一次西南涡暴雨的位涡分析

崔恒立[1]　王东仙[1]　吴梦雯[2]　牛奔[3]

（1 荆门市气象局，荆门 448000；2 中国气象科学研究院，北京 100081；3 武汉中心气象台,武汉 430074）

摘要：利用NCEP提供的FNL再分析资料对2013年5月25—26日发生在我国中东部西南涡暴雨过程的初期阶段进行了位涡分析，结果表明：高原槽附近异常高位涡，促进了低层西南涡前期的发展，这对西南涡前期的预报有很好指导意义；西南涡发展前期，强降雨中心湿位涡正压子项自低层至高层呈现出“负—正”的分布特征，湿位涡斜压子项在中低层有强负值中心，反映出低层对流不稳定和垂直风切变对于对流性降水的促进作用；西南涡发展阶段，湿位涡正压子项正值中心呈现出倾斜漏斗状，斜压子项在降雨中心低层出现了强负值中心；强降水中心与低层扰动湿位涡负值有较好的对应关系，对于强降雨落区的预报提供了一种参考。

关键词：暴雨，西南涡，位涡，湿位涡

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2018.04.013

Analysis of Potential Vorticity in a Heavy Precipitation Event Caused by a Southwest Vortex

Cui Hengli[1], Wang Dongxian[1], Wu Mengwen[2], Niu Ben[3]

(1 Jingmen Meteorological Bureau of Hubei Province, Jingmen 448000 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 3 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the FNL reanalysis data from NCEP, the preliminary stage of a heavy precipitation event caused by a southwest vortex in central eastern China during 25-26 May, 2013 is investigated by applying the potential vorticity theory. Results suggest that: there is a high potential vorticity anomaly near the plateau trough and favors the initial development of the low-layer of troposphere in the southwest vortex, it is quite an important implication for predicting the early stage of the southwest vortex. During the early stage of the southwest vortex, the barotropic term of the moist potential vorticity in the heavy rainfall center was in a “negative-positive” distribution from the lower to the upper layers, while the baroclinic term was in a large negative value center in the mid-lower layer, this reflects the enhancement effect of the low-layer convective instability and vertical wind shear on the convective instability. During the development stage of the southwest vortex, the positive value center of the barotropic term in the moist potential vorticity appeared a leaning funnel shape, and the baroclinic term in the low-layer of troposphere in the rainfall center occurred a large negative value center. The strong precipitation center has a good coincidence with the negative value of the disturbed moist potential vorticity in the low-layer of troposphere. These may, provide a reference for predicting the location of the heavy precipitation occurrence.

Keywords: heavy precipitation, southwest vortex, potential vorticity, moist potential vorticity

0　引言

西南低涡（简称西南涡）是出现在我国青藏高原东南侧川西地区700 hPa（或850 hPa）等压面上的一种α中尺度气旋系统，水平尺度为3～5个经距，多为暖性结构，生命史一般低于48 h[1-2]，个别可达5 d以上，它是特殊地形与环流相互作用的产物[3]。最早对于西南涡的研究可以追朔到20世纪40年代前后[3]，其涡源大多在九龙区，其次是四川盆地[3-5]，多数西南涡在源地生消，少数东移发展，其移动主要跟冷空气、风场和物理量场的分布有关，大都沿着正涡度中心、辐合中心和冷暖平流中心移动[6-8]，凝结潜热释放，低空急流形成与维持以及高层位涡扰动都有利于西南涡的发展[9-10]。西南涡是影响我国降水的重要天气系统，其产生暴雨天气的能力仅次于台风[11]，能够引起长江中下游等地大范围的暴雨天气[12]，当与高原涡、热带气旋等系统作用时能产生更强的降水[13-14]。近年来，通过位涡分析研究西南涡的成果越来越多。

位涡的概念最早是在1940年由Rossby提出的[15]，1942年Ertel提出了广义位涡的概念，它是绝对涡度矢

收稿日期：2018 年 5 月 15 日；修回日期：2018 年 7 月 1 日
第一作者：崔恒立（1985—），Email：cuihenrystyle@163.com
资助信息：湖北省气象局科技发展基金项目（2018Z01）；荆门市气象局科研开发项目（2018-05）

量与位温梯度矢量的点乘，因而是一个既包含动力因子又包含热力因子的物理量，并推得在绝热无摩擦的干空气中具有严格的守恒性[16]，Hoskins于1985年提出了位涡思想，在正位涡异常区内位涡比周围高，结果便出现围绕正位涡异常的气旋性环流[17]。国内也有气象学者系统性地总结了位涡、位涡思想、位涡理论以及应用[18]。近些年，位涡被广泛应用到暴雨研究中，低涡暴雨的发生发展与湿位涡的时空演变有很好的对应关系[19]，较高湿位涡值的高层冷空气沿等熵面快速南下的过程中绝对涡度增加导致了气旋性涡度的发展加强[20]，位涡的发展和暴雨的发展是一致的[21]，位涡场比涡度场更加能表现暴雨的移动和强度[22-23]。上述研究表明，对位涡的分析有助于增进对暴雨与低涡的发生发展的了解和认识。

