

黄河流域复合型水文干旱-高温热浪事件变化及相对贡献分析

杨瑀露, 陈 杰

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室)

摘要:基于利用分位数映射法校正后的 CMIP6 10 个气候模式数据,驱动 VIC 分布式水文模型模拟黄河流域径流,利用标准化径流指数表征水文干旱,利用热浪烈度表征高温热浪,从历时、频次、烈度 3 个维度刻画了未来复合型水文干旱-高温热浪事件(复合事件)的变化特征,并量化了单一事件及其交互作用对复合事件变化的相对贡献。结果表明:水文干旱事件在未来变化中具有明显的区域性特点,上游鄂尔多斯高原区域的水文干旱风险可能增加,相较于历史时期上中游部分地区干旱历时预估缩短 1~2 月,烈度降低 25%~50%;随着温室气体排放浓度升高及时间推移,黄河流域高温热浪、复合事件的历时、频次和烈度均呈现增加趋势;SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 3 种情景下,复合事件历时延长 0.1~12 d,频次增加 0.1~2 次/a,烈度增强 10%~230%;高温热浪增加是导致未来复合事件变化的主要原因,黄河流域大部分地区高温热浪在未来近期的相对贡献占比 60%及以上,远期升至 70%;交互作用对复合事件变化的相对贡献较低,未来近、远两期占比均为 20%及以下。

关键词:水文干旱;高温热浪;复合事件;气候变化;黄河流域

Changes in compound hydrological drought-heat wave events in the Yellow River Basin and relative contribution analysis//Yang Yulu, Chen Jie(*State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University*)

Abstract: Based on the calibrated data of ten global climate models of CMIP6 using quantile mapping method, the VIC distributed hydrological model was driven to simulate the runoff of the Yellow River Basin. The standardized runoff index was used to characterize hydrological drought, and the heat wave intensity was used to characterize heat waves. The change characteristics of future compound hydrological drought-heat wave events (compound events) were characterized from three dimensions, including duration, frequency, and intensity. And the relative contribution of single events and their interactions to the changes in compound events was quantified. The results indicate that hydrological drought events have obvious regional characteristics in future changes. The hydrological drought risk in the upstream Ordos Plateau region may increase, and the estimated drought duration in some areas of the upper and middle reaches may be shortened by 1-2 months, with a 25% to 50% decrease in intensity, compared to historical periods. With the increase in greenhouse gas emissions concentration and the passage of time, the duration, frequency, and intensity of heat waves and compound events in the Yellow River Basin have shown an increasing trend. Under three scenarios of SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, the duration of the composite event is prolonged by 0.1-12 d, the frequency increases by 0.1-2 times per year, and the intensity increases by 10%-230%. The increase in heat waves is the main reason for the changes in future compound events. In most areas of the Yellow River Basin, the relative contribution of heat waves in the near future is 60% or more, and in the long term it will rise to 70%. The relative contribution of interaction to the changes in compound events is relatively low, with a proportion of 20% or less in both the near and far future periods.

Key words: hydrological drought; heat wave; compound event; climate change; the Yellow River Basin

20 世纪中叶以来,全球变暖加剧,干旱、热浪等
极端气象事件更趋频发,且呈现出幅度更剧烈、地点

更多、时间任意性更大的趋势^[1-4]。干旱是最严重的
长期气象灾害之一^[5-6],会对社会经济和生态造成灾

基金项目:国家自然科学基金项目(W2412158);湖北省自然科学基金创新群体项目(2025AFA023)

作者简介:杨瑀露(2001—),女,硕士研究生,主要从事水文气象研究。E-mail:yulu_yang@whu.edu.cn

通信作者:陈杰(1981—),男,教授,博士,主要从事气候变化水文响应与极端水文事件研究。E-mail:jiechen@whu.edu.cn

难性影响^[7-9];高温热浪是最严重的短期气象灾害之一,会引起人和动植物生存的不适应性^[10],亦对生态环境和社会基础设施造成极高的危害^[11-12]。在气候变化的背景下,极端事件往往同时或接连发生,联合国政府间气候变化专门委员会将其定义为复合气候事件,与单一的极端事件相比,复合气候事件形成机理更加复杂,产生的影响更严重^[13-14]。分析流域未来复合气候事件的变化特征,对科学制定中长期规划、实现水资源高效利用和水灾害防治具有重要意义。

