

中国短时强降雨对暴雨的贡献特征

周晓敏¹ 田付友¹ 郑永光¹ 孙建华² 王超¹

1 国家气象中心, 北京, 100081

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京, 100029

摘要: 中国暖季暴雨有显著的对流性特征, 但尚不明确对流导致的短时强降雨对不同等级暴雨的贡献程度。本文利用 1951~2019 年的逐时降水资料, 统计分析了中国两种强度的短时强降雨 (小时雨量 ≥ 20 mm 和小时雨量 ≥ 50 mm, 分别简记为 HR20 和 HR50) 和不同等级暴雨之间的关系, 得到了两类短时强降雨对不同等级暴雨的贡献特征。结果显示, 短时强降雨发生频率高的暴雨分布区域与暴雨日数多的区域并不一致, 在华北南部到黄淮地区和西南地区到华南地区短时强降水对暴雨的影响最为显著, 其超过 50% 的暴雨中伴随 HR20, 华北南部和华南中部地区暴雨中发生短时强降雨的占比超过了 70%; 随着暴雨等级的提升, 伴随短时强降雨的比例逐渐增大, 尤其 HR50 的占比增加显著, 超 60% 的特大暴雨中伴有 HR50, 表明暴雨越强, 其对流性越强。在华北南部到黄淮地区、西南地区东部和华南地区, 短时强降雨雨量对暴雨雨量的贡献也最大, 且随着暴雨等级的提升, 这些地区短时强降雨雨量在暴雨总雨量中的占比呈显著增长的趋势, HR50 的贡献增幅超过 100%; 而江淮江南等地区短时强降雨雨量的贡献较小, 随暴雨强度等级的增强其增大程度也相对不明显。此外, 伴随有 HR20 的暴雨、大暴雨平均日雨量较无短时强降雨的暴雨平均日雨量分别多 20% 和 40% 以上, 进一步印证了中国暴雨对流性强的特点。

关键词: 短时强降雨, 暴雨, 雨量贡献, 气候特征

资助项目 国家重点研发计划 (2017YFC1502003, 2018YFC1507504), 国家自然科学基金项目 (41975056、42175017)。
Funded by National Key R&D Program of China (2017YFC1502003, 2018YFC1507504), National Natural Science Foundation of China (Grants 41975056、42175017).

作者简介 周晓敏, 女, 工程师, 主要从事强对流天气预报技术研究, Email: zhouxm@cma.gov.cn

通信作者 田付友, 男, 高级工程师, 主要从事中尺度气象学研究, E-mail: tianfy@cma.gov.cn

Contribution of Short-Duration Heavy Rainfall to Rainstorm in China

ZHOU Xiaomin¹ TIAN Fuyou¹ ZHENG Yongguang¹ SUN Jianhua² WANG Chao¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics,

Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

Abstract The convective characteristics of rainstorms in China are considerable, but the statistical relationship between rainstorms and short-duration heavy rainfall, which is one of the severe convective weather, remains unclear. The characteristics of the contribution of two types of short-duration heavy rainfall (hourly rainfall ≥ 20 mm and hourly rainfall ≥ 50 mm, referred to as HR20 and HR50, respectively) to different intensities of rainstorms are obtained by analyzing the hourly rainfall data during 1951 and 2019. The results show that the area of rainstorm with high frequency of short-duration heavy rainfall is not consistent with the area of high frequency rainstorms. Short-duration heavy rainfall has the most significant impact on rainstorms over the southern part of North China, the Huanghuai River Basin and the Southwest to South China, where HR20 account for more than 50% of the rainstorm days. The southern part of North China and the central part of South China accounting for more than 70% is the highest. Furthermore, the proportion of short-duration heavy rainfall gradually increases as the rainstorm intensity enhances, especially the HR50 has increased significantly. More than 60% of the extreme torrential rain days are accompanied by HR50, indicating that the stronger the rainstorm, the more significant the convection. The total precipitation amount produced by short-duration heavy rainfall contribute the most to the rainstorm over regions such as the southern part of North China, Huanghuai area, the eastern part of Southwest China and southern China. The contribution of the short-duration heavy rainfall also increases significantly as the rainstorm intensity enhances, especially that of HR50 increased by more than 100%. In areas such as Jianghuai and South China, the contribution of the short-duration heavy rainfall is smaller, and its increase is relatively insignificant with the increase of the intensity of the rainstorm. In addition, when there is a short-duration heavy rainfall (HR20), the amounts of rainstorm and heavy rainstorm increase by an average of 20% and 40% respectively compared to where no short-duration heavy rainfall accompanied. It further

demonstrates the convective characteristics of rainstorms in China.

Key words: short-duration heavy rainfall, rainstorm, rainfall contribution, climatic characteristics

1 引言

短时强降雨是强对流天气现象的一种,指短时间内产生剧烈降雨的天气。国家级天气预报业务规范中将小时雨量超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水事件定义为短时强降雨,小时雨量超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水事件定义为强短时强降雨事件(俞小鼎,2013;郑永光等,2017)或极端强降水事件(Doswell III,2001;郑永光等,2015)。根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)规定,暴雨、大暴雨和特大暴雨分别为日降水量在 $50 \sim 100 \text{ mm}$ 之间、 $100 \sim 250 \text{ mm}$ 之间和不小于 250 mm 。因此,短时强降雨关注的是短时间内的强降水,而暴雨则是日时间尺度的降水总量,但二者均能造成严重的洪涝等灾害。中国气候中所指每年我国因暴雨洪涝灾害造成的人员、经济损失是所有气象灾害之首(郑国光等,2019)。由于短时强降雨也能达到暴雨标准,因此,在一些灾害分析中并未对二者进行明确区分。

短时强降雨由于其降雨时间短、强度大,更容易造成局地、突发的洪涝和衍生灾害,比城市内涝、农田渍涝及滑坡和泥石流等(毛冬艳等,2018;孙继松,2017),相比于长持续时间的降水造成的暴雨,短时强降雨的预报预防也更为困难。进入21世纪以来,中国区域性的极端降水频率和强度有增加的趋势(林建和杨贵名,2014;Zhai et al,2005),加之中国地形复杂,短时强降雨和暴雨引发的山洪、滑坡泥石流等气象灾害也呈明显上升趋势,特别是在中国南方地区,每年都会因极端降雨造成严重的经济损失和人员伤亡(郁珍艳等,2011;江志红等,2007;李丽平等,2010)。

中国暴雨具有很强的对流性的特点。陶诗言(1980)在上世纪即指出,中国的暴雨过程和短时强降雨联系密切,暴雨具有显著的对流性特点。由于衡量暴雨和短时强降雨时间跨度的不同,一次短时强降雨事件不一定形成暴雨,但持续性或反复发生的短时强降雨必然形成暴雨甚至特大暴雨事件;一次暴雨事件也不一定包含短时强降雨,如雨强仅为 3 mm h^{-1} 左右的持续性层状云降水,其 17 h 的持续降水量也可达到暴雨量级。Doswell III et al (1996)对此有过很形象的描绘,当高强度的降水持续长时间影响同一个共同地点时,即可形成极端暴雨。大暴雨或特大暴雨天气过程中存在中小尺度的短时强降雨过程的例子数不胜数,特别是极端性的大暴雨、特大暴雨过程中,往往伴有高强度的短时强降雨(田付友等,2018)。2012年“北京7·21”暴雨过程是一次大范围的大暴雨、局地特大暴雨过程(方翀等,2012;孙建华

