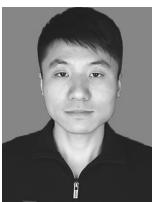


· 信息技术 ·



基于 AIS 大数据的南京长江大桥水域 规律航迹研究

夏辉宇¹, 刘安林², 程佳¹

(1. 长江南京航道局, 江苏南京 210011; 2. 河海大学理学院, 江苏南京 211100)

摘要: 南京长江大桥水域通航环境复杂, 安全风险高。掌握船舶航行规律, 对桥区水运安全监管及航道优化具有重要意义。利用船舶自动识别系统(AIS)大数据, 采用自动化并行航迹密度计算方法, 识别出不同大小的船舶在不同水期的规律航迹分布, 并结合多源数据分析其时空变化特征。通过研究发现大桥水域船舶航行总体符合航行规则; 相比小型船舶, 大型船舶航行更加规范, 通过桥孔时位置更居中, 和桥轴法向夹角更小, 主航迹带与航道重叠度更高; 洪季受水流作用影响, 船舶航迹较枯季整体偏北, 随水位降低呈逐步向南演变的趋势。

关键词: AIS; 船舶航迹; 南京长江大桥; 航道; 密度估计

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0189-07

Pattern recognition of ship routes in the Nanjing Yangtze River Bridge area based on AIS big data

XIA Hui-yu¹, LIU An-lin², CHENG Jia¹

(1. Changjiang Nanjing Waterway Bureau, Nanjing 210011, China; 2. College of Science, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The navigational condition of the Nanjing Yangtze River Bridge is complicated with high safety risk. It is of great significance to master the navigation rules of ships for maritime surveillance and waterway design. Applying a parallel approach developed for calculating the density of ship trajectories in the Nanjing Yangtze River Bridge waters based on AIS big data, we recognize the distribution of the regular routes of ships of different sizes in different seasons, and find that most ships follow the navigation rules of the Nanjing Yangtze River Bridge waters in general. Compared to small ships, large ships are more formal in sailing across the bridge. When passing through the bridge span, the position of large ships is more centered, the angle between the large ships' bow direction and the normal direction of the bridge axis is larger. Meanwhile, the overlap between the lane boundary of the large ships and the designed waterway is much higher than that of small ships. We also find that the ships prefer to take a northerly route in the flood season and a southerly route in the dry season. With the decrease of water level, ship tracks gradually change to the south.

Keywords: automatic identification system (AIS); ship trajectory; the Nanjing Yangtze River Bridge; waterway; density estimation

南京长江大桥是长江上第一座由我国自行设计建造的双层公铁两用桥, 具有十分重要的政治意义和经济价值。它不仅是东部地区交通关键节点, 也是长江黄金水道重要通航节点^[1]。近年来, 长江南

京段船舶不断大型化, 通航密度增加, 南京长江大桥水域通航风险日益加大, 给水运监管、航道布设带来了极大挑战^[2]。大桥水域桥孔多、宽度小、水流乱, 受多种因素影响, 船舶操纵会产生各种偏

差, 实际路线各不相同。从海量船舶路线中识别规律性航迹, 可以掌握船舶行为的共性特征, 从而进行标准状态建模, 发现异常模式^[3], 为大桥水域的安全监管及航道优化提供重要的数据支撑。

近年来, 随着船舶自动识别系统(AIS)的广泛应用, AIS 数据量迅速累积, 呈现出典型的大数据特征。基于 AIS 的大数据分析挖掘也在航道工程、水运管理及船舶导航等领域发挥了重要作用。李昱等^[4]提出一种基于非关系型数据库的 AIS 轨迹实时展示方法, 用于航标调整后的效果评估; 徐婷等^[5]利用 AIS 大数据对疏浚船舶轨迹进行识别和预测, 解决了施工过程无法实时监管的问题; 李建江等^[6]提出一种基于网格热度值的船舶路径提取算法, 从海量 AIS 轨迹中提取出不同形状的规律轨迹序列; ZHANG 等^[7]提出一种 AIS 大数据分析方法, 对新加坡港船舶时空行为模式进行识别, 并发现了船舶事故热点区域的分布规律。

