

# 基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究

张伟<sup>1,2,3</sup>, 王璇<sup>1</sup>, 孙慧超<sup>1</sup>, 李俊奇<sup>1,2,3</sup>

- (1. 北京建筑大学北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044;  
2. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044;  
3. 北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

**摘要:** 基于北京基本站 1987—2016 年逐分钟精度降雨数据, 利用 Kruskal-Wallis 检验对 1 min、1 h、3 h、6 h 等不同精度数据获取的极端降雨事件样本进行统计分析, 比较短历时极端降雨 (SEP)、长历时极端降雨 (LEP)、持续性极端降雨 (PEP) 3 类极端降雨事件降雨特征指标的差异, 并利用 Sen's 斜率、Mann-Kendall 检验、有序聚类等方法探究了极端降雨事件的时间变化规律。结果表明: 北京市极端降雨以 LEP 事件为主, 降雨数据精度会显著影响降水量和降雨历时的统计结果, 1 h 精度降雨数据可基本反映极端降雨事件的主要时间特征; 数据精度差异会造成极端降雨事件的降雨集中度和降雨集中期识别出现偏差, 北京市极端降雨多分布于 6—10 月, 并主要集中在 7—8 月, 但 9—10 月仍存在 PEP 事件出现的可能; SEP 和 LEP 事件多出现在夜间, 而 PEP 事件在 7—12 时更易形成降雨峰值, 对居民紧急避险和内涝应急响应造成更高潜在风险; 在统计年限内, 数据精度差异对降水量和降雨频率趋势预测结果的影响并不显著, 但会使得降雨历时预测不确定性增加, 降雨特征指标变年份产生“跳跃”; PEP 事件的降水量、降雨频率、降雨历时和降雨集中度受数据精度影响较小。

**关键词:** 极端降雨事件; 多重精度降雨数据; Kruskal-Wallis 检验; Sen's 斜率法; Mann-Kendall 检验; 有序聚类法; 北京市

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)02-0123-10

**Research on extreme precipitation events in Beijing based on multi-resolution rainfall data**//ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>, SUN Huichao<sup>1</sup>, LI Junqi<sup>1,2,3</sup> (1. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on the minute resolution rainfall data of Beijing basic station from 1987 to 2016, Kruskal-Wallis test was used to statistically analyze extreme precipitation event samples obtained from multi-resolution data such as 1 min, 1 h, 3 h, and 6 h. The differences in rainfall characteristic indicators of three types of extreme precipitation events, including short extreme precipitation (SEP), long extreme precipitation (LEP), and persistent extreme precipitation (PEP) were compared, and the temporal variation patterns of extreme precipitation events using methods such as Sen's slope, Mann-Kendall test, and ordered clustering were explored. The results show that extreme precipitation in Beijing is mainly caused by LEP events, and the resolution of rainfall data significantly affects the statistical results of precipitation amount and duration. The rainfall data of 1 h resolution can basically reflect the main time characteristics of extreme precipitation events. Differences in data resolution can cause deviations in the identification of rainfall concentration and rainfall concentration periods for extreme precipitation events. Extreme precipitation in Beijing is mostly distributed from June to October, and mainly concentrated in July and August, but there is still a possibility of PEP events occurring in September and October. SEP and LEP events often occur at night, while PEP events are more likely to form rainfall peaks from 7:00 to 12:00, posing higher potential risks to residents' emergency shelter and waterlogging emergency response. Within the statistical period, the difference in data resolution does not have a significant impact on the prediction results of

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2022YFC3800500); 泸州市海绵城市科研课题项目 (N5105012022000106); 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目 (BPHR20220108); 北京建筑大学培育项目专项资金项目 (X23047)

**作者简介:** 张伟 (1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事海绵城市与内涝治理研究。E-mail: zhangwei@buca.edu.cn

precipitation amount and frequency trends, but it will increase the uncertainty of rainfall duration prediction and cause a “jump” in the year of sudden changes in rainfall characteristic indicators. The precipitation amount, frequency, duration, and concentration of PEP events are less affected by data resolution.

**Key words:** extreme precipitation event; multi-resolution rainfall data; Kruskal-Wallis test; Sen’s slope method; Mann-Kendall test; ordered clustering method; Beijing

气候变化和城市快速发展可能导致城市降雨结构显著改变<sup>[1-2]</sup>,极端降雨的影响更为显著<sup>[3]</sup>。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告重点阐述了极端气候及相关问题,并首次全面对极端气候事件变化特征进行系统评估<sup>[4]</sup>。极端降雨引发的洪涝灾害给居民生命健康和财产安全带来巨大威胁<sup>[5]</sup>。对极端降雨特征及其规律的掌握是城市排水防涝工作的首要条件,已成为国内外学者重点关注的热点方向。极端降雨通常指大幅超过历史平均降雨强度或预期降雨强度的降雨过程,不同专业领域对其概念存在不同理解,其定义方法也尚未形成统一标准。极端降雨特征研究大多采用单日<sup>[6]</sup>或多日<sup>[7]</sup>等固定持续时间内降水量级定义极端降雨事件,而降雨事件的历时并非以 24 h 为单位<sup>[8]</sup>,日尺度研究很难准确描述实际降雨过程,如两场短历时降雨事件可能在日尺度分析时被人为合并为一场极端降雨事件<sup>[9]</sup>。降雨数据具有较高的时间变异性,在时间上呈现不稳定波动<sup>[10]</sup>。因此,作为极端降雨的重要特征,时间分布受到广泛关注。Han 等<sup>[11]</sup>研究发现降雨的时间分布总体呈现中等不均匀性,并推测极端降雨事件分布可能呈现更高的不均匀性。汪成博等<sup>[12]</sup>利用极端降雨集中度和极端降雨集中期分析了汉江流域极端降雨变化特征,发现其在旬、月、季等不同时间尺度下均呈现显著的变异性。此外,不同持续时间降雨事件在场次内的昼夜分布同样存在明显差异。Deng 等<sup>[13]</sup>研究发现京津冀地区长历时强降雨事件(持续时间大于 6 h)主要出现在 0—6 时,而短历时强降雨事件(持续时间为 1~6h)主要出现在 18—24 时,且峰值时间更加集中。

通常情况下,降水量并非呈现正态分布,而广义帕累托分布、P-III 型分布、Gumbel 分布、广义极值分布等形式能更好地体现降水量的实际分布特征<sup>[14-17]</sup>,但传统的参数检验方法不能真实地反映极端降雨变化规律,非参数检验方法在降雨特征统计分析中体现出更好的适用性。Santos 等<sup>[18]</sup>利用 Mann-Kendal (M-K) 检验和 Sen’s 斜率法分析发现,葡萄牙马德拉岛降水量呈显著减少趋势。Jiang 等<sup>[19]</sup>通过 M-K 检验识别出新疆维吾尔自治区年极端降水量的突变年份。然而 M-K 检验识别的突变结果在置信区间内的杂点会干扰突变点识别,相比之下,有序聚类分析结果通常更易辨识,其离差平方

和最小点对突变年份识别具有较高参考意义。降雨存在时序分布不均匀、高变异性特征,但特征描述与数据精度密切相关。高精度降雨数据有助于准确反映降雨过程,但限于数据获取条件,目前多数研究通常是以 1 h<sup>[20]</sup>、6 h<sup>[21]</sup>等亚日精度降雨数据开展,鲜有降雨数据精度对极端降雨特征影响的研究报道。

因此,本文选取北京基本站 1987—2016 年逐分钟精度降雨数据,比较数据精度对极端降水事件识别的影响,分析提出极端降雨定义和特征分析的适宜数据精度,明晰城市极端降雨的时间特征、变化趋势和变异特征,以期在城市有效应对极端降雨事件带来的内涝积水问题提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 极端降雨事件划分

北京市地处华北平原北部,中心位于北纬 39°56′、东经 116°20′,行政区域内包含 20 个国家级地面气象观测站(图 1)。本文基于经过质量控制的典型气象站北京基本站(区站号 54511) 1987—2016 年逐分钟精度降雨数据开展研究。

