全球增暖 1.5/2℃下中国区域极端降水的风险变化及其影响因子分析

朱连华[①②*]，祝颖锜[①]，姚壹壹[①]，石晨[④]，徐凡然[①]，赵暐昊[①]，江志红[③]
① 南京信息工程大学 数学与统计学院，江苏 南京 210044；
② 无锡学院 理学院，江苏 无锡 214105
③ 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，江苏 南京 210044；
④ 吉林省气象科学研究所，中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室，吉林 长春 130062
*联系人, E-mail: ahualian@nuist.edu.cn

2021-00-00 收稿，2021-00-00 接受

国家重点研发计划（2017YFA0603804，2018YFC1505804）；国家自然科学基金面上项目（41905078，11771215，41875098）；江苏省自然科学基金（BK20191394）

摘要 本文利用 24 个 CMIP6 全球气候模式的逐日降水模拟资料，基于广义极值分布（GEV）模型，研究了全球增暖 1.5/2℃下我国 20、50 和 100 年重现期极端降水的未来风险变化。可以发现，相对于历史时期（1995-2014），全球升温 1.5℃和 2℃下极端降水发生概率风险空间分布相近，总体上呈现增加趋势，但额外增暖 0.5℃将导致更高的风险。如 50 年重现期极端降水，在增暖 1.5/2℃下其重现期将分别变为 17/14 年，极端降水将变得更加频繁。不同区域对气候变暖的响应存在区域差异，其中中国西部长江黄河中上游和青藏高原地区、中国东部长江黄河中下游及其以南地区，极端降水发生概率比达到 3 以上，局部更是达到 5 以上，为我国极端降水气候变化响应高敏感区域。进一步，基于概率分布函数从理论角度探讨了位置和尺度参数对发生概率风险的影响与贡献度量，并用于探讨极端降水气候平均态和变率变化对极端降水发生风险的影响，结果显示：位置和尺度参数的增量变化、风险变化率存在着显著的东西部差异，从而导致极端降水发生风险的影响因素存在差异。如中国西部尽管极端降水气候平均态和变率变化幅度不大，但因风险变化率较高，从而导致该区域的发生风险大幅增加；与之相反，中国东部风险变化率较小，但气候平均态和年际变率增幅较大，同样导致该区域风险增加依然较高；此外，相对于位置参数，全国大部分区域主要是尺度参数的变化导致极端降水未来风险增大。

大气科学学报
优先出版稿

关键词 CMIP6；极端降水；全球变暖；广义极值分布；概率比

2020 年 3 月 10 日，世界气象组织（WMO）发布的《2019 年全球气候状况声明》中指出，全球变暖仍在加速，2019 年的地表平均气温相较于工业前水平上升 1.1±0.1℃，同时预计这种变暖趋势仍将继续下去。随着温度的不断上升，极端降水事件频发，给人们日常生活和经济系统造成了严重影响（Tian et al.，2015；王静等，2015；周莉等，2017；王艳君等，2019；丁凯熙等，2020；等等）。为了减轻气候变化风险，《巴黎协定》指出将全球平均气温控制在较工业化前水平 2℃之内，并为控制在 1.5℃内努力。但随着全球平均气温越来越接近 1.5℃的目标，开展不同升温阈值下极端降水事件的风险变化及其影响贡献来源分析的研究日益紧迫。

围绕极端降水的观测特征及其未来预估变化的分析，近年来国内外学者已经开展了较多研究（Yin et al.，2005；

Li H et al.，2018；Ge et al.，2019；Zhao et al.，2020；邵月红等，2020；Li et al.，2021）：观测研究表明，极端降水频率和强度在过去的几十年显著的增加，总体上呈现东南高-西北低的空间分布特征（Yuan et al.，2017；孔锋，2019）。同时，其变化趋势主要以增加为主，但区域差异显著。陈海山等（2009）、Fu et al.（2013）认为中国地区长江流域、东南沿海、华南、西北和青藏高原等地区的极端降水呈正趋势，而中部地区则呈负趋势；陈晓晨等（2015）、吴润琦等（2019）指出未来升温背景下降水将趋于极端化，且极端降水变化幅度将随着升温阈值的升高而增大。向竣文等（2021）则基于 CMIP6 模式对中国地区极端降水进行预估，指出 2021-2100 年中国区域极端降水将呈现显著增加趋势。在全球增暖 1.5℃和 2℃背景下，中国区域极端降水强度相对于历史时期分别增加 6%和 11%，其发生概率分别增加 1.6 倍和 2.4 倍（Li W et al.，2018）。

值得注意的是，在以往的研究中，一些学者已经注意到序列的均值与方差对气候极值的影响。例如，Mears et al.（1984）指出，气候要素的均值是导致极值频率和强度发生变化的重要原因，进一步程炳岩等（2013）研究认为平均气候与极端气候发生的概率呈非线性关系；Katz et al.（1992）、Huang et al.（2015）则从理论上指出气象要素方差的变化比均值对极端事件发生频率的影响大得多。同时，极值理论（Extreme Value Theory, EVT）近年来也被广泛引入用于极端气候研究，其中应用最为广泛的是广义极值分布（The generalized extreme value distribution, GEV）。如黄婕（2016）运用 GEV 拟合极端降水序列，结果显示序列方差会显著影响极端降水量，增加极端降水事件的发生风险。同样，Parey et al.（2013）基于 CMIP5 模式，通过应用 GEV 来研究均值和方差的演变在极端温度变化中的作用。Zhang et al.（2017）利用观测和全球气候模式数据，基于 GEV 发现最热天气温的变化更依赖于分布中形状参数，而最冷夜气温的变化与位置参数转移密切相关。Kharin et al.（2018）通过 GEV 评估两个变暖水平间极端温度和降水的风险差异。Shi et al.（2020）研究全球变暖下极端高温发生概率变化和温度分布的统计特征，结果发现青藏高原和西北地区的极端冷事件发生概率随位置参数的变化增加 3 倍和 4 倍。

综上所述，不难看出理解气候平均态和变率变化对极端事件发生概率风险的影响与贡献，将有助于对极端事件及其风险变化有更进一步的认识。针对此，本文将基于广义极值分布，首先从理论上论证气候平均态、变率与极端事件发生概率风险的量化关系，并通过代表站点验证其实用性；结合全球气候模式模拟逐日降水资料，探讨了增暖 1.5℃和 2℃背景下中国区域极端降水的未来风险变化，并评估气候变暖背景下极端降水响应高敏感区域；进一步，基于概率分布探讨了极端降水气候平均态和年际变率对极端降水发生概率风险的影响，这将为我国增强风险管理、提高气候变化应对提供科学决策依据。

1 资料和方法

1.1 资料选取

本文所用的极端降水为利用CMIP6的24个全球气候模式（见表1）模拟的1995-2100年逐日降水序列，基于区组最大法计算得到的年最大日降水量序列。其中1995-2014年为历史时期，2015-2100年为未来预估时期。此外，由于增暖1.5℃和2℃下的模式输出与排放情景相对独立，本文仅展示SSP245下的结果。与Shi et al.（2018）类似，通过对24个模式的全球平均气温异常（相对于1861-1900年工业化水平前）时间序列进行21年滑动平均，以抑制年

大气科学学报 优先出版稿

际变化，并以每个模式达到1.5℃和2℃的第一年作为中心，前后各推10年，作为全球增暖1.5℃和2℃的时间段。

表1　本研究中使用的24个CMIP6模式的基本信息以及在SSP245情景下全球地表增温达到1.5℃和2℃的时间段

Table 1　Basic information of 24 CMIP6 models used in this study and the 20-year time slices when global warming reaches to 1.5℃ and 2℃ relative to pre-industrial period under SSP245 scenario

