

海岸侵蚀、防护与修复研究综述

吉学宽¹, 林振良², 闫有喜^{1,2*}, 周昕伟¹

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 北部湾大学建筑工程学院, 广西钦州 535011)

摘要: 海岸带是固、液、气三相交互的特殊地带, 也是经济发达、人口稠密和矛盾突出的地带。人与海岸线的矛盾日益突出, 加剧了海岸侵蚀的破坏程度, 与此带来的一系列问题引起了诸多学者的探索和研究。本文旨在结合国内外最新的研究成果介绍砂质海岸、软岩质海岸和淤泥质海岸的侵蚀机制, 并剖析侵蚀的原因及危害, 给出对应的防护与修复方法, 重点阐述生态防护与修复方法, 从研究方法与手段等方面给出相应的思考, 对今后的侵蚀研究和修复工作进行展望。

关键词: 海岸带 海岸侵蚀 海岸防护 生态修复

中图分类号: P753 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2019)06-0604-10

0 引言

海岸带处于海洋、陆地和空气三带的交界处, 是一个极为敏感的地带, 在风、浪、潮、流和人类活动的影响下极易造成海岸的泥沙收支不平衡, 导致海岸线后退、海滩下蚀等一系列的海岸侵蚀现象。海岸带海洋资源丰富, 仅占世界陆地面积 10% 的海岸带区域居住着世界 60% 的人口^[1]。我国海洋局发布的《2018 年中国海洋经济统计公报》显示, 2018 年全国海洋生产总值 83 415 亿元, 海洋生产总值占国内生产总值的 9.3%。据“908”专项调查结果报告, 我国大陆海岸总侵蚀岸线为 3 255.3 km, 砂质海岸线的侵蚀 2 463.4 km, 占我国砂质海岸的 49.5%; 淤泥质海岸线侵蚀为 791.9 km, 占我国粉砂淤泥质海岸的 7.3%^[2], 已经严重影响海洋经济的可持续发展。海岸侵蚀的防护与修复应运而生, 在此之前海岸大多采用

硬性防护, 如海堤、防波堤、丁坝, 以及少数软性防护, 随着绿色环保深入人心, 同时贯彻和响应我国的“开展蓝色海湾整治行动”, 国家统筹支持地方开展“蓝色海湾”“南红北柳”“生态礁岛”等生态修复工程^[3], 可以看到, 未来的防护与修复将会是以生态防护与修复为主。

长期以来, 一系列的人类活动加上难以预测的自然灾害加剧了海岸侵蚀的程度, 相关学者针对不同侵蚀的侵蚀现象做了大量工作, 为海岸带的防护与修复提供了科学依据。本文简述和讨论国内外近年来海岸侵蚀相关理论研究情况, 包括海岸侵蚀机理、侵蚀原因和危害, 探索海岸防护与修复的方法, 从研究方法与手段等方面给出相应的思考, 希望对今后的海岸侵蚀研究和修复工作有一定的帮助。

【作者简介】

吉学宽 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事海岸防护与修复技术研究。

【* 通信作者】

闫有喜 (1969—), 男, 教授, 主要从事结构检测加固、人居环境治理修复技术研究, E-mail: mqyhb@162.com。

【引用本文】

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20191231.008

吉学宽, 林振良, 闫有喜, 等. 海岸侵蚀、防护与修复研究综述[J]. 广西科学, 2019, 26(6): 604-613.

JIX K, LIN Z L, YAN Y X, et al. Review on the research of coastal erosion, protection and restoration [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(6): 604-613.

1 海岸侵蚀机制研究

海岸侵蚀是指海岸带系统内沉积物的亏损状况或海岸线的变化^[4], 海岸侵蚀的研究最早始于20世纪初期, 1906年英国专门成立一个整治海岸侵蚀的皇家委员会^[5], 于1949年制定了英国《海岸保护法》。20世纪60年代, 美国针对自己海岸侵蚀情况编制了海岸侵蚀图集; 1972年, 国际地理学会成立海岸侵蚀动态小组, 目的是发动世界各地相关科学家收集相关资料。1974年, Bird教授撰写了“百年来的岸线变化”报告, 对世界各地岸线变化变化和原因进行了评论。此后我国海岸侵蚀研究就被纳入国家海洋科学委员会的计划^[6]。本文分别从砂质海岸的侵蚀机制、软岩的海岸侵蚀机制和淤泥质海岸侵蚀的机制展开叙述。

1.1 砂质海岸的侵蚀机制

最早由Bruun^[7]提出Bruun法则, 用于评判海平面上升引起的海岸侵蚀, 但由于此法则做了大量的假设, 实际工程不适用, 后来经多位学者修正完善^[8-10], 才成功将其用于实际工程中^[6, 11]。1968年Edelman提出岸滩沙丘侵蚀预测方法, Graaff等^[12]对其方法进行了改进, 但由于现场实测资料匮乏, 侵蚀量预测仅仅是基于较粗略的假设。Dean等^[13]通过对美国Plam沙滩的多年观察, 确定了防波堤波浪作用下波浪对海岸侵蚀的影响。日本学者Uda^[14-15]的研究团队研究发现, 渔港工程引起的海岸侵蚀是因为阻挡了沿岸输沙。Barrie等^[16]研究了加拿大太平洋地区的海岸, 详细评述了海平面变化对海岸的影响机制, 认为海平面变化在海岸演化过程中起主导作用。Pethick^[17]认为海岸地貌的变迁是对垂直和平行于海岸的动力因素的响应。

我国对砂质海岸侵蚀起步相对比较晚, 且停留在定性和半定量分析, 大部分主要集中在海岸侵蚀原因、影响因素和危害方面^[18-23]。少数以海岸滩涂蚀退及海岸地貌变化过程为目标, 通过沿岸及垂岸输沙率变化、岸线形态变化以及剖面变化来研究海岸变化过程和海岸海滩的稳定性^[24-29]。黎奕宏^[30]以顺岸硬式防护工程、渔港防波堤垂岸工程以及人工岛离岸工程为研究对象, 运用地质地貌调查、海滩岸线和剖面测量、卫星影像图对比分析等相结合的研究方法探讨了3类海岸工程对相邻海滩岸线形态和剖面形态的影响机制和原因。李汉英等^[31]结合多时相遥感影像和四期实测岸滩数据, 探讨日月岛工程的建设对日月湾

