



青藏高原东南部色季拉山地区夏季小时降水特征分析

肖峰 姚秀萍 马婷婷

Characteristics of summertime hourly precipitation over the Sygera Mountains on the southeastern Tibetan Plateau

XIAO Feng, YAO Xiuping, MA Tingting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-019>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

CMIP6 HighResMIP高分辨率气候模式对青藏高原降水模拟的评估

Evaluation of CMIP6 HighResMIP models in Simulating Precipitation over Tibetan Plateau

暴雨灾害. 2022, 41(2): 215–223 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.012>

青藏高原东侧九龙夏季非降水云的观测特征

Observational characteristics of summer non-precipitating clouds in Jiulong on the east side of the Qinghai-Tibet Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(2): 135–145 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-148>

青藏高原东南缘攀枝花市降水特征及其成因初探

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

暴雨灾害. 2024, 43(1): 101–109 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-246>

青藏高原夏季FY-4A卫星对流初生产品的分类识别

Classification and identification of FY-4A convective initiation products in summer on the Qinghai-Tibet Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(2): 214–223 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-193>

湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析

Analysis of diurnal variation characteristics and formation causes of summer precipitation in Hunan Province

暴雨灾害. 2026, 45(1): 130–141 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-012>

东北地区暖季小时降水特征分析

Analysis of hourly precipitation characteristics during the warm season in Northeast China

暴雨灾害. 2025, 44(1): 71–81 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-244>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

肖峰,姚秀萍,马婷婷. 2026. 青藏高原东南部色季拉山地区夏季小时降水特征分析[J]. 暴雨灾害, 45(5): 726–737. XIAO Feng, YAO Xiuping, MA Tingting. 2026. Characteristics of summertime hourly precipitation over the Sygera Mountains on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(5): 726–737 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025-019

青藏高原东南部色季拉山地区夏季小时降水特征分析

肖峰^{1, 2}, 姚秀萍^{1, 2}, 马婷婷²

(1. 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081;

2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘 要: 青藏高原东南部的色季拉山是雅鲁藏布大峡谷水汽通道西北侧的重要地形屏障, 该地区夏季降水频率远高于周边山脉。因此, 开展对色季拉山夏季小时降水事件特征的研究, 对揭示雅鲁藏布大峡谷水汽通道影响下复杂地形区的降水精细化分布规律、提升该地区气象次生灾害的预报预警能力具有重要意义。利用 2016—2021 年 6—8 月青藏高原东南部色季拉山 9 个气象观测站小时降水资料, 以及 ERA5 和 ERA5-Land 逐小时再分析资料, 分析了色季拉山夏季小时降水和小时强降水事件的时空分布特征, 对比了不同海拔高度和山谷走向影响下小时降水空间分布特征, 并揭示了地形对小时降水特征的影响。结果表明: (1) 色季拉山夏季以持续时间为 1~3 h 的短历时降水事件最为频发, 降水主要发生在夜间和午后, 降水量在 03 时 (当地时, 下同) 达到峰值, 午后至傍晚为另一个高值时段。(2) 小时强降水时次对总降水量的贡献率达 52.6%, 且以持续时间超过 6 h 的长历时降水事件为主, 具有降水强度高、持续时间长、发生频率低的特征。小时强降水事件同样主要发生在午后到傍晚时段, 夜间次之, 其降水量在午后和夜间相当。(3) 受海拔高度和山谷走向的影响, 色季拉山夏季不同区域的小时降水事件存在显著空间差异。山顶站的降水量、频率和强度均高于山谷站; 准南北向山谷以高频、长历时事件为主, 准东西向山谷则以低频、高强度的事件为主。对于小时强降水事件, 准东西向山谷以高强度、低频事件为主, 准南北向山谷则以低强度、高频、长历时事件为主。(4) 色季拉山地区夏季降水空间分布受地形热力与动力作用的协同影响, 二者在准南北向山谷造成的降水量均高于准东西向山谷, 地面饱和比湿和经向风的日变化主导了两种山谷站降水的日变化特征。

关键词: 青藏高原; 色季拉山; 夏季; 小时降水

中图法分类号: P426.6

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025-019

Characteristics of summertime hourly precipitation over the Sygera Mountains on the southeastern Tibetan Plateau

XIAO Feng^{1, 2}, YAO Xiuping^{1, 2}, MA Tingting²

(1. *State Key Laboratory of Severe Weather, National Key Laboratory of Disaster Weather Science and Technology, Beijing 100081*; 2. *CMA Training Centre, Beijing 100081*)

Abstract: Located on the southeastern margin of the Tibetan Plateau (TP), the Sygera Mountains represent a key topographic barrier on the northwestern flank of the water vapor channel of the Yarlung Zangbo Grand Canyon, where summer precipitation frequency is significantly higher than that in the surrounding mountainous areas. Therefore, investigating the characteristics of summertime hourly precipitation events over the Sygera Mountains is of great significance for revealing the fine-scale precipitation distribution patterns over complex terrain influenced by the water vapor channel of the Yarlung Zangbo Grand Canyon, and for improving the forecasting and early warning capabilities for meteorological secondary disasters in this region. Using hourly precipitation data from 9 meteorological stations in the Sygera Mountains and hourly ERA5 and ERA5-Land reanalysis data during June–August from 2016 to 2021, this study analyzes the spatiotemporal distribution characteristics of summer hourly precipitation events and hourly heavy precipitation events, compares the spatial distribution of hourly precipitation under the influence of altitude and valley orientation, and reveals the topographic effects on hourly precipitation characteristics. The results are as follows. (1) In summer, short-duration precipitation events lasting 1–3 h are the most

收稿日期: 2025-02-10; 定稿日期: 2025-09-02

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42030611); 国家重点研发计划项目 (2023YFC3007502); 西藏自治区重大科技专项 (XZ202402ZD0006-06)

第一作者: 肖峰, 主要从事高原气象研究。E-mail: 3190129264@qq.com

通信作者: 姚秀萍, 主要从事高原气象学、天气动力学、中尺度气象学研究。E-mail: yaoxp@cma.gov.cn

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

frequent over the Sygera Mountains. Precipitation mainly occurs at night and in the afternoon, with a peak at 03:00 (local time, i.e., Beijing Time minus 2 h; hereinafter the same) and another high-value period from afternoon to evening, during which relatively higher values appear around 14:00 and 18:00. (2) Hourly heavy precipitation events contribute 52.6% of the total summer precipitation and are dominated by long-duration events exceeding 6 h, characterized by high intensity, long duration, and low frequency. These heavy events also mainly occur from afternoon to evening, with a secondary peak in the early morning, and their precipitation amounts are comparable between afternoon and early morning, differing from the diurnal variation characteristics of hourly precipitation events. (3) Influenced by altitude and valley orientation, significant spatial differences exist in summer hourly precipitation events across different regions of the Sygera Mountains. The precipitation amount, frequency, and intensity at the summit station are higher than those at valley stations. The quasi-north-south oriented valley is dominated by high-frequency, long-duration events, whereas the quasi-east-west oriented valley features lower-frequency events with slightly higher intensity. For hourly heavy precipitation events, valley stations exhibit longer durations than the summit station. The quasi-east-west oriented valley is characterized by high-intensity, low-frequency events, while the quasi-north-south oriented valley is dominated by low-intensity, high-frequency, and long-duration events. (4) The summer precipitation distribution over the Sygera Mountains is jointly influenced by the thermal and dynamic effects of topography, with both effects producing higher precipitation amounts in the quasi-north-south oriented valley than in the quasi-east-west oriented valley. The diurnal variations of surface saturated specific humidity and meridional wind dominate the diurnal variation characteristics of precipitation at stations in both valley orientations.

