华北地区两次暴雨过程低涡结构和发展演变机制对比分析

胡艺[1,2] 张夕迪[2,*] 黄海波[3,4] 符娇兰[2,*] 黄鸿惠[5]

1. 全国暴雨研究中心，武汉，430205
2. 国家气象中心，北京，100081
3. 岳阳市气象局，岳阳，414000
4. 气象防灾减灾湖南省重点实验室，长沙，410021
5. 广西壮族自治区气象灾害防御技术中心，南宁，530007

摘要：本文基于地面常规观测资料和 ERA5 再分析数据对比分析了 2016 年 7 月 19-21 日（个例 1）和 2021 年 7 月 11-13 日（个例 2）两次华北低涡强降水过程的低涡垂直结构及其发展演变机制。结果表明：两个低涡系统均在西低东高的相似环流背景下生成，随后沿太行山东麓东移北上并给华北地区带来强降水，个例 1 高空急流明显强于个例 2，这是大尺度环流背景的显著区别。两个低涡的垂直结构存在差异，个例 1 低涡在垂直方向发展深厚，分别在高层（300 hPa）和低层（850 hPa）存在正涡度中心，低层正涡度中心随低涡的移动强度逐渐减弱，高层正涡度中心强度逐渐增强，且呈现上暖下冷的温度分布，中层 400 hPa 存在弱暖心结构，其下为冷气团，低涡中心轴线西侧有干冷空气；个例 2 低涡发展较为浅薄，仅存在低层一个正涡度中心，且始终位于 850 hPa 附近，对流层中层 700~300 hPa 之间呈现明显的暖心结构，冷心较强，位于近地面。两个低涡系统的发展均与高空位涡下传、低层暖湿气流的输送有关，但个例 1 有干冷空气侵入，高低空存在明显锋生和对流不稳定，有利于上升运动的产生和正涡度的增强；个例 2 对流层整层以暖平流为主，且位涡中心和暖平流中心均位于 850 hPa 以下，两者近乎重合，产生上升运动，使低涡系统发展。涡度收支分析表明，两个低涡在各演变阶段低涡中心北侧和东侧收支为正，表明低涡有向东、向北移动的趋势，水平散度项和扭转项在发展阶段对两个华北低涡低层涡度增长起到了主要的正贡献，之后平流项和散度项呈显著正贡献，后期个例 1 垂直项在低涡中心及其东侧为正贡献，而个例 2 垂直项始终为负贡献。

关键词：低涡，垂直结构，发展机制，涡度收支方程，对比分析

Comparative analysis of the evolution mechanism of low vortex during two heavy rainfall processes in North China

HU Yi[1,2] ZHANG Xidi[2,*] HUANG Haibo[3,4] FU Jiaolan[2,*] HUANG Honghui[5]

1. Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan, 430205
2. National Meteorological Centre, Beijing, 100081
3. Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang, 414000
4. Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha, 410021
5. Guangxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanning, 530007

收稿日期：2025-06-16　网络预出版日期
作者简介：胡艺，女，硕士研究生，主要从事灾害性天气预报和季风低压研究。Email:hyy0227@163.com
通讯作者：张夕迪，E-mail:dg20280030@smail.nju.edu.cn；符娇兰，E-mail:bluelilyfly@163.com
资助项目：全国暴雨研究开放基金青年项目（BYKJ2024Q06）；中国气象局气象能力提升联合研究专项（23NLTSZ007）；国家重点研发计划（2023YFC3006704）；中国气象局暴雨精细化分析和预报青年创新团队（CMA2023QN05）；国家重点研发计划（2022YFC3003905）
Funded by the Open Fund Project for Heavy Rain (BYKJ2024Q06); China Meteorological Administration Capacity Enhancement Joint Research Project(23NLTSZ007); National Key Research and Development Program of China(2023YFC3006704); China Meteorological Administration rainstorm Fine Analysis and Forecast Youth Innovation Team(CMA2023QN05); National Key Research and Development Program of China(2022YFC3003905)

Abstract: Based on the conventional ground observation data and ERA5 reanalysis data, the vertical structure and evolution mechanism of the low vortex during the heavy precipitation process in North China during July 19-21, 2016 (case 1) and July 11-13, 2021 (case 2) were compared and analyzed in this paper. The results show that the two vortex systems are generated in a similar circulation background of low west and high east, and the upper-level jet stream in case 1 is significantly stronger than that in case 2, which is the obvious difference between the two vortex structures in large-scale circulation background. The vertical structure of the two low vortices is different. In case 1, the low vortices develop deeply in the vertical direction, and there are two positive vorticity centers in the upper layer (300 hPa) and the lower layer (850 hPa), respectively. With the movement of the low vortex, the positive vorticity center in the lower layer gradually weakens, while the positive vorticity center in the upper layer gradually increases, and the temperature distribution is warm at the top and cold at the bottom. There is a weak warm core structure at 400 hPa, under which there is a cold air mass, and the dry and cold air on the west side of the central axis of the vortex. In case 2, the development of low vorticity is relatively shallow, with only one positive vorticity center in the lower layer, and it is always located at 850 hPa. The middle troposphere presents an obvious warm core structure between 700 and 300 hPa, and the cold core near the ground. The development of the two low vortex systems is related to the downward transmission of the upper potential vortex and the transport of warm and humid air at the lower level. However, in case 1, there is the intrusion of dry cold air, and there is obvious frontogenesis and convective instability in the upper and lower levels, which is conducive to the generation of upward motion and the enhancement of positive vorticity. In case 2, the whole troposphere is dominated by warm advection, and the center of the potential vortex and the center of the warm advection are both below 850 hPa, and they almost overlap, resulting in upward motion and the development of the low vortex system. The vorticity budget analysis reveals that during various evolution stages of the two vortices, the budget on the northern and eastern sides of the vortex centers is positive, indicating a tendency for the vortices to move eastward and northward. The horizontal divergence term and the tilting term play a primary positive role in the vorticity growth at the lower levels of the two North China vortices during their development stages. The advection term and the divergence term contribute significantly and positively during the strength and attenuation stages. The difference between the two cases lies in the fact that, for Case 1, the vertical term contributes positively in the strength and attenuation stages, particularly in the vortex center and its eastern side, whereas for Case 2, the vertical term remains negative throughout the entire evolution process.

Key words: vortex, vertical structure, development mechanism, vorticity budget equation, comparative analysis

1 引言

中尺度低涡是华北暴雨最常见的影响系统之一，造成重大灾害的“63·8”华北特大暴雨和

“7·21”北京特大暴雨都与之相关（游景炎, 1965; 孙建华, 2013）。中尺度低涡系统空间尺度小、非线性和不确定性强，一直都是暴雨预报中的重难点（陶诗言, 1980）。根据其生成原因不同，影响华北地区的低涡系统大致分成两类：一类是在青藏高原特殊地形作用下产生的中尺度涡旋，如产生于四川西南部的西南涡和青海湖附近的西北涡；另一类是从高空西风槽中切断出来的冷性涡旋，如华北冷涡和东北冷涡（朱乾根, 2007）。两类低涡系统常伴随气旋性垂直涡度的急剧增大，在每年 7 至 8 月均对华北地区降水产生重要影响。

前人对华北低涡的垂直结构和发展机制开展过一定的研究。符娇兰等（2019）研究了两次华北冷涡降水成因，指出低涡环境场及中尺度对流系统结构的差异对降水分布特征有明显影响。陈碧莹和闵锦忠（2020）认为成熟的华北低涡呈现贯穿对流层的直立正涡度柱，但涡度变化集中在 500 hPa 以下，中心维持在 850 hPa 附近。华北低涡具有低层冷心，高层暖心结构，且随高度有向北倾斜的特征，低涡区并非一致的低层辐合、高层辐散和整层均为上升气流的单一系统，而是上升和下沉气流共存，暴雨区上空上升运动较强（韦统建等, 1996; 田秀霞和邵爱梅，2008）。华北低涡的水汽主要来源于中国南海和东海两地，水汽辐合深厚，垂直方向可达 600 hPa（苗春生等, 2014）。有研究表明，涡度增长主要受正涡度区与辐合中心重合产生的拉伸效应以及干侵入等因素的促进作用（赵宇等, 2011; 苗春生等, 2014; 陈碧莹和闵锦忠, 2020）。对流层中层正涡度中心强迫和潜热释放是产生低压涡旋的主要成因，气旋发生、发展阶段低层动力辐合制造的正涡度是低涡发展的直接动力因子（Menard and Fritsch, 1989; Bartels and Maddox, 1991; Chen and Frank, 1993, 孙建华等, 2002; 张凤和赵思雄, 2003; 朱爱军和潘益农, 2007）。降水释放凝结潜热加热大气，增强低层正涡度区促使低涡发展，同时加强的气压梯度导致地转风增强，使得低空急流进一步发展加强（Raymond and Jiang, 1990; 段海霞等, 2008; 赵玉春等, 2010）。西南低空急流的发展和维持不仅是暴雨低涡形成和持续发展的重要动力学条件，也是暴雨过程所需水汽的载体（程麟生等, 1995; Bei et al., 2002）。高低空急流耦合中心和水汽凝结潜热释放区均有利于引导低涡及低涡暴雨加强东移（苗春生等, 2014）。

夏季华北低涡系统在东移发展过程中，往往会产生降水强度大、持续时间长的暴雨过程，对我国华北地区造成严重影响，而不同结构的低涡系统对应的降水特征不同，其发生发展机制也有所差异，因此有必要对华北低涡结构及发展演变成因开展更深入的研究。2016 年 7 月 19 日 00 时至 21 日 08 时（北京时，下同，个例 1），受低涡东移北上影响，河北大部、山西中东部、山东西部、河南北部、北京、天津等地出现暴雨到大暴雨，其中，北京西部和南部、河北西南部等太行山东麓地区还出现了特大暴雨，上述地区过程累计降水量 100~400 mm，部分地区超过 600 mm（图 1a）。同样受华北低涡东移发展的影响，2021 年 7 月 11 日 00 时至 13 日 08 时（个例 2），河北东北部和西南部、山西东南部、河南北部、山东北部出现了大到暴雨，部分地区大暴雨，此次过程累计降水量 50~250 mm，个别站点 250 mm 以上（图 1b）。两次过程华北地区均出现了强降水，且均伴随低涡的东移北上，但从过程累计降水量、降水强度及降水持续时间上来看，个例 2 的影响程度均不及个例 1（张夕迪等, 2023）。雷蕾等（2017）和康延臻（2017）指出，个例 1 低涡在发展过程中，高层正位涡异常向南延伸，

