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

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究

王宇浩 王晓慧 顾小丽 陶局 季焱 肖王星

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

WANG Yuhao，WANG Xiaohui，GU Xiaoli，TAO Ju，JI Yan，XIAO Wangxing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-062

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

基于地面分钟雨量数据的湖北省短时强降水时空分布特征分析

Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data

暴雨灾害. 2021, 40(1): 61-68 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.008

浙江省6—9月午后短时强降水空间分布特征分析

Analysis on spatial distribution characteristics of afternoon flash heavy rain from June to September in Zhejiang

暴雨灾害. 2019, 38(4): 320-328 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.04.004

近10 a浙江省极端短时强降水时空特征分析

Spatio-temporal characteristics of short-duration extreme rainfall in the recent ten years in Zhejiang Province

暴雨灾害. 2021, 40(6): 599-607 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.004

基于逻辑回归法的浙江省低涡型暴雨落区预报研究

The potential falling area forecast for rainstorm induced by vortex in Zhejiang Province based on logistic regression algorithm

暴雨灾害. 2024, 43(1): 32-44 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-009

基于聚类分析的浙江省汛期OCF降水预报分区订正试验

Regional correction calibration for OCF precipitation in flood season in Zhejiang Province based on cluster analysis

暴雨灾害. 2023, 42(6): 716-723 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-042

广西汛期极端短时强降水特征分析

Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season

暴雨灾害. 2022, 41(3): 308-314 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王宇浩,王晓慧,顾小丽,等.2025.基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究[J].暴雨灾害,44(1):60−70. WANG Yuhao, WANG Xiaohui, GU Xiaoli, et al. 2025. Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):60−70 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−062

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究

王宇浩[1, 2], 王晓慧[3], 顾小丽[1, 2], 陶局[2, 4], 季焱[5], 肖王星[1, 2]

(1. 宁波市气象台, 宁波 315000; 2. 宁波市智慧气象重点实验室, 宁波 315000; 3. 宁波市海曙区气象局, 宁波 315000; 4. 宁波市气象台院士工作站, 宁波 315000; 5. 无锡学院大气与遥感学院, 无锡 214105)

摘　要: 利用 2018—2022 年汛期 (4—9 月) 浙江省国家和区域自动气象站分钟和小时雨量数据, 结合功率谱分析方法, 研究了浙江省近 5 a 前汛期 (4—5 月)、梅汛期 (6—7 月) 和盛夏期 (8—9 月) 短时强降水时空特征, 对比分析了基于分钟和小时雨量数据统计的短时强降水时空特征差异, 探究了短时强降水高发区降水特征。结果表明: (1) 浙江省东部沿海和西南山区为短时强降水高发区, 东部沿海地区短时强降水强度较其它地区偏强。东部沿海地区短时强降水集中发生于梅汛期和盛夏期的午后至傍晚, 西南山区短时强降水集中发生于梅汛期的早晨至午后。(2) 与分钟雨量相比, 基于小时雨量数据统计的短时强降水时空特征与分钟雨量数据相似, 但统计所得的短时强降水小时数偏少且强度偏小, 小时数偏少约 30%, 强度偏小约 20%。(3) 在东部沿海地区, 从前汛期至盛夏期, 短时强降水过程频次、累计雨量、持续时间和降水效率随月份增加而增大。在西南山区, 短时强降水过程频次、累计雨量和持续时间在梅汛期最大, 而降水效率在梅汛期最小, 在盛夏期最大。(4) 不同高发区短时强降水过程分钟降水时间尺度接近, 以 35~55 min 为主。过程初期雨强增大快, 10~15 min 达到峰值, 20 min 起雨强逐渐减小。2 mm·(5 min)$^{-1}$ 和 5 mm·(10 min)$^{-1}$ 可作为浙江省短时强降水事件的预警参考指标, 5 mm·(5 min)$^{-1}$ 是发生极端短时强降水事件的初期预警参考指标。

关键词: 短时强降水; 分钟雨量; 小时雨量; 浙江省

中图法分类号: P458　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−062

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

WANG Yuhao[1, 2], WANG Xiaohui[3], GU Xiaoli[1, 2], TAO Ju[2, 4], JI Yan[5], XIAO Wangxing[1, 2]

(1. *Ningbo Meteorological Observatory*, *Ningbo* 315000; 2. *Ningbo Key Laboratory of Smart Meteorology*, *Ningbo* 315000; 3. *Ningbo Haishu Meteorological Bureau*, *Ningbo* 315000; 4. *Academician Workstation of Ningbo Meteorological Observatory*, *Ningbo* 315000; 5. *School of Atmosphere and Remote Sensing*, *Wuxi University*, *Wuxi* 214105)

Abstract: Using the minute and hour rain gauge data collected by automatic weather stations in Zhejiang Province during flood season (April to September) from 2018 to 2022 and the power spectrum analysis, this study investigates the spatial-temporal characteristics of short-duration heavy rainfall (SDR) in Zhejiang Province during the pre-flood season (April to May), plum rain season (June to July) and midsummer (August to September). The spatial-temporal differences of SDR based on minute and hour rainfall data are compared, and the characteristics of the heavy rainfall processes in high incidence areas are analyzed. The results are as follows. (1) East coastal area and southwestern mountain area are the high incidence areas of the SDR, and the intensity of the SDR is stronger in East coastal area than other areas. The SDR events in the eastern coastal area mainly occur from late afternoon to early evening during the plum rain season and midsummer, and the SDR events in the southwestern mountainous area mainly occur from early morning to mid-afternoon during the plum rain season. (2) Compared to the analyses based on the minute rain gauge data, the spatial-temporal characteristics of SDR revealed by the hour rain gauge data is similar to that based on the hour minute gauge data, but the hours of SDR is smaller and the intensity of SDR is weaker, with about 30% less hours and about 20% less intensity. (3) In the eastern coastal region, the frequency and intensity of the SDR

收稿日期: 2024−04−09; **定稿日期:** 2024−07−19

资助项目: 宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目 (2023Z139); 浙江省气象局科技计划一般项目 (2023YB16); 宁波市气象局科技计划项目 (NBQX2023001A, NBQX2023002B)

第一作者: 王宇浩, 主要从事天气气候预报技术和机理研究。E-mail: yhwangnuist@163.com

通信作者: 顾小丽, 主要从事强天气预报预警技术和灾害影响研究。E-mail: 68632949@qq.com

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

increases from the pre-flood season to midsummer, with the prolonged duration and larger rainfall efficiency. In the southwestern mountainous areas, the frequency, intensity and duration of the SDR peak during the plum rain season, while the seasonal variation of precipitation efficiency reaches its minimum in the plum rain season and maximum in the midsummer. (4) The time scales of SDR events are similar across different high-incidence regions, mainly ranging from 35 to 55 minutes. At the beginning of the SDR process, the rainfall intensity increases rapidly, reaching its peak at about 10 to 15 minutes, and gradually decreases after about 20 minutes. Statistical analyses indicate that 2 mm·(5 min)$^{-1}$ and 5 mm·(10 min)$^{-1}$ are effective warning indicators for SDR events, and 5 mm·(5 min)$^{-1}$ is the initial indicator for extreme SDR events.

