

云南省极端降水事件预估及其不确定性分析

宋茂楷^{1,2}, 李毅¹, 官蕾^{1,2}, 王世斌¹, 齐兴赞¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 克拉玛依市水务有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 为揭示低纬高原复杂地形区极端降水未来变化及预估不确定性, 基于云南省 22 个国家级气象站 1961—2023 年逐日降水资料和 22 个 NWAI-WG 降尺度 CMIP6 模式日值数据, 选取 CDD、Rx1day、Rx5day、R95p、PRCPTOT 和 SDII 6 个极端降水指数, 采用改进 Mann-Kendall 检验、泰勒图、S 评分、年际变率技能评分 (IVS)、多模式中位数集合及双因素方差分析, 研究云南省极端降水历史变化、未来趋势及不确定性来源。结果表明: 1961—2023 年云南省极端降水呈“年降水总量减少、连续干旱日数延长、单次降水强度增强”特征; 降尺度 CMIP6 对 PRCPTOT 和 SDII 模拟较稳定, 对 Rx1day 和 CDD 一致性较低。未来四种 SSP 情景下, 除 CDD 外, 湿润类指数总体由历史下降转为上升, 且增幅随排放强度提高而增强; PRCPTOT 在各情景下全域显著上升, SSP5-8.5 下 5 个湿润类指数显著上升站点基本覆盖全省。未来四个阶段预估不确定性均以 GCM 差异为主, 多数强度型和总量型指数 GCM 贡献率超过 70%, CDD 远期受 SSP 及 GCM × SSP 交互效应影响增强。

关键词: 云南省; 极端降水; CMIP6; 模式评估; 不确定性分析

中图分类号: TV11

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2026)03—0184—10

Projection of Extreme Precipitation in Yunnan Province and Its Uncertainty Analysis

SONG Maokai^{1,2}, LI Yi¹, GONG Lei^{1,2}, WANG Shibin¹, Qi Xingyun¹

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Karamay Water Affairs Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: To investigate future changes in extreme precipitation and projection uncertainty in a low-latitude plateau region with complex terrain, this study used daily precipitation observations from 22 national meteorological stations in Yunnan Province during 1961—2023 and daily outputs from 22 CMIP6 global climate models statistically downscaled using NWAI-WG. Six extreme precipitation indices, namely CDD, Rx1day, Rx5day, R95p, PRCPTOT and SDII, were selected. The modified Mann-Kendall test, Taylor diagram, S score, interannual variability skill score (IVS), multi-model median ensemble and two-way analysis of variance were applied to examine historical changes, future trends and sources of projection uncertainty in extreme precipitation over Yunnan Province. The results show that extreme precipitation in Yunnan Province during 1961—2023 was characterized by decreasing annual precipitation total, increasing consecutive dry days and enhanced precipitation intensity. The downscaled CMIP6 models showed relatively stable performance for PRCPTOT and SDII, but lower consistency for Rx1day and CDD. Under the four SSP scenarios, all wet-related indices except CDD generally shifted from historical decreasing trends to future increasing trends, with larger increases under higher-emission scenarios. PRCPTOT showed significant increases across the entire province under all

收稿日期: 2026-01-25

修稿日期: 2026-03-16

基金项目: 国家外专局高端外国专家引进项目“复合极端水气气候事件背景下的农业生产力提升机制”(H20240401)

作者简介: 宋茂楷(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为极端事件演变规律与水文过程模拟。E-mail: 2524154238@qq.com

通讯作者: 李毅(1974—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事极端降水和温度的演变规律、干旱对作物产量的影响等方面的研究工作。E-mail: liyikitty@126.com

scenarios, and under SSP5-8.5, stations with significant increases in the five wet-related indices almost covered the whole province. In all four future periods, projection uncertainty was dominated by inter-GCM differences, with GCM contributions exceeding 70% for most intensity- and amount-related indices. In the late future, CDD was increasingly affected by SSP scenarios and GCM × SSP interaction effects.

Keywords: Yunnan Province; extreme precipitation; CMIP6; model evaluation; uncertainty analysis

气候变暖背景下,大气持水能力增强,全球极端降水频次和强度总体增加,由此引发的洪涝、山洪泥石流和城市内涝已成为水利工程领域亟需关注的问题^[1-3]。观测资料表明,20世纪后半叶以来多数地区年最大日降水量和强降水贡献率呈上升趋势,全球约2/3站点存在显著增加信号,并与全球升温密切相关^[4-5]。中国极端降水变化具有明显区域分异和强度分化特征^[6-7],1961—2017年极端降水事件在趋势方向、突变时间和空间分布上均存在差异^[8]。因此,准确识别区域极端降水历史变化并预估未来演变,对防洪减灾和水资源适应性管理具有重要意义。CMIP6在模式物理过程、空间分辨率和情景设计等方面较CMIP5有所改进,为极端降水未来预估提供了重要数据基础^[9]。

云南省地处低纬高原,地形起伏剧烈,受东亚季风、南亚季风及青藏高原热力作用共同影响,干湿季分明,旱涝灾害交替发生,局地强降水诱发的山洪、滑坡泥石流风险突出^[10-11]。已有研究表明,1961年以来云南年降水量及年降水总量(PRCPTOT)、强降水量(R95p)和连续湿润日数(CWD)等指数总体下降,而降水强度(SDII)、年最大1日降水量(Rx1day)和连续干旱日数(CDD)呈上升趋势,反映出区域降水正向“总量减少、强度增强”调整^[12-13];小时尺度资料也显示,云南短时强降水频次和强度有所增加^[14]。

第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)引入共享社会经济路径(SSPs)情景框架^[15-16]。已有研究表明,未来我国极端降水强度增加范围可能进一步扩大,但不同区域、指数和情景间差异明显,预估可信度依赖于模式评估和不确定性分析^[17-18];统计降尺度CMIP6多模式集合有助于识别极端降水时空响应,但区域尺度结果仍受模式和情景差异影响^[19]。目前,针对云南复杂地形区CMIP6适用性、不同SSP情景下极端降水时空响应及预估不确定性来源定量分解的研究仍相对不足。尤其是云南受季风环流、水汽输送、地形抬升和局地对流共同影响,不同GCM对上述过程的模拟差异可能显著影响极