与对流层中低层锋区耦合，造成高空位涡倾斜下传，并逐渐演变成近乎直立的、贯穿整个对流层的深厚低涡系统。个例 2 的低涡结构特征与个例 1 是否存在差异？两个低涡发展演变的热动力机制又是否存在不同？这是本文重点研究和解决的科学问题。

本文采用地面自动气象观测站 1 小时降水数据、欧洲中心 ERA5 高分辨率再分析数据（空间分辨率为 0.25°，时间分辨率为 1 h）等资料，对两次华北低涡暴雨过程中的低涡垂直结构和发展演变热动力机制进行深入探究，以期通过两个典型个例的对比分析，初步揭示华北低涡结构的关键特征，为提升此类华北地区强降水的预报提供理论支撑。

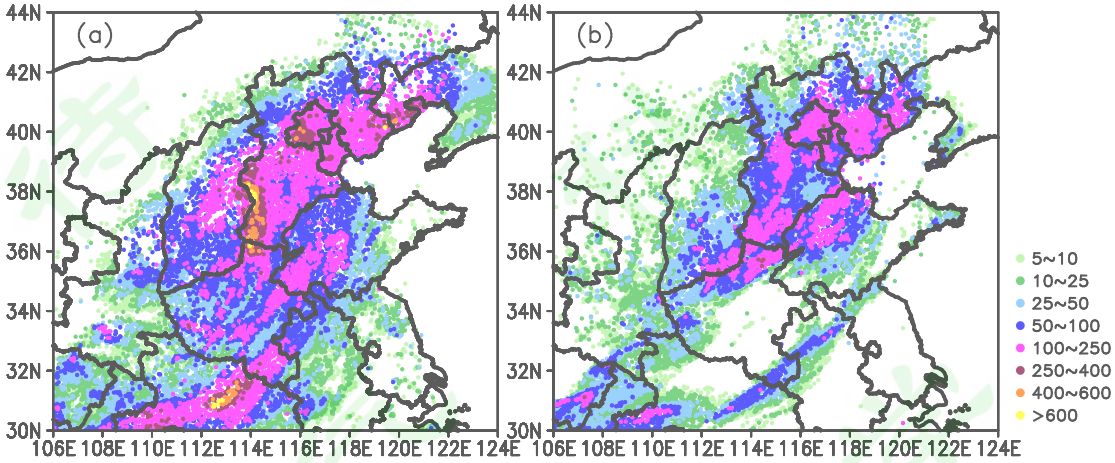

图 1 过程累计降水量（单位：mm）。（a）2016 年 7 月 19 日 00 时至 21 日 08 时；（b）2021 年 7 月 11 日 00 时至 13 日 08 时

Fig.1 Cumulative precipitation (unit: mm). (a) from 00:00 on July 19, 2016 to 08:00 on July 21, 2016; (b) from 00:00 on July 11, 2021 to 08:00 on July 13, 2021

2 影响系统与降水分布对比分析

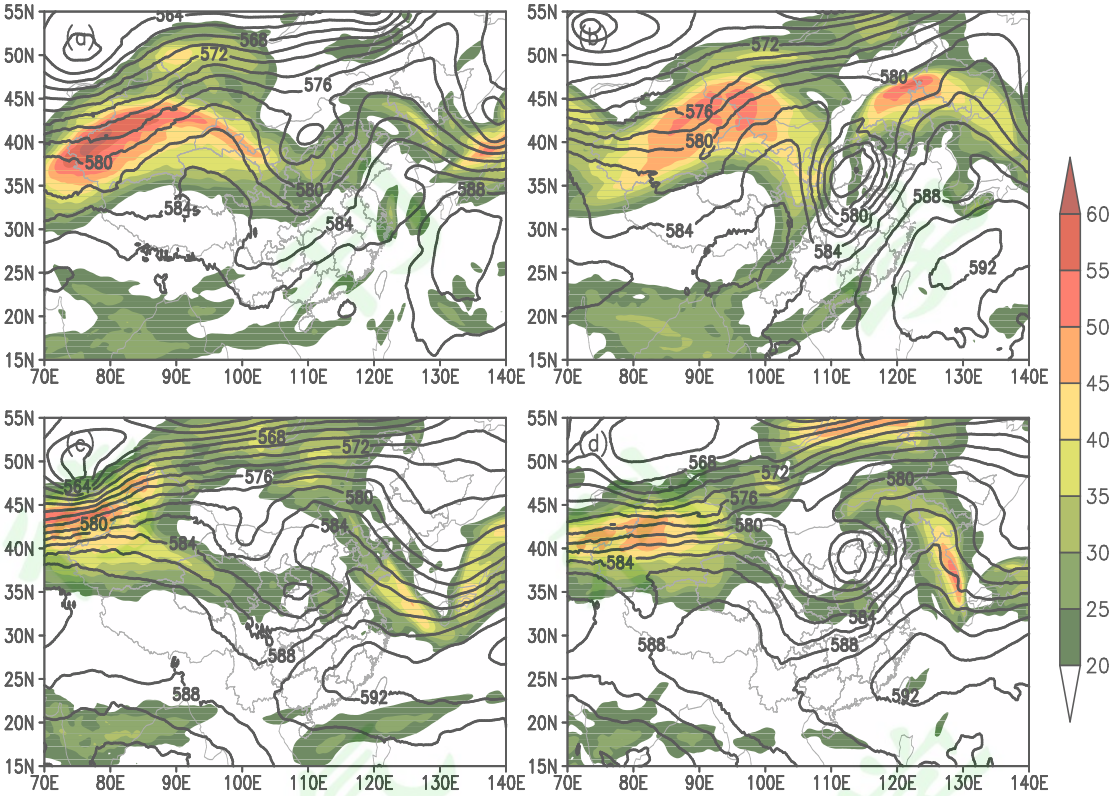

图 2 200 hPa 风速（填色，单位：m • s^{-1}）和 500 hPa 位势高度（等值线，单位：dagpm）。2016 年（a）7 月 19 日 02 时、（b）20 日 08 时、2021 年（c）7 月 11 日 02 时、（d）12 日 08 时

Fig.2 Wind speed at 200 hPa (highlighted, unit: m • s^{-1}) and geopotential height at 500 hPa (contour, unit: dagpm). (a) 02:00 on July 19, 2016, (b) 08:00 on July 20, 2016, (c) 02:00 on July 11, 2021, (d) 08:00 on July 12, 2021

2016 年 7 月 17 日，我国中高纬呈现“两槽一脊”的环流型，西部槽位于西北地区上空，高压脊位于贝加尔湖东侧，东部槽位于我国东北地区，系统东移且经向环流度增大，西太平洋副热带高压（以下简称西太副高）在我国东部洋面稳定维持。18 日前后，我国西北地区上空高空槽后冷空气不断堆积，东侧的高压脊发展且移动缓慢，呈现“西低东高”的环流形势（图略）。19 日 02 时，在内蒙古中部河套地区分裂出一个冷性切断低涡随着高空槽的加深不断发展增强，200 hPa 存在呈东西走向的高空急流带，急流核中心强度超过 60 m • s^{-1}，低涡生成的位置位于高空急流带出口区的左侧（图 2a），高空辐散抽吸作用有利于上升运动的发展，进而使低层低涡发展加强，高空槽出现在 110°E 附近，位置偏东且发展较为深厚。20 日 08 时前后低涡系统发展旺盛，500 hPa 出现了 574 dagpm 的闭合中心，整个低涡系统的位置也最偏南，高空槽南伸至 25°N 左右（图 2b），之后东移北上，21 日 10 时左右低涡减弱消失。在低涡生成发展过程中，西太副高呈块状分布且基本维持在 30°N 左右，与北方的高压脊在日本海附近叠加形成稳定的高压坝，副高脊线位于华南一带，由于上下游阻挡效应，低涡系统沿太行山和燕山山脉的方向移动发展。图 3a 中显示，7 月 20 日 02 时 850 hPa 低涡中心东侧和南侧有明显的低空急流区，西南气流和东南气流在鲁豫皖交界处辐合，过去 6 h 强降水主要出现在急流带附近的山东西南部和河南东北部。此外，低涡北侧的偏东风急流受地形影

响，沿太行山东麓出现强降水（图 3e）。20 日 08 时，西南急流和偏东风急流的强度和范围进一步增加（图 3b），强降水主要出现在河北东南部、山东西部等急流辐合区域中（图 3f）。

2021 年 7 月 10 日，我国上空同样呈现“西低东高”环流分布特征，11 日 02 时陕西关中平原有低涡移入，呈现“北槽南涡”形势（图 2c），北侧高空槽加深，低涡持续发展。与个例 1 不同的是，个例 2 高空低涡并非切断而来，更偏向于高原涡东移（李国平, 2005; 宋雯雯, 2010; 杨颖璨, 2017）。个例 2 于 12 日 08 时前后高空低涡发展增强，出现了 576 dagpm 闭合环流，槽底南伸至 28°N，低涡附近高空 200 hPa 急流较个例 1 明显偏弱，西太副高呈带状分布并向西延伸，576 dagpm 等位势高度线东西贯通，整体较个例 1 偏西、偏强，副高北界推至沿江一带，低涡东侧的高压坝更强，向北延伸至内蒙古北部，低涡在其阻挡下沿高压脊北上，移动缓慢（图 2c、2d）。低涡东侧和南侧有西南急流带不断发展，急流宽度和强度小于个例 1，同时低涡北侧的偏东风急流明显弱于个例 1。过去 6 h 降水主要出现在西南急流辐合和脉动处的河北大部、河南北部、北京大部以及山东西北部等地，太行山东麓的地形强降水明显弱于个例 1（图 3g、3f）。

两次华北低涡均是在西低东高的环流背景下产生的，西太副高与北部高压脊叠加形成稳定的高压坝，造成两个个例中高纬环流经向度较大，低层均有低涡沿高压坝缓慢东移北上，且伴有低空急流，同时，两个个例的西太副高脊线均位于 25°N~30°N 之间，华北地区位于副高西北侧，副高西侧与西风槽及低涡系统配合，有利于强降水的产生。不同之处在于，个例 1 的 200 hPa 高空急流明显强于个例 2，高层有明显的冷性切断低涡，高空槽出现的位置更偏东且更为深厚，低空急流的强度和范围也明显强于个例 2，导致个例 1 的降水强于个例 2。同时个例 1 在低涡北侧有明显的偏东风急流，从而在太行山东麓形成明显的地形强降水。

