



中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应

尹家波, 郭生练^{1*}, 顾磊², 杨光³, 王俊¹, 杨妍⁴

1. 武汉大学, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074;

3. Department of Electronics, Information and Bioengineering, Politecnico di Milano, Milan 20133, Italy;

4. 中国测绘科学研究院, 自然资源部测绘科学与地球空间信息技术重点实验室, 北京 100830

* 联系人, E-mail: slguo@whu.edu.cn

2021-05-10 收稿, 2021-06-20 修回, 2021-06-22 接受, 2021-09-03 网络版发表

国家自然科学基金(52009091)、湖北省自然科学基金(2020CFB239)、中国博士后科学基金(2020M682478)和中央高校基本科研业务费专项(2042020kf0003)资助

摘要 全球变暖改变了气候系统的热力和动力环境, 影响了陆地-大气系统的能量收支和水循环过程, 对降水、湿度、径流等水文要素产生显著影响. 大气边界层水汽是降水形成的物质基础, 现有研究主要关注饱和水汽压对极端降水的影响, 发现了呈“抛物线”形状的Hook气候响应结构. 但是未能定量阐明其形成原因, 也较少分离大气热力和动力作用对极端降水演化的贡献分量, 制约了未来气候灾害风险预测及水文过程模拟精度. 本文以中国大陆和151个典型流域为研究区域, 通过扩展的克劳修斯-克拉珀龙(Clausius-Clapeyron)方程评估了极端降水和地表径流对近地气温的响应强度, 采用ERA5再分析数据集评估了整层气柱水汽含量、对流有效位能和相对湿度对极端降水的促进/抑制作用, 基于能量收支和水分平衡分离了极端降水的热力项和动力项, 并解释了Hook结构的形成原因; 基于CMIP6框架下21个全球气候模式输出数据, 通过偏差校正和流域水文模拟方法预估了未来气象水文过程, 研究了Hook结构的迁移路径及其暴雨洪水效应. 研究发现, 动力学约束造成高温下极端事件的水汽输送能力受限, 进而形成了Hook结构, 但极端降水和地表径流的Hook结构并不稳定, 其峰点温度未来随气候变暖升高3~5°C, 造成响应曲线右移, 可能使21世纪末中国暴雨、洪水量级增长20%~30%.

关键词 极端降水, 气候变化, 水文响应, 洪水, Clausius-Clapeyron方程

工业革命以来, 大气中二氧化碳等温室气体排放量增加, 地球陆地圈与大气圈的能量收支平衡与物质循环过程发生改变, 全球温度不断升高、珊瑚礁和热带雨林大面积消亡、暴雨洪涝等极端灾害频发, 社会经济系统和生态环境的不均衡、不平等日益加剧^[1,2]. 中国是世界第一人口大国和第二大经济体, 虽然是温室气体排放量最大的发展中国家, 但力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和. 中国增温速率远高于全球平均水平, 21世纪末平均气温或将上升

4°C^[3,4], 将严重威胁国家防洪安全、供水安全、粮食安全和生态环境安全. 为应对上述挑战, 加强气候变化下水文循环响应机理的科学研究至关重要.

降水是水文循环的关键因子, 过去几十年来全球多数地区的极端降水强度和频率显著上升, 引发的洪涝灾害造成每年300亿美元以上的经济损失^[5,6]. 大气边界层水汽含量是形成降水的物质基础, 依据克劳修斯-克拉珀龙(Clausius-Clapeyron, C-C)热力学方程, 饱和水汽压随气温升高呈非线性增长, 约为6.8%/°C, 一

引用格式: 尹家波, 郭生练, 顾磊, 等. 中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应. 科学通报, 2021, 66: 4315–4325

Yin J B, Guo S L, Gu L, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4315–4325, doi: [10.1360/TB-2021-0438](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0438)

般称之为C-C标度^[7]. 国外学者进一步考虑水汽含量与降水强度的物理联系, 评估了全球降水对气候变暖的响应强度, 发现极端降水在多数地区呈现亚C-C标度或负响应系数^[8,9]. 同时, 全球多数地区的地面观测和卫星反演数据证实: 极端降水一般呈现Hook气候响应结构, 即随气温升高出现先上升后下降的“抛物线”轨迹^[10,11]. Hook结构偏离了C-C热力学方程的预期结果, 其是否预示未来极端降水存在上限约束? 该问题引发了国际学界的广泛讨论^[12,13].

极端降水的发生通常意味着充足水汽与不稳定的大气层结^[12], 不稳定的大气层结涉及复杂的热力和动力过程相互作用, 与相对湿度、垂直风速和对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)等多种气象因子有关. 然而, 目前国外关于极端降水的热力学响应研究起步不久, 通常仅关注饱和水汽压对极端天气气候事件的影响, 较少综合分析CAPE等多元气候因子对降水过程的驱动作用. 有研究表明, Hook结构同时受控于气候系统的热力和动力环境变化^[13], 但是如何定量分离热力和动力作用对极端降水演化的贡献分量成为难题, 国内相关研究仍然空白; 同时, 极端降水的Hook响应结构对未来洪水演化有何启示也有待探讨.

本文以中国大陆和151个典型流域为研究区域, 通过扩展的C-C方程定量评估极端降水和地表径流事件对气候变化的响应强度, 再采用ERA5再分析数据集辨识整层气柱水汽含量(total column water vapor, TCWV)、相对湿度和CAPE等湿度能量因子对降水过程的促进/抑制作用, 并基于能量收支和水分平衡定量分离极端降水事件的热力项和动力项. 最后, 基于CMIP6框架下的21个全球气候模式输出数据, 通过偏差校正和流域水文模拟方法预估未来气象水文情景, 探讨Hook气候响应结构的迁移路径及其暴雨洪水效应.

1 数据资料

1.1 地面观测数据

气象资料源于国家气象科学数据中心的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 栅格气象观测数据, 采用该数据集1985~2014年的逐日降水、最高气温、最低气温和日均温数据. 选取的151个流域分布于中国九大一级流域(因资料限制, 未包含西北内陆河流域), 流域出口断面的逐日径流数据主要

源于流域管理机构和全国水雨情信息网(http://xxfb.mwr.cn/sq_djdh.html), 基本覆盖1985~2014年, 各流域径流数据存在一定缺测, 但实测长度超过16年.

