

江苏海岸侵蚀及其防护工程研究进展

陈君,林祥

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098)

摘要:在分析江苏淤泥质海岸侵蚀特征的基础上,对江苏海岸防护工程发展历程进行了梳理。随着冲淤转换节点南移,江苏海岸侵蚀岸段范围逐渐扩大,滩面下蚀且海岸盐沼大面积消失;传统的局部海岸防护形式已显被动,迫切需要一种局部与宏观相结合、自然与工程相结合的可持续性侵蚀海岸管理策略。指出应将废黄河三角洲沿岸作为一个整体,建立宏观的“大型丁坝+离岸潜堤”相结合的整体海岸防护体系。在纵向上,构建以人工岬角为节点的岬湾相间海岸;在横向上,通过离岸潜堤消浪促淤来进行盐沼生态系统的修复与重建。

关键词:江苏海岸;海岸侵蚀;离岸潜堤;人工节点;生态修复;淤泥质海岸

中图分类号:P748

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)05-0001-06

Research progress on coastal erosion and protection engineering in Jiangsu Province//CHEN Jun, LIN Xiang
(College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On the basis of analyzing the erosion characteristics of muddy coast in Jiangsu Province, the development process of coastal protection engineering in Jiangsu Province is summarized. With the southward shift of the erosion and siltation transition node, the range of eroded coast is expanding, with significant undercutting of tidal flats and large-scale disappearance of coastal salt marshes. Traditional localized coastal protection method have become passive. There is an urgent need for a sustainable erosive coastal management strategy that integrates both local and macro approaches, as well as natural and engineering solutions. It is suggested that the coast along the abandoned Yellow River Delta should be treated as a whole, and a comprehensive coastal protection system that combines large groynes and offshore submerged breakwaters should be established. Longitudinally, a headland-bay alternating coastline should be built using artificial headlands as nodes. Transversely, the restoration and reconstruction of salt marsh ecosystems should be carried out through offshore submerged embankments to dissipate waves and promote sedimentation.

Key words: coast in Jiangsu Province; coastal erosion; offshore submerged embankment; artificial node; ecological restoration; muddy coast

海岸带是受自然过程和人为过程共同影响的动态系统^[1]。随着全球气温持续升高以及冰原、冰川融化等,海平面上升速度加快^[2-3],河口和沿海低洼地区极易受此影响^[4-5]。虽然海岸硬防护工程(如海堤、抛石、防波堤等)已成为保护沿海基础设施、维持沿海生物栖息地的默认措施^[6],但会导致海岸侵蚀的加剧和防护工程结构的破坏,尤其是在风暴事件发生期间^[7-8]。我国几乎所有河流三角洲和开敞式潮滩都遭受侵蚀^[9]。小范围海岸侵蚀可以采用局部工程加固等措施来解决,而对于较大范围的海岸侵蚀,宜在掌握海岸发育规律的基础上,构建切实可行的、人工适度干预下的、可自然调节的侵蚀型海岸防护体系,以期达到更好的防护效果。

1 江苏海岸侵蚀特征

1.1 侵蚀型岸段分布具有地域性

2022年江苏海岸侵蚀长度为243.94 km^[10],侵蚀型岸段主要分布于两个区域,分别是浦港—斗龙港北的废黄河口沿岸和辐射沙脊群南翼的东灶港—塘芦港,其长度分别为144.21、71.72 km,约占全部侵蚀型岸段的66%和29%,均为淤泥质海岸;其余侵蚀型岸段零散分布于木套河口—龙王河口,其长度约为11.76 km,为砂质海岸。

大部分废黄河口沿岸处于严重侵蚀或强侵蚀状态。古黄河1128—1855年由苏北入海,河口淤涨速度为54~215 m/a,至1855年,河口已伸至今河口外

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407501)

作者简介:陈君(1974—),女,副教授,博士,主要从事海洋资源开发管理研究。E-mail:junchen@hhu.edu.cn

近 20 km,形成了北达灌河、南抵射阳河的废黄河三角洲。1855 年黄河北归后,废黄河口急剧后退,河流的堆积作用大减,波浪和潮流的掀沙和输沙作用加强,海岸线重新调整^[11]。1898—1957 年平均后退速度为 169 m/a,1957—1970 年为 85 m/a^[12]。后因兴修了护岸工程,后退渐停,但滩面持续刷深。除局部海岸工程建设导致堤脚处出现少量淤积外(如灌河和射阳河口双导堤根部),灌河口—斗龙港岸段整体呈侵蚀状态。

辐射沙脊群南翼的东灶港—塘芦港岸段处于微侵蚀状态,高滩大部分被匡围成港区,岸外隔小庙洪水道与腰沙相望,其侵蚀主要是由于腰沙沙脊群整体向南迁移。蒿枝港—塘芦港岸段已被列入国家海岸生态修复项目,正在进行生态海堤建设。

