

重庆市北碚区两次暴雨天气过程对比分析

刘星辉

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: liuxinghui787@163.com

收稿日期: 2020年9月7日; 录用日期: 2020年9月20日; 发布日期: 2020年9月27日

摘要

本文应用了ECMWF-ERA5的逐时再分析数据对重庆市北碚区2019年7月31日和9月9日两次暴雨天气过程进行了比较和分析, 结果表明: 从等压面图的高空环流形势来看, 影响两个过程的降水系统均是高空低涡, 北碚地区均受偏南气流的控制。从大尺度分析9.9过程系统配置强度强于7.31过程, 7.31过程其纬度系统稳定少动。从影响暴雨的物理量场分析来看, 7.31过程最大负垂直速度中心与9.9过程最大负垂直速度中心出现的时间和高度均有所差异。从涡度、散度和水汽条件分析, 9.9过程辐合上升和正涡度平流条件优于7.31过程且9.9过程上空水汽更为充沛。从两次天气过程中影响降水的系统综合来看, 7.31过程降水影响范围小, 更多的是局部性降水, 由于低值系统稳定, 因此降水持续时间较长。而9.9过程能量和水汽条件均优于7.31过程, 降水强度更强, 影响范围更广。

关键词

北碚区, 暴雨, 环流场, 天气分析

Comparative Analysis of Two Heavy Rain Weather Processes in Beibei District of Chongqing City

Xinghui Liu

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: liuxinghui787@163.com

Received: Sep. 7th, 2020; accepted: Sep. 20th, 2020; published: Sep. 27th, 2020

Abstract

This paper uses the time-to-hour reanalysis data of ECMWF-ERA5 to compare and analyze the two heavy rain weather processes in Beibei District of Chongqing City on July 31 and September 9, 2019. The results show that the upper-air circulation from the isobaric map in terms of the situa-

tion, the precipitation systems that affect the two processes are both high-altitude vortexes, and the Beibei area is controlled by the southerly airflow. From the large-scale analysis, the 9.9 process system configuration strength is stronger than the 7.31 process, and the latitude system of the 7.31 process is stable and less moving. From the analysis of the physical quantity field that affects the rainstorm, the time and height of the maximum negative vertical velocity center in the 7.31 process and the maximum negative vertical velocity center in the 9.9 process are different. From the analysis of vorticity, divergence and water vapor conditions, the convergent rise and positive vorticity advection conditions of the 9.9 process are better than those of the 7.31 process and the water vapor over the 9.9 process is more abundant. From the comprehensive point of view of the system that affects precipitation during the two weather processes, the precipitation impact range of the 7.31 process is small, and more local precipitation. Because the low-value system is stable, the precipitation lasts longer. The 9.9 process energy and water vapor conditions are better than the 7.31 process, the precipitation intensity is stronger and the influence range is wider.

Keywords

Beibei District, Heavy Rain, Circulation Field, Weather Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

我国是一个暴雨灾害严重的国家，每年由于暴雨灾害造成的损失数以亿计[1]。川渝地区地处青藏高原东侧，受高原大地形和山地、丘陵地形的影响，该地区气候和天气异常复杂[2]，暴雨灾害是夏季川渝地区最重要的气象灾害之一[3]，它与人们的生活，交通，出行息息相关。暴雨常常导致一些灾害发生，例如山体滑坡，泥石流等，对人们的生命安全以及财产带来了极大的威胁。所以，中国政府和各级气象部门非常重视对暴雨的预报和研究分析。

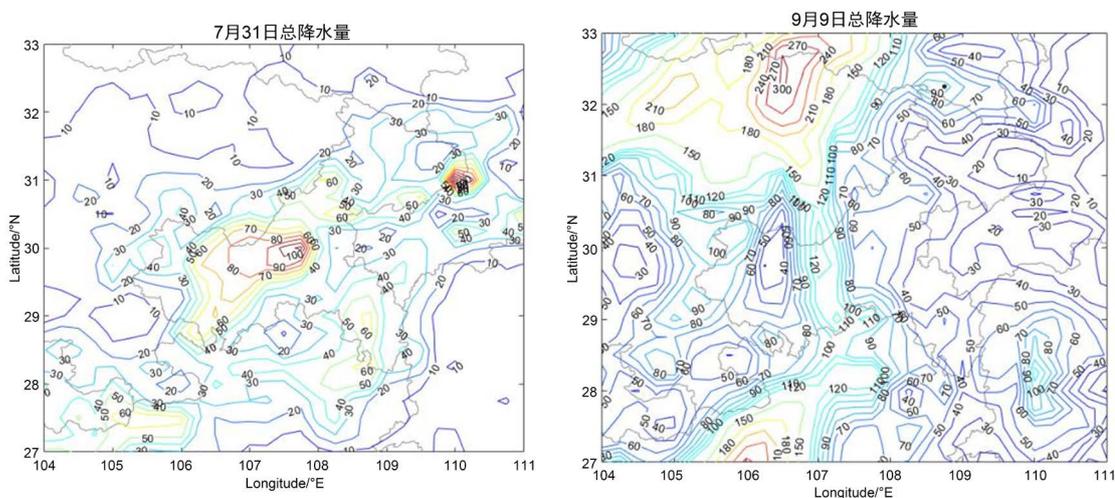


Figure 1. 7.31 and 9.9 process 24-hour precipitation distribution map

图 1. 7.31 和 9.9 过程 24 小时降水量分布图

重庆市北碚区气象局 2019 年 7 月 31 日(下文简称 7.31 过程) 6 时 30 分发布了“暴雨黄色预警信号”, 2019 年 09 月 09 日(下文简称 9.9 过程) 01 时 30 分发布“暴雨黄色预警信号”, 图 1 是 7 月 30 日 23 时至 31 日 23 时和 9 月 8 日 23 时至 9 日 23 时的 24 小时降水量, 由图 1 可知 7.31 过程 24 小时降水量已达 80 mm 以上, 9.9 过程 24 小时降水量已达 70 mm 以上, 两次降水均已达到暴雨级别。本文通过对这两次典型的暴雨天气过程进行对比分析, 以期对预报和分析暴雨天气过程提供帮助与参考, 对北碚区防灾减灾提供理论依据的作用。

1.2. 研究现状

暴雨是最常见的天气灾害之一, 高空低值系统和水汽抬升往往是导致暴雨天气的条件。孙婕等(2013)研究表明, 500 hPa 高空低槽与 850 hPa 四川盆地浅薄低涡耦合作用引发盆地产生大暴雨, 流场呈现有低层辐合、高层辐散的结构, 垂直速度场上维持较强烈的上升运动, 这些都为暴雨的发展和持续提供了有利的条件[4]。高松等(2019)指出四川盆地中东部强烈的不稳定大气层结在冷空气的触发下产生强对流天气, 同时, 孟加拉湾水汽源源不断地向盆地输送, 低层辐合, 高层辐散产生的抽吸作用配合上升运动进一步促使了暴雨的产生和维持[5]。彭军等(2010)通过数值模拟发现暴雨中心的涡度和随时间演变与降水量随时间的演变在中尺度特征上有很好的对应关系, 低层辐合和正涡度、高层辐散和负涡度极值与降水峰值对应, 且低层辐合最大值略超前于降水峰值, 这对预报有指示意义[6]。

1.3. 研究目的

暴雨形成的过程是相当复杂的, 一般从宏观物理条件来说, 产生暴雨的主要物理条件是充足的源源不断的水汽、强盛而持久的气流上升运动和大气层结构的不稳定。暴雨常常是从积雨云中落下的, 形成积雨云的条件是大气中要含有充足的水汽, 并有强烈的上升运动, 把水汽迅速向上输送, 云内的水滴受上升运动的影响不断增大, 直到上升气流托不住时, 就急剧地降落到地面[6]。暴雨灾害的发生有其自然的原因和人为因素。当暴雨发生以后, 地理环境成为影响灾害发生的重要因素[7]。地理环境包括地形、地貌、地理位置和江河分布等。我国面积广大, 地形复杂, 既有高原和大山, 也有平原、盆地和丘陵, 不同的地形对暴雨形成灾害的影响是不同的。