2013年5月25—26日，受西南涡影响，我国中东部出现了大范围的暴雨。由于西南涡初期发展受多个因素影响，数值天气预报并未做出非常准确的预报，造成过程初期预报出现了偏差。本文从位涡及位涡思想出发，试着揭示初期西南涡、强降雨与位涡的关系。

1 资料与方法

位涡在无粘绝热的斜压大气中沿气块轨迹守恒，所以位涡可以作为跟踪气块移动的物理量。而考虑水汽作用的湿位涡更好地表征了大气动力、热力性质，扰动湿位涡是从湿位涡中减去大气静止时的背景位涡，能更合理的解释暴雨发生发展的物理机制。P坐标系下假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多，位涡（pv）、湿位涡（mpv）、湿位涡正压项（mpv_1），湿位涡斜压项（mpv_2）和扰动湿位涡（mpv_{re}）的表达式为：

$$pv=-g(\zeta+f)\frac{\partial\theta}{\partial p}+g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial y}\right), \quad (1)$$

$$mpv=-g(\zeta+f)\frac{\partial\theta_e}{\partial p}+g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial y}\right), \quad (2)$$

$$mpv_1=-g(\zeta+f)\frac{\partial\theta}{\partial p}, \quad (3)$$

$$mpv_2=g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta}{\partial y}\right), \quad (4)$$

$$mpv_{re}=-g\zeta\frac{\partial\theta_e}{\partial p}+g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial y}\right), \quad (5)$$

式中，ζ为垂直涡度，f为科氏参数。其余为气象常用符号，其单位均为PVU（1 PVU=10^{-6} $m^2\cdot K\cdot s^{-1}\cdot kg^{-1}$）。

本文采用空间分辨率为1°×1°及时间间隔为6 h的FNL再分析资料、常规观测6 h和24 h降水量资料，按公式（1）～（5）分别计算位涡、湿位涡、湿正压项、湿斜压项和扰动湿位涡，然后分别讨论高层位涡异常与中低层低涡气旋发生发展情况和扰动位涡与强降水的关系。

2 暴雨过程分析

受西南涡影响，2013年5月25—26日重庆、湖北、河南、安徽、山东和江苏出现了强降水。从日累计降雨量的空间分布情况来看，25日（图1a）降水主要发生在湖北中部、陕西东南部和河南大部，强降雨中心位于河南中部，出现了超过100 mm的大暴雨。26日（图1b），强降水迅速向东北方向移动，降水强度也明显加大，鲁皖苏三省交界地方出现了暴雨到大暴雨，大暴雨主要集中在山东和江苏交界处。而后，随着西南涡继续东移入海，我国中东部的强降水过程减弱结束。

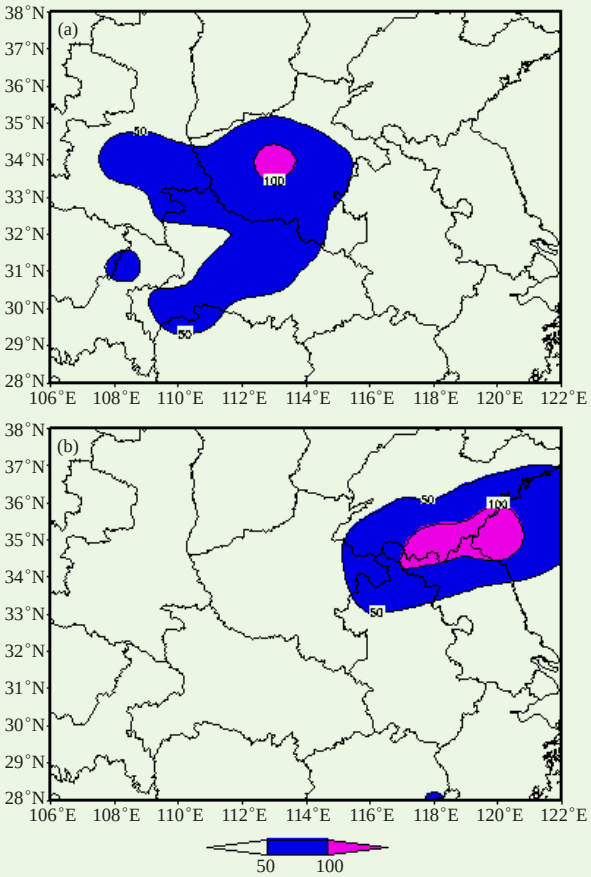

图1 2013年5月25日08时—26日08时累计降雨量（a）以及26日08时—27日08时累计降雨量（b）（单位：mm）

Fig. 1 (a) cumulative precipitation from 08 BT 25 May to 08 BT 26 May

(b) cumulative precipitation from 08 BT 26 May to 08 BT 27 May (unit: mm)

为了研究此次西南涡暴雨过程中强降水与位涡的关系，有必要研究强降水中心的位置移动情况。图2列出了6 h强降水中心的位置演变，25日20时至26日02时强的降水中心主要位于河南西部和湖北西南部，强

降水中心范围不大，强度也不强；随着西南涡发展，强降水中心也迅速向东北方向移动，范围也逐步扩大，26日08—14时强降水的范围达到了最大，6 h降雨量最大超过了60 mm，随后强降水中心进一步东移，但强度明显减弱。分析发现强降水发生前对于西南涡的预报出现了偏差，而在西南涡明显发展后预报与实况较为一致，因此本文重点研究西南涡发展前期。

