

基于聚类算法的热带气旋对西太平洋航路的影响分析

王宇¹, 王圣君², 胡甚平^{2*}, 何鑫达³, 孟祥乾²

(1. 海南铁路有限公司, 海南海口 570100; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306;
3. 威海芜船船舶制造有限公司, 山东 威海 264200)

摘要:为提升航运规划的安全性及效率,文章提出了基于多聚类算法融合的西太平洋热带气旋影响分析方法。首先,基于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的热带气旋数据,得出1924—2023年热带气旋的生成规律、强度变化和移动路径等特征;其次采用K-means聚类算法分析热带气旋的时空分布、移动速度及方向,运用高斯混合聚类算法分析热带气旋的热点区域、高频活动带;最后考虑二维聚类的局限性,提出基于二维与三维聚类的混合聚类分析方法,并将热带气旋轨迹与主要航线进行叠加分析,揭示其对航线安全的潜在影响。结果表明,热带气旋主要影响10°N至25°N,且存在季节差异,其中冬春气旋弱且范围小,夏秋台风强且频繁。在气旋的移动方向上,低纬度气旋自东向西,接近15°N时先向西再北折,高纬度气旋则西行后转向东北。基于混合聚类方法能够有效识别热带气旋的风险区域,为航运规划与风险管理提供参考。

关键词:航行安全;航运规划;聚类算法;热带气旋;航路安全;西太平洋

中图分类号:U694 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.004

Analysis of the impact of tropical cyclones on shipping routes in the Western Pacific based on a clustering method

Wang Yu¹, Wang Shengjun², Hu Shenping^{2*}, He Xinda³, Meng Xiangqian²

(1. Hainan Railway Co., Ltd., Haikou 570100, China; 2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 3. Weihai Wuchuan Shipbuilding Co., Ltd., Weihai 264200, China)

Abstract: To enhance the safety and efficiency of maritime route planning, this study proposes a hybrid clustering method integrating multiple algorithms to evaluate the impact of tropical cyclones in the Western Pacific. Firstly, using tropical cyclone data from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), we characterize genesis patterns, intensity variations, and track features of tropical cyclones from 1924 to 2023. Secondly, the K-means clustering algorithm is employed to analyze spatiotemporal distribution, movement speed and direction, while a Gaussian Mixture Model (GMM) is used to identify hotspot regions and high-frequency activity belts. Finally, to overcome the limitations of two-dimensional clustering, we propose a hybrid clustering approach combining 2D and 3D clustering analyses. By overlaying tropical cyclone tracks with major shipping routes, we reveal their potential impacts on maritime safety. Experimental results demonstrate that tropical cyclones primarily affect latitudes between 10°N and 25°N, with seasonal variations: cyclones are generally weaker and more localized in winter-spring, whereas typhoons are stronger and more frequent in summer-autumn. In terms of movement direction, low-latitude cyclones initially move westward from east and then recurve northward near 15°N, while high-latitude cyclones move westward before turning northeastward. The hybrid clustering method effectively identifies tropical cyclone risk zones, providing critical references for shipping route planning and risk management.

收稿日期:2025-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52272353);教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(23YJAZH157)资助

作者简介:王宇(1971—),男,高级船长,研究方向为载运工具运用工程、航海技术。*通信作者:sphu@shmtu.edu.cn

引用格式:王宇,王圣君,胡甚平,等.基于聚类算法的热带气旋对西太平洋航路的影响分析[J].中国航海,2026,49(2):34-41.

Wang Y, Wang S J, Hu S P, et al. Analysis of the impact of tropical cyclones on shipping routes in the Western Pacific based on a clustering method[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 34-41. (in Chinese)

Key words: navigation safety; shipping route planning; clustering algorithms; tropical cyclones; maritime route safety; the Western Pacific

随着中国 21 世纪海上丝绸之路战略的实施,西北太平洋沿岸国家的海上贸易将进一步扩大^[1]。海运是国际贸易的重要支撑,80% 的货运量是通过海运完成的。环境是影响海运安全性和经济性的主要因素,其中热带气旋等极端气候对航行的影响尤为显著。

热带气旋(Tropical cyclones, TCs)是生成于热带或副热带洋面上并伴随强烈对流活动的一种极端天气系统,它们是最具全球破坏性的自然灾害之一,每年给易发地区的国家带来相当大的社会经济影响,甚至造成生命财产威胁^[2]。热带气旋的出现可能引发海上巨浪、风暴潮和低能见度等恶劣天气条件,给航运规划和应急管理带来极大的挑战。因此,研究太平洋热带气旋对航路的影响,对提升航运业的抗风险能力和优化航路规划具有重要意义。随着气象学、海洋学和导航技术的逐步发展,国内外学者针对热带气旋、航行安全等方面分别进行了大量研究。前期主要从气象学角度研究热带气旋的主要动力来源、形成机制、结构和生命周期^[3],随着研究的不断深入,学者们开始探寻热带气旋的路径、强度规律并尝试做出预测。传统的热带气旋预报方法主要包括动力学方法、统计学方法等。Kudryavtsev 等^[4]在动力学方法的研究基础上,通过引入气流变化的概念,更加准确地描述气旋运动。刘炎^[5]对 1949—2023 年影响上海的热带气旋资料进行研究,从路径特点、登陆情况两方面来研究热带气旋的移动路径。近年来,研究边界不断拓展,逐渐延伸至热带气旋对航运领域的影响研究,Xu 等^[6]构建一个评估全球班轮运输网络(GLSN)对热带气旋抵御能力的理论框架,系统考察港口中断的直接与间接影响。Huang 等^[7]以台风“马鞍”为例,探究气旋如何导致港口关闭、航线中断、船舶延误等具体影响。

