

陈红专, 2021. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象, 47(10): 1219-1232. Chen H Z, 2021. Climatic characteristics and weather system classification of extreme precipitation in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 47(10): 1219-1232 (in Chinese).

湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究^{*}

陈红专^{1,2}

1 湖南省怀化市气象局, 怀化 418000

2 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118

提 要: 基于湖南省 97 个国家站 1981—2018 年共 38 年的逐日降水资料、常规高空、地面观测资料、ERA-Interim 再分析资料和台风路径资料, 采用气候统计、天气学分析和分类合成方法, 分析了湖南省极端降水的气候特征, 并对影响系统进行了分型研究, 结果表明: 38 年间, 湖南省日极端降水阈值均值是 71.6 mm, 年均出现 130 站次极端降水日, 二者年际变化大; 在 1993 年有一个明显的突变, 1993 年前日极端降水阈值均值低 (65.7 mm)、极端降水日站次少 (99 次 $\cdot a^{-1}$); 1993 年后均值高 (74.7 mm)、极端降水日多 (146 次 $\cdot a^{-1}$)。日极端降水阈值和极端降水日的空间分布不均, 湘中及以北地区阈值高, 极端降水强度大, 出现频次低, 湘南地区阈值低, 极端降水强度小, 出现频次高。湖南省区域性极端降水过程主要发生在 5—8 月, 6 月最多, 按主要影响系统分为五类: 西南涡-暖式切变线型、冷槽切变线型、台风型、副热带高压边缘型和一致南风型。湖南极端降水的主要影响系统是高空槽、西南涡、切变线和低空急流, 如果西南涡未出西南地区或位置偏南, 湖南极端降水由西南涡和暖式切变线产生, 如果西南涡位置偏北, 或者武陵山脉东侧有新生涡发展加强, 则湖南极端降水由西南涡 (新生涡) 后侧冷式切变线产生。地形对极端降水的增幅作用明显, 尤其是对于湘东南台风极端降水过程。不同季节副热带高压对极端降水的落区和强度有不同影响。对于弱强迫背景下的暖区极端降水, 应加强高时空分辨率资料的应用, 分析其中小尺度触发机制。

关键词: 极端降水, 气候特征, 分型, 合成分析

中图分类号: P456, P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.10.005

Climatic Characteristics and Weather System Classification of Extreme Precipitation in Hunan Province

CHEN Hongzhuan^{1,2}

1 Huaihua Meteorological Office of Hunan Province, Huaihua 418000

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation in Hunan, Changsha 410118

Abstract: Based on the daily precipitation data at 97 national stations in Hunan Province from 1981 to 2018, conventional observation data, ERA-Interim data and typhoon path data, the climatic statistics method, meteorological analysis method and composite synthesis method are used to analyze the climatic characteristics of extreme precipitation in Hunan Province and their weather system types. The results show that during the past 38 years, the average threshold of the daily extreme precipitation in Hunan Province was 71.6 mm, and there were 130 extreme precipitation days per year. Both the values had large interannual variability, and there was a significant change in 1993. Before 1993, the average threshold of the daily extreme precipitation was low (65.7 mm), and there were only 99 extreme precipitation days per year; after 1993, the average threshold was high (74.7 mm), and there were 146 extreme precipitation days per year. The spatial distributions of daily extreme precipitation thresholds and extreme precipitation

^{*} 湖南省气象局预报员专项 (XQKJ19C004, XQKJ19C011) 共同资助

2020 年 7 月 21 日收稿; 2021 年 6 月 4 日收修定稿

第一作者: 陈红专, 主要从事短期天气预报及相关研究工作. E-mail: dktanqx@tom.com

days were uneven. In central Hunan and areas north to it, the thresholds of extreme precipitation were high, the intensity of extreme precipitation was strong, and the frequency of occurrence was low. But in the south of Hunan, the threshold was low, the intensity of extreme precipitation was weak and the frequency of occurrence was high. The regional extreme precipitation processes of Hunan mainly occur from May to August, especially in June. Five types for weather systems of extreme precipitation processes are summarized: the southwest vortex and warm shear line type, the cold trough and shear line type, the typhoon type, the subtropical high edge type, the consistent southerly wind type. The main influence systems of extreme precipitation in Hunan are upper trough, southwest vortex, shear line and low-level jet. If the southwest vortex does not move out of the southwest region of China or its location is to the south, the extreme precipitation in Hunan will be caused by the southwest vortex and warm shear line, and if the location of southwest vortex is to the north, or there is a new vortex developing and strengthening on the east side of Wuling Mountains, then the extreme precipitation in Hunan will be caused by the cold shear line behind the southwest vortex (new vortex). The topography has a significant effect on the increase of extreme precipitation, especially on the extreme precipitation process of typhoon in southeastern Hunan. In different seasons, the subtropical high has different effects on the area and intensity of extreme precipitation. For the extreme precipitation in the warm zone under the background of weak forcing, the application of high spatio-temporal resolution data should be strengthened to analyze the meso- and small-scale trigger mechanism.

Key words: extreme precipitation, climatic characteristic, weather system classification, composite analysis

引 言

近几十年来,在全球变暖的气候背景下,极端降水事件频发,极端降水的强度增强,极端降水量显著增加(Zhai et al, 2005; 邹用昌等, 2008),往往会导致重大的人员伤亡和财产损失,造成较大的社会影响(谌芸等, 2012; 伍志方等, 2018; 陈红专等, 2019),因此针对极端降水事件的研究也越来越多(Alexander et al, 2006; Choi et al, 2009; 杨金虎等, 2010; 田付友等, 2018)。

研究表明,我国极端降水的时空分布和变化趋势具有较强的地域差异(Fu et al, 2013),其控制和影响系统多有不同,再加上复杂的地质和地貌特征,使得极端降水气候特征显得极为复杂,也增加了我国区域极端降水研究的难度。气象学者们从引起极端降水的中小尺度系统的结构和演变(张家国等, 2013; 曾勇和杨莲梅, 2018; 赵娴婷等, 2020)、多尺度相互作用(苗爱梅等, 2014; 沈新勇等, 2018)、大气环流和特征物理量场的异常(黄荣辉等, 2003; 杨金虎等, 2010; 孙军等, 2012)、多源资料的应用(王洪等, 2015; 傅佩玲等, 2018; 李伶杰等, 2018)、地形的影响(Gao et al, 2009; 徐珺等, 2018)等多个角度对极端

降水进行了大量研究,其中基于天气学诊断分析方法对极端降水进行分型的研究也不少。极端降水过程一般均具有典型的天气形势,通过对极端降水过程影响系统的分型,有助于理解导致极端降水的天气尺度和中尺度机制,进而提高此类事件的预报准确率。陶诗言(1980)总结了我国持续大暴雨的多种环流型,指出大的形势稳定、水汽的输送和辐合及对流不稳定能量的释放和再生是我国持续大暴雨发生的三个基本条件。Maddox et al(1979)调查了发生在美国的 151 次暴洪事件及其时空特征,根据地面和高空形势将这些暴洪分成四种天气类型:天气尺度强迫型、锋面型、中高压型和西部型,该分型至今仍被美国天气预报部门广泛应用。Kahana et al(2002)将发生在以色列内盖夫沙漠的 52 次洪水过程按天气学类型分为四类,分别是红海低压槽类、地中海气旋类、热带暖流向亚热带急流延伸类以及 Sharav 气旋类,并总结了一组动力和热力学物理量来预测主要山洪的发生和位置。肖递祥等(2017)依据 500 hPa 环流形势,将四川盆地极端暴雨分为东高西低型和两高切变型两种形势,同时总结了不同环流类型和不同暴雨中心的极端暴雨概念模型。陈静静等(2016)统计了 2006—2014 年湖南 117 例强降雨天气过程,依据湖南省暴雨预报经验和方法,将

其分为低涡冷槽型、地面暖倒槽锋生型、副热带高压(以下简称副高)边缘型、台风型、梅雨锋切变型和华南准静止锋型六种类型,并以同期 500 hPa 高度场和 850 hPa 径向风为参数,采用 K 均值聚类法,经过迭代得到六类暴雨日的客观天气型。这些研究对业务预报有较好的指导作用。

