

渤海湾高强度开发对潮波系统的累积影响机制

侯庆志, 陆永军*, 王志力

南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029

* 联系人, E-mail: yjlu@nhri.cn

2017-05-03 收稿, 2017-06-27 修回, 2017-06-30 接受, 2017-09-15 网络版发表

国家自然科学基金国际合作项目(51520105014)、国家自然科学基金(51379127)和国家重点研发计划(2017YFC1404204)资助

摘要 渤海湾2003年以来在不到十年内因高强度开发岸线形态变化极大, 然而目前对此背景下潮波系统累积变化过程及其响应机制认识不足. 选取渤海湾2003年、2006年、2012年、远期规划、0 m围填以及-5 m围填等6个代表围填阶段, 利用二维潮波数学模型, 通过对比整体围填与逐一累加围填对潮波系统变化的影响以及对比围填岸段潮差大小与潮波系统变化的对应关系, 揭示了潮波系统累积变化过程及变化的主导机制, 为认识人类对潮波系统的影响提供了客观依据. 研究显示, 渤海湾不同围填阶段对 M_2 分潮影响远大于对 K_1 分潮影响, 且对黄河口外 M_2 分潮无潮点影响明显; 围填规模增加使得该 M_2 分潮无潮点先向东南移动再向东北移动, 海湾西部潮差先变大再减小, 潮波传播速度先加快至0 m围填后趋于稳定, -5 m围填阶段潮波系统虽变化明显但湾内潮汐性质不变. 从北向南逆时针方向逐一增加围填直至远期规划围填全部实施, 该无潮点将先向西南再向东南移动. 受旋转潮波控制的半封闭海湾, 围填所在岸段潮差越大, 对潮波系统影响越明显. 持续围填将使海湾沿岸低地有被淹没的危险, 使得湾内流速减缓, 水交换减弱, 还会影响黄河口附近冲淤以及海岸防护和设计标准.

关键词 渤海湾, 高强度开发, 滩涂, 潮波系统, 累积响应, 数值模拟

在充足的泥沙来源和一定的潮差条件下, 海湾沿岸或半封闭海区常发育有粉沙淤泥质滩涂. 滩涂不仅是重要的湿地资源, 还是重要的空间资源. 在沿岸经济发达、人口众多、土地资源紧张的海湾, 滩涂更是人类强势开发活动的承载体. 与欧美逐步保护与恢复滩涂等湿地相比^[1], 我国在建国之后尤其是近10多年对滩涂进行了高强度围填开发, 围填年平均面积1950~2000, 2001~2005和2006~2010年分别约为240, 300^[2]和400 km²/a^[3]. 围填重心近期已经移至中、低滩甚至潮下带浅滩^[4], 部分岸段滩涂的围填速率远高于滩涂自然淤长速率.

潮波是滩涂发育演变的主要水动力条件, 然而滩涂又是潮波能量存储的重要空间^[5], 其面积多少对潮波影响较大. 东中国海区滩涂面积宽广, 对于这一

海区潮波系统的研究始于20世纪30年代^[6], 早期的研究手段主要为潮汐分析和数值推算^[7,8]; 随着计算机技术的飞速发展, 在潮波模拟方面取得了很大进展, 对潮波系统形成演化过程、主要分潮分布等取得了比较深刻的认识^[9~14]; 后期模拟精度有所提高, 模拟的分潮数更多^[15,16]; 近期开始更多关注人类干扰对潮波系统的影响^[5,17~19]. 这类研究对于海岸带开发管理、工程建设和生态系统保护具有重要意义.

渤海湾是位于渤海西部的半封闭海湾, 水域面积约1.44万km², 岸线长约650 km, 其中约80%为潮滩岸线^[20], 涧河口至徒骇河口理论基面0和-5 m以上滩涂面积分别约占全国滩涂面积的5%和12.1%. 渤海湾平均水深12.5 m, 最深处(约41 m)紧贴曹妃甸沙岛的南侧. 渤海湾受控于南渤海潮波系统, 湾内潮差

引用格式: 侯庆志, 陆永军, 王志力. 渤海湾高强度开发对潮波系统的累积影响机制. 科学通报, 2017, 62: 3479–3489

Hou Q Z, Lu Y J, Wang Z L. Cumulative impacts of high intensity reclamation in Bohai Bay on tidal wave system and its mechanism (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3479–3489, doi: 10.1360/N972017-00468

平均约 2.5 m, 最大超过 5 m, 潮差从湾口向湾顶逐渐增大^[21]. 由于沿岸迫切的土地需求, 渤海湾沿岸滩涂自 2003 年以来在不到 10 年间经历了成片开发且开发强度极大, 岸线变化巨大较为罕见, 不少围填区前沿已达理论基面 -2~-5 m, 岸线向海推进最远达 20 km 以上(图 1). 其中, 曹妃甸、天津港和黄骅港 2010 年累计围填约 562 km², 预计 2020 和 2030 年(远期规划)上述 3 处连同渤海湾南岸滨州段将围填约 1647 和约 2017 km², 届时渤海湾岸线形态与现状相比又将呈较大变化(图 1(a)). 受历史时期黄河以及滦河频繁改道的影响, 渤海湾历来是陆海相互作用以及海岸动力地貌研究的热点区域^[22,23]. 由于渤海湾紧邻南海旋转潮波主要半日分潮(M_2 分潮)无潮点^[24], 因而也为研究人类活动与潮波系统的关系提供了极佳区域. 高强度滩涂开发是严重干扰和改变海域自然属性的人类活动, 会带来生态与资源环境、社会经济及洪潮灾害等多方面问题, 有时这些问题的负面影响甚至不可逆转^[25], 其环境效应近年来备受关注. 针对渤海潮波系统的研究, 过去主要模拟了其现代分布特征^[15,24,26], 从黄河口变化角度对比了 20 世纪 70 年代与 30 年代的潮波系统变化^[27]. 近期虽有研究涉及围填造成渤海潮波系统变化^[17,28,29], 但未进行潮波系统累积变化过程及机制研究. 本文利用长江下游水文水资源勘测局实测水文数据、中国人民解放军海军司令部航海保证部海图数据、中国科学院对地观测与数字地球科学中心和中巴地球资源卫星中心遥感影像数据, 选择渤海湾作为研究区, 通过潮波数学模

型计算, 分析潮波系统对渤海湾内高强度滩涂开发的响应, 旨在揭示人类高强度开发背景下潮波系统累积变化过程及其机制, 深化关于半封闭海湾潮波系统演变机制和海湾地貌演变宏观动力背景的认识, 以及为该区海岸工程研究提供支持.

