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

湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析

谢傲 李易芝 罗伯良 欧小锋 邓剑波

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

XIE Ao，LI Yizhi，LUO Boliang，OU Xiaofeng，DENG Jianbo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-012

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

基于梯度观测小时数据的南岳山降水日变化特征

Diurnal variation of precipitation at the southern slope in Nanyue Mountain based on hourly rain dataset from gradient observation

暴雨灾害. 2020, 39(2): 201-206 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.011

长江中游2020年梅雨期两种大气再分析产品日变化特征再现能力分析

Analysis on reproducing ability of diurnal variation characteristics of two atmospheric reanalysis products in the middle reaches of the Yangtze River during the Meiyu period in 2020

暴雨灾害. 2022, 41(6): 691-700 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-057

华中区域年极端小时降水特征分析

Spatio-temporal distribution characteristics of annual extreme hourly rainfall over central China

暴雨灾害. 2020, 39(5): 508-515 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.009

两套新型高分辨率再分析降水资料在湖南年季尺度上的适用性评估

Applicability evaluation of two sets of new high-resolution reanalysis precipitation data on annual and seasonal scale in Hunan

暴雨灾害. 2021, 40(2): 167-173 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.008

安徽暖季对流活动的雷达气候学特征及影响因素

Characteristics of convective storm activity during the warm season over Anhui Province based on radar mosaic climatology and the possible causes

暴雨灾害. 2023, 42(5): 554-562 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-016

云贵高原两个国家基准站降水特性比较

Comparison of rainfall characteristics of two national reference stations in Yunnan-Guizhou plateau

暴雨灾害. 2022, 41(1): 50-57 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.006

关注微信公众号，获得更多资讯信息

谢傲,李易芝,罗伯良,等.2026.湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析[J].暴雨灾害,45(1):130−141. XIE Ao, LI Yizhi, LUO Boliang, et al. 2026. Analysis of diurnal variation characteristics and formation causes of summer precipitation in Hunan Province [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):130−141 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−012

湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析

谢傲[1, 2], 李易芝[1, 2], 罗伯良[1, 2], 欧小锋[1, 2], 邓剑波[1, 2]

(1. 湖南省气象科学研究所, 长沙 410118; 2. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118)

摘　要: 基于湖南省 65 个国家气象站 1971—2023 年夏季 (6—8 月) 逐小时降水资料及欧洲中期天气预报中心发布的全球最新一代再分析数据 (the fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis, ERA5), 采用 K 均值聚类算法, 分析了湖南夏季平均降水量、日最大降水量、降水频率的空间分布特征以及湖南夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度的日变化特征和形成原因。结果表明: (1) 湖南夏季平均降水量和日最大降水量整体表现为南北多、中间少的特点, 夏季降水频率表现为湘南和湘西北地区较高, 湘中和湘东北地区较低, 夏季日降水强度分布则表现为北强南弱。(2) 湖南夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度日变化均为双峰型, 主峰值出现在 16 时 (北京时, 下同) 左右, 次峰值出现在 00 时左右。(3) <6 h 的短持续性降水对 00 时的降水量峰值贡献较大, 而≥6 h 长持续性降水对 16 时的降水量峰值贡献较大。(4) 采用 K 均值聚类算法将 65 个站分类为 3 个区域; 区域 1 (以下简称 R1) 和区域 2 (以下简称 R2) 夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度日变化曲线呈双峰型, 但 R1 最大峰值出现在凌晨, R2 出现在下午; 区域 3 (以下简称 R3) 夏季平均小时降水量、降水频率为弱的双峰型, 主峰值出现在下午。(5) 通过热力、动力和水汽条件, 初步分析了 R1、R2 和 R3 区降水高峰的形成原因。R1 区出现在午夜的降水峰值可能是因为动力强迫引起, 凌晨南风加强, 低层上升运动达到最强, 从南方输入的水汽通量也达到最大值, 同时有水汽通量辐合, 有利于降水的产生。R2 和 R3 区出现在下午的降水峰值可能与局地热力不稳定有关, 由于午后地表加热, 大气稳定性弱, 有利于对流降水发展。

关键词: 湖南; 夏季降水; 日变化; K 均值聚类算法; 形成原因

中图法分类号: P426　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−012

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

XIE Ao[1, 2], LI Yizhi[1, 2], LUO Boliang[1, 2], OU Xiaofeng[1, 2], DENG Jianbo[1, 2]

(1. *Institute of Meteorological Science of Hunan Province*, *Changsha* 410118; 2. *Key Laboratory of Preventing and Reducing Meteorological Disaster of Hunan Province*, *Changsha* 410118)

Abstract: Using hourly precipitation data from 65 national level ground meteorological stations in Hunan and the fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis data (ERA5) during the summer seasons (June to August) of 1971 to 2023, and employing the K-means clustering algorithm, this study investigated the spatial distribution characteristics of average summer precipitation, daily maximum precipitation, and precipitation frequency, as well as the diurnal variation characteristics and the formation cause of average hourly precipitation, precipitation frequency, and precipitation intensity during the summer seasons in Hunan. The results are as follows. (1) The average summer precipitation and maximum daily precipitation in Hunan generally show a pattern of more in the north and south, and less in the central region. The frequency of average summer precipitation is higher in southern and northwestern Hunan, lower in central and northeastern Hunan. The distribution of summer precipitation intensity is stronger in the north and weaker in the south. (2) The daily variations of average summer hourly precipitation, precipitation frequency, and precipitation intensity in Hunan during summer are bimodal, with the main peak appearing around 16:00 (Beijing Time, same below) and the secondary peak appearing around 00:00. (3) The total precipitation of events persisting 1~6 hours contribute more significantly to the precipitation peak at 00:00, while the total precipitation of long-duration events persisting over 6 hours are associated with greater contributions to the peak at 16:00.

收稿日期: 2025−01−23; **定稿日期**: 2025−12−19

资助项目: 湖南省科技厅自然科学基金重大专项 (2021JC0009); 湖南省气象局创新发展专项 (CXFZ2024-F2ZX42)

第一作者: 谢傲, 主要从事天气气候诊断分析与预测研究。E-mail: xieao0209@163.com

通信作者: 李易芝, 主要从事天气气候诊断分析与预测研究。E-mail: girl.lyz@163.com

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

(4) Using the K-means clustering algorithm, 65 stations were classified into 3 regions. The daily variation curves of average summer hourly precipitation, precipitation frequency and precipitation intensity in Region 1 (R1) and Region 2 (R2) show a bimodal pattern, with the main peak of R1 appearing in the early morning and R2 appearing in the afternoon. Region 3 (R3) has a weak bimodal pattern of average summer hourly precipitation and frequency, with the main peak appearing in the afternoon. (5) The formation causes of precipitation peak formation in R1, R2, and R3 regions were preliminarily investigated through thermal, dynamic, and water vapor condition analysis. The peak precipitation in R1 area at midnight may be caused by dynamic forcing. In the early morning, the south wind strengthens, and the strongest low-level upward movement occurs. The water vapor flux input from the south also reaches its maximum value, and there is convergence of water vapor flux, which is conducive to the generation of precipitation. The peak precipitation in R2 and R3 regions in the afternoon may be triggered by local thermal instability. Due to surface heating in the afternoon, atmospheric stability is weak, which favors the development of convective precipitation.

Key words: Hunan; summer precipitation; diurnal variation; K-means clustering algorithm; formation causes

引　言

降水的日变化分析是认识区域气候特征和研究区域气候变化的一个重要方向 (Wallace, 1975; Yang and Slingo, 2001; 牛元甫等, 2025)。了解降水日变化的时空特征及其背后的物理机制对预测区域降水以及进一步提高防灾减灾能力也具有重要意义 (Yuan et al., 2012; 吴梦雯等, 2019; 黄艳等, 2024)。已有的研究表明, 中国大陆的夏季降水日变化较大且具有明显的区域特征 (Yu et al., 2007; 宇如聪和李建, 2016; 万昊旻等, 2024)。如青藏高原中西部夏季降水量和频率的日变化表现出凌晨和傍晚的双峰结构, 而高原北部降水量和频率的日峰值出现在傍晚, 东部出现在午夜至凌晨 (计晓龙等, 2017; 辛鹏超等, 2024)。高原以东四川盆地以及中东部山区夏季降水以夜间峰值为主, 可能与低层风速夜间加强有关 (Yu et al., 2009; 李方正和李国平, 2024)。秦岭南侧夏秋两季降水量、降水频率和降水强度均以清晨峰值为主; 而北侧降水量日变化夏秋变化较大, 且主要由降水强度贡献, 夏季降水强度在午后较强, 而秋季清晨降水强度更大 (张宏芳等, 2020; 唐敏丽等, 2022)。华南地区沿海和迎风山脉附近清晨降水峰值明显, 而午后降水峰值则在陆地上占主导地位, 且清晨和午后降水在时长、频率、强度和传播方式上有明显的不同 (Chen et al., 2018; 唐菁等, 2023)。