端降水预估结果,因此有必要进一步分离GCM、SSP及二者交互作用对预估不确定性的贡献。

基于此,本研究利用云南省22个国家级气象站1961—2023年逐日降水资料和22个CMIP6全球气候模式统计降尺度日值数据,选取CDD、Rx1day、Rx5day、R95p、PRCPTOT和SDII 6个极端降水指数,分析历史变化特征,评估CMIP6历史期模拟能力,预估SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下未来时空变化,并定量分解预估不确定性来源,以期对云南省防洪减灾、水资源管理和气候变化适应提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省地处中国西南边陲(21°8′~29°15′N, 97°31′~106°11′E),总面积约39.4万km²。受复杂构造和地形条件影响,全省地势总体呈西北高、东南低的阶梯状递降,山地面积占84%,最高海拔6740m,最低海拔76.4m,相对高差近6600m^[20]。云南位于低纬高原和东亚、南亚季风交汇区,形成典型的亚热带低纬高原季风气候,干湿季分明,5—10月雨季降水占全年85%以上;年降水量约500~2700mm,空间上总体呈南多北少、西多东少的格局^[11]。区内分布有金沙江、珠江、澜沧江、怒江等主要水系,水资源丰富但时空分布不均,山洪、滑坡泥石流和季节性干旱风险突出。研究区位置及气象站点分布见图1。

1.2 数据来源

1.2.1 气象站观测数据

气象站观测数据来源于中国气象局国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn>)。综合考虑站点空间代表性和资料连续性,选取云南省22个国家级气象站1961—2023年逐日降水资料。所选站点覆盖云南主要气候地貌单元,资料发布前已通过中国气象局质量控制与均一化检验,实有率和正确率均在99%以上,可满足长序列极端降水指数计算和趋势分析要求。

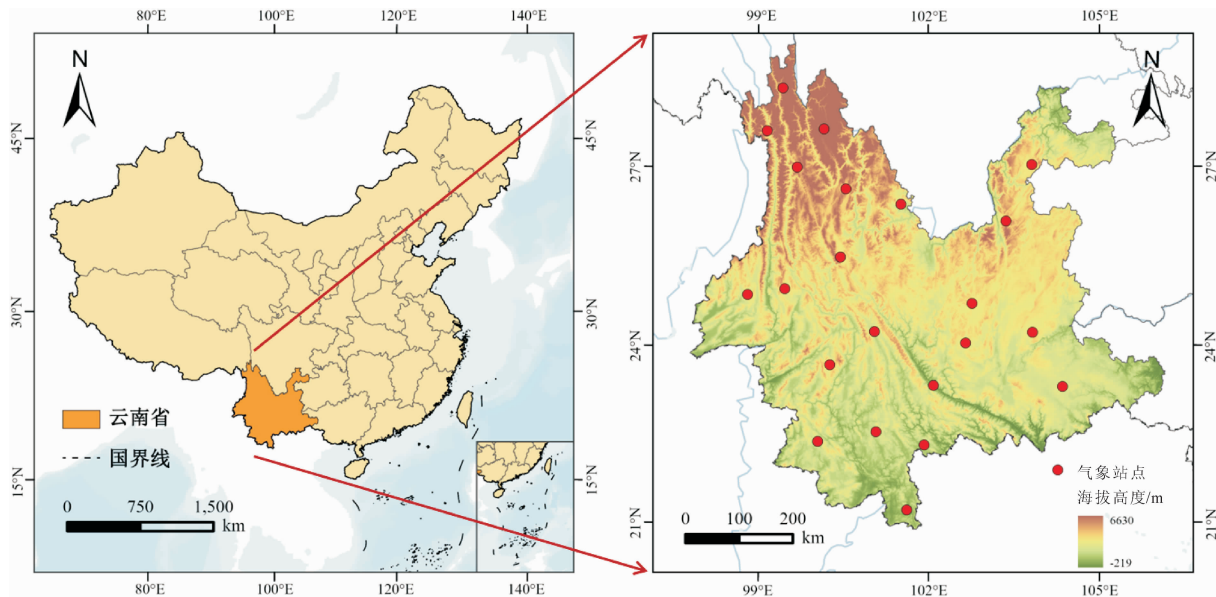


图 1 云南省区位概况与气象站点分布

1.2.2 CMIP6 气候模式数据

CMIP6 模式数据来源于地球系统网格联盟 (ESGF, <https://esgf-node.llnl.gov>) 官方节点。本文选取 22 个 CMIP6 全球气候模式, 包含 1961—2014 年历史模拟数据和 2015—2100 年未来情景数据; 未来情景采用 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5, 分别代表低、中、中高和高排放路径^[15]。考虑到原始 CMIP6 模式分辨率较粗, 难以直接用于站点尺度极端降水分析, 本文采用 NWA1-WG 统计降尺度方法进行处理: 先对 GCM 月尺度输出进行偏差校正和反距离加权插值, 获得站点月值序列, 再基于改进天气发生器 (WGEN) 生成逐日序列。已有研究表明, 该类统计降尺度方法能够较好再现气候变量在日、月、年尺度上的统计特征, 并已用于中国极端降水历史分析和未来预估^[21-22]。为刻画未来变化的阶段差异, 将 2015—2100 年划分为 P1 (2015—2040 年)、P2 (2041—2060 年)、P3 (2061—2080 年) 和 P4 (2081—2100 年) 4 个时期。

1.3 极端降水指数的选择

依据世界气象组织 (WMO) 和气候变化检测与指标专家组 (ETCCDI) 建立的极端气候指数体系^[23], 结合云南省旱涝并存的气候特征和区域防洪减灾需求, 选取 CDD、Rx1day、Rx5day、R95p、PRCPTOT 和 SDII 6 个极端降水指数, 分别表征降水持续时间、强度、总量和强降水贡献等特征, 具体定义与单位见表 1。本文对上述 6 个指数均开展历史趋势检验、模式评估、未来预估和不确定性分解。

表 1 极端降水指数定义

指数	定义	单位
CDD	日降水量 < 1 mm 的连续天数	d
Rx1day	年内最大 1 日降水量	mm
Rx5day	年内最大 5 日降水量	mm
R95p	日降水量超过 95th 分位数阈值的累计降水量	mm
PRCPTOT	年内日降水量 ≥ 1 mm 的降水量之和	mm
SDII	降水量 ≥ 1 mm 的总量与日数之比	mm/d

1.4 趋势检验方法

Mann-Kendall (MK) 非参数趋势检验法对样本分布无特定要求, 且对异常值不敏感, 在气象与水文时间序列趋势诊断中应用较为广泛^[24]。但传统 MK 方法建立在序列相互独立的假设之上, 未考虑时间序列内部的自相关结构, 而实际极端降水序列往往存在一定的正自相关, 这可能放大趋势显著性并导致检验结果偏差。为削弱序列自相关对趋势显著性判断的影响, 本研究采用 Hamed-Rao 方差修正型改进 Mann-Kendall 检验 (Modified Mann-Kendall, MMK) 识别 1961—2023 年云南省 22 个气象站极端降水指数的变化方向及其显著性。