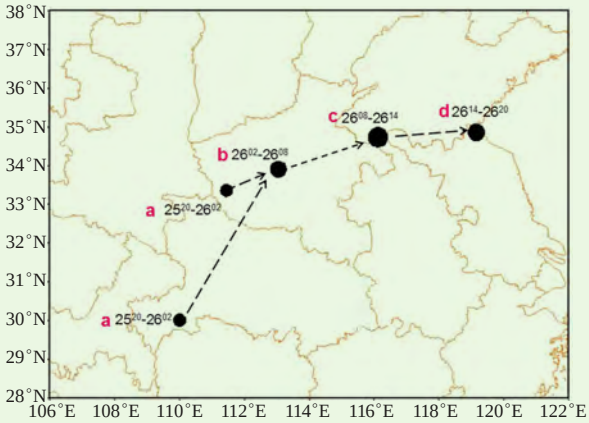

图2 地面6 h强降水中心移动路径图（●代表强降水中心，a为2013年25日20时—26日02时、b为26日02—08时、c为26日08—14时、d为26日14—20时）

Fig. 2 The moving path of high rainfall center (● represents high rainfall center, a: for 20 BT 25 May to 02 BT 26 May 2013; b: for 02 BT to 08 BT 26 May 2013; c: for 08 BT to 14 BT 26 May 2013; d: for 14 BT to 20 BT 26 May 2013)

3 环流形势分析

此次降水过程中，高纬西西伯利亚地区有冷涡稳定维持，冷涡不停的转动带动冷空气在45°N附近堆积。中纬度高原槽在东移的过程中逐渐加深，高纬的冷空气渗透到高原槽使其明显加强，发展成低涡，低涡在东移的过程中给我国江汉、江淮和黄淮地区带来了大范围的降水天气。

25日20时500 hPa（图3a），西西伯利亚地区有冷涡维持，冷涡转动带动冷空气南下，锋区稳定维持在45°N，高原槽东移到陕南—贵州西部，受其影响，陕南、湖北中部和河南大部出现了强降水。随着锋区附近堆积的冷空气渗透到高原槽里，高原槽在东移的过程中明显加深加强发展成低涡，雨带也迅速东移到鲁皖苏地区。在高原槽加强的过程中，西太平洋副热带高压（以下简称“副高”）加强北进，副高外围暖湿气流源源不断地进入山东、江苏等地，为鲁皖强降水提供了良好的水汽条件。随着低涡东移入海，中东部大范围的降水过程基本结束。

从NCEP资料分析的各层流场可以发现，这次强降水过程在低层有低涡活动。以850 hPa为例，25日西南涡主要位于川东、重庆附近，低涡环流并不是十分清楚，至26日08时（图3b）低涡明显加强，气旋性环流十分清楚，中心位于（33°N，112°E）。受500 hPa槽前西南气流影响，西南涡迅速向东北方向移动，强度逐渐加强，27日02时（图略）西南涡东移到鲁皖苏地区，中心位于（35°N，117°E）。从大暴雨中心的分布来看，大暴雨主要出现在低涡附近偏东的一侧。综上所述，在高原槽东移加深的过程中，中低层有西南涡发生发展，西南涡与副高外围的西南暖湿气流共同作用，导致了这次暴雨的发生。

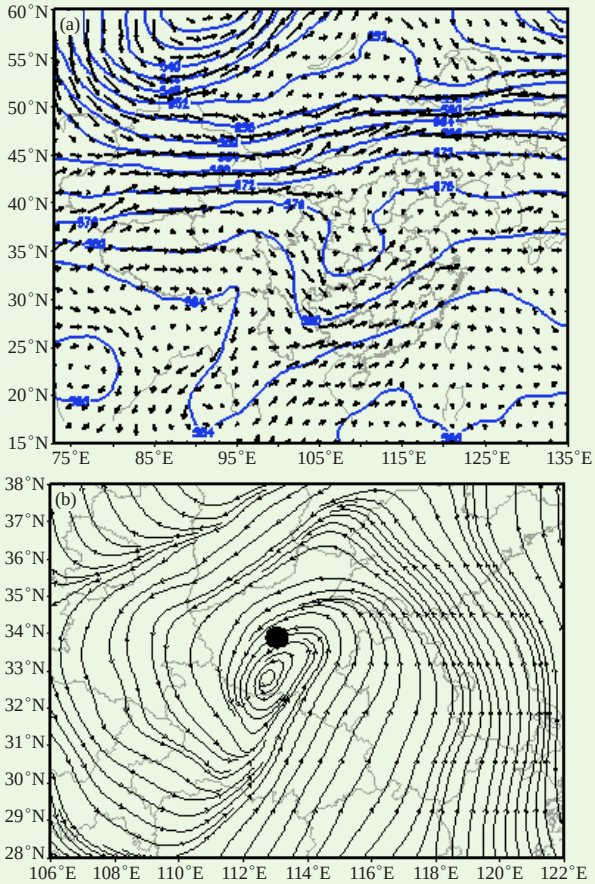

图3 2013年5月25日20时500 hPa位势高度场与风场（a）和26日08时850 hpa流场（b）（●代表大暴雨中心）

Fig. 3 The potential hight and wind field at 500 hPa at 20 BT 25 May 2013 (a) and the streamline field at 850 hPa at 08 BT 26 May (b) 2013（● represents high rainfall center）