复合型水文干旱-高温热浪事件(以下简称“复合事件”)是已有研究最多的复合气候事件,常用的研究方法是通过构建基于降水减少和温度异常的复合干热指数识别事件的发生以及量化其特征^[15]。例如,Hao等^[16]使用标准干热指数(SDHI),利用降水不足表征干旱,结合高温,评估了复合型干热事件烈度的变化;Li等^[17]引入标准化前期降水蒸散指数(SAPEI),与标准化温度指数(STI)结合,使用Copula函数构建了标准化复合干热指数(SCDHI),该方法可以在多个时间尺度进行计算,能更好地捕捉短期复合事件;姜雨彤等^[18]采用指数相对阈值法将标准化降水指数(SPI)与日最高温结合,分析了长江与黄河流域复合事件的分布、频率等特征。气候变暖的背景下,利用气候模式预估未来复合型气候事件变化趋势已成为研究热点^[19]。例如,Wu等^[20]利用来源于CMIP6的全球气候模式(GCMs)输出结果分析极端降水和气温,发现在未来情景下干热事件显著上升;姜慧妍^[21]基于SCDHI的研究发现未来我国所有地区复合事件的强度均可能增加。然而,现有对于复合事件的研究多针对降水和气温展开,未结合径流进行水文干旱分析。但径流作为水循环中关键一环,是流域水文系统的综合响应指标,直接表征流域在气候影响下的水资源丰欠状态,较降水、气温等指标更能反映社会经济的用水短缺^[22]。同时,水文干旱较气象干旱具有更强的滞后效应和累积性,结合径流特征评估干旱状态与热浪过程的叠加,更能体现流域在长期水分亏缺下遭遇高温的真实胁迫状态。VIC分布式水文模型能够结合GCMs网格化的输出结果^[23],实现格点尺度的水量平衡计算,考虑流域植被、土壤蓄水等空间差异,建立多层土壤水的动态机制^[24-25],较为准确地模拟径流序列,可作为水文干旱判别的可靠基础。与此同时,学者对于单一事件在复合事件中的贡献度亦做了较多地研究。例如,Wu等^[26]基于多元回归方法,研究了降水和气温趋势变化对我国复合干热事件烈度的贡献,识别出在我国大部分地区,气温

对复合干热事件严重程度的增加起主导作用;Guo等^[27]利用分时段回归分析,研究了全国范围内高温和干旱对复合干热事件的影响在区域和时间上存在差异。

20世纪70年代以来,黄河流域水循环和极端事件发生了显著变化,成为制约黄河流域高质量发展的主要因素之一^[28-30]。因此,本文基于CMIP6的GCMS数据,驱动VIC模型模拟黄河流域径流,利用标准化径流指数(SRI)与热浪阈值结合,构建复合事件指标,从历时、频次、烈度3个维度,进行多模式、多路径的未来复合事件变化预估,将历史、未来近期以及未来远期的单一及复合指标综合统计,构建跨时段尺度的多元线性回归模型量化水文干旱、高温热浪及其交互作用对复合事件变化的相对贡献,以期为黄河流域防治减灾提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河全长5464 km,发源于巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,整体呈“几”字形,流经青藏高原、黄土高原、内蒙古高原以及华北平原,最终于山东省注入渤海。黄河流域位于32°N~42°N、96°E~119°E,面积约79.58万km²(图1),流域大部分处于干旱半干旱气候区,北部为干旱气候,中部为半干旱气候,南部为湿润半湿润气候^[31],地区之间的气候条件迥异,温差悬殊,降水分配不均。近年来,黄河流域受自然因素与人为因素的共同影响,气候有暖湿化趋势^[29]。

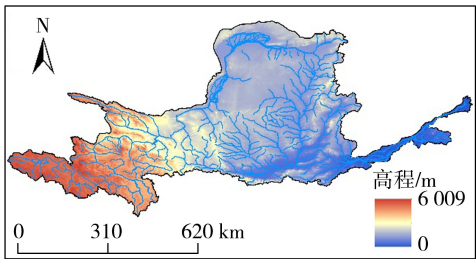


图1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

1.2 数据来源

本文选用CMIP6的10个GCMs数据,变量为日最高气温、日最低气温、日均气温、日降水量、日风速。水文干旱、高温热浪、复合事件的研究时段均为:历史时期1985—2014年,未来近期2030—2059年,未来远期2071—2100年。未来时期采用的温室气体浓度情景包括:SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5。GCMs的基本信息如表1所示,分辨率利用双线性插值方法统一插值至0.25°×0.25°。

