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

北半球冬季风暴路径及其降水的研究进展

傅云飞 王立羽 张祺 杨可

Progress in the study of winter storm track and its precipitation in the Northern Hemisphere

FU Yunfei，WANG Liyu，ZHANG Aoqi，YANG Ke

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-203

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

基于GPM与ERA5数据的北太平洋冬季风暴路径降水个例分析

A case study of precipitation along the winter storm track in the North Pacific based on the GPM and ERA5 data

暴雨灾害. 2022, 41(5): 525-535 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-256

地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展

Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars

暴雨灾害. 2023, 42(4): 361-371 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-075

中国首颗降水测量卫星(风云三号G星)的探测能力概述与展望

Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G

暴雨灾害. 2023, 42(5): 489-498 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-106

基于TRMM PR探测资料的青藏高原东坡降水结构特征分析

Analysis on the characteristic of precipitation structure on the eastern slope of the Qinghai-Tibet Plateau based on TRMM PR data

暴雨灾害. 2022, 41(4): 384-395 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.003

双偏振天气雷达精细化探测技术对2021年两个龙卷风暴识别能力的影响分析

Analysis on the influence of fine detection technology of dual polarization weather radar on recognition ability of two tornado storms in 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 130-141 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.003

雷达资料不同同化试验对短时降水预报影响的分析

Analysis of the influence of different assimilation experiments of radar data on short-term precipitation forecast

暴雨灾害. 2022, 41(6): 679-690 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-213

关注微信公众号，获得更多资讯信息

傅云飞,王立羽,张羡祺,等.2025.北半球冬季风暴路径及其降水的研究进展[J].暴雨灾害,44(2):133−143. FU Yunfei, WANG Liyu, ZHANG Aoqi, et al. 2025. Progress in the study of winter storm track and its precipitation in the Northern Hemisphere [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):133−143 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−203

北半球冬季风暴路径及其降水的研究进展

傅云飞[1], 王立羽[1], 张羡祺[2], 杨可[1]

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 2. 中山大学大气科学学院, 珠海 519082)

摘　要: 风暴路径指中纬度气旋的高发区, 其通过影响热量、水汽和角动量的输送进而影响全球气候系统。首先回顾和评述了风暴路径的天气动力学特征及其影响因子和气候变化、风暴路径降水特点等研究结果, 表明位于北半球中纬度太平洋和大西洋上空的两大风暴路径区是大气斜压性、海陆分布及大地形效应、大气非绝热加热等因素共同作用的产物, 同时也受到北大西洋涛动、北极涛动、太平洋海温异常及南方涛动等大尺度扰动的影响。然后通过分析风暴路径气旋中心区降水结构特点和风暴路径降水空间分布特征, 揭示了风暴路径大气扰动中心区与降水中心区错位现象, 这一新发现对深入理解中高纬度地区大气扰动与降水之间关系、进一步评估风暴路径降水及其潜热对气候变化的影响均具有重要意义。最后对未来风暴路径云和降水研究进行了展望。

关键词: 风暴路径; 降水; 雷达; 卫星

中图法分类号: P42　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−203

Progress in the study of winter storm track and its precipitation in the Northern Hemisphere

FU Yunfei[1], WANG Liyu[1], ZHANG Aoqi[2], YANG Ke[1]

(1. *School of Earth and Space Sciences University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026; 2. *School of Atmospheric Sciences*, *Sun Yat-sen University*, *Zhuhai* 519082)

Abstract: Storm tracks refer to the high-frequency area of mid-latitude cyclonic activities, which act on the global climate system by affecting the transport of a wide range of heat, water vapor, and angular momentum. This paper reviews and evaluates the important results of storm tracks from the aspects of their synoptic dynamic characteristics, influencing factors, climate changes, as well as their precipitation characteristics. These results demonstrate that the two major storm track regions over the Pacific and Atlantic in the middle latitudes of the Northern Hemisphere are the products of the combined effects of atmospheric baroclinicity, sea-land distribution, large topographic effects, and atmospheric diabatic heating. At the same time, results also show that storm tracks are affected by large-scale perturbations such as the North Atlantic Oscillation (NAO), the Arctic Oscillation (AO), the Pacific Ocean SST anomaly, and the Southern Oscillation (SO). By analyzing the characteristics of precipitation structure and spatial distribution of precipitation in the cyclone center of the storm track, this paper also reveals the dislocation between the center area of atmospheric disturbance in the storm track and the center area of precipitation. This new finding is of clear significance for further understanding the relationship between atmospheric disturbance and precipitation in the middle and high latitudes, and further evaluating the impact of storm track precipitation and its latent heat on climate change. In the end, this paper provides prospects for future studies on cloud and precipitation in storm tracks.

Key words: storm track; precipitation; radar; satellite

引　言

全球气候增暖已成为科学研究的热点。然而, 近 10 a 来北半球冬季时常出现极端严寒事件, 如 2009/2010 年冬季欧洲经历了自 1981 年以来持续时间最长的寒流; 2010 年 1 月上旬我国新疆出现近 60 a 来最严重的雪灾, 同期强暴风雪袭击美国。为什么全球气候增暖背景下, 局地甚至是近半球尺度出现极

收稿日期: 2023−09−25; **定稿日期**: 2024−05−09

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42230612, 41675041)

第一作者: 傅云飞, 主要从事大气物理学、大气探测和遥感学研究。E-mail: fyf@ustc.edu.cn

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

端严寒事件呢？近年的研究发现这些极端严寒事件与北半球冬季风暴路径密切相关 (Lehmann and Coumou, 2015; 周星妍等, 2015)。

风暴路径为北半球中纬度地区气旋活跃的纬度带，它是一种天气尺度现象，可通过大范围和系统性的热量、水汽和角动量输送来影响全球气候。Lehmann 和 Coumou (2015) 研究指出中纬度环流变化会强烈地影响极端天气现象出现的频率和强度，冬季寒潮发生与北半球风暴路径的强弱有关，且风暴路径活跃则会带来极端降水事件的增多。我国学者的研究也指出风暴路径位置的改变，会引起天气尺度瞬变涡动传播的异常，进而影响我国寒潮活动 (周星妍等, 2015)。上述研究表明风暴活动的强弱与北半球冬季严寒之间存在一定的联系。本文就冬季北半球风暴路径及其降水研究进行综述性分析和评述，并介绍利用全球降水测量 (Global Precipitation Measurement, GPM) 卫星搭载的双频测雨雷达 (Dual Precipitation Radar, DPR) 探测结果，揭示的风暴路径气旋中心区降水分布特征和风暴路径降水空间分布特征，并对未来风暴路径云和降水研究进行展望。

1 风暴路径的天气学研究

自 20 世纪 50 年代以来，研究指出从中国东海至中纬度太平洋、从落基山东侧至中高纬度大西洋及北欧为两个主要的气旋多发带，从地中海至中亚为第三个气旋多发带 (Petterssen, 1955; Klein, 1958; Whittaker and Horn, 1981)。Blackmon (1976)、Blackmon 等 (1977) 利用带通滤波方法对 500 hPa 位势高度的均方根分布进行滤波，开创了研究风暴路径的新方法，指出北半球中纬度的太平洋和大西洋存在两个主要风暴路径区。Lau (1988) 则利用经验正交函数 (EOF) 分析方法识别这两个风暴路径区。

天气学视角的研究已经得到了一些具有共识性的结论，如在风暴路径识别方法上，可用位势高度或经向风速等参数的天气尺度 (2.5~6.0 d) 滤波方差或均方差，来表征风暴路径的空间位置分布及其强度。如用 500 hPa 位势高度方差极小值可表征的风暴路径的中心区，太平洋风暴路径中心位于 (175°E, 42.5°N) 附近，强度达 40 dagpm^2 左右；大西洋风暴路径更强，其中心位于 (50°W, 45°N) 附近，强度可达 56 dagpm^2 左右。对风暴路径结构的研究表明，天气尺度涡动的位势高度方差和扰动动能的最大值、涡动西风动量通量的最强辐合及涡动对位涡的最大经向输送，均出现在风暴路径的对流层上部 300 hPa 附近，而涡动向极和向上的热量通量最大值，则位于对流层低层 850 hPa 附近 (Lau and Wallace, 1979; 朱伟军和孙照渤, 2000a; Chang and Fu, 2002; 朱伟军和李莹, 2010)。近年来的研究还表明北太平洋和北大西洋的对流层低层，分别存在“副热带风暴路径”和“副极地风暴路径”的双风暴路径 (傅刚等, 2009)，北太平洋东部还存在风暴路径多中心 (朱伟军等, 2013)。

