 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11531

Numerical Study on Oil Spill at Oil Wharf of Xiamen Xiang'an Airport

Caitian Ruan

China National Aviation Fuel Xiamen Branch, Xiamen, Fujian, 361006, China

Abstract

To assess the impact of an oil spill from the proposed fuel unloading terminal at Xiamen's new airport on the waters of Weitou Bay, a high-resolution "hydrodynamic–oil spill transport" model was established using the three-dimensional unstructured-grid finite-volume ocean model FVCOM, which comprehensively accounts for physical processes such as convection, diffusion, evaporation, and emulsification. The model employs an unstructured triangular grid in the plane, enabling accurate representation of islands, shipping channels, complex coastlines, and the intertidal zone. Using two typical spill scenarios—the rising tide surge and the falling tide surge—the study simulated the spatiotemporal evolution of the oil slick. The results indicate that under the rising tide surge scenario, the oil slick initially moved westward with the rising tide current; after 18 hours, it was primarily distributed in the deep channel between the western side of Dading Island and Kinmen Island and Little Kinmen Island, and expanded southward along the channel; in the rapid ebb scenario, the oil slick initially moved eastward and, after 24 hours, was primarily distributed along the western, northern, and eastern nearshore areas of Dazheng Island; the risk of nearshore adhesion was higher in the rapid ebb scenario. The research findings can provide a basis for emergency response to oil spill incidents in the Weitou Bay area.

Keywords

oil spill; weitou bay; FVCOM; emergency response

厦门新机场卸油码头溢油影响数值研究

阮彩添

中国航空油料有限责任公司厦门分公司，中国 · 福建 厦门 361006

摘　要

为评估厦门新机场拟建卸油码头溢油对围头湾海域的影响，基于三维非结构网格有限体积海洋模型FVCOM建立了高分辨“水动力——溢油输移”模型，综合考虑了对流、扩散、蒸发、乳化等物理过程。该模型在平面上采用非结构化三角形网格，能较好地描述岛屿、航道、复杂海岸线和潮间带。以大潮涨急和落急两个典型泄漏时刻为情景，模拟油膜泄漏时空演化规律。结果表明，涨急情景下油膜初期随涨潮流向西输移，18 h后主要分布于大嶝岛西侧至金门岛、小金门岛之间的深槽水道，并沿水道向南扩展；落急情景下油膜初期向东输移，24 h后主要分布于大嶝岛西部、北部和东部近岸，落急情景下近岸附着风险更高。研究结果可为围头湾海域溢油事故的应急处置提供依据。

关键词

溢油；围头湾；FVCOM；应急处置

1 引言

卸油码头及其邻近海域是海上溢油事故的高发区域之一，油品装卸、管线输送、船舶靠离泊等均可能诱发泄漏事故[1]。溢油进入海面后，油膜将在潮流、风等动力因素的作用下发生迁移、扩散、蒸发、乳化和附岸，对事故周边海域造成严重的环境污染，其影响范围与事故发生时刻、潮汐阶段、风场条件和岸线形态密切相关。围头湾位于厦门湾东部，该海域航道纵横交错、岛屿众多、水深条件复杂，精确预测溢油的影响范围较为困难。因此，建立适用于围头湾复杂岸线和潮流动力条件的高分辨率溢油预测模型，对厦门新机场航油码头的生产安全、围头湾及其邻近海域的水环境保护、突发溢油事故的应急处置具有重要意义。

自 20 世纪 60 年代以来，海上溢油数学模型得到了迅速发展。溢油数值模拟方法大体可分为油膜扩展理论、对流扩散理论和油粒子法三种[2-4]。近年来，油粒子法因其能有效追踪溢油质点的拉格朗日轨迹，在海上溢油数值模拟中得到了较广泛的应用[5]。王金华[6]建立了三维水动力和溢油模型，模拟了渤海海峡发生溢油事故时溢油浓度的分布。匡翠萍等[7]应用 Delft3D 模型中的 PART 模块对 2011 年蓬莱 19-3 溢油事故进行了数值模拟，指出在半封闭海湾中风对

