姜 丹,曾 晨,傅代均.内河船舶营运数据处理与碳强度核算方法研究——以重庆籍船舶为例 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):463-473.
Jiang D, Zeng C, Fu D J. Research on data processing and carbon intensity calculation methodology for inland ship - A case study of Chongqing ships [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):463-473.

内河船舶营运数据处理与碳强度核算方法研究
——以重庆籍船舶为例

姜 丹[1],曾 晨[1*],傅代均[2] (1.重庆交通大学航运与船舶工程学院,重庆 400074；2.重庆航运交易所,重庆 400025)

摘要：为了更准确地评价内河船舶碳排放强度,通过采集重庆籍 5000GT 及以上船舶的营运数据,在静态参数填充和动态轨迹修复的基础上,结合基于载运能力和运输距离的船舶碳强度指标计算方法,提出了适用于内河船舶数据特征的碳强度核算方法,并探究了船龄、船型、船籍港和平均航速等因素与船舶碳强度指标的相关性特征.结果表明:研究样本 2021 年 10 月的碳强度指标均处于 10^{-6} 数量级,并在(2.47~10.53)×10^{-6}t/(t·km)区间分布.随着船龄的增加,船舶碳强度指标呈上升趋势,而碳排放量与承载能力则呈负相关.根据碳强度指标值的中位数与平均数对各船型的整体能效水平进行量化与排序,结果为滚装船>杂货船>集装箱船>干散货船>客船.重庆主城籍营运船舶的能效普遍优于区县籍船舶,亟需通过建立标准化的碳排放监管制度以提升重庆籍船舶的整体能效水平.碳强度指标与平均航速有较强的相关性,且不同船型呈现不同变化特征,并分别在不同航速点达到碳强度最低值.

关键词：内河船舶；营运数据处理；碳强度指标；碳排放评价
中图分类号：X763.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0463-11

Research on data processing and carbon intensity calculation methodology for inland ship - A case study of Chongqing ships.

JIANG Dan[1], ZENG Chen[1*], FU Dai-jun[2] (1.Department of Shipping Navigation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China；2.Chongqing Shipping Exchange, Chongqing 400025, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：463~473

Abstract：A carbon intensity accounting method was developed to account for the distinct data characteristics of inland river ship based on carrying capacity and transport distance. The correlation between ship carbon intensity indicator (CII) and factors including vessel age, ship type, port of registry and average speed was analyzed based on operational data collected from ships of 5,000GT and above registered in Chongqing after static parameter filling and dynamic trajectory repair. The results indicated that the carbon intensity values of the study sample in October 2021 were all on the order of 10^{-6}, ranging between 2.47×10^{-6} and 10.53×10^{-6}t/(t·km). As vessel age increases, the CII demonstrates an upward trend, whereas carbon emissions exhibit a negative correlation with carrying capacity. The overall energy efficiency levels of different ship types were quantified and ranked based on the median and mean values of their CIIs. The resulting order from highest to lowest energy efficiency was Ro-Ro vessels, general cargo ships, container ships, dry bulk carriers, and passenger ships. Vessels registered in main urban area of Chongqing generally demonstrate superior energy efficiency compared to those from its outer districts and counties. Thus establishing a standardized carbon emission monitoring system was crucial to enhance the overall energy efficiency of the ship fleet registered in Chongqing. The CII demonstrated a strong correlation with ship average speed. Furthermore, different ship types exhibit distinct variation characteristics, each reaching its minimum carbon intensity at different specific speed points.

Key words：inland ship；data processing；carbon intensity indicator(CII)；evaluation of CO_2 emissions

国际海事组织(IMO)在第 4 次温室气体研究报告中指出,2018 年全球航运业的 CO_2 排放量高达 10.56 亿 t,其中内河航运的 CO_2 排放量约为 3.16 亿 t,占当年航运业 CO_2 排放总量的 29.9%,并呈逐年上升趋势[1].为解决航运领域碳排放控制问题,IMO 颁布了《IMO 温室气体减排战略》,明确了航运业脱碳目标与控制措施,并引入碳强度指标评价体系(CII)要求 5000 总吨及以上符合常规船型的所有船舶需基于营运数据核算碳强度指标.目前,该体系已纳入国际防止船舶造成污染公约(MARPOL)附则Ⅵ的相关管理条例,并已于 2023 年 1 月 1 日起强制执行.因此,科学地进行船舶碳排放量及碳排放强度核算,不仅对航运领域减排决策的制定与实施具有重要的参考价值,且对航运业实现脱碳目标具有积极的推动作用.

收稿日期：2025-06-12
基金项目：国家自然科学基金项目(51909017)
* 责任作者, 副教授, jiangdan@cqjtu.edu.cn

国内外学者针对船舶碳排放核算展开了大量研究,旨在为推动航运业实现碳中和目标提供理论方法和决策依据.目前,船舶碳排放核算方法主要分为自上而下和自下而上两种类型[2-3].自上而下法通过燃油消耗数据和排放因子进行船舶碳排放测算,具有操作简单的优点,但无法反映船舶实际航行状态,存在较大不确定性.自下而上法多采用船舶自动识别系统(AIS)提供的船舶实时移动数据,结合船舶发动机功率、发动机负载系数等船舶静态数据进行船舶碳排放核算.该方法应用广泛,可以准确反映船舶碳排放的时空分布特征,但存在船舶 AIS 数据缺失和船舶静态数据获取困难的问题.为了更准确的核算船舶碳排放量,研究者们致力于构建精确的核算框架和数据处理方法,例如利用多变量敏感分析构建碳足迹核算框架[4],结合AIS数据的自下而上动力法[5],以及融合随机森林算法和轨迹分割算法建立估算模型[7].这些方法和模型已被应用于中国全尺度船舶排放清单测算、天津港船舶碳排放时空特征提取等宏观和区域层面的实践研究[5-6].最终可为行业决策者提供脱碳策略工具[4],并为中国分阶段实施船舶 CO_2 排放控制和管理提供政策建议[7].碳强度指标的提出,为航运业衡量船舶碳排放水平提供了量化依据.碳强度指标表征了营运船舶的能效性能,指标值越低则代表船舶能效水平越高.克拉克森研究[8]数据表明,如果不实施相应措施,至 2026 年全球约 42%的散货船和集装箱船将无法达到 CII C 级标准.为提升船舶碳强度(CII)合规能力与减排效益,现有研究聚焦于评级影响分析、优化策略开发及区域实践评估.Bayramoğlu[9]采用案例模拟与量化分析的方法,验证了替代燃料、航行时长与发电机组合对双燃料集装箱船碳强度评级的影响.在优化策略方面,Hua 等[10]提出兼顾合规与效益的航速优化模型,可在维持 C 级以上评级的同时提升年度满载航程 5%~8%;车连发等[11]与高文等[12]分别基于渤海区域船队及中国籍散货船的实际数据,识别不同类型船舶的碳排放特征,指出航线规划、运营优化与燃料改造是实现 CII 达标的有效路径.

