李永军,卢萍.2024.青藏高原东南缘攀枝花市降水特征及其成因初探[J].暴雨灾害,43(1):101-109. LI Yongjun, LU Ping. 2024. Characteristics and genesis of precipitation in Panzhihua on the southeast margin of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):101-109 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-246

青藏高原东南缘攀枝花市降水特征及其成因初探

李永军[1,2,3,4],卢萍[1,2,3]

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081;2. 中国气象局成都高原气象研究所,成都 610072;
3. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072;4. 攀枝花市气象台,攀枝花 617000)

摘　要:为更好地认识青藏高原东南缘地形复杂区降水特征及其成因,利用位于青藏高原东南缘的攀枝花市2015—2020年72个国家、区域气象观测站资料和欧洲中心0.25°×0.25°分辨率的ERA5再分析资料,对攀枝花降水特征及成因进行分析。结果表明:(1) 攀枝花降水具有地形作用突出、北多南少的特点,降水日数是造成降水空间分布差异的主要原因之一。(2) 攀枝花夜雨特征显著,呈单峰型,降水峰值出现在03时(北京时),因攀枝花位于干热河谷区,日间湿度小、夜间湿度大,夜间较饱和的大气更容易凝结,触发降水,湿度的日变化是攀枝花易发生夜雨的原因之一。(3) 攀枝花干湿季分明,6—10月为攀枝花湿季,11月至次年5月为攀枝花干季,6月和10月是干湿转换的过渡期。6月孟加拉湾西南季风爆发,攀枝花雨季开始,干季逐渐结束;10月干燥的高原南支西风气流加强,雨季趋于结束,干季开始。

关键词:青藏高原;降水特征;南亚高压;西南季风;南支绕流

中图法分类号: P426.61+4　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2022-246

Characteristics and genesis of precipitation in Panzhihua on the southeast margin of Qinghai-Tibet Plateau

LI Yongjun[1,2,3,4], LU Ping[1,2,3]

(1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081; 2. *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu* 610072; 3. *Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu* 610072; 4. *Panzhihua Meteorological Observatory, Panzhihua* 617000)

Abstract: To enhance our comprehension of the precipitation patterns and underlying causes in the complex terrain area of the southeastern edge of the Qinghai Tibet Plateau, the observation data of 72 automatic weather stations in this area and the ERA5 reanalysis data with a resolution of 0.25°×0.25° obtained from the European Center between 2015 and 2020 were utilized to analyze the precipitation characteristics and genesis in Panzhihua. The results indicate that: (1) The precipitation in Panzhihua exhibits a prominent topographic effect, showing a significant decrease from north to south in annual precipitation distribution. The number of precipitation days is one of the main factors for the spatial distribution difference in precipitation. (2) Panzhihua displays obvious nighttime rain features, which shows a unimodal pattern, with the peak precipitation occurring at 03∶00 BT. Panzhihua is located in a dry and hot valley area, and thus experiences low daytime humidity and high nighttime humidity. The saturated atmosphere at night is more likely to lead to condensation, resulting in precipitation. The diurnal variation of humidity is one of the reasons why nighttime rain prevails in Panzhihua. (3) Panzhihua has distinct dry and wet seasons, with June to October being the wet season, November to May of the following year being the dry season, and June and October being the transition period between dry and wet. In June, the southwest monsoon breaks out in the Bay of Bengal, and the rainy season begins in Panzhihua, gradually the dry season finishes. In October, the dry southern branch of the plateau´s westerly airflow strengthens, and the rainy season tends to end and the dry season begins.

Key words: Qinghai Tibet Plateau; precipitation characteristics; south Asia high; southwest monsoon; south branch flow

引　言

青藏高原东西长达2 000 km,南北宽1 000 km左右,平均海拔在4 000 m以上,高大的地形到达对流层中下部,被称为世界屋脊和世界“第三级”。高原气象学研究表明,青藏高原的动力和热力作用对中国东部

收稿日期: 2022-11-28;**定稿日期:**2023-07-26

资助项目: 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0021);国家重点研发计划项目(2022YFC3003902);中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题项目(2021LASW-A06);攀枝花市市级指导性科技计划项目(2022ZD-S-6)

第一作者: 李永军,主要从事天气预报技术与方法研究。E-mail: leeyj0918@163.com

通信作者: 卢萍,主要从事高原天气研究。E-mail: abc-123@mail.iap.ac.cn

地区乃至全球大气环流和天气气候都有重要影响(叶笃正和高由禧,1979;钱正安和焦彦军,1997)。近年来,高原气象学的研究越来越受到重视,青藏高原及周边地区的降水特征及成因也引起了气象学者的广泛关注。许多学者对青藏高原和周边云南、四川等区域的降水日变化特征(Yu et al.,2009;周芳弛等,2023)、雨季开始期和结束期特征(林志强等,2014;王彬雁等,2018)、季节降水特征(朱艳欣和桑燕芳,2018;余迪等,2021)、年降水特征(李晓英等,2016;许建伟等,2020)等开展了大量的分析研究,同时从大气环流(晏红明等,2018;李跃清,2000)、海温变化(晏红明等,2001;严华生等,2005)、对流活动(肖子牛和温敏,1999;解明恩等,2006)、地形作用(周长春等,2015;唐永兰等,2019)等多方面对降水特征的成因进行了分析研究,结果表明青藏高原及周边地区降水特征区域差异明显,而降水特征及成因与青藏高原的动力、热力作用,南亚高压、西太平洋副热带高压、乌拉尔山附近高压脊等天气系统的配置,青藏高原季风、孟加拉湾西南季风和东亚季风等季风系统的建立、消失及其强度,热带太平洋和印度洋海温,孟加拉湾南部苏门答腊岛附近和中南半岛等地区对流活动强度,地形作用等息息相关。

针对青藏高原及周边地区降水的分析研究虽多,但少有关于青藏高原东南缘攀枝花这一地形复杂区年、月、日等多时间尺度的降水综合特征分析及成因探索。由于地形地貌的复杂性和地理位置的特殊性,攀枝花兼具高山、盆地、河谷等多型下垫面,同时受青藏高原南支绕流、孟加拉湾西南季风和南亚高压等天气系统的影响,降水独具特色,因此,成为研究青藏高原东南缘复杂地形区降水的典型区域之一。攀枝花地区范围不大,区域内只有4个国家气象观测站(以下简称国家站),均位于河谷地区,且有3个分布于南部区域,故仅使用国家站资料难以揭示其降水特征。近年来随着区域气象观测站(以下简称区域站)建设不断加快,攀枝花等地区也逐渐形成了布局合理、运行稳定的观测站网,考虑到观测资料的时空分辨率和质量,本文利用攀枝花市2015—2020年72个国家和区域站观测资料和欧洲中心0.25°×0.25°分辨率ERA5再分析资料,分析了青藏高原东南缘攀枝花的降水特征及成因,以期为认识青藏高原东南缘地形复杂区降水特征提供科学参考。

