



横断山区南部干湿坝子降水特征差异与成因分析

高晓云 徐安伦 闵颖

Analysis of precipitation characteristic differences and their causes between dry and wet basins on the southern section of the Hengduan Mountains

GAO Xiaoyun, XU Anlun, MIN Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2024221>

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

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>

沙颍河流域汛期（5—9月）不同短历时极端降水精细特征分析

Analysis of the detailed characteristics of different short-duration extreme precipitation events in the Shaying River basin during rainy season (May–September)

暴雨灾害. 2025, 44(4): 443–451 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024–164>

中国南方极端降水的不同变化特征分析

Analysis of different characteristics of extreme precipitation in Southern China

暴雨灾害. 2025, 44(3): 390–399 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023–204>

引发内蒙古汛期暴雨洪涝灾害的降水事件雨强特征分析

Analysis of rainfall intensity characteristics of precipitation events causing rainstorm and flood disaster in flood season in Inner Mongolia

暴雨灾害. 2023, 42(3): 346–352 <https://doi.org/10.12406/byzh.2021–224>

基于分钟降水数据的长沙市场次降水事件特征分析

Characteristic analysis of precipitation events in Changsha city based on minute rainfall data

暴雨灾害. 2021, 40(4): 437–443 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004–9045.2021.04.012>

湘中地区夏季极端小时降水和极端降水事件的时空分布及其环流特征

Spatial and temporal distribution and circulation characteristics of extreme hourly precipitation and precipitation events in central Hunan during summer

暴雨灾害. 2026, 45(4): 523–532 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025–220>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

高晓云,徐安伦,闵颖.2026.横断山区南部干湿坝子降水特征差异与成因分析[J].暴雨灾害,45(5):702–711. GAO Xiaoyun, XU Anlun, MIN Ying. 2026. Analysis of precipitation characteristic differences and their causes between dry and wet basins on the southern section of the Hengduan Mountains [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(5):702–711 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–221

横断山区南部干湿坝子降水特征差异与成因分析

高晓云¹, 徐安伦², 闵颖³

(1. 云南省宾川县气象局, 宾川 671600; 2. 大理国家气候观象台/中国气象局大理山地气象野外科学试验基地/大理山地气象云南省野外科学观测研究站, 大理 671003; 3. 云南省气象台, 昆明 650034)

摘 要: 横断山区南部地形复杂,“地近雨异”现象突出,为揭示该区域降水分布特征的差异与成因,基于 2019—2023 年横断山区南部 213 个区域气象观测站和 12 个国家气象观测站以及 2004—2023 年宾川、大理两个国家气象观测站的小时降水数据,以宾川站和大理站为代表对比分析了干、湿坝子的降水特征差异,并结合 2019—2023 年大理天气雷达观测资料探讨了 2 个代表站共有降水事件降水差异的成因。结果表明:(1) 横断山区南段年降水量、降水频次分布呈现东少西多而降水强度差异较小的特征。湿坝子的年、月、日降水量及降水频次均高于干坝子。湿坝子降水集中于 8 月,而干坝子在 7 月达到峰值。(2) 湿坝子降水日变化呈单峰型,降水峰值出现在 05 时(北京时,下同),干坝子则呈双峰型,峰值出现在 05 时和 15 时。湿坝子的降水频次和强度夜间明显高于白天,干坝子则相反。(3) 干、湿坝子降水类型均以短历时降水为主,但湿坝子的平均降水时长比干坝子多 2 h,是区域降水的主要来源。共有降水事件中湿坝子主要表现为高频次、中长历时降水,而干坝子则以午后短历时强对流降水为主。(4) 共有降水事件的雷达回波多呈自西向东传播,传播过程中降水强度减弱,难以到达干坝子,导致湿坝子降水频次与持续时间普遍高于干坝子。研究成果可为横断山区南段精细化天气预报和区域水资源管理提供参考。

关键词: 横断山区; 干湿坝子; 降水特征; 降水事件差异

中图法分类号: P426.62⁺3

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2024–221

Analysis of precipitation characteristic differences and their causes between dry and wet basins on the southern section of the Hengduan Mountains

GAO Xiaoyun¹, XU Anlun², MIN Ying³

(1. Binchuan Meteorological Bureau of Yunnan Province, Binchuan 671600; 2. Dali National Climate Observatory/Dali Field Research Station for Mountain Meteorology of China Meteorological Administration/Dali Mountain Meteorology Observation and Research Station of Yunnan Province, Dali 671003; 3. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034)

Abstract: The southern section of the Hengduan Mountains is characterized by complex terrain and frequent meteorological disasters, with distinct local heterogeneity in precipitation distribution being frequently observed. To reveal the characteristics and causes of precipitation distribution in this region, this study utilized hourly precipitation data from 213 regional automatic weather stations and 12 national meteorological stations during 2019–2023, as well as two national stations (Binchuan and Dali) during 2004–2023. The differences in precipitation characteristics between typical dry and wet basins, represented by the Binchuan and Dali stations, were analyzed. The causes of these differences of joint precipitation event were further examined using Dali Doppler weather radar data during 2019–2023. The results are as follows. (1) The annual precipitation amount and frequency in the southern Hengduan Mountains generally displayed a trend of lower values in the east and higher values in the west, but the difference in precipitation intensity was relatively small. The annual, monthly, and daily precipitation amount and frequency of the wet basin were all higher than those of the dry basin. The precipitation in the wet basin peaked in August, while that in the dry basin reached its peak in July. (2) The diurnal variation of precipitation in the wet basin showed a single-peak pattern, with the peak occurring at 05:00 (BT, the same below). In the dry basin, it

收稿日期: 2024–12–17; 定稿日期: 2026–02–14

资助项目: 云南省气象局科研基金项目 (YZ202429); 国家自然科学基金项目 (42275163); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2025J147); 云南省科技计划项目 (202505AW340002)

第一作者: 高晓云, 主要从事山地气象预报技术研究。E-mail: gaoxiaoyunyijia@163.com

通信作者: 徐安伦, 主要从事山地气象学、大气边界层、陆面过程、碳达峰碳中和监测评估技术应用研究。E-mail: xualun@126.com

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

presented a bimodal pattern, with peaks occurring at 05:00 BT and 15:00 BT. The frequency and intensity of precipitation in the wet basin were significantly higher during nighttime than during the daytime, while an opposite diurnal distribution was observed in the dry basin. (3) Short-duration precipitation events dominated both the dry and wet basins. However, the average precipitation duration in the wet basin was 2 h longer than that in the dry basin, making it the primary contributor to regional precipitation. During regional coincident precipitation events, the wet basin was characterized by high-frequency, medium- to long-duration precipitation, whereas in the dry basin, precipitation was mainly contributed by short-duration convective precipitation occurring in the afternoon. (4) The diurnal variation of radar reflectivity factor during coincident precipitation events indicated that precipitation systems generally propagated from west to east. During the propagation, the intensity tended to weaken, making it difficult to reach the dry basin. This resulted in the higher frequency and duration of precipitation in the wet basin compared to the dry basin. These findings provide a reference for refined weather forecasting and regional water resources management in the southern section of the Hengduan Mountains.

