

周秋雪,康岚,蒋兴文,等,2019.四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系[J].气象,45(6):811-819. Zhou Q X, Kang L, Jiang X W, et al, 2019. Relationship between heavy rainfall and altitude in mountainous areas of Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 45(6): 811-819(in Chinese).

## 四川盆地边缘山地强降水与海拔的关系\*

周秋雪<sup>1,2</sup> 康 岚<sup>3</sup> 蒋兴文<sup>1</sup> 刘 莹<sup>3</sup>

1 中国气象局成都高原气象研究所,成都 610072

2 四川省高原与盆地暴雨旱涝灾害重点实验室,成都 610072

3 四川省气象台,成都 610072

**提 要:** 利用四川盆地 1666 个站点 2011—2015 年 4—10 月的逐小时降水资料及高精度格点海拔高度资料,对降水特征与海拔高度的变化关系进行详细分析,研究发现:(1)汛期总降水量、总雨日、小雨日、中雨日随海拔高度升高而增加,但降水量与雨日随海拔的增长方式并不相同,降水量显著增长区主要集中在 200~1200 m,当海拔超过 1200 m 时降水量迅速减少;大雨日及暴雨日在海拔超过 1200 m 后也迅速减少。(2)盆地西北部、西南部沿山一带的暴雨日主要由强小时雨强贡献,而盆地东北部的暴雨日主要受持续性降水影响。(3)四川盆地复杂地形对降水的日变化有较为显著的影响,小时雨量及短时强降水频次峰值出现时间均随着海拔高度升高而提前,而短时强降水首次出现时间则随海拔高度升高而推迟。

**关键词:** 短时强降水,暴雨,海拔,汛期

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.007

## Relationship Between Heavy Rainfall and Altitude in Mountainous Areas of Sichuan Basin

ZHOU Qiuxue<sup>1,2</sup> KANG Lan<sup>3</sup> JIANG Xingwen<sup>1</sup> LIU Ying<sup>3</sup>

1 Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

3 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

**Abstract:** Based on the hourly precipitation data of 1666 stations during 2011—2015 and high-precision terrain grid data of Sichuan Basin, the relationship between the characteristics of precipitation and altitude is investigated by using statistical diagnostic methods. The main conclusions are as follows. (1) The total precipitation increases with the elevation of altitude. Total rainfall day, light and moderate rain days also show the same trend. However, the total precipitation is not the same as that of the rainy day. The precipitation growth area is mainly concentrated in the altitudes 200—1200 m. When the altitude exceeds 1200 m, precipitation decreases rapidly. Heavy rainy days and rainstorm days are also rapidly decreasing after an altitude of more than 1200 m. (2) The heavy rainfall along the mountains of the northwest and southwest of the basin mainly results from the strong hourly rainfall. But the heavy rainfall in the northeast of the basin is mainly caused by the persistent precipitation. (3) The complex topography of Sichuan Basin has a significant effect on the diurnal variation of precipitation. The appearance of peak frequency in one

\* 四川省气象局科学技术研究开发课题(川气课题 2015-青年-03)、省重点实验室项目(2017-重点-01)、中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金(2016 山区降雨的空间不均匀性对泥石流预报阈值的影响)、四川省高原与盆地暴雨旱涝灾害重点实验室项目(2017-青年-05)、四川强对流预报创新团队和雷达资料在短时强降水预报中的应用研究(创新团队)共同资助

2018 年 3 月 30 日收稿; 2019 年 4 月 3 日收修定稿

第一作者:周秋雪,主要从事高原东地区天气与气候研究. Email:1013456@sina.com

day is ahead of time with the elevation of altitude. And the first occurrence time of severe short-time heavy rainfall postpones with the elevation of altitude.

**Key words:** short-time heavy rainfall, torrential rain, altitude, flood season

## 引 言

四川是我国自然灾害多发省份,主要的自然灾害有干旱、洪涝、大雾、霜冻、泥石流等,并且与降水有着密切的关系。任国玉等(2000)、左洪超等(2004)和陈隆勋等(2004)研究指出,四川省近 50 年平均降水量是减少的,而且陈文秀和郝克俊(2001)、周长艳等(2006)分析发现四川西部高原与东部盆地的降水变化存在明显差异,其中盆地东部、中部和西部的降水变化具有不同的变化特征。另外,雨日的气候变化表现出与降水量变化既有密切关系,又有一定差异。王颖等(2006)分析了中国雨日的气候变化特征,发现整个中国年雨日明显减少,尤其是西南地区。其中位于西南地区的四川盆地各量级雨日在盆地不同位置也表现出不同的变化趋势(周长艳等,2011)。这些研究提高了对四川盆地降水变化的认识。值得注意的是,相关研究均是针对日降水量、月降水量及年降水量的分析。