AIS 大数据为南京长江大桥水域船舶规律航迹识别研究提供了非常有效的技术手段。本文在 AIS 大数据基础上, 采用船舶航迹密度自动化处理方法, 计算年度、月度以及不同水期的规律航迹分布, 分析研究大桥水域不同大小船舶规律航迹的空间分布及变化特征。研究结论可为水域内水运安全监管、航道优化设计、异常行为检测等领域提供参考和依据。

1 研究区域概况

研究区域位于长江下游南京河段, 南京长江大桥上下游各约 4 km 的水域, 总体呈顺直微弯河型, 大桥上游河段河床窄深, 下游逐渐展宽, 平均河宽约 1.5 km, 平均水深约 24 m, 两岸码头密布, 如图 1 所示。南京长江大桥正桥共 9 墩 10 孔, 目前开放了 3 个船舶通航桥孔, 第 4 孔为机动船 上行通航桥孔, 第 6、8 孔为机动船下行通航桥孔, 其中第 6 孔主要供 294 kW 以上大型机动船航行, 桥孔净空高度为 24 m。通航桥孔分别设置 1 条引航道, 采用两侧连续配布航标的方式标示航道界限, 航道在 6—9 月维护水深 10.5 m, 其他月份维护水深 9.0 m。大桥水域水流流速具有中间

大、越往两岸越小的特点, 洪水期随着水位升高, 流速明显增加。水流方向总体由北向南推压, 在第 4 孔和第 8 孔航道内, 水流方向与大桥轴线法向基本一致; 在第 6 孔航道内, 水流方向与大桥轴线法向存在一定夹角, 最大 6°~7°。

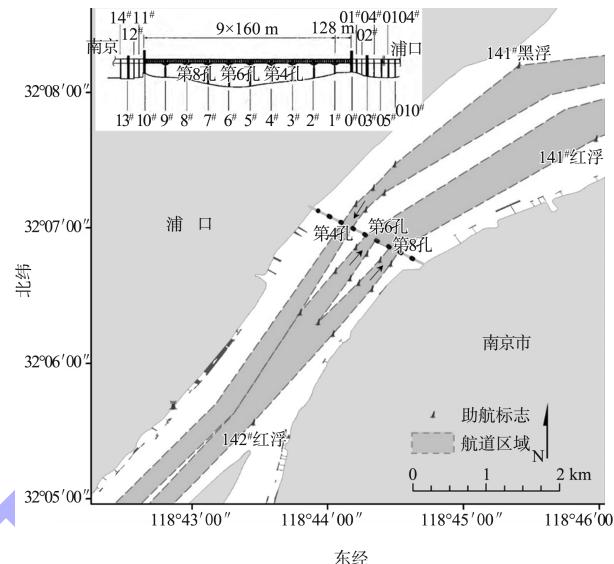


图 1 南京长江大桥水域概况

2 数据处理

AIS 数据量巨大, 手动处理无法满足分析需求, 为此开发了大规模自动化处理程序, 每日对数据进行自动处理。流程主要包括 3 个阶段: 数据采集和预处理, 船舶航迹密度计算和多源数据叠加分析(图 2)。