Key words: Hengduan Mountains; dry and wet basins; precipitation characteristics; differences in precipitation events

引言

降水的时空分布及其变化特征不仅是区域气候研究的核心问题,也是精细化天气预报与水资源管理的关键因素。研究表明,不同区域的降水时空特征存在显著差异,尤其在高原、盆地等复杂地形区域,地形抬升效应、局地环流及大尺度天气系统的相互作用与降水的分布和强度变化紧密相连(杨霞等, 2020; 张涛等, 2022; 冯亮亮等, 2026)。例如,川渝地区的“夜雨”特征(董新宁等, 2023; 李强等, 2026)、祁连山降水事件的地形强迫效应(付双喜等, 2021)以及青藏高原及其周边地区频发的极端降水事件(王灵芝等, 2022; 王灏等, 2023)等研究均表明降水的时空分布及其演变特征受到区域地形条件和气候背景共同影响。降水的区域特征研究有助于认识降水与地形、环流及下垫面条件之间的相互作用关系,深化对极端降水事件发生机制的理解(Li et al., 2008; 赵玮等, 2022; 季宗虎等, 2023)。此外,针对中小尺度天气系统的研究也表明,大尺度环流、地形及局地动力过程在调控降水强度与频次方面有重要作用(吴天贻等, 2021; 李君等, 2022; 李生辰等, 2022)。这些成果为理解复杂地形区降水的形成机理、提升短时临近降水预报精度提供了重要理论支撑,也为本文聚焦区域降水特征分析提供了有益启示。

横断山区是典型的高原山地区域,高山深谷平行排列,其间镶嵌着众多坝子,形成复杂的纵向岭谷地形。受复杂地形与气候条件共同作用,区域降水时空分布极不均匀,“地近雨异”现象显著,短时强降水、冰雹、雷暴等强对流天气突出,暴雨洪涝、滑坡泥石流等灾害频发。研究表明,横断山区降水分布受地形抬升、海拔高度及山谷格局等因素影响,整体呈由西南向东北递减的空间特征,不同山谷与坝子之间降水差异明显(Li et al., 2011)。横断山区最大日降水量总体表现为由北向南递增的空间分布特征,

而时间变化趋势整体不显著;除冬季外,最大日降水的离散程度在不同时间尺度上均与海拔和纬度呈显著负相关关系(Yu et al., 2020)。横断山区极端降水分布同样呈由西南向东北递减,并随海拔升高而减弱;同时极端降水指数与年降水量显著正相关(Zhang et al., 2014)。进一步研究指出,横断山区复杂山地地形通过改变低层水汽输送路径,增强气流辐合以及调节局地环流结构,对区域降水的形成和空间分布产生显著影响。数值模拟结果表明,横断山脉抬升可使区域降水增加约 25%,而深切河谷地形则进一步增强局地降水过程,说明复杂地形起伏是调制横断山区降水空间差异的重要动力因素(Xiang et al., 2024)。近年来,以横断山区南段苍山为代表的局地天气研究表明,在弱天气尺度强迫背景下,陡峭山地及平行岭谷地形可通过积聚水汽和不稳定能量、降低自由对流高度,并形成持续的低层辐合,促进夜间对流触发和发展(Zhao et al., 2026)。苍山山地降水试验进一步证实,复杂山地地形及山谷环流能够显著调制局地三维风场结构和降水空间分布,为揭示横断山区南段局地降水增强机制提供了重要观测依据(Li et al., 2026)。尽管已有研究从区域尺度和典型个例两个方面揭示了横断山区降水及局地天气过程的基本特征,但针对局地长期降水差异及其形成机制的研究仍较为薄弱。

横断山区南段有两个典型干、湿坝子,即宾川坝子和大理坝子,两个坝子间距离较近(38 km),海拔差异较小。处于坝子间的宾川国家基本气象站(以下简称宾川站)和大理国家基准气候站(以下简称大理站)1991—2020年观测资料显示,大理站年平均降水量为 1 038.0 mm,而宾川站年平均降水量仅为 547.0 mm,约为大理站的一半,呈现出典型的“地近雨异”现象。对两地近 5 a(2019—2023 年)暴雨洪涝灾害特征的分析也发现,干坝子(宾川)暴雨灾害造成的经济损失远超湿坝子(大理),约为湿坝子的

16.7 倍,且多由短时强降水引起。因此,开展干、湿坝子降水特征差异及成因研究,对于深化对横断山区南段复杂地形区降水形成机制的认识,提高区域暴雨监测预警和防灾减灾能力具有重要意义。

本文利用横断山区南段 2019—2023 年 213 个区域气象观测站(以下简称区域站)和 12 个国家气象观测站(以下简称国家站),以及 2004—2023 年宾川、大理两个国家站的小时降水数据,并结合 2019—2023 年大理多普勒天气雷达观测资料,以宾川站和大理站分别作为干、湿坝子的代表站点,对比分析干湿坝子的降水特征及差异,并探讨降水差异的形成原因。本文旨在揭示横断山区南段典型干湿坝子的降水局地差异,为复杂地形条件下精细化天气预报、区域水资源管理和防灾减灾规划提供科学依据,同时为认识复杂地形背景下降水过程提供参考。

1 研究区域概况、资料及方法

1.1 研究区域概况

横断山区(96°20′—104°30′ E, 24°40′—34°00′ N)位于青藏高原东南部,与云贵高原相邻(图 1)。海拔高度由西北向东南递减,影响中国周边国家和中国西部的气候与生态环境(Zhang et al., 2014)。横断山区地处典型的季风气候区,受南亚季风的控制,同时也受东亚季风的影响,此外,还受青藏高原季风和西风带的影响(Ning et al., 2012),山地地貌复杂,气候差异较大(Li et al., 2011; Zhu et al., 2012)。本文研究区域位于横断山区南段(图 1 红色显示区域),代表湿坝子的大理站位于苍山、洱海之间,代表干坝子的宾川站位于大理站的东侧,两个代表站点的直线距离约为 38 km,海拔相差 476.4 m。

1.2 资料说明

由于 2019 年后区域自动站网布局稳定、资料完整,本文选取 2019—2023 年大理州境内 213 个区域和 12 个国家站经质量控制后的小时降水数据,分析横断山区南段的降水空间分布特征;选取大理和宾川两个国家站自开展小时降水观测以来(2004—2023 年)逐小时降水数据,分析干湿坝子代表站的降水差异特征;为了保证与区域站资料时间一致,同时保证资料质量,选取 2019—2023 年大理天气雷达站回波数据,分析 2 站共有降水事件中雷达回波反射率因子的差异特征,探讨干湿坝子的降水差异成因。以上资料均来源于大理白族自治州气象局质控后的气象站站点数据及雷达站数据。

