

基于 BCC-CSM 气候模式预估淮河流域极端降水未来变化

孙文婷, 郭娜, 陈姗姗

南京市溧水区气象局 江苏南京

【摘要】 本文基于 1976-2020 年淮河流域 50 个气象台站逐日降水观测数据以及国家气候中心 BCC-CSM1.1-m 全球气候模式的历史模拟与未来预估数据, 构建了涵盖极端降水平均强度 (PA)、日数 (PN)、极值 (PE) 及频率 (PP) 的综合指标体系。采用 Mann-Kendall 检验、多元线性回归及区间订正等方法, 分析了淮河流域夏季极端降水的历史时空演变规律、气候模式的模拟性能与偏差订正效果, 并对未来变化趋势进行了预估。主要结果表明: (1) 历史时期 (1976-2020) 淮河流域夏季 PN 与 PP 在 90 年代后呈现增强趋势, 部分年份可能存在显著突变; PA 与 PE 年际波动剧烈, 整体线性趋势不显著。空间上, PN 与 PP 呈南多北少格局, PA 高值区位于沿海及西南部, PE 则在流域西南部出现局地强中心。(2) BCC-CSM1.1-m 模式对历史时期淮河流域夏季极端降水存在显著的系统性低估, 尤其在 PN 和 PP 的模拟上偏差较大。区间订正法能有效减小模式模拟降水在量级上的偏差, 显著改善对降水峰值的模拟结果。(3) 未来预估显示, 淮河流域夏季 PA 和 PE 将经历非线性的多阶段演变: 21 世纪初期波动性增强, 21 世纪中叶 (约 2035-2060) 显著大幅度减弱, 21 世纪后半叶 (约 2060 年后) 则再次转为波动中回升并增强。空间分布上也将经历从历史格局到世纪中期普遍减弱, 再到世纪末期部分恢复及格局重塑的动态调整, 预示未来极端降水高风险区可能发生转移。

【关键词】 淮河流域; 极端降水; 时空特征; 模式订正; 未来预估

【收稿日期】 2025 年 12 月 20 日

【出刊日期】 2026 年 1 月 22 日

【DOI】 10.12208/j.ccm.20260002

Future changes in extreme precipitation in the Huaihe River Basin based on the BCC-CSM climate model

Wenting Sun, Na Guo, Shanshan Chen

Nanjing Lishui District Meteorological Bureau, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】 Based on daily precipitation observation data from 50 meteorological stations in the Huaihe River Basin from 1976 to 2020, as well as historical simulations and future projections from the BCC-CSM1.1-m global climate model by the National Climate Center, this study constructed a comprehensive indicator system encompassing extreme precipitation intensity (PA), days (PN), extremes (PE), and frequency (PP). Methods such as the Mann-Kendall test, multiple linear regression, and interval correction were employed to analyze the historical spatiotemporal evolution patterns of summer extreme precipitation in the Huaihe River Basin, the simulation performance of the climate model, and the effectiveness of bias correction. Future trends were also projected. Key findings include: (1) During the historical period (1976-2020), PN and PP in the Huaihe River Basin summer showed an increasing trend after the 1990s, with possible significant abrupt changes in some years. PA and PE exhibited intense interannual fluctuations, with no significant overall linear trend. Spatially, PN and PP followed a pattern of higher values in the south and lower in the north, while PA high-value zones were located along the coast and southwestern regions, and PE exhibited localized strong centers in the southwestern part of the basin. (2) The BCC-CSM1.1-m model significantly underestimated historical summer extreme precipitation in the Huaihe River Basin, particularly in the simulation of PN and PP. The interval correction method effectively reduced the magnitude bias in

model-simulated precipitation and significantly improved the simulation of precipitation peaks. (3) Future projections indicate that PA and PE in the Huaihe River Basin summer will undergo nonlinear, multi-stage evolution: increasing variability in the early 21st century, significant and substantial weakening by mid-century (approximately 2035-2060), and a subsequent fluctuating rebound and intensification in the latter half of the century (after 2060). Spatially, the distribution will also dynamically adjust from the historical pattern to widespread weakening by mid-century, followed by partial recovery and reconfiguration by the end of the century, suggesting potential shifts in high-risk areas for future extreme precipitation.

【Keywords】 Huaihe River Basin; Extreme precipitation; Spatiotemporal characteristics; Model correction; Future projection

在全球变暖的大背景下, 全球水循环过程被显著改变并趋于强化^[1], 大气持水能力随温度升高而增加, 使得极端降水事件的强度和频率在许多地区呈上升趋势^[2]。已有研究表明, 气候变暖不仅改变了平均气候态, 而且使极端事件表现出频率加大、强度增强、影响范围扩大和致灾性加剧等特征, 极端天气气候事件正日益常态化^[3]。近百年来, 中国极端降水事件的频率和强度普遍增加^[4]。淮河流域地处我国南北气候过渡带, 受东亚夏季风影响显著, 气候复杂多变, 人口稠密, 经济发达, 是重要的粮食产区 and 能源基地。然而, 该区域降水时空分布不均, 汛期(6-9月)降水集中, 旱涝灾害频发^[5]。已有研究表明, 随着全球变暖, 淮河流域极端降水强度和频率可能增加^[6], 这无疑将加剧农业生产脆弱性和洪涝风险, 并对区域水资源管理、城市规划和基础设施安全带来挑战。区域极端降水变化的规律与成因已成为学术界关注的焦点。然而, 已有研究多集中于历史变化规律, 对未来极端降水变化及其不确定性评估仍相对不足。

