

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

中国主雨季极端小时降水时空分布和 日变化特征^{*}

汪小康 崔春光 刘 柯 王晓芳

中国气象局武汉暴雨研究所, 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

提 要: 基于国家级气象站逐小时降水资料, 采用百分位阈值的极端降水定义方法, 统计研究了中国 1951—2021 年 4—10 月小时降水时空分布和日变化特征。结果表明, 中国主雨季极端降水阈值东南大、西北小, 存在四个分别位于华南、环渤海、长江中下游和四川盆地的大值区, 随着极端性增强, 北方小时降水阈值的增大较南方更显著, 大值中心北移。月尺度上, 小时降水的最高频次月份由南向北从 5 月推迟至 8 月, 华西地区最晚(9—10 月), 随着极端性增强, 最高频次月份由 6 月、7 月推迟到 7 月、8 月, 且地区差异减小。日变化特征上, 全国范围内小时降水频次占比, 呈现午后到夜间的谷峰主循环和后半夜到上午的次循环, 且随着极端性增强, 主循环振幅增大, 次循环峰值减小。不同地理位置看, 四川盆地的极端小时降水峰值时刻出现在凌晨, 其他三个大值区则与全国平均较为一致, 日变化振幅从南到北逐渐减小, 西部最大。小时降水峰值时刻具有空间聚集的特征, 夜间峰值主要集中在南方沿海和华北、东北, 早晨—上午峰值集中在中部、东部、西南和西北部分地区, 空间分布中出现的逐渐推迟和突变特征与海陆分布和大地形密切相关。小时降水峰值时刻空间占比与频次占比的日变化特征类似, 均有上午峰值平缓、夜间峰值陡峭的特征, 这是因为不同站点到达夜间峰值的时刻接近, 而到达上午峰值的时刻不同; 两者主要区别在随着极端性增强, 频次占比夜间主峰值显著增大, 而峰值时刻空间占比主峰值几乎不变, 这是因为频次的变化主要是由同一一些站点上的次数变化导致, 而非不同站点之间的差异。

关键词: 极端小时降水, 百分比阈值, 时空分布, 日变化

中图分类号: P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.123001

Spatio-Temporal Distribution and Diurnal Variation of Extreme Hourly Precipitation in China During the Main Rainy Season

WANG Xiaokang CUI Chunguang LIU Ke WANG Xiaofang

CMA Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring
and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: Based on the hourly precipitation data from national meteorological stations of China and the definition method of extreme precipitation with percentile threshold, this paper makes a statistical study of the spatio-temporal distribution and diurnal variation of hourly precipitation in China from April to October in 1951—2021. The results show that the hourly precipitation thresholds of the main rainy season in China are large in the southeast but small in the northwest, and there are four large threshold value centers located in South China, the Circum-Bohai Region, the middle and lower reaches of the Yangtze River and the

^{*} 国家自然科学基金项目(42230612、41705019)、中国气象局流域强降水重点开放实验室开放研究基金(2023BHR-Y30)、湖北省自然科学基金联合基金项目(2023AFD091、2023AFD092)、湖北省气象局科技发展基金项目(2022Z02、2022Q04)和中国气象局武汉暴雨研究所基本业务费专项(202402)共同资助

2023 年 7 月 10 日收稿; 2023 年 12 月 29 日收修定稿

第一作者: 汪小康, 主要从事强天气统计和机理研究. E-mail: wxk816@163.com

通讯作者: 崔春光, 主要从事强天气机理分析与数值预报研究. E-mail: cgcui@whihr.com.cn

Sichuan Basin. With the increasing extremeness, the hourly precipitation threshold in northern China increases more significantly than that in southern China, and the large threshold center moves northward. On the monthly time scale, from the south to north of China, the month with the highest frequency of hourly precipitation is postponed from May to August and the latest month is in West China (September—October). As the extremeness increases, the month with the highest frequency of precipitation is postponed from June—July to July—August, and the regional differences are reduced. In terms of diurnal variation characteristics, the frequency proportion of hourly precipitation of China presents a main valley-peak cycle from afternoon to night and a sub-cycle from midnight to morning. With the increasing extremeness, the amplitude of the main cycle increases and the peak value of the sub-cycle decreases. From the perspective of different geographical locations, the peak time of extreme hourly precipitation in Sichuan Basin is in the early morning, while the peak time in other three areas is consistent with the mean of whole China. The diurnal variation amplitude declines gradually from south to north of China, with the largest amplitude in weastern China. The peak time of hourly precipitation has the characteristics of spatial concentration. The night peak is mainly concentrated in North China, Northeast China and southern coastal areas of China, while the morning-to-forenoon peak is concentrated in the central, east, southwest and the parts of northwest of China. And the gradual delay and abrupt change in spatial distribution of precipitation peak time are closely related to land-sea distribution and large topography. The diurnal variation characteristics of the spatial proportion and frequency proportion of hourly precipitation peak time are similar, both featured with gentle peak in the morning and steep peak at night. This is because the time of the night peak is close to the time at different stations, but the time of the morning peak is not so. Furthermore, with the increasing extremeness, the main peak of frequency proportion at night increases significantly, but the main peak of spatial proportion at night is almost unchanged. This difference is because the change of frequency is mainly caused by the change of frequency at the same stations, rather than the difference between different stations.

Key words: extreme hourly precipitation, percentile threshold, spatio-temporal distribution, diurnal variation

引 言

极端降水事件指的是降水量超过一定阈值,统计意义上不容易发生的降水事件(翟盘茂和潘晓华, 2003)。近年来,在全球增暖背景下,我国极端降水事件的发生频次、持续时间、影响范围都出现了明显的增加趋势(Chen and Zhai, 2013; 江洁等, 2022; 刘远等, 2023),其引发的泥石流、洪涝等次生灾害日益严重,使人民生命财产安全遭受巨大损失(李晓婧, 2019)。

许多学者基于日降水资料对极端降水分布和变化特征开展了细致研究。我国极端降水事件发生频次整体呈逐年上升趋势(Zhai et al, 2005; 程诗悦等, 2019; 伍红雨等, 2020), 1961—2013 年我国 68% 的地面观测站极端降水日数呈现增加趋势(卢珊等, 2020); 其中 1976—2000 年极端降水正线性变化趋

势比前期的范围更大(刘学华等, 2006)。我国极端降水变化趋势具有显著区域差异,过去 50 年我国东北、华北和黄河流域的极端降水事件呈下降趋势;长江流域、东南沿海、华南、内蒙古、西北和青藏高原的极端降水事件强度则呈上升趋势(王冀等, 2008; Fu et al, 2013; 任正果等, 2014; Ma et al, 2023); 西南地区约 60% 的站点极端降水频次和强度增加(Zheng et al, 2022)。除地区差异外,我国极端降水事件的变化趋势还有明显季节差异,其在西北地区的全年、长江流域及江南地区的冬季和夏季、华北地区的冬季和春季以及东北地区的冬季表现为增长趋势(邹用昌等, 2009; 黄垭飞等, 2021)。

近年来,我国极端降水伴随极端雨强的特征愈加显著,常造成区域或测站创历史纪录的短时雨量,如“21·7”河南特大暴雨小时降水 201.9 mm(冉令坤等, 2021; 汪小康等, 2022a; 杨浩等, 2022; 苏爱芳等, 2022), 2017 年广州“5·7”极端降水 3 h 降水量

382.6 mm(伍志芳等,2018;Li et al,2021),2021年湖北随州“8·12”极端强降水6 h降水量462.6 mm(汪小康等,2022b),湖北荆门2016年7月一次极端降水8 h雨量599.8 mm(赵娴婷等,2020)等,对于上述在日内尺度出现极大降水量的极端降水事件,采用日值降水数据很难捕捉其细部特征(孔锋等,2019),采用小时降水可以更准确地描述降水过程,更真实地反映降水强度和频次时空分布特征(Trenberth et al,2003;李建等,2013)。

