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

江苏梅雨期极端小时降水时空变化特征

杨梦兮 胡瑞金 刘梅 安礼政

The spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province

YANG Mengxi，HU Ruijin，LIU Mei，AN Lizheng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-033

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

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

2020年梅雨期上海一次强降水过程垂直结构的综合观测分析

Observational analysis of vertical structure of a heavy precipitation event in Shanghai during Meiyu period in 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 658-665 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.014

江淮梅雨期持续性暴雨和极端强降水事件的位涡比较分析

Comparative analysis of potential vorticity between persistent rainstorm and extreme intense rainfall events during the Yangtze-Huaihe Meiyu period

暴雨灾害. 2024, 43(2): 121-134 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-202

河南省暖季小时极端降水时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Henan

暴雨灾害. 2021, 40(2): 153-159 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.006

近25 a重庆地区小时降水时空分布特征分析

Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years

暴雨灾害. 2020, 39(1): 71-80 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.008

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨梦兮,胡瑞金,刘梅,等.2025.江苏梅雨期极端小时降水时空变化特征[J].暴雨灾害,44(4):473−482. YANG Mengxi, HU Ruijin, LIU Mei, et al. 2025. The spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):473−482 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−033

江苏梅雨期极端小时降水时空变化特征

杨梦兮[1], 胡瑞金[2], 刘梅[3], 安礼政[4]

(1. 江苏省泰州市气象局, 泰州 225300; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100;
3. 江苏省气象台, 南京 210008; 4. 江苏省淮安市气象局, 淮安 223001)

摘　要: 利用江苏省 2001—2020 年 70 个国家气象观测站逐小时降水量观测资料, 以第 98 百分位数为阈值, 采用小提琴图的方法, 分淮北、江淮之间、长江以南等三个区域, 对全省梅雨期极端小时降水的时空变化特征进行分析, 结果表明: (1) 全省极端小时降水量呈单峰正偏态分布, 小时降水量集中在 22.7 mm 附近, 最大值达 184.7 mm, 跨度极大。降水出现频次百分比在省内自北向南逐步递增, 频次高的站点, 年均梅雨期降水量也偏多。(2) 小时最大降水量在全省呈多个中心不均匀分布, 当站点的降水量平均偏多、集中偏多或标准差较大时, 往往极端性也更强。(3) 全省各站总 (平均) 极端小时降水量与降水频次在年际变化 (日变化) 中均呈明显正偏态分布, 但在频次异常偏高的站点概率偏多、单站频次异常偏高的年份, 站点降水量趋于极端的概率也更大、极端性也更强, 这与日变化相反。极端小时降水偏多偏强的地区位于长江以南, 且发生年份与 El Niño 的年份对应较好。(4) 淮北中午至凌晨时段易突发极端小时降水; 江淮之间在凌晨, 长江以南则是在上午最易多发极端小时降水。江淮之间发生极端小时降水的高峰出现时段较长江以南偏早。

关键词: 江苏; 梅雨期; 极端小时降水; 空间分布; 时间变化; 小提琴图

中图法分类号: P426.62　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−033

The spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province

YANG Mengxi[1], HU Ruijin[2], LIU Mei[3], AN Lizheng[4]

(1. *Taizhou Meteorological Bureau of Jiangsu Province*, *Taizhou* 225300; 2. *Physical Oceanography Laboratory*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100; 3. *Jiangsu Meteorological Observatory*, *Nanjing* 210008; 4. *Huaian Meteorological Bureauof Jiangsu Province of Jiangsu Province*, *Huaian* 223001)

Abstract: Based on hourly precipitation observation data from 70 national meterological stations in Jiangsu Province over the past 20 years (2001—2020), with the 98th percentile as threshold, the spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in different regions(Huaibei, the area between the Yangtze and Huaihe River, and the area south of the Yangtze River) are analyzed using the violinplot method. The results are as follows. (1) The extreme hourly precipitation in the province shows a unimodal positively skewed distribution, with a concentration of 22.7 mm and a maximum value of 184.7 mm, which spans a wide range. The frequency percentage gradually increases from the north to the south. Stations with a higher frequency often have more annual average Meiyu precipitation. (2) The maximum hourly precipitation is unevenly distributed across multiple centers throughout the province. When the precipitation distribution of the station is with a high average or concentration, or a large standard deviation, the extreme is often stronger. (3) The total and average extreme hourly precipitation at each station in the province show a significant positive skewed distribution in both annual and daily variations, corresponding to the precipitation frequency. But in the years when the precipitation frequency probability of the stations is abnormally high and abnormally high frequency exists at a single station, the precipitation probability of the stations tending towards extreme is also higher and the extreme is stronger, which is exactly opposite to the daily variation. The areas with higher precipitation frequency and amount of extreme hourly precipitation are located south of the Yangtze River and the occurrence years are consistent well with the El Niño years. (4) The sudden intense extreme hourly precipitation usually occurs from noon to the next early morning in Huaibei region, high frequency usually occurs in the early morning in the area between the Yangtze

收稿日期: 2024−02−26; **定稿日期**: 2024−09−22

资助项目: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J007); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-049)

第一作者: 杨梦兮, 主要从事中短期灾害性天气预报研究。E-mail: yangmengxi90418@163.com

通信作者: 刘梅, 主要从事中短期灾害性天气预报研究。E-mail: lmkerry@163.com

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

River and the Huaihe River, and in the forenoon in the region south of the Yangtze River. The peak time of the extreme precipitation in the area between the Yangtze River and the Huaihe River appears earlier than that south of the Yangtze River.

Key words: Jiangsu; Meiyu period; extreme hourly precipitation; space distribution; time variation; violinplot

引　言

随着全球变暖加剧, 极端天气事件 (也称高影响天气事件) 明显增多, 降水更是呈现极端化发展的趋势 (Westra et al., 2015; Zheng et al., 2016)。极端降水倾向于发生在更短的时间内 (最多几个小时内), 次日尺度极端降水的增长速率要高于日尺度及以上 (Haerter et al., 2010)。与日降水量相比, 小时降水量能够更准确地反映降水强度, 更适合于极端降水事件的研究 (Li et al., 2013)。而短时强降水 (通常指发生在 1 h 内) 往往具有空间尺度小、突发性强、预报难度大的特点, 频繁的极端小时降水引发洪涝和地质灾害给当地经济、交通、安全造成严重影响, 更甚者造成人员伤亡 (邓彪等, 2022; 黄武斌等, 2023)。因此, 针对极端小时降水进行研究是提高精细化气象服务质量和气象防灾减灾以及应对气候变化能力的主要环节之一, 具有重要的理论和应用价值。

