

1949—2020 年黄渤海区域台风特征分析

张可^{1,2} 丛春华^{1,2}

1 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省气象台, 济南 250031

摘要: 利用中国气象局台风最佳路径数据, 统计了 1949—2020 年进入黄渤海区域(30°~50°N、110°~130°E) 台风(以下简称黄渤海台风)的气候特征。结果表明: 年均有 4.3 个台风进入黄渤海区域, 逐年台风个数在西北太平洋台风中的占比呈现明显的增加趋势, 北上台风影响显著; 黄渤海台风活动季为 4—11 月, 从 20 世纪 90 年代开始出现向“秋季扩展”的趋势; 黄渤海台风源地集中在 5°~30°N、120°~160°E, 近 70 年出现了连续向西迁移, 以及 80 年代前逐步北移, 90 年代后伴随着“秋季扩展”南落的现象; 远海路径进入黄渤海区域的台风最多, 近海或登陆活动的转向、北上路径次之, 登陆填塞、高纬西进或黄海西折路径最少; 51.8%的黄渤海台风会发生变性, 黄渤海变性台风中的 28.6%在变性完成后会至少发生一次加强。变性加强过程主要发生在 6—10 月, 其中 8—9 月最多, 而我国华东中南部和日本海南部周边为变性加强的两个集中发生地区。

关键词: 黄渤海台风, 气候特征, 源地, 路径, 变性

Analysis of Typhoon Characteristics in the Huanghai and Bohai Sea from 1949 to 2020

ZHANG Ke^{1,2} CONG Chunhua^{1,2}

1 Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: Utilizing Best-track data of typhoon provided by the China Meteorological Administration (CMA), this paper conducts an analysis of the climatic characteristics of typhoons (TCs) entering the Huanghai and Bohai Sea regions (30°~50°N, 110°~130°E) from 1949 to 2020. The results indicate that, on average, 4.3 TCs enter the Huanghai and Bohai Sea (HBS) annually. It shows a significant increasing trend in the percentage of HBS TCs in the western North Pacific typhoons (WNP TCs). HBS TCs are active only between April and November. Since the 1990s, there has been an increase in HBS TC activity during autumn. The primary genesis region for HBS TCs is located between 5°N to 30°N and 120°E to 160°E. Since the 1950s, it has been continuously shrinking westward. Prior to the 1980s, there was a gradual northward trend, which was followed by a southward trend accompanied by the phenomenon of "autumn expansion" after the 1990s. Most HBS TCs enter the HBS via distant sea tracks, traveling a considerable distance from land. Additionally, there are HBS TCs that change direction or move northward during their offshore or landing activities. The remaining HBS TCs either dissipate after landing, continue moving westward at high latitudes, or turn westward within the Yellow Sea. 51.8 % of HBS TCs undergo extratropical transition, and among them, 28.6 % strengthen after the transition. The intensification following extratropical transition mainly occurs from June to October, peaking in August and September. The central and southern regions of East China and the southern part of the Sea of Japan are the two main areas where such intensification is concentrated.

资助课题: 山东台风与海洋创新团队项目(SDCXTD2021-2)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J015)、华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ202318)、山东省气象局重点项目(2023sdqxz11)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2023LASW-B10)共同资助

作者简介: 张可, 主要从事台风相关研究. E-mail: ke_zhang321@163.com

通讯作者: 丛春华(CONG Chunhua), 主要从事台风相关研究. E-mail: 632900631@qq.com

Key words: Huanghai and Bohai Sea typhoon, climatic characteristic, genesis region, track, extratropical transition

引言

西北太平洋是全球台风活动最频繁的海域。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，在全球气候变化背景下，西北太平洋台风（以下简称西太台风）移动路径向高纬度扩展的现象正逐步增多（IPCC，2021）。我国黄渤海位于中纬太平洋西岸，周边人口稠密，经济重镇密布。虽然黄渤海区域受台风影响频次远少于南方地区，但随着近年来的经济发展和人口增长，北方地区承灾体的脆弱性进一步凸显，华东中纬度省份由台风灾害引发的直接经济损失较华南出现了更显著的上升（柴博语等，2023；李瑞英等，2024；Yan et al, 2024）。这一方面由全球气候变暖导致的强台风增多，华东沿海地区台风登陆频率增加，以及台风登陆后衰减时间延长导致（Webster et al, 2005；Shan and Yu, 2021；Yan et al, 2024）；另一方面与台风登陆北上后的破坏力增加密切相关。有研究表明，我国台风年均降水量呈长期增长趋势，其中台风极端降水在我国东北地区的增长趋势显著（Chen et al, 2011；Chang et al, 2012）。另外，台风北上活动期间，虽然中心强度普遍弱于低纬台风，但当有适宜的中纬度系统、急流、地形等条件配合时，降水极端性往往显著提高（高晓梅等，2022；梁军等，2024）。例如，2023 年台风“杜苏芮”停编后的低压环流长时间维持，造成了京津冀地区连续三日大暴雨，部分站累计雨量甚至远超北京“7·21”特大暴雨事件（向纯怡等，2024；姚秀萍等，2024）。

北上台风气候特征的研究已取得较多成果。在气候变化背景下，西太台风路径有整体北移趋势，并且该趋势在未来几十年内仍可能继续维持（王秀萍和梁军，2006；Kossin et al, 2016；Nakamura et al, 2017）。1949 年以来，每年约有 3 个北上台风影响我国，最早出现在 5 月下旬，最晚在 11 月中旬（周小珊等，2007）。7—9 月是北上台风活动的主要月份，台风年频数有略微上升的趋势（王秀萍和梁军，2006；朱男男等，2024）。北上台风生成源地主要在 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 、 $122^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{E}$ ，源地偏北的台风未来转向点偏北和直接北上的可能性大（高松影等，2017）。冷涡背景下，北上台风路径密度大值区主要分布在 $21^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $130^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 区域内，进入 135°E 以西的北上台风则多以登陆、沿海或远海类路径影响北方地区（曹钢锋等，1992；杨旭等，2024）。其中，近海北上的台风主要出现在拉尼娜年，此时西北太平洋副热带高压（以下简称西太副高）强度偏弱、西伸脊点偏东、脊线位置偏北。相关统计发现，Niño 3.4 指数与北上台风的频数和强度分别呈显著的负相关和正相关关系，同时对北上台风的生成位置也有明显影响（朱业等，2012；李铮等，2024）。

相比于西太和南海台风，影响黄渤海区域的台风较少，针对性研究成果也较少。随着近年来北方台风极端暴雨事件的增多和学界对中纬度台风的关注度上升，基于高影响个例的分析工作也在增加，但仍鲜见全面的台风统计成果。另外，相对于探讨南方台风时多关注气旋

自身的强风雨，北方台风研究更关注中低纬相互作用引起的台风结构变化和暴雨增幅机理（罗亚丽等，2020），因此需要额外的系统性分析。同时，之前的北上台风气候统计，除频数外，也少有讨论台风源地、变性等其他特征的变化。鉴于黄渤海是我国涉海经济活动密集区，安全生产对防台减灾的需求迫切，本文基于长时间序列资料，分析 1949—2020 年期间进入我国黄渤海区域台风的气候特征（包括年际、月际活动频数、源地、路径、变性）及其演变，以期在全球气候变暖背景下更详尽描绘我国中纬度沿海周边台风气候的完整趋势，为有效防御北上台风灾害提供更多科学依据。

