

长、短东移路径暖季高影响高原涡动力结构特征的对比分析

*

高文良^{1,2,3} 郁淑华^{1,2} 彭骏^{1,2}

1. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072
2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072
3. 四川省雅安市气象局, 雅安 625000

摘要: 利用 1998~2018 年 5-9 月 NCEP/NCAR 全球分析数据、大气观测资料、青藏高原低涡切变线年鉴, 采用合成方法比较分析了准平直东移长、短路径暖季高影响高原涡的结构特征, 进一步讨论了长、短路径涡的强度与其结构的关系, 从而说明长、短路径涡的演变某种程度上是由低涡自身的结构决定的。其主要结论如下: (1) 长、短路径涡相同的结构特征有: 生成时是浅薄的天气系统、移出高原后发展为较深厚的天气系统; 在不同的活动阶段低涡的涡度变化趋势一致。(2) 长、短路径涡的结构特征明显差别表现在: 加强时, 长路径涡所伴的正涡度柱比短路径涡深厚, 上升运动柱比短路径涡强; 长路径涡所伴的正涡度柱随高度向北倾斜、涡度值上小下大, 不同于短路径涡呈对称分布、涡度值上大下小; 长路径涡所伴的南风中心位置比短路径涡偏东, 东、西风交汇位置比短路径涡更偏南、更强; 长路径涡加强时涡区上空正涡度平流中心位置比移出时下降、强度加强, 且持续时间长、向东偏离低涡, 短路径涡则相反。(3) 长、短路径涡在不同演变中, 低涡的强度变化是由输入涡区的正涡度平流支撑的。长、短路径涡加强时的结构特征差异体现了长路径涡蕴含涡度增加的垂直输送机制和正涡度平流强迫上升运动增强而使低涡加强的动力机制。

关键词: 高原涡, 准平直东移, 长路径, 短路径, 结构特征

文章编号

中图分类号 p447

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23078

The comparison analysis in dynamic structure characteristics for long and short path of high-impact eastward moving Tibetan Plateau vortex in warm season

GAO Wenliang^{1,2,3} YU Shuhua^{1,2} PENG Jun^{1,2}

1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China
2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Heavy Rain, Drought and Flood Disasters in Plateau and Basin, Chengdu 610072, China
3. Ya'an Meteorological Office of Sichuan Province, Ya'an 625000, China

Abstract Using the May-September, 1998-2018 NCEP-NCAR global analysis data, atmospheric observation data, and the Tibetan Plateau Vortex (TPV) and shear line yearbooks, a comparative analysis was conducted on the

* 收稿日期 2023-07-10; 网络预出版日期

作者简介: 高文良, 1971 年出生, 高级工程师, 主要从事高原及其邻近地区灾害性天气、气候研究。

E-mail: gaowl003@163.com

通讯作者: 郁淑华, E-mail: scshuhuayu@163.com

资助项目: 国家自然科学基金项目 91937301

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91937301)

structural characteristics of high-impact eastward moving plateau vortices with quasi-straight long (QSLTPVs) and short paths (QSSTPVs) adopting composite method in warm season. The relationship between the intensity and structure of QSLTPVs and QSSTPVs was further discussed, thereby indicating that the evolution of QSLTPVs and QSSTPVs is to some extent determined by the structure of the low vortex itself. The main conclusions are as follows: (1) The QSLTPVs and QSSTPVs have the same structural characteristics, namely, being shallow weather system when generating and turned into thicker weather system after moving out the Plateau, the consistent trend of the vorticity of the low vortex in different activity stages. (2) The differences in the structural characteristics of QSLTPVs and QSSTPVs are clearly manifested during strengthening stage. The positive vorticity column of the QSLTPVs is thicker than the QSSTPVs, and the ascending motion column of the QSLTPVs is stronger than the QSSTPVs. The positive vorticity column associated with the QSLTPVs tilts northward along with the height and the vorticity is small in the upper layer and large in the lower layer. The QSSTPVs has a symmetrical distribution with a vorticity vertical distribution contrary to the QSLTPVs. The center of south wind associated with the QSLTPVs is further to the east than that of the QSSTPVs. The confluence position of easterly and westerly winds of the QSLTPVs is further to the south and stronger than that of the QSSTPVs. The positive vorticity advection center position overlying the vortex area of the QSLTPVs is lower and the intensity is strengthened after it departure from the Tibetan Plateau and lasts longer, deviating to the east of the QSLTPVs, while the QSSTPVs is on the opposite side. (3) The intensity changes of low vortices in the different evolution of QSLTPVs and QSSTPVs are supported by the positive vorticity advection of the input vortex regions. The differences in structural characteristics between them in the strengthening stage reflect that the QSLTPVs contain a vertical transport mechanism that increases the vorticity and a dynamic mechanism that enhances the forced ascending motion of positive vorticity advection to be conducive to the strengthening of TPV.

Key words Tibetan Plateau vortex, quasi-straight eastward movement, long path, short path, structure characteristics

1 引言

在青藏高原地形与大气环流的相互作用下,高原及其周围地区经常形成不同类型的降水天气系统,青藏高原低涡(简称高原涡)就是其中之一。高原涡是造成青藏高原降水的主要天气系统,也是影响我国的一个重要天气系统。高原涡很少能移出高原,一旦东移出高原主体,会使中国广大地区产生暴雨、大暴雨,造成灾害性天气(Tao and Ding, 1981; Wang and Isidoro, 1987; 张顺利等, 2001; Kuo and Bao, 1988; Curio et al., 2019; Li et al., 2020a; 郁淑华等, 2022; 马婷等, 2020)。有些高原涡还能移出中国,影响到朝鲜半岛、日本,越南等(Yu et al., 2014)。

高原涡的结构特征可影响高原涡的演变,是低涡气象学的一个基本问题。因此,不少学者开展了高原低涡结构方面的研究。罗四维等(1992)得出了青藏高原上活动的低涡结构为暖性、浅薄的天气系统。乔全明和张雅高(1994)得出了高原涡不同于其他热带扰动结构的一些特征。丁一汇(1993)指出了影响1991年梅雨锋发展的来自高原东部短波扰动的结构特征。并且,切变低涡的生成、发展中正涡度中心的垂直结构及其演变与涡度正变率中心的垂直结构

及其演变基本一致(程麟生, 1991)。高原涡有涡眼和暖心结构(李国平和蒋静, 2000)。郁淑华和高文良(2010)比较了一个移出和一个非移出高原涡的结构, 指出前者涡度和上升运动更强, 更深。柳草等(2009)指出高原涡在东移过程中, 垂直方向上几乎都是正涡度, 500hPa上正涡度随时间呈增强趋势。李国平等(2011)指出高原涡既含有涡旋Rossby波又含有惯性重力外波的结构特征。宋雯雯等(2012)指出凝结潜热、水汽对低涡的维持以及结构特征演变起关键作用。杨颖璐等(2018a)指出深厚型高原涡的演变与南亚高压联系密切。Li等(2020b)指出高原涡的演变是由它们自身的结构特征决定的。

上述研究揭示了高原涡的基本结构, 但多数只是个例分析, 且不同个例的高原涡结构是不同的。因此, 本文通过对准平直东移高影响高原涡的综合分析, 试图得到东移的高影响高原涡的相同结构特征, 以及长、短路径涡在不同演变阶段的结构特征差异。这一工作对深入了解高影响高原涡结构特征, 以及演变阶段与结构特征之间的关系是有利的, 可加深对东移高原涡结构特征的认识, 进一步为提高东移高原涡的预报提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 资料

所用的资料包括: (1) 中国气象局国家气象信息中心提供的1998~2018年5-9月每日08:00、20:00(北京时, 下同)地面观测资料、高空探测资料; (2) 时间分辨率为6 h, 水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的1998~2018年5-9月NCEP(美国国家环境预报中心)/NCAR(美国国家大气研究中心)-FNL(全球可使用的最终分析)资料; (3) 青藏高原低涡切变线年鉴1998年册(李跃清等, 2010)至2018年册(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, 2020)。以前的高原涡研究已经验证了这些数据的可靠性(Li et al., 2019; 郁淑华和高文良, 2017)。

