

李强, 邓承之, 张勇, 等, 2017. 1980—2012 年 5—9 月川渝盆地小时强降水特征研究[J]. 气象, 43(9):1073-1083.

1980—2012 年 5—9 月川渝盆地 小时强降水特征研究*

李 强^{1,2} 邓承之¹ 张 勇¹ 何 跃¹ 邹 倩¹ 何慧根³

1 重庆市气象台, 重庆 401147

2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610000

3 重庆市气候中心, 重庆 401147

提 要: 利用四川和重庆 123 个气象观测站 1980—2012 年小时降水资料, 分析川渝地区主汛期 5—9 月小时强降水频次、强度和持续性等时间演变和空间分布特征。结果表明, ≥ 20 、 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 三种强度阈值强降水时间演变上, 1980—2012 年年际和日变化具有较好的一致性, 三种强降水年平均频次分别为 504、184 和 28 次。 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水空间分布上, 在山地地形动力辐合抬升, 以及盆地西部较大的地形梯度作用下, $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水高频次区主要分布于盆地西北部的龙山山脉、西南部雅安及乐山周围与盆地过渡区。 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水频次的日峰值空间分布上, 盆地南部主要出现在 20:00—01:00(北京时, 下同), 而盆地中部、北部和东部主要在 02:00—07:00。持续不同小时时间尺度的强降水事件日变化上, 具有双峰型结构, 午后为第一个降水峰值, 20:00 至第二天 07:00 为第二个峰值, 白天多为短时间(2~6 h)强降水事件, 而傍晚开始至第二天清晨, 持续 2~18 h 强降水事件均有发生。不同开始时间强降水事件的强度与频次和降水量具有一致性的日变化特征, 呈现单峰型结构, 峰值主要发生在 18:00—06:00, 且不同开始时间事件频次和降水量空间分布上, 白天(09:00—20:00)相对于夜间(21:00—08:00)偏小, 即夜间强降水事件特征表现明显。

关键词: 小时强降水, 频次, 强度, 阈值

中图分类号: PP468.0⁺24

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.005

Study on Spatio-Temporal Distribution Characteristics of Hourly Heavy Rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September During 1980—2012

LI Qiang^{1,2} DENG Chengzhi¹ ZHANG Yong¹ HE Yue¹ ZOU Qian¹ HE Huigen³

1 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610000

3 Chongqing Climatic Center, Chongqing 401147

Abstract: Based on the qualified hourly precipitation data of 123 stations in Sichuan Province and Chongqing City from 1980 to 2012, the multiple spatio-temporal distribution characteristics of the frequency, the intensity and the duration of hourly heavy rainfall (HHR) during main flood season from May to September are investigated. The main conclusions are as follows. The annual variation and diurnal variation of frequency during 1980—2012 are nearly identical at the thresholds above 20 mm, 30 mm and 50 mm per hour. The average annual frequency of HHR is 504, 184 and 28 respectively. According to the dynamic convergence lifting over mountain terrain and the forcing of large mountain gradient in the west of

* 中国气象局 2017 年预报员专项(CMAYBY2017-060)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目(SZKT2016004)和重庆市气象局 2016 年业务技术攻关团队项目(YWGGTD-201607, YWGGTD-201624)共同资助

2016 年 3 月 14 日收稿; 2017 年 4 月 14 日收修定稿

第一作者: 李强, 主要从事数值天气预报研究. Email: cqlqlq@163.com

Sichuan and Chongqing Basin, the high frequency areas of HHR at the thresholds above 20 mm per hour distribute in Longshan Mountains in the northwest of the basin and the transition zone between the surrounding area of Ya'an and Leshan and the southwest of basin. The diurnal peak of frequency mainly happens between 20:00 BT and 01:00 BT in the south of basin and between 02:00 BT and 07:00 BT in the central, north and east of the basin. The diurnal variation of different hours shows double active peaks with the first peak after the noon and the second peak between 20:00 BT and the next 07:00 BT. The events of short duration (2–6 h) mostly occur in the day time, yet the events of lasting 2 to 18 hours all happen between the nightfall and the next morning. The intensity, frequency and precipitation amount of the events of HHR at distinct beginning time are characterized by similar daily variation with the single active peak happening between 18:00 BT and 06:00 BT. The accumulating rainfall and the frequency of the HHR events are less during the day time (09:00–20:00 BT) than over night (21:00–08:00 BT), which means the HHR events are remarkable at night time.

Key words: hourly heavy rainfall, frequency, intensity, thresholds

引 言

短时强降水是短时间内降水强度较大,降水量级达到或超过一定阈值,且常伴有雷雨、大风、冰雹等强对流天气,具有降水的短时特征及强对流特征。美国易导致暴洪的短时强降水为 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (Davis, 2001),中央气象台对短时强降水的定义是小时降水量 $\geq 20 \text{ mm}$ 。四川和重庆地形复杂,海拔落差大,地貌类型多样,处于中国东部季风区和青藏高原高寒区的过渡带,受到高原气候和湿润的亚热带季风气候共同影响,因而川渝盆地地区常发生局部强降水,且盆地西部、中部和东部的降水有不同的特征(徐裕华, 1991; 朱艳峰和宇如聪, 2003; 马振锋等, 2006; 周长艳等, 2006; 2008)。由于资料时间分辨率的限制,对川渝地区降水特征的研究多以日、月、年降水资料为基础,研究降水的时空分布特征(张琪和李跃清, 2014; 周长艳等, 2011)。

近年来,随着高时间分辨率降水资料的出现和积累,国内外学者对降水日变化做了一些研究(Trenberth et al, 2003; Chen et al, 2007; 李建等, 2008; 戴泽军等, 2009; 郝莹等, 2012; 段鹤等, 2014; 何晗等, 2015)。Yu et al(2007a; 2007b)研究了中国大陆区域的夏季降水日变化特征,揭示了夏季降水的区域性差异,指出青藏高原及其东部地区在午夜达到降水极值,长江中游地区的最大降水出现在清晨,且研究降水持续性与降水日变化特征之间的关系,长持续性($\geq 6 \text{ h}$)降水峰值大多位于夜间和清晨,而短持续性(1~3 h)降水的极大值则多出现在

下午或傍晚。Zhou et al(2008)利用地面雨量计观测和卫星观测的降水资料进一步分析了中国夏季降水频率和强度的日变化特征。司波等(2012)运用广义 Pareto 分布和广义极值分布对四川盆地 12 个站的逐时降水极值进行了拟合,并推算出泸州 50 年一遇和 100 年一遇的 1 h 雨量极值分位数超过了 100 mm。陈炯等(2013)研究发现,中国西南部是仅次于华南地区的短时强降水活跃地带,且该区域短时强降水日变化呈夜间活跃型的单峰结构,活跃时段集中在 20:00 时至次日 02:00 时,且比湖北的短时强降水集中时间要提前 6 h 左右。周秋雪等(2015)利用自动站和基本站研究四川小时强降水时空分布特征,指出小时雨强落区主要集中在四川盆地及攀西南部的大部分地区,且强降水高发中心主要位于从盆地向山脉过渡的纵向陡峭地形区。

