

周芳,张瑛,陈翔翔,等.2024.江西局地短时强降水的天气学分型研究[J].暴雨灾害,43(3):352–362. ZHOU Fang, ZHANG Ying, CHEN Xiangxiang, et al. 2024. Weather system classification of local hourly heavy rainfall in Jiangxi Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(3): 352–362 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–248

江西局地短时强降水的天气学分型研究

周芳,张瑛,陈翔翔,肖潇

(江西省气象台,南昌 330096)

摘要:利用1998—2019年4—9月常规高空地面观测和江西省93个国家气象观测站1 h雨量资料,对筛选出的江西204次局地短时强降水过程,研究其天气学类型、各类型的探空平均和物理量特征,并建立了短时强降水概念模型。结果表明:江西局地短时强降水可分为槽前型、槽后型、热带系统型、副高边缘型和副高控制型五种类型。其中槽前型最多,占总数的48%,常发生在高空槽前、中低层切变线附近,地面冷锋、静止锋或低压倒槽中。热带系统型发生次多,占总数的19.1%,又可分为热带气旋类和东风波类,热带系统的结构、移动路径等对短时强降水落区影响大。副高边缘型分为副高西、南、北边缘型,短时强降水常发生在副高588 dagpm线边缘、低层切变线、辐合线附近。副高控制型占总数的5.5%,强降水发生在副高控制江西全省,500 hPa江南北部或东部有中心温度低于 -4°C 的冷槽影响的背景下,强降水多产生于地面地形辐合线上、高温区内或山脉迎风坡。槽后型最少,占总数4.4%,发生在槽后西北气流下、低空急流出口区及辐合区及地面辐合线上。

关键词:短时强降水;环流类型;物理量特征;概念模型

中图分类号: P458.1+21.1

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2022–248

Weather system classification of local hourly heavy rainfall in Jiangxi Province

ZHOU Fang, ZHANG Ying, CHEN Xiangxiang, XIAO Xiao

(*Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096*)

Abstract: Based on the conventional high-altitude and ground observation datasets and the 1-hour rainfall datasets from 93 national automatic weather stations in Jiangxi from April to September of 1998 to 2019, a total of 204 selected local hourly heavy rainfall events (hereinafter LHR) in Jiangxi were analyzed and classified. With the analysis of synoptic meteorology, radiosonde, and physical properties, the conceptual models of each category of these LHR events were established. The results are as follows. LHR in Jiangxi can be classified into 5 categories, including Pre-Trough pattern (PRT), Post-Trough pattern (POT), Tropical System pattern (TS), Edge of Subtropical High pattern (ESH), and Control of Subtropical High (CSH) pattern. PRT is the most common type, which accounts for 48% of the total events. These events usually occur in front of the high-altitude trough, near the mid-low-level shear lines, and are usually associated with cold fronts, stationary fronts, or low-pressure troughs on the surface. The second most frequent one is TS, which accounts for 19.1% of the total events. TS can also be divided into the tropical cyclone type and the east wind wave type. The structure and movement of the tropical systems can significantly affect the area of LHR. ESH is divided into western ESH, southern ESH, and northern ESH. For this type, LHR events usually occur near the edge of the subtropical high 588 dagpm line, the low layer shear line, or the convergence line. CSH accounts for 5.5% of the total events. LHR happens when the subtropical high controls the entire Jiangxi Province. Particularly, when a center temperature at 500 hPa over the northern or eastern Jiangnan regions below -4°C appears under the background of a cold trough, LHR events frequently occur on the ground convergence line, in the high-temperature area, or windward slope of mountains. POT is the least common type, which accounts for 4.4% of the events. It occurs under the northwesterly flow behind a trough, in the exit zone of the low-level jets, in the convergence zone, or on the surface convergence line.

Key words: hourly heavy rainfall; synoptic type; physical property; conceptual model

收稿日期: 2022-12-04; 定稿日期: 2023-08-16

资助项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBG71019); 中国气象局气象能力提升联合研究专项项目(23NLTSZ004); 中国气象局复盘总结专项项目(FPZJ2023-066); 江西省气象局面上项目(JX2023M13)

第一作者: 周芳,主要从事短期天气预报及其相关方法研究。E-mail: sunshine4281006@163.com

通信作者: 张瑛,主要从事数值天气预报和应用气象研究。E-mail: zysyq@hotmail.com

引言

强对流天气的发生需要不稳定层结、垂直风切变、抬升触发机制和适当的水汽条件。但在现实情况中,即使大气满足上述基本条件,天气预报员要进一步做出准确的定点分类预报,依然是非常困难的。而通过对不同环流背景下强对流天气要素和环境场分析,可以明显提高强对流天气的短时、临近预报水平(俞小鼎等,2012,2020;孙继松等,2017)。

短时强降水一般由中小尺度系统驱动,造成的衍生灾害局地而短促(孙继松,2017)。国内外学者利用诊断分析、中尺度分析、数值模拟等方法,对短时强降水的时空分布特征、多尺度特征、环境条件、物理机制、预报预警着眼点、模式释用技术等进行了广泛研究(俞小鼎等,2013;许爱华等,2014;Luo et al., 2016; Yin et al., 2022),提出了一些有益于24 h短期落区预报和2 h内短临预警的预报指标,但是对于短时强降水3~12 h的预报仍然缺少有效的方法。Browning (1985)认为建立各种天气系统结构、机制和生命史的概念模型,将有助于解决上述问题。因为概念模型可以较为直观、全面地理解某一类天气过程的发生发展及影响系统的动力配置,越来越多的专家学者研究建立了当地短时强降水的概念模型,在解释其机理、研发其预报方法和提高预报准确率方面取得了颇有成效的成果(花嘉佳等,2016;范元月等,2020;赵渊明和漆梁波,2021)。

江西短时强降水主要出现在5—8月,8月中旬最多,7月中旬次之;空间分布东多西少,武夷山西麓、怀玉山与武夷山北段之间的信江河谷地区出现最多也最集中,鄱阳湖平原次多,再次是罗霄山脉东麓的吉泰盆地(周芳等,2018a)。根据影响系统,江西短时强降水分为低槽型、副高边缘型、副高控制型和热带系统型(周芳等,2018a)。不同类型的强降水都可能引起严重的灾害,如受副高边缘中尺度对流系统影响,2014年5月25日07:00—08:00(北京时,下同)萍乡市湘东区龙头村1 h雨量达84.6 mm(支树林等,2015;周芳等,2018b),多处山洪暴发,桥梁冲断;受槽后西北气流下长时间维持的中尺度线状对流系统影响,2016年6月19日10:00—11:00景德镇市昌江区吕蒙站1 h雨量达89.5 mm(郑婧等,2018),暴雨迅速造成严重的城市内涝;受强梅雨锋上的对流云团影响,2020年7月8日07:00—08:00上饶市鄱阳县莲花乡1 h雨量达85.1 mm,频发的短时强降水导致鄱阳湖水位迅速上涨,造成了洪涝灾害。而江西以往的短时强降水预报是遵循暴雨的预报思路,但暴雨与短时强降水是尺度

不同、性质不同的降水过程,其预报和分析也应进行区别(孙继松,2017)。为了解决上述问题,本文对江西1998—2019年汛期筛选出的204次局地短时强降水过程进行分析,归纳不同类型短时强降水的环流特征和系统配置,建立概念模型,分析物理机制;并针对每个类型的强降水天气个例进行探空资料的分析,描述在该背景下中尺度对流系统的发展演变和移动,以期加深对江西省短时强降水的认识,提高短时强降水预报预警能力。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文使用的资料时段均为1998—2019年4—9月,主要包括:(1)江西省气象数据中心提供的江西省93个国家气象观测站的每小时降水资料,该数据经过严格的质量控制,可用于筛选局地强降水过程。(2)国家气象中心提供的高空、地面实况观测资料,用于分析主要影响系统特征和物理量特征。选取短时强降水发生前最临近时次及最邻近站点的探空资料,用于分析短时强降水过程的高空物理量特征,这些站点为武汉(站号为57494)、安庆(站号为58424)、南昌(站号为58606)、长沙(站号为57687)、郴州(站号为57972)、赣州(站号为57993)、衢州(站号为58633)、邵武(站号为58725)。地面观测数据的选取方法为距离该站短时强降水发生最近一个时次的的数据。