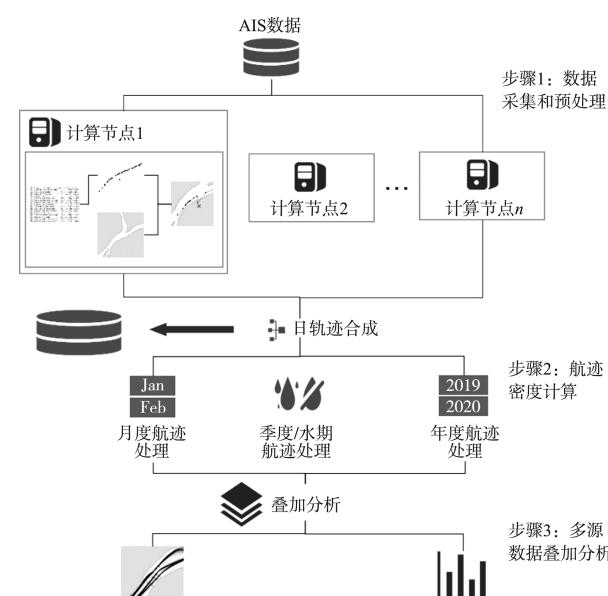


图 2 船舶规律航迹处理流程

2.1 数据采集和预处理

本研究使用的 AIS 数据来自长江通信管理部门实时推送的 AIS 原始报文, 经过解析后存储于数字航道管理系统数据库中。处理程序每日自动从数据库中导出 csv 格式的原始 AIS 数据集。受信号干扰、AIS 设备软硬件误差传输损失等多种因素影响, 原始 AIS 轨迹点存在较多噪音^[8], 为保证后续分析结果可靠, 首先应对原始数据进行预处理, 主要包括以下 3 个步骤。

1) 轨迹数据组织。按照船舶 MMSI 码将同一条船舶的 AIS 轨迹点合并为一条轨迹线, 并按照时间戳先后进行排序。如果连续两个轨迹点时间戳间隔超过一定阈值, 将其分割作为两条不同的轨迹线。

2) 删除错误记录。包括船舶 MMSI 码小于 9 位的记录, 轨迹点纬度大于 90° 或小于 -90° , 经度大于 180° 或小于 -180° 的记录, 船舶当日轨迹点少于 10 条的记录。

3) 删除异常位置。如果轨迹点与其前续后继节点距离过长, 且连线形成了尖锐角度, 则判定该点为跳点, 利用前续后继节点线性内插取代; 引入研究区陆域矢量文件, 判断与轨迹线是否相交, 如相交则删除该条轨迹线。

AIS 数据处理计算量主要集中在预处理部分, 以 2019 年为例, 每天须处理原始数据约 15 万条。为此, 采用多节点并行方式处理, 采用等量划分的原则将原始 AIS 数据集分块, 分配给每个并行计算节点处理, 有效提升了 AIS 大数据的处理效率。本研究使用 4 个并行计算节点, 能够在半小时内处理完当日所有数据。预处理阶段输出结果是当日所有船舶的轨迹线, 将这些轨迹线合成为一个数据集, 存储在产品数据库中, 待后续步骤调用。

2.2 船舶航迹密度计算

数据处理流程第 2 阶段是计算船舶航迹密度, 识别规律航迹。预处理阶段得到的轨迹线集合仅能够反映所有船舶航线在水域的覆盖情况, 但无法体现航线分布密集程度, 无法开展规律航迹分析。本流程采用一种基于格网的船舶航迹密度分

布自动化计算方法, 以规则格网值表示轨迹分布密集程度, 进而制作航迹密度分布图, 主要包括以下步骤。

1) 格网划分。将研究区划分为规则大小格网, 其上叠加合成的轨迹数据集, 本文选择的格网尺寸为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 覆盖研究区的格网总数共约 152 万个。

2) 密度计算。以每个格网中心为圆心设置一个搜索半径参数 r , 形成一个圆形区域。将每条轨迹线落入该圆域部分的长度求和, 再将其除以圆域面积, 得到的结果作为格网值。遍历该过程直到所有格网计算结束, 得到整个区域航迹密度分布图。值得注意的是, 格网是对研究区的规则划分, 便于遍历计算得到全体密度分布; 圆域则是以每个格网单元为基础, 计算密度分布值的一种抽象算法描述, 可通过灵活控制半径参数 r 调节密度计算结果, 本文将 r 设置为 10 m。

3) 归一化处理。将每个格网值除以所有格网中最大值得到归一化航迹密度分布图。

采用该方法得到的航迹密度分布图兼顾了空间自相关性, 与格网中心距离越近的轨迹线落入圆域的长度越长, 格网得到的值越高, 符合航迹密度分布特点。程序调用每日轨迹数据集, 根据需要自动合并计算月度、年度以及洪季、枯季南京长江大桥水域船舶规律航迹分布图。

