

2008—2020 年成都地区盛夏降水时空分布特征

吴尧^{1,2}, 肖天贵^{1,2}, 赵平², 李勇³

(1.成都信息工程大学, 成都 610225;

2.中国气象科学院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3 国家气象中心, 北京, 100081)

摘要:为获得成都盛夏降水的时空分布特征,通过 2008—2020 年中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水资料,分析了成都地区盛夏 7 月、8 月降水的时空分布特征。结果表明:(1) 成都地区盛夏平均降水量总体呈西高东低的分布趋势。(2) 成都盛夏以夜间降水为主,雨带明显向东传递,降水峰值主要出现在 3:00—4:00,并且中东部在午后还存在一个次峰值。(3) 小时强降水的降水量和降水频次的贡献率在空间上分布基本一致,最大值区均位于大邑和邛崃的交界处,低值区出现在西部高海拔地区和简阳地区。(4) 2013 年、2018 年、2020 年小时强降水的次数明显偏多,这是由于副高异常偏西偏北导致。(5) 成都西部地区小时强降水的频次明显多于其他地区,但极值却偏小,成都地区极端强降水事件更容易出现在 3:00 左右。综上,通过对成都盛夏降水的研究,为该地区降水监测、城市防洪和防灾减灾等提供决策依据。

关键词:成都降水; 时空分布; 短时强降水

中图分类号:P466

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0343-07

Temporal and Spatial Distribution of Midsummer Precipitation in Chengdu from 2008 to 2020

WU Yao^{1,2}, XIAO Tiangui^{1,2}, ZHAO Ping², LI Yong³

(1.Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2.State Key Laboratory of Hazardous Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3.National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of summer precipitation in Chengdu, based on hourly precipitation data from 2008 to 2020, the spatial and temporal distribution characteristics of precipitation of July and August in mid-summer in Chengdu were analyzed. The results show that: (1) the average summer precipitation in Chengdu presented a general trend of high in the west and low in the east; (2) in mid-summer of Chengdu, the precipitation mainly occurred at night, and the rain belt obviously transferred to the east; the precipitation peak mainly occurred from March to April, and there was a secondary peak in the afternoon in the central and eastern parts; (3) the contribution rates of precipitation and precipitation frequency of hourly heavy precipitation were consistent in spatial distribution base, the maximum values were observed in the junction of Dayi and Qionglai, and the low values were found in the high-altitude area of western China and Jianyang area; (4) the numbers of hourly heavy precipitation in 2013, 2018 and 2020 were significantly more than those in 2013, 2018 and 2020, which was caused by the abnormal west-north subtropical high; (5) the frequency of hourly heavy precipitation in western Chengdu was significantly higher than that in other areas, but the extreme value was smaller; the extreme heavy precipitation events in Chengdu were more likely to occur around 3:00. In summary, through the study of Chengdu summer precipitation, it provides decision-making basis for precipitation monitoring, urban flood control and disaster prevention and mitigation.

收稿日期:2021-06-23

修回日期:2021-08-04

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010408);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z010);第 31 届世界大学生运动会成都市赛事强天气短临预报系统项目(2020H467)

第一作者:吴尧(1997—),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,从事天气动力学研究。E-mail:707643823@qq.com

通信作者:肖天贵(1962—),男,四川成都人,教授,从事天气动力学研究。E-mail:xiaotiangu@cuit.edu.cn

Keywords: precipitation in Chengdu; spatiotemporal distribution; short time heavy precipitation

在全球气候变暖的背景下,经济高速发展,导致降水空间分布发生变化,四川地区为降水减少区域^[1-3],从而对研究区域降水的时空分布演变特征是具有十分重要的科学意义。四川盆地降水分布和日变化具有明显的区域性特性,盆地降水日变化呈现“一峰一谷”型,活跃时段集中在傍晚至凌晨,午夜达到峰值^[4-5],Huang 等人^[6]通过对青藏高原背风坡降水的研究,发现青藏高原与其背风坡低处之间的螺旋形环流有助于降水峰值的日变化并且向下游传播,降水峰值通常开始于青藏高原东部边缘的傍晚,随后向东传播,在凌晨时分,峰值到达四川盆地及其以东的邻近地区,胡迪等^[7]研究了四川地区 5—9 月夜雨的时空变化特征,指出四川地区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,而夜雨发生频次虽然不是很高,但夜雨强度较大。成都地区降水不仅以夜雨为主,而且受地形影响,易出现短时强降水,短时强降水可造成城市内涝,诱发山洪、泥石流等地质灾害,造成财产损失及人员伤亡。陈炯等^[8]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。李强等^[9]发现四川盆地短时强降水高频次区分布在盆地西部龙山山脉、雅安及乐山周围和盆地的过渡区。毛冬艳等^[10]分析了西南地区近 30 a 短时强降水的气候特征,发现四川盆地西部边缘地区的小时降水最强,且短时强降水在 02 时左右发生频次最多。周秋雪等^[11]通过研究四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系,降水量、降水日数随海拔升高而增加,但降水量显著增长区集中在 200~1 200 m,当海拔超过 1 200 m 时降水量迅速减少。