模式名称	研究机构	网格数	1.5℃	2℃
ACCESS-CM2	澳大利亚联邦科学与工业研究组织	192×144	[2019,2038]	[2031,2050]
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚联邦科学与工业研究组织	192×145	[2021,2040]	[2037,2056]
BCC-CSM2-MR	国家（北京）气候中心	320×160	[2028,2047]	[2050,2069]
CanESM5	加拿大环境署	128×64	[2015,2034]	[2015,2034]
CMCC-ESM2	欧洲地中海气候变化中心	288×192	[2021,2040]	[2031,2050]
CNRM-CM6-1	法国国家气象研究中心	256×128	[2021,2040]	[2038,2057]
CNRM-ESM2-1	法国国家气象研究中心	256×128	[2028,2047]	[2046,2065]
EC-Earth3-Veg	欧盟地球系统模式联盟	512×256	[2015,2034]	[2025,2044]
EC-Earth3	欧盟地球系统模式联盟	512×256	[2015,2034]	[2036,2055]
GFDL-CM4	国家大气海洋局地球流体动力学实验室	288×180	[2022,2041]	[2040,2059]
GFDL-ESM4	国家大气海洋局地球流体动力学实验室	288×180	[2038,2057]	[2065,2084]
HadGEM3-GC31-LL	英国气象局哈德莱中心	192×144	[2015,2034]	[2024,2043]
INM-CM4-8	俄罗斯科学院计算数学研究所	180×120	[2026,2045]	[2054,2073]
INM-CM5-0	俄罗斯科学院计算数学研究所	180×120	[2028,2047]	[2063,2082]
KACE-1-0-G	韩国气象局气象研究所	192×144	[2015,2034]	[2015,2034]
MIROC-ES2L	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所	128×64	[2032,2051]	[2054,2073]
MIROC6	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所	256×128	[2037,2056]	[2064,2083]
MPI-ESM1-2-HR	马普气象研究所	384×192	[2028,2047]	[2054,2073]
MPI-ESM1-2-LR	马普气象研究所	192×96	[2027,2046]	[2048,2067]
MRI-ESM2-0	日本气象局气象研究所	320×160	[2021,2040]	[2040,2059]
NESM3	南京信息工程大学	192×96	[2016,2035]	[2034,2053]
NorESM2-LM	挪威气候中心	144×96	[2047,2066]	[2075,2094]
NorESM2-MM	挪威气候中心	288×192	[2038,2057]	[2069,2088]
UKESM1-0-LL	英国气象局哈德莱中心	192×144	[2015,2034]	[2025,2044]

大气科学学报
优先出版稿

1.2　方法介绍

1.2.1　概率比

为探讨中国区域极端降水风险变化的情况，本文引入概率比 PR 来定量表征发生概率变化的程度。其定义为：

$$PR = P_1 / P_0 \tag{1}$$

其中 $P_0 = 1/\tau_0$、$P_1 = 1/\tau_1$ 分别表示所关注极端降水事件在历史和未来时期的发生概率；τ_0 和 τ_1 为当前 P_0 和未来

P_1 相对应的重现期，则 $PR=\tau_0/\tau_1$，表示当前时期平均 τ_0 年发生一次的极端降水在未来时期将变为平均每 τ_1 发生一次（Li W et al.，2018）。本文将主要关注 20、50 和 100 年重现期，即 $\tau_0=20,50,100$，代表着不同程度的极端降水。显然，概率比 *PR*>1（或 *PR*<1），则意味着极端降水发生概率风险呈现增加（或减少）变化。

1.2.2 广义极值分布

本文引入广义极值分布（GEV）用于刻画极端降水的分布特征，并用于从概率分布角度探讨极端降水未来发生概率风险的变化，以及位置和尺度参数对其影响与贡献度量。其概率分布函数为（Coles，2001）：

$$F(x;\mu,\sigma,\xi)=\exp\left\{-\left[1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\},\quad \sigma>0,\ 1+\xi(x-\mu)/\sigma>0 \tag{2}$$

其中 μ,σ,ξ 分别为位置、尺度和形状参数。形状参数 ξ 是确定极值分布类型的关键，当 $\xi=0$ 时，为 I 型极值分布；当 $\xi<0$ 时，为 II 型极值分布；当 $\xi>0$ 时，则为 III 型极值分布。上述三个参数的估计均采用极大似然估计法得到，与传统的矩估计相比，该方法具有更强的鲁棒性。

显然，GEV 三个参数会以不同的方式影响着极端降水概率分布的形态：如位置参数 μ 的增大或减小将造成极端事件概率分布的向左或右平移；尺度参数 σ 的改变则会影响概率分布的变异性，即造成分布函数变宽或者变窄；而形状参数 ξ 则通过影响分布的尾部特征来改变分布形态（Huang 等，2015）。依据位置和尺度参数与极值序列均值和方差的关系公式（史道济，2006），结合中国区域观测极端降水实际差异的空间分布（结果未给出），可知均值和方差能分别被位置和尺度参数较大程度的反映。位置和尺度参数是体现极端事件概率分布变化趋势和变异性的重要指标，本文引用其来表征极端降水的气候平均态和年际变率。此外，由于形状参数一般变化较小，为了更好的探讨平均态和年际变率对概率风险变化的影响，本文假设增温前后极端降水分布中形状参数 ξ 保持不变。

大气科学学报
优先出版稿

年最大降水量重现期是用来表示极端降水强度的重要指标，同时重现水平也常被用来关注气候极值或者水文极值的极端态（李洋等, 2015）。本文中，重现水平也就是估计分位数 x_p，通过反解 GEV 公式（2）可得：

$$x_p=\mu-\frac{\sigma}{\xi}[1-\{\log(1-p)\}^{-\xi}],\ \xi\neq 0 \tag{3}$$

其中 *p* 为超阈值的概率，如 *p* 依次取 0.05, 0.02 和 0.01 时，即可得 20、50 和 100 年重现期极端降水 x_p。

1.2.3 分布参数对极端降水风险变化的影响

若将 $X_0\sim F(\mu_0,\sigma_0,\xi_0)$ 视作极端降水历史时期的概率分布，$X_1\sim F(\mu,\sigma,\xi_0)$ 表示所关注未来时期的概率分布，其中 $\mu=\mu_0+\Delta\mu$，$\sigma=\sigma_0+\Delta\sigma$。依据公式（1）、（3），不难得到 $\tau_0=1/p_0$ 重现期极端降水 x_{p_0} 的未来时期发生概率 p_1，以及极端降水发生概率比，即：

$$PR = \frac{p_1}{p_0} = \frac{1-P\left(X_1 \le x_{P_0}\right)}{1-P\left(X_0 \le x_{P_0}\right)} \propto 1-F_1\left(x_{P_0};\mu,\sigma,\xi_0\right)$$

$$=1-exp\left(-\left\{1+\frac{\xi_0\left(x_{P_0}-\mu\right)}{\sigma}\right\}^{-\frac{1}{\xi_0}}\right) \approx 1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\mu}{\sigma}\right) \tag{4}$$

（1）位置参数对极端降水风险变化的影响

在不同的初始气候平均态和年际变率下，施加同样的位置与尺度参数变化导致的极端降水未来发生概率比并不相同。这里引入风险变化率的概念，其为极端降水发生概率比对参数的导数值，它的大小反映了极端降水发生概率风险对参数响应的不同与稳定性。显然，一个地区风险变化率越大（小），则意味着同等参数变化下引起的发生概率风险增加愈快（慢）。现假设极端降水概率分布仅位置参数发生变化，依据公式（4）不难得到此时的概率比为：

$$PR_{\mu} \propto 1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\mu}{\sigma_0}\right)=1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\left(\mu_0+\Delta\mu\right)}{\sigma_0}\right)=1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\mu_0}{\sigma_0}-\frac{\Delta\mu}{\sigma_0}\right) \tag{5}$$

利用式（5）可知当位置参数增量 $\Delta\mu=\mu-\mu_0$ 越大，概率分布函数值就会相应的变小，从而极端降水发生概率比增大，即 PR 随着 μ 的增大而增大。为满足可微分的条件，同时也便于空间上的比较，这里在公式（5）的基础上对 μ,σ 进行标准化。设区域上所有格点历史和未来预估时期 GEV 分布位置参数和尺度参数最大值为 $\mu_{\max},\sigma_{\max}$，令 $\mu=k_{\mu}\mu_{\max},\sigma=k_{\sigma}\sigma_{\max}$，其中 k_{μ}、k_{σ} 称为标准化参数，则 PR 进一步可表示为：

$$PR_{k_{\mu}} \propto 1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-k_{\mu}\mu_{max}}{\sigma_0}\right) \tag{6}$$

通过对式（6）求导可得位置参数变化引起极端降水发生概率风险变化的影响度量，也即风险变化率为：

$$PR'_{k_{\mu}}=\frac{\partial PR}{\partial k_{\mu}}=\left(1-F_1(x_{P_0};k_{\mu}\mu_{max},\sigma_0,\xi_0)\right)'_{k_{\mu}}\cdot\frac{1}{P_0}=-F_1(x_{P_0};k_{\mu}\mu_{max},\sigma_0,\xi_0)'_{k_{\mu}}\frac{1}{P_0}$$

$$=-exp\left(-\left\{1+\frac{\xi_0\left(x_{P_0}-k_{\mu}\mu_{max}\right)}{\sigma_0}\right\}^{-\frac{1}{\xi_0}}\right)'_{k_{\mu}}\frac{1}{P_0} \tag{7}$$

$$=exp\left(-\left\{1+\frac{\xi_0\left(x_{P_0}-k_{\mu}\mu_{max}\right)}{\sigma_0}\right\}^{-\frac{1}{\xi_0}}\right)\cdot\left(\left\{1+\frac{\xi_0\left(x_{P_0}-k_{\mu}\mu_{max}\right)}{\sigma_0}\right\}^{-\frac{1}{\xi_0}-1}\right)\cdot\frac{\mu_{max}}{\sigma_0}\frac{1}{P_0}$$