受复杂地形影响,四川不仅年平均降水量大,且易出现短时强降水(中国气象局规定小时雨量超过 20 mm 即为短时强降水),特别是高原与盆地过渡地带。短时强降水易造成城市内涝,诱发山洪、泥石流等次生灾害,造成财产损失及人员伤亡。因此,应用小时雨量资料对四川盆地小时雨量特征进行研究是非常必要的。早期有国外学者(Gray and Jacobson,1977;Kousky,1980)应用小时降水资料,揭示了降水日变化具有显著的海陆差异,随后 Yu et al (2007a;2007b),李建等(2008),戴泽军等(2009),Chen et al(2010),Li et al(2010),王夫常等(2011),毛冬艳等(2018)发现我国不同区域的短时强降水日变化特征有较大差异。王夫常等(2011)研究发现我国西南部降水“夜雨”特征明显,但存在午后次峰值,且区域差异显著。毛冬艳等(2018)分析了西南地区近 30 年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。而位于四川盆地西南部具有“天漏”之称的雅安,其降水量及降水频次日变化则是呈单峰单谷结构(周秋雪等,2016),峰值出现在 00 时,

谷值出现在 15—16 时,且峰值出现时间有向前半夜移动的变化特征。但是,由于所用地面降水资料为国家站数据,相关研究较为初步,且研究范围有较大局限性。之后,随着降水资料的日趋丰富,对降水日循环的研究也逐步深入(姚莉等,2009;司波等,2012),特别是近几年,气象学者通过加密站小时雨量资料与雷达、卫星、数值模式等资料相结合,对环流形势和诱发暴雨的中尺度系统特征方面进行描述和分析(张京英等,2010;郝莹等,2012)。但是针对于四川地区的相关研究较少,特别是对于短时强降水与地形的关系研究较为缺乏。周秋雪等(2015)利用四川省 1052 个站点 2008—2012 年逐小时降水资料分析了四川省短时强降水发生频次时空分布特征,发现高频区主要位于盆地周边山区,盆地内短时强降水频次及雨强极值随海拔高度升高而减少。但是站点数量较少,对盆周山区短时强降水的相关特征不能详细描述。

综上所述,利用尽量多的加密自动站小时降水资料对短时强降水特征变化进行深入研究有利于预报员掌握强小时雨强的发生及发展规律,进一步提高针对短时强降水及暴雨的预报能力,对四川省及西南地区乃至我国东部发达地区的防灾减灾具有重要意义。本文选取了较高空间密度的逐小时雨量资料,并且叠加了高精度的地形海拔高度数据,详细分析了短时强降水频次、雨强极值、短时强降水日变化及短时强降水首次出现时间与海拔高度之间的关系。

## 1 研究资料及方法

本文数据取自 MICAPS 第四类格式的西南地区高精度海拔高度资料,格点分辨率为  $0.00833^{\circ} \times 0.00833^{\circ}$ ,以及经过质量控制后得到的四川省盆地地区 2011—2015 年 4—10 月共 1666 站的逐小时降水数据,时间为北京时。其中 1666 个站中包含盆地地区 104 个基本站和 1562 个区域自动站。由于区域自动站每年均有新建,且部分区域自动站降水数据误差较大,为了固定数据分析的样本数,首先选出

四川省盆地地区 2011—2015 年均有降水资料的所有站点,然后从这些站点中挑选出每年缺失少于一个月的站点,最后根据四川省气象台值班记录以及卫星云图及雷达图对逐小时数据进行校正,对有问题降雨量数据用缺测值代替。例如,某站某时的小时雨量为 50 mm,但是值班记录本上明确指出该测站这个时刻的雨量值为错误,或者同时刻的红外云图显示该测站上空无对流云团,雷达反射率因子也未超过 40 dBz,该小时雨量就用缺测值替代,最后得到 1666 个站点的降雨量样本数据。需要说明的是,由于本文所用资料为整点资料,这可能导致部分连续 1 h 超过指定阈值的强小时雨强事件被划分到两个时段而未达到本文的统计标准,因此实际发生强小时雨强的频率可能更高。

本文中,小时降雨量大于或等于 0.1 mm 的被判定为有降水发生。四川省气象局业务规定,汛期四川省盆地地区小时雨量超过 30 mm 须向当地防汛部门传真实况雨量资料,小时雨量超过 50 mm 即达到暴雨的标准,所以本文短时强降水划分为三个等级:20、30、50 mm,分别研究其频次随海拔高度的变化特征。地区分类说明:盆地地区包括了盆中低海拔地区及盆地周边较高海拔地区,是指四川省除甘孜州、阿坝州、凉山州及攀枝花之外的其余市(县)。

## 2 四川盆地降水量及雨日与海拔高度的关系

为研究降水与地形高度的关系,按 100 m 的间距,分别统计盆地内 1666 个站点在各个海拔高度区间范围内的站点数分布。盆地内有 1225 个站点海

拔高度在 200~600 m,占总数的 73.5%;海拔高度超过 600 m 以后,台站数迅速减少,超过 1600 m 的站仅有 14 个。考虑研究的代表性,这里仅分析海拔高度在 200~1500 m 范围内所有站点 2011—2015 年 4—10 月(后简称汛期)的小时降水特征,并且以 100 m 间隔来做统计分析。在所有图中,海拔高度 1000 代表 900~1000 m 范围内所有站点的统计结果,以此类推。其中降雨量、雨日及短时强降水频次为所有站点的平均值,而雨强极值则是所有站点的最大值。