4 位涡诊断分析

4.1 位涡扰动与低涡发展的关系

在对流层的大气位涡值一般都较低，高位涡大气主要来自高纬地区对流层高层及平流层，很多学者将2 PVU作为对流层顶的边界线，也用它来表征对流层大气位涡的异常。从300 hPa位涡和急流的分布看到，高位涡多集中在45°N以北，这是因为平流层大气层结稳定和科氏参数随纬度增加而造成高纬高层大气位

涡较大，影响本次低涡发展的主要系统是30°—35°N的高原槽，在槽区出现了异常高位涡。25日08时（图略），与低槽对应的高位涡出现在高原上，位涡前侧高空急流发展不强、范围不大；20时（图4a），高原槽东移到四川盆地，与之相随的高位涡也明显东移，由于高原的地形作用，气块在背风坡被拉伸，气旋性涡度加大使得高原扰动发展加深。由于气旋性涡度增加使得位涡增大，到了26日08时（图4b）其中心值达3.2 PVU，在位涡异常区的下方气旋性涡度也随之增大，中心强度超过$12\times10^{-5}\,s^{-1}$。

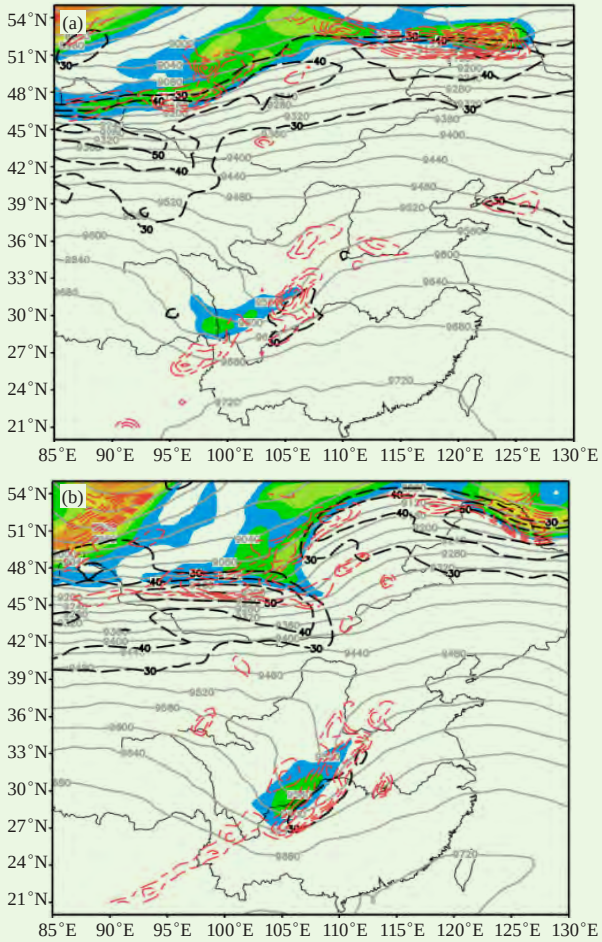

图4 2013年5月25日20时（a）和26日08时（b）300 hPa位势高度（灰色实线）、高空急流（≥30 m·s^{-1}，黑色虚线）、位涡（≥2 PVU，阴影区）和400 hPa强气旋性涡度（≥$6\times10^{-5}\,s^{-1}$，红色虚线）分布

Fig. 4 The geopotential height (grey solid line), upper layer jet (≥30 m·s^{-1}, black dotted line), potential vorticity (≥2 PVU, shadow area) at 300 hPa and strong cyclonic vorticity at 400 hPa(≥$6\times10^{-5}\,s^{-1}$, red dotted line) at 20 BT 25 May (a) and 08 BT 26 May (b) 2013

为了说明高层位涡异常区下方气旋性涡度生成的原因，下面将利用位涡思想来给出解释。25日20时在青藏高原（100°E）上空300 hPa附近存在异常高位涡（图5a），与之对应有比较大的位温梯度和垂直涡度，说明正位涡异常区是一个涡度和静力稳定度大值区，这与Hoskins在1997年提出位涡反演时的观点是一致的。由于下方等位温线向正位涡异常中心收拢，从而使得下方相邻等位温线的距离拉大，其下方大气的静力稳定度减小。由位涡守恒性，当静力稳定度减小使得低层涡度增大，在其下方便出现了气旋性垂直涡度。由于下方垂直涡度的增加，必然导致位涡增大，从而又使得更低层次的涡度发展，于是清晰看到正涡柱向下延伸并随高层位涡向东移动，向下发展的低涡进一步加强了西南涡，此时低涡前侧上升运动发展，

