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

2016—2023年萍乡市突发性暴雨过程的基本特征与环境条件分析

李侃 喻佳璇 王希瑞 林梅娟

Analysis of the basic characteristics and environmental conditions of sudden rainstorm processes in Pingxiang City from 2016 to 2023

LI Kan，YU Jiaxuan，WANG Xirui，LIN Meijuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-174

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

2008—2017年四川省突发性山地暴雨事件的演变特征

Evolution characteristics of sudden mountain rainstorm events in Sichuan Province from 2008 to 2017

暴雨灾害. 2023, 42(6): 670-678 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-041

贵州2020年汛期不同历时强降水雨量特征分析

Characteristics of rainstorm with different time scales in Guizhou during 2020 flood season

暴雨灾害. 2020, 39(6): 586-592 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.006

陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制

Mesoscale characteristics and triggering mechanism of a sudden heavy rainstorm in Shaanxi

暴雨灾害. 2025, 44(1): 19-30 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-224

2021年盛夏苏中南一次强冰雹过程大气环境与雷达回波特征

Atmospheric environment and radar echo characteristics of a strong hail event in central and southern Jiangsu in midsummer in 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 167-173 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.007

超低空急流形成的爬、绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响

Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains

暴雨灾害. 2023, 42(3): 273-282 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-035

豫东北一次春季大暴雨的环境条件与中尺度特征分析

Analysis of environmental condition and mesoscale characteristics for a heavy rainstorm event in Spring in northeast Henan

暴雨灾害. 2022, 41(1): 76-85 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.009

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李侃,喻佳璇,王希瑞,等.2025.2016—2023 年萍乡市突发性暴雨过程的基本特征与环境条件分析[J].暴雨灾害,44(6):767−779. LI Kan, YU Jiaxuan, WANG Xirui, et al. 2025. Analysis of the basic characteristics and environmental conditions of sudden rainstorm processes in Pingxiang City from 2016 to 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):767−779 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−174

2016—2023 年萍乡市突发性暴雨过程的基本特征与环境条件分析

李侃[1, 2], 喻佳璇[1, 2], 王希瑞[1, 2], 林梅娟[1, 2]

(1. 江西省萍乡市气象局, 萍乡 337002; 2. 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330096)

摘　要: 为揭示萍乡市突发性暴雨过程的天气学特征, 利用 2016—2023 年萍乡市 92 个国家和区域气象观测站的降水数据和欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料, 采用百分位法计算出各站点的 1 h、3 h 和 6 h 突发性暴雨降水阈值, 并根据超阈值站次识别出萍乡市 5 次强突发性暴雨过程, 同时对比分析其基本特征、环流形势特征和环境场特征。结果表明: (1) 5 次强突发性暴雨过程分别发生在 2016 年 6 月 15 日、2020 年 6 月 5 日、2019 年 6 月 22 日、2022 年 7 月 18 日和 2023 年 7 月 23 日 (以下分别简称“2016.06.15”、“2020.06.05”、“2019.06.22”、“2022.07.18”和“2023.07.23”), 其强降水的主要时段集中在凌晨或上午。相较于弱突发性暴雨过程, 强突发性暴雨过程 1 h、3 h 和 6 h 降水量超历史极值的站点数更多, 1 h、3 h 和 6 h 的最大降水量也更强。强突发性暴雨过程能在 3 h 或 6 h 内持续保持较高的降水强度, 且 3 h 和 6 h 降水量在总降水量中所占的比重分别超过 48% 和 77%。(2) 萍乡市的 5 次强突发性暴雨过程中有 4 次出现在低层西南急流的风速辐合区中。“2016.06.15”和“2020.06.05”两次强突发性暴雨过程的发生和维持更大程度地取决于超强水汽辐合后向上输送以及相对较强的垂直风切变。“2019.06.22”和“2022.07.18”两次强突发性暴雨过程的发生主要依赖于不稳定层结的强烈发展以及有利的能量条件。(3) 只有“2023.07.23”过程水汽辐合条件, 动力抬升条件和不稳定层结条件均集中在 700 hPa 同一等压面, 该过程具备相对较强的能量条件且能同时维持中等强度的水汽辐合后动力抬升条件和中等强度的不稳定条件, 进而产生突发性暴雨。(4) 强突发性暴雨过程, 水汽辐合后向上输送强度相当的条件下, 大气层结越不稳定, 短时雨强越强。

关键词: 突发性暴雨; 水汽辐合; 动力抬升; 不稳定层结

中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−174

Analysis of the basic characteristics and environmental conditions of sudden rainstorm processes in Pingxiang City from 2016 to 2023

LI Kan[1, 2], YU Jiaxuan[1, 2], WANG Xirui[1, 2], LIN Meijuan[1, 2]

(1. *Pingxiang Meteorological Bureau of Jiangxi Province*, *Pingxiang* 337002; 2. *Jiangxi Provincial Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention*, *Nanchang* 330096)

Abstract: Based on the precipitation data of 92 national and regional meteorological observation stations in Pingxiang City from 2016 to 2023 and the fifth-generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) atmospheric reanalysis datasets (ERA-5), the synoptic characteristics of sudden rainstorms in Pingxiang City are investigated. The 1-hour, 3-hour, and 6-hour sudden rainstorm precipitation thresholds for each station are investigated in this study. The 1-hour, 3-hour, and 6-hour sudden rainstorm precipitation thresholds for each station are calculated using the percentile method. Five severe sudden rainstorm processes in Pingxiang City are identified according to the number of station times exceeding the thresholds. Meanwhile, the basic characteristics, circulation situation characteristics, and environmental field characteristics are comparatively analyzed. The results are as follows. (1) The five severe sudden rainstorm processes occurred on June 15, 2016, June 5, 2020, June 22, 2019, July 18, 2022, and July 23, 2023 (referred to as "2016.06.15", "2020.06.05", "2019.06.22", "2022.07.18", and "2023.07.23", respectively), and the main periods of heavy precipitation are concentrated in the early morning or morning. Compared with weak sudden rainstorms, severe sudden rainstorms have more stations where the 1-hour, 3-hour, and 6-hour precipitation amounts exceed historical extremes, and the maximum precipitation amounts in 1-hour, 3-hour, and 6-

收稿日期: 2024−09−25; **定稿日期**: 2025−01−09

资助项目: 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-071); 江西省气象科技项目 (JX2020M08, JX2024Y03)

第一作者: 李侃, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: 276987254@qq.com

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

hour are also higher. Severe sudden rainstorms can maintain high precipitation intensity continuously for 3 or 6 hours. Moreover, the proportions of precipitation in 3 hours and 6 hours to the total precipitation exceed 48% and 77% respectively. (2) Four severe sudden rainstorm processes in Pingxiang City occur in the wind speed convergence zone of the low-level southwest jet stream. The occurrence and maintenance of the two severe sudden rainstorm processes on "2016.06.15" and "2020.06.05" were more significantly influenced by the upward transport following extreme water vapor convergence and the relatively strong vertical wind shear. The occurrence of the two severe sudden rainstorm processes on "2019.06.22" and "2022.07.18" mainly depended on the intense development of unstable atmospheric stratification and favorable energy conditions. (3) Only for the process on "2023.07.23", the conditions of water vapor convergence, dynamic lifting, and unstable stratification were all concentrated on the same isobaric surface at 700 hPa. This process exhibited relatively strong energy conditions and could simultaneously maintain moderate-intensity dynamic lifting conditions followed by water vapor convergence and moderate-intensity instability, thereby leading to the occurrence of sudden rainstorms. (4) Under the condition of similar upward transport intensity following water vapor convergence, the more unstable the atmospheric stratification, the stronger the short-term rainfall intensity during the severe sudden rainstorm process.

Key words: sudden rainstorm; water vapor convergence; dynamic lifting; unstable stratification

引　言

地处赣西的萍乡市地貌较为复杂，山地、丘陵和盆地交错分布。汛期短时突发性暴雨，常常诱发内涝、山体滑坡和泥石流等灾害 (李国平等, 2021; 尉英华等, 2024)。2023 年 7 月 23 日 03—09 时 (北京时，下同)，萍乡市在 6 h 内遭遇了一场突发性大暴雨，期间出现 73 站次暴雨、41 站次大暴雨。其中，12 站次的 1 h 降水量，17 站次的 3 h降水量，13 站次的 6 h 降水量均突破历史极值。此次暴雨过程具突发性强、降水强度大、持续时间短等特点，预报难度大。

对于突发性暴雨，一般认为是在暴雨发生前缺乏明显征兆、降雨强度大且造成严重灾害的降雨事件 (徐金波等, 2024)。王晓明 (1996) 将吉林省 1 h 降水量≥30 mm，且日降水量≥50 mm，并在降雨过程中伴有雷暴的强对流天气，定义为一次突发性暴雨过程。张弘等 (2007) 和侯建忠等 (2010) 将陕西省满足如下三个条件的降水过程判定为突发性暴雨：(1) 中心降雨强度≥30 mm·(6 h)$^{-1}$，且中心降雨强度≥50 mm·(12 h)$^{-1}$；(2) 暴雨站数≥3 站且连片；(3) 暴雨发生前 12 h，500 hPa 无明显低值系统。Chen 等 (2021) 对西南山地突发性暴雨事件作出如下具体定义：满足 1 h 内降水量≥20 mm 并且连续 3 h 累计降水量≥50 mm。由此可见，突发性暴雨的判定关键在于 1 h、3 h 或 6 h 的降水强度。各地突发性暴雨的判定主要依赖于经验性的主观认定，若当地不同区域采用同一标准，缺少客观判别方法。本文则采用百分位法确定了萍乡市 92 个站点 1 h、3 h 和 6 h 降水量的突发性暴雨降水阈值，确保了萍乡市各站点均具有相应的突发性暴雨降水标准。