### 2.1 降雨量及雨日与海拔高度的关系

图 1 为 2011—2015 年汛期降雨量、夜雨量、昼雨量随海拔高度的变化。如图所示,通过一次线性拟合后发现,总雨量、夜雨量及昼雨量均随海拔高度升高而增多,其中夜雨量增长最显著,昼雨量增长趋势最弱。通过二次多项式拟合后发现,总雨量、夜雨量及昼雨量随海拔高度的变化并不是呈现单一的增长趋势,而是先随着海拔高度升高而增多,然后再随海拔高度升高而减少,其中昼雨量随海拔高度的这种变化特征最明显。根据雨量随着海拔高度的这种分布特征,可将总降水量随海拔高度的变化分为三个区域:200~600 m 盆中区、600~1200 m 过渡区、1200~1500 m 高海拔区。其中盆中区总降雨量最少,平均值为 859.8 mm;过渡区总降雨量平均值达到了 987.3 mm,为三个区域之最,且较盆中区有个跃增的特征;高海拔区总降雨量平均值为 907.5 mm,较过渡区明显减少。

图 2 为 2011—2015 年汛期总雨日、小雨日、中雨日、大雨日及暴雨日随海拔高度的变化。如图所示,不论是一次拟合还是二次拟合,总雨日均随海拔

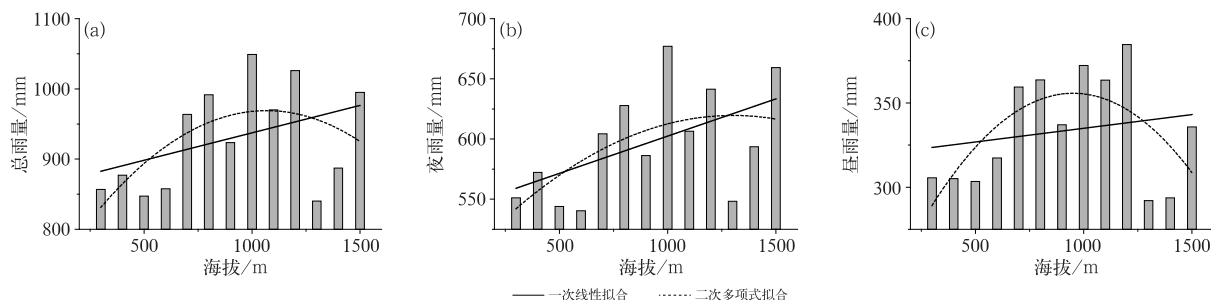


图 1 汛期降水量随海拔高度变化

Fig. 1 Variation of rainfall with altitude during flood season

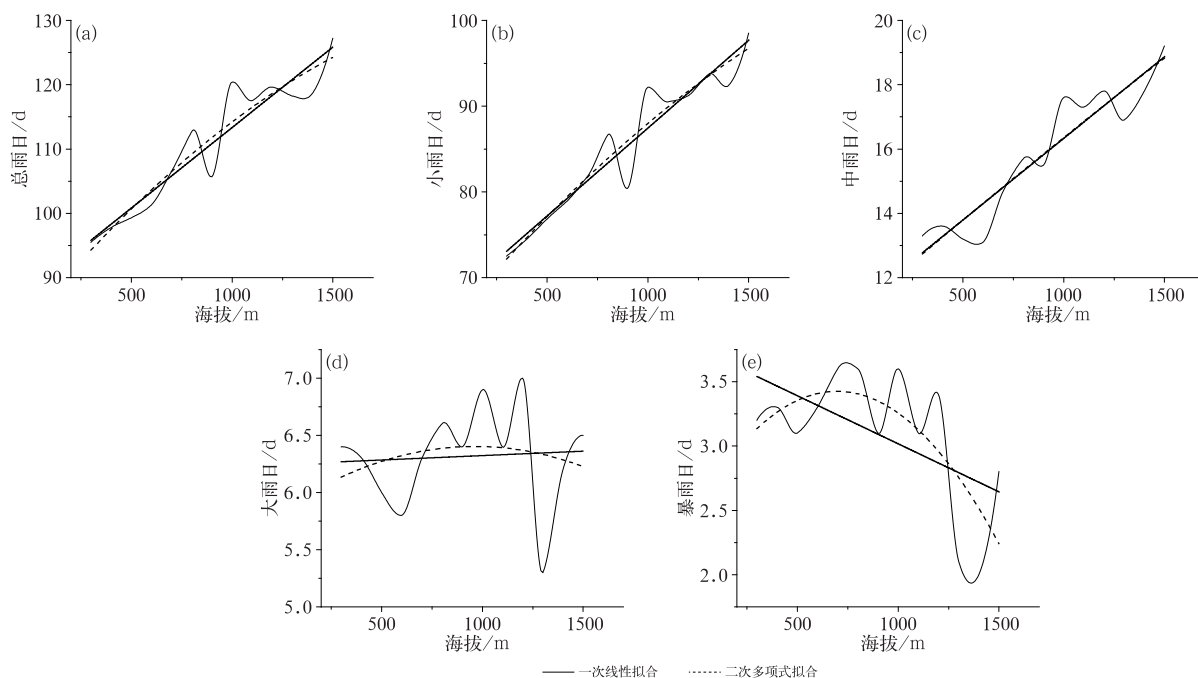


图 2 汛期雨日随海拔高度变化

Fig. 2 Variation of rain days with altitude during flood season

高度升高而增多。说明在四川盆地,海拔高度越高雨日越多。小雨日、中雨日与总雨日变化趋势较为一致,说明小雨及中雨日对总雨日贡献最大,基本影响了总雨日的变化趋势。大雨日随着海拔高度变化并不明显,但是当海拔超过 1200 m 时大雨日突然减少,在 1200~1500 m 范围内又显著增加。一次拟合显示暴雨日随海拔高度升高逐渐减少,且同样是当海拔超过 1200 m 时突然减少,在 1200~1500 m 范围内又显著增加。对比发现,大雨及暴雨日在 1200~1500 m 范围内的变化特征与总雨量随海拔高度的变化特征类似,说明大雨日与暴雨日产生的雨量对总雨量的贡献较大,影响了总雨量的变化。进一步分析发现,汛期大雨以上量级的累积雨量占汛期总雨量百分比随着海拔高度升高缓慢减少,但是在 1200~1500 m 范围内呈明显增加的趋势(图略)。