不难看出，上述风险变化率符号始终为正，意味着概率比将随着 k_{μ} 的增大而增大。

（2）尺度参数对极端降水风险变化的影响

同样，若仅考虑尺度参数所发生的变化，也可推导出 σ 引起的极端降水发生概率比 PR 的变化程度。令变化前后尺度参数分别为 σ_0 和 $\sigma=\sigma_0+\Delta\sigma$，参考公式（5）、（6），可得仅 σ 变化下的 PR 值：

大气科学学报
优先出版稿

$$PR_{\sigma} \propto 1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\mu_0}{\sigma}\right)=1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\mu_0}{\sigma_0+\Delta\sigma}\right)=1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\mu_0}{\sigma_0}\cdot\frac{\sigma_0}{\sigma_0+\Delta\sigma}\right) \tag{8}$$

$$PR_{k_\sigma} \propto 1-\Psi\left(\frac{x_{P_0}-\mu_0}{k_\sigma\sigma_{\max}}\right) \tag{9}$$

由式（8）可得随着尺度参数 σ 增量的增大，概率分布函数值将变小，极值风险呈现增大变化，即 *PR* 随着 σ 增大而增大。这也意味着 μ 和 σ 的增加都将导致风险 *PR* 的持续增大。

基于式（9）求导类似可得尺度参数变化引发的极端降水发生概率比 *PR* 的风险变化率：

$$\begin{aligned} PR'_{k_\sigma} &= \frac{\partial PR}{\partial k_\sigma} = (1-G'(x_{P_0};\mu_0,k_\sigma\sigma_{max},\xi_0))'_\sigma \cdot \frac{1}{P_0} = -G'(x_{P_0};\mu_0,k_\sigma\sigma_{max},\xi_0)'_{k_\sigma} \cdot \frac{1}{P_0} \\ &= -exp\left(-\left\{1+\frac{\xi_0\left(x_{P_0}-\mu_0\right)}{k_\sigma\sigma_{max}}\right\}^{-\frac{1}{\xi_0}}\right)'_{k_\sigma} \cdot \frac{1}{P_0} \\ &= exp\left(-\left\{1+\frac{\xi_0\left(x_{P_0}-\mu_0\right)}{k_\sigma\sigma_{max}}\right\}^{-\frac{1}{\xi_0}}\right) \cdot \left(\left\{1+\frac{\xi_0\left(x_{P_0}-\mu_0\right)}{k_\sigma\sigma_{max}}\right\}^{-\frac{1}{\xi_0}-1}\right) \cdot \left(\frac{x_{P_0}-\mu_0}{k_\sigma^2\sigma_{max}P_0}\right) \end{aligned} \tag{10}$$

（3）极端降水风险变化影响因子分析

依据式（7）、（10），PR_{k_μ}、PR_{k_σ} 分别刻画了位置和尺度参数变化下极端降水发生概率风险的变化率特征。两者值越大，则意味着极端降水发生风险呈现出更大、更快的变化。为了进一步综合考察位置和尺度参数也即极端降水气候平均态和年际变率变化在极端降水未来风险中的贡献，评估增暖 1.5℃和 2℃下极端降水的响应敏感区和主要影响因素贡献源，基于全微分可得极端降水风险变化分解公式：

$$dPR=\frac{\partial PR}{\partial k_\mu}dk_\mu+\frac{\partial PR}{\partial k_\sigma}dk_\sigma=PR'_{k_\mu}dk_\mu+PR'_{k_\sigma}dk_\sigma \tag{11}$$

显然，$PR'_{k_\mu}dk_\mu$ 和 $PR'_{k_\sigma}dk_\sigma$ 分别表示位置和尺度参数对极端降水风险变化的贡献率，用于度量两者的贡献大小。

1.2.4 模式拟合过程

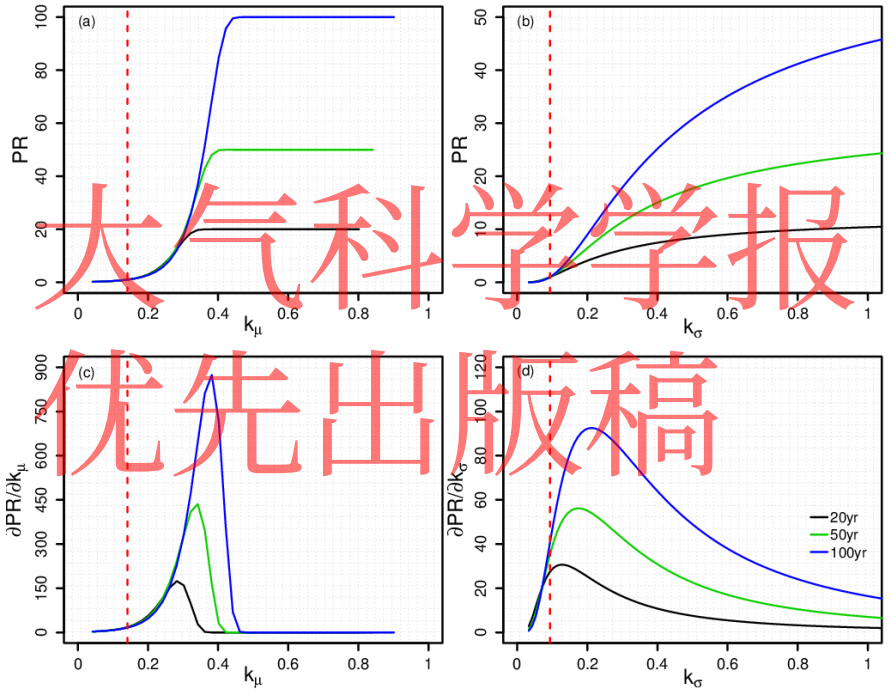
针对每个模式各格点的历史时期（1995-2014）模拟数据，基于极大似然估计可以得到 GEV 分布（2）中位置、尺度和形状参数，并由此得到相应的概率分布函数；类似，通过固定形状参数，可以得到每个格点 SSP245 排放情景极端降水增暖 1.5℃和 2℃下的 GEV 分布及其参数。结合公式（1）和（3），可以计算得到历史时期 20、50 和 100 年重现期极端降水未来发生的概率比 *PR*。进一步，依据公式（7）、（10）、（11）可以得到极端降水位置和尺度参数的增量变化、风险变化率和贡献率。此外，为便于模式比较和多模式结果应用，本文使用双线性插值将单个模式的上述各类指标等统一插值到 1°×1°网格中，并选取其中位数作为多模式集成结果。

大气科学学报
优先出版稿

2 主要结果

2.1 极端降水概率分布变化

中国区域极端降水概率风险发生变化，本质是其气候平均态和年际变率发生了改变，进而引起概率分布形态发生改变。为了更好的展示 GEV 参数变化以及对应的概率分布变化对极端降水发生风险的影响，这里选取乌鲁木齐作为代表站点（数据通过周边格点平均得到）。依据式（6）、（7）和（9）、（10），可以得到该站点不同重现期下极端降水发生概率比和风险变化率随位置、尺度参数变化的模拟曲线图（图 1）。不难看出，与理论结果相一致，不同重现期下极端降水事件的发生概率风险比随着 k_μ、k_σ 的增加而增大，且重现期越大其单位变化下的风险也越大（图 1a、b）；位置和尺度参数的变化引起的极端降水风险变化率也随着参数的增大而呈现出先增加后减少的抛物线特征（图 1c、d）。