我国不同地区极端小时降水的时空分布具有显著差异。纬度越低的地区出现极端小时降水的月份跨度越大,华南沿海和海南4—10月均可出现;5月起,强降水逐渐向北扩展,7月极端降水范围最大,有南部沿海和华北平原两个强中心;8月底后,大部分地区极端降水大幅减弱(Luo et al,2016;吴梦雯和罗亚丽,2019)。基于固定阈值的研究表明,我国小时强降水总体上呈现从南向北递减特征,与暴雨日频次空间分布相似(Chen and Zhai,2013),分钟降水也有类似特征(战云健等,2021)。基于相对阈值的研究发现,小时降水强度阈值高值在华北、长江中下游、华南沿海和四川盆地西部,西北地区阈值偏低(Zhang and Zhai,2011;李建等,2013)。

我国极端小时降水还具有显著的日变化特征。董新宇等(2023)分析了川渝地区夏季极端降水发现,高海拔地区峰值多在前半夜,低海拔地区峰值多在后半夜,且自西向东峰值时间逐渐推迟。基于百分位阈值统计的极端小时降水日变化显示,云南、华南、华北和东北地区最大频次在傍晚,川西高原最大值在午夜,云贵高原、四川盆地最大值在深夜和清晨(Zhang and Zhai,2011)。

回顾前人工作发现,早期学者对极端降水的研究多基于日降水量,关注了日极端降水的空间分布和长期变化趋势;近年来,随着小时降水数据集的完善,在研究中逐渐被采用,但多为极端降水演变趋势分析或展示某一个阈值降水的时空分布特征。本文着眼极端降水事件自身特征,基于完备的(1951—2021年)国家站小时降水资料,对全国范围内主雨季(4—10月)的小时降水进行了统计研究,对比了不同极端性(百分比阈值)的小时降水时空分布和变化特征,聚焦了不同强度小时降水日变化的共性和特性。

在全球气候变暖背景下,我国伴随极端雨强的灾害性强降水频发。这类灾害预警和防范的难点在

于强降水发生的精确时间和精准落区,因此精细刻画我国极端小时降水的统计特征就显得尤为重要,是掌握极端降水规律并准确预报、预警的重要基础。

1 数据、定义和方法

本研究基于1951—2021年主雨季(4—10月,其中北方部分站点为5—9月;详见Luo et al,2016)小时降水,开展全国范围内不同强度小时降水特征研究。小时降水数据来自国家气象信息中心,包含中国2420个国家级台站建站以来的小时降水,该数据经过国家气象信息中心的多源数据整合,通过了极限值检查、时空一致性检查等严格的质量控制。因本文不涉及年际变率等对数据年限有严格要求的量,为了呈现更多站点的特征,数据筛选过程中并未对站点数据年限进行限制,仅要求其数据准确可靠,只去除了北方冬季无降水观测的月份和整月缺测的月份。

极端降水的定义常用固定阈值和百分比阈值两种方法。基于固定阈值的定义方法,能够反映极端降水的绝对强度(陶诗言,1980);但我国各地区之间气候态地域差异显著,降水量极值差别巨大,小时降水也具有复杂的区域特征(Luo et al,2016)。且降水量大的地区一般防洪设施较完善,防洪能力较强,而干旱地区相对较小的降水量也可能会造成严重后果,因此采用百分比阈值的定义方法更能体现极端降水事件的空间分布特征,也更符合防灾减灾的需求(Zhang and Zhai,2011)。

基于上述原因,本文采用百分位阈值方法对极端降水进行分析,具体做法为:对每个台站,将小时降水所有样本按升序排列,雨量 ≥ 0.1 mm的子样本的第 x 个百分位的雨量数值,即为该站极端降水第 x 百分位阈值(李建等,2013;孙婧超等,2019)。

文中地图底图基于标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图无修改。

2 中国主雨季极端小时降水时空分布特征

2.1 极端小时降水空间分布特征

利用1951—2021年主雨季小时降水数据,计算

得到所有站点上小时降水最大值和不同百分位的阈值,并将全国所有站点的阈值从小到大排序得到表 1,表中序位数值越小对应阈值越小。如 99.9th 百分位阈值的 25%序位数值是 27.10,计算方法是全国所有站点 99.9th 百分位阈值从小到大排序,得到的第 605 位站点(2420 站的 25%)的阈值数值 27.10 mm,也即是有 75%的站点 99.9th 百分位阈值超过 27.10 mm。

由表 1 可见,不同站点之间小时降水最大值的差异显著,最大小时降水(201.9 mm)出现在 2021

年 7 月 20 日 17 时河南郑州站,超过 10%的站点出现过 100 mm 以上的小时降水,超过 75%的站点出现过 50 mm 以上的小时降水,同时,有 10%的站点最大小时降水在 36 mm 以下,最小值仅为 3.3 mm。以 99th 百分位阈值衡量,约 25%的站点小时降水达到小时强降水($20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)的标准;以 99.9th 百分位阈值衡量,超过 75%的站点达到小时强降水的标准,接近 10%的站点达到极端小时强降水($50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)的标准。

表 1 全国站点不同百分位小时降水不同序位区间的阈值(单位:mm)

Table 1 Thresholds of hourly precipitation for different percentiles and different ordinal ranges

at national meteorological stations of China (unit: mm)

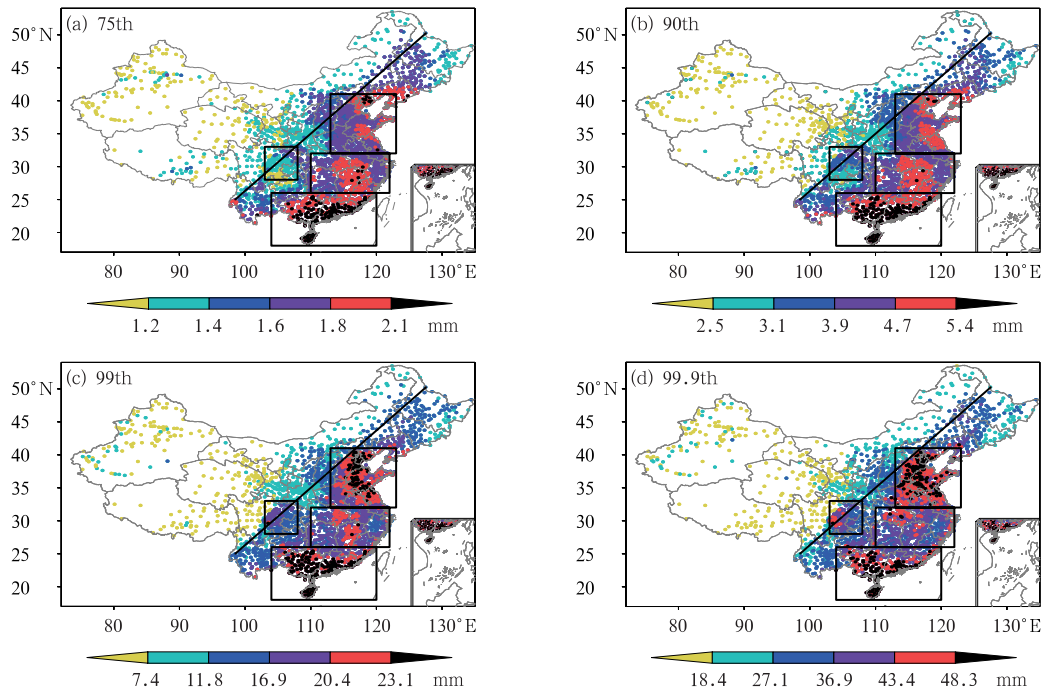
序位	最大值	99.9th	99th	95th	90th	75th
最大值	201.90	70.30	39.20	18.20	10.60	3.70
90%	100.60	48.34	23.10	9.30	5.40	2.10
75%	84.30	43.37	20.40	8.10	4.70	1.80
50%	70.90	36.90	16.90	6.70	3.90	1.60
25%	54.30	27.10	11.80	4.96	3.10	1.40
10%	35.92	18.40	7.41	3.60	2.50	1.20
最小值	3.30	3.08	2.30	1.50	1.00	0.40

