

张利国,程金香,韩兆兴,等.2014—2020年全国沿海溢油风险情势变化[J].环境工程技术学报,2024,14(2):692-698.

ZHANG L G,CHENG J X,HAN Z X,et al.Changes of the coastal oil spill risk regime in China from 2014 to 2020[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(2): 692-698.

2014—2020年全国沿海溢油风险情势变化

张利国¹,程金香^{1*},韩兆兴^{1,2},郑超蕙¹,徐洪磊¹,李悦¹

1.交通运输部规划研究院

2.清华大学

摘要 为研究大规模海上油品运输溢油风险的时空分布特征,采用地理空间分析、大数据分析、数理统计等方法,建立海上溢油风险空间分析模型,应用全国沿海船舶 AIS 数据、溢油历史事故、生态环境敏感目标等数据分析 2014—2020 年溢油风险情势的变化情况。结果表明:与 2014 年相比,2020 年溢油事故风险指数均值、最大值分别增加 27.8% 和 26.8%,溢油事故风险指数变化为-0.46~0.40,其中风险增加的海域主要分布在南北大通道、成山头、长江口、台湾海峡、珠江口海域,减少区域主要分布在近岸海域。全国沿海溢油事故高风险集中区主要分布在渤海—北黄海、长江口、台湾海峡、珠江口等海域;相较于 2014 年,2020 年高风险集中区内有局部调整变化,但是高风险集中区的分布格局未发生变化。研究成果可为溢油风险管控和应急装备配备提供支撑。

关键词 全国沿海;溢油风险;空间分析;风险指数;情势变化

中图分类号:X820.4 文章编号:1674-991X(2024)02-0692-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20230496

Changes of the coastal oil spill risk regime in China from 2014 to 2020

ZHANG Liguo¹, CHENG Jinxiang^{1*}, HAN Zhaoxing^{1,2}, ZHENG Chaohui¹, XU Honglei¹, LI Yue¹

1.Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport

2.Tsinghua University

Abstract In order to study the spatial and temporal distribution pattern of oil spill risk of large-scale oil transportation in marine, the spatial analysis model of marine oil spill risk was established by applying the methods of geospatial analysis, big data analysis and mathematical statistics. The changes of oil spill risk regime from 2014 to 2020 were analyzed based on the national coastal ship AIS data, historical oil spill accident data, and ecological environment sensitive area data. The results showed that compared with 2014, the average value and the maximum value of oil spill accident risk index in 2020 increased by about 27.8% and 26.8%, respectively. The change of oil spill accident risk index was about -0.46-0.40. The oil spill accident risk increasing areas were mainly in the north-south channel, Chengshantou, the mouth of the Yangtze River, Taiwan Strait, and the Pearl River estuary sea area. The oil spill accident risk decreasing areas were mainly distributed in the near-shore sea area. The high-risk concentration areas of coastal oil spill accident risk were mainly located in the Bohai Sea - North Yellow Sea, the mouth of the Yangtze River, Taiwan Strait and the Pearl River estuary sea area. There were localized adjustments within the high-risk concentration areas in 2020 compared with 2014, but the distribution pattern of high-risk concentration areas remained unchanged. The research results could provide support for risk control and emergency equipment.

Key words coastal area in China; oil spill risk; spatial analysis; risk index; regime changes

溢油是航运发展中最为典型的环境污染事故^[1-2],近年来,我国沿海陆续发生了 2010 年大连“7·16”溢油事故、2013 年东海“3·19”事故、2013 年青岛“11·22”事故、2018 年“桑吉号”事故、2021 年青岛

“交响乐号”事故等一系列重大溢油事故,对海洋环境造成了严重的生态损害。据统计^[3-4],2020 年中国原油进口 5.4 亿 t,相较于 2014 年增长 74.8%,其中 80% 以上通过海运实现,以 10 万 t 级以上远洋油轮

收稿日期:2023-07-06

基金项目:交通运输战略规划政策项目(062217-019)

