暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于层次聚类算法的环渤海地区北上台风活动路径及其影响范围精细化研究

袁雅涵 邢雅敏 徐玮平 孟祥新 伯忠凯 陈君芝 丛菁成

Refined analysis on the activity path and impact range of northward typhoons in the Bohai Rim region based on the hierarchical clustering method model

YUAN Yahan，XING Yamin，XU Weiping，MENG Xiangxin，BO Zhongkai，CHEN Junzhi，CONG Jingcheng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-126

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于三种聚类算法的雷暴系统识别效果对比研究

Comparative research on thunderstorms identification based on three clustering methods

暴雨灾害. 2023, 42(3): 334-345 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-179

湖北省区域性暴雨雨团识别及特征分析

Rain clusters identification and characteristics analysis of regional rainstorms in Hubei Province

暴雨灾害. 2021, 40(5): 505-512 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.007

基于聚类分析的浙江省汛期OCF降水预报分区订正试验

Regional correction calibration for OCF precipitation in flood season in Zhejiang Province based on cluster analysis

暴雨灾害. 2023, 42(6): 716-723 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-042

区域海气耦合模式对黄渤海周边近地层温湿预报的性能研究

Study on the performance of the regional air-sea coupled model on forecast accuracy of near-surface temperature and humidity in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea

暴雨灾害. 2024, 43(1): 63-72 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-051

变性台风“美莎克”结构演变特征及暴雨成因分析

Structural evolution characteristics and cause analysis of heavy rain of transition typhoon "Maysak"

暴雨灾害. 2023, 42(5): 521-531 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-050

干冷空气入侵台风“海棠”残余低压引发的华北地区大暴雨分析

Analysis of the heavy rain in North China for dry cold air intruding into typhoon "Begonia" depression

暴雨灾害. 2020, 39(3): 241-249 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.004

关注微信公众号，获得更多资讯信息

袁雅涵,邢雅敏,徐玮平,等.2025.基于层次聚类算法的环渤海地区北上台风活动路径及其影响范围精细化研究[J].暴雨灾害,44(5):602−611. YUAN Yahan, XING Yamin, XU Weiping, et al. 2025. Refined analysis on the activity path and impact range of northward typhoons in the Bohai Rim region based on the hierarchical clustering method model [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):602−611 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−126

基于层次聚类算法的环渤海地区北上台风活动路径及其影响范围精细化研究

袁雅涵[1, 2], 邢雅敏[1, 3], 徐玮平[1, 4], 孟祥新[1, 4], 伯忠凯[1, 4], 陈君芝[1, 4], 丛菁成[5]

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031; 2. 山东省气象数据中心, 济南 250031; 3. 山东省淄博市周村区气象局, 淄博 255300; 4. 山东省气候中心, 济南 250031; 5. 中国民用航空华东地区空中交通管理局, 上海 200335)

摘　要: 为了能够更加精细化地评估环渤海地区台风影响差异, 为该区域台风灾害防御提供决策支撑, 利用1961—2023 年 6—9 月台风最佳路径数据集和国家级气象观测站逐日降水资料, 按照地理边界构建环渤海地区台风活动路径数据集, 分析影响环渤海地区的北上台风总体特征及气候变化规律, 并基于层次聚类算法构建台风活动路径分类模型 (TPCAB), 对北上台风活动路径及其影响范围开展精细化研究。结果表明: (1) 平均每年有 1~2 个台风影响环渤海地区, 其中 6 月最少。气候变化趋势显示, 台风 7 月减少, 8、9 月增多。(2) 影响环渤海地区的北上台风可以分为转向型和直接北上型两类, 转向型台风日最大降水主要集中在山东中部地区; 直接北上型台风日最大降水主要集中在渤海湾北部和山东东南部等区域, 其中京津冀东部地区达 300 mm 以上, 具有较强的极端性。(3) 对比两类台风极端降水过程发现, 直接北上型台风生成位置更偏北, 同时水汽输送路径更加偏西、更靠近环渤海内陆地区, 极端降水风险更高。

关键词: 北上台风; 环渤海地区; 层次聚类

中图法分类号: P457.8　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−126

Refined analysis on the activity path and impact range of northward typhoons in the Bohai Rim region based on the hierarchical clustering method model

YUAN Yahan[1, 2], XING Yamin[1, 3], XU Weiping[1, 4], MENG Xiangxin[1, 4], BO Zhongkai[1, 4], CHEN Junzhi[1, 4], CONG Jingcheng[5]

(1. *Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong*, *Jinan* 250031; 2. *Shandong Meteorological Data Center*, *Jinan* 250031; 3. *Zhoucun Meteorological Bureau of Zibo of Shandong Provice*, *Zibo* 255400; 4. *Shandong Climate Center*, *Jinan* 250031; 5. *East China Air Traffic Management Bureau CAAC*, *Shanghai* 200335)

Abstract: In order to enable a more refined assessment of typhoon impact variations in the Bohai Rim region, thereby providing precise decision-making support for typhoon disaster prevention in the region, this study used the best path dataset of tropical cyclones (TCs) and daily precipitation data from national meteorological observation stations from June to September between 1961-2023, constructed the typhoon activity path dataset for the Bohai Rim region according to the geographical boundary relationship, and analyzed the general characteristic and variation rule of northward typhoon affecting the Bohai Rim region. Based on the hierarchical clustering algorithm, a typhoon activity path classification model (TPCAB) was developed to carry out detailed research on the northward typhoon activity path and its impact areas. The results are as follows. (1) On average, 1~2 TCs affect the Bohai Rim region every year, with the fewest number in June. The climate change trend indicates a decrease in July and an increase in August and September. (2) The northward TCs affecting the Bohai Rim can be divided into two types: turning type TCs and direct northward type TCs. The maximum daily precipitation of the turning type TCs is mainly concentrated in the middle part of some areas in the Shandong Peninsula. The maximum daily precipitation of the direct northward type TCs is mainly distributed in the northern part of Bohai Bay and southeast of Shandong Province, with the eastern part of Beijing-Tianjin-Hebei exceeding 300 mm, showing strong extremity. (3) By comparing the extreme precipitation processes of the two types, it is found that

收稿日期: 2024−06−24; **定稿日期**: 2025−04−30

资助项目: 环渤海区域海洋气象科技协同创新项目 (QYXM202307)

第一作者: 袁雅涵, 主要从事机器学习算法研究。E-mail: foreverlamaara@126.com

通信作者: 徐玮平, 主要从事短期气候预测和区域气候模拟研究。E-mail: xuweiping000@126.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

the direct northward typhoons originate from more northerly locations, with more westward water vapor transport paths and closer to the inland areas of the Bohai Rim region, which demonstrates higher risk of extreme precipitation.