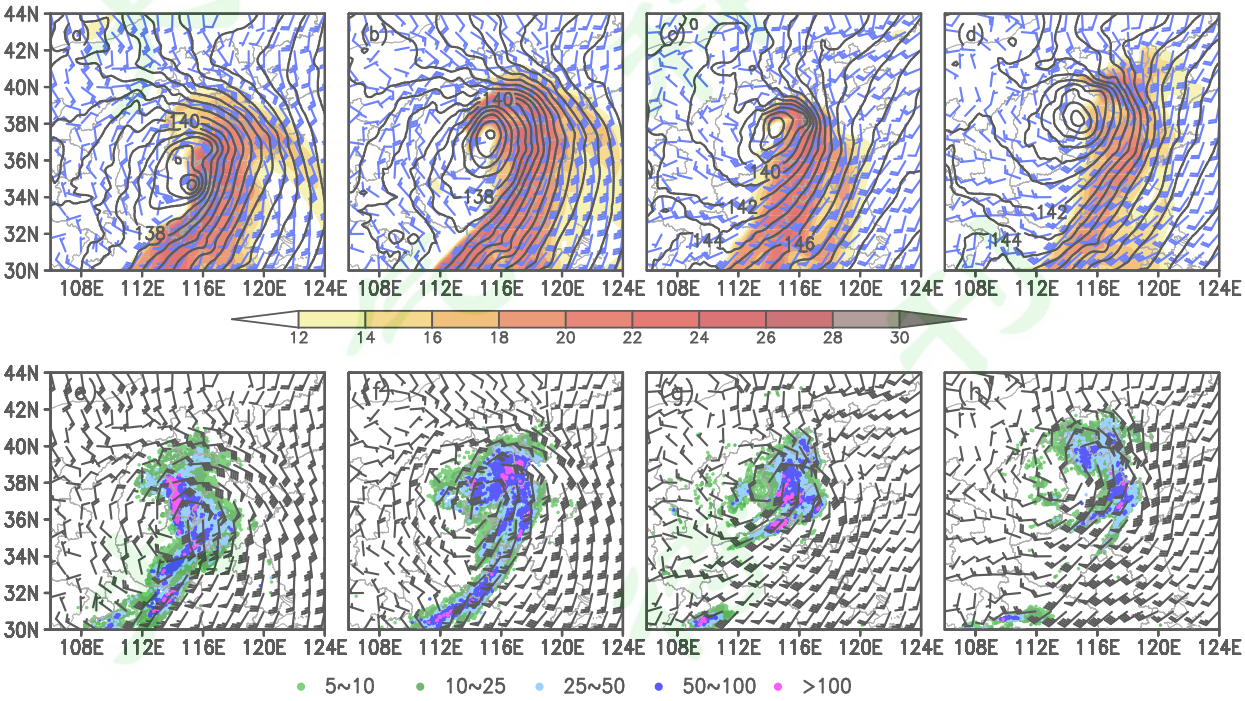

图 3 850hPa 位势高度（等值线，单位：dagpm）、风场（风矢）和风速（阴影，单位：m • s^{-1}）（a-d）；过去 6h 降水（散点，单位：mm）及 850hPa 风场（风矢）（e-h）。2016 年（a、e）7 月 20 日 02

时、（b、f）20 日 08 时、2021 年（c、g）7 月 12 日 02 时、（d、h）12 日 08 时

Fig.3 geopotential height (contour, unit: dagpm), wind field (barb arrow), and wind speed (shaded, unit: m • s^{-1}) at 850hPa (a-d); precipitation in the past 6 hours (scattered, unit: mm) and 850hPa wind field (barb arrow) (e-h). (a, e) 02:00 on July 20, 2016, (b, f) 08:00 on July 20, 2016, (c, g) 02:00 on July 12, 2021, (d, h) 08:00 on July 12, 2021

3 低涡系统强度演变、移动特征及垂直结构对比分析

3.1 低涡系统强度演变对比

为更好地研究和表述华北低涡在其生命史内不同发展演变阶段的结构特征，本文采用 Hu et al.（2019）对东亚热带季风低压的阶段划分方法，将两个华北低涡的演变过程划分为发展阶段、成熟阶段和衰减阶段。具体的划分方法如下：以 850 hPa 出现气旋性环流时间为生成时刻，闭合气旋性环流消失时间为消亡时刻，850 hPa 涡度发展最强对应的时刻为强盛时刻，取华北低涡生成时刻至强盛时刻的前 2/3 作为低涡的发展阶段，强盛时刻至消亡时刻的后 2/3 为低涡的衰减阶段，中间的部分为成熟阶段。

分析区域（20°~45°N，100°~120°E）各层最大涡度随时间演变发现（图 4），个例 1 低涡在生成前，区域内各层最大涡度相近，基本在 $40\times10^{-5}s^{-1}$ 以内，在发展阶段，500 hPa 和 700 hPa 涡度增长较快，高层 300 hPa 和低层 850 hPa 涡度增长较慢。强盛阶段对流层各层涡度迅速增强，特别是对流层低层（850、700 hPa）和高层（300 hPa）涡度增长幅度大，涡度大值远高于对流层中层的涡度，说明对流层高低层涡度均发展明显。衰减阶段 500hPa 涡度回落至 $20\times10^{-5}s^{-1}$ 左右，300 hPa 高层的涡度最大值后期长时间维持在 $60\times10^{-5}s^{-1}$ 上下，与 850hPa 涡度相近。由此看出个例 1 的低涡系统在整个过程中对流层高层涡度有明显发展，特别是低涡发展中后期，高层涡度发展更加显著，涡度发展强度不亚于低层涡度。与个例 1 低涡系统明显不同的是，个例 2 低涡整个过程以中低层涡度发展为主，高层始终变化不大，且高度越低，涡度值越大。在发展和强盛阶段，中低层涡度增长明显，12 日 23 时中低层涡度达到峰值，之后迅速减弱。在整个过程中，中低层低涡的发展强度略小于个例 1，且高层 300 hPa 涡度值变化不大，始终维持在 $20\times10^{-5}s^{-1}$ 左右。综上，从各层涡度最大值随时间演变情况来看，两个个例的中低层涡度随低涡发展均有明显增长，不同之处在于，个例 1 对流层高层 300 hPa 涡度增长早于中低层，且随着低涡的发展涡度有明显增强，特别是在低涡进入强盛阶段后，高层涡度先后超过 500 hPa、700 hPa 和 850 hPa，而个例 2 整个过程高层 300 hPa 涡度基本没有变化，且强度始终弱于中低层。从这个角度来看个例 1 是一个发展深厚的低涡系统，而个例 2 发展较为浅薄，这可能与高空急流的强度差异有关。

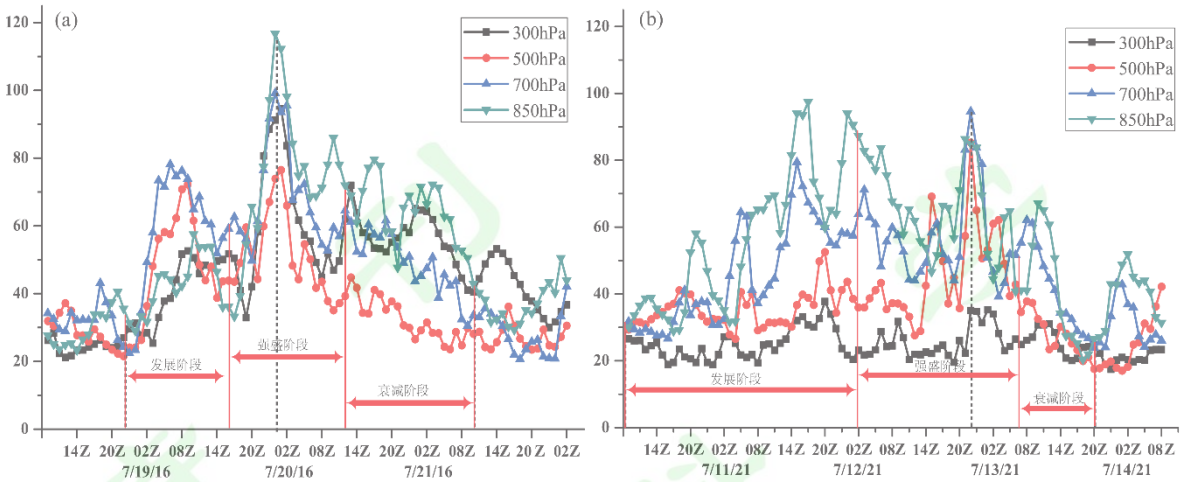

图 4 各标准等压面层（300 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa）最大正涡度（单位：$10^{-5}s^{-1}$）随时间演变及阶段划分（黑色虚线对应强盛时刻，首尾红色线条分别对应生成和消亡时刻）。（a）个例 1；（b）个例 2

Fig.4 The evolution of maximum vorticity (unit: $10^{-5}s^{-1}$) at standard isobaric levels (300 hPa, 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa) and stage division (the black dashed line represents the peak moment, and the red lines at beginning and end correspond to the start and disappearance moments. (a) in case 1; (b) in case 2