针对研究对象的相似性和分组问题,聚类方法应运而生,它能够深入挖掘数据中的潜在模式,揭示数据对象如何自然形成有意义的分组^[8],其应用广泛,包括统计学、环境污染和社会经济等。在早期发展阶段,距离聚类方法 K-means 算法最早由 Hugo Steinhaus^[9]在 1956 年提出。其简单高效,是迄今为止使用最广泛的分区聚类算法,通过最小化组内平方误差对数据点进行分组。Al Mamun 等^[10]使用 K-means 聚类确定了四个季节性站点集群,揭示不同季节温度的时空变化对水稻生产力的影响。Zheng 等^[11]基于 K-means 构建一个城市街道级热梯度创

新框架。Guo 等^[12]基于分布式过程的模型与模糊 k-means 方法,探讨青藏高原冻土的时空演变过程。Corporal-Iodanco 等^[13]用 K-means 根据起源、最大强度和衰变点位置对影响菲律宾的热带气旋进行聚类。基于距离的聚类方法在台风路径和轨迹模式识别中具有较好的计算效率,但在处理具有复杂空间分布和非均匀密度特征的台风数据时可能存在不足。仅通过距离度量划分数据可能无法准确反映台风活动区域的动态演化特征。密度聚类方法通过基于数据点局部密度的划分方式可以很好地解决这个问题。Fukunaga 等^[14]引入核密度估计思想,突破了 K-means 对凸形簇的限制,通过逐步向高密度区域移动实现聚类,适合发现任意形状簇。Cai 等^[15]提出一种改进的 ST-DBSCAN 用来识别 TCs 产生的区域强度,辨识台风登陆的可能性。张云菲等^[16]考虑事故周期性和交通事故严重程度,利用空间密度连接原理确定不同空间维度的事故多发位置。高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)是一种基于概率的聚类算法,可以拟合变化环境下动力特性的分布特征^[17]。黄艳国等^[18]提出一种利用高斯混合模型聚类算法判别城市道路交通状态的方法。随着人工智能技术的不断进步,一些学者开始尝试使用机器学习和深度学习算法发现、总结规律。智能算法在寻找研究对象相似性、归纳整理、热点分布情况等方面具有优越性。这些做法可以用来分析热带气旋对航路的影响。

鉴于此,本文以美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的 100 年热带气旋数据为研究对象,采用 K-means 距离聚类,得到西太平洋地区热带气旋活动的时空分布规律、移动速度及方向;使用高斯聚类方法,提出热带气旋的主要活动区域。然后,将 K-means 距离聚类和高斯混合(GM)相结合,经过混合聚类算法,分析不同风力等级的热带气旋移动轨迹趋势分布。结合船舶活动所形成的航路,得出热带气旋对船舶习惯性航路影响的基本规律。

1 热带气旋对航路安全的影响

1.1 热带气旋的复杂性及其对航路安全的影响

热带气旋(如热带低压、热带风暴和台风)是太平洋地区常见的极端气象,其生成和移动对航路安全构成重大威胁,如强风暴雨导致船舶受损或失控,高海浪增加船舶的航行难度,甚至引发严重的航行事故。此外,气旋的出现可能迫使船舶绕航或改变

航线,增加燃料消耗,延长运输时间,带来经济损失。除了热带气旋带来的极大危害之外,其路径和强度的不确定性使得船舶航路规划充满复杂性。因此,需要特别关注热带气旋对航路的影响,以确保航运安全。

虽然气旋的轨迹复杂多变,但长期历史数据表明,其生成和移动在一定程度上呈现出一定的规律。如热带气旋一般在特定的太平洋热带海域生成,夏秋季节里,其频率呈现出显著增加的态势。气旋的路径和强度变化常受海洋表面温度、气压分布以及季风系统的影响,通常呈现出一定的规律性。研究这些规律性特征有助于预测气旋的移动趋势,进而为航路规划提供指导。

1.2 多维特征融合的热带气旋轨迹聚类方法

热带气旋轨迹数据通常包含多个维度的特征,如经纬度、风力等级、移动速度与方向等。这些数据因时间跨度长、空间覆盖范围广而具有显著的复杂性,对于分析和揭示其规律提出了较高的要求。针对热带气旋历史轨迹数据,引入聚类算法,通过多维度信息的融合来探索轨迹特征和热带气旋的规律。

2 聚类算法及其在热带气旋分析中的应用

聚类算法作为一种常用的无监督学习方法,旨在通过分析数据的相似性将其分为不同的组或类别。目前,常用的聚类方法通常分成两类:距离聚类和密度聚类。

2.1 K-means 算法

K-means 算法是一种基于距离的无监督学习算法,旨在通过将数据点分配到最近的簇中心来进行聚类。在热带气旋分析中,K-means 算法通过计算气旋路径数据点之间的欧氏距离,将具有相似路径的气旋聚为一类。它适用于那些簇内数据相对均匀且分布较为明确的情况。K-means 算法的基本步骤如下:

1) 初始化:随机选择 K 个初始簇心(质心)。

2) 分配簇:将数据点分配给距离其簇心最近的簇。此时,簇的划分依据是每个数据点与簇心的欧氏距离。对于数据点 x_i 和簇心 c_k ,距离的计算公式为:

$$d(x_i, c_k) = \|x_i - c_k\|^2 = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n (x_{ij} - c_{kj})^2\right)} \quad (1)$$

式(1)中: x_i 是第 i 个数据点; c_k 是第 k 个簇的质心; n 是数据的维度。

3) 更新簇心:根据簇内所有点的均值重新计算

簇心位置:

$$c_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{x_i \in C_k} x_i \quad (2)$$