1 资料与方法

本文使用攀枝花市气象信息中心提供的攀枝花市2015—2020年国家气象站及区域自动气象站降水观测资料,对青藏高原东南缘攀枝花市的降水特征进行分析;使用欧洲数值预报中心提供的分辨率为0.25°×0.25°的ERA5再分析资料,对攀枝花降水特征成因进行分析探讨。为分析不同量级降水特征,将降水划分为小雨及以上(≥0.1 mm,微量降水除外)、中雨及以上(≥10 mm)、大雨及以上(≥25 mm)和暴雨及以上(≥50 mm)等不同量级。参照实际业务中暴雨考核的方法,以下辖县(区)行政区域为划分依据,将攀枝花分为市区仁和区片区、米易县片区和盐边县片区3个片区,按照至少有2个片区1/3及以上站点20—20时(北京时,下同)降水量≥40 mm的标准,选取强降水过程,将除强降水过程外的剩余降水过程称为弱降水过程,以分析不同强度降水过程特征。

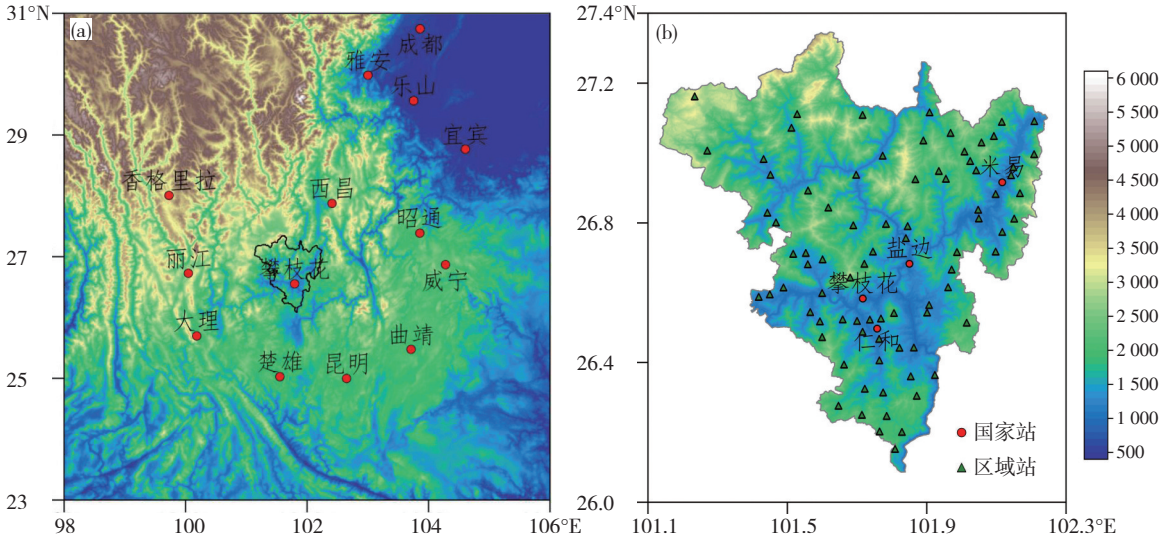


图1 攀枝花(粗黑色边界区域)地理位置与区域地形(填色) (a)、攀枝花精细地形(填色,单位: m)与气象观测站点的空间分布(b)

Fig.1 (a) Geographical location of Panzhihua (thick black lines mark the boundary area) and regional terrain (color filling), (b) space distribution of fine terrain (color filling, unit: mm) and meteorological observation stations in Panzhihua

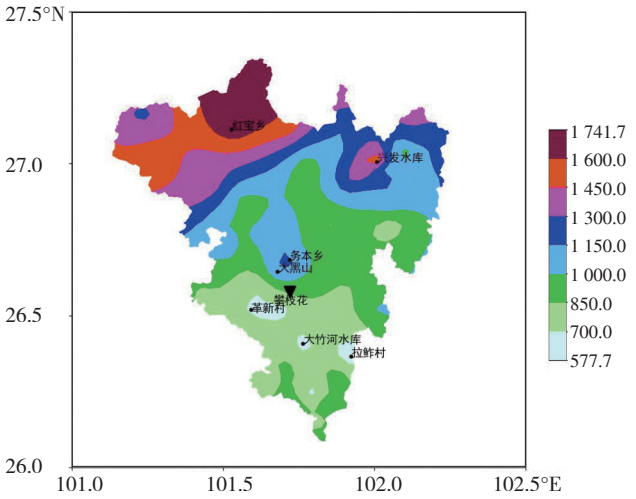


图2 2015—2020年攀枝花平均年降水量的空间分布图(单位：mm，黑色倒三角形为攀枝花站位置，下同)

Fig.2 Spatial distribution of the average annual precipitation in Panzhihua from 2015 to 2020 (unit: mm, the black inverted triangle represents the location of Panzhihua Station, hereinafter)

2 研究区域概况

攀枝花位于青藏高原东南缘，横断山脉东侧，范围为101°08′—102°15′E，26°05′—27°21′N，正好位于青藏高原南支气流的下游、夏季南亚高压东部脊线附近、孟加拉湾西南季风的迎风区，地理位置特殊(图1a)。由攀枝花精细地形及气象观测站点分布(图1b)可见，攀枝花境内山岭纵横、河谷幽深，地势由西北向东南倾斜，境内西北部和北部为高山区域，南部为金沙江河谷地区。攀枝花72个气象站中仅攀枝花、仁和、盐边和米易4个站为国家站，其余的68个站为区域站，除西北部高海拔站点相对稀疏外，其余站点分布较均匀，观测资料能反映该区域的降水特征。

3 降水特征及其成因初探

3.1 年降水特征及其地形影响

图2为2015—2020年攀枝花平均年降水量的空间分布，可见攀枝花平均年降水量空间分布呈现出西北部最多、北多南少、差异显著的特点。北部降水量大部分在1 000~1 600 mm之间，其中西北部红宝乡可达1 741.7 mm，南部降水量大部分在700~1 000 mm之间，其中务本乡降水量达1 206.8 mm，最小降水量出现在南部的拉鲊村，仅577.7 mm，平均年降水量的最大值

