

◆海洋科学◆

海岸带动态演变与韧性研究进展*

朱钰^{1,2,3},周赢涛^{1,3,4},薛玉龙^{1,2**},冯曦³,冯卫兵³

(1. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室,海南海口 570206;2. 海南省海洋地质调查院,海南海口 570206;3. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098;4. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海 200125)

摘要:海岸带作为海陆缓冲地带,长久以来发挥着保护陆域免受海洋灾害影响的重要作用。在遭受灾害带来的外界干扰时(例如风暴、海平面上升、海岸线侵蚀等),海岸带系统具备抵抗、恢复及适应负面影响的能力,这种与变化环境相适应的能力被称为海岸带韧性。然而人类文明发展以来,长期大规模的干扰活动削弱了海岸带韧性,破坏了海岸带动态演变过程中动力地貌的平衡。因此,本文从海岸带地貌演变的特征展开,总结现有的海岸带侵蚀机理研究成果,指出研究方法中存在的问题和不足,并对目前热点的海岸带韧性与灾后恢复机理研究进展进行梳理,同时结合近年来新兴研究方向指出现有研究内容的不足之处,最后展望了“海洋十年行动计划”背景下海岸带综合开发与管理的趋势。

关键词:海岸带;海岸带韧性;海岸地貌演变;动态平衡;海洋十年行动计划

中图分类号:P748 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)02-0205-08

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240619.001

海岸带面积虽然只占全球海洋面积的7%,但是其生物资源丰富、生态系统多样,贡献了全球25%的海洋初级生产力,渔获量和物种丰度更是分别高达86%和97%,是海洋“蓝碳”的主要埋藏区。目前,全球50%以上人口生活在海岸带地区,所贡献的GDP占全球的50%^[1]。全球海岸线总长超过975 168 km,我国作为海洋大国,拥有18 000 km的大陆海岸线和14 000 km的岛屿海岸线^[2]。海岸带作为海陆

之间的缓冲区,对抵御外海的极端风浪事件起到至关重要的作用,而人类活动与海岸带密切相关,人类活动影响着河口海岸带演变的形态与速率。受全球海平面上升影响,长时间尺度下全球海岸带正处于逐渐侵蚀退的趋势,但中短期尺度下海岸带则呈现冲淤交替的动态演变特征。自文明发生以来,人类对海洋的开发和冲突不可避免地在海岸带上演,特别是近50年来,海岸带社会经济的迅猛发展使得人口快速向海岸

收稿日期:2023-02-08

修回日期:2023-03-16

* 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放基金项目(22-HNHYZZYHJKFO28),海南省科协青年科技英才创新计划项目(QCXM202008)和海南省自然科学基金青年基金项目(421QN369)资助。

【第一作者简介】

朱钰(1983—),男,高级工程师,主要从事环境科学(海洋遥感方向)研究,E-mail:29849600@qq.com。

【通信作者简介】**

薛玉龙(1983—),男,高级工程师,主要从事海洋地质科学与工程方面研究,E-mail:xue_yulong2007@163.com。

【引用本文】

朱钰,周赢涛,薛玉龙,等. 海岸带动态演变与韧性研究进展[J]. 广西科学,2024,31(2):205-212.

ZHU Y,ZHOU Y T,XUE Y L,et al. Research Progress on Dynamic Evolution and Resilience of Coastal Zones [J]. Guangxi Sciences,2024,31(2):205-212.

带聚集, 涉海活动加剧, 再叠加升温、海平面上升等全球气候变化的影响, 给海岸带生态系统带来了巨大的压力, 海洋环境问题日益突出。

从 1984—2015 年全球的海岸带演变情况来看, 除北美太平洋沿岸、东非沿岸、里海沿岸外, 全球大部分大陆的陆域面积的减少量大于海岸带面积的增加量, 说明人类的永久居住地面积面临不断缩减的风险 [图 1(a)]; 在全球大部分区域, 陆域纵深减少量中的一部分转化为海岸带宽度增加量, 但同时期陆域纵深的减少量和海岸带宽度的增加量并不相等, 在北美太平洋沿岸、东非沿岸、里海沿岸, 陆域纵深的减少量小于海岸带宽度的增加量, 说明海岸带扩张的程度超过了陆域后退的程度, 陆域人口聚集地遭受海洋灾害的风险正逐步增加。总的来看, 陆域面积和海岸带宽度变化最大的是里海沿岸 (陆域面积减少 $2\ 880\ \text{m}^2$, 海岸带面积增加 $3\ 370\ \text{m}^2$, 陆域纵深减少 $593\ \text{m}$, 海岸带宽度增加 $696\ \text{m}$), 其次是南亚沿岸 (陆域面积减少 $3\ 590\ \text{m}^2$, 海岸带面积增加 $3\ 160\ \text{m}^2$, 陆域纵深减少

