

刘晓波, 储海. 2015. 一次西南低涡东移引发长江中下游暴雨诊断研究. 气象, 41(7): 825-832.

一次西南低涡东移引发长江中下游 暴雨的诊断研究^{* 1}

刘晓波 储 海

上海中心气象台, 上海 200030

提 要: 利用常规观测资料和 NECP 再分析资料, 对 2013 年 6 月 6—7 日西南低涡东移加强发展造成长江中下游大暴雨过程进行了诊断分析, 重点探讨了西南低涡东移和发展维持的物理机制以及最强降水的变化特征。结果表明, 沿着 700 hPa 高空切变线东移的西南低涡是造成此次长江中下游地区暴雨的直接影响系统, 西南低涡沿着 700 hPa 切变线东移发展, 深厚阶段正涡度柱伸展到 400 hPa 高度, 自下而上呈近垂直结构。西南低涡附近低层辐合与高层辐散的大尺度环境条件、西南低涡与西南低空急流耦合发展动力结构、低空暖平流和高空槽前正涡度平流输送等条件是导致西南低涡东移到长江中下游后加强发展的主要因子。与西南低涡相伴随的强降雨区主要位于低涡南部 3 个纬距以内, 该处的西南季风和副高西南侧东南气流两支水汽输送的汇合为暴雨发生提供了充沛的水汽和对流不稳定能量, 而对流层中低层携带的冷空气侵入低层低涡的后部, 不仅加强了低涡的斜压性, 也促进了上冷下暖不稳定层结的产生和发展, 为强降雨的发生提供了不稳定对流触发条件。

关键词: 西南低涡, 低空急流, 梅雨锋暴雨, 冷空气侵入

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 07. 004

Diagnostic Analysis of One Heavy Rainfall Process Induced by Southwest Vortex in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River

LIU Xiaobo CHU Hai

Shanghai Meteorological Centre, Shanghai 200030

Abstract: A heavy rainfall event induced by the moving and developing southwest vortex occurred in the middle-lower reaches of the Yangtze River from 6 to 7 June 2013. Using conventional observation and NCEP reanalysis data, diagnostic analysis was done on this event, especially on the physical mechanism of the vortex moving and developing and on the variability of the rainfall climax. The results show that the southwest vortex moving easterly along the 700 hPa shear line is the direct impact system to the heavy rainfall. Southwest vortex moves eastward and develops, and when reaching its deep phase, positive vorticity column stretches up to 400 hPa height with a nearly vertical structure in the relative vorticity chart. Large-scale condition of lower-level convergence and upper-level divergence in the vicinity of southwest vortex, dynamic structure of the coupling of southwest vortex and southwest low-level jet, positive vorticity advection in front of the high-level trough and other favorable weather conditions are the main causes for the vortex reinforcement when it gets to the middle-lower reaches of the Yangtze River. Heavy rainfall area that accompanies the southwest vortex is mainly located within 3 latitudes to the south and east side of the vortex. Convergence of two water vapor advection provides abundant humidity and latent unstable en-

* 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2013-021)资助

2014 年 3 月 7 日收稿; 2015 年 1 月 8 日收修定稿

第一作者: 刘晓波, 从事天气预报和暴雨研究. Email: lxb9326@sina. com

ergy for the rainfall. One is the southwest monsoon flow, and the other is the southeast flow from the southwest side of the tropical high. Besides, cold air from the middle-lower level of troposphere coming down to the rear side of the vortex reinforces the development of vortex, promoting an unstable stratification, which provides convective triggering mechanism to the heavy precipitation.

Key words: southwest vortex, low level jet, Meiyu front rainfall, cold air invasion

引言

长江中下游地区是我国经济技术发达,人口密集的重要地区,梅雨暴雨所造成的洪涝灾害对该地区的影响十分突出,几乎每年夏季该地区都发生梅雨暴雨所引起的洪涝灾害,造成国民经济和生命财产的重大损失,因此一直是气象学者研究的重点之一。

