

2023年双流地区一次强降水过程的数值诊断分析

王松, 杨显玉

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年8月15日; 录用日期: 2024年9月16日; 发布日期: 2024年9月24日

摘要

为了进一步研究四川省成都市双流区的强降水过程, 文章使用成都信息工程大学实习台提供的天气形势场, 探空资料和欧洲中期天气预报中心网站获取的ERA5数据集, 通过天气学诊断分析和物理量场数值分析, 对发生在2023年7月12日凌晨的暴雨过程进行诊断分析, 结果表明: 1) 500 hPa上四川盆地位于一个低槽前部, 副热带高压位于长江流域。由于副热带高压外围的反气旋环流和槽前西南气流的共同作用, 有利于引导低层西南暖湿气流向四川盆地输送。700 hPa高度上四川盆地以西存在低槽, 成都位于低槽前部, 受偏南气流影响, 存在西南暖湿气流的输送。盆地以北为偏北风, 向盆地内输送干冷气流。850 hPa高度上四川盆地处在暖区内, 存在低压区和气旋性旋转的风, 为降水提供动力条件。暖湿气流通过重庆进入盆地。2) 本次强降水天气过程的水汽来自于偏南气流, 经贵州、重庆到达成都, 高温高湿水汽的到来使得成都上空大气变得非常不稳定。下层暖湿, 上层干冷, 有利于对流的产生。水汽输送持续了整个暴雨过程, 使得在暴雨结束后成都市850 hPa比湿略有上升, 伴随着一个较强的水汽辐合中心。3) 暴雨过程中的垂直运动较为强烈; 散度场上500 hPa辐散、850 hPa辐合的配置, 利于上升运动的发展和加强; 500 hPa成都地区位于低槽前部, 槽前正涡度平流促使低层低压发展, 加强低层气流上升运动, 为暴雨的发生发展提供了良好的动力条件。4) 在热力条件上, 成都市上空假相当位温场存在一个高值区, 并且 $IC < 0$, K指数上同样有大于 $42^{\circ}C$ 的高值区, 这表明成都市上空大气已有较大的不稳定能量储备, 为暴雨发生提供良好的能量条件。在11日20:00探空图上也能看出CAPE为 $696.8 J \cdot kg^{-1}$, CIN为 $130.2 J \cdot kg^{-1}$, 在以上的环流形势中, 气块能够获取到足够能量越过LFC从而产生对流, 使得暴雨产生。

关键词

时强降水, 天气学诊断, 暖湿气流, 假相当位温

Numerical Diagnostic Analysis of a Heavy Precipitation Process in Shuangliu Area in 2023

Song Wang, Xianyu Yang

文章引用: 王松, 杨显玉. 2023年双流地区一次强降水过程的数值诊断分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(5): 1267-1283. DOI: 10.12677/ccrl.2024.135143

Abstract

To further investigate the process of heavy precipitation in Shuangliu District, Chengdu City, Sichuan Province, this paper utilizes weather situation fields provided by the internship station of Chengdu University of Information Technology, sounding data, and the ERA5 dataset obtained from the website of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Through meteorological diagnostic analysis and numerical analysis of physical fields, the heavy rain process occurring in the early morning of July 12, 2023, is diagnosed and analyzed. The results show the following: 1) At 500 hPa, the Sichuan Basin is located at the front of a trough with the subtropical high situated over the Yangtze River basin. Due to the anticyclonic circulation on the periphery of the subtropical high and the combined action of the southwest airflow in front of the trough, it is conducive to guiding the low-level southwest warm and moist airflow towards the Sichuan Basin. At 700 hPa, there is a trough to the west of the Sichuan Basin, with Chengdu located at the front of the trough, influenced by the southerly airflow, which facilitates the transport of southwest warm and moist air. To the north of the basin, there is a northerly wind, transporting dry and cold air into the basin. At 850 hPa, the Sichuan Basin is within a warm sector, with a low-pressure area and cyclonic wind rotation, providing dynamic conditions for precipitation. The warm and moist airflows into the basin through Chongqing. 2) The moisture for this heavy precipitation weather process comes from the southerly airflow, passing through Guizhou and Chongqing to reach Chengdu. The arrival of high-temperature and high-humidity moisture makes the atmosphere above Chengdu very unstable. The lower layer is warm and moist, while the upper layer is dry and cold, which is conducive to the occurrence of convection. The moisture transport lasted throughout the heavy rain process, resulting in a slight increase in specific humidity at 850 hPa in Chengdu after the rain, accompanied by a strong moisture convergence center. 3) The vertical movement during the heavy rain process is relatively strong; the divergence at 500 hPa and convergence at 850 hPa are favorable for the development and strengthening of upward motion; at 500 hPa, the Chengdu area is at the front of the trough, and the positive vorticity advection in front of the trough promotes the development of low-level low pressure, strengthening the upward motion of the airflow at low levels, providing good dynamic conditions for the occurrence and development of heavy rain. 4) In terms of thermal conditions, there is a high-value area in the pseudo-adiabatic potential temperature field above Chengdu, and $IC < 0$, the K index also has a high-value area greater than 42°C , indicating that the atmosphere above Chengdu already has a large reserve of unstable energy, providing good energy conditions for the occurrence of heavy rain. The sounding chart at 20:00 on the 11th also shows that CAPE is $696.8 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, and CIN is $130.2 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Under the above circulation conditions, the air mass can obtain enough energy to cross the LFC, thus generating convection and resulting in heavy rain.

Keywords

Short-Duration Heavy Rainfall, Meteorological Diagnosis, Warm and Moist Airflow, Pseudo-Adiabatic Potential Temperature

Copyright © 2024 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

四川省成都市双流区, 属于亚热带季风气候, 夏季炎热多雨。高楷祥[1]利用双流区 1981~2017 年逐月降水量资料进行气候特征分析, 结果显示, 近几十年来的区年均降水量呈逐年增加趋势, 尤其在夏季和秋季, 这一趋势更为明显, 表明该区域夏季暴雨事件的潜在风险正在上升。

夏季突发暴雨对成都市的社会经济活动产生了显著影响。尤其是双流区拥有成都双流国际机场等重要交通枢纽, 暴雨事件可能导致航班延误、城市内涝、交通瘫痪等问题, 严重影响区域经济的正常运行和居民的日常生活。鉴于双流区夏季暴雨的愈发频繁及其带来的广泛影响, 深入分析其过程特征、成因和潜在风险显得尤为重要。了解这些因素不仅有助于提高区域防灾减灾能力, 还能为城市规划和应急管理提供更为科学的依据。本研究旨在通过诊断分析双流区 2023 年 7 月 12 日凌晨的突发暴雨事件, 探讨其形成机制、发展过程和影响范围。为实现上述目的, 我们将利用常规测站资料, 结合 ERA5 再分析数据、雷达图像、卫星遥感数据等, 对双流机场夏季暴雨事件进行全面的气象特征和影响因素分析。

1.2. 研究现状

近年来, 对于暴雨的诊断研究接连不断, 对于暴雨的各项产生条件, 暴雨过程中的物理量变化等都有了发现。朱乾根等[2]提出一场暴雨的必要条件有以下三点: 充分的水汽供应、强烈的上升运动和较长的持续时间。缪语沛等[3]提出高、低空急流的耦合也是暴雨产生的重要机制。程佳佳等[4]补充, 稳定的环流背景也是必要条件之一。李俊等[5]的研究表明: 适当的流场也是形成暴雨的必要条件。四川盆地西靠青藏高原, 陈丹等[6]研究表明, 青藏高原及其周边的大气热源对四川盆地夏季暴雨频数具有显著的影响。当高原热力差指数偏高时, 副高位置偏西偏北, 阿拉伯海、孟加拉湾水汽输送增强, 盆地西部水汽辐合上升异常增强, 暴雨明显偏多; 而盆地东部暴雨偏少。当热力差指数偏低时, 副高位置偏东, 东南沿海水汽输送在盆地东部增强, 贝加尔湖南侧多阻塞形势, 使得水汽在盆地东部辐合上升增强, 产生暴雨偏多; 此时盆地西部暴雨偏少。由于青藏高原的热力和动力作用, 导致低涡在青藏高原或其周边地区形成, 特别是高原涡和西南涡被认为是影响四川强降水的重要中尺度天气系统, 对暴雨的形成有决定性的意义。魏葳等[7]认为发生暴雨时, 高空槽、西南涡、 β 地面气旋的维持和发展为其提供了必要的动力和水汽条件。李强等[8]利用四川盆地 1980~2012 年 5~9 月 123 个气象观测站逐时降水资料, 对 96 个西南低涡暴雨短时强降水日进行合成, 研究了区域性西南低涡暴雨过程中短时强降水的时间变化和空间分布特征。结果表明, 累计短时强降水频次和降水量较大值发生在 21:00 至次日 08:00, 这一结论与本文数据一致。晏红明等[9]得出西南地区降水与副高的东西变动也存在着密切联系, 副高主体偏东有利于西南降水偏多而华南偏少, 偏西则降水变化正好相反。王强等[10]研究表明中低层中尺度低涡或辐合中心是直接造成暴雨的系统, 其发展演变和移动直接影响降雨的落区和持续时间。高坤等[11]发现当西南涡不连续跳跃性东移, 东部气流辐合和非平衡性增强, 也容易诱发大暴雨天气。此外, 西太副高的异常活动还可能与青藏高原的热力作用相互作用, 进一步影响四川盆地的气候。例如, 青藏高原的加热作用可能导致西太副高的位置和强度发生变化, 从而影响四川盆地的降水分布和旱涝状况。

