万昊旻,李建,李妮娜,等.2024.基于小时降水资料的华西秋雨精细化特征分析[J].暴雨灾害,43(2):168-175. Wan Haomin, Li Jian, Li Nina. 2024. Fine-scale analysis of hourly precipitation of West China autumn precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters,43(2):168-175 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-139

基于小时降水资料的华西秋雨精细化特征分析

万昊旻[1],李建[2,3],李妮娜[4]

(1. 中国气象科学研究院,北京 100081;2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081;
3. 中国气象局青藏高原气象研究院,成都 610000;4. 国家气象中心,北京 100081)

摘　要: 华西秋雨是中国秋季主要的气候现象之一,其影响范围涵盖陕西、四川、重庆、贵州等多省(市),主要特征表现为多绵绵细雨。利用2011—2020年GPM卫星小时降水资料,统计分析了华西秋雨的强度-频次分布、持续时间、日变化等特征,结果表明:(1) 根据强度—频次特征,华西秋雨区可分为四川盆地中东部、云贵高原东部、青藏高原东缘三个典型区域。四川盆地中东部降水频率、降水强度两者均高,云贵高原东部降水频率低、降水强度强,青藏高原东缘降水频率高、降水强度弱。(2) 从降水日峰值位相看,青藏高原东缘降水量日峰值出现在夜间22:00 (北京时,下同),四川盆地中东部降水量日峰值出现在次日清晨06:00,两个区域之间自西向东存在降水日峰值位相的滞后;在云贵高原东部,降水量日峰值自西向东从傍晚18:00滞后至次日午后16:00;形成了北部、南部两种日峰值位相空间演变型。(3) 从不同持续时间降水事件的日变化特征看,随降水持续时间延长,青藏高原东缘降水日峰值出现时间逐渐延迟。四川盆地中东部和云贵高原东部降水均存在午后短时和清晨长持续性两种类型,其中四川盆地中东部的清晨长持续性降水对该地区总降水的贡献较云贵高原东部偏大。

关键词: 华西秋雨;降水日变化;降水事件;降水持续时间;GPM卫星

中图法分类号: P426.62+3　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-139

Fine-scale analysis of hourly precipitation of West China autumn precipitation

WAN Haomin[1], LI Jian[2,3], LI Nina[4]

(1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081; 2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorology Sciences, Beijing* 100081; 3. *Institute of Tibetan Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu* 610000; 4. *National Meteorological Centre, Beijing* 100081)

Abstract: The West China autumn precipitation (WCAP) is one of the most important climatic features in western regions of China (e.g. Shanxi, Sichuan, Chongqing, Guizhou), which is mainly characterized as continuous rain. Using the GPM precipitation data from 2011 to 2020, this study statistically analyzes the hourly characteristics of WCAP, including intensity-frequency distribution, duration, and diurnal variation. It is found that there are three key regions of WCAP: the central-eastern Sichuan Basin, the east of Yunnan-Guizhou Plateau, and the eastern periphery of the Tibetan Plateau. Further analysis of the detailed characteristics and differences of hourly precipitation between the three regions are as follows. (1) As regards the precipitation intensity-frequency distribution, both high precipitation frequency and strong precipitation intensity are found in the central-eastern Sichuan Basin, while a low precipitation frequency but strong precipitation intensity in the east of Yunnan-Guizhou Plateau, with a high precipitation frequency but weak precipitation intensity in the east periphery of the Tibetan Plateau. (2) The diurnal peak phase of WCAP presents two spatial evolution patterns. The first one is located in the northern regions, which shifts from the eastern periphery of the Tibetan Plateau peaking at 22:00 BT to the central-eastern Sichuan Basin peaking at 06:00 BT the next morning, showing a peak phase delay from west to east between these two regions. The second one is located in the east of the Yunnan-Guizhou Plateau, with the diurnal peak shifting from 18:00 BT in the western part of this region to 16:00 BT the next day in the eastern part. (3) From the perspective of the diurnal variation characteristics of precipitation events, with the increase in precipitation dura-

收稿日期: 2023-07-05;**定稿日期:** 2024-03-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(42225505, U2142204);中国气象科学研究院科技发展基金项目(2022KJ007)

第一作者: 万昊旻,主要从事降水精细化特征研究。E-mail: wanhmin@126.com

通信作者: 李建,主要从事东亚气候特征及变率分析研究。E-mail: lij@cma.gov.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

tion, the diurnal peak phase of precipitation in the eastern periphery of the Tibet Plateau shows a gradual delay signature. Two types of precipitation appear in both the central-eastern Sichuan Basin and the east of the Yunnan-Guizhou Plateau: afternoon short-duration precipitation and morning long-duration precipitation. However, the morning long-duration precipitation in the central-eastern Sichuan Basin contribute more to the total precipitation than that in the east of the Yunnan-Guizhou Plateau.

