

夏半年川西高原 600 hPa 低涡活动特征

武敬峰^{1,2} 徐晓芳¹ 邹玲¹ 张雷¹ 蒋清¹ 刘潇¹

(1 四川省阿坝州气象局, 马尔康 624000; 2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072)

摘要 600 hPa 天气系统能够分析川西高原低涡变化的主要特征, 并能识别低涡的发展移动和川西高原强降水落区的关系。利用 1979—2020 年逐 3 h 的 ERA5 再分析资料(0.25°×0.25°)和 2011—2020 年逐小时降水资料, 对夏半年川西高原 600 hPa 低涡活动特征、低涡与降水的关系及致雨低涡动力和热力特征进行统计分析, 结果表明: ①42 年间低涡年均 80 个, 持续时间 1 d 以内占总数的 95.7%; 在川西高原本地生成、移入和移出低涡年均 61.5 个、18 个和 5.3 个; 低涡源地和消散地分别在甘孜州白玉县和理塘县为中心的区域。②生命史大于 12 h 的低涡占比 36.4%, 都会带来降水, 其中超 83.7% 会造成中雨以上降水; 低涡伴随的日降水强度最大值中心位置随月份先由川西高原东部与南部地区北移到中部, 之后逐渐移回到东部与南部地区, 相对应 7—8 月多低涡从北部南移到中部摆动消亡, 其余月份多低涡从中部生成影响到东部和南部地区或在南部生成并停滞或摆动。③强烈垂直上升运动和正涡度区的耦合发展以及深厚不稳定层结的形成和加强是致雨低涡发生发展并产生强降水的动力特征和热力层结条件。

关键词 川西高原; 600 hPa 低涡; 气候特征; 移动路径; 物理量分析

中图分类号: P443, P458 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20220354 **文献标识码:** A

引言

高原低涡是夏季高原地区的主要降水系统之一。20 世纪 80 年代以来, 人们一直非常关注高原低涡的研究工作, 分别在低涡的涡源^[1-3]、活动特征^[4-5]、结构特征^[6-11]、发展机制^[12-16]、与降水的关系^[17-20]等方面有了许多进展。随着 600 hPa 高原涡的活动越来越受到人们的注意, 有气象工作者对 600 hPa 天气图和 600 hPa 低涡进行相关研究: 王位泰^[21]对庆阳地区降水过程的 600 hPa 和 500 hPa 天气系统特征进行统计分析, 发现 600 hPa 对西北区天气预报具有较 500 hPa 更好的指示性; 许东蓓等^[22]和胡天清等^[23]分别用 600 hPa 天气图预报甘肃河东和河西区域性降雨过程, 发现 600 hPa 天气图比 500 hPa 和 700 hPa 天气图更能准确地反映出大降水过程的影响系统, 从而减少漏报; 丁治英等^[24]通过 600 hPa 高原低涡生成的数值实验发现 600 hPa 系统的活动与温度场、流场等对低涡形成

的作用较 500 hPa 清楚、重要, 600 hPa 高原涡生成的动力因子是副高与高原东部偏北气流形成的切变线, 热力条件是高原特殊的下垫面。

川西高原位于青藏高原东麓, 四川盆地以西的高山峡谷和高原地区, 是低海拔地区向青藏高原过渡的地段, 地势由西北向东南倾斜, 气候复杂, 降水分布极为不均, 地质结构差异较大, 600 hPa 在 4300 m 左右, 高原平均高度为 4000 m, 因此 600 hPa 在川西高原的试用表明, 它不仅集 500 hPa 和 700 hPa 特征于一身, 而且具有独特的优越性, 能更加清楚地反映出川西高原天气系统, 很多在 600 hPa 上较清楚的低涡系统在 500 hPa 上没有反映。

目前 600 hPa 低涡在川西高原的发生频数、产生源地、生命史及移动情况等还缺乏较为清晰准确的认识, 特别是关于 600 hPa 低涡的统计工作相对较少。600 hPa 低涡是影响川西高原强降水过程的重要天气系统之一, 进一步加强对 600 hPa 低涡的统计研究, 对深入理解 600 hPa 低涡与川西高

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重点实验室 SCQXKJYJXMS202110)资助

作者简介: 武敬峰, 男, 1983 年生, 高工, 主要从事中短期及短时临近天气预报研究, Email: 42001969@qq.com

收稿日期: 2022 年 8 月 29 日; 定稿日期: 2023 年 6 月 26 日

©《气象科技》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

原强降水过程的关系,指导 600 hPa 低涡的预报和减少其造成的暴雨灾害都具有十分重要的意义。

1 资料与方法

1.1 资料选取

选取 1979—2020 年为 600 hPa 低涡统计分析时段。利用 ECMWF 再分析资料 ERA5(其时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$),所用的数据包括位势高度、水平风矢、温度和相对湿度等, Bao 等^[25-27]通过连续探空资料检验表明,ECMWF 再分析资料对常规观测资料缺乏的青藏高原地区具有较高的准确性;同时选取 2011—2020 年川西高原(包含阿坝、甘孜 2 州,共 31 个县(市))国家级自动站、区域自动站共 741 个站点逐小时降水资料(图 1)。

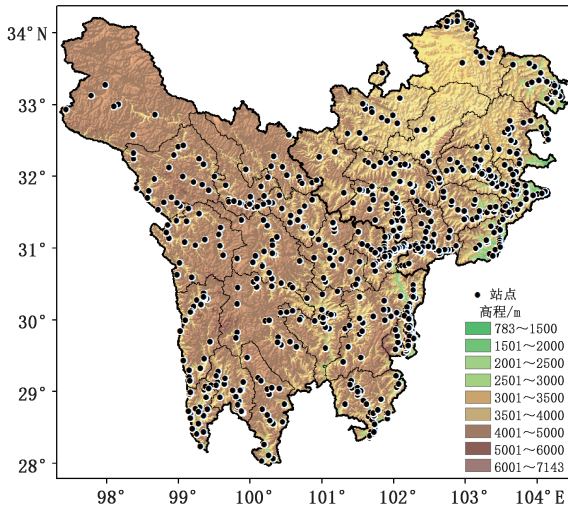


图 1 川西高原地形高度及地面站点分布

Fig. 1 The topographic height and ground station distribution of western Sichuan Plateau

1.2 川西高原 600 hPa 低涡识别方法

本文将出现在 $97.3^{\circ} \sim 104.5^{\circ} \text{E}$, $27.9^{\circ} \sim 34.4^{\circ} \text{N}$ 范围以内,满足以下 4 个条件的涡旋定义为川西高原 600 hPa 低涡:①在对流层中层 600 hPa 等压面上能分析出至少 1 根闭合低值(间隔 4 hPa)等高线或风场出现闭合的气旋性环流;②上述范围内有闭合环流中心或低压中心生成;③该闭合环流中心或低压中心位置涡度值为正;④能够维持 2 个时次(6 h)及以上时间。