以上关于不同地区降水日变化的研究主要按自然地理区域进行主观划分。按照降水日变化的峰值时间和幅度等, 使用 K 均值聚类分析方法将相似的格点或站点聚类并划分为不同的类型, 这种做法则能利用降水数据更客观地确定降水日变化的不同类型, 避免按照主观经验划分。如朱黎明等 (2021) 采用 K 均值聚类算法对中国陆地区域的夏季逐时格网降水数据进行了聚类, 发现中国大部分地区的降水量日变化由降水频率日变化主导, 此外一些盛行夜雨区域在空间分布上表现出从西向东的分布模式。赵玮等 (2022) 使用 K 均值聚类算法将北京划分为两个区域, 结果显示不同区域的降水量、降水频率和强度的日变化具有完全不同的分布特点。关于中国不同区域降水日变化的空间分布特征和时间演变特征已有不少研究, 而近年来对降水日变化的成因和机理研究也已成为大气科学领域的一个重要研究方向, 但多集中在沿海地区海陆风辐合 (Chen et al., 2015; 2017) 以及我国西部和北部大范围山地及其相邻平原或盆地之间形成的山地—平原螺线管环流 (Mountain-Plains Solenoid, MPS) 上 (He and Zhang, 2010; Jin et al., 2013; Zhang et al., 2014)。针对湖南地区地形地貌, 基于热力、动力及水汽条件分析湖南夏季降水日变化形成原因的研究相对较少。

湖南位于长江中下游地区, 南北气候差异大, 南部属于亚热带湿润气候, 北部则为亚热带季风气候; 东南西三面环山, 地形地貌复杂, 极端天气频发, 其中湘南的南岭山脉对夏季偏南暖湿气流有阻挡和辐合抬升等作用, 使得降水强度增强 (夏茹娣, 2006; 陈芳丽等, 2022)。不少学者对湖南夏季降水日变化特征进行了系统性分析 (陈红专, 2021; 周芳等, 2025)。林必元等 (1988) 研究表明洞庭湖湖陆风转换可以引起湖陆风散度和涡度的变化, 从而引起洞庭湖地区清晨和傍晚降水的加强, 夏季尤为显著。李晶等 (2019) 发现长株潭地区降水日变化呈现双峰型分布, 20 世纪 60 年代—21 世纪 10 年代各年代和春、夏、秋各季平均小时降水量峰值出现时间均集中在 04—08 时 (北京时, 下同) 和 15—16 时两个时段。戴泽军等 (2009) 使用 1992—2004 年逐时降水数据分析了湖南省夏季 (6—8 月) 降水日变化特征, 发现湘东南降水量、降水频率峰值主要出现在午后到傍晚, 而其它地区的降水峰值一般出现在清晨。目前关于湖南省降水日变化研究主要集中在降水量、降水频率峰值时间差异上, 而对于差异的形成原因分析较少。

且考虑到全球气候变暖的影响, 极端降水增多, 夏季最大小时降水量在中国大部分地区均呈现增长趋势 (Xiao et al., 2016), 降水日变化时空分布特征也发生了变化, 区域差异更加显著 (Yuan et al., 2013; 汪小康等, 2024), 因此使用最新气象资料对湖南地区降水日变化特征进行精细化和深入的研究十分必要。

本文基于 1971—2023 年共 53 a 的湖南夏季 (6—8 月) 逐时降水数据及 ECMWF 再分析资料 (ERA5), 采用 K 均值聚类算法, 研究了湖南夏季平均降水量、日最大降水量、降水频率的空间分布特征以及湖南夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度的日变化特征和形成原因, 还对比了本文研究结果与已有相关研究结果的差异, 以期为加强我国极端天气事件的监测、预测能力和区域精细化降水预报能力提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括: (1) 湖南省气象信息中心提供的湖南国家级地面气象站 1971—2023 年夏季 (6—8 月) 逐小时降水资料, 选取其中缺测较少的 65 个站 (图 1), 并通过了气候极值检验、单站极值检验和数据一致性检验等质量控制, 用于分析湖南夏季平均降水量、日最大降水量、降水频率的空间分布特征以及湖南夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度的日变化特征。(2) 欧洲中期天气预报中心发布的 1971—2023 年 ERA5 全球再分析数据, 包含全球逐小时水平风场、垂直速度、气温、比湿、相对湿度和对流有效位能 (Convective available potential energy, CAPE) 等, 空间分辨率为 0.5°×0.5°。用于分析湖南夏季降水日变化区域差异的形成原因。

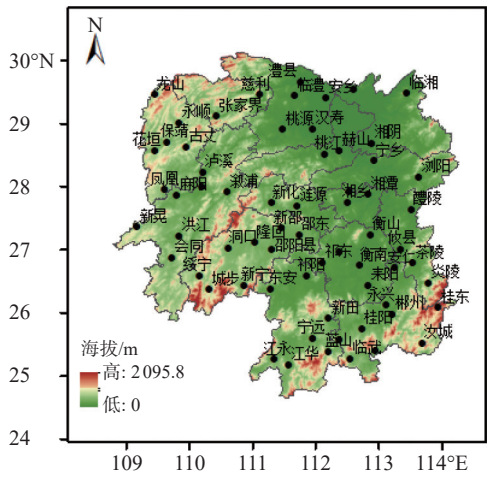


图 1 湖南省 65 个国家站点 (圆点) 分布 (填色为地形高度)

Fig. 1 Location distribution of 65 national (dots) observation stations in Hunan (color-filled denotes the topographic height)

1.2 研究方法

参考赵玮等 (2022) 的研究方法, 统计多年夏季平均日降水量、夏季平均日降水强度、夏季平均日降水频率、夏季平均小时降水量、夏季平均小时降水频率和夏季平均小时降水强度等。公式如下

$$P_s = \frac{P}{D} \times 92 \tag{1}$$

$$I_s = \frac{P}{P_d} \tag{2}$$

$$F_s = \frac{P_d}{D} \times 100\% \tag{3}$$

$$P_{ha} = \frac{P_{ht}}{H} \tag{4}$$

$$F_h = \frac{P_h}{H} \times 100\% \tag{5}$$

$$I_h = \frac{P_{ht}}{P_h} \tag{6}$$

式 (1)—(6) 中, P_s 为 1971—2023 年多年夏季平均日降水量 (单位: mm), P 为 1971—2023 年夏季总降水量 (单位: mm), D 为夏季总非缺测日数 (单位: d), 即逐小时降水资料中 24 h 内没有缺测值记录的日期总数(选取的 65 个站每个站缺测日数不超过 1%), I_s 为夏季平均日降水强度 (单位: mm·d^{-1}), F_s 为夏季平均日降水频率 (单位: %), P_d 为 1971—2023 年夏季总降水日数 (单位: d), 即 24 h 内降水总量≥0.1 mm 的日数, P_{ha} 为夏季平均小时降水量 (单位: mm·h^{-1}), P_{ht} 为夏季该时次总降水量 (单位: mm), H 为夏季该时次非缺测小时数 (单位: h), F_h 为夏季平均小时降水频率 (单位: %), P_h 为夏季该时次有降水的总小时数 (单位: h), I_h 为夏季平均小时降水强度 (单位: mm·h^{-1})。

使用 1971—2023 年夏季 ERA5 逐小时再分析资料计算夏季小时水平风场矢量距平、夏季小时单层水汽通量散度和夏季小时经向水汽通量, 公式如下

$$\vec{V}_{ha} = \vec{V}_h - \vec{V}_{ave} \tag{7}$$

$$D_{mf} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q_h U_h}{g}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Q_h V_h}{g}\right) \tag{8}$$

$$M_{fh} = \frac{1}{g}\int_{x_1}^{x_2} (Q_h V_h)\,\mathrm{d}x \tag{9}$$

式 (7)—(9) 中, $\vec{V}_{ha}$ 为夏季小时水平风场矢量距平 (单位: m·s^{-1}), $\vec{V}_h$ 为夏季该时次风场矢量 (单位: mm), $\vec{V}_{ave}$ 为夏季日平均风场矢量 (单位: m·s^{-1}), D_{mf} 为夏季小时单层水汽通量散度 (单位: 10^{-7} kg·hPa·m^{-2}·s^{-1}), g 为重

力加速度 (单位: $Pa·m^2·kg^{-1}$), Q_h为夏季该时次比湿 (单位: $kg·kg^{-1}$), U_h为夏季该时次纬向风 (单位: $m·s^{-1}$), V_h为夏季该时次经向风 (单位: $m·s^{-1}$), M_{fh}为夏季小时经向流入的水汽通量 (单位: $kg·m^{-2}·s^{-1}$)。

降水量的差异是由降水频次、降水强度引起的, 同时受到地理位置、地形等的影响 (宇如聪和李建, 2016)。本文将 65 个国家站的经纬度、海拔高度、夏季平均小时降水量日峰值、夏季平均小时降水频率日峰值、夏季平均小时降水强度日峰值等进行归一化处理, 消除量纲的影响后, 再使用 K 均值聚类分析算法对站点进行分类。该方法在聚类时首先将所有样本分成 K 个初始类, 然后将 K 个类的重心作为初始凝聚点, 然后对凝聚点之外的所有样本逐个归类, 将每个样本归入离它最近的凝聚点所在的类, 每分配一个样本, 该类的凝聚点更新为这一类目前的均值, 直至所有样本都归类 (Nakamura et al., 2009)。