Key words: Tibetan Plateau; Sygera Mountains; summer; hourly precipitation

引言

高大地形影响下的区域天气气候是气象研究的热点和难点 (Smith, 2019)。作为全球海拔最高的高原, 青藏高原 (以下简称高原) 分布有高山、峡谷、台地、冰川和湖泊等地貌, 是最典型的复杂地形之一。众多研究者们对高原对周边地区天气气候的动力和热力影响进行了研究 (马婷婷等, 2018; 赵平等, 2018; Liu et al., 2024)。

从气候态上看, 高原降水主要集中在夏季 (6—8月), 占全年总降水量的 61.3% (姚秀萍等, 2021a), 在空间上呈东南多、西北少的分布特征 (Sun et al., 2021; Chen et al., 2023; Wang et al., 2023; 刘俏华等, 2024)。在时间上, 整体的降水量和降水频率日变化呈独特的凌晨和傍晚的双峰结构 (段春锋等, 2013), 降水的日振幅强于我国其他地区 (毛江玉和吴国雄, 2012; Zhu et al., 2023)。进一步的研究表明, 这种日变化特征并非全域均一, 而是存在显著的区域性差异 (计晓龙等, 2017)。具体而言, 根据降水形成机制的不同, 可将其归纳为午后短历时降水和夜晚长历时降水两种降水模态, 两种模态的比例随地形变化而改变 (Li, 2018)。降水日变化模态的区域差异, 与下垫面地形地貌的异质性密切相关。聚焦到具体的下垫面类型, 研究发现不同地貌单元的降水日变化特征各异: 高原上的山地区域降水在下午最强, 山谷和湖泊区域的降水在夜晚最强, 而大型湖泊除了兼具两者的特征外, 还呈现一个早晨的次降水峰值 (Singh et al., 2009; Wang et al., 2018)。高原地形不仅影响降水的日变化, 还改变了降水的空间分布 (马玉坤等, 2022;

次旺扎西等, 2025)。观测表明, 在高原东北部的祁连山区中段的夏季降水峰值出现在 17—20 时 (当地时), 东中段 16 时后北坡降水多于南坡, 而 22 时至次日 07 时南坡降水多于北坡 (刘雪梅等, 2016)。类似的地形调控作用在高原南部的喜马拉雅山脉也得到了印证, 即山脉南侧恒河平原和喜马拉雅-高原台地的降水峰值位于下午, 谷值出现在早晨, 而喜马拉雅山脚下的降水峰值位于早晨, 南坡的陡峭地形区的降水则兼具下午和午夜两个峰值 (Pan et al., 2021)。

上述研究充分揭示了地形对降水分布的复杂调制作用, 然而, 高原东南部作为水汽输送的关键通道区, 其地形与降水的相互作用研究却相对薄弱。色季拉山地处高原东南部的复杂地形区, 平均海拔约 4 000 m, 地势陡峭。该地区正对雅鲁藏布江大峡谷水汽通道, 因此夏季降水充沛。复杂的地形和充沛的降水极易诱发泥石流、滑坡等气象次生灾害, 这给川藏铁路色季拉山隧道段的安全运营与维护带来严峻挑战。然而, 由于缺乏长时间序列的地面观测资料, 且卫星资料在该地区与气象观测站数据存在较大偏差 (Chen et al., 2012), 目前针对该地区夏季降水特征的研究十分有限。仅有的研究表明, 色季拉山的降水受高原多尺度天气系统、印度洋水汽输送和地形的综合影响 (刘菊菊等, 2019; 姚檀栋等, 2019; 李嗣源等, 2023; 周立波等, 2025)。其中, 降水的影响系统包括南亚高压、西北太平洋副热带高压、高原切变线和高原低涡等 (张硕等, 2019; 姚秀萍等, 2021b; 裴宇菲等, 2023)。Chen 等 (2012) 利用色季拉山 2006—2008 年 8 个气象观测站的小时降水资料, 分析发现山顶处的暖季 (5—9 月) 降水呈现下午和午

夜双峰分布,而山谷处的降水只有凌晨单峰。这一结果初步揭示了该地区降水的垂直差异性,但受限于资料年限,其精细化的小时降水演变特征仍有待深入研究。

在以往研究的基础上,本文在以下方面做了进一步研究:(1)基于长时间序列的小时降水数据,从降水频率、降水强度、持续时间等角度,系统揭示了色季拉山夏季小时降水事件与小时强降水事件的时空分布及日变化特征;(2)通过按海拔高度和山谷走向对气象观测站进行分类,并结合合成分析与诊断,揭示了局地地形对降水特征差异的调制作用,通过上述研究旨在深化对色季拉山地区夏季小时降水特征的认识,并为进一步探究地形影响下的降水过程提供了科学支撑。

1 数据与方法

1.1 数据说明

本文使用的资料包括:(1)2016—2021年6—8月色季拉山9个国家级和区域级气象观测站(以下分别简称国家站和区域站)(其中巴宜站和山口站属于国家站,其他为区域站)逐小时降水资料(18时—次日18时,当地时,用于对夏季小时降水的时空分布特征的分析);(2)欧洲中期预报中心(ECWMF)提供的2016—2021年6—8月ERA5逐小时水平风速、高度场和比湿的再分析资料,时间分辨率为1 h,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,用于分析水汽对降水空间分布差异的成因;(3)ECWMF提供的2016—2021年6—8月ERA5-land逐小时降水量、10 m风速、2 m气温的再分析资料,水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,用于分析地形对降水空间分布差异的成因;(4)国家青藏高原科学数据中心提供的高原地形资料和边界资料(汤国安, 2019; 张懿铨等, 2019)。

降水数据的质量控制方法如下:若某个气象观测站在一个夏季的有效观测数据低于15%,则将这一年的数据设为缺测(Li et al., 2011),并剔除该气象观测站,质控后,保留了位于色季拉山地区的9个气象观测站。

为深入探讨海拔高度对降水的影响,参考Li等(2017)的研究,将上述9个站按照海拔高度划分,其中高于4 000 m的2个站确定为山顶站,低于4 000 m的7个站确定为山谷站(表1)。

色季拉山主体呈西北—东南向,这一走向的山体将色季拉山两侧的山谷地形分为两种走向:准东西向和准南北向。为探究色季拉山地区降水的精细化特征,进一步将7个山谷气象观测站根据所在山谷的走向分为两组(图1):位于准东西向山谷的气象观

表1 色季拉山9个气象观测站经纬度、海拔高度和所处位置信息

Table 1 Summary of longitude, latitude, altitude, and location of 9 meteorological stations on the Sygera Mountains

站名	经纬度($^{\circ}\text{E}/^{\circ}\text{N}$)	海拔高度/m	所处位置
巴宜站(国家站)	94.33/29.67	2 992	准东西向山谷
尼池站(区域站)	94.47/29.57	3 035	准东西向山谷
114站(区域站)	94.55/29.55	3 698	准东西向山谷
113站(区域站)	94.60/29.60	4 160	山顶
山口站(国家站)	94.65/29.60	4 553	山顶
鲁朗站(区域站)	94.72/29.73	3 908	准南北向山谷
生态站(区域站)	94.70/29.65	3 390	准南北向山谷
兵站站(区域站)	94.73/29.82	3 132	准南北向山谷
拉月站(区域站)	94.87/29.99	2 438	准南北向山谷

测站(巴宜站、尼池站和114站)和位于准南北向山谷的气象观测站(鲁朗站、生态站、兵站和拉月站)。

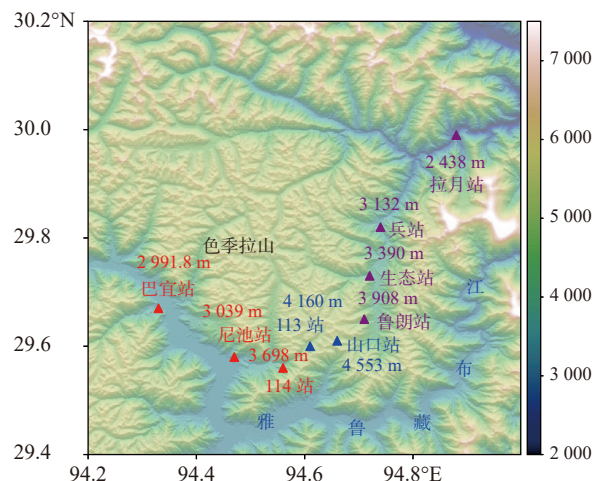


图1 色季拉山海拔高度(填色,单位:m)和9个气象观测站空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 9 meteorological stations against the shaded elevation background (unit: m) of Sygera Mountains

1.2 降水事件及相关统计量定义

本文对小时降水事件的定义采用以下标准:当小时降水量 ≥ 0.1 mm时,该时次被认定为降水时次;从首个降水时次开始,允许中间有1个非降水时次间隔,当连续出现2个或以上非降水时次时,该次降水事件结束(Li, 2018; 李争辉和罗亚丽, 2021; 李若莹和姚秀萍, 2024)。本文将持续时间 ≤ 3 h (≥ 6 h)的降水事件分别定义为短历时(长历时)降水事件(Zhang et al., 2021);需要说明的是,3~6 h的降水事件在机制上兼具短历时与长历时的过渡特征,本文聚焦于两类典型时长事件的空间差异,因此暂不单独讨论。