许多研究(陶诗言等,1980;张丙辰,1990;丁一汇等,1993;高守亭等,2003;孙兴池等,2015)表明,我国长江中下游梅雨锋降水有很大的时空不均匀性,一系列中尺度涡旋扰动在长江中下游某些特定地区的发生、发展是造成梅雨锋上强降水的主要原因之一。胡伯威等(1996)把长江中下游的梅雨锋气旋性扰动分为两类,一类是沿青藏高原背风侧向东移过来的 α 中尺度西南低涡系统,另一类是梅雨锋切变线上局地生成的中尺度低涡。同时指出西南低涡的移出可导致降水的出现,青藏高原大地形的绕流和自身干对流上升形成的高空冷槽起到了关键作用。杨帅等(2006)发现高空急流的走向与西南低涡的活动关系密切,当我国东部位于西北风急流时,西南低涡稳定少动,位于西风急流时,西南低涡快速东移。并进一步指出在西南低涡斜压性未建立之前,暴雨区可位于低层西南风急流左侧的任何位置,当低涡的斜压性加大,出现暖空气的作用时,暴雨区均出现在西南风急流的左前方。在西南涡引发暴雨的机制方面,王新敏等(2009)认为冷空气侵入路径是影响西南低涡发展移动的关键。傅慎明等(2012)研究也指出长江中下游梅雨锋暴雨与中尺度低涡有着很密切的联系,生成于四川盆地的西南低涡是造成梅雨期暴雨的一类主要低涡系统,其一般位于对流层低层,自上而下发展,孟加拉湾和南海是其发生发展的主要水汽源。刘建勇等(2012)研究指出,西南低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

一种主要的形态,并指出高空槽南移带动高空西风急流带南移,高低空急流的耦合作用也是涡旋迅速发展的重要因素之一。王新敏等(2009)、陈贵川等(2013)和陈永仁等(2013)都指出冷空气侵入路径是影响西南低涡发展移动的关键。杜倩等(2013)西南低涡暴雨云团出现在西南涡东南和南侧的南风盛行区域,云团发展伴有低空急流加强,同时,云系发展与500 hPa正涡度平流的贡献有关。然而,目前的研究更多地侧重于西南低涡的发生发展、移动机制和大尺度环流条件研究(何光碧,2012;刘婷婷等,2014;宗志平等,2013)。对西南低涡作为一个中尺度系统其长距离移到长江中下游以后的结构特征、发生发展的动力学机制研究还较缺乏,对西南低涡产生暴雨的机制机理还需要进一步加强观测和模拟研究。

2013年6月6—8日,受西南低涡东移加强发展的影响,长江中下游沿江地区发生了当年入梅以来首场区域性暴雨过程,湖北、安徽中南部、江西北部、浙江北部、江苏南部和上海等地均出现了暴雨,局地大暴雨,造成了严重农田渍害和城市内涝,经济损失严重(张峰等,2013)。本文利用加密观测资料以及NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,对这次西南低涡东移引起的长江中下游地区暴雨过程进行诊断分析,重点探讨西南低涡东移发展结构特征、加强的原因及引发大暴雨的机制,以期为今后西南低涡引发长江中下游梅雨锋暴雨预报提供一些参考。

1 西南低涡及暴雨过程描述

1.1 暴雨概况

从2013年6月6—7日逐24 h雨量分布图(图1a和1b)可以得到,强降水沿着长江及其附近范围内分布,主要出现在湖北西南部、安徽南部、浙江西北部和上海。6日大于100 mm的站点达到30个,7日有6个,最大降水量出现在6日,其中江西都昌县达205 mm,湖北武汉193 mm,黄山192 mm等。而从湖北武汉和上海宝山两个观测站6日08时

到 8 日 08 时的 6 h 雨量变化来看(图 1c 和 1d),武汉强降水发生在 6 日下午到半夜, 6 h 最大雨量 101 mm,24 h 雨量为 193 mm;宝山强降水出现在 7 日下午到上半夜,7 日 20 时 6 h 最大雨量为 49 mm,24 h 雨量为 82 mm。可见,此次暴雨过程主要发生在 6 日早

晨到 7 日白天,6 h 最大雨量出现在 6 日夜里。

此外,此次西南低涡暴雨过程还在途经地区造成大风天气,大风主要分布在西南低涡的南部和东部,其中,湖南省衡山县最大风速为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,江西省景德镇 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,上海市奉贤 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