1.2 研究方法

1.2.1 局地短时强降水天气过程的定义及筛选

综合考虑中国气象局对短时强降水的定义及对江西省本地的影响程度,规定1 d(08:00—次日08:00)中江西省有连片的4~8个国家站1 h雨量 ≥ 30 mm,则该日为一次局地短时强降水过程。依照此标准,1998—2019年4—9月江西共筛选出204次局地短时强降水过程。需要说明的是,南昌站(站号为58606)和南昌县站(站号为58607)之间的直线距离为6.3 km,上饶站(站号为58637)和上饶县站(站号为58623)站之间的直线距离为8.0 km左右,江西省其他各国家站相互之间直线距离均超过了14.0 km。经筛查,南昌、南昌县或上饶、上饶县站同时出现小时雨量 ≥ 30 mm的短时强降水日,强降水站数均超过了5站,因此不会出现由于相邻站点同时出现短时强降水而使得统计的个例标准不一的情况。

1.2.2 分类概念模型建立

天气尺度系统的演变过程是强对流酝酿和发生的重要基础条件之一,对天气系统的配置和理解是强对流预报成功的前提和基础(孙继松等,2015)。周芳

等(2018a)研究表明,江西局地短时强降水过程主要分为低槽型、热带系统型、副高控制型和副高边缘型四类,该研究中将发生在槽前和槽后的短时强降水统称为低槽型短时强降水,但在后续预报实际工作中发现这两类型的强降水无论在形成机理和热动力条件上均有差异。因此本文参考既往研究,并结合实际情况,将江西省的局地短时强降水过程分为槽前型、槽后型、热带系统型、副高控制型和副高边缘型五类。再基于同一类局地短时强降水过程的同一高度层上各个气象观测站的位势高度、温度、比湿、风(将风分解为纬向风和经向风,分别对两个分量进行平均,再合成最终得到平均风)等要素对单站做时间平均,分析其特征,得到综合探空分析图。最后,用中尺度天气(图)分析方法(蓝渝等,2013),借助MICAPS平台强天气工具箱,建立江西局地短时强降水天气学概念模型。

1.3 研究区概况

江西省按照南北地理跨度和地貌类型,可划分为赣北、赣中、赣南,本文所采用的国家气象观测站及下文中所提到的地区,均在图1中标明。

2 江西汛期局地短时强降水分类概念模型

表1是1998—2019年4—9月江西各类型局地短时强降水过程次数、占总数比和伴随的其他强对流天气的统计结果,可见,共有204次局地短时强降水过程,其中同时伴随有其他强对流天气的过程有82次,占总数的40.1%。槽前型短时强降水占总数的48%,次数最多,其中有43.8%的个例同时伴有冰雹或雷暴大风,39.7%的个例伴有雷暴大风,7.1%的个例伴有冰

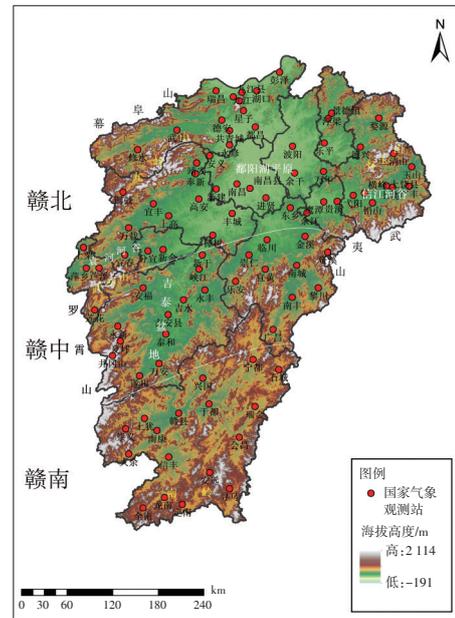


图1 研究区概况(白实线为分区线)

Fig. 1 Overview of the study area. The solid white line is the partition line

雹。副高边缘型占总数的23%,为次多,其中有34%的个例伴有雷暴大风,仅有1次过程伴有冰雹。热带系统型占总数的19.1%,这类型中33.3%的个例伴有雷暴大风,也有1次同时伴有冰雹。副高控制型占总数的5.5%,该类型中90.9%的个例会同时伴有雷暴大风,未出现过冰雹。槽后型最少,占总数的4.4%,该类型不同时伴有冰雹和雷暴大风。从局地短时强降水过程所伴随的其他强对流天气(冰雹、雷暴大风)的空间分布来看,冰雹最多出现在赣南南岭北侧的丘陵地带,其次位于信江河谷、吉泰盆地和袁河河谷中;雷暴大风多集中出现在鄱阳湖平原、吉泰盆地中,其中以鄱阳湖北的星子县为最多(图略)。

表1 1998—2019年4—9月江西省各类型局地短时强降水次数、占总数的百分比和伴随的其他强对流天气

Table 1 Counts and percentages of different categories of local hourly heavy rainfall (LHR) events and other strong convective weather systems in Jiangxi Province from April to September of 1998 to 2019

类型	总次数	各型占比/%	仅伴随冰雹次数	仅伴随雷暴大风次数	同时伴随冰雹和雷暴大风次数
槽前型	98	48.0	4	36	3
槽后型	9	4.4	0	0	0
热带系统型	39	19.1	0	12	1
副高边缘型	47	23.0	1	15	0
副高控制型	11	5.5	0	10	0
总计	204	100	5	73	4

2.1 槽前型

2.1.1 天气形势

槽前型局地短时强降水发生在高空槽前西南气流下,全省皆可出现,主要发生在赣北。1 h雨量多为30~50 mm,很少超过50 mm。200 hPa江西处于南亚高压右前侧的辐散气流区中;500 hPa东北冷涡位于黑

龙江北部,东海和黄海海面上为减弱东移的低槽,贵州西部和华中有低槽,西太平洋副热带高压(简称为副高)较弱,588 dagpm位于南海到台湾以东洋面上,脊线位于18°N以南(图2a);700 hPa(图略)切变线、850 hPa切变线(图2b,为了突显低压系统,等位势高度线以2 dagpm为间隔,下同)和925 hPa(图略)切变线位置与

500 hPa 槽线相距较近(锋区坡度陡),槽前有低涡、低空急流、气旋等系统发展,地面为锋面或者倒槽。

根据地面影响系统,将槽前型又分为三种类型。第一种,当强降水出现在地面冷锋上或冷锋后部时,高层有大尺度低槽东移,低层切变线两侧有较强的冷、暖平流,北侧北风为4~6 m·s⁻¹,南侧南风多为8~12 m·s⁻¹,有时也可达到急流强度;这种类型占槽前型的60%,与斜压锋生类(许爱华等,2014)的形势相似,但辐合强度不如斜压锋生类的强,多影响赣北、赣中(62.5%),有时影响全省(20.3%),很少单独影响赣南(6.7%)。第二种,当强降水出现在地面低压倒槽和地

面辐合线上时,高空常为短波槽,槽前没有温度平流或只有弱的冷平流,低层为暖切变线或强盛的西南急流,暖湿平流对热力不稳定的建立起主导作用;该类型占槽前型的19.3%,与暖平流强迫类(许爱华等,2014)类似,但暖平流强度没有该类强。第三种,出现在梅雨锋上,高空常有短波槽东移,低层有切变线,梅雨锋锋区两侧温度平流不明显,这种类型占槽前型20.7%,有时也会出现20站以上区域性短时强降水(付超等,2021),他们的区别在于,区域性短时强降水过程中低空急流尺度更大、影响范围更广、锋区的坡度更小。

