

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,48(3):324-333 (in Chinese).

初夏东北移高原低涡活动特征^{*}

孙 芳¹ 周顺武¹ 王美蓉¹ 马淑俊² 周 庶¹ 黄雨婧¹

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/
气候与环境变化国际合作联合实验室/资料同化研究与应用中心,南京 210044

2 拉萨市气象局,拉萨 850011

提 要: 高原低涡是青藏高原(简称高原)的主要降水系统,其移出高原后,往往会在高原下游地区造成大到暴雨甚至大暴雨。低涡移出高原后的移动方向主要有东移、东北移等。本文基于 1979—2018 年高原低涡数据库,选取初夏(6 月)东北移低涡为研究对象,依据其移出位置,将其分为偏西型低涡(简称 I 类低涡)和偏东型低涡(简称 II 类低涡),对两类东北移低涡的源地、结构、环流及其对降水的影响等方面进行了统计分析,并与东移低涡进行了对比。结果表明:东北移低涡源地较东移低涡偏北,I 类低涡主要生成于高原西北部,而 II 类低涡存在 3 个主要源地。移出高原后,I 类低涡最大上升运动主要出现在低涡东北侧,而 II 类低涡同东移低涡相似,上升区主要位于低涡东南侧。低涡在高原上的移动方向及移出位置主要受到 200 hPa 中纬度引导气流的影响,移出高原后的移动方向则主要受 500 hPa 高原以东槽脊的影响,其中河套高压脊对东北移低涡的阻挡作用尤为重要。低涡移动速度受海拔高度差和移动方向的共同影响,移出高原前 II 类低涡与东移低涡移动速度明显快于 I 类低涡;移出高原后两类东北移低涡平均移动速度较东移低涡更慢。I 类低涡移出后主要影响河西走廊地区,且降水以小雨为主;II 类低涡主要影响西北地区东部,其中近七成的低涡会引起大到暴雨。

关键词: 东北移高原低涡,东移高原低涡,高原低涡源地,移动速度,强度

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.112501

Activity Characteristics of the Northeast-Moving Tibetan Plateau Vortices in Early Summer

SUN Fang¹ ZHOU Shunwu¹ WANG Meirong¹ MA Shujun² ZHOU Shu¹ HUANG Yujing¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Joint Center for Data Assimilation Research and Applications, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Lhasa Municipal Meteorological Bureau, Lhasa 850011

Abstract: The Tibetan Plateau vortex (TPV) is the main precipitation system on the Tibetan Plateau (TP). It often causes heavy rain, torrential rain or even heavy rainstorms in the lower reaches of the TP. After TPV moves off the TP, its moving path is mainly divided into east moving (E-TPV), northeast moving (NE-TPV) and so on. Based on the database of TPV from 1979 to 2018, this paper selects the NE-TPV in early summer (June) as the research object. According to its moving-off position, NE-TPV is divided into the westward vortex (denoted as NE_I-TPV) and the eastward vortex (denoted as NE_{II}-TPV). In terms of the source, structure, circulation and influence on precipitation, the two types of NE-TPV are

^{*} 国家自然科学基金重点项目(42030611)、国家自然科学基金项目(42165005)和国家重点研发计划(2018YFC1505705)共同资助

2021 年 7 月 24 日收稿; 2021 年 11 月 15 日收修定稿

第一作者:孙芳,主要从事高原尺度系统的研究. E-mail:sunfang@nuist.edu.cn

通讯作者:周顺武,主要从事气候动力学、高原气象学的研究. E-mail:zhou@nuist.edu.cn

statistically analyzed and compared with the E-TPV. The results show that the source of the NE-TPV is more northerly than the E-TPV. NE_I -TPV is mainly generated in the northwestern part of the TP and NE_{II} -TPV is mainly generated in three relatively concentrated areas. After moving off the TP, the maximum ascending region of NE_I -TPV is located on the northeast side of the vortex, while the NE_{II} -TPV is similar to the E-TPV with its ascending area mainly located on the southeast side of the vortex. The moving direction and position of the TPV before it moves off are mainly affected by the westerly fluctuations at 200 hPa, and the moving direction after it moves off is mainly affected by the troughs and ridges at 500 hPa in the east of the TP. Among these troughs and ridges, the Hetao high pressure ridge is particularly important in blocking the NE-TPV. The moving speed of the TPV is jointly affected by the altitude difference and its moving direction. The TPV moving eastward often has a faster moving speed. After the NE_I -TPV moves off the TP, it mainly affects the Hexi Corridor Area, and the precipitation is dominated by light rain. NE_{II} -TPV mainly affects the eastern part of the northwestern China and nearly 70% of it will cause heavy rain or torrential rain.

Key words: northeast-moving Tibetan Plateau vortex (TPV), east-moving TPV, TPV source, moving speed, intensity

引 言

高原低涡是受青藏高原(简称高原)下垫面热力、动力共同影响而形成的独特产物,主要活动于500 hPa等压面上,水平尺度为400~800 km,垂直尺度为2~3 km,多生成于高原中西部,消亡于高原东部下坡处(叶笃正和高由禧,1979;罗四维和杨洋,1992)。在蒙古高压脊偏强、副热带高压偏西、背景环流经向度大等条件下,有利于低涡移出高原主体(顾清源等,2010)。依据低涡移出高原后的移动路径,通常可将其分为东移低涡、东北移低涡及东南移低涡(李国平,2002;Lin,2015)。另外也存在少量北移、南移及转向的奇异路径低涡(Xiang et al,2013;杨颖璨等,2018),而不同路径的低涡将对高原下游不同区域的天气产生一定的影响(郁淑华等,2015;孔祥伟等,2021)。

