

川渝地区夏季极端降水日变化特征分析

董新宁¹, 吴遥¹, 黄安宁², 唐红玉¹, 周杰¹

(1.重庆市气候中心, 重庆 401147; 2.南京大学大气科学学院, 南京 201109)

摘要 利用川渝地区 1991-2012 年夏季逐小时降水资料, 分析该地区总降水、极端降水时空分布特征, 特别是极端降水的日变化特征。结果表明, 川渝地区受西高东低的地形影响, 降水量总量 (precipitation amounts 简称 PA) 也呈西少东多分布, 具体是川西北高原少、川西南山地及东部盆地多, 盆周山区多、盆中丘陵区少; 降水频率 (precipitation frequency, 简称 PF) 则呈西高东低的相反分布, 高原地区 PF 较高; 降水强度 (precipitation intensity, 简称 PI) 的分布与 PA 较为一致, 自西向东逐渐增强。极端降水的 PA、PF、PI 空间分布特征与总降水的空间分布特征相似。东部的四川盆地乐山、雅安地区和达州、广元地区, 以及西南山地区的西昌、攀枝花地区的 PA 大主要是由于 PI 大。西昌地区北方小部分西南山地区的 PA 大主要是由于 PF 大。川西高原区 PA 小是因为 PI 小。PA 日峰值自西向东递增, PF 日峰值呈相反变化趋势, 自西向东递减。两者几乎全部都出现在夜间, “夜雨”特征显著。海拔较高的地区日峰值大多出现在前半夜, 而海拔较低的地区大多出现在后半夜, 自西向东日峰值出现时间逐渐推迟, 因此川渝地区的降水系统可能存在自西向东传播的特征。聚类得到四类区域站点的典型形态降水日变化曲线分析表明, 一区主要为川西高原地区, 二区主要为高原向盆地过渡的南部山区, 三区为盆地, 四区为盆地向东部过渡的丘陵地区, PA、PF 和 PI 的日变化曲线均有“一峰一谷”的特征, 区域一到四的 PA 峰值在午夜到凌晨, 谷值在午后到傍晚, 且自西向东逐渐推迟, PF 峰谷值时间均与 PA 峰谷值接近, PI 日变化波动较 PA 和 PF 的曲线大。位于高海拔地区的第一区 PA 小, 主要是其 PI 小, 高原向盆地过渡的南部山区的 PA 较大主要是 PF 较大, 盆地及其向东部过渡的丘陵地区的 PA 的主要贡献是 PI 大。极端降水日峰值及其出现时间的分布特征都与总降水相似。川渝地区夏季小时极端降水的阈值西低东高, 自西向东逐渐增大, 极端降水量占总降水量的比重自西向东呈增大趋势, 极端降水量对川渝地区东部总降水量贡献大, 对西部贡献较少。

关键词 川渝 夏季 极端降水 日变化

文章编号

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21032

Analysis of Diurnal Variation Characteristics of Summer Extreme

Precipitation in Sichuan and Chongqing

Dong Xinling¹, Wu Yao¹, Huang Anning², Tang Hongyu¹

(1. Chongqing Climate Center, Chongqing, 401147, China;

2. School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing, 201109, China)

Abstract Hourly precipitation data in the summer of 1991-2012 in Sichuan and Chongqing were used to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of total precipitation and

收稿日期 2020-08-20, 网络预出版日期

作者简介 董新宁 (1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事气候资料分析、气候诊断预测方面的研究. E-mail: 46589334@qq.com

资助项目 中国气象局创新发展专项 CXFZ2021Z033、CXFZ2021J019、CXFZ2021Z011, 重庆市气象局开放式研究基金 KFJJ-201606, 国家自然科学基金项目 41875111, 重庆市自然科学基金项目 cstc2021jcyj-msxmX0913, 重庆短期气候数值预测业务平台建设

extreme precipitation, especially the diurnal variation characteristics of extreme precipitation. The results show that the PA in Sichuan and Chongqing is mostly distributed like less in the west and more in the east for the influence of the terrain with higher west and lower east. Specifically, there are more precipitation in the eastern Sichuan basin and mountains of southwest of Sichuan, less in plateau of the northwest while more in the mountains around the Sichuan basin and less in the Basin. The PF was higher in the west and lower in the east inversely, the higher PF in the plateau. The distribution of PI is likely with that of PA which increases gradually from west to east. The spatial distribution characteristics of PA, PF and PI of extreme precipitation are similar to those of total precipitation. The greater precipitation in the eastern Sichuan basin such as Leshan, Ya'an, Dazhou and Guangyuan and in the mountains of southwest of Sichuan such as Xichang and Panzhihua are mainly due to the greater PI. The larger precipitation in a small part of the southwest mountain in the north of Xichang is mainly due to the higher PF. The less precipitation in the western plateau of Sichuan is due to the lower PI. The daily peak of PA increased from west to east, while the daily peak of PF showed an opposite trend, decreasing from west to east. Almost all of them occur at night, and the "night rain" feature is very prominent. Most of the daily peaks in the higher altitude areas occur in the early midnight while lower altitude areas in the later midnight. The time of the daily peaks in the areas from west to east delays gradually which indicated the precipitation system spreading from west to east in Sichuan and Chongqing. Four regions are gotten by clustering of the typical form of precipitation area site daily change curve analysis, the first region is plateau, the second is southern mountains for plateau transition to a basin, the third one is the basin and the forth one is the transition area from basin to eastern hilly, the diurnal variation of the PA, PF and PI curve has the same characteristics as "one peak and one valley", The peak values of PA from region one to four are from midnight to early morning, and the valley ones are from afternoon to evening which gradually delays from west to east. The peak and valley time of PF is close to PA's, and the diurnal fluctuation of PI is larger than PA and PF. The small PA of the first region mainly due to its weaker PI. The PA of the second region is high mainly because of its higher PF. The more PA of the third and fourth regions is mainly due to their stronger PI. The distribution characteristics of daily peak of extreme precipitation and its occurrence time are similar to the total precipitation. The threshold value of hourly extreme precipitation in summer in Sichuan and Chongqing was low in the west and high in the east, and gradually increased from west to east. The proportion of extreme precipitation to total precipitation was increasing from west to east. The extreme precipitation contributed more to the total precipitation in the eastern part of Sichuan and Chongqing, but less to the western part.

Keywords: Sichuan and Chongqing, summer, extreme precipitation, diurnal variation

1.引言

川渝地区位于青藏高原与我国东部平原的过渡带,影响该地区夏季降水的天气系统错综复杂,受到热带海洋和内陆环流系统的共同影响,影响因素主要包括太阳辐射加热、低空急流、地形热力效应(Yuan et al., 2014)、地形抬升阻塞效应(Xu et al., 2009; Chen et al., 2014a)以及中尺度对流系统(MCSs)(刘德等, 2012; 周秋雪等, 2015)等方面。该地区也是中国降水局

部区域差异最大、变化最复杂、南北气候系统交汇最多的地方之一(Fu et al., 2014; 谌贵珣和何光碧, 2008; 徐裕华, 1991; 张琪等, 2014; 晏红明, 2021)。因受到复杂地形、东亚季风等多种因素的共同影响, 川渝地区夏季暴雨频发(Zhai et al., 2005; 胡豪然等, 2009; 陈海山等, 2009; 李强等, 2020), 错综复杂的影响因素给川渝地区极端强降水预测的准确性带来了严峻的挑战, 对强降水个例的特征分析和数值模拟(汤欢等, 2020; 吴志鹏等, 2021; 周玉淑等, 2019; 蒋璐君等, 2015; 王成鑫等, 2013; 李琴等, 2014; 赵平等, 1991; 陈贵川等, 2018; 何光碧, 2012)、气候模式结果分析(张武龙, 2015; Qu et al., 2013; Chen, 2013; 李振朝等, 2013)和强降水成因(何光碧等, 2005; 赵思雄等, 2007; 康岚等, 2008; 王中等, 2008; 陈贵川等, 2013)是前期研究较多的方面。

川渝地区夏季极端强降水给人们的生产生活造成了严重的影响(袁文德等, 2014; 张琪等, 2014; 罗玉等, 2015), 由于不同时间尺度的极端降水有着不同的水文效应, 持续多天的极端降水则会引发大规模洪水如 1998 年长江洪水灾害, 而短时强降水常常会引发山体滑坡、泥石流、洪水、城市内涝等灾害(Zhang et al., 2012)。已有的研究表明, 使用逐小时的降水资料有助于了解降水的精细化时空分布(Miao et al., 2011; Zhong et al., 2015), 夏季川渝地区极端降水具有明显的日变化特征(唐红玉等, 2011; Zhang and Zhai, 2011; Li et al., 2013; 李超等, 2015)且表现出显著的区域性差别; 夏季西南大部地区总降水时数、极端强降水时数均有减少趋势, 平均雨强和极端强降水雨强则有增大趋势(张焕等, 2011); 通过分析重庆地区小时降水, 发现其年均降水量总体呈西低东高分布, 大值中心位于重庆东北和东南部, 且存在一定的季节性差异, 特别是夏季, 西部降水明显增强, 总降水呈两高东西高、中部低的分布(方德贤等, 2020)。四川盆地由西南低涡暴雨造成的短时强降水主要开始于夜间, 峰值出现在凌晨 4 点, 降水持续时间大多在 10h 以上, 且具有空间不对称分布特征(李强等, 2020)。因而, 揭示川渝地区极端降水日变化的时空演变特征及其形成机制并分析极端降水的发生发展过程, 有助于为气象灾害预报系统的发展并进一步提高极端降水的预测水平提供科学依据。

大量研究表明川渝地区夏季出现“夜雨”的频率非常高(Bao et al., 2011; 唐红玉等 2011), 被称为“巴山夜雨”, 它的形成与地形热力强迫有着密切关系(卢萍等, 2008): 川西地区特殊地形引起的大气层结不稳定对川西夜雨的形成和发展有重要影响, 另外, 河谷盆地中形成云后, 云顶辐射冷却, 下沉的冷气又增强了河谷上升气流, 因而地形性夜雨较多(Reiter and Tang, 1984)。在一定的环流形势下, 地形常常会触发局地强降水, 地形暴雨的发生往往与地形高度和坡度、大气稳定度和湿度、水汽输送等方面关系密切(Lin, 1993)。另外, 地形除了会影

响降水的发展过程 (Li et al., 2013), 一些与地形有关的天气系统如锋面、切变线、西南涡等过境也会带来强降水(Tao and Ding, 1981)。

以前, 人们大多采用逐日降水资料集中研究极端降水的时空分布特征和长期变化趋势(Su et al., 2005; 袁文德等, 2014; 周长艳等, 2006; 韩林君和白爱娟, 2019), 而较少关注极端降水自身的发生发展过程, 由于降水系统在时间和空间上的高度不均一性使得逐日降水资料的分析结果往往高估了持续时间较长的低雨强而低估了短历时的强降水的雨强(Li et al., 2013)。考虑到降水强度是极端降水事件选取的重要参考因子, 因而采用逐时降水可以更好地反映实际降水强度, 减小取样误差, 同时保留每次降水过程的更多细节(Sen, 2009; Yu et al., 2010)。近年来, 随着气象观测网络的快速发展, 高时空分辨率资料日渐丰富, 使研究人员能够更好地分析极端降水细节特征: 如极端降水的持续时间、日变化特征以及发展过程、城市化影响等(Yu et al., 2010; Li et al., 2013; Zhang and Zhai, 2011; 杨萍等, 2017)。目前对极端降水特别是短时极端降水的预测水平还非常有限(任国玉等, 2010), 天气和气候模式在川渝地区对极端降水模拟还存在较大误差, 而汛期降水量的多少往往取决于极端降水事件发生频次的多寡(张天宇等, 2009; 张天宇等, 2011; 陈晓燕等, 2010), 为进一步提高对极端降水的预测能力, 有必要借助高质量的观测资料以及数值模拟来深入研究川渝地区极端降水的日变化特征及其影响机制, 揭示其普遍规律有助于更好地预报极端降水事件提供关键科学支撑。本文利用川渝逐小时降水资料, 重点开展以下几个问题的研究: 川渝地区夏季极端降水日变化的区域性和季节性差异怎样? 其与该区域独特的地形特征具有怎样的联系? 内在的物理机制如何? 不同地形条件下极端降水的传播机制又怎样? 这些问题的研究有助于提高对川渝地区夏季极端降水日变化规律的认识, 对理解复杂地形和局地环流等对极端降水发生和发展的作用机制等方面也有重要的借鉴作用, 同时为进一步改进数值模式并提高其对川渝地区夏季极端降水的预测能力提供必要的科学依据。

2. 资料与方法

2.1 资料

本文使用的降水数据为国家气象信息中心融合经过质量控制的全国30000多个自动观测站的观测结果和CMORPH卫星反演降水产品的降水资料, 生成的一套中国区域1小时、0.1°空间分辨率的降水融合产品, 所取范围为川渝地区1991-2012年夏季(6-8月)195个自动站的降水资料。该融合产品的卫星反演降水产品用的是美国海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)开发的实时卫星反演降水产品。采用概率密度匹配法

(probability density function, PDF) 和最优插值 (optimal interpolation, OI) 相结合的两步融合方案 (宇婧婧等, 2013; 潘旻等, 2012), 生成全国自动站和CMORPH产品的降水量融合产品 (沈艳等, 2013)。经过PDF-OI两步融合的数据通过个例检验证明该方案可稳定有效地引入地面观测信息从而显著提高卫星反演降水的精度, 与融合前卫星降水相比, 平均偏差、相对误差和均方根误差均大幅减少, 并且能很好地捕捉小时降水在强降水事件中的不同特征, 在降水量值和降水空间分布上的刻画更为合理。在站点分布越密集的地区, 融合产品的值与地面格点分析值越接近, 在站点稀疏地区, 融合产品的值与卫星反演降水更接近, 充分发挥了地面观测与卫星反演降水各自的优点, 有效地解决了复杂地形条件下地面观测数据稀少的问题 (Shen et al., 2014)。

2.2 方法

(1) 极端降水阈值定义

前人的研究依据不同的研究对象对极端降水阈值做出了不同的定义。较为简单的定义方法是用固定的极端降水阈值进行划分, 例如姚莉等 (姚莉, 2009) 基于中国逐小时降水资料以8mm/h为标准划分两个级别的雨强进行研究; 陈炯等 (陈炯, 2013) 则分析了10、20、30、40、50mm/h五个级别短时强降水的时空分布。然而, 固定降水阈值的定义法在研究区域范围较大时会使得区域间的比较变得无意义, 比如在较为干旱的地区可以被定义为极端降水的降水量, 在降水充沛的地区却只是非常正常的降水量, 事实上并不应该属于极端降水。但是如果定义的阈值较大, 会忽略掉干旱地区的某些极端降水事件; 如果定义的阈值较小, 则研究结果对降水充沛的区域没有代表性。因此, 当研究对象范围较广时, 采取考虑降水区域差异的定义法才更为科学。川渝地区地域广阔, 地形多变, 因此我们采用95百分位法 (Zhai et al., 2005), 根据各个台站具体的日降水特征来定义其极端降水的阈值。

首先定义小时降水量大于等于0.1mm/h的时刻为有降水的时刻, 基于累积频率分布 (cumulative frequency distribution, CFD) 方法 (Zhai et al., 2005; Zhang and Zhai, 2011), 统计1991-2012年夏季小时降水量在0.1mm-125mm, 间隔0.1mm的各个时段的降水频数。当前面若干个时段的累积频数达到总降水频数的95%时, 定义当前的降水量为小时极端降水阈值。参考前人对降水事件的定义 (Yu et al., 2007a; Chen et al., 2010), 定义极端降水的开始时刻为小时降水量达到极端降水阈值, 结束时刻为该时刻下一个时刻的降水量达不到极端降水阈值, 持续时间为从开始时刻到结束时刻的小时数, 期间没有间断。极端降水的峰值时刻为降水事件持续期间出现最大小时降水量的时刻, 当极端降水持续时间为1小时, 降水的开始时间, 峰值时间和结束时间相互重合。

(2) 降水量总量 (PA)、降水频率 (PF) 和降水强度 (PI) 的定义

本文主要从PA、PF和PI三个方面对降水的气候特征进行刻画。对于绘制PA(单位mm/h)、PF(单位%)、PI(单位mm/h)的空间分布图而言,对1991-2012年逐年各夏季每天的小时降水量进行分析,先求出所有站点每个小时符合要求的降水量和降水时数,再对每一个站点的所有小时的降水量和降水时数求小时平均,求出每个站点的PA=该站点小时平均降水量,PF=该站点小时平均降水时数×100%,进而求出PI=PA/PF,即可绘制出空间分布图。

对于PA(单位: mm/h)、PF(单位: %)、PI(单位: mm/h)的日变化,同样先统计出所有站点每个小时符合要求的降水量和降水时数。计算夏季总小时数,对每个小时的数据都有22年×92天=2024个样本,求这些样本的平均,算出每个小时的平均PA=总降水量/2024、PF=(总降水时数/2024)×100%、PI=PA/PF,再求站点平均,即可绘制出三个变量的日变化曲线。

(3) 聚类方法介绍

参考Chen.et al (2009)的方法,聚类分析主要分为以下几个步骤:

第一步:用傅里叶方法对川渝地区每个站点的24小时PA, PF和PI序列做谐波分析(Yin et al. 2009),分解出不同周期的谐波,然后用谐波结果的前三波来近似代表原始序列,从而使得序列更加平滑。

$$\hat{y}(n) = \bar{y} + \sum_{m=1}^3 c_m \cos[(2k\pi n/24) - \sigma_m] + residel \quad (1)$$

其中 $\bar{y}$ 代表平均值。m=1,2,3, 代表谐波的前3波, residual 代表更高阶的谐波, cm 和 σ_m 分别代表第 m 阶的振幅和位相。n=1,2,...,24 代表北京时 00 时到 23 时。

第二步:对谐波做检验。用两种方法来检验:F 检验和前三波 cm 之和所占百分比。对于前3阶谐波均没有通过显著性检验的站点不能进行聚类。F 检验方程如下:

$$F_m = 0.5c_m^2 \times (24 - 2 - 1)/2(y_{var} - c_m^2) \quad (2)$$

通过以上方程计算的 F 值与查表所得到的值进行对比即能判断该谐波是否通过显著性检验(Yin et al. 2009)。

$$e_m = 0.5c_m^2 \times 100\%/y_{var} \quad (3)$$

其中 y_{var} 代表整个序列 24 个时次的方差。 e_m 用来表示第 m 阶谐波的方差占总方差的百分比,在一定程度上能反映该谐波代表整个序列变化的程度。

第三步:对前3波中有一个或多个通过显著性检验的谐波序列进行聚类(Fujibe, 1999)

分析，然后对相同类别的站点求平均，从而得到川渝地区几种典型形态的降水日变化特征。

3.结果分析

3.1. 川渝地区夏季降水的基本气候特征

3.1.1. 降水的空间分布特征

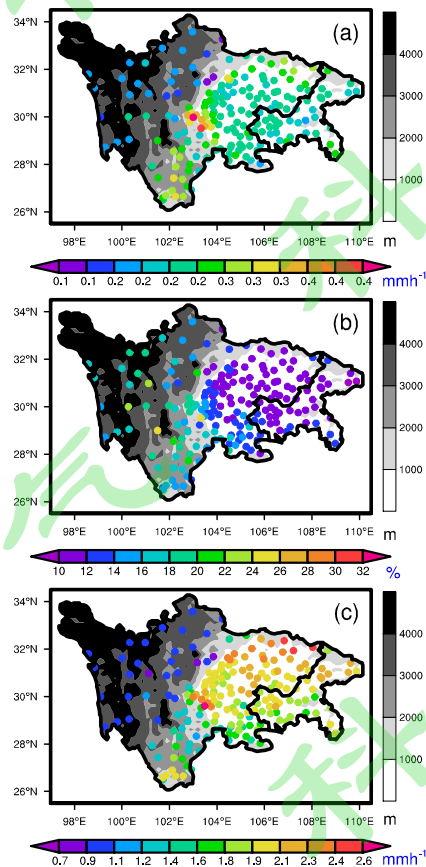


图1 川渝地区夏季降水小时平均PA (a)，PF (b) 和PI (c) 的空间分布（彩色点为物理量值，填色为站点所在海拔高度，下同）

Fig.1 Spatial distribution of hourly mean PA (a), PF(b) and PI (c) of summer precipitation in Sichuan and Chongqing(Colored points are values, shaded are the altitude, the same below)

为了更好地了解极端降水的特征，有必要首先了解川渝地区总降水的特征。从图 1a 可以看出，PA 的总体分布特征是西少东多，高原少、山地盆地多，盆周山区多、盆中丘陵区少。川西高原降水量最少，在石渠县存在一个小值中心，降水量低于 0.05 mm/h。四川盆地盆底地区和重庆东部边缘地区也属于小值区，盆周山地区降水量明显多于盆底丘陵、平原区。降水量大值区主要分布在中部的乐山、雅安地区，中心最大值超过 0.375mm/h。

PF 的空间分布与 PA 差异较大。图 1b 中显示 PF 西高东低，正好与 PA 的分布情况相反。川渝大部地区的 PF 都较低，尤其是东部盆地区，几乎均小于 10%，只存在零星的几小块区

域相对偏高。西部海拔较高的高原山地区存在个别大值区，并在道孚县和理塘县附近存在多个大值中心，中心最大值接近 30%。

PI 最显著的分布特征是西弱东强，自西向东逐渐增强，并且低值区和高值区界限分明，与川渝地区西高东低的地形一致。低值区基本上都位于西部海拔较高的高原山地区，在汶川县和道孚县附近存在两个低值中心，中心最小值小于 0.6mm/h。整个四川盆地基本上都是高值区，尤其在四川东北部的广元、巴中地区，最大值超过 2.4 mm/h。在四川中部的乐山、雅安地区也存在一个高值中心，最大值超过 2.2 mm/h，西昌、攀枝花地区的中心最大值超过 1.8 mm/h（图 1c）。

综合对比，显然，从PI的定义可以看出，东部四川盆地以及西南山地的西昌、攀枝花地区降水量大主要是由于降水强度大，这部分地区的降水频率相对偏低，即降水次数不多。反之，还有西昌地区小部分西南山地的降水量大主要是由于降水频率大，即降水次数较多，这部分地区的降水强度相对偏低。

3.1.2. 降水的日变化特征

(1) 四种典型形态降水的PA日变化及其空间分布

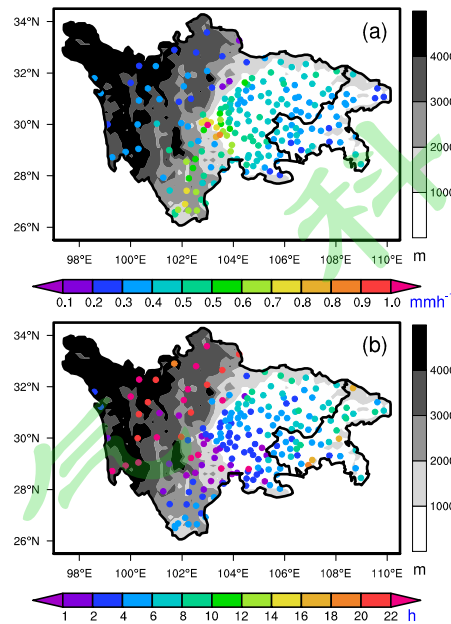


图2 川渝地区各站点夏季降水PA日峰值（a）及其出现时间（b）的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of PA daily peak value (a) and occurrence time (b) of summer precipitation at different stations in Sichuan and Chongqing

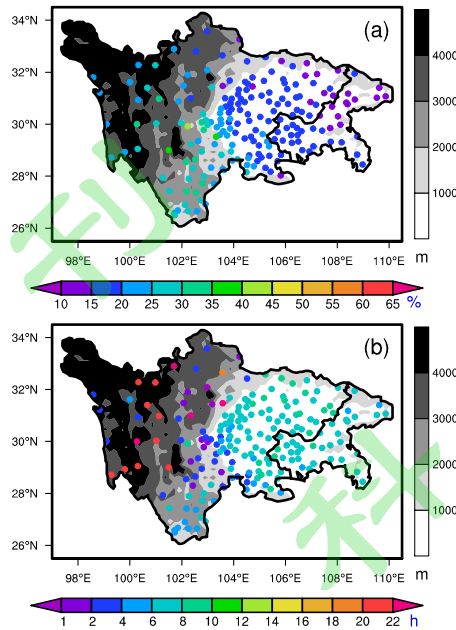


图3 川渝地区各站点夏季降水PF日峰值（a）及其出现时间（b）的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of PF daily peak value (a) and occurrence time (b) of summer precipitation at different stations in Sichuan and Chongqing

降水的日峰值是降水日变化的重要特征，除了受到外部大尺度环流的强迫影响，日峰值及其出现时刻也与降水系统自身的发展有关。图2a为各站点PA日峰值空间分布，可以看出，川渝地区降水量日峰值大体上呈现从西向东递增的趋势，海拔高的地区日峰值低，海拔低的地区日峰值相对高。但是大值中心主要存在于西南部的西昌、攀枝花地区以及中部的乐山、雅安地区，中心最大值均超过0.5mm/h。川西高原地区降水量日峰值基本低于0.2mm/h，而四川盆地及川西南地区大部分高于0.2mm/h，与PA的总体分布（图1a）相似。图2b为PA日峰值出现时间的空间分布，由图可见，日峰值几乎全部出现于夜间，且特征非常鲜明。川西高原区日峰值的出现时间主要集中在北京时间（下同）20:00-23:00，而川渝地区中东部主要集中在次日2:00-8:00，即海拔较高的地区日峰值大多出现在前半夜，而海拔较低的地区大多出现在后半夜，自西向东日峰值出现时间逐渐推迟，这一特征可能与降水系统的自西向东传播有关。

图3a为各站点的PF日峰值的空间分布。相对应的，PF日峰值的分布特征和图1b也非常的相似，与PA日峰值（图2a）的分布差异较大，大体上呈从西向东递减的趋势。中东部盆地几乎都是低于20%的小值区，盆周山区多而盆中丘陵区少，在鲜明分界线的西部海拔较高的高原山地区，日峰值却都相对偏高，大多为20-35%。图3b为PF日峰值出现时间的空间分布，同样自西向东逐渐推迟的特征非常明显，川西高原区的出现时间仍然主要分布在

20:00-23:00, 但是川渝地区中东部的分布与图2b有一定差异, 次日2:00-5:00时段的站点明显减少, 大部分都集中在次日5:00-8:00, 且内部差异较小。

综上, 图2a、3a和图1a、1b分布非常相似, 而日峰值出现时间的空间分布表明川渝地区的降水具有显著的夜雨特征, 且可能存在自西向东传播的特征。

(2) 四种典型形态降水的日变化及其空间分布

川渝地区地形复杂, 总体呈西高东低, 西部地区大致分为川西南山地区及川西北高原区, 海拔高度大部分在4000米以上; 东部地区大多是盆地、丘陵区, 海拔高度多在1000-3000米之间, 整体上可以分为川西高原和四川盆地两大部分。聚类法能更好的分析这种特殊的地表起伏状况对降水的分布特征的影响, 尤其适合地形复杂的区域。

图4a为PA的聚类分析结果, 一区主要为川西高原地区、二区主要为高原向盆地过渡的南部山区, 三区为盆地, 四区为盆地向东部过渡的丘陵地区, 其分布与图1a相似, 显示四种区域大致呈现自西向东各自集中分布的特征。图4b为PA日变化曲线, 均表现出“一峰一谷”的特征, 区域一到四的峰值时间依次为0:00、2:00、3:00、6:00, 谷值时间依次为13:00、16:00、17:00、21:00, 自西向东逐渐推迟, 验证了降水系统的自西向东传播的特征。不同区域的PA日变化较大, 峰值从大到小排序为 $k=2 > k=3 > k=4 > k=1$, 且一区峰值明显较小, 四区次之。可以看出, 川渝地区夜间到清晨的PA较大, $k=1$ 到4的区域, PA峰值逐渐从前半夜向后半夜移动。

对PF而言, 四个区域的分布与PA非常类似, 差异主要在一区和二区出现一定程度的混合, 表明川西高原和高原向盆地过渡的南部山区的PF有一定程度的相似性, 盆地和东部过渡丘陵地区的特征仍然是分明的(图4c)。四个区域的PF日变化曲线均呈“一峰一谷”, 类型一到四的峰值时间依次为0:00、5:00、6:00、7:00, 谷值时间依次为13:00、15:00、17:00、21:00, 峰谷值时间与PA的结果非常接近, 再次验证该地区降水系统自西向东传播的特征。不同区域的PF日变化较大, 峰值从大到小排序为 $k=1 > k=2 > k=3 > k=4$, 第一、第二区峰值明显高于第三区和第四区。可见, 川渝地区夜间到清晨的降水频率较大, 从不同区域的降水频率峰值可以看到其逐渐从前半夜向后半夜移动(图4d)。

PI在谐波分析中通过检验的站点是三个量中最少的, 不过图4e大体上的分布情况仍然与PA、PF的类似, 主要区别在于四川盆地南段部分站点在PA、PF聚类中属于第三区域, 而在PI中属于第二区域。PI的日变化曲线同样存在峰值和谷值自西向东逐渐延迟的特征, 但是较前两者而言, 波动较大。位于高海拔地区的第一区的强度明显偏弱, 且日变化较小, 说明该地区PA偏小正是因为PI小, 因为它的PF最大。其余三个区域的日变化都较为类似, 各区域

平均PI的大小排序为 $k=3 > k=4 > k=2 > k=1$ （图4f）。

从四个区域各物理量的对比分析可见，位于高海拔地区的第一区PA最小、PF最大、PI最小，因此PA小的主要原因是其PI小。同样的，可以得到以下结论，高原向盆地过渡的南部山区的PA较大主要是PF较高，盆地区域及其向东部过渡的丘陵地区的PA的主要贡献是PI大。

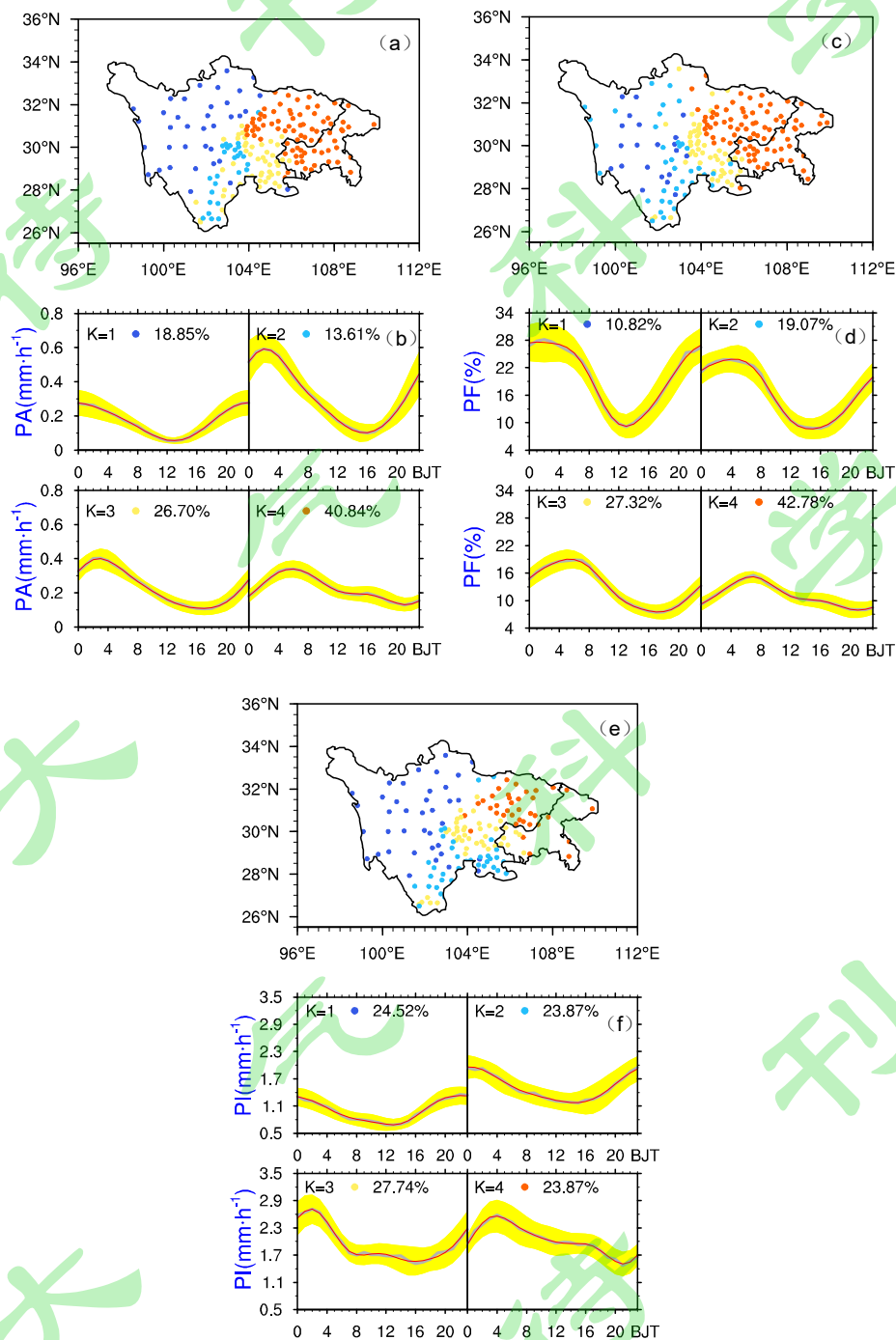


图4 PA、PF、PI变化四种典型形态站点空间分布（a、c、d）及不同类型站点区域平均日变化曲线（b、d、e）（其中，a和b为PA，c和d为PF，e和f为PI；深蓝色圆点为一区，蓝色圆点为二区，黄色圆点为三区，红色圆点为四区）

Fig. 4 Spatial distribution of four typical forms of PA, PF and PI (a, c, d) and average daily variation curves of different types of sites (b, d, e) (where *a* and *b* are PA, *c* and *d* are PF, and *e* and *f* are PI. The dark blue dots are zones one, the blue, yellow and red are two to four in turn.)

3.2. 川渝地区夏季极端降水的基本气候特征

3.2.1. 极端降水的空间分布特征

(1) 极端降水的阈值分布

图5给出了95百分位法所定义的小时极端降水阈值的空间分布。由图可知，川渝地区极端降水阈值的分布具有显著的区域性，小值区和大值区的分布都非常集中，且界限分明。同样是受到川渝地区特殊地形的影响，阈值西低东高，大体上自西向东呈增大趋势。8mm/h以上的大值区几乎全都分布川渝地区东部，即四川盆地地区及盆地以东重庆地区，内部相比较而言，四川盆地西北部的阈值偏高，东南部的阈值偏低。全区域的阈值分布主要存在四个大值中心，分别位于广元、巴中地区，绵阳、德阳地区，中心最大值均达到了12mm/h以上；以及乐山、雅安地区，中心最大值达到了11 mm/h以上；以及西昌、攀枝花地区，中心最大值达到了9 mm/h以上。而除了西南的西昌、攀枝花地区以外，川西南大部分山地区及川西北高原区均是低于8mm/h的小值区，内部相比较而言，西北高原区偏低，西南山地区偏高。在四川道孚县附近存在小值中心，中心最小值低于3mm/h。

小时极端降水阈值越小表明该地区弱降水占总降水事件的频率越高，从一定程度上可以反映出该地区PI较低。对比图1c可以发现，二者分布非常的相似，因为阈值的定义正是按小时降水量给出的。

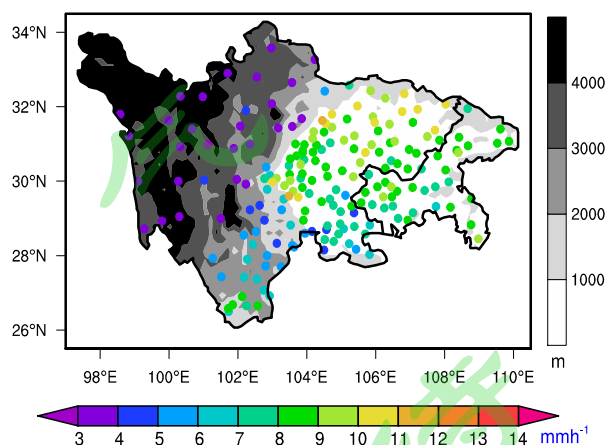


图5 川渝地区夏季小时极端降水阈值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of hourly extreme summer precipitation thresholds in Sichuan and Chongqing

(2) 极端降水的空间分布

根据阈值的空间分布，对逐小时降水数据进行筛选后进行分析，绘制出极端降水小时平均PA、PF和PI的空间分布（图6）。因为极端降水的定义是根据95百分位法定义的阈值所得到的，所以可以看到图6b呈现的极端降水的PF的空间分布与图1b呈现的总降水频率的空间分布是一致的（绝对值有大小之差，但是相对分布完全一致）。另外图6a与6c呈现的极端降水量PA和极端降水强度PI的分布和图1a、1c呈现的总降水量和总降水强度的分布也非常的相似，其具体特征此处不再赘述。

综合对比图6，我们同样可以发现，四川盆地部分地区以及部分西南山地区的极端降水量大主要是由于极端降水强度大。位于四川盆地南部，川渝地区西南部的小部分山地区的极端降水量较大，主要是由于极端降水频率高。而大部分高海拔的川西高原和山地区的极端降水量小，主要是由于其极端降水强度小，虽然其位于极端降水频率的大值区。

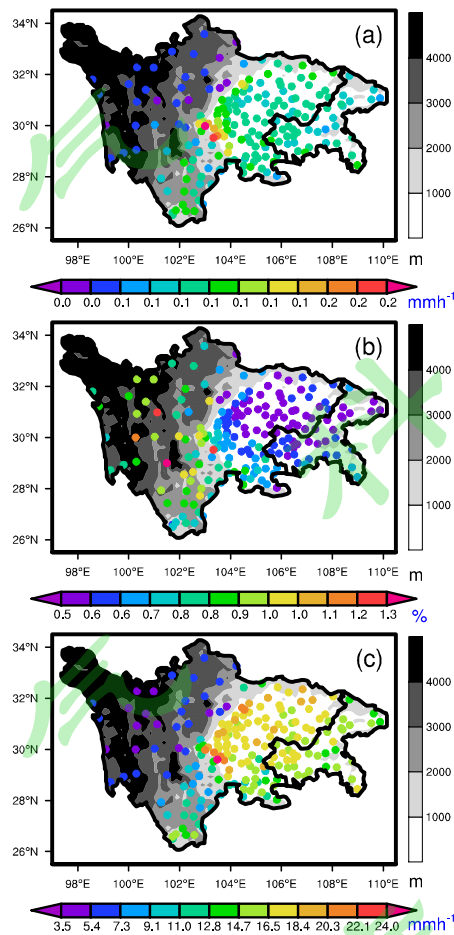


图 6 川渝地区夏季极端降水小时平均 PA (a)，PF (b) 和 PI (c) 空间分布
Fig.6 Spatial distribution of hourly mean PA (a), PF (b) and PI (c) of summer extreme precipitation in Sichuan and Chongqing

(3) 极端降水的比重

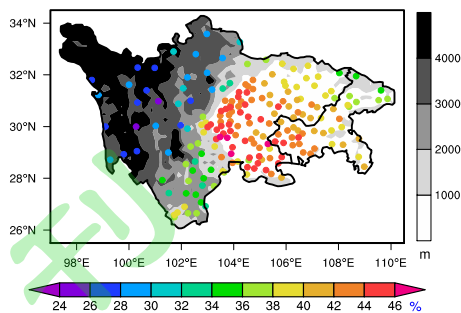


图 7 川渝地区夏季极端降水量占夏季总降水量比重的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the proportion of extreme summer precipitation to total summer precipitation in Sichuan and Chongqing

图7中可见，极端降水量占总降水量比重的空间分布总体呈西低东高且界限分明，西北部高原区较西南部山地区偏低，西部地区占比总体上位于34%及以下，在石渠县、白玉县、巴塘县附近存在小值中心，最小值可到达24%以下；四川盆地及重庆中西部、东南部地区较重庆东北部偏高，总体上占比位于38%以上，在乐山市附近存在大值中心，最大值可达到46%以上。

以上分析可以看出极端降水量对川渝地区中东部总降水量的贡献很大，对西部贡献却较少，中东部极端降水占比达到40%左右，说明研究总降水对反映极端降水的特征也是有意义的。

3.2.2. 极端降水的日变化特征

(1) 极端降水日峰值及其出现时间的空间分布

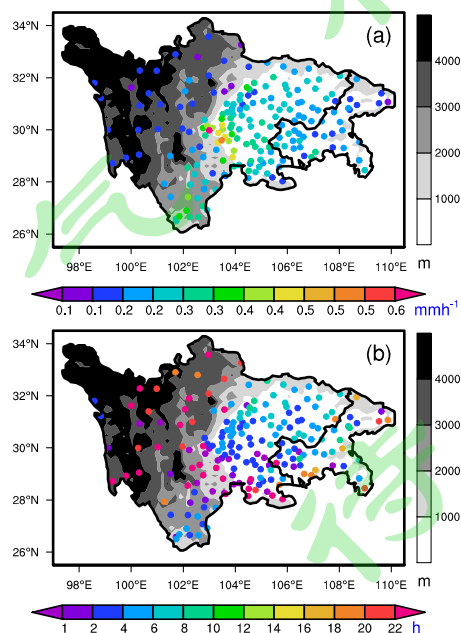


图 8 川渝地区各站点夏季极端降水 PA 日峰值 (a) 及其出现时间 (b) 的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of PF daily peak value (a) and occurrence time (b) of summer extreme precipitation at different stations in Sichuan and Chongqing

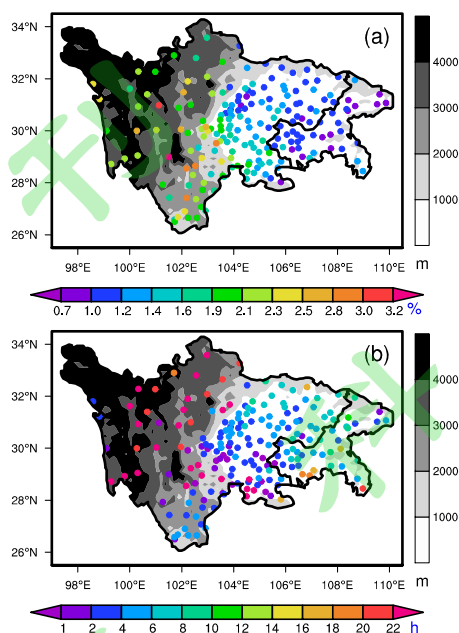


图9 川渝地区各站点夏季极端降水 PF 日峰值 (a) 及其出现时间 (b) 的空间分布
Fig.9 Spatial distribution of PF daily peak value (a) and occurrence time (b) of summer extreme precipitation at different stations in Sichuan and Chongqing

图8a是极端降水量日峰值的空间分布，整体上自西向东呈递增趋势，西北高原区日峰值低于 0.1mm/h ，而西南山地区以及四川盆地的日峰值大部分都高于 0.3mm/h ，但也穿插一些日峰值较低的区域。在四川盆地周边的雅安、乐山一带存在大值中心，中心最大值超过 0.5mm/h 。事实上该地区虽然极端降水频率不高，但是极端降水强度很高，导致极端降水量很大，极端降水量占总降水量的比重也很大，因此可以看出该地区夏季不仅降水充沛，且易发生暴雨。

图9a是极端降水频率日峰值的空间分布，与图8a的分布相反，整体自西向东呈递减趋势。西部海拔较高的高原及山地日峰值基本高于 2.1% 。而东部四川盆地以及重庆地区日峰值基本低于 1.4% 。

由于日峰值本身的定义，在分析极端降水的特征时，除了个别日期的小时降水量日峰值没有达到该站点极端降水的阈值，从而使得数据被排除，进而影响最后的结果之外，其余绝大多数天数日峰值的数据情况和总降水日峰值的数据情况相同，因此图8、9的分布和图2、3的分布是非常相似的。

图8b极端降水量PA日峰值的出现时间分布及图9b极端降水频率日峰值的出现时间分布均比较杂乱，各个时间段有穿插现象，但仍然能看出两个特征：一是日峰值均多发于晚间至第二天清晨，二是自西向东日峰值的出现逐渐延迟。这表明川渝地区的“夜雨”特征明显且

从侧面印证了降水系统有自西向东传播的特点。

(2) 区域平均极端降水的日变化特征

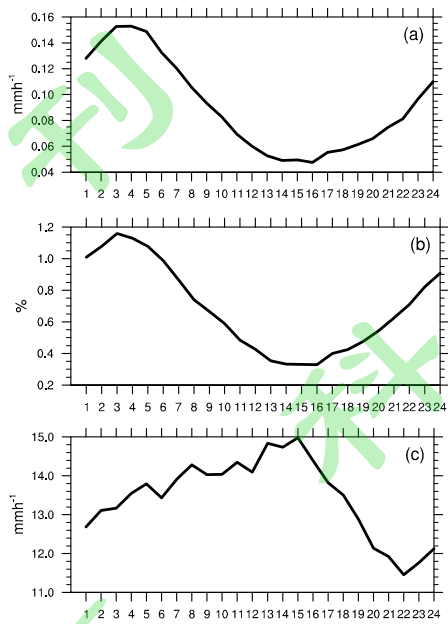


图 10 川渝地区站点平均夏季极端 PA (a)、PF (b)、PI (c) 日变化

Fig.10 Diurnal variation of mean summer extreme PA (a), PF (b) and PI (c) of stations in Sichuan and Chongqing

图10为极端降水的平均24小时日变化序列，由图可见，三者大体均呈单峰结构，其中PA和PF的日变化十分相似。PA的日峰值出现在凌晨3:00-4:00时，约为0.15mm/h；谷值出现在午后13:00-16:00时,约为0.05 mm/h；PF的日峰值出现在凌晨3:00左右，约为1.1%；谷值出现在午后14:00-16:00时左右，约为0.3%。PI则呈锯齿状波动结构，变化较为剧烈，在20:00-24:00时较低，在其他时间都较高。在13:00左右，虽然降水强度PI较高，但是降水频率PF很低，导致降水量PA出现谷值。在午夜2:00时左右，降水频率PF和降水强度PI都较高，降水量PA也出现峰值。

从以上分析可以看出，极端降水占总降水的比重很大，并且其时空分布和总降水的时空分布均非常的相似，因此总降水的日变化特征对极端降水的日变化特征非常有参考价值。

4 结论与讨论

本文利用 1991-2012 年川渝地区夏季 195 个站点的逐小时降水资料，对夏季的总降水、极端降水的时空分布特征进行了分析，主要结论如下：

(1) 川渝地区受西高东低的地形影响，各个变量分布的差异均主要位于东西方向上。总降水量的 PA 西少东多，而 PF 呈西高东低的相反分布，PI 的分布与 PA 较为一致，自西

向东逐渐增强。总降水量的 PA 日峰值自西向东递增, PF 日峰值呈相反变化趋势, 自西向东递减。两者几乎全部都出现在夜间, “夜雨”特征非常显著。海拔较高的地区日峰值大多出现在前半夜, 而海拔较低的地区大多出现在后半夜, 自西向东日峰值出现时间逐渐推迟, 因此川渝地区的降水系统可能存在自西向东传播的特征。极端降水的 PA、PF、PI 的空间分布特征与总降水特征非常相似。

(2) 聚类分析方法将川渝站点分为四类, 一区主要为川西高原地区、二区主要为高原向盆地过渡的南部山区, 三区为盆地区域, 四区为盆地向东部过渡的丘陵地区。一区的 PA 最小的主要原因是其 PI 小, 二区 PA 较大主要是 PF 较高, 三、四区 PA 的主要贡献因子是 PI。

(3) 日变化特征方面, 总降水的 PA、PF 和 PI 的日变化曲线均有“一峰一谷”特征, 区域一到四的降水量峰值时间依次为 0:00、2:00、3:00、6:00, 谷值时间依次为 13:00、16:00、17:00、21:00, 自西向东逐渐推迟, 表明川渝地区降水系统可能存在自西向东传播的特征; 极端降水的 PA、PF 日变化均呈现凌晨单峰结构, “夜雨”特征明显, 日峰值出现在凌晨, 谷值则在午后, PI 日变化呈锯齿状波动, 在 5:00-11:00 时较低, 在其他时间都较高, PA 的谷值主要是由于 PF 很低, 而峰值是由于 PI 和 PF 都较高。

(4) 川渝地区夏季小时极端降水的阈值西低东高, 自西向东逐渐增大, 该分布反映了降水强度 PI 的特点。极端降水量占总降水量的比重自西向东呈增大趋势, 极端降水量对川渝地区中东部总降水量的贡献很大, 对西部贡献却较少, 中东部地区比重大多达到 40% 以上。

本文虽然利用高时空分辨率的降水资料对川渝地区夏季极端降水日变化特征进行了细致的分析, 并且形成了较为清晰的认识, 但对日变化的形成机制仍然并不清楚, 今后仍需要进一步探讨其与复杂地形、大尺度环流场、热力差异等影响因素的联系, 揭示川渝地区夏季极端降水日变化形成的物理机制。

参考文献 (References)

- [1] Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China, Mon. Wea. Rev, 139(9), 2790-2810.
- [2] Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. Chin. Sci. Bull., 58 (12): 1462-1472
- [3] Chen X, Zhao K, Xue M. 2014a. Spatial and temporal characteristics of warm season convection over Pearl River Delta region, China, based on 3 years of operational radar data [J]. J. Geophys Res.: Atmospheres, 119(22), 12,447-412,465.
- [4] Fu S M, Zhang J P, Sun J H, et al. 2014. A fourteen-year climatology of the southwest vortex in summer [J].

Atmospheric and Oceanic Science Letters, 7 (6): 510–514.

- [5] Li, J., R. Yu, and W. Sun. 2013. Duration and seasonality of hourly extreme rainfall in the central eastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 27, 799-807.
- [6] Lin Y L.1993. Orographic effects on airflow and mesoscale weather systems over Taiwan[J]. *Terr. Atmos. Oceanic Sci*, 4:381-420.
- [7] Miao S G, Chen F, Li Q C, et al. 2011. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006 [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50 (4): 806–825, doi:10.1175/2010JAMC2513.1.
- [8] Qu X, Huang G, Zhou W. 2013. Consistent responses of East Asian summer mean rainfall to global warming in CMIP5 simulations [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 117 (1–2): 123–131, doi:10.1007/s00704-013-0995-9.
- [9] Reiter ER., Tang M. 1984. Plateau effects on diurnal circulation patterns[J]. *Monthly weather review*, 112(4), 638–651.
- [10] Sen Roy, S. 2009. A spatial analysis of extreme hourly precipitation patterns in India[J]. *International Journal of Climatology*, 29(3), 345-355.
- [11] Su, B, Xiao B, Zhu D, et al. 2005. Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River basin, China: 1960–2003/Tendances d'évolution de la fréquence des précipitations extrêmes entre 1960 et 2003 dans le bassin versant du Fleuve Yangtze (Chine) [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 50(3).
- [12] Tao S Y, Ding Y H. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China [J].*Bulletin of the American Meteorological Society*, 62(1), 23-30.
- [13] Xu W, Zipser E J, Lin C. 2009. Rainfall characteristics and convective properties of mei-yu precipitation systems over South China, Taiwan, and the South China Sea. Part I: TRMM observations [J]. *Monthly Weather Review*, 137(12), 4261-4275.
- [14] Yu R, Li J, Yuan W, et al. 2010. Changes in characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years revealed by hourly precipitation data [J]. *Journal of Climate*, 23(12), 3390-3396.
- [15] Yuan W, Sun W, Chen H, et al. 2014. Topographic effects on spatiotemporal variations of short - duration rainfall events in warm season of central North China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(19), 11,223-211,234.
- [16] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate*18:1096-1108.
- [17] Zhang Q, Zhou Y, Singh V P, et al. 2012. Scaling and clustering effects of extreme precipitation distributions[J]. *Journal of Hydrology*, 454, 187-194.
- [18] Zhang H, Zhai P M. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28, 1177-1183.
- [19] ZHONG S, YANG X Q. 2015. Ensemble simulations of the urban effect on a summer rainfall event in the great Beijing metropolitan area [J]. *Atmospheric Research*, 153: 318–334, doi:10.1016/j.atmosres.2014.09.005.
- [20] 陈贵川, 谌芸, 张勇, 等. 2013. “12.7.21” 西南涡极端强降雨的成因分析[J]. *气象*, 39(12) : 1529-1541. CHEN Guichuan CHEN Yun ZHANG Yon, et al. 2013. Causes Analysis of the Southwest Vortex Extremely Heavy Rain fall on 21 July 2012[J]. *Meteorological Monthly*, 39(12):1529-1541. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.12.001
- [21] 陈贵川, 谌芸, 王晓芳, 等, 2018. 一次冷性停滞型西南低涡结构的演变特征[J]. *高原气象*, 37(6) : 1628-1642. CHEN Guichuan, SHEN Yun, WANG Xiaofang, et al.2018. The Developmental Characteristics of the Structure of a Stationery Cold Southwest Vortex. *Plateau Meteorology*, 37(6) : 1628-1642. doi: 10.

7522/j.issn.1000-0534.2018.00093.

- [22] 谌贵珣, 何光碧. 2008. 2000 ~ 2007 年西南低涡活动的观测事实分析 [J]. 高原山地气象研究, 28 (4): 59-65. SHEN Guixun, HE Guangbi. 2008. The observed facts analysis of Southwest Vortex from 2000 – 2007 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28(4): 59-65. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2008.04.010
- [23] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 2009. 中国近 50a 极端降水事件变化特征的季节性差异 [J]. 大气科学学报, 32 (6): 744-751. CHEN Haishan, FAN Sudan, ZHANG Xinhua. 2009. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years [J]. Transactions of atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 744-751.
- [24] 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 Jiong, ZHENG Yongguang, ZHANG Xiaoling, 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. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 71(3): 367-382. doi: 10.11676/qxxb2013.035
- [25] 陈晓燕, 尚可政, 王式功, 等. 2010. 近 50 年中国不同强度降水日数时空变化特征 [J]. 干旱区研究, 27(5): 766-772. CHEN Jiong, ZHENG Yongguang, ZHANG Xiaoling, 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. doi: 10.11676/qxxb2013.035
- [26] 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2020. 2008~2016 年重庆地区降水时空分布特征 [J]. 大气科学, 44(2): 327–340. FANG Dexian, DONG Xinning, DENG Chengzhi, et al. 2020. Temporal and Spatial Distribution of Precipitation in Chongqing during 2008–2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 327–340. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18256
- [27] 李超, 李跃清, 蒋兴文. 2015. 四川盆地低涡的月际变化及其日降水分布统计特征 [J]. 大气科学, 39 (6): 1191–1203. LI Chao, LI Yueqing, JIANG Xingwen. 2015. Statistical characteristics of the inter-monthly variation of the Sichuan Basin vortex and the distribution of daily precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1191–1203, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14270.
- [28] 李强, 王秀明, 周国兵, 等. 2020. 四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究 [J]. 高原气象, 39(5): 960-972. LI Qiang, WANG Xiuming, ZHOU Guobing, et al, 2020. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Short-time Heavy Rainfall during Southwest Vortex Rainstorm in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology, 39(5): 960-972. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00096.
- [29] 李琴, 崔晓鹏, 曹洁. 2014. 四川地区一次暴雨过程的观测分析与数值模拟 [J]. 大气科学, 38(6): 1095–1108. LI Qin, CUI Xiaopeng, CAO Jie. 2014. Observational analysis and numerical simulation of a heavy rainfall event in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(6): 1095–1108. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13255.
- [30] 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 2013. CMIP5 部分模式气温和降水模拟结果在北半球及青藏高原的检验 [J]. 高原气象, 32 (4): 921–928. LI Zhenchao, WEI Zhigang, LV Shihua, et al. 2013. Verifications of surface air temperature and precipitation from CMIP5 model in Northern Hemisphere and Qinghai–Xizang plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (4): 921–928. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00088.
- [31] 刘德, 张亚萍, 陈贵川, 等. 重庆市天气预报技术手册. 北京: 气象出版社. 2012: 92-147. LIU De, Zhang Yaping, Chen Guichuan, et al. Beijing: China Meteorological Press. 2012: 92-147.
- [32] 罗玉, 范广洲, 周定文等. 2015. 西南地区极端降水变化趋势. 气象科学, 35(5): 581-586. LUO Yu, FAN Guangzhou, ZHOU Dingwen. 2015. A Extreme precipitation trend of Southwest China in recent 41 years [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 35(5): 581-586. doi:10.3969/2014jms.0084

- [33] 韩林君, 白爱娟. 2019. 2004-2017 年夏半年西南涡在四川盆地形成降水的特征分析[J].高原气象, 38(3) : 552-562. HAN Linjun, BAI Aijuan. 2019. Precipitation Characteristics of Southwest Vortex in Sichuan Basin from May to October in 2004-2017[J]. Plateau Meteorology, 38(3) : 552-562. doi:10.7522/j.issn.1000-0534. 2018.00100
- [34] 何光碧, 陈静, 李川, 等. 2005. 低涡与急流对“04.9”川东暴雨影响的分析与数值模拟[J].高原气象, 24 (6): 1012-1023. HE Guangbi, CHEN Jing, LI Chuan. 2005. Aalysis and Numerical Simulation for Effects of Vortex and Jet Stream on Heavy Rain in East Sichuan in September 2004[J]. Plateau Meteorology, 24(6): 1012-1023.
- [35] 何光碧, 2012. 西南低涡研究综述[J].气象, 38(2): 155-163. HE Guangbi. 2012. Review of the Southwest Vortex Research[J]. Meteorological Monthly, 38(2): 155-163. Doi:10.7519/j. issn.1000-0526.2012. 2. 003
- [36] 胡豪然, 毛晓亮, 梁玲. 2009. 近 50 年四川盆地汛期极端降水事件的时空演变[J].地理学报, 64(3): 278-288. HU Haoran, MAO Xiaoliang, LIANG Ling. 2009. Temporal and spatial evolution of extreme precipitation events in flood season in Sichuan Basin in recent 50 years[J].ACTA GEOGRAPHICA SINICA, 64(3): 278-288. doi: 10.11821/xb200903003
- [37] 蒋璐君, 李国平, 王兴涛. 2015. 基于 TRMM 资料的高原涡与西南涡引发强降水的对比研究 [J]. 大气科学, 39 (2): 249-259, JIANG Lujun, LI Guoping, WANG Xingtao. 2015. Comparative study based on TRMM data of the heavy rainfall caused by the Tibetan Plateau vortex and the southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 249-259. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.13260.
- [38] 康岚, 冯汉中, 屠妮妮, 等. 2008. 一次川渝大暴雨的中尺度分析[J].气象, 34(10) : 40-49. KANG Lan, FENG Hanzhong, TU Nini. 2008. Mesoscale Analysis of a Torrential Rain in Sichuan and Chongqing. Meteorological Monthly, 34(10) : 40-49. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.10.00
- [39] 卢萍, 宇如聪, 周天军. 2008. 2003 年 8 月“巴蜀夜雨”过程的模拟和分析研究[J]. 气象学报, 66(3) : 371-380. Lu Ping, Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2008. Numerical simulation of the mid-night rainfall over Sichuan basin during August 2003[J]. Acta Meteorologica Sinica, 66(3) : 371-380. doi: 10.11676/qxxb2008. 035
- [40] 潘昉, 沈艳, 宇婧婧等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J].气象学报, 70(6) : 1381-1389. PAN Yang, SHEN Yan, YU Jingjing, et al . 2012 . Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique, Acta Meteorologica Sinica, 70(6) : 1381-1389. doi: 10.11676/qxxb2012.116.
- [41] 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J].气候与环境研究, 15(4):337-353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei .2010 .Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4) : 337-353 . doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.01
- [42] 沈艳, 潘昉, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J].大气科学学报, 36 (1) : 37-46. SHEN Yan, PAN Yang, YU Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China[J] . Transactions of Atmospheric Sciences, 36(1): 37-46. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb. 2013.01.005.
- [43] 唐红玉, 顾建峰, 俞盛宾, 等. 2011. 西南地区降水日变化特征分析[J].高原气象,30(2): 376-384. TANG Hongyu, GU Jianfeng, YU Shengbin. 2011. Analysis on Diurnal Variation of Precipitation in Southwest China[J]. Plateau Meteorology, 30 (2): 376-384.
- [44] 汤欢, 傅慎明, 孙建华, 等. 2020. 一次高原东移 MCS 与下游西南低涡作用并产生强降水事件的研究 [J]. 大气科学, 44(6): 1275-1290. TANG Huan, FU Shenming, SUN Jianhua, et al. 2020. Investigation of Severe Precipitation Event Caused by an Eastward-Propagating MCS Originating from the Tibetan Plateau and a Downstream Southwest Vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6):