【作者简介】阮彩添（1988–），男，中国福建龙岩人，硕士，工程师，从事航空油料安全及工程管理研究。

溢油输移的作用显著，提出了风致拖曳系数的取值范围。吴桂丹等 [8] 应用 MIKE 溢油模块研究了钦州湾溢油漂移轨迹，指出了溢油事故发生在不同的时刻，油膜迁移规律存在较大差异。钱琴等 [9] 基于 EFDC 模拟潮流场并应用 GNOME 溢油模型，研究了福建湄洲湾虚拟溢油事故发生时，不同动力条件下的溢油扩散规律。李大鸣等 [10] 基于三角形网格建立了二维水动力模型和溢油模型，研究了烟台港栾家口港区油膜的运动轨迹。柴田和熊德琪 [11] 建立了溢油粒子迁移模型，对台湾海峡北部船舶溢油事故的危害进行了定量评价。

上述研究将油粒子法应用于特定海域的溢油预测，为相关区域溢油预测提供了重要参考。但针对厦门新机场卸油码头所在的围头湾海域，海岸与海洋环境复杂，对该类复杂动力环境下溢油漂移路径及最终影响范围的精细化模拟研究尚不充分。本文基于三维 FVCOM 水动力模型，建立围头湾海域“水动力 - 溢油输移”耦合模型，模拟厦门新机场航油码头在不同时刻发生溢油事故后溢油的影响范围，为溢油事故发生后的应急处置提供依据。

2 工程概况

厦门湾位于台湾海峡西南部、地处围头角与镇海角之间，围头湾位于厦门湾东部区域。拟建厦门新机场供油工程专用卸油码头位于围头湾湾顶，码头工程北接大嶝岛，南与金门岛隔海相望。该卸油码头西部水深相对较浅，东侧规划万吨级航道，航道自码头前沿自 ESE 向延伸至外海。图 1 为该工程的地理位置及厦门湾海域的水深分布情况，图中平面坐标为厦门 92 坐标系，水深基准为当地多年平均海平面。厦门湾属于强潮型海湾，鼓浪屿海洋站多年潮位资料显示，该海域平均潮差约 3.99 m，最大潮差可达 6.92 m。