Key words: WCAP; diurnal variation of precipitation; precipitation events; precipitation duration; GPM Satellite

引 言

华西秋雨是我国陕西、甘肃、四川、重庆、云南、贵州等地秋季多雨的特殊天气现象，具有降水持续时间长、降水日数多等特点。华西秋雨异常偏多时洪涝灾害易发，常造成人员伤亡和经济损失。如2017年华西秋雨异常偏多，甘肃、陕西、四川、重庆、贵州等省(市)出现了洪涝灾害，造成600多万人受灾，直接经济损失达121亿元(彭韵萌等，2021)。在实际业务中，全面地认识华西秋雨降水特征对提升华西秋雨的数值模式预警预报水平具有重要意义。

前人对于华西秋雨的空间分布、起止时间、年际与年代际变化、环流特征等方面开展了深入探索。在空间分布上，对华西秋雨范围的确定方式主要分为两类，一类按地理行政区域进行划分，研究者将宁夏南部、甘肃南部、陕西关中地区、四川、重庆、云南、贵州以及湖南湖北西部区域划为华西秋雨区(梁健洪，1989；蒋竹将等，2014)。另一类是直接按照经纬度进行划分，如白虎志和董文杰(2004)将90°—115°E，21°—36°N区域定义为“绵绵秋雨区”。在时间分布上，一部分研究者通过旬候定义华西秋雨起止时间，如袁旭等(2013)将华西秋雨开始和结束时间确定为第45候和第57候。另一类是直接按照月份进行划分，9—11月(白虎志和董文杰，2004；徐曼琳等，2020)或9—10月(罗霄等，2013)被取作秋雨期。在以往研究中，不同的研究者制定了不同的标准，导致研究结果缺乏可比较性。为弥补这一局限性，也便于实际应用，中国气象局制定下发了行业标准《中国雨季监测指标华西秋雨》，该业务规定对华西秋雨的规范识别、业务应用和科学研究都具有指导作用。

在华西秋雨的年际和年代际变化特征方面，王春学等(2015)研究表明，在年际尺度上华西秋雨最显著的周期为准4a周期，整体呈现“偏强-略偏强-偏弱-略偏弱”循环演变特征。在年代际尺度上，华西秋雨在20世纪60年代之后经历了两次明显的年代际变化：在20世纪80年代中期明显减少，在2010年以后又开始增加，且2010年之后的降水量多于1980年代中期以前(Wei et al.，2018；Zhang et al.，2019)。

以往有关华西秋雨的研究主要集中在日以上时间尺度降水特征的分析上，而从小时尺度细致分析华西秋雨的精细化特征亦非常重要。近年来，学者们借助高时空分辨率的气象数据对不同区域的小时尺度降水特征开展了大量分析工作。如原韦华等(2014)研究发现中国中东部地区暖季降水存在清晨和午后双峰值，且降水持续时间是分离中国中东部地区降水双峰值的关键因子，夜间和清晨峰值主要来自长持续性降水，午后或傍晚峰值主要来自短持续性降水。唐敏丽等(2022)比较了秦岭南北两侧暖季降水的演变特征，发现秦岭南北两侧在夏秋均表现为持续9 h以上(3 h以下)的降水为清晨(午后)降水峰值。罗乃兴等(2023)研究表明，在日内降水分布上，贵州四季均存在明显的夜雨现象，其中下半夜到凌晨降水发生概率更大且强度更强。这些工作一方面有助于从小时尺度理解区域降水的精细化特征，另一方面可为检验和评估数值模式提供科学依据，有助于改进模式，对提升不同区域降水的精细化预报水平具有指导作用。本文聚焦华西秋雨的小时降水精细化特征，从强度-频次分布、持续时间、日变化等方面对比分析了华西秋雨的小时降水精细化特征的区域差异，有助于从小时尺度细化对华西秋雨的小时降水精细化特征的认识，以期为预报提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

所用数据为2011—2020年GPM IMERG(integrated multi-satellite retrievals for GPM)降水数据中的非实时降水数据 IMERG Final(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_06/summary?keywords=GPM)。所用数据产品版本为V06B，空间分辨率为0.1°×0.1°。文中小时降水量由IMERG在该小时00分和30分估测的雨量取平均值所得。

1.2 研究方法

参考《中国雨季监测指标 华西秋雨》(QX/T 496—2019)，本文将华西地区的范围确定为(100°—111°E，25°—36°N)(如图1黑色虚线框所示)。图2给出华西地区2011—2020年多年平均逐旬降水量的时间序列(第一旬指1月1日至10日，以此类推)。该地区降水量季节变化呈双峰型，主峰值出现在6月下旬，次峰值出现在9月上旬，两峰之间的低谷位于8月下旬。在9月上旬以后华西地区降水量逐渐减少，并在10月中旬以后降至年平均

值以下。按照袁旭等(2013)的做法，本文将华西秋雨的时段定为8月下旬(两峰之间的低谷)至10月中旬(降水降至年平均值以下的时间)，持续时间为2个月。

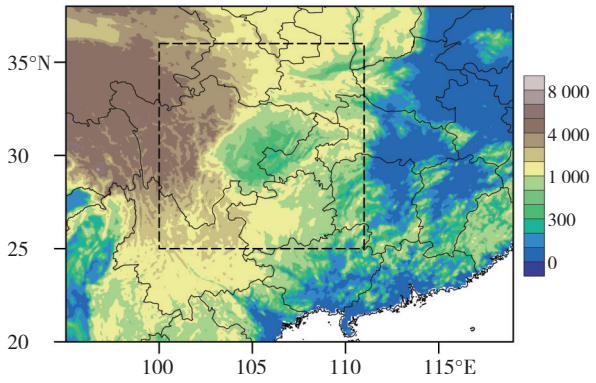


图1 华西地区(100°—111°E, 25°—36°N，黑色虚线框所示)及其周边区域与地形高度(填色，单位：m)

Fig. 1 The terrain features (shaded, units: m) in West China (100°–111°E, 25°–36°N, marked by the black dashed line box) and the surrounding regions.