1.2 ERA5大气再分析数据集

欧洲中期天气预报中心的ERA5数据集是目前时空分辨率最高的全球再分析数据之一, 提供了自1979年以来的逐时再分析资料. 大气垂直分析场分为137层, 顶层达到0.01 hPa高度, 具有 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的空间分辨率. 基于ERA5数据集的逐时资料, 获取中国1985~2014年期间日尺度的降水、近地2 m气温(T_{mean})、TCWV、CAPE和750 hPa相对湿度数据. 为定量分离大气热力和动力影响, 采用ERA5数据集50~1000 hPa共20层(50 hPa为间隔)的逐时气温和垂直风速数据, 并将其转换为空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的日尺度数据.

1.3 最新全球气候模式输出

为预估未来气候情景, 采用国际耦合模式比较计划第六阶段(Coupled Model Inter-comparison Project Phase6, CMIP6)最新发布的21个全球气候模式(global climate models, GCMs), 包括ACCESS-ESM1-5模型和文献^[14]记载的20个GCMs. 与早期版本(CMIP5)相比, CMIP6使用共享社会经济途径(shared socioeconomic pathway, SSP)和典型浓度路径(representative concentration pathway, RCP)的矩阵框架. 本研究采用最高温室气体排放情景SSP5-8.5的模式输出数据. 21个GCMs的输出变量包含逐日降水和气温数据, 选取1985~2014年(共30年)为历史期. 为预估未来气候变化情景下的气象水文特征, 设定21世纪的最后一个30年窗口(2071~2100年)为未来时期.

2 研究方法

2.1 基于箱元缩放函数推求气候响应系数

箱元缩放(binning scaling)函数能够较好地刻画变量间的非线性关系, 近年来被广泛应用于分析极端降水对全球变暖的响应特征^[8~10]. 对每一个空间栅格, 以日气温为排序准则, 将研究期的同日气温-降水组合系列划分到12个样本容量相同的箱元; 取日气温的中位数表征箱元温度, 采用高于99%分位数的3场降水的平均强度代表极值事件, 最终得到12组气温-极端降水系列.

C-C方程可定量描述饱和水汽压 e_{sat} 与气温 T 的非线性关系^[15]:

$$\frac{de_{\text{sat}}}{e_{\text{sat}}dT} = \frac{L_v}{R_v T^2}, \quad (1)$$

式中, L_v 为汽化潜热, 为 $2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$; R_v 为水汽气体常数, 取 $461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

大气水汽压是形成降水的物质基础, 随气温 T 升高呈非线性增长; 极端降水与气温可能也存在类似的指数关系, 故常用下式度量极端降水对气温变幅 δT 的响应函数^[11]:

$$P_2 = P_1(0.01\alpha_p + 1)^{\delta T}, \quad (2)$$

式中, P_1 和 P_2 分别为相邻箱元的极端降水强度; α_p 为标度系数(scaling rate), 又称响应强度.

通过局部加权滑动回归平滑方法拟合方程(式(2)). 研究发现, 极端降水的气候响应类型可划分为单调上升型、单调下降型和Hook结构(定义其拐点处为峰点温度, T_{pp}). 本研究首先识别气候响应类型及 T_{pp} , 再通过最小二乘法推求标度系数^[16]. 为了分析大气热力和动力因子对极端降水的影响, 取每个箱元中极端降水事件发生日的TCWV、CAPE和相对湿度数据与气温匹配, 再参考式(2)推求这3个气候因子对近地气温的响应系数. 为评估气候变化情景下极端降水演化的洪水效应, 常用地表径流来反映洪水量级. 这是由于地下径流(基流)受融雪、地壤、覆被、植物生理学效应等下垫面因素影响较大, 无法定量刻画气候变化对地下径流的影响^[9,13]. 采用递归数字滤波器分割基流推求地表径流^[17], 再采用箱元缩放函数研究极端地表径流的气候响应特征.

2.2 基于能量收支和水分平衡分离极端降水的热力和动力项

大气柱的干静能(dry static energy)收支表达如下^[18]:

$$\left\{ \frac{ds}{dt} \right\} \approx L_v \left\{ \frac{d(q_r + q_c)}{dt} \right\} + L_s \left\{ \frac{d(q_x + q_g + q_i)}{dt} \right\} + L_v P, \quad (3)$$

式中, $s = c_p T + gz$ 表征干静能, c_p 为干空气比热容, g 和 z 分别表示重力加速度和垂向高度; t 表征时间变量; q_r 、 q_c 、 q_x 、 q_g 、 q_i 分别表征雨、云滴、雪、霰和云冰的混合比; L_s 表示升华潜热, P 为地面降水; $\{\cdot\}$ 表征垂直方向

的质量加权积分.

极端降水事件通常伴随强烈的大气上升运动, 故干静能可用垂直平流项近似表征, 即 $ds/dt \approx \omega \partial s / \partial z$, 其中 ω 为垂直风速. 假设平均大气直减率接近湿绝热过程, 由能量守恒得:

$$ds = c_p dT + gz \approx -L_v dq_{\text{sat}}, \quad (4)$$

式中, q_{sat} 表示饱和比湿, 由气温和压强 p 求得; $q_{\text{sat}}(T, p) = \varepsilon e_{\text{sat}}(T) / [p - (1 - \varepsilon)e_{\text{sat}}(T)]$, ε 为干空气与水蒸气的气体常数之比, 取0.622.

忽略 L_v 和 L_s 的差异, 令 P_e 为极端降水强度, 联立式(3)和(4)得^[19]:

$$P_e \approx - \left\{ \omega \frac{\partial q_{\text{sat}}}{\partial z} \right\} - \left\{ \frac{d(q_r + q_c + q_x + q_g + q_i)}{dt} \right\}. \quad (5)$$

考虑水分平衡定义降水效率 v , 式(5)可简化为

$$P_e \approx -v \left\{ \omega \frac{\partial q_{\text{sat}}}{\partial z} \right\}, \quad (6)$$

式中,

$$v = 1 + \left\{ \frac{d(q_r + q_c + q_x + q_g + q_i)}{dt} \right\} / \left\{ \omega \frac{\partial q_{\text{sat}}}{\partial z} \right\}.$$

为了研究气候系统热力和动力作用对极端降水的不同影响机制, 常忽略降水效率的变化^[20], 利用大气静力平衡得到如下关系:

$$\frac{\delta P_e}{P_e} \approx \frac{\delta \{ \omega (\partial q_{\text{sat}} / \partial p) \}}{\{ \omega (\partial q_{\text{sat}} / \partial p) \}}. \quad (7)$$

将式(7)进一步分解为

$$\frac{\delta P_e}{P_e} \approx \underbrace{\frac{\delta \{ \omega (\partial q_{\text{sat}} / \partial p) \}}{\{ \omega (\partial q_{\text{sat}} / \partial p) \}}}_{\text{热力项}} + \underbrace{\frac{\delta \{ \omega (\partial q_{\text{sat}} / \partial p) \}}{\{ \omega (\partial q_{\text{sat}} / \partial p) \}}}_{\text{动力项}}. \quad (8)$$

大气热力效应影响饱和水汽压, 仅受气温和压强控制; 大气动力作用通过改变垂直风速影响环流强度, 故可将式(8)分解为极端降水的热力项和动力项^[12]. 本文采用ERA5数据集50~1000 hPa共20层数据计算式(5)~(8)的垂向积分.