我国对于次日尺度极端降水的研究起步较晚, 随着探测仪器的迅速发展和极端天气不利影响的加剧, 近年建立在相关极端小时降水定义基础之上的时空特征分析及其与天气系统和下垫面关系等方面的工作逐步展开。例如 Li 等 (2013) 采用拟合广义极值分布估算以确定中国中东部小时降水强度阈值, 并对极端事件的持续性和季节特征进行分析, 发现不同地区均存在有显著差异。Luo 等 (2016) 利用百分位法定义阈值, 研究了与中国极端小时降水相关的天气形势, 并根据其发生的情况分为热带气旋、锋面、涡旋/切变线和弱天气强迫四类。Liang 和 Ding (2017)、Zhong 等 (2017)、吴梦雯 (2019) 针对中国三大城市群 (京津冀、长三角和珠三角) 的极端小时降水开展了相关研究, 发现其发生频次在中国东部大部分地区呈现增长趋势, 且其它降水特征也存在明显地区差异。杨军勇和苏爱芳 (2021) 对河南省暖季极端小时降水的研究表明, 山地、丘陵、城市和平原 4 类下垫面降水的日变化特征明显不同。这些研究增进了对全国各地极端小时降水时空变化及其复杂影响因素规律性的认识。

江苏地处南北交界、雨热同季的中纬度地区, 易受强降水洪涝影响, 沈澄等 (2015) 对江苏暴雨洪涝灾害特征分析表明, 以梅雨锋降水引发的频次最多, 临界雨强为 18~20 mm·h^{-1}。沈伟等 (2017) 则针对江苏暖季短时强降水时空分布特征研究发现, 短时强降水在梅雨期骤增, 梅雨期也是其高发时段, 呈明显持续性、极端性、区域性特点, 且与梅前、盛夏和夏末初秋的变化有着显著差异。上述研究表明, 强降水在江苏梅雨期高发, 且与洪涝灾害发生直接关联。梅雨期也是江苏防洪的关键期, 但目前鲜少有专门针对梅雨期极端小时降水的相关研究。本文利用百分位法确定极端小时降水阈值, 对江苏梅雨期的极端小时降水不同时空尺度的变化特征进行分析, 根据地理位置和气候差异将江苏分为淮北、江淮之间和长江以南三个区域进行比较研究, 这既考虑了梅雨期降水存在的区域性特点, 也与前述有关研究工作中体现出的极端小时降水需要细致研究的思路相一致, 以期进一步了解江苏梅雨期极端小时降水的规律, 为当地降水预报和防洪抗涝提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的降水数据为 2001—2020 年共 20 a 的江苏 70 个国家气象观测站 (以下简称国家站) 逐小时降水量观测资料, 该资料来源于中国气象局国家气象信息中心 2022 年 4 月发布的《中国国家级地面气象站逐小时降水数据集》, 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。图 1 给出江苏省 70 个国家站的空间分布 (江苏省气象局, 2017)。在实际业务预报中, 通常将 70 个站点自北向南划分为 3 个部分, 其中淮河以北 (淮北) 22 个站、江淮之间 26 个站、长江以南 22 个站, 在图 1 中以不同颜色加以区分。这种划分方法充分考虑了行政区划, 与 3 个地区的名称有一定的差异, 比如江

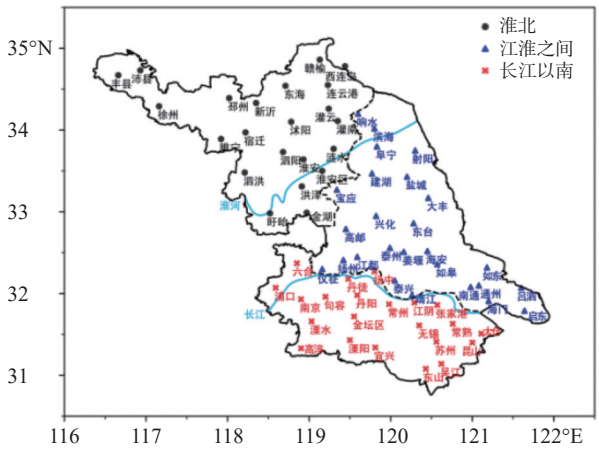


图 1 江苏省 70 个国家站的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of 70 national basic stations in Jiangsu Province

淮之间, 并非严格意义的长江与淮河所夹的区域, 分析中还是以业务划分为准。

2001—2020 年江苏入、出梅日期来自江苏省气象台提供的根据国家气候中心《梅雨监测指标》勘定后的江苏梅雨资料 (周兵等, 2017)。分析结果表明, 近 20 a 江苏没有空梅出现, 有 5 a 出现倒黄梅, 分别为 2005、2009、2011、2014 和 2017 年。倒黄梅是出梅之后由于西太平洋副热带高压的南退造成江淮地区持续降水, 根据江苏梅雨定义标准, 不计入梅雨期内 (江苏省气象局, 2017)。近 20 a 江苏平均梅雨日数为 23.6 d, 最短 5 d (2005 年), 最长达到 51 d (2020 年)。

1.2 研究方法

1.2.1 百分位法

百分位法是一种用于确定数据集中的百分位数方法 (李建等, 2013), 在气候分析中应用广泛, 尤其在极端事件的定义、分析中其作用更加突出 (Luo et al., 2016; 杨军勇和苏爱芳, 2021)。它适用于各种数据的分布类型, 是一种非参数方法。本文首先采用该方法对江苏极端小时降水事件进行定义, 并将每个站点大于等于 0.1 mm 的小时降水量按升序进行排列, 然后根据选取的百分位数确定此站点的降水阈值。

表 1 为江苏省 2001—2020 年梅雨期不同百分位极端小时强降水阈值, 共选取了 5 个百分位值进行对比分析, 从中选择合适的百分位, 同时还给出出现频次和降水量百分比的变化, 以达到理想的选取标准。由表 1 可知, 第 90 和 95 百分位小时降水量阈值平均值均在 10 mm 左右, 其标准差均较小, 而出现频次和降水量百分比均较高。第 98 百分位的平均值接近 20 mm, 标准差为 2.1 mm, 出现频次和降水量百分比大幅降低至 0.33% 和 21.8%。而第 99 和 99.5 百分位降水量平均值较大, 其标准差相应增大, 出现频次和降水量百分比过小, 达到阈值过于严格。

表 1 江苏 2001—2020 年梅雨期不同百分位极端小时强降水阈值以及出现频次和降水量百分比

Table 1 Thresholds of hourly heavy precipitation in different percentiles with their frequency and precipitation percentages during the Meiyu period in Jiangsu Province from 2001 to 2020

百分位	极端小时强降水量阈值/mm				出现频次百分比/%	降水量百分比/%
	最小值	最大值	平均值	标准差		
99.5	26.1	45.6	31.7	3.7	0.09	8.3
99.0	18.7	32.5	25.5	2.8	0.17	13.6
98.0	15.7	24.5	19.5	2.1	0.33	21.8
95.0	8.6	16.2	12.0	1.3	0.81	38.8
90.0	5.2	8.8	7.2	0.7	1.63	56.2