本文将小时降水量≥0.1 mm的时次定义为有效降水时次，相对应的降水量计为有效降水量。在分析华西秋雨的小时尺度特征时，使用宇如聪等(2016)提出的统计方法，具体如下：降水频率为秋雨时段(8月下旬至10月中旬)内的有效降水小时数除以总观测小时数(单位：%)。降水强度为有效降水量除以有效降水小时数(单位：mm·h^{-1})。降水事件结束的判定标准为：只有当某一降水时次之后连续2 h没有降水时，才判定这次降水事件结束。降水事件的持续时间定义为：从降水开始时刻到结束时刻之间的小时数(单位：h)。基于上述方法，下文根据华西秋雨的降水强度–频次分布特征的区域差异，将华西秋雨区进一步分为四川盆地中东部、云贵高原东部、青藏高原东缘三个典型区域，并针对上述3个典型区域开展了小时降水精细化特征的对比分析。

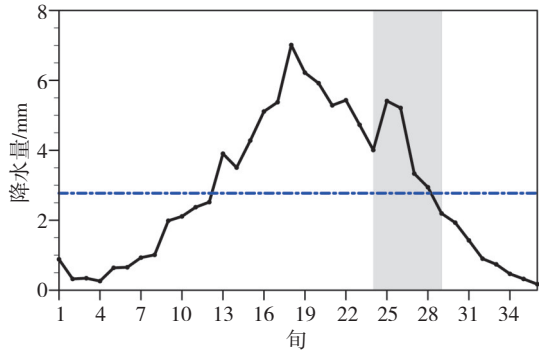


图2 2011—2020年华西地区(100°—111°E,25°—36°N)逐旬平均降水量(单位：mm)演变图(水平直线为华西地区2011—2020年共10 a的年均降水量)

Fig. 2 The time series of the 10-day average precipitation amount (unit: mm) from 2011 to 2020 in West China (100°–111°E, 25°–36°N) (The horizontal line is the annual mean precipitation, which is average from 2011 to 2020 in West China)

2 结果与分析

2.1 小时降水频率、强度特征

为了揭示华西秋雨小时降水的空间分布特征及区域差异，图3给出了华西秋雨多年平均的降水量、降水频率、降水强度的空间分布图。从中可见，华西秋雨降水主要集中在四川盆地中东部地区(SCE; 105°—110°E, 29°—33°N)，该区域平均日降水量为4.79 mm，区域最大日降水量为5.99 mm。对应地，该地区也是降水频率的一个大值中心，其区域平均降水频率为15.42%(图3b)。四川盆地中东部地区平均降水强度为1.30 mm·h^{-1}，与华西秋雨区(100°—110°E, 25°—36°N)全区平均降水强度1.24 mm·h^{-1}相当。值得注意的是，青藏高原东缘地区(TPE; 100°—103.5°E, 30°—33.5°N)和云贵高原东部地区(YGE; 104°—109°E, 25°—28°N)降水量相当，但这两个区域的降水频率和降水强度却存在明显差异。青藏高原东缘的降水频率显著高于云贵高原东部，是华西秋雨的另一个降水频率大值中心，该区域平均降水频率达15.56%。对于云贵高原东部地区而言，该区域平均降水强度达1.54 mm·h^{-1}，明显高于其周边地区。接下来将针对上述3个具有明显差异的区域开展进一步对比分析。

2.2 降水日变化特征

分析华西秋雨降水量、降水频率、降水强度的日峰值位相空间分布特征(图4)发现，降水日峰值位相自青藏高原东缘至四川盆地中东部逐渐滞后，且这种经向滞后特征与海拔高度有对应关系。青藏高原东缘海拔高度2 500 m以上的地区降水量日峰值主要出现在夜间(20:00—23:00)，青藏高原东缘海拔高度1 500—2 500 m的地区降水量日峰值则滞后至午夜(23:00—次日02:00)出现。相较于青藏高原东缘的夜间峰值，降水量日峰值在四川盆地西南缘滞后至凌晨(02:00—05:00)出现，在盆地东北部则出现在清晨(05:00—08:00)。降水频率日峰值位相在青藏高原东缘发生了由夜间向午夜的滞后，并在海拔1 000 m以下的四川盆地地区进一步滞后至清晨(05:00—08:00)。在四川盆地东北部大巴山和巫山附近地区，降水频率还出现了午后峰值。降水强度日峰值位相在青藏高原东缘至四川盆地主要表现为夜间向凌晨滞后。云贵高原东部的降水日峰值位相亦存在沿经度滞后的特征。在云贵高原东部海拔高度1 500—2 000 m的地区，降水日峰值主要出现在夜间；在云贵高原东部海拔1 000—1 500 m的地区，降水日峰值存在凌晨至清