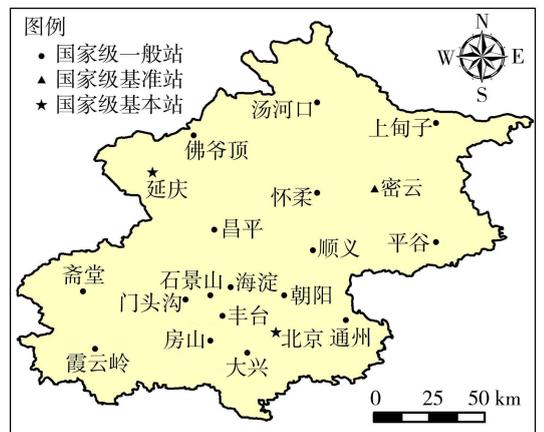


图 1 北京市国家级气象观测站分布

Fig. 1 Spatial distribution of national meteorological observation stations in Beijing

对 1 min 精度降雨数据进行升尺度处理得到 1 h、3 h、6 h、1 d 4 种精度的降雨数据,以降雨强度大于 0.1 mm/min 作为降雨事件开始的标准,以连续 2 h 内降雨强度均小于 0.1 mm/min 作为降雨事件结束标准,进行独立降水事件划分<sup>[22]</sup>,获得不同精度降雨时间序列下的常规降雨事件,分别用  $P_{1m}$ 、 $P_{1h}$ 、 $P_{3h}$ 、 $P_{6h}$ 、 $P_{1d}$  表示(图 2)。采用第 95% 百分位阈值

方法<sup>[23]</sup>划分极端降雨 (extreme precipitation, EP) 事件,不同精度数据划分的极端降雨事件分别用  $EP_{1m}$ 、 $EP_{1h}$ 、 $EP_{3h}$ 、 $EP_{6h}$ 、 $EP_{1d}$  表示。进而基于极端降雨事件的历时,将其进一步划分,降雨历时  $>0\sim 6$  h 的为短历时极端降雨 (short extreme precipitation, SEP)、降雨历时  $>6\sim 24$  h 的为长历时极端降雨 (long extreme precipitation, LEP)、降雨历时大于 24 h 的为持续性极端降雨 (persistent extreme precipitation, PEP)。以 1 min 精度的  $P_{1m}$  和  $EP_{1m}$  作为实际值参考,进行后续不同精度下降雨事件和极端降雨特征差异比较。

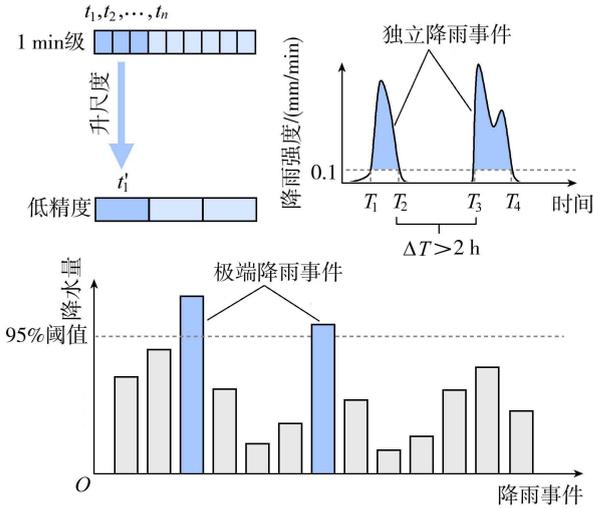


图2 极端降雨事件划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of division of extreme precipitation events

## 1.2 极端降雨特征指标

采用降水量  $P_A$ 、降雨频率  $P_F$ 、降雨历时  $P_D$ 、峰值时间  $P_T$ 、降雨集中度  $P_{CD}$ 、降雨集中期  $P_{CP}$  6 项指标研究极端降雨事件特征。其中,  $P_A$  指单场降雨事件的降水量;  $P_F$  指降雨事件按降水量从小到大顺序排列,所在序列中对应的经验频率;  $P_D$  指一场降雨从开始到结束的持续时间;  $P_T$  指一场降雨强度达到最大值时对应的时间;  $P_{CD}$  和  $P_{CP}$  利用向量原理定量描述降雨的时间分配特征,可以反映降雨序列在年内分布的不均匀程度,其中  $P_{CD}$  可将降雨在年内的集中程度量化呈现,  $P_{CP}$  则可反映降雨的集中时期。对于长度为  $n$  年的降雨序列,其计算公式为

$$P_{CD} = \sqrt{(R_{xt}^2 + R_{yt}^2)} / R_t \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$P_{CP} = \arctan(R_{yt} / R_{xt}) \quad (2)$$

其中  $R_{yt} = \sum_{i=1}^{12} r_{it} \sin \theta_i$   $R_{xt} = \sum_{i=1}^{12} r_{it} \cos \theta_i$

式中:  $R_{xt}$ 、 $R_{yt}$  分别为第  $t$  年  $x$  方向和  $y$  方向的降水量;  $R_t$  为第  $t$  年总降水量;  $r_{it}$  为第  $t$  年 第  $i$  月的降水量;  $\theta_i$  为第  $i$  月的方位角,即将一年分为  $360^\circ$  时每个

月所代表的角度,1 月对应  $0^\circ$ ,其他各月逐月递增  $30^\circ$ 。  $P_{CD}$  的取值范围为  $0\sim 1$ ,无量纲。数值越接近 0 则分布越均匀,越接近 1 则分布越集中。  $P_{CP}$  为  $R_{xt}$  和  $R_{yt}$  合成向量的方位角,取值范围为  $0^\circ\sim 360^\circ$ 。

## 1.3 降雨样本差异检验

利用非参数检验方法 Kruskal-Wallis (K-W) 检验<sup>[24]</sup>评价极端降雨场次划分结果的差异,其原理是将多组样本的所有观测值合并成 1 个组合样本,将观测值从小到大排序,给每个观测值赋予秩序,分别计算各组秩和,从而计算统计量  $H$  值,计算公式为

$$H = 12/[N(N+1)] \sum_{i=1}^k (C_i^2/n_i) - 3(N+1) \quad (3)$$

式中:  $k$  为样本组数;  $N$  为各组样本数之和;  $n_i$  为第  $i$  组的样本量;  $C_i$  为第  $i$  组的秩和。

根据样本量和显著性水平  $\alpha$  (一般为 0.05) 确定临界值  $H_0$ 。若  $H \geq H_0$ ,则拒绝原假设,即说明各组分布不完全相同,各组样本间在置信水平  $\alpha$  下存在显著性差异;若  $H < H_0$ ,则不拒绝原假设。

## 1.4 时间序列变化趋势检验

a. Sen's 斜率法。其原理基于 Kendall 秩相关检验,定量估计变量线性变化趋势<sup>[25]</sup>,常与 M-K 检验联用<sup>[26]</sup>。该方法不易受异常点影响,对变量分布形态不敏感。Sen's 斜率值按序列任意两点斜率中位数的估计值计算,结果为正时,序列呈上升趋势,结果为负时,序列则呈下降趋势。

b. M-K 检验。其为基于秩的非参数检验方法,广泛应用于水文时间序列趋势分析,适合非正态数据分析,且不易受序列异常值影响<sup>[27]</sup>。对统计量进行标准化得到检验统计量  $Z$  值,采用双侧检验,对于置信水平  $\alpha$ ,若  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ ,则拒绝原假设,即序列在  $\alpha$  的置信水平上具有显著变化趋势。

c. 有序聚类法。其是水文气象序列突变性诊断的一种非参数检验方法<sup>[28]</sup>,通过计算最优分割点,使同类间离差平方和最小化,不同类间离差平方和最大化。当总离差平方和最小时,对应的分割点为最可能的突变点。

