

金妍, 蔺邹兴, 管理, 等. 东移型西南涡对长三角地区区域性暴雨的影响分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 156-171. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.012

JIN Yan, LIN Zouxing, GUAN Li, et al. Analysis of impact of eastward-moving southwest vortices on regional heavy rainfall in Yangtze River Delta [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 156-171. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.012

东移型西南涡对长三角地区区域性暴雨的影响分析

金妍¹, 蔺邹兴², 管 理¹, 喻佳丽¹, 陈宇航¹

(1. 上海中心气象台, 上海 200030; 2. 复旦大学 大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

摘 要:【目的】东移型西南涡是影响我国长三角旱涝变化的重要天气系统, 但该系统对长三角地区的具体影响尚不完全明确。为研究西南涡东移对长三角地区区域性暴雨的具体影响特征, 【方法】基于《西南低涡年鉴》、CN05.1 格点降水数据和 ERA5 再分析资料, 对西南涡移动特征和受西南涡东移影响而产生的长三角区域性暴雨特征进行了统计分析和个例对比。【结果】结果显示: 2012—2019 年共形成 716 例西南涡, 其中西南涡移出源地的路径特征主要表现为向东移动, 东移型西南涡约占生成总数的 30%, 其影响的降水贡献占比约为长三角地区总降水量的 10% 以上。【结论】结果表明: 当东亚大槽和西北太平洋副热带高压的强度偏强时, 有利于西南涡的东移发展; 东移型西南涡对长三角降水的影响存在明显的空间不均匀性, 最大贡献区域主要位于长三角西部; 降水大值区与西南涡移动路径、低涡南侧西南暖湿气流的强度、高低空强辐合辐散区位置基本一致。东移型西南涡影响长三角暴雨的具体特征, 大型环流形势及中小尺度动力配置, 显示了其对长三角暴雨的独特影响, 为实际预报东移型西南涡可能导致长三角暴雨天气提供一定的理论参考。

关键词: 西南低涡; 东移型; 暴雨; 统计分析; 长三角地区; 环流形势; 动力分析; 水汽诊断

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P445

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0156-16



Analysis of impact of eastward-moving southwest vortices on regional heavy rainfall in Yangtze River Delta

JIN Yan¹, LIN Zouxing², GUAN Li¹, YU Jiali¹, CHEN Yuhang¹

(1. Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030, China; 2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: [Objective] The eastward-moving southwest vortex is an important weather system affecting drought and flood variations

收稿日期: 2025-09-13; 修回日期: 2025-11-20; 录用日期: 2025-11-23; 网络出版日期: 2025-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42505020); 上海市气象局科技人才类项目(KJRC202403, KJRC202411); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J001); 中国气象局气象能力提升联合研究专项(23NLTSZ002); 中国气象局青年创新团队(CMA2023QN06)

作者简介: 金 妍(1997—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事短临监测预报技术研究。E-mail: jinyan_cuit@163.com

通信作者: 蔺邹兴(1994—), 男, 工程师, 博士, 主要从事流域降水机理研究。E-mail: linzx@fudan.edu.cn

管 理(1989—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事短临监测预报技术研究。E-mail: glion2005@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

in the Yangtze River Delta region of China. However, its specific impact on the Yangtze River Delta region remains incompletely understood. The aim is to investigate the detailed characteristics of regional heavy rainfall in the Yangtze River Delta influenced by eastward-moving southwest vortex. [Methods] Using the “Southwest Vortex Almanac”, CN05.1 gridded precipitation data, and ERA5 reanalysis data, statistical analysis and case comparisons were conducted on the movement characteristics of southwest vortices and the characteristics of regional heavy rainfall in the Yangtze River Delta region caused by eastward-moving southwest vortices. [Results] The result showed that from 2012 to 2019, a total of 716 southwest vortices were generated. The primary movement path of southwest vortices exiting their source region was eastward. Eastward-moving southwest vortices accounted for approximately 30% of the total cases generated, contributing more than 10% of the total precipitation in the Yangtze River Delta region. [Conclusion] The findings indicate that the eastward movement and development of southwest vortices are favored when the East Asian Trough and the Northwestern Pacific Subtropical High are relatively strong. The impact of eastward-moving southwest vortices on precipitation in the Yangtze River Delta region exhibits significant spatial heterogeneity, with the maximum contribution mainly located in the western part of the region. The areas of heavy precipitation are generally consistent with the movement paths of the southwest vortices, the intensity of the southwesterly warm and moist airflow on the southern side of the vortices, and the locations of strong upper-and lower-level convergence and divergence zones. The specific characteristics of heavy rainfall in the Yangtze River Delta region influenced by eastward-moving southwest vortices, including the large-scale circulation patterns and meso-and micro-scale dynamic configurations, demonstrate their unique impact on heavy rainfall events in this region. These findings provide theoretical references for the operational forecasting of heavy rainfall in the Yangtze River Delta region potentially caused by eastward-moving southwest vortices.

Keywords: southwest vortex; eastward-moving; heavy rainfall; statistical analysis; Yangtze River Delta region; circulation pattern; dynamic analysis; moisture diagnostic

0 引 言

西南低涡(以下简称“西南涡”)是在青藏高原特殊地形与大气环流相互作用下,产生于高原东侧的700~850 hPa高度层上具有气旋性环流特征的中尺度闭合低压系统,其水平尺度约为300~500 km,是川西高原和西南背风坡特殊地形、地表加热与大气环流相互作用的结果^[1]。YEH等^[2-3]指出青藏高原的绕流作用使气流分支,两支气流在高原下游交汇形成急流,夏季绕流作用激发下易产生高原涡和西南涡^[4]。西南涡是造成中国夏半年强降水过程的主要天气系统之一,其发展可引发四川盆地暴雨灾害,东移往往造成华南、长江中下游甚至华北等地的强降水天气^[5]。因此,研究西南涡及其东移相关科学问题,了解西南涡对降水发生发展规律的影响作用,有利于为下游地区灾害性天气的预报预警工作提供一定的参考^[6]。

西南涡多生成于每年的3—8月,陈忠明等^[7]统计1983—1992年西南涡的活动特征,得出西南涡具有明显的年际变化和季节变化,其中夏季生成最多,冬季最少。QING等^[8]研究夏季与冬季西南涡的特征,分析两种类型西南涡尺度上的差异,发现夏季西南涡发展主要受潜热释放和斜压能量转换驱动,而冬季西南涡则主要由斜压过程驱动,对流活动较弱。FENG等^[9]利用再分析资料统计1979—2010年西南

涡特征,结果表明西南涡主要生成区域为四川盆地和青藏高原东南侧,具有季节性和日变化特征。西南涡的形成和发展与青藏高原乃至四川盆地等特殊地形的动力和热力作用密不可分^[10-12]。赖欣等^[13]通过研究西南涡的涡源分布、活动频数、移动路径及强度变化的多时空尺度分布特征,及其对我国部分地区天气、气候及区域环境的影响,总结了西南涡与高原涡、南亚高压等重要天气系统的协同作用过程。吴国雄等^[14]于1999年提出西南涡形成的主要机制是倾斜涡度发展,其中陡峭地形造成等熵面倾斜是其发生的重要条件。刘国忠等^[15]通过西南涡个例的天气学合成分析,讨论了副热带高压和印度低槽对影响华南地区低涡的移动路径的影响。赵思雄等^[16]对发生在川渝地区的大暴雨环境场进行分析发现,川东地区的特殊地形,高空槽以及低层鞍型流场是西南涡产生和维持的重要条件。LI等^[17]采用分块位涡诊断方法,揭示了潜热在西南涡下移加强过程中的关键作用。FENG等^[18]通过半理想模拟、轨迹分析和沿轨迹的涡度收支分析,探究西南涡形成的关键来源和动力过程,发现垂直运动和水汽相变对涡旋的形成发展起到了关键作用。ZHOU等^[19]探讨了西南涡演变过程和异常机制问题,发现周围流场的辐合辐散是影响西南涡发展和消亡的主要因素,而重力波扰动则是维持涡旋发展消亡的主要驱动力。SONG等^[20]通过对移出型与停

滞型西南涡进行合成研究分析大尺度环流特征,结果表明当对流层上层副热带西风急流增强时,西南涡位于急流入口区南侧,有利于西南涡进一步发展并促使系统向东流出,且冷空气活动更活跃时,可能使移出型西南涡具有更强的斜压性。上述结果表明,受南亚高压和高纬冷空气活动影响的西北气流和低层受副热带高压和季风槽控制的西南暖湿气流^[21]与地形相互作用,是对西南涡的形成和位置有重要影响的环流因子。

大多数西南涡都会在源地停滞发展或消失^[22],但在一定的环流形势配合下,部分西南涡能够发展移出,生命史可达6~7 d,往往能引发下游地区大范围的暴雨、雷暴大风等灾害性天气^[23]。西南涡移动路径主要分为偏东、东北和东南这三个方向,且主要以偏东路径为主。当西南涡向东北方向移动时^[24],常伴有其他气旋的发生发展,途经黄河下游地区造成大范围降水;当低涡向偏东方向移动时^[25],长江中下游地区会出现大片雨区,尤其当它移到两湖盆地后,常可以诱生出气旋波,引起暴雨或特大暴雨,部分江淮气旋就是在低涡东移过程中引起的;低涡向东南方向移动时,往往可造成华南阴雨天气^[26];当低涡被副热带高压阻挡于四川盆地时,有阻塞性降水,强度可达到大暴雨到特大暴雨量级^[27]。ZHOU等^[28]通过研究暖季四川盆地内由西南涡引起的暖区暴雨的动力学和热力学特征,揭示了西南涡在暖区暴雨中的关键作用。ZHOU等^[29]利用两个暖区极端暴雨事件中西南涡的热能发展机制与动能转换特征进行对比,揭示了在相似大尺度环流背景下,热力学过程对西南涡能量发展的决定性作用。马勋丹等^[30]对1979—2016年6—8月的西南涡活动规律及其降水特征展开统计分析发现,生命史超过36 h的高影响型西南涡都会带来降水,且造成大雨及以上量级的降水概率较大。胡伯威等^[31]通过研究沿青藏高原背风坡东移的中尺度西南涡系统,发现其是造成长江中下游梅雨锋气旋性扰动的原因之一,同时西南涡的移出可导致降水的出现。傅慎明等^[32]研究指出长江中下游梅雨锋暴雨与中尺度低涡密切相关,造成梅雨期暴雨的主要低涡系统就包括生成于四川盆地的西南涡。刘建勇等^[33]研究指出,西南涡东移加强低层切变涡度,在切变涡度增强的区域又有新生对流系统产生并组织增强进而生成新的涡旋系统,产生大范围的暴雨,是梅雨期暴雨主要形态的一种。CHIEN等^[34]通过探讨台湾南部的一次强降水个例发现,西南涡增强了梅雨锋附近的低层辐合与抬升,导致对流活动更加持续且强烈,突显

