

文章编号: 2096-1618(2016)03-0305-06

影响重庆夏季暴雨的中尺度低涡的气候学特征

石鹏翔¹, 刘海文^{1,2,3}, 段伯隆¹, 朱玉祥⁴

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 3. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体学数值模拟国家重点实验室(LASG), 北京 100029; 4. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要:为揭示对流层中低层中尺度低涡影响重庆夏季暴雨的可能原因,使用1979~2011年 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的ECMWF再分析资料和重庆市逐日降水资料,采用天气学诊断、合成分析等方法,在对重庆低涡暴雨定义的基础上,从天气、气候学角度,对重庆低涡导致的重庆暴雨进行分析。结果表明,30余年来,重庆低涡导致的重庆暴雨共有26例,重庆低涡导致的暴雨降水量和暴雨次数在空间分布上并不相同,重庆低涡导致的暴雨降水量最大值主要位于重庆中南部,而重庆低涡暴雨次数最大值区域则主要位于重庆的西南。导致重庆夏季暴雨的重庆低涡在700 hPa上空主要为一个闭合的低压,重庆暴雨发生次数最多的地区主要位于从重庆垫江到南川槽线的西北部;700 hPa上重庆西部的 θ_{se} 的“槽”和“脊”,使冷暖空气在重庆地区交汇,非常有利于重庆暴雨的发生。在对流层中层,和重庆低涡相对应的是一高空槽;重庆暴雨主要位于高空急流出口区的右侧。重庆低涡垂直结构表明,其在对流层低层主要表现为气旋性辐合环流,在对流层中高层则为反气旋性辐散环流,这样的垂直空间配置,使重庆上空从对流层低层到对流层顶层附近,都为明显的上升运动;强烈的上升运动和来自孟加拉湾、南海以及重庆西北部的水汽,使得重庆西边界、北边界以及南边界呈现为水汽输入边界,水汽在重庆地区辐合盈余,导致重庆夏季暴雨的发生。

关键词:气候学;中尺度低涡;重庆;暴雨;高空急流

中图分类号:P463.3

文献标志码:A

0 引言

作为影响中国夏季暴雨的主要中尺度系统的西南涡和西北涡,一般被认为是比较浅薄的系统^[1]。对于中尺度低涡,已有大量研究。比如,赵思雄等^[2]通过细网格多层原始方程模式,对中尺度低压系统做了数值模拟,认为风场尤其是低层风场在中尺度低压发展过程中有重要作用。周晓平等^[3]在对梅雨锋上中尺度低压的数值模拟研究中认为,风场动力作用在该系统发生阶段比较重要,水汽潜热则在该系统的维持和发展阶段中作用比较明显。Bei等^[4]对1998年7月发生在长江流域的强暴雨过程进行研究,认为 β 中尺度系统的发生演变是导致这次暴雨的直接原因。董佩明等^[5]通过分析引起梅雨暴雨频发的中尺度低压,给出梅雨锋中尺度低压的动力和热力结构特征。Schumacher等^[6]、James等^[7]对于中尺度对流过程的研究表明,中尺度低压有利于中尺度对流发展中低层气旋性涡旋的伸展以及在弱气旋环境中中尺度对流的形成壮大。程麟生等^[8]使用MM5模式对1998年7月湖北特大暴雨模拟研究认为,此次特大暴雨与700 hPa

上 β 中尺度低涡的发生发展有着直接关系。Galarneau等^[9]对2003年一次中尺度对流涡旋的发展进行了研究,认为中尺度对流涡旋在“斜压转变”期间受高层的强迫,产生地面锋,这个过程中斜压机制使得地面低压发展壮大。Trier等^[10]对中尺度对流涡旋的研究认为,中尺度涡旋一个重要的特征是可以引起第二次对流的发展,并在其临近地区导致强降雨的发生。张旭斌和张熠^[11]对一次华南暴雨过程进行了数值模拟,分析中尺度对流系统的形成和发展机制,认为一系列中尺度对流系统的相继生成、合并和发展是导致此次暴雨的主要原因。Li等^[12]对2008年6月中国南方的一次暴雨研究认为,较强的涡旋分布、水汽供应以及上升运动使得这一区域对流运动频繁发生发展,并给出了此类暴雨发生的概念模型。