突发性暴雨特征的研究主要聚焦于环境场 (井喜等, 2008)、锋生 (邱贵强等, 2018)、影响系统 (张芳丽等, 2020)、暴雨的时空分布 (肖递祥等, 2020)、中尺度对流系统以及演变 (王婧羽等, 2022; 江一啸等, 2023) 等方面。且多数基于个例的研究分析了地形抬升 (高珩洲和李国平, 2020)、重力波与对流耦合 (谢家旭和李国平, 2021)、中小尺度气旋性环流 (周文等, 2021)、地面辐合线和冷池出流 (李明娟等, 2023)、超低空急流 (刘成瀚等, 2023) 以及对流不稳定维持 (陈博宇等, 2023) 等条件，揭示了不同地区突发性暴雨的形成机制。这些研究主要关注的区域为西南山地，鉴于不同地区的地形地貌和气候背景存在差异，仍有必要针对萍乡市本地的突发性暴雨进行研究。

暴雨的发生发展依赖于充足的水汽供应和显著的上升运动。在以往的暴雨研究中，对水汽条件和上升运动条件的分析通常涉及对水汽和动力两类不同物理量的分别诊断。通常情况下，低层水汽条件比中低层和中层更好 (张芳丽等, 2022; 杨舒楠等, 2023; 刘嘉慧敏等, 2023; 罗金芳等, 2024)，但低层上升运动强度相较于中低层或中层则更弱 (曹舒娅等, 2023; 宋雯雯等, 2024; 毛江玉等, 2024)。若低层水汽丰富但低层上升运动偏弱，可能导致低层水汽向上输送的强度偏弱。中低层或中层虽然水汽条件较差，若其上升运动较强，水汽向上输送强度可能偏强。至于是哪一层水汽向上输送起主导作用，可采用水汽散度通量来综合分析暴雨过程的水汽和动力上升条件。水汽散度通量是垂直速度与水汽通量散度的乘积 (冉令坤和楚艳丽, 2009)，它能够反映各等压面层水汽在水平方向辐合后向上输送的强度。本文拟采用该物理量来综合诊断分析水汽和抬升条件。

目前，针对萍乡市暴雨天气的研究成果相对较少，尚未对多个强致灾性突发性暴雨过程开展系统性研究。本文基于 2016—2023 年萍乡市 92 个国家和区域气象观测站的降水数据和欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料，采用百分位法总结了本地突发性暴雨过程的客观判定标准，然后对萍乡市突发

性暴雨过程的基本特征、环流形势特征和环境场特征进行分析, 旨在探究不同天气背景下突发性暴雨的环境场差异, 以加深对突发性暴雨的理解, 进一步提升突发性暴雨的预报能力。

1 资料与方法

1.1 资料说明

研究资料包括: (1) 2016—2023 年萍乡市 4 个国家站和 88 个区域站的逐小时降水数据。数据来源于天擎气象大数据云平台 (江西), 用于萍乡市突发性暴雨的判定及其降水特征分析。(2) 欧洲中心第 5 代大气再分析逐日数据, 水平分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 h, 用于环流形势及环境条件分析。(3) 1991—2020 年欧洲中心第 5 代大气再分析逐月数据, 水平分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 m, 用于天气要素气候平均值和气候标准差的计算。

1.2 研究方法

1.2.1 突发性暴雨过程的判定

2016—2023 年 92 站的 1 h、3 h 和 6 h 降水量分别按升序排列, 92 站各自的 1 h、3 h 和 6 h降水量的第 99 个百分位值作为突发性暴雨降水阈值, 即 92 站均有 1 h、3 h 和 6 h 的突发性暴雨降水阈值。某站点 1 h 降水量大于等于其对应的突发性暴雨降水阈值, 表明该站点发生了 1 h 的突发性暴雨降水, 以此类推, 还存在 3 h 和 6 h 的突发性暴雨降水。同时定义 1 h、3 h 和 6 h 的突发性暴雨降水站次总和超 100 次的暴雨过程为强突发性暴雨过程 (表 1)。1 h、3 h 和 6 h 的突发性暴雨降水站次之和介于 30—99 次之间的暴雨过程 (实际上低于 100 站次过程中最大站次为 75 次), 定义为弱突发性暴雨过程。剩余的暴雨过程则为普通暴雨过程。2016—2023 年萍乡市共经历了 5 次强突发性暴雨过程 (表 1), 其中前 3 次发生在 6 月, 后 2 次则发生在 7 月。弱突发性暴雨过程出现 8 次, 普通暴雨过程则为 35 次。

1.2.2 标准化异常度

标准化异常度是分析天气要素极端性的一个重要工具, 通常认为其值超过 3 倍的气候标准差即表示异常的天气事件, 即极端性显著 (于超等, 2022)。本文将运用标准化异常度来分析突发性暴雨过程中环境条件的极端性。

将某一天气要素与气候平均值的差来表示其异常程度, 将异常程度的气候标准差进行标准化, 定义为标准化异常度 (SD, 记为 S_D) (杜钧等, 2014)。标准化异常度表示变量场的异常, 是气候标准差的倍数。计算公式如下

$$S_D = (F - M)/\sigma \tag{1}$$

其中, F 为某一个时刻的某一变量值, M 为变量场 30 a 的气候平均值, σ 为变量场 30 a 的气候标准差。本文暴雨过程中天气要素的标准化异常度计算采用暴雨所对应月份的气候平均值和气候标准差。

1.2.3 水汽散度通量的计算方法

暴雨过程中上升速度的最大值通常出现在 700—500 hPa, 从 700 hPa 往下则上升速度逐渐减弱, 而大多数暴雨过程从 700 hPa 往下水汽条件更好。尽管低层 925—850 hPa 水汽含量丰富, 若上升速度偏弱, 水汽向上输送的强度有可能偏弱。700 hPa 以上虽然水汽条件较差, 但若是上升速度较强, 水汽向上输送的强度有可能偏强。水汽散度通量综合了暴雨过程中的水汽水平辐合和动力上升条件, 能够反映各等压面层水汽在水平方向辐合后向上输送的强度, 即可确定水汽辐合后向上输送过程中起主要作用的等压面层。

冉令坤和楚艳丽 (2009) 将垂直速度与水汽通量散度的乘积定义为水汽散度通量 (Γ_m), 计算公式如下

$$\Gamma_m = \frac{\omega}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial x}(uq) + \frac{\partial}{\partial y}(vq)\right] \tag{2}$$

表 1 2016—2023 年萍乡市 5 次强突发性暴雨过程的降水概况

Table 1 Precipitation characteristics of five severe sudden rainstorm processes in Pingxiang City from 2016 to 2023

突发性暴雨日期/(年.月.日)	突发性暴雨降水阈值站次				降水量超历史极值站数/个			最大降水量/mm			突发性暴雨降水主要时段	降水量占总降水量的比重/%	
	1 h	3 h	6 h	合计	1 h	3 h	6 h	1 h	3 h	6 h		3 h	6 h
2016.06.15	24	46	57	127	6	9	12	63.1	105.6	140.9	05—10时	48.21	77.64
2020.06.05	37	35	35	107	13	10	15	74.0	122.9	189.8	06—11时	59.14	91.34
2019.06.22	32	33	42	107	6	10	10	55.5	137.4	165.8	11—15时	81.13	97.87
2022.07.18	37	35	41	113	8	8	5	88.5	144.7	183.1	02—04时	71.54	81.77
2023.07.23	58	49	40	147	12	17	13	72.7	124.6	154.4	05—08时	74.70	92.57

其中，u，v 和 ω 分别为等压坐标系中 x 方向，y 方向和垂直方向的速度，ρ 为密度，q 为水汽比湿。

1.2.4 湿位涡的计算方法

暴雨的发生发展与大气的不稳定密切相关，湿位涡 (Moist Potential Vorticity, MPV) 是一个综合了大气动力、热力和水汽特征的综合物理量 (Wu et al., 1995)，可用于诊断大气的对流不稳定、惯性不稳定和条件对称不稳定。本文将采用湿位涡来分析突发性暴雨过程中的不稳定层结条件。在 P 坐标系中，在湿绝热、无摩擦条件下，湿位涡可表示为

$$M_{\mathrm{pv}} = -g(\zeta + f)\cdot\frac{\partial\theta_{\mathrm{se}}}{\partial p} + \left(g\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_{\mathrm{se}}}{\partial x} - g\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_{\mathrm{se}}}{\partial y}\right) \quad (3)$$

其中，g 为重力加速度，ζ 为相对涡度，f 为科氏参数，θ_{se} 为假相当位温，p 为气压，u 为纬向风，v 为经向风。

2 突发性暴雨过程的基本特征

图 1 为各站点 1 h、3 h 和 6 h 突发性暴雨降水阈值分布，可见，1 h 和 6 h 突发性暴雨降水阈值较大的区域分布相似，主要集中在北部杨岐山周边，中北部的主城区、西部山区以及东部武功山附近，其中杨岐山和武功山附近区域均有 1 h 超 45 mm 及 6 h 超 100 mm 的极值中心。3 h 降水量阈值超 80 mm 的中心也分别位于杨岐山和武功山附近。萍乡市北部的杨岐山和东部的武功山附近区域，突发性暴雨过程降水雨强高于其他地区。