## 2 结果与分析

### 2.1 数据精度对极端降雨事件样本统计的影响

降雨数据是降雨规律研究的基础,数据精度可能会对降雨事件样本统计结果造成影响。图 3 为 1987—2016 年北京市不同精度的降雨数据统计出的常规降雨事件与极端降雨事件样本分布。由图 3 可见,各精度降雨事件样本年际变化均表现出不规则波动,高精度降雨事件样本在年内分布中表现得更为集中,而低精度样本在年内呈现更显著的分散

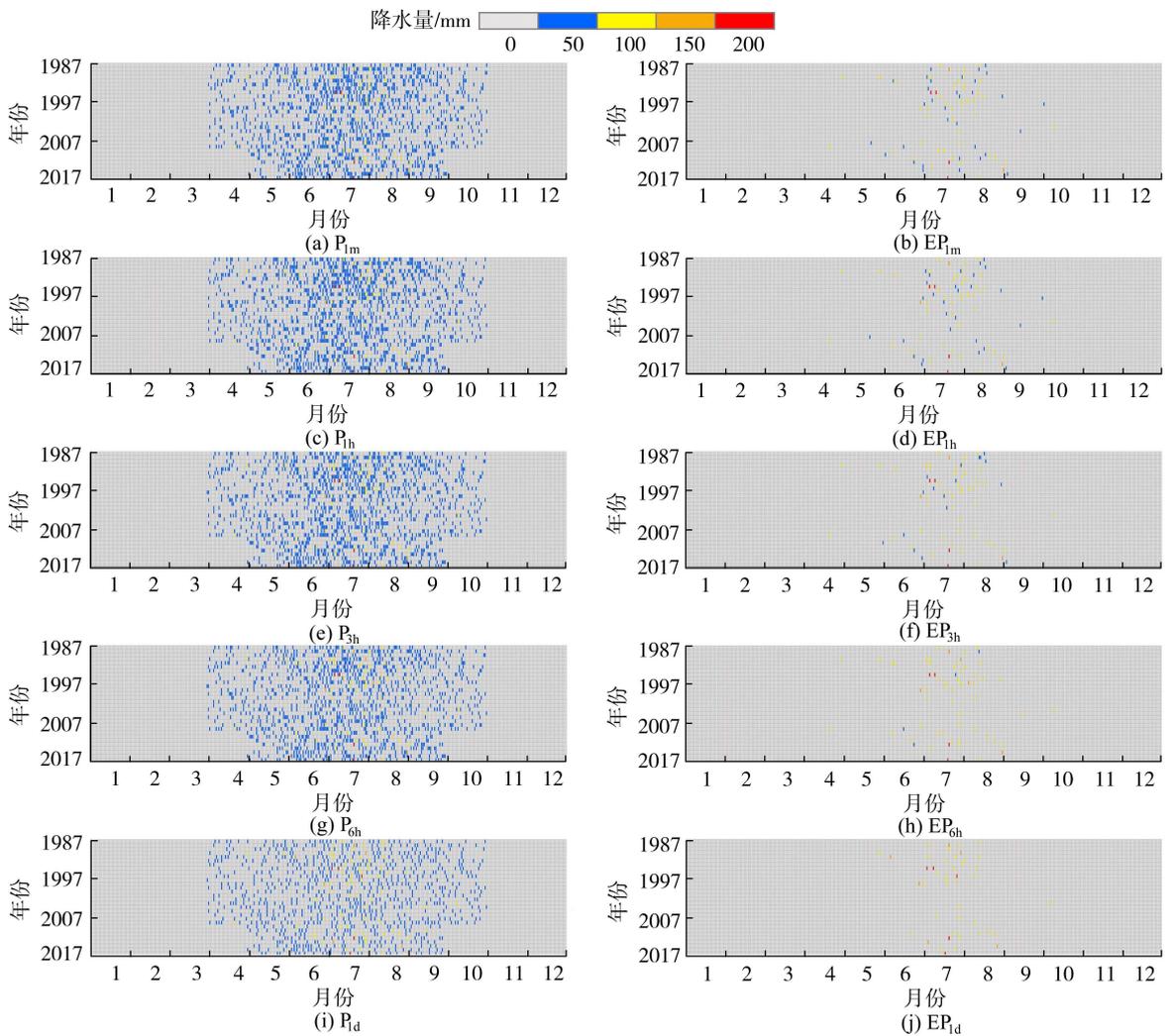


图3 1987—2016年北京市不同精度降雨数据统计的常规降雨事件与极端降雨事件样本分布

Fig. 3 Sample distribution of conventional and extreme precipitation events based on rainfall data with different resolutions in Beijing from 1987 to 2016

特征。在样本数量上,随着降雨数据精度降低,获取的降雨事件样本数量逐渐减少,常规降雨事件从1 min的1633场减少到1 d的883场,极端降雨事件从1 min的82场减少到1 d的45场,这主要由于在较低的降雨数据精度下,部分时间相邻且间隔较短的降雨事件被人为合并为同一场次。在发生时间上,降雨事件的人为合并也导致了极端降雨事件的起止时间发生变化。以 $EP_{1\text{min}}$ 的实际降雨过程作为参考, $EP_{1\text{h}}$ 、 $EP_{3\text{h}}$ 、 $EP_{6\text{h}}$ 和 $EP_{1\text{d}}$ 的降雨终止时间分别平均后移了2.43、7.99、16.58、65.72 h。由此可见,低精度的降雨数据会造成极端降雨事件在时间尺度上的滞后,这与庄琦等<sup>[29]</sup>的研究结论一致。

按照降雨持续时间对极端降雨事件进一步划分,得到SEP、LEP、PEP 3类事件的占比情况。在1 min精度降雨数据的分析中,LEP事件占比高达64.63%,可见实际情况中中长历时极端降雨占据主导地位。随着降雨数据精度降低,SEP事件和LEP事件样本数量呈现减少趋势,而PEP事件样本数量逐

步增加。甚至在6 h精度降雨数据中,PEP事件样本数量占比高达58.06%。这说明数据精度会对极端降雨事件统计结果造成影响,且不同类型极端降雨事件所受影响程度存在差异。而对极端降雨演变规律分析常用的各项特征指标而言,可以采用K-W检验对这种影响带来的统计偏差的显著性进行评估。将1 min精度数据看作可反映实际降雨过程的对照组,将其他精度降雨数据样本统计结果与之进行对比分析,其检验统计量的概率 $P$ 值大小反映其他精度降雨数据分析结果与实际情况间偏差的显著程度,结果如图4所示,图中若检验结果落入红色六边形范围内,即表明特征指标与真值的差异达到了 $P=0.05$ 的显著性水平。

由图4可见,随着数据精度降低,降水量、降雨频率、降雨历时、降雨集中度、降雨集中期、峰值时间与真值的差异显著性呈现总体增强的趋势。而对于不同精度数据统计获得的极端降雨事件,1 h与1 min精度数据的样本统计结果在6项指标均未呈

