

· 港口 ·



舟山海域油品码头布局与溢油风险评估

汪守东, 徐洪磊, 程金香, 朱高儒

(交通运输部规划研究院, 北京 100028)

摘要: 提出了一个基于不确定性分析理论的区域油品码头空间布局的溢油风险模拟与评估方法。该方法可系统分析沿海区域油品码头空间布局及其产生的海域溢油风险的空间分布规律, 能够满足我国当前近海高强度开发形势下战略环评和环境风险评估的技术需求。以舟山海域为研究对象, 通过油品码头布局模型和不确定性分析, 对舟山海域进行综合溢油风险评估, 结果表明该方法可以用于综合评估某一海区的溢油风险水平; 基于溢油风险概率和污染损害的时空分布, 依据风险值集中度最大及风险总值最小的原则, 能够实现多种码头布局方案下的海域溢油风险水平的综合比较, 并得到最优油品码头布局方案。

关键词: 码头布局; 溢油; 不确定性分析; 风险评估

中图分类号: X 55; U 651⁺. 4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0026-08

Oil dock layout at Zhoushan sea area & oil spilling risk assessment

WANG Shou-dong, XU Hong-lei, CHENG Jin-xiang, ZHU Gao-ru

(Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China)

Abstract: This paper proposed a simulation and evaluation method for the oil spilling risk in the spatial layout of regional oil dock based on the theory of uncertainty analysis. This method can be used to systematically analyze the spatial layout of oil dock along the coastal region and figure out the spatial distribution rule of sea-area oil spilling risk caused by the layout, and can also satisfy the technical demand for strategic environmental assessment and environmental risk assessment under the current situation of offshore high-strength exploitation in China. It treated Zhoushan sea area as the research object to evaluate the comprehensive oil spilling risk by analyzing the layout model of oil dock and the uncertainty. The results show that this method can be used to comprehensively analyze the oil spilling risk level of a certain sea area, and can realize comprehensive comparison among sea-area oil spilling risk levels under many kinds of dock layout schemes, and get the optimal scheme for the oil dock layout based on the oil spilling risk probability and the temporal and spatial distribution of pollution damage, and according to the principle that the total risk value is the smallest if the concentration ratio of risk value is maximum.

Keywords: dock layout; oil spilling; uncertainty analysis; risk assessment

舟山海区北至马鞍群岛, 南至梅散列岛, 东起海礁, 西迄王盘洋水域, 水域面积为 4.9 万 km², 共有岛屿 1 390 个。自 2006 年宁波、舟山两港实

施“一体化”战略以来, 宁波-舟山港已经发展成为全球货运吞吐量最大的港口, 截至 2012 年底, 宁波-舟山港共有千吨级以上生产性泊位 394 个

收稿日期: 2016-03-20

作者简介: 汪守东 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口规划环评、溢油风险评估等水运环保技术咨询及政策标准等方面的研究。

(深水泊位 152 个), 泊位总长度 68.8 km, 综合通过能力 7.5 亿 t。其中, 舟山港域分别占 43.7%、39.9% 和 37.8%。但是舟山海域为我国沿海溢油事故易发的高风险区域之一, 2006—2010 年, 仅舟山海域发生船舶污染事故 21 起、溢油量超过 1 300 t, 其中单次溢油量均超过 300 t 以上的有 3 起^[1-6]。在途经中国的 7 条主要国际海运航线中, 有 6 条经过舟山。《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》明确提出重点推进浙江舟山群岛新区发展。舟山地处我国最大的海洋渔场——舟山渔场, 海洋环境相对敏感, 分布有多处环境敏感目标, 海上密集分布着多处渔业捕捞区、繁育区和养殖区等。这些资源都容易受到溢油污染损害, 这在一定程度上加剧了该海域的溢油风险水平。因此, 研究舟山海洋经济相关产业布局及其引发的溢油环境风险具有典型意义。

1 基于不确定分析的溢油风险评估模型

1.1 油品码头布局

考虑国民经济、人口、产业和能源结构等因素, 通过对舟山及周边地区历史及未来石油供需市场的分析和预测, 采用消耗水平推算法、时间序列分析法和回归分析法, 预测舟山港域未来的油品吞吐量规模, 到 2020 年和 2030 年舟山港原油吞吐量将分别达 4 590 万和 7 050 万 t; 成品油吞吐量将分别达 5 000 万和 9 000 万 t。根据自然条件、作业条件、环保要求以及综合利用因素等方面, 建立油品码头选址的评价指标体系, 得出未来舟山海域适合进行油品码头开发的备选位置, 共 5 处: 岱山港区(大长涂山)、定海港区(岙山)、马岙港区(干览、天后宫)、六横港区(涨起港)、岑港港区(册子岛、外钓岛和烟墩), 见图 1; 再结合舟山地区的石油吞吐量预测结果, 得出 5 种油品码头空间布局方案, 见表 1。