等, 2013), 全市平均日降雨量 190.3mm, 暴雨中心更是达到了 460mm。此次过程中的最大小时雨量 100.3mm, 并普遍伴随有小时雨量 40~80 mm 的短时强降雨。2020 年 6~7 月长江中下游地区发生的极端降水, 不仅长时间降雨的累积效应明显, 降水强度的极端性也非常突出(陈涛等, 2020; 张芳华等, 2020)。2021 年 7 月 20 日河南的极端暴雨更是极端短时强降雨致灾的显著个例, 此次强降水过程中, 郑州站从 7 月 20 日 13 时到 23 时的连续 9 个小时均出现短时强降雨, 极端小时雨量达 201.9 mm, 直接贡献了当日(20 日 08 时-21 日 08 时)日雨量(624mm)的 75%, 高强度的短时强降雨显著加重了暴雨洪水的泛滥致灾程度。

短时强降雨和暴雨的关系密切, 分别针对二者的研究结果已有很多(陈炯等, 2013; 闵爱荣等, 2016; 田付友等, 2017; 毛冬艳等, 2018), 关于二者之间定量关系的研究还较少, 周璇等(2015)研究表明超过 60%的短时强降水(阈值为 15mm/h)发生在暴雨日, 同时短时强降水暴雨日数的比例普遍高于非短时强降水暴雨日。但对于短时强降雨对不同等级暴雨的直接贡献, 目前尚缺乏全面的认识和客观的数据支撑。本文希望通过分析短时强降雨对暴雨的贡献, 尤其是短时强降雨对不同等级暴雨的定量贡献, 为提升定量降水预报的准确性, 改进伴有对流性降雨的暴雨预报, 提升中小河流防汛预警准确性等提供参考。

2 资料与方法

本研究使用 1951~2019 年 2420 个国家站逐小时降水资料。站点分布显示(图 1b), 除青藏高原西部、新疆南部, 内蒙古西部荒漠地区等地方测站较为稀疏外, 中国大部分地区均有一定数量的站点分布。资料质量控制是进行后续处理的基础, 根据质量控制码剔除了可疑及错误的数据和缺测数据。1965 年之前的观测站点少于 1000 站(图 1a), 后续站点数量逐渐增多, 为便于对比, 以连续可用年限是否达到 30 年(气候平均值参考年份)对站点进行了区分(图 1b): 连续观测记录超过 30 年的站点主要分布在我国中东部地区(图 1b 中蓝色站点), 覆盖了我国中东部主要的降雨区。观测记录长度不足 30 年的站点主要分布在我国西部(图 1b 中红色站点), 多为近些年新建的观测站点。本研究主要基于连续观测记录超过 30 年的站点开展。

对于筛选的质控后的小时降水资料, 以北京时 20 时为日界, 计算日累计降水量是否达到了相应的暴雨等级, 而暴雨日的平均小时雨量通过除以 24 得到; 暴雨中发生短时强降雨的概率为伴有短时强降雨的暴雨日数与总暴雨日数之比; 而短时强降雨对暴雨的贡献为短时强降雨雨量之和与该暴雨日的总雨量之比。针对暴雨、大暴雨和特大暴雨三种等级的暴雨和

HR20 与 HR50 两种强度的短时强降雨，均对相关指标进行了计算。需要说明的是，在 HR20 的统计结果中均包含了 HR50。尽管 HR50 发生频率较低（俞小鼎，2013；陈炯等，2013；郑永光等，2017），但考虑 HR50 的极端性，同样对其做了较为详细的分析。

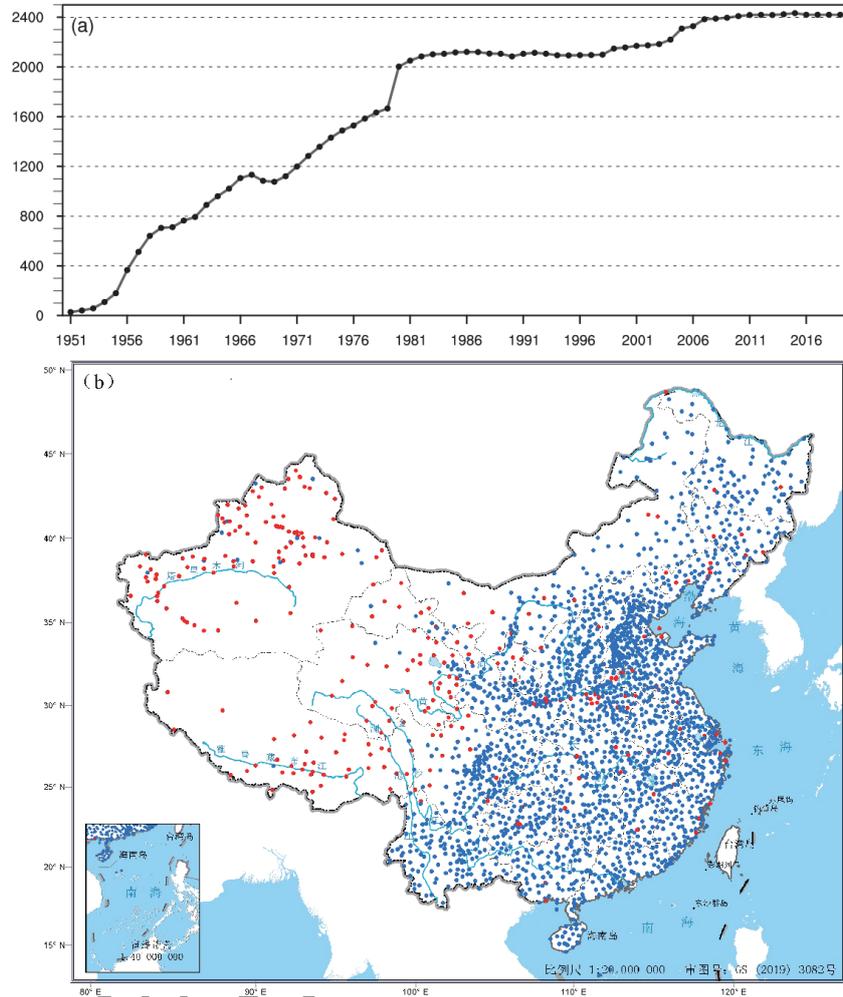


图 1 (a) 1951-2019 年期间国家观测站数量变化曲线；(b) 中国小时降水资料站点分布，蓝色表示站点在 1951-2019 年间连续记录超过 30 年，红色表示站点连续记录不足 30 年

Fig.1 (a) The number of national gauge stations from 1951 to 2019; (b) Hourly rain gauge stations in China, blue marks represent continuous records for more than 30 years, while red marks represent continuous records for less than 30 years from 1951 to 2019

3 不同等级暴雨数空间分布

基于 1951~2019 年逐站点不同等级的暴雨日数分布显示（图 2a），暴雨日数从东南向西北逐渐减少，华南及江南中部出现暴雨的频次最高，年平均日数在 5 天以上；而在西北地区东部、华北西部到东北地区北部，暴雨年平均日数不足 1 天，这一结果与鲍名和黄荣辉(2006)

所得结果基本一致。大暴雨的日数分布显示（图 2b），易于出现大暴雨的区域比出现暴雨的区域显著缩小，大值区主要在华南及江南东部沿海地区以及长江流域鄂皖赣三省交界处，四川盆地西部也是大暴雨的易发区域，可能与四川盆地的地形有关，以上地区大暴雨年平均数可达 2 天，其它大部分地区的大暴雨年平均日数均不足 1 天。对于特大暴雨，研究时段内发生特大暴雨的站点较少，仅华南沿海地区在研究时段内总和超过 5 日以上，其他地区大多只有 1~2 日（图略）。

