

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. [KONG Feng, SHI Peijun, FANG Jian, et al. Advances and Prospects of Spatiotemporal Pattern Variation of Extreme Precipitation and its Affecting Factors under the Background of Global Climate Change[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 165–174. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.029.]

## 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<sup>\*</sup>

孔 锋<sup>1,2,3</sup>, 史培军<sup>2,3,4</sup>, 方 建<sup>5</sup>, 吕丽莉<sup>1</sup>, 方佳毅<sup>2,3</sup>, 郭建平<sup>6</sup>

(1. 中国气象局 发展研究中心, 北京 100081; 2. 北京师范大学 地表过程与资源生态  
国家重点实验室, 北京 100875; 3. 民政部/教育部 减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 北京师范大学  
环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 5. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;  
6. 中国气象科学研究院 大气成分研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 近年来极端降水事件频发, 已引起学术与社会各界的广泛关注。研究不同尺度极端降水时空变化格局及其影响因素, 既是理解全球气候变化中极端天气/气候事件的重要内容, 也是制定减轻暴雨灾害风险对策的迫切需求。为此, 该文从极端降水的定义、阈值界定、诊断方法、时空格局变化和其影响因素研究五个方面进行了综述, 梳理和分析了目前对极端降水定义的内涵和外延、阈值界定和诊断统计方法的特点, 并从全球-大洲-区域三个尺度对极端降水的时空格局变化研究结果进行了对比分析。在此基础上, 从影响极端降水时空格局变化的自然因子和人文因子两方面, 重点总结了目前在极端降水时空格局变化影响因素研究方面已经取得的进展, 以及需要进一步加强研究的方向。提出从全球变暖对极端降水事件空间变化影响机制定量分析、多尺度极端降水事件空间变化成因对比、城市化对极端降水事件空间变化影响的定量评价, 以及利用高精度气候模式对极端降水事件空间变化影响因素进行定量化模拟分析等方面开展深入研究。

**关键词:** 极端降水; 影响要素; 时空格局; 全球变暖; 人类活动

**中图分类号:** X43; P333.2; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)02-0165-10

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.029

全球气候变化背景下, 极端降水时空格局变化显著, 对经济社会发展、生命安全和生态系统安全等诸多方面将可能造成巨大的危害, 并对区域可持续发展带来深远影响。因此, 极端降水时空格局变化及其影响因素的研究, 已经成为全球和区域灾害与环境风险定量评估的重要内容, 越来越受到学术与社会各界的关注<sup>[1-4]</sup>。IPCC AR5表明, 在气候变化背景下, 人类活动可能对极端降水的增加有影响<sup>[5]</sup>。因此, 在极端降水时空格局变化影响因素的研究中, 必须同时关注气候变化和人类活动的双重影响<sup>[6-8]</sup>。开展气候变化和人类活动对极端降水时空格局变化影响的研究, 探

究极端降水空间分布对气候变化和人类活动的响应, 预估未来极端降水时空格局变化, 一方面有利于促进对气候变化-地表覆盖-人类活动内在相互作用机制的研究, 另一方面也有利于理解极端降水时空格局变化的规律。同时, 有利于科学地减轻极端降水灾害风险, 保障经济社会可持续发展<sup>[9-11]</sup>。本文综述近年来国内外极端降水时空格局变化及自然和人文因子影响的相关研究, 总结研究的进展, 展望未来发展方向, 以期更好地深化极端降水研究, 提升应对极端降水导致的洪涝灾害的科技支撑能力。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-09-14 修订日期: 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“中国雾-霾及其对暖云降水垂直分布影响的立体观测及建模研究”(41471301); 国家自然科学基金重点项目“气溶胶与边界层相互作用及其对近地面大气污染的影响研究”(91544217); 国家自然科学基金创新研究群体项目“地表过程模型与模拟”(41621061); 中国博士后科学基金面上资助项目“基于时空变化分析的气候变化对洪水灾害影响研究”(2015M582263); 中央高校基本科研业务费专项资金课题“气候变化对长江流域洪水灾害影响研究”(2042016kf0067)

第一作者简介: 孔锋(1986-), 男, 山西临汾人, 博士, 主要研究方向为自然灾害与极端降水. E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

1 极端降水定义、阈值界定和诊断方法

1.1 极端降水定义的内涵和外延

极端天气事件和极端气候事件统称极端事件，它是指某个异常天气或气候变量值的发生，该值高于(或低于)该变量观测值区间的上限(或下限)端附近的某一阈值<sup>[4-5]</sup>。极端降水则是基于这一准则，且对人类社会造成重大影响的事件。例如近年来在中国发生的极端降水事件，均造成了重大的经济损失(表1)。在国外多采用由降水事件序列的百分位数来界定极端降水的阈值，如将超过降水序列95%或99%分位数的降水事件定义为极端降水<sup>[4-5]</sup>。在中国，极端降水统称为暴雨，通常指每1 h降雨量16 mm以上，或连续12 h降雨量30 mm以上，或连续24 h降雨达到50 mm以上的降水<sup>[6-10]</sup>。

表1 中国近10年引起严重城市内涝的极端降水事件

| 时间         | 地区   | 暴雨级别 | 最大日降雨量 / mm | 直接经济损失 / 亿元 |
|------------|------|------|-------------|-------------|
| 2005年6月30日 | 河南南召 | 特大暴雨 | ≈ 360.1     | 3.5         |
| 2006年6月12日 | 福建长汀 | 大暴雨  | > 150.0     | 32.0        |
| 2007年7月31日 | 山西垣曲 | 特大暴雨 | 303.4       | 10          |
| 2008年6月13日 | 广东深圳 | 特大暴雨 | > 250.0     | > 5.0       |
| 2009年5月24日 | 广东广州 | 大暴雨  | 147.9       | 2.0         |
| 2010年7月23日 | 河南西峡 | 特大暴雨 | 288.0       | 24.1        |
| 2011年6月23日 | 北京   | 特大暴雨 | 213.4       | ≈ 100.0     |
| 2012年7月21日 | 北京   | 特大暴雨 | > 460.0     | 159.9       |
| 2013年8月22日 | 湖北武汉 | 大暴雨  | > 101.1     | 2.5         |
| 2014年3月30日 | 广东深圳 | 特大暴雨 | 318.0       | 0.5         |
| 2015年8月17日 | 贵州铜仁 | 特大暴雨 | 293.8       | > 1.4       |

