大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

近十年我国涡旋系统的研究进展

孙建华 周玉淑 傅慎明 杨帅 张元春 汪汇洁 黄

Progress on Vortices in China in the Past Ten Years

SUN Jianhua ZHOU Yushu FU Shenming YANG Shuai ZHANG Yuanchun WANG Huijie HUANG Yue

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23323

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

一次高原东移MCS与下游西南低涡作用并产生强降水事件的研究

Investigation of Severe Precipitation Event Caused by an Eastward-Propagating MCS Originating from the Tibetan Plateau and a Downstream Southwest Vortex

大气科学. 2020, 44(6): 1275 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19206

高原低涡与西南涡结伴而行的不同活动形式个例的环境场和位涡分析

Analysis of Environmental Background and Potential Vorticity of Different Accompanied Moving Cases of Tibetan Plateau Vortex and Southwest China Vortex

大气科学. 2017, 41(4): 831 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16213

高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析

Comparative Analysis of Two Rainstorm Processes in Sichuan Province Affected by the Tibetan Plateau Vortex and Southwest Vortex

大气科学. 2019, 43(4): 813 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1807.18147

青藏高原低涡形成、发展和东移影响下游暴雨天气个例的位涡分析

Effect of Potential Vorticity on the Formation, Development, and Eastward Movement of a Tibetan Plateau Vortex and Its Influence on Downstream Precipitation

大气科学. 2020, 44(3): 472 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1904.18275

一次高原低涡与高原切变线演变过程与机理分析

Evolution and Mechanism Analysis of a Plateau Vortex and Plateau Shear Line

大气科学. 2017, 41(4): 713 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16179

高原横切变线与高原低涡关系的初步研究

A Preliminary Study of the Relationship between the Plateau Transverse Shear Line and Plateau Vortex

大气科学. 2020, 44(2): 269 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1906.18191

关注微信公众号，获得更多资讯信息

第 48 卷第 1 期
Vol. 48 No. 1
Jan. 2024
大气科学
Chinese Journal of Atmospheric Sciences

孙建华, 周玉淑, 傅慎明, 等. 2024. 近十年我国涡旋系统的研究进展 [J]. 大气科学, 48(1): 228−260. SUN Jianhua, ZHOU Yushu, FU Shenming, et al. 2024. Progress on Vortices in China in the Past Ten Years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(1): 228−260. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23323

近十年我国涡旋系统的研究进展

孙建华[1,3] 周玉淑[1,3] 傅慎明[2] 杨帅[1] 张元春[1] 汪汇洁[1] 黄玥[1,3]

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029
2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029
3 中国科学院大学, 北京 100049

摘　要　近年我国暴雨和强对流等中小尺度灾害性天气频发，涡旋是产生这些灾害天气的重要天气系统之一。为了不断提高对我国涡旋及其产生的暴雨和强对流天气发生发展机理的认识和预报准确率，本文对容易引发长江流域沿线灾害天气的三类涡旋 (高原低涡、西南低涡和大别山涡) 及对北方地区暴雨、强对流天气有重要影响的东北冷涡、中亚低涡的主要研究成果进行了梳理。主要回顾了近十年这些涡旋的识别方法、时空分布统计特征、三维结构以及产生的暴雨、强对流天气机理。最后，对与涡旋系统以及相关天气的研究与预报中的问题、未来发展方向进行了简要讨论和展望。

关键词　暴雨　高原低涡　西南低涡　大别山涡　东北冷涡　中亚低涡
文章编号　1006-9895(2024)01-0228-33　　**中图分类号**　P445　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23323

Progress on Vortices in China in the Past Ten Years

SUN Jianhua[1,3], ZHOU Yushu[1,3], FU Shenming[2], YANG Shuai[1], ZHANG Yuanchun[1], WANG Huijie[1], and HUANG Yue[1,3]

1 *Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *International Center for Climate and Environment Sciences*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

Abstract　In recent years, disastrous weather, such as heavy rainfall and severe convection, has occurred frequently in China, and vortices are one of the important weather systems that produce disastrous weather. This paper aims to improve the understanding and prediction accuracy of the mechanism of vortices, as well as the disastrous weather they generate in China, such as heavy rainfall and severe convection. Herein, the important research results of the three types of vortices (i.e., Tibetan Plateau, Southwest, and Dabie vortices) along the Yangtze River basin and the Northeast cold and Central Asian vortices in northern China in the past 10 years are summarized. This paper mainly reviews the identification methods, the statistical characteristics of spatial and temporal distribution, the three-dimensional structure of these vortices, and the formation mechanism of disastrous weather, such as heavy rainfall and severe convection, associated with the vortices in the past ten years. Finally, a brief discussion and outlook are given on the future directions in research and forecasting related to vortex systems and the disastrous weather that they generate.

Keywords　Heavy rainfall, Tibetan Plateau vortex, Southwest vortex, Dabie vortex, Northeast vortex, Central Asian vortex

收稿日期　2023-07-09；**网络预出版日期**　2023-12-07
作者简介　孙建华，女，1972 年出生，研究员，主要从事中尺度气象学研究。E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家自然科学基金项目 U2142202、41975057、41975056、42175012
Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grants U2142202, 41975057, 41975056, 42175012)

1 引言

我国气象灾害频发，尤其是降水引发的洪涝灾害更加频繁，新中国建立后经历了 1954、1991、1998、2007、2020 年江淮流域大洪水，1994 年西江大洪水，1963 年海河洪水及 1975 年和 2021 年河南大洪水等重大洪涝过程，给当地人民的生命和财产造成了严重损失。中国科学院大气物理研究所是国内最早从事降水形成机理与预报的研究机构，2023 年是该所成立 95 周年，回顾国内与暴雨形成有关的机理与预测方法、技术研究进展，并对其相关问题进行思考十分必要。由于最近几年一些学者已对我国暴雨形成机理以及相关的天气系统、数值预报和预报方法的研究历程与重要成果进行了较全面的回顾（高守亭等, 2018a; 陆汉城, 2019; 孟智勇等, 2019; 赵思雄和孙建华, 2019; 罗亚丽等, 2020）。本文不再进行全方位的梳理，而是专门对我国南北方的暴雨及强对流均有重要影响的几类涡旋系统研究进展进行回顾。

我国一些特殊区域暴雨和强对流天气的产生与 α 中尺度涡旋和 β 中尺度涡旋相关，这些中尺度涡旋系统除了热带气旋外，主要包括不同地区的气旋（江淮气旋、黄淮气旋、蒙古气旋等）和低涡（高原低涡、西南低涡、东北冷涡、中亚低涡等）。20 世纪，我国学者对中国造成暴雨的气旋和低涡进行了较为系统的研究，但是由于观测资料有限，较难开展细致的统计和结构特征研究。进入 21 世纪后，随着中国气象观测网的不断完善和再分析资料的时空分辨率的不断提高，对中尺度涡旋的时空统计特征、结构特征和形成机理研究不断深入。研究发现，高原低涡、西南低涡和大别山涡对长江流域的特大洪涝形成有重要影响，特别是在 1998 年和 2020 年的长江流域持续性暴雨过程中非常活跃（图 1，Fu et al., 2022），中亚低涡和东北冷涡为引发我国西北和东北地区的主要降水系统（孙力等, 1994; 杨莲梅等, 2020）。本文将从这些涡旋的时空统计特征、结构特征以及形成机理和产生的暴雨或者强对流天气等角度，概述国内的研究进展及其相关问题，目的在于总结过去，找到影响涡旋系统研究、预报与灾害防御的关键问题，希望能对今后相关领域的研究与预报工作改进提供参考。

2 高原低涡

高原低涡（简称高原涡）是指在青藏高原独特的动力、热力条件下形成的一类 α 中尺度涡旋，被定义为 500 hPa 等压面出现的生成于高原地区的具有闭合等高线的低压或者三站风向呈现气旋性旋转的低涡（青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 1981）。由于青藏高原自然环境恶劣，气象观测站点稀少且台站代表性不够，因此，过去的研究一直受限于观测资料的不足。1979 年以来相继开展三次青藏高原大气科学试验，对青藏高原天气系统的认识逐渐加强（Tao et al., 1986; 陈联寿和徐祥德, 1998; 徐祥德和陈联寿, 2006; 赵平等, 2018）。特别是近十年来，随着卫星遥感和同化技术的快速发展，高时空分辨率的再分析资料为高原涡研究提供了重要的支撑（张博和李国平, 2017; 黄一航等, 2018; Curio et al., 2019; Li et al., 2020; 汤欢等, 2023）。

2.1 高原涡的识别与结构特征

高原涡的准确识别与追踪是高原涡研究的基础。当前，高原涡的识别与追踪方法可以分为人工识别和客观识别两类。人工识别可以严格遵循高原涡的定义，利用天气图进行识别，可处理涡旋的合并和分裂等特殊情况，是识别高原涡最准确的方法（钱正安等, 1984; 郁淑华和高文良, 2006; 何光碧等, 2009; 李国平等, 2014），从 1998 年开始逐年发布的《青藏高原低涡切变线年鉴》（李跃清等, 2010; 中国气象局成都高原气象研究所和中国气象学会高原气象学委员会, 2022）是目前公认的高原涡观测识别的权威资料。然而，随着分析资料时空分辨率的提升，人工识别的工作量日益繁重，具备识别速度快、可处理数据量大、可调整标准重复识别等优点的客观识别方法已逐渐成为主要方法。目前的客观识别方法主要是对格点位势高度场中低值中心强度、水平和垂直尺度、持续时间及风场的气旋性环流同时进行约束（张博和李国平, 2017; 刘自牧等, 2018; 关良和李栋梁, 2019），或通过查找 500 hPa 位势高度分析场具有闭合等值线的低压系统（林志强等, 2013; Lin et al., 2020）。此外，以相对涡度（Feng et al., 2014; Curio et al., 2018）或基于风场的限制涡度（Fu S M et al., 2020; 汤欢等, 2023）为核心发展的客观识别算法，由于物理意义清晰，识别准确率得到大幅提升。基于不同时空分辨率再分析资料的客观识别追踪到的高原涡数目与人工识别的结果存在一些差异，其中基于 ERA-Interim（ECMWF Re-analysis-Interim，欧洲中期预报中心的第 4 代全球大气再分析产品）资料的统计结果与

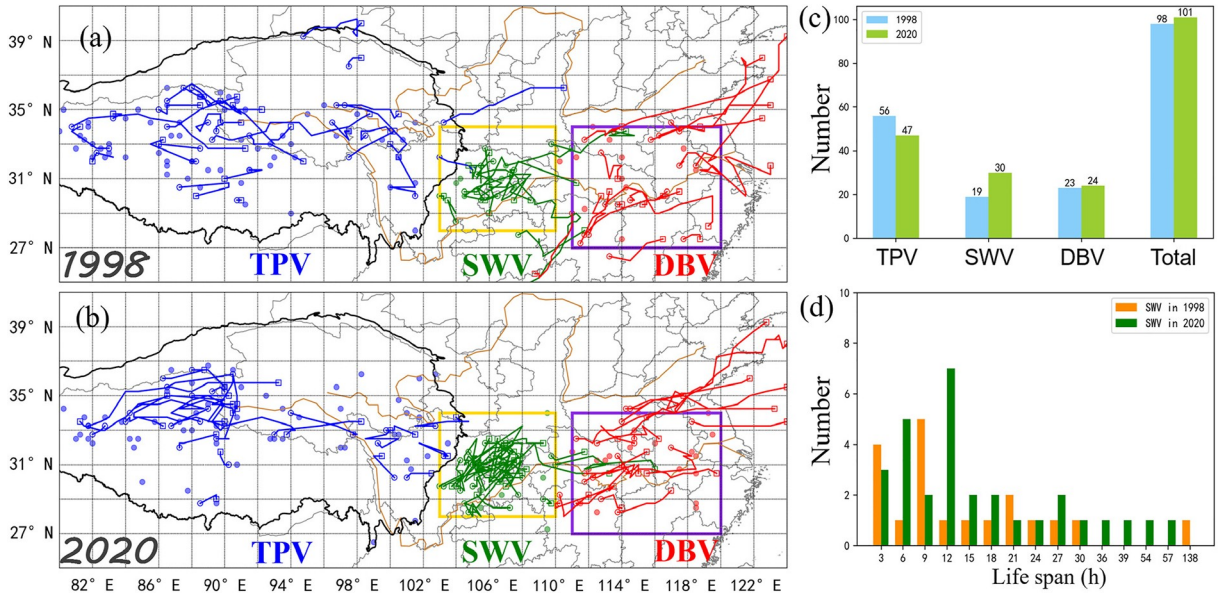

图 1 （a）1998 和（b）2020 年梅雨期三类中尺度涡旋的移动轨迹（蓝色对应高原涡，绿色对应西南涡，红色对应大别山涡，轨迹上的空心矩形和原型分别标注了生命史 6 h 以上涡旋的生成源地和消亡位置，而实心圆圈代表生命史 6 h 以内涡旋的生成源地，黑色曲线为青藏高原的区域，橘色和紫色方框分别为西南涡和大别山涡的源区），（c）三类中尺度涡旋的个数及总数，（d）西南涡的生命史分布。引自 Fu et al.（2022）。

Fig. 1 Tracks of the three types of mesoscale vortices in the Mei-yu seasons of (a) 1998 and (b) 2020, respectively, where blue, green, and red represent the Tibetan Plateau vortex (TPV), Southwest vortex (SWV), and Dabie vortex (DBV), respectively. Small open rectangles and circles mark the locations of the formation and dissipation of longer-lived (≥6 h) vortices, respectively, and small shaded circles mark the locations of the formation of shorter-lived (<6 h) vortices. The curved black solid line outlines the Tibetan Plateau, while the orange and purple boxes show the source regions for SWVs and DBVs, respectively. (c) Number of TPVs, SWVs, and DBVs, and their total in the Mei-yu seasons of 1998 and 2020. (d) Number distribution of SWVs in the Mei-yu seasons of 1998 and 2020 with their life spans. Cited from Fu et al. (2022).

年鉴相对接近，平均每年约有 53 个高原涡（林志强, 2015）。

基于大量识别高原涡的统计表明，高原涡多发生在 5～9 月，以 7 月最多，有明显的日变化特征，多生成于傍晚至夜间（Feng et al., 2014; Curio et al., 2019; Lin et al., 2020; 赵思玉和范广洲, 2022）。过去基于天气图的统计表明，高原涡的源地主要集中于羌塘、那曲、柴达木及松潘，其中以那曲的发生频率最高（青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 1981），基于再分析资料和客观识别算法识别的高原涡比年鉴中人工识别的高原涡生成位置偏西（张博和李国平, 2017; 黄一航等, 2018; Curio et al., 2019），结合多源观测资料的分析表明，年鉴中 60% 以上的高原涡可追溯至高原西部地区（林志强等, 2023）。高原涡的水平尺度平均约 500 km，最大可达 800 km，发展强盛的高原涡在卫星云图上具有与热带气旋相近的螺旋云系、无云或少云的涡眼及暖心结构（钱正安等, 1984; 徐祥德和陈联寿, 2006; 陈功和李国平, 2010; 宋雯雯和李国平, 2011），李国平和蒋静（2000）通过低涡模型方程求解，从动力学理论上论证了这一特征形成的原因，并发现涡眼中心存在下沉气流，模型概念图可参见 Liu and Li（2007）文中图 5。高原涡是垂直厚度约 2～3 km 的浅薄系统，正涡度一般在 400 hPa 以下（叶笃正和高由禧, 1979; 青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 1981），只有 1/5 左右的高原涡可以发展到 400 hPa（Li et al., 2021b）。生成于高原西部的低涡比东部更为浅薄（钱正安等, 1984; 罗四维等, 1993），初生涡为整层暖性结构，成熟涡为上暖下冷的斜压结构（吕君宁等, 1984），低涡移出高原前垂直速度与散度近似对称分布，而移出高原后，最大上升速度位于低涡中心东南侧 2～4 个经纬度（Li et al., 2020）。

2.2 高原涡的演变特征和形成机理

高原涡的发生、发展和移动，受大尺度环流及高原大气的动力和热力作用的影响。早期的研究归纳了有利于高原涡发生的 500 hPa 环流形势，包括北脊南槽型、西槽东脊型、变形场及平直西风型（青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 1981），且

常与高原上空 100 hPa 反气旋性环流（罗四维和王玉佩, 1984）、200 hPa 辐散气流（Feng et al., 2014）、副热带西风急流（Hunt et al., 2018; Curio et al., 2019）、低层偏南气流辐合（李国平等, 2014）等系统密切配合。此外，高原感热加热（Shen et al., 1986; Wen et al., 2010; 李国平等, 2016; Wu et al., 2018）、潜热释放（Dell´Osso and Chen, 1986; 屠妮妮和何光碧, 2010; 田珊儒等, 2015）和辐射加热（邓中仁等, 2022）的共同作用（Wang, 1987; Zhang F M et al., 2019; 马婷等, 2020）以及较高的海拔高度、陡峭的地形坡度等适宜地形条件（Feng et al., 2014; 陈联寿等, 2000; 何光碧等, 2009; 李国平等, 2014）均有利于高原涡的发展加强。其中，高原感热和潜热加热的相对贡献因季节、区域和高原涡的发展阶段不同而有一定的差异。目前较为一致的观点认为，低涡在生成时主要受地面感热的影响，而东移发展阶段潜热释放的影响更显著（郁淑华和高文良, 2019; Zhou et al., 2022）。

高原涡在高原主体范围内的活动路径受 300 hPa 引导气流或高原切变线的影响，主要向东北、东、东南三个方向移动（郁淑华和高文良, 2006）。其中向东北移动的低涡数量最多，其次是东南方向。平均每年约有 9 个高原涡可以移出高原并得以发展（黄楚惠等, 2015），移出高原后约一半以上向东移动，其次为东北，然后是东南（李国平等, 2014; 林志强, 2015）。移出型的高原涡大多数生成源地为高原东部（郁淑华和高文良, 2006）、具有垂直厚度深（柳草等, 2009; Lin et al., 2021a）和斜压性强（郁淑华, 2008）等特征。高原涡移出高原的有利条件包括：500 hPa 孟加拉湾季风槽位置偏北、副热带高压偏西、蒙古高压脊偏强、高原东部有低值系统活动且伴有冷平流，400 hPa 潜热释放形成的非绝热加热中心，200 hPa 南亚高压偏东、西风急流偏强等（宋敏红和钱正安, 2002; 顾清源等, 2010; 杨颖璨等, 2018）。大尺度环流系统位置与强度的差异会导致高原涡移向有所不同，其中副热带高压强度和南亚高压东伸脊点位置是主导因素（黄楚惠等, 2015; 师锐和何光碧, 2018; 孙芳等, 2022），在伴有较强热带低压活动时，易出现多折向路径（郁淑华等, 2022）。高原涡移出青藏高原后可以在较明显冷空气的影响下加强并持续，冷空气不仅可以增强高原涡的斜压性和对流不稳定，当高空有高位涡下传时，可以引起低涡区域正位涡异常且垂直涡度发展，从而使高原涡东移加强（郁淑华和高文良, 2018）。此外，高原涡东部扰动加热的垂直分布（Feng et al., 2014; Li et al., 2019a）、青藏高原东侧的地形坡度（Sun et al., 2022; 李祥等, 2023）等也影响高原涡的移动速度。

2.3 高原涡产生的降水

高原涡对青藏高原及其下游地区的降水过程均有显著影响（图 2）。夏季青藏高原及其东麓一半以上的暴雨是由高原涡引起的（Lin et al., 2021b, 2021c; Li and Zhang, 2023），在加强的南亚高压、西进的西太平洋副热带高压和北推的季风环流背景下，斜压不对称结构的高原涡在有偏强暖湿气流输送或高原切变线活动的影响下容易造成强降水（Feng et al., 2017; Fu et al., 2019; Lin et al., 2022; Chen L G et al., 2023; Cheng et al., 2023; Xu et al., 2023）。

青藏高原夏季对流性的降水过程存在明显的日变化：对流在 11 时（北京时，下同）至 17～18 时这一时段呈增强趋势，在 17～18 时达到最强，上午的对流活动较少，且降水过程持续时间较短，一般短于 1 h（常祎和郭学良, 2016; 江吉喜和范梅珠, 2002）。青藏高原的降水部分与高原涡相关，对高原涡降水的云-微物理特征研究，主要通过个例的多源观测和数值模拟两种方式进行。第三次青藏高原大气科学试验（TIPEX-III）外场试验结果表明，高原中部底层过冷水与高层霰粒子有利于降水的形成（Zhao et al., 2018）。在高原涡降水的初期以对流云为主，持续时间较短，低涡前部上升运动深厚，对流发展旺盛，雨滴能得到更好增长，雨滴谱分布较宽，小雨滴（<1 mm）占总雨滴数浓度的 87%。低涡降水后期以混合云为主，对流明显减弱，降水稳定且持续时间长，雨滴谱分布较窄，集中于 1～3 mm，小雨滴占总雨滴数比例仍然较大。伴随着云顶升高，0°C 层亮带出现在地面以上 1 km 左右，0°C 层亮带以上的云体以冰相为主（赵平等, 2018; 李筱杨等, 2019; 张浩然等, 2023）。Maussion et al.（2011）表明，微物理参数化方案在青藏高原对流降水区具有较高的敏感性。相对平原而言，青藏高原对流云降水的大雨滴（>3 mm）较多，数值模式中常用的 M-P 雨滴谱分布与 TIPEX-III观测的高原地区粒子谱特征有较大差异，而 Γ 分布能够更好拟合高原地区粒子谱特征（常祎和郭学良, 2016）。此外，高原对流云比平原地区更容易成冰，

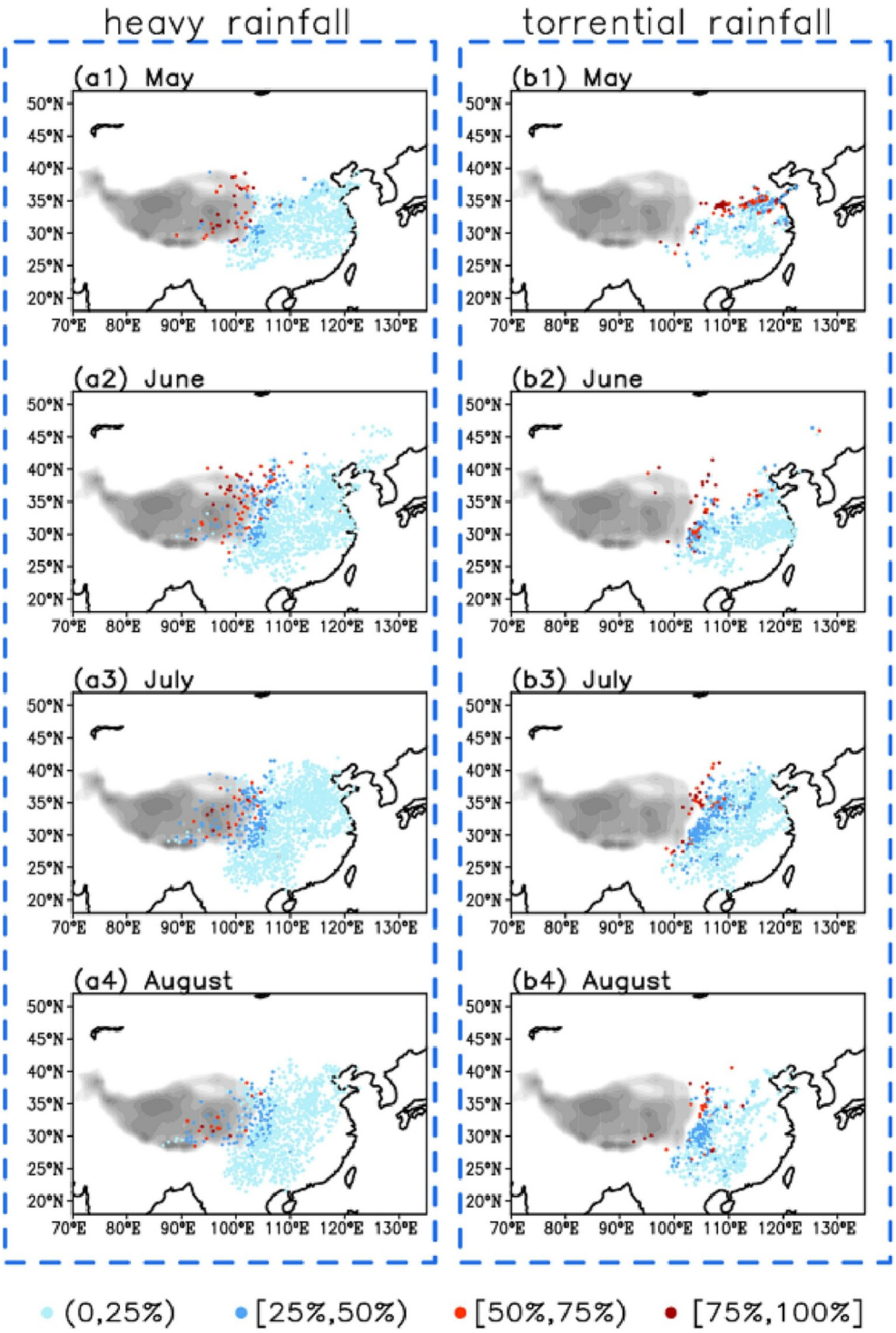

图 2 1998～2018 年（a1，b1）5 月、（a2，b2）6 月、（a3，b3）7 月、（a4，b4）8 月国家站不同等级降水中高原涡降水所占比重分布（阴影为青藏高原地形高度，左列对应大雨，右列对应暴雨）。引自 Li and Zhang（2023）。

Fig. 2 Ratios of Tibetan Plateau vortex (TPV)-associated rain days to total rain days at the corresponding precipitation intensity levels in (a1, b1) May, (a2, b2) June, (a3, b3) July, and (a4, b4) August from 1998 to 2018. Left panel: heavy rainfall; right panel: torrential rainfall. The shadings indicate the topography of TP, where a darker color corresponds to a higher elevation. Cited from Li and Zhang (2023).

