

· 综合 ·



基于风暴骤淤的通州湾港区 冷家沙浅滩匡围方案研究 *

罗广胜, 潘毅

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 基于 ADCIRC+SWAN 和 Delft3D+SWAN 模式建立双层嵌套的水沙地貌数学模型。根据路径特征将影响通州湾的所有台风分为 5 类, 选取每类的代表性台风驱动模型, 计算分析通州湾北部规划港区及周边海域的泥沙骤淤和地貌演变特征。结果表明: 当前港区建设状况下, 台风引起的海域冲淤变化幅度在 ± 0.18 m 以内, 平均冲淤厚度 0.05~0.10 m; 在匡围方案影响下, 研究海域水道沙洲系统受风暴潮影响也不大, 风暴冲淤量级较小; 一场风暴潮过后 3 个匡围方案下港区及口门外航道处淤积量均不大, 最大局部淤积厚度 0.1~0.6 m, 且最大淤积厚度主要受台风类型控制; 从风暴骤淤的角度, 港区匡围方案 2 略优, 但总体差异不大。建议综合考虑其他因素对匡围方案进行比选。

关键词: 通州湾; 冷家沙匡围工程; 台风; 泥沙骤淤; 数值模拟

中图分类号: TV 148; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0001-07

Reclamation schemes of Lengjiasha shoal in Tongzhou Bay Port due to storm siltation

LUO Guang-sheng, PAN Yi

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A nested tidal current and sediment transport model is established based on ADCIRC+SWAN and Delft3D+SWAN models. All typhoons affecting Tongzhou Bay are classified into 5 types according to the track characteristics, and a typical typhoon for each type is selected to drive the model and calculate the sudden siltation volume of the planned port area in the north of Tongzhou Bay and its surrounding sea areas and analyze the characteristics of seabed morphological evolution. The results show that under the current construction status of the port area, the range of sediment erosion and deposition in Yaosha-Lengjiasha sea area caused by the typhoons are within ± 0.18 m, and the average thickness of erosion and deposition is between 0.05 m and 0.10 m; in the context of considering the impact of the reclamation plan, the channel-sandbank system is not greatly affected by the storm surge, and the magnitude of the storm erosion and deposition is relative small; the deposition amount of all the three different schemes is small after a storm surge, and the maximum local deposition thickness which is mainly controlled by typhoon types is between 0.1 m and 0.6 m. Generally speaking, from the point of view of typhoon sudden siltation, the second scheme of port area reclamation is better. However, the differences among different schemes are small, and it is suggested to consider other factors to achieve the final decision.

Keywords: Tongzhou Bay; Lengjiasha reclamation project; typhoon; sudden siltation; numerical simulation

收稿日期: 2021-01-20

*基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2017ZX01); 江苏省海洋科技创新专项(HY2019-1)

作者简介: 罗广胜(1998—), 男, 硕士研究生, 从事海岸水动力研究。

通讯作者: 潘毅(1985—), 男, 教授, 博士生导师, 从事港口、海岸及近海工程研究。Email: panyi@hhu.edu.cn

通州湾港区位于江苏省南通市东部沿海海域，港区整体以近岸浅滩沙体为主体、潮汐水道为水域通道，是长三角北翼可开发的重要而稀缺的深水港口资源。2016年后，港区进入实质开发阶段，以所利用的潮汐通道划分，港区可分为南、北2个部分。南部港区建设基本完成，北部港区规划方案已明确，整体呈西北—东南走向。为进一步开发建设通州湾30万吨级深水港码头及航道，在现有港区规划的基础上对冷家沙浅滩进行陆域匡围。匡围工程的实施将引起海域水沙环境一系列变化，因此有必要开展匡围方案下海域的冲淤响应研究^[1]。

关于通州湾海域陆域围垦的工程已有研究：通过考虑通州湾新区围填海的生态优化，从淡水引入、盐碱改良、入海水水质控制等方面构建了生态优化系统^[2]；潮汐潮流、地貌地质、海床演变等实测数据表明，规划港区的建设是维持小庙洪水道长期稳定、改善航道水深条件的重要支撑^[3]；使用数学模型研究通州湾一期通道建设、一港池围垦、冷家沙匡围等工程前、后潮流泥沙运动则表明，工程建设明显改变周边的水沙环境，但影响范围有限^[4-7]。总之，现有研究大多关注常规动力条件下陆域围垦对规划海域动力泥沙环境的影响，而对台风期间产生的大浪和风暴潮等动力过程对通州湾港区滩槽格局的短历时影响的研究较少。