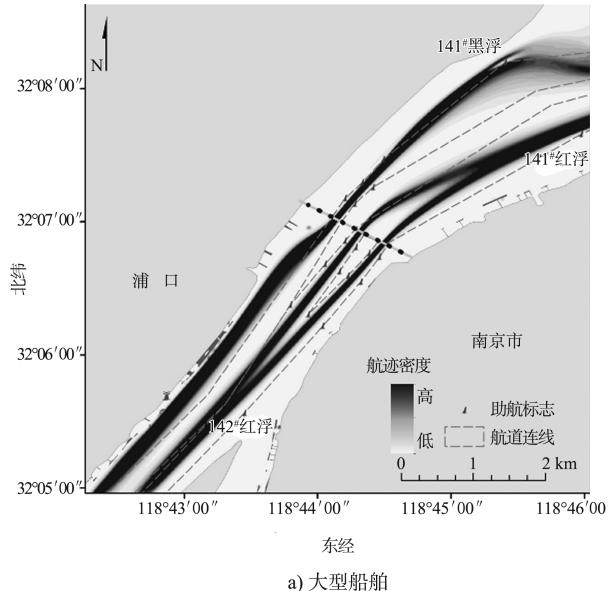
2.3 多源数据叠加分析

在航迹分析中须叠加多源地理信息, 包括岸线码头、航行标位、航道连线、桥孔桥轴等, 数据来源包括长江电子航道图和遥感影像。所有数据都统一转换为 WGS-84 地理坐标系。为直观反映规律航迹和通航要素间的空间关系, 有必要从航迹分布图中提取主航迹带以及主航迹中心线。主航迹带指的是航迹密度值处于 95% 概率范围内航迹的集合^[9], 将其矢量化为面数据。主航迹中心线是航迹中密度最高值构成的核心骨架线, 能够在一定程度上代表规律航迹。

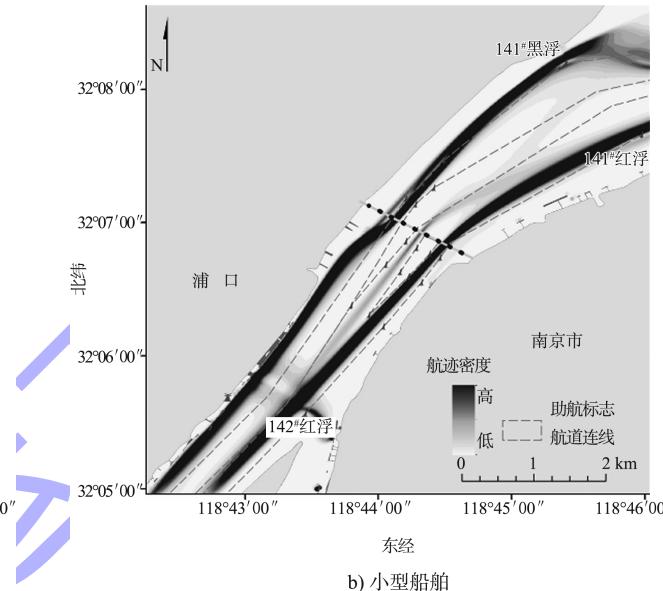
3 试验结果与分析

AIS 数据空间范围覆盖南京长江大桥整个水

域, 时间范围为 2019 年全年。总数据集超过 5 500 万条记录。数据自动处理程序采用 Python 开发, 部分 GIS 功能调用了 arcpy 开发包实现。每日轨迹合成产品采用 Oracle 数据库存储。本试验中, 预处理部分连续 2 个轨迹点分隔时间阈值设置为 10 min。为考察不同大小船舶规律航迹差异, 根据《长江江苏段船舶定线制》规定, 将 80 m 船长作为划分大型和小型船舶的条件。



a) 大型船舶



b) 小型船舶

图 3 南京大桥船舶规律航迹分布

对比发现, 大船和小船规律航迹在同一水域存在较大差别。

1) 船舶下行时, 图 3a) 显示 142#红浮附近航迹出现明显分叉, 第 6 孔和第 8 孔引航道内航迹密度分布基本一致。而小型船舶主要选择从第 8 孔通过, 图 3b) 显示第 6 孔引航道内航迹密度远低于第 8 孔。