因而云内降水粒子以冰相为主（岳治国等, 2018），多例数值试验均证实了冰相粒子在高原涡降水过程中的重要性（阴蜀城等, 2020; 路增鑫和范广洲, 2023）。

高原涡在高原上的降水一般呈纬向带状分布，强度相对较小；移出高原后的高原涡相关降水一般

呈西南—东北方向分布，强度比在高原上的降水增强（Li and Zhang, 2023）。统计表明，平均每年夏季约有 1.3 个高影响高原涡移出高原并在下游大范围地区产生强降水天气（李国平等, 2014），一般高原涡移出高原后会造成中雨以上强度的降水，其中移出高原后活动时间 36 h 以上的，有 60% 会产生暴雨或大暴雨（郁淑华和高文良, 2006; 郁淑华等, 2012）。高原涡输送的高层干冷空气、正涡度平流增强了降雨区的对流不稳定性、辐合，降水一般发生在涡旋生命史的中后期，降水落区为涡旋移动路径的东侧（Huang et al., 2022），降水产生的凝结潜热释放使涡旋进一步加强，形成正反馈机制，在四川盆地、河西走廊及云南等高原临近地区形成暴雨（肖红茹和陈静, 2010; 杨康权等, 2017a, 2017b; 孙芳等, 2022; 黄慧君等, 2023）。

高原涡与其他天气系统的相互耦合作用能增强高原涡的强度和影响范围，造成更强烈的天气。高原涡与高原切变线的协同作用，也称高原低涡切变，可以造成下游强降水的发生（罗四维, 1992; 姚秀萍等, 2014），但二者的关系和相互作用机理仍有待进一步研究（李国平和张万诚, 2019）。当高原涡与西南涡垂直耦合为更强的深厚涡旋后，耦合区上方稳定维持的正涡度柱和次级环流，有利于暴雨增幅（陈忠明等, 2004; Shou et al., 2019; 刘晓冉等, 2020; Zhang Y C et al., 2021; Dong et al., 2022; Chen Y et al., 2023）。

高原涡除了自身的影响，在其减弱消散后残留的正涡度系统仍然可以继续东移，对黄河流域、长江和淮河流域（Yasunari and Miwa, 2006; 黄楚惠等, 2015; Li et al., 2019b; 马婷等, 2020; Fu et al., 2022），乃至华北和日本（Li et al., 2023）等地的强降水天气造成影响。比如 1998 年、2020 年等破纪录的梅雨期暴雨过程，均受到东移高原涡与西风槽结合形成的低涡切变线的活动影响（杨克明等, 2001; Li et al., 2021a; Fu et al., 2022）。即便高原涡未移出高原，也可以通过正位涡水平平流增强对流层垂直运动，在非绝热加热和充沛水汽输送的条件下，同样可以对我国长江中下游的暴雨产生影响（Li et al., 2020; Zhao et al., 2021; Ma T T et al., 2022）。

3 西南低涡

西南低涡（简称西南涡）是西南地区至长江中下游地区影响强降水发生的重要天气系统之一，西南涡也是中国十分复杂的典型暴雨系统（卢敬华, 1986; 陶诗言等, 1980）。西南涡的定义是在 700 hPa 或 750 hPa 上有气旋性环流或闭合等高线，水平尺度约 300～500 km（陶诗言, 1980）。西南涡涡源（指低涡初生时中心相对集中区）及其形成机制是最重要的基础问题，此外，高原涡对西南涡的影响机理以及西南涡对暴雨的影响机理也是研究热点。

3.1 西南涡的识别和结构特征

近年来，很多学者对西南涡的发生源地、结构和活动特征等方面进行了深入的研究（卢萍等, 2016; 马勋丹等, 2018; 慕丹和李跃清, 2018）。对于西南涡的识别也有主观和客观识别两种方法，比较权威的主观识别是《西南低涡年鉴》，年鉴中使用每日天气图资料，人工识别西南涡及其中心位置和强度等，但由于西南涡源地附近地形复杂，气象探空观测站稀少且分布不均，人工识别的西南涡往往具有一定的主观性。随着高分辨再分析资料的发展，国内已有学者使基于 700 hPa 位势高度或风场进行西南涡的客观识别（高正旭等, 2009; 王金虎等, 2015; 王静等, 2019）。西南涡客观识别方法的发展为其统计特征的研究奠定了基础。

对西南涡涡源的研究是针对该系统研究的重要问题之一，不同的研究结论有差异，有些研究对涡源分类较细，但概括起来主要为两个地区：青藏高原东南缘（包括九龙和小金）和四川盆地（包括盆地西南部、东北部和西北部）（卢敬华, 1986; 陶诗言等, 1980; 陈忠明等, 2004; 陈启智等, 2007）。罗清等（2018）则利用天气图资料和《西南低涡年鉴》统计了 2012～2016 年西南涡，发现源地为九龙的西南涡出现的次数最多，源于盆地的西南涡次之，而起源于小金的西南涡最少。同时，该研究也发现西南涡在春季与夏初生成的最多，其中有三分之一的西南涡能够移出涡源区。近年来随着再分析资料时空分辨率的提高和年限的增加，利用再分析资料也对西南涡开展了大量的统计工作（Fu et al., 2014, 2015a; 李超等, 2015; Feng et al., 2016; 叶瑶和李国平, 2016; 李黎等, 2017; 范娇和陈科艺, 2019; 郁淑华等, 2021）。Fu et al.（2014）识别和统计了 2000～2013 年夏季的 578 例西南涡（图 3），其发生频数在 6 月份达到最高，主要发生在凌晨（02～08 时，北京时），大部分西南涡的生命史都小于 24 h，并且大多数的西南涡是准静止。李超等（2015）统计分析了 1983～2012 年全年的发生在

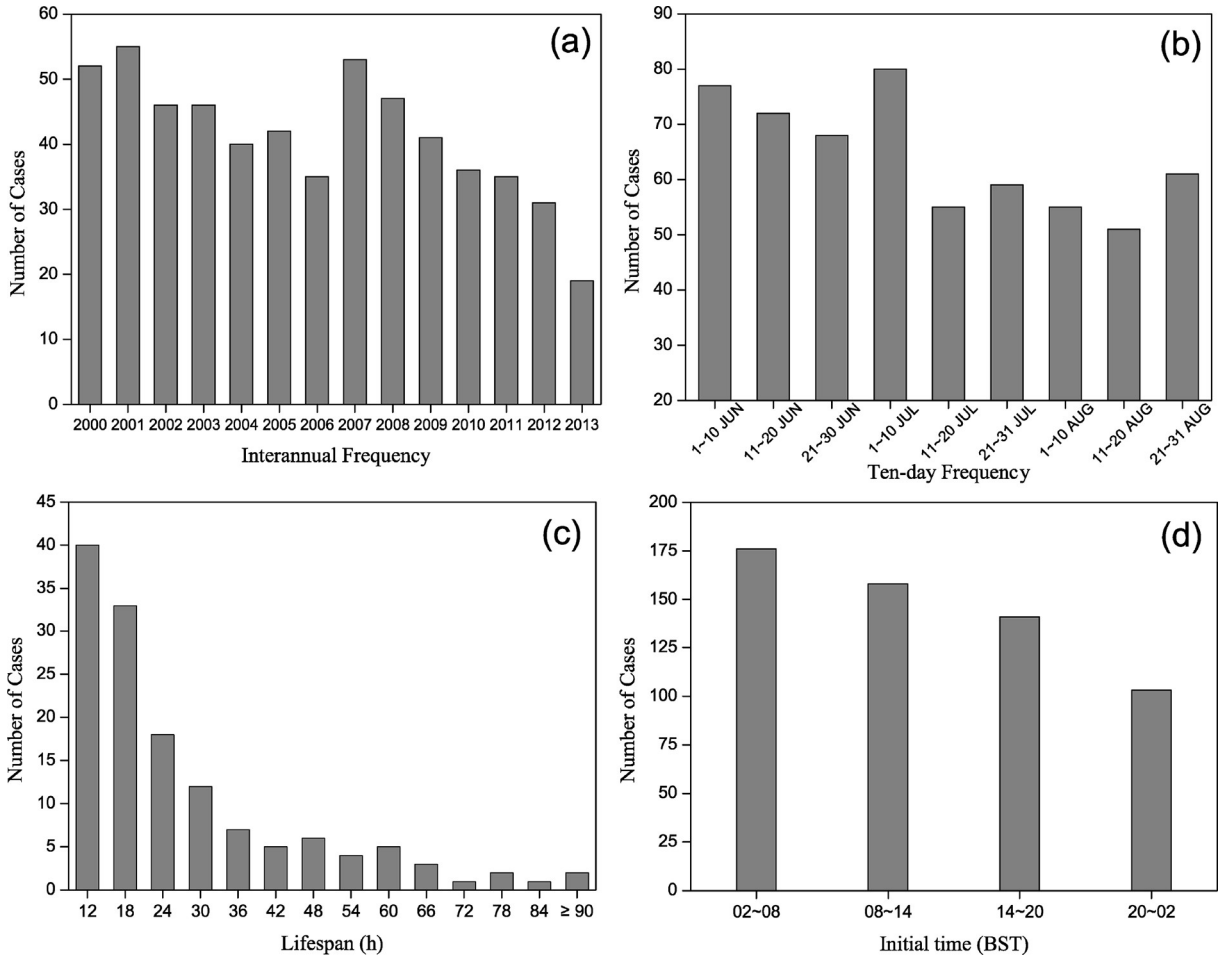

图 3 2000～2013 年西南涡的（a）年发生频次、（b）十天发生的频次、（c）生命史和（d）日变化。引自 Fu et al.（2014）。

Fig. 3 (a) The interannual frequency, (b) 10-day frequency, (c) lifespan distribution, and (d) diurnal cycle of SWV initiation (Beijing time). Cited from Fu et al. (2014).

四川盆地的低涡天气过程及其降水特征，发现其主要生成于盆地的西南部和东北部，西南型在 3～10 月具有明显的夜发性特点，东北型在 5～9 月夜晚发生的概率较大，并且西南涡生命史与对流的发展程度具有相关性。也有研究根据西南涡的移动特征将西南涡分为原地型和移动型，移动型的路径又进一步分为偏东路径，其中偏东型西南低涡发生频次最高，占移动型低涡总数的 48.5%; 东北型次之，占 35.3%; 东南型最少，占 16.2%（范娇和陈科艺, 2019）。研究表明，少部分西南涡对流向上发展成为深厚型涡旋，这些发展起来的深厚型西南涡只有一小部分会移出盆地，总共统计到的 1382 次低涡过程，有 57 次低涡能够移出统计区，所占比例为 4.13%（李超等, 2015）。

前人的很多研究已经揭示了西南涡在不同发展阶段的垂直结构特征，低涡形成初期一般在 700 hPa，表现为暖性气旋环流，而对流层中高层（500～300 hPa）常常出现高压区或有高压脊维持；西南涡发展至成熟阶段后，则为一个深厚的暖湿低压系统，正涡度可向上伸展到 100 hPa 以上，涡区内动量、层结、垂直运动等呈非对称分布。700 hPa 正涡度中心南侧由于低层辐合、高层辐散抽吸的共同作用造成上升运动更显著；而减弱阶段的西南涡又演变为一个斜压浅薄系统，对流层低层低涡为冷性结构（陶诗言, 1980; 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 1977; 叶笃正等, 1992; 陈忠明等, 2007; 翟丹华等, 2014）。Zhou et al. （2017）发现了一个西南涡中包含有两个更小尺度涡旋的现象。相比单涡，吴珍珍等（2018）发现的双涡更复杂，双涡产生的强降水更宽广，双涡并非维持暖湿结构，一个低涡初期为干冷低涡，逐渐转变为暖湿特征，而另外一个低涡一直维持暖湿结构特征；拉伸和倾斜项

在“C1”的发展阶段起着重要作用，而涡度的拉伸和垂直平流是“C2”形成和发展阶段的主要贡献者（Wu et al., 2022）。曾波等（2016, 2017）将川渝地区西南涡划分为有暴雨发生的西南涡和无暴雨发生的西南涡两类，指出两类西南涡形成前，有暴雨发生的西南涡的强度，水平尺度相对较大，且冷暖空气的交汇和水汽输送更强。涡旋中心附近为上升运动的大值中心，涡旋中心及其西侧和南侧为中性或不稳定层结。根据西南涡发生时是否发生降水和是否有地面低压的特征，将西南涡划分为无降水无低压型，只有降水型，只有地面低压型和既有降水又有地面低压型（张敬萍等, 2015）。基于此统计结果，Zhang Y C et al.（2019）挑选 10 个生命史大于 12 h 的典型西南涡个例揭示出西南涡的形成时的涡度分布有明显的空间不均匀性，由于水平辐合减小和与对流有关的倾斜项作用，西南涡的东部象限有利于气旋性涡度的增加，而其西部象限，与地形有关的倾斜项和水平输送则造成了气旋性涡度的减少（图 4）。

3.2　西南涡的形成机理以及对暴雨的影响

大量个例的统计研究发现西南涡多发年，低层流场在西南涡生成的关键区表现为西南风旺盛并且辐合异常强，气旋性切变加大，低纬季风环流增强，导致大量正角动量输送至关键区，从而有利于西南涡生成（叶瑶和李国平, 2016）。西南涡在盆地中所产生的暴雨往往有三个主要落区，分别位于盆地西北部的广元，绵阳一带线（西北型），盆地东北部的巴中、达州一带（东北型），盆地西南部的雅安、乐山、眉山附近（西南型）。降水落区的分布主要受四川盆地周围的地形特征影响，西北型和西南型主要是受青藏高原大地形的阻挡抬升，而东北型则是由于大巴山脉的抬升作用（卢萍和杨康权, 2017）。其降水的日变化也具有明显的区域性特性（李超等, 2015; Zhang Y C et al., 2019）。四川盆地降水在傍晚至凌晨开始活跃，并且在午夜达到峰值（Bao et al., 2011; Zhang et al., 2017）。在地形热力作用下，对流性降水主要在午后达到峰值，但四川盆地地区的少数对流降水峰值出现在午后至清晨；而层状云降水峰值主要出现在夜间至清晨（Yu et al., 2010; Li et al., 2011）。西南涡暴雨过程中短时强降水的累计频次和累计雨量均呈单峰型夜雨特征，短时强降水事件频次和降水的空间分布特征为盆地西部频次较高，而北部和东部地区频次相对较低，短时强降水的降水量大值也主要分布在盆地西部（图 5，李强等, 2020）。并且不同类型西南低涡造成的降水分布特征也各不相同，西南型的降水中心从 5 月到 10 月由盆地东北部向西南部移动，之后再由盆地西南部向东北部折回，东北型最大降水中心会稳定维持在盆地的东北部达州地区一带（李超等, 2015）。

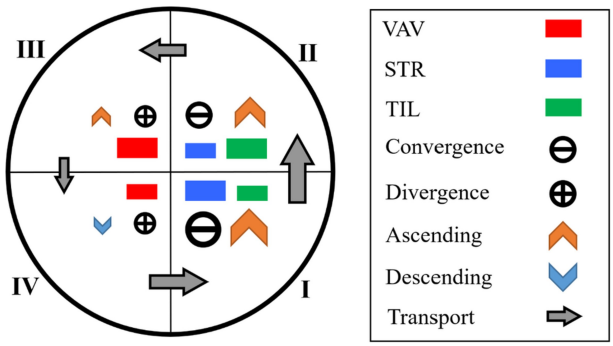

图 4　西南涡形成时影响气旋性涡度增加的关键特征和主要因子的概念图。灰色箭头代表沿西南涡边界的气旋性涡度输送，符号越大代表强度越强。引自 Zhang Y C et al.（2019）。

Fig. 4　Schematic of key features and dominant factors during SWV formation, where the gray shaded arrows denote the transport of cyclonic vorticity across the boundary lines of the SWV. A larger sign means a higher intensity. Cited from Zhang Y C et al. (2019).

西南涡与其他系统配合可能出现极端暴雨和持续性暴雨。肖递祥等（2017）对筛选出的四川盆地 23 次极端暴雨个例分析表明，极端暴雨主要出现在大尺度环流为“东高西低”型和“两高切变”型形势下，其中“东高西低”型中引发暴雨的主要系统是西南涡和高原涡，而“两高切变”型暴雨主要触发系统是切变线。四川盆地的持续性暴雨分为西部型持续性暴雨和东部型持续性暴雨，其中西南涡是造成暴雨的主要系统，涡度收支的诊断结果表明低层辐合是西南涡发展和维持的主要原因（Zhang Y C et al., 2021）。通过对大量典型个例的深入研究发现暴雨落区通常位于西南涡中心附近（以东侧为主），雨带分布与低涡移动路径相一致（卢萍等, 2014）。西南涡中产生的中尺度对流系统（MCS）是直接造成暴雨的重要系统，西南涡和其中发生的 MCS 存在明显的相互作用过程。在西南涡发展过程中，中低层的上升气流和正涡度配合利于热量和水汽垂直输送，高层的辐散进一步促使 MCS 的发展。水平涡度平流和涡度垂直输送项的配置影响上升气流和涡旋系统的发展，MCS 对

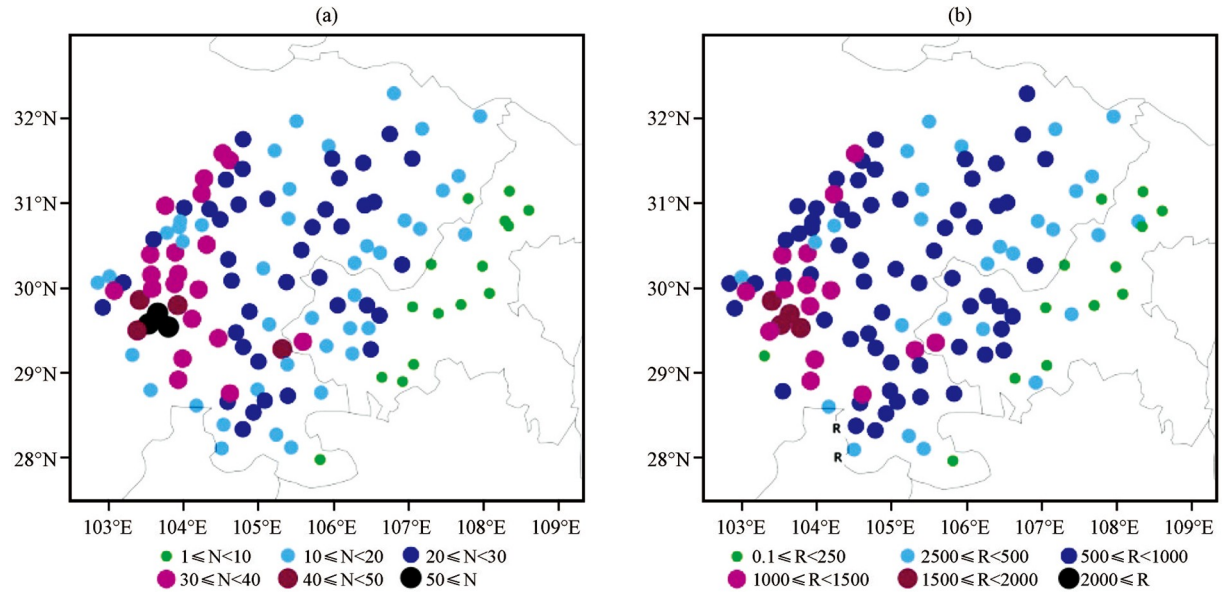

图 5 四川盆地西南涡（a）短时强降水累计频次（单位：次）和（b）短时强降水（≥20 mm h^{-1}）累计总量（单位：mm）分布。引自李强等（2020）。

Fig. 5 Spatial distribution of (a) frequency (units: times) and (b) total amount (units: mm) of short-duration heavy rainfall (≥20 mm h^{-1}) for southwest vortices in the Sichuan Basin. Cited from Li et al. (2020).

