DOI: 10.3724/j.1007-6336.2026-0034

从防御到共生:河口韧性内涵解析与研究进展

左书华[1], 冯小香[1], 严 冰[1], 赵德招[2],
居 尧[2], 欧阳群安[1], 谢 琳[1]

(1.交通运输部天津水运工程科学研究所 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456; 2.交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003)

摘 要: 河口作为海陆交互作用的关键界面,兼具生态服务功能与社会经济价值。在全球气候变化与人类活动的双重胁迫下,河口脆弱性问题日益加剧。韧性理念为破解河口系统发展困境、实现长期可持续发展提供了重要理论支撑。本文系统梳理韧性理论发展与演化过程,解析河口韧性内涵、核心研究内容、方法体系等方面研究现状,探讨河口韧性提升策略与技术,剖析现阶段研究在跨系统耦合机制、研究方法融合、实践转化落地等方面的短板。立足智慧技术革新与全球气候演变趋势,本文提出机制解析、方法创新、实践应用一体化的未来研究思路,为河口韧性优化、提升与管理及实践提供科学理论参考。

关键词: 河口; 韧性; 韧性评估; 研究体系; 提升策略
中图分类号: X32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2027)01-0001-13

From defense to symbiosis: connotation analysis and research progress of estuarine resilience

Zuo Shuhua[1], Feng Xiaoxiang[1], Yan Bing[1], Zhao Dezhao[2],
Ju Yao[2], Ouyang Qun'an[1], Xie Lin[1]

(1.Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China; 2.Changjiang Estuary Waterway Administration, MOT, Shanghai 200003, China)

Abstract: Estuaries represent critical sea–land interaction zones with prominent ecological functions and socio-economic importance. Exposed to the dual stresses of global climate change and intensive human activities, estuaries are facing growing vulnerability. The resilience framework serves as a vital theoretical basis for tackling the predicaments of estuarine systems and realizing long-term sustainability. This paper systematically reviews the development and evolution of resilience theory, analyzes the current research status regarding the connotation of estuarine resilience, core research contents, and methodological approaches, explores strategies and technologies for enhancing estuarine resilience, and identifies shortcomings in current research concerning cross-system coupling mechanisms, integration of research methods, and translation into practical applications. Considering technological innovations in smart systems and global climate trends, this paper proposes an integrated future research framework of mechanism analysis, methodological innovation, and practical

收稿日期: 2026-02-27, **修订日期:** 2026-06-15
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFB2605900)
作者简介: 左书华(1979—), 男, 河北邱县人, 博士, 研究员, 主要从事河口海岸动力地貌与数值模拟研究工作, E-mail: zsh0301@163.com
通信作者: 居 尧(1988—), 男, 江苏如皋人, 硕士, 高级工程师, 主要从事河口海岸动力地貌研究工作, E-mail: juy@cjkhd.com

application to provide scientific theoretical references for optimizing, enhancing, and managing estuarine resilience, as well as for practical implementation.

Key words: estuary; resilience; resilience assessment; research system; promotion strategy

河口是河流与海洋交汇形成的关键界面，涵盖河口湾、三角洲、潮滩等关键地貌单元，承担着物质循环、生物栖息地供给、防洪减灾、航运枢纽等多重功能，是全球人口集聚与经济活动的核心载体。全球约 40% 的人口居住在河口及滨海区域，河口三角洲贡献全球粮食总产量的 30% 以上，与此同时，高强度空间开发、资源过度利用使得河口负荷陡增，各类资源、生态与发展矛盾日益凸显[1-2]。

受全球气候变化的驱动，海平面上升速率逐渐加快，极端水文事件频发，诱发河口海岸侵蚀、海洋酸化、风暴潮等次生灾害风险持续走高。叠加人口向沿海集聚带来的高强度人为扰动，如围垦造陆、航道整治、污染物排放等，持续压缩河口生态空间，进一步加剧河口所面临的压力。河口作为自然、生态、社会、经济交织而成的复合系统，自然动力过程复杂，环境敏感度高[3-4]。在自然和人类活动双重胁迫下[5-18]，河口脆弱性日渐凸显，普遍面临栖息地退化、生物多样性锐减、泥沙供需失衡、洪涝与咸潮加剧等生态环境问题，如密西西比河三角洲湿地萎缩[19-20]、长江口盐水入侵加剧[21-23]、恒河口洪水灾害频发[24]。

如何推动河口由“被动”“应急”转变为“积极”“预防”，以应对多源、不确定风险，并通过系统自适应调节实现长效安全与可持续发展，已成为全球河口治理领域的重要议题。传统以“刚性防御”和“稳定控制”为核心的“对抗性”管理模式已难以适应河口系统的复杂性与扰动不确定性。在此背景下，聚焦扰动承压、功能存续、自适应转型的韧性（resilience）理念，逐步成为河口科研、治理、管理及实践的前沿。伴随着日益严峻的全球气候变化与高强度人类开发活动，片面侧重脆弱性管控以及追求绝对稳定与零风险的传统“防御型”范式已无法满足和应对复杂扰动的需求。以韧性为导向的和谐共生型理念为河口及其滨海区域发展及安全保障提供了一种新的策略指引。因此，河口治理理念亟须从“被动适应”向“主动韧性构建”转型。基于此，本文系统梳理韧性理论发展与演化过程，逐层剖析河口韧性内涵、研究内容、技术方法与提升策略等，在此基础上，归纳现阶段研究不足，提出未来重点研究方向。

1 材料与方法

进入 21 世纪以来，全球气候变化背景下的河口韧性研究持续升温，并取得了大量相关科研成果。为全面梳理国内外河口韧性相关研究进展，本文分别在 WOS 核心合集和中国知网（CNKI）两个数据库中开展文献检索，时间范围限定为 2000 年 1 月 1 日至 2025 年 12 月 31 日。本研究数据来源包含两部分，一部分以 Web of Science 核心合集数据库和中国知网（China National Knowledge Internet, CNKI）作为文献检索平台。以“estuary”“estuary system”“resilience”“resilience assessment”“promotion strategy”及其同义词作为关键词进行英文文献检索；以“河口”“河口系统”“韧性”“韧性评估”“提升策略”及其同义词作为关键词进行中文文献检索，并通过浏览检索文献的标题与摘要，剔除与本研究主题相关度不高的文章。另一部分文献来源于各互联网平台，包括 ASLA、Baidu、Bing、Google Scholar、Living Shorelines Academy 等。

通过系统的检索与筛选，并经过人工去重与复核，最终获得 216 篇有效文献作为本文的核心分析参考文献。已有的综述性文献主要针对海岸带韧性研究的较多，尚缺乏对河口韧性内涵、科研体系与韧性提升策略等方面的全面系统化的梳理和分析。本研究采用文献和案例分析等方法，对 2000—2025 年相关中、英文文献和国内外实践案例进行梳理和挖掘，以期了解河口韧性研究的概貌，归纳当前研究的不足，提出未来主要研究方向与发展趋势。