成都是中国西部地区重要的中心城市,又是西部大开发战略的关键平台,位于四川盆地西部、青藏高原的边缘,具有独特的地形条件,是盆地暴雨和短时强降水高发中心之一。近十几年来,成都城市化发展迅速,城市内涝问题也越来越明显,因此对成都地区降水的特征研究非常重要,不仅避免降水异常造成的重大经济损失,而且对城市防洪和环境保护提供了支持和帮助。但过去的研究主要使用的区域自动站日降水资料,不管是空间尺度还是时间尺度都明显不够精细,本文运用了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成都盛夏降水,尤其是小时强降水的时空分布,为成都地区短时强降水的预警和防灾减灾提供重要参考。

1 研究区域、资料及方法

1.1 研究区概况

成都市位于四川盆地西部,青藏高原东缘(30°—31.2°N,102.5°—104.5°E),地势由西北向东南倾斜,西部为龙门山脉,以深丘和山地为主,海拔大多在 1 000~3 000 m,龙泉山脉位于成都境内,是成都平原与川中丘陵的自然分界线,呈南北走向,平均海拔在 1 000 m,东部为四川盆地盆底平原,是成都平原的腹心地带,主要由平原和部分低山丘陵组成,海拔高度一般在 750 m 左右。由于巨大的垂直高差,在市域内形成了平原、丘陵、高山的独特地貌类型,这种地形无疑是降水时空分布特征最特别的地区之一。该地区属于典型的季风气候,成都多年平均降水在 1 000 mm 左右,雨水集中在 7,8 两个月。

为了进一步探究成都市降水的空间分布及其变化特征,以成都市盛夏逐时降水资料为基础,对其空间进行经验正交分解(EOF)。根据降水 EOF 结果一方差贡献率相对较大的 4 个模态的空间分布,分别为 42.7%,13.6%,7.7%,4.0%,累计方差贡献率为 68%。结合 EOF 的结果和地形特征将成都市划分 3 个区域,西部位于川西高原边缘,主要以山地为主,中部位于龙泉山西侧,代表市中心和人口密集区,东部位于龙泉山东侧,以平原、丘陵为主,本文将结合分区和地形来讨论成都及其分区的降水特征和区域差异。

1.2 数据

本文所使用的数据为国家气象信息中心提供的 2008—2020 年中国地面与 CMORPH 融合逐小时降水产品,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为 1 h,用概率密度匹配法(PDF 方法)调整样本数量及其的时空尺度^[12]和最优插值法(OI 方法)将 CMORPH 卫星反演降水和 CPA(Chinese Precipitation Analyses)二者融合^[13],产生融合降水产品,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,该产品能对于定量监测降水过程具有优势,可满足强天气过程监测和服务需求^[14-15]。

1.3 方法

降水资料的统计方法和定义:(1)降水事件。小时降水量大于等于 0.1 mm 作为有降水发生,记为一次降水事件。(2)降水量(Precipitation Amount,简称 PA,单位:mm/h)。一段时间内,总降水量/总时段,描述单位时间内降水的大小。(3)降水频次

(Precipitation Frequency, 简称 PF, 单位: %)。一段时间内, 降水的时次 $\times 100$ /总时次, 描述该地区降水事件出现的频率。(4) 降水强度(Precipitation Intensity, 简称 PI, 单位: mm/h)。一段时间内, 总降水量/总的降水时次, 描述当发生降水时的平均降水强度。(5) 短时强降水(单位: mm)。每小时降水量 ≥ 20 mm的降水。(6) 小时强降水极值(单位: mm)。该区域最大的小时强降水量。(7) 小时强降水频次(单位: 次)。在一段时间内, 发生了小时降水量 ≥ 20 mm的降水总次数。(8) 经验正交函数分析方法(empirical orthogonal function, EOF)。对成都盛夏降水进行空间分布研究, 得出成都盛夏降水的空间特征。