对于高原低涡的识别,无论是基于历史天气图及观测资料的人工识别方法(王鑫等,2009),还是基于再分析资料的客观识别方法(Lin,2015),均发现低涡年均生成65个左右,且以东移低涡为主,东北移次之,东南移较少。已有不少研究对低涡的源地、强度、结构、生命史等特征进行了统计分析。早期研究(陶诗言等,1984)指出低涡的涡源主要集中在高原中东部。随着高原西部站点的增加以及再分析资料的使用,罗四维等(1993)、Lin(2015)、Curio et al(2018)发现低涡主要生成于高原西部。在月际差异

上,李国平等(2014)指出6月低涡的源地较7、8月偏北。对于低涡的强度及结构特征,吕君宁等(1984)发现初生低涡的涡区在100 hPa以下均为上升气流,最大上升速度出现在低涡中心东部的400 hPa,且成熟低涡的中心在近地层出现下沉运动。柳草等(2009)对2001年6月初一次东移低涡个例诊断的结果表明,低涡在东移过程中,垂直方向上几乎都是正涡度,低涡移出高原后上升运动减弱。田珊儒等(2015)提出东移低涡的加强主要与低涡降水产生的凝结潜热释放有关。Li et al(2020)通过对比2000—2015年5—8月东移低涡移出高原前后的垂直结构,发现低涡移出前垂直速度与散度近似对称分布,而移出后最大上升速度位于低涡中心东南侧2~4个经纬距。对于低涡的移动方向,师锐和何光碧(2018)指出低涡移出后受200 hPa西风引导气流的影响。刘富明和湊梅娟(1986)指出高层辐散场是低涡移出高原的主导因子。黄楚惠等(2015)通过分析1981—2010年夏季高原低涡移出时的环流型,认为低涡在500 hPa中高纬西高东低的环流型下易向东移出高原,而在高原以北为低压异常、以东为高压异常的环流型下,低涡易向东北方向移动。另外,郁淑华和高文良(2006)发现初夏(6月)低涡以向东、东北方向移动为主,盛夏(7—8月)则以向东、东南方向为主。低涡在高原主体上时,引发大范围强降水的概率较小,一旦到达高原边缘及以东地区后,往往会造成大到暴雨甚至大暴雨(戴加洗,1990)。Kuo et al(1986)及周玉淑等(2019)提出东

移低涡与西南涡共同作用,常在四川盆地产生区域性暴雨天气过程。Li et al(2019)研究指出东移低涡产生的降水主要发生在四川、淮河上游及长江中下游。另外,在东移低涡个例的诊断分析中发现,随着低涡继续向东移动,通常会沿长江流域形成西南—东北向的降雨带(黄楚惠和李国平,2007;马婷等,2020)。对于低涡生命史,郁淑华和高文良(2018)发现冷空气入侵,西太平洋副热带高压(简称副高)偏南利于低涡持续较长的时间。同时低涡持续时间越长,产生的降水也越强。

综上所述,以往有关高原低涡的研究大多以东移低涡为主,且对低涡降水个例的研究多集中在西南地区及长江流域,而对于东北移低涡的研究还不多。随着资料分辨率的提高以及低涡识别方法的更新,对低涡的识别更为全面。同时,由于西北地区地处干旱半干旱区,降水稀少,突发的暴雨往往会引发较大的气象灾害,东北移低涡移入西北地区,是触发暴雨的强系统之一。因此有必要加强对东北移低涡活动及降水特征的认识。本文将 1979—2018 年初夏(6 月)东北移低涡进一步细化为偏西型低涡和偏东型低涡,分析不同路径低涡的源地、结构特征、移动速度、环流背景场等方面的差异,并与东移低涡进行对比。最后探讨了东北移低涡移出高原后对降水的影响。

1 资 料

文中高原低涡采用再分析资料经客观识别方法得到。由于在现有公开发表的识别结果中,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)推出的再分析数据集 ERA-Interim 识别出的低涡路径与同期其他再分析资料识别结果匹配度最高(Lin et al, 2020),同时其分辨率高、年限长,因此本文选取 1979—2018 年 ERA-Interim 资料识别的低涡数据库。分析低涡结构和环流时使用同期 ERA-Interim 再分析数据集,时间间隔为 6 h,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。降水资料为同期中国气象局国家气象信息中心 2944 个站点逐日(08 时至次日 08 时)降水观测资料。

2 高原低涡统计及分类

依据低涡消亡位置,将低涡库中移出型高原低涡分为:东移、东北移及东南移。通过对 1979—

2018 年夏季移出型高原低涡的统计(表 1),发现年均夏季有 4 个低涡移出高原,其中东移低涡最多(占三类移出低涡总数的 60%),东北移低涡次之(占 29%),东南移低涡最少(占 11%),这与王鑫等(2009)利用 1980—2004 年天气图资料通过人工识别得到的结果较一致。此外还可以看出,在整个夏季,东北移低涡和东移低涡多发生在 6 月,占其各自总数的一半左右;7 月东北移低涡次数略少于 8 月,而 8 月东移低涡次数最少;东南移低涡不仅数量少,且 6 月次数远小于 7 月和 8 月。

表 1 1979—2018 年夏季移出型高原低涡统计

Table 1 Statistics of the moving-out TPV in summer from 1979 to 2018

月份	移动路径			总计
	东北移(I:II)	东移	东南移	
6	20(7:13)	51	2	73
7	12(3:9)	30	8	50
8	14(6:8)	14	8	36
夏季	46(16:30)(29%)	95(60%)	18(11%)	159

东北移低涡和东移低涡在 6 月出现次数最多,同时初夏(6 月)与盛夏(7—8 月)环流型不同,因此本文主要关注 6 月的低涡活动特征。图 1 为 6 月东北移低涡的移动路径。由图可见,低涡移出高原前主要表现为东北移及东移,移出高原时位置有所不同,移出高原后影响的区域也明显不同。由此,以 100°E 为分界线,将东北移低涡细分为两类:一类低涡在高原上以东北移为主,从 100°E 以西的高原北边缘移出,移出后主要影响新疆东部及河西走廊地区(记为 I 类低涡,简称为 NE_I -TPV);另一类低涡在高原上以东移为主,移至 100°E 后从高原东边缘移出,移出后主要影响西北地区东部及内蒙古中西部(记为 II 类低涡,简称为 NE_II -TPV)。II 类低涡明显较 I 类低涡偏多,个数比接近 2:1(见表 1)。