2　结果与讨论

2.1　河口韧性内涵解析

2.1.1　韧性的起源与定义

韧性(resilience)起源于拉丁语“resilio”，其本意为“反弹”或“弹回”，初期常被翻译为“弹性”，意思是系统受到扰动后能恢复到“最初状态”。1973 年，加拿大生态学家 Holling[25] 率先在生态学领域引入韧性概念，后续逐步拓展至工程学、经济学和社会学等多个学科领域。

2021 年，国际标准化组织发布了 ISO 22300:2021《Security and resilience -Vocabulary》国际标准[26](初版发布于 2018 年)，统一规范了安全与韧性领域专业术语。其后，2022 年 12 月 30 日，我国国家标准化管理委员会批准《安全与韧性术语》立项(国家标准计划号为 20221877-T-469)；2024 年 4 月 2 日，中国标准化研究院正式发布国家标准《安全与韧性 术语》(GB/T 44483—2024)[27]。该标准将韧性定义为：承受和适应环境变化的能力(ability to absorb and adapt in a changing environment)。

2.1.2　韧性理论的发展与演化

韧性理论历经了工程韧性、系统韧性、复杂适应性系统韧性(即演化韧性)3 个发展阶段，研究边界从单一物理系统演变到社会复杂系统。

(1)工程韧性。初期韧性概念多应用于工程结构领域，侧重于物理基础设施在遭受冲击(如风暴、洪水)后抵抗破坏和快速恢复原状的能力。例如，传统堤防、丁坝的设计核心是“抗冲”与“固岸”。因此，初期韧性被视为工程韧性。

(2)系统韧性。1973 年，Holling[25] 将韧性的概念引入到生态学领域，用于描述生态系统吸收干扰、适应环境的能力，并引入了可持续发展的内涵，打破了原有单一“稳态”思维，实现了跨尺度动态交互循环及系统创新性的突破，为韧性赋予了新的理念，即系统在承受扰动时维持其结构、功能与反馈的能力，且允许系统状态发生转变而非必须回归原点。

(3)演化韧性。这一阶段韧性的概念将人类社会系统深度整合，强调系统在受到外界扰动后具备学习、适应、自组织的能力，通过调整自身以适应环境变化，不再强调系统恢复至稳态，更注重系统与外界扰动相互作用的耦合机制，追求适应性循环[28]。由此带来了一个根本性的思维转变，由“对抗–杜绝”模式转变为“承认–容纳–学习–共生”模式，体现了“工程与自然和谐共生”的韧性理念[29-30]。

2.1.3　河口韧性内涵解析

韧性是一个具有多维内涵的词语。受学科差异与河口陆海相互作用的复杂属性影响，河口韧性亦呈现多维特征[29]。它不仅指代物理上的坚固性和灾后的恢复性，也指代系统在面对不确定性时保持核心功能的稳健性、主动调节自身以适应新条件的适应性，还涵盖在必要时向更可持续状态转化的转型性。故此，河口韧性是系统在自然灾害和人为活动等多源不确定性扰动下，表现出来的当前和未来时期的抵御、恢复、适应与转型能力，其核心内涵包含 3 个维度(图 1)[1,31-33]。

一是抵抗性(resistance)，即系统在扰动(如台风、污染事件)作用下维持核心功能(如水质净化、航运安全)的能力。例如，长江口深水航道通过导堤、丁坝工程来抵御、防止或减少泥沙淤积[34]，稳固深水航道运行环境。

二是恢复性(recovery)，即系统从扰动中恢复至稳定状态的速率与效能。例如，珠江口潮滩湿地在人类围垦扰动停止后，通过自然演替逐步恢复植被覆盖的过程[35]。

三是转型性(transformability)，即当系统无法维持原有结构与功能时，向更具可持续的新状态转型的能力。例如，受流域来沙锐减与人类活动叠加影响，长江口拦门沙地貌系统出现淤蚀逆转和泥沙来源源汇重构等重大改变，整体面临从泥沙沉积和自然缓慢淤涨过程，向侵蚀冲刷与人类驱动的适应调整转变[36]。

与其他系统相比，河口韧性具有显著的耦合性与不确定性特征。耦合性体现为海陆动力过程、生物地球化学循环与人类活动的深度交织，例如，流域水库调度改变径流过程，进而影响河口泥沙淤积与湿地韧性[36]；不确定性则源于气候变化的不可预测性(如极端风暴潮频率变化)[37]与人类活动的复杂性(如围填海活动、人工挖沙与污染排放的影响)[21]。这使得河口韧性研究内

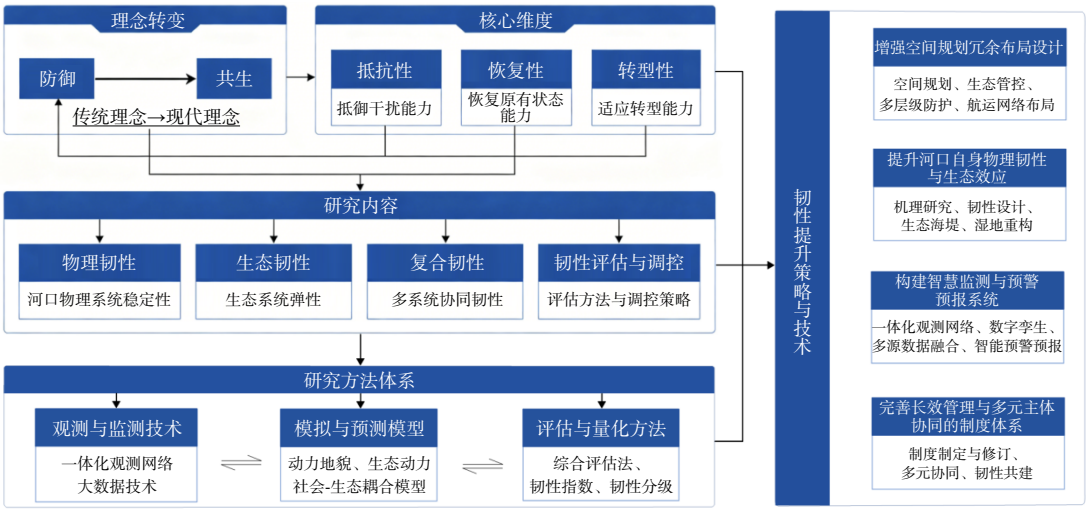


图 1 河口韧性内涵特征与核心研究内容及方法框架

Fig. 1 Diagram of connotation, core research contents and methods of estuary resilience

容更加丰富,其评估与调控更具挑战性。

2.2 核心研究内容与方法体系

2.2.1 河口韧性研究内容

根据韧性理论发展与演化过程及河口韧性的核心内涵,河口韧性研究主要包括 4 项关键内容,即物理韧性、生态韧性、复合韧性、韧性评估与调控(图 1)。

(1)物理韧性

物理韧性是河口在应对海平面上升、风暴潮、洪水、工程干扰等内外扰动时,维持地貌形态完整、水沙功能稳定与物理结构完好的能力,研究聚焦河口系统物理扰动与响应机制及治理工程效能两大方向。