船舶碳排放已成为当前绿色航运的关注热点,2015 年交通运输部发文,正式设立了珠三角、长三角和环渤海水域三大船舶排放控制区.2018 年在此基础上,进一步出台《船舶大气污染物排放控制区实施方案》,将排放控制区由沿海扩展到内河[13].2022 年中华人民共和国海事局印发了《船舶能耗数据和碳强度管理办法》,要求中国国际航行船舶(5000 总吨及以上)采用 IMO 标准公式进行碳强度指标(CII)计算,且国内航行的内河船舶需记录船舶能耗数据并评估能效水平,以备海事管理机构监督检查[14].然而,内河船舶的营运模式及船舶基础数据的采集问题,导致 IMO 提出的碳强度评价体系无法直接应用于内河船舶能效水平的评估,且目前尚缺乏衡量我国内河船舶碳强度核算的技术标准和相关研究.因此,本文将基于 IMO 碳强度指标体系,提出适用于内河营运船舶的碳强度核算方法,通过收集重庆籍 5000GT 及以上船舶的营运数据,实现碳强度指标的量化测算与多维度分析,研究船龄、船型、船籍港和平均航速等因素与碳强度指标的相关性,进而提取重庆籍船舶的能效特征.

1 内河营运船舶碳强度指标核算方法

1.1 内河营运船舶碳强度指标

IMO 于海上环境保护委员会(MEPC)第 78 次会议审议通过了碳强度指标最新导则(MEPC.352(78)决议),明确采用基于载运能力和运输距离的核算方法作为船舶碳强度的强制性核算指标,分别是年度船舶能效率(AER)(适用于散货船、气体运输船、液货船、集装箱船、杂货船、冷藏货船、兼用船和液化天然气运输船)和基于总吨运输距离的碳强度指标(CgDIST)(适用于滚装船、普通客船和豪华邮轮).导则中营运船舶的CO_2排放量由燃油消耗量和碳转换系数相乘得到,而燃油消耗数据来源于 IMO DCS 系统.考虑到中国籍内河船舶不属于上述系统的报送范畴,且我国内河航运系统缺乏规范的油耗数据收集体系,无法得到准确的燃油消耗数据,进而无法通过导则中方法进行碳排放量计算.因此,本文对照碳强度指标导则,提出内河营运船舶碳强度指标,即 $AER_{内}$和 $CgDIST_{内}$,采用自下而上动力法计算内河营运船舶的 CO_2 排放量,再结合运输功核算碳强度指标,所得指标值越小则代表该内河船舶的能效水平越高.$AER_{内}$和 $CgDIST_{内}$的核算方法如式(1)所示,式(2)为基于自下而上动力法的船舶碳排放量计算方法.

$$\mathrm{AER}_{内}=\frac{\sum_{i=1}^{n}E_{\mathrm{CO}_{2i}}}{\mathrm{DWT}\times\sum_{i=1}^{n}D_i} \tag{1}$$

$$\mathrm{CgDIST}_{内}=\frac{\sum_{i=1}^{n}E_{\mathrm{CO}_{2i}}}{\mathrm{GT}\times\sum_{i=1}^{n}D_i} \tag{2}$$

$$E_{\mathrm{CO}_{2i}}=\sum_{m=1}^{4}\sum_{p=1}^{2}\mathrm{MCR}\times\mathrm{LF}\times T\times\mathrm{EF}\times A_{\mathrm{LF}}\times10^{-6} \tag{3}$$

式中:$E\mathrm{co}_{2i}$为船舶第 i 次航程的 CO_2 排放量,t;m 与 p 代表航行工况和动力设备类型,表示为船舶在某种航行工况下某类动力设备的碳排放量, m=1,2,3,4,分别代表停泊、机动、低速巡航和巡航四种航行工况,p=1,2,代表主机、辅机 2 种动力设备(考虑到内河船舶的锅炉功率小且工作时间短或部分船舶未配备锅炉系统,因此本文只考虑主机、辅机两种碳排放源[15]);MCR 为发动机额定功率,kW; LF 为发动机负载率,无量纲;T 代表航行活动时间,由每一航段中相邻 AIS 轨迹点之间的时间差叠加而得,h;EF 为 CO_2 排放因子,t/(kW·h); A_{LF} 为低负载系数,无量纲,由 IMO 提出,用于修正主机负载率低于 20%时的排放计算(受内河通航环境制约,内河船舶的航行负载率普遍较低,需要引入低负载系数进行排放修正[16]);D_i 表示船舶第 i 个航次对应的航行里程,km.DWT 和 GT 则分别对应载重吨和总吨,t.

1.2　内河营运船舶碳强度指标核算参数确定

内河营运船舶碳强度指标核算参数包括基于航次的 CO_2 排放量、基于航次的航行里程以及船舶承载能力参数.CO_2 排放量由自下而上动力法测算得到,承载能力为船舶静态参数,重庆籍营运船舶各航次对应的航行里程及碳排放测算所需的 AIS 数据通过 Hifleet 平台数据库导出,该平台提供全球实时船位跟踪、历史 AIS 轨迹回放、船舶营运服务信息等航运大数据服务,本研究导出的数据主要包括船舶历史 AIS 轨迹(MMSI 号、时间、瞬时航速、经度、纬度)及船舶里程信息等.

动力法的计算参数包括发动机额定功率、发动机负载率、航行活动时间、CO_2 排放因子和低负载系数.发动机额定功率属于船舶静态参数;航行活动时间通过动态轨迹数据中轨迹点时间信息计算得到.船舶主机负载率由瞬时航速和最大设计航速决定,计算公式如式(3)所示;根据《第二次全国污染源普查公报》,辅机负载率与船型及船舶航行工况相关,航行工况判断依据及辅机负载率参考值如表 1、2 所示.发动机负载率内河船舶多为中速发动机,且长江干线属于内河排放控制区,要求船用燃油含硫量低于 0.1%[17],因此发动机排放因子将参考《第二次全国污染源普查公报》中对应中速机和含硫量低于 0.1%的移动源污染源排放系数,具体见表 3.内河船舶长期处于低负荷状态航行,导致主机排放强度上升,需引入低负载修正系数 A_{LF} 进行修正,修正系数取值参见表 4.

$$\mathrm{LF}_{主机}=\left(\frac{V_{瞬时}}{V_{\max}}\right)^3 \tag{4}$$

式中:$V_{瞬时}$是船舶瞬时航速,单位是 km/h,从动态轨迹数据中提取;$V_{\max}$ 是船舶最大设计航速,属于船舶静态参数.该公式来源于基于螺旋桨推进特性的主机负载率公式,用于估算不同航速下的主机负荷,是由全球咨询和技术服务公司(ICF International)于 2009 年提出的经验公式,可用于简化主机负载率的计算过程,目前被广泛应用于相关领域.