木套河口—龙王河口岸段位于海州湾顶,自 20 世纪 70 年代海州湾北端岚山头日照港建突堤码头、90 年代海州湾南端东西连岛建连岛大坝后,拦截了海州湾的沿海输沙,出现侵蚀。2010—2016 年赣榆港区防波堤建成后,外海偏北北东向波浪传播到工程水域时,波向角发生较为明显的偏转,原本斜向作用的波浪偏转为接近偏正向作用,波浪对局部海堤的冲刷作用增强^[13]。

1.2 冲淤转换节点南移

自废黄河口向南,侵蚀型海岸逐渐过渡至淤涨型海岸,冲淤转换节点一直是学术界讨论的热点之一。20 世纪 70 年代,学者们认为该节点位于运粮河口附近,80 年代南移至射阳河口^[12],当时预测至 20 世纪末可达新洋港附近^[14]。2012—2020 年,位于新洋港与斗龙港之间的盐城国家级珍禽自然保护区核心区范围内的米草滩外缘已发生明显侵蚀,其中新洋港南侧米草滩外缘受蚀向陆后退明显,斗龙港北侧变化相对较小,据此判断该区域已成为侵蚀转换的新地带^[15]。可见,1980—2020 年,冲淤转换节点由射阳河口南移 40 km 至斗龙港。

1.3 海岸侵蚀以滩面下蚀为主

江苏沿海潮滩剖面可分为 4 种类型,由淤涨型至侵蚀型依次为上凸型、上凸型+斜坡型、斜坡型和下凹型^[16],各类型剖面之间会互相转化^[9]。当潮滩由淤转蚀时,由于上边界被达标海堤固定,剖面会出现“上凸型—斜坡型—下凹型”的转化。几乎所有侵蚀型岸段的表现特征均有“滩面下蚀”。龚政等^[17]研究表明,部分淤涨型岸段甚至出现了侵蚀趋势,如川东港南侧潮滩剖面虽然呈双凸型,平均低潮位线以下潮间下带区域的剖面却呈下凹型,滩面的年冲刷超过 60 cm。

1.4 盐沼湿地面积萎缩

海岸盐沼主要分布于潮上带和潮间带。据 20 世纪 80 年代调查资料,潮上带和潮间带面积分别约为 832、5 000 km²^[11];据 21 世纪初江苏 908 专项调查资料,潮上带和潮间带面积分别约为 307、4 694 km²^[18],面积分别减少了约 525、306 km²。通过对比沿海各地适宜起围高程可知,侵蚀型海岸起围高程明显低于淤涨型海岸^[11],淤涨型海岸匡围工程的外堤线外侧通常至少保留宽度约 200 m 的草滩带,以持续扩张并拦沙促淤;而侵蚀型海岸匡围工程的外堤线则通常选址于草滩带的外缘线,盐沼湿地失去了适宜的生存空间,海岸发育进入“盐沼陆续消失—海岸持续侵蚀”的正反馈过程。

2 江苏海岸防护工程建设现状

2.1 海岸防护工程主要类型

海岸防护工程是指为海岸防护建造的不同类型的海岸建筑物或采取的其他海岸防护措施,其功能主要是防止海滩侵蚀以稳定海岸线,为海滨的后滨部分或填筑陆域提供保护^[19]。江苏海岸防护工程主要由海堤工程和护滩工程构成。

2.1.1 海堤工程

淮北海堤始建于南北朝,淮南海堤始建于唐朝,至清末沿海海堤全线已基本形成。1997 年和 2006 年,第一轮和第二轮海堤达标建设分别启动,后期又经历了多次完善加固^[20]。海堤面临的主要问题有两类:①短期显性破坏,受潮流(或潮沟)冲刷或强台风过境袭击,部分堤段会出现开裂、坍塌等,若同一段海堤经历多次破坏与修复,不同区间修复后的断面形式存在差异,安全隐患仍然存在;②长期隐性破坏,在海平面上升、泥沙来源断绝等各种自然因素作用下,堤外滩面持续刷低,威胁海堤稳定性。

海堤堤身结构形式主要为带消浪平台的复式断面结构^[21]。迎浪面护坡结构形式是工程的重点和难点。在侵蚀强烈或防护级别要求高的岸段,通常为干砌块石、浆砌块石、混凝土护坡等,部分岸段设有消浪石及消浪平台等,抗风浪能力较强。干砌块石护坡工程的块石之间无黏结力,易松动,缺乏整体性,若遇突发性的较大风浪袭击,如有一片块石松动被风浪冲掉即会形成突破口,致使砂石垫层及土堤迅速被破坏^[22]。浆砌块石和混凝土护坡结构相比干砌块石而言整体性更强、稳定性更好,但存在滩面持续冲刷所导致的护坡底坎冲刷问题,若底坎裸露,易形成空洞而成片塌落,堤脚处的抛石亦有可能随水体往复运动长期磨损海堤护坡。

