暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

华南“11.6”持续性与“13.4”短时极端强降水事件的形成机制对比研究

周妍 张潮 李昀英

A comparative study on the formation mechanisms of "11.6" persistent and "13.4" short-term extreme heavy precipitation events in South China

ZHOU Yan，ZHANG Chao，LI Yunying

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-208

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

江淮梅雨期持续性暴雨和极端强降水事件的位涡比较分析

Comparative analysis of potential vorticity between persistent rainstorm and extreme intense rainfall events during the Yangtze-Huaihe Meiyu period

暴雨灾害. 2024, 43(2): 121-134 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-202

一次极端短时强降水过程中FY-3微波湿度计观测特征分析

Analysis of observation characteristic of FY-3 microwave hygrometer during an extreme short-term heavy precipitation process

暴雨灾害. 2020, 39(3): 300-305 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.011

广西一次持续性暴雨过程中低空急流的作用及其特征

The role and characteristics of low-level jet during a persistent rainstorm in Guangxi

暴雨灾害. 2023, 42(6): 640-647 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-097

广西汛期极端短时强降水特征分析

Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season

暴雨灾害. 2022, 41(3): 308-314 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比

Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain

暴雨灾害. 2023, 42(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119

逗点状MCS中的γ中尺度涡旋形成机制及结构特征

Formation mechanism and structural characteristics analysis of meso--scale vortex in comma-shaped MCS

暴雨灾害. 2025, 44(5): 642-652 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-103

关注微信公众号，获得更多资讯信息

周妍,张潮,李昀英.2026.华南“11.6”持续性与“13.4”短时极端强降水事件的形成机制对比研究[J].暴雨灾害,45(1):24−35. ZHOU Yan, ZHANG Chao, LI Yunying. 2026. A comparative study on the formation mechanisms of "11.6" persistent and "13.4" short-term extreme heavy precipitation events in South China [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):24−35 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−208

华南“11.6”持续性与“13.4”短时极端强降水事件的形成机制对比研究

周妍[1], 张潮[1,2], 李昀英[1,2]

(1. 国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410073; 2. 中国气象局高影响天气 (专项) 重点开放实验室, 长沙 410073)

摘　要: 基于 ERA5 再分析资料、中国自动气象站与 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 气候预测中心卫星反演降水资料 CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Technique) 融合的逐时降水量网格数据集, 从环流背景、水汽输送、涡度收支等方面对比分析了华南沿海地区 2011 年 6 月 29 日极端持续性强降水事件 (以下简称“11.6”强降水) 与 2013 年 4 月 25 日极端短时强降水事件 (以下简称“13.4”强降水) 的发生发展机制。结果显示: “11.6”强降水伴随着稳定的低压天气系统, 高空由涡旋主导, 低空具有稳定的水汽输送带; 而“13.4”强降水不具备稳定的天气系统, 低空水汽输送少, 但由于存在短时的强水汽辐合导致小时降水量大。“11.6”强降水存在更大的正涡度收入, 低空急流是低层涡度收入的关键, 中层涡旋的生成加强是中层涡度收入的关键, 同时两者的正反馈作用也是降水维持的重要因素。

关键词: 极端短时强降水; 极端持续性强降水; 涡度收支; 低空急流; 中尺度涡旋

中图法分类号: P458.1+21　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−208

A comparative study on the formation mechanisms of "11.6" persistent and "13.4" short-term extreme heavy precipitation events in South China

ZHOU Yan[1], ZHANG Chao[1,2], LI Yunying[1,2]

(1. *College of Meteorology and Oceanography*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073; 2. *Key Laboratory of High Impact Weather* (*special*), *China Meteorological Administration*, *Changsha* 410073)

Abstract: Based on ERA5 reanalysis data and hourly gridded precipitation dataset produced by merging China's automatic weather-station observations with the NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) Climate Prediction Center's CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Technique) satellite-derived precipitation estimates, this study comparatively analyzes the formation and development mechanisms of the persistent extreme heavy precipitation event on June 29th, 2011 (hereinafter called "11.6" event) and the short-term extreme heavy precipitation on April 25th, 2013 (hereinafter called "13.4" event) along the coastal region of South China. From perspectives including synoptic circulation patterns, moisture transport, and vorticity budget, the results show that the "11.6" event was associated with a stable low-pressure weather system, dominated by an upper-level vortex that provided dynamic lifting and sustained by a steady low-level moisture transport band. In contrast, the "13.4" event lacked a stable synoptic system and exhibited weaker low-level moisture transport. However, it produced intense hourly rainfall due to transient but strong low-level moisture convergence. The "11.6" event featured greater positive vorticity advection, and the low-level jet was crucial for vorticity input in the lower troposphere, while the generation and intensification of mid-level vortices were key to vorticity input in the mid-troposphere. Furthermore, the positive feedback between these two processes played a vital role in sustaining the heavy precipitation.

Key words: short-term extreme heavy precipitation; persistent extreme heavy precipitation; vorticity budget; low-level jet; meso-scale vortex

收稿日期: 2024−11−28; **定稿日期**: 2025−12−19

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2242201, 42305069, 42075077); 湖南省自然科学基金项目 (2023JJ30629)

第一作者: 周妍, 主要从事极端降水形成机制研究。E-mail: zhouyan.0322@nudt.edu.cn

通信作者: 张潮, 主要从事边界层气象学研究。E-mail: zchao@nudt.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

引　言

中国是世界上气象灾害频发、灾害种类甚多的少数国家之一 (周佰铨和翟盘茂, 2023), 在全球气候系统的自然变率和人类活动导致的全球变暖背景下, 中国地区水循环更加活跃 (朱连华等, 2023; Huang et al., 2017), 有关统计表明中国极端降水事件的强度和频次均呈现出显著增加趋势 (卢珊等, 2020)。近些年我国发生的多次极端降水事件在降雨量和降雨时长方面都刷新历史记录, 例如“21.7”郑州特大暴雨其小时降水量达到 201.9 mm, 过程累积降水量达到 449 mm (姚秀萍和李若莹, 2023)。此外, 强降水引发的山体滑坡、泥石流、城市内涝等次生灾害造成的损失亦呈明显的上升趋势 (尹家波等, 2021), 这使得极端降水事件引发了广泛的社会关注, 对极端降水事件分布特征及发生发展机理的研究也成为了气象领域的热点问题之一。

根据降水的强度和持续时间, 可以将极端降水事件分为短时极端强降水事件和持续性极端强降水事件。前者是典型的中尺度天气过程之一, 多由时间尺度为几十分钟至几个小时的强对流天气系统导致 (Jiang et al., 2020), 这种类型的天气系统的发生发展和消亡都很迅速 (Brown et al., 2020; Ali et al., 2021; 廖胜石等, 2022)。然而, 由中尺度天气系统引起的强对流降水事件还会受到部分天气尺度的大气波动或者行星尺度的低频振荡的影响 (Huang et al., 2022; 马骄等, 2022; 李华实等, 2023), 导致降水事件呈现出降水量大和持续时间长的双重极端性, 即持续性极端强降水事件。统计资料表明, 两类降水事件在时空分布特征上呈现出一定的差异性 (郭建平等, 2017; Du et al., 2019), 并且不同降水事件的发生发展机理也存在显著不同。目前已有的工作多数将短时极端强降水以及持续性极端强降水事件孤立地分开讨论, 缺乏对二者区别与联系的详细研究, 这需要对两类降水事件的形成原因以及发生发展机制进行更加系统的对比。

华南地区是我国气候系统最复杂、降水指标最极端、灾害暴露度最高的地区之一 (刘雨佳等, 2017; 郭丽芳等, 2025), 也是研究极端降水机理的重点区域 (崔梦雪等, 2024; 蒋亚平等, 2025), 本文选取华南沿海地区两类典型的强降水事件开展对比研究, 旨在对比分析其降水特征, 围绕两类极端降水事件的环流背景、水汽输送、涡度收支等方面, 分析其发生发展机制, 为加强我国极端天气事件的监测、预测以及为区域极端强降水的预报提供科学依据。

1 资料说明与研究方法

1.1 资料说明

文中用到的资料主要包括: (1) 格点降水资料, 即国家气象信息中心提供的区域级气象观测站 (以下简称区域站) 与美国国家气候预测中心卫星反演降水资料 CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Technique) 产品融合的逐时降水量网格数据集 (1.0 版), 时间范围为 2008 — 2019 年, 水平空间分辨率为 0.1°×0.1°, 时间分辨率为 1 h。周璇等 (2015) 利用国家级气象观测站 (以下简称国家站) 逐时地面降水资料与该融合资料行对比, 发现后者可以很好地再现我国南方强降水的特征, 并且能够较好地反映地形的影响。(2) 再分析资料, 即欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的全球第五代大气再分析数据 (ERA5), 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1h。分析中所用的 ERA5 数据包括位势高度、涡度、散度、水平风速、垂直速度和相对湿度等变量, 研究区域为 (90°—130°E, 15°—45°N), 垂直层为 1 000—100 hPa。该资料在中国的适用性已经经过了广泛的验证, 其气象要素提取值可代替实测值用于中国区域对流层研究 (李瑞辉等, 2021)。