西南涡的移动有一定的引导作用（胡祖恒等, 2014）。西南涡发生之前的降水使得降水区上空的非绝热加热率增加，能够促进西南涡的生成; 强盛期的西南涡伴随有次级环流，次级环流既促进了低涡的进一步发展，又有利于触发涡心东侧的对流，有利于强降水的发生（卢萍等, 2014; 周长艳等, 2015; 董元昌等, 2017; 杨康权等, 2017a, 2017b; Chen et al., 2018）。也有研究表明，在副热带高压、中纬度短波槽、东北亚强冷涡的合适配置下，以及中低层来自孟加拉湾和南海的暖湿气流的不断输送等条件，西南涡还会影响华南持续性强降水（卢萍等, 2014）。

3.3 高原涡对西南涡的影响机理

已有研究基于观测事实分析了高原涡与西南涡共存活动的统计特征，两涡共同活动时段集中在6～7 月，多数情况下在同一过程中高原涡与西南涡移动方向逐渐接近或方向一致（刘新超和陈永仁, 2014; 陈贝和高文良, 2015）。高原涡与西南涡结伴而行有三种形式：高原涡诱发西南涡; 高原涡与西南涡耦合；同一天气系统下两涡，其中以高原涡诱发西南涡的形式居多。两涡伴行中西南涡的生成主要是通过 500 hPa 高位涡空气伸向西南涡上空，造成西南涡上空斜压不稳定增强，从而西南涡加强；此外，200 hPa 上西南风急流通过高空高位涡下传来影响高原涡与西南涡的耦合或者加强西南涡（郁淑华和高文良, 2017）。东亚环流经向度减弱，处在切变流场中的持续高原涡的环流东南部易诱发西南涡（周长艳等, 2008）。高原涡移出高原伴随正涡度向下伸展，与对流层低层四川盆地内气流的气旋性切变产生的正涡度重叠，使得盆地内气旋性涡度加强从而诱发西南涡生成（陈永仁等, 2010）。此外，西南涡上空正涡度平流随高度增加所强迫的上升作用也是高原涡诱发西南涡的一个重要因素（高文良和郁淑华, 2018）。高原涡与西南涡耦合有利于西南涡的发展和维持，对流层中层的正涡度平流、低层的辐合上升是耦合后西南涡发展的重要机制（何光碧等, 2014）。

4 大别山涡

长江流域是我国的三大雨区之一，长期以来受到暴雨洪涝灾害的严重影响（陶诗言, 1980; 赵思雄等, 2004）。该地区的降水系统种类多样，其中，中尺度涡旋所造成暴雨的频次与强度均是名列前茅的。大别山涡是我国长江流域中下游地区高频发生的一类中尺度涡旋（张敬萍等, 2015），它以初生于大别山及其周边地区（27°～34°N，112°～118°E）而命名。大别山涡以流场上的闭合中心与气旋式涡度中心为标准而定义，其中的大部分在早期稀疏的

气象探空观测中较难被识别。大别山涡中部分斜压性较强的成员常常可以在对流层低层的等高面上出现闭合低压中心且影响范围较大，这部分大别山涡常被中国的气象学者称为江淮气旋（陶诗言, 1980; 胡伯威和潘鄂芬, 1996），因其致灾性较强，它一直以来都是气象预报关注的重点之一。近年来，随着高质量、高时空分辨率的观测及再分析资料的广泛应用，大别山涡的研究逐渐增多，在其统计特征、三维结构、形成机制与演变机理等多个方面均取得了重要进展。

4.1 大别山涡的识别和时空分布特征

国内外的气象学者对长江流域的中尺度涡旋做了一系列的统计工作，谷文龙（2008）和杨引明等（2010）对长江中下游地区的中尺度涡旋进行了识别与统计研究，发现此类涡旋的致灾性强（>70%的涡旋触发了暴雨过程），其源地主要位于大别山及其周边地区的高能、高湿大气环境中，它们的水平尺度多为 100～400 km，垂直方向上主要位于 1000～700 hPa，此类涡旋主要为东移和东北移两类。王薇等（2011）对夏季我国东部的中尺度对流涡旋（Mesoscale convective vortex; MCV）进行了统计研究，发现，这些 MCV 主要是属于 α 中到 β 中尺度系统，他们主要位于对流层低层，多见于 850 hPa，其致灾性较强，常与强降水相联系。沈杭锋等（2013）基于 2006～2009 年高时空分辨率的日本再分析资料对梅汛期（5～7 月）长江流域的中尺度涡旋进行了统计研究，发现其中约有 70% 的涡旋可以引发暴雨过程，在这些产生暴雨的涡旋中，约有 80% 受到低空急流的影响，水汽与辐合条件均较优。张敬萍等（2015）对大别山涡提出了明确的定义，并利用 14 个夏季（2000～2013 年 6～8 月）的统计研究揭示了大别山涡的主要特征，并将之与西南低涡的主要特征进行了对比。他们研究发现，大别山涡水平尺度比西南涡略大，垂直厚度与西南涡相当，但位于更低的垂直层次上（850 hPa 是此类涡旋的中心层），大别山涡的发生频数与西南涡相当，但就引发暴雨的比例与强度而言，其均超过了西南涡。大多数的大别山涡为短生命史涡旋，但平均生命史超过了西南涡。大别山涡的移动性显著强于西南涡，偏东与偏东北路径是大别山涡的主要移动路径。董秋实（2017）对暖季长江中下游地区的中尺度涡旋进行了统计，结果表明，在 1996～2015 年间，长江中下游地区的中尺度涡旋活动频繁，其中 5～7 月的发生频数相当，而 8 月份则显著偏少。就日变化而言，凌晨 02:00 时为此类中尺度涡旋的高发期，午后 14:00 时则为涡旋生成的第二个峰值时段。

4.2 大别山涡的结构特征与降水

关于大别山涡旋的三维结构，早期的研究多集中在其水平尺度（谷文龙, 2008; 杨引明等, 2010），与垂直伸展（王薇等, 2011），发现此类涡旋的水平尺度多在 400 km 以下，而中心层次位于对流层低层。在高分辨率再分析资料出现之后，大别山涡三维结构的研究逐渐深入。Fu et al.（2015b）对一次典型的大别山涡进行了数值模拟与定量诊断，发现大别山涡的结构特征与涡旋的演变和降水过程密切相关。涡旋水平尺寸的增长有利于其维持，涡旋的长轴接近于东西方向时，其伴随的对流和降水趋于更强。张敬萍等（2015）的统计结果表明，绝大多数的大别山低涡是移动性的，对于长生命史的大别山低涡主要是东北路径和偏东路径，大别山涡垂直伸展较为浅薄，斜压性偏弱，多表现为流场上的闭合中心，而在等压面上形成闭合低压中心的个例比例不高，相比于一般的中尺度涡旋（如西南涡），大别山涡的水平尺度更大。Fu et al.（2016）利用涡旋生成前有无地面低压中心配合与生成前有无明显降水发生，将大别山涡分成了 4 个主要的类别，针对每个具体的类别，分别进行了拉格朗日合成，从共性上揭示了不同类别大别山涡的动力与热力结构，并通过涡旋的垂直识别算法确定了大别山涡的平均中心层次位于 850 hPa，但对极端个例而言，涡旋的顶层可以伸展至对流层顶，而涡旋的底层可以接地。大别山涡多呈现出较显著的偏心率，有效半径在 280～400 km 之间（图 6），涡旋移向的前方与右侧是发展的有利象限，也是暴雨发生概率最高的地区。

涡旋是长江流域的主要降水系统之一。Fu et al.（2016）所分的 4 类大别山涡中，生成前有显著降水但无地面低压中心型和生成前无显著降水但有地面低压中心型的最大 6 h 降水量显著高于其他两种类型。虽然针对涡旋本身的降水研究工作较少，但是有研究针对长江流域二级地形 MCS 的降水进行了统计，而部分 MCS 在东移后产生了中尺度涡旋，从而引发了较强的降水（Zhang et al., 2018; 杨如意等, 2020; Zhang et al., 2022）。二级地形上触发的 MCS 可分为四类（Yang et al., 2019），第 1

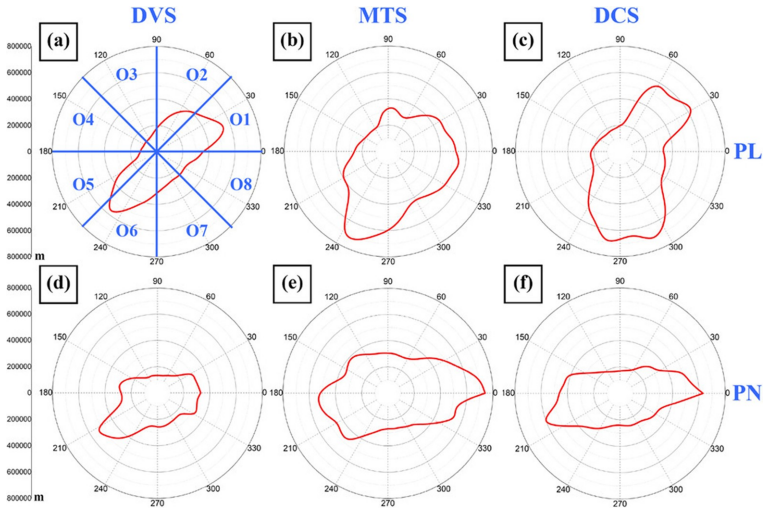

图 6 不同阶段（a–c）PL 型（生成前有降水与地面低压中心）与（d–f）PN 型（生成前仅有降水）大别山涡各自的外围廓线：（a，c）发展阶段（DVS）；（b，e）成熟阶段（MTS）；（c，f）减弱阶段（DCS）。图（a）的蓝线给出了涡旋的 8 个象限。引自 Fu et al.（2016）。

Fig. 6 (a–c) Outlines (red solid lines) for the precipitation and surface low (PL) types of DBV during the developing stage (DVS), maintaining stage (MTS), and decaying stage (DCS), where the blue lines in (a) mark the eight octants (O1–O8) for analysis. (d–f) Same as (a–c), but for the precipitation-only (PN)-type DBV. Cited from Fu et al. (2016).

类保持准静止，降水贡献率最小；第 2 类向东北方向移动，引发的降水影响河南至山东半岛以及华北地区；第 3 类是东移长生命史 MCS，对流发展最旺盛，对长江中下游地区 5～8 月的降水量的贡献率最大，其生命史中伴随涡旋的概率最高；第 4 类短生命史东移个例，对长江中游地区的降水贡献率较小。涡旋和对流过程可能产生各种强度的降水，而降水过程与云的微物理过程密切相关。研究表明长江中下游地区的层状云雨滴大小随着降雨率的增加而增加，层状云降水小粒径平均数浓度高而中、大粒径的平均数浓度低，而对流云降水各粒径平均数浓度高且粒径大，这与其内部活跃的冰相过程和暖云层中的雨滴碰并、碰撞—破碎微物理过程相关（李山山等, 2023; Fu Z et al., 2020）。

4.3 大别山涡的形成机制与演变机理

Fu et al.（2013）针对典型个例的研究发现大别山涡主要是“由上而下”发展的，低空急流所带来的强辐合是大别山涡形成的最有利因子，旋转风的动能输送是大别山涡发展的最重要能量来源。张敬萍等（2015）对 14 个夏季大别山涡的合成研究表明，大别山涡形成的有利背景条件主要包括：强盛南亚高压东伸所得来的高空强辐散，对流层中层西风带短波槽槽前的暖平流与正涡度平流，以及对流层低层低空急流带来的水汽输送与强辐合。Fu et al.（2015b）对一次典型大别山涡的研究结果表明，水平强辐合所导致的垂直伸展，背景场的涡度输送，以及涡旋自身的移动是本次大别山涡发展的主导因素；辐散所导致的垂直收缩，与背景场和扰动流的涡度输送共同导致了大别山涡的消亡。大别山涡与其背景场之间存在显著的相互作用，背景场通过降尺度能量级串来影响大别山涡，大别山涡通过升尺度能量级串来对其背景场进行反馈。大别山涡从其背景场中获得能量时能够发展与维持，反之，其快速消亡。基于 14 个夏季的统计结果，Fu et al.（2016）的研究发现，水平辐合所带来的气旋式涡度制造是大别山涡发展与维持的最主导因子（图 7），而倾斜项所制造的反气旋式涡度是大别山涡消亡的主要原因。大别山涡生命史中伴随着显著的能量转换过程，其中长生命史大别山涡具有较强的斜压性，斜压能量转换是此类涡旋发展与维持的主要能量来源。与之形成鲜明对比的是，正压能量转换起初有利于大别山涡的发展和维持，后来又导致了旋涡的消亡。基于多年的统计结果，利用中尺度数值模式开展了半理想数值试验（Fu et al., 2017），发现大别山地区的局地地形对于大别山涡的形成影响不大，大别山涡的形成与长江流域对流层低层的东西向横槽以及该槽南部低空急流的活动密切相关。此外，还有研究发现二级地形以东的长江中下游地区中尺

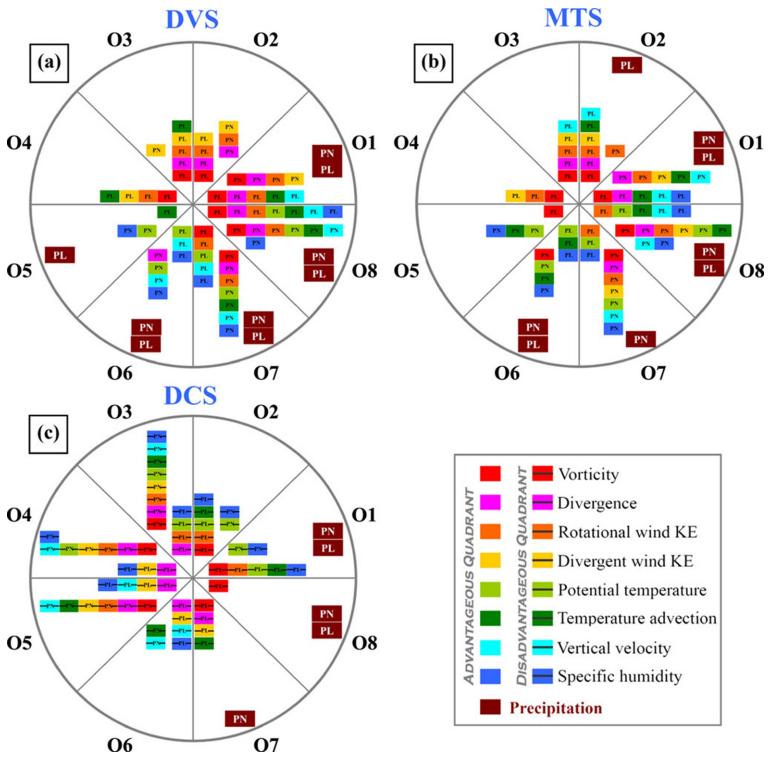

图 7　合成的 PL 型（生成前有降水与地面低压中心）与 PN 型（生成前仅有降水）大别山涡发展（DVS）、维持（MTS）与消亡（DCS）的基于涡度和动能收支的物理机理。引自 Fu et al.（2016）。

Fig. 7　Physical mechanism of composite precipitation and surface low (PL) and precipitation-only (PN) Dabie vortices with respect to the vorticity and kinetic energy budgets. Cited from Fu et al. (2016).

度对流涡旋（部分可发展为大别山涡）和对流存在一定的相互关系（Zhang et al., 2018, 2022）。二级地形东部对流东移过程中合并增强，加强了对流层低层气旋性的风场扰动，形成中尺度涡旋，对流和涡旋共同东移发展后，与其东侧不断增强的涡旋中心合并，中尺度涡旋发展到成熟阶段，其南部低空急流的辐合区产生较强降水（图 8）。

5　东北冷涡

东北冷涡具有较强的地域特色，是主要活跃于我国东北地区的深厚天气系统。因在冷涡背景下夏季暴雨、强对流频发，致灾严重，东北冷涡一直是东北地区灾害天气研究的重点天气系统。在东北冷涡环流中，风场、热力场、地形的非均一性，产生局地切变辐合上升，易引发暴雨；冷涡背景下的位涡下传、动量下传、强斜压性，可诱发地面气旋和中小尺度涡发展、甚至飑线和龙卷，产生雷暴大风、短时强降水、冰雹等强对流天气。目前，冷涡背景下的暴雨和强对流的触发，仍然是业务预报中的重要挑战。近年来，一些学者围绕东北冷涡这一东亚发生频率最高的切断低压，从冷涡本身的定义、客观识别、结构特征等方面展开研究；另外，在东北冷涡暴雨和强对流天气的特征和成因方面，也取得一些进展，依次回顾如下。

5.1　东北冷涡的定义和结构特征

对东北冷涡的研究，可追溯到 20 世纪 50 年代。最初是在谢义炳（1949）对欧美切断低压研究的基础上，由归佩兰和王作述（1959）对“一个东北低压的机制分析”开始的，文中指出该 500 hPa 的东北低压具备冷堆、高空孤立冷涡特征，引发了大风和降水天气。后续的研究对东北冷涡的定义逐渐明确，刘成歧等（1976）分别根据 700 hPa、500 hPa 闭合等高线、温度场等，定义东北冷涡为中国东北及附近地区具有一定强度的冷性高空深厚气旋性涡旋系统。目前业务中常用孙力等（1994）对东北冷涡的定义：在 500 hPa 天气图上（35°～60°N，115°～145°E）范围内出现闭合等高线，并配合有冷中心或明显冷槽，生命史至少为 3 天的低压环流系统。东北冷涡的水平尺度在 500～1000 km，5～8 月较活跃，可占总天数的近 1/3（孙力等, 1994; Hu et al.,

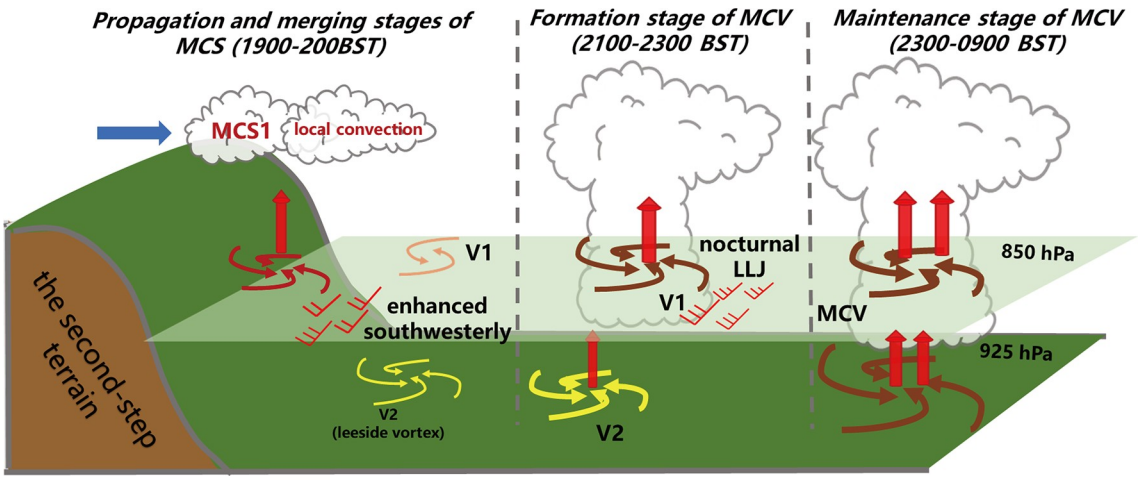

图 8 二级地形上向东传播的 MCS 对下游地区中尺度对流涡旋（MCV）演变影响的概念模型，包括 MCS1 从第二阶地势向东传播，与局部对流系统合并，MCV 的形成和维持阶段。引自 Zhang et al.（2022）。

Fig. 8 Conceptual model for analyzing the impact of an eastward-propagating MCS over the second-step terrain on the evolution of mesoscale convective vortex (MCV) over the downstream regions, including the following stages: eastward propagation of MCS1 out of the second-step terrain, merger with the local convection system, and formation and maintenance of MCV. Cited from Zhang et al. (2022).

2010; Fu and Sun, 2012; 谢作威和布和朝鲁, 2012）。我国学者编写的《东北暴雨》、《黑龙江省暴雨之研究》、《东北冷涡暴雨》等著作（郑秀雅等, 1992; 白人海和金瑜, 1992; 王东海, 2022），归纳总结了东北冷涡的气候学特征、天气学结构及演变规律、动力学机制等成果。

东北冷涡的识别方法，也有主观和客观识别两种。早期的研究多采用主观方法，利用逐日天气形势图、卫星云图等，根据冷涡的观测特征，人为识别与判定，虽直观但费时费力。后来许多学者开发了东北冷涡的客观识别算法（Hu et al., 2010; 王东海, 2022; Huang et al., 2023），即依据东北冷涡的天气学定义（郑秀雅等, 1992; 孙力等, 1994），在 500 hPa 高度上具有闭合等压线、冷心等特征，根据环流和温度场依据约束条件和参数来判定（张丰启, 2000; 王婉昭等, 2017; 蒋大凯等, 2012）。比如：谢作威和布和朝鲁（2012）对 500 hPa 逐日高度场滤波去掉 8 天以下的扰动，研究冷涡低频活动特征；王承伟等（2012）借鉴 Nieto et al.（2005）的方法，利用代表温度梯度变化的暖锋参数等约束条件对东北冷涡进行客观识别。以上客观识别方法，识别结果与主观识别结果基本一致，可应用于东北冷涡的研究。在客观识别的基础上，对东北冷涡发生频次、生命史、移动路径等开展了大量研究（孙力等, 2002; 谢作威和布和朝鲁, 2012; Fu and Sun, 2012; 傅慎明等, 2015; 刘刚等, 2015; Xie and Bueh, 2015）：大部分东北冷涡生命周期少于一周，夏季和冬季维持时间相对较长，发生频次在夏季最多，有一定的年际变化但没有显著的长期趋势；冷涡在东北平原北部和西北太平洋沿岸高发，且高发区随季节有纬向振荡，即夏季向陆地延伸冬季退回到太平洋沿岸；东北冷涡一般向东或东南移动，最终入海减弱衰亡，暖季的移动路径相对复杂。基于 1979～2018 年夏季（5～8 月）的 516 个东北冷涡过程的统计（黄璇和李栋梁, 2020），以 45°N 线为 X 轴，125°E 线为 Y 轴将冷涡频发的（35°～60°N，110°～145°E）区划分为 4 个象限。发现夏季东北冷涡生成位置以第 2 象限（西北部）最多，第 4 象限（东南部）最少。冷涡以向东移动为主，第 2、3、4 象限向东移动的冷涡均超过了 70%，而第 1 象限只有 31.8% 的冷涡向东移动，其向东南方向移动的冷涡却超过了 35%。近年来，根据东北冷涡的生成源地、移动方向和速度等特征参数，采用机器学习方法（Fang et al., 2021; Lin et al., 2023），将其活动路径分类。比如，蒙古高原东部生成东移型（东移型）、勒拿（Lena）河上游生成远距离东南移动型、贝加尔湖附近生成缓慢东移型、以及西伯利亚东部生成缓慢南移型。随着东北冷涡移动，所到之处易给当地带来暴雨或强对流等灾害性天气。

东北冷涡是阻塞系统的切断低压，具有切断低压的一般特征。东北冷涡多形成于贝加尔湖东部，欧亚大陆上空盛行阻塞型环流、东亚急流强度的变

化、斜压能量转换是东北冷涡形成和维持的重要原因（郑秀雅等, 1992; 谢作威和布和朝鲁, 2012; Fu and Sun, 2012; 傅慎明等, 2015）。钟水新（2011）总结了东北冷涡的结构特征（图 9）：具有上暖下冷结构，对流层中高层形成高位涡，并向低层伸展；在冷涡成熟期，冷涡中心及西侧有干冷空气侵入，冷涡东侧为来自低纬的西南或偏东暖湿气流且为上升运动区，有利于强对流在冷涡的东侧发生。另外，冷涡的高位涡下传及下沉增温效应，可加强地面大风，冷涡的强斜压性则有利于水平涡管生成，其倾斜抬升和快速伸展，则易激发垂直涡管的快速发展，为飑线和龙卷等强对流系统的形成提供有利条件（Meng et al., 2018; Xue et al., 2016; Sun et al., 2019; Shu et al., 2022）。

5.2　东北冷涡暴雨的特征与成因

作为我国东北最具地域特色的暴雨类型，夏季东北冷涡暴雨频发，约占夏季总降水量的四分之一

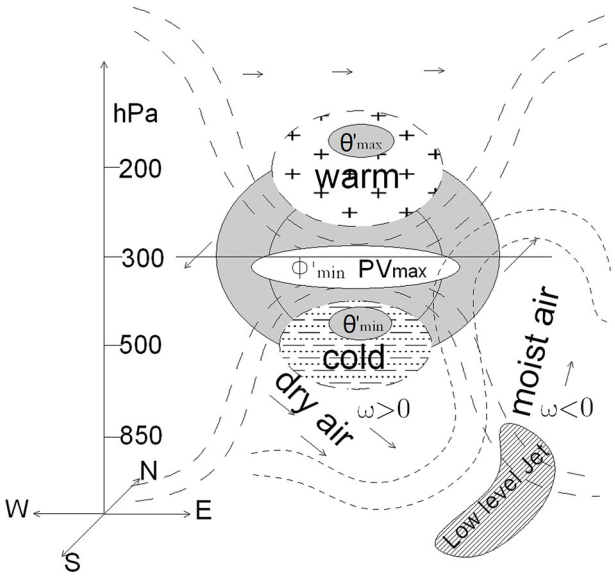

图 9　东北冷涡垂直结构示意图。实线为负位势高度距平，代表冷涡中心；长虚线为温度距平，代表扰动位温，上下分别为暖、冷中心；西北侧为干冷下沉空气，东南侧为暖湿上升大气。细虚线为相对湿度，斜线阴影为低空急流。引自钟水新（2011）。

Fig. 9　Schematic of the vertical structure of the Northeast cold vortex. The center of the Northeast cold vortex is represented by a negative potential height anomaly (solid line). The temperature anomaly (temperature perturbation) is denoted by the long dashed line, configured with the upper-level warm and lower-level cold centers. The dry-cold sinking airflow/warm-moist airflow is located at the northwest/southeast side of the vortex. The relative humidity and low-level jet are denoted by the thin dotted line and slanted shadow, respectively. Cited from Zhong (2011).