作者简介:张利国(1988—),男,博士,主要从事溢油风险防控研究,zhanglg@tpri.org.cn

* 责任作者:程金香(1978—),女,正高级工程师,主要从事溢油风险防控研究,chengjx@tpri.org.cn

运输为主,大规模的海上石油运输使得海上溢油风险居高不下。

溢油风险是指溢油事故对生态环境造成损害的可能性和危害程度,溢油风险分析是基于溢油风险源识别,明确溢油风险事故概率与影响后果,并提出风险应对措施的过程^[5]。已有研究主要聚焦于溢油事故概率分析和溢油风险评价方法。在溢油事故概率分析上,Anderson 等^[6-8]利用贝叶斯等方法对长时段溢油历史数据进行了分析,建立了历史事故与船舶流量、油品运量等的定量关系。竺诗忍等^[9-10]采用数理统计方法推导了船舶事故概率的离散二项式分布公式,并采用条件概率法计算海域溢油风险概率。基于概率论方法的事事故概率计算主要依据船舶流量,无法体现区域特点。在溢油风险评价上,通常用溢油事故概率指数及事故影响指数的乘积来表示溢油风险指数,并与风险准则进行比较,明确风险等级^[11]。岳汉秋等^[12-14]考虑气象水文、生态环境、应急清污、风险源、溢油污染程度等因素,结合模糊综合评价、多情景溢油模拟、层次分析等方法建立了海域风险评价指标体系,对典型海域开展了多级风险等级划分。汪守东等^[15]结合空间分析和多情景溢油模拟建立了一种区域溢油风险评估方法,能够描述不同油码头布局方案的溢油风险水平。Moe 等^[16-17]将 GIS 空间分析技术应用于溢油风险等级区划划分,分析了特定海域溢油风险空间分布特征。基于 GIS 分析技术的溢油风险评价可以绘制溢油风险等级区划图,实现溢油风险空间分布的可视化。但在具体应用场景上,现有研究主要聚焦于港口、码头水域,在采用的数据上,多为港口规划信息、进出港船舶统计数据、船舶遥感识别数据^[17]等,在溢油风险评估中应用长时段、大空间范围海量船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)数据的较少,难以精细化体现溢油风险在海区、全国沿海等不同空间尺度上的分布规律与时间变化。

为探究海区、全国沿海等大尺度海域上溢油风险精细化的空间分布格局和时间变化情况,采用大数据分析、数理统计、地理空间分析等方法,提出了基于地理空间的船舶溢油事故概率计算方法和风险定量分析模型,可描述溢油风险在时间和空间上的累积和差异,揭示大尺度海域溢油风险时空分布及演变特征。本研究基于 2014 年和 2020 年全国沿海船舶 AIS 数据、溢油历史事故数据、生态环境敏感目标分布情况等分析全国沿海溢油风险情势变化情况,提出溢油风险防控的高风险海域,以期为行业主管部门制定溢油风险分区管控策略提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究范围与数据来源

以我国内海、领海、毗连区、专属经济区、大陆架以及我国管辖的其他海域作为研究范围,研究对象主要为海域运输船舶溢油风险。

2014 年和 2020 年全国沿海船舶 AIS 数据、1973—2020 年船舶溢油历史事故数据来源于《国家重大海上溢油应急能力建设规划(2015—2020 年)》^[18]及《国家重大海上溢油应急能力发展规划(2021—2035 年)》^[19]编制期间由海事部门提供的数据,本文不涉及原始数据展示,只显示最终风险分析结果。

生态环境敏感目标数据主要通过收集沿海各省(市)生态保护红线、海洋功能区划中的各类保护区数据,包括自然保护区、海洋保护区、重要湿地、水产种质资源保护区、鱼类“三场”和洄游通道等。

1.2 海上溢油风险空间分析模型

建立了基于地理空间单元的船舶溢油风险定量分析模型,对风险评估水域进行空间单元划分,将船舶流量信息、溢油历史事故、生态环境敏感目标等数据在空间单元上进行统计分析,确定各空间单元上的船舶溢油事故规模、事故概率、海域敏感程度等信息,设计表征溢油污染程度和分布特征的 2 个指数:1)溢油事故风险指数,体现区域溢油事故规模和发生概率,表征溢油风险的时间和空间分布特征;2)溢油污染风险指数,在溢油事故风险指数的基础上叠加海域敏感程度,表征溢油污染风险的时空分布特征。具体步骤如图 1 所示。