1.2 研究方法

1.2.1 强降水事件的定义和选取

针对华南地区极端降水的特征, 基于长时间序列小时格点降水资料, 采用相对阈值法来定义极端强降水 (Wang et al., 2005; 马雨露等, 2017)。短时极端强降水以小时降水量表征降水强度, 定义小时降水量超过 50 mm 的降水事件为短时极端强降水事件 (Zhang and Zhai, 2011), 该强度阈值在研究华南地区短时强降水事件中具备一定的理论基础 (蔡悦幸等, 2018)。在本文所选取的研究时段即 2008—2019 年内, 将格点的降水数据按照从小到大排列, 该阈值取值为华南地区降水量的第 99.5 百分位。持续性极端强降水事件以小时降水量和降水时长双重特征表征降水强度, 定义为小时降水量超过 20 mm 且持续时间超过 5 h 的降水事件 (张弛, 2020), 其中持续时长阈值位于第 95 百分位, 小时降水量阈值也位于第 95 百分位。

图 1 为统计得到的华南地区持续性极端强降水事件与短时极端强降水事件的发生频次分布情况。可见, 两类极端降水事件的频发区均位于华南沿海地区, 其中持续性极端强降水事件存在更明显的两个集中区域 (图 1a), 而短时极端强降水事件则沿着海岸线呈现相对均匀的分布 (图 1b)。本文选择发生

在广西南部钦州湾附近 2011 年 6 月 29 日的持续性极端强降水事件 (以下称为“11.6”强降水) 与同样发生在该地的 2013 年 4 月 25 日的短时极端强降水事件 (以下称为“13.4”强降水) 进行研究, 首先两个个例均满足上述对于极端降水事件的定义, 总体强度按从小到大排序处于历史降水强度中前 5 百分位, 并且两个强降水事件发生的地点十分接近, 可以暂时忽略下垫面的地形作用对降水产生的影响, 从而更好地考虑背景环流形势以及天气系统配置等因素对降水过程的影响。

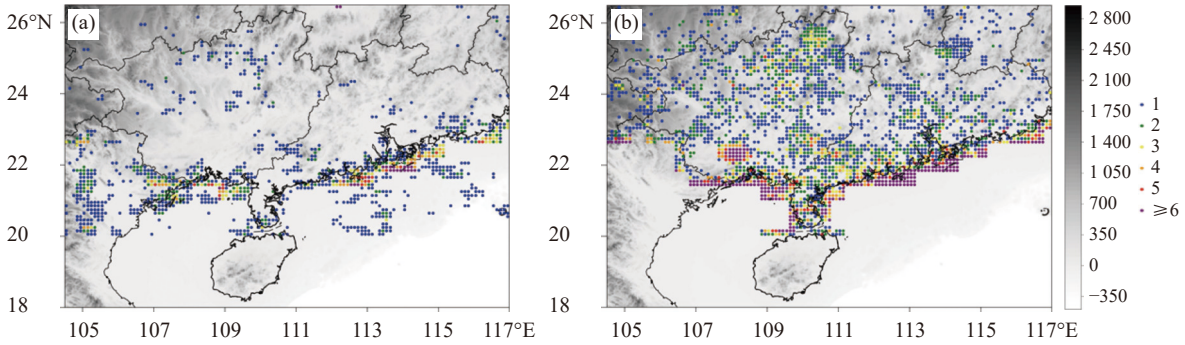


图 1 2008—2019 年华南局部地区极端持续性强降水事件 (a) 、极端短时强降水事件 (b) 发生频次 (彩色圆点, 单位: 次) 与地形 (填色, 单位: m) 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the frequency of (a) extreme persistent heavy precipitation events and (b) extreme short-duration heavy precipitation events (colored dots, unit: times) in part of South China from 2008 to 2019 and the elevation of terrain (shaded, unit: m)

1.2.2 涡度收支方程

为了分析降水过程中不同高度的涡度变化情况, 通过涡度收支方程来分析涡度的增减项以及收支情况 (Zhang, 1992), 具体方程如下

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}=-\left[u\frac{\partial \zeta}{\partial x}+v\left(\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\frac{\partial f}{\partial y}\right)\right]-\omega\frac{\partial \zeta}{\partial p}-(f+\zeta)\nabla\cdot\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)-\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}-\frac{\partial \omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial p}\right) \tag{1}$$

式中, u 是纬向水平风速, v 是经向水平风速, ω 是垂直运动速度, ζ 是相对涡度, f 为科里奥利参数。等式右边的四项依次为涡度水平平流项、涡度垂直输送项、水平辐合辐散项和扭转项, 分别用 A、B、C、D 表示。中尺度天气系统的分析中摩擦力的影响很小, 因此一般忽略摩擦力的计算 (Zhang, 1992)。

2 两次降水事件天气实况对比

图 2a、b 为“11.6”强降水事件的累计降水量以及逐小时降水量分布特征, 可见, 这次事件的降水区域空间分布呈现带状型, 降水中心 12 h 累计降水超过 180 mm, 降水从 15:00 (世界时, 下同) 开始呈现出增强的趋势, 21:00 之后渐弱, 其中 29 日 19:00—30 日 00:00 之间连续 6 h 的降水量大于 20 mm, 呈现出单峰值的特征, 是一次典型的持续性极端强降水事件。

图 2c、d 为“13.4”强降水事件, 可见, 本次降水过程虽然持续时间较短, 但降水分布集中, 在 18:00 降水强度达到峰值, 单小时的降水量就超过 50 mm, 19:00 后降水强度减小, 至 20:00 之后降水过程结束, 是一次典型的短时极端强降水事件。

3 两次降水事件环流背景对比

图 3 为“11.6”强降水事件的高低空位势高度及风场, 可见, 在 08:00 广西、贵州、四川三地上空存在深厚低压系统, 其厚度延伸至 500 hPa 以上并随时间加强, 在高空形势场中, 40°N 左右存在一支快速东移的短波槽, 在发展过程中冷空气脱离南下, 并在云贵高原西侧背风坡发展加强, 促使形成闭合涡旋系统, 该气旋在 08:00 尚处于初生阶段, 到 20:00 已发展加强形成具有明显低压槽的气旋系统, 中心气压持续降低。在季节背景上, 该事件处于该年江淮梅雨季的后期, 西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 脊线位于 23°N 左右, 但其西伸脊点位置偏东, 副高强度较该年平均态偏弱。在降水发生时段内, 海面上副高随时间西伸并加强, 这阻碍了该低压涡旋系统的移动, 使其在局地稳定发展, 这也为本次典型的持续性降水提供了低压的环流背景基础。从 850 hPa 高度场上可以看到在广东和广西南部有较强的两支暖湿气流气流, 一支是从南海上空来的偏南气流, 另一支是从孟加拉湾跨越中南半岛的偏西气流。其低空天气形势与高空形势相似, 主要受高空天气形势主导, 850 hPa 在 20:00 也出现闭合的低压中心, 整体呈现出稳定加强的低压系统, 风场呈现出低层风速大、高层风速小的特征。

图 4 为“13.4”强降水事件的高低空位势高度及风场, 从高空 500 hPa 形势场中可知, 副高脊线位于华南以南的海面, 强度偏弱且在整个降水过程中并

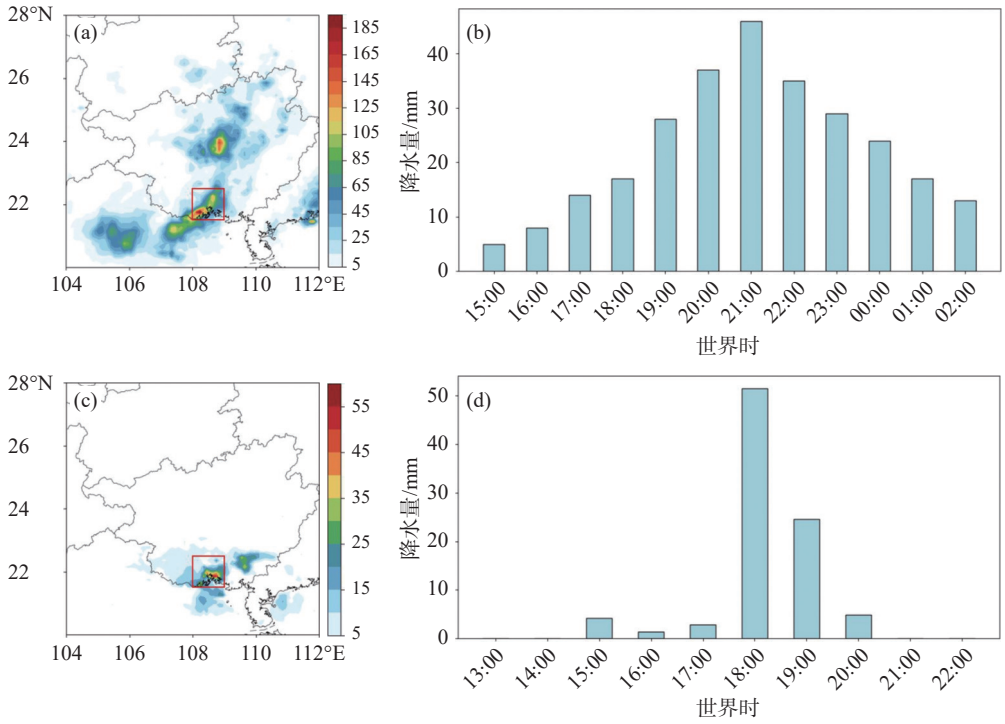


图 2 2011 年 6 月 29 日 15:00—30 日 02:00 (a, b) 和 2013 年 4 月 25 日 13:00—22:00 (c, d) 累计降水量 (单位: mm) 分布图 (a, c) 和区域格点平均的逐小时降水量柱状图 (b, d) (红色方框标注为此次研究的降水区域, 即 108°—109°E, 21.5°—22.5°N)