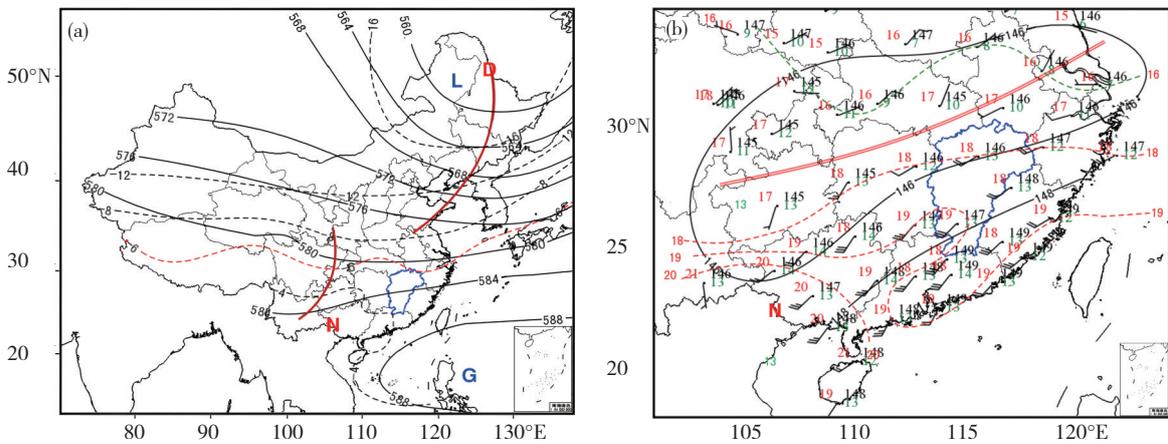


图2 1998—2019年4—9月江西省槽前型短时强降水个例500 hPa (a)、850 hPa (b)探空平均分析图(黑实线为等位势高度线,单位: dagpm; 红虚线为等温度线,单位: °C; 绿色数字为比湿,单位:g·kg⁻¹; 棕色粗单线为500 hPa槽线; 红色双实线为850 hPa切变线; G、D、L和N分别表示高压中心、低压中心、冷中心和暖中心; 黑色风向杆表示风速风向,单位:m·s⁻¹,下同)

Fig. 2 Sounding analysis at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa of the Pre-Trough pattern in hourly heavy rainfall from April to September of 1998 to 2019 (The black solid line is the allelic potential height line, unit: dagpm. The red dashed line is the isotherm line, unit: °C. The green number is the specific humidity; the thick brown single line is the 500 hPa trough line. The red double solid line is the 850 hPa shear line. G, D, L, N indicates the high-pressure center, low-pressure center, cold center and warm center, respectively. The black wind rod indicates wind direction, unit: m·s⁻¹, the same below)

2.1.2 物理量特征

槽前型短时强降水发生前高空冷温度槽位于低层均温区或锋区上,形成热力不稳定,850 hPa和500 hPa温差($T_{850} - T_{500}$)平均为24~25 °C;水汽沿西南气流输送至江西,850 hPa比湿平均达到13~14 g·kg⁻¹;湿层较深厚,从地面到500 hPa或700 hPa各层温度露点差均≤3 °C的个例占了88.2%;风垂直切变为中等偏强,0~6 km的平均风矢量差(近似代表风垂直切变)为9.7 m·s⁻¹;水汽垂直梯度较大,地面露点温度与700 hPa和高空干层最底层(近似代表云顶的高度)的露点温度的差平均为16.8 °C和36 °C,有利于较强的对流性降水发生(孙继松,2017)。

2.1.3 概念模型

基于上述影响系统和物理量特征,归纳出槽前型短时强降水天气概念模型图(图3)。可见在槽前型短时强降水中,中高层槽前冷西南气流叠加在低层暖湿南气流上,为短时强降水的发生提供了热力不稳定条件;

地面锋面或辐合线触发了对流系统的产生。对流系统触发后常形成片状层积混合降水回波或是伴随层状云型线状中尺度对流系统(MCS),MCS中对流单体向西南方向传播,整体向东北方向移动,形成“列车效应”。短时强降水区位于高空冷槽下、925 hPa或850 hPa的湿舌内、850 hPa切变线上或其南侧,低空急流(风速大值区)出口区附近及左侧,地面辐合线(锋面)上。

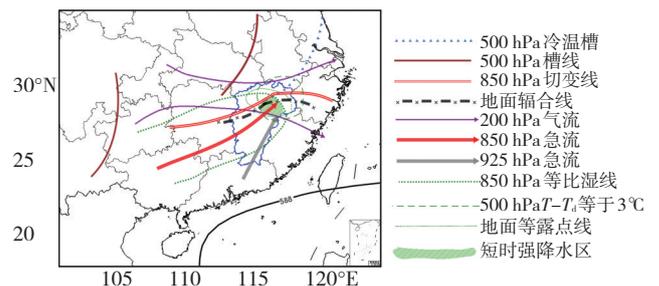


图3 江西省槽前型短时强降水概念天气模型图

Fig. 3 The conceptual model of the Pre-Trough pattern in Jiangxi Province

2.1.4 典型个例分析

2016年5月2日下午至晚上江西出现了大到暴雨和局地短时强降水天气,5月2日08:00南昌站探空(图4)显示存在较为深厚的西南气流和暖平流,湿层深厚,500 hPa以上有急流和干层,有利于高层干冷空气向下侵入,近地面抑制能量(CIN)为 $0 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(LFC)分别为434 m和926 hPa。 0°C 层高度为4 282 m,暖云层厚度为4.6 km,K指数为 42°C ,925 hPa比湿为 $14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这些条件表明暖云深厚、含水量大。对流有效位能(CAPE)为 $1\,275.4 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,有利于短时强降水的发生。在暖低压倒槽的北侧有较强的冷锋系统,冷暖空气交汇提供了大尺度动力强迫抬升条件。对流系统率先在海拔较高的九岭山脉触发,随后向下游移动并发展,与从鄱阳湖入长江口渗透进入江西的冷空气合并后,产生了短时强降水。

2.2 槽后型

2.2.1 天气形势

槽后型的短时强降水发生在高空槽后西北气流下,全省皆可出现,多发于沿长江地区、九岭山脉以南的河谷区和鄱阳湖平原,具有局地突发性强,雨强大(1 h雨量常超过50 mm)的特点。200 hPa江西处于南

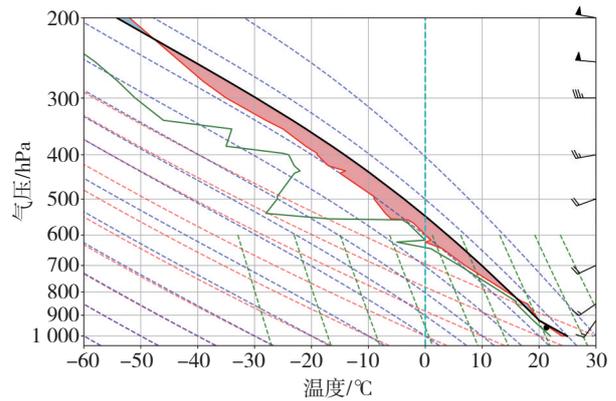


图4 2016年5月2日08:00南昌站探空
Fig. 4 Nanchang sounding at 08:00 BT on 2 May 2016

亚高压东北侧或槽后的西北急流中(图略),500 hPa冷涡涡位于黑龙江北部,华东沿海到赣北为加深发展的低槽,槽后西北风风速可达 $8\sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,副高稳定或略有摆动,588 dagpm位于江南中部,脊线位于 20°N 附近(图5a),700 hPa和850 hPa(图5b)切变线位于长江以北,切变线南侧为发展强盛的低空急流,急流核(风速 $> 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)位于桂林到赣州,925 hPa也有超低空急流,急流出口区位于赣北,地面西南地区倒槽伸向江南,倒槽内有辐合线。