1.3. 研究意义

暴雨, 作为中国最为常见的气象灾害之一, 以其高发频率、广泛影响范围和长期持续特性, 对国家的安全、经济繁荣以及人民的日常生活构成了严峻挑战。根据中国国家气象局的实际业务标准, 24 h 内降水量超过 50 mm 的降水事件即被定义为暴雨。这类极端降水事件不仅可能导致洪涝灾害, 对农作物产量造成重大打击, 还可能触发山洪、滑坡、泥石流等地质灾害, 严重威胁人民生命安全。在城市地区, 过

量的降水超出排水系统承载能力, 会引发城市内涝, 严重影响交通运行、工业生产和居民生活。

暴雨对机场的重要性在于其对飞行安全、航班调度、旅客服务和机场设施维护的显著影响。深化对暴雨及其衍生灾害的研究, 加强预警和应对措施, 对于减轻灾害损失、保障国家和人民的福祉至关重要。这不仅可以提高预警的准确性, 及时采取应对措施以减少人员伤亡, 保护农业和粮食安全, 减轻地质灾害风险, 缓解城市内涝问题, 还能确保航空运输的安全, 提升应急响应能力, 减少经济损失, 促进社会稳定和谐。此外, 暴雨研究还有助于推动科学研究和技术创新, 增强公众的防灾减灾意识, 支持政策制定和规划, 以及加强国际合作与交流, 共同应对全球性气象灾害挑战。总之, 通过加强暴雨研究和预警, 我们可以更有效地减轻这一气象灾害带来的影响, 保障人民生命财产安全, 促进社会的可持续发展。

2. 资料与方法

2.1. 研究区域概况

四川盆地, 地处长江上游, 东临长江三峡, 西靠青藏高原, 北接秦岭, 南邻云贵高原。四川盆地属于亚热带季风气候, 四季分明, 夏季炎热潮湿, 冬季温和少雨。受季风气候影响, 夏季降水量大[12][13]。成都市, 作为四川省的省会, 不仅是四川省的政治、经济和文化中心, 也是西南地区重要的交通枢纽和商贸中心。据成都市雨量站的实测资料统计, 成都市多年年均降水量为 1114.1 mm, 主要集中在夏季, 暴雨事件时有发生[14]。成都市地势平坦, 位于成都平原之上, 周围被山脉环绕, 包括西部的邛崃山脉和北部的龙门山脉。这种地形特征对局部气候和降水模式有着显著影响。

2.2. 资料概况

在本次对成都市双流国际机场暴雨的诊断分析中, 主要使用了以下数据:

1) 成都信息工程大学实习台提供的 2023 年 7 月 11 日 08:00、20:00 高空及地面形势场, 11 日 20:00、12 日 08:00 温江站探空资料。

2) 欧洲中期天气预报中心网站下载的第五代大气再分析数据集(ERA5), 时间为 2023 年 7 月 12 日 02:00、07:00, 高空 500 hPa、700 hPa、850 hPa 包括比湿、涡度、散度、相对湿度、垂直速度等物理量场。空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

2.3. 研究方法

本次分析资料以常规观测资料、ERA5 再分析资料以及探空资料为主, 利用常规观测资料对四川盆地的环流背景、影响系统进行天气学分析; 利用再分析资料以及探空资料对此次降水的水汽条件、动力条件和不稳定能量等方面进行诊断分析。

首先通过高空和地面的环流形势分析, 了解强降水发生时的大尺度系统配置。其次计算水汽通量和水汽通量散度, 结合比湿场, 分析水汽的输送和辐合情况。随后计算假相当位温和 K 指数来评估大气的热力条件和层结稳定性。分析垂直速度场和涡度场, 得到降水的动力条件。最后分析温江站的探空资料, 提取对流有效位能(CAPE)、沙氏指数(SI)、最大上升速度(w_{CAPE})等对流参数。通过这些参数变化, 判断大气层结的稳定性和对流发展的可能性。

其中水汽通量散度计算公式如下:

$$-\nabla \cdot \frac{qV}{g} = -\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{qu}{g} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{qv}{g} \right) \right) \quad (1)$$

其中 q 为比湿 V 为全风速, g 为重力加速度, u 和 v 分别为水平方向风速。

假相当位温计算公式如下:

$$\theta_{se} = T_k (1000/p)^{0.2854(1-0.28q)} * e^{\left[\left(\frac{3376}{T_l} - 2.54\right)q(1+0.81q)\right]} \quad (2)$$

$$T_l = \frac{2840}{3.5 \ln T_k - \ln e - 4.805} + 55 \quad (3)$$

其中 u 和 v 分别为水平方向风速, T_k 为绝对温度, T_l 为凝结高度的绝对温度, p 为气压, 公式(2)中 e 为自然常数, 公式(3)式中 e 为实际水汽压。

3. 结果与讨论

3.1. 天气实况

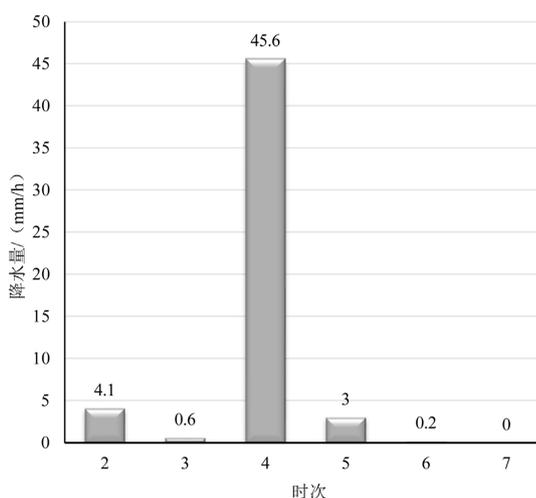


Figure 1. Total precipitation for one hour from 02:00 to 07:00 BT on 12 July 2023

图 1. 2023 年 7 月 12 日 02:00 至 07:00 逐小时降水量

由图 1, 双流地区在 7 月 12 日 02:00 开始发生降水, 至 04:00 降水量剧增, 达到 45.6 mm, 占据本次强降水过程的 85.23%。本次短时强降水过程历经 5 个小时, 于 7 月 12 日 07:00 结束, 已达到中央气象台所规定的暴雨标准。

3.2. 天气形势分析

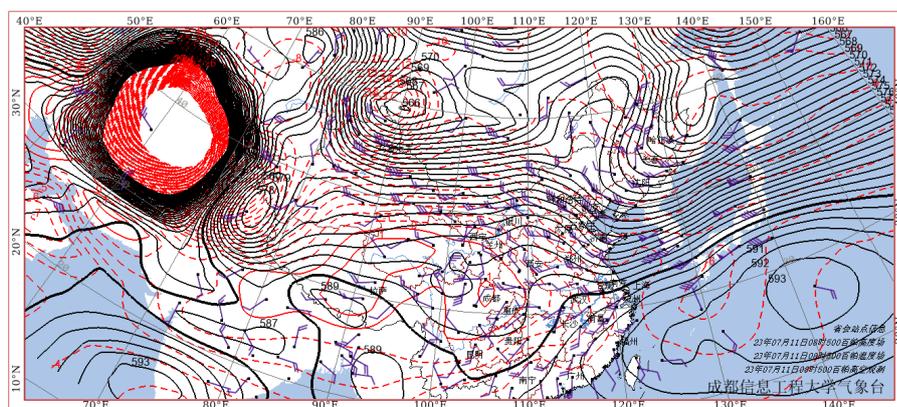


Figure 2. 500 hPa weather situation field at 08:00 on July 11, 2023

图 2. 2023 年 7 月 11 日 08:00 500 hPa 形势场

暴雨是不同天气尺度系统相互作用的结果, 尤其是特大暴雨或持续性暴雨, 天气系统的不同配置造成暴雨落区、强度及分布特点的差异; 大尺度系统制约和孕育小尺度系统的发生和发展, 小尺度系统产生以后成长壮大, 反过来对大尺度系统起作用, 使整个暴雨系统能继续维持和加强。

7月11日08:00 500 hPa 天气图上(图2), 四川盆地处在—低槽前, 副热带高压北抬至长江流域, 受其外围反气旋环流以及槽前西南气流的影响, 有利于西南暖湿气流向四川盆地输送。高原南部有一南支槽, 高原北部有一低槽存在。高原东部有波动存在, 若波动东移则有利于加强四川西部的槽线。

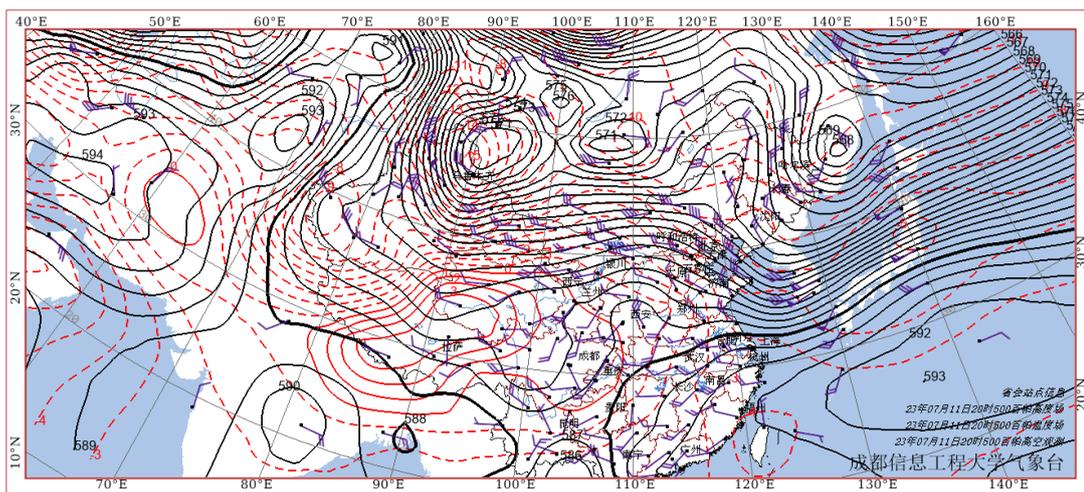


Figure 3. 500 hPa weather situation field at 20:00 on July 11, 2023

图3. 2023年7月11日20:00 500 hPa 形势场

7月11日20:00 500 hPa 天气图上(图3), 四川盆地以西的低槽依然维持, 位置移动不明显, 副热带高压维持在长江流域, 四川盆地受副热带高原外围顺时针环流影响, 仍旧处在偏南风的控制下。高原北部存在—槽线, 较08:00已发展东移。高原南部有南支槽东移, 其槽前正涡度平流, 有利于加强高原东侧, 四川盆地以西高原上的槽线, 能够提供产生、维持降水的动力条件, 且其配合副热带高压外围环流, 有利于西南暖湿气流向北输送至四川盆地地区, 为降水提供了部分水汽来源。