2.2 高原涡选例

个例选取的原则: (1) 高影响高原涡, 即高原涡活动造成在青藏高原以外, 二个省有暴雨的站点, 或一个省有大暴雨的站点, 或一个省有过程雨量 $\geq 150\text{mm}$ 的站点。(2) 东移路径, 即选取高原涡活动的起点与终点连线与正东方向夹角 $< 15^{\circ}$ 的路径。依据以上原则, 1998~2018年5-9月有较平直路径的东移高影响高原涡9例(表1), 其中, 一类是移动路径长, 横跨大陆出海, 简称为长路径涡(图1a), 共4例; 另一类是东移未出海($\leq 115^{\circ}\text{E}$), 简称为短路径涡(图1b), 共5例。它们对我国降水影响大, 长路径涡主要影响长江流域, 多数造成过程最大雨量在200mm以上, 它比短路径涡的降水要严重得多, 短路径涡主要影响长江以北、黄河流域, 多数造成过程最大雨量在100-180mm(表1)。

考虑到高原涡一般水平尺度是400-500km, 东移发展后为500-1000 km, 故本文涡区计算以低涡为中心, $8^{\circ} \times 8^{\circ}$ 经、纬距范围, 计算格距为 1° 经、纬距。涡中心区是指以低涡为中心, 半径为 1° 经、纬距的区域。

针对长路径涡, 分析其形成、移出(移出青藏高原)、加强、持续和减弱5个阶段, 分析时次为形成时、移出高原时(简称: 移出时)、加强时、持续时、将消失时, 记为1、2、3、4、5时次。短路径涡, 因其加强后下一时刻即将减弱消失, 分析时次无持续时, 其他同长路径涡。

表1 1998~2018年5-9月长、短路径涡过程

Table 1. List of processes of quasi-straight long-path plateau vortices (QSLTPVs) and short-path plateau vortices (QSSTPVs) from May to September during 1998 to 2018

路径类别	序号	高原涡编号	过程日期	移出高原时间	中心强度 (mm)	暴雨分布最广的日期\省份
长路径	1	C0012	7月1日08时~3日20时	1日20时	246.6	7月1日\川、鄂、渝
	2	C0115	6月1日08时~5日20时	2日20时	235.4	6月4日\桂、粤、闽、赣
	3	C1323	6月4日20时~10日08时	5日20时	287.9	6月7日\苏、浙、皖、鄂、湘、贵
	4	C1619	5月17日20时~22日20时	19日08时	111.1	5月19日\渝、湘、贵、赣
短路径	1	C0512	5月1日20时~4日08时	3日08时	170.9	5月4日\鄂、湘、豫
	2	C0824	6月25日20时~27日20时	26日20时	136.3	6月27日\苏、浙、皖、赣、陕
	3	C0836	8月11日08时~14日08时	12日08时	220.7	8月13日\豫、冀
	4	C0943	8月2日08时~4日08时	3日08时	141.0	8月3日\青、甘、陕
	5	C1741	7月25日20时~29日08时	27日20时	106.3	7月28日\陕、晋、冀

注：高原涡编号是以“C”字母开头，由年份的后2位数与当年低涡顺序2位数组成。

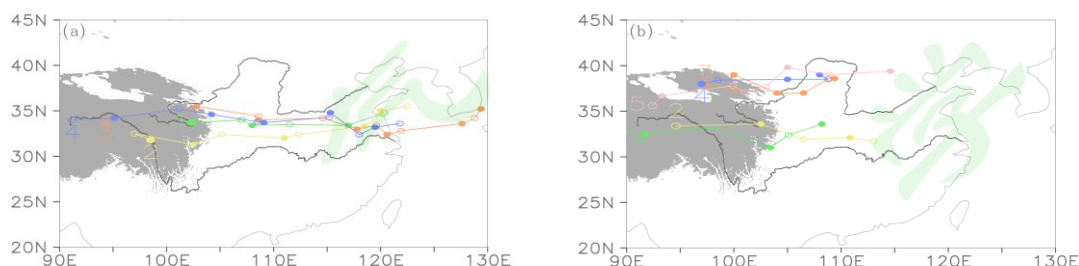


图1 1998–2018年5–9月高影响高原涡东移路径 (a) 长路径涡，(b) 短路径涡。图中数字表示表1中高原涡次序，实心圆、空心圆分别示为08、20时，黑色阴影为海拔高度 $\geq 3000\text{m}$ 区域

Fig. 1 The eastward paths of (a) QSLTPVs and (b) QSSTPVs from May to September during 1998–2018. The numbers in Fig.1 denote the sequence of TPVs as listed in Table 1, the solid circle and hollow circle are the positions of TPV at 08: 00 and 20: 00 BT, respectively. The shaded area presents the region with the altitude $\geq 3000\text{ m}$

2.3 合成方法

考虑到高原涡是一个移动的天气系统，本文采用伴随高原涡的移动坐标系 (x, y) 的跟随低涡的动态合成方法。公式(李英等, 2004)如下：

$$\bar{S}_t(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_t(x, y), \quad (1)$$

式中 $\bar{S}_t(x, y)$ 为 (x, y) 处的样本平均场， $S_t(x, y)$ 为 t 时刻 (x, y) 处的物理量场， N 为样本总数。

3 长、短路径涡不同演变阶段的结构特征

长、短路径涡的环流背景为：500hPa上，相似之处是在高原涡活动过程中各自维持同一种环流型，各有同一种影响天气系统(图略)，差异是长路径涡维持一槽一脊形势，高原涡处在低槽中，短路径涡维持两槽一脊形势，高原涡处在切变线中；移出青藏高原之后短路径涡

伴有热带低压活动，使副高北抬，对高原涡东移起一定的阻挡作用，长路径涡则没有；长路径涡的西南气流活动比短路径涡强；长路径涡以北锋区明显，短路径涡不明显。200hPa 上，相似之处是高原涡都位于南亚高压东北侧下空，伴有东、西段急流(图略)，差异是移出青藏高原之后，长路径涡的东、西段急流比短路径涡明显偏强；长路径涡的西段急流核心区比短路径涡更接近高原涡。

为分析长、短路径涡不同演变阶段的结构特征，以长、短路径涡不同分析时次代表不同的分析阶段，进行结构特征的比较。由于不同层次的辐合(辐散)联系不同层次的上升(下沉)运动，下面省略了散度分析。

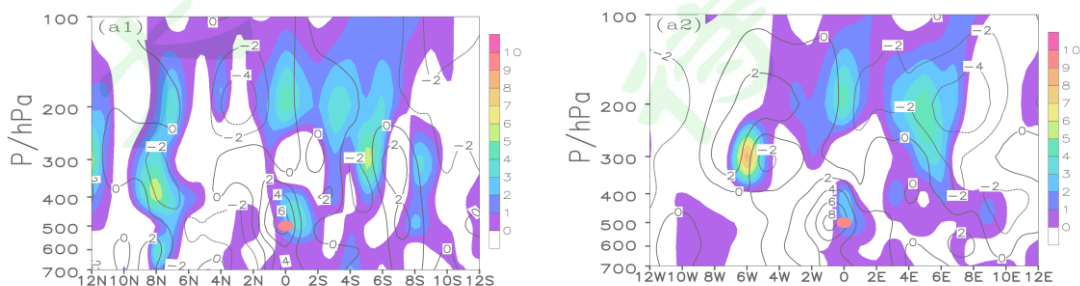
3.1 生成阶段

长、短路径涡生成时的结构特征可从图 2 看出，两者的正涡度中心都位于经、纬向剖面的 500hPa 上 (图 2a1、a2、b1、b2)，长路径涡正涡度 $\geq 2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 的区域在经、纬向上垂直伸展至 350hPa (图 2a1、a2)，短路径涡则垂直伸展至 300hPa (图 2b1、b)；两涡水平覆盖纬向约 $5 \sim 6^\circ$ 、经向约 3° 。这与一些研究指出的高原涡尺度相一致(叶笃正和高由禧，1979；罗四维，1992)，反映了长、短路径涡生成时是浅薄的天气系统。此时长路径涡的正涡度强度比短路径涡稍弱。长、短路径涡所伴的正涡度平流区中心位于高原涡垂直轴附近的南侧、东侧，但正涡度平流输入涡区的强度、范围长路径涡比短路径涡大。