目前国内外对于暴雨的研究主要是对天气系统的和暴雨机制成因的分析, 对一个辖区区域性的研究较少, 研究这种辖区的天气灾害有利于对当地的生产、生活、政治决策提出参考性的建议。因此本文以重庆市北碚区为研究区域, 对两次暴雨天气过程进行了分析。北碚区位于重庆西北方向, 辖区内有嘉陵江以及缙云山, 受地形地貌的影响, 常年降水充沛, 区内多发洪涝灾害, 山体滑坡等。通过北碚两次暴雨天气过程的对比分析, 对北碚区的气象防灾减灾有提供理论原理依据的作用, 以达到提高人们对极端天气的认识, 减少人们经济损失的目的。

2. 资料与方法

2.1. 资料说明

数据均来自于 ECMWF-ERA5 的逐时再分析数据, 分辨率均为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。分别为: 2019 年 7 月 31 日和 2019 年 9 月 9 日 00 时、06 时、12 时、18 时(UTC), 500 hPa、700 hPa 和 850 hPa 的散度场、位势高度场、涡度场、U 风场、V 风场; 2019 年 7 月 31 日和 2019 年 9 月 9 日 00 时、06 时、12 时、18 时(UTC), 1000 hPa 至 1 hPa 共 37 个气压层的垂直速度场; 2019 年 7 月 31 日和 2019 年 9 月 9 日 00 时、06 时、12 时、18 时(UTC), 500 hPa、700 hPa 和 850 hPa 的水汽通量与水汽通量散度场。

2.2. 研究方法

随着现代天气预报技术的发展, 呈现出了资料多, 信息量大, 数值预报产品丰富的特点。本文主要分析了 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa 的环流场形势以及与暴雨相关物理量场: 垂直速度(垂直速度是在大尺度下通过间接计算而得到, 例如连续积分方程法)、涡度(涡度是衡量空气质块转动强度物理量, 根据涡度变化, 就可以了解气压系统的发生和发展, 涡度虽为矢量, 但在天气学中我们一般只计算其垂直分量)其计算公式为:

$$\xi = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y \quad [8] \quad (1)$$

散度(散度是衡量速度场辐散、辐合强度的物理量)散度的水平表达式为:

$$D = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y \quad [8] \quad (2)$$

$D > 0$ 表示有辐散, $D < 0$ 表示有辐合。

水汽通量(水汽通量是单位时间内经与气流方向垂直的单位截面积的水汽质量), 其计算公式为:

$$|F| = |v|q/g \quad [8] \quad (3)$$

水汽通量散度, 其计算公式为:

$$A = \nabla \cdot (1/gV \rightarrow q) = \partial / \partial x (1/guq) + \partial / \partial y (1/gvq) \quad [8] \quad (4)$$

利用以上物理量的计算分析将重庆市北碚区 7.31 及 9.9 两次暴雨天气过程进行对比分析和研究。

2.3. 北碚区地理状况

如图 2 所示, 北碚区是重庆市主要城市的九个区之一, 位于重庆市核心区的西北部。它位于东经 $106^{\circ}18'02'' \sim 106^{\circ}40'57''$, 北纬 $29^{\circ}37' \sim 30^{\circ}05'08''$ 它与东部的渝北区, 南部的沙坪坝区, 西部的璧山区和北部的合川区相连。东西距离最大的是 24 公里, 南北最长的是 33 公里, 总面积 755 平方公里, 其中耕地 260 平方公里, 林地 249 平方公里, 其中 23 平方公里平方公里的水域面积。



Figure 2. Distribution map of various districts and counties in Chongqing
图 2. 重庆市各区县分布图

北碚区位于四川盆地东部平行的铃谷地区。地形受川东南弧形构造带的华莹山帚形褶皱的地质构造控制。背斜形成陡峭的低矮山脉，地形陡峭，通常在 500~900 米的高度；向斜线形成广阔的丘陵山谷，通常在 200~500 米的高度。嘉陵江从盐井经炭坝进入，从西北向东南贯穿全境，从童家溪镇五星村流出。北碚区的最高点是金刀峡镇的天竹林(海拔 1316 米)，最低点是童家溪镇的嘉陵江(海拔 175 米)。北碚区属于东南亚季风环流控制的亚热带湿润气候特征。

3. 两次暴雨天气过程环流形势分析

3.1. 500 hPa 环流场形势分析

如图 3 所示，7 月 31 日 08 时，高纬度地区呈两槽一脊的形势，西西伯利亚低涡中心强度 528 dagpm，东西伯利亚低涡中心强度 536 dagpm，两处低涡分别向南边延伸出一个低槽，贝加尔湖地区至我国新疆地区为高压脊。中纬度地区，纬向多波动，东北冷涡中心强度 556 dagpm，低槽延伸到内蒙甘肃一带。低纬地区，青海高压 576 dagpm，西太副高中心位于洋面，中心强度 580 dagpm，我国南海地区有热低压，中心强度 568 dagpm。

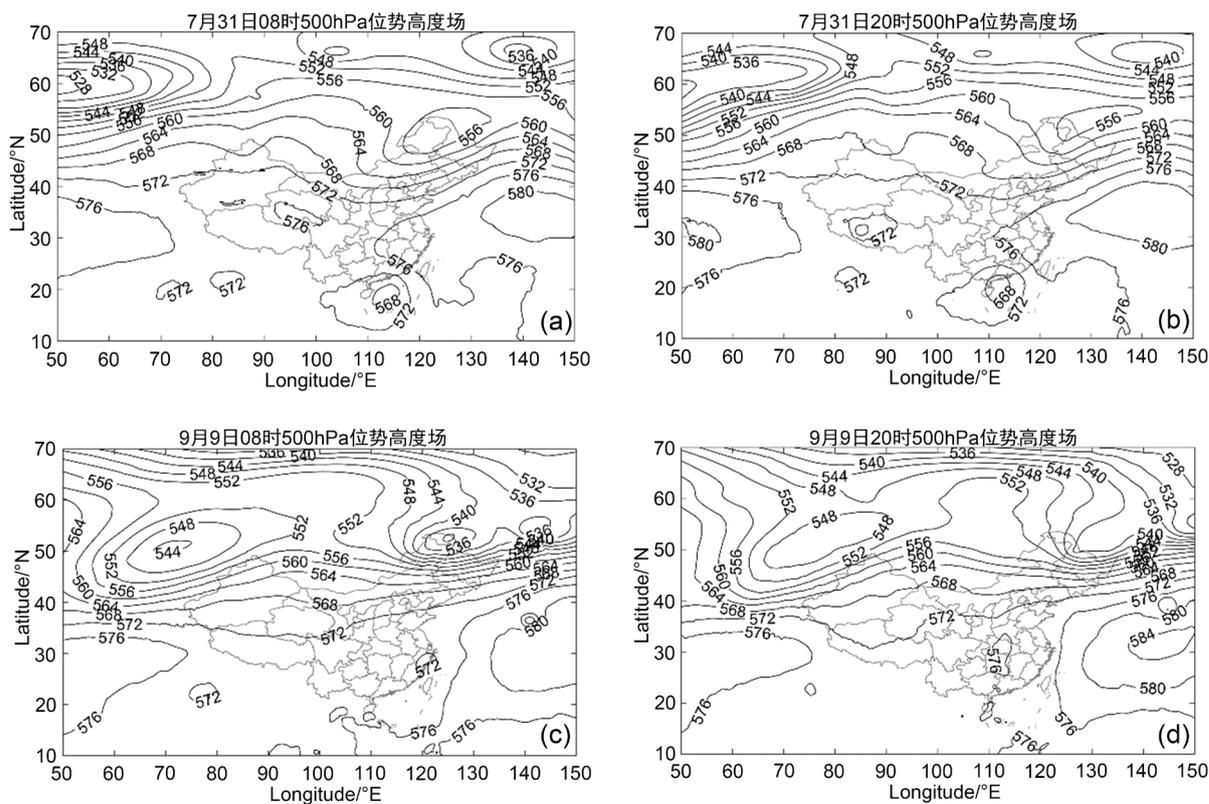


Figure 3. 500 hPa Geopotential Height Field, July 31 (a), 08:00 and 20:00 (b), September 9th, 08:00 (c) and 20:00 (d)

图 3. 500 hPa 位势高度场，7 月 31 日(a)，08 时和 20 时(b)，9 月 9 日 08 时(c)和 20 时(d)

青海高压西部的偏北气流将北方冷空气输送到川渝地区，热低压和副高外围共同作用的偏南气流源源不断向雨区输送暖湿气流，从 7 月 31 日 20 时形势场可以看出，各纬度系统稳定少动，再加上盆地地形影响，所以使得降雨持续时间较长。