关于对流层中低层中尺度低压影响川渝地区暴雨的研究也有很多。比如,Kuo等^[13]对1981年7月发生在四川盆地的强降水研究认为,稳定中尺度涡旋的停留以及低层准静止辐合区的维持是引起这次强降水的主要天气系统。矫梅燕等^[14]对2004年9月3~5日发生在川东地区大暴雨过程进行分析,认为西南低涡与暴雨区相对应的整层强上升运动是低涡切变线南北两侧正反向垂直环流共同作用的结果。周国兵等^[15]对2004年5月发生在重庆的一次暴雨进行诊断

分析和数值模拟,认为在高空低槽东移过程中,重庆地区产生的强中尺度气旋性辐合以及低层辐合高层辐散产生的强上升运动促使这次大暴雨的产生。赵思雄等^[16]通过对2004年9月川渝大暴雨的研究认为,该次暴雨主要有低空切变线和西南低涡两个降水系统,而在西南低涡影响阶段的降水量最强,降水范围最大。于波等^[17]使用数值模式对这次暴雨进行模拟研究,认为高原切变线、西南低涡、高空涡旋以及被切断的副热带高压是影响此次暴雨过程的主要天气系统。

上述研究表明,对流层中尺度低涡对于重庆以及中国东部地区暴雨的形成有重要作用,但这些研究大都是从个例出发研究对流层中尺度低涡在形成暴雨中的作用,如何从天气、气候学角度,研究对流层中低层低涡影响重庆夏季暴雨,到目前为止研究的相对较少。论文拟从天气、气候角度,分析对流层中低层低涡影响重庆夏季暴雨的原因,这对提高重庆夏季暴雨的预报能力,显然具有一定的现实意义。

1 资料与方法

所用资料包括:重庆市气候中心提供的34个观测站1979~2011年重庆市夏季逐日降水资料;1979~2011年一日4次的ECMWF再分析资料(ERA Interim),其水平分辨率为1°×1°,垂直分辨率为17层,气象要素包括位势高度场、风场、温度、相对湿度、垂直速度等。

为保证重庆夏季暴雨具有一定的区域性,参照陶诗言^[18]对暴雨日的选取标准,规定在重庆区域范围内有5个台站日降水量大于50 mm为一个暴雨日;且在进行合成分析时,仅当站点日降水大于50 mm参与计算。为简单起见,不考虑影响重庆夏季暴雨对流层中尺度低涡的源地,把位于重庆上空对流层中低层的中尺度低值系统,均称为重庆上空对流层中低层中尺度低涡;参照卢敬华^[19]关于西南低涡的定义,在(28°N~32.5°N, 105°E~110.5°E)范围内,在700 hPa或850 hPa天气图上,至少在一日4次的2个时次内,出现一条闭合等压线的中尺度低压,且风场具有明显的气旋性环流,为一次影响重庆夏季天气的中尺度低涡,在此简称为中尺度低涡。当重庆夏季出现暴雨且其上空存在中尺度低涡时,简称为重庆低涡暴雨。通过统计,1979~2011年共有26例重庆低涡暴雨。在对重庆低涡导致的重庆暴雨进行环流分析时,将一日4次资料转化为日资料。文中的夏季指6~8月。

从地面到300 hPa垂直积分的水汽通量计算^[20],

公式为

纬向水汽通量: $Q_{\lambda} = \frac{1}{g} \int_{300}^{P_s} (uq) dp$,

经向水汽通量: $Q_{\varphi} = \frac{1}{g} \int_{300}^{P_s} (vq) dp$.