Key words: short-duration heavy rainfall; minute rain gauge data; hour rain gauge data; Zhejiang Province

引　言

短时强降水是指在短时间内累计雨量达到一定阈值的天气事件, 是强对流天气的重要类型之一。短时强降水具有突发性、局地性、生命史短和致灾性等特点 (郑永光等, 2015; Fowler et al., 2021; 张俊兰等, 2022), 易引发城市内涝 (曹舒娅等, 2023; 翟丽萍等, 2024) 和山区暴洪 (Yuan et al., 2021) 等灾害, 严重威胁人民的生命财产安全。浙江省地处我国华东沿海, 属亚热带季风气候。受到西北太平洋副热带高压 (以下简称为副高)、台风和东风波等多种天气系统的影响, 浙江省短时强降水频发 (王镇铭等, 2013)。因此, 加强对浙江省短时强降水发生发展规律的认识, 提升短时强降水事件的监测和预警能力, 对于防灾减灾具有重要意义。

针对浙江省短时强降水基本气候特征, 前人已开展了深入研究。总体来说, 浙江省短时强降水具有明显的区域特征, 西南山区和东部沿海地区为高发区 (吕劲文等, 2019; 陶局等, 2021; 俞佩, 2022), 主要发生于 5—9 月, 集中于 6—8 月; 5—9 月随着影响系统的移动, 短时强降水落区从浙西地区逐渐移动至东部沿海地区。也有研究针对浙江省内某一地区的短时强降水特征进行分析, 比如徐慧燕等 (2016) 和李文娟等 (2017) 分别分析了丽水市和杭州市短时强降水时空特征, 丽水市短时强降水高发区为东南部地区和西南部高山区, 集中发生在 6—8 月; 杭州市短时强降水多发于市区和西北山区。

上述有关浙江省短时强降水时空特征的研究均基于小时雨量数据, 但自动气象站记录的小时雨量数据是两个临近整点之间的累计雨量, 所得的短时强降水特征与实际情况存在偏差, 且小时雨量数据难以反映短时强降水过程中雨强的演变特征。因此需要采用更为精细化的分钟雨量观测数据开展研究。通过选取不同纬度地区三次典型短时强降水过程 (华北飑线、江淮梅雨和海南热带降水), 盛杰等 (2012) 利用分钟雨量观测数据对比了不同天气系统短时强降水过程累计雨量、分钟级雨强演变、降水效率和分钟降水时间尺度等特征, 强调了飑线、梅雨锋和热带降水系统影响下短时强降水过程雨量特征差异。目前利用自动气象站分钟雨量观测数据来探究浙江省短时强降水时空特征未有研究。基于分钟雨量和小时雨量数据统计的浙江省短时强降水时空特征差异仍不清楚; 浙江省短时强降水过程累计雨量、分钟级雨强演变、降水效率和分钟降水时间尺度等特征也需要进一步深入研究。近年来浙江省内区域自动气象站数量持续增加, 提供了密集的地面分钟雨量观测数据, 这为进一步研究浙江省短时强降水特征提供了有力保障。

浙江省每年约 80% 的降水集中在汛期 (4—9 月) (王镇铭等, 2013)。因此本文利用 2018—2022 年汛期浙江省国家和区域自动气象站 (以下分别简称为国家站和区域站) 逐分钟和逐小时雨量数据, 分析浙江省前汛期 (4—5 月)、梅汛期 (6—7 月) 和盛夏期 (8—9 月) 短时强降水时空特征, 对比基于分钟雨量和小时雨量数据统计的短时强降水时空特征差异, 探究浙江省汛期短时强降水高发区短时强降水过程分钟级雨强演变、降水效率、持续时间和降水时间尺度等关键特征, 以加深对浙江省汛期短时强降水事件的认识, 提升预报员的监测和预警能力。

1　数据和方法

1.1　数据说明

本文采用浙江省气象信息中心提供的 2018—2022 年汛期浙江省 2 657 个国家和区域自动气象站逐分钟雨量观测数据。为对比基于逐分钟和逐小时雨量数据统计的短时强降水特征差异, 还采用了相同测站的逐小时雨量观测数据。

自动气象站雨量观测数据的质量控制由浙江省气象信息中心完成, 引入雷达估测降水资料进行质控判别 (吴书成等, 2015), 并采用了时间和空间对比、界限值检查等方法 (吴书成等, 2016)。考虑到质控后的雨量数据仍有缺测, 对所获取的逐分钟和逐小时雨量数据进一步做有效性检验, 剔除了区域站

有效数据不足 80% 的站点 (陶局等, 2021), 共计 179 个。因此本文统计分析基于剩余的 2 478 个站点 (图 1) 进行。

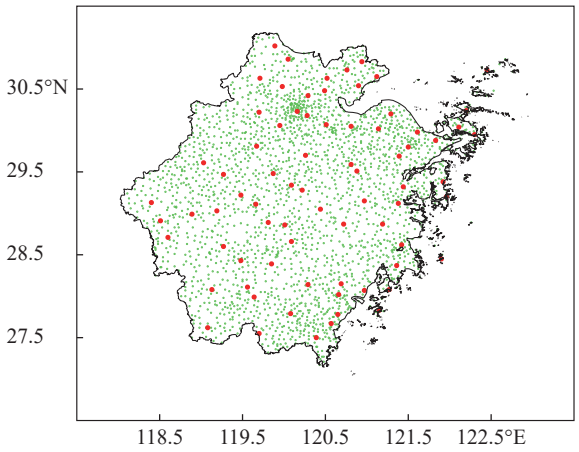


图 1 本研究所选取的浙江省国家站 (红点) 和区域站 (绿点) 地理分布

Fig. 1 The distribution of the national stations (red dots) and regional stations (green dots) in Zhejiang Province selected in this study

1.2 研究方法

1.2.1 短时强降水的定义及小时数统计方法

对于短时强降水的定义, 本文采用中央气象台的标准, 即≥20 mm·h^{-1} 的降水归为短时强降水。对于分钟雨量数据, 作 60 min 滑动累计雨量计算, 若累计雨量超过 20 mm, 则该小时记为短时强降水小时, 并跳至下一 60 min 继续判断。如对某个站点, 若某日 14 时 30 分—15 时 29 分 (北京时, 下同) 累计雨量超过 20 mm, 则认为此站点在该小时出现短时强降水, 记为 1 个短时强降水小时。接着从 15 时 30 分继续作 60 min 滑动累计雨量计算, 筛选下一个短时强降水小时。对于小时雨量数据, 若某个小时降水量超过 20 mm, 则该小时记为短时强降水小时。根据以上标准, 统计分析浙江省汛期短时强降水小时数时空特征。

台风和强对流天气影响下发生的短时强降水的特征有明显差别。台风影响下出现的短时强降水范围往往更广, 地形作用显著 (涂小萍等, 2013; 段晶晶等, 2017), 降水回波质心低 (何彩芬等, 2006), 降水粒子小、浓度大 (Wang et al., 2016); 强对流天气下出现的短时强降水局地性强, 降水回波质心高, 降水粒子大、浓度小 (Chen et al., 2022; 李山山等, 2023)。因此本文统计工作剔除了台风影响时段内出现的短时强降水小时。根据浙江省地方标准 DB33/T 1325—2023《台风灾害影响分级规范》, 影响浙江的台风被定义为: 台风进入活动关注区 (112°—130°E, 20°—34°N), 风雨影响评估区内 10% 及以上区域台风过程极大风速达到 8 级或 10% 及以上陆域台风过程雨量达到 50 mm。

1.2.2 短时强降水过程样本的选取

对于每个站点的每次短时强降水过程, 起始时刻定义为首次同时满足向后滑动 10 min 累计雨量超过 1 mm 和向后滑动 60 min 累计雨量超过 20 mm 所对应的时刻; 终止时刻定义为起始时刻 10 min 之后, 首次同时满足向前滑动 10 min 累计雨量小于 1 mm 和向前滑动 60 min 累计雨量小于 20 mm 所对应的时刻。若短时强降水过程持续时长大于 60 min, 则过程时段内任意滑动 60 min 的累计雨量需不小于 20 mm。如对某个站点, 某日 14 时开始出现降雨, 从该时刻开始向后作滑动 10 min 和 60 min 累计雨量计算, 若 14 时 10 分开始向后滑动 10 min 累计雨量达到 1 mm 且滑动 60 min 累计雨量达到 20 mm, 则 14 时 10 分记为该次短时强降水过程的起始时刻; 从 14 时 20 分开始向前作滑动 10 min 和 60 min 累计雨量计算, 若 15 时滑动 10 min 累计雨量小于 1 mm 且滑动 60 min 累计雨量小于 20 mm, 则 15 时记为该次短时强降水过程的结束时刻; 以上记为一次短时强降水过程。