2.3 偏差校正及流域水文模拟

GCMs输出数据存在一定系统偏差, 难以直接应用于未来气候水文情景预估, 故采用基于分位数映射的日偏差校正方法对GCMs输出降水、气温系列进行偏差校正^[21,22]. 首先, 基于LOCI(local intensity scaling)方

法校正降水的发生概率;再比较历史期(1985~2014年)的中国实测栅格气象数据集和气候模式输出系列在12个月份的频率分布函数,计算各分位数的系统偏差并推求相应的校正系数;最后将各分位数的校正系数用于未来时期(2071~2100年),具体计算公式如下:

$$P_{G,m}^{\text{cor}} = P_{G,m}^{\text{raw}} \times \left(F_{\text{obs}P,m}^{-1} [F_{GP,m}(P_{G,m})] / P_{G,m} \right),$$

$$T_{G,m}^{\text{cor}} = T_{G,m}^{\text{raw}} + \left(F_{\text{obs}T,m}^{-1} [F_{GT,m}(T_{G,m})] - T_{G,m} \right),$$
(9)

式中, $P_{G,m}^{\text{cor}}$ 和 $T_{G,m}^{\text{cor}}$ 分别为校正后第 m 月的日降水和气温系列; $P_{G,m}$ 和 $T_{G,m}$ 分别为历史期校正前第 m 月的日降水和气温系列; $F_{\text{obs}P,m}$ 和 $F_{GP,m}$ ($F_{\text{obs}T,m}$ 和 $F_{GT,m}$) 分别为历史期日降水(气温)实测和GCMs输出系列的累积分布函数。

考虑到151个流域所处气候类型与下垫面特征存在较大差异,选用新安江、HBV、GR4J与HMETS四个

水文模型作为备选模型,以1985~2014年的实测日降水、气温和径流系列作为输入,设定Kling-Gupta Efficiency(KGE)系数最大为目标函数,基于复合型混合演化算法(SCE-UA)优选水文模型参数^[23]。对每一个研究流域,选用最优的水文模型,输入偏差校正后的降水、气温系列,分别获得历史期(1985~2014年)和未来时期(2071~2100年)的日径流系列。

3 结果与讨论

3.1 极端降水和地表径流的气候响应特征

首先采用1985~2014年中国栅格气象观测数据集推求极端降水的标度系数及 T_{pp} ;再分割151个流域的基流得到地表径流系列,最后推求极端地表径流的气候响应特征。图1(a), (c)显示,中国极端降水对近地气温

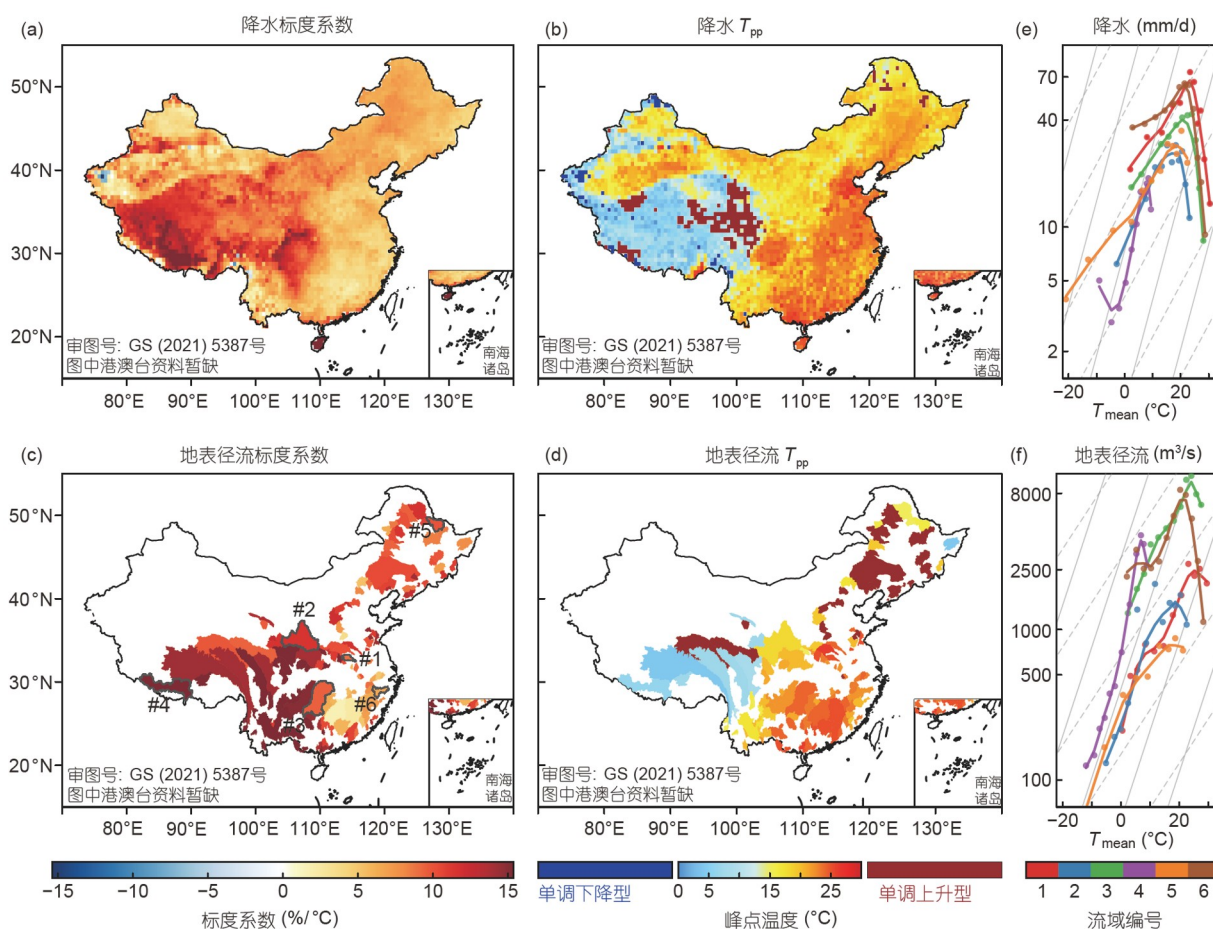


图1 中国极端降水和地表径流的气候响应特征。(a), (b) 极端降水的标度系数和 T_{pp} ; (c), (d) 极端地表径流的标度系数和 T_{pp} ; (e), (f) 极端降水(或地表径流)与近地气温的关系