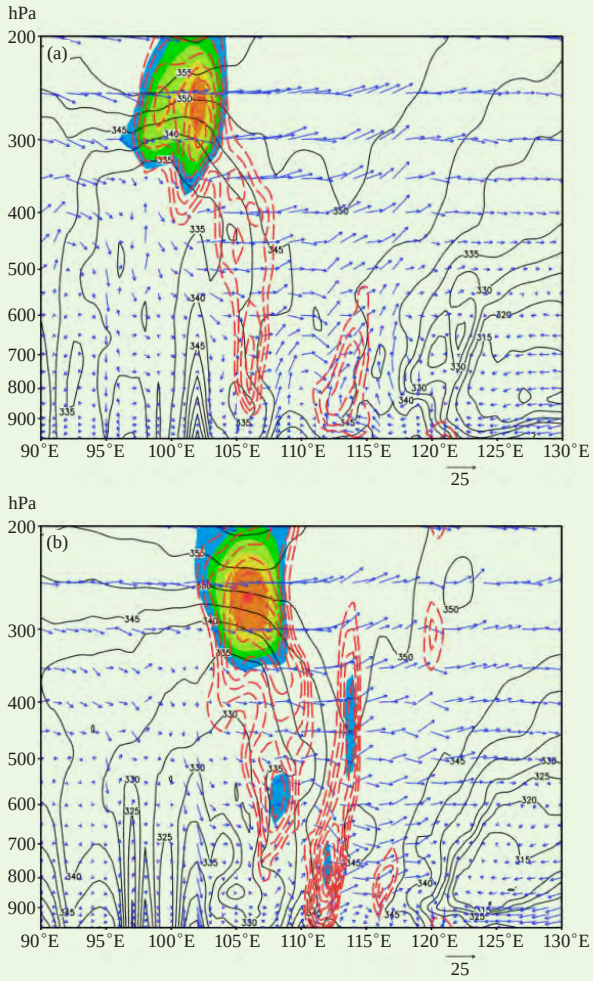

图5 2013年5月25日20时（a）和26日08时（b）位涡（≥2 PVU，阴影区）、相当位温（黑色实线）、三维风场（矢量）和强气旋性涡度（≥$6\times10^{-5}\,s^{-1}$，红色虚线）沿30°N垂直分布

Fig. 5 The vertical distribution of diagnosis in abnormal potential vorticity(≥2 PVU, shadow area), equivalent potential temperature (black dotted line), 3–D wind field (vector) and strong cyclonic vorticity(≥$6\times10^{-5}\,s^{-1}$, red dotted line) along 30°N at 20 BT 25 May (a) and 08 BT 26 May (b) 2013

地面开始出现降水，降水释放凝结潜热加热增加中层位温梯度，26日08时（图5b）在对流层中层（400和600 hPa）也出现了异常高位涡，低层低涡获得爆发性增长，其中心值超过$20\times10^{-5}\ s^{-1}$，由于气旋性涡度增加，低层800 hPa也出现了高值位涡。由此可见，高原槽附近高层位涡的异常，加强了低层西南涡的发展。

4.2 位涡与强降水的关系

4.2.1 湿位涡正压项与强降水的关系

由公式可知，湿位涡的正压项主要反映了绝对涡度和对流不稳定度的大小。沿着暴雨中心34°N作MPV_1的纬向剖面，25日20时—26日02时强降水区（111°—116°E）低层MPV_1为负值区，中上层为正值区（图6a和6b），说明在低层为对流不稳定区，而在中上层为对流稳定区，此时出现的降水为对流性降水。后期随着高原槽和低涡系统东移，由于槽后冷空气有较大的对流稳定度，26日08—14时冷空气以高MPV_1的形式向低层入侵，并呈现出倾斜的结构（图6c和6d），此时的降水为低涡系统产生的稳定性降水。值得注意的是，高值位涡柱向低层入侵的时候，边界层的湿正压项异常增加，这主要是由于气旋性辐合的增强导致绝对涡度增大的结果，而对流稳定度的贡献是次要的。

4.2.2 湿位涡斜压项与强降水的关系

由定义可知，湿斜压项的大小主要决定于水平风的垂直切变和相当位温的水平梯度，负值越大其斜压性越强。从沿34°N的湿位涡斜压项的纬向剖面图上看到，25日20时—26日02时（图7a和7b），强降水区