其中: g 为重力加速度,单位为 $m \cdot s^{-2}$; q 为各层比湿,单位为 $kg \cdot kg^{-1}$; u 、 v 分别为 u 方向和 v 方向的风速,单位为 $m \cdot s^{-1}$; P_s 为地表气压。

2 重庆夏季低涡暴雨降水量和暴雨次数的空间分布

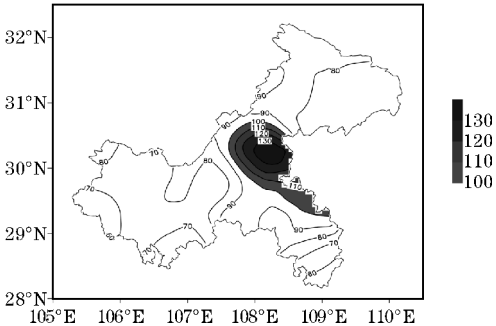


图1 1979~2011年重庆夏季中尺度低涡暴雨日平均降水量合成图

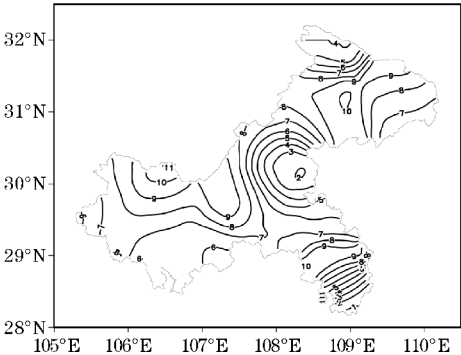


图2 1979~2011年重庆夏季中尺度低涡暴雨出现的次数空间分布

为分析夏季重庆低涡导致的重庆暴雨的空间分布特征,图1给出1979~2011年重庆低涡导致的暴雨降水量合成图。由图1可见,重庆低涡导致的暴雨极大值主要位于重庆中东部的忠县附近,且重庆低涡导致的暴雨的降水量空间分布特征和暴雨出现次数的空间分布特征(图2)并不一致。暴雨出现次数最多的地方则位于重庆的西南部,进一步分析重庆暴雨降水量最大值位于重庆中东部的原因,发现图1中暴雨极大值所在的中东部的忠县主要由两次较大暴雨造成,这两次暴雨降水量分别为171 mm和112 mm,由此可见,重庆低涡暴雨降水量极大值和暴雨发生次数的极大值并不位于同一个地方。

3 影响重庆夏季暴雨的中尺度低涡分析

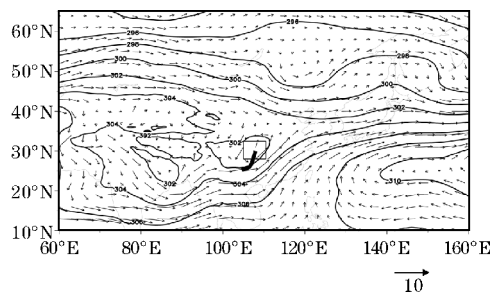


图3 1979~2011年700 hPa重庆低涡暴雨日平均位势高度和平均风场合成图,(图中方框表示重庆地区(下同))

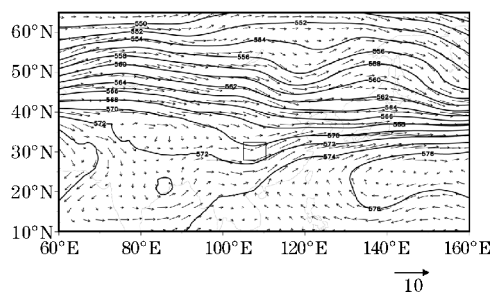


图4 1979~2011年500 hPa重庆低涡暴雨日平均位势高度和平均风场合成图

为进一步验证上述26例重庆低涡选取的合理性,图3给出这26例700 hPa位势高度合成图。由图3可见,在重庆及其以西的四川盆地地区,出现302 dagpm的闭合等值线,风场也呈现明显的气旋性环流特征,重庆的垫江到南川存在一个浅槽,重庆暴雨发生次数最多的地方主要位于该浅槽的后部。图3还表明,尽管在选取影响重庆暴雨的重庆低涡时,仅仅要求其维持两个时次,但是从26例逐日资料合成图上,仍然在对流层中低层高度上出现一个闭合的中尺度低涡,这也很好地说明选取的重庆低涡个例具有一定的代表性。另外,重庆低涡和位于海上的副热带高压,形成“东高西低”的形势,使得来自河西走廊的偏北气流和来自印度洋的暖湿空气在重庆地区交汇,导致重庆暴雨的发生。