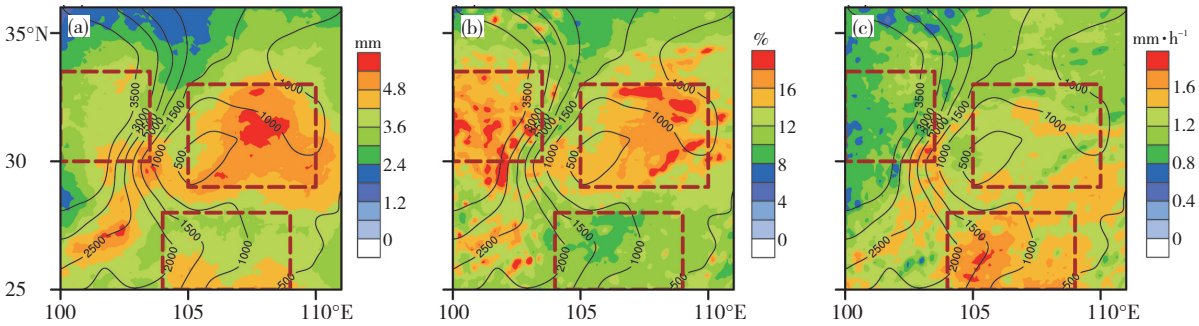


图3 2011—2020年多年平均的华西秋雨日降水量(a)、小时降水频率(b)、小时降水强度(c)空间分布(黑色等值线表示地形高度，单位：m；红色虚线框标示了青藏高原东缘(100°—103.5°E, 30°—33.5°N)、四川盆地中东部(105°—110°E, 29°—33°N)和云贵高原东部(104°—109°E, 25°—28°N)三个区域，下同)

Fig.3 Spatial distribution of (a) precipitation amount, (b) precipitation frequency, and (c) precipitation intensity of West China autumn precipitation (WCAP) averaged from 2011 to 2020 (The black lines refer to the terrain height (unit: m), the red dashed line boxes indicate the east periphery of the Tibetan Plateau (TPE) (100°–103.5°E, 30°–33.5°N), the central–eastern Sichuan Basin (SCE) (105°–110°E, 29°–33°N), and the east of Yunnan–Guizhou Plateau (YGE) (104°–109°E, 25°–28°N) regions)

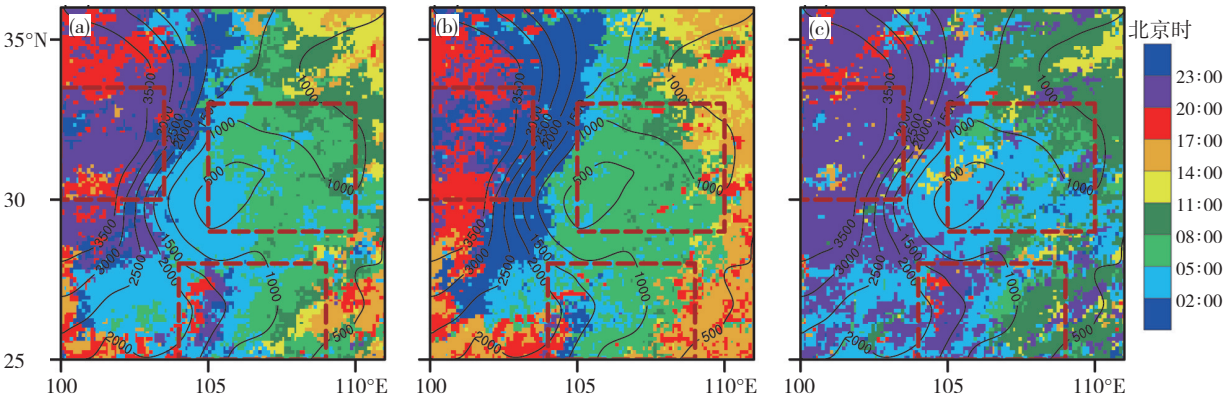


图4 2011—2020年华西秋雨降水量日峰值位相(a)、降水频率日峰值位相(b)、降水强度日峰值位相(c)的空间分布

Fig.4 The spatial distribution of diurnal peak phase (shaded) of (a) precipitation amount, (b) precipitation frequency, and (c) precipitation intensity of WCAP during 2011–2020

晨的滞后；在云贵高原东部海拔1 000 m以下的地区，降水还出现了午后峰值。

为更加清楚地显示降水日峰值位相自西向东的滞后现象，图5分别给出降水量和降水频率沿青藏高原东缘–四川盆地和沿云贵高原东部的经度–时间演变图。从中可见，降水量和降水频率在青藏高原东缘(100°—103°E)主要集中在16：00—次日02：00，在四川盆地(105°—110°E)主要集中在02：00—08：00，并在105°E附近存在明显的不连续过渡带，这反映出降水日峰值位相在青藏高原东缘与四川盆地之间的滞后可能存在不连续性。对于云贵高原东部而言，其降水量和降水频率的日峰值位相滞后特征有所差异。降水量日峰值位相在云贵高原东部自西向东表现为连续的“午后–夜间–凌晨–清晨”的滞后。降水频率日峰值位相则先在云贵高原东部105°E附近发生了由午后峰值向清晨峰值的滞后，又在107.5°E附近发生了由清晨峰值向午后峰值的滞后。

分析青藏高原东缘、四川盆地中东部、云贵高原东部三个区域的降水日变化曲线(图6)，结果表明，三个区域的降水频率日变化曲线均表现为双峰型。除了共同的午后峰值，三个区域分别在凌晨00：00(青藏高原东缘)、清晨06：00(四川盆地中东部)以及清晨05：00(云贵高原东部)存在峰值。青藏高原东缘的凌晨峰值与午后峰值相当，四川盆地中东部及云贵高原东部的清晨峰值则强于午后峰值。降水量和降水强度日变化曲线在青藏高原东缘和四川盆地中东部均表现为单峰型，其中青藏高原东缘的降水量和降水强度均在夜间22：00出现峰值，四川盆地中东部的降水量和降水强度则分别在清晨06：00、凌晨02：00出现峰值。与青藏高原东缘及四川盆地中东部不同，云贵高原东部的降水量和降水强度日变化曲线均表现为双峰型。该区域降水量峰值出现在清晨04：00及午后17：00，且由于午后的降水强度较弱，降水量的午后次峰不明显，降水强度则在夜间22：00及次日凌晨02：00