3 高原低涡的源地及结构特征

以下从低涡的源地(生成地)及垂直结构(主要是相对湿度和垂直速度)分析和比较低涡在移出高原前后的差异。

3.1 高原低涡的源地

为了形象展示高原低涡的源地,图 2 给出了两类东北移低涡及东移低涡生成地的累计频数分布。由图可知,不同路径低涡的源地在南北位置上差异

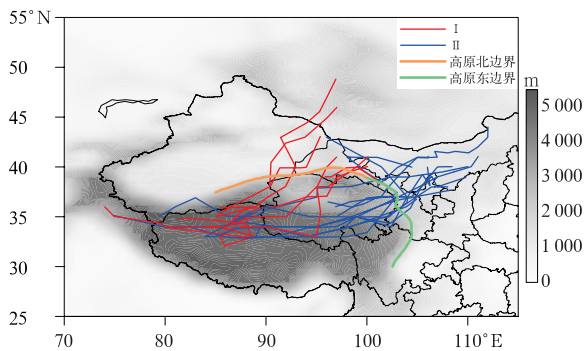


图1 1979—2018年6月Ⅰ类(红色实线)及Ⅱ类(蓝色实线)东北移低涡移动路径
(阴影为海拔高度)

Fig. 1 Tracks of NE_I -TPVs (red lines) and NE_{II} -TPVs (blue lines) in June from 1979 to 2018
(shaded: altitude)

较大,Ⅰ类低涡主要生成于高原西北部(图2a),东部低涡仅出现在柴达木盆地以北;Ⅱ类低涡绝大部分生成于 $33^{\circ}N$ 以北地区(图2b),主要有西、中、东3个源地(黄楚惠等,2015);东移低涡分布范围明显比东北移低涡广(图2c),但95%以上生成于 $35^{\circ}N$ 以南地区,其中,西部涡源位置与Ⅱ类低涡接近,而东部涡源主要位于玉树地区(王鑫等,2009)。

以上分析可见,不同路径低涡的源地不相同。

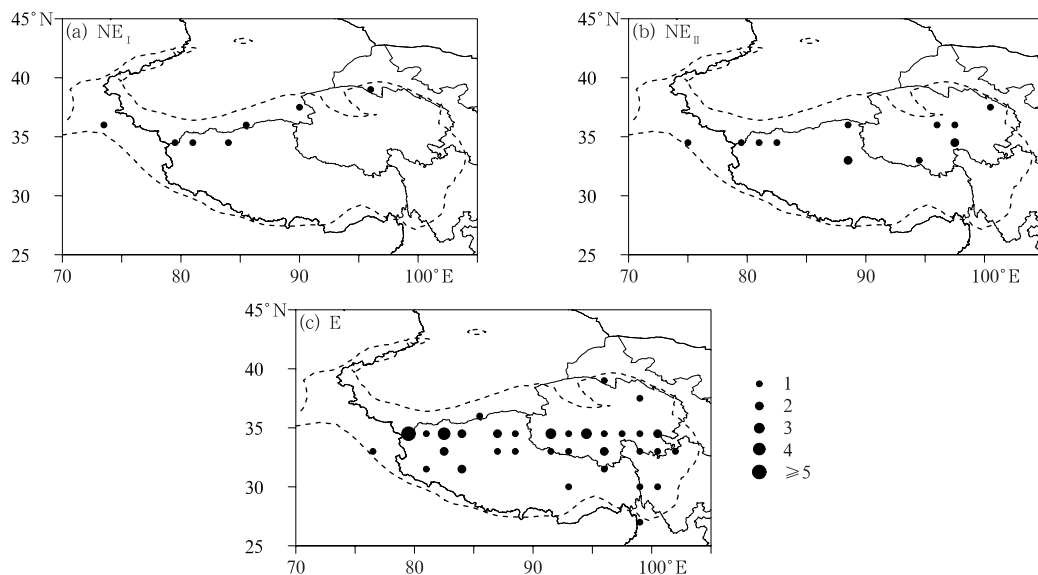


图2 1979—2018年6月Ⅰ类(a)、Ⅱ类(b)东北移及东移低涡(c)的源地累计频数
(黑虚线是3000 m的地形等高线,下同;黑色实心圆代表低涡频次,实心圆的大小表示频次数量)

Fig. 2 Source cumulative frequency of NE_I -TPV (a), NE_{II} -TPV (b), and E-TPV (c) in June from 1979 to 2018

(Black dotted line is the topographic contour of 3000 m, same as below;

black solid circle represents the vortex frequency and its size for number of frequency)

Ⅰ类和Ⅱ类低涡源地偏北,其中,Ⅰ类低涡生成地集中在高原西北部;东移低涡源地分布广泛,但其生成地明显较两类东北移低涡偏南。由此可推断,高原低涡移出位置可能会受其生成纬度的影响,在相同环流背景下,若低涡生成地位置偏北,则其移出高原时的位置也偏北。

3.2 高原低涡的结构特征

在低涡移出高原的过程中,会经历海拔高度的变化,其强度和结构往往会发生较大变化。以下对低涡移出高原前后垂直速度及相对涡度进行合成,以分析不同路径低涡移出高原前后的结构差异。考虑到高原低涡是移动的系统,这里使用广泛应用于台风的动态合成方法(Frank, 1977)来研究低涡的结构,即以低涡中心为坐标原点,对每个个例各时次选取相同范围进行合成。

Li et al(2020)分析了2000—2005年5—8月东移低涡的结构,发现低涡移出高原前低涡中心附近整层以上升运动为主,垂直速度近似对称分布,最大速度出现在450 hPa附近,最大正相对涡度出现在500 hPa附近,200 hPa以上为弱的负相对涡度区。对比两类东北移低涡的结构(图略),发现在结构上东北移低涡与东移低涡相似,但在强度上,无论是垂直速度还是相对涡度,Ⅱ类低涡及东移低涡均较Ⅰ类