表 1 10 种 GCMs 的基本信息

Table 1 Basic information of 10 GCMs

研发机构	气候模式	空间分辨率(经向×纬向)
BCC	BCC-CSM2-MR	1.1°×1.1°
CAS	FGOALS-g3	2.0°×2.0°
CMCC	CMCC-CM2-SR5	1.25°×1.0°
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1	1.4°×1.4°
CNRM-CERFACS	CNRM-ESM2-1	1.4°×1.4°
CSIRO	ACCESS-ESM1-5	1.8°×1.2°
CSIRO	ACCESS-CM2	1.8°×1.2°
INM	INM-CM4-8	2.0°×1.5°
INM	INM-CM5-0	2.0°×1.5°
IPSL	IPSL-CM6A-LR	2.5°×1.3°

2 研究方法

2.1 分位数映射法

将 GCMs 数据输入水文模型前,通常具有较大偏差,本文采用分位数映射法^[32-33]开展偏差校正。首先,计算历史时段的观测数据与模式数据的累积分布函数(CDF),找到 CDF 相等时的模拟值 x 和观测值 y ;其次,通过逆变换得到转换函数 $y=f(x)$,使模式模拟的 CDF 与观测数据的 CDF 匹配;最后,根据映射关系将模拟值转换到观测值的分布上,完成偏差校正。本文的观测数据为 CN05.1 数据,该数据集是吴佳等^[34]基于 2400 余个中国地面气象站点的资料进行插值,建立的一套空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的逐日观测数据,所用变量与 GCMs 数据相同。利用实测历史与模式历史所构建的转换函数对 VIC 的输入变量分别在历史、未来近期和未来远期完成偏差校正。

2.2 VIC 模型

VIC 模型是一种基于 SVATS (soil vegetation atmospheric transfer schemes) 思想的空间分布网格化大尺度分布式水文模型,易与 GCMs 进行嵌套,具有较强物理基础,能够考虑气候、土壤性质、地形、植被的综合作用,同时可以灵活处理各种复杂条件,在黄河流域已取得了良好的应用效果^[24-25]。本文将黄河流域划分为 1515 个分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的网格,进行 VIC 模型的产汇流计算。模型参数率定参考 Miao 等^[35]的研究成果,模型验证结果表明,黄河流域大部分地区模拟径流的纳什效率系数(NSE)大于 0.6, Kling-Gupta 效率系数大于 0.7,表明 VIC 模型适用于黄河流域的径流模拟。

2.3 复合事件指数构建及相对贡献计算

2.3.1 水文干旱指数

采用 SRI 表征水文干旱,该指数最初由 Shukla 等^[36]提出,可以用来衡量气候异常对水文过程的影响,本文选用 1 月尺度的 SRI 进行研究。参考 Gu

等^[37]的研究,干旱划分以 SRI 值小于 -0.5 作为标准。SRI 计算方法^[38]为:①计算给定时间尺度的累积径流量(式(1));②选用 Gamma 两参数分布对径流序列进行拟合,其概率密度函数见式(2);③采用等概率转换的方法,将累积分布转换为均值为 0、方差为 1 的正态分布,进而得到 SRI 值。

$$R_{v,t,k} = \sum_{i=0}^{k-1} z_{v,t-i} \quad (1)$$

$$f(R_{v,t,k} | \mu, \sigma) = (\sigma^2 \mu)^{-1/\sigma^2} (R_{v,t,k})^{1/\sigma^2 - 1} \cdot e^{-R_{v,t,k}/\mu\sigma^2} / \Gamma(1/\sigma^2)$$

$$(R_{v,t,k} > 0, \mu > 0, \sigma > 0) \quad (2)$$

式中: $R_{v,t,k}$ 为时间尺度 k 下 v 年 t 月的累积径流量,本文取 $k=1$ 月; $z_{v,t-i}$ 为 v 年 $t-i$ 月的月径流量; $f(\cdot)$ 为概率密度函数; μ 为位置参数; σ 为尺度参数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 两参数分布函数。