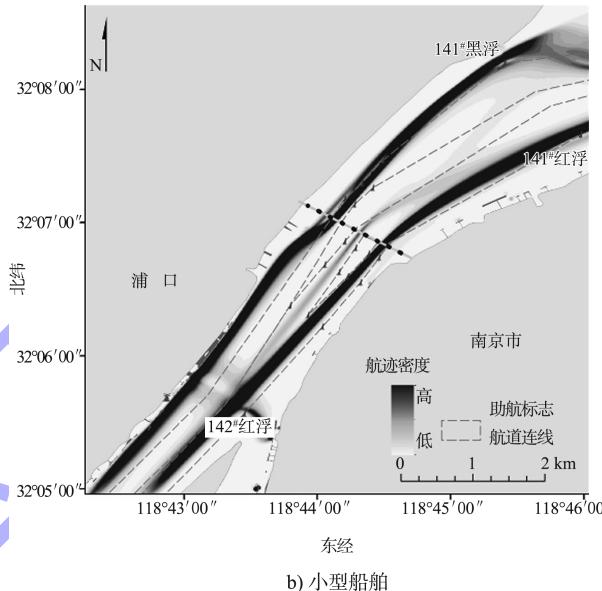
2) 船舶上行时, 大型船舶基本从第 4 孔通过, 但存在部分小船从第 3 孔通过。通过大桥后, 小船航迹明显更贴近北岸, 大船航迹和北岸距离相对较远。

3) 图 3b) 显示在 142#红浮附近, 还存在一处明显的小船横驶航迹, 这主要是由宁浦客渡小型渡轮(40~50 m)形成。

从以上船舶规律航迹分布可以看出, 南京长江大桥水域船舶航行总体符合通航规则。由于第

3.1 船舶规律航迹分布

图 3 分别为 2019 年南京长江大桥水域大、小型船舶规律航迹分布。可以看出船舶航迹呈现出典型的桥区多孔分道通航特点: 上行船舶从八卦洲头弯道经过 141#黑浮后, 主要通过大桥第 4 孔航行, 过第 4 孔后航迹偏向浦口北岸继续航行; 下行船舶经过 142#号红浮后, 分别选择第 6 孔或第 8 孔航行, 通过大桥后交汇偏向南岸继续航行。



6 孔一般只允许达到一定功率和尺寸的船舶通过, 第 8 孔则允许所有机动船通过^[10], 故大船对第 6 孔和第 8 孔的选择比较均衡。此外, 由于第 6 孔水流与桥轴法向夹角相对较大, 对小型船舶操纵要求高, 尤其是洪水期有碰撞到第 6 孔南侧桥墩的风险, 因此小船更倾向从第 8 孔通过。

图 4 为南京长江大桥水域主航迹带分布。叠加对比显示, 下行船舶主航迹带与航道连线标示区域重叠度较高, 而上行船舶主航迹带与航道区域重叠度较低。这主要是因为通过第 4 孔后, 大部分船舶会马上选择靠向北岸水流流速较低的水域航行, 这样可以减少油耗, 因此实际航迹总体在航道外侧。从图 4 还可以看出, 大型船舶主航迹带与航道区域重叠度比小船更高, 小型船舶主航迹带总体更偏航道外侧。

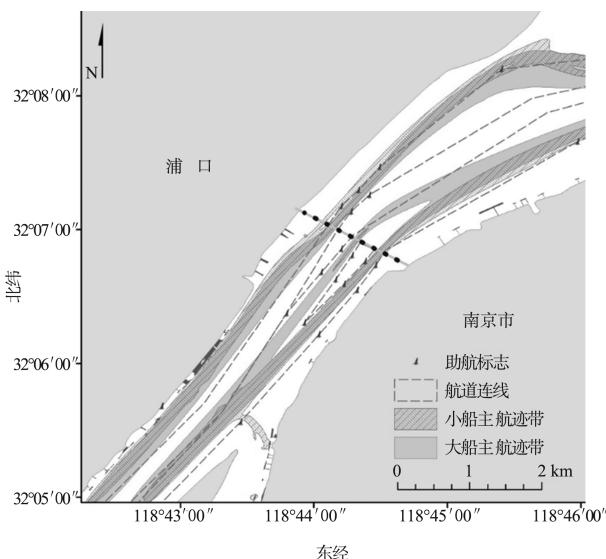


图 4 南京大桥水域船舶主航迹带

3.2 船舶规律航迹与桥轴空间位置关系

为考察船舶规律航迹和大桥空间位置关系, 提取桥轴线附近主航迹中心线, 叠加到实际遥感影像中展示, 如图 5 所示。计算主航迹中心线与桥轴法向夹角以及与各桥孔正中位置偏差, 如表 1、2 所示。



