候引起的环境胁迫长期作用在海岸带生态空间上致其基本属性改变并触发响应^[55](图 5)。

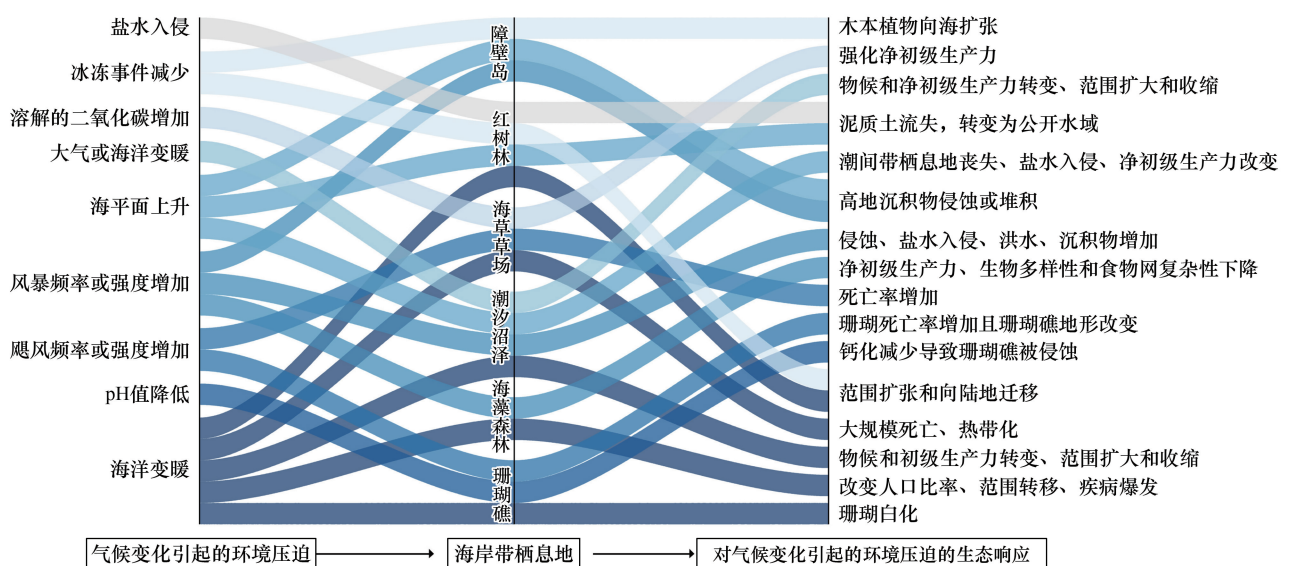


图 5 海岸带重要生境面对气候变化环境胁迫的生态响应(根据文献[55]改绘)

Fig.5 Ecological response of critical habitats in coastal zones in the face of environmental stress from climate change (drawn from reference [55])

3.2 气候变化扰动下海岸带韧性表征测度

3.2.1 韧性指标及表征

海岸带是个复杂巨系统,其韧性能力取决于环境背景、压力作用途径、系统规模及适应方向等,气候变化

冲击下韧性各阶段指标体系解析集中在环境观和系统观两个视角。(1) 基于环境背景的韧性研究注重指标的在地性、适配性和组合性,涵盖灾害、生态、社会、资源和建成等环境,如灾害环境强调风险时空动态管理,聚焦物理属性(建筑、空间、设施等)和人类社会(社区、机构、健康等)构成的可持续网络,以固有性、适应性、灵活性、恢复率等进行表征^[56];渔业资源聚焦生态系统的连通性和多样性等,社会经济的变革力和学习力等,以及社区治理的公平性和适应力等^[57];韧性作为城市适应气候变化多维联动的治理途径,旨在提升系统内稳性、杂食性、高流通性等促进沿海空间规划的灵活响应^[58]。(2) 建立以韧性过程及状态度量为核心的复杂系统指标体系需明确系统类别、构成、挑战、机制等基础属性,围绕韧性全生命周期厘清各阶段功能演变及要素链接,突出前期防范、中期复原、后期适应的韧性演进,常借助驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型结构化韧性繁杂流程,揭示韧性-过渡-转型的适应路径,突出功能持久性、自组织力和改革性等特征^[59]。从复杂动态系统理论解构自然-人类耦合系统中脆弱性和适应性指标的韧性互动^[60]也是常用方法之一。