根据不同百分位下所有站点阈值的排序结果,给出了站点上不同百分位阈值所处序位区间的空间分布(图 1)。不同颜色代表该站点的阈值在全国站点阈值中的排序位置,数字越大对应站点阈值越大,代表该站点降水极端性越强。图 1 显示,不同百分位下站点阈值所处序位区间的空间分布具有相似的特征,以胡焕庸线(图 1 黑色直线,瑗瑛—腾冲线)为界,西北小东南大。西部地区小时降水阈值几乎都在 10%以下,只有新疆西部、西藏南部等几个相对大值中心的阈值排序在 10%~25%。随着百分位增大,胡焕庸线以东的大值中心呈现从南向北移动的趋势,说明相比南方地区,北方地区降水极端性更强。

同一个站点的小时降水在不同百分位阈值排序中有所差异,综合考虑降水极端性、降水特征和性质及主要影响系统等因素之后,划定了四个大值区:华南地区(P1 区)、环渤海地区及其南侧(P2 区)、长江中下游地区(P3 区)和四川盆地及周边(P4 区),其中 P1 区的降水最强,P2 和 P3 区次之。四个区域不同百分位阈值(下称不同强度)小时降水差异具体表现为:(1)P1 区降水整体最强,各个百分位阈值均为从北向南增强,大值中心均位于沿海地区,区域内站点中位数降水阈值(图 2 中 P1 对应盒中线)均超过

全国所有站点排序的 90%(表 1)。随着阈值增大(极端性增强),P1 区内排序靠前的站点占比略有减小。(2)P2 区小时降水阈值从西向东增大,大值中心同样始终位于沿海地区。随着极端性增强,P2 区排序靠前的站点占比明显增大,其中 90th 百分位及以下阈值低于 P3 区,99th 百分位及以上阈值仅次于 P1 区,区域内 99.9th 百分位阈值中值(图 2d 中 P2 对应盒中线)接近 P1 区,25%分位数值(图 2d 中 P2 对应盒下端)为四个区最高。(3)随着极端性增强,P3 区站点排序略有减小,同时大值中心逐渐北移,99.9th 百分位阈值最大的区域在湖北省中东部。(4)P4 区百分位阈值始终最低,但随着极端性增强,P4 区排序靠前的站点增量最大,阈值在区域西部(四川盆地西坡)的增大更显著,99.9th 百分位阈值在雅安市及周边地区出现大值中心。

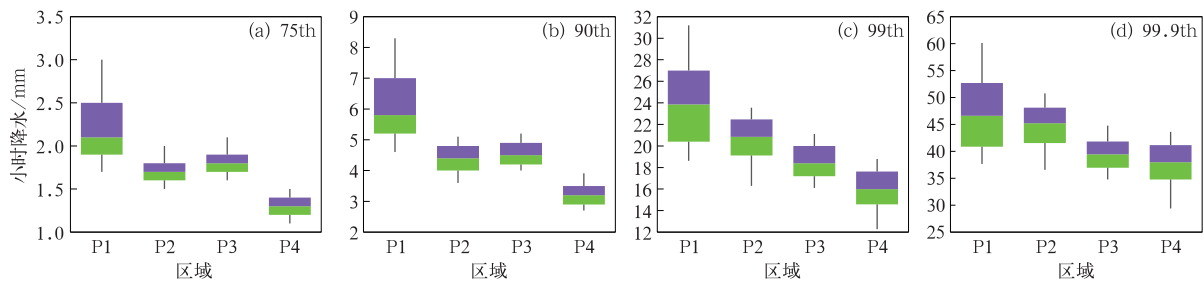
以上分析可见,中国小时降水大值主要分布在胡焕庸线的东侧,存在四个大值区,且随着极端性增强,各区演变特征不同:强度上看,P1 区始终为强中心,P3 区强度略有减少,P2 和 P4 区则有明显增强;位置上来看,全国范围内强降水中心逐渐北移,P3 区内的降水中心也有北移的趋势。极端雨强多发于 P1 和 P2 的沿海地区、P3 的湖北省中东部和 P4 的雅安市及周边地区。



注:四个黑色方框分别给出 P1(下)、P2(上)、P3(中右)和 P4(中左)四个区域的范围,下同;
黑线为胡焕庸线;均按照所有站点阈值的 10%、25%、50%、75%、90% 分为六个等级。

图 1 1951—2021 年小时降水在不同百分位阈值的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the hourly precipitation thresholds at different percentile thresholds from 1951 to 2021



注:盒上、中、下端分别对应 75%、50%、25% 分位数值,上端须最高值
代表 90% 分位数值,下端须最低值代表 10% 分位数值。

图 2 1951—2021 年四个区域内平均小时降水的不同百分位阈值统计特征

Fig. 2 Statistical characteristics of the hourly precipitation thresholds at different percentile thresholds of the four regions from 1951 to 2021

2.2 小时降水最高频次月份分布特征

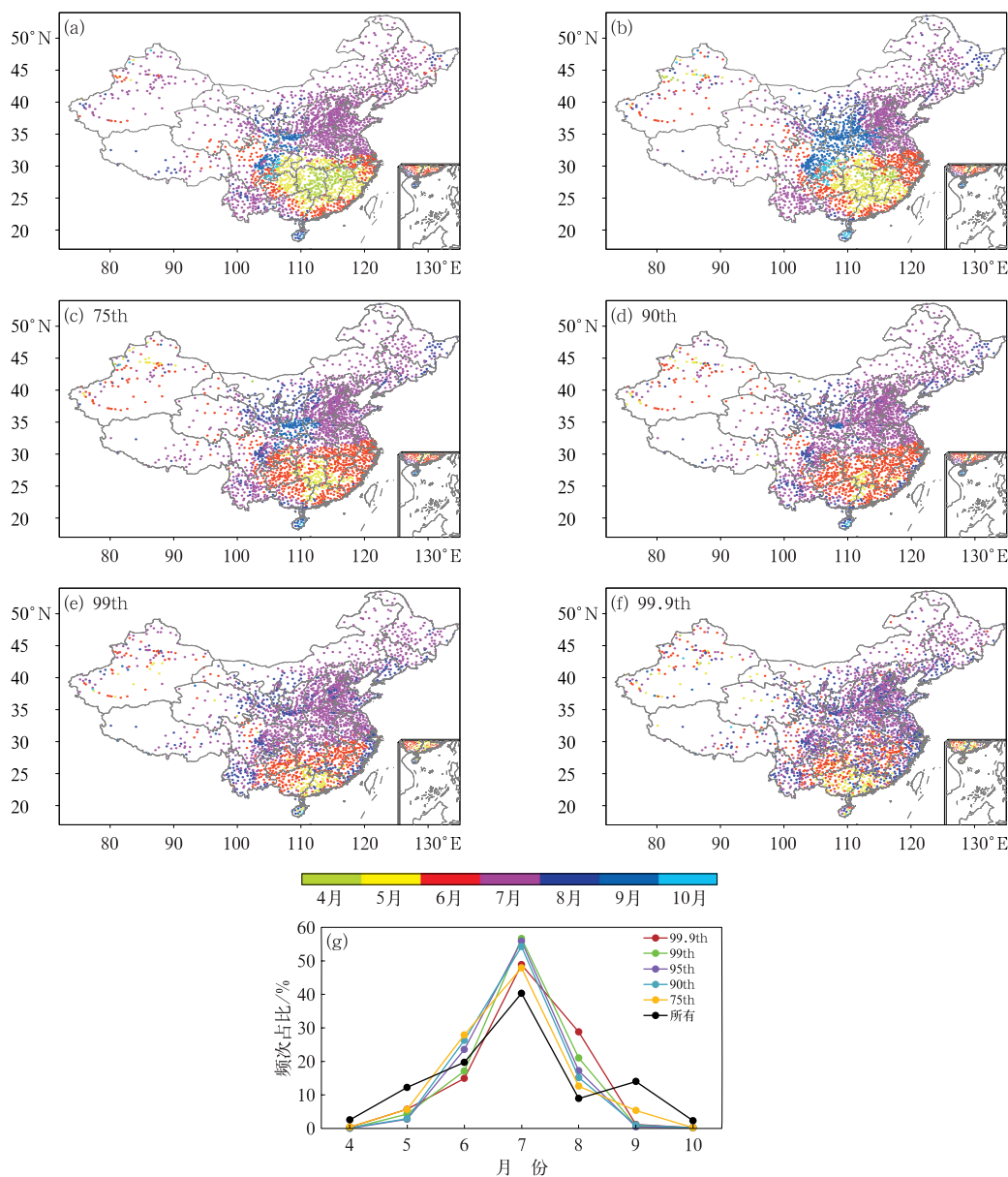
本节统计了每个站点小时降水超过 0.1 mm 的所有降水和不同强度极端小时降水出现在各个月份的次数,将次数最多的月份作为该站点的小时降水最高频次月份。图 3b 显示了所有小时降水最高频次月份的空间分布,其中最高频次月份分别为:4 月