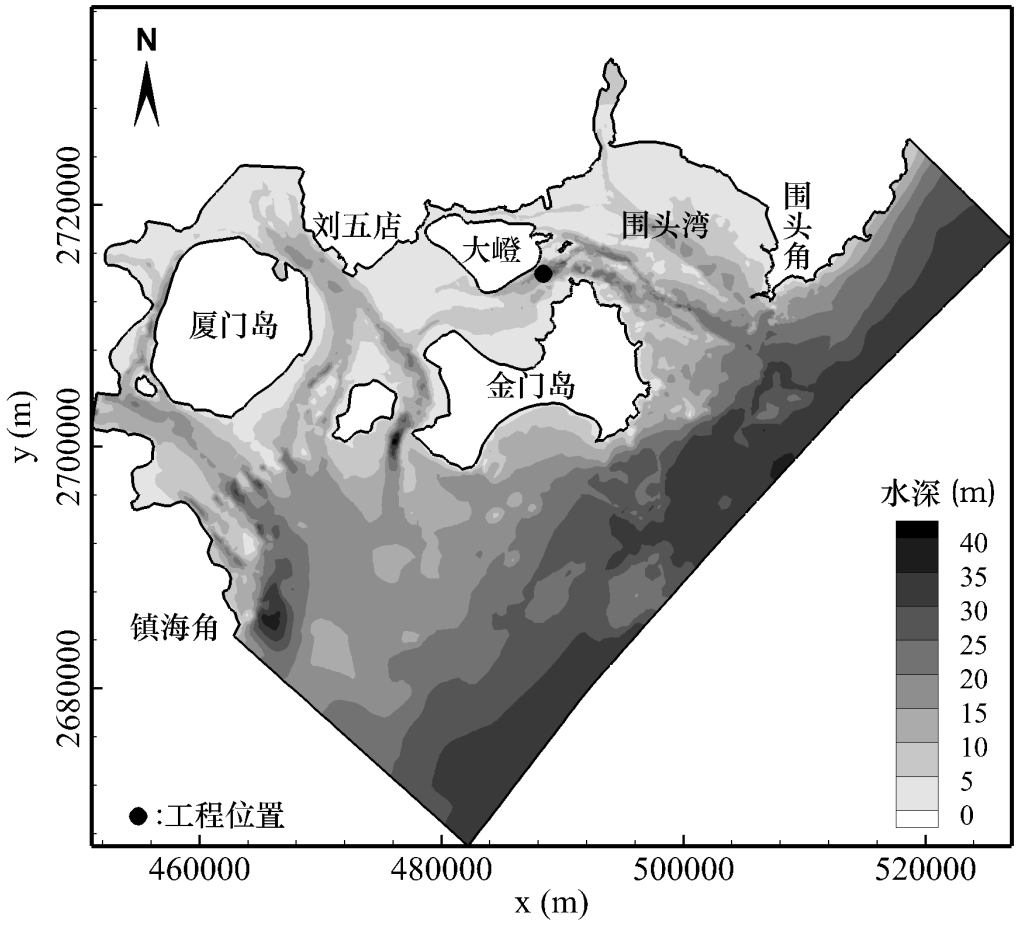


图 1 厦门新机场卸油码头工程位置及厦门湾海域水深地形

3 溢油迁移模型

本文基于 Chen 等 [12] 开发的三维有限体积海洋模型 FVCOM 计算潮流场。FVCOM 模型在水平方向采用非结构化三角形网格，在垂向采用 σ 坐标，可根据岸线复杂程度、航道尺度和工程位置进行局部网格加密，并通过干湿网格技术处理潮间带的淹没和出露过程。FVCOM 模型被广泛地应用于研究海洋及海岸水动力 [13-17]，取得了较好的效果。采用基于拉格朗日质点追踪的油粒子法建立了综合考虑对流、扩散、蒸发、乳化等物理过程的海上溢油输移数学模型。

3.1 控制方程

FVCOM 水动力模型求解动量方程和连续性方程，拉格朗日质点追踪模型则依据 FVCOM 计算的海表流速和时间步长计算质点的位移，控制方程如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}-fv=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial u}{\partial z}\right)+F_u \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}+fu=-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial v}{\partial z}\right)+F_v \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{4}$$

式中，ρ 表示密度；为 P 压力；f 为科氏力系数；K_m 为垂向紊动粘滞系数，由 Mellor-Yamada 紊流模型计算；F_U 和 F_V 表示动量方程中的水平扩散项。

$$\vec{U}=\vec{U}_{hydro}+\alpha\vec{U}_{wind} \tag{5}$$

式中，$\vec{U}$ 表示溢油质点运动速度，$\vec{U}_{hydro}$ 为水动力模型提供的海表流速，包括潮流、紊动扩散的影响。$\vec{U}_{wind}$ 为风速，α 为风导经验系数，本文取 0.03。油粒子在每个计算时间步长 Δt 之后的位移为：

$$S=\vec{U}\cdot\Delta t \tag{6}$$

在溢油的最初数十小时里，油膜扩展过程占支配地位，并随时间而迅速减弱，伴随着风化过程的作用，油膜逐渐达到最大半径，扩展过程最终停止，油膜的面积 A_f 与油膜的体积 Q 相关：

$$A_f=10^5\cdot Q^{3/4} \tag{7}$$

当油膜厚度减少到 $10^{-5}\cdot Q^{1/4}$ 时，扩展停止。此外，蒸发、乳化、附岸等物理过程依据 Wang 等 [18] 提出的方法计算。

3.2 模型设置

模型计算阈从西南向的镇海角至东北侧围头角，并向外海延伸至 35m 等深线附近。考虑厦门湾海域航道纵横交错、岛屿众多、岸线曲折等特点，本文对码头工程邻近海域、航道及水深变化较大的区域进行局部加密，整个区域包含 91065 个三角形单元和 47236 个节点。外海开边界近岸段网格尺度约 1km、码头工程和航道区域最小网格间距约 15m，如图 2 所示。在垂向均匀划分 10 个 σ 层，水动力计算采用内、外模式分离的方法，外模式时间步长为 0.25s，内模式时间步长为 2.5s。开边界水位依据 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1 和 Q1 等 8 个分潮的调和常数确定，分潮调和常数由美国俄勒冈州立大学全球潮汐模式提供，初始的水位和流速均为 0。