1.2.3 功率谱分析方法

为分析短时强降水过程的显著时间尺度, 采用功率谱分析方法 (魏凤英, 2007)。该方法是一种基于傅里叶变换的频域分析方法, 并用红噪音检验谱值的显著性。对于给定的时间序列, 首先将时间序列具有的总能量分解到不同频率上, 再根据不同频率的波动方差的贡献大小诊断出序列的显著时间尺度。

对于某一样本量为 N 的时间序列 $X(t)$, 利用傅里叶变换可将其展开为

$$X(t)=a_0+\sum_{k=1}^{\infty}\left(a_k\cos\frac{2\pi}{T}kt+b_k\sin\frac{2\pi}{T}kt\right) \tag{1}$$

其中 a_0 为常数, t 为时间, k 为波数, T 为波数 K 对应的周期, a_k 和 b_k 为波数 k 对应的傅里叶系数。不同波数 k 的功率谱值 (S) 为

$$S_k^2=\frac{1}{2}\left(a_k^2+b_k^2\right) \tag{2}$$

2 近 5 a 浙江省汛期短时强降水时空特征

2.1 空间分布特征

为探究浙江省汛期 (4—9 月) 短时强降水空间分布特征, 图 2a 给出基于分钟雨量统计的 2018—2022 年汛期浙江省年均短时强降水小时数的空间分

布。短时强降水小时数分布具有区域特征, 东部沿海 (包括东北沿海和东南沿海) 和西南山区为短时强降水小时数高值区, 中部盆地为短时强降水小时数低值区。全省年站点平均短时强降水小时数为 8.9 h, 单站短时强降水小时数最大出现在西南山区的潘坑村站, 为 20.8 h; 最小出现在北部平原的劳动路社区站, 为 1.2 h。图 2b 进一步给出各个站点小时累计雨量极大值的空间分布, 结果显示东部沿海地区短时强降水强度强于中部和西部地区。全省年站点平均小时累计雨量极大值为 66.8 mm。

为了比较利用分钟雨量和小时雨量数据统计的短时强降水小时数和强度的差异, 图 2c、d 分别给出基于小时雨量统计的浙江省汛期短时强降水年均小时数和小时雨量极大值空间分布。与采用分钟雨量数据的统计结果相比 (图 2a、b), 小时雨量数据基本能够反映短时强降水的空间分布特征, 但统计所得的短时强降水小时数偏少且强度偏小。基于小时雨量的全省年站点平均短时强降水小时数为 6.8 h, 与采用分钟雨量的统计结果相比 (8.9 h), 偏少 31.2%; 基于小时雨量的全省年站点平均小时雨量极大值为 56.9 mm, 较分钟雨量的统计结果 (66.8 mm) 偏小 17.4%。

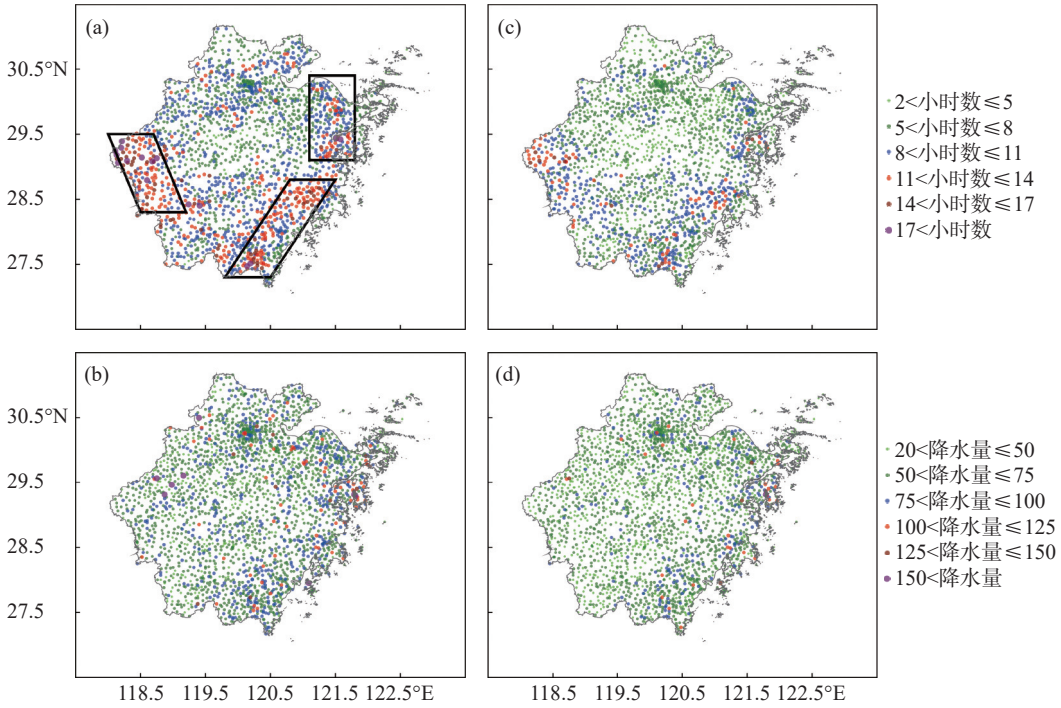


图 2 2018—2022 年汛期基于分钟雨量 (a、b) 和小时雨量 (c、d) 数据的浙江省年平均短时强降水小时数 (a、c, 单位: h) 和小时雨量极大值 (b、d, 单位: mm) 空间分布 (图 a 中黑色矩形框分别表示东北沿海、东南沿海和西南山区三个短时强降水高发区)

Fig. 2 The spatial distribution of (a, c, unit: h) the annual mean hours of short-duration heavy rainfall and (b, d, unit: mm) the maximum of the hourly rain intensity based on the (a, b) minute and (c, d) hour rain gauge data during flood season from 2018 to 2022 in Zhejiang Province (The black rectangles in Fig. 2a denotes the three high incidence areas of the short-duration heavy rainfall, namely, the Northeast coastal area, Southeast coastal area and Southeast mountain area)

为探究浙江省汛期短时强降水小时数空间分布的逐月变化特征, 图 3 给出基于分钟雨量统计的 4—9 月短时强降水小时数逐月空间分布。从中可见, 浙江省短时强降水主要发生于 5—9 月, 短时强降水落区逐渐从内陆地区移动至沿海地区, 这与基于小时雨量数据的统计结果一致 (俞佩, 2022)。其中, 5 月短时强降水落区主要位于西南和中南部地区; 6 月中西部地区为集中高发区, 北部平原和东部沿海地区发生小时数较 5 月增多; 7 月短时强降水落区分散, 除中部地区发生小时数相对较少, 其余地区均为多发区; 8—9 月短时强降水落区移动至东部沿海地区。

综上, 近 5 a 浙江省东部沿海 (东北沿海和东南沿海) 和西南山区为短时强降水高发区, 全省年站点平均短时强降水小时数为 8.9 h; 东部沿海地区短时强降水强度较其它地区偏强, 全省年站点平均小时累计雨量极大值为 66.8 mm。浙江省短时强降水集中发生于 5—9 月, 短时强降水落区逐渐从内陆地区移动到沿海地区。与分钟雨量数据相比, 基于小时雨量数据统计的短时强降水空间分布特征与基于分钟雨量的统计特征相似, 但统计所得的短时强降水小时数偏少且强度偏小, 小时数偏少约 30%, 强度偏小约 20%。