一是河口系统物理扰动与响应机制。围绕水沙运动和地貌演变两大核心,一方面开展水沙输运扰动与响应研究,包括河–海、滩–槽、汊道之间的水沙连通与扰动,悬沙、底沙的输运路径与通量变化及泥沙沉积与再悬浮的耦合关系;另一方面开展地形地貌扰动与动力响应研究,包括潮滩、河口沙坝、河槽等地貌单元在侵蚀–淤积过程中的形态调整规律与响应机制。河口形态的适应性变化是物理韧性的重要体现,极端水文事件、上游水沙变化和人类活动均会显著改变河口动力、泥沙和地貌形态。例如,黄河口水沙剧变导致河口形态重塑,相关研究聚焦于“临界阈值”,即量化系统从一种状态(如淤进)转向另一种状态(如侵蚀)的拐点[38]。

二是河口治理工程设计与效能。工程设计旨在通过整治建筑物合理布局来改善和优化水沙条件以达到特定目的,如改善通航、防洪或减缓侵蚀等。研究内容包括:河口治理工程自身的物理韧性,是整治建筑物本身在满足航道稳定或岸线防护等需求的同时,应具备的抗灾韧性(如抗冲刷、抗风暴等);工程布局与优化影响最小化研究,即工程对河口系统自然过程的干扰,应最大限度地保持原有地貌(潮汐汊道、滩槽系统等)的连通性与异质性,维持系统消散外界扰动的能力,最大限度地保持原有地貌单元(盐沼、红树林、潮滩等),充分发挥其天然的消浪、促淤作用。现代河口治理正逐步由全硬质刚性结构设计,向柔性、生态友好型结构设计(如抛石护岸、植被蜂巢)转型。

(2)生态韧性

河口生态韧性是河口韧性研究的重要内容,重点关注生态系统结构与功能对扰动的响应机制,核心研究内容包括 3 个方面。

一是关键生态要素的韧性机制。潮滩湿地、河口三角洲、红树林等关键地貌单元是河口生态韧性核心载体,地貌稳定性与生物适应性协同决定系统韧性水平。例如,研究发现长江口潮滩湿地的韧性与泥沙供给量密切相关[39],当流域来沙减少导致潮滩侵蚀时,湿地植被可通过根系固

沙能力提升地貌稳定性，植被群落物种越丰富，生境抗侵蚀能力越强；红树林通过根系捕获泥沙抬升地表高程，其地表抬升速率与海平面上升幅度的博弈关系直接决定湿地存续状态。

二是生物群落的韧性响应。浮游生物、底栖生物、鱼类等生物群落的结构变化是河口生态韧性直观表征。例如，珠江口在赤潮扰动后，浮游植物群落的恢复速度取决于优势种的繁殖能力与环境适应性[40]，以硅藻为主的群落因繁殖速度快、耐污染能力强，恢复韧性显著高于以甲藻为主的群落；鱼类群落的韧性与栖息地连通性密切相关。

三是生态韧性的驱动因子识别。在自然端，径流、潮汐、泥沙供给是核心变量，通过径流、盐度梯度、潮汐动力和泥沙供给调控生态系统规模与分布。在人为端，围垦造陆、污染排放、水利工程等是主要扰动源，可直接导致湿地面积减少、水体营养盐结构变化和河口动力泥沙环境变化。例如，三峡水库运行后，长江口入海泥沙大幅下降（减少 30% 以上），导致三角洲前缘侵蚀加剧，生态韧性下降[36]。

（3）复合韧性

复合韧性，即社会–生态系统韧性，立足解析生态系统与社会系统的双向反馈机制，重点关注生态服务、人类福祉、适应行为的耦合关联，具体包括以下几个方面。

一是生态服务韧性与人类福祉的关联。河口提供的渔业资源、水资源、航运、旅游等生态服务是人类福祉的核心支撑，其韧性直接影响区域可持续发展。例如，孟加拉国恒河口的渔业韧性与社区渔民生计高度耦合[41]，当洪水灾害导致渔业资源短期减少时，传统渔民通过发展水产养殖、兼职运输等多元化生计策略减小洪涝对渔业减产的冲击，但粗放养殖、过度捕捞又反向破坏水域生态韧性，形成“生态–社会”反馈循环。长江口相关研究则表明，航运工程提升航运服务韧性，促进区域经济发展，但也导致湿地生态服务（如水质净化、栖息地供给）韧性下降[36]，凸显不同生态服务间的韧性权衡关系。

二是人类适应行为对韧性的调控作用。人类通过工程措施（如防洪堤、生态修复）与非工程措施（如政策法规、社区参与）调控河口韧性，其效果取决于适应行为与系统特性的匹配度。例如，荷兰开展三角洲的“Room for the River”工程，通过退田还湖、河道拓宽等措施，将“对抗洪水”的工程韧性转化为“适应洪水”的生态–社会韧性，既提升防洪能力，又恢复湿地生态功能[42-43]。反观某些河口的过度围垦，虽然短期内土地资源供给的经济和社会效益得到了提升，但从长期来看，湿地流失，生态韧性下降，将会加剧洪水与盐水入侵风险[6-7, 44]。

三是多尺度韧性的协同与冲突。社会–生态系统韧性具有显著的尺度效应，水库调度属于流域性宏观尺度，航道工程属于区域性中观尺度，养殖活动属于社区性微观尺度，不同尺度的韧性变化常存在区域协同或利弊冲突。例如，河流流域水库群的联合调度（宏观）通过稳定径流提升了航道通航韧性（中观）[45]，但也可能导致河口咸潮入侵频率增加，影响沿岸社区的饮用水安全韧性（微观）[46]，这种跨尺度冲突是韧性管理的关键挑战。

（4）韧性评估与调控

韧性评估是连接理论研究与管理实践的桥梁，调控则是韧性提升的核心手段，相关研究聚焦于以指标体系构建、评估方法创新、调控策略优化实践为导向的技术链条。

在评估指标体系方面，已形成生态–社会–经济三维框架[1]，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、治理能力等因素，各因素间相互作用。例如，生态方面包括湿地面积、生物多样性、水质达标率等指标；社会方面包括人口密度、灾害响应能力、社区参与度等指标；经济方面包括人均 GDP、渔业产值、航运效率等指标。针对不同河口类型，应差异化设定指标体系，例如，潮汐河口需强化潮位变化、泥沙淤积等动力指标。在黄河口三角洲韧性指标体系研究[47-48] 中，研究者将淡水补给量、柽柳群落覆盖度、防洪工程达标率作为核心指标，精准反映了该河口淡水短缺、生态脆弱、洪水风险高的特性。

在评估方法方面，呈现从定性到定量、从静态到动态的发展趋势。早期以层次分析法

(AHP)、模糊综合评价法等静态方法为主[49-50],用于评估系统当前的韧性水平。近年来,数值模拟、情景分析、机器学习等动态方法逐渐成为主导,可预测不同扰动情景下的韧性变化趋势[51]。MIKE 21 数值模型、LSTM 神经网络模型已广泛应用于长江口潮滩湿地生态韧性的动态评估和珠江口社会−生态系统韧性对极端洪水的响应研究[52-53]。

