

基于 EFDC 模型的靖江河道多码头开发段 溢油事故综合污染风险分析

程宇^{1,2}, 马明睿¹, 钟毅¹, 韦婉霞¹, 李丹萍¹, 孙嘉慧¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:基于环境流体动力学模型 EFDC 模拟了长江靖江开发段 6 个码头溢油事故下油膜漂移路径, 提出了溢油污染风险评估方法, 计算了多码头溢油事故的污染风险指数分布及其对保护区的综合污染风险指数。结果表明:码头位置和周围流场影响油膜的漂移路径;急流区溢油事故产生的油膜峰值迁移速度快,影响距离长,而缓流区溢油事故产生的油膜聚集程度高,影响时间长;多码头溢油事故产生的污染风险主要分布在各油膜路径的叠加区域,在开发段中部至下游末端形成强等级污染风险带,综合污染风险指数约为 1.6;风险带主要影响 W1 保护区,应在高风险区域提前采取应急防范措施。

关键词:多码头;溢油事故;漂移扩散;EFDC 模型;污染风险评估;靖江开发段

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)02-0150-07

Comprehensive pollution risk analysis of oil spill accidents in Jingjiang multi-wharf development section based on EFDC model//CHENG Yu^{1,2}, MA Mingrui¹, ZHONG Yi¹, WEI Wanxia¹, LI Danping¹, SUN Jiahui¹ (1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the environmental fluid dynamics code (EFDC) model, the oil film drift paths under the oil spill accidents at six wharfs in Jingjiang development section of the Yangtze River were simulated. A method for oil spill pollution risk assessment was developed, and the pollution risk index distributions of multi-wharf oil spill incidents and the comprehensive pollution risk index for the protected area were calculated. The results indicate that the location of the wharfs and the surrounding flow field significantly affect the drift paths of oil film. The oil film caused by oil spill accidents in a rapid flow area exhibits a fast peak migration speed and a large impact distance, while the oil film caused by spill accidents in a slow flow area demonstrates significant aggregation and a prolonged impact duration. Pollution risks induced by multi-wharf oil spill incidents are mainly distributed in overlapping areas of oil film paths, and a high pollution risk zone forms from the middle to the end of the downstream of the development section, with a comprehensive pollution risk index of approximately 1.6. The risk zone mainly affects the W1 protected area, and emergency prevention measures should be taken in advance in high risk areas.

Key words: multi-wharf; oil spill accidents; drift diffusion; EFDC model; pollution risk assessment; Jingjiang development section

长江中下游地区人口密度大,水源地众多且水资源保护区分布集中^[1],其水质安全具有极为重要的社会意义,在我国经济社会发展和生态环境保护中具有十分重要的战略地位^[2]。长江拥有极其优越的航运条件,是我国重要的航运通道。随着经济社会的迅速发展,长江航运发展迅猛,沿岸码头数量迅速增加,船舶燃油泄漏或石油运输船溢油事故导

致的污染风险也随之上升。油品泄漏进入水体形成的油膜对水源地水质及水生态平衡破坏极大^[3],而对溢油迁移规律进行准确模拟是及时、有效削减溢油污染影响的前提和基础,具有重要的实际应用价值。

目前溢油风险模拟研究大多关注单个码头的风险事故,对国内航道码头沿岸密集分布的情况分析

较少^[4]。长江下游水域航运发达、码头密集,水源保护区、鱼类种质保护区、湿地保护区分布集中,如长江靖江段东西向 60 km 江段上,北岸连续分布 6 个大型码头及 7 个保护区,在分析该江段保护区的溢油污染风险时,应考虑多个码头对保护区风险的叠加效应^[5-6]。对溢油污染的分析主要基于溢油模型模拟,在此基础上进行溢油风险评估^[7]。常用的模型包括环境流体动力学 (environmental fluid dynamics code, EFDC) 模型和 MIKE、FluOil、RiverSpill、OILMAP 等模型,其中,EFDC 和 MIKE 模型将水动力模块与粒子漂移模块进行耦合,能够更好地反映复杂河流水动力状况以及油粒子的漂移过程^[7]。例如:郭健等^[8]利用 EFDC 模型建立近海水环境动力学模型,研究沿海近岸溢油事故对附近环境敏感区的影响;徐志豪等^[9]利用 EFDC 模型研究溢油事故对河口滩涂大型底栖动物群落的影响,模拟结果显示溢油污染造成的扰动仍将持续影响该区域底栖生态环境;余薇薇等^[10]利用 EFDC 模型研究嘉陵江井口段突发性溢油事故对周边环境敏感区造成的影响;田威等^[11]利用 EFDC 模型构建长江南京段二维流场,采用拉格朗日质点追踪法计算油品入江后油膜漂移轨迹以及到达、离开下游保护区的时间。这些研究结果显示,EFDC 模型具有通用性好、数值计算能力强、数据输出应用范围广等特点,尤其对于水体水动力模拟精度已达到相当高的水平。然而,现有内河溢油污染研究多针对单个码头的溢油事故,对码头集中分布区域的溢油事故造成周边保护区综合污染风险的预测依然较少。