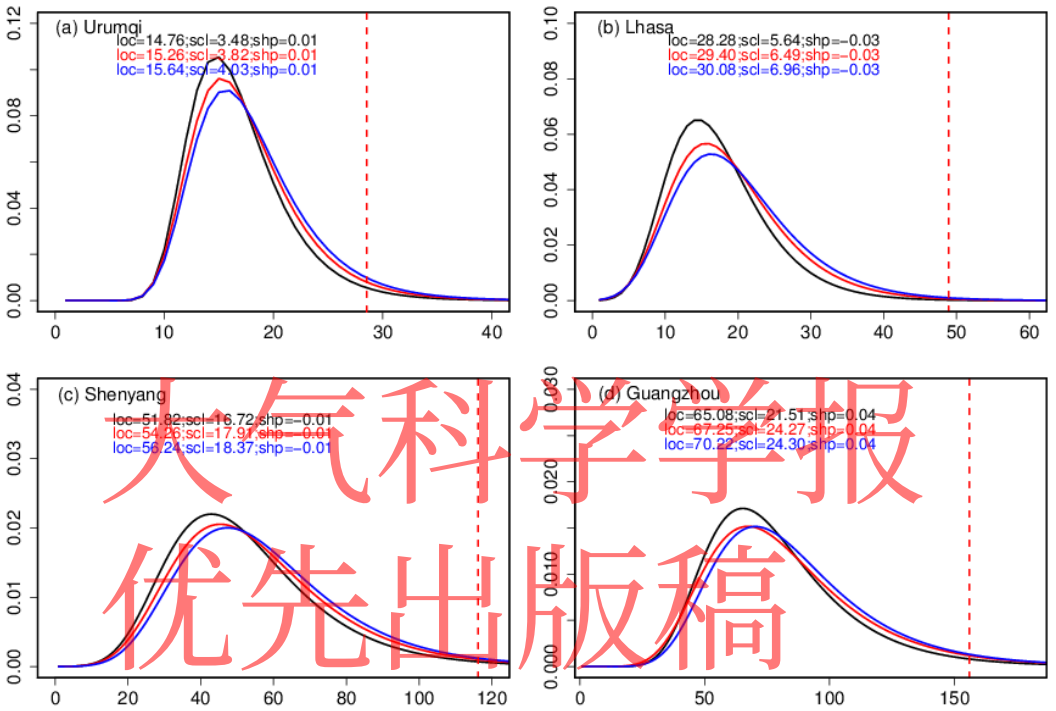
大气科学学报
优先出版稿

图1 20（黑色实线）、50（绿色实线）和100年（蓝色实线）重现期下*PR*和极端降水风险变化率随标准化后的位置参数 k_μ (a、c)和尺度参数 k_σ (b、d)的变化曲线图（垂直红色虚线分别对应初始参数 $k_{\mu_0}=0.142$ 和 $k_{\sigma_0}=0.093$）

Fig.1 Line charts showing the probability ratios (relative to unit change) and derivations of probability ratios for (a, c) standardize location parameter k_μ and (b, d) scale parameter k_σ in the 20- (black solid line), 50- (green solid line), 100-year (blue solid line) return values (the vertical red dashed lines are the original parameters: $k_{\mu_0}=0.142$ and $k_{\sigma_0}=0.093$)

上述结果从模拟角度验证了分布参数的变化将引起极端降水发生风险的变化，类似上述过程，这里从中国各

区域选取四个代表站：乌鲁木齐（西北），拉萨（西南），沈阳（东北）以及广州（东南），并从概率分布角度进一步探讨不同增暖背景下极端降水未来发生风险的变化，以及位置和尺度参数变化对其的影响。基于 24 个 CMIP6 模式模拟的历史和未来增暖 1.5℃和 2℃时期年极大降水数据，图 2 给出了四个代表站的多模式集成后的 GEV 拟合概率密度曲线和对应的参数结果。可以看出，不同增暖背景下四个代表站的位置和尺度参数均发生了不同程度的变化。其中，位置参数都呈现出增大趋势，导致对应的概率密度曲线向右迁移；尺度参数也显现出增大变化，其中拉萨站点增大变化较为明显，这导致概率密度曲线变得更宽。此外，形状参数有正有负，这说明四个站点的极端降水分布型并不一致，存在一定的差异。



大气科学学报
优先出版稿

图 2　乌鲁木齐、拉萨、沈阳、广州 4 个代表站的 GEV 概率密度拟合曲线。黑色、红色以及蓝色曲线分别代表历史时期、升温 1.5℃时期和升温 2℃时期。每个图中列出了对应时期的 GEV 三个参数结果：loc 表示位置参数，scl 代表尺度参数，shp 代表形状参数。垂直红色虚线表示 98%分位点（即 50 年重现期重现水平）

Fig.2　The probability density functions (PDFs) of GEV corresponding to four representative stations: Urumqi, Lhasa, Shenyang and Hangzhou. The solid black, red, and blue curves are for historical conditions, the 1.5°C warming level and the 2°C warming level, respectively. The three parameters are listed in each panel: “loc” for location, “scl” for scale, and “shp” for shape. The vertical dashed lines represent the 98th percentiles (50-year return level) of the historical PDF curve (red)

显然，位置和尺度参数的变化将会引起概率分布的变化，从而引起极端降水发生风险的变化。表 2 进一步给出了增暖 1.5℃和 2℃背景下四个代表站位置和尺度参数变化，以及不同重现期下极端降水发生概率比的量化结果及其 95%置信区间。相对于历史时期，四个站点位置和尺度参数总体上呈现变大趋势，且额外增暖 0.5℃将导

致更大的位置和尺度参数变化。两者的增大意味着增暖 1.5℃和 2℃背景下极端降水将呈现雨量增强、变率增大变化，从而极端降水发生概率风险也将呈现增加趋势，额外增暖 0.5℃导致更高的风险。例如，相对于历史时期，沈阳站在增暖 1.5℃下位置参数变大 2.44（95%置信区间为[1.33, 3.55]），尺度参数变大 1.19（[0.18, 2.20]）；而增暖 2℃下位置、尺度参数则大幅提升为 4.42（[3.23, 5.60]）和 1.65（[0.66, 2.63]），其 100 年重现期极端降水的发生概率比也由 3.08（[2.38, 3.78]）提升到 3.74（[2.61,4.88]）。此外，随着重现期的增大，四个代表站发生风险的可能性也呈现增大趋势。

表 2　全球变暖 1.5℃和 2℃背景下代表站 GEV 的位置和尺度参数变化与 20、50 和 100 年重现期下极端降水发生概率比（括号内为 95%的置信区间）

Table 2　Changes in location and scale parameters as well as the corresponding *PR* (expected every 20, 50 and 100 years in historical climate) under 1.5°C and 2°C global warming (with 95% confidence intervals in brackets)

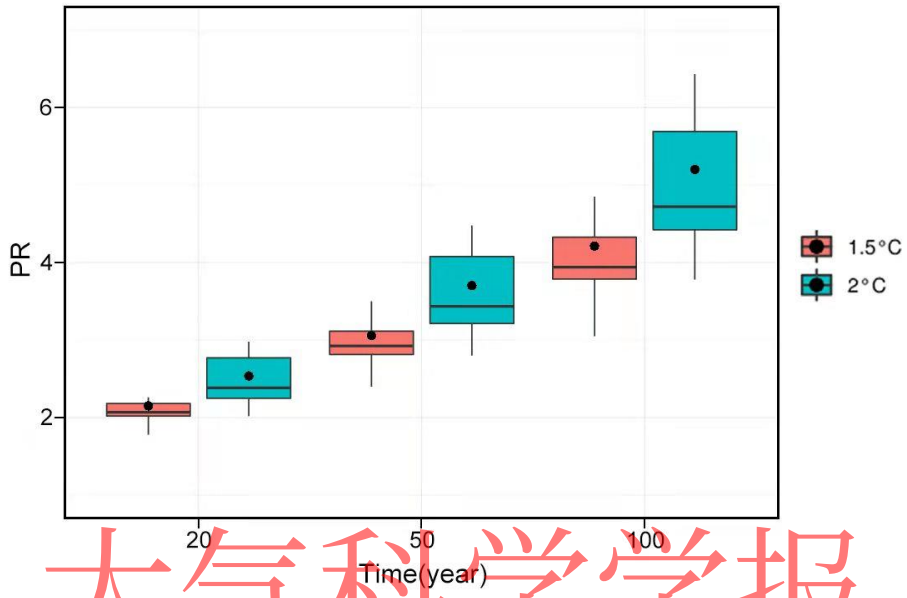
代表站点		乌鲁木齐	拉萨	沈阳	广州
位置	his→1.5℃	0.50[0.35,0.65]	1.12[0.57,1.67]	2.44[1.33,3.55]	2.17[0.61,3.74]
	his→2.0℃	0.88[0.69,1.07]	1.80 [1.07,2.53]	4.42[3.23,5.60]	5.14[3.33,6.95]
尺度	his→1.5℃	0.34[0.23,0.45]	0.85 [0.45,1.26]	1.19[0.18,2.20]	2.76[1.44,4.07]
	his→2.0℃	0.55 [0.39,0.72]	1.32[0.87,1.77]	1.65[0.66,2.63]	2.79[1.71,3.88]
概率比 PR(1.5/2°C)	20yr	1.87[1.70,2.05]/ 2.26 [2.04,2.48]	2.01[1.71 ,2.32] / 2.49[2.14,2.83]	1.73[1.50,1.96]/ 1.91[1.58,2.23]	2.02[1.79,2.24]/ 2.29[1.97,2.61]
	50yr	2.50[2.19,2.81]/ 3.21 [2.81,3.62]	2.90[2.33,3.48]/ 3.85[3.19,4.52]	2.33[1.91,2.75] / 2.67[2.02, 3.32]	2.76[2.33,3.18]/ 3.35[2.68,4.01]
	100yr	3.28[2.79,3.78]/ 4.42[3.72,5.11]	4.09[3.13 ,5.05]/ 5.60[4.43,6.76]	3.08[2.38,3.78]/ 3.74[2.61,4.88]	3.66[2.97,4.36]/ 4.66[3.48,5.85]