两种强度短时强降雨年均日数的分布与不同等级的暴雨分布有很大程度的相似，HR20 在华南到江南中东部出现日数最多（图 2d），年平均 5 天以上，范围较暴雨频发区域更广；HR20 平均日数不足 1 天的区域主要分布在西北地区东部、华北西部，范围则比暴雨稀发区域更小；在东北地区、华北东部年均日数都超过了 1 天，黄淮中部、江淮中部达 3 天以上。总体我国 HR20 同样呈现从东南向西北递减的分布特征，年均日数比暴雨数略多。HR50 的发生频次明显减少（图 2e），仅华南沿海地区以及四川盆地西部有超过 0.5 天/年，其他大部分地区年均日数不足 0.3 天。整体空间分布与大暴雨数相似，日数相比大暴雨略少，但明显多于特大暴雨数，表明特大暴雨和 HR50 的发生都属于极端现象。

在我国西藏和西北地区中西部，研究显示该地区的年降水量大多不足 500 mm（闵爱荣等，2016），暴雨的较少出现，大部分站点未出现过暴雨和特大暴雨，短时强降雨的发生频次也很少，仅个别站点发生过 HR50，所以本文在后面只讨论我国中东部地区（97E 以东）的情况。

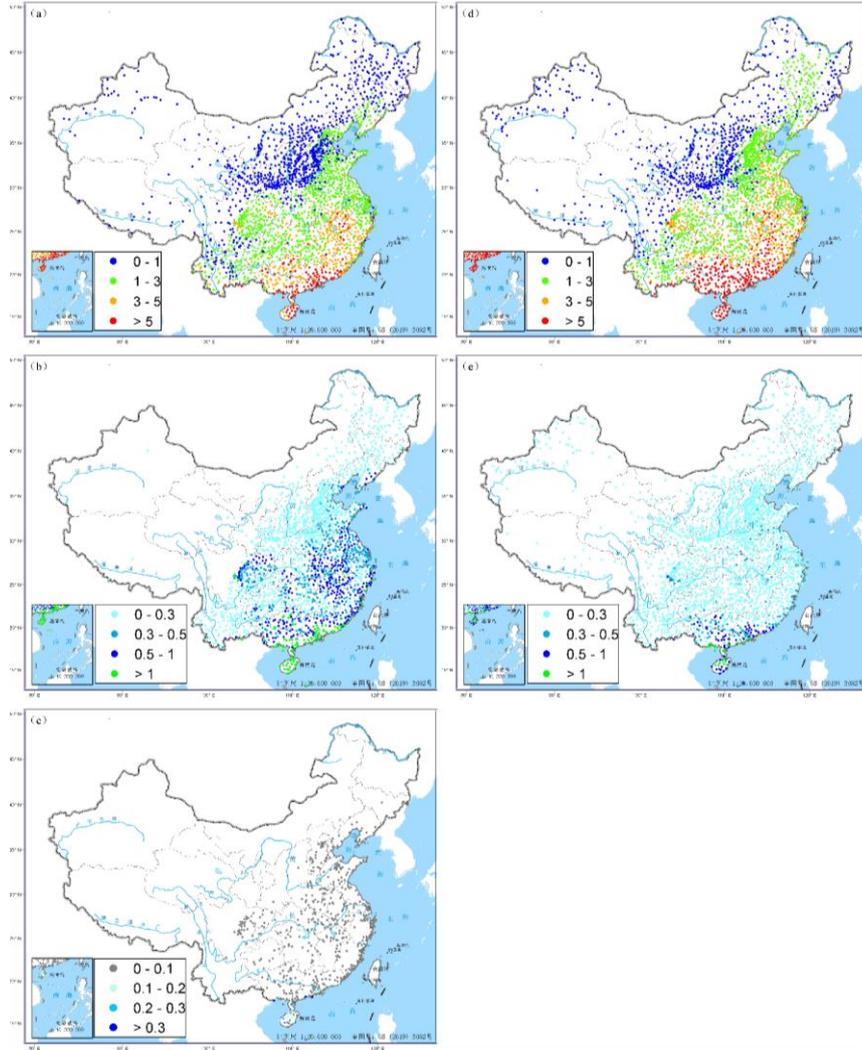


图2 不同等级暴雨和不同强度短时强降雨年平均日数分布：(a-c) 分别是暴雨、大暴雨和特大暴雨，(d-e) 分别是HR20和HR50（单位：天）

Fig.2 Distribution of annual average rainstorm days and short-duration heavy rainfall days of different grads: (a-c) are heavy rainfall (HR), torrential rainfall (TR), and severe torrential rainfall (STR), (d-e) are HR20 and HR50, respectively (unit: d)

4 不同等级暴雨中两种强度短时强降雨时空分布

暴雨可由强对流在短时间内产生的短时强降雨造成，也可由稳定少动的持续性弱对流或稳定的层状降水产生。针对暴雨的分析显示，暴雨中HR20超过50%的区域主要有三个（图3a）：分别是西南地区中东部到华南地区、华北南部到黄淮一带以及东北地区中西部，其中两广交界地区、京津冀鲁苏豫地区、黑龙江西南部和吉林西部地区超过了70%。这种分布主要与不同区域的地形分布有密切关系，在平原和谷地区域的短时强降雨相对较多（陈炯等，

2013); 暴雨中出现 HR50 的比例整体较低 (图 3d), 超过 10% 的区域集中在华南南部和冀鲁豫交界地区, 与图 3a 中的大值中心基本一致。

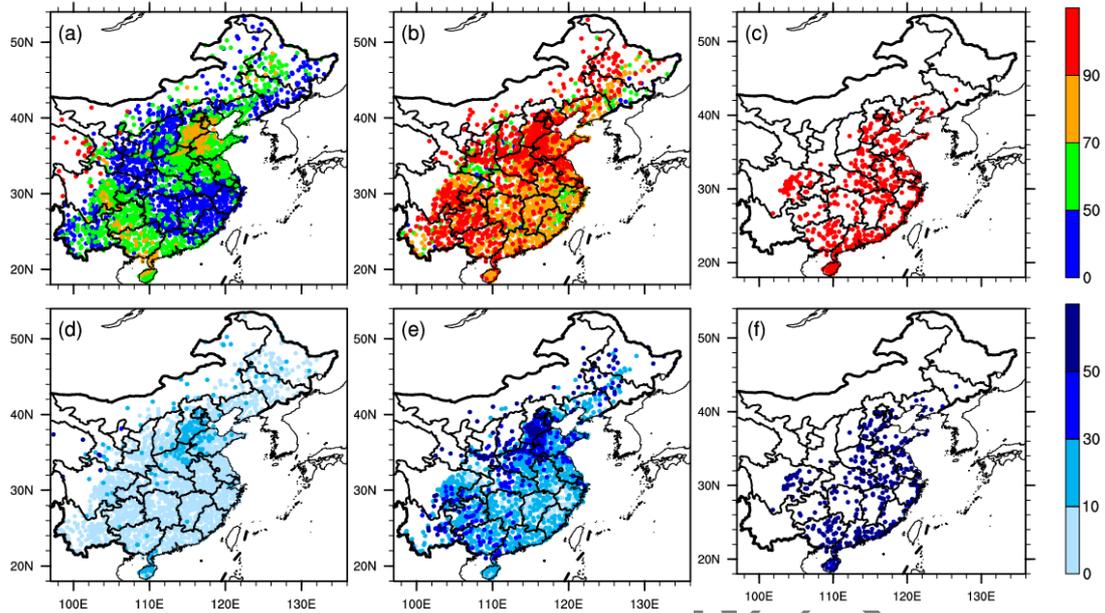


图 3 1951-2019 年中国 (a、d) 暴雨、(b、e) 大暴雨和 (c、f) 特大暴雨中出现 (a-c) HR20 和 (d-f) HR50 的日数与总暴雨数的比例 (单位: %)

Fig.3 The ratio of the number of rainstorm days with short-duration heavy rainfall to the total number of rainstorm days in (a, d) heavy rainfall, (b, e) torrential rainfall and (c, f) severe torrential rainfall, (a-c) and (d-f) refer to rainstorm days with HR20 and HR50, respectively (Unit:%)

