

河口滩涂围垦对水动力环境影响研究综述

汤立群¹, 卢 单^{1,2}, 赵慧明¹, 周建康², 郭传胜¹, 刘大滨¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;
2. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:通过综述评价,认为河口滩涂利用对水动力环境的影响主要体现在:滩涂围垦使得工程水域的水动力环境发生改变,迫使原有的河床稳定状态重新调整;大量的泥沙淤积导致陆域向海发展,海岸发生改变,导致潮滩失去对潮能的存储与耗散作用,改变潮汐范围;大规模的围垦也会使河口缩窄,破坏滩涂的湿地形态,导致河流的行洪能力可能降低,使周边城镇易受洪涝灾害。提出应将滩涂利用对水动力、河口岸线变化和防洪御潮等方面的影响进行系统评价,以指导滩涂的高效利用与保护。

关键词:滩涂围垦;水动力环境;河口;海岸线;纳潮量;防洪排涝

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)06-0078-07

Review of impacts of tideland reclamation on hydrodynamic environment near estuarine area//TANG Liqun¹, LU Dan^{1,2}, ZHAO Huiming¹, ZHOU Jiankang², GUO Chuansheng¹, LIU Dabin¹ (1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, IWHR, Beijing 100048, China*; 2. *College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*)

Abstract: The impacts of tideland reclamation on hydrodynamic environment near estuarine area were reviewed and evaluated. The hydrodynamic environment in the engineering water region can be changed by tideland reclamation, resulting in re-adjustment of the original stable river bed. Vast sediment accumulation can lead to the development of land area toward the sea, and coastlines can be altered. The effect of storage and dissipation of tidal energy by tidal flat can be lost, and the tidal range can be changed. Estuaries can be constricted and wetland morphology can be destructed by large scale reclamation, leading to possible reduction of flood discharge capacity of rivers and flood disasters impacted on surrounding towns. It is proposed that system evaluation should be performed for the impacts of tideland reclamation on hydrodynamics, estuary and coastline changes, flood and tide prevention so as to guide the efficient utilization and protection of tideland.

Key words: tideland reclamation; hydrodynamic environment; estuary; coastline; tidal prism; flood control and drainage

滩涂是河口海岸区域陆海相互作用的集中地带,在地貌学上称为“潮间带”,指沿海大潮高潮位与低潮位之间的潮浸地带,其物理、化学、生物、地质等过程十分复杂。因在提高海岸防御能力、增加潜在土地资源和保护生物多样性等方面具有重要作用,滩涂围垦受到沿海国家的极大重视。河口海岸滩涂利用具有两面性:一方面,随着沿海经济的快速发展,利用滩涂拓展发展空间,已成为各国沿海地区突破土地资源“瓶颈”、推动经济社会发展的重要途径;另一方面,滩涂作为人类活动最为频繁的地区,高强度的开发利用直接或间接地改变了海岸带原有的地表形态及自然的物理化学过程,使得河口海岸滩槽动力地貌格局发生变化,增加了海岸带潜在风险^[1],造成沿海生态、资源环境、洪潮灾害及经济社会等诸多问题^[2]。因此,实现滩涂资源保护与高效利用对保证各国沿海经济持续发展具有重要意义。国内外学者从水利工程学、地学、海洋学、环境学等不同学科角度,对河口海岸滩涂演变机理及利用影响机制等科学问题进行了大量研究,以尽量减少甚至避免滩涂围垦所引起的河口海岸线变化、水动力环境变化及洪涝灾害加剧等不利影响^[3]。然而,目前相关研究更多的关注于特定滩涂利用的局部影

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407503);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(SE0145B142017);中国水利水电科学研究院“十三五”创新团队支持项目(SE0145B572017)。

作者简介:汤立群(1962—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事河流及河口海岸泥沙运动过程模拟研究。E-mail: tanglq@iwhr.com

响,是对滩涂单个功能影响的定量分析。而滩涂作为一个具有多重功能的资源,具有空间动态性、资源多功能性和利用模式多样性等诸多特点。更具前瞻性和综合性的研究需要从以下两方面进行,一是从资源承载力的角度评估滩涂利用所产生的影响以及滩涂资源利用和相关制约因素之间的互馈关系;二是从可持续发展角度对其承载力及资源状况进行科学、准确的评价。包括系统研究河口河势、防洪、滩槽稳定和海堤安全等约束要素对滩涂利用的响应机制,量化评估其累积效应和互馈机制,分析滩涂利用引起河口河势和滩槽稳定变化对海堤稳定的可能影响,为海堤安全风险评估提供水沙动力指标因子等。

综上,围垦作为一项储备土地资源的有效手段,对经济社会发展具有重要的推动作用,同时,作为一项显著改变海洋自然属性的人类海洋开发利用行为,如果缺乏科学的评估与规划,会对海洋生态环境带来不利影响,制约社会经济的可持续发展^[4]。本文在介绍我国重点滩涂资源开发现状的基础上,综述了滩涂围垦在河口水动力、河口岸线及防洪排涝等水动力环境方面的影响,为后续整体系统开展河口海岸带滩涂利用与滩槽交换、河势演变、防洪御潮、海堤稳定的互馈关系提供前瞻性课题,科学指导河口滩涂利用的规划、实施与保护。