本文以长江下游典型城市靖江市为研究区,在其开发江段码头集中区域选取了 6 个典型码头,利用 EFDC 模型模拟该江段的二维流场,并采用拉格朗日质点追踪法计算 6 个码头发生溢油事故后油膜的漂移轨迹,利用综合污染指数^[12]分析油膜对周围保护区产生的污染风险。

1 研究区概况

长江靖江开发段是典型的分汊型河段,主河段自西向东绵延曲折,洲滩众多。主河道宽阔,宽度为 2.5 ~ 4.6 km,而局部支汊水面较窄,宽度为 0.5 ~ 1.5 km^[13]。该江段受下游潮汐和上游下泄径流的双重作用,水位呈一天内两涨两落周期变化^[14-15]。结合 GIS 遥感数据和长江航道图可知,该江段主河道两岸以人工开发段为主,岸线以堤岸石砌岸和码头为主,有众多国家级/省级保护区,而沿江开发段位于各保护区中间(图 1)。该区域沿江开发段范围 16 km,选取长江靖江开发段 6 个重要码头(即 M1 ~

M6 码头)作为风险源,其分布距离间隔为 2.5 ~ 4.5 km。为研究长江靖江开发段密集码头溢油事故对周围保护区造成的影响,本文对保护区和码头风险源进行了调研。该区域共有 7 个保护区,其中 3 个水源地保护区、2 个水产种质资源保护区、2 个生态湿地保护区。图 1 中 W1、W3 保护区分别为中华绒螯蟹、鳊鱼国家级水产种质和刀鲚国家级水产种质资源保护区,W2、W6 保护区分别为江心洲和长江(张家港市)重要湿地,W4、W5、W7 保护区分别为长江长青沙水源地、张家港三水厂水源地和彭蠡港水源地。W7 保护区紧邻 M1 码头,W6 保护区位于 M1 ~ M4 对岸,W1 ~ W5 保护区紧密分布在 M3 下游区域。研究区域河道中心分布有 3 个岛,从西向东依次为 X1、X2、X3。保护区较为集中地分布在 3 个岛周围。

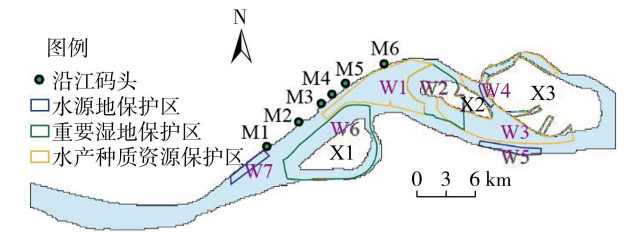


图 1 长江靖江开发段重要码头和保护区位置

Fig. 1 Locations of important wharfs and protected areas in Jingjiang section of the Yangtze River

2 研究方法

2.1 模型构建

本文采用 EFDC 模型对码头溢油事故进行模拟。EFDC 模型基于欧拉-拉格朗日粒子追踪算法对溢油漂移过程进行模拟,计算油粒子漂移、沉降、扩散过程。根据长江靖江开发段范围划定模型研究区域,确定计算范围为自 M1 上游 15 km 至下游 25 km 水域,江段长度共计 40 km。对研究区域进行矩形网格划分,网格大小为 150 m×150 m,共划分网格 9931 个。模型加载长江实测大断面地形,利用细分网格进行地形插值。研究区域温度、风场、降雨、蒸发数据来自国家气象科学数据中心,模型采用 2022 年 7 月逐日时序数据。设置初始水位为江阴站丰水期平均水位 5.6 m,水深垂向划分 4 层计算网格。模型选择 2022 年丰水期(7 月)水文数据作为水动力边界,上边界设置为鹅鼻嘴日流量,下边界取营船港逐日潮位。模型时间步长为 1 s,计算时间窗口为 8 d。根据研究区域风场数据可知,区域全年风速变化范围为 0.5 ~ 14.8 m/s,区域主导风向为东南偏东风 (ESE),出现频率为 14.1%,平均风速为 2.4 m/s。针对油膜快速向下游漂移的情况,其不利

风向为西风(W),不利风向最大瞬时速度为14 m/s,出现频率为0.01%。因此,设置模型常规工况风向为ESE,风速为2.4 m/s;不利工况风向为W,风速为14 m/s。