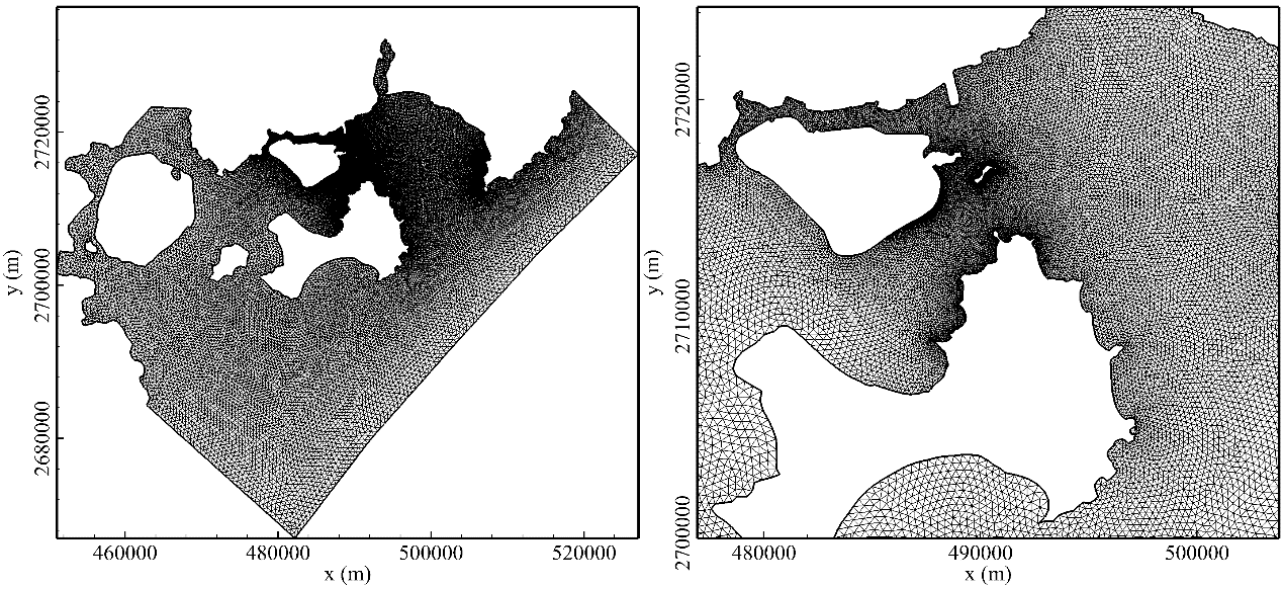


图 2 数学模型计算范围和网格划分

本研究假定溢油事故发生于拟建万吨级卸油码头泊位处，泄漏油品为轻质油，考虑潮流对油膜初始迁移方向的控制作用，选取大潮过程中的涨急和落急两个典型时刻作为事故起始条件。假设泄漏总量为 500 t，泄漏历时 1 h，泄漏量在涨急或落急时刻前 30 min 至后 30 min 内均匀释放。模型输出事故发生后 6 h、12 h、18 h 和 24 h 的油膜厚度分布，用于比较不同潮汐相位下油膜主要影响范围。

4 结果与讨论

4.1 围头湾潮流场分析

厦门湾海域的潮汐与潮流主要受台湾海峡潮波系统控制。潮波在湾口处分为南、北两支进入厦门湾：南部分支经后石 - 大金门断面进入厦门港海域，北部分支经大金门 - 围头断面进入围头湾海域 [19]。图 3 为围头湾海域在大潮周期

内高潮位、落急、低潮位和涨急 4 个典型时刻的流场分布。

高潮位时刻，围头湾东部大部分海域流速较小，大嶝岛与金门岛之间存在自东北向西南的水流，流速一般小于 0.5 m/s；外海水域出现相对较强的西南向水流，最大流速超过 0.8 m/s。落急时刻，围头湾东部海域自湾内向外海的落潮流显著，深槽航道流速较大，最大可达 1.2 m/s，浅滩处流速相对较小；拟建卸油码头工程位置存在约 1.0 m/s 的落潮流。低潮位时刻，湾内总体流速较小，仅大嶝岛南部仍有较明显的自西向东落潮流。涨急时刻，外海向湾顶的涨潮流作用增强，拟建卸油码头工程位置附近，最大涨潮流达约 1.2 m/s。

