

曹妃甸围填海工程对近海环境的影响综述

李 东^{1,2,3}, 侯西勇^{1,3}, 张 华^{1,3}

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 曹妃甸明显的区位优势、独特的地理特征、较强的资源支撑为其成为我国北方天然深水大港提供了必要条件。曹妃甸临港工业区的开发建设将大大加快环渤海经济一体化的进程。规模宏大的曹妃甸围填海工程在带来显著社会效益的同时, 也对近海环境产生了巨大影响。本文在结合前人调查研究的基础上, 对曹妃甸海域概况及围填海工程背景进行了介绍; 然后从地貌景观、水沙动力、海洋污染、生物多样性 4 个方面详细论述曹妃甸围填海工程对近海环境的影响; 针对曹妃甸海域生态环境问题, 提出加强科学研究、优化评估方法、落实管理制度、注重生态补偿的思考与建议, 以期曹妃甸围填海区域及其周边的可持续发展提供一定的科学依据。

关键词: 曹妃甸; 围填海; 近海环境; 可持续发展

中图分类号: X37 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)02-0082-09

DOI: 10.11759/hyxx20181011003

近几十年, 随着社会经济的快速发展, 人类日益增长的资源需求与有限的陆地资源之间的矛盾越来越突出^[1,2]。沿海国家和地区都将目光从陆地转向海洋, 近海开发已成为沿海地区进行空间资源扩展的主要途径^[3,4]。大规模围填海造陆是工业化和城市化过程中土地资源紧缺矛盾日益加剧背景下向海洋拓展空间的基本途径。急剧的岸线开发和扰动过程导致了一系列的资源、环境、生态和灾害问题^[5,6]。海洋生态环境破坏带来的影响是深远的, 生态系统一旦遭到破坏, 其恢复和治理需要投入巨大的财力和人力。2010 年的院士咨询报告“我国围填海工程中的若干科学问题及对策建议”中明确提出应高度重视围填海对近海生态系统的影响^[7]。

环渤海经济区是我国经济发展的重点地区^[8], 2011 年《河北沿海地区发展规划》的实施, 标志着河北沿海地区发展正式上升为国家战略。作为河北省第一大工程, 高强度、大规模的曹妃甸围填海工程在带来巨大社会和经济效益的同时, 也会对周边海区水沙运动、滩槽演变、防洪纳潮、防风抗浪以及生态环境等产生较大影响和干扰^[9]。自实施大规模围填海工程以来, 曹妃甸区域就成为研究热点。本文在梳理前人调查研究成果的基础上, 系统总结曹妃甸围填海工程对区域海洋环境的影响, 对曹妃甸围填海工程建设提出合理化建议, 为推动曹妃甸海域经济与生态协调可持续发展提供科学依据。

1 曹妃甸海域概况及围填海工程背景

1.1 曹妃甸海域概况

曹妃甸海域位于河北省唐山市唐海县南部, 坐标范围: 118°28'40"E~118°34'E、38°54'N~39°05'N。曹妃甸原是位于渤海湾湾口北侧的一个带状沙丘, 形成于全新世中期(距今 8 000~3 000 a), 为滦河扇形三角洲的前缘沙坝; 后来由于地面沉降和海洋动力的冲刷侵蚀, 形成了现今的障壁岛泻湖体系^[10]。“面向大海有深槽, 背靠陆地有浅滩”是曹妃甸独特的自然地理特征。其东北约 18 km 处有水深达 10~22 m 的老龙沟深槽; 甸头前 500 m 水深即可达 25 m, 附近深槽水深达 30 m, 天然水道直通渤海海峡, 是渤海沿岸不需要开挖航道和港池即可建设大型泊位的

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2018-12-24

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205); 中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-STZ-ZDTP-023); 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所)开放基金(编号: 2018KFJJ05)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, Grant No. XDA19060205; Science and Technology Service Network Initiative (STS) Project of the Chinese Academy of Sciences, Grant No. KFJ-STZ-ZDTP-023; Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, YICCAS Grant No. 2018KFJJ05]

作者简介: 李东(1985-), 男, 山东聊城人, 博士, 主要研究方向为近海生境演变, E-mail: dli@yic.ac.cn; 侯西勇, 通信作者, 男, 研究员, 电话: 0535-2109196, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

天然港址；曹妃甸后方有面积达 1 100 km² 的宽阔浅滩，为临港工业和城市发展提供了广阔空间。

曹妃甸海岸为淤泥质，沿海地势平坦。周边区域属典型的季风气候区，气温具有明显的大陆性气候特征。该海域为不规则半日潮区，潮差由东向西逐渐变小，潮流为往复流，涨潮流自东向西流，落潮流自西向东流^[11]。曹妃甸北侧大片浅滩泻湖区沉积物粒径相对较细(粒径为 0.016~0.12 mm)，较为松散，抗波浪潮流的侵蚀能力较弱；甸头前缘潮道沉积物粒径相对较粗(粒径为 0.2~0.3 mm)，较密实，抗波浪和潮流的侵蚀能力强^[12]。近岸海区无大河直接注入，径流动力影响基本可以忽略，潮流、波浪及两者共同作用下的泥沙运动是影响海岸地貌发育演变与滩槽稳定性的主要动力因素^[9]。该海域含沙量较小，其分布趋势为近岸大于深水、西侧大于东侧，在波浪作用下年平均含沙量约 0.21 kg/m³，海域底沙分布由陆向海呈细-粗-细的规律变化^[13]。