9 月 9 日 08 时，高纬地区呈现两槽一脊的环流形势。两低涡分别位于乌拉尔山和我国东北地区，其中，乌拉尔山低涡中心强度为 544 dagpm，我国东北地区低涡中心强度为 536 dagpm，均为从高空西风槽

切断出来的冷性涡旋，低涡中有较强的辐合气流，引起低涡中的上升运动，造成云雨天气。两处低涡分别向南延伸出低槽，我国东北地区为槽区，纬向多波动，新疆地区位于乌拉尔山低涡延伸出的高空槽前，有较强正涡度平流，出现较强辐合上升运动，有利于降雨的形成。中纬度地区的环流表现为纬向型环流，西风带平直少有波动，对应天气晴好。西太副高中心位于洋面，中心强度 580 dagpm。

从 9 月 9 日 20 时形势场可看出，高纬度的低涡强度有所减弱，乌拉尔山低涡中心强度变为 548 dagpm，东北地区已无法分析出低涡中心。

3.2. 700 hPa 环流场形势分析

如图 4 所示，7 月 31 日 08 时，高纬有三个低涡存在，在西西伯利亚、东西伯利亚、东北地区分别出现低涡，其中西西伯利亚低涡的中心强度为 280 dagpm，东西伯利亚低涡的中心强度为 276 dagpm，东北地区低涡的中心强度为 292 dagpm。中纬度我国西藏和印度可分析出一低压，强度为 304 dagpm。我国南海地区有热低压，中心强度为 300 dagpm。西太平洋上有副高存在，中心强度为 312 dagpm。

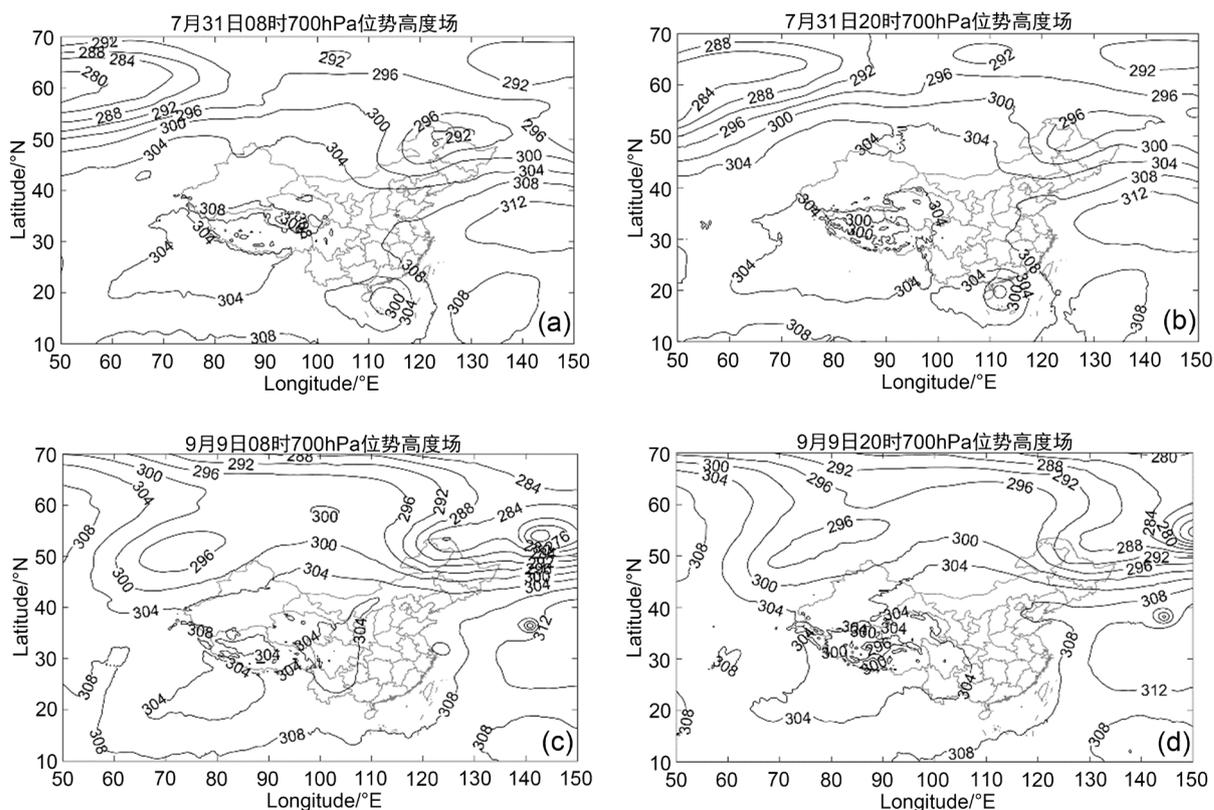


Figure 4. 700 hPa Geopotential Height Field, July 31 at 08:00 (a) and 20:00 (b), September 9 at 08:00 (c) and 20:00 (d)

图 4. 700 hPa 位势高度场，7 月 31 日 08 时(a)和 20 时(b)，9 月 9 日 08 时(c)和 20 时(d)

7 月 31 日 20 时，与上一时次的环流形势相比，西西伯利亚低涡有西移减弱的趋势，东西伯利亚低涡强度和范围大体不变，东北低涡有东移减弱的趋势。我国西藏和印度的低压较上一时次范围有所扩大，南海热低压强度、范围、位置少变。西太平洋副高有东移的趋势，其西北侧的西南气流从海上带来更加充足的水汽，为降雨的持续提供源源不断的水汽供应。

9 月 9 日 08 时，在高纬的乌拉尔山、东西伯利亚有低涡存在，其中乌拉尔山的低涡中心强度为 296 dagpm，东西伯利亚的低涡中心强度为 276 dagpm。在我国西南地区有槽存在，有利于辐合上升气流的出

现。西太平洋中的副高中心强度为 312 dagpm。

9月9日20时,与上一时次的环流形势相较,系统强度无较大变化,整体向东移动,降水区也将伴随着系统一起向东移动。

3.3. 850 hPa 环流场形势分析

如图5所示,7月31日08时,西西伯利亚、我国东北地区和南海有低压存在,其中西西伯利亚低压的中心强度为 128 dagpm,我国东北地区低压中心强度为 136 dagpm,南海地区热低压的中心强度为 140 dagpm。我国西南地区在气压场上表现为一东西向的槽。西太副高的中心强度为 148 dagpm。