2 结果与分析

2.1 湖南近 53 a 夏季降水的空间分布特征

降水日变化特征通常受到降水气候特征影响, 图 2 给出了 1971—2023 年夏季湖南平均降水量、降水频率、降水强度以及日最大降水量的空间分布。从近 53 a 湖南 65 站多年平均夏季降水量 (图 2a) 看, 其整体表现为南北多、中间少的特点, 最大值出现在湘东南的桂东站 (638 mm), 最小值出现在湘中中部的衡阳站 (375 mm), 二者相差达 263 mm。日最大降水量 (图 2d) 同样呈现南北多、中间少的特点, 最大值出现在湘西北的张家界站 (448 mm), 最小值出现在湘中西部的城步站 (112 mm), 二者相差达 336 mm。从夏季平均降水频率的空间分布来看 (图 2b), 湘南和湘西北地区较高, 湘中和湘东北地区较低, 夏季降水频率最高的站点是湘东南的桂东站

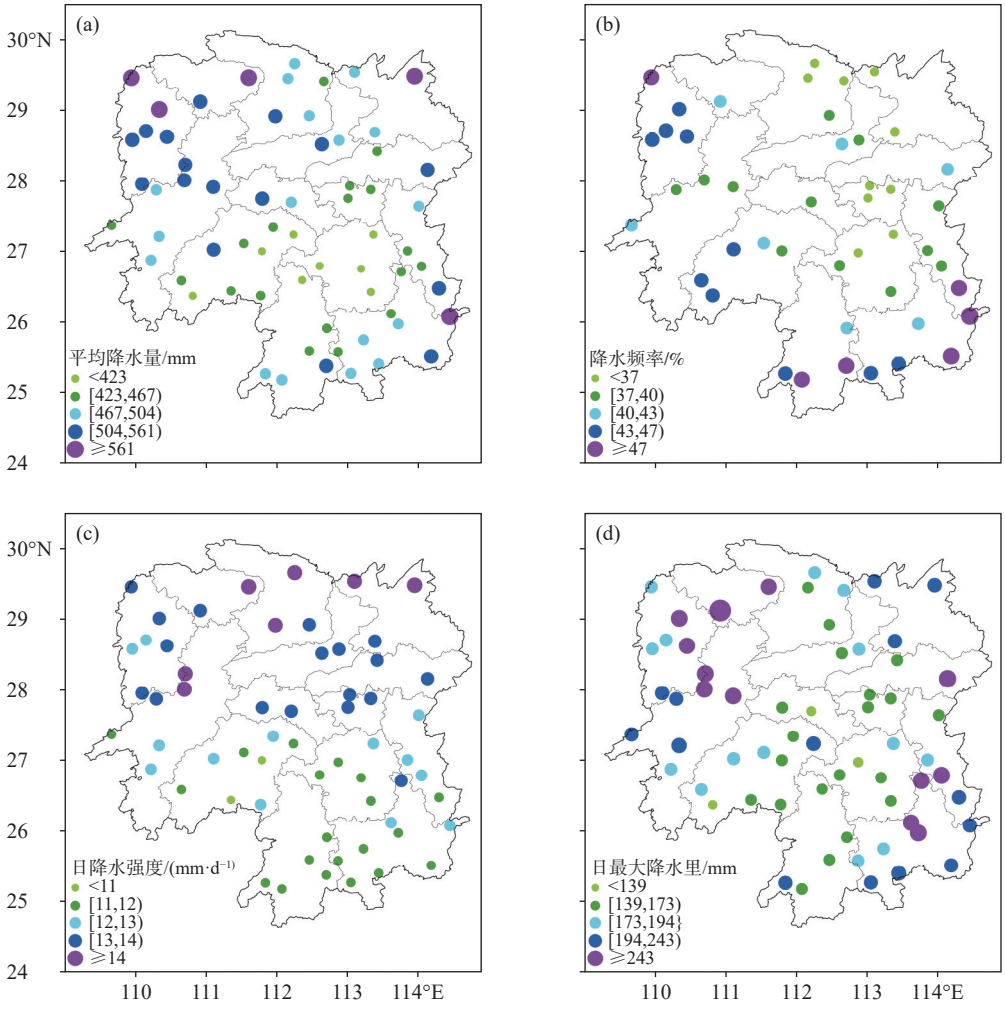


图 2 1971—2023 年湖南 65 站 (圆点) 夏季平均降水量 (a, 单位: mm)、平均降水频率 (b, 单位: %)、平均日降水强度 (c, 单位: $mm·d^{-1}$) 以及日最大降水量 (d, 单位: mm) 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a) the average precipitation amount (unit: mm), (b) average precipitation frequency (unit: %), (c) average daily precipitation intensity (unit: $mm·d^{-1}$), and (d) maximum daily precipitation amount (unit: mm) at 65 stations (dots) in Hunan in the summers from 1971 to 2023

(57%), 最低的是湘东北的华容站 (35%)。夏季平均降水强度分布则表现为北强南弱 (图 2c), 最大为湘东北的临湘站 (16 mm·d^{-1}), 最小值也出现在湘中西部的城步站(10 mm·d^{-1}), 二者相差达 6 mm·d^{-1}。夏季平均降水量、日最大降水量和夏季平均降水频率的分布与湖南地形密切相关, 湖南省东、南、西三面环山, 中部及北部低平, 形成向北开口的马蹄形盆地, 衡邵干旱走廊地形狭长, 东、西部有较高的山脉, 导致湿润季风气流难以进入, 造成区域内雨水较少。受北面武陵山脉和南面雪峰山地形影响, 湘南、湘北降水总体偏多, 频率较大。 总体而言, 湖南地区夏季降水极端性强, 区域分布不均, 地形复杂, 是旱涝灾害多发省份, 对这一地区的降水日变化特征和形成原因进行更精细化和更深入的分析十分必要。

2.2 湖南夏季降水日变化的基本特征

2.2.1 湖南夏季降水区域平均日变化特征

图 3 为湖南 1971—2023 年夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度的区域平均日变化特征。可见, 平均小时降水量、降水频率和降水强度均表现出明显的双峰型, 主峰值出现在 16 时左右, 次锋值出现在 00 时左右。夏季平均小时降水量一天之中最大值出现在 16 时, 最小值出现在 07 时 (图 3a); 夏季平均小时降水频率最高的时段为 15 时, 最低的时段为 08 时 (图 3b); 夏季平均小时降水强度最强的时段在 17 时, 最弱的时段在 07 时 (图 3c)。夏季平均小时降水量和降水频率的日变化双峰曲线相对较为平滑, 降水强度的日变化曲线相对更曲折, 在 08—17 时的上升期和 00—07 时的下降期均有波动, 10—12 时出现了微弱下降, 02—03 时有微弱上升。

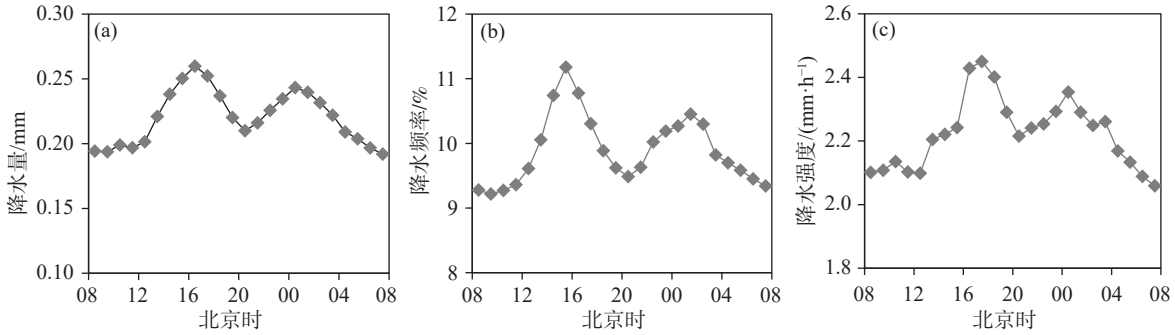


图 3 1971—2023 年湖南夏季平均小时降水量 (a)、夏季平均小时降水频率 (b) 和夏季平均小时降水强度 (c) 的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of (a) average hourly precipitation amount, (b) average hourly precipitation frequency, and (c) average hourly precipitation intensity regionally in Hunan in the summers from 1971 to 2023

2.2.2 湖南夏季降水日变化的区域差异

图 4 给出了湖南夏季平均小时降水量、降水频率以及降水强度峰值出现时间的空间分布。从图 4a 可见, 湘北地区夏季平均小时降水量日峰值均出现在 09 时之后的日间且多数为 15—17 时, 湘南地区则均出现在 21—02 时的夜间, 湘中地区大部分站点出现在中午 12 时以后。夏季平均小时降水频率 (图 4b) 和降水强度日峰值 (图 4c) 也呈现类似的空间分布特点, 湘北地区大部分站点夏季平均小时降水频率和降水强度日峰值出现在白天 09 时之后, 湘南地区大部分站点出现在夜间 21—02 时, 湘中地区大部分站点出现在午后 12—18 时。