图4给出1979~2011年形成重庆低涡暴雨的500 hPa位势高度合成图。图4和图3相比,天气形势和系统有所不同。在中高纬度,整个环流形势呈现为三脊两槽型,其中两个槽线分别位于阿尔泰山地区和大兴安岭地区,三个脊则分别位于巴尔喀什湖地区、贝加尔湖地区和鄂霍次克海地区。需要强调指出的是,和700 hPa图相对应的中尺度低涡在500 hPa则改变为高空槽,这进一步说明影响重庆夏季暴雨的中尺度低

涡的浅薄性。另外,位于贝加尔湖以东上空的700 hPa槽线,在500 hPa表现为从大兴安岭过太行山、秦岭到重庆的一个深槽,而且在大兴安岭段的槽和贝加尔湖附近的700 hPa槽相比,位置略微偏东,深度偏南。

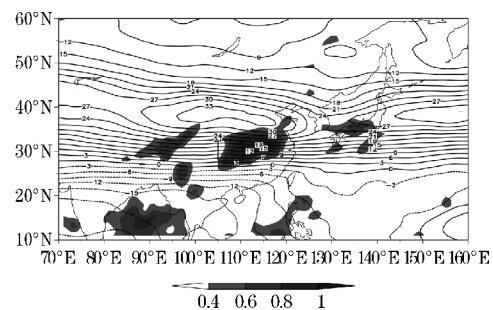


图5 1979~2011年200 hPa重庆低涡暴雨日平均高空西风(等值线)和平均散度(阴影)合成图

高空急流及其附近散度场对低层气旋有重要的影响^[21]。对于重庆低涡这个浅薄系统,是否在对流层中上层也存在高空急流,为此,图5给出1979~2011年200 hPa高度上导致重庆低涡暴雨的200 hPa纬向风分布。由图5可见,在重庆上空对流层中上层,的确存在一个高空急流核。在该急流核的出口处右侧,存在一个明显的散度正值区,这和Uccellini等^[22]所揭示的高空急流轴出口处右侧存在辐合下沉运动刚好相反,重庆暴雨区主要位于高空急流出口处右侧的辐散区。

综上所述,影响重庆夏季暴雨的中尺度低涡表现为一个浅薄系统,其在对流层低层主要表现为一个中尺度低涡,在对流层中层则表现为一个深厚的槽线;影响重庆夏季暴雨的天气形势是,在对流层中低层中高纬度主要为两脊一槽,中纬度为“东高西低”的形势,在对流层中高层,重庆上空对流层中低层的中尺度低涡主要位于高空急流出口处右侧的辐散区。