在调控策略方面,形成了工程调控、生态调控、政策调控的综合体系。工程调控聚焦提升系统抵抗性,如航道疏浚、防洪堤加固;生态调控强调恢复系统自我修复能力,如湿地退耕还湿、植被重建;政策调控则通过制度设计协调多方利益主体,如建立跨流域水资源调配机制、制定河口保护区法规,三者结合的多举措协同是未来发展趋势[54]。

2.2.2 河口韧性研究方法体系

观测−预测−评估的方法体系是贯穿河口韧性研究的核心技术框架,三者层层递进、相互耦合,为河口韧性的理论深化与工程实践提供科学支撑。

(1)观测与监测技术

河口韧性研究依赖长时序、高精度的多源数据。观测与监测是河口韧性研究的基础,其核心目标是获取河口系统结构、功能及胁迫因子的多维度、高精度数据,识别系统关键参数的时空演变规律,推动河口韧性研究从局部点观测向全域立体监测升级。

1)观测对象与核心指标

观测对象涵盖自然要素和人类社会要素两大范畴,具体可分为三类核心指标。

系统结构指标:地形地貌(岸线位置、滩涂高程、水下地形)、水文泥沙(潮位、流速、含沙量、输沙率)、生态群落(植被覆盖度、生物多样性、栖息地面积)、工程设施(海堤、闸坝、护岸的完整性与稳定性)[9,55]。

胁迫因子指标:极端气候事件(台风强度、风暴潮增水幅度、降雨强度)、长期环境变化(流域来水来沙量、海平面上升速率、海岸侵蚀速率)、人类活动(围填海规模、污染物排放强度)[10,23,55]。

系统功能指标:防洪排涝能力、纳潮冲淤能力、生态服务功能(碳汇、渔业资源供给、水质净化)、社会经济功能(港口航运、滨海旅游、农业生产)[55-56]。

2)观测技术与方法

在自然要素观测层面,融合多源技术手段可构建 空−天−地−水一体化观测网络[57]。遥感观测维度:依托 Landsat、Sentinel 系列卫星遥感结合无人机遥感,能够实现大尺度、长时序的岸线变迁、植被覆盖、水体浑浊度等指标的动态监测[58];借助合成孔径雷达(SAR)技术可突破云雨天气的观测限制,开展风暴潮等极端事件下的应急观测;通过无人机航测与高光谱技术耦合,可精准获取潮滩植被群落结构数据。地面与水下原位观测维度[59]:通过在潮位站布设流速仪、泥沙采样器、水质监测传感器等设备,可实现河口水深、流速、含沙量的自动化探测,稳定获取定点高频的水文泥沙观测数据;采用 RTK-GPS 结合专业测深仪开展地形剖面测量,能够掌握滩涂与水下地形的冲淤变化规律;依托生态监测样地搭配红外相机,或布设水下传感器阵列,可连续记录植被与生物群落的动态特征,长期监测水质变化、底栖生物活动等微观生态过程。

在人类社会要素观测层面,针对社会经济调查,可通过问卷调查、统计年鉴分析、实地访谈等传统方式,系统收集研究区域人口空间分布、产业结构特征、防灾减灾措施落实情况等核心社会经济数据[57],为量化人类活动对河口韧性的影响提供数据支撑。针对大尺度动态社会经济数据获取需求,可引入大数据技术拓展数据来源。例如,借助船舶自动识别系统(AIS)的公开航行数据,挖掘分析区域船舶的通航规律与活动强度,定量评估航运活动对河口韧性的扰动影响,弥补传统调查方法在动态流动性人类活动监测方面的不足[60]。

3)观测数据的处理与整合

针对多源观测数据存在的异质性问题(包括时空分辨率、数据格式、精度差异),可依托数据同化技术(如集合卡尔曼滤波),实现不同来源数据的标准化融合,构建统一规范的河口系统基础数据库,消除多源数据的适配偏差。在此基础上,进一步通过趋势分析、突变点检测等统计方

法，系统识别河口系统核心参数的长期演变特征与关键动态转折点，为后续河口韧性的模拟预测与综合评估筑牢标准化数据基础。

(2)模拟与预测模型

模拟与预测是河口韧性研究的关键环节，核心目标是基于前期标准化观测数据构建精准数值模型，复演不同胁迫情景下河口系统的动态响应过程，科学预判系统韧性的演变趋势。

1)模型的类型与耦合机制

河口是耦合了水文、泥沙、生态、地貌与人类活动等多种要素的复杂复合系统。数值模型则是解析河口韧性形成机制、预测未来演化方向的核心工具。根据研究尺度与研究对象的差异，当前河口韧性研究常用模型可划分为 3 类。

一是动力地貌模型[6-7,19,24]。以 Delft3D、MIKE 21/3、ECOMSED 等为典型代表，核心功能是模拟潮流、波浪、泥沙输运与地形演变之间的耦合过程，预测海岸侵蚀、滩涂淤涨、河口淤积等地貌单元的动态响应，支撑地形地貌演变对河口韧性影响的评估研究。

二是生态动力学模型[40]。以湿地生态模型(如 SWMM)、生物群落模型(如 BREED)为典型代表，核心特点是将水文过程与生态过程双向耦合，能够模拟植被演替、生物群落变化对外部扰动的响应，解析生态韧性的内在形成机制，实现生态系统的恢复力与抵抗力的定量表征。

三是社会–生态耦合模型。该类模型引入系统动力学(SD)、基于多智能体的 ABM 模型等方法[61]，将自然要素与人类活动(如防洪工程建设、生态修复措施)纳入统一模拟框架，可支撑模拟社会–生态系统的协同演化过程[57]。例如，通过 ABM 模型模拟渔民养殖决策对渔业资源韧性的影响，结合 SD 模型量化分析长期发展中经济开发与生态保护的权衡关系[62]。近年来，数字孪生技术的发展为河口模型应用带来了新突破，实现模型结果的可视化呈现与动态实时更新。例如，长江口数字孪生平台整合多源监测数据与多类模拟模型，可动态实时输出航道回淤量的变化过程，为河口管理决策提供直观、高效的数据支撑[54]。

针对多尺度模型的衔接问题，当前普遍采用“由大向小”与“自上而下”相结合的耦合策略，实现宏观“流域–河口”尺度与微观“滩涂–潮沟”尺度的模型嵌套，有效提升预测结果的精度与实际适用性。

2)情景设置与扰动模拟

预测环节的核心是通过设置基准情景与不同胁迫情景开展对照，量化分析不同情景下河口系统的响应差异。基准情景：设定为无新增极端事件、无大规模人类活动扰动的自然演变情景，作为后续河口韧性量化评估的参照基准。胁迫情景：可进一步划分为单一胁迫和复合胁迫，其中，单一胁迫聚焦单一因子的扰动影响，如百年一遇风暴潮、海平面上升 0.5 m 等；复合胁迫则是多因子叠加的扰动，如台风、暴雨、风暴潮三碰头的极端灾害以及海平面上升、流域来沙减少、围填海多过程长期叠加等，用于模拟不同强度、不同类型的极端与长期扰动下，河口系统结构与功能的动态变化。