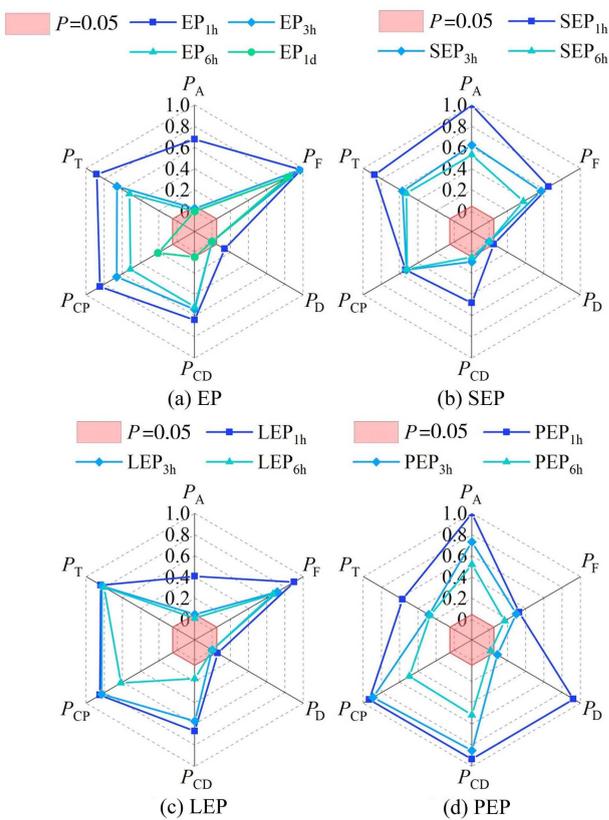


图4 K-W 检验结果  
Fig. 4 K-W test results

现显著差异 ( $P > 0.05$ ), 可见 1 h 精度降雨数据可基本反映极端降雨事件的主要特征。由图 4(a) 可见, 对于常规降雨事件, 1 d 精度数据的样本统计结果在降水量、降雨历时和降雨集中度呈现出显著差异, 相应  $P$  值分别为 0.001、0.001 和 0.049, 其余指标未呈现显著差异。EP<sub>1h</sub>、EP<sub>3h</sub> 和 EP<sub>6h</sub> 3 种亚日精度的样本统计结果的降雨频率、降雨集中度、降雨集中期和峰值时间与真值的差异并不显著, 但对于在海绵城市建设和排水防涝工程设计中更为关注的降水量和降雨历时, 3 种亚日精度的样本统计结果与真值产生显著偏差 ( $P < 0.05$ )。由图 4(b)(c)(d) 可见, 对于 SEP、LEP 和 PEP 3 类极端降雨事件而言, 数据精度变化对样本统计结果的降雨特征指标的影响程度有所不同。对于 SEP 事件, 样本差异主要体现在降雨历时上, 随着数据精度降低, 同一场次的降雨历时可能会被拉长; 对于 LEP 事件, 降水量和降雨历时受到影响较为显著, 3 h 和 6 h 精度下的差异均达到了 0.05 置信水平; 对于 PEP 事件, 降雨历时所受影响最明显, 但仅在 6 h 精度下达到显著水平, 其  $P$  值为 0.018。总体而言, 数据精度对极端降雨事件统计结果的显著影响集中体现在降水量和降雨历时这两项降雨特征, 对于 SEP 事件这一影响还会延伸至其他特征指标。

## 2.2 不同数据精度下极端降雨事件的特征指标

图 5 为不同数据精度下极端降雨事件 3 项指标的箱线图。由图 5(a) 可见, 随着数据精度降低, 降水量均值从 64.72 mm 升至 75.93 mm, 可见基于低精度数据的分析可能高估极端降雨事件的单场总降水量, 这是由于较低精度使本应统计为不同场次的降雨被人为合并所致。由图 5(b) 可见, 从降雨频率的角度, 数据精度对极端降雨事件的整体影响较小, 但在 3 种不同类型的极端降雨事件分析中体现显著差异。SEP 事件的降雨频率较高, 数据分布集中; PEP 事件的降雨频率较低, 数据分布分散; LEP 事件则介于二者之间。由图 5(c) 可见, 从降雨历时的

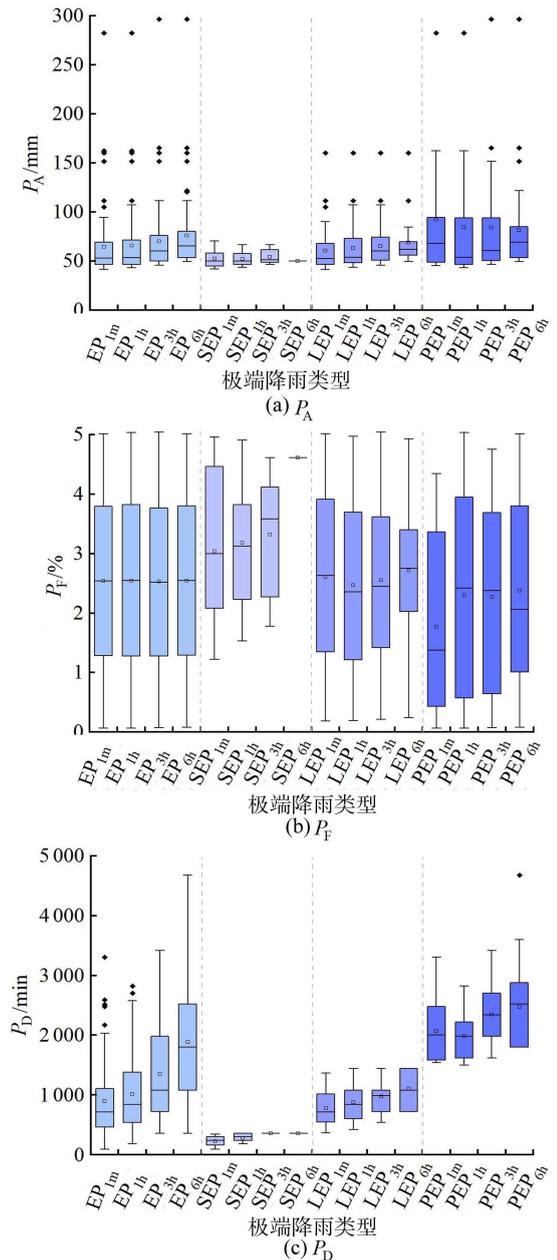


图5 不同精度数据极端降雨事件 3 项指标的箱线图  
Fig. 5 Box plots of three indicators of extreme precipitation events with different resolution data

角度,极端降雨事件整体随数据精度降低,其均值呈现上升趋势,对于 SEP、LEP 和 PEP 3 类极端降雨事件也基本呈现上升趋势,且数据分布呈现随降雨数据精度降低而分散的趋势。

图 6 为不同精度数据下各类极端降雨事件的降

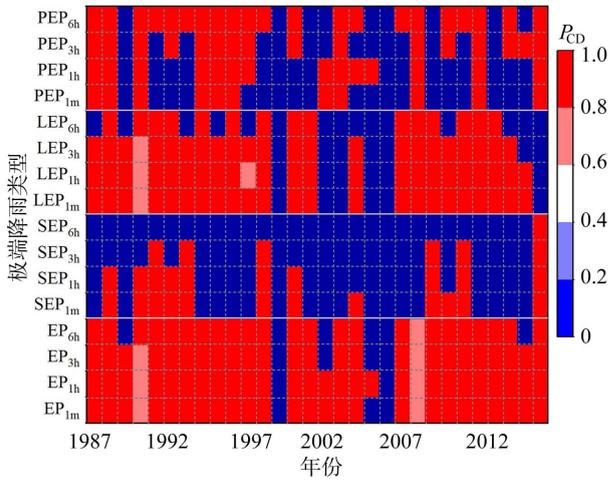


图 6 不同精度数据各类极端降雨事件降雨集中度年际分布

Fig. 6 Annual distribution of rainfall concentration for various extreme precipitation events under different resolution data

雨集中度年际分布。由图 6 可见,不同精度数据下极端降雨事件的降雨集中度在年际呈现出分布不均匀的特点,EP 事件整体降雨集中度较高,但 3 h 和 6 h 精度下个别年份出现了降雨集中度降低的情况。对于 3 种不同类型的极端降雨事件而言,高精度数据下 SEP 事件降雨集中度年际分布更加分散,低精度数据下 SEP 事件降雨集中度在统计年限内更多呈现出低值状态。高精度数据下 LEP 事件降雨集中度年际分布更加集中,但在 6 h 精度下降雨集中度在个别年份中有所下降。PEP 事件中降雨集中度高值年份和降雨集中度低值年份的占比情况较为一致,在 6 h 精度下降雨集中度低值年份出现了一定的减少和偏移。上述结果表明,低精度降雨数据会造成极端降雨集中度分布情况判断出现偏差,SEP 事件和 LEP 事件的降雨集中度易被低估,而 PEP 事件的降雨集中度则可能会被高估。

图 7 为不同精度数据下各类极端降雨事件的降雨集中中期分布。由图 7 可见,从 EP 事件整体情况来看,降雨集中中期分布于 6—10 月,并主要集中在 7—8 月,这与北京市 7 月 20 日至 8 月 10 日的主汛期<sup>[30]</sup>时间分布较为一致。对 3 种不同类型极端降