(绿色)的站点有 62 个,主要位于湖南东北部、江西中北部;5 月(黄色)的站点集中在江汉、江南中西部和华南北部;6 月(红色)集中在长江中下游,以及华南、西南地区 and 西北地区部分站点;7 月(紫色)站点最多(976 个),集中在华东中北部、华北中东部、东北地区以及西南地区南部、西部和西藏地区,零散出现在西北地区 and 内蒙古中西部;8 月(蓝紫色)站点

主要集中在内蒙古中西部及南侧相邻的西北地区、东北地区北部,零散出现在海南、广西和广东沿岸站点以及西北地区西部;9月(蓝色)站点集中西北地区东部和西南地区东部以及海南沿岸;10月(浅蓝色)站点最少(55个),集中在四川东部、重庆西部以

及海南中部。

基于日降水(图 3a)与基于小时降水(图 3b)的所有降水最高频次月份空间分布差别主要集中在华西秋雨北区(西南地区东北部、西北地区东部、华北地区西南部及华中地区西北部)、江南地区南部(湖



注:站点小时降水最高频次月份为该站点上所有满足条件的小时降水出现次数最多的月份。

图 3 1951—2021 年(a)所有日降水(>0.1 mm), (b)所有小时降水(>0.1 mm), (c~f)不同百分位阈值小时降水最高频次月份的空间分布;

(g)所有降水和不同百分位阈值小时降水最高频次月份的月变化分布

Fig. 3 Spatial distribution of the highest frequency month of (a) all daily precipitation (>0.1 mm) and (b) all hourly precipitation (>0.1 mm), the hourly precipitation at (c~f) different percentile thresholds; (g) the monthly variation of the highest frequency month of all hourly precipitation and the hourly precipitation at different percentile thresholds from 1951 to 2021

南中南部和江西中部)和海南中部三个区域。华西秋雨北区中,基于日降水的最高频次月份在5—7月和9—10月,基于小时降水统计之后集中在9—10月;海南中部降水最高频次月份在基于小时降水统计后也从8—9月推迟至10月,这说明如果用日降水统计,会对华西秋雨北区和海南的秋季降水估计不足。江南南部部分站点基于日降水统计的最高频次月份为4月,基于小时降水的则为5月。在这些站点上,4月日降水频次高,但小时降水频次相对较低,显示多为阵性降水;相反5月为小时降水统计最大值月份,日降水则不是,意味着这些小时降水更多的集中在同一天发生,与江南地区的梅雨属性相符,这个差异显示基于日降水的统计低估了江南南部早梅的贡献。

所有降水和不同强度小时极端降水的最高频次月份呈现出如下统计特征(图3g):(1)随着阈值的增大,降水最高频次月份占比的集中性增强,所有降水的最高频次月份有较大概率出现在从4月到10月的不同月份中,而99.9th百分位阈值则有3/4以上的站点集中在7月、8月;(2)所有强度下,最高频次月份为7月的站点均最多,从所有降水占比40.31%逐渐增长到99th百分位阈值占比56.67%;(3)随着极端性增强,最高频次月份为8月的占比稳步升高,从8.92%(所有降水)到28.79%(99.9th百分位阈值),增量最大。

不同强度小时降水最高频次月份的空间分布(图3c~3f)显示,随着极端性增强:(1)中国南方最高频次为4—5月的站点急剧减少,且位置向华南移动;江汉、江淮和江南地区极端降水月份从4—6月逐渐推迟5—8月,且上下游和南北向之间的差异逐步减小;华南沿海则从6—8月提前至5—7月。(2)西北地区东部和西南地区东部9—10月的高频次月份站点稳步减少,99.9th百分位阈值标准下,站点最高频次月份基本都出现7—8月。(3)其他地区与全国统计平均的变化特征基本一致,高频次月份向7月、8月集中,且8月增加的更显著。

上述分析显示:所有降水最高频次月份的空间分布呈现明显的区域性聚集特征,华南和江南地区最高频次月份多为4月、5月、6月,对应前汛期雨季;长江中下游地区多为5月、6月、7月,对应梅汛期,且呈现上游比下游早,江南比江北早的特征;华

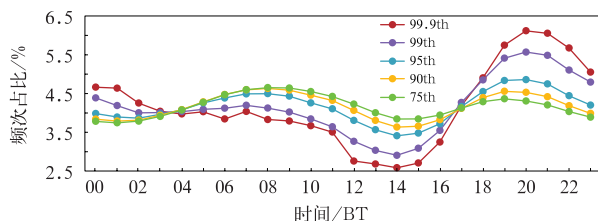
北、东北多为7—8月,对应盛夏北方强降水;华西地区多出现在9—10月,对应华西秋雨。

随着极端性增强,极端小时降水最高频次月份逐渐集中,并从6月、7月逐渐推迟到7月、8月,其中7月始终占比最高,但8月增长最快,这说明梅雨期小时降水的极端性小于盛夏时期。空间分布上,区域性聚集特征逐渐减弱,不同地区之间的差异逐渐减小,主要特征为从华南到华北从5月、6月推迟至7月、8月;江南地区虽然总降水最常发生在4月、5月,但极端小时降水更多的出现在6—8月;华西秋雨期出现极端小时降水的概率也很小。

2.3 极端小时降水频次日变化特征

上节统计分析了小时降水最频发月份的特征,本节对不同强度和不同区域小时降水频次的日变化特征展开分析。全国所有站点平均的不同强度小时降水频次占比日变化(图4)显示,95th及以下百分位阈值的小时降水日变化均呈现双峰双谷特征,峰值在08时(北京时,下同)和19—20时,两个峰值数值接近,随着阈值增大,上午峰值略有减小,下午峰值稍有增大;谷值在01—02时和14时。99th及以上百分位阈值小时降水中午到夜间为一个强的谷值(14时)—峰值(20时)循环,极端性越强,峰谷值差异越大,其中99.9th百分位阈值差异达3.5%;次峰值在00时,随后缓慢波动降低至午后谷值,后半夜—上午的循环不明显。

总体来看,18—03时,极端性越强占比越大,前半夜的峰值越大;04—16时,极端性越强占比越小,午后的谷值越小。除所有阈值均出现的午后—前半



注:频次占比=(该时次达到阈值的降水次数/所有时次即24 h达到阈值的降水次数) $\times 100\%$,下同。

图4 1951—2021年全国平均小时降水不同百分位阈值降水频次占比日变化

Fig. 4 Diurnal variation of the hourly precipitation frequency proportion at different percentile thresholds averaged over China from 1951 to 2021