1 资料和方法

1.1 资料

采用中国气象局（CMA）整编的台风最佳路径数据集，获取 1949—2020 年西北太平洋（含南海）强度达热带低压及以上级别的台风逐 6 h 或逐 3 h 的中心位置、中心最低气压和强度（含变性情况）等信息；台风降水资料来自 CMA《台风年鉴》和《热带气旋年鉴》中的国家级地面气象观测站逐 24 h 台风降水量记录（Ying et al, 2014; Lu et al, 2021）；西太副高指数信息来自国家气候中心提供的 1951 年至今逐月西太副高脊线、西伸脊点、强度和面积指数资料（刘芸芸等，2012）；利用 ERA5 逐月 500 hPa 位势高度资料（水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ），计算东亚大槽强度指数。全文所用时间为北京时间。

1.2 方法

1.2.1 黄渤海台风定义

本文结合黄海和渤海的地理位置，以及西太台风主要影响我国中纬度区域的范围，规定 $30^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ 、 $110^\circ \sim 130^\circ \text{E}$ 为“黄渤海区域”（图 1）。以西太台风中心是否进入规定的区域为判定标准，在台风最佳路径记录中，有任一时刻的西太台风中心位置位于黄渤海区域内时，即被认定为“黄渤海台风”。

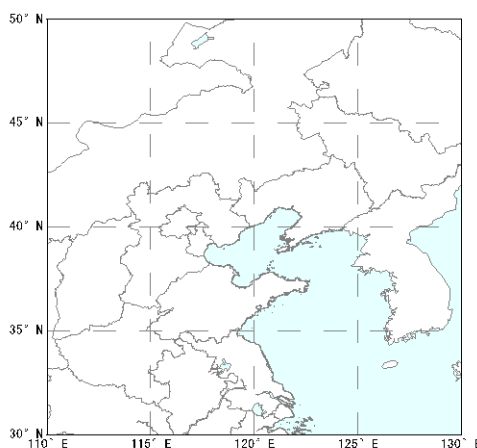


图 1 黄渤海区域范围

Fig.1 Schematic map of the Huanghai and Bohai Sea region

1.2.2 东亚大槽强度指数

参考黄小梅等（2013）对东亚大槽强度指数 I_{EAT} 的定义：

$$I_{EAT} = -\frac{\varphi_{\lambda_2} - \varphi_{\lambda_1}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

式中： φ_{λ_2} 和 φ_{λ_1} 分别为45°N纬圈上，120°~160°E的500 hPa位势高度最小值和70°~100°E的位势高度最大值， λ_2 和 λ_1 分别为最小和最大位势高度所在经度。由此定义可知，当 I_{EAT} 越大，即45°N处的纬向位势高度梯度的负值越大时，东亚大槽越强；反之越弱。

1.2.3 台风路径分类

参考曹钢锋等（1992）和丛春华等（2016）判别影响北方地区台风路径类型的方法，从4个指标出发对黄渤海台风进行路径分类：（1）根据转向方向，将转向后向西或西北方向移动的台风判定为“西折类”；（2）根据转向位置，将在30°N以南转向东北方向的台风判定为“转向类”，在30°~35°N转向东北方向的判定为“北上类”，在35°N以北转向或持续向西北方向移动的判定为“高纬西进类”；（3）以125°E为界，将进入中国沿海而未登陆的台风分为“近海类”和“远海类”；（4）在长江口以南我国大陆地区登陆的为“登陆类”。

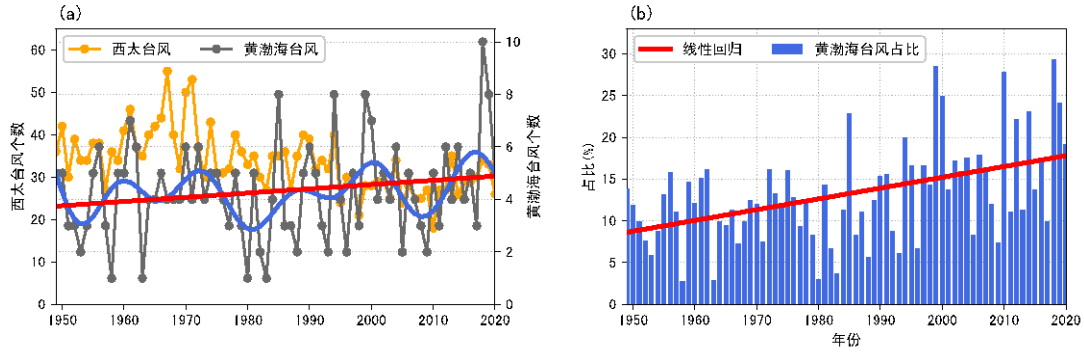
综合以上指标，登陆黄渤海台风按照登陆后转向的位置，可分为“登陆转向”“登陆北上”“登陆填塞”3类；在35°N以北转向东北方向或持续西进的为“高纬西进”类；在低纬海域向偏东方向移动，但在黄海周边转向西移的为“黄海西折”类；其余未登陆的黄渤海台风分为“近海北上”“近海转向”“远海”3类，共计8类。

2 结果分析

2.1 台风活动年频数

1949—2020年，共有311个台风进入黄渤海区域，年均4.3个（图2a）。黄渤海台风频数具有明显的年际和年代际变化特征：10 a低通滤波曲线显示20世纪50年代末到70年代中期、90年代后期到21世纪00年代中期和2012年后为黄渤海台风相对偏多时段，其余则偏少或与气候态持平。2018年为72年间黄渤海台风最多年份，有10个台风进入黄渤海区域；1958年、1963年、1980年和1983年则最少，仅有1个。序列的线性回归斜率为 $+0.16 \text{ 个} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，即黄渤海台风年频数存在不显著的上升趋势（ $P > 0.1$ ）。

分析逐年黄渤海台风个数在西太台风中的占比（图2b）可知：1949—1984年黄渤海台风占比在3.0~16.8%；1985年后高占比年迅速增多，36年中有14年超过了17.0%，其中11年出现在2000年以后。占比序列的线性回归斜率为 $+1.3 \% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，上升趋势显著（ $P < 0.01$ ）。可见虽然20世纪90年代后期西太台风出现了突变减少（Huangfu et al, 2017; Hu et al, 2018），但环流背景仍有利于引导更高比例的台风北上进入黄渤海区域，使黄渤海台风的活动频率始终维持在缓慢增加的水平。



注：图 a 中蓝色曲线和红色直线分别为黄渤海台风年频数的 10a 低滤波曲线和线性回归趋势。

图 2 1949—2020 年 (a) 西太台风和黄渤海台风个数以及 (b) 黄渤海台风个数在西太台风中的占比
Fig.2 The annual number of (a) WNP TCs and HBS TCs, and (b) the percentage of HBS TCs in WNP TCs from 1949 to 2020

Notes: Blue line and red line respectively indicate the 10a low-pass filter and the linear regression curve of the HBS TCs sequence