1.2 曹妃甸围填海工程背景

在渤海经济圈中京津冀是十分重要的一环，推进京津冀一体化，是加速环渤海地区开发开放的要求。建设北方深水大港和综合交通运输网，会极大改善渤海地区的运输条件，增强资源的开发能力^[14]。唐山曹妃甸明显的地理特征和区位优势为大型深水港口和临港工业的开发建设提供了得天独厚的条件。曹妃甸新区开发建设是我国“十一五”期间全国最

大的项目集群。根据港口和产业发展规划，曹妃甸工业区划面积 310 km²，以培育大港口、大钢铁、大化工和大电能 4 大主导产业为核心，将充分发挥腹地产业、技术和资源配置等优势，逐步建成国际性枢纽港、国家商业性能源储备和调配中心以及国家重化工业循环经济示范区^[14]。2003 年以前，曹妃甸涨潮时，只有约 2 km² 在海面以上，为了满足工业区总体开发建设规划需求，根据发展规划从 2003 年起对曹妃甸以北的浅海滩涂开始实施填海造陆工程^[4]。2005 年开始占据曹妃甸浅滩，2006 年主要在曹妃甸岛南部建设码头，2007 年占据了沿岸潮间带，2008 到 2011 年在逐步完善海上填海造地工程的同时，开始向陆地发展，至 2012 年围填浅滩面积已累计超过 210 km²^[15]，之后围填海面积增长速度放缓。图 1 为曹妃甸围填海工程遥感监测图像。值得注意的是，曹妃甸填海工程初期(2004—2005 年)规划设计存在一定缺陷，如填海面积过大、阻断浅滩潮道等问题，后经专家论证，2007 年出台了新的填海规划，在一定程度上减轻了对海洋环境的损害。

2 围填海工程对曹妃甸近海环境的影响

随着大规模近海开发项目的实施，接岸大堤工程、港区围填与码头建设、海床采沙与港池开挖等开发工作对曹妃甸海区岸线变迁、动力环境、滩槽演变、生态环境等均产生了重要影响^[9]。

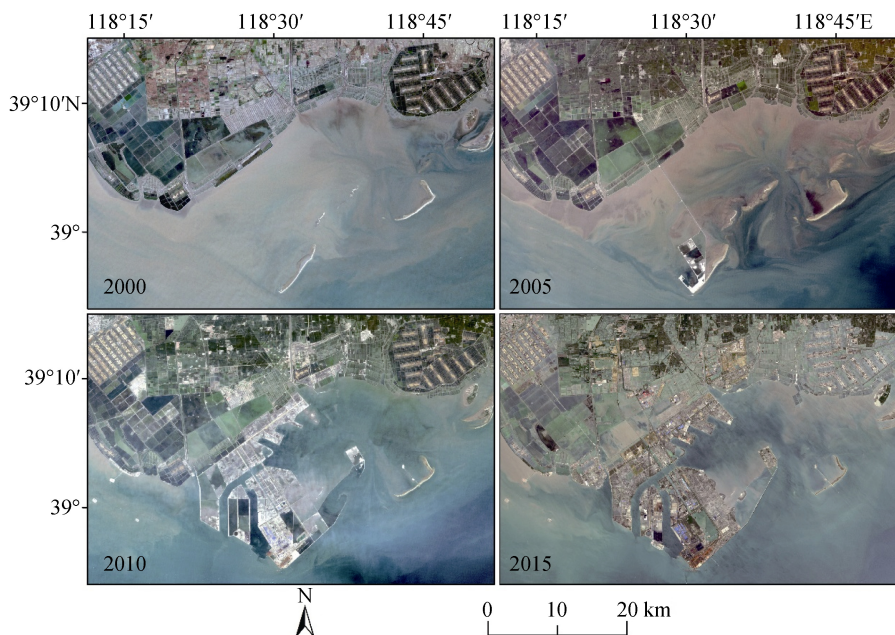


图 1 曹妃甸围填海工程遥感监测(2000—2015 年)

Fig. 1 Remote sensing monitoring of the Cao Feidian reclamation project (2000-2015)

2.1 造成潟湖萎缩、潮滩锐减、岸线和海岸带地形巨变

渤海湾东北岸的南堡咀至滦河口之间, 均被滨外沙坝所封闭, 构成我国最为典型的沙坝-潟湖体系。河北省“908 专项”委托国家海洋局第一海洋研究所对曹妃甸重点海域专题调查研究中发现, 由于围填海工程为主导的人类活动的干扰, 潟湖北端的某些剖面已无法实现监测, 个别剖面 2008 年度的监测北端较 2006 年度的监测北端向南迁移了近 3 km^[16]。左利钦等^[17]曾指出曹妃甸潟湖纳潮体是维持潮流动力的重要因素, 为维持口门动力、减少回淤, 应注意保护潟湖湾。