$90\ \text{m}$, 海岸带宽度增加 $82\ \text{m}$) [图 1(b)]。此外, 东非、里海、南亚、澳大利亚、亚洲太平洋沿岸的平均陆域纵深均减少了 $30\ \text{m}$ 以上, 全球 50% 以上的陆域和海岸带变化发生在亚洲和里海沿岸。

在过去的几十年, 海岸带演变不仅受制于自然因素 (诸如极端灾害及其后的常浪恢复), 而且也由于人类的频繁活动 (诸如填海围垦、修建水工建筑物), 导致其局部区域原本稳定的动力地貌平衡状态被破坏, 产生淤积和冲刷。因此, 本文从海岸带动力地貌的特征展开, 对现有的海岸带侵蚀动态演变特征的研究成果进行总结, 归纳整理常用的海岸带研究方法及相应的结论, 指出现有研究中存在的问题和不足; 对目前热点的海岸带韧性与灾后恢复机理研究成果进行总结, 并列举出研究不足之处; 结合近年来新兴研究方向指出现有研究内容的不足之处, 指明未来海岸带研究的重点方向, 展望“海洋十年行动计划”背景下海岸带综合开发与管理的趋势。

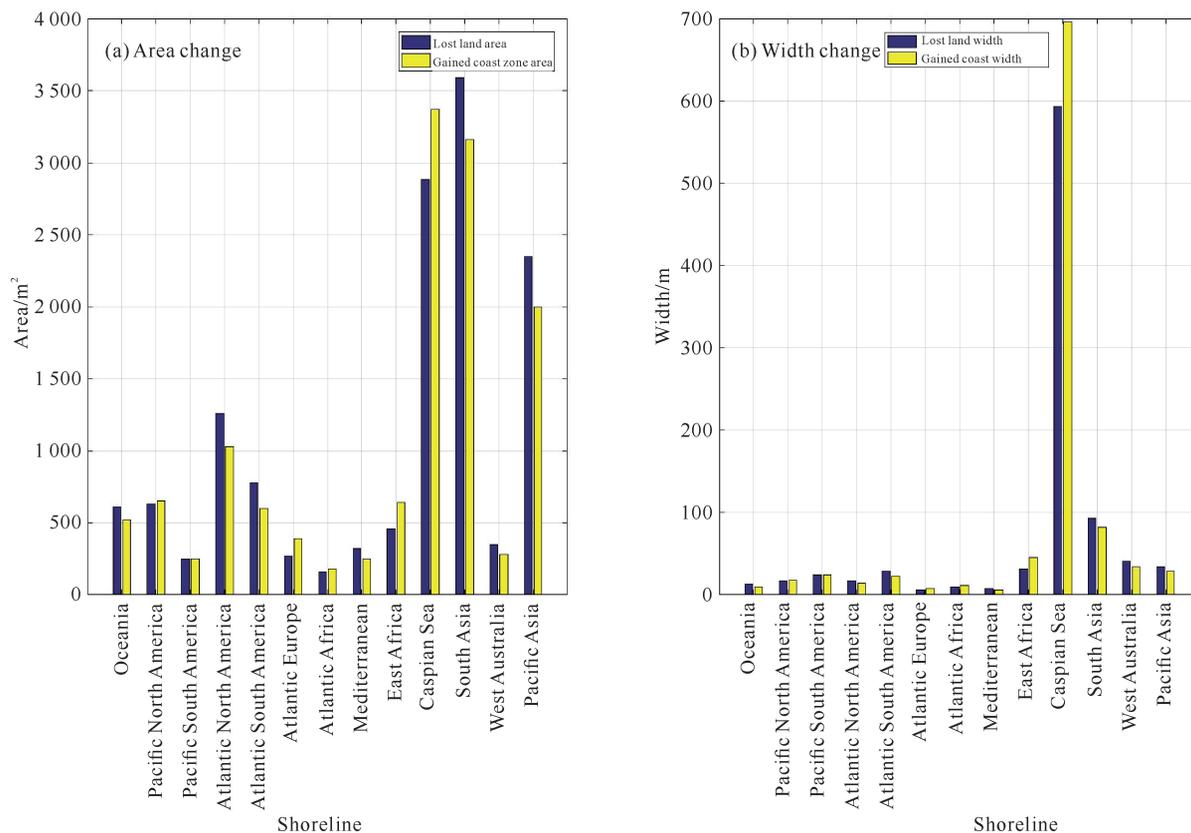


图 1 1984—2015 年全球海岸带演变情况 (修改自 Mentaschi 等^[3])

Fig. 1 Shoreline evolution in global scale between 1984 and 2015 (modify from Mentaschi, et al^[3])

1 海岸带动态演变特征及研究方法

1.1 海岸带基本类型

自然海岸地貌按其物质组成主要可分为基岩海岸、砂质海岸与淤泥质海岸等^[3,4]。基岩海岸近岸水深较深且风浪作用较强,其近岸坡度陡,地貌形态发育成为风蚀或海蚀形态,外力作用如风、浪及内部作用如降雨渗透等缓慢侵蚀是引起其碎岩崩塌的主要动力^[5]。砂质海岸在全球分布广泛,且平面线形多为弧形,其坡度较缓,为1:20—1:50,近岸主要受波浪动力控制,台风、涌浪、风暴潮作用也会造成短时间内的水面雍高和波浪紊动加剧引起的侵蚀^[6]。淤泥质海岸主要分布于河口三角洲区域,分布集中连片,其坡度可缓达1:500—1:2000,主要地貌控制要素为潮流和涌浪^[7]。砂质海岸和淤泥质海岸约占全球岸线总长的80%,多处于人口聚集区,因此开展针对上述两种海岸类型的演变研究显得尤为重要。