3)预测结果的输出与分析

基于情景模拟得到的预测结果，需重点明确两个核心内容：一是识别河口系统从稳定向不稳定转变的临界胁迫阈值(如滩涂高程低于某临界值后植被会发生不可逆退化)，明确河口韧性的临界边界；二是模拟生态海堤建设、滩涂修复等不同韧性提升措施下的河口系统恢复轨迹，为制定韧性优化方案提供科学依据。

(3)评估与量化方法

综合评估是河口韧性研究的最终落脚点，也是直观呈现河口韧性特征的核心环节。该环节核心逻辑是依托标准化观测数据与情景模拟预测结果，构建适配河口特征的科学评估指标体系，量化河口韧性整体水平，识别河口系统存在的韧性短板。根据评估逻辑的差异，当前河口韧性的表征与量化研究可分为两类：一类是聚焦演化过程的形成性韧性评估，另一类是聚焦当前格局状态的总结性韧性评估[29]。

1)评估方法与量化模型

基于状态的总结性韧性评估，也可称为基于指标的综合评估法。该方法通过层次分析、熵权、主成分分析等方法计算河口韧性综合指数，实现河口系统韧性水平的定量化表征，尤其适用

于不同河口之间韧性水平的横向对比研究[63]。另一类基于过程的形成性韧性评估，即基于过程的情景分析法，通过设定不同强度的扰动情景（如海平面上升 1 m、围垦面积增加 10%），模拟河口韧性的动态变化轨迹，进而识别韧性演化的关键调控节点[29,64]。

完整的河口韧性评估流程，涵盖指标权重确定、韧性指数计算、韧性分级与空间分异识别 3 个核心环节[65]。指标权重确定：通常采用层次分析法（AHP）、熵权法、主成分分析（PCA）法等，结合专家经验与数据客观特征，确定各指标的权重，最大程度地避免单一主观或客观赋值带来的偏差[66]。韧性指数计算：通过构建多指标综合评价模型，将各指标标准化处理后加权求和，得到河口韧性综合指数，也可采用 TOPSIS 法、模糊综合评价法，处理指标本身存在的模糊性与不确定性问题，提升评估结果的可靠性。韧性分级与空间分异识别：根据计算得到的韧性指数取值范围，将河口韧性划分为高、中、低 3 个等级，再结合空间插值技术[67] 绘制河口韧性空间分布图，识别侵蚀严重岸段、生态退化区域等韧性薄弱区域，为后续韧性提升指明方向。

2）评估结果的验证与优化

评估结果的可靠性需通过历史案例反演与模型预测校验双重验证。一方面选取已发生的典型历史极端事件（如某次强台风过程），反演事件前后河口韧性的动态变化，以此检验评估指标体系与数学模型的合理性；另一方面将验证后的评估结果反向反馈至前端观测与模拟预测环节，实现观测指标与模型参数的迭代优化。在韧性调控策略的优化层面，多目标优化模型（如 NSGA-Ⅲ）已得到广泛应用。该模型可在生态保护、经济发展、灾害防控等多目标约束下，寻优得到兼顾多端需求的河口韧性调控方案，最终形成观测−预测−评估−优化的完整闭环研究体系[57]。

2.3 韧性提升策略与技术

2.3.1 增强空间规划冗余布局设计

针对河口韧性提升，可通过空间规划强化系统布局冗余性，从规划层面实现功能合理布局、资源冗余替代和多级防护构建等（表 1）。

表 1 河口韧性提升策略与技术

Tab.1 Strategies and technologies for estuary resilience enhancement

策略类型	核心目标	关键技术/措施
增强空间规划冗余布局设计	优化河口空间布局	陆海统筹空间规划、生态红线划定与管控、河口功能区优化布局、洪水预留空间、恢复河口湿地/洪泛区等
	实现工程布局冗余	三角洲多层级屏障、航运网络格局构建、生态友好型产业培育、应急保障与服务产业发展
提升河口自身的物理韧性与生态效应	提升防护工程物理本质韧性	河口风险灾损模式与机理研究、韧性防护工程设计
	构建生态友好型防护体系	生态海堤构建（植被护岸、人工鱼礁、生态护面）、海岸带生态缓冲带修复、潮滩与红树林协同防护
	提升自然防护能力与生态服务功能	潮滩湿地重构、泥沙补抛与潮沟修复、盐沼与红树林植被恢复等
构建智慧监测与预警预报系统	实现河口多要素、实时精准监测	河口海岸一体化观测网（空天地海立体监测）、多源数据融合与智能分析等
	实现灾害风险精准预警预报	机器学习与数值模拟预警模型、无人机应急溯源与处置等
	形成智慧化管理平台，提升河口管理效率与决策科学性	河口数字孪生技术、韧性评估与决策支持系统等
完善长效管理与多元主体协同的制度体系	建立日常管理长效机制	与日常管理、维护相匹配的管理制度的制定与修订
	构建多元主体协同与风险分担机制	跨区域/跨部门协同治理机制、风险共担与利益共享机制
	提升区域整体风险抵御能力，实现韧性共建共享	社区韧性教育与培训、利益相关者参与式规划、区域韧性共建技术与政策体系

空间冗余布局设计往往需要在规划阶段进行，一方面通过科学的空间功能布局优化河口系统抗扰本底，依托多元主体协同的风险分担机制破解跨区域治理困境，实现河口自然−工程−社会

复合系统的风险有效防控、核心功能维持与长期可持续发展[55,68]。例如，在土地利用规划中预留洪水调蓄空间，可有效提升河口系统的“淹水容受力”，恢复河口自然湿地与洪泛区，联动建设河口型韧性海绵城市，均能发挥滞洪蓄水、削减洪峰的天然调蓄作用，从功能层面提升系统韧性。另一方面，通过工程布局的冗余设计，构建多路径、可替代的功能冗余系统，避免单点设施失效引发的整个河口系统的功能崩溃。例如，长江口当前推动构建的“一主（北槽深水航道）两辅（南槽航道、北港航道）”多汊通航格局，便是提升航运网络韧性的典范[54]。将三角洲区域的堤防、海塘、水闸、泵站等人工工程有机组合，结合湿地、蓄滞洪区等自然调蓄空间，可形成层级衔接、功能互补的多层级防洪屏障，大幅提升河口应对风暴潮、洪水等灾害的韧性水平[68]。

2.3.2　提升河口自身物理韧性与生态效应

河口韧性提升的核心关键，在于河口自身物理韧性的提升与优化（表 1）。为抵御风暴潮、台风浪等极端天气对河口带来的突发灾害风险，传统韧性提升策略多遵循工程学思维，核心思路是通过硬件工程防护设施提升河口及其沿海区域的灾害防御能力，降低外部风险的冲击强度，即“防御型策略”。传统硬质堤防虽坚固，但其建设往往会割裂河口陆海间的生态连通性，且长期受水流冲刷易发生结构失稳，导致局部工程失效问题。对此，需在清晰掌握河口风险灾损模式与形成机理的基础上，融合生态友好、施工便捷的现代工程理念，开展适配河口特征的韧性防护工程设计，在提升工程本质韧性的同时兼顾生态效益。例如，斜坡式植物蜂巢、生态型四脚空心方块等新型护面结构[69]，以及双排圆筒透空式防波堤[70]，既可以发挥消波缓流、稳定滩涂的工程防护作用，又能为本土生物提供栖息空间，促进滩涂泥沙自然淤积，助力河口生态系统实现自我修复。这类生态型结构目前已在长江口深水航道等多个重大工程中得到成功应用[71-72]。