对于大暴雨, 发生 HR20 的比例显著增高 (图 3b), 我国中东部大部分地区超过了 70%, 只在江南中东部武夷山东部和陕西南部低于 70%; 发生 HR50 的比例也明显增大 (图 3e), 西南地区以及陕西、山西南部大暴雨中 HR50 的局地占比超过 60%。特大暴雨属于特别极端的天气事件, 99% 以上的特大暴雨中伴有 HR20, 而且超过 50% 的特大暴雨中伴有 HR50 (图 3c 和 f、图 4c), 表明特大暴雨的对流性尤其显著, 高强度的短时强降雨是特大暴雨的重要组成部分。

以上结果表明, 暴雨过程中常有短时强降雨发生, 且存在明显的区域特征, 短时强降雨发生高频区域集中在东北地区中西部、华北南部到黄淮一带以及西南地区和华南地区。此外, 随着暴雨量级的增大, 短时强降雨占比更高、强度更大, 尤其对于特别极端的特大暴雨, 短时强降雨的贡献很大。

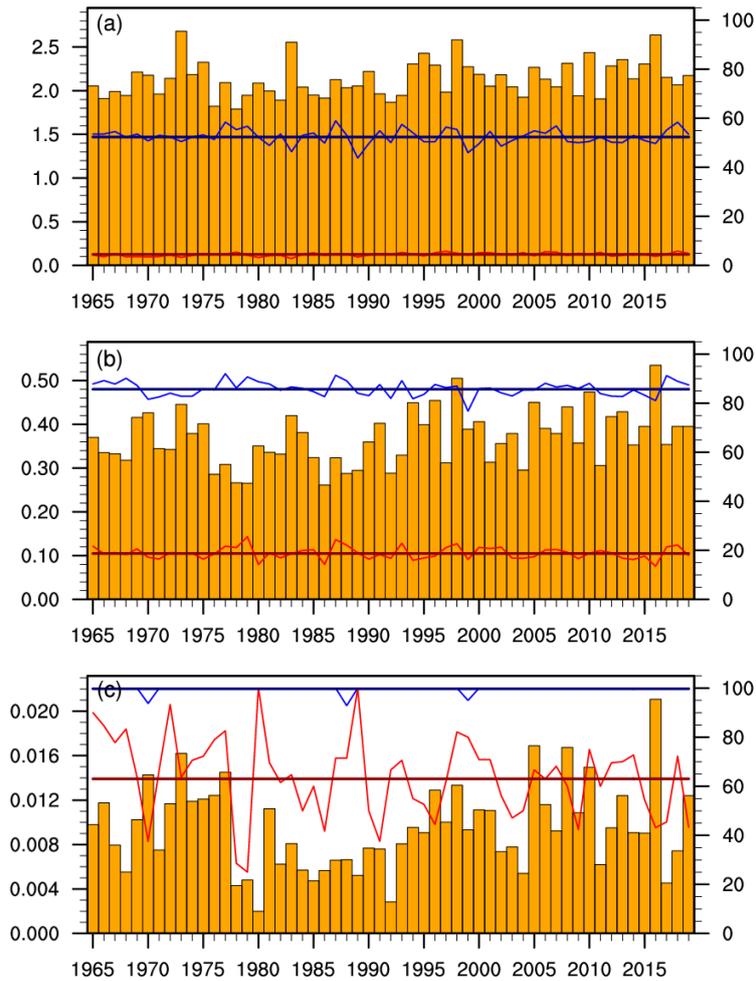


图 4 1965-2019 年中国 (a) 暴雨、(b) 大暴雨和 (c) 特大暴雨的年平均站日数年际变化, 蓝色曲线和红色曲线分别表示发生 HR20 和 HR50 的日数占总暴雨数的比例变化, 粗直线表示平均占比 (左侧纵坐标: 站日数, 右侧纵坐标: %)

Fig.4 Annual variations of rainstorm days of (a) heavy rainfall, (b) torrential rainfall and (c) severe torrential rainfall, the blue and red curves respectively indicate the proportion of the days with HR20 and HR50 to the total number of days, the thick lines represent the average proportion (left Y-axis: number of station days, right Y-axis: %)

此外, 对比图 2 还可以发现, 短时强降雨发生频率高的暴雨分布区域与暴雨日数高的区域并不一致, 暴雨数自西北向东南递增, 与我国三级阶梯地形分布有很好的对应关系, 但暴雨中短时强降雨发生的频率却没有相似的对对应关系, 表明部分区域的暴雨是由长持续时间的降雨造成的, 对流性较弱。对于造成这一现象的原因, 与决定不同地区降水性质的大气环流条件的差异有很大关系, 如华南由中尺度对流系统发展造成的暖区暴雨往往具有很强的对流性质 (高守亭等, 2018; 孙建华等, 2004), 而江淮流域暴雨主要受梅雨锋影响, 同时伴随有中小尺度对流系统, 表现为复杂的混合性强降雨 (高守亭等, 2018; 刘黎平等, 2004),

持续性强降雨中短时强降雨的平均占比不突出。

孙继松（2017）指出，大范围暴雨预报分析过程中的关键因子即是对流层低层的净水汽平流量或水汽通量辐合的强度以及天气系统的移动速度（决定了降水持续时间），这些因素不仅影响对流性降水、也会影响层云降水过程。但是对于对流降水过程而言，降水强度主要取决于水汽垂直递减率和低层大气对流有效位能的大小，而降水持续时间取决于对流系统的尺度、移动速度和传播。这也提示预报人员在实际业务预报中针对不同区域应该区别考虑短时强降雨对暴雨的贡献，比如对于华北南部到黄淮以及西南地区到华南一带的暴雨，就需要从短时强降雨的预报角度考虑对可能的暴雨等级的影响。

图 4 是不同等级暴雨平均站日数（即发生暴雨的总站日数/总站数）的演变情况。图中分别用伴有 HR20 和 HR50 两种强度短时强降雨的日数占总暴雨数的比例用来表征短时强降雨对暴雨的影响。图 4a 显示，暴雨数在年际上存在 3~4 年的变化周期（林建和杨贵名，2014），每站每年平均 2~2.5 日，但升降趋势并不明显；大暴雨数的年际偏差较大（图 4b），平均 0.3~0.4 日；越极端的事件变化越大，特大暴雨数表现出明显的年代际变化（图 4c），20 世纪 80 年代有一个波谷（平均站日数不足 0.01），20 世纪的 70 年代和 90 年代到 21 世纪初为波峰（平均站日数可达 0.02），这也与近年来极端降水事件发生频率增加的研究结论一致（IPCC，2014）。另一方面，随着暴雨等级的增强，发生短时强降雨的概率显著增加，在暴雨中发生 HR20 的概率为 55%，在大暴雨中增长至约 85%；暴雨中 HR50 的发生概率为 5%，大暴雨中增至 19%（粗直线），同时年际波动幅度略有增大，尤其是发生 HR50 的概率（红色曲线）的年际变化显著。在特大暴雨中，出现 HR20 的概率已经接近 100%，HR50 的发生概率也增长至 62%，表明在特大暴雨过程中，降雨量主要由短时强降雨贡献；且年际变化的幅度进一步增大，显示出了其极端性的特点。

综上，暴雨等级越强，暴雨中出现短时强降雨的概率越高，尤其是出现高强度的 HR50 的概率，接下来将从雨量的角度进一步对这种联系进行分析。

5 两种强度短时强降雨对不同等级暴雨的雨量贡献

5.1 暴雨中平均小时雨量的特征

短时强降雨描述的是小时雨量，暴雨是 24 小时时段的雨量累加值，那么暴雨过程中平均的小时雨量强度如何呢？基于逐站点不同等级暴雨的多年平均小时雨量显示，中东部地区暴雨平均小时雨量均超过了 2.5mm h^{-1} 以上（图 5a），其中四川盆地中西部、华北东南部-黄