图 1a 显示汛期总雨量、夜雨量、昼雨量均在海拔 1100~1500 m 范围内呈“凹”字型分布,图 3a、3b、3c 为 1100~1200、1200~1400、1400~1500 m 的站点分布图。如图 3a 所示,盆周山区地势复杂,盆地西北部、西南部及东北部的山脉走向、陡峭程度及站点坡向均有较大差异,这三个地区也是汛期总雨量的大值区(图 3d)。但是受地形影响,大值区分

布特征存在明显差异:盆地西北部雨量高值站点几乎沿着龙门山走向呈带状分布,且密集度高、梯度大;盆地西南部高值站点基本集中在雅安喇叭口地形区附近及峨眉山附近,雨量分布梯度大;盆地东北部高值站点最为分散。对比分析发现,1100~1500 m 范围内雨量呈“凹”字型分布与站点的地理位置有密切关系:1100~1200 m 范围内共 29 站,大多位于盆周雨量高值区,其中有 14 站雨量超过了 1000 mm,最大雨量达到了 1927.3 mm;1200~1400 m 范围内共 28 站,位于雨量高值区的站点数明显减少,超过 1000 mm 仅 9 站,最大雨量为 1336.8 mm;1400~1500 m 范围仅 11 站,但是有 5 站雨量超过 1000 mm,最大雨量为 1388 mm,其中 7 站位于雅安,雅安有世界著名的“天漏”之称,其北侧具有特殊的喇叭口地形,雨量大,雨日多,降水量受地形影响显著。

## 2.2 四川盆地暴雨雨日特征分析

暴雨预报是四川降雨预报的难点,由于四川地形复杂,暴雨的强度预报、落区预报会受到较大影响。图 4a 为 2011—2015 年盆地 1666 站次年平均暴雨日数统计,图 4a 中横坐标 1 是指发生暴雨数 1.0~1.9 d,以此类推。如图 4a 所示,随着暴雨日



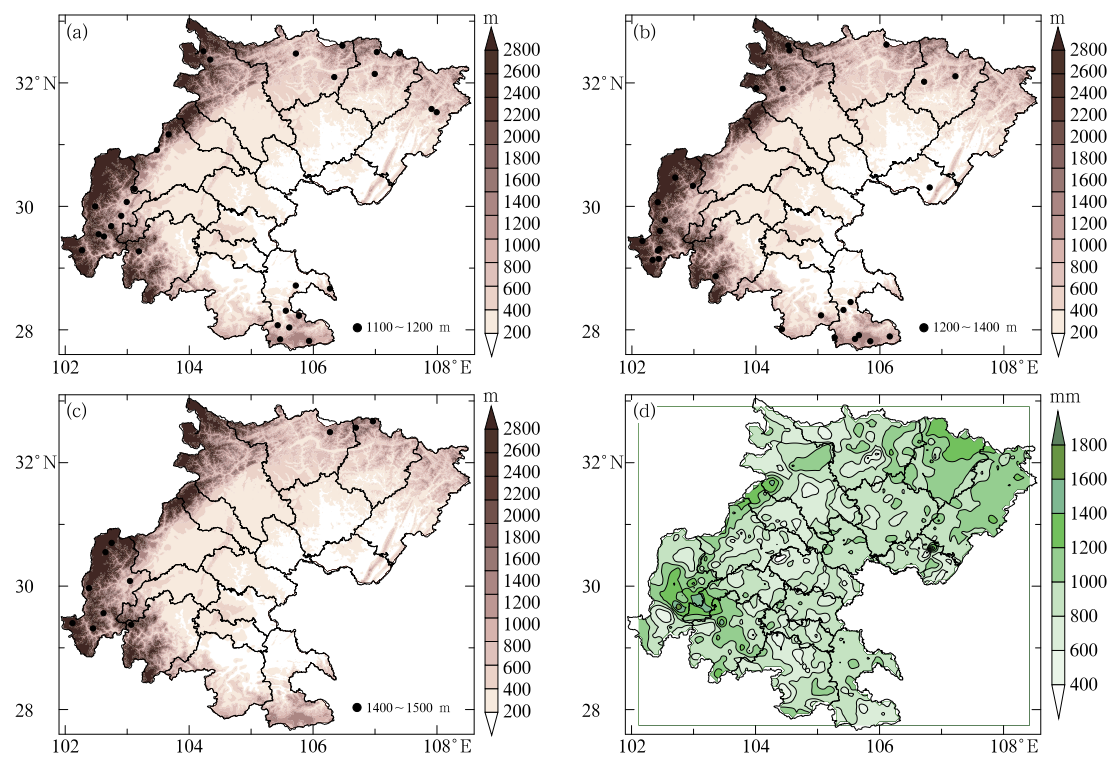


图 3 1100~1500 m 站点分布(a,b,c)(填色为海拔高度)及汛期总降雨量分布(d)  
(圆点:站点)