Key words: Northward typhoons; Bohai Rim region; hierarchical clustering algorithm

引　言

台风是形成于热带和副热带洋面上的热带气旋(Tropical Cyclone, TC), 我国位于欧亚大陆东部, 太平洋西北部, 是全球台风发生最频繁的地区 (陈联寿等, 1979)。台风的侵扰常常给我国沿海带来狂风、暴雨、风暴潮、巨浪等自然灾害, 对我国人民的生命财产安全造成较大的威胁。近年来, 影响我国的北上台风的比例显著上升, 登陆位置也逐渐向偏北方向移动 (Chen et al., 2022), 具有持续时间较长、影响范围广、更易致灾等特点 (孙密娜等, 2021; 杨晓亮等, 2021)。2018 年台风“温比亚”北上深入内陆导致河南发生 40 a 来罕见特大暴雨 (杨舒楠和端义宏, 2020), 直接经济损失 7.8 亿元 (中国气象局, 2019)。2020 年夏季东北地区罕见地遭受了北上台风“三连击”, 给当地社会经济和人民生活造成了严重的影响 (杨瑞雯等, 2024)。2022 年台风“暹芭”北上与高空西风槽相互配合, 造成中东部地区暴雨, 具有持续时间长、影响范围广、雨带跨度大等特点 (闵爱荣等, 2025)。2023 年第 5 号台风“杜苏芮”登陆后一路北上, 残余环流降水导致京津冀地区重大洪涝灾害 (刘达等, 2023; 杨舒楠等, 2023)。

围绕台风的研究中台风路径预报是一个关键问题 (Qian et al., 2013), 台风路径存在复杂性和非线性特征, 对台风路径进行及时预报对减少台风所造成的灾害具有十分重要的意义。北上台风路径的合理分类, 对研究台风降水至关重要。王媛和郑丽娜 (2023) 按照大尺度环流形势对影响山东的台风分成了 3 类。高松影等 (2017) 将北上台风分为转向北上和直接北上两大类, 并以 122°E 为界继续细化为西转向、中转向和东转向路径。温连杰等 (2016) 以 125°E 和 30°N 为分界点, 将北上台风分为了 4 类。大多数研究重点分析台风转向点, 并结合天气形势、降水强度等对台风路径开展主观分类, 此类研究容易受到个体经验和主观判断的影响, 效率较低 (孟莹等, 2005), 同时由于分界点判定标准的不同, 对于北上分类结果也存在不确定性。近年来, 随着机器学习算法技术不断发展, 为台风活动路径分类提供了全新的角度。聚类算法作为机器学习中一种经典的数据分析技术, 通过对无标签的样本学习从而揭示数据内在的结构规律和性质, 并且已经成功应用到台风活动路径研究领域。例如, Kim 等 (2011) 采用模糊 C 聚类算法, 把西北太平洋的台风路径数据划分成了 7 类。郑颖青等 (2013) 利用 K-Means 聚类算法对西北太平洋台风路径进行客观分类, 通过迭代使得每个数据点距离簇中心的距离最优。叶家成等 (2019) 利用台风的强度、转向点、质心和生命周期等特征参数, 使用 K-Means 聚类算法将 1949—2016 年影响中国大陆台风路径划分为 4 类。

虽然以上工作实现了台风的路径分类, 但是上述聚类算法往往依赖于预定义簇数, 对非线性路径的适应性和可解释性较差。这些因素会对台风路径分类效果造成影响, 因此如何消除这些影响尤为重要。近年来, 层次聚类算法因不需要预先设定聚类个数并且可以识别数据之间的层次关系而受到广泛关注 (邵佳和金百锁, 2022; 余恒和侯晓岚, 2022; 王红勇和许平, 2022)。层次聚类方法主要分为凝聚型聚类 (Agglomerative Clustering) 和分裂型聚类 (Divisive Clustering) 两大类, 该方法不依赖于簇的形状, 能够有效处理非线性特征, 生成树状图揭示数据之间的层次关系和相似度。因此, 层次聚类方法为研究台风路径的相似性提供了新的视角。

环渤海地区北上台风精细化分类研究并不多见, 且传统的分类方法无法充分捕捉台风数据的层次结构和内部关联性, 如何揭示环渤海地区北上台风活动路径的精细化特征及其降水影响、动态特征, 是目前亟需解决的科学问题。本文首先搭建基于凝聚型层次聚类算法的环渤海地区台风活动路径分类模型 (A Typhoon activity Path Classification algorithm based on Agglomerative clustering around the Bohai Sea Rim, TPCAB), 选取不同时刻的台风中心纬度、经度, 对环渤海地区北上台风路径进行聚类; 然后, 利用统计分析方法揭示不同路径北上台风影响环渤海地区的总体特征及其变化规律; 最后, 通过合成分析方法探究不同路径北上台风降水的物理机制。针对环渤海地区受台风影响差异, 开展更为精细化、系统化的评估, 旨在为环渤海地区的防灾减灾工作提供有力的科学依据。

1　资料与方法

1.1　资料说明

使用资料包括: (1) 中国气象局提供的 1961—2023 年 6—9 月台风最佳路径数据集 (Lu et al., 2021)。

(2) 国家气象信息中心提供的 1961—2023 年 6—9 月环渤海地区国家级气象站逐日降水资料。(3) 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 提供的 1961—2023 年 6—9 月逐日 500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场、比湿、海平面气压等再分析资料, 水平分辨率为 2.5°×2.5°。本文气候态为 1991—2020 年 6—9 月逐日气象要素平均。

台风强度参考热带气旋等级国家标准 (温连杰等, 2016), 包括热带低压 (Tropical Depression, TD, 风速范围 10.8~17.1 $m·s^{-1}$)、热带风暴 (Tropical Storm, TS, 17.2~24.4 $m·s^{-1}$)、强热带风暴 (Strong Tropical Storm, STS, 24.5~32.6 $m·s^{-1}$)、台风 (Typhoon, TY, 32.7~41.4 $m·s^{-1}$)、强台风 (Strong Typhoon, STY, 41.5~50.9 $m·s^{-1}$) 和超强台风 (Super Strong Typhoon, SuperTY, ⩾51.0 $m·s^{-1}$)。本文重点关注影响环渤海区域 (111°—124°E, 34°—43°N) 的 6—9 月北上台风。

1.2 台风影响区域判定方法

相关研究表明, 台风的影响范围不仅只在其过境区域 (尹宜舟等, 2011; Fang and Zhang, 2021), 也可以通过强大的环流导致远距离暴雨 (陈淑琴等, 2021; 刘胜男等, 2024)。在台风中心约 200 km 范围内多发生雷暴 (Molinari et al., 1999)、大风 (Mueller et al., 2006)、强降水 (Lonfat et al., 2007) 等天气现象。本文基于 Cartopy 方法库, 参考台风影响半径算法 (Yu et al., 2022), 以台风中心为圆心绘制半径为 2° (笛卡尔坐标系约为 222 km) 的缓冲区作为台风影响区域 (图 1 中阴影区, 109°—126°E, 32°—45°N)。当北上台风活动范围与环渤海影响区域边界存在交集, 则判定该台风过程对环渤海地区产生影响。其中台风最大强度为影响环渤海地区所有记录点的最大强度, 台风影响日期为影响环渤海地区的第一个记录点所在时间。