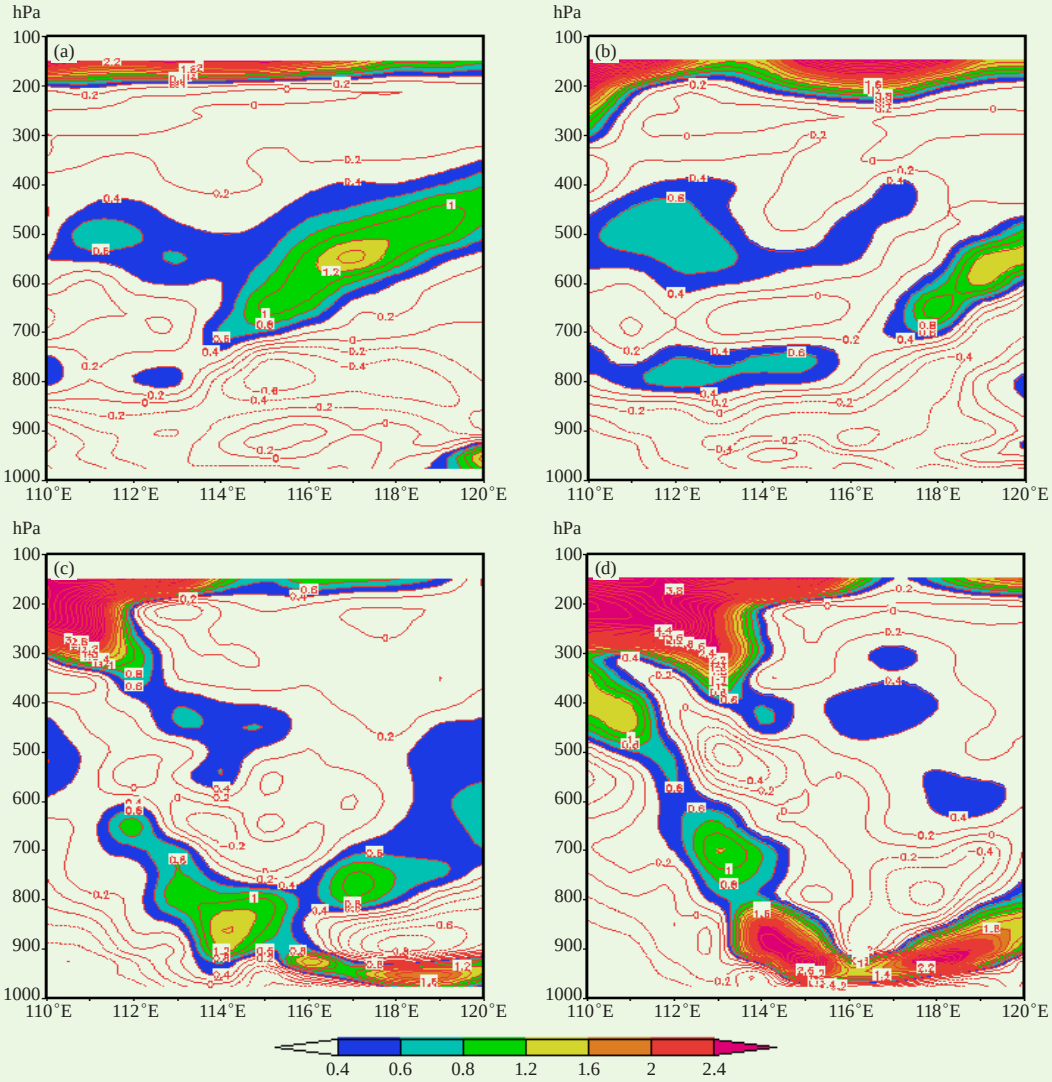

图6 2013年5月25日20时（a）、26日02时（b）、26日08时（c）和26日14时（d）沿34°N湿位涡正压项垂直剖面图（单位：PVU）

Fig. 6 The vertical cross-section of MPV_1 along 34°N at 20 BT 25 May (a), 02 BT 26 May (b), 08 BT 26 May and 14 BT 26 May 2013 (unit: PVU)