图 5 船舶航迹与桥轴空间位置关系

表 1 船舶航迹与桥轴线法向夹角 (°)

船舶类型	第 4 孔	第 6 孔	第 8 孔
大型船舶	13.01	11.79	16.89
小型船舶	17.07	14.23	19.85

表 2 船舶航迹与桥孔正中位置偏差 (偏南为正) m

船舶类型	第 4 孔	第 6 孔	第 8 孔
大型船舶	-7.8	4.7	9.3
小型船舶	-26.5	12.2	16.5

可以看出, 船舶航迹在第 4 孔处总体偏北, 第 8 孔处总体偏南, 在第 6 孔处位置相对居中; 航迹在第 8 孔处与桥轴法向夹角最大, 第 4 孔处次之, 第 6 孔处最小。相比小型船舶, 大型船舶在通过各桥孔时位置更加居中, 与桥轴法向夹角更小。叠加对比还显示, 遥感影像中实际船舶航向与主航迹中心线方向一致, 这也能够说明主航迹中心线提取的合理性。

3.3 洪枯水期航迹变化特征

为考察船舶在洪水期和枯水期规律航迹变化特征, 将 2019 年 6—9 月轨迹合成计算洪水期航迹, 将 1—2 月和 11—12 月轨迹合成计算枯水期航迹, 提取主航迹中心线叠加对比, 如图 6 所示。为展现细节差异, 另在大桥上下游各取一条断面 (方向自北向南), 绘制断面航迹密度分布, 如图 7 所示。通过对比可以发现, 无论上行还是下行, 无论大、小船型, 洪水期航迹总体更偏北岸, 枯水期更偏南岸。

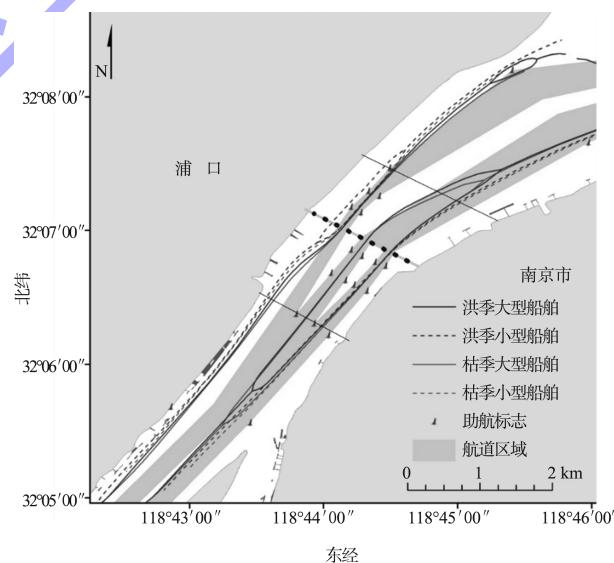
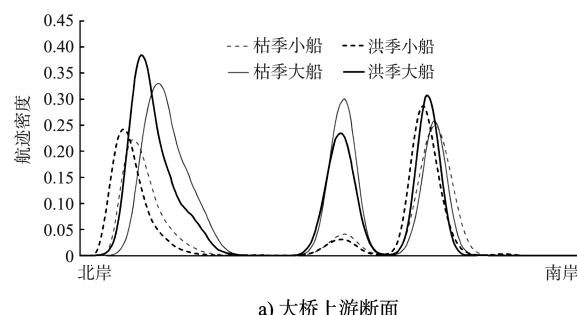