表 1　航行工况判定依据[18]

Table 1　Basis for determination of navigational conditions

航行工况	判定依据
停泊	V≤1.852km/h
机动航行	V>1.852km/h;LF $_{主机}$≤20%
低速巡航	20%<LF $_{主机}$≤65%
巡航	LF $_{主机}$>65%

表 2　辅机负载率参考表[18]

Table 2　Auxiliary load factor reference table

船型	航行工况			
	巡航	低速巡航	机动航行	停泊
干散货船	0.17	0.27	0.45	0.22
集装箱船	0.13	0.25	0.48	0.19
杂货船	0.17	0.27	0.45	0.10
滚装船	0.15	0.30	0.45	0.26
客船	0.80	0.80	0.80	0.64

表 3　CO_2 排放因子[18]

Table 3　CO_2 emission factors

发动机类型	燃油含硫量(%)	排放因子[g/(kW·h)]
主机	0.1	646.10
辅机	0.1	690.70

表 4 CO_2 排放低负载修正系数参考表[18]

Table 4 Low-load correction factor reference table

LF	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
A_{LF}	5.82	3.28	2.44	2.01	1.76	1.59	1.47	1.38	1.31	1.25
LF	11%	12%	13%	14%	15%	16%	17%	18%	19%	20%
A_{LF}	1.21	1.17	1.14	1.11	1.08	1.06	1.04	1.03	1.01	1.00

注:负载率为1%~20%的低负载系数参考值.

2 船舶数据采集与处理

2.1 船舶数据采集

本文选取 200 艘 5000GT 及以上的重庆籍营运船舶作为研究样本,并按照碳强度指标导则要求将其划分为以 DWT 和 GT 作为承载能力参数的两组船舶,即 $AER_{内}$组和 $CgDIST_{内}$组.$AER_{内}$组对应干散货船、集装箱和杂货船 3 种船型,共 160 艘;$CgDIST_{内}$组对应客船、滚装船 2 种船型,共 40 艘.分别获取样本组中船舶的静态参数和动态轨迹数据进行碳强度指标的核算.

根据海事局档案资料及导助航服务系统数据库获取研究样本的发动机额定功率、最大设计航速和承载能力参数等船舶静态参数信息.对于缺失的静态参数值,本文通过多元回归分析法进行填充,缺失情况统计见表 5.

表 5 静态参数缺失情况统计

Table 5 Statistics on missing static parameters

组别/承载能力	船型	数量	承载能力缺失率(%)	主机功率缺失率(%)	设计航速缺失率(%)
$AER_{内}$组(DWT)	干散货船	63	36.51	23.81	42.86
	集装箱船	53	16.98	9.43	26.42
	杂货船	44	25	38.64	47.73
$CgDIST_{内}$组(GT)	滚装船	20	15	20	40
	客船	20	35	30	30

注:表中静态参数缺失率为基于船型划分的缺失率.

从 Hifleet 平台导出 2021 年 10 月 1 日至 31 日的 AIS 动态轨迹数据用于碳强度指标核算,共 1451536 个轨迹点(行),其航迹覆盖长江干线.受限于内河船舶 AIS 系统传输信号不稳定、内河航道环境复杂多变和船员违规操作等因素,船舶动态数据会出现轨迹点航速异常、轨迹段缺失两类缺陷[19-20],将严重影响碳强度指标核算的精确性.航速异常表现为瞬时航速大于最大设计航速,轨迹段缺失表现为轨迹段缺失表现为相邻两个轨迹点的时间间隔大于 AIS 报送的最大间隔且地理间隔大于船长,通过如表 6 所示的异常信息边界条件筛选得到 2061 个异常航速点和 1572 处缺失轨迹段.对于轨迹点航速异常现象,本文将采用三次样条插值法进行修复;对于轨迹段缺失现象,本研究将通过基于 DBSCAN 算法的轨迹聚类分析进行重构修复.

表 6 轨迹异常信息判断边界条件

Table 6 Boundary conditions for trajectory anomaly judgement

轨迹缺陷类型	信息类别	异常边界范围
轨迹段航速异常	瞬时航速(km/h)	$V_{瞬时}>V_{max}$
轨迹段缺失	轨迹点时间间隔(min)	$T_{n+1}-T_n\geqslant 12$
	轨迹点地理位置间隔(m)	Distance(n,n+1)≥1000

注:考虑到信号传输延迟等,相邻轨迹点时间间隔大于12min判定为长时间缺失[7],间距大于1000m则为长距离缺失[21].

2.2 船舶数据处理

2.2.1 船舶静态参数补充 提取 MMSI 号、船长(L)、船宽(B)、主机额定功率($MCR_{主}$)、总吨(GT)、载重吨(DWT)和最大设计航速(V_{max})等船舶静态信息,构建静态参数子数据库.对子数据库中各项参数值进行皮尔逊相关性度量,结果如图 1 所示,船舶主机额定功率、总吨和载重吨参数与 L×B 参数的相关性最强.因此,分别对 L×B 与 $MCR_{主}$、GT 和 DWT 进行回归拟合分析,得到各船型中三类参数的回归模型,用于补充缺失的静态参数值.最大设计航速与各项参数之间的皮尔逊系数的绝对值均小于 0.3,部分组别的结果甚至接近 0,表明最大设计航速与其他参数之间呈弱相关性.对于最大设计航速的缺失值,本文参考《川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列》中设计航速标准值填充[22];对于辅机额定功率缺失值,本文基于《第二次全国污染源普查公报》中给出的船舶主辅机额定功率比值计算得到[18].研究样本船舶缺失静态参数的填充依据见表 7,缺失的承载能力参数与主机功率由回归分析所得模型填充,缺失的辅机功率及最大设计航速分别参考《川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列》和《第二次全国污染源普查公报》.

2.2.2 船舶动态轨迹修复 为详细说明轨迹修复方法,本文以 HANHUA888 轮为示例(船舶参数信息见表 8),通过表 6 所示边界条件对其 2021 年 10 月的

轨迹进行筛选,共识别出 17 个异常航速轨迹点和 3 处缺失轨迹段.对于航速异常现象,剔除异常点后得到离散轨迹序列,选定离散点处为待插值序列,在该序列上分别构建时间—经度、时间—纬度、时间—速度的三次样条函数,通过设置端点处连续、内部点连续可导条件构建样条函数的系数矩阵,求解后得到样条函数表达式,用于计算该序列任意时刻对应的经纬度、和速度,从而实现轨迹修复.2021 年 10 月 24 日 05:44:32~06:43:46 时间序列中共 18 个轨迹点,其中 06:13:33 和 06:39:34 轨迹点的瞬时航速大于最大设计航速,属于航速信息异常现象,选取该时间序列作为速度信息异常轨迹点修复的可视化说明,见图2.