1.2 极端降水阈值界定的方法

阈值的界定是极端降水事件研究中的关键问题，其直接影响到对极端降水事件的特征及演变趋势的理解<sup>[12-14]</sup>。现有的极端降水阈值界定的方法主要包括表2中的五类。极端降水事件的判定至今还没有统一成熟的阈值标准，表2列举的方法可针对不同尺度的研究区域使用。对于空间尺度较小的区域，采用绝对临界值法界定阈值较为合理<sup>[15-18]</sup>；对于空间尺度较大的区域，采用百分位法界定阈值较为合理<sup>[19-21]</sup>。此外，针对不同研究领域和研究目的会有差异，在研究中需要根据研究内容选择恰当的方法。例如在农业研究中通常采用标准差法；在气象诊断研究中通常采用百分位法。在气候特征相似的区域，利用绝对临界值法研究极端降水是较为实用的。

1.3 极端降水变化的诊断方法

目前学术界诊断极端降水变化特征的方法通常有两种：一种是根据降水现象本身定义的标准，通过对原始降水资料分析，判断极端降水事件的频率或强度有何变化<sup>[6,9,15]</sup>。另一种是定义与极端降水事件相关的代用气候指数，通过分析这些极端气候指数的特征来诊断极端降水事件的变化，从而可以对不同区域极端气候事件的研究结果进行统一对比，例如国际气候变化检测与指标专家组(ETCCDMI)提出的极端降水指标应用最为广泛<sup>[15]</sup>。目前国内外学界常用的极端降水变化诊断的研究方法如表3所示。需要指出的是，对于气候指数而言，当研究区域的气候差异比较大时，通常选用基于百分比阈值的相对指数。绝对阈值大小定义的指数适用于气候特征一致的区域。针对不同的研究目的，不同诊断方法具有不同的优势，需要在具体的研究中要根据研究目标来选取。

表2 极端降水阈值界定的方法对比

| 方法名称   |       | 方法原理                 | 阈值界定准则               | 优点表达                 | 缺点显现                      | 参考文献              |      |
|--------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|-------------------|------|
| 最大样取值法 |       | 绝对物理最大值              | 最大小时、日、月、年等降水        | 不同地区极端降水的最大值         | 不同地区最大值差别大，无法反映极端降水整体持续情况 | [15]              |      |
| 绝对临界值法 |       | 绝对物理界限值              | 某一绝对日降水强度作为临界值       | 同一标准下不同区域降水特征        | 阈值标准具有较强的经验性和主观性          | [16]              |      |
| 标准差法   | 局部标准差 | 偏离同一区域局部均值的n倍标准偏差    | 局部降水均值±n倍标准差         | 同一地区降水距平均气候态降水的偏差    | 无法定量比较不同区域降水偏差            | [17]              |      |
|        | 整体标准差 | 偏离不同区域整体均值的n倍标准偏差    | 整体降水均值±n倍标准差         | 同一标准下不同区域降水距气候态降水的偏差 | 放大或缩小了部分地区的降水偏差           | [18]              |      |
| 百分位法   | 绝对法   | 整体百分位法               | 不同区域降水大于0 mm序列的n%分位数 | 超过不同地区整体百分位法所确定的阈值   | 同一标准下不同区域极端降水情况           | 放大或缩小了部分地区的极端降水情况 | [19] |
|        |       | 局部百分位法               | 同一区域降水大于0 mm序列的n%分位数 | 超过同一地区百分位法所确定阈值      | 同一地区极端降水情况                | 无法定量比较不同区域极端降水情况  | [20] |
|        | 相对法   | 相对某一绝对物理界限值的序列的n%分位数 | 超过某一绝对物理界限值序列的n%分位数  | 不同分级极端降水情况           | 绝对物理界限值在不同地区差异较大          | [21]              |      |
| 隶属度法   |       | 基于模糊数学中隶属度概念的原理      | 基于隶属度函数界定极端降水事件      | 采用边缘值来补充极端降水样本不足     | 隶属度函数的选择会放大或缩小极端降水        | [22]              |      |

表 3 极端降水变化特征研究方法对比

|       | 方法             | 原理                   | 准则                           | 优点                                     | 缺点                                   | 参考文献 |
|-------|----------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|------|
|       | 重现期            | 超越概率                 | 大于或小于某一水平的降水事件重复出现的平均时间间隔    | 可以反映特定强度极端降水频次的时间间隔                    | 降水随机过程模型选择的不确定性                      | [5]  |
|       | 去趋势波动分析法(DFA)  | 探测降水序列长期相关性          | 滤去降水序列中的各阶趋势成分               | 消除了局部趋势,避免将短程相关序列检测为长期相关               | 确定不重叠等长度子区间具有随机性和主观性                 | [23] |
| 极值拟合  | 广义极值分布(GEV)    | 从概率意义上推估小概率的可能气候极端值  | 根据形状参数大小确定极值分布函数             | 将 Gumbel、Frechet、Weibull 极值分布统一为广义极值分布 | 需要给定参数来计算极值                          | [24] |
|       | 广义帕累托分布(GPD)   |                      | 由原始数据给定阈值来计算极大(小)值           | 减少所需年限,增加了样本量                          | 阈值过大或过小,对结果有较大的影响                    | [25] |
| 降水指数  | 绝对指数           | 绝对物理最大(小)界限值的绝对指数    | 代表季节或年最大(小)值的绝对指数            | 刻画不同地区绝对最大(小)值                         | 无法反映流域降水时空分布差异                       | [26] |
|       | 相对指数           | 基于降水百分比阈值的相对指数       | 代表季节或年最大(小)值的相对指数            | 刻画不同地区相对最大(小)值                         | 不同地区不具可比性                            | [27] |
|       | 阈值指数           | 降水大于或小于某固定阈值的阈值指数    | 代表季节或年最大(小)值的阈值指数            | 刻画不同地区最大(小)值                           | 无法反映流域降水时空分布差异特征                     | [28] |
|       | 持续指数           | 过度干-湿的持续时间所对应的持续指数   | 反映程度轻重、时间长短或频次多少的持续指数        | 刻画连续长时间极端降水的情况                         | 无法刻画持续过程中极端降水差异的情况                   | [29] |
|       | 其它指数           | -                    | 年极端降水占总降水的百分比等其它指数           | -                                      | -                                    | [30] |
| 趋势检验  | 参数趋势检验         | 回归模型检验               | 利用总体信息,以总体分布和样本信息对总体参数作出推断   | 检验回归方程对降水数据的拟合程度和显著性                   | 参数的确定具有一定主观性                         | [31] |
|       | 非参数趋势检验        | Sen 趋势检验法            | 通过计算序列中值来求趋势                 | 受噪声的干扰小                                | 不能实现序列趋势显著性判断                        | [32] |
|       |                | Mann - Kendall 统计检验法 | 明确突变开始时间和突变区域                | 样本不需遵从一定分布,也不受异常值干扰                    | 检测范围宽,对异常值不敏感,易出现多个虚假突变点             | [33] |
| 多指标联合 | Copula 函数      | 用不同边缘分布的变量来构造联合分布    | 多个随机变量相互独立,构建联合分布            | 可以表征多个指标下的极端降水变化特征                     | 实际中指标之间并不相互独立,且 Copula 函数的选择的客观性还不完善 | [34] |
| 信号分解  | 经验模态分解(EMD)    | 将整个时间序列分解成一系列的时间序列   | 原始信号包含不同时间尺度的波动,周期振荡依次由小到大   | 适用处理非线性和非平稳时间序列的方法                     | 分解出的模式混淆现象频繁出现                       | [35] |
|       | 集合经验模态分解(EEMD) |                      | 相比 EMD,既保留了原信号的信息,又克服了模态混淆问题 | 与 EMD 类似,确定每个时间尺度的权重具有不完善性             | [36]                                 |      |