了西南涡及其与天气尺度系统相互作用在梅雨期强降水中的重要作用。MAI等^[35]统计了2000—2016年5—9月青藏高原中尺度对流系统及其与降水和西南涡的关系,研究结果表明了高原中尺度对流系统和西南涡协同影响我国东部降水的统计规律,为延伸期预报提供关键形态指标。

我国历史上很多罕见重大的暴雨天气过程都与西南涡的发生发展密切相关,是仅次于台风及其残余低压的灾害性天气系统。例如,1998年6—8月发生西南涡过程较常年偏多达到21例,且发展和东移低涡比例明显偏高(70%以上),其中有19例造成了长江上游的区域性暴雨。可见,1998年夏季长江流域的全流域性大洪水,无不与西南涡的异常活动有关。虽然对西南涡与长江中下游地区降水相关关系的研究已有不少,但大多都是通过个例来进行探讨,缺乏对东移型西南涡影响长江中下游(特别是长三角地区)暴雨的系统性认知。长三角地区每年都会受到西南涡致灾暴雨的影响,作为我国人口密集、社会经济发达的重要区域,有必要进一步探究西南涡影响长三角区域的基本特征及其背后的物理机制,为实际预报东移型西南涡可能导致长三角地区的暴雨天气提供一定的理论判据。

1 资 料

西南涡资料主要来源于中国气象局成都高原气象研究所编著的《西南低涡年鉴》,时间为2012—2019年,主要包括西南涡概况、路径以及西南涡引起的降水等资料图表。年鉴对西南涡的定义为:700 hPa等压面上反映的生成于青藏高原背风坡(26°N—33°N、99°E—109°E),连续出现2次或者只出现1次但伴有云涡,有闭合等高线的低压或有3个站风向呈气旋式环流的低涡。

降水数据是基于中国2400多个中国地面气象台站的观测资料插值而成的格点化气象数据集(CN05.1),水平分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为逐日。

2012—2019年欧洲中期数值预报中心(ECMWF)提供的第五代全球再分析资料(ERA5),水平分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为逐日4次(00时、06时、12时、18时),变量主要包括位势高度、温度、相对湿度、涡度散度以及风场等气象要素。

2 西南涡统计特征

2.1 移动频次特征

根据《西南低涡年鉴》资料,统计2012—2019年

西南涡的生成移动情况，共统计出 716 例西南涡，其中有 499 例在源地生成后消亡，217 例移出源地发展，移出源地的西南涡以向东移动的路径特征为主，移出西南涡占总生成数的 30.3%。图 1 是 2012—2019 年西南涡总数与移出个数的统计图。由图 1 可见，2012 年西南涡生成频次最多，2014 年生成频次最少，但 2013 年、2014 年和 2015 年西南涡移出源地发生频次较高，其中 2014 年移出占比最高，达到 51.4%。从图 2 西南涡移出源地频数的月变化分布图上可以看出西南涡东移多发生于 3—6 月，12 月最少，即西南涡东移有显著的季节性差异，主要表现为春季和夏季的移动频次较秋季和冬季明显偏多，移动距离也相对更远。

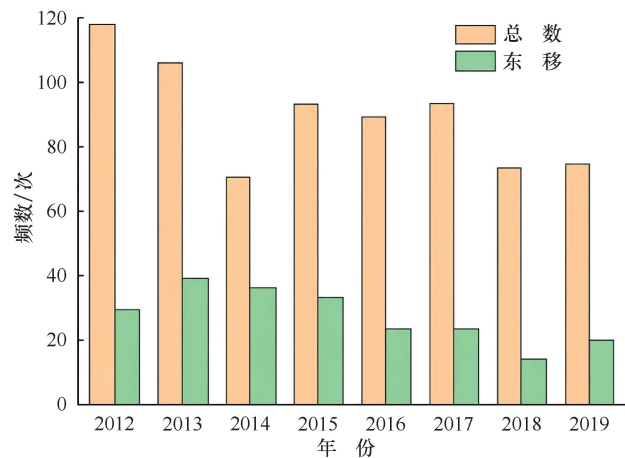


图 1 2012—2019 年西南涡生成总数与移出频数统计
Fig. 1 Statistics of total number of generated southwest vortices and exit frequency (2012—2019)

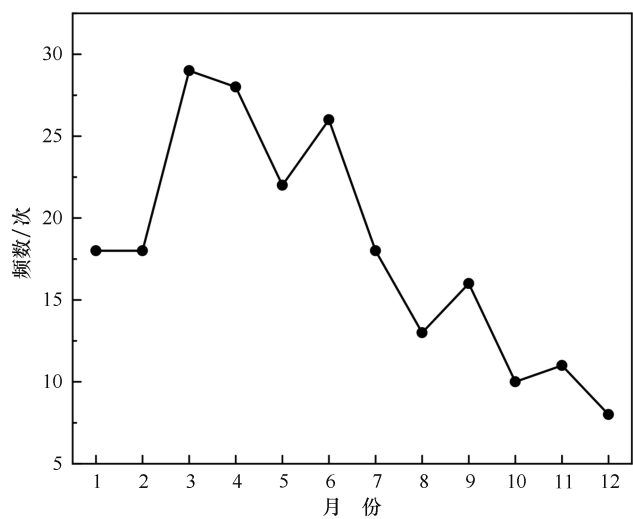


图 2 西南涡移出频次的月分布
Fig. 2 Monthly distribution of exit frequency of southwest vortices

2.2 环流特征

为了进一步了解西南涡东移的环流形势特征，利用《西南低涡年鉴》资料，筛选出 2012—2019 年影响长三角地区的东移型西南涡事件，将西南涡东移时的位势高度场和风场进行合成，并与 2012—2019 年 4—9 月环流形势平均态展开对比分析。图 3 是 500 hPa 平均位势高度场和 700 hPa 风场合成图，从 500 hPa 位势高度场上可以看到，4—9 月环流平均态 [见图 3(a)] 中高纬环流较为平直，风场较弱，而西南涡发生东移时 [见图 3(b)]，等高线则更加密集，东亚大槽加深明显，风场显著增强，且青藏高原东侧出现了较为明显的低槽，引导槽后冷空气南下，同

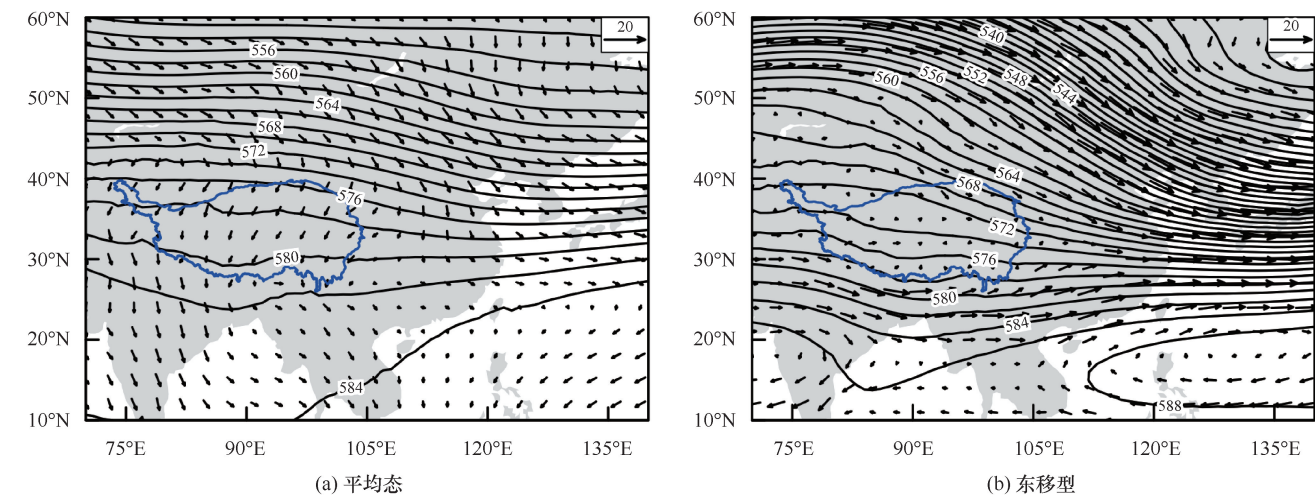


图 3 500hPa 位势高度场(单位: 10 gpm, 等值线)和 700 hPa 风场(单位: m/s, 矢量)合成
Fig. 3 Composite of 500 hPa geopotential height field (unit: 10 gpm, contour) and 700 hPa wind field (unit: m/s, vector)

时,低槽南侧西风加强,具有更加充沛的暖湿空气输送,为西南涡的东移提供了有利的动力和水汽条件。从低纬西北太平洋副热带高压(以下简称“西太副高”)来看,西南涡东移时西太副高西伸加强显著,这说明东移型西南涡的大气环流背景场经向和纬向剧烈波动,对低涡东移和发展起着重要促进作用^[36-38]。

3 长三角地区降水特征

为了解长三角地区降水的基本特征,对降水进行统计特征分析。图4是长三角地区降水的月变化和年变化图,由图4(a)可知,长三角区域降水具有明显的年循环特征,4—9月降水最为显著,其中6月降水量最多超过200 mm。因此,接下来将重点探讨4—9月的降水特征,从其年变化图上可以看到[见图4(b)],长三角地区雨季年均降水量均超过600 mm,降水量分布存在着显著的年际变化,变化范围在600~800 mm之间,其中2014—2016年雨季产生的降水量较多,2016年降水量最多接近800 mm。

研究受西南涡影响的长三角地区降水统计特征结果发现,2012—2019年长三角区域受西南涡影响产生的总降水量[见图5(a)]基本超过了1 000 mm,最大甚至超过2 400 mm,大值落区主要位于安徽南部和浙江西部,从西南涡引发降水的贡献[见图5(b)]来看,贡献占比约为长三角地区总降水量的10%以上,最大贡献占比区域主要在安徽西部。从概率密度函数图[见图5(c)]上可以看到,受西南涡影响的降水强度主要集中在50~100 mm之间,即暴雨到大暴雨量级。因此,上述结果表明东移型西南涡对长三角地区降水具有重要贡献。