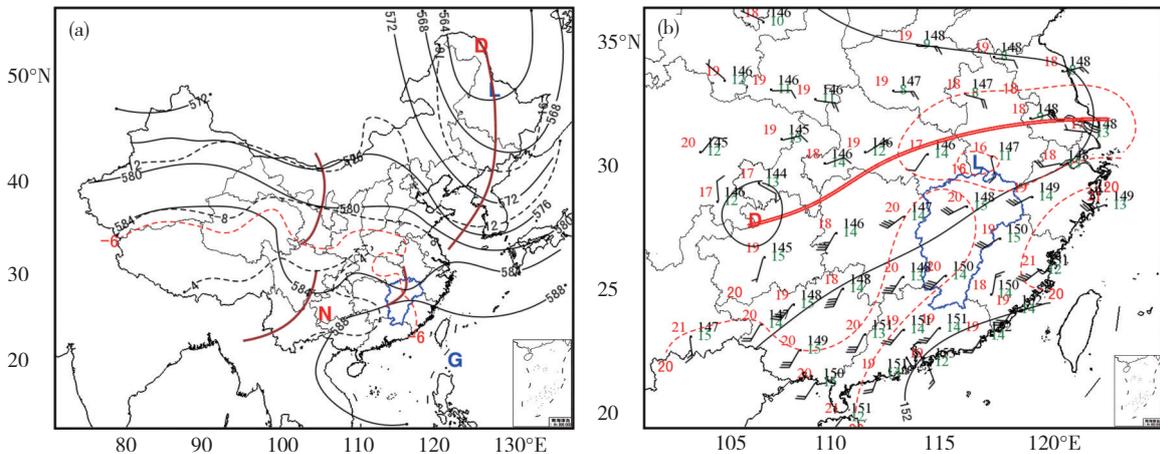


图5 江西省槽后型短时强降水个例500 hPa (a)、850 hPa (b)探空平均分析图

Fig. 5 Sounding analysis at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa of the Post-Trough pattern in Jiangxi Province from April to September of 1998 to 2019

2.2.2 物理量特征

槽后型短时强降水发生前高空深厚冷温度槽叠加在低层暖脊上, $T_{850}\sim T_{500}$ 平均为 $25\sim 26^\circ\text{C}$,为强热力不稳定;上干下湿,水汽垂直梯度较大,地面露点温度与700 hPa、高空干层最底层的露点温度差平均为 15.25°C 和 39°C ,为各类型中最大。水汽充足,850 hPa比湿平均为 $14\sim 15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,湿层厚度平均在5.0 km以上,全部个例都满足700 hPa温度露点差 $\leq 3^\circ\text{C}$,且500 hPa温度露点差 $\leq 4^\circ\text{C}$,LCL接近地面,平均值为989 hPa;垂直风切变强,高层为西北风,低层为西南

风, $0\sim 6 \text{ km}$ 的平均风矢量差为 $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2.3 概念模型

基于上述影响系统和物理量特征,归纳出槽后型短时强降水天气概念模型图(图6)。中高层槽后冷(或干)西北气流叠加在低层暖湿低空急流上,为短时强降水提供了强的热动力不稳定和垂直风切变条件;对流系统多数在低空切变线、急流出口区或地面辐合线上触发,少数在山脉迎风坡触发,对流单体向西北方向传播、向东南方向移动,组织成西北—东南向的前导层状云型线状MCS,短时强降水区位于切变线以南 $100\sim 150 \text{ km}$ 处。

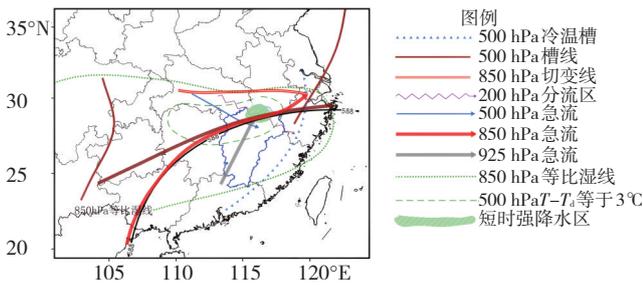


图6 江西省槽后型短时强降水天气概念模型图

Fig. 6 The conceptual model of the Post-Trough pattern in Jiangxi Province

2.2.4 典型个例

2016年6月18日20:00—19日20:00鄂赣皖三省交界出现了局地特大暴雨和短时强降水天气(郑婧等,2018)。200 hPa东亚大槽偏南,导致高空西北风向下扩展到对流层中层,急流最南达到了鄂东南、皖南,与低空急流位置缩小至2个纬距内,加强了垂直风切变和层结不稳定。18日20:00武汉站探空(图7)显示500 hPa以上为干西北急流,露点温度 $\leq -40^\circ\text{C}$,500 hPa为偏西气流,700 hPa以下为西南急流。18日20:00—19日08:00,0~3 km、0~6 km的风矢差分别从 $12.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $9.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增强为 $16.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $19.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,强风垂直切变有利于气旋性涡度的发展和低层辐合的加强。湿层、暖云层厚度分别由3.1 km、3.7 km增为5.7 km和4.2 km,925 hPa比湿为16~18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明有足够多的水汽供应。对流有效位能(CAPE)值由 $1582\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增长到 $1998\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,K指数由 38°C 增长至 46°C ,不稳定的加强有利于高效率对流性降水的产生。对流系统在暖切变线及大别山上分别被触发,而后沿着西北气流向东南方向移动,单体后向传播导致短时强降水的发生。

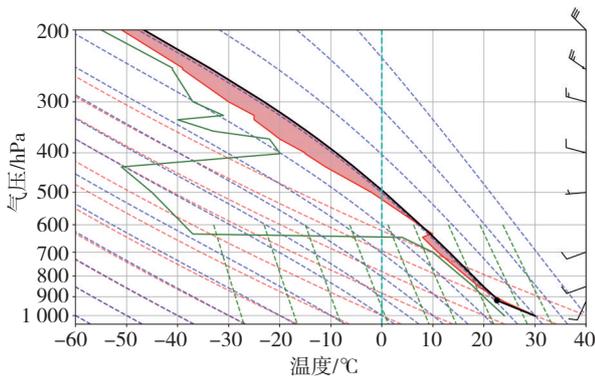


图7 2016年6月18日20:00武汉站探空

Fig. 7 Wuhan sounding at 20:00 BT on 18 June 2016

2.3 热带系统型

热带系统型短时强降水是在有热带系统直接或间接影响江西时产生的,又可再分为热带气旋类、东风波类和季风槽类。由于热带系统暖云层深厚(5.0 km以上),水汽充足,极易出现短时强降水天气。这一类型环境场的物理量特征表现为弱热力不稳定

到热力稳定, $T_{850}\sim T_{500}$ 平均为 $21\sim 23^\circ\text{C}$,垂直风切变弱到中等,0~6 km的平均风矢量差为 $9.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,高空常有分流辐散区。由于系统结构、影响位置、时间和路径不同,造成的短时强降水落区与系统之间的相对位置也不同。

2.3.1 热带气旋类

热带气旋类常由热带气旋本身或与其他天气系统相互作用而形成,1 h雨量为30~100 mm,最大还曾超过200 mm(郭达锋等,2017),短时强降水的落区与热带气旋登陆后的结构、强度、移动路径和速度、水汽含量、降水区的稳定度、高空辐散的位置及是否与其他系统相互作用有关。