在总结风暴路径研究方法时，张颖娴等 (2012) 指出了两种基本方法，即拉格朗日方法 (Hoskins and Hodges, 2002) 和欧拉方法 (Blackmon, 1976; Blackmon et al., 1977)，前者通过识别并追踪单个气旋，统计其强度、空间出现频率的分布，来表征风暴路径的强度和位置；后者则基于对大气参数 (如海面气压、位势高度、扰动速度等) 进行带通滤波 (Chang, 2009)，保留这些参数滤波后天气尺度运动的特征，来表征风暴路径活动的特点。

由于风暴路径反映了温带气旋活动，并与爆发性气旋 (也称为贝吉龙气旋) 关系密切 (Sanders and Gyakum, 1980)，这些爆发性气旋的频次在冬季达到峰值 (Murty et al., 1983; 齐桂英, 1992)，带来强烈或极端的天气现象 (李长青和丁一汇, 1989; 仪清菊和丁一汇, 1989; 黄立文等, 2001)，故风暴路径的强度和位置受到了爆发性气旋的影响。目前学术界对风暴路径的热力结构和云降水结构的天气学认知还十分有限，如对风暴路径上不同性质降水 (降雨还是降雪等) 和不同类型降水 (对流降水还是层状降水等) 的时空分布特征的认识还很有限，其主要原因是广阔的洋面上缺少气象参数的观测。

2 风暴路径的动力学研究

风暴路径的动力学研究主要从波动力学的角度，分析风暴路径上大气斜压性、涡流、瞬变涡动通量、位涡、位温、非地转运动、斜压与正压转化、涡动非地转位势、能量转化等动力学问题。如朱伟军和孙照渤 (2000a) 探讨了风暴路径异常与基本气流之间的关系，Hoskins 和 Hodges (2002) 分析了风暴路径区的温带气旋传播问题，Kaspi 和 Schneider (2013) 通过理想模型分析了静止涡旋在风暴路径中的作用。

Chang 及其合作者也做了大量关于风暴路径动力学研究，他们曾利用原始方程模式讨论风暴路径扰动维持的动力学因子 (Chang and Orlanski, 1993)，并利用欧洲中期天气预报中心 (European Center for Mediumrange Weather Forecasts , ECMWF) 再分析资料，分析了北半球冬季风暴路径与波包及其下游效

应的关系 (Chang and Yu , 1999)。Chang等 (2002) 总结了影响风暴路径的五个物理过程, 即斜压性、线性不稳定、下游效应、正压调整和非绝热加热。

数值模式也被用来研究风暴路径的动力学问题, Lee 和 Mak (1996) 的模拟试验结果表明, 青藏高原和落基山脉的大地形可作用缓变纬向气流, 进而对维持太平洋及大西洋风暴路径具有贡献, 而先前 Hoskins 和 Valdes (1990) 的理论分析则强调风暴路径维持的主要原因是非绝热加热作用。据此可以推测风暴路径上的降水潜热释放可以反馈作用风暴路径的大气流场等动力结构。

在风暴路径机理研究方面, Swanson 和 Kushner 等 (1997) 基于波动理论的简化模型, 研究了正压背景气流的经向差异如何产生局地的风暴路径, 并推导出风暴路径的波动作用随时间变化公式, 指出波动随时间的变化受到波移动速度空间分布的影响, 而波动也受到耗散 (波动破裂或地表摩擦导致) 的减弱, 但斜压源则为波动提供发展能量。谭本馗 (2008) 指出中纬度天气尺度扰动主要是斜压不稳定波, 因此风暴路径实际是斜压不稳定波活动的一种表征。本文作者赞同这一观点, 实际上风暴路径是冬季大气斜压性 (中纬度地区为强斜压区)、大地形与海陆分布 (如青藏高原、远东高地及鄂霍茨克海等)、非绝热加热 (云降水过程潜热) 这三个主要因素及其它次要因素共同作用的结果。以往机理方面的研究多基于模式模拟或对再分析资料的分析, 但风暴路径非绝热加热过程的云降水因缺乏实测资料, 故对非绝热加热过程在风暴路径活动中的作用认识不足。风暴路径上云降水过程的潜热三维结构特征及其对风暴路径的动力学反馈, 还有待通过分析实测资料或实测反演资料来揭示。

3 风暴路径活动的影响因子

研究表明影响风暴路径活动的因子很多, 这些研究多是利用统计学方法, 对再分析的大气参数进行诊断分析, 提取与风暴路径活动相关性大的气象参数作为影响因子。如发现北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) (Hurrell and VanLoon, 1997; Rogers, 1997)、太平洋厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) (Zhang et al., 1997)、北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) (Thompson and Wallace, 2000) 可影响风暴路径的活动。研究发现风暴路径也受到人类活动的影响, 如 Ulbrich 等 (2008) 的温室气体情景模拟试验表明, 人类活动将使得风暴路径在 21 世纪末增强 5%~8%。学者们还从冬季太平洋对流异常活动 (胡增臻和黄荣辉, 1997, 1998)、冬季赤道中东太平洋海表温度异常 (朱伟军等, 2000)、冬季黑潮区海温异常 (朱伟军和孙照渤, 2000a; 冯劭华等, 2015)、北美土壤湿度分布异常 (Pal and Eltahir, 2003)、海洋及大地形效应 (Wilson et al., 2009)、ENSO循环 (荷花等, 2009)、亚洲冬季风活动 (Lee et al., 2010)、高空急流变化 (Athanasiadis et al., 2010) 等角度, 探讨了这些因子对北半球风暴路径的影响。由此可见风暴路径受到诸多大尺度海气系统及地形的影响。

由于风暴路径与气旋活动密切关联, 因此风暴路径上的气旋活动特点也成为天气尺度层面上的研究侧重点。我国学者对西北太平洋爆发性气旋形成条件进行了分析, 指出洋面上空大气层结不稳定、高空急流出口区北侧的动力辐散、副热带高压北侧的强斜压区等, 均是风暴路径上气旋爆发性发展的有利因素 (李长青和丁一汇, 1989; 仪清菊和丁一汇, 1989)。这为追踪风暴路径上的气旋提供了具体指标。

上述研究多基于再分析大气参数, 因为风暴路径的地理位置处于洋面或人烟稀少区, 观测站稀少。因此, 未来可利用卫星平台搭载仪器的观测数据, 来研究风暴路径上云降水, 因为大气波动或涛动在一定程度上总会体现在云降水时空分布的演变上。为此, 在分析风暴路径的影响因子时, 要同时分析它们如何影响风暴路径的云降水, 形成大气动力学和大气物理学的结合, 来完善对风暴路径活动的认知。

4 风暴路径的气候变化研究

风暴路径的气候变化是过去二十多年来的研究热点。McCabe 等 (2001) 认为 20 世纪 50 年代末以后, 北半球 11 月至 3 月气旋频数在高纬度增加, 而在中纬度明显减少, 这意味着风暴路径有向极偏移的变化。Yin (2005) 用 15 个耦合气候模式的集合结果, 计算得出至 21 世纪末风暴路径仍继续向极地偏移, 并指出伴随着热带对流层温度升高和对流层顶高度抬升, 中纬度斜压区则向高纬度扩展。另一方面, Chang 和 Fu (2002) 利用 EOF 方法就北半球冬季风暴路径的年代际变化进行了分析, 指出风暴路径由 20 世纪 70 年代初 (1972/1973) 的弱转为强, 平均而言风暴路径强度在 20 世纪 90 年代比 60 年代后期至 70 年代早期强 30%。Nakamura 等 (2002) 发现北半球冬季风暴路径的年代际变化与亚洲冬季风天气