在全球变暖背景下,湖南极端强降水事件的发生频次呈现增加的趋势(张剑明等,2012),湖南也是极端降水致灾较为严重的省份之一。由于极端降水影响系统的复杂性以及地域差异,系统性地总结本区域极端降水天气系统类型不仅可为准确预测该类事件提供科学依据,也对强天气预报预警业务十分必要。为此,本文在分析 1981—2018 年湖南极端降水气候特征的基础上,总结了湖南省区域性极端降水过程的天气类型,然后通过分类合成方法研究各类区域性极端降水过程的主要天气系统和热动力过程特征,希望研究结果可用于进一步发展和改进湖南的极端降水预报技术。

1 资料和方法

1.1 资 料

本文所用降水资料为湖南 97 个国家站 1981—2018 年共 38 年的逐日降水资料,时间段为 08—08 时(北京时,下同)。天气系统分型所用资料为常规高空探测、地面观测资料以及欧洲中期天气预报中心间隔 6 h 一次的全球分析资料 ERA-Interim(Dee et al, 2011),分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。台风路径资料采用中国气象局上海台风研究所的台风最优路径资料(Ying et al, 2014)。

1.2 方 法

单站日极端降水阈值的确定采用百分位法,具体方法是:将某个站某年的有效日降水量(≥ 0.1 mm)按从小到大的顺序排列,取第 99 个百分位的值作为该站该年的日极端降水阈值。第 99 百分位阈值的确定采用 Bonsal et al(2001)的方法:如果某个气象要素有 n 个值,将这 n 个值按升序排列 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$, 则某个值小于或等于 x_m 的概率 P 为:

$$P = \frac{m - 0.31}{n + 0.38}$$

式中: m 为 x_n 的序号,如果某个站某年有 100 个有效降水值,那么第 99 个百分位上的值为排序后的 x_{99} ($P=98.32\%$)和 x_{100} ($P=99.31\%$)的线性插值。根据上述方法计算得到各站 1981—2018 年的逐年阈值,38 年平均的阈值定义为该站的日极端降水阈值。最后统计 1981—2018 年各站的日降水量,如果某站某日日降水量大于等于该站历年平均的日极端降水阈值,则计该日为一个极端降水日。

区域性极端降水过程的定义采用戴泽军等(2015)的标准,即若某日湖南 97 个国家站中有 10%及以上站点(≥ 10 站)出现极端降水,即至少有 10 个站同时达到极端降水日标准,则计该日为一次区域性极端降水过程,持续两天或以上只计算一次。

区域性极端降水过程的天气系统分型采用综合分析的方法,从天气类型的角度进行分型,然后对同类型的过程进行合成分析。由于过程较多,如果采用传统的简单算术平均的合成方法,会导致资料平滑(Frank, 1977),难以发现影响系统的主要特征,为此,本文采用以强降水中心为坐标原点和研究中心的动态合成方法,其方法是:同类型的每个个例选取其最强降水中心为中心(坐标原点)的经纬度范围固定的区域,对该区域内的物理量进行合成。这种合成分析与简单的算术平均在物理意义上有显著不同,它减少了样本物理量平均时的相互抵消作用,强降水区与其环境系统的相对位置也基本保持原状,而且强降水中心也总是处于研究区域的中心。合成的时间点是极端降水发生前最临近的 08 时或 20 时的再分析场,即如果极端降水发生在白天,则采用当天 08 时的再分析资料,如果发生在晚上,则采用当天 20 时的。

2 极端降水的气候特征

2.1 日极端降水阈值的气候特征

从图 1 可看出,湖南省平均的日极端降水阈值,1991 年最小(57.7 mm),2017 年最大(85.4 mm),平均值为 71.6 mm,序列在 1993 年有一个明显的突变,1993 年以前阈值大多小于 70 mm(平均值为 65.7 mm),而 1993 年以后阈值大多大于 70 mm(平均值为 74.7 mm)。阈值的年际变化大,尤其是世纪之交的 1996—2006 年以及 2017—2018 年,其中 2017 年和 2018 年的阈值相差 20 mm。

从日极端降水阈值的空间分布看(图 2),湘中及以北地区阈值大都在 70 mm 以上,其中湘东北和湘西北阈值大于 80 mm,最大值为湘东北的临湘(95.8 mm),而湘南大多在 70 mm 以下,最小值为湘西南的城步(54.3 mm)。

2.2 极端降水日的气候特征

38 年间湖南省 97 个国家站共出现 4 954 站次极端降水日,平均每年为 130 站次,平均每站为 51 次,其中有 5 个站少于 40 次,湖北省的南县最少(36 次),8 个站出现 60 次以上的极端降水日,湖南省

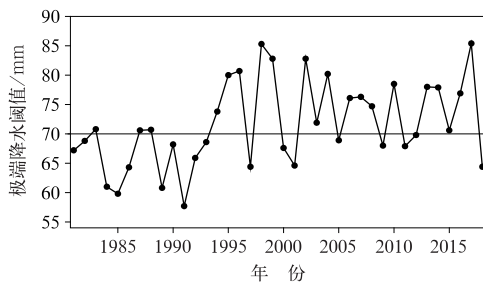


图 1 1981—2018 年湖南省日极端降水阈值的年际变化

Fig. 1 Annual variation of daily extreme precipitation thresholds in Hunan Province during 1981—2018

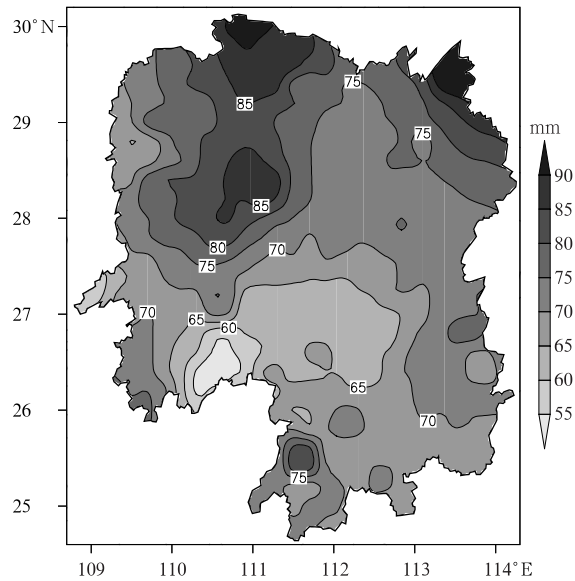


图 2 1981—2018 年湖南省日极端降水阈值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of daily extreme precipitation thresholds in Hunan Province during 1981—2018

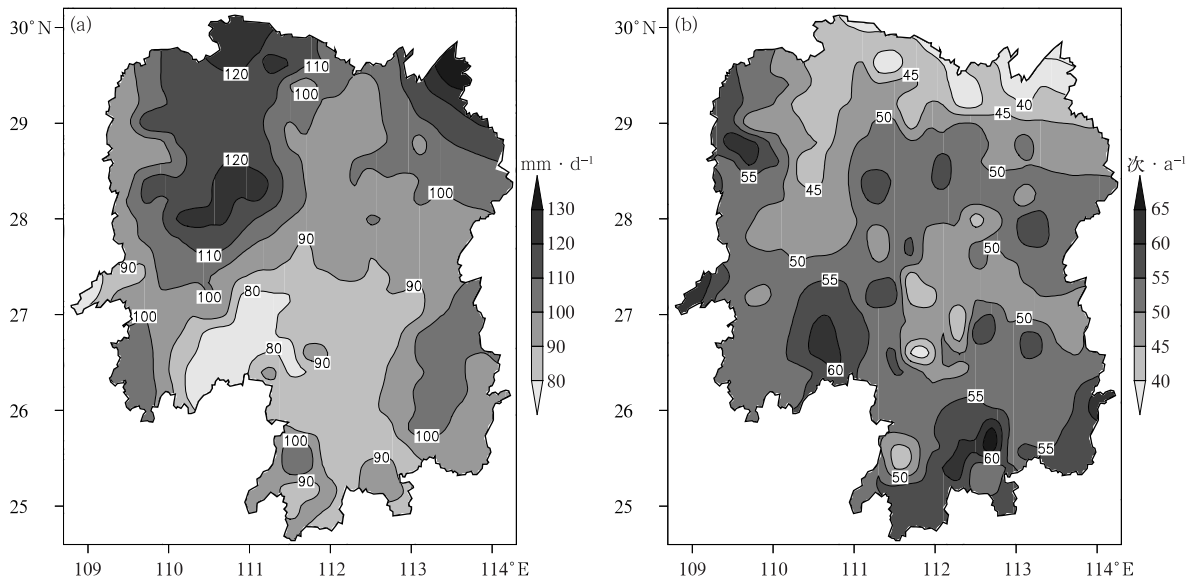


图 3 1981—2018 年湖南省极端降水日平均降水强度(a)和年均次数(b)的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of daily average rainfall intensity (a) and annual average frequency (b) on extreme precipitation in Hunan Province during 1981—2018