在提升河口防护工程物理本质韧性的同时，还需同步强化河口原生系统的自然物理韧性，例如，可通过河口生态基底修复、潮滩湿地重构、原位泥沙补抛与潮沟地形修复，提升河口的自然防护能力与生态服务功能；同时，通过削减陆源污染输入改善河口水环境质量，降低长期人类活动带来的生态胁迫。

2.3.3　构建智慧监测与预警预报系统

河口韧性的持续提升，离不开对系统状态的实时感知与风险快速响应能力的建设（表 1）。例如，依托无人机自动巡检、全域视频监控网络、多时序卫星遥感等技术手段，为河口防护工程建立全生命周期的数字孪生模型或动态影像档案，实现风险隐患的早识别、早预警。目前，长江口已建成涵盖 13 个浮标站、5 个平台站的现场监测体系，形成了可全面、连续、实时采集航道水文、气象要素的一体化监测网络（图 2）。

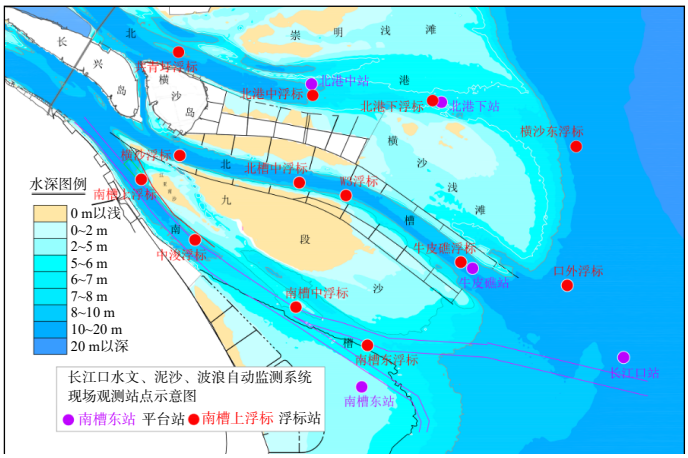


图 2　长江口现场监测系统

Fig. 2　Station layout for the on-site monitoring system at the Yangtze River Estuary

构建智慧监测与预警系统的核心目标，是依托全要素、高精度、实时化的智慧监测网络，搭建基于实时动态数据的预警预报系统，整合形成统一的河口智慧化管理平台，最终实现对河口多要素、精细化、动态化管控（表 1）[71-72]。再配以动态调整、闭环管理、风险导向的现代管理机制，可推动河口系统管理从传统的“被动应对扰动”向“主动适应变化”转型[54]。

2.3.4 完善长效管理与多元主体协同的制度体系

构建以全过程河口韧性提升长效机制为统领的完整制度体系，健全覆盖全面、运转有序、高效协同的河口韧性管理工作机制，有效保障河口自然–工程–社会系统实现风险防控、核心功能稳定维持与长期可持续发展[55-68]，具体可从以下三方面推进（表 1）。

首先，完善日常管理长效制度，建立适配河口韧性管理的日常长效机制。结合河口日常养护、安全管理与应急处置的实际需要，制定/修订与之相匹配的管理制度；严格对标国家、部委及地方省市相关规范要求，从规划、设计、施工、运行到管理全流程，制定落实河口韧性提升长效机制的具体实施细则，保障各项工作有章可循。其次，搭建跨部门、跨领域的多元主体协同工作机制，推动交通、海事、气象、水利、自然资源等多部门加强对接协调、信息沟通，形成覆盖规划建设、日常运维、安全监管、应急处置全链条的协同治理体系，破解跨区域、跨部门治理碎片化问题。

此外，还可以通过开展社区层面韧性宣传教育与技能培训、推行利益相关者参与式规划、搭建区域韧性共建的技术与政策共享体系，充分调动全社会参与河口韧性建设的积极性，系统性提升区域整体风险抵御能力，最终实现河口韧性共建共享。

2.4 当前不足与未来发展

综合前述分析可知，尽管当前河口韧性研究已取得显著进展，但仍存在如下几方面不足。

一是跨系统耦合机制解析深度不足。现有研究多孤立开展生态或社会单个子系统分析，对动力过程、自然地貌、生物响应、人类行为多系统的深层耦合互动机制解析不够充分，尤其缺乏不同尺度韧性传导效应与反馈规律的系统性研究。

二是韧性评估的不确定性缺乏量化框架。气候变化情景预设误差、人类活动扰动随机性、指标权重赋值主观性等因素，均会影响评估结果的可靠性，目前该领域内仍缺乏统一标准化的不确定性分析框架。

三是研究方法体系集成度偏低。观测技术、模拟模型、评估方法 3 个环节之间存在明显数据壁垒。例如，遥感监测数据与数学模型数据接口不统一，难以真正实现“数据–模型–评估”的全链条无缝衔接。

四是理论研究与实践转化存在脱节。多数韧性评估仍停留在学术研究层面，提出的调控策略或方案缺乏实际可操作性，未充分对接管理部门的决策需求与利益相关者的参与意愿，难以落地应用。

五是多目标协同与跨域治理存在难点。例如，防洪、航运、生态保护、土地利用等多目标之间存在固有冲突，如何量化权衡不同维度的韧性需求，实现河口系统整体韧性最优，仍是决策层面的核心问题。此外，河口管理通常涉及水利、交通、生态环境、自然资源等多个部门，跨越不同省市的行政区域，条块分割的传统治理模式难以支撑系统性韧性建设所需的跨域协同行动。

因此，未来河口韧性研究需聚焦机制解析、方法创新、实践应用三位一体的整合路径，主要发展方向集中在以下几个方面。

第一，深化河口–生态–社会系统耦合韧性机制研究。需从海陆统筹、多尺度协同的整合视角下开展研究，重点解析流域、河口、海洋（近海）联动过程中韧性的跨空间传导机制，以及超强台风、特大洪水等极端事件下，跨系统韧性的阈值效应与状态突变机制。同时可借助宏基因组、代谢组等多组学技术结合大数据分析方法，从微观层面揭示生物群落与环境因子、人类活动的耦合机制，建立宏观动力过程–微观生物响应–人类社会适应的整合理论框架，刻画河口系统对自然扰动与人类活动的响应、适应机制，为量化河口韧性、解析河口–生态–社会系统耦合路径提供精准理论支撑。

第二，构建多源融合的河口韧性评估与预测体系。整合卫星遥感、无人机航测、物联网原位

监测等多源观测技术，建立统一标准规范的河口韧性基础数据库，破除多源数据之间的格式壁垒；依托人工智能、大数据挖掘技术，发展模拟模型、统计模型、AI 模型三者耦合的混合模拟方法，例如，将传统水动力模型与深度学习模型结合，既可以保留物理过程的力学基础，又能借助 AI 提升极端情景下的韧性预测精度，增强对河口系统行为的模拟与预警能力；同时引入贝叶斯不确定性分析方法，量化评估全流程中的各类误差来源，系统性提升评估与预测结果的可靠性。