3.2 低涡系统移动特征对比分析

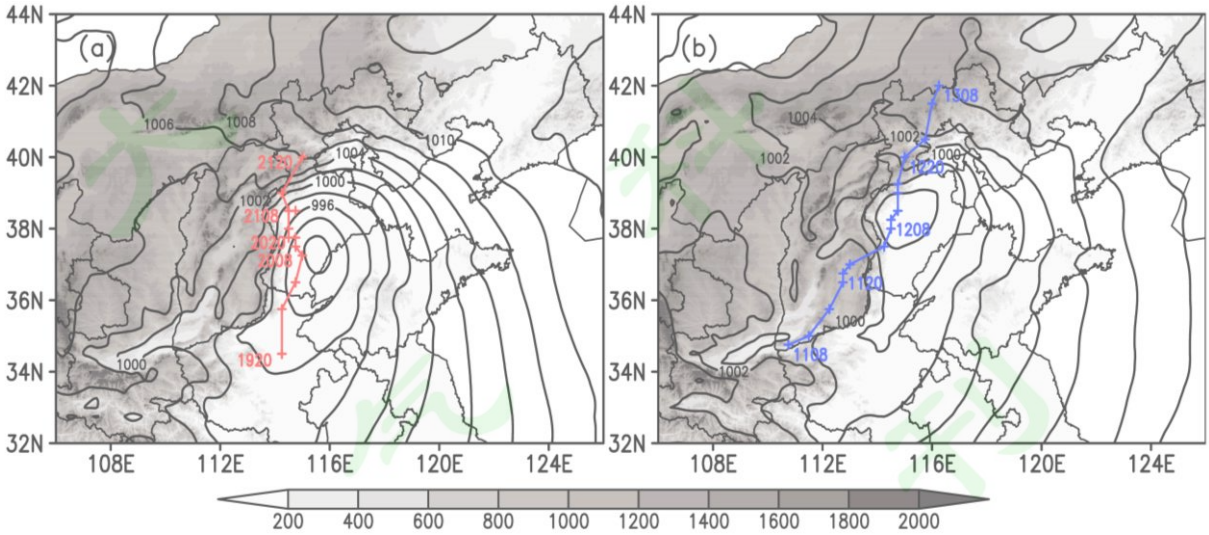

图 5 （a）个例 1 中 850hPa 低涡中心移动路径和 7 月 20 日 08 时海平面气压场（等值线，单位：hPa），（b）个例 2 中 850hPa 低涡中心移动路径和 7 月 12 日 08 时海平面气压场（等值线，单位：hPa）。移动路径逐 3h 打点，逐 12h 标记时间。

Fig.5 (a) The track of the 850 hPa vortex center and the sea level pressure field (contour, unit: hPa) at 08:00 on 20 July in Case 1, and (b) the track of the 850 hPa vortex center and the sea level pressure field (contour, unit: hPa) at 08:00 on 12 July in Case 2. The moving path is marked every 3 hours and the time is marked every 12 hours

两个个例的低涡均在低层有明显发展，且大部分时段 850 hPa 低涡的强度强于其他层次

（图 4），因此本文选择以 850 hPa 低涡中心为代表分析两个低涡的移动特征。2016 年 7 月 19 日 20 时，河南北部上空 850 hPa 存在气旋性环流，并不断发展加强向北移动，以 850 hPa 气旋性环流中心及涡度值综合判定低涡的移动路径，20 日 08 时前后低涡移入河北南部，移动速度明显减慢（图 5a），之后低涡强度开始减弱，低涡进入河北后沿太行山东麓向北推进至京冀交界一带，21 日之后逐渐消亡。2021 年 7 月 11 日 08 时，低涡移至山西汾渭平原生成气旋性闭合环流，并向东北方向移动，12 日 08 时位于河北西南部，强度相较于个例 1 略偏弱，之后沿太行山东麓向北移动，途径京冀交界继续北移至河北北部（图 5b），13 日之后逐渐消亡。

两个低涡系统移动路径涉及范围广，在华北地区均维持 48 h 以上，相较于一般中尺度低涡生命史约 1 天（庄潇然等，2022），两个低涡维持的时间更长。但两个低涡在移动速度上存在明显差异。相较于个例 1，个例 2 移动范围更广，自山西西南部沿太行山移至内蒙古东南部，移动距离更远且速度更快，个例 1 进入河北后，特别是发展旺盛阶段，移速明显减慢，36 h 从河北南部移动到河北中部，平均移动速度约为 6 km·h^{-1}，而个例 2 自 12 日 02 时移入河北后速度虽有所减慢，但 24 小时内从河北西南部移至河北北部内蒙交界处，平均移速 20 km·h^{-1}，移速明显大于个例 1。

3.3 低涡系统垂直结构对比分析

为了探究低涡演变不同阶段的结构特征，本文将各阶段内所有时刻沿 850 hPa 低涡中心纬向剖面的垂直结构进行动态合成，所用物理量为去除纬向平均后的异常值。

从不同阶段的涡度异常及比湿异常的垂直分布上看（图 6），两个低涡各阶段的正涡度区主体结构基本维持在 3 个经度左右，即水平尺度约为 300 km。个例 1 发展阶段涡度主要在对流层中低层发展，850 hPa 至 500 hPa 有明显的正涡度大值区，且正涡度异常强度超过 $24\times10^{-5}s^{-1}$；强盛阶段在对流层低层 850 hPa 和高层 200~300 hPa 之间分别有两个涡度中心，垂直方向上正涡度随高度略向西倾斜；衰减阶段高层涡度进一步增强，低层涡度中心范围略有缩小，强度依然维持在 $24\times10^{-5}s^{-1}$ 以上，这种低层涡度中心存在但范围不断缩小、高层涡度随着低涡的演变不断增强的特征，与前文探究的高层 300 hPa 区域涡度大值中后期显著增强一致（图 5a）。个例 2 在整个演变过程中，仅在低层 850 hPa 存在唯一的正涡度中心，强度与个例 1 相近，500 hPa 以下有连续闭合的正涡度等值线向上延伸，低涡结构在垂直方向上接近笔直，随高度没有明显的倾斜，基本维持正压结构。从比湿的垂直结构上可以看出，个例 1 低涡中心轴线西侧中高层偏干，这可能与高空槽后干冷空气的侵入有关，个例 2 低涡中心轴线西侧中层没有负的比湿异常，仅在西侧低层有干空气，比湿垂直结构上整体呈现对称分布，特别是强盛至衰减阶段，两个低涡湿度大值区均在涡度中心东侧，这与低层偏东风从渤海湾带来丰沛的水汽关系密切。

从不同阶段的温度异常和位势高度异常垂直剖面上看（图 7），个例 1 在高层 200 hPa 左右有暖心，强盛和衰减阶段暖心高度更高，对流层中层 400 hPa 左右存在弱暖心结构，在正涡度柱西侧对流层中低层存在冷心，且随着低涡演变冷心逐渐增强，这可能与前期高空槽后冷空气侵入和降水蒸发冷却有关。个例 2 与个例 1 在 100~200 hPa 之间均存在暖心，由于个

例 2 没有槽后干冷空气的作用，对流层中层 300~500 hPa 的暖心结构更为显著，暖心异常强度在 4 K 以上，低层的冷心始终存在，且中层暖心和低层冷心明显强于个例 1。受高空槽影响，个例 1 的位势高度整层均呈现负异常，个例 2 没有明显高空槽，整个过程低层位势高度负异常显著。

综上，两个低涡在对流层整层都表现为正涡度区，低层有湿层，且低层有明显的冷心并不断增强。两者垂直结构的不同之处在于，个例 1 在高低层分别存在两个正涡度中心分别位于 850 hPa 和 300 hPa 附近，涡度分布随高度略向西倾斜，且前期以低层低涡中心为主，之后高层低涡中心发展并逐渐强于低层低涡中心，受高空槽影响位势高度负异常中心位于对流层中高层，低涡中心轴线西侧偏干，这可能与中层干冷空气的侵入有关；而个例 2 在 850 hPa 存在唯一的正涡度中心，位势高度负异常中心在对流层低层，与涡度中心相对应，中层的暖心结构较个例 1 更显著。

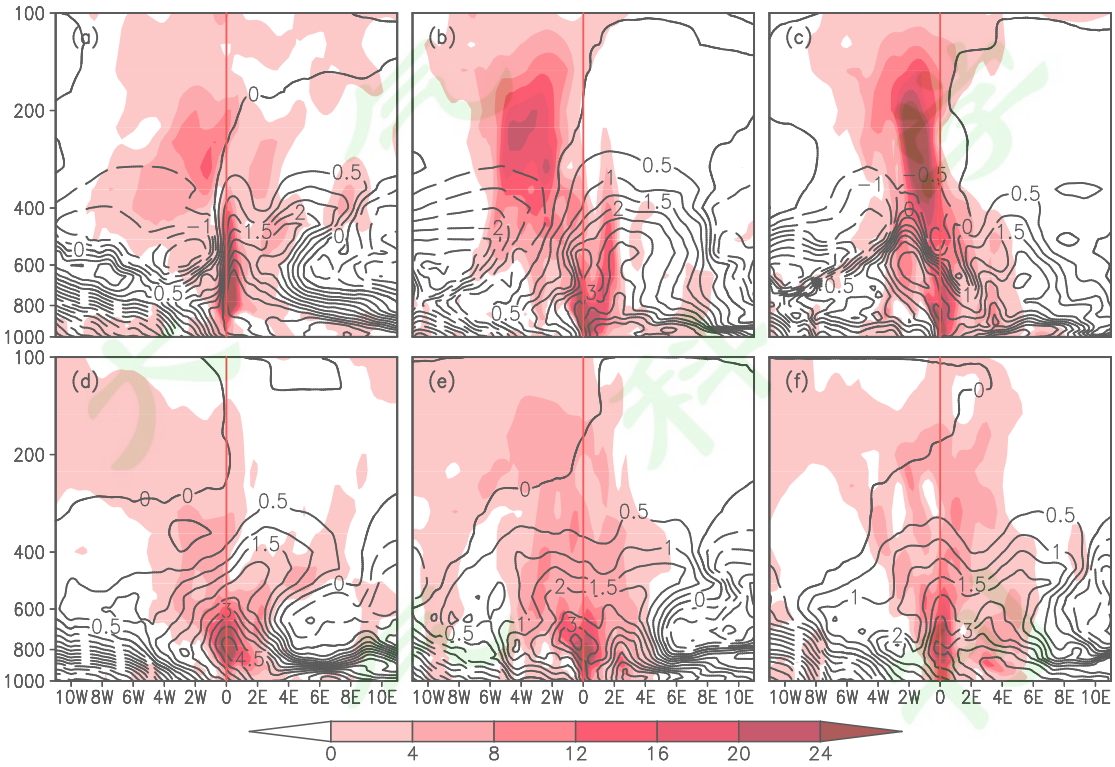

图 6 涡度异常（阴影，单位：10^{-5} s^{-1}）和比湿异常（等值线，单位：g • kg^{-1}）纬向垂直剖面图。（a-c）分别为个例 1 低涡的发展、强盛、衰减阶段，（d-f）分别为个例 2 低涡的发展、强盛、衰减阶段；横坐标表示距离低涡中心的相对位置，坐标原点为低涡中心，红线为低涡中心轴线。

Fig. 6 The zonal height cross-section of vorticity anomaly (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) and specific humidity anomaly (contour line, unit: g · kg^{-1}) for (a-c) the development, strength, and attenuation stages of the low vortex in case 1, and (d-f) for the development, strength, and attenuation stages of the low vortex in case 2. The horizontal coordinate represents the relative position from the center of the vortex, and the coordinate origin is the center of

the vortex. The red vertical line represents the central axis of the vortex.