淮江淮和东南沿海地区有大值中心，达 3 mm h^{-1} 以上。Luo et al (2016) 基于 1981-2013 年的小时雨量，将 99.9 百分位的雨量值定义为极端短时强降雨的阈值，但其平均强度的空间分布与图 5a 相似，该结果也表明，暴雨过程中一般有短时强降雨的贡献。大暴雨的平均小时雨量（图 5b）相较暴雨增大一倍，中东部地区整体平均小时雨量超过了 5 mm h^{-1} ；且空间分布上冀鲁豫地区和江南、华南沿海地区的平均小时雨量显著增强。特大暴雨数少，分布稀疏，只有沿海地区的记录比较密集，平均小时雨量达 12 mm h^{-1} 以上，若无对流性降水的出现，是难以达到这样的强度的，这也表明在极端暴雨过程中，高强度的短时强降雨起着决定性作用。

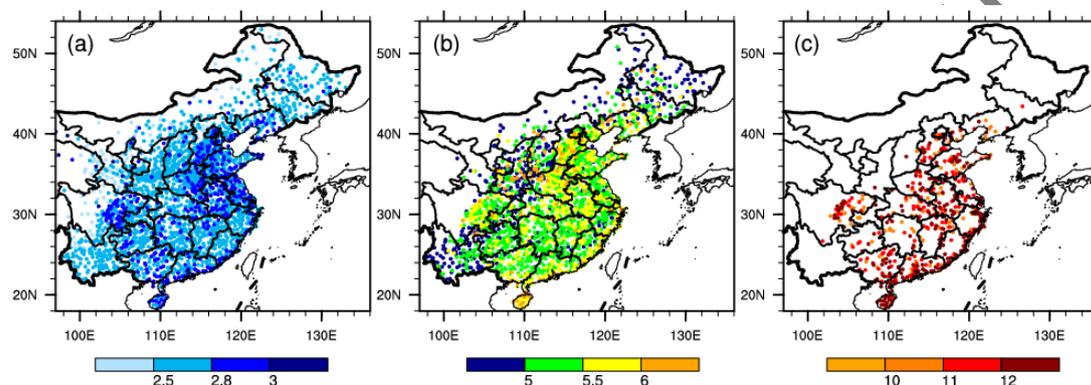


图 5 1951-2019 年中国 (a) 暴雨、(b) 大暴雨和 (c) 特大暴雨的平均雨强分布 (单位: mm h^{-1})

Fig.5 Distribution of hourly rainfall intensity of (a) heavy rainfall, (b) torrential rainfall and (c) severe torrential rainfall (unit: mm h^{-1})

5.2 两种强度短时强降雨对不同等级暴雨的雨量贡献

本文用暴雨中两种强度的短时强降雨各自的总雨量占暴雨总雨量的比例，来表征两种强度短时强降雨对不同等级暴雨雨量的贡献。结果显示，HR20 总雨量在暴雨中的平均占比均超过了 10%（图 6a），华北南部-黄淮以及西南地区中东部到华南地区是两个显著的大值中心，占比超过了 30%，其他地区多在 10-30% 之间。而 HR50 总雨量对暴雨雨量的贡献显著减小（图 6d），普遍低于 10%，大值中心缩小，仅在华北南部-黄淮北部和海南岛上有小范围站点超过 10%。这是由于就暴雨而言，高强度的 HR50 发生概率较低（图 3），所以对总雨量贡献不突出。

大暴雨中，HR20 的贡献相对暴雨过程整体都显著增大（图 6b），普遍在 30% 以上，大值中心分布与图 6a 基本一致，但达到了 50%，局地 70% 以上；HR50 的贡献同样显著增长（图 6e），增大幅度甚至高于 HR20，在华北南部-黄淮以及西南地区中东部到华南地区超过

10%的范围也明显扩大。而在江淮-江南地区 HR20 的贡献增幅相对较小, HR50 则无明显增大趋势。

特大暴雨中,我国中东部 HR20 总雨量在特大暴雨中的占比普遍超过 70%, 低值点分布较为分散(图 6c), 表明在特大暴雨中短时强降雨的贡献占主导, 对流性较暴雨和大暴雨更为明显。图 6f 显示 HR50 对特大暴雨雨量的贡献也呈现增大趋势, 华南沿海有相对集中的区域超过了 30%, 在华北南部和黄淮北部有个别站点超过 70%, 特大暴雨过程属于比较极端的现象, 在全国范围内未呈现明显的极值中心, 空间分布的区域性不如暴雨和大暴雨的特征显著。

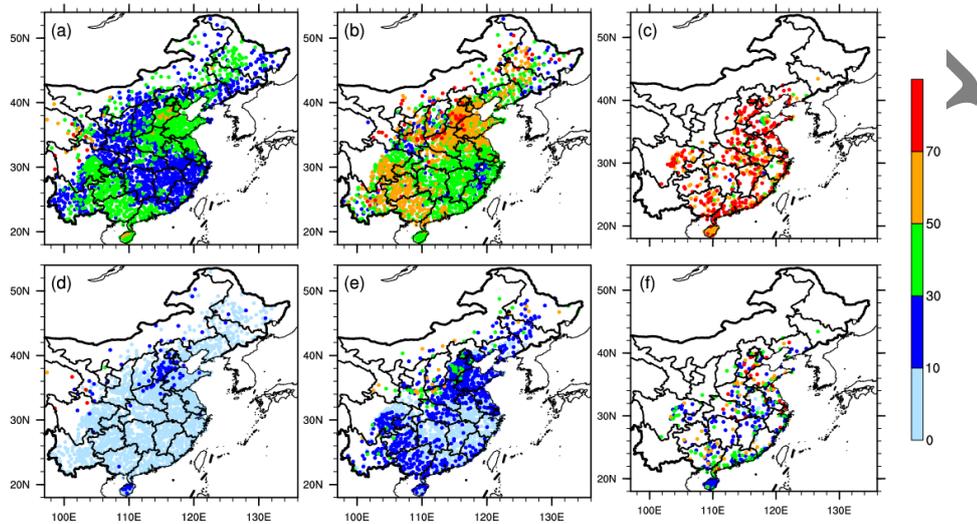


图 6 1951-2019 年中国 (a-c) HR20 和 (d-f) HR50 总雨量对 (a、d) 暴雨、(b、e) 大暴雨和 (c、f) 特大暴雨总雨量的贡献 (单位: %)

Fig.6 Contribution of short-duration heavy rainfall to the total rainfall in (a、d) heavy rainfall, (b、e) torrential rainfall and (c、f) severe torrential rainfall day, (a-c) and (d-f) refer to HR20 and HR50, respectively (Unit:%)

基于全国平均的两种强度短时强降雨的雨量对不同等级暴雨总雨量的贡献更清晰地展示了上述特征(图 7)。暴雨中 HR20 和 HR50 的平均贡献分别保持在 30%和 5%左右(粗直线), 年际变化不大(图 7a); 大暴雨中 HR20 和 HR50 的平均贡献相对暴雨中都有所增大, 但 HR20 对大暴雨雨量的贡献增至 45%, 增幅为 50%, 而 HR50 的贡献增至 10%, 增幅为 100%, 无明显的年际变化(图 7b)。在特大暴雨中短时强降雨雨量贡献进一步增大, HR20 和 HR50 对特大暴雨雨量的贡献分别增至约 70%和 25%, 增幅分别为 55%和 150%; 且年际变化明显, 尤其是 HR50 的贡献, 在 10%~40%之间波动(图 7c), 这与前两个等级的变化规律不太一致。以上结果表明 HR50 作为发生频率很低的极端性强对流天气, 对暴雨的贡献却极其关键, HR50 所表征的强对流性, 能直接影响到暴雨的强度, 决定了暴雨的等级甚至极