事实上，港口码头建设规划方案的选择要考虑诸多因素，如长期水沙动力条件、地貌格局变化、生态影响及补偿方案、货物吞吐量及后期发展空间等。本文聚焦风暴骤淤对通州湾北部规划港区的影响，从风暴骤淤的角度对几个方案进行比较并给出建议。针对台风作用下冷家沙匡围对港区及周边海域水沙系统空间格局的影响，首先根据路径特征对历史上影响该区域的台风进行分类，每类选取一场典型台风作为代表；然后建立双层嵌套数学模型，在验证良好的基础上，预测3种不同工程方案实施情况下、台风过境后周边水域的泥沙骤淤和短历时地貌演变情况，给出工程建议，为通州湾30万吨级码头建设提供参考依据和技术支持。

1 研究区域及典型台风选取

1.1 研究区域概况

通州湾地处南黄海辐射沙脊群南翼，受江苏岸外辐射状潮流场影响，沙洲、深水相间分布。该海域内存在腰沙和冷家沙（图1）2条主要沙脊，呈半岛状自西向东分布，面积>300 km²。借助这2处浅滩沙脊进行围填，同时对小庙洪、三沙洪水道进行航道疏浚成为在通州湾海域建成深水港的理想方案。

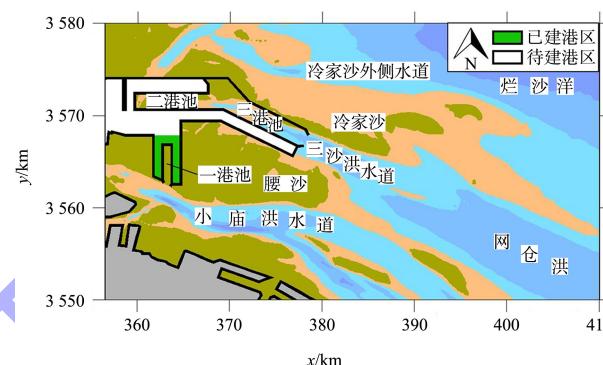


图1 通州湾港区平面布置

研究海域水体的含沙量不大，大、中、小潮平均含沙量分别为0.33、0.28和0.10 kg/m³；悬沙平均中值粒径0.02 mm左右；小庙洪水道深槽区底质中值粒径为0.007 mm，腰沙—冷家沙沙洲区一般大于0.1 mm^[8]。腰沙—冷家沙海域常浪向和强浪向均在N—E范围，与整体NW—SE走向的地貌格局存在较大交角，大风浪时易产生泥沙输移。

1.2 典型台风选取

研究表明，目前该区域水道沙洲演化处于较稳定阶段，突发事件如台风、风暴潮等将是该区今后大范围变迁的主要动力条件^[9]。统计分析出1945—2020年间59个影响研究海域的台风，根据路径特征将其分为5类，即东侧掠过型、西侧掠过型、南侧掠过型、北侧掠过型和直接穿过型。由于不同路径的台风引起的风暴骤淤具有不同特征，为了综合考虑各类台风的影响，依次摘选东侧掠过型1509号、西侧掠过型1614号、南侧掠过型1810号、北侧掠过型9415号及直接穿过型1416号共5个典型台风场次（图2）进行模拟计算。