本文对小时强降水事件的定义采用第95百分位

方法(尤焕苓等, 2014), 即计算气象观测站的小时降水量第 95 百分位阈值, 将降水量达到或超过这一阈值的降水事件定义为小时强降水事件, 所有气象观测站的第 95 百分位阈值在 2.8~3.2 mm 之间。

本文中各项统计量对小时降水事件和小时强降水事件均适用。本文将小时平均降水量定义为降水事件过程中的总降水量与所有非缺测小时数的比值; 将持续时间定义为降水事件经历的小时数; 将降水强度定义为降水事件的降水量与持续时间的比值; 将降水频率定义为降水时次总数与研究时段非缺测的总小时数的比值; 将起始时间频数定义为开始于某小时的降水事件次数。

1.3 整层水汽含量的计算

为分析色季拉山地区不同地理位置气象观测站降水事件持续期间的水汽情况, 引入垂直积分的水汽即将水汽从地表 (p_s) 到大气上层 (p_t) 的垂直积分, 即从地面到大气上层的气柱中水汽的含量, 计算公式如下

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} q dp \quad (1)$$

其中, Q 为整层水汽含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); g 为重力加速度, 取 $9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, p_t 和 p_s 分别取 400 hPa 和地表气压, 其中, t 代表大气上层, s 代表地面层; q 为比湿 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Ma et al., 2022)。

1.4 两种走向山谷站降水偏多时次的筛选标准及合成分析方法

筛选不同走向山谷站降水偏多时次并与夏季平均降水量的差值可以表明两种走向山谷站各自产生降水时的水汽来源与水汽含量的差异。以准东西走向山谷站降水偏多时次为例, 筛选步骤如下: (1) 选取准东西走向山谷站平均小时降水量大于准南北向山谷站的所有时次, 并计算两种走向山谷站同一时次降水量的差值; (2) 计算上述时次降水差值的标准差; (3) 选取降水差值大于两倍标准差的时次作为准东西走向山谷站降水偏多时次。同理, 筛选准南北向山谷站降水偏多时次。参照杨雯婷等 (2024) 的方法, 对两种走向山谷站降水偏多时次的垂直积分的比湿和水平风场进行合成分析, 并计算其与夏季平均值的差值场。

1.5 地形降水率的计算

地形降水率可以体现地形对降水的影响 (Colton, 1976), 其计算公式如下

$$C(x, y) = \rho q_{\text{VASTO}} \vec{U} \cdot \nabla h(x, y) \quad (2)$$

式中, C 为地形降水率, 表示由地形强迫引起的降水

强度, x 和 y 代表经向和纬向格点; ρ 为空气密度; q_{VASTO} 为地面饱和比湿, 代表近地面空气的水汽含量潜力, $\vec{U}$ 为地表风速矢量; $\nabla h(x, y)$ 为地形高度梯度, 表示地形在经向和纬向的变化率。 $\vec{U} \cdot \nabla h = u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y}$ 表示气流沿地形梯度方向的爬坡抬升强迫, 该项 >0 时代表气流沿地形升高方向运动, 被迫抬升, 有利于水汽凝结和降水形成, 该项分解后的两项分别代表纬向风沿东西向地形坡度的抬升强迫和经向风沿南北向地形坡度的抬升强迫。地形降水率的计算公式可以近似为 $q_{\text{VASTO}} = 0.0038 \exp(0.068T)$, T 为地表温度。

2 夏季小时降水事件时空分布特征

2.1 空间分布特征

图 2a—d 分别给出了色季拉山 9 个气象观测站夏季小时降水事件小时平均降水量、降水强度、持续时间和降水频率的空间分布。从中可见 (图 2a), 小时平均降水量的最大值 0.25 mm 出现在海拔最高的山口站 (山顶), 最小值 0.14 mm 出现在海拔较低的尼池站 (准东西向山谷), 说明色季拉山夏季山顶站和山谷站的降水量存在差异, 山顶站的小时平均降水量显著高于山谷站。同时, 准南北向山谷站的小时平均降水量又高于准东西向山谷站约 0.10 mm。这些特征与罗伦等 (2021) 使用色季拉山暖季逐日降水数据统计得出的“降水量空间分布东多西少”的结论一致。

该地区夏季小时平均降水强度约为 $0.51 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。准东西向山谷站的平均降水强度为 $0.52 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 略高于准南北向山谷站的 $0.49 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。山顶站与山谷站之间的降水强度差异较小, 最大值 $0.57 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 出现在 113 站 (山顶), 最小值 $0.46 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 出现在生态站 (准南北向山谷)。与小时平均降水量不同, 不同气象观测站间降水强度的变化与海拔高度的联系并不明显 (图 2b)。

夏季小时降水事件的平均持续时间约为 3.0 h。准东西向山谷站的小时降水事件持续时间最短, 山顶站和准南北向山谷站相对较长。与小时平均降水量类似, 山顶站的小时降水事件持续时间较山谷站长 0.1 h, 准南北向山谷站较准东西向山谷站长 0.3 h (图 2c)。

色季拉山夏季小时降水事件的平均降水频率约为 24.6%。由图 2d 可知, 降水频率的特征与小时平均降水量的特征基本一致, 即山顶站显著高于山谷站、准南北向山谷站高于准东西向山谷站。可见, 色季拉山各区域的降水量受降水频率影响较大, 较为

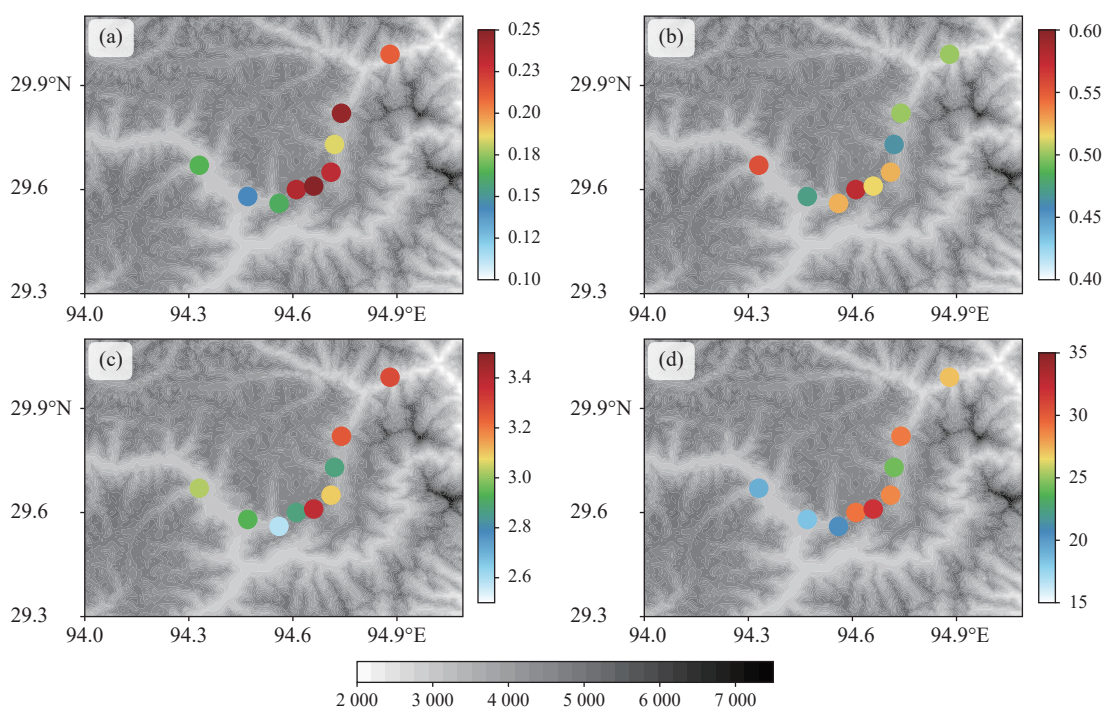


图 2 2016—2021 年 6—8 月色季拉山 9 个气象观测站小时降水事件的平均降水量 (a, 单位: mm)、降水强度 (b, 单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、持续时间 (c, 单位: h) 与降水频率 (d, 单位: %) 空间分布 (灰色阴影为海拔高度, 单位: m)