1 我国重点滩涂资源开发现状

我国海域接纳多条世界级大江大河,泥沙来源丰富,发育有约3万km²的滩涂。我国早在汉代已有小规模围垦,唐代与宋代时江苏、浙江沿海农业和盐业日益发达,围垦规模逐渐扩大,出现了百里长堤。近70年来,中国大陆岸线开发利用程度持续而显著增加,尤其是20世纪90年代以来,岸线人工化趋势迅猛,自然岸线由20世纪40年代初的1.48万km(约占总海岸线的81.69%)持续降低至2014年的0.65万km(约占总海岸线的32.92%)^[5]。

珠江三角洲沿海滩涂围垦发展较早,在改革开放初期的1980年,珠江口东岸区域就开始了一系列开发活动,前期开发方式为工程建设和围垦养殖相结合;1995年后,珠江口西岸区域开始进行较大规模的人类开发活动^[6]。1978—2003年珠江河口围垦的滩涂总面积约561km²,平均围垦强度达22.4km²/a,大规模围垦主要分布在蕉门、横门、磨刀门、鸡啼门西滩(连岛大堤)、崖门等处^[7]。随着社会经济的持续高速发展,珠江三角洲海岸演进呈现越来越快的趋势,河口向海延伸速度达100m/a左右,局部延伸速度高达200m/a,远大于长江河口20m/a及黄河河口48m/a的向海延伸速度^[8]。

1975—2017年,长江三角洲滩涂面积整体呈降低趋势,但存在区域差异,20世纪90年代后降低趋势较为明显,总体降低速率约为21.7km²/a^[9]。其中,江苏沿海滩涂数量众多,分布最广,面积约占全国总滩涂面积的1/4^[10]。解放后至2006年底,江苏沿海地区累计匡围滩涂170多次,匡围滩涂总面积达2493km²,用途则以农业生产、水产养殖、国营盐场为主^[11]。垦区主要分布于南通市的如东,盐城市的东台、大丰、射阳和响水,连云港市的连云区^[12]。浙江省濒临东海,海域辽阔,港湾岛屿众多,海岸线曲折而漫长,滩涂资源约占全国滩涂资源总量的13%左右^[13]。1950—2017年,全省滩涂围垦面积达2806km²,为浙江省经济社会的可持续发展特别是拓展发展空间发挥了重要作用^[14]。据资料统计,浙江省有近1/4的耕地是千百年来经过滩涂围垦所形成的,这些地区现已成为经济发达地区和富庶、繁荣的美好家园^[15]。上海地处长江入海口特殊的地理位置,长江所携带的泥沙在入海口沉淀淤积,使得滩涂资源不断增多,解放后上海市在长江口附近共匡围滩涂1000km²,相当于上海市陆地面积的近20%。围垦滩涂主要分布在长江口北支崇明岛北沿、东滩,长江口南支长兴岛北部,长江口南岸浦东新区三甲港至南汇嘴及杭州湾北岸^[16]。

环渤海区域包括辽宁省、河北省、天津市和山东省,沿海滩涂围垦造地发展最晚。但2000年以来围垦规模不断扩大,年均增长186.28km²。到2016年围垦土地面积为4745.42km²,占全国围垦总面积的52.0%^[17]。海岸带开发活动主要集中在辽东湾北部、渤海湾至莱州湾南部、辽宁省东部,以天津市和河北省所在的渤海湾地区海岸线变化最剧烈^[18]。环渤海已成为我国围填海的重心区域,由于围填海和河口三角洲增长,20世纪40年代以来渤海面积萎缩速率大于82km²/a,2000年以来萎缩速率更高达141km²/a,渤海自然岸线的长度急剧下降,由1990年的1397km减少为2014年的561km,占岸线总长度的比例由54.92%下降为16.18%^[19]。

2 河口滩涂围垦对水动力环境的影响

2.1 对水动力的影响

沿海滩涂的围垦将天然潮滩转换为人工海岸,使潮滩失去了对潮能的存储与耗散作用,导致剩余潮汐能的重分布,从而使沿岸潮差、无潮点位置发生改变,而沿岸潮差的增加可能使人们面临的风暴潮等海岸灾害更加严峻^[20]。据估计,在韩国西海岸修建的长33km的大堤导致了西南黄海潮汐的M振幅可能增加了0.03m以上。沿海的快速发展已经导

致了渤海潮汐动力学的显著变化,在 1976—2002 年,莱州湾西部 M_2 潮汐振幅增加超过 $0.2\text{ m}^{[21]}$ 。台州湾浅海滩涂大规模围垦后,河口缩窄,水域面积大幅度减少,使得围垦区域附近海域成潮波振幅减小、潮波向岸传播的速度减慢,海域最大高潮位降低约 $0.12\text{ m}^{[22]}$;渤海湾围垦后水动力呈现潮流动力减弱,常波浪动力减弱、强波浪动力增强的变化趋势,含沙量分布呈现常动力条件下减小、强动力条件下近岸海域减小、建筑物前海域增大的整体趋势^[23]。