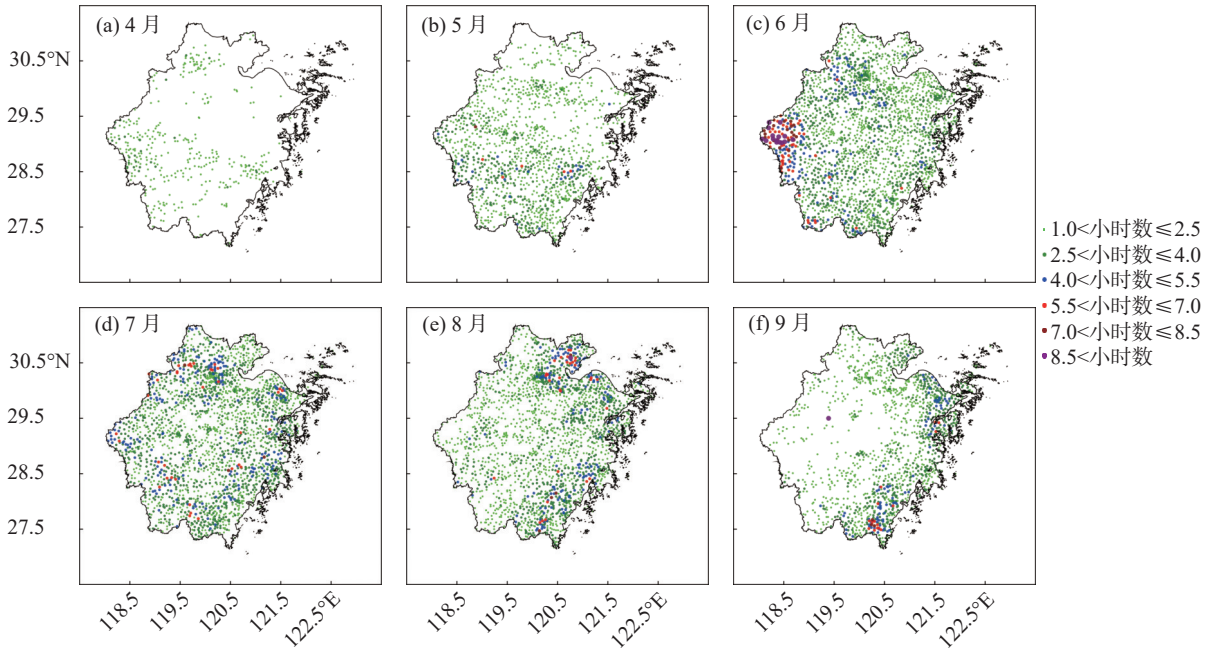


图 3 2018—2022 年 4—9 月 (a—f) 基于分钟雨量数据的浙江省年均短时强降水小时数 (单位: h) 分布

Fig. 3 The spatial distribution of the annual mean hours (unit: h) of the short-duration heavy rainfall from (a-f) April to September in Zhejiang Province from 2018 to 2022 based on the minute rain gauge data

2.2 时间变化特征

基于分钟雨量统计的浙江省 2018—2022 年汛期短时强降水年站点平均小时数逐年变化如图 4 所示, 可见 2021 年为短时强降水小时数最大的年份, 年站点平均小时数为 12.1 h; 2022 年短时强降水小时数最小, 年站点平均小时数为 6 h。这是因为 2021 年东亚夏季风在盛夏阶段显著偏强, 导致浙江省主汛期降水量极端偏多, 为 1961 年以来同期最多, 使得短时强降水频发 (赵俊虎等, 2022; Zhou et al., 2022)。而 2022 年夏季南亚高压和副高持续偏强, 导致长江中下游流域出现了破纪录的持续性极端高温事件, 使得短时强降水时数明显偏少 (He et al., 2023; Zhang et al., 2024)。

为进一步分析近 5 a 短时强降水高发区强降水小时数的变化特征, 分析了东北沿海、东南沿海和西南山区 (图 2a 中黑色矩形框) 短时强降水小时数的逐年变化 (图 4), 可见东北和东南沿海地区变化趋势和全省变化趋势相似, 东北和东南沿海地区短时强降水小时数在 2021 年最大, 为 16 h; 在 2022 年最小, 为 6 h 左右。西南山区近 5 a 短时强降水小时数均超过 11 h, 在 2022 年东部沿海地区和全省平均短时强降水小时数均为近 5 a 最小, 但西南山区短时强降水小时数仍达到 11 h, 这表明西南山区地形对短时强降水的发生可能具有关键作用 (曾秀娟等, 2023; Wei et al., 2024)。

为探究短时强降水高发区强降水小时数月变化

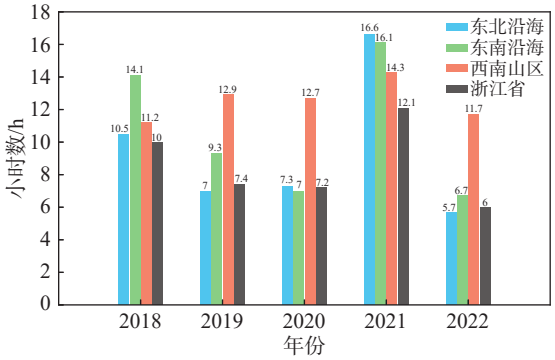


图 4 2018—2022 年汛期基于分钟雨量数据的浙江省和高发区 (东北沿海、东南沿海和西南山区) 站点平均短时强降水小时数逐年变化

Fig. 4 The interannual variation of the hours of the short-duration heavy rainfall per station during flood season from 2018 to 2022 in Zhejiang Province and three high incidence areas (Northeast coastal area, Southeast coastal area and Southeast mountain area) based on the minute rain gauge data

和日变化特征的差异, 图 5 给出三个高发区站点平均短时强降水小时数的月变化和日变化。对于东北沿海地区 (图 5a), 短时强降水主要出现在 6—9 月, 集中于 7—8 月; 6 月短时强降水发生时次分散, 主要出现在 8—18 时, 7—8 月集中发生在 12—19 时, 9 月主要出现在 5—8 时和 15—18 时。对于东南沿海地区 (图 5b), 短时强降水发生时间集中度高, 出现在 6—8 月的 13—18 时。对于西南山区 (图 5c), 短时强降水主要出现在 5—8 月, 集中于 6—7 月; 6 月短时强降水集中出现在 4—17 时, 其余月份主要