气候模式为理解和预估极端降水变化提供了重要工具。CMIP5 模式结果普遍预估, 在全球变暖背景下, 中国大部分地区未来极端降水事件将增强^[6]。CMIP6 模式在分辨率和物理过程刻画上有所改进, 为更可靠的区域预估提供了可能^[7]。然而, 由于对对流、云微物理和陆面过程等复杂过程的参数化不足, 模式对极端降水的模拟仍存在不确定性^[8], 在区域尺度尤为突出。为提高模式适用性, 通常需要开展偏差订正与降尺度处理, 其中分位数映射等方法应用广泛^[9]。已有学者利用 CMIP5 模式数据对淮河流域未来降水进行研究, 结果显示极端降水的强度和频率将增加^[10], 但考虑到模式本身存在差异及 CMIP6 的最新进展, 亟需基于新一代气候模式结合

合理的订正方法^[11], 对淮河流域未来极端降水变化趋势开展系统研究。本文基于观测资料与最新一代气候模式数据, 系统分析淮河流域夏季极端降水的历史时空演变规律, 评估气候模式的模拟性能与偏差订正效果, 并对未来变化趋势进行预估, 不仅有助于深化区域水文气候响应规律的认识, 为气候变化科学提供区域尺度证据, 同时对于区域防灾减灾、水资源管理及适应性规划具有重要的现实意义。

1 资料与方法

1.1 数据来源

用于计算极端降水综合指标以及评估气候模式模拟能力的逐日降水观测数据来源于中国气象局国家气象信息中心(CMA), 包含了淮河流域 50 个国家级地面气象观测台站在 1976 年至 2020 年期间的夏季(定义为 6 月、7 月、8 月)逐日降水观测记录。模拟降水数据由中国国家气候中心(NCC)发展的全球气候模式 BCC-CSM1.1-m 提供。模式数据从地球系统格点联盟(Earth System Grid Federation, ESGF)的数据节点下载。

1.2 研究区域概况

本文选取的淮河流域, 其地理位置大致介于北纬 30° 至 38°, 东经 110° 至 122° 之间。图 1 可以看出 50 个气象观测站点的空间分布情况, 这些站点相对均匀地分布在整个流域范围内, 覆盖了淮河流域的上、中、下游以及主要支流区域, 能够较好地反映整个流域降水特征的空间差异。

1.3 极端降水特征

为了全面刻画淮河流域极端降水的变化特征, 本研究借鉴了世界气象组织(WMO)气候变化检测与指标专家组(ETCCDI)推荐的部分指数以及其他广泛应用的相关指数, 并结合研究区域的特点, 选取了能够从不同侧面反映极端降水事件变化的四个

关键指数^[10]。这些指数基于站点逐日降水数据计算得到, 主要针对夏季(6-8月)进行分析, 具体的极

端降水综合特征指标体系见表 1。

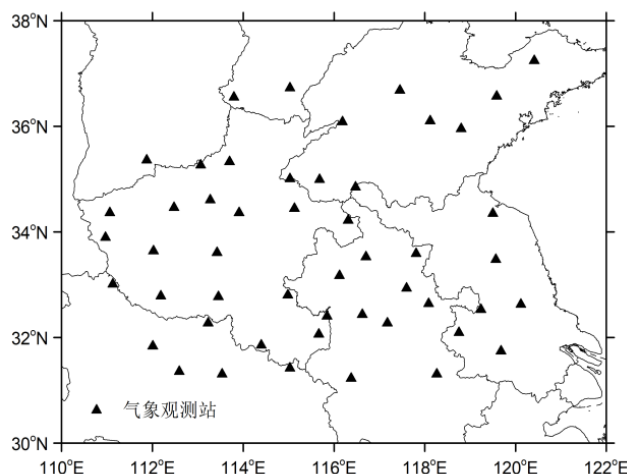


图 1 中国淮河流域站点坐标

表 1 极端降水综合特征指标

指数名称 (Acronym)	指标含义 (Definition)	表征特征 (Characteristic Represented)	计算方法 (Calculation Method)
PRCPTOT (PA)	极端降水事件平均降水量	平均强度 (Average Intensity)	统计夏季内所有极端降水事件的日降水量之和, 除以极端降水事件发生的总日数。极端降水事件阈值为日降水量超过 95% 的降水日。(单位: mm/day)
R95p (PN)	极端降水日数	次数 (Number of Events)	统计夏季日降水量超过特定阈值 (95th 百分位数) 的天数。(单位: day)
RX1day (PE)	夏季最大 1 日降水量	极大值 (Maximum Value)	选取夏季内所有降水日中最大的单日降水量。(单位: mm)
PP	极端降水频率	相对频率 (Relative Frequency)	夏季内极端降水日数 (PN) 除以该时期内总降水日数 (日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ 天数)。(单位: %)

1.4 Mann-Kendall 检验法

本研究采用了 Mann-Kendall (MK) 突变检验法识别淮河流域极端降水指数时间序列中可能存在的突变发生的时刻, 即气候状态从一种稳定态向另一种稳定态的急剧转变。Mann-Kendall (MK) 突变检验法是一种非参数统计方法, 其主要优点是不需要样本数据遵循特定的概率分布, 并且对序列中的少数异常值不敏感, 因此非常适合分析水文气象时间序列的非线性和非平稳特征^[12]。通过构建两个统计量序列来实现: 顺序统计量序列 (UF_i): 该序列是按时间序列的正向顺序计算得到的。 UF_i 曲线能够反映时间序列的变化趋势。如果 $UF_i > 0$, 表明序列有上升趋势; 如果 $UF_i < 0$, 表明序列有下降趋势。 UF_i 绝对值超过给定的显著性水平对应的临界值

(1.96), 表明该趋势是显著的。逆序统计量序列 (UB_i): 该序列是将原始时间序列逆序排列后, 按与计算 UF_i 类似的方法计算得到的, 该曲线通常与 UF_i 曲线一同分析, 以确定突变点的位置。

