

董旭光,高理,邬铭法,2026. 基于分钟级降水数据的山东汛期滑动和整点小时强降水差异研究[J]. 气象,52(7):799-809. Dong X G, Gao L, Wu M F, 2026. Difference between sliding window and hourly fixed-time heavy precipitation during the flood season in Shandong Province based on minutely precipitation data[J]. Meteor Mon, 52(7):799-809 (in Chinese).

基于分钟级降水数据的山东汛期滑动和 整点小时强降水差异研究^{*}

董旭光^{1,2} 高 理^{1,2} 邬铭法^{1,2}

1 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省气候中心, 济南 250031

提 要: 整点小时降水会低估小时尺度的强降水特征, 为进一步认识小时尺度强降水的变化规律, 基于山东 123 个国家级气象观测站 2004—2024 年汛期(6—9 月)逐分钟降水观测数据, 对比滑动 60 min 与整点小时两种统计方法在强降水识别中的差异, 定量评估不同方法对强降水频次、强度及其时空分布特征的影响。结果表明: 滑动 60 min 方法捕捉强降水事件更全面, 全省平均强降水累年发生次数为 124.3 次, 是整点小时(84.3 次)的 1.47 倍, 各站介于 1.31~1.81 倍; 滑动 60 min 最大降水量平均偏高 10.0 mm, 部分站点超 30.0 mm。两种方法的强降水空间分布总体一致, 但滑动 60 min 方法呈现更强的空间差异性和极端性。滑动 60 min 方法强降水频次和强度增加趋势更显著, 气候倾向率分别为 $1.291 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $4.514 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 且月、日变化特征更为明显, 7—8 月及午后至凌晨为主的高发时段差异尤为突出。传统整点小时方法系统性低估短时强降水的发生频次与极端强度, 而滑动 60 min 方法可更真实反映强降水特征, 对提高暴雨监测准确性和灾害风险预警能力具有重要应用价值。

关键词: 短时强降水, 滑动 60 min, 整点小时, 时空变化特征

中图分类号: P468

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.011602

Difference Between Sliding Window and Hourly Fixed-Time Heavy Precipitation During the Flood Season in Shandong Province Based on Minutely Precipitation Data

DONG Xuguang^{1,2} GAO Li^{1,2} WU Mingfa^{1,2}

1 Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Jinan 250031

2 Shandong Climate Center, Jinan 250031

Abstract: Hourly fixed-time precipitation data may underestimate the characteristics of heavy precipitation at the hourly scale. To gain a deeper understanding of the variation patterns of hourly heavy precipitation, utilizing the minutely precipitation observation data collected by 123 national meteorological stations in Shandong Province from June to September during the flood seasons of 2004—2024, we compare the differences between the 60 min sliding window and hourly fixed-time statistical methods in identifying heavy precipitation events, and quantitatively assess the impact of the two methods on the frequency, intensity and spatio-temporal distribution of heavy precipitation. The results indicate that the 60 min sliding window method can capture heavy precipitation events more comprehensively than the hourly fixed-time

^{*} 山东省气象局科研项目(2023SDBD02)和环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202206)共同资助

2025 年 9 月 15 日收稿; 2026 年 1 月 16 日收修定稿

第一作者: 董旭光, 主要从事气候变化和气候应用研究. E-mail: dongxuguang@sina.com

method. The average frequency of heavy precipitation across the whole province is 124.3 times by means of the 60 min sliding window method, and it is 1.47 times that of the hourly fixed-time method (84.3 times), with the ratio of each station ranging between 1.31 and 1.81. The maximum precipitation captured by the 60 min sliding window method is 10.0 mm more on average, exceeding 30.0 mm for some stations. The spatial distributions of the heavy precipitation by two methods are generally in line, but the 60 min sliding window method reveals even greater spatial variability and stronger extremity of heavy precipitation. The 60 min sliding window method also more clearly shows the increasing trends in both frequency and intensity of heavy precipitation, with climatic tendency rates being 1.291 times per decade and 4.514 mm per decade, respectively. Moreover, the monthly and daily variation characteristics of heavy precipitation are more distinct by using the 60 min sliding window method, particularly in the high-frequency periods from July to August and from afternoon to early morning. The traditional hourly fixed-time statistical method underestimates the frequency and extreme intensity of short-duration heavy precipitation. In contrast, the 60 min sliding window method can provide a more accurate representation of heavy precipitation characteristics, so it is of great application values for improving the accuracy of rainstorm monitoring and early warning capabilities for disasters.

Key words: short-duration heavy precipitation, 60 min sliding window, hourly fixed-time, spatio-temporal variation characteristic

引言

在全球气候变暖背景下,中国各地强降水事件发生频率、平均强度、极值等均呈上升变化趋势(杨金虎等,2008;周波涛和钱进,2021),全球平均气温每升高 1℃,强降水会增强 7%,而且全球变暖幅度越大,强降水强度就越强,两者呈现明显的正相关关系(周波涛和钱进,2021)。强降水会造成严重的洪涝灾害(Coumou and Rahmstorf, 2012; Thompson et al, 2017),从而引发严重的山洪地质灾害,此类相关事件难以及时发出预警并启动相应的应急响应(Westra et al, 2014)。

近年来,全球干旱和湿润地区的强降水事件均呈增加趋势(Donat et al, 2016; Ingram, 2016),且不同区域的强降水变化差异明显(Ban et al, 2015; 鲁菁等, 2019; 彭俊台等, 2011; 周北平等, 2016; 刘可晶等, 2012)。随着分钟级降水数据的信息化,基于分钟级降水数据的不同历时强降水的研究逐渐增多,但多数研究是采用滑动求和方法,如战云健等(2021)利用 2000 多个国家级气象观测站分钟级降水数据研究发现,夏季 15~45 min 历时最大降水量增幅最为显著。王冷力等(2025)使用 20 个北京地区气象站历史分钟级降水数据,分析了不同连续时间分钟强降水事件的空间分布和日变化特征。冷亮