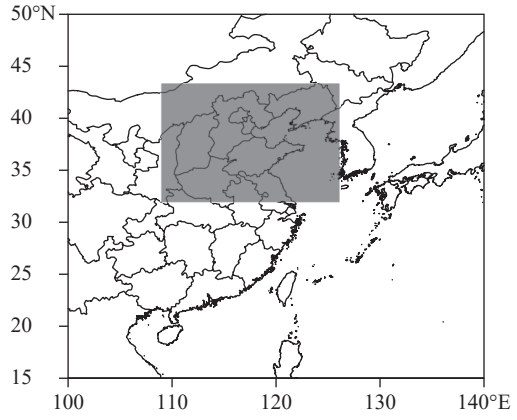


图 1 1961—2023 年 6—9 月影响环渤海区域的北上台风活动范围 (阴影区)

Fig. 1 The range of northward Tropical Cyclone (TC) path affecting the Bohai Rim region (shaded area) from June to September between 1961-2023

经过筛选, 1961—2023 年 6—9 月共有 100 次台风过程影响环渤海地区 (图 2), 基于 100 次台风过程构建环渤海地区台风活动路径数据集 (Typhoon activity path around Bohai Sea Rim, TB)。分析图 2 可知, 北上台风路径呈多样性, 有的台风从海上直接向北移动, 穿过环渤海地区; 有的则在接近海岸时向东北或西北方向移动, 登陆我国东部沿海, 因此需要进一步对北上台风路径进行分类。

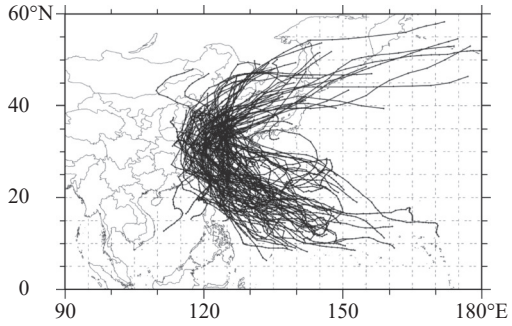


图 2 1961—2023 年 6—9 月影响环渤海地区的北上台风路径

Fig. 2 The northward TC path affecting the Bohai Rim region from June to September between 1961-2023

1.3 层次聚类算法

本文采用凝聚型层次聚类算法搭建环渤海地区台风活动路径分类模型 (TPCAB), 这是一种自底层向上层的聚类算法, 将每个样本视为单独簇, 通过距离度量逐步将相似簇合并, 直至所有对象合并在一个簇中或符合某种终结条件即为结束 (Ran et al., 2022), TPCAB 模型主要包括以下步骤:

对 TB 数据集中 100 条不同的台风活动路径进行特征提取, 其中第 i 条台风路径的第 j 个特征值为 X_{ij}。由于不同特征指标的性质不同, 具有不同的数据量级, 直接分析会影响台风数值权重, 并消弱较低数值特征的作用。因此在数据预处理阶段, 对特征指标进行标准化处理, 得到数据集TB′, 以消除由于不同特征尺度而可能引起的偏差 (Hogg and Tanise, 2005)。

在数据集TB′中含有 7 个不同的台风特征, 结合台风路径的研究经验, 重点关注台风的位置信息, 选取不同时刻的台风中心纬度、经度为特征值, 不考虑北上台风转向点的经纬度位置信息。采用欧式距离作为相似度度量标准, 对于任意两条台风路径 (第 i 条和第 k 条), 在 P 维特征空间中的欧式距离 d 定义如下

$$d(i,k)=\sqrt{\sum_{j=1}^{p}=(X_{ij}-X_{kj})^2} \tag{1}$$

链接准则采用 Ward linkage 方法 (Ward, 1963), 即计算台风的任意两个路径类别合并时的方差增量$\Delta(S,T)$, 将方差增量最小的合并, 不断进行迭代合并, 得到最终分类结果。其中$\Delta(S,T)$定义如下

$$\Delta(S,T)=\frac{|S|\cdot|T|}{|S|+|T|}\cdot\left\|\overline{X}_S-\overline{X}_T\right\|^2 \tag{2}$$

式中$|S|$和$|T|$分别代表台风任意两类的路径数量, $\overline{X}_S$和$\overline{X}_T$是样本均值向量

$$\overline{X}_S=\frac{1}{|S|}\sum_{i\in S}X_i \tag{3}$$

$$\overline{X}_T=\frac{1}{|T|}\sum_{k\in T}X_k \tag{4}$$

通过计算所有类的$\Delta(S,T)$值, 然后合并两个最相似的类 (任意方差增量最小的两类), 以减小最小化类内差异, 确保台风路径聚类过程中的紧密性, 使得同一类的台风相似度最高, 不断进行迭代合并, 直至得到影响环渤海地区的不同北上台风路径分类结果。为了更好的挖掘环渤海地区台风活动路径的分布和规律, 层次聚类时利用轮廓系数来确定最佳的簇数, 在数据间的相似度计算基础上, 以层级树形结构展示样本间的相似关系, 采用聚类谱系描述各样本之间的层次关系 (Ran et al., 2022)。

2 结果分析

2.1 影响环渤海地区台风数量和强度特征

图 3 为影响环渤海地区台风数量的年际变化。由图 3a 可知, 平均每年有 1~2 个台风影响环渤海地区, 其中 1985 年最多 (5 个), 1962、1984、1994、1999、2018、2019 年有 4 个, 还有 14 a 没有受台风影响。影响环渤海地区的台风个数存在明显的年际变化特征, 且呈逐渐增多趋势, 平均每 10 a 增多 0.033 个, 近些年增多趋势明显。从各月统计结果显示, 影响环渤海地区的台风多发生于 7—8 月, 6 月最少, 仅有 4 a 出现 (图 3b); 7 月呈现出减少趋势, 平均每 10 a 减少 0.013 个 (图 3c); 8、9 月均呈现出增多趋