因此, 本文选取第 98 百分位小时降水量为江苏梅雨期极端小时降水阈值, 符合由中小尺度天气系统造成降水的雨强指标, 也与我国中东部的极端小时降水标准相符 (Zhang and Zhai, 2011; 陈炯等, 2013)。

1.2.2 小提琴图方法

小提琴图是一种数据可视化图表, 用于展示样本的数据分布和概率密度 (Hintze and Nelson, 1998)。如图 2 中所示, 提琴中间的黑色粗条表示四分位数范围, 从其延伸出的细黑线代表数据范围, 白线处为中位数, 同时也有上、下极值范围之外的离散 (异常) 值的显示分布。目前小提琴图在气象统计方面的应用越来越为广泛, 例如陈刚等 (2022) 采用其对比分析了河南“21·7”特大暴雨过程中不同类型强降水雨滴谱样本的雨强, 潘佳文等 (2023) 则用之对比了不同类型风暴差分反射率因子柱深度和体积等。

小提琴图的两侧曲线即为核密度估计曲线, 用于展示数据分布的概率密度, 设有 n 个样本值 x_1, x_2, ⋯, x_n, 则其在 x 处的概率密度为

$$f_h(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \tag{1}$$

其中, h 为带宽, 一般以均方误差最小为选择原则。使用高斯函数 K 作为核函数来拟合数据集的概率密度函数, 其表达式为

$$K(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2}} \tag{2}$$

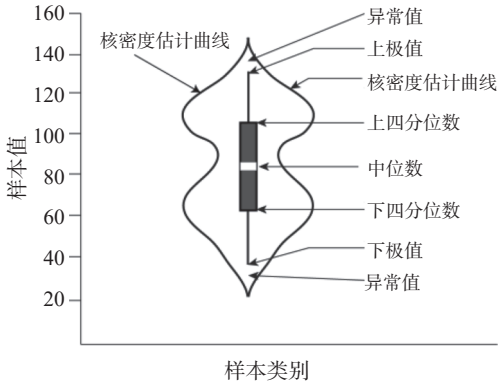


图 2 小提琴图方法示意图 (Hintze and Nelson, 1998)

Fig. 2 Schematic diagram of violinplot (Hintze and Nelson, 1998)

在 x 处的概率密度用各样本点高斯核函数之和表示，则其估计值为

$$f_h(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{h}\right)^2} \tag{3}$$

提琴曲线的宽度反映了数据在该位置的密度，本文中宽度根据该组中观察的数量缩放。由于提琴的对称性，数据组间的对比则采用“半”小提琴的展示方式 (Huang et al., 2021)。

本文采用小提琴图表征极端小时降水大数据的多组分布，它的优势在于除显示统计数据外，还给出数据整体核密度估计的分布，尤其在数据量大不便于一个个展示的时候特别适用。

1.2.3 峰度和偏度

峰度和偏度是用于描述数据概率密度曲线分布形态的两个统计量，本文采用二者来分别度量数据较正态分布的陡缓程度和不对称性 (黄嘉佑, 2007)。

2 江苏梅雨期降水基本概况

江苏全省 2001—2020 年区域平均的年均梅雨期降水量为 232.4 mm，标准差为 137.6 mm，最小和最大降水量分别为 31.8 mm (2005 年) 和 610.2 mm (2020 年)，与梅雨期长短有关。图 3a 给出江苏 2001—2020 年梅雨期年均降水量的空间分布，可见降水量自北向南递增，淮北平均在 200 mm 左右；江淮之间在 200~270 mm 之间；除东南部的个别站点外，长江以南在 230~310 mm 之间，最大中心位于常州一带，达到 300 mm 以上。区域平均和单站的年最少降水量也均出现在淮北，分别仅为 28.9 mm 和 1.1 mm (金湖站)，均出现在 2005 年；年最多降水量则均出现在 2020 年的长江以南，平均每站达到 673.1 mm，单站则高达 927.2 mm (高淳站)。

图 3b 给出江苏 2001—2020 年梅雨期小时最大降水量的空间分布，可见其在全省呈多个中心不均匀分布，大值中心与图 3a 中不重合，虽然两者的空间分布不直接相关，但均与日最大降水量的分布 (图略) 相似。小时最大降水量与日最大降水量的空间相关系数为 0.53，而后者与年均梅雨期降水量的空间相关系数达到 0.44，均通过显著性水平为 0.05 (下同) 的统计检验，表明小时最大降水量的多少也间接影响着年均梅雨期降水量的多寡。全省小时最大降水量的平均值达 63.9 mm，最小值为 39.8 mm (淮北，邳州站)，最大值达 184.7 mm (江淮之间，仪征站)。全省平均梅雨期小时最大降水量占年均梅雨期降水量的 28.2%，单站最少也占到 16.0% (长江以南，丹阳站)，仪征站的占比最大，达到 72.4%。

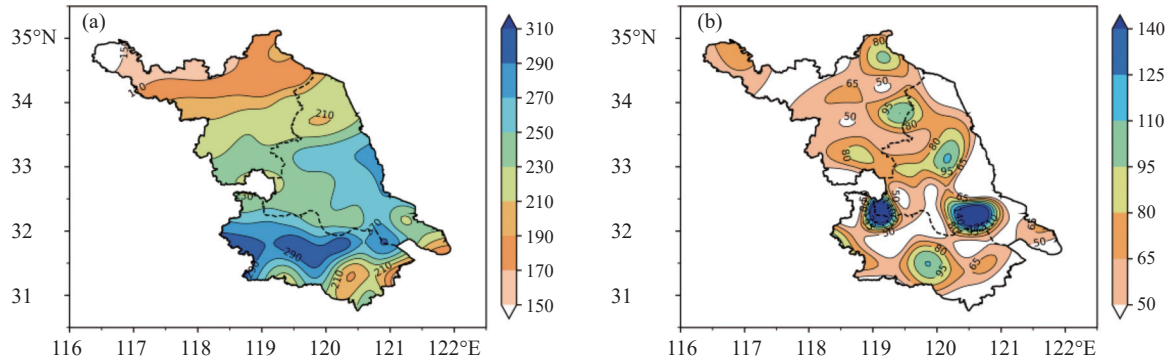


图 3 江苏省 2001—2020 年梅雨期年均降水量 (a, 单位: mm) 及小时最大降水量 (b, 单位: mm) 分布

Fig. 3 (a) Spatial distribution of annual average precipitation (unit: mm) and (b) hourly maximum precipitation (unit: mm) during the Meiyu period in Jiangsu Province from 2001 to 2020