曹妃甸岛在未进行围填海时期与大陆岸线之间发育为大片浅滩, 地形复杂破碎, 低潮时大片浅滩露出水面。随着曹妃甸工业区填海造陆工程的进展, 从 2007 年下半年开始, 双龙河至青龙河口的潮滩逐渐被吹填造陆, 吞噬了双龙河口至青龙河口全部潮滩, 到 2008 年全部改造成为工业区港口用地, 51.2 km² 的潮滩消失^[18]。曹妃甸周围海域滩涂面积每年都在逐渐减小, 2007 至 2008 年减少幅度最大, 到 2011 年止, 滩涂面积只剩约 18 km²^[15]。潮滩围垦和填海造陆等人类活动是引起该区潮间带变化的主要原因^[18]。

MSS、TM、ETM 及环境卫星的 5 期海岸线数据表明, 1979—2012 年唐山市海岸线长度共增加了 81.8 km, 其中自然岸线长度基本保持不变, 围填海工程的实施使人工岸线中港口岸线长度增加了 81.3 km, 海岸线向海推进距离最远达 11.1 km^[19]。结合近 30 年的遥感影像分析曹妃甸岸线岛体时空演变特征, 结果显示: 2002 年以前曹妃甸沙坝岸线均保持自然状态, 之后人工岸线比重大幅增加; 大规模围填海的实施使曹妃甸陆域岸线不再具备自然岸线的特征, 自然岸滩均被形状较为规则的养殖池塘、虾池等所代替; 自 2005 年底通岛公路建成后, 自然状态的岛体已不复存在^[20]。

2.2 影响水沙动力环境及海床冲淤

海岸的演变特征和综合治理受制于泥沙问题, 波浪与潮汐是引起泥沙输移的重要动力因素^[21]。大规模的围填海工程改变了原来的海洋动力边界条件, 势必引起周围海域的潮流、冲淤过程和泥沙迁移的改变^[22], 导致近岸海水与外海交换能力的下降。曹妃甸深槽为港区深水码头的集中布置区, 其冲淤演变

与港区的开发利用过程密切相关^[23, 24]。随着曹妃甸港区开发的不断深入, 各种人类活动对本海区水沙动力环境与滩槽演变的影响越来越强^[25]。2004—2005 年由于矿石码头施工、煤码头港池开挖抛泥、海床采沙吹填港区的严重影响, 使大量泥沙随潮流输移后落淤, 造成了曹妃甸深槽海区较大范围的淤积, 淤厚多在 0.5~1.0 m^[26]。陆永军等^[9, 21]通过泥沙数学模型研究曹妃甸港区泥沙运动规律, 计算曹妃甸港区水动力条件及冲淤变化, 发现: 与工程前相比, 甸头深槽区域流速有所增加, 港区、航道内流速有所减小; 由于港区大面积围垦阻挡了波浪向浅滩的传播, 使得其含沙量大幅减小; 由于浅滩区纳潮量的减少, 老龙沟潮汐通道流速有所减小, 该变化有利于通航安全但不利于水深维护。

围填海造陆前, 曹妃甸岛西北侧与大陆岸线间有大片浅滩, 甸东、西沿岸两侧通过涨落潮实现水体交换。曹妃甸接岸大堤长 18.4 km, 于 2005 年底完成通车。大堤位于潮流的分流与汇流区, 隔断了落潮期间小股从西侧向东侧滩地流动的水体, 浅滩潮道被阻断, 对老龙沟港口造成一定影响。青岛海洋地质研究所尹延鸿研究团队对曹妃甸浅滩潮道阻断后老龙沟深槽的地形变化做了多年跟踪调查^[10, 12, 27-30]。实地调查结果证明, 填海面积过大阻断浅滩潮道, 直接导致曹妃甸浅滩潮流通道淤死, 老龙沟槽内潮流流量和流速明显减小引起深槽水深变浅和淤积, 老龙沟港口潜力区的优势受到严重影响。

2.3 引起海水及沉积物污染

曹妃甸工业区以发展石油、化工、钢铁等重工业为主, 工业污染物中包含大量重金属及氮、磷等非金属化学元素。围填海后使得海洋潮差变小, 潮汐的冲刷能力降低, 港湾内纳潮量减少, 湾内水交换能力变差, 导致近岸海域水环境容量下降, 削弱海水净化纳污能力, 加剧海水富营养化风险^[31]。2007 年曹妃甸海域 11 个测点的磷酸盐浓度实测资料表明, 磷酸盐高浓度区主要集中在陡河、沙河出口至围填海区附近海域^[32]。2007 年的曹妃甸水环境质量现状调查与 2009 年“河北 908”调查均表明, 由于沿岸油田和港口石油类污染物进入海水, 近岸海域石油类含量高于远海^[33-34]。河北省科学院 2014 年对曹妃甸近岸海域进行的水质环境评价结果显示, 58% 的站点处于亚健康水平, 围填海影响了曹妃甸港东西两侧的水动力环境, 导致污染物在西侧更易集聚, 污