低涡更强。

比较两类东北移低涡移出高原后的相对涡度和垂直速度(图3),可以看出,东北移低涡在低涡中心低层(600 hPa以下)出现弱的下沉运动,同时上升运动中心偏离低涡中心,I类低涡最大上升运动位于低涡东北侧(图3a等值线),而II类低涡同东移低涡(Li et al, 2020)一样,上升区位于低涡东南侧(图3b等值线)。在强度上,I类低涡反而较II类低涡更强。相对涡度较移出高原前有所减弱,但垂直向有明显的扩大(从850 hPa向上延伸至200 hPa以上),大值仍维持在500 hPa附近。柳草等(2009)分析了6月一次东移低涡的结构,同样得出移出高原后相对涡度垂直伸展、垂直速度减弱的结论,而相对

涡度移出高原后强度增大。

由此可见,II类低涡移出前后的结构与东移低涡相似,而与I类低涡存在一定差异。在强度上,移出高原前II类低涡和东移低涡较I类低涡偏强,而移出高原后I类低涡更强。另外,两类东北移低涡移出高原后相对涡度在垂直方向进一步扩展,但相对涡度和垂直速度的强度有所减弱。

4 高原低涡的移动特征

以下比较高原低涡移出高原时的环流背景场及低涡在移出高原前后的移动速度,进一步揭示两类东北移低涡与东移低涡的差异。

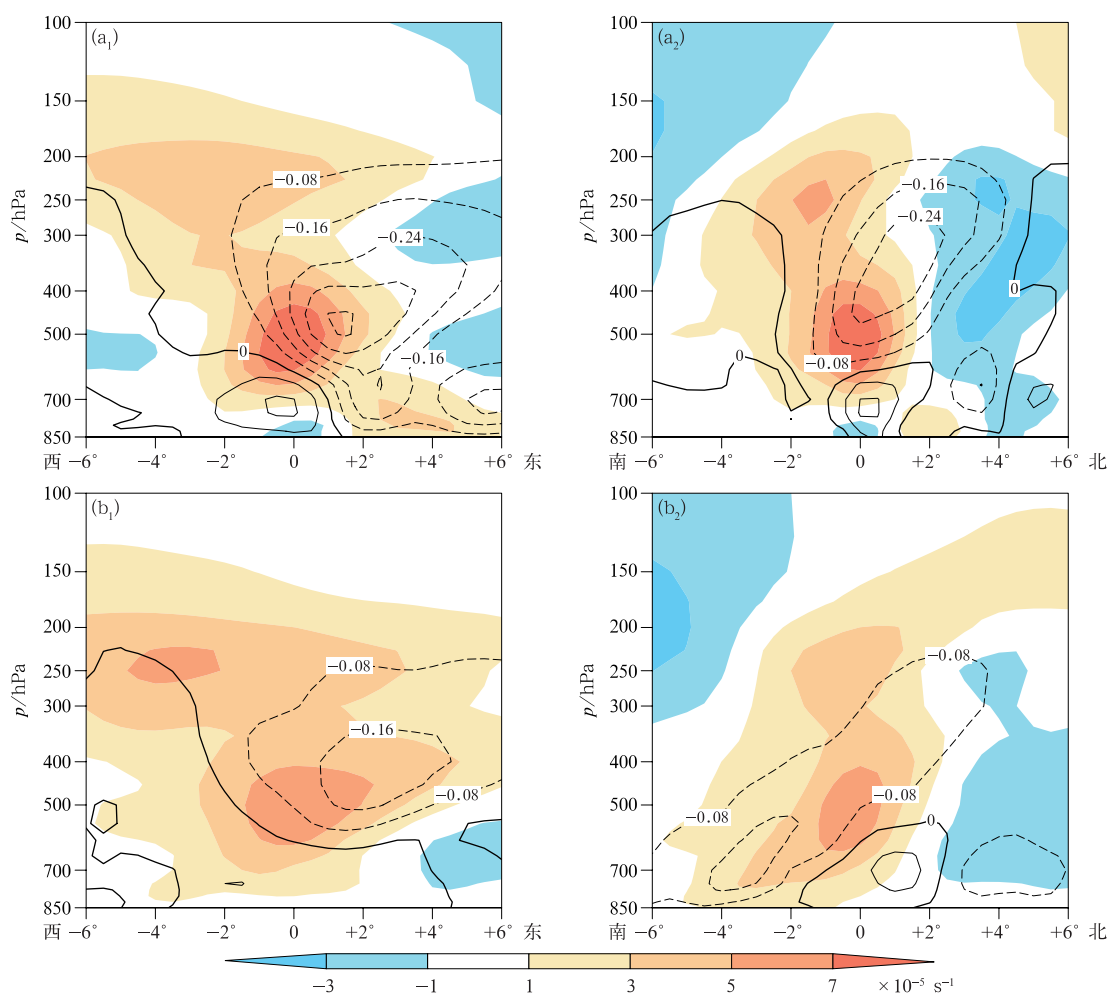


图3 I类(a)、II类(b)东北移低涡移出高原后相对涡度(填色)及垂直速度(等值线,单位: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)的经度-高度(a_1, b_1)及纬度-高度(a_2, b_2)剖面(横坐标“0”为低涡中心,正方向分别为向东、向北)

Fig. 3 Vertical cross-sections in zonal (a_1, b_1) and meridional (a_2, b_2) of relative vorticity (colored), and vertical velocity (contour, unit: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) of NE_I-TPV (a) and NE_{II}-TPV (b) after moving off the TP (“0” in abscissa is the vortex center, and the positive directions are east and north respectively)