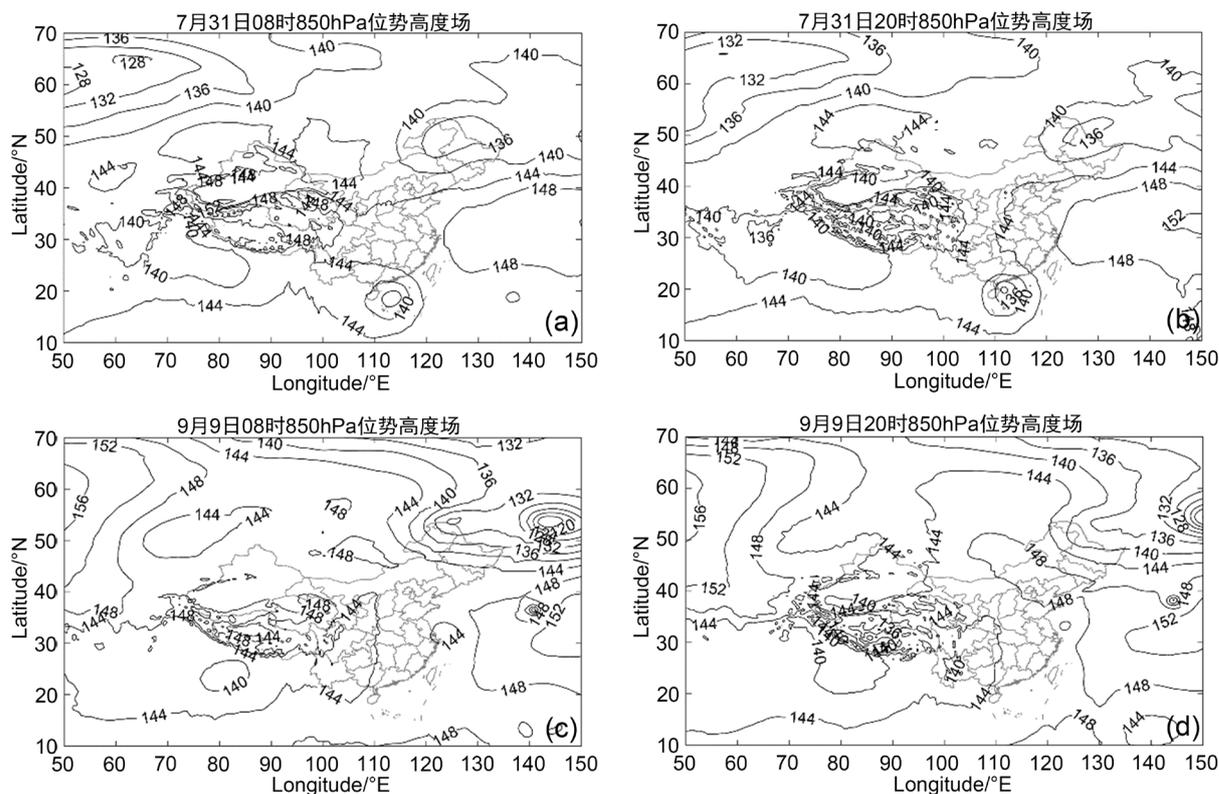


Figure 5. 850 hPa Geopotential Height Field, at 08:00 (a) and 20:00 (b) on July 31, the second line is at 08:00 (c) and 20:00 (d) on September 9

图 5. 850 hPa 位势高度场, 7月31日08时(a)和20时(b), 第二行为9月9日08时(c)和20时(d)

7月31日20时,西西伯利亚低压的强度变弱,中心强度减弱为 132 dagpm,我国东北地区的低压面积有所减小,南海地区的热低压强度有所增强。我国西南地区的东西向的槽范围有所缩小,气压梯度稍有增大。西太副高有加强东移的趋势。

9月9日08时,乌拉尔山、蒙古、东西伯利亚、印度等地均有闭合低压出现,其中乌拉尔山低压中心强度为 144 dagpm,蒙古低压中心强度为 148 dagpm,东西伯利亚中心强度为 120 dagpm,且该处气压梯度很大,对应这风速较大,印度低压中心强度为 140 dagpm。我国西藏地区气压场表现为东西向的槽。西太副高的中心强度为 152 dagpm。

9月9日20时,较上一时次可看出陆地上的系统有整体减弱且东移的趋势,而西太副高有东移的趋势。

如图6所示,7.31过程08时500 hPa北碇区散度为负,有水平气流的辐合,涡度为正,边界层在地

转偏差的作用下辐合上升,有利于形成云雨天气,但总体风场较为微弱。7.31过程20时500 hPa经过北碚区西南气流增强。风场总体上仍呈辐合和正涡度的形势。

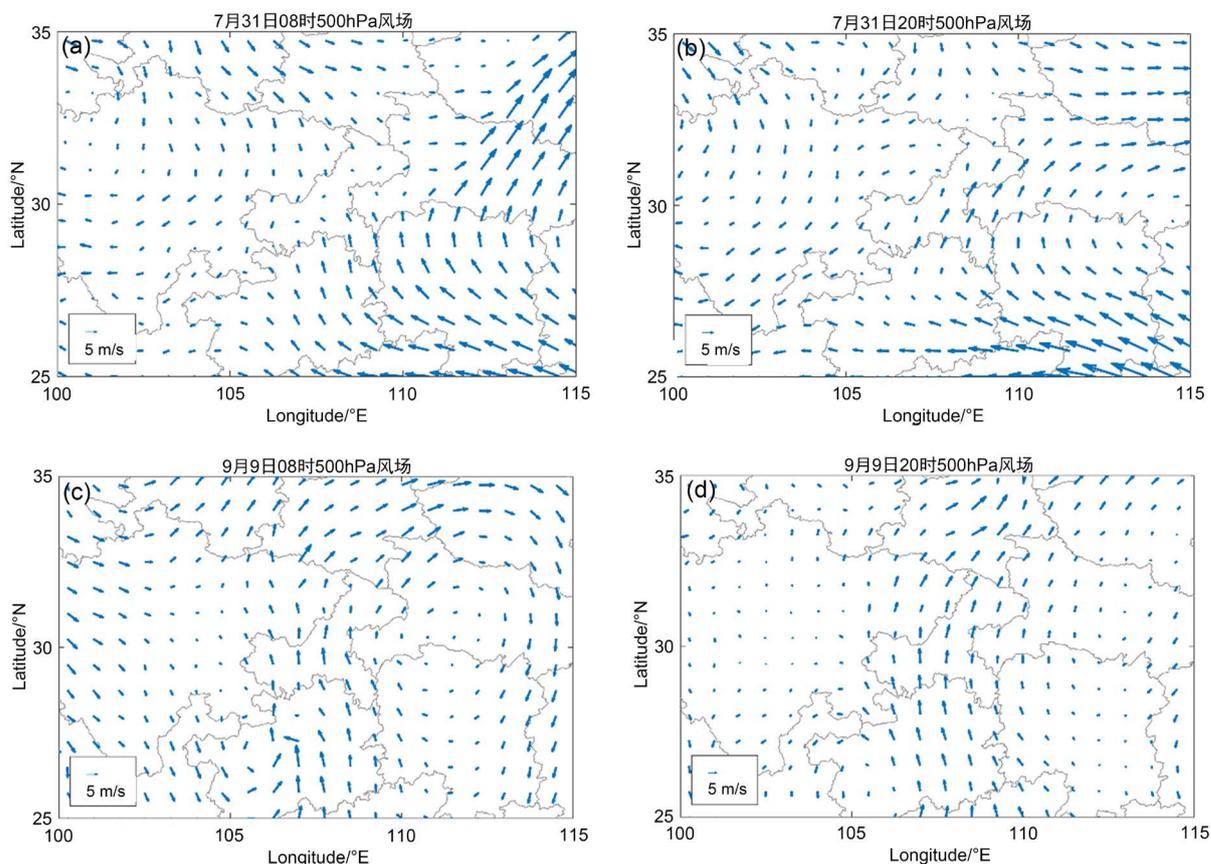


Figure 6. 500 hPa wind field, at 08:00 (a) and 20:00 (b) on July 31, and at 08:00 (c) and 20:00 (d) on September 9
图 6. 500 hPa 风场, 7月31日08时(a)和20时(b), 9月9日08时(c)和20时(d)

9.9过程08时500 hPa北碚区辐合辐散并不十分明显,而在重庆右侧的湖北湖南等地的正涡度较强,故该区域低层应为辐合气流,对应高层辐散,整层气流呈上升运动,而重庆北碚临近该区域,故其也呈上升气流,对应云雨天气,总体风向为南风。9.9过程20时500 hPa北碚区对应的南风增强,且风向比前一阶段更规则,其左右两侧风场稍微有所减小,但通过北碚区的较强南风有利于水汽和能量的供应,降雨得到维持。

如图7所示,7.31过程08时700 hPa北碚区的风场涡度为正,总体风向为西南风,与该时次500 hPa的风场相比,涡度和风速都有所增大,而散度较小。从此风场形势可以看出,该地区整层呈上升运动,对应云雨天气。而7.31过程20时700 hPa北碚区的风场由整体成较均匀的东南风转变为东南风与西南风的辐合,但整体相比08时而言风速较小。

9.9过程08时700 hPa北碚区总体吹南风,风速较大,为该地区提供充足的水汽供应,但该区域的涡度和散度不明显,其左侧区域风场较弱,而右侧区域风场对应的涡度为正,散度为负,有较强的辐合上升气流,重庆北碚区与该区域临近,受其上升气流的影响,整层也为上升运动,有利于云雨天气的维持。9.9过程20时700 hPa北碚区总体风场形势较上一时次无大变化,只是通过其的南风稍有减弱。