系统 (如西伯利亚高压、阿留申低压) 强弱密切相关。Chang 和 Fu (2003) 通过典型相关方法分析, 揭示风暴路径变化与平均流场的改变一致。

张颖娴等 (2012) 指出近几十年来的研究均表明, 北半球风暴路径存在北移的变化趋势, 而全球变暖很可能是造成温带气旋频数和强度变化的主要原因; 风暴路径位置向极移动与温带气旋活动区域向北移动的相关性高 (张颖娴和丁一汇, 2014a, 2014b), 本文作者认为其原因与变暖空气向极区扩张有关。风暴路径年代际变化的机理很复杂, 学者们从不同角度给出了研究结果 (李莹等, 2010; 朱伟军和李莹, 2010), 模式模拟试验结果也不尽相同 (Rivière, 2011; Woollings et al., 2012; Zappa et al., 2013; Harvey et al., 2014), 如 Chang (2013) 发现 CMIP5 (Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project) 模拟的北美风暴路径较 CMIP3 (Phase 3 of the Coupled Model Intercomparison Project) 的模拟结果弱 10% 以上。如果考虑海表温度及洋流的长期变化趋势, 那么风暴路径的气候变化将更为复杂, 如朱伟军和孙照渤 (2000a, 2000b) 发现赤道中、东太平洋区域和黑潮区域的海温异常, 可以影响冬季北太平洋风暴路径中心强度和位置的年际变化。虽然风暴路径指冬季中纬度的天气现象, 但近年研究也有关注风暴路径的季节变化, 如 Hoskins 和 Hodges (2019) 分析了北半球风暴路径的年循环, 指出风暴路径冬季强、夏季弱且位置偏向极区, 其结果也就再次说明了先前风暴路径的研究为什么聚焦在北半球冬季。

风暴路径的气候变化研究主要依据对再分析大气参数的分析, 缺少实际观测数据在此领域的应用, 其原因还是缺乏风暴路径上的观测数据。另外风暴路径气候变化的研究多从大气动力学方面进行研究, 而风暴路径的云降水物理学方面的研究甚少, 以至于学术界现在仍对风暴路径上云系特征、降水三维结构及其潜热结构的真实状况缺乏了解。因此利用长时间的卫星多仪器遥感的云资料、降水资料和云辐射资料, 来研究风暴路径的气候变化特点则大有作为。

5 风暴路径上云和降水的观测研究

大西洋风暴路径的气旋观测试验 (The Fronts and Atlantic Storm Track Experiment, FASTEX) (Joly et al., 1997) 大概是最早的观测研究, 该试验为期 2 个月, 使用了船载和机载探测设备 (探空仪、多普勒雷达、下投式探空仪等)、浮标探测器及卫星可见光红外探测器, 在中大西洋主要的斜压区进行观测, 以揭示大西洋风暴路径上气旋发生发展规律; 卫星光谱遥感表明大面积高云顶的云与大尺度斜压区和气旋活动相联系 (Chaboureau et al., 2001)。

卫星搭载光谱仪器和主/被动微波仪器观测为揭示风暴路径云和降水特征提供了丰富数据。Kodama 和 Tamaoki (2002) 利用热带测雨 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 卫星的降水产品资料和全球降水气候计划 (Global Precipitation Climatological Project, GPCP) 降水产品资料, 分析了风暴路径的降水空间分布特点。Klepp 等 (2003) 利用极轨卫星搭载的微波成像仪 (Special Sensor Microwave Imager, SSM/I) 和先进高分辨率辐射计 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 对大西洋风暴路径上气旋降水进行分析, 其研究还证实 GPCP 降水产品资料不能完整地表征气旋降水。

为了获得风暴路径活动与降水的关系, 学者们通常将再分析资料与降水产品资料相结合, 如 Garreaud (2007) 将 CMAP (Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation) 降水资料与 NCEP-NCAR (National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research) 再分析资料相结合, 在月尺度上分析了热带外 (包括风暴路径地域) 降水与大气环流之间的协变性; Hawcroft 等 (2012) 则是通过分析 GPCP 与 ERA-Interim 再分析资料, 揭示冬季风暴路径气旋降水占总降水的 90%。

近 10 a 来, 由于卫星搭载仪器的进步, 实现了光谱和高光谱、被动微波和主动微波 (雷达) 等多波段及多角度对大气及地表和海表的综合遥感 (傅云飞, 2018; 赵传峰和杨以坤, 2021), 也被用在风暴路径上云和降水的研究。Mace (2010) 利用 A-Train (美国 NASA 的多颗编队卫星) 搭载的测云雷达和激光雷达对大西洋风暴路径上云参数 (云量、液态水路径、冰水路径等及其辐射等) 进行了观测和分析。Yi 等 (2015) 对 A-Train 的测云雷达和激光雷达探测结果进行分析指出, 冬季中纬度北太平洋深厚对流发生频次较其它区域高, 其大部分深厚对流云的云顶高度可达 12 km, 最高可达 15 km 。由此推想这些深厚对流中的一部分很可能成为穿透性对流, 使得风暴路径成为对流层与平流层相互作用的重要区域。此外, 长时间的卫星资料, 为研究风暴路径上的云和降水气候变化提供了便利, 如 Bender 和 Ramanathan (2012) 通过分析 1983—2008 年 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 云产品资料, 证实

风暴路径上云向极区移动。

目前风暴路径上云和降水观测研究的不足在于: (1) 卫星仪器观测数据的有效性, 有些星载仪器的观测无法被用来研究风暴路径, 如 TRMM PR 只能对地球南北 37°之间进行有效探测, 而北半球风暴路径主要活动在 40°附近及其以北。(2) GPCP 降水产品资料主要来自静止卫星红外探测的反演, 而红外信号反映云顶附近的辐射特性, 与云下降水无一一对应关系, 且红外信号反演的层状降水率效果不好。(3) 卫星被动仪器遥感反演的降水产品资料 (如 GPCP 降水资料、SSM/I 反演降水资料等) 不能给出降水云内部的结构 (如回波强度垂直分布等), 判识的降水性质和降水类型不准; (4) A-Train 卫星搭载的测云雷达和激光雷达对风暴路径上气旋强降水的探测能力有限, 因为测云雷达和激光雷达波长短, 稍强的降水云的衰减效应, 使得它们探测能力大打折扣。上述不足, 使得学者对北太平洋和北大西洋的风暴路径上降水的时空分布特征, 包括温带气旋系统降水的性质 (降雪或降雨或雨雪混合)、类型 (对流降水或层状降水等)、强度、垂直结构、潜热等等还缺乏深入了解, 而 GPM 卫星和我国风云三号 G 星搭载的 DPR 探测将为认知风暴路径降水特征提供新机遇。

6 双频测雨雷达探测的风暴路径降水特征

GPM 卫星于 2014 年 2 月 28 日发射, 该卫星搭载了有史以来第一部 DPR 和一台微波成像仪 (Global Microwave Imager , GMI), 卫星轨道高度 407 km、轨道倾角 65°、非太阳同步卫星。GPM 探测覆盖范围为地球南北 68°之间区域, 较 TRMM 卫星覆盖范围有很大的提升。DPR 的频率分别为 13.6 GHz (Ku 波段) 和 35.5 GHz (Ka 波段), 探测扫描宽度分别为 245 km 和 120 km, 星下点分辨率均为 5 km, 正常的垂直分辨率为 250 m, 可以弥补 TRMM 测雨雷达对 0.5 mm·h^{-1} 以下弱降水探测的不足; GMI 具有 13 个通道, 其扫描宽度为 885 km, 频率从 10 GHz (水平分辨率 19 km × 32 km) 至 183 GHz (水平分辨率 4 km × 7 km), 其中 10 GHz 用于探测液态降水、19 GHz 和 37 GHz 用于探测中等至弱降水、21 GHz 用于探测水汽、89 GHz 和 183 GHz 分别用于探测冰粒子和小冰粒子、166 GHz 也用于探测弱降水 (Hou et al., 2014; Meneghini et al., 2015; Seto and Iguchi, 2015)。