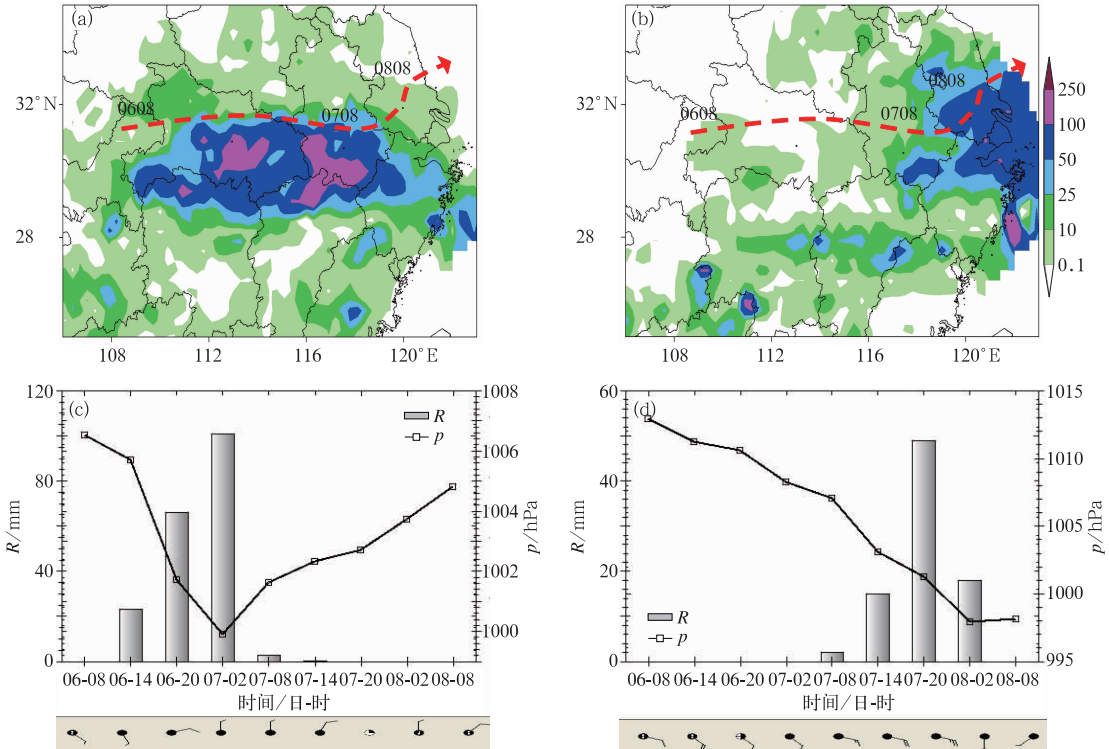


图 1 2013 年 6 月 6 日 08 时至 7 日 08 时(a)、7 日 08 时至 8 日 08 时(b)24 h 雨量分布图(a,b,单位:mm,图中粗虚线为 700 hPa 西南低涡移动路径)和湖北武汉站(c)、上海宝山站(d)6 月 6 日 08 时至 8 日 08 时地面单站气压、雨量和风矢量时序图

Fig.1 24 h accumulated precipitation from (a) 08:00 BT 6 to 08:00 BT 7, and from (b) 08:00 BT 7 to 08:00 BT 8 June 2013 (a, b, unit: mm, bold dashed line indicates path of the 700 hPa southwest vortex); station time series of pressure and precipitation at Wuhan (c) and Baoshan (d) Stations

1.2 西南低涡概述

造成此次长江中下游地区暴雨的西南低涡于 5 日白天形成于青藏高原南侧的四川盆地,生成后沿着 700 hPa 切变线东移,途径湖北全境、安徽南部、江苏南部和上海,于 8 日上午经长江口以北江苏启东附近进入东海北部海域(图 1a 和 1b)。其中,西南低涡生成初始阶段,以 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度向东较快移动,7 日 08 时左右进入安徽南部大别山地区后移速减慢,移动速度大约为 $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。强降雨区主要分布在与 700 hPa 西南低涡南部 3 个纬距以内,雨区随着低涡的东移向东移动(图 1a 和 1b)。而从图 1c 和 1d 中地面气压和风场的变化来看,强降雨发生的时段地面气压显著降低,地面风向沿逆

时针方向旋转,风速增大,表明低涡东移过程中触发中尺度对流系统的发展。从相应时次静止气象卫星云图上,可见西南低涡伴东南侧中尺度对流云团不断加强发展的过程(图略)。因此,这次暴雨过程是西南低涡的东移过程中,在有利的天气背景下触发中尺度对流系统发生发展而造成的。

2 西南低涡东移及加强发展

2.1 西南低涡东移和强度变化

综合分析高低空天气形势分析(图 2a),此次西南低涡形成于 500 hPa 高空槽前底部,生成后随槽前西南暖湿气流引导沿 700 hPa 切变线向东移动。

7 日白天低涡到达安徽南部后,低涡进一步向上加强发展,500 hPa 出现闭合性气旋式环流,而高空槽底端北缩到 40°N 附近,槽前东移引导气流明显减弱,导致低涡移速减慢。此外,当西南低涡 6 日 08 时移出高原进入长江中游后,副热带高压稳定维持在华南沿海一带,700 hPa 上低涡东南象限可见存在一支风速大于 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西南急流,急流核最大风速达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,由于急流辐合抬升作用,气流上升运动区位于低涡的东南侧,有利于西南低涡向辐合抬升区靠近,向东传播。