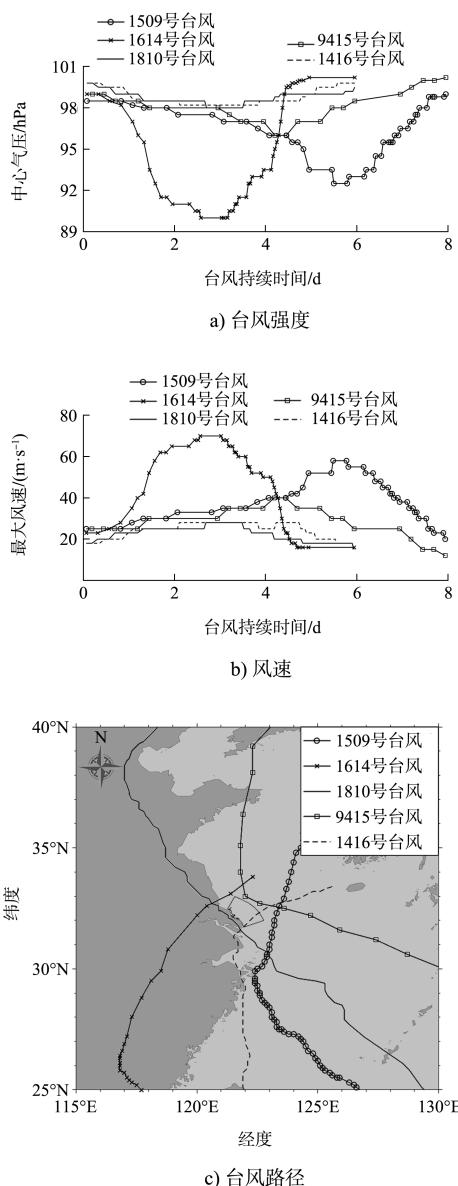


图 2 5 类台风典型场次的强度及路径信息

2 数学模型的建立及验证

2.1 模型设置

采用大、小模型双重嵌套(图 3)的方式进行数值模拟: 大模型为基于 ADCIRC+SWAN 模式建立风暴潮—波浪耦合模型, 网格经纬度跨度为(118°E~129°E, 25°N~41°N), 总网格数 43 549 个, 网格尺寸为 2~20 km; 小模型为基于 Delft3D+SWAN 模式建立的包含研究区域的水沙-地貌动力模型, 台风风场采用 Holland 风场和 ERA5 再分析数据组合而成的混合风场^[10], 网格经纬度跨度为(121°16' E~122°46' E, 31°44' N~32°59' N), 总网格数为 283 × 203, 水平空间网格长在 0.2~1.3 km。

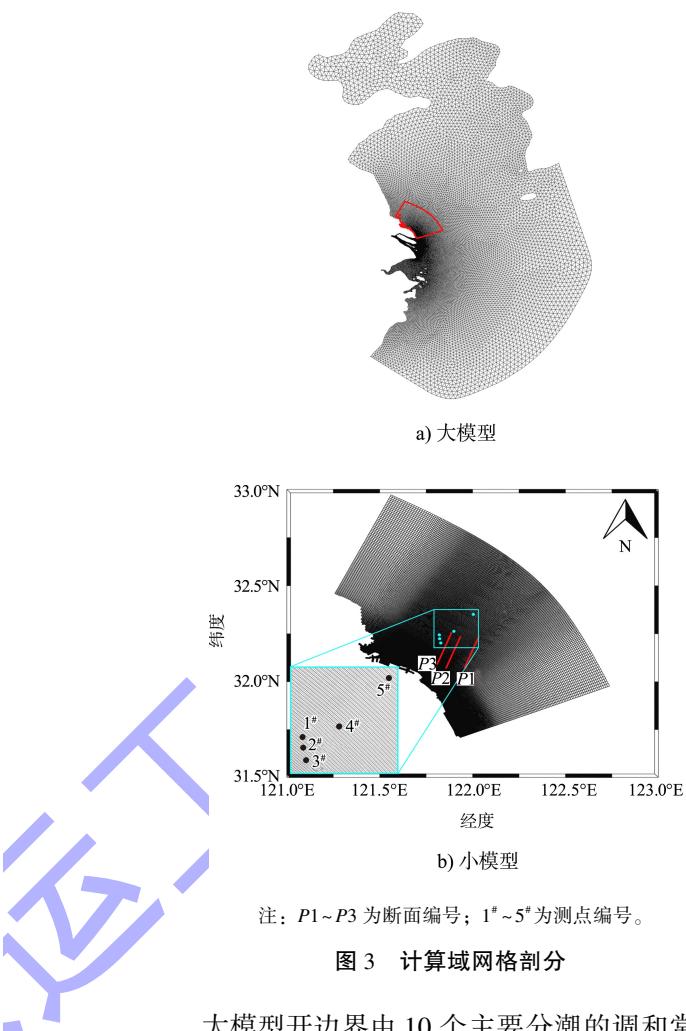


图 3 计算域网格剖分

大模型开边界由 10 个主要分潮的调和常数计算, 模型范围足够大使得风暴潮能得到充分成长; 小模型进行局部二维水沙地貌数值模拟, 开边界的潮位边界由大模型计算得到, 含沙量边界采用零梯度边界。小模型参数均在合理范围内根据模拟结果和现场数据调试得到, 其中底部摩阻系数采用曼宁系数, 取值 0.02; 水平和垂向紊动黏性系数分别取 20 和 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 临界淤积切应力取 0.8 N/m^2 ; 临界冲刷切应力取 0.25 N/m^2 。泥沙沉速采用公式(1)计算:

$$\omega = \omega_0 FD \quad (1)$$

式中: ω_0 为单颗粒泥沙的沉降速度; F 为絮凝因子; D 为衰减系数, 取 $4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。