表 1 舟山油品码头布局方案

码头类型	位置	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
		吨位/万 t	个数	吨位/万 t	个数	吨位/万 t	个数	吨位/万 t	个数	吨位/万 t	个数
原油码头	岑港港区外钓作业区	30	3	30	1	30	3				
		10	2	10	1	10	2	30	1		
		2	1	2	1	2	1				
	岑港港区册子作业区	30	1	30	1	30	1	30	1	30	1
	定海港区岙山作业区	30	1	30	1	30	1	30	1	30	1
	岱山港区大长涂作业区	20	3	25	1	25	1	20	2	25	1
		10	2	20	2	20	2	10	2	20	2
	六横港区涨起港作业区			10	2	10	2			10	2
						30	2	30	2	30	2
	成品油码头	岑港港区外钓作业区	1	3	1	2	1	3			1
0.5			3	0.5	2	0.5	3			0.5	3
岑港港区烟墩作业区		3	2	3	1	3	2	3	2	3	2
岱山港区大长涂作业区		8	2	8	1	8	2	8	2	8	2
		5	4	5	2	5	4	5	4	5	4
		3	4	3	2	3	4	3	4	3	4
		1	2	0.5	2	1	2	1	2	1	2
六横港区涨起港作业区						8	2	8	2		
						5	3	5	3		
						3	3	3	3		

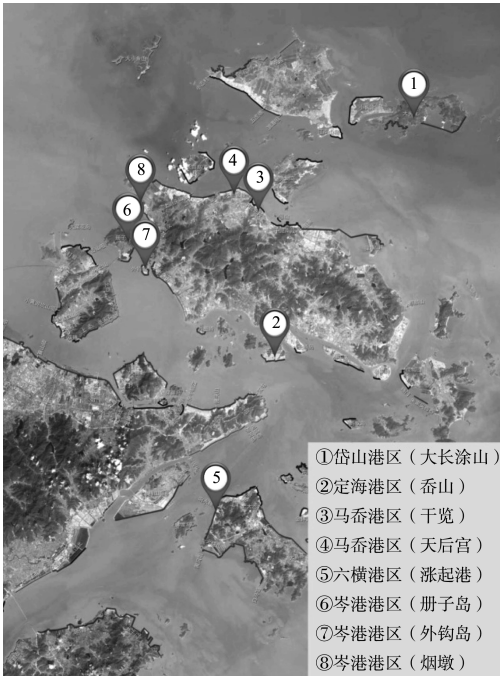


图1 各备选对象位置

1.2 溢油漂移扩散模型

溢油在海洋环境中的行为动态有着十分复杂的物理、化学和生物过程，这些过程受到众多因素影响，但在模型中需要对其进行适当简化以便开展模拟。本文采用基于 Lagrange 追踪的“油粒子”模型，油膜用大量的小油粒表示。每个油粒的运动受到风和潮流驱动。在每个时间步长，油粒首先随当地的时均流速和紊动流速而移动，表示水平方向紊动脉动的分量与随机模拟方法得到的扩散系数有关，然后再考虑风化等其它过程^[7-9]。有关溢油的迁移扩散和转化的详细计算公式见文献[7]，溢油模型技术路线见图2。

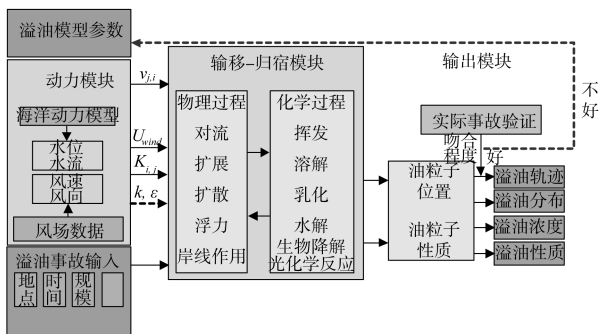


图2 溢油模型技术路线

1.3 溢油风险评估模型

为准确分析海域溢油风险水平，本研究采用基于不确定性分析的溢油风险模拟与评估系统^[10-13]，通过溢油污染指数和溢油风险指数两个综合评估指标来表征船舶溢油污染影响大小和风险高低。海域内所有地理单元的溢油风险指数即能够体现出评价海域的风险分布。海域溢油风险评估技术路线见图3。