在“波浪掀沙、潮流输沙”的作用下,淤泥质海滩的泥沙极易被波浪掀起并随潮流输移。“保堤先保滩”是江苏在长期工程实践中的科学总结,护滩工程包括丁坝、顺坝、网坝以及植被护滩等。

丁坝是一种大致与海岸线垂直布置的海岸建筑物,沿岸线建造多座丁坝可形成丁坝群,能够拦截沿岸输沙、促进淤积以保护一定长度的岸线。20 世纪 60 年代,在冲刷强烈的烧香河口—埕子口高滩岸段曾建有数十条长度为 100 m、间隔为 250 m 的丁坝。但是,由于海岸侵蚀并不受局部范围内的破波水流沿岸输沙所控制,丁坝保堤促淤效果并不理想^[23]。

顺坝是在离岸一定距离的水中建造的与岸大致平行的坝体,用以消减波浪并促使泥沙在坝后岸一侧沉积^[24]。目前,北起烧香河口,南至双洋港口岸段,除部分河口岸段和港区等区域外,均建有抛石顺坝、管桩顺坝等^[22,25]。顺坝建成后具有一定的促淤效果,如桩六合庄海岸防护中采用了高强管桩顺坝后,顺坝与岸坡之间滩面年最大淤积深度达 50 cm^[22];吕东海丰丁坝、顺坝工程建成 2 a 后,坝田内滩面平均淤高 32 cm^[26]。但是,顺坝由于距堤较近,防护范围有限,并不能阻止或减缓顺坝向海侧的滩面冲刷,甚至还需要通过某些工程手段以维持其自身稳定性。

网坝是一种用聚烯烃纤维编结的网,用水泥桩固定在海滩上做成网丁坝和网顺坝,用以消浪和减缓水流的冲刷,以达到保滩促淤的目的^[27]。由于网坝本身是透水的,相应地较实体的丁坝、顺坝在缓流促淤、改变水流结构、消减波能等方面弱得多^[28-29],目前已被舍弃。

江苏沿海地区自 1982 年开始引种互花米草,通过促淤消浪滞流来增加促淤量^[30-32]。但是,互花米草于 2003 年被列入中国第一批外来入侵物种名单。目前部分海岸生态修复工程已开始人工清除互花米草盐沼,盐城国家级珍禽自然保护区、东台条子泥、如东小洋口等近岸湿地自 2017 年起陆续利用多种综合防治方法治理互花米草以恢复滩涂原生植被,但是,互花米草清除后由于存在低潮滩区域的替代性植物缺乏等问题,只能形成光滩,可能会加剧海岸侵蚀^[33]。

2.2.1 沿岸均建有一定标准的海岸防护工程

江苏沿海除分布于海州湾附近的少量砂质海岸和基岩海岸为自然岸线外,其余均为人工岸线,约占海岸线总长度的 95.5%^[34]。海堤工程通常为 50 年一遇高潮位加 10 级风浪的设防标准,部分海堤为

50~100 年一遇的设防标准。即使在台风、风暴潮等极端天气情况下,大部分岸段的达标海堤工程安全性仍然较高,对于保护海堤内侧沿海地区起到了重要作用,海堤仍是江苏海岸防护的重要基础工程。

淤泥质海岸的沿岸输沙是一个横向范围十分宽阔、纵向距离很长的非封闭系统^[23]。然而,从横向上讲,海堤工程只能保护其后侧的海岸陆地,对于其前方的海滩并不能起到防止或减弱侵蚀的作用^[19];护滩工程防护范围基本局限在潮间带以浅区域,而对于破波带附近海域基本无防护效果。可见,保滩护岸工程仅局限于堤前有限的空间范围,只能被动地接受“海平面上升—海岸动力加强—海岸防护压力增大”这一事实。如振东闸以北段海堤自1998年以来,长期受潮水冲刷和台风袭击,堤前滩面刷降严重,滩面下切速度较快,滩面由建设初期的2.00 m降至-2.00 m左右^[25],导致作用于海堤上的波浪动力增强,板桩呈悬臂状态,堤身压脚石和桩周抛石沉陷,海堤护底、护面结构被侵蚀基本丧失工程防护能力。