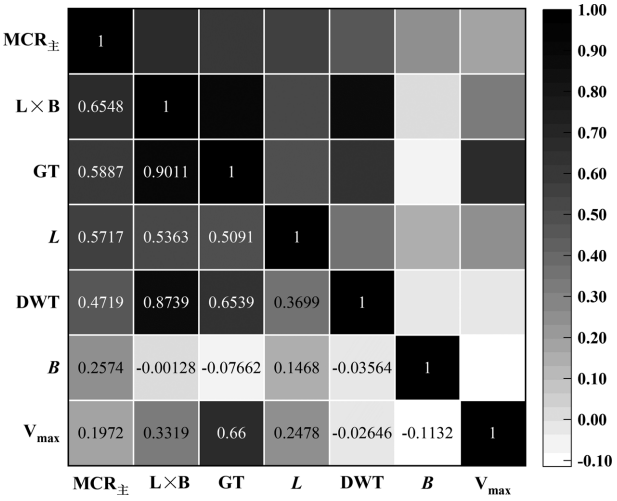


图 1　船舶静态参数皮尔逊相关性热图

Fig.1　Heat map of Pearson correlation of static parameters

表 7　船舶静态参数填充依据

Table 7　Basis for filling static parameters of ships

船型	承载能力参数(t)	主机功率(kW)	辅机(kW)	最大设计航速(km/h)
干散货船	Y=0.0003x^2+0.1169x+288.36R^2=0.831	y=0.002x^2+1.9314x+1389.95R^2=0.689	0.222MCR主	18
杂货船	Y=0.0003x^2+1.6167x−192.28R^2=0.827	y=0.0005x^2−0.0602x+215.54R^2=0.811	0.222MCR主	18
集装箱船	Y=−0.005x^2+18.81x−12912.21R^2=0.619	y=0.0012x^2−2.2334x+1411.69R^2=0.611	0.220MCR主	20
滚装船	Y=0.001x^3−0.055x^2+122.5x−83951.3R^2=0.631	y=0.0003x^2−0.8797x+2307.98R^2=0.601	0.259MCR主	23
客船	Y=0.0003x^2+3.7463x−1222.21R^2=0.811	y=−0.0001x^2+1.2447x−200.03R^2=0.796	0.278MCR主	27

注:干散货船、杂货船和集装箱船对应L×B与DWT的回归模型,滚装船、客船对应L×B与GT的回归模型.

表 8　HANHUA888 轮基本信息

Table 8　Basic Information of HANHUA888

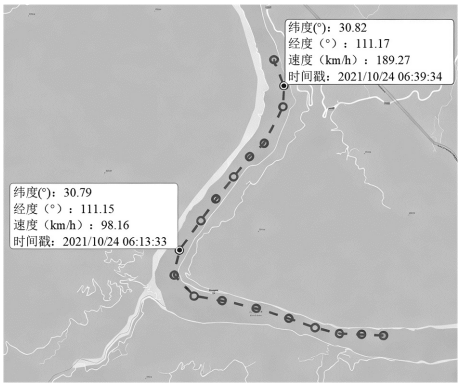
MMSI	船型	主机功率(kW)	辅机功率(kW)	总吨/载重吨(t)	最大设计航速(km/h)
41397778	干散货船	1202	266.84	5602/6124	22

对于轨迹段缺失现象,由于船舶在内河航道中的行为具有相似性[23],可通过聚类算法实现缺失区域船舶运动典型行为规律的挖掘,并提取核心轨迹点实现缺失区域的轨迹重构[20-21].本文采用基于空间-航向双指标的船舶聚类方法:首先,根据经纬度范围从动态轨迹数据中集成出缺失区域的轨迹库,并基于MMSI号与超时分割航次原则对每一艘船舶的轨迹进行分割与编号(若同一艘船舶的两相邻轨迹点时间间隔超过 24h,则以第二个点为新航次起点),以航次ID号(MMSI号+航次号)作为聚类基本单元,基本情况见表 9.其次,采用如式(5)所示豪斯多夫(Hausdorff)距离计算公式度量轨迹间空间相似性,同时通过确定各轨迹关键转向点与其航向角差值实现轨迹间的航向差异性的衡量,计算方法如式(6).随后,设置空间聚类邻域半径(ε_1)和航向差值邻域半径(ε_2)作为确定两条轨迹是否为同一轨迹簇的相似性阈值,结合形成有效的轨迹簇所需要的最小轨迹点数(MinPts)实现基于密度的轨迹聚类;得到轨迹簇后,通过轮廓系数评估聚类质量,系数越接近 1 表明轨迹簇内相似性越高、簇间区分度越好.最后,沿航行方向对簇中心线进行垂直扫描,获得核心轨迹(扫描阈值由缺失段时间间隔与 AIS 系统报送间隔的比值确定)[24],并将核心轨迹点所在轨迹簇的平均航速最为该点的瞬时航速.提取核心轨迹点的经纬度、时间戳、航向和瞬时航速等动态信息,实现缺失区域的轨迹修复.

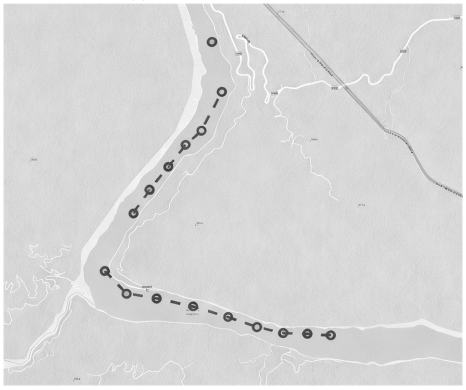
$$\text{Hausdorff} = \max\left\{d(T_A,T_B)\quad d(T_B,T_A)\right\} \tag{1}$$

式中:$d(T_A,T_B)$和$d(T_B,T_A)$分别代表 T_A 轨迹到 T_B 轨迹最接近点的最大距离和 T_B 轨迹到 T_A 轨迹最接近点的最大距离.

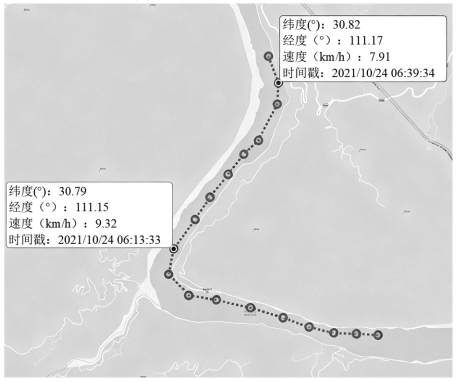
$$\begin{cases} D_{COG}(T_A,T_B) = \left|COG(T_A) - COG(T_B)\right| \\ COG(T_A) = COG(A_k) \\ COG(T_B) = COG(B_q) \end{cases} \tag{2}$$



(a) 速度异常点原始轨迹



(b) 清除异常点后轨迹



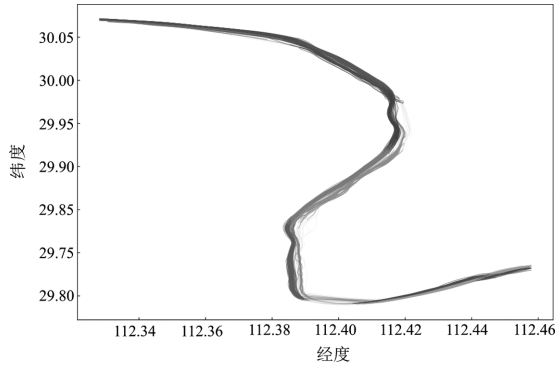
(c) 插值修复后轨迹

图 2 速度信息异常点修复过程

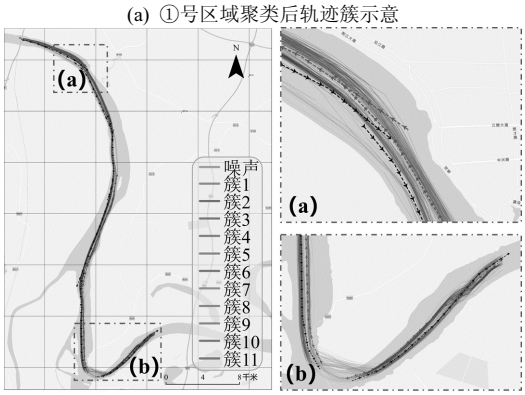
Fig.2 Speed information anomaly repair process

式中:COG(A_k)和 COG(B_q)分别代表 T_A 和 T_B 两段轨迹中关键转向点的航向值,关键转向点是指在一段轨迹中离起点和终点所连线段直线距离最远的点.