由于湖南夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度日峰值在区域特征上表现出的相似性, 使用 K 均值聚类分析算法对站点进行分类, 结果分为三个区域 (图 4d)。区域 1 (简称 R1) 有 17 个站, 大部分站点在 26° N 以南, 处于南岭、阳明山和罗霄山迎风一侧; 区域 2 (简称 R2) 包括 16 个站, 大部分站点在 26—27.2° N, 处于雪峰山、阳明山和罗霄山背风一侧; 区域 3(简称 R3) 包括 32 站, 大部分站点在 27.2° N 以北, 西部为武陵山脉, 中部和东部大部分为地势较低的平原和丘陵地区。图 5 给出了三个区域的夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度的日变化, R1 夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度日变化曲线呈双峰型, 主峰出现在 00—01 时, 次峰出现在 15—18 时。R2 夏季平均小时降水量和降水频率相对其他两个区域变化幅度较小, 日变化曲线也呈双峰型, 主峰出现在 15—16 时, 次峰出现在 00—01 时, 主峰值和次峰值在三个区域中均最小; 夏季平均小时降水强度日变化曲线波动较大, 没有明显的双峰特征, 较高的两个峰值也出现在 16 时和 00 时。R3 夏季平均小时降水量、降水频率日变化曲线呈较弱的双峰型, 日峰值出现在 15—17 时, 次峰值出现在 00—01 时, 其中次峰值波动较缓, 而夏季平均小时降水强度日变化曲线呈单峰型, 日峰值出现在 15—17 时。总体而言, 15—18 时三个区域的夏季平均小

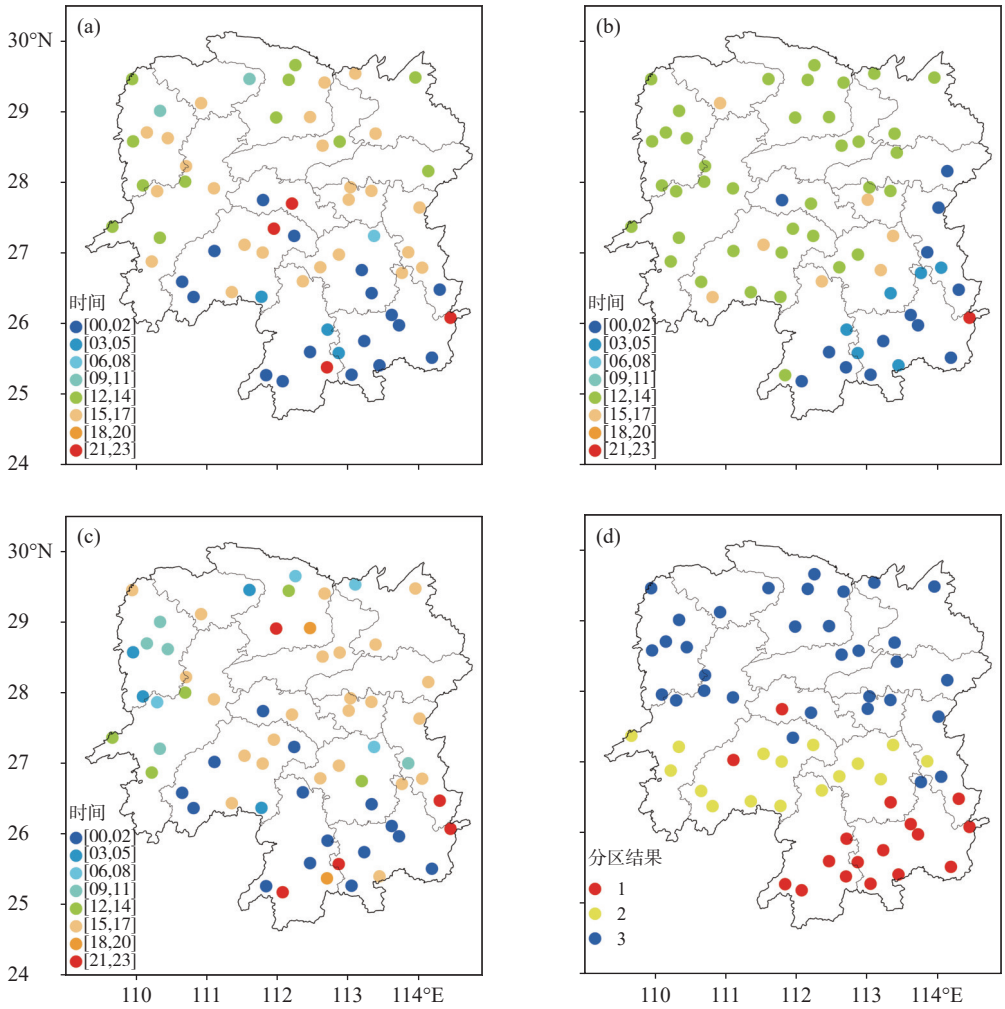


图 4 1971—2023 年湖南 65 站夏季平均小时降水量 (a)、平均小时降水频率 (b) 和平均小时降水强度 (c) 日峰值空间分布及基于 K 均值聚类分析划分的 3 个区域 (d)

Fig. 4 Spatial distribution of the (a) occurrence time of peak average hourly precipitation amount, (b)average hourly peak precipitation frequency, and (c) average hourly peak precipitation intensity in Hunan in the summer from 1971 to 2023, and (d) the three regions divided based on K-means clustering analysis

时降水量、降水频率和降水强度都出现了峰值, 其中 R2 和 R3 的幅度大于 R1; 00—01 时 R1 的峰值大于 R2 和 R3 区域, 说明湘南夜雨出现频率和降水强度均大于午后降水, 而湘中、湘北区域恰好相反, 午后降水出现频率和降水强度均大于夜间。另外, 三个区域夏季平均小时降水强度和平均降水频率峰值出现时间都基本一致, 说明降水强度大的同时降水频率也高。

图 6 给出了三个区域不同持续时间降水的降水量占 1971—2023 年夏季降水总量百分比的日变化分布, 三个区域持续 8 h 以内的降水都是在夜晚至清晨达到降水量峰值, 而持续 8 h 以上的降水一般在下午达到降水量峰值。R1 区 00 时的降水量高峰主要由持续 1~6 h 降水贡献, 累计降水量占 00 时降水总量的百分比达到 66.8%, 其中持续 2 h 的降水贡献最大, 达到 17.1%, 持续 6 h 以上的长时间降水(7~24 h)的累计降水量占 00 时降水总量的百分比为 33.2%; 而在 R2、R3 区, 不同持续时间的降水对 16 时降水量高峰的贡献相对更加分散, 持续 2 h 的降水贡献仍为最大, 但占 16 时降水总量的百分比减小到 8.0%、9.3%, 而持续 6 h 以上的长时间降水的累计降水量对 R2、R3 区峰值降水量的贡献增大, 占 16 时降水总量的百分比分别为 63.1%、61.9%。

综上, 湖南夏季降水日变化总的特征为夏季平均小时降水量、平均降水频率及平均降水强度日变化均表现出明显的双峰型, 主峰值出现在 16 时左右, 次锋值出现在 00 时左右; 持续 1~6 h 降水的累计降水量对 00 时的降水量峰值贡献较大, 而持续 6 h 以上长时间降水的累计降水量对 16 时的降水量峰值贡献较大。此外, 湖南夏季降水日变化还具有显著的区域差异, 湘南地区夏季平均小时降水量、平均降水频率及平均降水强度峰值主要出现在夜间, 湘中、