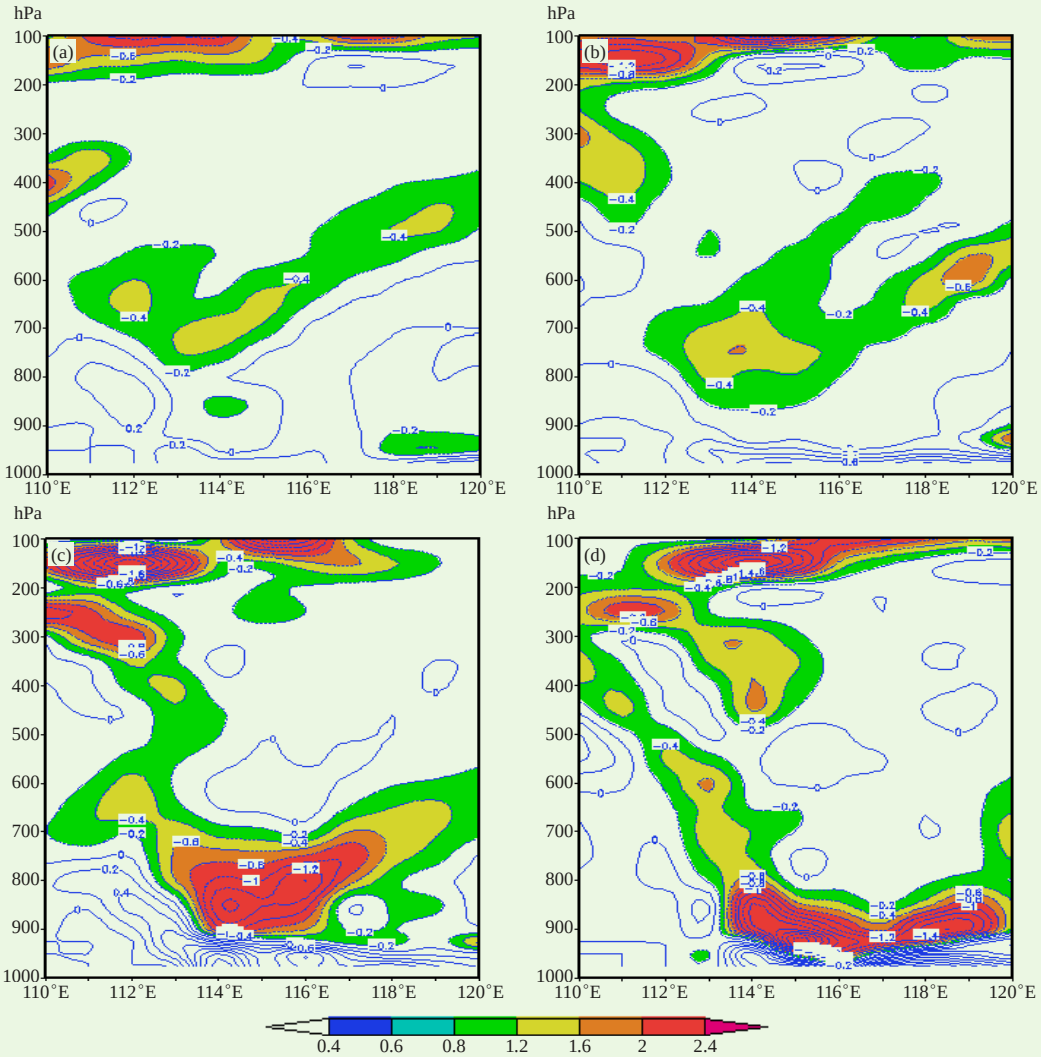

图7 2013年5月25日20时（a）、26日02时（b）、26日08时（c）和26日14时（d）沿34°N湿位涡斜压项垂直剖面图（单位：PVU）

Fig. 7 The vertical cross-section of MPV_2 along 34°N at 20 BT 25 May (a), 02 BT 26 May (b), 08 BT 26 May and 14 BT 26 May 2013 (unit: PVU)

上空200 hPa以上的负值中心逐渐加强，其最小值低于－1.0 PVU，而在400 hPa附近也出现了－0.6 PVU中心，这主要是因为低层强盛的西南气流伸展到400 hPa，而高层为西北气流，水平风垂直切变大，斜压性强，降水也多为对流性。26日08—14时（图7c和7d），高层负值继续减小，在低层850 hPa附近出现了强的负值中心，这主要是由于槽后冷空气加强，使得位温水平梯度加大，斜压性增强，降水也明显加强。

4.2.3 扰动湿位涡与强降水的关系

图8给出了25日20时—26日08时850 hPa扰动湿位涡和后6 h降水的空间分布。25日20时（图8a）位于重庆南部的扰动湿位涡移动加强，其中心强度达－0.62 PVU，其后6 h降水强度达40 mm；26日02时（图8b），低层气旋性环流进一步发展，在对流不稳定区出现了较强的扰动位涡，使得原本两个孤立的中心连成一条带，雨区分布形状同扰动位涡一样也呈带状，雨带中镶嵌多个中尺度强降雨雨团，随后6 h最大降水达72 mm，此时无论是扰动位涡还是降雨强度均达到最大；26日08时（图8c）带状位涡断裂，西南方扰动位涡由－1.2 PVU减弱至－0.8 PVU，东北方扰动位涡增强并继续向东北方向移动，雨带断裂为两个，西南方雨团减弱，东北方雨团强度不变但范围扩大；随后西南强雨团减弱消失，东北方雨团随着扰动位涡的东移发展而进一步增强。由此可见，低层扰动湿位涡对降水的发展确实具有指示意义，强降水出现在扰动位涡负值中心的前侧，扰动位涡越强降水越强。

5 结论与讨论

对发生在2013年5月25—26日我国中东部大范围

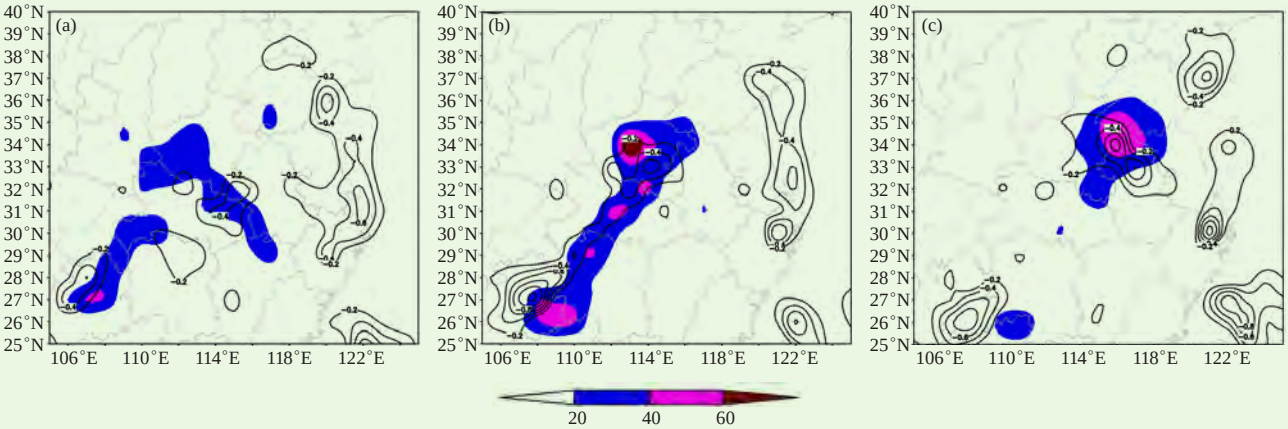

图8 2013年5月25日20时（a）、26日02时（b）和26日08时（c）强降水过程中扰动湿位涡（≤—0.2 PVU，黑色实线）和后6 h降水（≥20 mm，阴影）空间分布