海岸的冲淤影响。田会波等^[32]在万宁东部海岸建立了海岸动态监测系统, 经过5年的观察和监测, 发现在季节变化中海岸呈现夏秋侵蚀冬春淤积的规律, 在年际变化中, 海岸总体呈侵蚀趋势, 但相邻年份间又呈现侵蚀和淤积相间的现象。顾佳凯^[33]整理分析如东近岸海域地形、水文、遥感影像等数据资料, 应用GIS、RS和Delft 3D数学模型等技术, 揭示岸滩的演变特征、海域的冲淤变化情况。同时, 通过遥感影像的分析, 研究黄沙洋和烂沙洋水道的变迁情况, 结合海域水文动力场、泥沙来源及输沙特征, 从多角度阐述如东岸滩冲淤演变的机理。

除此之外还有一些极端气候条件也会造成砂质海岸海滩的侵蚀变化, 台风(或飓风)引起的大浪和风暴潮是造成海岸严重侵蚀的极端气候事件, 风暴作用对砂质海岸岸滩的影响是不容忽视的。Wise等^[34]在基于Kriebel和Dean两者的平衡剖面的基础上, 提出了风暴作用下的海滩侵蚀模型(S-beach模型), 评估沙丘侵蚀趋势, 该模型认为海滩—沙丘平衡剖面能消散来波能量, 之后Roelvink等^[35]在此基础上建立了二维的(S-beach模型), 并证明了其准确性。Dongerren等^[36]用XBeach模型模拟了欧洲9个海滩在风暴环境下的侵蚀过程, 模拟结果较好, 但同时也发现XBeach模型存在的不足。1996年Leont'ev^[37]提出一种受暴风浪影响的海滩剖面周期变化模型, 且此模型经过了实测数据的验证。2000年Sallenger^[38]首次将风暴潮对沙丘的作用分为4种机制, 分别为冲刷、沙丘冲蚀和冲越以及障壁岛淹没。Coco等^[39]、Lee等^[40]研究和论证了连续风暴对沙丘的侵蚀, 提出连续风暴带来的侵蚀更严重的观点。研究风暴对砂质海岸的侵蚀, 不仅仅通过数值模型来探讨, 在模型试验和实地长期勘测也有应用。Palmsten等^[41]于2012年用模型试验研究美国东北海岸1998年遭遇的风暴袭击。Ruz等^[42]和Pye等^[43]通过对法国Wissant Bay砂质海岸和英国的Sefton砂质海岸实地考察和监测后, 提出风暴潮对海岸侵蚀的机制。

国内大多数研究风暴潮对砂质海岸侵蚀时采用传统地理学的定性、半定量的方法, 在海岸地形与水动力耦合方面的研究较少^[44]。最早是1988年倪孟书^[45]研究福建海岸动态变化, 提出风暴潮对海滩作用存在着可逆和不可逆两种过程。于吉涛等^[44]和陈子桑^[46]分析了粤西水东湾“8616”号台风作用下海滩剖面地形动力与侵蚀机制, 定性讨论了剖面形式对泥沙输运方向机侵蚀或淤积部位的差别。蔡锋等^[47]对

“9914”号台风袭击厦门岛进行研究,认为不同走向的海岸滩地形对同一风暴潮过程具有不同响应特征。戚洪帅等^[48]对华南8处海滩6次风暴前后的调查资料进行了分析,探讨了剖面的响应特征:耗散型沙滩主要表现为滨后的沙丘侵蚀和滨前滩面调整,低潮阶地型海滩上部滩面响应剧烈;沙坝型海滩在风暴期间通常表现为滩肩的侵蚀和沙坝的向海迁移或潮间带沙坝夷平消失,无护岸和滨后沙丘发育的海滩易产生冲越。李文善^[49]采用SWAN波浪模型及ADCIRC潮流模型模拟了平潭湾水动力场,并作为岸滩演变XBeach模型的输入条件,分别验证了平潭龙凤头岸滩修复工程区域四条监测剖面。

国外砂质海岸的侵蚀研究十分成熟,但在一些领域还需要探索,比如风暴作用下对海岸的耦合机制、连续风暴作用下岸滩的演变。我国在砂质海岸侵蚀领域尚有待更进一步探索和研究,目前还停留在定性和半定量的情况分析风暴潮对海岸的侵蚀,且对其侵蚀机制也还停留在定性的描述,大多通过监测和统计的方法来探讨。

1.2 软岩质海岸的侵蚀机制

软岩质海岸是由弱岩化或半固结物质组成,所以自身抗侵蚀能力弱,是所有海岸中受侵蚀最严重的。Lajoie等^[50]认为波浪运动是海崖侵蚀的主要作用因素。Hampton^[51]对北佛罗里达州多个地区的海崖侵蚀研究后,认为地表径流渗透是引起海崖侵蚀后退的主要原因,而波浪的作用可能次要的驱动因素。Duperret等^[52]认为暴雨是海崖发生破坏的主要触发机制,同时通过水文地质概念模型说明了水平方向和垂直方向上水的作用。Young等^[53]应用激光雷达对加州德尔马2.5 km的软岩质海岸进行9年半的监测,发现软岩的侵蚀存在季节性变化,与侵蚀程度和暴风雨之间有着巨大的联系。Collins等^[54]对美国加利福尼亚州北部一处弱岩化砂质海岸断崖地区进行5年详细的实地考察和高分辨率陆地激光雷达扫描,最终得出结论:胶结砂崖破坏是由于波浪作用引起的坡面侵蚀变化,在破坏前最大坡度可达65°;中度胶结砂崖破坏是由于降水诱发的地下水渗流,导致抗拉强度降低和抗拉断裂。Brooks等^[55]对Suffolk软岩质海岸进行监测分析,结果表明,海岸风、高水位、风暴潮及暴雨对软岩的侵蚀有严重影响,特别是两种或多种的耦合作用下更严重。我国学者刘建辉^[6]针对福建软岩质海岸进行研究,认为降雨渗透是引起海岸侵蚀的主要原因,波浪和潮流是次要原因。

软岩质海岸侵蚀机理比较复杂,但主要受波浪、降雨、风暴潮岩石特性和地震影响。结合前人的研究,目前对于海崖后退的侵蚀机制还没有统一认识,大多理论由实地勘测和分析得出的,因地理位置不同,水文、潮汐和岩石特性不同,得出的结论也就不同,而且大多都只从单方面因素去研究侵蚀问题,众多因素耦合作用下的理论研究就更少,所以软岩质海岸侵蚀机制还需更深一步结合实地进行研究。目前我国对软岩质海岸侵蚀这一领域研究甚少,虽然我国的软岩质海岸占比并不多,但侵蚀破坏程度最为严重,也是一个有待解决的问题。

