暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于区域站的昆明市雨季短时强降水特征及天气系统分型

杨芳园 刘彬 金燕 潘娅婷 李思婷 李晓鹏 石宝灵

Characteristics and synoptic classification of short-duration heavy precipitation during the rainy season in Kunming based on regional station data

YANG Fangyuan，LIU Bin，JIN Yan，PAN Yating，LI Siting，LI Xiaopeng，SHI Baoling

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-213

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

南岭地区汛期短时强降水的时空变化特征分析

Analysis of spatiotemporal characteristics of the short-duration heavy rainfall during the flood season in Nanling Mountain

暴雨灾害. 2025, 44(6): 780-791 https://doi.org/10.12406/byzh.2025-014

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究

Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data

暴雨灾害. 2025, 44(1): 60-70 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-062

云南省盐津县暴雨及短时强降水特征分析

Analysis of the characteristics of torrential rain and short-duration heavy rainfall in Yanjin County, Yunnan Province

暴雨灾害. 2026, 45(1): 58-67 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-181

副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析

Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province

暴雨灾害. 2024, 43(5): 532-541 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-116

防辐射罩区域自动气象站气温观测偏差分析及其订正方法

Analysis and correction method of temperature observation deviation in the radiation shield of regional automatic meteorological stations

暴雨灾害. 2025, 44(1): 112-122 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-061

青海“8·18”短时强降水过程的水汽特征分析

Analysis of water vapor characteristics of the "8·18" short-duration heavy rainfall event in Qinghai

暴雨灾害. 2025, 44(1): 41-51 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-240

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨芳园,刘彬,金燕,等.2026.基于区域站的昆明市雨季短时强降水特征及天气系统分型[J].暴雨灾害,45(5):712−725. YANG Fangyuan, LIU Bin, JIN Yan, et al. 2026. Characteristics and synoptic classification of short-duration heavy precipitation during the rainy season in Kunming based on regional station data [J]. Torrential Rain and Disasters,45(5):712−725 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−213

基于区域站的昆明市雨季短时强降水特征及天气系统分型

杨芳园[1, 3], 刘彬[1, 3], 金燕[2, 3], 潘娅婷[1, 3], 李思婷[1], 李晓鹏[1], 石宝灵[1]

(1. 昆明市气象局, 昆明 650034; 2. 云南省气候中心, 昆明 650034; 3. 中国气象局横断山区 (低纬高原) 灾害性天气研究中心, 昆明 650034)

摘　要: 短时强降水是昆明市雨季 (5—10 月) 主要的灾害性天气, 深入研究其时空特征及天气系统分型, 对提升本地强降水预报预警能力具有重要意义。基于 2018—2022 年昆明市 12 个国家级气象观测站 (以下简称国家站) 和 406 个区域气象观测站 (以下简称区域站) 逐小时降水资料, 采用统计学与天气学诊断方法, 结合主观天气分型, 分析了昆明市雨季短时强降水的时空分布特征, 并对区域性过程进行天气系统分型。结果表明: 短时强降水空间分布呈“南多北少”的特征, 主城区表现出频次最多、强度最强的“雨岛效应”。主汛期 (6—8 月) 短时强降水出现频次最为集中, 其中, 短时强降水峰值出现在 7 月, 而极端短时强降水峰值在 6 月; 日变化呈凌晨和傍晚双峰结构。影响昆明市区域性短时强降水的主要天气系统可分为 4 类: 切变线型 (50.7%)、热带低值系统型 (20.8%)、两高辐合型 (17.4%) 和副热带高压外围型 (11.1%)。水汽来源和地形耦合的差异及抬升触发机制的不同, 导致不同天气系统降水特征不同, 其中地面辐合线(或锋面)配合 700 hPa 切变线是触发短时强降水的关键抬升触发机制, 对预报具有指示意义。

关键词: 雨季; 短时强降水; 雨岛效应; 天气系统; 区域气象观测站

中图法分类号: P468　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−213

Characteristics and synoptic classification of short-duration heavy precipitation during the rainy season in Kunming based on regional station data

YANG Fangyuan[1, 3], LIU Bin[1, 3], JIN Yan[2, 3], PAN Yating[1, 3], LI Siting[1], LI Xiaopeng[1], SHI Baoling[1]

(1. *Meteorological Bureau of Kunming*, *Kunming* 650034; 2. *Yunnan Climate Center*, *Kunming* 650034; 3. *Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau*, *CMA*, *Kunming* 650034)

Abstract: Short-duration heavy precipitation is a primary hazardous weather process during the rainy season in Kunming. Conducting an in-depth study of its spatiotemporal characteristics and synoptic systems is of great significance for enhancing local forecasting and warning capabilities for heavy precipitation. Based on hourly precipitation data from 12 national meteorological stations (referred to as national stations) and 406 regional meteorological stations (referred to as regional stations) in Kunming during May to October from 2018 to 2022, this study employed statistical and synoptic diagnostic methods, combined with subjective synoptic classification, to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of short-duration heavy precipitation during the rainy season and performed circulation classification for regional processes. The results show that spatially, short-duration heavy precipitation exhibited a pattern of "more frequent in the south and less in the north" with the main urban area demonstrating a "rain island effect" characterized by the highest frequency and intensity. Temporally, its occurrence was most concentrated during the main flood season (June to August), with the peak of ordinary short-duration heavy precipitation in July, while the peak of extreme short-duration heavy precipitation was in June. The diurnal variation presents a bimodal structure, with primary peaks in the early morning and late afternoon. The main synoptic systems affecting regional short-duration heavy precipitation processes in Kunming can be classified into four types: shear line type (50.7%), tropical low-

收稿日期: 2024−11−29; **定稿日期:** 2026−05−14

资助项目: 云南省重点基金项目 (202201AS070069); 中国气象局能力提升联合专项 (22NLTSZ005); 国家自然科学基金面上项目 (42375043); 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题 (23SWQXZ009); 云南省重点研发计划-社会发展专项 (202203AC100006); 云南省气象局科研项目 (YZ202614)

第一作者: 杨芳园, 主要从事天气预报及气候分析研究。E-mail: yfy_zh@163.com

通信作者: 金燕, 主要从事气候变化及生态气象研究。E-mail: apple_jjyy25@163.com

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

pressure system type (20.8%), two-high convergence type (17.4%), and subtropical high periphery type (11.1%). Differences in moisture source and topographic coupling, as well as the commonality of lifting trigger mechanisms, lead to differences in precipitation characteristics among different synoptic systems. The surface convergence line (or front) combined with the 700 hPa shear line is the key lifting trigger mechanism for short-duration heavy precipitation, providing valuable guidance for forecasting.

Key words: rainy season; short-duration heavy precipitation; synoptic systems; conceptual model; regional meteorological stations

引　言

短时强降水是指短时间内降水强度较大, 其降水量达到或超过某一量值的天气现象。在实际天气业务中, 通常将 1 h 雨量≥20 mm 或 3 h 雨量≥50 mm 的降水过程定义为短时强降水; 1 h 雨量≥50 mm 或 3 h 雨量≥100 mm 的降水过程则定义为极端短时强降水 (孙继松等, 2014; 俞小鼎, 2013; 郑永光等, 2015)。短时强降水具有突发性强、历时短、局地性强、破坏性大等特点, 常导致城市内涝、农田渍涝, 并可能引发山洪、滑坡、泥石流等次生灾害 (杨春等, 2020; 曹舒娅等, 2023), 对城市运行与公共安全造成严重影响, 因此一直是短时临近预报业务与气象预警服务的重点和难点 (周晓敏等, 2023)。深入开展短时强降水发生发展规律研究, 对提升短时强降水监测预警能力、制定科学有效的防灾减灾措施具有重要的现实意义与科学价值。

近年来, 众多学者围绕短时强降水开展了深入研究, 特别是在利用高密度区域站资料方面取得了显著进展 (王鹏飞等, 2025; 何科等, 2025)。由于极端短时强降水具有较强的突发性和局地性 (Zhai et al., 2005; 翟盘茂等, 2007; 吴梦雯和罗亚丽, 2019), 传统国家站资料在时空分辨率上往往难以全面捕捉此类过程, 而区域站资料则能有效弥补这一不足 (侯淑梅等, 2020)。伍红雨等 (2022) 基于广东省 2 000 多个区域站资料, 揭示了不同持续时间极端强降水的时空分布特征与演变规律, 深化了对华南地区强降水精细化结构的认识。何立富等 (2020) 利用区域站资料, 针对超强台风“利奇马”引发的极端降水过程, 从观测事实和物理机制进行成因剖析, 揭示了台风背景下中尺度对流系统的触发与组织机制。沈晓玲等 (2022) 利用浙江省区域站小时数据研究了暖季短时强降水的分布特征, 并对区域性短时强降水过程进行了客观分型。这些研究成果凸显了区域站资料在刻画强降水精细结构中的关键作用, 而这些研究多集中于东部及沿海地区, 针对低纬高原这类地形复杂、季风作用显著区域的相关分析仍相对有限。

云南省地处低纬高原, 受东亚季风与印度季风共同影响, 加之地形复杂, 是我国降水区域差异较大、变化最复杂的地区之一 (曹杰等, 2009; 苏锦兰等, 2015, 2021)。相关研究表明, 云南省强降水呈持续增加、频发态势 (梁红丽等, 2018; 薛媛等, 2024; Yan et al., 2025), 因而对该地区强降水的精细化研究日益受到重视。李华宏等 (2017, 2019) 利用云南省 125 个国家站资料, 揭示了云南省短时强降水的时空分布特征及日变化规律。何钰等 (2021) 结合国家站降水数据与雷达资料分析了西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 外围短时强降水的时空分布及回波特征。这些工作为理解区域强降水提供了重要基础, 但其依赖的资料空间分辨率较低, 在捕捉中小尺度、突发性强的降水过程方面仍存在一定局限。

昆明市位于云贵高原中部, 山地强对流天气突出 (孙建华等, 2024)。近年来, 昆明市屡遭短时强降水侵袭, 其中 2017 年与 2019 年 7 月 20 日均曾引发严重的城市内涝, 对社会经济与城市安全造成较大影响 (陈静, 2017; 刘冉阳, 2019)。因此, 本文利用昆明地区高密度区域站观测资料, 替代以往研究中常用的国家站数据, 以时空分辨率更高的观测资料来揭示昆明市雨季 (5—10 月) 短时强降水的时空分布特征。在此基础上, 结合天气学诊断分析方法及主观天气分型, 重点探讨引发短时强降水的主要天气系统及其配置特征, 以期深化对低纬高原地区短时强降水发生机理的认识, 为加强降水预报预警和城市防灾减灾工作提供更精准的科学依据。

1　资料与方法

1.1　资料说明

本文采用云南省气象信息中心提供的 2018—2022 年 5—10 月昆明市 12 个国家站及 406 个区域站 (图 1) 逐小时降水资料。该资料已采用界值检查及时空一致性检验等方法进行质量控制, 并剔除错误数据、年缺测天数超过 60 d 或记录年限不足 5 a 的站点, 最终挑选出 406 个区域站资料用于研究。