与南方台风不同的是，除副高以外，西风槽也是参与引导黄渤海区域台风移动的主要系统之一。结合 1951—2020 逐年 6—9 月平均的西太副高指数和东亚大槽强度指数，计算二者和黄渤海台风频数的同期相关关系，可得黄渤海台风的活动频次和副高脊线纬度位置 ($P < 0.01$)、东亚大槽强度 ($P < 0.1$) 均显著相关，相关系数分别为 0.50 和 -0.20 (图 3)。黄渤海台风活动频次和副高强度和面积的相关均不显著。当副高脊线较多年平均位置 (24.7°N) 偏北、西风槽较平均强度 (11.0) 偏弱时，利于黄渤海区域出现更多的台风。

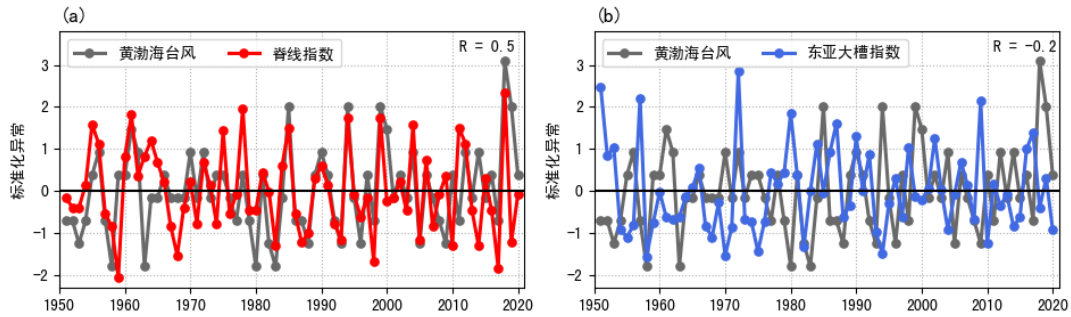


图 3 1951—2020 年 6—9 月平均的黄渤海台风数、(a) 副热带高压脊线指数和 (b) 东亚大槽强度指数的标准化异常年序列

Fig.3 The standardized anomaly sequences for the number of HBS TCs, (a) the subtropical high ridge line index and (b) the East Asian trough intensity index from June to September during 1951—2020

2.2 台风活动月频数

若分别统计西太台风和黄渤海台风在各月的生成频数，并将二者进行对比 (图 4)，可见西太台风在全年均有生成，其中 8 月最多 (512 个)，9 月次之 (421 个)。黄渤海台风仅在 4—11 月生成，同样 8 月最多 (109 个)，而 7 月次之 (100 个)。6 月前和 9 月后，黄渤海台风迅速减少。一年内台风进入黄渤海的最早日期为 2003 年的 4 月 25 日 (0302 号台风“鲸鱼”)，最晚为 2019 年的 11 月 24 日 (1927 号台风“凤凰”)。综上所述，盛夏 (7—8

月) 为黄渤海台风活动鼎盛期, 春季、秋季的黄渤海台风明显更少。

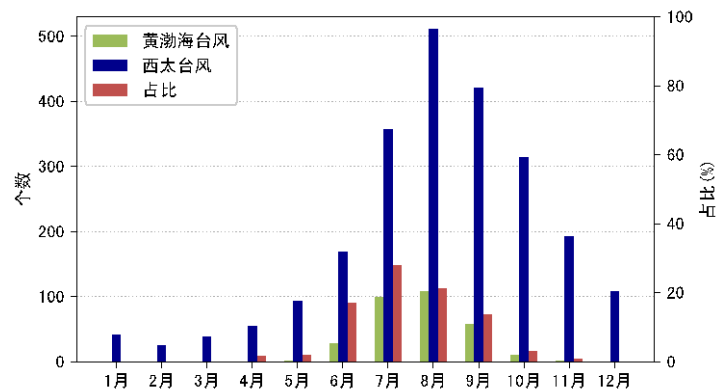


图 4 1949—2020 年西太台风和黄渤海台风生成频数及黄渤海台风在西太台风中占比的逐月分布
Fig.4 The monthly distribution of WNP TCs and HBS TCs, and the percentage of HBS TCs in WNP TCs from 1949 to 2020

黄渤海台风月际活动存在年代际变化。此处按年代划分, 分析 20 世纪 50 年代以来黄渤海台风在各月的生成频数, 以及台风在各月进入黄渤海区域的频数 (图 5), 结果显示: (1) 黄渤海台风生成、台风进入黄渤海区域的时段均集中在 7—8 月前后; (2) 20 世纪 50—80 年代, 7—8 月生成的黄渤海台风占全年黄渤海台风总数的 69.4%~77.3%, 但这一比例在 90 年代后下降至 50.0%~65.2%, 同时 9—10 月生成的黄渤海台风占比从 13.3%~19.4%上升至 29.6%~31.0%; (3) 类似地, 90 年代前 7—8 月进入黄渤海区域的台风占全年黄渤海台风总数的 58.3%~75.6%, 但在 90 年代后下降至 54.8%~63.0%, 同时 9—10 月进入黄渤海区域的台风占比从 15.6%~33.3%上升至 28.6%~37.0%。该结果表明从 90 年代开始, 伴随着黄渤海台风在西太台风中的占比快速增加, 黄渤海台风的活跃时段也出现了向“秋季扩展”的趋势。

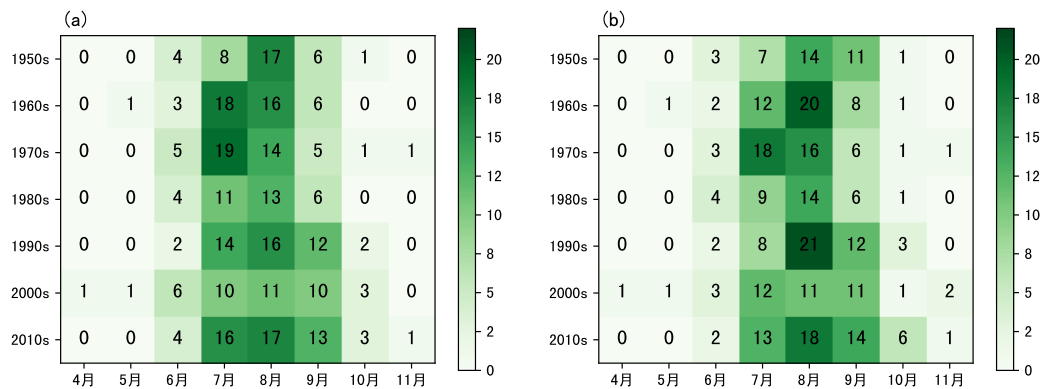


图 5 20 世纪 50 年代至 21 世纪 10 年代各月 (a) 黄渤海台风生成频数和 (b) 台风进入黄渤海区域频数的年代际变化
Fig.5 The monthly distribution of (a) HBS TCs and (b) TCs entering HBS region in each decade since 1950s

2.3 台风源地

对比黄渤海台风和西太台风的生成源地情况 (图 6)。由图可见西太台风生成源地主要

位于 5°~30°N、110°E~175°W，且西南密集、东北稀疏，菲律宾以东以及我国南海部分 2°~2° 格点区域内的台风个数可以达到 18 个以上。相较而言，黄渤海台风源地具有以下两个特点：

(1) 空间范围小：主要位于 5°~30°N、115°~170°E；(2) 生成集中区域偏北：有 24.4 % 的黄渤海台风在 20°N 以北生成（西太台风为 16.5 %）。