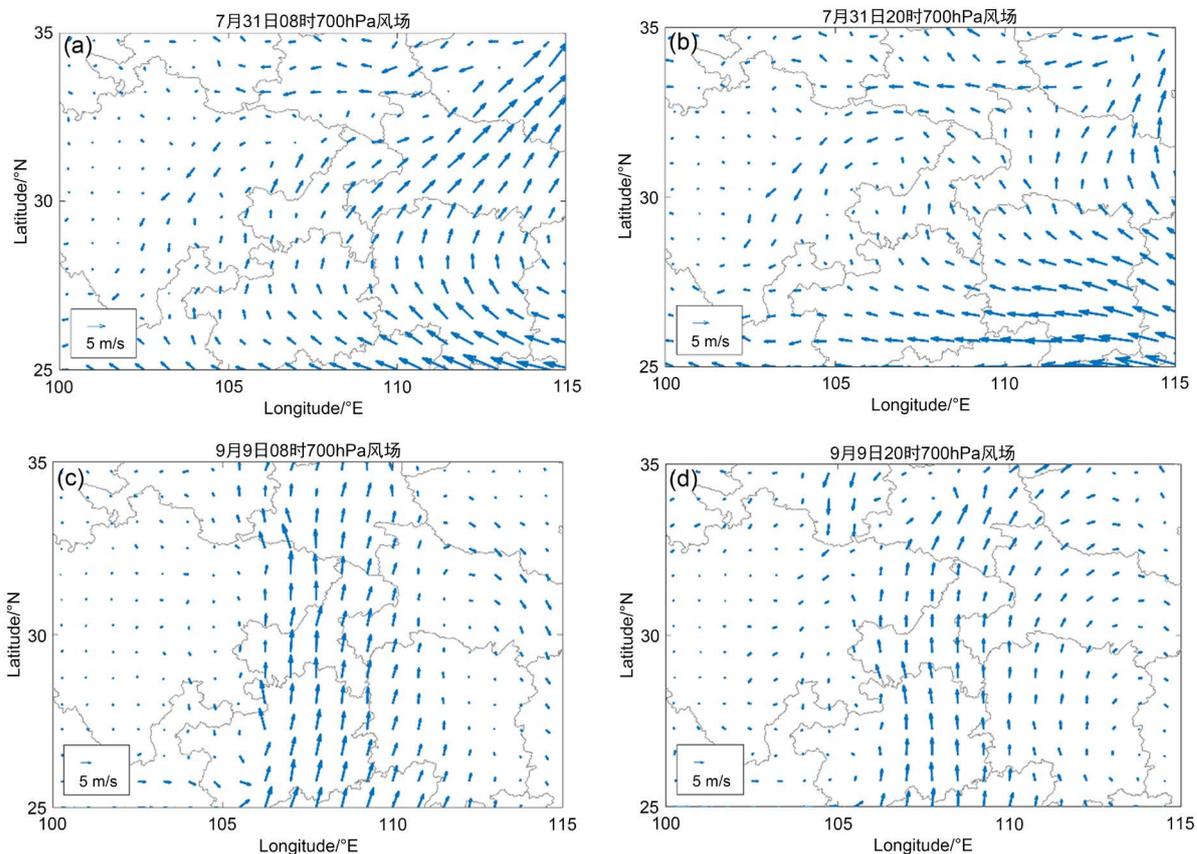
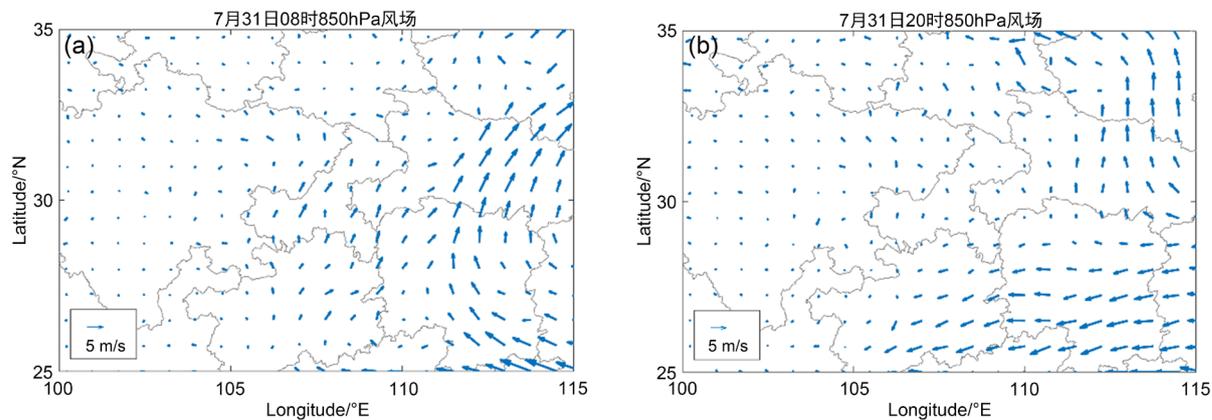


Figure 7. 700 hPa wind field, at 08:00 (a) and 20:00 (b) on July 31, and at 08:00 (c) and 20:00 (d) on September 9
图 7. 700 hPa 风场, 7月31日 08 时(a)和 20 时(b), 9月9日 08 时(c)和 20 时(d)

如图 8 所示, 7.31 过程 08 时 850 hPa 北碛区的风场为偏南风, 其四川东部地区形成了气旋性环流, 总体上呈现风场的辐合。7.31 过程 20 时 850 hPa 北碛区风场与上一时次相比风速减小, 但仍为偏南风, 呈气旋性环流, 此时整个系统风速很小。

9.9 过程 08 时 850 hPa 北碛区的风场为偏南风与东南风的辐合, 总体上呈辐合的形势, 涡度对应为正。低层辐合高层辐散有利于上升运动的发生, 产生云雨天气。而在其两侧风场较弱。9.9 过程 20 时 850 hPa 北碛区风场与上一时次相比, 东南风已占据了主导地位, 逐渐代替偏南风, 该区域的东南风较强, 正涡度也比之前更强, 故上升气流加剧, 云雨天气得以加强和维持。



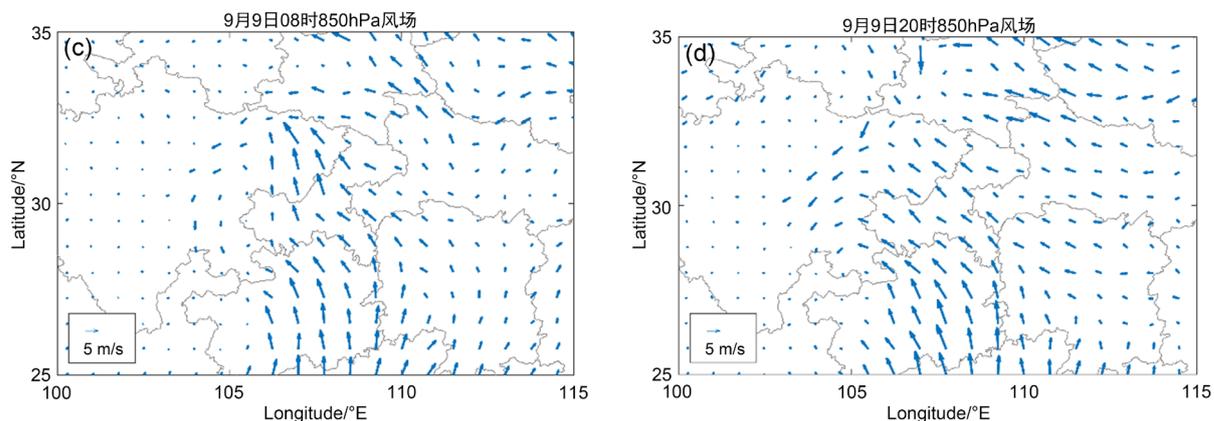


Figure 8. 850 hPa wind field, at 08:00 (a) and 20:00 (b) on July 31, and at 08:00 (c) and 20:00 (d) on September 9
图 8. 850 hPa 风场, 7月31日08时(a)和20时(b), 9月9日08时(c)和20时(d)

4. 暴雨相关物理量分析

4.1. 垂直速度

如图9所示, 7.31过程在08时到14时低层地面到850 hPa以上上升气流为主, 最大负速度中心出现在13时到14时, 此时对流达到最强, 在14时后主要以下沉气流为主, 最大正速度中心出现在17时左右400 hPa附近。9.9过程08时到13时地面到高空主要以下沉气流为主, 14时到22时地面到700 hPa附近出现了负速度, 主要为上升气流, 最大负速度中心在15时到21时位于850 hPa到700 hPa附近, 最大正速度中心位于15时到18时的500 hPa到400 hPa附近。