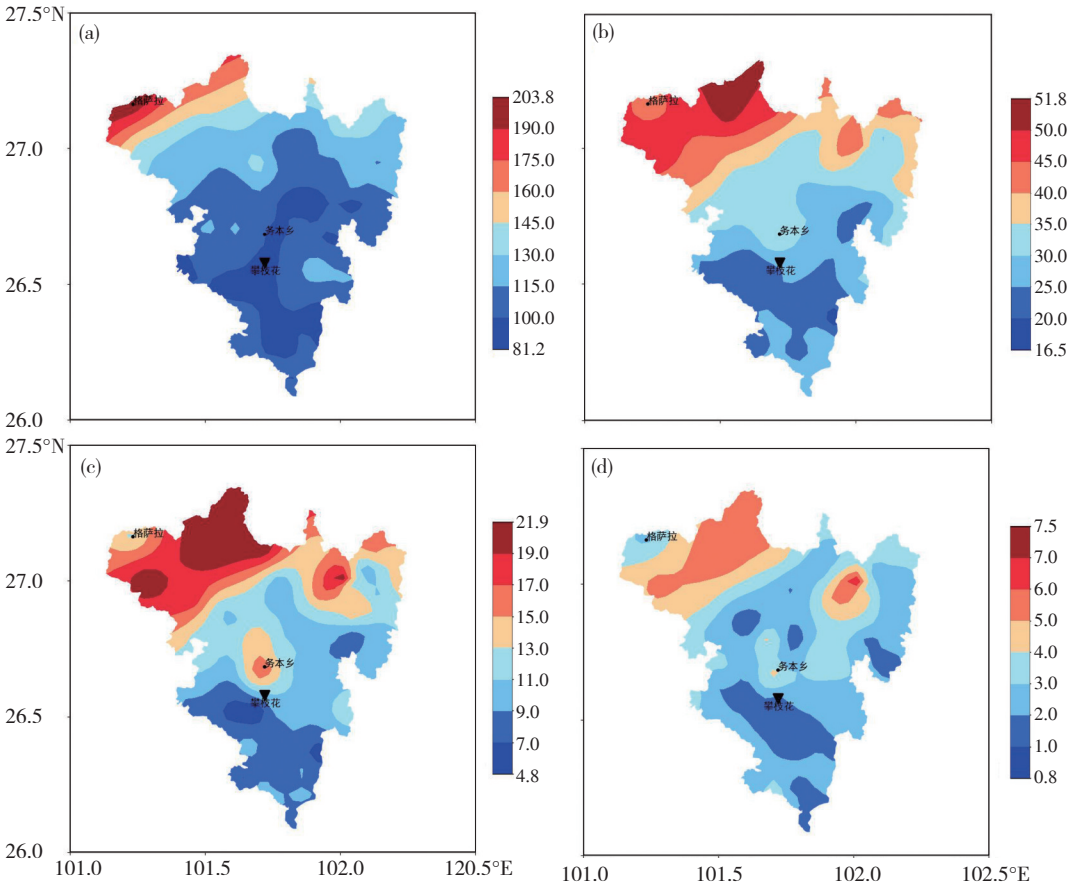


图3 2015—2020年攀枝花≥0.1 mm (a)、≥10 mm (b)、≥25 mm (c)和≥50 mm (d)降水量级的平均年降水日数(单位：d)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the average annual precipitation days (unit: d) with precipitation grades of (a) ≥0.1 mm, (b) ≥10 mm, (c) ≥25 mm, and (d) ≥50 mm in Panzhihua from 2015 to 2020

约是最小值的3倍。最强降水区域位于西北部，强降水中心在红宝乡，位于东北部的兴发水库和南部的务本乡是次降水中心。年降水与海拔高度呈现较好的相关性，西北部和北部海拔较高，降水量较大，主要由于攀枝花雨季的水汽主要来源于孟加拉湾西南季风，该区域是这支暖湿气流的迎风区，既有利于水汽聚集，又存在地形动力抬升作用，故降水较多(周秋雪等，2019；肖红茹等，2021)。拉鲊村、大竹河水库、革新村均位于南部山脉的背风坡，因此年均降水量少。

绘制2015—2020年攀枝花不同降水量级的平均年降水日数分布图(图3)，可见各量级降水日数均为北多南少，与平均年降水量的分布一致，说明降水日数是造成年降水量空间分布差异的主要原因之一。降水空间分布与地形关系密切，还体现在一些奇异点上，比如≥0.1 mm的平均年降水日数最多的格萨拉站点，其≥10 mm及以上量级的平均年降水日数较周边区域显著偏少，导致其平均年降水量较周边区域明显偏少。这主要是由于该站点海拔高(海拔高度为3 153 m)，水汽输送不充分，同时气温较低、对流较弱，这与郭晓芳等(2021)提出的“横断山脉高海拔地区海拔对降水的影响为负效应”的结论相一致，北部其余站点虽分布在高海拔地区，但多位于其河谷地带，站点的海拔相对较低，因此与格萨拉的降水特征存在一定的差异。南部降水中心务本乡，其≥0.1 mm和≥10 mm的平均年降水日数与周边持平，而≥25 mm和≥50 mm的平均年降水日数明显高于周边区域，也导致了其平均年降水量较周边区域显著偏多，其成为降水中心的原因可能是大黑山的地形作用，其机理有待进一步分析。可见，≥25 mm和≥50 mm的平均年降水日数分布(图3c、d)与攀枝花平均年降水量的空间分布(图2)较为一致，经计算大雨及以上和暴雨及以上降水量占总降水量的比重分别达52.4%和22.7%，二者是总降水的主要贡献者。

3.2 日降水特征及其成因

按照上文标准，挑选出34个强降水过程。下面分析2015—2020年攀枝花全市、北部和南部的全部降水过程、强降水过程、弱降水过程的降水量日变化。由图4a可见，攀枝花全市降水量的日变化表现为典型的单峰夜雨特征，降水峰值(0.216 mm)出现在03时，降水谷值(0.051 mm)出现在16时，峰值是谷值的4.2倍。与四川盆地的单峰夜雨特征比较，攀枝花的降水及其日变化振幅均小于四川盆地。四川盆地降水峰值出现时间存在着自西向东延迟现象，在盆地西部紧邻青藏高原东侧地区峰值多发生于午夜前(18—00时)，而盆地东部多发生于午夜后(00—06时) (王夫常等，2011；