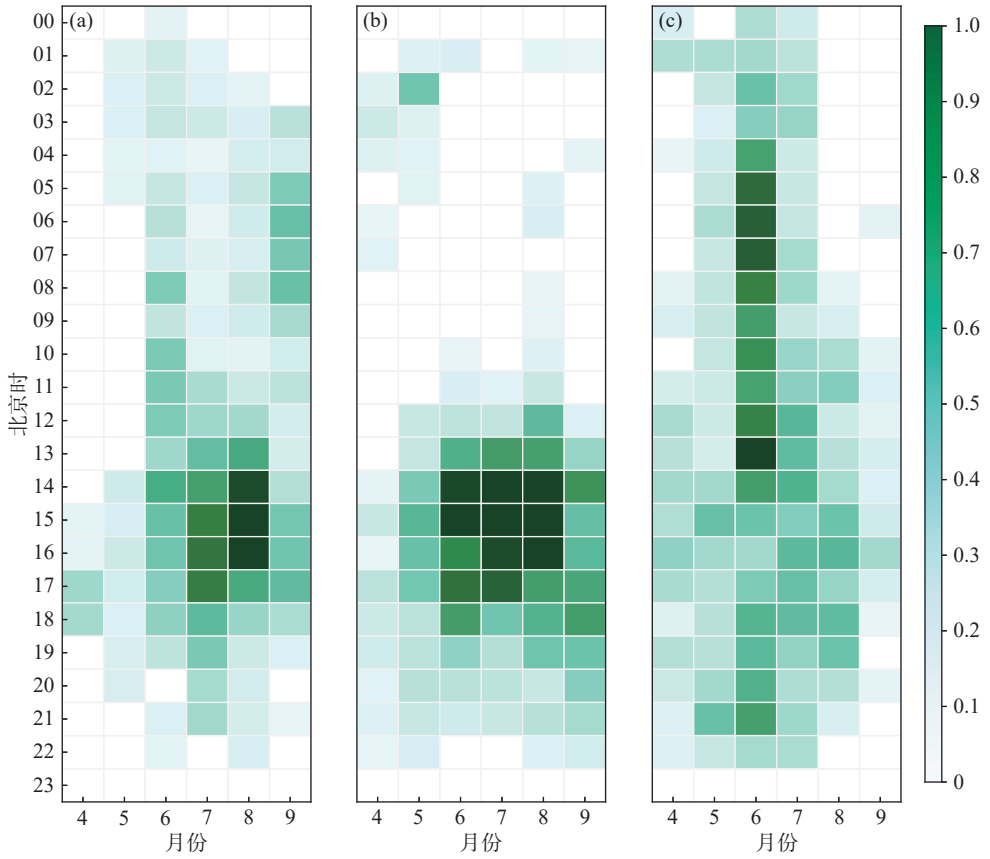


图 5 2018—2022 年汛期基于分钟雨量数据统计的浙江省东北沿海 (a)、东南沿海 (b) 和西南山区 (c) 站点平均短时强降水小时数 (填色, 单位: h) 的月变化和日变化

Fig. 5 The monthly and diurnal variation of the hours (color-filled, unit: h) of the short-duration heavy rainfall per station based on the minute rain gauge data in (a) Northeast coastal area, (b) Southeast coastal area and (c) Southeast mountain area in Zhejiang Province during flood season from 2018 to 2022

出现在 11—20 时。

东部沿海地区短时强降水主要出现在 6—9 月, 西南山区短时强降水主要出现在 5—8 月, 西南山区短时强降水主要出现季节较东部沿海地区偏早, 这与夏季风系统的移动有关 (俞佩, 2022; Wang and Lin, 2002)。东部沿海地区短时强降水多出现在午后至傍晚, 这可能与午后能量累积、城市热岛和海陆风环流有关 (易笑园等, 2012; 戴建华, 2013; Wang et al., 2021); 西南山区短时强降水多出现在早上至午后, 这或许来源于西南地区复杂地形的作用 (周金莲等, 2022)。

综上, 2021 年为 2018—2022 年以来浙江省汛期短时强降水小时数最大的年份, 2022 年为最小的年份, 这与当年汛期的气候背景态密切相关。不同高发区短时强降水小时数的月变化和日变化存在明显差异。东部沿海地区短时强降水集中发生在梅汛期至盛夏期的午后至傍晚。西南山区短时强降水多发期偏早, 主要出现在梅汛期的早晨至午后。

3 浙江省汛期短时强降水过程特征分析

基于分钟雨量数据, 分析浙江省汛期短时强降水过程频次和过程时段内雨量特征, 关注东北沿海、东南沿海和西南山区这三个短时强降水高发区。短时强降水过程样本的挑选方法见 1.2.2 节。

3.1 短时强降水过程频次、累计雨量、持续时间和降水效率

东北沿海、东南沿海和西南山区汛期短时强降水过程年站点平均频次的变化特征如图 6a 所示。东北沿海地区短时强降水过程主要集中于梅汛期和盛夏期, 两时期短时强降水过程频次接近, 年站点平均频次分别为 2.7 次和 2.6 次, 前汛期仅为 0.6 次; 东北沿海地区汛期年站点平均频次为 5.8 次。东南沿海地区短时强降水过程频次的变化特征与东北沿海地区相似, 年站点平均频次为 6.6 次。西南山区短时强降水过程集中于梅汛期, 梅汛期年站点平均频次为 4.4 次; 前汛期和盛夏期短时强降水过程频次少, 分别为 1.9 次和 1.3 次。西南山区汛期年站点平均频次为 7.6 次, 较东部沿海地区偏大。

各高发区短时强降水过程累计雨量、持续时间和降水效率在汛期各个阶段分布特征如图 6b—d 所示, 各统计量的中位值见表 1。对于东北沿海地区,

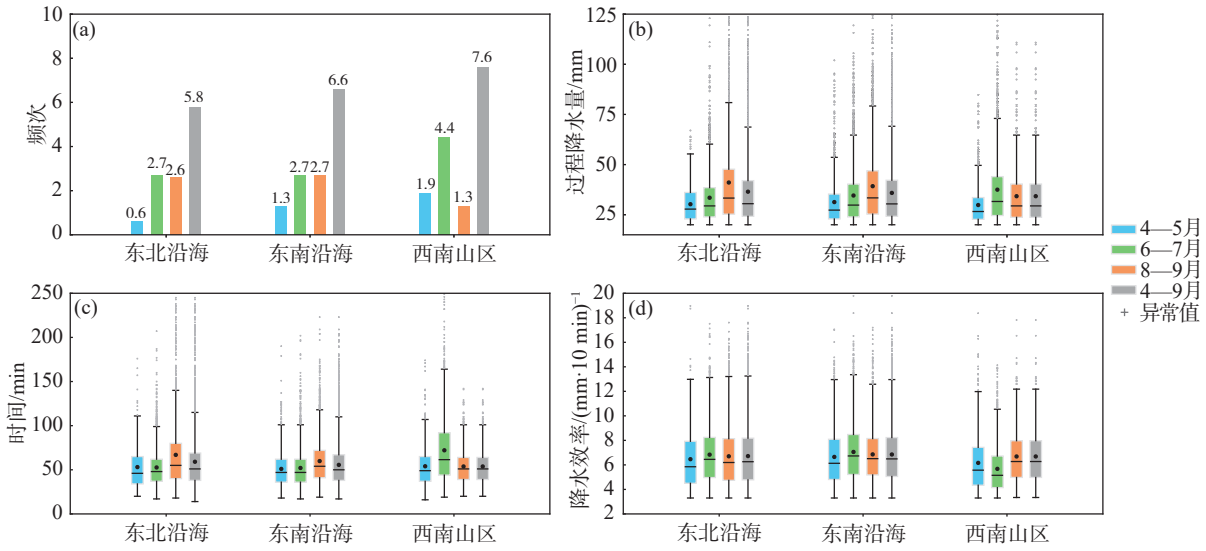


图 6 2018—2022 年汛期 (4—9 月)、前汛期 (4—5 月)、梅汛期 (6—7 月) 和盛夏期 (8—9 月) 基于分钟雨量数据的浙江省东北沿海、东南沿海和西南山区站点年平均短时强降水过程频次变化 (a), 以及短时强降水过程累计雨量 (b)、持续时间 (c) 和降水效率 (d) 箱线图

Fig. 6 The variation of (a) the annual mean frequency of the short-duration heavy rainfall processes per station and the boxplot of the (b) accumulated rainfall, (c) duration and (d) rainfall efficiency during short-duration heavy rainfall processes during flood season (April to September), pre-flood season (April to May), plum rain season (June to July) and midsummer (August to September) in Northeast coastal area, Southeast coastal area and Southeast mountain area in Zhejiang Province from 2018 to 2022 based on the minute rain gauge data