（Hu et al., 2010）。东北冷涡常常激发暴雨过程，其强度不亚于低纬地区，《东北冷涡暴雨》（王东海, 2022）一书中，归纳总结了东北冷涡暴雨的天气形势、发展规律和预报方法。

对于东北冷涡暴雨的成因，目前研究主要集中在水汽输送、冷涡引起的对流活动、降水在冷涡中的分布特征等方面（王宗敏等, 2015; 张弛等, 2019; Brooks et al., 2019; Tang et al., 2021; Chen et al., 2022）。东北冷涡给暴雨发生提供有利的不稳定和水汽输送条件（钟水新等, 2011; 邓涤菲等, 2012; 张桂莲等, 2018; Ding and Gao, 2021; 迟静等, 2021），且其中向下伸展的干侵入气流与暖湿气流相遇，会激发出强降水（王东海等, 2007, 2009; Yang et al., 2007; Yang and Wang, 2009; Wang and Yang, 2010; 吴迪等, 2010; 高守亭等, 2018a）。魏铁鑫等（2015）的统计研究表明东北冷涡暴雨事件的水汽源地较多，分别为西太平洋及相邻海域、孟加拉湾—南海海域、欧亚大陆（尤其是贝加尔湖附近）和东北地区。其中西太平洋及相邻海域的水汽贡献率最大，东北本地的贡献最小。马梁臣等（2017）对 2009 年一次东北冷涡暴雨的研究发现西北气流和来自海上水汽输送各占约 50%。孙力（1995a, 1995b）对暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡进行了合成对比分析，发现，暴雨主要出现在暴雨类冷涡的发展阶段，冷涡具有较强的斜压性，与南侧的副热带低值系统联系密切；非暴雨类冷涡降水主要集中在冷涡的成熟阶段，冷涡的正压结构明显，没有明显的副热带低值系统配合；冷涡降水主要出现在第四象限（Chen et al., 2022）。此外，在东北冷涡背景下，干冷空气的入侵可加强不稳定和增强斜压性，并成为对流触发的原因（王东海等, 2007; 吴迪等, 2010; 钟水新等, 2011; 高守亭等, 2018a）。切变风螺旋度和热成风螺旋度、Q 矢量散度和旋度等都是东北冷涡暴雨诊断与预测分析的有效因子（Yang and Wang, 2009; 王东海等, 2009; Yang et al., 2020; 王东海, 2022）。

针对东北冷涡暴雨的云微物理特征的研究，主要通过观测试验和数值模拟两种手段来实现。飞机探测是云降水探测和云微物理结构最直接的方式手段之一，但对流系统内的上升速度、滴谱等仍难以获取。随着地基探测技术的快速发展，云雷达、微雨雷达、雨滴谱仪等在云降水垂直结构的观测方面科研和应用效果更好（Liu et al., 2019; Fu Z et al., 2020; Morrison et al., 2020）。齐彦斌等（2007）利

用飞机对一次中等强度的东北冷涡对流云带开展垂直穿云观测，开展了东北冷涡积层混合云系的微物理特征分析，发现对流云带的上部存在冰粒子高浓度区，冰粒子在高过冷水含量区的快速长大对降水有重要作用；初步确定了冷涡云系降水的粒子相态、大小、获得了垂直方向上的雨滴谱分布特征。并初步探讨了冷涡对流云带可能存在冰晶繁生过程。在数值模拟研究中，发现微物理过程中霰粒子的融化是降水的主要因素，雨水的两个主要来源为雨水与云水的碰并和霰的融化过程；而云水的主要来源是过饱和水汽的凝结，且霰融化为雨水的转化率大于雨水与云水碰并生成雨水的转化率，冰相过程对东北冷涡降水有重要作用（耿树江等, 2006; 李兆慧, 2011）。

5.3 东北冷涡强对流天气特征与成因

东北冷涡的影响下，强对流天气频繁发生，带来短时强降水、雷暴、大风、冰雹等灾害天气（孙力等, 1994; 王东海, 2022），且在冷涡的形成、发展、持续和衰减阶段都可能发生（李爽等, 2016; 蔡雪薇等, 2019）。冷涡发展各阶段产生的强对流天气并不相同，冷涡初期易产生短时强降水和雷暴天气，发展和衰减期则还易出现冰雹和大风，这主要是由不同阶段冷暖气流的主导作用不同、水汽分布、不稳定层结的差异等造成（罗玲等, 2011; 应爽等, 2014）。东北冷涡南下或者冷涡后部的冷空气南下对华中、华东地区强对流也有明显的影响（苏爱芳等, 2012）。统计分析表明，安徽省 54.1%的强对流为冷涡槽后型，高空受西北气流控制，有强冷平流，强对流天气多发于午后至上半夜，位于冷涡的东南象限（郑媛媛等, 2011），也有研究认为强对流发生潜势区在东北冷涡背景下高低层影响系统（槽、切变线和大风速轴）交汇处的右侧（白人海和孙永罡, 1997; 苏爱芳等, 2012）。

对东北冷涡背景下强对流的发生机制也开展了一些研究。一般认为应具备以下几个条件（陈力强等, 2005, 2008; 张立祥和李泽椿, 2009）：假相当位温梯度大、风垂直切变强、明显中尺度低压系统或切变线，且日变化显著。在同一东北冷涡环流背景下，不同区域可引发不同的强对流天气（蔡雪薇等, 2019），如 2015 年 8 月 22 日冷涡过程中，其西南象限和地面冷高压前沿冷涡外围云系中的多单体风暴引发短时强降水；冷涡后部和地面冷锋前的多个对流单体，合并后形成人字形飑线系统引发短时强降水、冰雹和雷暴大风天气。冷涡背景下，引发强对流天气类型的差异主要取决于冷涡提供的环境热力、水汽条件、垂直风切条件，及触发机制的不同。冷涡背景下的 MCS 易发生在冷涡东南侧和东北侧的气旋性曲率最大处，可产生强降水（王培等, 2012）。冷涡背景下的雷暴大风则多与飑线和龙卷有关（Meng et al., 2018; Xue et al., 2016; Brooks et al., 2019; 钱维宏等, 2021）。其他的研究表明雷暴大风的形成存在多种机制，例如：高空急流产生的风切变引起次级环流（Zhang and Fritsch, 1987; Kawashima, 2003），重力波触发的飑线（Liu et al., 2018），弓形回波的后向入流和其中 γ 中尺度涡旋等都是是造成地面灾害性雷暴大风的重要系统（Trapp and Weisman, 2003; Atkins et al., 2005; Atkins and Laurent, 2009）。有关东北冷涡中的雷暴大风形成机制的认识目前仍然有限，还需要开展深入研究。

虽然针对东北冷涡中及冷涡背景下的灾害天气已经开展了很多研究，但对于产生暴雨和强对流的东北冷涡，其大尺度环流特别是双阻塞环流异常、冷涡强度和尺度的异常特征、及其对内部暴雨和强对流分布和强度影响的主要物理机制、冷涡云系微物理特征等，仍是需要探索的问题。

6 中亚低涡

我国的气象工作者将经常出现在里海以东至新疆地区的冷性涡旋称为中亚低涡（《新疆短期天气预报指导手册》编写组, 1986），中亚低涡频繁活动于中亚和新疆地区，常造成新疆暴雨（雪）、大风等恶劣天气（张家宝和邓子风, 1987; 张云惠等, 2012; 曾勇和杨莲梅, 2016; 杨莲梅等, 2020），是造成新疆灾害天气最主要的天气系统之一。虽然国内在 19 世纪 60 年代就开始了对中亚低涡的天气学特征及其对新疆降水影响的研究（《新疆短期天气预报指导手册》编写组, 1986），但是更多的研究成果则是出现在最近十多年。2000 年以后，由于国家“一带一路”战略的实施和观测资料的丰富，气象学者对中亚和新疆地区暴雨天气有重要影响的中亚低涡开展了更深入的研究，在中亚低涡的定义、活动特征、水汽输送特点、形成机制及其对新疆强降雨的影响等方面的认识都取得了重要进展。

6.1 中亚低涡的定义和活动特征

中亚低涡是中亚—新疆附近区域的高空切断涡

旋，其形成常与乌拉尔脊有关。张家宝和邓子风（1987）撰写的《新疆降水概论》给出了中亚低涡的定义，其为 500 hPa 高度场上低值中心位于（40°～60°N，60°～90°E）范围内出现两条以上闭合等高线（等值线间隔为 40 gpm），维持 48 h 以上的低压环流系统。后来的观测和研究则发现，此定义的区域总体偏北，北面包括了部分西西伯利亚低涡，而南面会漏掉南疆地区的低涡系统，因此，后续的研究对中亚低涡的活动范围进行了修订。依据低涡的三维结构提出了深厚型和浅薄型两类中亚低涡（张云惠等, 2012; Yang and Zhang, 2017; 杨莲梅等, 2019），两类低涡在 500 hPa 的活动区内都至少可以分析 2 条以上等位势高度闭合线（间隔为 40 gpm），且有冷中心或冷槽配合，持续活动 2 d 以上，而深厚型中亚低涡中心在（35°～55°N，60～90°E）范围，垂直范围常出现在 700～200 hPa，浅薄型中亚低涡闭合环流中心位于（35°～42.5°N，65°～90°E）范围内，垂直范围一般出现在 700～500 hPa。其中，北涡活动有明显的季节变化，以夏季比例最大，而南涡四季的活动差别不明显（张云惠等, 2012）。

中亚低涡属于中高纬度的次天气尺度系统，影响范围大，造成的天气复杂。深厚型中亚低涡空间分布存在两个高频次活动区域，分别位于哈萨克丘陵地区和萨彦岭一带，以及咸海东部地区和塔什干地区（张云惠等, 2012）。浅薄型中亚低涡活动有两个高频区，分别位于帕米尔高原的西侧和南侧（秦贺等, 2013）。根据中亚低涡对新疆天气影响的研究，中亚低涡还可分为“湿涡”和“干涡”两类，“湿涡”占比 40%，可造成新疆明显降水天气过程；“干涡”占比 60%，可造成新疆大风、降温和低温天气；也有时则对新疆天气没有明显影响。“湿涡”发生的季节性差异大，以夏季出现比列最高，秋春季次之；“干涡”的季节性分布则比较均匀（张云惠等, 2012）。

近年来，利用各种再分析资料对中亚低涡进行了识别和统计研究。杨莲梅等（2019）利用美国 NCEP/NCAR（National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research）再分析资料，编制了中亚低涡年鉴。Guo et al.（2021）利用客观识别和追踪算法，基于高分辨率的 ERA-Interim 再分析数据，对 1980～2019 年间的深厚型中亚低涡过程进行客观识别与追踪，建立了近 40 年的中亚低涡数据集。基于该数据集开展的统计研究发现，中亚低涡大多生成于新疆西侧的中亚地区西北部，据统计近 40 年间有 266 个中亚低涡（占中亚低涡总数的 71%）生成于 72°E 以西的研究区域，而中亚低涡的消散位置主要分布于中亚地区中、东部。受西风带气流的影响，中亚低涡生成后主要向东移动，其中部分会东移至新疆境内，但是也有少数中亚低涡初生后稳定少动或者向西移动。中亚低涡生成后主要向东移动，夏季活动最为频繁，维持时间多为 2～3 d，水平空间尺度平均为 900 km（集中在 852～1691 km）。低涡垂直结构十分深厚，正涡度区主要分布于 200～700 hPa 之间，中心位于 350 hPa 附近，高层（200 hPa）的暖心和中层（500 hPa）的冷心结构明显（Guo et al., 2021）。对造成新疆显著降水的中亚低涡的动态合成分析发现（郭楠楠, 2021），明显的水汽辐合带以及高层辐散大值区主要位于中亚低涡东南象限，在中亚低涡初生、发展至成熟阶段的过程中，中亚低涡东南象限的斜压能量发展利于低涡东南象限降水的增强。

6.2 中亚低涡降水过程的水汽源地和路径

中亚位于亚欧大陆中心的干旱半干旱区，远离大洋，其降水的水汽来源与东部季风区有明显区别。新疆降水的水汽主要来自其以西地区，包括中高纬地区的地中海、里海、黑海、大西洋和北冰洋，冬、春季水汽来自地中海和里海，夏季来自北大西洋和北冰洋，秋季来自黑海和里海（史玉光和孙照渤, 2008; 杨莲梅和刘晶, 2018）。统计和个例分析均表明，天山沿线和南疆西部暖季降水受中亚低涡或中亚低槽的影响较大（张云惠等, 2012; 郭楠楠, 2021; 黄昕, 2021），其水汽源区主要位于新疆以西的海洋和大陆，新疆不同降水过程的水汽源区与北大西洋副热带高压的南北调整有关，西风带水汽输送主要通过大气平流的远距离输送进入到新疆地区，而中亚区域和新疆本地则是新疆降水的水汽次源地（谢泽明, 2018）。

新疆大部分暴雨过程受到中亚低涡或低槽影响，而新疆不同区域暴雨的水汽输送来源和输送路径有不同。暴雨最为集中的天山山区及其两侧暴雨过程，水汽源地可以追述到里海、咸海及大西洋等，水汽输送受低空偏西气流、中高层偏南气流和中低层沿青藏高原东侧—河西走廊—南疆盆地的偏东急流三支气流影响，其中又以中亚低涡强烈发展导致的偏西水汽输送最强，这三支气流常汇合于天山山区及

其南北侧，提供了该区域暴雨的水汽条件（《新疆短期天气预报指导手册》编写组, 1986; 谢泽明, 2018; 张云惠等, 2018; Zhou et al., 2019; 庄晓翠等, 2022），此外，天山夏季特大暴雨的水汽源地，有时也有来自北冰洋的水汽输送（姚俊强等, 2018）。受中亚低涡东移、副热带高压北伸与贝加尔湖脊西伸影响，北疆暴雨的水汽输送主要为西风气流和贝加尔湖至新疆偏东低空急流为主，也有来自北冰洋的水汽输送，而偏东风水汽输送量大于西风水汽输送量（杨莲梅等, 2012; 庄晓翠等, 2017; 谢泽明, 2018）。东疆暴雨水汽输送有西风、东风、南风和北风四条路径，分别与 700 hPa 柴达木低压发展、500 hPa 乌拉尔脊东北向发展、中亚低涡东南移动和新疆脊的发展有关（张云惠和王勇, 2004; 杨莲梅等, 2012），其中，中亚低涡前部西南气流与副高西侧偏南气流的汇合，以及中低层经河西走廊进入东疆哈密的水汽对暴雨发生均有重要作用（王荣梅等, 2010; 白松竹等, 2022）。

南疆西部暴雨水汽输送路径较为复杂，除了中亚低涡自身携带水汽外，孟加拉湾、阿拉伯海和南海的水汽输送，尤其是中低层的东南风急流的水汽输送对暴雨发生有重要作用（曾勇和杨莲梅, 2017a, 2017b），此外，还与中低层南疆盆地偏东气流的水汽集聚和对流层中高层中亚南部的偏南风暖湿气流的水汽接力输送有关（张云惠等, 2013, 2015）。南疆塔里木盆地极端暴雨过程的水汽源地较为复杂，可源于黑海、里海、咸海、地中海、阿拉伯海、印度洋北部及孟加拉湾及中亚等地，水汽输送有偏西、偏南和偏东三条路径，阿拉伯海和孟加拉湾的东风北上后与西风带汇合形成的输送带对塔里木盆地极端暴雨的水汽输送有关键作用（张俊兰等, 2023a, 2023b）。

6.3 中亚低涡影响下的新疆暴雨形成机理

新疆暴雨的发生是多尺度天气系统协同作用的结果，近 20 年新疆地区范围较大、强度较强和持续时间长的暴雨过程均有中亚低涡的影响（杨莲梅和李曼, 2015; 郭楠楠, 2021; Ma S P et al., 2022; 杨涛等, 2022）。对 2013 年 6 月 17～18 日天山南侧阿克苏地区的大暴雨过程的研究（郭楠楠等, 2019; 郭楠楠, 2021），本文归纳给出该次具有该地区典型暴雨过程的多尺度系统配置概念模型（图 10）：在中高纬地区“两脊一槽”环流形势下，中亚低涡环流与天山南脉特殊地形造成的气流绕流，叠加地形作用生成的中尺度辐合线是此次强降水的重要影响系统；山谷地形热力性质差异造成的夜间下坡风推动辐合线移动，辐合线上发展的强对流引发了阿克苏地区强降水。

西天山伊犁河谷是新疆暴雨过程发生较频繁、雨量较大的区域（史玉光和孙照渤, 2008; 谢泽明, 2018），其暴雨产生的机理与天山南坡的暴雨过程有所不同。对该地区一次极端暴雨过程进行的研究（黄昕等, 2021; Huang et al., 2020），给出了此次极端暴雨的概念模型（图 11），发现伊犁河谷暴雨中高低空均存在重力波作用，极端降水受到了高低空重力波的共同影响。重力波通过纬向动量的垂直输送和热量的经向输送对河谷中部的环境风场实现正反馈，加强了伊犁河谷中部的上升运动。在其他的暴雨过程中是否都存在高低空重力波的共同影

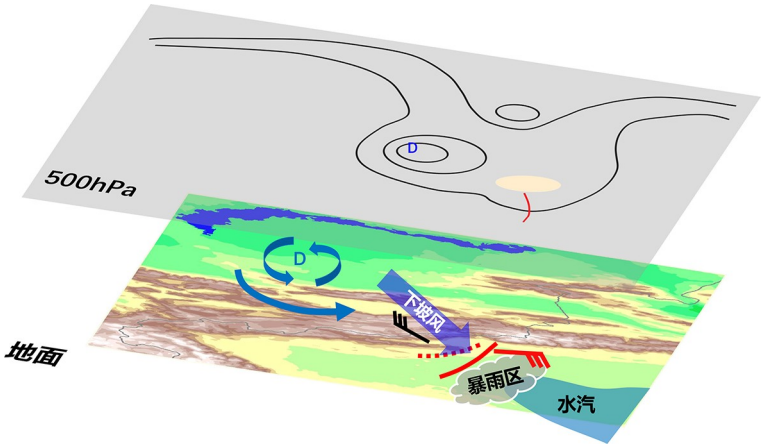

图 10 一次中亚低涡影响下的南疆西部暴雨过程的概念模型。

Fig. 10 Conceptual model for the heavy rainfall process in the west of Southern Xinjiang under the influence of the Central Asian vortex.

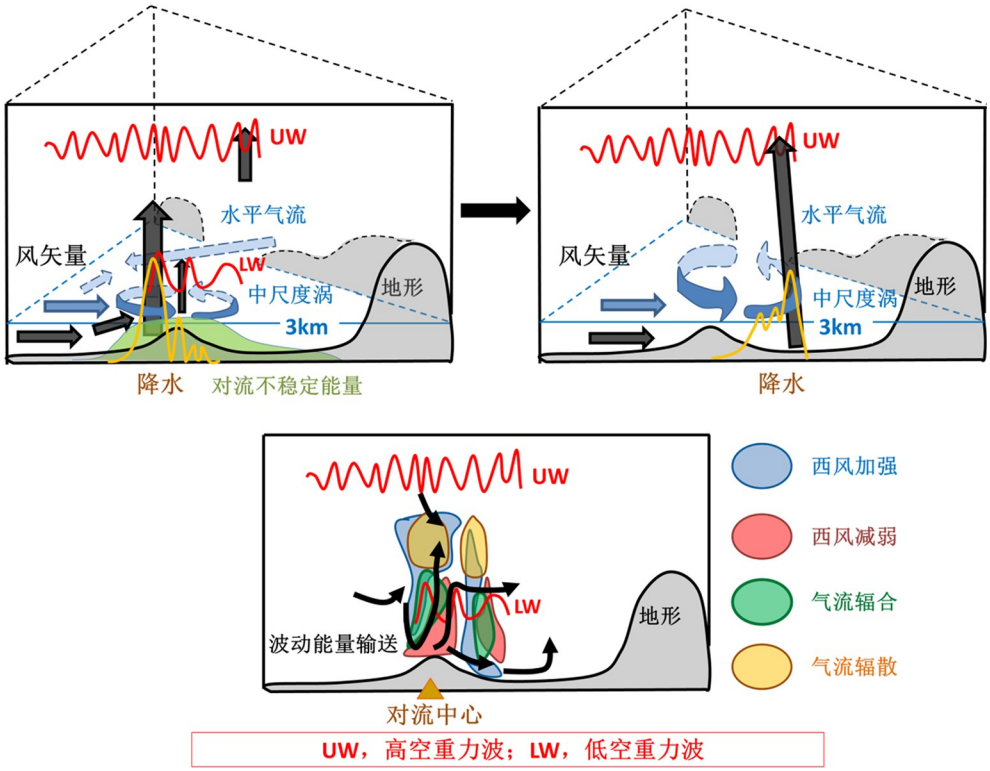

图 11　一次中亚低涡背景下的伊犁河谷极端暴雨过程概念模型。引自黄昕（2021）。

Fig. 11　Conceptual model for the extreme rainfall process in the Ili Valley under the influence of the Central Asian vortex. Cited from Huang (2021).