1.5 模型的评估与偏差订正

针对极端降水预报模型的评估以及偏差订正, 首先是对全球气候模拟数据进行评估, 通过统计各个站点数据, 计算出极端降水的综合指标在 45 年内的平均值、标准差、变异系数可以观测分析到模式的模拟能力。其次, 考虑到全球气候模式在区域尺度上对降水, 特别是极端降水的模拟存在系统性偏差, 本研究将采用区间订正法 (Interval Correction Method) 对 BCC-CSM1.1-m 模式输出的历史时期和未来预估的逐日降水数据进行偏差订正。ICM 方法针对流域

内的每个站点进行, 通过将各个站点的降雨量按照雨量差异分开订正, 得到每个站的订正因子, 尽可能保留区域降水的空间异质性^[13,14]。有效建立订正数据与模拟数据之间的传递函数, 最终得到订正结果。具体步骤为: ①将模拟值与观测值代入订正算式。②训练处理得到各站不同降水类型的订正因子。③利用订正因子订正模拟值与真实值作对比进行效果评估。④将得到的订正因子应用到未来模拟值。

2 结果与分析

2.1 淮河流域夏季极端降水的时空特征及其演变趋势

本节基于 1976-2020 年淮河流域 50 个代表性站点的夏季逐日降水观测数据, 计算得到的四个极端降水指数 (PA、PN、PE、PP) 的年际变化如图 2 所示, 其对应的 Mann-Kendall (MK) 趋势检验结果如图 3 所示。淮河流域夏季极端降水事件的年平均强度 (PA) 在观测期内表现出较稳定的年际波动 (图 2a)。从时间序列上看, PA 值在 1991 年之前呈现出一定的下降态势, 但此后至 2020 年期间, 波动幅度较大, 并未呈现出持续的单向变化。整个观测时段内, PA 的多年平均值约为 112mm。其中, 2013 年 PA 值达到峰值, 约为 138mm, 表明该年夏季的极端降水事件平均强度最高; 而 1977 年的 PA 值则为观测期内的最低点, 仅约 100mm。对 PA 时间序列进行 Mann-Kendall 检验 (图 3a) 结果显示, 尽管 UF 曲线在部分时段 (尤其是在序列末期) 呈现一定的上升趋势, 但其并未稳定地突破 0.05 显著性水平的置信区间, 表明 PA 的整体线性变化趋势在统计学上并不显著。UF 与 UB 曲线在整个观测时段内仅出现少量明确且稳定的交点, 这指示 PA 序列在 1976-2020 内无显著趋势和突变。

相比之下, 淮河流域夏季年极端降水日数 (PN) 的年际变化则更加显著 (图 2b), 其多年平均值约为 38 天。时间序列显示, 在 1976 年至 1996 年期间, PN 值呈现出较大的上下起伏, 波动剧烈。自 1997 年起至 2005 年前后, PN 值呈现出一个相对下降的阶段。然而, 在 2006 年之后, PN 值出现了一次显著的跃升, 并在随后的年份中维持在相对较高的水平, 个别年份 (2006 年) 的 PN 值甚至高达约 93 天。观测期内的最小值出现在 2008 年, 约为 10 天。MK 检验结果 (图 3b) 表明, PN 序列的 UF 曲线在大部分时段内位于零线以上, 并在序列后期有明显的上

升态势, 整体存在一定的上升趋势。图中 UF 与 UB 曲线有多个交点, 但均未突破显著水平。

淮河流域夏季年最大单日降水量 (PE) 的分布在年际间表现出极大的不均匀性 (图 2c), 多年平均值约为 227 mm。时间序列上, PE 值同样呈现出剧烈的年际振荡。1998 年的 PE 值达到了观测期内的峰值, 约为 423 mm, 显示出该年夏季发生了极强的短历时暴雨事件。值得注意的是, 在 2015 年初期, PE 值似乎呈现出一个相对下降的趋势。MK 检验图 (图 3c), UF 曲线在整个观测时段内呈现多次波动, 但整体趋势不甚明朗。图中 UF 与 UB 曲线有多个交点, 例如在上世纪 70 年代末、本世纪 10 年代中后期以后, 说明 PE 序列经历了多次结构性调整。

年极端降水频率 (PP), 即极端降水日数占总降水日数的比例, 其多年平均值约为 0.0165 (图 2d)。从整体上看, PP 值在观测时段内呈现出一定的上升趋势, 尽管线性趋势可能并不十分显著。2006 年的 PP 值达到最大, 约为 0.04。特别是在 2015 年之后, PP 值也表现出逐年上升的迹象, 这与 PN 在同时期可能的变化趋势有所协同, 值得进一步关注。经过 MK 检验 (图 3d) 整体线性上升趋势变化不显著, 并且从曲线分布来看突变点较多。

综上所述, 淮河流域夏季极端降水特征在 1976-2020 年期间表现出复杂的时空演变。总体而言, 多数指标在观测后期呈现出一定的增强或增加趋势, 这与全球变暖背景下极端降水事件趋于频繁和强化的普遍认知具有一定的区域响应。

为进一步揭示其极端降水事件在不同区域的差异性, 对 1976-2020 年期间的四个极端降水指数进行了空间插值, 从而得到了它们的多年平均空间分布格局 (图 4)。对淮河流域夏季四个极端降水指数的空间分布分析揭示了其在区域间的显著差异性, 这为理解不同类型极端降水风险提供了精细化视角。具体而言, PA 的高值区主要集中在流域沿海地带及西南部部分区域 (图 4a), 表明这些地区一旦遭遇极端降水, 其平均强度往往更为剧烈。而 PE 的空间分布则呈现出高度局地化的特征 (图 4c), 尤其在流域西南部出现高达约 500 mm 的极端高值中心 (如西华站附近)。这种点状强中心格局突出反映了局地强对流天气或特定类型暴雨 (如地形暴雨、台风登陆后深入内陆) 对年最大降水量的决定性影响, 揭示了潜在的极端暴雨洪涝高风险区域。与此

不同的是 PN 和 PP 均呈现出明显的南高北低梯度 (图 4a、d), 指示流域南部极端降水事件发生频率更高, 且其对总降水量的贡献亦相对较大。这一格局与夏季梅雨锋等大尺度天气系统对流域南部的持续影响密切相关。综上所述, 淮河流域夏季极端降