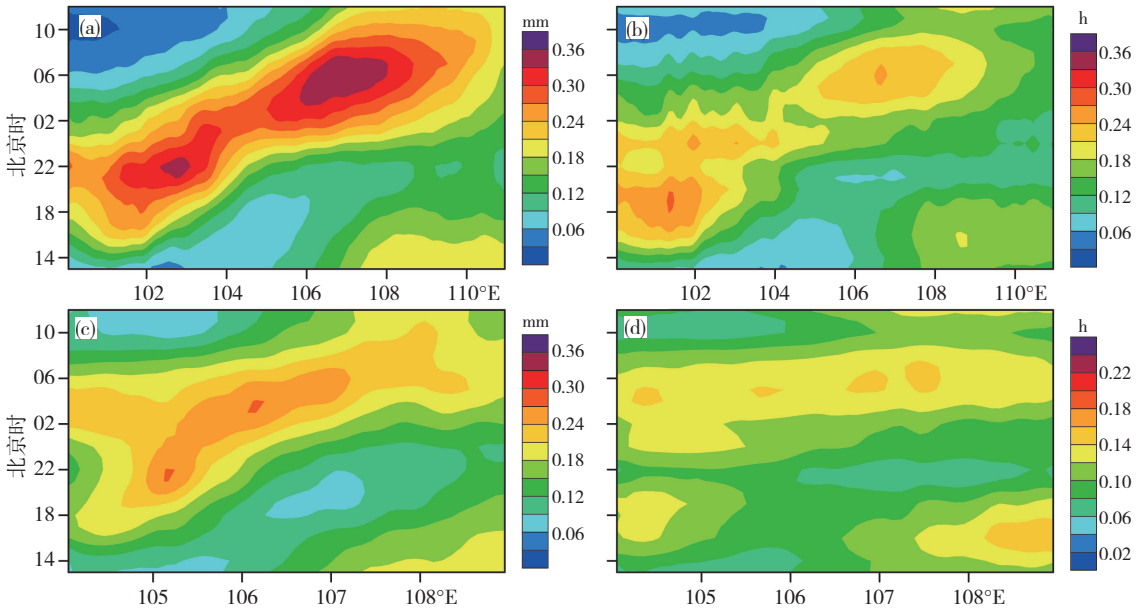


图5 2011—2020年29°—33.5°N平均(a, b)以及25°—28°N平均(c, d)的秋季降水量(a, c)、降水频率(b, d)时间-经度剖面图

Fig.5 Time-longitude cross section of the averaged (a, c) precipitation amount and (b, d) precipitation frequency of WCAP between (a, b) 29°–33.5°N and between (c, d) 25°–28°N during 2011–2020

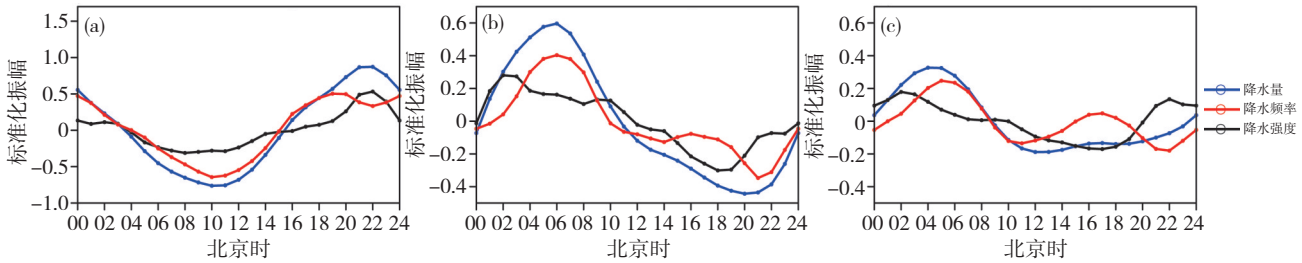


图6 2011—2020年青藏高原东缘(a)、四川盆地中东部(b)、云贵高原东部(c)的秋季降水量、降水频率和降水强度的标准化日变化曲线(图中曲线为三点滑动平均结果)

Fig.6 The normalization diurnal variation of precipitation amount, precipitation frequency, and precipitation intensity in (a) the TPE, (b) the SCE, and (c) the YGE during 2011–2020 (The curve shows the three-point moving average)

出现峰值。

2.3 不同持续时间降水事件特征

不同的持续时间对应着不同性质的降水事件，而降水性质对降水日变化有重要影响(Yu et al.，2007；原韦华等，2014)。下文分析了不同持续时间降水事件的相关特征。从图7可见，华西秋雨降水事件数的空间分布特征存在明显区域差异。降水事件数在青藏高原东缘较多、云贵高原东部较少。华西秋雨的平均降水持续时间整体处于3.19~6.80 h之间。在华西秋雨区内，平均降水持续时间在海拔高度1 000 m以下的地区要明显高于海拔高度1 000 m以上的地区(图7b)。在选取的三个区域中，以四川盆地中东部平均降水持续时间最长，该区域平均降水持续时间为5.78 h。