昆明市地势自北向南呈阶梯状倾斜, 北部为高山深谷地貌 (最高点轿子雪山海拔 4 223.4 m), 东南部为喀斯特地貌, 中部隆起, 东西两侧较低, 其间镶嵌着诸多坝子和湖泊, 南部有云贵高原上最大的湖泊滇池。区域站在昆明市主城区 (图 1 中粗实线区域, 主要包含五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡区) 站点密集, 平均间距约 4.8 km, 其余县区约为 7.3~

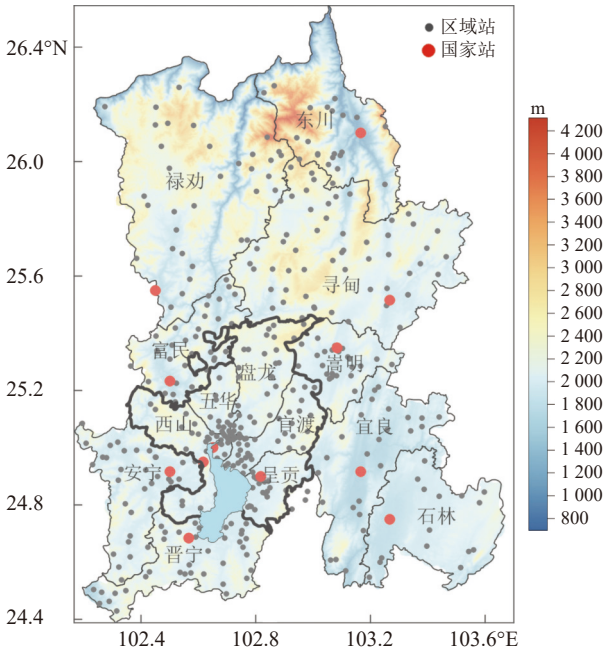


图 1 昆明市地形高度 (填色) 及站点 (红色圆点为国家站, 黑色圆点为区域站) 空间分布 (粗实线区域为昆明市主城区, 下同)

Fig. 1 Spatial distributions of terrain height (color filling) and meteorological stations (red dots for national stations, black dots for regional stations) in Kunming (the bold solid line marks the main urban area of Kunming, the same hereinafter)

8.2 km, 北部站点略少于南部。

天气系统分型中的环流形势分析采用短时强降水发生前或发生时的高空实况观测资料, 以及美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) 提供的 1°×1°逐日 4 个时次的再分析数据, 包括高度场、风场等多层变量。

1.2 研究方法

参考孙继松等 (2014)、俞小鼎 (2013)、郑永光等 (2015) 提出的降水强度划分标准, 将短时强降水划分为两个等级: 1 h 雨量≥20 mm 或 3 h 雨量≥50 mm 定义为短时强降水, 1 h 雨量≥50 mm 或 3 h 雨量≥100 mm 定义为极端短时强降水, 降水统计时段为每日 00—23 时 (北京时, 下同)。短时强降水年平均频次 (以下简称短时强降水频次) 定义为某站点在统计年内发生短时强降水的年平均次数; 短时强降水强度定义为该站点强降水总量与频次的比值; 短时强降水站均频次指在指定统计区域和时段内, 所有观测站点短时强降水总发生次数与站点总数的比值。

相较于单站局地短时强降水, 区域性短时强降水引发的次生灾害风险更高。因此, 本文重点分析此类过程的主要天气系统, 为客观、精准地筛选出区域性短时强降水过程, 参考陈元昭等 (2016)、李华宏等 (2021) 的方法, 将单日出现短时强降水的站点≥8 站次的过程定义为一次区域性短时强降水过程。基于该标准, 2018—2022年雨季共筛选出 144 次区域性短时强降水过程, 并采用主观天气分型方法对其进行分型。

2 统计与分析

2.1 年平均降水量空间分布特征

近 5 a 昆明市年平均降水分布显示 (图 2), 国家站观测数据表明昆明市年均降水量大值区集中在中部, 年降水量在 800 mm 以上; 低值区位于北部东川区, 不足 600 mm (图 2a); 区域站观测数据表明昆明市年均降水量大值区主要位于中部主城区、寻甸-嵩明-盘龙三地交界处及北部禄劝-东川-寻甸交界处 (轿子雪山一带), 年降水量达 800~1 000 mm; 低值区位于北部东川区及西南部安宁市, 年降水量为 400~600 mm (图 2b)。两类数据在昆明市中部多雨、北部少雨的空间分布趋势上一致, 但高密度区域站数据进一步揭示出更精细的降水空间结构: 北部轿子雪山区域存在一个局地降水高值中心, 西南部安宁一带则为相对低值区。这一差异主要源于地形与天气系统的共同作用: 轿子雪山地形对气流具有显著的强迫抬升效应, 利于水汽凝结和降水增强 (王宇, 2006), 同时该区域多受偏东路径天气系统影响, 易与西南暖湿气流交汇产生降水; 而西南部安宁一带的低值区可能与西山地形屏障导致冷空气入侵受阻相关, 致使冷暖空气交汇频率降低。因此, 高密度区域站观测资料更能精细地刻画出高原山地强降水的空间分布特征, 对短时强降水的监测更加有效。

2.2 短时强降水空间分布特征

图 3 为昆明市雨季各月短时强降水频次的空间分布, 5 月 (图 3a) 强降水频次大值区主要位于昆明市东南部的宜良、石林、嵩明及呈贡、晋宁和禄劝的局部地区。主汛期 (6—8 月) 短时强降水呈南多北少的空间分布, 其中主城区在整个主汛期期间均为降水高频中心, 表明该区域短时强降水发生最频繁; 6 月 (图 3b) 强降水频次增多, 分布不均匀, 大值区集中在主城区, 宜良、石林和禄劝局部地区, 低值区位于禄劝北部、东川-寻甸交界处及西南部的安宁市。7 月 (图 3c) 强降水频次范围进一步扩大, 仍以主城区频次最高, 其余地区存在零星分散的大值区, 单点性较为明显, 低值区也是较为分散和局地。8 月 (图 3d) 强降水频次范围和次数较 7 月有所减弱, 但主城区仍为最强中心, 且大值区略向西扩展。9 月

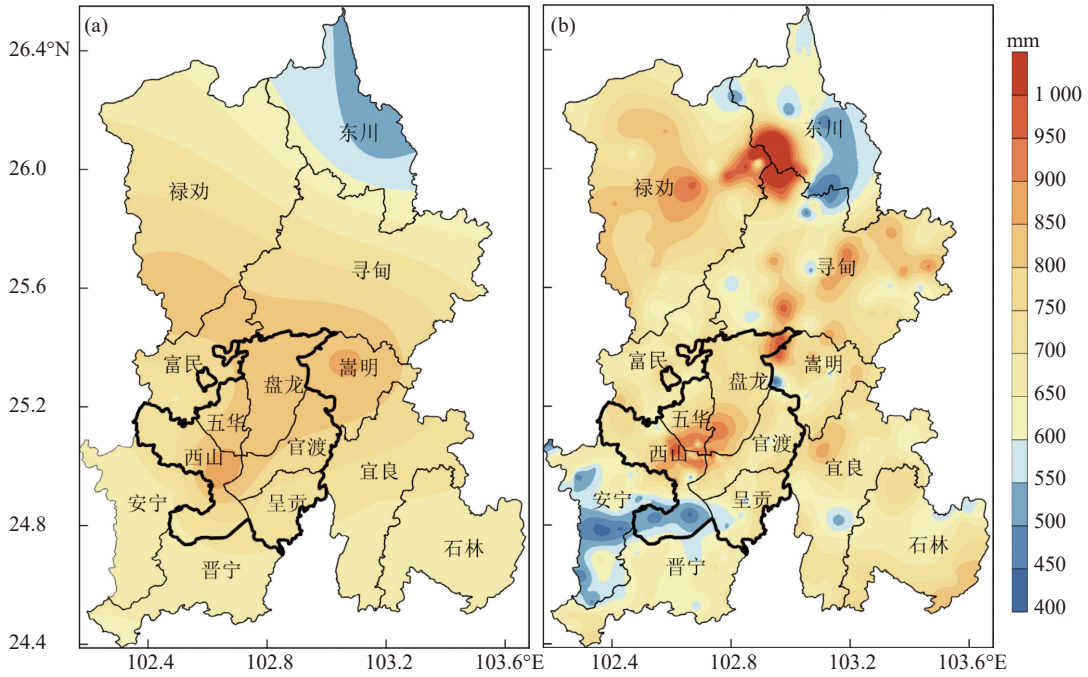


图 2 2018—2022 年昆明市国家站 (a)、区域站 (b) 年平均降水量分布

Fig. 2 Distribution of annual average precipitation at (a) national station and (b) regional station in Kunming from 2018 to 2022

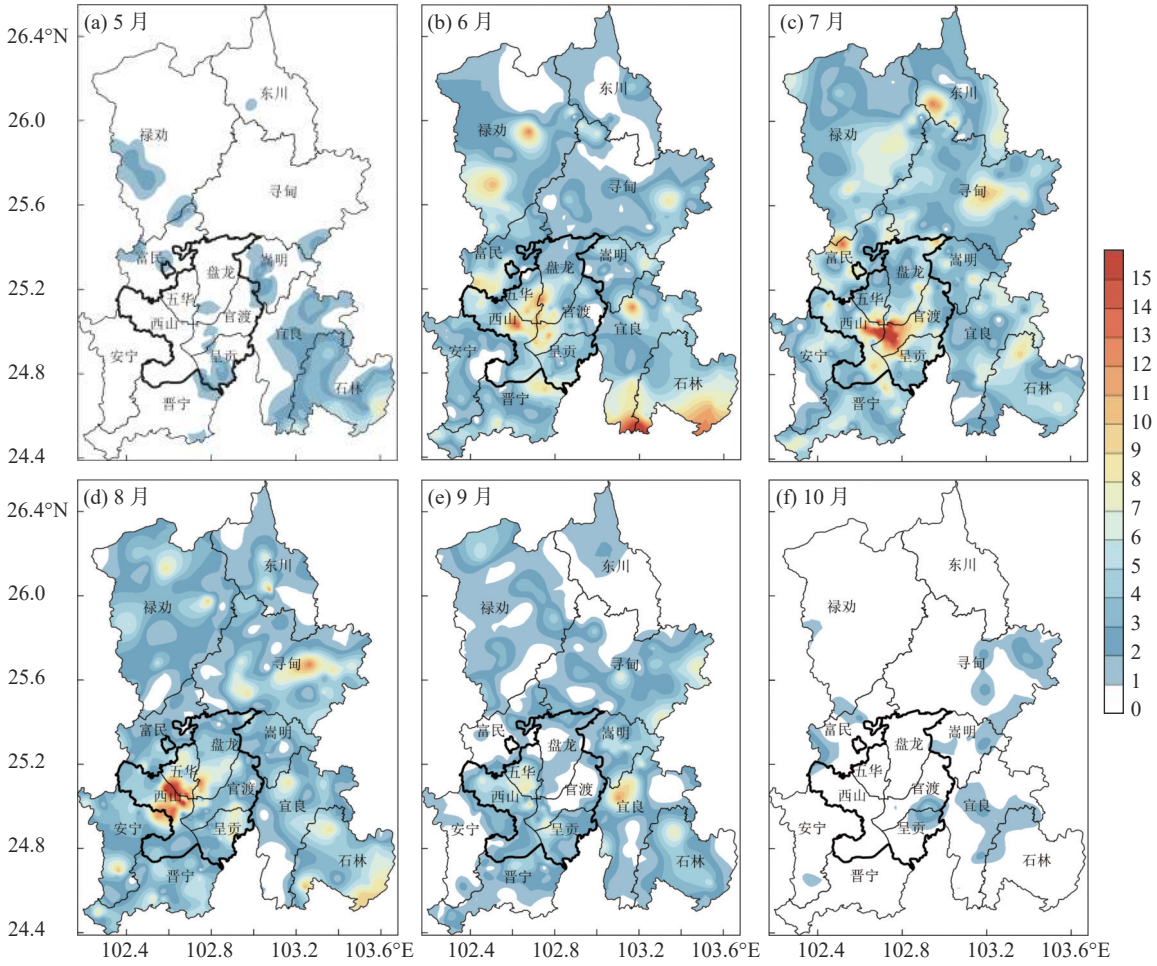


图 3 2018—2022 年昆明市雨季 5—10 月 (a—f) 短时强降水频次空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of short-duration heavy precipitation frequency in each month during the rainy season from May to October (a—f) in Kunming from 2018 to 2022