1 资料和方法

1.1 数据来源和处理

选择 2003 年(高强度开发起点年)、2006 年(湾内呈曹妃甸、天津港和黄骅港小规模单点围填)、2012 年(海湾内高强度开发格局基本成型)和远期规划作为代表年份, 同时选取海图理论基面 0 m 和 -5 m(下文简称 0 m 和 -5 m)围填进一步研究极端围填对潮波系统的可能影响. 潮波数学模型验证和计算所用岸线(2003, 2006, 2010, 2012 年)提取自中国科学院对地观测与数字地球科学中心和中巴地球资源卫星中心遥感影像图(Landsat 卫星、HJ 卫星, 空间分辨率 30 m). 远期规划围填资料来自于交通部规划研究院和《滨州港套尔河港区总体规划(2015~2030 年)》. 渤海湾水下地形、0 m 等深线和 -5 m 等深线取自 2005 年版 1:15 万海图(代表 2003 年资料)、2012 年版 1:15 万海图(代表 2010 年资料), 渤海湾以外水下地形来自 2005 年版和 2012 年版渤海及黄海北部 1:25 万海图. 用于验证的实测 1:10000 水下地形数据(渤海湾局部 2010 年 5 月)、水文测验数据(2010 年 6~7 月)来自于长江下游水文水资源勘测局, 潮波模型计算所用开边界潮位过程来

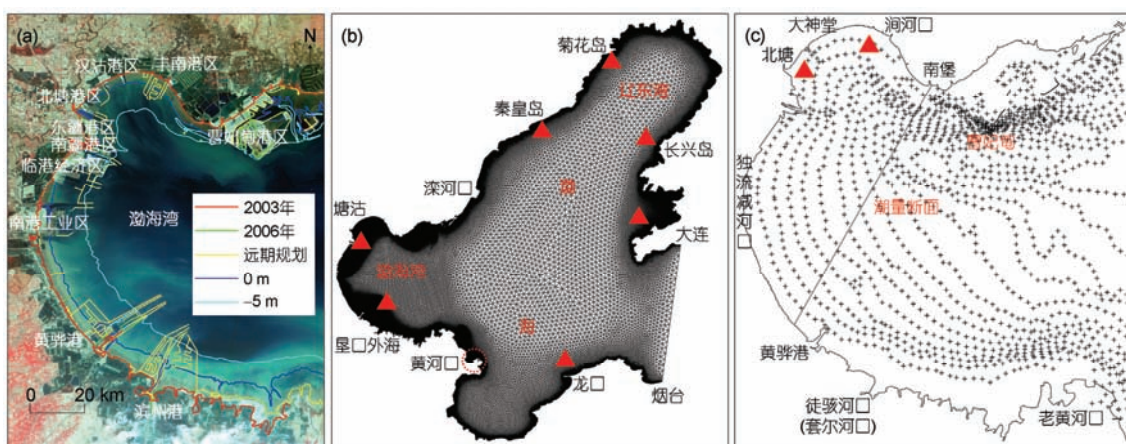


图 1 渤海湾区位及不同阶段岸线(a)(底图为 2012 年遥感影像图)、计算网格和监测点(b)、潮量断面(c)

Figure 1 Location of study area, coastline at different stages (a) (base map is remote sensing map of 2012), computational grids (b), monitoring points, and tidal volume sections (c)

自于中国国家海洋信息中心潮汐表。

遥感影像岸线提取采用人机交互方式,并根据实测资料进行校正,以保证提取精度。远期规划图和海图经ArcGIS 10.0软件地理配准后统一至遥感影像数据坐标系(WGS84坐标系, UTM投影50 N)。海图等深线和水下地形数据提取采用人工数字化方法,经校对后转为模型计算所需的xyz数据格式。对潮波计算结果采用最小二乘法进行调和与分析,得出潮波调和常数,进而作出潮波同潮图。

1.2 潮波数学模型

本文潮波计算采用半隐式非结构网格有限体积海洋模型,模型控制方程及数值离散方法等参见Wang和Geng^[30]。为准确模拟渤海湾内岸滩边界随涨、落潮交替出露和淹没现象,计算过程中采用了动边界技术^[21]。针对围垦后岸线曲折、边界复杂的特点,为克服矩形网格锯齿形边界所造成的流动失真,同时避免生成有结构贴体曲线网格的复杂计算和其他困难,采用可方便拟合复杂边界的非结构三角网格对计算域进行了剖分(图1(b))。

模型包括整个渤海,开边界位于大连、烟台一线(图1(b)),计算边数为401919,平均边长426 m,最小边长35 m;计算单元数为266274,计算结点数为135638,计算面积约为84689.7 km²。渤海湾沿岸河流入海径流量较小,因此模型中不考虑河流径流。由于风对潮波影响很小,因而模型中没有考虑风以及风吹流的影响。鉴于潮汐是主要水动力条件,在开边界处给了潮位过程。底床边界条件仅考虑摩阻,不包括地下水、渗流等边界条件。采用基本糙率和水深调

节糙率相加的办法确定糙率,基本糙率采用0.015~0.025。模型自冷启动开始,初始潮位和流速为0,温度和盐度分别为25℃和渤海湾夏季一般值30 PSU。模型运行时间为2010年6月5日至7月11日,为保证运算的精度,舍弃了最初5天的计算结果。

1.3 数值试验方案

由于东中国海潮波以半日型占绝对优势^[11],本文以M₂分潮为重点研究对象,同时涉及K₁分潮,计算过程中共设置了35组条件(表1)。为反映岸线变化单一因子对潮波系统的影响,计算过程中各方案均采用2003年水下地形条件。旋转潮波系统是半封闭海区 and 海湾内潮波运动的显著特征,由于无潮点不仅是该类潮波系统的重要特征,还控制潮波的潮差分布及旋转状态,因此本文重点分析M₂分潮无潮点变化,同时也分析振幅变化,潮汐性质变化、最大可能潮差变化^[31]、流速变化以及潮量变化。

1.4 模型验证

模型验证过程中,对开边界潮位进行了反复调整,调和常数模拟值与实测值吻合较好(验证点见图1红三角),M₂分潮振幅和迟角均方差分别小于9.2 cm和9.45°,K₁分潮振幅和迟角均方差分别小于2.3 cm和6.5°,模拟的M₂和K₁分潮振幅、迟角分布与文献[5,11]研究结果基本一致。模拟显示,进入渤海的潮波分别向辽东湾和渤海湾传播,各形成逆时针方向的同潮时线,在秦皇岛外以及黄河口外各有一个M₂分潮无潮点,在渤海入口附近有一个K₁分潮无潮点。部分计算与实测潮位过程见图2,由图可见,除