根据降水日变化峰值时间的不同，将持续时间为1~6 h的降水定义为短时降水，持续时间超过6 h的降水定义为长持续性降水。图8给出青藏高原东缘、四川盆地中东部、云贵高原东部不同持续时间降水事件的日变化特征。从中可见，对于青藏高原东缘的不同持续时间降水事件而言，随降水持续时间延长，其降水日峰值出现时间逐渐延迟，该地区短时降水(长持续性降水)的降水量和降水频率主要集中于午后至傍晚时段(夜间至凌晨时段)。四川盆地中东部以清晨长持续性降水为主，该地区午后短时降水频次也较高，但降水强度较弱。云贵高原东部的降水量、降水频次均集中在午后、清晨两个时段，其午后时段降水量主要来自短时降水事件，清晨降水量则主要来自长持续性降水事件。

图9给出长持续性降水事件对总降水量、总降水频次贡献率的空间分布。由图可见，长持续性降水对华西秋雨总降水量和总降水频次起主要作用，对应贡献率的全区平均值高于60%。从空间分布来看，长

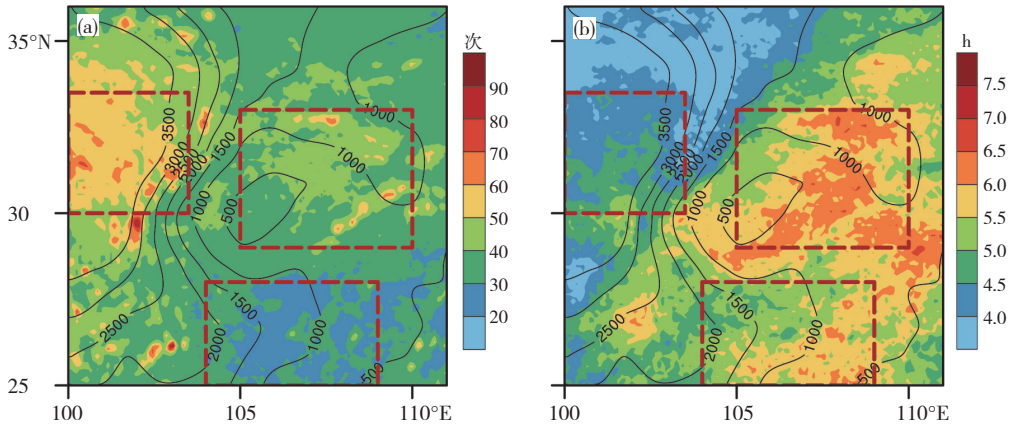


图7 2011—2020年华西秋雨平均降水事件总数(a)、平均降水持续时间(b)空间分布

Fig.7 The spatial distribution of (a) the total number of annual precipitation events and (b) the average precipitation duration of WCAP during 2011–2020

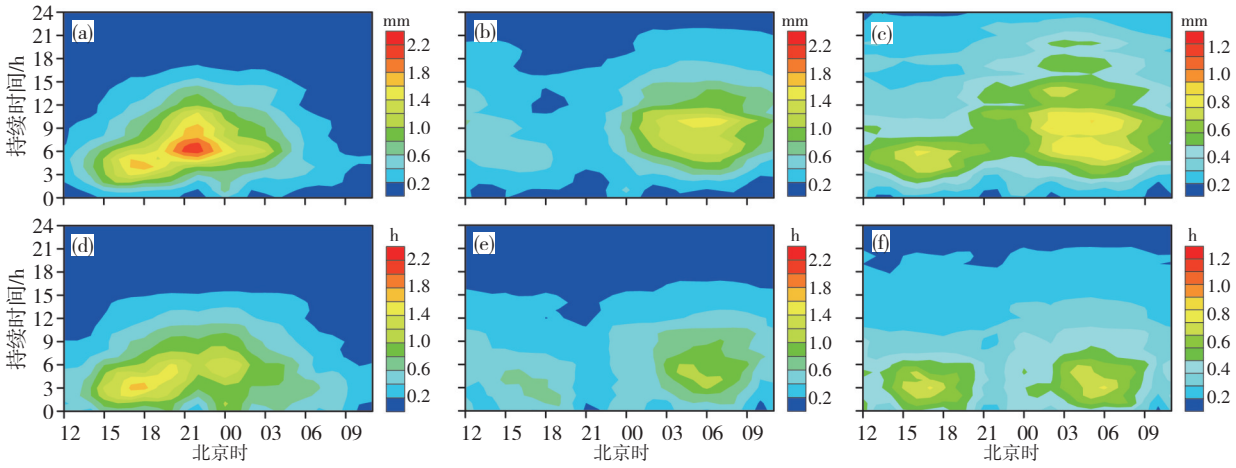


图8 2011—2020年秋季青藏高原东缘(a, d)、四川盆地中东部(b, e)、云贵高原东部(c, f)不同持续时间降水事件的降水量(a, b, c)和降水频次(d, e, f)日变化

Fig.8 The diurnal variation of (a, b, c) precipitation amount, (d, e, f) precipitation frequency of precipitation events with different durations in (a, d) the TPE, (b, e) the SCE and (c, f) the YGE during 2011–2020