2.2 溢油源强设置

码头溢油风险主要来自停靠船舶的泄漏事故,溢油成分主要为船舶所载货油和船用燃料油。根据JT/T1143—2017《水上溢油环境风险评估技术导则》,散货船载重吨位在8万~15万t之间,燃料油总量2 816~7 920 m³,单舱燃料油量为352~1 320 m³。码头M1~M6设计代表船型最大吨级为10万t,燃料油总量约为629 m³,密度约为0.991 g/cm³,总质量约为623 t,船舶泄漏时间以15 min计。考虑研究区域人工岸线对溢油的黏滞作用,设置油的黏滞系数为0.015 kg/(m·s)。模型对码头M1~M6的溢油事故进行模拟,分别得到6个码头发生溢油事故后油粒子的漂移过程,粒子轨迹每隔1 h保存和输出一次。

2.3 综合污染风险指数

污染负荷指数反映任一码头溢油事故下油粒子对各网格点的污染程度,其数据来自各码头油粒子的漂移轨迹。污染负荷指数的定义参照污染物风险计算方程^[16-17],其表达式为

F_{i,k} = \left(\frac{c_{mi,k}}{c_{0i}} - 1 \right) \frac{\tau}{\tau_0} + 1 \tag{1}

式中:F_{i,k}为在码头k溢油事故下网格点i的污染负荷指数;c_{mi,k}为码头k溢油事故下网格点i处的最大油膜厚度;c_{0i}为网格点i处的油膜厚度本底值,本文取油膜消散最小厚度(0.03 mm);\tau为油膜持续时间;\tau_0为模型计算总时间。

对于任一网格点i,码头周围溢油污染风险指数为

P_{ri} = \sqrt[n]{F_{i,1}F_{i,2}\cdots F_{i,n}} - P_{r0} \tag{2}

式中:n为码头数量;P_{r0}为无油膜污染的网格点风险指数,当最大油膜厚度为油膜厚度本底值时,P_{r0}=1。

保护区综合污染风险指数为

P = \sqrt[n']{P_{ri,1}P_{ri,2}\cdots P_{ri,n'}} \tag{3}

式中n'为保护区内的P_{ri}>0的网格数量。P_{ri}和P处于0~<0.5、0.5~<1.0、1.0~<2.0、2.0~<5.0、\geq5.0时,污染风险等级分别为轻微、中等、强、很强和极强。

3 结果与分析

3.1 河道水动力模拟

采用天生港2022年7月水位数据对EFDC模

型进行参数率定,结果如图2所示,模型计算值与实测值拟合较好(R^2=0.76),表明模型计算结果较为可靠。研究区受到长江感潮影响,存在往复流。图3为模型计算得到涨急流场与落急流场。落急时,流向由西向东,流场平均流速为0.60 m/s,最大流速位于研究区东端河道主汊,为1.91 m/s;涨急时,流向由东向西,流场平均流速为0.38 m/s,最大流速位于研究区西南端主汊,为1.05 m/s。总体来说,落急流场流速大于涨急流场,落急流场持续时间占全天的67.4%,为研究区的主导流场。流场模拟结果显示,河道主汊流速较大,存在3段高流速区,分别位于研究区西端、西南端、东端,高流速区对应的主汊地形河槽相对窄而深,地形变幅大。低流速区则位于支汊段,其中X2岛西北侧和X3岛北侧支汊存在较大缓流区。

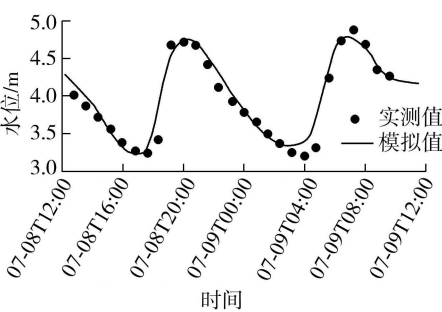


图2 水位验证
Fig. 2 Water level verification

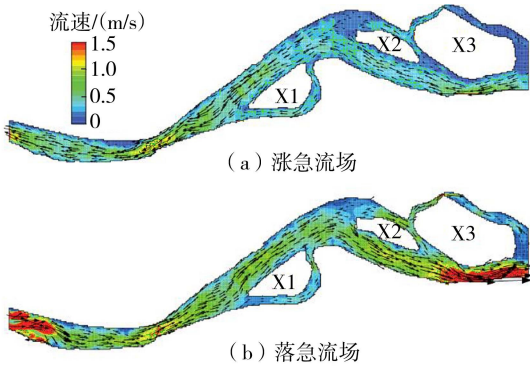


图3 涨急流场与落急流场

Fig. 3 Flow fields of flood tide andebb tide

3.2 油膜漂移过程解析

本文对丰水期常规工况、不利工况进行对比,分析常规与极端情况下油膜漂移路径的差异,并对油膜漂移过程进行分解,提取每个网格点经历的油膜最大厚度、油膜峰值到达时间以及油膜持续时间进行分析,探明不同位置码头溢油污染关注点的差异。