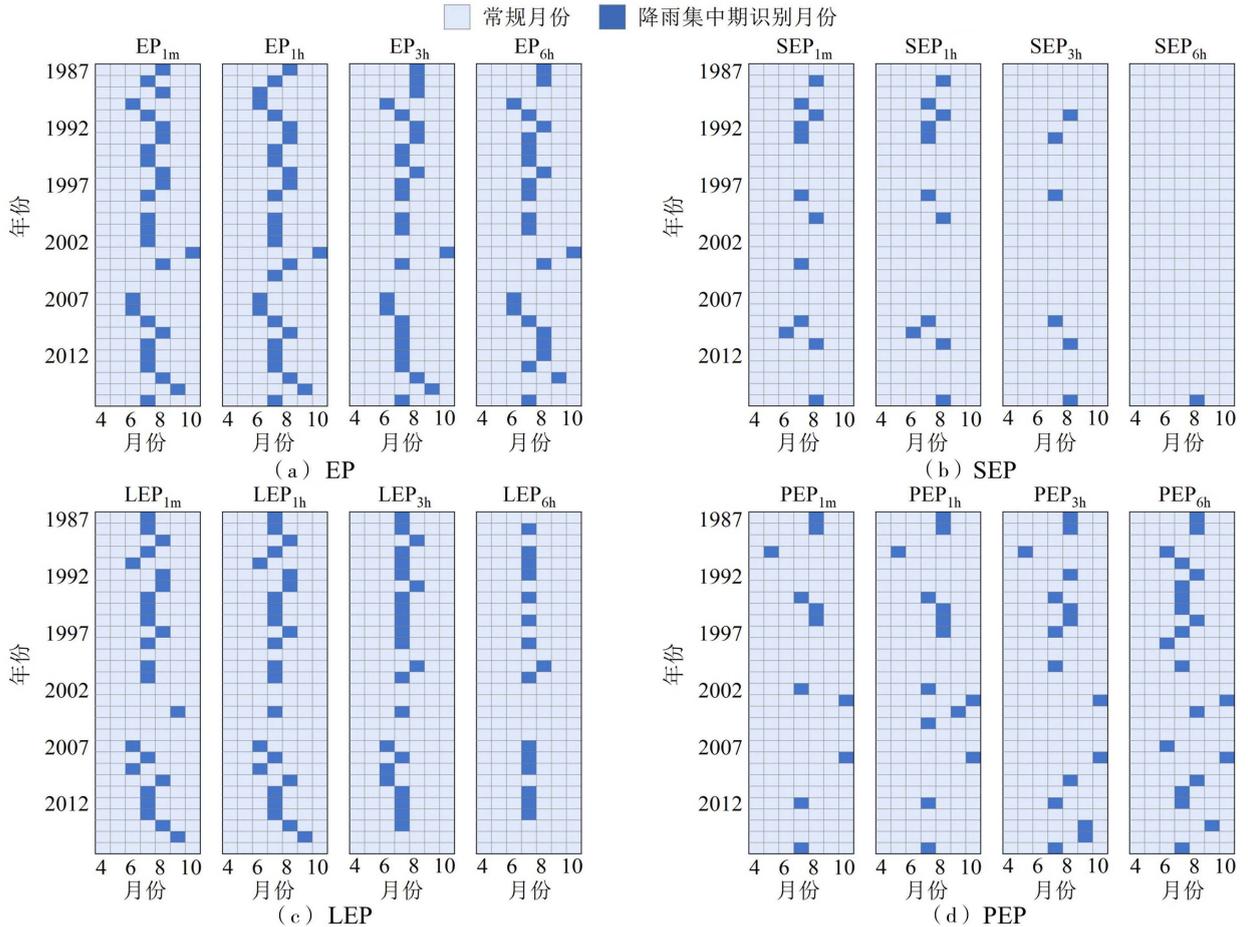


图 7 不同精度数据各类极端降雨事件降雨集中中期分布

Fig. 7 Distribution of rainfall concentration periods for various extreme precipitation events under different resolution data

雨事件分别讨论,SEP 事件和 LEP 事件的降雨集中中期分布时间与上述规律更为相符,然而 9—10 月仍然存在极端降雨事件集中出现的可能(占总体样本的 10.64%),且在这一时期中,PEP 事件最有可能发生(在同期的 3 种极端降雨事件中占比达到 80%),这无疑会对现有城市排水防涝和汛期运维管理安排造成影响<sup>[31]</sup>,未来可加强针对 9—10 月 PEP 事件的预警防控,避免城市洪涝灾害防控预警应急响应不及时等情况发生。此外,降雨数据精度的差异也对降雨集中中期识别结果造成了影响。随着降雨数据精度的降低,降雨集中中期识别结果与 1 min 精度数据的结果误差逐渐增大,这种误差的呈现形式对于 EP 事件主要体现在同年中降雨集中中期识别月份出现偏移,对于 SEP 事件和 PEP 事件主要体现在识别结果数量差异,而对于 LEP 事件,同年降雨集中中期识别月份的偏移和有效识别年份数的差异均有呈现。

极端降雨事件昼夜分布也存在差异。按照 0—6 时、7—12 时、13—18 时、19—24 时 4 个时段,探究不同精度数据下各类极端降雨事件的峰值时刻的昼夜分布,结果如表 1 所示。EP 事件峰值时间在 0—6 时最高,占比为 30%~35%,不同数据精度对 EP 事件的峰值时间的昼夜分布差异影响较小,4 个时段的正负偏差均不超过 5%。而不同类型的极端降雨事件的昼夜分布却呈现出不同特点,SEP 事件和 LEP 事件更可能在夜间出现,而 PEP 事件更可能出现在上午 7—12 时,与居民出行高峰时段相重叠。因此,城市排水防涝工作应当加强对 PEP 事件的关注,加强应对极端降雨应急调度方案中对这一类型降雨可能造成潜在威胁的预判,尽量减少因内涝积

表 1 不同精度数据各类极端降雨事件峰值时间分布

Table 1 Peak time distribution of various extreme precipitation events under different resolution data

极端降雨 类型	占比/%			
	0—6 时	7—12 时	13—18 时	19—24 时
EP <sub>1d</sub>	34.15	18.29	17.07	30.49
EP <sub>1m</sub>	30.38	18.99	22.78	27.85
EP <sub>1h</sub>	31.43	20.00	18.57	30.00
EP <sub>3h</sub>	35.48	17.74	17.74	29.03
EP <sub>6h</sub>	46.67	13.33	20.00	20.00
SEP <sub>1m</sub>	30.77	15.38	30.77	23.08
SEP <sub>1h</sub>	16.67	16.67	33.33	33.33
SEP <sub>3h</sub>	0	0	100	0
SEP <sub>6h</sub>	35.85	15.09	15.09	33.96
LEP <sub>1m</sub>	34.69	14.29	20.41	30.61
LEP <sub>1h</sub>	33.33	19.05	11.90	35.71
LEP <sub>3h</sub>	36.00	16.00	12.00	36.00
LEP <sub>6h</sub>	14.29	35.71	21.43	28.57
PEP <sub>1m</sub>	17.65	35.29	23.53	23.53
PEP <sub>1h</sub>	31.82	22.73	27.27	18.18
PEP <sub>3h</sub>	36.11	19.44	19.44	25.00
PEP <sub>6h</sub>	34.15	18.29	17.07	30.49

水导致的交通瘫痪和居民紧急避险难度<sup>[32-33]</sup>。

### 2.3 不同数据精度下极端降雨事件的时间变化规律

利用 Sen's 斜率法和 M-K 检验分析各类极端降雨事件时间变化的趋势及其显著性,结果见表 2。从 EP<sub>1m</sub> 和 EP<sub>1h</sub> 两种精度的极端降雨事件整体情况来看,降水量、降雨历时和峰值时间 3 项指标的变化呈现上升趋势,降雨频率、降雨集中度和降雨集中中期 3 项指标的变化呈现下降趋势,但两种趋势都不显著。随着数据精度降低至 3 h 和 6 h,降雨历时的变化趋势出现逆转,可见低精度数据无法准确反映降雨历时变化趋势,甚至可能得出与实际情况完全相反的结果。