等(2021)利用 2010—2015 年湖北自动气象站分钟级降水数据,分析了滑动累计小时强降水的时空分布特征。李欣欣等(2021)利用 1961—2018 年福建 66 个国家级气象观测站降水数据,对 10、30、60 min 等历时降水量极值的年、月等变化进行了统计分析。王宇浩等(2025)利用 2018—2022 年 4—9 月浙江分钟级降水数据,分析了小时强降水的时空差异特征,但对逐时强降水的差异分析明显不足。段丽洁等(2021)、郭冰芳等(2025)分别利用长沙、郑州的分钟级降水数据,采用滑动求和方法分析了场次降水事件的变化。虽然基于分钟级降水数据可以进行次小时尺度强降水的分析,但在小时尺度上,传统的逐时降水是整点的累计降水量,如果强降水过程在整点前后连续存在,则会人为减小实际强降水量值。滑动 60 min(或其他不同历时、逐时)强降水统计方法亦会截断连续降水过程,使得降水强度变小,但其在强降水发生频次、最大降水量的分析中结果更可靠,对各地强降水的监测评估更具指导意义。目前,已有的相关研究极少见滑动 60 min 和整点小时强降水的对比结果,两者统计得到的强降水出现频次、最大降水量等指标的差异是一个值得关注的问题。

山东地处我国中纬度沿海地区,受不同季节大气环流形势的影响(侯淑梅等, 2014),年内降水主要集中在夏季前后,同时由于复杂的下垫面特征,各地极端强降水出现频次、强度等差异明显。诸多学者

对山东的强降水变化特征进行了研究,但大多是基于山东国家级气象观测站逐时(董旭光等,2017;2018;赵海军等,2021)、逐日(段丽瑶等,2013;董旭光等,2014)、逐月(邹瑾等,2023)等时间尺度资料进行分析的,以分钟级精细降水观测数据对强降水的研究极少。因此,本研究利用2004—2024年山东123个国家级气象观测站逐分钟降水观测数据,对比分析山东汛期(6—9月)滑动60 min和整点小时强降水出现频次、最大降水量等指标的时空变化差异,可为深入理解山东强降水事件的变化情况,以及为当地城市内涝、山洪灾害防范等提供参考。

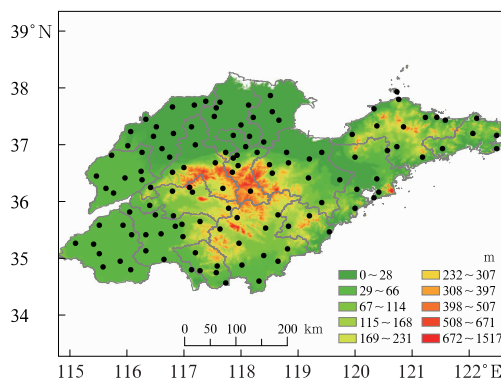
1 资料和方法

1.1 资料

2004年山东国家级气象观测站由人工观测转为自动观测,两种降水数据记录的精度不同(王冷力等,2025)。因此,选取山东123个国家级气象观测站2004—2024年汛期(6—9月)逐分钟降水观测数据,该数据由山东省气象数据中心提供,已经过多次数据质量检验和质量评估,具有较高的完整性和准确性。使用该数据进行强降水指标分析前,首先对分钟级降水量极大值进行统计,通过前后分钟降水数据对比及与其他邻近站点同时刻降水量对比,判断极大值的可靠性,对于可能有误的分钟级降水数据,采用邻近站点同时刻分钟级降水数据进行替换,经过对比分析,未发现存在明显错误的分钟级降水数据。山东地形、地貌特征和使用的国家级气象观测站的空间分布如图1所示,文中地图底图基于标准地图网站下载的审图号为GS(2017)3320号标准地图制作,底图无修改。本文所用时间均为北京时。

1.2 研究方法

采用俞小鼎(2013)和姜琪等(2025)使用的小时降水量 ≥ 20.0 mm作为强降水事件的绝对值阈值标准。整点小时强降水为整点前60 min(00—59分)的累计降水量 ≥ 20.0 mm;滑动60 min强降水为任意长度60 min的滑动窗口内累计降水量 ≥ 20.0 mm,从研究时段起始时刻向后取60 min的累计降水量,如果未达阈值,则窗口从起始时刻的下一分钟,再次计算,直到某个60 min窗口累计降水量 ≥ 20.0 mm,即记为一次强降水事件,从其结束时刻的下一分钟开始新的滑动统计。整点小时强降水发生



注:填色为海拔。

图1 山东地形特征及使用的国家级气象观测站(黑点)的空间分布

Fig. 1 Topography and distribution of used national meteorological stations (black dot) in Shandong Province

时次为降水量超过阈值的整点时刻,滑动60 min强降水发生时次根据该时间窗口的最后一分钟所处位置确定,若最后一分钟在半点之前(如强降水结束于07:22),强降水时次记为该整点(07:00),若最后一分钟在半点之后(如强降水结束于07:45),则记为下一个整点(08:00)。每个站各月和年滑动60 min、整点小时最大降水量为统计时段内超过强降水阈值的最大降水量。

依据上述强降水统计方法,统计得到山东123个站2004—2024年历年6—9月各月整点小时和滑动60 min强降水过程的出现频次、出现时次、最大降水量等指标,对比分析两种方法强降水指标在空间分布、历年变化和逐时变化特征方面的定量化差异。

2 结果分析

2.1 强降水空间变化对比

2.1.1 强降水频次空间变化对比

2004—2024年汛期(6—9月)山东国家级气象观测站滑动60 min、整点小时 ≥ 20.0 mm的强降水出现次数空间分布如图2所示。滑动60 min强降水全省累年平均出现次数为124.3次,空间分布差异显著,高频区(>140 次)集中出现在临沂、枣庄、泰安中部、济宁东部、济南南部及德州和菏泽的部分地区,共29个站,其中泰山(210次)和台儿庄(186次)频次最高。泰山滑动60 min强降水出现次数多且较整点小时强降水出现次数偏多60次以上,这可能

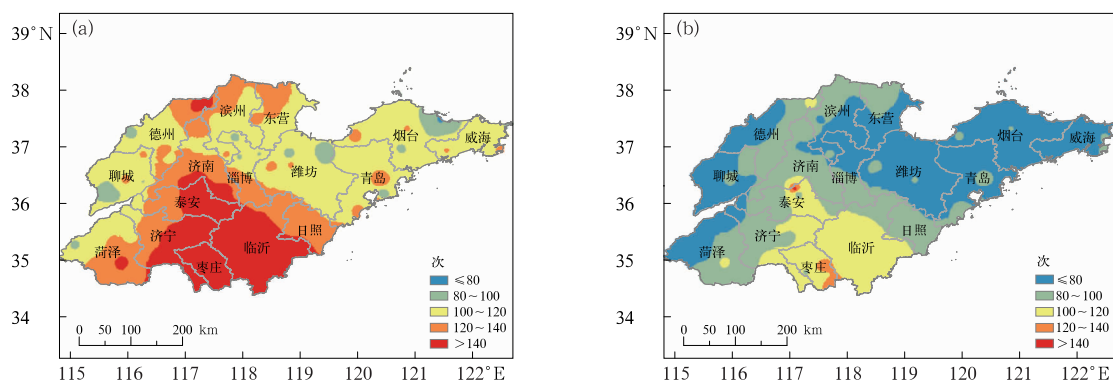


图 2 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)(a)滑动 60 min 和(b)整点小时强降水出现次数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy precipitation frequency using (a) the 60 min sliding window and (b) hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