的桂东最多(66 次)。从极端降水日的平均降水强度的空间分布看(图 3a),降水强度的空间分布与日极端降水阈值的空间分布(图 2)类似,即湘中及以北地区大于湘南地区,尤其是湘东北和湘西北地区,最大值是湘东北的临湘(139.4 mm),最小值同样是

湘西南的城步(71.8 mm),极大、极小值相差较大。极端降水日次数的分布与强度的分布刚好相反,即湘南偏多,而湘北和湘中的衡邵盆地偏少(图 3b),这可能与各站日极端降水阈值的年际变化特点有关,湘北各站的阈值年际变化大,造成大于平均阈值标准的极端降水日数少,而湘南则刚好相反。

从图 4a 可看出,极端降水日站次的年际变化大,1991 年最少(64 次),2002 年最多(242 次),其年际变化趋势与阈值的年际变化趋势(图 1)类似,即序列在 1993 年有一个明显的突变,1993 年以前极端降水日出现次数少(平均为 99 次·a⁻¹),年际变化小,而 1993 年后出现次数多(平均为 146 次·a⁻¹),年际变化大。极端降水日平均降水强度的年际变化虽然也较大,但没有类似频次和阈值的突变特征(图 4b)。结合图 1 和图 4 说明,20 世纪 90 年代以来,随着全球气候变暖等多种因素的影响,极端的洪涝灾害极易发生,表现为降水强度大(日极端降水阈值大)、频次高(极端降水日站次多)、大旱与大涝相间(日极端降水阈值和极端降水日频次的年际变化大)。

从极端降水日的月际变化看(表 1),极端降水日在一年 12 个月均可出现,但各月出现的频次差别

较大,具有明显的月际变化特征。极端降水日主要出现在 3—10 月,尤其是 5—8 月出现次数多,其中 6 月最多,其次是 7 月,占比分别为 28.02% 和 23.11%,1 月和 12 月最少。

2.3 区域性极端降水过程的气候特征

38 年间,湖南一共出现了 91 次区域性极端降水过程,平均每年 2.4 次,有 10 年(1988、1990、1996、1998、1999、2000、2002、2004、2014、2017 年)出现 4 次或以上区域性过程,其中 1999 年和 2002 年各出现 5 次,仅 2 年(1989 年、1991 年)没有出现区域性极端降水过程。91 次过程中,有 15 次为持续性过程,最长持续天数为 4 d,为 1996 年 7 月 14—17 日。有 3 次过程同一天达到极端降水日标准的站点数超过 30 个站,约占湖南总站数的 1/3,其中 2010 年 6 月 19 日和 2017 年 6 月 30 日均有 33 个站点达到极端降水日标准。从区域性极端降水过程的月发生频次(表 2)可看出,区域性极端降水过程仅出现在 4—11 月,尤其是 5—8 月,其中 6 月最多,其次是 7 月,占比分别为 31.87% 和 23.08%,12 月至次年 3 月未发生过区域性极端降水过程。

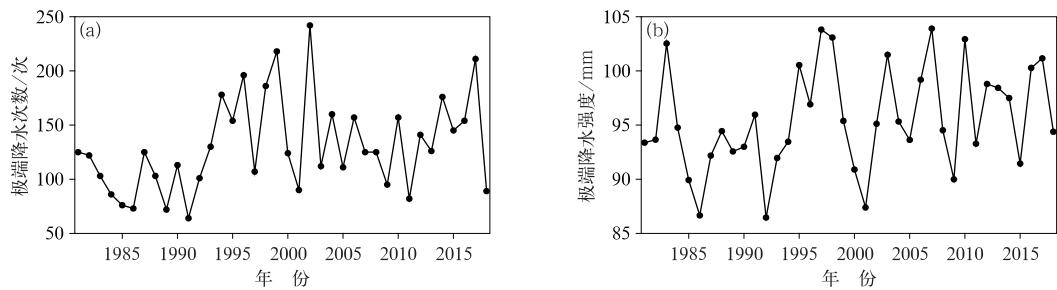


图 4 1981—2018 年湖南省极端降水日的频次(a)和强度(b)的年际变化
Fig. 4 Interannual variations of frequency (a) and intensity (b)
on extreme precipitation days in Hunan Province during 1981—2018

表 1 1981—2018 年湖南省极端降水日的逐月分布

Table 1 Monthly distribution of extreme precipitation days in Hunan Province during 1981—2018												
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
频次/次	3	28	75	253	820	1388	1145	714	294	135	91	8
占比/%	0.06	0.57	1.51	5.11	16.55	28.02	23.11	14.41	5.93	2.73	1.84	0.16

表 2 1981—2018 年湖南省区域性极端降水过程的逐月分布

Table 2 Monthly distribution of regional extreme precipitation processes in Hunan Province during 1981—2018								
月份	4	5	6	7	8	9	10	11
频次/次	3	15	29	21	12	4	3	4
占比/%	3.30	16.48	31.87	23.08	13.19	4.40	3.30	4.40

3 区域性极端降水过程天气类型

采用天气学诊断分析方法将 91 次过程归纳为西南涡-暖切变线型、冷槽切变线型、台风型、副高边缘型和一致南风型等五类,从表 3 可见,西南涡-暖切变线型和冷槽切变线型最多,分别占总次数的 47.2%和 28.6%,二者之和约占总次数的 3/4,是湖南两种主要的区域性极端降水天气类型,从平均降水强度、平均影响站次和日降水极值看,前三类明显强于后两类。下面采用以暴雨中心为坐标原点的动态合

成方法,利用 ERA-Interim 资料对每一类极端降水过程的高空、地面系统和降水区进行合成,主要从中低层和地面影响系统的角度讨论每一类区域性极端降水过程的主要天气系统和热动力过程特征。

3.1 西南涡-暖切变线型

西南涡-暖切变线型极端降水的主要影响系统是低层(850 hPa)的西南涡、暖式切变线以及地面暖低压倒槽。其天气系统特征如下:

500 hPa 在中高纬度为高空槽系统(图 5a),槽的经向度没有冷槽切变线型大,但槽前仍有较强正

表 3 五种区域性极端降水过程天气类型的主要特征
Table 3 Main characteristics of five types of regional extreme precipitation weather

要素	西南涡-暖切变线型	冷槽切变线型	台风型	副高边缘型	一致南风型
个例数/个	43	26	14	5	3
占比/%	47.2	28.6	15.4	5.5	3.3
平均降水强度/mm·d ⁻¹	103.4	99.1	106.9	103.1	92.3
平均影响站次/站	17.9	16.0	17.9	14.2	14.0
日降水极值/mm	259.2	275.9	256.6	200.5	123.4