1.3 淤泥质海岸的侵蚀机制

淤泥质海岸侵蚀研究是在砂质海岸研究的基础上建立起来的,到20世纪50年代才进行较为系统的潮滩水动力调查。Postma在研究荷兰北部瓦登海的淤泥质潮滩时,提出了“沉积滞后”作用,后来Straaten和Kenen又提出了“冲刷滞后”作用^[56]。多位学者对滨海沼泽的淤泥质海岸侵蚀机制进行了研究,发现淤泥质海岸侵蚀的主要原因是海平面上升和泥沙供应不足,波浪只是侵蚀的次要原因,并提出治理沼泽是要增加沉积作用而不是防护波浪的措施^[57-60]。

我国对淤泥质海岸侵蚀机制的研究理论比较成熟。陈吉余等^[61]首先对渤海湾南部淤泥质岸滩的平衡剖面塑造过程进行研究,强调组成物质对淤泥质潮滩剖面塑造的重要性,至此淤泥质海岸侵蚀研究在我国拉开了序幕。接着任美镔^[62]对淤泥质潮滩进行命名,且把我国淤泥质潮滩进行分类,按照地形分为开敞型、港湾型和河口型,按照潮滩的蚀积动态分为淤进型和蚀退型。陈才俊^[63]对淤长型淤泥质潮滩进行研究,发现其滩剖面形态为双凸形,上、下凸点分别位于平均高潮位和平均低潮位(偏上)附近,并且发现供沙量越大、沉积速度越快的潮滩,双凸形潮滩剖面形态越明显,侵蚀作用增强的潮滩剖面形态向下凹形发展。樊社军等^[64-65]以连云港淤泥质海岸为例建立了滩侵蚀堆积动力机制和剖面模式,指出波浪是侵蚀性岸滩侵蚀的主要动力因子,潮流主要起运移扩散泥沙的作用。在堆积型岸段,潮流则是岸滩塑造的主要动力,波浪作用退居次要地位,并在此基础上建立了淤积型海岸剖面堆积过程的数学模型。王艳红等^[66]通过对江苏多处淤泥质研究,发现在淤长型和侵蚀型岸段之间,存在着一种由淤积到侵蚀的过渡型岸段,并发现过渡型岸段具有上部淤积下部冲刷、冲刷逐渐向上部扩展、潮滩表层沉积物不断粗化、淤积带逐渐变

窄最后过渡到全剖面侵蚀的基本特征和发展趋势。多位学者针对废黄河淤泥质岸^[56,66-71]、浙江淤泥质潮滩^[72-75]和黄河三角洲淤泥质海岸滩^[76-81]的演变机制、剖面的塑造、沉积物的冲淤和防护进行研究, 得出了明确的结论。陈金月^[82]从海岸线空间分布、岸线利用程度、岸线位置变化以及不稳定性这4个角度, 运用岸线组成、分形维数以及不稳定性等多项指标, 多尺度对珠江三角洲的海岸线变迁进行系统分析, 讨论了引起其变化的主要驱动因素。陈玮彤等^[83]以江苏中部淤泥质海岸为研究对象, 基于多潮位站插值校正法对水边线潮位赋值, 改进了水边线方法, 并结合实测地形数据进行校正, 实现了淤泥质海岸遥感海岸线的有效推算。

针对我国淤泥质海岸(包括黄河三角洲、废黄河三角洲、长江三角洲和杭州湾), 我国学者进行了其侵蚀机理和原因研究。虽然我国对淤泥质海岸理论研究已经十分完善, 但由于地理位置的不同, 波浪、潮流、风况也均不同, 其侵蚀机制也就不同, 前人理论因此不具有普遍适用性, 还需更加深入研究, 在研究淤泥质海岸应更加注重实地考察与试验同时进行。

2 侵蚀原因及危害研究

2.1 侵蚀原因研究

海岸侵蚀主要包括两个大的原因: 一是受海洋、陆地、大气等自然环境的综合影响; 二是受人类活动干预影响。国内外学者^[84-90]针对海岸侵蚀现象把自然原因分为1)海平面上升, 2)风暴潮加剧, 3)河流入海口改道、改向, 4)地质构造下降, 5)泥沙的供应不足等5类。把人类活动带来的海岸侵蚀进行分为1)海岸工程破坏拦沙, 2)近海工程, 3)采砂和近海养殖, 4)人类娱乐活动等4类。罗时龙等^[91]综合前人研究, 把主要侵蚀原因重新分为6大类: 河流入海泥沙减少、海岸工程拦沙、采砂和围垦、相对海平面上升、海岸带生态系统破坏和护岸工程弱化, 并针对每类原因给出细化的直接原因, 更加直观、准确地描述海岸侵蚀原因。

2.2 侵蚀危害研究

综合前人研究^[84,86,91-92], 可将海岸侵蚀危害归为以下4类: 1)海岸线后退, 海滩功能减弱和海岸生态系统退化; 2)海水倒灌和淹没沿海低洼地, 滩涂养殖业萎缩, 海岸居民财产、基础设施遭到破坏, 且加剧土壤次生盐渍化程度; 3)防护林、防护工程破坏, 加快了海岸侵蚀的过程或引起沿岸洪泛; 4)海内动植物生存

环境遭到破坏, 生态平衡被破坏。

3 海岸侵蚀的防护与修复

3.1 海岸侵蚀防护与修复研究

目前数值模拟和物理模型成为海岸整治修复研究的热点^[88]。Raudkivi等^[93]采用实测数据分析和物理模型模拟方法探讨了人工补沙、修建丁坝和嵌入式隔膜等海岸潮滩防护方法。Mimura等^[94]和Sakashita等^[95]分别研究了纯波对离岸堤地形变化和防波堤对岸线的影响。Bianchi等^[96]提出通过再造海草床和潮间带海滩维护海岸水质净化功能、保护海岸环境多样性与稳定性的观点。

国内学者分别对江苏吕泗岸滩^[97]、胶州湾东北部^[98]、闽粤交界的大埕湾^[99]海岸冲淤形态和演化趋势进行了分析, 并提出了具体的防护措施。王广禄^[100]分析并提出了沙滩修复理论技术方法, 制定了厦门香山-长尾礁人造沙滩工程技术方案。李兵等^[101]针对福建砂质海岸进行勘察、分析、实验, 提出具体有效的防护措施。蔡锋^[102]于2013年出版《中国沙滩养护手册》, 为我国沙滩的养护提供理论标准。金雷鸣等^[103]基于人工填沙的基础上提出了扇面式吹填技术, 使得填沙技术更加有效和实用。李杏筠^[104]以汕头南澳县烟墩湾为例, 通过现状调查、海岸线变化调查、海滩剖面测量及沉积物粒度分析等手段, 分析砂质岸线的发展现状及存在的主要问题, 开展砂质海岸保护与整治修复研究, 提出针对性的整治修复措施及对策建议。