从前汛期至盛夏期, 短时强降水过程累计雨量 (图 6b) 和降水持续时间 (图 6c) 增大, 过程累计雨量中位值从 27.8 mm 增大至 33.3 mm, 降水持续时间中位值从 46 min 增加至 55 min (表 1)。值得注意的是, 在前汛期和梅汛期, 50 mm 的过程累计雨量已接近异常临界值, 属于极端短时强降水, 降水时长异常临界值约为 100 min。在盛夏期, 过程累计雨量和降水时长异常临界值分别约为 75 mm 和 150 min, 较前汛期和梅汛期增大, 这表明进入盛夏期后, 短时强降水过程累计雨量增大、持续时间增加。降水效率季节变化小, 梅汛期较其余时期稍偏大 (图 6d), 中位值为 6.4 mm·(10 min)$^{-1}$ (表 1)。东南沿海地区短时强降水过程的累计雨量、持续时间和降水效率的变化特征与东北沿海地区基本相似 (图 6 和表 1)。

对于西南山区, 短时强降水过程累计雨量在梅汛期最大 (图 6b), 中位值为 31.6 mm (表 1), 前汛期和盛夏期较梅汛期偏小 (图 6b), 分别为 26.6 mm 和 29.4 mm (表 1)。持续时间的变化特征与过程累计雨量相似 (图 6c), 在梅汛期最大, 中位值为 62 min (表 1)。各统计量的异常临界值在各个阶段的差异也反映了上述变化特征 (图 6b、c)。降水效率在前汛期和梅汛期偏小, 在盛夏期最大 (图 6d), 中位值为 6.3 mm·(10 min)$^{-1}$, 与东部沿海地区接近 (表 1)。

以上统计分析表明东北沿海和东南沿海地区短时强降水过程频次、累计雨量、持续时间和降水效率的变化特征相似, 西南地区和东部沿海地区短时强降水过程频次和雨量特征存在明显差异。对于东部沿海地区, 从前汛期至盛夏期, 短时强降水过程频次、累计雨量和降水持续时间增大; 降水效率在梅汛期最大, 在前汛期和盛夏期较梅汛期偏小。对于西南山区, 短时强降水过程频次、累计雨量和降水持续时间在梅汛期最大; 降水效率在盛夏期最大, 在前汛期和梅汛期较盛夏期偏小。

表 1 2018—2022 年前汛期、梅汛期和盛夏期基于分钟雨量数据的浙江省东北沿海、东南沿海和西南山区短时强降水过程累计雨量、持续时间和降水效率中位值

Table 1 The median of accumulated rainfall, duration, and rainfall efficiency of short-duration heavy rainfall events during the pre-flood season, the plum rain season, and the midsummer in the Northeast coastal, Southeast coastal, and Southwest mountainous areas in Zhejiang Province from 2018 to 2022 based on the minute rain gauge data

区域	过程累计雨量/mm			持续时间/min			降水效率/mm·(10 min)$^{-1}$		
	前汛期	梅汛期	盛夏期	前汛期	梅汛期	盛夏期	前汛期	梅汛期	盛夏期
东北沿海	27.8	29.4	33.3	46	48	55	5.9	6.4	6.2
东南沿海	27.3	29.8	33.4	47	47	54	6.1	6.7	6.5
西南山区	26.6	31.6	29.4	49	62	51	5.6	5.2	6.3

3.2 短时强降水过程分钟降水时间尺度

分析短时强降水过程分钟降水时间尺度有助于了解短时强降水过程降水振荡周期 (盛杰等, 2012), 因此选取代表站点分析分钟降水时间尺度。代表站点选取东北沿海、东南沿海和西南山区短时强降水小时数最大的站点, 具体站号为 K2844 (骆家坑站)、K3046 (莒溪站) 和 K9122 (潘坑村站), 分别位于宁波市、温州市和丽水市。将代表站点 2018—2022 年汛期所有短时强降水过程分钟雨量时间序列合并为一个序列做功率谱分析, 结果如图 7 所示。可见东北沿海地区短时强降水过程分钟降水显著周期为 35~45 min 和 55~70 min, 20 min 左右也存在一个降水周期 (图 7a); 东南沿海地区显著周期为 35~45 min, 且还存在一个 25 min 左右的降水周期 (图 7b); 西南山区显著周期为 30~55 min (图 7c)。

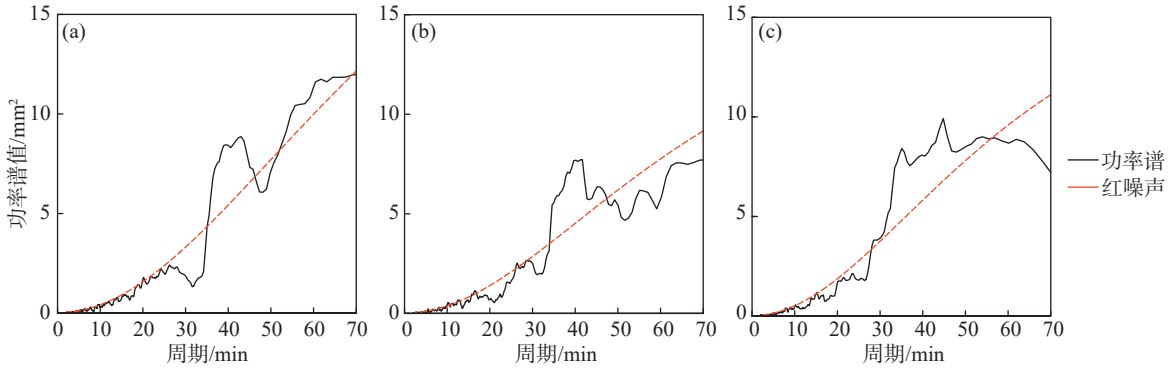


图 7 2018—2022 年汛期浙江省东北沿海 (a)、东南沿海 (b) 和西南山区 (c) 代表站点 (分别为骆家坑站、莒溪站和潘坑村站, 下同) 短时强降水过程分钟降水功率谱

Fig. 7 The power spectrum analysis of the minute rain during the short-duration heavy rainfall processes at the three selected stations (Luojiakeng station, Lyvxi station and Pankengcun station, the same as follow) in the (a) Northeast coastal area, (b) Southeast coastal area and (c) Southeast mountain area during the flood season from 2018 to 2022 in Zhejiang Province

上述结果表明, 浙江省不同的短时强降水高发区强降水过程分钟降水时间尺度接近, 以 35~55 min 降水周期为主, 且大都还存在一个 20~25 min 的降水周期。这表明浙江省短时强降水过程中单个降水周期的时间尺度集中在 35~55 min, 也在一定程度上反映引发短时强降水的中尺度对流单体的生命史以 35~55 min 为主。

3.3 短时强降水过程分钟级雨强演变和降水初期累计雨量

分析短时强降水过程雨强演变特征有助于了解短时强降水过程雨强变化趋势。由于短时强降水过程时间尺度以 35~55 min 为主 (图 7), 因此分析代表站点汛期短时强降水过程开始 1 h 内雨强演变情况。图 8 为三个代表站点所有短时强降水过程开始 1 h 内雨强中位值逐分钟演变, 可见三个代表站点雨强演变特征基本相似, 具体表现为过程初期雨强增大快, 于 10~15 min 达到峰值, 峰值中位值为 0.6~0.8 mm·min^{-1}, 20 min 起雨强逐渐减小。此外, 分析汛期各阶段代表站点短时强降水过程开始 1 h 内雨强演变 (图略), 显示汛期各个阶段短时强降水过程雨强演变特征基本相似。