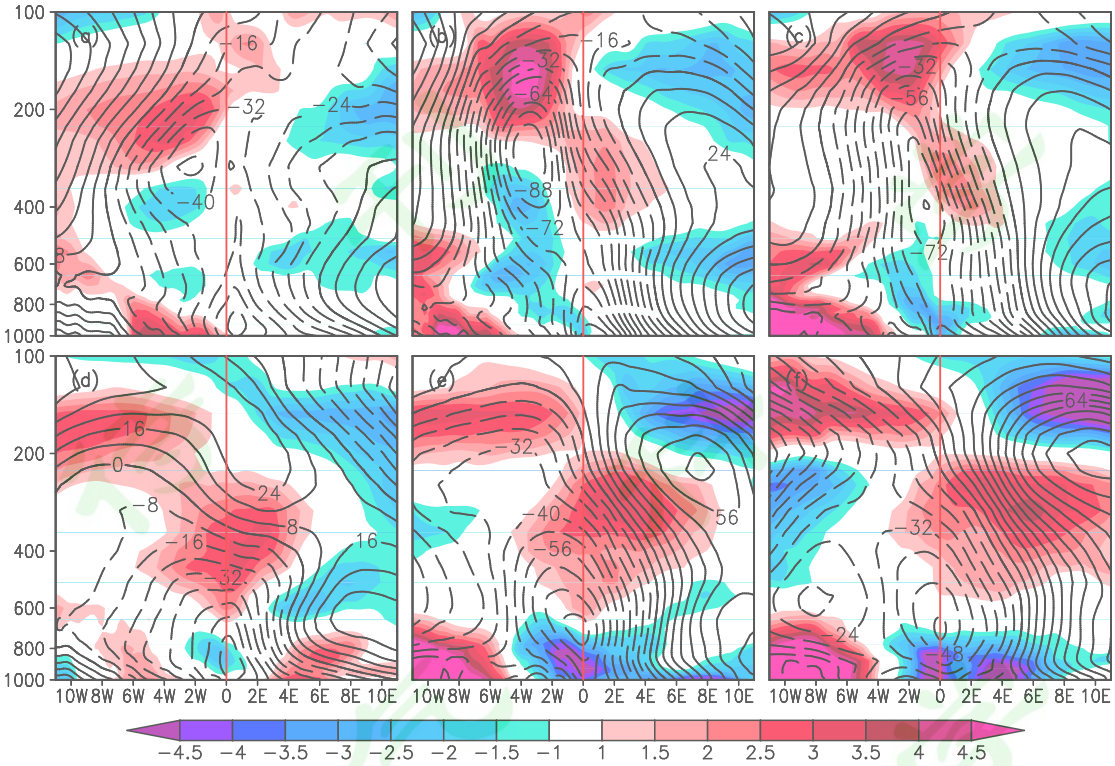

图 7 同图 6，但为温度异常（阴影，单位：K）和位势高度异常（等值线，单位：dagpm）纬向垂直剖面图。

Fig. 7 Same as Fig.6, but for the zonal height cross-section of temperature anomaly (shaded, unit: K) and geopotential height anomaly (contour line, unit: dagpm).

两个低涡在相似的环流背景及移动路径下，为何会表现出不同的垂直结构？造成涡度、暖心等特征的分布差异与什么因素有关？下文具体探究两个低涡系统发展的动热力机制。

4 低涡发展的热动力机制对比分析

4.1 低涡发展动力机制对比分析

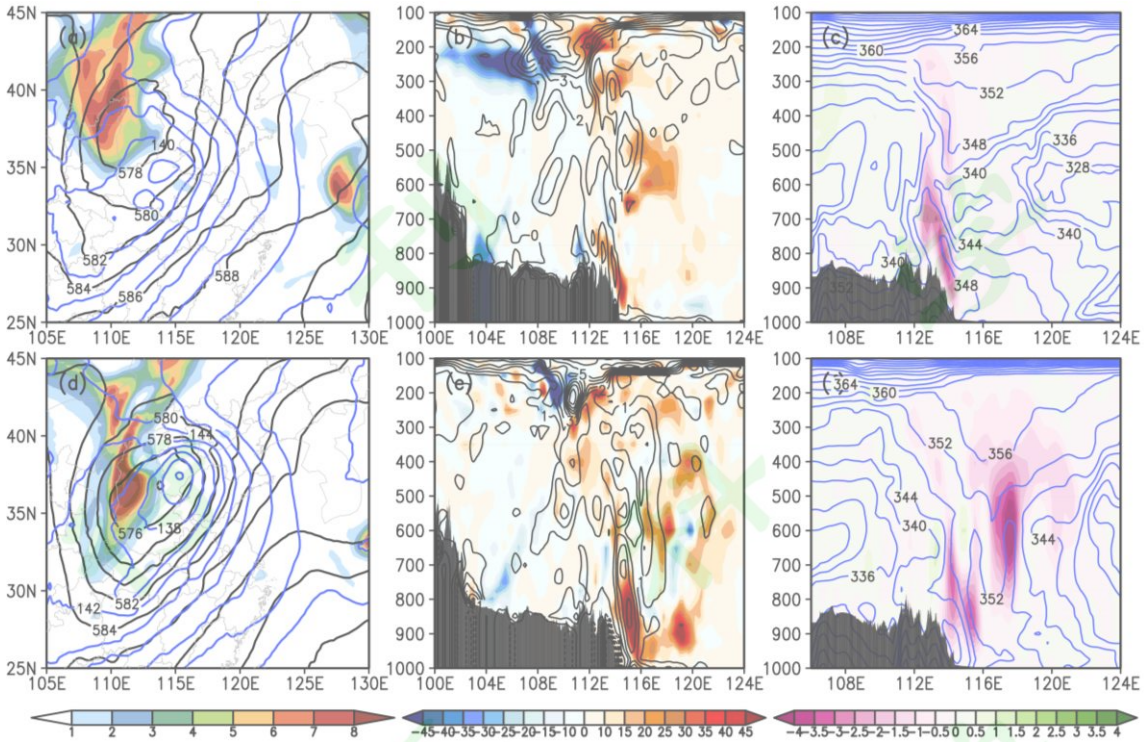

图 8 （a-c）2016 年 7 月 19 日 20 时、（d-f）20 日 08 时（a、d）200 hPa 位涡（阴影，单位：PVU，1PVU=10^{-6} K m^2 kg^{-1} s^{-1}）、500 hPa 位势高度（黑色等值线，单位：dagpm）和 850hPa 位势高度（蓝色等值线，单位：dagpm）；（b、e）沿 38°N 垂直剖面位涡（等值线，单位 PVU，1PVU=10^{-6} K m^2 kg^{-1} s^{-1}）和温度平流（阴影，单位：10^{-4} K s^{-1}）；（c、h）沿 38°N 上升运动（阴影，单位：Pa s^{-1}）和假相当位温（蓝色等值线，单位：K）

Fig.8 The zonal height cross-section at (a-c) 20:00 on July 19, 2016 and (a, d) 08:00 on July 20, 2016, (a, d) 200 hPa potential vorticity (shaded, unit: PVU, 1PVU=10^{-6} K m^2 kg^{-1} s^{-1}), 500 hPa geopotential height (black contour, unit: dagpm), and 850 hPa geopotential height (blue contour, unit: dagpm); the zonal height cross-section along the 38°N (b, e) potential vorticity (contour, unit: PVU, 1PVU=10^{-6} K m^2 kg^{-1} s^{-1}) and temperature advection (shading, unit 10^{-4} K s^{-1}); (c, h) ascending motion (shaded, unit: Pa s^{-1}) and potential pseudo-equivalent temperature (blue contour, unit: K)

为了更清晰探究两个华北低涡发展成因，本研究分别在靠近发展和强盛阶段选取两个时刻作为代表进行物理量诊断分析。个例 1 在低涡发展阶段，200 hPa 位涡大值区位于高空槽上游，位涡中心强度达 8 PVU，槽后有干冷空气不断侵入，使得环流经向度增加，随着高空槽的加深，高层位涡大值区向南、向下传送，位涡柱近乎上下贯通，高层 250 hPa 和低层 850 hPa 附近存在两个位涡大值中心，与高低层的两个低涡中心正好对应（图 7a、b、d、e）。根据位涡守恒原理（Rossby, 1940; Ertel, 1942; Wu et al., 1998），低层气旋性环流加大。低涡中心东侧整层都有明显的暖平流，在高层低涡中心后部冷平流显示出明显的干冷空气输送，高空槽前、后的冷、暖平流在 300~200 hPa 达到最强，强烈发展的斜压动力学过程是对流层上层高空槽早期加深发展的主要动力机制。高层 200 hPa 和低层 800 hPa 存在明显锋生（图 8b），分别对应低涡系统高低两个涡度中心，且高层锋生强于低层，导致高层涡度中心发展更强，

这与前文分析的 300 hPa 涡度增长明显且强盛和衰减阶段强度大于中低层相对应。低涡中心上空 650~850 hPa 内假相当位温处于$-\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p}<0$，气层表现为上干冷下暖湿（图 8b、c），呈现对流性不稳定，低涡中心附近上升运动显著增强，中心位于 700 hPa，最大上升速度增大至 3~3.5 Pa • s^{-1} 及以上（图 8c、f），使得高温高湿气团向上输送，触发对流不稳定能量释放。这种高空位涡的下传以及干冷空气侵入后对流不稳定层结的存在，有利于上升运动的产生和涡度的发展。