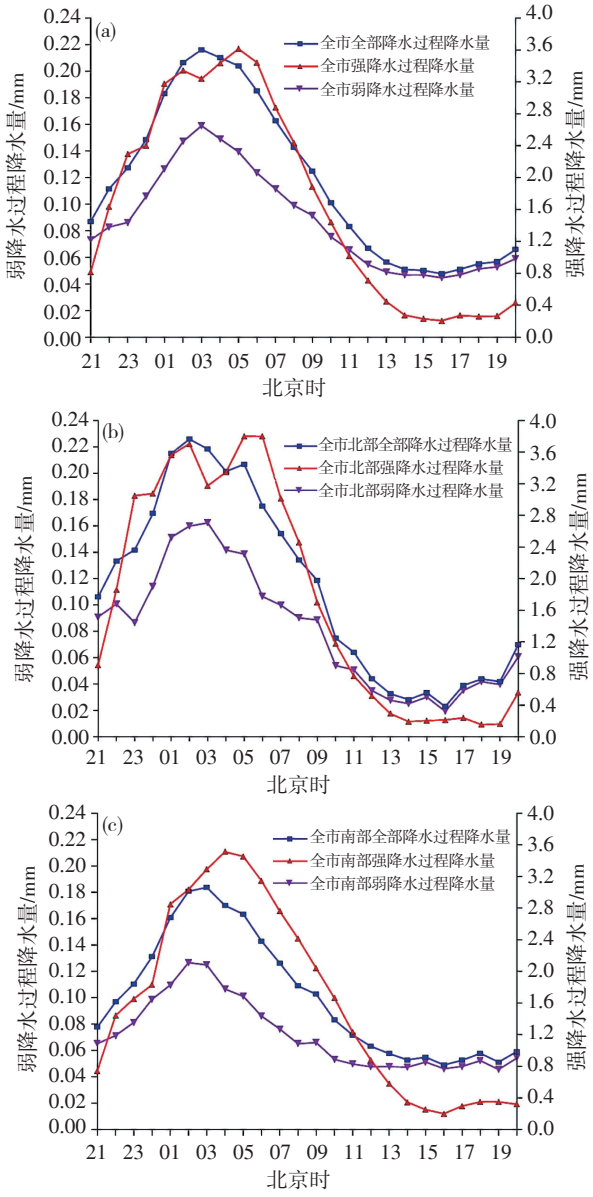


图4 2015—2020年攀枝花全市(a)、北部(b)和南部(c)降水量的日变化

Fig.4 Daily variation of precipitation in (a) the whole region, (b) the northern part, and (c) the southern part of Panzhihua from 2015 to 2020

金霞，2013；宇如聪等，2014)，攀枝花降水日变化峰值出现时间与四川盆地东部较为相似。此外，攀枝花全部降水过程、强降水过程和弱降水过程均表现出分布形态较一致的明显夜雨特征。

对比图4b、c可知，北部高海拔地区的全部降水过程、强降水过程和弱降水过程降水的强度均大于南部低海拔地区。从时间上来看，北部高海拔地区全部降水过程的20—09时，强降水过程的20—02时、05—08时和16时，弱降水过程的20—11时的小时降水量大于南部低海拔地区，其余时次小于南部低海拔地区。从降水峰值看，北部高海拔地区全部降水过程的降水峰值为0.226 mm (02时)，而南部全部降水过程的降水

峰值为0.184 mm (03时)；北部高海拔地区强降水过程的主峰值为3.801 mm (05时)，次峰值为3.705 mm (02时)，而南部低海拔地区强降水过程的峰值为3.511 mm (04时)。可见，北部高海拔地区降水强于南部低海拔地区，降水日变化峰值出现时间早于南部低海拔地区。

强降水过程是攀枝花降水的重要贡献者，同时代表了攀枝花降水的典型组织形势，下面基于强降水过程研究攀枝花降水日变化特征的形成原因。攀枝花上空大气日变化最显著的差异体现在低层，即700 hPa位势高度层。由2015—2020年攀枝花强降水过程不同时次700 hPa风场、相对湿度和比湿的合成场(图5)可见，20—08时有明显的辐合区由东北向西南移动。20时(图5a)辐合区位于攀枝花以北28°N附近一带，表现为来自四川盆地的东北气流、来自云南东北部的偏东气流和从攀枝花一带北上的偏南气流的辐合。02时(图5b)，辐合区南压至攀枝花北部至中部一带，攀枝花上空大气的比湿达12.0~12.4 g·kg^{-1}，相对湿度接近饱和状态，饱和状态的大气受到辐合抬升，极易凝结，触发降水。08时(图5c)辐合区继续向西南方向移动，强度逐渐减弱，相对湿度显著减小，比湿减少至10.8~11.6 g·kg^{-1}。14时(图5d)低层大气的相对湿度最小，比湿降至10.4~11.2 g·kg^{-1}，且攀枝花及其周边已无明显辐合区，难以形成降水。散度与风场情况相对应(图略)，20时较强辐合区位于攀枝花以北区域，02时攀枝花以北辐合区明显减弱，攀枝花中部、北部辐合显著加强，攀枝花西北地区辐合强度达到-8×10^{-5} s^{-1}，与攀枝花最强降水时段相对应，08时和14时攀枝花地区辐合中心逐渐南移并减弱，降水也随之逐渐减弱。

将攀枝花34次强降水过程的垂直速度进行合成，并作20时、02时、08时和14时沿27°N经强降水中心的合成垂直速度的纬向剖面图(图6)，可见强降水过程攀枝花区域内(约101.1°—102.4°E) 20—14时盛行上升气流，其中20时、02时、08时和14时的上升气流最大速度分别为−0.3 Pa·s^{-1}、−0.7 Pa·s^{-1}、−0.4 Pa·s^{-1}和−0.2 Pa·s^{-1}，最大强度在02时，与最大强降水时段对应，其强上升运动区在700—500 hPa，主要由于低层700 hPa气流辐合抬升形成。

可见，攀枝花强降水的夜雨特征主要由于夜间显著的气流辐合上升运动以及充沛的水汽条件等因素共同导致。由于攀枝花属于典型干热河谷地带，日间相对湿度较低，当低值系统过境攀枝花，白天低层较干燥的大气虽存在弱抬升现象，不容易凝结产生降水，而夜间相对湿度高，小的抬升扰动就容易凝结，触发降水，因此攀枝花低层大气相对湿度的日变化是攀枝花呈现单峰夜雨现象的主要原因之一。