2 极端降水时空格局变化研究进展

2.1 全球尺度的极端降水时空格局变化

在全球尺度上, 近百年来全球平均降水量的变化趋势不明显, 且全球降水极值的变化缺乏空间上的一致性。然而, 极端降水从 20 世纪初到 20 世纪末有显著变化, 尤其是中高纬地区极端降水增加显著<sup>[4-5]</sup>。自 1950 年以来的观测证据表明, 极端降水事件显著增加的区域可能多于显著减少的区域, 但在趋势上具有很强的区域和次区域分布特征<sup>[37]</sup>。全球气候模式输出结果表明, 人为气候强迫已导致全球极端降水加强<sup>[4,38]</sup>, 且温带地区的增加具有一致性, 而热带地区年际变异较大<sup>[39]</sup>。观测和模拟均发现温室气体的排放, 使得北半球 2/3 的陆地区域极端降水强度增强<sup>[40]</sup>。关于强降水变化的预估, IPCC SREX 认为 21 世纪全球许多

地区强降水频率或占总降水的比率可能将增加<sup>[4]</sup>。IPCC AR5 的结论是, 到 21 世纪强降水事件很可能将在全球大部分地区增加<sup>[5]</sup>。

2.2 大洲尺度的极端降水时空格局变化

观测到北美洲、欧洲、大洋洲和亚洲东部等, 大气中水汽含量呈现出增加趋势, 为保持大气水分平衡, 在一定程度上加快了水循环的速度, 尤其是在平均降水变化不大, 甚至总降水量减少的区域, 极端降水频率和强度均有所增加, 并且预计在总降水量回升时, 将会有更强的极端降水事件<sup>[4]</sup>。在东亚地区, 极端降水量、极端降水日数、极端降水降水强度从西北内陆向东南沿海递增, 但整个亚洲平均最大降水强度的年际变化不显著<sup>[41]</sup>。利用全球气候模式和区域气候模式的模拟结果均发现, 欧洲极端降水在目前和未来均呈现增加趋势, 且未来极端降水增加的比例更大<sup>[4-5,41-42]</sup>。北美洲极端降水频率增加, 且模拟研

究证明到 21 世纪末, 极端降水频率增加趋势将加剧。通过对比七大洲的暴雨雨日量级发现, 亚洲和南美洲最大, 南极洲、欧洲和大洋洲最小, 只有非洲和南极洲在波动中呈减少趋势。非洲和南极洲的年代际暴雨雨日分别从 1981 - 1990 年的  $5.89 \times 10^4$  d 和  $3.36 \times 10^3$  d 减少到 2001 - 2010 年的  $5.41 \times 10^4$  d 和  $3.09 \times 10^3$  d, 减少了 -8.24% 和 -8.20%; 其他大洲的年代际暴雨雨日从 1981 - 1990 年代到 2001 - 2010 年都呈现不同幅度的增加, 其中南美洲和亚洲暴雨雨日增幅最大分别为 35.09% 和 15.93%<sup>[42]</sup>。

### 2.3 区域尺度的极端降水时空格局变化

在全球变暖背景下, 总降水量增大的区域, 极端降水事件极有可能以更大比例增加, 即使在部分平均降水量减少的地区, 极端强降水事件也发现存在增加趋势<sup>[5]</sup>。美国、加拿大、日本、英国、挪威、南非、巴西以及俄罗斯的研究都证实了这一结论<sup>[4-5]</sup>。采用 IPCC 对全球陆地的 26 个分区(图 1), 对 1981 - 2000 年中仅有一次超过日均最大降水的重现期进行预估, 结果表明: 相邻两次超过日均最大降水的重现期越来越短, 重现期缩短表明极端降水事件的发生更频繁<sup>[4-5]</sup>。除此之外, 采用该 26 个分区对暴雨雨日进行统计分析结果表明: 有 11 个分区在波动中呈现不同程度的减少趋势, 其中减少趋势最大的是 WAF 分区, 其趋势是 -61.01 d/年; 其他 15 个分区在波动中呈现不同程度的增加趋势, 其中增加趋势最大的是 AMZ 分区, 其趋势是 135.59 d/年。从年代际暴雨雨日来看, 24 个分区呈现增加趋势, 增幅最大的三个分分别是 AMZ、CAM 和 SEA 分区, 增幅分别是 238.65%、142.79% 和 118.21%; 呈现减幅的分区是 SAH 和 WAF, 减幅分别是 36.58% 和 14.29%<sup>[42]</sup>。对中国来说, 全国尺度上的总降水量趋势变化不明显, 但极端降水强度在增强<sup>[43-45]</sup>, 遭受极端降水的地区也在增加<sup>[46-51]</sup>。利用不同气候模式在不同情景下预估的结果均一致表明, 未来中国极端降水的强度和频次都存在显著增加的趋势, 尤其是在全球变暖的背景下, 中国绝大多数地区极端降水都呈增加趋势<sup>[52-55]</sup>。