(图 3e) 强降水频次明显减少，高发区主要位于主城区、宜良北部和寻甸东部。10 月 (图 3f) 强降水频次明显减少，仅在东部的宜良、石林、寻甸存在低频区域。需要特别指出的是，北部轿子雪山区域仅在 7 月 (图 3c) 出现高值中心，其余月份降水频次均偏低。结合降水量和雨日分析来看，该降水高值区 (图 2) 以非短时强降水类型为主，符合山区降水特征，与前述结论一致。

图 4 为昆明市雨季各月短时强降水强度的空间分布，从中可见，强度的分布特征表现为局地性和分散性，与降水频次空间分布存在一定的差异，在寻甸南部、宜良、石林南部及主城区降水频次高但降水强度偏弱，主汛期 6—8 月降水强度的分布均较为分散，局地性强，这可能主要受局地复杂地形和天气系统的共同影响，与沈晓玲等 (2022)、李耀孙等 (2021) 的研究结论一致。

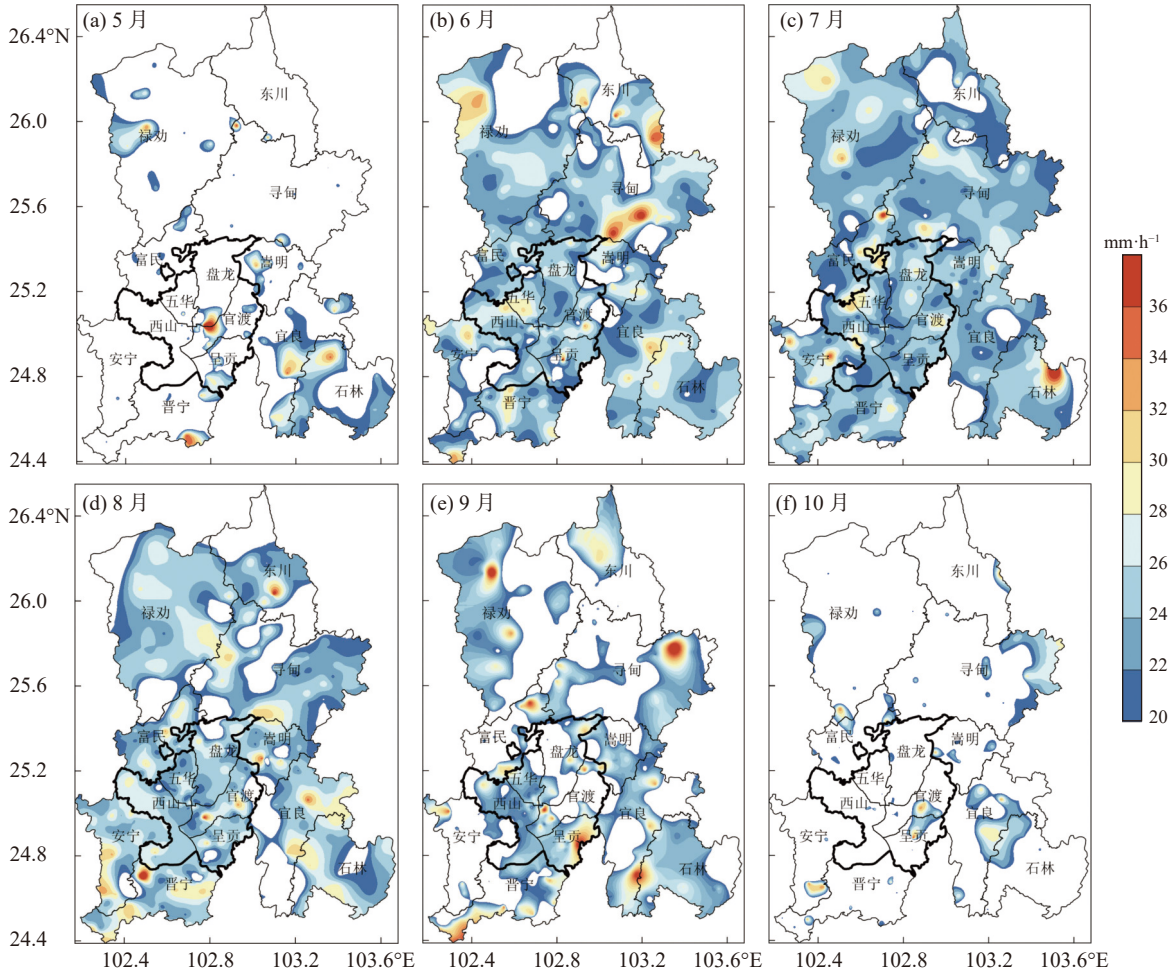


图 4 2018—2022 年昆明市雨季 5—10 月 (a—f) 短时强降水强度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of short-duration heavy precipitation intensity in each month during the rainy season from May to October (a—f) in Kunming from 2018 to 2022

2.3 极端短时强降水空间分布特征

图 5 为昆明市雨季各月极端短时强降水频次空间分布，图 6 为极端强降水强度的空间分布。分析发现，极端短时强降水空间分布不均，南部明显多于北部，以主城区最多，出现的月份主要集中在主汛期 6—8 月，其余月份呈局地性、单点性分布。6 月 (图 5b、图 6b) 极端短时强降水频次和强度均比 7、8 月多，主要集中在昆明市主城区、宜良和石林北部，主城区最强降水强度在 60.0~79.9 mm·h^{-1}。7 月 (图 5c) 极端短时强降水频次比 6 月明显减少，大值区主要集中在昆明市主城区及东部县区，降水强度 (图 6c) 也明显减少大部在 50.0~59.9 mm·h^{-1}。8 月 (图 5d、图 6d) 极端短时强降水频次和强度在东部县区寻甸出现的频次高于 6、7 月，主城区极端短时强降水频次出现的站点比 6、7 月少，但降水强度与 6 月相当，大部在 60.0 mm·h^{-1} 以上。9 月 (图 5e) 极端短时强降水频次范围进一步缩小，主要集中在昆明市主城及富民北部，降水强度 (图 6e) 在 50.0~69.9 mm·h^{-1}。昆明市 2018—2022 年雨季各月极端短时强降水时空分布存在一定的差异，极端强降水出

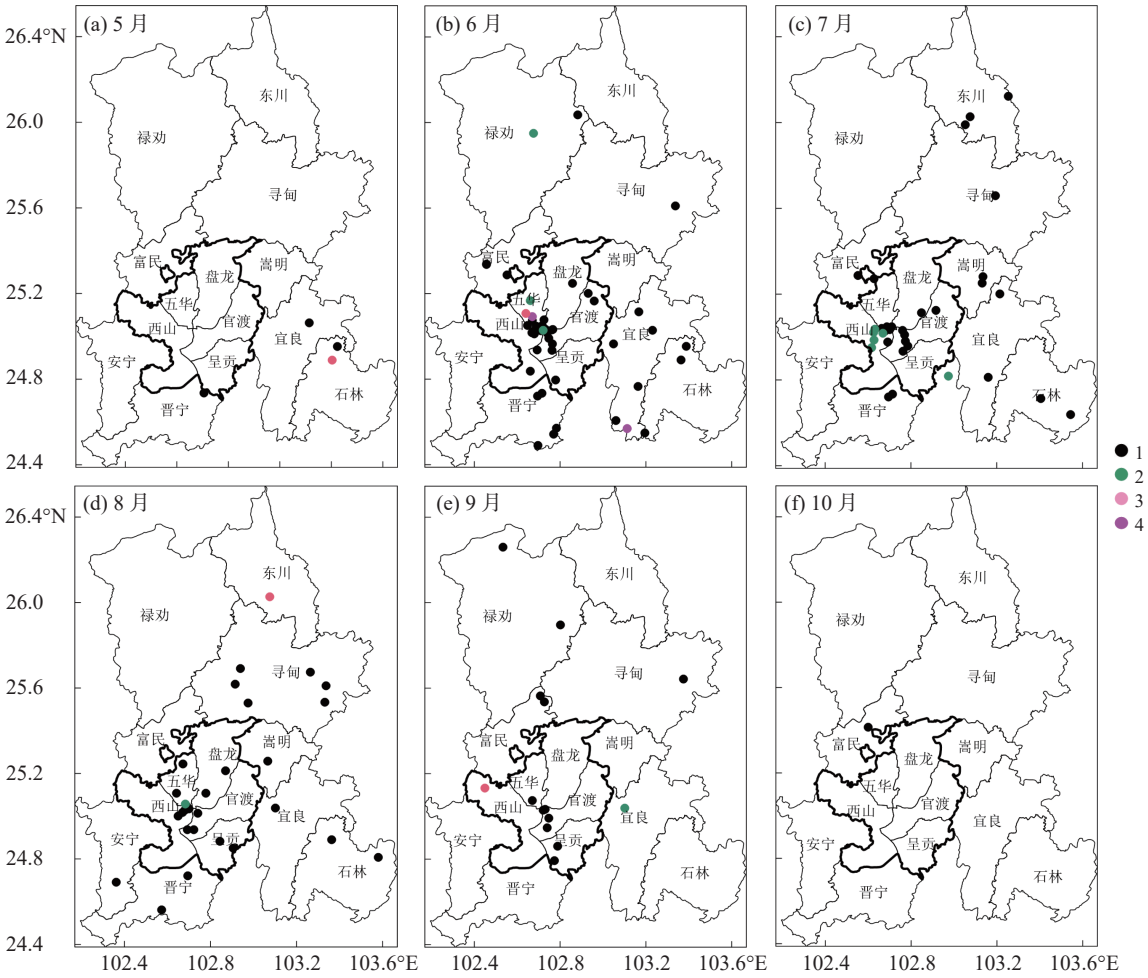


图 5 2018—2022 年昆明市雨季 5—10 月各月 (a—f) 极端短时强降水频次空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of extreme short-duration heavy precipitation frequency in each month (a—f) during the rainy season from May to October in Kunming from 2018 to 2022