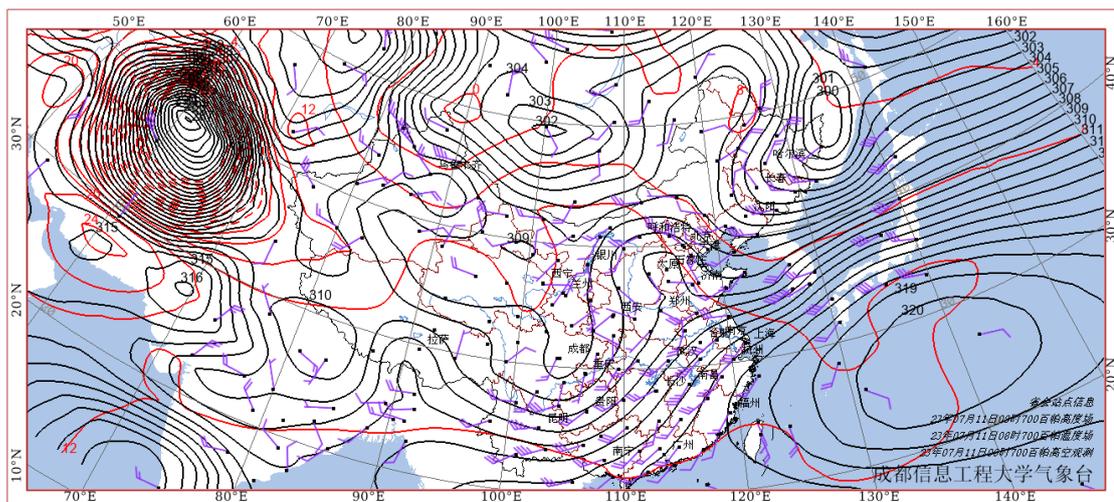


Figure 4. 700 hPa weather situation field at 08:00 on July 11, 2023

图4. 2023年7月11日08:00 700 hPa 形势场

7月11日08:00 700 hPa天气图上(图4), 四川盆地以西存在一低槽, 成都处在低槽前部, 受偏南气流影响, 有利于西南暖湿气流输送。盆地以北有北风、东北风存在, 向盆地内输送干冷气流, 有利于在盆地内激发对流。

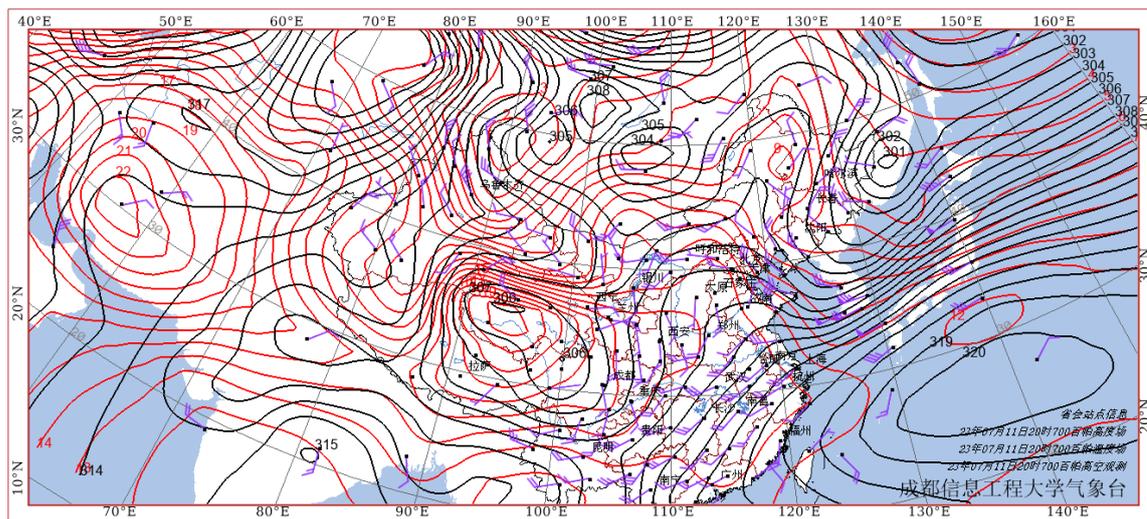


Figure 5. 700 hPa weather situation field at 20:00 on July 11, 2023

图5. 2023年7月11日20:00 700 hPa形势场

7月11日20:00 700 hPa天气图上(图5), 四川盆地以西的切变线依然存在, 成都依旧受南风、偏南风控制, 有利于暖湿气流的持续向四川盆地地区输送, 为持续性降水提供有利的水汽条件。四川以北有冷空气沿河西走廊南下, 可能影响四川盆地地区。

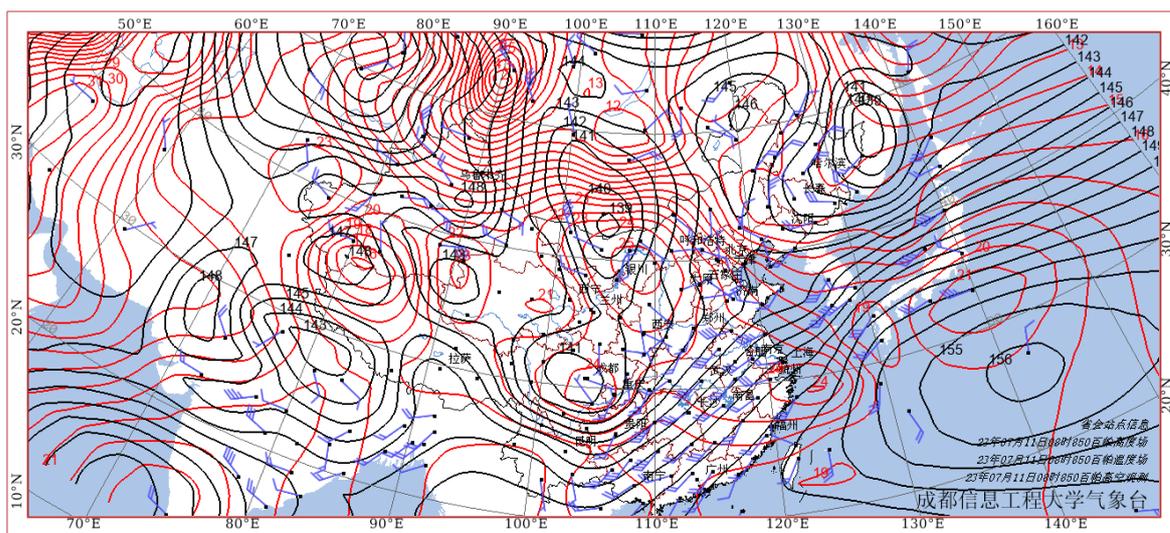


Figure 6. 850 hPa weather situation field at 08:00 on July 11, 2023

图6. 2023年7月11日08:00 850 hPa形势场

7月11日08:00 850 hPa天气图上(图6), 四川盆地处在一暖气团内, 存在明显的低压区, 且盆地内存在风的气旋性旋转, 有利于提供降水的动力条件。且成都为西南暖湿气流经重庆地区进入盆地的偏东风, 存在产生降水的水汽条件。

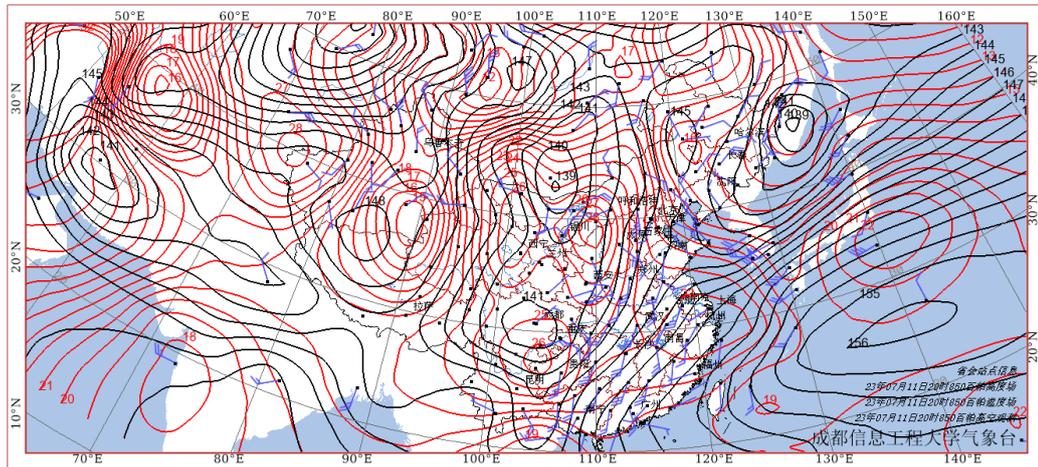


Figure 7. 850 hPa weather situation field at 20:00 on July 11, 2023
图 7. 2023 年 7 月 11 日 20:00 850 hPa 形势场