与泰山站海拔较高,地形抬升易引发当地短时强降水有关(郑丽娜和孙继松,2024;郑丽娜等,2025)。此外,台儿庄及其周边区域位于鲁中山区南部,处于山前偏南暖湿气流迎风向,是山东强降水多发区域,也是滑动 60 min 和整点小时强降水次数差异较大的区域。低频区(<100 次)则主要分布于山东西部、烟台东部、潍坊和淄博北部等地,其中烟台站为 74 次,为全省最低。整点小时强降水全省累年平均出现次数为 84.3 次,其空间分布与滑动 60 min 的统计结果类似,但是量值整体偏低,高频区(>100 次)范围减小,主要集中在临沂、枣庄、泰安中部、济宁东部及济南南部,共 23 个站,其中泰山站(147 次)和枣庄站(129 次)为高频中心;低频区(<80 次)范围则显著扩大,覆盖了山东西部、山东半岛大部、潍坊及鲁西北东部等区域。

总体而言,两种方法统计结果显示强降水空间分布基本一致,均表现为鲁南、鲁中南部及鲁西北部地区为高频次中心,而山东半岛、鲁西北东部等地出现次数相对较低。然而,滑动 60 min 方法得到的强降水出现次数显著多于整点小时。鲁中山区中部和南部、鲁南地区滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数差值普遍 >40 次,其中枣庄和临沂南部一带差值超过 50 次(图 3)。滑动 60 min 全省平均强降水出现次数(124.3 次)约为整点小时(84.3 次)的 1.47 倍,各站介于 1.31~1.81 倍,表明滑动统计对出现次数的放大效应普遍但程度不均。从两者出现次数的绝对差值来看,绝大多数站点的差值在 60 次以内,仅泰山、滕州和台儿庄 3 个站差值超过 60 次。这 3 个站点是强降水的高频次中心,更易发生滑动

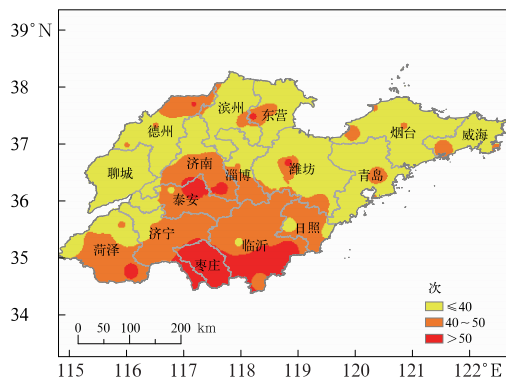
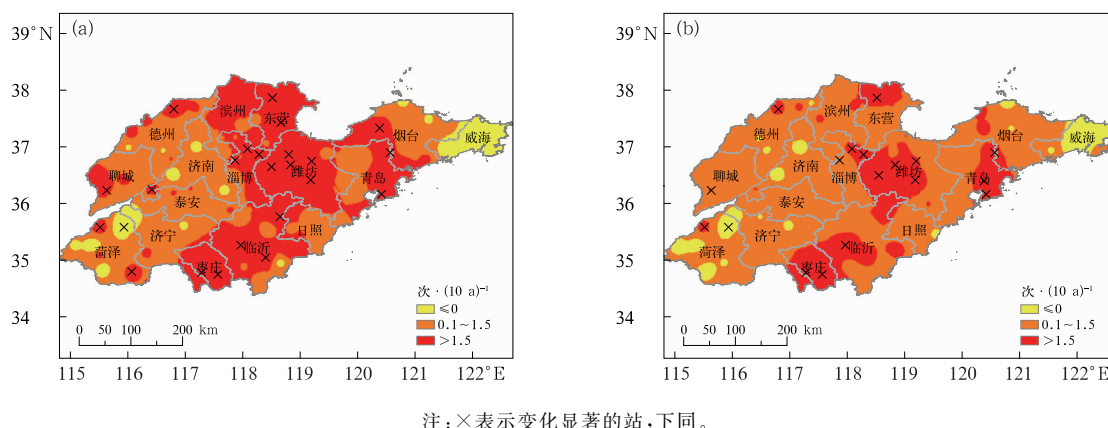


图 3 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数差值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the difference in the heavy precipitation frequency between the 60 min sliding window and hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

60 min 与整点小时不完全重合的强降水过程,从而导致两种方法的统计结果产生显著差异。

山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)各站滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数变化趋势空间分布如图 4 所示,可见二者在变化趋势上具有相似的空间分布,但在变化幅度和显著性方面存在明显差异,山东大部分地区的强降水出现次数均呈现增加趋势,这一现象在两种方法表现一致。然而,滑动 60 min 统计方法显示出更明显的增加信号,变化幅度更大,整点小时强降水变化趋势相对较小。鲁西北东部、鲁中东部、鲁南中东部、山东半岛中西部等



注:×表示变化显著的站,下同。

图 4 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)(a)滑动 60 min 和(b)整点小时强降雨水出现次数变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of trend variation in heavy precipitation frequency using (a) the 60 min sliding window and (b) hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004–2024

地共 55 个站滑动 60 min 强降雨水出现次数增加趋势最明显,超过 $1.5 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,共计 24 个站增加趋势显著($P < 0.05$),占增加趋势站点的 23.8%;共 33 个站整点小时强降雨水增加趋势超过 $1.5 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其中 17 个站增加趋势显著($P < 0.05$),占增加趋势站的 5.9%。两种统计方法下,减少趋势的站点分布基本一致,主要集中在山东半岛东部和山东中西部等地,滑动 60 min 和整点小时分别有 22 个、20 个站呈减小趋势,值得注意的是,郛城站在两种统计方法下均表现出显著的减少趋势($P < 0.05$)。滑动 60 min 方法检测到的增加趋势更强、更显著,说明该方法对强降雨频次变化的敏感性更高。山东强降雨水事件出现次数整体呈增加趋势,与