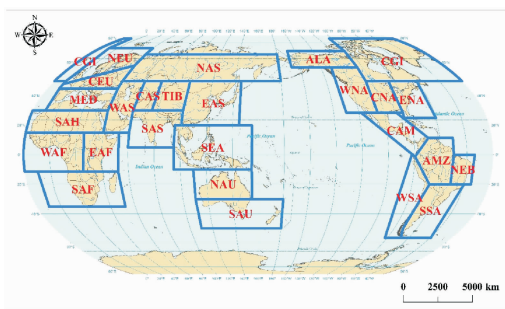


图 1 IPCC 对全球陆地的 26 个分区

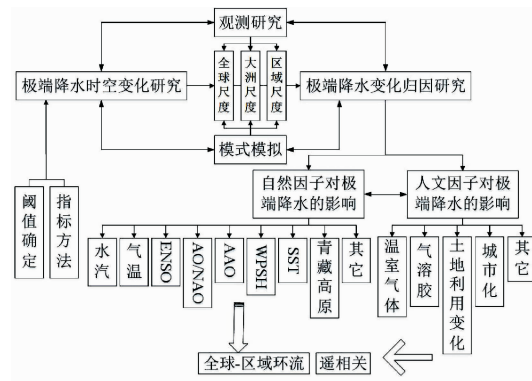


图 2 极端降水变化归因研究

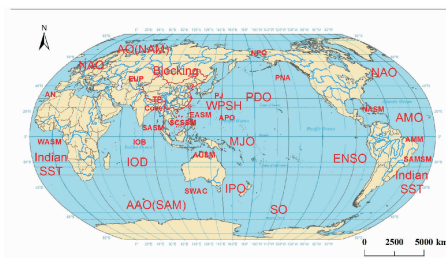


图 3 影响全球气候的主要自然系统

## 3 极端降水时空格局变化影响因素的研究进展

### 3.1 统计诊断和模式模拟在极端降水时空格局变化

目前国内外对极端降水影响因素的研究主要集中在统计诊断和模式模拟两个方面<sup>[4-5]</sup>。统计诊断主要是依靠观测记录来确定事件的发生频率或强度的变化情况; 模式模拟则是在有/无气候变化情况下极端事件的区别。大多数研究同时使用观测和模型两种方法。在统计诊断方面, 使用各种统计方法, 建立极端降水与各类影响因子之间的经验模型<sup>[9]</sup>。这类模型主要包括线性回归、非线性回归、奇异值分解(SVD)、典型相关分解(CCA)、主成分分析(PCA)和人工神经网络(ANN)等<sup>[15]</sup>。影响极端降水的因子一般分为大尺度环流因子和人类社会经济活动因子。统计方法所建立的诊断模型, 动力学意义不明确, 且容易造成过拟合现象, 解释的准确率有限。IPCC 依据全球和不同区域的观测结果, 对全球和不同区域尺度的极端降水长期和短期的变化进行诊断, 然后采用自然因子和人文因子的变化对区域极端降水的时空格局变化进行统计分析, 并试图从物理过程上对自然因子和人文因子对极端降水时空格局的影响作出相应解释(图 2)<sup>[4-5]</sup>。在模式模拟方面, CMIP 5 中的地球系统模式对极端天气事件有一定的模拟能力, 但一般模拟效果较差, 尤其对极端降水的模拟效果更差<sup>[2,4]</sup>。整体而言, 由于观测证据有限, 且地球系统模式的一致性低, 加

之缺乏物理认识, 因此, 在人类贡献认识方面具有低信度<sup>[5,11]</sup>。但模式模拟对整个极端降水的物理过程理解具有统计诊断研究无法比拟和替代的作用, 将会在极端降水变化热力和动力学研究中, 发挥越来越重要的作用。

### 3.2 自然因子对极端降水时空格局变化的影响

影响全球气候的主要自然系统在空间分布上复杂多样(图 3), 对极端降水时空格局变化的影响, 自然因子主要包括大气涛动和遥相关型、青藏高原、陆面过程和海洋。本文主要综述了以下几类自然因子对极端降水时空格局变化的影响:

#### 3.2.1 水汽对极端降水时空格局变化的影响

水汽是极端降水形成过程中最重要的因素之一<sup>[4]</sup>, 其在很大程度上受到全球气候变化影响, 尤其是 1990 年代以来的大气水汽含量不断增加, 在很大程度上归咎于全球变暖<sup>[5]</sup>。已有研究表明当大气湿度恒定, 水汽因素能够使全球增暖加快近一倍。随着全球变暖的持续, 水汽含量的增加速率远远大于地球表面总降水量的增加速率<sup>[56]</sup>。自 1950 年以来的观测记录表明, 全球极端降水事件增加频率上升, 恰巧与增暖背景下大气中的水汽含量增加相一致<sup>[5]</sup>。从全球尺度来看, 在 1973–2006 年期间整个北半球对流层水汽的变化趋势呈增加趋势<sup>[57]</sup>。从区域尺度来看, 在北美、欧洲、大西洋、和东亚等地区水汽含量均呈增加趋势。水汽因素对极端降水的反馈作用是一种正反馈作用, 由于目前缺乏精确的水汽数据, 无法精确量化这种正反馈作用, 其强弱估算还存在较强的不确定性。因此, 亟待定量探究水汽变化对极端降水时空格局变化的影响。

#### 3.2.2 气温对极端降水时空格局变化的影响

在全球变暖背景下, 气温变化对极端降水时空格局变化的影响是首位的。理论上温度的增加会导致水汽含量和降水的增加<sup>[56]</sup>, 观测资料也证实了气温增加引起大气含水量增加的理论推断<sup>[57]</sup>。但气温对降水的作用并非瞬时响应, 而是存在一个能量累积与系统发展的过程。不同地区具有较大的差异性<sup>[56–57]</sup>, 例如中纬度地区极端降水在相对低温时会随气温升高而增加, 而当气温高于一定数值时则下降<sup>[58–61]</sup>。中国华南地区在增暖趋势下极端降水的频次和强度均呈显著增加趋势<sup>[62]</sup>。在中国冬季气温升高时, 极端降水呈现出一致性的增加趋势<sup>[63]</sup>。但全球变暖并非全球一致性变暖, 降水也并非全球一致性变化, 因此, 一方面需要诊断全球变暖对极端降水时空格局变化的影响; 另一方面需要量化不同地区气温变化对极端降水时空格局影响的差异性。

#### 3.2.3 ENSO 对极端降水时空格局变化的影响

ENSO 对降水的影响表现在暖事件年全球陆地年降水量大范围显著减少<sup>[64]</sup>。1951–1980 年的 ENSO 与该时段的全球降水减少有关, 但是 1977

年开始, ENSO 发生了年代际变化, 1977 年后 ENSO 增强且频率高, 与 1951–1977 年 ENSO 的特点不同。1980 年以后的暖事件对东澳大利亚干旱、中国华北干旱的影响比 1980 年以前的影响要大<sup>[65]</sup>。在中国, ENSO 暖、冷年极端降水对比显著区域主要在华北东部地区, 暖年和冷年当年夏季该地区分别对应着极端降水的负、正距平区; 在暖年次年, 夏季和春季分布型有相似之处, 北方呈现正距平, 南方分布形势较为复杂, 江南地区也有极端降水的高值区; 次年秋季, 极端降水正距平区主要分布在北方; 次年冬季, 整个东部地区以极端降水负距平为主, 冷年次年四季极端降水基本呈相反的分布形势<sup>[66]</sup>。因此, 一方面需要量化 ENSO 对极端降水频次和强度的影响; 另一方面应加强不同强度 ENSO 对极端降水时空格局变化影响差异的研究。