2.2 模型验证

1) 水位、流速、流向、含沙量验证。采用 2019 年 2 月实测水文资料进行模型率定, 各测站位置如图 3b 所示。水位验证采用 1#~3# 测站的

逐时潮位数据, 计算所得水位过程线与验潮站潮位提供值一致性较好; 流速、流向、含沙量验证采用 1#~5#测站大潮数据, 计算值与实测值大小及

过程吻合较好(图 4~6)。以上表明模型能较好地模拟常规研究区域内水沙运动过程。

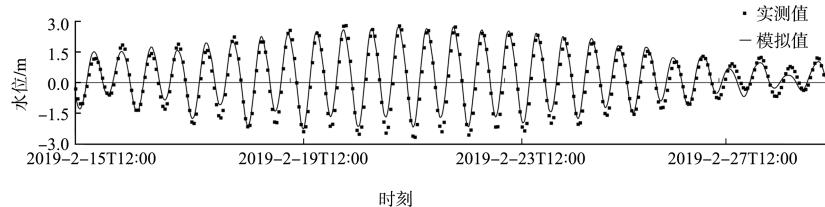


图 4 2019 年 2 月 15—30 日 1#测点水位过程验证

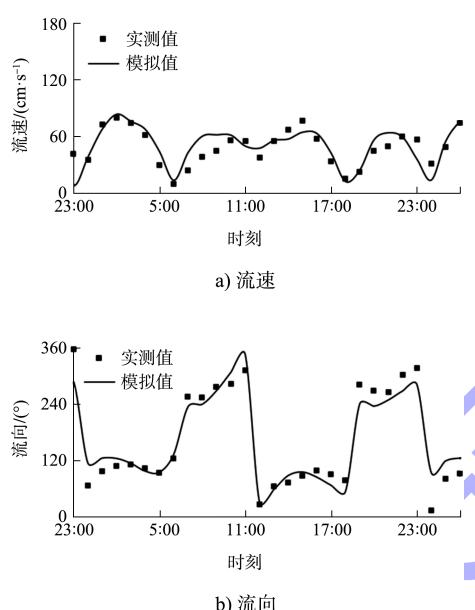


图 5 2019 年 2 月 19—21 日 1#大潮流速、流向验证

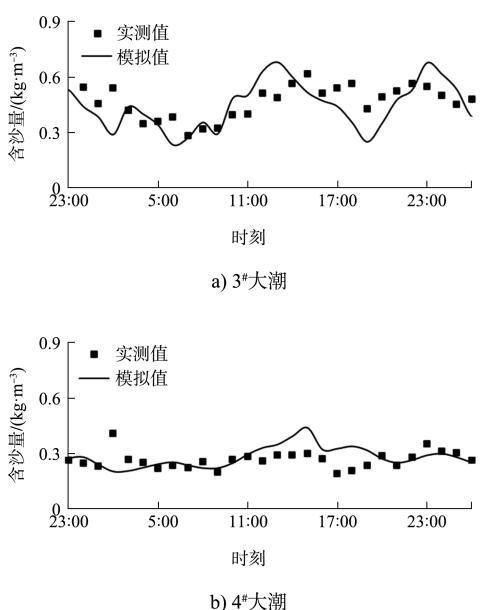
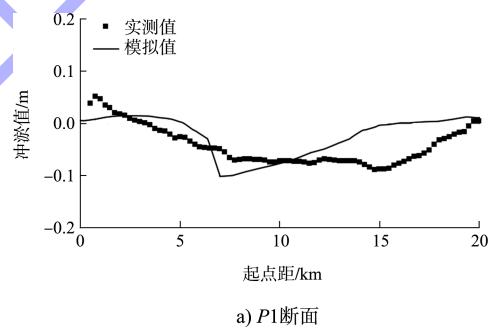
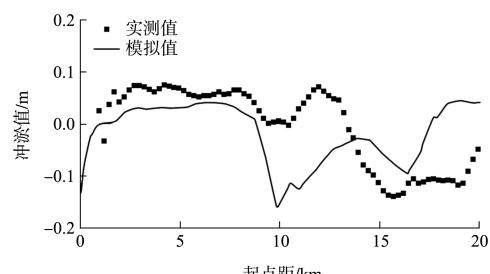