全球气候变暖背景下极端降水事件增多的预期一致(周波涛和钱进,2021;周天军等,2021)。

2.1.2 最大降水量空间变化对比

山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)各站滑动 60 min 和整点小时强降雨水最大降水量空间分布差异明显(图 5),两种统计方法的最大降水量均呈现明显的区域特征,全省滑动 60 min 最大降水量为 $57.5 \sim 147.1 \text{ mm}$,极值相差达 89.6 mm ,表明区域差异显著,高值区集中分布在鲁西北、鲁中西部、鲁南中东部和山东半岛沿海地区,普遍超过 85.0 mm ,其中 19 个站滑动 60 min 最大降水量超过 100.0 mm ,东营(147.1 mm)和费县(143.4 mm)为全省最高值中心。低值区主要位于鲁南西部、鲁中中东部、山东

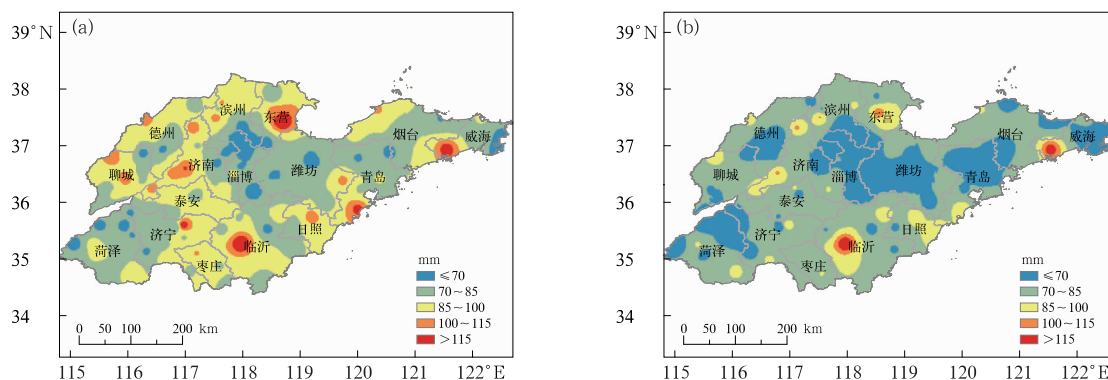


图 5 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)(a)滑动 60 min 和(b)整点小时最大降水量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of maximum precipitation using (a) the 60 min sliding window and (b) hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004–2024

半岛中西部和东部,其中潍坊(57.5 mm)为全省最低。全省整点小时最大降水量为 49.2~136.2 mm,极值相差为 87.0 mm,高值区分布相对零散,主要在鲁西北、鲁中西部、鲁南和山东半岛南部沿海地区有零星分布,仅有 6 个站的最大降水量超过 100.0 mm,其中费县(136.2 mm)和乳山(125.9 mm)为高值中心,低值区分布与滑动 60 min 方法基本一致,桓台(49.2 mm)为全省最低。

山东各站滑动 60 min 最大降水量均大于等于整点小时最大降水量,平均差值为 10.0 mm,表明滑动统计方法普遍能够捕捉到更强的降水过程,但差值分布不均,山东半岛中部和南部、滨州和东营大部、聊城、德州至枣庄一带最大降水量差值较大,大于 10.0 mm,部分区域大于 20.0 mm(图 6)。14 个站差值小于 1.0 mm,其中鄄城、东明、沂水 3 个站两者一致,4 个站差值超过 30.0 mm,东营差异最大(48.0 mm),说明该地区强降水过程的时间分布特征与整点时刻吻合度较低。滑动 60 min 降水量平均为整点小时的 1.14 倍,各站点在 1.0~1.5 倍,表明不同地区受统计方法影响程度存在差异,倍数较大的地区主要集中在沿海和地形复杂区域,这些地区的降水过程往往具有更强的时空不均匀性。总体而言,滑动 60 min 方法能更好地捕捉到强降水过程,短时强降水往往不在整点时刻达到最大值。

山东各站滑动 60 min 和整点小时最大降水量变化趋势空间分布类似(图 7),大部分地区滑动 60 min 和整点小时最大降水量呈增加变化趋势,一

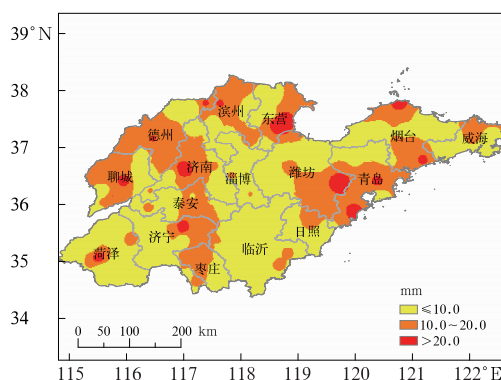


图 6 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)滑动 60 min 和整点小时最大降水量差值空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of the difference in maximum precipitation between the 60 min sliding window and hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

般在 $0 \sim 15.0 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,仅山东半岛东部、山东西北等部分地区有减小变化趋势,除了鄄城滑动 60 min 最大降水量显著减小($P < 0.05$)外,其他各站的减小趋势均不显著($P > 0.05$),滑动 60 min 和整点小时最大降水量分别有 89 个、94 个站呈增加变化趋势,但仅分别有 12 个、11 个站增加趋势显著($P < 0.05$),分别占增加趋势站点的 13.5%、11.7%。两种方法均表明了山东极端强降水呈增加变化趋势,与气候变暖背景下极端强降水增加的结论相符(周波涛和钱进等,2021;周天军等,2021)。