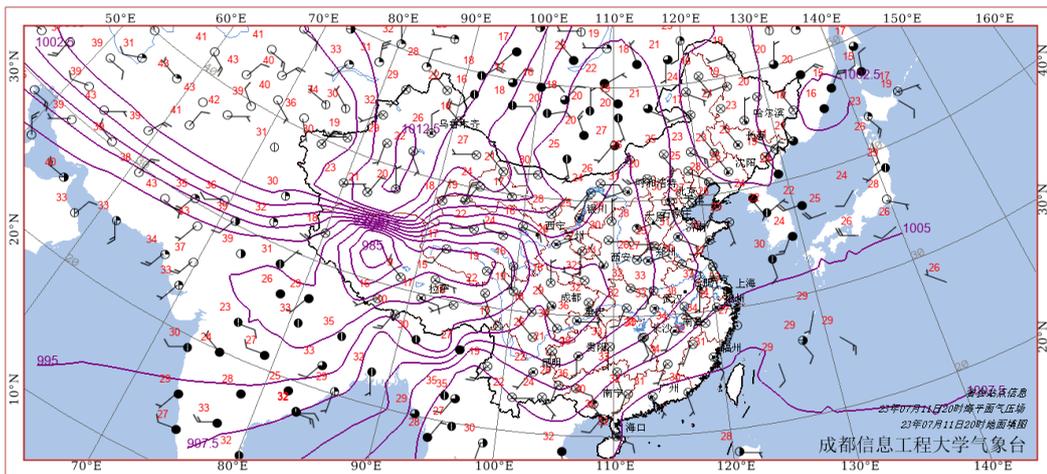


Figure 8. Ground weather situation field at 08:00 on July 11, 2023
图 8. 2023 年 7 月 11 日 08:00 地面形势

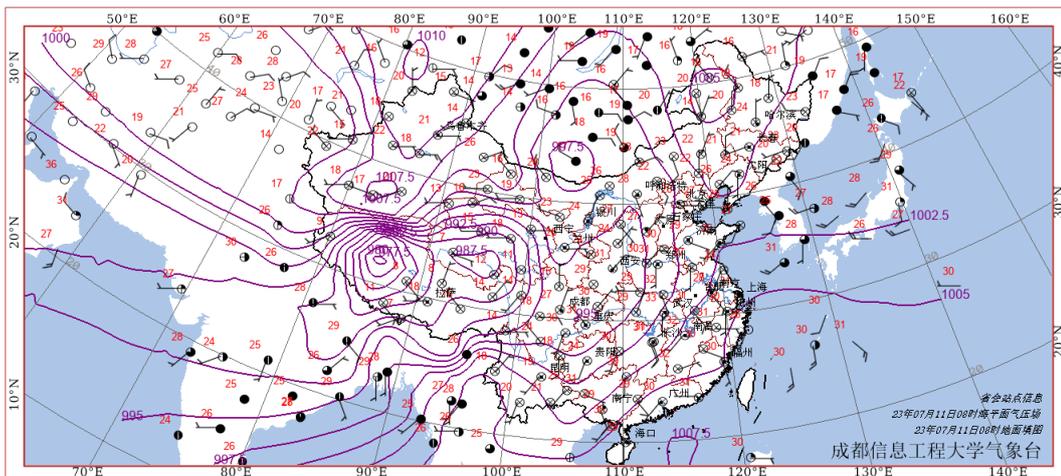


Figure 9. Ground weather situation field at 20:00 on July 11, 2023
图 9. 2023 年 7 月 11 日 20:00 地面形势

7月11日 20:00 850 hPa 天气图上(图 7), 四川盆地依旧处在暖气团影响中, 且暖湿气流经重庆进入盆地的气流已非常明显, 有利于向盆地内输送水汽。同时, 风向相较 08:00 依旧存在气旋性旋转, 有利于提供产生和维持降水的动力条件。

从 7月11日 08:00 地面形势(图 8)来看, 蒙古有一个低压中心, 东北有一个高压中心, 成都此时吹偏北风, 变压不明显。

从 7月11日 20:00 地面形势(图 9)来看, 蒙古的低压中心和东北的高压中心都已消失, 成都站温度有所上升, 达到了 36°C, 风向转为了西北风。

3.3. 水汽条件分析

3.3.1. 比湿

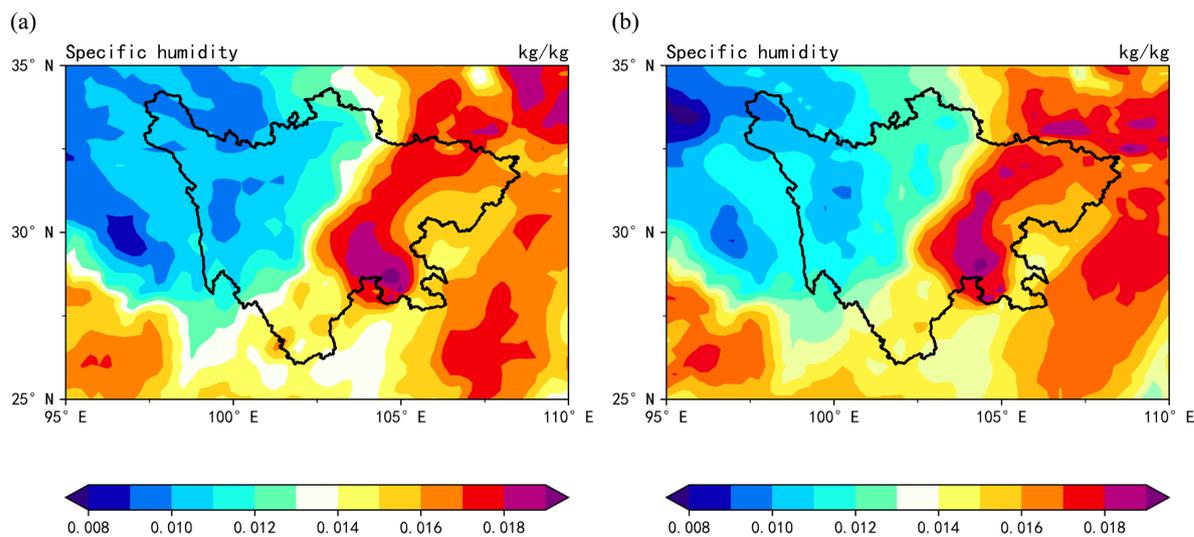


Figure 10. 850 hPa specific humidity field at 02:00 (a) and 07:00 (b) on July 12, 2023

图 10. 2023 年 7 月 12 日 02:00 (a)、07:00 (b) 850 hPa 比湿场

比湿是描述大气中水汽含量的气象参量, 定义为湿空气中水汽质量与湿空气质量之比, 单位为 g/g 或 kg/kg, 通常大气中比湿都小于 0.04 kg/kg。包慧濛等[15]对我国南方年、季、月平均比湿分析表明, 在空间分布上, 中层(500 hPa、700 hPa)年平均比湿西南高东北低, 低层(850 hPa、925 hPa)年平均比湿南高北低。暴雨日中层年平均比湿的空间分布差异较小, 低层年平均比湿自西南向东北减小。在暴雨等强降水事件中, 比湿具有重要的指示意义, 因为高比湿通常意味着大气中水汽含量较高, 增大了发生强对流降水的可能性。同时, 比湿高值区与降水落区有很好的对应关系[16] [17]。

从 12 日 02:00 850 hPa 的比湿场(图 10(a))可以看出, 在四川省宜宾市存在一个比湿高值中心, 中心处极大值达到了 0.019 kg/kg, 且向北伸出一个高值区域, 包括乐山、眉山、成都、德阳、绵阳等市, 成都市上空比湿达到 0.017 kg/kg。到 12 日 07:00 (图 10(b)), 比湿高值中心略微北移但仍在宜宾市内, 成都市比湿上升到 0.018 kg/kg, 略有上升。但四川省东北方向的高值区却分裂减弱为几个小区域, 结合 02:00 来看, 成都市水汽是由贵州, 经重庆而来, 水汽输送路径呈现气旋性弯曲。本次强降水过程之后, 水汽输送略有减弱, 使得高比湿中心北移, 成都市比湿上升。

3.3.2. 水汽通量及水汽通量散度

水汽通量是大气中水汽沿风向运动的积分度量, 其水平分量直接关联大气湿度和风场的空间分布。

单靠降水区域上空大气的水汽凝结不足以产生暴雨, 在一次强降水过程中, 局地大气的水汽状态持续保持饱和, 此时的降水来自于降水区外源源不断输送而来的水汽。在本研究中, 通过分析水汽通量及其散度的时空特征, 得出在强降水过程中水汽输送的通道及强度, 对诊断和模拟降水分布、强度及其对气候变化的响应中发挥着重要作用。