3.2.2 韧性测度方法及内容

海岸带韧性测度研究从关注系统恢复时效的结果导向转为关注系统适应状态的过程导向,由以往单一阈值估算转为多特征值级联测算,测度方法可分为阈值测算法、指标评估法、模型建构法和工具协同法,不同方法使用情景及优劣势对比如下(表3)。其中,阈值测算法是运用概率手段描述系统稳定与崩溃的分界点,包括观测法、统计法和曲线法等;指标评估法是根据韧性要素特征选取相应指标综合叠算,采用韧性计分法、层次分析法、德尔菲法等评估韧性整体性状,揭示指标的重要程度、达标情况和量化值等特性;模型建构法是基于海量数据拟合风险与韧性的函数逻辑阐述二者之间的复杂关联,近似评估韧性现状及预测未来韧性演变,常用系统动力学模型和概率图模型等;工具协同法是运用以上多种方法构建韧性程序式的综合评价流程,突出数据整合和模型互补提高韧性评估的精准度,常用GIS空间技术可视化表达。

3.3 适应气候变化的海岸带韧性提升路径

海岸带适应气候变化的韧性提升以负面影响最小化为目标,依据适应的对象、范围、时间及理念等,分为响应性被动适应、预见性主动适应^[32]和二者相结合的综合性适应,包括工程和非工程适应措施。(1) 响应性被动适应是指事后及时行动恢复原有功能和强化二次抵抗力,通过评估灾后海岸带损失程度和重建成本找出薄弱区域或环节,运用安全疏散、设施建设、医疗救助、政策扶持等方式快速恢复或重构海岸带系统,提出修缮给排水系统、修建海堤与护岸、修复生态防波堤等工程措施,兼具摒弃高脆弱性土地与建筑、解决受灾居民生计、修改相关政策法规、强化生境监管^[68]等非工程举措;(2) 预见性主动适应是指事前采取防范手段最大化降低灾时损失,突出韧性的稳定性、鲁棒性和冗余性,基于动态风险情景预测对长期与短期投资进行模式组合,强调设施投资建设与气候变化适配,如对投资大、寿命长的基础设施不断调整其可靠性,对投资小、建设快的短期设施可发挥其冗余功能,确保灾时系统多线安全运行。同时,强化社区宣传、知识科普、防灾组织联动、保险购买等措施;(3) 综合性适应则关注韧性全生命周期的动态调整,突出系统自我反思与变革能力,以利益主体共同参与贯穿韧性提升全路径,使用设施灵活规划、空间用途转换、建设时序调整和政策技术更新等方式。

3.4 适应气候变化的海岸带韧性管理策略

海岸带韧性管理历经承受-管控-适应风险的研究演进,对应于灾害管理、灾害风险管理和综合管理三种形式。(1) 灾害管理强调“扼杀”灾源及作用途径,通过减少温室气体排放、整治入海口污染和增加建筑底层适水高度等手段实施就地化管理。(2) 灾害风险管理是以降低海岸带脆弱性为核心分散或转移风险,通过识别高脆弱性空间或资源优先制定管控规则,如保护湿地生境完整性抵御风暴潮以分散近岸陆域被侵蚀的风险,实施有管理的撤退计划转移土著和资产对海平面上升的暴露^[44],强调韧性的灵活性和智谋性。(3) 综合管理是立足不同时段气候影响规模和分布的不确定性,通过汲取前期管理经验和先进技术知识联结政府、市场、公民共建社会支持网络和参与式合作空间的协同管理模式^[33],以公正合理的职责划分、资源分配、资金重组等组织集体行动提升韧性管理。