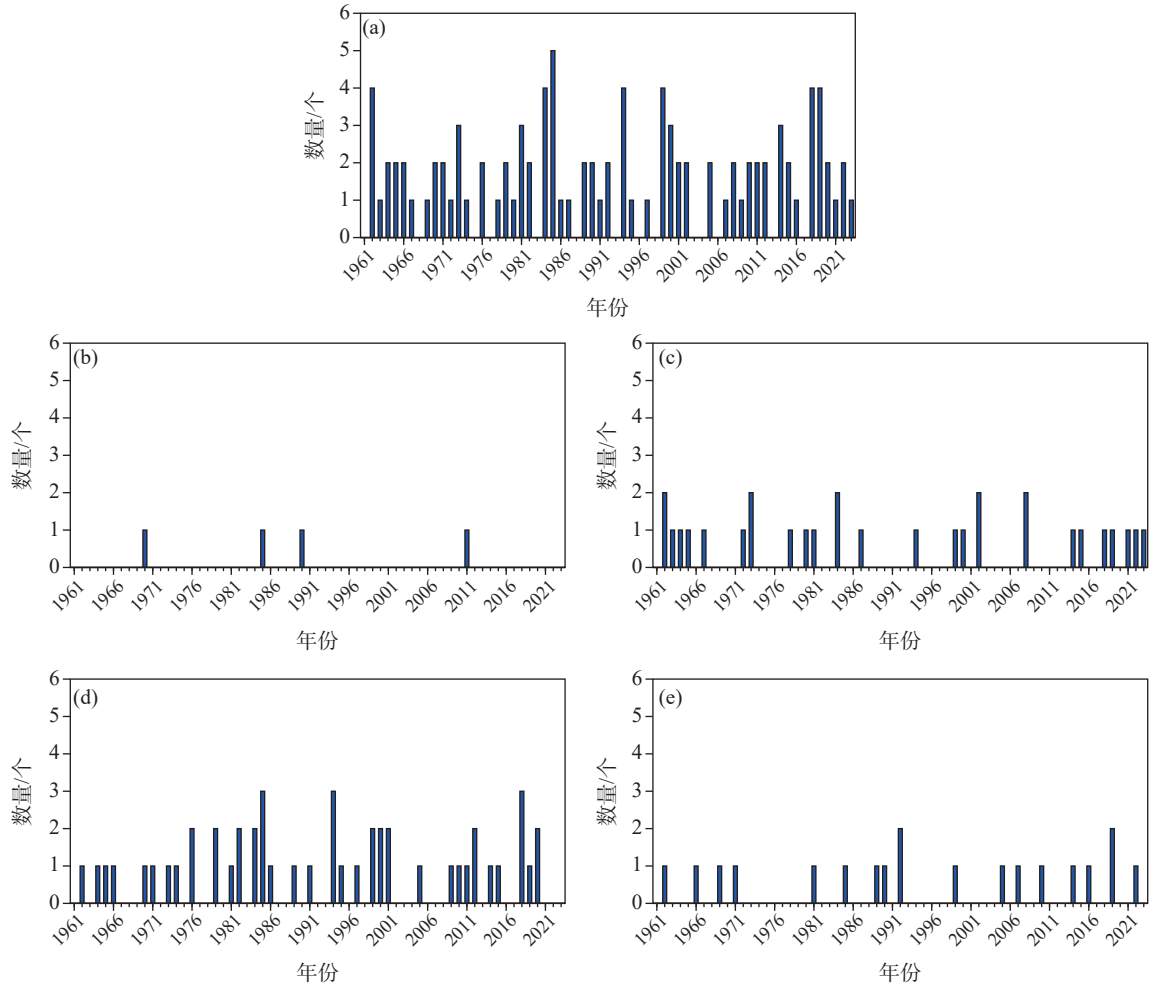


图 3 1961—2023 年影响环渤海地区台风数量年 (a)、6 月 (b)、7 月 (c)、8 月 (d)、9 月 (e) 分布

Fig. 3 Number of (a) annual, (b) June, (c) July, (d) August, (e) September of typhoons affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

势, 平均每 10 a 分别增加 0.023 个、0.029 个 (图 3d 和图 3e), 其中 8 月影响环渤地区台风最多, 1985、1994 和 2018 年最多 (3 个); 2000 年之后, 9 月影响环渤海的台风明显增多。杨晓亮等 (2021) 统计的影响环渤海地区北上台风数量显示, 1984、1994、2018 年达到 3 个, 平均约 6.6 个·(10 a)$^{-1}$, 主要出现在 7 月下旬—8 月, 以上结论与本文略有差别, 可能与选取的环渤海影响区域不同有关 (图 1)。

图 4 为影响环渤海地区台风各月和不同强度的占比分布。可见, 在 63 a 内, 6—9 月影响环渤海台风占比分别为 4%、29%、48% 和 19%, 8 月最多, 7 月次之 (图 4a)。影响环渤海的台风最大强度主要集中于热带风暴 (31%), 热带低压、强热带风暴、台风、强台风分别占 22%、20%、13%、3% (图 4b)。

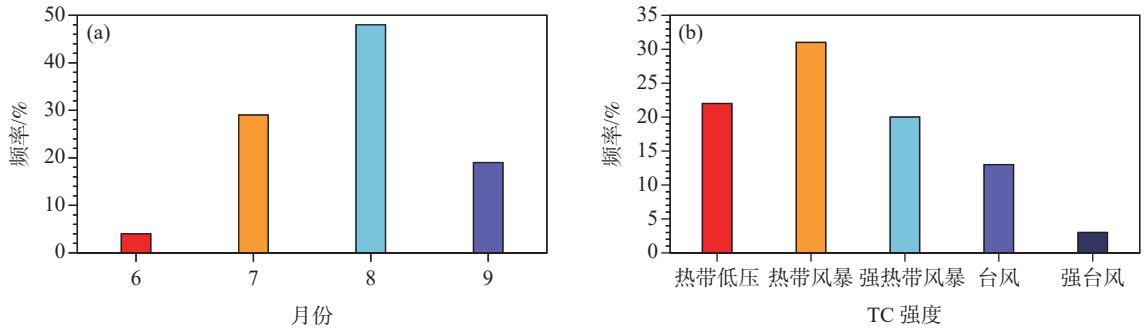


图 4 1961—2023 年 6—9 月 (a) 和不同强度台风 (b) 影响环渤海地区占比 (单位: %)

Fig. 4 Frequency (unit:%) distribution of (a) monthly (June—September) and (b) different intensities of typhoons affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

2.2 北上台风分类及降水和环流特征

2.2.1 聚类结果

使用轮廓系数衡量台风数据样本聚类的整体质量, 在台风路径聚类研究中, 分别对所有 TB′数据进行不同簇数 (2~6) 的对比实验, 绘制轮廓系数变化图。如图 5 所示, 轮廓系数在 2 个簇的时候最大达到 0.52 以上, 随着簇数增加轮廓系数出现明显下降随后趋于平稳, 虽略有波动但无明显提升, 表明 TB′数据在 2 个簇时具有较好的分离度和聚合度。利用树形结构展示北上台风层次聚类过程的路径分类 (图略), 在聚合过程中不同台风路径具有较高相似度的被归为同一簇, 与其他簇保持显著距离, 逐渐合并相似簇, 因此台风活动路径的聚类簇数定为 2。

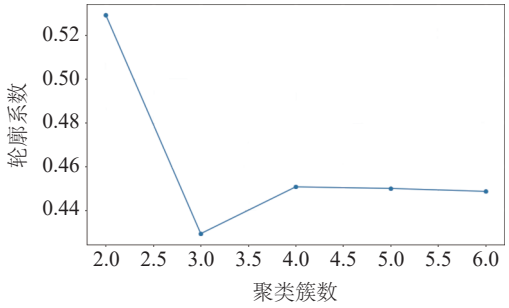


图 5 不同聚类结果的轮廓系数变化图

Fig. 5 Variation diagram of contour coefficients of different clustering results

2.2.2 不同路径台风分类及其特征

图 6 为利用 TPCAB 模型对影响环渤海地区的 100 次台风过程的聚类结果, 一共分为两类。第一类转向型北上台风 (图 6a), 先向西北方向移动再转为偏东方向移动, 有明显的转向点, 大部分台风在我国东南沿海至环渤海地区登陆, 之后路径转向鄂霍茨克海及日本以东, 并在较远的北太平洋洋面上消亡, 运动形态大致呈抛物线型。第二类直接北上型台风 (图 6b), 路径整体相对偏北, 轨迹较为平直, 部分登陆我国东南沿海北上, 之后向东北转向, 没有明显转向