通过调整 ε_1、ε_2 和 MinPts 的取值进行多次聚类分析实验,观察轨迹簇形成状态及噪声值分布情况,选择噪声值分布范围小且轮廓系数接近于 1 的组合作为聚类分析的参数选择.缺失轨迹段修复信息统计如表 10 所示,修复过程如图 3~图 5 所示,结果表明,各区域噪声数据的离散程度较低(主要集中在轨迹弯折幅度大、光滑程度低的区域),且轮廓系数均接近 1,表明聚类效果较好.



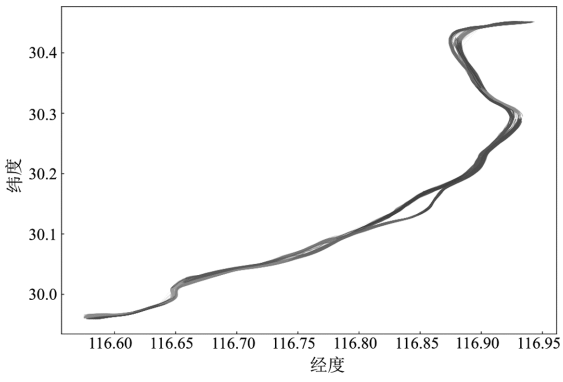
(a) ①号区域聚类后轨迹簇示意



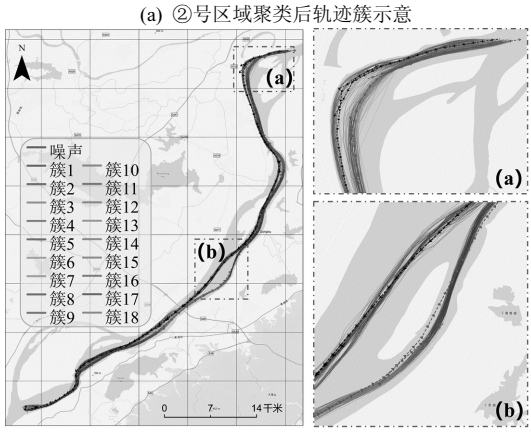
(b) ①号缺失区域核心轨迹示意

图 3 ①号缺失轨迹段修复过程

Fig.3 Trajectory repairing process in aera ①



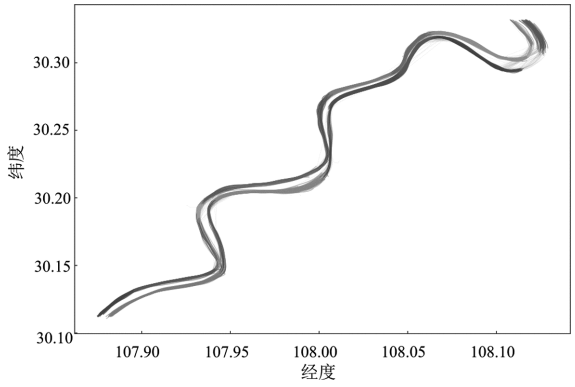
(a) ②号区域聚类后轨迹簇示意



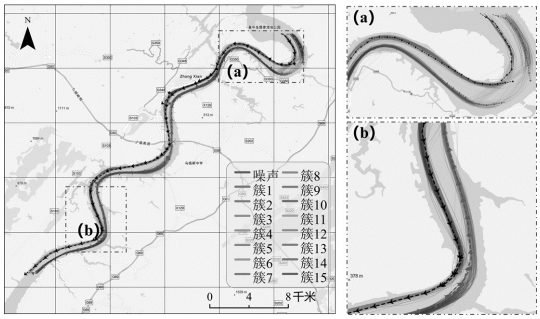
(b) ②号缺失段区域核心轨迹示意

图 4 ②号缺失轨迹段修复过程

Fig.4 Trajectory repairing process in aera ②



(a) ③号缺失段区域示意



(b) ③号缺失段区域核心轨迹示意

图 5　③号缺失轨迹段修复过程

Fig.5　Trajectory repairing process in aera ③

表 9　缺失区域轨迹集基本信息

Table 9　Information of the missing area

编号	缺失区域经纬度区间	直线距离(km)	时间间隔	轨迹集轨迹点数	轨迹ID数
①	[112.328°E,112.458°E] [29.729°N,30.073°N]	40.25	10/3 22:23:41~ 10/4 00:15:27	21323	2126
②	[116.575°E,116.959°E] [29.959°N,30.452°N]	59.31	10/17 14:28:51~ 10/17 22:17:18	29152	3004
③	[107.862°N,108.146°E] [30.112°N,30.332°N]	33.92	10/28 06:32:30~ 10/28 10:28:33	29984	4428

表 10　HANHUA888 轮缺失轨迹段修复情况

Table 10　Rehabilitation of the HANHUA 888

编号	ε_1(km)	ε_2(°)	MinPts(个)	轮廓系数	轨迹簇数量	新增轨迹点数
①	0.37	24.7	5	0.67	6	37
②	0.41	11.4	7	0.71	11	56
③	0.34	31.2	3	0.76	8	26

3　重庆籍营运船舶碳强度评价分析

3.1　重庆籍营运船舶碳强度指标核算结果

将处理得到的营运数据代入式(1)与(2)核算船舶碳强度指标,研究样本于 2021 年 10 月的碳强度指标均处于 10^{-6} 数量级,并在(2.47~10.53)×10^{-6}t/(t·km)区间分布,所得结果与车连发等[11]关于碳强度指标的研究成果相近,其中干散货船型的碳强度指标处于同一数量级,证明本研究具备一定的可靠性.部分船舶的碳强度指标核算结果详情见表 11;图 6 为各艘船舶月度里程、承载能力和月度碳排放量的三维分布图,分别由 Hifleet 数据库导出、静态参数填充和自上而下动力法测算得到;图 7 为各艘船舶月度碳排放量与碳强度指标的散点分布图,碳强度指标值由 $AER_{内}$和 $CgDIST_{内}$核算方法计算得到.