近年来生态防护与修复也随着可持续发展和绿色生活的生活理念被引入, 我国最早是彭子成等^[105]在黄河三角洲部分侵蚀地区采用米草生态工程与堤坝等传统防潮工程结合的方式, 利用生态工程的自组织功能, 能够减少海浪对堤坝的冲击, 延长传统工程的使用寿命, 提高安全系数, 降低维护保养费用。王瑾等^[106]通过对海南岛红厚壳植物的特性和分布资料考察后, 提出木麻海防红树林混种红厚壳来达到生态护岸的效果。潘丹等^[107]以防城港西湾红沙环海堤工程规划为例, 针对海岸的差别而设计不同的生态堤岸, 通过植物景观的营造、环境小品设计, 建设与当地人文景观相结合的生态示范海岸, 增强海堤生态防护效能, 以建成防城港首个旅游休闲生态景观海岸带。范航清等^[108]引入生态海堤并成功用于防城港西湾红沙环海堤工程。林俊翔^[109]利用拆除旧有堤岸块石及驳岸抛石形成海堤地台, 采取格宾网箱在抛

石区域内围拢建立绿植地台,并利用其促淤保滩,积存肥料,引入潮间带的概念,通过选苗、定植株距、绿植成活,形成完整的生态系统。李丽凤等^[110]以广西北海滨海国家湿地公园为研究对象把研究样地的海岸线按功能进行改造,形成“柔性岸线”“游憩亲水岸线”“海堤-半红树林地-红树林滩涂”3种海岸线模式,且利用厚藤对坡面进行绿化处理,形成生态堤岸。赵鹏等^[111]提出复杂地理环境下生态海堤建设的快速决策方法,为实际工程提供完美生态海堤方案。由于我国对生态海岸防护的重视远远不够,起步较晚,相关研究匮乏,且生态海岸防护是一个跨学科跨领域的问题,难度系数比较大,所以目前在工程领域中应用较少,但随着研究深入和技术的跟进,生态防护与修复将被广泛应用。

3.2 海岸侵蚀防护与修复技术

国内学者罗时龙等^[91,112]针对我国海岸侵蚀的不同机理和原因以及海岸侵蚀的管理方法差异,把海岸侵蚀分为5种类型:砂质海岸侵蚀、软岩质海岸侵蚀、淤泥质海岸侵蚀、生物海岸侵蚀、海岸工程侵蚀,并针对每种侵蚀都提出了相应的整治和防护措施。

3.2.1 砂质海岸侵蚀的修复

砂质海岸是我国占比最多的海岸,也是受人类活动影响最大的一种海岸。最理想的修复方法肯定是减少人类的干扰,让其自然恢复原始地貌,但有的海岸已经侵蚀严重已经完全不可能自然恢复。目前沙滩养护是修复砂质海岸修复的最常用方法,沙滩养护在美国、澳大利亚和日本理论已经相当成熟,大量用于修复砂质海岸。我国采用人工养滩技术起步比较晚,在秦皇岛、厦门、北海、威海等地已经采用了此技术,而且取得相当不错的效果。不论是国外还是国内,在使用人工养滩的同时都需要与符合当地地理水文条件的护岸工程相结合。我国学者李广雪等^[113]针对山东滨海岸滩侵蚀提出一套合适的人工养滩与防护工程组合的修复方法,在此基础上加入生态护岸,如在设置海堤、斜坡式防浪堤时,亲水面不做绿化补充,绿化中心在堤内侧,兼具防浪、防风和景观效果,生态稳定性好,且能在海堤和土堤堤脚进行防护,提供异质空间,促进海洋生物保育、破浪。

修复砂质海岸的方案如表1所示。虽然沙滩养护在我国已经被采用且取得一定的成效,但是由于我国起步较晚,大部分均借鉴于国外经验,耗费成本较高,且效果并不理想。2013年蔡锋^[102]出版了《中国海滩养护技术手册》,为我国沙滩的养护提供一定的

理论依据。由于我国海型岸类多样、环境地质条件复杂,所以一般理论并不具有普遍适用性,因此要加强针对我国海岸实情实施沙滩养护研究,探索和制定出符合我国海岸实情的沙滩养护方案。在探索砂质海岸修复方案时不能完全排除硬性防护,可以考虑复合式生态修复方案,不仅能够有效防治海岸侵蚀,同时也使海岸生态系统逐渐修复。由于空间限制和技术难度,复合式生态修复技术还有待进一步研究发展,但随着研究的深入和技术的提高,生态修复必然是最佳的海岸修复方法。

表1 沙滩防护工程组合形式

Table 1 Combination forms of beach protection engineering

| 组合形式 Combination forms | 适用海岸 Applicable seacoast |
|--|---|
| 海堤+抛沙+人工防护林 ^[113] Seawall+ sand throwing+ artificial shelter forest ^[113] | 对旅游要求较高但水域受限的海岸 Sea coasts with high demand for tourism but limited seashore |
| 生态海堤 ^[108] Ecological seawall ^[108] | 对旅游要求和景观要求较高的海岸 Sea coasts with high demand for tourism and landscape |
| 人工岬湾+抛沙 ^[113] Artificial headland bay+ sand throwing ^[113] | 对旅游需求高的顺直岸 Straight shore with high demand for tourism |
| 人工岬湾+抛沙+海堤+人工防护林 ^[113] Artificial headland bay+ sand throwing+ seawall+ artificial shelter forest ^[113] | 人造沙滩海岸 Artificial beach coast |
| 土堤+盐生植被 Earth embankment+ salty vegetation | 侵蚀不严重且无人居住 Not severely and uninhabited |
| 人工抛石+防护林 ^[109] Artificial riprap+ shelter forest ^[109] | 侵蚀严重且有人居住 Severe erosion and inhabited |