3 极端小时降水的空间分布

图 4a 为江苏梅雨期第 98 百分位极端小时降水量阈值的空间分布。由图可见，其在省内基本呈“低–高–低–高”的带状分布，淮北南部和江淮之间北部以及长江以南为两个高值带，降水量基本均达 20 mm 以上；淮北北部和江淮之间南部为两个低值带，降水量则在 20 mm 以下。极端小时降水出现频次百分比则呈明显的东—西带状分布并自北向南逐渐递增，从 0.2% 左右逐步增大至 0.4% (图 4b)，其空间分布与图 3a 的相似度极高，两者的相关性通过 0.05 的显著性检验，表明极端小时降水频次高的站点，年均梅雨期降水量也偏多。

通过对与小提琴图相关的其它统计特征量分析表明，各站的极端小时降水量分布均较为集中，峰度基本均为正值，偏度也均为正值。降水量的峰度、偏度，包括平均值、核密度最大值、标准差均与小时最大降水量的空间分布 (图 3b) 较为相似，因此不再给出它们的分布图，而是以彼此间的空间相关系数来反映 (表 2)。可见，这些统计量与最大

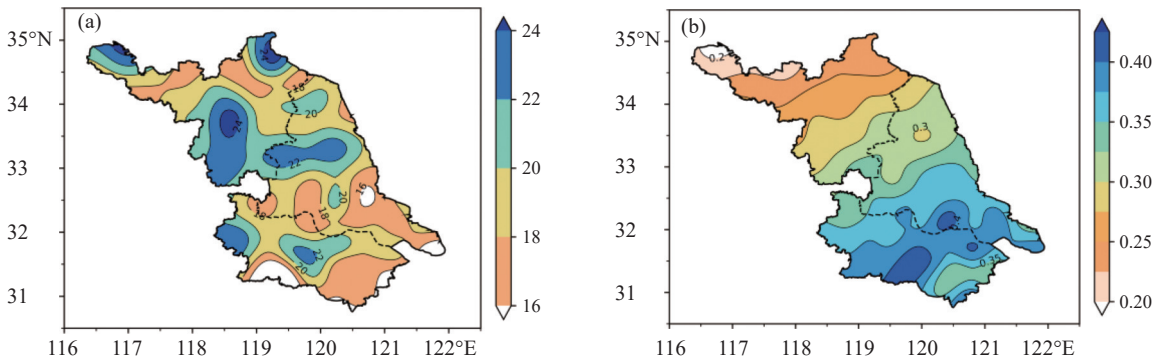


图 4 江苏 2001—2020 年梅雨期极端小时降水量阈值 (a, 单位: mm) 及出现频次百分比 (b, 单位: %)

Fig. 4 (a) Thresholds (unit: mm) and (b) frequency percentages (unit: %) of the hourly extreme precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province from 2001 to 2020

值 (图 3b) 之间均呈显著正相关, 当站点的降水量平均偏多、集中偏多或标准差较大时, 往往极端性也更强; 同时, 特别异常的降水导致大的偏度、峰度和标准差等, 从而也导致了空间分布的相似性。不仅如此, 各站降水量的集中正偏态分布表明降水量主要处在小值区, 导致平均值和核密度最大值与阈值的空间分布相似, 而这也导致最大值与阈值 (图 3b 与图 4a) 之间空间分布差异较大。表 2 中偏度与峰度及标准差之间的相关性也很强, 降水量集中度高或标准差大的站点, 异常偏多的概率也大。

表 2 江苏省 2001—2020 年梅雨期极端小时降水量相关统计量之间的空间相关系数

Table 2 The spatial correlation coefficients between the statistics of extreme hourly precipitation of various stations during the Meiyu period in Jiangsu Province from 2001 to 2020

统计量	峰度	偏度	平均值	核密度最大值	标准差	最大值	阈值
峰度	/						
偏度	0.98*	/					
平均值	0.14	0.13	/				
核密度最大值	0.17	0.18	0.90*	/			
标准差	0.68*	0.65*	0.51*	0.30*	/		
最大值	0.86*	0.84*	0.38*	0.28*	0.88*	/	
阈值	0.05	0.07	0.79*	0.87*	0.12	0.09	/

注: *号表示通过0.05显著性水平检验, /号表示忽略自相关, 下同

4 不同区域极端小时降水时空变化特征

4.1 阈值与出现频次百分比

表 3 给出了江苏不同地区区域平均的梅雨期极端小时降水量阈值与出现频次百分比。可见, 三个区域平均阈值均在 20 mm 左右, 站点间的最大差异均在 7 mm 左右, 全省站点在 15.7 ~ 24.5 mm 之间, 差距不到 9 mm, 标准差也小于各区域 (表 1)。出现频次百分比则向南依次增高, 淮北最低, 为 0.26%, 江淮之间为 0.35%, 长江以南最高为 0.37%。

4.2 概率密度分布

图 5 给出江苏不同区域梅雨期极端小时降水量与降水频次的小提琴图, 为全面起见, 也给出全省的结果。由图 5a 可见, 全省降水量呈明显单峰形态分布, 峰度大, 平均为 28.4 mm, 标准差达 11.0 mm, 核密度最大对应在 22.7 mm, 超过 75% 分位数的降水量集中在 35 mm 以下, 上极值也低于 50 mm。除外, 核估计还呈明显右拖尾的正偏态分布, 最大值 (184.7 mm) 与最小值 (15.7 mm) 差距极大, 偏度高达 3.7, 表明出

表 3 江苏不同区域 2001—2020 年梅雨期极端小时降水量阈值与出现频次百分比

Table 3 Thresholds and frequency percentages of the extreme hourly precipitation during the Meiyu period in different regions of Jiangsu Province from 2001 to 2020

地区	极端小时降水量阈值/mm				出现频次百分比/%
	最小值	最大值	平均值	标准差	
淮北	17.2	24.5	20.8	4.8	0.26
江淮之间	15.7	22.7	19.0	3.0	0.35
长江以南	16.1	22.4	18.7	3.6	0.37

现超记录极端小时降水的概率也较大。三个区域内的降水量分布均较为集中，尤其是江淮之间，峰度最大 (45.6)，它们的核密度最大均对应在 22~25 mm 之间。三个区域降水量也均呈正偏态分布，全省最大值出现在江淮之间，正偏度和标准差也最大，其它两地则较之右拖尾明显缩短，最大值也与图 3b 中分布相符。三个区域内各自站点的峰度、偏度及平均值等统计量之间变化的相关性基本上与全省 (表 2) 一致 (表略)。