3.2.1 涨落潮及不利风向影响

图4为常规工况和不利工况下溢油事故发生后油粒子前10.5 h及14.5 h的漂移路径(t为时间),可以看出溢油事故发生后,各码头油膜主要方向为

从西向东沿长江北岸扩散漂移。受涨落潮影响,油膜向下漂移的过程中会发生一定程度的向上游回溯,但整体向下游漂散,漂移过程中油膜逐渐拉伸扩大,面积增加,厚度减小^[1]。对比不利工况和常规工况结果发现,两个工况下油膜向下游漂移的趋势大致相同。这可能与 X3 岛北侧支汊存在较大缓流区有关,不利工况下该缓流区也对油膜的扩散漂移产生了缓冲作用,此结果与现有研究较为吻合^[11-12]。并且,不利工况发生的频率较低,而常规工况能较好地反映各码头群溢油的基本情况,下文采用常规工况进行风险分析。

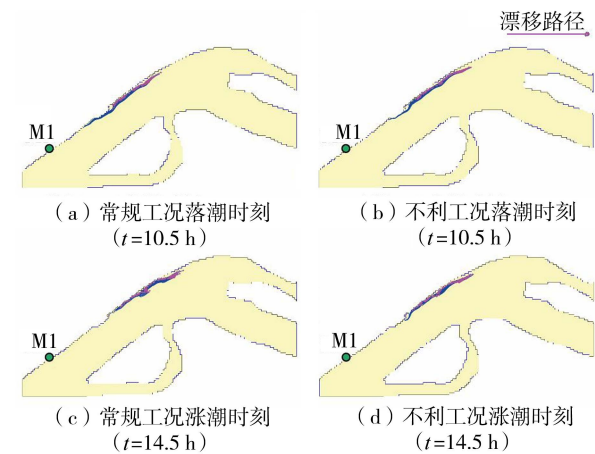


图 4 不同工况下油粒子漂移路径

Fig. 4 Oil particle drift paths under different conditions

3.2.2 油膜最大厚度分布

将溢油事故全过程导出后,提取各网格油膜最大厚度数据进行分析,结果如图 5 所示。码头 M1 ~ M6 处油膜轨迹较为相似,均从码头释放点沿开发段岸线向下游漂移,油膜经过 X2 岛北侧,在 X3 岛处形成不同程度分叉,油膜主体又沿 X3 岛北侧支汊向下游运动。油膜漂移过程中,厚度逐渐减小。溢

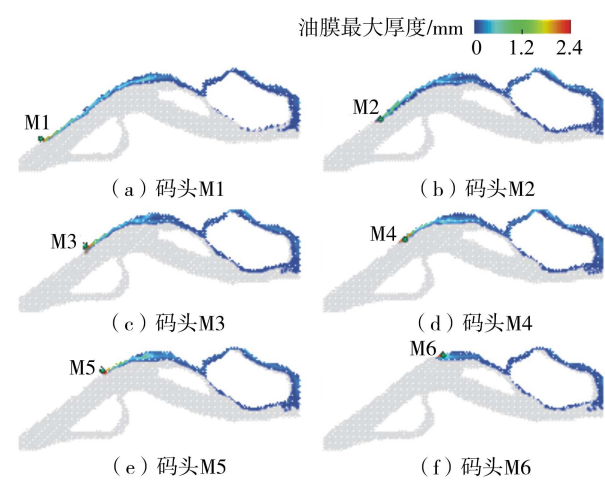


图 5 码头 M1 ~ M6 油膜最大厚度分布

Fig. 5 Maximum oil film thickness distributions at wharfs M1 ~ M6

油点处油膜厚度最大,码头 M1 ~ M6 处油膜最大厚度约为 2.4 mm。码头 M1 处油膜,其厚度超过 1 mm 的漂移距离最大,为 10.5 km;其次为码头 M2 处油膜,相同情况下漂移距离为 4.8 km;码头 M6 处油膜漂移距离最小,仅为 0.6 km。可以看出,高浓度油膜的漂移距离受到码头位置的影响。油膜最大厚度小于 0.03 mm 时可认为油膜已经消散,对环境影响极为微弱。从图 5 可看出,从码头 M1 ~ M6 漂移的油膜均在通过 X3 岛北侧支汊后逐渐消散,部分从 X3 岛南侧支汊汇入主汊的油膜本身厚度较小 (<0.03 mm),影响可忽略。