若热带气旋没有与其他系统相互作用,中心进入江西后,强降水区常位于气旋中心前进方向的左侧(南侧)或者山脉的迎风坡处。当南海热带气旋经过广东进入江西时,落区位于赣中、赣南;当西太平洋上热带气旋经过福建进入江西中北部时,落区位于赣北东部、赣中和赣南。若中心没有进入江西,又分为以下几种情况:若从广东登陆后填塞,由于受到倒槽和东南风气流的影响,强降水落区位于赣南和罗霄山脉以东;若从浙江、安徽登陆后填塞,则强降水落区位于赣东北、赣北北部;若从福建登陆后填塞,强降水落区位于气旋西北象限和武夷山脉以西的迎风坡中。

若热带气旋与其他系统相互作用,则短时强降水落区会有所变化。若登陆后仍与季风云团相连,落区会向台风中心的东南象限偏移,强度明显加强,持续时间加长;若登陆后与北方冷空气结合,冷空气往往从850 hPa以下的低层加强台风北侧的辐合,使得短时强降水发生,如果高空有低槽配合,则在槽前也会有短时强降水区。

图8为归纳的热带系统型短时强降水概念模型,200 hPa大陆高压和海上副高中心分别位于湖南境内和东海上,辐散分流区位于湘赣交界;500 hPa华东东部有冷温槽影响,有利于对流不稳定的建立。从福建登陆的台风,在向西或西北方向移动时,东北风急流被罗霄山脉(近南北向山脉)强迫抬升,高层辐散、低层

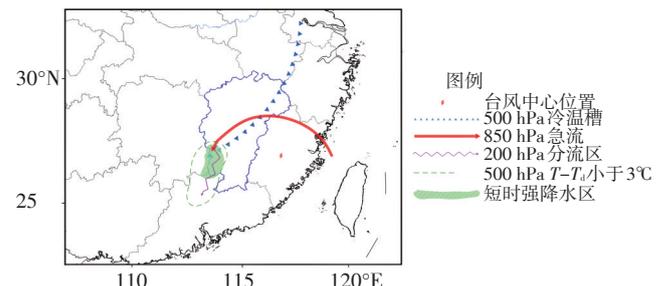


图8 江西省热带系统型短时强降水天气概念模型图

Fig. 8 The conceptual model of the Tropical System pattern in Jiangxi Province

辐合造成强的上升运动,触发了对流不稳定能量的释放,在罗霄山脉东麓及其上方产生短时强降水。

2.3.2 典型个例

2000年8月11日受第8号台风“杰拉华”西行减弱后的残余环流影响,江西西北部出现了局地短时强降水和大暴雨。11日08:00南昌站探空(图9)显示存在深厚的偏北气流,风垂直切变弱,0~6 km的风矢差为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,不利于对流的有组织发展。暖云层厚度为4.3 km,K指数为 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$,850 hPa和925 hPa比湿分别为 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,LCL和自由对流高度(LFC)分别位于559.4 m和867.9 hPa,说明暖云深厚、云底低且含水量大。CAPE值为 $3227.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,有强的不稳定。在螺旋云带上台风倒槽中触发孤立的风暴,在河谷中增强,导致了局地分布不均匀的短时强降水。

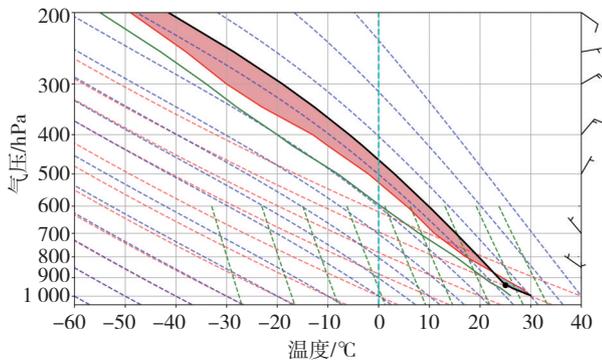


图9 2000年8月11日08:00南昌站探空

Fig. 9 Nanchang sounding at 08:00 BT on 11 August 2000

2.3.3 东风波类

东风波类短时强降水落区与东风波的结构有关,中低层东风波(朱星球等,2016)有利于罗霄山脉东麓

短时强降水的产生。影响江西并产生短时强降水的东风波通常有以下的特征,东风随高度减弱,波轴西倾,波后(东侧)高空为辐散,低层为辐合,短时强降水往往发生在波槽移动到湘赣交界以后。也有少数的例子中,东风风速随高度增加,波轴东倾,短时强降水出现在波前,但中高层有冷扰动,700 hPa及500 hPa 24 h内有小于 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的负变温区(个例略)。

2.4 副高控制型

2.4.1 天气形势及物理量特征

副高控制型短时强降水发生在7月下旬—8月中旬副高控制江西全省的情况下,多出现在山区或鄱阳湖沿岸,小时雨量 $30\sim 60\text{ mm}$ 。200 hPa南亚高压中心位于 90°E 以东、 32°N 以北,有低槽东移,且冷温度槽超前于高度槽,500 hPa (图10a)到地面均为副高控制,有地面地形性辐合线存在。

这一类型环境场的物理量特征为500 hPa江西北部或东部有中心温度低于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷槽;700 hPa到地面为暖湿区,有一定的对流不稳定能量, $T_{850}\sim T_{500}$ 平均为 $23\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。地面温度常在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;水汽充沛,850 hPa的比湿平均为 $17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,地面露点温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;LCL低于900 hPa,LFC午后也降至边界层;0~6 km垂直风切变很弱,平均风矢量差仅为 $4.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;但由于700 hPa西南气流较强,因此0~3 km垂直风切变中等到强,最大平均风矢量差可以达到 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,有利于有组织的强风暴发展,对流系统在地面地形辐合线上、高温区内或山脉迎风坡触发(白天山风导致气流强迫抬升),而后静止少动,造成局地强降水。

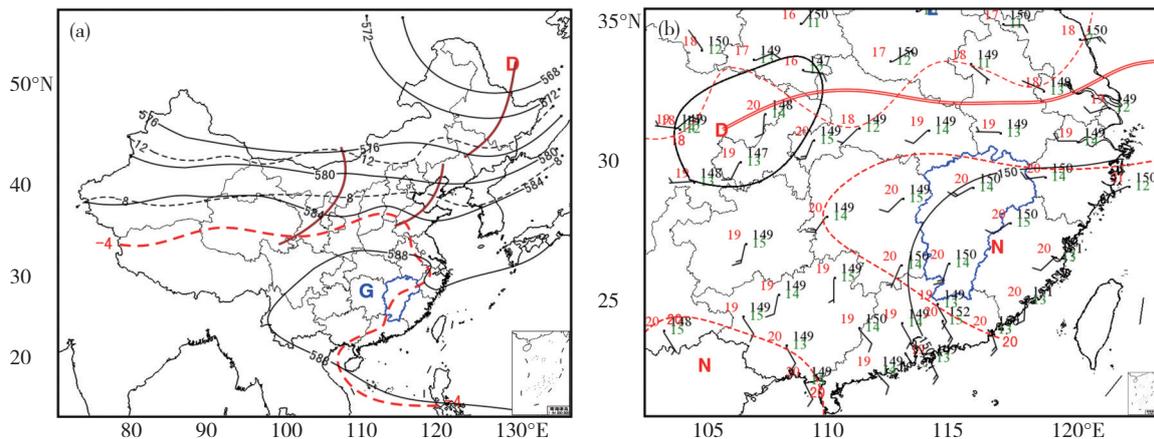


图10 江西省副高控制型短时强降水个例500 hPa (a)、850 hPa (b)探空平均分析图

Fig. 10 Sounding analysis at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa of the Control of Subtropical High pattern in Jiangxi Province April to September of 1998 to 2019

2.4.2 概念模型

图11为归纳出的副高控制型短时强降水天气模型。副高控制区内,日射升温、地面辐合线和局地热力环流触发对流系统原地生消,雨量的大小与水汽含

量密切相关,短时强降水发生在地面高温高露点中心。若高空没有冷温度槽,则这种短时强降水范围非常小;若高空有 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的冷温度槽,则短时强降水的范围将与高空冷温区一致。