具体统计方法为:按照本文设定的川西高原 600 hPa 低涡标准,对 1979—2020 年夏半年(5—10

月)的位势高度场、风场、涡度场图进行普查,统计川西高原 600 hPa 低涡的源地与消散地分布、移动路径、生命史、低涡天气过程伴随的日降水分布等低涡活动特征量。首先分析 600 hPa 低涡年际变化、月际变化、日变化,源地与消散地的时空分布等,其次低涡活动特征量结合降水,分析 600 hPa 低涡对应的日降水分布月际变化和致雨 600 hPa 低涡的动力和热力特征等,从而得出关于夏半年川西高原 600 hPa 低涡活动特征、与降水的关系及致雨低涡动力和热力特征。根据上述定义,42 年资料一共提取到 3341 个满足本文定义标准的川西高原 600 hPa 低涡。

2 川西高原 600 hPa 低涡特征

2.1 川西高原 600 hPa 低涡活动时间特征

对 1979—2020 年川西高原 600 hPa 低涡统计后发现,低涡出现个数具有显著的年际变化特征(图 2), 1979—1994 年期间年际变化振幅较其他时段更大, 2002—2012 年川西高原 600 hPa 低涡生成个数从极小值上升到极大值, 2013—2020 年在每年 78~89 个之间震荡。夏半年川西高原 600 hPa 低涡的多年平均生成个数为 80 个。就夏半年生成个数而言,川西高原 600 hPa 低涡生成个数的极大值年份为 2012、1986、1981,平均值为 109 个,其中 2012 年最多,为 117 个;极小值年份为 2002、1989 和 1999 年,平均值为 58.3 个,其中 2002 和 1989 年最少,为 58 个。因此,夏半年生成的川西高原 600 hPa 低涡个数

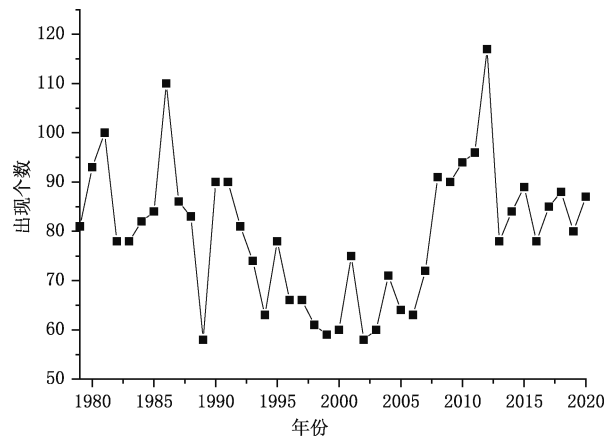


图 2 1979—2020 年川西高原夏半年 600 hPa 低涡逐年出现个数

Fig. 2 The annual occurrence numbers of the low vortex on 600 hPa in the western Sichuan Plateau during the summer half year from 1979 to 2020

的 年 际 差 异 是 很 大 的,最 多 年 可 达 最 少 年 的 2 倍。

由 夏 半 年 川 西 高 原 600 hPa 低 涡 逐 月 平 均 出 现 个 数 和 平 均 活 动 时 长 (图 3) 可 知,夏 半 年 川 西 高 原 600 hPa 低 涡 的 出 现 月 平 均 变 化 幅 度 较 小,在 6 月 出 现 频 次 最 高,年 均 15.3 个,5 月 次 之,年 均 14.2 个,最 少 在 10 月,年 均 11.1 个;从 低 涡 的 平 均 活 动 时 长 看,9 月 最 长,为 11.6 h,5—7 月 相 当,为 11.2~11.4 h,8 月 和 10 月 最 短,为 10.8~10.9 h。从 平 均 累 计 活 动 时 长 看 6 月 最 长 (图 略),为 170.7 h,5 月 次 之,为 162.1 h,10 月 最 短,为 121.1 h。

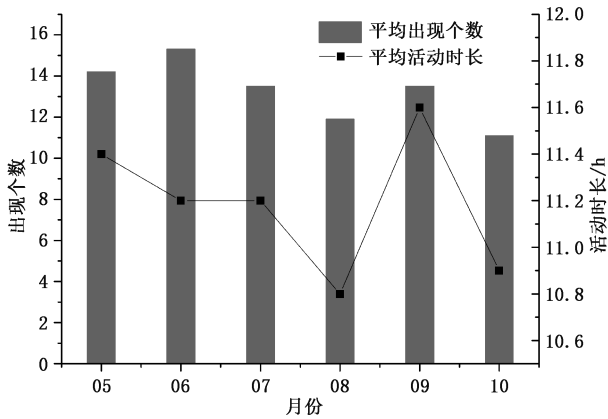


图 3 1979—2020 年川西高原夏半年 600 hPa 低涡逐月平均出现个数及平均活动时长

Fig. 3 The average monthly occurrence and average activity duration of the low vortex on 600 hPa in the western Sichuan Plateau during the summer half year from 1979 to 2020

统 计 和 分 析 夏 半 年 600 hPa 低 涡 在 川 西 高 原 的 持 续 时 间,600 hPa 低 涡 持 续 时 间 从 短 到 长 呈 指 数 减 少 分 布 (图 4),有 63.6% 的 600 hPa 低 涡 持 续 时 间 为 3 个 时 次 (9 h),1 d 以 内 的 600 hPa 低 涡 占 总 数 的 95.7%,2 d 以 内 的 600 hPa 低 涡 占 总 数 的 99.8%,持 续 时 间 为 4 个 时 次 (12 h) 及 其 以 上 时 间 的 600 hPa 低 涡 占 总 数 的 36.4%,可 见 川 西 高 原 600 hPa 低 涡 是 一 种 生 命 史 较 短 的 中 尺 度 天 气 系 统,持 续 时 间 长 的 600 hPa 低 涡 较 少。在 川 西 高 原 持 续 时 间 最 长 的 600 hPa 低 涡 为 26 个 时 次 (78 h),整 个 生 命 史 为 30 个 时 次 (90 h),是 2009 年 7 月 23 日 17:00 生 成 于 青 海 省 玉 树 州 称 多 县 (34.1°N, 97.5°E) 的 600 hPa 低 涡,生 成 后 东 移 进 入 甘 孜 州 石 渠 县,24 日 10:00 在 石 渠 县 东 部 南 移,随 后 受 偏 北 气 流 和 西 南 气 流 对 峙 影 响,低 涡 在 甘 孜 县、色 达 县、

德 格 县、白 玉 县、新 龙 县 之 间 左 右 摆 动,26 日 08:00 从 新 龙 县 逐 渐 南 下,影 响 理 塘 县 和 稻 城 县,26 日 23:00 从 稻 城 县 南 部 移 出,沿 着 四 川 省 和 云 南 省 交 界 处 东 南 下,在 丽 江 市 和 攀 花 枝 市 交 界 处 东 移,27 日 10:00 进 入 凉 山 州 会 理 县 (26.36°N,101.9°E) 后 消 亡。

从 600 hPa 低 涡 出 现 时 间 看,一 般 600 hPa 低 涡 出 现 时 间 在 11:00—20:00 之 间,占 到 全 部 600 hPa 低 涡 总 数 的 65%,其 中 14:00 出 现 次 数 最 多,占 20.4%;23:00 至 次 日 08:00 每 个 时 次 占 比 在 7%~10%。