针对不同空间尺度的风险特征,研究围绕宏-中-微观开展海岸带管理实践。其中,宏观尺度集中在国家-

表 3 海岸带韧性主要测度方法比较
Table 3 Comparison of the main measures of coastal resilience

研究方法归类 Research methodology categorization	方法原理 Method principle	优势 Advantages	劣势 Disadvantages	具体测度方法 Specific measurement methods	研究对象 Research subjects	研究实例 Research examples	参考文献 References
阈值测算法 Threshold measurement method	识别系统稳态转为崩溃时的临界值	直接表达系统的全状态值	不适用于复杂循环系统的多稳态量化	遥感影像解译、历史数据统计及预测、概率计算、基于韧性功能曲线评估等	主要为珊瑚礁、红树林、沼泽、鱼类群落等生态系统	通过解译长时段卫星影像变化揭示红树林扩张与极端严寒天气频次之间的响应阈值	[61]
指标评估法 Indicator evaluation method	框定作用要素及驱动因子测量韧性综合值	适用面域广,评价要素多,描述系统多维结构	指标选取及权重(分数)赋值具有主观性	韧性计分法、层次分析法、德尔菲法、李克特量表法等	研究面较广,涵盖海岸带区域、城市、社区、生境等多空间尺度	构建危险性概率分析框架判别超越海平面上升阈值的空间状态	[62]
模型建构法 Model construction method	运用大量数据构建函数或矩阵、求解图论等得到韧性值	简化揭示韧性复杂机理,接近现实状态	对基础数据的准确度和数量级要求较高	系统动力学模型(元胞自动机法、蒙特卡罗法、基于代理的建模等)、概率图模型(贝叶斯网络法)、遗传算法等	以沿海社区、基础设施、生态系统等物理维度为主,以适应策略、治理政策等管理维度为辅	运用韧性计分法评估华盛顿地方规划网络协同应对气候变化的脆弱性	[64]
工具协同法 Tool synergy method	综合以上几种工具方法	弥补不同方法之间的缺陷	要素选取需兼顾不同方法的适用性	以上几种方法的叠加,常用地理信息系统(GIS)空间技术可视化表达	研究对象较为广泛	采用层次分析法系统测算加拿大沿海社区环境适应气候决策的韧性水平	[65]
模型建构法 Model construction method	运用大量数据构建函数或矩阵、求解图论等得到韧性值	简化揭示韧性复杂机理,接近现实状态	对基础数据的准确度和数量级要求较高	系统动力学模型(元胞自动机法、蒙特卡罗法、基于代理的建模等)、概率图模型(贝叶斯网络法)、遗传算法等	以沿海社区、基础设施、生态系统等物理维度为主,以适应策略、治理政策等管理维度为辅	运用系统动力学模型评估温哥华市综合健康韧性时空分异特征	[56]
工具协同法 Tool synergy method	综合以上几种工具方法	弥补不同方法之间的缺陷	要素选取需兼顾不同方法的适用性	以上几种方法的叠加,常用地理信息系统(GIS)空间技术可视化表达	研究对象较为广泛	以密西西比河三角洲为例,开发韧性推理测量模型评估其社区韧性,采用空间动力学模型模拟其人口变化动态	[60]
模型建构法 Model construction method	运用大量数据构建函数或矩阵、求解图论等得到韧性值	简化揭示韧性复杂机理,接近现实状态	对基础数据的准确度和数量级要求较高	系统动力学模型(元胞自动机法、蒙特卡罗法、基于代理的建模等)、概率图模型(贝叶斯网络法)、遗传算法等	以沿海社区、基础设施、生态系统等物理维度为主,以适应策略、治理政策等管理维度为辅	基于系统动力学模型对沿海社区适应环境变化的战略方案进行韧性能力评估	[66]
工具协同法 Tool synergy method	综合以上几种工具方法	弥补不同方法之间的缺陷	要素选取需兼顾不同方法的适用性	以上几种方法的叠加,常用地理信息系统(GIS)空间技术可视化表达	研究对象较为广泛	访谈利益相关者构建多代理人模型,量化评估替代性政策情景与当前政策在时间、规模、效益上的差异,探讨沿海社区韧性适应可行性方案	[67]

地区、州-县、沿海流域、三角洲、海湾等空间,强调多级协同管治^[69];中观尺度包括沿海城市、乡镇、社区单元等,突出其在韧性空间管理传导的重要性;微观尺度涵盖沿海居民点、珊瑚礁、渔业资源、海洋保护区等单要素韧性管理。

3.5 研究进展的总体评述及发展思考

经总结,适应气候变化的海岸带韧性研究以“驱动识别-机制剖析-韧性测度-提升管理”的路径全面展开,形成集研究范围多级化、对象多维化、方法多元化和内容多样化的智库成果,但仍存一定局限。在研究范围方面,以战略空间、行政区划和地理单元为主,忽略了灾害影响范围的不确定性和陆海交互作用的复杂性。在研究对象方面,较少关注气候变化诱发的多灾耦合及其链式演变。在研究方法方面,需进一步深化海岸带复杂系统时空韧性组合的测度反馈。在研究内容方面,未考虑不同人群需求与韧性空间建设的弹性匹配以及韧性长效赋能的治理机制。基于此,结合我国海岸带气候韧性研究处于起步阶段的现实背景,提出推进海岸带适应气候变化韧性发展的几点思考:(1)完善海岸带气候韧性理论体系。明确陆海统筹视域下海岸带气候韧性的概念内涵及响应范围是促进多领域交叉研究的连接点,从陆海灾种差异性、耦合性及演化性构建海岸带气候韧性动态评价体系,并出台程式内容刚性引领和特征指标弹性组合的海岸带气候韧性评价标准是未来发展重点。(2)探究海岸带气候韧性空间实践范式。国土空间规划作为确保海岸带可持续发展的政策工具,其旨在建构人-地-海安全共生的空间模式,以试点先行探索海岸带气候风险时空分异与基于人本主义空间行为的耦合机理及规划范式是未来研究深化方向。同时,制定海岸带气候韧性管理的绩效考核制度将推动空间整治转向综合治理。(3)突破多学科研究融合瓶颈。加快建立气候变化问题导向下的多学科理论方法、技术工具、优缺点等融合路径及体系框架,进一步探索海岸带复杂系统集成跨尺度、多结构、多数据的韧性规律及治理途径。