围垦工程不仅会局部改变潮汐范围,还会由于潮汐能的重新分配而改变整个区域的水位。研究发现潮汐能的重新分配将局部效应扩展到更大的范围,从而产生远场效应,任何一侧的潮汐动力学变化都会影响另一侧^[24]。围垦后潮汐不对称性质也会发生改变^[25],1935—1966 年间胶州湾进行了大规模的土地复垦,导致这一时期水动力发生了重大变化,胶州湾东北部的 M_4 潮幅值急剧上升了 80%,导致了 M_2 - M_4 潮时不对称性显著增加;与此同时,通过内湾和外湾入口的 M_2 潮汐能通量减少了 50% 以上^[26]。人类围垦活动对长江口水动力影响显著,长江口北支由河控通道转变为潮控通道,分水分沙比急剧下降(分流比由 1915 年的 25% 下降到 2005 年的 3%),涨潮流的含沙量远远大于落潮流的含沙量^[27];北支河段平均高潮潮位增加,平均低潮潮位降低,盐水入侵更深,南支的盐度等值线变得稀疏^[28]。长江口的部分沉积物(细沙至中沙)堵塞了上升流,导致向海深度逐渐减小;泥沙输入量的减少迫使长江三角洲发生过渡,河口由不对称河口向受波浪影响的偏斜河口过渡^[29]。另外,有研究指出围垦后的莱州湾潮流在不同的方向和速度下变化,海水变得越来越深,潮汐范围越来越大^[30]。

在过去 70 年的土地围垦过程中,由于洋流的减少,悬沙浓度逐渐减弱^[31]。围垦会减少细粒沉积物的容纳空间从而导致悬浮沉积物浓度的增加^[1]。1923—1983 年,由于填海工程,东京湾的海面面积减少了 25%,湾内 M_2 潮幅值和湾口水交换量分别减少了 8% 和 35%;东京湾河口附近的表层沉积物由于潮汐波幅的减小而由砂变为粉砂^[32]。围垦之后,由于边界条件的改变,导致了水沙运行环境的改变,涨落潮流特性随之变化,净输沙格局也相应变化。围垦后槽蓄量减小,涨、落潮动力减小,潮流所挟带的沙量也随之减小^[33]。

水动力变化影响河流动力与海洋动力在纵向的消长对比关系,同时水流、潮流动力在平面分布也会发生偏移,从而影响其物理作用、化学作用以及生态过程随时间和空间的变化,其过程十分复杂。当前

的学者大多应用 MIKE21、TELEMAC-2D 及 FVCOM 等数值模拟软件分析人类活动对局部范围河口水动力的影响,加上人类活动漫长且复杂多变,使得模拟计算的可靠性及精度不尽如人意,同时河床随水动力具有自我调整作用,其水动力过程就更加复杂与特殊,需要开展整体系统的研究。

2.2 对河口岸线及纳潮量的影响

合理的滩涂围垦增加了土地资源、深水岸线资源,拓展了社会的发展空间。但在海岸线进退的驱动力上,人类活动作为叠加在泥沙淤积和海水侵蚀两大自然驱动力基础上的第三驱动力,加剧了海岸线变化特征的复杂性^[34]。河口的滩涂围垦可以带来大量的土地,但同时也会改变原有的河口及延伸地区的海岸线,使工程水域的流场发生改变,影响泥沙的运移,进而改变了原有海床长期稳定的冲淤状态,使海底地形重新调整以适应变化了的水流、泥沙动力场^[35]。众多的围垦填海项目及海岸带开发利用项目改变了海洋水动力环境,而沿岸的水土流失打破了海床的冲淤平衡,大量的泥沙淤积加快了海岸线向着由陆地向海洋的方向推进^[36]。有研究指出,2006—2009 年江苏海岸线快速向海推进,且区域的围垦面积越大海岸线推进速率越快^[37-38]。对三门湾海岸线的时空变化及其所受人为干扰程度的研究表明,人为因素对三门湾海岸线变化的影响大于自然因素,围垦工程是三门湾岸线变化的主导因素^[39]。此外,各种海岸线类型的历史变化揭示了人类对渤海的密集开发利用情况,由于人类活动的影响,渤海的海岸线类型和面积自 2002 年以来发生了迅速的变化,岸线总长度增加 633.7 km,年均增长 25.3 km,大量的自然滩涂被盐塘、文化塘、围垦地所取代,海岸线变化的主要原因是围垦和筑堤^[40]。