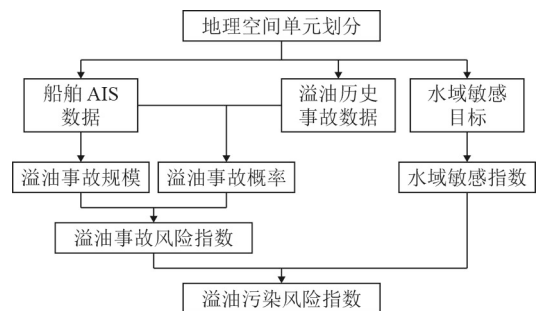


图 1 海上溢油风险分析模型技术路线

Fig.1 Technical route of marine oil spill risk analysis model

1.2.1 地理空间单元划分

基于 GIS 地理空间分析技术,综合考虑风险评估范围中港口空间布局、航道锚地等通航水域分布情况、海事机构管辖范围等要素的空间差异,将风险评估区域划分为若干地理空间单元,作为对风险分析基础数据进行统计分析的基准单元。对全国沿海海域开展溢油风险评估时,可设定地理空间单元的

精度为 28 km×28 km。

1.2.2 船舶 AIS 数据分析

将 AIS 数据^[20]应用到区域尺度溢油风险分析中。采用大数据分析技术对船舶 AIS 数据进行解译、匹配、分析^[21], 获得每个地理空间单元上的油船和非油船的流量、船舶尺度、船舶吨级等信息, 作为下一步求解每个空间单元上船舶溢油事故概率和事故规模的基础数据。

1.2.3 溢油事故规模分析

根据船舶 AIS 流量数据, 对任一地理空间单元, 按照该单元航行船舶中载油量最大船型的 1 个货油边舱或燃料油边舱的容积确定单元可能最大水上溢油事故规模(E)^[11]。

1.2.4 溢油事故概率分析

基于溢油历史事故和船舶流量的空间分布情况, 根据概率论方法求解各地理空间单元上的溢油事故发生概率。根据溢油历史事故统计分析, 船舶航行时发生溢油事故的概率很小, 是稀少事件, 通常认为海上航行船舶溢油事故概率服从离散二项概率分布^[9]。对于研究海域通过 n 艘次船舶, 发生 $k(k=0,1,\dots,n)$ 次船舶溢油事故的概率为:

$$P_n(k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \quad (1)$$

式中: $P_n(k)$ 为在 n 次独立重复船舶航行中发生 k 次船舶溢油事故的概率; p 为一次独立船舶航行中发生溢油事故的概率, 即船舶溢油事故基础概率值。

考虑溢油历史事故的影响, 认为每个空间单元发生溢油事故的可能性均受到全海域其他空间单元上溢油事故的影响, 则全海域溢油事故发生的概率可以根据历史事故发生的位置及其频次计算得到^[18-19]。根据上述假定认为每个空间单元的溢油事故概率均受到海域其他空间单元的影响, 且受影响程度与距离成反比关系。设定任一空间单元 j 上某一时间段内自身发生的溢油事故数为 N_j , 考虑周边影响的空间单元 j 上的溢油事故总数 N'_j 可用下式表示:

$$N'_j = N_j + \frac{N_1}{2} + \frac{N_2}{4} + \dots + \frac{N_m}{2m} \quad (2)$$

式中: $N_1 \sim N_m$ 分别为空间单元 j 外第 1~ m 圈单元上的溢油事故数目; m 为最外层单元。

对于空间单元 j , 其溢油事故基础概率 p_j 可用下式表示:

$$p_j = \frac{N'_j}{Q_{Aj}} \quad (3)$$

式中 Q_{Aj} 为与溢油历史事故同一统计时段内空间单元 j 上的船舶流量。

综上, 对于任一空间单元 j , 其发生船舶溢油事

故的概率 P_j 为:

$$P_j = 1 - (1 - p_j)^{Q_j} \quad (4)$$

式中 Q_j 为研究年份空间单元 j 上的船舶流量。

1.2.5 溢油事故风险分析

采用溢油事故风险指数(H)反映空间单元发生溢油事故的风险高低^[18-19]。根据风险的基本定义, 将溢油事故规模(E)与事故概率指数(P)相乘即得到空间单元的 H 。

1.2.6 溢油污染风险分析

综合考虑生态环境敏感目标空间分布、敏感目标在生态系统中的作用及受到溢油灾害时的易损性, 确定生态环境敏感目标的敏感指数(M)。参考《水上溢油环境风险评估技术导则》^[11] 和《国家重大海上溢油应急能力建设规划(2015—2020 年)》^[18] 对不同类型生态环境敏感目标的敏感指数进行赋值, 结果如表 1 所示。

表 1 生态环境敏感目标敏感指数赋值
Table 1 Ecological environment sensitive area sensitivity index