4 适应气候变化的海岸带韧性治理展望

面对危机,治理能力的高低是衡量城市“韧性”的核心指标^[70],提升海岸带韧性能级重在完善其韧性治理体系。因此,结合当前研究薄弱之处,提出我国未来海岸带适应气候变化的韧性治理可从对象、主体、空间和制度四个维度探索,遵循可持续、适应性、参与性和一体化原则^[71]推演海岸带韧性治理“原则-目标-路径”的逻辑框架(图6)。

4.1 辨识治理对象,以风险链评估为韧性治理起点

识别气候变化诱发的灾害种类、风险演化路径及灾害叠加效应,辨析陆海承载能力的时空分异是未来海岸带韧性一体化高效治理的前提。首先,划定风险空间范围。立足海岸带要素特性解析气候变化风险链机理,依据生态-社会系统内外的物质、信息和能量传递模拟风险影响界线。其次,评估风险承载能力。针对风险区内人口、用海用地、资源资产等运用生态足迹计算、资源消耗预测等方法评估海洋与陆地、保护与开发、投资与收益平衡下的空间风险承载容量。再次,完善韧性动态测度。基于系统动力学模型仿真海岸带结构功能的韧性动态变化,依据不同时空韧性等级调整治理区域及影响要素、优化用地用海规划设计、安排项目投资建设的先后次序。最后,评估反馈韧性能力。通过反思治理对象不同时段韧性诉求及组合形式,采取风险适应性评估反馈促进韧性方案实时调整,方案适调包括优化陆海治理途径、分配陆海使用权益、组合陆海资源配比和重构流域空间模式等。

4.2 协同治理主体,探索跨权益治理的韧性平衡

建立多元主体参与协同的治理模式,是未来海岸带韧性可持续治理的核心。以气候变化风险为导向,以博弈式治理为手段,明确各方利益冲突点及薄弱点,通过统筹政府机构、非政府组织、市场及公众等利益主体,建立跨系统合力、跨机构合作和跨区域协同的治理机制提升陆海统筹的韧性能级。同时,立足现有陆海行政管理主体、用途管控侧重点、空间治理手段的差异,从多元协作视角出发建立“远海-近海-海岸线-流域”空间治理新格局,如海洋生境治理需考虑空间流动性及与近岸陆域用途的弹性兼容,流域治理需关注陆海资产灵