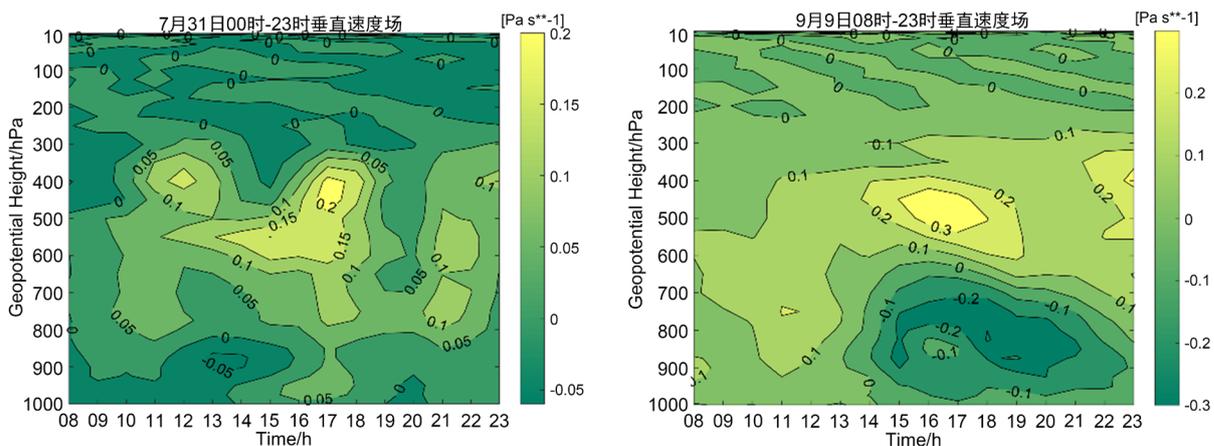


Figure 9. 7.31 (a) and 9.9 (b) Processes of Beibei District of Chongqing City (106°E, 30°N) vertical velocity time profile
图 9. 7.31 (a)及 9.9 (b)过程重庆市北碚区(106°E, 30°N)垂直速度时间剖面图

由垂直速度随时间的变化剖面图可以看出, 7.31过程在08时到15时有对流天气, 13时到14时对流最强, 为暴雨提供充足的动力条件, 可能在这个时间段出现强降水过程。之后时间降水有所减弱。9.9过程14到23时为负速度, 伴随对流天气出现, 在15时到21时出现了最大负速度中心, 为暴雨提供动力条件, 此时段可能降水达到最强。

通过对比可发现, 两次暴雨天气过程的最大负速度中心出现时间和强度不同, 因此可以推断暴雨发生时刻和强度均有差异。

4.2. 散度与涡度

如图 10 所示, 7.31 过程 08 时 850 hPa 北碚区散度为正值, 其周边区县地区散度为负, 重庆北部及重庆东部大部分地区散度为负值, 可以看出此时北碚区低层辐散。200 hPa 北碚区的部分街道以及重庆西部地区散度为负, 但北碚的部分街道地区散度为正由此分析出北碚地区此时刻上升运动不明显, 但北碚周边区县地区高层辐散, 低层辐合, 有上升运动的产生, 有利于形成云雨天气。9.9 过程 08 时 850 hPa 北碚区及重庆主城地区散度为负, 200 hPa 北碚区部分街道散度依旧为负, 小部分街道散度为正, 由此看出此时北碚区高层辐散, 低层辐合, 有上升运动, 甚至有些街道到 200 hPa 层依旧对应辐合, 此时整层能量较高, 易形成对流天气。

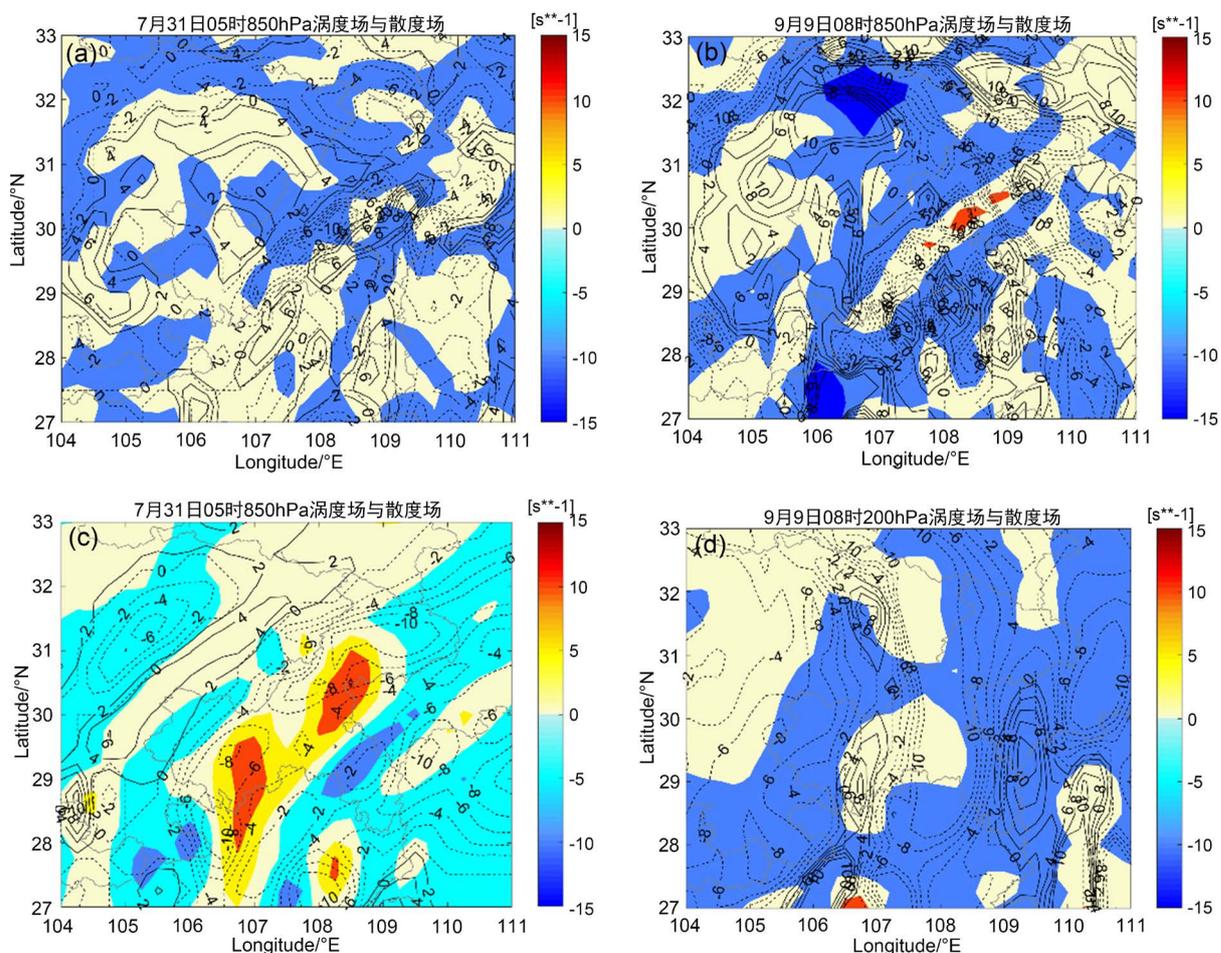
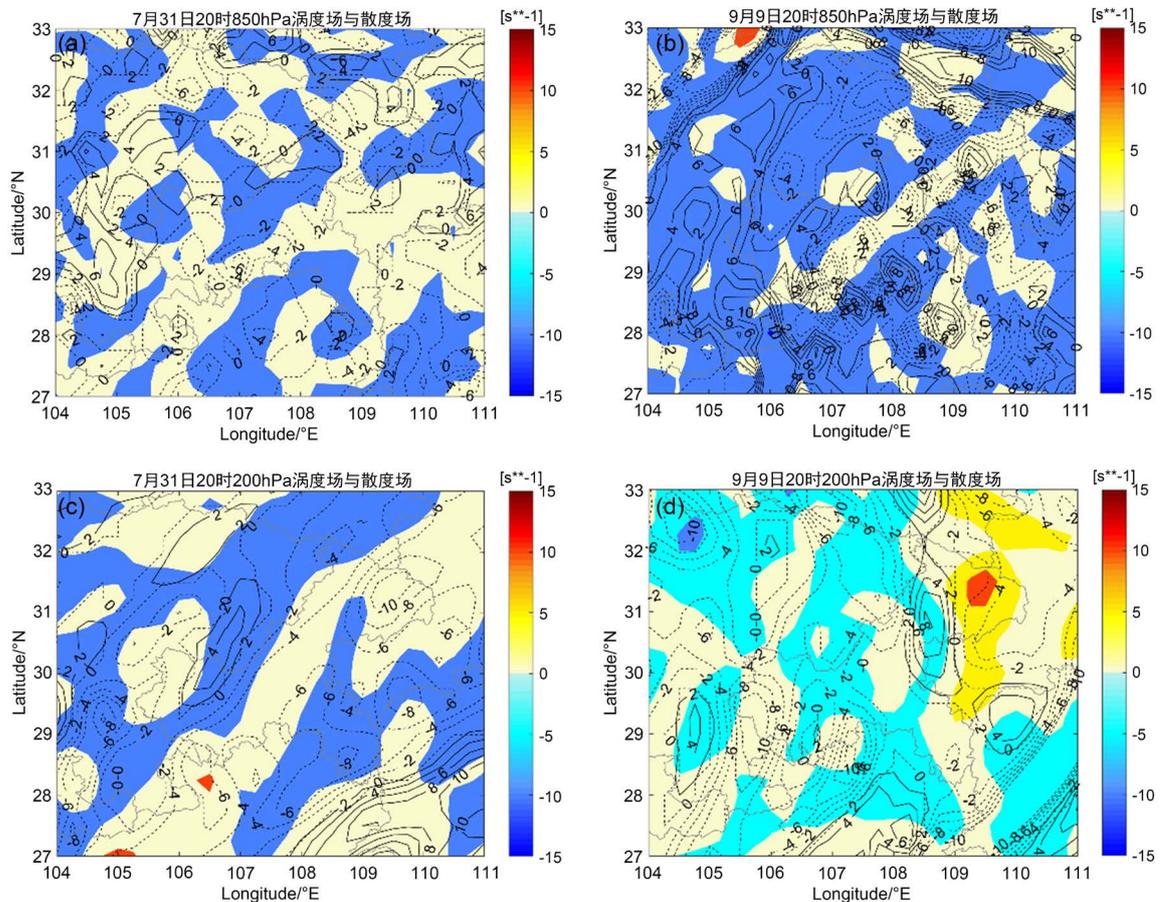