式(2)中: C_k 表示簇 k 中的所有数据点; $|C_k|$ 是簇中数据点的数量。

4) 重复步骤 2 和 3,直到簇心位置不再发生变化或者达到设定的迭代次数。

2.2 高斯混合模型(GMM)

与 K-means 算法基于距离进行聚类不同,GMM 是一种基于密度的聚类算法。GMM 假设数据点来自多个高斯分布,每个高斯分布表示一个簇。通过最大化数据点在每个高斯分布下的概率,GMM 能够识别数据的密度模式并将数据划分为多个簇。

在 GMM 中,对于包含 n 个 d 维样本的数据集,其概率密度函数定义为:

$$p(x | \theta) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x | \mu_k, \Sigma_k) \quad (3)$$

式(3)中: π_k 为第 k 个高斯分布的混合权重(满足 $\sum_{k=1}^K \pi_k = 1$); $N(x | \mu_k, \Sigma_k)$ 表示第 k 个高斯分布的概率密度函数,其参数为均值向量 μ_k 和协方差矩阵 Σ_k 。GMM 通过期望最大化(Expectation-Maximization, EM)算法来估计这些参数:

E 步(期望步):计算每个数据点属于每个高斯分布的后验概率:

$$Y_{ik} = \frac{(\pi_k \times N(x_i | \mu_k, \Sigma_k))}{\sum_{j=1}^K \pi_j N(x_i | \mu_j, \Sigma_j)} \quad (4)$$

式(4)中: Y_{ik} 表示数据点 x_i 属于第 k 个高斯分布的后验概率。

M 步(最大化步):根据后验概率 Y_{ik} 更新高斯分布的参数:

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ik} x_i}{\sum_{i=1}^N Y_{ik}} \quad (5)$$

$$\Sigma_k = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ik} (x_i - \mu_k)(x_i - \mu_k)^{x_i}}{\sum_{i=1}^N Y_{ik}} \quad (6)$$

$$\pi_k = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ik}}{N} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: N 是数据集的总样本数, μ_k 、 Σ_k 和 π_k 是需要估计的参数。

在热带气旋分析中,GMM 能够识别出具有不同强度、路径特点和发生频率的气旋聚类。

2.3 混合聚类算法

K-means 算法对球状或均匀分布数据的效果较好,但难以处理气旋复杂的曲线轨迹,它无法有效区

分高密度与低密度的气旋活动区域。而密度聚类虽然在挖掘非线性模式和热点区域方面表现优异,但其性能高度依赖于参数选择,且在高维数据中可能导致分类结果不稳定。单一类型的聚类算法通常难以处理多维特性的气旋轨迹,如经纬度的空间维度、时间维度的动态变化以及强度维度的变化特征,导致分析结果片面化。因此,本文基于多维气旋数据,综合距离聚类与密度聚类的优势,弥补单一算法的不足,全面挖掘气旋轨迹数据的规律性特征。针对气旋数据的三维特征(即经度、纬度和风力强度),能够在处理复杂数据分布时提供更为精细的聚类结果。混合聚类算法如下:

首先,利用 K-means 算法对气旋路径数据进行初步聚类,通过散点的空间特征(例如经度和纬度)对数据进行分类。假设数据集 X 包含 N 个样本,使用 K-means 进行初步划分,得到 K 个初始聚类中心 C_k 。

然后,基于 GMM 优化聚类概率分布,其优化目标函数为:

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^N \log \sum_{k=1}^K \pi_k N(x_i | \mu_k, \Sigma_k) \quad (8)$$

式(8)中: π_k 为第 k 个高斯成分的混合系数; $N(x_i | \mu_k, \Sigma_k)$ 表示均值为 μ_k 、协方差为 Σ_k 的高斯分布。

最后,考虑气旋的密度分布,细化簇的划分,并结合风力强度来加强聚类的精度。通过 EM 算法优化参数 $\theta = \{\pi_k, \mu_k, \Sigma_k\}$,混合聚类系统能够量化数据点的概率归属,并进一步构造聚类依赖矩阵:

$$M_{ij} = \sum_{k=1}^K p_{ik} p_{jk} \quad (9)$$

式(9)中: p_{ik} 、 p_{jk} 分别表示样本 x_i 、 x_j 属于聚类 k 的后验概率($i \neq j$)。该矩阵反映了数据点之间的聚类相关性,为后续模式识别与网络建模提供了数据交互权重依据。

3 实例分析

3.1 数据来源与分析

本研究采用 NOAA 的百年历史数据集,涵盖西北太平洋地区 1924—2023 年间的热带气旋完整记录数据。数据集包含多维时空特征参数:气旋生成位置(经度、纬度)、风力大小及风级、移动速度及方向等关键气象要素。为分析热带气旋的演变规律及其对航运影响提供坚实的数据支撑。

西太平洋热带气旋活动呈现显著的区域分异与动态聚集特征,如图 1 所示。其中,圆圈大小表示风力强度。高活跃区(黄色密度带)集中分布于

10°N—40°N 的西北太平洋海域,尤以菲律宾以东洋面(125°E—150°E)为核心区,该核心区域所产生的气旋约占总事件数的半数以上。低频活动区(蓝色区域)则分布于副热带高压边缘及赤道近岸海域,其平均风速强度较核心区明显降低。