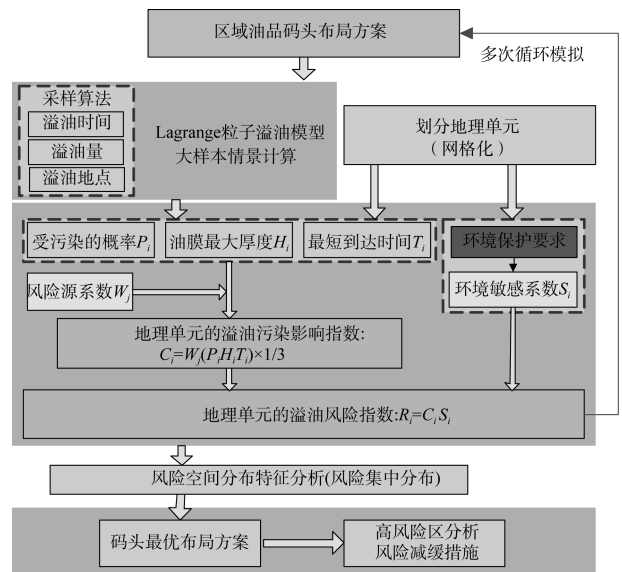


图3 区域溢油风险评估技术路线

1.3.1 参数不确定性分析

由于溢油风险事故发生的时间、溢油量和溢油点具有不确定性，需要对上述参数在可能发生的区间内进行采样，得到大样本采样数作为输入数据。通过上述3个参数的随机采样，实现输入参数的不确定性选择。结合“油粒子”模型，进行溢油事故大样本情景模拟计算，并对大样本情景模拟结果进行统计分析，实现对溢油风险的模拟，得到海域受污染的概率、油膜最大厚度和油膜到达最短时间。

1.3.2 溢油污染影响指数

溢油污染影响指数表征风险源发生溢油事故后对于海域的污染程度。在所有溢油地点都被采样，即每个风险源都参与溢油模拟的情况下，可以风险源（溢油地点）为单位依次统计影响指数，并对所有风险源相加得到地理单元的最终溢油污

染影响指数。针对每个地理单元, 引入污染概率、油膜最大厚度和最短到达时间 3 个指标, 综合得到溢油污染影响指数, 公式如下:

$$C_{ij} = \sqrt{P_{ij} \cdot H'_{ij} \cdot T'_{ij}} \quad (1)$$

$$H'_{ij} = [H_{ij} - \min(H_i)] / [\max(H_i) - \min(H_i)] \quad (2)$$

$$T'_{ij} = \begin{cases} [\max(T_i) - T_{ij}] / [\max(T_i) - \min(T_i)] & T_{ij} \neq 0 \\ 0 & T_{ij} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_{ij} 、 P_{ij} 、 H_i 分别为第 i 个风险源在第 j 个网格单元的溢油污染影响指数、污染概率、可能造成的最大油膜厚度; T_i 为第 i 个风险源溢油油膜到达第 j 个网格单元的最短时间; H'_{ij} 为标准化最大油膜厚度; T'_{ij} 为标准化最短到达时间。

1.3.3 溢油风险指数

溢油风险指数表征溢油风险对空间地理单元所造成的风险大小, 风险指数通过事故相对概率、溢油事故污染程度和海域环境敏感度综合得到。在此基础上, 可以实现对全海域风险分布空间的描述和不同区域风险水平的比较, 也可以计算每个风险源所产生的海域环境风险指数。其计算公式如下:

$$R_{ij} = p_i \cdot C_{ij} \cdot S_j \quad (4)$$

式中: R_{ij} 、 C_{ij} 为第 i 个风险源在第 j 个网格单元的溢油风险指数和溢油污染影响指数; p_i 为第 i 种风险源发生事故的相对概率; S_j 为第 j 个网格单元的环境敏感度。