图 6 2019 年 2 月 19—21 日 3#、4# 大潮含沙量验证

2) 台风暴地形冲淤验证。采用 1909 号台风“利奇马”过境后海床 P1、P2、P3 断面的实测水深变化资料进行剖面冲淤率定, 模拟台风作用时间从 2019 年 8 月 4 日 14:00—8 月 13 日 11:00。计算所得台风过后海床各剖面的地形冲淤变化值与实测结果拟合良好, 表明小模型能较好地模拟台风暴条件下研究区域内的地形地貌演变(图 7)。



a) P1断面



b) P2断面

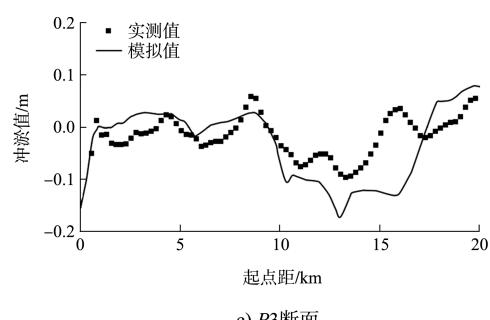


图 7 台风暴潮极端天气条件下剖面冲淤变化验证

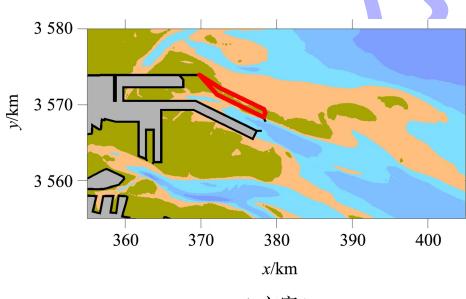
2.3 当前港区状况下的台风骤淤特征

当前港区建设状况下, 腰沙—冷家沙海域岸外沙洲和水下浅滩对水道深槽形成较好的掩护, 长期以来稳定存在; 但沙洲浅滩区泥沙以粉砂质为主, 活动性较强, 大风浪时易于成为深槽航道淤积的潜在沙源。1909 号台风“利奇马”过境前后腰沙—冷家沙海域的地形观测资料及模拟结果显示, 极端天气下风暴流与台风波浪共同作用造成沙脊滩地冲刷、水道深槽骤淤, 但冲淤变化幅度总体不大, 在 ± 0.18 m 以内, 海域平均冲淤厚度为 0.05~0.10 m。

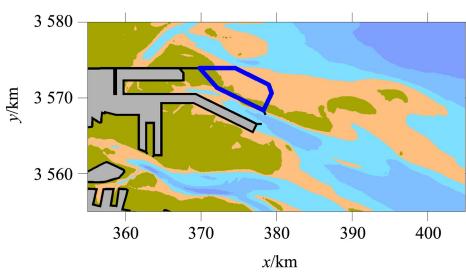
3 匡围工程的影响

3.1 方案介绍

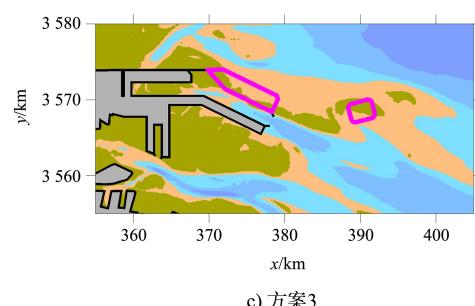
冷家沙陆域匡围工程实施后, 冷家沙东北侧具备建设 30 万吨级深水航道的条件^[11]。匡围工程共有 3 种方案(图 8): 1) 方案 1 匡围呈长条形, 匡围面积约 8 km²; 2) 方案 2 匡围类似梯形, 总匡围面积最大, 共计约 27 km²; 3) 方案 3 匡围分两部分, 其中西部主体匡围介于前 2 种方案之间, 面积约 11 km², 同时在东部 0 m 以上高滩呈方形匡围约 8 km², 总匡围面积约 19 km²。