探究短时强降水过程初期累计雨量特征能为预

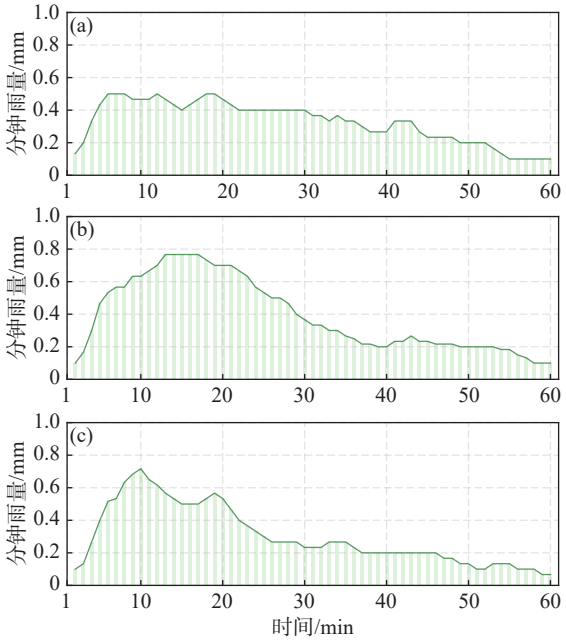


图 8 2018—2022 年汛期浙江省东北沿海 (a)、东南沿海 (b) 和西南山区 (c) 代表站点短时强降水过程开始 1 h 内逐分钟雨强中位值

Fig. 8 The evolution of the median of the minute rainfall within an hour from the beginning of the short-duration heavy rainfall at three selected stations in the (a) Northeast coastal, (b) Southeast coastal and (c) Southeast mountain area during flood season from 2018 to 2022 in Zhejiang Province

警提供参考。由于在短时强降水过程中，雨强于10~15 min达到峰值，因此分析短时强降水过程开始后5 min、10 min和15 min累计雨量分布特征(图9)，可见三个高发区短时强降水过程初期累计雨量分布特征基本相似，5 min、10 min和15 min累计雨量中位值分别约为2 mm、5 mm和8 mm。由于5 min和10 min累计雨量样本分布离散度小，15 min累计雨量样本分布离散度大，因此采用5 min和10 min累计雨量中位值作为短时强降水预警参考指标，分别为2 mm·5 min^{-1}和5 mm·(10 min)$^{-1}$。该指标与盛杰等(2012)基于个例的研究结果接近。值得注意的是，对于5 min累计雨量，5 mm·5 min^{-1}这一数值在三个高发区累计雨量分布中均为异常值(图9中“+”标识)，说明达到该指标时往往会发生极端短时强降水。因此，5 mm·(5 min)$^{-1}$可作为极端短时强降水事件初期预警参考指标。

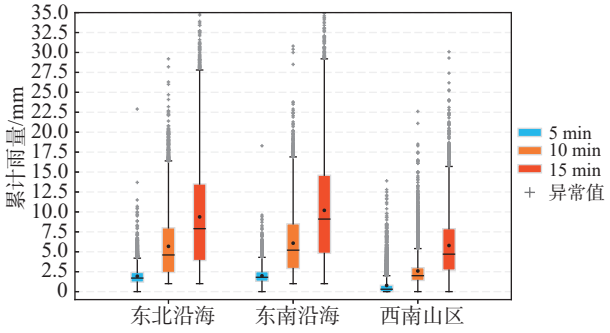


图9 2018—2022年汛期浙江省东北沿海、东南沿海和西南山区短时强降水过程开始后5 min、10 min和15 min累计雨量箱线图

Fig. 9 The boxplot of the accumulated rainfall within 5 min, 10 min and 15 min from the beginning of the short-duration heavy rainfall process in the Northeast coastal, Southeast coastal, and Southwest mountainous areas during flood season from 2018 to 2022 in Zhejiang Province

4 结论与讨论

本文利用2018—2022年汛期浙江省地面气象自动观测站逐分钟雨量数据，分析了近5 a浙江省汛期短时强降水时空特征，比较了基于分钟和小时雨量数据统计的短时强降水事件时空特征差异；结合功率谱分析方法，探究了短时强降水过程总累计雨量、初期累计雨量、持续时间、降水效率、分钟雨强演变和分钟降水时间尺度等特征。得到的主要结论如下：

(1) 浙江省汛期短时强降水空间分布具有明显的区域特征。东北沿海、东南沿海和西南山区为短时强降水高发区，全省近5 a站点平均短时强降水小时数为8.9 h；东部沿海地区短时强降水强度较其它地区偏强，全省年站点平均小时累计雨量极大值为66.8 mm。与基于分钟雨量数据的统计结果相比，基于小时雨量数据的统计分析基本能够反映短时强降水的时空特征，但统计所得的短时强降水小时数偏少且强度偏小，小时数偏少约30%，强度偏小约20%。

(2) 浙江省汛期短时强降水具有多时间尺度变化特征，地域间差异大。2021年为近5 a短时强降水小时数最大的年份，2022年为最小的年份，这与当年汛期的气候背景态密切相关。东北沿海和东南沿海地区短时强降水集中发生在梅汛期和盛夏期的午后至傍晚，西南山区短时强降水主要出现在梅汛期的早晨至午后。

(3) 浙江省汛期短时强降水过程特征具有季节和区域特征。对于东北沿海、东南沿海地区，从前汛期至盛夏期，短时强降水过程频次、累计雨量、持续时间和降水效率均增大。对于西南山区，短时强降水过程频次、累计雨量和持续时间在梅汛期最大，而降水效率在梅汛期最小，在盛夏期最大。

(4) 不同高发区短时强降水过程分钟降水时间尺度接近，以35~55 min为主，且大都还具有20~25 min的降水时间尺度。短时强降水过程初期雨强增大快，于10~15 min达到峰值，雨强峰值约为0.6~0.8 mm·min^{-1}，20 min起雨强逐渐减小。统计分析表明2 mm·(5 min)$^{-1}$和5 mm·(10 min)$^{-1}$可作为浙江省短时强降水预警参考指标，5 mm·(10 min)$^{-1}$是极端短时强降水事件的初期预警参考指标。

本文总结了浙江省汛期短时强降水过程频次、持续时间和降水效率的季节变化特征，探究了短时强降水过程中分钟降水时间尺度、雨强演变和初期累计雨量特征，有助于加深预报员对于短时强降水过程的理解，提炼的预警指标对短时强降水预警发布有参考意义。目前的研究未探讨短时强降水过程中雷达回波的演变以及降水的微物理特征，在后续工作中，可利用本地双极化雷达观测资料，提炼短时强降水过程分钟级雨强变化与雷达回波的关系并结合地面雨滴谱观测资料检验改进本地雷达降水估测产品，以期进一步提高对短时强降水的监测和预警能力。

参考文献 (References)：

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

戴建华.2013.长三角地区雷暴发展、演变特征分析与机理研究[D].南京:南京大学. Dai J H. 2013. Study on thunderstorm development and evolution,and its mechanisms in the Yangtze River Delta region [D]. Nanjing:Nanjing University (in Chinese)

段晶晶,钱燕珍,周福,等.2017.台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究[J].气象,43(6):686−695. Duan J J, Qian Y Z, Zhou F, et al. 2017. Numerical simulation of topographic effect on heavy rainfall in northeastern Zhejiang caused by typhoon Chan Hom [J]. Meteorological Monthly,43(6):686−695 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.06.005

何彩芬,朱龙彪,董杏燕,等.2006.宁波夏季强对流和台风短时暴雨雷达回波特征对比分析[J].气象,32(11):67−72. He C F, Zhu L B, Dong X Y, et al. 2006. Doppler radar data analysis of convective and typhoon short-time torrential rainfall in summer in Ningbo [J]. Meteorological Monthly,32(11):67−72 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2006.11.011

吕劲文,姚日升,涂小萍,等.2019.浙江省 6—9 月午后短时强降水空间分布特征分析[J].暴雨灾害,38(4):320−328. Lv J W, Yao R S, Tu X P, et al. 2019. Analysis on spatial distribution characteristics of afternoon flash heavy rain from June to September in Zhejiang Province [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):320−328 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.04.004

李山山,王晓芳,李国平,等.2023.短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比[J].暴雨灾害,42(1):1−12. LI S S, Wang X F, Li G P, et al. 2023. Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):1−12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−119