Figure 1 Temperature scaling results of precipitation and storm runoff extremes in China. (a), (b) Scaling rates and T_{pp} of precipitation extremes; (c), (d) scaling rates and T_{pp} of storm runoff extremes; (e), (f) relationship between precipitation (or storm runoff) extremes and near-surface temperatures

的响应强度一般呈现C-C标度或亚C-C标度(低于6.8%/°C), 极端地表径流一般为超C-C标度. 该结果与现有研究基本一致, 主要是受径流系数非线性增长、快速城镇化等因素影响, 洪水可能比暴雨对全球变暖更加敏感^[16,24]. 从图1(b), (d)看出, 中国极端降水和地表径流一般呈现Hook响应结构. 图1(e), (f)进一步展示了6个典型流域的Hook曲线: 当气温低于 T_{pp} 时, 极端事件持续增长; 当气温过热(超过 T_{pp})时, 极端降水和地表径流均呈现减弱趋势.

依据C-C热力学方程, 大气边界层饱和水汽压随气温升高呈非线性增长, 极端降水和地表径流为何会产生Hook结构? 采用ERA5数据集, 进一步分析极端降水过程TCWV、CAPE和750 hPa相对湿度随气温升高的变化规律. CAPE是描述大气热力特征的重要指标, 表征气块可用于对流的最大势能, 常用于衡量大气层结的不稳定性及对流发展强度^[25]. 从图2看出, CAPE的标度系数一般高于6.8%/°C, 说明大气热力机制主要对极端降水产生正促进效应; TCWV则呈现亚C-C标度. 这是由于大气实际水汽压由 e_{sat} 和相对湿度共同决定, 尽管 e_{sat} 随气温变暖的增长速率能达到C-C标度, 但相对湿度随气温升高出现下降趋势, 由此降低了TCWV的响应强度, 即形成降水的整层水汽含量受限于大气动力过程的湿度约束, 进而造成高温下极端降水、地表径流的下降趋势.

3.2 大气热力和动力作用对极端降水的贡献分量

为了定量评估大气热力和动力环境变化对极端降水事件的影响机制, 进一步考虑ERA5 20层气压场的气

温和垂直风速数据, 定量分离极端降水的热力和动力响应系数. 为分析热力/动力作用与Hook现象的联系, 分别研究气温低于/高于 T_{pp} 的两种情景. 首先, 采用基于式(6)估算的降水量计算极端降水对近地气温的总标度系数(图3(a)), 发现与图1(a)实测结果的空间分布基本一致, 说明采用能量收支方法评估极端降水的发生机制可行. 结合图3, 发现大气热力环境变化对极端降水主要起正促进效应(图3(b), (e)). 当气温低于 T_{pp} 时, 大气动力作用主要促进降水形成(图3(c)), 故总标度系数为正; 当气温过热、高于 T_{pp} 时, 垂直风速变化影响了水汽输送能力, 造成大气动力环境发生变化、对流无法维持, 周边水汽输送供给减弱, 进而抑制降水进一步发展, 起到约束作用, 最终抵消热力学效应的正贡献, 造成极端降水的负响应(图3(d)). 综上, 当近地气温升高到一定阈值时, 由于大气边界层水汽和能量约束, 动力环境发生变化、对流难以维持, 大气动力作用会抑制降水继续发展, 若气温继续升高, 极端降水强度则出现下降态势.

3.3 偏差校正及水文模拟效果

为探讨Hook结构是否约束未来暴雨、洪水风险增长, 采用CMIP6的全球气候模式集合和水文模型预估未来水文气候情景, 首先需要对GCMs输出数据进行偏差校正, 并率定水文模型. 采用表征均值和极值的39个指标^[13]评价偏差校正效果, 图4(a)~(d)给出了历史期中国所有栅格的绝对偏差均值, 可以看出校正后降水的相对偏差普遍低于20%, 气温则低于0.5°C. 本文需要考虑降水-气温关系, 故进一步分析了GCMs校正后数据

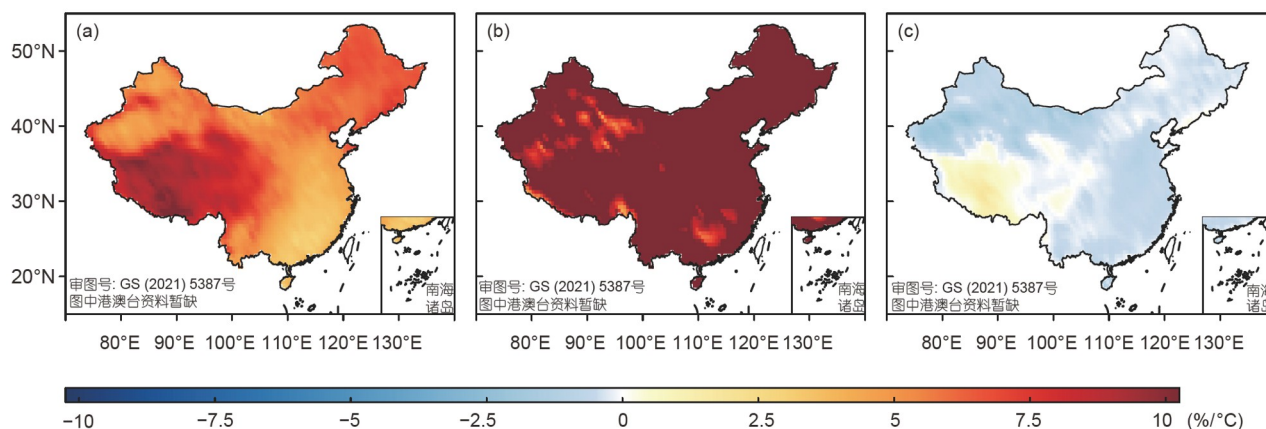


图2 中国极端降水事件中整层气柱水汽含量(a)、对流有效位能(b)和相对湿度(c)的标度系数

Figure 2 Scaling rates of TCWV (a), CAPE (b) and relative humidity (c) in extreme precipitation over China