以上研究在西南地区降水的日变化、年际变化、强度特征等取得了非常重要的成果,但以上研究中主要以四川范围内降水资料为研究对象,并没考虑重庆地区所在盆地东部范围,且川西高原和川渝盆地方面具有降水局地性差异,研究中利用区域自动站资料,由于其资料时间较短,在区域性长期气候方面并不具有代表性。本文利用 1980—2012 年小时强降水发生主要月份(5—9 月)逐小时降水资料,研究川渝盆地的小时强降水时空分布特征,从而提高对该地区小时强降水发生、发展规律的认识。

1 资料与研究方法

本研究所用数据包括四川和重庆 1980—2012

年主要降水月份 5—9 月逐小时降水观测资料,源于由中国气象局国家气象信息中心提供“中国国家级地面气象站逐小时降水数据集(V1.0)”,数据经过了气候极值检验、内部一致性检验和时间一致性检验等质量控制,考虑到数据的完整性,对于每年 5—9 月不能完整记录的站点,记录当年缺测,滤除了缺测两年以上的站点,最终使用有 123 个气象观测站,研究范围主要为四川盆地和重庆与四川省接壤地区的盆地地区(图 1),而川西高原和攀西地区高原不在本研究的范围之内。不同阈值小时强降水具有不同尺度天气系统特征(陈炯等,2013),本文主要研究 ≥ 20 、 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水阈值时空分布特征,研究是否具有时空一致性,且利用逐小时降水,研究强降水事件的时空分布特征,以 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为小时强降水阈值。

对每个站进行 24 h 降水普查,利用降水持续性分析降水日变化特征,为定义强降水事件,当一次降水过程有 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水发生即为强降水事件,定义一次强降水开始时间为至少 2 h 前没有降水发生,降水结束之后连续 2 h 没有降水发生,判定一次强降水过程结束,将一次强降水开始至结束间隔的小时数定义为强降水持续时间,强降水持续时间内的降水量累计为强降水事件的降水总量,开始时间定义为强降水事件开始时间,结束时间定义为强降水事件结束时间,一次强降水事件中,极大降水出现的值,为此次降水事件的峰值,出现时间为峰值

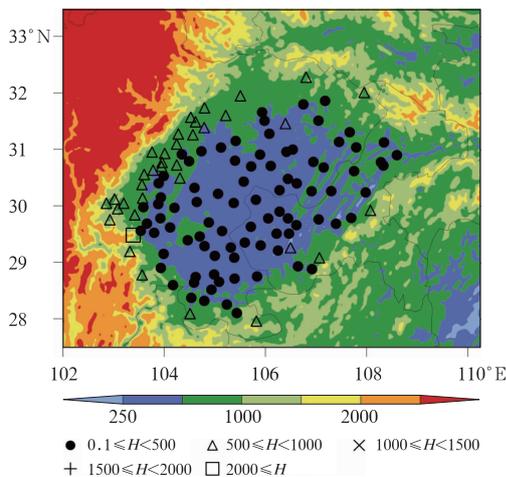


图 1 川渝盆地气象站高度及空间分布和地形叠加(单位:m)

Fig. 1 Spatial distribution and height of weather stations and the overlaid terrain in Sichuan and Chongqing Basin (unit: m)

出现时间。根据降水持续时间划分不同时间的持续性时间,以 1 h 为间隔,统计 1~24 h 持续性强降水事件次数、累计降水量和强度,强降水频次指统计时段内发生强降水的次数,降水总量为强降水累计雨量,而降水强度指降水总量和降水频次的比值,而大于 24 h 强降水事件不在统计范围之内。

2 结果分析

2.1 不同阈值小时强降水年代际演变特征

图 2 给出了川渝盆地地区逐年不同小时强降水频次变化,从图上分析不同阈值的强降水具有明显的年际和年代际变化特征,20 世纪 80 年代 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水,频次较大,为 542 次 $\cdot \text{a}^{-1}$;90 年代年际变化较大,1993、1997 年分别为 340、339 次,而 1998 年达到 670 次,总共 471 次 $\cdot \text{a}^{-1}$;2000 年以来,接近 500 次 $\cdot \text{a}^{-1}$ 。且 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水与 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水每年分布具有很好趋势,相关系数为 0.96,通过 0.01 显著性水平检验; $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水与 ≥ 20 和 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 具有一定年际差异,一些年份趋势较一致,陈炯等(2013)研究指出 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水一般是中小尺度天气系统造成,而 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水主要是小尺度天气系统导致。而 ≥ 50 和 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水相关系数为 0.68,通过 0.01 显著性水平检验,表明 ≥ 20 、 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水年际变化具有很好的—致性。1980—2012 年 ≥ 20 、 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

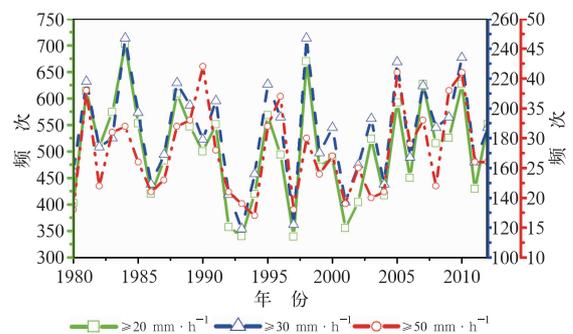


图 2 1980—2012 年 ≥ 20 、 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水频次年变化(单位:次)

Fig. 2 Annual variation of hourly heavy rainfall frequency above 20, 30 and 50 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ during 1980—2012 (unit: time)

强降水年平均频次分别为 504、184 和 28 次。

2.2 不同阈值小时强降水日变化演变特征

图 3 给出了 ≥ 20 、 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强度阈值强降水的累计频次逐时变化,不同阈值小时强降水具有明显的日变化特征, ≥ 20 和 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 小时雨强的日变化呈单峰型结构,频次峰值出现在 03:00 时,分别为 1327、504 次,这与陈炯等 (2013) 研究的盆地强降水单峰结构具有一致性; $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 在日变化上也呈现单峰型结构,但在夜间时段出现了两个峰值,分别出现在 01:00 和 03:00 时,峰值分别为 79 和 77 次,周秋雪等 (2015) 研究指出, $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 在四川境内具有多峰型结构,极大峰值出现在 03:00,次峰值在 00:00,与本结果较为一致。而小时强降水频次谷值均出现在下午,大致在 12:00—18:00 时均为小时强降水间歇时段。即从一日强降水频次分布上,从傍晚开始频次逐渐增加,在 00:00—03:00 时达到极大值,而后呈逐渐减小趋势,直到第二天上午。 ≥ 20 和 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强度阈值, ≥ 20 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强度阈值逐时变化相关系数为 0.99、0.95,均通过 0.01 显著性水平检验,表明以上三种强度阈值强降水逐时变化具有很好一致性。