响还需要进一步的研究。

很多研究还表明，中亚低涡提供了新疆及其周边暴雨发生的有利环流条件。暴雨过程中，冷涡中心附近为少云区域，冷涡南侧有大范围云带，云带中发展的 MCS 是直接造成暴雨的系统，强对流往往出现在暖区一侧（孔期等, 2011; 黄艳等, 2012; 张云惠等, 2013）。中亚低涡背景下，中低层多通道水汽输送和局地长时间水汽辐合、低层暖平流、大气不稳定层结、中低层的风场辐合和垂直切变，均为 MCS 发展和维持提供了动、热力条件（李建刚等, 2019）。由于中亚低涡西南气流携带水汽相对丰富，配合有利动、热力条件的 MCS 多以列车效应型和合并加强型为多，此类过程的暴雨过程范围相对大、时间相对长（曾勇和杨莲梅, 2017a; 2017b; 曾勇等, 2019; 杨涛等, 2021）。合并加强型的对流强度较强，雨强较大；列车效应型对流强降水变率大，雨强也大；孤立对流单体生命史短、尺度小，其引发的强降水范围小，持续时间短，突发性和局地性强，预报难度最大（杨涛等, 2021, 2022）。

最近对中亚低涡暴雨的动力学过程和降雨微物理特征也有一些研究。周括等（2022）和 Jiao et al.（2023）将基于包辛尼斯克（Boussinesq）近似建立的地形追随坐标非静力平衡广义垂直运动方程，应用于新疆涡旋暴雨的研究中，发现经向气压梯度力耦合经向散度、垂直气压梯度力耦合纬向散度和非绝热加热经向梯度是激发南疆极端暴雨垂直运动发展的三个主要强迫项。焦宝峰等（2022）在垂直速度位涡倾向方程中，以气压水平梯度的形式引入热力过程的间接作用，发现南疆极端暴雨过程的低层垂直风切变与冷池的耦合作用对垂直速度位涡局地变化影响最大，有利于触发新对流并造成持续性降水。除了动热力机理研究外，最近几年，基于伊犁河谷的观测站资料分析，揭示出西天山地区降雨系统和山谷风环流相互作用背景下的雨滴谱日变化特征。天山降雨微物理特征与我国其他地区相比具有显著差异（Zeng et al., 2021），且不同季节、不同位置及不同海拔处的降雨微物理特征也差异明显（Zeng et al., 2022a, 2022b, 2022c）。雨滴谱观测在提高天山地区定量降水估测水平、提升降雨动能估测能力及改善数值模式微物理过程参数化方案精度方面发挥了重要作用（Zeng et al., 2022d, 2023）。这些最新的研究成果，增加了我们对新疆暴雨过程

动热力机理和微物理特征的新认识。

7 存在的问题和未来研究的方向

本文回顾了我国产生暴雨或强对流天气的五类涡旋系统近十年的研究进展，虽然近年来我国在相关领域的研究取得了一些令世人瞩目的成绩，但是我国与世界先进国家相比还存在一定差距。为了缩短差距并实现超越，未来我国在涡旋系统以及产生相关天气的研究与预报中，还有一些科学问题值得思考和开展深入研究，主要包括：

（1）在低涡系统的客观识别和时空演变规律统计研究方面，虽然目前已有基于物理认识的客观识别算法，并应用高分辨率再分析资料进行了大量识别，和开展了相关的统计特征研究。但这些方法仍存在一些缺陷与不足，例如，对形状不规则的涡旋以及涡旋的分裂与合并过程都有一定的错误率，此外，这些方法一般采用单一资料和单一要素进行识别。目前，人工智能技术已经被越来越广泛地应用于涡旋的客观识别（Lu et al., 2020; Xie et al., 2022）。因此，发展多要素、多种资料的人工智能涡旋识别方法是未来的研究方向。

（2）涡旋系统对我国暴雨和强对流天气的产生有较大的贡献，而大部分涡旋系统以及其中的对流过程一般属于中尺度现象。由于中尺度动力学过程与大尺度动力学过程存在很大的差异，深入开展中尺度动力学和云对流动力学研究是未来的趋势（高守亭等, 2018a, 2018b; 陆汉城, 2019）。

（3）我国地形复杂，地形对其周边大气环境的动力、热力和水汽分布有重要影响，地形的动-热力作用对其周边对流系统的发生发展也有显著影响（Houze, 2012; Kirshbaum et al., 2018），本文种涉及的 5 类涡旋，高原涡、西南涡和大别山涡的形成与青藏高原和二级地形的作用有关，东北冷涡和中亚低涡的形成，虽然地形的作用不是特别显著，但是涡旋环流与山地的相互作用是其中对流系统形成的重要机理之一。众所周知，山区海拔高度差异较大、下垫面植被分布不均，复杂的动热力过程对对流系统的形成和发展影响的具体机制仍不清楚，应有针对性地开展外场观测试验，从而深入研究相关机理（徐安伦等, 2022）。

综上所述，我国的涡旋系统以及其中产生暴雨和强对流天气的机理与预测的研究任重道远，还需要继续开展监测、机理和预报等方面的研究，以提高我们对相关灾害天气的防灾和减灾能力。

参考文献（References）

Atkins N T, Laurent M S. 2009. Bow echo mesovortices. Part II: Their genesis [J]. Mont. Wea. Rev., 137(5): 1514−1532. doi:10.1175/2008MWR2650.1

Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX [J]. Mon. Wea. Rev., 133(8): 2275−2296. doi:10.1175/MWR2973.1

人海, 金瑜. 1992. 黑龙江省暴雨之研究 [M]. 北京: 气象出版社, 217pp. Bai R H, Jin Y. 1992. Study on Rainstorm in Heilongjiang Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 217pp.

白人海, 孙永罡. 1997. 东北冷涡中尺度天气的背景分析 [J]. 黑龙江气象, (3): 6−7,12. Bai R H, Sun Y G. 1997. The background analysis study of meso-scale weather of the cold vortex in Northeast China [J]. Heilongjiang Meteor. (in Chinese), (3): 6−7,12. doi:10.14021/j.cnki.hljqx.1997.03.002

白松竹, 热依拉·玉努斯, 洪月, 等. 2022. 新疆哈密一次罕见暖区暴雨的成因分析 [J]. 气象科技进展, 12(2): 58−63,80. Bai S Z, Reyila Y N S, Hong Y, et al. 2022. Cause analysis on rare warm-sector heavy rainfall in Hami of Xinjiang [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 12(2): 58−63,80.

Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. Mon. Wea. Rev., 139(9): 2790−2810. doi:10.1175/MWR-D-11-00006.1

Brooks H E, Doswell III C A, Zhang X L, et al. 2019. A century of progress in severe convective storm research and forecasting [J]. Meteor. Monogr., 59(1): 18.1−18.41. doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0026.1

蔡雪薇, 谌芸, 沈新勇, 等. 2019. 冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析 [J]. 气象, 45(5): 621−631. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al. 2019. Cause analysis of different types of severe convective weather under cold vortex background [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(5): 621−631. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.003

常祎, 郭学良. 2016. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征 [J]. 科学通报, 61(15): 1706−1720. Chang Y, Guo X L. 2016. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 61(15): 1706−1720. doi:10.1360/N972015-01292

陈贝, 高文良. 2015. 引发四川盆地西南地区暴雨的高原涡特征分析 [J]. 高原山地气象研究, 35(1): 9−15. Chen B, Gao W L. 2015. The causing storm rain in Southwest Sichuan Basin characteristic analysis of Tibetan Plateau vortex [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 35(1): 9−15. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2015.01.002

陈功, 李国平. 2010. 基于 WRF 的高原低涡内波动特征及空心结构的初步研究 [J]. 高原山地气象研究, 30(1): 6−11. Chen G, Li G P. 2010. The analyses of wave and eye region in Tibetan Plateau vortex

[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 30(1): 6−11. doi:10.3969/j.issn.1674-2184·2010.01.002

Chen L G, Chen B, Zhao R Y, et al. 2023. Characterizing the synoptic-scale precursors of extreme precipitation events in the southeastern edge of the Tibetan Plateau: Anomalous evolution of atmospheric dynamic-thermal structure [J]. Water, 15(7): 1407. doi:10.3390/w15071407

陈力强, 陈受钧, 周小珊, 等. 2005. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特征数值模拟 [J]. 气象学报, 63(2): 173−183. Chen L Q, Chen S J, Zhou X S, et al. 2005. A numerical study of the MCS in a cold vortex over northeastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63(2): 173−183. doi:10.11676/qxxb2005.017

陈力强, 张立祥, 周小珊. 2008. 东北冷涡不稳定能量分布特征及其与降水落区的关系 [J]. 高原气象, 27(2): 339−348. Chen L Q, Zhang L X, Zhou X S. 2008. Characteristic of instable energy distribution in cold vortex over northeastern China and its relation to precipitation area [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 27(2): 339−348.

陈联寿, 徐祥德. 1998.1998 年青藏高原第二次大气科学试验 (TIPEX) 陆气过程、边界层观测预研究进展 [J]. 中国气象科学研究院年报 (中文版), 20−21. Chen L S, Xu X D. 1998. Advances in the pre-research of terrestrial processes and boundary layer observation in the second atmospheric science experiment over the Tibetan Plateau (TIPEX) in 1998 [J]. Annual Report of CAMS (in Chinese), 20−21.

陈联寿, 马镜娴, 罗哲贤. 2000. 大地形对涡旋运动的影响 [M]//陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等. 第二次青藏高原大气科学理论研究进展-三. 北京: 气象出版社, 90−97. Chen L S, Ma J X, Luo Z X. 2000. The influence of large terrain on vortex motion [M]//Tao S Y, Chen L S, Xu X D, et al. The Second Theoretical Research Progress of Atmospheric Science Over the Tibetan Plateau (III) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 90−97.

Chen X, Zhuge X Y, Zhang X D, et al. 2022. Objective identification and climatic characteristics of heavy-precipitation northeastern China cold vortexes [J]. Adv. Atmos. Sci., 40(2): 305−316. doi:10.1007/s00376-022-2037-y

Chen Y R, Li Y Q, Qi D M. 2018. Analysis of the convective characteristics during the mutual evolution of an inverted trough/low vortex and its induced rainstorm over the northeastern Sichuan Basin, China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 131(4): 807−825. doi:10.1007/s00703-018-0607-4

Chen Y R, Li Y Q, Liu X C, et al. 2023. Helicity characteristics of cyclonic vortexes and their effect on convection in a wide-ranging extreme rainstorm in China [J]. Atmos. Sci. Lett., 24(7): e1162. doi:10.1002/asl.1162

陈启智, 黄亦武, 王其伟, 等. 2007. 1990～2004 年西南低涡活动的统计研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 43(6): 633−642. Chen Q Z, Huang Y W, Wang Q W et al., 2007, The statistical study of the Southwest vortexes during1990–2004, 2007 [J], Journal Of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 43(6): 633−642.

陈永仁, 师锐, 李跃清, 等. 2010. 四川盆地持续性暴雨发生的一类环流特征研究 [J], 高原山地气象研究, 30(1): 29–34. Chen Y R, Shi R, Li Y Q, et al. 2010. The study of a kind of circulations characters on sustaining heavy rain in Sichuan basin [J]. Plaetau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 30(1): 29−34. doi:10.3969/j.issn 1674-2184.2010.01.005

陈忠明, 闵文彬, 缪强, 等. 2004. 高原涡与西南涡耦合作用的个例诊断 [J]. 高原气象, 23(1): 75−80. Chen Z M, Min W B, Liao Q, et al. 2004. A case study on coupling interaction between Plateau and Southwest vortexes [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 23(1): 75−80. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.01.011

陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 2007. 暴雨中尺度涡旋系统发生发展的诊断 [J]. 暴雨灾害, 26(1): 29-–34. Chen Z M, Min W B, Cui C G. 2007. Diagnostic analysis on the formation and development of meso-scale vortex systems [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 26(1): 29-–34. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2007.01.005

Cheng Q X, Fan G Z, Zhu L H. 2023. Characteristics and changes in the atmospheric water cycle of the Tibetan Plateau vortex [J]. Theor. Appl. Climatol., 151(3-4): 1601−1614. doi:10.1007/s00704-022-04273-4

迟静, 周玉淑, 冉令坤, 等. 2021. 吉林一次极端降水发生发展动热力过程的数值模拟分析 [J]. 大气科学, 45(6): 1400−1414. Chi J, Zhou Y S, Ran L K, et al. 2021. Numerical simulation analysis on the generation and evolution of the dynamic and thermodynamic processes of an extreme rainfall in Jilin Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1400−1414. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20183

Curio J, Chen Y R, Schiemann R, et al. 2018. Comparison of a manual and an automated tracking method for Tibetan Plateau vortices [J]. Adv. Atmos. Sci., 35(8): 965−980. doi:10.1007/s00376-018-7278-4

Curio J, Schiemannm R, Hodges K I, et al. 2019. Climatology of Tibetan Plateau vortices in reanalysis data and a high-resolution global climate model [J]. J. Climate, 32(6): 1933−1950. doi:10.1175/JCLI-D-18-0021.1

Dell´Osso L, Chen S J. 1986. Numerical experiments on the genesis of vortices over the Qinghai–Tibet Plateau [J]. Tellus A, 38A(3): 236−250. doi:10.1111/j.1600-0870.1986.tb00468.x

邓涤菲, 周玉淑, 王东海. 2012. 有限区域分解分析方法在 2006 年一次东北冷涡暴雨分析中的应用 [J]. 地球物理学报, 55(6): 1852−1866. Deng D F, Zhou Y S, Wang D H. 2012. The application of wind and water-vapor flux partitioning technique to the structure of a northeast vortex in 2006 [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 55(6): 1852−1866. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.006

邓中仁, 葛旭阳, 姚秀萍, 等. 2022. 辐射对高原涡形成和发展影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 46(3): 541−556. Deng Z R, Ge X Y, Yao X P, et al. 2022. Simulation study on the radiation impacts on the formation and development of a Tibetan Plateau vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 541−556. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.20215

董秋实. 2017. 长江中下游地区暖季中尺度涡旋的特征分析 [D]. 南京大学硕士学位论文, 72pp. Dong Q S. 2017. Characteristics of warm season mesoscale vortices over the middle and lower researches of Yangtze River [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 72pp.

Ding T, Gao H. 2021. A feasible approach to improve forecast skill of summer precipitation in Northeast China by statistical regression of

the Northeast China cold vortex in the multimodel ensemble [J]. Int. J. Climatol., 41(14): 6397−6414. doi:10.1002/joc.7202

董元昌, 陈功, 吴遥. 2017. 一次非典型西南低涡与降水过程相互关系的天气学分析 [J]. 高原山地气象研究, 37(1): 7−13. Dong Y C, Chen G, Wu Y. 2017. The synoptic analysis about the relationship between an typical Southwest vortex and a precipitation process [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 37(1): 7−13. doi:10.3969/j.issn.1674-2184·2017.01.002

Dong Y C, Li G P, Jiang X W, et al. 2022. The characteristics and formation mechanism of double-band radar echoes formed by a severe rainfall occurred in the Sichuan Basin under the background of two vortices coupling [J]. Front. Earth Sci., 10: 915954. doi:10.3389/feart.2022.915954

范娇, 陈科艺. 2019. 有无台风影响下西南涡特征统计分析 [J]. 高原气象, 38(4): 744−755. Fan J, Chen K Y. 2019. Statistical analysis of the characteristics of the Southwest vortex with/without the existing of typhoons [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 38(4): 744−755. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00108

Fang Y H, Chen H S, Lin Y, et al. 2021. Classification of Northeast China cold vortex activity paths in early summer based on K-means clustering and their climate impact [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(3): 400−412. doi:10.1007/s00376-020-0118-3

Feng X Y, Liu C H, Rasmussen R, et al. 2014. A 10-yr climatology of Tibetan Plateau vortices with NCEP climate forecast system reanalysis [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 53(1): 34−46. doi:10.1175/JAMC-D-13-014.1

Feng X Y, Liu C H, Fan G Z et al. 2016. Climatology and structures of thwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis [J]. J. Climate, 29: 7675−7701. doi:10.1175/JCLI-D-15-0813.1

Feng X Y, Liu C H, Fan G Z, et al. 2017. Analysis of the structure of different Tibetan Plateau vortex types [J]. J. Meteor. Res., 31(3): 514−529. doi:10.1007/s13351-017-6123-5

Fu S M, Sun J H. 2012. Circulation and eddy kinetic energy budget analyses on the evolution of a Northeast China cold vortex (NCCV) in May 2010 [J]. J. Meteor. Soc. Japan Ser II, 90(4): 553−573. doi:10.2151/jmsj.2012-404

Fu S M, Yu F, Wang D H, et al. 2013. A comparison of two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the Mei-yu period of 2010 [J]. Sci. China Earth Sci., 56(2): 282−300. doi:10.1007/s11430-012-4420-5

Fu S M, Zhang J P, Sun J H, et al. 2014. A fourteen-year climatology of the Southwest vortex in summer [J]. Atmos. Ocean Sci. Lett., 7(6): 510−514. doi:10.3878/AOSL20140047

傅慎明, 孙建华, 张敬萍, 等. 2015. 一次引发强降水的东北冷涡的演变机理及能量特征研究 [J]. 气象, 41(5): 554–565. Fu S M, Sun J H, Zhang J P, et al. 2015. Study on evolution mechanisms and energy features of Northeast cold vortex with heavy rainfall events [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 41(5): 554−565. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.004

Fu S M, Li W L, Ling J. 2015a. On the evolution of a long-lived mesoscale vortex over the Yangtze River Basin: Geometric features and interactions among systems of different scales [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120(23): 11889−11917. doi:10.1002/2015JD023700

Fu S M, Li W L, Sun J H, et al. 2015b. Universal evolution mechanisms and energy conversion characteristics of long-lived mesoscale vortices over the Sichuan Basin [J]. Atmos. Sci. Lett., 16(2): 127−134. doi:10.1002/asl2.533

Fu S M, Zhang J P, Sun J H, et al. 2016. Composite analysis of long-lived mesoscale vortices over the middle reaches of the Yangtze River valley: Octant features and evolution mechanisms [J]. J. Climate, 29(2): 761−781. doi:10.1175/JCLI-D-15-0175.1

Fu S M, Sun J H, Luo Y L, et al. 2017. Formation of long-lived summertime mesoscale vortices over central east China: Semi-idealized simulations based on a 14-year vortex statistic [J]. J. Atmos. Sci., 74(12): 3955−3979. doi:10.1175/JAS-D-16-0328.1

Fu S M, Mai Z, Sun J H, et al. 2019. Impacts of convective activity over the Tibetan Plateau on Plateau vortex, Southwest vortex, and downstream precipitation [J]. J. Atmos. Sci., 76(12): 3803−3830. doi:10.1175/JAS-D-18-0331.1

Fu S M, Zhang J P, Tang H, et al. 2020. A new mesoscale-vortex identification metric: Restricted vorticity and its application [J]. Environ. Res. Lett., 15(12): 124053. doi:10.1088/1748-9326/abcac6

Fu S M, Tang H, Sun J H, et al. 2022. Historical rankings and vortices' activities of the extreme Mei-yu seasons: Contrast 2020 to previous Mei-yu seasons [J]. Geophys. Res. Lett., 49(2): e2021GL096590. doi:10.1029/2021GL096590

Fu Z K, Dong X Q, Zhou L L, et al. 2020. Statistical characteristics of raindrop size distributions and parameters in Central China during the Meiyu seasons [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 125(19): e2019JD031954. doi:10.1029/2019JD031954

高守亭, 周玉淑, 冉令坤. 2018a. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展 [J]. 大气科学, 42(4): 833−846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K. 2018a. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 833−846. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17277

高守亭, 左群杰, 杨帅. 2018b. 龙卷生成动力学初探 [J]. 气象科技进展, 8(2): 24−27,35. Gao S T, Zuo Q J, Yang S. 2018b. A preliminary study on the dynamics of tornado formation [J]. Advances in Meteorological Sciences and Technology (in Chinese), 8(2): 24−27,35. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.002

高文良, 郁淑华. 2018. 高原涡诱发西南涡伴行个例的环境场与成因分析 [J]. 高原气象, 37(1): 54−67. Gao W L, Yu S H. 2018. The case study in causes and environmental fields analysis of departure Plateau vortex accompanying with induced Southwest vortex [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(1): 54−67. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00020

高正旭, 王晓玲, 李维京. 2009. 西南低涡的统计特征及其对湖北降水的影响 [J]. 暴雨灾害, 28(4): 302−305,312. Gao Z X, Wang X L, Li W J. 2009. The statistic characteristics of Southwest China vortex and its effect on precipitation of Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 28(4): 302−305,312. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.04.003

耿树江, 王建捷, 宫福久. 2006. 一次夏季东北冷涡中积云发展过程

的数值模拟 [J]. 气象科学, 26(2): 149−156. Geng S J, Wang J J, Gong F J. 2006. A numerlcal simulation of cumulus features on Northeast cold vortex [J]. Sci. Meteor. Sinica (in Chinese), 26(2): 149−156.

顾清源, 师锐, 徐会明. 2010. 移出与未移出高原的两类低涡环流特征的对比分析 [J]. 气象, 36(4): 7−15. Gu Q Y, Shi R, Xu H M. 2010. Comparison analysis of the circulation characteristics of Plateau vortex moving out of and not out of the Plateau [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(4): 7−15.

谷文龙. 2008. 长江下游梅雨锋中尺度涡旋统计分析与模拟研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Gu W L. 2008. The statistical analysis and simulation research of mesoscale vortex along the Meiyu front over the lower reach of Yangtze River in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

关良, 李栋梁. 2019. 青藏高原低涡的客观识别及其活动特征 [J]. 高原气象, 38(1): 55−65. Guan L, Li D L. 2019. Objective identifying and activity characteristics of Qinghai–Tibetan Plateau vortex [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 38(1): 55−65. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00067

归佩兰, 王作述. 1959. 一个东北低压的机制分析 [J]. 气象学报, 30(2): 150−164. Gui P L, Wang Z S. 1959. An analysis of the mechanism of development of a cyclone in northeastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 30(2): 150−164. doi:10.11676/qxxb1959.019

郭楠楠. 2021. 中亚低涡的活动特征及其对新疆暴雨的影响 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 130pp. Guo N N. 2021. Statistical analysis of Central Asian vortices and their influence on precipitation in Xinjiang [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 130pp.

郭楠楠, 周玉淑, 邓国. 2019. 中亚低涡背景下阿克苏地区一次强降水天气分析 [J]. 气象学报, 77(4): 686−700. Guo N N, Zhou Y S, Deng G. 2019. Analysis of a severe precipitation process in Aksu area under the background of the Central Asian vortex [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(4): 686−700. doi:10.11676/qxxb2019.040

Guo N N, Zhou Y S, Yang L M. 2021. Statistical analysis of Central Asian vortices and their influence on precipitation in Xinjiang [J]. Atmos. Res., 249: 105327. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105327

何光碧, 高文良, 屠妮妮. 2009. 2000-2007 年夏季青藏高原低涡切变线观测事实分析 [J]. 高原气象, 28(3): 549−555. He G B, Gao W L, Tu N N. 2009. The observational analysis of shear line and low vortex over the Tibetan Plateau in summer from 2000 to 2007 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 28(3): 549−555.

何光碧, 屠妮妮, 张利红. 2014. 一次低涡暴雨过程发生机制及其模式预报分析 [J]. 暴雨灾害, 33(3): 239−246. He G B, Tu N N, Zhang L H. 2014. The analyses of occurrence mechanism and its numerical forecasts of a vortex rainstorm [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33(3): 239−246. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.03.006

Houze R A. 2012. Orographic effects on precipitating clouds [J]. Rev. Geophys., 50(1): RG1001. doi:10.1029/2011RG000365

胡伯威, 潘鄂芬. 1996. 梅雨期长江流域两类气旋性扰动和暴雨 [J]. 应用气象学报, 7(2): 138−144. Hu B W, Pan E F. 1996. Two kinds of cyclonic disturbances and their accompanied heavy rain in the Yangtze River valley during the Mei-yu period [J]. Quart. J. Appl. Meteor., 7(2): 138−144.

Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China [J]. Meteor. Atmos. Phys. , 106(1−2): 37−48. doi:10.1007/s00703-009-0049-0

胡祖恒, 李国平, 官昌贵, 等. 2014. 中尺度对流系统影响西南低涡持续性暴雨的诊断分析 [J]. 高原气象, 33(1): 116−129. Hu Z H, Li G P, Guan C G, et al. 2014. Diagnostic analysis of mesoscale convective systems influence on sustained rainstorm caused by Southwest vortex [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 33(1): 116−129. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00002

黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等. 2015. 近 30 年夏季移出型高原低涡的气候特征及其对我国降雨的影响 [J]. 热带气象学报, 31(6): 827−838. Huang C H, Li G P, Niu J L, et al. 2015. A 30-year climatology of the moving-out Tibetan Plateau vortex in summer and its influence on the rainfall in China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 31(6): 827−838. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.06.011

黄慧君, 郑建萌, 马涛, 等. 2023. 夏季高原低涡切变影响下云南大雨暴雨的分布及成因研究 [J]. 高原气象, 42(2): 403−416. Huang H J, Zheng J M, Ma T, et al. 2023. Distribution and genesis of heavy rain over Yunnan affected by the plateau low vortex shear in summer [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 42(2): 403−416. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00114

Huang L J, Cui X P, Chen L Q, et al. 2023. Objective circulation classification of rainstorm days associated with Northeast China cold vortexes in the warm seasons of 2000–19 [J]. Front. Earth Sci., 10: 1066070. doi:10.3389/feart.2022.1066070

Huang X, Zhou Y S, Liu L. 2020. Occurrence and development of an extreme precipitation event in the Ili Valley, Xinjiang, China and analysis of gravity waves [J]. Atmosphere, 11(7): 752. doi:10.3390/atmos11070752

黄昕. 2021. 新疆伊犁河谷极端降水的环流特征及发生发展机理分析 [D]. 中国科学院大学博士论文, 145pp. Huang X. 2021. Analysis on the circulation characteristics and the Initiation and development mechanisms of extreme precipitation in the Ili Valley, Xinjiang [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 145pp.

黄昕, 周玉淑, 冉令坤, 等. 2021. 一次新疆伊犁河谷特大暴雨过程的环境场及不稳定条件分析 [J]. 大气科学, 45(1): 148−164. Huang X, Zhou Y S, Ran L K, et al. 2021. Analysis of the environmental field and unstable conditions on a rainstorm event in the Ili Valley of Xinjiang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 148−164. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19219

黄璇, 李栋梁. 2020. 1979−2018 年 5−8 月中国东北冷涡建立的客观识别方法及变化特征 [J]. 气象学报, 78(6): 945−961. Huang X, Li D L. 2020. Objective identification method and variation characteristics of the Northeast China cold vortex from May to

August of 1979–2018 [J]. Acta Meteor. Sinica, 78(6): 945−961. doi:10.11676/qxxb2020.077

Huang Y J, Ma X L, Ma Y, et al. 2022. Heavy precipitation events in northwestern China induced by northeastward plateau vortex: Two cases comparison [J]. Front. Earth Sci., 10: 965005. doi:10.3389/feart.2022.965005

黄艳, 刘涛, 张云惠. 2012. 2010 年盛夏南疆西部一次区域性暴雨天气特征 [J]. 干旱气象, 30(4): 615−622. Huang Y, Liu T, Zhang Y H. 2012. Features of a regional rainstorm in midsummer of 2010 in western Xinjiang [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 30(4): 615−622.

黄一航, 陈权亮, 汪正林, 等. 2018. 1979～2016 年青藏高原低涡的变化特征研究 [J]. 暴雨灾害, 37(2): 97−104. Huang Y H, Chen Q L, Wang Z L, et al. 2018. Variation characteristics of Tibetan Plateau vortex during 1979–2016 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 37(2): 97−104. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.02.001

Hunt K M R, Curio J, Turner A G, et al. 2018. Subtropical westerly jet influence on occurrence of western disturbances and Tibetan Plateau vortices [J]. Geophys. Res. Lett., 45(16): 8629−8636. doi:10.1029/2018GL077734

江吉喜, 范梅珠. 2002. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统 [J]. 大气科学, 26(2): 263−270. Jiang J X, Fan H Z. 2002. Convective clouds and mesoscale convective systems over Tibetan Plateau in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(2): 263−270. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.02.12

蒋大凯, 王江山, 阎琦, 等. 2012. 1961−2010 年 5−9 月东北冷涡气候特征及其对辽宁气温的影响 [J]. 气象与环境学报, 28(2): 5−9. Jiang D K, Wang J S, Yan Q, et al. 2012. Climatic characters of northeast cold vortex and its effect on air temperature in Liaoning Province from May to September during 1961−2010 [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 28(2): 5−9. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2012.02.002

焦宝峰, 冉令坤, 李舒文, 等. 2022. 一次暴雨中尺度涡旋发展机制诊断分析研究 [J]. 大气科学, 46(3): 762−774. Jiao B F, Ran L K, Li S W, et al. 2022. Diagnosis of the mesoscale vortex development mechanism in a heavy rain event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 762−774. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21247

Jiao B F, Ran L K, Li N, et al. 2023. Comparative analysis of the generalized Omega equation and generalized vertical motion equation [J]. Adv. Atmos. Sci., 40(5): 856−873. doi:10.1007/s00376-022-1435-5

Kawashima M. 2003. The role of gravity waves in the meso-β-scale cycle of squall-line type convective systems [J]. J. Meteor. Soc. Japan Ser. II, 81(4): 713−746. doi:10.2151/jmsj.81.713

Kirshbaum D J, Adler B, Kalthoff N, et al. 2018. Moist orographic convection: Physical mechanisms and links to surface-exchange processes [J]. Atmosphere, 9(3): 80. doi:10.3390/atmos9030080

孔期, 郑永光, 陈春艳. 2011. 乌鲁木齐 7·17 暴雨的天气尺度与中尺度特征 [J]. 应用气象学报, 22(1): 12−22. Kong Q, Zheng Y G, Chen C Y. 2011. Synoptic scale and mesoscale characteristics of 7·17 Urumqi heavy rainfall in 2007 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 22(1): 12−22.

李超, 李跃清, 蒋兴文. 2015. 四川盆地低涡的月际变化及其日降水分布统计特征 [J]. 大气科学, 39(6): 1191−1203. Li C, Li Y Q, Jiang X W. 2015. Statistical characteristics of the inter-monthly variation of the Sichuan Basin vortex and the distribution of daily precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(6): 1191−1203. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14270

李国平, 张万诚. 2019. 高原低涡、切变线暴雨研究新进展 [J]. 暴雨灾害, 38(5): 464−471. Li G P, Zhang W C. 2019. Recent advances in the research of heavy rain associated with vortices and shear lines come from the Tibetan Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 38(5): 464−471. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.008

李国平, 蒋静. 2000. 一类奇异孤波解及其在高原低涡结构分析中的应用 [J]. 气象学报, 58(4): 447−455. Li G P, Jiang J. 2000. A type of singular solitary wave and its application of structure analysis of the Tibetan Plateau vortex [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58(4): 447−455. doi:10.11676/qxxb2000.047

李国平, 赵福虎, 黄楚惠, 等. 2014. 基于 NCEP 资料的近 30 年夏季青藏高原低涡的气候特征 [J]. 大气科学, 38(4): 756−769. Li G P, Zhao F H, Huang C H, et al. 2014. Analysis of 30-year climatology of the Tibetan Plateau vortex in summer with NCEP reanalysis data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 756−769. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13235

李国平, 卢会国, 黄楚惠, 等. 2016. 青藏高原夏季地面热源的气候特征及其对高原低涡生成的影响 [J]. 大气科学, 40(1): 131−141. Li G P, Lu H G, Huang C H, et al. 2016. A climatology of the surface heat source on the Tibetan Plateau in summer and its impacts on the formation of the Tibetan Plateau vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(1): 131–141. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15125

Li J, Yu R C, Yuan W H, et al. 2011. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years [J]. J. Climate, 24(21): 5683−5690. doi:10.1175/JCLI-D-11-00009.1

李建刚, 姜彩莲, 张云惠, 等. 2019. 中亚低涡背景下一次短时强降水过程 MCS 成因分析 [J]. 干旱区地理, 42(4): 724−734. Li J G, Jiang C L, Zhang Y H, et al. 2019. Causal analysis of MCS in a short-time severe precipitation process under the background of Central-Asia vortex [J]. Arid Land Geogr. (in Chinese), 42(4): 724−734. doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.04.03

Li L, Zhang R H. 2023. Evolution mechanisms, impacts, and variations of the vortices originated from the Tibetan Plateau [J]. Earth-Science Reviews, 242: 104463. doi:10.1016/j.earscirev.2023.104463

李黎, 刘海文, 吕世华. 2017. 春季西南低涡年际和年代际变化特征分析 [J]. 高原气象, 36(6): 1512−1520. Li L, Liu H W, Lü S H. 2017. Interannual and interdecadal variations analysis of the spring southwest vortex [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 36(6): 1512−1520. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00016

Li L, Zhang R H, Wen M. 2019a. Large-scale backgrounds and crucial factors modulating the eastward moving speed of vortices moving off the Tibetan Plateau [J]. Climate Dyn., 53(3−4): 1711−1722. doi:10.1007/s00382-019-04724-1

Li L, Zhang R H, Wen M, et al. 2019b. Characteristics of the Tibetan

Plateau vortices and the related large-scale circulations causing different precipitation intensity [J]. Theoret. Appl. Climatol., 138(1): 849−860. doi:10.1007/s00704-019-02870-4

Li L, Zhang R H, Wen M. 2020. Structure characteristics of the vortices moving off the Tibetan Plateau [J]. Meteor. Atmos. Phys., 132(1): 19−34. doi:10.1007/s00703-019-00670-z

Li L, Zhu C W, Zhang R H, et al. 2021a. Roles of the Tibetan Plateau vortices in the record Meiyu rainfall in 2020 [J]. Atmos. Sci. Lett., 22: e1017. doi:10.1002/asl.1017. doi:10.1002/asl.1017

Li L, Zhang R H, Wen M, et al. 2021b. Regionally different precipitation trends over the Tibetan Plateau in the warming context: A perspective of the Tibetan Plateau vortices [J]. Geophys. Res. Lett., 48(11): e2020GL091680. doi:10.1029/2020gl091680

Li L, Huang H H, Zhu C W. 2023. Causation of the heavy rainfall in Kyushu in early July 2020: A perspective of the depression that originated over the Tibetan Plateau [J]. Front. Earth Sci., 11: 1127299. doi:10.3389/feart.2023.1127299

李强, 王秀明, 周国兵, 等. 2020. 四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究 [J]. 高原气象, 39(5): 960−972. Li Q, Wang X M, Zhou G B, et al. 2020. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall during southwest vortex rainstorm in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 39(5): 960−972. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00096

李山山, 王晓芳, 李国平, 等. 2023. 短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比 [J]. 暴雨灾害, 42(1): 1−12. Li S S, Wang X F, Li G P, et al. 2023. Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 42(1): 1−12. doi:10.12406/byzh.2022-119

李爽, 丁治英, 戴萍, 等. 2016. 东北冷涡的最新研究进展 [J]. 干旱气象, 34(1): 13−19. Li S, Ding Z Y, Dai P, et al. 2016. Recent advances in research on Northeast China cold vortex [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 34(1): 13–19. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-01-0013

李祥, 杨帅, 杨书运. 2023. 中国西南部一次东移型暴雨中涡旋发展的多尺度地形影响研究 [J]. 大气科学, 47(1): 34–52. Li X, Yang S, Yang S Y. 2023. Influence of multi-scale topographic factors on vortex development during an eastward-propagating rainstorm event in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(1): 34−52. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21072

李筱杨, 郑佳锋, 朱克云, 等. 2019. 基于雷达资料的一次高原涡天气云降水宏微观特征研究 [J]. 气象, 45(10): 1415−1425. Li X Y, Zheng J F, Zhu K Y, et al. 2019. Study of macro and micro properties of cloud and precipitation caused by Tibetan Plateau vortex based on radar observations [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(10): 1415−1425. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.008

李跃清, 郁淑华, 彭骏, 等. 2010. 青藏高原低涡切变线年鉴——1998 [M]. 北京: 科学出版社, 1−234. Li Y Q, Yu S H, Peng J, et al. 2010. The Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–234.

李兆慧. 2011. 东北冷涡暴雨云降水物理过程的数值模拟研究 [D]. 中国气象科学研究院, 硕士学位论文, 90pp. Li Z H. 2011. A numerical study of cloud and precipitation microphysical processes of cold vortex over Northeast China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 90pp.

Lin Y T, Fang Y H, Zhao C Y, et al. 2023. Coordinated influence of Indian Ocean sea surface temperature and Arctic sea ice on anomalous Northeast China cold vortex activities with different paths during late summer [J]. Adv. Atmos. Sci., 40(1): 62−77. doi:10.1007/s00376-022-1415-9

林志强. 2015. 1979-2013 年 ERA-Interim 资料的青藏高原低涡活动特征分析 [J]. 气象学报, 73(5): 925−939. Lin Z Q. 2015. An objective analysis of the Tibetan Plateau vortexes based on the ERA-interim reanalysis data: 1979−2013 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(5): 925–939. doi:10.11676/qxxb2015.066

林志强, 周振波, 假拉. 2013. 高原低涡客观识别方法及其初步应用 [J]. 高原气象, 32(6): 1580−1588. Lin Z Q, Zhou Z B, Jia L. 2013. Objective identifying method of Qinghai–Xizang Plateau vortex using NCEP/NCAR reanalysis dataset [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(6): 1580−1588. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00153

Lin Z Q, Guo W D, Jia L, et al. 2020. Climatology of Tibetan Plateau vortices derived from multiple reanalysis datasets [J]. Clim. Dyn., 55(7): 2237−2252. doi:10.1007/s00382-020-05380-6

Lin Z Q, Yao X P, Guo W D, et al. 2021a. Vertical structure of Tibetan Plateau vortex in boreal summer [J]. Theoret. Appl. Climatol., 145(1−2): 427−440. doi:10.1007/s00704-021-03640-x

Lin Z Q, Guo W D, Yao X P, et al. , 2021b. Tibetan Plateau vortex-associated precipitation and its link with the Tibetan Plateau heating anomaly [J]. Int. J. Climatol., 41(14): 6300−6313. doi:10.1002/joc.7195

Lin Z Q, Guo W D, Ge J, et al. , 2021c. Increased Tibetan Plateau vortex activities under 2°C warming compared to 1.5°C warming: NCAR CESM low-warming experiments [J]. Adv. Climate Change Res. , 12(3): 322−332. doi:10.1016/j.accre.2021.05.009

Lin Z Q, Yao X P, Guo W D, et al. 2022. Extreme precipitation events over the Tibetan Plateau and its vicinity associated with Tibetan Plateau vortices [J]. Atmos. Res., 280: 106433. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106433

林志强, 郭维栋, 姚秀萍, 等. 2023. 基于多源资料的高原低涡源地研究 [J]. 大气科学, 47(3): 837−852. Lin Z Q, Guo W D, Yao X P, et al. 2023. Reexamine the Tibetan Plateau vortices sources based on multiple resource datasets [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(3): 837−852. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2211.21262

柳草, 李跃清, 李德俊. 2009. 高原低涡移出高原的动力结构特征分析 [J]. 高原山地气象研究, 29(3): 8−11. Liu C, Li Y Q, Li D J. 2009. Analysis on the dynamic structure of vortex moving out of the Tibetan Plateau [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 29(3): 8−11. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2009.03.002

刘成歧, 李贵臣, 陈连友. 1976. 东北冷涡移动路径的统计预报 [J]. 大气科学, 1(1): 68−71. Liu C Q, Li G C, Chen L Y. 1976. Statistical forecast of the moving track of northeast cold vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1(1): 68−71. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1976.01.10

刘刚, 廉毅, 颜鹏程, 等. 2015. 5～8 月东北冷涡客观识别分类及北半球大气环流特征分析 [J]. 地理科学, 35(8): 1042–1050. Liu G, Lian Y, Yan P C, et al. 2015. The objective recognition and classification of Northeast cold vortex and the Northern Hemisphere atmospheric circulation characters in May to August [J]. Sci. Geograph. Sinica (in Chinese), 35(8): 1042−1050.

Liu G, Qu M H, Feng G L, et al. 2018. Application study of monthly precipitation forecast in Northeast China based on the cold vortex persistence activity index [J]. Theoret Appl. Climatol., 135(3−4): 1079−1090. doi:10.1007/s00704-018-2399-3

Liu L, Ran L K, Gao S T. 2019. A three-dimensional wave activity flux of inertia–gravity waves and its application to a rainstorm event [J]. Adv. Atmos. Sci., 36(2): 206−218. doi:10.1007/s00376-018-8018-5

刘新超, 陈永仁. 2014. 两次高原涡与西南涡作用下的暴雨过程对比分析 [J]. 高原山地气象研究, 34(1): 1−7. Liu X C, Chen Y R. 2014. Comparative analysis of two heavy rainfall processes under interaction of plateau vortex and southwest vortex [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 34(1): 1−7. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2014.01.001

Liu X R, Li G P. 2007. Analytical solutions for thermal forcing vortices in boundary layer and its applications [J]. Appl. Math. Mech., 28(4): 429−439. doi:10.1007/s10483-007-0402-1

刘晓冉, 李国平, 胡祖恒, 等. 2020. 一次高原低涡诱发西南低涡耦合加强的动力诊断分析 [J]. 气象科学, 40(3): 363−373. Liu X R, Li G P, Hu Z H, et al. 2020. Dynamic diagnosis of the strengthened Southwest vortex coupling induced by the Plateau vortex [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 40(3): 363−373. doi:10.3969/2019jms.0012

刘自牧, 李国平, 张博. 2018. 高原涡与高原切变线伴随出现的统计特征 [J]. 高原气象, 37(5): 1233−1240. Liu Z M, Li G P, Zhang B. 2018. Statistical characteristics of the concurrence between Qinghai-Tibetan Plateau vortex and Qinghai–Tibetan Plateau shear line [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(5): 1233−1240. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00028

Lu C H, Kong Y, Guan Z Y. 2020. A mask R-CNN model for reidentifying extratropical cyclones based on quasi-supervised thought [J]. Sci. Rep., 10(1): 15011. doi:10.1038/s41598-020-71831-z

陆汉城. 2019. 江淮以南地区暴雨和强降水的中尺度天气动力学研究进展 [J]. 暴雨灾害, 38(5): 440−449. Lu H C. 2019. The major research advance of rainstorm and heavy precipitation regarding the mesoscale weather dynamics in south of Yangtze–Huaihe River basin [J]. Torrential Rain and Disasters, 38(5): 440−449. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.006

卢敬华. 1986. 西南低涡概论 [M]. 北京: 气象出版社, 276pp. Lu J H. 1986. The Introduction of Southwest Vortex (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 276pp.).

卢萍, 杨康权. 2017. 四川盆地三个典型落区西南涡暴雨天气成因的对比分析 [J]. 高原山地气象研究, 37(3): 16−20. Lu P, Yang K Q. 2017. Comparative analysis of the Southwest vortex rainstorm causes at three typical areas in Sichuan Basin [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 37(3): 16−20. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2017.03.003

卢萍, 翟丹华, 李英, 等. 2014. 影响重庆暴雨的三类西南低涡浅析 [J]. 热带气象学报, 30(4): 736−746. Lu P, Zhai D H, Li Y, et al. 2014. Analysis of three kinds of Southwest vortexes influencing rainstorms in Chongqing City [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 30(4): 736−746. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.04.014

卢萍, 李旭, 李英, 等. 2016. 空间加密探空观测资料对西南低涡暴雨天气过程数值模拟的影响 [J]. 大气科学, 40(4): 730−742. Lu P, Li X, Li Y, et al. 2016. The influence of spatially intensive sounding observation data on the numerical modeling of southwest vortex rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(4): 730−742. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15170

路增鑫, 范广洲. 2023. 一次高原低涡过程云微物理特征模拟研究 [J]. 成都信息工程大学学报, 38(2): 166−173. Lu Z X, Fan G Z. 2023. Simulation of cloud microphysical characteristics during a Plateau vortex process [J]. J. Chengdu Univ. Inf. Technol. (in Chinese), 38(2): 166−173. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.02.007

罗玲, 胡亮, 何金海, 等. 2011. 东北冷涡背景下浙江省两次强降水过程的对比分析 [J]. 气象与环境学报, 27(6): 35−42. Luo L, Hu L, He J H, et al. 2011. Comparison of two rainstorm processes in Zhejiang Province caused by Northeast cold vortex [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 27(6): 35−42.

罗清, 郁淑华, 罗磊等. 2018. 不同涡源西南涡的若干统计特征分析 [J]. 高原山地气象研究, 38(4): 8−15. Luo Q, Yu S H, Luo L, et al. 2018. Analysis on statistical characteristics of Southwest vortexes with different vortex sources [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 38(4): 8−15. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2018.04.002

罗四维. 1992. 青藏高原及其邻近地区几类天气系统的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 14−25. Luo S W. 1992. Study on Some Kinds of Weather Systems Over and Around the Qinghai–Xizang Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 14−25.

罗四维, 王玉佩. 1984.1979 年 5-8 月青藏高原地区天气系统的统计分析 [C]//青藏高原气象科学试验文集 (一). 北京: 科学出版社, 269−278. Luo S W, Wang Y P. 1984. The statistic analysis of synoptic systems of the Tibetan Plateau region from May to August 1979 [C]//The Tibetan Plateau Meteorological Experiment Corpus I (in Chinese). Beijing: Science Press, 269−278.

罗四维, 何梅兰, 刘晓东. 1993. 关于夏季青藏高原低涡的研究 [J]. 中国科学 (B 辑), 23(7): 778−784. Luo S W, He M L, Liu X D. 1993. Study on the vortex of the Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau in summer [J]. Science China (Series B) (in Chinese), 23(7): 778−784.

罗亚丽, 孙继松, 李英, 等. 2020. 中国暴雨的科学与预报: 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 (in Chinese), 78(3): 419−450. doi:10.11676/qxxb2020.057

吕君宁, 钱正安, 单扶民, 等. 1984. 夏季青藏高原低涡的综合结构 [M]//青藏高原气象科学实验文集编辑组. 青藏高原气象科学实验文集 (二). 北京: 科学出版社, 195−205. Lü J N, Qian Z A, Shan F M, et al. 1984. Comprehensive structure of the Tibetan Plateau vortex

in summer [M]//Editorial Group of the Collection of Meteorological Science Experiments on the Qinghai Tibet Plateau. The Tibetan Plateau Meteorological Experiment Corpus II (in Chinese). Beijing: Science Press, 195−205.

马梁臣, 孙力, 王宁. 2017. 东北地区典型暴雨个例的水汽输送特征分析 [J]. 高原气象, 36(4): 960−970. Ma L C, Sun L, Wang N. 2017. Analysis of water vapor transport characteristics of typical rainstorm cases in Northeast China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 36(4): 960−970. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00078

马勋丹, 智协飞, 王静, 等. 2018.1979～2016 年夏季西南涡活动及其与降水的关系 [J]. 大气科学学报, 41(2): 198−206. Ma X D, Zhi X F, Wang J. et al. , 2018, Analysis of the Southwest vortex activities in summer and their relationship with precipitation during the period of 1979–2016 [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 41(2): 198−206. doi:10.13878 /j.cnki.dqkxxb.20130427001.

