

文章编号: 2096-1618(2019)04-0384-08

一次东移型西南低涡引发的强降水诊断分析

蔺邹兴¹, 华维^{1,2}, 范广洲^{1,2}, 吴秋月¹, 李佩芝¹, 王星¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 气候与环境变化联合实验室 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川成都 610225; 2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044)

摘要:为研究由西南涡东移引发暴雨的中尺度特征,利用 NCEP 逐日 4 次 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点 FNL 再分析资料和中国自动气象站与 CMORPH 融合 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 格点逐时降水资料,采用非地转湿 Q 和湿位涡诊断方法,对 2015 年 7 月 14 ~ 17 日中国中部一次由西南涡引发的自西向东强降水过程进行了诊断分析。结果表明:受中高纬 500 hPa 低槽、低纬副高西伸北抬、沿低槽南下的冷空气以及来自孟湾暖湿空气的影响,为此次降水提供了非常有利的条件。非地转湿 Q 散度较好地反映了低涡降水的落区和强度变化,对未来 6 h 降水落区和强度的预报具有较好的指示意义;湿 Q 辐合区与未来 6 h 降水落区大致相符,且暴雨中心与辐合中心相对应,对应上空上升运动明显,对激发对流运动有重要作用。西南涡降水的发生、发展与湿位涡的时空演变呈现良好的对应关系;其中,对流层中低层 MPV1 上正下负叠加配置促进了不稳定能量的释放,有利于的暴雨发生和发展,而 MPV1 和 MPV2 的重叠区域有利于垂直涡度的增长,是降水落区预报的警戒区。

关键词:大气科学;中尺度气象;西南低涡;暴雨;非地转湿 Q ;湿位涡;诊断分析

中图分类号:P458

文献标志码:A

doi:10. 16836/j. cnki. jcuit. 2019. 04. 011

西南低涡(简称西南涡)一般形成于川西高原和四川盆地,是 850 ~ 700 hPa 上具有气旋性环流特征的中尺度闭合低压系统,水平尺度在 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]。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^[2]。因此,西南涡被认为是中国重要的暴雨系统之一。对西南涡的研究发现,西南涡多生成于每年的 3-8 月,其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^[3-7]。在生成机制方面,吴国雄等^[8]于 1999 年提出倾斜涡度发展(SVD)是西南涡形成的主要机制,其中陡峭地形造成等熵面倾斜是 SVD 发生的重要条件。此外,环流背景场的作用也不容忽视。也有研究认为低层季风西南支气流、浅薄暖湿西风 and 西太副高东风气流辐合并与地形相互作用可对西南涡的形成和位置起重要影响^[4]。同时,高空槽与低层鞍型流场存在也是其产生和维持的重要条件^[9]。涡度收支与潜热释放对西南涡的维持和发展也存在重要作用^[10-11]。

许多学者试图解释不同天气系统产生降水的物理机制,湿位涡和湿 Q 广泛应用于暴雨的诊断分析中,

分析发现湿位涡和锋面强降水天气中大气层结的状态、斜压性和垂直切变有紧密联系^[12],在西南涡降水方面,朱禾等^[13]利用湿位涡守恒探讨了西南涡与降水之间的能量稳定关系。陈栋等^[14]通过湿位涡诊断分析发现“鞍”型大尺度环流背景下从北部入侵的冷空气产生的垂直对流不稳定对西南涡产生降水有重要作用。此外,还有不少实际暴雨个例诊断分析表明暴雨的发生、发展与湿位涡变化趋势大致相符^[15-20]。同样地,随着湿 Q 不断地改进与完善,湿 Q 频繁应用于台风暴雨中的分析^[21-25],表明其散度负值区可作为未来 6 h 降水强度和落区的重要指标。此外,利用湿 Q 诊断高原涡东移和高原东部切变线产生降水的强度及落区也具有较好的指示性^[26-27]。刘运成等^[28]较早地将非地转湿 Q 与川北暴雨联系起来。张雪琦等^[29]发现非地转湿 Q 涡度诊断能力则不如非地转湿 Q 散度。

2015 年 7 月 14-17 日,受西南涡东移影响,中国出现了一次自西向东的大范围强降水天气过程。将采用非地转湿 Q 和湿位涡等诊断方法,重点研究西南涡引发暴雨的机制以及相关物理量作为暴雨预报的指示作用。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料为 2015 年 7 月 14-17 日(世界时,下同)美国国家环境预报中心(NCEP)逐日 4 次 $1^\circ \times 1^\circ$ 格

收稿日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41775072、91537214、41405069);四川省教育厅重点资助项目(16ZA0203)

点 FNL 再分析资料和中国自动气象站与 CMORPH 融合 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 格点逐时降水资料。

1.2 方法

Hoskin^[30]于 1978 年提出了 Q 概念,该理论广泛应用暴雨的预报和分析,此后很多学者对其进行了发展和完善^[31-34],并提出了湿 Q ,其表达式为

$$Q_x^* = \frac{1}{2} [f(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x}) - h \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \nabla \theta + \frac{\partial(hH)}{\partial x}] \quad (1)$$

$$Q_y^* = \frac{1}{2} [f(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y}) - h \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \nabla \theta + \frac{\partial(hH)}{\partial y}] \quad (2)$$