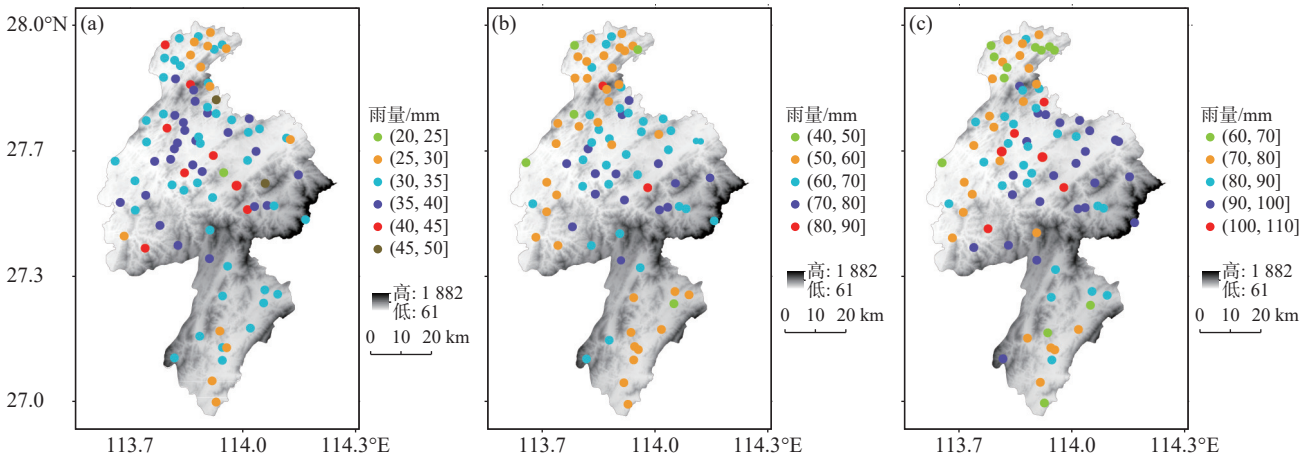


图 1 2016—2023 年萍乡市 92 个站点 1 h (a)、3 h (b) 和 6 h (c) 突发性暴雨降水阈值 (彩色圆点) 和地形高度 (阴影，单位：m)

Fig. 1 Distribution of sudden rainstorm precipitation thresholds (colored dots) for (a) 1 h, (b) 3 h and (c) 6 h at 92 stations and topographic elevation (shaded, unit: m) in Pingxiang City from 2016 to 2023

表 1 统计了萍乡市强突发性暴雨过程的降水特征。强突发性暴雨过程 1 h、3 h 和 6 h 雨量超突发性暴雨降水阈值站次基本能超过总站数的三分之一，且这三个时段雨量超阈值站次总和均超过 100 次。相比之下，弱突发性暴雨过程超阈值站次总和平均为 43 次，而普通暴雨过程仅为 11 次。强突发性暴雨过程 1 h、3 h 和 6 h 降水量超历史极值的站点数明显多于弱突发性暴雨过程 (平均 3 站左右) 和普通暴雨过程 (平均 0.5 站左右)。强突发性暴雨过程 1 h、3 h 和 6 h 的最大降水量在所有暴雨过程中最强，而且强突发性暴雨过程 1~3 h 和 3~6 h 最大降水量的增幅也显著高于普通暴雨过程 (平均增幅 20 mm 左右)，表明强突发性暴雨过程能在3 h 或 6 h 内持续保持较高的降水强度，而大多数普通暴雨过程仅 1 h 内出现强降水。

强突发性暴雨降水的主要时段集中在凌晨或上午 (表 1)。强突发性暴雨过程，3 h 降水量占总降水量的 48 % 以上，最大的超 81 %；6 h 降水量占总降水量的 77 % 以上，有三次过程超 90 %。相比之下，弱突发性暴雨过程 3 h 和 6 h 降水量占总降水量的比重普遍低于强突发性暴雨过程，普通暴雨过程的这一比重更低。

3 环流形势特征

表 2 为 2016—2023 年萍乡市 5 次强突发性暴雨过程主要影响系统。“2016.06.15”和“2020.06.05”两次过程影响系统位置和形态比较接近，中层低槽、低层切变线和地面倒槽均呈东北西南向，低层西南急流和风速辐合强度相对更为显著。“2019.06.22”和“2022.07.18”两次过程的中层低槽、低层切变线和地面辐合线均呈准东西向，低层西南急流和风速辐合强度相对前面两次过程偏弱。相较于其他强突发性暴雨过程，“2023.07.23”过程 850 hPa 无明显低涡和切变线，西南气流偏弱且无明显风速辐合。

表 2 2016—2023 年萍乡市 5 次强突发性暴雨过程主要影响系统

Table 2 The main influencing systems of severe sudden rainstorm processes in Pingxiang City from 2016 to 2023

突发性暴雨日期/(年.月.日)	500 hPa系统		850 hPa系统				地面低压倒槽或辐合线
	低槽	副高	低涡	切变线	西南急流强度/($m·s^{-1}$)	风速辐合即风速差/($m·s^{-1}$)	
2016.06.15	东北—西南向	偏南	西南涡	东北—西南向	18~20	10~14	东北—西南向低压倒槽
2020.06.05	东北—西南向	偏南	西南涡	东北—西南向	14~16	8~10	东北—西南向低压倒槽
2019.06.22	准东西向	偏北	西南涡	准东西向	12~14	8~10	准东西向辐合线
2022.07.18	准东西向	偏北	西南涡	准东西向	10~12	4~8	准东西向辐合线
2023.07.23	东北—西南向	偏北	不明显	不明显	8~10	不明显	低压带东南侧附近的暖区

3.1 “2016.06.15”和“2020.06.05”过程

图 2 为“2016.06.15”和“2020.06.05”两次强突发性暴雨过程发生前 500 hPa 和发生时 850 hPa 的形势场。“2016.06.15”过程发生前, 6 月 14 日 22 时 (图 2a) 500 hPa 欧亚中高纬地区维持“三槽两脊”的环流形势, 高压脊分别位于西伯利亚中部和贝加尔湖东部。“2020.06.05” 过程发生前, 6 月 4 日 20 时 (图 2b) 500 hPa 中高纬地区维持为“两槽一脊”形势, 高压脊位于贝加尔湖。两次过程的东北冷涡均偏东位于日本海。西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 588 dagpm 线稳定维持在华南沿岸, 冷涡槽后干冷的西北气流与副高西北侧西南暖湿气流持续交汇于江南地区。西南地区有东北西南向低槽东移加深发展, 副高西脊点从 110° E 附近开始逐渐东撤。受低槽影响, 低层西南涡生成。“2020.06.05”过程中湖北还出现了另一个低涡。地面江南地区处于呈东北西南向的低压倒槽中。萍乡市处于西南涡东南侧西南急流中, 降水开始发展。

副高受低槽东移影响, 缓慢的东移南压。2016 年 6 月 15 日 08 时 (图 2c), “2016.06.15”过程中西南涡受偏北气流和副高阻滞, 西南涡中心稳定维持在贵州境内, 西南涡东侧的暖切变线受西南急流北抬加强影响, 呈东北西南向。2020 年 6 月 5 日 08 时 (图 2d), “2020.06.05”过程西南涡东北侧并入东移的湖北低涡西南侧, 也形成一条东北西南向的切变线。萍乡市处于切变线东南侧的西南急流辐合区

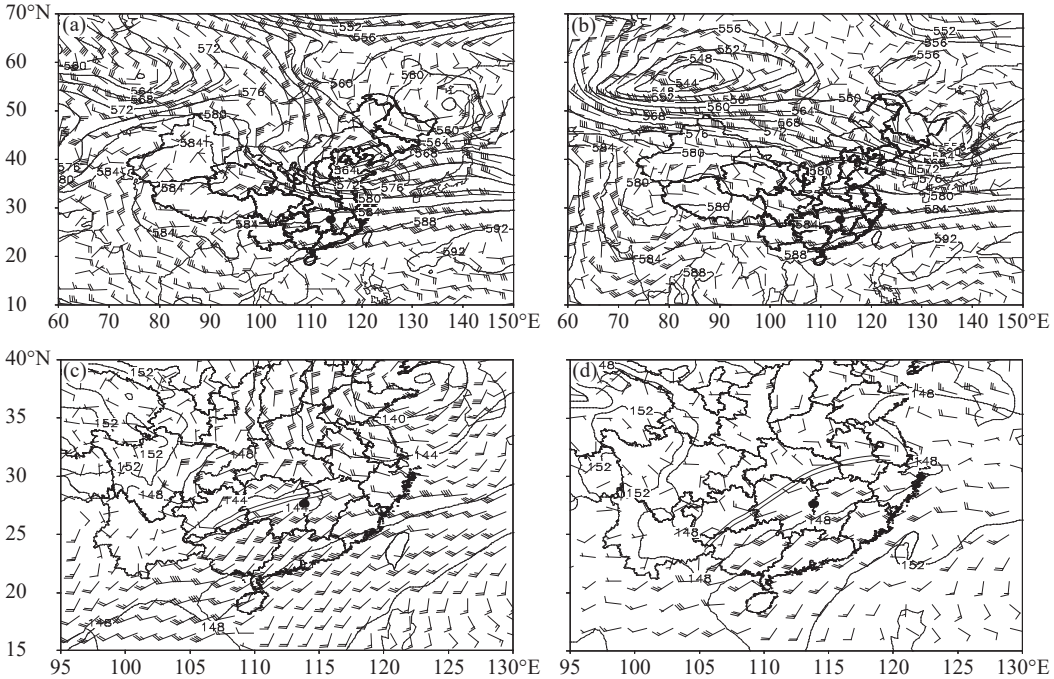


图 2 “2016.06.15” (a, c) 和“2020.06.05” (b, d) 两次强突发性暴雨过程发生前 500 hPa (a, b) 和发生时 850 hPa (c, d) 的位势高度场 (单实线, 单位: dagpm) 与风场 (风向杆, 单位: $m·s^{-1}$) 综合图 (双实线为切变线, 黑点表示萍乡市)