a) 方案1



b) 方案2

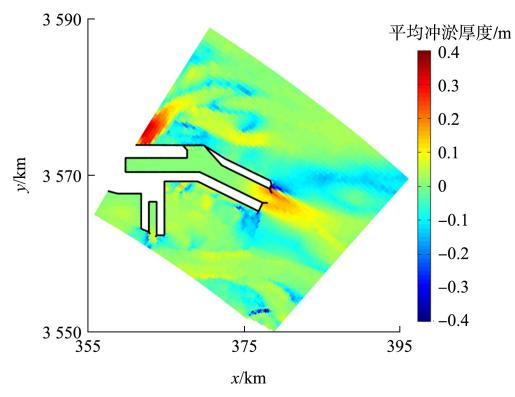


c) 方案3

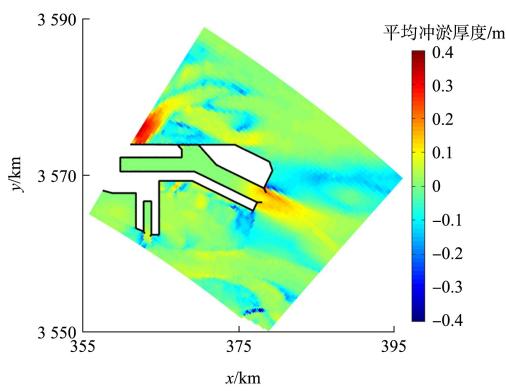
图 8 冷家沙陆域匡围方案

3.2 风暴骤淤影响预测

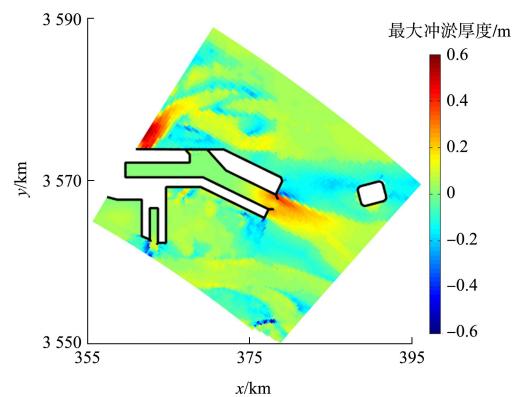
将 3 个方案分别放入模型, 比较分析 5 类典型台风作用下规划港区及邻近海域的风暴骤淤情况, 图 9、10 分别为 5 类台风过后研究区域的平均冲淤厚度分布情况和最大冲淤厚度分布情况。从图 9、10 可知: 各类台风过后, 沙脊浅滩产生冲刷, 水道深槽出现淤积, 港区仅在口门附近有淤积, 港池内基本无变化。如图 11 所示, 冲刷较大的区域集中在主港区与方案 3 离岸港区之间的冷家沙高滩(冲刷区 1)及腰沙近三港池南侧码头外部浅滩(冲刷区 2), 冲刷厚度在 0.1 m 以上, 最大达 0.4 m; 淤积明显的区域主要位于三港池口门附近和口外三沙洪—网仓洪航道(淤积区 1), 在 1509、9415 号台风影响下, 淤积厚度普遍在 0.15 m 以上, 最大接近 0.6 m。冷家沙外侧水道(淤积区 2)骤淤严重, 虽然不影响港区运行, 但须留意此处淤积是否会对周边水动力环境产生影响; 较北部规划港区而言, 南部港区及航道冲淤变化量级相对较小, 对港区的正常运营影响不大。