图 6 洪季和枯季主航迹中心线变化对比



a) 大桥上游断面

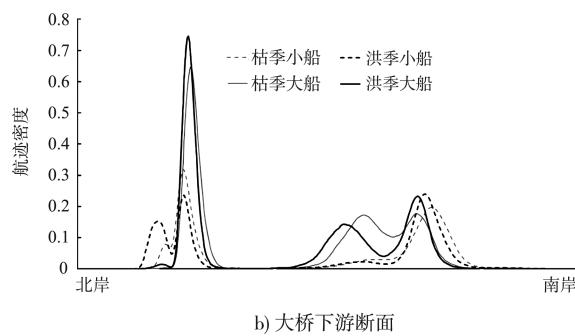


图 7 航迹密度对比

该现象可以从 2 个方面理解: 1) 洪水期上水船通过第 4 孔后航迹更偏北, 是因为洪季水流作用大, 船舶选择更贴近北岸以期进一步减少水流对船舶的顶推作用, 从而减少油耗; 2) 洪水期下水船通过第 6、第 8 孔前航迹更偏北, 是因为洪季桥区水流南压作用强, 下水船需要比枯水期更早调整船身, 略向北偏, 以便在通过狭窄引航道时获得更多调正船位的空间, 避免水流过急撞到南侧航标或桥墩; 通过桥孔后, 受水流作用影响, 船舶惯性较枯季更大, 因此操纵船舶向南岸转向会更慢, 造成航迹整体北偏。

船舶规律航迹在洪季和枯季的差异如果仅是偶然产生, 与洪枯季水位之间并无关联, 则讨论以上结果没有任何意义。为此, 选取 2019 年 7—12 月逐月航迹进行比较, 考察洪季到枯季规律航迹线演变规律。图 8 展示了大船和小船逐月航迹线变化情况。

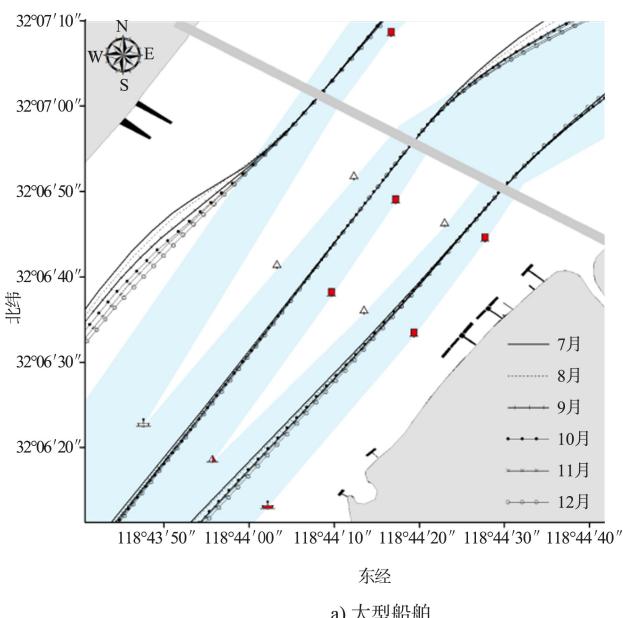


图 8 船舶逐月航迹变化

南京长江大桥水域 2019 年 7—12 月经历了一轮水位逐月降低的过程, 月平均水位分别为 6.23、5.07、3.26、2.61、2.10 和 1.45 m。从图 8 中可以看出, 无论大型船舶还是小型船舶, 航迹线在 7—12 月都呈现出明显的由北向南逐渐演变的趋势, 与水位变化相关性强。由此可以判断, 对洪季、枯季船舶规律航迹的变化分析前提是成立的。

4 结论

1) 南京长江大桥水域船舶航行总体符合航行规则。上行船舶主要从第 4 孔通过, 下行大船在第 6 孔和第 8 孔选择上较均衡, 小船主要从第 8 孔通过。船舶通过桥孔时航迹总体处于中间, 与桥轴法向夹角皆在 20° 以内。

2) 大型船舶航行比小型船舶更加规范。大船主航迹带与航道重叠度较小船更高, 更偏向在航道内航行。通过桥孔时, 大船位置更居中, 与桥轴法向夹角更小。部分小船在上行时从第 3 孔通过。