染物难以扩散^[35]。唐山市海洋环境监测中心和河北省海洋环境监测中心(1995—2012年)的生态环境监测数据显示无机氮、活性磷酸盐的高值区由曹妃甸东北海域转向西部海域, N:P有增加趋势, 水质从P贡献向N贡献转变(2003年以后无机氮含量升高更加明显), 说明人类活动已经影响到该海域的营养盐结构^[36]。围填海工程导致潮流系统的改变, 从而影响近岸海区的沉积环境。2004年11月曹妃甸海域的调查资料显示, 该海域涨潮时个别站位Zn、Pb、和Hg超标, 且存在Cu的污染; 等值线图表明越靠近陆地含量越高, 说明该海域的重金属污染主要是陆源排污的影响^[37]。2011年曹妃甸工业区附近海域表层沉积物中5种重金属的平均含量均高于渤海湾沉积物重金属背景值, 根据潜在生态风险指数及分级标准, Hg的生态风险指数属于较高至高值风险等级^[38]。

2.4 导致近海生物多样性破坏

浮游动物生存周期较长, 对外界环境变化敏感, 可作为监测环境污染和水质富营养化的指示生物^[39]。了解曹妃甸海域浮游动物生物量和种类的历史变化特征, 可以为认识围海造陆对附近海域生态系统的未来影响提供重要的参考^[40]。2015年的调查资料表明, 曹妃甸海域浮游动物丰度和群落结构与该海域环境污染状况的空间分布一致, 主要影响因素为DIN和SRP^[41]。近年来曹妃甸海域人类活动强度不断增大, 各种工业废水、生活污水的入海量也日益增加^[41], 营养盐含量持续升高, 使得浮游植物数量明显增加, 为水母提供了丰富的饵料, 导致其种类与数量迅速增加。与20世纪八九十年代相比, 2004年的调查资料显示, 曹妃甸海域浮游动物种类组成发生了改变, 水母类浮游动物的增加尤为明显(增加了十多种)^[40]。

底栖动物多数种类的成体终生栖息在固定场所或只能在有限的范围内活动, 对逆境的逃避相对迟缓, 受环境变化的影响更严重更持久^[42]。针对曹妃甸围填海工程的环境回顾性评价的研究表明, 在5类海洋生物群落中底栖动物受影响程度最大^[4]。2013年和2014年的ABC曲线分析表明, 曹妃甸海域大型底栖动物群落均已受到中等程度的干扰; M-AMBI指数显示, 该区域大型底栖动物群落健康状况明显较差^[43]。2007年曹妃甸海域大型底栖动物的物种数、丰度和香农威纳多样性指数均较低, 可能与该时期围填海面积迅速增加有关^[4]; 随着围填海工程的结束, 生物多样性有所恢复, 2013—2014年调查数据表

明该区域的底栖生物的物种数和生物多样性均有所回升^[43]。

曹妃甸围填海工程导致近海生物多样性破坏, 而生物多样性维持是海洋生态服务功能价值的重要组成部分。生物多样性维持功能主要由海域物种数量决定。国家海洋环境监测中心的调查研究显示, 曹妃甸围填海初期阶段(2005—2010年), 过度填海造陆减弱了东部海域的水交换过程, 工程前后相比, 其东部海域的生物种类减少了15.24%, 导致该海域生态系统服务功能价值每年损失421.1万元^[4]。

3 对曹妃甸围填海工程的几点思考

围填海造地可以为沿海经济社会发展提供大量土地资源, 满足港口码头和临港工业的发展, 为当地带来新的经济增长点^[44]; 但如果缺乏科学的规划与引导会对海洋资源环境可持续利用产生多方面的深远影响^[45]。对于作为生态脆弱区的曹妃甸近海生态系统, 必须及时对其健康状态进行评估和分析, 提出相应的治理方案, 以避免重大生态问题的出现, 维持近海健康与社会经济的和谐发展^[35]。

3.1 加大科学研究力度

曹妃甸深槽形成的深水岸线是港区发展的核心资源, 深槽的成因与稳定性是评价海区能否进行开发利用的关键问题^[26, 46-47]。关于曹妃甸填海工程的用海问题, 国家海洋局咨询中心多次主持召开专门会议进行认真讨论和评审。初期的填海规划论证不够充分, 不适当的施工浪费了大量人力物力。尹延鸿等^[27]指出曹妃甸老填海规划及修建通岛公路的主要缺陷, 提出保留浅滩潮道、保护曹妃甸外缘深槽和老龙沟深槽两个港口潜力区、缩小填海面积和保护海洋环境等方面的建议。2007年下半年出台的新的填海规划中准备开通浅滩潮道来恢复浅滩潮流系统, 并在老龙沟港口附近修建一个大港池来保护港口潜力区^[10]。浅滩潮道(纳潮河)于2016年8月正式开通, 对于维护海洋生态环境的可持续发展具有重要意义^[30]。

