

多源数据融合的水上交通安全分析与 事故预防策略研究

扶子澜

安徽交通职业技术学院航运工程学院,安徽 合肥 230051

摘要:为分析复杂通航水域的交通安全态势,判断水上船舶碰撞风险,融合船舶自动识别系统、港口空间分布、地理信息等多元数据资源,以珠江口水域为研究对象,统计该水域船舶类型及尺度、速度的分布情况,借助理学信息数据分析该水域港口空间布局特点;航线划分为24个时段,研究水域分为9部分,基于线密度分析水域交通流量空间特征和航线分布,计算珠江口水域水上交通安全重点区域的船舶碰撞危险度并进行可视化分析。结果表明:珠江口水域船舶类型多且尺寸较大、船速较高;广州港主出海航道、广州港次出海航道→担杆出海航道(途经鹿颈湾)、顺德水道→连沙容水道为3条主要航道,其余为一般航道;不同时段下区域3的航线数最多,区域5最少,区域3隶属双峰型,中午、夜间航行船舶较多,区域2、4、6、7为单峰型,区域1、5、8、9为平稳型区域,无明显峰谷,变化较小;区域3中船舶碰撞危险度分布差别较大,在公共航道与航道交汇处以及公共航道的掉头区域,船舶碰撞危险度较高。

关键词:多源数据;水上交通安全;碰撞危险度;数据挖掘;事故预防

中图分类号:U491.3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)06-0037-08

引用格式:扶子澜. 多源数据融合的水上交通安全分析与事故预防策略研究[J]. 山东交通学院学报,2025,33(6):37-44.

FU Zilan. Research on water traffic safety analysis and accident prevention strategies based on multi-source data fusion[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2025,33(6):37-44.

0 引言

水上交通运输是现代综合交通运输体系的重要组成部分,在推动区域经济协调发展和促进国际贸易往来中发挥着不可替代的战略作用。但水上交通事故往往导致重大人员伤亡和巨额经济损失,对海洋生态环境造成持续性破坏,成为制约航运业高质量发展的突出瓶颈^[1-3]。因此,确保船舶航行安全,对水上交通事故进行科学分析与有效预防成为航运安全领域亟待解决的重大课题^[4-6]。

学者们在水上交通事故致因因素、事故预测、风险评价、管理预防策略等不同领域开展研究,为预防水上交通事故提供可靠支撑^[7-15]。李伟^[16]统计2006—2022年沧州长航道的水上交通事故,从事故数、种类、等级、船舶种类、时空分布等角度揭示事故的规律和特点,构建SHEL模型,建立人、船、环境、管理评价体系,探究四要素对长航道交通事故的影响程度,认为船员缺乏系统培训、船舶设备维护保养不到位、寒潮大风冰凌影响严重和航运公司安全管理混乱等是长航道交通事故的主要原因;马建文等^[17]采用N-K模型模拟分析水上交通事故触发的过程,研究人、船舶、环境及管理4个风险因素的耦合关系,以2012年1月至2019年8月水上交通事故数据为实例计算耦合风险,认为水上交通事故与耦合风险因素数正相关,3个因素耦合时,人、环境、管理的耦合风险最大,双因素耦合时人与管理的耦合风险最大;吴

收稿日期:2024-10-19

作者简介:扶子澜(1983—),男,河南信阳人,工学硕士,主要研究方向为水上交通运输安全分析及事故预防,E-mail:zilany007@126.com。

建华等^[18]提出基于船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)的水上交通事故检测方法,构建基于卡尔曼滤波的水上交通事故检测模型,通过长江武汉段水域内 AIS 数据对此检测方法进行模型验证,此检测模型耗时最短,命中率最高,误检率最低,此方法均能在 5 min 内识别 3 种不同的船舶事故场景下的交通事故;江玉杰等^[19]提出一种基于人为因素分析与分类系统模型、贝叶斯网络模型和途径模型的水上交通事故致因路径分析方法,基于人为因素分析与分类系统模型从中国沿海水上交通事故调查报告中识别 5 个层级包含 38 种水上交通事故的致因因素,采用途径模型计算各类水上交通事故致因的路径系数,结果表明触礁事故和触礁事故的最大致因路径均为海图资料配备不当和航行计划不当;Kong 等^[20]建立基于改进 BN 算法的海上事故安全评估框架,显著提高安全评估的准确性和可靠性;Ma 等^[21]通过伊辛模型理论从自动识别系统提取船舶数据,研究船舶间的相互影响机制,通过伊辛模型开发可确定港口水域中的船舶碰撞风险的计算模型;Desanto 等^[22]利用精密单点定位进行船舶导航数据运动学后处理,掌握船舶发生水上交通安全事故的机理;Mat Radzi 等^[23]基于航海模拟器训练模块生成船舶航行数据,并据此进行事故预防研究;水上交通事故受通航环境、气象、交互船舶等多重因素影响,特征较复杂^[24]。现有研究主要依托历史交通事故数据和风险评估模型分析水上交通事故,普遍未考虑船舶实时航行状态和港口环境等动态因素。因此,整合多源数据挖掘船舶通航风险,制定精准预防交通事故的策略均具有重要的现实意义。