3) 洪水期对船舶操纵影响明显, 无论上行还是下行, 船舶在洪季航迹整体更偏北, 随着水位降低逐步向南演变。未来研究将从更多渠道采集船舶属性信息, 按照船舶类型和吃水进一步区分规律航迹, 并加入船舶航速和航向讨论, 深入研究桥区船舶行为特征。

另一方面, 未来研究将考察其他规律航迹生成方法, 如基于格网统计的轨迹密度计算方法, 并与本文采用的方法进行对比。

参考文献:

- [1] 林强.南京长江大桥第5孔开通上行通道可行性研究[J].水运工程, 2016(7): 77-82.
- [2] 崔国平.南京长江大桥桥区水域通航风险分析及安全管理对策[D].大连: 大连海事大学, 2012.
- [3] 毛嘉莉, 金澈清, 章志刚, 等.轨迹大数据异常检测: 研究进展及系统框架[J].软件学报, 2017, 28(1): 17-34.
- [4] 李昱, 张扬, 史卿.基于大数据的航标配布优化效果评估方法[J].水运工程, 2019(8): 161-164.
- [5] 徐婷, 戴文伯, 鲁嘉俊.基于自动识别系统大数据的船舶施工轨迹识别与预测[J].水运工程, 2019(12): 119-122, 126.
- [6] 李建江, 陈玮, 李明, 等.基于网格热度值的船舶规律路径提取算法[J].计算机研究与发展, 2018, 55(5): 908-919.

(上接第149页)

- [17] KARAMI H, EHTERAM M, MOUSAVI S F, et al. Optimization of energy management and conversion in the water systems based on evolutionary algorithms[J]. Neural computing and applications, 2019, 31(10): 5951-5964.
- [18] XU X B, YANG G S, TAN Y. Identifying ecological red lines in China's Yangtze River economic belt: a regional

(上接第173页)

3)通过对分水岭的线路方案比较, 推荐路线长度、移民占地等条件较优的方案2(水库方案), 工程咨询阶段应对红旗岗船闸的施工和工程对水库运行的影响进一步论证。

参考文献:

- [1] 王平义, 李健, 王梅力, 等.建设人工运河, 打造西部南北水运出海大通道[J].中国水运(下半月), 2019, 19(7): 33-34, 36.
- [2] 高嵩, 焦芳芳.赣粤运河建设的必要性和可行性[J].中

- [7] ZHANG L Y, MENG Q, FWA T F. 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.

- [8] MAO S, TU E, ZHANG G, et al. An automatic identification system (AIS) database for maritime trajectory prediction and data mining[C]//Proceedings of ELM-2016. Springer, 2018: 241-257.

- [9] 陈金海, 陆锋, 李明晓.海上主航迹带边界统计推断与海西航路警戒区布局优化分析[J].地球信息科学学报, 2015, 17(10): 1196-1206.

- [10] 陈勇保, 王瑞勤.关于南京长江大桥通航桥孔调整的必要性与可行性探讨[C]//中国航海学会.中国航海学会2010年学术年会论文集.北京: 中国航海学会, 2010: 81-85.

(本文编辑 郭雪珍)

- [17] KARAMI H, EHTERAM M, MOUSAVI S F, et al. Optimization of energy management and conversion in the water systems based on evolutionary algorithms[J]. Neural computing and applications, 2019, 31(10): 5951-5964.
- [18] XIE A, LIU P, GUO S, et al. Optimal design of seasonal flood limited water levels by jointing operation of the reservoir and floodplains[J]. Water resources management, 2018, 32(1): 179-193.

(本文编辑 王璁)

- [3] 国水运, 2020(3): 27-29.

- [4] 浙江省交通规划设计研究院.衢江上游常山江航运工程预可行性研究报告[R].杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2016.

- [5] 浙江省交通规划设计研究院.钱塘江中上游航道常山江航运规划(报批稿)[R].杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2009.

- [6] 湖北省交通规划设计院股份有限公司.浙赣运河(常山江至省界段)建设方案研究报告[R].武汉: 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 2017.

(本文编辑 郭雪珍)