2 结果与分析

2.1 降水的空间分布

2.1.1 年降水的空间分布 图1给出了成都地区2008—2020年盛夏平均降水量、降水频次和降水强

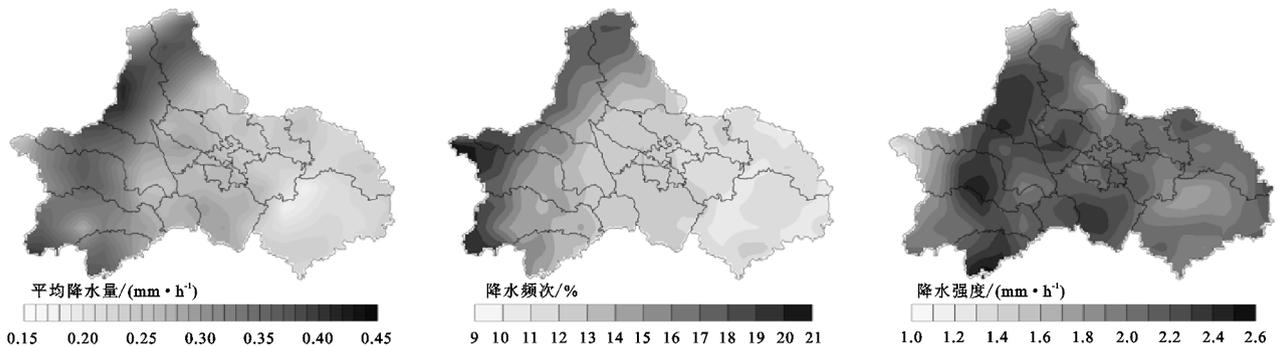


图1 成都地区2008—2020年盛夏平均降水量、降水频次和降水强度空间分布

2.1.2 逐小时降水的空间分布 从成都盛夏小时降水的空间分布可以看出, 成都盛夏时期降水主要以夜间降水为主, 在2:00—5:00平均降水量普遍较多, 从空间上可以看出雨带总体随着时间向东传递的特征, 西部地区降水的峰值出现在2:00—3:00, 12:00为全天最低值, 中东部在4:00左右达到峰值, 但中部在16:00为全天最低, 而东部在19:00达到了全天最低。这也证明了西南地区主要以夜间降水为主, 雨带呈现一致的向东传递这一结论。从21:00开始, 西部降水开始增强且降水增强区域向东随时间逐渐扩张; 到02:00西部降水持续增强, 在都江堰地区出现极值区, 随后西部较强区域向南部和东部扩张; 在3:00时刻成都西南部降水达到了最大值; 4:00, 西部降水强度开始下降, 中东部降水达到了峰值; 从6:00之后, 总体降水量都普遍减少, 到12:00时, 各个区域的降水量持续减少, 大值区位于中部南侧, 其次是西部, 东部一直处于低值区, 从14:00—17:00时, 在成都的北部出现了降水量较明显的增强。

度的空间分布特征。总体上, 西部平均降水量明显偏大, 中部相对较小, 东部明显偏小, 降水量呈西高东低的分布趋势, 并且存在两个大值中心, 一个在都江堰的西部, 另一个在邛崃的西部, 都在约0.4 mm/h以上, 这与李昕翼等^[16]利用50 a自动站站点资料统计的降水呈西高东低的结论一样, 但降水大值区较前人研究的更偏向于山区, 可能由于西部山区站点稀少的原因。有一个低值中心位于龙泉驿区和简阳市的交界处, 在龙泉山脉的东侧, 约为0.18 mm/h。降水频次与地形高度有密切的关系, 龙门山脉的降水频次普遍都超过17%, 海拔高度越高, 降水也越频繁, 在平原地区的降水频次相对较低, 在成都的东部出现低于10%的低值区。降水强度与降水频次几乎是相反的, 虽然地势海拔越高有利于降水的出现, 但是海拔越高, 降水强度越低, 强降水易出现在龙门山脉东部的过渡区, 说明地形抬升有利于产生强降水, 还有一个降水强度大值区出现在双流地区的南部。

2.2 降水的时间分布

2.2.1 降水的年变化特征 从成都2008—2020年各区域盛夏时期平均降水量、降水频次、降水强度的年际变化特征(图2)显示, 除了2013年、2018年、2020年盛夏平均降水量异常偏多, 其他年的各区域降水量呈现稳定的波动特征, 无明显变化的趋势; 降水频次总体上都比较平稳, 但是2017年降水频次明显偏低和2020年降水频次明显偏高; 而降水强度呈现着上升—下降—上升的趋势。总体上来看, 虽然西部地区的降水量和降水频次普遍都比其他区域的大, 但是在降水强度方面, 西部的降水强度只有在2013年、2015年、2017年和2020年这四年比其他区域强; 中部地区的降水量和降水频次大多数都是排在第二位, 但降水强度在2010年、2011年、2014年、2018年、2019年都强于其他两个区域, 比西部地区多一年, 说明中部地区比西部地区更容易产生强降水; 东部地区从平均降水量、降水频次、降水强度都要低于其他两个区域。