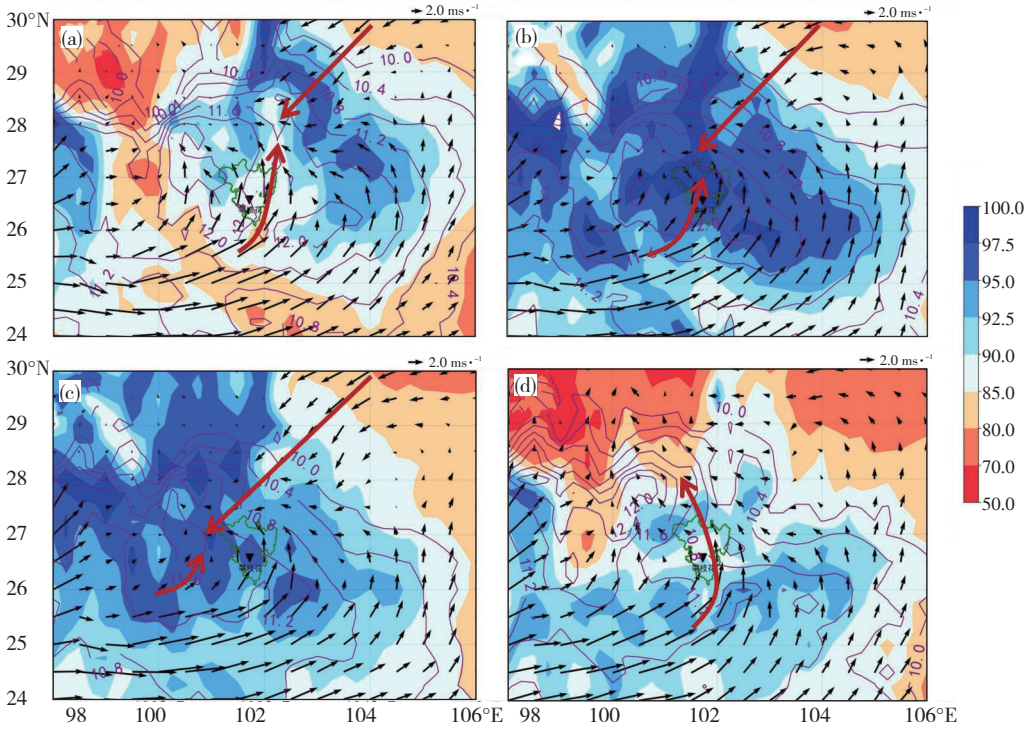


图5 2015—2020年攀枝花强降水过程20时(a)、02时(b)、08时(c)和14时(d) 700 hPa风场(矢量，单位：m·s^{-1})、相对湿度(填色，单位：%)和比湿(紫色等值线，单位：g·kg^{-1})合成场(亮绿色线条区域为攀枝花地区，红色箭头表示显著气流)

Fig.5 Composite field of wind field (vector, unit: m·s^{-1}), relative humidity (color filling, unit: %), and specific humidity (purple contour line, unit: g·kg^{-1}) at 700 hPa of heavy precipitation events in Panzhihua at (a) 20:00 BT, (b) 02:00 BT, (c) 08:00 BT, and (d) 14:00 BT from 2015 to 2020 (Bright green line area represents the Panzhihua area, and the red arrow indicates significant airflow)

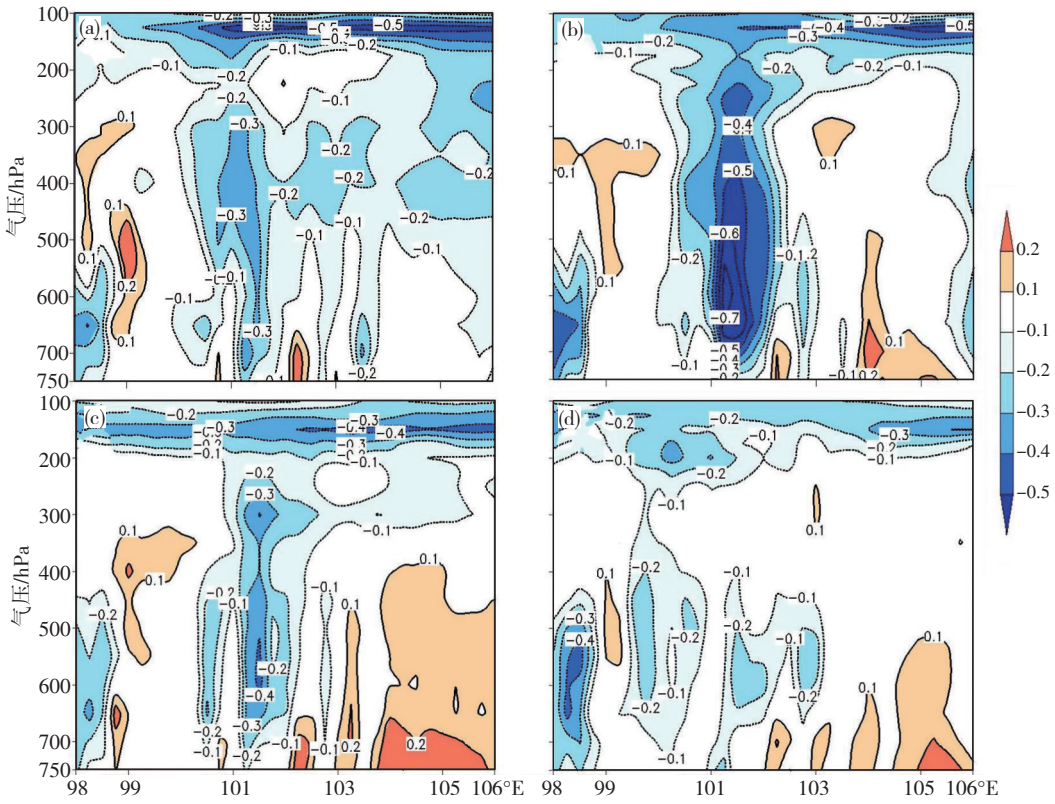


图6 2015—2020年攀枝花强降水过程20时(a)、02时(b)、08时(c)和14时(d)沿27°N经强降水中心的的合成垂直速度(单位:Pa·s^{-1})纬向垂直剖面图

Fig.6 Zonal cross-section of synthesized vertical velocity (unit: Pa·s^{-1}) of heavy precipitation events in Panzhihua through the heavy precipitation center along 27°N at (a) 20:00 BT, (b) 02:00 BT, (c) 08:00 BT, and (d) 14:00 BT from 2015 to 2020

