

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.06.001

预估全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 下淮河流域 极端降雨的变化特征

卞国栋¹, 张建云^{2,3}, 王国庆^{2,3}, 宋明明^{2,3}

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 淮河流域暴雨洪水灾害严重, 科学预估未来全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下淮河流域极端降雨的变化特征对流域防洪减灾及应对气候变化具有重要意义。基于最新的第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 中 22 个全球气候模式数据, 利用改进的可靠性集合方案与概率比法, 采用 6 个极端降雨指标预估了全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下淮河流域未来极端降雨的时空变化与风险变化特征。结果表明: 改进可靠性集合方案对淮河流域极端降雨的模拟性能要优于单一气候模式与算术平均集合方案; 全球升温达到 1.5 °C 与 2.0 °C 阈值的平均时间段分别约为 2017—2046 年和 2026—2055 年; 全球升温 2.0 °C 下极端降雨指标增幅约为升温 1.5 °C 下的 1.4~2.6 倍, 其中流域北部地区为极端降雨增幅大值区; 2 种升温条件下极端降雨发生风险呈增加趋势, 且额外增暖 0.5 °C 将导致淮河流域极端降雨风险更高, 如 100 a 重现期的极端降雨在升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下将分别变为 32 年一遇和 22 年一遇, 未来淮河流域极端降雨将会更加频繁。

关键词: 极端降雨; CMIP6; 多模式集合; 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C; 淮河流域

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)06-0827-12

进入 21 世纪以来, 全球变暖仍在继续, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告指出^[1], 21 世纪前 20 a 全球平均气温相较于 1850—1900 年升高了 0.99 °C, 并预计全球升温将在 2021—2040 年达到或超过 1.5 °C。研究表明, 气候变暖将导致全球和区域水循环加剧, 极端降雨事件发生的频率和强度明显增强^[2-4], 对生态环境和经济社会等多方面产生较大影响。为缓解全球变暖的严重风险, 《巴黎协定》提出将全球平均气温控制在较工业化前水平以上 2.0 °C 之内, 并努力将其控制在 1.5 °C 之内^[5]。随着全球平均气温逐渐接近升温 1.5 °C 阈值, 探究不同升温条件下极端降雨事件的变化及其影响研究对区域防洪减灾规划及适应性措施制定具有重要的现实意义。

近年来, 国内外学者围绕全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 下未来极端降雨变化预估开展了较多研究^[6-7]。结果表明, 不同区域的极端降雨事件对于全球升温阈值的响应存在区域差异, 例如北美东部、欧洲北部、亚洲北部和澳大利亚等地区的极端降雨预估存在显著增加的态势, 而北美西南部和非洲南部等地区极端降雨预计将有所下降^[8-9]。中国是气候变化影响显著区, 其未来变暖幅度预计将明显高于全球平均水平^[10], 且极端降雨变化幅度将随气候变暖而增大。在全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 下中国大部分区域极端降雨预计呈明显增加趋势, 额外增暖 0.5 °C 将导致大多数区域的极端降雨增加超过 1 倍^[11-15]。对于淮河流域, 已有研究多集中在对历史极端降雨特征的分析, 以及基于全球气候模式对未来极端降雨指标的变化趋势预估, 结果表明近 60 a

收稿日期: 2023-05-10; 网络出版日期: 2023-10-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231012.1100.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52121006; 52279018)

作者简介: 卞国栋 (1994—), 男, 安徽宣城人, 博士研究生, 主要从事全球变化对水文水资源影响等研究。

E-mail: 605232755@qq.com

通信作者: 张建云, E-mail: jy Zhang@nhri.cn

来淮河流域极端降雨呈增加趋势^[16-17], 且未来流域极端降雨上升趋势将更为显著^[18-19]。然而, 针对不同升温背景下淮河流域极端降雨变化的研究较少, 且如何分析不同升温条件下极端降雨的风险变化亟待研究。

本文基于22个第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)模式输出, 探求淮河流域在全球升温1.5℃和2.0℃下极端降雨的时空变化及风险变化特征, 以为淮河流域应对气候变化和科学决策提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 淮河流域概况

淮河流域地处中国中东部, 介于长江流域与黄河流域之间, 位于111°55'E—121°25'E、30°55'N—36°36'N。淮河干流全长约1000 km, 高程总落差约为200 m, 上游河段的高程落差远大于中下游, 一旦产生暴雨洪水, 中游行洪缓慢, 极易导致严重洪涝灾害^[20]。淮河流域位于南北季风气候过渡带, 流域年均气温约为14℃, 年均降水量约为910 mm, 降水量分布特点为南部大于北部, 山区大于平原。每年5—9月为淮河流域的汛期, 其间年均降水量约占全年总降水量的60%, 尤其在6、7月份的梅雨季, 降雨量大、范围广、持续时间长, 常会造成流域性洪水。本文主要选取淮河流域中上游区域(吴家渡站以上)作为研究区, 如图1所示。

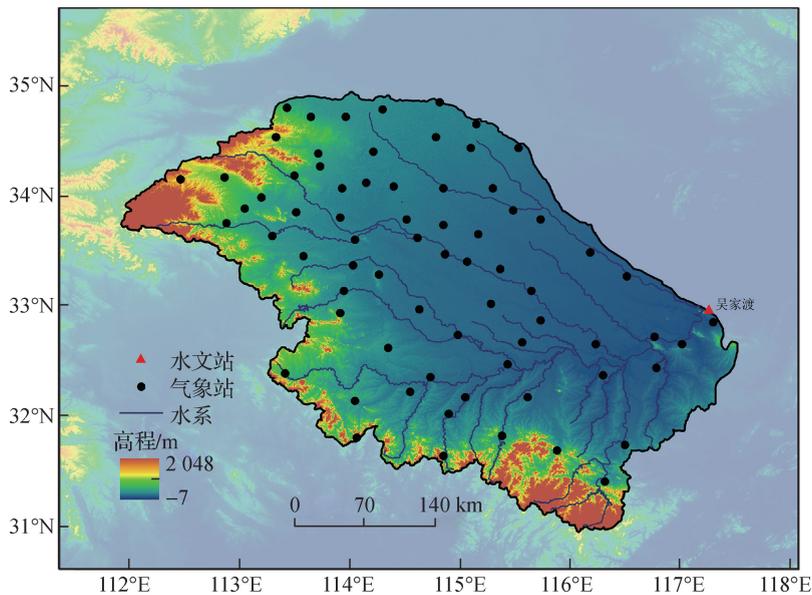


图1 淮河流域中上游区域及71个气象站地理位置

Fig.1 Location of the study area and Spatial distribution of 71 meteorological station