对于长度为 n 的时间序列 x_i , 传统 MK 统计量 S 计算为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (1)$$

传统 MK 检验在计算标准化统计量时采用原始方差 $\text{var}(S)$, 而 Hamed-Rao 修正方法通过引入自相关修正系数 n^s 对方差进行调整, 得到修正方差:

$$\text{var}^*(S) = \frac{n\text{var}(S)}{n^*} = n^s(n-1)(2n+5)/18 \quad (2)$$

式中: n^s 为序列自相关修正系数,由不同滞后阶数的自相关系数计算得到;仅当某一滞后阶自相关系数超过给定显著性水平下的置信区间时,才将其纳入修正系数计算。进一步得到改进后的标准化统计量:

$$Z^* = \frac{Z}{\sqrt{s^*}} \quad (3)$$

式中: Z 为传统MK检验统计量; Z^* 为考虑自相关修正后的MMK检验统计量。 $Z^* > 0$ 表示序列呈上升趋势, $Z^* < 0$ 表示序列呈下降趋势;当 $|Z^*| \geq 1.96$ 时,表示趋势通过0.05显著性水平检验。

1.5 CMIP6 模式评估方法

采用泰勒图法和年际变率技能评分(IVS)从空间格局和时间变率两个维度评估CMIP6模式经降尺度后对历史期极端降水的模拟能力。泰勒图通过相关系数、均方根误差和标准差等指标在同一图形中表征模拟值与观测值的吻合程度。在此基础上引入综合评分 $S^{[9,25]}$,其计算公式为:

$$S = \frac{4(1+R)^4}{\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} + \frac{\sigma_0}{\sigma_m}\right)^2(1+R_0)^4} \quad (4)$$

式中: R 为模拟值与观测值的空间相关系数; R_0 为所有评估模式中的最大空间相关系数,用于归一化处理; σ_m 和 σ_0 分别为某一站点模拟时间序列与观测时间序列的标准差。 S 的取值范围为 $[0,1]$,越接近1表示模拟效果越好。

泰勒图法侧重于空间分布格局的再现能力,而对时间维度上年际波动特征的捕获程度则需借助 IVS 加以补充^[9,18]。 IVS 通过比较各站点模拟序列与观测序列标准差之间的偏离程度,衡量降尺度后GCMs对逐站年际变率的模拟精度,其计算公式为:

$$IVS = \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} - \frac{\sigma_0}{\sigma_m}\right)^2 \quad (5)$$

IVS 越接近0,说明二者在离散程度上的差异越小,模式对年际变率的模拟能力越好。

1.6 多模式集合与不确定性分解

为降低单一GCM模拟结果的偏差,本研究采用多模式中位数表征集合中心趋势,并以10%~90%分位数区间表征模式间的离散程度。

未来极端降水预估结果的不确定性主要来源于气候模式自身的结构差异以及不同排放情景假设所引入的偏差^[26]。为定量分解各分量的贡献,采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)将极端降水预估

值的总方差分解为GCM间差异、SSP情景间差异及二者交互效应3个分量:

$$SST = SST_{GCMs} + SST_{SSPs} + SST_{GCMs \& SSPs} \quad (6)$$

式中: SST 为预估极端降水指数方差的总平方和; SST_{GCMs} 为不同GCM之间引起的方差分量; SST_{SSPs} 为不同SSP情景之间引起的方差分量; $SST_{GCMs \& SSPs}$ 为模式与情景交互效应产生的方差分量。

各分量占总方差的百分比即为该分量对预估不确定性的相对贡献。在P1、P2、P3和P4四个时期分别开展不确定性分解,可揭示不确定性来源随预估时段推进的演变特征。

2 结果与分析

2.1 云南省极端降水历史变化特征

1961—2023年云南省22个气象站6个极端降水指数均进行了MMK趋势检验,图2展示了CDD、R95p和PRCPTOT三个代表性指数的空间趋势与显著性,其余指数结果结合站点统计进行说明。CDD以上升趋势为主,19站呈上升,其中8站通过95%置信水平检验,占36.4%,显著上升站点主要分布于滇西和滇西北,表明全省连续干旱日数总体延长。Rx1day、Rx5day和R95p趋势方向较分散,上升与下降站点数大致相当,其中Rx1day仅3站显著上升,Rx5day无显著上升站点,R95p各站均未通过显著性检验,说明极端降水强度变化具有较强局地性,全省一致性较弱。PRCPTOT下降一致性最强,19站呈下降趋势,占86.4%,其中1站显著下降,表明年降水总量整体减少。SDII则以上升为主,16站呈上升趋势,占72.7%,其中5站显著上升,且滇西腾冲、保山一带增强信号较突出。总体来看,1961—2023年云南省极端降水呈现“年降水总量减少、连续干旱日数延长、单次降水强度增强”的变化特征。

2.2 CMIP6 模式对极端降水指数的模拟能力评估

2.2.1 空间格局模拟能力

采用泰勒图和S评分评估22个NWAI-WG降尺度CMIP6模式对极端降水指数空间格局的模拟能力,其中图3为代表性指数的泰勒图,S评分结果在正文中综合说明。率定期内,各指数模拟能力差异明显:PRCPTOT表现最优,各模式散点集中于观测值附近,标准差比接近1,相关系数均在0.95以上,S评分均超过0.99;SDII和R95p次之,空间相关性较高,S评分分别为0.91~0.93和0.95~0.99;Rx5day和Rx1day模拟能力居中,模式间差异有所增大;CDD模拟效果相对较弱,S评分为0.69

~0.78,散点离散度较高。

验证期内,各指数模式离散度较率定期增大,S评分总体下降,表明模式稳定性减弱。其中PRCPTOT仍保持较高模拟能力,S评分维持在0.96以上;SDII为0.81~0.94,模拟效果相对稳定;R95p、Rx5day、Rx1day和CDD分别降至0.57~0.89、0.74~0.89、0.47~0.75和0.47~0.84,说明Rx1day和

CDD的空间模拟稳定性较弱。综合率定期与验证期结果,降尺度CMIP6模式对PRCPTOT和SDII的空间格局模拟最稳定,对Rx1day和Rx5day模拟能力中等,对CDD和R95p的模拟不确定性相对较高;其中ACCESS-CM2、CNRM-CM6-1和MRI-ESM2-0整体表现相对较优。