本文以珠江口水域为例,融合船舶 AIS、港口数据、基础地理信息等多源数据资源,基于船舶历史航行轨迹挖掘水上交通时空特征,计算水上交通安全重点区域的船舶碰撞危险度,进行可视化分析,结合数据分析结果提出针对性事故预防策略,以期充分发挥船舶航行数据价值、构建高质量水上交通安全管理体系提供理论参考。

1 研究数据与方法

1.1 数据收集

珠江口水域是我国通航密度最高、航运最繁忙的区域之一,具有港口密集、航线交错和航路复杂等特点,构成典型的高风险通航环境。本文选择珠江口水域北纬 21.10°~北纬 23.20°、东经 112.30°~东经 114.65°作为研究区域。

采集的数据包括船舶 AIS、港口数据和基础地理信息 3 类数据资源,分别来源于船讯网、中国港口网及国家基础地理信息数据库。船舶自动识别系统能提供船舶的主要特征参数,记录航行状态信息,在碰撞、监控、航行管理等方面应用广泛^[25]。基于 AIS 数据挖掘水上交通安全信息,已成为海上交通安全评估的重要发展趋势^[26]。采集 2022 年 8 月研究区域内 AIS 数据(10 696 238 艘次船舶),包括水上移动通信业务标识(maritime mobile service identity, MMSI)码、航行速度数据、目的港口信息、时间戳字段、经纬度、航向和船舶尺寸等船舶静态与动态数据;珠三角主要港口包括广州、香港、澳门、佛山、东莞、中山和蛇口等;基础地理信息数据包括行政区划水系数据、道路数据、海岸线与岛屿等。

1.2 数据预处理

通过船舶航行数据的属性研究水上交通事故特征,需研究船舶 AIS 数据中最显著的特性。以基于唯一 9 位标识码的 MMSI 码表示船舶,同时排列船舶的索引,将船舶地理位置(经纬度)、对地航向(course over ground, COG)、对地航速(speed over ground, SOG)3 个特征信息引入模型,分析船舶运动轨迹,通过这 3 个特征信息能较好地反映船舶的航行过程。船舶的航迹线可表示为:

$$T_i = (T_{i_1}, T_{i_2}, \dots, T_{i_n})^i,$$

式中: i 为船舶编码 MMSI, T_{i_n} 为时间戳 t_n 上的轨迹点。

受船舶 AIS 设备更新、信号缺失等影响,采集的船舶 AIS 原始数据会有数据缺失、噪声等问题。为减少噪声对研究的影响并减小计算量,分析前先对 AIS 数据进行清洗、插值等预处理。为最大程度地保留船舶的速度、航向及位置等关键动态信息,采用改进线性插值修复船舶轨迹^[27]。

根据 MMSI 数据划分 AIS 数据,展示不同船舶的轨迹,同时以时间序列为依据实现船舶排序,构建全局化的轨迹网络,围绕空间间隔、轨迹点的时间间隔对每条船的轨迹点划分不同航次,生成 14 466 条航线。

1.3 基于航行轨迹的水上交通时空特征挖掘

1.3.1 研究区域船舶类型分布

明确研究区域船舶种类、尺寸及速度等信息有助于分析水上交通的流动性和潜在风险,为水上交通安全管理提供重要依据。通过对不同类型船舶的监测与分析,可有效识别交通高峰期、潜在冲突区域以及事故频发点,制定针对性的安全管理措施和应急响应策略,提高水上交通的安全性和通畅性。根据船舶 AIS 数据的统计分析,区域船舶中集装箱船、干散货船、油船、高速船、拖轮、其他船舶的占比分别为 28.6%、38.1%、15.3%、4.9%、5.9%、7.2%,船舶长度为 <50、50~100、>100~150、>150~200、>200~250、>250 m 的占比分别为 7.9%、37.4%、20.7%、18.9%、7.3%、7.8%,船舶速度为 <5、5~10、>10~12、>12~15、>15~20、>20 kn 的占比分别为 7.6%、35.3%、36.2%、17.0%、3.3%、0.6%。研究水域的船舶主要为干散货船和集装箱船,其次为油船;船舶长度集中在 50~150 m,其次为 >150~200 m,大型船舶分布较多;船舶速度主要集中在 5~12 kn,其次为 >12~15 kn。