从2012—2019年西南涡影响长三角区域降水的平均频次统计特征上(见图6)可以看出,西南涡引起

长三角地区降水存在明显的空间不均匀性,大部分区域受影响频次基本在5次左右,其中频次影响最多的主要位于安徽南部,达10次以上。另外,逐年统计4—9月长三角地区受影响频次可以看到(见图7),影响区域也存在着空间分布不均匀的特点,其中2014—2016年受西南涡影响而产生的降水频次较多,部分区域年影响频次超过8次,这可能是导致2014—2016年降水量偏多的重要原因之一。而在影响频次较少的年份如2013年,长三角大部地区影响频次也基本达到3次左右。因此,根据上述研究结果说明,每年东移型西南涡都会对长三角地区降水造成一定影响。

4 个例分析

4.1 降水实况

为探讨西南涡与强降水关系,本文基于东移西南涡不同路径特征,分别选取了D13050(偏北)、D13052(偏中)和D19049(偏南)这三个西南涡个例进行对比分析。筛选个例时考虑的条件:个例西南涡生命周期较长,且生命史内降水明显,造成的降水落区差异显著。此外,尽量避免同时段内有其他明显降水系统。

本文选取的3个降水事件的降水落区有明显差异,过程累积降水量分布如图8所示。D13050是2013年5月23—27日(北京时,下同)发生的一次西南涡东移引发降水的个例,从其累积降水分布图[见图8(a)]上可以看到,降水大值区主要集中在江苏和安徽的北部,24 h累积降水量极值出现在江苏东海,达到116 mm。D13052发生时间为2013年6月5—8日[见图8(b)],安徽、浙江、江苏有降雨量大于100 mm的降雨中心,降水大值区主要位于安徽西南

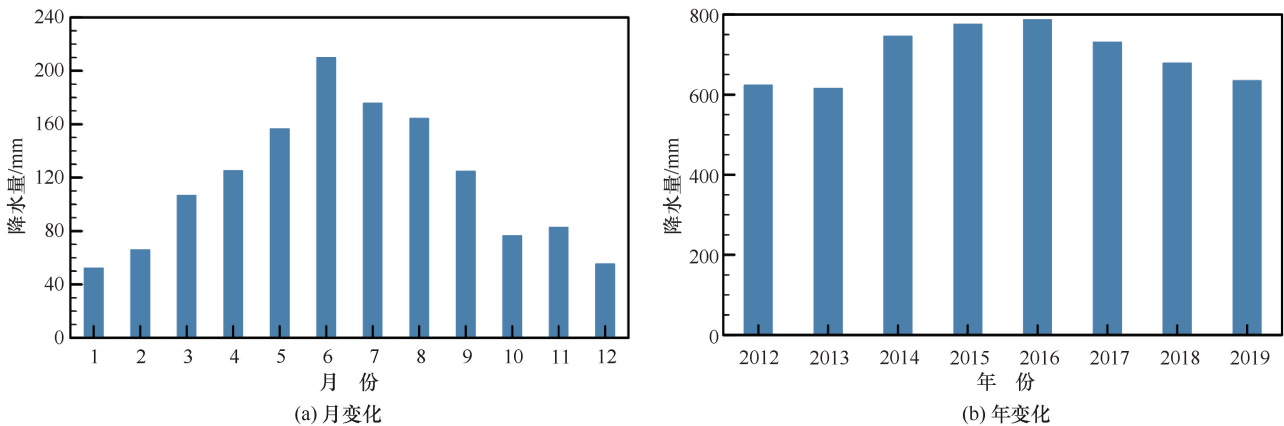


图4 长三角地区降水分布

Fig.4 Distribution of precipitation in Yangtze River Delta region

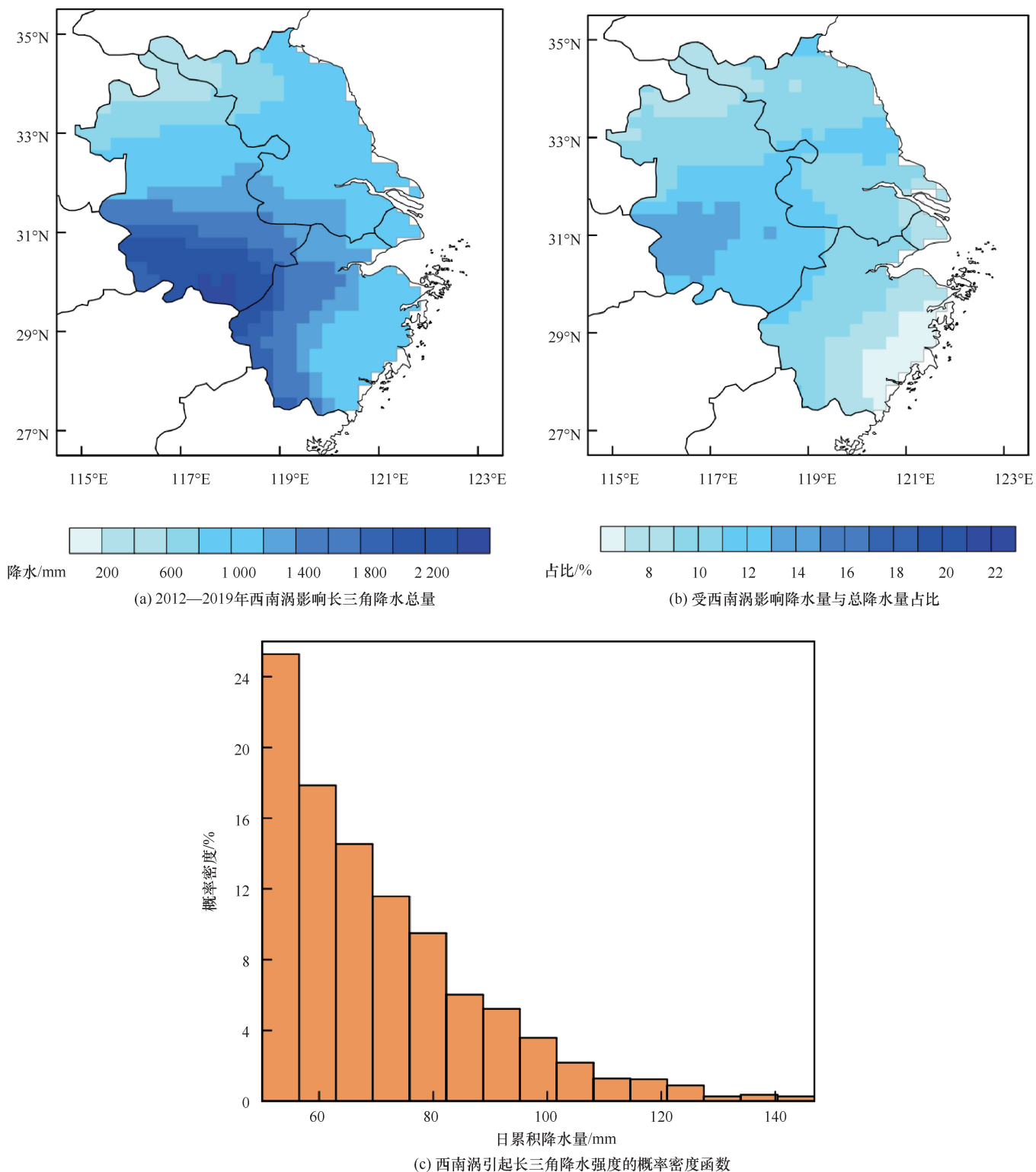


图5 西南涡对长三角地区降水的影响

Fig. 5 The impact of southwest vortices on precipitation in the Yangtze River Delta Region

部, 24 h 累积降水量极值出现在安徽黄山, 达到 192 mm。D19049 是发生在 2019 年 7 月 8—15 日的西南涡东移个例[见图 8(c)], 这次过程降水大值区主要出现在安徽南部和浙江大部, 有成片降水量超过

150 mm 的区域, 24 h 累积降水量极值出现在浙江缙云, 降水量达到 94 mm。

以上 3 个受东移型西南涡影响的降水个例中, 个例 D13050 的低涡移动路径是沿东偏北方向, 在苏北

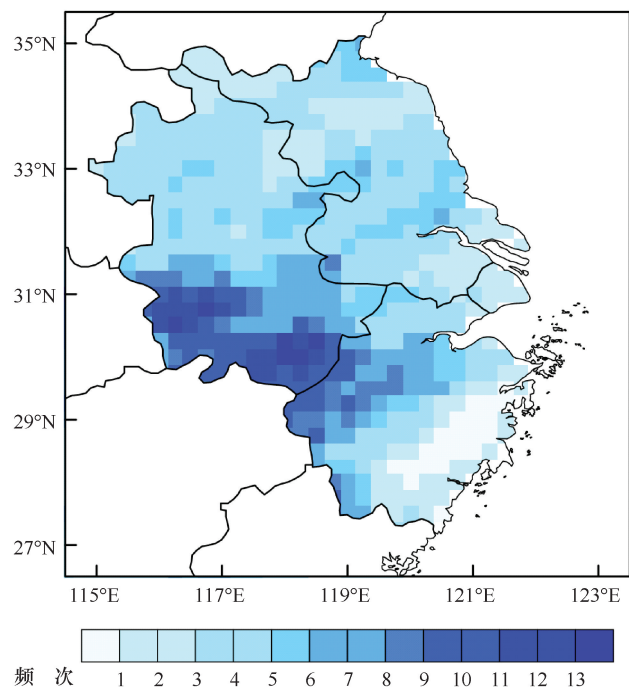


图6 2012—2019年西南涡影响长三角区域降水的平均频次
Fig.6 Average frequency of precipitation in Yangtze River Delta region affected by southwest vortices (2012—2019)

入海,降水大值区主要位于长三角北部;个例D13052和D19049路径相似为沿偏东方向移动,低涡均从长江口附近入海,但两个个例的强降水落区却有很大差异,分别位于长三角地区的中部和南部。因此,接下来我们利用再分析数据,探究不同移动路径和降水落区中的动力和水汽输送等环流形势配置的差异。