从 2013 年 6 月 5 日 08 时至 8 日 20 时西南低涡近中心附近各层位势高度场和地面气压随时间变

化图(图 2b)可见,随着西南低涡的东移,低涡近中心各层高度场和地面气压场均明显下降,到 8 日 08 时移入东海前降到最低,其中 500 hPa 位势高度降低了 10 dagpm,700 hPa 降低了 9 dagpm,850 hPa 降低了 7 dagpm,925 hPa 降低了 6 dagpm,而地面气压下降 5 hPa。其中 6 日 08 时到 7 日 20 时各层高度值(地面气压)下降幅度最大,低涡发展最为迅速,到 7 日 20 时,地面气压已下降达到 997 hPa。由此说明,低涡在向东移动的过程中不仅移动减慢,而且快速加强发展,这与图 2a 中低涡近中心 700 hPa 最大风速在低涡东移过程中增大是一致的。

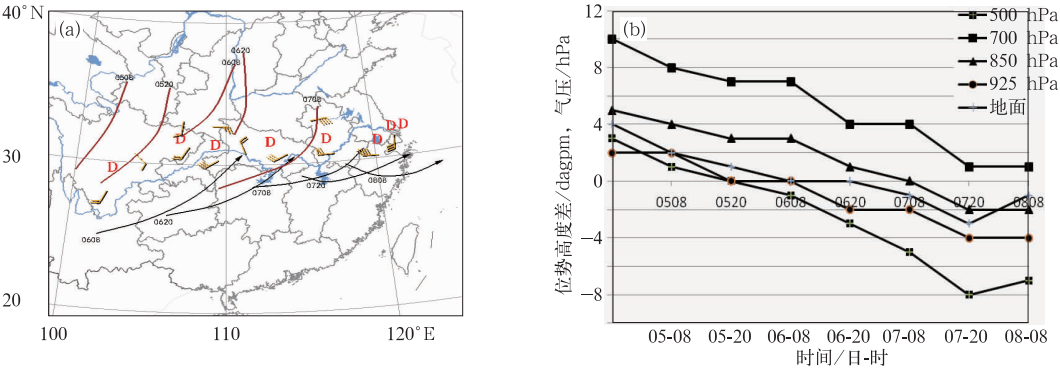


图 2 2013 年 6 月 5 日 08 时至 8 日 20 时 700 hPa 西南低涡位置(a,图中字幕“D”表示 700 hPa 低涡中心位置,风矢量为 700 hPa 低涡近中心最大风,红色实线为 500 hPa 高空槽,黑色箭头实线为 700 hPa 低空急流轴)和西南低涡近中心附近各层位势高度随时间变化图[b,纵坐标标值为 500 hPa 到地面相应各层位势高度(或地面气压)分别减去 580、300、140、70、1000]

Fig. 2 Location of 700 hPa southwest vortex from 08:00 BT 5 to 20:00 BT 8 June 2013 (a, red “D” indicates the locations of vortexes, wind barbs indicate maximum wind around them, red lines indicate 500 hPa troughs, arrows indicate 700 hPa low level jets) and time series of potential heights near the centre of southwest vortexes [b, vertical axis values are potential heights (or surface pressure) at 5 levels minus 580, 300, 140, 70, 1000, respectively]

2.2 西南低涡结构和降雨分布

从 6 日 20 时和 7 月 08 时降雨最强时刻的沿西南低涡中心的涡度和垂直速度垂直剖面图(图 3a~3d)上可以发现,6 日 20 时低涡中心主要位于 925~850 hPa 之间的对流层的低层,水平范围约为 200~300 km,中心最大正涡度值达到 $22\times10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。到了 7 日 08 时,低涡的范围和强度都没有明显变化,而低涡向上垂直发展,700~600 hPa 出现了大于 $18\times10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的正涡度区,大于 $5\times10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 涡度区高

度接近 400 hPa,这与图 2b 中 6 日 20 时至 7 日 20 时 500 hPa 高度场显著下降是一致的,与傅慎明等(2012)研究指出西南低涡一般位于对流层低层且自上而下发展的结论不同。而从相同时刻经过相同位置的垂直速度场上来看,强上升运动区位于正涡度中心偏南约一个纬距,6 日 20 时强上升运动中心位于 600 hPa 附近,而到 7 日 08 时强上升运动中心最高达近 400 hPa,也进一步说明与暴雨相关的中尺度对流系统发展位于低涡中心的南侧,这与前述的强降雨区位于低涡的南侧 3 个纬距内是一致的。