水在空间上呈现出复杂而独特的分布格局, 各指标既有共性亦有差异。PN 和 PP 揭示了南部地区极端降水事件的高频率与高占比, 而 PA 和 PE 则突出了沿海、西南部特定区域单次极端事件的超强强度和极值风险。

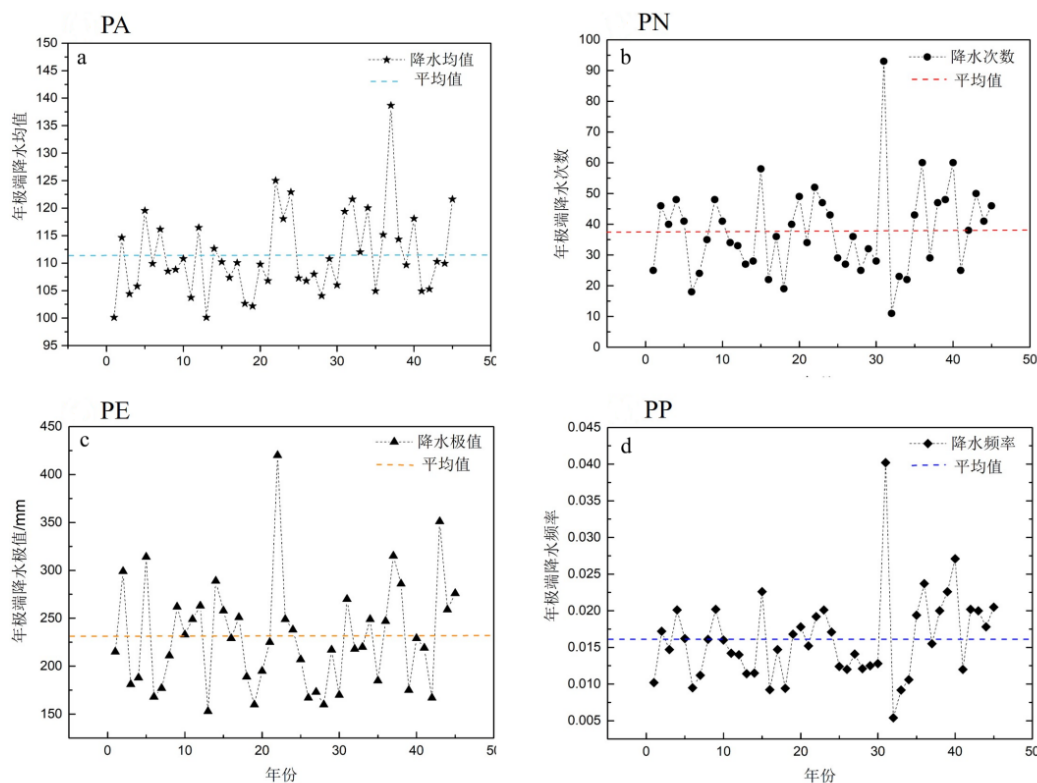


图 2 1976-2020 淮河流域夏季极端降水特征的年际变化

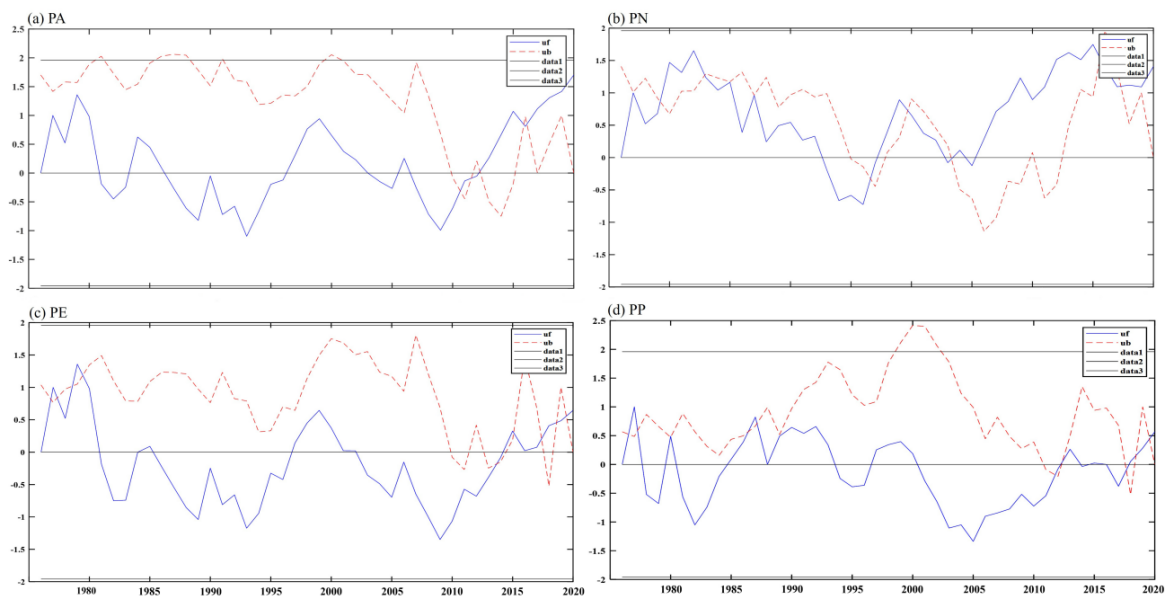


图 3 淮河流域夏季极端降水特征的 MK 检验

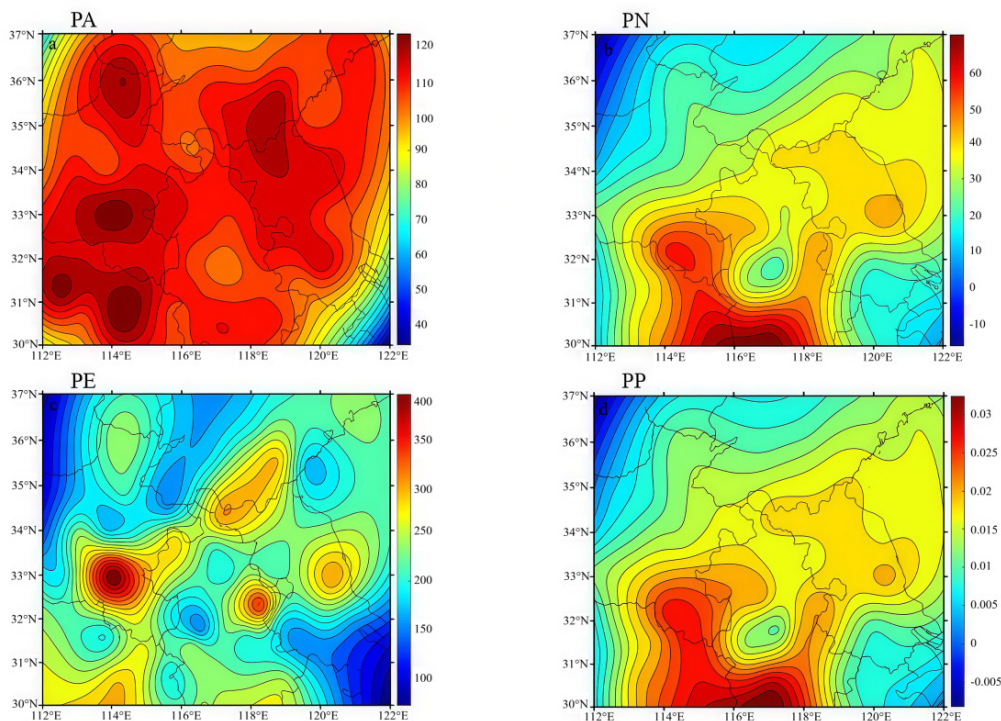


图 4 淮河流域夏季极端降水特征的空间分布

2.2 气候模型对夏季淮河极端降水特征的评估以及偏差订正

为了评估国家气候中心 BCC-CSM1.1-m 全球气候模式（以下简称“模式”）对淮河流域夏季极端降水特征的模拟性能，本节将模式在历史时期（1976-2020 年）模拟的四个极端降水指数（PA、PN、PE、PP），并分析了两者在平均值、标准差和变异系数等统计特征上的差异（表 2）。对于极端降水的强度（PA）和极大值（PE），虽然也存在低估，但 PE 的变异系数与观测较为接近，可能暗示模式在捕捉极端降水强度相对变化的能力上略优于次数和频率。然而，模式普遍高估了 PA 的年际变异程度，而严重

低估了 PN 和 PP 的平均水平及其年际变化的绝对幅度。这些模拟偏差凸显了在全球气候模式应用于区域极端气候事件研究时，进行有效的偏差订正的必要性和重要性，尤其是在进行未来预估之前。模式对极端降水模拟能力的不足可能源于其分辨率对局地对流过程的刻画不足、参数化方案的局限性以及对区域水汽输送和中小尺度天气系统影响的模拟偏差等。

鉴于 BCC-CSM1.1-m 模式在模拟淮河流域极端降水方面存在显著偏差，本研究采用区间订正法对模式输出的逐日降水数据进行校正，以期提高其在区域尺度上的适用性。

表 2 河流域夏季各极端降水指数观测值与模式模拟值的统计特征对比

参数 (Index)	数据来源 (Source)	平均值 (Mean)	标准差 (Std.Dev.)	变异系数 (CV)
PA (mm)	观测 (OBS)	111.5	7.6	0.07
	模式 (Model)	132.3	8.2	0.29
PN (days)	观测 (OBS)	37.8	14.4	0.40