1.3 方法介绍

1.3.1 降水相关定义

本文对小时降水数据进行统计,将降水量达到或超过 0.1 mm 的时次定义为有效降水时次,对应时段内的降水量称为有效降水量(单位: mm)。所有有效降水量的总和定义为累计降水总量(单位: mm)。有效降水的总时次定义为降水频次(单位: 次)。累计降水量与降水频次的比值定义为降水强度(单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)(张涛等, 2022)。

1.3.2 单站降水事件

单站降水事件采用 Li 等(2008)给出的定义:将连续 2 h 以上无有效降水后,出现的第一个降水大于等于 0.1 mm 的时刻记为降水事件开始,之后连续 2 h 时无有效降水则判定此次降水事件结束,从开始到结束所经历的时间记为此次降水事件的持续时间,累计的降水总量记为过程累计雨量。采用杨萍等(2017)对降水事件的分析方法,将降水事件按持

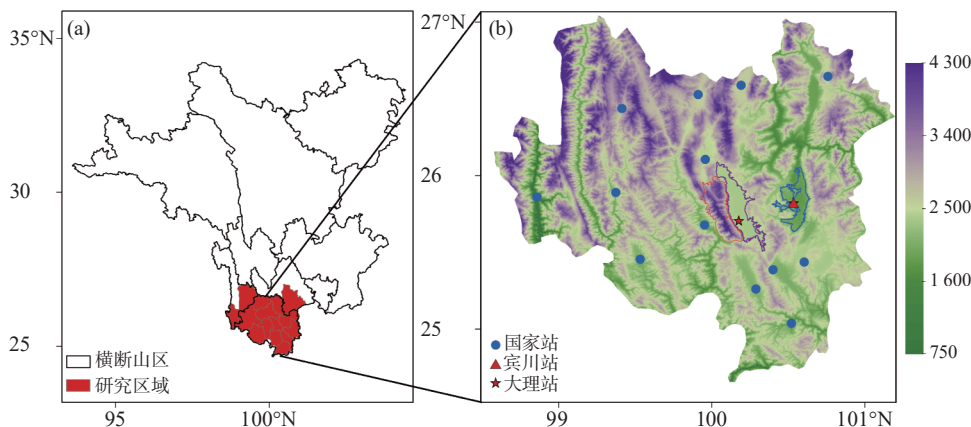


图 1 横断山区地理位置 (a) 及研究区域高程 (b, 单位: m) 图 (图 b 中红色线区域表示苍山, 紫色线区域表示湿坝子, 蓝色线区域表示干坝子, 下同)

Fig. 1 The (a) geographical location of the Hengduan Mountains and (b) elevation (unit: m) of the study area (Red, purple, and blue outlines indicate Cangshan Mountain, the wet basin, and the dry basin in fig b, respectively, the same hereinafter)

续时间划分为三类:短历时降水(持续时间 ≤ 3 h)、中历时降水(持续时间为4~6 h)和长历时降水(持续时间 > 6 h)。

1.3.3 区域降水事件

区域降水事件的统计采用 Yu 等 (2015) 提出的方法,定义干湿坝子任意代表站的某一时次降水量 ≥ 0.1 mm 记为区域降水事件的起始时刻,两个站点连续两小时均无降水时,将第一个无降水的时次确定为结束时刻,降水区域降水事件的降水量使用两个代表站降水量的最大值表示,即

$$P_{x,t} = \max(P_{i,t}) \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

式中, i 为站点序号,包含大理和宾川两个站点, $P_{i,t}$ 为第 i 站在 t 时刻的小时降水量。定义在降水过程中两个站点均出现降水的事件为共有降水事件,若只有一个站点出现降水的事件,则该事件为该区域的单独降水事件。

1.3.4 坝子边界线的提取

为更清晰地表达干、湿坝子在区域地形中的空间位置,本文从地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>) 下载 SRTMSLOPE 90 m 分辨率坡度数据产品,参考张述清等 (2012) 划定云贵高原地区坝子的方法,基于 DEM 计算坡度,利用 ArcGIS 软件提取坡度 $\leq 8^\circ$ 且面积 ≥ 1 km²的区域作为坝子初始范围,结合地形特征对边界进行适当修正,最终确定干、湿坝子的边界范围。

2 结果分析

2.1 横断山区南段降水空间分布

由 2019—2023 年横断山区南段区域站降水资料分析年平均降水量、降水频次和降水强度的空间分布 (图 2) 显示,横断山区南段年平均降水量 (图 2a) 呈现东少西多的特征,以大理坝区为分界线,以西的

苍山周边平均降水量均在 800 mm 以上,最多出现在大理镇双阳站 1 517.9 mm,而东侧宾川、祥云坝区除部分山区外其余均在 700 mm 以下,坝区降水量最少出现在宾川县金牛站 (464.8 mm)、次少出现在宾川国家站 (465.1 mm)。从年平均降水频次的空间分布 (图 2b) 可见,整体上降水频次分布和降水量的类似,也呈现东少西多的特征,苍山东西两侧降水频次均在 650 次以上,最多出现在大理镇双阳站 957 次,而大理坝子东侧宾川、祥云境内降水频次均在 550 次以下,最少出现在宾川站 (365.8 次)。从降水强度的空间分布 (图 2c) 可见,东西两侧降水强度差异不大,湿坝子的降水强度范围在 1.3~1.5 mm·h⁻¹ 之间,干坝子的降水强度在 1.1~1.4 mm·h⁻¹ 之间。干湿坝子降水量、降水频次的空间分布一致,均为东少西多,降水强度差异也较小,东西两侧差值在 0.3 mm·h⁻¹ 以内,西侧略高于东侧。为深入分析干湿坝子的降水特征,本文选取宾川和大理两个国家站为代表,使用 2004—2023 年逐小时降水数据,对降水差异进行详细分析。

2.2 干湿坝子降水特征

2.2.1 年际变化

总体来看,2004—2023 年大理 (湿坝子) 和宾川 (干坝子) 站的降水量、降水频次以及平均降水强度的年际变化趋势较为一致,表现为围绕平均值的波动,未呈现明显的增加或减少趋势,然而数值存在显著差异。湿坝子年平均降水量为 953.7 mm,明显高于干坝子的 497.1 mm。从年降水量的变化 (图 3a) 可见,其中 8 个年份干湿坝子的年降水量相差超过一倍。2006 年两个坝子的年降水量差异最小,2022 年差异最大。2008 年均均为研究期间两个坝子年降水量最多的年份。湿坝子 2021 年的年降水量为研究期内最少,较平均值偏少 33.1%,干坝子的年降水量最