Figure 10. The vorticity and divergence field of 850 hPa (a, b) and 200 hPa (c, d) in the process of 7.31 and 9.9 at 08:00
图 10. 7.31 及 9.9 过程 08 时 850 hPa (a, b), 200 hPa (c, d) 涡度与散度场

7.31 过程 08 时 850 hPa 北碚区涡度为正, 值为+4, 而北碚下游地区涡度为负, 最大负值为-10, 因此此时北碚地区有正涡度平流, 与之对应的是槽前脊后, 此时刻的风为偏南风, 所以有利于上升运动的产生。9.9 过程 08 时 850 hPa 北碚处于涡度零线附近, 可以看出北碚的上游地区为正涡度中心最大值为+8, 北碚的下游地区为负涡度中心最大值为-16, 因此北碚地区有正涡度平流, 此时刻的风为偏南风, 有利于上升运动的产生, 形成云雨天气。7.31 过程 08 时 200 hPa 北碚区涡度为负, 其上游地区涡度为正, 与之对应的仍然是正涡度平流, 上升运动。9.9 过程 08 时 200 hPa 北碚区涡度为正, 其下游地区涡度为

负，与之对应的是正涡度平流，上升运动。综上，北碚地区高、低层都对应正涡度平流，上升运动，有利于对流天气的形成。

如图 11 所示，7.31 过程 20 时 850 hPa 北碚地区大部分街道散度为正，低层呈现出辐散的趋势，200 hPa 北碚区大部分散度为负，高层呈现出辐合的趋势，此时能量逐渐消散，降水将有所减小或停止。9.9 过程 20 时 850 hPa 北碚地区散度为负，低层出现辐合的趋势，200 hPa 北碚区的散度依旧为负，高层同样为辐合，由此可以分析出此时整层能量较高，非常有利于暴雨的形成，产生强对流天气。



Figures 11. The vorticity and divergence field of 850 hPa (a, b) and 500 hPa (c, d) in the process of 7.31 and 9.9 at 20 o'clock
图 11. 7.31 及 9.9 过程 20 时 850 hPa (a, b), 500 hPa (c, d) 涡度与散度场

7.31 过程 20 时 850 hPa 北碚地区处于涡度零线附近，其上下游涡度数值较小，这时候的涡度平流很弱，200 hPa 北碚地区同样处于涡度零线附近，其上下游涡度数值较小，北碚地区涡度平流很弱。9.9 过程 20 时 850 hPa 北碚地区为正涡度，其下游地区为负涡度，此时有正涡度平流，对应槽前脊后，低层辐合，高层辐散，有利于上升运动的产生，200 hPa 北碚地区涡度相比 850 hPa 较小，呈现为正涡度平流，此时高层，低层都为正涡度平流，与之对应的是槽前脊后，有利于上升运动产生。

通过两次暴雨天气过程散度与涡度的对比，发现 9.9 过程北碚地区气流的辐合上升和槽前正涡度平流更强，影响的区域也更广。

4.3. 水汽通量与水汽通量散度

如图 12 所示，填色图中黄色代表水汽通量散度为正，蓝色代表水汽通量散度为负。7.31 过程 08 时

700 hPa 可以看到, 有较大水汽通量输送到重庆以及四川东部地区, 水汽通量在四川东部地区呈现气旋性弯曲, 四川东部为水汽通量的汇。北碚地区此时水汽通量散度为正, 北碚地区水汽通量辐合不明显。9.9 过程 08 时 700 hPa 可以看出大量的水汽通量从南输送经整个重庆地区, 此时北碚地区的水汽通量散度小于零, 水汽通量辐合。

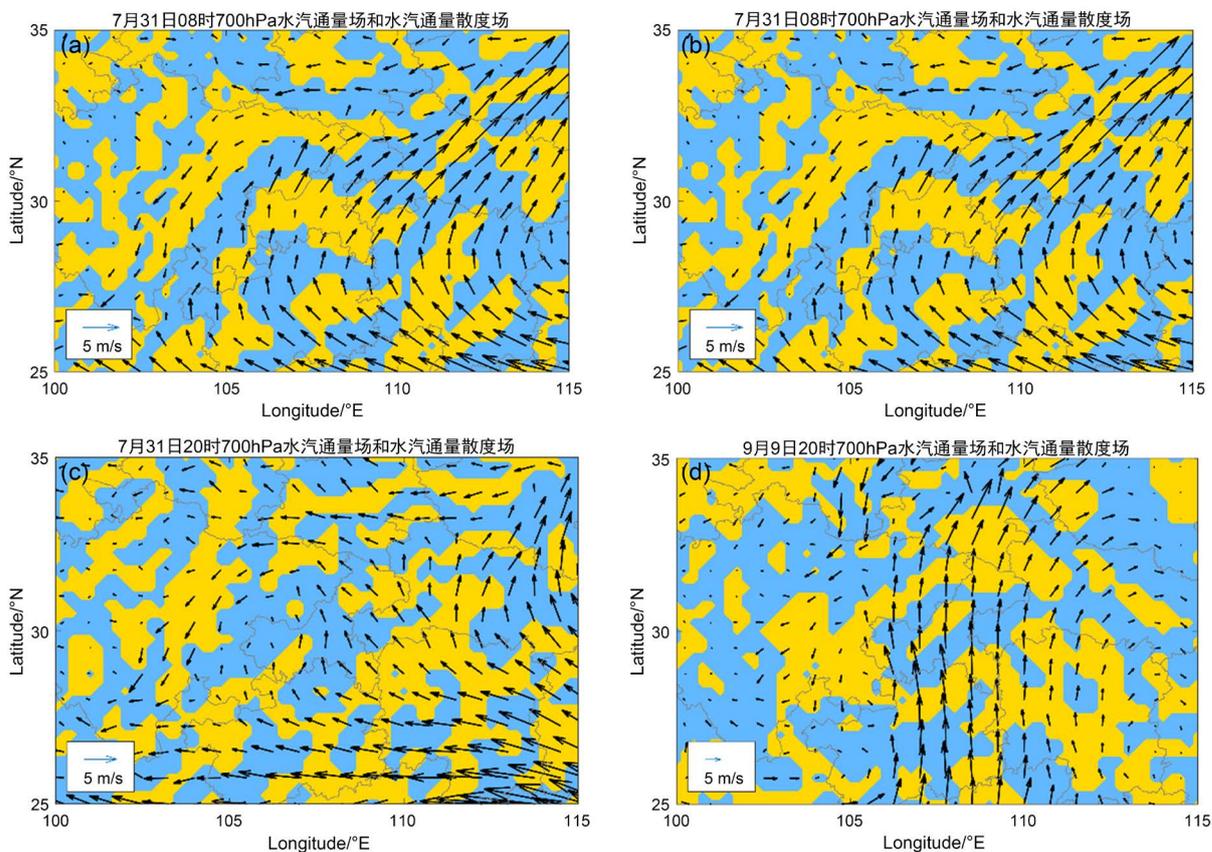


Figure 12. 7.31 and 9.9 process 08 (a, b) (c, d) 700 hPa water vapor flux (arrow) and water vapor flux divergence (filling) distribution diagram