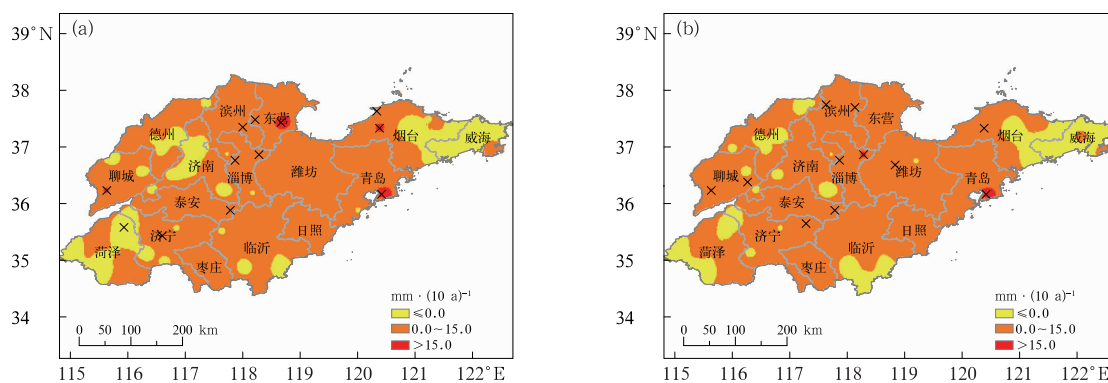


图 7 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)(a)滑动 60 min 和 (b)整点小时最大降水量变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of trend variation in maximum precipitation using (a) the 60 min sliding window and (b) hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

2.2 强降水时间变化对比

2.2.1 强降水历年变化对比

山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)各站滑动 60 min 和整点小时平均强降水出现次数历年变化如图 8 所示。可见,滑动 60 min 强降水历年平均出现次数较整点小时偏多 1.9 次,历年偏多 1.0~3.1 次,2014 年相差最小,2024 年相差最大。滑动 60 min 强降水历年平均出现次数为 5.9 次,历年在 3.1~9.9 次,2014 年最少,2024 年最多,呈波动增加的变化趋势,气候倾向率为 $1.291 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,增加趋势显著($P < 0.05$)。整点小时强降水历年出现次数变化特征与滑动 60 min 类似,亦呈波动增加的变化趋势,历年平均出现次数为 4.0 次,历年在 2.1~6.8 次,历年出现次数均少于滑动 60 min,气

候倾向率为 $0.931 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,增加趋势显著($P < 0.05$)。

山东各站滑动 60 min 和整点小时历年最大降水量变化如图 9 所示。滑动 60 min 历年平均最大降水量较整点小时偏多 1.4~37.9 mm,2016 年相差最小,2024 年相差最大。滑动 60 min 历年平均最大降水量为 75.2~147.1 mm,2005 年最少,2024 年最多,呈波动增加的变化趋势,气候倾向率为 $4.514 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,增加趋势不显著($P > 0.05$)。整点小时历年最大降水量变化特征与滑动 60 min 类似,亦呈波动增加的变化趋势。整点小时历年最大降水量为 64.8~136.2 mm,均少于滑动 60 min 历年最大降水量,气候倾向率为 $1.484 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,增加趋势不显著($P > 0.05$)。

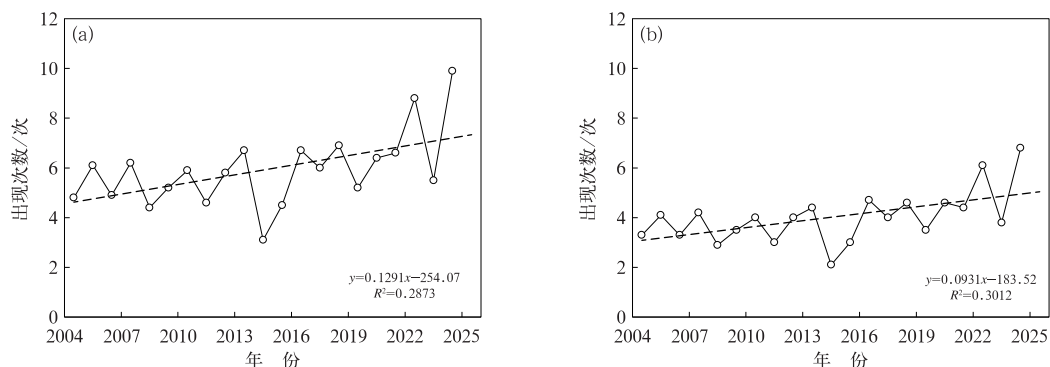


图 8 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)(a)滑动 60 min 和
(b)整点小时强降水出现次数历年变化

Fig. 8 Annual variation of heavy precipitation frequency using
(a) the 60 min sliding window and (b) hourly fixed-time statistical methods in
Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

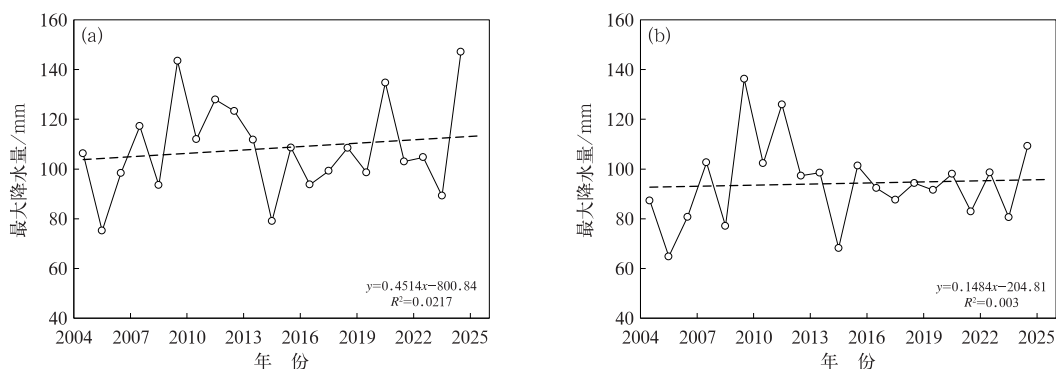


图 9 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)(a)滑动 60 min 和(b)整点小时最大降水量历年变化

Fig. 9 Annual variation of maximum precipitation using (a) the 60 min
sliding window and (b) hourly fixed-time statistical methods in
Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

2.2.2 强降水逐月变化对比

山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)各月滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数如图 10 所示。各月滑动 60 min 强降水出现次数均超过整点小时,差值在 2.0~17.6 次,9 月差值最小,7 月最大。7 月滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数最多,分别为 54.8 次、37.1 次,其次为 8 月,9 月相对较少,分别为 6.3 次、4.3 次。

山东各站 2004—2024 年汛期(6—9 月)各月滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数、最大降水量的空间分布类似(图略),但同一站点各月强降水出现次数、最大降水量差异较大。表 1 给出了各月滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数、最大降水量极值的差值和出现站点。可见,山东各站逐月滑动 60 min 强降水出现次数和最大降水量均大于等于