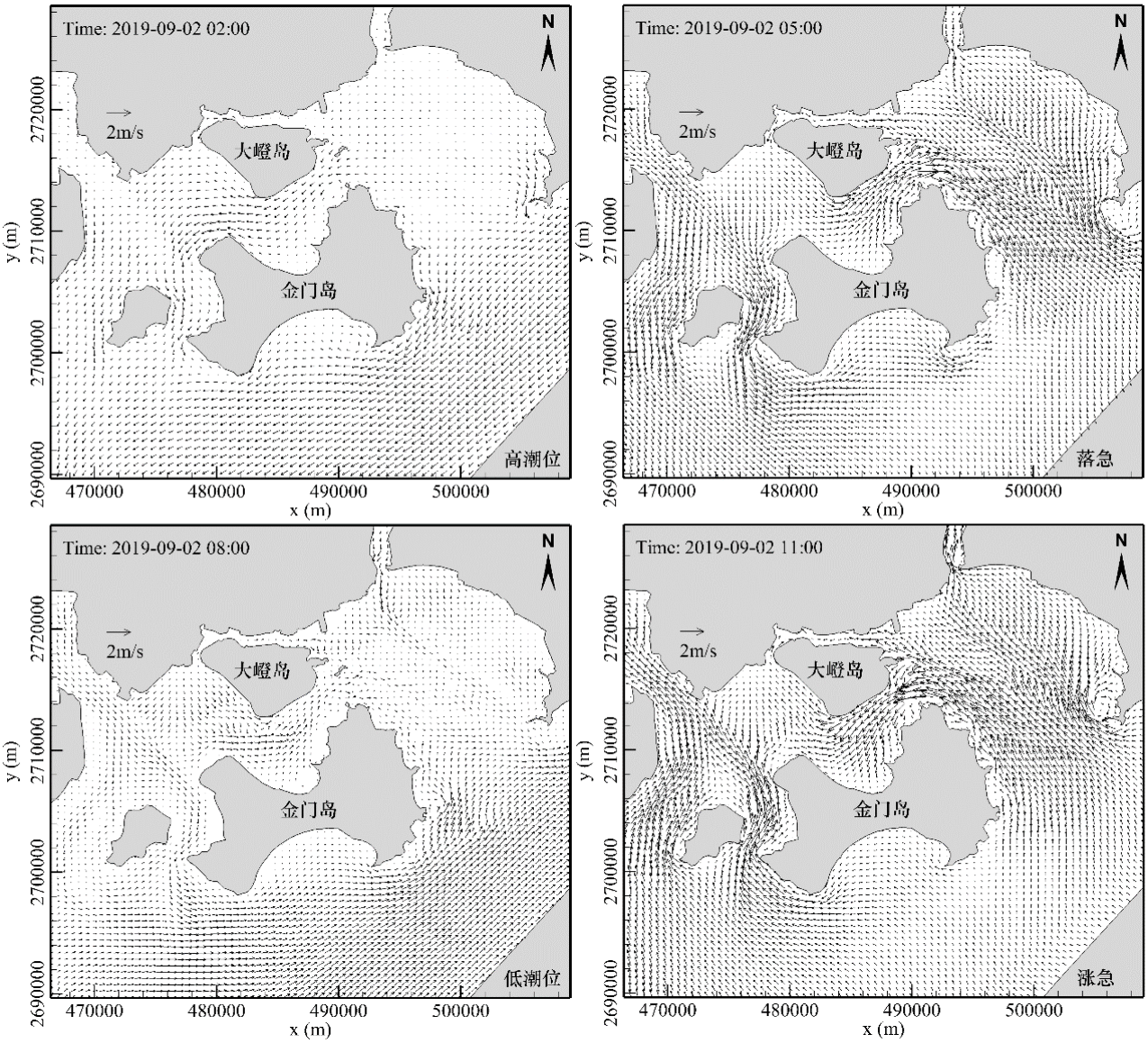


图 3 围头湾海域大潮周期内的流场分布

总体而言，金门岛东、西两侧以南北向潮流运动为主，金门岛以北海域东西向潮流作用较强。围头湾内高潮位和低潮位时流速较小，涨急和落急时流速显著增大；深槽航道流速大于邻近浅滩区。

4.2 溢油输移模拟结果

4.2.1 涨急油膜输移过程

大潮涨急时刻发生泄漏时，泄漏后 6 h、12 h、18 h 和 24 h 的油膜厚度分布如图 4 所示。溢油发生初期，油膜随涨潮流向工程位置西部迁移。事故发生 6 h 后，油膜迁移至大嶝岛西南部海域，此时溢油分布相对较为集中、油膜厚度相对较大。12 h 后，溢油在大嶝岛西南部和金门岛北部海域逐渐扩散，影响范围逐渐增大、油膜厚度较初期降低。18 h 后，溢油主要分布在大嶝岛西部至金门岛和小金门岛之间的深槽水道，并沿水道呈带状分布。24 h 后，油膜继续沿深槽向南迁移扩散，厚度进一步降低但影响范围明显扩大。该过程表明，涨急情景下油膜具有由工程邻近海域进入深槽水道并形成远距离带状扩散的趋势；若错过事故发生后数小时内的处置窗口，后续处置将面临作业范围大、回收效率低等问题。