表1 模型计算方案^{a)}

Table 1 Model runs

方案	岸线	方案	岸线	方案	岸线	方案	岸线
Case1	2003	Case10	黄骅港FP	Case19	Central	Case28	Case27+汉沽港区FP
Case2	曹妃甸2006	Case11	丰南港FP	Case20	N1	Case29	Case28+北塘港区FP
Case3	曹妃甸2012	Case12	渤海湾2006	Case21	N2	Case30	Case29+东疆、南疆港FP
Case4	曹妃甸FP	Case13	渤海湾2012	Case22	S1	Case31	Case30+临港工业区FP
Case5	天津港2006	Case14	渤海湾FP	Case23	S2	Case32	Case31+南港工业区FP
Case6	天津港2012	Case15	滨州港北	Case24	CN	Case33	Case32+黄骅港FP
Case7	天津港FP	Case16	滨州港FP	Case25	CS	Case34	Case33+滨州港北FP
Case8	黄骅港2006	Case17	0m围填	Case26	Case1+曹妃甸FP	Case35	Case34+滨州港FP
Case9	黄骅港2012	Case18	-5m围填	Case27	Case26+丰南港FP		

a) FP指远期规划阶段, CN指Central+N1+N2, CS指Central+S1+S2

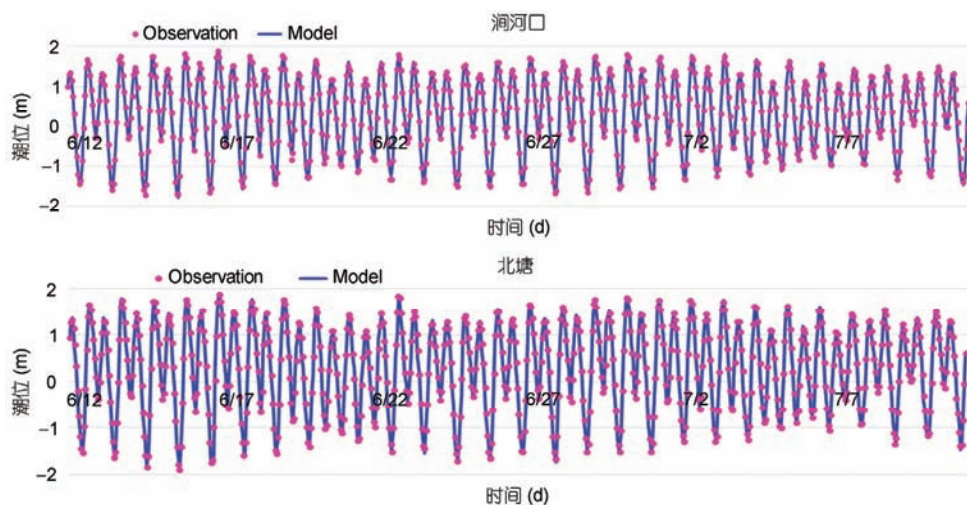


图2 (网络版彩色) 涧河口、北塘潮位实测值与计算值对比

Figure 2 (Color online) Comparison of measured and simulated tidal elevations for Jianhe Estuary and Beitang

个别点和个别时刻, 潮位过程、高潮位和低潮位与实测值均较一致, 整体上潮位误差小于10 cm, 相位误差小于15 min. 验证表明, 模型采用的计算参数基本合理, 能够较好地模拟该海域潮波系统及潮流运动过程, 即可用于本文的计算.

2 结果与讨论

2.1 潮波系统整体变化

2003年以后, 随着围填规模增加至远期规划, 黄河口外 M_2 分潮无潮点持续向东南移动(图3), 2006, 2012年和远期规划阶段分别相对于2003年移动了约1, 10和22.5 km. 0 m围填阶段, 该无潮点相对于2003年移动约27.3 km, 但相对远期规划阶段向东北移动. 2003年至0 m围填阶段, 渤海湾内潮差总体逐渐增加(图4), 潮差增幅(相对2003年)呈自西北向东南增加的趋势, 0 m围填阶段相对2003年潮差增幅为0.1~0.15 m区约占海湾一半面积. -5 m围填阶段, 该无潮点相对2003年移动约83.8 km, 且相对0 m围填阶段又大幅度向东北移动, 同时该阶段渤海湾西部的潮差还有所减小, 表明渤海湾 M_2 分潮已出现较大的变化. 以塘沽以北大神堂附近的湾顶区为例, 相对于2003年, 潮差增幅2006年为0~0.01 m, 2012年为0.02~0.04 m, 远期规划为0.04~0.065 m, 0 m围填阶段为0.068~0.08 m; 但-5 m围填阶段该区相对2003年潮差减小, 减幅最大约0.035 m.

相比而言, 不同围填阶段秦皇岛外 M_2 分潮无潮

点最大移动距离约5.9 km, K_1 分潮无潮点最大移动距离约6.3 km(图3). 由此可见, M_2 分潮受渤海湾围填的影响远大于 K_1 分潮所受影响, 且秦皇岛外 M_2 分潮无潮点受影响程度远小于黄河口外 M_2 分潮无潮点(下文简称 M_2 分潮无潮点)所受影响.

从不同年份 M_2 分潮同潮时线来看(图3), 90° 同潮时线变化较大, 其他同潮时线变化相对较小. 该线2003年与近岸交于大神堂附近, 2012年南移至南港工业区附近, 远期规划又南移至黄骅港附近; 与远期规划相比, 0 m围填阶段该线变化不大. 由于上述年份 60° 同潮时线一直在曹妃甸附近, 相比 90° 同潮时线变化小很多, 表明随着围填规模增加至0 m围填阶段, 渤海湾内 M_2 分潮传播速度先变快后趋稳定. -5 m围填阶段因 M_2 分潮无潮点大幅移动, 60° 和 90° 同潮时线也移动明显. 与 M_2 分潮迟角变化相比, 不同年份 K_1 分潮迟角变化较小, 以 150° 同潮时线为例, 直至-5 m围填, 该线才由曹妃甸海域附近移至塘沽附近.

为反映不同围填强度对渤海湾水动力环境的影响, 沿湾内主要等深线布置了若干监测点(图1(c)), 以监测点平均流速变化反映渤海湾流速变化. 统计表明, 随着围填强度增加, 渤海湾整体涨、落潮平均流速逐渐下降, 涨、落潮平均流速2003年为0.33~0.37 m/s, 2012年为0.3~0.34 m/s, 远期规划为0.29~0.31 m/s, 至-5 m围填为0.16~0.17 m/s.