1.2 海岸带动态演变影响因素

从年际角度来看,海岸带受海洋气候、大洋环流、常年风浪的大小和方向、地貌边界形态等综合作用的影响;而年内的动力地貌变化则受风浪方向、涨落潮和极端事件等非线性要素及其相互间因叠加或耦合而产生的放大效应的影响,这些因素导致中短期海岸地貌演变具有一定的偶然性。影响海岸带动态演变的主要动力参数的定量化成为当下研究海岸带地貌侵蚀与修复的重难点。本文重点聚焦极端天气事件中风、浪、流综合作用引起的海岸带动态变化过程。海岸带动态变化程度不仅与极端天气发生的强度、频次及周期性有关,还与其自身岸滩坡度、泥沙粒径及岸线形态等特征因素密切相关。

1.3 砂质海岸带演变研究方法及结论

年、月际等中长时间尺度的砂质海岸带演变的主要研究方法有实地观测、数值模拟;日际等短时间尺度的研究方法主要有物理模型试验、数值模拟。研究普遍认为,波浪作用下的床面剪切力是引起沙滩地貌改变的动因,导致海滩剖面在沙坝剖面(风暴剖面)和滩肩剖面(常浪剖面)之间循环演变。基于上述认识,人工沙坝养滩被广泛运用于砂质海岸的修复工程^[8],该方法使波浪在离岸较远处破碎,不仅消减了波能,而且还能利用破波所形成的水平环流加强填砂的向岸运输。岸线平直的海滩在近岸流作用下易塑造出分布规律的沿岸沙坝和离岸流沟槽;而对于分布更广的弧形岸线海滩,其剖面冲淤存在沿岸差异性,近岸

波生环流的强度和方向也随着入射条件发生较大变化,导致剖面演变不单单呈现出沙坝-滩肩的变化形式,这说明岸线形态会影响砂质海岸的空间演变格局。周赢涛等^[9]发现风暴期间沿岸输沙对岬湾海滩的剖面再塑造起到至关重要的影响;冯曦等^[10]通过数值模拟实验,研究了影响岬湾海滩恢复效率的敏感因素,认为潮动力对澳大利亚东部 Narrabeen 岬湾海滩的恢复起到至关重要的作用;周赢涛等^[11]通过实测岸线数据分析发现,岬湾海滩在长期动态演变中存在定点旋转的特性。综上可知,不同时间尺度下砂质海岸的演变过程中虽然存在不均匀性,但是也包含一定的规律性,使得准确地定量预测海岸带冲淤成为海岸带养护的重要研究课题。