200 hPa 上，长、短路径涡垂直轴以北为西风分量大值区，分别有 26m s^{-1} 、 24m s^{-1} 核心区 (图 2c1、d1)；长、短路径涡上空 200 hPa 分别为弱的南、北风分量 (图 2c2、d2)。反映了长、短路径涡以北 200 hPa 存在西风急流，长路径涡的比短路径涡强。这是高影响高原涡不同于一般高原涡的高空风特征，一般高原涡上空 200 hPa 不存在西风急流 (Li et al., 2020b)。

由风的垂直剖面看出，在经向上(图 2c1、d1)，长、短路径涡的垂直轴北侧在 500 hPa 以下为东风，南侧为下传的西风，涡中心区内有东、西风交汇，交汇强度($-\Delta u$)长路径涡不如短路径涡强；在纬向上(图 2c2、d2)，长、短路径涡在 400 hPa 以下其垂直轴东侧为南风、西侧为北风，南、北风中心的风速相近，长路径涡的南风水平、垂直范围比短路径涡大；两涡中心区内有南、北风交汇，长路径涡的交汇强度(Δv)比短路径涡强；上述东、西风交汇和南、北风交汇，与长、短路径涡经、纬向涡度差异相吻合。

由上升运动的垂直剖面看出，在经向上(图 2c1、d1)，长、短路径涡上升运动中心在 400hPa，分别靠近其垂直轴的北、南侧，长路径涡更强；短路径涡的明显上升运动($\leq -0.2 \times 10^{-3} \text{Pa s}^{-1}$)的水平、垂直范围比长路径涡大。在纬向上(图 2c2、d2)，两涡明显的上升运动几乎在其垂直轴东侧 500hPa 以上的南风区域内，垂直向上至约 200 hPa，中心在 400hPa，短路径涡更强，但长路径涡的水平范围比短路径涡大。反映了长、短路径涡生成时在其垂直轴附近伴有较深厚的上升运动柱，其强度长路径涡比短路径涡强。这是高影响高原涡不同于一般高原涡的上升运动特征，一般高原涡是 $\leq -0.08 \times 10^{-3} \text{Pa s}^{-1}$ 的上升运动可伸展到 200 hPa (Li et al., 2020b)。



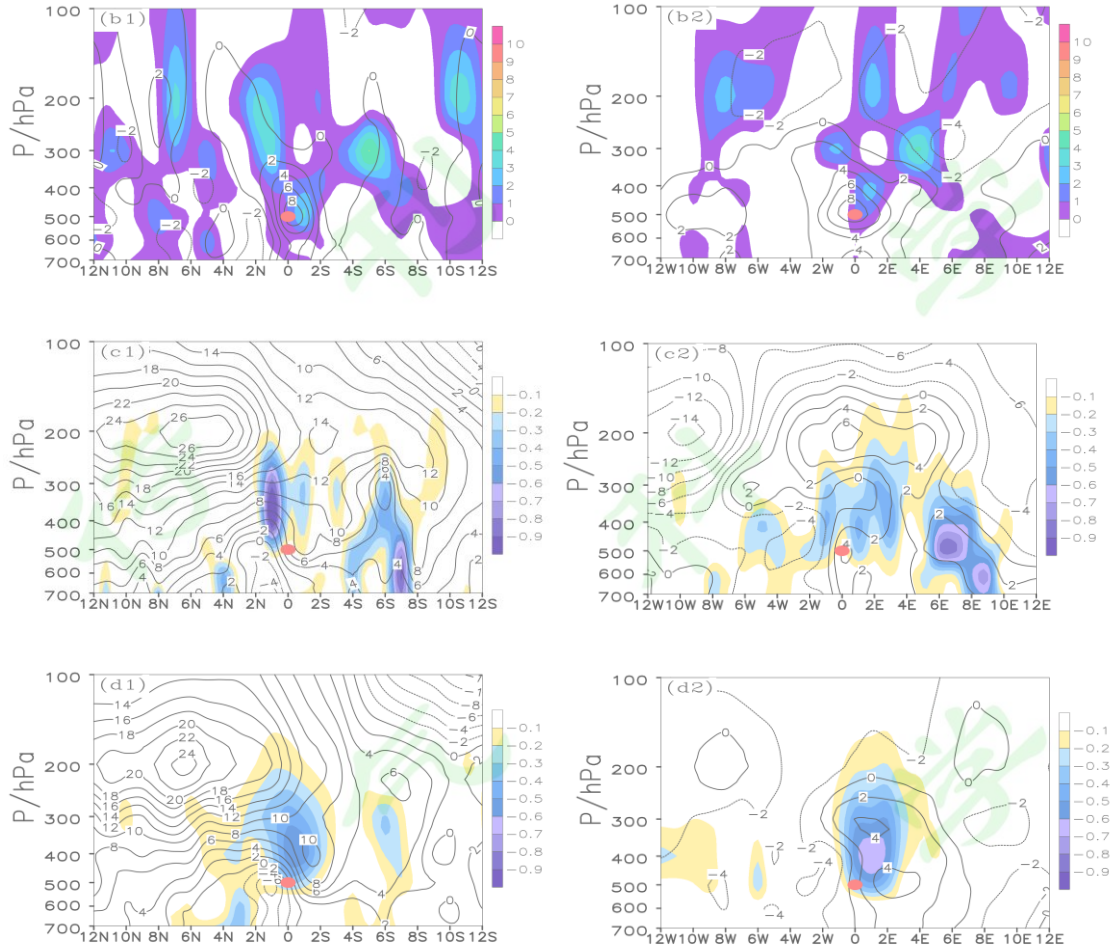


图2 生成时高影响高原涡经向(a1、b1、c1、d1)、纬向(a2、b2、c2、d2)垂直剖面

a1、a2 长路径涡涡度（等值线，单位： 10^{-5}s^{-1} ）和涡度平流（阴影，单位： $10^{-9}\cdot\text{s}^{-2}$ ），b1、b2 短路径涡涡度（等值线，单位： 10^{-5}s^{-1} ）和涡度平流（阴影，单位： $10^{-9}\cdot\text{s}^{-2}$ ），c1 长路径涡垂直速度（阴影，单位： Pa s^{-1} ）和纬向风速（等值线，单位： m s^{-1} ），c2 长路径涡垂直速度（阴影，单位： Pa s^{-1} ）和经向风速（等值线，单位： m s^{-1} ），d1 短路径涡垂直速度（阴影，单位： Pa s^{-1} ）和纬向风速（等值线，单位： m s^{-1} ），d2 短路径涡垂直速度（阴影，单位： Pa s^{-1} ）和经向风速（等值线，单位： m s^{-1} ）。横坐标分别是以涡中心为原点的经、纬向的相对坐标（单位：度）

Fig. 2 Vertical cross-sections in meridional (a1,b1,c1,d1) and zonal (a2,b2,c2,d2) directions When the high-impact Tibetan Plateau vortices (HITPVs) generating. **a1** and **a2** vorticity (contours, unit: 10^{-5}s^{-1}) and vorticity advection (hading, unit: 10^{-9}s^{-2}) of QSLTPVS, **b1** and **b2** vorticity (contours, unit: 10^{-5}s^{-1}) and vorticity advection (hading, unit: 10^{-9}s^{-2}) of QSSTPVS, **c1**. vertical velocity (hading, unit: Pa s^{-1}) and zonal wind speed (contours, unit: m s^{-1}) of QSLTPVS, **c2**. vertical velocity (hading, unit: Pa s^{-1}) and meridional wind speed (contours, unit: m s^{-1}) of QSLTPVS, **d1**. vertical velocity (hading, unit: Pa s^{-1}) and zonal wind speed (contours, unit: m s^{-1}) of QSSTPVS, **d2**. vertical velocity (hading, unit: Pa s^{-1}) and meridional wind speed (contours, unit: m s^{-1}) of QSSTPVS. The abscissa is the relative coordinates (unit: degree) of meridional and zonal directions with the vortex center as the origin, respectively

由上看出，长、短路径涡生成时的结构特征：共性是低涡中心与正涡度中心重合，水平尺度为 $400\sim 700\text{km}$ ，有正涡度平流输入涡区，是浅薄的系统；低涡所伴的上升运动中心在 400hPa ，明显的上升运动在高原涡垂直轴附近与南风区域内，垂直伸展到接近 200hPa ；东、西风交汇带与南、北风交汇带通过低涡中心；高空有西风大值中心区。差异是长路径涡所伴