现的频次和强度均较弱, 表明昆明市极端强降水与短时强降水相比, 出现概率偏低, 但又以主汛期居多, 呈零散、孤立点分布。

综上分析发现, 昆明市出现短时强降水、极端短时强降水的月份主要集中在主汛期 6—8 月, 且主城区是最为集中的高发、频发区, 除主城区观测站点密集外, 最重要的一个原因是特殊的地理位置, 其所在地形北、东、西三面环山, 地势较高, 中部、南部较低, 南部濒临滇池, 呈喇叭口特征, 其对降水的影响与低层风向风速及水汽辐合相关, 当风速与水汽辐合达到一定的阈值时, 在有利的风向与地形配合下, 易触发极端强降水 (伍红雨等, 2022)。滇池流域为该区域提供了较好的水汽输送, 偏南、西南及东南气流利于将滇池流域的暖湿气流向北部山区输送抬升 (杨芳园等, 2021)。此外, 城市化进程通过改变局地地形, 增加城区凝结核浓度及提升下垫面温度, 改变了近地面局地对流活动和水汽条件, 导致城区降水量、极端强降水次数及降水强度均明显高于郊区, 城市雨岛效应日益显著 (李鹏等, 2020; 赵彦军等, 2021; 吴燕汶等, 2023; 金燕等, 2024)。在多种因素的共同影响下, 昆明市主城区局地短时强降水现象尤为显著。

2.4 不同等级短时强降水时间变化特征

图 7 统计了昆明市不同等级短时强降水站均频次的月变化和日变化特征。月变化上, 不同等级短时强降水站均频次均呈单峰型分布, 短时强降水的主峰出现在 7 月, 次峰在 8 月 (图 7a); 而极端短时强降水的主峰均在 6 月, 次峰在 7 月 (图 7b)。因此, 昆明市主汛期为短时强降水频发期, 其中短时强降水在 7 月频次最高, 极端短时强降水则主要集中在 6 月。

日变化上, 不同等级短时强降水站均频次呈双峰结构, 峰值主要集中在凌晨和傍晚, 谷值集中出现在中午 11—14 时。其中, 短时强降水 (图 7a) 峰值出现在下午 17—19 时 (最明显为 18 时), 次峰值出现在 00—03 时 (最明显为 01 时), 即短时强降水的高发时段集中在傍晚和凌晨; 极端短时强降水 (图 7b) 站均频次主峰出现在 02—03 时, 次峰值在 20—23 时。这与毛冬艳等 (2018) 提出的西南地区短时强降水具

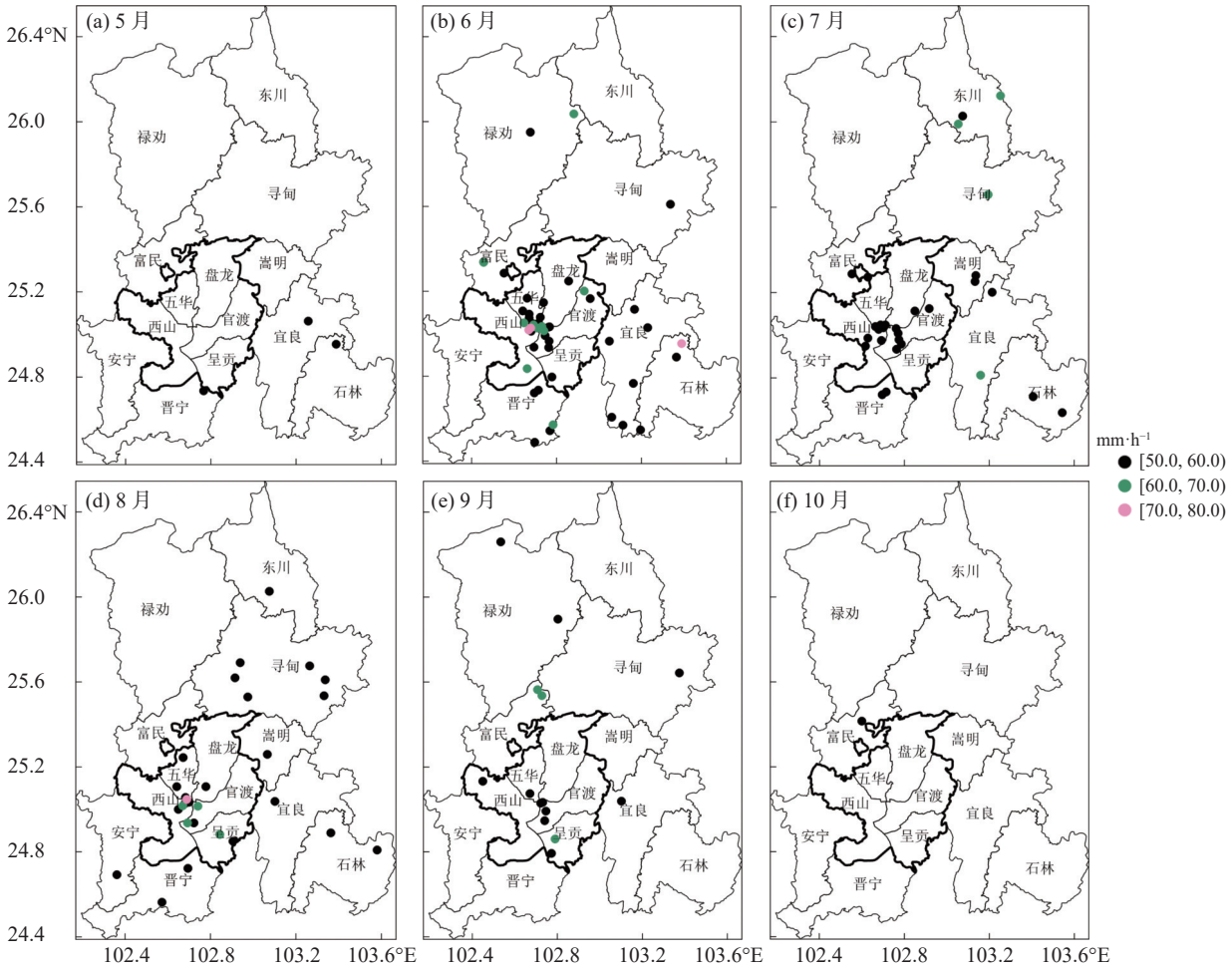


图 6 2018—2022 年昆明市雨季 5—10 月 (a—f) 极端短时强降水强度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of extreme short-duration heavy precipitation intensity in each month during the rainy season from May to October (a—f) in Kunming from 2018 to 2022

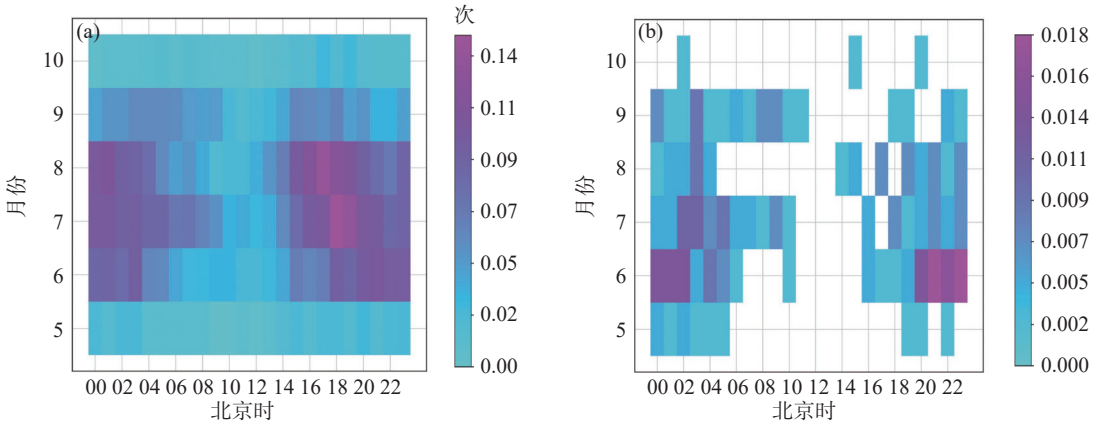


图 7 2018—2022 年昆明市短时强降水 (a)、极端短时强降水 (b) 站均频次月和日变化

Fig. 7 Monthly and diurnal distribution of mean frequency average over stations of (a) short-duration heavy precipitation, (b) extreme short-duration heavy precipitation in Kunming from 2018 to 2022

有明显的夜发性, 杨竹云等 (2021) 提出的云南省夜雨特征结论相一致。本文分析认为, 昆明市夜雨概率高于昼雨, 其原因可能是: 白天地面气温升高, 近地面水汽随高度抬升凝结形成暖云体, 入夜后, 高原辐射降温显著, 导致暖云体云顶降温, 上冷下暖的气温梯度分布使得云团内部的稳定层结被打破, 促使不稳定能量释放, 引发夜间强对流天气。

2.5 主要天气系统分型

在低纬高原地区主要天气系统及区域型短时强降水过程的研究中, 许美玲等 (2011) 归纳出 7 类主

要天气系统, 包括昆明准静止锋、切变线、两高辐合、南支槽、西南涡、孟加拉湾风暴。其中, “两高辐合”是指副高与青藏高压(或滇缅高压)之间的辐合区。基于前期的研究, 根据区域性短时强降水过程的定义, 本文对影响昆明市 144 次区域性短时强降水过程的天气系统进行主观天气分型, 将其归纳为 4 类主要类型: 切变线型 (50.7%)、热带低值系统型 (20.8%)、两高辐合型 (17.4%) 及副热带高压外围型 (11.1%)。

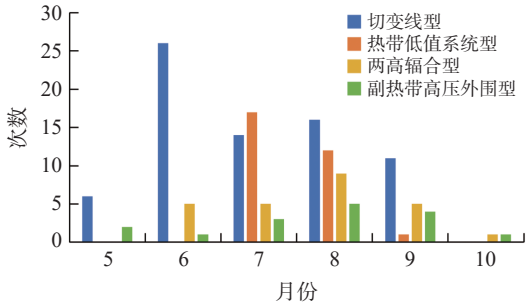


图 8 不同天气系统类型区域性短时强降水过程出现次数的逐月分布

Fig. 8 Monthly distribution of the occurrence frequency of regional short-duration heavy precipitation processes for different synoptic system types

图 8 为不同天气系统类型区域性短时强降水过程出现次数的逐月分布, 所有类型的短时强降水过程在 6—9 月出现频率较高, 但各种类型峰值出现的月份又有所差别。切变线型在 5—9 月均有发生, 又以 6 月最为突出, 其次是 8 月, 是昆明市短时强降水的主要天气系统; 热带低值系统型主要出现在 7—9 月, 其中 7 月出现最多, 9 月仅在少数年份存在; 两高辐合型在 6—10 月出现, 其中 8 月最多; 副热带高压外围型在 8 月出现频次最多, 多以午后热对流性降水为主。