4.2 环流特征

D13050: 850 hPa西南涡2013年5月27日20时东移入海,长三角地区最强降水时段主要出现在26日08时至27日08时,24 h累积降水量最大为116 mm(江苏东海)。图9是27日08时最强降水时段内的环流形势图,500 hPa高度场上[见图9(a)]有一较深厚低槽位于我国中东部,长三角地区受槽前西南气流控制,对流层中低层700 hPa[见图9(b)]和850 hPa上[见图9(c)]低涡位于苏皖北部,低涡位置与此次过程的降水大值区很好对应起来,风场上具有明显的气旋式环流特征,且环流较深厚,降水主要发生在风向发生切变附近,同时低涡南侧不断有较强的西南急流向该区域输送水汽,为此次降水的发生发展提供了有利条件。

D13052: 该个例中850 hPa西南涡于2013年6月8日20时东移入海,最强降水时段出现在6日08时至7日08时,24 h累积降水量最大出现在安徽

黄山达192 mm。从7日08时的位势高度场和风场上看,500 hPa高度场上[见图10(a)],安徽到湖南一带存在一较浅薄的低槽,长三角地区处在槽底附近,受偏西气流影响。此时,700 hPa[见图10(b)]和850 hPa[见图10(c)]上低涡主要位于安徽、湖北、湖南三省交界处,且风场发生明显气旋式辐合,低涡南侧存在西南急流向北输送,此次过程的降水大值区位置主要位于安徽西南部,进一步表明西南涡与降水落区密切相关。

D19049: 此次东移型西南涡个例的850 hPa西南涡于2019年7月10日20时东移入海,最强降水时段出现在7月9日08时至10日08时,浙江缙云24 h累积降水量达到94 mm为最大。分析9日08时的环流背景场,如图11所示,500 hPa高度上[见图11(a)]我国中部有一明显深厚低槽,槽后西北气流强盛,中东部地区主要受槽前西南气流控制。对应着对流层中低层,西南涡位置更加偏南,700 hPa上[见图11(b)]低涡主要位于安徽中南部,850 hPa上[见图11(c)]低涡位置偏南且范围更广,风场的气旋式辐合在三个高度层上均有较为明显的体现,低涡南侧的西南急流较前一个例强度更强,有着更加强盛充沛的暖湿气流输送,而此次西南涡东移个例的降水大值区位置也较偏南,大值区主要位于浙江地区。因此,上述结果表明,西南涡强度位置以及低涡南侧西南急流的输送均会对降水强度和落区产生一定的影响。

4.3 动力条件

辐合辐散的分布特征可以表征垂直运动,图12分别为D13050、D13052、D19049三个个例中降水最强时段内不同层结高度上散度场的分布图。从图中可以看到,D13050个例5月26日20时200 hPa高度上[见图12(a)]安徽、江苏地区上空为一致的辐散区,大值区主要位于山东,辐散中心强度超过 $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,而对流层中低层700 hPa[见图12(b)]和850 hPa[见图12(c)]上相对应的则为气流辐合区,辐合大值区也主要位于江苏北部到山东地区,江苏北部的辐合中心强度超过 $-4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。D13052个例200 hPa高度上[见图12(d)]在浙江中北部上空存在较强的辐散,辐散中心强度超过 $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。与之对应的700 hPa[见图12(e)]和850 hPa[见图12(f)]上则为较一致的辐合区,辐合中心主要位于长三角地区中部,中心强度达到 $-6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以上,上下层辐散辐合很好的对应起来。个例D19049,200 hPa高度[见图12(g)]辐散区位置更加偏南,辐散大值区位置主要位于浙江

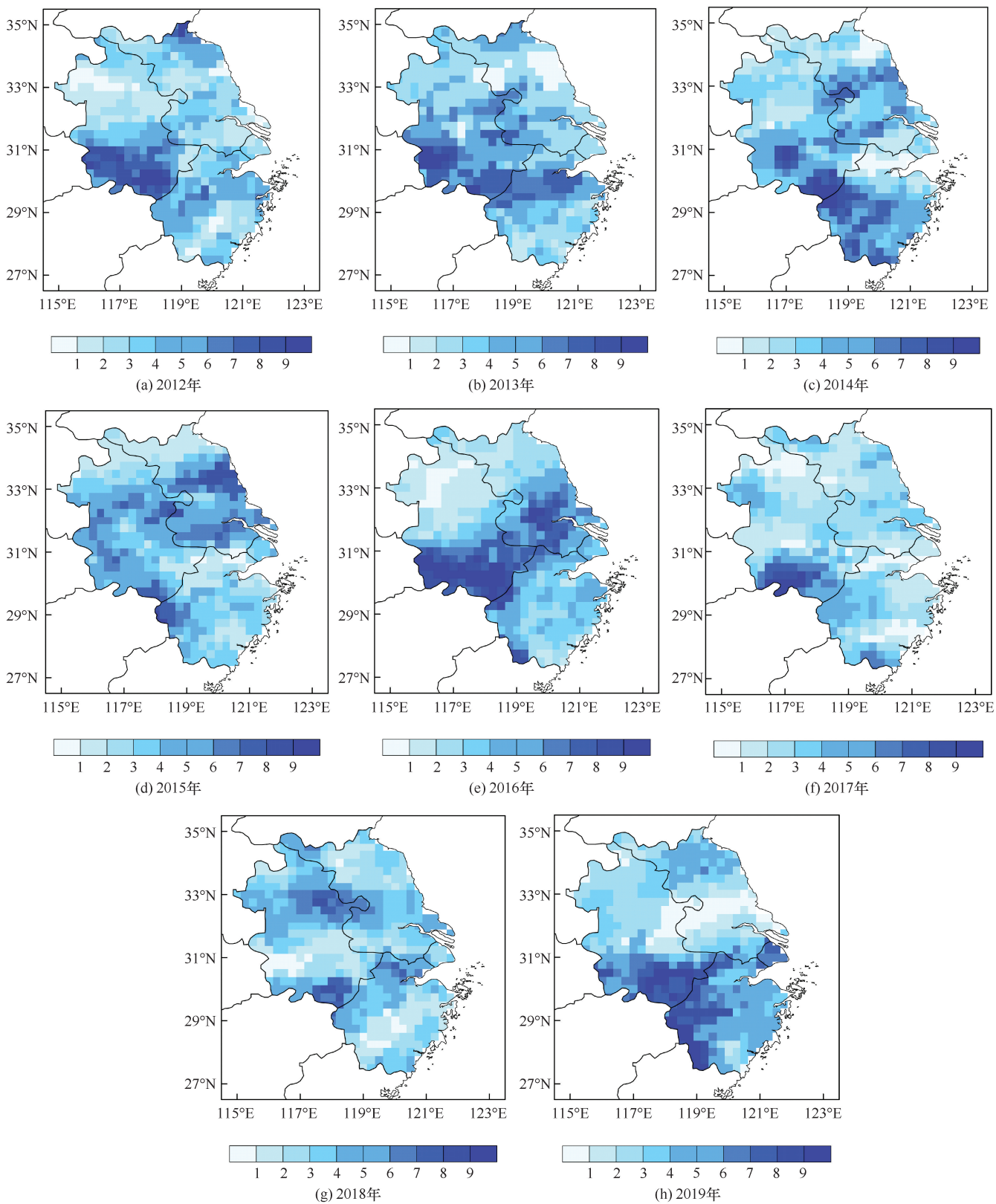


图 7 2012—2019 年逐年长三角地区降水受西南涡影响频次

Fig. 7 Annual frequency of precipitation in Yangtze River Delta region affected by southwest vortices (2012—2019)

南部，大值中心强度为 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。同时，700 hPa [见图 12(h)] 和 850 hPa [见图 12(i)] 高度上，辐合区位置也更加偏南，大值中心主要位于浙江北部，中心强度达到 $-6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。三个个例中均存在低层辐

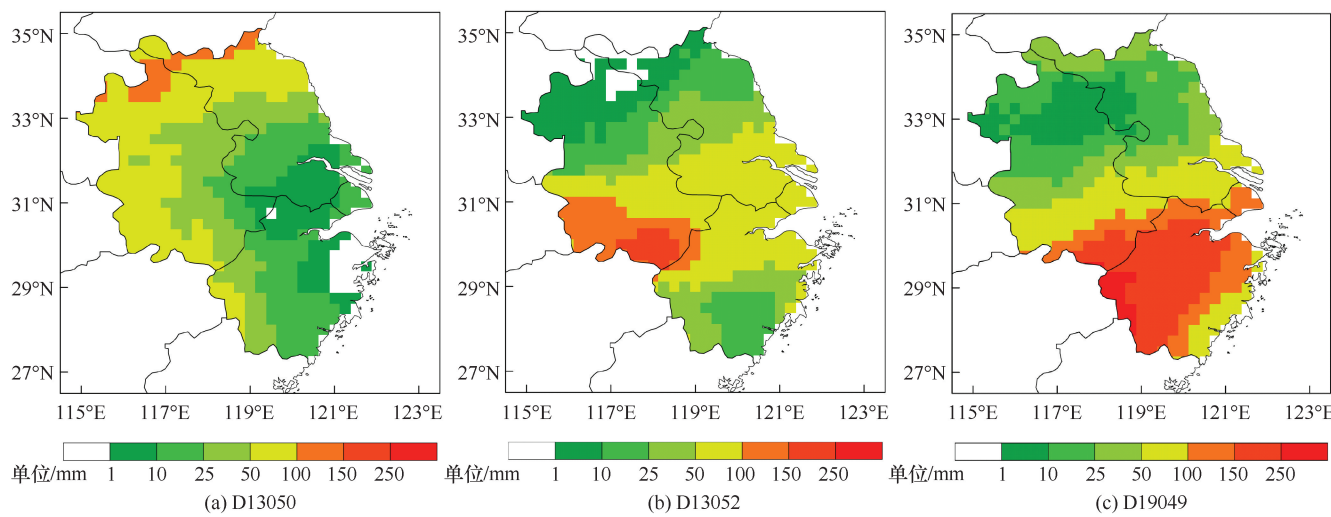


图 8 不同个例过程累积降水量分布
Fig. 8 Distribution of cumulative precipitation for different cases