夜循环以外,95th 及以下阈值还出现了后半夜—上午的循环,而 99th 及以上阈值存在位于 00 时的次峰值。

不同强度小时降水空间分布(图 1)显示全国范围内有四个大值区,图 5 以 75th 和 99.9th 百分位阈值为代表详细分析两者日变化的异同。75th 百分位阈值标准下(图 5a),P1、P2、P3 区域小时降水频次占比日变化与全国平均相类似,均有两个峰值和两个谷值。P1 区主峰值在 18—19 时,数值达到 5.3%,接近全国平均 99th 百分位阈值的峰值,次峰值在 09—10 时,谷值在 02 时和 14 时。P2 区和 P3 区的两个峰值数据接近,均在 4.5%左右,其中 P3 区夜间峰值略强,出现在 19 时,上午峰值在 10—11 时,夜间谷值在 02—03 时;P2 区则是上午峰值稍强,出现在 08 时,夜间峰值在 20—21 时,谷值在 01—02 时。P4 区日变化与其他三个区域以及全国平均则完全不同,为单峰单谷结构,峰值在 06 时,谷值在 20 时,且峰值最大(6.3%)、谷值最小(2.5%)、振幅最大(3.8%)。

99.9th 百分位阈值标准下(图 5b),由于样本量的减少(最小样本量仍超过 100 个,具有统计意义),变化不规则,但仍能看出以下特征:P1 和 P3 区仍为双峰双谷结构,主峰值均在 20 时,其中 P3 区峰值最大(7.3%);上午的次峰值 P1 区为 07 时,P3 区为 11 时,两个谷值分别出现在凌晨和午后。P2 区变为单峰谷循环,夜间的谷值和上午峰值消失,峰值在 20 时,谷值在 14 时。P4 区仍为峰值在清晨 05 时的单峰谷结构,但谷值由夜间提前到与其他三个区域一致的午后。

总的来说,75th 百分位阈值小时降水频次占比

日变化,P1、P2、P3 均为双峰双谷循环,且从南到北夜间峰值略有推迟,数值逐渐减小,夜间谷值逐渐增大,夜间的峰谷循环振幅逐渐减小;白天峰值在上午,谷值在午后。P4 区则为单峰谷结构,峰值在凌晨,日变化振幅最大。而 99.9th 百分位阈值标准下,P1、P2、P3 区主峰值均在夜间 20 时,但 P3 区最大;P2 区上午峰值消失,P1 区提前;P4 区的变化主要是谷值由夜间提前到午后。

2.4 极端小时降水峰值特征

上一节的分析发现全国平均小时降水频次占比日变化(图 4)的两个峰值特征不同,夜间峰值数值大时间短(19—20 时),而上午峰值平缓(07—11 时),高耸的夜间峰值说明站点达到峰值的时间较为接近,而平缓的上午峰值有两种可能,一是站点本身的峰值就是平缓的,二是不同站点到达峰值的时刻有所差异。为了解释这个问题,本节聚焦站点小时降水峰值时刻的精细化特征。

2.4.1 不同强度小时降水峰值特征差异

某时刻的小时降水峰值时刻空间占比定义为:小时降水日变化的峰值时刻为该时刻的站点数/全国站点数 $\times 100\%$,占比越大显示峰值时间为该时刻的站点越多。不同强度小时降水峰值时刻空间占比的日变化(图 6)显示,95th 及以下百分位阈值日变化特征基本一致,为双峰双谷循环,主峰值在 19 时,最大占比在 11%~12%,次峰值数值较低(约 6%)但持续时间较长,且极端性越强,峰值越小;谷值为 14—15 时和 02—03 时。99th 百分位阈值为单峰单谷,下午—夜间的变化特征与 95th 及以下百分位阈值类似,峰值略晚(20 时),谷值稍早(13 时),

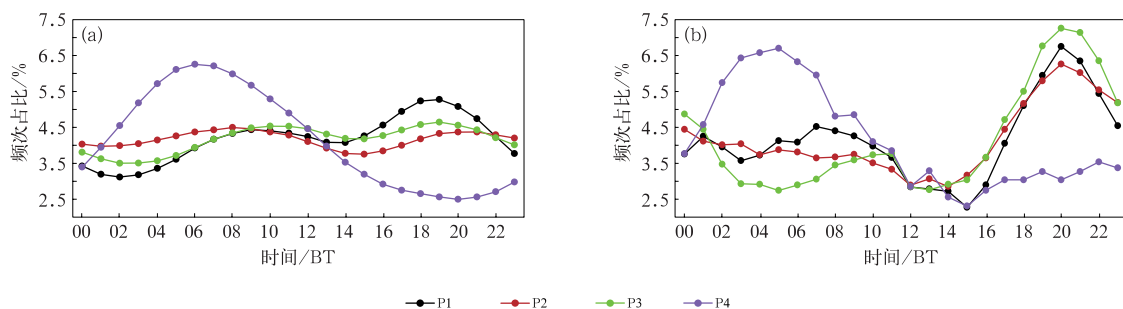
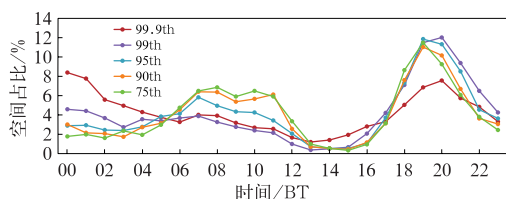


图 5 1951—2021 年不同区域平均站点小时降水频次占比日变化

(a)75th 百分位阈值,(b)99.9th 百分位阈值

Fig. 5 Diurnal variation of the hourly precipitation frequency proportion averaged over different regions (P1, P2, P3 and P4 in Fig. 1) at the (a) 75th and (b) 99.9th percentile thresholds from 1951 to 2021



注:某站点峰值时刻=该站点上超过某个阈值的降水次数最多的时刻;某时次峰值时刻空间占比=(峰值时刻为该时刻的站点数/全国站点数) $\times 100\%$ 。

图6 1951—2021年全国范围内所有站点平均的不同强度小时降水峰值时刻空间占比

Fig. 6 Spatial proportion of hourly precipitation peak time at different percentile thresholds averaged over all stations of China from 1951 to 2021

振幅最大(接近12%),夜间到上午呈小幅波动。99.9th百分位阈值则与其他阈值差异较大,其在00时和20时有两个相当强度的峰值(8%左右),谷值在13时。

总体来看,不同强度小时降水峰值时刻空间占比日变化在11—23时基本一致,均为上午减小,中午至午后达到谷值,下午迅速增大,19—20时达到峰值,最后迅速下降。00—10时不同强度之间差异较大,01—05时极端性越强,峰值时刻空间占比越大,06—11时则相反,因而95th及以下阈值降水峰值时刻空间占比次峰值出现在上午,99.9th百分位阈值则在00时出现峰值。

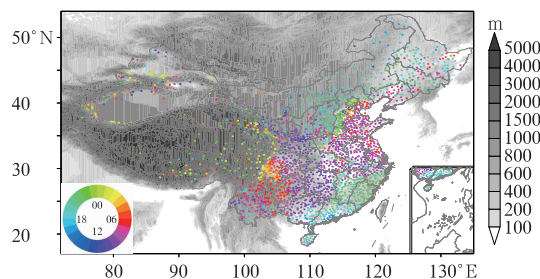
某时次的峰值时刻空间占比越大,代表峰值时刻为该时刻的站点数越多;而某时次的频次占比越大,显示该时刻出现达到阈值的降水总次数最多。小时降水峰值时刻空间占比(图6)与小时降水频次占比(图4),两者均为下午到夜间出现主谷峰,且95th及以下在后半夜到上午出现次谷峰。在频次占比日变化中出现的夜间峰值大时间短、上午峰值平缓的特征,在峰值时刻空间占比中同样出现了,这说明频次占比上午平缓的峰值很大程度上可能是不同站点的峰值时刻存在明显的差异所导致。随极端性增大,频次占比主谷峰振幅增大(峰值变大、谷值变小),而峰值时刻空间占比99th百分位及以下阈值峰谷值基本一致,可能原因是随着阈值的增大,出现在该时次的降水总次数增多/减小了,但是这些增量/减量多由峰值时刻为该时次的站点贡献,所以峰