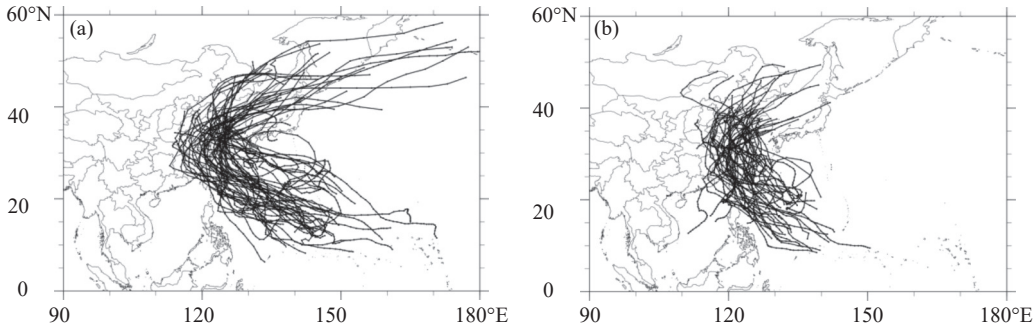


图 6 1961—2023 年影响环渤海地区的转向型 (a) 和直接北上型 (b) 台风路径

Fig. 6 The (a) turning and (b) direct northward typhoon paths affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

点。该类台风大部分途径我国东海、黄海及辽东半岛, 其中一部分在朝鲜半岛及其以东地区向东北方向移动并消亡, 而另一部分台风在我国内蒙古及东北地区消亡。

图 7 为 1961—2023 年影响环渤海地区的转向型和直接北上型两类台风数量的年际变化。转向型北上台风共 54个, 占比为 54%, 具有明显的年际变化特征; 呈现出明显下降趋势, 平均每 10 a 减少 0.101 个 (图 7a)。直接北上型台风 46 个, 占比为 46%, 也具有明显的年际变化特征, 呈现出增多趋势, 平均每 10 a 增加 0.134 个 (图 7b)。近 10 a 主要以直接北上型台风为主, 对环渤海地区产生较大影响。

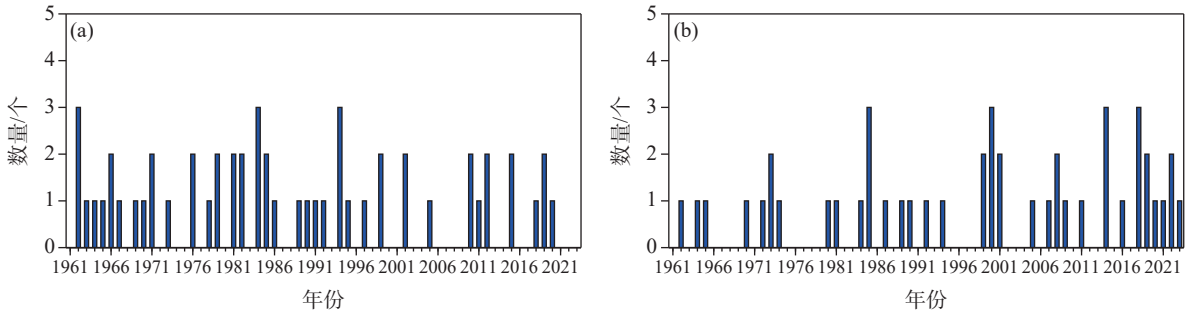


图 7 1961——2023 年影响环渤海地区的转向型 (a) 和直接北上型 (b) 台风数量的逐年变化

Fig. 7 Interannual variation in the frequency of (a) turning and (b) direct northward typhoons affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

进一步分析两类北上台风路径的主要影响区域, 将台风路径区域划分为 2°×2°的经纬度网格, 统计 100 个台风移入每个经纬度网格的频数, 由此得到图 8。图 8a 显示, 转向型北上台风频繁经过东海、黄海等洋面以及多在浙江沿海地区登陆, 北上穿过环渤海地区。环渤海地区主要受台风外围云系影响, 沿海部分地区狂风、暴雨等自然灾害的风险较高。由图 8b 可见, 直接北上型台风多经过东海、黄海洋面和江苏、浙江等沿海地区, 部分路径直接穿过山东中部地区, 影响范围更加靠近我国内陆地区。

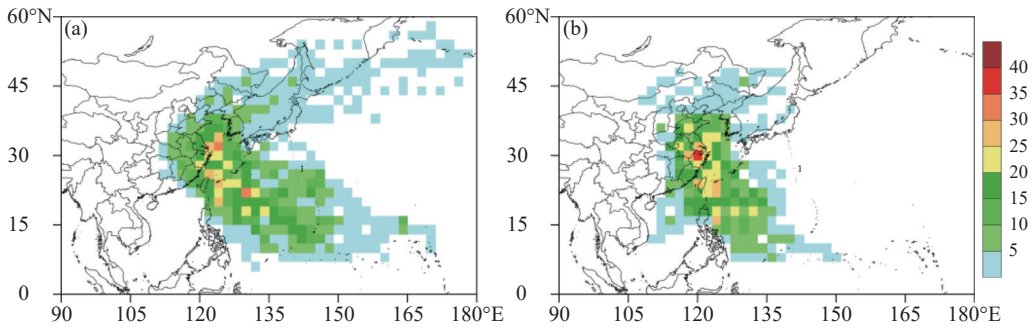


图 8 1961—2023 年影响环渤海地区转向型 (a) 和直接北上型 (b) 台风的路径频数 (单位: 个) 分布

Fig. 8 Track frequency (unit: counts) distribution of (a) turning and (b) direct northward typhoons affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

2.2.3 不同路径台风降水及其环流特征

根据 Cartopy 方法库分别挑出两类北上台风影响环渤海地区日期。图 9 为两类北上台风影响环渤海地区期间的日最大降水量分布。可见, 转向型北上台风降水从东往西呈现出逐渐减少趋势, 降水大值区主要集中在山东中部和辽宁北部的部分区域, 其中山东中部地区日降水量最大, 达 200 mm(图 9a); 直接北上型台风降水也呈现出西少东多趋势, 降水大值区主要分布在渤海湾北部和山东东南部等部分区域, 其中京津冀东部地区日降水量最大, 达 300 mm 以上 (图 9b), 较转向型台风降水整体偏多, 具有较强的极端性。地形抬升耦合效应与台风降水密切相关 (黄奕武等, 2009), 由于冀北地区燕山山脉的地形抬升作用, 使得台风携带的大量湿润空气冷却凝结, 导致降水强度明显加强。综上可知, 环渤海地区北上台风日最大降水量分布特征与台风路径活动特征 (图 8) 相符合, 表明台风数据和分类结果是合理的。