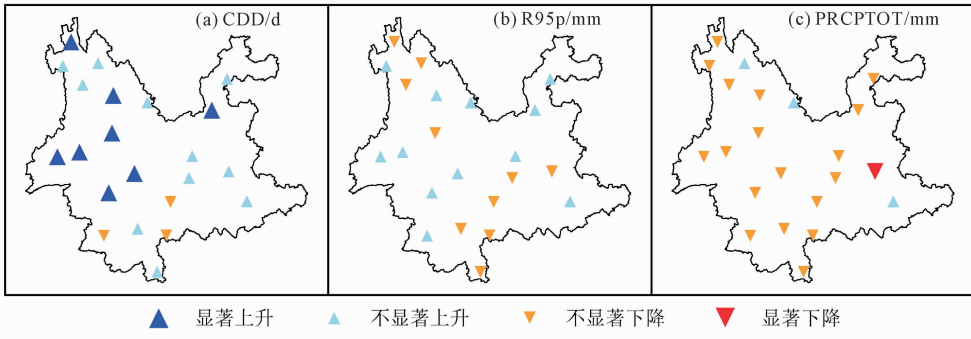


图 2 1961—2023 年云南省代表性极端降水指数的趋势与显著性

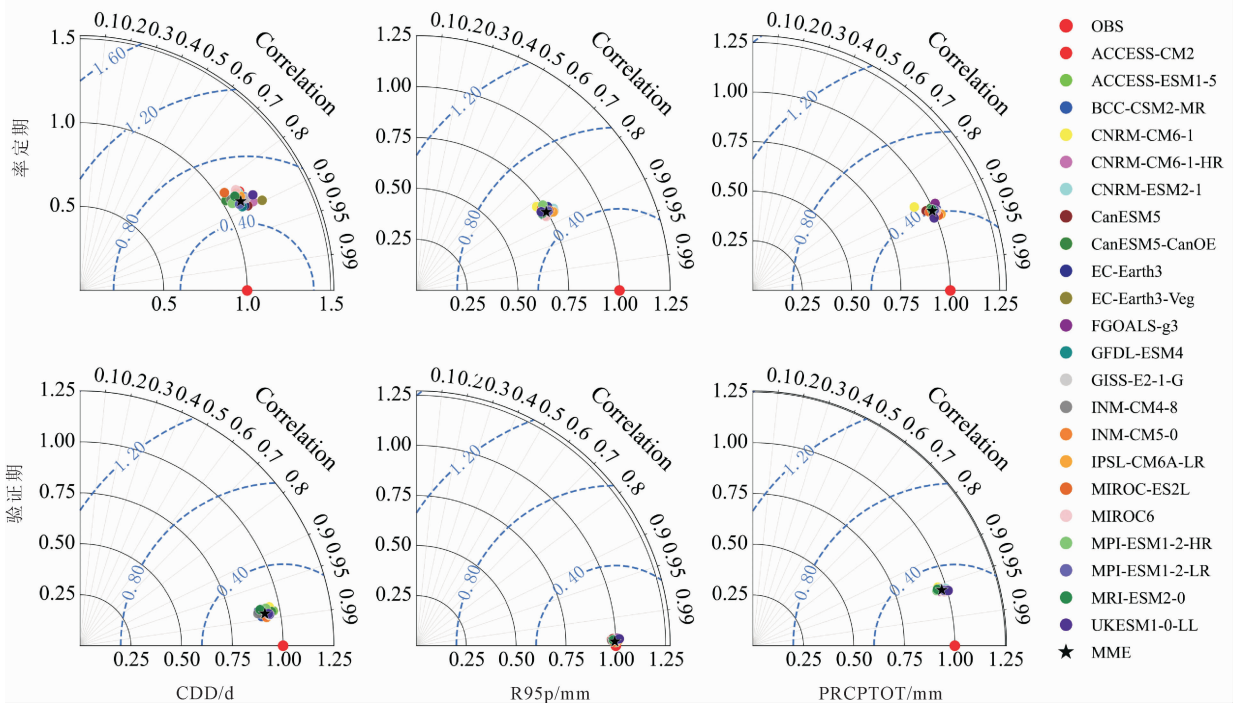


图 3 22 个降尺度 GCMs 对率定期和验证期代表性极端降水指数多年平均空间格局的模拟

2.2.2 年际变率模拟能力

采用 IVS 指标进一步评估 22 个 GCMs 对极端降水指数区域均值年际变率的模拟能力,图 4 展示了 CDD、R95p 和 PRCPTOT 三个代表性指数的 IVS 结果,其余指数结合正文统计进行说明。CDD 在率定期和验证期的 IVS 均控制在 1.0 以内,年际变率模拟效果较好;Rx5day 多数模式 IVS 位于 0~1.5

之间,模拟能力较稳定;PRCPTOT、SDII 和 Rx1day 率定期 IVS 多为 0~4,验证期有所收敛;R95p 的 IVS 整体偏高,率定期部分模式达到 6~8,验证期虽有改善但仍高于其他指数,表明其年际变率模拟偏差较大。

需要指出的是,IVS 仅反映模拟序列与观测序列标准差之间的相对偏离,数值较小并不等同于模

式综合模拟能力更优,也不能反映空间格局、趋势方向和逐年变化相位的一致性。因此,本文将 IVS 作为年际变率模拟能力的补充指标,并结合泰勒图和 S 评分综合评价模式适用性。总体来看,降尺度 CMIP6

模式对 PRCPTOT 和 SDII 的模拟能力最稳定,R95p 率定期表现较好但验证期模式间差异增大,Rx5day 表现中等偏上,Rx1day 和 CDD 一致性相对较低,后续预估中应重点关注其变化方向和情景差异。