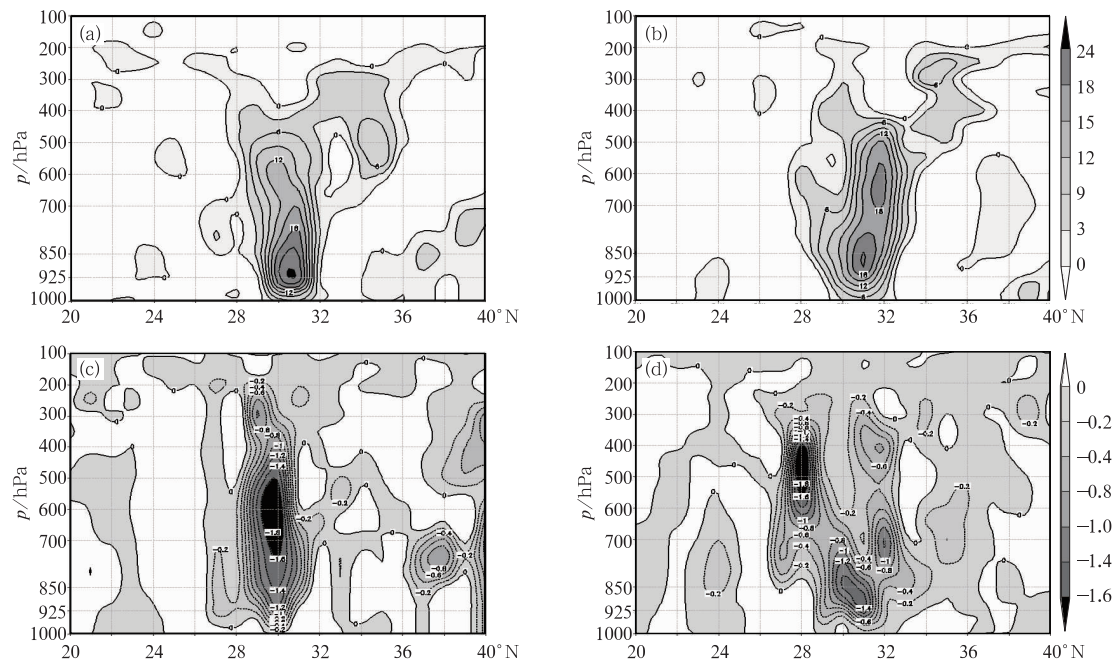


图 3 2013 年 6 月 6 日 20 时沿低涡中心 113.10°E(a, c)和 7 日 08 时沿低涡中心 117.38°E(b, d)的
涡度垂直剖面(a, b, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和垂直速度剖面(c, d, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Vertical sections of vorticity (a, b, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity
(c, d, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along the center of vortex at 113.10°E (a, c) at 20:00 BT 6 June
and at 117.38°E (b, d) at 08:00 BT 7 June 2013

2.3 西南低涡增强机制

从 6 日 20 时和 7 月 08 时 200 hPa 的对流层高层流程图来看(图 4a 和 4b),受南亚高压的影响,200 hPa 江淮地区为一致的西北强风带,大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 急流轴位于长江下游地区,东移西南低涡位于高空急流的右后侧,受高空急流出口处的右侧辐散气流的抽吸作用,有利于低层的辐合上升运动加强,有利于西南低涡东移发展。而对流层低层(图 4c 和 4d),在低涡的西南方向约 100 km 处,存在中心最大风速为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的低空急流带,急流伴随着低涡的东移而东移,并且强度也伴随着低涡的增强而增强,西南低涡位于 700 hPa 西南急流的左前方的辐合上升区。因此,一方面随着西南低涡的东移发展,使得低涡南部的西南气流加强,并发展为急流带,而低空急流的发展又加强了西南低涡东南侧辐合气流,使得西南低涡也获得发展,两者形成耦合发展机制。另一方面,低涡位于 700 hPa 西南急流的左前方和 200 hPa 高空急流的右后方,形成高空辐合和低空辐散的正反馈机制(朱乾根等, 2001;周宏伟等,2011),非常有利于低涡东移过程中

不断加强发展。

进一步分析低涡附近的温度平流(图 4e 和 4f),发现 6 日 20 时 700 hPa 低涡东南侧西南急流区对应为暖平流区,低涡后部西北象限为弱的冷平流区,到了 7 日 08 时冷暖平流进一步加强,暖平流中心最大值达 $20 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,而冷平流中心最低值也达 $-10 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,这种强烈的冷暖平流导致斜压不稳定、低层等压面下降和较强的辐合抬升,从而西南低涡进一步增强发展。此外,已有的研究表明,积云对流潜热释放是西南低涡发展的主要因子(陈忠明等,1989;赵平等,1991;赵玉春等, 2010),而这次西南低涡形成后其东南侧的低空西南气流相伴,促使暖湿空气辐合抬升形成对流降水,降水潜热又通过使低涡区气压降低、低层气旋辐合以及高层反气旋加强,使低涡进一步发展,两者形成正反馈机制。同时,降水潜热释放还有利于西南低涡东南侧暖区的形成和维持。