近年来侵蚀型海岸陆续建设了若干近似垂直于堤线的海岸工程(图1、表1),改变了近岸动力泥沙过程,部分侵蚀型岸段转变为稳定型岸段或淤涨型岸段,尤以绣针河口—灌河口岸段表现明显。21世纪初江苏侵蚀型岸段为绣针河口—兴庄河口、烧香河口—射阳河口、东灶港—蒿枝港等^[35]。根据《2022年江苏省海洋灾害公报》^[10],绣针河口—兴庄河口对应的侵蚀型岸段调整为木套河口—龙王河口,而修建了赣榆港区环抱式防波堤的绣针河口—

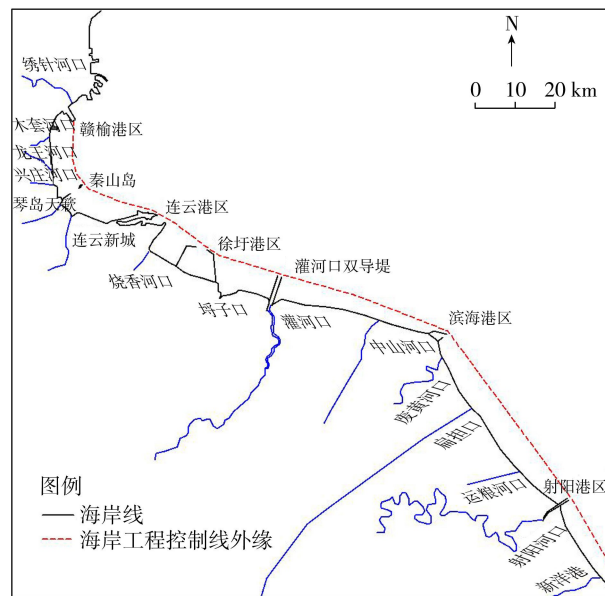


图 1 江苏绣针河口—新洋港岸段部分海岸工程示意图

表 1 江苏绣针河口—新洋港岸段部分海岸工程统计

工程名称	与前一工程 距离/km	建设时间	主要工程参数
赣榆港区东防波堤	9	2010—2012 年	东防波堤长约 6.3 km
赣榆港区防波堤 C 段		2014—2016 年	防波堤 C 段长约 4 km
赣榆琴岛天籁区围工程	20	2012—2021 年	围填新海堤与老海堤间距约 2 km,垂直于新建东堤建设长约 2 km 栈桥,与秦山岛相望
连云新城围工程	7	2006—2012 年	围填海面积 17.64 km ² ,自海堤向海延伸约 2 km
连云港区旗台作业区防波堤工程	13*	2009—2014 年	北防波堤长约 2.5 km,南防波堤长约 5 km
徐圩港区东、西防波堤	8	2012—2018 年	东、西防波堤形成大环抱形态,总长约 22 km;口门离岸 9.5 km,位于-5.0 m 等深线附近,宽度 1.2 km
灌河口 2 万 t 级航道整治 双导堤工程	15.5	2011—2012 年	东导堤长 10.117 km,西导堤长 8.426 km,堤顶高程+3.0 m,堤头位于-2.0 m
滨海港区 10 万 t 级航道 防波挡沙堤工程	45	2008—2011 年	港池口门面向东南,分为南、北两堤,出水口门宽 800 m,南堤长 1 735 m,堤头水深-8.5 m 左右,北堤起始段长 2 356 m,至-8 m 水深附近南偏 35°后延伸至-12 m
射阳河口双导堤工程	60	2011—2016 年	双导堤工程分 2 期完成:一期工程建成航道南侧 6.2 km、北侧 6.3 km 的防沙挡浪双导堤,导堤间距为 1.2 km,堤头位于-5 m 等深线处;二期工程南北导堤分别沿一期工程端部向航道方向偏转约 7°,南北导堤长度分别延长了 1.6 km

注: * 其间为东西连岛。

木套河口段调整为淤涨型岸段,位于新建围海养殖垦区北侧的龙王河口—兴庄河口岸段亦调整为稳定型岸段;烧香河口—灌河口北导堤长约 40 km 的岸线,仅烧香河口南—徐圩港区北防波堤和埭子口两侧为侵蚀型岸段,其余均转变为稳定型岸段或淤涨型岸段。

由图 1 和表 1 可知,灌河口 2 万 t 级航道整治双导堤工程以北岸段,几乎每隔 10 km 左右便有一道延伸入海的防波堤、潜堤或栈桥,此类海岸工程建筑物近似将海岸动力带外推约 4~10 km 不等。反观灌河口以南至新洋港口岸段,除在废黄河口新建滨海港区 10 万 t 级航道防波挡沙堤工程外,无其他新建向海突出的海岸工程,难以对长距离海岸发育产生明显影响。