端性。

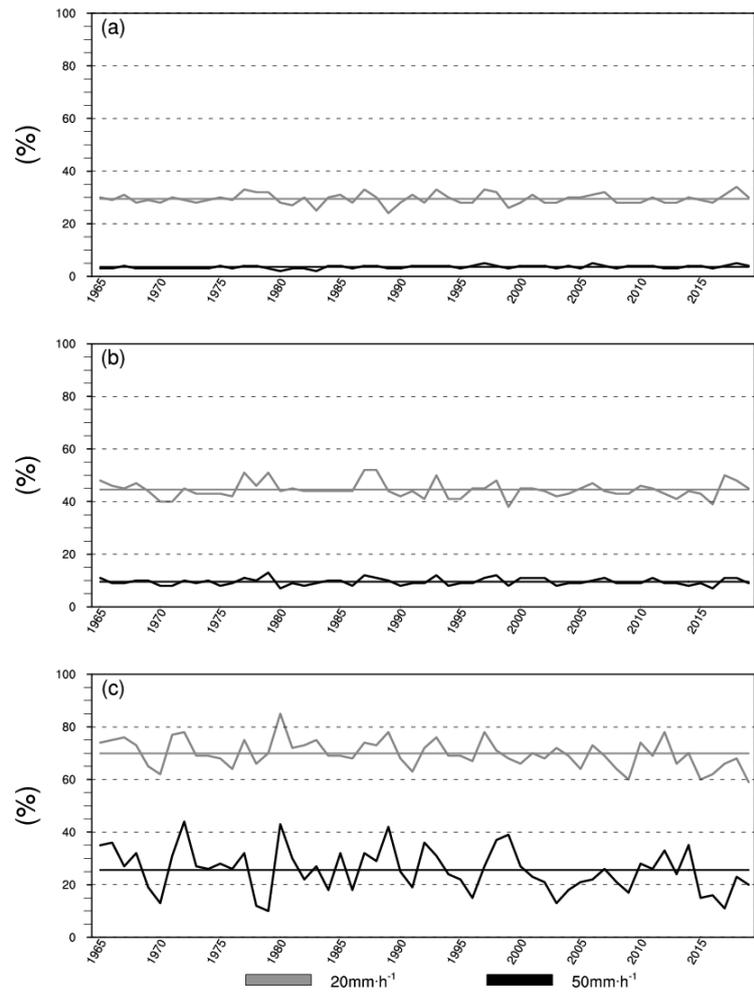


图 7 HR20 和 HR50 总雨量对 (a) 暴雨、(b) 大暴雨和 (c) 特大暴雨总雨量的贡献演变，粗直线表示平均贡献

Fig.7 Annual variations of contribution of HR20 and HR50 to the total rainfall in (a) heavy rainfall and (b) torrential rainfall and (c) severe torrential rainfall day, the thick lines represent the average contribution

综上所述，暴雨等级越高，伴有短时强降雨的可能性越大，短时强降雨雨量对暴雨总雨量的贡献也随暴雨强度的增强而增大。尽管如此，短时强降雨雨量对暴雨的贡献在不同地区有不同的特征，在华北南部-黄淮地区、西南地区东部到华南西部最为显著，其贡献随着暴雨等级的增强而显著增大，表明在这些地区降雨的对流性更为显著，很多暴雨是由短时强降雨直接导致的，这也表明这些地区的暴雨预报将会更难；但对于江淮江南等地区，短时强降雨对暴雨的作用相对较小，其贡献随着暴雨的增强增大程度也相对不明显，这表明江淮地区暴雨的对流性弱于前述的短时强降雨贡献显著区域，这在不同等级暴雨中短时强降雨的出现小时数中也有明显的体现。

图 8 所示为短时强降雨和非短时强降雨在不同强度等级暴雨中的持续时间。从图 8a 中可以看到，暴雨中华北东部-黄淮地区的平均短时强降雨（ 20 mm h^{-1} 以上）小时数相对要更多，而在江淮江南地区的非短时强降雨数（ $0\sim 20 \text{ mm h}^{-1}$ ）则更多，平均超过了 10 个小时（图 8d），说明该地区暴雨降水相对比较均匀持续，而前者则较为分散，较强的降水会集中在短时间内完成，从而造成了短时强降雨在不同地区贡献的差异。这种差异在大暴雨中更加明显，华北南部-黄淮地区的日平均短时强降雨数增至 3 小时以上（图 8b），而江淮江南地区的日平均非短时强降雨小时数增加至 15 小时以上（图 8e），表明随着暴雨等级的增强，华北黄淮地区降水的对流性进一步加大，而江淮江南地区的持续稳定性降水特征更显著。其与降水类型、影响天气系统息息相关，比如我国东北和华北地区受冷涡系统影响很大，何晗等（2015）研究了冷涡背景下京津冀以及山东西部等地区短时强降雨对暴雨的贡献率发现，38.8%的站点短时强降雨的贡献率在 70% 以上，这与本文的结论基本一致。但毛冬艳等（2018）在对西南地区短时强降雨的研究中则发现强短时强降雨（ $\geq 41.1 \text{ mm h}^{-1}$ ）和强暴雨（ $\geq 105.2 \text{ mm d}^{-1}$ ）的变化趋势不一致。Luo et al（2016）在关于极端小时降水的研究中发现除了四种天气尺度类型的影响外，中小尺度的对流系统对于极端小时降水的分布也有着相当的作用，这种作用势必会进一步影响到整个暴雨过程的强度。所以，要深入理解短时强降雨对暴雨的贡献差异，还须针对不同地区进行更详细的研究。

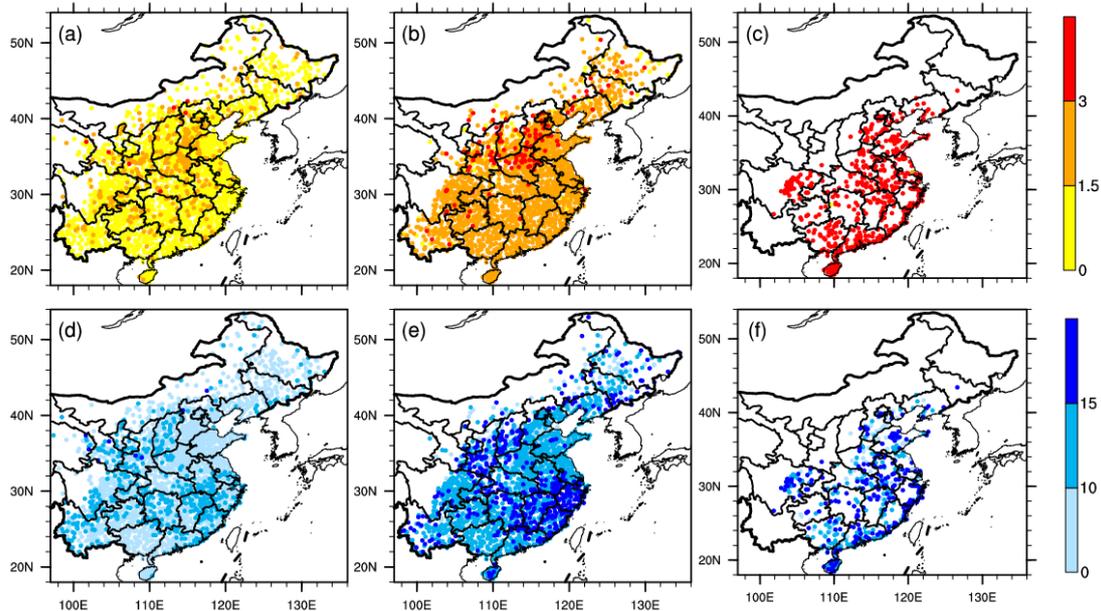


图 8 1951-2019 年中国 (a、d) 暴雨、(b、e) 大暴雨和 (c、f) 特大暴雨中 (a-c) HR20 和 (d-f) 非短时强降雨的平均小时数