#### 3.2.4 NAO/AO 对极端降水时空格局变化的影响

NAO 通过影响西风带, 进而通过环流调整影响青藏高原上空水汽输送和辐合、辐散场的分布, 最终对中国降水的时空格局产生影响<sup>[67]</sup>。在 NAO 强年份, 中国的水汽输送通量增强, 水汽辐合增强, 造成中国北部极端强降水偏多, 南部偏少<sup>[68]</sup>。在 NAO 弱年份, 与上述情形相反。AO 与东亚夏季降水有密切关系, 在年际尺度上, 5 月 AO 指数偏高时, 夏季长江中下游到日本南部的极端强降水偏少, 反之, 则偏多<sup>[69–70]</sup>。因此, 需要进一步加强 NAO/AO 对全球其它地区的极端降水的影响程度研究, 以及不同强度的 NAO/AO 对极端降水时空格局变化的影响程度研究。

#### 3.2.5 AAO 对极端降水时空格局变化的影响

北半球春季时的南极涛动(AAO)指数与中国长江中下游地区夏季降水存在超前一个季度的显著正相关关系<sup>[71]</sup>。春季 AAO 指数与夏季中国降水在长江中下游地区为显著相关区。北半球春季时 AAO 指数序列与夏季长江中、下游地区降水序列存在很好同步关系。说明春季 AO 偏强(弱)时, 夏季长江流域降水偏多(偏少)。而且, 在强春季 AAO 指数事件年份, 长江中下游地区夏季降水偏多; 在弱春季 AAO 指数事件年份(即低于负的一个标准差的年份), 长江中下游地区夏季降水均偏少<sup>[72]</sup>。因此, 需要进一步加强 AAO 对极端降水影响的机理研究, 以及 AAO 对全球其他区域的极端降水变化的影响研究。

#### 3.2.6 海温异常对极端降水时空格局变化的影响

在空间和时间上, 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水存在较好的相关关系。在对 ENSO 事件导致全球气候异常的基础上, 已有学者开始致力于从海温异常对降水影响的角度来寻找旱涝预报因子<sup>[73]</sup>。印度洋全海盆的增温趋势与中国夏季降水的变化趋势相一致, 正 SIOD(南印度洋偶极子)年中国江南和西南及长江中下游的降水偏多,

负 SIOD 年则偏少<sup>[74]</sup>。长江流域降水与赤道中东太平洋海温的关系不确定,而与邻近海域如西太平洋、南海、印度洋有较密切的关系,前春赤道南印度洋海温异常偏暖,则夏季南海海温异常偏暖,南海低空出现异常偏南风,异常多的水汽向中国南方输送,长江中下游地区易涝;反之,则易旱<sup>[75-76]</sup>。也有学者以一些影响降水的环流系统如副热带高压、南亚高压等为切入点研究其影响旱涝的可能机制<sup>[77]</sup>。因此,不同地区的 SST 异常对不同地区极端降水有不同的影响,需要在模式模拟中加以验证。

### 3.2.7 青藏高原对极端降水时空格局变化的影响

赵声蓉认为青藏高原上空的潜热加热增强,华北地区降水偏少;反之,华北地区降水偏多<sup>[78]</sup>。李栋梁等认为夏季青藏高原大面积感热异常偏强时,黄河流域降水偏多;相反,华北干旱<sup>[79]</sup>。高原积雪是青藏高原对中国降水影响的另外一种途径。高原积雪主要是通过改变高原热源来影响大气环流,进而对天气和气候产生影响。高原积雪的增加可以使高原热源减弱,海陆温差减小,从而致使季风减弱,并导致“南涝北旱”。高原积雪的增加在“南涝北旱”雨型的形成中究竟起了什么作用?这些问题值得进一步深入研究<sup>[80]</sup>。学界对高原积雪变化造成亚洲季风推迟已达成共识,但对其影响机理的分析却相当不一致,因此,高原积雪对中国夏季降水如何产生影响,仍存在争议,亟需从动力和热力两方面来加强其对极端降水影响的研究。

### 3.2.8 亚洲季风环流系统对极端降水时空格局变化的影响

东亚西风带南缘和西太平洋副热带高压之间的地区,是夏季最有利于深对流和极端降水事件发展的地区<sup>[81]</sup>。当有一条西东走向的静止锋位于这个区域时,这里将成为极端降水发生最多的危险地带。副热带高压的东、西向及南、北向进退决定了中国东部夏季雨带的位置;中纬度西风扰动、从南海向北的水汽输送则有助于梅雨锋的维持和加强<sup>[82-83]</sup>。因此,需要在模式模拟中,加强亚洲季风环流系统对极端降水影响的定量分析。

## 3.3 人文因子对极端降水时空格局变化的影响

### 3.3.1 温室气体排放对极端降水时空格局变化的影响

在观测方面,现有结果认为温室气体排放所导致的全球变暖使得地表蒸发加剧,导致大气保水能力增加,全球和区域水循环加快,势必造成部分地区降水增多<sup>[2,4]</sup>,其中对流性降水的增加大于层状降水<sup>[5]</sup>。在模拟方面,通过模式模拟研究发现当前全球 18% 的强降水是由人类活动引起的全球变暖所导致的。随着未来气温上升,这个比例还会增加;模拟结果表明,当气温比工业发展前的水平多升高 2°C,人类活动将影响 40% 的极端

降水。但从全球视角来预测气候变暖给长期的极端降水所造成的影响要比仅聚焦于单个极端降水事件的模拟预测更可靠,毕竟针对单个极端降水事件的模拟存在较大的不确定性。在区域尺度上,利用 WRF 模式模拟发现,在化石燃料密集排放的情境下,美国东部地区的年极端强降水要比目前状况严重的多,大约增加了 107.3 mm<sup>[84]</sup>。需要特别指出的是,在对比模式结果与观测结果后,发现气候变暖下极端降水的实际增加大于模式模拟的结果<sup>[38-40]</sup>。因此,一方面需要加强历史温室气体排放对目前极端降水空间分布影响的定量分析;另一方面需要甄别不同种类温室气体排放对观测和模拟中对极端降水空间分布的定量影响。