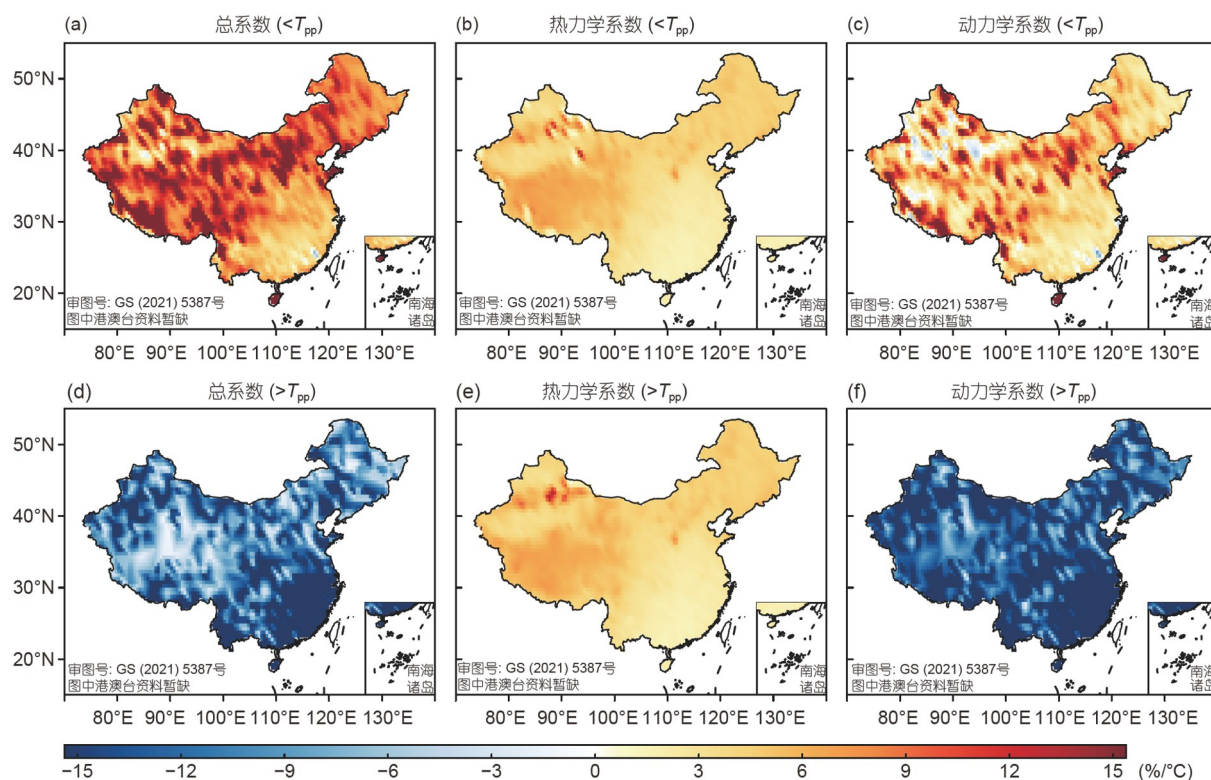


图3 大气热力和动力作用对极端降水的贡献分量。(a)–(c) 气温低于 T_{pp} 的情景；(d)–(f) 气温高于 T_{pp} 的情景

Figure 3 Contribution rates of thermodynamic and dynamic impacts on extreme precipitation. (a)–(c) The temperature is lower than T_{pp} condition; (d)–(f) the temperature is higher than T_{pp} condition

对历史期气候响应系数及 T_{pp} 的模拟能力。图4(e), (f)显示GCMs能够较好地捕捉极值事件, 对标度系数和 T_{pp} 均有优良的模拟效果, 其中对 T_{pp} 的相对偏差(relative error, RE)仅为2.9%, 相关系数达到0.97, 说明GCMs校正后数据可用于未来气候情景预估。

基于栅格气象观测数据, 通过交叉验证方法划分水文模型的率定期与验证期, 即以奇数年的KGE系数最大为目标函数, 以偶数年的KGE系数检验模型率定效果^[26]。图S1给出了各流域最优的水文模型及相应的KGE系数, 发现新安江模型在中国40%以上的流域表现最优, HEMTS和GR4J模型次之, 仅有少数流域适用于HBV模型。新安江模型的蓄水容量曲线是其核心和关键, 能较好地描述产流区和产流量的时空变化和非线性特征, 在湿润、半湿润地区具有良好的模拟预测效果^[27]。HMETs模型由渗流区及饱水带2个相连水库模块串联, 涉及蒸散发、渗流、融雪积雪及河道汇流过程; GR4J模型采用两个非线性水库进行产汇流计算, 涉及4个参数, 具有结构简单、参数少、精度高等优点。HBV模型是考虑土壤湿度的概念性模型, 假定产流比

例和土壤水分呈幂函数关系, 模型含融积雪模块, 在高寒区具有一定的适用性^[26]。整体而言, 超过80%的流域在最优模型下可得到0.75以上的KGE系数值, 说明水文模型率定效果较好, 能够通过输入校正后的GCMs系列预估未来流域日径流过程。

3.4 未来极端降水预估及其洪水效应

基于校正后的CMIP6全球气候模式集合及率定的最优水文模型, 模拟得到历史期和未来时期日尺度的气象水文系列, 分析气候响应结构的迁移路径, 并探究其对极端降水和地表径流事件的可能影响。图S2给出了历史期和未来时期21个GCMs模拟的极端事件对近地气温的响应系数, 可以看出不同时期降水和地表径流的响应系数差异较小, 说明升温情景下极端事件的气候响应系数较为稳定。图5进一步给出了全球气候模式集合预估的响应结构变化结果, 由于历史、未来时期均呈现3种气候响应结构, 故图5展示了9种可能的变化类型。例如, I-D表征历史期为单调上升型(I)、未来时期为单调下降型(D), 图5中点据(斜线)表征该栅格