1.3.2 轨迹线集时间与空间划分

将轨迹线集内的每条航线划分为 24 个时段,获取航线轨迹的起始时刻与结束时刻数据后,通过轨迹线插值方法生成整点时刻的连续数据序列。具体步骤为:基于起始/结束时间戳提取轨迹线的时间区间,按整点对轨迹数据时间维度进行分段,在每段内采用线性插值法计算整点时刻对应的轨迹坐标、速度等属性值,形成按整点时段划分的标准化轨迹数据集。假设两个相邻点上航行的船舶按相同的速度匀速航行, t_1 、 t_2 为相邻两个轨迹点对应时刻,对应位置为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) , t 为待插值时刻,对应位置为 (x, y) 。采用线性插值公式计算 x 、 y ,计算公式为:

$$x = (t - t_1)(x_2 - x_1) / (t_2 - t_1), y = (t - t_1)(y_2 - y_1) / (t_2 - t_1)。$$

根据航区、航道、港口特征对船舶轨迹线及空间进行划分,将研究区域划分为 9 部分。结合时空划分结构分析,可获得区域 1~9 的港口空间分布情况,如表 1 所示。综合船舶轨迹,对轨迹线集、划分后的区域进行叠加分析,获取船舶时空轨迹线分布数据,以便计算航迹线密度分布。

表 1 基于时空划分的研究区域港口空间分布情况

区域编号	空间分布情况
1	包括惠州港、盐田港,大鹏湾、大水坑湾
2	包括香港、蛇口、赤立角、汲水门、大铲湾五大港口,航道包括担杆水道、珠江口以及广州港出海航道
3	包括东莞、广州、虎门三大港口,集中于珠江口与广州港出海航道
4	包括中山、澳门、珠海、佛山四大港口,航道为莲沙容、顺德、洪奇沥三大航道
5	港口为新会港,航道包括崖门水道
6	包括江门、濠涌渔港、高栏三大港口,航道包括虎跳门水道、崖门出海航道
7、8、9	属于珠江口下游区域,无主要港口

1.3.3 基于线密度分析的交通流空间分布

采用线密度分析法研究水上交通繁忙情况下不同区域的空间分布特征。将研究区域划分为多个规则矩形网格,每个网格对应一个图像像元;根据获取的船舶时空轨迹线分布数据分析线密度,通过计算每个网格周边设定距离内的航线总长度与该网格面积之比,如图 1 所示。

像元 k 半径为 R 的区域内仅存在两条轨迹 l_1 、 l_2 ,则像元 k 的线密度

$$\rho_k = (s_1 + s_2) / (\pi R^2),$$

式中 s_1 、 s_2 分别为 l_1 、 l_2 的轨迹线长度。

轨迹线总长度与圆形区域面积之比为线密度

$$\rho = \sum_{i=1}^n l_i / (\pi R^2), \quad (1)$$

式中: l_i 为第 i 条轨迹线的长度, n 为轨迹线总数。

在每个圆形区域内, 选取 n 条代表性轨迹线, 其长度分别为 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$, 线密度 ρ 反映以网格像元为中心的圆形区域内轨迹线的密集程度, 可用于量化和比较不同网格内的交通繁忙状态, 揭示水上交通在各区域的空间分布特征。

根据处理后的船舶 AIS 数据和研究区域空间特征, 设置半径搜索范围为 0.005° (以目标点为中心向四周扩展 0.005 个经纬度角度形成的圆形区域), 通过式 (1) 计算该区域的船舶航线空间分布线密度, 得到研究区域的交通流空间聚类情况, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知: 在研究区域中, 广州港主出海航道航线最密集, 关联港口包括东莞港和广州港; 其次为广州港次出海航道→担杆出海航道(途经鹿颈湾), 关联港口包括广州港和香港港; 再次为西江→虎跳门水道, 关联港口包括江门港、珠海港、高明港、澳门港; 最后为顺德水道→连沙容水道; 其余航道均可归纳为一般航道, 航线密度基本相同。

1.3.4 时空统计分析各区域航线数变化

为分析不同区域的时空变化特征, 统计 8 月份全天珠江口不同子域各时刻航线数, 如图 3 所示。以此为依据, 分析不同区域内航线数的变化特征, 不同区域内全天航线数及全天平均航线数如表 2 所示。