环境敏感资源	赋值
自然保护区	5
海洋保护区	4
重要湿地	3
水产种质资源保护区	2
鱼类“三场一通道”	1
其他水域	0.1

在溢油事故风险指数的基础上, 综合考虑生态环境敏感目标的敏感程度, 将各空间单元的溢油事故风险指数和生态环境敏感指数相叠加, 得出溢油污染风险指数(C_p)。

1.2.7 溢油风险等级区划划分

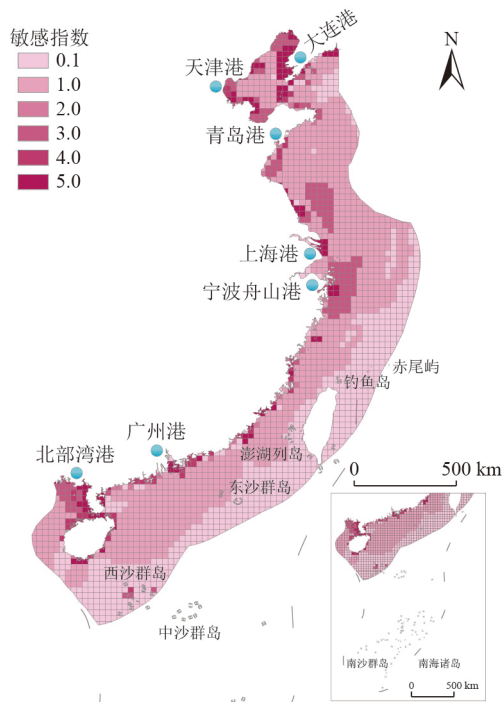
为量化识别溢油风险高低, 可将 H 或者 C_p 按大小进行排序, 参考《国家重大海上溢油应急能力建设规划(2015—2020 年)》^[18] 对风险等级区划的划定, 前 3% 定义为高风险集中区, 3%~10% 定义为高风险区, 10%~25% 定义为较高风险区, 25%~50% 定义为中风险区, 50%~75% 定义为较低风险区, 其余定义为低风险区。确定溢油风险等级区划, 可为风险针对性管控提供决策支撑。

2 全国沿海溢油风险情势

2.1 全国沿海 2020 年溢油风险情势

基于全国沿海 2020 年船舶 AIS 数据、1973—2020 年船舶溢油历史事故数据、沿海生态环境敏感目标数据, 采用海上溢油风险空间分析模型求解

2020 年全国沿海溢油污染风险指数分布格局, 并进行溢油污染风险等级区划划分。其中, 溢油污染风险指数为 5.2~83.7、2.0~5.2、0.14~2.00、0.006~0.140、0.000 4~0.006 及 0.000 06~0.000 4 的区域分别对应高风险集中区、高风险区、较高风险区、中风险区、较低风险区以及低风险区。全国沿海生态环境敏感指数、2020 年溢油污染风险指数及等级区划分布如图 2、图 3 所示。



注: 地图底图为 GS(2023)2763 号。全文同。

图 2 生态环境敏感指数

Fig.2 Sensitivity index of sensitive area

总体来说, 2020 年全国沿海溢油污染风险指数分布呈现如下特点: 1) 溢油污染风险指数由航运强度、历史事故、生态环境敏感目标分布情况等综合确定, 与生态环境敏感指数有较大相关性, 体现了海域的易损性; 2) 溢油污染风险指数由近岸向远海逐渐递减, 整体上呈现北高南低的态势; 3) 高风险集中区域主要分布在渤海—北黄海海域、长江口海域、台湾海峡海域、珠江口海域等, 需要重点加强环境风险防控。

2.2 全国沿海溢油风险情势变化

基于 2014 年、2020 年全国沿海船舶 AIS 数据及 1973 年以来船舶溢油历史事故数据, 根据海上溢油风险空间分析模型分别计算了 2014 年及 2020 年全国沿海溢油事故风险指数, 分析 2014—2020 年全国沿海溢油风险情势变化情况, 与同时段溢油事故发生情况、油品运输量增长情况等数据做验证分析,