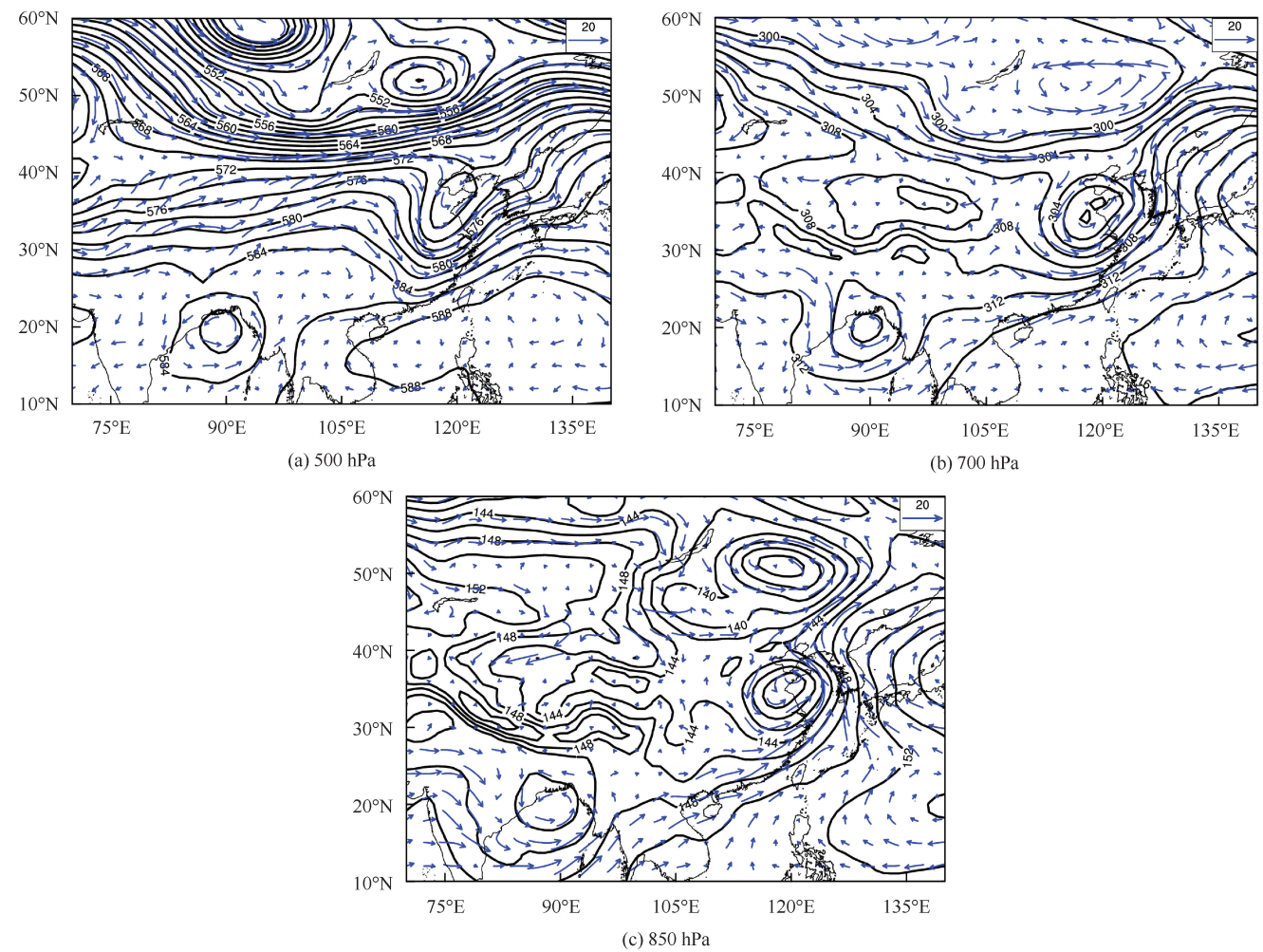
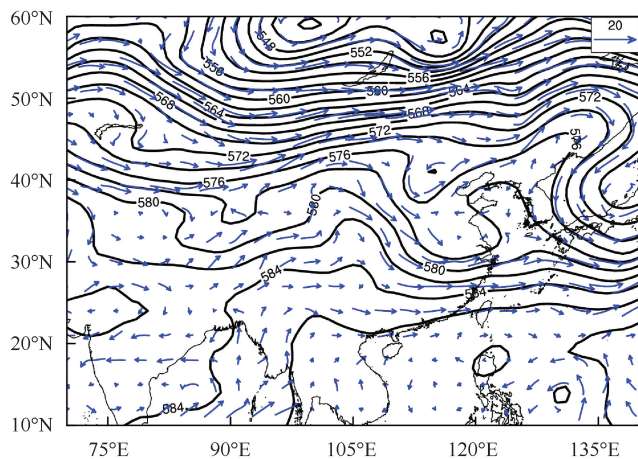
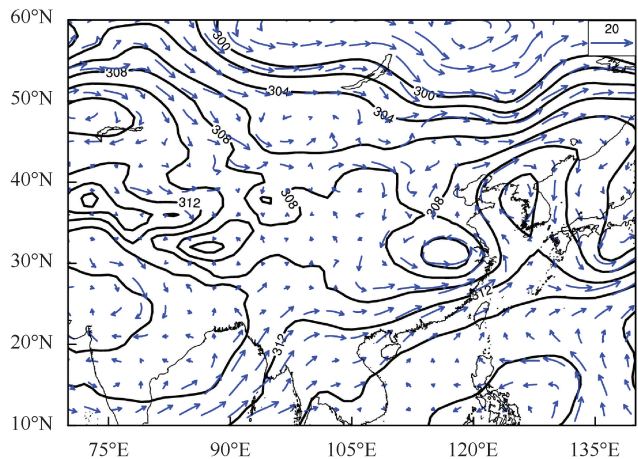


图 9 2013 年 5 月 27 日 08 时位势高度场 (单位: 10 gpm, 等值线) 和风场 (单位: m/s, 矢量)

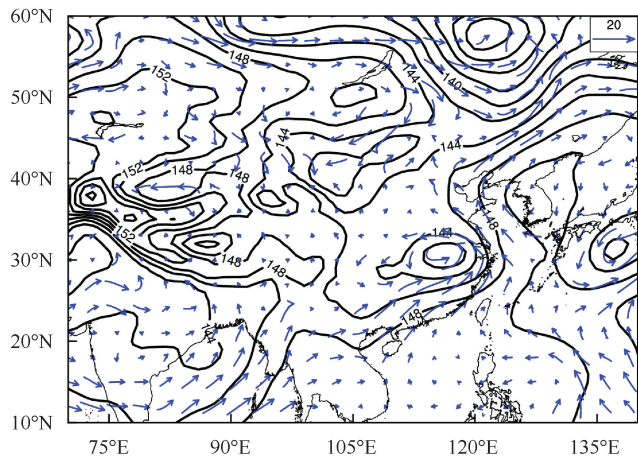
Fig. 9 Geopotential height field (unit: 10 gpm, contour) and wind field (unit: m/s, vector) at 08: 00 on May 27, 2013



(a) 500 hPa



(b) 700 hPa

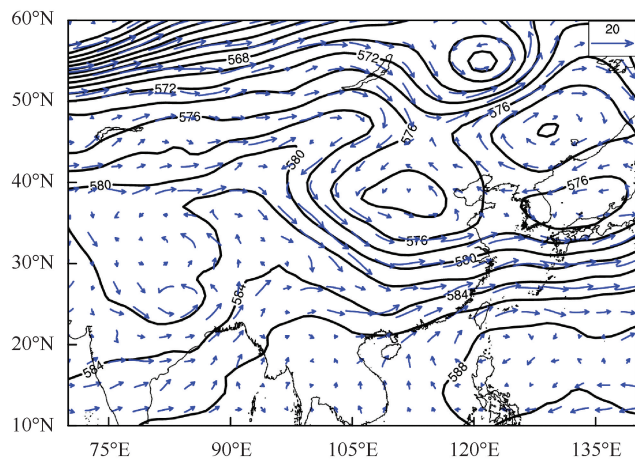


(c) 850 hPa

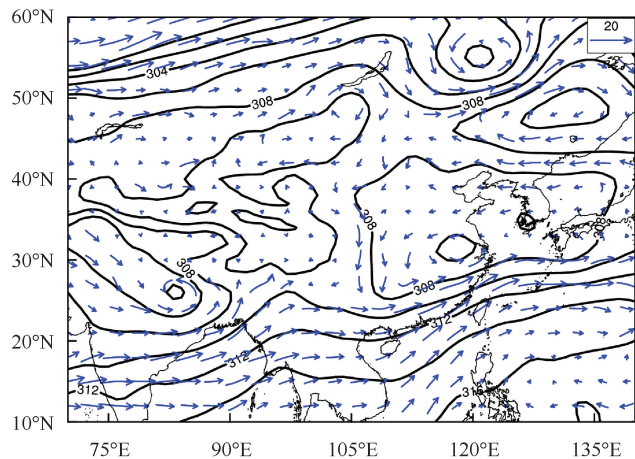
图 10 2013 年 6 月 7 日 08 时位势高度场(单位: 10 gpm, 等值线)和风场(单位: m/s, 矢量)

Fig. 10 Geopotential height field (unit: 10 gpm, contour) and wind field (unit: m/s, vector) at 08: 00 on June 7, 2013

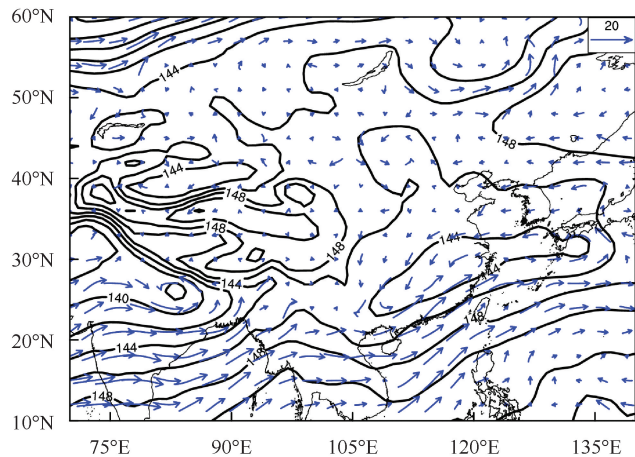
合、高层辐散,在这种高、低层强辐散辐合的配合下,易产生垂直上升运动,为降水的维持增强创造有利条件。



(a) 500 hPa



(b) 700 hPa



(c) 850 hPa

图 11 2019 年 7 月 9 日 08 时位势高度场(单位: 10 gpm, 等值线)和风场(单位: m/s, 矢量)

Fig. 11 Geopotential height field (unit: 10 gpm, contour) and wind field (unit: m/s, vector) at 08: 00 on July 9, 2019