Ma S P, Cao J, Zhao H J, et al. 2022. Decomposition of water vapor flux divergence and its application to a blizzard event over Ili Valley in Central Asia during 30 Nov to 1 Dec 2018 [J]. Atmos. Res., 270: 106079. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106079

马婷, 刘屹岷, 吴国雄, 等. 2020. 青藏高原低涡形成、发展和东移影响下游暴雨天气个例的位涡分析 [J]. 大气科学, 44(3): 472−486. Ma T, Liu Y M, Wu G X, et al. 2020. Effect of potential vorticity on the formation, development, and eastward movement of a Tibetan Plateau vortex and its influence on downstream precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 472−486. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.18275

Ma T T, Wu G X, Liu Y M, et al. 2022. Abnormal warm sea-surface temperature in the Indian Ocean, active potential vorticity over the Tibetan Plateau, and severe flooding along the Yangtze River in summer 2020 [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 148(743): 1001−1019. doi:10.1002/qj.4243

Maussion F, Scherer D, Finkelnburg R, et al. 2011. WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China—An assessment using remote sensing and ground observations [J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15: 1795−1817. doi:10.5194/hess-15-1795-2011

Meng Z Y, Bai L Q, Zhang M R, et al. 2018. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China [J]. Wea. Forecasting, 33(3): 693−713. doi:10.1175/WAF-D-17-0085.1

孟智勇, 张福青, 罗德海, 等. 2019. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究: 天气篇 [J]. 中国科学: 地球科学, 49(12): 1875−1918. Meng Z Y, Zhang F Q, Luo D H, et al. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Synoptic meteorology [J]. Sci. China Earth Sci., 62(12): 1946−1991. doi:10.1007/s11430-019-9534-6

Morrison H, van Lier-Walqui M, Fridlind A M, et al. 2020. Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics [J]. J. Adv. Model. Earth Syst., 12(8): e2019MS001689. doi:10.1029/2019MS001689

慕丹, 李跃清. 2018. 基于 ERA-interim 再分析资料的近 30 年九龙低涡气候特征 [J]. 气象学报, 76(1): 15−31. Mu D, Li Y Q. 2018. Climatic characteristics of the Jiulong low vortex in recent 30 years based on the ERA-interim reanalysis data [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(1): 15−31. doi:10.11676/qxxb2017.084

Nieto R, Gimeno L, De La Torre L, et al. 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere [J]. J. Climate, 18(16): 3085−3103. doi:10.1175/JCLI3386.1

齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 2007. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究 [J]. 大气科学, 31(4): 621−634. Qi Y B, Guo X L, Jin D Z. 2007. An observational study of Macro/Microphysical structures of convective rainbands of a cold vortex over Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(4): 621−634. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.07

钱维宏, 艾阳, 陈笑晨. 2021. 辽宁开原龙卷强对流过程的扰动天气环境 [J]. 地球物理学报, 64(5): 1531−1541. Qian W H, Ai Y, Chen X C. 2021. Anomalous synoptic environments of a strong convective process with tornado in Kaiyuan City, Liaoning Province [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 64(5): 1531−1541. doi:10.6038/cjg2021O0180

钱正安, 单扶民, 吕君宁, 等. 1984.1979 年夏季青藏高原低涡的统计及低涡产生的气候因子探讨 [M]//青藏高原气象科学实验文集编辑组. 青藏高原气象科学实验文集 (二). 北京: 科学出版社, 182–194. Qian Z A, Shan F M, Lv J N, et al. 1984. The discuss on climate factors and statistic analysis of the Tibetan Plateau vortex in 1979 summer [M]//Editorial Group of the Collection of Meteorological Science Experiments on the Qinghai Tibet Plateau. The Tibetan Plateau Meteorological Experiment Corpus II (in Chinese). Beijing: Science Press, 182–194.

秦贺, 杨莲梅, 张云惠. 2013. 近 40 年来塔什干低涡活动特征的统计分析 [J]. 高原气象, 32(4): 1042−1049. Qin H, Yang L M, Zhang Y H. 2013. Statistical analysis on activity characteristic of Tashkent vortex in last 40 years [J]. Plateau Meteor., 32(4): 1042−1049. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00099

青藏高原气象科学研究拉萨会战组. 1981. 夏半年青藏高原 500 毫巴低涡切变线的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1−122. The Lhasa Focus Group on Tibetan Plateau Meteorology Research. 1981. The Research of Vortex and Shear Line on 500 hPa of Tibetan Plateau in Summer Half Year (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1−122.

沈杭锋, 翟国庆, 尹金方, 等. 2013. 长江下游梅汛期中尺度涡旋特征分析 [J]. 大气科学, 37(4): 923−932. Shen H F, Zhai G Q, Yin J F, et al. 2013. Feature analysis of mesoscale vortex over lower reaches of Yangtze River during Meiyu period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(4): 923−932. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12075

Shen R J, Reiter E R, Bresch J F. 1986. Some aspects of the effects of sensible heating on the development of summer weather systems over the Tibetan Plateau [J]. J. Atmos. Sci., 43(20): 2241−2260. doi:10.1175/1520-0469(1986)043<2241:SAOTEO>2.0.CO;2

师锐, 何光碧. 2018. 移出高原后长生命史高原低涡在不同移动路径下的大尺度环流特征及差异 [J]. 气象, 44(2): 213−221. Shi R, He G B. 2018. Comparison analysis of circulation features of different moving tracks of long-life-cycle Plateau vortexes moving out of the Plateau [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 44(2): 213−221. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.02.001

史玉光, 孙照渤. 2008. 新疆水汽输送的气候特征及其变化 [J]. 高原

气 象 , 27(2): 310−319. Shi Y G, Sun Z B. 2008. Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 27(2): 310−319.

Shou Y X, Lu F, Liu H, et al. 2019. Satellite-based observational study of the Tibetan Plateau vortex: Features of deep convective cloud tops [J]. Adv. Atmos. Sci., 36(2): 189−205. doi:10.1007/s00376-018-8049-y

Shu Y, Sun J S, Jin C L. 2022. A 10-year climatology of midlevel mesoscale vortices in China [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 61(4): 309−328. doi:10.1175/JAMC-D-21-0095.1

宋敏红, 钱正安. 2002. 高原及冷空气对 1998 和 1991 年夏季西太副高及雨带的影响 [J]. 高原气象, 21(6): 556−564. Song M H, Qian Z A. 2002. Impact of Plateau and cold air on SHWP and rain belt summer in 1998 and 1991 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 21(6): 556−564. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.06.005

宋雯雯, 李国平. 2011. 一次高原低涡过程的数值模拟与结构特征分析 [J]. 高原气象, 30(2): 267−276. Song W W, Li G P. 2011. Numerical simulation and structure characteristic analysis of a plateau vortex process [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30(2): 267−276.

苏爱芳, 梁俊平, 崔丽曼, 等. 2012. 豫北一次局地雹暴天气的预警特征和触发机制 [J]. 气象与环境学报, 28(6): 1−7. Su A F, Liang J P, Cui L M, et al. 2012. Warning characteristic and trigger mechanism of a local strong hailstorm in northern He'nan Province [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 28(6): 1−7.

孙芳, 周顺武, 王美蓉, 等. 2022. 初夏东北移高原低涡活动特征 [J]. 气象, 48(3): 324−333. Sun F, Zhou S W, Wang M R, et al. 2022. Activity characteristics of the northeast-moving Tibetan Plateau vortices in early summer [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 48(3): 324−333. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.112501

Sun F, Zhou S W, Yang C, et al. 2022. Activity characteristics of the northeast moving Tibetan Plateau vortices in summer [J]. Atmos. Res., 272: 106141. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106141

孙力, 郑秀雅, 王琪. 1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系 [J]. 应用气象学报, 5(3): 297–303. Sun L, Zheng X Y, Wang Q. 1994. The climatological characteristics of Northeast cold vortex in China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 5(3): 297−303.

孙力, 王琪, 唐晓玲. 1995a. 暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡的合成对比分析 [J]. 气象, 21(3): 7–10. Sun L, Wang Q, Tang X L., 1995a. A composite diagnostic analysis of cold vortex of storm-rainfall and non-storm rainfall types [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 21(3): 7−10. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1995.3.002

孙力, 廉毅, 白乐生. 1995b. 东北地区一次突发性暴雨分析 [J]. 高原气象, 14(4): 486−494. Sun L, Lian Y, Bai L S. 1995b. A diagnostic analysis of flash heavy rain in Northeast China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 14(4): 486−494.

孙力, 安刚, 高枞亭, 等. 2002. 1998 年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析 [J]. 应用气象学报, 13(2): 156−162. Sun L, An G, Gao Z T, et al. 2002. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the northeast cold vortex over Songhuajiang–Nenjiang River basin in summer of 1998 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 13(2): 156−162. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.02.003

Sun Z Q, Xue M, Zhu K F, et al. 2019. Prediction of an EF4 supercell tornado in Funing, China: Resolution dependency of simulated tornadoes and their structures [J]. Atmos. Res., 229: 175−189. doi:10.1016/j.atmosres.2019.06.019

汤欢, 傅慎明, 孙建华, 等. 2023. 基于高分辨率再分析风场的高原涡三维识别技术及应用 [J]. 大气科学, 47(3): 698−712. Tang H, Fu S M, Sun J H, et al. 2023. Three-dimensional objective identification of the Tibetan Plateau vortex based on a reanalysis wind field with a high spatial and temporal resolution [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(3): 698−712. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21127

Tang Y, Huang A N, Wu P L, et al. 2021. Drivers of summer extreme precipitation events over East China [J]. Geophys. Res. Lett., 48(11): e2021GL093670. doi:10.1029/2021GL093670

陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao S Y. 1980. Rainstorms in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.

Tao S Y, Luo S W, Zhang H C. 1986. The Qinghai–Xizang Plateau meteorological experiment (QXPMEX) May–August 1979 [C]// Proceedings of International Symposium on the Qinghai-Xizang Plateau and Mountain Meteorology. Boston, MA: American Meteorological Society, 3−13.

田珊儒, 段安民, 王子谦, 等. 2015. 地面加热与高原低涡和对流系统相互作用的一次个例研究 [J]. 大气科学, 39(1): 125−136. Tian S R, Duan A M, Wang Z Q, et al. 2015. Interaction of surface heating, the Tibetan Plateau Vortex, and a convective system: A case study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(1): 125−136. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13311

Trapp R J, Weisman M L. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part 2: Their genesis and implications [J]. Mon. Wea. Rev., 131(11): 2804−2823. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<2804:LMWSLA>2.0.CO;2

屠妮妮, 何光碧. 2010. 两次高原切变线诱发低涡活动的个例分析 [J]. 高原气象, 29(1): 90−98. Tu N N, He G B. 2010. Case analysis on two low vortexes induced by Tibetan Plateau shear line [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 29(1): 90−98.

Wang B. 1987. The development mechanism for Tibetan Plateau warm vortices [J]. J. Atmos. Sci., 44(20): 2978−2994. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<2978:TDMFTP>2.0.CO;2

王承伟, 徐海明, 任丽, 等. 2012. 东北冷涡客观识别方法的研究 [J]. 气象与环境学报, 28(2): 1−4. Wang C W, Xu H M, Ren L, et al. 2012. The objective identification method of northeast cold vortex [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 28(2): 1−4.

王东海. 2022. 东北冷涡暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 214pp. Wang D H. 2022. Northeast Cold Vortex Rainstorm (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 214pp.

Wang D H, Yang S. 2010. An atmospheric dry intrusion parameter and its application [J]. J. Meteor. Res., 24(4): 492−500.

王东海, 钟水新, 刘英, 等. 2007. 东北暴雨的研究 [J]. 地球科学进展, 22(6): 549−560. Wang D H, Zhong S X, Liu Y, et al. 2007. Advances in the study of rainstorm in Northeast China [J]. Adv.

Earth Sci. (in Chinese), 22(6): 549−560. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2007.06.0549

王东海, 杨帅, 钟水新, 等. 2009. 切变风螺旋度和热成风螺旋度在东北冷涡暴雨中的应用 [J]. 大气科学, 33(6): 1238−1246. Wang D H, Yang S, Zhong S X, et al. 2009. The application of shearing wind helicity and thermal wind helicity in Northeastern cold vortex rainfall event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(6): 1238−1246. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.10

王静, 陈静, 张进, 等. 2019. 一种新型西南低涡逐步订正识别方法 [J]. 大气科学学报, 42(4): 621−630. Wang J, Chen J, Zhang J, et al. 2019. A new method for gradually identifying the southwest vortex [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 42(4): 621−630. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170523001

王金虎, 李栋梁, 王颖. 2015. 西南低涡活动特征的再分析 [J]. 气象科学, 35(2): 133−139. Wang J H, Li D L, Wang Y. 2015. Characteristics reanalysis on Southwest vortex [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 35(2): 133−139. doi:10.3969/2014jms.0039

王培, 沈新勇, 高守亭. 2012. 一次东北冷涡过程的数值模拟与降水分析 [J]. 大气科学, 36(1): 130−144. Wang P, Shen X Y, Gao S T. 2012. A numerical study and rainfall analysis of a cold vortex process over Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(1): 130−144. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.11

王荣梅, 道然, 屠月青. 2010. 哈密地区 7·17 暴雨天气过程分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 4(1): 36−40. Wang R M, Dao R, Tu Y Q. 2010. Analysis of rainstorm on 7th July 2007 in Hami Area [J]. Desert Oasis Meteor. (in Chinese), 4(1): 36−40.

王婉昭, 李辑, 胡春丽, 等. 2017. 东北冷涡的定义、识别与定量化研究综述 [J]. 气象科学, 37(3): 394−402. Wang W Z, Li J, Hu C L, et al. 2017. A review of definition, identification and quantitative investigation on Northeast cold vortex [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 37(3): 394−402. doi:10.3969/2015jms.0092

王薇, 潘益农, 束宇. 2011. 中国东部夏季中尺度对流系统以及中尺度对流涡旋的特征 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 47(6): 692−702. Wang W, Pan Y N, Shu Y. 2011. The characteristics of mesoscale convective system and mesoscale convective vortex in summers over eastern China [J]. J. Nanjing Univ. Nat. Sci) (in Chinese), 47(6): 692−702. doi:10.13232/j.cnki.jnju.2011.06.005

王宗敏, 李江波, 王福侠, 等. 2015. 东北冷涡暴雨的特点及其非对称结构特征 [J]. 高原气象, 34(6): 1721−1731. Wang Z M, Li J B, Wang F X, et al. 2015. Asymmetric characteristics of the Northeast cold vortex and its effect on heavy rain [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 34(6): 1721−1731. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00084

魏铁鑫, 缪启龙, 段春锋, 等. 2015. 近 50a 东北冷涡暴雨水汽源地分布及其水汽贡献率分析 [J]. 气象科学, 35(1): 60−65. Wei T X, Miao Q L, Duan C F, et al. 2015. Water vapor sources distribution of cold eddy rainstorm in Northeast China and its contribution analysis in recent fifty years [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 35(1): 60−65. doi:10.3969/2013jms.0080

Wen L K, Cui P, Li Y, et al. 2010. The influence of sensible heat on monsoon precipitation in central and eastern Tibet [J]. Met. Appl., 17(4): 452−462. doi:10.1002/met.181

吴迪, 姚秀萍, 寿绍文. 2010. 干侵入对一次东北冷涡过程的作用分析 [J]. 高原气象, 29(5): 1208−1217. Wu D, Yao X P, Shou S W. 2010. Analysis of impact of dry intrusion on a cold vortex process in Northeast China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 29(5): 1208−1217.

Wu D, Zhang F M, Wang C H. 2018. Impacts of diabatic heating on the genesis and development of an inner Tibetan Plateau vortex [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 123(20): 11691−11704. doi:10.1029/2018JD029240

吴珍珍, 刘海文, 潘丽丽. 2018. 2011 年 8 月 4～5 日四川盆地双核西南低涡及其带来的降水天气分析 [J]. 成都信息工程大学学报, 33(6): 681−687. Wu Z Z, Liu H W, Pan L L. 2018. Analysis of a binary Southwest vortex and its precipitation over the Sichuan Basin on 4–5 August 2011 [J]. J. Chengdu Univ. Inf. Technol. (in Chinese), 33(6): 681−687. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.06.014

Wu Z Z, Liu H W, Chan K T F, et al. 2022. Effects of topography and latent heat on the evolution of a mesoscale dual-core southwest vortex over Sichuan Basin, China [J]. Front. Earth Sci., 10: 827601. doi:10.3389/feart.2022.827601

《新疆短期天气预报指导手册》编写组. 1986. 新疆短期天气预报指导手册 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. Writing Group for the Xinjiang Short Term Weather Forecast Guidance Manual. 1986. Xinjiang Short-Term Weather Forecast Guidebook (in Chinese) [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House.

肖递祥, 杨康权, 俞小鼎, 等. 2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析 [J]. 气象, 43(10): 1165−1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al. 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(10): 1165−1175. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.001

肖红茹, 陈静. 2010. 一次东移高原低涡影响四川暴雨的数值模拟分析 [J]. 高原山地气象研究, 30(2): 12−17. Xiao H R, Chen J. 2010. Numerical study of one Plateau vortex moving eastward affecting heavy rainfall in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 30(2): 12−17. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2010.02.003

Xie M, Li Y, Dong S. 2022. A deep-learning-based fusion approach for global cyclone detection using multiple remote sensing data [J]. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observat. Remote Sens., 15: 9613−9622. doi:10.1109/JSTARS.2022.3219809

谢义炳. 1949. 北美高空冷涡旋的研究 [M]. 中国近代科学论著丛刊-气象学, 267−284. Xie Y B. 1949. A Study of High-Level Cold Vortex in North America (in Chinese) [M]. Chinese Modern Science Series- Meteorology, 267−284. .

谢泽明. 2018. 新疆降水的水汽来源特征分析研究 [D]. 成都信息工程大学硕士学位论文, 67pp. Xie Z M. 2018. Analysis of vapor source characteristics of precipitation in Xinjiang [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chengdu University of Information Technology, 67pp.

谢作威, 布和朝鲁. 2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流 [J]. 气象学报, 70(4): 704–716. Xie Z W, Cholaw B. 2012. Low frequency characteristics of Northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70(4): 704−716. doi:10.11676/qxxb2012.057

Xie Z W, Bueh C. 2015. Different types of cold vortex circulations over Northeast China and their weather impacts [J]. Mon. Wea. Rev., 143(3): 845−863. doi:10.1175/MWR-D-14-00192.1

徐安伦, 张万诚, 李建, 等. 2022. 复杂山地气象观测试验研究综述 [J]. 气象科技进展, 12(2): 13–20. Xu A L, Zhang W C, Li J, et al. 2022. An overview of the field observation experiments and associated investigation on mountain meteorology over complex terrain region [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol., 12(2): 13−20. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.003

徐祥德, 陈联寿. 2006. 青藏高原大气科学试验研究进展 [J]. 应用气象学报, 17(6): 756−772. Xu X D, Chen L S. 2006. Advances of the study on Tibetan Plateau experiment of atmospheric sciences [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 17(6): 756−772.

Xu X K, Huang A N, Huang D Q, et al. 2023. What are the dominant synoptic patterns leading to the summer regional hourly extreme precipitation events over central-eastern Tibetan Plateau and Sichuan Basin? [J]. Geophys. Res. Lett., 50(5): e2022GL102342. doi:10.1029/2022GL102342

Xue M, Zhao K, Wang M J N, et al. 2016. Recent significant tornadoes in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 33(11): 1209−1217. doi:10.1007/s00376-016-6005-2

杨克明, 毕宝贵, 李月安, 等. 2001. 1998 年长江上游致洪暴雨的分析研究 [J]. 气象, 27(8): 9−14. Yang K M, Bi B G, Li Y A, et al. 2001. On flood-causing torrential rainfall in the upstream district of Changjiang River in 1998 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27(8): 9−14. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2001.8.002

杨康权, 卢萍, 肖递祥, 等. 2017a. 高原低值系统影响下一次极端强降水天气诊断分析 [J]. 高原山地气象研究, 37(2): 1−7. Yang K Q, Lu P, Xiao D X, et al. 2017a. Impact of the low-pressure system of Qinghai–Xizang Plateau on the occurrence and maintenance of extreme heavy rainfall event [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 37(2): 1−7. doi:10.3969/j.issn.1674-2184·2017.02.001

杨康权, 卢萍, 张琳. 2017b. 高原低涡影响下的一次暖区强降水特征分析 [J]. 热带气象学报, 33(3): 415−425. Yang K Q, Lu P, Zhang L. 2017b. Analyses of heavy rainstorm in warm sector under the influence of the low-pressure system of Qinghai–Xizang Plateau [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 33(3): 415−425. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.03.012

杨莲梅. 2019. 中亚低涡年鉴 (1970-2017) [M]. 北京: 气象出版社. Yang L M. 2019. Central Asian Vortex Yearbook 1970−2017 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

杨莲梅, 李曼. 2015. “96·7”中亚低涡持续活动能量转换和频散特征 [J]. 气象科技进展, 5(3): 40−48. Yang L M, Li M. 2015. Energy conversion and dispersion characteristics of “96·7” Central Asian vortex persistent activity [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 5(3): 40−48. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2015.03.003

Yang L M, Zhang Y H. 2017. Summary of current research on Central Asian vortex [J]. Adv. Climate Change Res., 8(1): 3−11. doi:10.1016/j.accre.2017.03.002

杨莲梅, 刘晶. 2018. 新疆水汽研究若干进展 [J]. 自然灾害学报, 27(2): 1−13. Yang L M, Liu J. 2018. Some advances of water vapor research in Xinjiang [J]. J. Nat. Disast. (in Chinese), 27(2): 1−13. doi:10.13577/j.jnd.2018.0201

杨莲梅, 张云惠, 汤浩. 2012. 2007 年 7 月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析 [J]. 高原气象, 31(4): 963−973. Yang L M, Zhang Y H, Tang H. 2012. Analyses on water vapor characteristics in three heavy rainstorm processes of Xinjiang in July 2007 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 31(4): 963−973.

杨莲梅, 张云惠, 黄艳, 等. 2020. 新疆短时强降水诊断分析暨预报手册 [M]. 北京: 气象出版社. Yang L M, Zhang Y H, Huang Y. 2020. Xinjiang Short−Term Heavy Precipitation Diagnostic Analysis and Forecasting Guidebook (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

Yang R Y, Zhang Y C, Sun J H, et al. 2019. The characteristics and classification of eastward-propagating mesoscale convective systems generated over the second-step terrain in the Yangtze River valley [J]. Atmos. Sci. Lett., 20(1): e874. doi:10.1002/asl.874

杨如意, 张元春, 孙建华, 等. 2020. 暖季长江中游二级地形附近东移和准静止 MCSs 的统计特征和环流形势对比 [J]. 中国科学: 地球科学, 50(8): 1149–1164. Yang R Y, Zhang Y C, Sun J H, et al. 2020. The comparison of statistical features and synoptic circulations between the eastward-propagating and quasi-stationary MCSs during the warm season around the second-step terrain along the middle reaches of the Yangtze River [J]. Sci. China Earth Sci., 63(8): 1209−1222. doi:10.1007/s11430-018-9385-3

Yang S, Wang D H. 2009. Diagnostic analyses of the modified convective vorticity vector in non-uniformly saturated moist flow [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2(3): 142−147. doi:10.1080/16742834.2009.11446788

Yang S, Gao S T, Wang D H. 2007. Diagnostic analyses of the ageostrophic $\vec{Q}$ vector in the non-uniformly saturated, frictionless, and moist adiabatic flow [J]. J. Geophys. Res., 112(D9): D09114. doi:10.1029/2006JD008142

Yang S, Zhang W, Chen B, et al. 2020. Remote moisture sources for 6-hour summer precipitation over the southeastern Tibetan Plateau and its effects on precipitation intensity [J]. Atmos. Res., 236: 104803. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104803

杨涛, 杨莲梅, 张云惠, 等. 2021. 新疆短时强降水天气系统环流配置及雷达回波特征 [J]. 干旱气象, 39(4): 631−640. Yang T, Yang L M, Zhang Y H, et al. 2021. Circulation configuration of synoptic system and radar echo characteristics of short-time heavy rainfall in Xinjiang [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 39(4): 631−640. doi:10.11755/J.ISSN.1006-7639(2021)-04-0631

杨涛, 杨莲梅, 李建刚, 等. 2022. 中亚低涡及其对新疆强降雨影响研究进展 [J]. 暴雨灾害, 41(6): 613−620. Yang T, Yang L M, Li J G, et al. 2022. Review of studies about Central Asian vortex and its influence on heavy precipitation in Xinjiang [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 41(6): 613−620. doi:10.12406/byzh.2022-086

杨引明, 谷文龙, 赵锐磊, 等. 2010. 长江下游梅雨期低涡统计分析 [J]. 应用气象学报, 21(1): 11−18. Yang Y M, Gu W L, Zhao R L, et al. 2010. The statistical analysis of low vortex during Meiyu season in the lower reaches of the Yangtze [J]. J. Appl. Meteor. Sci.