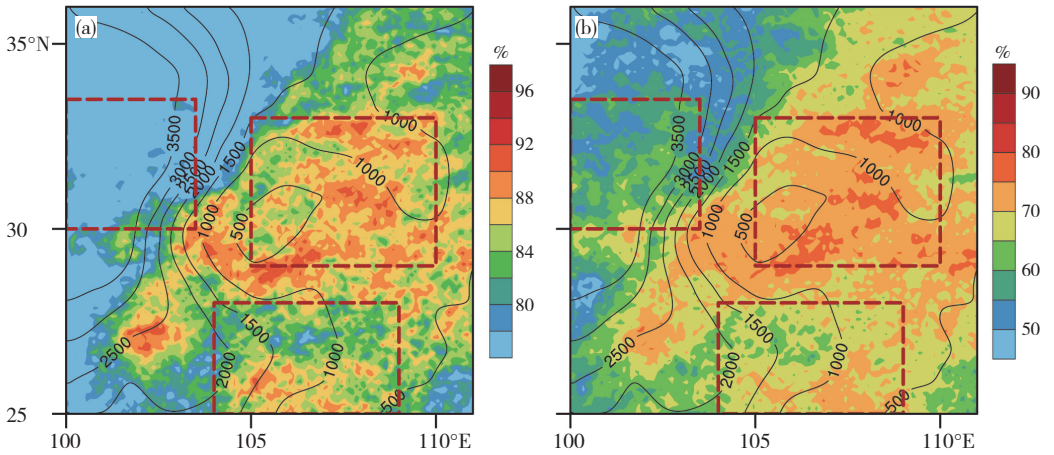


图9 2011—2020年华西地区长持续性降水事件对秋季总降水量贡献率(a)、总降水频次贡献率(b)的空间分布

Fig. 9 Percentage of (a) precipitation amount and (b) precipitation frequency of long-duration precipitation to total precipitation (shaded) during 2011–2020

持续降水事件对总降水量、总降水频次的贡献率在秋雨区内海拔高度1 500 m以下的地区明显高于海拔高度1 500 m以上的地区。短时降水事件特征与之相反(图略)。

进一步统计了青藏高原东缘、四川盆地中东部、云贵高原东部的短时降水事件与长持续性降水事件

的累计降水量(表1)、累计降水频次(表2)。从表中可见,青藏高原东部的短时降水事件和长持续性降水事件的累计频次相当,而该区域长持续性降水事件的降水强度更强、对总降水量起主要作用。四川盆地中东部的总降水频次与青藏高原东缘相当,其长持续性降水事件占该地区总降水频次的比例要高于青藏高原东缘。三个区域的降水量均主要来自长持续性降水事件,其中四川盆地中东部的长持续性降水事件占该区域总降水量的比例最高。

表1 2011—2020年华西地区多年平均的不同持续时间降水事件累计降水量及其占总降水量比例

Table 1 The averaged cumulative precipitation amount and the proportion to total precipitation amount of precipitation events with different durations from 2011 to 2020 in West China

区域	短时降水		长持续性降水	
	降水量/mm	频率/%	降水量/mm	频率/%
青藏高原东缘(TPE)	78.58	34	149.03	65
四川盆地中东部(SCE)	47.36	16	240.82	84
云贵高原东部(YGE)	45.84	19	195.77	81

表2 2011—2020年华西地区多年平均的不同持续时间降水事件累计降水频次及占总降水频次比例

Table 2 The averaged cumulative precipitation frequency and the proportion to total precipitation frequency of precipitation events with different durations from 2011 to 2020 in West China

区域	短时降水		长持续性降水	
	降水频次/h	比例/%	降水频次/h	比例/%
青藏高原东缘(TPE)	109.79	49	114.54	51
四川盆地中东部(SCE)	74.29	33	149.14	67
云贵高原东部(YGE)	59.97	38	97.56	62

注:表中降水频次表示发生降水的累计小时数。

3 结论与讨论

本文利用2011—2020年GPM卫星小时降水数据,统计分析了华西秋雨的强度-频次分布、持续时间、日变化等降水精细化特征,得到如下主要结论:

(1) 小时尺度华西秋雨精细化特征在空间分布上存在明显区域差异,可分为:四川盆地中东部、云贵高原东部、青藏高原东缘三个典型区域。从强度—频次分布特征来看,四川盆地中东部的降水频率、降水强度均高,云贵高原东部的降水频率低、降水强度强,青藏高原东缘的降水频率高、降水强度弱。

(2) 从降水日峰值位相来看,自青藏高原东缘至四川盆地中东部,降水日峰值从夜间22:00滞后至次日清晨06:00;云贵高原东部降水日峰值从傍晚18:00滞后至次日午后16:00,形成了北部、南部两种日峰值位相的空间演变型。这种日峰值位相的滞后特征与海拔高度有一定对应关系。从降水日变化曲线来看,降水量和降水强度在青藏高原东缘(四川盆地中东部)以夜间峰值(清晨峰值)为主,在云贵高原表现为清晨和午后的双峰。对于降水频率而言,青藏高原东缘表现为夜间和午后的双峰,四川盆地中东部和云贵高原东部均表现为清晨和午后的双峰。

(3) 从不同持续时间降水事件的日变化特征来看,随降水持续时间延长,青藏高原东缘降水日峰值出现时间逐渐延迟,具体表现为由短时降水的午后峰值演变为持续性降水的夜间峰值。四川盆地中东部和云贵高原东部降水均存在午后短时和清晨长持续性两种类型,其中四川盆地中东部的清晨长持续性降水对该地区总降水的贡献较云贵高原东部偏大。