对流层中低层为辐合,高层为辐散,在这样的高低层散度配置下形成大气抽吸效应,有利于产生垂直上升运动。图 13 和图 14 分别是个例中降水最强时段

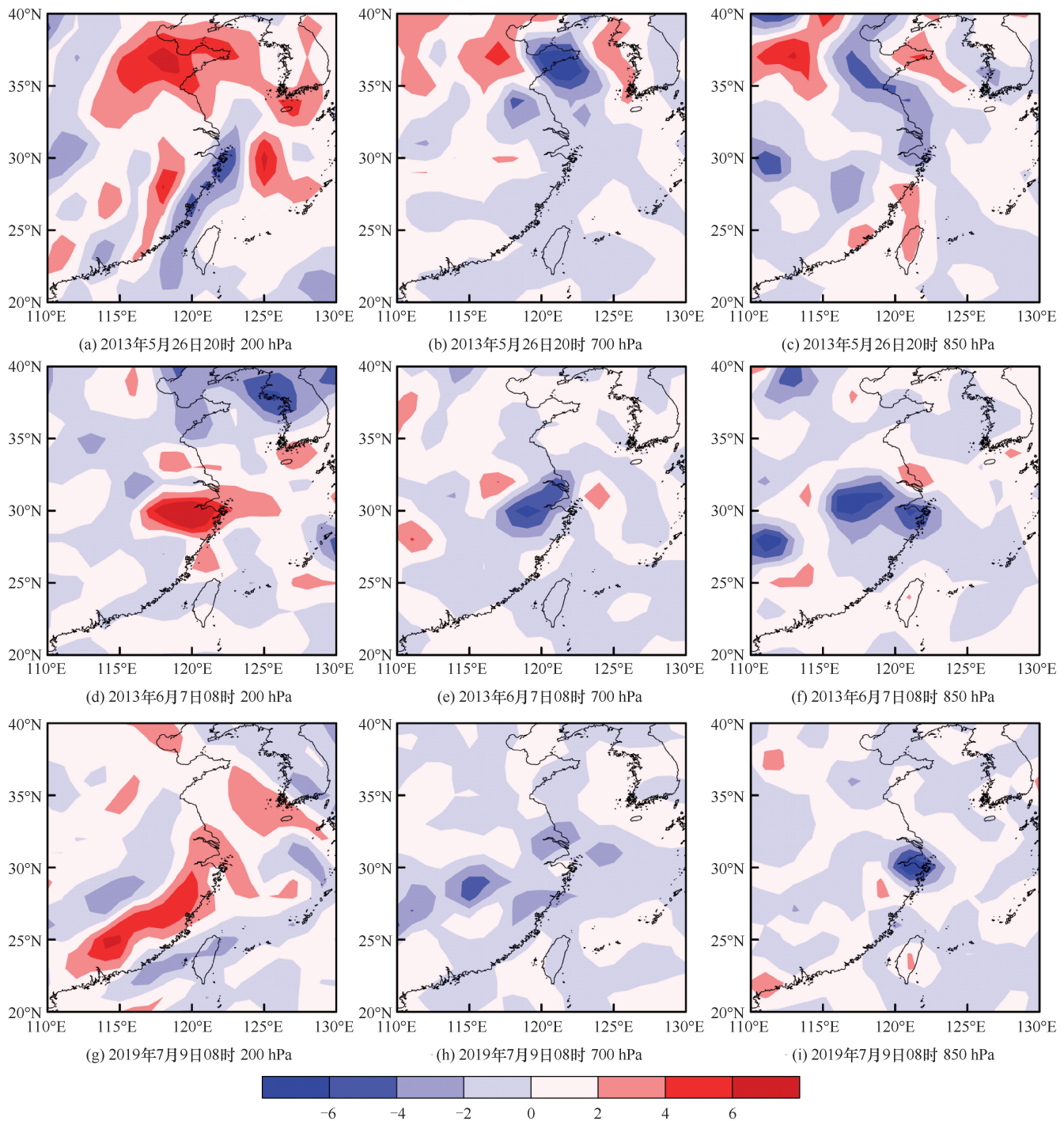


图 12 散度场(单位: 10^{-4} s^{-1})
Fig. 12 Divergence field (Unit: 10^{-4} s^{-1})

内垂直速度和纬向风场与垂直速度合成矢量随高度变化的剖面图。D13050 垂直速度大值区出现在 35°N 附近, 垂直上升运动一直延伸到对流层中高层, 沿 35°N 降水中心附近的垂直纬向环流剖面图上, 117°E—121°E 之间是大范围的强上升气流, 上升运动一直延伸到 300 hPa 以上。D13052 的垂直速度大值区出现在 30°N 附近, 大值中心出现在 500 hPa 左

右, 强度超过 0.4 m/s, 垂直上升运动一直延伸到 200 hPa 以下, 且 117°E—120°E 之间是大范围的强上升气流, 上升运动一直延伸到 300 hPa 以上。D19049 个例的垂直速度大值区出现在 28°N 附近, 中心位于 300 hPa 左右, 对流层中高层为一致的上升运动。此外, 沿 28°N 附近的垂直纬向环流剖面图也可以看出相似的特征, 强上升气流主要出现在 119°E 附

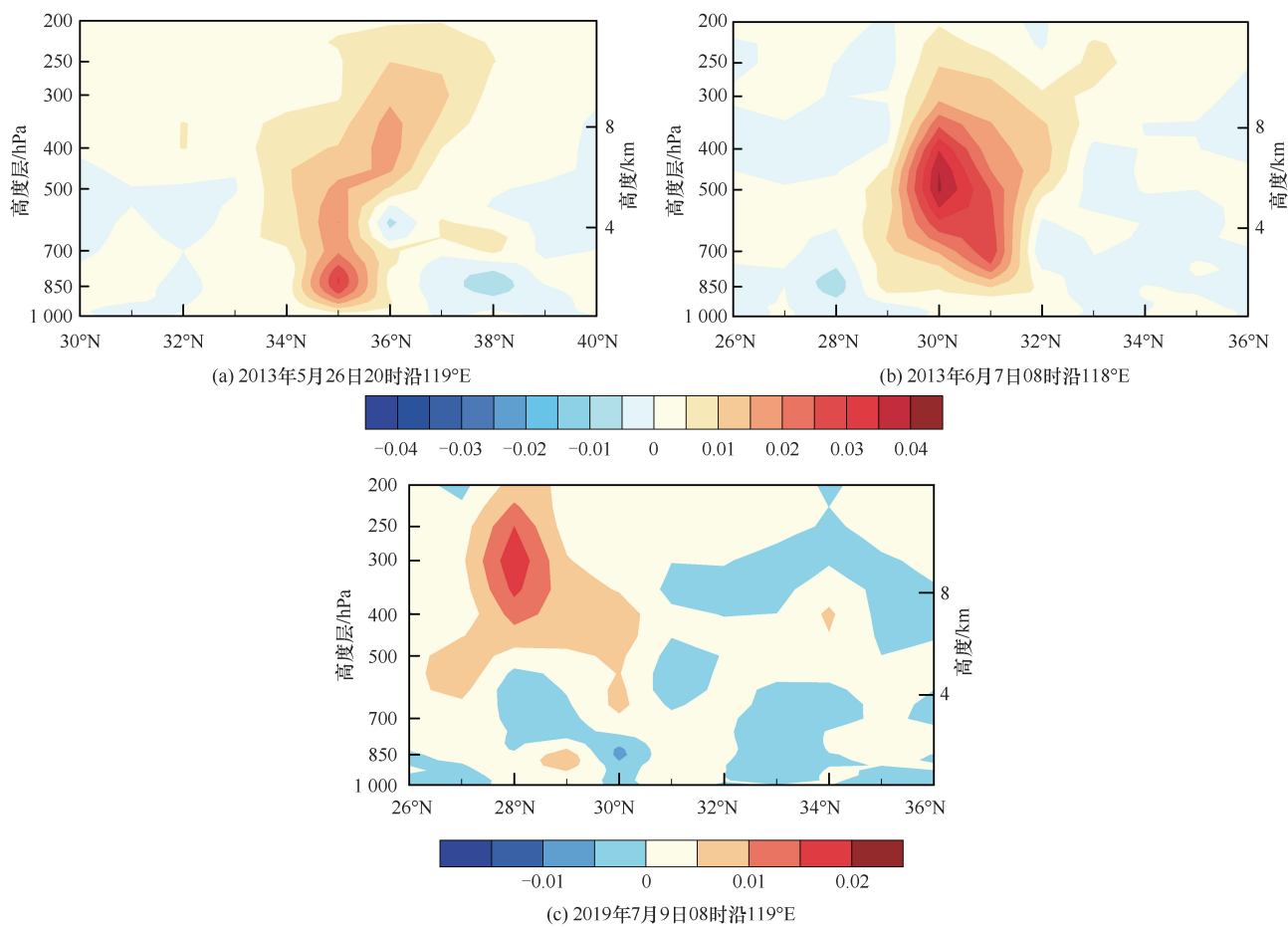


图 13 垂直速度剖面图 (单位: m/s)
Fig. 13 Vertical velocity profiles (Unit: m/s)