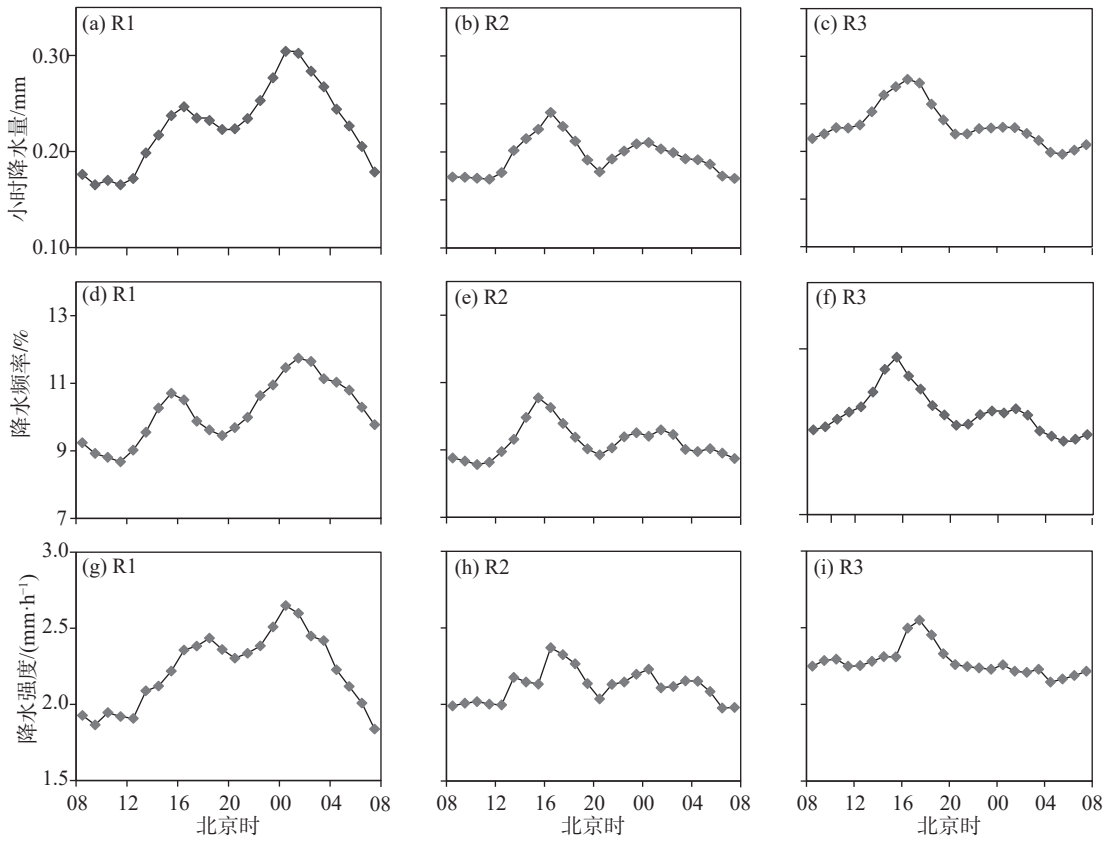


图 5 1971—2023 年湖南 R1 (a、d、g)、R2 (b、e、h)、R3 (c、f、i) 的夏季平均小时降水量 (a—c)、夏季平均小时降水频率 (d—f) 和夏季平均小时降水强度 (g—i) 的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of the (a-c) average hourly precipitation amount, (d-f) average hourly precipitation frequency, and (g-i) average hourly precipitation intensity over (a, d, g) R1, (b, e, h) R2, and (c, f, i) R3 in Hunan in the summers from 1971 to 2023

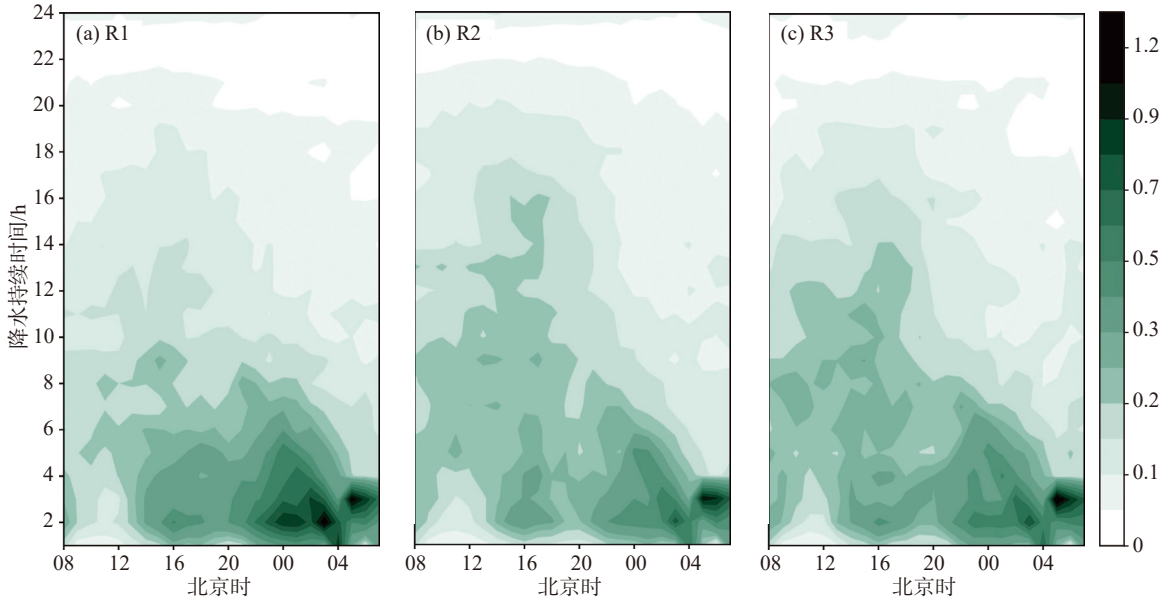


图 6 1971—2023 年湖南夏季 R1 (a)、R2 (b) 和 R3 (c) 不同降水持续时间降水量占降水总量百分比 (阴影, 单位: %) 的日变化分布

Fig. 6 Diurnal variations of precipitation amount as a percentage of total precipitation (sha'ded, unit: %) for different precipitation durations over (a) R1, (b) R2, and (c) R3 in Hunan in the summers from 1971 to 2023

湘北地区主要出现在午后到傍晚。这一区域特征与戴泽军等 (2009) 使用 1992—2004 年逐时降水数据揭示的湖南夏季降水量、降水频率峰值时间有差异，该研究认为湘东南降水量、降水频率峰值主要出现在午后到傍晚，而其它地区的降水峰值一般出现在清晨。宇如聪等 (2016)发现包括湖南区域在内的

105° E 以东、32° N 以南的大部分台站和东南内陆地区的降水量峰值时间多出现在下午时段。

2.3 湖南夏季降水日变化形成原因

降水由太阳辐射驱动, 受非均匀下垫面、多尺度大气环流、水汽路径等因素影响, 日变化机制十分复杂, 例如中国南方低层的海陆风辐合是珠江三角洲山区迎风坡存在夜间降水高峰的主要原因 (Chen et al., 2015, 2017), 但在我国西部和北部的大范围山地及其相邻的平原或盆地中, 午后的日降水峰值与热力驱动的区域山地-平原螺线管环流 (MPS) 有着密切的关系 (He and Zhang, 2010; Jin et al., 2013; Zhang et al., 2014)。

为进一步研究湖南夏季降水日变化区域差异的形成原因, 本文分析了 1971—2023 年夏季 ERA5 水平风场、对流有效位能 (CAPE)、垂直速度逐小时数据, 并通过水平风场、比湿数据等计算得到水汽通量散度和经向水汽通量。首先分析湖南地区降水日变化的热力条件, 图 7 给出了 08 时开始间隔 4 h 的 CAPE 值和假相当位温距平日变化。12 时开始, 湘中以北 CAPE 值上升到 800 ~ 1 000 J·kg^{-1}。16 时湖南地区 CAPE 值与 12 时相差不大, 由于午后地表加热, 湘中以北假相当位温正距平达到一天之中峰值, 此时大气不稳定性最强, 有利于对流发展。20 时湘