表 11　碳强度指标核算结果

Table 11　Carbon intensity indicator accounting results

编号	指标组别	船型	DWT/GT(t)	月度里程(km)	月度 CO_2 排放量(t)	碳强度指标值 [10^{-6}t/(t·km)]
1	AER	干散货船	6600	1411.53	98.10	10.53×10^{-6}
2			7566	3166.15	96.01	4.01×10^{-6}
3		集装箱船	5221	4788.76	136.72	5.47×10^{-6}
4			6541	5839.20	94.50	2.47×10^{-6}
5		杂货船	5165	1678.54	61.09	4.74×10^{-6}
6			7767	2262.82	70.05	3.99×10^{-6}
7	CgDIST	滚装船	6165	4298.097	89.27	3.37×10^{-6}
8			6028	6620.07	180.06	4.51×10^{-6}
9		客船	10650	1218.99	113.74	8.76×10^{-6}
10			11458	11862.21	148.73	5.09×10^{-6}

表 12　碳强度指标分布情况统计量

Table 12　Tables of statistics for CII

统计量	干散货船	集装箱船	杂货船	滚装船	客船
平均值 [10^{-6}t/(t·km)]	4.53	4.16	3.93	3.89	5.03
中位数 [10^{-6}t/(t·km)]	4.16	3.81	3.69	3.28	4.99
标准差	1.47	1.24	1.09	1.27	1.52

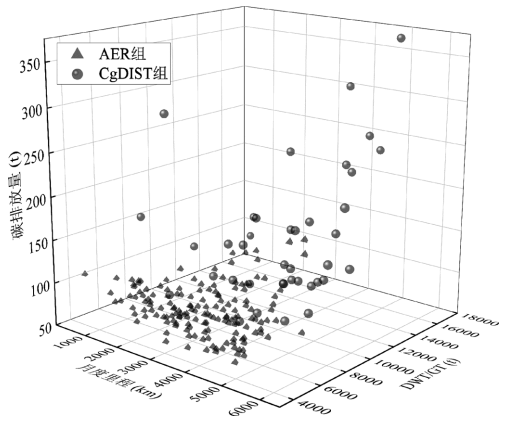


图 6　营运参数-CO_2 排放量分布

Fig.6　Fig of operational parameters-CO_2 emissions

可见,研究样本的碳强度指标主要集中于(3~5)×10^{-6}t/(t·km),其中 $CgDIST_{内}$组的碳强度值显著高于 $AER_{内}$组.整体来看,内河船舶的碳强度指标与国际航行船舶相比呈现较小的波动与离散性[12],这主要是归因于内河船舶在吨位、航程及营运模式上具有相对较高的相似性.

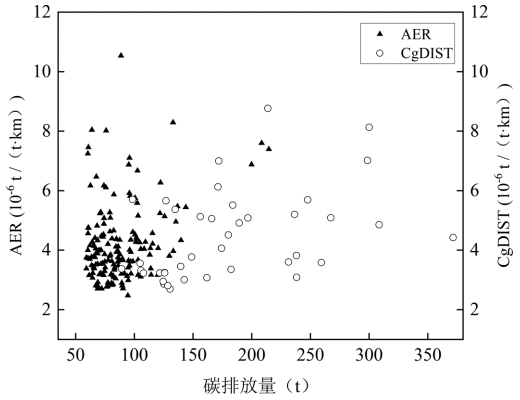


图 7 船舶碳强度指标分布

Fig.7 Distribution of carbon intensity indicators

3.2 重庆籍营运船舶碳强度指标特征分析

3.2.1 基于船龄的碳强度指标特征分析 不同船龄船舶的碳强度核算结果存在差异,基于船龄划分的碳强度指标分布情况如图 8 所示.整体来看,随着船龄的增加,船舶碳强度指标呈上升趋势,而碳排放量与承载能力则呈负相关.

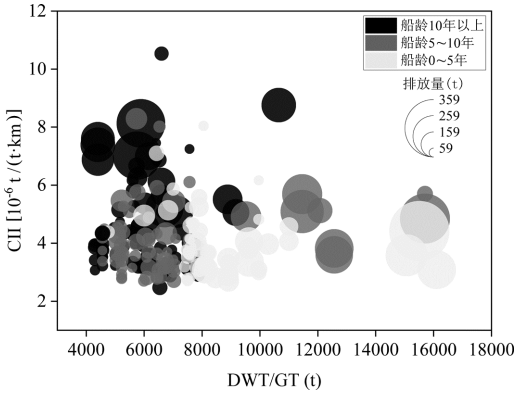


图 8 基于船龄划分的船舶碳强度指标分布情况

Fig.8 Chart of CII information based on ship age

船龄 10 年以上的船舶共 78 艘,承载能力主要集中于 4000~8000t 级,绝大多数船舶的碳排放量介于 59~159t,且该组船舶碳强度指标值普遍高于其他船龄船舶.

船龄 5~10 年的船舶有 68 艘,其承载能力的分布情况与船龄 10 年以上组高度相似,但碳排放量与碳强度指标值却显著降低,表明该组船舶的能效有所提升.船龄 5 年以下的船舶共 54 艘,承载能力集中分布 6000~12000t 级,其碳强度指标集中分布于(2~4)×10^{-6}t/(t·km)区间,略低于 5~10 年船龄组.

船龄为 5 年以下的新船由于载重吨的增加以及承担更多的运输任务,其碳排放量有所增加,但大型化、高效化和低碳化的船型设计,使其能效水平为三组中最优.

3.2.2 基于船型的碳强度指标特征分析 图 9 所示为不同船型碳强度指标分布情况,表 12 为基于碳强度指标数据的统计量.总体来看,各船型能效水平的顺序为滚装船>杂货船>集装箱船>干散货船>客船.

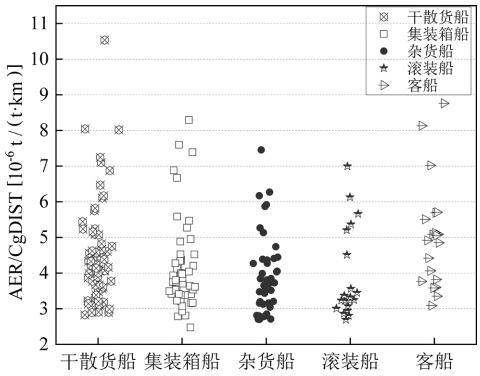


图 9 基于船型划分的船舶碳强度指标分布情况

Fig.9 Chart of CII information based on ship type

干散货船碳强度指标的平均值和中位数分别为 4.53×10^{-6}t/(t·km)和 4.16×10^{-6}t/(t·km),仅低于客船,其峰值为 10.53×10^{-6}t/(t·km),为研究样本中的最高值,表明干散货船的节能表现差,能效水平有待提升;此外,干散货船碳强度指标的标准差为 1.47,处于所有船型中第二位,表明数据的波动程度较大,碳排放管理水平参差不齐.

集装箱船碳强度指标的平均值、中位数和标准差分别为 4.16×10^{-6}t/(t·km)、3.81×10^{-6}t/(t·km)和 1.24,均位于所有船型中第三位,其最小值为 2.47×10^{-6}t/(t·km),为研究样本中的最低值,表明集装箱船的能效处于中等水平.

杂货船碳强度指标的平均值和中位数分别为 3.93×10^{-6}t/(t·km)和 3.69×10^{-6}t/(t·km),仅高于滚装船,

展现出良好的低碳营运特性;其标准差为 1.09,为所有船型中最低,表明杂货船的碳强度指标分布集中,主要处于 3×10^{-6}~4×10^{-6}t/(t·km)区间.

滚装船碳强度指标的平均值和中位数分别为 3.89×10^{-6}t/(t·km)和 3.28×10^{-6}t/(t·km),为所有船型最低,其中位数远低于其他四类船型,具有最优的能效水平.