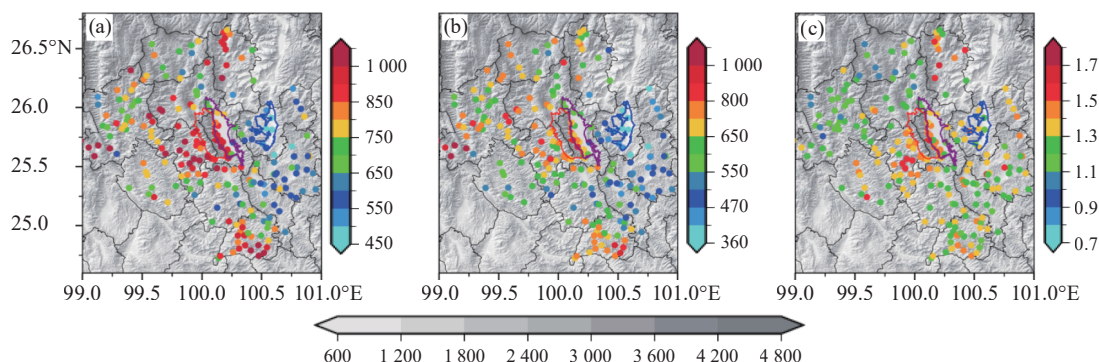


图 2 2019—2023 年横断山区南段年平均降水量 (a, 单位: mm)、降水频次 (b, 单位: 次)、降水强度 (c, 单位: mm·h⁻¹) 与地形高度 (阴影, 单位: m) 空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of (a) annual average precipitation amount (unit: mm), (b) precipitation frequency (unit: time), and (c) precipitation intensity (unit: mm·h⁻¹) over elevation (shaded, unit: m) in the southern section of the Hengduan Mountains during 2019–2023

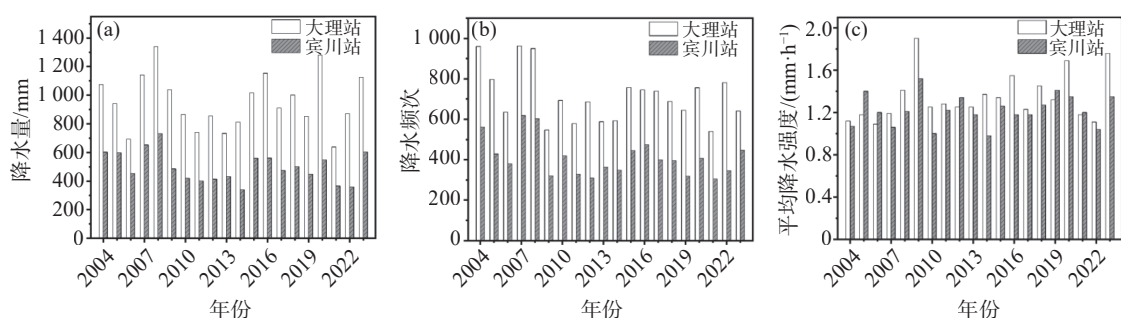


图 3 2004—2023 年大理和宾川站降水量 (a)、降水频次 (b) 和平均降水强度 (c) 年变化

Fig. 3 Annual variations of (a) total precipitation amount and (b) precipitation frequency, and (c) average precipitation intensity at Dali and Binchuan stations during 2004–2023

少出现在 2014 年,较平均值偏少 31.7%。年降水频次的变化趋势与年降水量相似 (图 3b),湿坝子年平均降水频次为 714 次,显著高于干坝子,为干坝子年平均降水频次的 1.73 倍。研究期间,2007 年均为两个坝子降水频次最高年份,2022 年年降水频次差异最大,湿坝子比干坝子多 435 次。各年平均降水强度的变化 (图 3c) 显示,两个坝子的年平均降水强度差异较小,湿坝子的多年平均降水强度比干坝子的高 $0.13 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在 2005、2006、2012、2019 和 2021 年,干坝子的年平均降水强度超过湿坝子,其他年份湿坝子的降水强度更强。特别是在 2009、2014 和 2023 年,湿坝子的年平均降水强度比干坝子的高 $0.39 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,约为两个坝子年平均差值的 3 倍。

2.2.2 月变化

采用 2004—2023 年大理 (湿坝子) 和宾川 (干坝子) 站降水资料分析累计降水量、降水频次和平均降水强度的月变化特征 (图 4) 显示,湿坝子各月的累计降水量显著高于干坝子 (图 4a),两地累计降水量均呈单峰分布,峰值集中在 6—9 月。湿坝子累计降水量的最大值出现在 8 月,干坝子的最大值则出现在 7 月。两地的累计降水量最大差异出现在 8 月,湿坝子约为干坝子的 1.9 倍,占有差异的 23%;最小差异出现在 11 月。两地累计降水频次的逐月变化 (图 4b) 与累计降水量的变化趋势一致,湿坝子的累计降水

频次各月均高于干坝子,两地累计降水频次均呈单峰形分布,峰值均出现在 7 月。在平均降水强度方面 (图 4c),两地平均降水强度的差异较小,湿坝子的平均降水强度比干坝子高出 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。各月的平均降水强度与累计降水量类似,湿坝子的峰值出现在 8 月,干坝子的峰值出现在 7 月,除 4 月干坝子平均降水强度略大于湿坝子外,其他月份湿坝子均高于干坝子,其中 8 月也是两地平均降水强度差异最大的月份。

2.2.3 日变化

采用 2004—2023 年大理 (湿坝子) 和宾川 (干坝子) 站降水资料,分析累计降水量、累计降水频次和平均降水强度的日变化 (图 5) 可见,干湿坝子的降水频次日变化均呈单峰型,而累计降水量的日变化在湿坝子表现为单峰型,干坝子则呈现双峰型。两地平均降水强度日变化差异显著。从累计降水量日变化 (图 5a) 可见,湿坝子累计降水量比干坝子高出 47.9%,除 15 时 (北京时,下同) 外,其余时段均高于干坝子。干坝子在 15 时出现第二个累计降水量峰值,而湿坝子同时刻的累计降水量处于低谷。04—08 时为两地的降水峰值时段,最大值均出现在 05 时。湿坝子降水的低值期出现在 13—17 时,干坝子则在 11—14 时,两地低谷期的降水量差异接近。累计降水频次日变化 (图 5b) 显示,湿坝子各个时次的

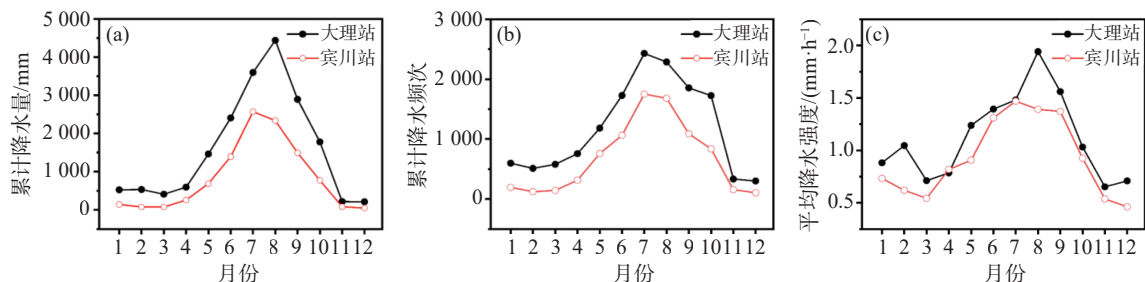


图 4 2004—2023 年大理和宾川站的累计降水量 (a)、降水频次 (b) 和平均降水强度 (c) 月变化

Fig. 4 Monthly changes of (a) cumulative precipitation amount, (b) precipitation frequency, and (c) average precipitation intensity at Dali and Binchuan stations during 2004–2023