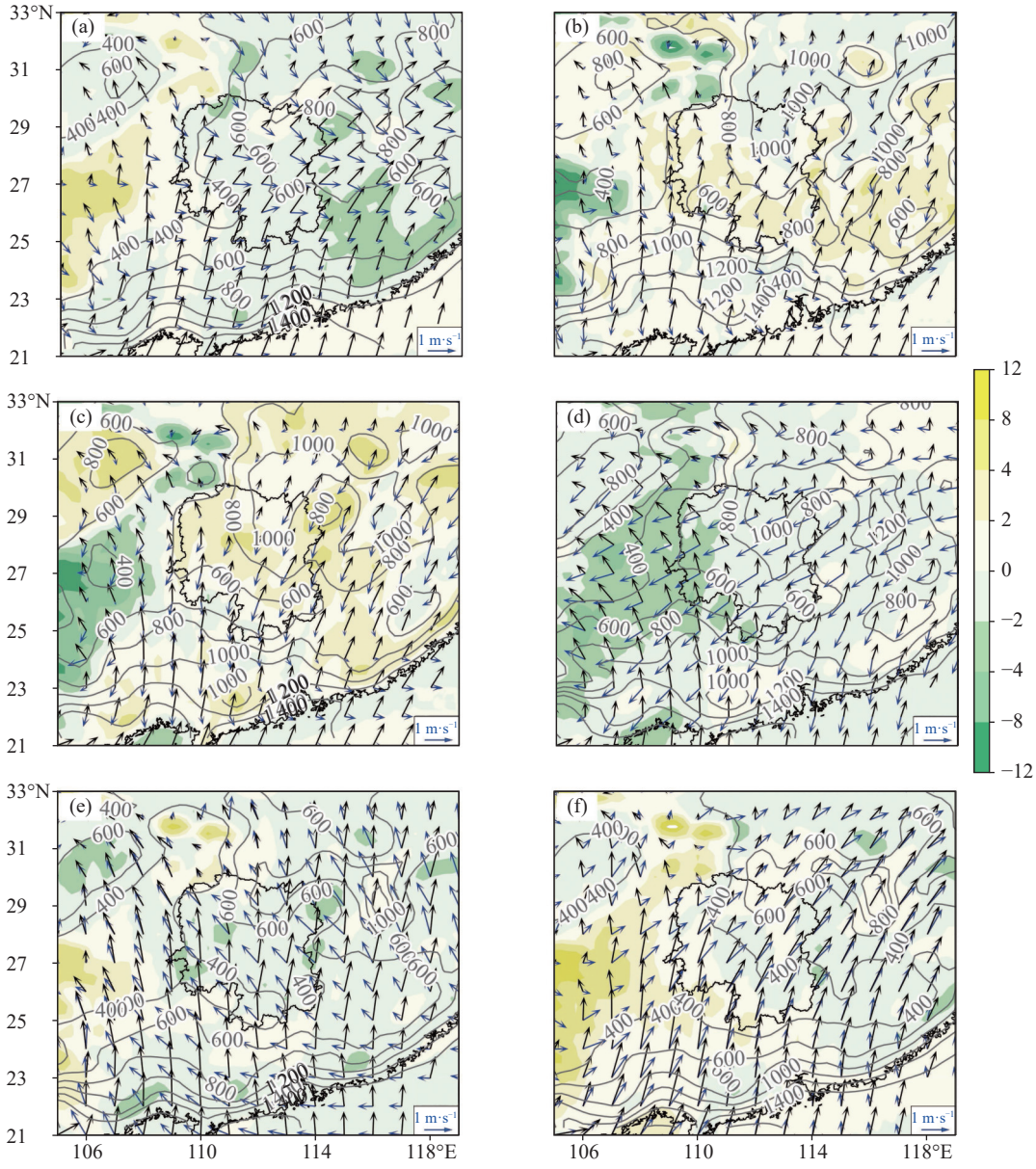


图 7 1971—2023 年湖南夏季 08 时 (a)、12 时 (b)、16 时 (c)、20 时 (d)、00 时 (e)、04 时 (f) 850 hPa 等压面上的水平风场 (单位: m·s^{-1}, 黑色矢量箭头) 及异常 (单位: m·s^{-1}, 蓝色矢量箭头)、CAPE 值 (单位: J·Kg^{-1}, 黑实线)、假相当位温距平 (单位: K, 阴影) 场

Fig. 7 Horizontal wind field (unit: m·s^{-1}, black vector arrows), anomalies (unit: m·s^{-1}, blue vector arrows), CAPE value (unit: J·Kg^{-1}, black lines), and pseudo equivalent temperature anomaly (unit: K, color-filled) of 850 hPa at (a) 08:00 BT, (b) 12:00 BT, (c) 16:00 BT, (d) 20:00 BT, (e) 00:00 BT, and (f) 04:00 BT in Hunan in the summerd from 1971 to 2023

中以北 CAPE 值与 16 时相比略微减小，假相当位温距平转为负值。00 时湖南地区假相当位温距平值为负，CAPE 值在 400 J·kg^{-1} 左右，不利于热对流的发生发展，此时的降水高峰更可能是动力强迫引起。

图 7 为间隔 4h 850 hPa 等压面上平均风矢量及异常 (每小时相对于每日平均值的偏差) 的日变化。从中可见，湖南夏季从早到晚盛行西南风，风速由南向北逐渐减小，异常风风向从早到晚顺时针旋转。04—12 时湖南为西北风异常，异常值逐渐减小，16 时开始转为东北风异常，20 时转为东风异常，00 时东南风异常增强达到最大值，有利于东南方向的水汽输送。

根据上一节划分的区域 (图 4d)，R1 大部分站点在 26° N 以南，R2 大部分站点在 26°—27.2° N，R3 大部分站点在 27.2° N 以北，图 8 给出湖南区域 (109°—114° E) 平均风场的纬度-高度剖面来分析每个区的垂直动力条件。从图中可见，R1 区处于迎风一侧，以上升运动为主；R2 区处于背风一侧，大部分时间受下沉气流控制，因此相对 R1、R3 区降水较少；R3 区中高层主要受上升运动控制。午夜 00 时 R1 区上升气流达到最强，风速最大值出现在 850 hPa 附近，南风有所增强，东风异常也达到一天之中的最大值，最大值中心出现在 800 hPa 附近；R2 区下沉运动增强，风速最大值也在 850 hPa 附近；R3 区低层为下沉运动，900 hPa 高度开始转变为上升运动。16 时位于南岭背风坡的 R2 区为较弱的下沉气流，R3 区850 hPa 以下低层上升气流达到最强，随着高度增加上升气流逐渐减弱，至 650 hPa 又开始增强；R2、R3 区低层为东风异常，800 hPa 转为西风异常。

除了热力和动力条件引发的垂直运动，降水还需要充足的水汽条件。图 9 给出水汽通量散度与经向流入的水汽通量的垂直剖面图，R1 区各小时经向水汽通量均为正值，说明有水汽一直从南方输入，00 时从南方流入的水汽通量达到一天之中最大值，同时水汽通量散度为负值，有水汽辐合。由于湘南山脉的阻挡，流入 R2、R3 区的水汽减少，低层经向水汽通量由 4 ~ 6 kg·m^{-1}·s^{-1} 减小到 2 ~ 4 kg·m^{-1}·s^{-1}。

综上所述，湖南夏季降水在不同区域出现日高峰的时间不同，形成原因也有差异。通过热力、动力和水汽条件初步分析 R1、R2 和 R3 区降水日高峰形成的不同原因，并在图 10 中给出了概念图。R1 区出现在午夜的降水峰值可能是动力强迫引起，00 时南风加速，低层上升运动达到最强，从南方输入的水汽通量也达到最大值，同时有水汽通量辐合，有利于降水的产生。以往的研究也表明，低空急流的夜间加

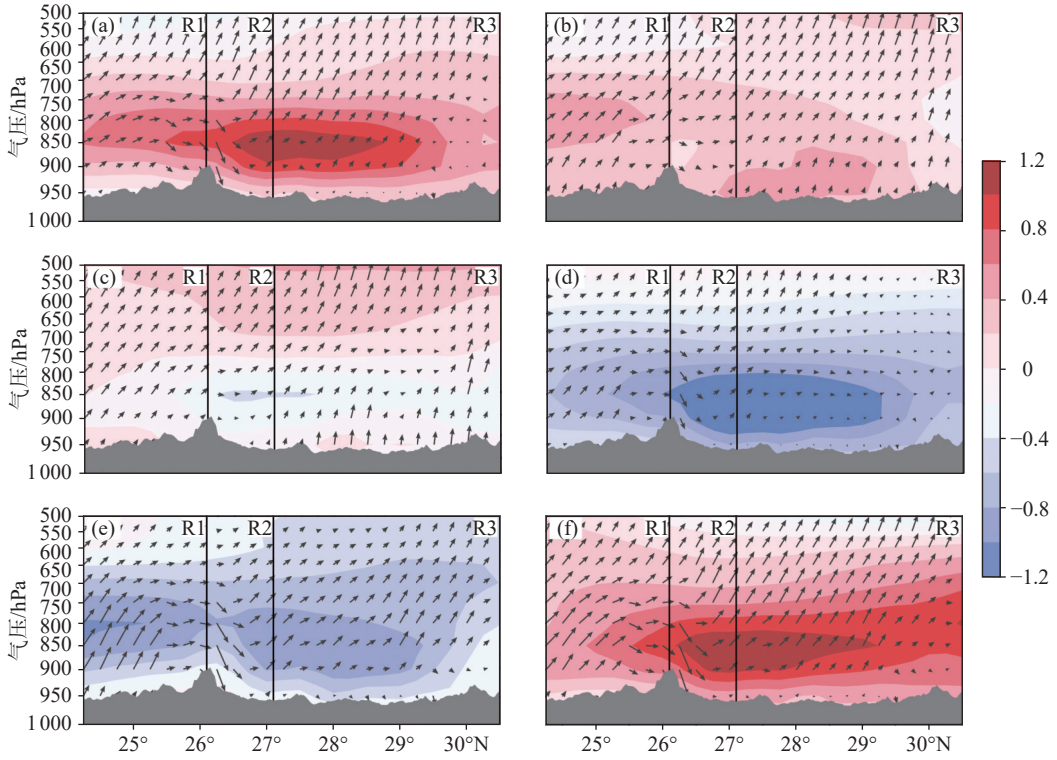


图 8 1971—2023 年湖南夏季 08 时 (a)、12 时 (b)、16 时 (c)、20 时 (d)、00 时 (e)、04 时 (f) 108.5°—114°E 平均水平风场 u 分量异常 (单位：m·s^{-1}，填色) 与 v、ω(单位：Pa·s^{-1}) 分量合成矢量 (黑色矢量箭头) 纬向垂直剖面 (其中，阴影为地形高度，下同)

Fig. 8 Zonal-vertical cross-section of average u wind field (unit: m·s^{-1}, shaded) and composition (black vector) of u and ω (unit: Pa·s^{-1}) fields along 108.5°—114°E at (a) 08:00 BT, (b) 12:00 BT, (c) 16:00 BT, (d) 20:00 BT, (e) 00:00 BT, (f) 04:00 BT in Hunan in the summers from 1971 to 2023 (Shading denotes the topographic height, same hereinafter)

