

张辛,张凌云.我国极端降水时空分布及大气环流背景研究进展[J].气象研究与应用,2023,44(4):70-77.

ZHANG Xin,ZHANG Lingyun. Progress in the study of spatio-temporal distribution of extreme precipitation and its atmospheric circulation background in China[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(4): 70-77.

我国极端降水时空分布及大气环流背景研究进展

张 辛, 张凌云*

(柳州市气象局, 广西 柳州 545001)

摘要: 文章较系统回顾国内研究领域中有极端降水阈值确定、时空分布特征和大气环流背景的研究进展,并将有关研究进行分类,总结研究涉及的主要成果。在此基础上展望今后极端降水在时空分布特征和大气环流背景等方面研究的可能方向。

关键词: 极端降水;时空特征;大气环流;研究进展

中图分类号: P434

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.11

已有研究表明^[1-2],全球平均气温上升会引起大气水汽增加,从而导致极端降水增加。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)也证实了这一观点。该报告指出,2011—2020年地表气温较1850—1900年地表气温已上升约1.09℃;1950年以来,极端降水在大部分有观测资料的区域呈增加趋势。报告还指出,由于极端降水增加的速度整体快于平均降水,导致降水的年内变率增加,从而给区域水资源管理带来挑战^[3]。

近年来,中国气象局主办评选的“国内外十大天气气候事件”中,每年都有国内外的极端降水事件入选,例如“21·7”河南特大暴雨创中国大陆小时气象观测降雨量纪录,2021年夏秋欧洲遭遇极端强降水等。极端降水所带来的危害影响广泛,对于人民生命和财产安全、社会经济、生态环境等都会造成威胁。因此,研究极端降水的时空分布规律,分析它的形成机理,不仅有利于提高中短期极端降水预报的准确率,也有利于预估未来极端降水的时空变化格局,以便于提早采取适应和应对措施。本文主要综述国内科技工作者在极端降水阈值的确定、时空分布、形成机制等方面开展的相关研究进展,在此基础上,对今后的相关研究作初步展望,以期开展极端

降水研究与预报预警工作提供参考。

1 极端降水阈值的确定

通过在气象要素上选取一个阈值,以此对极端降水进行定量研究是较为普遍的方法,不同阈值的选取对于极端降水的定义及其时空分布分析会有不同的影响^[4-5]。常用的方法主要有3大类,即绝对阈值法、相对阈值法和极端指数法。

1.1 绝对阈值法

绝对阈值法是采用直接给定一个某一固定时段内降水量(如日降水量或1h降水量等)的绝对界限值,当约定时段内降水量超过这个值,就认为达到极端降水。GROISMAN等^[6]研究气候变化的指标时,选取北部国家(加拿大、挪威、俄罗斯和波兰)日降水量超过25.4mm和中纬度国家(美国、墨西哥、中国和澳大利亚)日降水量超过50.8mm作为极端降水的阈值。GONG等^[7]采用日降水量大于50.0mm作为极端降水的阈值来研究中国北方半干旱地区的日降水变化。俞小鼎^[8]、范元月^[9]等将1h降水量大于等于50.0mm或3h降水量大于等于100.0mm作为极端短时强降水的阈值。这种方法的优点是有利于在同一个标准下评价较大范围区域的极端降水特

收稿日期: 2023-11-25

基金项目: 广西气象科研计划项目(桂气科2023M18)

第一作者简介: 张辛(1991—),女,助理工程师,主要从事气象服务及研究。E-mail: 262602220@qq.com

* 通讯作者: 张凌云(1975—),女,正高级工程师,主要从事中短期天气及气候研究。E-mail: 364548737@qq.com

征。但在实际使用时,若想取值较为准确,需要研究者对于研究区域的降水状况有较深的了解,在基于丰富的经验数据和主观认识下进行选取,且该方法忽略研究区域降水的局地差异,研究的结果可能在该研究区域的特殊位置不适用。