综上所述,槽前正涡度平流、低空西南急流的形成与维持、对流凝结潜热释放正反馈机制是本次西南低涡东移增强的主要机制,而冷暖平流造成的斜压辐合抬升也是低涡增强的主要原因。

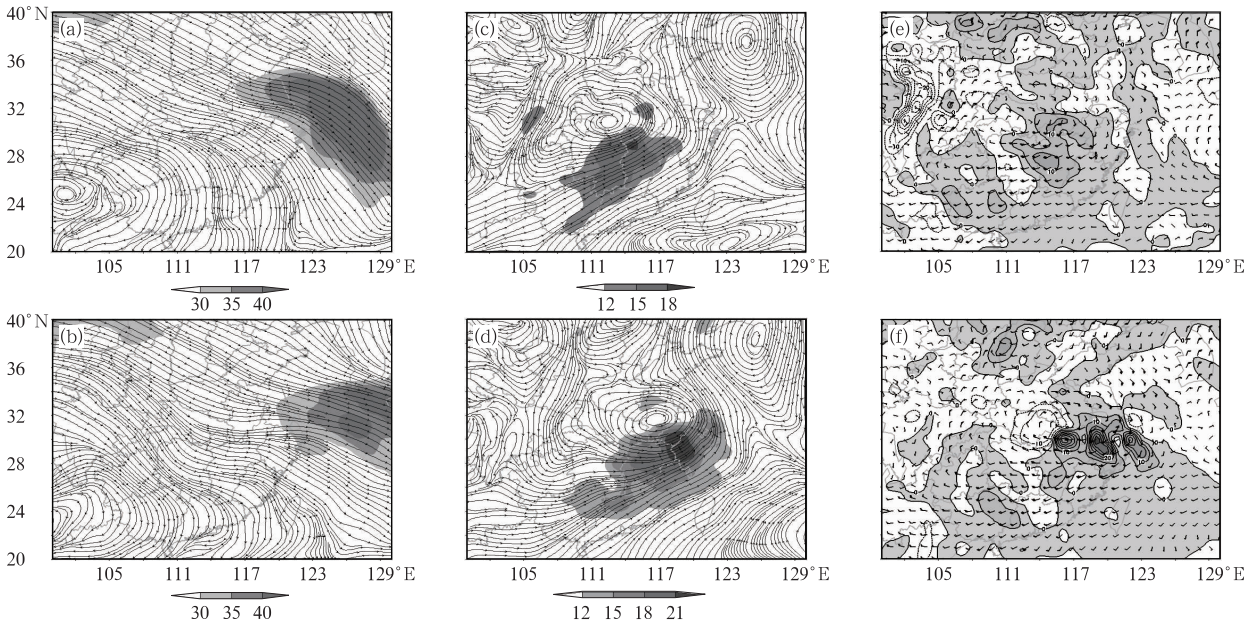


图 4 2013 年 6 月 6 日 20 时(a, c, e)和 7 日 08 时(b, d, f)200 hPa 流场(a, b, 阴影区为风速 $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空急流区)、700 hPa 流场(c, d, 阴影区为风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流区)和 700 hPa 温度平流(e, f, 单位: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 200 hPa stream field (a, b, shaded area indicates upper level jets $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 700 hPa stream fields (c, d, shaded area indicates low level jets $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and 700 hPa temperature advection (e, f, unit: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) respectively at (a, c, e) 20:00 BT 6 and (b, d, f) 08:00 BT 7 June 2013

3 西南低涡诱发暴雨的机制

西南低涡 6 日 20 时左右进入安徽南部大别山地区后移速减慢,使得降水云团持续经过同一地区,造成湖北大部、安徽南部、江苏南部和上海等地出现区域性的暴雨。

3.1 动力抬升条件

如前所述,暴雨主要发生于低涡南侧的低空急流区左前方,其暴雨发生发展的物理过程与西南低涡的发展增强密不可分,即西南风急流沿暖锋的辐合抬升作用和有利的高空辐散条件是中尺度暴雨云团发展的主要动力抬升机制,且由于西南低涡东移发展位于 500 hPa 高空槽南侧底端,高空槽引导北方冷空气南下,一方面与西南低涡环流相结合,有利于大气有效位能向动能转化,使西南低涡低层辐合,高层辐散加强,涡度值增大,涡旋加强发展,另一方面与对流层低层暖湿气流结合,加剧对流不稳定,导致暴雨显著增加。特别地,在 7 日 08 时冷空气在中低层加强扩展后,西南低涡的北部也出现了