Fig. 2 Spatial distributions of (a) hourly mean precipitation (unit: mm), (b) intensity (unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), (c) event duration (unit: h) and (d) frequency (unit: %) of hourly precipitation events recorded at the 9 meteorological stations in the Sygera Mountains during the June-August from 2016 to 2021 (The grey shaing represent terrain height, unit: m)

频繁且长持续时间的降水事件导致准南北向山谷站小时平均降水量多于准东西向山谷站。

为进一步揭示色季拉山夏季不同区域小时降水事件的结构特征, 表 2 给出了各区域平均小时降水事件发生次数及其占该区域总降水事件的比例。可知, 各区域短历时降水事件的占比均超过 50%, 长历时降水事件占比超过 20%, 说明该地区夏季小时降水事件以短历时事件为主导, 且不同区域间的占比差异不大。

综上, 色季拉山夏季小时降水事件以短历时降

表 2 色季拉山夏季不同区域气象观测站平均小时降水事件发生次数及其占相应区域总小时降水事件的比例

Table 2 Average occurrences of hourly precipitation events and their proportions in different areas of the Sygera Mountains during summertime, measured by meteorological stations

区域	事件类型	短历时		长历时	
		次数	占比/%	次数	占比/%
准东西向山谷	小时降水事件	835	73.4	81	9.0
	小时强降水事件	16	20.2	38	70.9
准南北向山谷	小时降水事件	799	63.8	108	9.6
	小时强降水事件	16	17.2	57	80.8
山顶	小时降水事件	855	67.5	124	10.0
	小时强降水事件	30	28.1	57	72.7

水为主。山顶站在小时平均降水量和降水频率上高于山谷站, 准南北向山谷站在小时平均降水量、持续时间和降水频率上高于准东西向山谷站, 而在降水强度上低于准东西向山谷站。

2.2 日变化特征

高原上的降水往往存在较强的日变化特征, 因此进一步分析了色季拉山不同区域气象观测站夏季小时降水量的日变化 (图 3)。色季拉山小时降水量较大的时段出现在夜间和午后。与高原地区降水常见的双峰结构 (Li, 2018) 一致。降水量在 03 时

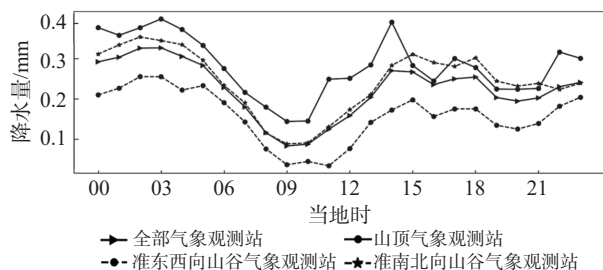


图 3 2016—2021 年 6—8 月色季拉山全部气象观测站、准东西向山谷、准南北向山谷和山顶的气象观测站小时降水事件降水量日变化

Fig. 3 Diurnal variations in hourly precipitation recorded at all meteorological stations, the quasi-east-west valley, quasi-north-south valley, and the top in the Sygera Mountains during June-August 2016-2021

达到峰值,午后至傍晚为另一个高值时段,其中14时和18时前后相对较高,降水量分别为0.27 mm、0.24 mm和0.23 mm;谷值出现在09时左右、16时和20时,09时降水量最低约0.10 mm。

准东西向和准南北向山谷站的降水量具有大致相同的日变化特征,降水量在02时达到峰值,之后逐渐减少,在09—10时达到谷值,之后又逐渐增加,于15和18时达到峰值。准南北向山谷站的降水量显著高于准东西向山谷站的降水量,这种差异在小时降水量较大的夜间和下午时段尤为明显。山顶站的小时降水日变化也呈双峰特征,分别为夜间的03时以及午后的14时和17时,山顶站下午的降水量相比于山谷站提前1 h达到峰值。两种走向的山谷站夜间降水的峰值均略高于下午降水的峰值,而山顶站两者相当。

进一步分析色季拉山夏季小时降水事件起始时间的发生频数和对应的持续时间(图4)可知,不同地理位置的气象观测站降水起始时间频数差异较大。14时降水峰值前后时段色季拉山的降水起始频数最高,且该时段降水的持续时间相对较长,为4~6 h。夜间降水峰值前后的降水起始频数略低于午后,降水持续时间相对较短,为2~5 h。山顶站的降水起始频数显著高于山谷站。两种走向的山谷站降水起始

频数略有不同,准南北向山谷站降水起始频数在两个降水峰值期的分布较为平均,均为30次以上,而准东西向山谷站降水频数在夜间的峰值期较高,为30次左右,但该时段的降水持续时间相对较短,为4~5 h,降水起始频数在午后的峰值期较低,为20次左右,但降水的持续时间相对较长,进一步表明两种走向的山谷站之间降水结构存在差异。无论是山顶站还是山谷站,降水起始频数均在09时前后的降水谷值期最低,该时段降水的持续时间也最短。午后降水的发生频数在山顶站较高,1~2 h后山谷站小时降水事件的起始时间频数逐渐增加。

综上,色季拉山夏季小时降水事件以夜间和午后降雨为主。全部气象观测站的降水量均有夜间和午后两个日峰值。两种走向的山谷站夜间降水的峰值均略高于午后降水的峰值,而山顶站两者相当。准南北向山谷站降水发生频数和持续时间在三个降水峰值期的分布较为一致,而准东西向山谷站降水在夜间比午后发生频数更高,持续时间相对较短。

3 夏季小时强降水事件时空分布特征

上节对比了色季拉山9个气象观测站小时降水事件的特征,发现不同区域的降水特征存在差异。基于此,本节将进一步聚焦小时强降水事件,分析其不同区域间的统计特征与演变规律,以探究强降水条件下区域差异。

3.1 空间分布特征

色季拉山夏季小时强降水事件约贡献了夏季总降水量的52.6%。图5分别给出了色季拉山9个气象观测站夏季小时强降水事件占总降水事件的比值、小时强降水事件的降水强度、持续时间和发生频率的空间分布。色季拉山整体夏季小时强降水事件约占总降水事件的9%(图5a),比值在不同气象观测站之间差异较大。准南北向山谷站小时强降水事件占比较高,达到10.00%,而准东西向山谷站只有巴宜站出现了较高的小时强降水事件占比(10.50%)。山顶站的小时强降水事件占比略低于准南北走向山谷站。夏季小时强降水事件的平均持续时间约为8.4 h(图5b),显著高于小时降水事件。各气象观测站长历时小时强降水事件占总强降水事件的比例均大于70%(表2),表明色季拉山夏季小时强降水事件主要以长历时降水为主。与小时降水事件的特征相似,准南北走向山谷站的小时强降水持续时间比准东西走向山谷站长约1.2 h,但与小时降水事件不同的是山谷站持续时间比山顶站长约0.2 h。

色季拉山夏季小时强降水事件的发生频率约为

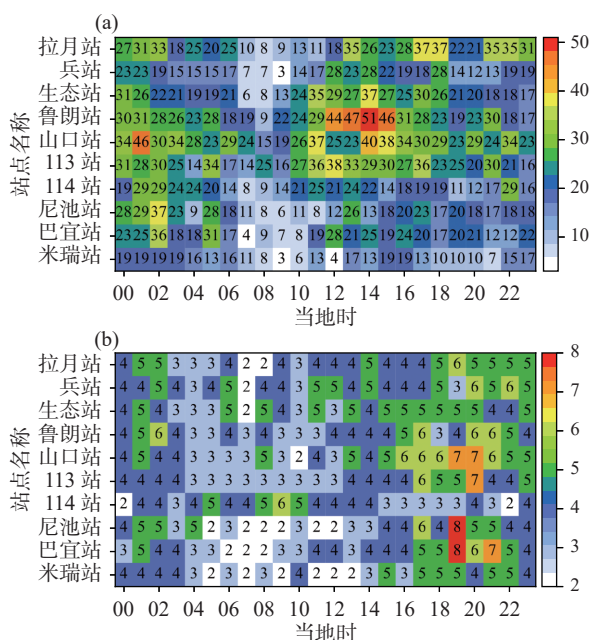


图4 2016—2021年6—8月色季拉山9个气象观测站小时降水起始时间频数(a,单位:次)和持续时间(b,单位:h)

日变化热力图

Fig. 4 Heatmaps of diurnal variations in the (a) frequency of hourly precipitation start times (unit: times) and (b) duration (unit: h) at 9 meteorological stations on the Sygera Mountains during June–August 2016–2021