Fig. 2 The geopotential height (single solid lines, unit: dagpm) and wind (barb, unit: $m·s^{-1}$) at (a, b) 500 hPa prior to the occurrence and at (c, d) 850 hPa during the occurrence of two severe sudden rainstorm processes on (a, c) June 15, 2016 and (b, d) June 5, 2020 (the double solid line represents the shear line, and the black dot indicates Pingxiang City)

中, 产生强降水。低槽移出, 西北气流控制江南地区, 副高范围和强度均明显减小, 低层切变线东移南压, 强降水过程趋于结束。

3.2 “2019.06.22”和“2022.07.18”过程

图 3 为“2019.06.22”和“2022.07.18”两次强突发性暴雨过程发生前 500 hPa 和发生时 850 hPa 的形势场。两次过程发生前(21 日 20 时和 17 日 22 时), 500 hPa 中高纬均呈现为“两槽一脊”的形势, 高压脊均位于贝加尔湖附近。“2019.06.22” (图 3a) 过程的冷涡位于日本海, “2022.07.18” (图 3b) 过程则为东北冷涡型。长江中下游地区均为西北气流控制, 副高强盛, 588 dagpm 线在江南地区位于 26º—28º N, 30º N 以南低纬度地区西风带中, 有短波槽东移。“2019.06.22”过程低层在云贵交界有西南涡生成, 该西南涡向东的暖切变从湘中延伸至赣西中部, 沿江还有一条偏西风和东风形成的暖切变线。“2022.07.18”过程低层不仅有西南涡生成, 东海还有另一低涡, 萍乡市处于两低涡之间的低压带中。地面萍乡市均处于偏北风和偏南风形成的准东西向辐合线附近。短波槽移近, 萍乡市的降水逐渐开始发展。

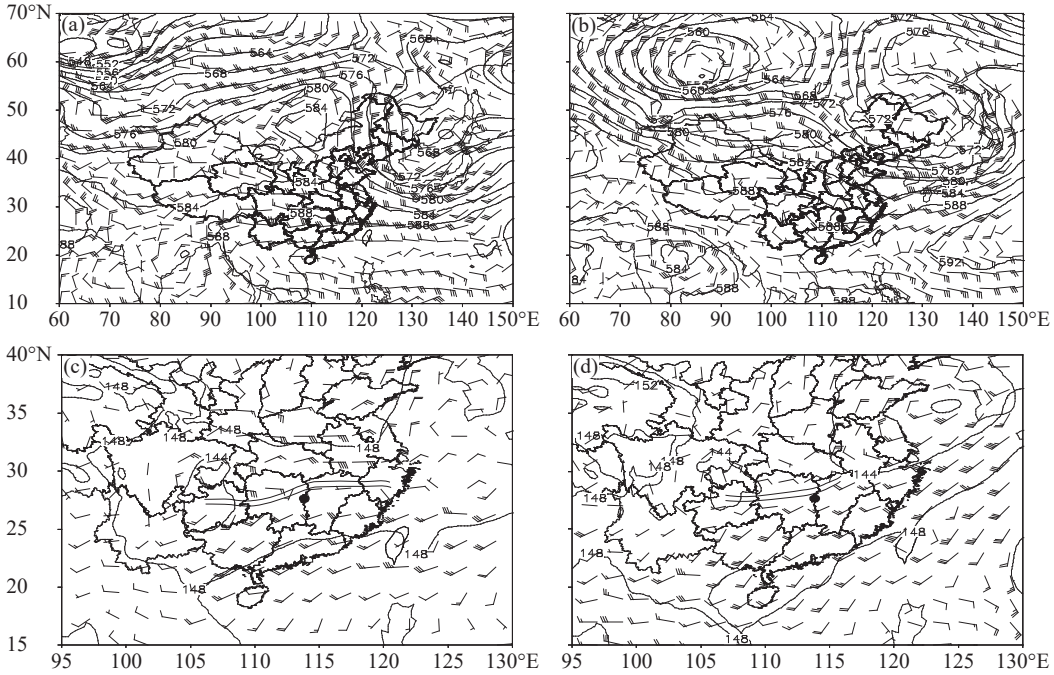


图 3 同图 2, 但为“2019.06.22” (a, c) 和“2022.07.18” (b, d) 两次强突发性暴雨过程综合图

Fig. 3 The same as Fig. 2, but for two severe sudden rainstorm processes which occurred on (a, c) June 22, 2019, and (b, d) July 18, 2022, respectively

副高受到沿江西北气流的挤压, 588 dagpm 线均有南压, 西风带中的短波槽均发展为准东西向的低槽。2019 年 6 月 22 日 11 时 (图 3c), “2019.06.22”过程中西南涡北抬且东移发展, 其东侧切变线与沿江切变线汇合为一条更长的准东西向切变线, 萍乡市处于切变线南侧西南急流强风速辐合区中 (风速差达 8~10 m·s^{-1})。2022 年 7 月 18 日 02 时 (图 3d), “2022.07.18” 过程中西南涡也北抬且东移发展, 萍乡市处于西南涡东侧准东西向切变线附近风速辐合区中 (风速差达 4~8 m·s^{-1})。两次过程中, 萍乡市均是处于风速辐合区时, 强降水发生。副高南压, 萍乡市转为偏北气流控制, 低层切变线南压, 强降水过程结束。

3.3 “2023.07.23”过程

图 4 为“2023.07.23”强突发性暴雨过程发生前 500 hPa 和发生时 850 hPa 的形势场。该过程发生前, 7 月 22 日 20 时 (图 4a) 500 hPa 欧亚中高纬维持“两槽一脊”的环流形势, 高压脊位于贝加尔湖北侧, 中心位于内蒙的冷涡伸出一支东北西南向深槽, 贯穿华北和华中至西南地区。副高强盛且呈东西带状分布, 592 线北抬至湘中至赣中。低层萍乡市处于西南气流中。

位于内蒙的冷涡东移入东北, 深槽分裂为两支, 北支槽移速较快, 南支槽受副高的阻滞移动缓慢, 持续停留在湖南境内。7 月 23 日 06 时 (图 4b), 850 hPa 萍乡市仍处于偏弱的西南气流中, 无明显的低涡或切变线影响, 也无明显的风速辐合。但 700 hPa (图略) 湘赣鄂交界至湘西有切变线生成, 且湘中至赣北有风速辐合 (风速差达 8 m·s^{-1})。地面萍乡市处于低压带东南侧的暖区中。萍乡市受 700 hPa 风速辐合的影响, 产生强降水。随着南支槽东移南压, 萍乡市转为偏北气流控制, 强降水过程结束。

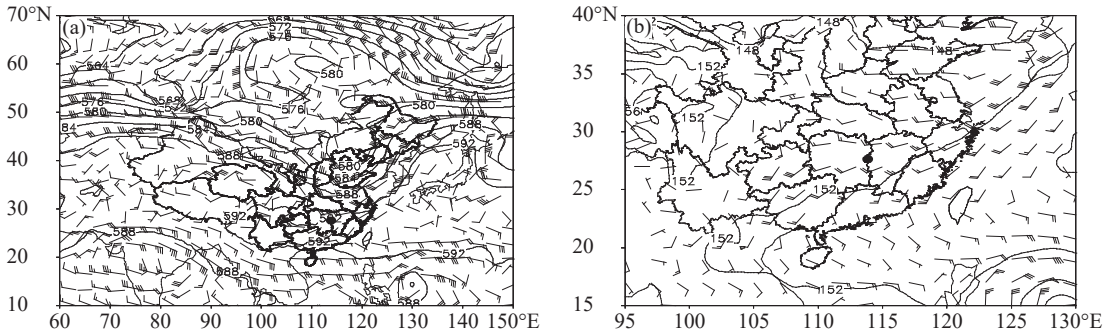


图 4 同图 2, 但为“2023.07.23”强突发性暴雨过程的 500 hPa (a) 和 850 hPa (b) 综合图

Fig. 4 The same as Fig.2, but for the severe sudden rainstorm process at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa on July 23, 2023