### 3.3.2 气溶胶排放对极端降水时空格局变化的影响

空气污染在很多方面都会影响降水,且影响过程非常复杂,这取决于大气状况和气溶胶特征,既可能增强,也可能减弱。随着地表气溶胶浓度增加,云顶高度和云厚度都有显著增加。在严重污染的情况下,夏季云厚度可比低污染时高出一倍。因此可显著增强雷暴天气,增加强降水。相反,在干燥的季节和地区,气溶胶(污染物)抑制云的生成与发展,降低降水发生的概率。污染在相对干燥的环境中对云发展有抑制效应,因此使干旱恶化<sup>[85-86]</sup>。在盆地地区,由于气溶胶显著削弱了到达地面的太阳辐射,同时增强了大气的辐射吸收,使得盆地大气变得异常稳定,而大量水汽和湿对流不稳定能量被堆积在盆地上空,并随气流传向山区。受地形抬升,这些堆积的水汽和能量被迅速释放出来,造成异常强烈降水。这些观测结果可以用精细的云模式模拟出来,但目前的气候模式尚无法实现。因此,目前模式模拟的人类活动对极端降水的影响可能与实际有很多出入<sup>[85-87]</sup>。

### 3.3.3 城市化进程对极端降水时空格局变化的影响

城市化进程伴随着土地利用的变化,由于土地利用变化会造成地表反照率、蒸散、土壤湿度、地表粗糙度、地气通量交换、能量和水循环等发生变化,进而影响辐射强迫,导致极端降水发生变化<sup>[88]</sup>。城市土地利用的变化使得城市下垫面物理性质与自然地表有很大区别,密集的楼群大大增加了下垫面的粗糙程度,太阳辐射量的变化差异,城市中强烈的人为加热,大气环境、土壤环境的日益恶化等,在很大程度上影响着城市气候状况的变化。大规模城市数量和大面积建成区的增加有利于对流型极端降水的增加。区域大气模式模拟表明,澳洲悉尼盆地地表植被的减少,影响大气水分和能量收支平衡,使得对流活动加强,从而对极端降水增加起了作用<sup>[89]</sup>。另外,许多学者针对其他不同区域的降水做了大量的研究,虽

然地域和方法存在差异,但这些研究同样都检测到城市化对极端降水的影响在增强<sup>[90-91]</sup>。需要注意的是目前城市化过程涉及的因素较多,如何定量地研究城市化过程对极端降水的影响,亟待在观测研究和模式模拟中进一步加强。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

(1)近十年来极端事件归因科学发展迅速,具有以下特征的极端事件,归因研究结果更加可信:一是具有长期的历史观测记录,可以在合适的历史背景下整体考虑;二是可以利用气候模型充分模拟;三是本质上纯粹是自然现象,受人为干扰有限。极端降水作为一种主要的极端事件,满足以上特点,可以使得其归因结果稳定和可信,尤其是对自然和人文因子的定量贡献。

(2)极端降水时空格局变化的研究从阈值界定和诊断方法出发,着眼于极端降水的频次和强度在不同时空尺度上的演变特征。此外,受制于长时间序列的高时空分辨率降水数据的有限,极端降水时空格局变化的研究虽然在变化趋势具有一致性,但是在极端降水变化的绝对数量级上具有较大差异,尤其是气候模式模拟的极端降水变化具有很强的不确定性。由于统计诊断和模式模拟在预测区域极端降水方面受到精度的局限,将两者建立联系的统计与动力降尺度方法在未来极端降水时空格局变化的预测研究中将会起重要作用。

(3)极端降水相对于平均降水对自然因子和人文因子的响应更加敏感。极端降水时空格局变化的影响因素研究主要以全球环流因子、区域环流因子及遥相关为主的自然因子对极端降水时空格局变化的影响,而且主要关注于大尺度分析,尤其是极端降水与温度的关系较为密切,因此在研究极端降水特征时常常与温度变化的研究相结合。人文因子对极端降水时空格局变化的影响研究目前主要关注于局地尺度;在大区域尺度上还未取得一致性的认识,但 IPCC AR5 和最新研究指出人文因子已经在中高信度水平上影响着极端降水的时空格局。

### 4.2 展望

2016 年 3 月 11 日,美国国家科学院出版社发布的《Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change》<sup>[93]</sup>指出,随着科学的进步,人类活动导致的天气变化影响了某些极端事件的强度和频率。为了更好地深化极端降水时空格局变化及其影响因素的研究,未来应重点关注以下五个方面的问题:

(1)客观归因体系的构建。为了更好地服务于利益相关者,极端事件归因体系需要:首先开发

和利用客观的极端事件选择标准,减少选择偏差,使利益相关者可以理解如何将单个事件纳入更加广阔的气候变化背景。其次在事件发生后的数天内为利益相关者提供成因信息,随后随着数据和分析结果的增加随时更新这些信息。再次与利益相关者明确交流,沟通关于方法和框架选择以及相关的不确定性和可能性的关键信息。最后能可靠地评估极端事件归因体系的成效。

(2)多尺度极端降水的定量对比研究。从多空间尺度来看,多种空间尺度的对比分析有助于研究整体和局部的极端降水特征。在国家尺度上,中国极端降水,无论频次,还是雨量都呈增加趋势。但在局地尺度上,中国极端降水也有呈减少趋势的区域。从多时间尺度来看,年际和年代际极端降水的增加是区域性现象,还是全球性现象?全球不同地区的极端降水变化具体表现如何?2015 年全球已有超过 54% 的人口居住在城镇,预计非洲和亚洲到 2020 年将分别有 56% 和 64% 的人口居住在城镇<sup>[92]</sup>。这些地区极端降水的区域变化差异是何种因子起到关键性作用?亟待从全球和区域尺度上开展更深入的观测、诊断和模拟研究。

(3)全球变暖对极端降水影响的定量研究。全球气候变暖背景下的气温的增加对降水的增加具有放大作用。在全球变暖的背景下,通过综合分析影响区域极端降水的物理因子来探究其成因机制。全球变暖冬季最强,所以如果说全球变暖对降水存在影响,那么冬季降水对变暖的响应理应更强。但不同地区降水对增暖的响应是不同的,这一差异说明,开展降水对变暖区域的响应研究更加重要,不但要从全球尺度探讨这一问题,还应加强区域尺度对比研究,从而能够全面地理解全球变暖的影响。

(4)城市化进程影响的定量研究。人类活动已对极端降水产生了较大影响,尤其是土地利用变化和土壤湿度等强迫因子在模式中已产生了不可忽视的影响。纵观国内外研究,大都从某个城市的城市化入手,研究其对极端降水的影响,用城市化的某一表征变量与降水做相关分析探讨其与极端降水的相关性。但是很少涉及城市化对极端降水变化的贡献率,因此,需要深入开展城市化进程对极端降水的定量研究。

(5)高精度气候模式的模拟验证。人类活动能够在比预先估计更大的程度上扰乱地球的自然系统。由于经济发展往往伴随着气溶胶排放的增加,对可持续发展有不利的影响。目前的气候模式尚未将这些综合效应考虑进去。在极端降水研究方面,一方面在给定观测的自然和人为强迫因子的条件下,合理再现和确认大尺度极端降水变化的稳健信号;另一方面,通过模拟研究加深对不同气候变化分区下人类活动对极端降水的热动力和云物理过程影响的科学理解,从而进一步揭示极