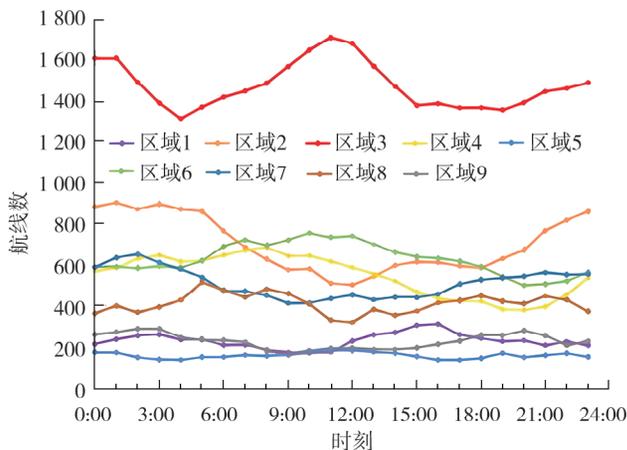


图 3 不同区域各时刻航线数

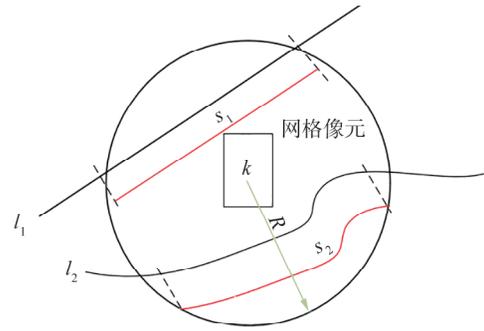


图 1 线密度计算实例

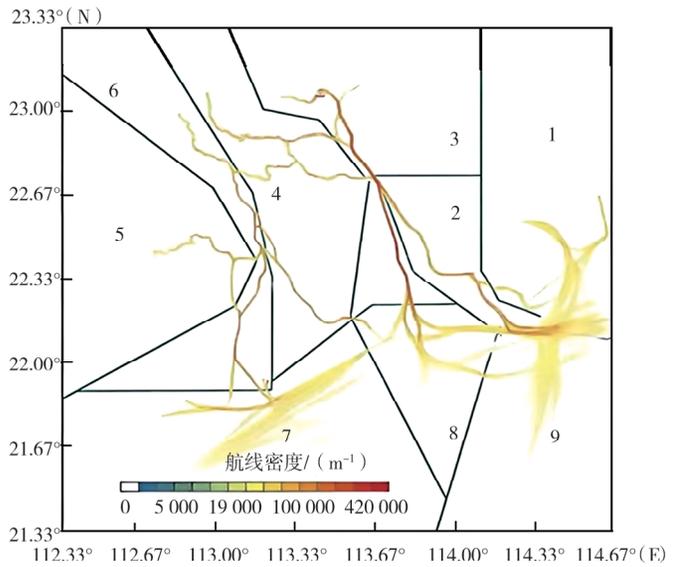


图 2 研究区域线密度分析示意图

表 2 不同区域内全天航线数及全天平均航线数

区域	航线数	全天平均航线数
1	5 275	229
2	16 881	703
3	35 568	1 482
4	13 185	549
5	3 746	156
6	16 165	751
7	12 324	514
8	9 903	413
9	5 404	225

由图 3、表 2 可知: 不同时刻下区域 3 的航线数最多, 区域 5 最少, 分析原始船舶 AIS 数据, 统计得到 8 月份每天各时刻区域 3 的平均航线数为 1 200~1 800, 单一时刻有 40 条航行船舶, 航道繁忙度最大; 区域 2、6 为较繁忙区域, 夜间时段区域 2 的航线数最大, 区域 6 在白天的航线数最大; 区域 1、5、9 每天的航线

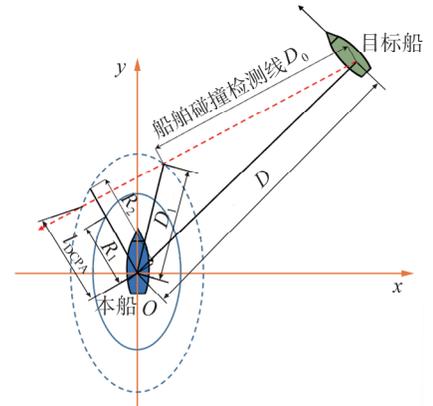
数最少, 这些区域的月航线数始终小于 350, 各时刻的航行船舶数均小于 15。从每个区域不同时刻航线变化分析, 区域 3 隶属双峰型, 峰值主要集中于 0:00—1:00、12:00—13:00, 中午、夜间航行船舶较多; 区域 2(0:00—1:00)、区域 4(7:00—8:00)、区域 6(9:00—10:00)、区域 7(1:00—2:00) 均为单峰型; 区域 1、5、8、9 为平稳型区域, 无明显峰谷, 变化较小。从航线数波动角度分析, 9 个区域中, 区域 2(134.7) 标准差最大, 波动最大; 其次为区域 3、4; 其他几个区域的标准差从小到大排列依次为区域 5、1、9、8、7、6, 区域 1、5、6 的标准差均低于 40, 航线波动相对较小。

1.4 研究区域船舶碰撞危险度分析

1.4.1 船舶碰撞危险度计算

水上交通事故的主要形式为船舶碰撞, 根据船舶碰撞危险度 (collision risk index, CRI) 能有效识别水上交通潜在风险。一般采用船舶间相对运动参数量化碰撞风险, 同时基于最近会遇距离 (distance at closest point of approach, DCPA) l_{DCPA} 以及最近会遇时间 (time for closest point of approach, TCPA) t_{TCPA} 的变化反映船舶碰撞风险程度。该方法计算便捷, 但未考虑船舶尺度、轨迹交叉等影响因素^[28]。以船舶领域理论^[29]下的碰撞风险量化方法为依据, 综合考虑影响碰撞风险的多种因素, 构建可量化的船舶碰撞危险度模型, 如图 4 所示。