3 江苏海岸防护工程建设建议

3.1 淤涨型和稳定型淤泥质海岸防护工程

海岸盐沼作为抵御风暴潮和风浪的天然缓冲器^[36-37],是表征淤涨型和稳定型淤泥质海岸冲淤动态的重要标志之一。一些国家过去 50 年海岸盐沼损失率达 70%~80%^[38-39],为了改变这一现状,陆续实施了海岸盐沼湿地生态修复工程,以恢复和增强生态系统功能^[40-42]。

2017 年《全国海堤建设方案》提出生态海堤可成为未来海堤建设的一个重要方向。生态海堤是指满足海洋灾害防护要求、模拟滨海生态系统结构和生态过程、具有生态功能和美学价值的复合生态系统,具备抵御风暴潮涨水、抵御海浪侵蚀、防止水土流失、维护生物多样性和改善水质等功能,主要包括离岸防护、海向浅滩、海堤堤身 3 个系统^[43]。其中,

海向浅滩主要是进行岸滩植被修复,以防风促淤、护岸护堤形成堤前天然缓冲带。《围填海工程生态建设技术指南(试行)》指出,江苏的粉砂淤泥质滩涂岸滩可选择碱蓬属、柽柳属、芦苇属等植物,以恢复海岸的生态涵养、鸟类栖息、促淤消浪等功能。

3.2 侵蚀型淤泥质海岸防护工程

对于零散分布的小范围侵蚀型岸段,仍可采取修建传统的局部防护方式解决。对于灌河口—斗龙港和东灶港—塘芦港两个连续大范围侵蚀型岸段,东灶港—塘芦港目前已采取修建离岸潜堤的生态海堤修复方案;灌河口—斗龙港的废黄河三角洲沿岸仍是关注的焦点,传统的局部海岸防护工程不可能改变较大范围内输沙不平衡所导致的海岸逆向发育过程,这里提出将废黄河三角洲沿岸作为一个整体,建立宏观的“大型丁坝+离岸潜堤”相结合的整体海岸防护体系,通过关键节点的海岸工程建设,使岸滩剖面和岸线形态达到平衡与稳定。

3.2.1 人工岬角的构建

密西西比河三角洲沿岸区存在准连续的悬浮沉积物源,自 1985 年开始建设大型丁坝来拦截泥沙和稳定海岸^[44],目前已取得了预期效果。因此,参考类似工程以及灌河口以北海岸工程实践,灌河口—斗龙港岸段可按照适宜间距建设大型丁坝形成人工岬角以拦沙促淤、控制侵蚀^[45]。可选择建设的人工岬角位置有中山河口(与灌河口、滨海港区的间距均约为 20 km)、苏北灌溉总渠入海口(与滨海港区、双洋港口的间距约为 20 km)、双洋港口(与苏北灌溉总渠入海口、射阳河口双导堤的间距分别约为 20、10 km)。人工岬角向海侧端点可选择达到冲淤平衡的水深处,形成以稳定岸弧为主体的岬湾相间

海岸整体防护体系。

3.2.2 离岸潜堤的构建

波浪是控制侵蚀型海岸演变的主要动力,可在离岸一定距离的浅水海域中建造大致与岸线平行的离岸潜堤以达到消浪效果。例如,射阳河口北侧双洋港—运粮河口的生态修复方案中就包括在-5 m等深线处建设离岸潜堤,根据数模计算结果,在代表性风速、风向情况下,平均海平面的消浪效果可达70%以上,计算高水位的消浪效果约为10%~25%。由此,离岸潜堤与海堤之间形成一个开放的弱淤积潮滩环境,促进淤泥质海岸湿地生态系统的恢复和重建,实现物理环境-生物生长之间的反馈机制^[46],即以海岸盐沼植被结合传统的堤脚抛石共同构成自然与工程相结合的防护体系。

4 结 语

江苏侵蚀型海岸主要集中连片分布于灌河口—斗龙港,处于滩面蚀低且受蚀后退过程中,是未来海岸防护的重点地区;其次分布于东灶港—塘芦港,处于微侵蚀状态,已列入国家海岸生态修复项目之列;其余侵蚀型岸段零散分布于海州湾顶以及烧香河口—灌河口之间,此岸段已趋于由侵蚀型转向稳定型。

江苏海岸防护包括海堤工程和护滩工程,海堤工程设防标准为50~100年一遇,95.5%海岸建有达标海堤;护滩工程包括丁坝、顺坝、植被护滩等,对于侵蚀型海岸而言防护范围和防护效果均有限,难以阻止堤外潮滩的持续冲刷。

鉴于局部海岸防护形式较为被动,提出将废黄河三角洲沿岸作为一个整体,建立宏观的“大型丁坝+离岸潜堤”相结合的整体海岸防护体系,通过关键节点的海岸工程建设,使岸滩剖面 and 岸线形态达到平衡与稳定,从而恢复盐沼湿地生态环境和海岸功能。

参考文献:

[1] POLK M A, EULIE D O. Effectiveness of living shorelines as an erosion control method in North Carolina [J]. Estuaries and Coasts, 2018, 41 (8) : 2212-2222.