3.2.2 软岩质海岸侵蚀的修复

软岩质海岸主要受海岸风、高水位、风暴潮、暴风雨和波浪的影响。根据当地地质、水文和气象情况,种植防护林,可以有效地减轻海岸风、风暴潮和暴风雨的直接侵蚀作用;在软岩的顶部和底部设置排水管道,可以防止波浪和暴风雨的渗流,减缓对软岩的破坏;也可根据当地实情设置防浪堤或者潜堤,减少波浪对软岩地部的直接侵蚀;在近岸抛石形成海堤地台,采取格宾网箱在抛石区域内围拢建立绿植地台。软岩前端沙滩对软岩的侵蚀有减缓作用^[114-115],沙滩的养护也不失为一种方法。在侵蚀严重的地方可以采取组合的方式,在山上种植防护林,崖顶和崖底设置排水管道,设置潜堤消减波浪和潮流的直接作用,近岸采用人工抛沙养护。

软岩质海岸虽然在我国占比少,但是侵蚀最为严重,且对其治理方案研究甚少,软岩质海岸侵蚀的修复刻不容缓,研究其治理方案也迫在眉睫。

3.2.3 淤泥质海岸的修复

淤泥质海岸的修复目前主要采用种植盐生植被的方法。盐沼植被的消长受到波浪、潮流、底质特征、潮侵频率等诸多因素的影响^[116],因此采用此方法需要采取一些硬性的防护工程对盐生植被进行保护。在侵蚀严重且不用于旅游的地方可采用一定的硬性工程配合红树林护岸。护岸工程可以消减波浪,保护后方的红树林,而红树林具有消浪固沙的作用,可以在不影响海岸生态环境的情况下,减少海滩泥沙的流失甚至使海岸转冲为淤。在侵蚀不严重的地方,可采用一些护岸工程配合大米草或互花米草种植,此方法普遍得到认可和采用,很早就被用于我国福建、浙江、江苏和山东等地淤泥质海岸。人工岬湾是一个介于硬性和软性之间的一种防护工程。王艳红^[116]就废黄河三角洲的淤泥质海岸采用波浪泥沙物理模型试验,反演了废黄河口凹入岸段稳定砂质海滩的形成过程,认为由于废黄河三角洲海岸侵蚀过程中存在近岸表层泥沙粗化并向砂质海岸变异趋势,使岬角控制在此也能形成稳定岸弧,为海岸整体防护体系的构建提供了新的途径。

复合式生态修复是治理淤泥质海岸侵蚀的好方法,如在离岸设置斜坡式防浪堤近岸种植一些盐生植被,或采取在离岸建立人工鱼礁而近岸种植红林,恢复盐沼湿地结合近岸种植红树林等,都符合生态修复的理念,但需要根据实地情况、侵蚀机理和权衡护岸工程带来的优弊端。同时需考虑盐生植被的脆弱性和外来物种入侵危害性,根据实地勘测和模型实验相结合是一种确定修复方案的高效办法,且修复效果具有直观性。

3.2.4 生物海岸侵蚀的修复

生物海岸一般指红树林海岸和珊瑚礁海岸,红树林具有防风消浪、促淤造陆和抵御海啸的功能^[117],珊瑚礁具有削波减浪,保护岸滩的作用^[118]。目前对生物海岸侵蚀严重地区采用的是重建生态系统方法,设置海岸生态保护区,在重建时可结合护岸工程来达到最佳效果,对于不严重的地方可以采用人工补种的方法。李元超等^[119]在西沙赵树岛采用了人工礁基和人工移植珊瑚进行对已破坏的珊瑚海岸修复,结果发现人工礁基修复效果明显大于人工移植。对于侵蚀比较轻的地方采取建立自然保护区,防止人为活动

破坏。在重建或补种时要防止二次破坏和外来物种入侵危害。

南红北柳工程和生态岛礁工程被列入四大海洋工程之中,但局限于目前的修复方案远远不够,新的生物海岸修复技术亟待开展。推广原生态红树林、珊瑚礁、盐沼湿地保护,恢复原生态,在考虑修复方案时,应实地考察和勘测,因地制宜,进行必要的数值模拟或者物理试验模型找出最优的修复方案。同时人类活动的影响也不容小视,加强相关知识的普及,让保护海岸理念深入人心,对破坏海岸的行为坚决抵制和处罚。

3.2.5 海岸工程侵蚀的修复

海岸工程中包括导堤、岸堤、丁坝、顺坝、离岸堤,在对海岸进行保护的同时也存在各自的缺点。海岸工程带来的侵蚀一般指的是下游滩面的下蚀和海岸线后退,前人对其侵蚀机制和原因的研究基本完善,但针对其修复技术研究较少,通常针对侵蚀严重的工程一般采用拆除处理,针对当地的地势、水文和气象综合考虑,采用合适沙滩养护、生物护岸方案或者两者相结合的方案;而针对不严重的工程一般采取合适的生态防护措施,如人工养滩、种植盐生植被、恢复盐沼湿地,不仅能减轻海岸侵蚀的破坏又能提供优美的环境。

海岸工程带来的海岸侵蚀不容小视,在设计时就应考虑其利弊,针对其弊端提前做好防护方案。在治理时从源头出发,根据其侵蚀原因,充分利用当地资源,做到防护最优。针对严重岸段采用拆除海岸工程,在拆除时,应该考虑其拆除方案,做到对环境污染最小,拆除效率最高。海岸工程在拆除之后会改变了潮流和水流情况,对岸线也在一定存在影响,极有可能会加剧侵蚀,所以在拆除前要进行合理性分析和危害评估,若拆除后带来轻微的侵蚀,可以结合实地情况采取合适的软性防护。

4 展望

以上综述了国内外学者针对海岸侵蚀研究的主要进展,在过去一个多世纪里,国内外学者对砂质海岸、软岩质海岸、淤泥质海岸侵蚀机理进行研究,分析其侵蚀的原因,并探索出相适应的防护与修复方案,为后人提供理论依据和修复方法。尽管如此,由于海岸带差异性和复杂性,加之不同区域特色显著,继续进行深入研究仍是必要的。可以从以下方向进行进一步的探索:

(1)我国海岸生态防护与修复起步较晚,各方面都需要完善,需加强对基础理论研究,并结合实际工程案例,形成一个完整的海岸生态防护与修复理论体系;结合我国海岸实际情况,开展技术性研究,设计出符合我国海岸的生态防护与修复方案;有关部门应尽快编制出工程规范和建设标准,为海岸生态防护与修复提供一个标准。

(2)在整治工程导致严重的海岸侵蚀时,海工建筑物拆除后对潮流和水流的影响,极有可能会加剧侵蚀,且拆除时也会对生态环境造成一定破坏,例如大型旧损码头拆除后,水环境被污染导致的鱼类和浮游植物死亡等,引发生态系统的破坏,所以在拆除前要进行合理的分析和危害评估,且需加强对旧损海工建筑物拆除技术研究,防止拆除导致的二次破坏。