我国风云三号 G 星于 2023 年 4 月 16 日发射升空, 该星搭载了我国首次研制降水测量雷达 (Precipitatition Measurment Radar, PMR)、降水型微波成像仪 (MicroWave Radiance Imager-Rainfall Measurement, MWRI-RM)、降水型中分辨率光谱成像仪 (ModErate-Resolution Spectroradio-meter ImagerRainfall Measurement, MERSI-RM)。PMR 为双频测雨雷达, 其 Ka 波段 35.55±0.01 GHz、Ku 波段 13.35±0.01 GHz, 采用水平极化方式, Ka 和 Ku 的星下点分水平辨率为 5 km, Ka 和 Ku 的最小可检测降水强度分别为 0.2 mm·h^{-1} (12 dBz) 和 0.5 mm·h^{-1} (18 dBz)。PMR 可观测台风、暴雨、暴雪等天气系统降水回波的三维结构, 并反演给出降水粒子谱三维结构。由于 PMR 为主动微波探测降水, 因此它比被动微波遥感降水更准确; 与 DPR 一样, PMR 可获得降水类型、不同降水类型的反射率因子廓线或降水率廓线。总体上 PMR 与国际上第二代降水雷达 DPR 能力相当, 部分指标略优于 DPR。MWRI-RM 是一部降水型的微波成像仪, 扫描宽度为 800 km; 它共有 17 个通道, 从低频 10.65 GHz 至 183.31±7 GHz, 可以对陆面、洋面、云和降水进行遥感。MERSI-RM 为观测降水类型的中分辨率光谱成像仪, 扫描宽度为 1 000 km; 它有 8 个通道 (可见光 0.65 μm, 近红外 0.865、0.94、1.38、1.64 μm, 中红外 3.8μm, 远红外 10.8、12.0 μm), 空间分辨率 500 m, 可遥感地表状况 (植被、水体)、云和大气水汽 (谷松岩等, 2023)。

6.1 风暴路径气旋中心区降水空间分布特征

由于风暴路径本质上为低压 (气旋) 活动引起大气扰动的统计表象, 认知这些低压 (气旋) 降水特点非常重要。Zhang 等 (2020)、王立羽和傅云飞 (2022) 通过分析 GPM DPR 探测结果和 ERA-Interim 再分析资料的大气参数, 研究了北太平洋风暴路径区气旋中心区的降水特征和大气参数特征。首先依据大气参数的变化, 将气旋分为发展型、成熟型、消散型和短期型四类, 随后针对各类型进行了统计分析, 结果表明气旋位势高度在大气低层 (地面和 850 hPa) 具有较好的对称性, 而在大气中高层 (500 hPa 和 200 hPa) 无对称性, 表现为低压槽的一部分。垂直速度剖面图 (图 1) 显示气旋中心为强上升运动、东南部也为一致的上升运动区; 而在气旋西北部为一致的下沉运动区。对 2014—2018 年冬季 (12 月、1 月和 2 月) DPR 轨道级降水数据的统计结果 (图 2) 表明, 所有类型的气旋均呈现“逗号”状雨带; 与季节平均降水参数相比, 气旋东南部的降水量大、降水粒子数浓度高、降水回波顶高, 而气旋西北部则相反。锋面气旋中心区东南部与西北部降水参数差异, 是由气旋动力结构和所处温湿环境所决定: 气旋东南部区为南北暖湿气流交汇区, 且处于高空槽前, 而气旋

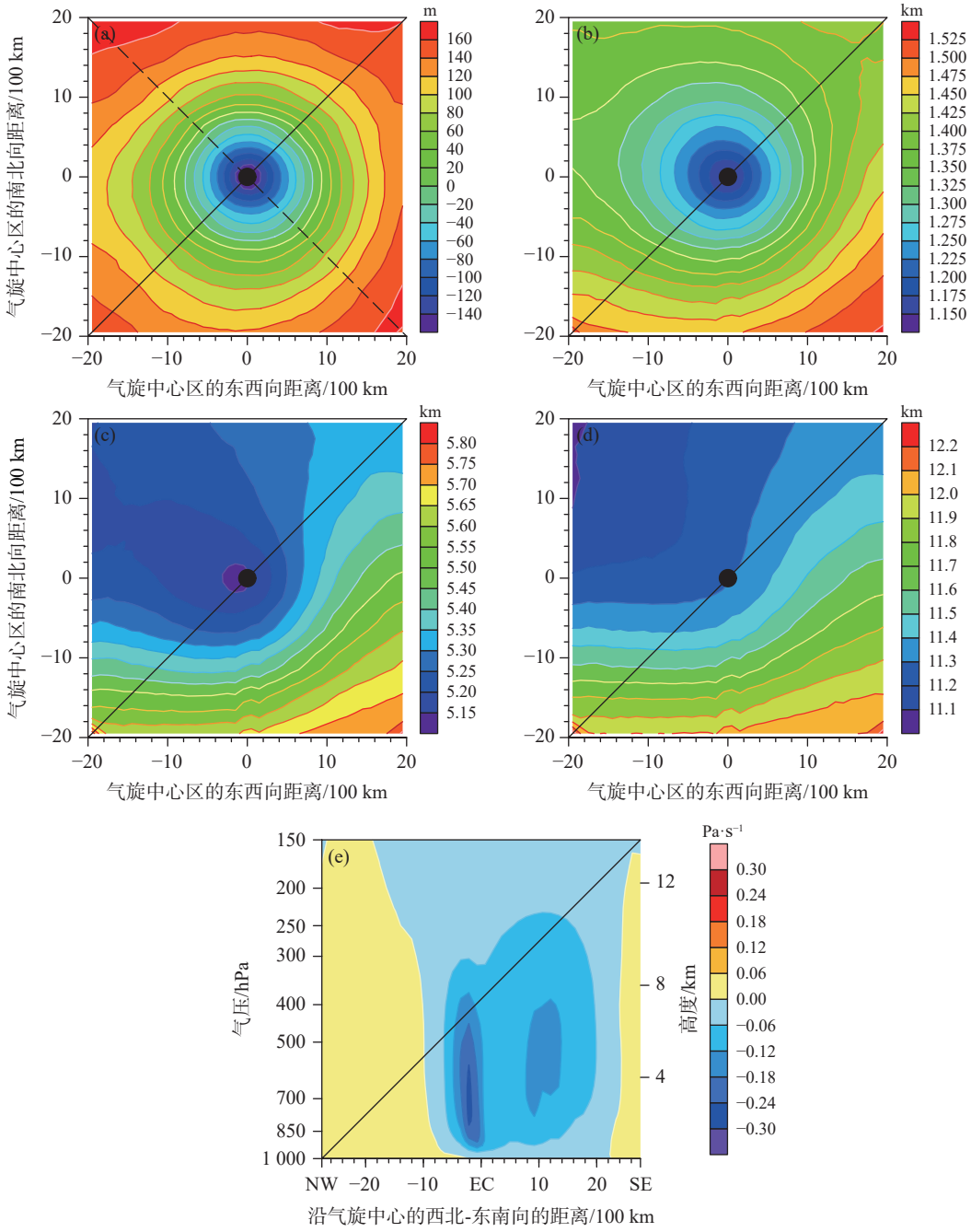


图 1 基于 2014 年 12 月—2018 年 2 月 ERA-interim 再分析资料的风暴路径气旋坐标系 (气旋中心为坐标原点, 记为黑点) 中 1 000 hPa (a)、850 hPa (b)、500 hPa (c) 和 200 hPa (d) 位势高度均值空间分布以及沿图 a 中西北—东南向虚线的垂直速度垂直剖面 (e) (Zhang et al., 2020)