2.2 多工程累积影响过程

从无潮点位置变化来看, 渤海湾内各单一围填

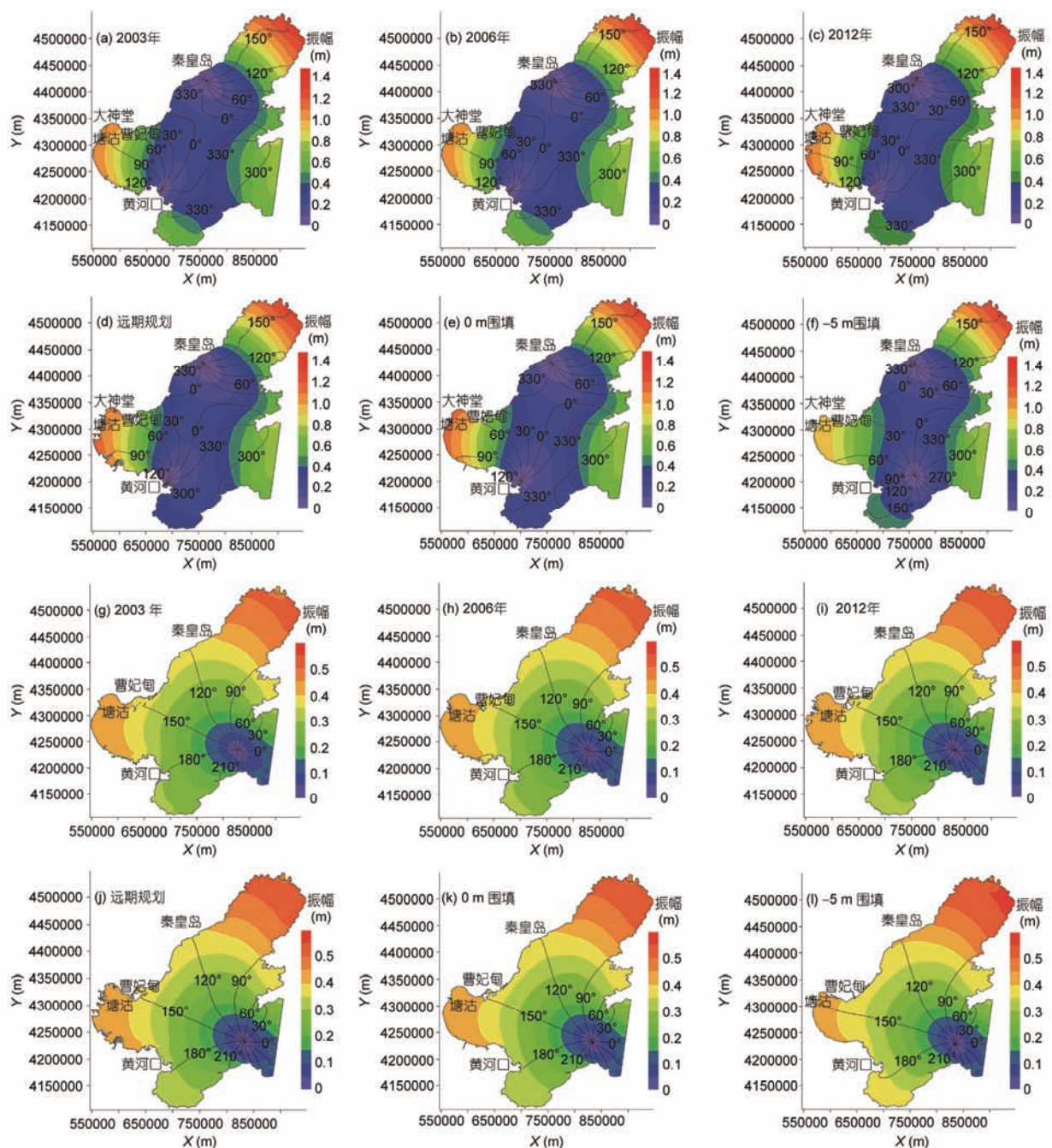


图3 M_2 ((a)~(f)) 和 K_1 ((g)~(l)) 分潮变化

Figure 3 Change of M_2 constituent tide ((a)~(f)) and K_1 constituent tide ((g)~(l)) in different years

工程面积越大, 对潮波系统影响越大. 流速变化也反映这一影响规律, 例如, 对于远期规划阶段, 天津港由于围填面积较大, 围填后使得海湾流速减小约 $0.02 \sim 0.03$ m/s, 而其他单一围填对海湾流速影响很小. 从无潮点移动方向看, 曹妃甸规模增加、滨州港规模增加均使 M_2 分潮无潮点向西南移动为主, 天津

港、黄骅港、丰南港规模增加则使该无潮点向东南移动为主(图5(c)). 以远期规划阶段为例, 在2003年岸线基础上, 从北向南逆时针方向逐一增加各远期规划阶段的单一工程, 直至远期规划围填全部实施 (Case26~Case35), M_2 分潮无潮点先向西南移动, 再向东南移动, 与各单一工程影响规律一致(图5(b)).

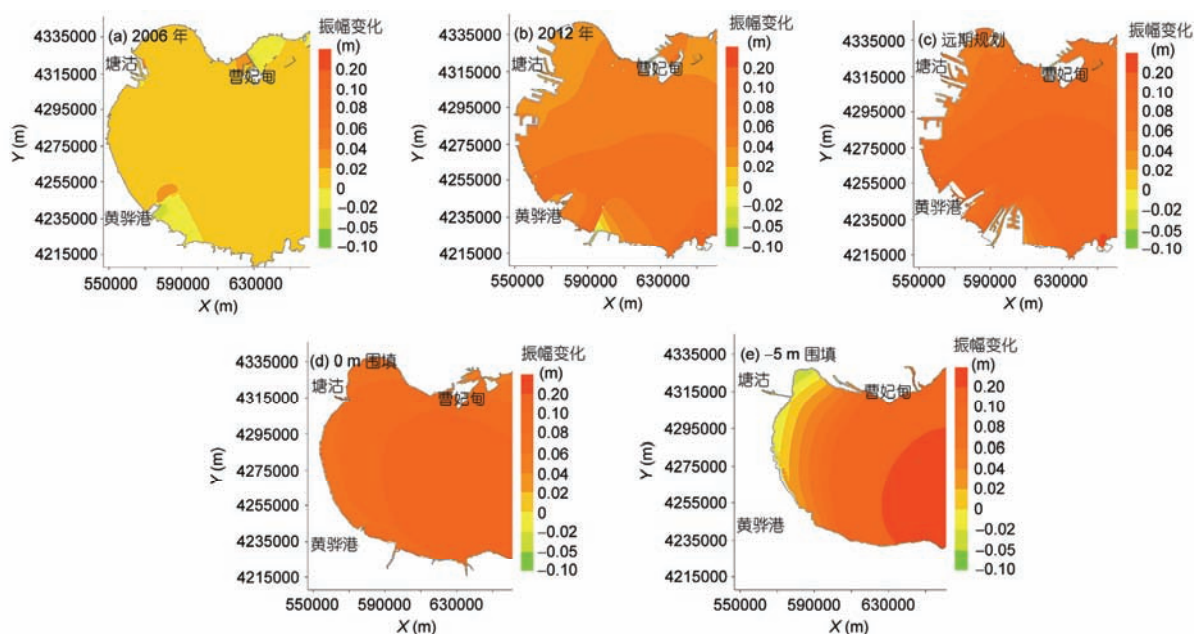


图 4 相对 2003 年 M_2 分潮振幅变化

Figure 4 Relative change of M_2 constituent tide amplitude compared to its condition in 2003