[2] BORCHERT S M, OSLAND M J, ENWRIGHT N M, et al. Coastal wetland adaptation to sea level rise: quantifying potential for landward migration and coastal squeeze [J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 55 (6) : 2876-2887.

[3] SAFAK I, ANGELINI C, NORBY P L, et al. Wave transmission through living shoreline breakwalls [J]. Continental Shelf Research, 2020, 211 : 104268.

[4] ELLISON J C. Vulnerability assessment of mangroves to

climate change and sea-level rise impacts [J]. Wetlands Ecology and Management, 2015, 23 (2) : 115-137.

[5] THORNE K, MACDONALD G, GUNTENSPERGEN G, et al. U. S. Pacific coastal wetland resilience and vulnerability to sea-level rise [J]. Science Advances, 2018, 4 (2) : eaa03270.

[6] SAFAK I, NORBY P L, DIX N, et al. Coupling breakwalls with oyster restoration structures enhances living shoreline performance along energetic shorelines [J]. Ecological Engineering, 2020, 158 : 106087.

[7] GITTMAN R K, POPOWICH A M, BRUNO J F, et al. Marshes with and without sills protect estuarine shorelines from erosion better than bulkheads during a category 1 hurricane [J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 102 : 94-102.

[8] GITTMAN R K, SCYPHERS S B, SMITH C S, et al. Ecological consequences of shoreline hardening: a meta-analysis [J]. BioScience, 2016, 66 (9) : 763-773.

[9] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要 [M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 1-10.

[10] 江苏省自然资源厅. 2022 年江苏省海洋灾害公报 [R]. 南京: 江苏省自然资源厅, 2023.

[11] 任美镔. 江苏海岸和海涂资源综合调查报告 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 368-379.

[12] 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. (ZHANG Renshun. Land-forming history of the Huanghe River delta and coastal plain of North Jiangsu [J]. Acta Geographic Sinica, 1984, 39 (2) : 173-184. (in Chinese))

[13] 王登婷, 陈长奇, 赵一晗, 等. 江苏省海堤建设及生态海堤研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 2020: 88-95.

[14] 高抒. 废黄河口海岸侵蚀与对策 [J]. 海岸工程, 1989, 8 (1) : 37-42. (GAO Shu. Erosion of Old Yellow River delta in northern Jiangsu and coast protection [J]. Coastal Engineering, 1989, 8 (1) : 37-42. (in Chinese))

[15] 何金, 傅成来, 束立勇, 等. 江苏盐城海岸侵蚀淤积现状及原因 [J]. 地质学刊, 2021, 45 (2) : 189-196. (HE Jin, FU Chenglai, SHU Liyong, et al. Analysis on the status quo and causes of erosion and deposition of Yancheng coastline in Jiangsu Province [J]. Journal of Geology, 2021, 45 (2) : 189-196. (in Chinese))

[16] 陈君, 王义刚, 蔡辉. 江苏沿海潮滩剖面特征研究 [J]. 海洋工程, 2010, 28 (4) : 90-96. (CHEN Jun, WANG Yigang, CAI Hui. Profile characteristics study of the Jiangsu coast [J]. The Ocean Engineering, 2010, 28 (4) : 90-96. (in Chinese))

[17] 龚政, 靳闯, 张长宽, 等. 江苏淤泥质潮滩剖面演变现场观测 [J]. 水科学进展, 2014, 25 (6) : 880-887. (GONG Zheng, JIN Chuang, ZHANG Changkuan, et al. Surface elevation variation of the Jiangsu mudflats: field observation [J]. Advances in Water Science, 2014, 25