Fig. 2 Distribution of (a, c) accumulated precipitation (unit: mm) and bar charts of (b, d) hourly precipitation averaged over the local grid points for the periods of (a, b) from 15:00 UTC to 02:00 UTC on June 29–30, 2011 and (c, d) from 13:00 UTC to 22:00 UTC on April 25, 2013 (the red box indicates the precipitation area in this study, 108°-109°E, 21.5°-22.5°N)

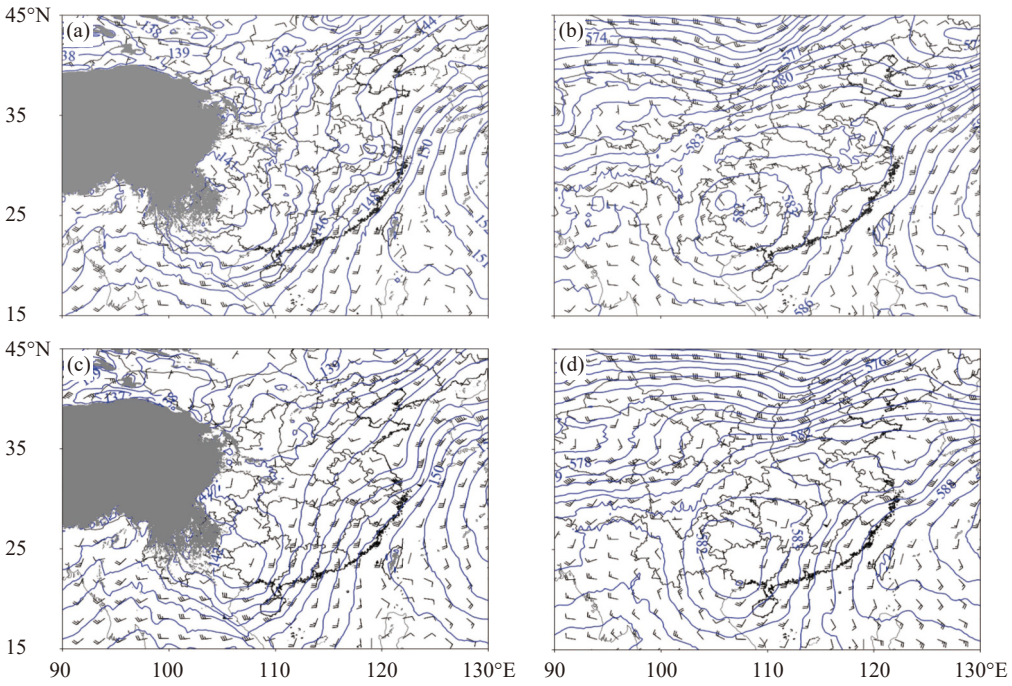


图 3 2011 年 6 月 29 日 08:00 (a, b)、20:00 (c, d) 850 hPa (a, c) 和 500 hPa (b, d) 高度场 (蓝色实线, 单位: dagpm) 与风场 (风羽) 综合图 (阴影部分为海拔高于 2 000 m 的地区, 下同)

Fig. 3 Height field (solid blue lines, unit: dagpm) and wind field (wind barbs) at (a, c) 850 hPa, (b, d) 500 hPa at (a, b) 08:00 UTC and (c, d) 20:00 UTC on June 29, 2011 (the shaded areas represent regions with an elevation higher than 2 000 m, the same hereinafter)

未显著北推, 与华南前汛期气候平均态一致。整体高空等高线相对平直, 东北部存在低压中心, 华南地区位于其西南方向的弱脊后下沉区。从其 850 hPa 的风场中可以分析出 23°N 附近存在一条接近东西

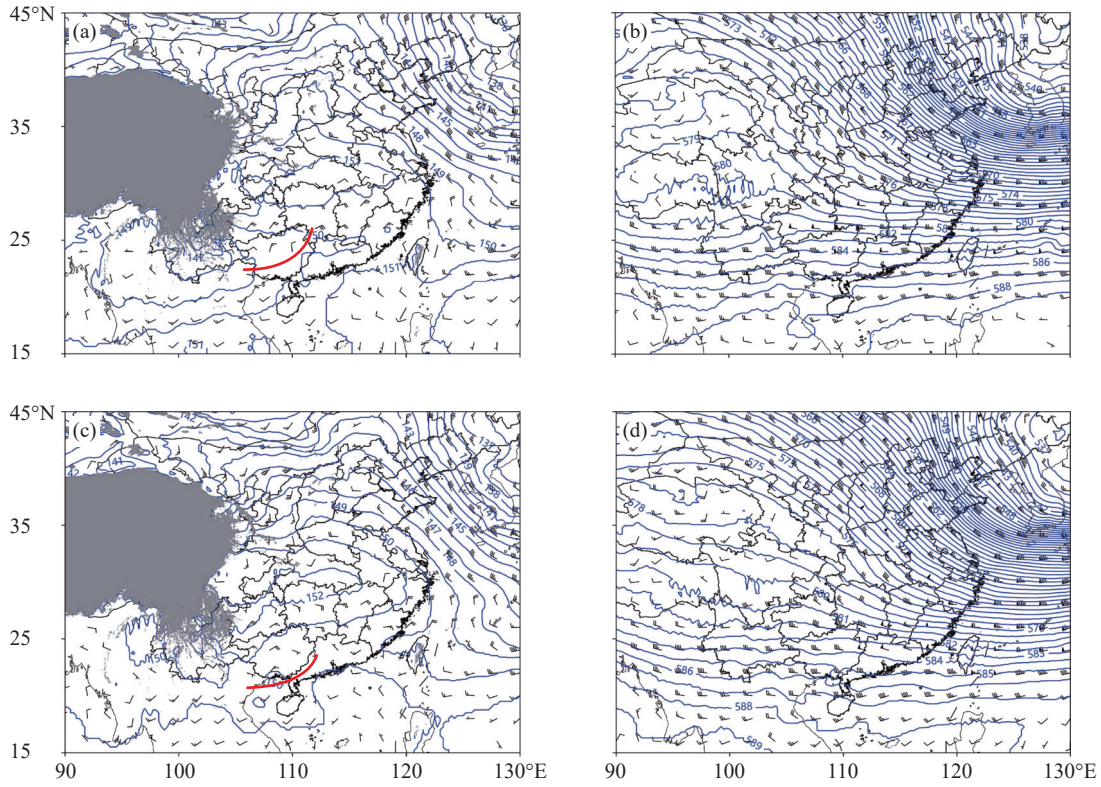


图 4 2013 年 4 月 25 日 12:00 (a, b)、18:00 (c, d) 850 hPa (a, c) 和 500 hPa (b, d) 高度场 (蓝色实线, 单位: dagpm) 与风场 (风羽) 综合图 (红色实线为切变线)

Fig. 4 Height field (solid blue lines, unit: dagpm) and wind field (wind barbs) at (a, c) 850 hPa, (b, d) 500 hPa at (a, b) 12:00 UTC and (c, d)18:00 UTC on April 25, 2013 (the red solid line represents the shear line)

走向的切变线, 该切变线位于降水区域的北侧, 并且随时间向南移动, 两侧风切变随时间增强, 整体呈现出典型的华南前汛期的暴雨天气形势 (李争辉, 2019)。相比于“11.6”强降水事件的环流形势, 该短时强降水事件的高空环流型稳定、无持续低压系统移入雨区, 大尺度场缺乏维持长时间上升运动的强迫源, 从而不利于降水的延续与增强。