Fig. 3 Distribution of sites in the 1100–1500 m range (a, b, c; shaded area; altitude) and the total rainfall distribution during flood season (d)  
(black dot; stations)

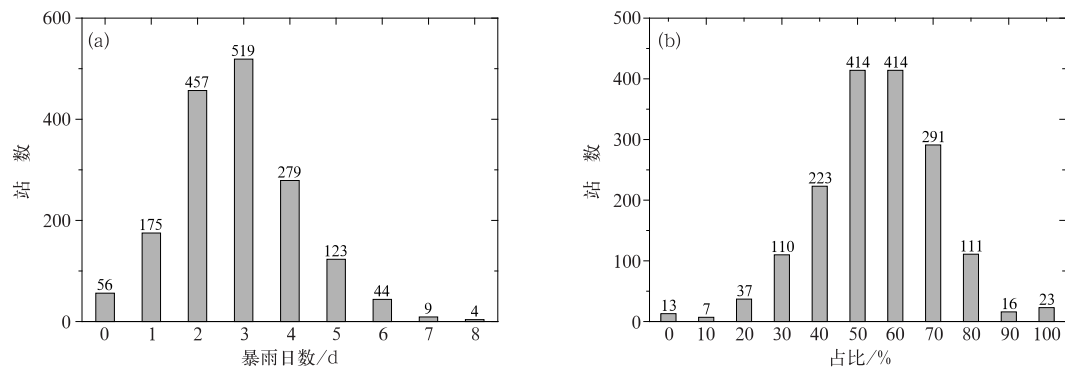


图 4 2011—2015 年汛期不同暴雨日数站点统计(a)  
及有短时强降水发生的暴雨日占比统计(b)

Fig. 4 Statistics of stations for different torrential rain days (a) and the percentage with short-time heavy rainfall (b) in flood seasons 2011–2015

数增加,站点数先增加后减少,四川盆地平均每年汛期发生暴雨日数最多为 3 d,超过 5 d 一共有 180 个站点,占总站数 10.8%。暴雨的标准是 24 h 累积降雨量超过 50 mm,有可能这 24 h 中发生降水的小时数少,但一个或几个小时的强小时雨强贡献即达到

暴雨标准;也有可能小时雨量只有几毫米,但是持续时间长,最后达到暴雨标准,前者更容易造成次生灾害。为了进一步了解四川盆地的暴雨日特征,统计盆地 1666 站所有暴雨日中出现了短时强降水的暴雨日,并逐站求出后者占总暴雨日的百分比(后称占

比)。结果如图 4b 所示,随着百分比增加,站点数先增加后减少,呈正态分布,其中占比 50%~60% 站点最多,达到总站次 50%,说明在四川盆地,大多地区一半以上暴雨日均有短时强降水发生。所有暴雨日均有短时强降水发生的情况也存在,但其总暴雨日只有 1~2 d,代表性不强。

图 5 为暴雨日达 5 d 以上及有短时强降水发生的暴雨日占比超过 60% 的站点分布。如图所示,暴雨日超过 5 d 的站点主要分布在盆地东北部,其次是盆地西南部及盆地西北部。盆地西北部 80% 以上站点的占比超过了 60%,西南部 50% 左右站点的占比超过 60%,而东北部只有 10% 左右站点的占比超过 60%,说明盆地西北部、西南部沿山一带暴雨日主要有短时强降水贡献,而盆地东北部的暴雨日则是因为持续性降水造成的。根据本地预报员平时积累的预报经验,盆地东北部有呈南北走向的山脉,东移的降水系统会受其阻挡,移动缓慢,造成较大的累积降水,该地区稳定且持续的混合型降水云团也不容忽视。

### 3 盆地地区强小时雨强与地形的关系

图 6 为短时强降水频次及雨强极值随海拔高度

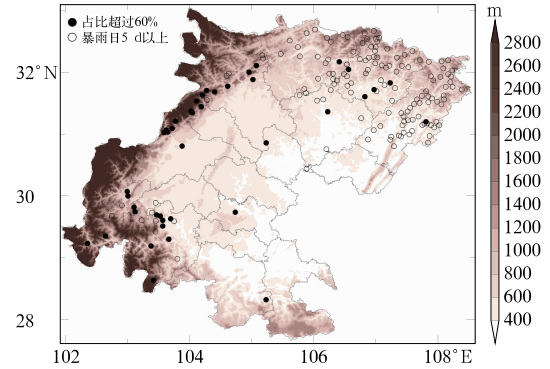


图 5 暴雨日 5 d 以上及占比超过 60% 的站点分布图  
(填色:海拔高度)

Fig. 5 Distribution of stations with above 5 d torrential rain and percentage over 60% stations on rainstorm days  
(shaded area; altitude)