将每个风险源的相应网格溢油风险指数叠加, 即可得到海域内多类型风险源下的综合溢油风险指数:

$$O_j = \sum R_{ij} \quad (5)$$

式中: O_j 为某个单元网格的综合溢油风险指数。

2 案例分析

2.1 模型数据概化

选取码头布局方案中的油品码头以及舟山海域的主要航道作为主要风险源, 具体包括 9 处油品码头和船舶流量较大的 3 条主要航道, 见图 4。

对上述 12 处溢油点进行均匀采样, 每次采样出的溢油点均作为模型输入数据, 直至 12 处风险源全部被采样。根据油品码头的靠泊能力、航道的货物实载率、船舶流量估算 12 处风险源的溢油量可在 100~3 万 t 进行随机采样, 溢油模拟时长选为 5 d。根据文献[13], “油粒子”的特征体积取为 0.02 m³, 采样次数为 3 650 次。根据舟山和宁波海域的历史事故的统计分析, 设定码头和航道发生溢油事故的相对概率比值为 1:0.812 (方案 3 和方案 4), 由于方案 1、方案 2 和方案 5 中涉及 8 处码头, 因此, 码头和航道发生溢油事故的相对概率比值为 1:0.722。

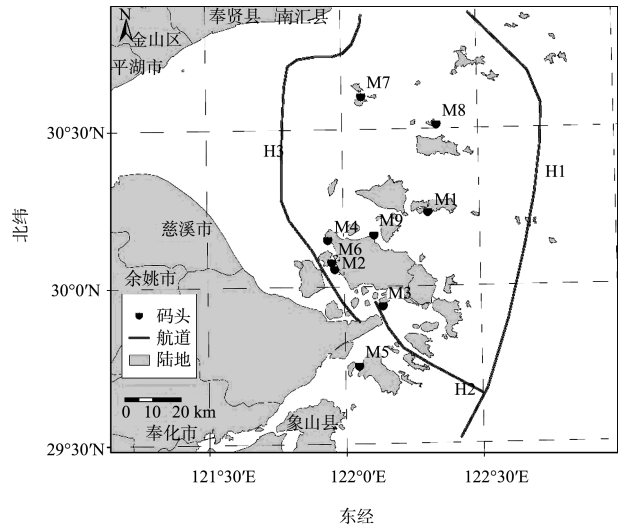


图 4 舟山海域风险源分布

2.2 环境敏感度分析

根据舟山海域敏感目标的分布情况, 得到舟山海域环境重要度分级及其赋值 (表 2)。赋值采用 2 倍等比分布, 并考虑对敏感目标的有效保护, 在各敏感目标外围设定相应的缓冲区, 范围设定为 2 km, 区域赋值与岸线相同。根据对各个敏感目标的分级赋值, 得到舟山海域环境敏感度分级, 见图 5。由图 5 可见, 舟山海域敏感度较高的区域主要分布在东侧外海以及各岛屿和大陆岸线周围; 面积较大的高敏感区包括嵊泗马鞍列岛海洋特别保护区、韭山列岛上升流生态系统自然保护区和普陀中街山列岛海洋特别保护区。

表2 环境重要度分级

分级	赋值	自然保护区	渔业区	旅游区	岸线	其他
1	1/16					其他海域
2	1/8				港口、围垦、盐田	
3	1/4	市级保护区	一般渔业区	市级	石质	
4	1/2	省级保护区	水产种质资源保护区	省级	淤泥质	
5	1	国家级保护区		国家级	砂质、湿地潮滩	