4 两次降水事件形成机制比较

4.1 水汽输送

4.1.1 水汽通量和水汽通量散度

降水的持续发生需要有源源不断的水汽输送条件作为支撑 (李跃清和蒋兴文, 2007; 李超等, 2022; 王中等, 2025), 根据以往的研究, 华南地区的极端降水事件往往伴随着较强的水汽输送, 降水中水汽源地主要集中在大气低层 (杨雯婷等, 2024)。图 5 为利用水汽通量公式计算得到的 1 000—700 hPa 的水汽通量和水汽通量散度分布。可见, 2011 年 6 月 29 日 08:00—20:00 (图 5a、b), 水汽输送方向均为稳定的西南方向, 水汽的主要源地是孟加拉湾, 这也是华南地区极端降水事件常见的水汽通道 (陈明亚, 2017), 同一方向持续的水汽输送为“11.6”强降水事件的发生积累了良好的水汽条件。降水区域正处于水汽的辐合中心, 并且该中心强度随着时间增加, 这表明在强降水发生之前该地区的水汽辐合抬升运动较强, 伴随着整层的空气都处于相对饱和的状态, 符合持续性强降水发生的特点 (王小玲等, 2017)。

从“13.4”强降水事件的水汽通量图 (图 5c、d) 可见, 其小时水汽通量显著低于上述“11.6”强降水事件, 且水汽呈南北双通道输送格局, 两路水汽在降水区域附近相遇并产生强烈辐合, 18:00 水汽通量散度峰值达-4×10^{-3} kg·m^{-2}·s^{-1}。短时、高强度的局地水汽汇聚为对流的发生提供了充沛的可降水量, 并通过快速抬升释放凝结潜热, 显著降低对流抑制, 触发降水的爆发式增强。该配置与“11.6”强降水事件中平稳、深厚的水汽输送特征形成鲜明对比, 进一步表明短时极端降水对短时辐合强度及多源水汽汇合路径的敏感性。

4.1.2 水汽梯度

除大尺度环流背景风场驱动的水汽平流外, 水汽梯度也是水汽水平输送的原因之一 (唐南军等, 2020)。图 6 为两次降水事件发生过程中比湿以及水汽梯度的变化, 在降水发生前降水区周围的比湿均处于高值, 其值大于 10 g·kg^{-1}, 并且由于低层稳定的

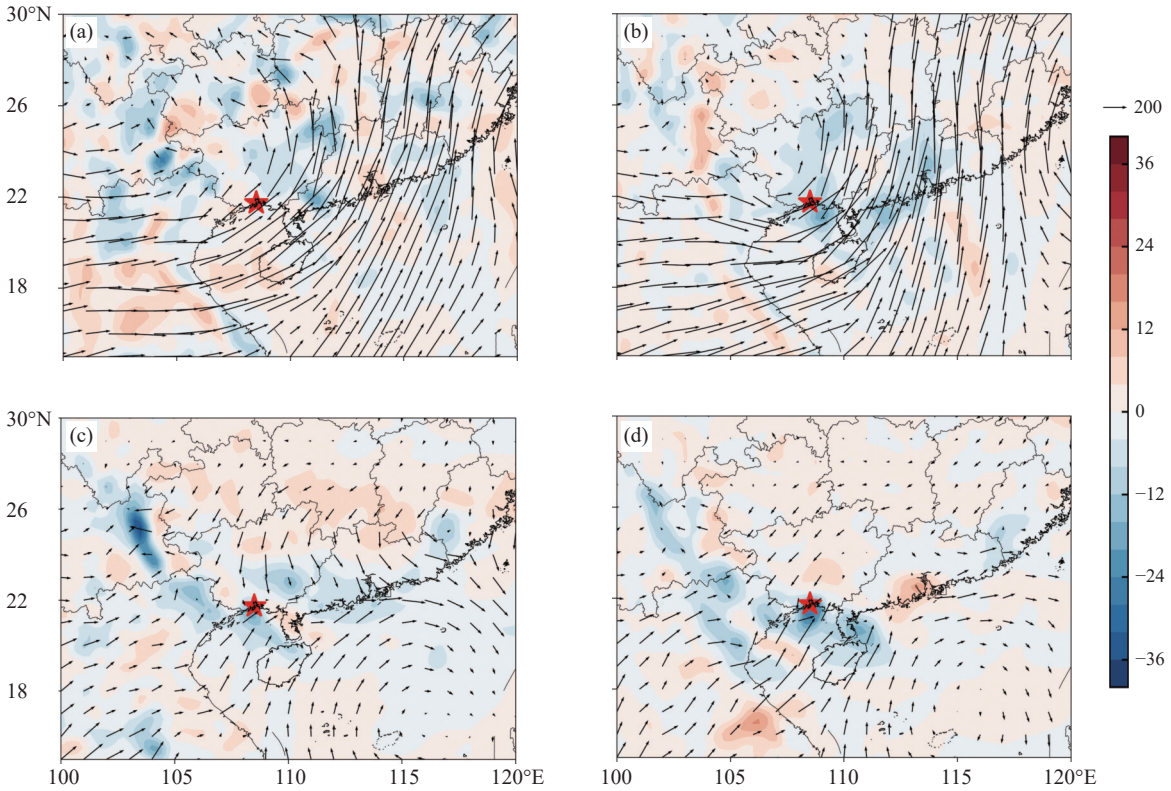


图 5 2011 年 6 月 29 日 08:00 (a)、20:00 (b) 与 2013 年 4 月 25 日 12:00 (c)、18:00 (d) 1 000 hPa 至 700 hPa 水汽通量 (箭矢, 单位: kg·m^{-1}·s^{-1}) 和水汽通量散度 (填色, 单位: 10^4 kg·m^{-2}·s^{-1}) 综合图 (红色五角星为降水中心, 下同)

Fig. 5 Distribution of water vapor flux (vectors, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^4 kg·m^{-2}·s^{-1}) from 1 000 hPa to 700 hPa at (a) 08:00 UTC and (b) 20:00 UTC on June 29, 2011, (c)12:00 UTC and (d) 18:00 UTC on April 25, 2013 (the red pentagram indicates the precipitation center, the same hereinafter)

西南气流的水汽输送, “11.6”强降水事件中部分地区的比湿随时间递增大约为 1~2 g·kg^{-1}, 形成相对显著的湿舌结构。相反, “13.4”强降水的区域内比湿偏低, 并且随时间呈现减小趋势。从水汽梯度来看, 持续性强降水的水汽梯度比较小, 其水汽输送与低层 850 hPa 大风所携带的水汽有关, 梯度项对水汽输送的贡献有限, 这保证了本次持续性强降水事件有充足稳定的水汽供应。并且“13.4”强降水事件中整体水汽分布呈现出由南向北“干-湿-干”的纬向分布, 降水区位于高湿核内。两次事件虽均处于高湿环境, 但其维持机制均表现为对风速平流的依赖, 而非水汽梯度衰减所主导。

4.2 涡度、散度与暴雨的关系

4.2.1 涡度、散度垂直分布

在中尺度天气系统中, 存在强烈的非地转运动, 涡度和散度是反映天气系统演变的重要标志 (张小玲和程麟生, 2000; 乔枫雪等, 2007)。图 7 为两个降水事件主要发生时段的涡度、散度的时间–高度剖面图, 由涡度的垂直剖面图 (图 7a) 可以看出, 28—30 日大气 500 hPa 以下均存在着明显的正涡度, 29 日夜间至凌晨近地面高度存在着正涡度的中心, 其值超过 10^{-4} s^{-1}, 在该时段正涡度值的区域延伸至约 250 hPa, 并且在高空 400 hPa 左右也存在一个正涡度中心, 正涡度增加的时段正与“11.6”强降水事件发生的时段保持一致, 因此这种深厚的正涡度层可能是触发维持该次降水的关键。另外, 根据散度的垂直剖面图 (图 7b) 发现, 近地面层存在负的散度中心, 说明近地面以水平辐合运动为主, 中低空则伴随着较弱的辐散运动。而 200 hPa 以上多个时段存在强的辐散中心, 其中最强辐散中心正好出现在强降水发生的时段, 其散度最大值超过 1.5×10^{-4} s^{-1}。这表明该过程是以中低层强正涡度中心配合高空强辐散中心, 从而导致剧烈的上升运动并伴随着向上的水汽和动量输送。

而在“13.4”强降水事件中, 850 hPa 以下涡度为正, 低空切变线南移加强导致低层涡度的增加, 而在 600 hPa位置存在一个负涡度中心 (图 7c)。局地短时强降水发生时段为 18:00, 19:00 过后降水减小并停止, 在降水发生的时段前后, 大气低层存在强辐合中心而中高层存在辐散中心 (图 7d), 辐合层从 850 hPa 延伸到 550 hPa 左右, 辐合中心强度大于 3×10^{-4}s^{-1}, 辐合辐散的强度均大于“11.6”强降水事件, 这对应了短时强降水事件的突发性和剧烈性, 同时低层的辐