相对湿度日变化是攀枝花夜雨形成的主要原因之一,与四川盆地夜雨成因有一定差异。四川盆地夜雨的产生曾经被归因于围绕盆地的青藏高原和盆地之间的热力差造成的环流日变化(Bao et al.,2011;Jin et al.,2013),以及青藏高原东部和云贵高原的对流系统分别向东和东北移动,夜间进入四川盆地(Wang et al.,2004;Huang et al.,2010),后来有研究(Zhang et al.,2019)强调来自盆地东南侧的边界层内气流的非地转风惯性振荡起关键作用。Li等(2021)认为四川盆地夜雨主要起源于青藏高原背风坡的盆地西南地形边缘处,在中低层大尺度西南气流的引导下,降水系统从盆地西南向东北地区移动。

3.3 月降水特征及其成因

选取攀枝花国家站以及北部降水中心红宝乡、兴发水库站,南部降水中心务本乡站、拉鲊村站,分析2015—2020年攀枝花全市和不同站点平均降水量的月分布(图7),从中看到,无论是全市还是单站的降水量月变化均表现为干湿季分明的特点,攀枝花11月至次年4月降水量极少,降水主要发生在5—10月,尤其是6—9月,呈现干湿季分明的特点。单站对比结果显示,降水量表现为从北向南递减的特征,月降水峰值

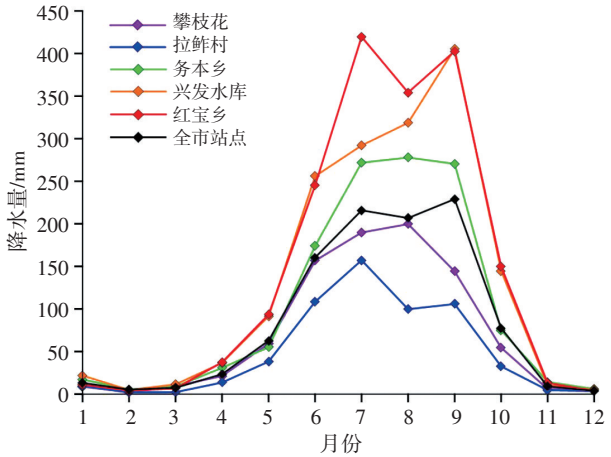


图7 2015—2020年攀枝花全市站点和不同站点平均降水量的月分布

Fig.7 Distribution of overall and average monthly precipitation at different stations in Panzhihua from 2015 to 2020

集中在7月、8月和9月,具体峰值出现月份因站点而异。攀枝花干季和雨季的转换时间为6月和10月,下面从5月、6月、10月和11月的大气演变合成特征来探讨攀枝花干湿季转换的原因。

通过合成分析发现,攀枝花干湿季转换大气演变特征最显著的差异体现在低层,即700 hPa位势高度

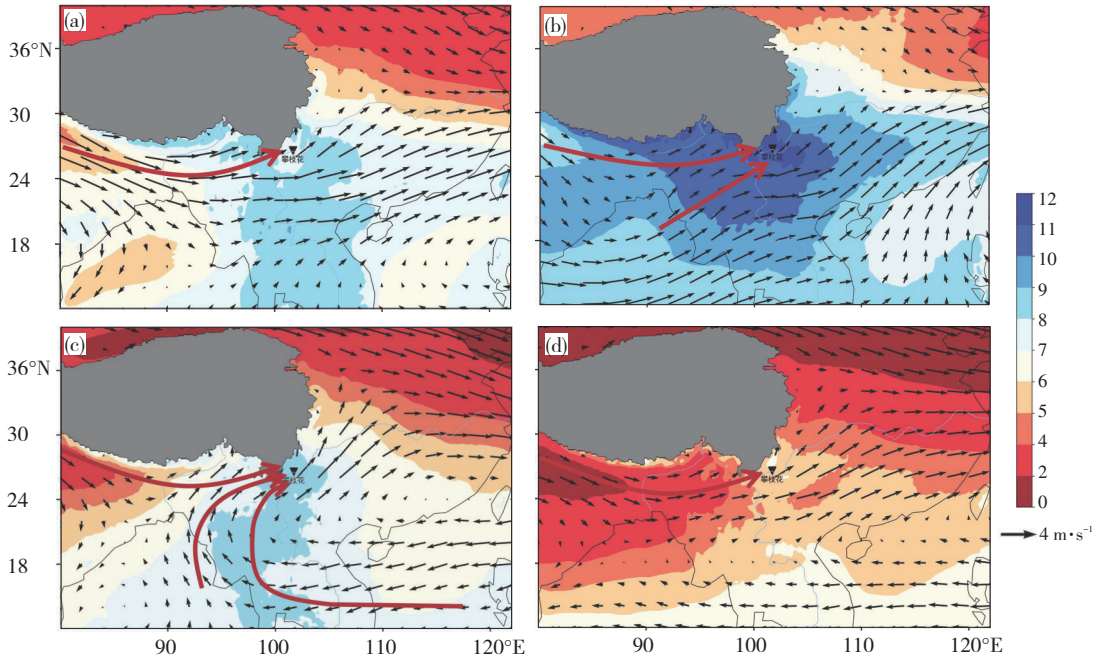


图8 2015—2020年5月(a)、6月(b)、10月(c)和11月(d) 700 hPa合成环流形势(矢量为风场,单位: m·s^{-1};填色为比湿,单位: g·kg^{-1};红色箭头代表显著气流;灰色代表青藏高原区域)

Fig.8 Synthetic circulation patterns at 700 hPa in (a) May, (b) June, (c) October, (d) November from 2015 to 2020 (Vector represents wind field, unit: m·s^{-1}. Shaded represents specific humidity, unit: g·kg^{-1}. Red arrow represents significant airflow. Gray represents the Qinghai Tibet Plateau region)