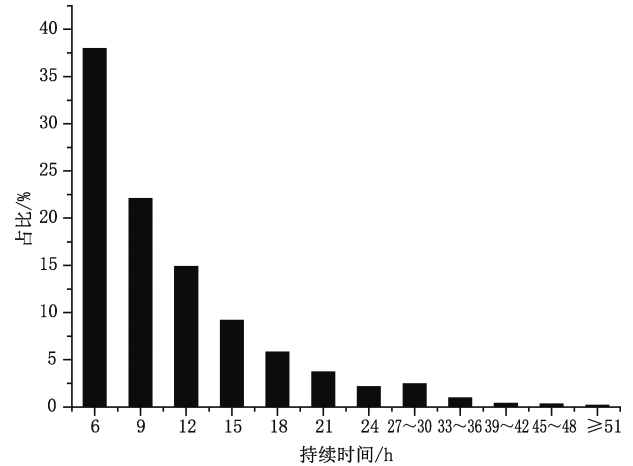


图 4 1979—2020 年川西高原夏半年 600 hPa 低涡不同持续时间占比

Fig. 4 The percentage of the low vortex on 600 hPa in the western Sichuan Plateau at different duration during the summer half year from 1979 to 2020

2.2 川西高原 600 hPa 低涡路径特征

在 川 西 高 原 区 域 活 动 的 600 hPa 低 涡 按 其 来 源 可 分 为:从 川 西 高 原 外 部 移 入 和 在 川 西 高 原 区 域 生 成 两 类,1979—2020 年 从 川 西 高 原 外 移 入 的 600 hPa 低 涡 仅 有 759 个 (图 5a),年 均 18 个;从 源 地 看,主 要 来 源 于 青 海、西 藏 和 甘 肃 3 省;川 西 高 原 区 域 内 生 成 的 600 hPa 低 涡 达 2582 个 (图 5b),年 均 约 61.5 个,可 见 川 西 高 原 区 域 的 低 涡 主 要 为 内 部 生 成,从 外 部 移 入 的 较 少。图 5c 给 出 了 移 出 川 西 高 原 区 域 的 600 hPa 低 涡,42 年 共 计 有 226 个 600 hPa 低 涡 移 出 川 西 高 原,年 均 约 5.3 个,大 部 分 的 600 hPa 低 涡 向 偏 东 或 偏 南 方 向 移 出 川 西 高 原,南 部 最 远 可 达 云 南 中 部,东 部 可 达 湖 北 或 河 南;其 余 移 出 川 西 高 原 的 600 hPa 低 涡 向 西 到 西 藏 东 部 昌 都 地 区,向 北 到 青 海 东 南 部 或 甘 肃 南 部,这 些 600 hPa 低

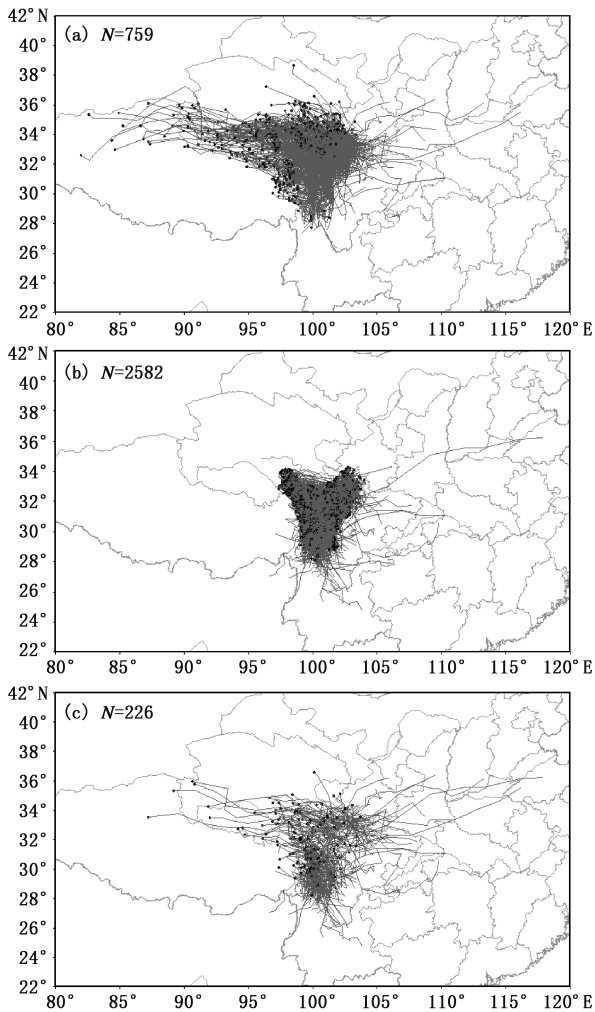


图 5 1979—2020 年川西高原夏半年 600 hPa 低涡活动路径：
(a) 川西高原外移入，(b) 川西高原形成，(c) 移出川西高原
(图中圆点表示源地， N 表示该类活动路径数量)

Fig. 5 The activity path of the low vortex on 600 hPa in the western Sichuan Plateau during the summer half year from 1979 to 2020: (a) moving from the outside into the western Sichuan Plateau, (b) generated on the western Sichuan Plateau, (c) moved out of the western Sichuan Plateau
(Dots represent the source area, N represents the number of low vortex on 600 hPa)

涡移出川西高原后很快消亡，仅能到达川西高原的邻近地区；极少数的 600 hPa 低涡沿偏东方向移至山西甚至到山东。

600 hPa 低涡多在川西高原生成，移入和移出较少，并且生命史较短，可能受到两方面影响：一是川西高原位于青藏高原东侧，为西风带的背风坡，有利于降压形成动力性涡旋；其次，600 hPa 从南侧绕

过的西风气流由于边界摩擦而产生气旋性涡度，配合北方南下的偏北气流，形成南北气流交汇，也利于低涡形成^[28]。二是青藏高原地表温度有明显的日变化，600 hPa 低涡的生成与高原短波辐射加热密切相关，地面感热对低涡的生成起主要作用，地表温度增加，促进高原低涡发展，反之，地表温度减小，高原低涡发展受到抑制，温度减小的越多，对高原低涡发展的抑制作用越强^[24,29-30]。并且通过分析发现川西高原 600 hPa 低涡水平尺度大部分在 100~300 km 之间，个别能达到 400 km，尺度介于中 α 到中 β 之间。其移入和移出同 500 hPa 环流形势关系密切，当 500 hPa 存在低值系统东移或南下时，600 hPa 低涡容易发展东移或南下。600 hPa 低涡在川西高原的发展及移入和移出过程中高原动力、热力如何起作用是一个尚待进一步研究的工作。

2.3 川西高原 600 hPa 低涡地理分布特征

统计 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格中川西高原 600 hPa 低涡的源地与消散地分布，分析川西高原 600 hPa 低涡相关的地理分布特征。从图 6a 可以看出，川西高原 600 hPa 低涡源地高频中心在甘孜州白玉县，其次为巴塘县和理塘县西北部形成的三角区域，生成个数为 207~271 个，随后是西藏东部、青海南部、云南西北部、甘孜州和阿坝州中西部地方生成个数为 20~198 个。从图 6b 可以看出，川西高原 600 hPa 低涡消散地高频中心在甘孜州理塘县，其次为巴塘县和新龙县南部一带区域，消亡个数为 265~343 个，随后是西藏东部、云南西北部、凉山州西北部、甘孜州和阿坝州中部、南部地方生成个数为 28~238 个。