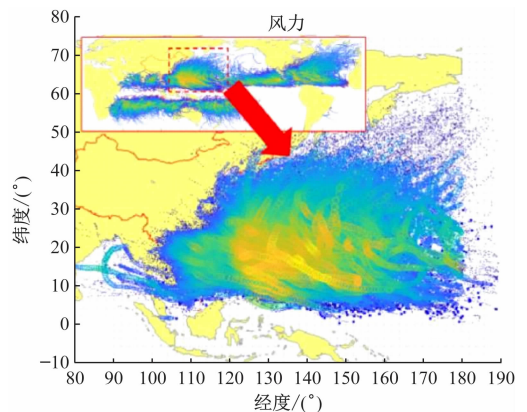


图 1 西太平洋历史热带气旋移动轨迹

Fig. 1 Historical tropical cyclone tracks in the Western Pacific

3.2 算法应用

3.2.1 距离聚类

针对热带气旋历史轨迹中的位置信息(经纬度数据),采用 K-means 算法对热带气旋的区域位置进行聚类分类,经过反复调试最终确立 18 类,如图 2 所示。在图 2 中,将一年 12 个月划分成四季,通过聚类中心位置的颜色标识聚类结果,箭头的方向反映了聚类后的统计移动方向,箭头长短反映气旋移动速度。由于同一个类别的热带气旋的移动速度与方向差异性很大,本文进行众数统计,给出统计结果。试验结果表明:

1) 热带气旋在不同季节的分布特性差异较大。春季(3 月至 5 月)与冬季(12 月至 2 月)的气旋活动较为相似,而夏季(6 月至 8 月)和秋季(9 月至 11 月)的气旋活动相似。春冬季气旋移动速度较慢、路径较短、强度较弱。夏秋两季气旋活动更加频繁,表现出更为复杂和动态的变化。

2) 春季的热带气旋活跃度相对较低,整体移动速度较慢,部分气旋在海面上停滞较长时间。这一时期的气旋对菲律宾、中国华南沿海以及中国台湾地区产生影响,但整体风力强度较弱,对港口影响有限。夏季海洋表面温度较高,水汽充足,为气旋提供了能量来源。此时气旋的移动速度明显加快。由于西太平洋副热带高压的强度和位置变化较大,热带气旋的路径呈现出多样化趋势,影响范围最广。此时,中国沿海、菲律宾、日本、韩国等均易受影响。秋季的气旋活动仍然较为频繁,移动速度相对夏季略有降低,但强度依然较大,并且更容易出现路径偏北

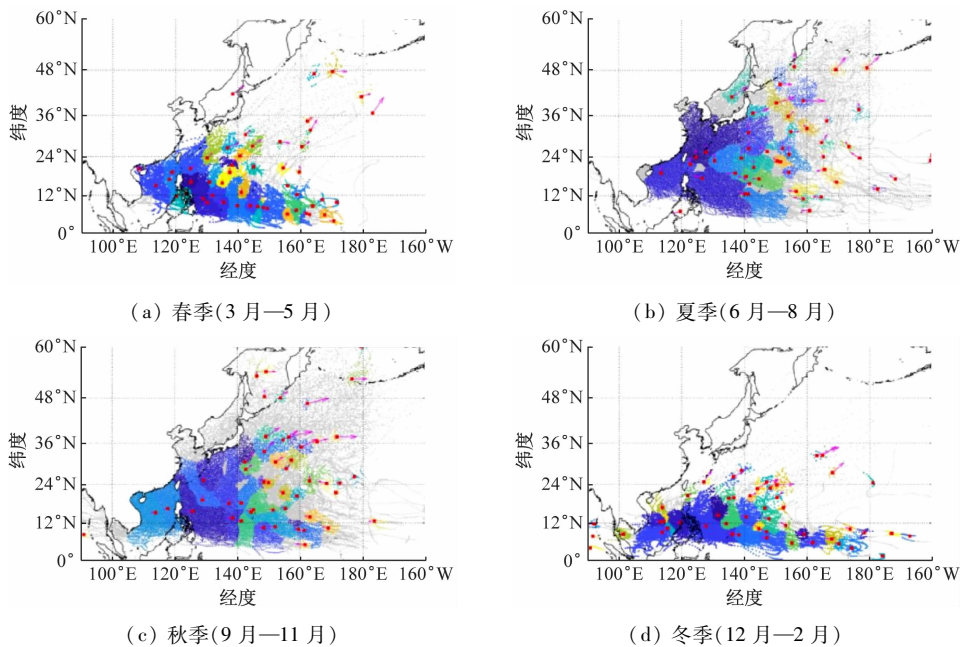


图2 不同季节时期的西太平洋历史热带气旋移动轨迹

Fig. 2 Seasonal variations in historical tropical cyclone tracks in the Western Pacific

的情况,使得日本、韩国甚至俄罗斯远东地区受气旋影响的频率增高。冬季是热带气旋最少的季节,冷空气活动频繁,使得热带气旋的生成环境受限,影响范围相对较小。

3.2.2 密度聚类

将热带气旋历史轨迹中的位置信息再次采用基于密度的聚类,可以将路径数据按密度分布进行热

力图统计,从而对气旋活动的热点区域进行识别与分析,如图3所示。其中,颜色梯度从黄到蓝依次表示台风路径的密度强度由大到小。在12个月中,主要影响区域位于菲律宾东部至日本海域(12°N—24°N),尤以夏季(6—8月)最为密集,范围扩展至中国东部、日本及西北太平洋,而冬季台风活动明显减少,主要集中在菲律宾附近。