层。图8为2015—2020年5月、6月、10月和11月700 hPa合成环流形势,分析可知,5月(图8a)攀枝花至云南一带受干燥的青藏高原南支西风绕流控制,水汽较少,不易产生降水,此时孟加拉湾西南季风爆发(Wu and Zhang, 1998),该地区已有低槽形成,但南亚高压还位于中南半岛。6月(图8b)孟加拉湾地区有低槽存在,南亚高压移动至南亚,其东北区存在辐散抽吸作用,正位于攀枝花及其附近(Liu et al., 2013; Liu et al., 2013),攀枝花同时受减弱后的青藏高原南支西风绕流气流和孟加拉湾西南季风的影响,水汽输送较充分,攀枝花地区比湿达到11~12 g·kg^{-1},易于降水产生。陈艳等(2006)、刘瑜等(2006)和赵尔旭等(2006)分析了云南雨季开始期的大气环流特征发现,夏季风的爆发与云南雨季开始有很好的正相关性,孟加拉湾地区经向水汽输送对云南雨季的开始有重要影响,毗邻云南的攀枝花雨季同样与孟加拉湾水汽的经向输送密切相关,与上述研究结论相一致。10月(图8c)攀枝花同时受青藏高原南支绕流、减弱的孟加拉湾西南气流和我国东南沿海反气旋外围气流影响,其中我国东南沿海反气旋外围气流的比湿较大,携带着大量的水汽。11月(图8d)青藏高原南支气流显著东伸南压并加强,孟加拉湾西南气流逐渐减弱消失,东南支气流也减弱且东移南落,经向水汽输送通道被切断,转换为受干燥的青藏高原南支西风绕流控制。

综上所述,在干湿季转换的6月,孟加拉湾西南季风爆发后经向水汽输送对攀枝花雨季的开始具有重要作用,10月攀枝花的水汽主要来源于我国东南沿海反气旋外围气流,11月随着青藏高原南支气流加强并占主导影响时,雨季随之结束。

4 结论

本文利用攀枝花市2015—2020年国家站、区域站降水观测资料以及欧洲中心0.25°×0.25°分辨率的ERA5再分析资料,对青藏高原东南缘攀枝花市的降水特征成因进行分析探讨,得到以下主要结论:

(1) 攀枝花降水具有地形作用突出,年均降水量分布北多南少、差异显著的特点,不同量级降水日数均为北多南少,与年均降水量的分布一致,降水日数是造成年均降水空间分布差异的主要原因之一。

(2) 攀枝花夜雨特征显著,呈单峰型,03时为降水峰值时次,16时为谷值时次,北部高海拔地区降水强于南部低海拔地区,降水日变化的峰值出现时间早于南部低海拔地区。攀枝花属于典型干热河谷地带,日间相对湿度较低,当低值系统白天过境攀枝花,低层较干燥的大气虽存在弱抬升现象,但不容易凝结产生降水,而夜间相对湿度非常高,小的抬升扰动就易于凝结,触发降水,因此攀枝花低层湿度的日变化是攀枝花易发生夜雨的原因之一。

(3) 攀枝花干湿季分明，6月和10月是干湿转换的过渡期，6月孟加拉湾西南季风爆发，攀枝花雨季(6—10月)开始，干季逐渐结束，孟加拉湾西南季风爆发后的经向水汽输送对攀枝花雨季的开始具有重要作用；10月干燥的青藏高原南支西风气流加强并逐渐控制攀枝花及周边区域，水汽输送通道被切断，雨季趋于结束，攀枝花干季(11月—次年5月)开始。

参考文献(References):

陈艳,丁一汇,肖子牛,等.2006.水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响[J].大气科学,30(1):25–37. Chen Y, Ding Y H, Xiao Z N, et al. 2006. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,30(1):25–37 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2006.01.03

郭晓芳,李旭东,程东亚.2021.云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素[J].水土保持研究,28(1):159–163,170. Guo X F, Li X D, Cheng D Y. 2021. Spatial distribution of temperature and precipitation and its influencing factors in the Yunnan–Guizhou Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation,28(1):159–163,170 (in Chinese). doi:10.13869/j.cnki.rswc.2021.01.021

金霞.2013.四川盆地降水日变化特征分析及成因研究[D].北京:中国气象科学研究院. Jin X. 2013. Study of diurnal cycle of precipitation over the Sichuan Basin: characteristic and its causes [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences

李跃清.2000.青藏高原上空环流变化与其东侧旱涝异常分析[J].大气科学,24(4):470–476. Li Y Q. 2000. Analysis of circulation variations over the Tibetan Plateau and drought–flood anomalies on its Eastern side [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,24(4):470–476 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2000.04.04

李晓英,姚正毅,肖建华,等.2016. 1961—2010年青藏高原降水时空变化特征分析[J].冰川冻土,38(5):1233–1240. Li X Y, Yao Z Y, Xiao J H, et al. 2016. Analysis of the spatial–temporal variation characteristics of precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 through 2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,38(5):1233–1240 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0240.2016.0144

林志强,德庆,文胜军,等.2014.西藏高原汛期大到暴雨的时空分布和环流特征[J].暴雨灾害,33(1):73–79. Lin Z Q, De Q, Wen S J, et al. 2014. Spatio–temporal distribution and general circulation of heavy rainfall in rainy season over Tibetan Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,33(1):73–79 (in Chinese)

刘瑜,赵尔旭,孙丹,等.2006.东南亚地区夏季风异常对云南2005年初夏干旱的影响[J].气象,32(6):91–96. Liu Y, Zhao E X, Sun D, et al. 2006. Impacts of anomaly of summer monsoon over the Southeast Asia on the early summer drought of Yunnan in 2005 [J]. Meteorological Monthly,32(6):91–96 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2006.6.016

钱正安,焦彦军.1997.青藏高原气象学的研究进展和问题[J].地球科学进展,12(3):207–216. Qian Z A, Jiao Y J. 1997. Advances and problems on Qinghai–Xizang Plateau meteorology research [J]. Advances in Earth Science,12(3):207–216 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001–8166.1997.03.0207

唐永兰,徐桂荣,于晓晶.2019.近49 a中国30°N带不同地形下大城市与其郊区的降水特征[J].暴雨灾害,38(4):354–363.Tang Y L, Xu G R, Yu X J. 2019. Precipitation characteristics in large cities and their suburbs under different terrains in 30° N zone of China in recent 49 years [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):354–363 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.04.008

王彬雁,赵琳娜,许晖,等.2018.四川雨季小时降水的概率分布特征及其降水分区[J].暴雨灾害,37(2):115–123. Wang B Y, Zhao L N, Xu H, et al. 2018. Probability distribution and partition of hourly rainfall during the rainy season over Sichuan Province [J]. Torrential Rain and Disasters, 37(2):115–123 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2018.02.003

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.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]. Torrential Rain and Disasters,30(2):117–121 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2011.02.003

解明恩,鲁亚斌,程建刚,等.2006.云南雨季开始期与5月雨量的TBB特征[J].高原气象,25(2):319–324. Xie M E, Lu Y B, Cheng J G, et al. 2006. TBB features of Yunnan rainy season onset and May rainfall [J]. Plateau Meteorology,25(2):319–324 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000–0534.2006.02.019