4 影响重庆夏季暴雨的中尺度低涡动力学特征

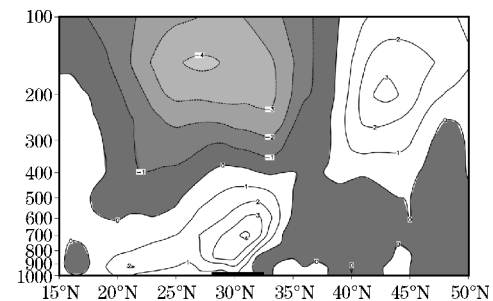


图6 1979~2011年重庆低涡暴雨日平均涡度沿107°E的纬度-高度剖面合成图

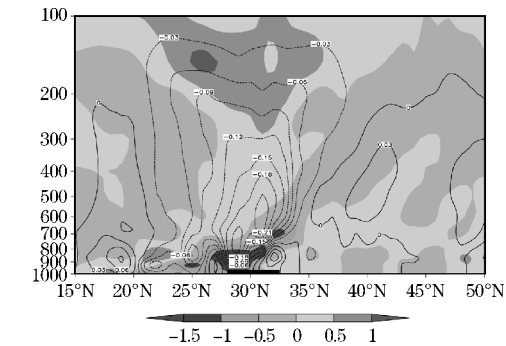


图7 1979~2011年重庆低涡暴雨日平均散度(阴影)和平均垂直风速(等值线)沿107°E的纬度-高度剖面合成图

为研究中尺度低涡影响重庆夏季暴雨的大尺度动力学特征,图6给出上述26例重庆中尺度低涡暴雨日涡度沿107°E的纬度-高度剖面合成图。由图6可见,在对流层中低层400 hPa以下,主要为正涡度区,正涡度中心主要位于重庆上空700 hPa高度,这和图3在700 hPa高度上存在的中尺度气旋性低涡相对应。在对流层中高层,负的涡度中心主要位于对流层中高层的200~100 hPa,且位于重庆南部。图7给出重庆低涡暴雨日散度沿107°E的纬度-高度剖面合成图,图7和图6相比,虽然也表现出低层正涡度,高空负涡度这样的配置,但是负的散度从对流层低层到对流层中高层向北倾斜的一个特征,重庆上空存在一个明显的上升运动,负的上升运动中心主要出现在500~800 hPa高度之间,在200 hPa高度仍然有明显的上升运动,强烈的上升运动是重庆低涡暴雨得以形成的一个重要条件。

5 影响重庆夏季中尺度低涡暴雨的冷暖空气分析

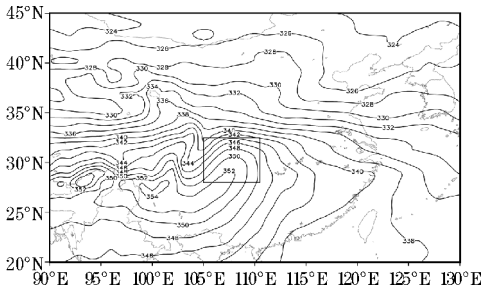


图8 1979~2011年700 hPa重庆低涡暴雨日平均 θ_{se} 合成图

冷暖空气的相互作用是西风带降水的一个重要特征。刘还珠等^[23]认为, θ_{se} 的密集带正是冷暖空气团所交界的位置。为分析冷暖空气的相互作用对重庆夏季暴雨的影响,图8给出1979~2011年重庆夏季中尺度低涡暴雨日700 hPa上 θ_{se} 空间分布。由图8可见,

在重庆西部地区是一个 θ_{se} “槽”,在重庆上空是 θ_{se} 的一个“脊”,重庆上空的 θ_{se} 无论从经度还是纬度方向上,都存在很大的 θ_{se} 梯度,重庆西部的冷空气和重庆上空的暖湿气团相互作用,导致重庆夏季暴雨的发生。

6 影响重庆夏季中尺度低涡暴雨的水汽条件分析

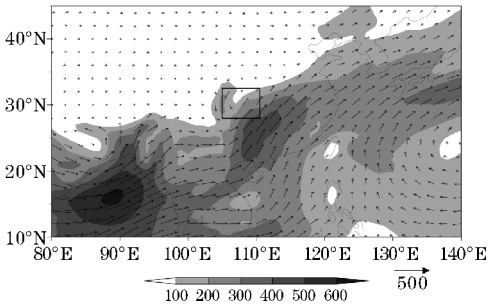


图9 1979~2011年重庆低涡暴雨日平均水汽通量及其矢量分布合成图

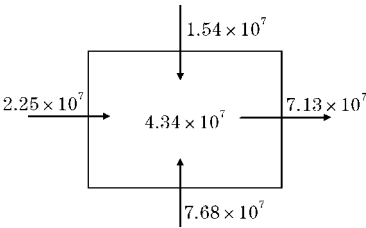


图10 1979~2011年重庆低涡暴雨日平均水汽收支合成图(箭头表示水汽输送方向)

源源不断的水汽供应是产生暴雨的一个重要条件^[24],为进一步分析重庆低涡暴雨的水汽来源,图9给出1979~2011年重庆夏季中尺度低涡暴雨日地面-300 hp的整层积分的水汽通量合成图。由图9可见,重庆低涡暴雨的水汽主要来自于孟加拉湾、南海以及重庆西北部的北方水汽,这3支水汽在重庆地区形成气旋性水汽辐合。水汽收支结果表明(图10),重庆夏季中尺度低涡暴雨的水汽主要由3个边界供应,其分别为南边界、西边界以及北边界,只有东边界是水汽输出边界,其中南边界水汽供应最多,和图9所示的水汽来源基本一致,这也和Huang等^[25]关于2009~2013年四川盆地夏季暴雨水汽来源的研究相符合。整个重庆地区为水汽盈余,这为重庆夏季暴雨的发生提供有利的水汽条件。