值时刻空间占比的数值(即站点数量)没有显著变化。

2.4.2 不同强度小时降水峰值时刻空间分布特征

分析站点小时降水频次占比(图4)和峰值时刻空间占比(图6)日变化时,发现了夜间19—20时的主峰值和上午的次峰值,为了验证上一节对降水日变化特征的解释,本节进一步给出不同强度小时降水峰值时刻的空间分布。所有降水峰值时刻的空间分布(图7)显示,这两个峰值具有明显的空间聚集特征:夜间峰值(青色-绿色系)主要出现在江南中东部、华南沿海(东南丘陵地区南侧)和华北地区中西部、东北地区中北部(非沿海地区,太行山、燕山山脉西侧)。早晨—上午峰值(红色-紫色系)覆盖了中国中东部除了夜间峰值以外的大部分区域、西南地区东部和南部以及西北地区西部,中国西部其他地区的小时降水峰值时刻分布较为零散,特征不显著。

结合中国地形分布特征(图7)分析发现,西南地区和中东部地区的小时降水峰值时刻空间分布中出现了逐渐推迟和突变两种特征。具体来说:(1)逐渐推迟:华南沿海(广东、广西)和海南峰值呈现从南到北(从海岸到内陆)逐渐推迟,海岸地区峰值时刻最早,多在中午前后,进入内陆后峰值时刻逐渐推迟到下午和前半夜。华北地区小时降水峰值时刻则从西向东推迟,从山西、内蒙中部到河北中南部、北京,降水峰值从18时逐渐推迟到00时。四川盆地降水峰值时刻呈现从盆地西部(02时)到东部(10时)逐渐推迟的特征。(2)突变:东南丘陵地区出现突变,山地南侧小时降水峰值为18时前后,北侧为08时



注:24个颜色对应24个时刻。

图7 1951—2021年所有小时降水(>0.1 mm)峰值时刻(彩色圆点)的空间分布和地形(灰色阴影)

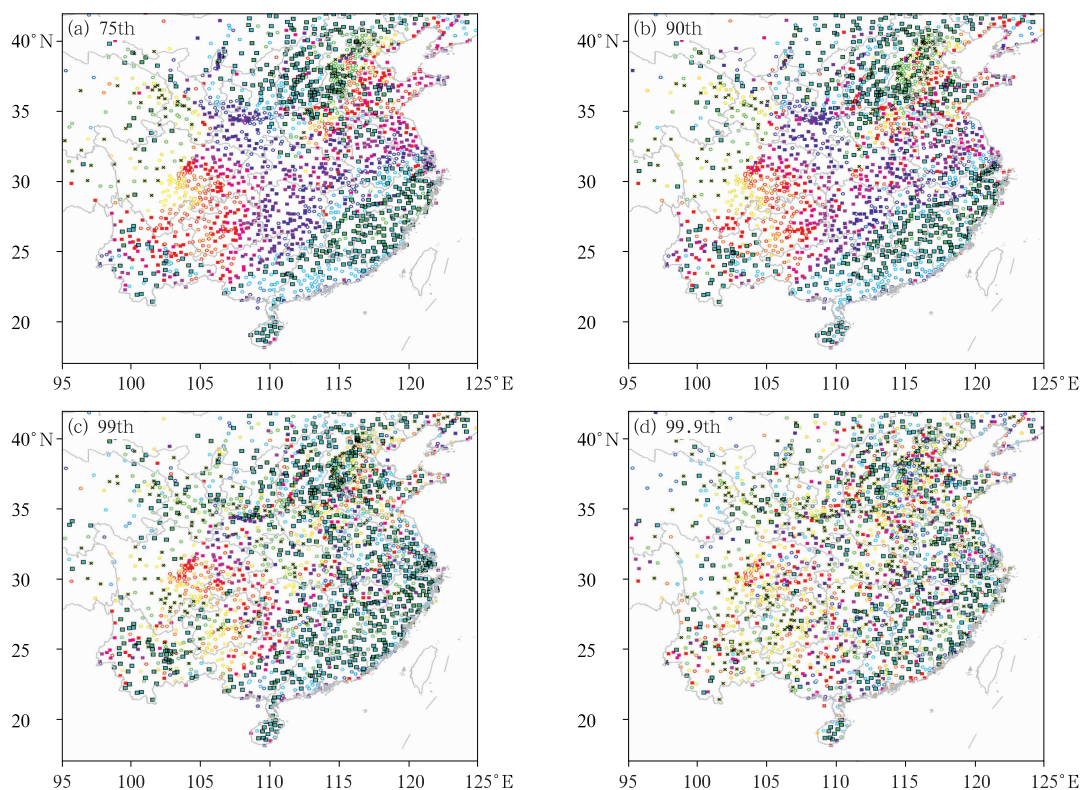
Fig. 7 Spatial distribution of peak time (colored dot) of all hourly precipitation (>0.1 mm) and terrain (grey shaded) from 1951 to 2021

前后;华北地区在靠近海岸时出现突变,从河北南部和北京的 22 时左右突变为天津和河北东部沿海的 06—10 时。

这种逐渐推迟和突变的特征与地形以及海陆分布密切相关。一般在山脉背风坡一侧,降水系统多发生东传现象(Parker and Ahijevych, 2007)。Qian et al(2015)研究发现,夜间青藏高原东坡和云贵高原的降雨东移,午夜前进入四川盆地西部,午夜至清晨降水覆盖整个四川盆地,随后自西向东减弱,上午仅在四川盆地东北部出现。动力分析显示,四川盆地降水量的日变化及其向东传播的特征与独特的盆地地形造成的青藏高原和云贵高原与四川盆地之间的山地-平原螺旋管环流密切相关,并受到中低层盛行风向和地面加热不均匀的影响。也有分析表明,西南地区午夜至清晨的降水与热力作用导致的山谷风环流、夜间加强的西南风联系密切的水汽输送有关(Wu et al, 2018)。华北地区,降水日变化位相自西北向东南逐渐滞后的现象也与山地-平原螺旋管

环流有关,沿燕山-太行山系的辐射加热导致该地区在午后易发生对流性降水,该对流降水在对流层中层平均气流的引导下向下游及东南方向传播,是华北平原地区的清晨降水峰值形成的可能原因(He and Zhang, 2010; 宇如聪等, 2014; 杨蕾, 2020)。华南沿海,降水日变化峰值时间向北(内陆)逐渐推迟的特征与华南地区的天气系统相关的低空急流(SLLJ)和边界层急流(BLJ)的日变化及其与海岸的相互作用密切相关:夜间两支急流强度更强, SLLJ 位置更偏南,两者在华南海岸地区垂直交叠,在 BLJ 出口区造成边界层内强辐合,加上地形强迫抬升和海岸辐合作用,使得沿岸地区的降水出现在上午—中午;白天两支急流减弱且 SLLJ 向北移动,受其影响广东广西中部的降水峰值推迟到下午至傍晚(Du and Chen, 2019; Du et al, 2022; 智协飞等, 2022)。

对比中国中东部地区不同强度小时降水峰值时刻的空间分布(图 8)发现,夜间峰值主要集中在 19—20 时(黑色方框标记站点),而早晨—上午峰值则均



注:颜色同图 7,区别在 19—20 时的夜间峰值有黑色方框,07—10 时的上午峰值为彩色正方形,其余时次为彩色圆环,其中 00—01 时有黑色×标志。

图 8 1951—2021 年中东部地区不同百分位阈值小时降水峰值时刻的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of peak time of the hourly precipitation at different percentile thresholds in Central and East China from 1951 to 2021

匀分布在 07—10 时(彩色正方形标记站点)。随着降水极端性的增强,降水峰值时刻的空间聚集性逐渐减弱,随机性逐渐增强;南方和北方的夜间峰值多发区内,降水峰值发生在凌晨和日间的站点增多;而中东部的早晨—上午峰值多发区内,降水峰值时刻出现在夜间的站点逐渐增多;但总体来看,峰值出现在 19—20 时的站数基本稳定,出现在 00—01 时的站点(×标记站点)数目则有明显增加。这些结论很好地验证和支撑了前述统计分析的猜想和研判。