2.3.2 高温热浪指数

目前常用阈值法定义高温热浪,即连续一段时间的日平均气温或最高气温超过预先设定的阈值^[39],即称这段时间形成高温热浪事件。参考黄河流域相关文献^[18,40],本文将高温热浪阈值设为历史时期每个栅格 5—9 月日均气温的第 90 百分位数,当研究时段中连续 3 天及以上的气温大于或等于该阈值,则计为一次高温热浪事件。采用热浪烈度表征高温热浪的强度^[41],计算公式为:

$$I_H = \sum_{d=1}^{D_H} [(T_{s,d} - T_{p25}) / (T_{p75} - T_{p25})] \quad (3)$$

$$(D_H \geq 3 \text{ d}, T_{s,d} \geq T_{p90})$$

式中: I_H 为热浪烈度; D_H 为高温热浪事件历时; $T_{s,d}$ 为高温热浪事件中第 d 天的气温; T_{p25} 、 T_{p75} 、 T_{p95} 分别为历史时段 5—9 月日均气温的第 25、75、90 百分位数值。

2.3.3 复合事件指数

图 2 为复合事件定义示意图。同时满足以下 2 个条件即认定为复合事件:①发生水文干旱,即达到干旱状态;②发生水文干旱的同时发生高温热浪(连续 3 天及以上 $T_p \geq T_{p90}$), T_p 为研究时段 5—

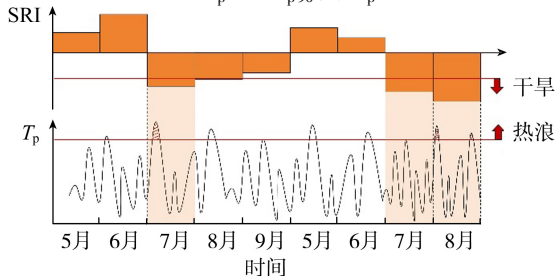


图 2 复合事件定义示意图

Fig. 2 Schematic diagram of compound event definition

9月的日均气温。采用复合事件烈度表征复合事件的强烈程度^[41],计算公式为:

$$I_C = \sum_{d=1}^{D_C} [-I_{SR,d}(T_{s,d} - T_{p25}) / (T_{p75} - T_{p25})] \quad (D_C \geq 3 \text{ d}, T_{s,d} \geq T_{p90}) \quad (4)$$

式中: I_C 为复合事件烈度; D_C 为复合事件历时; $I_{SR,d}$ 为第 d 天所在月的SRI值。

2.4 单一事件及交互作用对复合事件变化的相对贡献计算

本文采用多元线性回归方法量化水文干旱和高温热浪分别对复合事件变化的贡献度。对于每个网格,基于历史时段、未来近期、未来远期数据,计算年均SRI、年均热浪烈度、年均复合事件烈度长序列进行分析。由于水文干旱、高温热浪存在一定的相关性,参考Shieh等^[42-43]的研究,对自变量序列去中心化后建立包含交互作用项的线性回归模型,表达式为:

$$S_{CE} = \beta_1 S_{HD} + \beta_2 S_{HW} + \beta_3 S_{HD} S_{HW} + \varepsilon \quad (5)$$

式中: S_{CE} 为复合事件烈度序列; S_{HD} 为水文干旱指数序列; S_{HW} 为热浪烈度序列; β_1 、 β_2 、 β_3 分别为水文干旱、高温热浪、交互作用项的回归系数; ε 为常数。从而得到水文干旱、高温热浪、交互作用的贡献度:

$$C_{HD} = \beta_1 \Delta I_{SR} / \Delta I_C \quad (6)$$

$$C_{HW} = \beta_2 \Delta I_H / \Delta I_C \quad (7)$$

$$C_{IF} = \beta_3 \Delta I_H \Delta I_{SR} / \Delta I_C \quad (8)$$

式中: C_{HD} 为水文干旱贡献度; C_{HW} 为高温热浪贡献度; C_{IF} 为交互作用贡献度; ΔI_{SR} 、 ΔI_H 、 ΔI_C 分别为水文干旱指数均值、热浪烈度均值、复合事件烈度均值在未来时期相对历史时期的变化量。在此基础上,利用比例法计算单一事件及交互作用对复合事件变化的相对贡献。