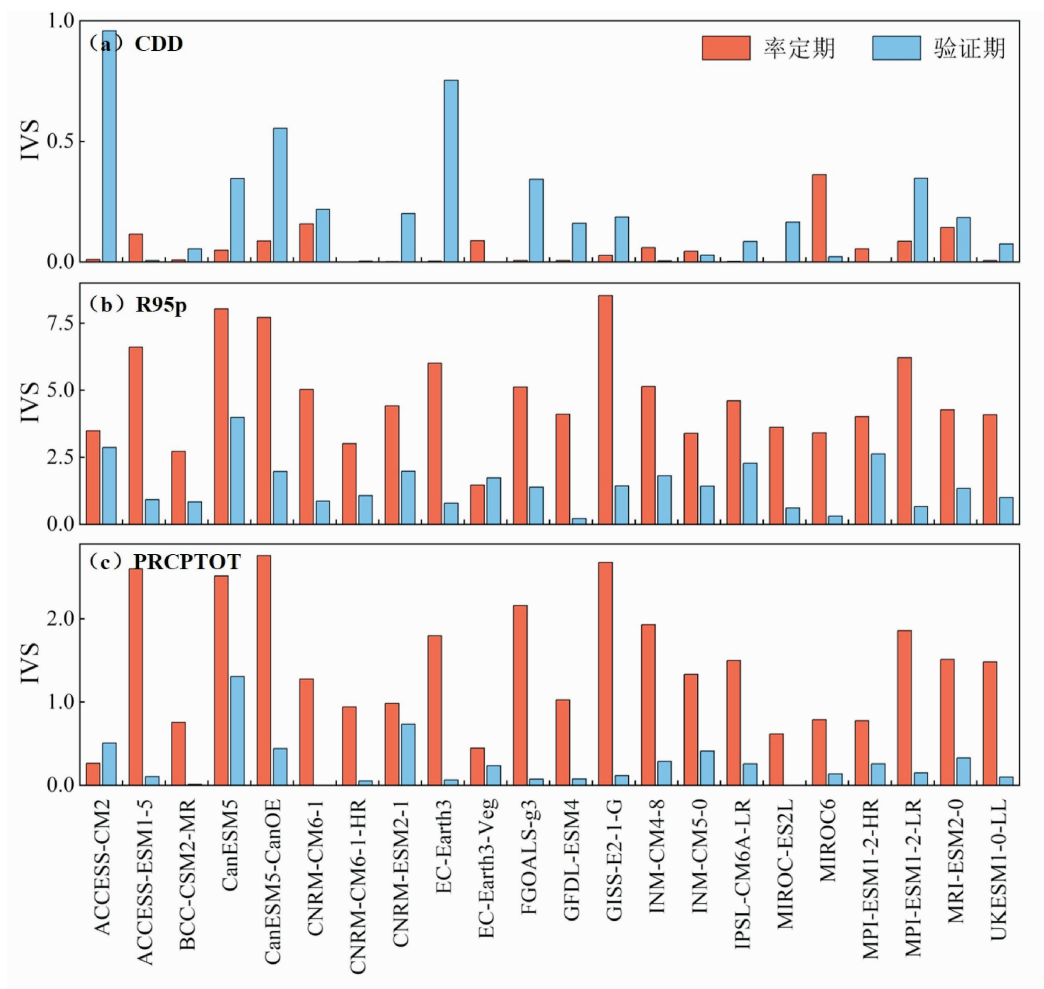


图 4 22 个降尺度 GCMs 对代表性极端降水指数区域平均年际变化的模拟

2.3 不同 SSP 情景下极端降水的时间演变特征

图 5 给出了四种 SSP 情景下云南省 1961—2100 年 CDD、R95p 和 PRCPTOT 三个代表性指数的时间演变过程,图中实线及阴影区域的上下边界分别表示 22 个 GCMs 逐年区域平均序列的中位数、90% 分位数和 10% 分位数。采用多模式中位数能够降低个别模式异常偏差对集合结果的影响,10%~90% 分位数区间则反映不同 GCMs 之间的离散程度。各指数在历史期和四种 SSP 情景下的趋势斜率及显著性见表 2,表中 *、**、*** 分别表示趋势通过 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 、 $p < 0.001$ 显著性检验,无标记表示趋势不显著 ($p \geq 0.05$)。CDD 趋势单位为 d/a ,Rx1day、Rx5day、R95p 和 PRCPTOT 趋势单位为 mm/a ,SDII 趋势单位为 $(mm/d)/a$ 。

历史期内,除 CDD 呈显著上升趋势外,其余 5 个湿润类指数均呈下降趋势,其中 PRCPTOT 下降速率最大,为 $-1.565 mm/a$,R95p 次之,为 $-0.613 mm/a$,与图 2 的 MMK 趋势检验结果一致。进入未来期后,Rx1day、Rx5day、R95p、PRCPTOT 和 SDII 均由历史期下降转为上升,且增幅整体随排放强度提高而增强。PRCPTOT 上升速率由 SSP1-2.6 情景下的 $1.605 mm/a$ 增至 SSP5-8.5 情景下的 $2.384 mm/a$,R95p 由 $0.842 mm/a$ 增至 $1.711 mm/a$ 。以 SSP5-8.5 为例,至 21 世纪末期,R95p 较历史期增加约 60%~80%,PRCPTOT 增加约 15%~20%,表明强降水贡献型指数对未来增暖响应更为敏感。相比之下,CDD 在四种情景下变化方向不一,多模式中位数基本稳定在 40~48 d 之间,未表现出持续增强或减弱趋势。

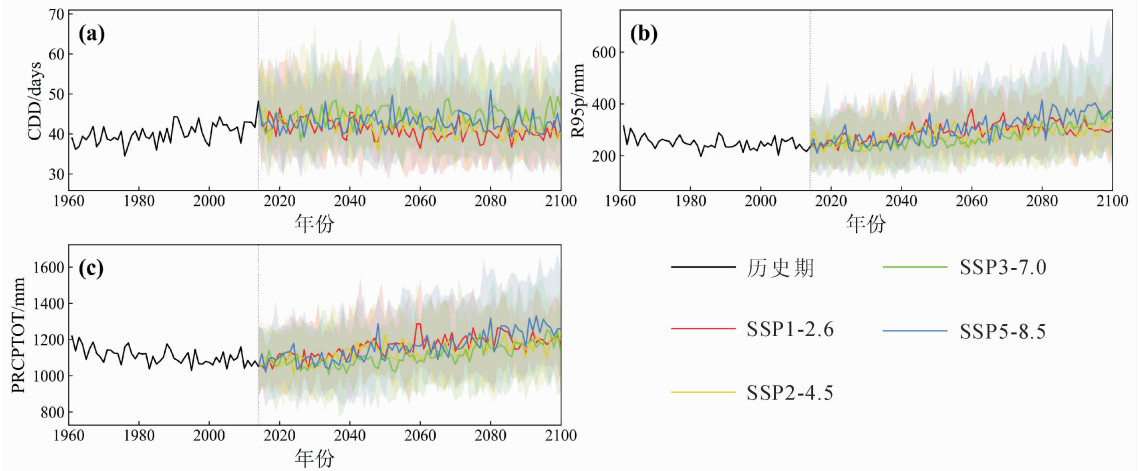


图 5 四种 SSP 情景下云南省代表性极端降水指数未来变化时间序列 (1961—2100 年)

表 2 云南省 6 个极端降水指数区域平均序列在历史期和
未来不同 SSP 情景下的趋势斜率及显著性

极端降水指数	历史期	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
CDD	0.090***	-0.042***	-0.041***	0.019	-0.001
Rx1day	-0.034*	0.082***	0.088***	0.124***	0.160***
Rx5day	-0.086*	0.142***	0.155***	0.224***	0.309***
R95p	-0.613**	0.842***	0.758***	1.296***	1.711***
PRCPTOT	-1.565***	1.605***	1.278***	1.651***	2.384***
SDII	-0.008***	0.011***	0.009***	0.015***	0.018***