第三，发展智慧化的韧性调控技术与落地实践模式。依托数字孪生技术构建河口韧性智慧管理平台，实现实时监测、动态模拟、科学评估、精准调控的全过程实时闭环研究，赋能河口韧性的动态管控；探索适配河口特征的自然–工程–社会协同韧性提升模式，如生态修复与社区参与一体化的潮滩湿地韧性提升方案、跨区域联防联控的洪水灾害韧性管理机制；同时强化典型案例的总结提炼，归纳不同类型河口可复制的韧性调控范式，推动学术理论成果向管理政策与工程实践高效转化。

第四，强化跨学科合作与国际协同网络建设。河口韧性研究涉及生态学、水动力学、社会学、管理学等多个学科领域，同时河口兼具承上启下的区位特征，上接流域来水来沙，下连通海岸、近海海洋，因此需要推动流域–河口–海洋（近海）全链条整合，同时打破生态学、水动力学、社会学、管理学等多学科的领域壁垒，推动多视角、多维度的交叉融合研究；针对海平面上升、风暴潮增多、全球气候变暖等事关河口韧性的全球性问题，需进一步深化国际科研合作，推动跨区域观测数据与研究成果开放共享，共同搭建全球河口韧性评估与调控协作网络。

在此基础上，还需推动共建、共享的协同治理模式，构建跨部门、跨区域、跨学科的常态化协作平台，同时深入推动公众参与和社区赋能，让河口韧性建设真正成为全社会共同参与的责任与行动。

3　结 论

河口作为海陆交互作用的关键界面，同时承载着重要的生态服务功能与社会经济价值，当前正面临气候变化与高强度人类活动的双重胁迫，系统脆弱性日益加剧。河口韧性研究是应对全球变化与人类活动双重挑战的核心科学议题，标志着河口管理理念从单纯追求绝对稳定、零风险的传统“防御型”范式，向以“韧性”为导向的“人与自然和谐共生型”新范式转变。

本文系统梳理了韧性理论发展与演化过程，解析了当前学界关于河口韧性内涵、核心研究内容、方法体系等方面的研究进展，探讨了河口韧性提升策略与技术。在此基础上，深入剖析了当前研究在跨系统耦合机制解析、多方法集成应用、理论成果实践转化等方面存在的不足，最后结合智慧技术发展与全球变化的时代背景，提出未来河口韧性研究需聚焦机制解析、方法创新、实践应用三位一体的整合发展路径。研究成果可为河口韧性提升与管理实践提供理论参考与技术支撑，助力实现河口区域生态保护与社会经济发展双赢。

参考文献：

[1] 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.

[2] 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.

[3] 凡姚申, 窦身堂, 裴洪杨, 等. 大河三角洲侵蚀灾害与应对策略研究进展 [J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 12-25.

[4] 朱勇辉, 李梦雨, 栾华龙, 等. 河口海岸堤防安全风险评估及预警研究与展望 [J]. 长江科学院院报, 2025, 42(6): 1-7.

[5] 解思梅, 魏立新, 郝春江, 等. 南极海冰和陆架冰的变化特征 [J]. 海洋学报, 2003, 25(3): 32-46.

[6] 解思梅, 邹　斌, 王　毅, 等. 南极海冰变化异常与全球海平面变化 (英文)[J]. 冰川冻土, 1998, 20(4): 473-480.

[7] 王　慧, 全梦媛, 徐卫青, 等. 中国沿海和近海海平面上升预测 [J]. 海洋学报, 2023, 45(8): 1-10.

[8] 赵宗慈, 罗　勇, 黄建斌. 全球变暖和海平面上升 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(6): 700-703.

[9] Su Q X, Li Z Q, Li G C, et al. Coastal erosion risk assessment of Hainan Island, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023, 42(7): 79-90.

[10] Lai X H, Zeng C Q, Su Y, et al. Vulnerability assessment of coastal wetlands in Minjiang River Estuary based on cloud model under sea level rise[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023, 42(7): 160-174.

[11] 谢冬梅, 潘军宁, 王红川, 等. 考虑海平面上升影响的极值水

位计算 [J]. 海洋学报, 2023, 45(4): 17-30.

[12] Cao C, Mao Z J, Cai F, et al. Dynamic geomorphology and storm response characteristics of the promontory-straight beach: a case of Gulei Beach, Fujian[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023, 42(7): 64-78.

[13] 苗丽敏, 杨世伦, 朱 琴, 等. 风暴过程中潮滩悬沙浓度和悬沙输运的变化及其动力机制: 以长江三角洲南汇潮滩为例 [J]. 海洋学报, 2016, 38(5): 158-167.

[14] 张 妮, 孙木子. “黄金水道”的韧性密码: 长江口航道管理局韧性航道建设实践探索 [N]. 中国水运报, 2025-09-29(01).

[15] Deng J J, Yu H Z, Zhang Y, et al. Balancing physical and human-driven morphodynamic changes: insights from the Pearl River Estuary[J]. Earth’s Future, 2025, 13(8): e2025EF005965,

[16] Lin S C, Niu J W, Liu G P, et al. Variations of suspended sediment transport caused by changes in shoreline and bathymetry in the Zhujiang (Pearl) River Estuary in the wet season[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2022, 41(10): 54-73.

[17] 黎奕宏, 雷 刚, 蔡 锋, 等. 我国硬式护岸、渔港工程和人工岛等 3 类典型海岸工程对相邻海滩的影响研究 [J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(1): 118-125.

[18] 岳娜娜, 吴建政, 朱龙海, 等. 离岸人工岛对砂质海岸的影响 [J]. 海洋地质动态, 2008, 24(4): 18-22.

[19] Yang J J, Dai Z J, Mei X F, et al. Wetland gain and loss in the Mississippi River bird-foot delta[J]. Earth’s Future, 2025, 13(6): e2024EF005003.

[20] 丁喜桂, Menclelssohn I A, 王吉松. 美国密西西比河三角洲湿地流失的原因及修复措施 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(2): 61-65.

[21] Qiu W, Zhu J R, Luan H L, et al. Saltwater intrusion and emergency freshwater release in the Changjiang River estuary under extreme drought conditions[J]. Water Resources Research, 2025, 61(8): e2025WR040033.

[22] 裘 诚, 朱宜平, 朱建荣. 长江口咸潮入侵格局变化及其成因 [J]. 热带海洋学报, 2026, 45(2): 42-58.

[23] 顾靖华, 朱建荣, 裘 诚, 等. 长江河口盐水入侵长期演变分析 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2021(6): 174-186.

[24] Haque C E, Jakariya M, et al. Bengal delta, *Char*land formation, and riparian hazards: why is a flexible planning approach needed for deltaic systems?[J]. Water, 2023, 15(13): 2373.

[25] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.

[26] ISO 22300: 2021. Security and resilience: vocabulary[S].

[27] GB/T 44483—2024 安全与韧性 术语 [S].