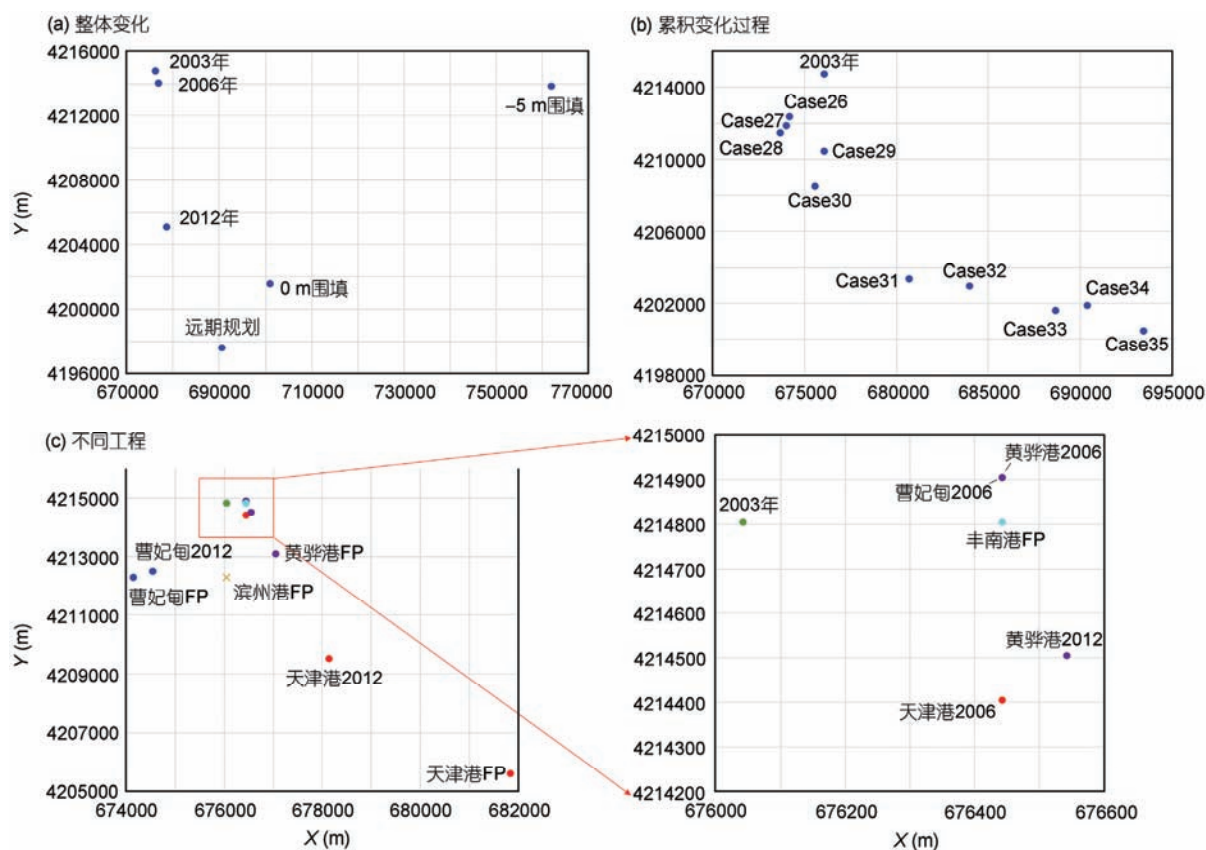


图 5 (网络版彩色)不同围填条件下黄河口外 M_2 分潮无潮点位置

Figure 5 (Color online) Location of M_2 constituent tide amphidromic point at different reclamation stages

2.3 最大可能潮差和潮汐性质变化

渤海湾2003年最大可能潮差为2~5 m(图6(a)), 分布规律与 M_2 分潮潮差相似, 由湾口向湾内逐渐增加. 与2003年相比, 2006, 2012年渤海湾内最大可能潮差3 m等值线持续向东移动, 表明湾内最大可能潮差在持续增加. 远期规划阶段(图6(b)), 最大可能潮差4 m等值线和3 m等值线在2012年的基础上均向东移动, 且在渤海湾西部湾顶区出现了最大可能潮差大于5 m的区域. 随着围填规模进一步增加至0 m围

填和-5 m围填, 位于湾口的2 m等值线仅向东略有移动, 渤海湾内最大可能潮差相对远期规划阶段变化不大.

潮汐性质对比表明(图6(c), (d)), 不同围填强度下, 渤海湾潮汐系数均为0.5~2, 与2003年相比潮汐性质没有发生变化, 仍以不规则半日潮为主.

2.4 讨论

(i) 潮波系统变化的机制. 本文中几个代表年

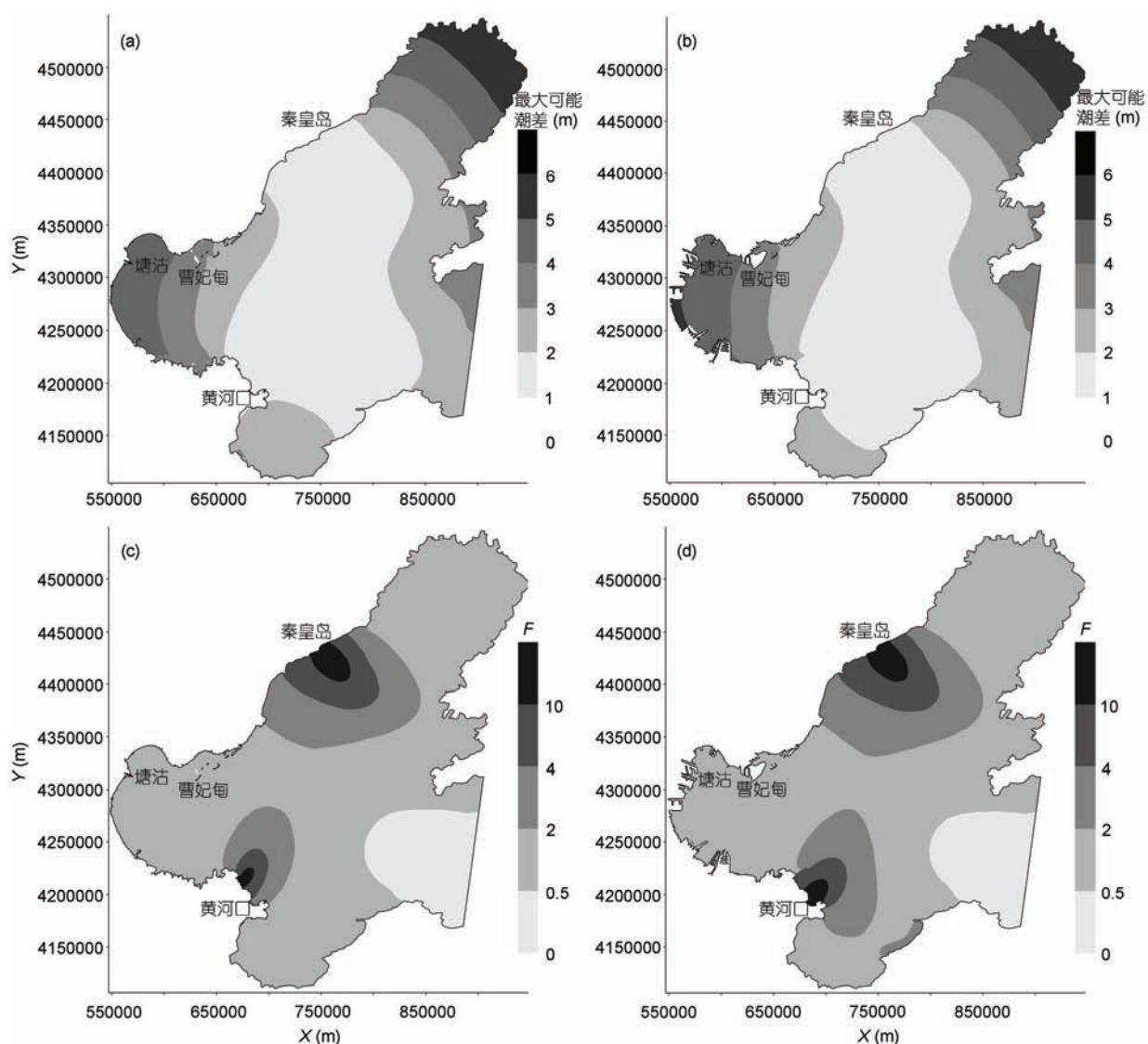


图6 2003年((a), (c))、远期规划((b), (d))最大可能潮差((a), (b))和潮汐性质((c), (d)). F 为潮汐性质系数, 规则半日潮: $0 < F \leq 0.5$; 不规则半日潮: $0.5 < F \leq 2$; 不规则全日潮: $2 < F \leq 4$; 规则全日潮: $4 < F$