1.4 淤泥质海岸带演变研究方法及结论

目前,淤泥质海岸带的研究广度和深度较砂质海岸带均存在不足,其研究方法主要以现场观测为主,辅以物理模型试验、数值模拟进行规律性研究和机理研究。大量现场勘测研究发现,淤泥质潮滩海岸对风暴期及常浪期的响应规律与砂质海岸有明显区别。在潮滩剖面的塑造过程中,潮流和波浪是形成剖面形态的主要动力因素,也是影响潮滩不同类型泥沙运动和分选的主要动力因素,海岸动力与泥沙输运共同塑造了岸滩特有的地貌特征,其根本是动力驱动下泥沙时空重分布的结果。极端天气事件引起的极端大浪虽然持续时间短,但是能量很强。Zhou 等^[12]通过实测和数值模拟研究发现,风暴潮造成淤泥质潮滩上部淤积、下部冲刷,连续的风暴作用对潮滩的侵蚀大于两个独立风暴作用下的侵蚀。除了潮流、波浪外,泥沙来源、泥沙特性和输沙方式等对于潮滩形态的演变也至关重要,沙源供给充足有利于潮滩的淤长,形成上凸形剖面,而抬高的潮滩滩面可减弱波浪作用,进一步促进潮滩的向海侧淤积且剖面形态基本保持不变;除动力要素外,沙源供给也是使潮滩形态改变的重要因素之一。

2 海岸带演变机理研究的成果与不足

2.1 研究成果

实地观测、物理模型和数值模拟研究成果,逐渐向人们揭示出海岸带的受灾特征。二维平面研究可以宏观反映空间上近岸水动力和泥沙运动的量级和方向,一维剖面研究则可以从微观角度探究海岸带泥沙起动的原因和影响因素。海岸带底部离岸流驱动泥沙的机理普遍认为:水位压力梯度在整个水深中均

匀分布,而波浪剩余动量流梯度却存在着垂向变化,于是对于任意水深处的一个单元水质体,波浪剩余动量流梯度和水位压力梯度的局部不平衡需要一个作用在其上下表面处的时均剪切应力梯度来满足动量守恒,这种沿水深不均匀分布的时均剪切应力便引起时均流速的垂向变化^[13]。而极端天气如台风、风暴潮期间,近岸波生流的垂向结构更为复杂,在现场尺度的大浪条件下,较强的波致雷诺应力会压制波浪边界层发育使其发生“薄化”现象^[14,15],所产生的床面剪切力比传统理论方法预测的结果更大。虽然张炫等^[16]对底部沿岸流和波流共同作用下的底部边界层模型进行了优化改进,但是目前对水体紊动的产生和扩散机理、波面水滚的演化过程以及边界条件的确定等泥沙运动的关键问题尚缺乏系统的探讨,限制了砂质海岸演变量化研究的精确性。从宏观上看,不仅前滨的冲淤变化存在复杂性,而且当极端天气叠加天文大潮时,其增水叠加下的波浪爬高更易冲越沙丘趾,从而对相对稳定的沙丘造成侵蚀,导致常浪期间沙丘趾以上的滨面区域难以恢复。

2.2 研究的不足

Dean^[17]提出砂质海岸平衡剖面的指数型公式,认为产生地貌稳定态的主要因素是泥沙平均粒径,后人又在此基础上不断改进,如 Inman 等^[18]的两段式和 Wang 等^[19]的三段式剖面模型。基于对受灾机理的初步探索,不同学者基于不同海岸带的地貌特征,总结出了可以定量预测海岸带变化的经验公式。戚洪帅等^[20]发现影响我国华南沿海砂质海岸带侵蚀的主要因素为波浪、潮位、岸滩前滨坡度等,因此提出使用地貌动力合成参数对海岸演变规律进行量化分析;Phillips 等^[21]就澳大利亚 Narrabeen 沙滩对水动力、地貌参数与海岸侵蚀量的相关性进行分析,认为海滩的恢复速率与波陡度、泥沙沉降速度、沙坝迁移速度存在负相关性,且越靠近岸的沙坝,上述因子的负相关性越强;除此之外,生物作用^[22]、人类活动、潮汐不对称^[23]、植被覆盖^[24]、沙坝位置^[25]等因素的耦合作用也会不同程度地影响海岸带的演化及其形态特征,这就导致这些预测公式缺乏普适性,并不能很好地反映海岸带受侵的普遍特征,其背后则是缺乏对一系列物理化学生物过程及其耦合作用机理的深入研究。而作为能有效反演海岸带受灾过程的数值模拟方法,目前也存在以下不足:(1)由于短期极端天气引起的风暴浪所产生的泥沙运动包含极为复杂的物理过程,相较于长期模拟的稳定态,短期内各物理因素叠加后