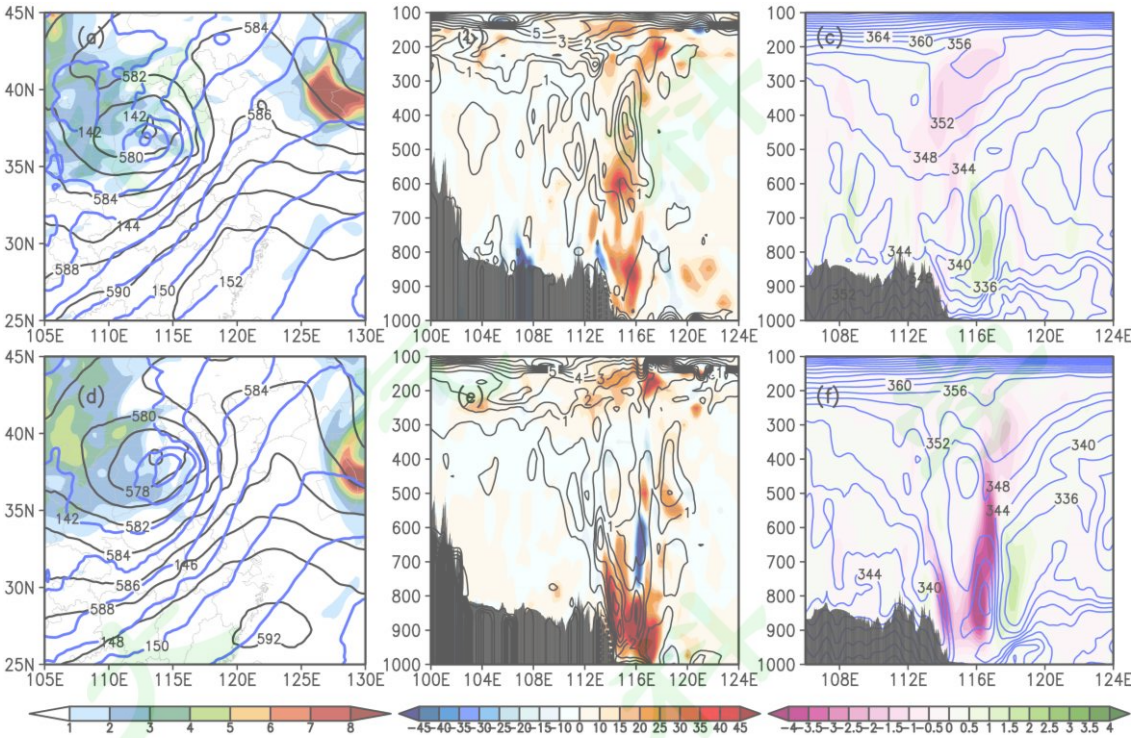

图 9 同图 8，但为 2021 年 7 月 11 日 20 时（a-c）和 12 日 02 时（d-f）

Fig.9, as Fig.8, but (a-c) at 20:00 on July 11, 2021 and (d-f) at 02:00 on July 12, 2021

个例 2 发展阶段高空 200 hPa 位涡明显弱于个例 1，大部地区强度仅为 2 PVU 以上，高层位涡下传的强度不如个例 1（图 9a、b、d、e），仅低层有较大的位涡中心，这可能与 200 hPa 高空急流不明显，以及中高层没有冷平流侵入有关。个例 2 的对流层整层都是以暖平流为主，没有明显的锋生（图 8b、e）。位涡中心与暖平流中心近乎重合（图 9e），并处于超过 348 K 假相当位温大值区内，产生显著的上升运动（图 9c、f），使得对流层低层涡度迅速发展，形成较为浅薄的低涡。

综上，两个华北低涡在发展过程中对流层低层均有高层位涡的动量下传至近地面，两者不同之处在于，个例 1 高空位涡强于个例 2，有明显的位涡下传，而个例 2 高空位涡较弱。个例 1 低涡有明显的干冷空气侵入，高低空均存在锋生，且高层的锋生更加显著，对应高低层两个涡度中心，辐合辐散环流叠加，上升运动可以发展至对流层高层，而个例 2 低涡没有明显冷空气入侵，整层以暖平流为主，低层暖平流明显强于个例 1，辐合辐散中心也集中在对流层低层，且辐合强于辐散。因此，个例 1 华北低涡的发展主要是由高层干冷空气侵入造

成对流不稳定和锋生以及位涡下传导致，而个例 2 低涡的发展主要与低层暖平流的输送和位涡下传有关。

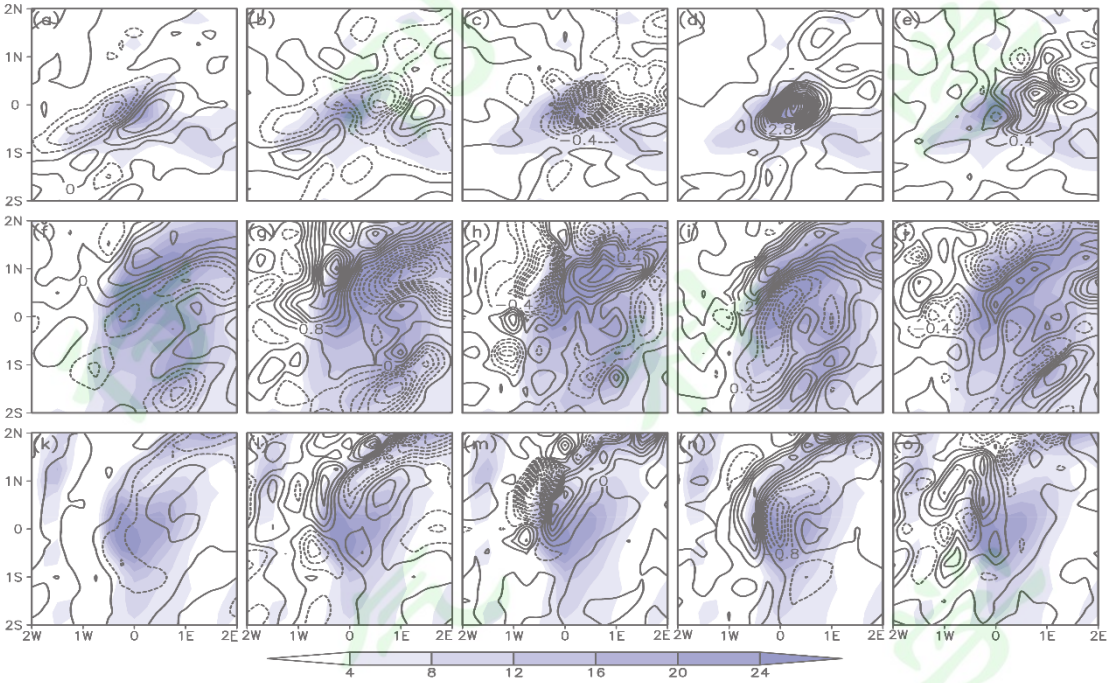

图 10 2016 年低涡 850hPa 涡度收支。850hPa 涡度（阴影，单位：$10^{-5}s^{-1}$）（a-e）为发展阶段，（f-j）为强盛阶段，（k-o）为衰减阶段；（a、f、k）为涡度局地变化项，（b、g、l）为绝对涡度水平平流项、（c、h、m）为涡度垂直输送项、（d、i、n）为绝对涡度水平散度项、（e、j、o）为扭转项作用的涡度倾向（等值线，单位：$10^{-5}s^{-1}$）

Fig.10 The 500 hPa vorticity budget in case 1. The 850 hPa vorticity (shaded, unit: $10^{-5}s^{-1}$), (a, f, k) the tendency, and the vorticity tendency caused by (b, g, l) the absolute vorticity horizonal advection, (c, h, m) vortical vertical transport, (d, i, n) the absolute vorticity horizontal divergence, (e, j, o) deformation (contour, unit: $10^{-5}s^{-1}$) during the (a-e) development stage, (f-j) strength stage, (f-j) attenuation stage.

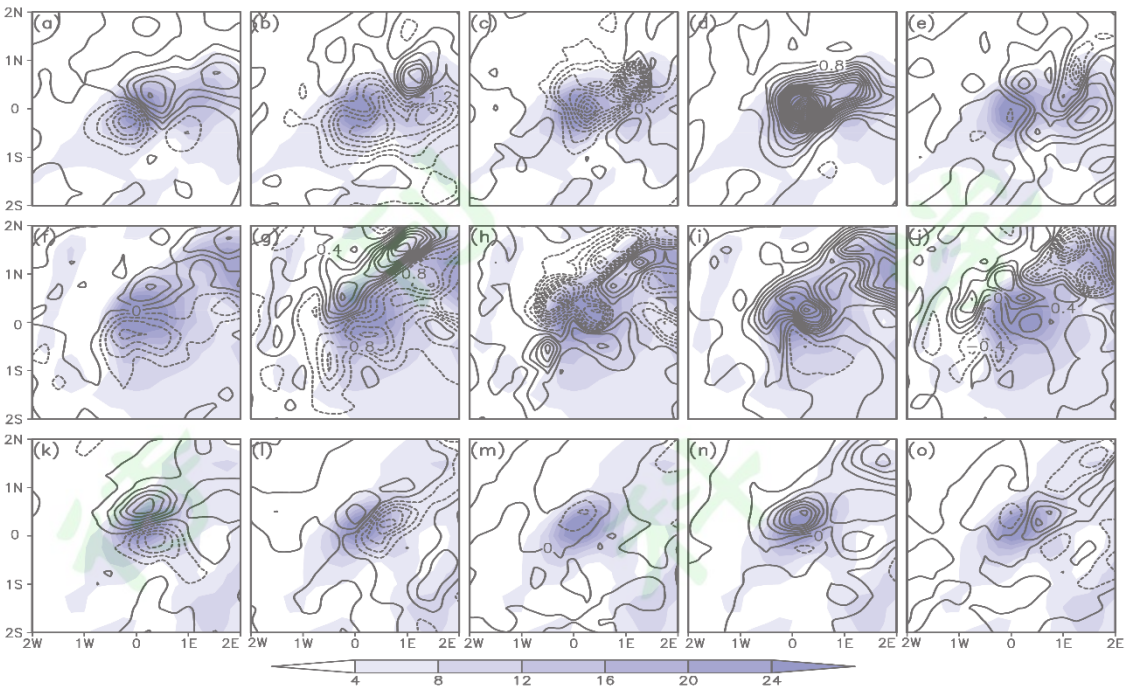

图 11 2021 年低涡 850hPa 涡度收支。850hPa 涡度（阴影，单位：$10^{-5}s^{-1}$）（a-e）为发展阶段，（f-j）为强盛阶段，（k-o）为衰减阶段；（a、f、k）为涡度局地变化项，（b、g、l）为绝对涡度水平平流项，（c、h、m）为涡度垂直输送项，（d、i、n）为绝对涡度水平散度项，（e、j、o）为扭转项作用的涡度倾向（等值线，单位：$10^{-5}s^{-1}$）

Fig.11 The 500 hPa vorticity budget in case 2. The 850 hPa vorticity (shaded, unit: $10^{-5}s^{-1}$), (a, f, k)the tendency, and the vorticity tendency caused by (b, g, l) the absolute vorticity horizonal advection, (c, h, m) vortical vertical transport, (d, i, n) the absolute vorticity horizontal divergence, (e, j, o) deformation (contour, unit: $10^{-5}s^{-1}$) during the (a-e) development stage, (f-j) strength stage, (f-j) attenuation stage.