湿 Q 主要考虑了风的水平和垂直切变的差异作用、风的水平梯度和温度梯度的乘积以及非绝热作用,是一个综合表征动力、热力作用的物理量,其中 Q_x^* 和 Q_y^* 分别表示在 x 和 y 方向上的湿 Q 分量。

以湿 Q 散度为唯一强迫项的非地转 ω 方程可表达为

$$f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} + \nabla^2(\sigma \omega) = -2 \nabla \cdot Q^* \quad (3)$$

其中:

$$\frac{\partial Q_x^*}{\partial x} + \frac{\partial Q_y^*}{\partial y} = \nabla \cdot Q^* \quad (4)$$

当 $\nabla \cdot Q^* > 0$ (辐散), $\omega > 0$ (下沉运动); 当 $\nabla \cdot Q^* < 0$ (辐合), $\omega < 0$ (上升运动)。

湿 Q 涡度可表达为

$$\zeta_{Q^*} = \frac{\partial Q_y^*}{\partial x} - \frac{\partial Q_x^*}{\partial y} \quad (5)$$

由式(5)可知湿 Q 涡度和中低层非地转风涡度成正比,散度场和垂直速度场将随非地转涡度的出现而产生,从而在风场与质量场之间达到趋于平衡的状态^[33]。

湿位涡是一个能综合反映大气动力、热力和水汽性质的物理量,广泛应用于暴雨诊断分析中^[35-37]。等压面上湿位涡方程^[38]为

$$MPV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}) \quad (6)$$

湿位涡可分为正压湿位涡 (MPV1) 和斜压湿位涡 (MPV2), 即:

$$MPV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (7)$$

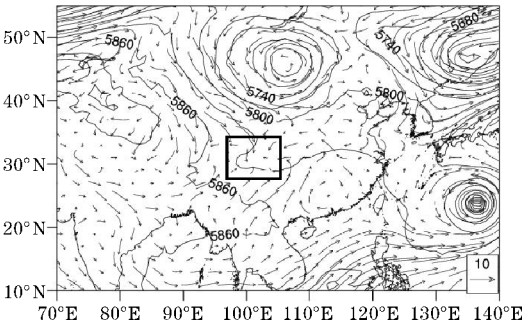
$$MPV2 = g(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}) \quad (8)$$

其中,MPV1 为垂直分量,表示惯性稳定度与对流稳定度的共同作用。MPV2 为水平分量,表示斜湿压性和水平风垂直切变的作用。当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$ (对流不稳定), $MPV1 < 0$, 只有 $MPV2 > 0$ (条件性对称稳定) 条件下,垂直涡度才能发展;反之,当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) < 0$ (对

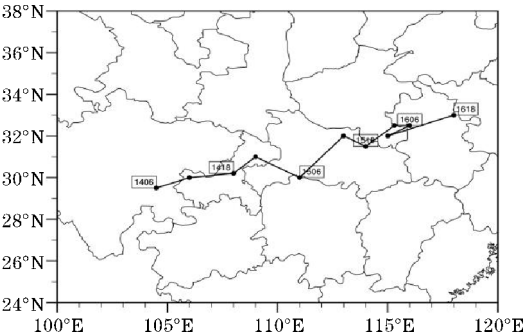
流稳定), $MPV1 > 0$, 仅 $MPV2 < 0$ (条件性对称不稳定) 时,垂直涡度才能发展。湿位涡的单位是 PVU ($1PVU = 10^{-6} \cdot m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$)

2 环流背景与天气过程概况

从 500 hPa 高度场 (图 1a) 可见,此次降水过程大型环流形势相对稳定。2015 年 7 月 14 日 06:00,中高纬环流形势为“两槽两脊”型,两弱脊分别位于新西伯利亚和内蒙古东部,西槽位于贝湖以南,东槽位于鄂霍次克海,其中西槽作为深厚冷低压系统,对此次暴雨发生发展有重要影响,对应 700 hPa 风场有一气旋性辐合。15-16 日,西槽向南略有加深,并引导槽后冷空气南下 (图略)。低纬华南地区受西太平洋副热带高压 (简称西太副高) 控制,并持续不断地西伸北抬。高纬度槽和中低纬西太副高在中国中部的稳定维持为西南涡东移及水汽输送提供了有利条件。



(a) 14 日 06:00 (500 hPa 高度场和 700 hPa 风场)



(b) 西南低涡移动路径

图 1 500 hPa 高度场 (等值线)、700 hPa 风场 (矢量) 和西南低涡移动路径

西南涡约于 14 日 06:00 在四川东部生成 (图 1b), 然后东移至重庆、湖北、河南和安徽等地,最终在江淮地区减弱并消失。2015 年 7 月 14-16 日,受高空槽、西南涡和低空切变线共同影响,四川东部、重庆、湖北和安徽等地出现大范围强降水,该过程累积最大降水量出现在安徽定远 (210.9 mm)。结合 24 h 降水量分布 (图 2) 可见,降水大值区与西南涡路径基本一致。14 日 (图 2a) 降水落区主要位于川渝交界地区,24 h 累积降水量达到 75 mm; 随着西南涡东移,15 日 (图 2b)