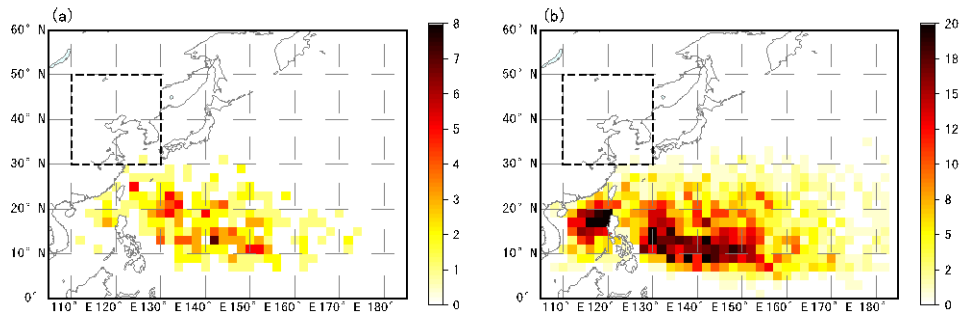
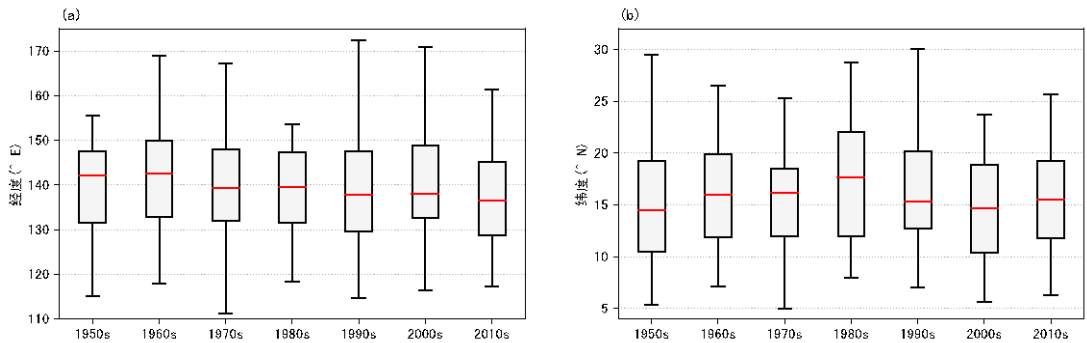


图 6 1949—2020 年 (a) 黄渤海台风和 (b) 西太台风在逐 2°×2° 区域的生成个数

Fig.6 The count of (a) HBS TCs and (b) WNP TCs from 1949 to 2020, generated within 2°×2° grid areas

从年代际迁移角度看，20 世纪 50 年代以来每 10 a 黄渤海台风的生成经度中位数从 50—60 年代的 142°E 以东，连续迁移到 21 世纪 10 年代的 137°E 以西。纬度中位数则在 20 世纪 50—80 年代逐步增加，90 年代迅速减少并维持在 15°N 附近（图 7）。以上结果表明，伴随着近 70 年副高西伸脊点整体以 $-4.8^{\circ} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 的线性趋势西进（图略），黄渤海台风源地也出现了连续西迁。另外参考西太副高位置常年在 8 月达到最北，9 月南撤（那莹等，2022）。源地的纬度分布方面，由于 20 世纪 90 年代以后黄渤海台风活跃时段向秋季扩展，更多的黄渤海台风在偏南的副高边缘生成，导致黄渤海台风生成源地也出现了南落。



注：上、下两条须横线分别为最大和最小值，箱体上、下两条横线分别为第 75% 和 25% 分位值，红线为中位数。

图 7 20 世纪 50 年代至 21 世纪 10 年代黄渤海台风生成源地 (a) 纬度和 (b) 经度分布年代际变化箱须图

Fig.7 The boxplot of the (a) latitudinal and (b) longitudinal distributions of HBS TCs' genesis location in each decade since 1950s

Note: The upper and lower whiskers respectively represent the maximum and minimum values. The top and bottom edges of the box denote the 75th and 25th percentiles, and the red line indicates the median

2.4 台风路径

根据 1.2.3 节的标准，1949—2020 年 8 类黄渤海台风路径由出现频次从多到少依次为：远海（34.7 %）、近海转向（18.3 %）、登陆转向（12.5 %）、登陆北上（12.5 %）、近海北上

（8.4 %）、登陆填塞（6.4 %）、高纬西进（4.5 %）和黄海西折（2.6 %）类，各类路径出现的总次数及造成黄渤海区域不同量级过程降水量极值的个例数如表 1 所示。

表1 1949—2020年8类路径的黄渤海台风造成黄渤海区域各量级降水量极值个例统计（单位：个）

Table 1 Statistics of cases for extreme process rainfall amounts at different intensity levels in the Huanghai and Bohai Sea region caused by 8 types of tracks of HBS TCs (Unit: number)

降水量	远海	近海转向	登陆转向	登陆北上	近海北上	登陆填塞	高纬西进	黄海西折
<0.1 mm	62	15	0	0	3	0	3	1
0.1~50 mm	20	11	1	0	0	2	0	2
50~100 mm	12	11	6	3	7	4	0	2
100~250 mm	14	15	18	15	14	8	10	1
>250 mm	0	5	14	21	2	6	1	2
合计	108	57	39	39	26	20	14	8

远海台风主要在 125 °E 以东、40 °N 以南活动。因距离远，远海台风对朝日韩三国影响较重，对黄渤海区域的影响相对较弱，108 个远海台风中 57.4 % 在黄渤海区域没有降水，仅 13.0 % 造成 100 mm 以上的过程降水量，且主要影响我国东北地区。

近海转向台风发生频次仅次于远海类。此类台风多发源于菲律宾以东，生成后在热带低纬洋面持续西行，于 125 °E 以西、20 °~30 °N 转向东北方向移动并远离我国。部分南海台风生成后在 30 °N 以南持续向东北方向移动且没有登陆我国大陆的也被归为此类（图 8b）。此类路径对黄渤海区域的影响以长三角周边为主，其中 8.8 % 的个例可造成 250 mm 以上降水量。