- (6):880-887. (in Chinese))
- [18] 王颖. 南黄海辐射沙脊群环境与资源[M]. 北京:海洋出版社,2014:9-13.
 - [19] 严恺. 海岸工程[M]. 北京:海洋出版社,2002:50-60.
 - [20] 江苏省水利厅. 江苏水利年鉴(2019)[M]. 南京:河海大学出版社,2019:100.
 - [21] 陈君,林祥,孙典红. 江苏海堤工程建设研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 103-108. (CHEN Jun, LIN Xiang, SUN Dianhong. Research review on seawall project construction in Jiangsu Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 103-108. (in Chinese))
 - [22] 曹爱武,李云飞. 江苏省滨海县侵蚀性海岸治理工程结构型式浅析[J]. 治淮, 2002(11): 30-31. (CAO Aiwu, LI Yunfei. Analysis of structural types of erosive coastal treatment projects in Binhai, Jiangsu Province[J]. Control Huaihe River, 2002(11): 30-31. (in Chinese))
 - [23] 虞志英,劳治声,金庆祥,等. 淤泥质海岸工程建设对近岸地形和环境影响[M]. 北京:海洋出版社,2003:80-90.
 - [24] 薛鸿超. 海岸及近海工程[M]. 北京:中国环境科学出版社,2003:160-179.
 - [25] 赵一晗,黄哲,王登婷. 侵蚀岸段海堤破坏机理及修复方案[J]. 水运工程, 2022(7): 23-28. (ZHAO Yihan, HUANG Zhe, WANG Dengting. Damage mechanism and remediation plan of seawall on eroded coast[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(7): 23-28. (in Chinese))
 - [26] 汤仲仁. 南通市侵蚀性海岸的防护[J]. 江苏水利, 2002, 18(7): 26. (TANG Zhongren. Protection of erosive coasts in Nantong[J]. Jiangsu Water Resources, 2002, 18(7): 26. (in Chinese))
 - [27] 喻国华. 江苏海岸侵蚀特点与治理[J]. 江苏水利, 1986(4): 57-64. (YU Guohua. Characteristics and management of coastal erosion in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Water Resources, 1986(4): 57-64. (in Chinese))
 - [28] 呼延如琳. 网坝在实践中的作用和效果[J]. 江苏水利, 1980(1): 83-93. (HUYAN Rulin. The role and effectiveness of network dams in practice[J]. Jiangsu Water Resources, 1980(1): 83-93. (in Chinese))
 - [29] 唐晓春. 一九八一年十四号强台风对江苏海岸的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1986(2): 153-164. (TANG Xiaochun. The influence of the Agnes typhoon of 1981 on the coast of Jiangsu, China[J]. Journal of Southwest Teachers University, 1986(2): 153-164. (in Chinese))
 - [30] 张忍顺,沈永明,陆丽云,等. 江苏沿海互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼的形成过程[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(4): 358-366. (ZHANG Renshun, SHEN Yongming, LU Liyun, et al. Formation of *Spartina alterniflora* salt marsh on Jiangsu coast, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(4): 358-366. (in Chinese))
 - [31] 关道明. 中国滨海湿地米草盐沼生态系统与管理[M]. 北京:海洋出版社,2009:43-65.
 - [32] 罗锋,代建成,陈治澎,等. 基于改进机会窗口理论的盐城湿地互花米草前缘时空变化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 56-64. (LUO Feng, DAI Jiancheng, CHEN Zhipeng, et al. Spatial-temporal variation of *Spartina alterniflora* edge in Yancheng wetland based on improved windows of opportunity theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 56-64. (in Chinese))
 - [33] 赵晖,康晓光,朱正杰,等. 江苏海岸带互花米草防治策略探讨[J]. 湿地科学与管理, 2023, 19(6): 77-80. (ZHAO Hui, KANG Xiaoguang, ZHU Zhengjie, et al. Strategies for controlling *Spartina alterniflora* in coastal zones of Jiangsu Province[J]. Wetland Science & Management, 2023, 19(6): 77-80. (in Chinese))
 - [34] 张长宽. 江苏省近海海洋环境资源基本现状[M]. 北京:海洋出版社,2013:100-130.
 - [35] 张忍顺,陆丽云,王艳红. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 469-478. (ZHANG Renshun, LU Liyun, WANG Yanhong. The mechanism and trend of coastal erosion of Jiangsu Province in China[J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 469-478. (in Chinese))
 - [36] LEONARDI N, CARNACINA I, DONATELLI C, et al. Dynamic interactions between coastal storms and salt marshes: a review[J]. Geomorphology, 2018, 301: 92-107.
 - [37] WANG Xinchun, XIN Pei, ZHOU Zeng, et al. A systematic review of morphological models of salt marshes[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4): 313-323.
 - [38] ZHOU Zeng, LIANG Mengjiao, CHEN Lei, et al. Processes, feedbacks, and morphodynamic evolution of tidal flat-marsh systems: progress and challenges[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(2): 89-102.
 - [39] DUKE N C, MEYNECKE J O, DITTMANN S, et al. A world without mangroves? [J]. Science, 2007, 317(5834): 41-42.
 - [40] LIU Zezheng, CUI Baoshan, HE Qiang. Shifting paradigms in coastal restoration: six decades' lessons from China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566-567: 205-214.
 - [41] BAYRAKTAROV E, SAUNDERS M I, ABDULLAH S, et al. The cost and feasibility of marine coastal restoration[J]. Ecological Applications, 2016, 26(4): 1055-1074.
 - [42] LIU Zezheng, FAGHERAZZI S, MA Xu, et al. Consumer control and abiotic stresses constrain coastal saltmarsh restoration[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 274: 111110.