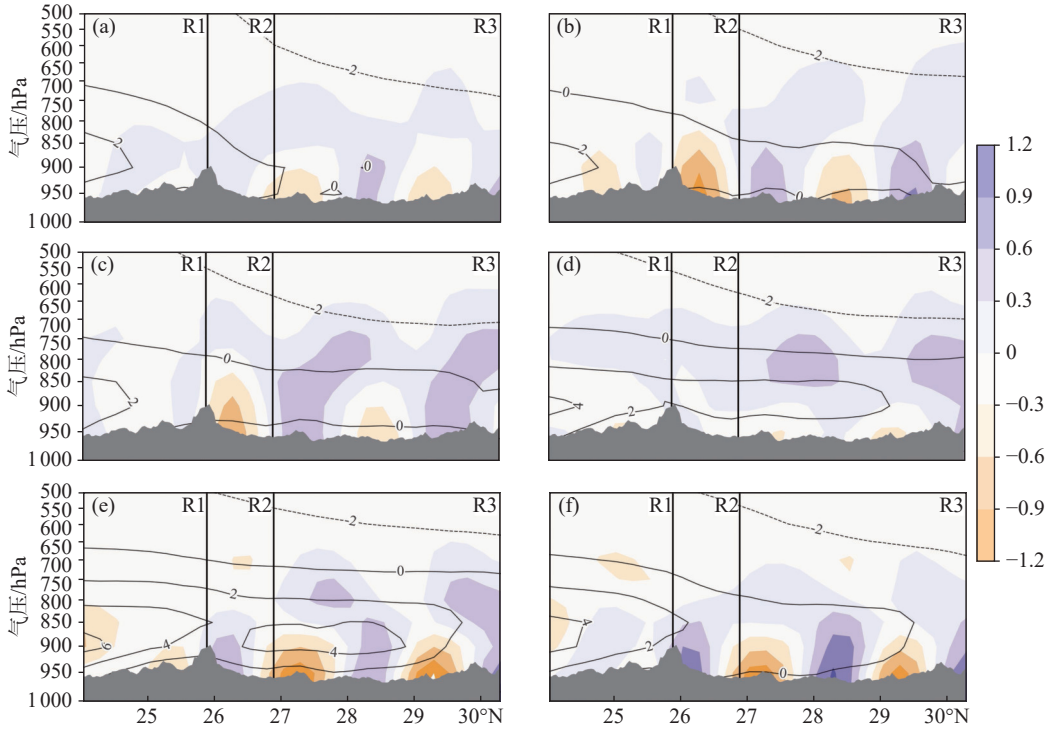


图 9 1971—2023 年湖南夏季 08 时 (a)、12 时 (b)、16 时 (c)、20 时 (d)、00 时 (e)、04 时 (f)108.5º—114º E 平均水汽通量散度 (填色, 单位: 10^{-7} kg·m^{-2}·s^{-1}) 与经向流入的水汽通量 (等值线, 单位: kg·m^{-1}·s^{-1}) 的纬向垂直剖面

Fig. 9 Zonal-vertical cross-section of (in Hunan) average water vapor flux divergence (unit:10^{-7} kg·m^{-2}·s^{-1}, shaded) and meridional inflow water vapor flux (unit: kg·m^{-1}·s^{-1}, contours) along 108.5º-114ºE at (a) 08:00 BT, (b) 12:00 BT, (c) 16:00 BT, (d) 20:00 BT, (e) 00:00 BT, and (f) 04:00 BT in Hunan in the summers from 1971 to 2023

速可能会引起上坡风和暖湿气流的增强, 从而形成夜间至凌晨的降水高峰 (Yu et al., 2009; Chen et al., 2010)。R2 和 R3 区出现在下午的降水峰值可能由局地热力不稳定触发, 由于午后地表加热, 16 时假相当位温正距平达到一天之中峰值, 湘中以北位于高 CAPE 值区; 此外, 从垂直动力条件来看, 16 时位于背风坡的 R2 区下沉气流最弱, R3 区 850 hPa 以下低层上升气流达到最强, 此时大气稳定性弱, 有利于对流降水发展, 造成了 16 时的降水高峰。这种由热力驱动的区域山地-平原螺线管环流造成的午后降水高峰在很多地区都有体现 (He and Zhang, 2010; Jin et al., 2013; Zhang et al., 2014)。

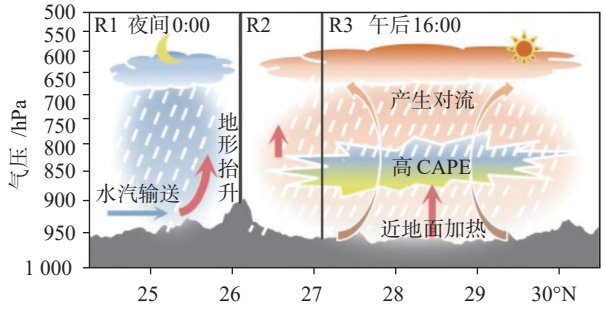


图 10 湖南降水不同区域日变化形成原因概念图

Fig. 10 Conceptual diagram of daily variation mechanism of precipitation in different regions of Hunan

3 结论与讨论

本文使用湖南 65 个国家站 1971—2023 年夏季 (6—8 月) 逐小时降水资料及 ERA5 再分析资料, 采用 K 均值聚类分析算法, 分析了湖南夏季平均降水量、日最大降水量、降水频率的空间分布特征以及湖南夏季平均小时降水量、降水频率和降水强度的日变化特征和形成原因。得到的主要结论如下:

(1) 湖南夏季平均降水量和平均日最大降水量整体都表现为南北多、中间少的特点, 平均夏季降水量最大值出现在湘东南, 而平均日最大降水量最大值出现在湘西北, 最小值都出现在湘中; 夏季平均降水频率空间分布显示, 湘南和湘西北地区频率较高, 湘中和湘东北地区较低, 最高值在湘东南, 最低在湘东北。夏季平均日降水强度分布则表现为北强南弱, 最大值出现在湘东北, 最小值也出现在湘中。

(2) 湖南夏季平均小时降水量日变化呈双峰型, 主峰值出现在 16 时, 次峰值出现在 00 时, 最低值出现在 07 时, 夏季平均小时降水频率与平均小时降水量日变化趋势较为一致, 也为双峰型, 主峰值出现比降水量早一些在 15 时, 而次峰值出现时间晚一些在 01 时, 最低值也晚 1 h, 出现在 08 时。夏季平均小时降水强度日变化大体上也呈双峰型, 主峰值出现比

降水量晚一些，在 17 时，次峰值也出现在 00 时，最低值出现在 07 时。

(3) 利用 K 均值聚类分析算法，将 65 个湖南国家站分类为三个区域。R1 夏季平均小时降水量、平均降水频率和平均降水强度日变化曲线呈双峰型，主峰出现在 00—01 时，次峰出现在 15—18 时；R2 夏季平均小时降水量、平均降水频率相对其他两个区域较小，日变化曲线也呈双峰型，主峰出现在 15—16 时，次峰出现在 00—01 时，夏季平均小时降水强度日变化曲线波动较大，两个相对较高的峰值也出现在 16 时和 00 时。R3 夏季平均小时降水量、平均降水频率日变化曲线呈较弱的双峰型，主峰值出现在 15—17 时，次峰值出现在 00—01 时，而夏季平均小时降水强度日变化曲线呈单峰型，峰值出现在 15—17 时。

(4) 湖南夏季持续 8 h 以内的降水其降水量一般在夜晚至清晨达到峰值，而持续 8 h 以上的降水其降水量一般在下午达到峰值。R1 区 00 时的降水量高峰主要由持续 1~6 h 降水的累计降水量贡献，占 00 时降水总量的百分比达到 67%；而在 R2、R3 区，不同持续时间的降水对 16 时降水量高峰的贡献相对更加分散，持续 6 h 以上的长时间降水的累计降水量对 R2、R3 区峰值降水量的贡献增大，达到 60% 以上。

(5) R1 区出现在午夜的降水峰值可能是动力强迫引起，00 时南风加速，低层上升运动达到最强，从南方输入的水汽通量也达到最大值，同时有水汽通量辐合，有利于降水的产生。R2 和 R3 区出现在下午的降水峰值可能由局地热力不稳定触发，由于午后地表加热，16 时假相当位温正距平达到一天之中峰值，湘中以北位于高 CAPE 值区，位于背风坡的 R2 区下沉气流最弱，R3 区 850 hPa 以下低层上升气流达到最强，此时大气稳定性弱，有利于对流降水发展。

本文按照湖南 65 个国家站分区后大体的纬度位置，结合地形对不同区域降水日变化形成原因进行了初步分析，实际每个站降水日变化形成原因非常复杂，可能还与不同下垫面、城市热岛效应等多种因素有关，例如位于湘中的洞口、新化站却表现出与湘南 R1 地区更为一致的降水日变化，其原因需进一步深入研究。

参考文献 (References):