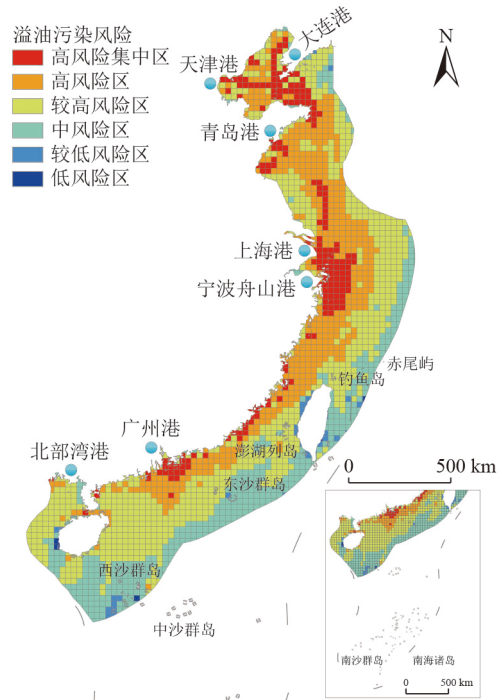


图 3 2020 年污染风险指数及等级区划

Fig.3 Oil spill pollution risk index and grade zoning in 2020

以支撑海上溢油风险空间分析模型, 并为风险管理提供依据。2014 年、2020 年船舶溢油事故风险指数分布情况分别见图 4、图 5, 2014—2020 年溢油事故风险指数变化情况、高风险集中区变化情况如图 6、图 7 所示。

由表 2 可见, 2014 年全国沿海溢油事故风险指数平均值为 0.018, 最大值为 1.53; 2020 年全国沿海溢油事故风险指数平均值为 0.023, 最大值为 1.94。2014—2020 年溢油事故风险指数均值、最大值分别增长 27.8% 和 26.8%, 这与同期中国原油进口量的增长趋势一致^[3]。根据统计^[22-23], 2014 年沿海港口完成货物吞吐量为 80.3 亿 t, 海船平均净载质量约为 10 590 t, 2020 年沿海港口完成货物吞吐量为 94.8 亿 t, 海船平均净载质量约为 11 300 t, 海船平均净载质量增长 6.7%。估算 2014—2020 年全国沿海船舶艘次增长 11%。2014—2020 年全国沿海船舶平均吨级及船舶流量均有所增长, 与溢油事故风险指数的增长趋势相吻合。

2014—2020 年全国沿海溢油事故风险指数变化为-0.46~0.40, 其中溢油风险增加的海域主要分布在南北大通道、成山头、长江口、台湾海峡、珠江口海域, 减少区域主要分布在近岸海域。海域溢油事故风险指数增加的原因在于船舶平均吨级和船舶流量总体呈增加趋势, 上述局部重点海域是大连港、天津港、青岛港、上海港、宁波舟山港、广州港等沿海主