为了进一步分析两类不同路径台风影响环渤海地区期间的环流特征, 分别对转向型和直接北上型台风影响环渤海期间的日平均 500 hPa 位势高度场距平进行分析 (图略)。直接北上型台风较转向型在西北太平洋地区自北向南的“- + -”波列呈现出向偏北偏东方向偏移, 更有利于台风直接北上影响环渤海地区, 其中日本海-我国东北地区的正距平中心是影响北上台风移动路径的关键环流区。大多数台风生成于季风槽内, 季风槽内热带扰动的发生概率要

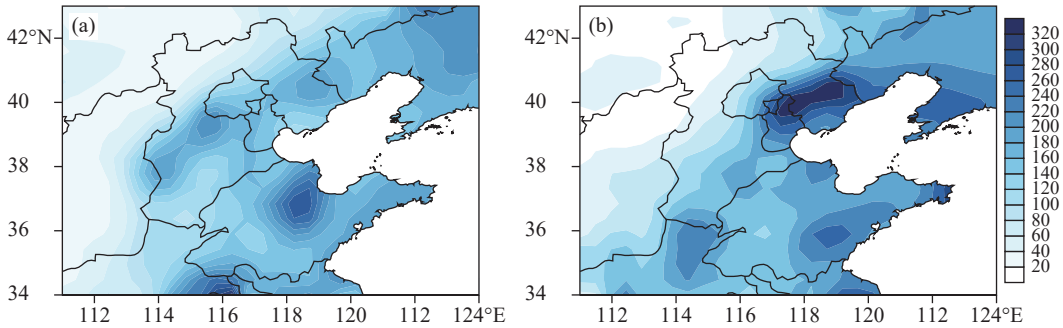


图 9 1961—2023 年影响环渤海地区转向型 (a) 和直接北上型 (b) 台风的日最大降水量 (单位: mm) 分布

Fig. 9 Daily maximum precipitation (unit: mm) of (a) turning and (b) direct northward typhoons affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

远高于非季风槽 (王慧等, 2006)。对转向型和直接北上型台风影响环渤海期间的 850 hPa 流场合成进行分析 (图略) 发现, 直接北上型台风较转向型台风的平均生成位置更偏北。

由于两类台风的大尺度环流系统平均场差异不大, 因此挑选两类台风的个例 (表 1) 进一步分析。合成分析两类台风影响环渤海期间的平均 850 hPa 流场和 500 hPa 位势高度场 (图 10)。由图 10a 可见, 转向型台风在朝鲜半岛上空风速明显加大, 同时海上副高主体更靠近大陆, 且台风中心位置大约与副高脊线几乎在同一线上, 受副高西侧南风引导利于台风转向。而图 10b 显示, 直接北上型台风在长三角及渤海湾地区上空风速加大, 海上副高主体更偏东, 且台风中心大约位置位于副高脊线南侧, 且台风北侧为低压系统, 该形势利于台风直接北上, 向内陆转向并入北侧低压。另外环渤海位于台风中心东侧, 导致环渤海北侧受南风向岸风影响降雨更加显著。

表 1 1961—2023 年影响环渤海地区两类北上台风个例信息

Table 1 The northward typhoon examples of different types affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

台风类型	台风名称(年份)
转向型	卡努(2005)、圆规(2010)、梅花(2011)、布拉万(2012)、玲玲(2019)
直接北上型	安比(2018)、摩羯(2018)、温比亚(2018)、利奇马(2019)、烟花(2021)

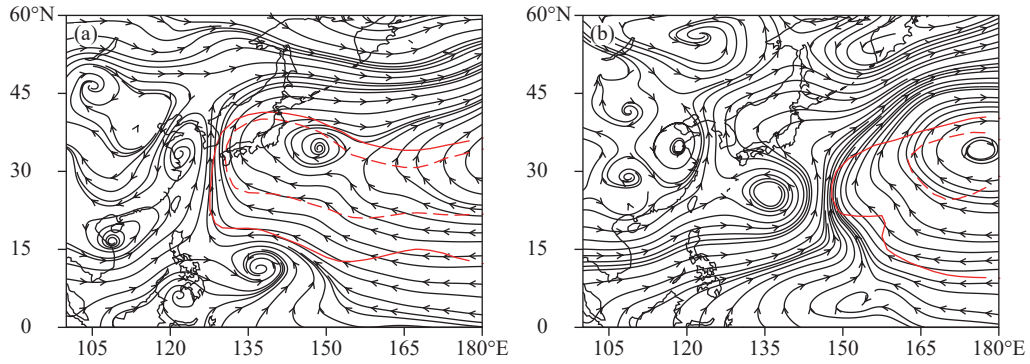


图 10 1961—2023 年影响环渤海地区转向型 (a) 和直接北上型 (b) 台风影响环渤海期间的平均 850 hPa 流场 (流线, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 和 500 hPa 位势高度场 (单位:dagpm, 红色实线和虚线分别表示平均 588、592 等高线) 合成分布

Fig. 10 Composite distribution of the mean 850 hPa flow field (arrow, unit: $m \cdot s^{-1}$) and 500 hPa geopotential height field (unit: dagpm) of (a) the turning type and (b) the direct northward typhoons affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023 (red solid and dotted lines represent the mean 588 and 592 contour lines of the geopotential height, respectively)

从对流层整层的水汽输送距平场 (图 11) 可以看出, 转向型台风在环渤海以东洋面形成水汽通量异常辐合区 (图 11a), 导致山东半岛以及辽宁东部部分地区降水异常偏多。而直接北上型台风在渤海湾地区形成水汽通量异常辐合区 (图 11b), 导致环渤海北侧内陆地区降水异常偏多。直接北上型台风水汽输送路径更加偏西, 造成环渤海内陆地区极端降水的风险更高。有研究指出, 西风水汽输送是环渤海地区重要的水汽来源之一, 也会给台风降水提供充足的水汽条件 (Zhu and Liu, 2023), 因此环渤海地区的水汽输送同时受东亚季风和中纬度西风共同影响。对于转向型和直接北上型台风的水汽输送的差异还需进一步诊断分析。

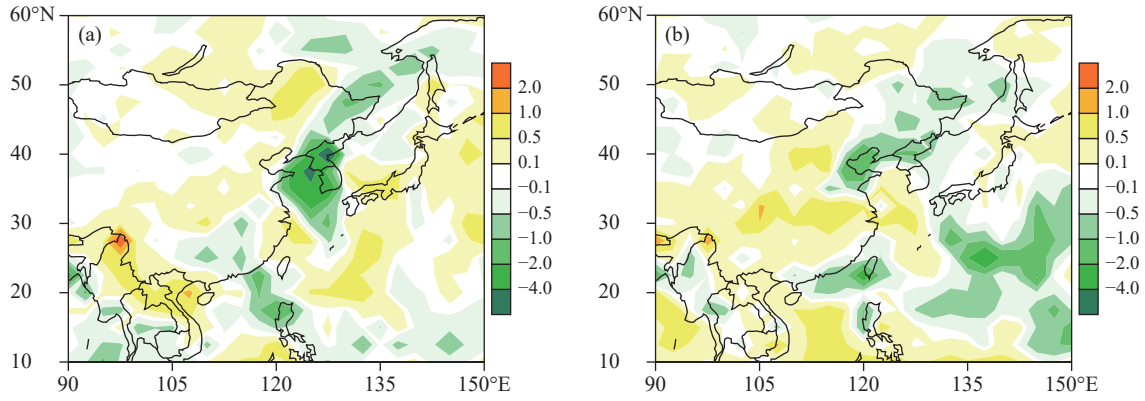


图 11 1961—2023 年影响环渤海地区转向型 (a) 和直接北上型 (b) 台风影响环渤海期间的日平均对流层整层水汽通量散度距平场 (填色, 单位: $10^{-5}\cdot kg\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}$)