Figure 6 Maximum probable tidal range ((a), (b)) and tidal property ((c), (d)) of 2003 ((a), (c)) and future planning ((b), (d)). F refers to the tidal property coefficient, regular semi-diurnal tide: $0 < F \leq 0.5$; irregular semi-diurnal tide: $0.5 < F \leq 2$; irregular diurnal tide: $2 < F \leq 4$; and regular diurnal tide: $4 < F$

份 M_2 分潮无潮点整体移动方向先向东南再向东北,但累积变化过程对比表明,不同工程对该无潮点移动方向的影响有所不同.例如,曹妃甸围填造成该无潮点向西南移动,但曹妃甸叠加渤海湾西岸围填后该无潮点却向东南移动.整体与局部围填条件下 M_2 分潮无潮点位置变化对比表明,湾口曹妃甸围填对潮波系统变化的影响相对弱于海湾西岸围填对潮波系统变化的影响.

根据潮波理论,半封闭海区 and 海湾的潮波运动受科氏力影响为旋转潮波系统,入射潮波和反射潮波振幅相等处叠加形成无潮点,摩擦使无潮点相对于入射潮波向左移动.渤海湾内的围填相当于增加了潮波传播的阻力,潮波自东向西传入渤海湾,因此无潮点向入射潮波的左边即向南移动.从潮能分布角度来看,滩涂通过底部摩擦和水平扩散影响潮波能量,涨潮时储存潮波能量,落潮时释放潮波能量,且存储于滩涂区的潮波能量远高于潮波在滩涂区传播因底摩擦等损耗的能量^[5].由围填工程对潮波系统影响概化图可见(图7),围填工程建设的海堤对传入滩涂区的潮波形成反射,由于计算过程中不同规模的围填并未影响边界处的进出潮量,因此原先存储于滩涂区的这部分被反射的潮波能量(图7灰箭头)将在滩涂以外海区重新分布,即使得这一区域潮波能量(动能、势能)增加,其中潮波势能即潮差.由此造成了潮差增加、无潮点外移等潮波系统变化.对于渤海湾,由于湾口向东开敞,因此无潮点外移即向东移动.

由潮波同潮图可见,受无潮点位置的影响,渤海湾内 M_2 分潮振幅自湾口向湾顶增加.由于与 M_2 分潮无潮点直线距离相近的黄骅港(平均潮差2.24 m)和曹妃甸(平均潮差1.4 m)潮差相差较大,因此湾内潮波

分布与距离 M_2 分潮无潮点远近并无直接关系.鉴于渤海湾内潮波振幅的分布特征,对于渤海湾这样湾口分布有 M_2 分潮无潮点的半封闭海湾,海湾西部(或湾顶)潮差较大区和其南部接近 M_2 分潮无潮点区的围填哪个对潮波系统影响更大目前还不清楚.为探索围填所在岸段潮差大小、距离无潮点远近与潮波系统变化之间的关系这一问题,本文以南堡附近(N1)、涧河口附近(N2)、独流减河口附近(Central)、老黄河口附近(S1)和黄骅港至套尔河口之间(S2)等5个区域为例,分别自岸线至0 m线选取了100 km²的围填,形成了5个单独围填以及两个组合围填方案(CN, CS),详见表1(Case19~Case25).需要指出的是,本文中距离 M_2 分潮无潮点距离增加是指自湾口沿岸顺时针方向.计算表明(图8),从对 M_2 分潮无潮点影响角度来看,N2围填(平均潮差约2.5 m)和C围填(平均潮差约2.5 m)均造成该无潮点移动约1.6 km, S2(平均潮差约2.2 m), N1(平均潮差约1.5 m), S1围填(平均潮差约0.9 m)分别使该无潮点移动约1.3, 1和0.5 km; CN围填和CS围填分别使该无潮点移动约4.7和3.9 km.对比围填所在岸段潮差大小和无潮点移动距离可见,围填所在岸段潮差越大,对于潮波系统的影响越明显.海湾或半封闭海区潮差大的地区一般滩涂垂直于海岸方向宽度较大,在这一区域围填除了直接减少滩涂宽度,更因使原先存储于滩涂区域的潮能重新分布而使潮波系统发生明显变化.因此,对类似渤海湾湾顶区域的半封闭海湾潮差较大岸段的围填开发尤需科学论证.需要指出的是,虽然围填造成海湾潮差增加,但由于滩涂面积减少,海湾纳潮水域减少,因而海湾内潮流动力整体减弱.

(ii) 潮波系统变化的效应. 由于海平面上升将

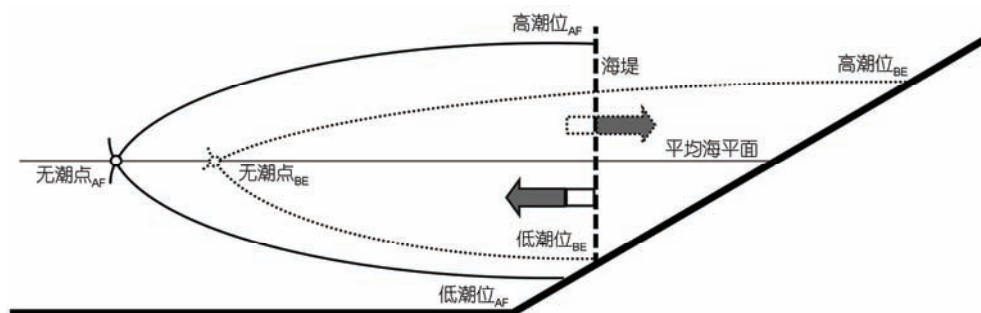


图7 围垦前(BE)、后(AF)潮差变化及无潮点移动概念模式图(灰色, 储存于滩涂区潮波能; 白色, 滩涂区外潮波能)

Figure 7 Conceptual map of tidal range change and replacement of amphidromic point before and after reclamation (gray, tidal energy stored in mudflat area; white, tidal energy out of mudflat area)

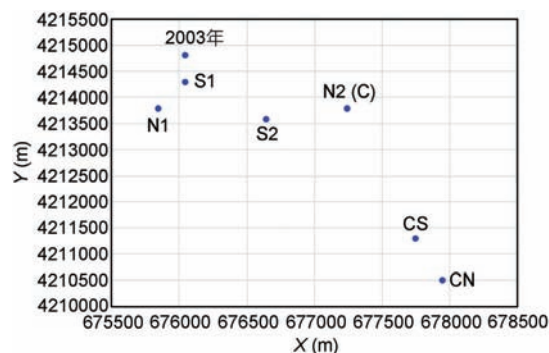


图8 (网络版彩色)不同位置围填条件下黄河口外 M_2 分潮无潮点位置
Figure 8 (Color online) Movement of M_2 constituent tide amphidromic point outside of the Yellow River mouth under reclamation at different sites in the Bohai Bay