的高空西风大值、南、北风交汇带、正涡度平流、上升运动比短路径涡强；而长路径涡所伴的东、西风交汇带不及短路径涡强。

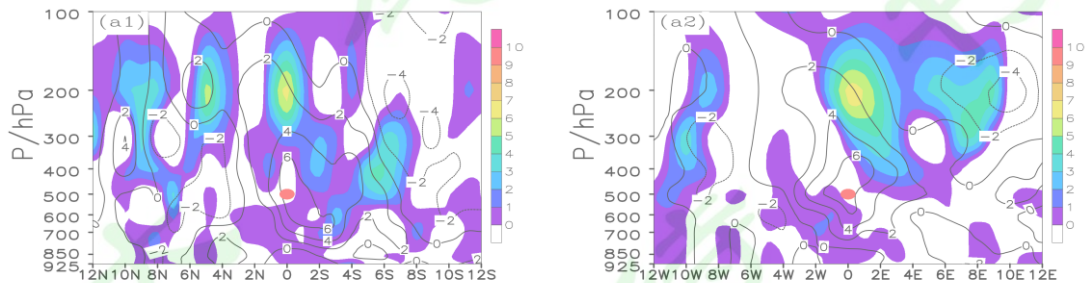
3.2 移出阶段

长、短路径涡移出时涡区结构特征为：两涡正涡度中心在 500 hPa 上，比生成时减弱，但短路径涡比长路径涡强；两涡经、纬向正涡度平流区范围、强度分别比生成时明显减小、减弱，有来自西南部的正涡度平流输入涡区，长路径涡输入的范围比短路径涡大，强度比短路径涡稍弱（图 3a1、a2、b1、b2），两涡区内正涡度平流变化与涡区内正涡度变化是一致的。

由移出时涡度、涡度平流的垂直剖面看出，长路径涡涡度 $\geq 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 垂直伸展区域(正涡度柱)，经、纬向垂直伸展约为 700-150 hPa，稍向北、西倾斜（图 3a1、a2），短路径涡则为 700-250 hPa，在其垂直轴西、南侧 1° ，呈对称分布（图 3b1、b2）。长、短路径涡在其垂直轴东、南侧的涡区内有正涡度平流柱，长路径涡垂直伸展比短路径涡厚，长路径涡正涡度平流柱的大值中心位置比与短路径涡高。并且，长路径涡所伴的正涡度柱比短路径涡深厚，是与长路径涡所伴的正涡度平流柱比短路径涡深厚相吻合。

由移出时风的垂直剖面看出，长、短路径涡涡区上空，200 hPa 西风比生成时增大，在其垂直轴上分别有 22 m s^{-1} 、 24 m s^{-1} 核心区(图 3c1、d1)；纬向上 200 hPa 仍为弱的南风分量(图 3c2、d2)。反映了移出时 200 hPa 西风急流南移，急流核已达到低涡中心区上空，长路径涡上空的急流核强度不如短路径涡强。长、短路径涡 400 hPa 以下所伴的东风比生成时向南、北扩展，短路径涡东、西风扩展不如长路径涡大(图 3c1、d1)；长路径涡的东、西风的交汇位置比短路径涡偏南，但强度比短路径涡弱。两涡在 200 hPa 以下南、北风在其垂直轴附近交汇，此交汇带长度比生成时长(图 3c2、d2)；长路径涡的交汇强度比短路径涡强。结合涡度变化可知，长、短路径涡所伴的正涡度柱（ $\geq 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ）上界与南风上界一致；上述东、西风和南、北风的交汇带垂直伸展，与移出时长、短路径涡经、纬向正涡度柱垂直伸展及涡中心区强度变化相吻合。

由移出时上升运动的垂直剖面看出，长、短路径涡上升运动比生成时减弱。在经向上(图 3c1、d1)，长、短路径涡所伴的上升运动柱在 $0-4^\circ \text{ S}$ ，垂直厚度约为 850-200 hPa，向北倾，上升运动中心分别在 600 hPa、500 hPa，长路径涡比短路径涡偏南、偏强。在纬向上(图 3c2、d2)，两涡较明显的上升运动区在南风区域内，长路径涡垂直厚度为 400-150 hPa，短路径涡则为 500-200 hPa；长路径涡所伴的上升运动柱随高度向东倾比短路径涡偏东、偏高、偏强；短路径涡在其垂直轴周围垂直向上。可以看出，移出时长、短路径涡仍伴有较深厚的上升运动柱，长路径涡比短路径涡偏东、偏南、偏强。



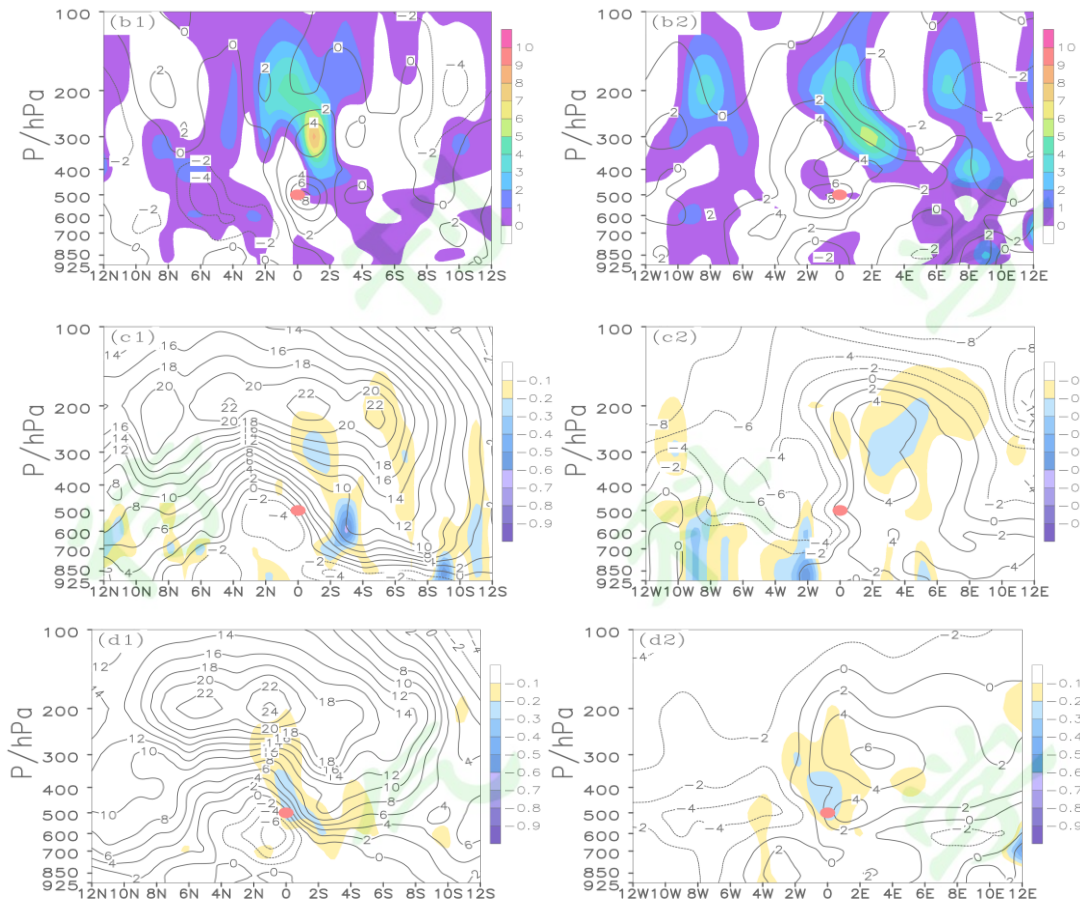


图3 同图2，但为移出时

Fig.3 same as Fig.2, but when HITPVs moving out the plateau

由上看出，长、短路径涡移出时的结构特征：共性是低涡中心仍与正涡度中心重合，比生成时减弱；在高原涡东、南侧的上升运动比生成时减弱；伴有较深厚的正涡度柱、正涡度平流柱、上升运动柱；所伴的东、西风交汇带与南、北风交汇带的长度比生成时长；200 hPa 西风比生成时增大，大值中心已达低涡中心区上空。差异是短路径涡正涡度中心、输入涡区的正涡度平流强度、200 hPa 西风与 400 hPa 以下的东、西风交汇强度比长路径涡大；长路径涡所伴的正涡度柱、正涡度平流柱、上升运动柱比短路径涡强、厚；所伴的南、北风交汇比短路径涡强；所伴的东、西风交汇与经向上升运动的位置比短路径涡偏南、偏低。