3.2.3 油膜峰值到达时间

油膜峰值(最大浓度)到达时间反映了油膜扩散的速度,油膜扩散速度越快,对周围水体的影响越大。提取码头 M1 ~ M6 处油膜峰值到达时间,结果如图 6 所示。溢油事故发生后,码头 M1 ~ M6 处油膜峰值到达模型下边界的时间均为 63.2 ~ 68.4 h。油膜峰值到达 X2 岛西端的时间为 26.5 ~ 36.7 h,油膜峰值到达 X3 岛西端的时间为 45.3 ~ 50.3 h。对于事故应急措施来说,最关注 24 h 内污染扩散输移情况。24 h 内码头 M1 ~ M6 处油膜漂移距离由大到小依次为 M1、M2、M3、M4、M5、M6。其中,24 h 内码头 M1 处油膜漂移距离为 5.4 km,码头 M2 处油膜漂移距离为 3.5 km,码头 M6 处油膜漂移距离最小,为 0.3 km。结合码头油膜最大厚度分布可知,码头 M1 和 M2 发生溢油事故后,油膜厚度、扩散速度较其他码头处更快,污染影响相对更大,这可能与各码头分布位置及流场相关。码头 M1 和 M2 附近流速较高,约为 0.5 m/s,码头位置更接近主流场(图 3);码头 M3 ~ M6 附近流速较低,为 0.1 ~ 0.3 m/s;码头 M6 接近 X2 岛,X2 岛西北侧分布着约 3.6 km 的低流速区,使其油膜扩散相对更慢。

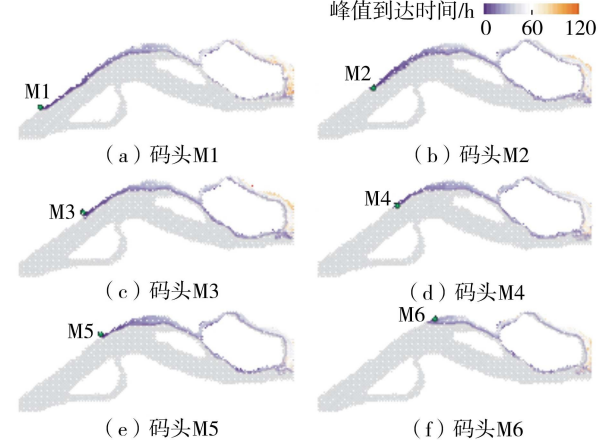


图 6 码头 M1 ~ M6 油膜峰值达到时间分布

Fig. 6 Distributions of oil film peak reaching time at wharfs M1 ~ M6

3.2.4 油膜持续时间

油膜持续时间定义为从油膜到达某网格至其从该网格消散(厚度小于 0.03 mm)的时间。提取码头 M1 ~ M6 处油膜持续时间,结果如图 7 所示。与油膜峰值到达时间分析不同的是,油膜持续时间分析中剔除了油膜厚度小于 0.03 mm 的部分,仅关注对环境产生影响的时间。码头 M1 ~ M6 处油膜持续时间为 0.2 ~ 4.8 h,即油膜在任一网格产生影响的时间均在 4.8 h 内。对油膜持续影响范围进行统计计算表明,码头 M3 处油膜影响范围最大,为 7.68 km²,持续时间为 3.4 h;其次为码头 M2 处油膜,影响范围为 7.24 km²,持续时间为 3.2 h;码头 M6 处油膜影响范围最小,为 4.23 km²,但其持续时间为 4.8 h。由此可见,码头 M6 处油膜影响范围较小,但其消散速度相对较慢。码头 M1 和 M6 处油膜在进入 X2 岛北侧分汊后基本消散;码头 M2 ~ M5 处油膜影响持续至 X3 岛北侧分汊,且在 X3 岛北侧分汊的影响时间均小于 0.5 h。