3 结果与分析

3.1 偏差校正效果评价

图3为气象变量偏差校正前后对比。由图3(a)~(c)可见,日降水量在部分区域存在偏差,尤其黄河流域南部模拟结果存在明显高估现象;校正后日降水量将模式日降水量高估区域的数值大幅降低,从5 mm降低到2 mm,趋近于实测值,表明校正可有效降低模拟日降水量的偏差。由图3(d)~(f)可见,黄河流域大部分区域风速在1.2~3.6 m/s,且空间分布不均匀;模式风速在整体分布上与实测风速存在差异,在流域北部模式风速接近4.5 m/s,明显高于实测风速,校正后的模式风速高估区域接近实测值。由图3(g)~(i)可见,模式历史的最低、最高气温结果与实际分布较为相似,尤其在上游与下游区域;经过校正后,流域中部的模拟结果也与实测数据更加吻合。

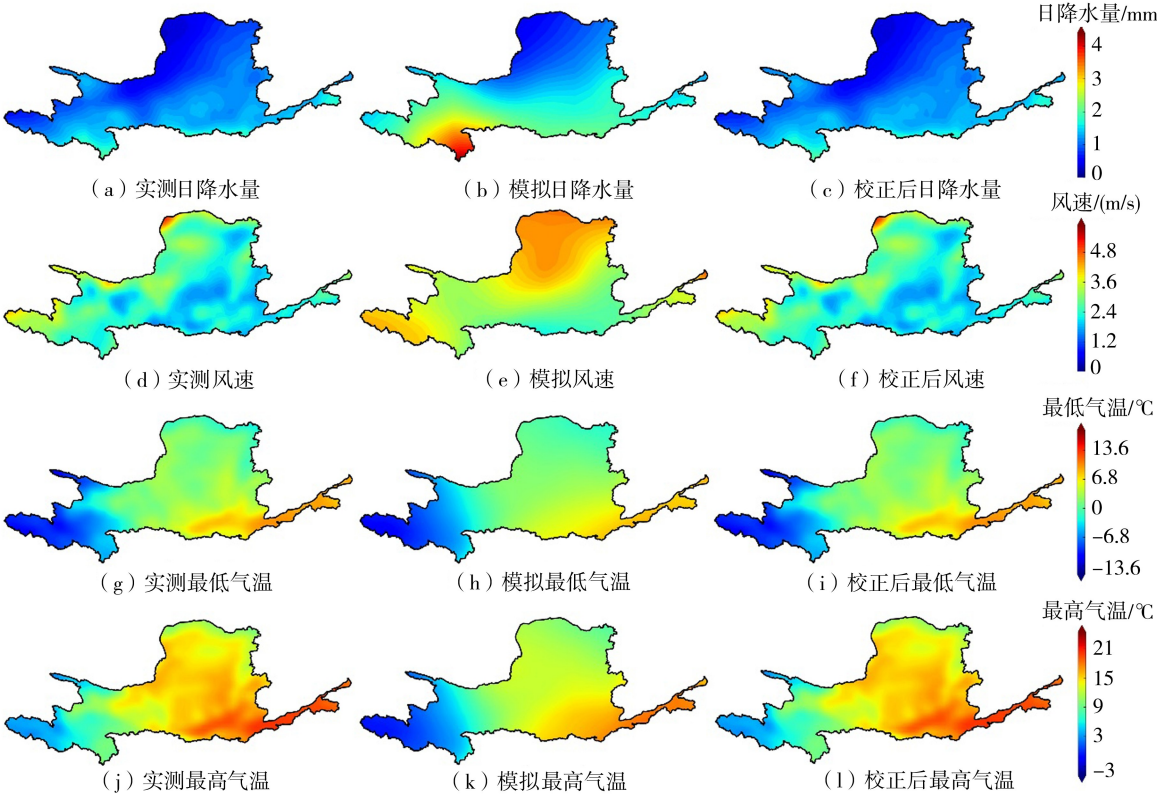


图3 气象变量偏差校正前后对比

Fig. 3 Before and after bias correction for meteorological variables

3.2 复合事件特征指标变化

3.2.1 历时变化

图4为黄河流域水文干旱、高温热浪及复合事件的历时在未来不同情景下相对于历史时期的变化。由图4(a)~(f)可见,黄河流域水文干旱历时从上游至下游,呈现减少—增加—减少的规律,整体随时间和气候情景变化不大,增减幅度均在2月之内,但在空间分布上呈现明显区域性差异。在上游青藏高原区、陕西的无定河和泾河区间流域以及流域的东北部,未来近、远期的干旱历时相比历史时期减少了1~2月。在上中游的鄂尔多斯高原以及其周边区域,未来水文干旱历时预计增加1~3月。下游未来水文干旱历时变化较小,在-0.5~0.5月范围内波动。结合王有恒等^[44]的研究,黄河流域上中游部分地区的径流量在持续减少,并将延续此趋势,会导致未来水文干旱加剧。

由图4(g)~(l)可见,黄河流域高温热浪历时

在未来不同情景下相较于历史时期普遍延长,变化幅度在空间上呈现明显的梯度特征。上游区域如青藏高原的高温热浪历时增幅较大,变化范围为1~17d;中下游区域的增幅相对较小,在13d以内。这种空间差异与地形和气候背景有关,青藏高原作为“地球第三极”,在全球变暖背景下未来升温幅度更大,高温热浪事件的持续时间会更长^[45-46]。从时间尺度来看,黄河流域未来远期的高温热浪历时增幅为1~16d,显著高于未来近期的0~4d。此外,预估未来高温热浪历时在SSP1-2.6情景下将增加0.5~2d,SSP2-4.5情景下将增加0.5~5d,SSP5-8.5情景下将增加3~16d。随着排放浓度增加,高温热浪历时的增幅也不断变大,这一趋势表明随着气候变化的加剧,高温热浪事件的持续时间将增加。