Fig. 1 Average distributions of the (a) 1 000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 500 hPa, and (d) 200 hPa geopotential height in the extratropical cyclone coordinate system (The center of the cyclone is the coordinate origin, denoted as a black dot), and (e) vertical cross-section of the vertical velocity along the northwest-southeast direction shown by the dashed line in Fig.1a derived from the ERA-interim dataset from December in 2014 to February in 2018 (Adapted from Zhang et al., 2020)

西北部区主要受南下干冷空气作用 (图 3)。研究结果还发现降水参数受到风暴路径气旋不同生命阶段的影响, 气旋发展阶段对降水的影响最大, 成熟阶段次之, 消散阶段影响最小。上述研究首次利用实测数据揭示了以前鲜为人知的风暴路径气旋降水时空分布特征。

6.2 风暴路径大气扰动中心区与降水中心区错位现象

通过分析欧洲中心 ERA5 近 10 a 冬季大气低层 (850 hPa) 位势高度和流场的平均值及位势高度和流场日较差的标准差 (相当于 3~5 d 带通滤波)、大气可降水量均值和日较差的标准差、大气水汽通量散度

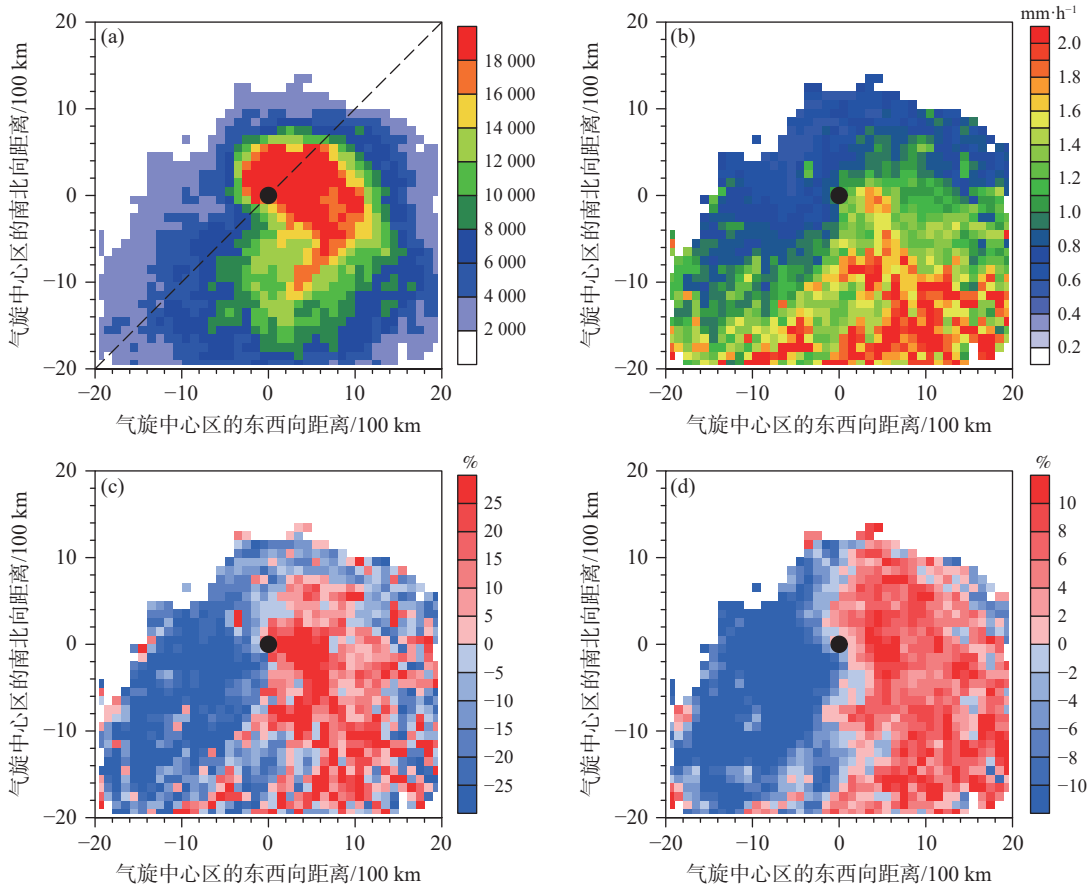


图 2 基于 2014—2018 年冬季 (12 月、1 月和 2 月) DPR 轨道级降水数据的风暴路径气旋坐标系 (气旋中心为坐标原点, 记为黑点) 中气旋区近地面降水样本 (a)、近地表降雨率 (b)、气旋区近地表降水相对于局地冬季平均降水的异常 (c) 和气旋降水回波顶高度相对于局地冬季降水回波顶平均高度的异常 (d)

Fig. 2 Distribution of (a) precipitation samples, (b) near-surface rain rate, (c) near-surface rain rate anomaly relative to the local seasonal average, and (d) storm top height anomaly compared with the local seasonal average in the extratropical cyclone coordinate system (The center of the cyclone is the coordinate origin, denoted as a black dot) derived from DPR data from December to February between 2014 and 2018

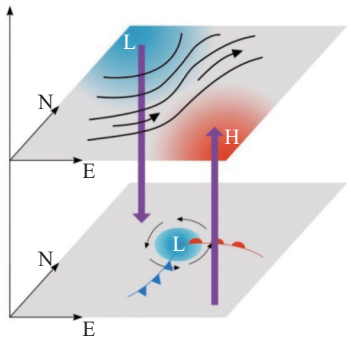


图 3 风暴路径上气旋动力结构示意图 (蓝色代表低压区 L, 红色代表高压区 H, 紫色矢量代表上升或下沉运动, 黑线为等压线, 黑色矢量为水平气流)

Fig. 3 Sketch of the extratropical cyclone of storm tracks (Blue represents the low-pressure area L, red represents the high-pressure area H, purple vector represents upward or downward motion, black line represents isobaric line, and black vector represents horizontal airflow)

均值和日较差标准差, 结果显示可降水高值区和水汽通量散度高值区均位于 850 hPa 低压区和气旋区南侧的 30°N 以南中低纬度地区 (图 4a、5a), 而可降水扰动中心和水汽通量散度扰动中心也分别位于位势高度扰动低值中心 (40°—50°N) 和气旋扰动低值中心 (40°—50°N) 南侧 25°—35°N 附近 (图 4b、5b), 降水扰动中心与流场或位势高度场扰动中心位置相差 15°左右, 这意味着风暴路径上大气动力扰动中心与降水中心 (潜热扰动中心) 错位。此外图 4、5 还表明风暴路径气旋降水多位于气旋的暖区和大气斜压性最大区域, 而不是位于大气低压中心和大气扰动中心。这与中低纬度气旋 (低压) 系统引发降水空间分布迥然不同, 如台风的强降水中心位于台风中心附近的内螺旋、江淮气旋的降水也多位于气旋中心区, 因为中低纬度地区水汽条件好, 气旋中心区辐合上升运动强, 降水也就强。由此可见利用最新的星载测雨雷达探测结果, 结合再分析数据, 研究以往大气动力学经典问题, 会揭示一些新现象, 促进相应理论的研究和完善。

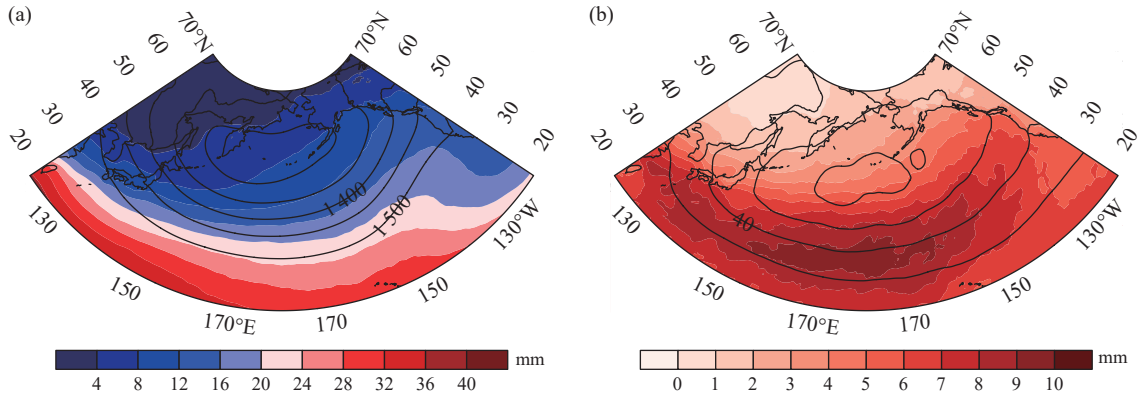


图 4 基于 ERA-interim 再分析资料的 850 hPa 位势高度的平均值 (等值线) 和可降水量的平均值 (填色) (a), 以及 850 hPa 位势高度日较差的标准差 (等值线) 和可降水量日较差的标准差 (填色) (b)