强降水。

此外,长江中下游地区大别山等复杂地形抬升作用也有利于暴雨的发生发展,而西南低涡与中尺度对流凝结潜热释放之间形成的正反馈机制则对暴雨维持和发展起到重要的作用。

3.2 热力不稳定和水汽条件

西南低涡生成后 700 hPa 以下为西南暖湿急流,中高空 500 hPa 以上为高空槽后西到西北风,而从 6 月 20 日低涡南侧湖北武汉站的温度对数压力图上可见(图略),600 和 925 hPa 之间假相当位温差为 -4.57°C ,开尔文指数(K 指数)达 37°C ,对流有效位能(CAPE)达 $247.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,呈现出典型的热力不稳定层结特征,十分有利于中尺度对流系统的发生发展。

而从 6 日 20 时和 7 日 08 时的 850 水汽通量散度图(图 5a 和 5b)上,发现 6 月 6 日 20 时有两支水汽输送到湖北、安徽等强降水区,一支是西南急流水汽输送,另一支来自于我国东部沿海的东南水汽输送,两支水汽在低涡东南侧辐合聚集,6 日 20 时水汽通量散度达到 $15 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

且水汽通量的辐合区与强降水落区基本一致。到 7 日 08 时,两支水汽输送依然活跃,强水汽通量散度辐合区东移到湖北、江西北部 and 安徽南部等地区。相应地,6 日 20 时经过低涡中心的沿经线的水汽通量散度剖面图上(图 5c),可以看到水汽通量辐合区位于 850 hPa 以下的对流层低层,最大辐合中心位

于 925 hPa 以下的近地层。而到 7 日 08 时(图 5d),水汽通量散度强度相当,但水汽辐合中心较 6 日 20 时有所抬升,这可能与低空急流加强导致对流抬升有关。可见,两支急流水汽输送并在低涡南侧聚集是西南低涡加强发展并诱发暴雨的重要原因。

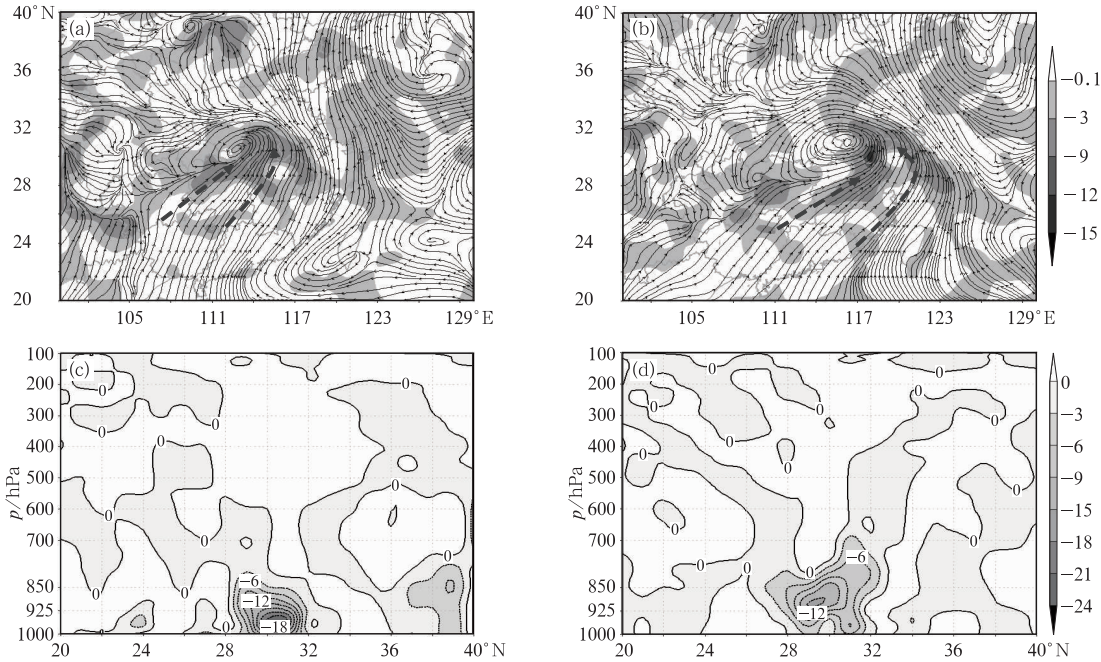


图 5 2013 年 6 月 6 日 20 时(a)和 7 日 08 时(b)850 hPa 水汽通量流线(单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(a,b,阴影,单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),分别沿 113.10°E (c)和 117.38°E (d)低涡中心的经向垂直剖面

Fig. 5 Water vapor flux (streamline, unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (shaded, unit: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa at (a) 20:00 BT 6, (b) 08:00 BT 7 June 2013; the vertical section of water vapor flux divergence at (c) 113.10°E , (d) 117.38°E