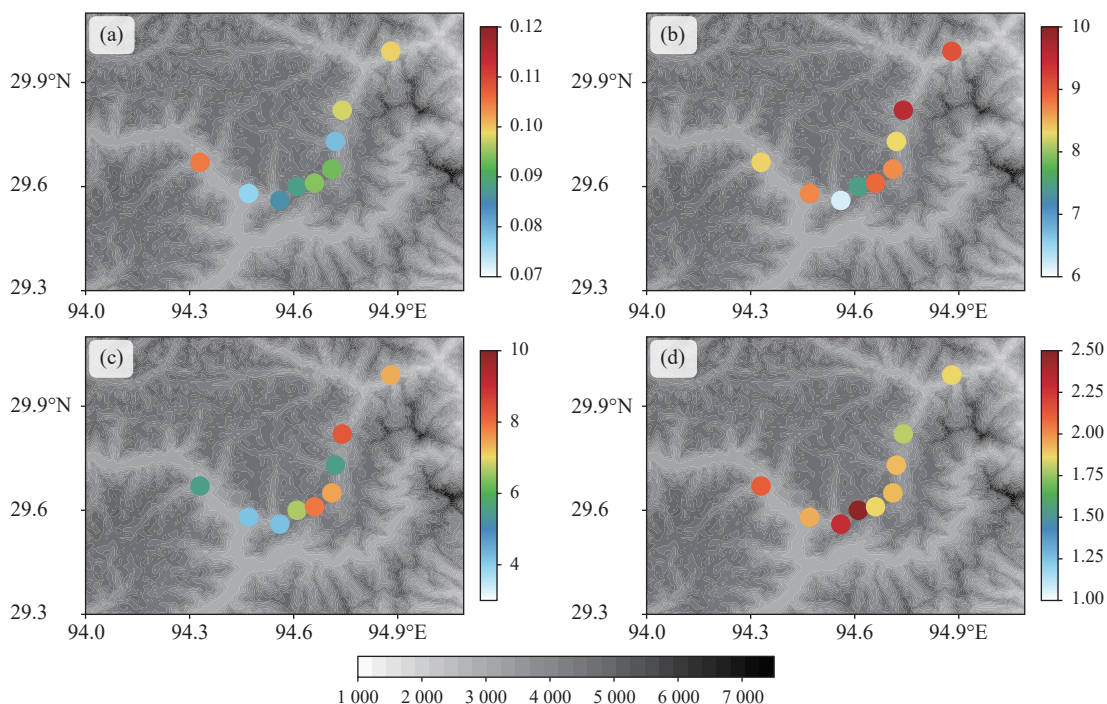


图 5 2016—2021 年 6—8 月色季拉山 9 个气象观测站平均小时强降水事件占小时降水事件比例 (a)、持续时间 (b, 单位: h)、降水频率 (c, 单位: %) 与降水强度 (d, 单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 空间分布 (灰色阴影为海拔高度, 单位: m)

Fig. 5 Spatial distributions of (a) the proportion of heavy hourly precipitation events to total hourly precipitation events, (b) duration (unit: h), (c) frequency (unit: %), and (d) intensity (unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) of mean heavy hourly precipitation events recorded at the nine meteorological stations in the Sygera Mountains during the June-August from 2016 to 2021 (The grey shading represent terrain height, unit: m)

6% (图 5c), 约为小时降水事件发生频率的四分之一。不同气象观测站间小时强降水事件发生频率的特征与强降水事件占总降水事件的比例 (图 5a) 相似, 即准南北向山谷站高于准东西向山谷站和山顶站。色季拉山夏季小时强降水事件的降水强度为 $2.12 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 约为小时降水事件的四倍。与小时降水事件相似, 气象观测站间小时强降水事件的降水强度随海拔高度的变化不明显, 准东西向山谷站的小时强降水事件的降水强度显著高于准南北向山谷站, 山顶站显著高于山谷站 (图 5d)。与小时降水事件相比, 色季拉山小时强降水事件呈现出强降水强度、长持续时间和低发生频率的特征, 不同区域气象观测站之间小时强降水事件的特征与小时降水事件的特征相似。

3.2 日变化特征

图 6 为色季拉山夏季小时强降水事件平均的小时降水量的日变化分布, 小时强降水事件降水量的日变化特征与小时降水事件呈现出不同的特征。所有气象观测站平均的降水量日变化曲线大致呈现出三峰结构, 三个峰值分别出现在 00 时、14 时和 18 时, 谷值出现在 09 时、15 时和 20 时。小时强降水事件降水量在午后和夜间的峰值相当。在 14 时左右的峰值期, 准东西向山谷站的降水量显著高于准

南北向山谷站, 而在其他时段, 两种走向山谷站的降水量相差不大。山顶站降水量在不同峰值期波动较大, 在 14 时降水量峰值最强, 18 时和夜间的峰值相对较弱。

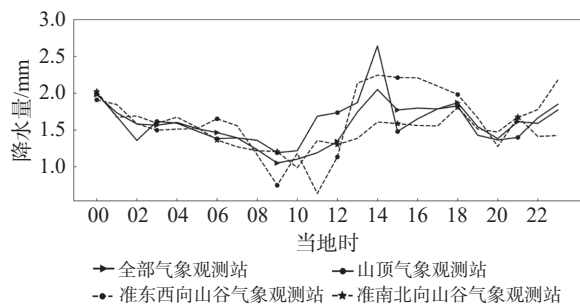


图 6 同图 3, 但为小时强降水事件

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the hourly heavy precipitation events

色季拉山夏季小时强降水事件主要起始于午后到傍晚 (12—17 时) 及夜间 (00—02 时) (图 7a), 后半夜至上午 (04—10 时) 时段很少发生小时强降水事件。与小时降水事件的特征相似, 山顶站午后 (12—17) 时的小时强降水事件多于夜间, 傍晚时段小时强降水事件的持续时间偏长 (图 7b)。准南北向山谷站在午后至夜间的各时段内强降水发生频率大致相当, 但强降水的持续时间在上午时段 (06—12 时) 最长, 午后次之。与小时降水事件特征不同的是, 准东

西向山谷站在午后和夜间两个时段内强降水的发生频数大致相当,但强降水的持续时间在午后到傍晚时段相对较长。

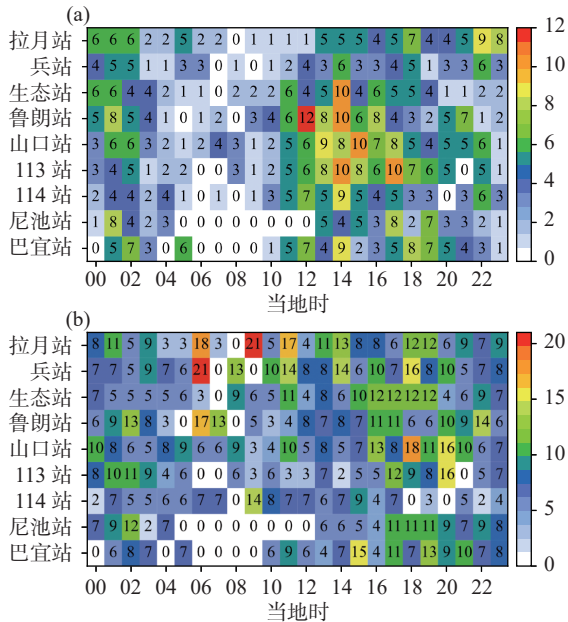


图7 同图4, 但为小时强降水事件

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for the hourly heavy precipitation events

综上, 色季拉山地区夏季小时强降水事件约占总降水事件的9%左右, 小时强降水事件主要发生在午后到傍晚间, 且持续时间也相对较长。夏季小时强降水事件的特征与小时降水事件类似, 准东西向

山谷站以降水强度大、发生频率低的强降水事件为主, 而准南北向山谷站以降水强度较小、发生频率高、持续时间长的小时强降水事件为主, 山顶站以持续时间短、发生频率高的小时强降水事件为主。

4 准东西向和准南北向山谷站降水差异的成因

前文分析表明, 色季拉山夏季小时降水事件中, 准南北向山谷站的降水量和发生频率均显著高于准东西向山谷站, 本节将从两种走向山谷站降水偏多时次的水汽条件以及地形降水率的特征进一步深入探究地形分布对该地区夏季降水分布的影响。

