

惠州大亚湾海域风暴潮期间溢油情景模拟研究

英晓明, 严金辉, 赵明利

(国家海洋局南海规划与环境研究院, 广东 广州 510300)

摘 要: 通过 MIKE21 数值模式, 建立了惠州大亚湾附近海域高分辨率的风暴潮和溢油数学模型, 并对模型进行了风速、潮位和流速的验证; 通过引入 M_4 、 MS_4 、 M_6 和 $2MS_6$ 浅水分潮, 提高了模型的水动力验证精度。运用模型模拟分析了 1604 号台风“妮妲”和 1713 号台风“天鸽”两场典型风暴潮期间, 大亚湾海域发生溢油情景事故对敏感目标的影响, 最后给出溢油风险防控建议。

关键词: 风暴潮; 溢油; 大亚湾; 数值模拟

中图分类号: X55; P731.23 **文献标识码:** A

文章编号: 1003-0239(2023)05-0081-09

0 引言

惠州大亚湾位于粤港澳大湾区的惠州市, 西邻大鹏湾, 东接红海湾, 属于半封闭海湾(见图1)。大亚湾湾内潮波因受狭长海湾和岛屿地形反射及变形影响, 浅水分潮效应较大^[1]。根据惠州海洋站 2006—2019 年的长期验潮资料, 该站平均潮差为 0.85 m, 最大潮差为 1.25 m, 湾内为不正规半日潮。大亚湾海域年平均气压为 1 012.0 hPa, 多年平均气温为 22.9 ℃, 累年平均降水量为 1 734.0 mm, 累年平均风速为 3.4 m/s, 常风向为东南向, 强风向为东北向。实测资料表明, 2019 年 3 月纯洲岛与湾顶之间海域的垂向平均最大流速为 0.17 ~ 0.18 m/s; 大亚湾中部海域垂向平均最大流速为 0.18 ~ 0.34 m/s。该海域鹅洲站 2018 年夏季和冬季浮标观测资料记录, 夏季有效波高平均值为 0.41 m, 平均波周期为 4.1 s; 冬季有效波高平均值为 0.23 m, 平均波周期为 3.5 s。大亚湾内岛屿众多, 化工企业聚集, 港口码头密集, 是粤港澳大湾区重要的海湾。大亚湾海域海洋生物资源丰富, 属于环境敏感区, 有大亚湾水产资源自然保护区、珊瑚、重要产卵场、无居民海岛、红树林、淡澳溪河口等环境敏感保护目标。大亚湾

是许多名贵鱼类的繁殖、产卵和育肥场所^[2]。广东省海洋功能区划显示大亚湾还分布着多个旅游休闲娱乐区。

随着中海壳牌、埃克森美孚惠州乙烯等众多石化项目的落户, 大亚湾过往船舶密度增大, 溢油事故风险增加。大亚湾海域一旦发生船舶溢油事故, 将严重影响其环境敏感保护目标并破坏海洋生态环境。1970—2018 年登陆粤港澳大湾区的热带气旋共有 40 个, 年均 0.8 个^[3], 台风风暴潮发生频率较高。2017 年台风“苗柏”风暴潮期间, 大亚湾多艘船舶走锚; 2018 年台风“山竹”风暴潮期间, 大亚湾大辣甲西侧海域发生船舶走锚事故, 所幸均没有发生环境污染事故。风暴潮期间因发生船舶事故导致破坏海洋环境安全的风险是潜在的, 应用数学模型研究风暴潮期间的船舶溢油事故能够预测污染物扩散范围, 为溢油事故应急处置提供参考。已有学者对大亚湾溢油和危化品泄露事故风险进行了模拟研究^[1-5]。然而, 已有研究是针对常规天气下环境污染事故风险进行模拟, 而极端天气风暴潮期间溢油事故的模拟研究较少。本文通过数值模拟方式, 对大亚湾海域风暴潮期间的溢油事故进行情景模拟, 为溢油事故应急决策提供技术支撑。

收稿日期: 2022-08-30。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405300, 2017YFC1405303, 2017YFC1405306, 2022YFC3106200)。

作者简介: 英晓明(1979-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail: yingxm@scs.mnr.gov.cn

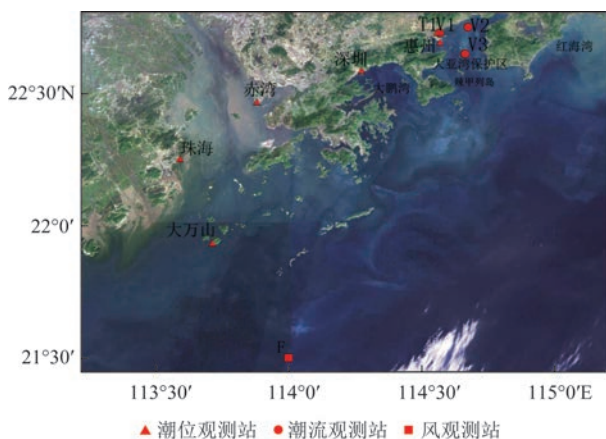


图1 研究区域和水文观测站位置示意图

Fig.1 Location of the study area and observation station

1 数学模型

1.1 水动力模型

对于南海地区台风风暴潮的数值模拟,已有学者采用数学模型 MIKE21、高级环流模型(Advanced Circulation Model, ADCIRC)、Delft 3D 三维水动力-水质模型系统和非结构网格海洋环流与生态模型(Finite-Volume Coastal Ocean Model, FVCOM)等开展了风暴增水和海浪等研究^[6-11]。本文选择 MIKE21 数值模式进行风暴潮与天文潮耦合情况下的水动力预测模拟,模型网格及模拟范围见图2。模型共有 35 835 个节点,63 770 个网格单元,最小网格边长约为 17 m。