3 川西高原 600 hPa 低涡与降水关系

3.1 川西高原 600 hPa 低涡生命史与降水

从川西高原 1997—2020 年逐夏半年降水看，降水量最少前 5 年为 1997、2002、2006、1994 和 2007 年，降水量最多前 5 位为 2020、1998、1993、2019 和 2018 年，在 42 年低涡个数从多到少排序中，降水量最少年分别排在 32、41、45、36 和 30 位，降水量最多年分别排在 13、37、29、22 和 12 位，可以看出降水量少和低涡个数少有一定相关性，但降水量多时低涡个数并不是最多。

对 2011—2020 年夏半年 600 hPa 低涡在川西高原伴随的降水单独提取进行分析，将一次低涡过程影响范围统计对应时段的日降水量 P (单位: mm)，

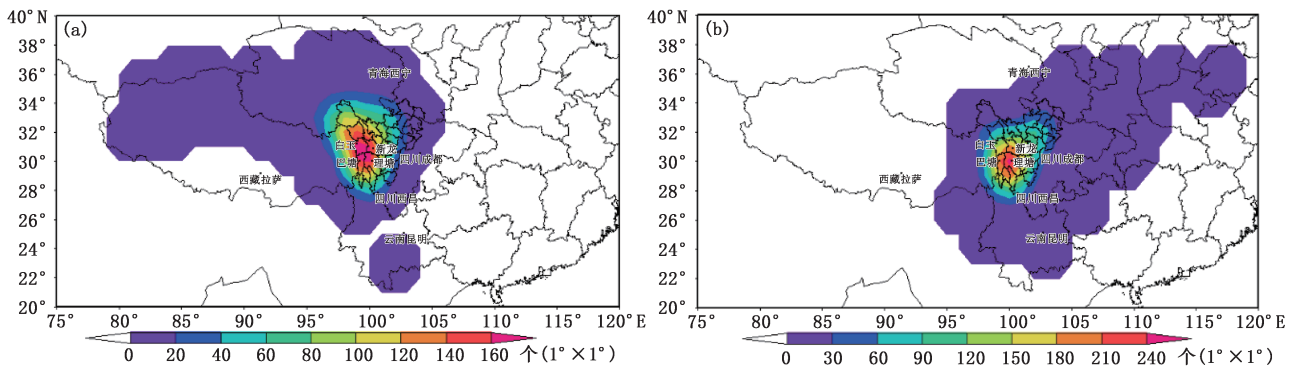


图 6 1979—2020 年川西高原夏半年 600 hPa 低涡源地(a)和消散地(b)空间分布

Fig. 6 The geographical distribution of the vortex source (a) and extinction sites (b) on 600 hPa in the western Sichuan Plateau during the summer half year from 1979 to 2020

并将 600 hPa 低涡的生命史和降雨级别进行对照统计,分为小雨($4.9 \geq P \geq 0.1$),中雨($14.9 \geq P \geq 5$),大雨($24.9 \geq P \geq 15$),暴雨($P \geq 25$)共 4 个降雨级别。

通过统计发现(表 1),600 hPa 低涡生命史在 12 h 以内,564 个个例中有 38 个无降雨出现,占比

6.7%,中雨以下占比达 92.8%;生命史大于 12 h 的 600 hPa 低涡都会带来降水,占比 36.4%,并且超过 83.7%会造成中雨及以上的降水;但生命史大于 24 h 的 600 hPa 低涡产生暴雨以上的次数最多,88 个中有 26 个,占比 29.5%,说明 600 hPa 低涡维持时间越长,累积雨量越大,越容易造成暴雨天气。

表 1 2011—2020 年川西高原夏半年 600 hPa 低涡不同生命史与降水级别个例数

Table 1 Numbers of the vortex on 600 hPa in the western Sichuan Plateau at different life histories and precipitation levels during the summer half year from 2011 to 2020

	生命史(T/h)							合计
	$T \leq 6$	$6 < T \leq 12$	$12 < T \leq 18$	$18 < T \leq 24$	$24 < T \leq 30$	$30 < T \leq 36$	$36 < T$	
小雨	154	118	30	16	2	0	1	321
中雨	67	149	76	38	14	3	4	351
大雨	2	36	29	21	22	9	7	126
暴雨	0	0	1	2	9	5	12	29
合计	223	303	136	77	47	17	24	827

3.2 川西高原 600 hPa 低涡日降水分布月际变化

根据 600 hPa 低涡天气过程,分别提取对应的降水区域日降水分布,经过处理后,得出对应的川西高原 600 hPa 低涡伴随的日降水强度区域分布(图 7),可以看出,川西高原 600 hPa 低涡伴随的日降水强度的最大值中心位置会逐月出现有规律性的移动,5 月日降水最大值中心首先出现在川西高原南部地区,6 月日降水大值区继续维持在川西高原南部乡城和汶川县,7 月日降水最大值中心向北移动,位于道孚县一带,8 月降水最大值中心略有东移和南移,主要位于理塘县、雅江县到泸定和汶川县一带,9 月降水最大值有所减弱,位于阿坝州中部到南部和甘孜州南部,10 月日降水最大值中心范围再次缩小,

位于阿坝州中部马尔康到理县一带。可见在 5—8 月有部分乡镇降水都达 25 mm 以上,除 7 月强降水位于中部外,其余月强降水位于东部到南部地区。从逐月低涡的位置和移动看,整个夏半年都有自北向南和向东影响的低涡,但在 5—6 月和 9—10 月多低涡在南部生成并停滞或摆动,也有部分低涡从中部生成影响到东部和南部地区,而 7—8 月在南部生成和维持的低涡较少,多低涡从北部影响到中部摆动消亡。