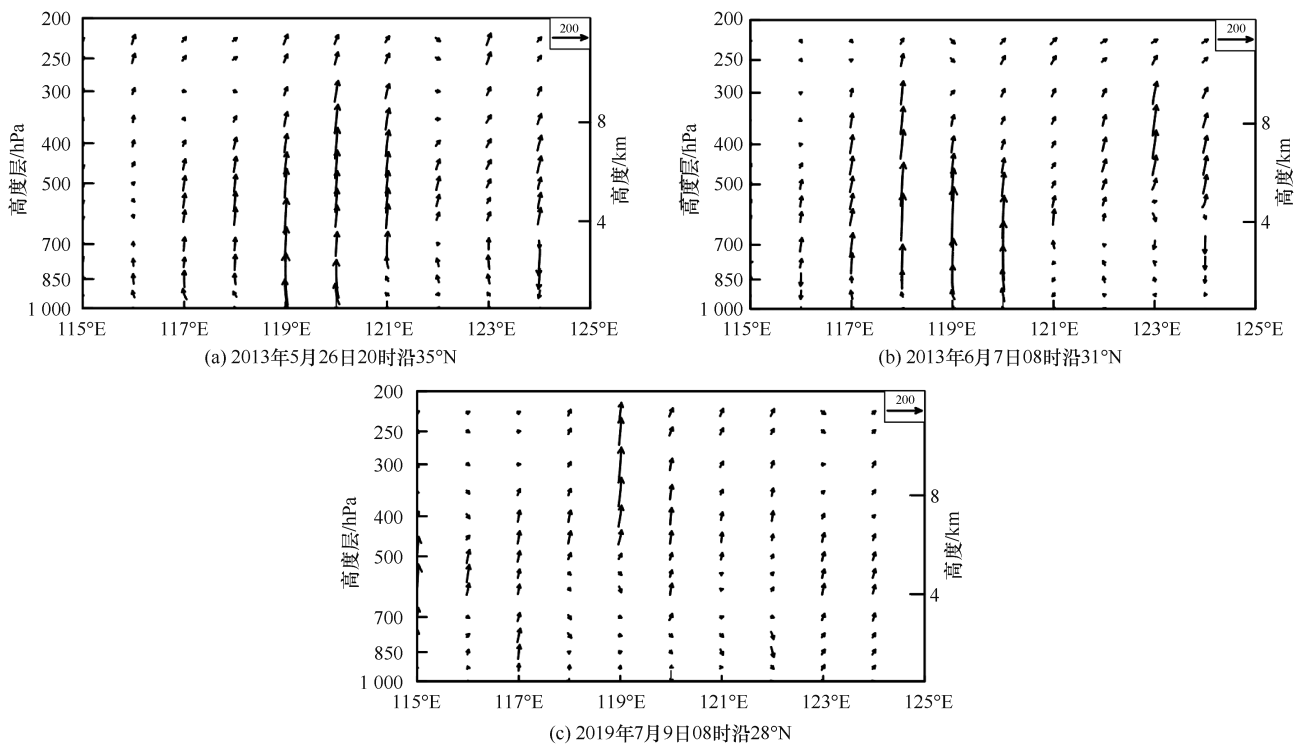


图 14 纬向风场与垂直速度合成矢量随高度变化的剖面图 (单位: Pa/s)
Fig. 14 Vertical profiles of composite vector of zonal wind field and vertical velocity (Unit: Pa/s)

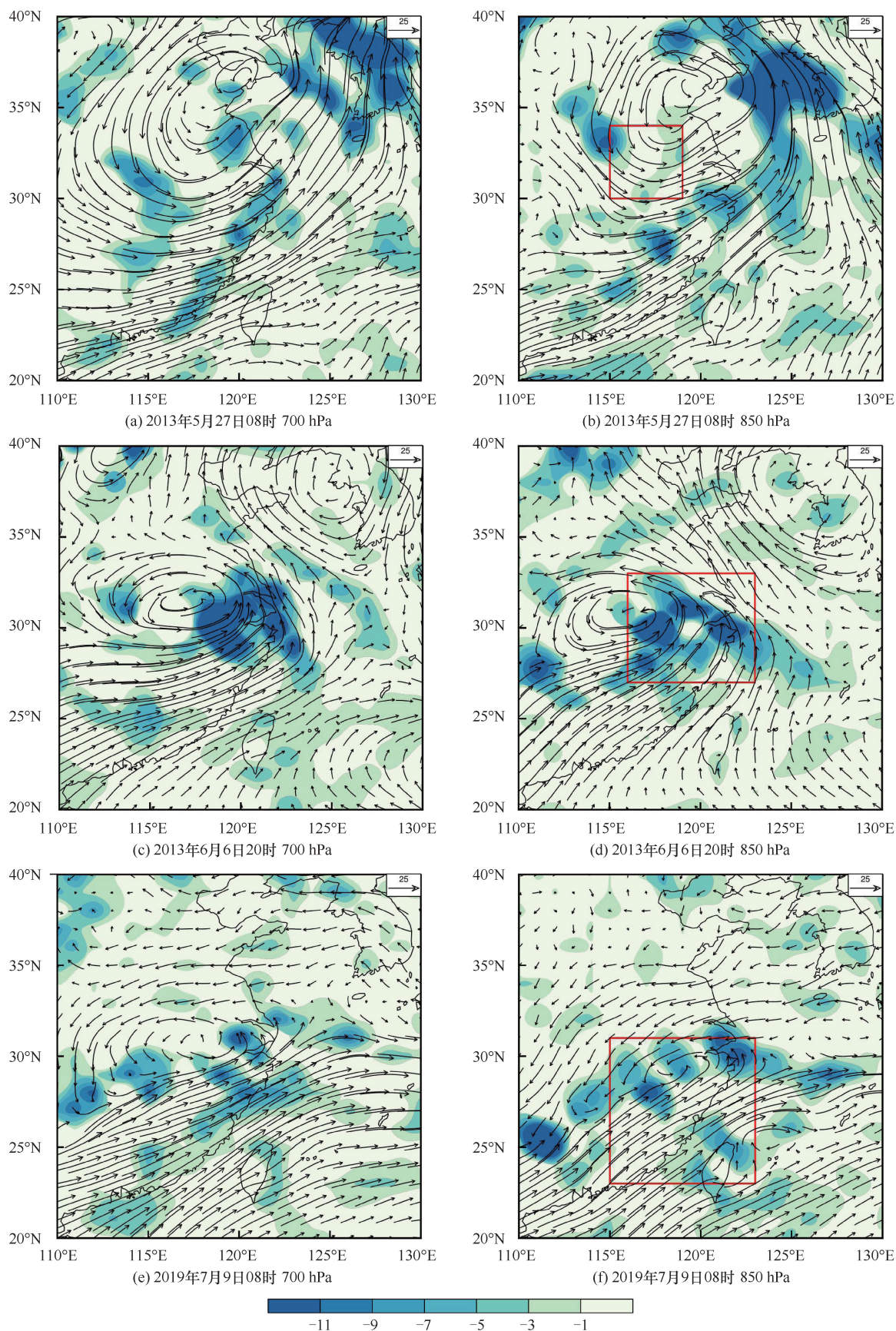


图 15 水汽通量矢量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 矢量)和水汽通量散度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 阴影)

Fig. 15 Water vapor flux vector (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, vector) and water vapor flux divergence (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, shadow)

近的 500 hPa 高度以上。综合垂直速度和经向垂直环流可以看到,上升运动均与降水大值区很好对应起来,说明降水与垂直运动密不可分。

4.4 水汽条件

图 15 是 700 hPa 和 850 hPa 单层水汽通量矢量和水汽通量散度分布图。就水汽输送情况来看, D13050:2013 年 5 月 27 日 08 时[见图 15(a)(b)]从水汽条件上可以看到,孟加拉湾和南海西部的暖湿气流与来自北方的干冷空气在山东地区相遇形成涡旋,且强度较强、范围较大,低涡南侧不断有西南急流向长三角地区内输送水汽,在长三角一带均出现水汽通量散度大值区。同时,700 hPa 上在江苏北部存在一个水汽通量散度强度中心,表明该区域存在强烈的水汽辐合,水汽辐合区与降水大值区相对应。D13052:2013 年 6 月 6 日 20 时[见图 15(c)、(d)],700 hPa 和 850 hPa 上形势较一致,水汽均在 31°N 附近形成涡旋,此时水汽通量散度大值区位于涡旋区右侧,即安徽南部地区,与降水强度中心很好的对应起来,表明该区域水汽辐合强烈,水汽充沛,降水明显。D19049:2019 年 7 月 9 日 08 时[见图 15(e)(f)]低涡中心主要位于 30°N 附近,其南侧西南急流强度较强,不断将孟加拉湾和南海西部的水汽向长三角地区输送。700 hPa 上水汽通量散度大值区位于涡旋中心东南侧,即安徽南部和浙江大部地区,水汽辐合明显,对应着此次过程的降水量大值中心。以上三个个例中,低涡东南侧均存在着西南急流,这有利于将热带充沛的水汽输送到长三角地区,为了定量表述水汽输送在降水中的作用,我们利用水汽收支对降水大致落区进行了量化。如图 15(b)(d)(f)所示,850 hPa 红色框区表示三个个例的降水大值区域,其 850 hPa 等压面的水汽净流入分别约为 $20.3\text{ kg}\cdot\text{m/s}$ 、 $24\text{ kg}\cdot\text{m/s}$ 和 $7.9\text{ kg}\cdot\text{m/s}$,表示该区域内均有水汽的累积,为暴雨的发生发展提供了有利的水汽条件。

5 结 论

本文根据《西南低涡年鉴》资料,结合 CN05.1 的 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 逐日降水数据和 ECMWF ERA5 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 全球再分析资料,对 2012—2019 年西南涡特征和受西南涡东移影响而产生的降水特征进行统计分析,并选取了 D13050(2013 年 5 月 23—27 日)、D13052(2013 年 6 月 5—8 日)和 D19049(2019 年 7 月 8—15 日)这三个东移型西南涡展开个例分析。首先探究西南涡的统计特征,主要根据西南涡移向、频次和环流形势差异等展开分析。然后筛选出东移型西南

涡,通过研究西南涡东移对长三角地区 4—9 月降水的贡献,分析二者的相关关系。最后,选取三个受西南涡东移影响的长三角地区降水个例,进一步探究西南涡位置与降水落区的关系。通过研究得到以下结论。

(1)统计 2012—2019 年西南涡特征情况,移出源地的西南涡占总生成数的 30.3%,西南涡移出源地的路径特征主要表现为向东移动,且多发生在每年的 3—6 月。分析西南涡移出的大气环流形势发现,东亚大槽的强弱和西太副高位置的变化是影响西南涡发生东移的关键环流因素,东移型西南涡的环流背景上东亚大槽更加深厚,西太副高西伸明显,且青藏高原东侧存在低槽,其南侧西风偏强,有着更加充足的水汽输送,从而有利于西南涡移出源地。

(2)2012—2019 年长三角地区降水过程具有明显的年循环特征,其中 4—9 月降水量分布存在着显著的年际变化,平均降水量超过 600 mm,2014—2016 年雨季产生的降水量较多。长三角区域受西南涡影响产生的总降水量基本超过 1 000 mm,西南涡影响的贡献占比约为长三角地区总降水量的 10%以上,降水存在明显的空间不均匀性,最大贡献占比区域主要位于安徽西部,降水强度主要集中在暴雨到大暴雨量级,表明东移型西南涡对长三角地区降水具有重要贡献。

(3)进一步通过选取降水落区存在明显差异的西南涡影响降水个例进行对比分析,结果表明不同个例东移型西南涡中心位置均能与长三角地区降水大值区较好的吻合。其中值得关注的是,低空辐合、高空辐散的动力配置,以及充足的水汽条件的共同作用是西南涡触发长三角区域暴雨发生的关键条件,降水大值区与西南涡移动路径、低涡南侧西南暖湿气流的强度、高低空强辐合辐散区位置基本一致。