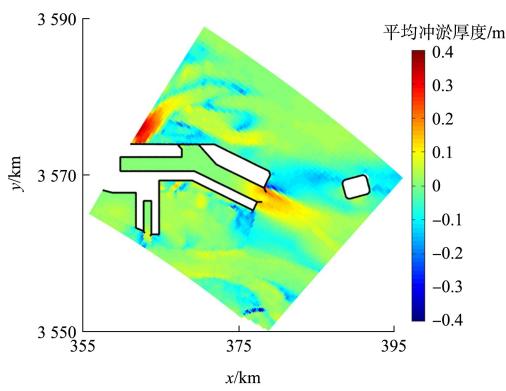
a) 方案1



b) 方案2



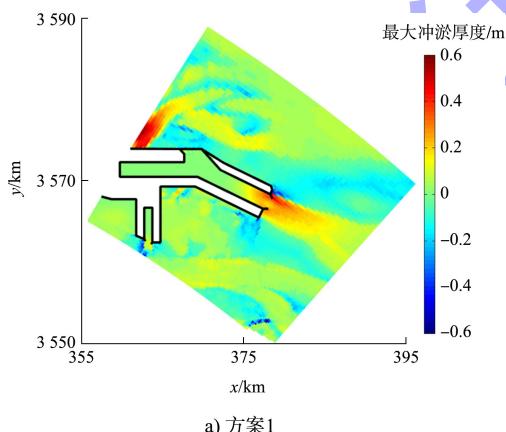
c) 方案3



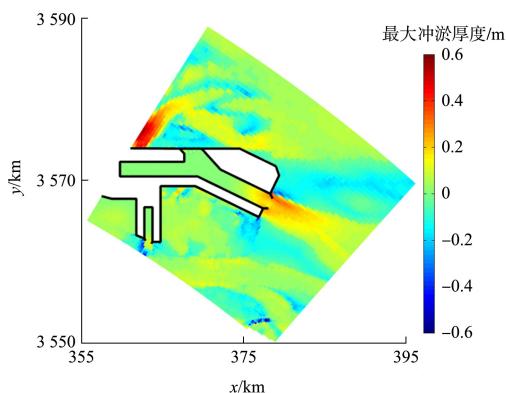
c) 方案3

注：正值表示淤积，负值表示冲刷。

图 9 各类台风影响下泥沙平均冲淤厚度分布



a) 方案1



b) 方案2

图 10 各类台风影响下泥沙最大冲淤厚度分布

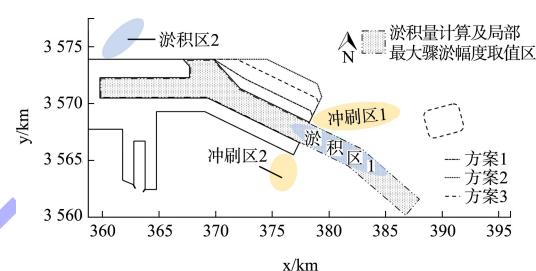
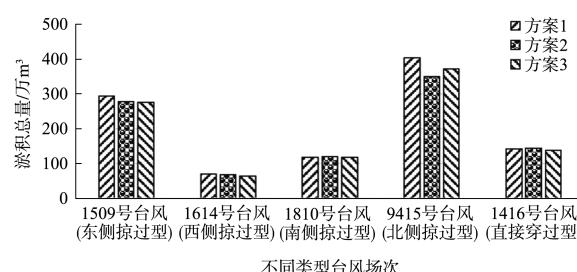


图 11 3 种匡围方案下规划港区及周边风暴

冲淤变化明显的区域

为了直观地分析各类风暴潮条件下 3 种不同匡围方案实施后对规划港区及周边水道沙洲系统空间格局和航道淤积所产生的影响程度，以二、三港池和口外三沙洪水道为选定区域（图 11）分别计算 5 场典型台风后该区域内的泥沙骤淤总量，并统计局部最大淤积厚度，结果见图 12。



a) 泥沙骤淤量

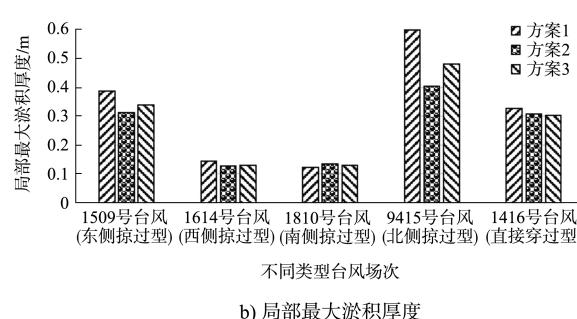


图 12 不同匡围方案下选定区域泥沙骤淤量及最大淤积厚度对比

由图 12a) 可知, 不同台风暴极端天气条件下, 3 种方案匡围引起的淤积总量相差不大。一般情况下, 方案 3 匡围引起的淤积量最小, 但这种差别几乎可以忽略; 在引起强烈骤淤的 9415 号北侧掠过型台风过后, 方案 2 匡围引起的淤积总量最小, 其较方案 1 少淤 55 万 m^3 , 较方案 3 少淤 24 万 m^3 。由图 12b) 可知, 1614 号西侧掠过型、1810 号南侧掠过型和 1416 号直接穿过型台风条件下, 3 种方案匡围引起的局部最大淤积厚度相差不大; 1509 号东侧掠过型和 9415 号北侧掠过型台风条件下, 方案 2 匡围引起的局部最大淤积厚度最小, 方案 3 次之, 方案 1 最大。