3.3 低涡移动和降雨的关系

根据 600 hPa 低涡天气过程,统计 3 h 累计降水落区与低涡移动的对对应关系,降水主要发生在低涡中心附近、南侧、东南侧和东侧,少数发生在低涡

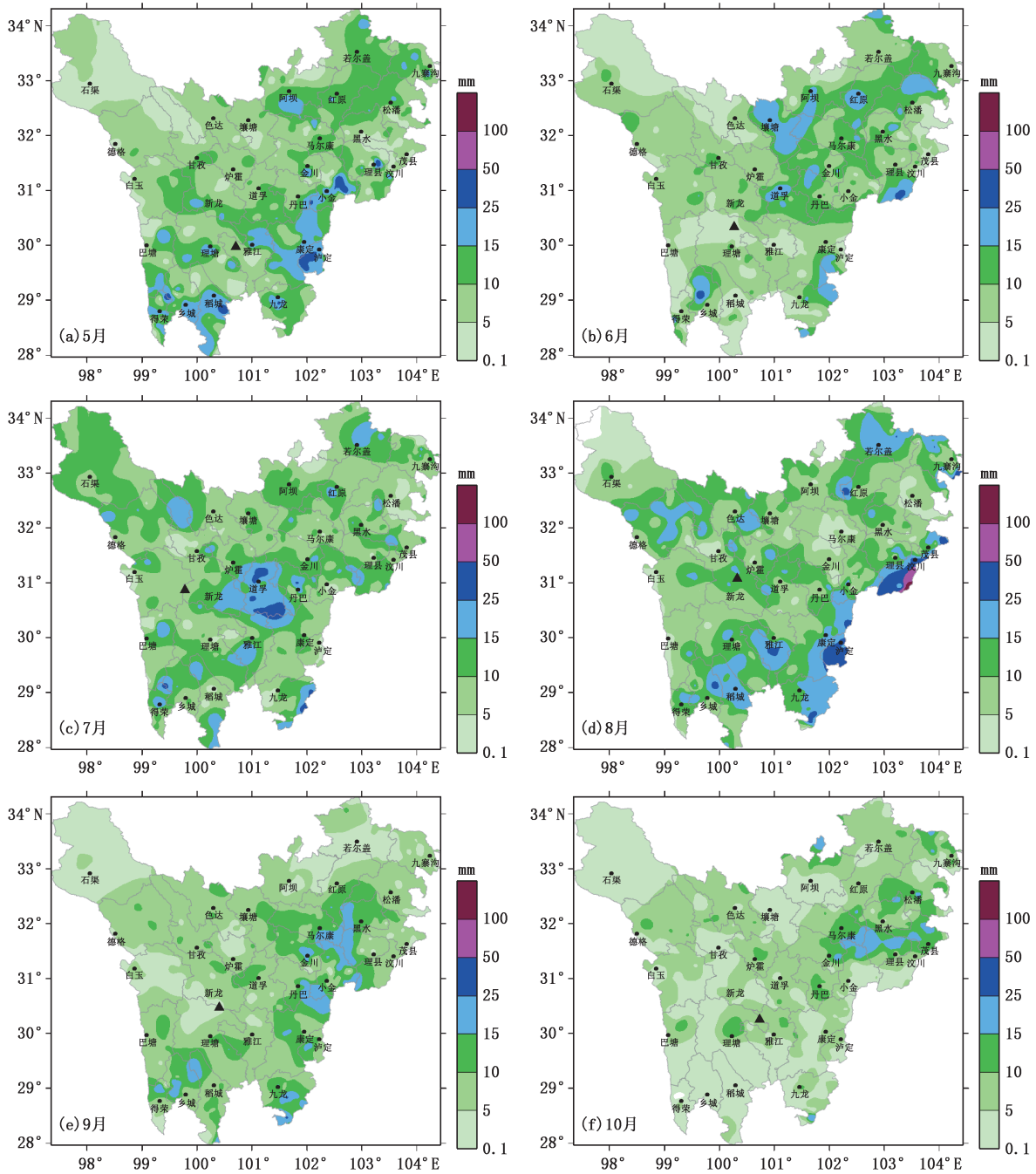


图 7 2011—2020 年川西高原夏半年 600 hPa 低涡伴随的日均降水量分布
(黑点表示低涡平均中心位置)

Fig. 7 The regional distribution of average daily precipitation accompanied by the vortex on 600 hPa in the western Sichuan Plateau during the summer half year from 2011 to 2020
(The black dots represent the mean center of the vortex)

西南侧,个别发生在低涡北侧和东北侧。同时,强降水主要发生在低涡中心附近及东南侧及东侧。低涡造成的降水有明显的日变化,总体表现为入夜增强,早晨减弱的特点,强降水也主要发生在夜间。但有

少数发生在西北部至东北部的个例表现出强降水在午后 16:00 左右开始、持续至夜间的情况。另外,也存在有个别个例低涡从西往东移动缓慢,导致东部强降水开始于早晨的情况^[31-33]。

通过初步分析,移入川西高原和本地生成的 600 hPa 低涡强度差别不大,但移出的 600 hPa 低涡强度强于移入和本地生成的 600 hPa 低涡,移出低涡其后部有较强偏北气流引导冷空气侵入低涡,使其东移发展;移出较移入和本地生成 600 hPa 低涡降水强度更强,而部分移入和本地生成低涡,500 hPa 为偏西气流多波动或南北气流辐合,低涡移动缓慢、南北摆动或停滞,导致降水持续时间较长,也会出现次生灾害。

4 致雨 600 hPa 低涡动力和热力特征

对 2011—2020 年大雨及以上的 155 个 600 hPa 低涡个例进行挑选,由于移动路径较为复杂,因此在自北向南移动的个例中选择从石渠经白玉到理塘的

34 个个例进行从初生期到成熟期的合成分析,着重分析沿(33.75°N,97.5°E)到(29.25°N,100.5°E)低涡的动力和垂直热力特征。

4.1 致雨 600 hPa 低涡垂直动力结构

对散度、涡度和垂直速度的垂直剖面进行分析,在 600 hPa 低涡初生期,高层在 400 hPa 有辐合存在(图 8a),辐合强度达 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,在低涡东南侧 600 hPa 存在弱辐合,低涡上空 500 hPa 附近有正涡度中心(图 8c),强度为 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,伴随较弱的垂直运动,垂直速度为 -0.1 m/s ,到低涡成熟期,在低涡位置从地面到 500 hPa 为辐合层(图 8b),600 hPa 为辐合中心,辐合强度达 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,200 hPa 层上是辐散中心,其中中心值为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,低层辐合且是高能大气层结与高层辐散有利于低涡