大气科学学报
优先出版稿

2.2　极端降水未来风险变化

相对于历史时期（1995-2014 年），图 3 给出了 24 个模式在增暖 1.5℃和 2℃背景下 20、50 和 100 年重现期极端降水中国区域平均发生概率比箱线图。可以看出，与前述代表站结果相似，极端降水发生风险总体上呈现显著增大变化，增暖 1.5℃和 2℃背景下 20、50 和 100 年重现期极端降水概率比基本都大于 2。相对于 1.5℃，0.5℃的额外增温造成全国极端降水发生风险明显增加。如 50 年重现期极端降水在全球增暖 1.5℃和 2℃下概率比均值分别为 3.0、3.7，重现期变为 17、14 年，极端降水发生变得更加频繁。不同重现期间的概率比增加幅度不同，随着重现期越大极端降水事件未来发生风险越大。如在增温 1.5℃下，20 年重现期极端降水发生概率比平均为 2.1，

而 50、100 年重现期极端降水则变为 3.0 和 4.2。此外，在较高的重现期下，概率比在模式间的不确定范围也越大。这与 Li W et al.（2018）和 Zhang et al.（2020）等研究结果总体上一致，但相对于 CMIP5 的结果，CMIP6 的概率比增幅更大，且模式间不确定也更大。

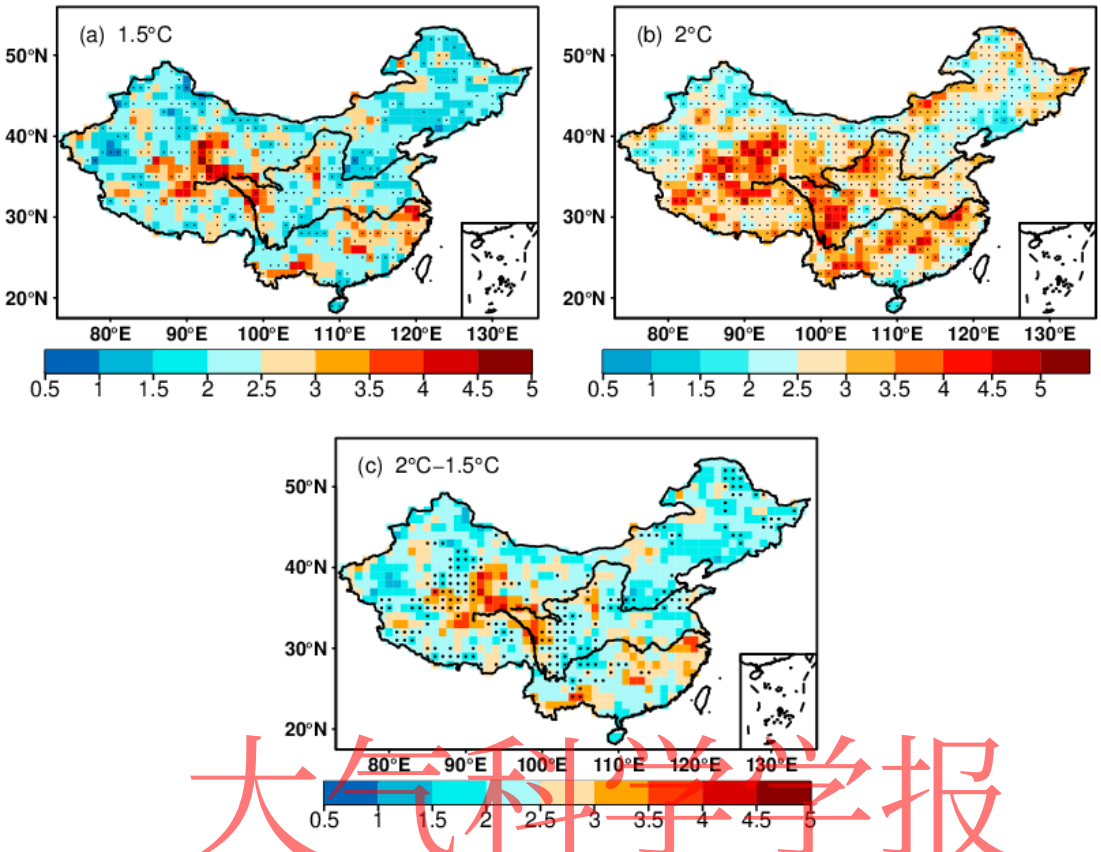


大气科学学报
优先出版稿

图 3　24 个模式全球增暖 1.5℃和 2℃时 20、50、100 年重现期极端降水相对于历史时期（1995-2014）中国区域平均 *PR* 变化箱线图。箱线图箱体的上下分别代表 24 个模式的 75th 和 25th 分位数，横线代表模式中位数，箱须上下代表模式的最大值和最小值，黑点表示多模式平均

Fig.3　Boxplots of the *PR* for the historical 20-, 50-, 100-year return values in 1.5°C and 2°C warming conditions among 24 models. The upper and lower limits of the box indicate the 75th and 25th percentile value among models. The horizontal lines in the box indicate the multi-model ensemble medians and the whiskers show the range of models. MME is represented by black points

图 4 进一步给出了全球增暖 1.5℃、2℃和 2℃-1.5℃背景下中国区域 50 年重现期极端降水概率比的空间分布。不难发现，增暖 1.5℃和 2℃背景下概率比空间分布相似，中国绝大部分地区极端降水风险呈现增加趋势（*PR*>1），24 个模式间也具有较好的一致性，大部分格点通过了一致性检验，即 24 个模式中超过 85%支持 *PR*>1。增暖 1.5℃背景下，概率比大值区（*PR*>3）主要位于中国西部长江黄河上游和青藏高原部分地区，以及长江下游以南部分地区；相对于增暖 1.5℃，额外增暖 0.5℃带来极端降水更大风险变化，增暖 2℃下概率比大值区呈现进一步扩大和增强趋势，*PR*>3 的区域在中国西部扩大到长江黄河中上游和青藏高原地区、中国东部长江黄河中下游以南等地区。此外，1.5℃和 2℃差异图也显示中国西部长江黄河中上游地区通过了 95%置信度检验。显然，这些区域为我国气候变化极端降水高敏感响应区域，这与吴佳等（2015）、吴润琦（2019）和周天军等（2021）表明与水有关的灾害多发生在青藏高原、长江流域等地区结果类似。



大气科学学报
优先出版稿

图 4　全球变暖 1.5℃, 2℃和 2℃-1.5℃时中国区域 50 年重现期极端降水相对于历史时期（1995-2014）概率比（多模式集合中位数）空间分布（a-b 中黑点表示通过 24 个模式 85%以上一致支持 *PR*>1，c 中黑点表示 2℃-1.5℃差异概率比变化通过 95%的置信度检验）