1275–1290. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19206

- [45] 王成鑫, 高守亭, 梁莉, 等. 2013. 动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析[J]. 大气科学, 37(5): 1099-1110. WANG Chengxin, GAO Shouting, LIANG Li, MA Yanzhi. Diagnostic Analysis of Dynamical Parameters for Sichuan Rainstorm Influenced by Terrain[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(5): 1099-1110. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12112
- [46] 王中, 白莹莹, 杜钦, 等. 2008. 一次无地面冷空气触发的西南涡特大暴雨分析[J]. 气象, 34 (12) : 63-71. WANG Zhong, BAI Yingying, DU Qin, et al. 2008. Analysis of a Torrential Southwest Vortex Rainstorm Without Surface Cold Air Intrusion[J]. Meteorological Monthly, 34 (12) : 63-71. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.12.00
- [47] 吴志鹏, 李跃清, 李晓岚, 等. 2021. WRF 模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响[J]. 大气科学, 45(1): 58–72. Wu Zhipeng, Li Yueqing, LI Xiaolan, et al. 2021. Influence of Different Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes on the Simulation of Precipitation Caused by Southwest China Vortex in Sichuan Basin Based on the WRF Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 58–72. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19171
- [48] 徐裕华. 1991. 西南气候 [M]. 北京: 气象出版社, 56-60. Xu Yuhua. 1991. Climate of Southwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 56-60.
- [49] 晏红明, 字侯丞. 2021. 夏季副高次季节尺度东西变动特征及其与中国西南降水的关系 [J]. 大气科学, 45(1): 1–20. YAN Hongming, ZI Yucheng. 2021. Characteristics of the Subseasonal-Scale Zonal Movement of Subtropical High in Summer and Its Relationship with Precipitation in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 1–20. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19204
- [50] 姚莉, 李小泉, 张立梅. 2009. 我国 1 小时雨强的时空分布特征[J]. 气象, 35(2):80-87. Yao Li, LI Xiaoquan, ZHANG Limei. 2009. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Hourly Rain Intensity in China[J]. Meteorological Monthly, 35(2):80-87.
- [51] 杨萍, 肖子牛, 石文静. 2017. 基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征 [J]. 大气科学, 41 (3): 475-489. YANG Ping, XIAO Ziniu, SHI Wenjing. 2017. Fine-scale characteristics of rainfall in Beijing urban area based on a high-density autonomous weather stations (AWS) dataset[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 475–489, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16134.
- [52] 袁文德, 郑江坤, 董奎. 2014. 1962-2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. 资源科学, 36(4):0766-0772. YUAN Wende, ZHENG Jiangkui, DONG Kui. Temporal and spatial variations of extreme precipitation events in Southwest China from 1962-2012 [J]. Resources Science, 36(4): 766-772.
- [53] 宇婧婧, 沈艳, 潘昶等. 2013. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. 应用气象学报, 24(5) : 544-553. YU Jingjing, SHEN Yan, PAN Yang, et al. 2013. Improvement of Satellite-based Precipitation Estimates over China Based on Probability Density Function Matching Method [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 24(5) : 544-553.
- [54] 张武龙, 张井勇, 范广州. 2015. CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估 [J]. 大气科学, 39 (3): 559–570, ZHANG Wulong, ZHANG Jingyong, FAN Guangzhou. 2015. Evaluation and projection of dry- and wet-season precipitation in southwestern China using CMIP5 models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 559–570. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14136.
- [55] 张琪, 李跃清. 2014. 近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J]. 高原气象, 33(2): 372-383. ZHANG Qi, LI Yueqing. 2014. Climatic Variation of Rainfall and Rain Day in Southwest China for Last 48 Years[J]. Plateau Meteorology, 33(2): 372-383. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00032
- [56] 赵平, 孙淑清. 1991. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断 (一) —地形动力作用和潜热作用对西南低涡影响的数值试验对比分析[J]. 大气科学, 15 (6):46-52. ZHAO Ping, SUN Shuqing. 1991. A numerical experiment and diagnosis of the formation process of the SOUTHWEST Vortex (1) -- a

- comparative analysis of the numerical experiment on the influence of topographic dynamic action and latent heat action on the southwest vortex [J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (6):46-52.
- [57] 赵思雄, 傅慎明, 2007. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场分析[J].大气科学, 31 (6) : 1059-1075. ZHAO Sixiong, FU Shenming. 2017. An Analysis on the Southwest Vortex and Its Environment Fields during Heavy Rainfall in Eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004 [J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6) : 1059-1075. doi:10.3878/j. issn. 1006-9895. 2007. 06. 03.
- [58] 张焕, 翟盘茂, 唐红玉. 2011. 1961-2000 年西南地区小时降水变化特征[J].气候变化研究进展, 7(1): 7-12. ZHANG Huan, ZHAI Panmao, TANG Hongyu. 2011. Trends of Hourly Precipitation over Southwest China During 1961-2000[J]. Climate Change Research, 7 (1): 8-13.
- [59] 张天宇, 程炳岩, 刘晓冉, 等. 2009. 重庆汛期极端降水事件分析[J]. 热带气象学报, 25(4): 475-482. ZHANG Tianyu, CHENG Bingyan, LIU Xiaoran, et al. Analysis of Extreme Precipitation Events over Chongqing in Flood Season During the Past 46 Years[J]. Journal of Tropical Meteorology, 25(4): 475-482. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2009.04.01
- [60] 张天宇, 李永华, 程炳岩, 等 . 2011. 重庆主城区百年雨日及强度变化特征[J] . 重庆师范大学学报(自然科学版), 28(3): 37-42 . ZHANG Tianyu, LI Yonghua, CHENG Bingyan, et al. 2011. The Variation Features of Rainy Days and Its Intensity in the Main Districts of Chongqing During the Past 100 years[J]. Journal of Chongqing Normal University (Nature Science/JCQNU), 28(3): 37-42 . doi:10.11721/cqnuj 20110308
- [61] 周长艳,李跃清,彭俊. 2006. 高原东侧川渝盆地降水与水资源特征及变化[J].大气科学, 30(6):1217-1226. ZHOU Changyan, LI Yueqing, PENG Jun. The Characteristics and Variation of Precipitation and Water Resource of Sichuan and Chongqing Basin on the Eastern Side of the Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(6): 1217-1226. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.16
- [62] 周秋雪, 刘莹, 冯良敏, 等.2015. 2008-2012 年四川强小时雨强的时空分布特征[J]. 高原气象, 34(5):1261-1269. ZHOU Qiuxue, LIU Ying, FENG Liangmin, et al. Analysis on Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Strong Hour Rainfall Intensity in Sichuan during 2008-2012[J].Plateau Meteorology, 34(5):1261-1269. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00070
- [63] 周玉淑, 颜玲, 吴天贻, 等. 2019. 高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析[J]. 大气科学, 43(4): 813-830. ZHOU Yushu, YAN Ling, WU Tianyi, et al. 2019. Comparative analysis of two rainstorm processes in Sichuan Province affected by Tibetan Plateau vortex and Southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 813-830. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1807.18147