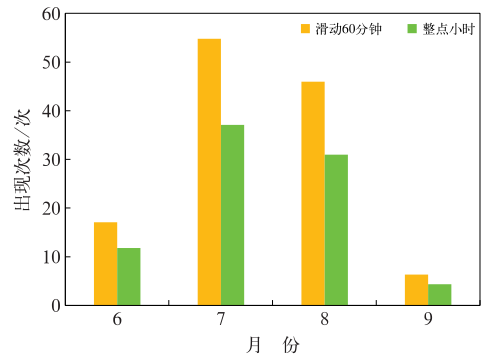


图 10 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)各月滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数
Fig. 10 Monthly heavy precipitation frequency using the 60 min sliding window and hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

表 1 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数、最大降水量差值

Table 1 Differences in monthly frequency and maximum precipitation of heavy precipitation between the 60 min sliding window and hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004—2024

月份	出现次数差值/次		最大降水量差值/mm
	最少	最多	
6 月	1(荣成,莘县,郓城)	11(邹城,新泰)	31.4(即墨)
7 月	6(牟平)	32(泰山)	39.0(武城)
8 月	7(长岛,巨野)	25(利津)	48.0(东营)
9 月	0(巨野等 23 个站)	6(薛城,郯城)	33.8(临沭)

注:括号内为站点。

整点小时,其中,6—9 月各站滑动 60 min 强降水出现次数较整点小时分别偏多 1~11、6~32、7~25、0~6 次,最大降水量分别偏大 31.4、39.0、48.0、33.8 mm。

2.2.3 强降水历年逐月变化对比

由历年汛期(6—9 月)平均滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数(图 11)可看出,滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数均以 7 月和 8 月最多,其次为 6 月,9 月最少。各月滑动 60 min 强降水出现次数普遍高于整点小时,但各月差异程度不同:6 月,滑动 60 min 强降水出现次数较整点小时偏多 0.1~0.8 次,7 年相差 0.1 次;7 月和 8 月,分别偏多 0.4~1.9 次、0.2~1.3 次,均有 4 年相差超过 1.0 次;9 月,两者差异最小,历年相差 0~0.4 次,其

中 7 年相差接近 0 次。

2.2.4 强降水逐时变化对比

山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)逐时平均滑动 60 min 和整点小时强降水出现次数如图 12 所示。可见,各时次强降水出现次数均以滑动 60 min 方法统计较多,各时次相差 1.3~2.2 次,11:00—13:00 相差最少,02:00 最多,共 6 个时次相差超过 2.0 次。两种方法各时次强降水出现次数日变化呈明显的双峰变化特征,03:00 前后和 16:00 前后是滑动 60 min 和整点小时强降水出现的高峰时段,16:00 最多,分别为 6.2 次、4.3 次,其次 03:00,11:00 和 22:00 前后是低值时段,11:00 最少,分别为 3.7 次、2.4 次。

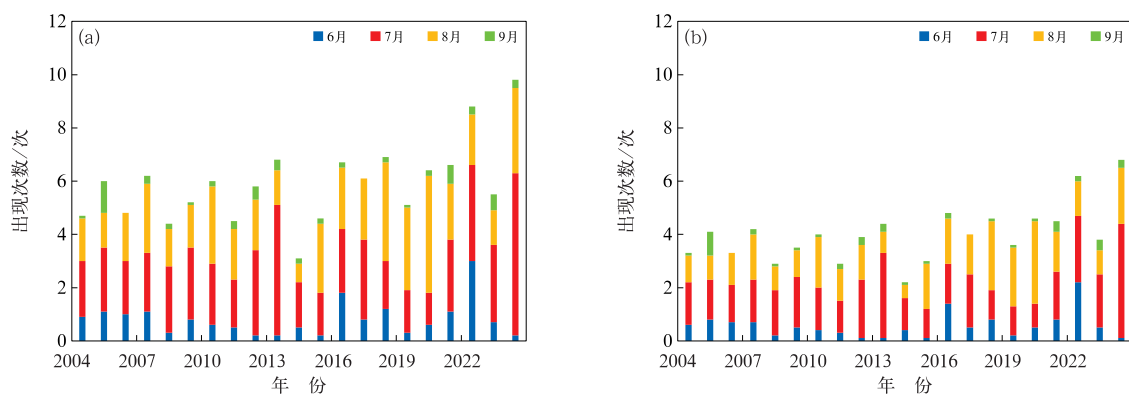


图 11 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)(a)滑动 60 min 和

(b)整点小时强降水历年各月出现次数

Fig. 11 Monthly variation of heavy precipitation frequency using (a) the 60 min sliding window and (b) hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004–2024

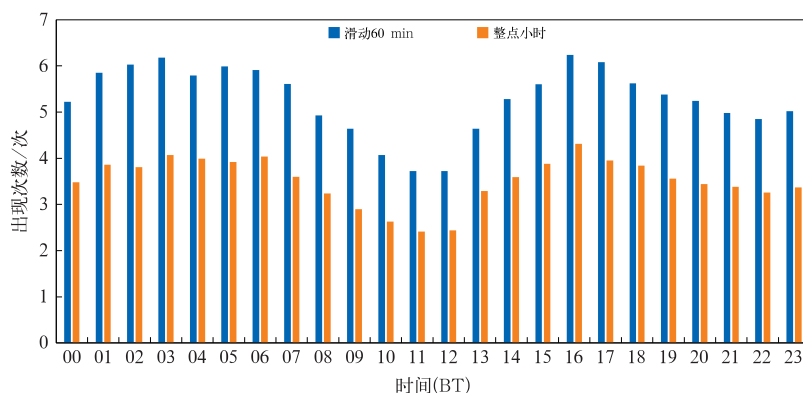


图 12 山东 2004—2024 年汛期(6—9 月)逐时平均滑动 60 min 和

整点小时强降水出现次数变化

Fig. 12 Hourly variation of heavy precipitation frequency using the 60 min sliding window and hourly fixed-time statistical methods in Shandong Province from June to September in the flood seasons of 2004–2024

3 结论和讨论

本研究基于山东 123 个国家级气象观测站 2004—2024 年历年逐分钟降水观测数据,对比分析了山东汛期(6—9 月)滑动 60 min 和整点小时强降水(≥ 20.0 mm)出现频率以及最大降水量的时空变化特征差异,研究结果如下。