呈现出的非稳定态,其非线性特征更强。由于风暴浪持续时间短,短期伴随能量强,在水动力和地形条件尚未适应的情况下进行模拟往往会伴随极大的数值误差,这种数值误差将产生过大或过小的泥沙运动,从而使模型趋于不稳定^[26]。(2)数值模型的验证是模拟结果可信度的重要保证,虽然验证期模拟值与真实值匹配程度较好,但是并不能保证其余时期模拟结果的真实性,模型的结果稳定并不代表真实物理意义上的稳定^[27]。(3)用短时间尺度调试的地貌参数如曼宁系数、扩散系数等去模拟长时间尺度的地貌演变时,动力模型会显示出物理意义上无法解释的冲淤变化,如 Baar 等^[28]在模拟潮汐河口的地貌演变时,需要人为地给出高出合理参数 100 倍以上的横向河床坡度参数才能获得相对逼真的通道形态,说明模型的参数成为制约模拟结果的重要因素,在模拟过程中无法根据实际情况实时调节参数,可能导致模拟结果与实际情况千差万别。(4)边界条件的约束被认为是海岸地貌模拟的控制性因素^[29],在河口海岸区域,由于河流边界条件狭窄而海岸带地形范围大,导致约束边界平面形态突变,造成地貌形态变化。Guo 等^[29]在模拟长江口的地貌演变时发现,人类活动带来的岸线边界固化使得海岸带韧性减小,河道的自然摆动和分汊有利于三角洲整体的稳定和保护,这也是密西西比河河口导堤修建导致近岸滩涂减少的原因^[30]。

3 海岸带韧性的研究重点

提升海岸带韧性是全球应对气候变暖和海平面上升的重要举措,也是对海岸带生态保护和修复政策的积极响应。刘成等^[31]将经典的 Dean 剖面与实测剖面拟合,探讨山东半岛西北部某海滩剖面稳定态及 Dean 模型参数的物理意义;科研人员通过对沙滩地貌动力响应的机制进行深入研究,建立了考虑波浪和底部离岸流的互制输沙机制的数学模型,先后提出了波浪破碎新指标^[32]、波峰面坡度新公式^[33]和波浪反射的高效模拟方法^[34],并成功应用于不同补沙粒径和设计形式的海滩养护方案优化、平衡剖面预测和稳定性分析^[35,36]。以我国华南沿海城市湛江市为例,程阳艳等^[37]通过分析近 30 年的岸线遥感资料,发现海岸线摆动剧烈区域主要集中于受围填海等工程影响较显著的岸段,人工建设码头或岛屿的岸段岸线年变化率甚至达到平均变化率的 20—25 倍,且数十年来的向海扩张导致地貌冲淤不稳定性逐渐加剧;李平等^[38]通过对粤东南澳岛的调查分析,系统开展了海

岛海滩侵蚀风险评价,认为该区域人类频繁活动、无序岸滩建筑及污水肆意排放等因素,破坏了海滩泥沙供给平衡,极大程度地干扰了其纵向物质交换,使得游客安全受到威胁。因此,统筹建设韧性海岸带已迫在眉睫。以大型河口三角洲城市上海为例,根据相关规划和防汛要求,地面设计高程均大于4 m,而根据历史记录和数值计算,该地区风暴潮造成的最大水位为3.67 m,再加上上海堤和江堤的额外保护,使得上海地区遭受风暴潮淹没的概率大大降低,这样的地貌稳定对于上海的社会经济发展大有裨益^[39]。但河口海岸的地面高程存在上限阈值,其与地貌土质、地下水位及海平面上升等因素密切相关,过度地抬高地面高程既不经济也会带来沉降加速的风险,因此在提升海岸带韧性的相关工程措施中,需要统筹考虑成本与效益,既要保护近岸区域的人民生命财产安全,也要保证工程建设后的地貌稳定。