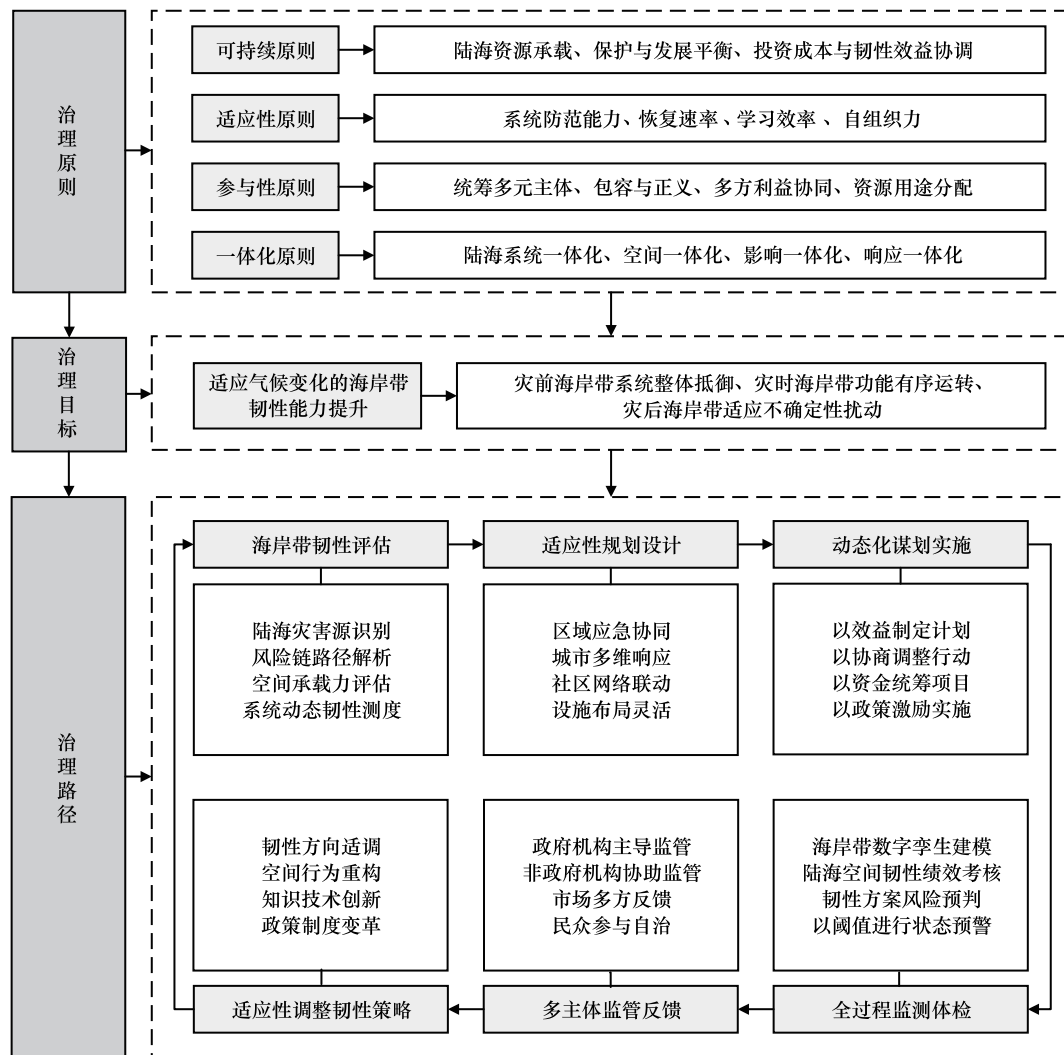


图6 适应气候变化的海岸带韧性治理框架

Fig.6 Coastal resilience governance framework for climate change adaptation

活分配和多类空间韧性效益的倾斜配置。针对陆海治理条块分割困境,需以陆海生态整体性、空间连续性、陆海交互反馈等特征出发,建立区域空间协同、灾种分类适应、资源分级防护和资产属地化保护的韧性治理方式,编织多主体动态协作的气候韧性治理网络。

4.3 统筹治理空间,建构韧性空间优化治理模式

明确人类需求与韧性空间建设的弹性匹配,结合特定问题及尺度以过程定义空间管理单元是推进未来海岸带韧性长效治理的途径。首先,分析不同空间单元人员构成及需求,权衡人-地-海之间的空间要求与韧性阈值的关系。其次,建设跨尺度的理想空间韧性模式,融合双碳目标形成国家-省-市县-乡镇联动的“风险管控与韧性治理”一张图,立足不同层级规划地位分级分类地传导韧性指标、计划韧性项目和出台空间管控规则。针对陆海跨系统影响的复杂性,采取差异化划定空间网格治理边界,如基于韧性空间绩效等级定义网格治理边界。最后,探究气候变化与空间规划的耦合性,针对海洋空间流动性管控毗邻空间效应溢出,通过利用强度、用途兼容、立体化分层联动等手段和相应指标促进空间内外韧性协同;针对用地活动复杂的现实困境,按照“减少气候风险-降低治理成本-提升韧性效益”的路径优化空间的规模形态、功能组合、资源配置和位置分布,强化空间韧性功能动态化分区和制定韧性过程响应的规划指标。

4.4 创新治理机制,完善韧性治理能级长效路径

结合韧性演变机理创新治理机制是确保未来海岸带韧性效能稳定发挥的持续保障。立足海岸带韧性灾前抵御和灾后适应的特征,以区域风险最小化的整体性思维和以决策参与最大化的分散性思维出发,建构基于行政治理和基于协作治理的预防型和响应型机制。(1)行政引导的制度创新。预防型制度创新包括制定海岸带气候韧性评估标准、出台气候韧性国土空间规划编制指南和建立气候风险大数据预警平台等;响应型制度创新包括强化高风险区设施韧性建设,如对“搬离海岸线计划”中涉及的居民、企业、资产等实施公共资金补偿、市场资金补偿和财政支付转移等,针对搬迁安置用地进行税收减免、功能兼容和开发强度等补偿。(2)协作引导的制度创新。预防型制度创新包括鼓励多元主体参与气候韧性动态评估、气候适应方案制定、陆海规划用途调整的全过程;响应型制度创新包括针对韧性等级低的区域内部企业集体搬迁和腾退恢复生态的行为进行政策激励。建立区域应急协同、城市多元组织防灾、沿海社区网络联动和设施多样冗余的一体化气候响应协作机制。

参考文献 (References):