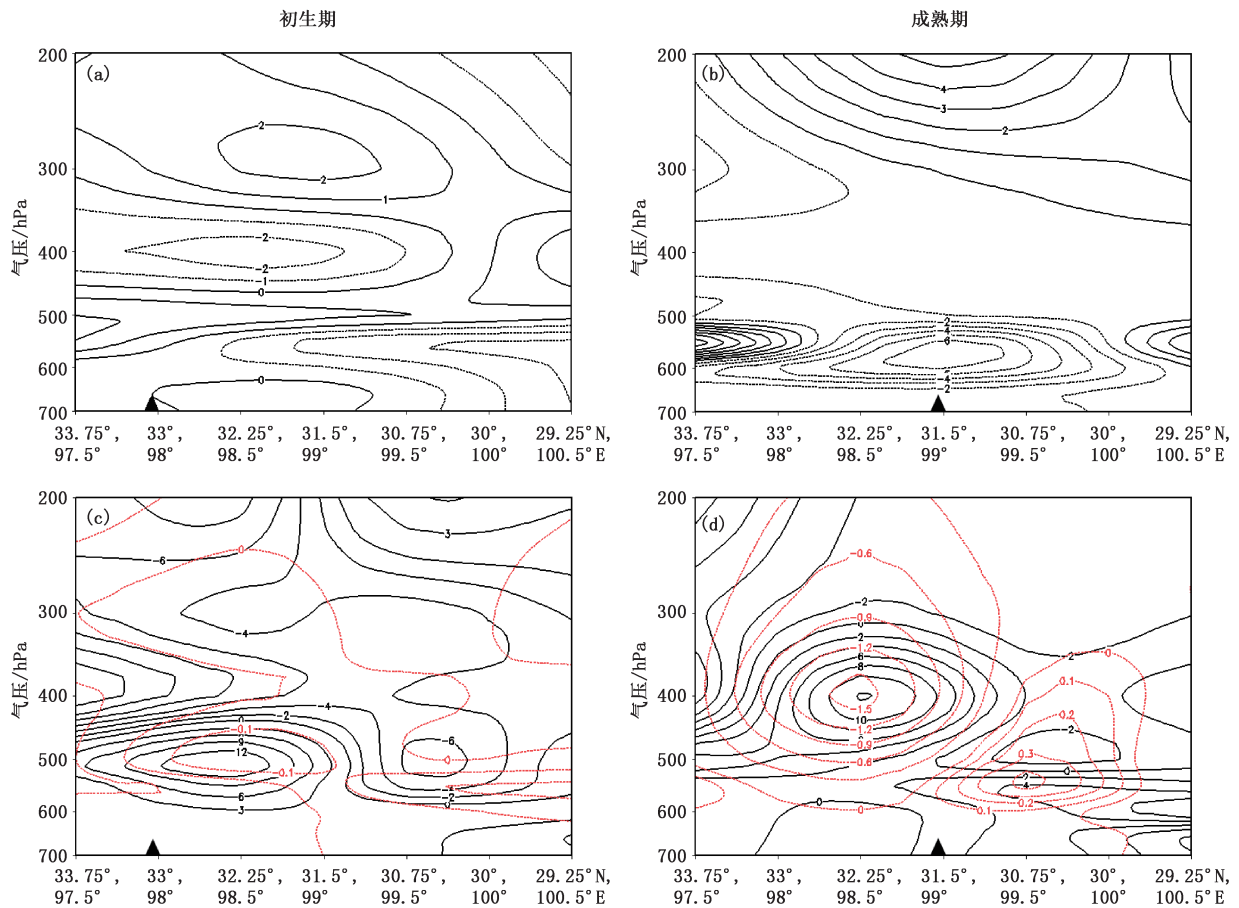


图 8 川西高原 600 hPa 低涡初生期、成熟期沿 33.75°N,97.5°E 至 29.25°N,100.5°E 的散度(a,b,实线,单位: 10^{-5} s^{-1})及涡度(c,d,实线,单位: 10^{-5} s^{-1})和垂直速度(红色虚线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的垂直剖面
(实心三角代表低涡所在位置)

Fig. 8 The vertical profile of divergence (a, b, solid line, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vorticity (solid line, c, d, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity (red dotted line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of the vortex in infancy and maturity stages on 600 hPa in the western Sichuan Plateau along 33.75°N, 97.5°E to 29.25°N, 100.5°E
(The solid triangle represents the location of the low vortex, the same below)

生成;从涡度看在低涡西北侧 400 hPa 有正涡度中心(图 8d),强度为 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,在低涡上空 600 hPa 存在弱的正涡度,表明 400 hPa 低值系统和 600 hPa 低涡上下层涡度差异将形成垂直差动平流强迫,激发低层的上升运动与气旋性涡度加强,涡旋系统发展,最强上升速度位于低涡西北部 400 hPa,其上升速度高于 -1.5 m/s ,在低涡上空从 650~200 hPa 有垂直上升运动强烈发展,上升运动与正涡度区具有伴随关系,在正涡度中心初始形成时,上升运动较弱,其后不断发展,垂直上升运动与正涡度的这种耦合过程,是一种重要的动力特征^[34],即强烈的上升运动要求低空有强烈的辐合,而这种强烈的辐合必然导致局地有正涡度生成,再通过垂直上升运动输送到高空,使正涡度区继续加

强,此时,这支强上升气流和两侧的弱下沉气流构成次级垂直环流,该环流是完成低空和高空水汽、热量与动量输送、交换和循环所必需的,这是 600 hPa 低涡在川西高原生成并发展维持的原因。

4.2 致雨 600 hPa 低涡垂直热力特征

强降水的发生与高能不稳定层结密切相关。从 θ_{se} 的垂直剖面可以看出,600 hPa 低涡初生期(图 9a),在其上空 500 hPa 以下为一高能舌,600 hPa 上 θ_{se} 在 81°C ,大气层结处于对流不稳定状态,到低涡成熟期(图 9b),低涡上空 600 hPa 位于高能中心附近, θ_{se} 为 88°C ,对流不稳定层位于 600~450 hPa 之间,明显增厚,深厚的不稳定层结的形成和维持是低涡形成和维持以及产生强降水所必须的。

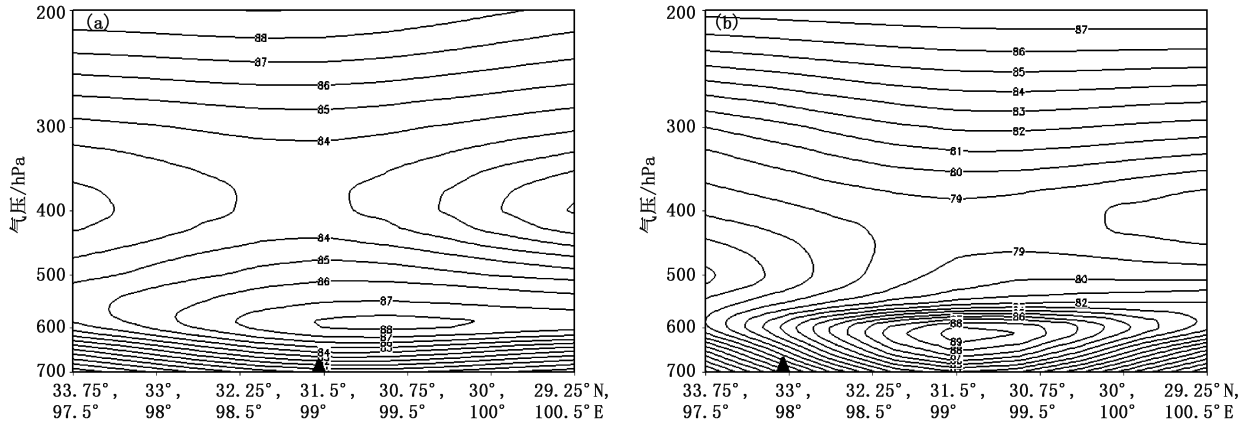


图 9 川西高原 600 hPa 低涡初生期(a)、成熟期(b)沿 $33.75^\circ\text{N}, 97.5^\circ\text{E}$ 至 $29.25^\circ\text{N}, 100.5^\circ\text{E}$ 的 θ_{se} (单位: $^\circ\text{C}$) 垂直剖面
Fig. 9 The θ_{se} (Unit: $^\circ\text{C}$) vertical profiles of the vortex in infancy (a) and maturity (b) stages on 600 hPa in the western Sichuan Plateau along $33.75^\circ\text{N}, 97.5^\circ\text{E}$ to $29.25^\circ\text{N}, 100.5^\circ\text{E}$.