(1)滑动 60 min 强降水统计方法能更全面地反映强降水的发生频次。山东汛期滑动 60 min 强降水平均发生次数为 124.3 次,是整点小时(84.3 次)的 1.47 倍,各站介于 1.31~1.81 倍。

(2)两种方法得到的强降水频次和最大降水量的空间分布总体一致,但滑动 60 min 方法呈现更强的空间差异性和极端性。滑动 60 min 最大降水量平均较整点小时偏高 10.0 mm,部分站点超过 30.0 mm。

(3)滑动 60 min 方法更显著地反映出强降水频次和最大降水量均呈增加趋势,气候倾向率分别为 $1.291 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $4.514 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,且逐月变化与逐时变化特征更为明显。7—8 月差异最突出,日变化呈现 03:00 和 16:00 双峰结构,与整点小时相比,滑动 60 min 统计方法更清晰表现出强降水的日内非均匀性。

本研究系统地给出了滑动 60 min 与整点小时

统计方法在强降水识别中的显著差异,但仍存在若干值得深入探讨的问题。首先,本研究虽基于分钟级降水数据,但未进一步区分不同天气系统(如台风、气旋、强对流等)下降水结构的差异对统计结果的影响,未来可结合天气分型进行更精细化归因分析。其次,尽管数据经过质量控制,但分钟降水观测尤其在极端强降水情况下可能存在仪器响应误差或微小滞后,对滑动统计结果带来不确定性,后续可引入多源数据(如雷达、卫星)进行融合验证(王宏等, 2021)。此外,本研究主要关注 ≥ 20.0 mm 的强降水事件,未对其他不同短历时(如 10 min、30 min 等)的极端强降水(如 50 mm 以上)进行研究,其统计差异是否进一步扩大仍需探讨。滑动窗口的起始时间设定(如将分钟级降水数据先统计为 5 min 或 10 min 降水量,再统计滑动 60 min 强降水事件)(吴照宪等, 2022; 肖柳斯等, 2024)是否对结果产生敏感影响也值得进一步分析。本研究结果对区域暴雨内涝模拟和山洪预警具有直接参考意义,也对进一步认识和揭示不同气候区的强降水变化规律、提升强降水预报预警能力具有积极的参考价值。

参考文献

- 董旭光,顾伟宗,曹洁,等,2017. 山东省汛期小时极端强降水分布和变化特征[J]. 气象, 43(8): 953-961. Dong X G, Gu W Z, Cao J, et al, 2017. Variation features of hourly precipitation in Shandong Province in flood season during 1961-2012[J]. Meteor Mon, 43(8): 953-961(in Chinese).
- 董旭光,顾伟宗,孟祥新,等,2014. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. 地理学报, 69(5): 661-671. Dong X G, Gu W Z, Meng X X, et al, 2014. Change features of precipitation events in Shandong Province from 1961 to 2010[J]. Acta Geogr Sin, 69(5): 661-671(in Chinese).
- 董旭光,顾伟宗,邱黎,等,2018. 山东省汛期小时降水过程时空分布特征[J]. 气象, 44(8): 1063-1072. Dong X G, Gu W Z, Qiu C, et al, 2018. Spatio-temporal distribution characteristics of hourly precipitation in Shandong Province in flood season[J]. Meteor Mon, 44(8): 1063-1072(in Chinese).
- 段丽洁,曾向红,蒋元华,等,2021. 基于分钟降水数据的长沙市场次降水事件特征分析[J]. 暴雨灾害, 40(4): 437-443. Duan L J, Zeng X H, Jiang Y H, et al, 2021. Characteristic analysis of precipitation events in Changsha City based on minute rainfall data[J]. Torr Rain Dis, 40(4): 437-443(in Chinese).
- 段丽瑶,杨艳娟,李明财,2013. 近 50 年环渤海地区夏季降水时空变化特征[J]. 高原气象, 31(1): 243-249. Duan L Y, Yang Y J, Li M C, 2013. Spatial-temporal changes of summer precipitation in the Bohai Rim in recent 50 years[J]. Plateau Meteor, 31(1): 243-249(in Chinese).
- 郭冰芳,朱业玉,郭佳文,等,2025. 基于分钟数据的郑州场次降水事件特征分析[J]. 气象与环境科学, 48(3): 1-10. Guo B F, Zhu Y Y, Guo J W, et al, 2025. Characteristics of precipitation events in Zhengzhou based on minute-resolution rainfall data[J]. Meteor Environ Sci, 48(3): 1-10(in Chinese).
- 侯淑梅,盛春岩,万文龙,等,2014. 山东省极端强降水天气概念模型研究[J]. 大气科学学报, 37(2): 163-174. Hou S M, Sheng C Y, Wan W L, et al, 2014. The conceptual models of extreme precipitation weather in Shandong Province[J]. Trans Atmos Sci, 37(2): 163-174(in Chinese).
- 姜琪,秦鹏程,刘火胜,等,2025. 1954—2022 年武汉短历时强降水时空变化特征[J]. 气象, 51(7): 803-816. Jiang Q, Qin P C, Liu H S, et al, 2025. Spatio-temporal variation of short-duration heavy rainfall in Wuhan from 1954 to 2022[J]. Meteor Mon, 51(7): 803-816(in Chinese).
- 冷亮,周伶俐,肖艳姣,等,2021. 基于地面分钟雨量数据的湖北省短历时强降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 40(1): 61-68. Leng L, Zhou L L, Xiao Y J, et al, 2021. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data[J]. Torr Rain Dis, 40(1): 61-68(in Chinese).
- 李欣欣,白龙,林昕,等,2021. 福建省短历时强降水历史极值气候特征分析[J]. 海峡科学, (9): 3-10. Li X X, Bai L, Lin X, et al, 2021. Analysis of climatic characteristics of historical extremes of short-duration heavy precipitation in Fujian Province[J]. Strait Sci, (9): 3-10(in Chinese).
- 刘可晶,王文,朱烨,等,2012. 淮河流域过去 60 年干旱趋势特征及其与极端降水的联系[J]. 水利学报, 43(10): 1179-1187. Liu K J, Wang W, Zhu Y, et al, 2012. Trend of drought and its relationship with extreme precipitation in Huaihe River Basin over the last 60 years[J]. J Hydraul Eng, 43(10): 1179-1187(in Chinese).
- 鲁普,张玉虎,高峰,等,2019. 近 40 年三江平原极端降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 26(2): 272-282. Lu J, Zhang Y H, Gao F, et al, 2019. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation in the Sanjiang Plain in recent 40 years[J]. Res Soil and Water Conserv, 26(2): 272-282(in Chinese).
- 彭俊台,张强,陈晓宏,等,2011. 珠江流域极端降雨时空演变特征分析[J]. 灾害学, 26(4): 24-28, 34. Peng J T, Zhang Q, Chen X H, et al, 2011. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfalls in the Pearl River Basin[J]. J Catastrophol, 26(4): 24-28, 34(in Chinese).
- 王宏,王秀明,姜云雁,等,2021. 承德山区夏季短历时强降水的时空分布及环境参数特征[J]. 气象, 47(12): 1469-1483. Wang H, Wang X M, Jiang Y Y, et al, 2021. Spatio-temporal distribution and environmental parameters of short-time severe precipitation in the Chengde Mountains in summer[J]. Meteor Mon, 47(12): 1469-1483(in Chinese).
- 王冷力,任国玉,战云健,2025. 北京地区夏季分钟强降水气候学特征[J]. 气候与环境研究, 30(3): 260-274. Wang L L, Ren G Y, Zhan Y J, 2025. Climatological characteristics of summer