[28] 刘永超, 张海涛, 应 超, 等. 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 [J]. 海洋通报, 2024, 43(3): 415-425.

[29] 中国环保协会. 荷兰治水之道: 从“与水斗争”到“与水共生 ” [EB/OL]. [2024-08-05]. http://zhb.org.cn/gjhb/gjhb_2/2024-08-05/20142.html.

[30] 王宗祺, 张路峰. 从抵御到接纳: 荷兰填海造地实践中基于自然的解决方案 [J]. 新建筑, 2024(2): 72-77.

[31] Folke C. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.

[32] 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.

[33] Sajjad M, Li Y F, Tang Z H, 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.

[34] 郭磊城, 朱 磊, 陈 语, 等. 河口航道治理中导堤丁坝工程措施的影响探讨 [J]. 泥沙研究, 2021, 46(4): 54-59.

[35] Peng Y T, Welden N, Renaud F G. Incorporating ecosystem services into comparative vulnerability and risk assessments in the Pearl River and Yangtze River Deltas, China[J]. Ocean & Coastal Management, 2024, 249: 106980.

[36] 何 青, 朱春燕, 郭磊城, 等. 变化条件下长江口沉积地貌系统转型与应对 [J]. 中国水利, 2024(16): 12-19.

[37] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(5): 625-636.

[38] 张荷悦, 周 怡, 孙 涛, 等. 潮滩生物−物理互馈机制与系统稳态效应研究进展 [J]. 科学通报, 2023, 68(5): 457-468.

[39] Zhang H Y, Sun T, Zhou Z, et al. Increased River flow enhances the resilience of spatially patterned mudflats to erosion [J]. Water Research, 2022, 220: 118660,

[40] 粟 丽, 徐姗楠, 李纯厚, 等. 丰水期珠江口浮游植物群落结构特征及其环境影响因子分析 [J]. 南方水产科学, 2025, 21(1): 46-54.

[41] Ahmed N, Bunting S W, Rahman S, et al. Community-based climate change adaptation strategies for integrated prawn-fish-rice farming in Bangladesh to promote social-ecological resilience[J]. Reviews in Aquaculture, 2014, 6(1): 20-35.

[42] Sien K, Lars H, Solen le Clec’h, et al. Room for the River: An extended cost benefit analysis of integrated river-floodplain management for the Rhine in the Netherlands[J]. Ecosystem Services, 2026, 78: 101830,

[43] Klijn F, Asselman N, Wagenaar D. Room for rivers: risk reduction by enhancing the flood conveyance capacity of The Netherlands’ Large Rivers[J]. Geosciences, 2018, 8(6): 224.

[44] van Loon M P, Hijbeek R, ten Berge H F M, et al. Impacts of intensifying or expanding cereal cropping in sub-Saharan Africa on greenhouse gas emissions and food security[J]. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3720-3730.

[45] 何中政, 周建中, 贾本军, 等. 基于梯度分析法的长江上游水库群供水−发电−环境互馈关系解析 [J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 601-610.

[46] 金　智, 朱建荣, 仇　威. 长江流域梯级水库夏末秋初蓄水对河口盐水入侵和淡水资源的影响 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2024(1): 90-103.

[47] Ji H Y, Chen S L, Pan S Q, et al. Morphological variability of the active Yellow River mouth under the new regime of riverine delivery[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 329-341.

[48] Li J Q, He W J, Jiang E H, et al. Spatio-temporal evaluation of water resources system resilience and identification of its driving factors in the Yellow River Basin[J]. Water, 2024, 16(3): 414.

[49] Cutter S L. The landscape of disaster resilience indicators in the USA[J]. Natural Hazards, 2016, 80(2): 741-758.

[50] 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.

[51] 盖　美, 曾安琪, 徐玉梅, 等. 多要素匹配对中国海岸带韧性的影响机制及仿真模拟 [J]. 地理学报, 2025, 80(4): 1031-1051.

[52] 易　思, 谭金凯, 李梦雅, 等. 长江口海平面上升预测及其对滨海湿地影响 [J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(6): 598-605.

[53] Zheng J X, Huang G R. Towards flood risk reduction: commonalities and differences between urban flood resilience and risk based on a case study in the Pearl River Delta[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 86(10): 3568-3582.

[54] 赵洪波, 高　敏. 长江口航道体系建设与创新发展思考 [J]. 水道港口, 2025, 46(6): 813-824.

[55] 孟海星, 王从春, 叶属峰. 景观格局视角下的海岸带空间韧性: 内涵特征、关键要素与提升路径 [J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(12): 2124-2137.

[56] 陈崇贤, 禹舜尧, 李志雄, 等. 海岸带韧性景观理论与实践研究进展 [J]. 风景园林, 2023, 30(5): 19-27.

[57] 韩广轩, 毕晓丽, 侯西勇, 等. 中国海岸带生态屏障: 概念、功能与建设理论 [J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(12): 2113-2123.

[58] Tian B, Zhou, Y X, Thom R M, et al. Detecting wetland changes in Shanghai, China using FORMOSAT and Landsat TM imagery[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1-10.

[59] 张家豪, 周丰年, 程和琴, 等. 多模态传感器系统在河槽边坡地貌测量中的应用 [J]. 测绘通报, 2018(3): 102-107.

[60] 姚　鑫, 牟军敏, 张行健. 基于 AIS 数据的长江口船舶排放清单研究 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1510-1514.

[61] 吕　鹏. 计算社会科学中仿真模拟的三个发展阶段 [J]. 清华社会学评论, 2022(1): 38-59.

[62] Yang A J, Yuan S L, Kang Y. Fast anthropogenic environmental change can cause the collapse of fishery ecosystems[J]. Journal on Applied Mathematics, 2025, 85(5): 2242-2268.

[63] Zhang H T, Liu Y C, Li J L, 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.

[64] Wu J H, Liang S L. Assessing terrestrial ecosystem resilience using satellite leaf area index[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 595.

[65] ZAMPIERI M. Reconciling the ecological and engineering definitions of resilience[J]. Ecosphere, 2021, 12(2): e03375.

[66] 古雄杰, 邓建明, 曾　剑, 等. 活力海岸概念辨析及评价指标体系构建 [J]. 中国环境科学, 2024, 44(6): 3387-3394.

[67] 中交公路规划设计院有限公司. 公路安全韧性提升技术指南 (试行)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2025.

[68] 张卫国, 侯立军, 彭　忠, 等. 面向可持续发展方案的三角洲研究趋势与展望 [J]. 中国科学基金, 2024, 38(6): 946-953.

[69] 季则舟. 基于与环境相协调的韧性海岸工程建设策略 [J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 830-837.

[70] 易雨君, 刘　奇, 王雪原, 等. 生态海岸防护工程研究进展与展望 [J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 806-812.

[71] 石　进, 陈　琳, 陈复奎. 长江口航道整治建筑物修复实践 [J]. 水道港口, 2021, 42(4): 517-523.

[72] 左书华, 冯小香, 赵德招, 等. 长江口航道治理研究进展与展望 [J]. 水道港口, 2026, 47(1): 1-13.