1.2 相对阈值法

该方法充分考虑降水在不同区域分部不均匀的特点,基于所研究区域的降水状况,对极端降水的判断阈值进行针对性的选取。

1.2.1 百分位法

百分位法是将某观测时效的降水量观测值按从小到大进行排序,选取序列某百分位值作为极端阈值,当某降水量超过该阈值,则是极端降水。此种方法应用比较广泛,但是针对不同的研究区域和不同的降水时效,不同学者对于百分位的取值有所不同。在开展日极端降水量的研究中,翟盘茂等学者^[10-11]取第 99 百分位作为阈值,研究中国北方近 50 a 的降水变化,也有学者取第 97.5 百分位^[12]作为研究我国极端降水变化趋势。而在小时极端降水量的研究中,有学者在研究我国极端降水时取第 99.9 百分位^[13],也有在研究四川省极端降水时取第 95 百分位^[14]。大部分学者在百分位取值时,主要考虑结合工作经验和研究实际,避免在研究极端降水时空分布规律时,出现阈值较低导致个例过多、所研究对象不具有极端性,和阈值过高导致个例太少,不利于总结规律。在建立降水量序列时,一般以研究时段内降水量大于等于 0.1 mm 的观测值建立数据序列^[15-16],也有学者在研究小时极端降水时,采用降水量大于等于 1 mm 的观测值建立数据序列^[17-18]。

确定百分位的值,广为认可的是 BONSAL 等^[19]的计算方法:把降水量序列的 n 个值按升序排列 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$, 某个值小于或等于 x_m 的概率为

$$P = (m - 0.31) / (n + 0.38) \quad (1)$$

其中, m 为 x_m 的序号。若 $n=30$, 则第 95% 百分位上的值是排序后 x_{29} ($P=94.4\%$) 与 x_{30} ($P=97.7\%$) 的线性插值。

这种算法的优点是计算方便,并且避免对降水量函数分布型的假设。罗梦森等^[20]则认为这种方法是在假定降水量遵从均匀分布的基础上进行的线性插值,与实际降水量的概率分布会有偏差。他们采用改进的百分位法计算区域极端降水阈值,即将降水量分布函数转化为标准正态分布函数后再求百分位值,计算结果的稳定性较好。他们还建议对于较长研

究时段的分析,应当将整个时段利用年降水量变化趋势转折点分为几个气候段,分别计算各个气候段内的阈值,或者以滑动气候阶段阈值的平均值代替整个研究段的阈值。

1.2.2 不同分布型的边缘值法

通过用降水量序列拟合经验曲线函数,将边缘值作为阈值。这种方法总体可以分为四个步骤。第一步获取降水序列,主要有两种方法,即年最大值法和超门限峰值法。年最大值法又细分为常规年最大值法和年多个样法^[21]。常规年最大值法从每年的雨量资料中选出一个或一组最大雨量,有 N 年则选出 N 组,组成统计样本;年多个样法在 N 年资料序列中,每年各取 6~8 个最大值,不论年份按大小统一排序(升序或降序),然后取资料年限的 3~4 倍个数的最大雨量组成统计样本。超门限峰值法取样是在原始降水资料数据中,先确定阈值(一般使用百分位法),再从原始资料中选取达到或超过该阈值的降雨量建立极端降水序列^[22]。很多学者^[23-25]将使用年最大值法和超门限峰值法建立的极端降水序列进行比较,在对不同地区运用不同函数分布拟合地区的极端降水时,两种方法的表现各有优劣,对于选择哪一种更优目前没有定论,但两种方法拟合的极端降水在空间分布变化上得到的规律相似。第二步选择概率分布模型,被用来拟合极端降水的概率分布型有很多,苏布达等^[25]采用广义帕累托分布(GPD)、贝塔分布、韦伯尔分布等 20 种分布拟合长江流域日极端降水序列分布情况,方思达^[26]则使用 Gamma 函数。一般来说,国内使用较多的是广义极值分布(GEV)、对数正态分布(log-normal)和皮尔森Ⅲ(PearsonⅢ)型分布^[27-28]。第三步对概率分布模型的参数进行估计。姜彤等^[29]发现,当样本数量较少时,概率权重法和线性矩法可以获得较好的参数估算结果,最小二乘法对尺度参数估算结果差,最大似然法和矩法无法得到参数的解析式。前三步可以得到拟合的极端降水概率分布模型,但是与实际极端降水的差别还不能确定,所以还需要进行第四步。第四步对概率分布函数拟合极端降水概率分布的效果进行检验,通常采用柯尔莫哥洛夫-斯米尔洛夫(K-S)检验^[30],通过检验则说明拟合效果较好。运用分布型的边缘值法,还可以通过概率分布模型计算不同重现期降水,便于在水利水电、城市防洪防涝等工程设计上运用。