李文娟,赵放,赵璐,等.2017.基于单站探空资料的不同强度短时强降水预报指标研究[J].暴雨灾害,36(2):132−138. Li W J, Zhao F, Zhao L, et al. 2017. Study of the forecasting index for short-duration heavy rainfall with different intensities based on sounding data at Hangzhou [J]. Torrential Rain and Disasters,36(2):132−138 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.02.005

盛杰,张小雯,孙军,等.2012.三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析[J].气象,38(10):1161−1169. Sheng J, Zhang X W, Sun J, et al. 2012. The comparative analysis of minute-class rainfall on three different heavy rain processes [J]. Meteorological Monthly,38(10):1161−1169 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.10.001

翟丽萍,梁依玲,周云霞,等.2024.桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析[J].暴雨灾害,43(3):313−321. Zhai L P, Liang Y L, Zhou Y X, et al. 2024. Observation analysis of "5.22" extreme rainfall event in Guilin [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):313−321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−141

陶局,唐燕玲,易笑园,等.2021.近 10 a 浙江省极端短时强降水时空特征分析[J].暴雨灾害,40(6):599−607. Tao J, Tang Y L, Yi X Y, et al. 2021. Spatio-temporal characteristics of short-duration extreme rainfall in the recent ten years in Zhejiang Province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6):599−607 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.06.004

涂小萍,徐迪锋,王毅.2013.浙江省地形对 0908 台风“莫拉克”降水影响的数值试验[J].浙江气象,34(4):17−24. Tu X P, Xu D F, Wang Y. 2013. Numerical simulation of the impact of Zhejiang Province's terrain on the precipitation of typhoon Morakot (0908) [J]. Zhejiang Meteorology,34(4):17−24 (in Chinese). doi:10.16000/j.cnki.zjqx.2013.04.008

魏凤英.2007.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社:77-82. Wei F Y. 2007. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing:China Meteorological Press:77-82 (in Chinese)

王镇铭,杜惠良,杨诗芳.2013.浙江省天气预报手册[M].北京:气象出版社:161−172. Wang Z M, Du H L, Yang S F. 2013. The manual for Zhejiang weather forecast [M]. Beijing:China Meteorological Press, 161−172 (in Chinese)

吴书成,魏爽,吴京生.2015.雷达估测降水在区域站降水质控中的应用[J].气象科技,43(1):49−52. Wu S C, Wei S, Wu J S. 2015. Application of radar precipitation estimation to quality control for regionalprecipitation[J].MeteorologicalScienceandTechnology,43(1):49−52 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2015.01.008

吴书成,魏爽,王丽吉,等.2016.自动气象站降水实时快速质控算法设计[J].气象科技,44(6):882−888. Wu S C, Wei S, Wu L J, et al. 2016. Algorithm design of fast and real-time quality contral for precipitation data from automatic stations [J]. Meteorological Science and Technology,44(6):882−888 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2016.06.005

俞佩.2022.浙江省短时强降水的时空分布特征[J].气候与环境研究,27(3):397−407. Yu P. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Zhejiang Province [J]. Climatic and Environmental Research,27(3):397−407 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2021.21043

徐慧燕,邓霞君,周国华.2016.丽水地区短时强降水时空分布特征及成因分析[J].气象与环境科学,39(3):44−49. Xu H Y, Deng X J, Zhou G H. 2016. Temporal-spatial distribution characteristics and course analysis of short-time heavy precipitation in Lishui [J]. Meteorological and Environmental Sciences,39(3):44−49 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2016. 03. 006

易笑园,张义军,沈永海,等.2012.一次海风锋触发的多单体雷暴及合并过程的观测分析[J].气象学报,70(5):974−985. Yi X Y, Zhang Y J, Shen Y H, et al. 2012. Observational analysis of a multicell hailstorm triggered by a sea-breeze front and its merging process [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(5):974−985 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.082

赵俊虎,陈丽娟,章大全.2022. 2021 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,48(1):107−121. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q. 2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021 [J]. Meteorological Monthly,48(1):107−121 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.120201

曾秀娟,李亚东,舒守娟,等.2023.复杂地形下浙江省夏季午后降水的空间估算及其影响因素[J].气象,49(5):574−587. Zeng X J, Li Y D, Shu S J, et al. 2023. Spatial estimation and impact factors of summer afternoon precipitation in Zhejiang Province under complex terrain [J]. Meteorological Monthly,49(5):574−587 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.013002

周金莲,张家国,吴涛,等.2022.长江中游梅雨锋极端暴雨过程中的边界层中尺度系统主要特征[J].气象,48(8):1007−1019. Zhou J L, Zhang J G, Wu Tao, et al. 2022. Characteristics of the mesoscale weather system producing extreme rainstorm in boundary layer during the

Meiyu front over the Middle Reaches of Yangtze River [J]. Meteorological Monthly,48(8):1007−1019 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.05280

张俊兰,李伟,郑育琳.2022.昆仑山北坡短时强降水天气分型及雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,16(1):1−9. Zhang J L, Li W, Zheng Y L. 2022. Weather Classification and Radar Echo Characteristics of Short-term Heavy Precipitation in the Northern Kunlun Mountains [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(1):1−9 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2022.01.001

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,26(6):641−657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al. 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of sever convective weather [J]. Journal of Applied Meteorological Science,26(6):641−657 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20150601

Chen F, Zheng X, Wen H, et al. 2022. Microphysics of convective and stratiform precipitation during the summer monsoon season over the Yangtze–Huaihe River Valley, China [J]. Journal of Hydrometeorology, 23:239−252. doi:10.1175/JHM−D−21−0078.1

He C, Zhou T, Zhang L, et al. 2023. Extremely hot East Asia and flooding western South Asia in the summer of 2022 tied to reversed flow over Tibetan Plateau [J]. Climate Dynamics,61:2103−2119. doi:10.1007/s00382−023−06669−y

Fowler H, Lenderink G, Prein A, et al. 2021. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes [J]. Nature Reviews Earth and Environment,2:107−122. doi:10.1038/s43017−020−00128−6

Wang J, Chen F, Doan Q, et al. 2021. Exploring the effect of urbanization on hourly extreme rainfall over Yangtze River Delta of China [J]. Urban Climate,36:100781. doi:10.1016/j.uclim.2021.100781

Wang B, Lin H. 2002. Rainy season of the Asian–Pacific summer monsoon [J]. Journal of Climate,15(4):386–398. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2

Wang M, Zhao K, Xue M, et al. 2016. Precipitation microphysics characteristics of a Typhoon Matmo (2014) rainband after landfall over eastern China based on polarimetric radar observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,121(20):415−433. doi:10.1002/2016JD025307

Wei Q, Sun J, Fu S, et al. 2024. Spatiotemporal characteristics of rainfall over different terrain features in the middle reaches of the Yangtze River Basin during the warm seasons of 2016–20 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,41:915−936. doi:10.1007/s00376−023−3034−5

Yuan W, Tu X, Su C, et al. 2021. Research on the critical rainfall of flash floods in small watersheds based on the design of characteristic rainfall patterns [J]. Water Resource Managenement,35:3297−3319. doi:10.1007/s11269−021−02893−5

Zhang D, Huang Y, Zhou B, et al. 2024. Who is the major player for 2022 China extreme heat wave? Western Pacific Subtropical high or South Asian high? [J]. Weather and Climate Extremes,43:100640. doi:10.1016/j.wace.2024.100640

Zhou T, Zhang W, Zhang L, et al. 2022. A year of unprecedented climate extremes in Eastern Asia, North America, and Europe [J]. Advances in Atmospheric Sciences,39:1598−1607. doi:10.1007/s00376−022−2063−9

(责任编辑　唐国瑛)