Fig. 8 The spatial distribution of disturbance of moist potential vorticity in heavy rainfall (≤—0.2 PVU ,black dotted line) and the last 6 hour rainfall (≥20 mm, shadow area) at 20 BT 25 May (a), 02 BT 26 May (b) and 08 BT 26 May 2013

的西南涡暴雨过程，本文利用NCEP再分析资料对西南涡发展前期进行了位涡分析，主要结论如下：

1）西南涡的发展与高层位涡的异常有关，在高原槽附近的异常强位涡，有较大位温梯度和垂直涡度，垂直涡度向下发展使得低层的气旋性环流加强，从而增强了西南涡的发展，这对于西南涡发展前期的预报有很好的指导意义。

2）西南涡发展前期，在对流不稳定区出现了对流性降水，利用湿位涡可以很好的揭示。在强降雨上空，湿位涡正压子项自低层至高层呈现出“负—正”的分布特征，湿位涡斜压子项在中层有强负值中心，反映出低层强对流不稳定和中层垂直风切变对于对流性降水的促进作用。

3）西南涡发展阶段，伴随冷空气的加入，湿位涡正压子项正值中心表现出倾斜漏斗状向低层入侵，斜压子项在低层出现了强负值中心，反映出斜压性在强降水发生时所起的重要作用。强降水中心与低层扰动湿位涡负值有较好的对应关系，这对于强降雨落区的预报提供了一种参考。

本文给出了西南涡及其降水与位涡的关系，这为研究西南涡提供了一种新的思路。目前，西南涡主要是根据风场和温度场的演变来预报，未来可以尝试通过分析高层位涡扰动、湿位涡子项的变化来预报西南涡和降水，但值得注意的是高层位涡异常、扰动湿位涡加强是否与强降水发展存在反馈关系，这些仍需要进行深入分析。

参考文献

[1] 刘红武, 李国平. 近三十年西南低涡研究的回顾与展望. 高原山地气象研究, 2008, 28(2): 68-73.
[2] 李跃清, 徐祥德. 西南涡研究和观测试验回顾及进展. 气象科技进展, 2016, 6(3): 134-140.
[3] 卢敬华. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 1986: 58.
[4] 乔全明, 张雅高. 青藏高原天气学. 北京: 气象出版社, 1994: 156.
[5] 谌贵询, 何光碧. 2000—2007年西南低涡活动的统计分析. 高原山地气象研究, 2008, 28(4): 59-65.
[6] 潘旸, 李建, 宇如聪. 东移西南低涡空间结构的气候学特征. 气候与环境研究, 2011, 16(1): 60-70.
[7] 陈贝, 高文良. 引发四川盆地西南地区暴雨的高原涡特征分析. 高原山地气象研究, 2012, 35(1): 9-15.
[8] 廖文超, 刘海文, 朱玉祥, 等. 2013年7.18四川暴雨分析. 大气科学学报, 2016, 39(5): 702-711.
[9] 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 西南低涡研究的一些新进展. 高原气象, 2004, 23（S1）: 1-5.
[10] 范可, 琚建华, 寿绍文. 位涡守恒原理在中尺度低涡降水中的应用研究. 云南大学学报, 2001, 23(5): 374-378.
[11] 王作述, 汪迎辉, 梁益国. 一次西南低涡暴雨的数值试验研究//课题组. 暴雨科学, 业务试验和天气动力学理论的研究. 北京: 气象出版社, 1996: 235-267.
[12] 李跃清, 赵兴炳, 邓波. 2010年夏季西南涡加密观测科学实验. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 80-84.
[13] 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. 气象科技, 2009, 37(5): 538-544.
[14] 陈忠明, 黄富均, 何光碧. 热带气旋与西南低涡相互作用的个例研究. 大气科学, 2002, 26(3): 353-360.
[15] Rossby C G. Planetary flow patterns in the atmosphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1940, 66(s): 68-87.
[16] Ertel H. Einneuer hydrodynamischer Wirbelsatz. Meteorologische Zeitschrift, 1942, 59: 277-281.
[17] [17] Hoskins B J, Mcintyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1985, 111: 877-946.
[18] 寿绍文. 位涡理论及其应用. 气象, 2010, 36(3): 9-18.
[19] 黄金霞, 陈楷荣, 肖天贵, 等. 广东“080613”暴雨过程的湿位涡诊断分析. 广东气象, 2010, 32(1): 25-28.
[20] 吴启树, 连东英, 刘爱鸣, 等. 湿位涡子项在华南前汛期两类暴雨中的诊断分析. 气象科学, 2014,34(3): 317-324.
[21] 赵兵科, 刘屹岷, 梁萍. 夏季梅雨期一次强江淮气旋位涡反演分析. 高原气象, 2008, 27(3): 158-169.
[22] 何光碧, 高文良, 屠妮妮. 两次高原低涡东移特征及发展机制动力诊断. 气象学报, 2009, 67(4): 599-612.
[23] 邱静雅, 李国平, 郝丽萍. 高原涡与西南涡相互作用引发四川暴雨的位涡诊断. 高原气象, 2015,34(6): 1556-1565.