从以上结果来看,华西秋雨小时尺度精细化特征存在明显区域差异,这与四川盆地中东部、云贵高原东部、青藏高原东缘三个典型区域的降水性质不同有关。具体而言,青藏高原东缘多对流性降水,其前半夜峰值与高原热力性质变化所引起的垂直环流日变化有关,是前半夜青藏高原东缘上升运动较强有利于对流发生的结果(Jin et al.,2013)。四川盆地中东部则以层状云降水为主,其后半夜峰值与大尺度环流的日变化(Chen et al.,2010)、盆地的云辐射效应(Li et al.,2008)等因子密切相关。需要指出的是,青藏高原东缘、四川盆地中东部、云贵高原东部的地形条件有明显差异。地形在造成华西秋雨的小时尺度降水精细化特征存在区域差异的机制中所起的作用如何也值得进一步探究。

参考文献(References):

白虎志,董文杰.2004.华西秋雨的气候特征及成因分析[J].高原气象,23(6):884-889. Bai H Z, Dong W J. 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China [J]. Plateau Meteorology, 23(6):884-889 (in Chinese)

高由禧,郭其蕴.1958.我国的秋雨现象[J].气象学报,29(4):264-273. Gao Y X, Guo Q Y. 1958. On the autumn raining area in China [J]. Acta Meteorologica Sinica,29(4):264-273 (in Chinese)

蒋竹将,马振峰,刘佳,等. 2014. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J].大气科学,38(1):32-44. Jiang Z J, Ma Z F, Liu J, et al. 2014. Improved index and climatological characteristics of the autumn rain in Western China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(1):32-44 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13120

梁 健洪.1989.华西秋雨的时空分布[J].地理科学,9(1):51-59, 96. Liang J H.1989. The regional and seasonal distribution of autumn rain in West China[J]. Scientia Geographica Sinica, 9(1):51-59,96 (in Chinese)

罗霄,李栋梁,王慧.2013.华西秋雨演变的新特征及其对大气环流的响应[J].高原气象,32(4):1019-1031. Luo X, Li D L, Wang H.2013.New

evolution features of autumn rainfall in West China and its responses to atmospheric circulation [J]. Plateau Meteorology,32(4):1019–1031 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2013.00018

罗乃兴.2023.基于小时降水资料的贵州降水精细特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(4):39–45. Luo N X. 2023. Characteristics of precipitation distribution in Guizhou province based on hourly rain–gauge data [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):39–45 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.04.006

彭韵萌,徐海明.2021. 2017年华西秋雨异常偏多的环流特征及其成因分析[J].气象科学,41(3):363–373. Peng Y M, Xu H M. 2021. Circulation features and causes of the anomalous rainfall over the West China in 2017 [J]. Journal of the Meteorological Sciences,41(3):363–373 (in Chinese). doi:10.12306/2020jms.0007

唐敏丽,肖潺,原韦华.2022.秦岭南北降水小时尺度特征对比分析[J].暴雨灾害,41(1):24–32. Tang M L, X C, Yuan W H. 2022. Comparative analysis of hourly features of precipitation in the north and south areas of Qinling Mountains [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):24–32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.01.003

王春学,马振峰,王佳津,等.2015.华西秋雨准4年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J].大气科学,39(3):643–652. Wang C X, Ma Z F, Wang J J, et al. 2015. The characteristics of Huaxi autumn rain and its relationship with sea surface temperatures over the equatorial pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,39(3):643–652 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1408.14141

徐曼琳,周波涛,程志刚.2020. 2010年以来华西秋季降水年代际增多原因初探[J].大气科学学报,43(3):568–576. Xu M L, Zhou B T, Cheng Z G. 2020. Preliminary analysis on the interdecadal increase of autumn rainfall in western China since 2010 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,43(3):568–5761 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191227002

袁旭,刘宣飞.2013.华西秋雨起止与秋冬季节大气环流转换[J].气象学报,2013,71(5):913–924. Yuan X, Liu X F. 2013. Onset–withdrawal dates of autumn persistent rains over western China and the associated autumn to winter evolution of the atmospheric circulation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 71(5):913–924 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.034

宇如聪,李建.2016.中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J].气象学报,(1):18–30.Yu R C, Li J.2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica,(1):18–30 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.011

原韦华,宇如聪,傅云飞.2014.中国东部夏季持续性降水日变化在淮河南北的差异分析[J].地球物理学报,57(3):752–759. Yuan W H, Yu R C, Fu Y F. 2014. Study of different diurnal variations of summer long–duration rainfall between the southern and northern parts of the Huai River [J]. Chinese Journal of Geophysics,57(3):752–759 (in Chinese). doi:10.6038/cjg20140306

Wei T, He S, Yan Q, et al. 2018. Decadal shift in West China autumn precipitation and its association with sea surface temperature [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,123(2):835–847. doi:10.1002/2017JD027092

Yu R, Xu Y, Zhou T, et al. 2007. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. Geophysical research letters,34:L13703. doi:10.1029/2007GL030315

Zhang C, Wang Z, Zhou B, et al. 2019. Trends in autumn rain of West China from 1961 to 2014 [J]. Theoretical and Applied Climatology,135:533–544. doi:10.1007/s00704–017–2361–9

（责任编辑　何明琼）