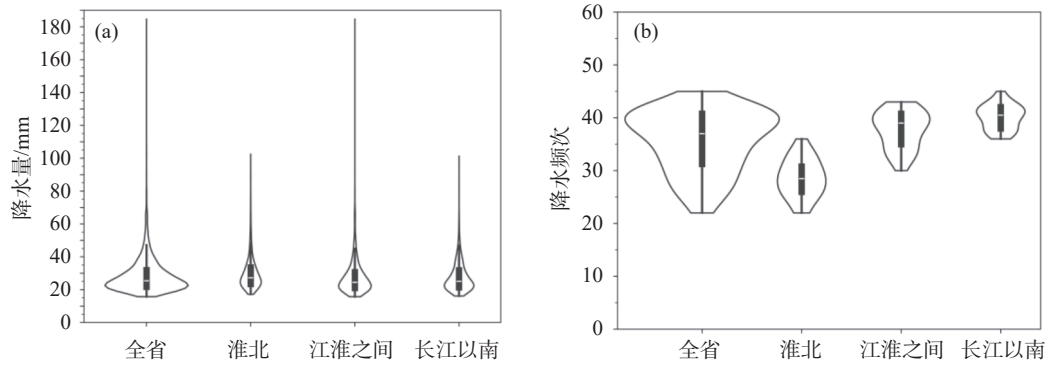


图 5 江苏全省及不同区域 2001—2020 年梅雨期极端小时降水量 (a, 单位: mm) 与降水频次 (b, 单位: 次) 的小提琴图

Fig. 5 (a) Violinplots of the precipitation (unit: mm) and (b) precipitation frequency (unit: time) of the extreme hourly precipitation in different regions of Jiangsu Province during the Meiyu period from 2001 to 2020

由图 5b 极端小时降水频次的小提琴图可见，自北向南，核曲线整体明显向右偏移，平均值和各特征分位数也依次递增。偏度仅在淮北为正，江淮之间和长江以南高频次的概率密度大，标准差较淮北偏小，这些均和梅雨期极端小时降水高频次出现在淮河以南相吻合 (图 4b 和表 3)。全省出现高频次极端小时降水的概率也偏大，核估计最大值为 40 次，峰度和偏度值均为负，标准差大于各区域，达 5.9 次。

4.3 年际变化

图 6 给出 2001—2020 年江苏全省及不同区域梅雨期逐年极端小时降水量与降水频次的小提琴图，其中淮北与长江以南采用“半”小提琴图以展示南北差异 (下同)。由图可见，无论全省还是分区域，降水量和频次小提琴的“形态”在演变中大相径庭。为了更加直观地体现小提琴图中所反映出的极端小时降水年际变化特征，表 4 给出全省降水量和降水频次有关统计量之间的相关系数。从两者的年际变幅来看，它们的标准差与平均值、核密度最大值以及最大值之间均呈显著的正相关，分区域的情况也相同 (表略)。各区域与全省的极端小时降水在变化中整体保持较强一致性，降水量和频次的平均、核密度最大值相关系数均在 0.7 以上。降水量与频次的平均值、核密度最大值以及标准差的正相关性也均通过信度为 0.05 的显著性检验。

全省的降水量和降水频次在演变中均呈明显的正态偏离 (图 $6a_1$、b_1)，表 4 中它们各自的偏度与峰度之间的相关系数均接近于 1，然而，它们各自的偏度与平均值、核密度最大值之间却均呈显著负相关。除外，降水量与频次之间的偏离程度也有着较好的对应关系，偏度和最大值的正相关性均十分显著。由图 $6a_2$、a_3 和图 b_2、b_3 可见，各区域与全省降水量和降水频次的偏离有着很强的一致性，偏度之间的相关系数均通过信度为 0.05 的显著性检验。

具体来看，由图 $6b_2$、b_3 可知，长江以南是省内年际极端小时降水最为多发的地区，平均和单站最高频次出现的年份最多 (分别有 12 a 和 10 a)；在 2003、2007 和 2020 年，所有站点均出现过极端小时降水，这种概率也远高于淮北和江淮之间 (分别仅在 2006 年和 2016 年出现过 1 次)。由图 $6a_2$、a_3 可知，与频次相对应，雨带位于长江以南的年份最为多见，有 2001、2002、2003、2004、2007、2008、2009、2010、2011、2014、2015 和 2020 年，共 12 a。在这些年份中，2001、2002、2003、2004、2009、2010、2014、2015 和 2020 年共 9 a 对应为 El Niño 年，其中仅 2003 和 2010 年为其衰减的年份，平均降水量达全省最大，核曲线整体较其它两地偏右，标准差基本达至最大 (有 11 a)，许多年份出现有异常偏离特征的右拖尾，出现最大降水的概率也极高 (有 8 a)，这些基本也均与频次对应的年份相一致。

从图 $6a_1$、b_1 还可看出，由核密度最大值表现出的极端小时降水量有逐渐增多且降水频次有逐渐增高的趋势 (线性倾向值分别为 0.6 $mm \cdot a^{-1}$ 和 0.1 $次 \cdot a^{-1}$)，极端小时降水量和降水频次的最大值也均有逐渐升高的趋势 (线性倾向值分别为 2.6 $mm \cdot a^{-1}$ 和 0.1 $次 \cdot a^{-1}$)；极端小时降水在逐年的演变中整体强度逐渐增强，也愈发极端，这也与诸多研究之中在全球变暖的大背景下，次日尺度极端降水在全球范围逐渐增强的结论一致 (Westra et al., 2015; Zheng et al., 2016)。