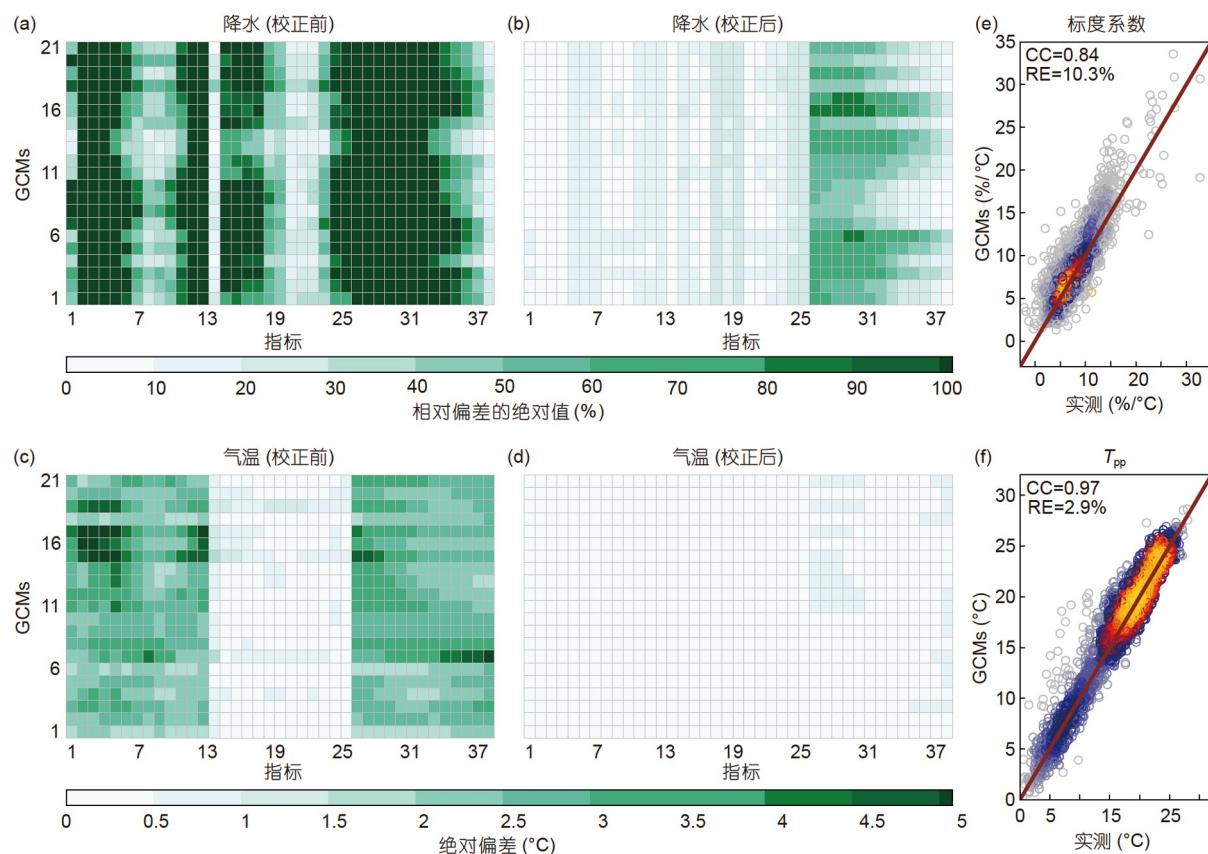


图4 CMIP6框架下21个全球气候模式输出降水和气温的偏差校正效果。(a)~(d) 校正前后39个度量指标结果; (e)~(f) 偏差校正后GCMs输出与实测数据标度系数和 T_{pp} 的散点图

Figure 4 Performance of bias correction of precipitation and temperatures for 21-GCMs outputs under CMIP6. (a)~(d) Results of 39 evaluation indexes before and after bias correction; (e)~(f) scatter plots of scaling rates and T_{pp} between bias-corrected GCMs outputs and observations

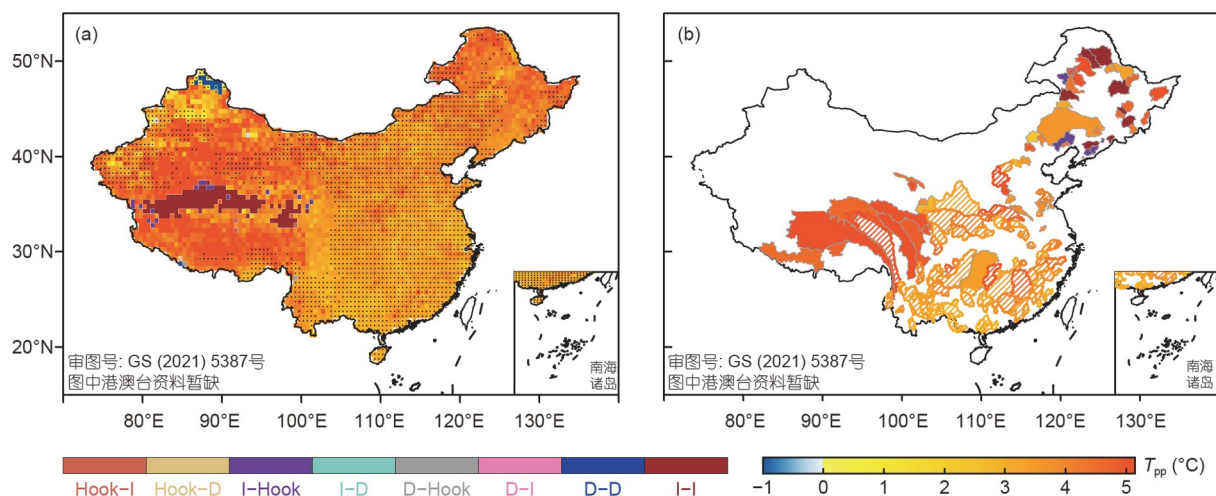


图5 全球气候模式集合预估的极端降水(a)和地表径流(b)对气候响应结构及峰点温度(T_{pp})的变化规律

Figure 5 The GCMs ensemble mean change of scaling structures and peak point temperature (T_{pp}). (a) Precipitation extremes; (b) storm runoff extremes

(流域)中超过90%的GCMs预估得到同一类型的变化结果. 从图5看出, 中国极端降水、地表径流一般在历史时期和未来时期均呈现Hook结构, 但是在气候变化情景下Hook结构并不稳定, 其随气候变暖发生迁移, 未来时期极端降水和地表径流事件的 T_{pp} 普遍升高3~5°C.

为了分析Hook结构迁移对暴雨、洪水可能造成的影响, 图6给出了未来时期中国极端事件的变化结果, 发现CMIP6全球气候模式集合预估21世纪末中国极端降水、地表径流事件的量级可能增长20%~30%. 为何前文发现的Hook结构并未约束未来极端事件增长? 分析其原因, Hook响应曲线由上升段和下降段构成, 降水(地表径流)峰值出现在 T_{pp} 处; 尽管存在大气动力效应造成的湿度和能量约束, 随着 T_{pp} 升高, 响应曲线向气候变暖方向移动, 仍然会造成未来时期的极端降水和洪水量级继续升高. 因此, 中国迫切需要提高对暴雨洪水的防御标准, 需要科学评估未来气候变暖对基础设施和生态系统可能造成的负面影响, 切实采取相关措施以促进未来社会经济可持续发展.