由图 8 可知, 不同天气系统在发生频次和季节变

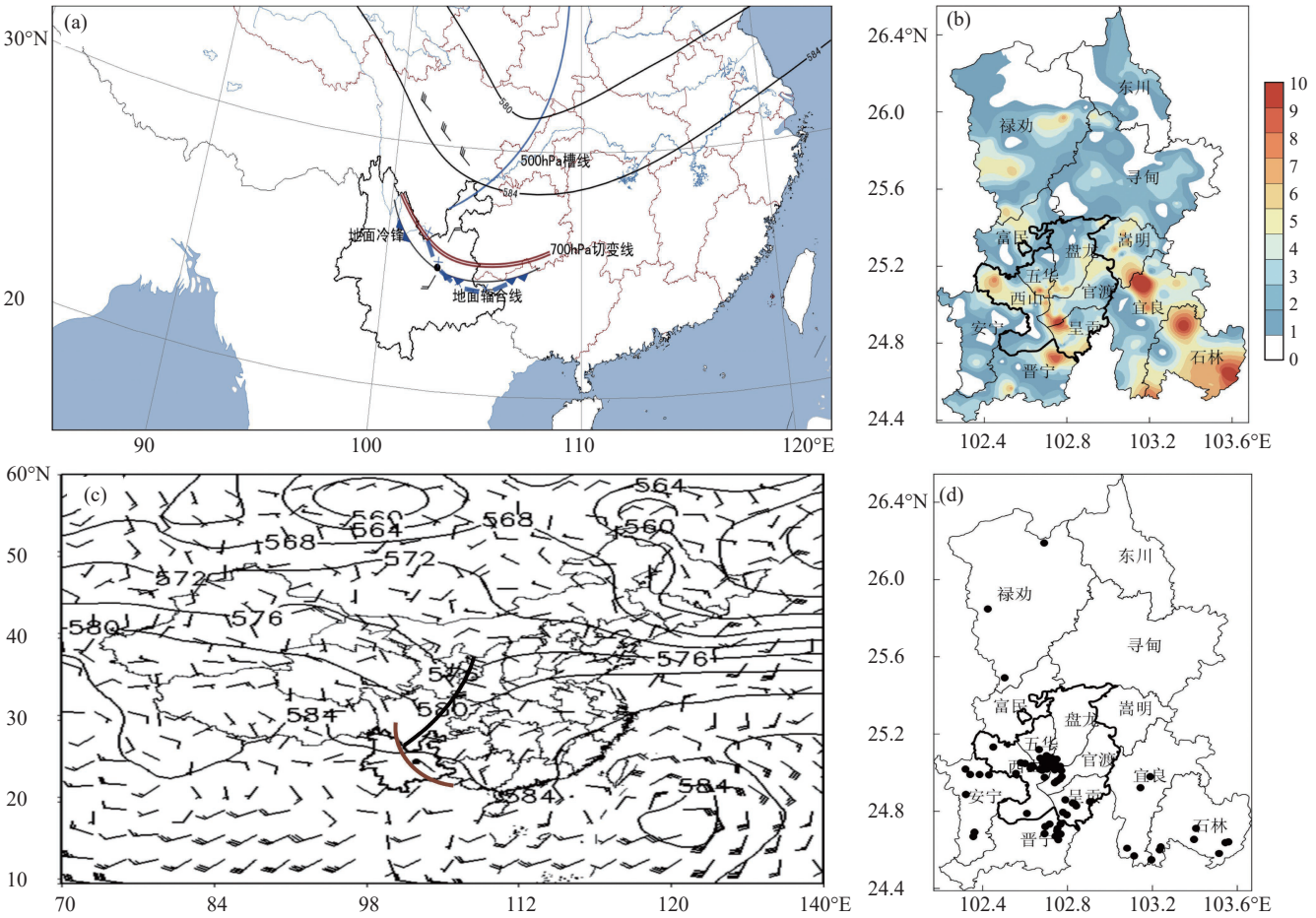


图 9 昆明市切变线型短时强降水概念模型 (a), 2018—2022 年间该型短时强降水频次分布 (b), 2018 年 6 月 8 日 08 时 500 hPa 高度场 (单位: dagpm, 黑色粗实线为槽线) 与 700 hPa 风场 (c, 单位: $m \cdot s^{-1}$, 棕色实线为 700 hPa 切变线), 以及个例 2018 年 6 月 8 日 08:00—9 日 08:00 短时强降水站点分布 (d)

Fig. 9 (a) Conceptual model of short-duration heavy precipitation for the shear line type, (b) frequency distribution of short-duration heavy precipitation of this type in Kunming from 2018 to 2022, (c) 500 hPa height field (unit: dagpm, black bold solid line denotes the trough line) and 700 hPa wind field (unit: $m \cdot s^{-1}$, brown solid line denotes the 700 hPa shear line) at 08:00 BT on June 8, 2018, and (d) distribution of short-duration heavy precipitation stations from 08:00 BT on June 8 to 08:00 BT on June 9, 2018

化上存在明显差异，为进一步揭示各型天气系统在环流配置、降水落区、水汽来源等方面的异同，以下结合典型个例，对占比较高的切变线型、热带低值系统型及两高辐合型分别进行环流配置与降水特征分析。

2.5.1 切变线型

图 9 为切变型短时强降水的概念模型与典型个例分析。切变线型中 (图 9a)，500 hPa 高原上有西风槽东移，昆明市处于槽后西北气流，高空槽不断引导高层冷空气南下。700 hPa 上在云南东北部至贵州一带存在西北—东南向的切变线，随着系统西移南压影响昆明市，切变南侧的暖湿气流与北侧的冷空气在昆明市附近形成风向切变，低层冷空气以偏东路径或东北路径影响云南，切变南侧往往存在地面冷锋，昆明市位于地面冷锋附近，东北风携带南下的冷空气与西南风携带的暖空气刚好在昆明市附近交汇，昆明市中部以南存在地面辐合线，地面冷锋与地面辐合线为短时强降水的发生发展提供了较好的抬升触发机制。强降水落区 (图 9b) 主要位于 700 hPa 切变线南侧、地面冷锋与地面辐合线之间、水汽条件较明显的南部区域。

图 9c 为典型的切变线型区域短时强降水过程 (2018 年 6 月 8 日)，高原上有短波槽不断向云南输送冷空气，孟湾附近季风低压活跃，利于水汽不断向云南上空输送，切变线位于昆明市附近并不断向西推南压，强降水落区 (图 9d) 位于中部以南的区域。

2.5.2 热带低值系统型

热带低值系统指在西太平洋或南海区域内形成的西行台风、热带低压及在孟加拉湾地区生成的热带风暴 (李华宏等，2021)。经统计分析发现，影响昆明市的热带低值系统主要是西行台风登陆后减弱的热带低值系统，因此本文主要分析西行台风及热带

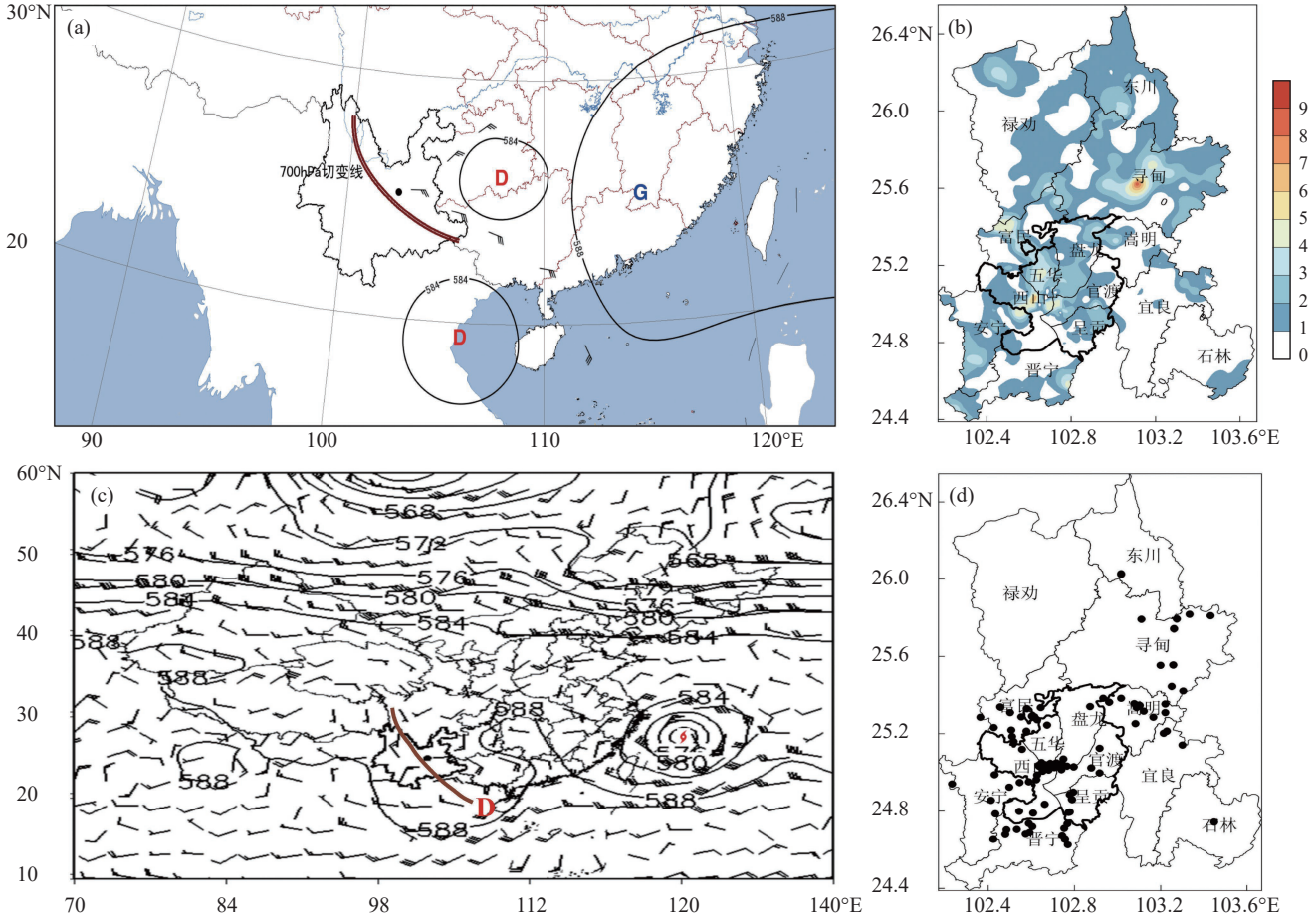


图 10 昆明市热带低值系统型短时强降水概念模型 (a)，2018—2022 年间该型短时强降水频次分布 (b)，2023 年 8 月 4 日 20 时 500 hPa 高度场 (单位：dagpm) 和 700 hPa 风场 (c，单位：$m \cdot s^{-1}$，棕色实线为 700 hPa 切变线，D 表示低值系统)，以及个例 2023 年 8 月 4 日 08:00—5 日 08:00 短时强降水站点分布 (d)