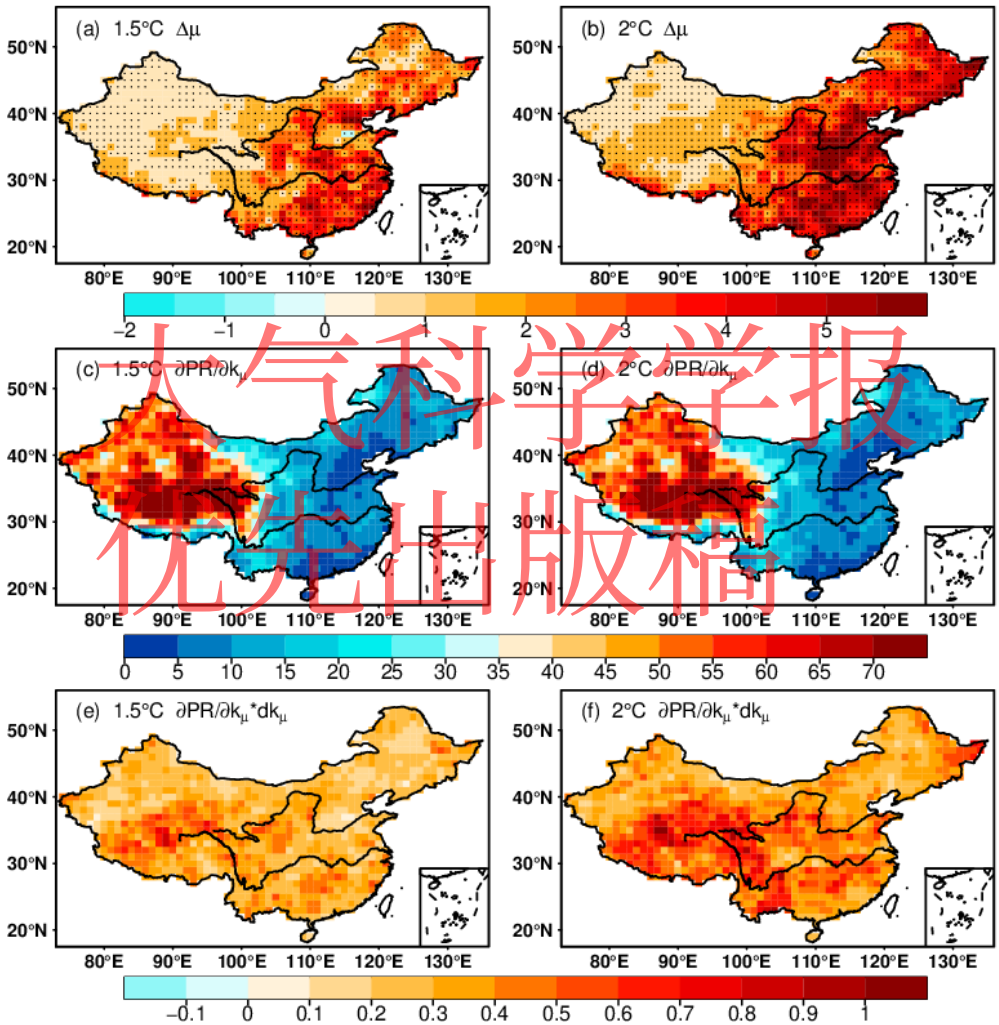
Fig.4　Spatial distributions of probability ratios (expressed as multimodel median) for extreme precipitation that expected to occur every 50 years under 1.5°C, 2°C and 2°C-1.5°C global warming levels(The black dotted points in a-b represent that at least 85% of 24 modes support that *PR*>1, and the black dotted parts in c represent the changes between 1.5°C and 2°C have passed the 95% confidence level tests)

2.3　极端降水风险变化影响分析

中国区域极端降水未来风险的变化，体现在其概率分布形态发生了改变，本质是极端降水气候平均态和年际变率发生了改变。为了解极端降水 GEV 分布参数对中国区域极端降水未来风险变化的影响，这里基于公式（11），可以进一步计算得到全球变暖 1.5℃和 2℃下中国区域 50 年重现期极端降水位置和尺度参数的增量、风险变化率和贡献率空间分布图（图 5、6）。

对于位置参数，从图 5 可以看出中国区域极端降水参数增量、风险变化率以及贡献率在 1.5 和 2℃升温阈值下的空间分布特征相似，但增暖 2℃背景下变化幅度更大。与降水气候态相近，极端降水位置参数增量空间上总体上呈现出由东南向西北递减特征，其中增量较大区域主要集中于中国东部区域。相对于历史时期，1.5 和 2℃增暖背景下全国大部分地区极端降水位置参数变化通过 95%的置信度检验，变化显著。如增暖 1.5℃背景下，中国

西部西北和青藏高原地区位置参数平均分别增加 1.0、1.3，中国东部东北和东南地区则为 2.1、3.4；而在 2℃增暖下，西北和青藏高原地区则分别平均增加 1.5 和 1.9，东北和东南地区则达到 3.2 和 4.4（图 5a、b）；从图 5c、d 可以看出，位置参数变化引起的风险变化率均为正值，意味着极端降水气候平均态的上升将引起概率风险呈现增加趋势。与参数增量空间分布相反，中国西部青藏高原和西北地区风险变化率偏高，而中国东部总体风险变化率偏低。这也将导致位置参数施加同等增量变化下，中国西部和东部由极端降水气候平均态变化引起的概率风险变化中国西部增加更快、东部则相对较为缓慢。如青藏高原地区由于其风险变化率较高，尽管其位置参数增量不高，但其最终贡献率依然较大，远远大于其它区域。而东北地区由于风险变化率较低，尽管位置参数增量较高，但最终贡献率依然相对偏低（图 5e、f）。



大气科学学报 优先出版稿

图 5　全球变暖 1.5℃和 2℃下中国区域 50 年重现期极端降水（多模式集合）位置参数增量（a-b，1995-2014 年为历史时期）、风险变化率（c-d）和贡献率（e-f）的空间分布（a-b 中黑点表示位置参数变化通过 95%的置信度检验）

Fig.5　Spatial distributions of the changes (a-b), the derivations of probability ratios (c-d) and contribution rates (e-f) of location parameters for extreme precipitation that expected to occur every 50 years (expressed as multimodel

median) under 1.5°C and 2°C global warming levels (the black dotted parts in a-b represent the changes between 1.5°C and 2°C have passed the 95% confidence level tests)

尺度参数增量和风险变化率空间分布与位置参数总体相似，增暖 1.5℃和 2℃背景下我国西部青藏高原、西北地区的尺度参数增量依然相对较小，我国东部区域增量相对较大。增暖 2℃比增暖 1.5℃变化幅度更大，且相对于历史时期，全国大部分区域尺度参数变化通过 95%置信度检验（图 6a、b）。尺度参数引起的风险变化率较大的区域依然主要位于中国西部青藏高原和西北地区，东部地区的风险变化率则相对偏小（图 6c、d）。尺度参数变化引起的贡献率总体为正，其中东部地区与西部地区呈现出不一样的增加特性：西部地区尺度参数总体增加幅度较小，但风险变化率较高，从而导致西部地区贡献率不低；而东部区域尽管风险变化率较低，但因为尺度参数变化幅度总体较大，从而导致该区域呈现较高的贡献率（图 6e、f）。

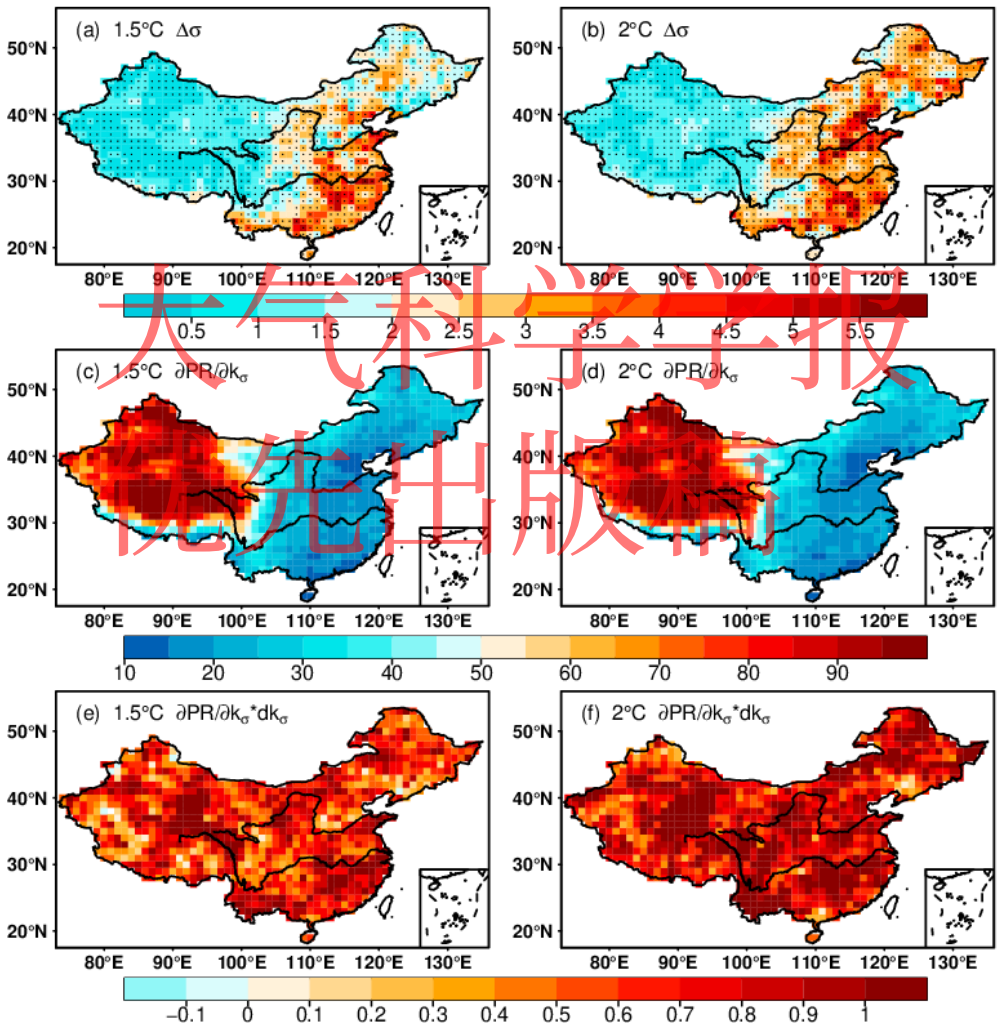


图 6　全球变暖 1.5℃和 2℃下中国区域 50 年重现期极端降水（多模式集合）尺度参数增量（a-b，1995-2014 年为历史时期）、风险变化率（c-d）和贡献率（e-f）的空间分布（a-b 中黑点表示尺度参数变化通过 95%的显著性检验）