(3)将人工智能引入到海岸侵蚀这个领域具有很好的前景,如将其用于监测和预测海岸侵蚀的程度,用于海岸侵蚀危险性评估,需要加强人工智能与海岸侵蚀相结合的应用研究,争取做到智能化观测岸线变化。

(4)海岸带环境特殊,涉及地质学、数学、物理学、岩土学、环境生态学、气象学、水文学等多学科的综合研究,探讨海岸侵蚀机制,寻求海岸生态修复技术与海岸带生态环境保护及重建海岸生态系统可持续发展道路是未来人类活动对海岸带资源环境影响研究的发展趋势。

参考文献

- [1] LAKSHMI A, RAJAGOPALAN R. Socio-economic implications of coastal zone degradation and their mitigation: A case study from coastal villages in India [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2000, 43(8/9): 749-762.
- [2] 国家海洋第三研究所. 我国近海海洋综合调查与评价专项成果——海岸侵蚀现状评价与防治技术研究总报告[R]. 厦门: 国家海洋第三研究所, 2010: 39-50.
- [3] 张志卫, 刘志军, 刘建辉. 我国海洋生态保护修复的关键问题和攻坚方向[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(10): 26-30.
- [4] 罗时龙. 海岸侵蚀风险评价模型构建及其应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [5] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. *地理学报*, 1993, 60(5): 468-476.
- [6] 刘建辉. 福建砂质海岸侵蚀机制及影响因素分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [7] BRUUN P. Sea-level rise as a cause of shore erosion [J]. *Journal of Waterways and Harbors Division*, 1962: 67-82.
- [8] BRAY M J, HOOKE J M. Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise [J]. *Journal of Coastal Research*, 1997, 13(2): 453-465.
- [9] BRUUN F P. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: A discussion on large-scale two- and three-dimensional usages [J]. *Journal of Coastal Research*, 1988, 4(4): 627-648.
- [10] 任美镔. 海平面研究的最近进展[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2000, 36(3): 269-279.
- [11] 覃超梅, 于锡军. 海平面上升对广东沿海海岸侵蚀和生态系统的影响[J]. *广州环境科学*, 2012, 27(1): 25-27.
- [12] GRAAFF J. Dune erosion during a storm surge [J]. *Coastal Engineering*, 1982, 1: 99-134.
- [13] DEAN R G, CHER R J, BROWDER A E. Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA [J]. *Coastal Engineering*, 1997, 29(S3/4): 291-315.
- [14] UDA T, SAN-NAMI T, SERIZAWA M. Beach erosion in Japan as a structural problem [A]// Proc. 14th Biennial Coastal Zone Conf. New Orleans, Louisiana, 2005.
- [15] UDA T. Beach erosion arising from artificial land modification [J]. *Disaster Resport*, 2007, 2(1): 29-36.
- [16] BARRIE J V, CONWAY K W. Rapid sea-level change and coastal evolution on the Pacific margin of Canada [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 150(1/2): 171-183.
- [17] PETHICK J. Coastal management and sea-level rise [J]. *Catena*, 2001, 42(2/3/4): 307-322.
- [18] 冯卫兵, 李冰, 王铮, 等. 二维沙质海滩剖面形态试验研究[J]. *海洋通报*, 2008, 27(5): 110-115.
- [19] 王广禄, 蔡锋, 苏贤泽, 等. 泉州市砂质海岸侵蚀特征及原因分析[J]. *台湾海峡*, 2008, 27(4): 547-554.
- [20] 易晓蕾. 中国的海岸侵蚀 [J]. *中国减灾*, 1995(1): 46-49.
- [21] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要 [J]. *地理学报*, 1993, 60(5): 468-476.
- [22] 李兵. 福建砂质海岸侵蚀原因和防护对策研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [23] 孙丽. 厦门海岸侵蚀淤积灾害及防治研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [24] 罗宪林, 李春初, 罗章仁. 海南岛南渡江三角洲的废弃与侵蚀 [J]. *海洋学报: 中文版*, 2000, 22(3): 55-60.
- [25] 黄少敏, 罗章仁. 海南岛沙质海岸侵蚀的初步研究 [J]. *广州大学学报: 自然科学版*, 2003, 2(5): 449-454.
- [26] 丰爱平, 夏东兴, 谷东起, 等. 莱州湾南岸海岸侵蚀过程与原因研究 [J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(1): 83-90.
- [27] 陈吉余, 陈沈良. 中国河口海岸面临的挑战 [J]. *海洋地质动态*, 2002, 18(1): 1-5.
- [28] 邸有鹏, 孙乐川, 王全勇. 海南博鳌湾海岸侵蚀演变及原因分析 [J]. *科学技术创新*, 2019(10): 35-37.
- [29] 王建, 张军强, 郭志谦, 等. 莱州湾南部地区 1973—2016 年海岸演化及防护对策 [J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(2): 27-36.
- [30] 黎奕宏. 我国三类典型海岸工程对相邻海滩的影响研