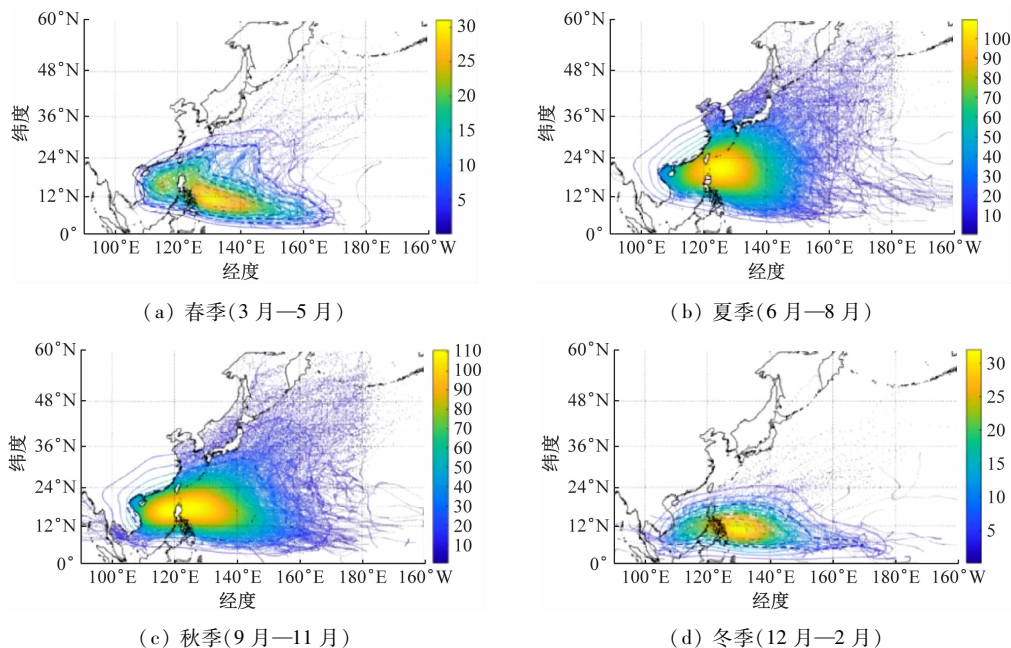


图3 太平洋历史热带气旋移动轨迹的密度聚类

Fig. 3 Density-based clustering of historical tropical cyclone tracks in the Pacific

从图3中可以看出,热带气旋活动的热点分布在不同季节存在显著差异。春冬两季热带气旋生成

频率较低,影响范围相对有限。大多数热带气旋主要在菲律宾东部的西北太平洋海域。夏季是热带气

旋最为活跃的季节,气旋路径极为集中,影响范围扩大。秋季的热带气旋活跃度稍低于夏季,气旋数量依然较多,部分台风仍然能达到较大的强度,且仍然较为密集。

3.2.3 混合聚类

混合聚类方法是了解决三维数据(如经度、纬度和风力强度)的聚类问题,为弥补单一聚类方法的局限性而提出的。通过这种混合聚类方法,可以更精准地分析不同区域台风的空间分布及强度特征。具体到数据处理:一方面直接使用 K-means 算法对经纬度和风力进行三维聚类;另一方面,采用

GM 聚类,确立热带气旋的空间分布特征,如图 4 所示。图中将一年 12 个月划分为四季,通过聚类中心位置的颜色标识聚类结果,箭头的方向反映聚类后的统计移动方向,箭头长短反映气旋移动速度。

从图 4 与图 2 的对比可以看出,混合聚类的结果更加显著。春季和冬季气旋较少且影响范围较小、强度小,通常只影响菲律宾及南海一带。夏秋两季是主要的热带气旋季节,影响范围广,强度大,路径长。大多数气旋沿着由东到西移动,并在接近陆地时受地形和高压影响向北偏转。此外,在高纬地区,部分气旋受西风带引导向东北方向移动。

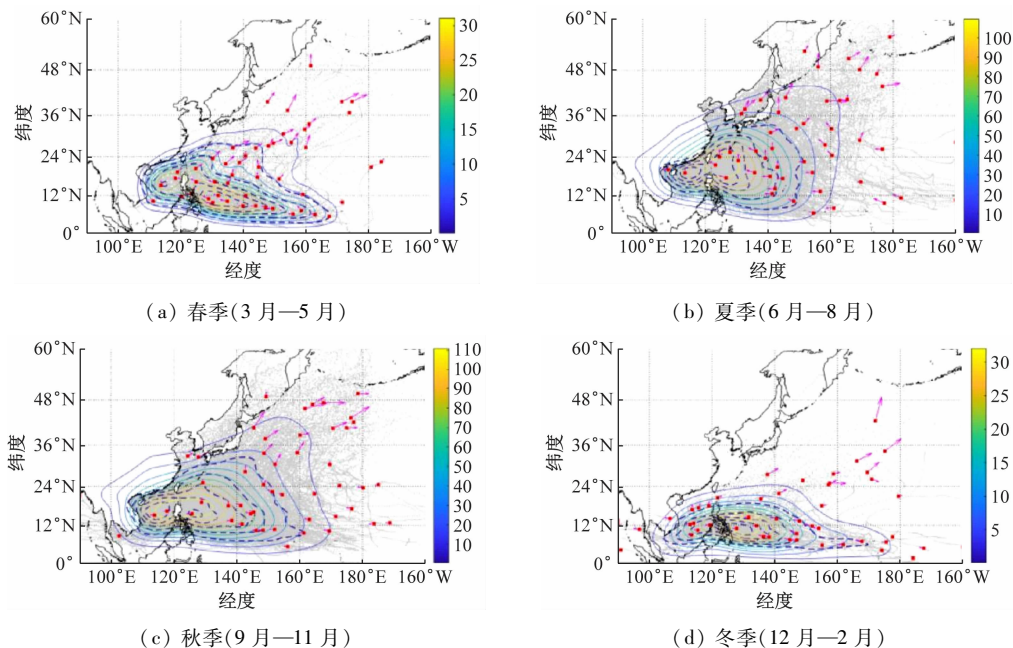


图 4 西太平洋历史热带气旋移动轨迹的密度距离聚类
Fig. 4 Density-based clustering of historical tropical cyclone tracks in the Western Pacific