Fig. 4 Distribution of (a) the mean geopotential height at 850 hPa (contour line) and mean precipitable water (shaded), (b) the standard deviation of daily variation in geopotential height (contour line) at 850 hPa and precipitable water (shaded) derived from the ERA-interim dataset

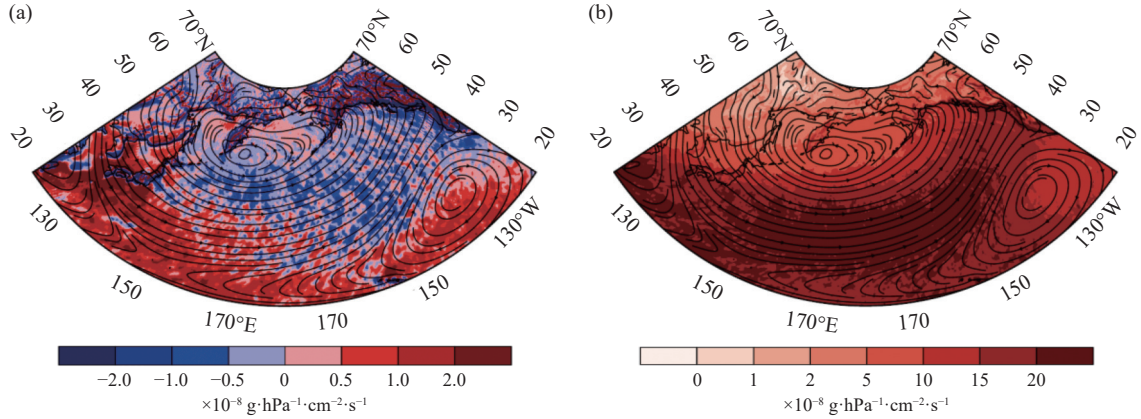


图 5 基于 ERA-interim 再分析资料的 850 hPa 平均流场 (等值线) 和水汽通量散度的平均值 (填色) (a), 以及 850 hPa 流场日较差的标准差 (等值线) 和水汽通量散度 (填色) 日较差的标准差 (b)

Fig. 5 Distribution of (a) mean flow at 850 hPa (contour line) and mean water vapor flux divergence (shaded), (b) the standard deviation of daily variation in the flow field at 850 hPa (contour line) and water vapor flux divergence (shaded) derived from the ERA-interim dataset

7 展　望

(1) 未来风暴路径的研究重点应集中在如何定量分析影响风暴路径活动的因子 (如大气多种涛动、大气斜压程度、大气非绝热加热等), 因为一种现象受到多种因素影响时, 就必须指出各个影响因子的占比, 以及这些因子之间的相互联系。

(2) 对风暴路径降水的研究, 在天气学和动力学方面, 要研究风暴路径气旋过程中云和降水的时空分布特征, 认知风暴路径上不同性质降水 (降雨还是降雪等) 和不同类型降水 (对流还是层云降水等) 的时空分布特征, 并利用实测云降水数据, 研究非绝热加热对风暴路径强弱变化的影响, 如云降水潜热的热力与云动力结构之间的相互反馈作用特点。在风暴路径云和降水气候变化方面, 可以利用卫星平台搭载仪器的观测数据, 结合典型气候事件的时空分布, 研究风暴路径区域云和降水的长期变化特征, 尤其是降水类型和降水三维结构的特征, 因为大气涛动等大尺度气候事件, 总会相应地体现在云和降水的时空分布上。在风暴路径云和降水的物理学方面, 主要是研究与风暴路径相联系的气旋活动过程中, 云粒子谱三维结构、不同相态云的演变、雨雪与云粒子谱及云温结构之间关系、不同类型降水潜热结构等, 这些研究对改进模式中云过程具有帮助。

(3) 由于风暴路径区域缺少实际观测数据, 因此利用好卫星搭载仪器观测数据十分重要。全球降水测量卫星和我国风云三号 G 星搭载的双频测雨雷达探测及其它被动仪器遥感, 为认知风暴路径云和降水特征提供机遇, 特别是我国风云三号 G 同时搭载了主被动微波和可见光/红外仪器, 这将在研究风暴路径云和降水中发挥巨大作用。

参考文献 (References):

冯劼华,罗德海,钟霖浩.2015.黑潮延伸体中尺度涡年代际变化与北太平洋风暴轴变化之间的关系[J].大气科学,39(5):861−874. Feng Z H,

Luo D H, Zhong L H. 2015. The relationship between mesoscale eddies in the Kuroshio extension region and storm tracks in the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,39(5):861−874 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1410.14142

傅刚,毕玮,郭敬天.2009.北太平洋风暴轴的三维空间结构[J].气象学报,67(2):189−200. Fu G, Bi W, Guo J T. 2009. Three-dimensional structure of storm track over the North Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica,67(2):189−200 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2009.019

傅云飞.2018.云-降水遥感研究现状及夏季东亚云-降水研究思考[J].暴雨灾害,37(6):493−501. Fu Y F. 2018. Research actuality of remote sensing on cloud precipitation and reflections on summer East Asian cloud precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters,37(6):493−501 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.06.001

谷松岩,张鹏,陈林等.2023.中国首颗降水测量卫星 (风云三号 G 星) 的探测能力概述与展望 [J].暴雨灾害,42(5):489−498. Gu S Y, Zhang P, Chen L, et al. 2023. Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G[J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):489−498 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−106

荷花,聂绩,谭本馗.2009.北半球冬季风暴轴与 ENSO 循环的关系及其能量平衡特征[J].气象学报,67(2):210−217. He H, Nie J, Tan B K. 2009. Northern hemisphere storm tracks in winter seasons and their energy budgets during the ENSO events [J]. Acta Meteorologica Sinica,67(2):210−217 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2009.021

胡增臻,黄荣辉.1997.冬季热带西太平洋对流活动异常的年际变化及其对北太平洋风暴轴的影响[J].大气科学,21(5):513−522. Hu Z R, Huang R H. 1997. The interannual variation of the convective activity in the Tropical West Pacific in winter and its effect on the storm track in the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 21(5):513−522 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1997.05.01

胡增臻,黄荣辉.1998.冬季菲律宾周围对流活动与北太平洋风暴轴联系的数值模拟[J].大气科学,22(1):46−56. Hu Z R, Huang R H. 1998. Simulation study of the connection between convective activities around the Philippines and the storm track in the North Pacific in winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,22(1):46−56 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1998.01.07

黄立文,吴国雄,宇如聪,等.2001.海洋风暴形成的一种动力学机制[J].气象学报,59(6):674−684. Huang L W, Wu G X, Yu R C, et al. 2001. A dynamical mechanism of marine storm genesis [J]. Acta Meteorologica Sinica,59(6):674−684 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2001.071

李长青,丁一汇.1989.西北太平洋爆发性气旋的诊断分析[J].气象学报,47(2):180−190. Li C Q, Ding Y H. 1989. A Diagnostic study of an explosively deepening oceanic cyclone over the Northwest Pacific Ocean [J]. Acta Meteorologica Sinica,47(2):180−190 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb1989.023

李莹,朱伟军,魏建苏.2010.冬季北太平洋风暴轴指数的评估及其改进[J].大气科学,34(5):1001−1010. Li Y, Zhu W J, Wei J S. 2010. Evaluation and improvement of the North Pacific storm track index in winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,34(5):1001−1010 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2010.05.14