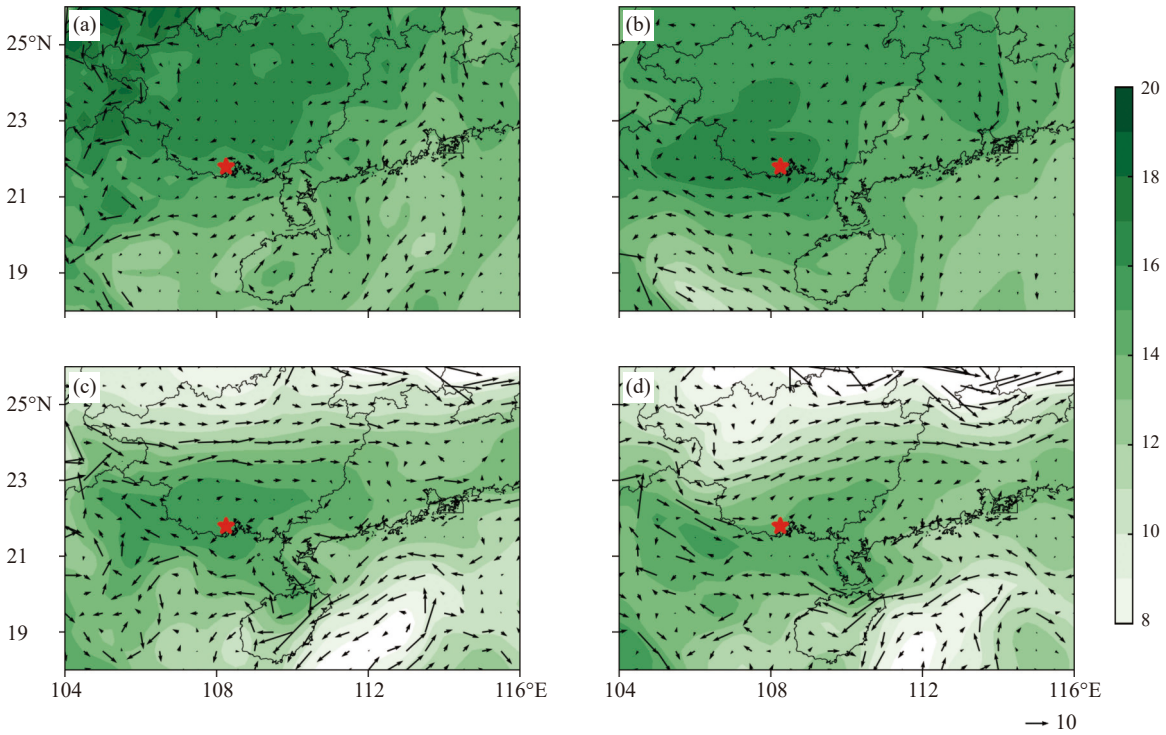


图 6 2011 年 6 月 29 日 850 hPa 08:00 (a)、20:00 (b) 与 2013 年 4 月 25 日 12:00 (c)、18:00 (d) 水汽梯度 (箭矢, 单位: $g\cdot kg^{-1}\cdot m^{-1}$) 和比湿 (填色, 单位: $g\cdot kg^{-1}$) 场

Fig. 6 Distribution of water vapor gradient (unit: $g\cdot kg^{-1}\cdot m^{-1}$) and the specific to humidity (unit: $g\cdot kg^{-1}$) at 850 hPa, at (a) 08:00 UTC and (b) 20:00 UTC on June 29, 2011, and at (c) 12:00 UTC and (d) 18:00 UTC on April 25, 2013

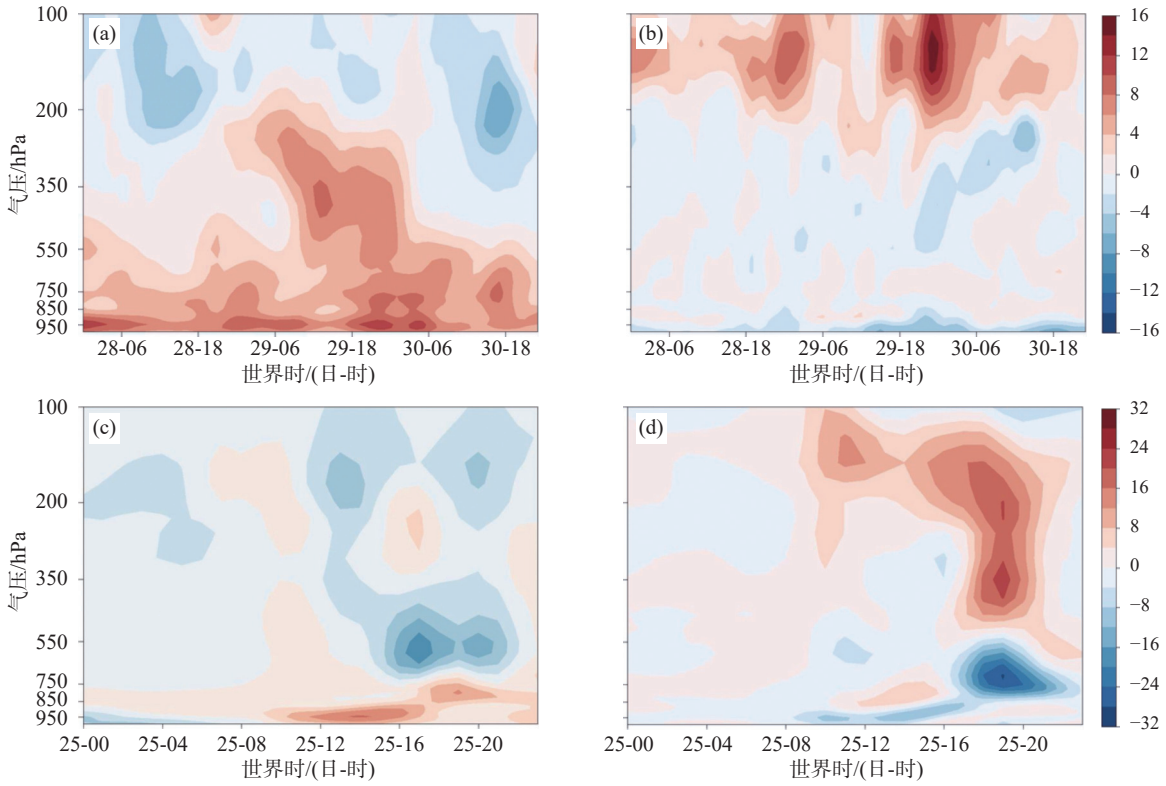


图 7 2011 年 6 月 28—30 日 (a, b) 和 2013 年 4 月 25 日 (c, d) 降水区域 (108°—109°E, 21.5°—22.5°N) 平均涡度 (a, c; 单位: $10^{-5}\ s^{-1}$) 和散度 (b, d; 单位: $10^{-5}\ s^{-1}$) 时间–高度剖面图

Fig. 7 Time-height cross-section of (a, c) average vorticity (unit: $10^{-5}\ s^{-1}$) and (b, d) divergence (unit: $10^{-5}\ s^{-1}$) over the precipitation area (108°-109°E, 21.5°-22.5°N) during (a, b) June 28–30, 2011 and on (c, d) April 25, 2013

合增强了气旋性环流, 而高层的辐散则通过抽吸作用进一步加强上升气流, 使得对流活动更加活跃, 也是本次短时强降水发生发展的重要动力机制。

4.2.2 涡度收支

为了进一步分析降水区域涡度演变的垂直结构差异, 利用涡度收支方程诊断各气压高度上的涡度变化, 图 8a—c 为“11.6”强降水事件中不同时刻涡度收支方程中各项值的垂直变化, 在低层以及中高层涡度平流项主要为正, 08:00 在 850 hPa 位置存在很强的正涡度平流, 达到接近8×10^{-9} s^{-2}, 同时在中层 500 hPa 位置也存在一个较强的涡度平流, 水平辐合辐散项在 750 hPa 以下早期为负值, 20:00 该项转为正值, 并且超过5×10^{-9} s^{-2}, 此时在 650 hPa 扭转项也存在一个相对较大的正值。涡度垂直输送项整体影响较小。图 8d—f 同上但为“13.4”强降水事件, 从中可知各项收支变化集中在 400 hPa 以下, 在低层各项的变化的绝对值均在5×10^{-9} s^{-2}以内, 各项值正负交替, 无单一主导项存在, 这与短时强降水的天气背景也相对应, 即缺乏稳定天气系统支撑, 生消迅速。

综上, “11.6”强降水事件中正涡度收入值大于“13.4”强降水事件, 其中涡度水平平流项和水平辐合辐散项在正涡度收入中贡献较大。由于涡度收支项的主要变化集中在 500 hPa 以下, 为了研究涡度变化与降水持续特征的关系, 下一节将进一步分析“11.6”强降水事件的中低层天气系统演变的规律。