然而目前关于海岸带韧性研究,还存在着不少亟待解决的重难点问题。(1)海岸带动力地貌过程与作用机制尚不明确,缺乏能耦合生物、物理、化学过程的数学模型,多因素非线性耦合作用下的机制研究更是充满挑战。(2)海岸带受自然条件变化和人类活动的双重影响,其扰动存在多重性,不同类型的扰动相互交织可能产生风险放大效应。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导致海岸带韧性变化的内在作用机制,揭示其跨尺度影响过程和多反馈特征。(3)海岸带韧性作为一个系统概念,包含了多学科的交叉融合,且海岸带韧性存在明显的地域特征,缺乏统一的衡量标准,因此亟待对海岸带韧性开展更为系统的理论研究,并建立统一的评价指标。

4 “海洋十年行动计划”背景下的研究重点和研究方向

《联合国海洋科学促进可持续发展十年(2021—2030年)实施计划摘要》(以下简称“海洋十年行动计划”)于2020年底正式发布,在“海洋十年行动计划”数字生态系统的构建中,河口海岸地区作为重要的陆海界面是重点关注区域。全新世以来,河流输沙的巨变^[40]使得上游河流泥沙在河口海岸区域不断堆积,三角洲面积不断增长,此类特殊的沉积型海岸带因其丰富的动植物分布,构成河口海岸边缘生态交错系统^[41],从而成为陆地重要的汇和海洋重要的源^[42]。然而海岸带属于多学科交叉融合的研究区域,近岸系

统化监测仍未全面构建并推广到海岸带管理应用中,物理-化学-生物耦合过程的模型还有待进一步开发^[43],并基于此更为清晰、系统性地解释海岸带动态演变机理。因此,未来十年海岸带地貌动态演变的研究方向主要包括以下方面。(1)加强海岸带调查^[44],摸清海岸带韧性本底,开展与海岸带韧性机制研究相关的重要基础工作。突破海岸带研究学科界限,大力发展信号、仪器、设备等海岸带调查技术,构建海陆空立体观测网络,实现立体智能数据采集传输;加强海岸带的泥沙起动和水流相互作用机理研究,进一步揭示海岸带泥沙运动特征与规律。另外,目前陆海过渡带的碳源汇问题尚不明晰,碳、磷、氮等元素地下地上入海通量的非均匀性强、隐蔽性强,不同海岸带植被如红树林、海草床、盐沼植被的消浪能力和有机物固定量缺乏量化指标,需构建能有效耦合物理-生物-化学综合反馈机制的海岸带植被作用数学模型,建立统一的海岸带对海洋和陆地环境影响的评估标准。(2)加强人类多样活动耦合作用下的海岸带韧性研究工作。构建智慧海洋系统,并有效结合上下游水文泥沙情况、河口海岸人类活动痕迹,加上海岸带多动力交互作用下的大气水、地表水、土壤水、地下水等相互转换,以及近岸潮流驱动及波浪上涌引起的地下水位变化、盐分入侵等因素的综合影响。重点设计和建设一个能够呈现整个海洋(包括其社会和经济特征)且由多个部分组成的数字生态系统。这一系统可以利用历史、当代数据构建模型来描述过去和当前的海洋状况,并预测未来的海洋状况,从而有助于了解海洋。(3)构建海岸带韧性评价指标和体系。现有的海岸带评价指标体系主要是针对可持续发展^[45],大多采用层次分析方法构建^[46],并且以沿海行政地理单元为评价对象,缺乏以某一类型海滩为单元的海岸带韧性评价方法。因此,应建立具有强针对性的、能综合反映某类型海岸带单元动力、地貌、生态/生物、化学、社会等学科角度的韧性能力评价模型,从而可使决策者根据评价结果在极端天气来临前对海岸带的受灾情况进行诊断和预警,并给出提升海岸带韧性的对策和措施。

参考文献

- [1] The Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO. Revised roadmap for the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development [EB/OL]. (2018-06-18) [2018-06-20]. <https://unesdoc.org>.