图 4 中, 蓝色实线为本船的船舶领域, 蓝色虚线为基于本船的安全域, 当目标船进入本船安全域内, 依据目标船的位置坐标与相对航向构成碰撞危险检测线 (图中红色虚线)。船舶碰撞危险度^[32]



注: D 为两船间距, D_0 为目标船至安全距离边界的距离, D_1 为本船至安全距离边界的距离, R_1 为最近会遇距离线与船舶领域边界的交点距本船的距离, R_2 为最近会遇距离延长线与安全距离边界的交点距本船的距离。

图 4 基于船舶领域理论的船舶碰撞危险度模型

$$E_{CRI} = \mathbf{WR} = (W_{DCPA} \quad W_{TCPA} \quad W_D \quad W_C \quad W_K) (u_{DCPA} \quad u_{TCPA} \quad u_D \quad u_C \quad u_K)^T = W_{DCPA}u_{DCPA} + W_{TCPA}u_{TCPA} + W_Du_D + W_Cu_C + W_Ku_K, \quad (2)$$

式中: \mathbf{W} 为评价指标的权重矩阵, 一般取值为 $[0.36 \quad 0.32 \quad 0.14 \quad 0.10 \quad 0.08]$ ^[28]; \mathbf{R} 为评价指标隶属度矩阵, 基于模糊理论, 选择 l_{DCPA} 、 t_{TCPA} 、 D (两船间距)、 C (基于船舶坐标系的相对航向)、 K (目标船速度与本船速度之比)、船舶长度等 6 个参数的隶属函数计算, 评价指标隶属度矩阵。

以船舶最近会遇距离 l_{DCPA} 下的隶属函数 u_{DCPA} 以及 D 的隶属函数 u_D 反映空间和时间维度内的船舶碰撞风险程度。 l_{DCPA} 的隶属函数

$$u_{DCPA} = \begin{cases} 1, n_s > 0, n_q > 0 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{180^\circ}{R_2 - R_1} \left(l_{DCPA} - \frac{R_2 + R_1}{2}\right)\right], R_1 < l_{DCPA} < R_2, n_q = 0, \\ 0, l_{DCPA} > R_2 \text{ 或 } n_s = 0 \end{cases}$$

式中: n_s 为碰撞危险检测线与安全边界的交点数, n_q 为碰撞危险检测线与船舶领域的交点数。

D 的隶属函数

$$u_D = \begin{cases} e^{-\ln^2\left(\frac{D-D_0}{D_1-D_0}\right)^2}, n_s > 0 \\ 0, n_s = 0 \end{cases}$$

t_{TCPA} 的隶属函数 u_{TCPA} 反映时间维度下船舶碰撞危险的紧迫程度, 计算公式为:

$$u_{TCPA} = \begin{cases} e^{-\ln^2(l_{DCPA}/T_0)^2}, n_s > 0 \\ 0, n_s = 0 \end{cases}$$

式中 T_0 为船舶碰撞危险度模型中用于标准化最近会遇距离的基准时间参数, 通常取固定值, 如 10、

30 min。当 $t_{\text{TCPA}} < T_0$ 时,标准化后的 l_{DCPA} 放大(时间紧迫,相同距离下危险度更高);当 $t_{\text{TCPA}} > T_0$ 时,标准化后的 l_{DCPA} 缩小(时间充裕,危险度相对降低);当 $t_{\text{TCPA}} = T_0$ 时,标准化的 l_{DCPA} 为原始 l_{DCPA} (基准状态)。

本船坐标系下的相对航向 C 和船速比 K 的隶属函数 u_C, u_K 反映船舶的避碰难度。相对航向 C 的隶属函数

$$u_C = \begin{cases} \frac{17}{44} \left\{ \cos(C + 161^\circ) + \left[\cos^2(C + 161^\circ) + \frac{440}{289} \right]^{-1/2} \right\}, n_s > 0 \\ 0, n_s = 0 \end{cases}$$

船速比 K 的隶属函数

$$u_K = \begin{cases} \left\{ 1 + \left[K \sqrt{K^2 + 1} + 2K \left| \sin(|c_i^0 - c_i^T|) \right| \right]^{-2} \right\}^{-1}, n_s > 0 \\ 0, n_s = 0 \end{cases}$$