3.3 加强（持续）阶段

长、短路径涡加强时涡区结构特征为：长、短路径涡中心涡度(图 4 a1、a2、c1、c2)比移出时增强，分别为 $7.353 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 、 $9.359 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。长路径涡输入涡区的正涡度平流南侧最强，经向正涡度平流比移出时增强、范围扩大；短路径涡则为东侧最强，纬向正涡度平流比移出时增强，范围明显扩大，并且输入正涡度平流范围比长路径涡大，强度不及长路径涡。长、短路径涡输入涡区正涡度平流的不同特征是与长、短路径涡分别处在低槽、切变线及长路径涡所伴的西南气流比短路径强有关。长路径涡持续时，涡中心正涡度(图 4b1、b2)比加强时增加；输入涡区的正涡度平流仍为南侧最强，经、纬向正涡度平流强度分别比加强时减弱、增强。反映了低涡涡区的正涡度平流加强对低涡涡度加强、维持起重要作用。

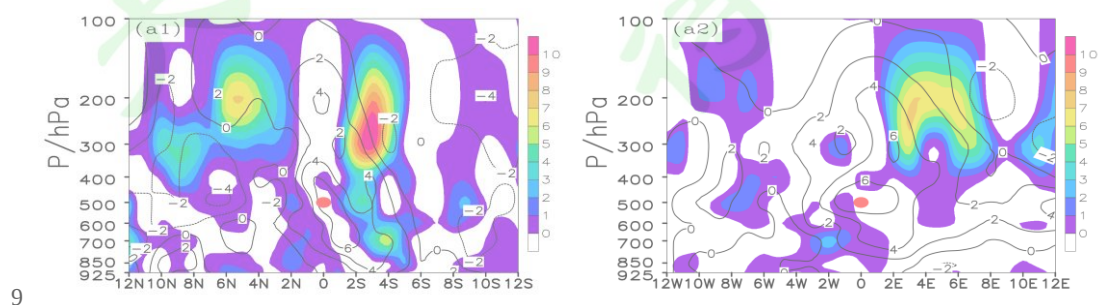
由涡度的垂直剖面看出：长路径涡加强时，经、纬向正涡度柱范围从 850hPa 到 150 hPa 以上，宽度分别为 7、10 经/纬距(图 4 a1、a2)，纬向正涡度柱比移出时明显加宽；正涡度柱

在高原涡垂直轴东侧、向北倾和大值中心在 500 hPa。短路径涡加强时，经、纬向正涡度柱范围分别从约 700hPa 到约 100hPa、从 700hPa 到约 150hPa，宽度分别为 5、10 经/纬距，在高原涡垂直轴东、南侧呈对称分布，大值中心在 300 hPa(图 4 c1、c2)。短路径涡正涡度柱 400hPa 以上涡度比以下的大，这与长路径涡相反。长路径涡持续时则正涡度柱垂直伸展范围、经、纬向宽度(图 4b1、b2)比加强时大；正涡度柱向东、南倾斜和大值中心经向上在 300 hPa、500 hPa，纬向上在 500 hPa。说明长、短路径涡是在正涡度柱增厚、增强时加强的，长路径涡比短路径涡更深厚，长路径涡还具有向北倾、涡度上小下大而明显不同于短路径涡呈对称分布、涡度上大下小的特征，反映了长路径涡存在与东移致灾高原涡发展相一致的重要机制-涡度的垂直输送机制(李祥等, 2023)。正是在正涡度柱增宽、增厚时，低涡在此机制作用下维持、发展的。

由正涡度平流的垂直剖面看出：长路径涡加强时，所伴的正涡度平流柱轴线位于高原涡垂直轴南、东侧 3° ，中心在 250hPa(图 4 a1、a2)，经、纬向正涡度平流柱比移出时明显加强，且更向南、向东，正涡度平流中心位置比移出时(200hPa)下降；持续时正涡度平流柱(图 4b1、b2)比加强时明显增强，位置更向南、向东，随高度向南倾，经向中心位置比加强时下降，纬向未降低。短路径涡加强时所伴的正涡度平流柱轴线位于高原涡垂直轴东侧 3° 、南侧 $4^{\circ}-1^{\circ}$ ，随高度向北倾；中心在 300hPa(图 4 c1、c2)，与移出时位置没有下降，经、纬向正涡度平流柱比移出时明显减弱、明显加强。短路径涡加强时经向正涡度平流柱强度比长路径涡弱很多，也比长路径涡持续时弱。结合涡区内上升运动分析可知，涡区上空正涡度平流中心位置的变化与涡区内上升运动变化相匹配。

由风的垂直剖面看出：长路径涡西风动量下传比短路径涡更明显、更向下、向南，两涡在 600hPa 以下东风比移出时加强，其中长路径涡东风中心区加强、南扩比短路径涡明显，长路径涡的东、西风的交汇比短路径涡偏南、更强(图 4d1、f1)。长、短路径涡南风中心分别约在 200hPa、300hPa，分别比移出时加强了 4 m s^{-1} 、 8 m s^{-1} ，长路径涡南风中心比短路径涡偏东(图 4d2、f2)。短路径涡在 200-500hPa 的南、北风对峙比移出时强，比长路径涡强；长路径涡则在 150hPa 以下有南、北风交汇带，比移出时长(图 4d2、f2)。持续时(图 4e1、e2)，长路径涡 500 hPa 以下东风比加强时增强，南、北风比加强时增强，都比短路径涡强；其垂直轴附近经、纬向两侧风的交汇比加强时强。结合涡度变化可知，上述东、西风交汇带和南、北风交汇带的变化与长、短路径涡经、纬向正涡度柱的厚度、宽度、强度变化相吻合。

由上升运动的垂直剖面看出：两涡加强时，较明显的上升运动区在南风区域内加强；长路径涡经、纬向较明显的上升运动垂直厚度(图 4d1、d2)比移出时向下伸至近地面，长路径涡所伴的较明显的上升运动柱比短路径涡强，主要在其垂直轴南、东侧，中心在南侧 600hPa；短路径涡(图 4f1、f2)则比移出时薄，比长路径涡薄很多，并且位置比长路径涡偏东、偏北，中心在南侧 350hPa。长路径涡持续时(图 4e1、e2)，所伴的上升运动柱，纬向随高度向东倾，比加强时增强，也比短路径涡加强时强，中心在南侧 300hPa，这与高空南风加强有关；经向的上升运动柱比加强时明显减弱，只在 500 hPa 以下。结合风的垂直变化可知，低涡所伴上升运动柱的变化还与其垂直轴东侧南风加强与南、北风交汇带的变化相匹配。长、短路径涡加强时上升运动区在南风区域内可伸展到 200hPa，这与深厚型低涡旺盛阶段上升运动位于低涡东侧并一直发展到 200hPa 相似(杨颖璨等, 2018b)。