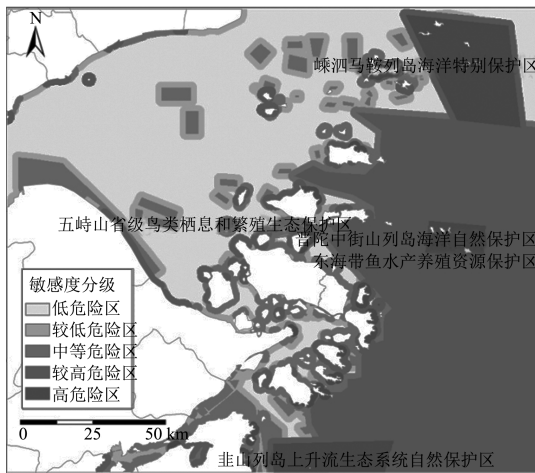


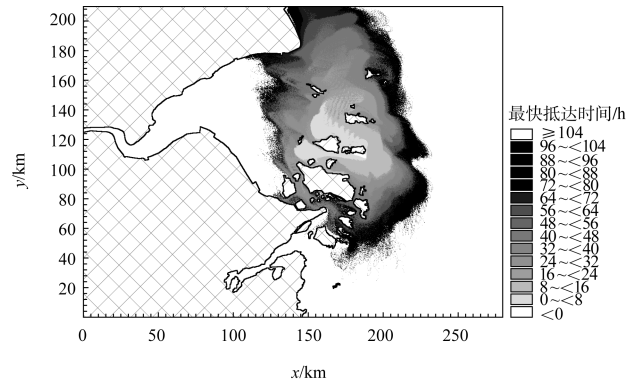
图5 舟山海域环境敏感度分级

2.3 溢油模拟和结果分析

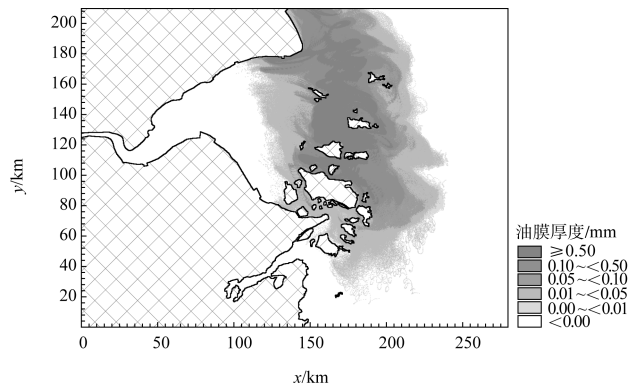
采用“油粒子”模型对12处风险源可能发生的溢油事故进行大样本情景模拟，得出海域受污染概率、油膜厚度和油膜到达最短时间，图6展示了M1码头发生溢油事故5d后的污染情况。