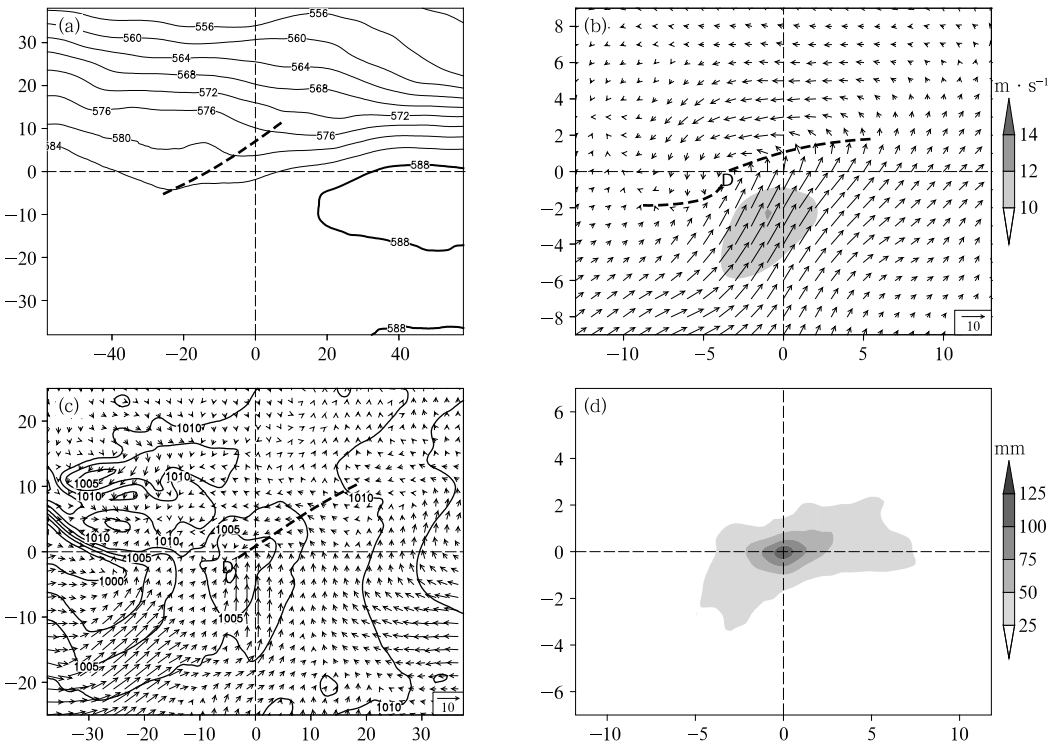


图 5 1981—2018 年湖南省西南涡-暖切变线型极端降水过程合成的天气形势
(a)500 hPa 高度场(单位:dagpm),(b)850 hPa 风场(矢量)和 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风速区(阴影),
(c)地面气压场(等值线,单位:hPa)和风场(矢量),(d)24 h 累计降雨量
(降雨中心位于坐标原点, x 、 y 坐标分别是距离降雨中心的经纬度数;图 5a、5b、5c 中粗虚线分别为高空槽、切变线和低压倒槽槽线)
Fig. 5 The combined weather situation of the southwest vortex and warm shear line type in Hunan Province during 1981–2018
(a) 500 hPa height field (unit: dagpm), (b) 850 hPa wind (vector) and the strong wind speed area with synthetic wind speed $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (shaded), (c) surface pressure field (isoline, unit: hPa) and wind field (vector), (d) the 24 h accumulated precipitation
(The precipitation center is located at the origin of the coordinate, and the x and y coordinates are the longitude and latitude from the center, the same below; bold dashed lines in Figs. 5a, 5b, 5c are trough, shear line and warm inverse trough, respectively)

涡度平流,如果在东北或华北地区存在冷涡系统,则表现为从冷涡往西南方向伸展的深厚高空槽系统。本型的副高相对较弱,位置偏东,湖南处在副高与高空槽之间的西南暖湿气流中。850 hPa 受西南涡及人字形切变线,尤其是暖式切变线影响(图 5b),西南涡是本型最常见的天气系统,仅 4 例无西南涡影响。其余个例中,有 12 例西南涡未移出西南地区就消亡(或者在极端降水时段未移出西南地区),其余 27 例按其移动路径可分为三类:东南移型 8 例(图 6a),西南涡经贵州东南部或湘西地区往东南行,强降雨一般位于湘西和湘中以南地区;先东南移再东(北)移型 11 例(图 6b),西南涡东南行到贵州东部或湖南西部后转向东或东北方向,经湖南中部地区,强降雨一般位于湘中一线;东(东北)移型 8 例(图 6c),西南涡经湘中以北地区往东(东北)方向移动,强降雨一般位于湘中以北。

地面形势是由西南地区往东北方向伸展的暖低压倒槽(图 5c),暖倒槽及其南侧高温高湿的环境为中小尺度扰动的产生提供了有利的热动力环境条件。强降雨区位于西南涡东南侧、暖式切变线南侧,雨带分布与暖式切变线的走向相同,有时强降雨带

上会有东西两个强中心,一个位于西南涡东南侧附近,另一个位于暖切变线南侧,低空急流出口区附近。如果在暖式切变线东北侧还有一条冷式切变线,则强降雨中心会偏向暖式切变线东侧与冷式切变线汇合处附近,因为该区域冷暖气流交汇最明显。降水强度为暴雨,极易出现大暴雨甚至更大量级的降雨(图 5d)。因此预报员在面对西南涡暴雨时,除了关注西南涡的消和移动路径外,还要关注西南涡与人字形切变线、低空急流等系统的配置关系。

3.2 冷槽切变线型

冷槽切变型极端降水的主要影响系统是中层(500 hPa)的高空槽和低层(850 hPa)的冷式切变线,其天气系统特征如下:

500 hPa 在中高纬度为深厚的高空槽系统(图 7a),槽前正涡度平流较强,大尺度的动力强迫有利于大范围地区维持较长时间的上升运动。副高大多已经登陆我国大陆或位于我国东南沿海一带,强大而稳定维持的副高导致中低纬系统移动缓慢或受阻,有利于强降雨的维持。低层受冷式切变线的影响,切变线南侧通常均伴有急流(图 7b)。本型有

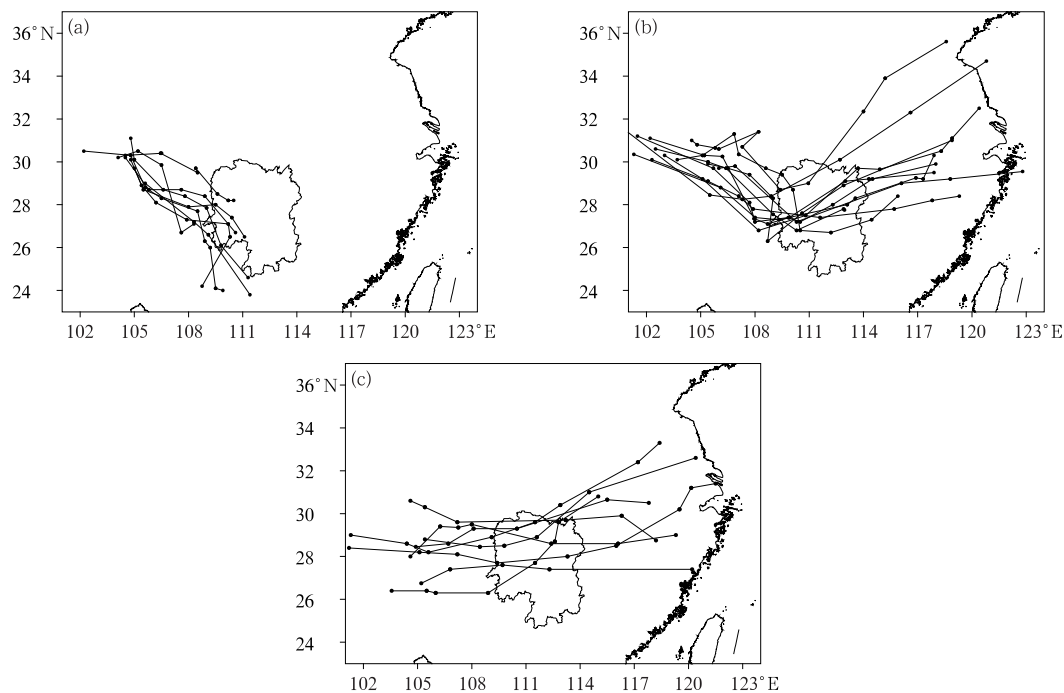


图 6 1981—2018 年湖南省西南涡的移动路径

(a) 东南移型, (b) 先东南移再东(东北)移型, (c) 东(东北)移型

Fig. 6 The moving track of southwest vortices in Hunan Province during 1981—2018

(a) southeast type, (b) first southeast then east or northeast type, (c) east or northeast type