5 结论与讨论

通过采用 ERA5 再分析资料和逐小时降水资料对 1979—2020 年川西高原 600 hPa 低涡进行低涡活动特征、低涡与降水的关系及致雨低涡动力和热力特征进行了分析,得到以下结论:

(1) 42 年间川西高原 600 hPa 低涡年均 80 个, 6 月出现频次最高, 年均 15.3 个, 9 月平均活动时长最长, 为 11.6 h, 持续时间从短到长呈指数减少分布, 1 d 以内的低涡占总数的 95.7%。从高原外移入和区域内生成的低涡年均 18 个和 61.5 个; 移出的低涡年均 5.3 个, 大部分从偏东或偏南方向移出。低涡源地和消散地分别在甘孜州白玉县和理塘县为

中心的区域。

(2) 生命史大于 12 h 的低涡占比 36.4%, 且都会带来降水, 其中超 83.7% 会造成中雨及以上的降水。低涡伴随的日降水强度最大值中心位置先由川西高原东部与南部地区北移到中部, 之后逐渐移回到东部与南部地区, 相对应 7—8 月多低涡从北部南移到中部摆动消亡, 其余月多为低涡从中部生成影响到东部和南部地区或在南部生成并停滞或摆动。低涡造成的强降水主要发生在低涡中心附近及东南侧及东侧, 强降水主要发生在夜间, 也有部分从午后开始到夜间和早晨开始的情况。

(3) 强烈垂直上升运动和正涡度区的耦合发展以及深厚不稳定层结的形成和加强是致雨低涡发生

发展并产生强降水的动力特征和热力层结条件。

本文对影响川西高原的 600 hPa 低涡活动特征、与降水的关系及致雨低涡动力和热力特征做了较深入地统计分析,但需要指出的是,600 hPa 低涡形成机理尚不明确,川西高原地处青藏高原背风坡,地形复杂,高原的动力、热力和水汽等多因子对 600 hPa 低涡的生成和发展如何影响?为什么 600 hPa 低涡移入和移出川西高原的比率低,大部分在原地消亡?500 hPa 低值系统与 600 hPa 低涡之间的相互作用?600 hPa 低涡强度对降水强度的影响以及和降水之间的内在联系等问题还有待继续研究。

参考文献

- [1] 章基嘉,朱抱真,朱福康,等.青藏高原气象学进展[M].北京:科学出版社,1988. Zhang J J, Zhu B Z, Zhu F K, et al. Advances in meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [2] 李跃清.西南涡涡源研究的有关新进展[J].高原气象,2021,40(6):1394-1406. Li Y Q. New related progress on researches of the vortex source of Southwest China vortex [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2021, 40(6): 1394-1406.
- [3] 慕丹,李跃清.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,2018,76(1):15-31. Mu D, Li Y Q. Climatic characteristics of the Jiulong low vortex in recent 30 years based on the ERA-interim reanalysis data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2018, 76(1): 15-31.
- [4] 郁淑华,高文良.高原低涡移出高原的观测事实分析[J].气象学报,2006,64(3):392-399. Yu S H, Gao W L. Observational analysis on the movement of vortices before/after moving out the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2006, 64(3): 392-399.
- [5] 林志强.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,2015,73(5):925-939. Lin Z Q. An objective analysis of the Tibetan Plateau vortexes based on the ERA-interim reanalysis data:1979—2013 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2015, 73(5): 925-939.
- [6] 郁淑华,高文良.1998 年夏季两例青藏高原低涡结构特征的比较[J].高原气象,2010,29(6):1357-1368. Yu S H, Gao W L. Comparison on structure characteristics of two Tibetan Plateau vortexes in summer, 1998 [J]. Plateau Meteorology (in China), 2010, 29(6): 1357-1368.
- [7] 彭新东,程麟生.高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究——II.中尺度数值模拟[J].兰州大学学报,1994,29(01):124-131. Peng X D, Cheng L S. A case numerical study on the evolution of the low vortex and shear-line on the east side of the plateau II: mesoscale numerical simulation [J]. Journal of Lanzhou University (in Chinese), 1994, 29(1): 124-131.
- [8] 彭新东,程麟生.高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究——I.分析和诊断[J].兰州大学学报,1992,27(2):163-168. Peng X D, Cheng L S. A case numerical study on the evolution of the low vortex and shear-line on the east side of the plateau-east-side low vortex and shear-line [J]. Journal of Lanzhou University (in Chinese), 1992, 27(2): 163-168.
- [9] 郁淑华.夏季青藏高原低涡研究进展述评[J].暴雨灾害,2008,27(4):367-372. Yu S H. New research advances of the Tibetan Plateau vortex in summer [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 2008, 27(4): 367-372.
- [10] 杨颖臻,李跃清,陈永仁.青藏高原及邻近地区低涡系统结构研究进展[J].气象科技,2018,46(1):76-83. Yang Y C, Li Y Q, Chen Y R. Progresses and new understanding of researches on vortex systems over Tibetan Plateau and its adjacent areas [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2018, 46(1): 76-83.
- [11] 杨颖臻,李跃清,陈永仁.高原低涡东移加深过程的结构分析[J].高原气象,2018,37(3):702-720. Yang Y C, Li Y Q, Chen Y R. The characteristic analysis of an eastwards plateau vortex by its strengthening process [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2018, 37(3): 702-720.
- [12] 李国平.青藏高原动力气象学[M].北京:气象出版社,2002. Li G P. Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Press, 2002.
- [13] 高文良,郁淑华.高原低涡东移出高原的平均环流场分析[J].高原气象,2007,26(1):206-212. Gao W L, Yu S H. Analyses on mean circulation field of the plateau low vortex moving out of Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2007, 26(1): 206-212.
- [14] 罗四维.青藏高原东侧动力性低涡形成机制的分析[J].气象科技,1977,5(增刊):54-65. Luo S W. Analysis of the formation mechanism of dynamic low eddies on the eastern side of the Qinghai Tibet Plateau [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 1977, 5 (Supplement): 54-65.
- [15] 陈功,李国平,李跃清.近 20 年来青藏高原低涡的研究进展[J].气象科技进展,2012,2(2):8-14. Chen G, Li G P, Li Y Q. The research progress of the Tibetan Plateau vortex in recent twenty years [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2012, 2(2): 8-14.
- [16] 李国平.高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(3):1-6. Li G P. Advances in Tibetan Plateau vortex and southwest vortex research and related scientific problems [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 2013, 7(3): 1-6.
- [17] 马勋丹,智协飞,王静,等.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,2018,41(2):198-206. Ma X D, Zhi X F, Wang J, et al. Analysis of the southwest vortex activities in summer and their relationship with precipitation during the period of 1979—2016 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2018, 41(2): 198-206.