Fig.6　Spatial distributions of the changes (a-b), the derivations of probability ratios (c-d) and contribution rates (e-f) of

大气科学学报 优先出版稿

scale parameters for extreme precipitation that expected to occur every 50 years (expressed as multimodel median) under 1.5°C and 2°C global warming levels (the black dotted parts in a-b represent the changes between 1.5°C and 2°C have passed the 95% confidence level tests)

综上所述，位置和尺度参数的增量变化、风险变化率存在着显著的区域性，从而导致气候平均态和年际变率的变化对极端降水发生风险的影响与贡献存在差异。尽管西部地区位置和尺度参数变化幅度不大，但因为有着较高的风险变化率，为气候变化响应不稳定区域，导致该区域呈现出较高的风险变化，其中长江黄河中上游和青藏高原部分地区增暖 2℃下 50 年重现期极端降水发生概率比更是达到 5 以上。东部地区则与之相反，由于位置和尺度参数增幅较大，尽管其风险变化率较小，在两者的共同影响下风险增加依然较高；相对于位置参数，全国大部分区域主要是尺度参数即年际变率变化的贡献导致了极端降水未来风险增大。

3 结论

全球变暖背景下，极端事件频发，开展极端降水的未来风险与影响分析研究，将为我国增强风险管理、提高气候变化应对提供科学参考依据。本文主要通过引入广义极值分布，首先从理论上探讨位置参数（气候平均态）和尺度参数（年际变率变化）对极端降水发生概率风险的影响与贡献度量；进一步，结合 24 个 CMIP6 全球气候模式逐日降水模拟数据，探讨了增温 1.5℃和 2℃背景下中国区域极端降水的未来风险变化及其高敏感响应区域，并量化评估了气候平均态和年际变率变化对极端降水发生概率风险的影响与贡献。主要结论如下：

1）极端降水发生风险的变化本质是因为气候平均态和年际变率发生了改变，从而导致其概率分布形态的变化。本文基于偏导数和全微分构建了风险变化率和贡献率指标，用于刻画位置和尺度参数变化下发生风险的变化率，以及在风险总变化中各自的贡献。理论分析和代表站实例均显示，位置和尺度参数的风险变化率均为正值，随着两者的增大呈现出先增大后减小的抛物线变化特征；且位置和尺度参数的变大，将导致极端降水分布的正向迁移和分布的变宽，从而导致发生风险的增大。

2）增暖 1.5℃和 2℃背景下，中国区域极端降水发生风险呈现增加趋势，额外增暖 0.5℃将导致高风险区域呈现扩大和增强变化，这与 Li W et al.（2018）和 Zhang et al.（2020）等研究结果总体上一致。如历史时期（1995-2014 年）50 年重现期极端降水，在全球增暖 1.5℃、2℃下其重现期将分别变为 17 年、14 年，极端降水变得更频繁。不同区域对气候变暖的响应也存在较大差异，极端降水发生概率风险大值区主要位于中国西部长江黄河中上游和青藏高原地区、中国东部长江黄河中下游及其以南地区。这些区域的概率比达到 3 甚至 5 以上，几乎是其他区域的两倍，为我国气候变化极端降水高敏感响应区域。

3）位置和尺度参数增量变化、风险变化率的区域特征，导致其对极端降水发生风险的影响与贡献存在显著的东西部差异。中国西部地区位置和尺度参数变化幅度不大，但因为有着较高的风险变化率，从而导致该区域尤其长江黄河中上游、青藏高原区域呈现出较高的风险变化，为我国气候变化响应不稳定区域。Wei et al.（2019）也指出中国西部旱地区域为气候变化响应最为敏感区域，增温 1.5℃和 2℃下降水量将会显著增加。中国东部则相反，尽管其风险变化率较小，但位置和尺度参数增幅较大，两者的共同影响下风险增加依然较高。此外，相对于位置参数，全国大部分区域主要是尺度参数即年际变率的变化导致极端降水未来风险增大。

大气科学学报
优先出版稿

参考文献（References）

Coles S, 2001. An Introduction to Statisical Modeling of Extreme Values. London, UK: Spring Verlag. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0

程炳岩，丁裕国，郑春雨，等, 2013. 极端气候对平均气候变化的非线性响应及其敏感性试验[J]. 气候与环境研究, 18(01):135-144. Cheng B Y, Ding Y G, Zheng C Y, et al., 2013. Nonlinear response and sensitivity test for extreme climate relative to average climate[J]. Climatic and Environmental Research, 18(01):135-144. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11134(in Chinese).

陈海山，范苏丹，张新华, 2009. 中国近 50a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J]. 大气科学学报, 32(06):744-751. Chen H S, Fan S D, Zhang X C, 2009. Seasonal Differences of Variation Characteristics of Extreme Precipitation Events over China in the Last 50 Years [J]. Trans Atmos Sci, 32(06):744-751. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.06.005(in Chinese).

陈晓晨，徐影，姚遥, 2015. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估[J]. 大气科学, 39(6):1123-1135. Chen X C, Xu Y, Yao Y, 2015. Changes in Climate Extremes over China in a 2℃, 3℃, and 4℃ Warmer World [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 39(6):1123-1135. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14224.(in Chinese).

丁凯熙，张利平，佘敦先，等, 2020. 全球升温 1.5℃和 2.0℃情景下澜沧江流域极端降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 16(04): 466-479. Ding K X, Zhang L P, She D X, et al., 2020. Variation of extreme precipitation in Lancang River basin under global warming of 1.5℃ and 2.0℃[J]. Climate Change Research, 16(04):466-479. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.126.(in Chinese).

Fu G B, Yu J J, Yu X B, et al., 2013. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009[J]. Journal of Hydrology, 487:48-59. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.02.021.

Ge F, Zhu S P, Peng T, et al., 2019. Risks of precipitation extremes over Southeast Asia: does 1.5 ℃ or 2 ℃ global warming make a difference?[J]. Environmental Research Letters, 14(4):044015. doi:10.1088/1748-9326/aaff7e.

Huang, W. K., Stein, M. L., Mcinerney, D., et al., 2015. Estimating changes in temperature extremes from millennial scale climate simulations using generalized extreme value (GEV) distributions[J]. Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography, 2(1):79-103. doi:10.5194/ascmo-2-79-2016.

黄婕, 2016. 非平稳条件下东南沿海汛期极端降水演变特征及其归因研究[D]. 福建: 福建师范大学. Huang J, 2016. Analysis of variation characteristics of extreme precipitation and its attribution during rainy season in the southeast coast of China under the non-stationary condition[D]. Fujian: Fujian Normal University.

IPCC, 2013. Climate change 2013: The physical science basis conclusions. Bulletin Fuer Angewandte Geologie, 18(2):5-19.

Katz R W, Brown B G, 1992. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages[J]. Climatic Change, 21(3):289-302. doi:10.1007/BF00139728.

Kharin, V. V., Flato, G. M., Zhang, X., et al., 2018. Risks from climate extremes change differently from 1.5 ℃ to 2.0 ℃ depending on rarity[J]. Earth's Future, 6:704-715. doi:10.1002/2018EF000813.

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 Frenquency of Hourly Extreme Precipitation in China from 1961 to 2013[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 28(12):3051-3067. doi:10.11870/cjlyzyyhj201912024(in Chinese).

Lang X M, Sui Y, 2013. Changes in mean and extreme climates over China with a 2 ℃ global warming[J]. Chinese Science Bulletin, 58(12):1453-1461. doi:10.1007/s11434-012-5520-5.

Li H, Chen H P, Wang H J, et al., 2018. Future precipitation changes over China under 1.5 ℃ and 2.0 ℃ global warming targets by using CORDEX regional climate models [J]. Science of the Total Environment, 640-641:543-554. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.324.

大气科学学报 优先出版稿

Li T, Jiang Z H, Zhao L H et al., 2021. Multi-Model Ensemble Projection of Precipitation Changes over China under Global Warming of 1.5 and 2 ℃ with Consideration of Model Performance and Independence[J]. Journal of Meteorological Research, 35(1):184-197. doi:10.1007/s13351-021-0067-5.