降水移至湖北中部地区,24 h 累积降水量超过 100 mm;16 日(图 2c)降水继续东移至安徽中部,尽管西南涡强度有所减弱,但暴雨强度仍达到特大暴雨级别(≥ 100 mm)。由于此次伴随低涡的降水强度大、时

间长以及影响范围广等特点,选取西南涡生成前期、初生期、成熟期和衰减期的 4 个时刻(14 日 00:00、14 日 06:00、15 日 06:00、16 日 00:00)进行分析,来探讨西南涡不同演变时期产生降水的物理机制。

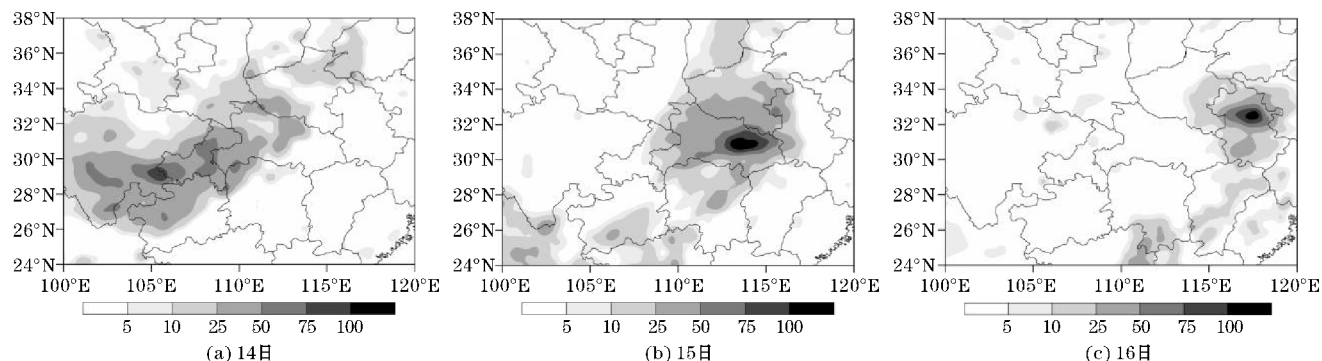


图2 不同时段 24 h 累积降水量分布

水汽是强降水天气过程的重要条件之一,因此水汽的输送和区域集中情况值得关注。由 700 hPa 水汽通量分布(图 3)可知,此次降水的主要水汽来源为孟加拉湾,经云南、贵州和湖南等地将暖湿水汽向北输送,与偏北干冷气流交汇,从而在中国中部产生较强的水汽辐合,为此次暴雨提供了充足的水汽。

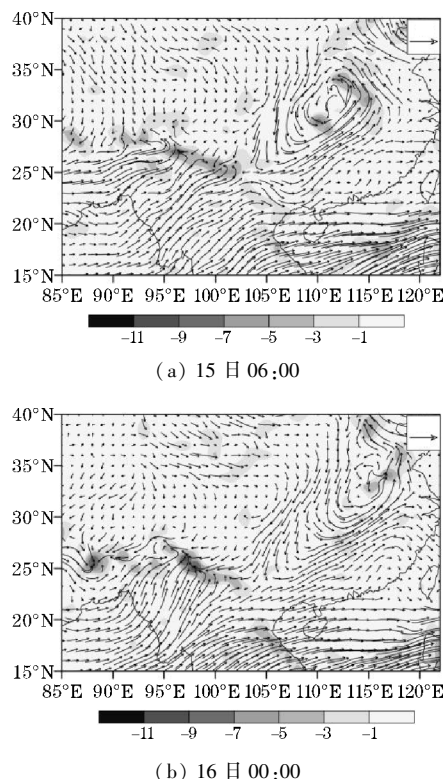


图3 不同时刻 700 hPa 水汽通量和水汽通量散度(阴影)

3 非地转湿 Q 分析

3.1 非地转湿 Q 散度水平分析

图 4 为对流层中层(700 hPa)非地转湿 Q 散度分布。

由图可见,非地转湿 Q 散度呈块状或带状的正、负相间分布,具有明显的中小尺度特征(水平尺度 ≤ 300 km)。结合 700 hPa 风场分布发现,降水主要发生在西南涡中心,且暴雨区具有明显的湿 Q 辐合特征。14 日 00:00(图 4a),四川东南部开始出现降水,对应区域存在一条东北-西南向弱的湿 Q 辐合带。14 日 06:00(图 4b),西南涡开始生成,降水强度和范围均有所增加,对应低涡中心湿 Q 辐合同时增强,说明辐合区垂直上升运动明显,辐合带东、西两侧和北部存在较弱辐散区,未来 6 h 累积降水范围亦有所扩大。15 日 06:00(图 4c),低涡东移至湖南、湖北交界处一带,暴雨区上空湿 Q 辐合剧烈,说明辐合区垂直上升运动进一步增强,辐合带东西侧均有较强的湿 Q 辐散区,未来 6 h 累积降水落区与湿 Q 辐合区部分重叠。16 日 00:00(图 4d),低涡中心移至湖北、河南和安徽交界处,湿 Q 辐合区中心强度和降水范围均有所减小,但降水强度并未减弱,这可能是由于暴雨区及其南部的低空急流(图略),加强了对水汽的输送,使暴雨得到发展。上述分析表明,非地转湿 Q 辐合区表示了垂直上升运动的强弱程度,与未来 6 h 降水区域大致重合,其强度与未来 6 h 降水强度呈正相关,但并非呈线性关系。这对未来 6 h 降水强度和落区的预报提供一定参考。