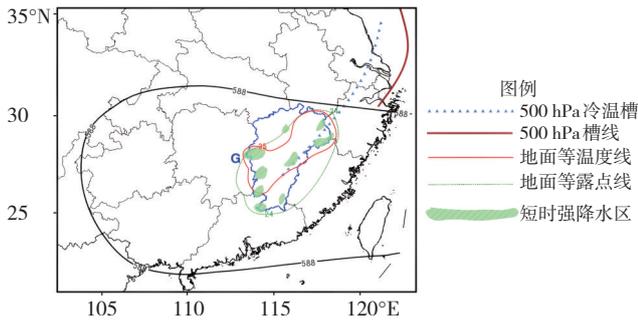


图 11 江西省副高控制型短时强降水天气概念模型图

Fig. 11 The conceptual model of the Control of Subtropical High pattern in hourly heavy rainfall in Jiangxi Province

2.4.3 典型个例

以2001年8月10日发生在赣北、赣中的局地短时强降水过程分析副高控制型短时强降水过程的环境场特征和探空特征。2001年8月10日08:00 200 hPa高空槽位于华北-华中,冷温度槽超前于高度槽,副高控制着长江流域及以南地区,江南北部500 hPa气温下降,24 h变温为-1℃,午后地面气温上升至30℃以上,山坡上和地面辐合线上有局地强风暴和短时强降水产生。10日08:00赣州站探空(图12)显示近地面到850 hPa为较弱的西南气流,700 hPa为较强的西南气流(13 m·s⁻¹),500 hPa为弱西风(风速为5 m·s⁻¹),0~3 km、0~6 km的风矢差分别为12.7 m·s⁻¹和4.5 m·s⁻¹,这样的风垂直切变配置有利于强风暴单体在局地稳定少动。暖云层厚度为4.8 km,K指数为36℃,850 hPa和925 hPa比湿分别为17 g·kg⁻¹和20 g·kg⁻¹,LCL和LFC分别位于50 m和992 hPa,CAPE值为1 493.2 J·kg⁻¹,CIN值为0,对流温度仅为26℃,说明随着温度的上升,仅靠单纯热力作用即可触发对流,且对流触发后,由于低层含水量大,强降水也容易发生。

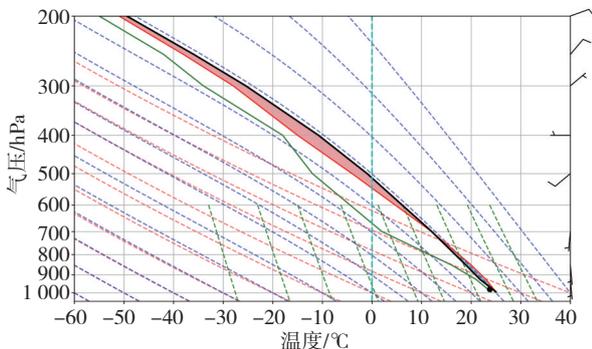


图 12 2001年8月10日08:00赣州站探空

Fig. 12 Ganzhou sounding at 08:00 BT on 10 August 2001

2.5 副高边缘型

副高边缘型短时强降水发生在副高边缘有低槽、台风倒槽或东风波移过的情况下,多发于赣北的西部、北部,赣中的西部以及赣南的南部。主要有副高西边缘类、副高北边缘类和副高南边缘类这三种类型。

2.5.1 概念模型图

副高西边缘类短时强降水常发生在袁河河谷内以及吉泰盆地北部(图1),图13a为概念模型图。可见500 hPa副高控制江南东部,大陆副高控制西南地区,脊线位于27°N附近,西脊点位于114°E以东,强降水区位于两环副高之间的切变线上,华中有大低槽缓慢东移,温度槽超前于高度槽,槽前冷平流叠加在低层暖湿气流上,有利于赣北、赣中建立热力不稳定层结,700—925 hPa之间切变线位于江南北部,其南侧为西南气流,西南风风速8~10 m·s⁻¹,925 hPa有时有超低空急流、暖脊和湿舌,地面为强烈发展的暖低压或者倒槽,赣北、赣中有中尺度地面辐合线,温度和露点温度均较高,垂直风切变中等。对流系统在地面辐合线、边界层切变线或者风速辐合区中发展加强,沿高空西偏南气流向东北方向较缓慢移动,形成短时强降水。

副高北边缘类短时强降水常发生在赣北,图13b为其概念模型图。可见200 hPa高空槽位于110°E附近,江南北部上空为气流辐散区;500 hPa副高控制江南中南部和华南,脊线位于22~25°N、30°N以北有低槽东移,温度槽超前于高度槽,赣北上空形成不稳定层结,700~850 hPa切变线位于500 hPa槽前,低空急流位于江南北部,925 hPa切变线自鄂东南或湘西北移入赣北,在地面辐合线和边界层切变线上高湿区内对流系统触发和发展,而后缓慢东北移,形成短时强降水。这种形势类似于许爱华等(2014)提出的西风带低槽进入到副高边缘类的形势。

副高南边缘类短时强降水常发生在赣南,图13c为其概念模型图,可见副高控制江南东部,其脊线位于27°—30°N、588 dagpm等高线南界位于江南南部,华南南部到沿海有东风波或者台风倒槽向西移。高空有冷温度槽影响赣南,形成热力不稳定层结。低层东南风急流被罗霄山脉强迫抬升,对流系统触发向西北方向移动、向东南方向传播,形成短时强降水。

综上,副高边缘型短时强降水的总体特征为高空弱冷扰动叠加在低层暖湿气流上,产生不稳定层结。副高边缘的低压系统或山脉提供触发抬升条件;风垂直切变中等,且中低层水平风向变化很小;对流系统触发后,沿着引导气流向下游缓慢移动,并且后向传播。这类短时强降水发生在高空冷温度槽和低层强暖(湿)平流、水平气流辐合最强区以及925 hPa以下的边界层辐合线所共同影响的区域。

2.5.2 典型个例

2002年7月20日08:00 500 hPa湘赣交界地区处于两环副高之间的切变线上,700 hPa切变线位于江南北部,200 hPa为分流辐散区。赣州站探空(图14)显示