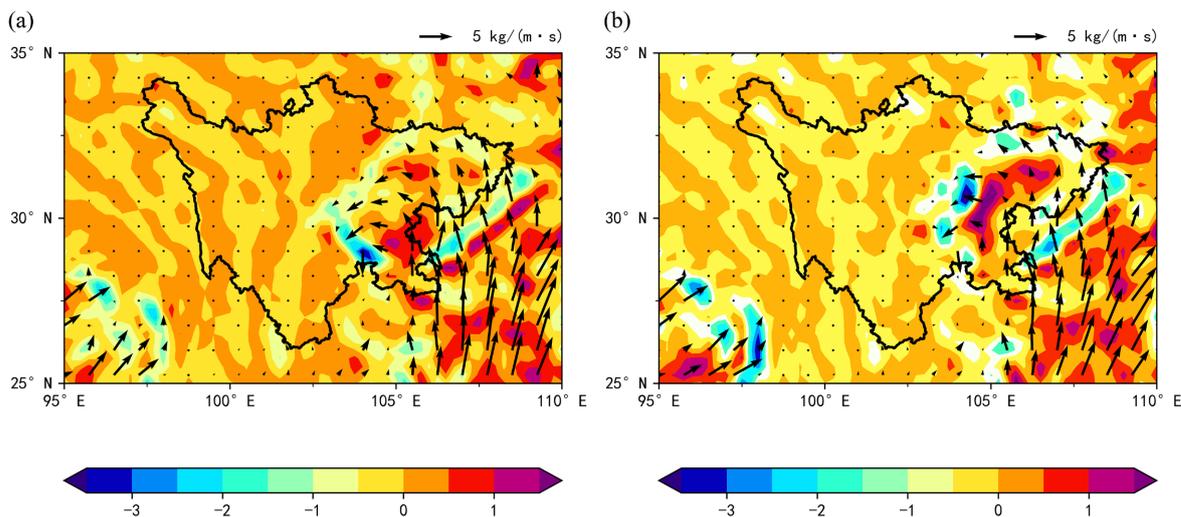


Figure 11. 850 hPa water vapor flux and water vapor flux dispersion field at 02:00 (a) and 07:00 (b) on July 12, 2023
图 11. 2023 年 7 月 12 日 02:00 (a)、07:00 (b) 850 hPa 水汽通量及水汽通量散度场

由 7 月 12 日 02:00 盆地上空 850 hPa 水汽通量及水汽通量散度场(图 11(a))可以看出, 缅甸北部存在一股较小的水汽往东北方向输送, 并在 07:00 有所增强, 在水汽通量散度图来看, 在该股水汽的影响下, 该区域出现了较大的水汽辐合和水汽辐散, 可能会出现强降水天气过程, 但与本次暴雨过程联系不大。在盆地东南方向贵州省有一支很强的水汽向北输送而来, 达到重庆后一分为二, 其中一部分向东北方向即湖北省输送, 另外一部分继续北上, 到达广安遂宁等地时开始呈气旋性弯曲, 覆盖盆地东部及东北部。进入盆地后, 盆地东北部分水汽输送强度略弱于盆地东部, 到 07:00 (图 11(b))向湖北省输送的一支水汽仍然强盛, 但向盆地内的水汽输送略有减弱, 总体上水汽路径的气旋性趋势不变。

当水汽被输送到降水区域后, 还需要有使得水汽抬升凝结的条件, 才能产生降水。水汽通量散度描述了水汽在空间上的源汇特性, 其正值指示水汽在该区域的辐合, 常与降水过程相联系; 而负值则表明水汽辐散, 可能导致干旱条件的加剧。在 02:00 水汽通量散度图上(图 11(a)), 成都市上空无明显的水汽辐合, 至 07:00 (图 11(b)), 成都市上空出现水汽辐合中心, 强度达到了 $-4 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hpa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 可知暴雨期间存在水汽的不断辐合, 使得水汽不断积聚, 比湿上升。

3.4. 动力条件分析

3.4.1. 垂直速度

在特定条件下, 大气所储存的不稳定能量可以被释放。这种能量的释放和转换, 主要是通过气团的垂直运动, 即上升和下沉气流来完成的。垂直速度是描述这种垂直运动的一个关键物理参数, 其数值大小直接关系到垂直运动的强度。在 P 坐标系下, 较大的负值意味着更强烈的上升气流, 这通常有利于强对流天气如雷暴和短时强降水的形成和发展。此外, 大气的垂直运动不仅影响着水汽和热量的垂直交换, 还涉及到动量和能量的垂直及水平传输, 这些过程对中小尺度系统的发生发展和强度具有显著的影响。

从 12 日 02:00 850 hPa 垂直速度场(图 12(a))可知, 宜宾市存在一个垂直速度极大值, 中心速度达到

了 $-1.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, 并向北减小, 到成都市上空已减弱至 $-0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, 此时暴雨刚开始, 上升运动开始缓慢加强。至 07:00 (图 12(b))暴雨结束后, 成都市上空垂直速度已至 $0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, 为弱下沉气流, 大气层结已趋于稳定。

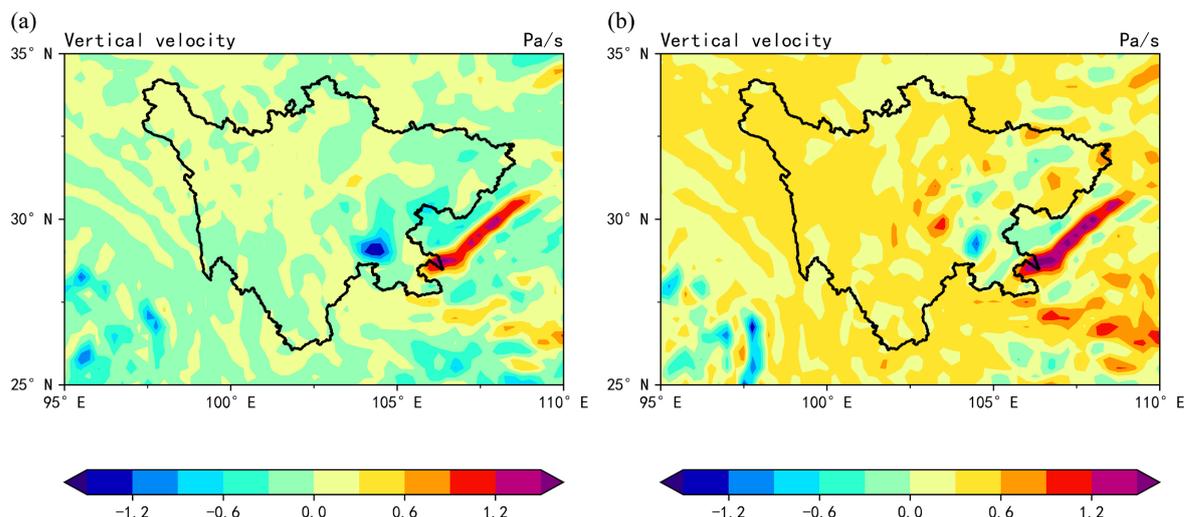


Figure 12. Vertical velocity at 850 hPa on July 12, 2023 at 02:00 (a), 07:00 (b)

图 12. 2023 年 7 月 12 日 02:00 (a)、07:00 (b) 850 hPa 垂直速度

3.4.2. 散度

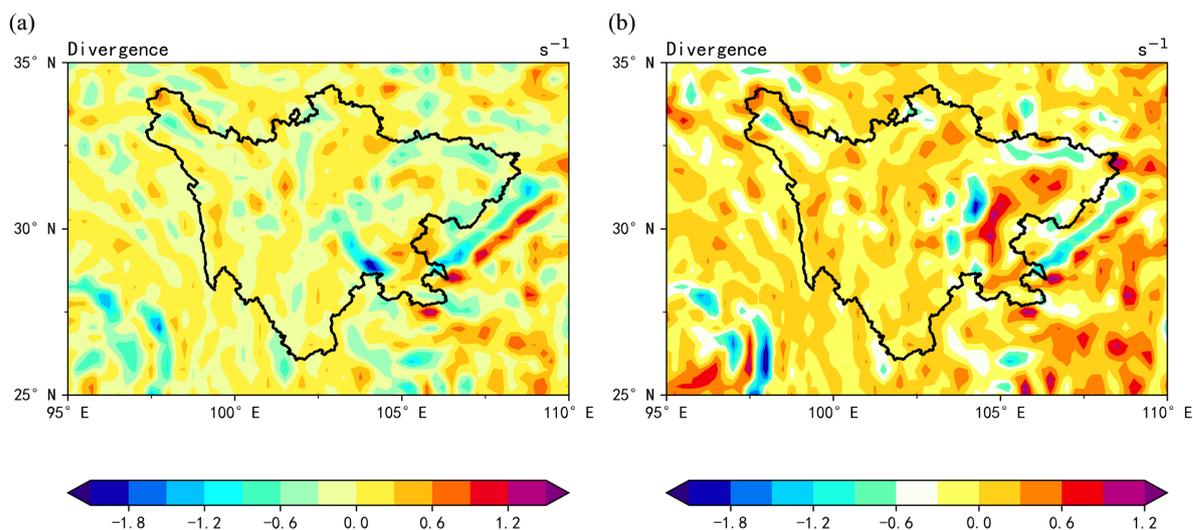


Figure 13. Divergence at 850 hPa 02:00 (a), 07:00 (b) on July 12, 2023

图 13. 2023 年 7 月 12 日 850 hPa 02:00 (a)、07:00 (b)散度

散度, 即速度场的散度, 表征了空间各点矢量场发散的强弱程度, 它反映了大气中流体速度场的发散或汇聚趋势。散度分析在暴雨诊断领域扮演着至关重要的角色, 因为它与大气动力学过程紧密相连。具体来说, 散度的局部分布和变化趋势能够揭示气流的汇聚或扩散区域, 这些区域对天气系统的发展和持续起着决定性作用。高压中心的正散度区域通常预示着晴朗的天气, 而低压中心的负散度区域可能预示着降水和风暴活动。研究散度场, 有助于我们更精确地识别高压和低压系统的形成与演变, 这些系统