2.3 不同阈值强度强降水空间分布特征

图 4 给出了 1980—2012 年 5—9 月 ≥ 20 、 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 三种小时阈值强降水累计频次空间分布。 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水 ≥ 120 次高频次区主要分布于四川盆地西部的龙山山脉、西南部雅安及乐山周围与盆地过渡区,极大频次出现在四川雅安和峨眉,均达 295 次;而川渝盆地东北部频次相对

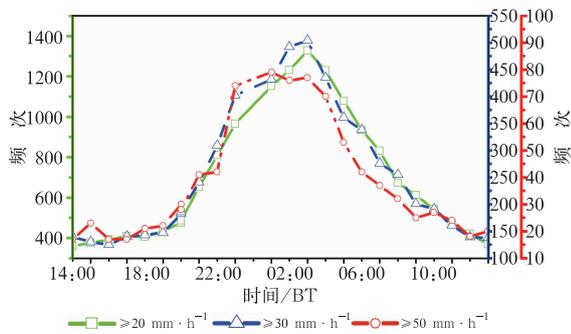


图 3 同图 2, 但为频次日变化

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for diurnal variation of hourly heavy rainfall frequency

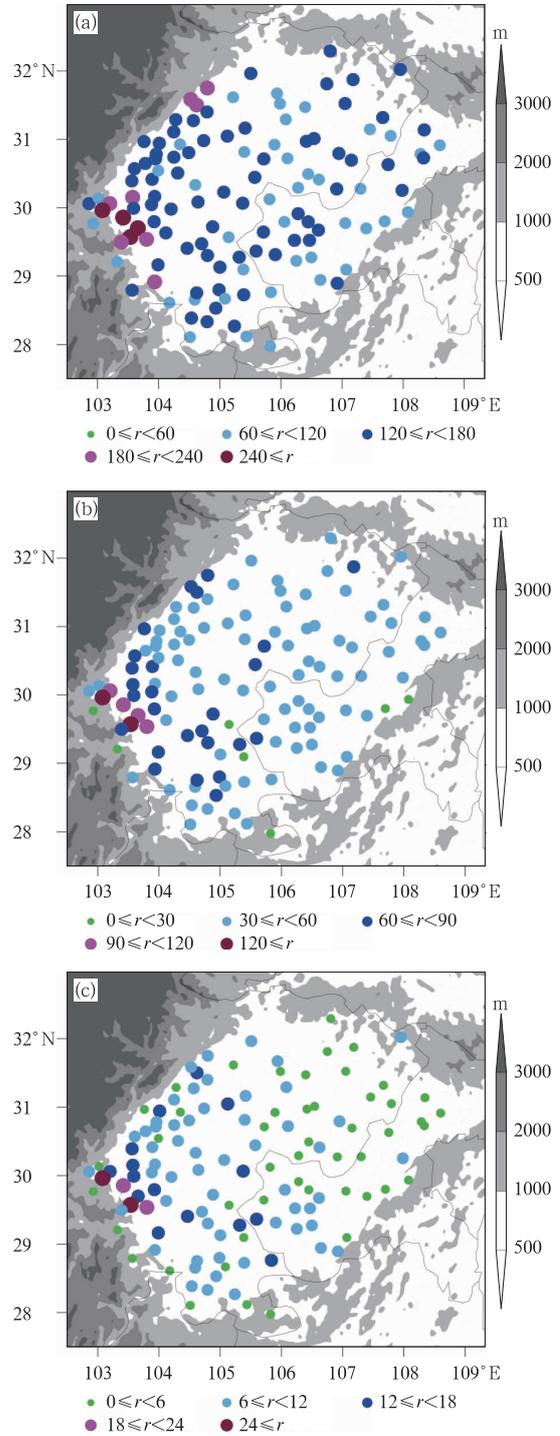


图 4 川渝盆地地区不同小时阈值强降水频次的空间分布 (a) $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (c) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (灰色阴影表示地形高度, r 表示强降水频次)

Fig. 4 The frequency distribution of heavy rainfall with different hourly intensities in Sichuan and Chongqing Basin

(a) $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (c) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

(The gray shading means the height of topography, r indicates the frequency of hourly heavy rainfall)

较小。 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水 ≥ 60 次高频次区主要分布在四川盆地西部和南部,尤其在雅安和峨眉附近地区较大,中部和北部也出现个别高频次站点,极大频次出现在四川峨眉,达 150 次;同样地,川渝盆地东北部为频次相对较小。 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水 ≥ 12 次高频次站点有所减少,仍然也主要分布在盆地西部,而盆地南部表现并不明显,最大频次同样也出现在四川峨眉,达 35 次;而东北部也为 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水低频次区。从以上不同阈值强降水频次空间分布上,川渝盆地地区西部和南部为高频区,中部为次高频区,而东北部为相对低频区。以上分析表明 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 能够很好反映川渝盆地地区小时强降水的时空分布特征,以下主要以研究 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为主。

图 5 给出了 1980—2012 年 5—9 月 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水 21:00—02:00、03:00—08:00、09:00—14:00 和 15:00—20:00 四个时间段累计频次站点空间分布。21:00—02:00,强降水 ≥ 60 次高频次区主要分布于四川盆地南部和西部地区,最大频次出现在四川雅安,达 151 次;03:00—08:00,强降水高频次区向北、向东扩大,最大频次出现在四川峨眉,达 93 次,从以上两个时次上, ≥ 60 次高频次区主要位于盆地与山脉过渡的陡峭地形区,即西北部的龙山山脉、西南部雅安及乐山周围与盆地过渡区,周秋雪等(2015)研究指出这与山脉走向,影响强降水的系统有密切关系,盆地低层盛行偏南风,在盆地偏北和偏西的陡峭地形作用下强迫抬升,产生小时强降水;09:00—14:00和15:00—20:00,强降水的频次