4.3 涡度增强机制及其形成的物理过程分析

4.3.1 低空急流

研究表明, 华南地区的低空急流对强降水发生过程中热量、动量和水汽的输送等方面具有重要影响 (黄小彦等, 2020, 覃皓等, 2023)。低空急流可以将南方的暖湿空气向北输送到较干较冷空气的下方, 形成对流性不稳定结构, 配合急流出口区的强辐合抬升, 可为深对流爆发提供持续上升运动 (Du and Chen, 2019; 陈芳丽等, 2021)。本文选择的两次极端强降水事件中, “11.6”强降水事件的发生伴随着低空急流, 而“13.4”强降水事件则不存在低空急流, 这可能也是两次降水事件持续时长不同的原因之一。图 9 为“11.6”强降水事件中低空急流的分布情况, 可见,

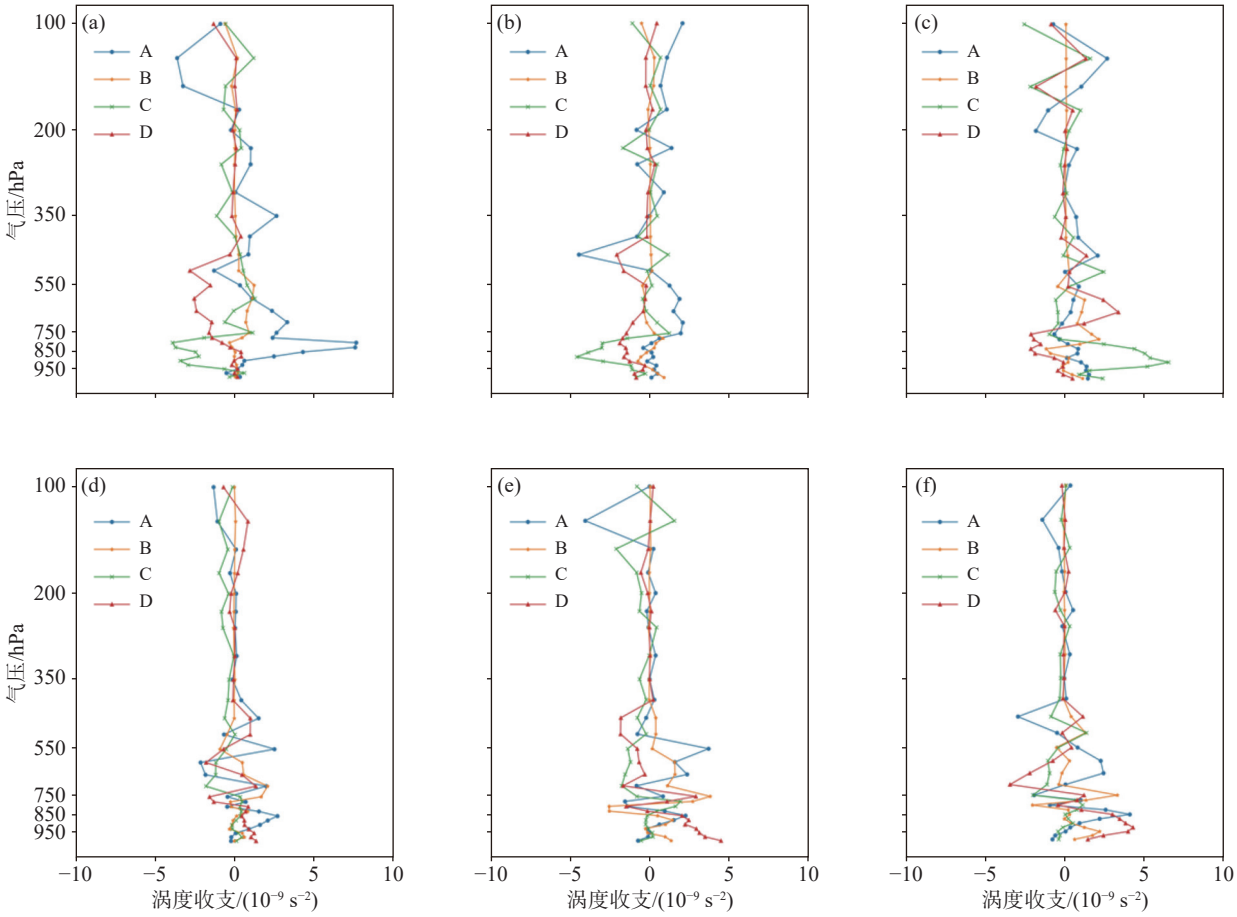


图 8 2011 年 6 月 29 日 08:00 (a)、14:00 (b)、20:00 (c) 和 2013 年 4 月 25 日 14:00 (d)、16:00 (e)、18:00 (f) 涡度收支方程中 A—D 项 (单位: 10^{-9} s^{-2}) 在降水区域 (108° —109° E, 21.5°—22.5° N) 中的平均垂直廓线

Fig. 8 Average vertical profiles of A-D term in the vorticity budget equation (unit: 10^{-9} s^{-2}) over the precipitation area (108°–109°E, 21.5°–22.5°N) at (a) 08:00 UTC, (b) 14:00 UTC, and (c) 20:00 UTC on June 29, 2011, and at (d) 14:00 UTC, (e) 16:00 UTC, and (f) 18:00 UTC on April 25, 2013

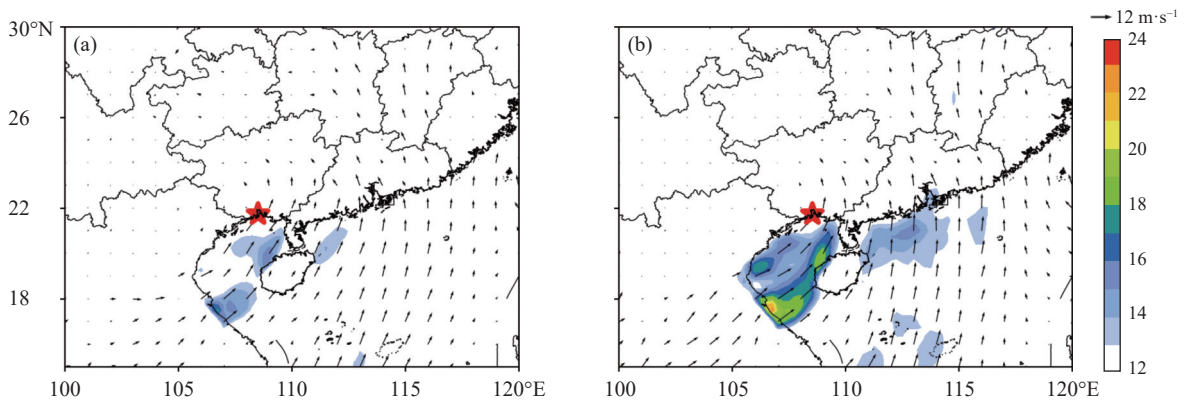


图 9 2011 年 6 月 29 日 08:00 (a)、20:00 (b) 950 hPa 风矢量 (箭矢) 及水平风速 (填色, 单位: m·s^{-1}) 合成图

Fig. 9 Composite maps of velocity vector (arrow) and the wind speed (shaded, unit: m·s^{-1}) at 950 hPa at (a) 08:00 UTC and (b) 20:00 UTC on June 29, 2011

2011 年 6 月 29 日 08:00—20:00, 低空急流核中心风速与急流的范围都在增加, 到 20:00 急流核的中心风速超过 20 m·s^{-1}。当急流中心风速增大时, 风场的气旋式切变增加从而导致局地正涡度增加, 这与上节涡度收支方程的计算结果相符合, 同时降水中心位于急流出口左侧的辐合上升区, 又进一步对应了方程中辐合辐散项的变化特征。根据孙继松 (2005) 的研究, 低空急流与强降水发展之间呈现出正反馈的关系, 降水释放的凝结潜热会促进急流的加速, 而急流的发展则会进一步促进上升运动进而增强降水。因此, 这种低空急流作用下的正反馈机制也是此次强降水的持续奠定了动力基础。

4.3.2 中层涡旋演变

大气中的中尺度涡旋系统是引起我国极端降水过程的重要天气系统, 中尺度涡旋系统在移动的过程中不断激发出新生的对流, 造成降水的增强和维持 (常煜等, 2018; 杨磊等, 2023)。图 10 为 2011 年 6 月 29 日的不同时刻 500 hPa 流场以及涡度场的分布情况, 可见, 08:00 在降水区存在一浅薄短波槽, 槽前的正涡度平流使得该槽不断加深, 至 16:00 短波槽已闭合发展为中尺度气旋式涡旋。该闭合涡旋水平尺度达到 300~400 km, 垂直方向伸展厚度从 700 hPa 发展至 400 hPa 以上, 具备典型 α 中尺度涡旋结构。随后涡旋沿西南路径移动, 其内部正涡度随时间增大, 对应降水强度同步增强, 降水释放的凝结潜热又进一步导致气压降低, 对涡旋系统强度形成正反馈作用。在 21:00 左右降水强度达到峰值, 此后涡旋中心离开大陆边界, 由于下垫面摩擦系数的变化和温度的差异, 涡旋开始解体, 降水强度也随之减弱。在浅槽向闭合涡旋系统发展的过程中, 大气中层正涡度不断增加, 对降水的发展演变起到了重要作用, 这与涡度垂直剖面的变化相一致 (图 7a)。而本文所选的“13.4”强降水事件发生过程并没有类似的天气系统演变过程 (图略), 进一步说明低空急流增强与中层中尺度涡旋生消的协同效应是本次持续性降水得以维持的核心机制。