式中: c_i^0 为本船航向, c_i^T 为目标船航向。

根据获取的船舶 AIS 数据及对船舶轨迹线、船速、船长等的统计,获取式(2)中的相关参数,量化制定指定水域的船舶碰撞危险度。

1.4.2 船舶碰撞危险度可视化

区域3船舶航迹分布密集、数量最多且波动较大,属于交通繁忙的复杂水域,该区域代表性较强,计算该区域8月份的碰撞危险度,如图5所示。

由图5可知:区域3中船舶碰撞危险度分布差别较大,在公共航道与航道交汇处以及公共航道的掉头区域,船舶碰撞危险度较高,主要原因是该区域公共航道交通环境复杂,船舶分布密集、船舶类型较多、船舶航迹频繁交叉且距离较近,在时间及空间上产生交叉、会遇局面。这种船舶交通的复杂性可能会增大交通事故发生的概率,导致该区域水上碰撞危险度分布不均,但危险分布较集中。对水上船舶碰撞风险进行量化及可视化处理,有助于船员和水上交通管理人员准确掌握水上交通安全态势的实时分布,为船员及时调整船舶航向和航行计划、提高交通安全管理效率提供直观参考。

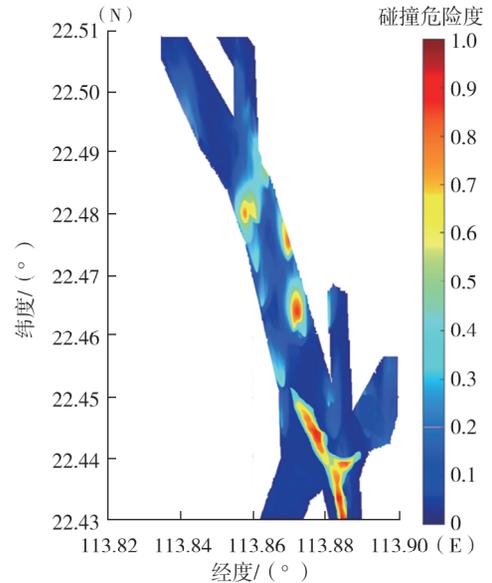


图5 区域3船舶碰撞危险度分布

2 结论与策略

2.1 结论

为提高水上交通安全,预防水上交通事故,融合船舶 AIS、港口空间分布、地理信息等多源数据资源,对交通密集水域珠江口水域的船舶特征、航线分布及水域的船舶碰撞危险度进行挖掘和可视化分析,分析珠江口水域交通时空特征分布状况和安全态势,实现该水域交通繁忙区域、重点安全区域的精准辨识,以及船舶碰撞风险度的量化,适用于交通较密集的水域,有助于相关部门和企业制定、规划高度合理的航线,同时也可水上交通安全管理部门在风险预测、干预期间提供有效的参考数据以及理论方法支持,减小水上交通事故的发生概率。

1) 珠江口水域重要港口较多,航道环境复杂且航线交叉频繁,船舶交通密度大,其中商船类型较多,大型化船舶较多,船舶航速较快,增大了该区域的航行风险。

2) 区域内船舶航线密度分布差距较大,其中主航道水域航线分布较密集,每天平均航线数较多,对海上交通安全管理提出更高的要求。密集的航线分布可能导致船舶间的碰撞风险增大,尤其是在能见度低或天气恶劣的情况下。需加强对主航道的监测与管理,合理规划航道,优化交通流量,降低水上交通事故发生的可能性。建立有效的信息共享机制,确保各船舶能及时获得航线密度信息,迅速进行合理的航行

决策,提高整体水域交通的安全性和效率。

3)通过计算主航道区域3的船舶碰撞危险度及可视化分析发现,区域3局部碰撞危险度较高,表明在特定水域内,船舶间的相对运动和空间重叠增大了碰撞风险。分析碰撞危险度能识别高风险区域和关键航段,为海上交通安全管理提供针对性的干预措施。

2.2 策略

挖掘研究区域基于航行轨迹的交通时空特征后,相关部门应公正、合理地分配航道资源,确保有效、高效的运输,避免因航道拥挤而引发交通事故。提高广州次出海航道→鹿颈湾区域→担杆出海航道、西江→虎跳门水道航道、顺德水道→莲沙容水道航线的安全建设力度,在掌握航道安全隐患基础上,充分利用船舶AIS数据和遥感技术监测航道使用情况,定期进行航道巡查与风险评估,加强航道疏通,提高航标明显度,定期发布航道安全信息。改进航行线路设计,建议引入智能化的航道管理系统,结合实时天气、海流、航行密度等信息,动态调整航道疏通状况,优化船舶通行流量,避免出现拥堵现象,从多维度最大化降低船舶碰撞交通事故的发生概率。