Fig. 11 Daily average tropospheric vertically integrated moisture flux divergence anomaly fields (shaded, unit:$10^{-5}\cdot kg\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}$) during the period of (a) the turning type and (b) direct northward typhoons affecting the Bohai Rim region from 1961 to 2023

3 结论与讨论

本文利用 1961—2023 年 6—9 月台风最佳路径数据集, 挑选北上影响环渤海地区的台风过程, 构建基于聚类算法的环渤海地区台风活动路径分类模型 TPCAB, 对台风路径进行聚类分析。利用统计分析方法揭示不同路径北上台风影响环渤海地区的特征及其变化规律。进一步挑选台风降水过程个例, 分析低层流场及水汽输送条件, 探讨其空间差异特征。得出如下主要结论:

(1) 1961—2023 年 6—9 月影响环渤海地区的台风数量共 100 个, 平均每年约有 1~2 个台风影响环渤海地区, 其中 6 月最少。气候变化趋势显示 7 月减少, 8、9 月增多。影响环渤海的台风强度主要为热带风暴 TS (31%)。

(2) 聚类结果显示, 影响环渤海地区的台风分别为先向西北方向移动之后转向东北方向的转向型台风和路径轨迹相对偏北的直接北上型台风。

(3) 转向型北上台风降水呈现出西少东多分布, 降水主要集中在山东中部和辽宁北部的部分区域, 日最大降水量达 200 mm 以上。直接北上型台风降水也呈现出西少东多趋势, 降水主要集中在渤海湾北部和山东东南部等部分区域, 其中京津冀东部地区日最大降水量达 300 mm 以上。

(4) 直接北上型台风较转向型台风在西北太平洋地区的"- + -"波列呈现出向偏北偏东方向偏移, 更有利于台风直接北上影响环渤海地区, 其中日本海-我国东北地区的正距平中心是影响北上台风移动路径的关键环流区。通过对造成环渤海地区强降水的两类台风对比发现, 直接北上型台风生成位置更偏北, 且水汽输送路径更加偏西, 更靠近环渤海内陆地区, 降水更强。

本文精细化地评估了环渤海地区受台风影响的路径差异, 为环渤海地区台风灾害防御提供决策支持, 特别是在沿海经济带风险区划及应急响应预案制定等方面具有重要应用价值。后续研究将结合高分辨率数值模式模拟, 进一步揭示地形抬升耦合效应、中纬度西风水汽输送等对环渤海台风灾害天气的影响机制。此外, 太平洋海温对于台风的生成及其活动路径存在重要影响, 可以通过海气相互作用调节其上空的大气环流分布, 来影响台风的运动 (Huang et al., 2011)。下一步将针对不同关键区海温对不同路径北上台风及其影响环渤海地区的机理进行深入分析, 以期全面了解海温异常变化与台风路径、强度之间的内在联系。

参考文献 (References):

中国气象局.2019.中国气象灾害年鉴[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration. 2019. China Meteorological Disaster Yearbook. Beijing: China Meteorological Press

陈联寿,丁一汇.1979.西太平洋台风概论[M].北京:北京科学出版社:221-491. Chen L S, Ding Y H. 1979. Introduction to typhoons in the Western Pacific [M]. Beijing: Beijing Science Press:221-491

陈淑琴,李英,范悦敏,等.2021.台风"山竹"(2018) 远距离暴雨的成因分析[J].大气科学,45(3):573−587. Chen S Q, Li Y, Fan Y M, et al. 2021. Analysis of long-distance heavy rainfall caused by Typhoon Mangosteen (2018) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45(3):573−587 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2009.20126

高松影,赵婷婷,宋莉莉,等.2017. 1949—2015 年北上热带气旋特征[J].气象科技,45(5):313−323. Gao S Y, Zhao T T, Song L L, et al. 2017. Study of northward moving tropical cyclones in 1949-2015 [J]. Meteorological Science and Technology,45(5):313−323 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20160229

黄奕武,端义宏,余晖.2009.地形对超强台风罗莎降水影响的初步分析[J].气象,35(9):3−10. Huang Y W, Duan Y H, Yu H. 2009. A study of the impact of terrain on the Precipitation of KROSA [J]. Meteorological Monthly,35(9):3−10 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2009.9.001

刘达,向纯怡,张玲,等.2023.台风“杜苏芮”(2305) 的主要特点及路径和强度预报难点分析[J].海洋气象学报,43(4):1−10. Liu D, Xiang C Y, Zhang L, et al. 2023. Analysis on maincharacteristics of Typhoon Doksuri (2305) and difficulties in its track and intensity forecast [J]. Journal of Marine Meteorology,43(4):1−10 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn2096−3599.2023.04.001

刘胜男,屈丽玮,张蔚然,等.2024.陕北两次不同强度的区域性暴雨过程特征对比[J].高原山地气象研究,44(3):48−57. Liu S N, Qu L W, Zhang W R, et al. 2024. Comparative analysisof characteristics of two regional rainstorm processes with different intensities in Northern Shaanxi [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(3):48−57 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.03.006

孟莹,卢娟,缪启龙.2005.影响台湾岛海域的西太平洋台风特征分析[J].热带气象学报,21(3):315−322. Meng Y, Lu J, Liao Q L. 2005. Analysis of the characteristics of the west pacific typhoon affecting the sea area around the island of taiwan [J]. Journal of Tropical Meteorology,21(3):315−322 (in Chinese)

闵爱荣,张文,王晓芳,等.2025. 2022 年 4—10 月我国主要暴雨天气过程简述[J].暴雨灾害,44(2):264−276. Min A R, Zhang W, Wang X F, et al. 2025. Major heavy rainfall events in China from April to October in 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):264−276 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−223

孙密娜,韩婷婷,徐姝.2021.冷空气在北上台风“利奇马”致灾暴雨中的作用分析[J].自然灾害学报,30(1):201−212. Sun M N, Han T T, Xu S. 2021. Analysis of the role of cold air in the rainstorm caused by typhoon “Lichma” [J]. Journal of Natural Disasters,30(1):201−212 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2021.0121

邵佳,金百锁.2022.基于层次聚类的图像分割算法[J].计算机应用,42(S2):211−216. Shao J, Jin B S. 2022. Image segmentation algorithm based on hierarchical clustering [J]. Journalof Computer Applications,42(S2):211−216 (in Chinese). doi:10.11772/j.issn.1001−9081.2021112014