Fig. 10 (a) Conceptual model of short-duration heavy precipitation for the tropical low-value system type in Kunming, (b) frequency distribution of short-duration heavy precipitation of this type from 2018 to 2022, (c) 500 hPa height field (unit: dagpm) and 700 hPa wind field (unit: $m \cdot s^{-1}$, brown solid line denotes the 700 hPa shear line, D denotes the low system) at 20:00 BT on August 4, 2023, and (d) distribution of short-duration heavy precipitation stations from 08:00 BT on August 4 to 08:00 BT on August 5, 2023

低压生成后, 西移过程中对昆明市的影响。图 10 为热带低值系统型短时强降水的概念模型与典型个例分析。500 hPa (图 10a) 副高位于华南一带, 台风沿副高外围西南气流移入广西北部湾, 台风登陆后快速减弱为热带低压并逐渐西行至越南北部一带, 云南处于低压外围东南及偏东气流或低压倒槽控制下, 昆明市南部处于东南气流气旋性弯曲最大处, 短时强降水多发生在热带低值系统西侧的偏东气流区或者台风倒槽附近。另一种情况为, 台风在广东登陆后, 沿副高外围东南气流向西北方向移至广西至贵州、湖南一带, 短时强降水多发生在台风西侧的东北气流区 (30 例中出现 6 例)。上述两种情况影响下, 500 hPa 和 700 hPa 上昆明市为偏东或东南气流控制, 往往存在西北风与偏东风或东南风的切变辐合, 热带低值系统外围的偏东或东南气流是水汽和热力的输送通道, 风向风速的辐合为强对流天气提供了较好的动力抬升机制, 此类短时强降水天气 (图 10b) 主要出现在昆明市东北部及西南区域。

图 10c 为典型的热带低值系统型区域短时强降水过程 (2023 年 8 月 4 日), 受台风“卡努”、副高及南海附近的热带低值系统共同影响, 昆明市处于副高和低压外围东南气流与西北气流的切变辐合区内, 水汽通道畅通, 致使强降水落区 (图 10d) 位于昆明市中部以南的区域。

2.5.3 两高辐合型

两高辐合型短时强降水过程中 500 hPa 上昆明市处于两个高压环流的辐合区内, 根据高压环流的位置通常分为两类: Ⅰ类是青藏高原东南部至缅甸东北部的高压 (简称滇缅高压) 与副高在云南中东部形成辐合区; Ⅱ类是青藏高原一带有高压形成 (简称青藏高压) 与副高在云南中东部形成辐合区。图 11 为Ⅰ类两高辐合型概念模型与典型个例分析, Ⅰ类

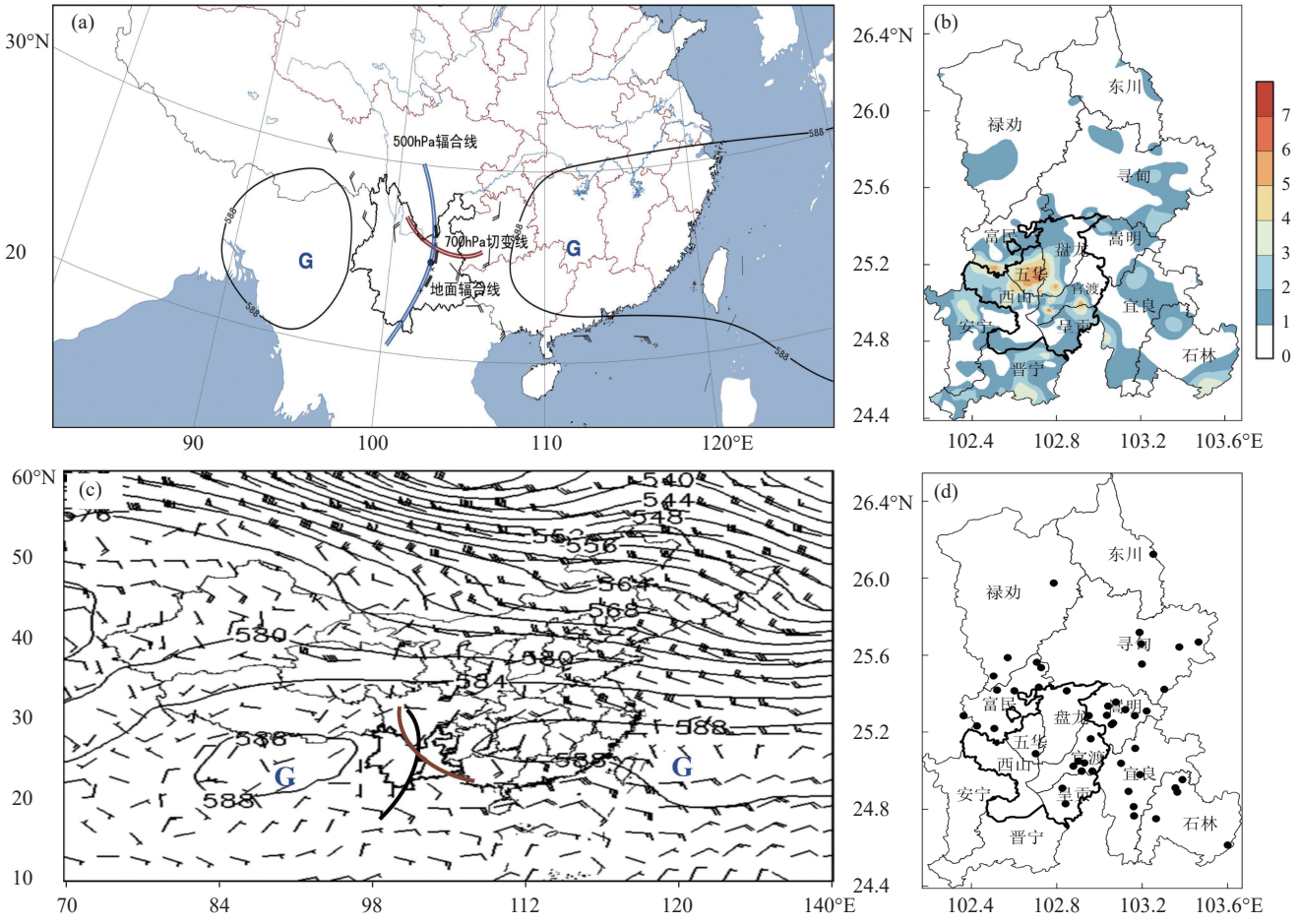


图 11 昆明市Ⅰ类两高辐合型短时强降水概念模型 (a), 2018—2022 年间该型短时强降水频次分布 (b), 2019 年 10 月 5 日 08 时 500 hPa 高度场 (单位: dagpm, 黑色粗线为辐合区) 和 700 hPa 风场 (c, 单位: $m \cdot s^{-1}$, 棕色实线为 700 hPa 切变线), 以及个例 2019 年 10 月 4 日 08:00—5 日 08:00 短时强降水站点分布 (d)

Fig. 11 (a) Conceptual model of short-duration heavy precipitation for the type-I two-high convergence type, (b) frequency distribution of short-duration heavy precipitation of this type from 2018 to 2022, (c) 500 hPa height field (unit: dagpm, black bold solid line denotes the convergence zone) and 700 hPa wind field (unit: $m \cdot s^{-1}$, brown solid line denotes the 700 hPa shear line) at 08:00 BT on October 5, 2019, (d) distribution of short-duration heavy precipitation stations from 08:00 BT on October 4 to 08:00 BT on October 5, 2019

中 (图 11a) 500 hPa 上副高位于华南一带，云南处于副高外围西南气流控制，利于将南海附近的水汽向云南上空输送，584 dagpm 线位于云南中东部，在云南至缅甸东部存在滇缅高压或高压脊区，高压东侧的偏北及西北气流与副高外围的偏南气流在云南中部形成一条准南北向的辐合区，昆明市刚好位于辐合区附近。700 hPa 上常存在西北—东南向的切变，同时往往存在地面辐合线，两高辐合区、切变线和地面辐合线，为短时强降水的形成提供了较好的动力、热力、水汽条件和抬升触发机制，在这样的配置下，短时强降水 (图 11b) 主要发生在辐合区附近，多为分散对流性降水，大值区主要位于 500 hPa辐合区和 700 hPa 切变线东南气流交汇处，水汽条件更充沛的南部地方。

图 11c 为典型的滇缅高压与副高辐合型区域短时强降水过程 (2019 年 10 月 5 日)，昆明市处于滇缅高压与副高辐合区内的偏南和东南气流内，强降水 (图 11d) 主要位于昆明市中部以东的区域内。

图 12 为Ⅱ类两高辐合型概念模型与典型个例分析，Ⅱ类中 (图 12a) 500 hPa 上副高位于长江中下游一带，西脊点位于贵州一带，副高外围的西南气流利于将南海附近的水汽向云南输送，青藏高压东侧的西北风与副高外围的西南风或偏西风，在四川-贵州-云南一带形成东北—西南向的辐合区。700 hPa 在昆明市中部以北形成西北—东南向的切变线，地面存在东北—西南向的地面辐合线与之相配合，短时强降水落区 (图 12b) 较为分散，以对流性降水为主。

图 12c 为典型的青藏高压与副高辐合型区域短时强降水过程 (2019 年 7 月 30 日)，昆明市处于青藏高压与副高辐合区内，南海附近有热带低值系统，副高与低压外围的东南暖湿空气与青藏高压外围的西北干冷空气刚好在昆明市附近交汇，700 hPa 上昆明