7 结束语

利用1979~2011年重庆逐日台站降水资料及1°×1°ECMWF Interim的再分析资料级,通过天气学诊断、合成分析等方法,分析影响重庆夏季暴雨的中尺度

低涡的环流特征,主要结论有:

(1)30多年来,重庆中尺度低涡暴雨共有26例,重庆中尺度低涡导致的暴雨的降水量空间分布特征和暴雨出现次数的空间分布特征并不一致,重庆暴雨降水量的极大值主要位于重庆的中东部,而发生次数的极大值地区主要位于重庆的西南部,重庆暴雨发生次数最多的地方主要位于与重庆低涡暴雨相伴随的重庆垫江到南川的一个浅槽后部。

(2)重庆中尺度低涡是位于700 hPa高度上的一个浅薄系统,在对流层中层500hPa高度上,其主要表现为一个西风槽,在对流层中高层则为一高空急流核,重庆暴雨主要发生在高空急流核出口处的右侧,在700hPa高度上,重庆西部地区的一个 θ_{se} “槽”和重庆上空的一个 θ_{se} “脊”,使重庆西部的冷空气和其上空的暖湿气团相互作用,重庆夏季暴雨得以产生。

(3)影响重庆夏季暴雨的低涡在垂直空间上表现为对流层低层为气旋性涡度场,对流层上空为反气旋性涡度场,散度场有从对流层低层到对流层中高层向北倾斜的一个特征,整个垂直分布呈现为低层辐合高层辐散,上升运动一直延伸到对流层顶。

(4)重庆低涡暴雨的水汽主要来自孟加拉湾、南海以及中纬度西风带,西边界、北边界以及南边界是重庆低涡暴雨的主要水汽输入边界,东边界是重庆低涡暴雨水汽输出边界,四边水汽在重庆辐合,为重庆夏季暴雨提供了丰富的水汽供应。

需要指出的是,论文仅仅从降水条件上分析了重庆低涡暴雨的环流特征,至于高空急流与重庆低涡之间的动力耦合关系,仍值得进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 陶诗言,丁一汇,周晓平. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 1979, 3(3):227-238.
- [2] 赵思雄,周晓平,张可苏,等. 中尺度低压系统形成和维持的数值实验[J]. 大气科学, 1982, 6(2):109-117.
- [3] 周晓平,赵思雄,张宝严. 梅雨锋上中尺度低压发生的数值模拟实验[J]. 大气科学, 1984, 8(4):353-361.
- [4] Bei Naifang, Zhao Sixiong, Gao Shouting. Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998[J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 2002, 80(1):153-164.
- [5] 董佩明,赵思雄. 引发梅雨锋暴雨的频发型中尺度低压(扰动)的诊断研究[J]. 大气科学, 2004, 28(6):876-891.
- [6] Schumacher R S, Johnson R H. Mesoscale Processes Contributing to Extreme Rainfall in a Midlatitude Warm-Season Flash Flood [J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(10):3964-3986.
- [7] James E P, Johnson R H. Patterns of Precipitation and Mesoscale Evolution in Midlatitude Mesoscale Convective Vortices [J]. Mon. wea. rev, 2010, 138(3):909-931.
- [8] 程麟生,冯伍虎. "987"突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟[J]. 大气科学, 2001, 25(4):465-478.
- [9] Galarneau T J, Bosart L F, Davis C A, et al. Baroclinic Transition of a Long-Lived Mesoscale Convective Vortex [J]. Monthly Weather Review, 2010, 137(2):562-584.
- [10] Trier S B, Davis C A, Tuttle J D. Long-Lived Mesoconvective Vortices and Their Environment. Part I: Observations from the Central United States during the 1998 Warm Season [J]. Mon. wea. rev, 2010, 128(10):3376-3395.
- [11] 张旭斌,张熠. 一次华南暴雨过程的数值模拟——中尺度对流系统形成发展机制[J]. 气象科学, 2011, 31(2):145-152.
- [12] Li B, Liu L P, Zhao S X. The possible mechanism of a type of vortex heavy rainfall during the pre-rainy season in South China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2011, 4(5):247-252.
- [13] Kuo Y H, Cheng L, Anthes R A, et al. Mesoscale Analyses of the Sichuan Flood Catastrophe, 11-15 July 1981 [J]. Monthly Weather Review, 1986, 114:1984-2003.
- [14] 矫梅燕,李川,李延香. 一次川东大暴雨过程的中尺度分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5):701-704.
- [15] 周国兵,隆霄,刘毅. 重庆市"5·29"暴雨天气过程诊断分析与数值模拟[J]. 气象科技, 2006, 34(1):29-34.
- [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.
- [17] 于波,林永辉. 引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析[J]. 大气科学, 2008, 32(1):141-154.