- unesco.org/ark:/48223/pf0000265141.
- [2] 许宁. 中国大陆海岸线及海岸工程时空变化研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.
- [3] MENTASCHI L, VOUSDOUKAS M I, PEKEL J F, et al. Global long-term observations of coastal erosion and accretion [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12876.
- [4] 高义, 苏奋振, 周成虎, 等. 基于分形的中国大陆海岸线尺度效应研究[J]. *地理学报*, 2011, 66(3): 331-339.
- [5] 黎家财, 邓友国, 孙娟娟, 等. 北海冠头岭沙滩表层沉积物粒度变化再研究[J]. *地质论评*, 2015, 61(S1): 77-78.
- [6] 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. *应用海洋学报*, 2019, 38(4): 452-463.
- [7] 杨世伦. 中国淤泥质海岸的发育特点[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1990(4): 85-91.
- [8] 李元, 张弛. 近岸人工沙坝的剖面演变规律和泥沙输运机制研究综述[J]. *海洋学报(中文版)*, 2023, 45(5): 79-89.
- [9] 周赢涛, 冯曦, 管卫兵, 等. 风暴浪作用中岬角型弧形沙滩冲淤过程研究[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(4): 73-80.
- [10] 冯曦, 江沅书, 周赢涛, 等. 常浪期沙质海滩风暴剖面自然恢复过程研究[J]. *泥沙研究*, 2023, 48(1): 57-64.
- [11] 周赢涛, 冯曦, 管卫兵, 等. 波浪作用下岬湾海滩蚀积特点: 以澳大利亚 Narrabeen 海滩为例[J]. *科学通报*, 2019, 64(2): 223-233.
- [12] ZHOU Z, WU Y, FAN D, et al. Sediment sorting and bedding dynamics of tidal flat wetlands: modeling the signature of storms [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127913.
- [13] DYHR-NIELSEN M, SØRENSEN T. Some sand transport phenomena on coasts with bars [C]// *Coastal Engineering 1970*. New York: American Society of Civil Engineers, 1970: 855-865.
- [14] 张弛, 卜鑫涛, 刘建辉, 等. 考虑水沙和风沙过程的海滩-沙丘系统耦合演变数学模型研究综述[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 81-90.
- [15] XIE M, ZHANG C, LI J, et al. Flow structure and bottom friction of the nonlinear turbulent boundary layer under stormy waves [J]. *Coastal Engineering*, 2021, 164: 103811.
- [16] 张炫, 郑金海, 张弛. 波浪运动在底边界层的湍流结构数值研究[J]. *海洋学报*, 2023, 45(12): 13-24.
- [17] DEAN R G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications [J]. *Journal of Coastal Research*, 1991, 7(1): 53-84.
- [18] INMAN D L, ELWANY M H S, JENKINS S A. Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1993, 98(C10): 18181-18199.
- [19] WANG P, JR DAVIS R A. A beach profile model for a barred coast: case study from Sand Key, West-Central Florida [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(3): 981-991.
- [20] 戚洪帅, 蔡锋, 雷刚, 等. 华南海滩风暴响应特征研究[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(9): 975-985.
- [21] PHILLIPS M S, HARLEY M D, TURNER I L, et al. Shoreline recovery on wave-dominated sandy coastlines: the role of sandbar morphodynamics and near-shore wave parameters [J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 146-159.
- [22] 周曾, 陈雷, 林伟波, 等. 盐沼滩生物动力地貌演变研究进展[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 470-484.
- [23] 周曾, 陈璐莹, 蒋春海, 等. 河口地貌对潮汐不对称性影响的数值模拟研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(7): 37-46.
- [24] 江晨辉, 曹海锦, 冯卫兵, 等. 规则波作用下刚性植被海岸准静态平衡剖面试验[J]. *水运工程*, 2019(4): 7-14, 30.
- [25] 吉立, 冯曦, 冯卫兵, 等. 规则波作用下沙质岸滩剖面演变研究[J]. *水运工程*, 2020(6): 1-8.
- [26] 时连强, 郭俊丽, 刘海江, 等. Argus 系统在我国海滩研究中的应用进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(5): 552-560.
- [27] MARMOUSH R Y, MULLIGAN R P. A three-dimensional laboratory investigation of beach morphology change during a storm event [J]. *Geomorphology*, 2020, 363: 107224.
- [28] BAAR A W, BOECHAT ALBERNAZ M, VAN DIJK W M, et al. Critical dependence of morphodynamic models of fluvial and tidal systems on empirical downslope sediment transport [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4903.
- [29] GUO L, SU N, ZHU C, et al. How have the river discharges and sediment loads changed in the Changjiang River Basin downstream of the Three Gorges Dam? [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 259-274.
- [30] VMEADE R H, MOODY J A. Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River system, 1940-2007 [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(1): 35-49.
- [31] 刘成, 胡日军, 朱龙海, 等. Dean 模型在山东半岛西北岸滩动力地貌研究的应用[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(2): 348-358.
- [32] ZHANG C, LI Y, CAI Y, et al. Parameterization of nearshore wave breaker index [J]. *Coastal Engineering*, 2021, 168: 103914.