1.2 数据来源

气候模式数据来源于最新的CMIP6, 其较之前版本具有更高的空间分辨率和改进的参数化方案^[21-22]。CMIP6输出结果已经被广泛用于气候变化和极端气候相关的研究中^[23-25]。本研究主要采用22个CMIP6全球气候模式的逐日降雨和气温数据, 数据均通过CMIP6官网(<http://esgfnodl.llnl.gov/search/cmip6/>)下载获得。模式历史时间段为1961—2014年, 未来时间段为2015—2100年。考虑到模式分辨率较粗且日尺度模拟偏差大, 本研究对原始模式数据进行了统计降尺度和偏差校正处理。气候观测数据采用中国国家气象局国家气象信息中心(NMIC, <http://data.cma.cn/>)提供的淮河流域蚌埠以上区域均匀分布的71个常规气象站的逐日降雨和气温观测资料(图1), 时间段为1961—2014年。

2 研究方法

2.1 极端降雨指标

基于气候变化检测和指标专家组 (ETCCDI) 的标准^[26], 根据淮河流域的气候特征, 本文定义了 6 个极端降雨指标, 分别是年最大 1 日降水量 (Rx1day)、年最大 3 日降水量 (Rx3day)、大雨日数 (R20mm)、暴雨日数 (R50mm)、极端降水量 (R90p) 和极端强降水量 (R95p)。

2.2 偏差校正方法

由于全球气候模式空间分辨率较低, 且存在模型偏差, 因此需要进行降尺度或偏差校正。本文首先采用反距离权重插值法将 22 个 CMIP6 气候模式输出的历史时期 (1961—2014 年) 与未来时期 (2015—2100 年) 的逐日降雨数据降尺度至 71 个观测站点上, 然后采用日偏差校正方法对逐日降雨数据进行逐站点偏差校正^[27]。日偏差校正方法是通过建立观测数据与模式输出数据的经验分布之间的关系来校正气象要素未来时段的经验分布, 原理简单, 操作简便, 故在气候变化研究中被广泛使用^[28-29]。

2.3 改进的可靠性集合平均方案

在进行未来气候预估时, 由于模式间的内部机理以及适用范围不同, 仅基于单一气候模式的预估结果存在较大的不确定性。研究表明, 多模式集合 (MME) 方法在一定程度上可以有效地削减气候模式物理过程以及参数化方案对未来预估结果的不确定性^[30-31]。目前最常用的方案是多模式算术平均 (AME), 但需要注意的是在使用该方法时, 模拟性能差的气候模式会降低多模式集合总体的模拟能力。本文基于可靠性集合平均 (REA) 框架^[32], 考虑了气候模式在相对误差、空间结构及年际变率等方面的模拟性能, 提出了改进可靠性集合方案 (MREA), 该方案的可靠性系数 (R_i) 计算公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_i = f_{\text{bias}}^{m_1} f_{\text{cor}}^{m_2} f_{\text{var}}^{m_3} \\ f_{\text{bias}} = \frac{\varepsilon_p}{\text{abs}(P_{\text{mod}} - P_{\text{obs}})} \\ f_{\text{cor}} = \frac{4(1+r)^4}{(\hat{\sigma}_f + 1/\hat{\sigma}_f)^2 (1+r_0)^4} \\ f_{\text{var}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{\text{mod}}}{D_{\text{obs}}} - \frac{D_{\text{obs}}}{D_{\text{mod}}}\right)^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 个模式的可靠性系数; f_{bias} 为模式再现观测气候态的能力; f_{cor} 为模式模拟观测空间结构的能力; f_{var} 为模式模拟观测年际变率的能力; P_{obs} 和 P_{mod} 分别为观测和模拟的极端降雨指标; ε_p 为历史观测值去趋势后 20 a 滑动平均的最大值和最小值之间的差值; $\text{abs}(\)$ 为取绝对值函数; r 为观测与模拟的空间相关系数; r_0 为可获得的最大相关性, 取值为 0.999; $\hat{\sigma}_f$ 为观测与模拟的空间标准差比; D_{obs} 和 D_{mod} 分别为观测和模拟的年际变化的标准差; 文中将参数 m_1 、 m_2 和 m_3 都设为 1, 以平等地对待 f_{bias} 、 f_{cor} 和 f_{var} 的贡献, 其取值范围均为 0 ~ 1。

当计算出 N 个气候模式的可靠性系数后, 则可确定每个模式的权重 (W_i), 计算公式如下:

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (2)$$

2.4 概率比

为探讨淮河流域极端降雨风险变化情况，本文引入概率比(R_p)来定量表征发生概率变化的程度，计算过程如下^[33]：

$$\begin{cases} R_p = P_1/P_0 \\ P_0 = 1/\tau_0 \\ P_1 = 1/\tau_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_0 、 P_1 分别为所关注极端降雨事件在历史和未来时期的发生概率； τ_0 、 τ_1 分别为当前 P_0 和将来 P_1 相对应的重现期。 R_p 表示当前时期平均 τ_0 年发生一次的极端降雨在未来时期将变为平均每 τ_1 年发生一次， $R_p > 1$ (或 $R_p < 1$)，意味着极端降雨发生概率风险呈现增加(或减少)变化。

3 结果及分析

3.1 极端降雨的模拟性能评估

为评估 22 个 CMIP6 气候模式以及多模式集合方案对淮河流域极端降雨指标的模拟能力，图 2 给出了气候模式及多模式集合方案模拟值相较于观测值的区域平均相对误差。从图 2 中可以看到，除 Rx3day 指标外，22 个气候模式对流域极端降雨指标均存在低估，区域平均相对误差大多不超过 -15%，表明气候模式输出对流域极端降雨指标的模拟能力总体较好。就不同极端降雨指标而言，R20mm 指标模拟结果的区域平均相对误差最小，说明气候模式对 R20mm 指标的模拟性能最优。另外，相较于单一气候模式，多模式集合方案的模拟结果明显更好。具体来看，对于极端降雨指标 Rx1day、Rx3day、R20mm、R50mm、R90p 和 R95p，AME 方案模拟值与观测值的相对误差分别为 -18.3%、-5.9%、-2.6%、-17.8%、-3.4% 和 -6.8%，

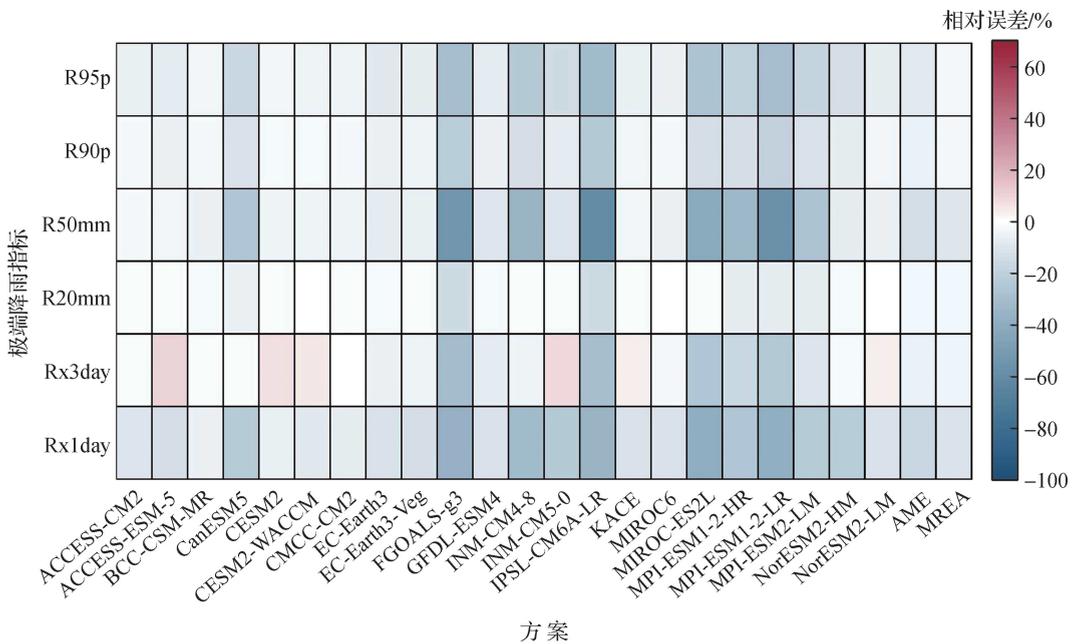


图 2 22 个 CMIP6 模式及多模式集合方案模拟淮河流域极端降雨指标的区域平均相对误差
Fig. 2 Portrait diagram of regional average biases of 22 CMIP6 GCMs、AME and MREA in simulating extreme precipitation indices in the Huai River basin

而 MREA 方案模拟的相对误差分别为 -16%、-3.5%、-1.8%、-13.8%、-2.3% 和 -5%。结果表明, 多模式集合方案对 Rx3day、R20mm、R90p 和 R95p 指标的模拟效果更好, 且 MREA 方案模拟极端降雨指标相对误差的性能更优。

使用泰勒图进一步直观地来反映气候模式以及多模式集合方案对淮河流域极端降雨指标在空间结构方面的模拟能力。泰勒图能有效综合模拟数据的空间相关系数、空间标准差之比和中心化均方根误差这 3 个指标的信息^[34], 其中空间相关系数和空间标准差之比越接近 1 越好, 中心化均方根误差越小越好。图 3 展示了气候模式和多模式集合方案的模拟结果泰勒图, 结果发现大多数气候模式输出对淮河流域极端降雨指标空间结构的模拟能力较好, 空间相关系数均在 0.8 以上, 其中气候模式对 R20mm 指标空间结构的模拟结果最好, 其模拟值与观测值更为接近。另外, 2 种多模式集合方案对极端降雨指标空间结构的模拟结果明显优于单一气候模式, 模拟结果的空间相关系数均大于 0.9, 中心化均方根误差均小于 0.5, 空间标准差之比为 0.6~1.0, 表明多模式集合方案对极端降雨指标空间结构方面的模拟性能更好, 且 MREA 方案优于 AME 方案。

总之, MREA 方案对极端降雨指标模拟的相对误差与空间结构的模拟性能均表现最优, 故在接下来的研究中采用 MREA 方案进行全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 条件下淮河流域未来极端降雨变化的预估。

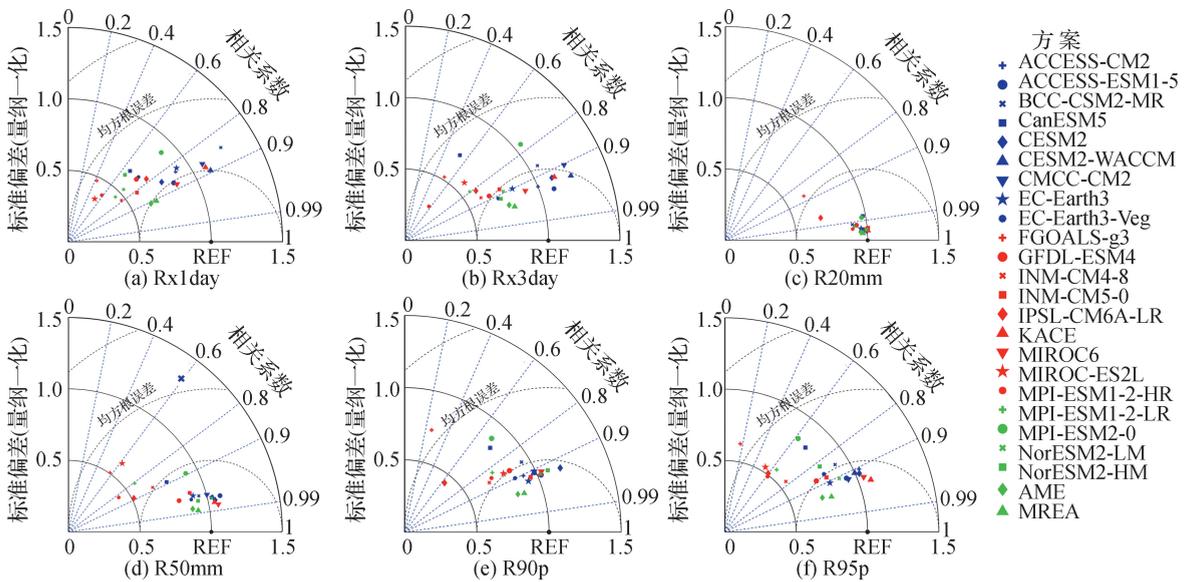


图 3 22 个 CMIP6 气候模式及多模式集合方案模拟淮河流域极端降雨指标的泰勒图

Fig. 3 Taylor diagrams of 22 CMIP6 GCMs, AME and MREA in simulating extreme precipitation indices in the Huai River basin

3.2 全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 时间段的选取

为探究全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 下淮河流域极端降雨的变化, 首先对达到 2 种升温阈值的时间进行预估。《巴黎协定》指出升温阈值是相对于工业化前水平而言, 且指持续的全球平均升温 1.5 °C 与 2.0 °C, 而不是某一年的平均温度。因此, 本文参考以往研究^[35], 将 1861—1900 年定义为工业化前参考期, 选取全球平均气温的 30 a 滑动平均值来确定升温幅度。基于 22 个 CMIP6 气候模式, 分别选取 SSP2-4.5 情景与 SSP5-8.5 情景下的全球平均气温数据用以确定全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 出现的时间段, 结果如图 4 所示。总的来看, 全球升温达到 1.5 °C 与 2.0 °C 阈值的平均时间段分别约为 2017—2046 年和 2026—2055 年, 但不同气候模式到达 1.5 °C 和 2.0 °C 升温阈值的时间段存在较大差异, 例如, EC-Earth3-Veg 模式预计将在 1998—2027 年达到升温 1.5 °C 阈值, 而 NorESM2-LM 模式预计将在 2022—2051 年才会达到升温 1.5 °C 阈值。这可能与

各气候模式本身的气候敏感度密切相关, 敏感度高的模式将会更早达到特定的升温阈值^[36]。为避免模式间升温时段差异的影响, 分别将各模式到达升温 1.5 °C 与 2.0 °C 阈值时间段的气候态与历史参考期(1961—2014年)进行比较, 选取最优的加权方案进行全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 下淮河流域极端降雨变化的未来预估。

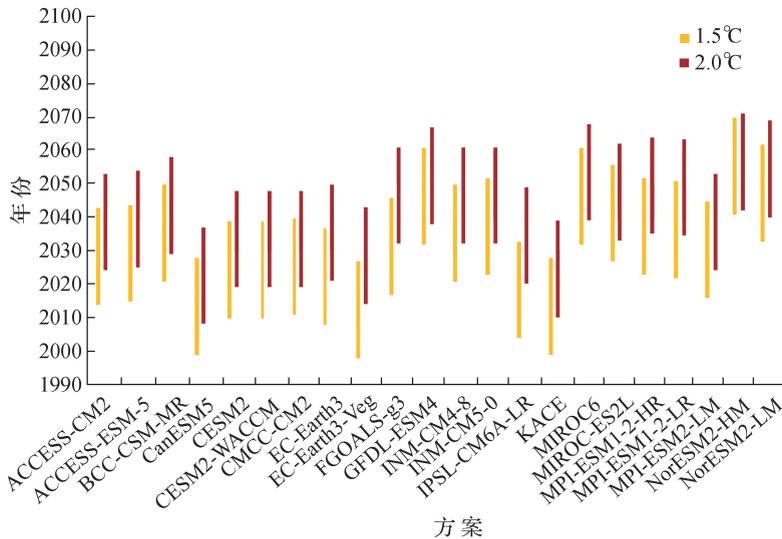


图4 22个CMIP6模式达到全球升温1.5 °C与2.0 °C阈值的时间段

Fig. 4 Timing spans of 1.5 °C and 2.0 °C global warming for 22 CMIP6 GCMs

3.3 全球升温1.5 °C和2.0 °C下流域极端降雨强度变化

首先对全球升温1.5 °C和2.0 °C下淮河流域各极端降雨指标的变化幅度进行总体分析, 绘制了2种升温条件下淮河流域平均极端降雨指标相对于历史时期变化的箱线图(图5)。由图5可知, 不同气候模式预估的变化幅度存在较大差异, 尤其对于R50mm指标而言, 气候模式的不确定性最大。从MREA方案预估结果来看, 未来淮河流域极端降雨总体随全球气温升高而逐渐增加。具体来看, 相较于历史时期, 全球升温1.5 °C条件下, 流域平均Rx1day、Rx3day、R20mm、R50mm、R90p和R95p指标值预计将分别增加4.8%、6.2%、2.6%、8.9%、1.1%和2.4%; 而全球升温2.0 °C条件下, 流域平均极端降雨指标将进一步增加, 增幅分别达到10.4%、10.9%、6.8%、16.7%、2.5%和3.6%。总的来说, 全球升温2.0 °C下淮河流域各极端降雨指标较历史时期的增幅更为显著, 约为升温1.5 °C下的1.4~2.6倍, 说明随着全球气候变暖, 淮河流域极端降雨发生的强度和频率将会显著增大。

图6反映了全球升温1.5 °C和2.0 °C条件下, 淮河流域极端降雨指标相较于历史时期变幅的空间分布。总体来看, 全球升温1.5 °C条件下极端降雨指标普遍增加, 但不同极端降雨指标的增幅范围存在较大差异, 其中, R50mm指标的增幅最大, 为2.9%~23.7%, 而R90p指标的变幅范围为-1.1%~3.4%。此外, 全球升温1.5 °C条件下极端降雨指标变化没有表现出明显的空间分布特征。对于全球升温2.0 °C, 淮河流域极端降雨指标增加更为显著, Rx1day、Rx3day、R20mm、R50mm、R90p和R95p指标的变幅范围分别上升到8%~16.8%、7.4%~17.3%、2.8%~11.2%、1.8%~32.7%、-0.4%~5.3%和2.4%~9.6%。从空间分布上看, 极端降雨指标增幅整体存在流域北部明显高于南部的空间分布特征。就Rx1day和Rx3day指标而言, 流域北部地区的增幅预计将超过15%; 对于R20mm指标, 流域北部和西部地区的增幅将超过8%; 而流域北部的R50mm指标增幅最高, 预计将超过25%, 明显高于南部地区; 对于R90p与R95p指标, 流域北部的增幅也要高于其他地区, 增幅超过5%。另外, 2种升温条件下极端降雨指标的增幅差异如图6(c)所

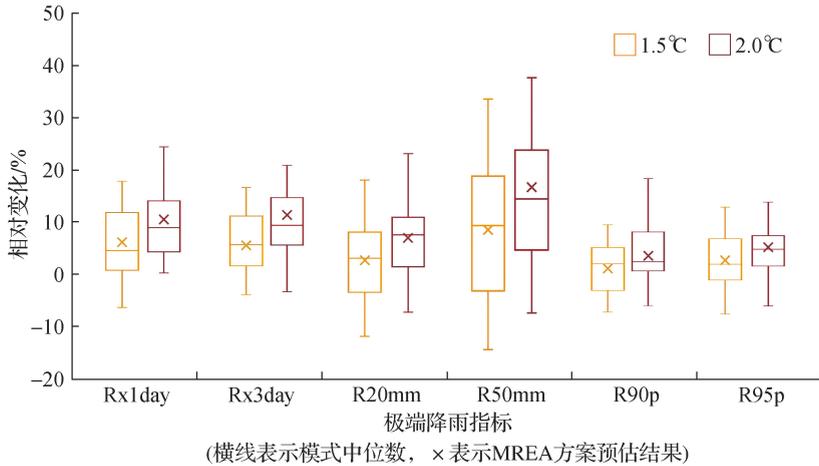


图5 全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 下淮河流域极端降雨指标相对于历史时期的相对变化箱线图

Fig. 5 Boxplot of relative changes of extreme precipitation indices over the Huai River basin under 1.5 °C and 2.0 °C global warming compared to the reference period

示, 发现额外变暖 0.5 °C 将导致流域北部极端降雨指标增加更为显著, 表明流域北部地区极端降雨对升温阈值更为敏感。因此, 将升温水平控制在 1.5 °C 阈值会明显降低淮河流域北部地区极端降雨事件发生的强度和频率。

3.4 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下流域极端降雨风险变化

年最大降水量的重现期是用来表征极端降雨风险的重要指标, 本文采用广义极值分布 (GEV) 来计算年最大 1 日降水量的概率分布, 进而探究未来淮河流域极端降雨发生风险的变化。图 7 展示了全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 条件下, 淮河流域 20、50 和 100 a 重现期极端降雨较历史时期平均发生概率比的箱线图。由图 7 可知, 2 种升温条件下淮河流域 20、50 和 100 a 重现期极端降雨的概率比均大于 1.5, 表明未来流域极端降雨发生风险总体呈现增大态势, 且相较于升温 1.5 °C, 额外增暖 0.5 °C 将会造成流域极端降雨风险显著增加。具体来看, 升温 1.5 °C 条件下, 淮河流域 20、50 和 100 a 重现期极端降雨概率比分别为 1.6、2.3 和 3.1, 重现期预计将分别变为 12、21 和 32 a; 在升温 2.0 °C 条件下, 淮河流域 20、50 和 100 a 重现期极端降雨概率比分别提升到 2.4、3.4 和 4.6, 重现期预计将分别变为 8、15 和 22 a。此外, 对于不同重现期的极端降雨, 概率比增加幅度明显不同。随着重现期增大, 极端降雨的概率比也将不断增大, 未来重现期大的极端降雨事件发生风险增加更高, 表明未来全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 对重现期大的极端降雨事件影响更为剧烈。

图 8 进一步给出了全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 条件下淮河流域 20、50 和 100 a 重现期极端降雨概率比的空间分布。从图 8 中可以看到, 2 种升温条件下淮河流域所有地区极端降雨风险均呈现增加趋势 ($R_p > 1$)。另外, 流域 20、50 和 100 a 重现期极端降雨概率比的空间分布特征类似, 其中 100 a 重现期极端降雨的概率比明显更高。具体来看, 对于 100 a 重现期极端降雨, 全球升温 1.5 °C 条件下, 概率比大值区主要位于流域北部和南部部分地区, 概率比将超过 3, 表明这些地区极端降雨重现期将减少到 33 a 以下; 而全球升温 2.0 °C 条件下, 极端降雨风险显著增大, 概率比大值区 ($R_p > 3$) 呈现进一步扩大和增强趋势, 且流域北部和南部部分地区的概率比预计将达到 5, 表明这些地区未来极端降雨重现期将不足 20 a。另外, 升温 1.5 °C 与 2.0 °C 的概率比差异图显示 (图 8(c)), 额外增温 0.5 °C 将会导致流域北部和中部地区的概率比增加显著, 说明这些地区为淮河流域气候变化极端降雨高敏感响应区域。因此, 未来需要重点关注该地区气候变化对极端降雨的影响, 进一步提升区域适应气候变化的能力。

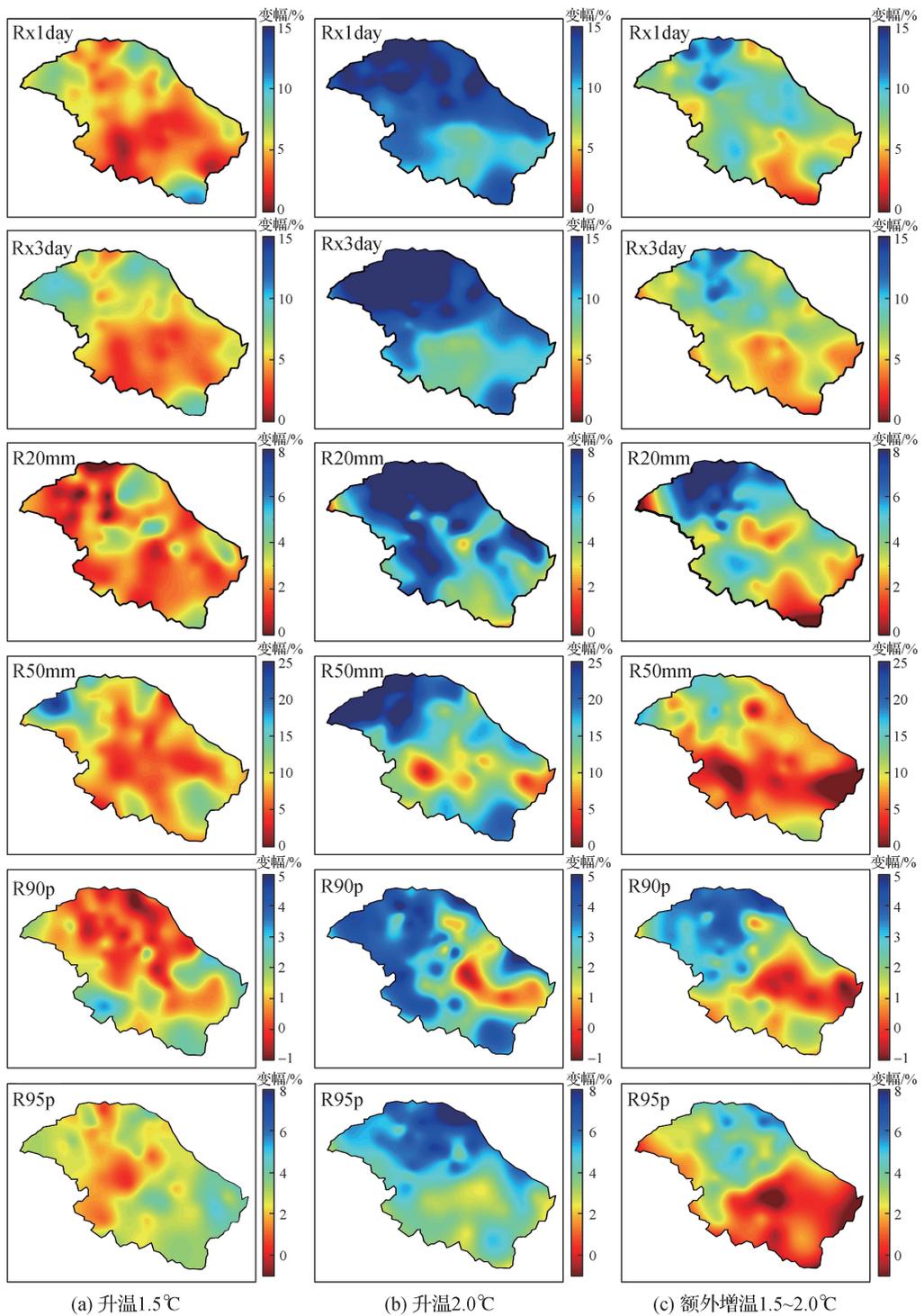


图6 全球升温1.5°C和2.0°C下淮河流域极端降雨指标变幅的空间变化

Fig.6 Spatial distribution of variation of extreme precipitation indices over the Huai River basin under 1.5 °C and 2.0 °C global warming

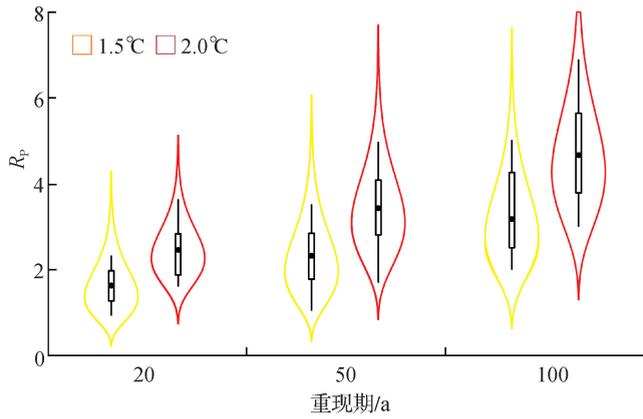


图7 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下 20、50 和 100 a 重现期极端降雨相较于历史时期平均概率比箱线图
 Fig. 7 Boxplots of the R_p for the historical 20-, 50-, 100-year return values of extreme precipitation under 1.5 °C and 2 °C global warming

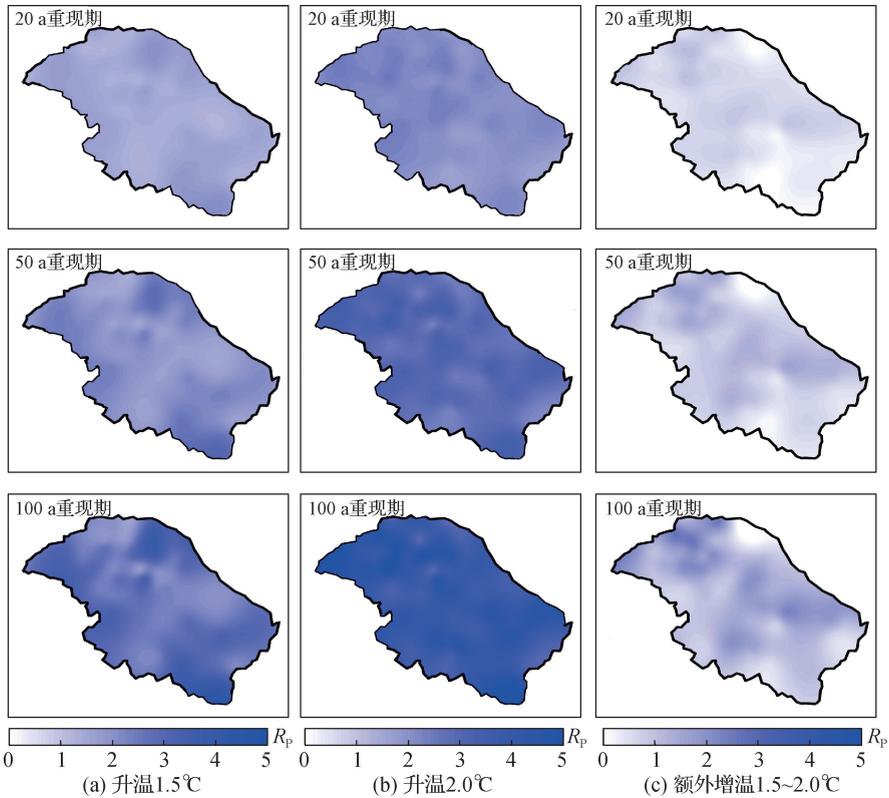


图8 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下淮河流域 20、50 和 100 a 重现期极端降水相对于历史时期概率比空间分布
 Fig. 8 Spatial distributions of R_p for the historical 20-, 50-, 100-year return values of extreme precipitation under 1.5 °C and 2.0 °C global warming

4 结 论

本文利用 22 个 CMIP6 气候模式、改进的可靠性集合方案与概率比法, 预估了全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 对淮河流域极端降雨的影响, 主要结论如下:

(1) 相较于单一气候模式与算术平均方案,改进的可靠性集合方案对历史参考期淮河流域极端降雨指标模拟的相对误差与空间结构的模拟性能更佳。

(2) 不同气候模式达到升温阈值的时间差异较大,总的来看,全球升温达到 1.5 °C 与 2.0 °C 阈值的平均时间段分别为 2017—2046 年和 2026—2055 年。

(3) 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下,淮河流域极端降雨指标均显著增加,且升温 2.0 °C 下极端降雨指标的增幅约为升温 1.5 °C 下的 1.4~2.6 倍。极端降雨指标增加的大值区集中在流域北部,额外升温 0.5 °C 将使年最大 1 日和 3 日降水量指标的增幅超过 10%,暴雨天数指标的增幅甚至超过 25%。

(4) 2 种升温条件下 20、50 和 100 a 重现期极端降雨概率均大于 1.5,表明未来淮河流域极端降雨发生风险总体呈现增大态势,且未来重现期大的极端降雨事件发生风险增加更显著。100 a 重现期极端降雨在升温 1.5 °C 和 2.0 °C 下将可能分别变为 32 年一遇和 22 年一遇。额外增温 0.5 °C 将会导致流域北部和中部地区的极端降雨风险增加更为明显。

参考文献:

- [1] ALLAN R P, ACHUTARAO K M. Climate change 2021: the physical science basis: working group I contribution the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva: IPCC, 2021.
- [2] 黄生志, 杜梦, 李沛, 等. 变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究[J]. 水科学进展, 2019, 30(4): 496-506. (HUANG S Z, DU M, LI P, et al. Investigation of the abrupt changes in precipitation concentration and the driving forces under the changing environment[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(4): 496-506. (in Chinese))
- [3] CHEN H P, SUN J Q, LIN W Q, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes[J]. Science Bulletin, 2020, 65(17): 1415-1418.
- [4] THACKERAY C W, HALL A, NORRIS J, et al. Constraining the increased frequency of global precipitation extremes under warming[J]. Nature Climate Change, 2022, 12(5): 441-448.
- [5] MONDAL S K, HUANG J L, WANG Y J, et al. Changes in extreme precipitation across South Asia for each 0.5 °C of warming from 1.5 °C to 3.0 °C above pre-industrial levels[J]. Atmospheric Research, 2022, 266: 105961.
- [6] LI T, JIANG Z H, ZHAO L L, et al. Multi-model ensemble projection of precipitation changes over China under global warming of 1.5 and 2 °C with consideration of model performance and independence[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 184-197.
- [7] 朱连华, 祝颖琦, 姚壹壹, 等. 全球增暖 1.5/2 °C 下中国区域极端降水的风险变化及其影响因子[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 97-109. (ZHU L H, ZHU Y Q, YAO Y Y, et al. Risk and impact analysis of extreme precipitation over China under 1.5 and 2 °C global warming levels[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 97-109. (in Chinese))
- [8] JU J L, WU C H, YE H P J F, et al. Global precipitation-related extremes at 1.5 °C and 2 °C of global warming targets: projection and uncertainty assessment based on the CESM-LWR experiment[J]. Atmospheric Research, 2021, 264: 105868.
- [9] SHI X Y, CHEN J, GU L, et al. Impacts and socioeconomic exposures of global extreme precipitation events in 1.5 and 2.0 °C warmer climates[J]. Science of the Total Environment, 2021, 766: 142665.
- [10] ZHANG G W, ZENG G, IYAKAREMYE V, et al. Regional changes in extreme heat events in China under stabilized 1.5 °C and 2.0 °C global warming[J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 198-209.
- [11] WANG G, ZHANG Q, YU H Q, et al. Double increase in precipitation extremes across China in a 1.5 °C/2.0 °C warmer climate[J]. Science of the Total Environment, 2020, 746: 140807.
- [12] 王艳君, 刘俸霞, 翟建青, 等. 全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 目标下长江流域极端降水的变化特征[J]. 气象科学, 2019, 39(4): 540-547. (WANG Y J, LIU F X, ZHAI J Q, et al. Variation characteristics of extreme precipitation in the Yangtze River basin under the global warming 1.5 °C and 2.0 °C[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(4): 540-547. (in Chinese))
- [13] 丁凯熙, 张利平, 余敦先, 等. 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 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, 2020, 16(4): 466-479. (DING K X, ZHANG L P, SHE D X, et al. Variation of extreme precipitation in Lancang River basin under global warming of 1.5 °C and 2.0 °C[J]. Climate Change Research, 2020, 16(4): 466-479. (in Chinese))

- [14] ZHAO Y M, LI Z S, CAI S Y, et al. Characteristics of extreme precipitation and runoff in the Xijiang River basin at global warming of 1.5 °C and 2 °C [J]. *Natural Hazards*, 2020, 101(3): 669-688.
- [15] ZHANG X Q, CHEN Y N, FANG G H, et al. Future changes in extreme precipitation from 1.0 °C more warming in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128269.
- [16] 朱继前, 韩美, 徐泽华, 等. 淮河流域不同量级降雨时空分布特征及其影响因素 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 87-95. (ZHU J Q, HAN M, XU Z H, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and factors of different magnitude rainfall in Huaihe River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 87-95. (in Chinese))
- [17] JIN H Y, CHEN X H, ZHONG R D, et al. Spatiotemporal distribution analysis of extreme precipitation in the Huaihe River basin based on continuity [J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(3): 3627-3656.
- [18] MOU S Y, SHI P, QU S M, et al. Projected regional responses of precipitation extremes and their joint probabilistic behaviors to climate change in the upper and middle reaches of Huaihe River basin, China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 240: 104942.
- [19] 谭兴文, 张行南, 牟时宇, 等. 未来气候情景下淮河中上游降水极值及其联合概率行为变化特征 [J]. *水电能源科学*, 2020, 38(6): 1-4, 12. (TAN X W, ZHANG X N, MOU S Y, et al. Changing characteristics of precipitation extremes and their joint probability behaviors in the upper and middle reaches of Huaihe River basin based on future climate scenario [J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(6): 1-4, 12. (in Chinese))
- [20] 钟平安, 唐洪武. 淮河中下游洪涝综合治理的思考与初探 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 746-753. (ZHONG P A, TANG H W. Thinking and preliminary practice of comprehensive treatment of the middle and lower reaches of the Huaihe River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 746-753. (in Chinese))
- [21] EYRING V, COX P M, FLATO G M, et al. Taking climate model evaluation to the next level [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(2): 102-110.
- [22] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述 [J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445-456. (ZHOU T J, ZOU L W, CHEN X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445-456. (in Chinese))
- [23] GE F, ZHU S P, LUO H L, et al. Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(2): 024013.
- [24] 刘艳丽, 华悦, 周惠成, 等. 1470年以来中国东部季风区降水变化规律及趋势预估 [J]. *水科学进展*, 2022, 33(1): 1-14. (LIU Y L, HUA Y, ZHOU H C, et al. Precipitation variation and trend projection in the eastern monsoon region of China since 1470 [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(1): 1-14. (in Chinese))
- [25] 舒章康, 李文鑫, 张建云, 等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 116-125. (SHU Z K, LI W X, ZHANG J Y, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 116-125. (in Chinese))
- [26] YIN H, SUN Y. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(4): 218-226.
- [27] CHEN J, BRISSETTE F P, ZHANG X J, et al. Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology [J]. *Climatic Change*, 2019, 153(3): 361-377.
- [28] BIAN G F, ZHANG J Y, CHEN J, et al. Projecting hydrological responses to climate change using CMIP6 climate scenarios for the Upper Huai River basin, China [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 759547.
- [29] 顾磊, 陈杰, 尹家波, 等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 321-333. (GU L, CHEN J, YIN J B, et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 321-333. (in Chinese))
- [30] 张林燕, 郑巍巍, 杨肖丽, 等. 基于CMIP5多模式集合和PDSI的黄河源区干旱时空特征分析 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(6): 95-99, 137. (ZHANG L Y, ZHENG W F, YANG X L, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode ensemble and PDSI [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(6): 95-99, 137. (in Chinese))
- [31] 刘绿柳, 魏麟骁, 徐影, 等. 气候变化对黄河流域生态径流影响预估 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 824-833. (LIU L L, WEI L X, XU Y, et al. Projection of climate change impacts on ecological flow in the Yellow River basin [J]. *Advances in*

- Water Science, 2021, 32(6): 824-833. (in Chinese))
- [32] XU Y, GAO X, GIORGI F. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections[J]. Climate Research, 2010, 41: 61-81.
- [33] LI H X, CHEN H P, WANG H J, et al. Future precipitation changes over China under 1.5 °C and 2.0 °C global warming targets by using CORDEX regional climate models[J]. Science of the Total Environment, 2018, 640/641: 543-554.
- [34] YANG X L, YU X H, WANG Y Q, et al. The optimal multimodel ensemble of bias-corrected CMIP5 climate models over China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(4): 845-863.
- [35] ZHU H H, JIANG Z H, LI L. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6[J]. Science Bulletin, 2021, 66(24): 2528-2537.
- [36] MARIE F C, THORSTEN M. On the climate sensitivity and historical warming evolution in recent coupled model ensembles[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(13): 7829-7842.

Projection of extreme precipitation over the Huai River basin under 1.5 °C/2.0 °C global warming*

BIAN Guodong¹, ZHANG Jianyun^{2,3}, WANG Guoqing^{2,3}, SONG Mingming^{2,3}

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The Huai River basin has been severely affected by rainstorm and flood disasters. It is of great significance to scientifically estimate the changes in extreme precipitation under global warming of 1.5 °C and 2.0 °C in the Huai River basin for flood control and adaptation to climate change. Based on the projections of the 22 GCMs (Global Climate Models) issued in the CMIP6 (the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project), the spatiotemporal variations of extreme precipitation and changes in future risk over the Huai River basin are investigated by using the modified reliability ensemble method, probability ratio method and six extreme precipitation indices. The results show that: ① The modified reliability ensemble method performs better in simulating extreme precipitation indices over the Huai River basin than the single GCM and arithmetic mean ensemble approach. ② The timing spans of 1.5 °C and 2.0 °C global warming approximately occur in 2017—2046 and 2026—2055, respectively. ③ The increase of extreme precipitation indices under 2.0 °C global warming is 1.4 to 2.6 times of that under 1.5 °C global warming, with the largest increase occurring in the northern region of the Huai River basin. ④ Under two global warming of 1.5 °C and 2.0 °C, the risk of extreme precipitation has an increasing trend, and the additional 0.5 °C global warming from 1.5 °C to 2.0 °C will result in higher risk over the Huai River basin. For instance, the return period of a 100-year extreme precipitation will likely become to 32-year and 22-year under 1.5 °C and 2.0 °C global warming, respectively. In the future, extreme precipitation events will probably become more frequent over the Huai River basin.

Key words: extreme precipitation; CMIP6; multimodal ensemble; 1.5 °C and 2.0 °C global warming; Huai River basin

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52121006; No. 52279018).