- [18] 陶诗言. 中国之暴雨[M], 北京:科学出版社, 1980:225.
- [19] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社, 1986:263.
- [20] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京:科学出版社, 1989:293.
- [21] 全美兰, 刘海文, 朱玉祥, 等. 高空急流在北京“7.21”暴雨中的动力作用[J]. 气象学报, 2013, 71(6):1012-1019.
- [22] Uccellini L W, Johnson D R. The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms[J]. Mon. wea. rev, 1979, 107, 682-703.
- [23] 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.
- [24] 丁一汇, 胡国权. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2):129-145.
- [25] Huang Y, Cui X. Moisture sources of torrential rainfall events in the Sichuan Basin of China during summers of 2009-2013 [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16:1906-1917.

The Summery Heavy Rainfall Climatic Characteristics Associated with the Mesocale Low Vortex over Chongqing

SHI Peng-xiang¹, LIU Hai-wen^{1,2,3}, DUAN Bo-long¹, ZHU Yu-xiang⁴

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 2. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 3. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to reveal the possible reason that the mesoscale low vortex in the lower troposphere affect the summer heavy rainfall in the Chongqing area, ECMWF reanalysis data and Chongqing daily precipitation data us the weather diagnosis and analysis synthesis methods ased on the definition of the Chongqing vortex heavy rainfall, then from the weather and climate perspective, the heavy rainfall caused by the Chongqing Vortex. The results show that, more than 30 years, the Chongqing Vortex have cased Chongqing heavy rainfall in a total of 26 cases. The precipitation and frequency of heavy rainfall caused by Chongqing vortex are not the same in the space distribution. The maximum of heavy rainfall precipitation is mainly located in the central and southern Chongqing, but the frequency maximum area is mainly located in the southwest Chongqing. On 700hPa the Chongqing vortex which caused Chongqing summer heavy rainfall is a closed low pressure. The region that Chongqing heavy rainfall occurs most frequently is mainly located in the north-west of trough-line from Chongqing Dianjiang to Nanchuan. On 700hPa the θ_{se} "trough" in west Chongqing and its "ridge" over Chongqing make the intersection of cold and warm air in the Chongqing region, which is very conducive to Chongqing heavy rainfall occur. In the middle troposphere, corresponding to the Chongqing vortex is an upper trough. Chongqing heavy rainfall is mainly located in the right side of upper-level jet stream outlet zone. The Chongqing vortex vertical structure show that it is convergence cyclonic circulation in the lower troposphere and is divergent anticyclonic circulation in the upper troposphere, an obvious upward movement from the lower troposphere to top over Chongqing. The strong upward movement and the water moisture from the Bay of Bengal, South China Sea and the northwestern Chongqing moisture make the Chongqing west boundary, northern boundary and southern boundary appear as input border of water vapor, which lead to the moisture convergence and surplus and final result the summer heavy rainfall occur in Chongqing.

Key words: climatology; mesoscale low vortex; chongqing; heavy rainfall; upper-level jet