	模式 (Model)	7.6	6.8	0.90
PE (mm)	观测 (OBS)	230.6	55.8	0.24
	模式 (Model)	125.9	29.3	0.25
PP (%)	观测 (OBS)	0.017	0.008	0.46
	模式 (Model)	0.003	0.003	0.91

2.3 夏季淮河极端降水特征的未来预估分析

基于订正后的国家气候中心 BCC-CSM1.1-m 模式未来预估降水数据, 可对淮河流域 2026-2100 年夏季的 PA 和 PE 的变化趋势进行预估和分析。图 5 展示了这两个指数在未来时期的年际变化序列 (蓝色虚线代表历史时期极端降水特征平均, 绿色虚线代表 21 世纪中期极端降水特征平均, 红色虚线代表 21 世纪末期极端降水特征平均)。图 6 则给出了相应的 MK 趋势检验结果。研究发现, 预估结果显示 (图 6), 淮河流域夏季的 PA 和 PE 在 21 世纪的演变路径均呈现出显著的非线性、多阶段特征, 而非单一的线性趋势。具体而言, 两个指数在 21 世纪初期 (约 2000 年至本世纪 10 年代初) 均表现出一段波动性的增强趋势, PE 也出现相对高值。然而, 随后在 21 世纪中叶, 特别是约 2035 年至 2060 年期间, PA 和 PE 均将经历一个历时较长且幅度巨大的显著减弱阶段。在此期间, PA 值甚至可能在某些年

份急剧降低至远低于历史平均的水平, PE 也出现持续的低值期。进入 21 世纪后半叶 (约 2060 年之后), PA 和 PE 则共同呈现出波动中逐步回升并再次增强的态势, 尽管年际波动依然显著, 但整体水平较世纪中叶有明显提高, 至 21 世纪末期, 两个指数预计将恢复至或接近 21 世纪初期的较高水平。Mann-Kendall 趋势检验结果 (图 6) 为这种“增强-显著减弱-再次增强”的“U 型”或“V 型”反转后的演变格局提供了统计支持。两个指数的 UF 统计量曲线均清晰地反映了 21 世纪初期趋势的增强、世纪中叶趋势的急剧转折和显著减弱, 以及世纪末期趋势的再次回升。特别是在 21 世纪中叶的减弱阶段, UF 曲线均显示出强烈的负向偏离, 表明这一时期的减弱趋势在统计上极有可能是显著的, 并可能伴随着趋势的突变。进入 21 世纪后半叶, UF 曲线再次转为上升趋势, 并逐渐接近零线, 到 21 世纪末期, UF 值虽仍为负, 但有向正值恢复的趋势。