4.1 影响高原低涡路径的环流特征

有研究(陈功等,2012;李筱杨等,2019)指出高原低涡的结构与海洋上热带气旋类似,大多伴随着涡旋状云系,那么其移动方向是否也同热带气旋一样受到某一层引导气流的影响?以下对低涡移出时的环流场进行合成分析。图4为两类东北移低涡和东移低涡移出高原前一个时次的200 hPa位势高度场以及两类东北移低涡相对于东移低涡的位势高度偏差。从位势高度场可以看到,对于Ⅰ类低涡(图4a),高原北部为西低东高的环流型,对应高原北部较强的西南风,有利于低涡向东北方向移动。对于Ⅱ类低涡(图4b),中纬西风波动较弱,高原上以平直西风为主,导致低涡以东移为主,并在高原东边缘向东北方向移出。对于东移低涡(图4c),高原东部为西高东低的环流型,高原处于西北风控制,由于低涡移动方向偏向于200 hPa气流的左侧(董克勤和刘治军,1965),导致低涡向东移出高原。此外,从位势高度偏差场(阴影区)可以看到,两类东北移低涡

相对于东移低涡,在高原东北侧均存在正偏差,而西北侧为负偏差,同时Ⅰ类低涡正负偏差偏西且偏强,从而导致了两类东北移低涡和东移低涡移动方向和移出位置不同。

图5给出了两类东北移和东移低涡移出高原时500 hPa风场和相对涡度平流场。由图可见,对于Ⅰ类低涡、Ⅱ类低涡和东移低涡,其正相对涡度平流分别位于高原北侧(图5a)、高原东北侧(图5b)及高原东侧(图5c)。根据位势倾向方程可知,正相对涡度平流会使得位势高度降低,致使低涡向正涡度平流区移动。6月副高脊线位于 20°N 以南,距高原低涡较远,因此对东北移低涡的影响不明显。而在河套地区的小高压脊,可阻挡低涡的东移,且其在Ⅰ类低涡移出时最强(图5a),加之在内蒙古西部的小的阻塞高压,阻挡作用更明显,从而使得Ⅰ类低涡移动方向更加偏北。而对于东移低涡(图5c),其位于东亚大槽后部,受槽后西北风以及副高北侧西风的引导,有利于其向东移出高原后继续向东移动。

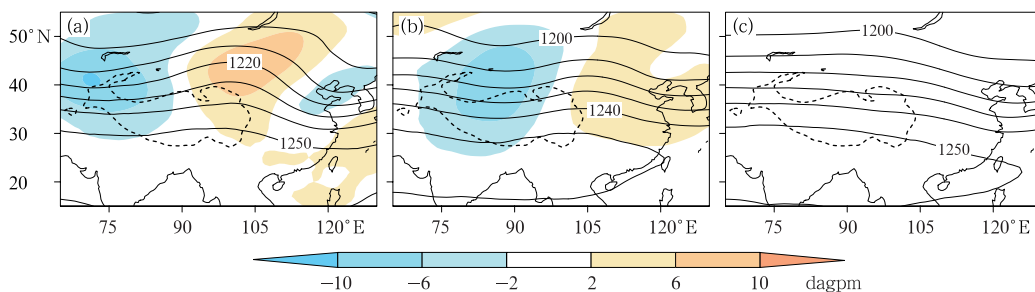


图4 Ⅰ类(a)、Ⅱ类(b)及东移低涡(c)在6月移出高原时的200 hPa位势高度(等值线,单位:dagpm)和两类东北移低涡相对于东移低涡的位势高度偏差(填色)

Fig. 4 The 200 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and the geopotential height deviation of NE-TPV relative to E-TPV (colored) of NE_I-TPV (a), NE_{II}-TPV (b), and E-TPV (c) at the edge of the Tibetan Plateau in June

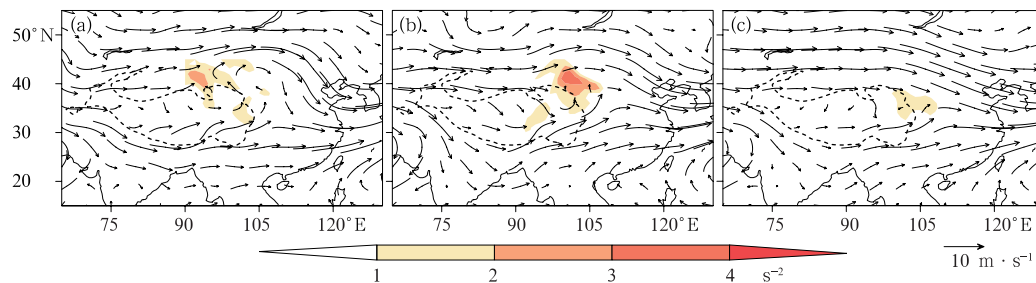


图5 同图4,但为500 hPa风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和相对涡度平流(填色)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for 500 hPa winds (vectors, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and relative vorticity advection (colored)

综上分析可知,高原低涡的移动方向主要受到 200 hPa 中纬度西风波动和 500 hPa 高原以东槽脊的共同作用,高层西风引导气流以及位势高度异常很大程度上决定了低涡在高原的移动方向和移出位置,而其移出高原后的移动方向则主要受 500 hPa 槽脊的影响,其中河套高压脊的强度与位置对东北移低涡移动方向的影响尤为重要。

4.2 高原低涡的移动速度

考虑到高原低涡在不同移动阶段所处海拔高度及影响系统的差异,故将低涡移动过程分为三个阶段:移出高原前、在高原边缘下坡时以及移出高原后,并对东北移和东移低涡各阶段的移动速度进行统计(图 6)。采用 Wilcoxon 秩和检验方法(Wilcoxon, 1945)对不同阶段低涡平均移动速度差异的显著性进行了检验,结果发现,三类低涡移动速度差异均能通过 0.05 的显著性水平检验,即低涡移出时平均移动速度在 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,大于低涡移出前 ($40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右),而低涡移出后平均移动速度在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。产生此差异的可能原因在于低涡移出时海拔高度差较大,低涡下坡致使其移动速度加快,而移出后相比移出前,多受到对流层 500 hPa 短波脊的阻挡,致使其移动速度有所减慢。