Li W, Jiang Z H, Zhang X B, et al., 2018. Additional risk in extreme precipitation in China from 1.5 ℃ to 2.0 ℃ global warming levels. Science Bulletin, 63(4):228-234. doi:10.1016/j.scib.2017.12.021.

李洋, 杨赤. 中国区域气候极值重现水平的非平稳模型及趋势分析[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(3):347-355. Li Y, Yang C. 2015. Non-Stationary Modeling and Trend Analysis of Return Levels of Climate Extremes in China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(3):347-355. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14246(in Chinese).

Mears L O, Katz R W, Schneider S H, 1984. Extreme high temperature events: changes in their probabilities with changes in mean temperature [J]. Journal of Climatology & Applied Meteorology, 23 (12):1601–1613. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<1601:EHTECI>2.0.CO;2.

Parey S., Hoang, T.T.H., Dacunha-Castelle, D., 2013. The importance of mean and variance in predicting changes in temperature extremes[J]. Journal Geophysical Research: Atmospheres, 118(15):8285-8296. doi:10.1002/jgrd.50629.

Shi C, Jiang Z H, Chen W L, et al., 2018. Changes in temperature extremes over China under 1.5 ℃ and 2.0 ℃ global warming targets[J]. Advances in Climate Change Research, 9(2):120-129. doi:10.1016/j.accre.2017.11.003.

Shi C, Jiang Z H, Zhu L H, et al. Risks of temperature extremes over China under 1.5 ℃ and 2 ℃ global warming[J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3):172-184. doi:10.1016/j.accre.2020.09.006.

邵月红, 刘玲, 刘俊杰, 等, 2020. 海河流域近 60a 降水极值的频率分析及时空分布特征[J]. 大气科学学报, 43(2):381-391. Shao Y H, Liu L, Liu J J, et al., 2020. Frequency analysis and its spatiotemporal characteristics of precipitation extremes in the Haihe River Basin during 1951—2010[J]. Trans Atmos Sci, 43(2): 381-391. doi:10. 13878 /j.cnki.dqkxxb.20170625001(in Chinese).

史道济, 2006. 实用极值统计方法[M]. 天津: 天津科技出版社. Shi D J, 2006. Practical extremum statistical method [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press.

Tian D, Guo Y, Dong W, 2015. Future changes and uncertainties in temperature and precipitation over China based on CMIP5 models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32(4):487-496. doi:10.1007/s00376-014-4102-7.

王静, 余锦华, 何俊琦, 2015. 江淮地区极端降水特征及其变化趋势的研究[J]. 气候与环境研究, 20(01):80-88. Wang J, Yu J H, He J Q, 2015. Study on characteristics and change trend of extreme rainfall in the Jianghuai region[J] .Climatic and Environmental Research , 20(01): 80-88. doi:10.3878/j.issn.1006-9585(in Chinese).

王艳君, 刘俸霞, 翟建青, 等, 2019. 全球升温 1.5℃与 2.0℃目标下长江流域极端降水的变化特征[J].气象科学, 39(04):540-547. Wang Y J, Liu F X, Zhai J Q, et al. 2019. Variation characteristics of extreme precipitation in the Yangtze River Basin under the global warming 1.5℃ and 2.0℃[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 39(04): 540-547. doi :10.3969 /2018jms.0071(in Chinese).

Wei Y, Yu H P, Huang J P, et al., 2019. Drylands climate response to transient and stabilized 2℃ and 1.5℃ global warming targets[J]. Climate Dynamics, 53:2375-2389.

WMO, 2020. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019[M]. World Meteorological Organization (WMO).

吴佳, 周波涛, 徐影. 2015. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5 模式模拟评估和预估[J]. 地球物理学报, 58(09):3048-3060. Wu J, Zhou B T, Xu Y, 2015. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection[J]. Chinese J. Geophys, 58(09):3048-3060. doi:10.6038/cjg20150903(in Chinese).

吴润琦, 2019. 全球增暖 1.5℃/2.0℃下中国极端气候事件响应的精细结构及高敏感区的甄别[D]. 南京:南京大学. Wu R Q, 2019. Fine Structure and Sensitive Areas in China Under 1.5/2℃ Warming as Indicated by Extreme Climate Events. Nanjing : Nanjing University.

向竣文, 张利平, 邓瑶, 等, 2021. 基于 CMIP6 的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估[J]. 武汉大学学报, 54(1):46-57,81. Xiang J W, Zhang L P, Deng Y, et al., 2021, Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in

大气科学学报
优先出版稿

major regions of China by CMIP6 models[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 54(1):46-57,81. doi:10.14188/j.1671-8844.2021-01-007(in Chinese).

Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al., 2005. Regional difference of aridity/humidity conditions change over China during the last thirty years[J]. Chinese Science Bulletin, 50:2226–33. doi:10.1007/BF03182674.

Yuan Z, Yang Z, Yan D, et al., 2017. Historical changes and future projection of extreme precipitation in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 127(1-2):393-407. doi:10.1007/s00704-015-1643-3.

Zhang M, Yu H P, King A. D., et al., 2020. Greater probability of extreme precipitation under 1.5°C and 2°C warming limits over East-Central Asia[J]. Climatic Change, 162:603-619. doi:10.1007/s10584-020-02725-2.

Zhang Y J, Gao Z Q, Pan Z T, et al., 2017. Spatiotemporal variability of extreme temperature frequency and amplitude in China[J]. Atmospheric Research, 185(1):131-141. doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.10.018.

Zhao Y M, Li Z S, Cai S Y, et al., 2020. Characteristics of extreme precipitation and runoff in the Xijiang River Basin at global warming of 1.5 ℃ and 2 ℃[J]. Natural Hazards, 101(3):669-688. doi:10.1007/s11069-020-03889-x.

周莉, 江志红, 2017. 基于转移累计概率分布统计降尺度方法的未来降水预估研究:以湖南省为例[J]. 气象学报, 75(2):223-235. Zhou Li, Jiang Z H, 2017. Future changes in precipitation over Hunan Province based on CMIP5 simulations using the statistical downscaling method of transform cumulative distribution function[J]. Acta Meteorologica Sinica, 75(2):223-235. doi:10.11676/qxxb2017.012(in Chinese).

周天军, 任俐文, 张文霞. 2021. 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, 51(10): 1637–1649.Zhou T, Ren L, Zhang W. 2021. Anthropogenic influence on extreme Meiyu rainfall in 2020 and its future risk[J]. Science China Earth Sciences, 64(10): 1633–1644. doi:10.1360/ SSTe-2020-0325(in Chinese).

大气科学学报
优先出版稿

Risk and impact analysis of extreme precipitation over China under 1.5/2°C global warming

ZHU L H[12*], Zhu Y Q[1], YAO Y Y[1], SHI C[4], XU F R[1], ZHAO W H[1], JIANG Z H[3*]

[1]School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

[2]Wuxi University, Wuxi 214105, China

[3]Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education(KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change(ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

[4]Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China

Abstract: Based on the daily precipitation of 24 global climate models from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) multimodel simulations, the generalized extreme value distribution (GEV) is introduced to study the risks of precipitation extremes that expected to occur every 20, 50 and 100 years over China under 1.5/2 ℃ global warming. Compared to the historical period (1995-2014), the changes in the probability risks of extreme precipitation under global warming of 1.5/2℃ present an overall increasing trend. Although their spatial distributions show similar characteristics, the additional half a degree global warming will lead to a higher risk. For example, extreme precipitation that occurred once every 50 years will become once about every 17/14years under the warming of 1.5/2 ℃, respectively, and extreme precipitation will become more frequent. There are regional differences in the responses of different regions to climate warming, among which the middle and upper reaches of the Yangtze and Yellow Rivers and the Qinghai-Tibet Plateau region in the Western China, and the middle and lower reaches of Yangtze and Yellow Rivers and its south in Eastern China, are highly sensitive response regions to climate change, and their probability ratios reach 3 or even 5 or more. Furthermore, the influence and contribution measures of location and scale parameters on the probability ratios are explored from a theoretical perspective based on the probability distributions, and are used to explore the influences of the climate means and variability changes on the risks of extreme precipitation. The results show that there are significant differences between Eastern China and Western China in the incremental changes of location and scale parameters, and in the rates of probability risk changes, which lead to differences of the factors that influencing the risk of extreme precipitation. In the Western China, although the changes in climate means and variabilities of extreme precipitation are small, the probability ratios increase significantly due to the high rates of probability risk changes. In contrast, the change rates are small, but the climate means and variabilities present a high increase, which also lead to an increase in the Eastern China. Moreover, compared to the location parameters, the increase risks in most of regions over China are mainly due to the changes of scale parameters of extreme precipitation in the future.

Key words: CMIP6; Extreme precipitation; Global warming; GEV; Probability ratio

大气科学学报
优先出版稿