- 究[D]. 厦门:国家海洋局第三海洋研究所,2018.
- [31] 李汉英,张红玉,王霞,等. 海洋工程对砂质海岸演变的影响——以海南万宁日月湾人工岛为例[J]. 海洋环境科学,2019,38(4):575-581.
- [32] 田会波,印萍,阳凡林. 海南省万宁东部砂质海岸侵蚀特征分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(4):44-55.
- [33] 顾佳凯. 如东海岸动态特征及机理研究[D]. 南京:南京师范大学,2018.
- [34] WISE R A, SMITH S J, LARSON M. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 4. Cross-shore transport under random waves and model validation with SUPERTANK and field data [J]. Army Corps of Engineers, CERC, Technical Report CERC-89-9, 1997.
- [35] ROELVINK D, RENIERS A, DONGEREN A, et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands [J]. Coastal Engineering, 2009, 56 (11/12): 1133-1152.
- [36] DONGEREN A, BOLLE A, VOUSDOKAS M L, et al. Micore: Dune erosion and overwash model validation with data from nine european field sites [J]. Proceedings of Coastal Dynamics, 2009(9):7-11.
- [37] LEONT'YEV I O. Numerical modelling of beach erosion during storm event [J]. Coastal Engineering, 1996, 29(1/2):187-200.
- [38] SALLENGER A H. Storm impact scale for barrier islands [J]. Journal of Coastal Research, 2000, 16(3): 890-895.
- [39] COCO G, SENECHAL N, REJAS A, et al. Beach response to a sequence of extreme storms [J]. Geomorphology, 2014, 204:493-501.
- [40] LEE G H, NICHOLLS R J, BIRKEMEIER W A. Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981-1991 [J]. Marine Geology, 1998, 148(3/4):163-177.
- [41] PALMSTEN M L, HOLMAN R A. Laboratory investigation of dune erosion using stereo video [J]. Coastal Engineering, 2012, 60(5):123-135.
- [42] RUZ M H, MEUR-FEREC C. Influence of high water levels on aeolian sand transport: Upper beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, northern France [J]. Geomorphology, 2004, 60(1/2):73-87.
- [43] PYE K, BLOTT S J. Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates: An investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK [J]. Geomorphology, 2008, 102(3):652-666.
- [44] 于吉涛, 陈子荣. 砂质海岸侵蚀研究进展[J]. 热带地理, 2009, 29(2):112-118.
- [45] 倪孟书. 福建岸滩动态变化[J]. 台湾海峡, 1988, 7(2):103-111.
- [46] 陈子荣. 台风作用下海滩剖面地形动力与侵蚀机制分析[C]. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 南京, 2007.
- [47] 蔡锋, 苏贤泽, 杨顺良, 等. 厦门岛海滩剖面对 9914 号台风大浪波动力的快速响应[J]. 海洋工程, 2002, 20(2):85-90.
- [48] 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.
- [49] 李文善. 风暴环境下海岸沙丘演变的数值模拟研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
- [50] LAJOIE K R, MATHIESON S A. 1982-83 El Nino coastal erosion, San Mateo County, California [R]. Science for a Changing World, 1998.
- [51] HAMPTON A M. Short term evolution of three coastal cliffs in San Mateo County, California [J]. Shore and Beach, 1998, 4(66):24-30.
- [52] DUPERRET A, GEMTER A, MORTIMORE R N, et al. Coastal rock cliff erosion by collapse at Puys, France: The role of impervious marl seams within chalk of NW Europe [J]. Journal of Coastal Research, 2002, 18(1):52-61.
- [53] YOUNG A P, FLICK R E, GUTIERREZ R T, et al. Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California [J]. Geomorphology, 2009, 112(3):318-323.
- [54] COLLINS B D, SITAR N. Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA [J]. Geomorphology, 2008, 97(3/4):483-501.
- [55] BROOKS S M, SPENCER T, BOREHAM S. Deriving mechanisms and thresholds for cliff retreat in soft-rock cliffs under changing climates: Rapidly retreating cliffs of the Suffolk coast, UK [J]. Geomorphology, 2012, 153/154:48-60.
- [56] 哈长伟. 江苏淤泥质海岸侵蚀与沉积特征研究[D]. 上海:华东师范大学, 2009.
- [57] RAVENS T M, THOMAS R C, ROBERTS K A, et al. Causes of salt marsh erosion in Galveston Bay, Texas [J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(2):265-272.
- [58] ALLEN J R L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(12):1155-1231.
- [59] WAL D V, PYE K. Patterns, rates and possible causes of saltmarsh erosion in the Greater Thames area (UK) [J]. Geomorphology, 2004, 61(3/4):373-391.
- [60] SCHWIMMER R A. Rates and processes of marsh shoreline erosion in rehoboth bay, delaware, USA [J]. Journal of Coastal Research, 2001, 17(3):672-683.
- [61] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口发育的模式[J]. 海洋学报, 1979, 1(1):103-111.
- [62] 任美镔. 中国淤泥质潮滩沉积研究的若干问题[J]. 热带海洋, 1985, 4(2):6-14, 99.
- [63] 陈才俊. 江苏淤长型淤泥质潮滩的剖面发育[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(4):360-368.