针对不同精度数据下各类型极端降雨事件,对于降水量指标,PEP 事件上升程度更大,但变化趋势仍不显著,数据精度的改变对降水量变化趋势的影响不明显。对于降雨频率指标,SEP 事件和 LEP 事件均呈不显著的下降趋势,而 PEP 事件呈不显著的上升趋势,数据精度差异同样不会造成降雨频率变化趋势的显著改变。对于降雨历时指标,SEP 事件和 LEP 事件均呈上升趋势,而 PEP 事件呈下降趋势,这种趋势在高精度样本中不显著,而在低精度样本中显著。EP<sub>1m</sub> 和 EP<sub>1h</sub> 的上升趋势与 EP<sub>3h</sub> 和 EP<sub>6h</sub> 的下降趋势表明,低精度数据样本对降雨历时趋势预测的不准确性,进一步印证了前述 1 h 及以上的高精度数据更适合作为极端降雨事件规律分析样本的判断。总的来说,PEP 事件历时可能缩短,而持续时长 24 h 以下的极端降雨事件历时可能会增大,这也将进一步引起城市雨水系统受极端降雨干扰后的系统内涝弹性,即抵御城市内涝灾害和恢复灾前排水能力的减小<sup>[34]</sup>。对于降雨集中度指标,各种类型极端降雨事件变化趋势以显著性下降为主,而 3 h 和 6 h 精度的 SEP 事件呈现出显著上升趋势,这表明极端降雨事件的年内分布可能会更加分散,进一步印证了前述非主汛期月份同样需要关注极端降雨风险的结论。对于降雨集中中期指标,除 3 h 和 6 h 精度的 SEP 事件和 PEP 事件呈现上升趋势外,其余类型极端降雨事件均呈现下降趋势。对于峰值时间指标,数据精度降低造成的趋势预测偏差较大,对于 1 min 和 1 h 的高精度样本而言,SEP 事件呈现不显著的下降趋势,而 LEP 事件和 PEP 事件均呈现不显著的上升趋势。

除了降雨特征的变化趋势分析之外,降雨特征的突变年份作为划分极端降雨变化阶段的重要依据,也是极端降雨变化规律研究中不可忽视的关注点,然而数据精度和极端降雨类型的差异同样可能得出完全不同的降雨突变年份识别结果。利用有序

表 2 各类极端降雨时间特征指标变化趋势检验值

Table 2 Test values of temporal variation trends of various extreme precipitation characteristic indexes

极端降雨类型	$P_A$	$P_F$	$P_D$	$P_{CD}$	$P_{CP}$	$P_T$
EP <sub>1d</sub>	0.0030	0.0000	0.3600	-0.0029	-0.2844	0.0045
EP <sub>1m</sub>	0.0022	0.0000	0.3067	-0.0009	-0.2767	0.0081
EP <sub>1h</sub>	0.0091	0.0000	-3.2375	-0.0033	-0.4666	-0.0273
EP <sub>3h</sub>	0.0111	0.0000	-13.4260	-0.0032	-0.3561	-0.0434*
EP <sub>6h</sub>	0.0889	-0.0001	3.4964*	-0.0070	-1.3725	-0.6464*
SEP <sub>1m</sub>	0.0230	-0.0001	1.3187	-0.0119*	-2.1401*	-0.4451
SEP <sub>1h</sub>	0.4433	-0.0012	0.0000	0.0040*	0.9010*	-0.8571
SEP <sub>3h</sub>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065*	1.3548*	0.0000
SEP <sub>6h</sub>	0.0386	-0.0001	2.8104	-0.0095*	-0.2763*	0.0473
LEP <sub>1m</sub>	0.0141	-0.0001	2.4673	-0.0093*	-0.4005	0.0222
LEP <sub>1h</sub>	0.0550	-0.0001	0.1896	-0.0153*	-1.1239	0.0680
LEP <sub>3h</sub>	0.1917	-0.0002	7.7538	-0.0063*	-1.0306*	-0.1062
LEP <sub>6h</sub>	2.6654	0.0005	-14.5300	-0.0112*	-1.9448*	0.4330*
PEP <sub>1m</sub>	1.0024	0.0011	-23.5290	-0.0105*	-1.8183*	0.3284
PEP <sub>1h</sub>	1.1931	0.0002	-26.3240	-0.0029*	0.2469*	-0.0949
PEP <sub>3h</sub>	0.8658	0.0001	-4.3089*	-0.0099*	0.1669*	-0.1514
PEP <sub>6h</sub>	0.0030	0.0000	0.3600*	-0.0029*	-0.2844	0.0045*

注：\* 表示该指标的变化趋势在 0.05 的置信水平上显著。

聚类法识别各类极端降雨的时间突变年份,结果如图 8 所示。由图 8 可见,对于降水量指标,1 min 与 1 h 精度的突变年份识别结果一致,但除 PEP 事件外,3 h 和 6 h 两种低精度结果均与高精度结果存在偏差,低精度的 EP 事件和 SEP 事件降水量突变年份前移 2~3 a;对于降雨频率指标,低精度的 EP 事

件突变年份前移,而低精度的 SEP 事件和 PEP 事件突变年份则后移 1 a;对于降雨历时指标,低精度的 EP 事件、SEP 事件和 PEP 事件突变年份后移。上述 3 项指标中,高精度的 LEP 事件均未检测出突变年份。对于降雨集中度指标,数据精度降低造成 EP 事件突变年份后移,而 SEP 事件和 LEP 事件突变年

● 常规年份 ● 突变年份 (在 0.05 置信水平上不显著) ● 突变年份 (在 0.05 置信水平上显著)