造成沿岸低地淹没, 因此渤海湾围填规模增加造成的潮差增大将使沿岸低地有被淹没的危险。随着潮流动力减弱, 渤海湾内从动力角度将以淤积为主要态势, 但具体的冲淤还取决于含沙量等其他因素的变化。

海湾纳潮量是其能容纳潮水的体积, 反映了海湾水交换能力的强弱。随着渤海湾内滩涂面积因围垦而减少, 进出湾内的潮量也减少。以湾内断面潮量为例(图1(c)), 相对于2003年, 该断面2006年进出潮量减少约1%, 2012年减少约13.5%, 远期规划减少约22.1%, 至-5 m围填将减少约64.5%。从水环境角度来看, 潮量的减少将减小渤海湾的水交换能力, 从而不利于湾内污染物扩散。

无潮点附近往往潮流较强。渤海湾内高强度围填将使 M_2 分潮无潮点位置移动明显, 从而改变近岸强潮流区的分布, 不仅影响黄河口附近的冲淤变化, 还将对相关岸段海岸工程防护以及设计标准造成影响。

响。潮波计算对比还表明, 切除黄河口三角洲(位置见图1(b))将使得其口外 M_2 分潮无潮点向西南移动。因此, 0 m围填以及-5 m围填使得 M_2 分潮无潮点向东北移动, 与黄河口三角洲向外延伸的效果相当。

3 结论

(1) 渤海湾内不同阶段围填对 M_2 分潮的影响远大于对 K_1 分潮的影响, 且以对黄河口外 M_2 分潮无潮点影响为主。相对于2003年, 2006年、2012年、远期规划围填使该 M_2 分潮无潮点向东南移动约1, 10, 22.5 km, 并造成湾内潮差增加、潮波传播加快。0 m围填和-5 m围填使该无潮点相对2003年移动约27.3和83.8 km, 相对于远期规划阶段向东北移动, 但0 m围填阶段潮波传播速度变化很小, -5 m围填阶段海湾西部潮差有所减小, 潮波系统变化明显。

(2) 不同位置围填对黄河口外 M_2 分潮无潮点移动方向影响不同, 曹妃甸、滨州港围填规模增加使得该无潮点向西南移动为主, 天津港、黄骅港以及丰南港围填规模增加使得该无潮点向东南移动为主。从北向南逆时针方向逐一增加围填直至远期规划围填全部实施, 该无潮点先向西南移动, 再向东南移动。

(3) 受旋转潮波控制的半封闭海湾, 潮波系统变化与湾内围填所在岸段潮差大小关系明显, 所在岸段潮差越大, 围填对潮波系统影响越明显。对海湾内潮差大的岸段围填开发尤需科学论证。

(4) 高强度围填将使渤海湾内涨、落潮平均流速下降, 水交换能力减弱, 但不改变湾内潮汐性质。围填将使沿岸低地有被淹没的危险, 还将造成黄河口附近冲淤变化、海岸工程防护和设计标准变化。

致谢 本文曾得到南京师范大学王建教授、南京水利科学研究院陈可锋高工、孙忠滨高工、季荣耀高工、王艳红教授和陆彦教授的指导与帮助, 审稿专家为本文修改提供了诸多建设性意见, 在此一并致谢。

参考文献

- Ni W F, Wang Y P, Symonds A M, et al. Intertidal flat development in response to controlled embankment retreat: Freiston Shore, The Wash, UK. *Mar Geol*, 2014, 355: 260–273
- Zhang J. On the critical issues of land-ocean interactions in coastal zones (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 1956–1966 [张经. 关于陆-海相互作用的若干问题. *科学通报*, 2011, 56: 1956–1966]
- Ma Z J, Melville D S, Liu J G, et al. Rethinking China's new great wall. *Science*, 2014, 346: 912–914
- Wang Y P, Gao S, Jia J J. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China. *Mar Geol*, 2012, 291/294: 147–161
- 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 Seas. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2013, 133: 147–160
- 6 Ogura S. The tides in the northern part of the Huang Hai. *Jpn J Astron Geophys*, 1936, 14: 27–55
- 7 Chen Z Y. A tidal model for rectangular shallow bay (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 1965, 7: 85–93 [陈宗镛. 长方形浅水海湾的一种潮波模式. *海洋与湖沼*, 1965, 7: 85–93]
- 8 Fang G H, Wang R S. Tides and tidal streams in gulfs (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 1966, 8: 60–77 [方国洪, 王仁树. 海湾的潮汐与潮流. *海洋与湖沼*, 1966, 8: 60–77]
- 9 Shen Y J. Numerical computation of tides in the East China Sea (in Chinese). *J Ocean Univ Chin*, 1980, 10: 26–35 [沈育疆. 东中国海潮汐数值计算. *中国海洋大学学报*, 1980, 10: 26–35]
- 10 Xia Z W, Wang Z J. Numerical computation about semi closed gulf (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 1987, 9: 16–22 [夏综万, 王钟楫. 关于半封闭海湾潮波的数值模拟. *海洋学报*, 1987, 9: 16–22]
- 11 Zhao B R, Fang G H. Numerical modeling of tide and tidal current in Bohai Sea, Huanghai Sea, and Donghai Sea (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 1994, 16: 1–10 [赵保仁, 方国洪. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟. *海洋学报*, 1994, 16: 1–10]
- 12 Lin H, Lü G N, Song Z Y, et al. Study on modeling the tidal wave system of East China Sea with GIS (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1997, 52: 161–169 [林珏, 闰国年, 宋志尧, 等. 地理信息系统支持下东中国海潮波系统的模拟研究. *地理学报*, 1997, 52: 161–169]
- 13 Lü G N, Lin H, Song Z Y, et al. Modeling of the tide wave system changes in the marginal seas adjacent to eastern China since the last full glacial period (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2000, 20: 1–7 [闰国年, 林珏, 宋志尧, 等. 末次冰期最盛时期以来中国东部边缘海潮波系统演变过程的模拟研究. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20: 1–7]
- 14 Jia J J, Lü G N, Song Z Y, et al. Simulation of mechanisms for the tidal wave system in marginal seas, Eastern China since the last full glacial period (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 2000, 31: 159–167 [贾建军, 闰国年, 宋志尧, 等. 中国东部边缘海潮波系统形成机制的模拟研究. *海洋与湖沼*, 2000, 31: 159–167]
- 15 Yao Z G, He R Y, Bao X W, et al. M_2 tidal dynamics in Bohai and Yellow Seas: A hybrid data assimilative modeling study. *Ocean Dynam*, 2012, 62: 753–769
- 16 Song Z K, Yu L L, Xiang Y Y, et al. A numerical simulation study on eight major tidal components in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea (in Chinese). *Coast Eng*, 2016, 35: 16–23 [宋泽坤, 俞亮亮, 向芸芸, 等. 渤、黄、东海 8 个主要分潮的数值模拟研究. *海岸工程*, 2016, 35: 16–23]
- 17 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 Geophys Res Oceans*, 2013, 118: 3462–3472
- 18 Gao G D, Wang X H, Bao X W. Land reclamation and its impact on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2014, 151: 285–294
- 19 Suh S W, Lee H Y, Kim H J. Spatio-temporal variability of tidal asymmetry due to multiple coastal constructions along the west coast of Korea. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2014, 151: 336–346
- 20 Xu J S. Dynamic factors and feature analysis of geomorphic development of coastal zone in western Bohai Bay (in Chinese). *Mar Sci Bull*, 1990, 9: 58–64 [徐家声. 渤海西部海岸带地貌发育的动力因素及特征分析. *海洋通报*, 1990, 9: 58–64]
- 21 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. *Coast Eng*, 2009, 56: 831–843
- 22 Li C C. Shore and tidal inlet system in Dakouhe area on southwest coast of Bohai Bay (in Chinese). *Mar Sci Bull*, 1993, 12: 29–35 [李春初. 渤海湾西南岸大口河的海岸与潮汐通道体系. *海洋通报*, 1993, 12: 29–35]
- 23 Zhang R S. Development of tidal inlet in mud coast along Bohai Bay (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1995, 50: 506–513 [张忍顺. 渤海湾淤泥质海岸潮汐汉道的发育过程. *地理学报*, 1995, 50: 506–513]
- 24 Fang G H. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *Chin J Oceanol Limn*, 1986, 4: 1–16
- 25 Bao Y. Tide reverse transmitted resulted in flood by human project in estuary (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2014, 44: 531–538 [包芸. 人类重大工程改变河口潮波传播方向引发的灾害与恢复. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 531–538]
- 26 Lü X Q, Fang G H. Numerical experiments of the adjoint model for M_2 tide in the Bohai Sea (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2002, 24: 17–24 [吕咸青, 方国洪. 渤海 M_2 分潮的伴随模式数值实验. *海洋学报*, 2002, 24: 17–24]
- 27 Huang Z K. Tidal waves in the Bohai Sea and their variations (in Chinese). *J Ocean Univ Chin*, 1991, 21: 1–12 [黄祖珂. 渤海的潮波系统及其变迁. *中国海洋大学学报*, 1991, 21: 1–12]
- 28 Meng Y, Lou A G, Liu Y F, et al. Impact of coastline and topography changes on tidal wave system and tidal current character in the Bohai Sea (in Chinese). *J Ocean Univ Chin*, 2015, 45: 1–7, 101 [孟云, 娄安刚, 刘亚飞, 等. 渤海岸线地形变化对潮波系统和潮流性质的影响. *中国海洋大学学报*, 2015, 45: 1–7, 101]
- 29 Li B T, Wang Y G, Wei Z X, et al. Numerical study on tides of Bohai Sea and impact of topography changes on the tidal wave system (in Chinese). *Oceanol Limnol Sin*, 2015, 46: 9–16 [李秉天, 王永刚, 魏泽勋, 等. 渤海主要分潮的模拟及地形演变对潮波影响的数值研究. *海洋与湖沼*, 2015, 46: 9–16]
- 30 Wang Z L, Geng Y F. A three-dimensional semi-implicit unstructured grid finite volume ocean model. *Acta Oceanol Sin*, 2013, 32: 68–78
- 31 Chen K F, Wang Y H, Lu P D, et al. Effects of coastline changes on tide system of Yellow Sea off Jiangsu coast, China. *China Ocean Eng*, 2009, 23: 741–750