加强研究西南涡对长三角地区区域性暴雨发生发展的动力、热力机制问题,对发展长三角区域暴雨的预报方法具有非常重要的意义。然而,本文也存在一定的局限性。首先,受西南涡资料的限制,本项目仅研究了 2012—2019 年西南涡影响长三角区域降水的统计特征,并选择了三个东移型西南涡个例展开动力和水汽诊断分析,未来还需要搜集 2020 年至最新年份的西南涡资料和降水个例,通过动力、热力和水汽等物理诊断量来加深对影响长三角降水机制的理解。其次,西南低涡系统并非独立的天气系统,其发生发展受到多尺度天气系统的叠加作用影响,西南涡降水在长三角中的占比在今后可能需要开展不同大尺度环

流强迫下的数值试验。需要指出的是,复杂地形强迫被认为是影响暴雨落区的重要因素,但以往研究大多关注高原和盆地地形对西南涡发展演变的影响,主要聚焦于展开西南涡与长江上游地区降水关系的研究,缺乏对长三角地区地形及其相关物理过程与西南涡降水落区的影响研究,因此有必要开展长三角地区地形敏感性试验,进一步厘清地形高度差对西南涡降水落区强度的潜在影响,为实际预报东移型西南涡可能导致长三角地区的暴雨天气提供更加精准的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 朱乾根. 天气学原理和方法[M]. 4版. 北京:气象出版社, 2015.
- ZHU Q G. Principles and Methods of Meteorology[M]. 4th Edition. Beijing: China Meteorological Press, 2015.
- [2] YEH T C. The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945-46[J]. Tellus, 1950, 2(3): 173-183.
- [3] BOLIN B. On the influence of the Earth's orography on the general character of the westerlies[J]. Tellus, 1950, 2(3): 184-195.
- [4] 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010年夏季西南涡加密观测科学试验[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 80-84.
- LI Y Q, ZHAO X B, DENG B. Intensive observation scientific experiment of the southwest vortex in the summer of 2010[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(4): 80-84.
- [5] 陈艳. 西南低涡的气候特征及与降水的关系研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2007.
- CHEN Y. Climatic Characteristics of Southwest Vortex and Its Relationship with Precipitation[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007.
- [6] 宋娜, 冯鑫媛. 移动型与源地消型西南涡的气候特征[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(1): 59-67.
- SONG N, FENG X Y. Climate characteristic of moving-out and non-moving-out southwest vortices[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2021, 41(1): 59-67.
- [7] 陈忠明, 闵文彬. 西南低涡活动的统计研究/青藏高原气象学研究文集[M]. 北京:气象出版社, 2004.
- CHEN Z M, MIN W B. Statistical Study on the Activity of Southwest Vortex/Collection of Tibetan Plateau Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- [8] QING Y Y, DENG Z R, ZHOU S W, et al. Significant scales differences between summer and winter southwest vortex generated in Sichuan Basin and the associated mechanisms[J]. Atmospheric Research, 2024, 304: 107416.
- [9] FENG X Y, LIU C H, FAN G Z, et al. Climatology and structures of southwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis[J]. Journal of Climate, 2016, 29(21): 7675-7701.
- [10] 高守亭. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用[J]. 大气科学, 1987, 11(3): 263-271.
- GAO S T. The dynamic action of the disposition of the fluid fields and the topography on the formation of the southwest vortex[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1987, 11(3): 263-271.
- [11] 赵平, 孙淑清. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断(一): 地形动力作用和潜热作用对西南低涡影响的数值试验对比分析[J]. 大气科学, 1991, 15(6): 46-52.
- ZHAO P, SUN S Q. Numerical simulation and diagnosis of the formation of SW vortex Part I: An analysis of numerical simulation of the effects of topography and latent heat on SW vortex[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1991, 15(6): 46-52.
- [12] 何光碧. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 2012, 38(2): 155-163.
- HE G B. Review of the southwest vortex research[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(2): 155-163.
- [13] 赖欣, 王庆语, 皇甫静亮, 等. 西南涡的气候学研究进展[J]. 大气科学, 2023, 47(6): 1983-2000.
- LAI X, WANG Q Y, HUANGFU J L, et al. Progress in climatological research on the southwest China vortex[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(6): 1983-2000.
- [14] 吴国雄, 刘还珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1999, 57(1): 1-15.
- WU G X, LIU H Z. Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(1): 1-15.
- [15] 刘国忠, 丁治英, 贾显锋, 等. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究[J]. 气象, 2007, 33(1): 45-50.
- LIU G Z, DING Z Y, JIA X F, et al. The statistical research on activity of southwest vortex and flood-producing vortex influencing south China[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(1): 45-50.
- [16] 赵思雄, 傅慎明. 2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1059-1075.
- ZHAO S X, FU S M. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan province and Chongqing in September 2004[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1059-1075.
- [17] LI C, JIANG X W, FU S M, et al. Latent heating effect on the intensification of southwest vortices over the downstream area of the second-step terrain in China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2024, 129(17): e2024JD041036.
- [18] FENG S L, JIN S L, FU S M, et al. Formation of a kind of heavy-precipitation-producing mesoscale vortex around the Sichuan Basin: An along-track vorticity budget analysis[J]. Atmospheric Science Letters, 2020, 21(1): e949.
- [19] ZHOU W L, LI Y Q, LIU C, et al. Physical mechanism of the development and extinction of the China southwest vortex[J]. Atmosphere, 2023, 14(2): 337.
- [20] SONG N, FENG X Y, FENG C Y. Large-scale circulation characteristics of summer moving-out and non-moving-out southwest vortices in the Sichuan Basin[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2025, 156(9): 494.
- [21] 潘畅, 李建, 宇如聪. 东移西南低涡空间结构的气候学特征[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(1): 60-70.
- PAN Y, LI J, YU R C. Climatic characteristics of the spatial structure of the eastward-moving southwest vortex[J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(1): 60-70.

- [22] 段炼. 汛期西南低涡移向频数的年际变化与降水[J]. 气象, 2006, 32(2): 23-27.
DUAN L. Relationship between frequency of moving direction of southwest vortex and rainfall in flood season[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(2): 23-27.
- [23] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京: 气象出版社, 1986.
LU J H. Introduction to the Southwest Vortex[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1986.
- [24] 晋建设, 王超, 王淑娟, 等. 2007年7月12—15日河南省大暴雨天气诊断分析[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(4): 64-70.
JIN J S, WANG C, WANG S J, et al. Diagnostic analysis of heavy rainstorm in Henan province from 12 to 15 July 2007[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2010, 33(4): 64-70.
- [25] 陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 等. 1998年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 162-167.
CHEN Z M, XU M L, MIN W B, et al. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(2): 162-167.
- [26] 高安宁, 陈见, 李生艳, 等. 两次西南低涡造成广西暴雨差异的对比分析[J]. 气象科学, 2009, 29(4): 4557-4563.
GAO A N, CHEN J, LI S Y, et al. Comparison and analysis on the differences between two torrential rain events caused by southwest vortex in Guangxi[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(4): 4557-4563.
- [27] 张朝辉, 李国平, 黄楚惠. 一次引发四川盆地南部暴雨的西南低涡湿旋转量分析[J]. 高原山地气象研究, 2011, 31(1): 46-50.
ZHANG C H, LI G P, HUANG C H. Wet rotation analysis of southwest vortex causing a heavy rain in southern Sichuan Basin[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2011, 31(1): 46-50.
- [28] ZHOU C H, LI Y Q. Dynamic and thermodynamic characteristics of warm-sector rainstorms caused by the southwest China vortex in Sichuan Basin[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2024, 155(8): 7095-7108.
- [29] ZHOU C H, ZHANG J, XIAO H R. Comparative analysis of energy characteristics of two southwest vortices in Sichuan under similar circulation backgrounds[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2024, 30(2): 167-178.
- [30] 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, 2018, 41(2): 198-206.
- [31] 胡伯威, 潘鄂芬. 梅雨期长江流域两类气旋性扰动和暴雨[J]. 应用气象学报, 1996, 7(2): 138-144.
HU B W, PAN E F. Two kinds of cyclonic disturbances and their accompanied heavy rain in the Yangtze River valley during the Mei-yu period[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1996, 7(2): 138-144.
- [32] 傅慎明, 于翥, 王东海, 等. 2010年梅雨期两类东移中尺度涡旋的对比研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(8): 1282-1300.
FU S M, YU F, WANG D H, et al. Comparative study of two types of eastward-moving mesoscale vortices during the 2010 Mei-yu period[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 42(8): 1282-1300.
- [33] 刘建勇, 谈哲敏, 张熠. 梅雨期3类不同形成机制的暴雨[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 452-466.
LIU J Y, TAN Z M, ZHANG Y. Study of the three types of torrential rains of different formation mechanism during the Mei-yu period[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 452-466.
- [34] CHIEN F C, CHIU Y C. The impact of large-scale environments and a southwest vortex on heavy rainfall in southern Taiwan in late May 2020[J]. Monthly Weather Review, 2024, 152(3): 745-767.
- [35] MAI Z, FU S M, SUN J H, et al. Key statistical characteristics of the mesoscale convective systems generated over the Tibetan Plateau and their relationship to precipitation and southwest vortices[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41: E875-E896.
- [36] 晏红明, 肖子牛, 薛建军. 初夏西北太平洋副高东西变动对中国南部降水东西差异的影响[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 765-781.
YAN H M, XIAO Z N, XUE J J. The influence of east-west displacement of Northwestern Pacific subtropical high on east-west difference of precipitation in southern China in early summer[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 765-781.
- [37] 周春花, 肖递祥, 郁淑华. 四川盆地2020年“8.11”特大暴雨过程中尺度系统演变特征[J]. 热带气象学报, 2022, 38(6): 812-824.
ZHOU C H, XIAO D X, YU S H. Evolution characteristic of mesoscale system during “8.11”, 2020 torrential rain in Sichuan Basin[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, 38(6): 812-824.
- [38] 周春花, 肖递祥, 陈朝平. 四川盆地西部连续两次特大暴雨过程的西南涡特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(1): 26-33.
ZHOU C H, XIAO D X, CHEN Z P. Characteristics of southwest vortex during two consecutive heavy rains in western Sichuan Basin[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2023, 43(1): 26-33.

(责任编辑 王海锋)