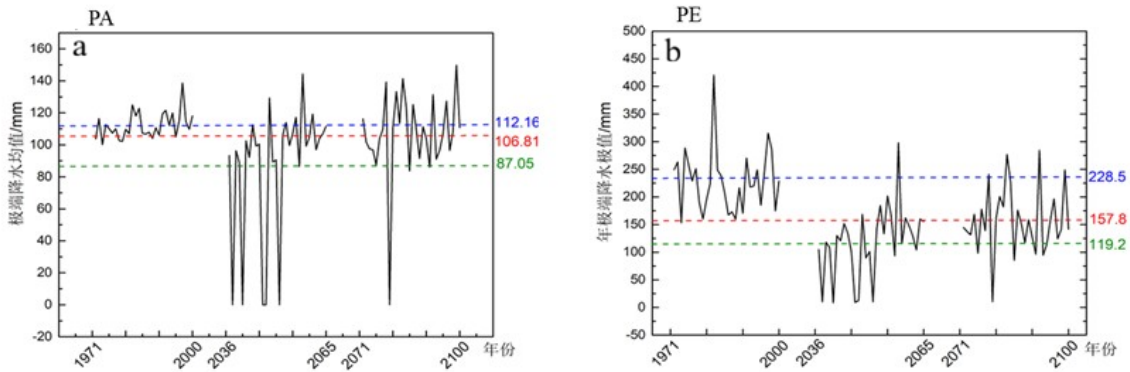
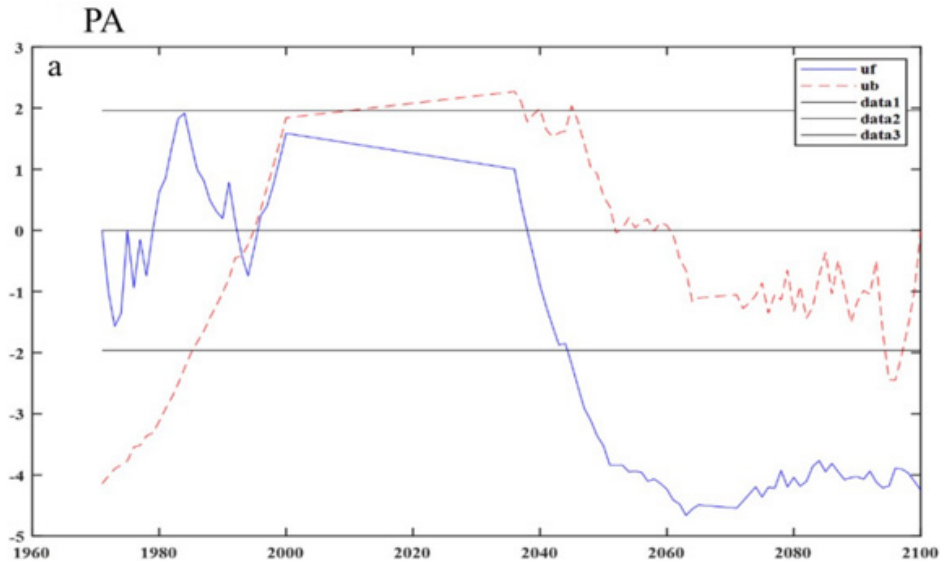


图 5 未来淮河流域夏季极端降水特征的年际变化



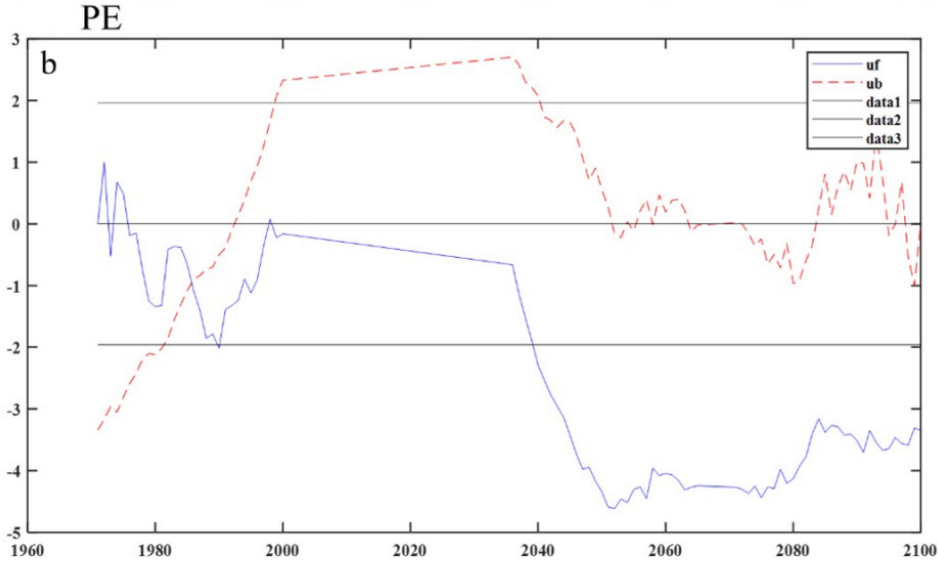


图 6 未来淮河流域夏季极端降水特征的 MK 检验

综合来看, BCC-CSM1.1-m 模式预估淮河流域夏季极端降水强度相关的两个关键指标 (PA 和 PE) 在 21 世纪并非呈现单向的持续增强或减弱, 而是将经历一个显著的先增强、后急剧减弱、再逐步回升的复杂演变过程。这一预估结果揭示了未来极端降水变化的非平稳性和阶段性特征, 对于区域气候变化适应策略的制定具有重要的指导意义。