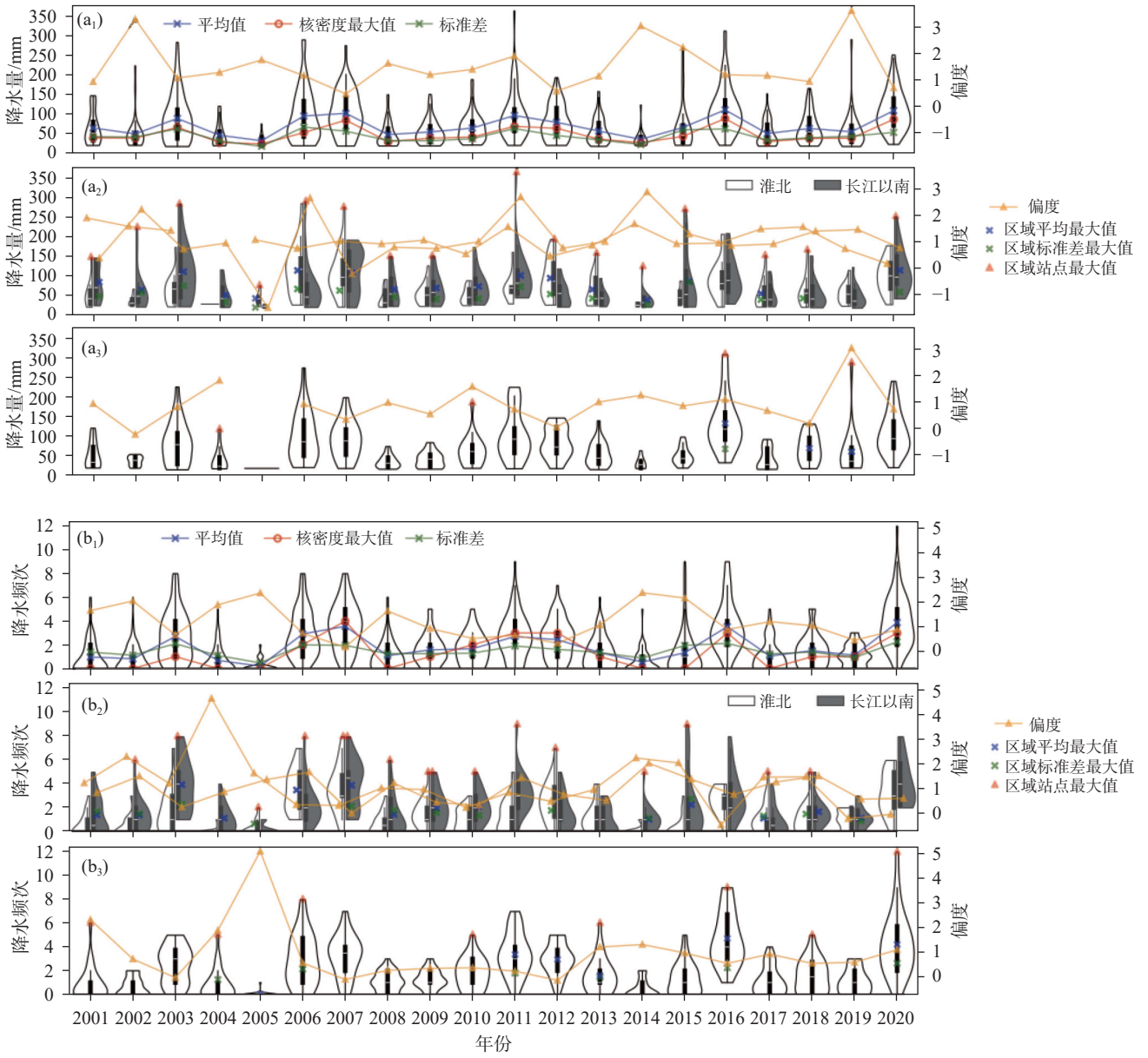


图 6 2001—2020 年江苏全省 (a_1, b_1)、淮北和长江以南 (a_2, b_2) 以及江淮之间 (a_3, b_3) 梅雨期逐年极端小时降水量 (a_1—a_3) 和降水频次 (b_1—b_3) 的小提琴图及其相关统计量 (图 a_2 和图 b_2 为“半”小提琴图)

Fig. 6 Violinplots and their statistics of (a_1-a_3) the annual variations of the extreme hourly precipitation and (b_1-b_3) the precipitation frequency during the Meiyu Period in (a_1, b_1) Jiangsu Province, (a_2, b_2) Huaibei and south of the Yangtze River, and (a_3, b_3) the area between the Yangtze River and the Huaihe River from 2001 to 2020 (panels (a_2) and (b_2) illustrate the split violinplots, respectively)

4.4 日变化

图 7 给出 2001—2020 年平均的江苏不同区域梅雨期极端小时降水量与降水频次逐时日变化的小提琴图。可见, 全省各站每个时次的平均降水量和降水频次在演变中均呈正偏态分布, 与年际变化 (表 4) 一致, 表 5 中它们各自的偏度与峰度的正相关性也均十分显著, 且还与最大值显著相关, 极端小时降水明显的日变化也体现在右拖尾处。02—10 时 (北京时, 下同) 极端小时降水的强度基本均在 60 mm 以下, 从 11 时开始, 偏度伴随大的异常值出现而达到最大, 较强偏离一直持续至次日 01 时, 最大基本均超过 60 mm (图 $7a_1$)。04—10 时, 高频次概率密度对应范围较广, 最高均超过 5 次; 而 11—次日 03 时, 各站普遍在 5 次以内, 偏度也较其它大部分时次偏小 (图 $7b_1$)。图 $7b_1$、图 $7a_1$ 对比统计还可发现, 频次与降水量的偏度以及最大值在各时次呈反相关的变化, 其中最大值通过 0.05 的显著性检验通过, 表明在频次异常偏高的站点概率偏低、单站最高频次偏低的时次, 站点降水量趋于极端的概率却更大、极端性却更强。