- [64] 樊社军, 虞志英, 金镠. 淤泥质岸滩侵蚀堆积动力机制及剖面模式——以连云港地区淤泥质海岸为例 I. 波浪和潮流[J]. 海洋学报, 1997, 19(3): 66-76.
- [65] 樊社军, 虞志英, 金镠. 淤泥质岸滩侵蚀堆积动力机制及剖面模式——以连云港地区淤泥质海岸为例 II. 泥沙运动和岸滩剖面演变模式[J]. 海洋学报, 1997, 19(3): 77-85.
- [66] 王艳红, 张忍顺, 吴德安, 等. 淤泥质海岸形态的演变及形成机制[J]. 海洋工程, 2003, 21(2): 65-70.
- [67] 高抒. 废黄河口海岸侵蚀与对策[J]. 海岸工程, 1989, 8(1): 37-42.
- [68] 陆勤. 废黄河三角洲淤泥质海岸稳定性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [69] 陈宏友. 近期苏北废黄河三角洲海滩动态及其防护[J]. 海洋通报, 1991, 10(4): 59-65.
- [70] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 173-184.
- [71] 虞志英, 金镠, 陈德昌, 等. 淤泥质海岸近岸带水动力特征及人工吹泥条件下的岸滩演变——以连云港附近海岸为例[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1986(3): 88-99.
- [72] 王宝灿, 虞志英, 刘苍宇, 等. 海州湾岸滩演变过程和泥沙流向[J]. 海洋学报, 1980, 2(1): 79-96.
- [73] 逢自安. 浙江港湾淤泥质海岸剖面若干特性[J]. 海洋科学, 1980(2): 9-14, 18.
- [74] 王宝灿, 金庆祥. 浙江温州地区淤泥质海岸发育的探讨[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1983(4): 75-86.
- [75] 曹沛奎, 董永发. 浙南淤泥质海岸冲淤变化和泥沙运动[J]. 地理研究, 1984, 3(3): 53-63, 119.
- [76] 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 604-615.
- [77] 陈小英, 陈沈良, 刘勇胜. 黄河三角洲滨海区沉积物的分异特征与规律[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 714-721.
- [78] 陈沈良, 张国安, 陈小英, 等. 黄河三角洲飞雁滩海岸的侵蚀及机理[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 9-14.
- [79] 陈小英, 陈沈良, 李九发, 等. 黄河三角洲孤东及新滩海岸侵蚀机制研究[J]. 海岸工程, 2005, 24(4): 1-10.
- [80] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策[J]. 水利学报, 2004(7): 1-6, 13.
- [81] 徐宗军, 张绪良, 张朝晖. 山东半岛和黄河三角洲的海岸侵蚀与防治对策[J]. 科技导报, 2010, 28(10): 90-95.
- [82] 陈金月. 基于 GIS 和 RS 的近 40 年珠江三角洲海岸线变迁及驱动因素研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.
- [83] 陈玮彤, 张东, 施顺杰, 等. 江苏中部淤泥质海岸岸线变化遥感监测研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(5): 138-148.
- [84] 李光天, 符文侠. 我国海岸侵蚀及其危害[J]. 海洋环境科学, 1992, 11(1): 53-58.
- [85] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [86] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 468-476.
- [87] 季子修. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 69-79.
- [88] YÜKSEK Ö, ÖNSOY H, BIRBEN A R, et al. Coastal erosion in Eastern Black Sea Region, Turkey [J]. Coastal Engineering, 1995, 26(3): 225-239.
- [89] THEVENOT M M, KRAUS N C. Longshore sand waves at Southampton Beach, New York: Observation and numerical simulation of their movement [J]. Marine Geology, 1995, 126(1/2/3/4): 249-269.
- [90] 张明慧, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 海岸整治修复国内外研究进展与展望[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 635-640.
- [91] 罗时龙, 蔡锋, 王厚杰. 海岸侵蚀及其管理研究的若干进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1239-1247.
- [92] 张裕华. 中国海岸侵蚀危害及其防治[J]. 灾害学, 1996, 11(3): 15-21.
- [93] RAUDKIVI A J, DETTE H H. Reduction of sand demand for shore protection [J]. Coastal Engineering, 2002, 45(3): 239-259.
- [94] MIMURA N, SHIMIZU T, HORIKAWA K. Laboratory study on the influence of detached breakwater on coastal change [C]. Coastal Structures, 2010.
- [95] SAKASHITA T, SATO S, TAJIMA Y. Alongshore extension of beach erosion around a large-scale structure [C]. Coastal Sediments, 2011.
- [96] BIANCHI C N, MORRI C. Marine biodiversity of the mediterranean sea: Situation, problems and prospects for future research [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(5): 367-376.
- [97] 喻国华, 施世宽. 江苏省吕四岸滩侵蚀分析及整治措施[J]. 海洋工程, 1985, 3(3): 26-37.
- [98] 董吉田, 吕常五. 胶州湾东北部岸滩改造方案的讨论[J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(4): 73-79.
- [99] 蔡锋, 苏贤泽, 高智勇, 等. 闽粤交界的大埕湾岸滩稳定分析及岸滩防护对策[J]. 台湾海峡, 2003, 22(4): 518-525.
- [100] 王广禄. 海湾沙滩修复研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2008.
- [101] 李兵, 蔡锋, 曹立华, 等. 福建砂质海岸侵蚀原因和防护对策研究[J]. 台湾海峡, 2009, 28(2): 156-162.
- [102] 蔡锋. 中国海滩养护技术手册[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [103] 金雷鸣, 夏广政. 扇面式吹填技术在砂质海岸修复整治工程中的应用[J]. 中国水运, 2018, 18(7): 150-152, 176.
- [104] 李杏筠. 烟墩湾砂质海岸保护和整治修复探讨[J]. 汕头大学学报: 自然科学版, 2018, 33(3): 39-46.
- [105] 彭子成, 孙卫东. 治理黄河三角洲海岸侵蚀的生物措施——米草生态防护工程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(3): 45-48, 17.
- [106] 王瑾, 刘顿, 刘强. 海南岛海岸带红厚壳资源分布及生态防护应用研究进展[J]. 热带林业, 2014, 42(2): 11-14.
- [107] 潘丹, 曾嵘. 城市生态景观型海堤岸带工程建设初探——以防城港西湾红沙环海堤工程规划为例[J].

- 林业科技开发, 2014, 28(2):135-138.
- [108] 范航清, 何滨源, 王欣, 等. 生态海堤理念与实践[J]. 广西科学, 2017, 24(5):427-434, 440.
- [109] 林俊翔. 绿色生态海堤施工技术探讨[J]. 低碳世界, 2017(1):159-160.
- [110] 李丽凤, 刘文爱, 蔡双娇, 等. 广西北海滨海国家湿地公园生态海堤建设模式研究[J]. 湿地科学, 2019, 17(3):277-285.
- [111] 赵鹏, 朱祖浩, 江洪友, 等. 生态海堤的发展历程与展望[J]. 海洋通报, 2019, 38(5):481-490.
- [112] 罗时龙. 海岸侵蚀风险评价模型构建及其应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [113] 李广雪, 宫立新, 杨继超, 等. 山东滨海沙滩侵蚀状态与保护对策[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5):35-46.
- [114] LEE E M. Coastal cliff behaviour: Observations on the relationship between beach levels and recession rates [J]. Geomorphology, 2008, 101(4):558-571.
- [115] WALKDEN M, DICKSON M. Equilibrium erosion of soft rock shores with a shallow or absent beach under increased sea level rise [J]. Marine Geology, 2008, 251(1/2):75-84.
- [116] 王艳红. 废黄河三角洲海岸侵蚀过程中的变异特征及整体防护研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- [117] 李玫. 红树林生态防护效应研究进展[J]. 防护林科技, 2017(2):54-57.
- [118] 邵超. 海滩—珊瑚礁海岸侵蚀及适应性管理研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016.
- [119] 李元超, 兰建新, 郑新庆, 等. 西沙赵述岛海域珊瑚礁生态修复效果的初步评估[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(3):348-353.

Review on the Research of Coastal Erosion, Protection and Restoration

JI Xuekuan¹, LIN Zhenliang², YAN Youxi^{1,2}, ZHOU Xinwei¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530000, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi, 535011, China)

Abstract: The coastal zone is a special zone where three phase of solid-liquid-gas interact, and it is also a zone with developed economy, dense population and prominent contradictions. As the contradiction between people and the coastline has become increasingly prominent, the degree of damage to coastal erosion has been aggravated, and a series of problems brought about by this have caused many scholars to explore and study. This paper aims to introduce the erosion mechanism of sandy coast, soft rocky coast and muddy coast in combination with the latest research results at home and abroad, and analyze the causes and hazards of erosion, and give corresponding protection and repair methods. The emphasis is on ecological protection and restoration methods, corresponding considerations are given in terms of research methods and means, and prospects for future erosion research and repair work are presented.

Key words: coastal zone, coastal erosion, coastal protection, ecological restoration

责任编辑: 符支宏

更正声明

兹证明: 甄丹丹, 何柳艳, 莫缓恒, 唐春丽, 甄汉深同志在我刊即《广西科学》(ISSN 1005-9164, CN45-1206/G3) 2019年第5期522—526页发表的论文《广西产兰香草 HPLC 指纹图谱分析》, 页脚通信作者简介中的“唐春雪”应为“唐春丽”, 现特做更正声明。

《广西科学》编辑部
2019年12月1日