4.1 水汽条件对降水差异的影响

基于第1.4节的方法筛选了两种走向山谷站降水偏多时次进行合成分析(即将筛选出的所有时刻相应的物理量场求平均)。其中, 准东西向山谷站降水偏多时次共111个, 占其总降水时次的4.6%。准南北向山谷站降水偏多时次共167个, 占其总降水时次的5.5%。

色季拉山及周边地区夏季平均的整层水汽含量分布呈南多北少的特征(图8a), 其南侧存在较强的水汽梯度分布, 色季拉山及其以南地区盛行的西南风有利于将水汽向山谷输送。两种走向山谷站降水偏多时次的整层水汽和风场分布与夏季平均相似(图略), 其与夏季平均的差值场更能体现出两种走向山谷站降水特征差异的成因(图8b、c)。

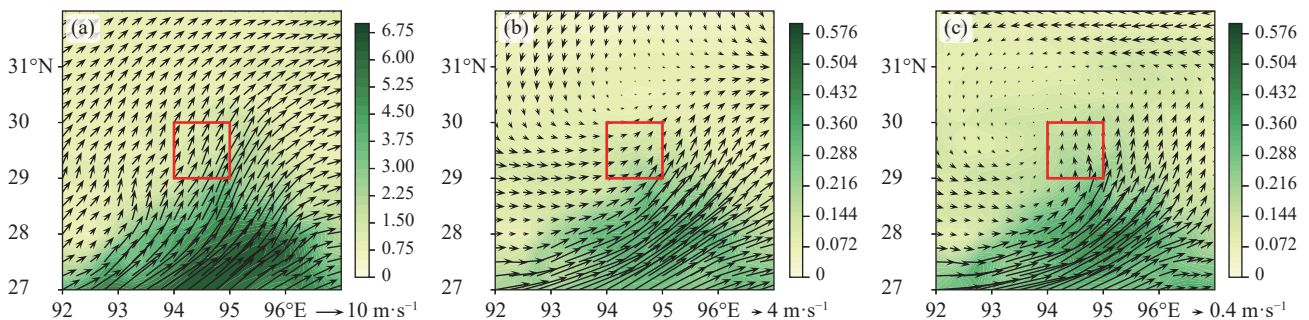


图8 2016—2021年6—8月色季拉山夏季平均(a), 准东西向山谷站降水偏多时次异常(b), 准南北向山谷站降水偏多时次异常(c) 整层水汽含量(填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 和水平风场(箭头, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的合成场(红色框为色季拉山)

Fig. 8 Composite fields of vertically integrated water vapor content (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) and horizontal wind (vectors, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of (a) summer mean, (b) anomalies during wet periods at quasi-east-west oriented valley stations, (c) anomalies during wet periods at quasi-north-south oriented valley stations over the Sygera Mountains during the June-August from 2016 to 2021 (The red box denotes the Sygera Mountains)

当准东西向山谷站降水偏多时, 色季拉山及其以西地区偏西风异常增强, 此时准东西向的山谷为迎风坡, 有利于降水发生, 而准南北向的山谷为背风坡, 降水较准东西向山谷站弱。当准南北向山谷站降水偏多时, 色季拉山以南地区偏西南风异常增强, 而色季拉山地区以偏南风增强为主, 有利于更多的

水汽向色季拉山地区输送。根据图1所示的色季拉山地区地形分布, 色季拉山以南的异常西南气流和色季拉山地区的异常偏南风有利于更多的水汽穿过色季拉山以南的东北—西南向山谷, 直达准南北向山谷地带, 造成这里降水偏多。而水汽在到达准东西向山谷前, 需要翻越色季拉山西南部的山体, 损失

一部分水汽,导致准东西向山谷站降水较准南北向山谷站弱。由于夏季色季拉山地区整体盛行偏南气流,有利于准南北向山谷站降水的发生,导致准南北向山谷站在降水量和降水频率上均高于准东西向山谷站。

4.2 地形对降水差异的影响

根据第 1.5 节中公式 (2), 使用 ERA5-land 资料进行计算。为验证 ERA5-Land 资料在研究区域的适

用性,首先检查其 2016—2021 年夏季平均小时降水量的空间分布 (图 9a) 特征,可见虽然 ERA5-Land 资料的降水量略低于气象观测站降水量 (图 2a),但二者空间分布特征基本一致,即准南北向山谷的夏季平均小时降水量高于准东西向山谷。基于上述资料适用性验证结果,可进一步利用 ERA5-Land 资料计算两种走向山谷的地形降水率,探讨地形动力和热力作用对降水分布的影响。

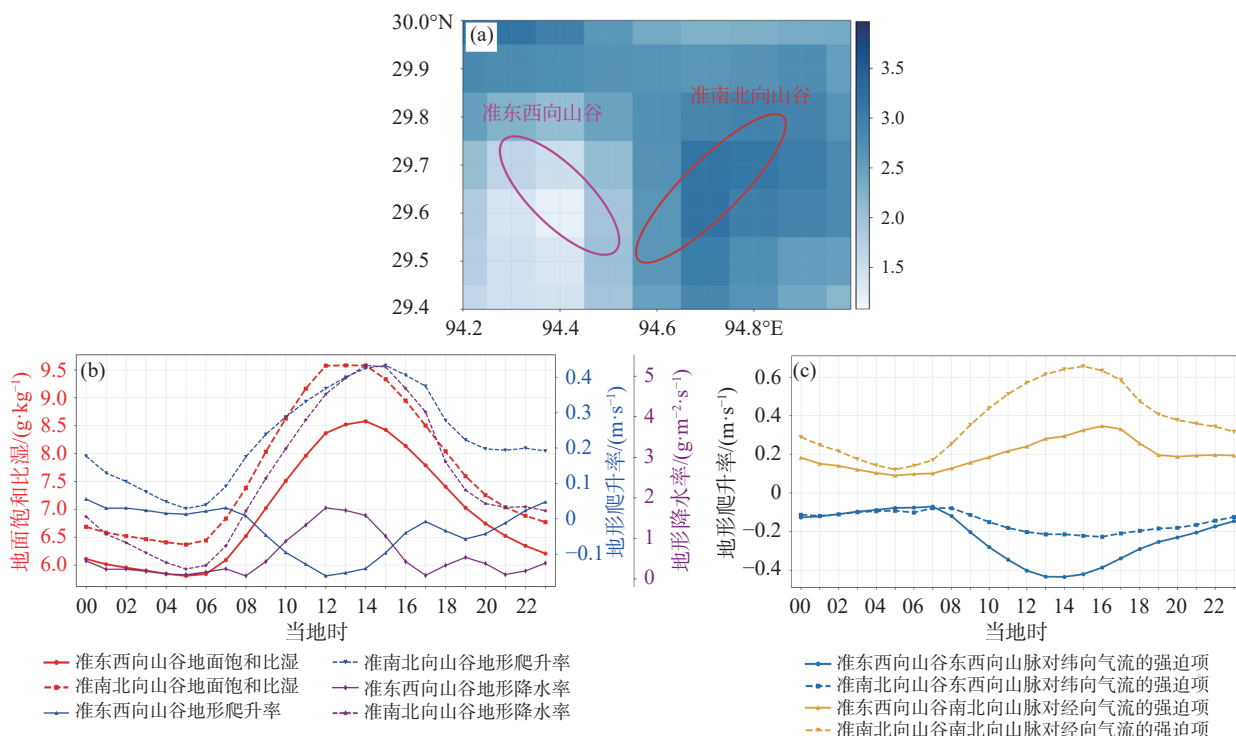


图 9 2016—2021 年 6—8 月色季拉山平均小时降水量 (a, 单位: mm)、两种山谷的地形降水率 (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 地形爬升率 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和地面饱和比湿 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 日变化 (b) 和两种山谷地形爬升率分量日变化 (c)

Fig. 9 The (a) mean hourly precipitation (unit: mm), (b) diurnal variations of orographic precipitation rate (unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), topographic uplift rate (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and surface saturated specific humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) for the two valley types, (c) diurnal variations of the components of topographic uplift rate for the two valley types over the Sygera Mountains during June–August 2016–2021

图 9b 给出两种走向山谷地形降水率的日变化特征,可见与准南北向山谷站降水量更高的结论一致,准南北向山谷的地形降水率始终高于准东西向山谷,这一差异源于地形强迫与热力作用的协同调控:两种走向山谷的地形降水率、地面饱和比湿及地形爬升率 ($\vec{U} \cdot \nabla h$) 项均呈 11—16 时和 22—02 时双峰值特征,但准南北向山谷的峰值更高。地面饱和比湿在午间和夜间的峰值为降水提供了更充足的水汽条件,地形爬升率的峰值也表明气流沿地形抬升的动力强迫更强。

进一步对地形爬升率的经向和纬向分量进行分析 (图 9c),发现两种走向山谷中南北向山脉对经向气流的强迫项 ($v \cdot \frac{\partial h}{\partial y}$) 的日变化趋势与地形降水率相

似,而东西向山脉对纬向气流的强迫项 ($u \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$) 则刚好相反,表明相较于纬向风,经向风对该地区降水的促进作用更强。同时,南北向山脉对经向气流的强迫项 ($v \cdot \frac{\partial h}{\partial y}$) 均高于准东西向山谷,这一结论与上文偏南风水汽输送更有利于准南北向山谷站降水的结论一致。

综上,两种走向山谷的降水特征及其差异源于地形热力与动力作用的协同影响。地面饱和比湿和经向风的日变化主导了两种走向山谷站降水的日变化特征,二者在准南北向山谷造成的降水率均高于准东西向山谷,导致准南北向山谷的降水量高于准东西向山谷。

5 结论与讨论

本文基于2016—2021年6—8月色季拉山9个气象观测站小时降水资料、ERA5再分析和ECMWF提供的ERA5-Land逐小时降水量、10 m风速、2 m气温的再分析资料,分析了色季拉山夏季小时降水和小时强降水事件的时空分布特征,对比了不同海拔高度和山谷走向影响下小时降水的空间分布特征,并揭示了地形对小时降水特征的影响。得到以下主要结论:

(1) 色季拉山夏季以持续时间为1~3 h的短历时降水事件最为频发,降水主要发生在夜间和午后,降水量在03时达到峰值,午后至傍晚为另一个高值时段,其中14时和18时前后相对较高。

(2) 色季拉山夏季小时强降水事件约贡献了夏季总降水量的52.6%,以持续时间大于6 h的长历时降水事件为主,具有降水强度高、持续时间长、发生频率低的特征。小时强降水事件降水量的日变化特征与小时降水事件类似,同样主要发生在午后到傍晚时段,夜间次之,傍晚时段发生的强降水事件的持续时间相对较长。与小时降水事件不同的是,小时强降水事件的降水量在午后和夜间相当。

(3) 受海拔高度和地理位置的影响,色季拉山夏季不同区域的小时降水与小时强降水事件存在显著空间差异。就小时降水事件而言,山顶站的降水量、频率和强度均高于山谷站;山顶站在夜间和午后均出现降水峰值,而山谷站以夜间峰值占优。准南北向山谷以高频、长历时事件为主,准东西向山谷则以低频、强度略高的事件为主。准南北向山谷降水起始时间在夜间和午后峰值期分布较均匀,而准东西向山谷则集中于夜间。对于小时强降水事件,准东西向山谷以高降水强度、低频事件为主,准南北向山谷则以低降水强度、高频、长历时事件为主。

(4) 两种走向山谷的降水特征及其差异源于地形热力作用与动力作用的协同影响:地面饱和比湿和经向风的日变化主导了两种走向山谷站降水的日变化特征,二者在准南北向山谷造成的降水率均高于准东西向山谷,导致准南北向山谷的降水量高于准东西向山谷。

本文揭示了色季拉山地区夏季小时降水事件与小时强降水事件的空间分布及时间演变特征,从降水频率、降水强度、持续时间等多维度分析色季拉山的降水特征,并从合成分析与地形降水率的角度,揭示了局地地形对小时降水空间分布的影响。然而,由于该地区地形复杂、气象观测站稀少,难以找到与

站点降水特征相匹配的高分辨率再分析资料或卫星资料来分析降水区域性差异产生的机制。同时,过去的卫星资料在该地区对降水的表征并不十分准确,不能准确表征山谷和山顶处降水的差异(Chen et al., 2012),对于GPM(Global Precipitation Measurement)等最新的降水产品,尚未有人对该地区的数据可靠性进行验证。因此,本文仅利用气象观测站观测资料来揭示区域内降水特征的差异,并讨论了地形作用,但对这种差异的形成机制并未涉及。未来可以借助中尺度模式进行高精度模拟,对色季拉山降水特征进行模拟,并通过敏感性试验进一步揭示降水区域性差异的成因,从而加深对高原东南缘复杂地形降水形成机制的理解。

参考文献(References):

- 次旺扎西,旦增伦珠,次央,等.2025.青藏高原地区不同海拔高度气温的变化特征[J].高原山地气象研究,45(1):32-38. Ci W Z X, Dan Z L Z, Ci Y, et al. 2025. Characteristics of temperature changes at different altitudes over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 45(1):32-38 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2025.01.004
- 段春锋,曹雯,缪启龙,等.2013.中国夏季夜雨的空间分布特征[J].自然资源学报,28(11):1935-1944. Duan C F, Cao W, Miao Q L, et al. 2013. Spatial distribution of night rainfall in summer over China [J]. Journal of Natural Resources, 28(11):1935-1944 (in Chinese). doi:10.11849/zrxyxb.2013.11.010
- 计晓龙,吴昊旻,黄安宁,等.2017.青藏高原夏季降水日变化特征分析[J].高原气象,36(5):1188-1200. Ji X L, Wu H W, Huang A N, et al. 2017. Characteristics of the precipitation diurnal variation over the Qinghai-Tibetan Plateau in summer [J]. Plateau Meteorology, 36(5): 1188-1200 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00119
- 李若莹,姚秀萍.2024.青藏高原东南部-川西地区夏季小时极端降水事件特征研究[J].高原气象,43(5):1113-1124. Li R Y, Yao X P. 2024. Characteristics of summer hourly extreme rainfall events in the region of southeastern Xizang Plateau-western Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology, 43(5):1113-1124 (in Chinese) doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2024.00005
- 李嗣源,郭学良,唐洁,等.2023.青藏高原东南局地山谷风环流在一次地形云和降水形成中的作用[J].大气科学,47(5):1576-1592. Li S Y, Guo X L, Tang J, et al. 2023. Role of local mountain-valley wind circulation in the formation of an orographic cloud and precipitation-event on the southeastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 47(5):1576-1592 (in Chinese) doi:10.3878/j.issn.10069895.2202.21257
- 李争辉,罗亚丽.2021.1980—2017年南海季风爆发前后华南前汛期降水统计特征对比分析[J].暴雨灾害,40(2):101-110. Li Z H, Luo Y L. 2021. Statistical characteristics of pre-summer rainfall over South China before and after South China Sea monsoon onset from 1980 to 2017 [J]. Torrential Rain and Disasters, 40(2):101-110 (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.001

- 刘菊菊,游庆龙,王楠.2019.青藏高原夏季云水含量及其水汽输送年际异常分析[J].*高原气象*,38(3):449–459. Liu J J, You Q L, Wang N. 2019. Interannual anomaly of cloud water content and its connection with water vapor transport over the Qinghai-Tibetan Plateau in summer [J]. *Plateau Meteorology*,38(3):449–459 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00138
- 刘俏华,姚秀萍,马嘉理,等.2024.青藏高原夏季极端降水研究进展与展望[J].*大气科学学报*,47(5):737–754. Liu Q H, Yao X P, Ma J L, et al. 2024. Research progress and prospect on summer extreme precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,47(5):737–754 (in Chinese) doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240217001
- 刘雪梅,张明军,王圣杰,等.2016. 2008—2014 年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素[J].*地理学报*,71(5):754–767. Liu X M, Zhang M J, Wang S J, et al. 2016. Diurnal variation of summer precipitation and its influencing factors of the Qilian Mountains during 2008–2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*,71(5):754–767 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb201605005
- 罗伦,旦增,朱立平,等.2021.藏东南色季拉山气温和降水垂直梯度变化[J].*高原气象*,40(1):37–46. Luo L, Dan Z, Zhu L P, et al. 2021. Vertical gradient changes of temperature and precipitation in the Sygera Mountains, Southeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plateau Meteorology*,40(1):37–46 (in Chinese) doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00123
- 马婷婷,吴国雄,刘屹岷,等.2018.青藏高原地表位涡密度强迫对 2008 年 1 月中国南方降水过程的影响 I: 资料分析[J].*气象学报*,76(6):870–886. Ma T T, Wu G X, Liu Y M, et al. 2018. Impacts of surface potential vorticity density forcing over the Tibetan Plateau on the evolution of precipitation over southern China in January 2008. Part I: Data analysis [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,76(6):870–886 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.052
- 马玉坤,马俊强,李菲,等.2022.青藏高原边坡临夏地区短时强降水时空分布及海拔特征分析[J].*沙漠与绿洲气象*,16(3):68–74. Ma Y K, Ma J Q, Li F, et al. 2022. Spatial and temporal characteristics of short-time strong rainfall and its altitude distribution characteristics in Linxia at plateau slope [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,16(3):68–74 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.010
- 毛江玉,吴国雄.2012.基于 TRMM 卫星资料揭示的亚洲季风区夏季降水日变化[J].*中国科学:地球科学*,55(42):554–556. Mao J Y, Wu G X. 2012. Diurnal variations of summer precipitation over the Asian-monsoon region as revealed by TRMM satellite data [J]. *Science China Earth Sciences*,55(42):554–556 (in Chinese) doi:10.1007/s11430-011-4315-x
- 裴宇菲,朱敏红,张少波.2023.强弱南亚季风不同发展期对青藏高原垂直环流的影响[J].*高原气象*,42(6):1402–1415. Pei Y F, Song M H, Zhang S B. 2023. Influence of different development periods of the strong and weak South Asian Monsoon on the vertical circulation over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *Plateau Meteorology*,42(6):1402–1415 doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00022
- 汤国安.2019.中国数字高程图 (1KM)[OL].国家青藏高原数据中心. Tang G A. 2019. China digital elevation map (1KM) [OL]. National Data Center for Qinghai-Tibet Plateau Science. <https://data.tpdc.ac.cn/>
- zhans/data/12e91073-018144bf-8308-c50e5bd9a734
- 杨雯婷,孙建华,傅慎明,等.2024. 1981—20 年华南地区区域性极端降水事件研究[J].*大气科学*,48(3):906–922. Yang W T, Sun J H, Fu S M, et al. 2024. Study on regional extreme precipitation events over South China during 1981–2020 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,48(3):906–922 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2211.22056
- 姚秀萍,包晓红,刘俏华,等.2021b.近 10 a 高原切变线研究进展综述[J].*暴雨灾害*,40(6):569–576. Yao X P, Bao X H, Liu Q H, et al. 2021. Review on the research advances of the Tibetan Plateau shear line in the last decade [J]. *Torrential Rain and Disasters*,40(6):569–576 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.001
- 姚秀萍,马嘉理,刘俏华,等.2021a.青藏高原夏季降水研究进展[J].*气象科技进展*,11(3):66–74. Yao X P, Ma J L, Liu Q H, et al. 2021a. Research progress on summer precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,11(3):66–74 doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.009
- 姚檀栋,余武生,郭光剑,等.2019.青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾害风险[J].*科学通报*,64(27):2770–2782. Yao T D, Yu W S, Wu G J, et al. 2019. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Chinese Science Bulletin*,64(27):2770–2782 doi:10.1360/TB-2019-0246
- 尤焕苓,刘伟东,任国玉.2014. 1981—2010 年降水变化特征[J].*气候与环境研究*,19(1):69–77. You H L, Liu W D, Ren G Y. 2014. Variation characteristics of precipitation extremes in Beijing during 1981–2010 [J]. *Climatic and Environmental Research*,19(1):69–77 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12143
- 张硕,姚秀萍,巩远发.2019.基于客观判识的青藏高原横切变线结构及演变特征合成研究[J].*气象学报*,77(6):1086–1106. Zhang S, Yao X P, Gong Y F. 2019. A synthetic study of the structure and evolution characteristics of a meridionally-oriented shearline over the Tibetan Plateau based on objective identification [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,77(6):1086–1106 (in Chinese) doi:10.11676/qxxb2019.058
- 张德铨.2019.青藏高原边界数据总集[OL].国家青藏高原数据中心. Zhang Y L. 2019. Integration dataset of Tibet Plateau boundary [OL]. National Tibetan Plateau Third Pole Environment Data Center. doi:10.11888/Geogra.tpdc.270099
- 赵平,李跃清,郭学良,等.2018.青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应:第三次青藏高原大气科学试验[J].*气象学报*,76(6):833–860. Zhao P, Li Y Q, Guo X L, et al. 2018. The Tibetan Plateau surface atmosphere coupling system and its weather and climate effects: The Third Tibetan Plateau Atmospheric Scientific Experiment [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,76(6):833–860 doi:10.11676/qxxb2018.060
- 周立波,王雅萱,邹捍,等.2025.青藏高原典型山地低层大气过程观测及其研究进展[J].*高原山地气象研究*,17(2):81–90. Zhou L B, Wang Y X, Zou H, et al. 2025. Observed research on the lower atmospheric processes over the Tibetan Plateau [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,17(2):81–90 (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2025.03.001
- Colton D E. 1976. Numerical simulation of the orographically induced precipitation distribution for use in hydrologic analysis [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,15:1241–1251. doi:10.1175/1520-0450

- Chen H M, Yuan W H, Li J, et al. 2012. A possible cause for different diurnal variations of warm season rainfall as shown in station observations and TRMM 3B42 data over the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(1):193–200. doi:10.1007/s00376-011-0218-1
- Chen M C, Yao X P. 2023. The characteristics and mechanisms of diurnal variation in summer precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Climate Dynamics*, 60(7-8):2405–2418. doi:10.1007/s00382-022-06423-w
- Li J. 2018. Hourly station-based precipitation characteristics over the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 38(3):1560–1570. doi:10.1002/joc.5281
- Li J, Chen T and Li N. 2017. Diurnal variation of summer precipitation across the central Tian Shan Mountains [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56:1537–1550. doi:10.1175/JAMC-D-16-0265.1
- Li J, Yu R, Yuan W H, et al. 2011. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years [J]. *Journal of Climate*, 24:5683–5690. doi:10.1175/JCLI-D-11-00009.1
- Liu Y M, Wei Y, Jiang J L, et al. 2024. The Tibetan Plateau bridge: Influence of remote teleconnections from extratropical and tropical forcings on climate anomalies [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 17(1):100396. doi:10.1016/j.aosl.2023.100396
- Ma T T, Wu G X, Liu Y M, et al. 2022. Abnormal warm sea-surface temperature in the Indian Ocean, active potential vorticity over the Tibetan Plateau, and severe flooding along the Yangtze River in summer 2020 [J]. *Royal Meteorological Society*, 148:1001–1019. doi:10.1002/qj.4243
- Pan X, Fu Y, Yang S, et al. 2021. Diurnal Variations of Precipitation over the Steep Slopes of the Himalayas Observed by TRMM PR and VIRS [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38:641–660. doi:10.1007/s00376-020-0246-9
- Singh P, Nakamura K. 2009. Diurnal variation in summer precipitation over the central Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114:D20107. doi:10.1029/2009JD011788
- Sun J, Yao X P, Deng G W, et al. 2021. Characteristics and synoptic patterns of regional extreme rainfall over the central and eastern Tibetan Plateau in boreal summer [J]. *Atmosphere*, 12(3):379. doi:10.3390/atmos12030379
- Smith. 2019. 100 years of progress on mountain meteorology research [J]. *Meteorological Monographs*, 59(20):20.1–20.73. doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0022.1
- Wang X J, Pang G J, Yang M X. 2018. Precipitation over the Tibetan Plateau during recent decades: a review based on observations and simulations [J]. *International Journal of Climatology*, 38:1116–1131. doi:10.1002/joc.5246
- Wang M R, Yao X P, Wang J, et al. 2023. Spatial heterogeneity of summer rainfall trends over the Tibetan Plateau contributed by different rainfall intensities [J]. *Remote Sensing*, 15(23):5587. doi:10.3390/rs15235587
- Zhang M K, Li J, Li N. 2021. Fine-Scale Characteristics of Summer Precipitation over Cang Mountain [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60:1285–1300. doi:10.1175/JAMC-D-20-0220.1
- Zhu Z, Wang M R, Wang J, et al. 2023. Diurnal variation characteristics of the surface sensible heat flux over the Tibetan Plateau [J]. *Atmosphere*, 14(1):128. doi:10.3390/atmos14010128

(责任编辑 唐国瑛)