分区域来看, 由图 $7a_2$、a_3 可知, 长江以南降水量的变化在省内最为平稳, 而淮北平均降水量在

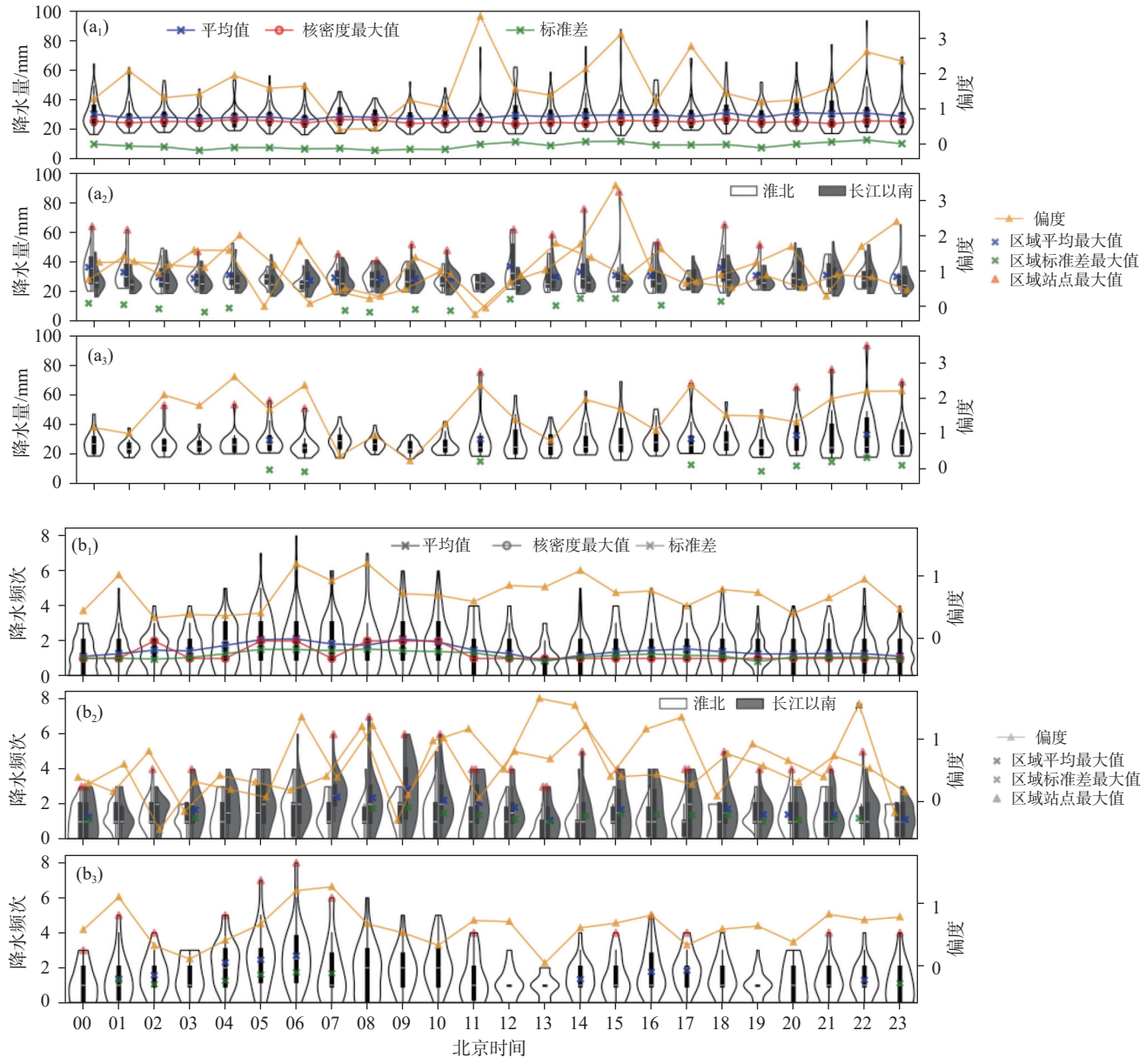


图 7 2001—2020 年江苏全省 (a_1, b_1)、淮北和长江以南 (a_2, b_2) 以及江淮之间 (a_3, b_3) 梅雨期不同时次平均的极端小时降水量 (a_1—a_3) 和降水频次 (b_1—b_3) 的小提琴图及其相关统计量 (图 a_2 和图 b_2 为“半”小提琴图)

Fig. 7 Violinplots and their statistics of (a_1-a_3) the different time variations of the extreme hourly precipitation and (b_1-b_3) the precipitation frequency during theMeiyu Period in (a_1, b_1) Jiangsu Province, (a_2, b_2) Huaibei and south of the Yangtze River, and (a_3, b_3) the area between the Yangtze River and the HuaiheRiver from 2001 to 2020 (panels (a_2) and (b_2) illustrate the split violinplots, respectively)

表 4 2001—2020 年江苏全省梅雨期逐年极端小时降水量/降水频次有关统计量之间的相关系数

Table 4 The correlation coefficients between the statistics of the annual variations of the extreme hourly precipitation/precipitation frequency during the Meiyu period in Jiangsu Province from 2001 to 2020

统计量	峰度	偏度	平均值	核密度最大值	标准差	最大值	最小值
峰度	/						
偏度	0.96*/0.94*	/					
平均值	−0.36/−0.62*	−0.49*/−0.72*	/				
核密度最大值	−0.28/−0.65*	−0.43*/−0.79*	0.96*/0.89*	/			
标准差	−0.15/−047*	−0.22/−0.53*	0.88*/0.89*	0.78*/0.67*	/		
最大值	0.17/−0.22	0.07/−0.31	0.79*/0.82*	0.74*/0.59*	0.92*/0.93*	/	
最小值	−0.12/0	−0.10/0	0.38/0	0.40/0	0.24/0	0.20/0	/

表 5 2001—2020 年平均的江苏全省梅雨期极端小时降水量/降水频次逐时日变化有关统计量之间的相关系数

Table 5 The correlation coefficients between the statistics of the hourly variations of the average extreme hourly precipitation/precipitation frequency within the day during the Meiyu period in Jiangsu Province from 2001 to 2020

统计量	峰度	偏度	平均值	核密度最大值	标准差	最大值	最小值
峰度	/						
偏度	0.97*/0.88*	/					
平均值	0.03/0.25	0.04/0.08	/				
核密度最大值	0.04/0.32	−0.05/0.11	0.21/0.74*	/			
标准差	0.53*/0.26	0.58*/0.26	0.74*/0.89*	−0.14/0.60*	/		
最大值	0.77*/0.65*	0.77*/0.49*	0.58*/0.84*	−0.08/0.69*	0.91*/0.85*	/	
最小值	−0.02/0	−0.01/0	−0.05/0	0.15/0	−0.18/0	−0.18/0	/

12—次日 04 时持续偏高, 有 14 个时次达到最大, 核曲线整体较其它两地偏右, 右拖尾跨度大。与之不同, 由图 7b$_2$、b$_3$ 可知, 淮北的频次变化不明显, 基本均在 3 次以下, 最高不超过 5 次; 降水则主要发生在长江以南, 平均有 14 个时次达到最高。07—13 时和 18—00 时是长江以南的主、次两段高峰期, 各时次平均均达最高, 其中主高峰较次高峰整体更高, 单站高频次的概率及最大值也更大, 最高达到 7 次 (08 时)。江淮之间也有两段集中期, 分别为 01—06 时及 14—17 时, 对应时次整体频次也基本达至最高, 其中主高峰出现在凌晨, 单站最高达 8 次 (06 时), 同时为全省各时次中最高; 午后则较之整体偏低, 对应两段高峰时段较长江以南偏早。

与全省 (表 5) 一致, 分区域降水量和降水频次各自的平均值与标准差之间呈正相关, 而它们之间的平均值、标准差、偏度, 包括最大值均呈反相关的变化关系 (表略)。因此, 需针对省内淮北中午至凌晨的极端小时降水突发, 以及江淮之间凌晨和长江以南上午极端小时降水多发, 且均不确定性极强的情况进行重点防范。

5 结论与讨论

本文利用江苏省 2001—2020 年 20 a 70 个国家站的逐小降水量观测资料, 以第 98 百分位法确定极端小时降水阈值, 根据地理位置和气候差异将江苏分为淮北、江淮之间和长江以南三个区域对江苏梅雨期的极端小时降水不同时空尺度的变化特征进行分析, 主要结论如下:

(1) 全省极端小时降水量呈单峰正偏态分布, 小时降水量集中在 22.7 mm, 最大值达 184.7 mm, 跨度极大。降水出现频次百分比在省内自北向南逐步递增, 频次高的站点, 年均梅雨期降水量也偏多。

(2) 小时最大降水量在全省呈多个中心不均匀分布, 当站点的降水量平均偏多、集中偏多或标准差较大时, 往往极端性也更强。

(3) 全省各站总 (平均) 极端小时降水量与降水频次对应在年际变化 (日变化) 中均呈明显正偏态分布, 但在频次异常偏高的站点概率偏多、单站频次异常偏高的年份, 站点降水量趋于极端的概率也更大、极端性也更强, 这与日变化相反。极端小时降水偏多偏强的地区位于长江以南, 且发生年份与 El Niño 的年份对应较好。全省极端小时降水在逐年的演变中呈整体强度逐渐增强、愈发极端的趋势。