从情景分化看,湿润类指数的情景差异多在 21 世纪中叶后逐渐显现。SSP1-2.6 情景下,多数指数增幅趋缓或趋于稳定;SSP5-8.5 情景下,各指数至世纪末仍持续上升,显示高排放路径将进一步增强云南省极端降水风险。以 R95p 为例,21 世纪末期 SSP1-2.6 情景下约为 270~300 mm,而 SSP5-8.5 情景下降至 350~400 mm。模式间离散度随指数极端性增强而增大,R95p 在 SSP5-8.5 情景世纪末期的上边界超过 600 mm,而 CDD 上下边界差值约 2 d,说明强降水贡献型指数的预估不确定性明显高于持续干旱指数。

2.4 未来不同情景下极端降水的空间格局变化

图 6 展示了云南省 22 个气象站三个代表性极端降水指数在历史期及四种 SSP 情景下的空间趋势分布,用以表征连续干旱持续性、强降水贡献和年降水总量的空间响应特征。历史期内,CDD 是唯一以上升趋势为主的指数,显著上升站点主要分布于滇西、滇中和滇东;其余 5 个指数以下降为主,其中 PRCPTOT 和 SDII 的显著下降站点几乎覆盖全省,R95p 显著下降站点也基本覆盖全省,仅西北部少数

站点未通过显著性检验;Rx1day 和 Rx5day 下降信号相对较弱,多数站点未通过显著性检验。

未来期内,PRCPTOT 在四种情景下均实现全域显著上升,22 个站点全部通过显著性检验;SDII 在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下也实现全域显著上升。Rx1day、Rx5day 和 R95p 的显著上升站点比例随排放强度提高而增加,低排放情景下部分不显著站点在高排放情景下转为显著上升。至 SSP5-8.5 情景下,Rx1day、Rx5day、R95p、PRCPTOT 和 SDII 5 个湿润类指数的显著上升站点基本覆盖全省,表明高排放路径下云南省强降水和降水总量增加具有较强空间一致性。

CDD 未来空间变化与历史期存在明显差异,由历史期以上升为主转为未来期以下降为主,仅 SSP3-7.0 情景下出现少量上升与下降站点并存的格局。综合来看,PRCPTOT 和 SDII 空间趋势确定性最高,Rx1day、Rx5day 和 R95p 在高排放情景下表现出较强的一致性增强信号,CDD 对排放路径的响应则相对复杂,后续应用中需结合不同情景和区域差异进行判断。

2.5 极端降水预估不确定性来源分解

为识别云南省极端降水预估不确定性的主导来源,采用双因素方差分析将 P1—P4 四个阶段的总方差分解为 GCM 间差异、SSP 情景间差异及 GCM × SSP 交互效应,6 个指数的分解结果见图 7。P1 阶段,6 个指数的不确定性均主要由 GCM 间差异控制,除 CDD 为 74.0% 外,其余指数 GCM 贡献率均超过 80%,其中 R95p、SDII 和 PRCPTOT 分别达到 87.2%、86.3% 和 85.8%;SSP 情景贡献整体较小,多数指数低于 5%,说明近未来阶段模式间差异远