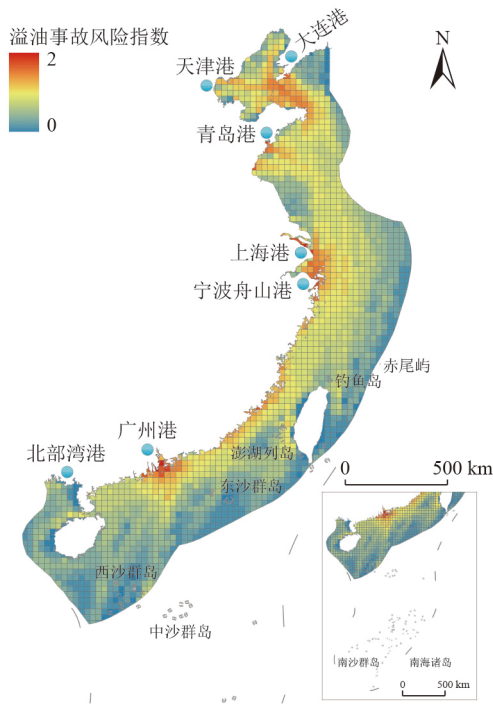


图 4 2014 年溢油事故风险情况
Fig.4 Oil spill accident risk in 2014

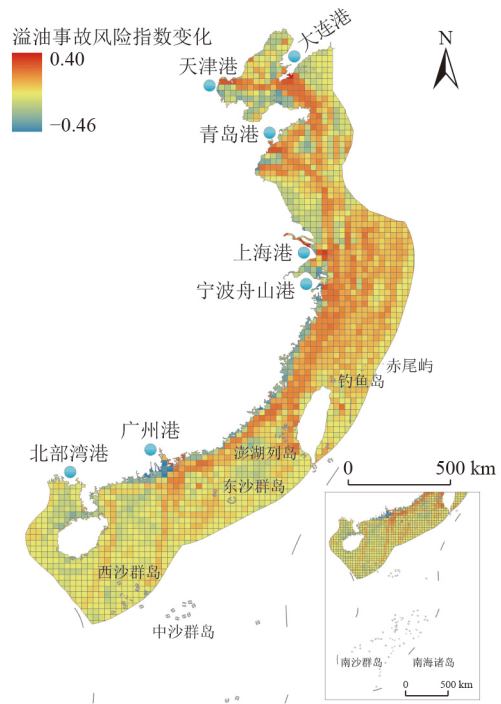


图 6 2014 年和 2020 年溢油事故风险指数变化
Fig.6 Changes of oil spill accident risk of 2014 and 2020

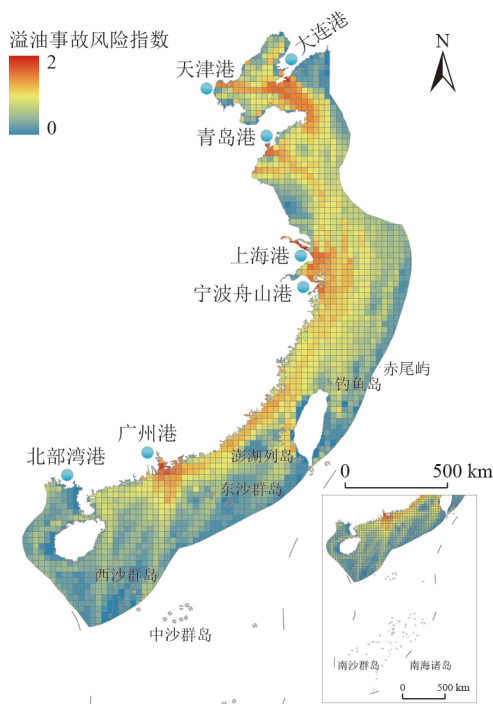


图 5 2020 年溢油事故风险情况
Fig.5 Oil spill accident risk in 2020

险情势的变化情况,可在应急设备库建设过程中加强配备大中型、深远海应急装备。

如图 7 所示,全国沿海溢油事故高风险集中区主要分布在渤海—北黄海、长江口、台湾海峡、珠江口等海域,2014—2020 年高风险集中区内有局部调整变化,但是高风险集中区的分布格局未发生变

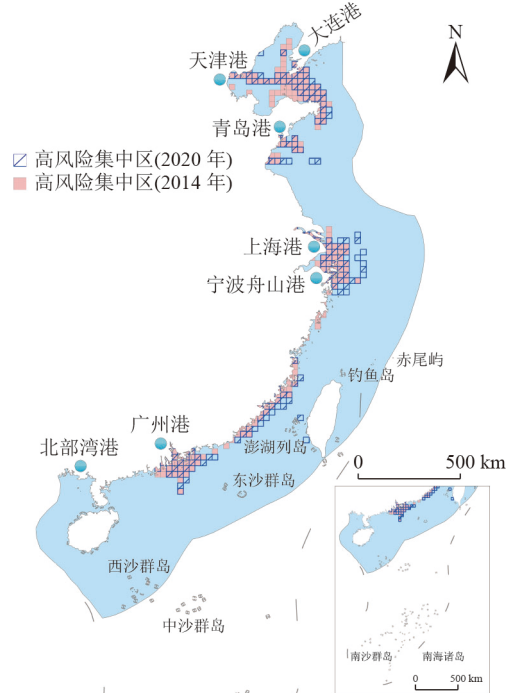


图 7 2014 年和 2020 年高风险集中区变化
Fig.7 Changes of high-risk concentration area of 2014 and 2020

要港口进出港航线,船舶通航密度大。近岸海域溢油事故风险呈减小趋势,这与近年来船舶大型化、港口离岸式、深水化的发展趋势一致^[24]。根据《国家重大海上溢油应急能力建设规划(2015—2020 年)》^[18],在全国沿海 44 个地区建成溢油应急设备库 191 座,加强海上溢油应急清除能力。考虑全国沿海溢油风

表2 2014—2020年溢油事故风险指数变化情况
Table 2 Changes of oil spill accident risk index from 2014 to 2020