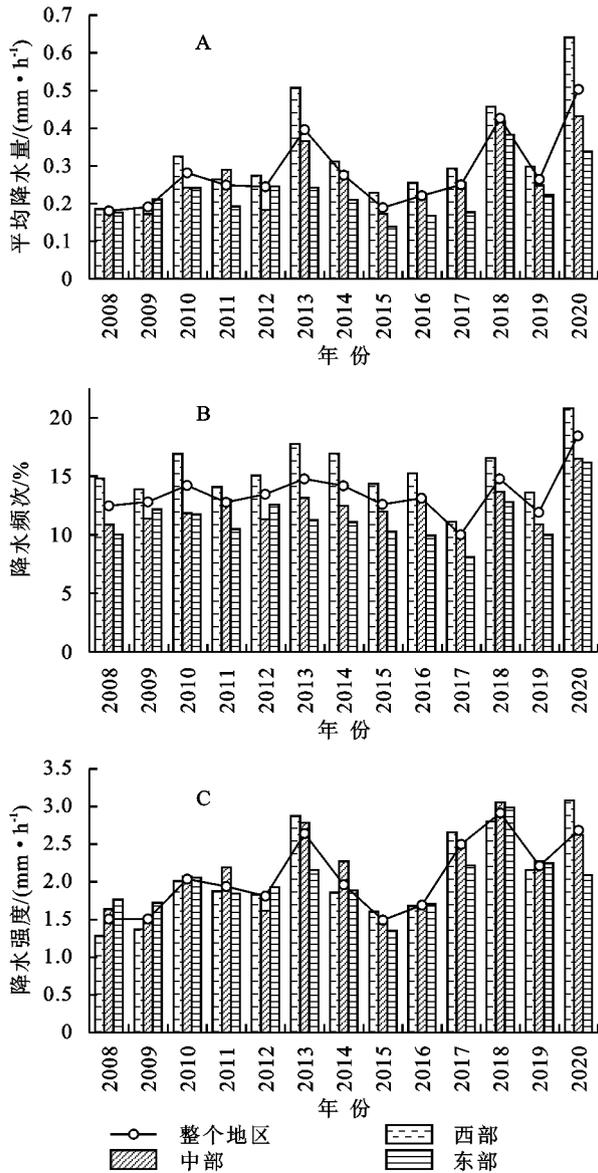


图 2 2008—2020 年成都地区各区域盛夏平均降水量、降水频次和降水强度的年际变化特征

2.2.2 降水的日变化特征 图 3 是成都 2008—2020 年各区域盛夏时期平均降水量、降水频次、降水强度的日变化特征。降水量呈单峰分布,有明显的日变化,降水主要是以夜雨为主,各区域的峰值主要出现在 3:00—4:00,西部地区在 3:00 达到峰值,而中东部则在 4:00 达到峰值,峰值出现的时间呈现自西向东的滞后,另外各区域的白天(8:00—20:00)的降水是远小于夜晚(20:00—8:00)降水;从降水频次可知,各地区的峰值出现的时间大多数在 4:00 到 5:00,并在 8:00 达到次峰值,但各区域在其余时间(12:00—22:00)的变化是各有差异的,西部地区最低值出现在 12:00,随后降水频次开始上升,中部地区在 19:00 出现了第 3 个峰值,并和东部地区在 22:00 时降水频次为最低值;西部地区的降水强度呈单峰型,而中部和东部的降水强度呈双峰型,3 个地区都在 3:00 达到

峰值,但中部地区在 13:00 达到次峰值,此时的降水强度远大于其他两个地区,东部地区在 15:00 达到了第 2 个峰值,这是受到午后局地性对流的影响。

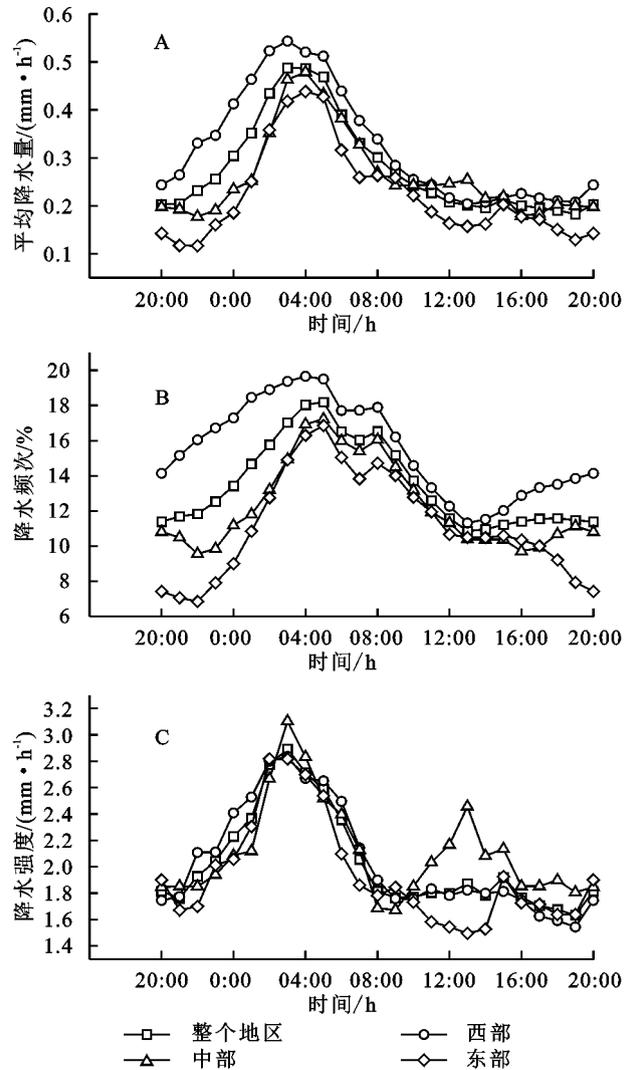


图 3 2008—2020 年成都地区各区域盛夏多年平均降水量、降水频次和降水强度的日变化

2.3 成都地区盛夏小时强降水的时空分布

盛夏时期小时强降水($\geq 20 \text{ mm/h}$)是最容易发生的时候,强降水容易造成山洪、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,为此,需要进一步对小时强降水的时空分布特征进行深入了解。

2.3.1 时强降水对总降水的贡献率 图 4 给出了成都地区 2008—2020 年盛夏小时强降水的降水量和降水频次对盛夏总降水量和降水频次的贡献率。小时强降水的降水量和降水频次的贡献率在空间上分布基本一致,降水频次的贡献率最大值不超过 2%,而降水量的贡献率大值区接近 18%,说明盛夏时期空间各点出现小时强降水频率并不是很高,但对盛夏总降水量贡献较大。从降水频次贡献率可以看出,大邑和邛崃的交界地区是最容易出现小时强降水,其次容

易发生小时强降水的地方有都江堰、蒲江地区,最低值区出现在都江堰和彭州的北部和大邑的西部,这些

地方的海拔高于 3 km,说明高海拔的地区不容易出现小时强降水,其次低值区位于简阳地区。

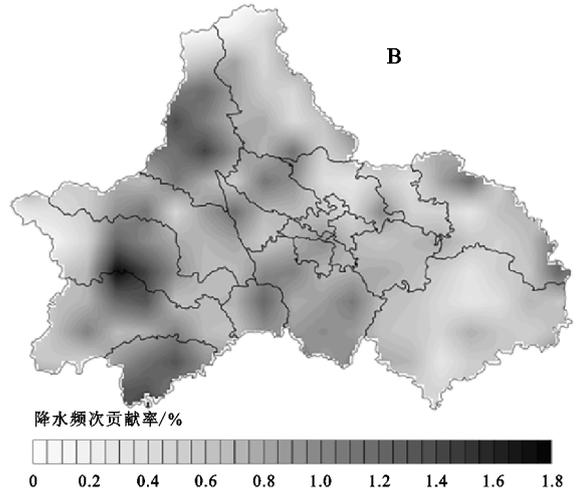
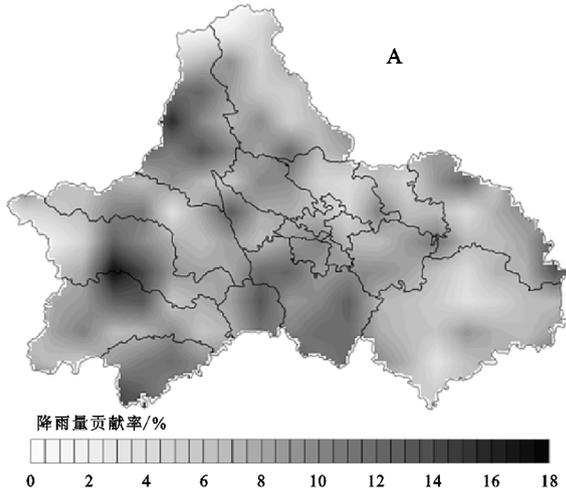


图 4 2008—2020 年成都地区盛夏平均小时强降水的贡献率

2.3.2 时强降水的空间分布特征

(1)多年内小时强降水极值和总频次的空间分布特征。多年内小时强降水最大值(图 5A)的空间差异比较大,变化范围从 20~78 mm/h,简阳地区小时雨强相对较小,还有都江堰和彭州北部的高海拔地区,崇州、大邑、邛崃的部分地区的小时雨强都基本在 40 mm/h 以下,在双流地区的极端小时雨强最大,都是 50 mm/h 以上,其中有两个大值区,分别一个在双流地区的西部,极端小时雨强为 72 mm/h 左右,另一个在双流与龙泉的交界处,同时也在龙泉山的西侧,达到 78 mm/h 左右,在成都的西侧也存在 3 个极端小时雨强的极大值区,与图 5B 的 3 个强降水频次高值

区相对应,基本在 50~62 mm/h。由图 5B 可知,四川 ≥ 20 mm/h 的降水的次数总体是自西向东逐渐递减的,其主要存在 3 个高频次中心,分别是都江堰地区、大邑和邛崃的交界处、蒲江地区,都是在 40 次以上,而东部平原地区普遍都是在 10 次以下,还有两个低值区在都江堰的北部和大邑的西部。结合小时强降水的极值和频次两张图,总结出高海拔山区是不利于强降水的产生,而山坡地区和山前的平坝区域易出现强降水,并且西部 3 个 50 mm/h 以上的极值中心都出现在强降水频次的高值区,且位于平原向高海拔山区的过渡区域,说明地形抬升是有利于强降水的产生,这与前人得出的结论较为一致^[17-18]。

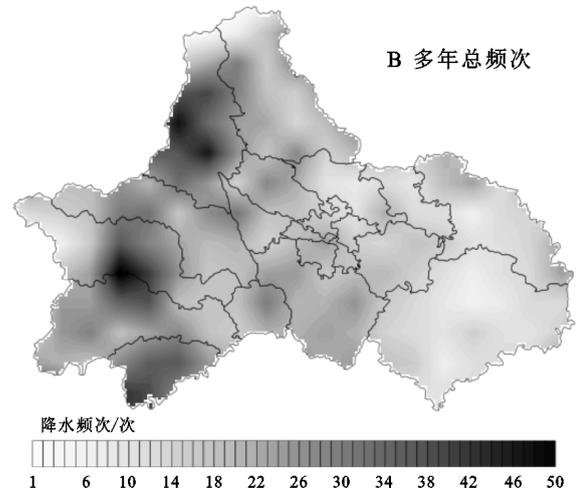
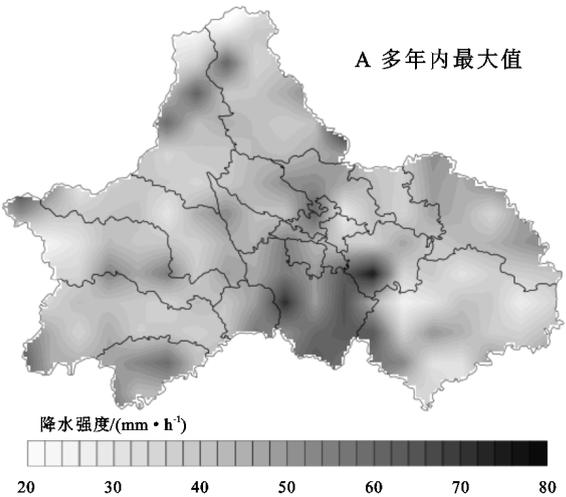


图 5 成都地区 2008—2020 年盛夏小时强降水空间分布

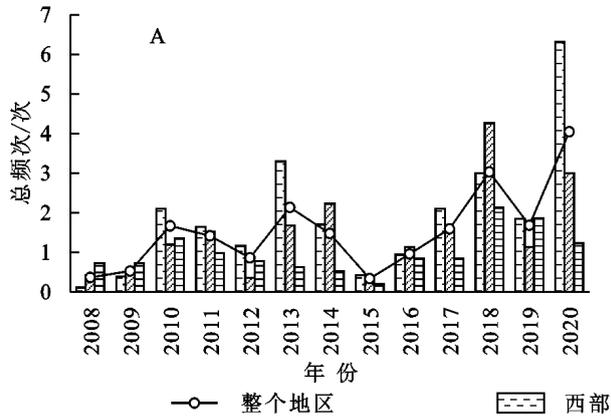
(2)不同时次小时强降水极值及频次的空间分布特征。从小时强降水最大雨强和多年总频次的空间分布日变化来看,夜间(1:00—7:00)为强降水较为活跃的时间段,超过 50% 的区域出现过强降水,而

2:00—4:00 为强降水出现的最活跃的时段,超过 80% 的区域均出现过强降水,而下午(12:00—16:00)为次活跃期,仅有 30% 的区域出现过强降水,大部分都集中在中部地区。不同时段,小时强降水的出现频

次具有较大的空间差异,从 8:00—10:00,17:00—21:00,小时强降水出现的频次很少且区域较为零散,11:00—16:00 中部地区出现了小时强降水,并且区域随时间由南向北移动,从 22:00 开始,西部地区开始出现小时强降水,在 3:00 西部小时强降水频次较高,特别在都江堰和大邑邛崃地区出现了频次的极值中心,而中东部地区陆续出现小时强降水,小时强降水的频次夜间也有明显的东传效应。

2.3.3 时强降水的时间分布特征

(1) 时强降水极值及频次的年变化特征。图 6 给出了 2008—2020 年成都盛夏时期不同区域小时强降水的频次和极值的年际变化。成都盛夏小时强降水的频次和最大值呈现年际波动的趋势,从频次图可看出,2008 年、2009 年、2015 年发生强降水的次数明



显比其他年少得多,但 2013 年、2018 年、2020 年的小时强降水的次数明显偏多,这是因为这三年的盛夏时期,副热带高压异常的偏西和偏北,有利于低纬度的暖湿空气沿副高的边缘北上,冷暖空气在四川盆地地区交汇,低层形成了水汽的异常辐合区,南亚高压较为偏暖、偏东,有利于我国西南地区高层大气辐散,并有西南气流输送阿拉伯海和孟加拉湾的水汽,东南气流输送南海和西太平洋的水汽。这种低层辐合、高层辐散,低空急流输送充足的水汽,是有利于成都地区对流的发展和降水的频繁产生^[19-20]。成都西部地区小时强降水的频次与其他两地区相比,强降水的次数是明显偏多,但每年的降水极值却经常小于整个地区的极值,特别是 2014 年、2018 年、2019 年西部的强降水极值是都小于其他两个地区。

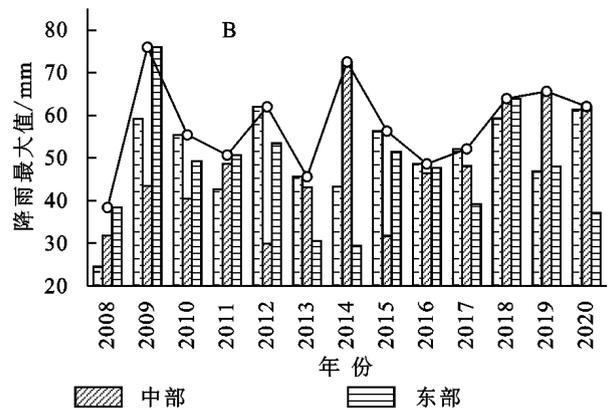
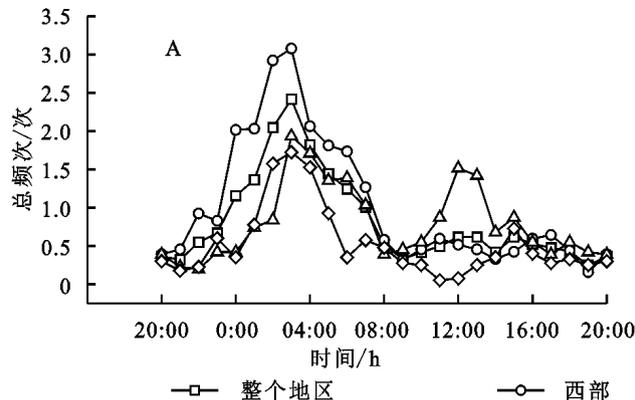


图 6 2008—2020 年成都盛夏时期不同区域小时强降水年变化特征

(2) 时强降水极值及频次的日变化特征。图 7 是 2008—2020 年成都盛夏时期不同区域小时强降水出现总频次和最大值的日变化特征。根据强降水出现频次的日变化可以发现,小时强降水主要还是发生在夜间时段,活跃的时间段主要集中在 22:00 到次日 7:00,在 3:00 都达到了峰值。

另外成都中部地区在 12:00 和东部地区在 15:00 各存在一个日次峰值,这与白天的强对流天气有关。夜



间(20:00—08:00)西部地区出现强降水的次数是远多于其他地区。从强降水的最大雨强可以了解,强降水的极值呈现多峰分布,但峰值都出现在夜间和午后,夜间时段中东部地区的峰值虽然迟于西部地区,但强降水极值都高于西部地区,午后强降水的最大值区都集中在中部和东部地区,虽然强降水的频次不高,但是受午后的强对流的影响,容易发生小时强降水。

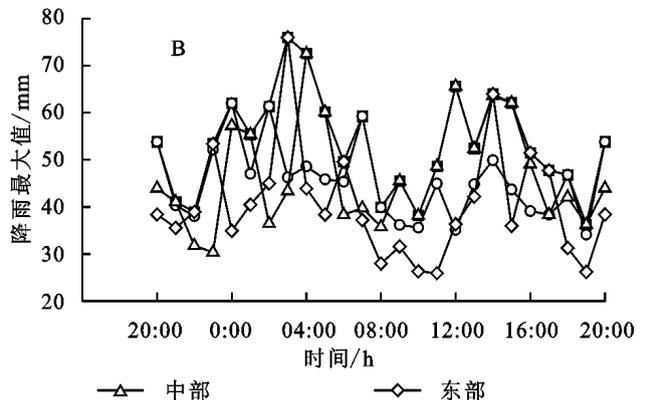


图 7 2008—2020 年成都盛夏时期不同区域降水日变化特征

3 结论

(1) 成都地区盛夏平均降水量总体呈西高东低的分布趋势,降水量的大值区主要位于成都的西北部和西南部,低值区位于龙泉山的东侧。降水频次和降水强度与地形高度密切相关,降水频次与海拔成正比,海拔越高容易出现降水,而降水强度与频次相反,海拔越高降水强度减少,其大值区发生在龙门山脉东部过渡区。

(2) 成都地区盛夏降水存在明显的日变化,降水主要以夜间降水为主,雨带呈现一致的东传效应。成都西部地区的降水量和降水频次都大于其他区域,但中部地区降水强度较大,比西部地区更容易产生强降水。西部地区峰值出现在凌晨 3:00 左右,而中东部地区为 4:00 左右。中东部地区在 13:00,15:00 左右还存在一个次峰值,是受到午后局地对流性天气的影响。

(3) 小时强降水的降水量和降水频次的贡献率在空间上分布基本一致,最大值区均位于大邑和邛崃的交界处,次大值区位于都江堰、蒲江、新津和双流地区,低值区出现在西部高海拔地区和东部简阳地区,这与盛夏平均降水量的分布较为一致。这说明高海拔山区是不利于强降水的产生,而山坡和山前的平坝区域是易出现强降水。

(4) 成都盛夏小时强降水的频次和最大值呈现年际波动的趋势,2013年、2018年、2020年的成都盛夏小时强降水的次数明显偏多,这是由于夏季副热带高压异常偏西偏北导致。成都西部地区小时强降水的频次与其他两地区相比,强降水的次数是明显偏多,但每年的降水极值却经常小于整个地区的极值。短时强降水日变化峰值出现在下午和夜间,但极端强降水更容易在 3:00 左右出现。

以上基于 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的格点数据得出了成都地区盛夏时期更加精细的降水时空分布特征,为成都地区的水资源开发利用和自然灾害防御工作提供了必要的参考。但是对于成都盛夏降水的影响因子、形成机制和地形关系还需要进行进一步的深入研究。

参考文献:

[1] 陈隆勋,周秀骥,李维亮,等.中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J].气象学报,2004(5):634-646.
 [2] 左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J].高原气象,2004(2):238-244.
 [3] 王颖,施能,顾骏强,等.中国雨日的气候变化[J].大气科

学,2006(1):162-170.

[4] Yu R, Xu Y, Zhou T, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(13), <https://doi.org/10.1029/2007GL030315>.
 [5] Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(1), <https://doi.org/10.1029/2006GL028129>.
 [6] Huang H L, Wang C C, Chen G T J, et al. The role of diurnal solenoidal circulation on propagating rainfall episodes near the eastern Tibetan Plateau [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(7):2975-2989.
 [7] 胡迪,李跃清.青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J].大气科学,2015,39(1):161-179.
 [8] 陈炯,郑永光,张小玲,等.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,2013,71(3):367-382.
 [9] 李强,邓承之,张勇,等.1980—2012年5—9月川渝盆地小时强降水特征研究[J].气象,2017,43(9):1073-1083.
 [10] 毛冬艳,曹艳察,朱文剑,等.西南地区短时强降水的气候特征分析[J].气象,2018,44(8):1042-1050.
 [11] 周秋雪,康岚,蒋兴文,等.四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系[J].气象,2019,45(6):811-819.
 [12] 宇婧婧,沈艳,潘旻,等.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,2013,24(5):544-553.
 [13] 沈艳,潘旻,宇婧婧,等.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,2013,36(1):37-46.
 [14] 潘旻,沈艳,宇婧婧,等.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,2012,70(6):1381-1389.
 [15] Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(6):3063-3075.
 [16] 李昕翼,肖国杰,白爱娟,等.成都地区降水时空分布变化[J].气象科技,2011,39(4):417-422.
 [17] 赵衍斌,肖天贵.四川地区强降水的时空分布特征[J].成都信息工程大学学报,2016,31(1):94-101.
 [18] 周秋雪,刘莹,冯良敏,等.2008—2012年四川强小时雨强的时空分布特征[J].高原气象,2015,34(5):1261-1269.
 [19] 龚志强,王艳娇,王遵娅,等.2013年夏季气候异常特征及成因简析[J].气象,2014,40(1):119-125.
 [20] 何光碧,师锐,曾波.2018年7月四川盆地降水异常特征及成因分析[J].气象与环境学报,2020,36(6):21-30.