- [1] 谭红建,蔡榕硕,杜建国,胡文佳. 气候变化与海洋生态系统:影响、适应和脆弱性——IPCC AR6 WG II 报告之解读. 大气科学学报, 2022, 45(4): 489-501.
- [2] 叶有华,林珊玉,何玉琳,王丹丹,陈晓意,倪广艳. 粤港澳大湾区海岸带生态系统修复框架. 生态学报, 2021, 41(23): 9186-9195.
- [3] Roberts C M, O'Leary B C, McCauley D J, Cury P M, Duarte C M, Lubchenco J, Pauly D, Sáenz-Arroyo A, Sumaila U R, Wilson R W, Worm B, Castilla J C. Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(24): 6167-6175.
- [4] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. *Climate change: the IPCC scientific assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [5] Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [6] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [7] 李彤玥,牛品一,顾朝林. 弹性城市研究框架综述. 城市规划学刊, 2014(5): 23-31.
- [8] 史晨辰,朱小平,王辰星,吴锋. 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.
- [9] Dai L, Vorselen D, Korolev K S, Gore J. Generic indicators for loss of resilience before a tipping point leading to population collapse. *Science*, 2012, 336(6085): 1175-1177.
- [10] Masselink G, Lazarus E. Defining coastal resilience. *Water*, 2019, 11(12): 2587.
- [11] McGlathery K, Reidenbach M, D'Odorico P, Fagherazzi S, Pace M, Porter J. Nonlinear dynamics and alternative stable states in shallow coastal systems. *Oceanography*, 2013, 26(3): 220-231.
- [12] Flood S, Schechtman J. The rise of resilience: evolution of a new concept in coastal planning in Ireland and the US. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 19-31.
- [13] Rosati J D, Touzinsky K F, Lillycrop W J. Quantifying coastal system resilience for the US Army Corps of Engineers. *Environment Systems and Decisions*, 2015, 35(2): 196-208.
- [14] Lloyd M G, Peel D, Duck R W. Towards a social-ecological resilience framework for coastal planning. *Land Use Policy*, 2013, 30(1): 925-933.
- [15] Thrush S F, Hewitt J E, Dayton P K, Coco G, Lohrer A M, Norkko A, Norkko J, Chiantore M. Forecasting the limits of resilience: integrating empirical research with theory. *Proceedings Biological Sciences*, 2009, 276(1671): 3209-3217.
- [16] Rölfer L, Celliers L, Abson D J. Resilience and coastal governance: knowledge and navigation between stability and transformation. *Ecology and Society*, 2022, 27(2): art40.
- [17] Garmestani A, Craig R K, Gilissen H K, McDonald J, Soininen N, van Doorn-Hoekveld W J, van Rijswijk H F M W. The role of social-ecological resilience in coastal zone management: a comparative law approach to three coastal nations. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 10.3389/fevo.2019.00410.
- [18] Bennett N J, Blythe J, Tyler S, Ban N C. Communities and change in the anthropocene: understanding social-ecological vulnerability and planning adaptations to multiple interacting exposures. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(4): 907-926.
- [19] Marshall N, Marshall P, Tamelander J, Obura D, Malleret-King D, Cinner J. A framework for social adaptation to climate change: sustaining tropical coastal communities and industries. Report. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2010.
- [20] 赵翔,贺桂珍. 基于 CiteSpace 的驱动力-压力-状态-影响-响应分析框架研究进展. 生态学报, 2021, 41(16): 6692-6705.
- [21] Markham A. Potential impacts of climate change on ecosystems: a review of implications for policymakers and conservation biologists. *Climate Research*, 1996, 6: 179-191.