1) 溢油污染指数。

由污染概率、油膜厚度和最短达到时间可以计算得出溢油污染指数，对其余12个风险源的溢油污染影响指数进行计算，得到各风险源的溢油污染影响指数分布^[12]。



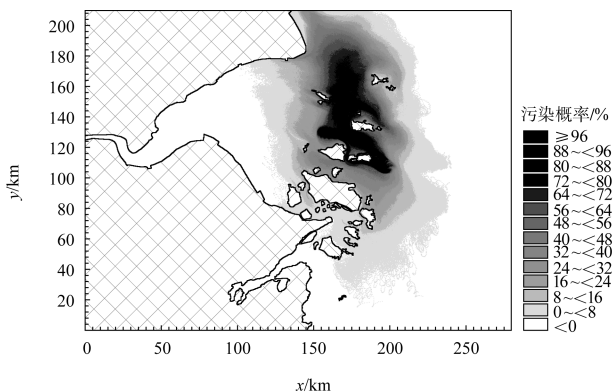
b) M1油膜到达最短时间



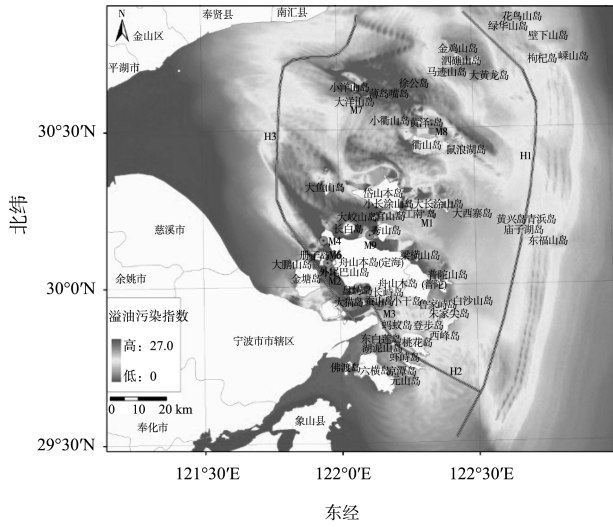
c) M1油膜最大厚度

图6 M1油品码头溢油5d后海域污染情况

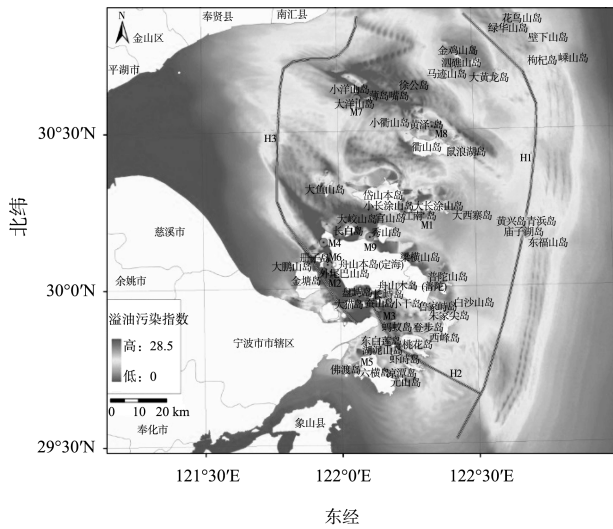
将各风险源的污染指数按照事故相对概率进行加权叠加，得到每种布局方案下的综合溢油污染指数(图7)。可见，5种方案下的综合溢油污染指数较高的区域主要分布在虾峙岛-舟山本岛-岱山岛-衢山岛之间的海域，以此为中心向东西两侧递减。为了解码头布局与高污染区的空间位置关系，对舟山海域的码头、航道溢油风险源与高污染区进行了叠图分析。方案1、2高污染区的最高污染指数为16.0，方案3、4高污染区的最高污染指数为27.7，方案5高污染区的最高污染指数为19.9。