理论指导实践, 实践完善理论。尽管目前来看曹妃甸填海工程没有明显改变周边海区的宏观动力地貌格局且海区滩槽稳定性较好, 但开发建设过程中引发的一系列环境生态问题却是持久且难以估量的。因此, 必须加强曹妃甸海域的基础观测体系建设, 大力促进科学研究的发展, 为围填海区及其毗邻区环境与生态恢复等工作提供可靠的基础数据和坚实

的科技支撑。

3.2 完善围填海评估方法

国家海洋公益性行业科研专项 2007 年启动了“典型围填海综合评估体系与应用示范研究”项目,创建了围填海管理领域一系列管理支撑评估技术方法^[45]。针对曹妃甸海域,国家海洋环境监测中心建立了围填海工程的海洋生态环境影响回顾性评价指标体系、评价标准与评价方法,并综合运用层次分析法对曹妃甸围填海工程的海洋生态、水动力环境、水质环境和底质环境影响进行了回顾性综合评价^[4]。

曹妃甸围填海工程规模宏大,其规划评估、适应性评估及对海洋生态服务功能价值损失的评估,均需根据曹妃甸围填海工程的特点,结合历史与现场调查数据,设置并筛选评价指标、建立合理的评估体系,才能做出相对客观真实的评估。例如在适应性评价中,遵循的原则应包括:①重要生态与海岸资源优先保护原则;②综合性原则;③开发与保护并重原则;④陆海统筹原则等^[45]。围填海生态环境影响评估指标体系可以完整的反映围填海对海洋生态系统的影响,是综合评估成功与否的关键。因此在建立曹妃甸围填海生态环境影响评估的指标体系时,要明确海洋环境要素、生物生态因子、初级生产功能指数所包含的内容,根据当地海洋生态系统的特点及当地的人类社会经济发展水平,充分分析曹妃甸资源支撑力及环境承载力,考虑评估的重点,做到全面、客观、可操作。

3.3 落实围填海管理制度

为加强围填海管理,我国先后实施了海域使用论证制度、区域建设用海规划制度等相关围填海管理措施。主要包括 1993 年的《国家海域使用管理暂行规定》、2002 年的《中华人民共和国海域使用管理法》以及 2011 年的《围填海计划管理办法》。2017 年 5 月,国家海洋局印发《关于进一步加强渤海生态环境保护工作的意见》,明确在环渤海区域全面实施“湾(滩)长制”,同时暂停受理、审核渤海内围填海项目。该文件的出台,有助于全面落实中央关于生态文明建设的重要部署要求,对于进一步加强渤海生态环境保护工作具有重要意义。

曹妃甸填海工程是渤海乃至全国迄今为止最大的填海工程,其开发过程必须严格落实国家相关的围填海制度规定,如一味考虑经济利益至上,盲目

开发,势必会引发环境与社会问题,威胁当地人民群众的生存环境及财产安全。曹妃甸工业区定位于要建立循环经济示范区,因此对于产业空间布局的合理化、资源保障体系的多元化及环境保护的有效性提出了更高的要求。为此,河北省海洋局提出建立先行先试的制度保障体系:①实施绿色 GDP 考核制度;②建立重大工程项目建设综合决策制度;③创设生态环境保护管理制度^[33]。

3.4 加强海洋生态补偿

大规模围填海工程造成的生态损害包括生物资源消失、生态调节功能减弱及生物栖息地破坏等^[48]。生态资源的破坏和灾害频发可以通过海洋生态资源损害补偿来控制与修复^[49]。国内外关于围填海生态修复的研究主要集中在 3 各方面:人为增加海域生物量,对围填海后造成生态环境退化的区域进行生态修复;在围填海的同时增加自然保护区;退陆还海。

曹妃甸围填海工程使该海域最主要的鱼类产卵繁殖场——曹妃甸泻湖渔场被侵占,近岸渔场成了取沙区,最终导致海洋生物链系统从浮游生物到经济鱼虾繁殖场、育肥场的丧失,生物苗种缺乏。根据曹妃甸实际情况与现有的技术条件,可选择人工苗种增殖放流和人工鱼礁建设。增殖放流可以弥补渔业资源种群与数量,改善与修复因过度捕捞或水利工程等遭受破坏的生态环境。在工业建设规划之外的周边海区布置人工鱼礁和藻礁建设海洋生物生息场,能够改善当地海洋环境,营造适宜海洋生物生息的环境条件,增加海区生物多样性。

4 结语

曹妃甸围填海工程作为我国规模最大的滩涂综合开发利用工程,对近海环境产生了不可避免的影响:引起潟湖萎缩、潮滩锐减,使岸线和海岸带地形发生巨大变化,影响水沙动力环境及海床冲淤,造成海水及沉积物污染,并导致近海生物多样性遭到破坏。针对曹妃甸海域生态环境问题,提出注重科学研究、优化评估方法、落实管理制度、加强生态补偿的思考与建议,以期进一步提高对围填海生态危害性的重视,为曹妃甸围填海区域及其周边的可持续发展提供一定的科学依据。

参考文献:

- [1] Wang W, Liu H, Li Y, et al. Development and manage-

- ment of land reclamation in China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 415-425.
- [2] 郑延璇. 人工鱼礁流场效应与物理稳定性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Zheng Yanxuan. Flow field effect and physical stability of artificial reefs[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [3] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的海洋生态服务功能损失估算[J]. *海洋科学*, 2012, 36(3): 108-114.
Suo Anning, Zhang Minghui, Yu Yonghai, et al. Loss appraisal on the value of marine ecosystem services of the sea reclamation project for Caofeidian[J]. *Marine Science*, 2012, 36(3): 108-114.
- [4] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的环境影响回顾性评价[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(2): 105-111.
Suo Anning, Zhang Minghui, Yu Yonghai, et al. Post project environmental retrospective evaluation of reclamation in Caofeidian[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(2): 105-111.
- [5] 侯西勇, 侯婉, 毋亭. 20世纪40年代初以来中国大陆沿海主要海湾形态变化[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 118-129.
Hou Xiyong, Hou Wan, Wu Ting. Shape changes of major gulfs along the mainland of China since the early 1940s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 118-129.
- [6] Hou X Y, Wu T, Hou W, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59: 1791-1802.
- [7] 中国科学院学部. 我国围填海工程中的若干科学问题及对策建议[J]. *中国科学院院刊*, 2011, 26(2): 171-173, 141.
Academic Divisions of Chinese Academy of Sciences. Scientific problems and suggestions in the process of reclamation in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2011, 26(2): 171-173, 141.
- [8] 郑丙辉. 渤海湾海岸带生态系统的脆弱性及生物修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
Zheng Binghui. Ecosystem vulnerability and bioremediation in coastal zones of Bohai Bay[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013
- [9] 陆永军, 季荣耀, 左利钦. 曹妃甸深水大港滩槽稳定及工程效应研究[J]. *水利水运工程学报*, 2009, 4: 33-46.
Lu Yongjun, Ji Rongyao, Zuo Liqin. Stability and engineering effect of shoals and channels in Caofeidian deep-water harbor area[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2009, 4: 33-46.
- [10] 尹延鸿. 曹妃甸浅滩潮道保护意义及曹妃甸新老填海规划对比分析[J]. *现代地质*, 2009, 23(2): 200-209.
Yin Yanhong. The Significance of Protection of the Caofeidian Shoal Tidal Channel and Comparison of the New Caofeidian Plan of Sea Reclamation Land to the Old One[J]. *Geoscience*, 2009, 23(2): 200-209.
- [11] 王文辉, 王相玉, 袁本坤. 曹妃甸邻近海域的海冰状况与特征[J]. *海岸工程*, 2005, 3: 50-57.
Wang Wenhui, Wang Xiangyu, Yuan Benkun. Conditions and characteristics of sea ice in the sea area adjacent to Caofeidian[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 3: 50-57.
- [12] 尹延鸿. 对河北唐山曹妃甸浅滩大面积填海的思考[J]. *海洋地质动态*, 2007, 3: 1-10.
Yin Yanhong. Some Questions About Large-Area Marine Reclamation Land in Caofeidian Bank, Tangshan of Hebei Province[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2007, 3: 1-10.
- [13] 龚政, 张长宽, 陶建峰, 等. 曹妃甸粉沙质海岸围垦后港内泥沙研究[J]. *海洋工程*, 2012, 30(1): 112-118, 125.
Gong Zheng, Zhang Changkuan, Tao Jianfeng, et al. Siltation in harbor basin after reclamation in Caofeidian silty coast[J]. *The Ocean Engineering*, 2012, 30(1): 112-118, 125.
- [14] 于文金, 邹欣庆, 朱大奎, 等. 曹妃甸深水大港与临港工业对环渤海经济圈崛起影响研究[J]. *海洋地质动态*, 2006, 7: 30-34, 37.
Yu Wenjin, Zou Xinqing, Zhu Dakui, et al. Effect of Caofeidian great deep-water harbor and near-harbor industry on the rising of the Circum-Bohai Sea economic circle[J]. *Marine Geology Letters*, 2006, 7: 30-34, 37.
- [15] 吴越, 杨文波, 王琳, 等. 曹妃甸填海造地时空分布遥感监测及其影响初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2013, 1: 153-158.
Wu Yue, Yang Wenbo, Wang Lin, et al. Primary study on the spatial-temporal changes and the effect of sea reclamation in Caofeidian based on remote sensing[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013, 1: 153-158.
- [16] 河北省海洋局. 曹妃甸周边重点海域调查研究报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Ocean Administration of Hebei Province. Research report on Key Sea Areas Around Caofeidian[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [17] 左利钦, 季荣耀, 陆永军. 离岸沙坝-潟湖海岸拦门沙航道回淤——以渤海湾曹妃甸海域老龙沟拦门沙为例[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 87-95.
Zuo Liqin, Ji Rongyao, Lu Yongjun. Case study of siltation in channel-mouth bar in offshore barrier-lagoon coast[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 87-95.