与天气变化过程紧密相关。

从7月12日02:00 850 hPa 散度场(图 13(a))可知, 成都市双流区上空存在一个较弱的散度负值区, 数值为 $-0.3 \times 10^{-4}/s$, 气层总体上处于弱辐合状, 结合02:00 垂直场(图 12), 此时已有气流开始缓慢上升, 对应02:00的零星小雨。到07:00 850 hPa(图 13(b)), 成都上空已发展出一个低压中心, 极大值达到了 $-1.8 \times 10^{-4}/s$, 双流上空区域也达到了 $-0.6 \times 10^{-4}/s$, 这表明在暴雨过程中, 与暴雨相匹配的散度场也在不断发展。

3.4.3. 涡度

涡度定义为速度场的旋度, 作为表征大气旋转特性的物理量, 其量化了大气中流体速度场的旋转程度。在大气科学领域, 一般只考虑涡度的垂直分量。涡度直接关系到与暴雨形成密切相关的上升运动, 涡度的局部分布和变化趋势能够揭示出可能的上升运动区域, 这些区域是水汽凝结和云发展的关键场所, 从而为降水事件的发生提供了条件。通过对涡度场的深入分析, 我们能够更精确地识别低气压系统的演变, 这些系统常常与强降水过程有关。涡度的应用增强了我们对极端降水事件预测的能力, 为气象预报提供了一个强有力的工具。

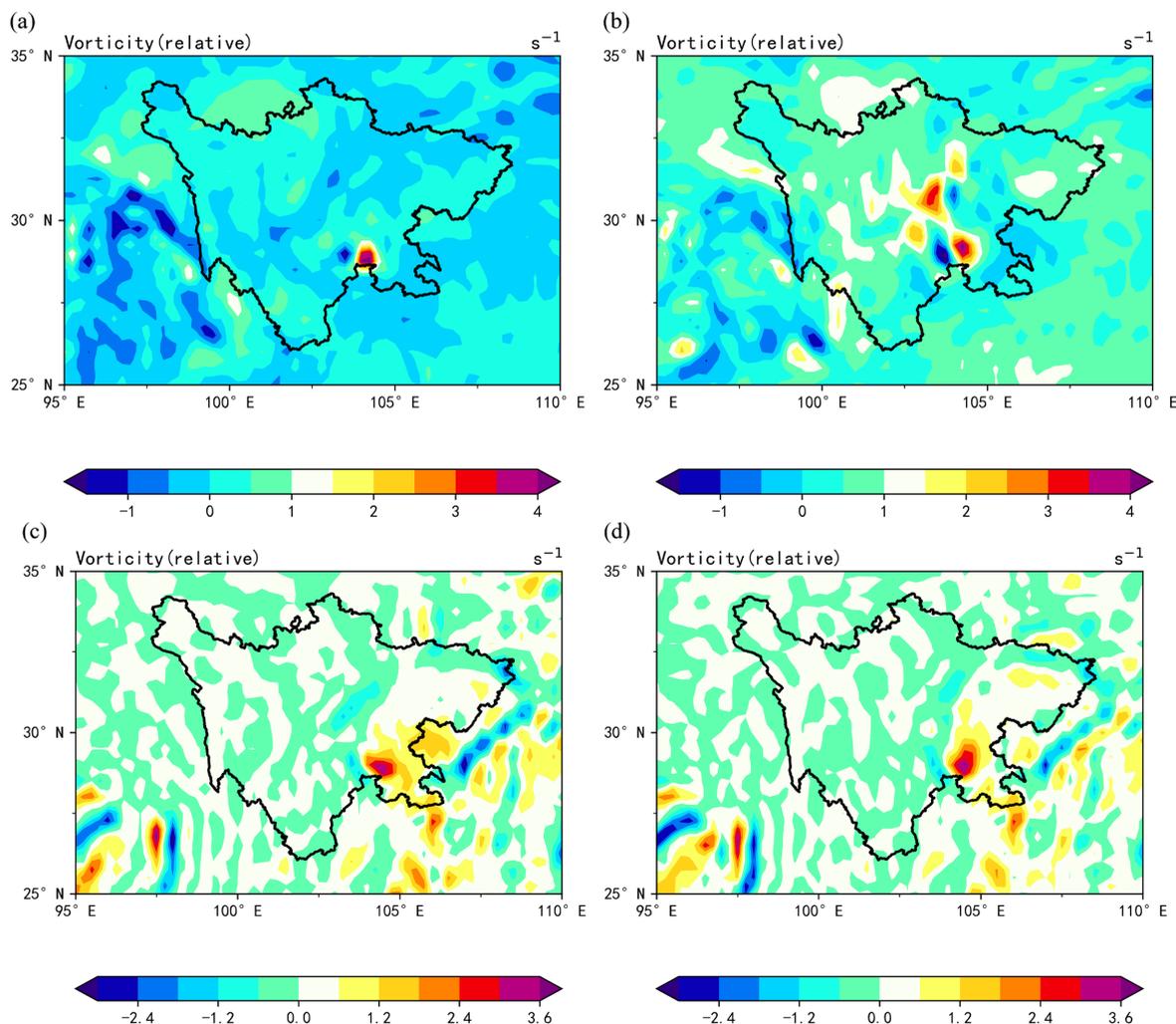


Figure 14. Vorticity at 850 hPa 02:00 (a), 07:00 (b), 500 hPa 02:00 (c), 07:00 (d) on July 12, 2023

图 14. 2023 年 7 月 12 日 850 hPa 02:00 (a)、07:00 (b), 500 hPa 02:00 (c)、07:00 (d) 涡度

由 12 日 02:00 850 hPa 涡度场(图 14(a)), 宜宾市存在一个正涡度高值中心, 其中心强度达到了 $3.6 \times 10^{-4}/s$, 并有向北发展的趋势, 成都市上空涡度值在 $0/s$ 到 $0.6 \times 10^{-4}/s$ 之间, 对应上升运动开始逐渐发展。500 hPa(图 14(c))上, 成都市上空涡度值在 $-0.5 \times 10^{-4}/s$ 到 $0.5 \times 10^{-4}/s$ 之间, 到 07:00 850 hPa(图 14), 位于宜宾市的正涡度中心已剧烈发展, 覆盖区域向北扩展, 成都市上空涡度值已达到 $0.6 \times 10^{-4}/s$, 而在 500 hPa(图 14)上, 涡度值为 $0.5 \times 10^{-4}/s$ 。

3.5. 热力条件分析

3.5.1. 假相当位温

假相当位温(θ_{se})被用于分析和量化大气中气块的潜在不稳定性及不稳定能量。与位温相比, 假相当位温综合考虑了气块在凝结过程中潜热的释放, 从而提供了对大气能量状态的更全面描述[18]。通过对假相当位温分析, 揭示了大气中可能促成对流降水增强的关键区域。值得关注的是假相当位温的高值区域, 这些区域上空大气中存在较强的上升运动和水汽的凝结降落, 这是诊断潜在暴雨区域的重要线索。此外, 假相当位温的三维结构分析进一步帮助我们理解了大气中的能量分布, 以及这些能量如何通过垂直运动和水汽输送过程影响对流活动的发展。在暴雨事件的诊断中, 假相当位温不仅揭示了大气中不稳定能量的分布, 还有助于识别出能量释放的关键层结。这些信息对于预测和理解暴雨事件的触发机制至关重要。通过对假相当位温分布的深入分析, 能够更准确地定位和预测可能导致强降雨的区域, 为采取相应的天气应对措施提供科学依据。

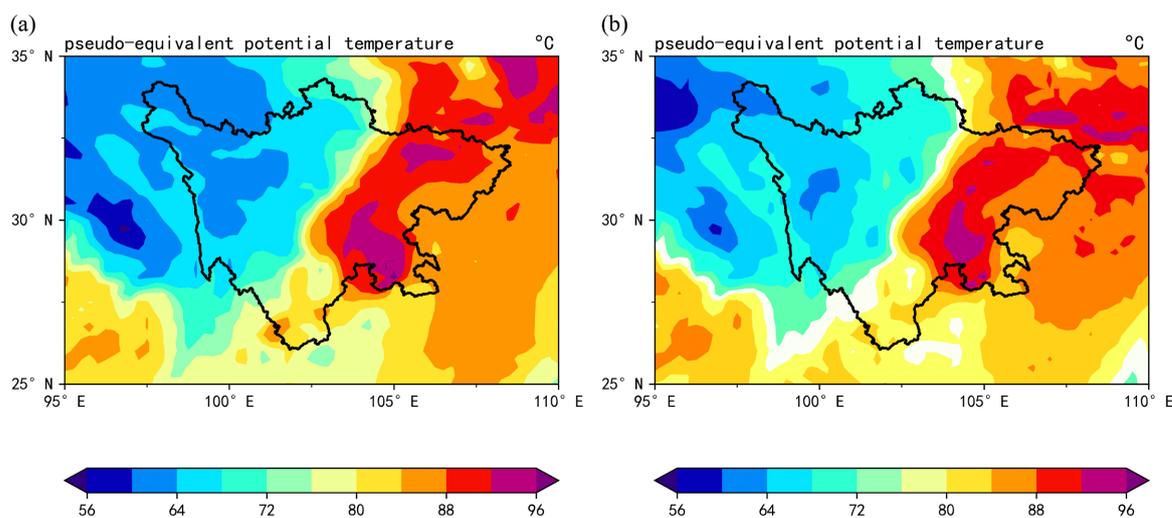


Figure 15. 850 hPa pseudo-equivalent level temperature at 02:00 (a) and 07:00 (b) on July 12, 2023