为进一步揭示淮河流域未来夏季极端降水强度在空间上的变化特征, 本节分析了基于偏差订正的 BCC-CSM1.1-m 模式在未来情景下预估的 PA 和 PE 在历史时期 (1976-2020 年)、21 世纪中期 (2036-2065 年) 和 21 世纪末期 (2071-2100 年) 的空间分布格局。在历史时期 (图 7a), 淮河流域的 PA 高值区主要分布在流域的沿海地带以及西南部部分地区, 整体呈现西南部和东北部较高, 中东部相对较低的空间特征, 大部分区域 PA 值在 80~120 mm 之间。进入 21 世纪中期 (图 7b), PA 的空间分布格局发生了显著改变, 整体表现为大幅减弱的趋势。历史时期的大部分高值区均转变为低值区, 整个流域的 PA 水平普遍下降, 大部分区域 PA 值降至 70~100 mm 以下, 尤其是流域中部和东部地区, PA 减弱尤为明显, 呈现大范围的冷色调 (低值) 区域。这与前述年际变化分析中 21 世纪中叶 PA 显著减弱的结论在空间上高度吻合。展望 21 世纪末期 (图 7c), PA 的空间分布则呈现出一定程度的恢复和增

强, 但其空间格局与历史时期有所不同。尽管流域整体的 PA 水平较世纪中期有所回升, 大部分区域 PA 值恢复至 80~110 mm 左右, 但历史时期东北沿海的高值区强度有所减弱, 而在流域的西北部和中西部可能出现新的相对高值中心。总体而言, PA 在未来的空间演变路径并非简单的线性增强或减弱, 而是伴随着空间分布重心的调整和强度的阶段性涨落。

对于 PE 而言, 历史时期 (图 8a) 其空间分布呈现多个相对分散的高值中心, 其中最为突出的是位于流域西南部的一个强中心, 其他区域 PE 值则相对较低。与 PA 的演变相似, 在 21 世纪中期 (图 8b), PE 在整个淮河流域也表现出显著的普遍性减弱。历史时期的所有高值中心强度均大幅下降, 西南部原有的强中心范围缩小且强度锐减至 200 mm 以下, 流域大部分地区转变为 PE 的低值区 (如图中大范围的蓝色和浅蓝色区域所示), PE 值普遍低于 150 mm。这一变化同样印证了年际趋势分析中 21 世纪中叶 PE 显著减弱的预估。至 21 世纪末期 (图 8c), PE 的空间分布显示出一定程度的增强, 但其强度和空间格局与历史时期及世纪中期均有差异。流域整体的 PE 水平较世纪中期有所回升, 但历史时期西南部极端强中心未能完全恢复, 而在流域的中北部和东部可能出现新的、强度相对温和 (例如 250~300 mm) 的高值区。这表明, 未来 PE

不仅在量级上发生变化, 其极端高风险区的地理位置也可能发生转移。

综合来看, BCC-CSM1.1-m 模式预估淮河流域未来的 PA 和 PE 在空间分布上将经历相似的演变路径: 即从历史时期的特定空间格局, 转变为 21 世纪中期的普遍性、大幅度减弱, 再到 21 世纪末期的部分恢复和空间格局重塑。这种“先减弱后增强(或

调整)”的空间演变特征, 与两个指数在年际时间序列上预估的“U 型”或“V 型”反转后的趋势高度一致。这一发现强调了在评估未来气候变化对区域极端降水影响时, 不仅要关注时间上的趋势变化, 还需重视空间分布格局的动态调整, 这对区域水资源规划、防洪减灾重点区域的识别以及基础设施的适应性建设具有重要的指导意义。