海湾纳潮量定义为海湾高潮水量与低潮水量之差,纳潮量的数值主要取决于海湾高、低潮时潮位的变化和海域面积的变化^[41]。总水域面积的缩小和总岸线的增长必然会破坏原有的水动力条件,使得纳潮量减小,海水交换能力下降,挟沙能力随之减弱,势必会引起海湾的淤积^[42],如渤海湾海岸线的变化导致了最大潮汐增加了 $0.1 \sim 0.2\text{ m}^{[43]}$ 。有研究指出,乐清湾水域由于围垦等海湾开发,50 多年来纳潮量减少 17.69%,随着海湾开发建设加速,海域纳潮量减少速率也加快^[44]。曾相明等^[45]在 POM (princeton ocean model) 模型的基础上,对象山港不同时期的岸线与地形进行模拟,发现象山港 1963—2010 年围垦后大潮纳潮量减少 12.7%,中潮纳潮量减少 12.7%,小潮纳潮量减少 12.4%,全潮平均纳潮量减少 12.6%。

利用 Landsat MSS/TM/ETM+、RS 及 GIS 等技术能够有效支持监测河口岸线变迁的过程,但由于潮位变化、地形和季节气候等因素的影响,提取的海岸线的精度难免存在误差;再加上海岸线上持续不断的人类活动,河口区域岸线变化特征在时空上更加复杂。另一方面,海岸线的变化会引起海湾纳潮量变化,海湾纳潮量又与水体的自净能力息息相关,深刻影响着河口区域的生态环境,但前人就此方面研究较少,需要更进一步的深入研究。

2.3 对防洪排涝的影响

围垦滩涂是增加土地资源的重要手段,经过科学论证的合理的围垦对局部的行洪不会产生明显影响,有的甚至会起到稳定河床节点的作用,有助于河势趋稳调整。但围垦不当会破坏滩涂湿地形态使河流行洪受到影响,导致围垦区上游城镇受洪水、台风等自然灾害的侵犯^[46]。近十几年来,杭州钱塘江行洪的滩地上围垦造田达 3.3 万 hm²,导致钱塘江中下游河口断面只有原河道宽的 1/4,水面宽度仅为钱塘江入海口宽度的 1/10,潮水一来河水水位显著抬高^[47]。同时各条入海水道随着围垦和联垦而不断延长,大大增加了泄洪难度^[48]。不合理的围垦所导致的水量集中、蓄滞洪能力减小及网河区水文特征发生变异,对滩槽演变和泄洪产生深远的影响。白藤堵海工程初期,各口门低潮水位抬升 0.1 ~ 0.3 m,高潮水位降低 0.2 m 左右,内涝加剧^[49]。1996 年东台市三仓垦区围垦,由于规划不周,标准偏低,全线海堤在即将竣工时被潮冲刷决口,被迫退建,并提高标准,造成千万元的直接经济损失^[50]。

洪水会造成大规模的基础设施破坏及严重的人员伤亡,而河口滩涂围垦会改变所在海湾的纳潮量,影响防洪排涝,使沿海城市在处理风暴潮和内涝等突发性自然灾害时产生风险隐患。围垦工程附近区域的海岸线变化可以引起更高的风暴潮,且风暴潮增加约七成是海岸线变化导致的^[51]。吴玮等^[52]基于 ADCIRC 模型对台风路径和强度,以及有、无围堤的假设进行数值模拟,表明温州近岸的围垦工程实施后增大了风暴潮漫滩淹没风险。同时,茅洲河河口围垦导致潮位最大壅高 0.459 m,潮差减小,涨、落潮量缩减,最大潮量减幅为 3.54%,围垦区西侧水域流速最大增加值约 0.5 m/s^[53];渤海湾大规模围垦导致渤海湾最大潮汐增加 0.1 ~ 0.2 m,总水位接近或超过海湾港口的警戒水位^[54]。围垦后海河口潮位表现出的潮差增大、高潮位增高给防洪带来更加严峻的挑战,高潮位增高要求防洪工程的防洪标准也随之增高,或者说使得现有的防洪标准变相降低;另外,潮差增大也给防洪排涝增加了难度^[55]。

围垦工程引起的水位变化率与海平面上升的影响相似,甚至大于海平面上升的影响^[56]。而海平面的上升会导致我国沿海地区的一系列环境灾害,如海岸侵蚀、海水入侵、沿海低地洪涝灾害等^[57]。有专家预测 2010—2030 年上海地区相对海平面上升 10 ~ 16 cm,使得上海近岸海域潮位增高 8 ~ 24 cm,设计高潮位抬升 16 cm,设计波高上升 12.48 cm^[58]。在世纪之交,海平面以上不到 1 m 的沿海低地将被淹没,三角洲面临洪水威胁的地区将增长 50%^[59]。

大多数河口进行围垦后会新建海堤护岸,与天然海岸线相差巨大,河口区域的潮汐波浪、地貌及泥沙条件等都将发生变化,纳潮量减小,风暴潮强度及发生频率增大,区域水文平衡遭到破坏,增大了防洪压力及防洪成本。在今后的研究中,应该充分应用精细化的数值模型计算、局部的物理模型试验以及大数据长系列水沙浪流资料分析,系统论证滩涂围垦对水流动力、纳潮量、河口岸线及河床稳定等方面的影响,科学指导河口滩涂进行合理高效的开发利用。