4 环境场特征

4.1 典型个例的环境条件

选取 2 次典型的强突发性暴雨过程 (“2016.06.15”和“2022.07.18”) 和 1 次弱突发性暴雨过程 (“2019.06.08”) 从动力、水汽条件和热力不稳定等方面对比分析。图 5 为这三次暴雨过程中心位涡的时间-高度剖面图以及沿暴雨中心的假相当位温、垂直速度和水汽通量散度纬向-高度剖面图。从图 5a 可见, “2016.06.15”过程, 15 日 04—08 时, 中层正位涡从 12×10^{-7} m$^2\cdot$s$^{-1}\cdot$K$\cdot$kg^{-1} 减弱为 3×10^{-7} m$^2\cdot$s$^{-1}\cdot$K$\cdot$kg^{-1}, 低层 700—800 hPa 正位涡从 6×10^{-7} m$^2\cdot$s$^{-1}\cdot$K$\cdot$kg^{-1} 增长至 15×10^{-7} m$^2\cdot$s$^{-1}\cdot$K$\cdot$kg^{-1}。这表明中层有正位涡向低层发展, 有利于低层气旋性涡度增长, 上升运动增强。从图 5d 可见, “2016.06.15”过程的暴雨中心上空形成了 −4.5 Pa$\cdot$s^{-1} 的强上升运动中心, 同时低层强西南急流为暴雨区输送了充足的水汽, 水汽通量散度辐合中心值超 -25×10^{-7} g$\cdot$hPa$^{-1}\cdot$cm$^{-2}\cdot$s^{-1}。持续不断的低层暖湿气流输送导致了假相当位温值达 356 K 的高能舌形成, 强上升运动使得高能舌向上凸起, 形成了假相当位温的密集带, 即假相当位温锋区, 对应为不稳定层结。不稳定条件与强水汽辐合上升条件相结合, 形成了强降水。15 日 07—10 时暴雨中心连续产生短时强降水, 最强达到 46.7 mm$\cdot$h^{-1}。突发性暴雨“2020.06.05”过程与“2016.06.15”过程的影响系统位置和形态比较接近, 环境场的变化也类似。“2020.06.05” 过程 (图略) 低层也有正位涡的增长, 中心值达 12×10^{-7} m$^2\cdot$s$^{-1}\cdot$K$\cdot$kg^{-1}, 低层水汽通量散度辐合中心值达到 -20×10^{-7} g$\cdot$hPa$^{-1}\cdot$cm$^{-2}\cdot$s^{-1}, 上升运动中心速度为 −2.8 Pa$\cdot$s^{-1}, 这些环境参数均略弱于“2020.06.05”过程, 但其假相当位温锋区更密集, 不稳定条件优于“2016.06.15”过程。

“2022.07.18” (图 5b) 过程和“2019.06.08” (图 5c) 过程中高层正位涡均呈现增长态势, 中高层正位涡无明显的向下发展。“2022.07.18” (图 5e) 过程和“2019.06.08” (图 5f) 过程暴雨中心的上升运动较为相似, 垂直速度中心值介于-1.2~-1.6 Pa$\cdot$s^{-1} 之间。低层水汽通量散度辐合中心值也均超-15×10^{-7} g$\cdot$hPa$^{-1}\cdot$cm$^{-2}\cdot$s^{-1}, 但均不位于暴雨中心上空, “2022.07.18”过程中层还有一个稍弱的水汽通量散度辐合中心。“2022.07.18”过程在 800 hPa 上东面有相对干冷的空气嵌入假相当位温的高能舌中, 导致 950 hPa 和 700 hPa 分别形成了 362 K 和 356 K 的假相当位温高值中心, 同时 800—950 hPa 和 600—700 hPa 分别形成了两个假相当位温锋区。“2019.06.08”过程 850 hPa 上假相当位温 356 K 的高值中心与 650 hPa 上假相当位温 344 K 的低值中心也形成了假相当位温锋区。

“2016.06.15” (图 5d) 过程有明显优于其他过程的动力上升条件和水汽辐合条件, 但其假相当位温锋区偏高, 位于 700 hPa 以上, 而其水汽辐合区位于 700 hPa 以下。“2022.07.18” (图 5e) 过程虽然动力上升条件和水汽辐合条件弱于“2016.06.15”过程, 但其低层更密集的假相当位温锋区和水汽辐合区叠加, 高能高湿和强不稳定的环境场叠加上升运动有利于中尺度对流系统的发生发展, 进而导致短时强降水的发生。18 日 02—04 时暴雨中心连续产生了 44 mm$\cdot$h^{-1} 以上的短时强降水, 最强为 88.5 mm$\cdot$h^{-1}。此外“2016.06.15”过程暴雨临近时对流有效位能 (CAPE) 仅 700 J$\cdot$kg^{-1} 左右, 能量条件是 5 个强突发性暴雨过程中最弱的。

综上所述, 不同突发性暴雨过程中起主导作用的环境条件存在差异。例如, 在“2016.06.15”和“2020.06.05”过程中, 动力条件与水汽条件起主导作用; 而在“2022.07.18”和“2019.06.08”过程中, 热力不稳定条件与能量条件起主导作用。下文将针对各类环境参数标准化异常度、水汽散度通量和湿位涡等方面做进一步分析。

4.2 环境大气的异常特征

表 3 为 2016—2023 年萍乡市各类暴雨强降水时段水汽、热力和动力条件参数的标准化异常度。从水汽条件参数的标准化异常度 (表 3) 可见, 仅普通暴

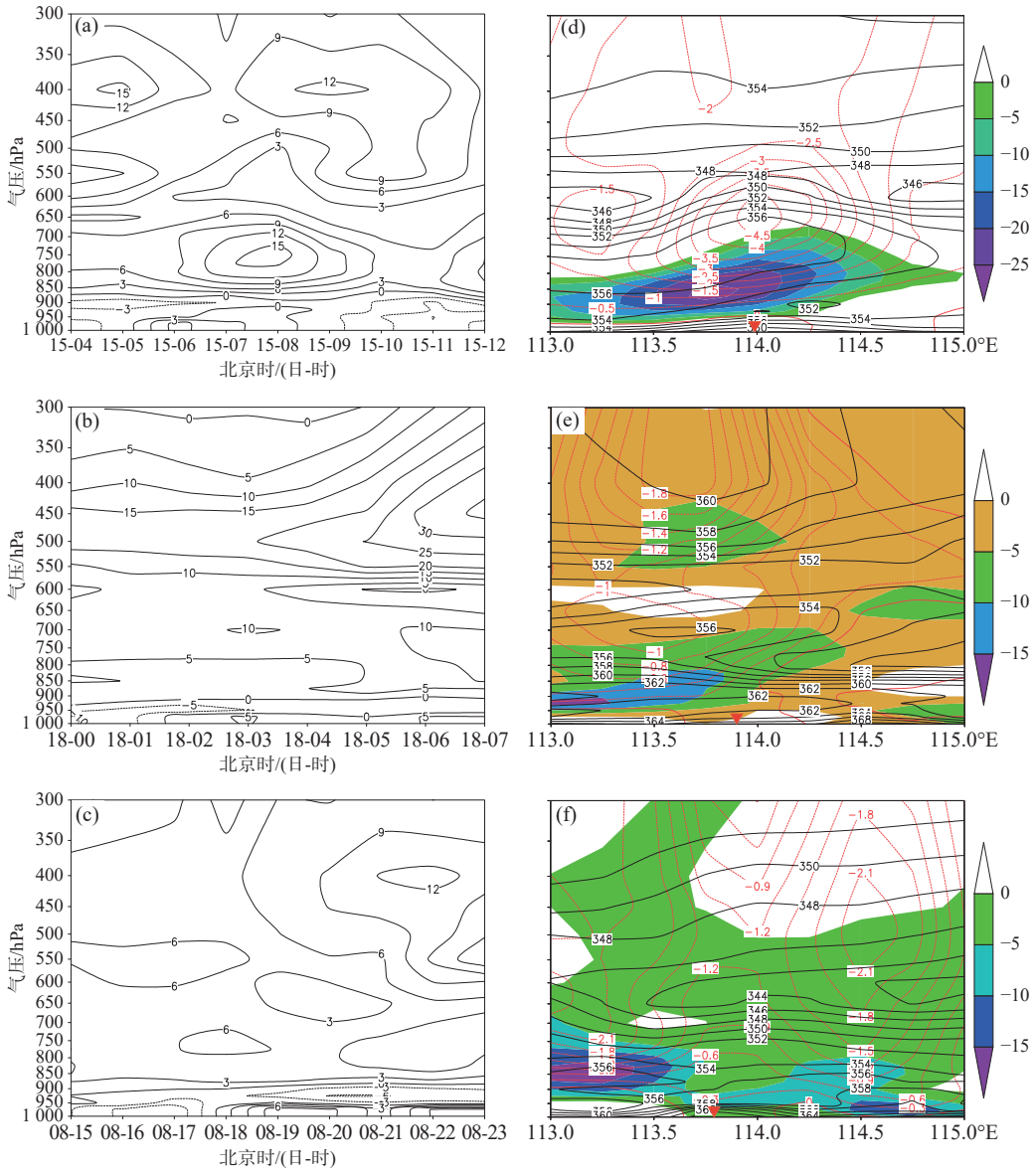


图 5 “2016.06.15” (a, d)、“2022.07.18” (b, e) 和“2019.06.08” (c, f) 三次暴雨过程暴雨中心位涡 (等值线, 单位:10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$) 的时间-高度剖面图 (a—c) 以及 15 日 07 时 (d)、18 日 03 时 (e) 和 8 日 20 时 (f) 沿暴雨中心的假相当位温 (黑色实线, 单位:K)、垂直速度 (红色虚线, 单位: $Pa \cdot s^{-1}$) 和水汽通量散度 (填色, 单位: $10^{-7} g \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$) 纬向-垂直剖面图 (红色三角表示暴雨中心)