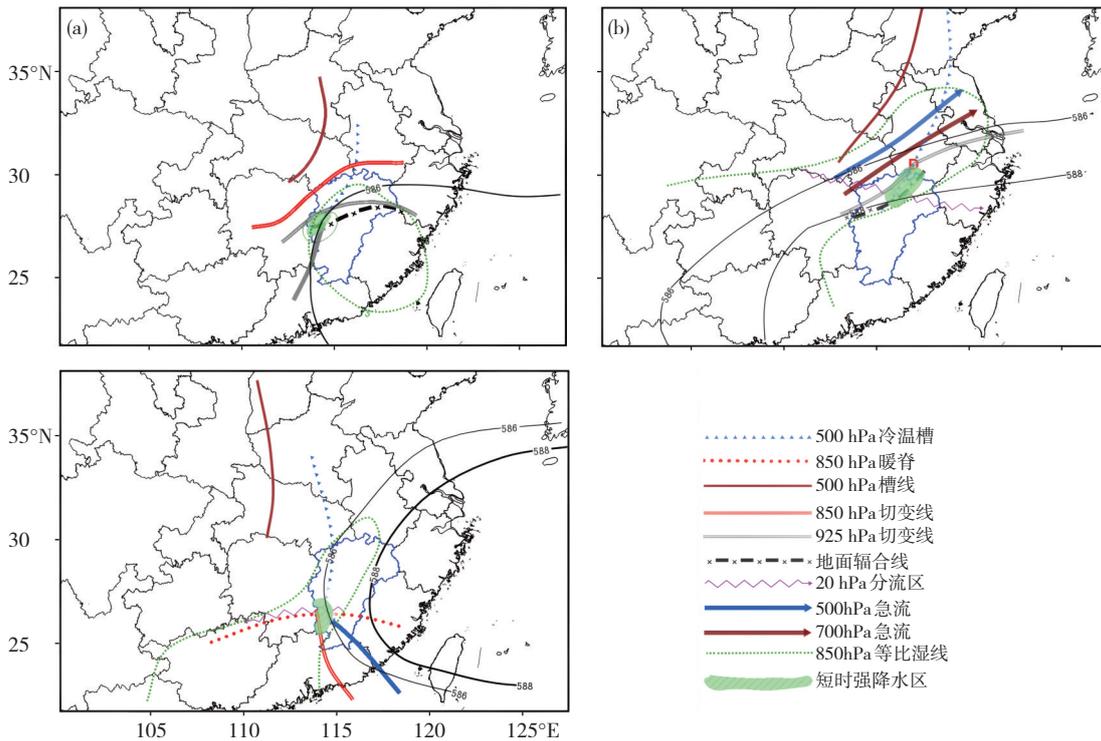


图 13 江西省副高西边缘类(a)、副高北边缘类(b)和副高南边缘类(c)短时强降水概念模型

Fig. 13 The conceptual model of the Western Edge of Subtropical High pattern (a), the Northern Edge of Subtropical High pattern (b), and the Southern Edge of Subtropical High pattern (c) in hourly heavy rainfall

925—850 hPa 为较强的西南气流,700—500 hPa 为减弱的西南气流;0—1.5 km、0—3 km、0—6 km 风矢差分别为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $7.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这样的风垂直切变与副高控制类有相似性,其作用也相似,都是有利于少动的较强风暴的发生发展。暖云层和湿层厚度分别为 4.6 km 和 5.7 km, K 指数为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 925 hPa 比湿为 $17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明暖云层厚且低层水汽充沛。对流温度为 $29 \text{ }^\circ\text{C}$, CIN 为 $0 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, LCL 和 LFC 分别在 385 m 和 892 hPa, CAPE 为 $701.6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,有利于短时强降水的发生。7月20日对流系统在湘赣交界产生后迅速组织成为较大的 MCS, MCS 向南扩展和移动,形成了吉泰盆地南岭北部等地区的短时强降水。

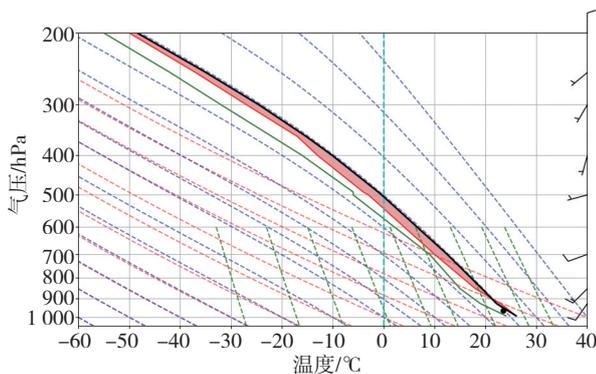


图 14 2002 年 7 月 20 日 08:00 赣州站探空

Fig. 14 Ganzhou sounding at 08:00 BT on 20 July 2002

3 结论与讨论

利用 1998—2019 年 4—9 月常规高空、地面观测和江西省 93 个国家气象观测站 1 h 雨量资料,对筛选出的江西省 204 次局地短时强降水过程进行分型,统计其环境场物理量特征,并通过中尺度分析方法建立各类型的概念模型,得到以下主要结论:

(1) 江西局地短时强降水过程根据影响系统可分为槽前型、槽后型、热带系统型、副高控制型和副高边缘型五种类型,热带系统型又可分为热带气旋类和东风波类两类,副高边缘型可以分为副高西、北、南边缘类三类;其中槽前型次数最多,槽后型、副高边缘型最少。

(2) 槽前型短时强降水出现在高空槽前、低空切变线南侧,对流系统在地面锋面或辐合线上触发,向东北方向移动;槽后型短时强降水出现在高空槽后、低空急流出口区,对流系统由地面辐合线触发,向东南方向移动;热带气旋类短时强降水的落区与热带气旋的移动路径、强度、是否与其他纬度天气系统相互作用有关,东风波类短时强降水则主要发生在东风随高度的波后,对流由波槽触发,向西移动;副高控制型短时强降水发生时,200 hPa 到 925 hPa 副高控制江南,对流系统在地面地形辐合线以及山坡上触发,少动且原地生消;副高边缘型短时强降水发生在副高控制江南东部且其边缘有低压系统移动时,降水发生区域与低

压系统的位置有关,对流系统在切变线或辐合线上触发,缓慢移动。除了副高控制型外所有类型的对流系统都存在后向传播和列车效应。

(3) 槽前型短时强降水抬升条件最强,辐合最深厚,副高控制型辐合最浅薄,可能仅集中在近地面;槽后型的热力不稳定最强,垂直温度递减率均为最大;槽后型的水汽条件最好,不论是局地比湿、湿层厚度还是水汽垂直梯度都是最强的,因此其产生的短时雨量也很大;热带系统型的水汽条件次之,最小的是季风爆发前的槽前型短时强降水,其短时雨量也往往较小。从平均垂直风切变来看,槽后型、槽前型、热带系统型、副高边缘型、副高控制型依次减小。多数情况下高空有冷槽,低层有暖中心或者暖脊,短时强降水往往发生在高空冷温槽影响的区域中。

短时强降水的成因是复杂的,本研究主要从大尺度-中尺度环境热动力场进行了分类分析和研究,对江西当前强降水短期预报业务可以提供参考,有助于江西的暴雨防灾减灾服务。值得指出的是,复杂山体、城市热岛效应及湖陆相互作用通常会导致短时强降水的发生,江西的地形对短时强降水的影响机理,中小尺度系统与大尺度系统的相互作用及短时强降水的日变化成因等都有待于今后做更深入的研究。

江西省气象台许爱华正高级工程师(退休)对本文在短时强降水分类方法上做出的指导,谨致谢忱。

参考文献(References):

曹艳察,郑永光,盛杰,等.2020.2018年7月15—17日北京极端强降水过程三类对流风暴及其强降水特征分析[J].气象,46(7):885-897. Cao Y C, Zheng Y G, Sheng J, et al. 2020. Characteristics of three types of convective storms during the Beijing extreme precipitation event in 15-17 July 2018 [J]. *Meteorological Monthly*,46(7):885-897 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.002

陈涛,张芳华,于超,等.2020.2020年6—7月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J].气象,46(11):1415-1426. Chen T, Zhang F H, Yu C, et al. 2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River Basin during June-July 2020 [J]. *Meteorological Monthly*,46(11):1415-1426 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.003

陈炯,郑永光,张小玲,等.2013.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J].气象学报,71(3):367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,71(3):367-382 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.035

樊李苗,俞小鼎.2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D. 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China [J]. *Plateau Meteorology*,32(1):156-165 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00016

付超,谌芸,朱克云,单九生,等.2019.2010—2016年江西省暖季短时强降水特征分析[J].气象,45(9):1238-1247. Fu C, Chen Y, Zhu K Y, et al. 2019. Characteristics of flash heavy rain in Jiangxi warm season from 2010 to 2016 [J]. *Meteorological Monthly*,45(9):1238-1247 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.00

郭达烽,周芳,陈翔翔,等.2015.登陆台风“麦德姆”的空心结构及其特征[J].气象与环境学报,33(3):10-20. Guo D F, Zhou F, Chen X X, et al. 2015. Analysis of the hollow structure and characteristics of landing typhoon “Matmo” [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,33(3):10-20 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2017.03.002