Summary for “渤海湾高强度开发对潮波系统的累积影响机制”

Cumulative impacts of high intensity reclamation in Bohai Bay on tidal wave system and its mechanism

HOU QingZhi, LU YongJun^{*} & WANG ZhiLi

State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

^{*} Corresponding author, E-mail: yjlu@nhri.cn

Contiguous mudflats exist along the coast zone of the Bohai Bay in the western part of the Bohai Sea of China. They are generally suitable for land reclamation, which can ease the contradiction between land resource shortage and the demand for development, because mudflats are important geomorphological systems which provide land resources. The shoreline at the Bohai Bay has experienced significant changes since 2003 due to high intensity reclamation. Environmental impacts of reclamation at different stages, especially on the tidal wave system, have attracted worldwide attention. However, there is still a lack of understanding on the cumulative response process of the tidal wave system and its response mechanism to high intensity development of mudflats. In this study, six periods were selected as representative reclamation stages in the Bohai Bay: 2003, 2006, 2012, future planning, and 0 m and -5 m reclamation stages. A two-dimensional tidal wave mathematical model was developed to analyze the cumulative changing process and dominant mechanism of the change of the tidal wave system by comparing effects of reclamation of the entire bay and cumulative effects of sequential reclamation projects, as well as studying the relations between the tidal wave change and tidal range on the shore segment where the reclamation project is located. Based on the analysis results, the influence of reclamation in the Bohai Bay on the M_2 constituent tide was much greater than that on the K_1 constituent tide, especially on the M_2 constituent tide amphidromic point outside of the Yellow River mouth. The movement distance of the M_2 constituent tide amphidromic point outside the Yellow River mouth for the aforementioned reclamation stages compared to its location in 2003 was about 1, 10, 22.5, 27.3, and 83.8 km, respectively. In contrast, the maximum movement distance of the other M_2 constituent tide amphidromic point outside Qinhuangdao and the unique K_1 constituent tide amphidromic point in the Bohai Sea for the aforementioned reclamation stages compared to their conditions in 2003 were about 5.9 and 6.3 km, respectively. With the increase of the reclamation scale, the M_2 constituent tide amphidromic point outside of the Yellow River mouth first moved southeastward, and then moved northeastward, and the tidal range of the western Bohai Bay first increased and then decreased, while the speed of tidal wave propagation first accelerated and then stabilized during the 0 m reclamation stage. During the -5 m reclamation stage, the tidal wave system experienced obvious changes, however, the tidal properties inside the bay remained the same. The average tidal current velocity of the bay decreased with the increase of the reclamation scale, and the tidal current velocity of 2003, 2012, future planning and -5 m reclamation stages were 0.33–0.37, 0.3–0.34, 0.29–0.31, and 0.16–0.17 m/s, respectively. When reclamation projects were performed one by one counterclockwise from Caofeidian (future planning) in the north to south until all the future planned reclamation projects were completed, the M_2 constituent tide amphidromic point first moved southwestward, and then moved southeastward. In semi-closed bays influenced by rotational tidal wave, the impact intensity of reclamation projects to the tidal wave system depends mostly on the tidal range of the coast where the reclamation projects are located. The greater the tidal range, the more obvious the effects of the reclamation projects will be on the tidal wave system. Continuous reclamation will increase flooding risks and tendency of siltation in the bay, weaken the water exchange rate in the bay, affect scouring and silting, as well as impact the design and defense standards of coastal engineering projects near the Yellow River mouth.

Bohai Bay, high-intensity reclamation, mudflat, tidal wave system, cumulative impacts, numerical simulation

doi: 10.1360/N972017-00468