4.2.2 落急油膜输移过程

大潮落急时发生溢油事故时，泄漏后 6 h、12 h、18 h 和 24 h 的油膜厚度分布如图 5 所示。溢油发生初期，油膜随落潮流向工程位置东部迁移，事故发生 6 h 后，部分油粒子在大小嶝岛东部附岸，溢油分布相对集中，油膜厚度较大。12 h 后，油膜分布集中在大嶝岛东北侧、大嶝岛西南侧两个部分。18 h 后，大嶝岛东北侧的油膜逐渐向东扩散，油膜影响面积逐渐增大。大嶝岛南部的油膜沿岸线向西部迁移。24 h 后，溢油分布较为分散，主要集中在大嶝岛西部、北部和东部三个区域。与涨急情景相比，落急情景下油膜进入深槽水道并向南远距离扩散的趋势较弱，但早期附岸和多岸段污染风险更为突出。

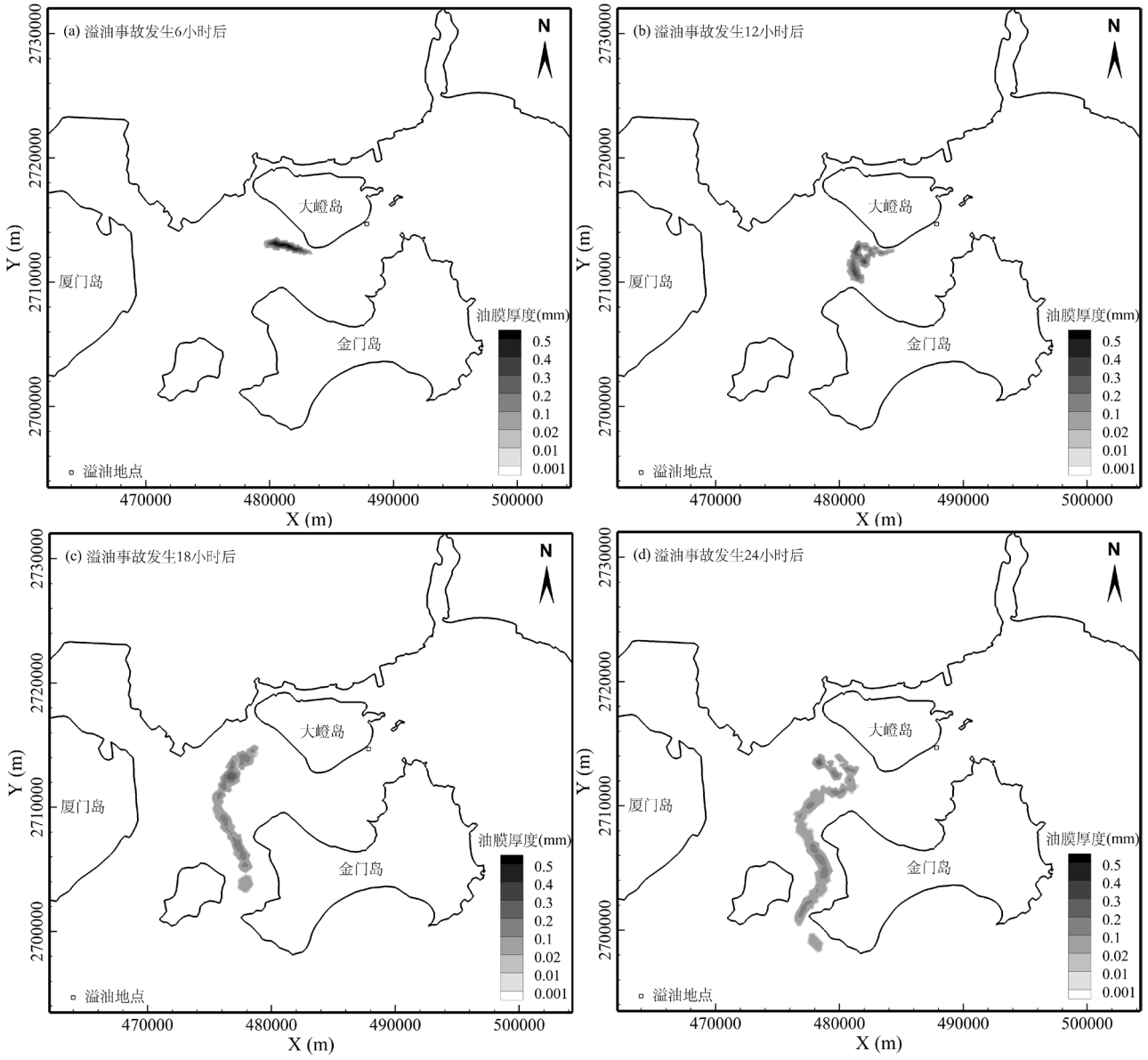


图 4 涨急时刻发生溢油时，油膜厚度在 6 小时、12 小时、18 小时和 24 小时后的分布

5 结论

(1) 基于三维非结构网格水动力模型 FVCOM 和拉格朗日油粒子方法，建立了适用于围头湾复杂岸线、岛屿、航道和潮间带条件的“水动力 - 溢油输移”耦合模型，该模型能较好地描述岛屿、航道、复杂海岸线和潮间带。

(2) 围头湾潮流场表现出明显的潮相差异和空间非均匀性。涨急和落急时刻码头附近流速较大，最大流速约 1.0-1.2 m/s；深槽航道流速明显大于浅滩区，是控制油膜迁移路径的重要动力通道。涨急时刻发生溢油事故时，溢油主要分布在大嶝岛西部至金门岛和小金门岛之间的深槽水道中，且有向南部扩散的趋势。落急时刻发生溢油事故时，油膜主要集中分布在大嶝岛西部、北部和东部三个区域，且有部分油粒子附岸。

(3) 本文结果可为厦门新机场卸油码头及其邻近的围头湾海域溢油事故的应急处置提供依据，后续应结合实测水动力验证、多风况敏感性分析，进一步提高模型预测结果的可靠性和工程可用性。