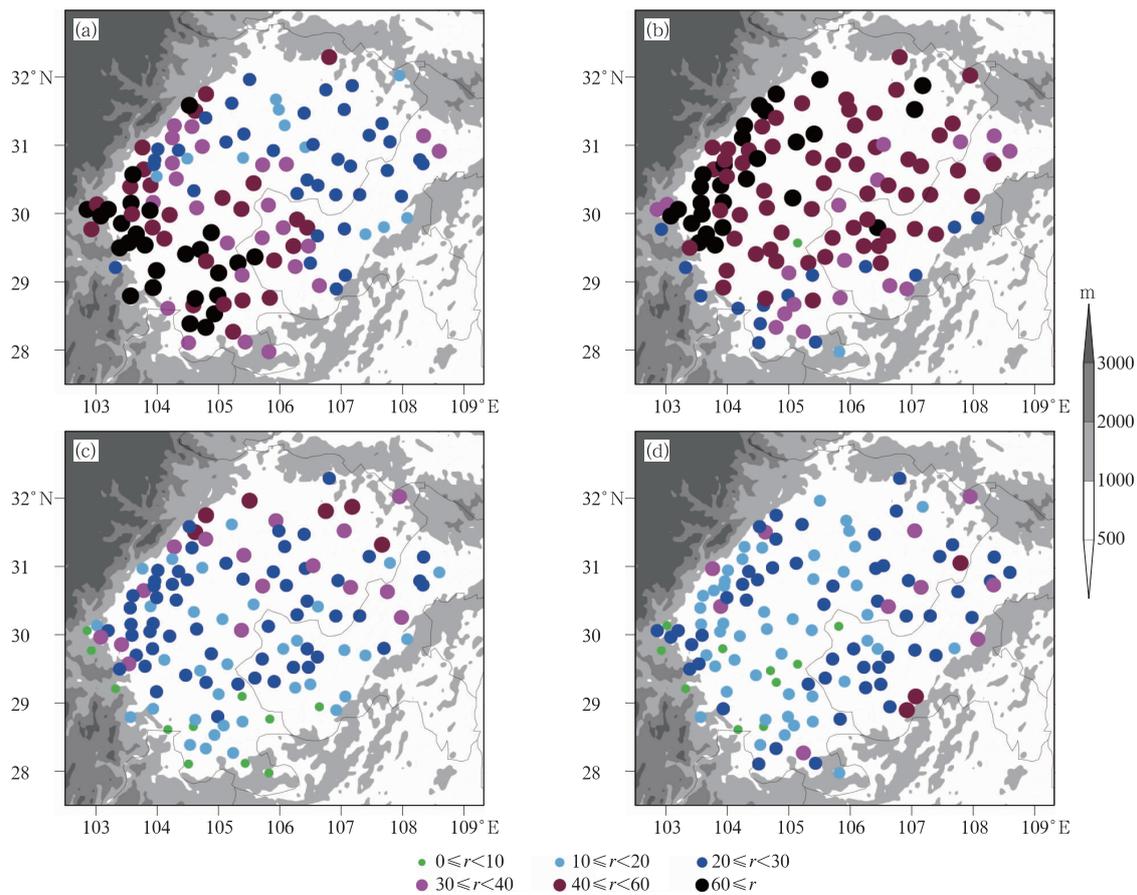


图 5 川渝盆地地区不同时段 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水频次空间分布

(a) 21:00—02:00 BT, (b) 03:00—08:00 BT, (c) 09:00—14:00 BT, (d) 15:00—20:00 BT
(灰色阴影表示地形高度, r 表示强降水频次)

Fig. 5 The frequency distribution of hourly heavy rainfall $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ in Sichuan and Chongqing Basin during the time range

(a) 21:00—02:00 BT, (b) 03:00—08:00 BT, (c) 09:00—14:00 BT, (d) 15:00—20:00 BT
(The gray shading means the height of topography, r indicates the frequency of hourly heavy rainfall)

明显减小,09:00—14:00 高频次强降水分布在四川北部地区,只出现 6 个站频次达到 40 次以上,最大频次出现在四川江油,15:00—20:00,强降水高频次东移,主要分布在重庆地区,极大频次出现在重庆万盛,这与唐红玉等(2011)研究指出盆地东部最大降水频次出现在白天较一致。

进一步分析 ≥ 30 和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水 4 个时间段空间分布上(图略),与 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 具有类似空间分布特征,而 09:00—14:00 和 15:00—20:00 两个时次强降水表现不明显。从以上不同小时强度阈值频次空间分布上,盆地南部和西部的强降水在 21:00—02:00 较活跃,03:00—08:00 南部的强降水较弱,而高频次向北、向东扩展;但从频次数量上,前半夜频次较大,强降水表现活跃,强降水特征显著,陈炯等(2013)研究指出主要是由于该区域的中尺度对流系统日变化及传播特征一致。但雅安地区前半夜和后半夜均为强降水高频次区,大量研究(彭贵康等, 1994;宇如聪等, 1994;曾庆存等, 1994)指出,地形作用所造成的山谷风环流、夜间云顶辐射冷却等,是导致该地区夜间强降水的重要原因,地形差异造成的温度梯度日变化可驱动地形性热力流,白天平原地区为地形性辐合热力流(赵玉春等,2012)。王国荣和王令(2013)研究北京小时强降水时空分布特征,指出午后到前半夜是大气热力条件最有利于强对流出现的时段,源于强烈的太阳辐射导致地面大量的感热和潜热通量进入大气,易激发对流,产生了小时强降水。相对于夜间两个时段小时强降水频次高发时段,09:00—14:00 和 15:00—20:00 为小时强降水频次不活跃时段,即夜间为四川盆地地区小时强降水高发时段。

图 6a 给出了 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水川渝盆地地区每站平均强度空间分布,盆地南部、中部大部分地区以及西部部分地区均为 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$ 强度区,而西北部龙山山脉附近盆地的强降水强度表现并不明显,极大值出现在四川峨眉,达 $33.17 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$,而盆地地区内重庆站点强降水强度相对较小,只出现 4 站次达 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$ 的站点,其余站点均在 $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$,尤其在盆地东北部地区,表现为强降水强度较弱。以上分析表明,强降水强度具有很明显的局地性差异,与 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水高频次区并不具有一致性特征,尤其在盆地龙山山脉和盆地东部地区一些站点强降水强度表现并不明显。