的变化。如图所示,两种拟合结果显示三类短时强降水频次及雨强极值均随海拔高度升高而减少。与周秋雪等(2015)得出的结论有所差异的是,在盆周山区过渡地带频次及雨强极值的波动幅度较大,呈多峰结构,最大峰值出现的海拔高度也与其得出的结论不同。这是因为盆周山区站点数显著增多,所以对该地区的降水变化特征描述也更详细。进一步

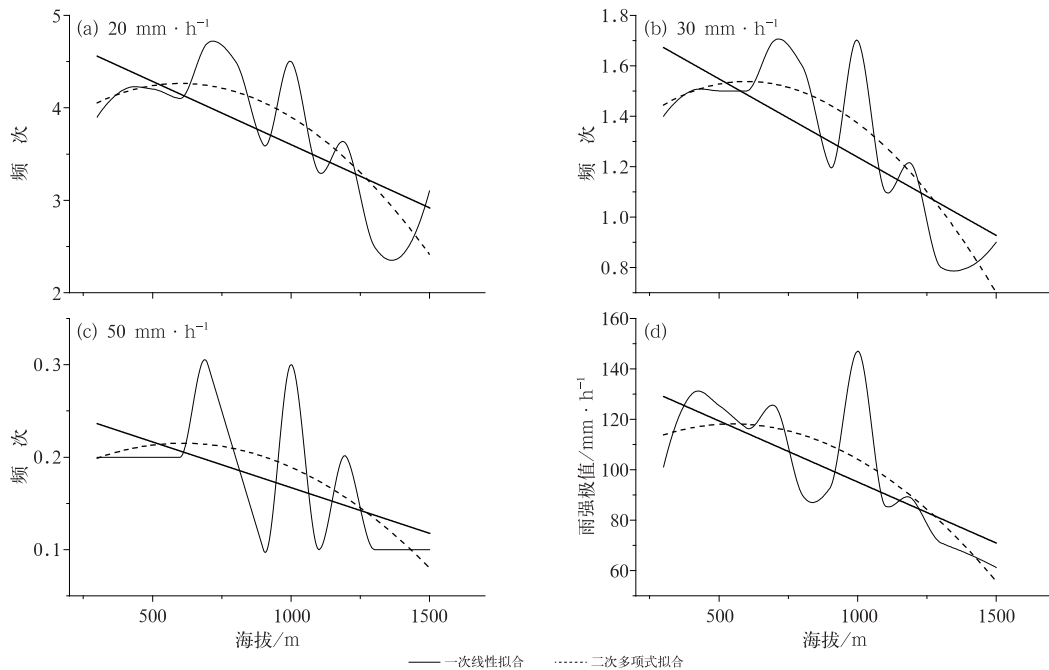


图 6 短时强降水频次及雨强极值随海拔高度变化

Fig. 6 Variation of short-time heavy rainfall frequency and extreme rainfall intensity with altitude

分析发现,三类短时强降水及雨强极值峰值区正好对应短时强降水的三个高发地区(图略):盆地西北部沿龙门山脉一线,盆地西南部喇叭口附近,盆地中部的遂宁虽然海拔较低,地势平坦,但也是强小时雨强多发地之一。青泉等(2015)对四川盆地内初始回波生成地及其移动演变的特点进行了研究,发现在850 hPa风和地形的相互作用下,初始回波主要在盆地周边山区边缘附近生成,根据承载层风向及回波的移动发展建立了盆地西部、北部、中部、南部的强降雨概念模型,基本能够解释为什么雨强大的站点集中出现在上述三个地区。

图7为不同海拔对应的小时雨量及短时强降水频次日变化峰值出现时间。如图所示,两者的峰值均出现在夜间,且随着海拔高度升高而提前。在海拔较低的盆中地区,峰值出现在02—06时,到了盆周高海拔地区,峰值出现时间提前至前一日23时至01时。另外,小时雨量及短时强降水频次谷值出现时间也随海拔升高而提前(图略)。说明地形对降水的日变化也有较为显著的影响。

汛期盆地内不同站点短时强降水的开始、结束时间及持续时间均有较大差异。统计分析发现,最早开始出现短时强降水在4月上旬,最晚结束在10月中旬。某些站点短时强降水出现时间跨度最长可

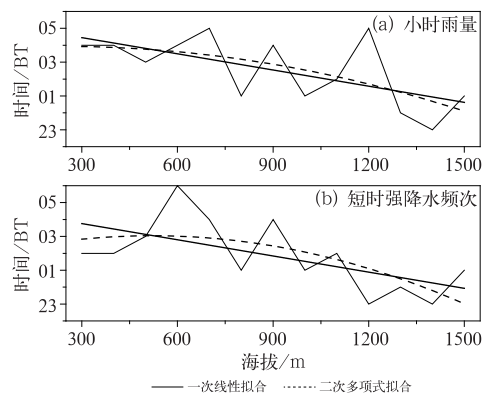


图7 小时雨量及短时强降水频次日变化峰值出现时间随海拔高度变化

Fig. 7 Variation in the peak time of daily rainfall and short-time heavy rainfall frequency with altitude