- [22] Markus Meier H E, Dieterich C, Gröger M, Dutheil C, Börgel F, Safonova K, Christensen O B, Kjellström E. Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100. *Earth System Dynamics*, 2022, 13(1): 159-199.
- [23] Martello M V, Whittle A J, Keenan J M, Salvucci F P. Evaluation of climate change resilience for Boston's rail rapid transit network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 97: 102908.
- [24] Cinner J E, Huchery C, Darling E S, Humphries A T, Graham N A J, Hicks C C, Marshall N, McClanahan T R. Evaluating social and ecological vulnerability of coral reef fisheries to climate change. *PLoS One*, 2013, 8(9): e74321.
- [25] He Q, Silliman B R. Climate change, human impacts, and coastal ecosystems in the anthropocene. *Current Biology*, 2019, 29(19): R1021-R1035.
- [26] Schuerch M, Spencer T, Temmerman S, Kirwan M L, Wolff C, Lincke D, McOwen C J, Pickering M D, Reef R, Vafeidis A T, Hinkel J, Nicholls R J, Brown S. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature*, 2018, 561(7722): 231-234.
- [27] Ligorini V, Malet N, Garrido M, Four B, Etourneau S, Leoncini A S, Dufresne C, Cecchi P, Pasqualini V. Long-term ecological trajectories of a disturbed Mediterranean coastal lagoon (Biguglia lagoon): Ecosystem-based approach and considering its resilience for conservation? *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9, 937795.
- [28] Thumerer T, Jones A P, Brown D. A GIS based coastal management system for climate change associated flood risk assessment on the east coast of England. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(3): 265-281.
- [29] Rehr A P, Small M J, Bradley P, Fisher W S, Vega A, Black K, Stockton T. A decision support framework for science-based, multi-stakeholder deliberation: a coral reef example. *Environmental Management*, 2012, 50(6): 1204-1218.
- [30] Smith T F, Daffara P, O'Toole K, Matthews J, Thomsen D C, Inayatullah S, Fien J, Graymore M. A method for building community resilience to climate change in emerging coastal cities. *Futures*, 2011, 43(7): 673-679.
- [31] Mills A K, Bolte J P, Ruggiero P, Serafin K A, Lipiec E, Corcoran P, Stevenson J, Zanolco C, Lach D. Exploring the impacts of climate and policy changes on coastal community resilience: Simulating alternative future scenarios. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 109: 80-92.
- [32] Fankhauser S, Smith J B, Tol R S J. Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological Economics*, 1999, 30(1): 67-78.
- [33] Tompkins E L, Adger W N. Does adaptive management of natural resources enhance resilience to climate change? *Ecology and Society*, 2004, 9(2): art10.
- [34] Gilman E, Ellison J, Jungblut V, Lavieren H V, Wilson L, Areki F, Brighthouse G, Bungitak J, Dus E, Henry M, Kilman M, Matthews E, Sauni I, Teariki-Ruatu N, Tugia S, Yuknavage K. Adapting to Pacific Island mangrove responses to sea level rise and climate change. *Climate Research*, 2006, 32: 161-176.
- [35] McLaughlin S, Cooper J A G. A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, 2010, 9(3): 233-248.
- [36] Cinner J E, McClanahan T R, Graham N A J, Daw T M, Maina J, Stead S M, Wamukota A, Brown K, Bodin Ö. Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 12-20.
- [37] Alexandrakis G, Poulos S E. An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6078.
- [38] Zander K K, Petheram L, Garnett S T. Stay or leave? Potential climate change adaptation strategies among Aboriginal people in coastal communities in northern Australia. *Natural Hazards*, 2013, 67(2): 591-609.
- [39] Huq N, Hugé J, Boon E, Gain A. Climate change impacts in agricultural communities in rural areas of coastal Bangladesh: a tale of many stories. *Sustainability*, 2015, 7(7): 8437-8460.
- [40] Ferrario F, Beck M W, Storlazzi C D, Micheli F, Shepard C C, Airolidi L. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 2014, 5: 3794.
- [41] Bennett N J, Kadfak A, Dearden P. Community-based scenario planning: a process for vulnerability analysis and adaptation planning to social-ecological change in coastal communities. *Environment, Development and Sustainability*, 2016, 18(6): 1771-1799.
- [42] Leonardi N, Ganju N K, Fagherazzi S. A linear relationship between wave power and erosion determines salt-marsh resilience to violent storms and hurricanes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(1): 64-68.
- [43] Baustian J J, Mendelssohn I A. Sea level rise impacts to coastal marshes may be ameliorated by natural sedimentation events. *Wetlands*, 2018, 38(4): 689-701.
- [44] Doberstein B, Tadgell A, Rutledge A. Managed retreat for climate change adaptation in coastal megacities: a comparison of policy and practice in Manila and Vancouver. *Journal of Environmental Management*, 2020, 253: 109753.
- [45] Kasmalkar I, Suckale J. Traffic accidents and delays present contrasting pictures of traffic resilience to coastal flooding in the San Francisco Bay Area, USA. *Urban Climate*, 2021, 37: 100851.
- [46] Freire P, Tavares A O, Sá L, Oliveira A, Fortunato A B, dos Santos P P, Rilo A, Gomes J L, Rogeiro J, Pablo R, Pinto P J. A local-scale approach to estuarine flood risk management. *Natural Hazards*, 2016, 84(3): 1705-1739.
- [47] Maltby K M, Rutterford L A, Tinker J, Genner M J, Simpson S D. Projected impacts of warming seas on commercially fished species at a