(下转第31页)

(FU Chun, YANG Zhifeng, LIU Changming. Connotation and evaluation index system for water conservancy modernization[J]. Advances in Water Science, 2002, 13 (4):502-506. (in Chinese))

[32] 尹豪,章仁俊. 水利现代化评价模型及其应用[J]. 农业现代化研究, 2005, 26(5):393-396. (YIN Hao, ZHANG Renjun. An evaluation model for modernization of water conservancy and the application [J]. Research of Agricultural Modernization, 2005, 26 (5): 393-396. (in Chinese))

[33] 孟祥礼,张玉福. 水利现代化评价指标体系的赋权方法研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(2):248-250. (MENG Xiangli, ZHANG Yufu. Method of determining evaluation index system of water conservancy and index weight[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(2):248-250. (in Chinese))

[34] 欧建锋,叶健,程吉林. 主成分分析法在江苏水利现代化评价中的应用[J]. 人民长江, 2010, 41(2):97-100. (OU Jianfeng, YE Jian, CHENG Jilin. Application of main component analysis method in comprehensive evaluation for water conservancy modernization in Jiangsu Province [J]. Yangtze River, 2010, 41(2):97-100. (in Chinese))

[35] 王亚华,黄译萱. 中国水利现代化进程的评价和展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(6):120-127. (WANG Yahua, HUANG Yixuan. Evaluation and prospect of China's water conservancy modernization process[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22 (6):120-127. (in Chinese))

[36] 喻君杰. 水利高质量发展评价因素初探[J]. 水利发展研究, 2019, 19(10):27-32. (YU Junjie. Preliminary study on evaluation factors of high-quality development of water conservancy [J]. Water Resources Development Research, 2019, 19(10):27-32. (in Chinese))

[37] 左其亭,钟涛,张志卓,等. 水利高质量发展的判别准则及评价体系[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5):109-117. (ZUO Qiting, ZHONG Tao, ZHANG Zhizhuo, et al. Discriminant criteria and evaluation system of high-quality development of water conservancy[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 33(5):109-117. (in Chinese))

[38] LU Nan, ZHU Jiwei, CHI Hui, et al. Progress assessment and spatial heterogeneity analysis of water conservancy modernization construction in China [J]. Sustainability, 2021, 13(7):3736.

[39] 栗欣如,姜文来,冯欣. 我国水利绿色发展水平测算分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1):7-17. (LI Xinru, JIANG Wenlai, FENG Xin. Calculation and analysis of water conservancy green development in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1):7-17. (in Chinese))

[40] 吴丹. 中国水利绿色现代化发展进程评价与战略构想[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9):114-123. (WU Dan. Evaluation and strategic conception of China's water conservancy green modernization process[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25 (9): 114-123. (in Chinese))

[41] 王亚华,胡鞍钢. 中国水利之路:回顾与展望(1949—2050)[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2011, 26(5):99-112. (WANG Yahua, HU Angang. The road of China water development; retrospect and prospect (1949-2050) [J]. Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences), 2011, 26 (5): 99-112. (in Chinese))

[42] 王亚华,黄译萱,唐啸. 中国水利发展阶段划分:理论框架与评判[J]. 自然资源学报, 2013, 28(6):922-930. (WANG Yahua, HUANG Yixuan, TANG Xiao. Division of China water conservancy development stages; theoretical framework and evaluation [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(6):922-930. (in Chinese))

[43] 吴丹,王亚华. 中国水利现代化进程的再评价及其含义[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(5):137-151. (WU Dan, WANG Yahua. Re-evaluation of the process of water conservancy modernization in China and its implications [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(5):137-151. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-28 编辑:俞云利)

(上接第6页)

[43] 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. (ZHAO Peng, ZHU Zuhao, JIANG Hongyou, et al. The development and outlooks of the ecological seawall [J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(5):481-490. (in Chinese))

[44] NORMAN C, HUNTER R G, DAY J W, et al. A review of issues related to formation, deterioration and restoration of the Chenier Plain, Mississippi River Delta, LA: combining nature based and engineered approaches [J]. Nature-Based Solutions, 2022, 2:100037.

[45] 戴龙洋,张阳. 盐城市侵蚀性海岸防护设计[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3):49-53. (DAI Longyang, ZHANG Yang. Protection design of erosive coast of Yancheng City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3):49-53. (in Chinese))

[46] 陈一宁,陈鹭真,蔡廷禄,等. 滨海湿地生物地貌学进展及在生态修复中的应用展望[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(5):1055-1065. (CHEN Yining, CHEN Luzhen, CAI Tinglu, et al. Advances in biogeomorphology in coastal wetlands and its application in ecological restoration [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51 (5): 1055-1065. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-12 编辑:俞云利)