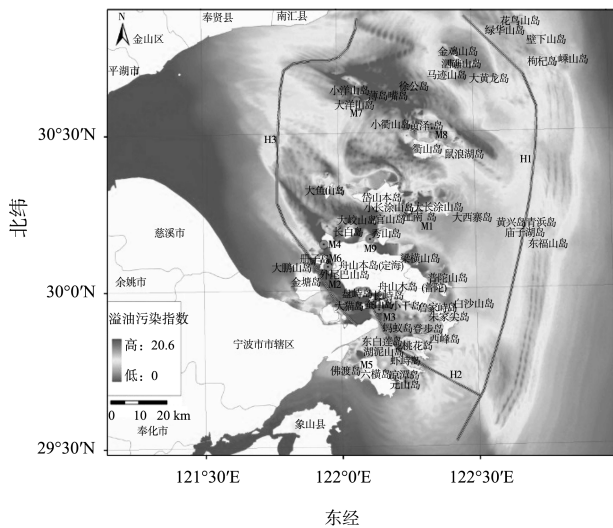
a) M1海域受污染概率



a) 方案1、2



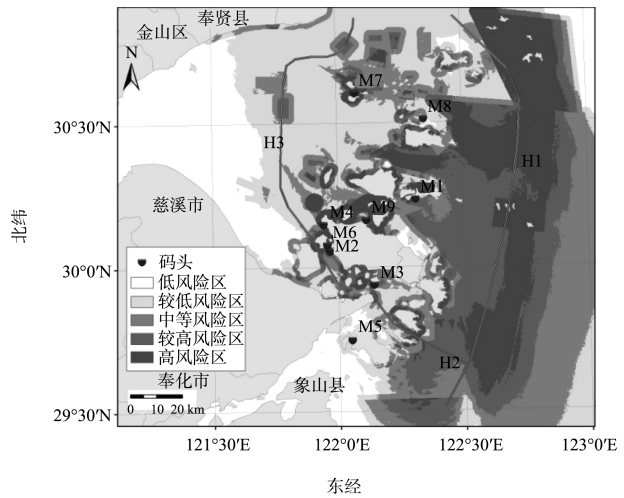
b) 方案3、4



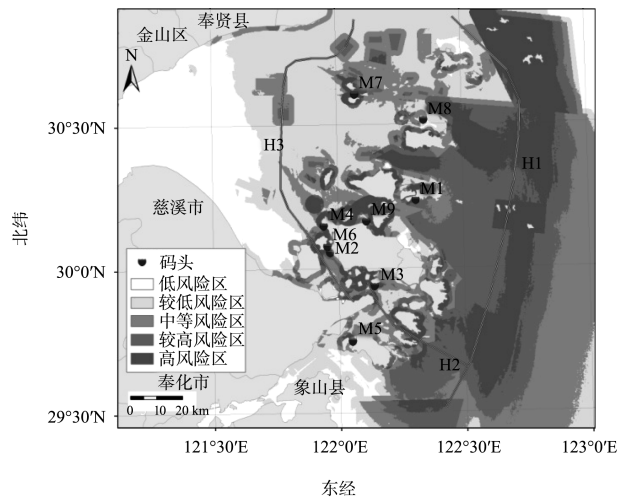
c) 方案5

2) 溢油风险指数。

综合事故发生概率、溢油污染指数和环境敏感度, 计算单个码头或航道的溢油风险指数分布。之后进行布局方案的风险指数分析, 将每种布局方案下综合溢油风险指数排序: 前 10% 为高风险区; 10%~25% 为较高风险区; 25%~50% 为中等风险区; 50%~75% 为较低风险区; 其余为低风险区, 得到 5 种布局方案下舟山海域的综合溢油风险度分级, 见图 8。综合溢油风险指数高值区的主要分布特征如下: ①主要位于从韭山列岛自然保护区至鼠浪湖岛一线, 即各大岛屿的东侧海域, 以及其它保护区和部分岛屿周围; ②综合溢油风险指数由中间向东西两侧递减, 低风险区主要位于整个海域东侧和西侧。



a) 方案1、2



b) 方案3、4

图 7 5 种油品码头布局方案下的溢油污染指数分布

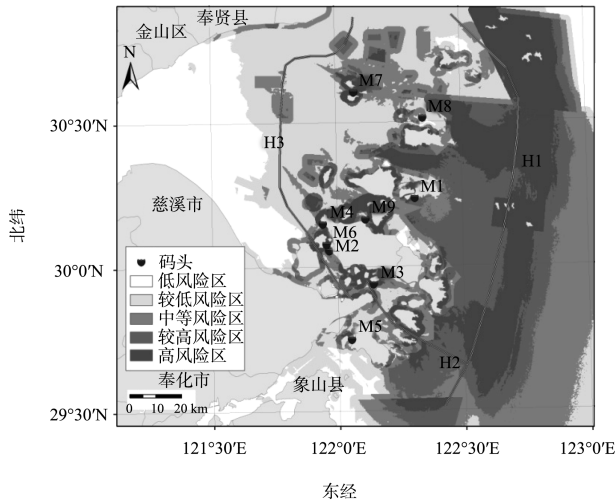


图8 各种油品码头布局方案溢油风险指数分布

使用 SPSS 软件对综合溢油风险指数进行统计分析, 由表 3 可见, 方案 3、4 的风险指数极值最高, 说明方案 3、4 可能发生的溢油事故对附近海域造成的风险最为严重。方案 1、2 的偏度和峰度较高, 均值最低, 表明方案 1、2 的风险范围更为集中, 有利于风险的集中管控, 而且总体风险程度相对最低。因此, 无论从风险集中分布或风险集中管控的角度, 还是从总体风险程度来考量, 本文推荐方案 1 (方案 1 相对于方案 2, 在满足油品吞吐量接卸的规模需求下, 码头数量的内部分配更加合理)。

表 3 综合溢油风险指数的数量分布特征

方案	最大值	均值	标准差	偏度	峰度
方案 1、2	15.999	0.544	0.608	2.908	22.678
方案 3、4	16.170	0.615	0.665	2.576	17.184
方案 5	14.918	0.550	0.586	2.433	16.866

3) 高风险区识别。

针对方案 1 的综合溢油风险指数分布, 找出风险指数高值区。筛选面积大于 20 km² 的高风险区, 根据地理位置进行归并和拆分, 得到 10 个需要重点管控的高风险区, 见图 9 和表 4。

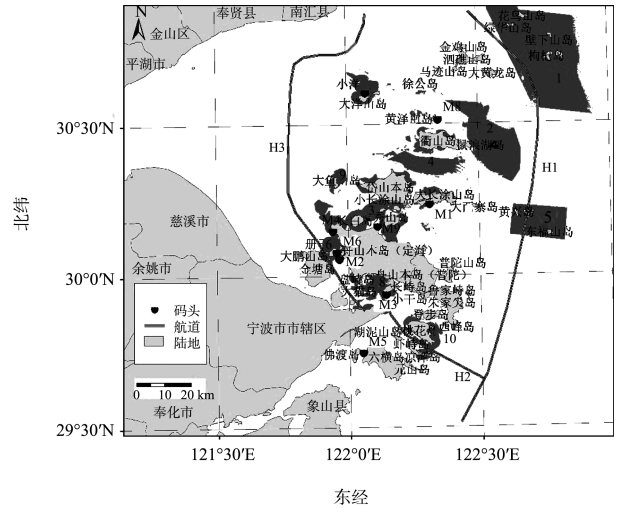


图 9 10 个重点管控的高风险区分布

表 4 10 个重点管控的高风险区情况

位置	面积/km ²	风险指数平均值
绿华山岛—嵎泗列岛附近	905.24	1.83
鼠浪湖岛东侧	389.12	1.34
岱山岛—秀山岛—长白山岛之间	378.52	1.91
衢山岛南侧	252.88	1.43
中街山列岛附近	228.24	1.87
环册子岛	137.76	2.40
大小洋山岛附近	83.96	2.46
宁波-舟山本岛之间	75.36	1.40
环大鱼山岛	73.80	1.43
虾峙岛附近	23.24	1.63