客船碳强度指标的平均值、中位数和标准差分别为 5.03×10^{-6}t/(t·km)、4.99×10^{-6}t/(t·km)和 1.52,均为所有船型中最高值,表明其能效水平为所有船型中最差,且个体的营运模式与管理水平差异明显.

3.2.3　基于船籍港的碳强度指标特征分析　不同船籍港船舶碳强度指标分布特征如图 10 所示.整体来看,重庆主城籍船舶的箱体和各类箱线的位置均低于区县籍船舶,表明主城籍船舶的能效整体高于区县籍船舶.主城籍船舶碳强度指标的中位数是 3.75×10^{-6}t/(t·km),上四分位点和下四分位点分别是 4.37×10^{-6}t/(t·km)和 3.23×10^{-6}t/(t·km);区县籍船舶碳强度指标的中位数是4.27×10^{-6}t/(t·km),上四分位点和下四分位点分别是 5.27×10^{-6}t/(t·km)和 3.47×10^{-6}t/(t·km).区县籍船舶的中位数与主城籍船舶的上四分位点接近,表明主城籍船舶的整体能效水平显著高于区县籍船舶.此外,主城籍船舶碳强度的四分位距是 1.14×10^{-6}t/(t·km),明显低于区县籍的 1.80×10^{-6}t/(t·km),且其中位数相较于区县籍船舶更接近于箱体中心,表明主城籍船舶碳强度指标分布的相对更集中.

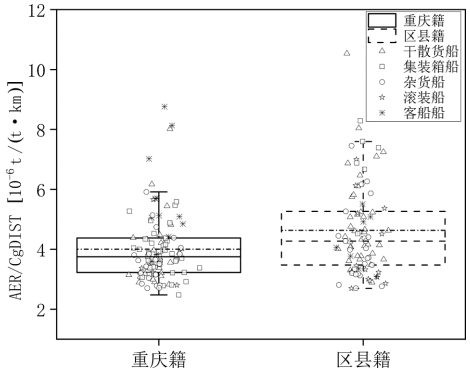


图 10　基于船籍港划分的船舶碳强度指标分布情况

Fig.10　Chart of CII information based on ship's registry

从船龄分布来看,主城籍船舶中船龄为 10 年以上的低能效船舶占比为 33.63%,区县籍船舶中船龄为 10 年以上的低能效船舶占比为 45.56%.从船舶类型分布看,主城籍船舶主要由集装箱、杂货船等高能效船型组成,而区县籍船舶主要为干散货船、滚装船等低能效船型.由此可见,造成区县籍船舶能效普遍低于主城籍船舶的主要原因为船舶老龄化和运力结构不佳.此外,由于主城籍船舶营运模式与排放控制的标准化程度更高,或由于区县籍船舶的碳排放控制意识较弱,以及区县地区可能面临相对较少的政策支持和排放监控机制等因素,造成区县籍营运船舶的能效相对较差.后续亟需推动重庆区县的老旧船舶拆解更替及运力结构优化,并建立标准化的碳排放管控制度,以提升重庆籍船舶的整体能效水平.

3.2.4　基于船舶平均航速的碳强度指标特征分析　船舶平均航速与碳强度指标的相关性如图 11 所示,不同船型的高能效航速区间存在明显差异.

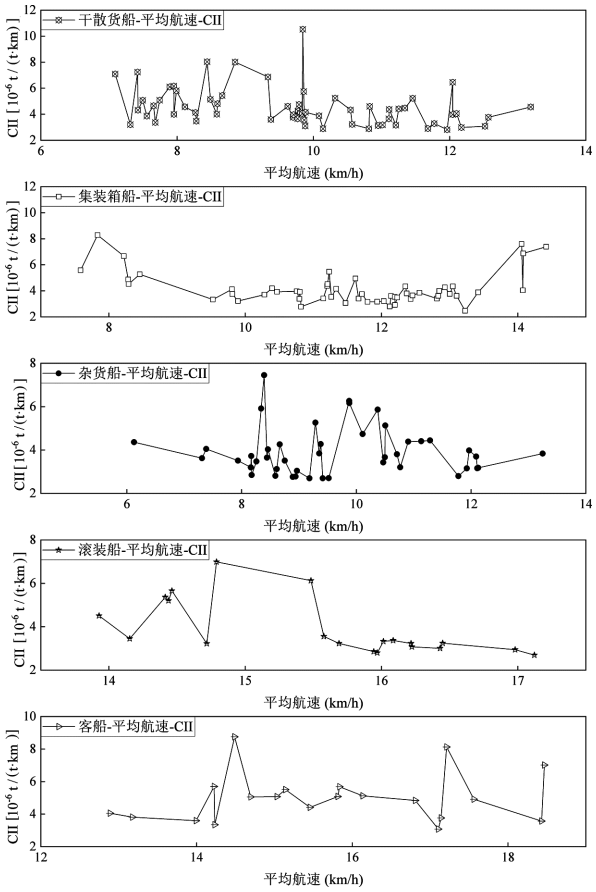


图 11　船舶平均航速与船舶碳强度指标关系

Fig.11　Relationship between average speed and CII

在平均航速为 7~14km/h 区间内,干散货船的碳强度指标与平均航速整体呈现出负相关,当平均航

速提升至 10.08km/h 以上时,碳强度指标的数值显著降低,并在 11.96km/h 处达到碳强度最低值 2.83×10^{-6}t/(t·km).在平均航速为 7~15km/h 的区间内,集装箱船的碳强度指标与平均航速的关系呈先降后升的 U 型变化规律,航速为 7.83km/h 时,碳强度指标达到峰值 8.29×10^{-6}t/(t·km),于 13.23km/h 达到碳强度最低值 2.47×10^{-6}t/(t·km),随后迅速上升.在平均航速为 6~14km/h 区间内,杂货船的碳强度指标随着平均航速的增加呈现先降后升再降的变化趋势,并于 9.41km/h 时达到碳强度指标最低值 2.70×10^{-6}t/(t·km).整体来看,滚装船的碳强度指标与平均航速呈现先升后降的变化趋势,当航速上升至 14.79km/h 时,碳强度指标达到峰值 6.99×10^{-6}t/(t·km),随后与平均航速呈负相关变化,17.12km/h 达到碳强度最低值 2.69×10^{-6}t/(t·km),表明滚装船处于高航速状态时的能效更高.客船的碳指标在平均航速为 12~19km/h 区间中呈稳定波动,仅在 14.48km/h、17.21km/h 和 18.46km/h 出现突增点,于 17.10km/h 达到碳强度指标最低值 3.09×10^{-6}t/(t·km).

4 结论

4.1 样本的碳强度指标均处于 10^{-6} 数量级,并在 $(2.47\sim10.53)\times10^{-6}$t/(t·km)区间分布.

4.2 随着船龄的增加,船舶碳强度指标呈上升趋势,而碳排放量与承载能力则呈负相关.

4.3 不同船型碳强度指标呈现显著差异,根据碳强度平均值与中位数进行排序,能效水平最优的为滚装船(3.89×10^{-6}、3.28×10^{-6}),其次为杂货船(3.93×10^{-6}、3.69×10^{-6})和集装箱船(4.16×10^{-6}、3.81×10^{-6}),干散货船(4.53×10^{-6}、4.16×10^{-6})和客船(5.03×10^{-6}、4.99×10^{-6})表现最差.