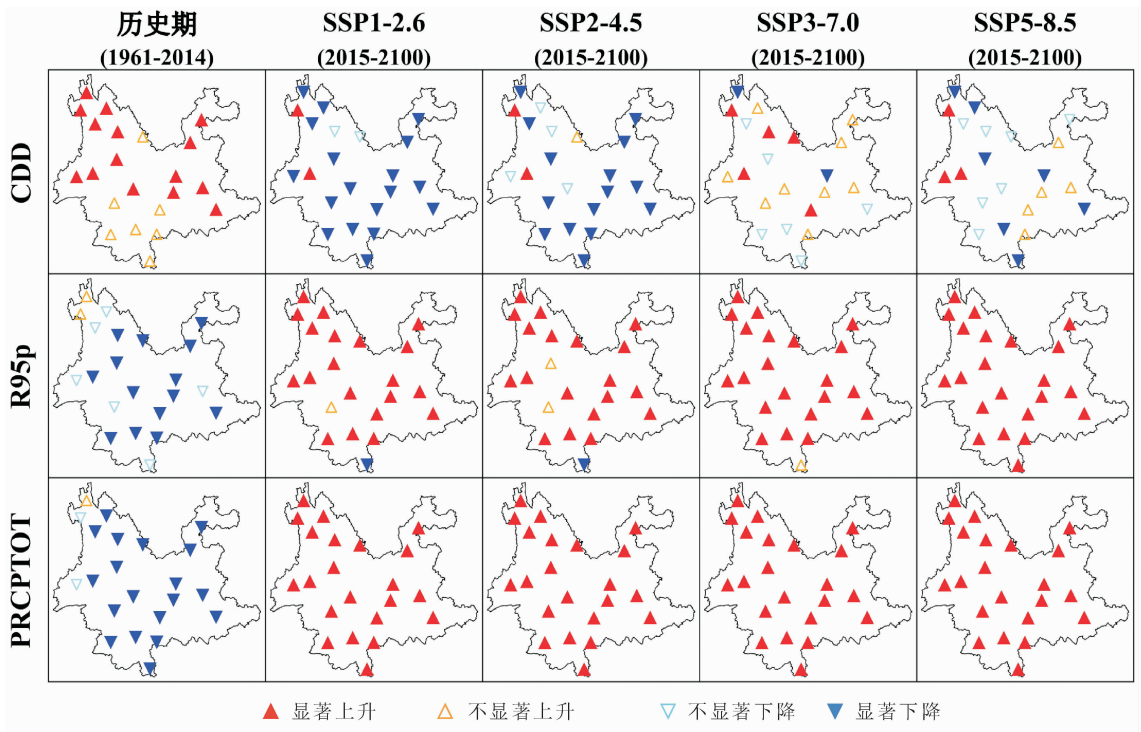


图 6 四种 SSP 情景下代表性极端降水指数在历史期与未来期的趋势空间格局

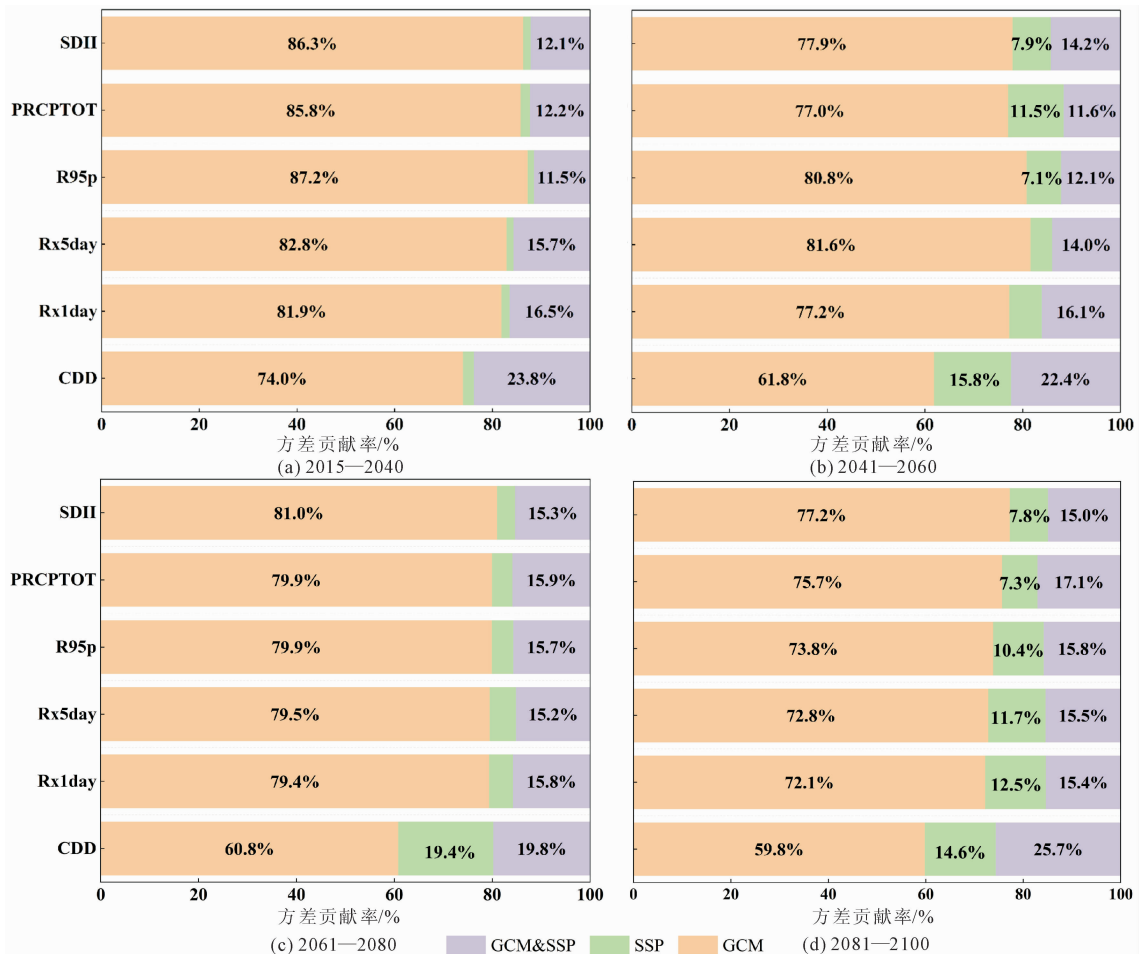


图 7 云南省 6 个极端降水指数未来预估不确定性来源贡献率

大于排放情景差异。

P2 和 P3 阶段, GCM 贡献率仍占主导, 但较 P1 阶段有所下降, 多数指数维持在 77%~82%; 与此同时, SSP 贡献和 GCM × SSP 交互效应逐步增强, P3 阶段各指数交互项贡献均超过 15%, 表明模式结构与排放情景的耦合作用开始增强。P4 阶段, GCM 仍是主要不确定性来源, 多数强度型和总量型指数的 GCM 贡献率维持在 72%~77%; 但 CDD 的 GCM 贡献率降至 59.8%, SSP 贡献升至 14.6%, 交互效应贡献达到 25.7%, 说明连续干旱日数远期预估受模式差异、排放情景及二者耦合作用共同影响。

总体来看, 云南省极端降水预估不确定性具有两个主要特征: 一是 GCM 间差异始终占主导, 即使到 21 世纪末, 多数强度型和总量型指数的 GCM 贡献率仍维持在 70% 以上; 二是不同指数的不确定性结构存在差异, PRCPTOT、R95p、Rx1day、Rx5day 和 SDII 的 GCM 主导地位较稳定, 而 CDD 在远期受 SSP 情景和 GCM × SSP 交互效应影响明显增强。

3 讨论

云南省极端降水未来变化的突出特征是历史期与未来期趋势方向出现明显反转。历史期 PRCPTOT 以下降为主, 而未来四种 SSP 情景下均转为全域显著上升; Rx1day、Rx5day 和 R95p 等强降水指数也表现出类似变化。这一现象与中国其他区域 CMIP6 预估结果基本一致^[7,26]。其可能原因在于增暖背景下大气持水能力增强, Clausius-Clapeyron 关系指出气温每升高 1℃, 饱和水汽含量约增加 7%, 为极端降水增强提供了热力学基础^[2]; 同时, 未来印度洋和南海海温升高可能增强输向云南的水汽通量, 并与低纬地区上升运动增强等动力过程共同作用, 使强降水响应进一步放大。云南历史期“总量减少、强度增强”与未来“总量和强度均增加”的对比表明, 季风环流及水汽输送的年代际变化可能是区域降水趋势反转的重要原因。

从区域防洪减灾与水资源管理角度看, 未来 PRCPTOT 在四种情景下均呈全域显著上升, SDII 在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下实现全域显著上升, Rx1day、Rx5day 和 R95p 的显著上升范围也随排放强度提高而扩大, 表明高排放路径下云南省降水总量和强降水增加具有更强空间一致性。未来云南省山洪、滑坡泥石流、城市内涝风险以及水库调度压力可能进一步加大。已有研究指出, 不同社会经济发展水平会影响极端降水风险暴露和区域响应差异^[27], 因此云南省未来防洪减灾和水资源管理应综

合考虑气候变化信号、人口集聚、城市化水平、基础设施承载能力及工程调度需求。

不确定性分析表明, P1—P4 四个阶段云南省极端降水预估均以 GCM 间差异为主导, 这与中国干旱区及极端降水预估中模式差异占主导的认识基本一致^[26]。其原因可能在于, 不同 GCM 对季风环流、水汽输送、地形抬升和局地对流过程的模拟能力存在差异, 且云南低纬高原复杂地形会进一步放大模式分辨率和参数化方案造成的偏差。因此, 降低云南极端降水预估不确定性, 不仅依赖排放情景约束, 更需要提升气候模式对区域降水过程的模拟能力和统计降尺度精度。