值得注意的是,并非所有湿 Q 辐合区都产生降水,如图 4(b)、(d)所示,在陕西宝鸡等地也出现了较强的湿 Q 辐合区,但未来 6 h 并无降水产生,该现象属于“空报”。这可能是由于湿 Q 仅考虑了大气的大尺度稳定凝结加热的非绝热加热信息,而对于对流较强,即伴有对流凝结潜热释放的天气现象而言,无疑存在一定缺陷。因此,根据不同天气特点将相关潜热加热信息加以考虑对湿 Q 诊断效果至关重要^[32-33]。此外,还可以采用考虑湿 Q 辐合区的垂直上升运动状况来对降水区域的预报效果进行订正^[26]。

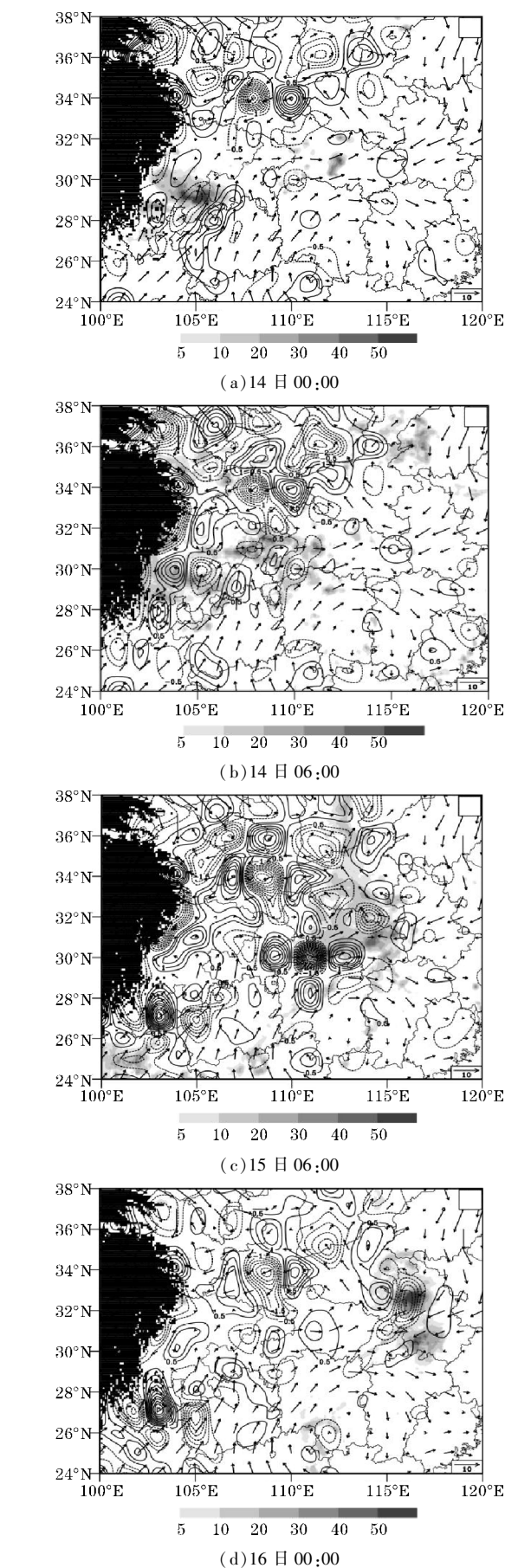


图 4 不同时刻 700 hPa 非地转湿 Q 散度(等值线)、700 hPa 风场(矢量)和未来 6 h 累积降水(灰色阴影区,)分布(黑色阴影区为 700 hPa 高原地形)