4.4 重庆主城籍船舶(碳强度中位数 3.75×10^{-6})的能效显著高于区县籍船舶(碳强度中位数 4.27×10^{-6}),且碳强度指标的分布范围更集中.

4.5 不同船型碳强度随平均航速变化的趋势各异.干散货船递减,集装箱船呈 U 型,杂货船先降后升再降,滚装船先升后降,客船波动平稳.各船型在不同航速点达到碳强度指标最低值.

参考文献:

[1] 张 爽,苑海超,孙德平.IMO 第四次温室气体研究报告要点解读 [J]. 中国船检, 2020,(9):44-50.
Zhang S, Yuan H C, Sun D P. Interpretation of key points from IMO's Fourth Greenhouse Gas Study [J]. China Ship Survey, 2020,(9):44-50.

[2] 余红楚,方庆龙,方志祥,等.船舶动态驱动的碳排放时空分布规律 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1769-1776.
Yu H C, Fang Q L, Fang Z X, et al. Exploring the spatiotemporal distribution patterns of carbon emissions driven by massive ship trajectory data [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1769-1776.

[3] 张志炜.基于 AIS 数据的动态化船舶排放清单建立方法与应用研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2020.
Research on the establishment method and application of dynamic Zhang Z W. ship emission inventory based on AIS data [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[4] Aseel S, Al-Yafei H, Kucukvar M, et al. A model for estimating the carbon footprint of maritime transportation of Liquefied Natural Gas under uncertainty [J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 27:1602-1613.

[5] Chen D, Wang X, Li Y, et al. High-spatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014 [J]. Science of the Total Environment, 2017,609:776-787.

[6] Qi Y, Yang J, Qin K S. Spatial-temporal analysis of carbon emissions from ships in ports based on AIS data [J]. Ocean Engineering, 2024, 308:118394.

[7] Li H, Jia P, Wang X, et al. Ship carbon dioxide emission estimation in coastal domestic emission control areas using high spatial-temporal resolution data: A China case [J]. Ocean & Coastal Management, 2023,232:106419.

[8] Clarksons Research, 2022. Shipping Review & Outlook [EB]. March 2022.

[9] Bayramoğlu K. The effects of alternative fuels, cruising duration and variable generators combination on exhaust emissions, energy efficiency existing ship index (EEXI) and carbon intensity rating (CII) [J]. Ocean Engineering, 2024,302:117723.

[10] Hua R, Yin J, Wang S, et al. Speed optimization for maximizing the ship's economic benefits considering the Carbon Intensity Indicator (CII) [J]. Ocean Engineering, 2024,293:116712.

[11] 车连发,方 健,牛亚斌,等.渤海区域营运船舶碳排放强度指标核算与评级 [J]. 科学技术与工程, 2024,24(14):6108-6116.
Che L F, Fang J, Niu Y B, et al. Calculation and rating of carbon emission intensity indicator for ships during operation in the bohai sea region, china [J]. Science Technology and Engineering, 2024,24(14): 6108-6116.

[12] 高 文,汤瑾璟,刘梦园.碳强度指标主要影响因素及优化方案 [J]. 船舶工程, 2022,44(9):29-32.
Gao W, Tang J J, Liu M Y. Index main influencing factors and optimization scheme on carbon intensity [J]. Ship Engineering, 2022, 44(9):29-32.

[13] 中华人民共和国交通运输部.船舶大气污染物排放控制区实施方案 [Z]. 北京:中华人民共和国交通运输部, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Implementation plan for the ship emission control areas [Z]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2018.

[14] 中华人民共和国海事局.船舶能耗数据和碳强度管理办法 [Z]. 北京:中华人民共和国海事局, 2022.
Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Measures for the Administration of Ship Energy Consumption Data and Carbon Intensity [Z]. Beijing: Maritime Safety Administration of the People's Republic of China, 2022.

[15] 王　霞,曹亚丽,徐文文.2019 年江苏省内河船舶(不含长江)大气污染物排放清单 [J]. 环境科学学报, 2023,43(4):142−152.
Wang X, Cao Y L, Xu W W. Air pollutants emission inventory from inland vessels (excluding the Yangtze River) in Jiangsu Province in 2019 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(4):142−152.

[16] Zhang X, van der A R, Ding J, et al. The impact of inland ship emissions on air quality [J/OL]. EGUsphere, 2022. https://doi.org/10.5194/egusphere−2022−1411.

[17] Huang H, Zhou C, Huang L, et al. Inland ship emission inventory and its impact on air quality over the middle Yangtze River, China [J]. Science of the Total Environment, 2022,843:156770.

[18] 黄志辉,丁　焰,尹　航,等.中国船舶大气污染物排放清单报告 [R]. 北京:环境保护部机动车排污监管中心, 2016.
Huang Z H, Ding Y, Yin H, et al. Report on ship air pollutant emission inventory in China [R]. Beijing: Vehicle Emission Control Center of the Ministry of Environmental Protection, 2016.

[19] 张黎翔,朱怡安,陆　伟,等.基于 AIS 数据的船舶轨迹修复方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2021,39(1):119−125.
Zhang L X, Zhu Y A, Lu W, et al. A detection and restoration approach for vessel trajectory anomalies based on AIS [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021,39(1):119−125.

[20] 张志炜,黄志炯,徐媛倩,等.基于 AIS 轨迹修复的船舶排放空间表征改进方法与应用 [J]. 环境科学学报, 2020,40(6):1931−1942.
Zhang Z W, Huang Z J, Xu Y Q, et al. Ship emissions spatial characterization improved method and application based on AIS trajectory restoration [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(6):1931−1942.

[21] 刘　奎,张雪婷,姚达文,等.基于资料修复的内河船舶动态排放特性研究——以重庆水域为例 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4478−4489.
Liu K, Zhang X T, Yao D W, et al. Research on dynamic discharge characteristics of inland river vessels based on data restoration—An Example in Chongqing [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4478−4489.

[22] 中华人民共和国交通运输部.川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列(2010 年修订版) [Z]. 北京:中华人民共和国交通运输部, 2010.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Principal Dimensions Series of Standard Ship Types for Transport Ships in the Chuan jiang River and Three Gorges Reservoir Area (2010 Revision) [Z]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2010.

[23] 李　佳,初秀民,刘兴龙,等.内河船舶缺失轨迹修复方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019,40(1):67−73.
Li J, Chu X M, Liu X L, et al. An approach for restoring the lost trajectories of vessels in inland waterways [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019,40(1):67−73.

[24] 祁文娟,刘志恒,周绥平,等.基于改进 TRACLUS 算法的船舶轨迹聚类研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2025,47(4):1214−1221.
Qi W J, Liu Z H, Zhou S P, et al. Research on ship trajectory clustering based on improved TRACLUS algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2025,47(4):1214−1221.

作者简介：姜　丹(1988−),女,湖北武汉人,副教授,博士,主要从事绿色航运研究.发表论文 20 余篇.jiangdan@cqjtu.edu.cn.