3 结语及展望

a. 河口水动力环境复杂多变、影响甚广,围垦改变了潮汐的范围,使潮滩失去了对潮能的存储与耗散作用,还会由于潮汐能的重新分配而改变整个区域的水位;潮汐不对称性质随之发生改变,分水分沙比急剧下降,盐水入侵,悬沙浓度逐渐减弱。

b. 河口海岸的滩涂围垦影响河流动力与海洋动力在纵向的消长对比关系,同时水流、潮流动力在平面分布上也会发生偏移,从而影响水沙盐运动在时空上的分配过程,应从系统的观点进行整体模拟与评价。

c. 围垦加剧了海岸线变化特征的复杂性,沿岸的水土流失打破海床的冲淤平衡,大量的泥沙淤积加快了海岸线向着由陆地向海洋的方向推进;使得纳潮量减小,海水交换能力下降,挟沙能力随之减弱;随着海湾开发建设加速,海域纳潮量减少速率也加快。

d. 滩涂围垦会破坏湿地形态,导致水量集中、蓄滞洪能力减小及网河区水文特征发生变异,使河流行洪受到影响;围垦后河口潮差增大、高潮位增高,增大了风暴潮漫滩淹没风险,给防洪排涝增加了难度,也间接降低了现有工程的防洪标准。

滩涂资源保护与高效利用已成为事关沿海经济持续发展的重大问题之一。在当前大力推进河流生态保护的新时代,应更多地关注于滩涂利用对生态环境的影响。在水(潮)流动力、河口岸线变化和防洪御潮等方面进行整体系统地模拟,从资源承载力的角度科学评估滩涂围垦所产生的影响,揭示滩涂资源利用和相关制约因素之间的互馈关系,让规划

更合理、开发更科学、保护更有效、城市更美好,实现真正意义的滩涂资源高效开发与保护。

参考文献:

[1] 许妍,曹可,李冕,等. 海岸带生态风险评价研究进展[J]. 地球科学进展,2016,31(2):137-146. (XU Yan, CAO Ke, LI Mian, et al. Coastal ecological risk assessment: its research progress and prospect [J]. Advances in Earth Science,2016,31(2):137-146. (in Chinese))

[2] 尚辉,苏伟霞,姚宇阔,等. 滨海围垦区替代传统农业的生态产业效益研究:以江苏东台条子泥垦区为例[J]. 水利经济,2020,38(4):21-27. (SHANG Hui, SU Weixia, YAO Yutian, et al. Benefits of ecological industry mode to replace traditional agriculture mode in coastal reclamation areas: an example of Tiaozini reclamation area in Dongtai City of Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources,2020,38(4):21-27. (in Chinese))

[3] MULLER J R M, CHEN Yongping, AARNINKHOF S G J, et al. Ecological impact of land reclamation on Jiangsu coast (China): a novel ecotope assessment for Tongzhou Bay[J]. Water Science and Engineering, 2020, 13(1), 57-64.

[4] 于永海,索安宁. 围填海评估方法研究[M]. 北京: 海洋出版社,2013.

[5] 毋享. 近 70 年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2016.

[6] 李婧贤,王钧,杜依杭,等. 快速城市化背景下珠江三角洲滨海湿地变化特征[J]. 湿地科学,2019, 17(3): 267-276. (LI Jingxian, WANG Jun, DU Yihang, et al. Change characteristics of coastal wetlands in the Pearl River Delta under rapid urbanization [J]. Wetland Science, 2019,17(3):267-276. (in Chinese))

[7] 陈小文,刘霞,张蔚. 珠江河口滩涂围垦动态及其影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):39-43. (CHEN Xiaowen, LIU Xia, ZHANG Wei. Shore reclamation in Pearl River Estuary and its impact analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011,39(1):39-43. (in Chinese))

[8] 黄镇国,张伟强. 珠江河口近期演变与滩涂资源[J]. 热带地理,2004,24(2):97-102. (HUANG Zhenguo, ZHANG Weiqiang. Recent evolution of the Zhujiang Estuary and tidal flat resource [J]. Tropical Geography, 2004,24(2):97-102. (in Chinese))

[9] 仇传银,李行,刘淑安,等. 长江三角洲滩涂信息的遥感提取及时空变化[J]. 地球信息科学学报,2019,21(2):269-278. (QIU Chuanyin, LI Xing, LIU Shu'an, et al. Monitoring tidal flats in the Yangtze River Delta using Landsat images [J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(2):269-278. (in Chinese))

[10] 章志,宋晓村,邱宇,等. 江苏沿海滩涂资源开发利用研

究[J]. 海洋开发与管理,2015,32(3):45-49. (ZHANG Zhi, SONG Xiaocun, QIU Yu, et al. Development and utilization of coastal tideland resources in Jiangsu Province [J]. Ocean Development and Management, 2015,32(3): 45-49. (in Chinese))