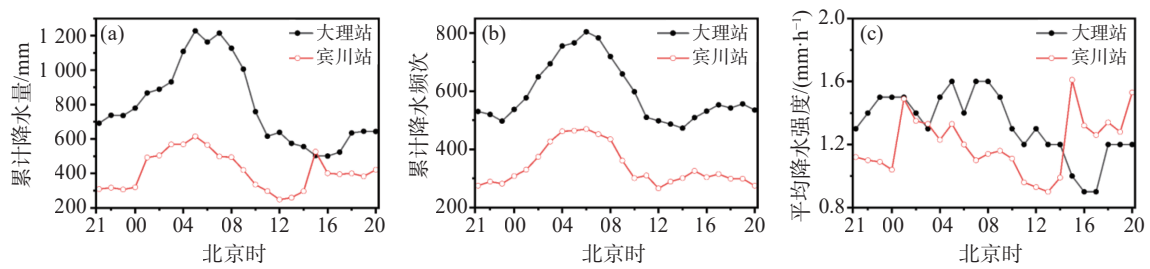


图5 2004—2023年大理和宾川站的累计降水量(a)、累计降水频次(b)和平均降水强度(c)的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of (a) cumulative precipitation amount, (b) cumulative precipitation frequency, and (c) average precipitation intensity at Dali and Binchuan stations during 2004–2023

累计降水频次均高于干坝子。两地的累计降水频次峰值均出现在04—08时,峰值时段差异较小。两地降水频次差异主要集中在非峰值时段,最大差异出现在10时,湿坝子的累计降水频次是干坝子的1.98倍。在平均降水强度日变化方面(图5c),湿坝子的平均降水强度比干坝子高 $0.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,虽然平均降水强度差异不大,但其日变化特征显著。湿坝子的平均降水强度夜间高于白天,而干坝子白天高于夜间。湿坝子的平均降水强度峰值出现在05、07—08时,干坝子的峰值出现在01、15和20时。最大差异出现在15时,此时是干坝子的平均降水强度峰值和湿坝子的平均降水强度低谷。整体来看,虽然干湿坝子的平均降水强度日变化差异较小,但由于高峰和低谷时段的不同,两地平均降水强度的时间演变差异显著。

2.3 干湿坝子降水事件的时空特征

2.3.1 降水事件的时间特征

从大理(湿坝子)和宾川(干坝子)站2004—2023年不同历时降水事件的累计降水量、次数和强度特征(表1)可知,湿坝子的各类降水事件次数均多于干坝子,两地的降水事件以短历时降水为主,占总降水事件的62%以上。湿坝子的中历时、长历时降水事件次数相近,长历时事件略多,而干坝子的中历时降水事件次数明显多于长历时事件,表明干坝子的降

表1 2004—2023年大理和宾川站不同历时降水事件次数、累计降水量和降水强度

Table 1 The numbers, cumulative precipitation amounts and precipitation intensity for different duration precipitation events at Dali and Binchuan stations during 2004–2023

降水事件 类型	次数		累计降水量/mm		降水强度/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	
	宾川站	大理站	宾川站	大理站	宾川站	大理站
短历时	1 438	2 084	2 165.1	2 570.8	0.94	0.75
中历时	415	619	2 348.5	3 431.0	1.27	1.28
长历时	370	648	5 428.1	13 072.3	1.32	1.60
总体	2 223	3 351	9 941.7	19 074.1	1.21	1.34

水持续时间较湿坝子短。从累计降水量可见,尽管短历时降水事件占主导,但长历时降水事件是区域累计降水量的主要来源,占总降水量的50%以上,湿坝子尤为明显,长历时事件贡献了69%的累计降水量。在降水强度方面,干坝子的短历时降水强度略大于湿坝子,而湿坝子的长历时降水强度略大于干坝子,中历时降水事件的降水强度差异不大。两地累计降水量差异的84%来源于长历时降水事件,湿坝子长历时降水事件的降水量是干坝子的2.4倍,而短历时降水事件的差异较小,仅占总差异的4%。综合来看,两个坝子的降水类型均以短历时降水为主,干坝子的降水持续时间更短,而湿坝子的降水持续时间较干坝子更长。

2.3.2 降水事件的分布特征

从大理(湿坝子)和宾川(干坝子)站2004—2023年降水事件的空间特征来看(表2),共有降水事件、单独降水事件分别占区域降水事件的37.83%、62.17%,可见区域降水事件中,单独降水事件居多,尤其在湿坝子,单独降水事件就占了区域降水事件的49.69%,约为干坝子单独降水事件的4倍。从降水频次来看,共有降水事件的频次所占比例最大,达72.00%,表明共有降水事件的持续时间比单独降水事件持续时间更长,分析2004—2023年的1 353次共有降水事件,湿坝子的降水频次为10 253次,平均持续时间为7.6 h,干坝子的降水频次为7 497次,平均持续时间为5.5 h,表明在共有降水事件中,湿坝子的降水持续时间比干坝子多出约2.1 h。另外,尽管湿坝子单独降水事件数量较多,但区域降水事件的降水量有85.93%来自于共有降水事件,区域降水量主要依赖于共有降水事件,单独降水事件仅占区域总降水量的14.07%。共有降水事件的持续时间和降水量均超过单独事件。湿坝子的单独降水事件的降水量也远远高于干坝子,是干坝子的3倍左右。从以上分析可知,共有降水事件的持续时间和降水量均超过单独事件,湿坝子的单独降水事件、降水频

次、降水量远远高于干坝子。

采用 2004—2023 年大理(湿坝子)和宾川(干坝子)站降水资料,分析共有降水事件累计降水量、累计降水频次及平均降水强度的日变化特征(图 6a、c、e)可见,湿坝子的累计降水量呈现出单峰型,而干坝子则表现为双峰型。除 15 时外,湿坝子各时段累计降水量均显著高于干坝子。此外,湿坝子的累计降水频次在各时段均高于干坝子。平均降水强度方面,湿坝子在 15—17 时的平均降水强度相对较低,而干坝子在此时段达强度峰值,平均降水强度明显强于湿坝子。干坝子的另一个峰值出现在 20 时,强度也高于湿坝子,其余时段湿坝子的平均降水强度普

遍强于干坝子。从不同持续时间的共有降水事件的累计降水量(图 6b)、累计频次(图 6d)和平均降水强度(图 6f)对比曲线可见,持续时间为 1~3 h 及 37 h 的降水事件中,干坝子的累计降水量略高于湿坝子。而在其他持续时间的降水事件中,湿坝子的累计降水量均高于干坝子。在所有不同持续时间的降水事件中,湿坝子的累计降水频次均大于干坝子。平均降水强度的分析显示,除了 1~3 h 的短时降水事件以及 7、28 和 37 h 的降水事件中,干坝子的平均降水强度高于湿坝子外,其余降水事件均是湿坝子的平均降水强度更强。综上可知,在共有降水事件中湿坝子累计降水量、累计降水频次及平均降水强度均明显高于干坝子,降水贡献主要来源于高频次、中长历时降水事件;干坝子仅在午后及 1~3 h 等短历时降水事件中平均降水强度较大,降水贡献更多依赖于局地强对流过程。