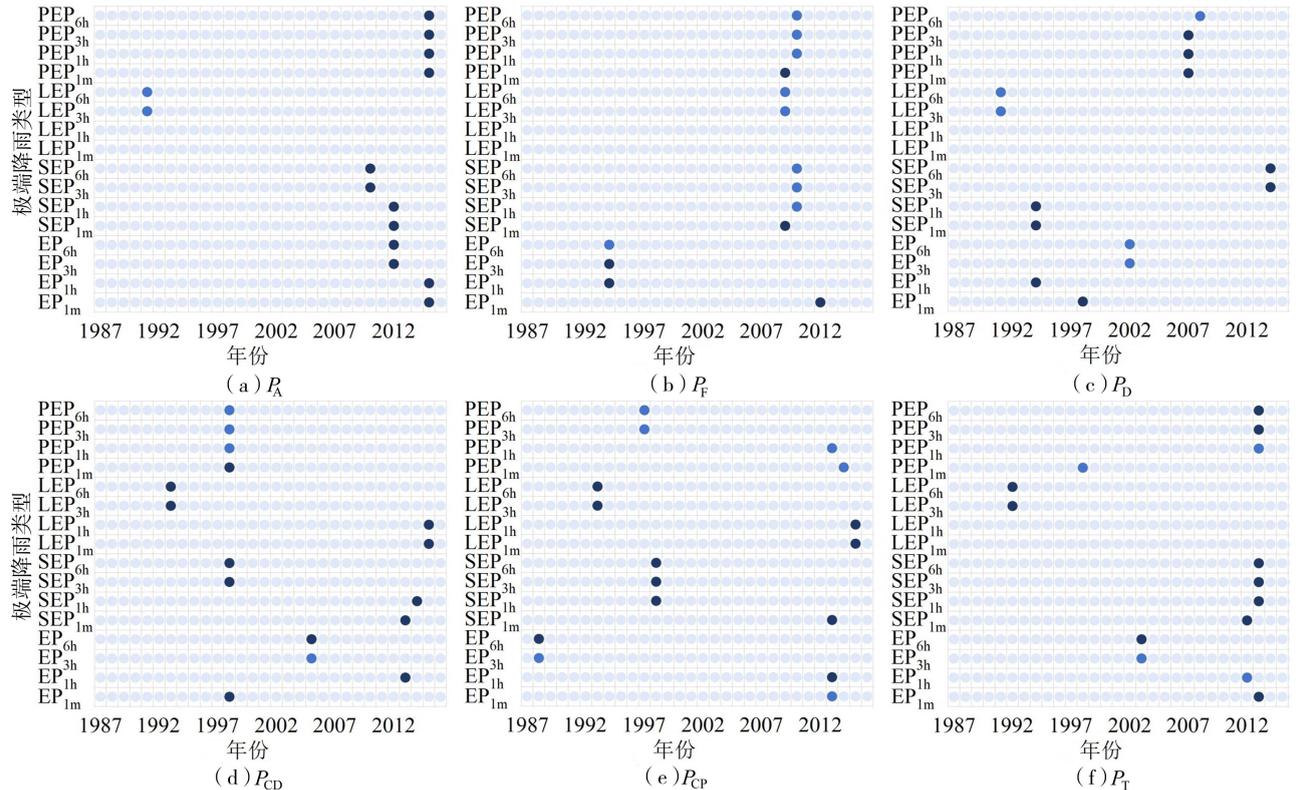


图 8 各类极端降雨事件不同指标突变年份识别结果

Fig. 8 Identification results of abrupt changes in various indicators of extreme precipitation events in different years

份则出现前移;对于降雨集中期指标,与 1 min 精度相比,各类极端降雨事件突变年份出现了 16~24 a 的前移;对于峰值时间指标,低精度 EP 事件突变年份前移,而低精度 SEP 事件和 PEP 事件突变年份后移。总的来说,数据精度的变化会使得极端降雨事件的特征指标突变情况产生“跳跃”,但精度差异对于 PEP 事件的降水量、降雨频率、降雨历时和降雨集中期的识别影响较小,获得高精度降雨数据支撑是确保极端降雨时间突变年份识别结果具备更高准确性的关键。

### 3 结 论

**a.** 北京市不同类型的极端降雨事件中,LEP 事件占主导地位。降雨数据精度降低会使得部分时间相邻且间隔较短的降雨事件被人为合并,并影响降雨特征指标变化规律的统计分析结果,其中集中体现在对降水量和降雨历时的显著影响。1 h 精度降雨数据可基本反映极端降雨事件的主要时间特征。

**b.** 降雨数据精度差异会造成对极端降雨事件的降雨集中度分布判断出现偏差,且使得降雨集中期出现的识别月份偏移和有效识别结果数量偏差。北京市极端降雨事件分布于 6—10 月,并集中在 7—8 月,这与北京市主汛期时间相近,但 9—10 月仍存在极端降雨事件出现的可能,且此时段多表现为 PEP 事件,这可能会对北京市排水防涝应急管理带来挑战。SEP 事件和 LEP 事件更可能在夜间出现,而 PEP 事件更可能在上午 7—12 时形成降雨峰值,对居民紧急避险和内涝预警响应造成影响。

**c.** 对于各类极端降雨事件,数据精度的改变对降水量和降雨频率在统计年限内的变化趋势影响不显著,而低精度降雨数据会增加降雨历时变化趋势预测的不准确性,SEP 事件和 LEP 事件的降雨历时可能缩短,PEP 事件的降雨历时可能增大,这可能造成城市内涝灾害潜在风险增加。低精度降雨数据会造成趋势预测出现较大偏差,降雨特征指标的突变年份产生“跳跃”,但对 PEP 事件的降水量、降雨频率、降雨历时和降雨集中度影响较小。

#### 参考文献:

[ 1 ] KOTZ M, LEVERMANN A, WENZ L. The effect of rainfall changes on economic production [ J ]. *Nature*, 2022, 601 ( 7892 ): 223-227.

[ 2 ] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施 [ J ]. *水资源保护*, 2022, 38 ( 1 ): 7-17. ( XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [ J ]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 ( 1 ): 7-17. ( in

Chinese) )

- [ 3 ] 于超,贺靛,张恒德,等. 北京市 2018 年“7·16”极端暴雨特征及成因分析 [ J ]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50 ( 4 ): 42-49. ( YU Chao, HE Liang, ZHANG Hengde, et al. Analysis on characteristics and causes of the extreme rainstorm on 16 July 2018 in Beijing City [ J ]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences )*, 2022, 50 ( 4 ): 42-49. ( in Chinese) )
- [ 4 ] IPCC. *Climate Change 2021: the physical science basis* [ M ]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [ 5 ] 刘家宏,骆卓然,张永祥,等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响 [ J ]. *水资源保护*, 2022, 38 ( 1 ): 100-105. ( LIU Jiahong, LUO Zhuoran, ZHANG Yongxiang, et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province [ J ]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 ( 1 ): 100-105. ( in Chinese) )
- [ 6 ] 商守卫,王磊之,王银堂,等. 1960—2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析 [ J ]. *水资源保护*, 2023, 39 ( 3 ): 195-204. ( SHANG Shouwei, WANG Leizhi, WANG Yintang, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019 [ J ]. *Water Resources Protection*, 2023, 39 ( 3 ): 195-204. ( in Chinese) )
- [ 7 ] ZHANG Yixin, LI Peng, XU Guoce, et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation on the Loess Plateau of China facing the precipitation process [ J ]. *Journal of Arid Land*, 2023, 15 ( 4 ): 439-459.
- [ 8 ] YIN Changyan, WANG Jiayi, YU Xin, et al. Definition of extreme rainfall events and design of rainfall based on the copula function [ J ]. *Water Resources Management*, 2022, 36 ( 10 ): 3759-3778.
- [ 9 ] ZHANG Yihui, LIANG Kang, LIU Changming. Time distribution pattern and spatial heterogeneity of hourly scale event-based extreme precipitation in China [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2023, 622: 129712.
- [ 10 ] WU Guocan, LI Yun, MA Zhanshan, et al. The unevenness in observed daily precipitation in mainland China [ J ]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 146 ( 3 ): 1031-1041.
- [ 11 ] HAN Jingya, MIAO Chiyuan, DUAN Qingyun, et al. Changes in unevenness of wet-day precipitation over China during 1961-2020 [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126 ( 19 ): e2020JD034483.
- [ 12 ] 汪成博,李双双,延军平,等. 1970—2015 年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征 [ J ]. *自然资源学报*, 2019, 34 ( 6 ): 1209-1222. ( WANG Chengbo, LI Shuangshuang, YAN Junping, et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation regimes in the Hanjiang River Basin during 1970-2015 [ J ]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34 ( 6 ): 1209-1222. ( in Chinese) )