分析空间分布特征后设计航行路线,加强监控广州港次出海航道→鹿颈湾→担杆出海航道等3条航道。相关部门应建立高效航线监控系统。通过收集、分析航行数据,定期(或实时)生成航行报告,判断航线是否存在拥堵、航行违规等交通异常,基于实时数据分析,建立智能预警系统,在船舶接近高风险区域时提前发出警示。实施船舶动态监控,对每艘船舶配备具备实时报告功能的设备,记录船舶的速度、航向、地理位置等信息,通过实时分析这些数据,监控中心可立即发现异常,及时采取处理措施;推动船舶间的信息共享,特别是在密集航行区,鼓励船舶通过AIS进行实时定位和信息交换。增强船舶间的协同工作,减少碰撞风险。海事机构、监管部门应加强定期航道巡查力度,在港口入口、航道交叉点等重要航道节点设置清晰的指引标识,借助无人机巡查、近岸视频监控等严格监督航线中恶劣天气、设备故障、非法行为等情况。

根据聚类分析实现区域识别后,相关海事机构、监管部门应通过收集、分析广州港、南沙港、东莞港、蛇口港历史航线数据,深度理解此类区域中航行的异常状况及其可能导致的后果。基于上述信息加强重点区域的监控,深度分析重点区域历史航线发展规律,识别未来可能存在的水上交通事故风险。根据密度聚类分析结果获取轨迹异常数据后,立即追踪、分析船舶航行路径,将船舶的位置、速度、航向、时间等数据作为评估航行状态的指标,根据轨迹数据快速识别可能存在的船舶平均速度异常、离开航线等航行问题,并及时制定纠正措施。

参考文献:

- [1] 郭健. 水上交通事故致因理论及其在安全管理中的应用[J]. 运输经理世界, 2023(30):131-133.
- [2] 张庆年,张璠,杨杰,等. 基于聚类分析的水上交通事故影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(6):1-7.
- [3] 康宁. 事故致因理论及其在水上交通安全管理中的应用[J]. 中国航务周刊, 2024(24):51-53.
- [4] 万程鹏,刘翼飞,吴兵,等. 基于复杂网络的水上交通风险辨识及事故演化机理研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(8):165-171.
- [5] 孙家庆,李默涵,修晓仪. 基于复杂网络理论的水上交通事故致因分析[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(2):80-90.
- [6] 王泽. 基于灰色模型的舟山海域水上交通事故预测研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2023.
- [7] 杨洋,邵哲平,赵强,等. 基于厦门港的海上交通事故地理空间分布及风险预测研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(9):1676-1687.
- [8] YANG Y, SHAO Z P, HU Y, et al. Geographical spatial analysis and risk prediction based on machine learning for maritime traffic accidents: a case study of Fujian sea area[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 113106.
- [9] 关帅. 长江太仓段通航安全风险评价与防控研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2023.
- [10] MA X S, ZHOU Z X, WANG S P, et al. Prediction of Liaoning maritime traffic accidents based on improved SCGM(1,1)c model[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2504(1):012064.

- [11] 初晓,蒋仲廉,非鹏,等.基于信息扩散技术的内河通航风险评价研究[J].水道港口,2023,44(1):137-142.
- [12] 张骞予,杨家其.基于 ARERAC 评价模型的水上交通安全风险源评估[J].水运管理,2020,42(7):35-40.
- [13] 陈兵.内河水上交安管理优化路径探讨[J].中国航务周刊,2024(2):51-53.
- [14] 朱一番.水上通航安全管理问题及对策研究:以上海宝山海事局辖区为例[D].上海:华东政法大学,2022.
- [15] XIN X R, LIU K Z, LOUGHNEY S, et al. Maritime traffic clustering to capture high-risk multi-ship encounters in complex waters[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 230: 108936.
- [16] 李伟.沧州长航道水上交通事故问题及预防对策研究[D].保定:河北大学,2023.
- [17] 马建文,王波,黄子硕.基于 N-K 模型的水上交通事故触发过程及风险因素耦合研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(3):25-30.
- [18] 吴建华,彭虎,王辰,等.基于 AIS 通信量的水上交通事故检测方法[J].交通信息与安全,2023,41(5):83-94.
- [19] 江玉杰,万征,陈继红.中国沿海水上交通事故致因路径分析[J].大连海事大学学报,2024,50(1):76-84.
- [20] KONG D W, LIN Z L, LI W, et al. Development of an improved Bayesian network method for maritime accident safety assessment based on multiscale scenario analysis theory[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 251: 110344.
- [21] MA J W, HU Q Y, LIU T, et al. Research on ship collision risk calculation in port navigation waters based on Ising model and AIS data[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems: Part A: Civil Engineering, 2024, 10(2): 04024003.
- [22] DESANTO J B, CHADWELL C D, SANDWELL D T. Kinematic post-processing of ship navigation data using precise point positioning[J]. Journal of Navigation, 2019, 72(3): 795-804.
- [23] MAT RADZI Z B, JUT WENG T, MD EUSOFF M H, et al. Creation of ship navigation data using simulation technology in training module[J]. Transactions on Maritime Science, 2021, 10(2): 355-360.
- [24] 李莹.基于 TAN-Bayes 的海上交通事故风险研究[D].大连:大连海事大学,2023.
- [25] 张哲.基于历史数据挖掘的海上船舶交通事故预测[J].舰船科学技术,2024,46(14):174-177.
- [26] 乔卫亮,邓婉怡,马晓雪,等.复杂网络下船舶碰撞风险传播演化分析[J].中国安全科学学报,2024,34(5):101-110.
- [27] 秦红星,杨茜.改进线性插值的船舶轨迹修复迭代算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(10):1759-1767.
- [28] 周壮壮,刘钊,胡英俊,等.基于四元船舶领域的船舶碰撞危险度模型[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(3):582-588.
- [29] GOODWIN E M. A statistical study of ship domains[J]. Journal of Navigation, 1975, 28(3):328-344.