2.4 干湿坝子降水差异原因

为进一步揭示干湿坝子降水差异的成因,更好的体现具有一定强度的降水回波,排除部分弱回波及非降水回波的干扰,提高降水识别的可靠性,图 7 展示了 2019—2023 年共有降水事件中,大理(湿坝子)和宾川(干坝子)站南、北 3 km (25.68°—25.85° N) 纬度带内雷达回波反射率因子 ≥ 30 dBz 的降水累计频次分布。依据降水事件在干湿坝子起始时间顺序,将共有降水事件划分为三类:自西向东传播型(RREs-W)、自东向西传播型(RREs-E)以及同步开始

表 2 2004—2023 年大理和宾川站的区域降水事件分布特征

Table 2 Distribution characteristics of regional precipitation events at Binchuan (a) and Dali (b) stations during 2004—2023

降水事件名称	降水事件		降水频次		累计降水	
	次数	占比/%	次数	占比/%	降水量/mm	占比/%
区域降水事件	3 576	—	16 945	—	25 104.9	—
共有降水事件	1 353	37.83	12 199	72.00	21 571.7	85.93
干坝子单独降水事件	446	12.48	717	4.23	827.3	3.29
湿坝子单独降水事件	1 777	49.69	4 029	23.78	2 705.9	10.78

注:“—”代表无。

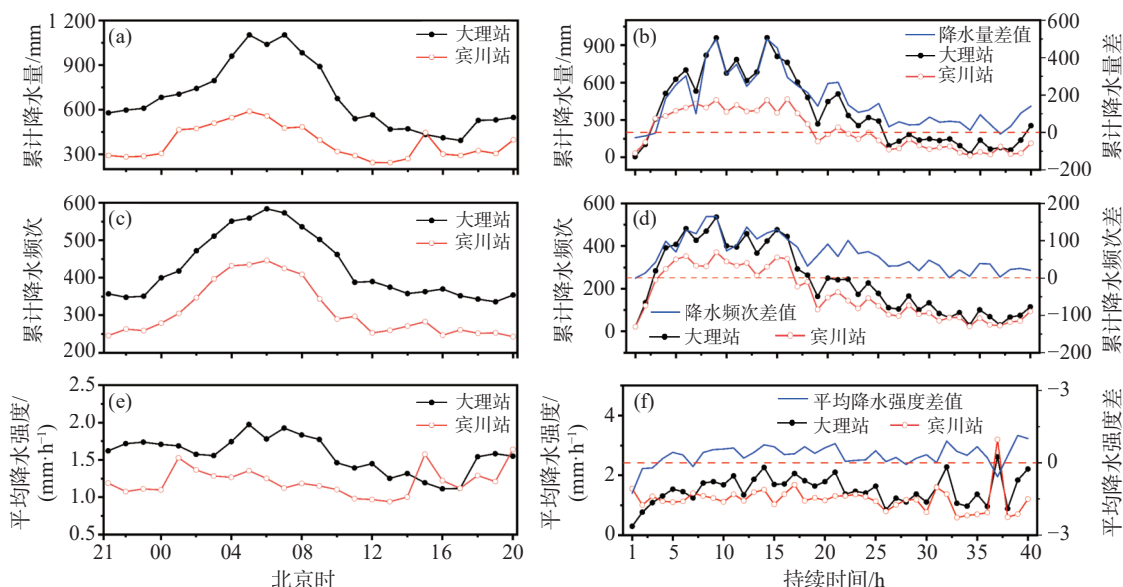


图 6 2004—2023 年大理和宾川站共有降水事件的累计降水量 (a)、累计降水频次 (c)、平均降水强度 (e) 的日变化和不同持续时间的累计降水量 (b)、累计降水频次 (d)、平均降水强度 (f) 及两站差值的变化 (红色虚线表示差值为 0)

Fig. 6 Diurnal variations of (a) cumulative precipitation amount, (c) cumulative precipitation frequency, and (e) average precipitation intensity, change and different change of (b) cumulative precipitation amount, (d) cumulative precipitation frequency, and (f) average precipitation intensity for the coexistent-precipitation-event at Dali and Binchuan stations during 2004—2023 (The red dotted lines indicate a difference of 0)

型(RREs-C)。其中,RREs-W指降水首先出现在湿坝子并向干坝子方向传播的事件;RREs-E则表示降水由干坝子区域开始并向湿坝子方向传播;若降水事件在干、湿坝子代表站点同一时段开始,则归为RREs-C类型。三个类型的降水事件中,受地形影响,在苍山附近均有一个明显的增强,从RREs-W类型降水统计分析可知,该类型的降水主要在傍晚和清晨时段表现出显著的自西向东传播特征(图7a),该特征与Zhang等(2021)的研究结果一致。然而,该类降水在传播过程中强度呈衰减趋势,在02—04时段最为显著,降水传播通常止于约100.5°E,未能到达干坝子。该特征在空间分布上与干坝子区域降水频次显著低于湿坝子的观测事实相一致。相较之下,15时前后的降水在传播过程中强度逐渐增强,传播至干坝子时有增强趋势,与该干坝子日降水的次峰值时段相对应。RREs-E类型降水事件则主要呈

现自东向西传播特征(图7b)。该类降水事件在15—20时和04—07时两个时段表现出较高的出现频率。15—17时段内,降水在西移过程中显著减弱,多数事件传播范围仅及100.23°E附近;而04—07时段内的降水事件则在西移过程中表现出明显增强趋势,并具有更长的持续时间。这一日变化特征与干湿坝子区域降水的主要峰值时段相一致,反映出该类型系统在不同时间段对干湿坝子降水贡献存在差异。对于RREs-C类型降水事件,湿坝子区域雷达反射率 ≥ 30 dBz的出现频率显著高于干坝子,夜间降水强度差异尤为突出(图7c)。进一步分析雷达反射率的经度-时间剖面表明,此类事件中降水多起源于湿坝子区域并向东传播,远高于起源于干坝子区域并向西传播的频次。该结果与前文结论一致,即在共有降水事件中,受自西向东传播天气系统影响的频率及强度普遍高于自东向西系统的影响。