- [13] DENG Yue, CAO Guangzhen, JIANG Weiguo, et al. Spatiotemporal changes in heavy precipitation events in the Beijing-Tianjin-Hebei region revealed by hourly meteorological station observations [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 141(1/2):483-494.
- [14] PARCHURE A S, GEDAM S K. Probability distribution analysis of extreme rainfall events in a flood-prone region of Mumbai, India [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(11):369.
- [15] CHAUDHURI R R, SHARMA P. Addressing uncertainty in extreme rainfall intensity for semi-arid urban regions: case study of Delhi, India [J]. *Natural Hazards*, 2020, 104(3):2307-2324.
- [16] LIMA A O, LYRA G B, ABREU M C, et al. Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: characterization using probability distribution functions and clustering analysis [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 247:105221.
- [17] DU Mingcheng, ZHANG Jianyun, YANG Qinli. Spatial and temporal variation of rainfall extremes for the North Anhui Province Plain of China over 1976-2018 [J]. *Natural Hazards*, 2021, 105(3):2777-2797.
- [18] SANTOS J A, CORTE-REAL J, LEITE S M. Rainfall trends over a small island teleconnected to the North Atlantic Oscillation: the case of Madeira Island, Portugal [J]. *Internaxional Journal of Climatology*, 2014, 34(3):606-613.
- [19] JIANG Xuechen, ZHANG Jing, LEI Xiaohui. Spatial-temporal variations of extreme precipitation indices in the Xinjiang Cold Area over the past 60 years [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2023, 28(4):04023005.
- [20] 朱凯莉, 赖成光, 王兆礼, 等. 城市化背景下长三角核心城市群汛期降水时空演变特征分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(6):95-103. (ZHU Kaili, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Temporal and spatial evolution characteristics analysis of flood season precipitation in core city group of the Yangtze River Delta under background of urbanization [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6):95-103. (in Chinese))
- [21] KAŠPAR M, BLIŽŇÁK V, HULEC F, et al. High-resolution spatial analysis of the variability in the subdaily rainfall time structure [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 248:105202.
- [22] WANG Peng, WANG Jianlong, YANG Zitong, et al. Effect of different MIT rainfall event division methods on volume capture ratio of annual rainfall based on bioretention assessment [J]. *Water Science & Technology*, 2023, 87(6):1423-1437.
- [23] PENDERGRASS A G. What precipitation is extreme? [J]. *Science*, 2018, 360(6393):1072-1073.
- [24] 张志俊, 王盼盼. 基于 Kruskal-Wallis 检验的公路货运车辆实载率差异分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(5):216-220. (ZHANG Zhijun, WANG Panpan. Loading rate variance analysis for road freight vehicles based on Kruskal-Wallis test [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(5):216-220. (in Chinese))
- [25] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324):1379-1389.
- [26] 王雨潇, 孙营营, 张天宇, 等. 1998—2020 年三峡库区最大 1h 降水的时空变化特征 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1):10-18. (WANG Yuxiao, SUN Yingying, ZHANG Tianyu, et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020 [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(1):10-18. (in Chinese))
- [27] 姜瑶, 徐宗学, 王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比 [J]. *水利学报*, 2020, 51(7):845-857. (JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(7):845-857. (in Chinese))
- [28] 张献志, 汪向兰, 王春青, 等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(11):22-26. (ZHANG Xianzhi, WANG Xianglan, WANG Chunqing, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2020, 42(11):22-26. (in Chinese))
- [29] 庄琦, 刘曙光, 周正正. 降雨数据时空精度对城市暴雨变异性及频率分析的影响 [J]. *水科学进展*, 2023, 34(3):398-408. (ZHUANG Qi, LIU Shuguang, ZHOU Zhengzheng. Impact of rainfall spatiotemporal resolutions on urban extreme rainfall variability and rainfall frequency analysis [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3):398-408. (in Chinese))
- [30] 刘璐, 张琨佳, 苏筠. 北京 2012、2013 年汛期暴雨响应行为的对比研究 [J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(1):26-34. (LIU Lu, ZHANG Kunjia, SU Yun. Comparative study of response behavior to the rainstorm during the flood season of 2012 and 2013 in Beijing [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(1):26-34. (in Chinese))
- [31] 刘星. 预警响应缘何失灵: 基于应急管理过程论的一个解释框架: 德国洪灾与河南暴雨的启示 [J]. *云南民族大学学报(哲学社会科学版)*, 2022, 39(6):85-95. (LIU Xing. A study of the causes of failure in early warning responses based on an explanatory framework in the theoretical perspective of emergency management process: enlightenment from the flood in Germany and the rainstorm in Henan [J]. *Journal of Yunnan Minzu University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2022, 39(6):85-95. (in Chinese))

(下转第 157 页)

- Research, 2015, 34(8): 1547-1558. (in Chinese))
- [26] 杨好周, 梁忠民, 胡义明, 等. 游程理论在云南省干旱重  
现期分析中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12):  
8-12. (YANG Haozhou, LIANG Zhongmin, HU Yiming, et  
al. Application of run-length theory to drought return  
period analysis of Yunnan Province[J]. Water Resources  
and Power, 2013, 31(12): 8-12. (in Chinese))
- [27] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水  
文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学  
版), 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE  
Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of  
hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to  
2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural  
Sciences), 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese))
- [28] 朱丽, 吕潇雨, 郭浩, 等. ERA5-Land 降水产品在黄河流  
域干旱监测中的适用性研究[J]. 干旱气象, 2023, 41  
(5): 677-687. (ZHU Li, LYU Xiaoyu, GUO Hao, et al.  
Suitability study of ERA5-Land precipitation product for  
drought monitoring in the Yellow River Basin[J]. Journal  
of Arid Meteorology, 2023, 41(5): 677-687. (in  
Chinese))
- [29] 黄晓龙, 吴薇, 许剑辉, 等. ERA5-Land 降水再分析资料  
在中国西南地区的适用性评估[J]. 高原气象, 2023, 42  
(6): 1562-1575. (HUANG Xiaolong, WU Wei, XU  
Jianhui, et al. The applicability performance of the ERA5-  
land precipitation datasets in Southwest China[J]. Plateau  
Meteorology, 2023, 42(6): 1562-1575. (in Chinese))
- [30] 田丰, 杨建华, 刘雷震, 等. 地理学视角的干旱传播概  
念、特征与影响因素研究进展[J]. 地理科学进展,  
2022, 41(1): 173-184. (TIAN Feng, YANG Jianhua, LIU  
Leizhen, et al. Progress of research on the conception,
- characteristic, and influencing factors of drought  
propagation from the perspective of geographic sciences[J].  
Progress in Geography, 2022, 41(1): 173-184. (in  
Chinese))
- [31] KONAPALA G, MISHRA A. Review of complex networks  
application in hydroclimatic extremes with an  
implementation to characterize spatio-temporal drought  
propagation in continental USA[J]. Journal of Hydrology,  
2017, 555: 600-620.
- [32] APURV T, SIVAPALAN M, CAI Ximing. Understanding  
the role of climate characteristics in drought propagation  
[J]. Water Resources Research, 2017, 53(11): 9304-  
9329.
- [33] WEN Li, ROGERS K, LING J, et al. The impacts of river  
regulation and water diversion on the hydrological drought  
characteristics in the Lower Murrumbidgee River, Australia  
[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 382-391.
- [34] VANLANEN H A J, WANDERS N, TALLALSEN M, et  
al. Hydrological drought across the world: impact of climate  
and physical catchment structure[J]. Hydrology and Earth  
System Sciences, 2013, 17(5): 1715-1732.
- [35] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望  
(II) 影响因素与干旱传播研究展望[J]. 南水北调与  
水利科技(中英文), 2023, 21(4): 654-668. (ZHI  
Xiefei, TIAN Yuntao, CHEN Changchun, et al. Progress  
and prospects in drought propagation research, part II:  
influencing factors and research prospects [J]. South-to-  
North Water Transfers and Water science & Technology,  
2023, 21(4): 654-668. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-27 编辑: 施业)

(上接第 132 页)

- [32] 黄国如, 李梅萍. 基于微观交通仿真的城市内涝对道路  
交通的影响评估研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39  
(5): 69-78. (HUANG Guoru, LI Meiping. Research  
progress on impact assessment of urban waterlogging on  
road traffic based on micro traffic simulation [J]. Water  
Resources Protection, 2023, 39(5): 69-78. (in Chinese))
- [33] 李瑞栋, 倪广恒, 陆科成, 等. 北京“23·7”特大暴雨影  
响下城市交通应急响应时间动态分析: 以北京市通州  
区为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(2):  
365-377. (LI Ruidong, NI Guangheng, LU Kecheng, et al.  
Dynamics of urban traffic emergency response times during  
the extraordinary “23·7” rainstorm event in Beijing: a  
case study of Tongzhou District, Beijing [J]. Journal of  
Basic Science and Engineering, 2024, 32(2): 365-377.  
(in Chinese))
- [34] 宋川, 王琳, 王浩程, 等. 降雨雨型对城市雨水系统内涝  
弹性的影响[J]. 中国农村水利水电, 2024(1): 197-  
206. (SONG Chuan, WANG Lin, WANG Haocheng, et al.  
The influence of rainfall patterns on the waterlogging  
resilience of urban rainwater system [J]. China Rural  
Water and Hydropower, 2024(1): 197-206. (in  
Chinese))

(收稿日期: 2024-05-22 编辑: 王芳)