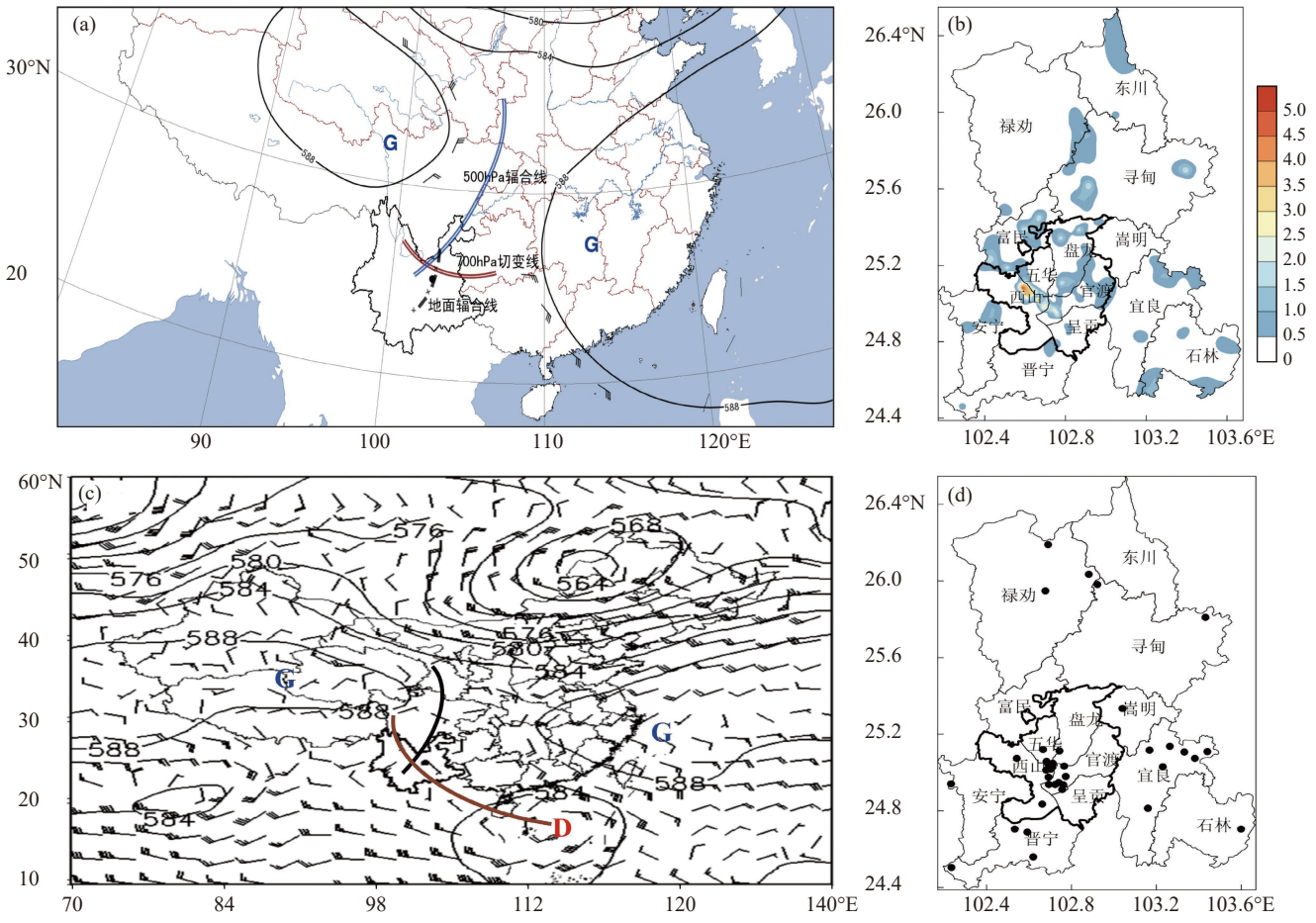


图 12 昆明市Ⅱ类两高辐合型短时强降水概念模型 (a)，2018—2022 年间该型短时强降水频次分布 (b)，2019 年 7 月 30 日 14 时 500 hPa 高度场 (单位：dagpm，黑色粗线为辐合区) 和 700 hPa 风场 (c，单位：$m \cdot s^{-1}$，棕色实线为 700 hPa 切变线)，以及个例 2019 年 7 月 30 日 08:00—31 日 08:00 短时强降水站点分布 (d)

Fig. 12 (a) Conceptual model of short-duration heavy precipitation for the type-Ⅱ two-high convergence type in Kunming, (b) frequency distribution of short-duration heavy precipitation of this type from 2018 to 2022, (c) 500 hPa height field (unit: dagpm, black bold solid line denotes the convergence zone) and 700 hPa wind field (unit: $m \cdot s^{-1}$, brown solid line denotes the 700 hPa shear line) at 14:00 BT on July 30, 2019, and (d) distribution of short-duration heavy precipitation stations from 08:00 BT on July 30 to 08:00 BT on July 31, 2019

市处于切变辐合区, 强降水落区 (图 12d) 主要集中在昆明市主城区, 其他地区均较为分散。

2.5.4 不同天气系统的配置特征及预报指示意义

上述天气系统在环流配置、水汽来源及抬升触发条件上存在差异, 直接影响降水时空分布。基于个例分析, 并结合前人相关研究成果, 对其成因及预报着眼点归纳如下:

(1) 水汽来源差异。切变线型水汽源自孟加拉湾, 由西南气流持续输送, 利于形成范围较大的降水 (李华宏等, 2021); 热带低值系统型水汽主要来源于南海, 受台风外围及副高边缘东南气流输送, 低层暖湿条件好, 易触发局地强对流 (何钰等, 2018; 周泓等, 2025); 两高辐合型的水汽主要来自南海, 经副高外围气流输送至云南中东部汇聚, 多以分散性对流为主 (马文倩等, 2023)。

(2) 地形耦合作用。偏南暖湿气流遇主城区喇叭口地形强迫辐合抬升, 导致切变线型下主城区成为高频区 (杨芳园等, 2021); 偏东气流在东北部山区迎风坡产生强迫抬升, 形成热带低值系统型的东北部强降水中心。

(3) 抬升触发机制共性。对比分析表明, 尽管环流背景各异, 但引发短时强降水的抬升触发机制具有显著共性: 500 hPa 有大尺度系统引导, 700 hPa 存在风向切变或风速辐合, 近地面层存在辐合线或冷锋。因此, 地面辐合线 (或锋面) 配合 700 hPa 切变线, 是触发昆明短时强降水的关键触发机制。

3 结论与讨论

本文利用 2018—2022 年昆明市雨季 (5—10 月) 国家站与区域站逐小时降水观测资料, 统计分析了昆明市雨季短时强降水和极端短时强降水的时空分布特征, 并对区域性短时强降水过程进行天气分型, 归纳出主要的天气系统及环流配置, 主要结论如下:

(1) 昆明市雨季短时强降水空间分布极其不均, 总体呈南多北少的分布特征, 高发期集中在主汛期 6—8 月, 短时强降水主要集中在昆明市主城区、东部及东南部等区域; 极端短时强降水则零散分布于主城区、东部及南部县区, 相较于短时强降水, 极端短时强降水出现的概率偏低, 多呈零散、孤立点分布。不同等级短时强降水频次与降水强度的空间分布存在一定的差异性。主城区为短时强降水的高发频发区, 其特殊的地理位置及地形对降水具有显著的增幅作用。

(2) 月变化上, 不同等级短时强降水呈单峰型分布, 短时强降水在 7 月发生频次最多, 其次为 8 月; 极端短时强降水则以 6 月最为频繁, 其次是 7 月, 反映了极端短时强降水更依赖初夏的不稳定能量。日变化上, 不同等级短时强降水均呈双峰型分布, 且夜雨特征尤为明显, 短时强降水多发生于 17—19 时以及凌晨 00—03 时; 极端短时强降水则集中于 02—03 时及 20—23 时, 傍晚峰值主要与日间热力不稳定能量积累释放相关, 凌晨峰值则与夜间辐射冷却导致层结不稳定增强有关。

(3) 昆明市区域性短时强降水的主要天气系统分为 4 类: 切变线型、热带低值系统型、两高辐合型、副高外围型。切变线型发生次数最多, 多见于 6 月和 8 月, 高发于傍晚至凌晨, 强降水主要位于昆明市中部以南; 热带低值系统型主要集中在 7 月和 8 月, 高发于傍晚, 强降水集中于东北部及西南部; 两高辐合型以 8 月最多, 高发于午后至次日凌晨, 其中 I 类强降水位于中南部, Ⅱ 类落区分散; 副高外围型高发于午后, 强降水分散、局地。4 类天气系统环流背景各异, 但抬升触发机制存在共性: 500 hPa 有大尺度系统引导, 700 hPa 存在风向切变或风速辐合, 近地面层存在辐合线或冷锋。

本文利用高密度区域自动站观测资料, 弥补了以往基于国家站资料在揭示云南复杂地形下短时强降水精细化空间分布方面的不足, 深化了对低纬高原地区短时强降水时空特征及天气分型的认识。但由于复杂地形下观测站点空间分布不均且空间覆盖相对有限, 对山区、河谷等典型下垫面上强降水的特征刻画尚不够完整。同时, 研究侧重于气候统计与天气系统分型, 对地形动力强迫作用、中小尺度对流触发机制等缺乏深入分析。后续研究将结合多源高分辨率观测资料与数值模拟, 重点分析地面辐合线与 700 hPa 切变线这一关键触发机制在不同环流背景下的配置特征, 为短时强降水的精细化预报与风险预警提供科学依据。

参考文献 (References):

曹杰,李华宏,姚平,等.2009.北半球夏季印度洋和太平洋水汽交汇区及其空间分异规律研究[J].自然科学进展,19:302−309. Cao J, Li H H, Yao P, et al. 2009. Research on the convergence zone and spatial differentiation of water vapor in the Indian Ocean and Pacific Ocean during summer in the Northern Hemisphere [J]. Progress in Natural Science,19:302−309 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1002−008X.2009.03.009

曹舒娅,邹兰军,王易,等.2023.苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征[J].暴雨灾害,42(5):532−540. Cao S Y, Zou L J, Wang Y, et al. 2023. Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy

rainstorm in southern Jiangsu [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5): 532−540 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−128

陈静.2017.云南昆明突降暴雨致多地被淹 1300 余人被困[N/OL]. 中国新闻网, https: //www. chinanews. com. cn/m/sh/2017/07-20/828305-6.shtml. Chen J. 2017. Multiple areas flooded by the sudden rainstorm in Kunming and more than 1300 people were trapped [N/OL]. China News, https://www.chinanews.com.cn/m/sh/2017/07-20/8283-056.shtml (in Chinese)

陈元昭,俞小鼎,陈训来.2016.珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J].气象,42(2):144−155. Chen Y Z, Yu X D, Chen X L. 2016. Characteristics of short-time severe rainfall events based on weather flow and key environmental parameters in Pearl River Delta [J]. Meteorological Monthly,42(2):144−155 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.02.002

何科,黄楚惠,李永军,等.2025.近 10 a 攀枝花市短时强降水时空分布特征研究[J].高原山地气象研究,45(1):95−104. He K, Huang C H, Li Y J, et al. 2025. Temporal and spatial distribution characteristics of short-term heavy precipitation in Panzhihua in recent ten years [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(1):95−104. doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.01.011

何立富,陈双,郭云谦.2020.台风利奇马 (1909) 极端强降雨观测特征及成因[J].应用气象学报,31(5):513−526. He L H, Chen S, Guo Y Q. 2020. Observation characteristics and synoptic mechanisms of typhoon Lekima extreme rainfall in 2019 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(5):513−526 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200501

何钰,陈小华,李耀孙,等.2021.云南省副热带高压外围类短时强降水的雷达回波特征[J].气象,47(2):450−462. He Y, Chen X h, Li Y S, et al. 2021. Radar echo characteristics of short-time severe rainfall in the periphery of subtropical high in Yunnan Province [J]. Meteorological Monthly,47(2):450−462 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.04.006

何钰,陈小华,杨素雨,等.2018.基于“配料法”的云南短时强降水预报概念模型建立[J].气象,44(12):1542−1554. He Y, Chen X H, Yang S Y, et al. 2018. Forecast conceptual model establishment of short-time severe rainfall on Yunnan based on the "Ingredients" [J]. Meteorological Monthly,44(12):1542−1554 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.12.004

侯淑梅,孙敬文,孙鹏程,等.2020.基于加密自动气象观测站和国家气象观测站的山东省极端短时强降水时空分布特征的对比分析[J].气象,46(2):200−211. Hou S M, Sun J W, Sun P C, et al. 2020. Comparative analysis of spatio-temporal distribution characteristics of extreme short time severe precipitation in Shandong based on the dense observations from automatic weather stations and national stations [J]. Meteorological Monthly,46(2):200−211 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.02.006