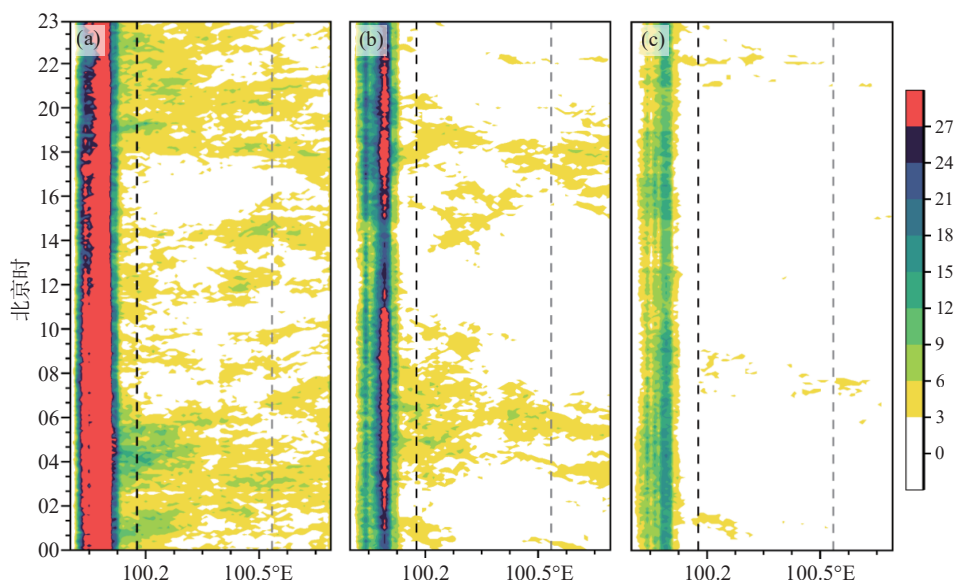


图7 2019—2023年干湿坝子共有降水事件中降水首先出现在湿坝子并向干坝子传播的事件(RREs-W)(a),降水由干坝子开始并向湿坝子传播的事件(RREs-E)(b),降水同一时段开始出现在干、湿坝子两个代表站点的事件(RREs-C)(c) 25.68°—25.85°N区域大理天气雷达0.5°仰角反射率因子 ≥ 30 dBz的累计频率(单位:次/日)变化(黑色和灰色虚线分别代表湿坝子和干坝子所在的位置)

Fig. 7 Diurnal variation of the cumulative frequency (units: num) of radar reflectivity factors ≥ 30 dBz along 25.68°—25.85°N at a 0.5° elevation angle by the Dali weather radar in the precipitation events of (a) first occurred in the wet basin and subsequently propagated to the dry basin (RREs-W), (b) first occurred in the dry basin and subsequently propagated to the wet basin (RREs-E), and (c) occurred simultaneously in the dry and wet basins (RREs-C) during 2019—2023 (The black and gray dashed line indicates the location of the wet and dry basin)

3 结论和讨论

本文选取2019—2023年大理州境内213个区域和12个国家站小时降水数据,分析横断山区南部的降水空间分布特征。选取大理和宾川两个国家站自开展小时降水观测以来(2004—2023年)逐小时降水数据,分析了横断山区南部典型干湿坝子在年际尺度、月尺度和小时尺度上的降水量、降水频次、降水

强度及降水事件的时空变化特性与差异。选取2019—2023年大理天气雷达站回波数据,分析了共有降水事件中雷达回波反射率因子的差异特征,探讨了典型干湿坝子的降水差异成因。得到以下主要结论:

(1) 横断山区南部年降水量、降水频次的空间分布一致,整体呈现为东少西多的特征,但降水强度差异较小,西侧降水强度略高于东侧。

(2) 湿坝子的年、月、日降水量和降水频次显著高于干坝子的, 但降水强度差异不明显。两地的降水量和频次的年际变化趋势整体较稳定; 两地月降水量和频次均呈单峰分布, 集中于盛夏和初秋 (6—9 月), 湿坝子的峰值出现在 8 月, 干坝子则在 7 月; 湿坝子降水日变化呈单峰型降水峰值出现在 05 时, 且夜间降水频次和强度显著高于白天, 干坝子的降水在日间更为活跃, 并呈现双峰模式, 峰值分别出现在 05 时和 15 时。

(3) 从降水持续时间来看, 干、湿坝子降水类型均以短历时降水事件为主, 但湿坝子降水持续时间更长, 平均较干坝子多 2 h, 是区域降水的主要来源; 共有降水事件的持续时间和降水贡献均明显高于单独降水事件, 其中湿坝子在累计降水量、降水频次和平均降水强度上整体均高于干坝子, 降水贡献主要来自高频次、中长历时降水过程, 而干坝子则主要依赖午后短历时强对流降水。

(4) 共有降水事件的反射率因子日变化显示, 多数降水事件自西向东传播, 在传播过程中回波强度逐渐减弱, 影响范围受限, 难以到达干坝子, 导致湿坝子降水频次与持续事件普遍高于干坝子。

本文研究揭示了横断山区南段典型干湿坝子的降水差异特征及其成因, 加深了对山地降水分布不均匀性的科学认识, 为提高复杂地形区精细化天气预报能力提供了重要观测事实。研究发现, 在共有降水事件中, 自西向东移动的天气系统所产生的影响显著强于自东向西移动的天气系统, 但本文未深入探讨这些天气系统的持续时间及大尺度环流背景的差异。此外, 尽管分析表明湿坝子的降水持续时间明显长于干坝子, 但对其成因仍待进一步阐述。未来工作将依托大理国家气候观象台的微小型 X 波段天气雷达、微波辐射计、Ka 波段云雷达、云高仪、激光测风雷达等多源观测资料, 结合天气学理论, 深入探讨干湿坝子降水的形成机制, 并进一步研究自东向西与自西向东天气系统的差异及其对区域降水的具体影响。

致谢: 在本文撰写中, 中国科学院大气物理研究所原韦华研究员对本研究降水差异特征分析给予指导, 谨致谢忱!

参考文献 (References):

董新宁, 吴遥, 黄安宇, 等. 2023. 川渝地区夏季极端降水日变化特征分析[J]. *大气科学*, 47(2): 259–272. Dong X N, Wu Y, Huang A N, et al. 2023. Analysis of diurnal variation characteristics of summer extreme pre-