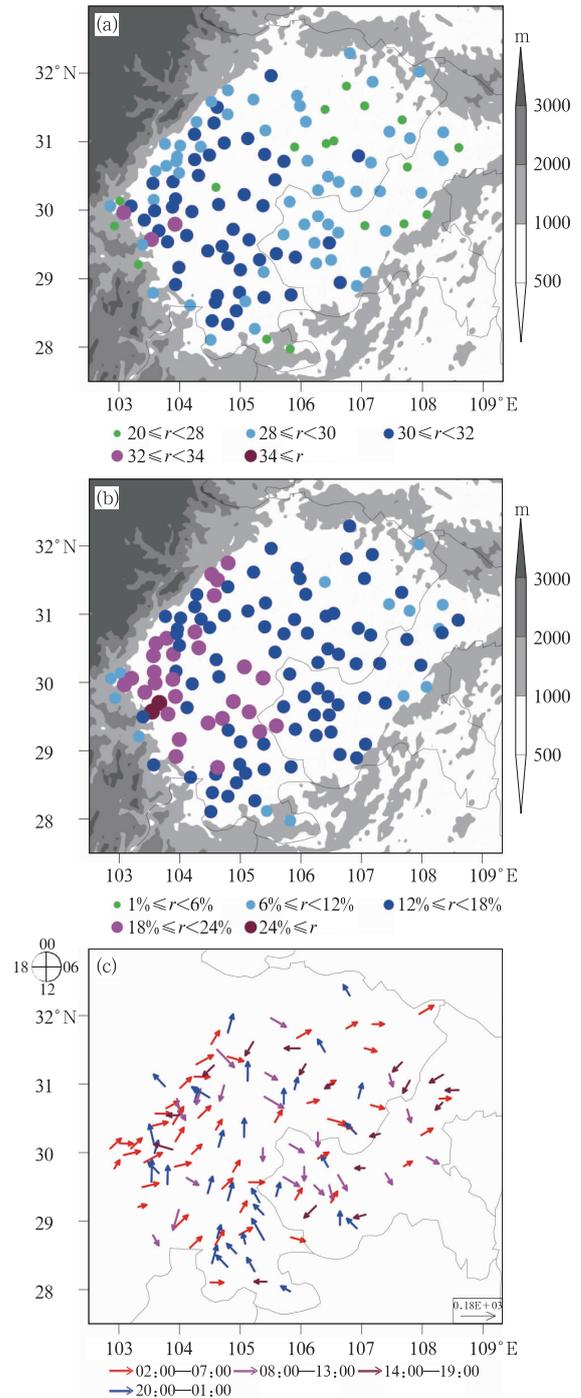


图 6 (a) $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水平均强度空间分布 (r 表示小时强降水平均强度,单位: $\text{mm} \cdot \text{次}^{-1}$), (b)小时强降水量占总降水量的百分比空间分布 (r 表示小时强降水百分比值,单位: %), (c)极端最强降水和出现时间空间分布 (方向杆的长度表示强降水极大降水的大小,箭头表示出现时间)
 Fig. 6 (a) The spatial distribution of average intensity hourly heavy rainfall $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (r indicates the average intensity of hourly heavy rainfall, unit: $\text{mm} \cdot \text{time}^{-1}$), (b) proportion of hourly heavy rainfall in the total rainfall (r indicates the percentage value of hourly heavy rainfall, unit: %), and (c) spatial distribution of the diurnal phase of maximum rainfall at stations in Sichuan and Chongqing Basin (The direction of the vectors means the local time when the maximum rainfall value occurs, while the length of the vector stands for amplitude of the maximum precipitation)

从1980—2012年5—9月 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水总量占总降水量的比例上(图6b),18%以上高比例达31站,主要分布于盆地西部、中部,以及南部部分地区,与 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水高频次区具有一致性,四川峨眉和夹江2站 $\geq 24\%$,分别为27.08%和25.07%,东部地区强降水总量占总降水量百分比为6%~18%。综上,川渝盆地地区强降水强度并不具有区域一致性特征,且与强降水高频次区具有差异,这种局地性差异可能与局地环流特征有关;而强降水总量占总降水量比例上,与强降水高频次区具有很好的一致性特征。

从极端降水量级(箭矢长度)和出现时间空间(箭矢方向表示)分布上(图6c),川渝地区极端强降水大部分出现在夜间20:00—01:00和02:00—07:00这两段时间内,站次分别为35与49,分别占站数28%和40%,尤其01:00—03:00这段时间内,达41站,占夜间出现站数36%,且与强降水的频次高时段是一致的;极端小时强降水空间分布上,盆地南部、中部和西部较大,而盆地东部以及北部地区相对较小,极大值出现在四川安县,达123.1 mm。

从1980—2012年5—9月 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水最大频次(箭矢长度)和出现时间空间(箭矢方向表示)分布上(图7),可以发现盆地南部地区最大频次的强降水出现在20:00—01:00,极大频次出现在01:00,发生在四川峨眉(45次),而盆地中部、北部和东部主要发生在02:00—07:00,极大频次出现01:00,发生在四川夹江,达33次。从极大频次强降水出现时间空间分布上,从盆地南部到北部地区,极大频次事件由20:00逐渐过渡到01:00,而盆地中部、北部以及东部,从02:00开始,逐渐向07:00过渡,这反映了盆地降水发生发展过程,由于盆地地形作用下,低层偏南气流到达盆地西部,受地形抬升作用影响,诱发中小尺度系统,同时如有偏北气流翻越秦岭山脉,受地形影响产生一些气旋式涡旋,也有利于加强中小尺度系统的发生和发展,中小尺度对流系统生成后,逐渐东移北上发展,在盆地中部、北部和东部产生强降水。同时在盆地中部发现,出现在潼南、安岳、隆昌和资中站发生21:00—01:00的极大频次强降水,由于此地区为西南低涡发生和发展地区,且西南低涡生成初期,其中小尺度对流系统移动缓慢,易在该地区产生小时强降水,随着西南低涡逐渐东移向北向东发展,产生盆地东部小时强降水。

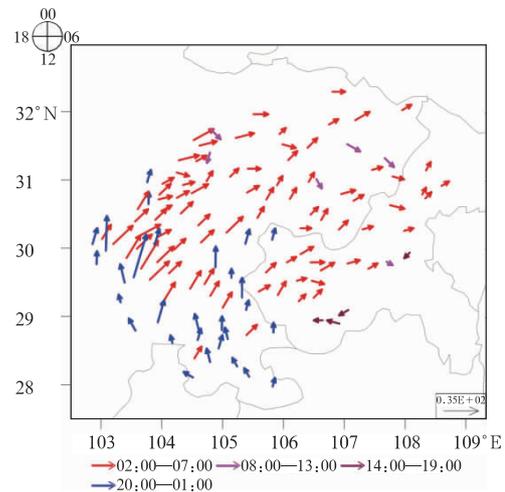


图7 川渝盆地地区小时强降水的频次日峰值出现时间分布(方向杆的长度表示强降水极大频次大小,箭矢表示出现时间)

Fig. 7 Spatial distribution of the diurnal phases of maximum frequency at stations in Sichuan and Chongqing basin (The direction of vectors means the local time when the maximum frequency peak value occurs, while the length of vectors stands for amplitude of the maximum frequency of SHR)

2.4 不同持续时间强降水特征分析

降水的日变化与降水的持续性之间存在紧密关系,Yu et al 研究(2007a;2007b)指出,中国中东部地区持续时间($\geq 6 \text{ h}$)的长持续性降水的最大降水量通常出现在清晨,而持续时间1~3 h之间的短持续性降水易于在下午和傍晚达到降水量峰值。图8a是不同起始时刻强降水事件日分布图,发现川渝盆地地区的小时强降水具有双峰型结构,从上午12:00开始,直到20:00之前,为第一个降水峰值,主要为维持4 h左右强降水事件;20:00左右开始的强降水持续时间逐渐增长,在00:00持续时间达到最长,对应第二个峰值强降水事件峰值,超过12 h以上,此后强降水事件的持续时间又呈逐渐减小趋势,一直到第二天08:00。从强降水事件持续时间上,白天多为短时间强降水事件(1~6 h),而傍晚开始至第二天清晨,持续2~18 h强降水事件均有发生。

从降水总量比较上(图8a),白天的短持续时间强降水事件累积平均降水量极大值持续时间为3 h左右,夜间极值持续时间为6~12 h,且前一峰值明

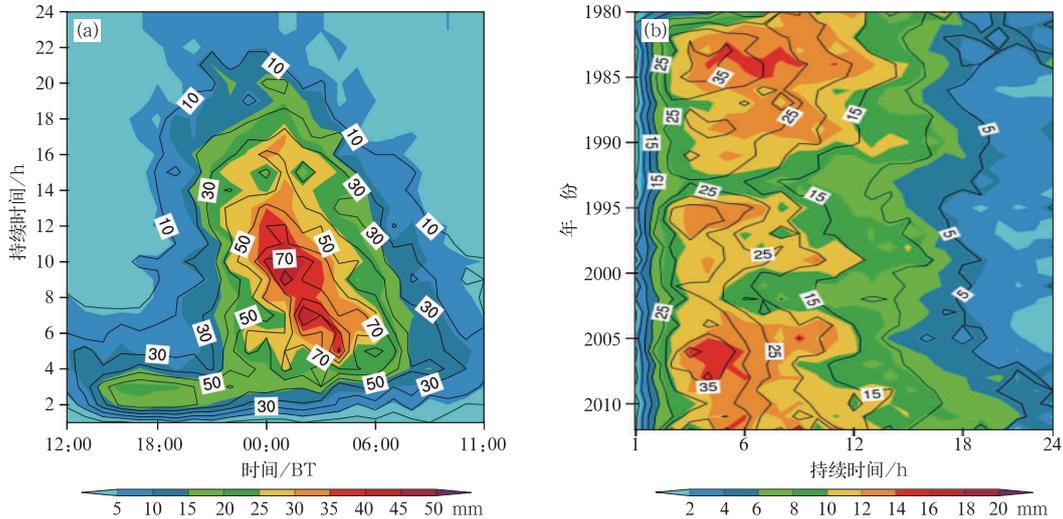


图 8 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水事件日变化(a)和 1980—2012 年不同持续时间强降水事件年变化(b)
(阴影为区域平均累积降水量,等值线为相应的事件累积数量)

Fig. 8 Diurnal variations of the precipitation in different rainfall events (a) and annual variation of the rainfall in different duration hours (b)

(Shaded area means the area averaged and accumulated precipitation in different rainfall events, and contours denote the total amount of different rainfall events)

显较后者偏小,这反映了两类不同性质的降水,白天主要以局地对流性强降水事件为主,由于太阳辐射加热的日变化,低层大气在白天易于达到不稳定状态,并激发出局地湿对流小尺度系统活动,形成短时间的强降水事件,而夜间则由于不同尺度天气系统触发,在系统发生、发展和成熟的各个阶段产生的强降水,持续时间长,产生了强降水。1~6 h 强降水占总降水量 57%,而 7~12 h 占总降水量 27%。从强降水事件的数量上,与强降水量有很好的吻合,即强降水事件的降水总量出现极大值,也为事件频次的极大值。

从不同持续时间 1980—2012 年演变上(图 8b),强降水持续时间多为 2~18 h,极大值中心持续时间为 2~4 h,持续 6 h 以上降水事件,降水量逐渐减小,直到 18 h 左右;不同年代上,20 世纪 80 年代 1~6 h 持续性事件降水量较大,尤其在 80 年代的前期,90 年代前期为减少趋势,后期又有所增加趋势,一直维持到 21 世纪初,而近些年有所增大。

图 9a 是不同开始时间持续性事件的日变化曲线,强降水事件频次和平均累积降水量具有很好一致性变化趋势,且为单峰型结构。强降水事件频次上,从 12:00 开始,强降水事件逐渐增加,直到 18:00,强降水事件陡然增加,而后又呈逐渐增加趋势,一直到 00:00 达到极大值(996 次),同时强降水

量也达到极大值(559.4 mm),而后逐渐递减,一直到 07:00,而主要强降水事件主要发生在 18:00—06:00 这段时间内,占强降水事件 76%,相应的降水占总降水量的 80%,且频次和降水量日变化相关系数为 0.99,通过 0.01 显著性水平检验;强降水强度与频次和降水量具有相似的日变化特征,也呈现单峰型结构,但整体在 0.35~0.55,其变化幅度并没有频次和降水量明显。

图 9b 是不同持续时间的日变化曲线,强降水事件频次上,1~24 h 强降水事件具有双峰型结构,第一极大峰值持续时间为 3 h,达 1115 次,且 3~6 h 强降水事件均维持较大频次(≥ 1000 次),次极大峰值持续时间为 10 h,而 3~24 h 降水事件频次逐渐减小,2~12 h 强降水持续事件为主要持续时间段,占总频次的 75%;而不同持续性强降水事件总降水量上,也具有双峰型结构,极大峰值持续时间为 6 h(410.0 mm),次峰值持续时间为 10 h(400.1 mm),降水量极大峰值相对于频次峰值持续时间滞后,次峰值一致,且持续 3~12 h 降水量差别较小,但 3~12 h 持续时间降水量占总降水量比例为 60%;强降水事件不同持续时间强度上,随着降水事件持续时间的延长,平均持续降水事件的单位小时降水量除了在 20 h 有弱的减小,整体上呈现逐渐增加的趋势。

不同开始时间事件频次空间分布上(图 10a, 10b),白天(09:00—20:00)≥40 次主要发生在盆地

西部和东部地区,极大值出现在雅安(63 次),而盆地中部和北部地区频次相对较小。夜间

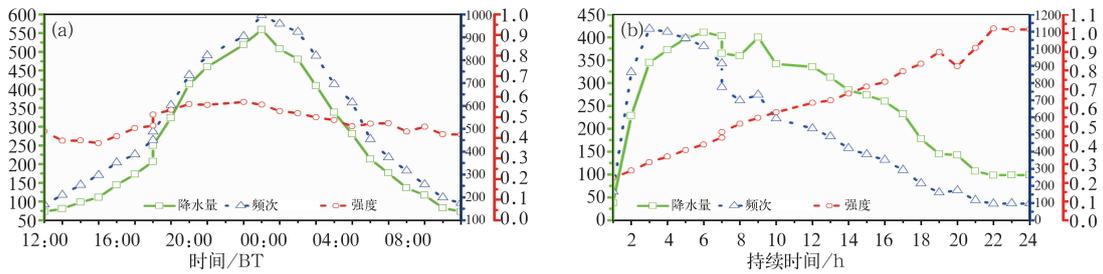


图 9 不同开始时间(a)和不同持续时间(b)的强降水事件频次(单位:次)、降水量(单位:mm)和降水强度(单位: mm · 次⁻¹)变化

Fig. 9 Diurnal variation of heavy rainfall events at different onset times (a) and different durations (b) for the frequency (unit: time), precipitation amount (unit: mm) and intensity (unit: mm · time⁻¹)

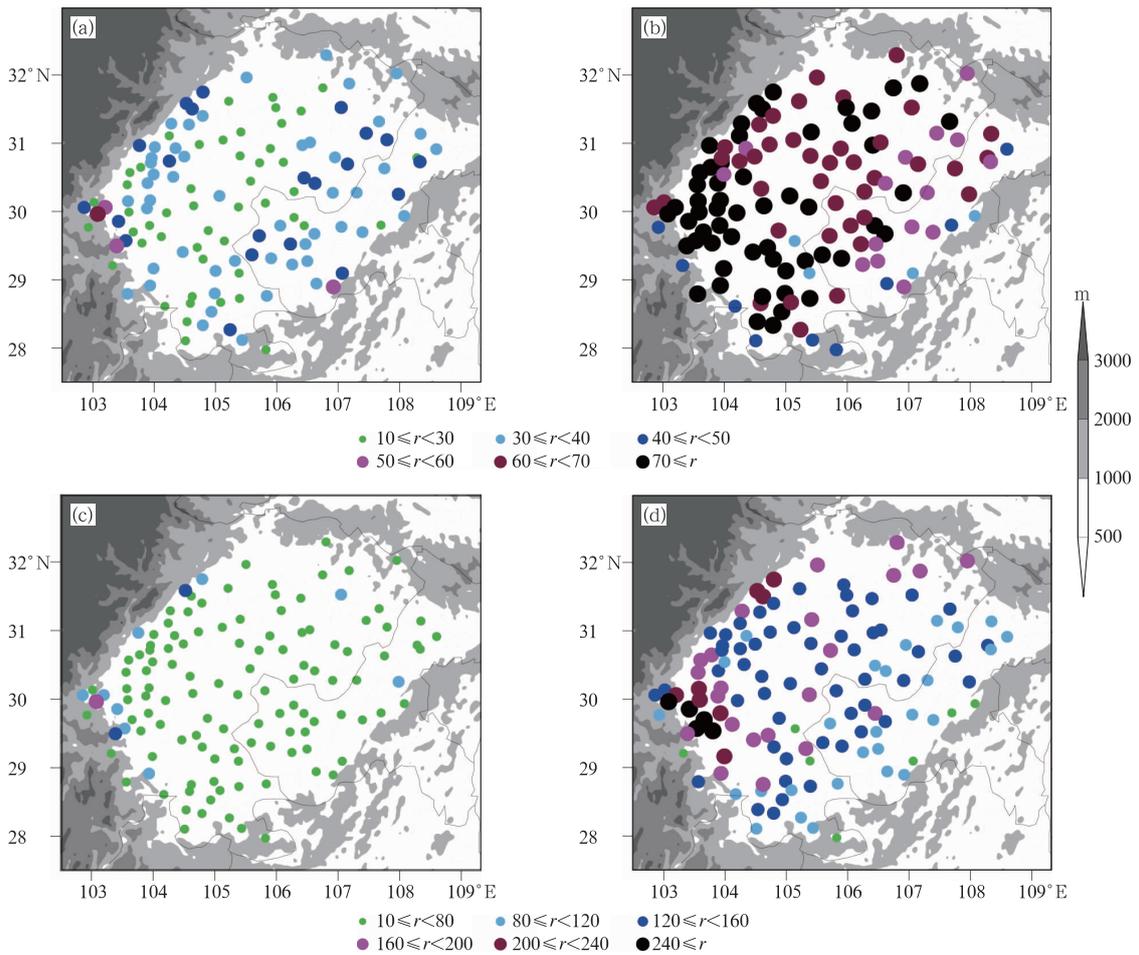


图 10 不同开始时间段的强降水事件频次(a, b; r 表示小时强降水的频次)和累积降水量(c, d; r 表示小时强降水的总量)空间分布 (a, c) 09:00—20:00; (b, d) 21:00—08:00

Fig. 10 Spatial distributions of the frequency of heavy rainfall events (a, b, r indicates the frequency of strong hourly rainfall, unit: time) and accumulated precipitation (c, d, r indicates the precipitation amount of hourly heavy rainfall, unit: mm) during time range of 09:00—20:00 BT (a, c) and 21:00—08:00 BT (b, d)

(21:00—08:00) ≥ 60 次主要发生在盆地西部、南部、中部和北部, 尤其盆地西部和南部地区相对较大, 从雅安附近沿龙山山脉附近的站点, 以及盆地北部大巴山附近地区为强降水事件高频次区, 极大频次出现在四川峨眉(147 次), 而盆地东部强降水事件频次相对较小。整体上, 夜间强降水事件频次明显较白天偏大。

1980—2012 年不同开始时间事件累计平均降水量上(图 10c, 10d), 白天(09:00—20:00) 90.2% 以上站点在 80 mm 以下, 只出现 12 站点在 80 mm 以上的强降水, 极大值出现在雅安, 达 160.7 mm。夜间(21:00—08:00) ≥ 160 mm 以上的强降水区主要分布于盆地西部、北部和南部部分站点, 极大值出现在四川峨眉(361.5 mm), 而盆地东部和中部地区相对较小。从以上分析发现, 川渝地区盆地强降水事件开始时间在白天分布区, 主要位于盆地东部和西部地区, 而开始于夜间主要除了东部部分地区频次较低, 其余地区均有可能开始地区; 而从降水量空间分布上, 白天降水量明显较小, 而夜间除了盆地东部较小, 其余地区均较大, 整体上, 强降水事件频次和降水量空间分布, 夜间明显较白天大, 即表明为明显的夜间强降水特征明显, 这与小时强降水发生的时间段也是一致的。

不同持续时间强降水事件频次空间分布上(图 11), 短持续(1~6 h)强降水空间分布上, ≥ 50 次主要分布于盆地西部、南部和东部地区, 极大值出现雅安(70 次), 而盆地北部和中部出现频次较小; 长持续(7~12 h)强降水事件空间分布上, ≥ 50 次

频次空间站点明显减小, 主要分布峨眉站附近地区, 极大值出现在峨眉(78 次)。

3 结论和讨论

本文主要利用 1980—2012 年川渝盆地地区 123 个逐时降水资料, 分析了川渝盆地地区的主汛期 5—9 月强降水时空分布特征和持续性特征, 主要结论如下:

(1) ≥ 20 、 ≥ 30 和 ≥ 50 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 三种阈值强降水时间分布上, 1980—2012 年年际和日变化, 均具有较好的一致性, 三种强降水年平均频次分别为 504、184 和 28 次; 强降水频次日变化分布上, 高频次主要发生在傍晚至凌晨, 且峰值出现在 00:00—03:00。 ≥ 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水高频次区主要分布于盆地西北部的龙山山脉、西南部雅安及乐山周围与盆地过渡区, 川渝盆地地区西部和南部为高频区, 由于山地地形动力辐合抬升, 是强降水触发和加强的重要原因, 盆地西部巨大的地形梯度, 易于形成强的水平温度梯度, 从而易出现低空风的垂直切变, 促使了强降水的发生概率偏大, 在高原低涡东移和西南低涡耦合, 使得高低空低涡发展加强, 促使强降水不断产生。

(2) ≥ 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水极大频次的出现时间空间分布上, 盆地南部地区最大频次的强降水出现在 20:00—01:00, 而盆地中部、北部和东部主要发生在 02:00—07:00, 极大频次出现 01:00, 且从盆地南部到北部地区, 极大频次事件由 20:00 逐渐过

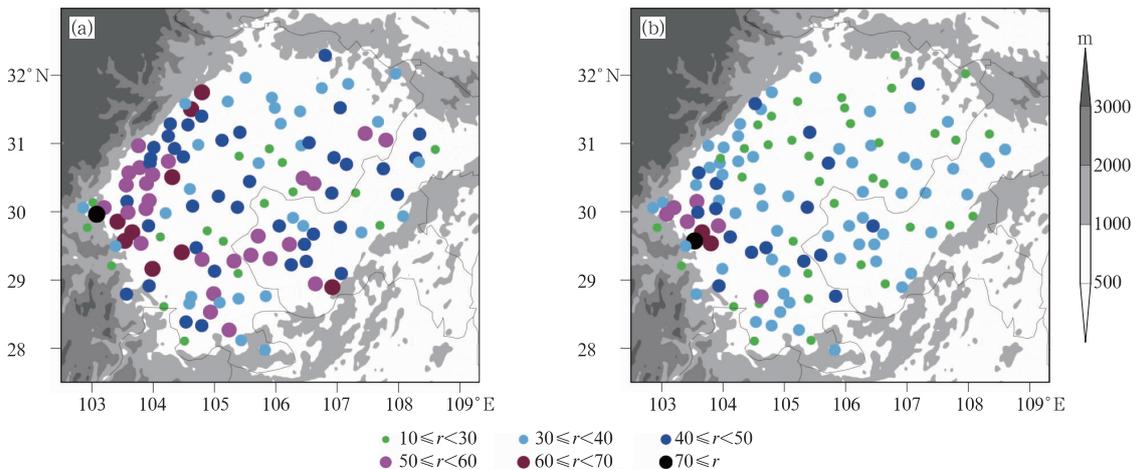


图 11 不同持续时间(a) 1~6 h, (b) 7~12 h 的频次空间分布
(r 表示小时强降水的频次)

Fig. 11 Spatial distribution of the frequency of heavy rainfall events at different durations
(a) 1—6 h, (b) 7—12 h
(The r indicates the frequency of hourly heavy rainfall)

渡到 01:00,而盆地中部、北部以及东部,从 02:00 开始,逐渐向 07:00 过渡,这反映了盆地降水发生发展过程,高原系统东移,在傍晚先在高原南侧诱发中小尺度系统,中小尺度对流系统生成后,逐渐东移北上发展,在盆地中部、北部和东部产生强降水。

(3) 不同持续时间小时强降水事件具有双峰型结构,午后为第一个降水峰值,20:00 到第二天 07:00 对应第二个峰值强降水事件峰值,白天多为短时间强降水事件(2~6 h),而傍晚开始至第二天清晨,持续 2~18 h 强降水事件均有发生。强降水强度与频次和降水量具有相似的日变化特征,呈现单峰型结构,主要发生在 18:00—06:00 这段时间内。不同持续时间的频次和总降水量日变化曲线,均具有双峰型结构,2~12 h 强降水持续事件为主要持续时间段,占总频次的 75%,3~12 h 持续时间降水量占总降水量比例为 60%;不同强降水事件的持续时间强度,随着降水事件持续时间的延长,整体上呈现逐渐增加的趋势。

(4) 不同开始时间事件频次空间分布,白天(09:00—20:00)强降水事件高频次区主要分布在盆地西部和东部地区,夜间(21:00—08:00)除了盆地东部相对较小,其余地区均较大,尤其盆地西部和南部地区相对较大。不同开始时间事件累计平均降水量上,白天(09:00—20:00)强降水整体上相对较小,夜间(21:00—08:00)强降水区主要分布于盆地西部、北部和南部部分站点,强降水事件频次和降水量空间分布,夜间明显较白天大,即表明为明显的夜间强降水特征明显。

研究中发现盆地南部、西部、西北和东部的强降水频次具有差异,这与强降水的影响系统发生、发展和移动有密切关系,不同的环流系统背景场下与所产生的强降水时空分布联系,以及持续强降水事件的持续性特征,需要针对这几个地区强降水进一步研究。

参考文献

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.

戴泽军,宇如聪,陈昊明,2009. 湖南夏季降水日变化特征[J]. 高原气象,28(6):1463-1470.

段鹤,夏文梅,苏晓力,等,2014. 短时强降水特征统计及临近预警[J]. 气象,40(10):1194-1206.

郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象,38(8):903-912.

何晗,湛芸,肖天贵,等,2015. 冷涡背景下短时强降水的统计分析[J]. 气象,41(12):1466-1476.

李建,宇如聪,王建捷,2008. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. 科学通报,53(7):829-832.

马振锋,彭骏,高文良,等,2006. 近 40 年西南地区的气候变化事实[J]. 高原气象,25(4):633-642.

彭贵康,柴复新,曾庆存,等,1994. “雅安天漏”研究 I: 天气分析部分[J]. 大气科学,18(4):466-475.

司波,余锦华,丁裕国,2012. 四川盆地短历时强降水极值分布的研究[J]. 气象科学,32(4):403-410.

唐红玉,顾建峰,俞胜宾,等,2011. 西南地区降水日变化特征分析[J]. 高原气象,30(2):376-384.

王国荣,王令,2013. 北京地区夏季短时强降水时空分布特征[J]. 暴雨灾害,32(3):276-279.

徐裕华,1991. 西南气候[M]. 北京:气象出版社:1-5.

宇如聪,曾庆存,彭贵康,等,1994. “雅安天漏”研究 II: 数值预报试验[J]. 大气科学,18(5):535-551.

曾庆存,宇如聪,彭贵康,等,1994. “雅安天漏”研究 III: 特征、物理量结构及其形成机制[J]. 大气科学,18(6):649-659.

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.

赵玉春,徐明,王叶红,等,2012. 2010 年汛期长江中游对流降水日变化特征分析[J]. 气象,38(10):1196-1206.

周长艳,岑思弦,李跃清,等,2011. 四川省近 50 年降水的变化特征及影响[J]. 地理学报,66(5):619-630.

周长艳,李跃清,房静,等,2008. 高原东侧川渝盆地东西部夏季降水及其大尺度环流特征[J]. 高原山地气象研究,28(2):1-9.

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.

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.

朱艳峰,宇如聪,2003. 川西地区夏季降水的年际变化特征及与大尺度环流的联系[J]. 大气科学,27(6):1045-1056.

Chen C S, Chen Yileng, Liu Cheling, et al, 2007. Statistics of heavy rainfall occurrences in Taiwan[J]. Wea Forecasting, 22(5):981-1002.

Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[J]. Meteor Monogr,28(50):481-526.

Trenberth K E, Dai Aiguo, Rasmussen R M, et al, 2003. The changing character of precipitation[J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(9):1205-1217.

Yu Rucong, Xu Youping, Zhou Tianjun, et al, 2007a. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. Geophys Res Lett, 34(13):L13703. DOI: 10.1029/2007GL030315.

Yu Rucong, Zhou Tianjun, Xiong Anyuan, et al, 2007b. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophys Res Lett, 34(1):L01704. DOI:10.1029/2006GL028129.

Zhou Tianjun, Yu Rucong, Chen Haoming, et al, 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: a comparison of satellite data with rain gauge observations[J]. J Climate, 21(16):3997-4010.