- [18] 王小丹, 方成, 康慧, 等. 曹妃甸地区潮间带演变的遥感监测[J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 559-565.
Wang Xiaodan, Fang Cheng, Kang Hui, et al. Remote sensing monitoring of the Caofeidian tidal zone evolution[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(5): 559-565.
- [19] 方成, 孙晓明, 康慧, 等. 遥感技术在曹妃甸海岸带地质环境调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 119-127.
Fang Cheng, Sun Xiaoming, Kang Hui, et al. Application of remote sensing technology to geological environment investigation in the Caofeidian coastal zone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 119-127.
- [20] 田海兰, 刘西汉, 王红, 等. 近三十年来曹妃甸岸线岛体时空演变特征分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(5): 68-74.
Tian Hailan, Liu Xihan, Wang Hong, et al. Spatiotemporal change characteristics of Caofeidian shoreline and island in the past three decades[J]. Marine Sciences, 2015, 39(5): 68-74.
- [21] 陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等. 渤海湾曹妃甸港区开发对水动力泥沙环境的影响[J]. 水科学进展, 2007, (6): 793-800.
Lu Yongjun, Zuo Liqin, Ji Rongyao, et al. Effect of development of Caofeidian harbor area in Bohai bay on hydrodynamic sediment environment[J]. Advances in Water Science, 2007, (6): 793-800.
- [22] 匡翠萍, 戚健文, 蒋茗韬, 等. 泥沙输运与海床演变对曹妃甸港口工程的响应特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1840-1845.
Kuang Cuiping, Qi Jianwen, Jiang Mingtao, et al. Responses of sediment transport and bed evolution to Caofeidian harbor project[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(12): 1840-1845.
- [23] Lu Y J, Ji R Y, Zuo L Q. Morphodynamic responses to the deep water harbor development in the Caofeidian sea area, China's Bohai Bay[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(8): 831-843.
- [24] Liang H D, Kuang C P, Olabarrieta M, et al. Morphodynamic responses of Caofeidian channel-shoal system to sequential large-scale land reclamation[J]. Continental Shelf Research, 2018, 165: 12-25.
- [25] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 曹妃甸老龙沟潮汐通道拦门沙演变机制[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 645-652.
Ji Rongyao, Lu Yongjun, Zuo Liqin. Mechanism of outer delta evolution of the Laolonggou tidal inlet in Caofeidian sea area on China's Bohai Bay[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 645-652.
- [26] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 渤海湾曹妃甸深槽形成机制及稳定性分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 348-355.
Ji Rongyao, Lu Yongjun, Zuo Liqin. Formation mechanism and stability of Caofeidian channel in the Bohai Bay[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 348-355.
- [27] 尹延鸿, 褚宏宪, 李绍全, 等. 曹妃甸填海工程阻断浅滩潮道初期老龙沟深槽的地形变化[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(5): 1-6.
Yin Yanhong, Chu Hongxian, Li Shaoquan, et al. An analysis of the topographical change of Laolonggou deep trough the initial stage of Caofeidian reclamation project after blocking the shoal tidal channel[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(5): 1-6.
- [28] 尹聪, 褚宏宪, 尹延鸿. 曹妃甸填海工程阻断浅滩潮道中期老龙沟深槽的地形变化特征[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(5): 15-20.
Yin Cong, Chu Hongxian, Yin Yanhong. Topographic change of Laolonggou deep trough in the middle stage of Caofeidian reclamation project for blocking the shoal tidal channel[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(5): 15-20.
- [29] 尹延鸿, 白伟明, 褚宏宪, 等. 曹妃甸填海工程阻断浅滩潮道后期老龙沟深槽的地形演化趋势[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 1-5.
Yin Yanhong, Bai Weiming, Chu Hongxian, et al. Recent topographic change of Laolonggou deep trough after Caofeidian reclamation project blocking the shoal tidal channel[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(12): 1-5.
- [30] 尹延鸿, 高茂生, 尹聪. 河北唐山曹妃甸浅滩潮道(纳潮河)开通过程及开通意义[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(3): 40-46.
Yin Yanhong, Gao Maosheng, Yin Cong. Opening up of the tidal inlet (Nachao river) on Caofeidian shoal in Tangshan, Hebei Province and its significance[J]. Geology Frontiers, 2017, 33(3): 40-46.
- [31] Nie H T, Tao J H. Eco-environment status of the Bohai Bay and the impact of coastal exploitation[J]. Bulletin of Marine Science, 2009, 11(2): 81-96.
- [32] 匡翠萍, 霍蕊, 孙晓明, 等. 曹妃甸海域磷酸盐容量控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 562-566.
Kuang Cuiping, Huo Rui, Sun Xiaoming, et al. Phosphate Capacity Control in Caofeidian Coastal Area[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(4): 562-566.
- [33] 河北省海洋局. 河北省近海海洋综合评价报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
Ocean Administration of Hebei Province. Comprehensive Evaluation Report of Offshore Marine in Hebei Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013.
- [34] 陆永军, 徐啸, 潘军宁, 等. 曹妃甸滩涂开发利用与环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Lu Yongjun, Xu Xiao, Pan Junning, et al. Development