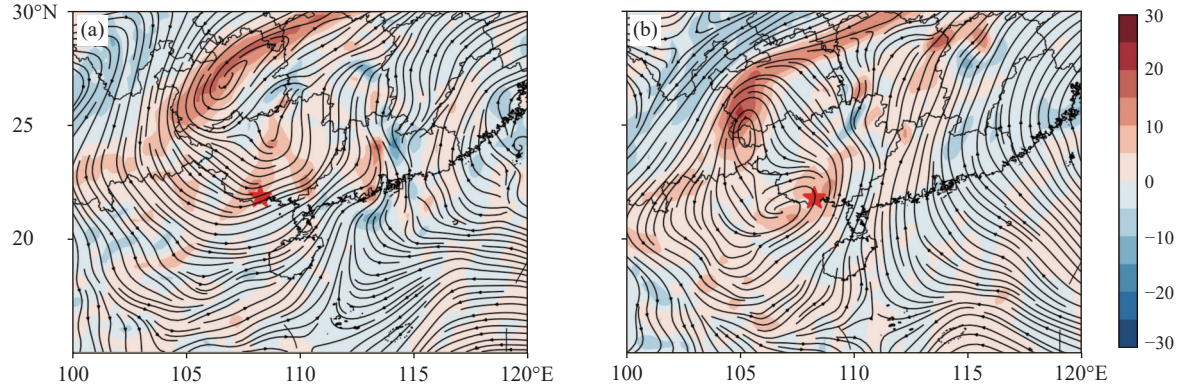


图 10 2011 年 6 月 29 日 08:00 (a)、20:00 (b) 500 hPa 流场 (实线) 和涡度 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 场

Fig. 10 Distribution of the flow field (solid lines) and vorticity (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) at 500 hPa at (a) 08:00 UTC, (b) 20:00 UTC on June 29, 2011

5 结论与讨论

本文主要针对发生在华南沿海地区的“11.6”强降水事件和“13.4”强降水事件, 从环流背景、水汽输送、涡度收支等方面对比分析了这两次典型过程的的发生发展机制, 主要得到了以下结论:

(1) “11.6”强降水事件受大尺度天气背景的影

响, 存在有利于降水发生的稳定低压天气系统, 并主导了降水强度的变化, 而“13.4”强降水事件不具备此类天气背景, 因此在降水持续时长和总降水量方面均小于上述事件。

(2) 水汽条件是形成极端降水的重要因素之一, “11.6”强降水事件中水汽输送由背景风场主导, 水汽输送量异常偏大并且水汽输送路径稳定, 而“13.4”强降水事件中虽然水汽输送量偏小但具备异常偏强的水汽辐合运动, 造成了降水的突发性。

(3) 通过涡度收支方程分析发现, “11.6”强降水事件中伴随着涡度的显著增强, 特别是低层 850 hPa 以下和中层 500 hPa, 方程中涡度水平平流项和水平辐合辐散项是正涡度的主要贡献项, “13.4”强降水事件中整体涡度收支较小, 没有主导作用的收支项。

(4) 在涡度收支方程的基础上, 进一步分析了低空急流和中尺度涡旋的演变过程。对于“11.6”强降水事件而言, 低空急流的发展加强以及中层涡旋的演变和移动, 均对降水起到正反馈的作用, 从而增加了降水的持续时间。

上述研究, 加深了对极端持续性强降水与极端短时强降水事件发生机制的共性与区别的认识, 为两类极端降水的区分预报提供了一定的科学依据。需要注意的是, 个例的对比分析并不能代表所有情况, 极端强降水的产生也往往是多种因素的叠加作用, 本文典型降水事件的选择集中在广西南部地区, 未能充分结合华南地区复杂的地形条件对降水的调制作用展开分析, 因而缺乏复杂下垫面与降水机制相互作用的研究。未来的研究方向可从以下两个方面推进, 一是扩大研究区域, 涵盖华南地区的不同地区单元, 展开多区域多个例的对比研究, 二是结合更高分辨率的观测或模式资料, 挖掘更精细的系统演变过程, 从而为强降水的预报提供更多有效的指示。

参考文献 (References):

蔡悦幸,陆希,杨崧.2018.华南地区前后汛期极端降水事件对比分析[J].中山大学学报 (自然科学版),57(1):83−92. Cai Y X, Lu X, Yang S. 2018. Comparison of extreme precipitation events in early and latter rainy seasons over South China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,57(1):83−92 (in Chinese). doi:10.13471/j.cnki.acta.snus.2018.01.012

陈芳丽,姜帅,李明华,等.2021.边界层急流在粤东暴雨中心两次极端强降水过程中的作用[J].气象,47(3):290−302. Chen F L, Jiang S, Li M H, et al. 2021. The role of boundary layer jet in two extreme severe rainfalls over eastern region of Guangdong province [J]. Meteorology Monthly,47(3):290−302 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.03.003

陈明亚.2017.华南持续性暴雨过程的水汽输送及相关异常环流特征分析[D].杭州:浙江大学. Chen M Y. 2017. Analysis of water-vapor transport and related circulation anomalies before persistent heavy rainfall event over Southeast Coastal China [D]. Hangzhou:Zhejiang University (in Chinese)

崔梦雪,张晗昀,陈德花,等.2024. 2023 年 4 月 18 日厦门暖区特大暴雨中尺度特征及低空急流的作用[J].暴雨灾害,43(5):521−531. Cui M X, Zhang H Y, Chen D H, et al. 2024. Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):521−531 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−107

郭建平,孔锋,史培军,等.2017.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,32(2):165−174. Guo J P, Kong F, Shi P J, et al. 2017. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change [J]. Journal of Catastrophology,32(2):165−174 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2017.02.029

郭丽芳,巩远发,孙昕.2025.中国南方极端降水的不同变化特征分析[J].暴雨灾害,44(3):390−399. Guo L F, Gong Y F, Sun X. 2025. Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):390−399 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−204

黄小彦,孙继松,刘文婷.2020.地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J].气象学报,78(4):551−567. Huang X Y, Sun J S, Liu W T. 2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(4):551−567 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.034

蒋亚平,覃皓,黄妮,等.2025.广西西南部一次极端暴雨过程成因分析[J].高原山地气象研究,45(1):113−121. Jiang Y P, Qin H, Huang N, et al. 2025. Cause analysis of an extreme rainstorm in southwest Guangxi [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(1):113−121(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.01.013

李超,崔春光,徐慧燕,等.2022.河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J].气象,48(12):1497−1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al. 2022. Characteristics associated with the transport, budget, conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021 [J]. Meteorology Monthly,48(12):1497−1511 (in Chinese). doi:10. 7519/j.issn.1000−0526.2022.072701

李华实,王东海,陆虹,等.2023.广西汛期大范围持续性强降水特征与天气学分型研究[J].热带气象学报,39(2):242−255. Li H S, Wang D H, Lu H, et al. 2023. Study on characteristics and synoptic classification of large-scale persistent sever rainfall events during rainy season in Guangxi [J]. Journal of Tropical Meteorology,39(2):242−255 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2023.023

李瑞辉,袁运斌,张红星.2021. ERA5 应用于区域对流层研究的适用性分析[J].导航定位学报,9(6):29−37. Li R H, Yuan Y B, Zhang H X. 2021. Applicability analysis of applying ERA5 reanalysis data to regional tropospheric research [J]. Journal of Navigation and Positioning,9(6):29−37 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−4999.2021.06.005

李跃清,蒋兴文.2007. 1998 年夏季长江上游暴雨过程的水汽输送特征[J].暴雨灾害,26(1):35−39. Li Y Q, Jiang X W. 2007. Characteristics of

water vapor transportation during summer heavy rainfall at the upper reaches of Yangtze River in 1998 [J]. Torrential Rain and Disasters, 26(1):35−39 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2007.01.006

李争辉.2019.华南前汛期降水及其天气背景的统计特征[D]. 北京:中国气象科学研究院. Li Z H. 2019. Statistical Characteristics of Presummer Rainfall over South China and Associated Synoptic Conditions [D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

廖胜石,卓健,罗建英,等.2022.广西汛期极端短时强降水特征分析[J].暴雨灾害,41(3):308−314. Liao S S, Zhuo J, Luo J Y, et al. 2022. Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):308−314 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.03.007