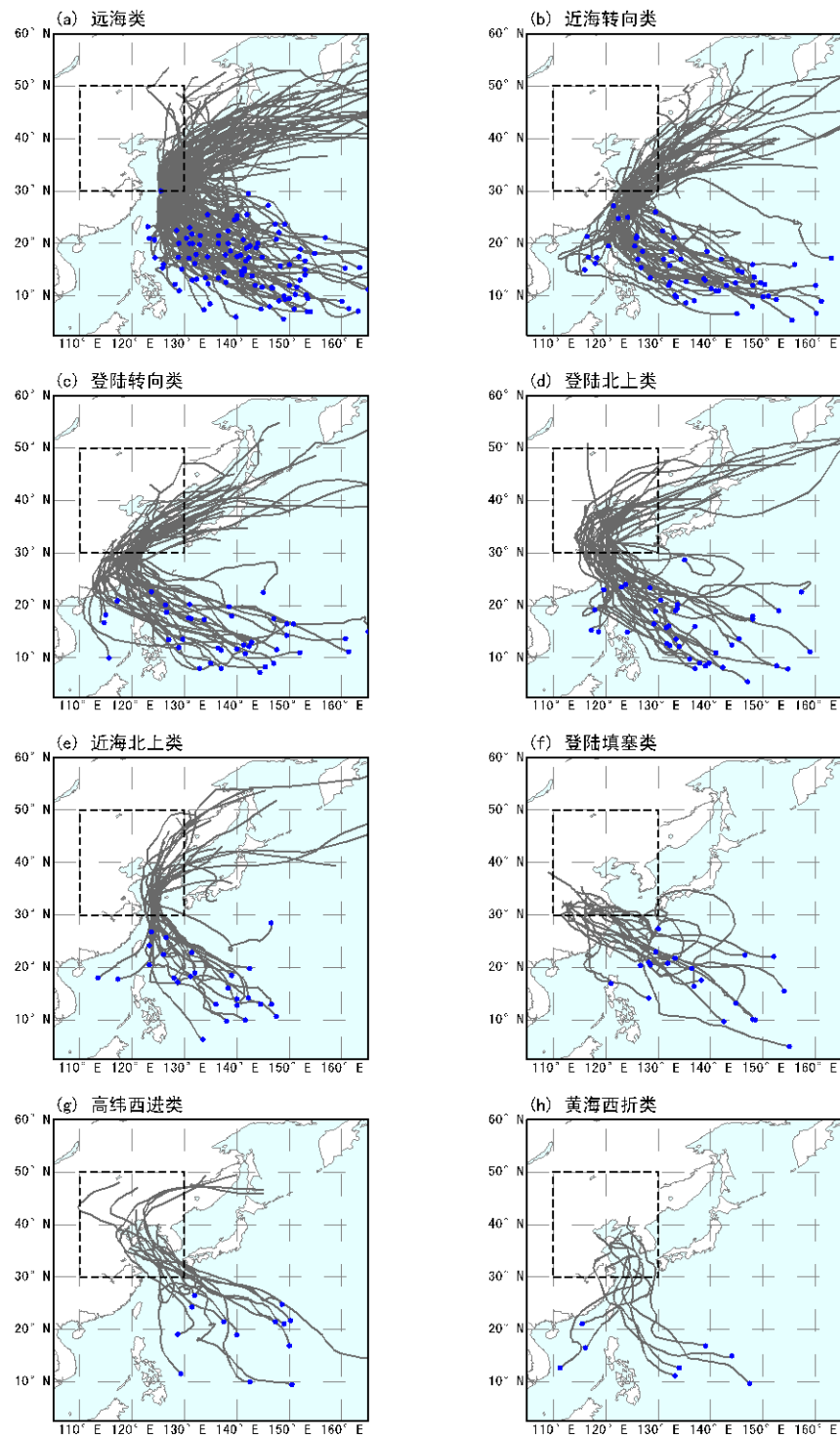
登陆转向和登陆北上台风各出现 39 次。登陆转向台风在菲律宾以东生成后持续西移，于广东至华东南部登陆后，在 30 °N 以南转为东北方向移动并快速远离。部分南海台风生成后北移登陆华南，并在 30 °N 以南转向，也被归为此类（图 8c）。登陆转向台风降水以影响黄渤海区域黄淮以南的华东及华中地区为主，其中 82.1 % 降水量极值超过了 100 mm，35.9 % 超过了 250 mm。登陆北上台风在近海西行期间北移分量比转向路径更大、更深入大陆。此类台风暴雨范围广，降水极端性强，对黄渤海区域的降水影响是 8 类路径中最大的，其中 92.3 % 的个例降水量极值超过 100 mm，53.8 % 的个例极值超过 250 mm，降水区域覆盖我国华东、华中、华北和东北的大部地区。部分南海台风登陆后在 30 °~35 °N 转向，也被归为此类（图 8d）。

近海北上台风生成源地较前 4 类更偏北。除 2 个南海台风外，其余台风生成后均以向西北方向移动进入黄渤海区域，随后在 30 °~35 °N 转向东北方向。其中有 2 个擦过山东半岛，其余在朝鲜半岛或辽宁附近登陆（图 8e）。近海北上台风降水量极值主要在 50~250 mm，雨区主要位于东北地区、华北沿海和华东中北部地区。

登陆填塞台风共 20 个。此类台风在进入我国近海时以位置偏南的西北行为主，登陆位置集中在长江口至华东南部。登陆后，台风的陆上维持时间在 6~126 h 不等，是对华中地区降水影响最强的类别之一（图 8f）。

高纬西进台风中的一半在 20°N 以北生成,源地偏北。台风在远海西行时普遍位于 25°N 以北,中心越过 35°N 时仍持续向西北方向移动,后期转向东北行或填塞。此类台风虽然登陆时强度普遍在强热带风暴级以下,但有西风带系统配合时常给山东和东北地区周边带来大范围暴雨,极值在 100 mm 以上(图 8g)。

最后为黄海西折类,这类路径 72 年间仅出现 8 次。黄海西折台风北上期间,受长波调整或多台风的作用,使原本东进的台风转向偏西方向移动(图 8h)。此类台风路径和强度均具有突变性,预报难度较大。其中 6007 号台风“Shirley”先后登陆台湾、福建、胶东半岛,造成了江苏和辽宁出现 500 mm 以上的极端降水量,是此类别中影响最大的个例。



注：虚线框所示区域为黄渤海，蓝色圆点为台风生成位置。

图 8 1949—2020 年黄渤海区域各类台风移动路径

Fig. 8 Tracks of HBS TCs from 1949 to 2020

Note: The dashed box indicates the Huanghai and Bohai Sea region, with blue dots representing TCs genesis locations

各类路径月际出现频次呈不同的特征（图 9）。由图可见，7—9 月远海类台风影响黄渤海区域最多。除此以外，4—6 月台风主要以两类转向路径进入黄渤海；7 月，北上台风增多，

数量超过转向台风。同时高纬西进和黄海西折台风开始活动；8月，北上台风仍较多，但登陆填塞路径集中出现并且数量超过转向路径；9月，北上和登陆填塞台风减少，转向路径再次增多；10—11月，台风仅以远海或转向路径进入黄渤海区域。对比各年代8类路径的月际分布：20世纪90年代以后，9—11月期间远海、近海转向、登陆北上和近海北上路径均有增多，其中9—10月的远海和11月的近海转向台风年均频次有显著增加（ $P < 0.1$ ）。