本文从动力学角度，运用涡度收支方程诊断低涡的东移发展。在不考虑摩擦的前提下，P 坐标下的涡度收支方程为（朱爱军和潘益农, 2007; 田秀霞等, 2008; 苗春生等, 2014; 陈碧莹等, 2020）：

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}=-\left(u\frac{\partial\zeta_a}{\partial x}+v\frac{\partial\zeta_a}{\partial y}\right)-\omega\frac{\partial\zeta}{\partial p}-\zeta_a\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial p}-\frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}\right) \qquad (1)$$

其中，ζ为相对涡度，ζ_a为绝对涡度，式中的各项可采用字符相应表示：

$$\zeta_s=\zeta_h+\zeta_v+\zeta_d+\zeta_c \qquad (2)$$

式中，ζ_s为总涡度变率，ζ_h、ζ_v、ζ_d、ζ_c分别表示绝对涡度水平平流项、涡度垂直输送项、绝对涡度水平散度项和扭转项（垂直风速的水平变化造成的水平涡度的倾斜项），涡度收支主要取决于右侧四项的共同作用。

个例 1 发展阶段低涡中心东侧平流项有负贡献，而在西南侧有正贡献；同时，涡度中心附近上升运动明显，将 850hPa 涡度向上输送，垂直项贡献为负；散度项的分布与垂直项基本相反，由于低空急流辐合和上升运动的存在，使得散度项对涡度收支有正贡献；垂直速度

在涡度中心东侧沿水平涡度方向增大，扭转项为正。因此，低涡在发展阶段主要受散度项和扭转项的正贡献作用。强盛阶段和衰减阶段，受东南及偏东气流辐合影响，低涡中心西侧为正涡度平流；低涡中心东侧有上升运动，西侧有下沉运动，低涡在这期间随高度有向西倾斜的特征，因此低涡中心东侧在强盛和衰减阶段涡度垂直输送项为正，西侧垂直输送项为负；相反，散度项在低涡中心附近及其东侧呈负贡献，西侧呈现正贡献，这可能与偏东风辐合位于低涡中心西侧有关；扭转项在低涡中心附近基本呈现正贡献。整体来看，涡度收支主要在低涡中心的东侧和北侧为正，在一定程度上有利于低涡向东、向北移动（图 10）。

个例 2 发展阶段涡度收支总和在低涡中心东北侧为正，西南侧为负，强盛阶段和衰减阶段低涡中心北侧为正，南侧为负，因此，低涡有向北，向东移动的趋势。在整个发展演变阶段，平流项在低涡中心东北侧受风场辐合的作用有正贡献，但低涡中心附近及其南侧为负贡献，垂直项在低涡中心附近始终为负贡献，同样，拉伸项作用与垂直项相反，扭转项有弱的正贡献（图 11）。

两个低涡整体都在低涡中心北侧和东侧有正涡度收支，且在发展阶段，以散度项和扭转项正贡献为主，强盛和发展阶段，以平流项和散度项正贡献为主。不同之处在于，个例 1 发展阶段垂直项为负，强盛和衰减阶段低涡中心附近垂直项为正贡献，而个例 2 垂直项始终为负贡献，这与个例 2 涡度大值中心始终位于 850hPa 有关，上升运动将低层涡度向上输送，而个例 1 在强盛和衰减阶段，高层涡度发展，其强度超过低层 850hPa 涡度强度，并伴有一定的下沉运动（图 8f），将高层的涡度向低层输送，垂直项在低涡中心东侧有明显的正贡献。

4.2 低涡发展热力机制对比分析

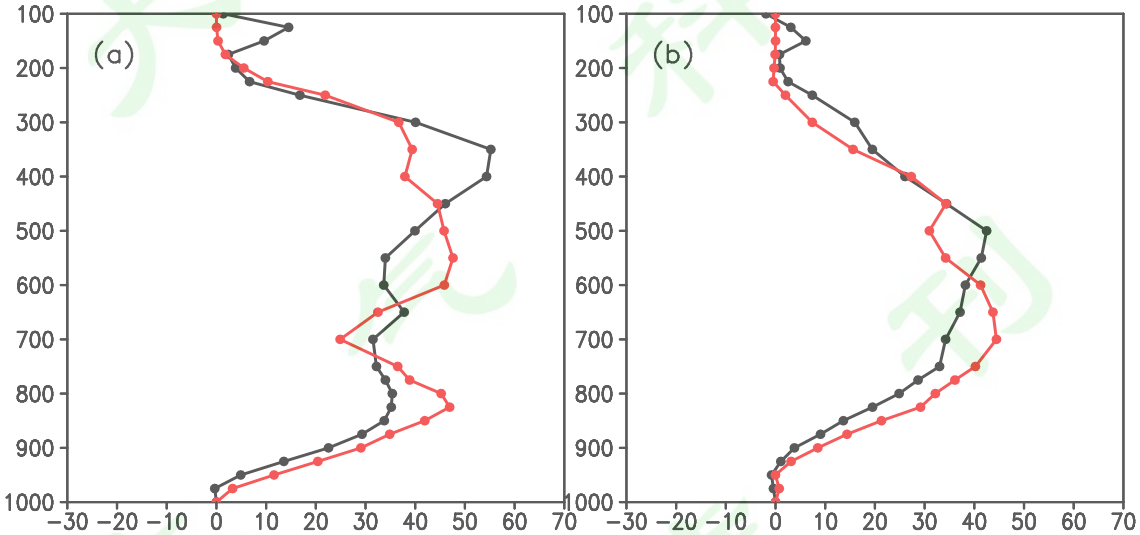

图 12 2016 年 20 日 02 时（a）和 2021 年 11 日 14 时（b）视热源 $Q1/c_p$（黑色）和视水汽汇 $Q2/c_p$（红色）随高度的变化（单位：$K\cdot(6h)^{-1}$）

Fig.12 Heat source Q1/cp (black line) and apparent moisture sink Q2/cp (red line) with height (a) at 02:00 on Feb 20, 2016 and (b) at 14:00 November 11, 2021 (unit: $K\cdot(6h)^{-1}$)

本文引入视热源 Q1 和视水汽汇 Q2 分别表示单位时间内单位质量空气的增温率和水汽

凝结潜热释放引起的增温率，涡度区的平均视热源、视水汽汇垂直廓线以涡度中心为中心点，1.5 个经纬距为半径范围进行计算，从热力作用角度探讨两个华北低涡的发展机制。

$$Q_1 = c_p[\frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\kappa} \omega \frac{\partial \theta}{\partial p}] \qquad (3)$$

$$Q_2 = L(\frac{\partial q}{\partial t} + \boldsymbol{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p}] \qquad (4)$$

式中，$\boldsymbol{V}$为水平风矢量（单位：$m \cdot s^{-1}$），T 为温度（单位：K），ω为 p 坐标下的垂直速度（单位：$Pa \cdot s^{-1}$），κ为常数 0.286，L 为凝结潜热（单位：$J \cdot kg^{-1}$），q 为比湿（单位：$g \cdot kg^{-1}$）。

由于低涡发展的连续性，为了探究两个低涡发展与热力作用的关系，本文取低涡强盛时刻前的时刻探究视热源和视水汽汇的垂直分布，由图 12a 可见，个例 1 低涡发展时视热源垂直廓线在对流层整层均为正，且随着高度增加而增大，在 350 hPa 明显“右凸”，达到最大值 52 $K \cdot (6h)^{-1}$，再往上随高度快速减小，视热源 Q1“右凸”型垂直廓线有利于最“凸”点以下高度的涡度增长，曲线的斜率越大，越有利于涡度增加（肖玉华等, 2018; 周春花等, 2022）。因此，个例 1 发展阶段最大加热区位于对流层的高层，造成 350 hPa 附近增暖，产生上升运动，在对流层中高层形成了气旋性环流，有利于高层涡度的发展。同时，视水汽汇在 850 hPa 和 600 hPa 分别达到峰值 47 $K \cdot (6h)^{-1}$，呈现双峰分布特征，低层峰值与低空急流强水汽输送带的水汽凝结有关，中层峰值靠近视热源的大值区，Q1 和 Q2 两者的共同作用在对流层高低层分别产生上升环流圈，使得高低层涡度共同发展，也是该时期暴雨持续发生发展的主要热力机制。与其不同的是，个例 2 视热源最大加热区位于对流层中部 500 hPa 附近，达到 42 $K \cdot (6h)^{-1}$，因而气柱中层增温明显，空气上升运动加强，根据质量连续理论，低空有大量湿空气辐合补充，又因加热区热量向上输送，加强了高空反气旋性环流的发展和气流辐散，又进一步造成低空强辐合，形成正反馈。同时，降水释放凝结潜热在 700 hPa 左右达到峰值 45 $K \cdot (6h)^{-1}$，两者共同作用使得低层空气增温，低层涡度持续发展。

5 结论和讨论

（1）两个华北低涡都是在西低东高的环流背景下生成的，低涡东侧副高和北方高压脊叠加形成稳定的高压坝，中高纬经向环流度大，但个例 1 的 200 hPa 有明显的高空急流，高层有明显的冷性切断低涡，高空槽偏东且发展更为深厚，低层急流带更加宽广，低层辐合抬升及高空辐散抽吸作用为低涡发展提供有利的大尺度环流背景，高低层的协同配合使低涡发展得更加深厚；个例 2 高空没有急流发展，低层低空急流带较狭窄，造成的低涡发展及降水强度不及前者。

（2）两个低涡在强度及垂直结构上存在明显不同。个例 1 在高低层分别存在涡度中心，发展阶段以低层涡度中心为主，强盛和衰减阶段高层涡度发展强盛，整个低涡系统发展深厚。位势高度负异常中心位于中高层，对流层中层暖心较弱，中心轴线西侧有明显干冷空气。而个例 2 低涡系统发展浅薄，高层涡度没有明显增长，仅在低层存在唯一涡度中心，对流层中层有明显的暖心结构，近地面冷心强烈发展。

（3）两个低涡系统的发展机制也存在较大差异。个例 1 高空位涡较强，上游位涡中心强度

达 8 PVU，且不断有位涡从高层下传至近地面，槽后有干冷空气侵入，高低层有明显的锋生，并呈现对流不稳定，加之视热源加热使高层涡度发展，同时低空急流强水汽输送凝结使低层涡度增长。个例 2 整层以暖平流为主，没有明显的锋生，低层较强辐合和暖平流输送及降水凝结潜热释放共同作用造成低层涡度增强。散度项和扭转项在两个低涡的发展阶段提供正贡献，平流项和散度项在强盛和衰减阶段为低层涡度的增长和移动提供主要的正贡献，但个例 1 强盛和衰减阶段垂直项为正贡献，而个例 2 垂直项始终为负贡献。

本文探究了两个相似环流背景下华北暴雨过程中低涡的垂直结构差异，并初步分析了低涡发展演变的热动力机制，未来将整合更多观测数据，包括地面加密观测、雷达、雨滴谱等资料，以及高分辨率的数值模式，进一步深入对比两个低涡精细结构、发展机制以及降水形成机理的差异。

参考文献

Bartels D L, Maddox R A. 1991. Mid-level cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems[J]. Monthly Weather Review, 119(1): 104-118.