[11] 张晓祥,严长清,徐盼,等. 近代以来江苏沿海滩涂围垦历史演变研究[J]. 地理学报,2013,68(11):1549-1558. (ZHANG Xiaoxiang, YAN Changqing, XU Pan, et al. Historical evolution of tidal flat reclamation in the Jiangsu coastal areas[J]. Acta Geographica Sinica,2013, 68(11):1549-1558. (in Chinese))

[12] 罗锋,常曼,宋晓村,等. 江苏沿海滩涂开发利用对策研究[J]. 水利经济,2016,34(4):1-3. (LUO Feng, CHANG Man, SONG Xiaocun, et al. Development and strategy of coastal beaches in Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016,34(4): 1-3. (in Chinese))

[13] 郑城. 浙江滩涂围垦中长期发展对策研究[J]. 浙江水利水电学院学报,2016,28(3):60-63. (ZHENG Cheng. Research on mid-long term development of reclamation in Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College,2016,28(3):60-63. (in Chinese))

[14] 刘毅,彭秋伟. 新理念下浙江滩涂围垦发展的分析及对策[J]. 浙江水利水电学院学报,2019,31(1):32-35. (LIU Yi, PENG Qiuwei. Countermeasures for development of reclamation in Zhejiang Beach under new concept[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower,2019,31(1):32-35. (in Chinese))

[15] 徐承祥,周柏水. 浙江滩涂围垦的现状与展望[J]. 东海海洋,2004,22(2):53-58. (XU Chengxiang, ZHOU Baishui. Current situation and prospect of beach reclamation in Zhejiang Province[J]. Journal of Marine Sciences,2004,22(2):53-58. (in Chinese))

[16] 巢路,何伟,关许为. 长江口和杭州湾北岸生态保滩促淤护岸工程设计与应用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(6):571-577. (CHAO Lu, HE Wei, GUAN Xuwei. Research on design and application of a new type of ecological embankment to coast protection and siltation promotion in the north part of Hangzhou Bay and Yangtze River Estuary [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(6):571-577. (in Chinese))

[17] 刘彦随,李进涛. 近 30 年中国沿海围垦土地利用格局及其驱动机制[J]. 中国科学:地球科学,2020,50(6):761-774. (LIU Yansui, LI Jintao. The patterns and driving mechanisms of reclaimed land use in China's coastal areas in recent 30 year [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2020,50(6):761-774. (in Chinese))

[18] 许宁,高志强,宁吉才. 基于分形维数的环渤海地区海岸线变迁及成因分析[J]. 海洋学研究,2016,36(1):45-51. (XU Ning, GAO Zhiqiang, NING Jicai. Spatial-temporal variations of coast-lines in Bohai Rim based on fractal dimension and their causes analysis [J].