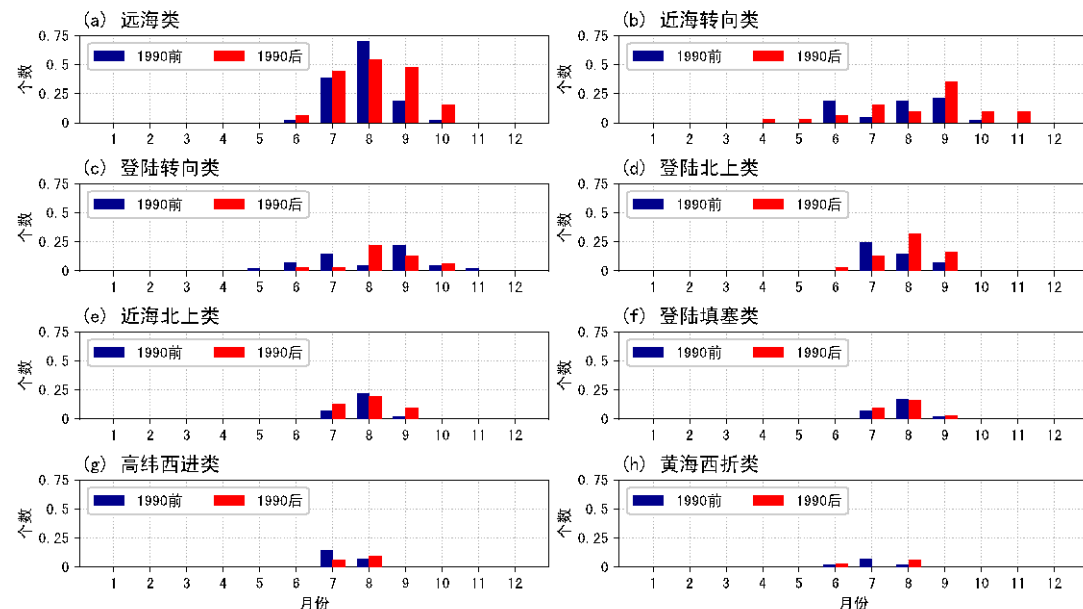


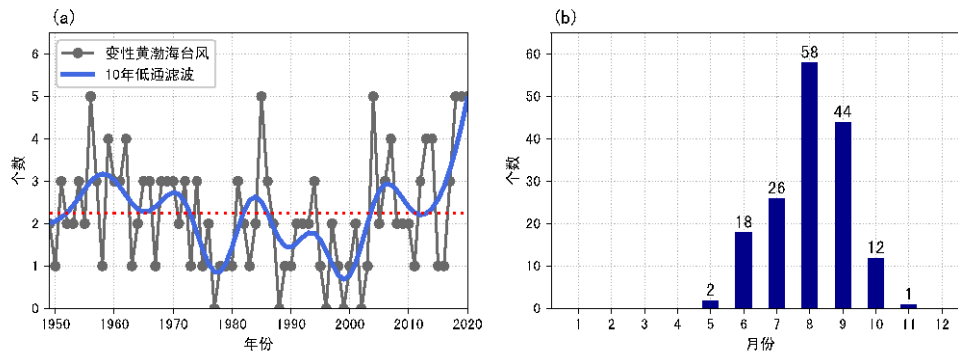
图9 1990年前后年平均的黄渤海台风各类移动路径的逐月分布

Fig.9 The monthly distribution of HBS TCs tracks before and after 1990, averaged annually before and after 1990

2.5 变性及强度变化

在台风北上中纬度地区的过程中，如遇到冷空气侵入则会获得斜压能量，台风的暖心结构受到破坏，并可能向半冷半暖的温带气旋转变（丁一汇和陈联寿，1979），这一过程称为台风变性。台风在变性过程中，其结构、移速、路径以及降水分布等都会发生明显变化，给中纬度地区带来强降水、大风、海浪和潮涌等灾害性天气影响（钟颖旻等，2009；孙莎莎等，2017）。1949—2020年，共161个黄渤海台风完成了变性，这一数目占黄渤海台风总数的51.8%，年均2.2个（图10a）。1956年、1985年、2004年、2018年、2019年和2020年变性的黄渤海台风最多，每年出现5个；1977年、1988年、1996年、1999年和2002年则最少，当年均无黄渤海台风完成变性。从10年以上低频曲线来看，20世纪50—60年代和2004—2020年为黄渤海台风变性的相对多发期，而20世纪70年代中期至21世纪00年代前期为变性的相对少发期。

从各月完成变性的黄渤海台风个数（图10b）可见，5—11月均有黄渤海台风完成变性，其中8月最多，9月次之。与图4对比后可发现，5—11月完成变性的黄渤海台风分别占当月黄渤海台风总数的100.0%、90.0%、31.7%、49.2%、62.9%、85.7%和25%，即一年中黄渤海台风在春末夏初（5—6月）和夏末秋初（9—10月）发生变性的概率更大。



注：图 a 中红色虚线为年序列均值。

图 10 1949—2020 年完成变性的黄渤海台风 (a) 逐年和 (b) 逐月分布

Fig.10 The (a) annual and (b) monthly counts of HBS TCs undergoing extratropical transition from 1949 to 2020

Note: Red dashed line in Figure a indicates the annual average

台风变性是热带系统与中纬度环流系统相互作用的一个特殊阶段。当台风在变性过程中从斜压区获得能量时，有可能再度加强，使暴雨突然增幅（李英等，2013；丁一汇和陈联寿，1979）。《台风年鉴》记录的台风完成变性后，当后一时次与前一时次之间的中心气压差为负（正）时，记为该台风发生 1 次变性加强（减弱）过程，连续时次之间气压差符号一致记为同一次（若变性台风仅有 1 个时次记录不计入分析）。

从台风经历变性后加强（减弱）的次数来看，黄渤海变性台风中的 28.6 % 会至少出现 1 次加强。强度变化次数最多的是 1951 年台风“Pat”——它在变性完成后共经历了 3 次加强和 3 次减弱。另外，1 个台风经历了 5 次强度变化（8108 号台风），1 个台风经历 4 次（6512 号台风“Jean”），10 个台风经历 3 次，33 个台风经历 2 次。变性加强在 8—9 月多发，其次为 7 月、6 月、10 月和 5 月，其余月份没有发生变性加强（图 11）。黄渤海台风变性加强（减弱）的位置（图 12）也显示，台风变性后的强度变化过程主要发生在 27°N 以北台风受西风带引导向东北方向移动期间，其中我国华东中南部以及日本海南部周边为变性加强的两个集中发生区域。

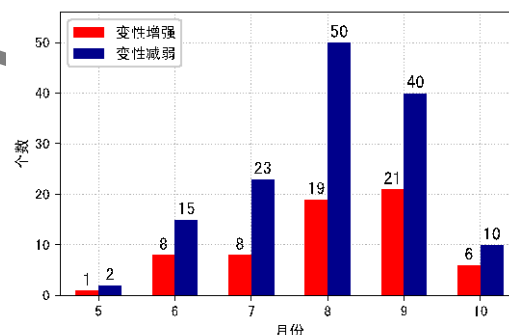


图 11 1949—2020 年黄渤海台风变性加强、减弱逐月分布

Fig.11 The monthly distribution of intensification and weakening after extratropical transition of HBS TCs from 1949 to 2020

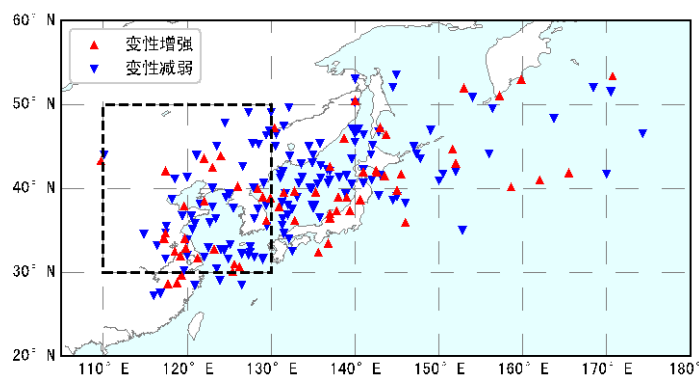
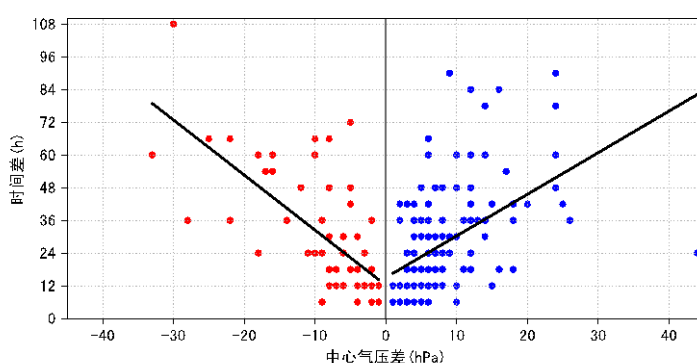