由图4(m)~(r)可见,黄河流域复合事件历时在未来不同气候情景下均长于历史时期。从流域东北部到西南部,复合事件历时呈现递增趋势,变化范

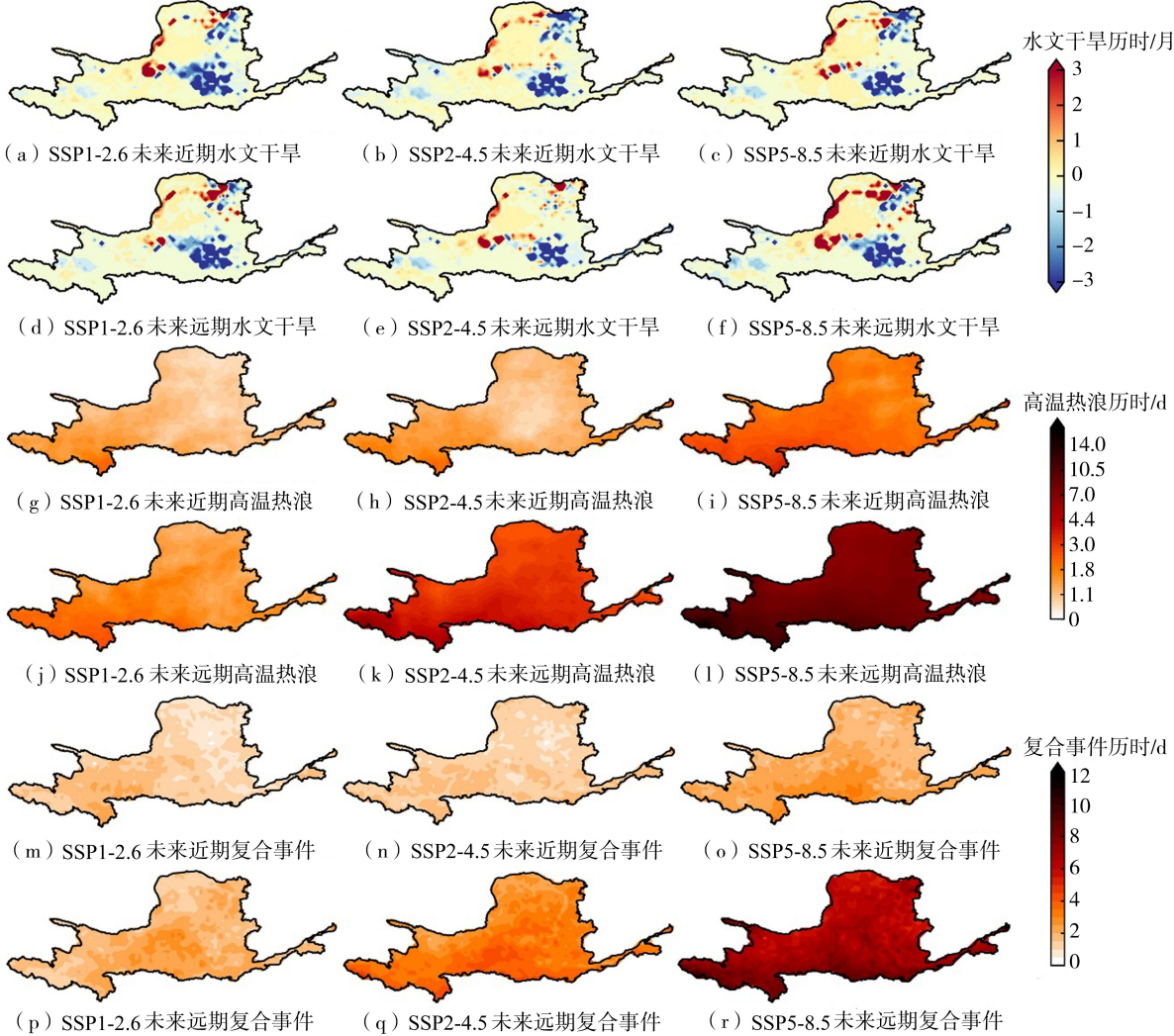


图4 黄河流域水文干旱、高温热浪及复合事件的历时在未来不同情景下相对于历史时期的变化

Fig.4 Duration change of hydrological drought, heatwaves, and compound events in the Yellow River Basin under future scenarios relative to historical periods

围为 0~12 d。未来近期复合事件历时变化范围为 0~3 d;未来远期变化幅度增大,SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下的变化范围为 1~5 d,SSP5-8.5 情景下的变化幅度达 6~12 d,这种变化趋势与高温热浪、水文干旱的协同作用有关。高温热浪的延长可能导致土壤水分蒸发加剧,从而加剧水文干旱事件,进而延长复合事件的持续时间。

3.2.2 频次变化