齐桂英.1992.冬季北太平洋爆发性气旋的天气气候特征[J].应用气象学报,3(1):51−60. Qi G Y. 1992. Weather and climate characteristics of explosive cyclones in the North Pacific in Winter [J]. Journal of Applied Meteorology,3(1):51−60 (in Chinese)

谭本馗.2008.大气 Rossby 波动力学的研究进展[J].气象学报,66(6):870−879. Tan B K. 2008. Advances in the study of atmospheric Rossby wave dynamics [J]. Acta Meteorologica Sinica,66(6):870−879 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2008.079

王立羽,傅云飞.2022.基于 GPM 与 ERA5 数据的北太平洋冬季风暴路径降水个例分析[J].暴雨灾害,41(5):525−535. Wan L Y, FU Y F. 2022. A case study of precipitation along the winter storm track in the North Pacific based on the GPM and ERA5 data [J]. Torrential Rain and Disasters,41(5):525−535 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−256

仪清菊,丁一汇.1989.海洋温带气旋发生发展的研究[J].大气科学,13(2):238−246. Yi Q J, Ding Y H. 1989. Study on the formation and development of oceanic temperate cyclones [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,13(2):238−246 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1989.02.14

张颖娴,丁一汇.2014a.北半球温带气旋的模拟和预估研究 I: 6 个 CMIP5 耦合模式模拟能力的检验[J].气象学报,72(6):1155−1170. Zhang Y X, Ding Y H. 2014a. Simulation and projection study of temperate cyclones in the northern hemisphere I: evaluation of 6 CMIP5 coupled models [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(6):1155−1170 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.072

张颖娴,丁一汇.2014b.北半球温带气旋的模拟和预估研究 II: 耦合模式预估的未来 RCP4.5 情景下的变化[J].气象学报,72(6):1171−1185. Zhang Y X, Ding Y H. 2014b. Simulation and projection study of temperate cyclones in the northern hemisphere II: Changes under future RCP4.5 scenario as projected by coupled models [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(6):1171−1185 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.073

张颖娴,丁一汇,李巧萍.2012.北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化[J].大气科学,36(5):912−928. Zhang Y X, Ding Y H, Li Q P. 2012. Interdecadal variations of extratropical cyclone activities and storm tracks in the Northern Hemisphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,36(5):912−928 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2012.11158

赵传峰,杨以坤.2021.地基云遥感反演进展及挑战[J].暴雨灾害,40(3):243−258. Zhao C F, Yang Y K. 2021. Progress and challenges of ground-based cloud remote sensing [J]. Torrential Rain and Disasters,40(3):243−258 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.03.003

周星妍,朱伟军,顾聪.2015.冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响[J].大气科学,39(5):978−990. Zhou X Y, Zhu W J, Gu C. 2015. Possible impact of winter north atlantic storm track anomalies on cold surges in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,39(5):978−990 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1501.14259

朱伟军,李莹.2010.冬季北太平洋风暴轴的年代际变化特征及其可能影响机制[J].气象学报,68(4):477−486. Zhu W J, Li Y. 2010. Decadal variability characteristics and possible impact mechanisms of the North Pacific storm track in winter [J]. Acta Meteorologica Sinica,68(4):477−486 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2010.046

朱伟军,孙照渤.2000a.冬季北太平洋风暴轴的年际变化及其与 500 hPa 高度以及热带和北太平洋海温的联系[J].气象学报,58(3):309−320. Zhu W J, Sun Z B. 2000a. Interannual variability of the North Pacific

storm track in winter and its relationship with 500 hPa height and sea surface temperatures in the Tropical and North Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica,58(3):309−320 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2000.03.006

朱伟军,孙照渤.2000b.冬季黑潮区域海温异常对北太平洋风暴轴的影响[J].应用气象学报,11(2):145−153. Zhu W J, Sun Z B. 2000b. Impact of winter Kuroshio region sea surface temperature anomalies on the North Pacific Storm Track [J]. Journal of Applied Meteorology, 11(2):145−153 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2000.02.003

朱伟军,孙照渤,闵锦忠,等.2000.冬季赤道中东太平洋区域海表温度异常对北半球风暴轴年际变化的影响[J].热带气象学报,16(1):91−106. Zhu W J, Sun Z B, Min J Z, et al. 2000. Impact of winter equatorial Central-Eastern Pacific Sea Surface temperature anomalies on the interannual variability of the Northern Hemisphere storm track [J]. Journal of Tropical Cyclone,16(1):91−106 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:RDQX.0.2000−01−011

朱伟军,袁凯,陈懿妮.2013.北太平洋东部风暴轴的时空演变特征[J].大气科学,37(1):65−80. Zhu W J, Yuan K, Chen Y N. 2013. Spatiotemporal evolution characteristics of the eastern North Pacific storm track [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,37(1):65−80 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2012.11245

Athanasiadis P J, Wallace J M, Wettstein J J. 2010. Patterns of wintertime jet stream variability and their relation to the storm tracks [J]. Journal of Atmospheric Sciences,67:1361−1381. doi:10.1175/2009jas3270.1

Bender F A M, Ramanathan V, Tselioudis G. 2012. Changes in extratropical storm track cloudiness 1983-2008: observational support for a poleward shift [J]. Climate Dynamics,38:2037−2053. doi:10.1007/s00382−011−1065−6

Blackmon M L. 1976. A climatological spectra study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. Journal of Atmospheric Sciences,33:1606−1623. doi:10.1175/1520−0469(1976)0332.0.co;2

Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. Journal of Atmospheric Sciences,34:1040−1053. doi:10.1175/1520−0469(1977)0342.0.co;2

Chaboureau J P, Claud C, Cammas J P, et al. 2001. Large-scale cloud, precipitation and upper level features during Fronts and Atlantic Storm Track Experiment as inferred from TIROS-N Operational Vertical Sounder observations [J]. Journal of Geophysical Research,106(D15):293−302. doi:10.1029/2000jd000150

Chang E K M. 2009. Are band-pass variance statistics useful measures of storm track activity? Re-examining storm track variability associated with the NAO using multiple storm track measures [J]. Climate Dynamics,33:277−296. doi:10.1007/s00382−009−0532−9

Chang E K M. 2013. CMIP5 projection of significant reduction in extratropical cyclone activity over North America [J]. Journal of Climate,26:9903−9922. doi:10.1175/jcli−d−13−00209.1

Chang E K M, Fu Y F. 2002. Interdecadal variations in northern hemisphere winter storm track intensity [J]. Journal of Climate,15:642−658. doi:10.1175/1520−0442(2002)0152.0.co;2

Chang E K M, Fu Y F. 2003. Using mean flow change as a proxy to infer interdecadal storm track variability [J]. Journal of Climate,16:2178−2196. doi:10.1175/2773.1

Chang E K M, Lee S, Swanson K. 2002. Storm track dynamics [J]. Journal of Climate,15:2163−2183. doi:10.1175/1520−0442(2002)0152.0.co;2

Chang E K M, Orlanski I. 1993. On the dynamics of a storm track [J]. Journal of Atmospheric Sciences,50:999−1015. doi:10.1175/1520−0469(1993)0502.0.co;2

Chang E K M, Yu D B. 1999. Characteristics of wave packets in the upper troposphere. Part I: Northern Hemisphere winter [J]. Journal of Atmospheric Sciences,56:1708−1728. doi:10.1175/1520−0469(1999)0562.0.co;2

Garreaud R D. 2007. Precipitation and circulation covariability in the Extratropics [J]. Journal of Climate,20:4789−4797. doi:10.1175/jcli4257.1

Harvey B J, Shaffrey L C, Woollings T J. 2014. Equator-to-pole temperature differences and the extra-tropical storm track responses of the CMIP5 climate models [J]. Climate Dynamics,43:1171−1182. doi:10.1007/s00382−013−1883−9