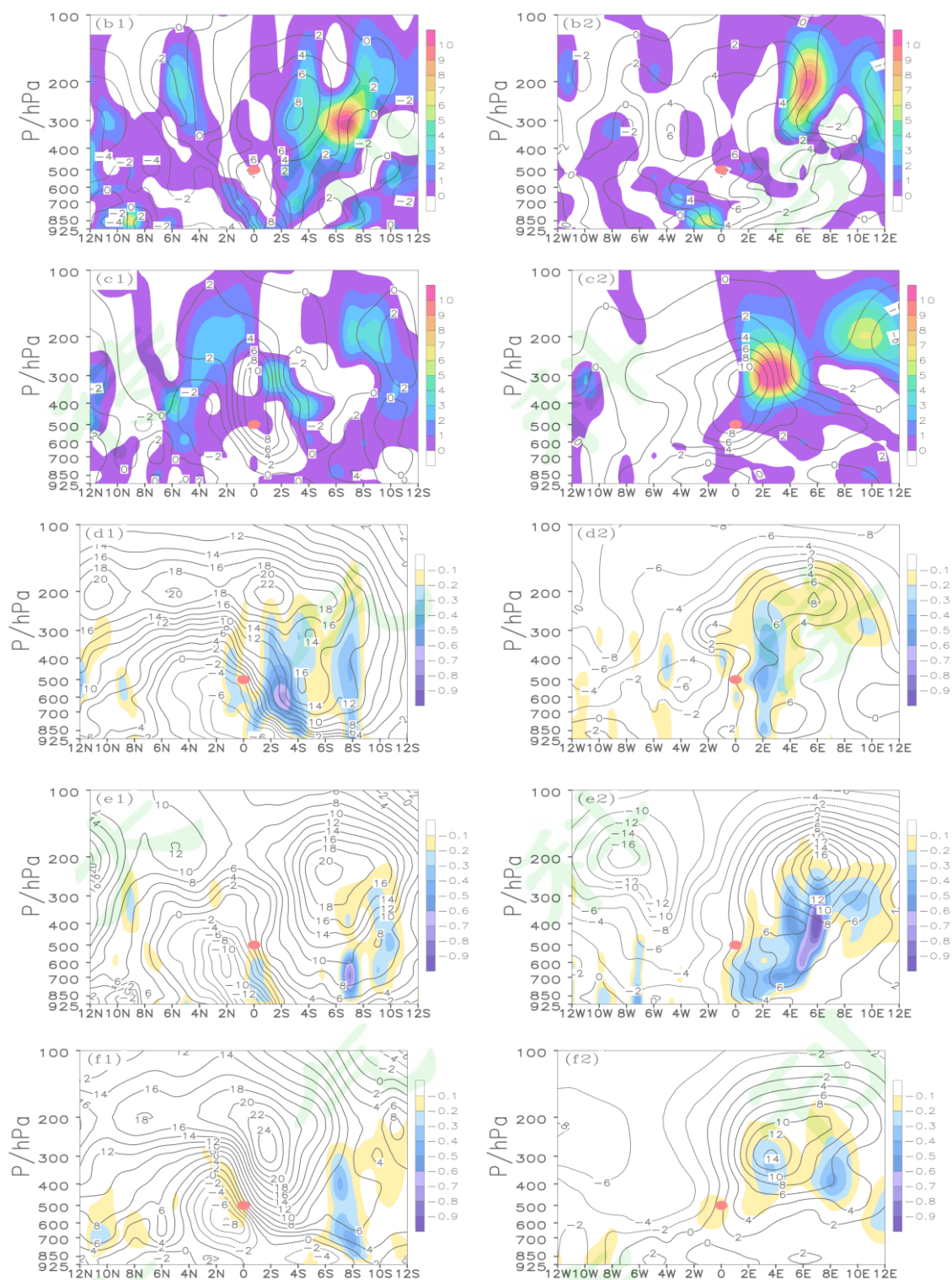


图4 同图2，但为加强或持续时

a1、**a2** 同图 2 **a1**、**a2**，但为加强时；**b1**、**b2** 同图 2 **a1**、**a2**，但为持续时；**c1**、**c2** 同图 2 **b1**、**b2**，但为加强时；**d1**、**d2** 同图 2 **c1**、**c2**，但为加强时；**e1**、**e2** 同图 2 **c1**、**c2**，但为持续时；**f1**、**f1** 同图 2 **d1**、**d2**，但为加强时

Fig.4 same as Fig.2, but when HITPVs strengthening or persistence

a1 and **a2** same as Fig.2 **a1** and **a2**, but when QSLTPVS strengthening. **b1** and **b2** same as Fig.2 **a1** and **a2**,

but when QSLTPVS persistence. **c1** and **c2** same as Fig. 2 **b1** and **b2**, but when QSSTPVS strengthening. **d1** and **d2** same as Fig. 2 **c1** and **c2**, but when QSLTPVS strengthening. **e1** and **e2** same as Fig. 2 **c1** and **c2**, but when QSLTPVS persistence. **f1** and **f1** same as Fig. 3 **d1** and **d2**, but when QSSTPVS strengthening

由上看出，长、短路径涡加强时的结构特征：共性是输入涡区的正涡度平流范围比移出时增大，低涡中心正涡度比移出时增强；所伴的正涡度柱、正涡度平流柱比移出时增强；高空西风动量下传与南风中心比移出时增强；上升运动在南风区域内加强。差异是长路径涡输入涡区的正涡度平流范围比短路径涡小，涡中心正涡度比短路径涡弱；长路径涡所伴的向北倾斜的正涡度柱比短路径涡呈对称分布的深厚，长路径涡正涡度柱 400hPa 以上涡度比以下的小，与短路径涡相反；长路径涡所伴的上升运动柱比短路径涡强、厚；长路径涡高空西风动量下传比短路径涡明显，长路径涡东、西风交汇位置比短路径涡更偏南、更强，南、北风交汇带不及短路径涡强；长路径涡涡区上空正涡度平流中心位置比移出时下降、强度加强，短路径涡则位置不变，经向的中心强度减弱。长路径涡持续时，涡中心正涡度比加强时强；所伴的正涡度柱、上升运动柱比加强时强，分别向东倾斜，涡区上空正涡度平流中心位置继续下降、强度加强，高原涡垂直轴附近两侧水平风的交汇带继续加强。

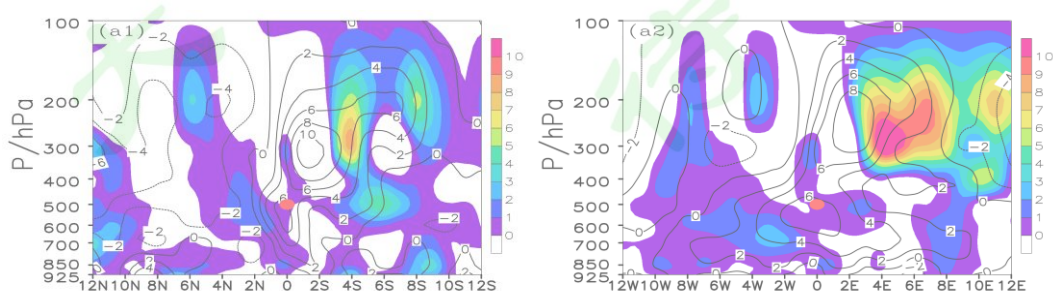
3.4 减弱阶段

长、短路径涡减弱时涡区结构特征为：低涡中心与涡区的正涡度(图 5 a1、a2、b1、b2)比之前(长路径涡指持续时，短路径涡指加强时)减弱。长、短路径涡输入涡区的正涡度平流分别比之前增强、减弱。

由减弱时涡度、涡度平流的垂直剖面看出，长路径涡经向正涡度柱、正涡度平流柱大值中心的位置与之前同在 300hPa，比之前偏北，强度分别为增强、减弱，正涡度柱随高度向南倾斜；纬向正涡度柱与正涡度平流柱大值中心比之前强；经、纬向正涡度柱在 400hPa 以下比之前减弱，以上比之前增强，形成了正涡度柱内涡度上大下小的分布(图 5 a1、a2)，这与加强时、持续时的正涡度柱垂直分布相反。短路径涡经、纬向正涡度柱与正涡度平流柱的中心位置约在 300hPa，正涡度柱强度比之前减弱，经、纬向正涡度平流柱强度分别为比之前略微增强、明显减弱；正涡度柱在 400hPa 以上、以下涡度比之前减弱，仍维持涡度上大下小的分布(图 5b1、b2)。

由减弱时风的垂直剖面看出，长、短路径涡垂直轴附近两侧的风(图 5 c1、c2、d1、d2)比之前减弱。长路径涡垂直轴附近北、南风交汇带已不存在，转为东北-西南向，短路径涡则比之前明显减弱；两涡垂直轴附近 400hPa 以下东、西风交汇带减弱。长路径涡经、纬向两侧风的交汇处位置比之前偏上，短路径涡与之前相近，这与两涡减弱将消失时经、纬向正涡度中心位置变化相吻合。