- Journal of Marine Sciences, 2016, 36 (1): 45-51. (in Chinese))
- [19] 侯西勇,张华,李东,等. 渤海围填海发展趋势、环境与生态影响及政策建议[J]. 生态学报,2018, 38(9): 3311-3319. (HOU Xiyong, ZHANG Hua, LI Dong, et al. Development trend, environmental and ecological impacts, and policy recommendations for Bohai Sea reclamation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (9): 3311-3319. (in Chinese))
- [20] EICHENTOPF S, KARUNARATHNA H, ALSINA J M. Morphodynamics of sandy beaches under the influence of storm sequences: current research status and future needs [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12 (3): 221-234.
- [21] PELLING H E,UEHARA K,GREEN J A M. The impact of rapid coastline changes and sea level rise on the tides in the Bohai Sea, China [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2013,118(7):3462-3472.
- [22] 张琴,陶建峰,张长宽,等. 台州湾浅海滩涂大规模围垦下水动力变化分析[J]. 海洋通报,2015, 34(4):392-398. (ZHANG Qin, TAO Jianfeng, ZHANG Changkuan, et al. Effect of the large-scale reclamation of tidal flats on the hydrodynamic characteristics in the Taizhou Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34 (4): 392-398. (in Chinese))
- [23] 张鹏程,孙林云,诸裕良. 渤海湾围填海对三河口海域水动力及含沙量的影响[J]. 中国港湾建设,2015, 35 (10): 6-12. (ZHANG Pengcheng, SUN Linyun, ZHU Yuliang. Reclamation-induced influence on hydrodynamics and suspended sediment concentration at Three Estuary Area in Bohai Bay [J]. China Harbour Engineering, 2015,35(10):6-12. (in Chinese))
- [24] SONG D H, WANG X H, ZHU X M, et al. Modeling studies of the far-field effects of tidal flat reclamation on tidal dynamics in the East China Sea [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2013,133(20):147-160.
- [25] 方彤瑶. 滩涂围垦对水动力环境的影响[C]//左其华, 窦希萍. 中国海洋工程学会第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京:海洋出版社,2015: 516-521.
- [26] GAO G D, WANG X H, BAO X W . Land reclamation and its impact on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2014,151:285-294.
- [27] 张云峰,张振克,刘玉卿,等. 长江口北支沉积动力变化及对人类活动的响应[J]. 人民长江,2019, 50(9):24-29. (ZHANG Yunfeng, ZHANG Zhenke, LIU Yuqing, et al. Sediment dynamic processes in North Branch of Yangtze River Estuary and response to human activities [J]. Yangtze River,2019,50(9):24-29. (in Chinese))
- [28] CAO D F, SHEN Y M, SU M R, et al. Numerical simulation of hydrodynamic environment effects of the reclamation project of Nanhui tidal fiat in Yangtze Estuary [J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(3):603-613.
- [29] PREOTEASA L, VESPREMEANU-STROE A, TÂTUI F, et al. The evolution of an asymmetric deltaic lobe (Sf. Gheorghe, Danube) in association with cyclic development of the river-mouth bar: long-term pattern and present adaptations to human-induced sediment depletion [J]. Geomorphology,2016,253:59-73.
- [30] ZHANG J W ,WANG J. Combined impacts of MSL rise and the secular trend in MLTR on marine environment in the Areas Around the Huanghe River Mouth[J]. Marine Science Bulletin,2000,2(1):6-13.
- [31] GAO G D, WANG X H, BAO X W, et al. The impacts of land reclamation on suspended-sediment dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2018,206:61-75.
- [32] van MAREN D S, OOST A P, WANG Z B, et al. The effect of land reclamations and sediment extraction on the suspended sediment concentration in the Ems Estuary[J]. Marine Geology,2016,376(6):147-157.
- [33] YANAGI T, ONISHI K. Change of tide, tidal current, and sediment due to reclamation in Tokyo Bay [J]. Oceanography in Japan,1999, 8(6):411-415.
- [34] 宋立松. 钱塘江河口围垦回淤过程预测探讨[J]. 泥沙研究, 1999 (3): 76-81. (SONG Lisong. Study on prediction of aggradation processes for reclamation project in Qiantangjiang Estuary [J]. Journal of Sediment Research,1999(3):76-81. (in Chinese))
- [35] 王集宁,蒙永辉,张丽霞. 近 42 年黄河口海岸线遥感监测与变迁分析[J]. 国土资源遥感,2016,28(3):188-193. (WANG Jining, MENG Yonghui, ZHANG Lixia. Remote sensing monitoring and change analysis of Yellow River Estuary coastline in the past 42 years[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28 (3): 188-193. (in Chinese))
- [36] 宋泽坤. 近 30 年来长江口北支滩涂围垦对水动力和河槽冲淤演变影响分析[D]. 上海:华东师范大学,2013.
- [37] 聂鑫,郭瑞琦,汪晗,等. 基于 GIS/RS 的海岸带生态环境变化研究综述[J]. 海洋湖沼通报,2018(3):12-24. (NIE Xin, GUO Ruiqi, WANG Han, et al. Review of hotspots and frontier issues of coastal ecological environment research based on GIS/RS[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018 (3): 12-24. (in Chinese))
- [38] 陆晓燕,杨智翔,何秀凤. 2000—2009 年江苏沿海海岸线变迁与滩涂围垦分析[J]. 地理空间信息, 2012, 10 (5): 69-71. (LU Xiaoyan, YANG Zhixiang, HE Xiufeng. Analysis of monitoring shoreline changes and tidal flat reclamation of Jiangsu from 2000 to 2009 [J]. Geospatial Information, 2012, 10 (5): 69-71. (in Chinese))
- [39] 宋文杰,禹丝思,陈梅花,等. 近 30 年三门湾海岸线时空变化及人为干扰度分析[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版),2017,40(3):343-349. (SONG Wenjie, YU