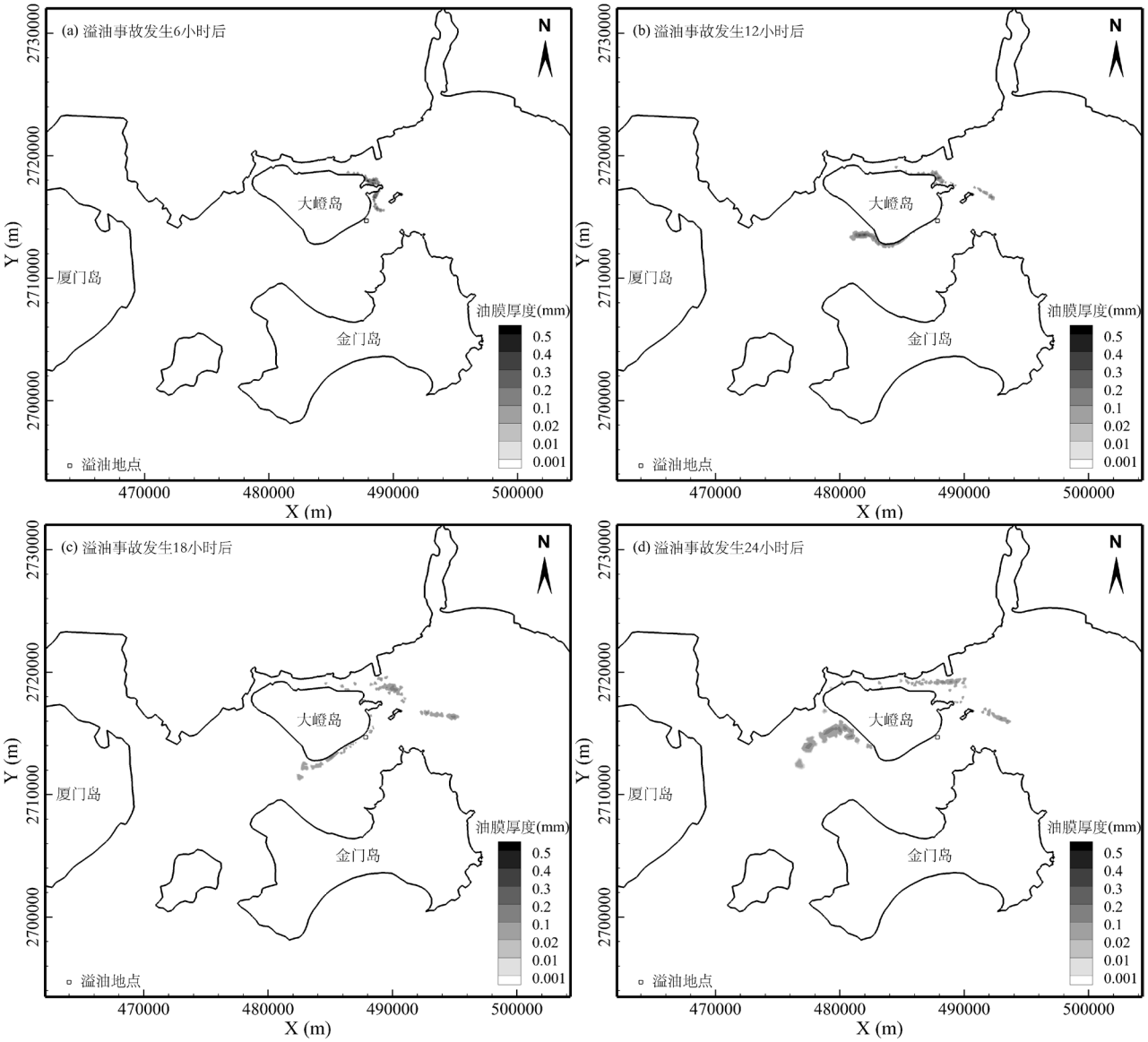


图 5 落急时刻发生溢油时，油膜厚度在 6 小时、12 小时、18 小时和 24 小时后的分布

参考文献

[1] 郝栋, 杨海鹏, 康亚军. 原油码头溢油事故致因分析[J]. 石油化工设计, 2012(2):57-58.

[2] 熊善高, 李洪远, 丁晓, 等. 中国海域船舶溢油事故特征与预防对策[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6):875-879.

[3] 周群群, 何利民. 海上溢油数值模拟研究进展[J]. 油气田环境保护, 2018, 028(001):4-9.

[4] Cai Y., Mu L., Li H., et al. A review of numerical modeling research on the marine oil spill[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 15(2): 71-86.

[5] 张昂, 周杰, 李云,等. 溢油数值模拟方法的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2):313-320.

[6] 王金华. 三维非结构波流耦合数值模型建立及应用研究[D]. 大连理工大学(博士学位论文), 2011.

[7] 匡翠萍, 谢华浪, 苏平,等. 蓬莱19-3溢油运移与归宿数值模拟和分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1585-1594.

[8] 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, 167(02):26-33.

[9] 钱琴, 赵东波, 姬厚德. 基于GNOME和EFDC模型的溢油数值模拟研究——以湄洲湾为例[J]. 中国水运, 2018, 18(5):79-81.

[10] 李大鸣, 甄珠, 李杨杨, 等. 烟台港栾家口港区海上溢油数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017,38(1): 66-73.

[11] 柴田, 熊德琪. 基于随机情景模拟的船舶溢油危害后果量化评价——以台湾海峡北部水域为例[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(1):45-52.

[12] Chen C, Liu H, Beardsley R C, An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186