花家嘉,张婉莹,陈桂万,等.2016.河北唐山地区盛汛期短时强降水概念模型及物理量特征分析[J].冰川冻土,38(2):463-472. Hua J J, Zhang W Y, Chen G W, et al. 2016. Conceptual models and physical quantity feature analysis of short-term heavy precipitation during dominant flood season in Tangshan Prefecture, Hebei Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,38(2):463-472 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0052

蓝渝,张涛,郑永光,等.2013.国家级中尺度天气分析业务技术进展 II:对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术[J].气象,39(7):901-910. Lan Y, Zhang T, Zheng Y G. 2013. Advances of mesoscale convective weather analysis in NMC II: mesoscale nowcasting analysis and supporting techniques [J]. *Meteorological Monthly*,39(7):901-910 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.011

孙继松,陶祖钰.2012.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,38(2):164-173. Sun J S, Tao Z Y. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast [J]. *Meteorological Monthly*,38(2):164-173 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.2.004

孙继松.2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36(6):498-506. Sun J S. 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. *Torrential Rain and Disasters*,36(6):498-506 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.06.002

唐传师,许爱华,马锋敏,等.2018.1961—2015年江西省短历时强降水时空分布特征[J].暴雨灾害,37(5):421-427. Tang C S, Xu A H, Ma F M, et al. 2018. Spatial and temporal variations of short-duration heavy precipitation in Jiangxi during 1961-2015 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,37(5):421-427 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.05.004

田付友,郑永光,张涛,等.2017.中国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J].暴雨灾害,36(6):518-526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China [J]. *Torrential Rain and Disasters*,36(6):518-526 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.06.004

肖靖宇,杨玲,俞小鼎,等.2022.佛山相控阵阵列雷达探测2020年9月4日短时强降水天气过程的分析[J].气象,48(7):826-839. Xiao J Y, Yang L, Yu X D, et al. 2022. Analysis of short-time severe rainfall on 4 September 2020 detected by phased array radar in Foshan [J]. *Meteorological Monthly*,48(7):826-839 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032801

许爱华,谌芸.2013.中尺度天气图分析技术在我国2011年南方4次强降水过程中的应用[J].气象,39(7):883-893. Xu A H, Chen Y. 2013. Application of mesoscale synoptic analysis techniques in four heavy rainfall processes in south China in 2011 [J]. *Meteorological Monthly*,39(7):

- 883–893 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.009
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等.2014.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J].气象,40(4):400–411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al. 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. Meteorological Monthly,40(4): 400–411 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.002
- 许彬,许爱华,陈云辉,等.2019.强对流天气概念模型在江西“3.4”极端大风预报中的应用[J].暴雨灾害,38(2):144–151. Xu B, Xu A H, Chen Y H, et al. 2019. Application of severe convection weather conceptual model to forecast of an extreme gale event occurred in Jiangxi on 4 March 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):144–151 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.02.006
- 尹洁,郑婧,张瑛,等.2011.一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟[J].气象,37(7):827–837. Yin J, Zheng J, Zhang Y, et al. 2011. Analysis and numerical simulation of a heavy rainfall event along the Meiyu Front [J]. Meteorological Monthly,37(7):827–837 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011.7.007
- 俞小鼎,周小刚,王秀明.2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311–337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, et al. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(3):311–337 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.030
- 赵渊明,漆梁波.2021.短时强降水概率预报的多模式集成技术研究[J].气象,47(5):529–538. Zhao Y M, Qi L B. 2021. Multi-model integration technology for probabilistic forecasting of short-time severe rainfall [J]. Meteorological Monthly,47(5):529–538 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.002
- 张芳华,陈涛,张芳,等.2020.2020年6—7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J].气象,46(11):1405–1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al. 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June–July 2020 [J]. Meteorological Monthly,46(11):1405–1414 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.002
- 张涛,蓝渝,毛冬艳,等.2013.国家级中尺度天气分析业务技术进展 I:对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术[J].气象,39(7):894–900. Zhang T, Lan Y, Mao D Y, et al. 2013. Advances of mesoscale convective weather analysis in NMC I: convective weather environment analysis and supporting techniques [J]. Meteorological Monthly,39(7):894–900 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.010
- 郑婧,许爱华,孙素琴,等.2018.高空西北气流下特大暴雨的误差分析及思考[J].气象,44(1):93–106. Zheng J, Xu A H, Sun S Q, et al. 2018. Forecast error analysis of extremely heavy rain under high-level north-west flow [J]. Meteorological Monthly,44(1):93–106 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.008
- 郑媛媛,姚晨,郝莹,等.2011.不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,37(7):795–801. Zheng Y Y, Yao C, Hao Y, et al. 2011. The short rime forecasting and early warning research on severe convective weather under different types of large scale circulation background [J]. Meteorological Monthly,37(7): 795–801 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.7.003
- 支树林,陈娟,包慧濛.2015.一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析[J].气象,41(10):1203–1214. Zhi S L, Chen J, Bao H M. 2015. Mesoscale characteristics analysis of rainstorm on the edge of subtropical high [J]. Meteorological Monthly,41(10):1203–1214 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.003
- 周芳,陈翔翔,郭达烽,等.2013.台风“海葵”(2012)造成的景德镇特大暴雨过程分析[J].气象与减灾研究,36(3):35–42. Zhou F, Chen X X, Guo D F, et al. 2013. Effects of typhoon Haikui (2012) on heavy rainfall over Jingdezhen [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,36(3): 35–42 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2013.03.005
- 周芳,陈翔翔,肖潇,等.2018a.江西局地短时强降水的时空分布特征[J].气象与减灾研究,41(3):176–182. Zhou F, Chen X X, Xiao X, et al. 2018. The spatial-temporal distribution characteristics of local short-time heavy rainfall in Jiangxi Province [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,41(3):176–182 (in Chinese). doi:10.12013/qxyjzyj2018-025
- 周芳,肖潇,黄龙飞,等.2018b.2014年5月下旬江西省西部区域暴雨天气过程分析[J].气象与减灾研究,41(1):27–35. Zhou F, Xiao X, Huang L F, et al. 2018. Analysis on the regional torrential rain process in western Jiangxi during the last third of May 2014 [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,41(1):27–35 (in Chinese). doi:10.12013/qxyjzyj2018-004
- 朱星球,王咏青,许爱华,等.2016.东风波对江西强对流天气环境条件的影响分析[J].暴雨灾害,35(3):210–219. Zhu X Q, Wang Y Q, Xu A H, et al. 2016. Analysis of the effect of the easterly wave on the environmental condition of convection in Jiangxi Province [J]. Torrential Rain and Disasters,35(3):210–219 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.03.003
- Browning K A. 1985. Towards the more effective use of radar and satellite imagery in weather forecasting [M]. Meteorological Office Radar Research Laboratory.
- Chen Y, Luo Y L. 2018. Analysis of paths and sources of moisture for the south China rainfall during the presummer rainy season of 1979–2014 [J]. Journal of Meteorological Research,32(5):744–757. doi: 10.1007/s13351-018-8069-7
- Luo Y L, Wu M W, Ren F, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. Journal of Climate,29(24):8703–8719. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0057.1
- Luo Y L, Chen Y R X. 2015. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: An ensemble approach [J]. Journal of Geophysical Research,120(20):593–618. doi:10.1002/2015JD023584
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. 1979. Synoptic and meso- α -scale aspects of flash flood events [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,60(2):115–123. doi:10.1175/1520-0477-60.2.115
- Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al. 2022. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021 [J]. Meteorology Research,36(1):6–25. doi:10.1007/s13351-022-1166-7
- Zhuang X R, Min J Z, Zhang L, et al. 2020. Insights into convective-scale predictability in east China: error growth dynamics and associated impact on precipitation of warm-season convective events [J]. Advances in Atmospheric Sciences,37(8):893–911. doi:10.1007/s00376-020-9269-5