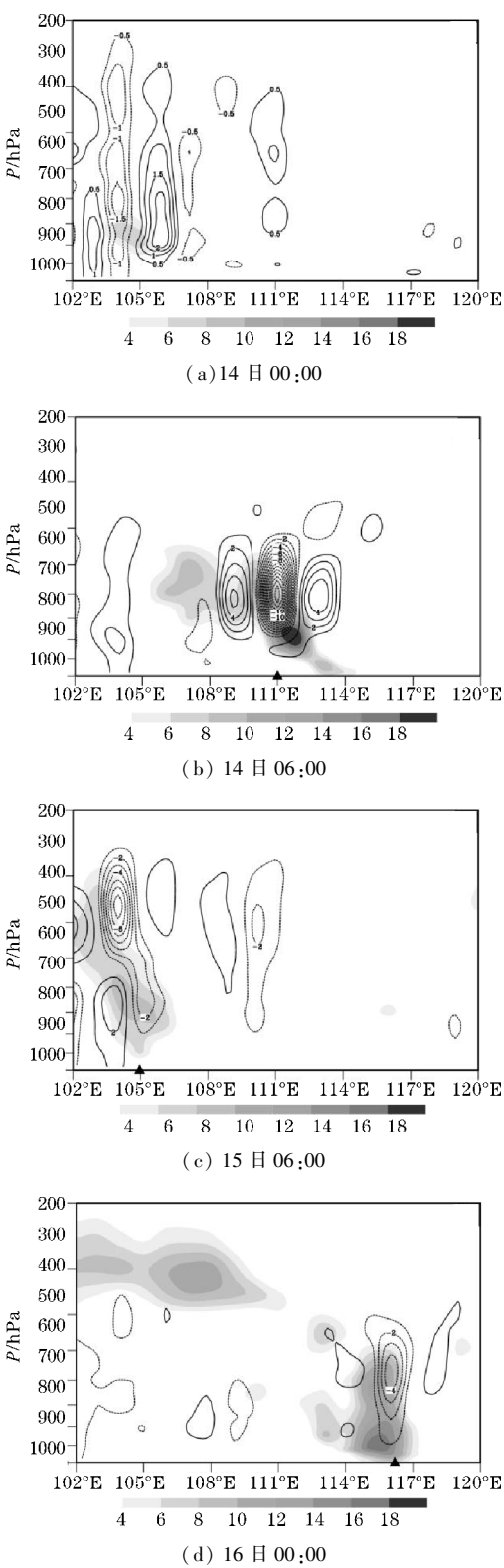


图 5 不同时刻过低涡中心的涡度(阴影)和非地转湿 Q 散度(等值线)垂直剖面分布(▲为降水中心)

3.2 非地转湿 Q 散度垂直剖面分析

非地转湿 Q 散度表示产生垂直运动的强迫机制的强弱,而强烈的上升运动是暴雨发生的必要条件,本节结合涡度和非地转湿 Q 散度对降水进行了分析。由于降水主要发生在低涡附近,且非地转湿 Q 散度与

低涡有较好的对应关系,因此主要对低涡中心的垂直剖面进行非地转湿 Q 分析。由图 5(a)可见,低涡生成前无降水产生(14 日 00:00),在 105°E 左右两侧分别为条状分布的湿 Q 辐合和辐散;14 日 06:00(图 5b),西南涡开始生成,其生成可能与高原涡的作用有关^[39],在 105°E 附近中低层(850 ~ 600 hPa)有弱的湿 Q 辐合,降水落区与湿 Q 辐合区相对应,但降水强度并不明显(图略);到 15 日 06:00(图 5c),西南涡强度达到最大值,对应暴雨中心(111°E 附近)上空(800 ~ 400 hPa)辐合强烈,中心位于 600hPa,表明暴雨区上空存在强烈的上升运动,且对未来 6 h 降水的分析表明,该地区将产生较强的连续性降水,同时暴雨落区两侧的辐散亦有所增强;16 日 00:00(图 5d),西南涡强度有所减弱,暴雨中心(116°E 附近)上空(900 ~ 400 hPa)的湿 Q 辐合强度较 15 日 06:00 也有所减弱,辐合中心位于 800 hPa,这表明垂直上升运动有所减弱,对应未来 6 h 降水范围亦有所减小。以上分析表明:非地转湿 Q 辐合强弱可直接影响上升运动的剧烈程度。且暴雨区对流层中低层辐合一致,说明产生暴雨区上升运动主要由于低层的强迫作用,从而对在不稳定层结产生强对流活动产生重要影响。

4 湿位涡分析

4.1 正压湿位涡垂直剖面分析

假相当位温(θ_{se})是综合表征温度和湿度的参数,其高低值区可以在一定程度上代表湿静力能量的高低,通过结合 MPV1 和 θ_{se} 来分析垂直剖面来分析暴雨的对流稳定状况。图 6 是沿低涡中心的 MPV1 和 θ_{se} 垂直分布。低涡产生前(14 日 00:00),对流层中低层(1000 ~ 600 hPa)主要为 MPV1 负值(对流不稳定)分布,600 hPa 以上则为 MPV1 正值(对流稳定)分布(图 6a);至 14 日 06:00(图 6b),弱降水区($104^{\circ}\text{E} \sim 106^{\circ}\text{E}$) MPV1 随高度呈现正负叠加分布,对流层中高层的 MPV1 正值向下延伸,使具有高位涡的冷空气叠加在底层扰动对应 MPV1 负值上,有利于低层气旋式辐合。特别是在暴雨期间,这种 MPV1 上正下负叠加分布变得更为明显;15 日 06:00(图 6c),暴雨区(111°E 附近)上空(1000 ~ 650 hPa) MPV1 呈上正下负叠加分布,正、负值中心分别为 1.8 PVU 和 -0.9 PVU,暴雨中心以西高层 400 hPa 存在一正压湿位涡舌(对流稳定)延伸至 550 hPa,有利于高空冷空气向中低层输送;16 日 00:00(图 6d),暴雨区(116°E 附近)上空(1000 ~ 800 hPa) MPV1 同样呈上正下负叠加分布,正、负值中心分别为 1.2 PVU 和 -2.1 PVU,且暴雨西侧高空 300 hPa—正压湿位涡舌(对流稳定)向下延伸至 650 hPa,低层也存在一 MPV1 正值区。暴雨西侧的 MPV1 高空正值(对流稳定),为暴雨区提供了持续的冷空气,因而对 MPV1 上正