分析可知, 9415 号北侧掠过型、1509 号东侧掠过型台风过境期间, 冷家沙浅滩水域(冲刷区 1)潮位较低且流速增大, 流向自北向南, 束流作用导致掀起的泥沙大量输移并落淤到深槽航道内, 选定区域内泥沙骤淤量比其他情况大得多; 1416 号直接穿过型台风过境主要掀起腰沙浅滩(冲刷区 2)泥沙并向北输运落淤至航道, 在口门附近淤积大, 口外稍远处深槽区淤积较小, 选定区域内泥沙骤淤量较前两者略少; 1614 号西侧掠过型、1810 号南侧掠过型台风过境时则无上述特征。

为综合考虑 3 种匡围方案下各类台风暴潮对规划港区及周边海域骤淤的影响, 对图 12 中 5 种典型路径台风引起的泥沙骤淤量及最大淤积厚度取平均值, 结果见表 1。由表 1 知, 方案 2 泥沙骤淤总量均值和最大淤积幅度均值最小, 方案 3 次之, 方案 1 最大。方案 3 与方案 2 虽然总体上差别不大, 但 9415 号北侧掠过型台风来临时将引起三沙洪—网仓洪航道强烈骤淤, 前者引起的泥沙骤淤量及最大淤积厚度均远大于方案 2。基于风暴骤淤角度综合考虑, 方案 2 为最优匡围方案。

表 1 选定区域内的泥沙骤淤总量平均值和局部最大淤积幅度平均值

方案	泥沙骤淤总量平均值/万 m^3	最大淤积幅度平均值/m
1	206.1	0.32
2	192.2	0.26
3	193.9	0.28

4 结论

1) 在当前港区建设的自然状况下, 台风过后沙脊滩地冲刷、水道深槽骤淤, 但腰沙—冷家沙

海域冲淤变化幅度总体不大, 在 ± 0.18 m 以内, 平均冲淤厚度为 0.05~0.10 m。

2) 研究海域水道沙洲系统受风暴潮影响不大, 风暴冲淤量级较小, 在考虑匡围方案影响的背景下, 一次典型风暴潮过程后局部最大冲淤深度大多在 0.5 m 以下, 且多集中在人为疏浚的航道口门位置。

3) 一场风暴潮过后 3 个匡围方案下规划港区及口门外航道处淤积量均不大, 最大局部淤积厚度在 0.1~0.6 m, 且最大淤积厚度主要受台风类型控制, 各方案之间的差别小于 0.2 m; 相比而言, 北侧掠过型台风更易造成较大淤积。

4) 从风暴潮冲淤的角度看, 3 个陆域匡围方案的优劣性相差不大, 总体来说方案 2 略优, 但不同匡围情况下的港区风暴冲淤差异不大, 建议参考其他影响因素来确定最终工程方案。

参考文献:

- [1] 陈鹏, 李瑞杰, 董啸天, 等. 连云港海域围垦工程对水沙环境的影响[J]. 水运工程, 2016(3): 29-34.
- [2] 周秦. 基于“应对—防范”模式的围垦型新区生态优化研究[C]//中国城市规划学会. 城市时代, 协同规划——2013 中国城市规划年会论文集. 青岛: 中国城市规划学会, 2013: 862-879.
- [3] 纪为刚, 付桂. 南通通州湾港区水文泥沙特性分析[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(8): 204-208.
- [4] 杨宏兵. 通州湾港区围垦一期通道工程对水动力环境影响研究[C]//中国海洋(岸)工程学会. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会. 北京: 海洋出版社, 2013: 174-177.
- [5] 石娟, 李瑞杰, 陈鹏, 等. 通州湾围垦工程数值模拟及其影响[J]. 水运工程, 2017(4): 20-27.
- [6] 周婷婷, 王义刚, 黄惠明, 等. 腰沙—冷家沙匡围对周边水沙环境的影响[J]. 水道港口, 2012, 33(6): 461-468.
- [7] 谢灵运, 王勇, 白玉川. 通州湾建港工程对辐射沙洲海域潮流泥沙条件的影响[J]. 港工技术, 2016, 47(23): 1-6.
- [8] 陆培东. 江苏省如东县人工岛工程泥沙物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.
- [9] 黄海军, 李成治. 南黄海海底辐射沙洲的现代变迁研究[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 640-645.
- [10] 唐树涛, 黄惠明, 王义刚, 等. 台风路径对长江口各汊道波高的影响[J]. 水运工程, 2019(1): 48-54.
- [11] 交通运输部规划研究院. 南通港通州湾港区总体规划方案[R]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2014.