由减弱时上升运动的垂直剖面看出，长路径涡所伴的纬、经向上升运动柱已消失(图 5c1、c2)，短路径涡的(图 5d1、d2)分别比之前减弱、明显缩短，说明长、短路径涡经、纬向较明显的上升运动区明显减弱，长路径涡比短路径涡减弱更明显。



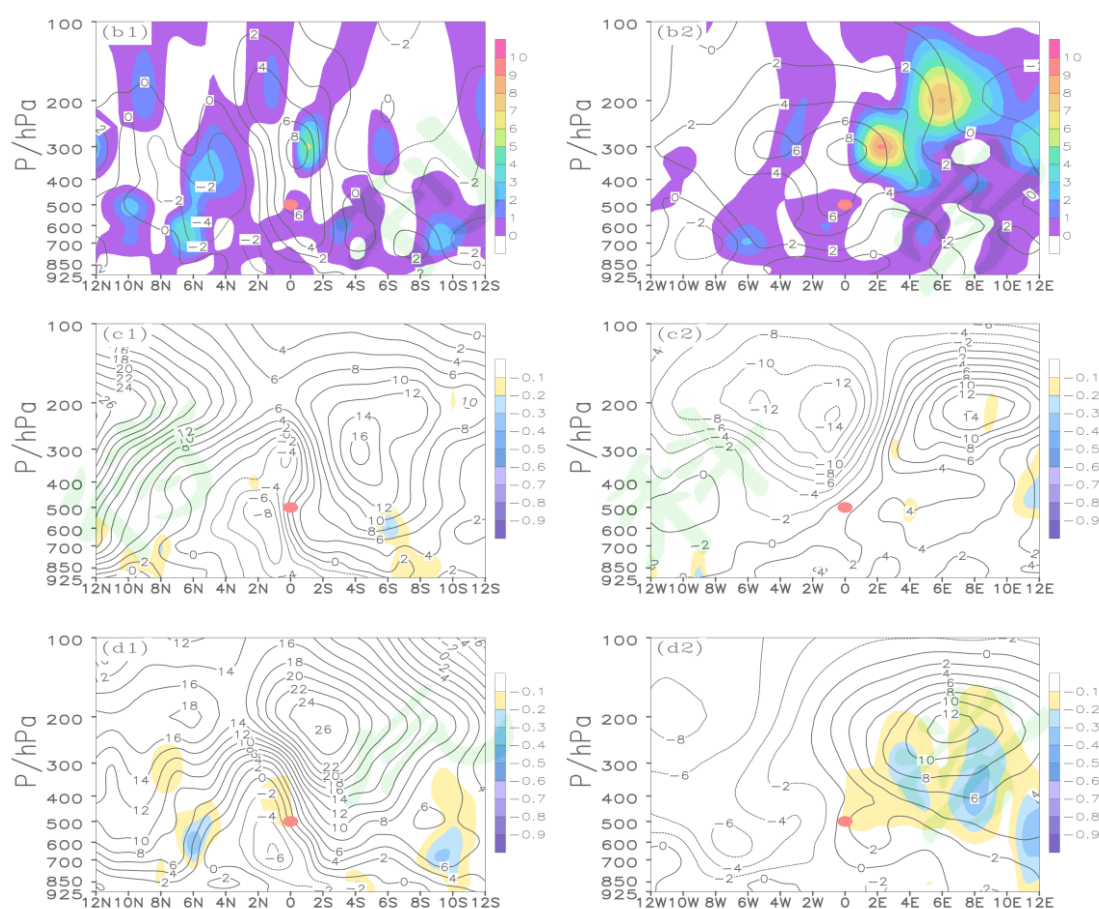


图5 同图2，但为减弱将消失时

Fig. 5 same as Fig.2, but when HITPVs will disappear

由上看出，长、短路径涡减弱时的结构特征：共性是低涡中心与涡区的正涡度比之前减弱；所伴的经向正涡度柱、正涡度平流柱大值中心的位置与之前同在300hPa，强度分别为增强、减弱，正涡度柱400hPa以上涡度比以下的大；高原涡垂直轴附近两侧风的交汇带减弱；所伴的上升运动柱比之前明显减弱。差异是长、短路径涡输入涡区正涡度平流分别比之前增强、减弱，长路径涡经向的正涡度柱与正涡度平流柱的大值中心比之前增强、减弱，短路径涡则相反。

4 长、短路径涡演变与结构的关系

高影响东移高原涡在生成、移出时低涡中心与正涡度中心重合，移出时正涡度减弱，加强时正涡度增强，在低涡生成到加强过程中，涡区正涡度变化与输入涡区的正涡度平流变化一致，反映涡区的正涡度平流对低涡维持起重要作用。移出后伴有正涡度柱、正涡度平流柱，后者位置偏东，反映正涡度平流柱对低涡所伴正涡度柱的支撑作用。移出时正涡度柱的形成是与经、纬向上气旋性切变垂直伸展密切相关。

长、短路径涡结构特征的显著差别表现在加强时。长路径涡加强时，正涡度柱比短路径涡更偏南、更深厚（下界到地面），这与长路径涡加强时高空西风动量下传比短路径涡更明显、更向下、更向南，使东、西风交汇位置、强度分别比短路径涡更偏南、更向下、更强有关，这一东、西风交汇使长路径涡伴有更高强度的水平涡旋，使正涡度增强，长路径涡正涡度柱更偏南、向下伸展。

长路径涡加强时,正涡度柱还具有向北倾而明显不同于短路径涡呈对称分布的特征,这与长路径涡加强时,经向垂直运动分布不均匀和纬向风的垂直切变迫使涡旋管倾斜有关。长路径涡加强时,正涡度平流柱的位置比短路径涡更南、更东、更强,低涡移向涡度加强的区域(肖递祥等,2016),使长路径涡更向东移,持续时间更长。长路径涡加强时,经、纬向正涡度柱 400hPa 以下涡度比以上的大,这与短路径涡恰恰相反,反映长路径涡涡区附近具有使涡度增加的垂直输送机制。

长路径涡加强时,其正涡度平流中心区强度增强、位置下降的空间结构变化特征,蕴含了使低涡上空正涡度平流随高度增加而强迫上升运动增强使低涡加强的动力机制。这是由于若正涡度平流随高度增大,则对应上升运动(寿绍文等,2009),因此,长路径涡加强时,涡区上空结构特征反映了具有更利于低涡加强的动力机制,使低涡得以持续活动;短路径涡则相反,使低涡减弱。

长路径涡持续时的结构特征与加强时相似,具有相同的动力机制,但动力机制比加强时弱,比短路径涡加强时强,造成了长路径涡能继续向东移,而短路径涡加强后减弱将消失。并且长、短路径涡减弱时结构特征体现出具有不利于低涡发展的动力机制。

由上可推断,长、短路径涡的演变是由低涡本身突出的结构决定的,这些结构蕴含了低涡发展与否的动力机制。但值得注意的是,高原涡的演变是多尺度因子的协同作用的结果,上面的讨论仅揭示了长、短路径涡演变与结构之间的一种可能关系。

5 小结与讨论

本文在分析 1998~2018 年 5~9 月高原涡活动的基础上,选取了天气影响较大的 9 例东移路径高原涡,并分为准平直长、短路径 2 类低涡,对其演变过程中动力结构的共同特征与差异进行了对比分析,得到以下主要结论:

(1) 长、短路径涡生成时都是浅薄的天气系统,低涡中心与正涡度中心重合,其东、南侧伴有正涡度平流中心;明显的上升运动位于高原涡垂直轴附近与南风区域内,中心在 400hPa;低涡中心 400hPa 以下有东、西风交汇带和南、北风交汇带通过。差异是长路径涡所伴的高空西风大值区、南风和北风交汇带、正涡度平流、上升运动比短路径涡强。

(2) 长、短路径涡移出时,伴有较深厚的正涡度柱、正涡度平流柱、上升运动柱,已发展为较深厚的天气系统,长路径涡比短路径涡更强、更深厚;长路径涡所伴的南、北风交汇程度比短路径涡强;所伴的东、西风交汇与经向上升运动的位置也比短路径涡偏南、偏低。