下负叠加这样的分布形式,表明对流上空 MPV1 正值区(对流稳定区),即冷空气将以高位涡的形式向下输送,叠加在低层负值位涡上空,这加快了低层不稳定能量的释放,使对流不稳定性更加旺盛,从而有利于暴雨的发展^[40-41]。由以上分析可表明,此次暴雨由于高空冷空气向下入侵导致层结不稳定,叠加于低层湿位涡能量扰动之上,使对流得到发展。

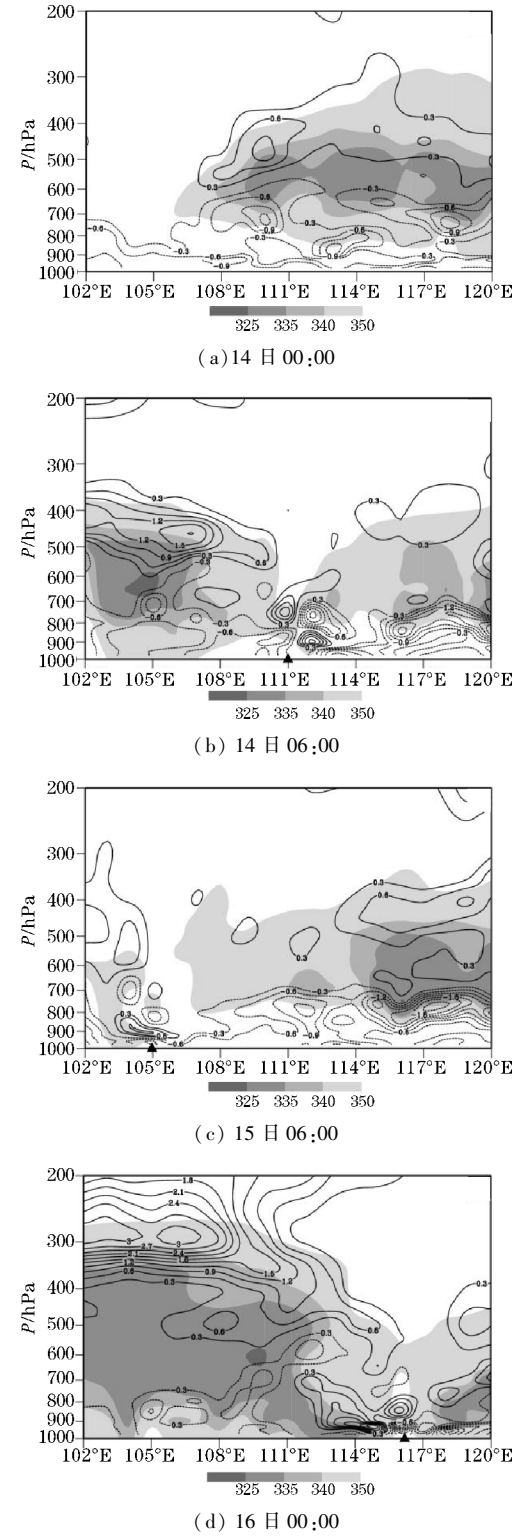


图 6 不同时刻过低涡中心的 MPV1 和假相当位温(阴影)垂直剖面分布

4.2 斜压湿位涡垂直剖面分析

由于低涡生成初期(14日00:00–06:00)无明显MPV2产生(图略),故主要对暴雨强盛期的MPV2进行分析。由15日06:00沿30°N纬向垂直剖面图(图7a)可知,MPV2最大值中心(0.4 PVU)中心位于850 hPa,暴雨中心(111°E附近)位于MPV2正、负等值线密集交界处,暴雨中心东侧为MPV2负值区,最大值(−1.6 PVU和−2.8 PVU)中心分别位于850 hPa和950 hPa,降水落区主要出现MPV2正、负等值线密集分布区。16日00:00沿32°N纬向垂直剖面图(图7b)可知,对流层低层主要为MPV2正值,最大值(0.8 PVU)中心位于950 hPa,暴雨中心(116°E附近)位于MPV2正值区东侧的零线附近,降水落区主要出现在MPV2正的等值线密集分布区。这是由于暴雨时刻MPV1为负(正)值时,MPV2正(负)值分布有利于垂直涡度的增长,未来6 h累积降水亦有部分降水区位于MPV2正、负值等值线密集分布区域。因此,尽管MPV2量级较MPV1小,但仍表现出对流层低层水平风的垂直切变和湿斜压性,且对流层低层MPV2正、负等值线密集分布区对降水落区的指示性较好,并对预报未来6 h累积降水区有一定的指示作用。