3 结语

1) 本文综合溢油轨迹预报模型和不确定性分析思想, 构建了一整套基于不确定性条件下区域油品码头空间布局的溢油风险模拟与评估技术方法, 该方法由基于模糊综合评价的油品码头选址模型、基于不确定性分析的拉格朗日溢油“粒子”模型、基于概率分布的溢油风险评估方法 3 部分构成。可系统分析沿海区域油品码头空间布局及其产生的海域溢油风险的空间分布规律, 能够满足我国当前近海高强度开发形势下战略环评和环境风险评估的技术需求。

2) 采用消耗水平推算法、时间序列分析法和回归分析法, 预测 2020 年和 2030 年舟山港原油吞

吐量将分别达到 4 590 万、7 050 万 t; 成品油吞吐量将分别达到 5 000 万、9 000 万 t。应用基于模糊综合评价法的油品码头选址模型, 得出未来舟山海域适合进行油品码头开发的 5 处备选位置为岱山港区(大长涂山)、定海港区(岙山)、马岙港区(干览、天后宫)、六横港区(涨起港)、岑港港区(册子岛)。在满足未来舟山港域油品吞吐量接卸的码头规模需求下, 预测出 5 种油品码头空间布局方案。

3) 使用本文建立的方法对舟山海域码头布局方案进行分析, 得出 5 种油品码头布局方案。综合考虑各布局方案下舟山海域的石油码头、航道等溢油风险因素, 结合海域环境敏感区分布情况, 根据风险集中分布及风险总值最低的原则, 从风险集中管控的角度, 推荐布局方案 1。

4) 方案 1 下, 全海域平均溢油污染指数为 1.83, 最高溢油污染指数为 27.03, 出现在册子岛与舟山本岛之间; 全海域平均风险指数为 0.54, 最高风险指数 16.00, 出现在绿化山岛—嵎泗列岛附近海域。高风险区总体围绕主要溢油风险源分布, 但受岛屿和海洋动力等因素影响, 呈显著的各向异性特征, 其中面积大于 20 km² 的高风险连续分布区共计 10 处, 总面积 2 607 km², 主要位于嵎泗马鞍列岛国家海洋特别保护区—鼠浪湖岛—册子岛连线两侧, 10 处高风险海域的平均风险指数为 1.76。

5) 根据油品码头布局方案 1 的 10 个高风险区分布情况, 应从船舶管理、交通管理和人员管理等方面采取强制性措施, 以降低风险。

参考文献:

- [1] 马甲益. 舟山港船舶溢油事故风险评估研究[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2012 (2): 182-187.
- [2] 麻亚东. 宁波-舟山港油轮溢油环境风险评估研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [3] 臧士文. 基于 FVCOM 模型的二维海上溢油数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [4] 何浩冬. 基于 ECDIS 的舟山港溢油信息系统研制[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2009 (2): 15-18.
- [5] 娄厦, 刘曙光. 溢油模型理论及研究综述[J]. 环境科学与管理, 2008(10): 33-37.
- [6] 俞济清, 魏敏, 黄立文. 中国舟山港溢油模拟信息系统研制[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2002(4): 463-465.
- [7] 汪守东. 基于 Lagrange 追踪的海上溢油预报模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [8] 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: 1 556-1 571.
- [9] Wang S D, Shen Y M, Guo Y K, et al. Three-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas[J]. Ocean Engineering, 2008, 35: 503-510.
- [10] Xu H L, Chen J N, Wang S D, et al. Oil spill forecast model based on uncertainty analysis: A case study of Dalian oil spill[J]. Ocean Engineering, 2012, 54: 206-212.
- [11] 交通运输部规划研究院. 国家重大海上溢油应急能力建设规划研究[R]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2015.
- [12] 交通运输部规划研究院. 基于不确定性分析的区域油品码头空间布局溢油风险评估技术研究报告[R]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2015.
- [13] 徐洪磊. 基于不确定性分析的海域溢油风险评估研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。