肖红茹,王佳津,肖递祥,等.2021.四川盆地暖区暴雨特征分析[J].气象,47(3):303–316. Xiao H R, Wang J J, Xiao D X, et al. 2021. Analysis of warm–sector rainstorm characteristics over Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly,47(3):303–316 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.03.004

肖子牛,温敏.1999.云南5月降雨量与前期季节内振荡活动相互关系的分析研究[J].大气科学,23(2):177–183. Xiao Z N, Wen M. 1999. Relation between the precipitation of Yunnan in May and intraseasonal oscillation before May [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 23(2):177–183 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1999.02.05

许建伟,高艳红,彭保发,等.2020.1979—2016年青藏高原降水的变化特征及成因分析[J].高原气象,39(2):234–244. Xu J W, Gao Y H, Peng B F, et al. 2020. Change characteristics of precipitation and its cause during 1979–2016 over the Qinghai–Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology, 39(2):234–244 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2019.00029

晏红明,李清泉,王东阡.2018.云南雨季的时空特征及与大气环流变化的关系[J].热带气象学报,34(1):12–22. Yan H M, Li Q Q, Wang D Q. 2018. Studies on spatial–temporal characteristics of Yunnan rainy season and its relationship with atmospheric circulation [J]. Journal of Tropical Meteorology,34(1):12–22 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2018.01.002

晏红明,杞明辉,肖子牛.2001.云南5月雨量与热带海温异常及亚洲季风变化的关系[J].应用气象学报,12(3):368–376. Yan H M, Qi M H, Xiao Z N. 2001. Relationship between precipitation in May over Yunnan and the changes of tropical sea surface temperature and Asia monsoon [J]. Journal of Applied Meteorological Science,12(3):368–376 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001–7313.2001.03.012

严华生,鲁亚斌,程建刚,等.2005.前期大气环流和海温变化对云南汛期雨量的影响[J].热带气象学报,21(3):248–256. Yan H S, Lu Y B, Cheng J G, et al. 2005. The impact of preceding atmospheric circulation and SST variation on flood season rainfall in Yunnan [J]. Journal of

Tropical Meteorology,21(3):248–256 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–4965.2005.03.003

叶笃正,高由禧.1979.青藏高原气象学[M].北京:科学出版社:10–48,153–171. Ye D Z, Gao Y X. 1979. Qinghai Tibet Plateau Meteorology [M]. Beijing: Science Press:10–48,153–171 (in Chinese)

余迪,段丽君,温婷婷,等.2021.青藏高原雨季特征及其对气候增暖的响应[J].气象与环境学报,37(2):12–18. Yu D, Duan L J, Wen T T, et al. 2021. Characteristics of wet season over the Tibetan Plateau and its response to climate warming [J]. Journal of Meteorology and Environment, 37(2):12–18 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X.2021.02.002

宇如聪,李建,陈昊明,等.2014.中国大陆降水日变化研究进展[J].气象学报,72(5):948–968. Yu R C, Li J, Chen H M, et al. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(5):948–968 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.047

赵尔旭,吕俊梅,琚建华.2006.东南亚地区夏季风爆发对云南雨季开始的影响[J].热带气象学报,22(3):209–216. Zhao E X, Lv J M, Ju J H. 2006. Impacts of onset of summer monsoon over southeast Asia on the rainy season in Yunnan [J]. Journal of Tropical Meteorology,22(3):209–216 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–4965.2006.03.001

周长春,吴蓬萍,周秋雪.2015.一次复杂地形暖区强降水特征及触发机制分析[J].暴雨灾害,34(1):27–33. Zhou C C, Wu P P, Zhou Q X. 2015. Analysis of the characteristics and trigger mechanism of the warm–sector heavy precipitation over complex terrain [J]. Torrential Rain and Disasters, 34(1):27–33 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2015.01.004

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):79–87. 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):79–87 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.04.011

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]. Meteorological Monthly,45(6):811–819 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.06.007

朱艳欣,桑燕芳.2018.青藏高原降水季节分配的空间变化特征[J].地理科学进展,37(11):1533–1544. Zhu Y X, Sang Y F. 2018. Spatial variability in the seasonal distribution of precipitation on the Tibetan Plateau [J]. Progress in Geography,37(11):1533–1544 (in Chinese). doi:10.18306/dlkxjz.2018.11.009.

Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. Monthly Weather Review,139(9):2790–2810. doi:10.1175/MWR–D–11–00006.1

Huang H L, Wang C C, Chen T J, et al. 2010. Therole of diurnal solenoidal circulation on propagating rainfall episodes near the eastern Tibetan Plateau [J]. Monthly Weather Review,138(7):2975–2989. doi:10.1175/2010MWR3225.1

Jin X, Wu T W, Li L. 2013. The quasi–stationary feature of nocturnal precipitation in the Sichuan Basin and the role of the Tibetan Plateau [J]. Climate Dynamics,41(3–4):977–994. doi:10.1007/S00382–012–1521–Y

Li J, Li Y Q, Zhao T L, et al. 2021. Northeastward propagation of nocturnal precipitation over the Sichuan Basin [J]. International Journal of Climatology,41(1):2863–2879. doi:10.1002/joc.6886

Liu B Q, Wu G X, Mao J Y, et al. 2013. Genesis of the South Asian High and its impact on the Asian Summer Monsoon Onset [J]. Journal of Climate,26(9):2976–2991. doi:10.1175/JCLI–D–12–00286.1

Liu Y M, Hu J, He B, et al. 2013. Seasonal evolution of the subtropical anticyclones in a climate system model FGOALS–s2 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,30(3):593–606

Wang C C, Chen G T J, Carbone R E. 2004. A climatology of warm–season cloud patterns over east Asia based on GMS infrared brightness temperature observations [J]. Monthly Weather Review,132(7):1606–1629. doi:10.1175/1520–0493(2004)1322.0.CO;2

Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan Plateau Forcing and monsoon onset in South Asia and Southern China Sea [J]. Monthly Weather Review, 126(4):913–927

Yu R C, Yuan W H, Li J, et al. 2009. Diurnal phase of late–night against late–afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China [J]. Climate Dynamics,35(4):567–576. doi:10.1007/s00382–009–0568–x

Zhang Y H, Xue M, Zhu K F, et al. 2019. What is the main cause of diurnal variation and nocturnal peak of summer precipitation in Sichuan Basin, China? The key role of boundary layer Low–Level Jet inertial oscillations [J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,124(5):2643–2664. doi:10.1029/2018JD029834

（责任编辑　唐永兰）