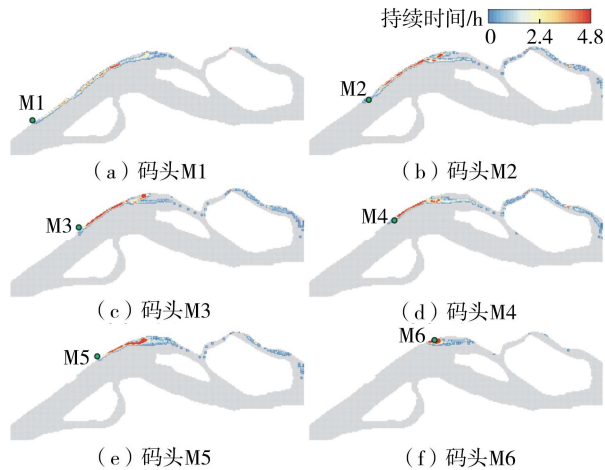


图7 码头 M1 ~ M6 处油膜持续时间分布

Fig.7 Distributions of oil film duration at wharfs M1 ~ M6

3.3 溢油污染风险分析

溢油污染综合风险指数反映了开发段 6 个码头溢油事故对研究区污染风险的综合影响,其分布情况如图 8 所示。剔除风险值为 0 的网格点,溢油污染主要风险带沿着码头 M1 ~ M6 开发段近岸分布。其中码头 M3 ~ M6 段综合污染风险指数较高,均值约为 1.6,达到强污染风险等级,该风险带长度约为 6.2 km;码头 M1 ~ M3 段综合污染风险指数低,均值约为 0.4,为轻微污染风险等级,风险带长度约为 4.8 km。码头 M6 下游至 X2 岛北侧缓流区形成了一个较大的风险带,综合污染风险指数均值为 1.3,为强污染风险等级,风险带面积约为 2.13 km²。计算各保护区的综合污染风险指数可得,W1 ~ W4 保护区存在污染风险,而 W5 ~ W7 保护区污染风险较

低,可忽略不计。W1 保护区与开发段距离最近,受风险带影响最大,其综合污染风险指数为 0.25;而 W2、W3、W4 保护区的综合污染风险指数均较低,分别为 0.04、0.05、0.03。因此,开发段溢油污染风险主要影响 W1 保护区。

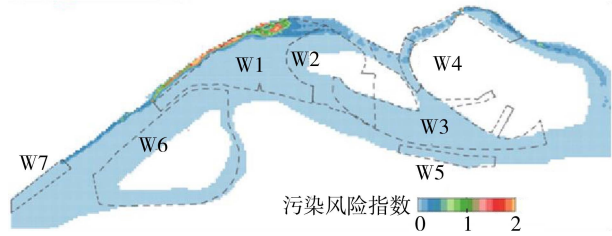


图8 溢油污染风险指数分布

Fig.8 Distribution of oil spill pollution risk index

4 讨论

4.1 多码头溢油漂移特征

本文分别从油膜的厚度、峰值到达时间和持续时间分析了各码头溢油事故对水体造成的影响。油膜最大厚度越大、峰值到达时间越早、持续时间越长,其对水体造成的影响就越大^[18]。从分析结果可知,码头位置所处流场影响了油膜的漂移过程。码头 M1 和 M2 所处位置靠近主流场,流速相对较大,使得 M1 和 M2 释出的油膜漂移距离更大,峰值能够更快到达下游水域。码头 M3 ~ M6 周围流场相对较弱,油膜峰值影响距离较短,油膜峰值主要影响码头周围水体。码头 M6 处于 X2 岛西北侧的缓流区,其油膜漂移距离最短,但在缓流区持续时间最长。因此,急流区码头溢油事故应注意油膜向下游快速漂移问题,而缓流区码头溢油事故应注意油膜的持续聚集问题。

中、大型溢油事故的围控措施一般分为溢油起点、溢油终点、溢油中段 3 部分^[19]。由于急流区码头油膜向下漂移速度快,更应关注溢油起点处的拦截措施,在下游近点做好围油栏的布设^[20];缓流区码头溢油事故发生后,油膜一般会持续聚集在浅滩周围,可利用浅水地带做好溢油回收工作^[21]。

4.2 溢油综合污染风险分布特征

溢油综合污染风险指数反映了多码头溢油事故对于周围水体的污染风险,与各码头发生溢油事故后油膜漂移特征相关,是各溢油场景叠加影响的体现。溢油污染风险指数的计算参考了重金属污染风险评价方法^[22-23],公式中加入了油膜持续时间作为事故短期污染影响评价的特征参数。从计算结果可知,多码头溢油污染风险带主要分布在各油膜路径的叠加区域,即下游 4 个码头沿岸区,可达强污染风

险等级,且码头 M6 周围缓流区形成了相应的强等级污染风险带。下游 X2、X3 岛北侧支汊虽然也是油膜扩散的必经之路,但由于此处油膜厚度较小,持续时间较短,综合污染风险指数较低,为轻微污染风险等级。保护区的综合污染风险指数反映了保护区受多码头溢油污染风险的影响程度^[24-25],从结果可知,受多码头溢油污染风险影响最大的为 W1 保护区,其次为 W3、W2、W4 保护区,W5、W6、W7 保护区所受影响可忽略不计。W1 保护区边界紧邻多码头开发带,尤其是码头 M6 至 X2 岛缓流区的强等级污染风险带位于 W1 保护区内。W1 为中华绒螯蟹、鳊鱼国家级水产种质资源保护区,溢油事故可能会对水产种质资源产生不利影响,应在高污染风险区域做好应急防范措施。