3.3 结果分析

3.3.1 热带气旋演化规律的时空分析

鉴于目前采集的数据情况,确立热带气旋的强度等级划分:热带低压(10 min 内平均风速的最大持续风速为 10.8 ~ 17.1 m/s)、热带风暴(最大持续风速为 17.2 ~ 24.4 m/s)和台风(最大持续风速 \geq 24.5 m/s)。由此,本文确定的演化规律为:热带低压(蒲福风级 6 至 7 级)作为热带气旋发展的初始阶段,其特征为风速较低且对流活动相对较弱,对航海有一定影响。随着热带气旋的增强,进入中级阶段的热带风暴(蒲福风级 8 至 9 级),其风速与强度相较于热带低压有显著提升,对航海有明显影响。当热带气旋发展至最强阶段,达到特定的高风速标准后便被归类为台风(蒲福风级 10 级及以上),对航海有严重影响。

为探索热带气旋全过程演化特性,采用前述的

混合聚类方法,通过对热带气旋中的位置信息、风力风级以及移动方向和速度进行三维度数据聚类,可以得到前后 50 年的具体结果,如图 5 所示。颜色深浅表示气旋的三维点密度值。对比西北太平洋热带气旋 1924—1973 年与 1974—2023 年两个时间段内的情况,分析如下。

1) 西北太平洋热带气旋活动频率与强度显著提升:两个时间段内不同等级热带气旋(热带低压、热带风暴、台风)的分布和活动轨迹具有差异性。无论是热带低压、热带风暴还是台风,1974—2023 年活动与前 50 年相比都更加密集,强度都明显增加。热带气旋的影响范围在近 50 年内逐渐扩大,整体路径更趋向于日本东部和太平洋深处,并表现出更明显的北移趋势。

2) 西北太平洋热带气旋影响范围扩大与移动路径复杂化:热带低压呈现出分布分散的态势,虽影

响范围广泛,但强度较弱。与之不同,热带风暴和台风的分布则显著集中,尤其在西北太平洋深处的热带及副热带区域。这两类热带气旋展现出更广的影响范围,在后期,台风的强度不断增强,持续时间不

断延长,影响区域也在持续扩大。其移动路径变得愈发复杂多变,不再是简单的线性移动,而是呈现出更多的转向、打转等非规则路径,这对航线预测和避险提出了更高的要求。

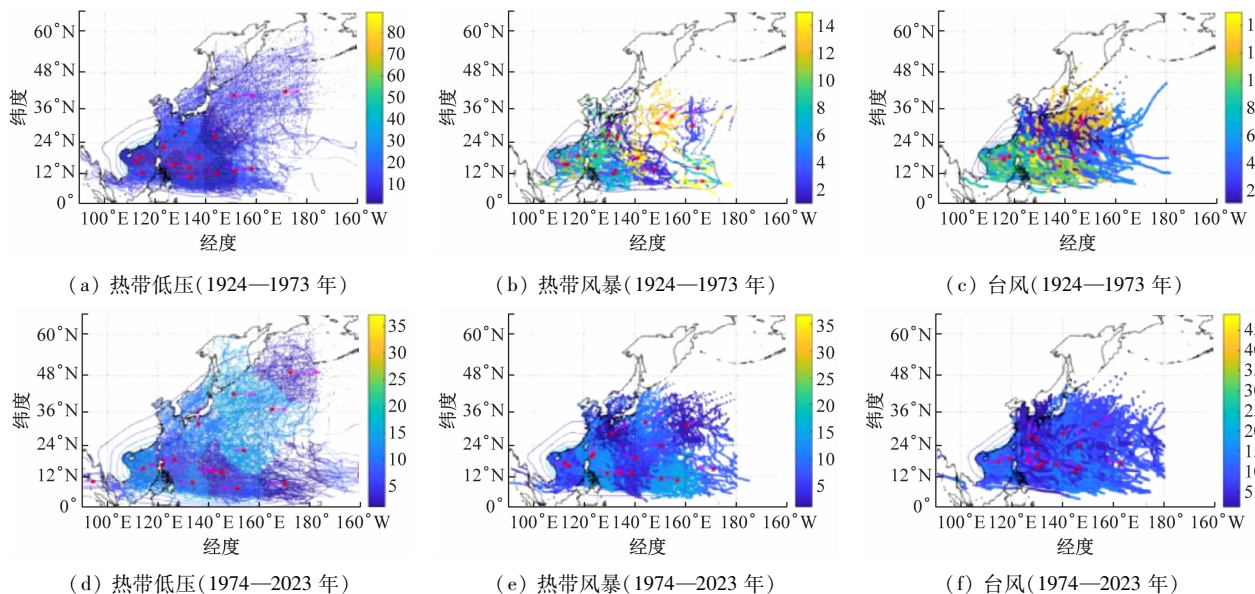


图 5 热带气旋不同时间段内演化的前后 50 年对比

Fig. 5 Comparison of tropical cyclone evolution between the first and last 50 years(1924—1973 VS 1974—2023)

3.3.2 热带气旋对航路的影响分析

随着船舶 AIS 数据密度的增加,船舶在全球,包括西太平洋海域的航线数据所对应的航路图,可以通过网站 AIS 数据获得。本文将该类型数据中的主要航路信息进行提取,可以得到图 6 中的浅色区域,即船舶航路分布情况。将前面混合聚类的热带气旋历史轨迹数据进行合成,开展热带气旋历史轨迹对船舶航路的影响分析。