对于相同阶段两类东北移和东移低涡的移动速度,同样存在较大差异。I 类东北移低涡生成于高原北侧,位于 200 hPa 脊后并以东北移为主(图 4a),由于脊区风速较小,致使 I 类低涡移动速度较缓,几乎 75% 的 I 类低涡移动速度在 $43 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以内;而 II 类低涡与东移低涡在高原上均以东移为主,其顺西风而行,移动速度自然更快。因此,在第一阶段去除两个极端大值外, I 类低涡移动速度整体上明显小于 II 类低涡与东移低涡;东移低涡平均移动速度略弱于 II 类低涡。移出高原后,东移低涡移动速度由移出前的 $36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 减弱至 $31 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, I 类低涡平均移动速度也由移出前的 $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 减弱至 $26 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,而 II 类低涡移动速度减弱幅度最大,移出前平均移动速度可达 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,移出后却与 I 类低涡相差无几,其原因在于 II 类低涡移出后由东移转为东北移,与 I 类低涡一样受到河套小高压脊的阻挡,移动速度自然减弱更明显。

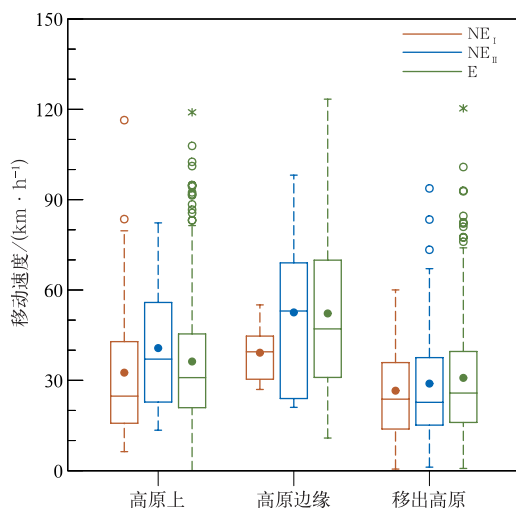


图 6 I 类(红色)、II 类(蓝色)及东移(绿色)低涡在三个阶段的移动速度的箱线图
(实心圆为平均值)

Fig. 6 The quartile boxplot of moving speed of NE_1 -TPV (red), NE_2 -TPV (blue) and E-TPV (green) at three stages
(The filled circle represents the average)

由此可见,除了海拔高度差的影响外,高原低涡的移动速度与其移动方向密切相关,低涡东移时移动速度更快,因此移出高原前及移出时, II 类低涡与东移低涡移动速度明显快于 I 类低涡,而移出高原后两类东北移低涡平均移动速度较东移低涡更慢。

5 东北移高原低涡对降水的影响

以下主要从低涡降水范围及强度两个方面探讨两类东北移低涡对降水影响,其中选取低涡周围 $6^\circ \times 6^\circ$ 的区域作为低涡的影响范围(Li et al, 2019)。

5.1 高原低涡降水范围

图 7 给出了 6 月两类东北移低涡移出高原后产生的累计降水及 500 hPa 位势高度合成结果。从 I 类低涡合成的位势高度场可见,在高原东北部存在一个小槽, I 类低涡在高原北边缘移出后,其活动区域主要位于新疆东部及河西走廊西部,故其引发的降水主要分布在河西走廊、青海西北部地区(图 7a),降水区位于 500 hPa 低压槽底部。而 II 类低涡移出后,在 500 hPa 上从内蒙古中部向甘肃南部伸出低压槽,低涡主要活动于西北地区东部以及内蒙古中部,故其引发的降水主要发生在甘肃东部、宁夏

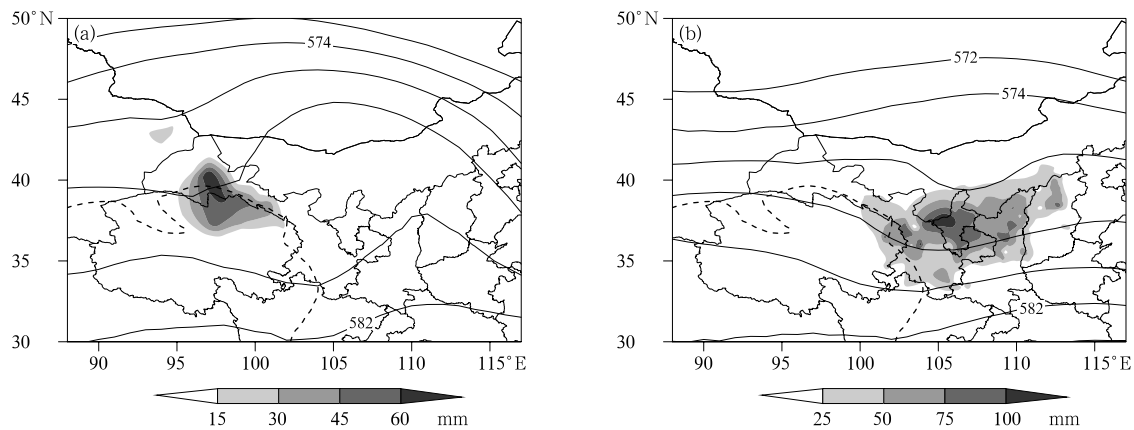


图 7 6 月 I 类(a)及 II 类(b)东北移低涡移出后的总降水(阴影)及 500 hPa 位势高度(等值线,单位: dagpm)

Fig. 7 Total precipitation (shaded) and 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) after the NE_I-TPV (a) and NE_{II}-TPV (b) moving off the TP

及陕西北部,位于低压槽前,同时降水大值中心位于陕甘宁三省交界处以及陕西南部大巴山附近(图 7b)。而对于东移低涡,其移出后引发的降水主要位于四川、淮河上游以及长江中下游(Li et al, 2019),可见其相对于 II 类东北移低涡的影响区域偏南且偏东,同时影响范围更广。