5 结 论

a. 研究区溢油事故发生后,油膜污染总体沿北岸随水流从西向东往下游漂移扩散,涨潮及不利风向对油粒子漂移路径的影响有限,码头位置所处流场影响了油膜的漂移过程,并进一步影响溢油污染风险强度。靠近主流流场的码头 M1 和 M2 溢油事故对下游水域影响更大,而浅滩区的码头 M3 ~ M6 溢油事故对周围水域影响更大。

b. 急流区码头发生溢油事故,油膜会快速向下游漂移,其油膜峰值更快到达下游水域,应采取下游端提前拦截措施。缓流区码头发生溢油事故,油膜不会快速向下游漂移,但会在缓流区水域产生聚集,应做好码头周围水域的应急处理。

c. 多码头溢油事故的风险评估相对单个码头溢油事故更为复杂,其综合污染风险指数是各溢油场景叠加影响的体现。研究区多码头溢油事故产生的污染风险主要分布在各油膜路径的叠加区域,在开发段中部至下游末端形成强等级污染风险带。该风险带主要对 W1 保护区北侧边界和北侧缓流区产生影响,应在高风险区域提前做好应急防范措施。

参考文献:

[1] 黄轶康,李一平,邱利,等. 基于 EFDC 模型的长江下游码头溢油风险预测[J]. 水资源保护,2015,31(1):91-98. (HUANG Yikang, LI Yiping, QIU Li, et al. Risk prediction on wharf oil spill in the lower reaches of Yangtze River based on EFDC [J]. Water Resources Protection,2015,31(1):91-98. (in Chinese))

[2] 胡春燕,路彩霞,侯卫国. 长江中下游干流河道治理回顾与展望[J]. 人民长江,2022,53(2):7-11,20. (HU Chunyan, LU Caixia, Hou Weiguo. Review and prospect of

channel regulation in middle and lower reaches of Changjiang River[J]. Yangtze River, 2022,53(2):7-11, 20. (in Chinese))

[3] 巫丽俊. 感潮江段事故溢油二维数值模拟[D]. 南京: 河海大学,2006.

[4] 付玉,童思陈,王啸,等. 内河溢油污染源逆时追踪数值模拟[J]. 长江科学院院报,2024,41(2):61-66. (FU Yu, TONG Sichen, WANG Xiao, et al. Numerical simulation of inverse time tracking of oil spill pollution sources in inland waterways [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2024,41(2):61-66. (in Chinese))

[5] JIANG Pinfeng, TONG Sichen, WANG Yiting, et al. Modelling the oil spill transport in inland waterways based on experimental study[J]. Environmental Pollution,2021, 284:117473.

[6] 赵兴,王宪鑫,吴亮,等. 围头湾海域溢油风险模拟及对周围环境敏感区的影响研究[J]. 海洋预报,2023,40(1):57-64. (ZHAO Xing, WANG Xianxin, WU Liang, et al. The oil spill risk simulation in Weitou Bay and its impact on the surrounding environmentally sensitive area [J]. Marine Forecasts, 2023, 40 (1): 57-64. (in Chinese))

[7] 韩龙喜,张琳,金文龙,等. 基于油粒子模型的水库水质应急预警[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(2):120-124. (HAN Longxi, ZHANG Lin, JIN Wenlong, et al. Water quality emergency warning in reservoirs based on oil particle model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41 (2): 120-124. (in Chinese))

[8] 郭健,孔善云,杨红,等. 滨海近岸溢油风险模拟及对附近环境敏感区的影响[J]. 海洋湖沼通报,2019(4):30-39. (GUO Jian, KONG Shanyun, YANG Hong, et al. The oil spill risk simulation and the effects on the environmental sensitive area offshore the coast of Binhai [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019 (4): 30-39. (in Chinese))

[9] 徐志豪,吴健,王敏,等. 溢油事故对河口滩涂大型底栖动物群落的影响[J]. 环境科学与技术,2019,42(4):207-213. (XU Zhihao, WU Jian, WANG Min, et al. Stress of oil spill on community structure of benthic macroinvertebrate in the estuarine tidal marshes [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42 (4): 207-213. (in Chinese))

[10] 余薇薇,余钧波,孙尉哲,等. 嘉陵江井口段突发性溢油事故影响预测及分析[J]. 安全与环境学报,2023,23(12):4540-4547. (YU Weiwei, YU Junbo, SUN Weizhe, et al. Prediction and analysis of sudden oil spill accident based on a numerical model for Jingkou section, Jialing