Hawcroft M K, Shaffrey L C, Hodges K I, et al. 2012. How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? [J]. Geophysical Research Letters,39:L24809. doi:10.1029/2012GL053866

Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks [J]. Journal of Atmospheric Sciences,59(6):1041−1061. doi:10.1175/1520−0469(2002)0592.0.co;2

Hoskins B J, Hodges K I. 2019. The Annual cycle of northern hemisphere storm-tracks. Part 1: Seasons [J]. Journal of Climate,32(6):1743−1760. doi:10.1175/jcli−d−17−0870.1

Hoskins B J, Valdes P J. 1990. On the existence of storm tracks [J]. Journal of Atmospheric Sciences,47(15):1854−1864. doi:10.1175/1520−0469(1990)0472.0.co;2

Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. 2014. The global precipitation measurement mission [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2014:701−722. doi:10.1175/BAMS−D−13−00164.1

Hurrell J W, VanLoon H. 1997. Decadal variation in climate associated with the North Atlantic Oscillation [J]. Climatic Change,36(3):301−326. doi:10.1007/978−94−015−8905−5_4

Joly A, Jorgensen D, Shapiro M A, et al. 1997. The Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment (FASTEX): Scientific objectives and experimental design [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,78(9):1917−1940. doi:10.1175/1520−0477(1997)0782.0.co;2

Kaspi Y, Schneider T. 2013. The role of stationary eddies in shaping midlatitude storm tracks [J]. Journal of Atmospheric Sciences,70:2596−2613. doi:10.1175/jas−d−12−082.1

Klein W H. 1958. The frequency of cyclones and anticyclones in relation to the mean circulation [J]. Journal of Atmospheric Sciences,15(1):98−102. doi:10.1175/1520−0469(1958)0152.0.co;2

Klepp C P, Bakan S, Grassl H. 2003. Improvements of satellite-derived cyclonic rainfall over the North Atlantic [J]. Journal of Climate,16:657−669. doi:10.1175/1520−0442(2003)0162.0.co;2

Kodama Y M, Tamaoki A. 2002. A Re-examination of precipitation activity in the subtropics and the mid-latitudes based on satellite-derived data [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,80(5):1261−1278. doi:10.2151/jmsj.80.1261

Lau N C. 1988. Variability of the observed midlatitude storm tracks in

relation to low-frequency change in the circulation pattern [J]. Journal of Atmospheric Sciences,45(19):2718−2743. doi:10.1175/1520−0469(1988)0452.0.co;2

Lau N C, Wallace J M. 1979. On the distribution of horizontal transport by transient eddies in the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. Journal of Atmospheric Sciences,36:1844−1861. doi:10.1175/1520−0469(1979)0362.0.co;2

Lee W J, Mak M. 1996. The role of orography in the dynamics of storm tracks [J]. Journal of Atmospheric Sciences,53(12):1737−1750. doi:10.1175/1520−0469(1996)0532.0.co;2

Lee Y Y, Lim G H, Kug J S. 2010. Influence of the East Asian winter monsoon on the storm track activity over the North Pacific [J]. Journal of Geophysical Research,115:D09102. doi:10.1029/2009JD012813

Lehmann J, Coumou D. 2015. The influence of mid-latitude storm tracks on hot, cold, dry and wet extremes [J]. Scientific reports,5(1):17491. doi:10.1038/srep17491

Mace G G. 2010. Cloud properties and radiative forcing over the maritime storm tracks of the Southern Ocean and North Atlantic derived from A-Train [J]. Journal of Geophysical Research,115:D10201. doi:10.1029/2009JD012517

Meneghini R, Kim H, Liao L, et al. 2015. An initial assessment of the surface reference technique applied to data from the dual-frequency precipitation radar (DPR) on the GPM satellite [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,32:2281−2296. doi:10.1175/jtech−d−15−0044.1

McCabe G J, Clark M P, Serreze M C. 2001. Trends in northern hemisphere surface cyclone frequency and intensity [J]. Journal of Climate, 14:2763−2768. doi:10.1175/1520−0442(2001)014<2763:tinhsc>2.0.co;2

Murty T S, Mcbean G A, Mckee B. 1983. Explosive cyclogenesis over the northeast Pacific ocean [J]. Monthly Weather Review,111:1131−1135. doi:10.1175/1520−0493(1983)111<1131:ecotnp>2.0.co;2

Nakamura H, Izumi T, Sampe T. 2002. Interannual and decadal modulations recently observed in the pacific storm track activity and East Asian winter monsoon [J]. Journal of Climate,15:1855−1874. doi:10.1175/1520−0442(2002)015<1855:iadmro>2.0.co;2

Pal J S, Eltahir E A B. 2003. A feedback mechanism between soil-moisture distribution and storm tracks [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,129:2279−2297. doi:10.1256/qj.01.201

Petterssen S. 1955. A general survey of factors influencing development at sea level [J]. Journal of Atmospheric Sciences,12(1):36−42. doi:10.1175/1520−0469(1955)012<0036:agsofi>2.0.co;2

Rivière G. 2011. A dynamical interpretation of the poleward shift of the jet streams in global warming scenarios [J]. Journal of Atmospheric Sciences,68:1253−1272. doi:10.1175/2011jas3641.1

Rogers J C. 1997. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe [J]. Journal of Climate,10(7):1635−1647. doi:10.1175/1520−0442(1997)010<1635:nastva>2.0.co;2

Sanders F, Gyakum J R. 1980. Synoptic-dynamic climatology of the “bomb” [J]. Monthly Weather Review,108:1589−1606. doi:10.1175/1520−0493(1980)108<1589:sdcot>2.0.co;2

Seto S, Iguchi T. 2015. Intercomparison of attenuation correction methods for the GPM dual-frequency precipitation radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,32:915−926. doi:10.1175/jtech−d−14−00065.1

Swanson K L, Kushner P J, Held I M. 1997. Dynamics of barotropic storm tracks [J]. Journal of Atmospheric Sciences,54:791−810. doi:10.1175/1520−0469(1997)054<0791:DOBST>2.0.CO;2

Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. Journal of Climate, 13:1000−1016. doi:10.1175/1520−0442(2000)013<1000:amitec>2.0.co;2

Ulbrich U, Pinto J G, Kupfer H, et al. 2008. Changing Northern Hemisphere storm tracks in an ensemble of IPCC climate change simulations [J]. Journal of Climate,21:1669−1679. doi:10.1175/2007jcli1992.1

Whittaker L M, Horn L H, 1981. Geographical and seasonal distribution of North American cyclogenesis, 1958-1977 [J]. Monthly Weather Review,109(11): 2312-2322. doi:10.1002/joc.3370040307

Wilson C, Sinha B, Williams R G. 2009. The effect of ocean dynamics and orography on atmospheric storm tracks [J]. Journal of Climate, 22:3689−3702. doi:10.1175/2009JCLI2651.1

Woollings T, Gregory J M, Pinto J G, et al. 2012. Response of the North Atlantic storm track to climate change shaped by ocean-atmosphere coupling [J]. Nature Geoscience,5:313−317. doi:10.1038/ngeo1438

Yi M, Fu Y F, Liu P, et al. 2015. Deep convective clouds over the Northern Pacific and their relationship with oceanic cyclones [J]. Advances in Atmospheric Sciences,32:821−830. doi:10.1007/s00376−014−4056−9

Yin J H. 2005. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate [J]. Geophysical Research Letters, 32:L18701. doi:10.1029/2005GL023684

Zappa G, Shaffrey L C, Hodges K I. 2013. The ability of CMIP5 models to simulate North Atlantic extratropical cyclones [J]. Journal of Climate,26:5379−5396. doi:10.1175/JCLI−D−12−00501.1

Zhang A, Chen Y, Zhang Q, et al. 2020. Structure of cyclonic precipitation in the Northern Pacific storm track measured by GPM DPR [J]. Journal of Hydrometeorology,21:122. doi:10.1175/JHM-D-19-0161.1

Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability:1900-1993 [J]. Journal of Climate,10:1004−1020. doi:10.1175/1520−0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2

(责任编辑　唐永兰)