17 例在冷式切变线东北侧伴有低涡系统,其中 13 例为西南涡,西南涡的位置偏北,一般位于湖北境内或擦过湘西北地区,另有 4 例为江汉平原和洞庭湖区新生涡。低涡的移动路径一般为东北方向(图 8),与西南涡-暖切变线型过程的西南涡路径相比要明显偏北(图 6)。低涡本身对湖南极端降水的

影响较弱或没有影响,主要是低涡在东移过程中其西南侧的冷式切变线影响湖南,造成极端降水的发生。

本型的地面形势可分为三类,第一类是地面辐合线型(图 7c),其特点是地面为东高西低形势,降水区以南低纬地区有较强的偏南气流,北侧南风风速较小或为弱的偏北气流,强降水区有较强的风速

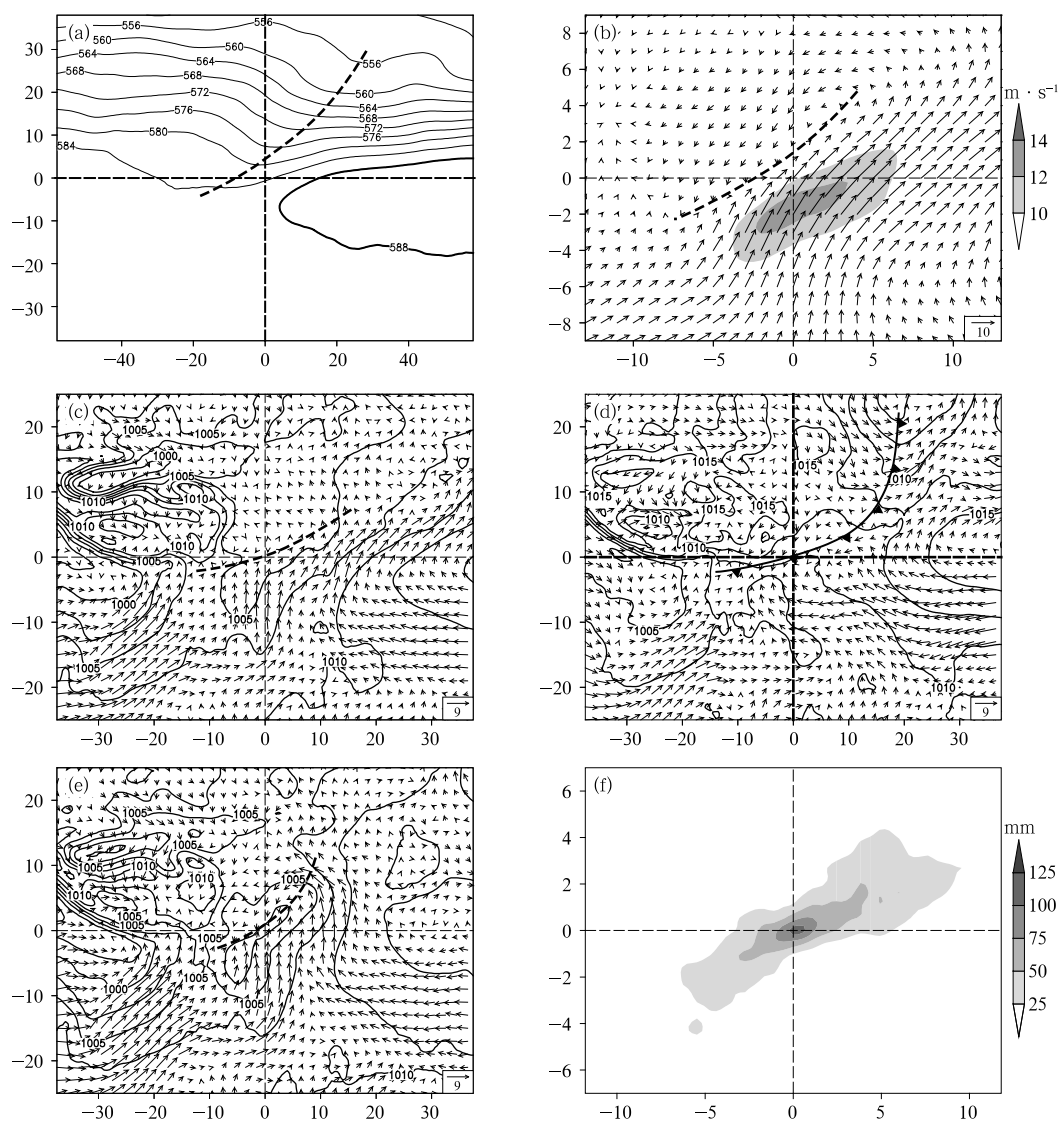


图 7 1981—2018 年湖南省冷槽切变线型极端降水过程合成的天气形势

(a) 500 hPa 高度场(等值线,单位: dagpm); (b) 850 hPa 风场(矢量)和 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风速区(阴影);
(c~e) 地面气压场(等值线,单位: hPa)和风场(矢量): (c) 地面辐合线型, (d) 冷锋型,
(e) 暖低压倒槽型; (f) 24 h 累计降雨量

(图 7a、7b、7c、7e 中粗虚线分别为高空槽、切变线、地面辐合线和低压倒槽)

Fig. 7 The combined weather situation of cold trough and shear line type in Hunan Province during 1981–2018

(a) 500 hPa height field (isoline, unit: dagpm);

(b) 850 hPa wind (vector) and strong wind speed area with synthetic wind speed $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

(shaded); (c~e) surface pressure field (isoline, unit: hPa) and wind field (vector),

of which: (c) type of surface convective line, (d) type of cold front, (e) type of warm

depression inverse trough; (f) the 24 h accumulated precipitation

(Bold lines in Figs. 7a, 7b, 7c, 7e are trough, shear line, surface convergence line and warm inverse trough, respectively)

(和风向)辐合。第二类是地面冷锋型(图 7d),其特点是我国东部地区地面为鞍形场结构特征,中高纬受东北冷涡控制,冷涡东移带动后侧冷空气南下至暴雨区北侧,与副高西侧暖湿气流汇合,冷暖气流交汇有利于冷锋锋生。第三类是地面暖低压倒槽型(图 7e),暖低压倒槽为极端降水提供高温高湿的不稳定层结,也为极端降水的发生提供触发条件。

此型的强降水区位于高空槽和冷式切变线东南侧,雨区分布与影响系统类似,呈东北—西南向带状分布,带状结构特征在 5 种类型中最明显,大雨区可连绵上千千米,强度上,该型极易出现大暴雨量级的降雨(图 7f)。

冷槽切变线型极端降水的天气系统较为明显,中低层和地面的动力强迫作用清晰,日常业务分析中应注意地面影响系统的不同而导致的降水类型的差异。另外武陵山东侧湘鄂交界区域是梅雨锋上中尺度气旋波新生或加强的重要源地之一,其形成原因与长江中游复杂地形下有利的动力和热力因素有关(张家国等,2013),因此应关注有利于该区域新生涡发展和加强的环境条件。

3.3 台风型

湖南虽然地处内陆,但登陆台风仍对湖南有较大的影响,例如 21 世纪初影响较大的 200604 号台风碧利斯和 200709 号台风圣帕,均造成了湖南严重的洪涝灾害(叶成志等,2009)。38 年间,造成湖南区域性极端降水过程的台风个例有 14 例(包括 2 个台风减弱后的低压环流与西风带系统相互作用的个例)。台风移动路径可分为西北行路径和北上路

径,从浙江和福建登陆的台风移动路径均为西北行路径,广东登陆的台风中 2 例为西北行路径,3 例为北上路径(图 9)。台风登陆后由于受多种因素的影响,其降水分布通常呈不对称结构特征(陈联寿等,2004;孙力等,2015),统计结果显示,这 14 例按其降水的分布特征,可分为西南象限型(10 例)、西北象限型(2 例)和东北象限型(2 例)。从浙江和福建登陆的 9 例均为西南象限型。