Fig. 5 Time-height profiles of the potential vorticity (contour, unit: 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$) at the rainstorm centers during the three processes on (a) June 15, 2016, (b) July 18, 2022, and (c) June 8, 2019, and zonal-height profiles of the pseudo-equivalent potential temperature (black solid line, unit: K), vertical velocity (red dashed line, unit: $Pa \cdot s^{-1}$), and water vapor flux divergence (shaded, unit: $10^{-7} g \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$) along the rainstorm center at (d) 07:00 BT on June 15, 2016, (e) 03:00 BT on July 18, 2022, and (f) 20:00 BT on June 8, 2019 (the red triangle represents the rainstorm center)

雨的比湿条件未表现出极端性。除“2023.07.23”过程外, 其他暴雨过程 925—500 hPa 水汽通量散度的垂直积分极端性要明显高于其他水汽条件参数。尤其是“2016.06.15”和“2020.06.05”这两次强突发性暴雨过程, 虽然比湿条件相对较差, 但其超强的西南急流和风速辐合导致了超极端的水汽辐合。从热力条件参数的标准化异常度 (表 3) 可见, 萍乡市 7 月以晴热高温天气为主, 7 月的 CAPE 气候平均值偏大, 导致 7 月两次突发性暴雨过程 CAPE 的标准化异常度为负值, 实际上 7 月两次过程的 CAPE 值是较高的。“2016.06.15”和“2020.06.05”这两次强突发性暴雨过程 CAPE 和 K 指数均弱于其他突发性暴雨。“2016.06.15”和“2020.06.05”两次过程为相对较弱能量条件, 其他 3 次强突发性暴雨过程则具有相对较强的能量条件。从 925—500 hPa 上升速度的垂直积分的标准化异常度 (表 3) 可见, 除普通暴雨外, 其他暴雨过程均超过−10, 尤其是“2016.06.15”过程上升速度的极端性明显超过其他暴雨过程。通过各类环境参数的异常特征分析, 发现 925—500 hPa 水汽通量散度的垂直积分和上升速度的垂直积分具有显著的极端性, 是

表 3 2016—2023 年萍乡市各类暴雨强降水时段水汽、热力和动力条件参数的标准化异常度

Table 3 Standardized anomalies of water vapor, thermal, and dynamic condition parameters during the periods of heavy precipitation for various rainstorms in Pingxiang City from 2016 to 2023

暴雨类型	日期/(年.月.日)	水汽条件参数的标准化异常度			热力条件参数的标准化异常度		动力条件参数的标准化异常度
		925—700 hPa比湿的垂直积分	整层可降水量	925—500 hPa水汽通量散度的垂直积分	CAPE	*K*指数	925—500 hPa上升速度的垂直积分
强突发性暴雨	2016.06.15	4.91	7.82	−33.39	0.43	3.41	−68.28
	2020.06.05	3.35	3.77	−22.53	2.82	3.41	−27.15
	2019.06.22	6.35	6.47	−10.74	6.57	3.78	−13.21
	2022.07.18	6.68	8.03	−10.55	−0.06	4.35	−11.07
	2023.07.23	3.67	4.79	−3.13	−1.20	5.15	−16.06
弱突发性暴雨	/	4.52	5.78	−10.18	4.92	3.62	−10.22
普通暴雨	/	2.84	3.76	−5.40	0.93	2.84	−7.23

注: 弱突发性暴雨和普通暴雨在表中的数值均为平均值, “/”表示无具体日期, 下同。

突发性暴雨的关键因子。下节将结合这两个关键因子进行深入分析。

4.3 水汽散度通量和湿位涡分析

水汽散度通量为水平方向水汽通量散度与垂直速度的乘积, 能反映各等压面层水汽辐合后向上输送的强度。表 4 为 2016—2023 年萍乡市各类暴雨强降水时段水汽散度通量的垂直积分和不同等压面层水汽散度通量的占比。可见, “2016.06.15”和“2020.06.05”这两次强突发性暴雨, 其 925—500 hPa 水汽散度通量的垂直积分值为所有暴雨过程中的最大值, 表明这两次暴雨过程水汽辐合后向上输送能力最为显著。虽然“2023.07.23”突发性暴雨过程水汽条件相对偏弱, 但其较强的上升速度 (表 3) 仍使其 925—500 hPa 水汽散度通量的垂直积分值能达到 0.13 $kg^{-1}\cdot m^3\cdot Pa^2\cdot s^{-2}$。“2019.06.22”和“2022.07.18”这两次强突发性暴雨及弱突发性暴雨的 925—500 hPa 水汽散度通量的垂直积分值相当, 介于 0.06~0.08 $kg^{-1}\cdot m^3\cdot Pa^2\cdot s^{-2}$ 之间, 表明其水汽辐合后向上输送的强度弱于其他突发性暴雨。普通暴雨水汽辐合后向上输送强度相对较弱。根据 925—500 hPa 水汽散度通量垂直积分值的大小, 将水汽辐合后向上输送强度进行分级, “2016.06.15”和“2020.06.05”过程为相对较强, “2023.07.23”过程为中等, “2019.06.22”、“2022.07.18”过程及弱突发性暴雨为中等偏弱, 普通暴雨则为相对较弱。

从各层水汽散度通量的占比 (表 4) 可见, “2016.06.15”和“2020.06.05”这两次强突发性暴雨是 850 hPa 的水汽辐合后向上输送为主。“2019.06.22”和“2022.07.18”两次强突发性暴雨、弱突发性暴雨及普通暴雨则主要是 925 hPa 和 850 hPa 这两层水汽辐合后向上输送为主, 其中“2019.06.22”和“2022.07.18”两次强突发

表 4 2016—2023 年萍乡市各类暴雨强降水时段水汽散度通量的垂直积分和不同等压面层水汽散度通量的占比

Table 4 Vertical integration of the moisture divergence flux during the periods of heavy precipitation for various rainstorms and the proportion of the moisture divergence flux at different isobaric surface layers in Pingxiang City from 2016 to 2023

暴雨类型	日期/(年.月.日)	925—500 hPa水汽散度通量的垂直积分/($kg^{-1}\cdot m^3\cdot Pa^2\cdot s^{-2}$)	不同等压面层水汽散度通量占水汽散度通量垂直积分总量的比重/%				
			925 hPa	850 hPa	700 hPa	600 hPa	500 hPa
强突发性暴雨	2016.06.15	0.29	6.36	93.64	0	0	0
	2020.06.05	0.22	0	47.45	19.73	18.54	14.28
	2019.06.22	0.06	40.18	54.38	5.44	0	0
	2022.07.18	0.08	32.32	33.35	21.64	0	12.69
	2023.07.23	0.13	19.76	0	38.27	27.43	14.54
弱突发性暴雨	/	0.07	31.38	24.49	16.69	17.09	10.35
普通暴雨	/	0.03	26.56	27.92	18.96	18.02	8.54

注: 比重为0的情况有三种, 一是该层为下沉运动且水汽辐合; 二是该层为上升运动且水汽辐散; 三是该层为下沉运动且水汽辐散。上述三种情形中, 均无水汽辐合上升。“/”表示无具体日期。

性暴雨的水汽散度通量在这两层的占比相对较高。“2023.07.23”突发性暴雨过程则呈现出显著差异，其水汽散度通量的占比主要集中在 700 hPa 和 600 hPa 层，表明此次暴雨是由 700—600 hPa 层水汽辐合后向上输送所主导。高原地区关注 700 hPa 水汽输送的情况较为普遍 (魏栋等, 2021; 赵强等, 2022; 郭大梅等, 2022)，但江南地区汛期暴雨水汽条件的分析主要集中在 925—850 hPa (包慧濛等, 2021)。“2023.07.23”过程水汽辐合后向上输送主要发生在 700 hPa，非常罕见。结合前文的分析，“2023.07.23”过程中低层的西南气流偏弱且无明显的低值系统，这也表明其发生发展的关键不在低层，而是中低层水汽辐合后向上的强烈输送。

湿位涡能够全面体现大气对流不稳定、惯性不稳定和条件对称不稳定的发展状况。负湿位涡的绝对值越大，表示不稳定层结发展愈为强烈，湿位涡负值中心与暴雨中心存在较为显著的对应关系 (青逸雨等, 2023)。表 5 为 2016—2023 年萍乡市各类暴雨强降水时段湿位涡的垂直积分和不同等压面层湿位涡的占比。从各类暴雨强降水时段 925—600 hPa 湿位涡的垂直积分值 (表 5) 可见，“2022.07.18”过程绝对值最大，其次是“2019.06.22”过程，表明这两次暴雨强降水时段不稳定层结还有明显的发展，有利于对流性短时强降水的形成。“2016.06.15”过程湿位涡的绝对值比普通暴雨还小，表明该过程不稳定条件相对偏弱，极端的水汽辐合与动力抬升条件才是其产生突发性暴雨的主要原因。根据 925—600 hPa 湿位涡的垂直积分绝对值的大小，对不稳定条件的强弱进行分级，“2019.06.22”和“2022.07.18”过程为相对较强，“2020.06.05”过程和弱突发性暴雨为中等偏强，“2023.07.23”过程为中等，“2016.06.15”过程和普通暴雨为相对偏弱。