1) 船舶航路特征。重要的航运通道高度集中于东亚沿海地区。东亚沿海航路覆盖了中国沿海、南海、菲律宾海域以及日本海等诸多区域,航线所涉区域与热带气旋区域高度重合,不可避免会受到气旋的影响。

2) 热带气旋近年来对船舶航路的影响范围显著扩大。尤其是在近 50 年间,热带低压影响延伸至俄罗斯远东地区的航线。而热带风暴与台风对航路的影响则更具破坏性。结合气旋发展过程的时间特性,不同强度气旋影响时长差异显著。热带低压 1—2 天;热带风暴 3—5 天;台风 5 天以上、极端时达 10 天,台风季连续影响。总体而言,航运企业在规划航线时需综合考虑不同强度的热带气旋影响,并结合航路特点优化避台策略。

3) 近年来台风的整体路径相较于热带风暴呈现北移趋势。特别需要注意的是 35°N 附近的航行风险。建议采取以下避台策略:避免继续北移,北移可能进入台风增强区,增加遭遇台风的概率;适当减速或临时停靠,若前方航路存在台风威胁,可在安全港口适当停靠,等待台风路径明确后再调整航线。

4) 跨太平洋航线从日本、韩国以及中国东部等地区延伸至北美西海岸。此航线在实际运行中,通常采用大圆航线(大致位于 48°N)与恒向线航线这两种不同的航线规划方式,以实现高效的海上运输。在高纬度地区(40°—45°N),航运企业通常采用混合航线策略,即结合大圆航线和恒向线航线的航行路径,以优化航程和燃油消耗。在台风季节,选择大圆航线避免受到台风影响。

5) 在低纬度区域,南海、菲律宾以东海域以及西太平洋部分区域是台风的高发区。从图 6c 和图 6f 可以看出,低纬度航线的规划需要更加灵活,以避免进入台风发展初期的强对流区域。此外,船舶在途经此类海域时,应密切监测天气预报,跟踪气旋动态,合理调整航速与航向,必要时采取绕行或避风措施,以确保安全通过。

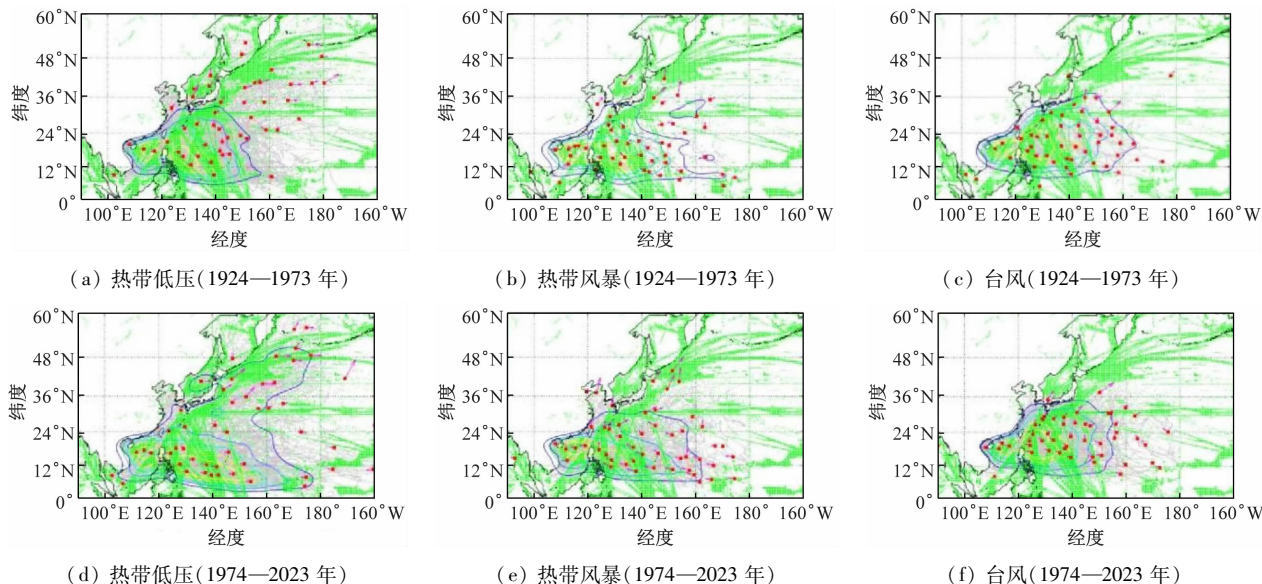


图6 船舶航路与不同时间段内演化的热带气旋移动趋势

Fig. 6 Shipping routes and tropical cyclone track trends across different periods

4 结 语

本文通过使用多种聚类算法对热带气旋进行分析,提出一种基于二维聚类和三维聚类的混合聚类算法。分析热带气旋的活动规律,揭示气旋的空间分布、强度变化以及不同风力等级气旋的风险区域。

结合太平洋地区 100 年的热带气旋历史轨迹数据进行分析,结果表明,气旋主要影响 10°N 至 25°N ,且存在显著季节差异。冬春季气旋活动弱,范围小;夏秋季则为台风高发季,气旋强度大且活动频繁。从风向来看,低纬度地区的台风主要自东向西,接近 15°N 时,先西向大陆再折向北;在高纬度地区,台风先西行后北转,最终转向东北。在高纬度地区应采用混合航线策略避开台风,在低纬度区域需灵活规划航线,避开强对流区并调整航速航向。台风路径北移趋势明显,建议避免北移,适当减速或停靠避险。

今后的研究可以从点聚类方法转向线聚类方法,专注于气旋路径的连续性和演变趋势,为航路规划提供更精细的预测。此外,研究将更多聚焦于多维数据融合与复杂聚类方法的应用,以提升航运风险管理的精度和效率。

参 考 文 献

[1] Mou N X, Liu C X, Zhang L X, et al. Spatial pattern and regional relevance analysis of the maritime silk road shipping network [J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 977.