综上所述,降水峰值时刻空间占比存在明显的日变化,且随极端性增强而改变:95th 及以下百分位阈值均为双峰双谷循环,上午峰值随着极端性增强而变大;99th 百分位阈值为单峰单谷特征;99.9th 百分位阈值则存在位于 00 时和 20 时的两个相当强度的峰值和一个午后谷值。不仅如此,中国小时降水峰值时刻具有空间聚集的特征,夜间峰值主要出现在江南中东部、华南沿海、华北中西部和东北中北部,早晨峰值则覆盖了除了夜间峰值以外的大部分地区,且峰值时刻空间分布中出现了逐渐推迟和突变两种特征,与海陆分布和大地形密切相关。随着降水极端性的增强,降水峰值时刻的空间聚集性逐渐减弱,随机性逐渐增强。

3 结论和讨论

基于中国 2420 个国家级气象观测站点的小时降水资料,本文采取百分位阈值的极端降水统计方法,系统地分析了 1951—2021 年中国主雨季(4—10 月)小时降水的时空分布和日变化特征,主要结论如下:

(1)中国主雨季小时降水阈值具有西北小、东南大的特点,四个大值中心分别位于华南地区(P1 区)、环渤海地区及其南侧(P2 区)、长江中下游地区(P3 区)和四川盆地及周边(P4 区)。其中 P1 区阈值最大,从北到南逐渐增强;P2 和 P3 区次之,P2 区阈值从西至东部沿海逐渐增大,P3 区阈值的大值中心主要在中部。随着极端性的增强,P2 区排序靠前的站点比例明显增大,P3 区大值中心位置向北移动,P4 区排序靠前的站点增量最大,又以四川盆地西坡最为显著。

(2)小时降水最高频次月份的空间分布随极端性增大发生变化。统计所有降水时,华南和江南地区最高频次月份多为前汛期雨季的 4—6 月;长江中

下游地区多为梅汛期的 5—7 月;华北、东北多为 7—8 月;而华西地区多在华西秋雨期的 9—10 月。随着极端性增强,最高频次月份逐渐集中,并从 6 月、7 月逐渐推迟到 7 月、8 月,而且空间分布上,不同地区之间的差异逐渐减小。

(3)不同强度不同区域内小时降水频次占比的日变化特征不同。小时降水均存在一个强的谷值(14 时)—峰值(19—20 时)循环,且振幅随降水极端性增强而增大。95th 及以下阈值降水还存在后半夜到上午的次循环,但峰值与极端性成反比。小时降水的日循环还具有明显区域性差异:P1、P2、P3 均为双峰(前半夜、上午)—双谷循环;P4 为单峰(凌晨)—谷循环,日变化振幅最大。随着极端性增强,P1、P2、P3 三个区域夜间峰值集中在 20 时,上午峰值提前(P1 区)或消失(P2 区);P4 区谷值由夜间提前到午后。

(4)99th 及以下阈值小时降水峰值时刻空间占比的主谷峰循环在下午到夜间,95th 及以下阈值还存在后半夜到上午的次谷峰。与此不同,99.9th 百分位阈值在 00 时和 20 时有两个相当强度的峰值。降水峰值时刻具有空间聚集的特征,夜间峰值主要集中在江南、华南沿海和华北、东北,早晨—上午峰值覆盖了除了夜间峰值以外的大部分地区;随着降水极端性的增强,峰值时刻的空间聚集性逐渐减弱,随机性增强。此外,峰值时刻空间分布中出现了逐渐推迟和突变两种特征,与海陆分布和大地形密切相关。

某时次的峰值时刻空间占比越大代表峰值时刻为该时刻的站点数越多;而某时次的频次占比越大显示该时刻出现达到阈值的降水总次数最多,两者 95th 及以下阈值均出现了下午到夜间的主谷峰和后半夜到上午的次谷峰。不同站点到达夜间峰值的时刻接近,导致夜间峰值数值大而时段集中,且随极端性增大,频次占比循环振幅显著增大,而峰值时刻空间占比没有明显变化,这是因为频次的变化主要是由同一些站点上的次数变化导致,而非不同站点之间的差异。与夜间峰值不同,上午较为平缓的峰值则是由于不同站点小时降水到达峰值的时刻有所差异造成的,所以频次占比和峰值时刻空间占比呈现类似的特征。

对比前人的研究结果与本文的结果后发现,前人基于日值资料得出的极端降水阈值的空间分布为从东南到西北地区逐渐减少,在环渤海地区及其南

侧区域(P2 区)并不存在大值中心(闵岫和钱永甫, 2008;王志福和钱永甫, 2009;江洁等, 2022),而本文基于小时降水资料则发现 P2 区存在较大的极端降水阈值,并且在随着极端性增强,逐渐超过传统强降水 P3 区(长江中下游地区)。这种差异的可能原因是 P2 区域极端降水的日变化振幅较大,极端降水多集中于 20 时左右,基于日降水量统计就会显著减弱 P2 区域降水的极端性。一方面,这里的极端降水多为突发性短时强降水,另一方面,北方地区防洪设施和意识往往不如南方地区,更易导致严重的人员和财产损失,凸显了基于小时数据尤其是不同极端性对比研究的意义。此外,月际变化方面,相比日降水,基于小时降水的统计分析强调了华西秋雨北区和海南岛中部 9—10 月的秋季降水贡献以及江南地区南部 5 月早梅降水的贡献,这对于汛期降水的预报预警及灾害防控都是极为重要的。

本文对中国主雨季小时降水进行了统计研究,关注了不同极端性小时降水的时空分布和变化特征,聚焦了不同极端性小时降水日变化的共性和特性,并初步解释了降水峰值时刻的空间分布特点的成因,及其与频次占比峰值成因之间的异同,但本文尚未对影响小时降水时空特征的原因进行深入分析,因此,对于不同区域、不同性质及不同极端性的降水事件对应的大气环流特征、表面温湿状况、地形作用、气候变化等内部变率或外部强迫因素,值得在今后的工作中进行研究和讨论。

参考文献

- 程诗悦,秦伟,郭乾坤,等,2019. 近 50 年我国极端降水时空变化特征综述[J]. 中国水土保持科学, 17(3): 155-161. Cheng S Y, Qin W, Guo Q K, et al, 2019. Review on spatio-temporal variation of extreme precipitation events in China in the past 50 years[J]. Sci Soil Water Conserv, 17(3): 155-161(in Chinese).
- 董新宁,吴遥,黄安宁,等,2023. 川渝地区夏季极端降水日变化特征分析[J]. 大气科学, 47(2): 259-272. Dong X N, Wu Y, Huang A N, et al, 2023. Analysis of diurnal variation characteristics of summer extreme precipitation in Sichuan and Chongqing[J]. Chin J Atmos Sci, 47(2): 259-272(in Chinese).
- 黄娅飞,管兆勇,蔡倩,等,2021. 近 41 年来江南地区暴雨洪涝灾害时空变化特征分析[J]. 气象学报, 79(4): 582-597. Huang Y F, Guan Z Y, Cai Q, et al, 2021. Spatiotemporal variation characteristics of rainstorms and related flood disasters in Jiangnan Region in the recent 41 years[J]. Acta Meteor Sin, 79(4): 582-597(in Chinese).
- 江洁,周天军,张文霞,2022. 近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 46(3): 707-724. Jiang J, Zhou T J, Zhang W X, 2022. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years[J]. Chin J Atmos Sci, 46(3): 707-724(in Chinese).
- 孔锋,方建,乔枫雪,等,2019. 透视中国小时极端降水强度和频次的时空变化特征(1961~2013 年)[J]. 长江流域资源与环境, 28(12): 3051-3067. Kong F, Fang J, Qiao F X, et al, 2019. Temporal and spatial variation characteristics of intensity and frequency of hourly extreme precipitation in China from 1961 to 2013[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 28(12): 3051-3067(in Chinese).
- 李建,宇如聪,孙激,2013. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征[J]. 气象学报, 71(4): 652-659. Li J, Yu R C, Sun W, 2013. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central-eastern part of China[J]. Acta Meteor Sin, 71(4): 652-659(in Chinese).
- 李晓婧,2019. 基于 GSMaP 数据的中国大陆近 5 年极端降水时空分布特征及与次生灾害关系研究[D]. 兰州: 兰州大学. Li X J, 2019. Study on the spatial-temporal distribution characteristics of extreme precipitation in recent 5 years in Mainland China and its relationship with secondary disasters based on GSMaP data [D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 刘学华,季致建,吴洪宝,等,2006. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报, 22(6): 618-624. Liu X H, Ji Z J, Wu H B, et al, 2006. Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for latest 40 years[J]. J Trop Meteor, 22(6): 618-624(in Chinese).
- 刘远,李莹,郭增元,等,2023. 2022 年全球重大天气气候事件[J]. 气象, 49(9): 1142-1148. Liu Y, Li Y, Guo Z Y, et al, 2023. Global significant weather and climate events in 2022[J]. Meteor Mon, 49(9): 1142-1148(in Chinese).
- 卢珊,胡泽勇,王百朋,等,2020. 近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象, 39(4): 683-693. Lu S, Hu Z Y, Wang B P, et al, 2020. Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events over China in recent 56 years[J]. Plateau Meteor, 39(4): 683-693(in Chinese).
- 闵岫,钱永甫,2008. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J]. 水科学进展, 19(6): 763-771. Min S, Qian Y F, 2008. Regionality and persistence of extreme precipitation events in China[J]. Adv Water Sci, 19(6): 763-771(in Chinese).
- 冉令坤,李舒文,周玉淑,等,2021. 2021 年河南“7·20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 45(6): 1366-1383. Ran L K, Li S W, Zhou Y S, et al, 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the “7·20” extreme rainstorm event in Henan Province, 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1366-1383(in Chinese).
- 任正果,张明军,王圣杰,等,2014. 1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 69(5): 640-649. Ren Z G, Zhang M J, Wang S J, et al, 2014. Changes in precipitation extremes in South China during 1961—2011[J]. Acta Geogr Sin, 69(5): 640-649(in Chinese).