Bei N, Zhao S, Gao S. 2002. Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998[J]. Meteorology Atmospheric Physics, 80(1-4): 153-164.

陈碧莹, 闵锦忠. 2020. 华北“7·19”暴雨中低涡系统演变及多尺度相互作用机制研究[J]. 热带气象学报, 36(1): 85—96. Chen B Y, Min J Z. 2020. A study on the evolution of vortex system and multi-scale interaction mechanism during the "7 19" rainstorm in North China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 36(1): 85-96.

Chen S S, Frank W M. 1993. A numerical study of the genesis of extratropical convective mesovortices. Part I: Evolution and Dynamics[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 50(15): 2401-2426.

程麟生,彭新东,马艳. 1995. "91.7"江淮暴雨低涡发展结构和演变的中尺度数值模拟[J]. 高原气象, 14(3): 270-280. Cheng L S, Peng X D, Ma Y. 1995. Mesoscale numerical simulation of developing structure and evolution for vortex with heavy rain in JiangHuai areas during 4—7 July 1991[J]. Plateau Meteorology, 14(3): 270-280

段海霞, 陆维松, 毕宝贵. 2008. 凝结潜热与地表热通量对一次西南低涡暴雨影响分析[J]. 高原气象, 27(6): 1315-1321. Duan H X, Lu W S, Bi B G. 2008. Impact of the condensation heating and surface heat flux on a rainstorm event of Southwest vortex[J]. Plateau Meteorology. 27(6): 1315-1321.

Ertel H. 1942. Ein neuer hydrodynamischer wirbelsatz[J]. Meteorologische Zeitschrift, 59: 271-281.

符娇兰, 陈双, 沈晓琳, 等. 2019. 两次华北冷涡降水成因及预报偏差对比分析[J]. 气象, 45(5): 606—620. Fu J L, Chen S, Shen X L, et al. 2019. Comparative study of the cause of rainfall and its forecast biases of two cold vortex rainfall events in North China[J]. Meteor Mon, 45(5): 606—620.

Hu Y, Wen M, Li L, et al. 2019. Climatic characteristics of East Asian tropical monsoon depressions [J]. Theoretical and Applied Climatology, 138: 399-415.

康延臻. 2017. 华北"7·20"特大暴雨动力诊断与数值模拟[D]. 兰州大学. Kang Y Z. 2017. A study on numerical simulation and diagnostic analysis on the torrential rainfall event in North China during 18-21 July, 2016[D]. Lanzhou University.

雷蕾, 孙继松, 何娜, 等. 2017. "7.20"华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J]. 气象学报, 75(5): 685-699. Lei L, Sun J S, He

N, et al. 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016. Acta Meteorologica Sinica, 75(5): 685-699.

梁必骐，王安宇，梁经萍 等. 1990. 热带气象学[M]. 中山大学出版社. Liang B Q, Wang A Y, Liang J P, et al. 1990. Tropical meteorology[M]. Sun Yat-sen University press.

李国平，蒋静. 2005. 一类奇异孤波解及其在高原低涡结构分析中的应用[M]. 气象学报, 58(4): 447-456. Li G P, Jiang J. 2005. A type of singular solitary wave and its application of structure analysis of the Tibetan Plateau vortex[M]. Acta Meteorologica Sinica, 58(4): 447-456.

刘冲，赵平. 2020. 1979-2016 年四川盆地低涡的气候特征分析[J]. 气候变化研究进展, 16(2): 203-214. Liu C, Zhao P. 2020. Climatological characteristics of Sichuan Basin vortex during 1979-2016 [J]. Climate Change Research, 16 (2): 203-214.苗春生，吴旻，王坚红. 等. 2014. 一次浅薄低涡暴雨过程数值模拟及发展机制分析[J]. 气象, 40(1): 28-37. Miao C S, Wu M, Wang J H, et al. 2014. Modeling of a shallow vortex heavy rainfall and analysis on its developing mechanism[J]. Meteor Mon, 40(1): 28-37.

Menard R D , Fritsch J M. 2009. A mesoscale convective complex-generated inertially stable warm core vortex[J]. Monthly Weather Review, 117(6): 1237.

Rossby C G .1940. Planetary flow patterns in the atmosphere[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 66: 68-87.

Raymond D J, Jiang H. 1990. A theory for long-lived mesoscale convective systems[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 47(24):3067-3077.

宋雯雯，李国平. 2010. 高原低涡结构特征模拟与诊断的初步研究[J].成都信息工程学院学报, 25(3): 281-259. Song W W, Li G P. 2010. Preliminary study on simulation and diagnosis of structural characteristics of Plateau Vortex[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 25(3): 281-259.

孙建华，张小玲，齐琳琳，等. 2004. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变线上发展的中尺度对流系统研究[J]. 大气科学, 28(5): 675-691. Sun J H, Zhang X L. Qi L L , et al. 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002[J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences, 28(5): 675-691.

孙建华，赵思雄，傅慎明，等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学, 37(3): 705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012[J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences, 37(3): 705-718.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨[Z]. 中国科学院大气物理研究所. Tao S Y. 1980. Rainstorms in China[Z]. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.

田秀霞，邵爱梅. 2008. 一次河北大暴雨的华北低涡结构和涡度收支分析[J]. 暴雨灾害, 27(4):34-39. Tian X X, Shao A M. 2008. Study of the vortex structure and vorticity budget on a heavy rain in North China[J]. Torrential rain and disasters, 27(4): 34-39.

韦统健，薛建军. 1996. 影响江淮地区的西南涡中尺度结构特征[J]. 高原气象, 15(4): 456-463. Wei T J, Xue J J. 1996. The mesoscale structure characteristics of southwest vortex over Jiang Huai River Areas[J]. Plateau Meteorology, 15(4): 456-463.

Wu G X , Liu H Z .1998. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface[J]. Dynamics of Atmospheres & Oceans, 27(1-4): 715-743.

肖玉华，郁淑华，高文良，等. 2018. 一例伴随西南低涡的入海高原涡持续活动成因分析[J]. 高原气象, 37(6): 1616-1627. Xiao Y H, Yu S H, Gao W L, et al. 2018. Analysis of the causes of one sustained enter-the-sea plateau vortex accompanied by southwest vortex[J]. Plateau Meteorology, 37(6): 1616-1627.

杨颖璨. 2017. 两类不同深厚型低涡结构特征及成因分析[D]. 中国气象科学研究院, 67. Yang Y C. 2017. An analysis of the structure characteristics and cause of two kinds of deep vortex[D]. Chinses Academy of Meteorological Sciences, 67.

游景炎. 1965. 暴雨带内的中尺度系统[J]. 气象学报, 35(3): 31-42. You J Y. 1965. Mesoscale system in rainstorm zone[J]. Acta Meteorologica Sinica, 35(3):31-42.

赵宇, 崔晓鹏, 高守亭. 2011. 引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究[J]. 大气科学, 35(5): 945—962. Zhao Y, Cui X P, Gao S T. 2011. A Study of structure of mesoscale systems producinga heavy rainfall event in North China[J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences, 35(5): 945-962.

赵玉春, 王叶红. 2010. 高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究. 高原气象, 29(4): 819-831. Zhao Y C, Wang Y H. 2010. A case study on plateau vortex inducing southwest vortex and producing extremely heavy rain[J]. Plateau Meteorology, 29(4): 819-831.

张凤, 赵思雄. 2003. 梅雨锋上引发暴雨的低压动力学研究[J]. 气候与环境研究, 8(2): 143-156. Zhang F, Zhao S X. 2003. A dynamic study of one kind of Meiyu front lows producing heavy rainfall[J]. Climatic and Environmental Research, 8(2): 143-156.

张军辉, 唐细坝, 彭静. 2023. 四川“8.11”暴雨的视热源和视水汽汇特征分析[J]. 高原山地气象研究, 43(1): 43-53. Zhang J H, Tang X B, Peng J. 2023. Characteristics of apparent heat source and apparent moisture sink of "8.11" rainstorm in Sichuan[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 43(1): 43-53.

张夕迪, 胡艺, 张芳, 等. 2023. 华北地区两次低涡暴雨过程降水特征和成因对比分析[J]. 大气科学, 47(5): 1593−1610. Zhang X D, Hu Y, Zhang F, et al. 2023. Comparative study of the characteristics and causes of two low-vortex heavy rain events in North China[J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences, 47(5): 1593-1610.

周春花, 肖递祥, 郁淑华. 2022. 持续东北移和在四川盆地停滞的九龙涡结构特征比较[J]. 高原气象, 41(5): 1220-1231. Zhou C H, Xiao D X, Yu S H. 2022. Comparison of the structural characteristics of the Jiulong vortex continuing to move northeast and stagnating in the Sichuan Basin[J]. Plateau Meteorology, 41(5): 1220-1231.

朱乾根. 2007. 天气学原理和方法[M]. 气象出版社. Zhu Q G. 2007. Principles and methods of weather science[M]. China Meteorological Press.

朱爱军, 潘益农. 2007. 中国东部地区一个中尺度对流涡旋的涡度收支分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 43(3): 47-56. Zhu A J, Pan Y N. 2007. A vorticity budget for a mesoscale convective vortex over East China[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 43(3): 47-56.

庄潇然, 康志明, 徐渊, 等. 2022. 2021 年 7 月 17 日长江中下游地区 β 中尺度低涡及其模式预报不确定性分析[J]. 热带气象学报, 38(5): 680-693. Zhuang X R, Kang Z M, Xu Y, et al. 2022. Forecast uncertainty of a meso-β-scale vortex on July 17, 2021 in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Tropical Meteorology, 38(5): 680-693.