Research on water traffic safety analysis and accident prevention strategies based on multi-source data fusion

FU Zilan

School of Marine Engineering, Anhui Communications Vocational & Technical College, Hefei 230051, China

Abstract: To analyze the traffic safety situation in complex navigable waters and assess the risk of vessel collisions, this study integrates multi-source data resources such as the automatic identification system (AIS) for vessels, port spatial distribution, and geographic information. The focus of the research is on the Pearl River Estuary, where the distribution of vessel types, sizes, and speeds in this water area is statistically analyzed. Geographic information data is utilized to analyze the spatial layout characteristics of the ports in this area. The navigation routes are divided into 24 time periods, and the water area is segmented into 9 parts. Based on line density analysis, the spatial characteristics of traffic flow and route distribution in the water area are studied, and the collision risk of vessels in key maritime traffic safety areas of the Pearl River Estuary is calculated and

(下转第 113 页)

shear stress first increased and then decreased. Under confined conditions, both initial and failure resistivity values exhibited negative exponential relationships with moisture content. As the vertical stress increased, the degree of reduction in failure resistivity decreased across different moisture contents. Under different moisture contents, the failure resistivity of the specimen generally decreases with increasing vertical pressure.

Keywords: cement-improved soil; electrical resistivity; shear strength; experimental study (责任编辑:王惠)

(上接第44页)

visualized. The results indicate that the vessel types in the Pearl River Estuary are diverse, with large sizes and high speeds; the main outbound navigation route from Guangzhou Port, the secondary outbound route from Guangzhou Port to the Dagang outbound route (passing through Lujing Bay), and the Shunde waterway to the Liansha Rong waterway are the three major routes, while the others are general routes. During different time periods, Route 3 has the highest number of routes, while Route 5 has the least. Route 3 is bimodal, with a higher number of vessels navigating during the noon and nighttime. Routes 2, 4, 6, and 7 are unimodal, and Routes 1, 5, 8, and 9 are stable regions with no significant peaks or troughs and little variation. In Route 3, the distribution of collision risk among vessels varies significantly, with higher collision risks present at the intersections of public channels and in the turning areas of the public channel.

Keywords: multi-source data; waterborne traffic safety; risk of collision; data mining; accident prevention (责任编辑:王惠)

(上接第69页)

and radial fracturing tests, the impact of different moisture capacity on the shear strength, residual strength, and tensile strength of the soil is analyzed. Combined with scanning electron microscope tests, the microscopic morphology of the soil samples after ring shear failure is observed. The research results indicate that: 1) Under the same moisture capacity, the shear strength of the soil samples significantly increases with the increase of confining pressure; under the same confining pressure, the shear strength of the soil samples significantly decreases with the increase of moisture capacity; when the confining pressure is not greater than 200 kPa, the stress-strain curve of the soil samples shows that after reaching peak strength, the shear strength decreases with the increase of axial strain, eventually approaching the residual strength; when the confining pressure is greater than 200 kPa, the stress-strain curve of the soil samples has no obvious peak point, and the shear strength gradually increases with the increase of axial strain. After the moisture capacity reaches 20%, the stress-strain curve changes from strain hardening to strain softening; when the moisture capacity increases from 14% to 17%, the reduction of the shear strength of the soil samples is the greatest. 2) When the normal stress changes from 100 kPa to 400 kPa, both peak strength and residual strength increase with the increase of normal stress, and the curves are similar under the same moisture capacity conditions; under different moisture capacity, the shear strength increases rapidly to the peak strength and then slowly decreases with the increase of shear displacement; when the moisture capacity is not greater than 17%, the curves exhibit strain softening characteristics, while the moisture capacity is not less than 20%, the curves only include two stages: strain hardening and residual strength, without strain softening phenomena. 3) The residual strength of the soil samples is linearly positively correlated with normal stress, and the tensile strength decreases with the increase of moisture capacity. The tensile strength of undisturbed soil samples and remolded sample tends to be consistent when the moisture capacity is not less than 17%, and slowly decreases; the tensile strength of the soil samples is close to the residual cohesion, indicating that cohesion is the main source of tensile strength.

Keywords: slope engineering; Ili loess; shear strength; residual strength; tensile strength (责任编辑:王惠)