5.2 高原低涡降水强度

由于合成降水不能直观地了解降水强度之间的差异,因此需要对每次东北移低涡过程在移出高原后的阶段引发的最大日雨量进行统计,并与东移低涡(考虑到东移低涡移至华东地区后,降水的影响因素更为复杂,因此只统计其移出后 1 000 km 以内的降水)进行对比,以比较不同路径低涡对降水强度的

具体影响(表 2)。

由表 2 可知,6 月 I 类低涡引发的降水以小雨为主,日雨量达到 50 mm 以上的只有 1 次;而 II 类低涡最大降水以大雨为主的频次(占比为 46.1%),能够引发暴雨的低涡占到该类低涡总数的 23.1%;对于东移低涡,有 40% 以上的低涡能够在移出后 1 000 km 范围内引发暴雨,仅有 23.5% 的低涡移出后引发的最大降水在 25 mm 以下。对于不同路径低涡降水强度的差异,原因在于河西走廊深居内陆,热带及副热带海洋水汽输送至此的寥寥无几,致使该区域水汽贫乏,降水稀少,而西北地区东部地处季风区与非季风区的过渡区,由于两地水汽条件等背景的差异,这势必导致低涡移入后对不同区域产生的降水存在差异。

表 2 两类东北移低涡及东移低涡移出后引发的最大
降水量级发生频次统计

Table 2 Frequency of the maximum precipitation
caused by TPVs after moving off the TP

降水等级		I 类低涡占比/%	II 类低涡占比/%	东移低涡占比/%
小雨	(<25 mm)	85.7	30.8	23.5
大雨	(25~50 mm)	0	46.1	35.3
暴雨	(≥50 mm)	14.3	23.1	41.2

经上统计分析,发现 I 类低涡移出后影响范围较小且降水强度较弱,II 类低涡移出后的降水强度明显较 I 类低涡强,且影响范围更广,但略弱于东移低涡。产生差异的原因一方面在于不同区域水汽条件不同,另一方面在于高原低涡以及其他影响系统强度存在差异。

6 结论与讨论

基于 1979—2018 年高原低涡数据库,针对东北移高原低涡数量最多的初夏(6 月),本文将东北移低涡细分为 I 类低涡(从北边缘移出)和 II 类低涡(从东边缘移出),分析了两类东北移低涡的源地、路

径、结构和移动速度等特征,并与东移低涡特征进行比较,得到以下主要结论:

(1)对于低涡涡源,发现Ⅰ类低涡主要生成于高原西北部,Ⅱ类低涡绝大部分生成于 33°N 以北地区,存在3个源地;东移低涡分布较广,其中的95%以上生成于 35°N 以南,相对两类东北移低涡的生成源地,东移低涡源地位置整体偏南。

(2)Ⅱ类低涡在高原上活动的阶段,在强度上均较Ⅰ类低涡更强,移出高原后两类低涡相对涡度的强度均明显减弱;对于垂直结构,移出高原后,Ⅰ类低涡最大上升运动位于低涡东北侧,而Ⅱ类低涡同东移低涡相似,最大上升区位于低涡东南侧。

(3)高原低涡的移动方向受到200 hPa中纬西风气流和500 hPa高原以东槽脊的共同作用,低涡在高原的移动方向及移出位置主要受高层西风影响,两类东北移低涡相对于东移低涡,在高原东北侧均存在位势高度正偏差场,而西北侧为负偏差;在其移出高原后,移动路径主要受到500 hPa槽脊的影响,尤其需要关注河套高压脊对东北移低涡的阻挡作用。

(4)低涡移动速度一方面受到海拔高度差的影响,另一方面也与移动方向有关。在西风气流引导下,向东移动的低涡通常具有更快的移动速度,因此移出高原前Ⅱ类低涡和东移低涡移动速度明显快于Ⅰ类低涡;移出高原后两类东北移低涡平均移动速度较东移低涡更慢。

(5)Ⅱ类低涡及东移低涡移出后引发降水的范围更广,且引发强降水的比例更高。Ⅰ类低涡移出后主要影响河西走廊地区,且降水以小雨为主;Ⅱ类低涡主要影响西北地区东部,其中有七成的低涡会产生大到暴雨。

本文对东北移高原低涡的特征做了较深入的统计分析,发现Ⅰ类和Ⅱ类低涡在不同特征上存在较大差异,说明对东北移低涡分类研究的必要性。但需要指出的是,尽管本文统计时段较长,但此类低涡总量仍相对较少,在对其统计时部分认识可能缺乏代表性。此外,高原低涡移出后对降水影响只做了初步分析,关于低涡强度、生命史、对降水强度的影响以及低涡与降水之间的内在联系等问题,今后需挑选典型的东北移低涡个例进一步进行诊断分析。

致 谢: 特别感谢林志强博士提供高原低涡数据库。

参考文献

陈功,李国平,李跃清,2012.近20年来青藏高原低涡的研究进展[J].气象科技进展,2(2):6-12. Chen G, Li G P, Li Y Q, 2012.

The research progress of the Tibetan Plateau vortex in recent twenty years[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(2): 6-12 (in Chinese).

戴加洗,1990. 青藏高原气候[M]. 北京:气象出版社:75-87. Dai J X, 1990. Climate of Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press: 75-87 (in Chinese).

董克勤,刘治军,1965. 台风路径与各等压面上基本气流的关系[J]. 气象学报,35(2):132-137. Dong K Q, Liu Z J, 1965. Relationship between typhoon path and basic airflow on isobaric surfaces [J]. Acta Meteor Sin, 35(2): 132-137 (in Chinese).

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, 36(4): 7-15 (in Chinese).

黄楚惠,李国平,2007. 一次东移高原低涡的天气动力学诊断分析[J]. 气象科学,27(S1):36-43. Huang C H, Li G P, 2007. Synoptic and dynamic diagnostic analysis for a case of plateau vortex moving east[J]. Sci Meteor Sin, 27(S1): 36-43 (in Chinese).