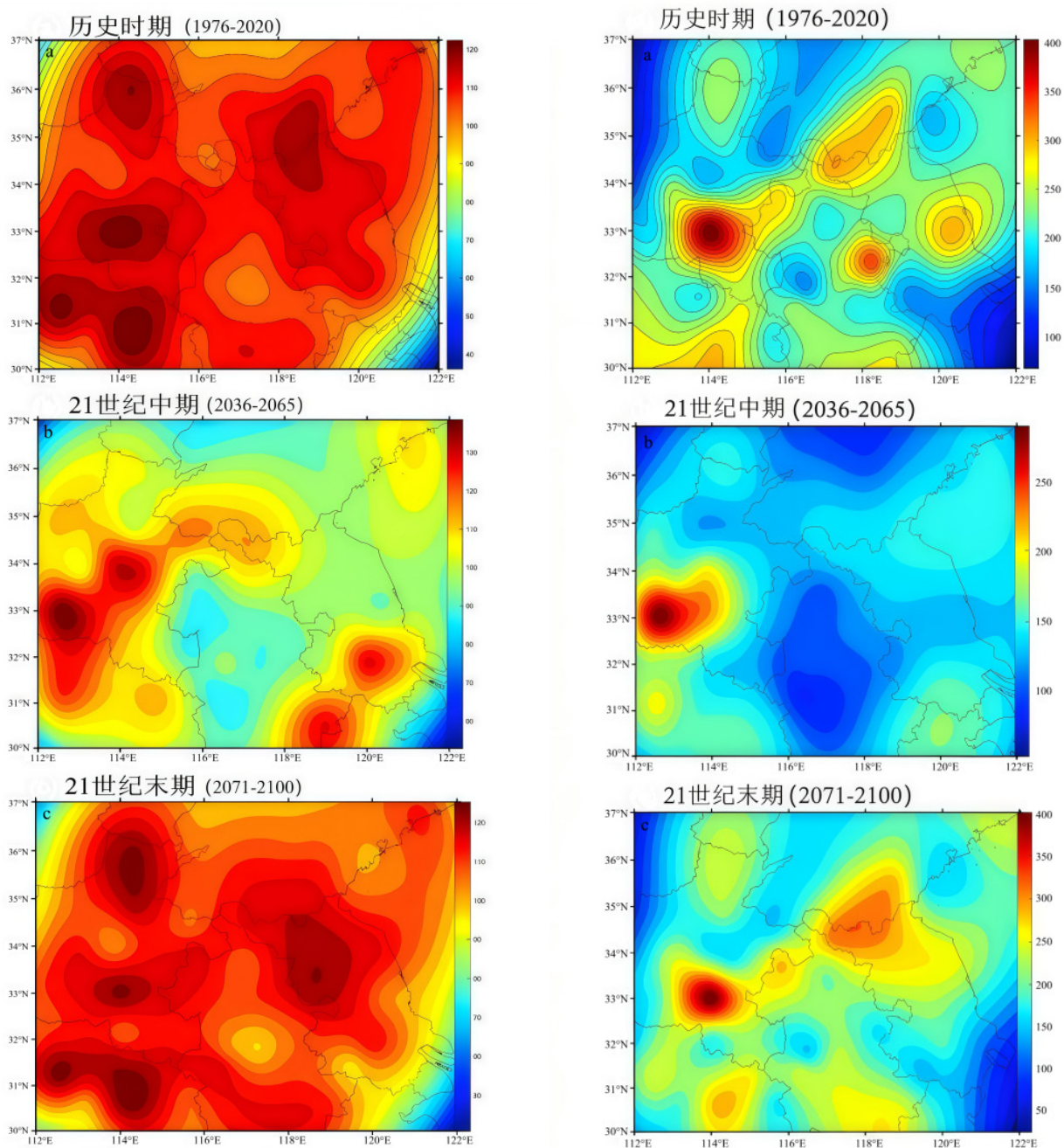


图 7 历史 (a) 和未来不同时期 (b, c) 淮河流域夏季极端降水均值 (PA) 的空间分布 (上图左)

图 8 历史 (a) 和未来不同时期 (b, c) 淮河流域夏季极端降水极值 (PE) 的空间分布 (上图右)

3 结论与讨论

本文系统地探讨了基于 BCC-CSM 气候模式淮河流域夏季极端降水的时空演变特征、气候模式模拟能力及未来变化趋势, 结果表明: (1) BCC-CSM1.1-m 模式在直接模拟淮河流域历史时期夏季极端降水方面存在显著的系统性低估, 尤其在 PN 和 PP 上偏差较大, 对 PA 和 PE 也存在不同程度的低估。模式还普遍高估了 PA 的年际变异程度。(2) 对未来淮河流域夏季极端降水的变化预估显示: 淮河流域夏季极端降水强度相关的两个关键指标 (PA 和 PE) 在 21 世纪的演变路径将呈现显著的非线性、多阶段特征。在 21 世纪初期波动性增强, 21 世纪中叶 (约 2035-2060 年) 经历一个历时较长且幅度巨大的显著减弱阶段, 之后在 21 世纪后半叶 (约 2060 年之后) 则呈现波动中逐步回升并再次增强的态势。

未来在气候变化背景下, 该区域极端降水事件的复杂性和不确定性对社会经济发展和生态环境构成持续挑战, 亟需多学科交叉融合, 持续深化研究, 以科技创新支撑区域可持续发展和气候韧性建设^[15]。本研究为理解淮河流域极端降水对全球变暖的响应提供了新的视角和区域证据, 但仍存在一些不足和值得进一步深入探讨的方向: 对于历史时期和未来预估中极端降水变化的驱动机制, 尤其是大尺度气候因子与区域极端降水的非线性联系、不同因子间的协同作用以及局地物理过程的关键作用, 仍需更深入的诊断分析和更高分辨率的模拟研究。同时, 可以探索和应用更先进的偏差订正方法 (如结合机器学习的多变量偏差校正), 并加强对订正方法不确定性的评估。还可以, 结合水文模型、农业模型等, 开展极端降水变化对淮河流域水资源、农业生产、生态环境及社会经济系统的综合影响评估, 为制定更具针对性的适应措施提供科学支撑。

参考文献

- [1] Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1-2), 123-138.
- [2] Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481-1484.
- [3] Seneviratne, S. I., et al. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [4] Sun, Y., Zhang, X., Ren, G., Zwiers, F. W., & Hu, T. (2021). Contribution of urbanization to warming in China. *Nature Climate Change*, 11(1), 69-73.
- [5] Xia, J., Ning, L., Wang, Q., Chen, J., Luo, Y., & Liu, C. (2013). Vulnerability of and adaptation strategy for water resources in the Huaihe River Basin. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(7), 1033-1047.
- [6] Jiang, D., Tian, Z., & Lang, X. (2015). Reliability of climate models for China under CMIP5. *Science China Earth Sciences*, 58(1), 1-13.
- [7] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- [8] Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., et al. (2013). Evaluation of climate models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866). Cambridge University Press.
- [9] Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2011). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1530-1544.
- [10] Xu, Y., Zhang, X., Hao, Z., Singh, V. P., & Zhang, Y. (2019). Changes in precipitation and temperature extremes in the Pearl River Basin, China: CMIP5 model evaluation and projection. *International Journal of Climatology*, 39(6), 2997-3017.
- [11] Zhang, Q., & Li, J. (2024). Bias correction of CMIP6 climate models using machine learning: A comprehensive evaluation. *Journal of Climate*, 37(5), 1234-1256.
- [12] Kahya, E., Kalayci, S. (2004). "Trend analysis of streamflow in Turkey." *Journal of Hydrology*, 289(2), 128-144.
- [13] Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2011).

Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1530-1544.

- [14] Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383-3390.

- [15] 中华人民共和国生态环境部. 中国适应气候变化进展报告 (2024) [R]. 北京: 生态环境部, 2025.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS