

2008-2016年重庆地区降水时空分布特征

方德贤^{1,2} 董新宁³ 邓承之¹ 吴钲⁴ 海川⁵ 高松⁴ 黄安宁⁶

1 重庆市气象台, 重庆 401147
2 重庆市渝北区气象局, 重庆, 401147
3 重庆市气候中心, 重庆 401147
4 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147
5 重庆市綦江区气象局, 重庆 401147
6 南京大学大气科学学院中国气象局—南京大学气候预测研究联合实验室, 南京 210093

摘要 利用2008-2016年国家气象信息中心提供的 0.1° 分辨率的中国地面与CMORPH融合逐小时降水产品,分析了重庆地区的降水时空分布特征,尤其是小时强降水的时空分布特征。结果表明:(1)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(西部、东部)一低(中部)的分布;降水频次、降水强度与地形的相关性较高,海拔高度较高的山区(海拔高度 $>1000\text{m}$)降水频次多大于盆地和丘陵区(海拔高度 $<1000\text{m}$),降水强度与之相反,且小时强降水多发生在迎风坡前侧的过渡区域,说明高海拔区域易出现降水,但降水强度不强,而地形抬升则是触发强降水的重要原因,导致山前降水明显大于山峰。(2)重庆地区降水主要集中在5-9月,降水量、降水强度和小时强降水频次均呈单峰型分布,峰值出现在6-7月,降水频次呈双峰型分布,一个峰值出现在5-6月,另一个峰值出现在10月,7-8月为低频期,与副高控制下的连晴高温天气有关。(3)重庆地区降水存在明显的日变化特征,降水以夜雨为主,且降水峰值出现时间表现为向东延迟的特征,重庆西部日峰值出现在凌晨02:00,中部出现在清晨05:00,东北部出现在早上08:00。从不同季节来看,春季、秋季和冬季降水日变化呈单峰型分布,主要集中在清晨,而夏季受午后局地对流性天气的影响,在下午17:00左右存在一个次峰值。(4)强降水的主要集中在夏季,在空间上存在三个大值中心,受西南涡及地形的相互作用,夏季在缙云山以西的盆地区域,小时强降水频次明显较高。

关键词 重庆 降水 短时强降水 气候特征

文章编号 中图分类号 P 文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18256

Temporal and Spatial Distributions of Precipitation In Chongqing during 2008-2016

FANG Dexian^{1,2}, DONG Xinning³, DENG Chengzhi¹, WU Zheng⁴, HAI Chuan⁵,
GAO Song⁴, HUANG Anning⁶

1. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing, 401147

2. Chongqing Yubei District Meteorological Bureau, Chongqing, 401147

3. Chongqing Climate Center, Chongqing, 401147

4. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing, 401147

5. Qijiang Meteorological Bureau, Chongqing, Qijiang 401420

6. CMA-NJU Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The spatial and temporal distribution characteristics of precipitation, especially the hourly heavy precipitation in Chongqing area were analyzed based on the satellite precipitation products with the resolution of

收稿日期 2018-11-13; 网络预出版日期

作者简介 方德贤,男,1978年出生,博士研究生,高级工程师,主要从事强对流天气及数值模拟研究,
E-mail: cqhawk@163.com

通讯作者 董新宁, E-mail: 46589334@qq.com

资助项目 重庆市科委基金项目(cstc2015jcyjA00039),重庆市气象局面上公共项目(YWGGTD-201623)
Funded by Chongqing Science and Technology Commission Fund Project (Grant cstc2015jcyjA00039),
Key projects in Chongqing Meteorological Bureau (Grant YWGGTD-201623)

0.1° from 2008 to 2016 provided by the National Meteorological Information Center. The results show that: (1) the annual mean precipitation increases from west to east part of Chongqing with large precipitation centers located in the northeast and southeast of Chongqing and varies seasonally. Especially in summer, the precipitation in the west Chongqing is significantly increased. In addition, the total precipitation displays large values over west and east Chongqing and low values over middle Chongqing; the distribution of the precipitation frequency, intensity highly relies on the topography. The precipitation frequency over the areas with the altitude over 1000m is more than that over the basin and hilly areas with the altitude lower than 1000m. The precipitation intensity tends to show contrary distribution. Moreover, the hourly heavy precipitation mainly occurs in the transition area in the front of the windward slope, which indicates that the precipitation is easy to occur in the high altitude areas but with weak precipitation intensity. The uplift of terrain is an important reason for triggering heavy precipitation, leading to larger precipitation in front of the mountains than in the mountains. (2) The precipitation in Chongqing is mainly concentrated in May-September. The precipitation amount, intensity and hourly heavy precipitation frequency all show single-peak distribution with a June-July peak. The precipitation frequency displays double peaks with one in May-June and the other in October. However, the valley of precipitation frequency mainly happens in July-August corresponding to the sunny and high-temperature days under the control of the subtropical high.. (3) The precipitation in Chongqing shows obvious diurnal variation. The precipitation is mainly contributed by the nocturnal rain, and the time of precipitation diurnal peaks display eastward delay. The diurnal peaks of precipitation tend to occur at 02:00 am in west Chongqing, at 05:00 am in middle Chongqing, and at 08:00 am in east Chongqing. The precipitation over Chongqing in spring, autumn and winter shows a single diurnal peak in the early morning. In summer, there is a sub-peak at about 17:00 PM due to the local convective weather in the afternoon.(4) Heavy precipitation is mainly concentrated in summer. There are three large value centers in space. Due to the interaction of Southwest Vortex and topography, the frequency of heavy hourly precipitation is obviously higher in the basin area west of Jinyun Mountain in summer.

Keywords Chongqing, Precipitation, Short-term heavy rainfall, Climate characteristics

1 引言

重庆位于四川盆地东部，辖区内多山，地形地貌极其复杂，由降水引发的小流域山洪、地质灾害是影响重庆人民生命财产安全的主要自然灾害之一。而降水由于受诸多条件的影响，尤其是地形的影响，具有明显的区域性特征（翟盘茂等，1999；王遵娅等，2008；Bao et al., 2011；郑腾飞等，2017）。

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。姚莉等（2009）研究了我国小时雨强的时空分布特征，指出出现大雨强频数最多的地区夏季主要在我国南部沿海地区，春季是安徽南部与江西地区，秋季则是海南岛和云南南部，雨强的日变化也具有明显的地区差异，其中西南和华南地区日变化最为明显。四川盆地处于中国东部季风区和青藏高原高寒区的过渡带，受高原气候和湿润的亚热带季风气候共同影响，加之复杂的地形条件和西南低涡的影响（陈忠明等，1998；蒋璐君等，2015；郁淑华等，2017），其降水的复杂性和区域特征得到了国内外众多学者的关注（Yanai and Li, 1994；朱艳峰和宇如聪，2003；马振锋等，2006；Yu et al., 2007；Yin et al., 2009；周长艳等，2011；Qian et al., 2015）。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6h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。胡迪和李跃清（2015）利用29个气象站逐小时降水资料，研究了雨季（5-9月）夜雨的时空变化特征，指出四川地区雨季夜雨占日降水量的比例较大，且具有显著的区域性差异，盆地西南部的夜雨占日降水量的比例最大，川西高原东北与川东北则为明显的两个低值区。李强等（2017）研究了川渝盆地小时强降水的特征，指出强降水（ $\geq 20\text{mm h}^{-1}$ ）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。

从前人的研究来看，关注的重点在于盆地及西侧高原区域的降水特征，而对盆地东部尤其是重庆地区复杂地形下的降水特征分析较少（李艳等，2010；张倩倩等，2016；Yan et al., 2017, Chen et al., 2018）；此外，过去的研究中多是利用区域自动站资料，虽然目前自动站的密度已基本能反映该区域的降水特征，但重庆地形较为复杂，尤其是重庆东部地区，高山较多，受建站条件（电力、交通等）影响，在东部山区的自动站明显不够，且大部分站都建立在地势较低的河谷地区，从两种资料降水分析的对比结果来看，在东部山区差异较大，用常规的自动站资料不能有效地描述精细化的地形分布对降水的影响，尤其是高海拔地区降水会明显偏小，与数值模式预报偏差较大。因此本文利用国家气象信息中心提供的高时空分辨率卫星融合降水资料分析重庆地区年均降水，尤其是小时强降水的时空分布特征，目的是为进一步揭示复杂地形下，尤其是重庆地区东部山区，更精细的降水结构及分布特征，初步了解地形对降水的作用，为验证并进一步改进数值模式中降水有关的参数化方案提供必要参考依据（Zhuo et al., 2013），同时对于该区域水资源利用及自然灾害防御也具有重要的现实意义。

2 研究区域基本概况

重庆位于四川盆地东部（经度 $105^{\circ}\text{E}\sim 110.5^{\circ}\text{E}$ ，纬度 $28^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$ ，如图1. a所示），西为盆地地形、南部有西南-东北走向的武陵山脉和巫山山脉，北靠秦岭-大巴山脉，长江从中自西南向东北穿流而过，是青藏高原与长江中下游平原的过渡带（Bao et al., 2011），其独特的地形无疑是降水时空分布特征最丰富和区域特点最显著的地区之一。该区域属于典型的季风气候，东南季风每年给重庆带来丰沛的降水（图1. c），多年平均降水量在1200 mm左右，降水集中时段多以夜间至凌晨为主，呈自西向东传播，且暖季降水频次高、强度大（唐红玉等，2011；李强等，2017），强降水诱发的山洪、地质灾害严重影响了重庆经济社会发展和人民生命财产安全。考虑地形和气候特征的差异，将重庆按照多年气候特征、地形及行政区划划分为了西部、西南部、主城、中部、东南部和东北部等6个区域（如图1. b），西部代表了渝西经济圈，以平原和丘陵为主，主城代表了城市和人口聚集区，西南部代表了西部偏南地区的山地区域，主要受贵州北部天气系统的影响，中部代表了盆地与山地的过渡带，东北部和东南部则分别代表了山地区域，该分区标准在重庆日常气候业务中得以应用，本文将针对各个分区结合地形特征，讨论各区域的降水特征及其区域差异。

图1 研究区域的 (a) 地形分布（紫色线为长江上游干流）、(b) 重庆气候业务分区图、(c) 2008-2016年850hPa平均风场（风矢量，单位： m s^{-1} ）和垂直速度（填色图，单位： Pa s^{-1} ，冷色为上升，暖色为下沉）的空间分布，红色矩形为研究区域

Fig.1 The location area used in this study (a) , the climate zoning map of Chongqing (b) and the spatial distribution of 850 hPa mean wind field (wind vector, unit: m s^{-1}) and vertical velocity (color map, unit: Pa s^{-1} , cold is rising, warm is sinking) in 2008-2016. Red rectangle is the research area.

3 数据及方法

3.1 数据

本文所使用的数据为国家气象信息中心提供的2008-2016年中国地面与CMORPH融合逐小

时降水产品(沈艳等, 2013; <http://cdc.cma.gov.cn>), 空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 时间分辨率为1小时, 该降水融合产品采取概率密度函数匹配法(宇婧婧等, 2013)和最优插值法(潘昶等, 2012), 将经过质量控制的中国大陆3万多个地面自动观测站的逐时降水数据与NOAA的CMORPH[CPC(Climat e Prediction Center)morphing technique]卫星反演降水数据(Joyce et al.,2004)融合而成, 有效结合了地面观测降水和卫星反演降水的优势, 产品总体误差水平在10%以内, 对强降水和站点稀疏区的误差在20%以内, 优于国际上同类型产品(沈艳等, 2013;Shen et al.,2014)。

3.2 方法

本研究以重庆作为研究区域, 按照地形条件及行政分区进行分类, 主要包括重庆西部的盆地区域、重庆东北部和东南部的山地区域等。参考Zhuo et al (2008)的做法, 将小时降水量大于等于0.1mm作为有降水发生的依据, 即小时降水量大于0.1mm时记为发生降水事件一次, 引入降水量、降水频次、降水强度、小时降水极值和小时强降水频次, 对重庆地区2008~2016年的降水特征, 尤其是小时强降水(Davis, 2001), 的时空分布进行了分析, 具体定义如下:

1) 降水量(Precipitation Amount, 简称PA), 指统计时段内, 累计降水量/总时次, 该量用于描述单位时间内降水的多少。

2) 降水频次(Precipitation Frequency, 简称PF), 指统计时段内, 有降水的时次*100/总时次, 该量用于描述降水事件出现的频率。

3) 降水强度(Precipitation Intensity, 简称PI), 指统计时段内, 总降水量/总的降水时次, 即降水强度=降水量/降水频次, 该量用于描述实际有降水发生时降水的平均强度。

4) 小时降水极值是指该区域最大的小时降水量, 而小时强降水频次是指该区域平均每点在统计时段内出现小时降水量 $\geq 20\text{mm}$ 的小时强降水次数(中央气象台对短时强降水的定义是小时降水量 $\geq 20\text{mm}$)。

4 重庆地区降水的时空分布特征

4.1 降水的空间分布特征

4.1.1 年降水的空间分布特征

图2给出了重庆地区2008-2016年年均降水量、降水频次和降水强度的空间分布特征。总体上, 降水量呈西低东高的分布趋势, 且存在两个大值中心, 一个在东北部巫溪、开县和云阳的交界区域, 另一个在东南部的酉阳北部, 均在 0.17mm h^{-1} 以上, 这与刘德等(2012年)利用30年自动站资料统计的降水呈西少东多的结论较为一致, 但降水大值区更偏向于山区, 可能与山区观测站点稀少有关; 中部以及西部的降水量相对较小, 大多在 0.11mm h^{-1} 以下, 在中部的丰都有一个低值中心, 约 0.08mm h^{-1} ; 此外长江沿线的河谷区域降水也大多低于两侧的山区。降水频次与地形的分布相关性较高, 在大巴山脉、巫山和武陵山脉等山区(海拔高度 $>1000\text{m}$, 下同), 降水频次较高, 超过14%, 而平坝河谷及丘陵区域(海拔高度 $<1000\text{m}$, 下同)频次较低, 大多低于10%; 降水强度则几乎与之相反, 说明地形有利于降水的出现, 在高海拔山区降水频次较高, 但强降水更容易出现在山前东南面, 即地形与东南风相互作用的迎风坡地带, 而非山峰(Houze,2012), 说明地形抬升是强降水产生的重要原因。

图2 重庆地区 2008-2016 年年均降水量 (PA, 单位 mm h^{-1})、降水频次 (PF, 单位%) 和降水强度 (PI, 单位 mm h^{-1}) 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual average precipitation (PA, unit mm h^{-1}), precipitation frequency (PF, unit%) and precipitation intensity (PI, unit mm h^{-1}) in Chongqing from 2008 to 2016

4.1.2 不同季节降水的空间分布特征

由于重庆地处亚热带季风区, 不同季节的降水情况也不尽相同。为此, 为进一步了解降

水空间分布的季节性差异,按春季(MAM,3-5月)、夏季(JJA,6-8月)、秋季(SON,9-11月)和冬季(DJF,12月-2月),对不同季节的降水量、降水频次和降水强度进行了统计(如图3)。

从降水量来看,春季降水量在东南部最强,大值中心位于酉阳北部,为 0.21mm h^{-1} ,东北部次之,西部荣昌、大足、潼南存在一低值中心,约 0.07mm h^{-1} ;夏季为全年主要降水季节,与其他季节相比,西部降水明显增强,整个区域呈两边高,中间低的分布,最强中心位于东北部的巫溪、云阳、奉节的交界处,为 0.31mm h^{-1} ,这与夏季西南涡活动较为频繁以及西太平洋副热带高压的西伸、北抬有关(吴国雄等,2006;陈启智等,2007;王鑫等,2009);秋季降水比夏季偏弱,和春季降水相当,但与春季相比,秋季降水在东南部减弱,降水大值区位于东北部偏北区域;冬季降水较少,大值中心出现在在重庆东南部的酉阳和秀山交界处,最大值为 0.05mm h^{-1} ,低值中心位于东北部城口一带。

从降水频次来看,各季节降水频次的大值区和全年的分布类似,均随地形的走势出现在大巴山脉、巫山和武陵山脉等低山、中山区。夏季大巴山区的降水频次最高,而冬季武陵山区的降水频次相对较高。从降水强度上来看,夏季降水较强,尤其是长江沿线以北区域,这与西南涡的移动路径以及副热带高压的位置变化有关(吴国雄等,2006),而冬季较弱。

综上所述,春季渝东南降水量主要来源于降水频次的贡献,夏季渝东北降水量来源于降水强度;武陵山区和大巴山区的降水频次与降水强度呈反相分布,山区降水频次高,但降水强度小,说明山区有利于降水的出现,但山前强降水的出现不利于山区强降水的产生。

图3 同图2,为不同季节。
Fig.3 same as Fig2,but for different seasons

4.1.3 逐小时降水的空间分布特征

从不同时次降水的空间分布来看(图4),重庆地区大部分区域降水主要集中在夜间(北京时间02:00-09:00,下同),且雨带在空间上随时间的推移表现为自西向东传播的特征。西部盆地区域在02:00-05:00达到峰值,18:00为全天最低;中部和东南部山区在06:00前后达到峰值,21:00为全天最低;东北部山区在08:00前后达到峰值,22:00前后为全天最低,这与前人研究(Yu et al, 2007; Bao et al, 2011)中指出的西南地区降水以夜雨为主,降水峰值出现时间自西向东有所延迟的结论基本一致,不同的是重庆地区降水峰值出现时间并非完全自西向东,而是自西南向东北方向移动,与重庆地区的山脉走向基本相同。

从不同时次降水量的空间分布来看,18:00(图4(j)),西部大足、荣昌、永川的降水少(为全天最少的时次),中部和东南部次之,东北部较强;21:00(图4(m)),西部降水开始增强,中部和东北部降水进一步减弱,且降水少的区域增大并东移;00:00(图4(p)),西部降水持续增强,且较强区域向东扩张,降水量较大的区域分布在西部、东南部和东北部,中部较小;03:00,总降水量呈南高北低分布,西部降水达到峰值,中部、东南部和东北部继续增强;06:00,总降水量中部、东南部最强,达到峰值,西部降水开始减弱,东北部继续增强;09:00,总降水量呈东高西低的分布,东北部在达到峰值后开始减弱,而西部、中部和东南部降水继续减弱;12:00,各区域总降水量进一步减小,大值区在东北部,东南部次之,西部、中部降水量较低;15:00,东北部长江两侧的山区降水较多,谷区降水较少,西部和东南部降水继续减少。

从不同时次降水频次的空间分布来看(图略),09:00-20:00,降水频次较大的区域主要出现在大巴山、巫山和武陵山脉的山区;20:00-次日09:00,降水频次较大的区域主要出现在西部、中部和东南部,且随着时间的推移,从00:00开始,西部的降水频次逐渐增强,和降水量的变化较为一致。从不同时次降水强度的空间分布来看(图略),西部从19:00开始,降水强度逐渐增强,到次日03:00开始达到峰值,随后减弱;中部从22:00开始增强,次日05:00

达到峰值；东南部20:00开始增强，次日06:00达到峰值；东北部16:00开始增强，次日08:00达到峰值。

图4 重庆地区2008-2016逐小时降水量空间分布(单位 mm h^{-1})
Fig.4 spatial distribution of hourly precipitation in 2008-2016 of Chongqing (unit mm h^{-1})

4.2 降水的时间分布特征

4.2.1 降水的年变化特征

图6给出了重庆地区2008-2016年各区域年降水量(a)、降水频次(b)和降水强度(c)的年际变化特征。可以看出，近年来各区域年总降水量呈现一个波动特征，无明显的趋势；而降水频次总体呈减少趋势，2014、2016年略有回升，降水强度则呈上升的趋势，说明近年来，重庆地区的降水频次虽然有所减少，但降水强度却明显增加。

图5 2008-2016年重庆地区各区域年降水量(a)、降水频次(b)和降水强度(c)的年际变化特征
Fig.5 Interannual variations of annual precipitation (a), precipitation frequency (b) and precipitation intensity (c) in various regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

4.2.2 降水的月变化特征

图6给出了重庆地区2008-2016年各区域降水量、降水频次和降水强度的月际变化。从降水量来看(图6a)，降水主要集中在5-9月，呈单峰型分布，除东北部外，各区域的月变化趋势较为一致，在6月达到峰值，然后明显减少，而东北部从5月开始降水一直较多，直到9月降水才明显减少。降水频次(图7b)呈双峰型分布，一个峰值出现在5月或6月，另一个峰值出现在10月。7月为降水频次低值期，这是因为5月冷暖空气交汇比较频繁，易出现连阴雨天气有关，而10月副高后退，南支槽比较活跃，也常出现连阴雨天气，即华西秋雨，7-8月受副高控制，易出现连晴高温。降水强度(图7c)呈单峰分布，峰值主要出现在7月或8月，这与7、8月份的对流性强降水天气有关。

图6 2008-2016年重庆地区各区域多年平均的降水量、降水频次和降水强度的月变化特征
Fig.6 Monthly variation characteristics of annual average precipitation, precipitation frequency and precipitation intensity in various regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

4.2.3 降水的日变化特征

图7给出了重庆地区2008-2016年各区域多年平均的降水量、降水频次和降水强度的日变化情况。从图中可以看出，降水量(图7a)呈单峰分布，具有明显的日变化特征，降水以夜雨为主，峰值出现的时间集中在03:00-08:00，其中西部在03:00达到峰值，东北部08:00达到峰值，峰值的出现时间自西向东有所滞后，此外，除东北部外各区域夜间降水(20:00-次日05:00)的变化趋势较为一致，而白天(08:00-20:00)各区域变化差异较大，西部以夜间降水为主，白天降水较少，而东北部夜间和白天降水的贡献差异不大，夜雨特征并不明显；降水频次(图7b)呈单峰分布，各区域峰值出现时间主要集中在05:00，而东北部则出现在午后，进一步说明东北部夜雨的特征并不明显；降水强度(图7c)也呈单峰型分布，各区域峰值主要集中在03:00-08:00，其中东北部和西部的平均降水强度较强。

图7 2008-2016年重庆地区各区域多年平均的降水量、降水频次和降水强度的日变化
Fig.7 Diurnal variation of annual average precipitation, precipitation frequency and precipitation intensity in various regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

5. 重庆地区小时强降水的时空分布

上面给出了重庆地区降水的气候分布特征，但小时强降水($>20\text{mm h}^{-1}$ ，下同)往往才是造成灾害的重要原因，尤其是夏季，强降水容易造成小流域山洪、地质灾害等，为此，需要进一步对小时强降水的气候分布特征做深入的认识。

5.1 小时强降水对总降水的贡献率

图8给出了重庆地区2008–2016年夏季小时强降水降水量和降水频次对总降水的贡献率。从二者的分布来看，小时强降水对降水量和降水频次的贡献在空间分布上几乎一致，降水频次的贡献率不到1%，但降水量贡献率的大值区接近15%，说明小时强降水空间各点上的出现频次虽然不高，但降水强度大，对总降水的贡献较大。从空间上来看，小时强降水在重庆西部缙云山以西的盆地区域最易出现，降水贡献率达13%以上，其次是渝东北和渝东南谷地与山区的过渡区域；最低值出现在渝东北大巴山以北及巫山山脉，不到1%，说明高海拔的山区不易出现小时强降水。

图8 2008–2016年重庆地区夏季小时强降水的贡献率，(a)降水量(%)；(b)降水频次(%)

Fig.8 The contribution rate of hourly heavy precipitation in Chongqing from 2008 to 2016, (a) precipitation (%) and (b) precipitation frequency (%)

5.2 小时强降水的空间分布特征

5.2.1 年均小时强降水极值及频次的空间分布特征

从2008年–2016年重庆地区小时强降水出现频次来看(如图9a)，该地区小时强降水存在明显的区域性差异，总体上表现为两高(西部、东部)一低(中部)的分布，其主要存在3个高频次中心，分别是西部的潼南、大足、铜梁、荣昌、永川、合川一带，位于缙云山的西侧；东北部开州、巫溪和云阳的相邻区域，位于大巴山的南侧；以及东南部的武隆、黔江、酉阳交界处，位于武陵山脉的南侧。而低值区主要为大巴山以及巫山–武陵山一带的中山地区，说明在山前的平坝和丘陵区域易出现强降水，而在大巴山、武陵山等山区反而不利于强降水的产生，这与周秋雪等(2015)和赵衍斌等(2016)得出的川渝地区强降水的空间分布特征较为一致。小时强降水最大值(图9b)的区域差异并不明显，但 50mm h^{-1} 以上的几个极值都出现在强降水频次的高值区，且位于谷底向山区的过渡区域，说明地形抬升有利于强降水的形成。

图9 重庆地区2008–2016年多年平均小时强降水($>20\text{mm h}^{-1}$)出现频次(单位:次)(a)和最大值(单位:mm)(b)的空间分布。

Fig. 9 Spatial distribution of frequency (a) and maximum (b) of annual mean hourly heavy precipitation ($>20\text{mm h}^{-1}$) in Chongqing from 2008 to 2016.

5.2.2 不同季节小时强降水极值及频次的空间分布特征

从各个季节小时强降水出现的频次及最大值的空间分布来看(图10)，重庆地区小时强降水主要出现在夏季，尤其是西部，缙云山以西的盆地区域，从日常预报分析来看，夏季，在该区域西南涡活动较为频繁，气旋式气流与缙云山相互作用，往往在该区域会带来强降水，因此夏季强降水的空间分布和全年的基本一致，而冬季无强降水产生。春季偏南地区，尤其是东南部，出现小时强降水的概率要高一些，秋季则在长江沿线以北的区域出现小时强降水的概率要大一些。小时强降水的最大雨强上，夏季最强，多出现在西部缙云山以西，武陵山脉南侧和大巴山脉南侧的平坝河谷区域与高山的过渡区域；秋季次之，多出现在长江沿线以北，冬季较强降水出现在长江沿线的河谷区域，但均没有出现超过 20mm h^{-1} 的强降水。

图10 2008–2016年重庆地区不同季节小时强降水($>20\text{mm h}^{-1}$)出现频次(单位:次)及最大值(单位:mm)的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of frequency and maximum of hourly heavy rainfall ($>20\text{mm h}^{-1}$) in different

5.2.3 不同时段小时强降水极值及频次的空间分布特征

从小时强降水出现频次和最大雨强的空间分布的日变化来看(图略), 03:00-07:00为强降水出现的活跃期, 超过80%的区域均出现过强降水, 08:00-11:00和22:00-次日02:00为次活跃期, 超过50%的区域出现过强降水, 14:00-17:00最不活跃, 仅不到30%的区域出现过强降水。不同时间段, 小时强降水出现频次的空间分布具有较大的差异。其中08:00, 西部、东北部和东南部出现强降水的频次较高, 中部只有少部分区域出现强降水; 14:00小时强降水出现的区域较为零散, 仅有西部合川、永川和东南部的石柱出现了小时强降水, 其余大部无强降水出现; 20:00, 小时强降水集中出现在西部和东北部, 其余大部无强降水; 02:00, 西部、东南部大部地区出现小时强降水, 出现频次最高区域分布在西部的永川和大足交界处。

5.3 小时强降水的时间分布特征

5.3.1 小时强降水极值及频次的年变化特征

图11给出了2008-2016年重庆不同区域多年平均的小时强降水出现频次和最大值的年际变化。频次总体呈上升趋势, 小时强降水最大值的年际波动变化并不显著, 但2015年的西部、西南部极端强降水的强度明显大于其余年份, 这可能因为2015年5月以来, 热带印度洋海温一致偏暖模态正位相发展, 激发出西升东降的局地异常纬向环流, 有利于西太平洋副热带高压强度偏强, 位置偏西, 而加强西伸的西太平洋副热带高压造成西南低空急流频发, 强度偏强。低空急流为重庆地区带来了充足的水汽, 并激发不稳定能量释放, 有利于对流活动的发展和降水的产生, 导致降水持续时间长, 雨量偏多(王东阡等, 2016)。

图11 2008-2016年重庆不同区域小时强降水 ($>20\text{mm h}^{-1}$) 出现频次(左图)和最大值(右图)的年变化特征

Fig. 11 Annual variation characteristics of hourly heavy precipitation ($>20\text{mm h}^{-1}$) frequency (left) and maximum (right) in different regions of Chongqing (same as Fig. 1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

5.3.2 小时强降水极值及频次的月变化特征

图12给出了2008-2016年重庆不同区域多年平均小时强降水的频次和最大值的月际变化。从强降水的出现频次来看, 强降水主要集中在5-9月, 呈单峰型分布, 冬季无强降水出现, 各区域峰值出现时间略有差异, 集中在6-7月, 西部夏季强降水的频次明显高于其他区域, 东北部和中部出现强降水的频次相对较少; 小时降水最大雨强呈单峰或多峰分布, 总体上在6-9月, 尤其是7月出现极端强降水的概率最大。

图12 2008-2016年重庆不同区域多年平均的小时强降水 ($>20\text{mm h}^{-1}$) 出现频次(左图)和最大值(右图)的月际变化特征

Fig. 12 Monthly variations of annual mean hourly heavy rainfall ($>20\text{mm h}^{-1}$) frequency (left) and maximum (right) in different regions of Chongqing (same as Fig. 1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

5.3.3 小时强降水极值及频次的日变化特征

图13给出了2008-2016年重庆不同区域多年平均小时强降水出现频次和最大值的日变化特征。从出现频次的日变化(图12a)可以发现, 重庆小时强降水活跃时段主要集中在22:00-次日10:00, 峰值出现的时间大多在凌晨02:00到06:00, 西南部峰值出现在03:00左右, 主城、

东南部、中部峰值出现在05:00, 东北部峰值出现在07:00, 整体呈自西向东延迟的特征。另外, 西部在午后14:00和主城在午后17:00各存在一个日次峰值, 与午后的强对流天气有关(刘德等, 2012)。西部出现强降水的频次远大于其余区域, 中部次之, 这与西南涡偏北气流与南海偏南气流形成的切变有关(陈忠明等, 2003)。从强小时雨强来看, 极端降水呈多峰分布, 但峰值多出现在凌晨和午后, 其中午后虽然出现强降水的频次不多, 但受午后局地对流的影响, 短时强降水的雨强较强。

图13 2008-2016年重庆不同区域多年平均的小时强降水 ($>20\text{mm h}^{-1}$) 出现频次(左图)和最大值(右图)的日变化特征

Fig.13 Daily variations of annual mean hourly heavy precipitation ($>20\text{mm h}^{-1}$) frequency (left) and maximum (right) in different regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region, downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

6 主要结论

利用2008年-2016年CMPA-Hourly逐小时降水格点资料研究分析了重庆地区降水量、频次和强度, 以及小时强降水 (20mm h^{-1}) 出现频次和极值的时空分布特征。主要结论如下:

(1) 年降水大值中心主要位于重庆的东北部和东南部, 夏季受西南涡和地形的相互影响, 西部降水增强, 降水量总体呈两高(西部、东部)一低(中部)的分布。降水频次和强度与地形的相关性较高, 低山和中山区降水频次多大于盆地和丘陵区, 而降水强度与之相反。降水频次(强度)随地形高度增加而增加(减小)。

(2) 小时强降水出现频次存在明显的区域性差异, 总体上与夏季降水量分布较为一致, 存在3个高频次中心, 分别是西北部的潼南、大足、铜梁、荣昌、永川、合川一带, 位于缙云山的西侧; 东北部开州、巫溪和云阳的相邻区域, 位于大巴山的南侧; 以及东北部的武隆、黔江、酉阳交界处, 位于武陵山脉的南侧。而低值区主要为大巴山以及巫山-武陵山一带的中山地区, 与降水量的分布较为一致。这说明在山前的平坝和丘陵区域易出现强降水, 而在中山等山地区域反而不利于强降水的产生。此外, 夏季受西南涡和缙云山地形的相互作用, 小时强降水频次明显增加。。

(3) 年降水量和降水频次以及小时强降水频次在2008-2016年间均表现出增强的趋势。降水量主要集中在5-9月, 年峰值出现在6-7月。降水频次年变化呈双峰型分布, 一个峰值出现在5月或6月, 另一个峰值出现在10月。降水强度和小时强降水出现频次的年变化表现为单峰分布, 峰值主要出现在7月或8月, 这与对流性强降水天气有关。

(4) 重庆地区降水存在明显的日变化特征, 降水以夜雨为主, 且降水日峰值自西向东有所滞后, 西部峰值出现在凌晨02:00-03:00, 中部为04:00-06:00, 东部则为早上07:00-09:00; 春季、秋季和冬季降水日变化呈单峰型分布, 主要集中在凌晨, 而夏季受午后局地对流性天气的影响, 在下午17:00左右还存在一个次峰值。

以上给出了重庆地区更加精细的降水时空分布特征, 为验证并进一步改进数值模式中降水有关的参数方案提供了必要参考依据, 同时对于提高该区域水资源利用及自然灾害防御能力也具有重要的现实意义。但对应的形成机制、日变化的区域性特征以及降水与地形的关系还需进一步利用数值模式并设计敏感性试验开展深入研究。

参考文献 (References)

Bao X, Zhang F, Sun J. 2011. Diurnal Variations of Warm-Season Precipitation East of the Tibetan Plateau over China[J]. Monthly Weather Review, 139(9):2790-2810.

- 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.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 Meteorologica Sinica (in Chinese),71(3):367~382
- 陈启智,黄奕武,王其伟,等.2007.1990-2004 年西南低涡活动的统计研究.南京大学学报(自然科学版),43(6):633~642 Chen Qi-Zhi,Huang Yi-Wu,Wang Qi-Wei,et al.2007.The Statistical Study of the Southwest Vortexes during 1990-2004.Journal of Nanjing University: Nat Sci Ed (in Chinese),43(6):633~642
- Chen S , Yan Y , Liu G , et al. 2018.Spatiotemporal characteristics of precipitation diurnal variations in Chongqing with complex terrain[J]. Theoretical and Applied Climatology.
- 陈忠明,徐茂良,闵文彬,等. 2003.1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象, 22(2):162-167. Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Winbing, et al. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yantze river during summer of 1998. Plateau Meteorology (in Chinese),2003,22(2):162~167
- Davis, C. A., K. W. Manning, R. E. Carbone, S. B. Trier,et al. 2003. Coherence of warm-season continental precipitation in numerical weather prediction models, Mon. Weather Rev., 131(11), 2667-2679.
- 胡迪,李跃清. 2015.青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J]. 大气科学, 39(1):161-179. HU Di,LI Yueqing.2015.Spatial and Temporal Variations of Nocturnal Precipitation in Sichuan over the Eastern Tibetan Plateau[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),39(1):161-179,doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13307.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.13260. 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.
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. J. Hydrometeorol., 5 (3): 487-503.
- 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. Li Qiang, Deng Chengzhi, Zhang Yong, et al. 2017. Study on Spatio-Temporal Distribution Characteristics of Hourly Heavy Rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September During 1980-2012.Meteorological Monthly, 43(9):1073-1083
- 李艳,耿丹,董新宁,等. 2010. 1961-2007 年重庆风速的气候变化特征, 大气科学学报, 33(3),336-340. LiYan, GengDan, DongXin—ning, et al. 2010.Climate change of wind speed in Chongqing from 1961 to 2007[J]. Trans Atmos Sci, 33(3): 336. 34
- 刘德,张亚萍,陈贵川,等 2012: 重庆市天气预报技术手册[M].气象出版社。
- 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. Ma Zhenfeng, Peng Jun, Gao Wenliang et al. Climate Variation of Southwest China in Recent 40 Yeas. Plateau Meteorology (in Chinese),2006,25(4): 633-642

- 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
- Qian T, Zhao P, Zhang F, et al. 2015. Rainy-Season Precipitation over the Sichuan Basin and Adjacent Regions in Southwestern China [J]. *Monthly Weather Review*, 143(1):383-394.
- Robert A. Houze Jr. 2012. Orographic effects on precipitating clouds [J]. *Reviews of Geophysics*, 50(1):RG1001.
- 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]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 36 (1): 37–46
- Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 119 (6):3063–3075
- 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. Tang Hongyu, Gu Jianfeng, Yu Shengbin, et al. 2011. Analysis on Diurnal Variation of Precipitation in Southwest China. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2011, 30(2): 376-384
- 王东阡, 王艳姣, 崔童, 等. 2016. 2015 年夏季气候异常特征及其成因简析 [J]. 气象, 42(1):115-121. Wang Dongqian, Wang Yanjiao, Cui Tong, et al. 2016. Analysis on Climate Anomalies and Causations in Summer 2015. *Meteorological Monthly*, 42(1):115-121
- 王鑫, 李跃清, 郁淑华, 等. 2009. 青藏高原低涡活动的统计研究. 高原气象, 28(1):64~71 WANG Xin, LI Yue-qing, YU Shu-hua, et al. 2009. Statistical Study on the Plateau Low Vortex Activities. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28(1):64~71
- 王遵娅, 丁一汇. 2008. 中国雨季的气候学特征. 大气科学, 32(1):1~13. WANG Zun-Ya and DING Yi-Hui. 2008. Climatic Characteristics of Rainy Seasons in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(1):1~13
- 吴国雄. 2006. 夏季副热带高压变化研究的新进展 [M]. 气象出版社
- Yanai, M., and C. Li, 1994. Mechanism of heating and the boundary layer over the Tibetan Plateau. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 305–323.
- Yin S Q, Li W J, Chen D L, et al. 2011. Diurnal variations of summer precipitation in the Beijing area and the possible effect of topography and urbanization [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (4): 725–734.
- Yan Li, Weican Zhou, Xianyan Chen, et al. 2017. Influence of the Three Gorges Dam on precipitation over surrounding regions, *Journal of Meteorological Research*, 31, 767-773.
- 宇婧婧, 沈艳, 潘昉, 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. Improvement of satellite-based precipitation estimates over China based on probability density function matching method. *Journal of Applied Meteorological Science*. 24 (5): 544–553
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007a. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (1):223–234.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al. 2007b. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (13).

- 郁淑华, 高文良. 2017. 高原低涡与西南涡结伴而行的不同活动形式个例的环境场和位涡分析 [J]. 大气科学, 41 (4): 831–856. Yu Shuhua, Gao Wenliang. 2017. Analysis of environmental background and potential vorticity of different accompanied moving cases of Tibetan Plateau vortex and Southwest China vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 831–856, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16213.
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检验 [J]. 气象学报. 57(2): 208-216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese). 57(2): 208-216.
- 张倩倩, 李艳, 王志福, 等. 2016. 1961-2012 年重庆市的降水特征分析, 南京信息工程大学学报, 8(3), 215-225. Zhang Qianqian, Li Yan, Wang Zhifu, et al. 2016. Precipitation characteristics in Chongqing during 1961-2012. J Nanjing Univ Inf Sci Technol. 8(3), 215-225
- 赵衍斌, 肖天贵. 2016. 四川地区强降水的时空分布特征 [J]. 成都信息工程学院学报, 31(1): 94-101. Zhao Yanbin, Xiao Tianguai. 2016. The temporal and spatial distribution of heavy rainfall in Sichuan. Journal of Chengdu University of information technology. 31(1): 94-101
- 郑腾飞, 刘显通, 万齐林, 等. 2017. 近 50 年广东省分级降水的时空分布特征及其变化趋势的研究 [J]. 热带气象学报, 32(2): 212-220. Zheng Tengfei, Liu Xiantong, Wan Qilin, et al. 2017. The characteristics of precipitation in Guangdong province over the past 50 years: dependence on rainfall intensity. Journal of tropical meteorology. 32(2): 212-220
- 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. 2015. Analysis on temporal and spatial distribution characteristics of strong hour rainfall intensity in Sichuan during 2008-2012. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(5): 1261-1269
- 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. 地理学报, 66(5): 619~630. ZHOU Changyan, CEN Sixuan, LI Yueqing, et al. 2011. Precipitation Variation and Its Impacts in Sichuan in the Last 50 Years. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 66(5): 619~630
- 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. 大气科学, 27(6): 1045~1056. Zhu Yanfeng and Yu Rucong. 2003. Interannual Variation of Summer Precipitation in the West of Sichuan Basin and Its Relationship with Large-Scale Circulation. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(6): 1045~1056
- Zhuo H, Zhao P, Zhou T J. 2013. Diurnal cycle of summer rainfall in Shandong of eastern China [J]. Int. J. Climatol., 34 (3): 742–750.

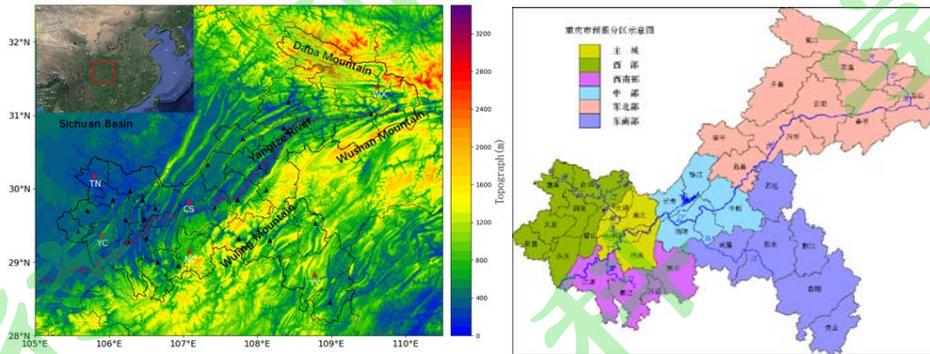


图1 研究区域的 (a) 地形分布 (紫色线为长江上游干流)、(b) 重庆气候业务分区图、(c) 2008-2016 年850hPa平均风场 (风矢量, 单位: m s^{-1}) 和垂直速度 (填色图, 单位: Pa s^{-1} , 冷色为上升, 暖色为下沉) 的空间分布, 红色矩形为研究区域

Fig.1 The location area used in this study (a), the climate zoning map of Chongqing (b) and the spatial distribution of 850 hPa mean wind field (wind vector, unit: m s^{-1}) and vertical velocity (color map, unit: Pa s^{-1} , cold is rising, warm is sinking) in 2008-2016. Red rectangle is the research area.

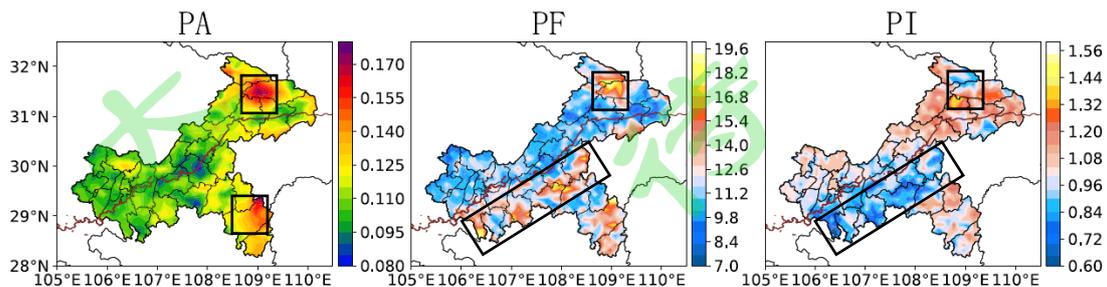


图2 重庆地区 2008-2016 年年均降水量 (PA, 单位 mm h^{-1})、降水频次 (PF, 单位%) 和降水强度 (PI, 单位 mm h^{-1}) 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual average precipitation (PA, unit mm h^{-1}), precipitation frequency (PF, unit%) and precipitation intensity (PI, unit mm h^{-1}) in Chongqing from 2008 to 2016

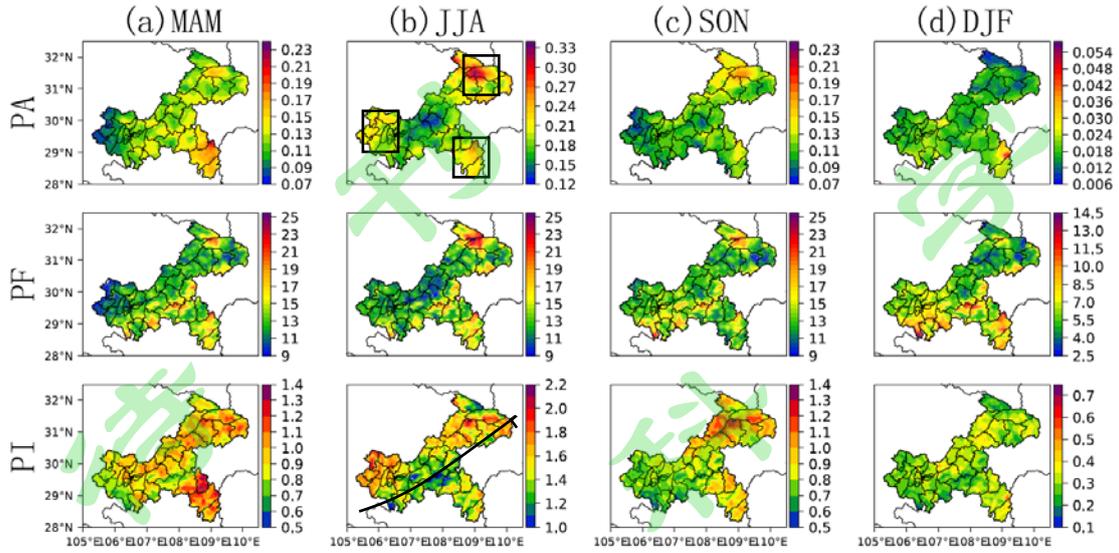


图3 同图2，为不同季节。

Fig.3 same as Fig2, but for different seasons

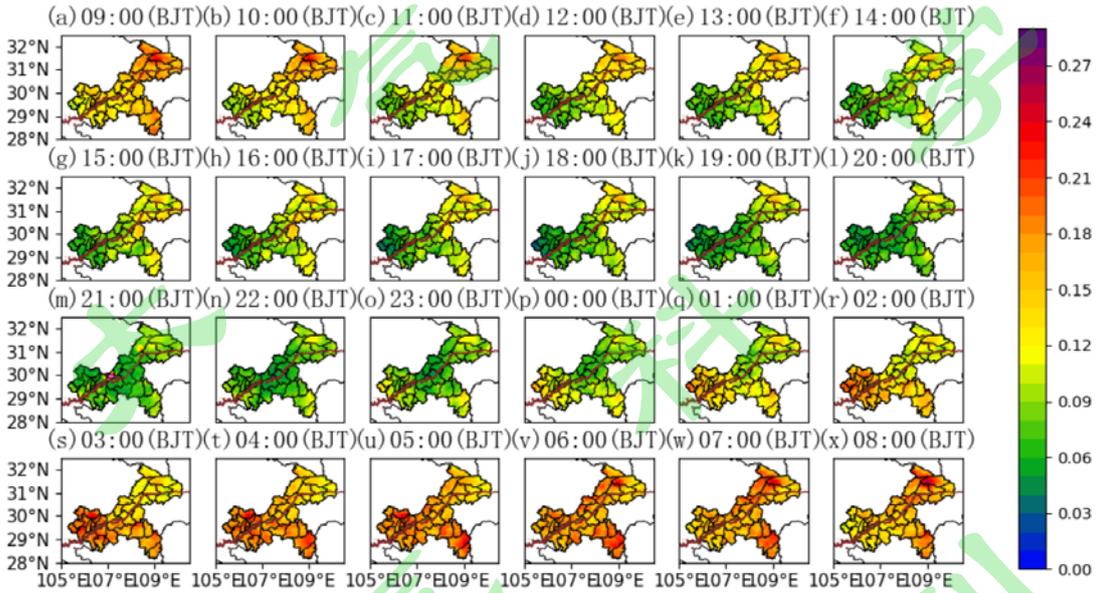
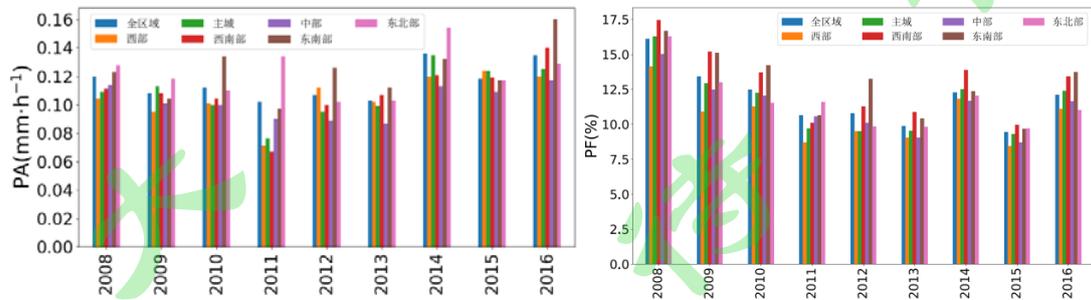


图4 重庆地区 2008-2016 逐小时降水量空间分布 (单位 mm h^{-1})

Fig.4 spatial distribution of hourly precipitation in 2008-2016 of Chongqing (unit mm h^{-1})



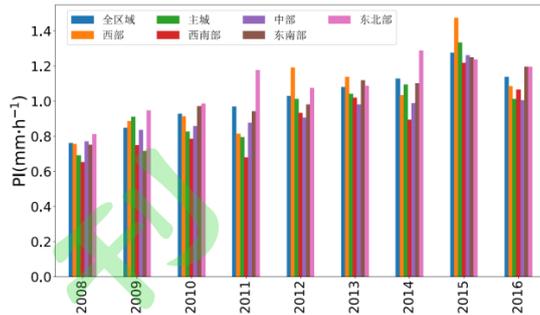


图5 2008-2016年重庆地区各区域年降水量(a)、降水频次(b)和降水强度(c)的年际变化特征
 Fig.5 Interannual variations of annual precipitation (a), precipitation frequency (b) and precipitation intensity (c) in various regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

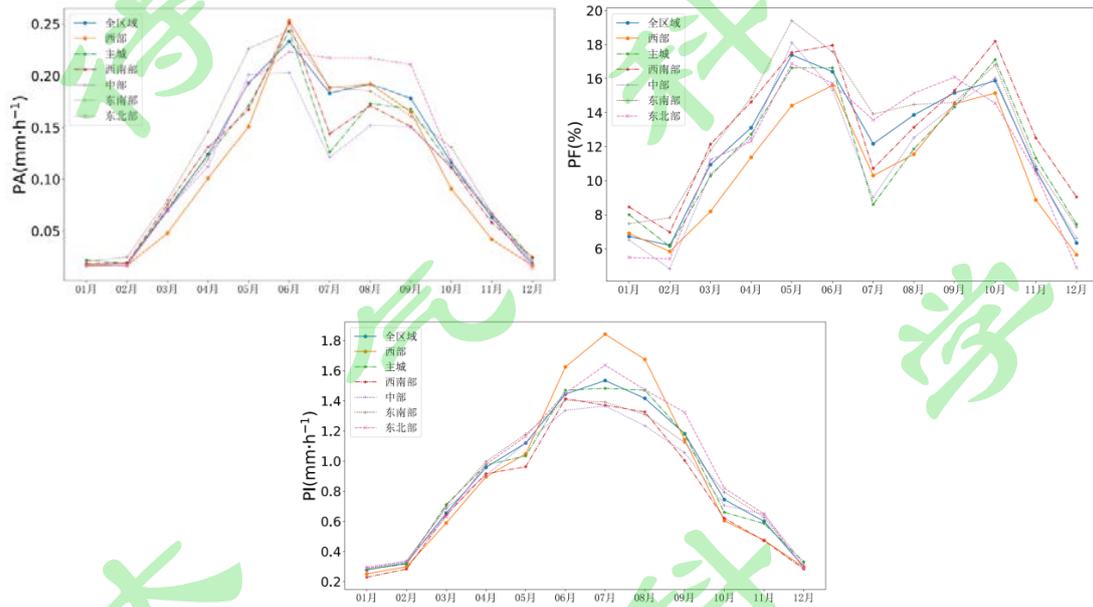
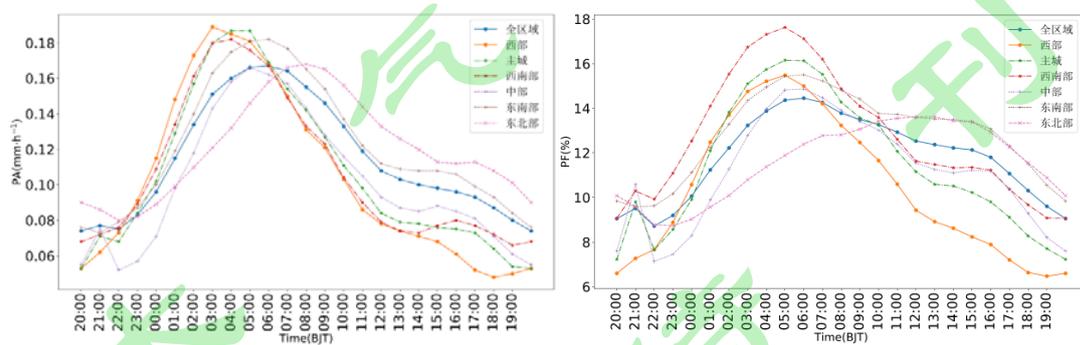