(in Chinese), 21(1): 11−18. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.002

杨颖璨, 李跃清, 陈永仁. 2018. 高原低涡东移加深过程的结构分析 [J]. 高原气象, 37(3): 702−720. Yang Y C, Li Y Q, Chen Y R. 2018. The characteristic analysis of an eastwards Plateau vortex by its strengthening process [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(3): 702−720. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00054

姚俊强, 杨青, 毛炜峄, 等. 2018. 基于 HYSPLIT4 的一次新疆天山夏季特大暴雨水汽路径分析 [J]. 高原气象, 37(1): 68−77. Yao J Q, Yang Q, Mao W Y, et al. 2018. Analysis of a summer rainstorm water vapor paths in Tianshan Mountains (Xinjiang) based on HYSPLIT4 model [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(1): 68−77. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00031

姚秀萍, 孙建元, 康岚, 等. 2014. 高原切变线研究的若干进展 [J]. 高原气象, 33(1): 294−300. Yao X P, Sun J Y, Kang L, et al. 2014. Advances on research of shear convergence line over Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 33(1): 294−300. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00164

Yasunari T, Miwa T. 2006. Convective cloud systems over the Tibetan Plateau and their impact on meso-scale disturbances in the Meiyu/Baiu frontal zone [J]. J. Meteor. Soc. Japan Ser. II, 84(4): 783−803. doi:10.2151/jmsj.84.783

叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 115−126. Ye D Z, Gao Y X. 1979. Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 115–126.

叶笃正, 高由禧. 1992. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 115−121. Ye D Z, Gao Y X. 1992. Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 115−121.

叶瑶, 李国平. 2016. 近 61 年夏半年西南低涡的统计特征与异常发生的流型分析 [J]. 高原气象, 35(4): 946−954. Ye Y, Li G P. 2016. Statistics characteristics and the abnormal development of flow pattern of the Southwest vortex in recent 61 summer half years [J]. Plateau Meteor (in Chinese), 35(4): 946−954. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00073

阴蜀城, 李茂善, 刘啸然, 等. 2020. 2014 年 8 月 7 日那曲地区对流云降水及其云微物理过程的数值模拟 [J]. 高原气象, 39(1): 48−57. Yin S C, Li S M, Liu X R, et al. 2020. Numerical simulation of cloud precipitation and cloud microphysical process in Nagqu area on August 7, 2014 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 39(1): 48−57. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00062

应爽, 袁大宇, 李尚锋. 2014. 一次东北冷涡不同阶段强对流天气特征对比分析 [J]. 气象与环境学报, 30(4): 9−18. Ying S, Yuan D Y, Li S F. 2014. Comparative analysis of severe convective weather characteristics in different stages of Northeast China cold vortex [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 30(4): 9−18. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.04.002

Yu R C, Yuan W H, Li J, et al. 2010. Diurnal phase of late-night against late-afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China [J]. Climate Dyn., 35(4): 567−576. doi:10.1007/s00382-009-0568-x

郁淑华. 2008. 夏季青藏高原低涡研究进展述评 [J]. 暴雨灾害, 27(4): 367−372. Yu S H. 2008. New research advances of the Tibetan Plateau vortex in summer [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 27(4): 367−372. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2008.04.016

郁淑华, 高文良. 2006. 高原低涡移出高原的观测事实分析 [J]. 气象学报, 64(3): 392−399. Yu S H, Gao W L. 2006. Observational analysis on the movement of vortices before/after moving out the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64(3): 392−399. doi:10.11676/qxxb2006.038

郁淑华, 高文良. 2017. 高原低涡与西南涡结伴而行的不同活动形式个例的环境场和位涡分析 [J]. 大气科学, 41(4): 831−856. Yu S H, Gao W L. 2017. Analysis of environmental background and potential vorticity of different accompanied moving cases of Tibetan Plateau vortex and Southwest China vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(4): 831−856. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16213

郁淑华, 高文良. 2018. 冷空气对夏季高原涡移出高原后长久与短期活动影响的对比分析 [J]. 大气科学, 42(6): 1297−1326. Yu S H, Gao W L. 2018. A comparative analysis of cold air influences on short-and long-time maintenance of the Tibetan Plateau vortex after it moves out of the Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(6): 1297−1326. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17207

郁淑华, 高文良. 2019. 移出与未移出青藏高原的高原低涡涡源区域的地面加热特征分析 [J]. 高原气象, 38(2): 299–313. Yu S H, Gao W L. 2019. Characteristics of surface land heating in the Qinghai–Tibetan Plateau vortex source regions along with the departure Plateau Vortex and non-departure Plateau Vortex [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 38(2): 299−313. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00086

郁淑华, 高文良, 彭骏. 2012. 青藏高原低涡活动对降水影响的统计分析 [J]. 高原气象, 31(3): 592−604. Yu S H, Gao W L, Peng J. 2012. Statistical analysis on influence of Qinghai–Xizang Plateau vortex activity on precipitation in China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 31(3): 592−604.

郁淑华, 高文良, 彭骏. 2021. 2012—2017 年不同涡源西南低涡多发的影响因素分析 [J]. 暴雨灾害, 40(6): 577−588. Yu S H, Gao W L, Peng J. 2021. Analysis of influencing factors on frequent occurrence of Southwest China vortexes with different vortex sources from 2012 to 2017 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 40(6): 577−588. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.002

郁淑华, 高文良, 彭骏. 2022. 准平直长路径与多折向路径东移高原涡的环境场特征 [J]. 气象学报, 80(6): 864−877. Yu S H, Gao W L, Peng J. 2022. The ambient field characteristics for quasi-straight long path and multi-turning path of eastward moving Tibetan Plateau vortex [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 80(6): 864−877. doi:10.11676/qxxb2022.067

岳治国, 余兴, 刘贵华, 等. 2018. NPP/VIIRS 卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征 [J]. 气象学报, 76(6): 968−982. Yue Z G, Yu X, Liu G H, et al. 2018. NPP/VIIRS satellite retrieval of summer convective cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(6): 968−982. doi:10.11676/qxxb2018.051

曾波, 何光碧, 余莲. 2016. 川渝地区两类西南涡形成前环境物理量

场分析 [J]. 高原山地气象研究, 36(4): 9−16. Zeng B, He G B, Yu L. 2016. Analysis of the physical field for two types of Southwest vortexes before formation period in Sichuan–Chongqing region [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 36(4): 9−16. doi:10.3969/j.issn.1674-2184·2016.04.002

曾波, 何光碧, 余莲. 2017. 川渝地区两类西南涡物理量场诊断分析 [J]. 成都信息工程大学学报, 32(2): 157−164. Zeng B, He G B, Yu L. 2017. Diagnostic analysis of the physical field for two types of Southwest vortexes in Sichuan–Chongqing region [J]. J. Chengdu Univ. Inf. Technol. (in Chinese), 32(2): 157−164. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.02.009

曾勇, 杨莲梅. 2016. 中亚低涡背景下新疆连续短时强降水特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 10(4): 67−73. Zeng Y, Yang L M. 2016. Characteristics of persistent short-time heavy rainfall causing by central Asian vortex in Xinjiang [J]. Desert Oasis Meteor. (in Chinese), 10(4): 67−73. doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2016.04.010

曾勇, 杨莲梅. 2017a. 南疆西部一次暴雨强对流过程的中尺度特征分析 [J]. 干旱气象, 35(3): 475−484. Zeng Y, Yang L M. 2017a. Mesoscale characteristic analysis of a severe convective weather with torrential rain in the west of southern Xinjiang [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 35(3): 475−484. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0475

曾勇, 杨莲梅. 2017b. 南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析 [J]. 暴雨灾害, 36(5): 410−421. Zeng Y, Yang L M. 2017b. Comparative analysis on mesoscale characteristics of two severe short-time precipitation events in the west of southern Xinjiang [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 36(5): 410−421. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.05.003

曾勇, 周玉淑, 杨莲梅. 2019. 新疆西部一次大暴雨形成机理的数值模拟初步分析 [J]. 大气科学, 43(2): 372−388. Zeng Y, Zhou Y S, Yang L M. 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism for a heavy rainstorm in western Xinjiang by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(2): 372−388. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.18106

Zeng Y, Yang L M, Tong Z P, et al. 2021. Statistical characteristics of raindrop size distribution during rainy seasons in Northwest China [J]. Adv. Meteor., 2021: 6667786. doi:10.1155/2021/6667786

Zeng Y, Tong Z P, Jiang Y F, et al., 2022a. Microphysical characteristics of seasonal rainfall observed by a Parsivel disdrometer in the Tianshan Mountains, China [J]. Atmos. Res., 280: 106459. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106459

Zeng Y, Yang L M, Zhou Y S, et al. 2022b. Characteristics of orographic raindrop size distribution in the Tianshan Mountains, China [J]. Atmos. Res., 278: 106332. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106332

Zeng Y, Yang L M, Zhou Y S, et al. 2022c. Statistical characteristics of summer season raindrop size distribution in the western and central Tianshan Mountains in China [J]. J. Meteor. Soc. Japan Ser. II, 100(6): 855−872. doi:10.2151/jmsj.2022-044

Zeng Y, Yang L M, Tong Z P, et al. 2022d. Characteristics and applications of summer season raindrop size distributions based on a PARSIVEL^2 disdrometer in the western Tianshan Mountains (China) [J]. Remote Sens., 14(16): 3988. doi:10.3390/rs14163988

Zeng Y, Li J G, Yang L M, et al. 2023. Microphysical characteristics of raindrop size distribution and implications for dual-polarization radar quantitative precipitation estimations in the Tianshan Mountains, China [J]. Remote Sens., 15(10): 2668. doi:10.3390/rs15102668

翟丹华, 刘德, 李强, 等. 2014. 引发重庆中西部暴雨的西南低涡特征分析 [J]. 高原气象, 33(1): 140–147. Zhai D H, Liu D, Li Q et al. 2014. Feature analysis of Southwest vortex causing heavy rain in western and middle Chongqing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(1): 140−147. doi:10.7522 /j.issn.1000-0534.2012.00181

张博, 李国平. 2017. 基于 CFSR 资料的青藏高原低涡客观识别技术及应用 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 53(1): 106−111, 118. Zhang B, Li G P. 2017. An objective identification of the Tibetan Plateau vortex based on climate forecast system reanalysis data [J]. J. Lanzhou Univ. Nat. Sci.) (in Chinese), 53(1): 106−111, 118. doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2017.01.016

张弛, 王咏青, 沈新勇, 等. 2019. 东北冷涡背景下飑线发展机制的理论分析和数值研究 [J]. 大气科学, 43(2): 361−371. Zhang C, Wang Y Q, Shen X Y, et al. 2019. Theoretical analysis and numerical study on the development mechanism of squall line in the Northeast cold vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(2): 361−371. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1806.18101

Zhang D L, Fritsch J M. 1987. Numerical simulation of the mesa-β scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part III. Internal gravity waves and the squall Lin [J]. J. Atmos. Sci., 45(7): 1252−1268. doi:10.1175/1520-0469(1988)045<1252:NSOTMS>2.0.CO;2

Zhang F M, Wang C H, Pu Z X. 2019. Genesis of Tibetan Plateau vortex: Roles of surface diabatic and atmospheric condensational latent heating [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 58(12): 2633−2651. doi:10.1175/JAMC-D-19-0103.1

张丰启. 2000. 东北冷涡特征及其关键区的计算机识别 [J]. 气象, 27(9): 46−48. Zhang F Q. 2000. Computer recognition of Northeast cold vortex [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 27(9): 46−48. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2001.09.012

张桂莲, 常欣, 黄晓璐, 等. 2018. 东北冷涡背景下超级单体风暴环境条件与雷达回波特征 [J]. 高原气象, 37(5): 1364−1374. Zhang G L, Chang X, Huang X L, et al. 2018. The environmental conditions and radar echo characteristics of the super cell storm under the background of the Northeast cold vortex [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(5): 1364−1374. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00068

张浩然, 郑佳锋, 车玉章. 2023. 一次青藏高原低涡影响下的云—降水宏微观特征研究 [J]. 成都信息工程大学学报, 38(6): 681−688. Zhang H R, Zheng J F, Che Y Z. 2023. Macro-microscopic characteristics of cloud-precipitation under the influence of a low vortex over the Tibetan Plateau [J]. J. Chengdu Univ. Inf. Technol. (in Chinese), 38(6): 681−688. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.06.010

张家宝, 邓子风. 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang J B, Deng Z F. 1987. Overview of Precipitation in Xinjiang (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

张俊兰, 李如琦, 李娜, 等. 2023a. 新疆塔里木盆地 2021 年 “7·19”

暴雨水汽特征的初步分析 [J]. 大气科学, 47(2): 567−584. Zhang J L, Li R Q, Li N, et al. 2023a. Preliminary analysis of the water vapor characteristics of the "July 19" heavy rain in 2021 in the Tarim Basin, Xinjiang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(2): 567−584. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21153

张俊兰, 李火青, 汤浩. 2023b. 西风和印度季风协同作用对塔里木盆地极端暴雨影响的初步分析 [J]. 大气科学学报, 46(2): 242−258. Zhang J L, Li H Q, Tang H. 2023b. Preliminary analysis of the synergistic influence of westerly wind and Indian monsoon on rainstorm over Tarim Basin [J]. Trans Atmos Sci. (in Chinese), 46(2): 242−258. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220113001

张敬萍, 傅慎明, 孙建华, 等. 2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成研究 [J]. 气候与环境研究, 20(3): 319−336. Zhang J P, Fu S M, Sun J H, et al. 2015. A statistical and compositional study on the two types of mesoscale vortices over the Yangtze River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(3): 319−336. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14164

张立祥, 李泽椿. 2009. 东北冷涡研究概述 [J]. 气候与环境研究, 14(2): 218−228. Zhang L X, Li Z C. 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 14(2): 218−228.

Zhang Y C, Sun J H. 2017. Comparison of the diurnal variations of precipitation east of the Tibetan Plateau among sub-periods of Meiyu season [J]. Meteorol. Atmos. Phys., 129(5): 539−554. doi:10.1007/s00703-016-0484-7

Zhang Y C, Zhang F, Davis C A, et al. 2018. Diurnal evolution and structure of long-lived mesoscale convective vortices along the Mei-yu front over the East China plains [J]. J. Atmos. Sci., 75(3): 1005−1025. doi:10.1175/JAS-D-17-0197.1

Zhang Y C, Fu S M, Sun J H, et al. 2019. A 14-year statistics-based semi-idealized modeling study on the formation of a type of heavy rain-producing Southwest vortex [J]. Atmos. Sci. Lett., 20(5): e894. doi:10.1002/asl.894

Zhang Y C, Sun J H, Zhu L Q, et al. 2021. Comparison of two types of persistent heavy rainfall events during sixteen warm seasons in the Sichuan Basin [J]. Atmos. Ocean Sci. Lett., 14(6): 100094. doi:10.1016/j.aosl.2021.100094

Zhang Y C, Sun J H, Yang R Y, et al. 2022. Initiation and evolution of long-lived eastward-propagating mesoscale convective systems over the second-step terrain along Yangtze–Huaihe River valley [J]. Adv. Atmos. Sci., 39(5): 763−781. doi:10.1007/s00376-022-1303-3

张云惠, 王勇. 2004. 哈密南部暴雨成因分析 [J]. 气象, 30(7): 41−44. Zhang Y H, Wang Y. 2004. Analysis of heavy rainfall in southern Hami, Xinjiang [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 30(7): 41−44. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2004.07.009

张云惠, 杨莲梅, 肖开提·多莱特, 等. 2012. 1971～2010 年中亚低涡活动特征 [J]. 应用气象学报, 23(3): 312−321. Zhang Y H, Yang L M, Duolaite X, et al. 2012. The Central Asian vortexes activity during 1971–2010 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 23(3): 312−321. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.03.007

张云惠, 陈春艳, 杨莲梅, 等. 2013. 南疆西部一次罕见暴雨过程的成因分析 [J]. 高原气象, 32(1): 191−200. Zhang Y H, Chen C Y, Yang L M, et al. 2013. Cause analysis on rare rainstorm in west of southern Xinjiang [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 32(1): 191−200. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00019

张云惠, 李海燕, 蔺喜禄, 等. 2015. 南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析 [J]. 气象, 41(7): 816−824. Zhang Y H, Li H Y, Lin X L, et al. 2015. Analysis of continuous rainstorm circulation background and the dynamic process of synoptic scale in west of southern Xinjiang [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 41(7): 816−824. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.003

张云惠, 于碧馨, 王智楷, 等. 2018. 伊犁河谷夏季两次极端暴雨过程的动力机制与水汽输送特征 [J]. 暴雨灾害, 37(5): 435−444. Zhang Y H, Yu B X, Wang Z K, et al. 2018. Dynamic mechanism and water vapor transportation characteristics of two extreme rainstorm events in Ili River valley in summer of 2016 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 37(5): 435−444. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.05.006

Zhao P, Xu X D, Chen F, et al. 2018. The third atmospheric scientific experiment for understanding the earth–atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 99(4): 757−776. doi:10.1175/BAMS-D-16-0050.1

赵平, 李跃清, 郭学良, 等. 2018. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应: 第三次青藏高原大气科学试验 [J]. 气象学报, 76(6): 833−860. Zhao P, Li Y Q, Guo X L, et al. 2018. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The Third Tibetan Plateau atmospheric scientific experiment [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(6): 833−860. doi:10.11676/qxxb2018.060

赵思雄, 孙建华. 2019. 我国暴雨机理与预报研究进展及其相关问题思考 [J]. 暴雨灾害, 38(5): 422−430. Zhao S X, Sun J H. 2019. Progress in mechanism study and forecast for heavy rain in China in recent 70 years [J]. Torrential Rain and Disasters, 38(5): 422−430. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.004

赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 281pp. Zhao S X, Tao Z Y, Sun J H, et al. 2004. Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 281pp.

赵思玉, 范广洲. 2022. 青藏高原大气水循环与高原涡持续时间的关系分析 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 44(10): 114−126. Zhao S Y, Fan G Z. 2022. Study on the relationship between atmospheric water cycle and the duration of vortex over the Tibetan Plateauin [J]. J. Southwest Univ. Nat. Sci. Ed.) (in Chinese), 44(10): 114−126. doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2022.10.013

Zhao Y, Chen D L, Deng Y, et al. 2021. How were the eastward-moving heavy rainfall events from the Tibetan Plateau to the lower reaches of the Yangtze River enhanced? [J] J. Climate, 34(2): 607−620. doi:10.1175/JCLI-D-20-0226.1

郑秀雅, 张廷治, 白人海. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 299pp. Zheng X Y, Zhang T Z, Bai R H. 1992. The Heavy Rainfall in Northeast China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 299pp.

郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究 [J]. 高原气象, 37(7): 795−801. Zheng Y Y, Yao C, Hao Y, et al. 2011. The short-time forecasting and early-warning reasearch on severe convective weather under different types of large-scale circulation background [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(7): 795−801.

中国科学院兰州高原大气物理研究所. 1977. 青藏高原东侧动力性低涡形成机制的分析 [J]. 气象科技资料, (S1): 54−65. Lanzhou Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 1977. Analysis of the mechanism of dynamic low vortex formation on the eastern side of the Tibetan Plateau [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), (S1): 54−65.

中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. 2022. 青藏高原低涡切变线年鉴——2020[M]. 北京: 科学出版社, 1−328. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu, and Plateau Meteorology Committee of Chinese Meteorological Society. 2017. Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook 2020 (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1−328.

钟水新. 2011. 东北冷涡结构特征及其强降水形成机理研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 117pp. Zhong S X. 2011. Structural features of cold vortex and its formation mechanism of heavy rainfall over Northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 117pp.

钟水新, 王东海, 张人禾, 等. 2011. 一次东北冷涡降水过程的结构特征与影响因子分析 [J]. 高原气象, 30(4): 951−960. Zhong S X, Wang D H, Zhang R H, et al. 2011. Analyses on the structure characteristic and formation mechanism of the rainstorm related to a cold vortex system over Northeast China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30(4): 951−960.

周长艳, 李跃清, 房静, 等. 2008. 高原东侧川渝盆地东西部夏季降水及其大尺度环流特征 [J]. 高原山地气象研究, 28(2): 1−9. Zhou Changyan, Li Yueqing, Fang Jing. et al. 2008. Features of the summer precipitation in the west and east of Sichuan and Chongqing basin and on the eastern side of the plateau and the relating general circulation [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28(2): 1−9.

周长艳, 唐信英, 邓彪. 2015. 一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析 [J]. 高原气象, 34(6): 1636−1647. Zhou C Y, Tang X Y, Deng B. 2015. Precipitation characteristics and water vapor source analysis of record heavy rainfall process in Sichuan [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 34(6): 1636−1647. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00121

Zhou K, Liu H W, Zhao L, et al. 2017. Binary mesovortex structure associated with Southwest vortex [J]. Atmos. Sci. Lett., 18(6): 246−252. doi:10.1002/asl.749

周括, 冉令坤, 蔡仁, 等. 2022. 地形追随垂直运动方程在南疆极端暴雨中的诊断分析 [J]. 大气科学, 46(3): 745−761. Zhou K, Ran L K, Cai R, et al. 2022. Diagnostic analysis of terrain following vertical motion equation in southern Xinjiang extreme rainstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 745−761. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21194

Zhou S, Sun F, Wang M R, et al. 2022. Effects of atmospheric heat source on the Tibetan Plateau vortex in different stages: A case study in June 2016 [J]. Atmosphere, 13(5): 689. doi:10.3390/atmos13050689

Zhou Y S, Xie Z M, Liu X. 2019. An analysis of moisture sources of torrential rainfall events over Xinjiang, China [J]. Journal of Hydrometeorology, 20(10): 2109−2122. doi:10.1175/JHM-D-19-0010.1

庄晓翠, 李如琦, 李博渊, 等. 2017. 中亚低涡造成新疆北部区域暴雨成因分析 [J]. 气象, 43(8): 924−935. Zhuang X C, Li R Q, Li B Y, et al. 2017. Analysis on rainstorm caused by Central Asian vortex in northern Xinjiang [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 43(8): 924−935. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.003

庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等. 2022. 天山南坡暖季暴雨过程的水汽来源及输送特征 [J]. 干旱气象, 40(1): 30−40. Zhuang X C, Li B Y, Zhao J W, et al. 2022. Water vapor source and transport characteristics of rainstorm processes in warm season on southern slope of the Tianshan Mountains [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 40(1): 30−40. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-01-0030