表 5 2016—2023 年萍乡市各类暴雨强降水时段湿位涡的垂直积分和不同等压面层湿位涡的占比

Table 5 Vertical integration of the moist potential vortex during the periods of heavy precipitation for various rainstorms and the proportion of the moist potential vortex at different isobaric surface layers in Pingxiang City from 2016 to 2023

暴雨类型	日期/(年.月.日)	925—600 hPa湿位涡的垂直积分/(10^{-2} Pa·m^2·K·s^{-1}·kg^{-1})	不同等压面层湿位涡占湿位涡垂直积分总量的比重/%			
			925 hPa	850 hPa	700 hPa	600 hPa
强突发性暴雨	2016.06.15	−3.58	6.50	0	61.25	32.25
	2020.06.05	−6.53	0	30.67	53.42	15.91
	2019.06.22	−8.66	27.12	21.04	35.40	16.44
	2022.07.18	−9.72	6.06	44.00	49.94	0
	2023.07.23	−5.95	0	27.36	64.06	8.58
弱突发性暴雨	/	−7.71	29.83	23.13	41.71	5.33
普通暴雨	/	−4.66	25.78	23.96	43.43	6.83

注: 比重为0表示该层湿位涡为正值，“/”表示无具体日期。

从各层湿位涡的占比 (表 5) 可见，大部分暴雨过程均是 700 hPa 的湿位涡占比显著，即 700 hPa 大气较不稳定。暴雨过程的水汽散度通量，即水汽辐合后向上输送的条件主要是集中在 925—850 hPa，而最不稳定的层结却位于 700 hPa。只有“2023.07.23”突发性暴雨过程水汽辐合条件、动力上升条件和不稳定条件均是集中于 700 hPa。这可能是该过程仅维持中等强度水汽散度通量和中等强度湿位涡条件，仍能产生突发性暴雨的原因之一。

“2016.06.15”和“2020.06.05”两次强突发性暴雨过程低层强西南急流和强风速辐合不仅导致了超极端水汽辐合后向上输送，还使其 0—6 km 垂直风切变相对较强，为 13.7~14.1 m·s^{-1}(图略)，有利于对流风暴长时间的维持 (表 1，这两次强突发性暴雨强降水维持了 5 h 左右，其他暴雨 2~4 h 左右)。“2019.06.22”和“2022.07.18”两次强突发性暴雨尽管水汽辐合后向上输送强度中等偏弱且强降水维持时间相对较短 (0—6 km 垂直风切变为 10.8~11.3 m·s^{-1})，但是这两次过程伴有不稳定层结的强烈发展及较强的能量条件，仍能产生突发性暴雨。“2016.06.15”和“2020.06.05”两次强突发性暴雨过程水汽散度通量相当 (表 4)，“2020.06.05”过程不稳定条件优于“2016.06.15”过程 (表 5)，“2020.06.05”过程 1 h、3 h 和 6 h 最大降水量均高于“2016.06.15”过程 (表 1)。同时“2019.06.22”和“2022.07.18”两次强突发性暴雨过程水汽散度通量相近 (表 4)，“2022.07.18”过程不稳定优于“2019.06.22”过程 (表 5)，“2022.07.18”过程 1 h、3 h 和 6 h 最大降水量均高于“2019.06.22”过程 (表 1)。这表明水汽辐合后向上输送强度相当的条件下，大气层结越不稳定，短时雨强越强。

5 结论与讨论

本文基于 2016—2023 年萍乡市 92 个国家和区域气象观测站逐小时降水数据和 ERA5 再分析资料, 采用百分位法计算出各站点 1 h、3 h 和 6 h 的突发性暴雨降水阈值。根据超阈值站次识别出萍乡市 5 次强突发性暴雨过程。通过对 5 次强突发性暴雨过程的基本特征、环流形势特征和环境场特征分析, 得出以下主要结论:

(1) 萍乡市北部的杨岐山和东部的武功山附近区域, 突发性暴雨过程降水雨强高于其他地区。5 次强突发性暴雨过程均发生在 6 或 7 月, 且主要集中在凌晨或上午。相较于弱突发性暴雨过程, 强突发性暴雨过程 1 h、3 h 和 6 h 降水量超历史极值的站点数更多, 1 h、3 h 和 6 h 的最大降水量也更强。强突发性暴雨过程能在 3 h 或 6 h 内持续保持较高的降水强度, 且 3 h 和 6 h 降水量在总降水量中所占比重分别超过 48% 和 77%。

(2) 萍乡市大部分突发性暴雨过程的形成, 通常与低槽、副高、低涡切变、低层西南急流、地面倒槽以及地面辐合线等天气系统之间的相互作用密切相关, 而且其水汽、热力及动力等环境条件参数大多呈现出显著的极端性。然而主要影响系统之间的相互作用在位置、形态和强度等方面存在差异, 有利于突发性暴雨发生的主要环境因素亦不尽相同。

(3)“2016.06.15”和“2020.06.05”两次强突发性暴雨过程主要影响系统的位置和形态比较接近, 中层低槽, 低层切变线和地面倒槽均呈东北西南向。两者的能量和不稳定层结条件相对来说并不突出, 但其低层西南急流和风速辐合强度相对更为显著, 低层强西南急流和强风速辐合导致了超极端的水汽辐合后向上输送以及相对较强的垂直风切变, 有利于突发性暴雨的发展和维持。“2019.06.22”和“2022.07.18”两次强突发性暴雨过程主要影响系统的位置和形态也比较接近, 中层低槽, 低层切变线和地面辐合线均呈准东西向。两者水汽辐合后向上输送强度中等偏弱且强降水维持时间相对较短, 但两者均伴有不稳定层结的强烈发展及有利的能量条件, 仍能产生突发性暴雨。上述 4 次突发性暴雨过程均是发生在低层西南急流的风速辐合区中。

(4)“2023.07.23”突发性暴雨过程中 850 hPa 的西南气流偏弱且无明显的低值系统, 但只有该过程水汽辐合条件、动力抬升条件和不稳定层结条件均集中在 700 hPa 同一等压面。该过程具备相对较强的能量条件且能同时维持中等强度的水汽辐合后动力抬升条件和中等强度的不稳定条件, 进而产生突发性暴雨。

(5) 通过比较“2016.06.15”和“2020.06.05”的两次过程, 以及“2019.06.22”和“2022.07.18”的两次过程, 还可以发现: 突发性暴雨过程的水汽散度通量值接近即水汽辐合后向上输送强度相当的条件下, 大气层结越不稳定, 短时雨强越强。

鉴于萍乡市区域气象观测站自 2016 年起才开始有逐小时降水数据记录, 本文的时间跨度相对较短, 导致选取的突发性暴雨案例数量有限, 难以对突发性暴雨进行细致的分类研究。未来随着自动气象站逐小时降水数据的进一步完善, 计划选取更多的突发性暴雨个例, 以揭示在不同天气分型条件下萍乡市突发性暴雨的成因和预报着眼点。

参考文献 (References):

包慧濛,肖安,李葳,等.2021.南方比湿特征及其与暴雨的关系[J].气象与环境科学,44(2):33−42. Bao H M, Xiao A, Li W, et al. 2021. Characteristics of specific humidity in South China and its relationship with rainstorm [J]. Meteorological and Environmental Sciences,44(2):33−42 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2021.02.005

曹舒娅,邹兰军,王易,等.2023.苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征[J].暴雨灾害,42(5):532−540. Cao S Y, Zou L J, Wang Y, et al. 2023. Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu [J]. Torrential Rain and Disasters, 42(5):532−540 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−128

陈博宇,谌芸,孙继松,等.2023.诱发四川冕宁“6.26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制[J].大气科学,47(1):1−19. Chen B Y, Chen Y, Sun J S, et al. 2023. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the “6.26” mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(1):1−19 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2201.21186

杜钧,Richard H,邓国.2014.预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”: 以北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨为例[J].大气科学,38(4):685−699. Du J, Richard H, Deng G. 2014. Ensemble anomaly forecasting approach to predicting extreme weather demonstrated by extremely heavy rain event in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(4):685−699 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2013.13218

高珩洲,李国平.2020.黔东南地形影响局地突发性暴雨的中尺度天气分析与数值试验[J].高原气象,39(2):301−310. Gao H Z, Li G P. 2020. Mesoscale synoptic meteorology analysis and numerical experiment of local sudden rainstorm affected by topography in southeast part of Guizhou Province [J]. Plateau Meteorology,39(2):301−310 (in Chi-

nese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00079

郭大梅,潘留杰,李明娟,等.2022.关中北部一次暴雨水汽条件及不稳定分析[J].高原气象,41(6):1481−1491. Guo D M, Pan L J, Li M J, et al. 2022. Water vapor condition and instability analysis of a rainstorm in Northern Guanzhong [J]. Plateau Meteorology,41(6):1481−1491 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00090

侯建忠,刘瑞芳,王文强,等.2010.青藏高原东北侧突发性暴雨特征综合分析[J].灾害学,25(2):81−86. Hou J Z, Liu R F, Wang W Q, et al. 2010. Comprehensive analysis on abrupt torrential rains in Northeast Tibet Plateau [J]. Journal of Catastrophology,25(2):81−86 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2010.02.017