Fig.8 Average hours of short-duration heavy rainfall (a-c) and non- short-duration heavy rainfall (d-f) during (a、

d) heavy rainfall, (b、 e) torrential rainfall and (c、 f) severe torrential rainfall day

5.3 两种强度短时强降雨对暴雨雨量的影响

为进一步体现短时强降雨对暴雨雨量的影响,本部分分别对比伴有两类短时强降雨发生的暴雨(短时强降雨暴雨)和无短时强降雨发生的暴雨(非短时强降雨暴雨)雨量的差值分布情况(图9和图10)。伴有HR20的暴雨雨量普遍大于非短时强降雨暴雨的雨量,在全国范围内分布均匀(图9a),差值在0~10 mm以内(图10a),仅有约7%的日数非短时强降雨暴雨雨量反超了短时强降雨暴雨(差值负数);当有HR50发生时,短时强降雨暴雨与非短时强降雨暴雨的雨量差值增大,在10~20 mm区间内的比例最大,0-10 mm和20~30 mm区间内的次之,但超过40 mm的情况极少,且空间分布上不均匀(图9c),大值区在华北南部-黄淮地区、西南地区东部和华南西部。

对于大暴雨,短时强降雨暴雨雨量小于非短时强降雨暴雨的站点相对暴雨等级有所增加(图10b),差值为负数的占比约为9%,主要由持续性弱降水比例的增加导致,与前面的结论一致,但短时强降雨暴雨雨量大于非短时强降雨暴雨的情况仍占主导,差值普遍在0~40 mm内,对于伴有HR50的极端情况,差值可超过100 mm,大值集中区域相对收缩,仅四川中东部和皖赣交界处比较明显。

特大暴雨过程中基本都伴随有短时强降雨,所以此处未做讨论。按业务规定的雨量标准来说,伴随短时强降雨的暴雨和大暴雨雨量平均分别可以增加20%和40%,最大甚至能增加超过1倍,所以在暴雨预报中需要考虑短时强降雨的贡献。

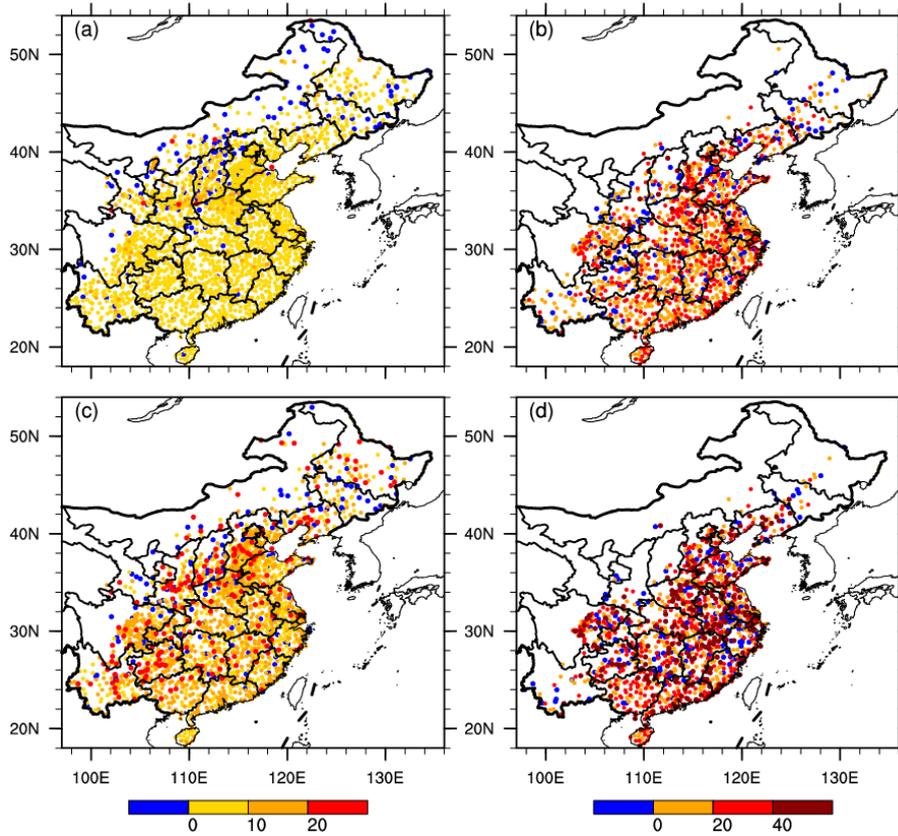


图9 1951-2019年中国 (a、c)暴雨、(b、d)大暴雨中有(a、b)HR20/(c、d)HR50和无短时强降雨发生的暴雨雨量差分布

Fig.9 The distribution of the daily rainfall difference between the rainstorm days with (a、b)HR20/(c、d) HR50 and without short-duration heavy rainfall in (a、c) heavy rainfall and (b、d) torrential rainfall day

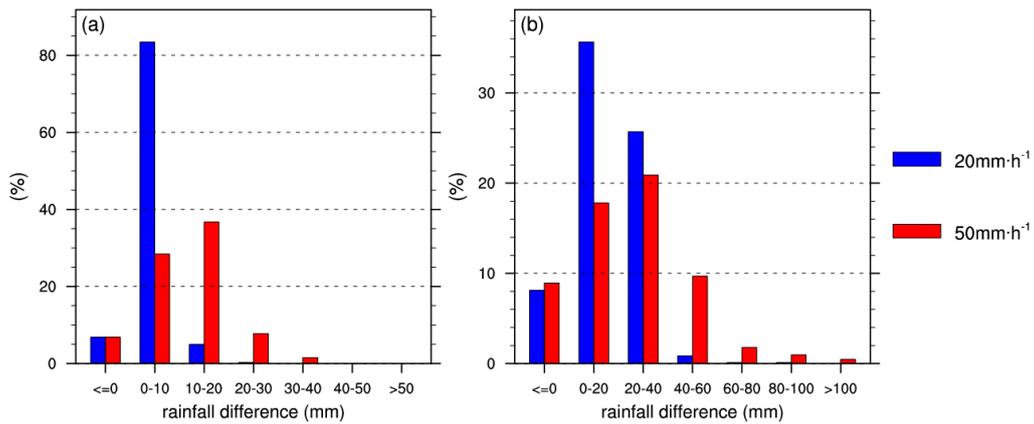


图10 1951-2019年中国 (a)暴雨、(b)大暴雨中有短时强降雨和无短时强降雨发生的暴雨雨量差不同区间占比

Fig.10 The proportion of days in different interval of daily precipitation difference between the rainstorm days with short-duration heavy rainfall and no short-duration heavy rainfall in (a) heavy rainfall and (b) torrential

6 总结与讨论

中国暴雨具有显著的对流性，尤其大暴雨和特大暴雨。短时强降雨作为强对流天气的一类，其对暴雨的形成有显著影响，但短时强降雨对不同强度等级暴雨的贡献度还缺乏客观的统计信息。针对此问题，本文利用 1951-2019 年的逐小时降水资料，统计分析了 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 短时强降雨与不同等级暴雨之间的联系，揭示了不同强度等级短时强降雨对不同等级暴雨的影响程度。主要结论如下：

(1) 我国东北地区中西部、华北南部到黄淮一带以及西南地区到华南地区超过 50% 的暴雨中均伴有短时强降雨 (HR20)，华北南部和华南中部地区暴雨中短时强降雨的占比最高，超过了 70%，说明这些区域暴雨的对流性明显；随着暴雨等级的增强，短时强降雨的占比逐渐增加，且高强度的 HR50 的发生比例增加更为显著，超 60% 的特大暴雨中伴有 HR50，表明特大暴雨的对流性更加显著。