指标	2014年	2020年	变化情况/%
平均值	0.018	0.023	27.8
最大值	1.53	1.94	26.8

化。具体来说,在渤海—北黄海海域,成山头、老铁山水道及大连港、天津港等进港航道海域高风险集中区变化不大,潍坊港、烟台港等进港航道海域高风险集中区有所调减,青岛港进港航道海域高风险集中区有所增加;在长江口、台湾海峡、珠江口海域,高风险集中区呈向外海拓展的趋势。如表3所示,2014年高风险集中区海域面积为14.43万km²,2020年高风险集中区海域面积为14.27万km²,变化不大;相较于2014年,2020年高风险集中区溢油事故风险指数总和为46.2,各高风险集中区海域溢油事故风险指数总和均有所增加,合计增加8.9%,这与全国沿海溢油事故风险指数的变化趋势也是一致的。2014—2020年发生10t以上溢油事故9起^[19],主要分布在珠江口、长江口、北黄海海域,其中溢油量较大的2018年“桑吉号”事故、2021年青岛朝连岛东南海域“交响乐号”事故发生在本文提出的溢油高风险集中区。针对溢油高风险集中区,建议强化应急清除能力和应急反应能力建设,确保高风险集中区周边辖区应急组织指挥体系有效运行,应急清除控制能力达到10000t^[19],卫星、雷达、无人机等多种监视装备全覆盖高风险集中区,实现高风险集中区监视监测及时准确、应急处置快速高效。

综上所述,本文建立的溢油风险空间分析模型基于船舶AIS大数据、溢油历史事故数据,获得了溢油事故概率空间分布,能够客观反映溢油风险的时空分布特征,研究时段溢油风险情势与港口航运发展趋势一致,大型溢油历史事故发生于溢油事故高

表3 2014—2020年高风险集中区溢油事故风险指数变化情况

Table 3 Changes of oil spill accident risk index from 2014 to 2020 in high-risk concentration area

高风险集中区	2014年		2020年		风险指数变化/%
	面积/万km ²	风险指数总和	面积/万km ²	风险指数总和	
渤海—北黄海	6.43	17.16	5.57	18.22	6.2
长江口	4.08	13.81	4.08	15.22	10.2
台湾海峡	1.88	4.24	2.20	4.83	14.0
珠江口	2.04	7.23	2.43	7.93	9.7
合计	14.43	42.43	14.27	46.20	8.9

风险集中区,与模型得出的溢油风险情势变化情况吻合,划定的风险等级区划可以为风险的实际管理提供可靠支撑。

3 结论

(1)建立了一套海上溢油风险空间分析模型,设计了溢油事故风险指数和溢油污染风险指数2个指标来表征溢油风险在时间和空间上的分布情况,划定了高风险集中区、高风险区、较高风险区、中风险区、较低风险区、低风险区,实现溢油风险等级区划划分,为风险管理提供决策支撑。

(2)2020年溢油污染风险指数分布呈现如下特点:溢油污染风险指数与生态环境敏感指数有较大相关性,体现了海域的易损性;溢油污染风险指数由近岸向远海逐渐递减,整体上呈现北高南低的态势;高风险集中区域主要分布在渤海—北黄海、长江口、台湾海峡、珠江口海域等,需要重点加强环境风险防控。

(3)2014—2020年溢油事故风险指数变化呈现如下特点:与2014年相比,2020年溢油事故风险指数均值和最大值分别增长27.8%和26.8%,与同期中国原油进口量增长、港口航运发展趋势一致;全国沿海溢油事故风险指数变化为-0.46~0.40,其中溢油风险增加的海域主要分布在南北大通道、成山头、长江口、台湾海峡、珠江口海域,减少区域主要分布在近岸海域。全国沿海溢油事故高风险集中区主要分布在渤海—北黄海、长江口、台湾海峡、珠江口等海域,高风险集中区内有局部调整变化,但是高风险集中区的分布格局未发生变化。考虑全国沿海溢油风险情势的变化情况,可在应急设备库建设过程中加强配备大中型、深远海应急装备。

参考文献

- [1] 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.
XIONG S G, LI H X, DING X, et al. Characteristics and prevention countermeasures of marine oil spill accidents from ship in China[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(6): 875-879.
- [2] ÇAKIR E, SEVGILI C, FISKIN R. An analysis of severity of oil spill caused by vessel accidents[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 90: 102662.
- [3] 海关总署. 2020年12月进口主要商品量值表(人民币值)[EB/OL]. (2021-01-18)[2023-09-03]. <http://gdfs.customs.gov.cn/customs/302249/zfxgk/2799825/302274/302277/302276/3516038/index.html>.
- [4] 李蓉茜,陈海萍.画好能源保供同心圆[N].中国水运报,2021-