- biogeographic boundary of the European continental shelf. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(11): 2222-2233.
- [48] Walters D C, Kirwan M L. Optimal hurricane overwash thickness for maximizing marsh resilience to sea level rise. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(9): 2948-2956.
- [49] Kato S, Ahern J. The concept of threshold and its potential application to landscape planning. *Landscape and Ecological Engineering*, 2011, 7(2): 275-282.
- [50] Dutra L X C, Bustamante R H, Sporne I, van Putten I, Dichmont C M, Ligtermoet E, Sheaves M, Deng R A. Organizational drivers that strengthen adaptive capacity in the coastal zone of Australia. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 109: 64-76.
- [51] Reusch T B H, Ehlers A, Hämmerli A, Worm B. Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(8): 2826-2831.
- [52] Mumby P J, Hastings A. The impact of ecosystem connectivity on coral reef resilience. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 45(3): 854-862.
- [53] Fischer A P. Pathways of adaptation to external stressors in coastal natural-resource-dependent communities: implications for climate change. *World Development*, 2018, 108: 235-248.
- [54] Kim H, Marcouiller D W, Woosnam K M. Coordinated planning effort as multilevel climate governance: insights from coastal resilience and climate adaptation. *Geoforum*, 2020, 114: 77-88.
- [55] Reed D C, Schmitt R J, Burd A B, Burkepile D E, Kominoski J S, McGlathery K J, Miller R J, Morris J T, Zinnert J C. Responses of coastal ecosystems to climate change: insights from long-term ecological research. *BioScience*, 2022, 72(9): 871-888.
- [56] Owrangi A M, Lannigan R, Simonovic S P. Mapping climate change-caused health risk for integrated city resilience modeling. *Natural Hazards*, 2015, 77(1): 67-88.
- [57] Mason J G, Eurich J G, Lau J D, Battista W, Free C M, Mills K E, Tokunaga K, Zhao L Z, Dickey-Collas M, Valle M, Pecl G T, Cinner J E, McClanahan T R, Allison E H, Friedman W R, Silva C, Yáñez E, Barbieri M Á, Kleisner K M. Attributes of climate resilience in fisheries: from theory to practice. *Fish and Fisheries*, 2022, 23(3): 522-544.
- [58] Wardekker J A, de Jong A, Knoop J M, van der Sluys J P. Operationalising a resilience approach to adapting an urban delta to uncertain climate changes. *Technological Forecasting and Social Change*, 2010, 77(6): 987-998.
- [59] Le T D N. Theoretical frameworks in climate change adaptation planning: a comparative study in coastal cities of developing countries1. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2022, 66: 424-444.
- [60] Lam N S N, Qiang Y, Li K N, Cai H, Zou L, Mihunov V. Extending resilience assessment to dynamic system modeling: perspectives on human dynamics and climate change research. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85: 1401-1405.
- [61] Cavanaugh K C, Kellner J R, Forde A J, Gruner D S, Parker J D, Rodriguez W, Feller I C. Poleward expansion of mangroves is a threshold response to decreased frequency of extreme cold events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(2): 723-727.
- [62] Luo X A, Lin T. Probabilistic Sea level rise hazard analysis based on the current generation of data and protocols. *Journal of Structural Engineering*, 2023, 149(3): 04022252.
- [63] Morelli A, Taramelli A, Bozzeda F, Valentini E, Colangelo M A, Cueto Y R. The disaster resilience assessment of coastal areas: a method for improving the stakeholders' participation. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 214: 105867.
- [64] Berke P, Newman G, Lee J, Combs T, Kolosna C, Salvesen D. Evaluation of networks of plans and vulnerability to hazards and climate change: a resilience scorecard. *Journal of the American Planning Association*, 2015, 81(4): 287-302.
- [65] Mostofi Camare H, Lane D E. Adaptation analysis for environmental change in coastal communities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2015, 51: 34-45.
- [66] Lane D, Beigzadeh S, Moll R. Adaptation decision support: an application of system dynamics modeling in coastal communities. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2017, 8(4): 374-389.
- [67] Lipiec E, Ruggiero P, Mills A, Serafin K A, Bolte J, Corcoran P, Stevenson J, Zanolco C, Lach D. Mapping out climate change: assessing how coastal communities adapt using alternative future scenarios. *Journal of Coastal Research*, 2018, 34(5): 1196.
- [68] Sales R F M. Vulnerability and adaptation of coastal communities to climate variability and sea-level rise: their implications for integrated coastal management in Cavite City, Philippines. *Ocean & Coastal Management*, 2009, 52(7): 395-404.
- [69] 范学忠, 袁琳, 戴晓燕, 张利权. 海岸带综合管理及其研究进展. *生态学报*, 2010, 30(10): 2756-2765.
- [70] 张东锋. 韧性城市最终指向的是治理能力. *南方日报*, 2022-04-22(A04).
- [71] Duxbury J, Dickinson S. Principles for sustainable governance of the coastal zone: in the context of coastal disasters. *Ecological Economics*, 2007, 63(2/3): 319-330.