可见,在西南涡东移过程中,湿位涡可以较好地反映强对流不稳定性、强的层结不稳定和垂直涡度发展等,这些都是暴雨产生的重要物理机制。正压项湿位涡和斜压项湿位涡均对暴雨的产生有重要影响,对流层中低层正负重叠区域和降水落区有较好的对应关系,暴雨中心一般出现在MPV1上正下负叠加区域和MPV2正、负等值线零线附近。

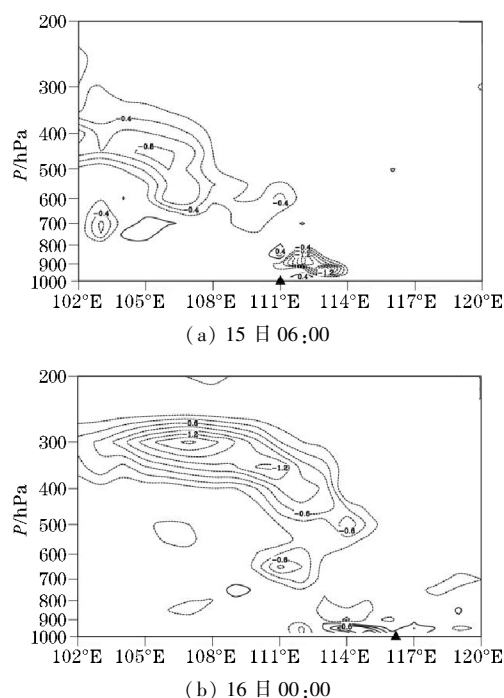


图7 不同时刻过低涡中心的MPV2垂直剖面分布

5 结论

利用NCEP逐日4次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点FNL再分析资料和中国自动气象站与CMORPH融合的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 格点逐时降水资料,采用非地转湿 Q 和湿位涡诊断方法,对2015年7月14–17日一次由西南低涡引发的自西向东强降水过程进行了诊断分析,得到以下结论:

(1)500 hPa高度场中高纬经向环流较强,中高纬低槽南下和低纬西太副高升北抬并稳定维持在中国中部,这样的高空环流形势有利于北方干冷空气与来自孟加拉湾的暖湿气流在中国中部相遇,为此次西南涡强降水过程提供了有利的条件。

(2)非地转湿 Q 辐合区能够较好地反映低涡降水的落区和强度,对未来6 h降水落区和强度的预报有一定的指示性。暴雨区对流层中低层上升运动明显,激发不稳定层结产生强对流活动,对应强的湿 Q 辐合,与降水强度呈正相关。且600 hPa上湿 Q 辐合中心和降水区相对应,未来6 h降水落区亦位于湿 Q 辐合区。

(3)东移型西南涡降水的发生、发展与湿位涡时空演变有较好的对应关系,对流层中低层MPV1上正下负叠加配置促进了不稳定能量的释放,是暴雨发生、发展的有利形势,而MPV1、MPV2的正、负值重叠区域有利于垂直涡度的增长,是降水落区预报的警戒区。

致谢:感谢成都信息工程大学科研项目(J201516、KYTZ201517);气象灾害教育部重点实验室开放课题(KLME201803)对本文的资助

参考文献:

- [1] 朱乾根. 天气学原理和方法[M]. 4版. 北京:气象出版社,2015:371–374.
- [2] 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.
- [3] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社,1986:1–270.
- [4] 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):39–47.
- [5] 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(6):46–52.
- [6] 何光碧. 西南低涡研究综述[J]. 气象,2012,38(2):155–163.
- [7] 母灵,李国平. 复杂地形对西南低涡生成和移动影响的数值试验分析[J]. 成都信息工程学院学报,2013,28(3):241–248.
- [8] 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(1):1–15.