图 12 1949—2020 年黄渤海台风发生变性加强、减弱时的位置

Fig.12 The locations of intensification and weakening events after extratropical transition of HBS TCs from 1949 to 2020

最后简要统计台风变性加强（减弱）过程气压演变的速率，图 13 中散点斜率越小表明气压变化越快。从两类散点的线性回归来看，黄渤海台风在经历变性加强时，中心气压每下降 10 hPa 平均需要 20 h 左右，而变性减弱的台风气压上升 10 hPa 平均需要约 15 h，即黄渤海台风变性加强一般慢于变性减弱。两类变化的极端情况分别发生在 8711 号台风“Dinah”和 8519 号台风“Brendan”中，其中“Dinah”的变性涡旋在 1987 年 9 月 1 日 02 时的过去 6 h 变压为+10 hPa，而“Brendan”则在 1985 年 10 月 8 日 02 时的过去 6 h 变压达到了-9 hPa。



注：黑线为两类散点的线性回归。

图 13 1949—2020 年黄渤海台风变性加强（红点）、减弱（蓝点）时中心气压随时间的变化

Fig. 13 Temporal variation of central pressure of intensified (red dots) and weakened (Blue dots) HBS TCs after extratropical transition from 1949 to 2020

Note: Black lines indicate the linear regression for both sets of dots

3 结论和讨论

利用 1949—2020 年台风最佳路径资料，分析进入黄渤海区域（30°~50°N、110°~130°E）台风在年际、月际活动频数、生成源地、路径以及变性方面的气候特征，结论如下：

（1）1949—2020 年，共 311 个台风进入黄渤海区域，年均 4.3 个。黄渤海台风年频数有不显著的上升趋势，同时黄渤海台风在西太台风中的占比有显著的增加趋势（ $P < 0.01$ ）。黄渤海台风的活动频数和副高脊线位置（ $P < 0.01$ ）、东亚大槽强度显著相关（ $P < 0.1$ ）。当

副高脊线较多年平均位置偏北、西风槽偏弱时，利于黄渤海区域出现更多的台风。

(2) 黄渤海台风只在 4—11 月期间活动，呈现“夏多、春秋少”的态势。20 世纪 90 年代开始，随着 9—10 月的黄渤海台风在全年台风活动中的占比增加，黄渤海台风的活跃时段出现了向“秋季扩展”的趋势。

(3) 黄渤海台风的生成源地主要位于 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$ 。从年代际演变来看，20 世纪 50 年代以来黄渤海台风源地连续向西迁移，50—80 年代连续北移。参考副高普遍于 9 月开始南撤的季节活动规律，伴随着 90 年代后黄渤海台风活跃时段向秋季扩展，台风源地也出现了南落。

(4) 进入黄渤海区域的台风最多为远海路径，其余依次递减为近海转向、登陆转向、登陆北上、近海北上、登陆填塞、高纬西进和黄海西折路径。雨量极值方面，登陆北上是对黄渤海区域降水影响最大的路径类型，其次为登陆转向。其中 7—9 月远海路径出现最频繁；除了远海类，4—6 月和 9 月的黄渤海台风以两类转向路径为主，7—8 月以两类北上和登陆填塞路径为主。20 世纪 90 年代以后，9—10 月的远海和 11 月的登陆转向台风年均频次有显著增加趋势 ($P < 0.1$)。

(5) 约 51.8 % 的黄渤海台风会在北上过程中完成变性，变性事件更有可能出现在春末夏初 (5—6 月) 和夏末秋初 (9—10 月)。28.6 % 的黄渤海变性台风会在变性完成后增强 (中心气压下降)，变性加强主要发生在 6—10 月，其中 8—9 月最多，而我国华东中南部以及日本海南部附近为变性加强的两个集中发生区域。黄渤海台风变性加强的速率平均为 $-10 \text{ hPa} \cdot (20 \text{ h})^{-1}$ ，略慢于台风变性减弱的速率。

(6) IPCC 第六次评估报告指出，尽管西太台风生成频率呈下降趋势，但台风路径向高纬延伸的现象却日益凸显 (IPCC, 2021)，这与本研究得到的黄渤海区域台风活动增多的趋势一致。同时本文指出了黄渤海台风活动季节向秋季延伸的现象，表明黄渤海区域作为我国经济和人口活动的密集区，需格外关注其面临的台风风险是否正在发生新的变化。因此，未来需要结合气候变化背景下的科学预测，完善区域性防灾减灾体系并制定更加精准的应对策略，以有效防范台风活动对我国北方社会经济发展可能造成的不利影响。

参考文献

- 曹钢锋, 朱官忠, 朱君鉴, 1992. 影响我国北方的台风路径分类及降水特征[J]. 气象, 18(7): 12-16. Cao G F, Zhu G Z, Zhu J J, 1992. Classification and precipitation characteristics of typhoon tracks affecting northern China[J]. Meteor Mon, 18(7): 12-16 (in Chinese).
- 柴博语, 徐峰, 徐建军, 等, 2023. 近 160 年西北太平洋副高的年代际变化及其对台风年际变化的影响[J]. 热带气象学报, 39(2): 276-288. Chai B Y, Xu F, Xu J J, et al, 2023. Interdecadal variation of the west pacific subtropical high and its influence on the variation of typhoons in recent 160 years[J]. J Trop Meteor, 39(2): 276-288 (in Chinese).
- 丛春华, 吴炜, 孙莎莎, 2016. 1949—2012 年影响山东地区热带气旋的特征[J]. 气象与环境学报, 32(5): 67-73. Cong C H, Wu W, Sun S S, 2016. Characteristics of tropical cyclones influencing Shandong province from 1949 to 2012[J]. J Meteor Environ, 32(5):

67-73 (in Chinese).

丁一汇, 陈联寿, 1979. 西太平洋台风概论[M]. 科学出版社. Ding Y H, Chen L S, 1979. An Introduction to Western Pacific Typhoons[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).

高松影, 赵婷婷, 宋丽丽, 等, 2017. 1949—2015 年北上热带气旋特征[J]. 气象科技, 45(2): 313-323. Gao S Y, Zhao T T, Song L L, et al, 2017. Study of northward moving tropical cyclones in 1949-2015[J]. Meteor Sci Technol, 45(2): 313-323 (in Chinese).

高晓梅, 李峰, 王文波, 等, 2022. 台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析[J]. 海洋气象学报, 42(2): 33-43. Gao X M, Li F, Wang W B, et al, 2022. Multi-scale characteristics of extreme rainstorm caused by Typhoon Lekima in Shandong[J]. J Marine Meteor, 42(2): 33-43 (in Chinese).

黄小梅, 管兆勇, 戴竹君, 等, 2013. 冬季东亚大槽强度年际变化及其与中国气候联系的再分析[J]. 气象学报, 71(3): 416-428. Huang X M, Guan Z Y, Dai Z J, et al, 2013. A further look at the interannual variations of East Asian trough intensity and their impacts on winter climate of China[J]. Acta Meteor Sinica, 71(3): 416-428 (in Chinese).