[13] Weisberg R., Zheng L. Circulation of Tampa Bay driven by buoyancy, tides, and winds, as simulated using a finite volume coastal ocean model. Journal of Geophysical Research, 2006,

111(111):281-291.

[14] Wang L., Justic D., A modeling study of the physical processes affecting the development of seasonal hypoxia over the inner Louisiana-Texas shelf: circulation and stratification. Continental Shelf Research, 2009, 29(11):1464-1476.

[15] Shore J A., Modelling the circulation and exchange of Kingston Basin and Lake Ontario with FVCOM. Ocean Modelling, 2009, 30(2):106-114.

[16] Han G., Ma Z., Deyoung B., et al., Simulation of three-dimensional circulation and hydrography over the Grand Banks of Newfoundland. Ocean Modelling, 2011, 40(3–4): 199-210.

[17] Bai X., Wang J., Schwab D., et al., Modeling 1993–2008 climatology of seasonal general circulation and thermal structure in the Great Lakes using FVCOM. Ocean Modelling, 2013, 65(1): 40-63.

[18] Wang S D , Shen Y M , Zheng Y H . Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(13):1556-1571.

[19] 谢森扬, 王翠, 王金坑,等. 基于EFDC的九龙江口-厦门湾三维潮流及盐度数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2016, 31(1): 63-75.