- [9] 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分析[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1059-1075.
- [10] 邹波,陈忠明. 一次西南低涡发生发展的中尺度诊断[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 141-149.
- [11] 陈鹏,徐海明,林永辉. 涡度收支与潜热释放对西南低涡形成的作用[J]. 大气科学学报, 2014, 37(5): 575-584.
- [12] 刘还珠,张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构[J]. 应用气象学报, 1996, 7(3): 275-284.
- [13] 朱禾,邓北胜,吴洪. 湿位涡守恒条件下西南涡的发展[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 343-351.
- [14] 陈栋,李跃清,黄荣辉. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 185-201.
- [15] 李国平,刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 应用气象学报, 1994(3): 354-360.
- [16] 段旭,李英. 滇中暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 253-259.
- [17] 高守亭,雷霆,周玉淑,等. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 662-670.
- [18] 蒙伟光,王安宇,李江南,等. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析[J]. 大气科学, 2004, 28(3): 330-341.
- [19] 任余龙,寿绍文,李耀辉. 西北区东部一次大暴雨过程的湿位涡诊断与数值模拟[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 344-352.
- [20] 田珍富,腾俏彬. 一次局地特大暴雨湿位涡的中尺度分析[J]. 热带气象学报, 1998, 15(2): 49.
- [21] 姚秀萍,于玉斌. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 436-446.
- [22] 颜琼丹,蔡亲波. 非地转湿 Q 矢量在台风“云娜”暴雨过程中的分析应用[J]. 热带气象学报, 2006, 22(5): 505-509.
- [23] 高留喜,丛春华,李本亮. 地转湿 Q 矢量在北上台风“桃芝”造成山东大暴雨中的应用[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 533-538.
- [24] 傅灵艳,岳彩军,黄亿,等. 应用湿 Q 矢量分解方法诊断分析“圣帕”(2007)台风暴雨[J]. 热带气象学报, 2010, 26(5): 598-605.
- [25] 郭荣芬,鲁亚斌,李燕,等. “伊布都”台风影响云南的暴雨过程分析[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 784-791.
- [26] 黄楚惠,李国平. 基于螺旋度和非地转湿 Q 矢量的一次东移高原低涡强降水过程分析[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 319-326.
- [27] 李山山,李国平. 一次鞍型场环流背景下高原东部切变线降水的湿 Q 矢量诊断分析[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 317-329.
- [28] 刘运成,王澄海,隆霄. 非地转湿 Q 矢量在川北大暴雨过程分析中的应用[J]. 山地学报, 2008, 26(4): 445-452.
- [29] 张雪琦,白爱娟. “15·8”川东西南涡暴雨的 Q 矢量分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(3): 32-38.
- [30] Hoskins B J, Draghici I, Davies H C. A new look at the M-equation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1978, 104(439): 31-38.
- [31] 张兴旺. 湿 Q 矢量表表达式及其应用[J]. 气象, 1998, 24(8): 3-7.
- [32] 岳彩军,寿亦萱,寿绍文,等. Q 矢量的改进与完善[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 308-316.
- [33] 岳彩军,寿绍文,周军. 非地转 Q 矢量的改进及其应用[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 86-93.
- [34] 刘汉华,寿绍文,周军. 非地转湿 Q 矢量的改进及其应用[J]. 大气科学学报, 2007, 30(1): 86-93.
- [35] 屠妮妮,陈静,何光碧. 高原东侧一次大暴雨过程动力热力特征分析[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 796-806.
- [36] Bennetts D A, Hoskins B J. Conditional symmetric instability-a possible explanation for frontal rainbands[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 105(446): 945-962.
- [37] 黄楚惠,顾清源,李国平,等. 一次高原低涡东移引发四川盆地暴雨的机制分析[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 832-839.
- [38] 吴国雄,蔡雅萍. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-405.
- [39] 陈忠明,闵文彬,缪强,等. 高原涡与西南涡耦合作用的个例诊断[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 75-80.
- [40] 范可,琚建华,范学峰. 湿位涡诊断分析在东南亚强降水中的应用[J]. 气象科技, 2003, 31(1): 23-28.
- [41] 陶丽,李国平. 一次西南低涡诱发川南特大暴雨的综合诊断[J]. 气象科技进展, 2011, 1(3): 47-51.

A Diagnostic Analysis of the Heavy Precipitation Caused by Eastward Shift of Southwest Vortex

LIN Zouxing¹, HUA Wei^{1,2}, FAN Guangzhou^{1,2}, WU Qiuyue¹, LI Peizhi¹, WANG Xing¹

(1. College School of Atmospheric Sciences, Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster (KLME), Ministry of Education & Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to study the mesoscale characteristics of the heavy rain caused by the southwest vortex eastward movement, the NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ grid reanalysis data and China Automatic Weather Station with CMORPH fusion $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ precipitation data, the non-geostrophic Q and wet-potential vortex diagnostic methods were used to analysis the precipitation from the west to the east caused by the southwest vortex in central China from July 14 to 17, 2015. The results show that Influenced by the 500 hPa trough in the middle and high latitudes, the northward extension of the subtropical high in the low latitudes, the cold air along the south of the trough and the warm and humid air from Bengal, the precipitation is very favorable. The non-geostrophic wet- Q divergence reflects the precipitation area and intensity change of low-vortex precipitation, and has a good indication for the prediction of precipitation area and intensity in the next 6 hours. The wet Q convergence area is approximately consistent with the precipitation area in the next 6 hours, and the rainstorm center corresponds to the convergence center, which corresponds to the obvious upward motion over the sky, and plays an important role in stimulating convective motion. The occurrence and development of Southwest Vortex precipitation have a good correspondence with the spatial and temporal evolution of moist potential vorticity. The positive and negative superposition of MPV1 in the middle and lower troposphere promotes the release of unstable energy and is beneficial to the occurrence and development of rainstorm. The overlap area of MPV1 and MPV2 is favorable to the growth of vertical vorticity and is a warning area for precipitation forecast.

Keywords: atmospheric science; mesoscale meteorology; Southwest vortex; heavy rain; non-geostrophic wet- Q ; wet-potential vortex; diagnostic analysis