图 15. 2023 年 7 月 12 日 02:00 (a)、07:00 (b) 850 hPa 假相当位温

从 7 月 12 日 02:00 850 hPa 假相当位温图(图 15(a))上可知, 盆地内东南部存在一个较大的假相当位温高值区, 中心强度高达 $96^{\circ}C$, 范围较大, 覆盖了宜宾、眉山、乐山等市, 双流区上空假相当位温也高达 $92^{\circ}C$; 盆地东北部也有相同的区域, 但范围只有前者的 1/3。到了 07:00(图 15(b)), 两个高值区范围均有不同程度的缩减, 位于宜宾市的高值区缩小北移, 位于广元市的高值区已减弱至几近消失, 数值下降到 $88^{\circ}C$, 双流上空假相当位温也下降到 $88^{\circ}C$ 。结合暴雨前后 850 hPa 水汽通量及水汽通量散度场(图 11)可以看出, 经贵州重庆而来的高温高湿水汽为双流区上空大气积聚了不稳定能量, 暴雨过后, 不稳定能量释放了一部分, 之后假相当位温下降。

当假相当位温随高度减小时, 表明大气低层存在较强的潜在不稳定能量, 有利于对流发展。本文使

用对流性稳定度指数 IC 衡量大气的潜在不稳定, IC 定义为 500 hPa 和 850 hPa 之间的假相当位温之差, 即 $IC = \Delta\theta_{se500-850}$ [19]。当 $IC < 0$ 时为对流性不稳定, 表明在中层大气中存在较冷的空气, 而在低层大气中存在较暖的空气, 其绝对值越大, 表示大气越不稳定, 局地对流发展可能会更加旺盛。

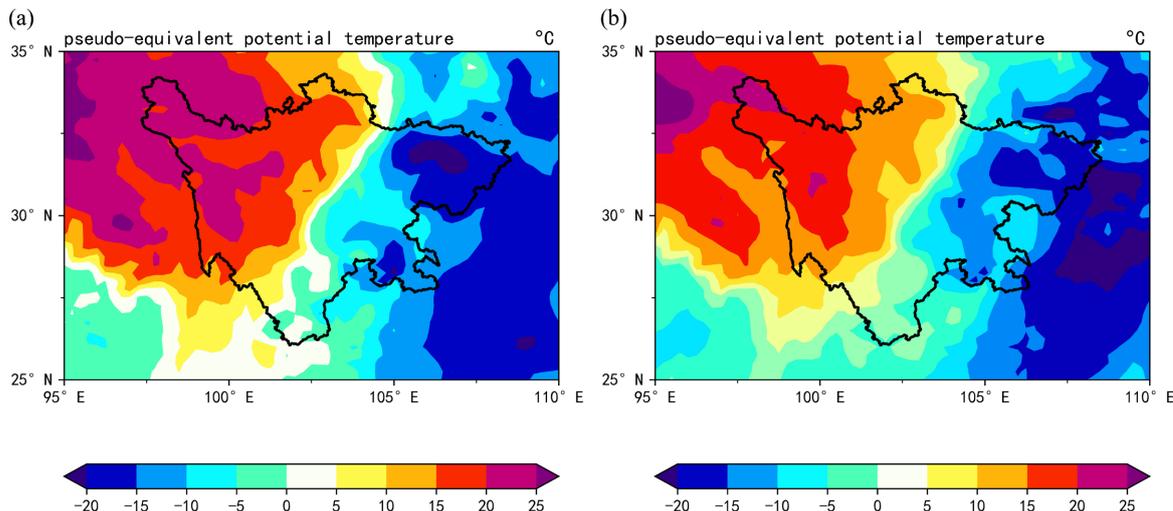


Figure 16. $\Delta\theta_{se500-850}$ at 02:00 (a), 07:00 (b) on July 12, 2023

图 16. 2023 年 7 月 12 日 02:00 (a)、07:00 (b) $\Delta\theta_{se500-850}$

从 7 月 12 日 02:00 IC 场(图 16(a))可知, 宜宾市和巴中市都存在一个对流不稳定区域, IC 极大值都达到了 -20°C , 宜宾处高值区呈月牙状, 巴中市高值区覆盖了盆地东北部; 双流上空 IC 为 -5°C 。到了 07:00 (图 16(b)), 两处不稳定区域已连成一片, 因此双流上空 IC 数值有所上升, 达到了 -10°C 。这表明即使暴雨释放掉一部分不稳定能量, 经过 5 个小时的水汽输送, 使得双流上空不稳定能量仍然在稳步增加。

3.5.2. K 指数

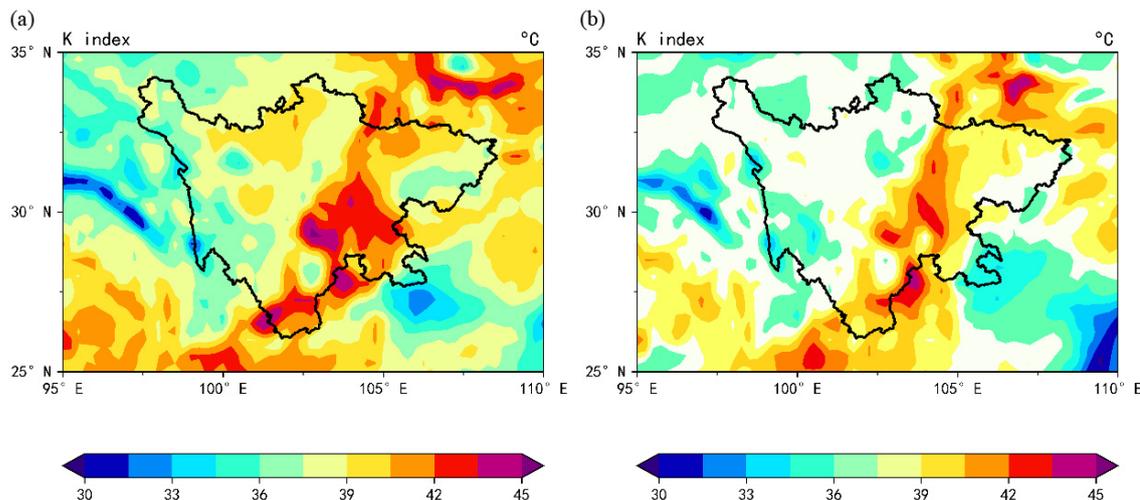


Figure 17. 02:00 (a), 07:00 (b) July 12, 2023 K index

图 17. 2023 年 7 月 12 日 02:00 (a)、07:00 (b) K 指数

K 指数, 也称 K 值, 通过计算大气中 500 hPa、700 hPa 和 850 hPa 三个层次之间的温差来量化大气

层结的不稳定性, 识别大气中可能的对流活动。K 指数的分析有助于揭示大气中潜在的对流活动区域, 尤其是在 K 指数较高值的区域, 这些区域更有可能发生强烈的上升气流, 进而触发雷暴和强降水。当 $K > 30^{\circ}\text{C}$ 时就可能会出现雷暴的可能[20]。因此, K 指数在暴雨诊断中扮演着重要角色, 它不仅能够指示大气的热力状态, 还能辅助预测对流降水的强度。

从 7 月 12 日 02:00 K 指数(图 17(a))可以看出, 双流上空存在很大一片 K 值达到 42°C 的区域, 双流上空达到了 43.5°C , 这表明大气中已存在较大的不稳定能量, 为暴雨发生提供较好的能量条件。至 07:00 (图 17(b)), 双流上空 K 指数下降了 1.5°C , 不稳定区域大幅缩小, 02:00 雅安市高达 45°C 的 K 值在 07:00 也下降了 5°C 。

3.6. 探空资料分析

探空资料来源于成都信息工程大学气象楼实习台, 测站为成都温江站, 编号 56187, 取 2023 年 7 月 11 日 20:00 和 12 日 08:00 的对数压力图及各类对流参数如表 1。

Table 1. Convective Parameters for July 11 - 12, 2023

表 1. 2023 年 7 月 11~12 日各对流参数

时间	K 指数	SI	w_CAPE	CAPE	CIN
11 日 20:00	43°C	-0.93°C	$37.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$696.8 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$130.2 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$
12 日 08:00	44°C	-3.46°C	$29.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$429.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$