- River[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23 (12):4540-4547. (in Chinese))
- [11] 田威,邱利,李一平. 基于 EFDC 模型的感潮江段溢油事故风险预测[J]. 水资源保护, 2015, 31 (6): 98-102. (TIAN Wei, QIU Li, LI Yiping. Prediction of oil spill risk on tide sect of Yangtze River based on EFDC model[J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6): 98-102. (in Chinese))
- [12] 闻云呈,夏云峰,蔡翠苏,等. 长江下游南京至浏河口河段沿程设计最低通航水位分析[J]. 水运工程, 2012 (3): 99-103. (WEN Yuncheng, XIA Yunfeng, CAI Cuisu, et al. Design lowest navigation water level of river reach from Nanjing to Liu River estuary on lower Yangtze River [J]. Port & Waterway Engineering, 2012(3): 99-103. (in Chinese))
- [13] 徐元,黄志扬. 长江下游南通至南京段深水航道设计通航标准研究[J]. 水运工程, 2014 (1): 1-9. (XU Yuan, HUANG Zhiyang. Designed navigational standards for deepwater channel in the lower stretch of the Changjiang River between Nantong and Nanjing[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(1): 1-9. (in Chinese))
- [14] 蒋艳. 长江江苏段主要地区水流数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [15] 蒋书琴,唐红军,程珍. 遂宁某水源地周边土壤重金属特征分析及污染评价[J]. 绿色科技, 2022, 24 (22): 29-33. (JIANG Shuqin, TANG Hongjun, CHENG Zhen. Analysis of heavy metal characteristics and pollution evaluation of soil around a certain water source in Suining [J]. Green Science and Technology, 2022, 24 (22): 29-33. (in Chinese))
- [16] 朱静,侯耀宗,邹书成,等. 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42 (7): 3215-3222. (ZHU Jing, HOU Yaozong, ZOU Shucheng, et al. Spatio-temporal distribution characteristic and risk assessment of heavy metals in soils around centralized drinking water sources in Wuhan[J]. Environmental Science, 2021, 42 (7): 3215-3222. (in Chinese))
- [17] AHMED S, ELGHARBAWI T, SALAH M, et al. Deep neural network for oil spill detection using Sentinel-1 data: application to Egyptian coastal regions [J]. Geomatics, Natural Hazards & Risk, 2023, 14 (1): 76-94.
- [18] LIU B. Inland water oil release response [R]. London: Energy Instiute, 2004.
- [19] 王亚锋,李喜来,赵绍祯,等. 河流溢油处置技术研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36 (增刊 2): 316-319. (WANG Yafeng, LI Xilai, ZHAO Shaozhen, et al. River oil spill response technologies research [J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36 (Sup 2): 316-319. (in Chinese))
- [20] 李彤,谢志宜. 水上事故溢油漂移轨迹预测模型研究与应用[J]. 环境科学与管理, 2013, 38 (7): 56-61. (LI Tong, XIE Zhiyi. Study and application of oil spill trajectory model [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38 (7): 56-61. (in Chinese))
- [21] 林奎,雷世元,杨建立,等. “3·24”重大油污事故引起的思考[J]. 交通环保, 2000, 21 (1): 1-4. (LIN Kui, LEI Shiyuan, YANG Jianli, et al. Consideration from “3·24” oil pollution accident[J]. Environmental Protection in Transportation, 2000, 21 (1): 1-4. (in Chinese))
- [22] 李彤,邓滢. 珠江口典型溢油事故河口岸线污染数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23 (11): 4136-4142. (LI Tong, DENG Ying. Research on numerical simulation of estuarine shoreline pollution caused by typical oil spill in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23 (11): 4136-4142. (in Chinese))
- [23] 张逸驰,彭辉,徐卫红,等. 基于数值模型和事件树模型的长江中游溢油风险研究[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44 (6): 80-88. (ZHANG Yichi, PENG Hui, XU Weihong, et al. Oil spill risk study based on numerical model and event tree analysis in the middle reach of the Yangtze River[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44 (6): 80-88. (in Chinese))
- [24] 刘晓东,徐少南,贾庆林,等. 长江感潮河段溢油风险评价体系构建及应用[J]. 水利信息化, 2021 (2): 54-57. (LIU Xiaodong, XU Shaonan, JIA Qinglin, et al. Establishment and application of risk evaluation index system of oil spill accidents in Yangtze River tidal section [J]. Water Resources Informatization, 2021 (2): 54-57. (in Chinese))
- [25] 熊海滨,孙昭华,陈立,等. 码头密度对长江中游典型河段内溢油运移影响数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (5): 2252-2261. (XIONG Haibin, SUN Zhaohua, CHEN Li, et al. Numerical simulation of the impacts of piers densities on oil spill transport in typical reach of the middle Yangtze River[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21 (5): 2252-2261. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-11 编辑:施业)