李瑞英, 吕桂恒, 樊杰, 等, 2024. 华东地区台风气候特征及危险性分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 18(1): 119-125. Li R Y, Lü G H, Fan J, et al, 2024. Climatic characteristics and risk analysis of typhoon in East China[J]. Desert Oasis Meteor, 18(1): 119-125 (in Chinese).

李英, 陈联寿, 雷小途, 2013. Winnie(9711)台风变性加强过程中的降水变化研究[J]. 大气科学, 37(3): 623-633. Li Y, Chen L S, Lei X T, 2013. Study on rainfall variation associated with Typhoon Winnie (9711) during its extratropical transition process[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 623-633 (in Chinese).

李铮, 邱兰兰, 王伟, 等, 2024. 北上台风时空变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 热带地理, 44(6): 973-986. Li Z, Qiu L L, Wang W, et al, 2024. Spacio-temporal variation characteristics of northward-moving typhoon and their relationship with ENSO[J]. Trop Geogr, 44(6): 973-986 (in Chinese).

梁军, 张胜军, 贾旭轩, 等, 2024. 登陆北上台风结构变化及其引发的辽东半岛强降水分析[J]. 气象, 50(11): 1306-1316. Liang J, Zhang S J, Jia X X, et al, 2024. Analysis on structure changes of landfall northbound typhoons and the heavy precipitation in Liaodong Peninsula induced by them[J]. Meteor Mon, 50(11): 1306-1316 (in Chinese).

刘芸芸, 李维京, 艾锐秀, 等, 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报, 23(4): 414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly Western Pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 414-423 (in Chinese).

罗亚丽, 孙继松, 李英, 等, 2020. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放 40 年研究成果[J]. 气象学报, 78(3): 419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. Acta Meteor Sinica, 78(3): 419-450 (in Chinese).

那莹, 王冀, 张英娟, 等, 2022. 分段副热带高压位置指数的建立及应用[J]. 气象, 48(11): 1439-1448. Na Y, Wang J, Zhang Y J, et al, 2022. Establishment and application of the west and east WPSH meridional indices[J]. Meteor Mon, 48(11): 1439-1448 (in Chinese).

孙莎莎, 丛春华, 魏萌, 等, 2017. 1949—2014 年影响山东的变性台风特征分析[J]. 气象科技, 45(1): 157-163. Sun S S, Cong C H, Wei M, et al, 2017. Characteristics of extratropical transitional typhoons from 1949 to 2014 affecting Shandong Province[J]. Meteor Sci Technol, 45(1): 157-163 (in Chinese).

王秀萍, 梁军, 2006. 近 52 年北上热带气旋的若干气候特征[J]. 气象, 32(10): 76-80. Wang X P, Liang J, 2006. Climatic features of tropical cyclones influencing northern China for recent 52 years[J]. Meteor Mon, 32(10): 76-80 (in Chinese).

向纯怡, 董林, 刘达, 等, 2024. 2023 年台风杜苏芮登陆后残涡维持的热力和动力机制研究[J]. 气象, 50(11): 1289-1305. Xiang C Y, Dong L, Liu D, et al, 2024. Thermodynamic and dynamic mechanism of maintenance of Typhoon Doksuri remnant vortex after its landfall in 2023[J]. Meteor Mon, 50(11): 1289-1305 (in Chinese).

杨旭, 任航, 尹路婷, 等, 2024. 近 20 年冷涡背景下北上台风的分布及降水特征分析[J]. 气象灾害防御, 31(2): 1-6. Yang X, Ren H, Yin L T, et al, 2024. Analysis of the distribution and precipitation characteristics of northward-moving typhoons under the background of cold vortex in the past 20 years[J]. Meteor Dis Prev, 31(2): 1-6 (in Chinese).

姚秀萍, 张悦含, 袁俊肖, 2024. 台风“杜苏芮”(2305)过程的气象服务分析与思考[J]. 气象科技进展, 14(1): 59-62. Yao X P,

- Zhang Y H, Yuan J X, 2024. Analysis and reflection on the meteorological services for Typhoon Doksuri(2305)[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 14(1): 59-62 (in Chinese).
- 钟颖旻, 徐明, 王元, 2009. 西北太平洋变性台风时空分布特征[J]. *气象学报*, 67(5): 697-707. Zhong Y M, Xu M, Wang Y, 2009. Spatio-temporal distributive characteristics of extratropically transitioning tropical cyclones over the Northwest Pacific[J]. *Acta Meteor Sinica*, 67(5): 697-707 (in Chinese).
- 周小珊, 杨阳, 杨森, 等, 2007. 北上热带气旋气候特征分析[J]. *气象与环境学报*, 23(6): 1-5. Zhou X S, Yang Y, Yang S, et al, 2007. Climatic characteristics of north-going tropical cyclone[J]. *J Meteor Environ*, 23(6): 1-5 (in Chinese).
- 朱男男, 王科, 胡田田, 等, 2024. 1949—2019 年中心经过渤海的北上台风统计分析[J]. *海洋预报*, 41(3): 90-97. Zhu N N, Wang K, Hu T T, et al, 2024. Statistical analysis of typhoons moving northward through the Bohai Sea from 1949 to 2019[J]. *Marine For*, 41(3): 90-97 (in Chinese).
- 朱业, 陆建新, 卢美, 2012. 近海北上热带气旋特征[J]. *海洋预报*, 29(5): 23-28. Zhu Y, Lu J X, Lu M, 2012. Characteristics of the northward tropical cyclones over the East China Sea[J]. *Marine For*, 29(5): 23-28 (in Chinese).
- Chang C P, Lei Y H, Sui C H, et al, 2012. Tropical cyclone and extreme rainfall trends in East Asian summer monsoon since mid-20th century[J]. *Geophys Res Lett*, 39(18): L18702.
- Chen X Y, Wu L G, Zhang J Y, 2011. Increasing duration of tropical cyclones over China[J]. *Geophys Res Lett*, 38(2): L02708.
- Hu F, Li T, Liu J, et al, 2018. Decrease of tropical cyclone genesis frequency in the Western North Pacific since 1960s[J]. *Dyn of Atmos Oceans*, 81: 42-50.
- Huangfu J L, Huang R H, Chen W, 2017. Interdecadal variation of tropical cyclone genesis and its relationship to the convective activities over the central Pacific[J]. *Climate Dyn*, 50(3): 1439-1450.
- IPCC, 2021. *Climate change 2021: the physical science basis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kossin J P, Emanuel K A, Camargo S J, 2016. Past and projected changes in Western North Pacific tropical cyclone exposure[J]. *J Climate*, 29(16): 5725-5739.
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the china meteorological administration[J]. *Adv Atmos Sci*, 38(4): 690-699.
- Nakamura J, Camargo S J, Sobel A H, et al, 2017. Western North Pacific tropical cyclone model tracks in present and future climates[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 122(18): 9721-9744.
- Shan K Y, Yu X P, 2021. Variability of tropical cyclone landfalls in China[J]. *J Climate*, 34(23): 9235-9247.
- Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al, 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 309(5742): 1844-1846.
- Yan F, Shan K Y, Zhao H K, et al, 2024. Growing threat of tropical cyclone disasters in inland areas of East China[J]. *Geophys Res Lett*, 51(23): e2024GL111877.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 31(2): 287-301.