金燕,晏红明,何雨芩,等.2024.昆明城市降雨特性变化及城市热岛效应的可能影响[J].地理科学,4(1):2039−2050. Jin Y, Yan H M, He Y Q, et al. 2024. Change of urban precipitation characteristics and the possible influence of urban heat island effect in Kunming [J]. Scientia Geographica Sinica,4(1):2039−2050. doi:10.13249/i.cnki.sgs.20230666

李华宏,胡娟,闵颖,等.2017.云南短时强降水时空分布特征分析[J].灾害学,32(3):57−62. Li H H, Hu J, Min Y, et al. 2017. The analysis of short-time heavy rainfall spatio-temporal characteristics in Yunnan [J]. Journal of Catastrophology,32(3):57−62 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2017.03.011

李华宏,闵颖,许彦艳,等.2021.云南短时强降水及其诱发山洪灾害预报预警技术研究[M].北京:气象出版社:13-86. Li H H, Min Y, Xu Y Y, et al. 2021. Research on Short-time Heavy Precipitation and Its Induced Mountain Flood Disaster Forecasting and Early Warning Technology in Yunnan Province [M]. Beijing:China Meteorological Press: 13-86 (in Chinese)

李华宏,王曼,闵颖,等.2019.昆明市雨季短时强降水特征分析及预报研究[J].云南大学学报 (自然科学版),41(3):518−525. Li H H, Wang M, Min Y, et al. 2019. The analysis and forecast of short-time heavy rainfall in rainy season in Kunming [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition,41(3):518−525 (in Chinese). doi:10.7540/j.ynu.20180367

李耀孙,原韦华,孙绩华,等.2021.云南雨季和干季小时降水的时空特性分析[J].高原山地气象研究,41(3):24−32. Li Y S, Yuan W H, Sun J H, et al. 2021. Temporal and spatial distribution of hourly precipitation in rainy and dry seasons over Yunnan province [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,41(3):24−32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2021.03.004

李鹏,徐宗学,张瑞,等.2020.济南市极端降水特性与雨岛效应分析[J].北京师范大学学报 (自然科学版),56(6):822−830. Li P, Xu Z X, Zhang R, et al. 2020. Extreme precipitation and rainfall island effect in Jinan city [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 56(6):822−830 (in Chinese). doi:10.12202/j.0476−0301.2020139

梁红丽,王曼,李湘.2018. 2012 年春末昆明大暴雨的中尺度对流系统特征分析[J].气象,44(11):1391−1403. Liang H L, Wang M, Li X. 2018. Characteristic analysis of mesoscale convective system of heavy rainstorm in Kunming in the late Spring 2012 [J]. Meteorological Monthly,44(11):1391−1403 (in Chinese). doi:10.7519/i.issn.1000−0526.2018.11.002

刘冉阳.2019.昆明遭大到暴雨袭击城市积水严重[N/OL]. 中国日报网, https://baijiahao.baidu.co-m/s?id=1639618909389413899&wfr=spider&for=pc. Liu R Y. 2019. Kunming was hit by heavy rains and the city was seriously flooded [N/OL]. China daily, https://baijiahao.baidu.com/s?id=1639618909389413899&wfr=spider&for=pc (in Chinese)

马文倩,李耀孙,陈小华,等.2023.云南两高辐合背景下低涡强降水过程对比分析[J].云南大学学报 (自然科学版),45(1):124−134. Ma W Q, Li Y S, Chen X H, et al. 2023. A comparative analysis of low-vortex heavy precipitation events over Yunnan Province under the convergence area between two highs [J]. Journal of Yunnan University:Natural Sciences Edition,45(1):124−134 (in Chinese). doi:10.7540/j.ynu.20220144

毛冬艳,曹艳察,朱文剑,等.2018.西南地区短时强降水的气候特征分析[J].气象,44(8):1042−1050. Mao D Y, Cao Y C, Zhu W J, et al. 2018. Climatic characteristics of short-time severe precipitation in southwest China [J]. Meteorological Monthly,44(8):1042−1050 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.08.006

沈晓玲,黄海迅,章丽娜.2022. 2010—2019 年浙江暖季短时强降水特征分析[J].气象科技,50(1):103−113. Shen X L, Huang H X, Zhang L N. 2022. Characteristics of short-term heavy precipitation in warm season of Zhejiang province from 2010 to 2019 [J]. Meteorological Science and Technology,50(1):103−113 (in Chinese). doi:10.19517/i.1671−6345.20210049

苏锦兰,李建,杨桂荣,等.2015.横断山系云岭余脉点苍山东西侧小时降水特性对比分析[J].气象,41(1):17−24. Su J L, Li J, Yang G R, et al. 2015. Comparative analysis on hourly precipitation features on the

east and west sides of Yunling Diancang mountain in Hengduan mountains [J]. Meteorological Monthly,41(1):17−24 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2015.01.002

苏锦兰,张万诚,宋金梅,等.2021.云南小时降水的时空分布变化研究[J].气象,47(2):133−142. Su J L, Zhang W C, Song J M, et al. 2021. Study on spatio-temporal distribution of hourly precipitation in Yunnan province [J]. Meteorological Monthly,47(2):133−142 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.02.001

孙继松,戴建华,何立富,等.2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社:1-6. Sun J S, Dai J H, He L F, et al. 2014. The Basic Principles and Technical Methods of Convective Weather Forecasting - China Convective Weather Forecasting Handbook [M]. Beijing:China Meteorological Press: 1-6 (in Chinese)

孙建华,周玉淑,傅慎明,等.2024.近十年我国涡旋系统的研究进展[J].大气科学,48(1):228−260. Sun J H, Zhou Y S, Fu S M,et al. 2024. Progress on vortices in China in the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(1):228−260 (in Chin-ese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2311.23323

王鹏飞,陶岚,管理,等.2025.喀什地区北部短时强降水环境参数和雷达特征分析[J].沙漠与绿洲气象,19(4):10−18. Wang P F, Tao L, Guan L, et al. 2025. Environmental parameters and radar characteristics of short-term heavy precipitation in northern Kashgar [J]. Desert and Oasis Meteorology,19(4):10−18. doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2407.12001

王宇.2006.云南山地气候[M].昆明:云南科技出版社:33-41. Wang Y. 2006. Yunnan Mountain Climate [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press:33-41 (in Chinese)

伍红雨,李芷卉,李文媛,等.2022.基于区域自动气象站的广东极端强降水特征分析[J].气象,46(6):801−812. Wu H Y, Li Z H, Li W Y, et al. 2022. Characteristics analysis of extremely severe precipitation based on regional automatic weather stations in Guangdong [J]. Meteorological Monthly,46(6):801−812 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.06.007

吴梦雯,罗亚丽.2019.中国极端小时降水 2010—2019 年研究进展[J].暴雨灾害,38(5):502−514. Wu M W, Luo Y L. 2019. Extreme hourly precipitation over China: Research progress from 2010 to 2019 [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):502−514. doi:10.3969/i.issn.1004−9045.2019.05.012

吴燕汶,晏红明,史正涛,等.2023.昆明强降水对城市化和热环境变化的响应研究[J].气候变化研究进展,19(6):723−737. Wu Y W, Yan H M, Shi Z T, et al. 2023. Research on the response of heavy precipitation in Kunming to urbanization and thermal environment changes [J]. Climate Change Research,19(6):723−737. doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2023.126

许美玲,段旭,杞明辉,等.2011.云南省天气预报员手册[M].北京:气象出版社:10-84. Xu M L, Duan X, Qi M H, et al. 2011. Handbook for Weather Forecasters in Yunnan Province [M]. Beijing:China Meteorological Press:10-84 (in Chinese)

薛媛,杨庆,马柱国,等.2024. 1961—2020 年中国区域不同等级降水的变化趋势及其可能成因[J].大气科学,48(2):619−644. Xue Y, Yang Q, Ma Z G, et al. 2024. Trends and possible causes of different levels of precipitation variations in China during 1961-2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(2):619−644 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2208.22033

杨春,张勇,张亚萍,等.2020.近 25 a 重庆地区小时降水时空分布特征分析[J].暴雨灾害,39(1):71−80. Yang C, Zhang Y, Zhang Y P, et al. 2020. Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years [J]. Torrential Rain and Disasters,39(1):71−80 (in Chinese). doi:10.3969/i.issn.1004−9045.2020.01.008

杨芳园,潘娅婷,邹灵宇,等.2021.昆明市两次局地短时暴雨过程对比分析[J].云南大学学报 (自然科学版),43(5):953−963. Yang F Y, Pan Y T, Zou L Y, et al. 2021. Comparative analysis of two local short-time rainstorm processes in Kunming [J]. Journal of Yun-nan University: Natural Sciences Edition,43(5):953−963 (in Chinese). doi:10.7540/j.y−nu.20200599

杨竹云,段玮,孙绩华,等.2021.云南夜雨气候特征分析[J].暴雨灾害,40(2):160−166. Yang Z Y, Duan W, Sun J H, et al. 2021. Climatological characteristics of night rain in Yunnan province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(2):160−166 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.02.007

俞小鼎.2013.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,32(3):202−209. Yu X D. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,32(3):202−209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.002

翟盘茂,王萃萃,李威.2007.极端降水事件变化的观测研究[J].气候变化研究进展,3(3):144−148. Zhai P M, Wang C C, Li W. 2007. A review on study of change in precipitation extremes [J]. Climate Change Research,3(3):144−148 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−1719.2007.03.004

赵彦军,夏军,徐宗学,等.2021.深圳市雨岛效应分析[J].北京师范大学学报 (自然科学版),57(6):768−775. Zhao Y J, Xia J, Xu Z X, et al. 2021. Rain island effect in Shenzhen city [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),57(6):768−775 (in Chinese). doi:10.12202/j.0476−0301.2020397

郑永光,周康辉,盛杰,等.2015.强对流天气监测预报预警技术进展[J].应用气象学报,26(6):641−657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al. 2015. Advances in techniques of monitoring forecasting and warning of severe convective weather [J]. Journal of Applied Meteorological Science,26(6):641−657 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20150601

周泓, 韩敏, 周晓宇, 等.2025.滇中地区 6—10 月短时强降水环境参数特征及天气学概念模型[J].气象科学,45(3):352−366. Zhou H, Han M, Zhou X Y, et al. 2025. Environmental parameter characteristics and synoptic conceptual model of short-time heavy rainfall in central Yunnan from June to October [J]. Journal of the Meteorological Sciences,45(3):352−366 (in Chinese). doi:10.12306/2023jms.0029

周晓敏,田付友,郑永光,等.2023.中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J].气象,49(3):267−278. Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G, et al. 2023. Contribution of short-duration heavy rainfall to rainstorm in China [J]. Meteorological Monthly,49(3):267−278 (in Chinese). doi:10.7519/i.issn.1000−0526.2022.071201

Yan J, Yun X W, Hua H L, et al. 2025. Interdecadal variability and possible drivers of summer extreme precipitation on the low latitude plateau of southwestern China [J]. Theoretical and Applied Climatology,156:66. doi:10.1007/s00704−024−05305−x

Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. Journal of Climate,18(7):1096−1108. doi:10.1175/JCLI−3318.1

(责任编辑　闵爱荣)