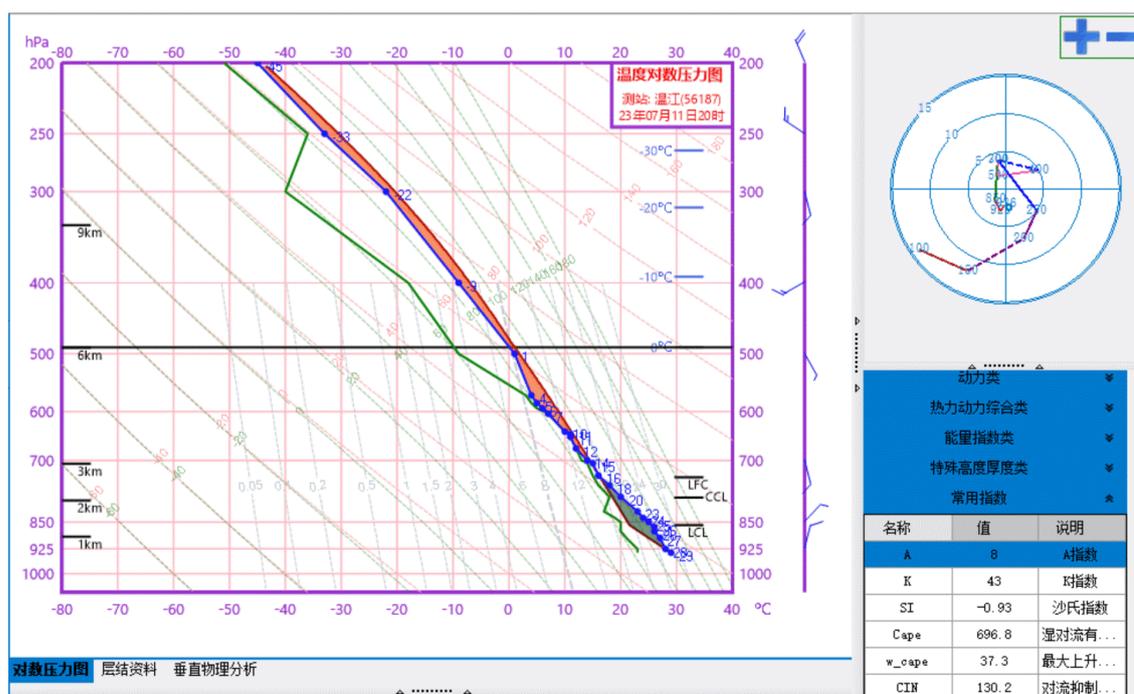


Figure 18. Log pressure plot of temperature at 20:00 on July 11, 2023

图 18. 2023 年 7 月 11 日 20:00 温度对数压力图

沙氏指数是指在 850 hPa 等压面上, 未饱和湿空气沿干绝热线抬升至抬升凝结高度, 再沿湿绝热线上升到 500 hPa 时, 气块温度(T')与 500 hPa 等压面上的环境温度(T_{e500})之间的差值。 $SI = T_{e500} - T'$, SI < 0 表示大气层结不稳定, 负值越大表示不稳定度越高; 反之表示气层是稳定的[21]。K 指数综合考虑了

温度直减率、低层水汽条件和中层饱和程度,用于表征大气热力稳定度[22]。 K 指数越大,表示大气层结越不稳定[23]。在 K 值较大的不稳定区域中,常受气流辐合、辐散的影响。辐合区会加强雷暴活动,而辐散区则会减弱雷暴活动。对流有效位能 $CAPE$ 是指在不稳定气层中气块做垂直运动时所获得的动能,是由不稳定大气中储存的能量转化而来。在发生深厚湿对流的环境中, $CAPE$ 是与环境联系最密切的热力学变量[24]。对流抑制能量 CIN 是反映发生对流之前所需的最小能量,定义为气块达到自由对流高度 LFC 所做的负功,对流抑制能量(CIN)也是深厚湿对流发生潜势和潜在强度的一个重要指标[25]。 w_CAPE 是由 $CAPE$ 估算的气块达到平衡高度 EL 时的最大垂直速度,估算公式 $w_cape = \sqrt{2 \cdot CAPE}$ 。

由表1可知,7月11日20:00,成都上空 K 指数为 $43^{\circ}C$, SI 为 $-0.93^{\circ}C$,这表明雷暴发生的可能性很高,环境不稳定能量积聚很大;对流有效位能为 $696.8 J \cdot kg^{-1}$, CIN 为 $130.2 J \cdot kg^{-1}$ 。到了12日08:00, K 指数上升了一度,但陈军等[26]指出在 K 指数指示的不稳定区域里,常受气流辐合辐散的影响, K 指数不能明显表示出整个大气的层结不稳定程度,且在成都市上空由于暴雨前后一直存在水汽的不断输送,使得 K 指数并没有因为暴雨而下降。 SI 指数则下降更多,达到了 $-3.46^{\circ}C$ 。从 $CAPE$ 值来看,本次暴雨消耗了大气中近1/3的不稳定能量, $CAPE$ 下降到了 $429.5 J \cdot kg^{-1}$,结合探空图(图18)可以看出,暴雨过后大气中500 hPa以下不稳定能量大幅减少,即使气块能越过 LFC 也没有足够的能量供其发展壮大。

4. 结论

1) 500 hPa上四川盆地位于一个低槽前部,副热带高压位于长江流域。由于副热带高压外围的反气旋环流和槽前西南气流的共同作用,有利于引导低层西南暖湿气流向四川盆地输送。700 hPa高度上四川盆地以西存在低槽,成都位于低槽前部,受偏南气流影响,存在西南暖湿气流的输送。盆地以北为偏北风,向盆地内输送干冷气流,利于激发对流活动。850 hPa高度上四川盆地处在暖区内,存在低压区和风的气旋性偏转,为降水提供动力条件。

2) 本次强降水天气过程的水汽来自于偏南气流,经贵州、重庆到达成都,高温高湿水汽的到来使得成都上空大气变得非常不稳定。下层暖湿上层干冷的配置非常有利于对流的产生。水汽输送持续了整个暴雨过程,使得在暴雨结束后成都市850 hPa比湿略有上升,伴随着一个较强的水汽辐合中心。

3) 暴雨过程中的垂直运动较为强烈;散度场上500 hPa辐散、850 hPa辐合的配置,利于上升运动的发展和加强;500 hPa成都地区位于低槽前部,槽前正涡度平流促使低层低压发展,加强低层气流上升运动,为暴雨的发生发展提供了良好的动力条件。

4) 在热力条件上,成都市上空假相当位温场存在一个极值达 $96^{\circ}C$ 的高值区,并且 $IC = -5^{\circ}C$, K 指数上同样有大于 $42^{\circ}C$ 的高值区,这表明成都市上空大气已有较大的不稳定能量储备,为暴雨发生提供良好的能量条件。在11日20:00探空图上也能看出 $CAPE$ 为 $696.8 J \cdot kg^{-1}$, CIN 为 $130.2 J \cdot kg^{-1}$,在以上的环流形势中,气块能够获取到足够能量越过 LFC 从而产生对流,使得暴雨产生。

参考文献

- [1] 高楷祥. 成都市双流区近30年降水气候特征分析[J]. 区域治理, 2018(5): 223.
- [2] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 第4版. 北京: 气象出版社, 2000.
- [3] 缪语沛, 陈杰, 赵一夫, 等. 台风“暹芭”引起宁德市远距离暴雨过程分析[J]. 海峡科学, 2023(6): 24-29.
- [4] 程佳佳, 徐国强. 郑州“7·20”极端暴雨过程中水汽和高低空急流作用机制的数值模拟[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(3): 57-68.
- [5] 李俊, 赵拓宇. 暴雨成因研究[J]. 科技信息, 2011(21): 417-418.
- [6] 陈丹, 周长艳, 齐冬梅. 夏季青藏高原及周边大气热源与四川盆地暴雨的关系[J]. 高原气象, 2019, 38(6): 1149-1157.

- [7] 魏葳, 蒋丽, 陈晓伟, 等. 2015 年皖江最强梅雨锋短时强降水过程成因分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1): 66-74.
- [8] 李强, 王秀明, 周国兵, 张亚萍, 何跃. 四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 960-972.
- [9] 晏红明, 字侯丞. 夏季副高次季节尺度东西变动特征及其与中国西南降水的关系[J]. 大气科学, 2021, 45(1): 1-20.
- [10] 王强, 王起唤, 肖敏, 等. 怀化三次西南涡暴雨天气过程对比分析[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(4): 16-24.
- [11] 高坤, 徐亚梅. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究[J]. 大气科学, 2001(6): 740-756.
- [12] 陈中友. 透水沥青路面在市政道路建设中的应用研究[J]. 四川水泥, 2023(5): 208-210.
- [13] 杜佳昊, 吕镔. 四川成都地区第四纪红土磁学特征及其环境意义[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 82-93.
- [14] 姜文超. 城镇地区水资源(极限)承载力及其量化方法与应用研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [15] 包慧濛, 肖安, 李葳, 等. 南方比湿特征及其与暴雨的关系[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(2): 33-42.
- [16] 迟静, 周玉淑, 冉令坤, 等. 吉林一次极端降水发生发展热力过程的数值模拟分析[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1400-1414.
- [17] 王勇, 陈豫英, 李婷, 等. 贺兰山东麓两次暴雨过程湿位涡特征分析[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(6): 1-9.
- [18] 许乾杰, 沈龙喜, 涂若冰, 等. 漳州市中南部一次大暴雨过程的成因分析[J]. 大众科技, 2023, 25(12): 33-36.
- [19] 杨学斌, 代玉田, 吕伟绮. 闪电发生的环境场特征及闪电活动的预报[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 96-102.
- [20] 王岩韬, 赵昕颐. 基于危险天气不确定性的最小风险路径规划方法[J]. 工程科学学报, 2024, 46(5): 887-896.
- [21] 孙兴国. 长白朝鲜族自治县 2013 年 8 月中旬大暴雨天气过程分析[J]. 北京农业, 2014(18): 214-215.
- [22] 宋刘明, 田德宝, 吴建青, 等. 浙北地区春季一次弓形回波造成的雷暴大风天气过程成因分析[J]. 科技通报, 2023, 39(8): 7-13.
- [23] 王宏, 黄金洪, 赵芮, 等. 2022 年 9 月福建邵武边界层臭氧异常升高的气象成因[J]. 山地气象学报, 2024, 48(1): 21-30+53.
- [24] Doswell III, C.A. and Rasmussen, E.N. (1994) The Effect of Neglecting the Virtual Temperature Correction on CAPE Calculations. *Wea Forecasting*, **9**, 625-629. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0625:TEONTV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0625:TEONTV>2.0.CO;2)
- [25] 周泓, 闵颖, 许彦艳, 等. 滇中地区不同影响系统下 3 次短时强降水过程的大气环境特征和雷达特征分析[J]. 高原气象, 2024, 43(1): 166-183.
- [26] 陈军, 李小兰, 喻义军, 等. 贵州铜仁地区一次罕见大范围冰雹过程分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 1047-1053.