王红勇,许平.2022.基于层次聚类的航空器群识别方法[J].西华大学学报 (自然科学版),41(2):1−7. Wang H Y, Xu P. 2022. Recognition method of Aircraft Group based on hierarchical clustering [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition,41(2):1−7 (in Chinese). doi:10.12198/j.issn.1673−159X.4141

王慧,丁一汇,何金海.2006.西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响[J].气象学报,(3):345−356. Wang H, Ding Y H, He J H. 2006. Influence of western north pacific summer monsoon changes on typhoon genesis [J]. Acta Meteorologica Sinica,(3):345−356 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2006.03.009

王媛,郑丽娜.2023. 2000—2021 年影响山东的北上台风分类及降水落区分析[J].沙漠与绿洲气象,17(2):162−169. Wang Y, Zheng L N. 2023. Classification of northward typhoons affecting shandong province and precipitation area during 2000-2021 [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(2):162−169 (in Chinese). doi:10.12075/j.issn.1002−0799.2023.02.021

温连杰,刘桂艳,刘清容,等.2016. 1960—2013 年影响渤海的热带气旋特征分析[J].海洋开发与管理,33(8):84−89. Wen L J, Liu G Y, Liu Q R, et al. 2016. Statistical analysis of tropical cyclones which affected the Bohai Sea during 1960-2013 [J]. Ocean Development and Management,33(8):84−89 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1005−9857.2016.08.018

杨晓亮,杨敏,隆璘雪,等.2021.影响环渤海地区的北上台风特征及其各类典型大暴雨过程分析[J].海洋预报,38(4):99−106. Yang X L, Yang M, Long L X, et al. 2021. The characteristics of northward-moving typhoons affecting the Bohai Rim Region and the analysis of various types of related heavy rainfall processes [J]. Marine Forecasts,38(4):99−106 (in Chinese). doi:10.11737/j.issn.1003−0239.2021.04.012

杨舒楠,端义宏.2020.台风温比亚 (1818) 降水及环境场极端性分析[J].应用气象学报,31(3):290−302. Yang S N, Duan Y H. 2020. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of typhoon Rumbia in 2018 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(3):290−302 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200304

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508−520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and cause of the “23·7” torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

杨瑞雯,曲荣强,谭政华,等.2024. 2020 年北上台风不同模式的预报误差分析[J].成都信息工程大学学报,39(2):208−215. Yang R W, Qu R Q, Tan Z H, et al. 2024. Forecast error analysis of typhoon going north for different models in 2020 [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,39(2):208−215 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.012

尹宜舟,肖风劲,罗勇,等.2011.我国热带气旋潜在影响力指数分析[J].地理学报,66(3):367−375. Yin Y Z, Xiao F J, Luo Y, et al. 2011. Study on tropical cyclone potential impact index in China [J]. Acta Geographica Sinica,66(3):367−375 (in Chinese). doi:10.11821/xb201103009

叶家成,杜新观,余锦华.2019.影响中国大陆热带气旋路径分类及其特征研究[J].气象科学,39(3):304−311. Ye J C, Du X G, Yu J H. 2019. Study on the classification and characteristics of tropical cyclone tracks in mainland China [J]. Journal of Meteorological Sciences,39(3):304−311 (in Chinese). doi:10.3969/2018jms.0021

余恒,侯晓岚.2022.层次聚类算法的天文学应用[J].中国科学: 物理学力学天文学,52(8):118−131. Yu H, Hou X L. 2022. Hierarchical clustering in astronomy [J]. Scienta Sinica-Physica Mechanica Astronomica,52(8):118−131 (in Chinese). doi:10.1360/SSPMA−2022−0053

郑颖青,余锦华,吴启树,等.2013. K-均值聚类法用于西北太平洋热带气旋路径分类[J].热带气象学报,29(4):607−615. Zheng Y Q. Yu J H, Wu Q S, et al. 2013. K-means clustering method for classification of the northwestern pacific tropical cyclone tracks [J]. Journal of tropical meteorology,29(4):607−615 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−4965.2013.04.009

Chen T, Chen S M, Zhou M S, et al. 2022. Northward shift in landfall locations of tropical cyclones over the Western North Pacific during the last four decades [J]. Advances in Atmospheric Sciences,39(2):

304−319. doi:10.1007/s00376−021−1077−z

Fang W H, Zhang H X. 2021. Zonation and scaling of tropical cyclone hazards based on spatial clustering for coastal China [J]. Natural Hazards,109(1):1271−1295. doi:10.1007/s11069−021−04878−4

Hogg R, Tanis E. 2005. Probability and statistical inference (7th edition) [M]. London:Prentice Hall,120-145

Huang G, Qu X, Hu K. 2011. The impact of the tropical Indian Ocean on South Asian high in boreal summer [J]. Advances in Atmospheric Sciences,28(2):421−432. doi:10.1007/s00376−010−9224−y

Kim H S, Kim J H, Ho C H, et al. 2011. Pattern classification of typhoon tracks using the fuzzy c-means clustering method [J]. Journal of Climate,24(2):488−508. doi:10.1175/2010jcli3751.1

Lonfat M, Rogers R, Marchok T, et al. 2007. A Parametric model for predicting hurricane rainfall [J]. Monthly Weather Review,135(9): 3086−3097. doi:10.1175/MWR3433.1

Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western north Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. Advances in Atmospheric Sciences,38(4):690-699. doi: 10.1007/s00376-020-0211-7

Molinari J, Moore P, Idone V. 1999. Convective structure of hurricanes as revealed by lightning locations [J]. Monthly Weather Review,127(4): 520−534. doi:10.1175/1520−0493(1999)127<0520:CSOHAR>2.0.CO;2

Mueller K J, Demaria M, Knaff J, et al. 2006. Objective estimation of tropical cyclone wind structure from infrared satellite data [J]. Weather and Forecasting,21(6):990−1005. doi:10.1175/WAF955.1

Qian C H, Zhang F Q, Green B W, et al. 2013. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of super typhoon Megi (2010) [J]. Weather and Forecasting,28(6):1562−1577. doi:10.1175/WAF−D−12−00121.1

Ran X, Xi Y, Lu Y, et al. 2022. Comprehensive survey on hierarchical clustering algorithms and the recent developments[J]. Artificial Intelligence Review. 56: 8219-8264. doi:10.1007/s10462−022−10366−3

Ward Jr J H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function [J]. Journal of the American statistical association,58(301): 236−244. doi:10.1080/01621459.1963.10500845

Yu Y Q, Fang Y H, Zhao C Y, et al. 2022. Modulation of pacific sea surface temperature on two types of tropical cyclone tracks affecting northeast China [J]. Frontiers of Earth Science,10:810943. doi:10.3389/feart.2022.810943

Zhu Q, Liu Y Z. 2023. The combined effect of multiple water vapor transport channels can better reflect the variability in summer precipitation over North China [J]. Climate Dynamics,61:5887-5904. doi:10.1007/s00382−023−06891−8

(责任编辑　杨　浩)