(4) 07—13 时和 18—00 时是长江以南梅雨期发生极端小时降水的主、次两段高峰期, 主高峰整体频次更高; 江淮之间两段集中降水时段分别为 01—06 时及 14—17 时, 其中主高峰出现在凌晨, 对应两段高峰出现时段较长江以南偏早。淮北则是在 12—次日 04 时易突发极端小时降水。

本文通过对江苏梅雨期极端小时降水的分析, 揭示了其时空变化特征, 文中计算出的极端小时降水量阈值与沈澄等 (2015) 的引发暴洪的临界雨强相近, 得出的一些与小提琴图相关统计特征量的变化规律也更好地对梅雨期降水预报提供参考。随着加密自动站布置趋于完备, 降水的空间变化有待后期利用相关资料进行更加细致的分析。在时间变化特征和机制上, 后续工作将结合周期分析并借助对流可分辨区域模拟开展更深入的研究。

参考文献 (References):

陈刚,赵坤,吕迎辉,等.2022.河南“21·7”特大暴雨过程微物理特征变化分析[J].中国科学:地球科学,52(10):1887−1904. Chen G, Zhao K, Lyv Y H, et al. 2022. Variability ofmicrophysical characteristics in the “21·7” Henan extremely heavy rainfall event [J]. Science China Earth Sciences,52(10):1887−1904 (in Chinese). doi:10.1360/N072022−0029

陈炯,郑永光,张小玲,等.2013.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J].气象学报,71(3):367−

382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short–durationheavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warmseason [J]. Acta Meteorologica Sinica,71(3):367−382 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.035

邓彪,王春学,孙蕊,等.2022.四川省近 10 年极端小时降水时空分布特征[J].高原山地气象研究,42(4):115-120. Deng B, Wang C X, Sun R, et al. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of extreme hourly precipitation in Sichuan Province in recent 10 years [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,42(4):115-120 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2022.04.016

黄嘉佑.2007.气象统计分析与预报方法 (第三版)[M]. 北京:气象出版社:1–27. Huang J Y. 2007. Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Methods (the third edition) [M]. Beijing:China Meteorological Press:1–27 (in Chinese)

黄武斌,王研峰,刘娜, 等.2023.甘肃省暖季小时降水变化特征[J].沙漠与绿洲气象,17(4):95−100. Huang W B, Wang Y F, Liu N, et al. 2023. Spatial and temporal distribution of hourlyprecipitation in warm season in Gansu Province [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):95−100 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.04.013

江苏省气象局.2017.江苏省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社:12–16. Meteorological Bureau of Jiangsu Province. 2017. Jiangsu Weather Forecast Technical Manual [M]. Beijing:China Meteorological Press:12–16 (in Chinese)

李建,宇如聪,孙溦.2013.中国大陆地区小时极端降水阈值的计算与分析[J].暴雨灾害,32(1):11−16. Li J, Yu R C, Sun W. 2013. Calculation and analysis of the thresholds of hourlyextreme precipitation in mainland China [J]. Torrential Rain and Disasters,32(1):11−16 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2013.01.002

潘佳文,徐鸣一,吴举秀,等.2023.基于对流风暴结构的双偏振雷达 ZDR 柱识别及应用研究[J].气象学报,81(6):943−957. Pan J W, Xu M Y, Wu J X, et al. 2023. Identification of the ZDR column in dual polarization radar observations based on convective storm structure andrelated applications [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(6):943−957 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20230050

沈澄,孙燕,尹东屏,等.2015.江苏省暴雨洪涝灾害特征分析[J].自然灾害学报,24(2):203−212. Shen C, Sun Y, Yin D P, et al. 2015. Characteristic analysis of rainstorm–induced flooddisaster in Jiangsu Province [J]. Journal of Disasters Natural,24(2):203−212 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2015.0226

沈伟,袁慧玲,陈曦,等.2017.江苏暖季短时强降水的时空不均匀特征分析[J].大气科学学报,40(4):453−462. Shen W, Yuan H L, Chen X, et al. 2017. Temporal and spatial heterogeneity of warm–season short–time heavy rainfall in Jiangsu Province [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,40(4):453−462 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160824002

吴梦雯.2019.中国极端小时降水的天气背景及其与城市化的关系研究[D]. 北京:中国气象科学研究院. Wu M W. 2019. Synoptic Situations of Extreme Hourly Precipitation over China and Its Observed Link to Urbanization [D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological-Sciences (in Chinese)

杨军勇,苏爱芳.2021.河南省暖季小时极端降水时空分布特征[J].暴雨灾害,40(2):153−159. Yang J Y, Su A F. 2021. Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Henan [J]. Torrential Rain and Disasters,40(2):153−159 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.02.006

周兵,梁萍,王东阡,等.2017.GB/T 33671–2017,梅雨监测指标[S]. 北京:中国标准出版社. Zhou B, Liang P, Wang D Q, et al. 2017. GB/T 33671–2017,plum rain monitoring indices [S]. Beijing:China Standards Press (in Chinese)

Haerter J O, Berg P, Hagemann S. 2010. Heavy rain intensity distributions on varying time scales and at different temperatures [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,115:D17102. doi:10.1029/2009JD013384

Hintze J L, Nelson R D. 1998. Violin plots: A box plot–density trace synergism [J]. Statistical Computing and Graphics,52(2):181−184. doi:10.2307/2685478

Huang X, Zhang G, Tang T Y, et al. 2021. Identification of tumor antigens and immune subtypes of pancreatic adenocarcinoma for mRNA vaccine development [J]. Molecular Cancer,20(1):44. doi:10.1186/s12943–021–01310–0

Li J, Yu R C, Sun W. 2013. Duration and seasonality of hourly extreme rainfall in the central eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica,27(6):799−807. doi:10.1007/s13351–013–0604–y

Liang P, Ding Y. 2017. The long–term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916–2014 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,34(3):321−334. doi:10.1007/s00376–016–6120–0

Luo Y, Wu M, Ren F, et al. 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. Journal of Climate,29(24):8703−871. doi:10.1175/JCLI–D–16–0057.1

Westra S, Fowler H J, Evans J P, et al. 2015. Future changes to the intensity and frequency of short–duration extreme rainfall [J]. Reviews of Geophysics,52(3):522−555. doi:10.1002/2014RG000464

Zhang H, Zhai P M. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season [J]. Advance in Atmospheric Sciences,28(5):1177−1183. doi:10.1007/s00376−011−0020−0

Zheng Y, Xue M, Li B, et al. 2016. Spatial characteristics of extreme rainfall over China with hourly through 24–hour accumulation periods based on national–level hourly rain gauge data [J]. Advance in Atmospheric Sciences,33(11):1218−123. doi:10.1007/s00376–016–6128–5

Zhong S, Qian Y, Zhao C, et al. 2017. Urbanization–induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,17(8):5439−5457. doi:10.5194/acp–17–5439–2017

(责任编辑 闵爱荣)