在台风降水分布的三种类型中,西北象限型和东北象限型样本较少(均只有 2 例),而西南象限型有 10 例,因此本型的合成分析仅针对西南象限型。其天气系统特征如下:

西南象限型台风主要出现在盛夏季节,正是一年中副高最强大的时段,因此中层 500 hPa 副高偏强,位置偏北,脊线多呈东西走向(图 10a),台风低压环流位于副高西南侧的偏东气流中,有利于台风的西北行。低层台风中心位于强降水区的东北方向,台风低压环流受两支强水汽输送通道影响,即与西南季风相联系的偏南风水汽通道和与台风低压环流相联系的偏北风水汽通道(图 10b,10c),强降水受台风低压环流及其西南侧的切变线影响,主要出现在台风低压环流的西南象限。从强降水发生的区域看,台风型区域性极端降水主要出现在湖南东部和南部,尤其是湘东南地区。与其他类型的雨区呈带状结构明显不同,台风型的降水区带状结构不明显,多呈块状分布,降水强度在 5 种类型中也最强,极易出现大暴雨以上量级的降水(图 10d),影响区域多为湖南东部和南部地区,尤其在湘东南地区,这除了与台风系统具有较好的热动力条件有关外,还与该地区有利的地形有关,湘东南地区南部为南岭

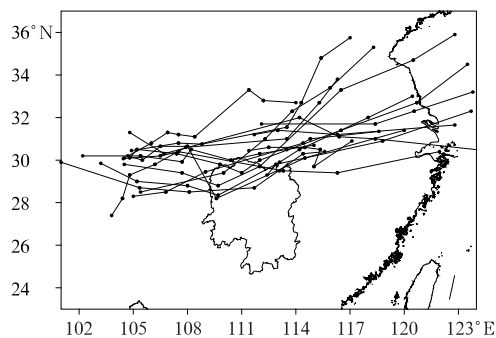


图 8 1981—2018 年湖南省冷槽切变线型西南涡的移动路径

Fig. 8 Tracks of southwest vortices of cold trough and shear line type in Hunan Province during 1981–2018

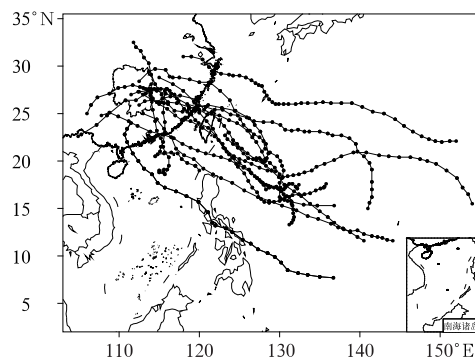


图 9 1981—2018 年湖南省台风型个例的路径
Fig. 9 Tracks of the typhoon type cases in Hunan Province during 1981–2018

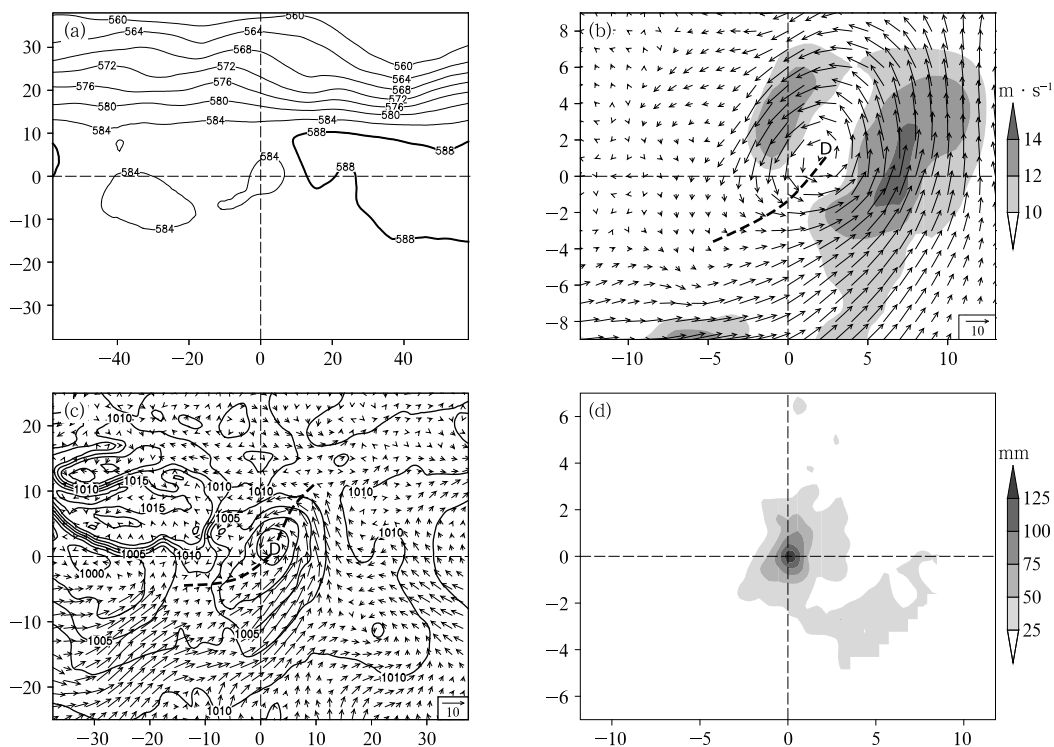


图 10 同图 5, 但为台风型

Fig. 10 Same as Fig. 5, but for the typhoon type

山脉, 东部为罗霄山脉, 西部有雪峰山脉, 地形对湘东南台风暴雨有明显的增幅作用(姚蓉等, 2007; Gao et al, 2009), 因此在实际业务预报中预报员除了要关注登陆台风的移动方向和风雨分布外, 也要关注湘东南的复杂地形对强降水的增幅作用。

3.4 副高边缘型

副高边缘型极端降水过程仅出现 5 次, 其主要影响系统是 500 hPa 稳定维持的副高、低层的切变线和急流。其天气系统特征如下:

500 hPa 副高已控制湖南的东南部地区, 副高脊线位于 23°N 附近, 副高较为稳定, 虽然在过程期间略有东退, 但仍控制我国东南部省份, 5 例中, 有 3 例副高西北侧为短波槽控制, 2 例由于在北方分别有东北冷涡和华北冷涡存在而在副高西北侧存在深厚高空槽, 因此合成图上高空槽较为明显(图 11a), 稳定维持的副高一方面可以阻挡西风带系统的南下, 有利于降水维持, 另一方面有利于其西侧从低层到地面暖湿急流的建立, 为降水区输送充足的水汽和不稳定能量。低层 850 hPa 暴雨区北侧受切变线影响, 其中 4 例低空急流建立(图 11b), 过程期间切变线随副高的缓慢减弱而南移。地面图上, 暴雨区

南侧均有较强的偏南风, 暴雨区有明显的风速辐合(图 11c)。雨区呈东北—西南向分布在副高北界附近, 以暴雨为主, 局地大暴雨(图 11d)。本型与冷槽切变线型的影响系统有些类似, 主要区别是强降水落区与副高的位置关系以及发生的季节不同。副高边缘型的强降水大都出现在盛夏季节, 雨带位于副高北界不稳定层结区, 雨带的分布和移动与副高密切相关, 因此该型的预报除了要关注上游高空槽以及低层切变线的位置关系, 更要关注副高的移动和强度变化。

3.5 一致南风型

38 年间, 一致南风型极端降水过程仅出现 3 次, 其主要影响系统是从地面到高空上下一致的西南气流。其天气系统特征如下:

强降水区从地面至高空均受上下一致的偏南气流控制, 500 hPa 处在高空槽前强西南气流中(图 12a), 高空槽移动缓慢, 副高稳定少动。低层 850 hPa 虽然也有切变线, 但切变线离强降水区较远, 强降水区受较强西南气流控制, 暴雨区北侧有较强的西南气流风速辐合, 强降水的产生与西南气流的脉动有关(图 12b), 地面形势虽各不相同, 但共同