4 结 论

通过上述常规观测资料和 NCEP 资料的诊断分析,得到以下几点结论:

(1) 受高空槽前西南暖湿气流和低空西南急流等环境气流引导,西南低涡沿着 700 hPa 切变线东移,是造成此次长江中下游地区暴雨的直接影响系统。

(2) 西南低涡气旋式环流主要位于 700 hPa 以下的对流层低层,水平范围约为 200~300 km,深厚阶段正涡度柱伸展到 400 hPa 高度,自下而上呈近垂直结构。

(3) 西南低涡附近高空辐散与低层辐合、低层

正涡度中心与西南相伴中尺度低空急流耦合发展的动力结构有利于上升运动的发展和维持,为暴雨的产生提供了有利于的动力条件。

(4) 西南低涡发展于 500 hPa 高空槽的底端,槽前正涡度平流的输送是西南低涡在移到长江中下游后加强发展的一个重要原因。

(5) 暴雨区起初出现在西南低涡的南侧 3 个纬距内,该处的西南季风和副热带高压西南侧东南气流两支水汽输送的汇合为暴雨的发生提供了充沛的水汽和潜在的不稳定能量。冷空气影响时,西南低涡的北部也出现了强降水。

(6) 低层水汽通量散度的负值辐合区与垂直速度的上升区相对应,也与强降水落区相对应。对流层中低层强辐合和上升运动为大暴雨发生提供了动

力条件,强降水区与强正涡度辐合上升运动区有较好的对应关系。

(7) 500 hPa 高空槽携带的冷空气侵入低层低涡的后部,不仅加强了低涡的发展,也促进了上冷下暖不稳定层结的产生和发展,为强降水提供了不稳定对流触发条件。

关于西南低涡与低空急流耦合发展的机制、冷空气影响西南低涡加强发展及暴雨发展的机制尚待通过更精细的观测资料和数值模拟等进一步的深入研究。

参考文献

陈贵川,湛芸,张勇,等. 2013. “12. 7. 21”西南涡极端强降雨的成因分析. 气象, 39(12):1529-1541.

陈永仁,李跃清. 2013. “12. 7. 22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响. 气象, 39(7):848-860.

陈忠明. 1989. 环流场作用与西南低涡移动的初步分析. 高原气象, 8(4):301-312.

丁一汇,等. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨的研究. 北京:气象出版社.

杜倩,覃丹宇,张鹏. 2013. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的 FY-2 卫星观测分析. 气象. 39(7):821-831.

傅慎明,于翥,王东海,等. 2012. 2010 年梅雨期两类东移中尺度涡旋的对比研究. 中国科学:地球科学. 42(8):1282-1300.

高守亭,赵思雄,周晓平,等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展. 大气科学, 27(4):618-627.

何光碧. 2012. 西南低涡研究综述. 气象, 38(2):155-163.

胡伯威,潘鄂芬. 1996. 梅雨期长江中下游地区两类气旋性扰动和暴雨. 应用气象学报, 7(2):138-144.

刘建勇,谈哲敏,张熠. 2012. 梅雨期 3 类不同形成机制的暴雨. 气象学报, 70(3):452-466.

刘婷婷,苗春生,张亚萍,等. 2014. 多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用. 气象, 40(12):1530-1538.

孙兴池,郭俊建,王业宏,等. 2015. 低涡和副热带高压共同影响下的暴雨落区分析. 气象, 41(4):401-408.

陶诗言,等. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社.

王新敏,宋自福,张霞,等. 2009. 一次西南低涡预报路径偏差分析及数值模拟. 气象, 35(5):18-25.

杨帅,丁治英,徐海明. 2006. 梅雨暴雨中高低空急流与西南低涡的活动. 南京气象学院学报, 29(1):122-128.

张丙辰. 1990. 长江中下游梅雨锋暴雨研究. 北京:气象出版社.

张峰,何立富. 2013. 2013 年 6 月大气环流和天气分析. 气象, 39(9):1227-1232.

赵平,孙淑清. 1991. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断 I: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. 大气科学, 15(6):46-52.

赵玉春,王叶红. 2010. 高原涡诱发西南涡特大暴雨成因的个例研究. 高原气象, 29(4):819-831.

周宏伟,王群,裴道好,等. 2011. 苏北东部一次梅雨锋大暴雨过程的多尺度特征. 气象, 37(4):432-438.

朱乾根,周伟灿,张海霞. 2001. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究. 南京气象学院学报, 24(3):308-314.

宗志平,陈涛,徐珺,等. 2013. 2012 年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验. 气象, 39(5):567-576