江一啸,李山山,李国平,等.2023. 2008—2017 年四川省突发性山地暴雨事件的演变特征[J].暴雨灾害,42(6):670−678. Jiang Y X, Li S S, Li G P, et al. 2023. Evolution characteristics of sudden mountain rainstorm events in Sichuan Province from 2008 to 2017 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):670−678 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−041

井喜,李栋梁,李明娟,等.2008.青藏高原东北侧一次突发性大暴雨环境场综合分析[J].高原气象,27(1):46−57. Jing X, Li D L, Li M J, et al. 2008. Synthetic analyses on environmental conditions of an abrupt heavy rainstorm on the northeast side of Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology,27(1):46−57 (in Chinese)

李国平,孙建华,王晓芳.2021.中国西南山地突发性暴雨特征与机理研究的新进展[J].气象科技进展,11(4):57−63. Li G P, Sun J H, Wang X F. 2021. New research progress on characteristics and mechanism of sudden rainstorm in southwest China. Advances in Meteorological Science and Technology [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,11(4):57−63 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1973.2021.04.010

李明娟,郭大梅,冯典,等.2023.弱天气系统强迫下一次突发性大暴雨成因分析[J].高原气象,42(4):934−948. Li M J, Guo D M, Feng D, et al. 2023. Mechanism analysis of an abrupt torrential rain event under weak synoptic forcing [J]. Plateau Meteorology,42(4):934−948 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00101

刘成瀚,王月,阎琦,等.2023.超低空急流形成的爬、绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响[J].暴雨灾害,42(3):273−282. Liu C H, Wang Y, Yan Q, et al. 2023. Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):273−282 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−035

刘嘉慧敏,潘留杰,郭大梅,等.2023.商洛金丝峡“6.26”极端短时强降水成因分析[J].暴雨灾害,42(6):659−669. Liu J H M, Pan L J, Guo D M, et al. 2023. Comprehensive analysis of the extreme short-time heavy rain event on 26 June 2022 in Jinsi Gorge, Shangluo [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):659−669 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−256

罗金芳,吴君涛,姜敏,等.2024.鄂东北春季三类典型极端强降水特征分析[J].沙漠与绿洲气象,18(2):44−51. Luo J F, Wu J T, Jiang M, et al. 2024. Analysis of the characteristics of three kinds of typical extreme precipitation in Northeast Hubei in spring [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):44−51 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.006

毛江玉,赵雪洁,刘屹岷,等.2024.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[J].暴雨灾害,43(2):121−134. Mao J Y, Zhao X J, Liu Y M, et al. 2024. Comparative analysis of potential vorticity between persistent rainstorm and extreme intense rainfall events during the Yangtze-Huaihe Meiyu period [J]. Torrential Rain and Disasters,43(2):121−134 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−202

青逸雨,黄雨婧,孙芳,等.2023.东北移高原低涡引发我国西北两次强降水过程的对比分析[J].暴雨灾害,42(2):144−149. Qing Y Y, Huang Y J, Sun F, et al. 2023. Comparative analysis of two heavy precipitation events in Northwest China induced by northeastward Tibetan Plateau vortices [J]. Torrential Rain and Disasters,42(2):144−149 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−014

邱贵强,赵桂香,董春卿,等.2018.一次副热带高压边缘突发性暴雨的锋生及水汽特征分析[J].高原气象,37(4):946−957. Qiu G Q, Zhao G X, Dong C Q, et al. 2018. Frontogenesis and moisture characteristic analysis on a sudden rainstorm at the edge of subtropical high [J]. Plateau Meteorology,37(4):946−957 (in Chinese). doi:10.7522/i.issn.1000−0534.2017.00059

冉令坤,楚艳丽.2009.强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的诊断分析[J].物理学报,58(11):8094−8106. Ran L K, Chu Y L. 2009. Diagnosis of vertical helicity, divergence flux and their extensions in heavy-rainfall events [J]. Acta Physica Sinica,58(11):8094−8106 (in Chinese). doi:10.7498/aps.58.8094

宋雯雯,李国平,叶瑶.2024.基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析[J].暴雨灾害,43(1):13−22. Song W W, Li G P, Ye Y. 2024. Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):13−22 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−221

王婧羽,崔春光,陈杨瑞雪,等.2022.西南山区 5—8 月产生突发性暴雨事件的中尺度对流系统的时空分布特征[J].气象学报,80(1):21−38. Wang J Y, Cui C G, Chen Y R X, et al. 2022. Temporal and spatial characteristics of mesoscale convective systems associated with abrupt heavy rainfall events over Southwest China during May—August [J]. Acta Meteorologica Sinica,80(1):21−38 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.006

王晓明.1996.吉林省突发性暴雨的时空分布特征[J].气象,22(4):27−31. Wang X M. 1996. The space-time distribution features of sudden hard rain in Jilin Province [J]. Meteorological Monthly,22(4):27−31 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.1996.4.007

尉英华,陈宏,王艳春,等.2024.弱天气背景下天津三次局地突发暴雨中尺度特征及触发机制[J].气象,50(9):1093−1104. Wei Y H, Chen H, Wang Y C, et al. 2024. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of three sudden rainstorms under weak synoptic scale background in Tianjin [J]. Meteorological Monthly,50(9):1093−1104 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.051601

魏栋,刘丽伟,田文寿,等.2021.基于卫星资料的西北地区高原涡强降水分析[J].高原气象,40(4):829−839. Wei D, Liu L W, Tian W S, et al.

2021. Analysis of the heavy precipitation caused by plateau vortex in Northwest China based on satellite data [J]. Plateau Meteorology, 40(4):829−839 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.000021

肖递祥,王佳津,曹萍萍,等.2020.四川盆地突发性暖区暴雨特征及环境场条件分析[J].自然灾害学报,29(3):110−118. Xiao D X, Wang J J, Cao P P, et al. 2020. Characteristics and environmental conditions of the sudden warm-sector rainstorms in Sichuan Basin [J]. Journal of Natural Disasters,29(3):110−118 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2020.0312

谢家旭,李国平.2021.重力波与对流耦合作用在一次山地突发性暴雨触发中的机理分析[J].大气科学,45(3):617−632. Xie J X, Li G P. 2021. Mechanism analysis of a sudden rainstorm triggered by the coupling of gravity wave and convection in mountainous area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(3):617−632 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2009.20137

徐金波,卢萍,曾波,等.2024.青藏高原东南缘攀西一次突发性山地暴雨成因分析[J].高原山地气象研究,44(2):40−49. Xu J B, Lu P, Zeng B, et al. 2024. Cause analysis of a sudden mountain rainstorm in the southeastern margin of Tibetan Plateau [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(2):40−49 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.005

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508−520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y, et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

于超,贺靓,张恒德,等.2022.北京市 2018 年“7·16”极端暴雨特征及成因分析[J]. 河海大学学报 (自然科学版),50(4): 42-49,82. Yu C, He L, Zhang H D, et al. 2022. Analysis on characteristics and causes of the extreme rainstorm on 16 July 2018 in Beijing City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),50(4):42-49,82 (in Chinese). doi:10.3876/j.issn.1000−1980.2022.04.006

张芳丽,李国平,李武阶.2022. 2020 年 7 月 5—6 日武汉江夏特大暴雨水汽源地和输送特征分析[J].暴雨灾害,41(4):375−383. Zhang F L, Li G P, Li W J. 2022. Analyses of moisture sources and transport characteristics in a rainstorm event in Jiangxia, Wuhan during July 5—6, 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(4):375−383 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.04.002

张芳丽,李国平,罗潇.2020.四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统分析[J].高原气象,39(2):321−332. Zhang F L, Li G P, Luo X. 2020. Some influence factors of a sudden rainstorm event in Northeast Sichuan Basin of China [J]. Plateau Meteorology,39(2):321−332 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00080

张弘,侯建忠,杜继稳.2007.陕西突发性暴雨监测预警系统研究[J].陕西气象,(6):6−11. Zhang H, Hou J Z, Du J W. 2007. Research on the sudden rainstorm monitoring and early warning system in Shaanxi Province [J]. Journal of Shaanxi Meteorology,(6):6−11 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006−4354.2007.06.002

赵强,彭力,李文耀,等.2022. 2021 年 4 月陕西一次极端暴雨过程的成因诊断[J].暴雨灾害,41(2):109−118. Zhao Q, Peng L, Li W Y, et al. 2022. Diagnosis of the causation of an extreme rainstorm in Shaanxi in April 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(2):109−118 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.02.001

周文,王晓芳,杨浩,等.2021.造成贵州水城“7·23”山体滑坡的大暴雨成因分析[J].气象,47(8):982−994. Zhou W, Wang X F, Yang H, et al. 2021. Causes analysis of severe torrential rain inducing the landslide in Shuicheng of Guizhou Province on 23 July 2019 [J]. Meteorological Monthly,47(8):982−994 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.08.006

Chen Y, Wang X, Huang L, et al. 2021. Spatial and temporal characteristics of abrupt heavy rainfall events over Southwest China during 1981-2017 [J]. International Journal of Climatology,41(5):3286−3299. doi:10.1002/joc.7019

Wu G X, Cai Y P, Tang X J. 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. Acta Meteorologica Sinica,53(4):387−405. doi:10.11676/qxxb1995.045

(责任编辑　闵爱荣)