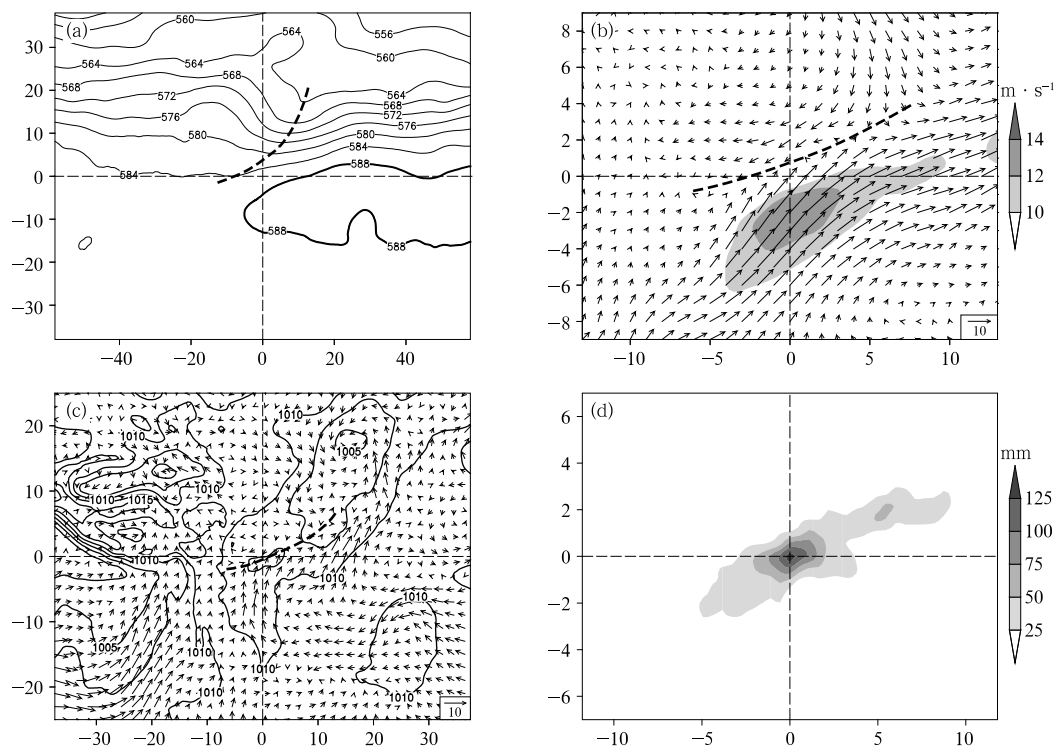


图 11 同图 5, 但为副高边缘型

Fig. 11 Same as Fig. 5, but for the subtropical high edge type

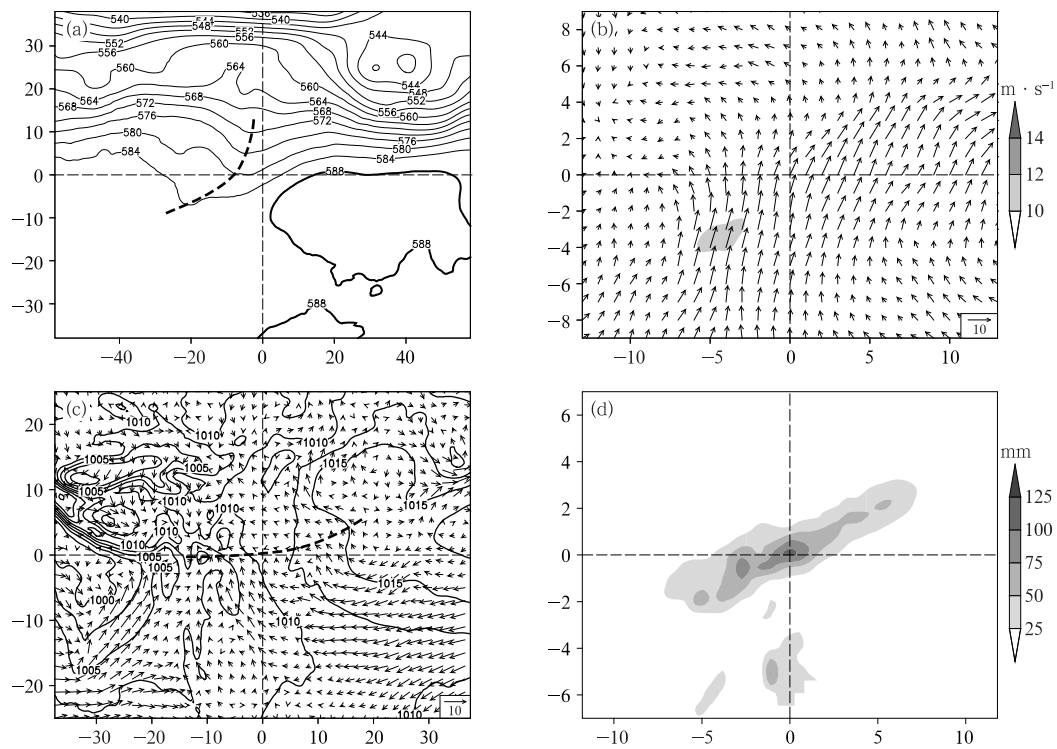


图 12 同图 5, 但为一致南风型

Fig. 12 Same as Fig. 5, but for the consistent southerly wind type

的特点是地面均为偏南风控制,高温高湿的不稳定环境条件有利于强对流的发生,强降水区有较强的风速辐合(图12c)。强降水位于地面辐合线附近,强度一般为大到暴雨,局地可达到大暴雨(图12d)。

一致南风型的个例较少,但预报难度较大,虽然中层处在高空槽前,有一定的大尺度强迫,但低层没有明显的切变线影响或切变线远离暴雨区,低层动力条件不足,触发条件多为西南气(急)流的脉动导致的风速辐合或是边界层辐合线。对这种弱强迫背景下的暖区极端降水过程,数值天气预报模式的可预报性明显不足,因此应当在临近预报中加强高时空分辨率区域自动站资料的应用,通过加密区域自动站资料判断地面辐合线的位置,结合卫星和多普勒雷达资料提高短时临近预报准确率,及时发布预警信号。

4 结论与讨论

本文在分析了1981—2018年湖南极端降水气候特征的基础上,对湖南省区域性极端降水过程进行天气系统分型,然后采用分类合成方法研究了各类区域性极端降水过程的主要天气系统和热动力过程特征,得到以下结论:

(1)38年间,湖南省日极端降水阈值均值是71.6 mm,年均出现130站次极端降水日,二者年际变化大,在1993年有一个明显的突变,即1993年前日极端降水阈值均值低(65.7 mm)、极端降水日站次少(平均99次 $\cdot a^{-1}$),1993年后阈值均值高(74.7 mm)、极端降水日多(平均146次 $\cdot a^{-1}$)。日极端降水阈值和极端降水日的空间分布不均,湘中及以北地区阈值高,极端降水强度大,出现频次低,湘南地区阈值低,极端降水强度小,出现频次高。

(2)38年间,湖南共发生91次区域性极端降水过程,主要发生在5—8月,尤其是6月和7月,根据主要影响系统分为五种天气型:西南涡-暖式切变线型、冷槽切变线型、台风型、副高边缘型和一致南风型,其中前两种是湖南最主要的极端降水天气型。

(3)极端降水是由各影响系统相互作用的结果,其中高空槽、西南涡、切变线和低空急流是湖南极端降水最主要的影响系统。当西南涡未出西南地区或位置偏南,湖南极端降水由西南涡和暖式切变线产生,如果西南涡位置偏北,或者武陵山东侧有新生涡发展和加强,则湖南极端降水由西南涡(新生涡)后侧

冷式切变线产生。地形对极端降水的增幅作用明显,尤其是对于湘东南台风极端降水过程。不同的季节,副高对极端降水的落区和强度有不同的影响。弱强迫背景下的暖区极端降水预报难度大,应加强高时空分辨率的区域自动站资料、卫星和多普勒雷达资料的应用。