图6 2008-2016年重庆地区各区域多年平均的降水量、降水频次和降水强度的月变化特征
 Fig.6 Monthly variation characteristics of annual average precipitation, precipitation frequency and precipitation intensity in various regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016



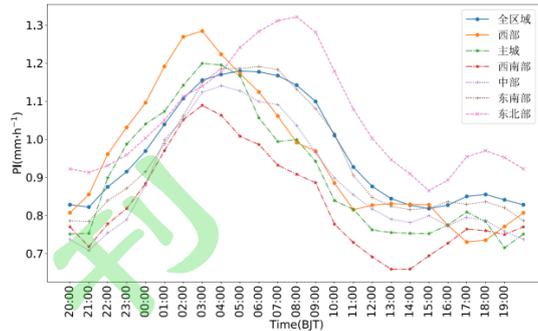


图 7 2008-2016 年重庆地区各区域多年平均的降水量、降水频次和降水强度的日变化
 Fig.7 Diurnal variation of annual average precipitation, precipitation frequency and precipitation intensity in various regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016

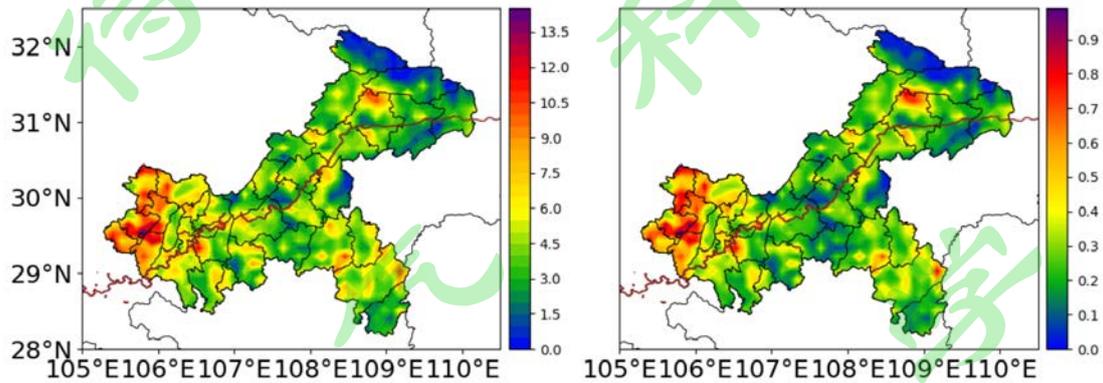


图 8 2008-2016 年重庆地区夏季小时强降水的贡献率, (a) 降水量 (%); (b) 降水频次 (%)
 Fig.8 The contribution rate of hourly heavy precipitation in Chongqing from 2008 to 2016, (a) precipitation (%) and (b) precipitation frequency (%)

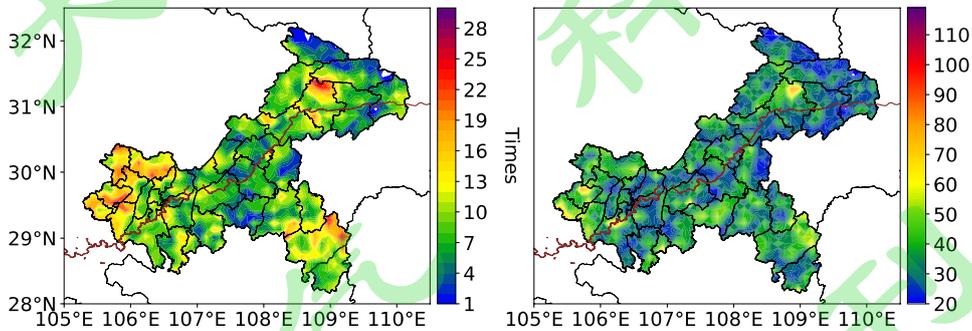


图 9 重庆地区 2008-2016 年多年平均小时强降水 (>20mm h⁻¹) 出现频次 (单位: 次) (a) 和最大值 (单位: mm) (b) 的空间分布.
 Fig. 9 Spatial distribution of frequency (a) and maximum (b) of annual mean hourly heavy precipitation (>20mm h⁻¹) in Chongqing from 2008 to 2016.

游 刊 刊 游
科 科 科 科
游 游 游 游
刊 刊 刊 刊
游 游 游 游

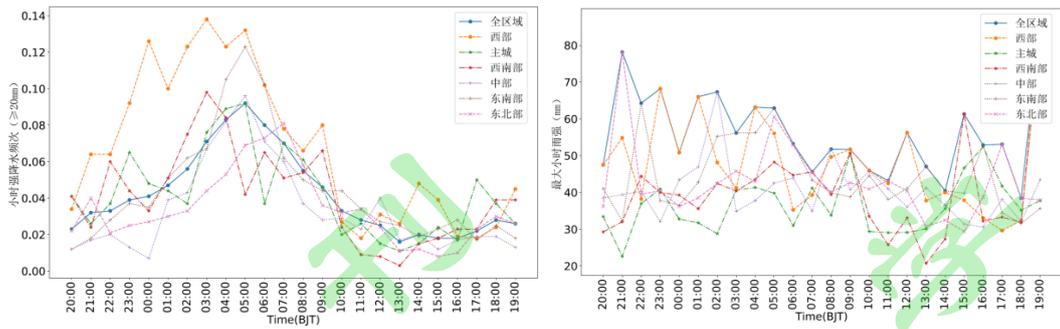


图13 2008–2016年重庆不同区域多年平均的小时强降水 (>20mm h⁻¹) 出现频次 (左图) 和最大值 (右图) 的日变化特征

Fig.13 Daily variations of annual mean hourly heavy precipitation (>20mm h⁻¹) frequency (left) and maximum (right) in different regions of Chongqing (same as Fig.1.c, including the whole region ,downtown, Western, Southwest, Central, Northeast and Southeast) from 2008 to 2016