- minute-scale intense precipitation in Beijing Area[J]. *Climatic Environ Res*, 30(3):260-274(in Chinese).
- 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 Y H, Wang X H, Gu X L, et al, 2025. Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data[J]. *Torr Rain Dis*, 44(1):60-70(in Chinese).
- 吴照宪, 罗亚丽, 刘希, 等, 2022. 2011—2018 年安徽暖季短时强降水及其环流背景统计特征[J]. *气象*, 48(8):963-978. Wu Z X, Luo Y L, Liu X, et al, 2022. Statistical characteristics of the hourly heavy rainfall events over Anhui Province during the 2011—2018 warm seasons and the associated synoptic circulation patterns[J]. *Meteor Mon*, 48(8):963-978(in Chinese).
- 肖柳斯, 张华龙, 吴乃庚, 等, 2024. 广东省汛期分钟尺度极端降水的时空分布及持续性特征[J]. *大气科学*, 48(5):1728-1742. Xiao L S, Zhang H L, Wu N G, et al, 2024. Spatiotemporal distribution and duration characteristics of minute-scale extreme precipitation during flood season in Guangdong Province[J]. *Chin J Atmos Sci*, 48(5):1728-1742(in Chinese).
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等, 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. *气候与环境研究*, 13(1):75-83. Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al, 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China[J]. *Climatic Environ Res*, 13(1):75-83(in Chinese).
- 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]. *Torr Rain Dis*, 32(3):202-209(in Chinese).
- 战云健, 鞠晓慧, 范邵华, 等, 2021. 1965—2019 年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析[J]. *气象学报*, 79(4):598-611. Zhan Y J, Ju X H, Fan S H, et al, 2021. An analysis of minute summer precipitation in China during 1965—2019[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(4):598-611(in Chinese).
- 赵海军, 曹洁, 潘玲, 等, 2021. 2007—2019 年山东省短时强降水时空分布特征[J]. *海洋气象学报*, 41(2):149-155. Zhao H J, Cao J, Pan L, et al, 2021. Spatio-temporal distribution of short-time severe precipitation in Shandong from 2007 to 2019[J]. *J Marine Meteor*, 41(2):149-155(in Chinese).
- 郑丽娜, 孙继松, 2024. 泰山地形对一次副高边缘大暴雨过程影响的观测分析[J]. *气象学报*, 82(2):155-167. Zheng L N, Sun J S, 2024. Observational analysis of the topographic effect of Mount Tai on an extreme rainfall event occurring at the edge of the subtropical high [J]. *Acta Meteor Sin*, 82(2):155-167(in Chinese).
- 郑丽娜, 俞小鼎, 孙骞, 等, 2025. 泰山地区暴雨日中尺度对流系统的组织形态演变及地形的可能影响[J]. *气象学报*, 83(2):179-192. Zheng L N, Yu X D, Sun Q, et al, 2025. Organization of mesoscale convective systems during rainstorm days in the Tai Mountain Area: evolution and possible influence of topography [J]. *Acta Meteor Sin*, 83(2):179-192(in Chinese).
- 周北平, 史建桥, 李少魁, 等, 2016. 近 53 年长三角地区极端降水时空变化分析[J]. *长江科学院院报*, 33(9):5-9. Zhou B P, Shi J Q, Li S K, et al, 2016. Spatio-temporal variations of extreme precipitation in the Yangtze River Delta during 1960—2012[J]. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 33(9):5-9(in Chinese).
- 周波涛, 钱进, 2021. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. *气候变化研究进展*, 17(6):713-718. Zhou B T, Qian J, 2021. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. *Climate Change Res*, 17(6):713-718(in Chinese).
- 周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 等, 2021. IPCC AR6 报告解读: 未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息[J]. *气候变化研究进展*, 17(6):652-663. Zhou T J, Chen Z M, Chen X L, et al, 2021. Interpreting IPCC AR6: future global climate based on projection under scenarios and on near-term information [J]. *Climate Change Res*, 17(6):652-663(in Chinese).
- 邹瑾, 李君, 高理, 2023. 气候变暖下山东省月尺度极端降水的时空变化特征[J]. *山东科学*, 36(4):104-113. Zou J, Li J, Gao L, 2023. Characteristics of spatiotemporal variation of monthly-scale extreme precipitation in Shandong Province under climate warming [J]. *Shandong Sci*, 36(4):104-113(in Chinese).
- Ban N, Schmidli J, Schär C, 2015. Heavy precipitation in a changing climate: does short-term summer precipitation increase faster? [J]. *Geophys Res Lett*, 42(4):1165-1172.
- Coumou D, Rahmstorf S, 2012. A decade of weather extremes[J]. *Nat Climate Change*, 2(7):491-496.
- Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al, 2016. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J]. *Nat Climate Change*, 6(5):508-513.
- Ingram W, 2016. Increases all round[J]. *Nat Climate Change*, 6(5):443-444.
- Thompson V, Dunstone N J, Scaife A A, et al, 2017. High risk of unprecedented UK rainfall in the current climate[J]. *Nat Commun*, 8(1):107.
- Westra S, Fowler H J, Evans J P, et al, 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall[J]. *Rev Geophys*, 52(3):522-555.

(本文责编:侯翠梅)