(3) 长、短路径涡加强时,所伴的上升运动柱、正涡度平流柱仍在高原涡的东、南侧,正涡度柱比移出时增强、增厚,位置更偏东,已发展为更深厚、更强的天气系统。明显差异是长路径涡所伴的正涡度柱向北倾斜比短路径涡呈对称分布的深厚,正涡度柱内 400hPa 以上涡度比以下的小,与短路径涡相反;所伴的上升运动柱比短路径涡强;东、西风交汇的位置、强度分别比短路径涡更偏南、更强;长路径涡所伴的正涡度平流柱大值中心比移出时增大、位置下降,短路径涡则位置未下降,经向值减少。长路径涡持续时,涡中心正涡度继续加强,所伴的正涡度柱、上升运动柱继续加强,分别向东倾斜;涡区上空正涡度平流中心位置继续下降,高原涡垂直轴附近两侧风交汇继续加强。

(4) 长、短路径涡的演变是由低涡突出的本身结构决定的,这些结构蕴含了低涡发展与否的动力机制。长、短路径涡的强度变化是由输入涡区的正涡度平流支撑的。且长、短路径涡加强时结构特征差别显著,体现了低涡发展的不同动力机制。

本研究是合成分析结果,对同类路径高原涡是有代表性的,集中了它们的一些最本质的共性。研究表明,当高原涡移出青藏高原后,依据低涡的结构特征差异,可以初步判断其是长时间准平直东移还是短时间东移及其动力原因。另外,得出的准平直长、短路径两类东移

涡的结构特征差异也是明显的。但是,今后还需针对准平直长、短路径东移涡的热力结构特征开展研究,以及东北路径与东南路径低涡、东移路径与多折向路径低涡的结构特征进行对比分析,以进一步了解高原涡的结构特征及其演变机理。

参考文献

- 程麟生.1991.“8.18”持续暴雨期中- α 尺度低涡发展的涡度变率及其热源[J].高原气象,10(4):337-350.
- Cheng Linsheng.1991.The vorticity change-rate and its heat source for development of meso- α scale vortex during a persistent heavy rain of 14- 24 august 1981. Plateau Meteor. (in Chinese),10(4):337-350.
- Curio J, Schiemann 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: 1933-1950
- 丁一汇.1993. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 69-92.
- Ding Yihui. 1993. Study on the sustained heavy rain in 1991 over the Yangtze-Huai river valley[M]. Beijing: Meteorological Press(in Chinese), 69-92.
- Kuo Y H, Bao J W. 1988. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood, part I: Evolution of a mesoscale Southwest vortex [J]. Mon Wea Rev,116: 2481-2504.
- 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): 447-456.
- Li Guoping, Jiang Jing . 2000. A Type of singular solitary wave and its application of structure analysis of the Tibetan Plateau vortex[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58:447-456.
- 李国平, 罗喜平,陈婷, 等. 2011. 高原低涡中涡旋波动特征的初步分析[J]. 高原气象, 30 (3): 553-558.
- Li Guoping, Luo Xiping, Chen Ting, et al. 2011. Preliminary theoretical study of waves in the Tibetan Plateau vortex[J].Plateau Meteor. (in Chinese), 30 (3): 553-558. .
- Li Lun, Zhang Renhe, Wen Min, et al. 2019. Characteristics of the Tibetan Plateau vortices and the related large-scale circulations causing different precipitation intensity [J] . Theor Appl Climatol,138: 849-860
- Li Lun, Zhang Renhe, Wu Peili,et al. 2020a. Roles of Tibetan Plateau vortices in the heavy rainfall over southwestern China in early July 2018 [J]. Atmospheric Res, 245(2020)105059
- Li Lun, Zhang Renhe, Wen Min. 2020b. Structure characteristics of the vortices moving off the Tibetan Plateau [J]. Meteor.Atmos. Phys.,132:19-34
- 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,47(1): 34-52. Li Xiang, Yang Shuai, and Yang Shuyun.2023. Influence of multi-scale topographic factors on vortex development during an eastward-propagating rainstorm event in southwest China[J]. chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese), 47(1): 34-52. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21072
- 李英、陈联寿、王继志. 2004. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征[J]. 气象学报, 62(2):167-179. Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi.2004. The diagnostic analysis on the characteristics of the large scale circulation corresponding to the sustaining anddecaying of tropical cyclone after it's landfall [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62(2):167-179.
- 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, 234pp. Li Yueqing, Yu Shuhua, Peng Jun,et al. 2010. Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook 1998[M]. Beijing: Science Press(in Chinese), 234pp.
- 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 Cao, Li Yueqing, Li Dejun. 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.
- 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 Ting, Liu Yimin, Wu Guoxiong, 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 J. Atmos. Sci. (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese), 44(3): 472-486.
- 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, 1-55. Luo Siwei. 1992. Study on Some Kinds of Weather Systems over and Around the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 1-55 .
- 乔全民, 张雅高. 1994. 青藏高原天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 250pp. Qiao Quanmin, Zhang Ya gao. 1994. Synoptic Meteorology of the Tibetan Plateau. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 120-155 .
- 寿绍文, 励申申, 寿亦萱, 等. 2009. 中尺度大气动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 385pp. Shou Shaowen, Li Shenshen, Shou Yixuan, et al. 2009. Mesoscale Atmospheric Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press (in Chinese), 385pp.
- 宋雯雯, 李国平, 唐钱奎, 2012. 加热和水汽对两例高原低涡影响的数值试验[J]. 大气科学, 36(1): 117-129. Song Wenwen, Li Guoping, Tang Qiankui. 2012. Numerical simulation of the effect of heating and water vapor on two cases of plateau vortex [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese), 36 (1): 117-129.
- Tao Shiyan, Ding Yihui. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China[J]. Bull Amer Meteor Soc, 62:23-30
- Wang B, Isidoro O. 1987. Study of a Heavy Rain Vortex Formed over the Eastern Flank of the Tibetan Plateau[J]. Mon Wea Rev, 115:1370-1393.
- 肖递祥, 郁淑华, 屠妮妮. 2016. 高原低涡移出高原后持续活动的典型个例分析[J]. 高原气象, 35(1):43-54. Xiao, Dixiang, Yu Shuhua, Tu Nini. 2016. Analysis of Typical Sustained Plateau Vortexes after Departure[J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 35(1):43-54.
- 杨颖璨, 李跃清, 陈永仁. 2018a. 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 Yingcan, Li Yueqing, Chen Yongren. 2018. The characteristic analysis of an eastwards plateau vortex by its strengthening process. Plateau Meteor. (in Chinese), 37 (3): 702-720.
- 杨颖璨, 李跃清, 陈永仁. 2018b. 青藏高原及其邻近地区低涡系统结构研究进展[J]. 气象科技, 46 (1) : 76-83. Yang Yingcan, Li Yueqing, Chen Yongren. 2018. Progresses and new understanding of researches on vortex systems over Tibetan Plateau and its adjacent areas. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 46 (1) : 76-83.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 278pp. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. Meteorology of Tibetan Plateau[M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 278pp.
- 郁淑华, 高文良, 2010. 1998 年夏季两例青藏高原低涡结构特征的比较[J]. 高原气象, 29 (6): 1357-1368. Yu Shuhua, Gao Wenliang. 2010. Comparison on structure characteristics of two Tibetan Plateau vortexes in summer, 1998[J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 29 (6): 1357-1368 .
- 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 Shuhua, Gao Wenliang. 2017. Analysis of environmental background and potential vorticity of different accompanied moving cases of Tibetan Plateau vortex and Southwest China vortex[J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 41 (4): 831-856 .
- 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 Shuhua, 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.
- Yu Shuhua, Gao Wenliang, Peng Jun, et al. 2014. Observational facts of sustained departure plateau vortexes[J]. Meteor. Res., 28(2): 296-307.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2001. 1998 年夏季中国暴雨洪涝灾害的气象水文特征 [J]. 应用气象学报,

- 12 (4): 442–457. Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. 2001. Meteorological and hydrological characteristics of severe flooding in China during the summer of 1998 [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (4): 442–457 .
- 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.2020. 青藏高原低涡切变线年鉴 (2018) [M]. 北京: 科学出版社, 301pp. Chengdu Institute of Plateau Meteorology, Plateau Meteorology Committee of Chinese Meteorological Society. 2020. Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook 2018[M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 301pp. .