- 苏爱芳,席乐,吕晓娜,等,2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. 气象,48(5):556-570. Su A F, Xi L, Lyu X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5): 556-570(in Chinese).
- 孙婧超,管兆勇,李明刚,等,2019. 华南地区7—10月两类区域性极端降水事件特征及环流异常对比[J]. 气象学报,77(1):43-57. Sun J C, Guan Z Y, Li M G, et al, 2019. Anomalous circulation patterns in association with two types of regional daily precipitation extremes over South China from July to October[J]. Acta Meteor Sin, 77(1):43-57(in Chinese).
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社. Tao S Y, 1980. Rainstorm of China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 汪小康,崔春光,王婧羽,等,2022a. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象,48(5):533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022a. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):533-544(in Chinese).
- 汪小康,杨浩,崔春光,等,2022b. 2021年中国降水异常气候特征及4次典型极端天气过程分析[J]. 暴雨灾害,41(5):489-500. Wang X K, Yang H, Cui C G, et al, 2022b. Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather processes in China in 2021[J]. Torr Rain Dis, 41(5):489-500(in Chinese).
- 王冀,江志红,严明良,等,2008. 1960—2005年长江中下游极端降水指数变化特征分析[J]. 气象科学,28(4):384-388. Wang J, Jiang Z H, Yan M L, et al, 2008. Trends of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River Valley of China during 1960—2005[J]. Sci Meteor Sin, 28(4):384-388(in Chinese).
- 王志福,钱永甫,2009. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. 水科学进展,20(1):1-9. Wang Z F, Qian Y F, 2009. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China[J]. Adv Water Sci, 20(1):1-9(in Chinese).
- 吴梦雯,罗亚丽,2019. 中国极端小时降水2010—2019年研究进展[J]. 暴雨灾害,38(5):502-514. Wu M W, Luo Y L, 2019. Extreme hourly precipitation over China: research progress from 2010 to 2019[J]. Torr Rain Dis, 38(5):502-514(in Chinese).
- 伍红雨,李芷芹,李文媛,等,2020. 基于区域自动气象站的广东极端强降水特征分析[J]. 气象,46(6):801-812. Wu H Y, Li Z H, Li W Y, et al, 2020. Characteristics analysis of extremely severe precipitation based on regional automatic weather stations in Guangdong[J]. Meteor Mon, 46(6):801-812(in Chinese).
- 伍志方,蔡景就,林良勋,等,2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象,44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,等,2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象,48(5):571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):571-579(in Chinese).
- 杨蕾,2020. 中国夏季降水日变化的空间分布特征研究[D]. 南京:南京师范大学. Yang L, 2020. Study on the characteristics of spatial distribution for diurnal rainfall variation in summer over China[D]. Nanjing: Nanjing Normal University(in Chinese).
- 宇如聪,李建,陈昊明,等,2014. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报,72(5):948-968. Yu R C, Li J, Chen H M, et al, 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteor Sin, 72(5):948-968(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).
- 翟盘茂,潘晓华,2003. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报,58(S1):1-10. Zhai P M, Pan X H, 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th Century[J]. Acta Geogr Sin, 58(S1):1-10(in Chinese).
- 赵娴婷,王晓芳,王珏,等,2020. 2016年7月18—20日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象,46(4):490-502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al, 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016[J]. Meteor Mon, 46(4):490-502(in Chinese).
- 智协飞,李佳,张玲,2022. 双低空急流影响下华南初夏降水日变化的时空分布特征[J]. 大气科学学报,45(3):444-455. Zhi X F, Li J, Zhang L, 2022. Temporal and spatial distributions of diurnal cycle of early-summer precipitation in South China influenced by double low-level jets[J]. Trans Atmos Sci, 45(3):444-455(in Chinese).
- 邹用昌,杨修群,孙旭光,等,2009. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异[J]. 南京大学学报(自然科学),45(1):98-109. Zou Y C, Yang X Q, Sun X G, et al, 2009. Seasonal difference of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China[J]. J Nanjing University (Nat Sci), 45(1):98-109(in Chinese).
- Chen Y, Zhai P M, 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951—2010[J]. Climate Res, 57(2):143-155.
- Du Y, Chen G X, 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II: convection initiation[J]. Mon Wea Rev, 147(2):543-565.
- Du Y, Shen Y A, Chen G X, 2022. Influence of coastal marine boundary layer jets on rainfall in South China[J]. Adv Atmos Sci, 39(5):782-801.
- Fu G B, Yu J J, Yu X B, et al, 2013. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961-2009[J]. J Hydrol, 487:48-59.
- He H Z, Zhang F Q, 2010. Diurnal variations of warm-season precipitation over northern China[J]. Mon Wea Rev, 138(4):1017-1025.
- Li M X, Luo Y L, Zhang D L, et al, 2021. Analysis of a record-breaking rainfall event associated with a monsoon coastal megacity of

- south China using multisource data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 59(8):6404-6414.
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. J Climate, 29(24):8703-8719.
- Ma Q R, Li Z W, Lei H J, et al, 2023. Interannual variability of extreme precipitation during the boreal summer over Northwest China[J]. Remote Sens, 15(3):785.
- Parker M D, Ahijevych D A, 2007. Convective episodes in the east-central United States[J]. Mon Wea Rev, 135(11):3707-3727.
- Qian T T, Zhao P, Zhang F Q, et al, 2015. Rainy-season precipitation over the Sichuan Basin and adjacent regions in Southwestern China[J]. Mon Wea Rev, 143(1):383-394.
- Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al, 2003. The changing character of precipitation[J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(9):1205-1218.
- Wu Y, Huang A N, Huang D Q, et al, 2018. Diurnal variations of summer precipitation over the regions east to Tibetan Plateau[J]. Climate Dyn, 51(11/12):4287-4307.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. J Climate, 18(7):1096-1108.
- Zhang H, Zhai P M, 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season[J]. Adv Atmos Sci, 28(5):1177-1183.
- Zheng G W, Li Y, Chen Q L, et al, 2022. The increasing predominance of extreme precipitation in Southwest China since the late 1970s[J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 15(5):100227.

(本文责编:俞卫平)