- Sisi, CHEN Meihua, et al. Spatio-temporal changes of Sanmen Bay shoreline and human disturbance degree analysis of recent 30 years [J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences), 2017, 40(3): 343-349. (in Chinese))
- [40] ZHU L H, WU J Z, XU Z Q, et al. Coastline movement and change along the Bohai Sea from 1987 to 2012 [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8: 083585-1-083585-16.
- [41] 陈红霞, 华锋, 刘娜, 等. 不同方式的纳潮量计算比较: 以胶州湾 2006 年秋季小潮为例 [J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 11-15. (CHEN Hongxia, HUA Feng, LIU Na, et al. Comparison among different methods for tidal prism calculation: neap tide of Jiaozhou Bay in autumn 2006 as an expounded example [J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(1): 11-15. (in Chinese))
- [42] 郑全安, 吴隆业, 张欣梅, 等. 胶州湾遥感研究: I. 总水域面积和总岸线长度量算 [J]. 海洋与湖沼, 1991(3): 193-199. (ZHENG Quanan, WU Longye, ZHANG Xinmei, et al. A remote sensing study of Jiaozhou Bay I. measurement of total area and coastal line [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1991(3): 193-199. (in Chinese))
- [43] ZHU L H, HU R J, ZHU H J, et al. Modeling studies of tidal dynamics and the associated responses to coastline changes in the Bohai Sea, China [J]. Ocean Dynamics, 2018, 68(12): 1625-1648.
- [44] 王诚超, 潘国富, 许雪峰, 等. 乐清湾水域纳潮量演变分析 [J]. 海洋科学, 2017, 41(8): 76-85. (WANG Chengchao, PAN Guofu, XU Xuefeng, et al. Analysis of evolution of tidal prism of the Yueqing Bay [J]. Marine Sciences, 2017, 41(8): 76-85. (in Chinese))
- [45] 曾相明, 管卫兵, 潘冲. 象山港多年围填海工程对水动力影响的累积效应 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(1): 73-83. (ZENG Xiangming, GUAN Weibing, PAN Chong. Cumulative influence of long term reclamation on hydrodynamics in the Xiangshangang Bay [J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(1): 73-83. (in Chinese))
- [46] 潘翠霞. 入海河口围垦引起灾变的景观生态机理分析与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [47] 王紫雯, 程伟平. 城市水涝灾害的生态机理分析和思考: 以杭州市为主要研究对象 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2002, 36(5): 582-587. (WANG Ziwen, CHENG Weiping. Analysis of ecological mechanism of urban flood and waterlog: research based mainly on Hangzhou City [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(5): 582-587. (in Chinese))
- [48] 刘岳峰, 韩慕康, 郭伦, 等. 珠江三角洲河口区近期演变与围垦远景分析 [J]. 地理学报, 1998(6): 14-22. (LIU Yuefeng, HAN Mukang, WU Lun, et al. Recent evolution of outlets in Zhujiang River Delta and the prospect for land reclamation [J]. Acta Geographica Sinica, 1998(6): 14-22. (in Chinese))
- [49] 陈晓宏, 陈永勤. 珠江三角洲网河区水文与地貌特征变
异及其成因 [J]. 地理学报, 2002(4): 429-436. (CHEN Xiaohong, CHEN Yongqin. Hydrological change and its causes in the River Network of the Pearl River Delta [J]. Acta Geographica Sinica, 2002(4): 429-436. (in Chinese))
- [50] 徐向红, 陈刚. 论江苏沿海滩涂围垦与可持续发展 [J]. 河海大学学报 (哲学社会科学版), 2002, 30(4): 26-28. (XU Xianghong, CHEN Gang. Jiangsu beach reclamation and sustainable development [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2002, 30(4): 26-28. (in Chinese))
- [51] GUO Y K, ZHANG J S, ZHANG L X, et al. Computational investigation of typhoon-induced storm surge in Hangzhou Bay, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 85(4): 530-536.
- [52] 吴玮, 傅赐福, 于福江, 等. 温州近岸围堤对风暴潮漫滩影响的数值研究 [J]. 海洋学研究, 2012, 30(2): 36-42. (WU Wei, FU Cifu, YU Fujiang, et al. Numerical simulation of the influence of Wenzhou coastal dike on storm surge inundation [J]. Journal of Marine Sciences, 2012, 30(2): 36-42. (in Chinese))
- [53] 卢素兰, 姜宇, 吴琼, 等. 茅洲河口滩涂开发对洪潮及河势的影响与对策研究 [J]. 人民珠江, 2019, 40(4): 23-30. (LU Sulan, JIANG Yu, WU Qiong, et al. Study on the influence and countermeasure of tidal flat reclamation on the flood-tide and river regime in Maozhou Estuary [J]. Pearl River, 2019, 40(4): 23-30. (in Chinese))
- [54] DING Y M, WEI H. Modeling the impact of land reclamation on storm surges in Bohai Sea, China [J]. Natural Hazards, 2017, 85(1): 559-573.
- [55] 王玉芳, 任金刚, 杨士斌, 等. 填海造陆对海河口防洪影响分析 [J]. 海河水利, 2015(5): 37-39. (WANG Yufang, REN Jingang, YANG Shibin, et al. Sea reclamation impacts analysis on flood control of Haihe River Estuary [J]. Haihe Water Resource, 2015(5): 37-39. (in Chinese))
- [56] VELLINGA N E, HOITINK A J F, van der VEGT M, et al. Human impacts on tides overwhelm the effect of sea level rise on extreme water levels in the Rhine-Meuse Delta [J]. Coastal Engineering, 2014, 90: 40-50.
- [57] ZHANG Y F, CHEN Y Y, HUA X B, et al. Coastal environmental changes and management in China in the context of global changes and human activities [J]. Asian Agricultural Research, 2019, 11(7): 24-30.
- [58] 程和琴, 陈祖军, 阮仁良, 等. 海平面变化与城市安全: 以上海市为例 [J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 363-373. (CHENG Heqin, CHEN Zujun, RUAN Renliang, et al. Sea level change and city safety: the Shanghai as an example [J]. Quaternary Sciences, 2015, 35(2): 363-373. (in Chinese))
- [59] GIOSAN L, SYVITSKI J, CONSTANTINESCU S, et al. Climate change: protect the world's deltas [J]. Nature, 2014, 516: 31-33.

(收稿日期: 2020-06-12 编辑: 郑孝宇)