陈芳丽,刘显通,曾丹丹,等.2022.珠三角北部一次暖区强降水过程中的地形作用[J].热带气象学报,38(3):377−386. Chen F L, Liu X T, Zeng D D, et al. 2022. Effect of topography on a warm-sector heavy rainfall event in the northern pearl river delta [J]. Journal of Tropical Meteorology,38(3):377−386 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2022.034

陈红专.2021.湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象,47(10):1219-1232. Chen H Z. 2021. Climatic characteristics and weather system classification of eatreme precipitation in Hunan Province [J]. Meteorological Monthly,47(10):1219-1232 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.10.005

戴泽军,宇如聪,陈昊明.2009.湖南夏季降水日变化特征[J].高原气象,28(6):1463−1470. Dai Z J, Yu R C, Chen H M. 2009. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hunan [J]. Plateau Meteorology,28(6):1463−1470 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534(2009)06−1463−08

黄艳,杨莲梅,唐鹏,等.2024.新疆伊犁河谷暖季短历时强降水变化特征[J].沙漠与绿洲气象,18(6):32−37. Huang Y, Yang L M, Tang P, et al. 2024. Variation characteristics of flash heavy rain with different durations in the warm season of the Yili River Valley in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(6):32−37 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.05.004

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 M, Huang A N, et al. 2017. Characteristics of the precipitation diurnal variation over Qinghai-Tibetan Plateau in summer [J]. Plateau Meteorology,36(5):1188−1200 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00119

李方正,李国平.2024.一次西南涡影响下四川盆地夏季暴雨过程昼夜降水的对比分析[J].高原山地气象研究,44(2):1−8. Li F Z, Li G P. 2024. Comparative analysis of diurnal precipitation during summer rainstorm in Sichuan Basin under the influence of a southwest vortex [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(2):1−8 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.001

李晶,汪天颖,朱宏武,等.2019.长株潭城市群体小时级降水资源分布及变化特征[J].湖北农业科学,58(15):44−50. Li J, Wang T Y, Zhu H W, et al. 2019. Distribution and variation features of hourly precipitation resource in Chang-Zhu-Tan typical city-group [J]. Hubei Agricultural Sciences,58(15):44−50 (in Chinese). doi:10.14088/j.cnki.issn0439−8114.2019.15.010

林必元,李敏娴.1988.洞庭湖湖陆风特征与降水[J].南京气象学院学报,11(1):78−88. Lin B Y, Li M X. 1988. Characteristic feature of the lake-land breeze and its effect on precipitation over the Dongtinghu Lake [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,11(1):78−88 (in Chinese)

牛元甫,陈昊明,李娟.2025.东北地区暖季小时降水特征分析[J]. 暴雨灾害,44(1):71−81. Niu Y F, Chen H M, Li J. 2025. Analysis of hourly precipitation characteristics during the warm season in Northeast China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):71−81 (in Chinese). doi:10.12406/byzh. 2023−244

唐菁,陈生,李峙,等.2023.基于雷达观测的华南夏季降水类型日变化的时空分布特征[J].气象,49(3):279−290. Tang J, Chen S, Li Z, et al. 2023. Spatio-Temporal distribution characteristics of diurnal variation of summer rainfall in South China based on radar observation [J]. Meteorological Monthly,49(3):279−290 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.061001

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

万昊旻,李建,李妮娜.2024.基于小时降水资料的华西秋雨精细化特征分析[J].暴雨灾害,43(2):168−175. Wan H M, Li J, Li N N. 2024. Fine-

scale analysis of hourly precipitation of West China autumn precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters,43(2):168−175 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−139

汪小康,崔春光,刘柯,等.2024.中国主雨季极端小时降水时空分布和日变化特征[J].气象,50(4):393−406. Wang X K, Cui C G, Liu K, et al. 2024. Spatio-temperal distribution and diurnal variation of extreme hourly precipitation in China during the main rainy season [J]. Meteorological Monthly,50(4):393−406 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.123001

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 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.012

夏茹娣,赵思雄,孙建华.2006.一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究[J].大气科学,30(5):988−1008. Xia R D, Zhao S X, Sun J H. 2006. A study of circumstances of Meso-β-scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,30(5):988−1008 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2006.05.26

辛鹏超,央珍,王其伟,等.2024.青藏高原及周边地区极端降水天气及其基于自组织特征映射方法的天气背景分型[J].气象科学,44(1):94−105. Xin P C, Yang Z, Wang Q W, et al. 2024. Extreme precipitation weather events in the Qinghai Tibet Plateau and its surrounding areas and weather background classification based on self-organizing feature mapping [J]. Journal of the Meteorological Sciences,44(1):94−105 (in Chinese). doi:10.12306/2022jms.0072

宇如聪,李建.2016.中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J].气象学报,74(1):18−30. Yu R C, Li J. 2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica,74(1):18−30 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.011

张宏芳,潘留杰,陈昊明,等.2020.秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J].高原气象,39(5):935−946. Zhang H F, Pan L J, Chen H M, et al. 2020. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas [J]. Plateau Meteorology,39(5):935−946 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00067

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

周芳,王东海,汪如良.2025. 1980—2020 年 4—9 月湘赣浙闽日极端降水与次生灾害分布特征研究[J].暴雨灾害,44(5):667−678. ZHOU F, Wang D H, WANG R L. 2025. Study on the distribution characteristics of daily extreme precipitation and secondary disaster in Hunan, Jiangxi, Zhejiang and Fujian province from April to September 1980-2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):667−678 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−097

朱黎明,张智欣,魏庆伟.2021.基于 K 均值聚类的中国夏季降水日变化空间分布模式[J].气象科技,49(4):552−560. Zhu L M, Zhang Z X, Wei Q W. 2021. Spatial distribution of diurnal rainfall variation in summer over China using K-means algorithm [J]. Meteorological Science and Technology,49(4):552−560 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20200313

Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley [J]. Journal of Climate,23(4):905−917. doi:10.1175/2009JCLI3187.1

Chen G, Lan R, Zeng W, et al. 2018. Diurnal variations of rainfall in surface and satellite observations at the monsoon coast (South China) [J]. Journal of Climate,31(5):1703−1724. doi:10.1175/JCLI−D−17−0373.1

Chen X C, Zhao K, Xue M, et al. 2015. Radar-observed diurnal cycle and propagation of convection over the Pearl River Delta during mei-yu season [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,120(24):12557−12575. doi:10.1002/2015JD023872

Chen X C, Zhang F Q, Zhao K. 2017. Influence of monsoonal wind speed and moisture content on intensity and diurnal variations of the mei-yu season coastal rainfall over south China [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,74(9):2835−2856. doi:10.1175/JAS−D−17−0081.1

He H, Zhang F. 2010. Diurnal variations of warm-season precipitation over northern China [J]. Monthly Weather Review,138(4):1017−025. doi:10.1175/2010MWR3356.1

Jin X, Wu T W, Li L. 2013. The quasi-stationary feature of nocturnal precipitation in the Sichuan Basin and the role of the Tibetan Plateau [J]. Climate Dynamics,41(3-4):977−994. doi:10.1007/s00382−012−1521−y

Nakamura J, Lall U, Kushnir Y, et al. 2009. Classifying North Atlantic ropical cyclone tracks by mass moments [J]. Journal of Climate,22(20):5481−5494. doi:10.1175/2009JCLI2828.1

Wallace J M. 1975. Diurnal variations in precipitation and thunderstorm frequency over the conterminous United States [J]. Monthly Weather Review,103(5):406−419. doi:10.1175/1520−0493(1975)103<0406:DVIPAT>2.0.CO;2

Xiao C, Wu P, Zhang L, et al. 2016. Robust increase in extreme summer rainfall intensity during the past four decades observed in China [J]. Scientific reports,6(1):38506. doi:10.1038/srep38506

Yang G Y, Slingo J. 2001. The diurnal cycle in the tropics [J]. Monthly Weather Review,129(4):784−801. doi:10.1175/1520−0493(2001)129<0784:TDCITT>2.0.CO;2

Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. Geophysical Research Letters,34(1):L01704. doi:10.1029/2006GL028129

Yu R C, Li J, Chen H. 2009. Diurnal variation of surface wind over central eastern China [J]. Climate Dynamics,33(7-8):1089−1097. doi:10.1007/s00382−008−0478−3

Yuan W, Yu R, Zhang M, et al. 2012. Regimes of diurnal variation of summer rainfall over subtropical East Asia [J]. Journal of Climate,25(9):3307−3320. doi:10.1175/JCLI−D−11−00288.1

Yuan W H, Yu R C, Li J. 2013. Changes in the diurnal cycles of precipitation over eastern China in the past 40 years [J]. Advances in Atmospheric Sciences,30(2):461−467. doi:10.1007/s00376−012−2092−x

Zhang Y, Sun J, Fu S. 2014. Impacts of diurnal variation of mountain-plain solenoid circulations on precipitation and vortices east of the Tibetan Plateau during the mei-yu season [J]. Advances in Atmospheric Sciences,31(1):139−153. doi:10.1007/s00376−013−2052−0

(责任编辑　闵爱荣)