天气系统分型研究有助于预报员快速识别极端降水的形势及配置关系,判断极端降水发生的可能性,对于极端降水的预报是必不可少的。但分型是基于天气尺度系统的,而极端降水的直接制造者往往是中小尺度系统,因此在业务预报中,预报员应该在大尺度天气分型的基础上,分析中小尺度系统的环境条件、结构特征及其生消演变过程,同时参考数值预报(尤其是集合预报少数成员的极端预报)以及综合观测资料,对极端降水的可能落区、强度和起止时间做出精确预报,同时在临近阶段及时发布预警信号。

参考文献

- 陈红专,叶成志,陈静静,等,2019. 2017年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J]. 气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al, 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017[J]. Meteor Mon, 45(9):1213-1226 (in Chinese).
- 陈静静,叶成志,吴贤云,2016. 湖南汛期暴雨天气过程环流客观分型技术研究[J]. 暴雨灾害,35(2):119-125. Chen J J, Ye C Z, Wu X Y, 2016. Objectively classified patterns of atmospheric circulation for rainstorm events in flood season in Hunan[J]. Torr Rain Dis, 35(2):119-125 (in Chinese).
- 陈联寿,罗哲贤,李英,2004. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报,62(5):541-549. Chen L S, Luo Z X, Li Y, 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteor Sin, 62(5):541-549 (in Chinese).
- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266 (in Chinese).
- 戴泽军,刘志雄,李易芝,等,2015. 近54 a湖南区域暴雨的时空分布特征[J]. 暴雨灾害,34(1):41-46. Dai Z J, Liu Z X, Li Y Z, et al, 2015. Climatic characteristics of regional heavy rain over Hunan during the last 54 years[J]. Torr Rain Dis, 34(1):41-46 (in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J]. 气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics,

- initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):500-510(in Chinese).
- 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等, 2003. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J]. 大气科学, 27(4):770-787. Huang R H, Chen J L, Zhou L T, et al, 2003. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system[J]. Chin J Atmos Sci, 27(4):770-787(in Chinese).
- 李伶杰, 胡庆芳, 黄勇, 等, 2018. 近实时卫星降水数据对南京“20170610”极端性强降水过程的监测分析[J]. 高原气象, 37(3):806-814. Li L J, Hu Q F, Huang Y, et al, 2018. Monitoring and analysis of the extreme heavy rainfall process on June 10, 2017 in Nanjing using five near real time satellite rainfall estimations[J]. Plateau Meteor, 37(3):806-814(in Chinese).
- 苗爱梅, 郝振荣, 贾利冬, 等, 2014. “0702”山西大暴雨过程的多尺度特征[J]. 高原气象, 33(3):786-800. Miao A M, Hao Z R, Jia L D, et al, 2014. The multi-scale features of “0702” heavy rainstorm process[J]. Plateau Meteor, 33(3):786-800(in Chinese).
- 沈新勇, 沙沙, 刘靓珂, 等, 2018. 大气中多尺度相互作用的研究进展[J]. 暴雨灾害, 37(3):197-203. Shen X Y, Sha S, Liu L K, et al, 2018. Research progress on atmospheric multiscale interaction[J]. Torr Rain Dis, 37(3):197-203(in Chinese).
- 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteor Mon, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 孙力, 董伟, 药明, 等, 2015. 1215 号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析[J]. 气象学报, 73(1):36-49. Sun L, Dong W, Yao M, et al, 2015. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of Typhoon Bolaven (2012) [J]. Acta Meteor Sin, 73(1):36-49(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社. Tao S Y, 1980. The Torrential Rain in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017 年 5 月 7 日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象, 44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):469-484(in Chinese).
- 王洪, 王东海, 万齐林, 2015. 多普勒雷达资料同化在“7·21”北京特大暴雨个例中的应用[J]. 气象学报, 73(4):679-696. Wang H, Wang D H, Wan Q L, 2015. Application of assimilating doppler weather radar data in the “7·21” Beijing excessive storm[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):679-696(in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等, 2018. 2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 肖递祥, 杨康权, 俞小鼎, 等, 2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象, 43(10):1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al, 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 43(10):1165-1175(in Chinese).
- 徐珺, 毕宝贵, 湛芸, 等, 2018. “5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 76(4):511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):511-524(in Chinese).
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等, 2010. 太平洋 SSTA 同中国东部夏季极端降水事件变化关系的研究[J]. 海洋学报, 32(1):23-33. Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al, 2010. Relation research on between SSTA of Pacific and extreme precipitation events in the eastern China[J]. Acta Oceanol Sin, 32(1):23-33(in Chinese).
- 姚蓉, 黎祖贤, 叶成志, 等, 2007. 强热带风暴碧利斯特大暴雨山洪成因分析[J]. 气象, 33(8):40-46. Yao R, Li Z X, Ye C Z, et al, 2007. Causality analysis of super rainstorm and mountain torrents by Strong Tropical Storm “Bilis”[J]. Meteor Mon, 33(8):40-46(in Chinese).
- 叶成志, 李昉, 黎祖贤, 2009. 两次严重影响湖南的登陆台风水汽场特征数值模拟[J]. 高原气象, 28(1):98-107. Ye C Z, Li Y Y, Li Z X, 2009. Numerical study on the water vapor transports of the two landfalling cyclones affecting Hunan Province[J]. Plateau Meteor, 28(1):98-107(in Chinese).
- 曾勇, 杨莲梅, 2018. 新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析[J]. 高原气象, 37(5):1220-1232. Zeng Y, Yang L M, 2018. Analysis on the causes of an extreme rainfall event in the west of Xinjiang [J]. Plateau Meteor, 37(5):1220-1232(in Chinese).
- 张家国, 黄小彦, 周金莲, 等, 2013. 一次梅雨锋上中尺度气旋波引发的特大暴雨过程分析[J]. 气象学报, 71(2):228-238. Zhang J G, Huang X Y, Zhou J L, et al, 2013. Analysis of an excessive rainstorm event initiated by a mesoscale cyclonic wave along the Mei-yu front[J]. Acta Meteor Sin, 71(2):228-238(in Chinese).
- 张剑明, 廖玉芳, 段丽洁, 等, 2012. 湖南近 50 年极端连续降水的气候变化趋势[J]. 地理研究, 31(6):1004-1015. Zhang J M, Liao Y F, Duan L J, et al, 2012. Climate variations of extreme continuous rainstorms in Hunan during 1960-2009[J]. Geogr Res, 31(6):1004-1015(in Chinese).
- 赵娟婷, 王晓芳, 王珏, 等, 2020. 2016 年 7 月 18—20 日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象, 46(4):490-502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al, 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016[J]. Meteor Mon, 46(4):490-502(in Chinese).
- 邹用昌, 杨修群, 潘志祥, 等, 2008. CO₂ 倍增对我国东部极端降水的影响[J]. 气候变化研究进展, 4(2):84-89. Zou Y C, Yang X Q, Pan Z X, et al, 2008. Effect of CO₂ doubling on extreme precipitation in eastern China[J]. Adv Climate Change Res, 4(2):84-89

- (in Chinese).
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al, 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *J Geophys Res Atmos*, 111(D5): D05109.
- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al, 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada[J]. *J Climate*, 14(9): 1959-1976.
- Choi G, Collins D, Ren G Y, et al, 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network Region, 1955-2007[J]. *Int J Climatol*, 29(13): 1906-1925.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(656): 553-597.
- Frank W M, 1977. The Structure and energetics of the tropical cyclone I: storm structure[J]. *Mon Wea Rev*, 105(9): 1119-1135.
- Fu G B, Yu J J, Yu X B, et al, 2013. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961-2009[J]. *J Hydrol*, 487: 48-59.
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al, 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe Tropical Storm Bilis (2006) after its landfall[J]. *Mon Wea Rev*, 137(6): 1881-1897.
- Kahana R, Ziv B, Enzel Y, et al, 2002. Synoptic climatology of major floods in the Negev Desert, Israel[J]. *Int J Climatol*, 22(7): 867-882.
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R, 1979. Synoptic and meso- α scale aspects of flash flood events[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 60(2): 115-123.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(2): 287-301.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *J Climate*, 18(7): 1096-1108.