

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

## 2008—2017年四川省突发性山地暴雨事件的演变特征

江一啸<sup>1,3</sup>, 李山山<sup>2,4</sup>, 李国平<sup>3</sup>, 李超<sup>2,4</sup>, 陈杨瑞雪<sup>3</sup>

(1. 湖北省黄石市阳新县气象台, 黄石 435299; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205; 3. 成都信息工程大学, 成都 610225; 4. 三峡国家气候观测台, 宜昌 443099)

**摘要:**突发性山地暴雨诱发的山洪、滑坡、泥石流等是我国西南山区重大自然灾害。本文利用2008—2017年国家站10 a的小时降水量数据,对四川省突发性山地暴雨事件开展统计特征分析。结果表明:(1) 2008—2017年10 a间四川省共出现了979次突发性山地暴雨事件,平均每年约98次,大多数地区出现5次以上,突发性暴雨事件主要发生在四川盆地及其东部、南部山区、西部山区,西部山区频次远远大于东部山区,与地形影响密切相关。(2) 突发性山地暴雨事件从4月开始增多,6—7月显著增长,7月之后渐渐减少;夜间多于白天,事件日变化的高频次先从四川西部山区下午16时开始,到深夜转为东部山区最高,表现出强降水有一个从西向东发展传播的过程。(3) 突发性山地暴雨事件持续时间大多集中在3~12 h,平均持续时间6月、7月和9月较长,而5月和8月较短,平均持续时间东部山区明显比西部山区长。(4) 突发性山地暴雨事件年平均累计雨量在80~120 mm之间,且7月最多,8月次之,5月和9月最小。2015年突发性山地暴雨事件频次最少,但年平均累计雨量最多,说明2015年突发性暴雨强度最大。

**关键词:**突发性山地暴雨事件;统计特征;暴雨事件频次;日变化;暴雨强度

中图分类号:P426.61+1

文献标志码:A

DOI:10.12406/byzh.2023–041

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

JIANG Yixiao<sup>1,3</sup>, LI Shanshan<sup>2,4</sup>, LI Guoping<sup>3</sup>, LI Chao<sup>2,4</sup>, CHENYANG Ruixue<sup>3</sup>

(1. Meteorological Station of Yangxin County, Huangshi City, Hubei Province, Huangshi 435299; 2. China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain,, CMA, Wuhan 430205; 3. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225; 4. Three Gorges National Climatological Observatory, Yichang 443099)

**Abstract:** The secondary disasters such as flash floods, landslides and debris flows induced by sudden mountain rainstorm are major natural disasters in mountain areas of China. In this paper, the statistical characteristics of sudden mountain rainstorm events in Sichuan Province are analyzed by using the 10 year hourly precipitation data of national stations from 2008 to 2017. The results are as following: (1) During the 10 years from 2008 to 2017, there were 979 sudden mountain rainstorm events in Sichuan Province, with an average of 98 events per year. More than 5 sudden rainstorm events occurred in most areas. Sudden rainstorm events mainly occur in the Sichuan Basin and its eastern and southern mountainous areas, and the frequency of sudden rainstorm events in the western mountainous areas is far higher than that in the eastern mountainous areas, which indicates that it is closely related to the terrain. (2) The sudden rainstorm events increased from April, increased by leaps and bounds from June to July, and gradually decreased after July. The sudden rainstorm events at night is more than that in the daytime. The high-frequency distribution of sudden rainstorm events starts at 16:00 pm. in the western mountainous area of Sichuan Province, and turns to the highest in the eastern mountainous area at midnight, which shows that there is a process of development and propagation of heavy rainfall from west to east. (3) The duration of mountain sudden rainstorm events is mostly concentrated in 3~12h, and the average duration is longer in June, July and September, but shorter in May and August. (4) The annual average rainfall of sudden mountain rain-

收稿日期:2023-04-28;定稿日期:2023-09-10

资助项目:国家自然科学基金项目(41975058,42105012,42105010, 42175002);湖北省气象局科技发展基金重点基金项目(2022Z02);武汉暴雨研究所基本业务费项目(202302)

第一作者:江一啸,主要从事天气预报服务工作。E-mail: 595515018@qq.com

通信作者:李山山,主要从事降水云微物理和暴雨机理研究。E-mail: 1539139442@qq.com

storm events ranges from 80 mm to 120 mm. The accumulated rainfall is the largest in July, followed by August, and the smallest in May and September. In 2015, the frequency of sudden mountain rainstorm events was the least, but the annual average accumulated rainfall was the most, indicating that the intensity of sudden rainstorm was the largest in 2015.

**Key words:** sudden mountain rainstorm events; statistical characteristics; frequency ; daily variation; intensity

## 引言

四川地形复杂,盆地四周均为海拔较高的山地,西侧为陡峭的青藏高原,北侧和东侧为地形起伏较大的坡地,并向大巴山、武陵山脉过渡,南侧为云贵高原。盆地海拔也在500 m以上。且四川山地地质结构呈多样性,大部分地区尤其是川西北为地震多发带,山体结构不稳定。因此山地暴雨特别是突发性的山地暴雨容易形成山洪,常带来严重甚至毁灭性的灾难,2010年和2012年四川山地暴雨事件造成的洪涝、地质灾害均超过25次,因暴雨造成地质灾害呈逐年增加趋势(黄楚惠,2020)。四川山洪地质灾害与突发性山地暴雨事件密切相关,同时还具有季节性、突发性、高频次、破坏性大等特点(曾波,2019),故研究突发性山地暴雨事件的时空演变特征很有必要。

山地暴雨的发生与天气影响系统密切相关,高空槽引导高原云团东移出高原,诱生西南涡东移,从而高原云团在东移过程中激发新对流,造成四川省沿途暴雨天气(覃丹宇,2006),高原云团东移和西南低涡相互作用过程可互相反馈增强,带来盆地及四周山地暴雨(李国平,2018,2019;李超,2015)。冷平流、南风脉动、涡度平流是促进低涡东移的重要因子,低涡的东移发展又促使其移动前方新对流的激发,而新对流被激发往往位于川东大巴山—武陵山脉一带(郁淑华等,2008;Yu et al.,2016)。肖递祥(2012,2017)对不同暴雨过程对比分析,认为突发性暴雨过程均发生在大气层结处于高能不稳定的状态下,高层干冷空气叠加在低层暖湿气流之上,加大了对流不稳定能量,且四川省极端暴雨主要出现在盆地西部。陈丹(2018)分析四川盆地暴雨的区域分布特征也指出副高偏北偏强有利于西太平洋水汽输送至盆地西部地区,造成该地暴雨发生。

针对四川省降水特别是暴雨特征近年来也有很多统计分析成果,如四川夏季降水呈减少趋势,其中盆地东部和川西高原长期变化呈增多趋势,四川盆地降水明显减少(赵旋等,2013),而四川暴雨日数总体上从西到东也呈现增加—减少—增加的趋势(周长艳,2011)。近50 a四川盆地东部地区、川西南山区由偏旱逐渐向偏涝转变(齐冬梅,2011),盆地年降水量的增加主要由降水量级大的降水次数增加所致(曾波,2019)。王佳津等(2017)发现盆地西南和东北9月易发

生单站持续性暴雨,而区域性暴雨多发生在7月,降水中心多发生在盆地西部沿山一带及盆地东北部。黄楚惠(2020)统计四川10 a山地暴雨事件特征,指出四川山地暴雨事件频次呈递减趋势,但累计雨量和地质灾害却呈逐年增多趋势。

以往对四川暴雨分析大多是日降水量达到暴雨量级的过程,很少对四川省突发性山地暴雨事件展开分析。近年来,张芳丽(2020)诊断突发性山地暴雨事件个例表明,低层中尺度切变线与高层辐散流场的耦合为突发性山地暴雨事件的发生提供了有利环境条件。地形、切变不稳定以及非地转平衡三者共同作用下形成的重力波可导致山地暴雨事件的发生(谢家旭,2021)。目前四川地区突发性强降水事件的研究仍然较少,了解四川突发性山地暴雨事件的特征,如时空分布、频次、持续时间,其累计雨量的年际和月季演变等,是提高西南山地暴雨事件预报水平的重要支撑,更是国家防灾减灾的迫切需求。

## 1 资料与方法

本文所用资料为2008—2017年共10 a四川省165个国家气象站(简称国家站)每天逐小时降水量,高分辨地形数据。四川省地形及站点分布如图1示,可见川西高原上站点稀疏,盆地及其四周地区站点密集。

四川突发性山地暴雨事件的挑选根据Chen等(2021)提出的突发性山地暴雨事件定义标准:(1)水平尺度小于200 km;(2)3 h累计雨量 $\geq 50$  mm,且3 h中至少有1 h降雨量 $\geq 20$  mm(青藏高原及以西地域1 h累计雨量 $\geq 10$  mm且3 h累计雨量 $\geq 25$  mm);(3)同一降水事件内至多只有1 h降雨量 $< 0.1$  mm。识别方法:实际编程查找四川突发性山地暴雨事件时,用小时降水量资料,定义一个事件满足上述标准外,两个突发性暴雨事件的分割规则:小时降水量至少有2 h及以上时间降水中断。如果只有1 h中断降水,前后都均有降水发生,则这1 h归为该突发性暴雨事件持续时间。如有连续7 h降水量:5 mm、0 mm、15 mm、35 mm、26 mm、0 mm、12 mm分布,则记为一次突发性暴雨事件,其持续时间为7 h,以次类推。突发性暴雨事件频次为识别统计时间段内国家站发生突发性山地暴雨事件的次数,同一国家站一天内可有多个突发性暴雨事件,也可1 d或2 d或3 d及以上只有一次突发性暴雨事件。

山地是海拔500 m以上且起伏大、多呈脉状分布

的高地,考虑四川省地理特征及其降水落区时空分布特征(王春学,2017; Zheng,2019),盆地及四周均可视为山地。另外四川西部处于青藏高原东缘,降水量没有平原地区丰富,降水成因和平原地区差异大,也更复杂,属于高原天气气候特征,本文暂不讨论青藏高原东侧的四川甘孜州、阿坝州等高海拔地区,即高原地区的突发性山地暴雨事件,以海拔高于500 m且小于3 000 m的山地作为重点研究区域。统计可得2008—2017年10 a间总计发生979站次(平均每年约有98次)突发性山地暴雨事件(图2)。10 a间突发性山地暴雨事件主要集中在102°E以东的四川地区,川西高原地区仅1次,因此研究四川省突发性山地暴雨事件的特征,以102°E以东的四川地区作为本文分析区域是合理的。

此外四川盆地西部是高原向盆地过渡的陡峭地形带,其降水强度和频次与四川其它山地差异显著(王佳津等,2017)。参照黄楚惠等(2020)对四川省的分区方法,以105°E为界,将四川山地分为东部山区(105°—108.5°E,26°—33°N)和西部山区(102°—105°E,26°—33°N)。西部山区有122个站点、东部山区有43个站点(图1)。

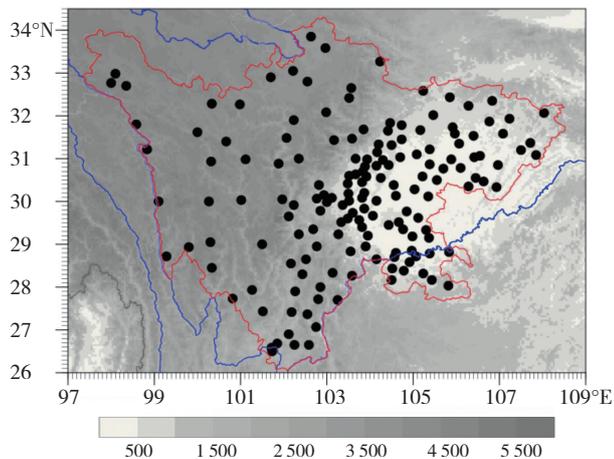


图1 四川省165个国家气象基准站点分布图(灰色阴影为地形高度,单位:m;黑色圆点为观测站点,红线为四川省省界,蓝线标识为河流,下同)

Fig.1 Distribution map of 155 national meteorological reference stations in Sichuan Province (gray shade is terrain height, unit: m. the black dot is the observation station, the red line is the boundary of Sichuan Province, and the blue line is the river. the same as follows)

## 2 四川省突发性山地暴雨事件基本特征

### 2.1 突发性山地暴雨事件频次的空间分布

图2给出2008—2017年四川省国家站突发性山地暴雨事件频次的空间分布。四川省102°E以东突发性山地暴雨事件频次出现1~4次的站点主要位于川西南的大凉山和攀枝花地区,多数国家站大于5次,主要

出现在四川盆地及其东部、四川南部山区;都江堰、温江、名山、乐山四站突发性山地暴雨事件的次数大于15次,峨眉站、峨眉山站则超过了20次,雅安站最多为30次。这与四川省降水统计特征常常提及“雅安天漏”有重叠之处,说明四川省年降水量较大的雅安地区出现突发性暴雨事件也多,故常因突发性暴雨致灾。此外,突发性山地暴雨事件频次多的站主要分布在高原地形与盆地交界处,频次基本在10次或以上,如龙门山脉地形陡峭处,说明地形对突发性山地暴雨事件影响大。盆地东侧地形海拔相对低的区域频次较少。

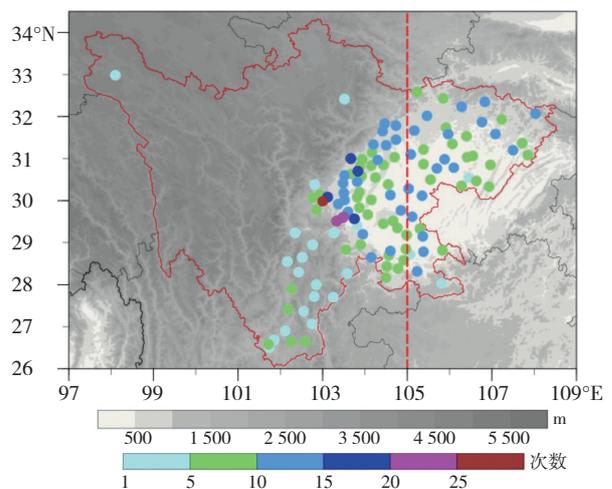


图2 2008—2017年四川省突发性暴雨事件频次的空间分布(彩色圆点表示频次,红色虚线为四川盆地东西部分界线,下同)

Fig.2 Spatial distribution of frequency of sudden rainstorms events in Sichuan Province from 2008 to 2017 (The color origins indicate frequencies, the red dashed line represents the boundary between the eastern and western parts of the Sichuan Basin, hereafter)

### 2.2 突发性山地暴雨事件年际变化

图3为2008—2017年四川省102°E以东的四川地区、东部山区和西部山区突发性暴雨事件频次的年际变化。由图3a可知,2008—2017年10 a间有7年突发性暴雨事件发生的频次在100站次以上,尤其是2009年发生了155站次、2010年发生了185站次;而2013—2015年的年突发性山地暴雨事件频次急剧减少,均在40站次以下,2015年仅只有15站次。年频次在2008—2010年呈上升趋势,2011—2015年呈下降趋势,2016年后又开始上升。

由东部山区和西部山区突发性暴雨事件频次(图3b—c)可知,东部山区和西部山区突发性暴雨事件频次与四川省除高原地区外的整体变化趋势大致类似。东部山区突发性山地暴雨事件频次在2008—2012年呈波动式的下降、上升变化趋势,2013—2015年剧减为低谷频次,2016年又陡然上升,增加了45次,2017年再次下降。东部山区突发性山地暴雨事件频

次最高出现在2010和2012年,达到64次。西部山区突发性山地暴雨事件频次从2008—2010年逐年上升,到2011—2012年频次突然减少,2013年再次剧降到12次,低谷持续了3 a,到2015年最低谷,2016年陡增到67次。西部山区突发性暴雨事件频次最高出现在2010年,高达121次。由图3b、c知,除2008、2012、

2016年外,其它年份西部山区突发性暴雨事件明显比东部山区多2倍左右,差别最大的年份是2009年,西部山区比东部多61次。

综上可见,西部山区突发性山地暴雨事件频次远远大于东部山区,说明四川地区的突发性山地暴雨事件频次更多依赖于西部山地的突发暴雨事件频次。

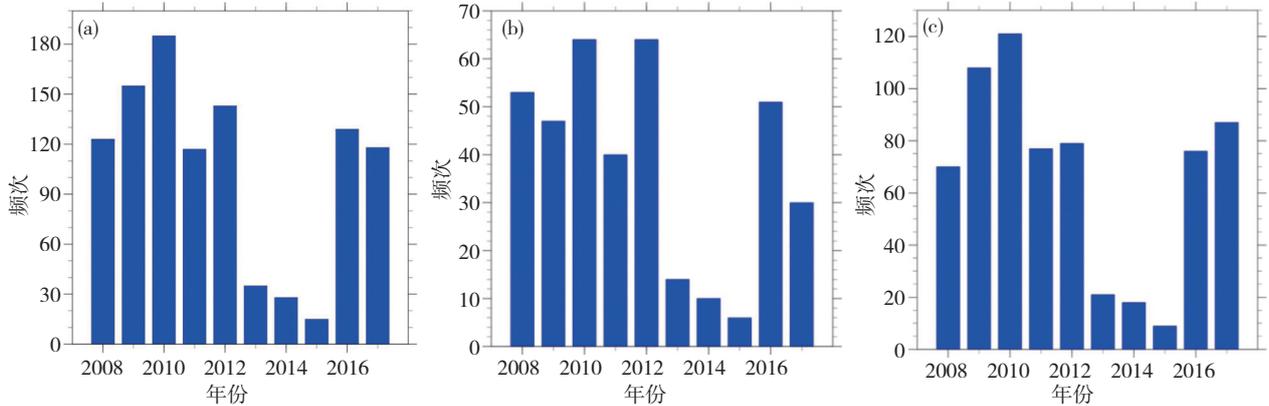


图3 2008—2017年四川省102°E以东的四川地区(a)、东部山区(b)和西部山区(c)突发性暴雨事件频次的年际变化

Fig.3 The annual frequency of sudden rainstorm events in (a) the east of 102°E Sichuan area, (b) eastern mountainous area and (c) western mountainous area in Sichuan Province from 2008 to 2017

### 2.3 突发性山地暴雨事件频次月变化

图4为2008—2017年10 a间四川突发性山地暴雨事件频次的月分布。突发性山地暴雨事件在4—12月均有出现,7月份最多,为452次,其次是8月295次,6月和9月差异不大,分别为119、120次,而4、10、11、12月较少发生突发性暴雨事件,12月仅有1次(荣县,2017年12月1日02时)。10 a间四川省突发性暴雨事件从4月开始逐渐增多,6—7月是飞跃式增长,7月之

后渐渐减少。

从东部山区与西部山区的突发性山地暴雨事件频次的月分布发现,二者逐月演变趋势类似,均是先增加后减少。西部突发性山地暴雨事件频次明显比东部山区多,如7月西部山区突发性山地暴雨事件频次(283次)比东部山区(182次)多了101次,8月份二者差异最大,达到150次,这表明西部山地比东部山地更容易发生突发性山地暴雨事件。

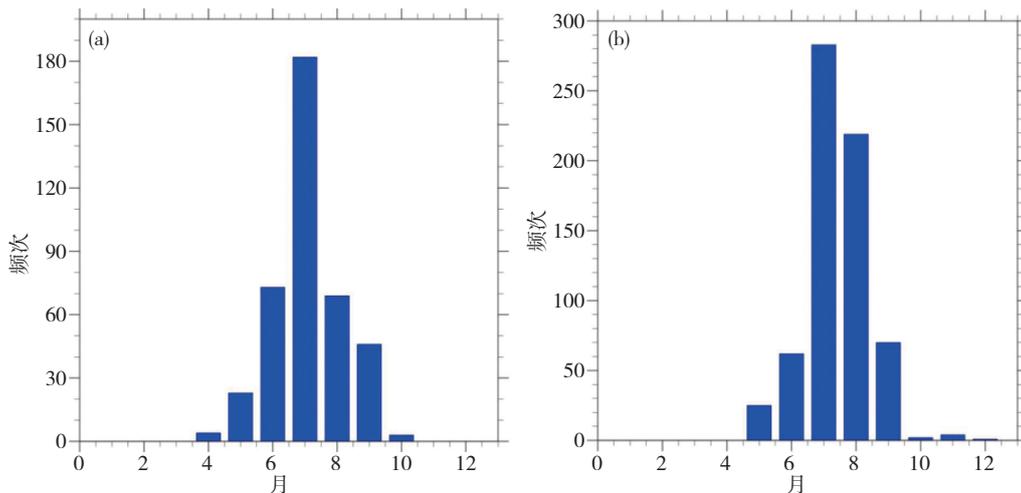


图4 2008—2017年四川省东部山区(a)和西部山区(b)突发性暴雨事件频次的月变化

Fig.4 Monthly frequency of sudden rainstorm events in (a) eastern mountainous area and (b) western mountainous area of Sichuan Province from 2008 to 2017

### 2.4 突发性山地暴雨事件频次的日变化

图5a为2008—2017年102°E以东四川地区突发性暴雨事件频次的日变化。由图5a可知,2008—2017年10 a间102°E以东四川地区突发性山地暴雨事件频次夜间明显高于白天。从19时(北京时,下同)时到凌

晨02时,逐时频次均在60次以上,其中夜间23时最多,达86次。上午08时—14时频次在30次以下,10时最少,为11次。突发性山地暴雨事件频次,从凌晨1时开始逐渐下降,到上午10时达到低谷,11时开始上升,到23时达峰值。

图5b、c为东部山区与西部山区的突发性山地暴雨事件的日变化分布。可见东部山区逐小时频次分布类似图5a变化,夜间频次高,白天频次少,且东部山区深夜至凌晨频次高于上半夜,02时突发性山地暴雨事件出现次数最多为32次,比西部山区多13次。西部山区突发性山地暴雨事件频次日变化与东部有较大差异,高频次时次从16时开始,到上半夜突发性山地暴雨事件频次几乎为深夜至凌晨时间段的两倍,16时发生突发性山地暴雨事件频次最多为34次,且比东部山区多22次。

突发性山地暴雨事件频次的日变化夜间多于白天,在深夜到凌晨东部山区的频次明显多于西部山

区,这与四川东部巴山夜雨对应。而下午到上半夜突发性暴雨事件频次西部山区则显著多于东部山区,这可能与午后热对流多,或天气系统先在四川西部发展有关。东部山区突发性山地暴雨事件频次日变化比西部地区略少。四川省突发性暴雨高频次时次分布先从西部地区16时开始,到深夜转为四川东部最高,表现出强降水有一个从西向东发展传播的过程,这除了高原大地形和午后热对流影响外,也与天气系统如青藏高原低值系统东移或对流云系东移活动有关,与已有研究结论“在30°N附近对流由西向东传播”(王婧羽,2019;Zheng et al.,2019;周芳弛等,2023)一致。

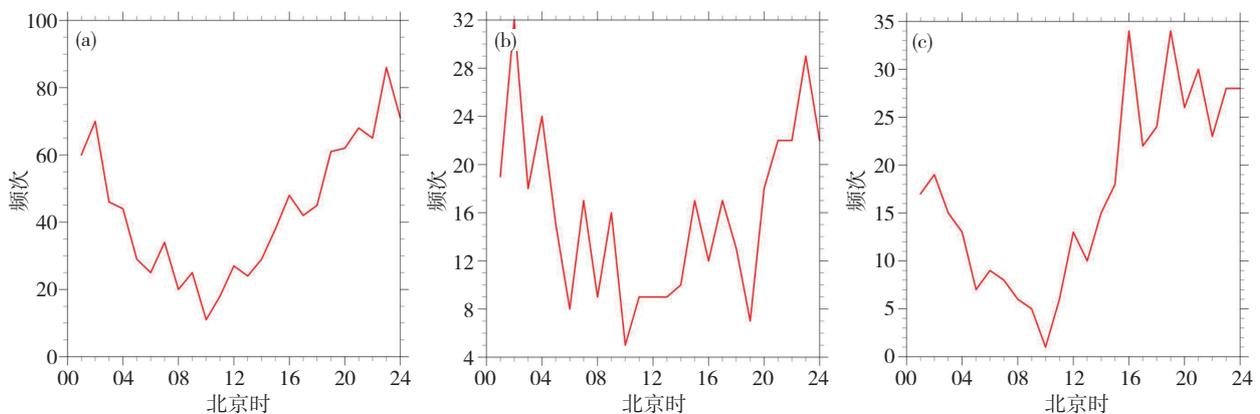


图5 2008—2017年四川省102°E以东地区(a)、东部山区(b)和西部山区(c)的突发性山地暴雨事件频次的日变化

Fig.5 Daily variation of frequency of sudden mountain rainstorm events in (a) the east of 102°E Sichuan area,

(b) eastern mountainous area and (c) western mountainous area from 2008 to 2017

### 3 突发性山地暴雨事件持续时间

突发性山地暴雨事件存在明显的年际、月和日变化特征,那它的持续时间是否存在变化特征,以下展开分析。

图6给出四川省国家站2008—2017年突发性山地暴雨事件平均持续时间的空间分布。可见四川省东部地区突发性山地暴雨事件的平均持续时间大多超过12 h,南江站甚至10 a突发暴雨事件的平均持续时间达到24 h,位于大巴山南麓。而四川西部突发山地暴雨事件的平均持续时间多数在6~12 h之间,少数站点超过12 h,还有两个国家站突发暴雨平均持续时间小于6 h,尤其是在四川省西部龙门山脉一带和西南部山地的突发性山地暴雨事件的平均持续时间基本小于12 h,但是这些突发性山地暴雨事件频次则是较多的(图2),说明西部高海拔的山前突发性山地暴雨事件的小时降水强度更大,更容易致灾。由图6还可知四川省东西部突发性暴雨事件的持续时间有相对明显的区分度,这与造成东西两部分地区突发性暴雨的天气影响系统及其持续时间差异有关,东部突发性山地暴雨事件与西南低涡关系较为密切(郁淑华等,

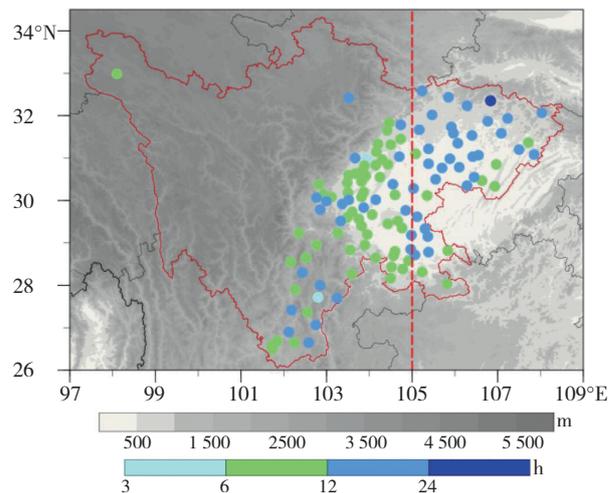


图6 2008—2017年四川省国家站突发性山地暴雨事件平均持续时间(单位:h)

Fig.6 Average duration (unit: h) of sudden mountain rainstorm events at Sichuan national station from 2008 to 2017

2008; Yu et al., 2016),西部突发性山地暴雨事件与天气过程的偏东气流影响有关(肖递祥等,2012,2017),这还有待今后进一步分析。可见沿105°E对四川省突发暴雨进行东西部分区有一定科学上的意义。

图7给出2008—2017年5—9月份突发性山地暴

雨事件持续时间分布,即持续时间的最大值、最小值、平均数、中位数,以及10百分位、90百分位值。由箱须图可知,2008—2017年5—9月份102°E以东四川地区突发性山地暴雨事件持续时间的中位数分别为:8.5、11、11.9、11 h;持续时间的中位数、10百分位值差异不大,但90百分位值差异很明显,说明持续时间较长的突发性暴雨事件月际变化大,6和7月份持续时间最长。5—9月份突发山地暴雨事件持续时间平均数分别为:9.77、13.31、13.46、11.21、13.09 h,持续时间平均值6、7、9三个月最长,5月最短。持续时间最大值6、7月份最长,5月最短,7月份最大值为68 h,比平均值高54 h,这属于极端情形。持续时间最短仅2~3 h。

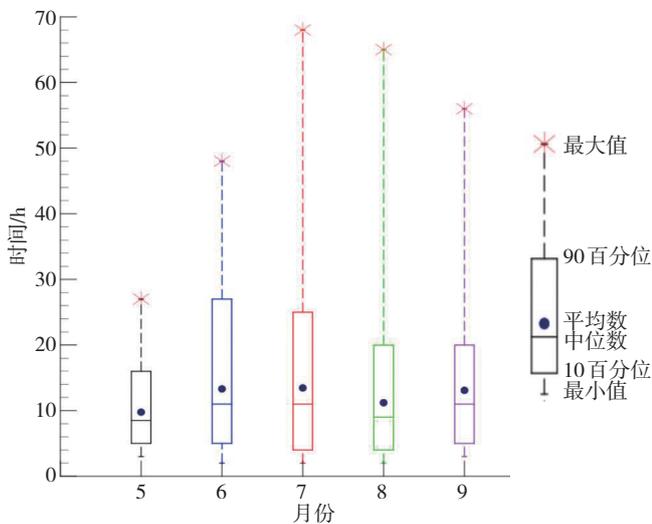


图7 2008—2017年5—9月份102°E以东四川地区突发性山地暴雨事件的持续时间

Fig.7 The duration of sudden mountain rainstorm events in Sichuan area east of 102°E from May to September 2008 to 2017

图8为2008—2017年102°E以东四川地区不同持续时间突发性暴雨事件频次分布。10 a间102°E以东四川地区突发性山地暴雨事件持续时间主要集中在3~12 h,大于50次以上;其次是13~24 h,大于30 h以上的突发性暴雨事件较少,10 a频次不超过10次,大多在1~5次之间。最长突发性暴雨事件持续了68 h,发生在2013年7月8—10日的温江站,累计雨量达330 mm,最强降水出现在9日07—11时,达到了突发性暴雨事件标准,显然这是一次持续近3 d的强降水过程。

东部山区和西部山区突发性暴雨高频次事件持续时间也均在3~12 h(图略),其中东部山区事件持续时间为9、11、14 h的频次最多,均为26次。西部山区突发性暴雨事件的持续时间大多数为5 h,有58次。持续时间超过30 h以上的突发性暴雨事件频次东部山区则比西部山区要多,进一步凸显了四川西部山地暴雨事件突发性更强的特征。

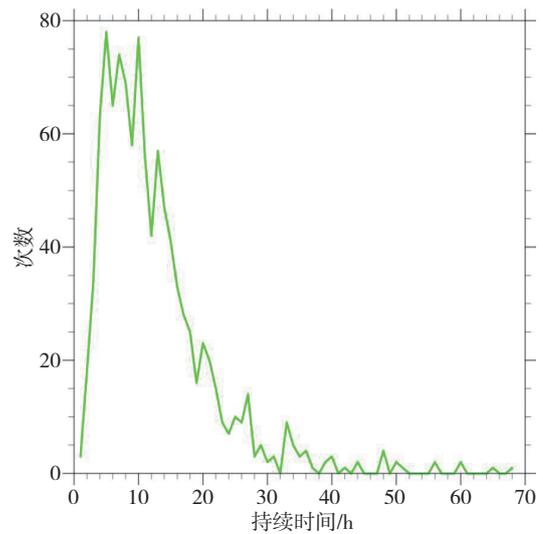


图8 2008—2017年四川省不同持续时间突发性暴雨事件发生的频次

Fig.8 The frequency of sudden rainstorm events of different durations in Sichuan Province from 2008 to 2017

综上所述,2008—2017年102°E以东四川地区突发性山地暴雨事件持续时间大多集中在3~12 h,持续时间超过30 h的事件东部山区略多于西部山区。6、7、9三个月平均持续时间长,5月和8月平均持续时间较短。

#### 4 突发性山地暴雨事件强度特征

图9给出2008—2017年四川省国家站突发性山地暴雨事件的平均累计雨量的空间分布。10 a四川省突发性山地暴雨事件平均累计雨量东部明显比西部多,这与东部突发性山地暴雨事件的平均持续时间较长有关(图6)。东部山区10 a突发性山地暴雨事件的平均累计雨量大多数国家站超过100 mm,而西部山区主要集中在50~100 mm之间,但西部的雅安地区表现

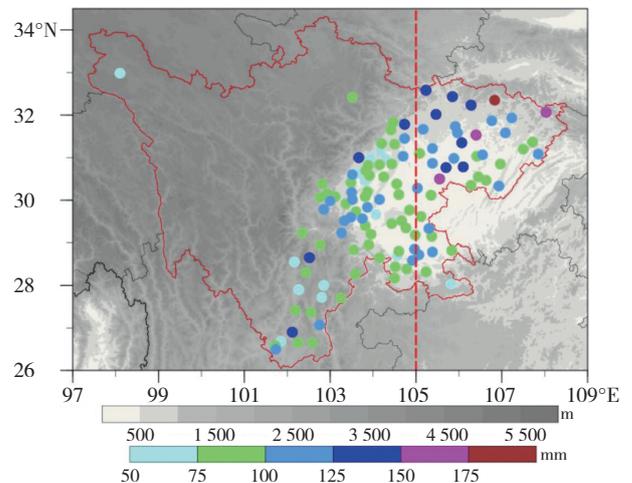


图9 2008—2017年四川省国家站突发性山地暴雨事件的平均累计雨量的空间分布(单位:mm)

Fig.9 Spatial distribution of average cumulative rainfall (unit: mm) of sudden mountain rainstorm events at Sichuan national station from 2008 to 2017

为平均累计雨量超过 100 mm,这与“雅安天漏”对应(曾波等,2019),说明雅安地区不仅突发性山地暴雨事件频次高、暴雨强度也大。东部南江站突发暴雨事件的平均持续时间最长(图6),对应的平均累计雨量也是最大的,超过 175 mm(图9中深橙色点)。

图 10 为 2008—2017 年 102°E 以东四川地区突发性山地暴雨事件的年平均累计雨量分布。102°E 以东四川地区突发性山地暴雨事件年平均累计雨量在 80~120 mm 之间,事件的年平均累计雨量从 2008 年开始先缓慢增多,之后略有下降,再上升而后下降,如此反复。年平均累计雨量 2013 年最大,达 126.9 mm, 2008 年最小,为 81.2 mm。

东部山地突发性山地暴雨事件的年平均累计雨量略低于西部山地,并且东部山地与西部山地的年平均累计雨量年际变化趋势差异较小。东部山地年平均累计雨量 2015 年最大,达 140.3 mm, 2008 年最小,为 65.2 mm。西部山地年平均累计雨量 2013 年最大,达 130 mm, 2016 年最小,为 78.8 mm。由前面频次分析知,2013—2015 年突发性山地暴雨事件的频次少,而这 3 年事件的年平均累计雨量反而多,说明这 3 年突发性山地暴雨强度较其它年份强。

图 11 给出 2008—2017 年共 10 年间 5—9 月份突发性山地暴雨事件的累计雨量。5 月,突发性山地暴雨事件累计雨量较多的年份是 2008、2011、2012 年,2012 年最多,达 1 250.2 mm,2011 年次之,且两年主要是西部山区突发性山地暴雨事件造成的累积雨量,其余年份较少。此外只有 5 年东部和西部山区均有突发性山地暴雨事件出现,另外 5 年要么是西部无突发性山地暴雨事件或东部无突发性山地暴雨事件,而 2013 和 2014 年 102°E 以东四川地区无突发性暴雨事件发生。

6 月,突发性山地暴雨事件累计雨量较 5 月份开始增多。除 2008 年东部山区和 2010 年 102°E 以东四川

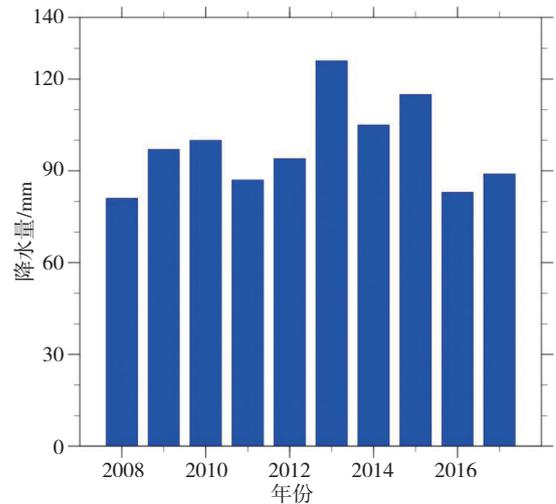


图 10 2008—2017 年 102°E 以东四川地区突发性山地暴雨事件年平均累计雨量(单位:mm)

Fig.10 Average annual accumulated rainfall of sudden mountain rainstorm events in Sichuan east of 102°E from 2008 to 2017(unit:mm)

地区未发生突发性暴雨事件外,其余年份均有,其累计雨量从 2011 年到 2015 年呈现逐年缓慢减少趋势,2016 年急剧增多,2017 年又急剧减少变化。2009 和 2016 年突发性山地暴雨事件的累计雨量较其它年份异常偏多,特别是 2009 年累计雨量高达 3 924.7 mm。

7 月,西部山区和东部山区每年均有突发性山地暴雨事件发生,其累计雨量显著比其它月份要大很多,2010 年尤其突出,累计雨量高达 9 638.5 mm,2015 年最少,为 386.3 mm。7 月突发性山地暴雨事件累计雨量先缓慢增加,后减少,到 2012 年又增加,2015 年后持续缓慢减少,2016 年增加,2017 年略有降低,呈现波动式增加、减少的变化趋势。

8 月,突发性山地暴雨事件年际变化与 7 月有类似之处:呈波动式先增加后减少的演变趋势。8 月其累计雨量整体偏多,仅次于 7 月份,2010 年最多,为 8 737.3 mm;2015 年最少,仅 763.1 mm。与 7 月份不同之

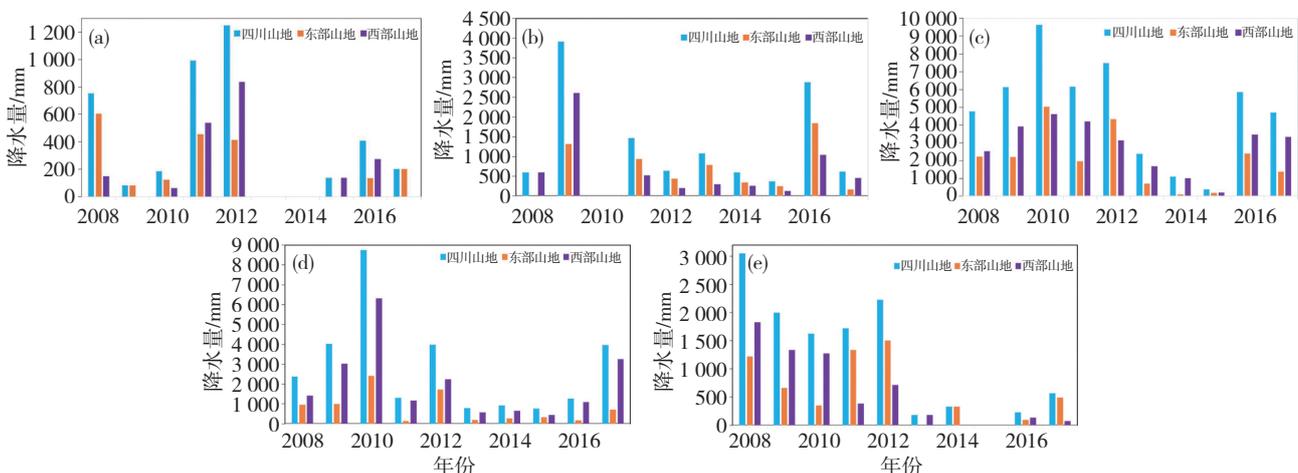


图 11 2008—2017 年 5 月(a)、6 月(b)、7 月(c)、8 月(d)、9 月(e)突发性山地暴雨事件的累计雨量分布(单位:mm)

Fig.11 Cumulative rainfall distribution of sudden mountain rainstorm events from (a) May, (b) June, (c) July, (d) August, (e) September during 2008–2017 (unit:mm)

处在于:2013—2016年8月呈现累计雨量变化较小的低值时期,西部山区累计雨量比东部山区多,而7月东西两地累计雨量差异较小。

9月,突发性山地暴雨事件累计雨量比7月和8月明显减少,2008—2012年5 a间累计雨量先减少后增加,到了2012年之后断崖式减少,2013—2017年5 a累计雨量是低谷期,2015年9月无突发性山地暴雨事件发生。9月累计雨量年际变化整体前5 a多,后5 a异常少。

综上所述,四川山地突发性山地暴雨事件累计雨量年际变化和月季变化都较显著,10 a间5—9月累计突发性暴雨事件的累计雨量7月最多,8月次之,5月、6月、9月累计雨量明显比7月和8月少。2008年、2010年、2011年、2012年突发性暴雨事件的累计雨量最多,2013—2015年3 a较少,2015年最少,但突发性暴雨事件的年平均累计雨量2015年最多,说明2015年突发性山地暴雨事件很少,但强度大。

## 5 结论与讨论

本文利用2008—2017年国家站10 a小时降水量资料和地形数据,对102°E以东四川地区突发性山地暴雨事件开展了统计特征分析,主要结论如下:

(1) 2008—2017年10 a间四川共出现了979次突发性山地暴雨事件,突发性山地暴雨事件主要出现在四川盆地及其东部、四川南部山区。突发性山地暴雨事件高频次主要分布在盆地与西部高原地形交界处,且西部山区突发性山地暴雨事件频次远高于东部山区,地形对突发性山地暴雨事件影响大。

(2) 四川东部山区与西部山区突发性山地暴雨事件频次的月分布演变趋势相似,均是先增加后减少。突发性山地暴雨事件从4月开始逐渐增多,6—7月是飞跃式增长,7月之后渐渐减少;

(3) 突发性山地暴雨事件夜间多于白天,深夜到凌晨东部山区事件频次明显高于西部山区,而下午到上半夜西部山区事件频次要高于东部山区。突发性山地暴雨事件高频次时次分布先从西部地区的下午16时开始,到深夜转为四川东部最高,表明强降水有一个从西向东发展传播的过程。

(4) 四川突发性山地暴雨事件的持续时间大多集中在3~12 h,东部山区和西部山地变化趋势基本一致,但事件的平均持续时间东部山区明显比西部山区长。

(5) 东部与西部突发性山地暴雨事件的年平均累计雨量年际变化趋势差异小,西部山区略高,年平均累计雨量在80~120 mm之间。5—9月突发性山地暴雨累计量7月最多,8月次之,5月、6月、9月累计雨量明显偏少。2015年突发性山地暴雨事件频次最少,但

年平均累计雨量最多,说明2015年发生突发性山地暴雨事件很少,但强度大。

本文统计了近10 a四川省除西部高原地区以外地区的突发性山地暴雨事件的一些基本特征,初步揭示了突发性山地暴雨事件的演变和发展趋势。但仍有一些问题尚未考虑:(1) 由于资料获取问题,本文使用的降水资料只有10 a,对四川省突发性山地暴雨事件的长期变化趋势,需要用30 a以上的降水数据分析才更客观地反应出其气候变化等;(2) 本文只使用了四川省国家站小时降水资料,区域站资料观测时间短及质量问题而未采用;(3) 四川西部高原地区由于降水成因更为复杂,降水量分级标准与平原地区不一样,本文未对该地区展开统计分析,而高原地区强降水也容易造成灾害,需要后续继续统计并分析高原地区强降水特征。

## 参考文献(references):

- 陈丹,周长艳,熊光明等.2018.近53年四川盆地夏季暴雨变化特征分析[J].高原气象,37(1):197-206. Chen D, Zhou C Y, Xiong G M, et al. 2018. Characteristics of climate change of summer rainstorm in Sichuan basin in the last 53 years. Plateau Meteorology,37(1):197-206 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00022
- 陈栋,顾雷,蒋兴文.2010.1981—2000年四川夏季暴雨大尺度环流背景特征[J].大气科学学报,33(4):443-450. Chen D, Gu L, Jiang X W. 2010. Characteristics of large-scale circulation background of summer heavy rainfall in Sichuan during 1981-2000 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, (4):443-450 (in Chinese)
- 黄楚惠,李国平,张芳丽,等.2020.近10 a气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征[J].暴雨灾害,39(4):335-343. Huang C H, Li G P, Zhang F L, et al. 2020. Evolution characteristics of mountain rainstorms over Sichuan Province in the past ten years under the influence of climate change [J]. Torrential Rain and Disasters,39(4):335-343 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.003
- 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 C, Li Y Q, Jiang X W. 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,39(6):1191-1203 (in Chinese). doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14270
- 李国平.2016.近25年来中国山地气象研究进展[J].气象科技进展,6(3):115-122. Li G P. 2016. Progress and prospects in research of mountain meteorology in China during the past 25 years [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,6(3):115-122 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.016
- 李国平,陈佳.2018.西南涡及其暴雨研究新进展[J].暴雨灾害,37(4):293-302. Li G P, Chen J. 2018. New progresses in the research of heavy rain vortices formed over the southwest China [J]. Torrential Rain and Disasters,37(4):293-302 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.001
- 李国平,张万诚.2019.高原低涡、切变线暴雨研究新进展[J].暴雨灾害,38(5):464-471. Li G P, Zhang W C. 2019. Recent advances in the research of heavy rain associated with vortices and shear lines come from

- the Tibetan Plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*,38(5):464–471 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.008
- 李琴,杨帅,崔晓鹏,等.2016.四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究[J].*大气科学*,41(2):341–356. Li Q, Yang S, Cui X P, et al. 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,40(2):341–356 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14296
- 蒋兴文,王鑫,李跃清,等.2008.近20年四川盆地大暴雨发生的大尺度环流背景[J].*长江流域资源与环境*,17(z1):132–137. Jiang X W, Wang X, Li Y Q, et al. 2008. Large scale general orclulation characteristics of heavy rain of sichuan basin at latest twenty years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,17(z1):132–137 (in Chinese)
- 齐冬梅,李跃清,陈永仁,等.2011.近50 a 四川地区旱涝时空变化特征研究[J].*高原气象*, 30(5):1170–1179. Qi D M, Li Y Q, Chen Y R, et al. 2011. Spatial-temporal variations of drought and flood intensities in Sichuan region in the last 50 years [J]. *Plateau Meteorology*,30(5):1170–1179 (in Chinese)
- 覃丹宇,方宗义,江吉喜.2006.典型梅雨暴雨系统的云系及其相互作用[J].*大气科学*,30(4):578–586. Qin D Y, Fang Z Y, Jiang J X. 2006. The cloud systems of heavy rainfall in the typical meiyu period and their interactions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,30(4): 578–586 (in Chinese). doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.04
- 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 C X, Gao S T, Liang L, et al. 2013. Diagnostic analysis of dynamical parameters for Sichuan rainstorm influenced by terrain [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,37(5):1099–1110 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12.112
- 王春学,马振峰,王佳津,等.2017.四川盆地区域性暴雨时空变化特征及其前兆信号研究[J].*气象*,43(12),1517–1526. Wang C X, Ma Z F, Wang J J, et al. 2017. Characteristics of regional rainstorm in Sichuan basin and its precursor signal [J]. *Meteorology Monthly*,43(12): 1517–1526 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.12.007
- 王佳津,陈朝平,刘莹,等.2017.四川省持续性暴雨定义及时空分布特征[J].*气象科技*,45(2):331–341. Wang J J, Chen C P, Liu Y, et al. 2017. Statistical analysis of persistent heavy rainfall in Sichuan [J]. *Meteorological Science and Technology*,45(2):331–341 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20160242
- 王婧羽,王晓芳,汪小康,等.2019.青藏高原云团东传过程及其中尺度对流系统的统计特征[J].*大气科学*,43(5):1019–1040. Wang J Y, Wang X F, Wang X K, et al. 2019. Statistical characteristics of eastward propagation of cloud clusters from the tibetan plateau and meso-scale convective systems embedded in these cloud clusters [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,43(5):1019–1040 (in Chinese).doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18167
- 肖递祥,杨康权,祁生秀.2012.2011年7月四川盆地两次突发性暴雨过程的对比分析[J].*气象*,38(12):1482–1491. Xiao D X, Yang K Q, Qi S X. 2012. Comparative analysis of two abrupt heavy rain processes in Sichuan basin in July 2011 [J]. *Meteorology Monthly*,38(12):1482–1491 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.12.005
- 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]. *Meteorology Monthly*,43(10):1165–1175 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.001
- 谢家旭,李国平.2021.重力波与对流耦合作用在一次突发性山地暴雨事件触发中的机理分析[J].*大气科学*,45(3): 617–632. Xie J X, Li G P. 2021. Mechanism analysis of a sudden rainstorm triggered by the coupling of gravity wave and convection in mountainous area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,45(3):617–632 (in Chinese). doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20137
- 郁淑华,高文良,肖玉华.2008.冷空气对两例高原低涡移出高原影响的分析[J].*高原气象*,27(1):96–103. Yu S H, Gao W L, Xiao Y H. 2008. Analysis for the influence of cold air mass on two cases of plateau vortex moving out of the Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*,27(1): 96–103 (in Chinese)
- 曾波,湛芸,王钦,等.2019.1961–2016年四川地区不同量级不同持续时间降水的时空特征分析[J].*冰川冻土*,41(2):192–204. Zeng B, Chen Y, Wang Q, et al. 2019. Temporal and spatial characteristics of different classes and various durations of precipitation in Sichuan Province from 1961 to 2016 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,41(2): 444–456 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0012
- 张芳丽,李国平,罗潇. 2020.四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统分析[J].*高原气象*,39(2):321–332. Zhang F L, Li G P, Luo X. 2020. Some influence factors of a sudden rainstorm event in northeast Sichuan basin of China. *Plateau Meteorology [J]*,39(2):321–332 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00080
- 赵旋,李耀辉,齐冬梅.2013.1961–2007年四川夏季降水的时空变化特征[J].*冰川冻土*, 35(4):959–967. Zhao X, Li Y H, Qi D M. 2013. Spatial-temporal variation characteristics of summer precipitation in Sichuan, 1961–2007 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,35(4): 959–967 (in Chinese). doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0108
- 周长艳,岑思弦,李跃清,等.2011.四川省近50 a 降水的变化特征及影响[J].*地理学报*,66(5):619–630. Zhou C Y, Cen S X, Li YQ, et al. 2011. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*,66(5): 619–630 (in Chinese). doi: 10.11821/xb201105005
- 周芳弛,李国平,黄楚惠.2023.四川山地暖季夜间暴雨的空间分布以及对海拔高度的依赖性[J].*沙漠与绿洲气象*,17(4):78–86. Zhou F C, Li G P, Huang C H. 2023. Spatial distribution of nighttime rainstorms in warm season in Sichuan mountains and the dependence on altitude[J]. *Desert and Oasis Meteorology*,17(4):78–86 (in Chinese). doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.04.011.
- Chen Y, Wang X, Huang L, et al. 2021. Spatial and temporal characteristics of abrupt heavy rainfall events over Southwest China during 1981–2017 [J]. *International Journal of Climatology*,41(5):3286–3299. doi:10.1002/joc.7019
- Yu S H, Gao W L, Xiao D X, et al. 2016. Observational facts regarding the joint activities of the southwest vortex and plateau vortex after its departure from the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,33:34–46. doi:10.1007/s00376-015-5039-1
- Zheng Y G, Gong Y D, Chen J, et al. 2019. Warm-season diurnal variations of total, stratiform, convective, and extreme hourly precipitation over central and eastern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(2),143–159. doi:10.1007/s00376-018-7307-3