图 12. 7.31 和 9.9 过程 08 时(a, b) (c, d) 700 hPa 水汽通量(箭头)和水汽水汽通量散度(填色)分布图

7.31 过程 20 时 700 hPa 可以看出经重庆的水汽通量较上一时刻有所减少, 在北碚地区水汽通量呈气旋性弯曲, 整个重庆北部包含北碚地区为水汽通量的汇, 此时北碚地区水汽通量散度为负。9.9 过程 20 时 700 hPa 大量的水汽通量从南输送经重庆, 四川东南部为水汽通量的汇。相比于上一时刻重庆地区周边水汽通量气旋性环流加强, 此时北碚部分街道水汽通量散度小于零, 水汽通量辐合。

如图 13 所示, 7.31 过程 08 时 850 hPa 水汽通量由南输送而来经重庆北碚地区, 在四川东部形成了水汽通量的气旋性环流, 此时北碚地区水汽通量散度辐合不明显。9.9 过程 08 时 850 hPa 水汽通量由南输送经重庆北碚地区, 四川东部形成了气旋性环流, 此时北碚地区水汽通量散度小于零, 水汽通量辐合。

7.31 过程 20 时 850 hPa 水汽通量由南输送经过重庆北碚地区, 此时水汽通量较上一个时刻已经减小, 此时水汽通量散度的辐合不明显。9.9 过程 20 时 850 hPa 水汽通量由南输送到重庆北碚地区, 此时已呈现一个明显的气旋性环流, 北碚水汽通量散度小于零, 水汽通量辐合, 此时北碚上空水汽非常丰富, 有上升气流, 因此水汽会被抬升凝结而形成降水。

通过对两次暴雨天气过程的水汽通量和水汽通量散度分析, 9.9 过程北碚地区上空的水汽更为丰富, 两次过程均有水汽通量的辐合但 9.9 过程水汽通量辐合更为明显。

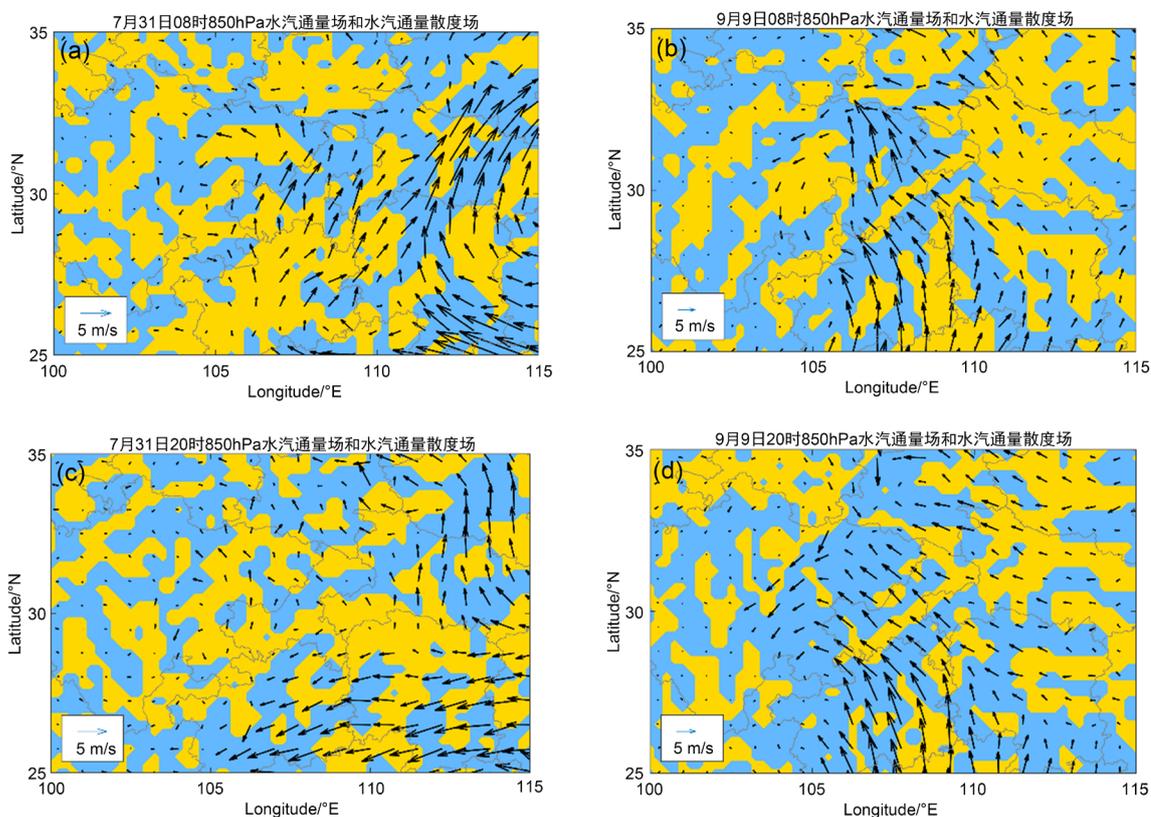


Figure 13. 7.31 and 9.9 process 08 (a, b) and 20 (c, d) 850 hPa water vapor flux (arrow) and water vapor flux divergence (coloring) distribution map

图 13. 7.31 和 9.9 过程 08 时(a, b)和 20 时(c, d) 850 hPa 水汽通量(箭头)和水汽通量散度(填色)分布图

5. 结论

本文通过 ECMWF ERA5 的逐时再分析资料对比分析了 2019 年 7 月 31 日与 9 月 9 日重庆市北碚地区的两次暴雨天气过程, 通过这两次过程高空环流形势和暴雨相关物理量的分析得出以下结论:

(1) 从等压面图的高空环流形势来看, 影响两个过程的降水系统均是高空低涡, 北碚地区均受偏南气流的控制。从大尺度分析 9.9 过程系统配置强度强于 7.31 过程, 7.31 过程其纬度系统稳定少动。

(2) 从影响暴雨的物理量场分析来看, 7.31 过程最大负垂直速度中心与 9.9 过程最大负垂直速度中心出现的时间和高度均有所差异。从涡度、散度和水汽条件分析, 9.9 过程辐合上升和正涡度平流条件优于 7.31 过程且 9.9 过程上空水汽更为充沛。

(3) 从两次天气过程中影响降水的系统综合来看, 7.31 过程降水影响范围小, 更多的是局部性降水, 由于低值系统稳定, 因此降水持续时间较长。而 9.9 过程能量和水汽条件均优于 7.31 过程, 降水强度更强, 影响范围更广。

基金项目

本文受到都信息工程大学引进人才科研启动项目(KYTZ201736)和成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2019047)的资助。

参考文献

- [1] 杨康权, 陈忠明. 斜压热动力耦合强迫在暴雨发生维持过程中的动力诊断分析[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(3): 20-30
- [2] 陈忠明. 暴雨激发和维持的正、斜压强迫机制的理论研究[J]. 大气科学, 2007(2): 291-297.
- [3] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [4] 孙婕, 李国平. 西南低涡东移引发重庆暴雨的综合诊断[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(2): 10-17.
- [5] 高松, 陈贵川, 吴钲, 杜钦, 赵磊, 呼延李豆. 一次西南低涡影响下的川渝地区暴雨个例分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 597-612.
- [6] 彭军, 张立凤, 罗雨, 徐锐, 陈锋立. “07.7”重庆暴雨的数值模拟分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(2): 135-141.
- [7] 梁必骥. 暴雨形成的条件[J]. 气象, 1978(6): 21-22.
- [8] 朱乾根. 天气学原理和方法[M]. 第3版. 北京: 气象出版社, 1992.