(2) 短时强降雨雨量对暴雨的雨量贡献也有很强的区域特点：华北南部到黄淮地区、西南地区东部和华南地区，短时强降雨雨量对暴雨总雨量的贡献最大，且随着暴雨等级的提升，这些地区短时强降雨雨量在暴雨总雨量中的占比呈显著增长的趋势，HR50 的贡献增幅超过 100%；而江淮江南等地区短时强降雨雨量的贡献较小，随暴雨强度等级的提升其增长程度也较为不明显。通过对比暴雨中短时强降雨和一般降水的时长发现，这一现象取决于暴雨过程中降水的性质，江淮江南地区多受梅雨影响，梅雨期暴雨往往表现为复杂的混合性强降雨，平均对流性弱于前述的短时强降雨贡献显著区域。

(3) 短时强降雨对暴雨总雨量也有显著影响，伴随短时强降雨的暴雨和大暴雨雨量比无短时强降雨暴雨的雨量平均可以增加 20% 和 40%，最大可达 1 倍以上；此外，当伴随有 HR50 发生时，暴雨日雨量的极端性更为突出。这些结果进一步说明了对流活动对暴雨雨量具有决定性作用。

以上分析表明，短时强降雨对暴雨有显著影响，短时强降雨雨量的大小一定程度上决定了暴雨的等级，该结果有助于预报人员更全面地看待短时强降雨的预报，也对暴雨的预报预警有一定的参考意义。结果也表明短时强降雨对暴雨的贡献具有区域特点，目前的定量降水预报中，对于华南、华北的预报不够准确，一种可能的原因是模式对不同地区对流性降水的预报存在不足，不能真实反映短时强降雨的雨量和持续时间，从而影响了定量降水预报中暴

雨以上量级降水预报的准确性，具体原因还有待于进一步研究。此外，本文所用小时降水资料为两个临近整点时刻的降雨累计，未考虑跨整点时刻的情况，因此，各等级短时强降雨对暴雨的实际贡献度还要高于本文的结果。本文的分析是基于全年资料进行的，在不同季节是否仍然具有相同的特征，有待进一步探讨。

参考文献

- 鲍名, 黄荣辉, 2006. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征[J]. 大气科学, 30(6): 1057-1067.
- Bao M, Huang R H, 2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6): 1057-1067 (in Chinese).
- 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-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteor Sin, 71(3): 367-382 (in Chinese).
- 陈涛, 张芳华, 于超, 等, 2020. 2020 年 6—7 月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J]. 气象, 46(11): 1415-1426. Chen T, Zhang F H, Yu C, et al, 2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River Basin during June-July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1415-1426 (in Chinese).
- 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等, 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J]. 气象, 38(10): 1278-1287. Fang C, Mao D Y, Zhang X W, et al, 2012. Analysis on the mesoscale convective conditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(10): 1278-1287 (in Chinese).
- 高守亭, 周玉淑, 冉令坤, 2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学, 42(4): 833-846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K, 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 833-846 (in Chinese).
- 国家气象中心, 2012. GB/T 28592—2012: 降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社. National Meteorological Centre, 2012. GB/T 28592—2012: Standard of precipitation[S]. Beijing: China Standard Press.
- 何晗, 湛芸, 肖天贵, 等, 2015. 冷涡背景下短时强降水的统计分析[J]. 气象, 41(12): 1466-1476. He H, Chen Y Xiao T G, et al, 2015. Statistical analysis of severe short-time

- precipitation under cold vortex background[J]. Meteor Mon, 41(12): 1466-1476 (in Chinese).
- 江志红, 丁裕国, 陈威霖, 2007. 21 世纪中国极端降水事件预估[J]. 气候变化研究进展, 3(4): 202-207. Jiang Z H, Ding Y G, Chen W L, 2007. Projection of precipitation extremes for the 21st century over China[J]. Adv Climate Change Res, 3(4): 202-207 (in Chinese).
- 李丽平, 章开美, 王超, 等, 2010. 近 40 年华南前汛期极端降水时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 15(4): 443-450. Li L P, Zhang K M, Wang C, et al, 2010. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years[J]. Clim Environ Res, 15(4): 443-450 (in Chinese).
- 林建, 杨贵名, 2014. 近 30 年中国暴雨时空特征分析[J]. 气象, 40(7): 816-826. Lin J, Yang G M, 2014. Spatio-temporal characteristics of rainstorm in China during 1981-2010[J]. Meteor Mon, 40(7): 816-826 (in Chinese).
- 刘黎平, 阮征, 覃丹宇, 2004. 长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 34(12): 1193-1201. Liu L P, Ruan Z, Qin D Y, 2005. Case studies on mesoscale structures of heavy rainfall system in the Yangtze River generated by Meiyu front[J]. Sci China Ser D Earth Sci, 48(8): 1303-1311.
- 毛冬艳, 曹艳察, 朱文剑, 等, 2018. 西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. 气象, 44(8): 1042-1050. Mao D Y, Cao Y C, Zhu W J, et al, 2018. Climatic characteristics of short-time severe precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon, 44(8): 1042-1050 (in Chinese).
- 闵爱荣, 廖移山, 邓雯, 2016. 2008—2013 年我国暴雨分布情况及变化趋势分析[J]. 暴雨灾害, 35(6): 576-584. Min A R, Liao Y S, Deng W, 2016. The analysis of the distribution and trend for heavy rainfall based on the precipitation data from 2008 to 2013 in China[J]. Torr Rain Dis, 35(6): 576-584 (in Chinese).
- 孙继松, 2017. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 36(6): 498-506. Sun J S, 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 498-506 (in Chinese).
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等, 2004. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究[J]. 大气科学, 28(5): 675-691. Sun J H, Zhang X L, Qi L L, et al, 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002[J]. Chin J Atmos Sci, 28(5): 675-691 (in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等, 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科

- 学, 37(3): 705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al, 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 705-718 (in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 45-46. Tao S Y, 1980. Rainstorms in China[M]. Beijing: Science Press, 45-46 (in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张涛, 等, 2017. 我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J]. 暴雨灾害, 36(6): 518-526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 518-526 (in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象, 44(4): 469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484 (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).
- 郁珍艳, 何立富, 范广洲, 等, 2011. 华北冷涡背景下强对流天气的基本特征分析[J]. 热带气象学报, 27(1): 89-94. Yu Z Y, He L F, Fan G Z, et al, 2011. The basic features of the severe convection at the background of cold vortex over north china[J]. J Trop Meteor, 27(1): 89-94 (in Chinese).
- 张芳华, 陈涛, 张芳, 等, 2020. 2020年6-7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J]. 气象, 46(11): 1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al, 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June-July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1405-1414 (in Chinese).
- 郑国光, 矫梅燕, 丁一汇, 等, 2019. 中国气候[M]. 北京: 气象出版社. Zheng G G, Jiao M Y, Ding Y H, et al, 2019. Climate in China[M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese).
- 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等, 2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 26(6): 641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6): 641-657 (in Chinese).

-
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6): 641-652.
- Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6): 641-652 (in Chinese).
- 周璇, 罗亚丽, 郭学良, 2015. CMORPH 卫星—地面自动站融合降水数据在中国南方短时强降雨分析中的应用[J]. 热带气象学报, 31(3): 333-344. Zhou X, Luo Y L, Guo X L, 2015. Application of a CMORPH-AWS merged hourly gridded precipitation product in analyzing characteristics of short-duration heavy rainfall over southern China[J]. J Trop Meteor, 31(3): 333-344 (in Chinese).
- Doswell III C A, 2001. Severe Convective Storms[M]. Boston: American Meteorological Society: 1-26.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4): 560-581.
- IPCC, 2014. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- 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.