刘雨佳,张强,余予.2017.华南地区 1961—2014 年暴雨及典型暴雨事件统计分析[J].暴雨灾害,36(1):26-32. Liu Y J, Zhang Q, Yu Y. Analysis of heavy rain and typical torrential rain event in Southern China during 1961-2014 [J]. Torrential Rain and Disasters,36(1):26-32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.01.004

卢珊,胡泽勇,王百朋,等.2020.近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J].高原气象,39(4):683−693. Lu S, Hu Z Y, Wang B P, et al. 2020. Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events over China in recent 56 years [J]. Plateau Meteorology,39(4):683−693 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00058

马骄, 魏科, 陈文.2022.长江流域梅雨期大范围持续性强降水事件的自维持机制: 2020 年一次暴雨过程的个例分析[J].大气科学,46(6):1394−1406. Ma J, Wei K, Chen W. 2022. Self-maintaining mechanism of a large-scale persistent heavy rainfall event in Mei-yu period: Case study of Yangtze River heavy rainfall in 2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(6):1394−1406 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2201.21082

马雨露,赖成光,习树峰,等.2017.南方高度城市化地区极端降雨特征分析及阈值确定——以深圳市为例[J].水资源与水工程学报,28(2):76−81. Ma Y L, Lai C G, Xi S F, et al. 2017. Analysis and determination of extreme precipitation threshold in highly urbanized areas of southern China: A case from Shenzhen [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,28(2):76−81 (in Chinese). doi:10.11705/j.issn.1672−643X.2017.02.13

乔枫雪,赵思雄,孙建华.2007.一次引发暴雨的东北低涡的涡度和水汽收支分析[J].气候与环境研究,12(3):397−412 Qiao F X, Zhao S X, Sun J H. 2007. Study of the vorticity and moisture budget of a northeast vortex producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research,12(3):397−412 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−9585.2007.03.021

覃皓,刘乐,农孟松,等.2023.广西一次持续性暴雨过程中低空急流的作用及其特征[J].暴雨灾害,42(6):640-647. Qin H, Liu L, Nong M S, et al. 2023. The role and characteristics of low-level jet during a persistent rainstorm in Guangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):640-647 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−097

孙继松.2005.北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J].大气科学,29(3):445−452. SUN J S. 2005. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,29(3):445−452 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2005.03.12

唐南军,任荣彩,吴国雄.2020.青藏高原及周边 UTLS 水汽时空特征的多源资料对比[J].大气科学学报,43(2):275−286. Tang N J, Ren R C, Wu G X. 2020. Comparison of upper troposphere and lower stratosphere water vapor spatial and temporal distribution between reanalysis data and MLS observations over the Tibetan Plateau [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,43(2):275−286 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170706001

王小玲,丁一汇,张庆云.2017.中国东部夏季持续强降水发生的主要环流模态和水汽输送研究[J]. 气候与环境研究,22(2):221-230. Wang X L, Ding Y H,Zhang Q Y. 2017. Circulation pattern and moisture transport for summertime persistent heavy precipitation in eastern China [J]. Climatic and Environmental Research,22(2):221−230 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2016.16056

王中,李东川,王嘉佩.2025. 2016—2022 年四川盆地东部极端降水特征[J].沙漠与绿洲气象,19(3):88−95. Wang Z, Li D C, Wang J P. 2025. Characteristics of extreme precipitation in eastern Sichuan basin during 2016-2022 [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(3):88−95 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2310.17001

杨磊,郑永光,袁子鹏,等.2023. 2019 年 8 月 16 日沈阳极端降水事件的低空 γ 中尺度涡旋观测特征和机理分析[J].气象学报,81(1):19-39. Yang L, Zheng Y G, Yuan Z P, et al. 2023. The low-level meso-γ-scale vortices during the extreme rainfall in Shenyang on 16 August 2019: Formation, merging, and rain-producing mechanisms [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(1):19-39 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220023

杨雯婷,孙建华,傅慎明,等.2024. 1981-2020 年华南地区区域性极端降水事件研究[J].大气科学,48(3):906−922. Yang W T, Sun J H, Fu S M, et al. 2024. Study on regional extreme precipitation events over South China during 1981–2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(3):906−922 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2211.22056

姚秀萍,李若莹.2023.河南“21.7”极端暴雨的研究进展[J]. 气象学报,81(6):853-865. Yao X P, Li R Y, 2023. Progress in research of the July 2021 extreme precipitation event in Henan province, China [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(6):853-865 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20230038

尹家波,郭生练,顾磊.2021.中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应[J].科学通报,66(33):4315−4325. Yin J B, Guo S L, Gu L. 2021. The thermodynamic response mechanism and flood effect of extreme precipitation in China to climate change [J]. Chinese Science Bulletin,66(33):4315−4325 (in Chinese). doi:10.1360/tb−2021−0438

张弛.2020.华南地区极端持续性强降水事件研究[D]. 长沙:国防科技大学. Zhang C. 2020. Research on extreme persistent heavy precipitation events in south China [D]. Changsha:Nation University of Defense Technology (in Chinese)

张小玲,程麟生.2000. “96.1”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断Ⅰ: 涡度和涡度变率诊断[J].高原气象,19(3):285−294. Zhang X L, Cheng L S. 2000. Dynamic diagnoses of the genesis and development for the mesoscale shear line during "96.1" snowstorm Ⅰ: Diagnoses of vorticity and vorticity variability [J]. Plateau Meteorology,19(3):285−294 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−0534.2000.03.003

周佰铨,翟盘茂.2023.未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J].气象,49(3):257−266. Zhou B Q, Zhai P M. 2023. The future projec-

tions of extreme weather, climate and water events and strategic responses [J]. Meteorology Monthly,49(3):257−266 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.022301

周璇,罗亚丽,郭学良.2015. CMORPH 卫星-地面自动站融合降水数据在中国南方短时强降水分析中的应用[J].热带气象学报,31(3):333−344. Zhou X, Luo Y L, Guo X L. 2015. Application of a CMORPH-AWS Merged hourly grided precipitation product in analyzing characteristics of short-duration heavy rainfall over southern China [J]. Journal of Tropical Meteorology,31(3):333−344 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2015.03.005

朱连华,祝颖锜,姚壹壹.2023.全球增暖 1.5/2 ℃ 下中国区域极端降水的风险变化及其影响因子[J].大气科学学报,46(1):97−109. Zhu L H, Zhu Y Q, Yao Y Y, et al. 2023. Risk and impact analysis of extreme precipitation over China under 1. 5 and 2 ℃ global warming levels [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,46(1):97-109 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210811002

Ali H, Fowler H J, Lenderink G, et al. 2021. Consistent large-scale response of hourly extreme precipitation to temperature variation over land [J]. Geophysical Research Letters,48(4). doi:10.1029/2020GL090317

Brown V M, Keim B D, Black A W. 2020. Trend analysis of multiple extreme hourly precipitation time series in the southeastern United States [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,59(3):427−442. doi:10.1175/JAMC−D−19−0119.1

Chang Y, Ma S Y, Zhong X. 2018. Meso-scale characteristics of typical summer short-time strong rainfall events in Inner Mongolia [J]. Journal of Applied Meteorological Science,29(2):232−244 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20180209

Du H, Alexander L V, Donat M G, et al. 2019. Precipitation from persistent extremes is increasing in most regions and globally [J]. Geophysical Research Letters,46(11):6041−6049. doi:10.1029/2019GL081898

Du Y, Chen G X. 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II: convection initiation [J]. Monthly Weather Review,2019(2):543−565. doi:10.1175/MWR−D−18−0102.1

Huang H, Winter J M, Osterberg E C, et al. 2017. Total and extreme precipitation changes over the northeastern United States [J]. Journal of Hydrometeorology,2017(6):1783−1798. doi:10.1175/JHM−D−16−0195.1

Huang X G, Zhang C, Fei J F, et al. 2022. Uplift mechanism of coastal Extremely Persistent Heavy Rainfall (EPHR): the key role of low-level jets and ageostrophic winds in the boundary layer [J]. Geophysical Research Letters,49(8):e2021GL096029. doi:10.1029/2021GL096029

Jiang X, Luo Y, Zhang D, et al. 2020. Urbanization enhanced summertime extreme hourly precipitation over the Yangtze River Delta [J]. Journal of Climate,2020(13):5809−5826. doi:10.1175/JCLI−D−19−0884.1

Wang Y Q, Zhou L, 2005. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation[J]. Geophysical Research Letters, 32(17), L15705. doi:10.1029/2005GL022574

Zhang D L. 1992. The Formation of a cooling induced mesovortex in the trailing stratiform region of a midlatitude squall line [J]. Monthly Weather Review,120:2763−2785. doi:10.1175/1520−0493(1992)1202.0.CO;2

Zhang H, Zhai P. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season [J]. Advances in Atmospheric Sciences,28(5):1177−1183. doi:10.1007/s00376−011−0020−0

(责任编辑　闵爱荣)