- [33] ZHANG C,ZHANG Q,ZHENG J,et al. Parameterization of nearshore wave front slope [J]. Coastal Engineering,2017,127:80-87.
- [34] ZHANG C,LI Y,ZHENG J,et al. Parametric modeling of nearshore wave reflection [J]. Coastal Engineering,2021,169:103978.
- [35] 陈雅莉. 非均匀沙滩剖面演变数值模拟研究[D]. 南京:河海大学,2015.
- [36] LI Y,ZHANG C,CAI Y,et al. Wave dissipation and sediment transport patterns during shoreface nourishment towards equilibrium [J]. Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(5):535.
- [37] 程阳艳,付东洋,祁雅莉,等. 基于 Landsat 影像的近 30 年湛江东北海岸线变迁分析[J]. 海洋科学进展,2022,40(2):261-273.
- [38] 李平,杜军,张志卫,等. 粤东南澳岛青澳海滩侵蚀退化风险评估及其安全调控[J]. 海洋科学进展,2020,38(1):171-181.
- [39] GAO S. Human utilization of mega-deltas; the importance of tidally modulated ground surface elevation [J]. Anthropocene Coasts,2022,5(1):2.
- [40] WU X,BI N,XU J,et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) delta lobe (1976—2013); dominant roles of riverine discharge and sediment grain size [J]. Geomorphology,2017,292:115-127.
- [41] FLADER S L,CALLICOTT J B. The river of the mother of God; and other essays by Aldo Leopold [M]. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin Press,1992.
- [42] GAO G,BEARDALL J,JIN P,et al. A review of existing and potential blue carbon contributions to climate change mitigation in the Anthropocene [J]. Journal of Applied Ecology,2022,59(7):1686-1699.
- [43] CHEN N,HONG H. Integrated management of nutrients from the watershed to coast in the subtropical region [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability,2012,4(2):233-242.
- [44] 李平,谷东起,杜军,等. 海岸带及其调查技术进展[J]. 海岸工程,2019,38(1):32-39.
- [45] 熊永柱. 海岸带可持续发展评价模型及其应用研究:以广东省为例[D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2007.
- [46] 金建君,恽才兴,巩彩兰. 海岸带可持续发展及其指标体系研究:以辽宁省海岸带部分城市为例[J]. 海洋通报,2001,20(1):61-66.

Research Progress on Dynamic Evolution and Resilience of Coastal Zones

ZHU Yu^{1,2,3}, ZHOU Yingtao^{1,3,4}, XUE Yulong^{1,2*}, FENG Xi³, FENG Weibing³

(1. Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou, Hainan, 570206, China; 2. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou, Hainan, 570206, China; 3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210098, China; 4. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200125, China)

Abstract: As a sea-land buffer zone, the coastal zone has played an important role in protecting land from marine disasters for a long time. When suffering from external disturbances caused by disasters (such as storms, rising sea levels, coastline erosion, etc.), the coastal zone system has the ability to resist, restore and adapt to this negative impact. This ability to adapt to the changing environment is called coastal zone resilience. However, since the development of human civilization, long-term large-scale disturbance activities have weakened the resilience of the coastal zone and destroyed the balance of dynamic landform in the dynamic evolution of the coastal zone. Therefore, this article starts from the characteristics of coastal morphology evolution, summarizes the existing research results of coastal erosion mechanism, points out the problems and

shortcomings in the research methods, and sorts out the current research progress of coastal zone resilience and post-disaster recovery mechanism. At the same time, combined with the emerging research directions in recent years, the shortcomings of the existing research contents are pointed out. Finally, the research trend of comprehensive development and management of coastal zones under the background of the “Decade of the Oceans Plan” is prospected.

Key words: coastal zone; coastal resilience; evolution of coastal landform; dynamic balance; decade of the oceans plan

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>