[2] Zhang L J, Zhu H Y, Sun X J. China's tropical cyclone

disaster risk source analysis based on the gray density clustering[J]. *Natural Hazards*, 2014, 71: 1053-1065.

- [3] Emanuel K. *Hurricanes: a century of scientific progress* [M]. Boston: American Meteorological Society, 2011.
- [4] Kudryavtsev V, Monzikova A, Combet C, et al. A simplified model for the baroclinic and barotropic ocean response to moving tropical cyclones: 1. satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*; JGR, 2019, 124(5): 3446-3461.
- [5] 刘炎. 1949—2023 年影响上海的热带气旋移动路径特征分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2025, 35(7): 23-29.
- Liu Y. Analysis of tracks characteristics of tropical cyclones affecting Shanghai from 1949 to 2023 [J]. *China Flood & Drought Management*, 2025, 35(7): 23-29. (in Chinese)
- [6] Xu M Q, Zhu Y F, Liu K S, et al. Assessing resilience of global liner shipping network to tropical cyclones[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 131: 104189.
- [7] Huang Z C, He Z Y, Zhao P J, et al. The effects of tropical cyclone on the container shipping network: a case study of typhoon Ma-on (2022) [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 136: 104449.
- [8] Rokach L, Maimon O. *Clustering methods* [M]// MAIMON O, ROKACH L. *The data mining and knowledge discovery handbook*. Boston: Springer, 2005: 321-352.
- [9] Bock H H. Origins and extensions of the k-means algorithm in cluster analysis[J]. *Electronic Journal for History Probability and Statistics*, 2008, 4(2): 1-18.

- Liu Y K. Evaluation of port-industry-city integration degree[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [10] 闫金珠,李少梅,王映雪,等. 多视图协同交互的港口规模与国家经济关联关系可视化研究[J]. 测绘科学技术学报,2025,41(1):80-87.
Yan J Z, Li S M, Wang Y X, et al. Visualization research on the relationship between port scale and national economy based on multi-view collaboration interaction [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2025,41(1): 80-87. (in Chinese)
- [11] 庄宗武,叶振宇,张可云. 产业链龙头企业、超大规模市场与制造业劳动生产率[J]. 经济学动态,2024(1):54-73.
Zhuang Z W, Ye Z Y, Zhang K Y. Industry chain leading firms, super large-scale market and manufacturing labor productivity [J]. Economic Perspectives, 2024(1):54-73. (in Chinese)
- [12] Wang C, Yang Q, Wu S. Coordinated development relationship between port cluster and its hinterland economic system based on improved coupling coordination degree model: empirical study from China's port integration[J]. Sustainability, 2022, 14(9):1-13.
- [13] Park Y S, Egilmez G, Kucukvar M. A novel life cycle-based principal component analysis framework for eco-efficiency analysis: case of the United States manufacturing and transportation nexus [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 92: 327-342.
- [14] 邓郴宜,万勇. 长三角产城融合水平测度、时空特征及驱动因素——基于修正后耦合协调度模型的研究[J]. 城市发展研究,2023,30(6):18-24.
Deng C Y, Wan Y. The level and features of industry-city integration level in the yangtze river delta: based on the modified coupled coordination model [J]. Urban Development Studies, 2023, 30 (6): 18-24. (in Chinese)
-
- (上接第41页)
- [10] Al Mamun M A, Sarkar M A R, Sarker M R, et al. Temperature variability and its effect on seasonal yield of rice in Bangladesh; a long-term trend assessment [J]. Cogent Food & Agriculture, 2025, 11(1): 2447903.
- [11] Zheng L, Lu W S, Huang J X, et al. Harnessing geographic information system and street view imagery for thermal gradient distribution auditing [J]. Urban Climate, 2025, 59: 102248.
- [12] Guo L M, Wang G X, Song C L, et al. Ground thermal regime changes caused by integrated warming, wetting, and greening in permafrost regions of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Catena, 2025, 249: 108658.
- [13] Corporal-Iodangco I L, Leslie L M. Cluster analysis of Philippine tropical cyclone climatology: applications to forecasting [J]. Journal of Climatology and Weather Forecasting, 2016, 4: 1-17.
- [14] Fukunaga K, Hostetler L. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1975, 21(1): 32-40.
- [15] Cai L, Li Y B, Chen M, et al. Tropical cyclone risk assessment for China at the provincial level based on clustering analysis [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 869-886.
- [16] 张云菲,张泽旭,朱芳琪. 利用时空密度聚类的高速公路交通事故黑点路段鉴别[J]. 测绘通报,2022(10):73-79.
Zhang Y F, Zhang Z X, Zhu F Q. Identification of highway accident black spots based on spatio-temporal density clustering [J]. Bulletin of Surveying Mapping, 2022(10): 73-79. (in Chinese)
- [17] 黄杰忠,杨健,李东升. 环境影响下基于模糊C均值聚类和高斯混合模型的隐式损伤识别方法[J]. 振动工程学报,2026,39(1):249-259.
Huang J Z, Yang J, Li D S. Implicit damage identification method based on fuzzy C-means clustering and Gaussian mixture model under environmental influence [J]. Journal of Vibration Engineering, 2026, 39(1):249-259. (in Chinese)
- [18] 黄艳国,张升升,刘红军. 基于高斯混合模型聚类算法的交通状态划分[J]. 现代电子技术,2022,45(7):168-173.
Huang Y G, Zhang S S, Liu H J. Urban road traffic state identification based on Gaussian mixture model clustering algorithm [J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(7): 168-173. (in Chinese)