4 结论

本研究以中国大陆和151个典型流域为研究区域, 通过扩展的C-C热力学方程定量评估了极端降水和地表径流事件对近地气温的响应强度, 采用ERA5再分析数据集辨识了TCWV、相对湿度和CAPE等气候因子对极端降水的促进或抑制作用; 基于能量收支和水分平衡分离出大气热力和动力作用对极端降水演化的贡

献分量, 定量探讨了Hook结构的形成原因, 发现动力学约束是造成高温下极端降水和洪水量级减弱的关键因素. 为了识别气候响应结构对未来极端事件增长的可能影响, 基于CMIP6框架下的21个全球气候模式输出数据, 通过偏差校正和流域水文模拟方法预估了未来的气象水文情景, 发现Hook结构并不稳定, 其峰点温度可能随未来气候变暖升高3~5°C, 造成气候响应曲线右移, 从而增大暴雨、洪水量级. 本研究证实了Hook气候响应结构并不意味着未来中国暴雨、洪水增长存在上限约束, 需要进一步关注未来气候变化对基础设施及生态系统的影响. 由于现阶段难以获取高精度的中国大气实测数据, 采用ERA5再分析数据集定量分离极端降水的热力项和动力项, 尽管其具有较高的时空分辨率, 但与实际测量存在一定区别^[28]. 通过对比分析ERA5数据集与中国栅格气象观测数据的差异, 发现两种数据集推求的标度系数差异并不显著(图1和3), 可见ERA5数据集的准确度不会影响本文的主要结论. 未来将进一步对比多源观测和再分析数据集在水文响应研究领域的适用性. 气候变化影响评估的多个环节均存在不确定性, 本文仅考虑了GCMs的不确定性, 如何考虑多环节的综合不确定性有待进一步探讨. 气候变化和强人类活动(如水利工程修建、水库调蓄等)均影响了极端天气气候事件^[29], 未来需要进一步考虑人类活动对极端水文事件的影响, 尤其是要定量分离气候自然变率、人为气候变化和下垫面人类活动对水文循环的影响机制.

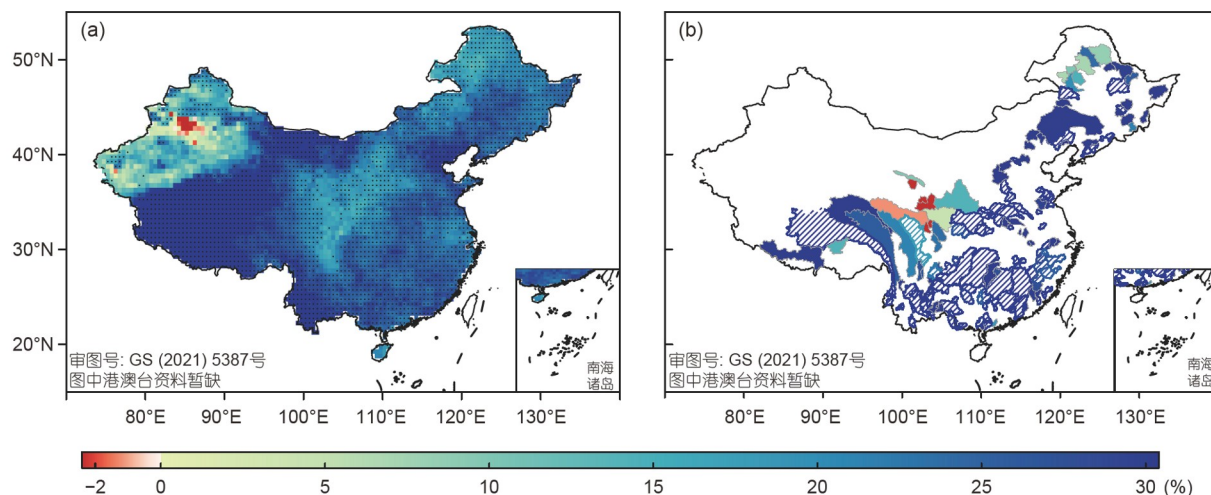


图6 全球气候模式集合预估的极端降水(a)和地表径流(b)相对于历史期的极端事件相对变化率

Figure 6 Relative changes in precipitation (a) and surface runoff extreme (b) projected by GCMs ensemble with reference of historical period