本研究仍存在一定局限。首先, CMIP6 降尺度结果对 CDD、Rx1day 等指数的模拟一致性相对较低, 相关增减幅度解释应保持谨慎。其次, 统计降尺度方法对日尺度极端波动和尾部分布的刻画仍有限, 后续可引入 LSTM-Attention、PINN 等深度学习或物理约束方法, 提高低模拟能力指数的时序捕捉和极端尾部模拟能力。最后, 本文尚未考虑城市化和土地利用变化对极端降水的叠加影响, 未来可结合下垫面变化情景, 进一步评估云南极端降水风险。

4 结论

基于云南省 22 个气象站 1961—2023 年逐日降水资料和 22 个 NWAI-WG 降尺度 CMIP6 模式数据, 评估了 CDD 等 6 个极端降水指数的历史变化、模式适用性、未来趋势及不确定性来源, 主要结论如下:

(1) 1961—2023 年云南省极端降水呈现“年降水总量减少、连续干旱日数延长、单次降水强度增强”的特征。PRCPTOT 下降一致性最强, 86.4% 的站点呈下降趋势; CDD 和 SDII 以上升为主, 分别有 8 站和 5 站通过显著性检验; Rx1day、Rx5day 和 R95p 趋势方向较分散, 全省一致性较弱。模式评估表明, 降尺度 CMIP6 对 PRCPTOT 和 SDII 的模拟最稳定, Rx5day 表现中等偏上, R95p 验证期模式间差异增大, Rx1day 和 CDD 一致性相对较低。

(2) 未来四种 SSP 情景下, 除 CDD 外的 5 个湿润类指数均由历史期下降转为上升, 且增幅随排放强度提高而增强。PRCPTOT 在各情景下均全域显著上升, SDII 在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下全域显著上升; SSP5-8.5 情景下, 5 个湿润类指数显著上升站点基本覆盖全省, 表明高排放路径下云南省强降水和降水总量增加具有较强空间一致性。CDD 未来变化方向相对复杂, 情景间差异弱于湿润类指数。

(3) 不确定性分解结果表明, P1—P4 四个阶段

云南省极端降水预估不确定性均以 GCM 间差异为主导,多数强度型和总量型指数的 GCM 贡献率维持在 70% 以上;SSP 情景贡献在远期有所升高但总体低于 GCM 贡献,CDD 在 P4 阶段受 SSP 情景和 GCM \times SSP 交互效应影响明显增强。提升气候模式对区域降水过程的模拟能力和统计降尺度精度,是降低云南省极端降水预估不确定性的关键。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Ógorman P A, Schneider T. The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009,106(35):14773-14777.
- [3] 朱贺,张永双,任三绍,等. 拒马河上游极端降雨引发的地质灾害特征与链生演化过程[J]. 水文地质工程地质,2025,52(03):186-196.
- [4] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. Journal of Geophysical Research, 2006,111(D5):D05109.
- [5] Westra S, Alexander L V, Zwiers F W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation[J]. Journal of Climate, 2013,26(11):3904-3918.
- [6] 夏阳,龙园,任倩,等. 云贵高原夏季不同等级极端日降水事件的气候特征[J]. 热带气象学报,2018,34(02):239-249.
- [7] 李慧慧,栾承梅,夏栩,等. 基于 CMIP6 气候模式的中国大陆未来极端降水情景预估[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(08):16-29.
- [8] Li Linzhao, Zou Yufeng, Li Yi, et al. Trends, change points and spatial variability in extreme precipitation events from 1961 to 2017 in China[J]. Hydrology Research, 2020,51(03):484-504.
- [9] 王予,李惠心,王会军,等. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较[J]. 气象学报,2021,79(03):369-386.
- [10] 段旭,陶云,许美玲,等. 西风带南支槽对云南天气的影响[J]. 高原气象,2012,31(04):1059-1065.
- [11] 万云霞,晏红明,金燕,等. 低纬高原水汽输送特征及其对云南气候的影响[J]. 高原气象,2020,39(05):925-934.
- [12] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学,2010,25(01):39-44.
- [13] 张汉声,李谢辉,刘子堂,等. 近 50 年云南省极端气候事件时空变化特征[J]. 成都信息工程大学学报,2021,36(04):434-442.
- [14] 毛冬艳,曹艳察,朱文剑,等. 西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. 气象,2018,44(08):1042-1050.
- [15] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. Geoscientific Model Development, 2016,9(05):1937-1958.
- [16] 晋程绣,姜超,张曦月. CMIP6 模式对中国西南地区气温的模拟与预估[J]. 中国农业气象,2022,43(08):597-611.
- [17] Zhao Jin, Gan Zhanjin, Zhang Gengxi, et al. Projected changes of precipitation extremes in North America using CMIP6 multi-climate model ensembles[J]. Journal of Hydrology, 2023,621:129598.
- [18] 向竣文,张利平,邓瑶,等. 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(工学版),2021,54(01):46-57.
- [19] Wang Lei, Li Yi, Li Min, et al. Projection of precipitation extremes in China's mainland based on the statistical downscaled data from 27 GCMs in CMIP6[J]. Atmospheric Research, 2022,280:106462.
- [20] 丰博,董燕. 2010—2020 年云南省植被覆盖度时空变化及其地形效应[J]. 浙江林业科技,2022,42(03):23-32.
- [21] Liu Deli, Zuo Heping. Statistical downscaling of daily climate variables for climate change impact assessment over New South Wales, Australia[J]. Climatic Change, 2012,115(03-04):629-666.
- [22] Li Linchao, Yao Ning, Liu Deli, et al. Historical and future projected frequency of extreme precipitation indicators using the optimized cumulative distribution functions in China[J]. Journal of Hydrology, 2019,579:124170.
- [23] 任福民,高辉,刘绿柳,等. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. 气象,2014,40(07):860-874.
- [24] Ni Yongxin, Lv Xizhi, Yu Zhongbo, et al. Intra-annual variation in the attribution of runoff evolution in the Yellow River source area[J]. CATENA, 2023,225:107032.
- [25] 郑衍欣,李双林,何源. 共享社会经济路径(SSPs)下未来 30 年长江流域夏季降水预估[J]. 大气科学,2023,47(05):1405-1420.
- [26] 赖雨瞳,徐影. CMIP6 全球气候模式对中国地区干旱模拟能力评估与预估[J]. 大气科学,2024,48(06):2157-2177.
- [27] Zhang Junyao, Yao Ning, Li Yi, et al. Effects of different socioeconomic development levels on extreme precipitation events in mainland China[J]. Sustainability, 2022,14(22):15284.