大亚湾海域具有显著的潮位“双峰”现象和涨潮流速“双峰”现象。研究表明,当潮波由湾口传播至湾顶时,上述现象主要由 M_2 、 M_4 和 M_6 分潮共同作用造成^[12], M_6 分潮的异常增大是引起大亚湾内部潮位“双峰”现象的主要原因, $2MS_6$ 分潮对大亚湾内部潮汐的扭曲也具有一定作用^[13]。多站位实测潮位调和研究表明,浅水分潮 (M_4 、 M_6 、 MS_4 和 $2MS_6$) 振幅的增长是造成“双峰”现象在湾内增强的主要原因^[14]。模型水位边界条件采用的 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_4 、 MS_4 分潮调和常数初始值引自全球潮汐模型^[15],此外增加了 M_6 和 $2MS_6$ 两个分潮,这两个分潮的调和常数初始值取自南海潮流模型结果^[16]。海面风场及气压场采用 Holland 模型。台风气压模型如下^[9,17]:

$$P(r) = P_c + (P_n - P_c) \cdot \left(-\frac{R_{MW}}{r} \right)^B \quad (1)$$

$$B = \rho_A \cdot e \cdot V_{\max}^2 / (P_n - P_c) \quad (2)$$

$$R_{MW} = 51.6 \cdot e^{(-0.0223 \times V_{\max} + 0.0281 \times \text{lat})} \quad (3)$$

式中: P_c 为台风中心气压; P_n 为台风外围气压; R_{MW} 为最大风速半径; r 为距离台风中心的距离; V_{\max} 为台风最大风速; lat 为台风中心纬度; B 为 Holland 参数。台风对水动力的影响通过海水表面摩擦系数来体现,摩擦系数取值范围为 0.000 5~0.001 7。

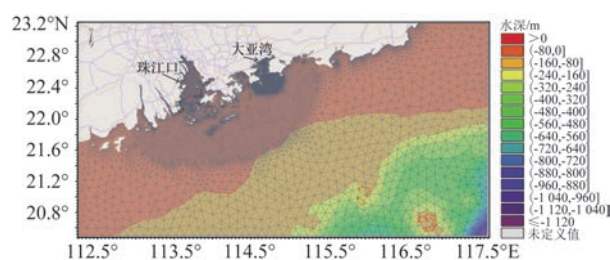


图2 模型网格和水深地形

Fig.2 Model mesh and bathymetry

1.2 溢油模型

溢油事故发生后,油膜主要在风和海流共同驱动下发生平移运动、扩展以及蒸发、乳化、溶解等风化过程。本文采用 MIKE21 HD 模块构建平面二维水动力模型,在此基础上耦合 MIKE21 OS 模块建立溢油模型。关于模型中的风漂移系数,一些学者取值 0.03~0.04^[18-19],另一些学者取值 0.02~0.03^[20-22],也有学者取值 0.025~0.044^[23]。风漂移系数和风速有关,当风速较大时风漂移系数取大值,因此本文取 0.044。

2 模型验证和流场分析

本文选择 2019 年 3 月 20—21 日项目附近海域 2 个潮位观测站和 3 个潮流观测站的观测值进行常规情况下的潮位和潮流验证,选择 2016 年 7 月 30 日 17 时(北京时,下同)—8 月 2 日 23 时赤湾、珠海、深圳和惠州 4 个验潮站的潮位值以及 2017 年 8 月 22 日 00 时—24 日 05 时赤湾、大万山、深圳和惠州 4 个验潮站的潮位值进行台风风暴潮期间潮位和风速、风向的验证。观测站位见图 1。风暴潮期间潮位观测值引自文献[7]。

2.1 模型验证和流场特征分析

2019年3月潮位和潮流模型验证结果分别见图3和图4。由图3可见,潮位模拟值和观测值基本一致,T1站和惠州站的平均潮位误差分别为10%和-3%,潮位验证结果较好,模型能够较好地模拟大亚湾海域的潮位“双峰”现象。由图4可见,潮流模拟值和观测值变化趋势大体一致,V1、V2和V3站的平均流速误差分别为2%、13%和14%,平均流向误差分别为3%、-6%和44%。潮流验证结果总体较好,模型能够反映大亚湾海域的潮流运动特征。

大亚湾海域涨急时刻和落急时刻的流场分布见图5。无论是涨急还是落急时刻,大亚湾中部海域和范和湾湾口的流速较大。涨急时刻的平均流速约为0.23 m/s;落急时刻平均流速约为0.18 m/s。涨急时刻,潮流主要由东南向进入大亚湾,湾内中央主流向北;落急时刻,湾内中央主流向南,潮流主要由东南向流出大亚湾。

2.2 风暴潮验证

本文采用1713号台风“天鸽”风暴潮的风速和风向过程对模式进行风的参数验证,验证结果见图6,

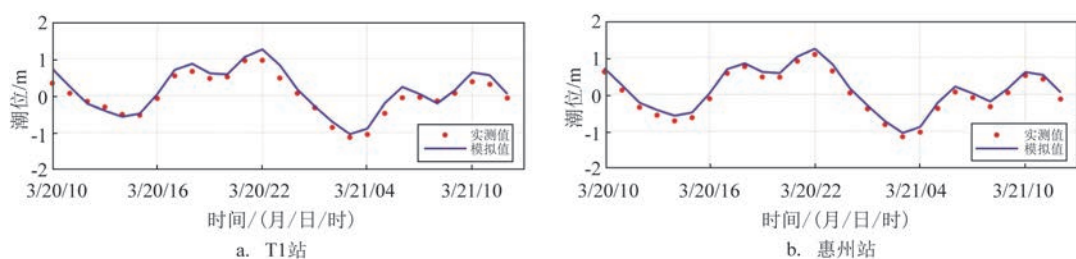


图3 2019年3月20日10时—21日12时潮位验证结果

Fig.3 Tidal level verification results from 10:00 on March 20 to 12:00 on March 21, 2019

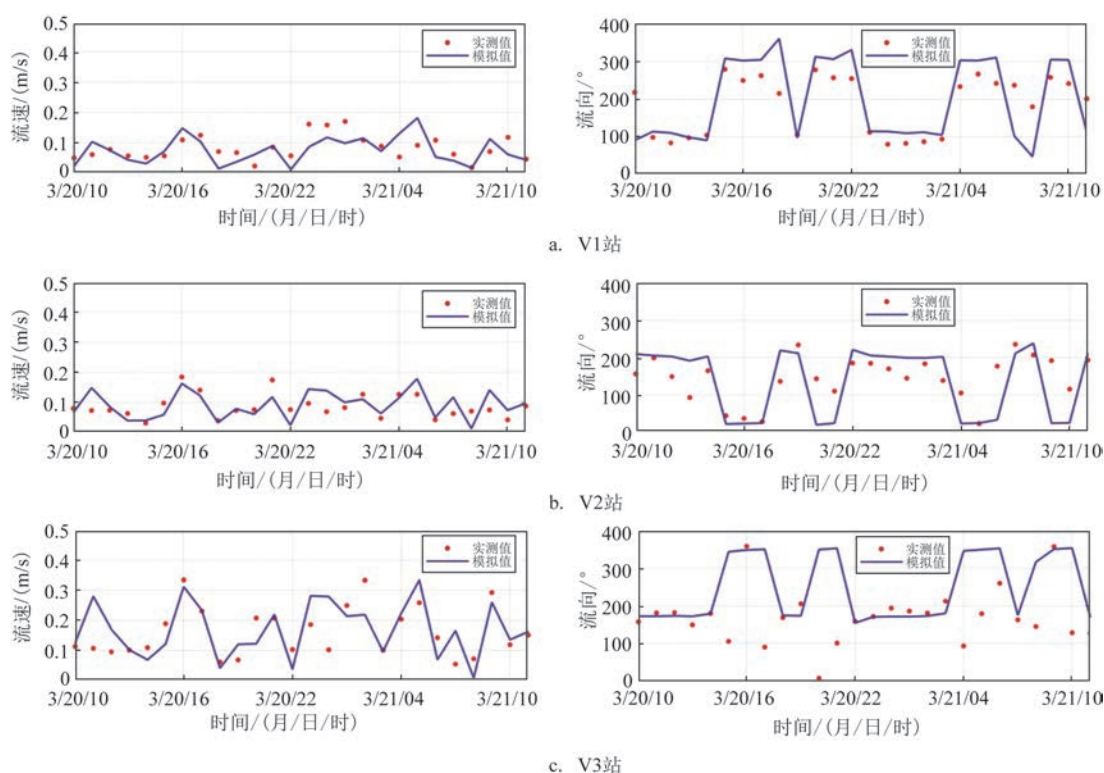


图4 2019年3月20日10时—21日12时潮流验证结果

Fig.4 Tidal current verification results from 10:00 on March 20 to 12:00 on March 21, 2019

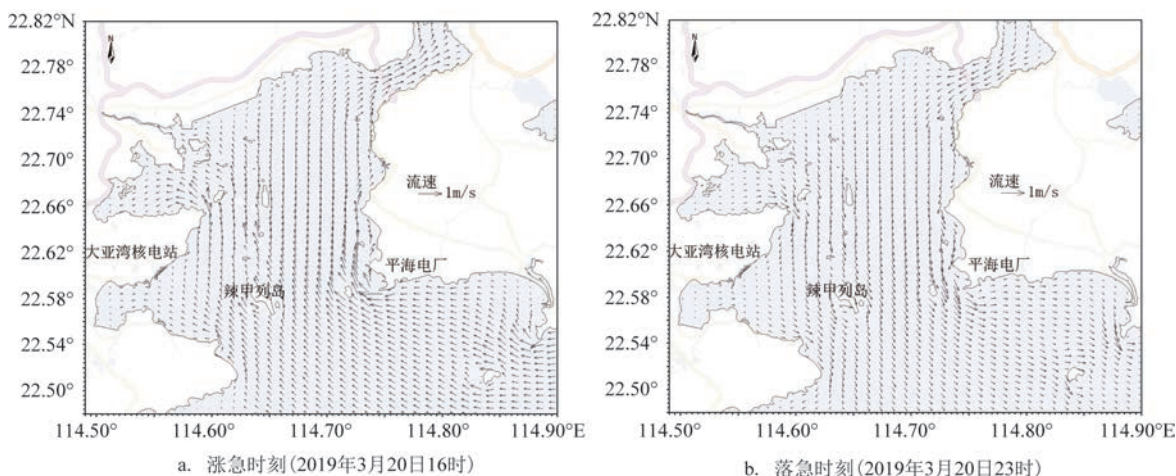


图5 大亚湾海域涨急和落急时刻流场分布

Fig.5 Distribution of tide current velocity field in Daya Bay at flood tide and ebb tide

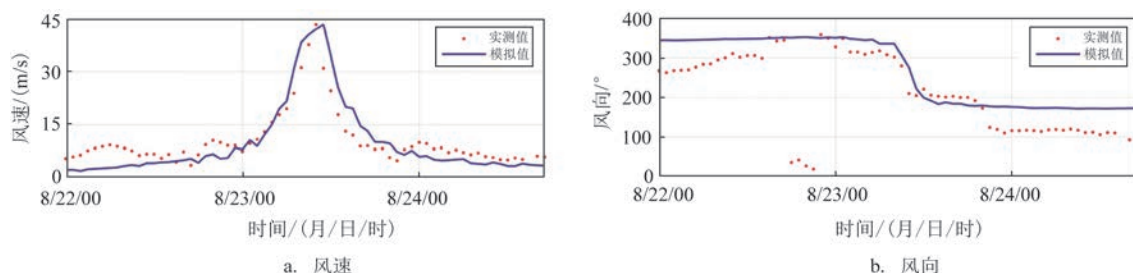


图6 1713号台风“天鸽”风暴潮期间风速过程比较结果

Fig.6 Comparison results of wind speed during storm surge of 1713 Typhoon "Hato"

由图可见,模拟的风速和风向与实测值趋势相同,整体吻合较好。1604号台风“妮妲”和1713号台风“天鸽”风暴潮期间的潮位过程验证结果见图7,由图可见,在两次台风风暴潮期间,潮位模拟值和观测值基本接近,模型能够反映台风风暴潮的潮位变化过程。

3 结果分析

由于近年来大亚湾海域没有发生典型等级以上的涉海溢油事故案例,这里仅进行情景事故模拟。假设台风风暴潮期间发生特别重大的船舶污染事故,参照《防治船舶污染海洋环境管理条例》,船舶发生溢油情景事故的溢油量为1 000 t。漏油时间为1 h,在模型中溢油由240 000个“油粒子”表示。溢油方式选择固定点源连续性溢油,油品选择柴油,密度取 $0.89 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

3.1 1604号台风“妮妲”风暴潮溢油情景模拟结果

1604号台风“妮妲”风暴潮模拟时间为2016年7月29日20时—8月3日05时。在台风行进过程中,假设在8月2日凌晨(台风中心临近大亚湾前3 h)大辣甲西侧海域发生溢油事故。风暴潮过程期间溢油扫海面积、残油量和油膜中心位置见表1,风暴潮中止后油膜扫海面积见图8。

事故发生后,溢油将立即影响到附近珊瑚区、大亚湾水产资源自然保护区中部核心区、中部缓冲区和大辣甲无居民海岛等4个敏感目标,2 h后影响到大亚湾水产资源自然保护区南部缓冲区,3 h后影响到大亚湾水产资源自然保护区南部核心区,8 h后影响到小辣甲附近的珊瑚,10 h后影响到许洲无居民海岛和重要产卵场,11 h后影响到大亚湾水产资源自然保护区北部实验区和沙鱼洲无居民海岛,12 h后影响到沙鱼洲东侧的珊瑚,13 h后影响到大亚湾

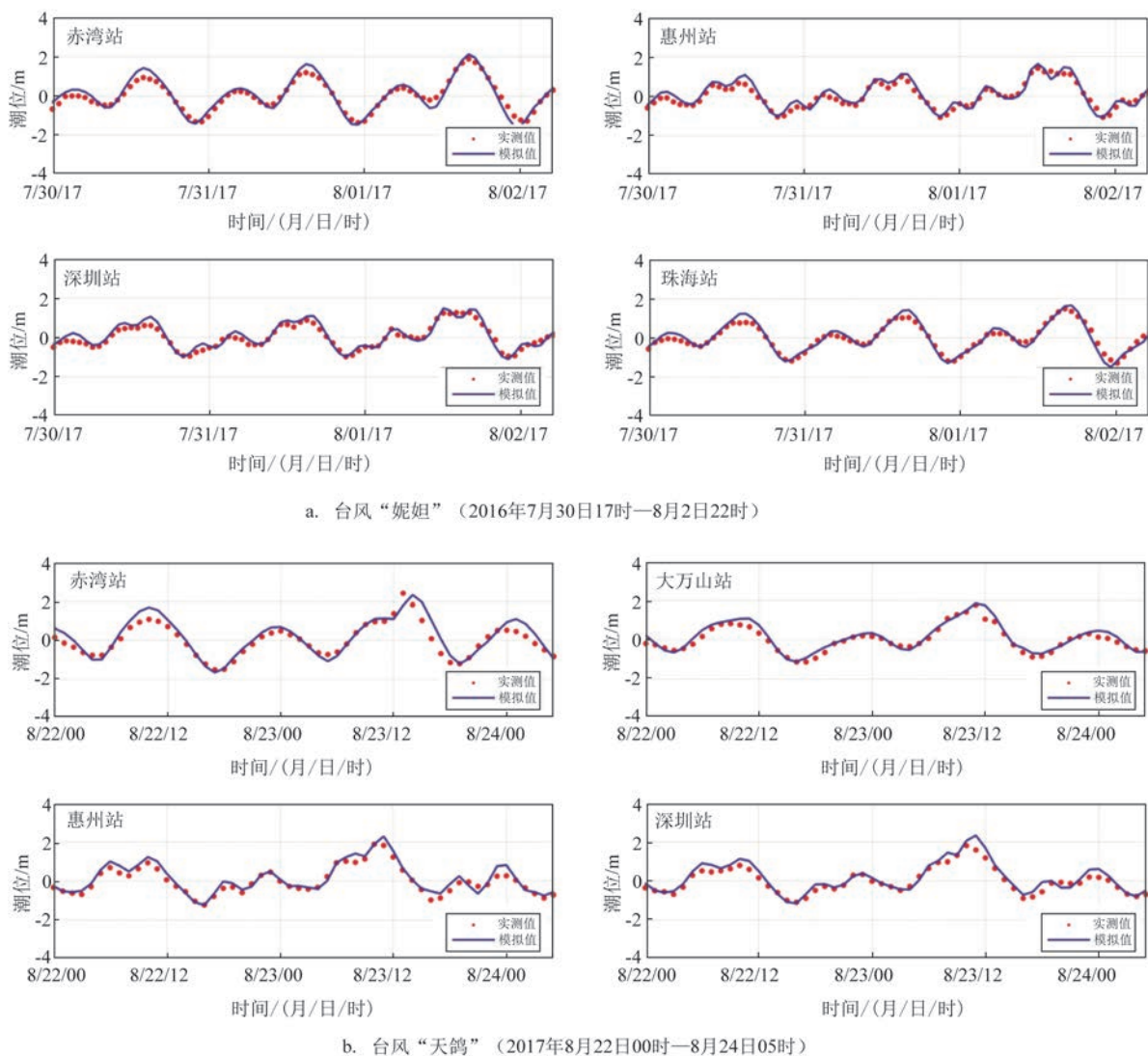


图7 1604号台风“妮姐”和1713号台风“天鸽”风暴潮期间潮位过程比较结果

Fig.7 Comparison results of tidal level during storm surge of 1604 Typhoon "Nida" and 1713 Typhoon "Hato"

湾顶岸线,14 h后影响到鹅洲和赤洲附近的珊瑚,16 h后影响到马鞭洲附近海域,18 h后影响到宝塔洲无居民海岛。台风“妮姐”风暴潮中止后(溢油后29 h)油膜扫海范围约为256.38 km²,残油量为640.10 t。

3.2 1713号台风“天鸽”风暴潮溢油情景模拟结果

1713号台风“天鸽”风暴潮模拟时间为2017年8月21日02时—24日17时。在台风行进过程中,假设在8月23日06时(台风中心临近大亚湾南侧)平海电厂码头附近海域发生溢油事故。风暴潮过程期间溢油扫海面积、残油量和油膜中心位置见表

2,风暴潮中止后油膜扫海面积见图9。

事故发生后,溢油将在1 h后影响到大亚湾水产资源自然保护区北部实验区,2 h后影响到大亚湾水产资源自然保护区中部缓冲区和桑洲无居民海岛,3 h后影响到大亚湾水产资源自然保护区中部核心区和大辣甲无居民海岛,4 h后影响到大辣甲附近的珊瑚,5 h后影响到大亚湾水产资源自然保护区中部缓冲区,7 h后影响到大亚湾核电站北侧岸线,8 h后影响到小辣甲附近的珊瑚,9 h后影响到小辣甲无居民海岛,13 h后影响到重要产卵场、赤洲附近的无居民海岛和珊瑚,14 h后再次影响到大亚湾水产资源自然保护区北部实验区,15 h后影响到沙鱼洲和

表 1 1604 号台风“妮妲”风暴潮过程期间溢油扫海面积、残油量和油膜中心位置

Tab.1 Oil spill sweeping area, residual oil volume and oil film center position during the storm surge process of 1604 Typhoon "Nida"

溢油后 时间/h	扫海面积/ km ²	残油量/t	油膜中心位置坐标	
			x/°	y/°
1	4.31	867.99	114.628 445	22.567 558
2	9.83	807.10	114.626 636	22.549 877
3	16.88	782.57	114.624 420	22.530 410
4	23.44	766.37	114.619 439	22.517 886
6	36.22	743.18	114.615 313	22.527 068
8	51.83	726.00	114.610 232	22.554 420
12	81.46	700.87	114.609 855	22.594 322
18	168.94	674.45	114.623 425	22.637 815
24	221.02	654.28	114.633 734	22.651 289
29	256.38	640.10	114.641 733	22.663 713

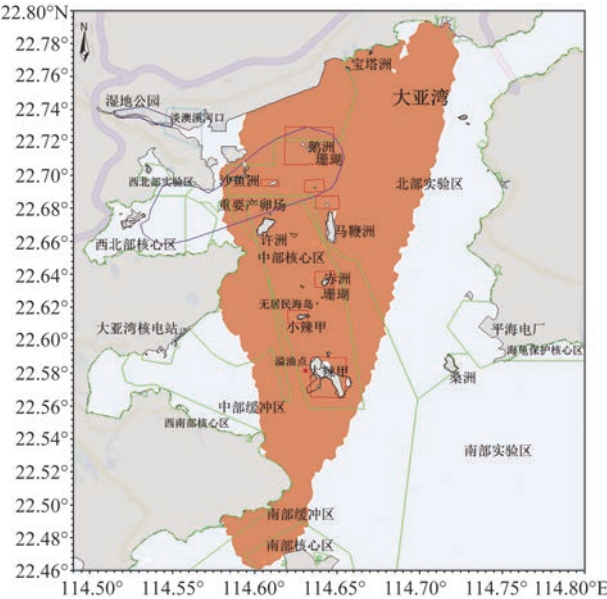


图 8 1604 号台风“妮妲”风暴潮过程期间溢油 29 h 后油膜扫海范围

Fig.8 Scope of oil film sweeping after 29 h oil spill during the storm surge of 1604 Typhoon "Nida"

许洲无居民海岛,17 h 后影响到马鞭洲北侧的珊瑚,18 h 后影响到淡澳溪河口和鹅洲附近的珊瑚,20 h 后影响到大亚湾湾顶岸线。风暴潮中止后(溢油后

表 2 1713 号台风“天鸽”风暴潮过程期间溢油扫海面积、残油量和油膜中心位置

Tab.2 Oil spill sweeping area, residual oil volume and oil film center position during the storm surge process of 1713 Typhoon "Hato"

溢油后 时间/h	扫海面积 /km ²	残油量/t	油膜中心位置坐标	
			x/°	y/°
1	6.24	867.98	114.717 498	22.596 875
2	13.48	807.07	114.698 512	22.591 762
3	19.25	782.40	114.686 337	22.590 762
4	27.33	765.54	114.668 824	22.592 094
6	39.89	741.77	114.610 571	22.597 394
8	45.53	724.67	114.608 728	22.599 321
12	59.18	700.05	114.606 918	22.607 132
18	87.08	674.34	114.602 962	22.636 200
24	107.66	654.85	114.602 443	22.651 833
30	112.11	638.72	114.602 066	22.655 953
35	115.62	626.94	114.602 697	22.657 338

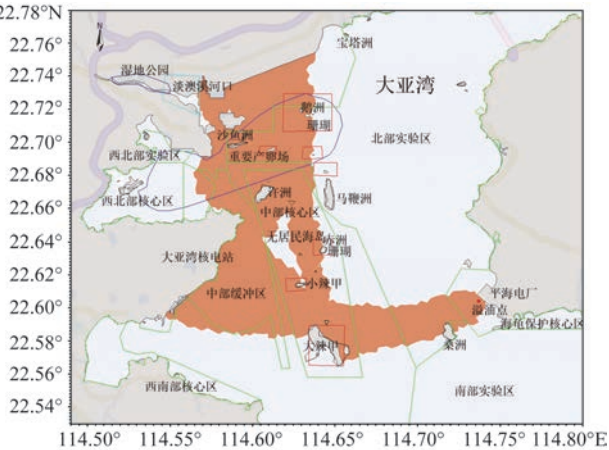


图 9 1713 号台风“天鸽”风暴潮过程期间溢油 35 h 后油膜扫海范围

Fig.9 Scope of oil film sweeping after 35 h oil spill during the storm surge of 1713 Typhoon "Hato"

35 h) 油膜扫海范围约为 115.62 km², 残油量为 626.94 t。

3.3 流速变化分析

本节通过分析台风风暴潮期间和无台风时的流速变化探讨台风风暴潮的影响。由图 10 可见,

1604号台风“妮姐”风暴潮导致大亚湾内大部分区域流速增加,尤其在湾口区域、马鞭洲西侧区域和大亚湾湾顶区域,湾口区域流速最大增加值超过0.9 m/s,马鞭洲西侧区域流速最大增加值超过0.8 m/s,大亚湾湾顶区域流速最大增加值超过0.5 m/s。1713号台风“天鸽”风暴潮导致大亚湾内大部分区域流速增加,尤其在湾口区域、大亚湾核电站附近区域和大亚湾湾顶区域,湾口区域流速最大增加值超过1.0 m/s,大亚湾核电站附近区域超过0.8 m/s,大亚湾湾顶区域超过0.5 m/s。台风风暴潮期间流速的增大加速了油膜的漂移和扩散。

4 结论和建议

大亚湾海域岛屿众多,潮汐具有独特的“双峰”

现象。本文通过MIKE21数值模式,建立了高分辨率的惠州大亚湾附近海域的风暴潮和溢油数学模型,通过引入 M_4 、 MS_4 、 M_6 和 $2MS_6$ 浅水分潮,精确模拟了大亚湾潮位的“双峰”特征。通过Holland模型对1713号台风“天鸽”风暴潮的风场进行了模拟,验证结果较好,运用模型模拟分析了在1604号台风“妮姐”和1713号台风“天鸽”两场典型台风风暴潮期间,大亚湾海域发生1 000 t特大溢油情景事故对敏感目标的影响。

在1604号台风“妮姐”风暴潮期间,假设大辣甲西侧海域发生溢油事故,油膜最大扩散范围约为256.38 km²,溢油发生后,3 h内将影响附近珊瑚区、大亚湾水产资源自然保护区中部核心区、大辣甲无居民海岛、中部缓冲区、大亚湾水产资源自然保护区南部缓冲区和亚湾水产资源自然保护区南部

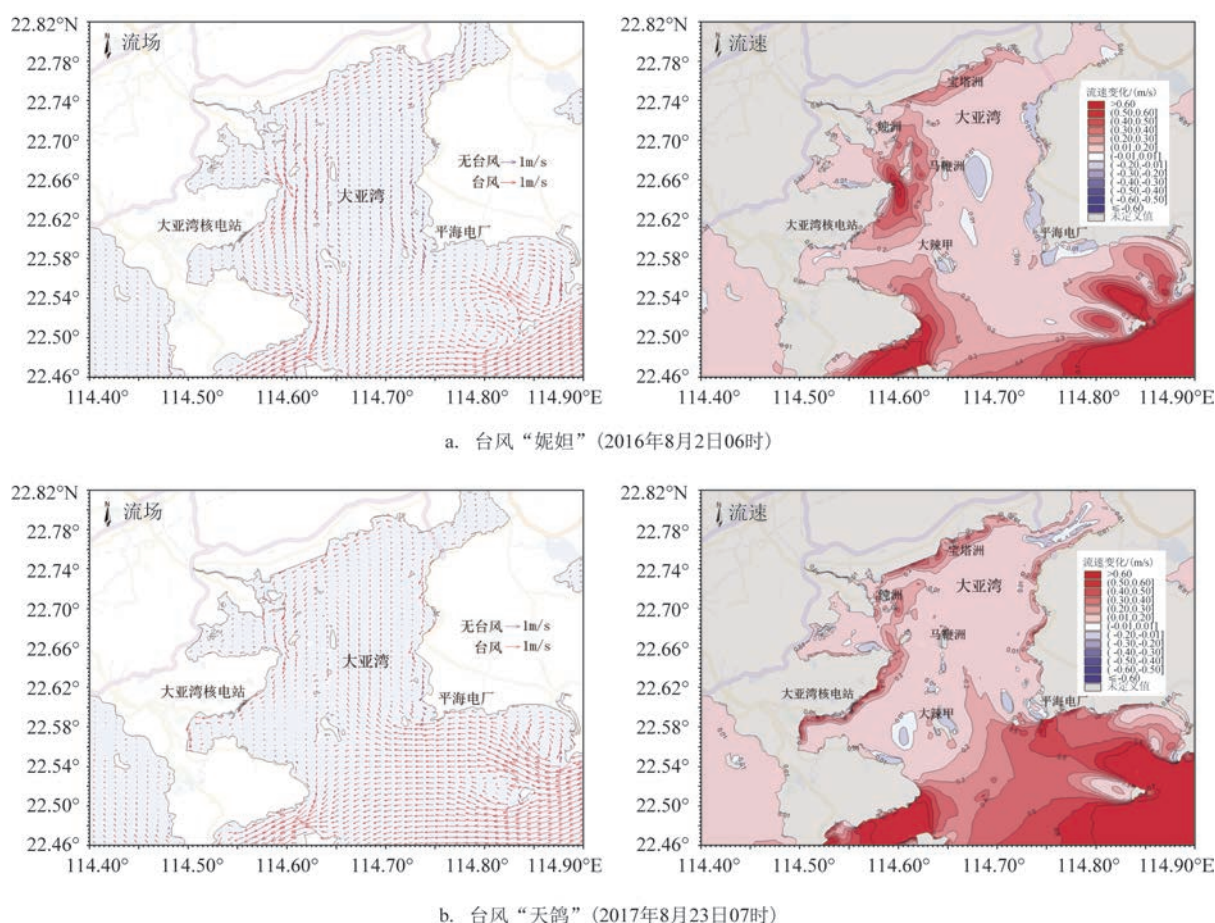


图10 1604号台风“妮姐”和1713号台风“天鸽”风暴潮过程期间和无台风的流场和流速变化

Fig.10 Comparison of current fields and current velocity change among the storm surge process of 1604 Typhoon "Nida", 1713 Typhoon "Hato" and the scenario without typhoon

核心区等敏感目标,台风风暴潮中止后,残油为溢油量的64.0%;在1713号台风“天鸽”风暴潮期间,假设平海电厂码头附近海域发生溢油事故,油膜最大扩散范围约为115.62 km²,溢油发生后,3 h内将影响附近大亚湾水产资源自然保护区北部实验区、大亚湾水产资源自然保护区中部缓冲区、桑洲无居民海岛、大亚湾水产资源自然保护区中部核心区和大辣甲无居民海岛等敏感目标,台风风暴潮中止后,残油为溢油量的62.7%。本文建立的溢油模型可以应用于常规天气和台风风暴潮情况下的溢油扩散模拟,能够为溢油事故应急决策提供技术支撑。

本文所采用的模型没有考虑大洋环流对近岸区域的影响,同时由于大亚湾溢油事故较少,缺少验证资料,因此没有深入分析溶解、扩散等参数对溢油的影响,这是本文存在的不足,后续将根据资料情况进一步开展研究。

对于溢油事故风险防控,应做好应急预案,充分准备溢油防控应急物资,平时做好应急演练;加强船舶管控,在台风风暴潮来临前做好防台准备;在台风风暴潮期间若发生溢油事故,除借助卫星遥感监测技术外,还可以通过数值模拟及时预测溢油扩散范围和到达敏感目标的时间;在台风风暴潮过后,及时安排船舶、人员利用除油物资开展油膜打捞等应急处置。

参考文献:

- [1] 袁春光,王义刚,黄惠明,等. 大亚湾芒洲岛海域移动溢油数值模拟研究[J]. 海洋通报, 2014, 33(6): 659-667.
YUAN C G, WANG Y G, HUANG H M, et al. Oil spill numerical simulation on the wharf engineering of Mangzhou Island in the Daya Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(6): 659-667.
- [2] 黄小平. 丙烯腈事故泄漏对大亚湾水质影响的模拟研究[J]. 海洋通报, 1998, 17(3): 24-31.
HUANG X P. Simulation of the impact of accidental spillage of Acrylonitrile on the water quality in the Daya Bay[J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(3): 24-31.
- [3] 罗志发,黄本胜,邱静,等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79.
LUO Z F, HUANG B S, QIU J, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 72-79.
- [4] 李大鸣,陈海舟,付庆军. 海上溢油数学模型的研究与应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(12): 1291-1297.
LI D M, CHEN H Z, FU Q J. Research and application of mathematical modeling to oil spills on the sea[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(12): 1291-1297.
- [5] 张翠萍,马正波,王平,等. 大亚湾石化区危化品陆源泄漏的海洋环境风险分析及防范对策研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018(1): 66-74.
ZHANG C P, MA Z B, WANG P, et al. Marine environmental risk analysis and countermeasures research of hazardous chemicals leakage of petrochemical enterprises in Daya Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(1): 66-74.
- [6] 张博文,朱良生. “海鸥”台风作用下近海最大增水、波高分布特征分析[J]. 广东造船, 2019, 28(2): 46-50.
ZHANG B W, ZHU L S. Analysis on characteristics of water set-up extremes and wave height distribution in offshore waters under typhoon “seagull” [J]. Guangdong Shipbuilding, 2019, 28(2): 46-50.
- [7] 高佳,潘嵩,王慧,等. 基于ADCIRC+SWAN耦合模型的风暴潮数值模拟研究——以深圳西部海域为例[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 662-674.
GAO J, PAN S, WANG H, et al. Storm surge simulation based on ADCIRC + SWAN coupling model: a case study of the western Shenzhen water[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 662-674.
- [8] 刘秋兴,傅赐福,李明杰,等. “天鸽”台风风暴潮预报及数值研究[J]. 海洋预报, 2018, 35(1): 29-36.
LIU Q X, FU C F, LI M J, et al. Storm surge forecast and numerical study of “Hato” typhoon[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(1): 29-36.
- [9] 刘睿哲,朱庆勇,倪培桐. 珠江河口地区风暴潮增水过程数值模拟[J]. 广东水利水电, 2018(4): 6-10.
LIU R Z, ZHU Q Y, NI P T. Numerical simulation of storm surge process in pearl river estuary[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2018(4): 6-10.
- [10] 朱磊,刘会欣. 基于Delft 3D模型的风暴潮增减水模拟研究——以“9711”号台风为例[J]. 海洋湖沼通报, 2018, 5:1-10.
ZHU L, LIU H X, A Numerical simulation of storm surge with Delft 3D Model: A case study of Typhoon Winni[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018, 5:1-10.
- [11] 吕蒙,丁扬,侍茂崇. 南中国海北部对台风的响应[J]. 海洋湖沼通报, 2019(5): 9-19.
LYU M, DING Y, SHI M C. The response process of typhoon China south sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(5): 9-19.
- [12] 严聿晗,武文,宋德海,等. 大亚湾的潮汐动力学研究—II 潮位和潮流双峰现象的产生机制[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(3): 46-54.
YAN Y H, WU W, SONG D H, et al. Study on the tidal dynamics in Daya Bay, China-Part II. The generation of double high waters and double-peak flood-current flows[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(3): 46-54.

- [13] 刁希梁, 丁扬, 鲍献文. 大亚湾海域潮位“双峰”现象生成机制研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(9): 1-10.
DIAO X L, DING Y, BAO X W. The generation mechanism of the double peak tidal elevation in Daya Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(9): 1-10.
- [14] 彭帅星, 朱佳, 陈照章, 等. 大亚湾双峰水位的形成条件及准调和分量应用的分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(5): 937-944.
PENG S X, ZHU J, CHEN Z Z, et al. Analyses of the formation conditions of bimodal phenomenon and the application of quasi-harmonic components in the Daya Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(5): 937-944.
- [15] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [16] DING Y, YAO Z, ZHOU L, et al. Numerical modeling of the seasonal circulation in the coastal ocean of the Northern South China Sea[J]. Frontier of Earth Science, 2020, 14(1):90-109.
- [17] 杨万康, 杨青莹, 尹宝树, 等. 1409号“威马逊”台风对铁山港海域的风暴潮增水研究[J]. 海洋预报, 2016, 33(1): 80-85.
YANG W K, YANG Q Y, YIN B S, et al. Study on the storm surge characteristics of N0.1409 typhoon “Rammasun” along Tieshan Bay[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(1): 80-85.
- [18] 郭健, 杨红, 张午, 等. 江苏滨海北区风电场溢油风险数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2018(3): 68-78.
GUO J, YANG H, ZHANG W, et al. An numerical simulation of the oil spill risk for the wind farm in northern coastal area of Jiangsu province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(3): 68-78.
- [19] 陈秋良, 蔡学石, 姜倩, 等. 曹妃甸甸头海域溢油行为数值模拟研究[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(1): 85-93.
CHEN Q L, CAI X S, JIANG Q, et al. Study on numerical modeling for oil-spill at the front hayfield maritime space of Caofeidian[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(1): 85-93.
- [20] 胡田, 潘家琳. 风漂移系数对海上溢油扩展漂移影响的数值模拟[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2022, 45(3): 68-74.
HU T, PAN J L. Numerical simulation on the influence of wind drift coefficient on spreading and drift of marine oil spill[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2022, 45(3): 68-74.
- [21] 吴桂丹, 朱冬琳, 高劲松. 钦州湾溢油数值模块及其应用[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 24-31.
WU G D, ZHU D L, GAO J S. The application of numerical module of oil spill in Qinzhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(2): 24-31.
- [22] 顾靖华, 朱建荣, 金智. 长江口宝钢码头溢油事故油膜漂移扩散数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2022, 41(6): 159-170.
GU J H, ZHU J R, JIN Z. Numerical simulation of oil film drift and diffusion after oil spill accident at the Baosteel wharf in the Changjiang estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2022, 41(6): 159-170.
- [23] 孙琰, 刘大召, 许源兴, 等. 湛江湾海域溢油漂移扩散数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(2): 73-83.
SUN Y, LIU D Z, XU Y X, et al. Numerical simulation of oil spilling drift and diffusion in Zhanjiang Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(2): 73-83.

Simulation of oil spill during storm surge in Daya Bay, Huizhou

YING Xiaoming, YAN Jinhui, ZHAO Mingli

(South China Sea Institute of Marine Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China)

Abstract: In this paper, the MIKE21 numerical model is used to establish a high-resolution mathematical model of storm surge and oil spill in the sea area near Daya Bay in Huizhou, and the model is verified against wind speed, tidal level and flow velocity. The hydrodynamic verification accuracy of the model is improved by introducing shallow water tidal components M_4 , MS_4 , M_6 and $2MS_6$. On this basis, the model is used to simulate and analyze the impact of oil spill scenario accidents on sensitive targets in Daya Bay during the two typical typhoon storm surges of 1604 Typhoon "Nida" and 1713 Typhoon "Hato". Finally, the countermeasures and suggestions for the prevention and control of oil spill risk are given.

Key words: storm surge; oil spill; Daya Bay; numerical simulation