致谢 文中涉及的地图经自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2021)5387号。

参考文献

- 1 Zhou T Y, Chen X L, Wu B. Frontier issues on climate change science for supporting future earth (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1967–1974 [周天军, 陈晓龙, 吴波. 支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题. 科学通报, 2019, 64: 1967–1974]
- 2 Wu S H, Luo Y, Wang H, et al. Climate change impacts and adaptation in China: Current situation and future prospect (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1042–1054 [吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望. 科学通报, 2016, 61: 1042–1054]
- 3 You Q, Cai Z, Wu F, et al. Temperature dataset of CMIP6 models over China: Evaluation, trend and uncertainty. *Clim Dyn*, 2021, 57: 17–35
- 4 Zhang D F, Gao X J. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2516–2526 [张冬峰, 高学杰. 中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估. 科学通报, 2020, 65: 2516–2526]
- 5 Roxy M K, Ghosh S, Pathak A, et al. A threefold rise in widespread extreme rain events over central India. *Nat Commun*, 2017, 8: 708
- 6 Xia J, Chen J. A new era of flood control strategies from the perspective of managing the 2020 Yangtze River flood (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2021, 51: 27–34 [夏军, 陈进. 从防御2020年长江洪水看新时代防洪战略. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 27–34]
- 7 Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 2008, 321: 1481–1484
- 8 Prein A F, Rasmussen R M, Ikeda K, et al. The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 48–52
- 9 Fowler H J, Lenderink G, Prein A F, et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, 2: 107–122
- 10 Sullivan S C, Schiro K A, Yin J B, et al. Changes in tropical precipitation intensity with El Niño warming. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL087663
- 11 Zeder J, Fischer E M. Observed extreme precipitation trends and scaling in central Europe. *Weather Clim Extreme*, 2020, 29: 100266
- 12 Pfahl S, O’Gorman P A, Fischer E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 423–427
- 13 Yin J B, Guo S, Gentile P, et al. Does the hook structure constrain future flood intensification under anthropogenic climate warming? *Water Resour Res*, 2021, 57: e2020WR028491
- 14 Xiang J W, Zhang L P, Deng Y, et al. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models (in Chinese). *Eng J Wuhan Uni*, 2021, 54: 46–57, 81 [向峻文, 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. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54: 46–57, 81]
- 15 Koutsoyiannis D. Clausius-Clapeyron equation and saturation vapour pressure: Simple theory reconciled with practice. *Eur J Phys*, 2012, 33: 295–305
- 16 Yin J, Gentile P, Zhou S, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes. *Nat Commun*, 2018, 9: 4389
- 17 Lin K R, Chen X H, Jiang T, et al. Application and study on base flow separation using digital filters (in Chinese). *Water Power*, 2008, 34: 28–30 [林凯荣, 陈晓宏, 江涛, 等. 数字滤波进行基流分割的应用研究. 水力发电, 2008, 34: 28–30]
- 18 Khairoutdinov M F, Randall D A. Cloud resolving modeling of the ARM summer 1997 IOP: Model formulation, results, uncertainties, and sensitivities. *J Atmos Sci*, 2003, 60: 607–625
- 19 Muller C J, O’Gorman P A, Back L E. Intensification of precipitation extremes with warming in a cloud-resolving model. *J Clim*, 2011, 24: 2784–2800
- 20 O’Gorman P A, Schneider T. The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 14773–14777
- 21 Chen J, Brissette F P, Chaumont D, et al. Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *J Hydrol*, 2013, 479: 200–214
- 22 Yin J B, Guo S L, Wang J, et al. Blending multi-source data in hydrological simulations based on BMA method (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2020, 51: 1335–1346 [尹家波, 郭生练, 王俊, 等. 基于贝叶斯模式平均方法融合多源数据的水文模拟研究. 水利学报, 2020, 51: 1335–1346]
- 23 Duan Q, Sorooshian S, Gupta V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour Res*, 1992, 28: 1015–1031
- 24 Wasko C. Review: Can temperature be used to inform changes to flood extremes with global warming? *Phil Trans R Soc*, 2021, 379: 20190551
- 25 Chen J. Changes in convective available potential energy and convective inhibition and their linkage with precipitation under global warming (in

- Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2020 [陈姣. 全球增暖背景下对流有效位能和对流抑制能的变化及其与降水的关系. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2020]
- 26 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 (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2021, 32: 321–333 [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. *水科学进展*, 2021, 32: 321–333]
- 27 Lu M J. Recent and future studies of the Xin'anjiang model (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2021, 52: 432–441 [陆旻皎. 新安江模型研究的回顾和展望. *水利学报*, 2021, 52: 432–441]
- 28 Tang G, Clark M P, Papalexiou S M, et al. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sens Environ*, 2020, 240: 111697
- 29 Zhai P M, Yuan Y F, Yu R, et al. Climate change and sustainable development for cities (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1995–2001 [翟盘茂, 袁宇锋, 余荣, 等. 气候变化和城市可持续发展. *科学通报*, 2019, 64: 1995–2001]
-

补充材料

图S1 中国151个流域率定和检验期最佳水文模型及相应的KGE系数

图S2 全球气候模式集合平均的历史期及未来时期极端降水、地表径流对近地气温的响应系数

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应”

Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China

Jiabo Yin¹, Shenglian Guo^{1*}, Lei Gu², Guang Yang³, Jun Wang¹ & Yan Yang⁴

¹ State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

² School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

³ Department of Electronics, Information and Bioengineering, Politecnico di Milano, Milan 20133, Italy;

⁴ Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology of Ministry of Natural Resources, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

* Corresponding author, E-mail: slguo@whu.edu.cn

As the planet warms, shifts in the thermodynamic and dynamic environments of the climate system exert substantial impacts on the energy budget and water cycle. Understanding the response of precipitation extremes to climate change is essential for mitigating weather-related hazards and facilitating adaptive water resources management. The moisture holding capacity of the atmosphere, governed by the Clausius-Clapeyron (C-C) relationship, increases with temperature at a rate of about 7%/°C. Thermodynamically, precipitation intensity is expected to increase exponentially and worsen flood conditions with atmospheric warming. However, both observational and satellite data have revealed a nonmonotonic (hook) scaling of precipitation and storm runoff, in which extremes strengthen with warming temperature up to a peak point (T_{pp}) and decline thereafter. Few studies have yet considered whether and why the hook structure might change in a future warming climate. Moreover, existing studies have largely failed to detect and attribute changes of extreme precipitation to atmospheric thermodynamics versus dynamics, limiting reliable projection of future hydrological hazards and climate simulations. Here, we build upon existing studies to understand how precipitation and storm runoff scaling might change over Chinese mainland. We use gridded observational data to examine the temperature scaling of precipitation and storm runoff extremes, extending the C-C relationship. Using the ERA5 reanalysis dataset, we diagnose the impacts of total column water vapor (TCWV), convective available potential energy (CAPE) and relative humidity on precipitation extremes. After partitioning the thermodynamic and dynamic contributions of precipitation extremes based on the energy budget and water vapor balance, we quantify the underlying physical mechanisms of hook structures. Future climate scenarios are projected by using a large ensemble from 21 global climate models (GCMs) within Coupled Model Inter-comparison Project Phase-6 (CMIP6). Future streamflow series of 151 basins are projected by forcing hydrological model with bias-corrected climate model outputs. We quantify changes in the hook structures and their T_{pp} , and investigate implications of these shifts for future storms and flooding. The results show that relative humidity usually decreases with warming near-surface temperatures over most areas of China, while the TCWV and CAPE exhibit positive scaling rates with temperatures. The ERA5 reanalysis data over China reveals that atmospheric dynamics are responsible for the intensification of precipitation extremes and even flooding under very warm temperatures. The daily bias correction method reduces the systematical biases of GCMs outputs adequately, and captures extreme precipitation and temperatures well. By using four different hydrological models, we find that the Xinanjiang model typically exhibits the best performance in simulating daily streamflow over Chinese mainland. Projections of future hydro-climatological scenarios indicate that the hook structures do not set a firm upper-bound constraint on the intensification of extremes; rather, both the hook structure and the T_{pp} shift toward warmer temperatures in a warming climate. Alongside the shifts in T_{pp} , future storm and flooding extremes are projected to intensify by 20%–30%. These findings highlight the urgency in enhancing societal resilience to climate change, and understanding how the intensification of weather-related hazards might affect existing infrastructure and ecosystems.

extreme precipitation, climate change, hydrological responses, flood, Clausius-Clapeyron relationship

doi: [10.1360/TB-2021-0438](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0438)