- cipitation in Sichuan and Chongqing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 47(2): 259–272 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21032
- 冯亮亮, 詹正杰, 刘雨润, 等. 2026. 昆明市夏季夜间冰雹天气分型及其环境参数特征[J]. *暴雨灾害*, 45(4): 513–522. Feng L L, Zhan Z J, Liu Y R, et al. 2026. Characteristics of environment parameters and weather type of nighttime hail weather in Kunming City from June to August [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(4): 513–522 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025-046
- 付双喜, 张洪芬, 杨丽杰, 等. 2021. 地形影响下祁连山北麓不同类型降水特征对比分析[J]. *干旱区研究*, 38(5): 1226–1234. Fu S X, Zhang H F, Yang L J, et al. 2021. Comparative analysis of different types of precipitation characteristics in the northern foot of Qilian Mountain under the influence of topography [J]. *Arid Zone Research*, 38(5): 1226–1234 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2021.05.04
- 季宗虎, 孙栋元, 牛最荣, 等. 2023. 疏勒河流域降水变化特征研究[J]. *干旱区研究*, 40(10): 1583–1594. Ji Z H, Sun D Y, Niu Z R, et al. 2023. Characteristics of precipitation changes in the Shule River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 40(10): 1583–1594 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2023.10.05
- 李君, 李妍, 贾瑞, 等. 2022. 两个相似路径台风引发的东部沿海地区降水分布特征及成因对比分析[J]. *海洋预报*, 39(3): 25–36. Li J, Li Y, Jia R, et al. 2022. A comparison analysis of precipitation distribution over the eastern coastal area and their causes between two typhoons with similar paths [J]. *Marine Forecasts*, 39(3): 25–36 (in Chinese). doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2022.03.003
- 李强, 夏繁, 周盈颖, 等. 2026. 2023 年重庆长滩镇“7.4”局地特大暴雨的中尺度对流系统特征和成因[J]. *暴雨灾害*, 45(2): 159–170. Li Q, Xia F, Zhou Y Y, et al. 2026. Characteristics and causes of mesoscale convective system induced the “7.4” local extremely heavy rainstorm event in Changtan Town, Chongqing in 2023 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(2): 159–170 (in Chinese) doi:10.12406/byzh.2024-185
- 牛生辰, 张青梅, 沈晓燕, 等. 2022. 青海高原暴雨的形成条件与基本特征分析[J]. *高原气象*, 41(2): 526–540. Li S C, Zhang Q M, Shen X Y, et al. 2022. Torrential rain in Qinghai Plateau: Forming conditions and characteristics [J]. *Plateau Meteorology*, 41(2): 526–540 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00009
- 王灏, 胡泽勇, 杨耀先, 等. 2023. 近 60 年青藏高原季风期降水的南北变化特征及机理研究[J]. *高原气象*, 42(4): 848–857. Wang H, Hu Z Y, Yang Y X, et al. 2023. The changing features and the mechanism of the precipitation in southern-northern Qinghai-Xizang Plateau during monsoon period in last 60 years [J]. *Plateau Meteorology*, 42(4): 848–857 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00034
- 王灵芝, 李茂善, 吕钊, 等. 2022. 藏东南峡谷地区不同下垫面地表通量变化特征及其与降水的关系[J]. *高原气象*, 41(1): 177–189. Wang L Z, Li M S, Lyu Z, et al. 2022. Variation characteristics of surface fluxes on different underlying surfaces and their relationship with precipitation in the canyon area of southeast Tibet [J]. *Plateau Meteorology*, 41(1): 177–189 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00107
- 吴天贻, 周玉淑, 王咏青, 等. 2021. 两次不同季风强度背景下的西行台风登陆过程降水特征对比分析[J]. *大气科学*, 45(6): 1173–1186. Wu T Y, Zhou Y S, Wang Y Q, et al. 2021. Comparative analysis of precipitation characteristics of the westward typhoon cases “Bilis” and

- “Sepat” during landfall under different monsoon intensities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,45(6):1173–1186 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20101
- 杨萍,肖子牛,石文静.2017.基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征[J].*大气科学*,41(3):475–489. Yang P, Xiao Z N, Shi W J. 2017. Fine-scale characteristics of rainfall in Beijing urban area based on a high-density autonomous weather stations (AWS) dataset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,41(3):475–489 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16134
- 杨霞,周鸿奎,赵克明,等.2020. 1991–2018年新疆夏季小时极端强降水特征[J].*高原气象*,39(4):762–773. Yang X, Zhou H K, Zhao K M, et al. 2020. Variation features of hourly precipitation in Xinjiang Province during 1991–2018 [J]. *Plateau Meteorology*,39(4):762–773 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00114
- 张述清,王爱华,王宇新,等.2012.云贵高原地区坝子划定技术与方法研究—以云南省为例[J].*地矿测绘*,28(4):1–4. Zhang S Q, Wang A H, Wang Y X, et al. 2012. Study on techniques and methods in demarcation of bazi in Yunnan-Guizhou Plateau-Taking Yunnan Province as an example [J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*,28(4):1–4 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007-9394.2012.04.001
- 张涛,李亮亮,李建.2022.云贵高原两个国家基准站降水特性比较[J].*暴雨灾害*,41(1):50–57. Zhang T, Li L L, Li J. 2022. Comparison of rainfall characteristics of two national reference stations in Yunnan-Guizhou plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(1):50–57 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.006
- 赵玮,郝翠,曹洁,等.2022.近40年北京地区夏季降水日变化及不同持续时间降水事件的特征[J].*大气科学*,46(5):1167–1176. Zhao W, Hao C, Cao J, et al. 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,46(5):1167–1176 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22028
- Li J, Yu R C, Wang J J. 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing [J]. *Chinese Science Bulletin*,53(12):1933–1936. doi:10.1007/s11434-008-0195-7
- Li J, Zhao Y, Wang G L, et al. 2026. The Cangshan Mountain Precipitation Experiment (CAMPEX): Modulation of precipitation by typical steep mesoscale terrain over Southeast China [J]. *Journal of Meteorological Research*,40(4):1008–1026. doi:10.1007/s13351-026-6047-z
- Li Z X, He Y Q, Wang C F, et al. 2011. Spatial and temporal trends of temperature and precipitation during 1960–2008 at the Hengduan Mountains, China [J]. *Quaternary International*, 236(1–2): 127–142. doi:10.1016/j.quaint.2010.05.017
- Ning B Y, Yang X M, Chang L. 2012. Changes of temperature and precipitation extremes in Hengduan Mountains, Qinghai-Tibet Plateau in 1961–2008 [J]. *Chinese Geographical Science*,22(4):422–436. doi:10.1007/s11769-012-0549-6
- Xiang R L, Steger C R, Li S P, et al. 2024. Assessing the regional climate response to different Hengduan Mountains geometries with a high-resolution regional climate model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,129(6):e2023JD040208. doi:10.1029/2023jd040208
- Yu H, Wang L, Yang R, et al. 2020. Temporal and spatial distribution of maximum daily precipitation in Hengduan Mountainous region of China and its probability characteristics [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*,25(11):05020039. doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0002009
- Yu R C, Chen H M, Sun W. 2015. The definition and characteristics of regional rainfall events demonstrated by warm season precipitation over the Beijing plain [J]. *Journal of Hydrometeorology*,16(1):396–406. doi:10.1175/JHM-D-14-0086.1
- Zhang K X, Pan S M, Cao L G, et al. 2014. Spatial distribution and temporal trends in precipitation extremes over the Hengduan Mountains region, China, from 1961 to 2012 [J]. *Quaternary International*,349:346–356. doi:10.1016/j.quaint.2014.04.050
- Zhang M K, Li J, Li N N. 2021. Fine-scale characteristics of summer precipitation over Cang Mountain [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,21(9):1285–1300. doi:10.1175/JAMC-D-20-0220.1
- Zhao Y, Li J, Wang G L, et al. 2026. Influence of low-level winds and topography on nocturnal convection initiation over Cangshan Mountain in Southwest China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 40(4):1199–1215. doi:10.1007/s13351-026-5281-8
- Zhu G F, He Y Q, Pu T, et al. 2012. Spatial distribution and temporal trends in potential evapotranspiration over Hengduan Mountains region from 1960 to 2009 [J]. *Journal of Geographical Sciences*,22: 71–85. doi:10.1007/s11442-012-0912-7

(责任编辑 张 文)