- and Environmental Effects of Caofeidian beach[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [35] 程林, 王欣平, 王艳霞, 等. 河北省曹妃甸近岸海域春季生态系统健康现状评价[J]. 海洋通报, 2017, 36(1): 107-113.
- Cheng Lin, Wang Xinping, Wang Yanxia, et al. Near-shore ecosystem health assessment for the coastal area of Caofeidian of Hebei Province in spring[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(1): 107-113.
- [36] 李志伟, 崔力拓. 人类活动影响下唐山湾近岸海域营养盐及其结构变化[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 307-314.
- Li Zhiwei, Cui Lituo. Nutrient composition changes in coastal waters of Tangshan Bay, Hebei, China under anthropogenic influence[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 307-314.
- [37] 王娟, 刘宪斌, 张增强, 等. 曹妃甸港海域环境质量现状评价与分析[J]. 环境与可持续发展, 2007, 1: 63-65.
- Wang Juan, Liu Xianbin, Zhang Zengqiang, et al. Present evaluation and analysis of environmental quality in Caofeidian Harbor[J]. Environment and Sustainable Development, 2007, 1: 63-65.
- [38] 陈燕珍, 孙钦帮, 王阳, 等. 曹妃甸围填海工程开发对近岸沉积物重金属的影响[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 402-405.
- Chen Yanzhen, Sun Qinbang, Wang Yang, et al. Impact of the sea reclamation project in Caofeidian on the heavy metals contents in sediments[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 402-405.
- [39] Beaugrand G. Long-term changes in copepod abundance and diversity in the north-east Atlantic in relation to fluctuations in the hydroclimatic environment[J]. Fisheries Oceanography, 2010, 12(4-5): 270-283.
- [40] 王红, 石雅君, 刘西汉, 等. 河北省曹妃甸海域浮游动物群落长期变化特征[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 95-101.
- Wang Hong, Shi Yajun, Liu Xihan, et al. Research on the long-term variation of zooplankton community in the coastal area of Caofeidian, Hebei Province[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1): 95-101.
- [41] 李志伟, 崔力拓. 环境因子对唐山湾海域浮游动物群落结构的驱动作用[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3797-3804.
- Li Zhiwei, Cui Lituo. Environmental control of zooplankton community structure in Tangshan Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3797-3804.
- [42] 李宝泉, 李晓静, 周政权, 等. 围填海及其对底栖生物群落的生态效应[J]. 广西科学, 2016, 23(4): 293-298.
- Li Baoquan, Li Xiaojing, Zhou Zhengquan, et al. Ecological effects of reclamation on benthic communities[J]. Guangxi Sciences, 2016, 23(4): 293-298.
- [43] 李晓静, 周政权, 陈琳琳, 等. 渤海湾曹妃甸围填海工程对大型底栖动物群落的影响[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 617-627.
- Li Xiaojing, Zhou Zhengquan, Chen Linlin, et al. Effect of coastal reclamation on benthic macrofauna in coastal area of Caofeidian, Bohai Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(3): 617-627.
- [44] 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.
- [45] 于永海, 索安宁. 围填海评估方法研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- Yu Yonghai, Suo Anning. Study on the Method of Reclamation Assessment[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013.
- [46] Lu Y J, Zuo L Q, Shao X J, et al. A 2D mathematical model for sediment transport by waves and tidal currents[J]. China Ocean Engineering, 2005, 4: 571-586.
- [47] Lu Y J, Zuo L Q, Ji R Y, et al. Effect of development of Caofeidian Harbor area in Bohai Bay on hydrodynamic sediment environment[J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(1): 97-112.
- [48] 李京梅, 刘铁鹰. 基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7146-7155.
- Li Jingmei, Liu Tieying. Ecological damage assessment of jiaozhou bay reclamation based on habitat equivalency analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7146-7155.
- [49] 冯友建, 楼颖霞. 围填海生态资源损害补偿价格评估方法探讨研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(7): 33-39.
- Feng Youjian, Lou Yingxia. Discussion on evaluation method of compensation price of ecological resources damaged by reclamation[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(7): 33-39.

A review of the impacts of the Caofeidian reclamation project on the offshore environment

LI Dong^{1, 2, 3}, HOU Xi-yong^{1, 3}, ZHANG Hua^{1, 3}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Oct. 11, 2018

Key words: Caofeidian; reclamation; offshore environment; sustainable development

Abstract: The obvious regional advantages, unique geographical features, and strong resource support make Caofeidian a natural deep-water port in northern China. With the development and construction of maritime industrial areas in Caofeidian, the economic integration process in the Bohai Sea Rim will be greatly accelerated. While the large-scale reclamation project has brought significant social and economic benefits, it also has also had a huge influence on the offshore environment. Based on previous investigations and studies, this paper first introduces the general situation of the Caofeidian Sea and background of the reclamation project. Subsequently, the impacts of the Caofeidian reclamation project on the offshore environment were elaborated from four aspects including landscape, dynamics, pollution, and biodiversity. Finally, some suggestions, such as basic research reinforcement, assessment methods optimization, management system implementation, and ecological compensation diversification, were put forward to provide some scientific support for the sustainable development of the Caofeidian reclamation area.

(本文编辑: 康亦兼)