1.3 极端指数法

通过定义若干与极端降水有关的指标值,以此描述极端降水的变化。2002年,FRICH等^[31]提出10个相对受其他因素干扰低的极端指数来描述气候的极端变化,其中有5个指数与极端降水有关,分别是中雨以上降水日数($R10$)、连续干日(CDD)、最大5 d降水总量($R5d$)、平均日降水强度($SDII$)、超过95%百分位降水占总降水量的百分率($R95T$)。2003年,气候变化与监测指数专家小组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)^[32]定义27个气候指数来描述气候状况,在用于描述极端事件的气候指数中,包括11个降水指数,分别是最大1 d降水量($RX1day$)、最大5 d降水量($RX5day$)、平均日降水强度($SDII$)、中雨以上日数($R10$)、大雨以上日数($R20$)、连续干日(CDD)、连续湿日(CWD)、湿日数($R95p$)、极端湿日数($R99p$)、日降雨量大于等于N毫米的天数(RN)、年总降水量(PT)。值得注意的是,这些指数中,既有绝对阈值的含义,也有相对阈值的含义。例如,中雨以上日数定义为日降水量大于等于10 mm的日数,有绝对阈值的含义,极端湿日数定义为某时段降雨量大于1961—1990年期间湿日第99个百分位的降雨量的日数,有相对阈值的含义在其中。已有较多学者采用极端降水气候指数开展对极端降水的研究。吴文祥^[33]等以年最大5日降水量作为极端降水指标研究不同重现期极端降水的变化。张仪辉^[34]在ETCCDI的基础上,新定义了最大3 h降水量($RX3h$)、最大12 h降水量($RX12h$),并调整最大5日降水量($RX5day$)为最大7日降水量($RX7day$),结合其他5个指标,对雅鲁藏布江流域降水时空变化特征进行研究。当选取多个极端指数综合描述极端降水变化时,由于不同指数的表现不同,在一定程度上可以规避选用单一指数对极端降水变化的过度或过轻估计。

2 极端降水的时空分布特征

近年来大量学者对极端降水的时空分布特征做了深入的分析,初步掌握了一些分布和变化规律。

2.1 中国极端降水的时空分布特征

中国极端降水的时空分布复杂,具有明显的局地性和阶段性。有研究发现^[35],极端降水趋势有三个显著区域:东南地区和西北地区为正趋势区,华北地区为负趋势区;极端降水存在三个频发时期:20世纪60年代早期、20世纪90年代中晚期和21世

纪早期。吉戴婧琪等^[36]选取9个极端降水指数研究1960—2017年中国极端降水事件,结果表明极端降水事件的强度呈显著增加趋势,空间分布总体遵循“南多北少、东多西少”的规律,且华南地区的极端降水事件在降水量、降水强度、降水日数三个方面都位于七大自然地理分区前列。

夏季极端降水事件是我国极端降水研究的热点。大量研究^[37-41]发现我国夏季极端降水事件频率和强度总体有所增大,但空间分布存在明显的区域性差异。在长江中下游地区、华南地区、东南地区和西北地区夏季极端降水事件的发生表现为增加趋势,特别在长江中下游和东南地区和西北地区有明显增长,但在东北地区、华北地区、西南部分地区表现为减少趋势。其中,长江中下游地区和西北地区极端降水事件增加主要表现在降水量的增加、降水强度的增大和持续时间的增加等三个方面,而华南地区极端降水事件增加主要表现在降水量和降水强度的增加。贺冰蕊^[42]将夏季极端降水按连续性(持续2 d以上)和非连续性两类进行研究,发现长江中下游的非持续性极端降水量增加趋势明显,甚至可达 $10\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 以上;东南沿海的持续性极端降水量有显著的增加趋势,趋势大于 $10\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 的地区主要集中在福建、浙江两省。值得关注的是,在1992年左右夏季极端降水事件发生突变^[43],在突变之后,我国西部和长江以南地区极端降水事件较突变前偏多,东北至西南一带极端降水事件较突变前减少。有研究^[44-46]进一步分析表明,自1992、1993年以来,我国华南地区夏季极端降水经历明显的年代间增加,且前汛期极端强降水量异常程度明显增强,后汛期发生极端旱涝的情况增多。还有研究进一步发现,极端降水事件的开始时间和结束时间分别呈现出明显的提前和推迟趋势^[47],并且我国东部夏季极端降水事件随日期的变化与夏季雨带的南北移动相吻合^[48],雨带主要位于华南地区时,该地区发生极端降水的概率也相应地最大,随着气候雨带北移,长江中下游地区、华北和东北地区发生极端降水概率也依次增大。

受气象观测资料时间分辨率限制,以及传统的全球或区域模式对小时极端降水的物理过程的模拟能力有限等因素的影响,我国极端小时降水的研究起步较晚^[49]。孔峰等^[50]研究发现中国小时极端降水强度具有明显的东南高、西北低的空间分布特征,长江流域地区的小时极端降水频次在1961—1985年

呈迅速增加趋势,1986—2013 年在波动中呈缓慢增加趋势。一些研究表明^[17-18,51-54],小时极端降水的局地性更强,在各个地区的日变化也不相同,但普遍出现在夜间和凌晨。例如,广西汛期 17—18 时和 04—05 时最容易出现小时极端降水,但强度上日雨与夜雨相当;山东省汛期小时极端降水出现在傍晚(17 时高峰)和凌晨(01 时次高峰),夜雨强度大于日雨;湖北省小时极端降水主要集中在午后 15 时至凌晨 01 时的前半夜,峰值出现在 15—16 时和 22 时,次峰值出现在凌晨 01 时;四川省小时极端降水频次的日变化具有单峰特征,盆地 05 时发生频次最高,川西高原主峰出现在 21 时,攀西地区高频次发生在 02 时;重庆小时极端降水高频次主要出现在 03—05 时。

3 产生极端降水的大气环流和天气系统特征

极端降水是在一定的大气环流背景下,多种尺度系统相互作用的结果。分析产生极端降水的大气环流和天气系统特征对揭示极端降水的形成机理有重要作用。

3.1 产生极端降水的大气环流和水汽输送特征

近年来对某一季节区域极端降水的大尺度环流研究主要包括气候变率模态(即大气低频环流型)和逐日大气环流两种^[55]。大量研究表明^[56-58],ENSO 对我国极端降水有影响。在厄尔尼诺(ENSO)事件发生的当年和次年,长江中下游区域性极端降水增多且尺度变大。海温影响方面,印度洋和赤道太平洋前期海面温度通过调节异常反气旋和风向,对华东,特别是华东南部下游的春季极端降水影响较大。在冬季平流层准两年震荡(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)的调制作用下,冬季 QBO 西风位相时,厄尔尼诺发展年夏季,我国整体偏旱而华南偏涝,衰减年夏季,华南、华东北部偏旱而东北、长江流域偏涝;冬季 QBO 东风位相时,厄尔尼诺发展年夏季,长江以北偏旱,衰减年夏季,我国东部降水异常呈负-正-负的三极分布。方浩^[48]发现当降水关键区位于高层 200 hPa 西风急流轴右侧,中层 500 hPa 对应西太平洋副热带高压(副高)位置异常,低层 850hPa 出现局地异常气旋环流,对应低空异常辐合,这种高层辐散、低层辐合的环流配置为极端降水提供动力条件,易出现极端降水。在逐日大气环流对极端降水的影响方面也有不少研究。晏红明等^[59]指出,由于副高东西变动引起的环流有所差异,因此其东西位置对我国西

南和华南地区降水的影响不同,当副高偏东时西南降水偏多、华南偏少;偏西则降水情况相反。ZHAO 等^[60]将华北地区夏季极端降水的日大气环流型通过 K-means 聚类分析方法,总结出两种与之相关的类型,即以异常偏北的副热带高压和副高外围强盛的西南气流为特点的大气环流型,和以位置异常偏西的副热带高压和中纬度低压槽为特点的大气环流型。梅雨带移动对江苏省内极端降水有影响,陈燕等^[61]研究发现,2010 年以后梅雨雨带中心南移至长江流域,江苏省长江流域极端降水增多,开始时间明显提前,结束时间推后,持续时间增长。

水汽输送方面,已有研究表明^[62-63],东亚的水汽主要有四个来源:与南亚季风相联系的西南季风气流,经过南海与南海夏季风相联系的 105°E 越赤道偏南气流,与副高联系的东南季风气流,以及与副热带西风急流联系的偏西气流。在此基础上,田红等^[64]定义四个水汽通道,发现西南通道(南亚季风水汽)与华南中部、广西南部夏季降水有显著的正相关关系,南海通道(南海季风水汽)与华南地区降水有显著的正相关关系,东南通道(东南季风水汽)与长江中游地区降水呈显著正相关,西北通道(西风带水汽)主要与新疆和江淮部分地区、黄河中上游地区的降水有显著正相关关系。

3.2 产生极端降水的天气尺度系统特征

在我国,对产生极端降水天气尺度系统的研究比较多的是对某次短历时极端降水或某次极端降水过程的研究。造成极端降水的天气尺度系统主要有低涡、切变线、静止锋和气旋等。西南涡是产生于我国西南地区、活动频繁的低压系统,川渝地区及我国东部地区的极端降水均与西南涡的发展、移动有关^[65-67]。低空切变线对极端降水的影响广泛分布在我国西南、华南及东部地区^[68-70]。静止锋作为造成我国极端降水的重要天气系统之一,其中,梅雨锋是我国东部地区梅雨季的极端降水的典型天气系统,华北锋则与我国华北春夏季极端降水有关^[55,71-73]。热带气旋也是造成极端降水的重要天气系统之一,不同地区受其影响的程度不同,一般来说从我国东南和华南沿海向西北内陆递减^[74-76]。影响华南极端降水的三大系统是锋面、切变线和低涡,三者共同作用时可为华南极端降水提供并加强水汽辐合,同时促成不稳定能量的释放^[77]。小时极端降水的天气背景也相类似,主要分为热带气旋型(TC 型)、地面锋面型、低涡或切变线型和弱天气尺度强迫型^[78]。

4 总结与展望

近年来,国内学者对极端降水阈值确定、时空分布特征和天气背景特征等进行广泛研究。大量的研究表明,要研究极端降水的时空分布特征和成因,需对极端降水阈值进行确定,不同的定义对极端降水的规律研究有影响。主流的阈值确定方法有三种,即绝对阈值法、相对阈值法和极端指数法,三种方法在使用上各有优劣,应根据研究区域的大小和研究内容进行选择。我国极端降水在全球变暖背景下,其时空变化规律有很强的局地性。加上不同学者使用资料的种类、时间序列长度、观测数据空间分辨率以及对极端降水阈值的确定方法不同,对同一地区极端降水时空分布变化描述也有差异。总体来说,长江中下游、华南、东南和西北等大部分地区的极端降水事件的强度和频率存在增加趋势。大气环流方面,ENSO 对我国极端降水有调制作用,副热带高压的位置影响我国极端降水的出现时间和强度。形成极端降水的天气背景比较复杂,至今没有被完全揭示,目前使用比较广泛的研究方法是统计分析和数值模拟法。在我国,造成极端降水的天气尺度系统主要有低涡、切变线、静止锋和气旋等。

随着科学技术的发展,近些年对极端降水的研究较几十年前更为深入。但对于极端降水的变化规律和天气背景的研究仍有巨大空间。可以预见,未来的研究重点将围绕如下几个方面:

(1)开展我国极端降水时空变化客观规律的研究^[79]。现有研究所选用降水资料的类型、时间序列长度、资料分布密度、极端阈值的选择和趋势检验方法的不同均会影响分析结论,并且选取的年代际不同时,得到的变化趋势也不同。因此,还需要进一步完善。

(2)开展种类丰富、时间序列长和高空间分辨率的数据资料在研究极端降水中的应用。极端降水的区域性和次区域性特征较高,因此,采用高分辨率的降水数据对于诊断极端降水变化特征具有重要意义^[50]。目前已有中国地面降水日值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(1961—2015 年)在极端降水阈值选取中运用^[22],若能使用雷达资料等^[52],获取更长观测时间序列、更高空间分辨率的数据,相信能更准确揭示极端降水的时空分布规律。

(3)开展 3 h 和 6 h 等不同降水时效的次日尺度极端降水的系统性研究。进一步研究中国次日尺度极端降水的时空分布和演变特征,探索产生我国次

日尺度极端降水的作用机理,完善现有的物理机制认识和预报概念模型^[49]。

(4)进一步运用动力模式和统计方法相结合的研究方法,改进数值模式,强化对环流场的模拟和对极端降水前兆信号的追溯,加强对极端降水发生和维持机理的认识,延长极端降水的预报时效^[80]。

参考文献:

- [1] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,2017,32(2):165-174.
- [2] DOU T, XIAO C, HUANG Y, et al. Estimation of the atmospheric ice content mass, spatial distribution, and long-term changes based on the ERA5 reanalysis [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47 (15). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL088186>
- [3] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [M]. London: Cambridge University Press, 2021.
- [4] FREI C, SCHAR C. Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14 (7): 1568-1584.
- [5] KLEIN TANK A M G, KONNEN G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99 [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16 (22): 3 665 - 3 680.
- [6] GROISMAN P Y, KARL T R, EASTERLING D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climate change [J]. *Climatic Change*, 1999, 42 (1): 243-283.
- [7] GONG D Y, SHI P J, WANG J A. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(4): 771-784.
- [8] 俞小鼎.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,2013,32(3):202-209.
- [9] 范元月,罗剑琴,张家国,等.宜昌极端短时强降水中小尺度对流系统特征分析[J].气象,2020,46(6):776-791.
- [10] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(增刊):1-10.
- [11] ZHANG H, ZHAI P M. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(5): 1 177-1 183.
- [12] WANG Y, ZHOU L. Observed trends in extreme precipita-

- tion events in China during 1961—2001 and the associated changes in large-scale circulation[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(9). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL022574>
- [13] LUO Y, WU M, REN F, et al. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(24): 8 703–8 719.
- [14] 邓彪, 王春学, 孙蕊, 等. 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*, 2022, 42(4): 115–120.
- [15] 于淑婷. 珠江三角洲地区极端降水的对流和微物理特征统计分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2022.
- [16] 王苗. 我国东部极端降水变化特征及成因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [17] 廖胜石, 卓健, 罗建英, 等. 广西汛期极端短时强降水特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2022, 41(3): 308–314.
- [18] 侯淑梅, 孙敬文, 孙鹏程, 等. 基于加密自动气象观测站和国家气象观测站的山东省极端短时强降水时空分布特征的对比分析[J]. *气象*, 2020, 46(2): 200–211.
- [19] BONSAL B R, ZHANG X B, VINCENT L A, et al. Characteristic of daily and extreme temperature over Canada[J]. *Climate*, 2001, 5(14): 1 959–1 976.
- [20] 罗梦森, 熊世为, 梁宇飞. 区域极端降水事件阈值计算方法比较分析[J]. *气象科学*, 2013, 33(5): 549–554.
- [21] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市设计暴雨研究综述[J]. *科学通报*, 2017, 62(33): 3 873–3 884.
- [22] 张昕怡, 方国华, 闻昕等. 中国格点化日降水极值统计模型及阈值的选取[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(4): 346–355.
- [23] 王蒙, 殷淑燕. 近 52a 长江中下游地区极端降水的时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1 221–1 229.
- [24] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1 200–1 210.
- [25] 苏布达, 姜彤, 董文杰. 长江流域极端强降水分布特征的统计拟合[J]. *气象科学*, 2008, 28(6): 625–629.
- [26] 方思达. 全球变暖背景下中国地区降水强度分布结构变化的特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [27] 毛慧琴, 杜尧东, 宋丽莉. 广州短历时降水极值概率分布模型研究[J]. *气象*, 2004(10): 3–6.
- [28] 李正泉, 宋丽莉, 梁卓然, 等. 杭州市降水特征及极端降水趋势预估[J]. *气象*, 2018, 44(6): 781–789.
- [29] 姜彤, 苏布达, MARCO Gemmer. 长江流域降水极值的变化趋势[J]. *水科学进展*, 2008(5): 650–655.
- [30] 么枕生, 丁裕国. 气候统计[M]. 北京: 气象出版社, 1990, 48–51.
- [31] FRICH P, ALEXANDER L V, DELLA-MARTA P M, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. *Climate Res*, 2002, 19(3): 193–212.
- [32] KIKTEV D, SEXTON D M H, ALEXANDER L, et al. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(22): 3 560–3 570.
- [33] 吴文祥, 侯凌云, 李娅梅, 等. 气候变化下中国极端降水的道路暴露度分析[J]. *灾害学*, 2021, 36(3): 103–108, 124.
- [34] 张仪辉, 刘昌明, 梁康, 等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 603–618.
- [35] SUN J, ZHANG F Q. Daily extreme precipitation and trends over China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2 190–2 203.
- [36] 吉戴婧琪, 元媛, 韩剑桥. 中国极端降水事件的时空变化及趋势预测[J]. *中国农村水利水电*, 2022(10): 74–80.
- [37] 龙妍妍, 范广洲, 段炼, 等. 中国近 54 年来夏季极端降水事件特征研究[J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(4): 429–438.
- [38] 曾颖婷, 陆尔. 1961—2010 年我国夏季总降水和极端降水的变化[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(2): 79–85.
- [39] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 337–353.
- [40] 李娟, 闫会平, 朱志伟. 中国夏季极端气温与降水事件日数随平均气温变化的定量分析[J]. *高原气象*, 2020, 39(3): 532–542.
- [41] WANG Y J, ZHOU B T, QIN D H, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of north-western China: Observation and projection[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(3): 289–305.
- [42] 贺冰蕊, 翟盘茂. 中国 1961—2016 年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5): 437–444.
- [43] 陈金明, 陆桂华, 吴志勇, 等. 1960–2009 年中国夏季极端降水事件与气温的变化及其环流特征[J]. *高原气象*, 2016, 35(3): 675–684.
- [44] LI H X, CHEN H P, WANG H J. Changes in clustered extreme precipitation events in South China and associated atmospheric circulations[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(9): 3 226–3 236.
- [45] 李丽平, 章开美, 王超, 等. 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*, 2010, 15(4): 443–450.
- [46] 李丽平, 许冠宇, 成丽萍, 等. 华南后汛期极端降水特

- 征及变化趋势[J]. 大气科学学报, 2012, 35(5): 570–577.
- [47] 卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 等. 近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 683–693.
- [48] 方浩, 乔云亭. 中国东部夏季极端降水时空分布及环流背景[J]. 热带气象学报, 2019, 35(4): 517–527.
- [49] 吴梦雯, 罗亚丽. 中国极端小时降水 2010—2019 年研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 502–514.
- [50] 孔锋, 方建, 乔枫雪等. 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, 2019, 28(12): 3 051–3 067.
- [51] 董旭光, 顾伟宗, 曹洁, 等. 山东省汛期小时极端强降水分布和变化特征[J]. 气象, 2017, 43(8): 953–961.
- [52] 冷亮, 周伶俐, 肖艳姣, 等. 基于地面分钟雨量数据的湖北省短时强降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(1): 61–68.
- [53] 邓彪, 王春学, 孙蕊, 等. 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, 2022, 42(4): 115–120.
- [54] 杨春, 张勇, 张亚萍, 等. 近 25 a 重庆地区小时降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1): 71–80.
- [55] 徐珺. 华北春季极端降水的主导环流型及其中尺度动力过程[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [56] CHEN S, LIU B, TAN X, et al. Characteristics and circulation background of extreme precipitation over East China[J]. Natural Hazards, 2019, 99(1): 537–552.
- [57] 刘楚薇, 饶建, 吴志文, 等. ENSO 与中国夏季降水的联系: 冬季 QBO 的调制作用[J]. 热带气象学报, 2019, 35(2): 210–223.
- [58] 李培熙, 余钟波, 江鹏, 等. 长江中下游区域性极端降水时空变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 1–5.
- [59] 晏红明, 肖子牛, 薛建军. 初夏西北太平洋副高东西变动对中国南部降水东西差异的影响[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 765–781.
- [60] ZHAO Y, XU X, LI J, et al. The large-scale circulation patterns responsible for extreme precipitation over the north China plain in midsummer[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(23): 12 794–12 809.
- [61] 陈燕, 陈兵, 孙佳丽, 等. 梅雨雨带移动对 1961–2020 年江苏省极端降水的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 27–35.
- [62] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 76–85.
- [63] 陈际龙, 黄荣辉. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 II. 夏季风水汽输送[J]. 大气科学, 2007, 31(5): 766–778.
- [64] 田红, 郭品文, 陆维松. 中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(4): 401–408.
- [65] 赵思雄, 傅慎明. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析[J]. 大气科学, 2007(6): 1 059–1 075.
- [66] 刘晓波, 储海. 一次西南低涡东移引发长江中下游暴雨的诊断研究[J]. 气象, 2015, 41(7): 825–832.
- [67] 汤欢, 傅慎明, 孙建华, 等. 一次高原东移 MCS 与下游西南低涡作用并产生强降水事件的研究[J]. 大气科学, 2020, 44(6): 1 275–1 290.
- [68] 张家国, 王珏, 吴涛, 等. 长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(1): 14–23.
- [69] 迟静, 周玉淑, 冉令坤, 等. 吉林一次极端降水发生发展热力过程的数值模拟分析[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1 400–1 414.
- [70] 陈红专. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象, 2021, 47(10): 1 219–1 232.
- [71] 杨玮, 程智. 近 53 年江淮流域梅汛期极端降水变化特征[J]. 气象, 2015, 41(9): 1 126–1 133.
- [72] 杜小玲, 吴磊, 杨秀庄, 等. 梅雨锋西段持续性暴雨的环境场特征及贵阳极端降水成因[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(5): 415–426.
- [73] 周天军, 任俐文, 张文霞. 2020 年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(10): 1 637–1 649.
- [74] 夏侯杰, 朱伟军, 任福民. 两广地区热带气旋极端降水特征及成因初探[J]. 热带气象学报, 2017, 33(4): 510–518.
- [75] 周璇, 孙继松, 张琳娜, 等. 华北地区持续性极端暴雨过程的分类特征[J]. 气象学报, 2020, 78(5): 761–777.
- [76] 杨宝琛, 罗亚丽, 姜晓玲. 热带气旋对 1975—2018 年暖季中国极端降水气候态、变化趋势及其与温度关系的影响研究[J]. 热带气象学报, 2022, 38(3): 397–409.
- [77] 陈杨瑞雪. 华南前汛期极端降水多尺度特征的统计分析 with 个例研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2018.
- [78] LUO Y, WU M, REN F, et al. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. Journal of Climate, 2016, 29(24): 8 703–8 719.
- [79] 高涛, 谢立安. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577–589.
- [80] 翟盘茂, 李蕾, 周佰铨, 等. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 631–640.

Progress in the study of spatio-temporal distribution of extreme precipitation and its atmospheric circulation background in China

ZHANG Xin, ZHANG Lingyun*

(Liuzhou Meteorological Bureau, Guangxi Liuzhou 545001, China)

Abstract: The article systematically reviews the progress of research on the determination of extreme precipitation thresholds, spatio-temporal distribution characteristics, and atmospheric circulation background in China, classifies the relevant studies, and summarizes the main results involved in the research. On this basis, the possible directions of future research on extreme precipitation in terms of spatio-temporal distribution characteristics and atmospheric circulation background are envisioned.

Key words: extreme precipitation; spatial and temporal characteristics; atmospheric circulation; research progress