- [18] 周春花, 顾清源, 何光碧. 高原涡与西南涡相互作用暴雨天气过程的诊断分析[J]. 气象科技, 2009, 37(5): 538-544. Zhou C H, Gu Q Y, He G B. Diagnostic analysis of vorticity in a heavy rain event under interaction of plateau vortex and southwest vortex [J]. Meteorological Science And Technology (in Chinese), 2009, 37(5): 538-544.
- [19] 邓承之, 赵宇, 牟容, 等. 一次西南涡特大暴雨过程中 MCS 的演变特征[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 121-128. Deng C Z, Zhao Y, Mu R, et al. Evolution features of MCS during a torrential rain caused by southwest vortex [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2018, 46(1): 121-128.
- [20] 周玉淑, 颜玲, 吴天贻, 等. 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, 2019, 43(4): 813-830. Zhou Y S, Yan L, Wu T Y, et al. Comparative analysis of two rainstorm processes in Sichuan Province affected by the Tibetan Plateau vortex and southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2019, 43(4): 813-830.
- [21] 王位泰. 600 hPa 夏季西北区天气系统特征分析[J]. 甘肃气象, 1993, 11(1): 9-11. Wang W T. Characteristic analysis of the weather system in the northwest region on 600 hPa during summer [J]. Gansu Meteorology (in Chinese), 1993, 11(1): 9-11.
- [22] 许东蓓, 蔡玉琴. 用 600 hPa 图预报河东区域性大降水[J]. 甘肃气象, 1993, 11(1): 7-9. Xu D B, Cai Y Q. Regional heavy precipitation forecast in Hedong with weather chart on 600 hPa [J]. Gansu Meteorology (in Chinese), 1993, 11(1): 7-9.
- [23] 胡天清, 曹玲. 600 hPa 图对河西低值系统预报能力强[J]. 甘肃气象, 1994, 12(4): 39-39. Hu T Q, Cao L. The weather chart on 600 hPa has strong forecasting ability for the low value systems in Hexi [J]. Gansu Meteorology (in Chinese), 1994, 12(4): 39-39.
- [24] 丁治英, 刘京雷, 吕君宁. 600 hPa 高原低涡生成机制的个例探讨[J]. 高原气象, 1994, 13(04): 411-418. Ding Z Y, Liu J L, Lu J N. The study for the mechanism of forming QXP-vortex on 600 hPa [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 1994, 13(4): 411-418.
- [25] Bao X H, Zhang F Q. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Climate, 2013, 26(1): 206-214.
- [26] Dong Y, Li G, Yuan M, et al. Evaluation of five grid datasets against radiosonde data over the eastern and downstream regions of the Tibetan Plateau in summer [J]. Atmosphere, 2017, 8(3): 56-75.
- [27] 荀学义, 胡泽勇, 孙俊, 等. 高原地区 ERA40 与 NCEPI 再分析资料对比分析[J]. 气象科技, 2011, 39(4): 392-400. Xun X Y, Hu Z Y, Sun J, et al. A comparative analysis of two geopotential height field reanalysis datasets in plateau [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2011, 39(4): 392-400.
- [28] 乔钰, 周顺武, 马悦, 等. 青藏高原的动力作用及其对中国天气气候的影响[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 1039-1046. Qiao Y, Zhou S W, Ma Y, et al. Dynamic effect of Tibetan Plateau and its impact on weather and climate in China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2014, 42(6): 1039-1046.
- [29] 张恬月, 李国平. 夏季青藏高原地面热源和高原低涡生成频数的日变化[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(2): 70-76. Zhang T Y, Li G P. The diurnal variation of the surface heat source on the Tibetan Plateau and the generating frequency of Tibetan Plateau vortex in summer [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 2016, 10(2): 70-76.
- [30] 朱伊. 青藏高原地表温度对高原涡影响的数值模拟[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018. Zhu Y. Numerical simulation of the impact of surface temperature on plateau vortex in the Tibetan Plateau (in Chinese)[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2018.
- [31] 武敬峰, 徐晓芳, 赵巍燃, 等. 川西高原持续性暴雨特征和水汽输送[J]. 气象科技, 2020, 48(5): 704-716. Wu J F, Xu X F, Zhao W R, et al. Characteristics of persistent heavy rainfall and water vapor transport in western Sichuan Plateau [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2020, 48(5): 704-716.
- [32] 谷艳茹, 范广洲. 青藏高原地区深对流系统特征分析[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 372-379. Gu Y R, Fan G Z. Characteristics of deep convective system over Tibetan Plateau [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(3): 372-379.
- [33] 旺杰, 德庆央宗, 旦增, 等. 2012—2018 西藏“雨窝”降水特征及其成因分析[J]. 气象科技, 2021, 49(2): 211-217. Wang J, Deqing Y Z, Dan Z. Characteristic and causal analysis of concentrated and frequently occurring intense rainfall in Tibet in 2012—2018 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(2): 211-217.
- [34] 肖红茹, 顾清源, 何光碧, 等. 一次大暴雨过程中高原低涡与西南低涡相互作用机制探讨[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(1): 14-20. Xiao H R, Gu Q Y, He G B, et al. Mechanism of the interaction between plateau vortex and southwest vortex during a heavy rain event [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 2009, 28(1): 14-20.

Characteristics of 600 hPa Vortex Activity at Western Sichuan Plateau in Summer Half-Year

WU Jingfeng^{1,2} XU Xiaofang¹ ZOU Ling¹ ZHANG Lei¹ JIANG Qing¹ LIU Xiao¹

(1 Aba Meteorological Observatory, Maerkang 624000; 2 Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072)

Abstract: The weather system on 600 hPa can analyse the main characteristics of the variation of low vortex over the western Sichuan Plateau and identify the relationship between the development and movement of low vortex and the heavy precipitation area over the western Sichuan Plateau. Therefore, we are currently analyzing the spatiotemporal distribution of the vortex on 600 hPa, the relationship between low vortex and precipitation, and dynamic and thermal characteristics of vortex causing rainfall in the western Sichuan Plateau in the summer half of the year by using the 3-hour ERA5 reanalysis data ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) and the hourly precipitation data from 2011 to 2020. The results show that there are 80 low vortices per year in 42 years, and the duration of less than one day accounts for 95.7% of the total. The formation and extinction of the low vortices are affected by the topography on the east side of the plateau and the obvious diurnal variation of surface temperature. The annual average number of the low vortices generated in the western Sichuan Plateau is 61.5. The annual average number of the low vortices which move in the western Sichuan Plateau is 18. And the annual average number of the low vortices which move out of the western Sichuan Plateau is 5.3. The source area of the low vortex is located in Baiyu County in Ganzi Prefecture. And the dissipation area of the low vortex is located in Litang County in Ganzi Prefecture. The low vortices with a life history longer than 12 h account for 36.4%, which will bring precipitation. And more than 83.7% of them will cause moderate rainfall or above. The central position of the maximum daily precipitation intensity associated with the low vortex moves from the eastern and southern parts of the western Sichuan Plateau to the central part each month, and then gradually moves back to the eastern and southern parts. Correspondingly, in July and August, majority low vortices move from the north and south to the centre and wobble away. In other months, majority low vortices formed in the centre will affect the east and south areas, or generated in the south and then stagnate or wobble in situ. Strong vertical upward motion, the coupling development of positive vorticity region and the formation and maintenance of the deep unstable stratification are the dynamic characteristics and thermodynamic stratification conditions of the generation and development of vortex, causing heavy precipitation.

Keywords: western Sichuan Plateau; vortex on 600 hPa; climate characteristic; moving path; physical quantity analysis

Received: 2022-08-29 Accepted: 2023-06-26

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)