- 11-14(4).
- [5] 程金香, 徐洪磊. 水上溢油风险分析与应急能力规划理论和实践 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.
- [6] ANDERSON C M, LABELLE R P. Estimated occurrence rates for analysis of accidental oil spills on the US outer continental shelf[J]. *Oil and Chemical Pollution*, 1990, 6(1): 21-35.
- [7] MCMAHON ANDERSON C, LABELLE R P. Comparative occurrence rates for offshore oil spills[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1994, 1(2): 131-141.
- [8] ANDERSON C M, LABELLE R P. Update of comparative occurrence rates for offshore oil spills[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2000, 6(5/6): 303-321.
- [9] 竺诗忍, 张继萍. 舟山海域突发性溢油环境风险评价 [J]. *海洋环境科学*, 1997, 16(1): 53-59.
- ZHU S R, ZHANG J P. Risk assessment of oil spilled in Zhoushan Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 1997, 16(1): 53-59.
- [10] 胡二邦. 环境风险评价实用技术、方法和案例 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [11] 交通运输部. 水上溢油环境风险评估技术导则: JT/T 1143—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [12] 岳汉秋, 甘鑫平, 牟乃夏, 等. 海上船舶溢油事故模糊评估与决策分析 [J]. *环境工程技术学报*, 2015, 9(8): 3780-3784.
- YUE H Q, GAN X P, MU N X, et al. Fuzzy evaluation and decision-making analysis of oil spills from ships[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(8): 3780-3784.
- [13] 张晓霞, 郑丙辉, 汪星, 等. 辽东湾近岸海域石化产业环境风险综合评价 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 275-283.
- ZHANG X X, ZHENG B H, WANG X, et al. Comprehensive environmental risk assessment of petrochemical industry in Liaodong Bay coastal waters[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 275-283.
- [14] 陈昊, 卢士强, 邵一平, 等. 基于敏感目标被访问概率法的长江口水域溢油风险区划研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(1): 47-53.
- CHEN H, LU S Q, SHAO Y P, et al. Study on oil spill risk zoning in the Yangtze River Estuary based on the visited probability method of sensitive targets[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(1): 47-53.
- [15] 汪守东, 徐洪磊, 程金香, 等. 舟山海域油品码头布局与溢油风险评估 [J]. *水运工程*, 2016(8): 26-33.
- WANG S D, XU H L, CHENG J X, et al. Oil dock layout at Zhoushan sea area & oil spilling risk assessment[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2016(8): 26-33.
- [16] MOE K A, SKEIE G M, BRUDE O W, et al. The svalbard intertidal zone: a concept for the use of GIS in applied oil sensitivity, vulnerability and impact analyses[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2000, 6(2): 187-206.
- [17] 邴磊. 基于遥感和 GIS 的海上溢油风险识别及区划研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [18] 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 (2015—2020 年) [A]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2015.
- [19] 交通运输部规划研究院. 国家重大海上溢油应急能力发展规划 (2021—2035 年) [A]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2022.
- [20] 田璐, 张敖木翰, 张翼, 等. 船舶 AIS 大数据资源管理及分析应用架构设计 [J]. *交通运输研究*, 2019, 5(5): 31-40.
- TIAN L, ZHANG A M H, ZHANG Y, et al. Ship AIS big data management, analysis and application architecture design[J]. *Transport Research*, 2019, 5(5): 31-40.
- [21] ZHANG L Y, MENG Q, FWA T. Big AIS data based spatial-temporal analyses of ship traffic in Singapore Port waters[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 129: 287-304.
- [22] 交通运输部. 2014 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2015-04-30)[2023-09-03]. https://www.gov.cn/xinwen/2015-04/30/content_2855735.htm.
- [23] 交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2021-05-19)[2023-09-03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202105/t20210517_3593412.html.
- [24] 王成金, 张梦天, 程佳佳. 离岸枢纽港口的发展模式与机理: 以洋山深水港为例 [J]. *经济地理*, 2016, 36(6): 100-108.
- WANG C J, ZHANG M T, CHENG J J. Spatial pattern of offshore hub port and development mechanism: the case of Yangshan Port in Mainland China[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(6): 100-108. ⊕