达20旬,最短只有1旬。图8为短时强降水首次出现在4—7月的站点占总站数比重(后简称占比)随海拔高度的变化。如图所示,短时强降水首次出现时间与站点海拔也有一定的关系,总体来讲,不论在哪个海拔高度,短时强降水首次出现均有可能在4、5、6这3个月。通过拟合后发现,4、5月占比随着海拔高度升高逐渐减少,6、7月占比则是随着海拔高度升高逐渐增多。说明随着海拔高度的增加,短时

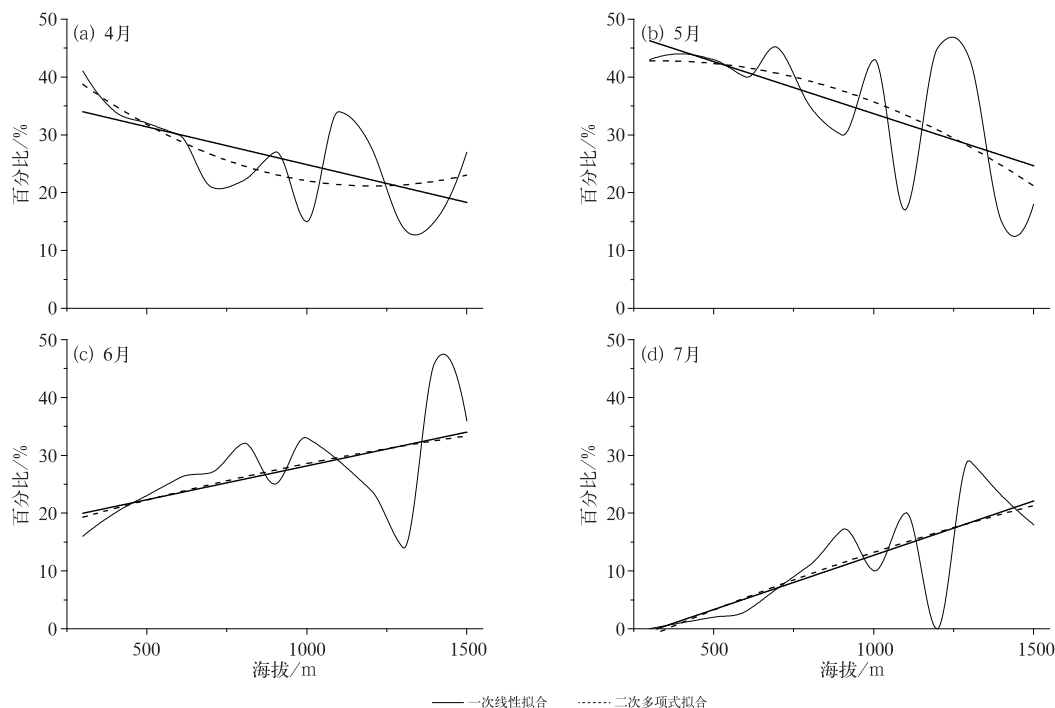


图8 短时强降水首次出现月份随海拔高度变化

Fig. 8 Variation of the occurrence time (month) of short-time heavy rainfall with altitude

强降水首次出现时间有逐渐推迟的变化特征。

## 4 结 论

本文首次运用空间分辨率较高的站点小时雨量资料及海拔高度资料,对四川盆地 2011—2015 年 4—10 月雨量、雨日、小时雨强等多个降水特征与海拔高度的变化关系进行详细分析,得出以下结论:

(1) 汛期总降雨量、夜雨量及昼雨量均随着海拔高度升高先增加再减少。汛期总雨日、小雨日、中雨日随着海拔高度升高而增加,暴雨日则随着海拔高度升高而减少,且减少趋势主要发生在海拔 1200 m 以上地区。

(2) 暴雨日高值区主要集中在盆地西北部龙门山东侧、盆地西南部夹金山东侧和小相岭东北侧及盆地东北部大巴山南侧。进一步分析发现,盆地西北部、西南部沿山一带的暴雨日主要由短时强降水贡献,而盆地东北部的暴雨日主要是由持续性降水造成的。

(3) 三类短时强降水频次及雨强极值均随海拔高度升高而减少,其中在 600~800、900~1000 m 范围内最容易出现短时强降水,而 900~1000 m 范围内出现的雨强极值明显大于其余地区。

(4) 四川盆地复杂地形对降水的日变化也有较为显著的影响,小时雨量及短时强降水频次峰值出现时间均随着海拔高度升高而缓慢提前。进一步分析发现,短时强降水首次出现时间随海拔高度升高逐渐推迟。

本文使用的资料时间长度只有 5 a,不能准确展示有些气候态的统计特征。由于盆周山区站点数较少,雨量、雨日及小时雨量等与海拔高度的变化特征分析还不够深入。另外,本文只是从统计学方面揭示了一些特征现象,而对于相关机理方面的研究较为缺乏。例如盆地西部山区的坡向及对流层低层的风向夹角与强降水的关系;盆地西南部、西北部、东北部降水量大值站点分布特征差异的原因等等。这些问题还需要进一步深入分析。

## 参考文献

陈隆勋,周秀骥,李维亮,等,2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J]. 气象学报,62(5):634-646. Chen L X, Zhou X J, Li W L, et al, 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years[J]. Acta Meteor Sin, 62(5):634-646(in Chinese).