端降水成因机制。

## 参考文献:

- [1] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal. Geophysics. Research*, 2005; 1-65.
- [2] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections[J]. *Climatic Change*, 2007, 81(1): 71-95.
- [3] Brown P, Bradley R, Keimig F. Changes in extreme climate indices for the Northeastern United States, 1870-2005[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(24): 6555-6572.
- [4] IPCC SREX. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[M]. London: Cambridge University Press. 2012.
- [5] IPCC AR5. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change Fifth Assessment Report (AR5) [M]. London Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2013.
- [6] 史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. *地理科学*, 2014, 34(11): 1281-1290.
- [7] 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961-2010年)[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2294-2306.
- [8] Liu J, Zhai P. Changes in climate regionalization indices in China during 1961-2010[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(2): 374-384.
- [9] 方建, 杜鹃, 徐伟, 等. 气候变化对洪水灾害影响研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(9): 1085-1093.
- [10] 史培军, 孔锋, 叶谦, 等. 灾害风险科学发展与科技减灾[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(11): 1205-1211.
- [11] Coumou D, Rahmstorf. A decade of weather extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.
- [12] 冉祥滨, 于志刚, 臧家业, 等. 地表过程与人类活动对硅产出影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(5): 577-587.
- [13] Frei C, Schär 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.
- [14] Klein Tank A M G, Können G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99 [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(22): 3665-3680.
- [15] 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.
- [16] 王研峰. 半干旱地区天气相互作用对降水的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [17] Qian W, Fu J, Yan Z. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961-2005 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(11): 224-238.
- [18] Qian W, Lin X, Zhu Y, et al. Climatic regime shift and decadal anomalous events in China[J]. *Climatic Change*, 2007, 84(2): 167-189.
- [19] Nandintsetseg B, Greene J S, Goulden C E. Trends in extreme daily precipitation and temperature near Lake Hovsgol, Mongolia[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(3): 341-347.
- [20] Li F, Collins W D, Wehner M F, et al. Impact of horizontal resolution on simulation of precipitation extremes in an aquaplanet version of Community Atmospheric Model (CAM3) [J]. *Tellus A*, 2011, 63(5): 884-892.
- [21] Zolina O, Kapala A, Simmer C, et al. Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: a comparative assessment [J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 44(1): 129-161.
- [22] 李娇, 任国玉, 战云健. 浅谈极端气温事件研究中阈值确定方法[J]. *气象科技进展*, 2013, 2(5): 36-40.
- [23] 彭鹏, 张韧, 洪梅, 等. 气候变化影响与风险评估方法的研究进展[J]. *大气科学学报*, 2015, 38(2): 155-164.
- [24] Zhang Q, Zhang J, Yan D, et al. Extreme precipitation events identified using detrended fluctuation analysis (DFA) in Anhui, China[J]. *Theoretical and applied climatology*, 2014, 117(1): 169-174.
- [25] Wehner M F, Smith R L, Bala G, et al. The effect of horizontal resolution on simulation of very extreme US precipitation events in a global atmosphere model[J]. *Climate dynamics*, 2010, 34(2): 241-247.
- [26] Li Z, Brissette F, Chen J. Finding the most appropriate precipitation probability distribution for stochastic weather generation and hydrological modelling in Nordic watersheds [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(25): 3718-3729.
- [27] Kioutsioukis I, Melas D, Zerefos C. Statistical assessment of changes in climate extremes over Greece (1955-2002) [J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(11): 1723-1737.
- [28] You Q, Kang S, Pepin N, et al. Relationship between trends in temperature extremes and elevation in the eastern and central Tibetan Plateau, 1961-2005 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(4): 317-333.
- [29] Mouhamed L, Traore S B, Alhassane A, et al. Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2013, 1: 19-25.
- [30] Ngo-Duc T, Kieu C, Thatcher M, et al. Climate projections for Vietnam based on regional climate models [J]. *Climte Research*, 2014, 60: 199-213.
- [31] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [32] Bae D H, Jung I W, Chang H. Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins [J]. *Hydrological processes*, 2008, 22(14): 2644-2656.
- [33] Luo Y, Liu S, Fu S L, et al. Trends of precipitation in Beiji River basin, Guangdong province, China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(13): 2377-2386.
- [34] Mondal A, Kundu S, Mukhopadhyay A. Rainfall trend analysis by Mann-Kendall Test: A case study of North-Eastern part of Cuttack district, Orissa [J]. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*, 2012, 2(1): 70-78.
- [35] Zhang Q, Li J, Singh V P. Application of Archimedean copulas in the analysis of the precipitation extremes: effects of precipitation changes [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 107(1): 255-264.
- [36] Sun X, Qiao S F, Xie J R. The study of precipitation forecast model on EMD-RBF neural network-A case study on northeast China [J]. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 641: 119-122.
- [37] Shao Z, Gao F, Yang S L, et al. A new semiparametric and EEMD based framework for mid-term electricity demand forecasting in China: Hidden characteristic extraction and probability density prediction [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 876-889.
- [38] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J].

- Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 417–426.
- [39] Ghil M, Allen M R, Dettinger M D, et al. Advanced spectral methods for climatic time series [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(1): 313–341.
- [40] Paul A. O'Gorman. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change [J]. *Nature Geoscience* 2012, 5(10): 697–700.
- [41] Min S K, Zhang X, Zwiers F W, et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes [J]. *Nature*, 2011, 470(7334): 378–381.
- [42] Durman C F, Gregory J M, Hassell D C, et al. A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(573): 1005–1015.
- [43] 孔锋, 王铸, 刘凡, 等. 全球、大洲、区域尺度暴雨时空变化格局(1981–2010) [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(2): 228–234.
- [44] Zhai P, Sun A, Ren F, et al. Changes of climate extremes in China [J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 203–218.
- [45] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(7).
- [46] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144–148.
- [47] Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. *Nature*, 2007, 448(7152): 461–465.
- [48] Feng L, Zhou T, Wu B, Tim LI. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, (02): 464–476.
- [49] Fu G, Yu J, Yu X, Ouyang R, Zhang Y, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009 [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 48–59.
- [50] Wang Y, Zhou L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961–2001 and the associated changes in large-scale circulation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, (32): 982–993.
- [51] Yu R, Li J. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(19): 6851–6861.
- [52] Zhang Y, Xu Y, Dong W, et al. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24): 194–199.
- [53] 江志红, 丁裕国, 陈威霖. 21 世纪中国极端降水事件预估 [J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(4): 202–207.
- [54] 陈活泼. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估 [J]. *科学通报*, 2013, 58(8): 743–752.
- [55] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探 [J]. *湖泊科学*, 2004, 16(04): 289–297.
- [56] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring? [J]. *Science*, 2007, 317(5835): 233–235.
- [57] Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor [J]. *Climate Dynamics*, 2005, 24(7): 741–758.
- [58] Utsumi N, Seto S, Kanae S, et al. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(16): 239–255.
- [59] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle [J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 224–232.
- [60] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes [J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1481–1484.
- [61] Emori S, Brown S J. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): 231–232.
- [62] Zhou T, Yu R, Zhang J, et al. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(8): 2199–2215.
- [63] 孙建奇, 敖娟. 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应 [J]. *科学通报*, 2013, 58(8): 674–679.
- [64] Hulme M. A 1951–1980 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models [J]. *Climate Dynamics*, 1992, 7(2): 57–72.
- [65] 夏冬冬, 施能, 陈绿文. 1948–2000 年 ENSO 事件与全球陆地年降水量的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 2003, 03: 333–340.
- [66] 王苗. 中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.
- [67] 范丽军, 李建平, 韦志刚, 等. 北极涛动和南极涛动的年变化特征 [J]. *大气科学*, 2003, 27(3): 419–424.
- [68] 龚道溢, 王绍武, 朱锦红. 北极涛动对中国冬季日气温方差的显著影响 [J]. *科学通报*, 2004, 49(5): 487–492.
- [69] New M, Todd M, Hulme M, et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(15): 1889–1922.
- [70] Vasconcellos F C, Cavalcanti I F A. Extreme precipitation over Southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere annular mode [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2010, 11(1): 21–26.
- [71] Wang H, Fan K. Central-north China precipitation as reconstructed from the Qing dynasty: Signal of the antarctic atmospheric oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(24): 348–362.
- [72] Nan S, Li J. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): 171–185.
- [73] 罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析 [J]. *大气科学*, 1985, 9(3): 314–320.
- [74] 杨明珠, 丁一汇. 中国夏季降水对南印度洋偶极子的响应研究 [J]. *大气科学*, 2007, 31(4): 685–694.
- [75] 张琼, 吴国雄. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. *气象学报*, 2001, 59(5): 569–577.
- [76] 张琼, 刘平, 吴国雄. 印度洋和南海海温与长江中下游旱涝 [J]. *大气科学*, 2003, 27(6): 992–1006.
- [77] 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征关 [J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(3): 307–318.
- [78] 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究 [J]. *大气科学*, 2003, 27(5): 881–893.
- [79] 李栋梁, 魏丽, 李维京. 青藏高原地面感热对北半球大气环流和中国气候异常的影响 [J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 60–70.
- [80] 朱玉祥, 丁一汇. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题 [J]. *气象科技*, 2007, 35(10): 1–8.
- [81] Sun J, Wang H, Yuan W. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze

- River valley summer rainfall[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(9): 1276 – 1284.
- [82] Zhang L, Wang B, Zeng Q. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in southeast China[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(2): 201 – 216.
- [83] Zhu Y, Wang H, Zhou W, et al. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(7): 1463 – 1473.
- [84] Gao Y, Fu J S, Drake J B, et al. Projected changes of extreme weather events in the eastern United States based on a high resolution climate modeling system[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 1: 12.
- [85] Li Z, Niu F, Fan J, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation[J]. *Nature Geoscience* 2011, 12(4): 888 – 894.
- [86] Fan J, Yuan T, Comstock J M, et al. Dominant role by vertical wind shear in regulating aerosol effects on deep convective clouds[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114 (D22): 2191 – 2196.
- [87] Fan J, Leung L R, Li Z, et al. Aerosol impacts on clouds and precipitation in eastern China: Results from bin and bulk microphysics[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(2): 262 – 269.
- [88] Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992[J]. *Global Biogeochemical Cycles*. 1999, 13(4): 997 – 1027.
- [89] Gero A F, Pitman A J, Narisma G T, et al. The impact of land cover change on storms in the Sydney Basin, Australia, Global and Planetary Change[J]. *Global and Planetary Change*. 2006, 54 (1): 57 – 78.
- [90] Wan H, Zhong Z, Yang X, et al. Impact of city belt in Yangtze River Delta in China on a precipitation process in summer: a case study[J]. *Atmospheric Research*, 2013, 125(3): 63 – 75.
- [91] Wu K, Yang X Q. Urbanization and heterogeneous surface warming in eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 (12): 1363 – 1373.
- [92] Gerland P, Raftery A E, Ševčíková H, et al. World population stabilization unlikely this century[J]. *Science*, 2014, 346(6): 234 – 237.
- [93] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2016. doi: 10. 17226/21852.

## Advances and Prospects of Spatiotemporal Pattern Variation of Extreme Precipitation and its Affecting Factors under the Background of Global Climate Change

KONG Feng<sup>1, 2, 3</sup>, SHI Peijun<sup>2, 3, 4</sup>, FANG Jian<sup>5</sup>, LU Lili<sup>1</sup>, FANG Jiayi<sup>2, 3</sup> and GUO Jianping<sup>6</sup>

(1. *Research Centre for Strategic Development, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*; 2. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 3. *Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China*; 4. *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 5. *School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China*; 6. *Institute of Atmospheric Composition, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** Recent research have noted a worldwide increase in the occurrence of extreme-precipitation events, which has caused extensive concern of the academic and the social from all walks of life. Research different spatial scale pattern of extreme precipitation and its affecting factors, is not only an understanding of an important part of the extreme weather/climate events under the background of global climate change, but also urgently needs to reduce the urban waterlogging risk countermeasure. Therefore, in this research, the definition, threshold, diagnostic methods, spatial pattern variation and its affecting factors of extreme precipitation are reviewed. Comprehensive combing and analysis are done to the current definition of extreme precipitation threshold and the characteristics of the diagnostic methods. Extreme precipitation spatial pattern variations from the global-continent-regional scale are then comparatively analyzed. Based on these, from the affecting factors of extreme precipitation spatial pattern variation both natural climate indices and anthropogenic economic activity factors two aspects, emphatically summarized the present advances in the affecting factors of extreme precipitation spatial pattern variation research, and further to strengthen the direction of the research. Global warming quantitative influence extreme precipitation spatial pattern variation, the causes of multi-scale contrast in extreme precipitation spatial pattern variation, quantitative evaluation of the impact of urbanization to extreme precipitation spatial pattern variation and high precision model simulation to extreme precipitation spatial pattern variation will be the future research emphasis.

**Key words:** extreme precipitation; threshold; spatiotemporal pattern; global warming; human activities