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, 31(6): 827-838 (in Chinese).

孔祥伟,杨建才,李红,等,2021. 河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J]. 气象,47(4):412-423. Kong X W, Yang J C, Li H, et al, 2021. Analysis on water vapor characteristics of an extreme rainstorm in the arid region of western Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 47(4): 412-423 (in Chinese).

李国平,2002. 青藏高原动力气象学[M]. 北京:气象出版社. Li G P, 2002. Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

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]. Chin J Atmos Sci, 38(4): 756-769 (in Chinese).

李筱杨,郑佳峰,朱克云,等,2019. 基于雷达资料的一次高原涡天气云降水宏观特征研究[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, 45(10): 1415-1425 (in Chinese).

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 Mountain Meteor Res, 29(3): 8-11 (in Chinese).

刘富明,洪梅娟,1986. 东移的青藏高原低涡的研究[J]. 高原气象,5(2):125-134. Liu F M, Fu M J, 1986. A study on the moving eastward lows over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor,

- 5(2):125-134(in Chinese).
- 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 化学 生命科学 地学),23(7):778-784. Luo S W, He M L, Liu X D, 1993. A study on the Tibetan Plateau vortex in summer[J]. Sci China (Ser B), 23(7):778-784(in Chinese).
- 罗四维,杨洋,1992.一次青藏高原夏季低涡的数值模拟研究[J].高原气象,11(1):39-48. Luo S W, Yang Y, 1992. A case study on numerical simulation of summer vortex over Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau[J]. Plateau Meteor, 11(1):39-48(in Chinese).
- 吕君宁,钱正安,单扶民,等,1984.夏季青藏高原低涡的综合结构[C]//青藏高原气象科学实验文集(二).北京:科学出版社:195-205. Lv J N, Qian Z A, Shan F M, et al, 1984. Comprehensive structure of the Tibetan Plateau vortex in summer[C]//Collected Works of Meteorological Science Experiment in Qinghai-Tibet Plateau (Part II). Beijing: Science Press: 195-205(in Chinese).
- 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]. Chin J Atmos Sci, 44(3):472-486(in Chinese).
- 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, 44(2):213-221(in Chinese).
- 陶诗言,罗四维,张鸿材,1984.1979年5—8月青藏高原气象科学实验及其观测系统[J].气象,10(7):2-5. Tao S Y, Luo S W, Zhang H C, 1984. Meteorological science experiment and its observation system in Qinghai-Tibet Plateau from May to August 1979[J]. Meteor Mon, 10(7):2-5(in Chinese).
- 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个个例研究[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]. Chin J Atmos Sci, 39(1):125-136(in Chinese).
- 王鑫,李跃清,郁淑华,等,2009.青藏高原低涡活动的统计研究[J].高原气象,28(1):64-71. Wang X, Li Y Q, Yu S H, et al, 2009. Statistical study on the plateau low vortex activities[J]. Plateau Meteor, 28(1):64-71(in Chinese).
- 杨颖璨,李跃清,陈永仁,2018.青藏高原及邻近地区低涡系统结构研究进展[J].气象科技,46(1):76-83. Yang Y C, Li Y Q, Chen Y R, 2018. Progresses and new understanding of researches on vortex systems over Tibetan Plateau and its adjacent areas[J]. Meteor Sci Technol, 46(1):76-83(in Chinese).
- 叶笃正,高由禧,1979.青藏高原气象学[M].北京:科学出版社:278. Ye D Z, Gao Y X, 1979. Meteorology of Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press: 278(in Chinese).
- 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 Sin, 64(3):392-399(in Chinese).
- 郁淑华,高文良,2018.冷空气对夏季高原低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]. Chin J Atmos Sci, 42(6):1297-1326(in Chinese).
- 郁淑华,高文良,彭骏,2015.高原低涡移出高原后持续的对流层中层环流特征[J].高原气象,34(6):1540-1555. Yu S H, Gao W L, Peng J, 2015. Circulation features of sustained departure plateau vortex at middle tropospheric level[J]. Plateau Meteor, 34(6):1540-1555(in Chinese).
- 周玉淑,颜玲,吴天贻,等,2019.高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析[J].大气科学,43(4):813-830. Zhou Y S, Yan L, Wu T Y, et al, 2019. Comparative analysis of two rain-storm processes in Sichuan province affected by the Tibetan Plateau vortex and southwest vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 43(4):813-830(in Chinese).
- Curio J, Chen Y R, Schiemann R, et al, 2018. Comparison of a manual and an automated tracking method for Tibetan Plateau vortex [J]. Adv Atmos Sci, 35(8):965-980.
- Frank W M, 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone I. storm structure[J]. Mon Wea Rev, 105(9):1119-1135.
- Kuo Y H, Cheng L S, Anthes R A, 1986. Mesoscale analyses of the Sichuan flood catastrophe, 11—15 July 1981[J]. Mon Wea Rev, 114(11):1984-2003.
- 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.
- Li L, Zhang R H, Wen M, et al, 2019. Characteristics of the Tibetan Plateau vortices and the related large-scale circulations causing different precipitation intensity[J]. Theor Appl Climatol, 138(1):849-860.
- Lin Z Q, 2015. Analysis of Tibetan Plateau vortex activities using ERA-Interim data for the period 1979-2013[J]. J Meteor Res, 29(5):720-734.
- Lin Z Q, Guo W D, Jia L, et al, 2020. Climatology of Tibetan Plateau vortices derived from multiple reanalysis datasets[J]. Climate Dyn, 55(7):2237-2252.
- Wilcoxon F, 1945. Individual comparisons by ranking methods[J]. Biometrics Bull, 1(6):80-83.
- Xiang S Y, Li Y Q, Li D, et al, 2013. An analysis of heavy precipitation caused by a retracing plateau vortex based on TRMM data [J]. Meteor Atmos Phys, 122(1-2):33-45.

(本文责编:王蕾)