- 陈文秀,郝克俊,2001. 20 世纪四川盆地降水变化特征分析[J]. 四川气象,21(1):37-39. Chen W X, Hao K J, 2001. Analysis on the character of rainfall changing over Sichuan Basin in the 20th century[J]. J Sichuan Meteor, 21(1):37-39(in Chinese).
- 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. Dai Z J, Yu R C, Chen H M, 2009. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hunan[J]. Plateau Meteor, 28(6):1463-1470(in Chinese).
- 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. Hao Y, Yao Y Q, Zheng Y Y, et al, 2012. Multi-scale analysis and nowcasting of short time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 38(8):903-912(in Chinese).
- 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. Li J, Yu R C, Wang J J, 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing[J]. Chin Sci Bull, 53(12):1933-1936(in Chinese).
- 毛冬艳,曹艳荣,朱文剑,等,2018. 西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. 气象,44(8):1042-1050. Mao D Y, Cao Y C, Zhu W J, et al, 2018. Climatic characteristics of short time severe precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon, 44(8):1042-1050(in Chinese).
- 青泉,赵静,叶儒辉,2015. 夏季四川盆地强降水列车效应特征[J]. 气象科技,43(2):250-260. Qing Q, Zhao J, Ye R H, 2015. Characteristic analysis of train effects of summer heavy precipitation in Sichuan Basin[J]. Meteor Sci Technol, 43(2):250-260(in Chinese).
- 任国玉,吴虹,陈正洪,2000. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报,11(3):322-330. Ren G Y, Wu H, Chen Z H, 2000. Spatial patterns of change trend in rainfall of China[J]. Quart J Appl Meteor, 11(3):322-330(in Chinese).
- 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. Si B, Yu J H, Ding Y G, 2012. Research on extreme value distribution of short-duration heavy precipitation in the Sichuan Basin[J]. J Meteor Sci, 32(4):403-410(in Chinese).
- 王夫常,宇如聪,陈昊明,等,2011. 我国西南部降水日变化特征分析[J]. 暴雨灾害,30(2):117-121. Wang F C, Yu R C, Chen H M, et al, 2011. The characteristics of rainfall diurnal variation over the southwestern China[J]. Torr Rain Dis, 30(2):117-121(in Chinese).
- 王颖,施能,顾骏强,等,2006. 中国雨日的气候变化[J]. 大气科学,30(1):162-170. Wang Y, Shi N, Gu J Q, et al, 2006. Climatic variations of wet days in China[J]. Chin J Atmos Sci, 30(1):162-170(in Chinese).
- 姚莉,李小泉,张立梅,2009. 我国 1 h 雨强的时空分布特征[J]. 气象,35(2):80-87. Yao L, Li X Q, Zhang L M, 2009. Spatial-temporal distribution characteristics of hourly rain intensity in China[J]. Meteor Mon, 35(2):80-87(in Chinese).
- 张京英,陈金敏,刘英杰,等,2010. 大暴雨过程中短时强降水机制分析[J]. 气象科学,30(3):407-413. Zhang J Y, Chen J M, Liu Y J, et al, 2010. Analysis of mechanisms of short-time rainfall in

- the process of strong rainfall[J]. *Sci Meteor Sin*, 30(3):407-413 (in Chinese).
- 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. Zhou C Y, Cen S X, Li Y Q, et al, 2011. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years[J]. *Acta Geogr Sin*, 66(5):619-630 (in Chinese).
- 周长艳, 李跃清, 彭俊, 2006. 高原东侧川渝盆地降水与水资源特征及变化[J]. *大气科学*, 30(6):1217-1226. Zhou C Y, Li Y Q, Peng J. 2006. The characteristics and variation of precipitation and water resource of Sichuan and Chongqing Basin on the eastern side of the Plateau[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(6):1217-1226 (in Chinese).
- 周秋雪, 李跃清, 蒋兴文, 等, 2016. “雅安天漏”降水变化气候特征的分析[J]. *自然资源学报*, 31(2):343-353. Zhou Q X, Li Y Q, Jiang X W, et al, 2016. Analysis on the climatic characteristics of the precipitation variations at “Ya'an Sky-leakage”[J]. *J Nat Resour*, 31(2):343-353 (in Chinese).
- 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 Q X, Liu Y, Feng L M, et al, 2015. Analysis on temporal and spatial distribution characteristics of strong hour rainfall intensity in Sichuan during 2008—2012[J]. *Plateau Meteor*, 34(5):1261-1269 (in Chinese).
- 左洪超, 吕世华, 胡隐樵, 2004. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. *高原气象*, 23(2):238-244. Zuo H C, Lü S H, Hu Y Q, 2004. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years[J]. *Plateau Meteor*, 23(2):238-244 (in Chinese).
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al, 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley[J]. *J Climate*, 23(4):905-917.
- Gray W M, Jacobson Jr R W, 1977. Diurnal variation of deep cumulus convection[J]. *Mon Wea Rev*, 105(9):1171-1188.
- Kousky V E, 1980. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil[J]. *Mon Wea Rev*, 108(4):488-498.
- Li Y Q, Li D J, Yang S, et al, 2010. Characteristics of the precipitation over the Eastern Edge of the Tibetan Plateau[J]. *Meteor Atmos Phys*, 106(1-2):49-56.
- 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):L13703.
- 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):L01704.