图 5 为黄河流域水文干旱、高温热浪及复合事件的频次在未来不同情景下相对于历史时期的变化。由图 5(a)~(f)可见,未来近、远期黄河流域的水文干旱频次在大部分地区相较于历史时期有所增加,尤其是在中游以外的区域,变化幅度为 0~0.4 次/a;部分区域如青藏高原及黄土高原东部的增加幅度超过 0.4 次/a。上中游部分区域水文干旱频次在不同气候情景下均有所减少,未来近期减少 0.1~0.3 次/a,未来远期减少 0.1~0.4 次/a,但未

来远期水文干旱频次减少的面积小于近期。这种变化与未来降水量分布的不均匀性有关,降水量减少或季节性变化加剧的区域水文干旱发生更频繁。另外,水文干旱频次变化的空间规律与历时的变化呈负相关关系,即同一区域干旱历时越长,频次越低,反之亦然,这与刘玉针等^[47]的研究结果一致。

由图 5(g)~(l)可见,黄河流域高温热浪频次在未来不同情景下相比历史时期均有所增加,增幅呈现出从上游到下游递减的趋势。空间分布上,甘肃和四川交界处的高温热浪频次增幅最高,形成了辐射状的变化,未来近期增幅为 2~4 次/a,远期为 2~6 次/a;下游的山东半岛的增幅相对较小,未来近期为 1~2 次/a,远期为 2~4 次/a。不同气候情景下的高温热浪频次变化也有所不同,在 SSP1-2.6 情景下,未来流域平均频次相比历史时期增长约 3 次/a,SSP2-4.5 情景下增长约 4 次/a,SSP5-8.5 情景下增幅最大,可达 5.8 次/a。综上所述,高排放浓度情景

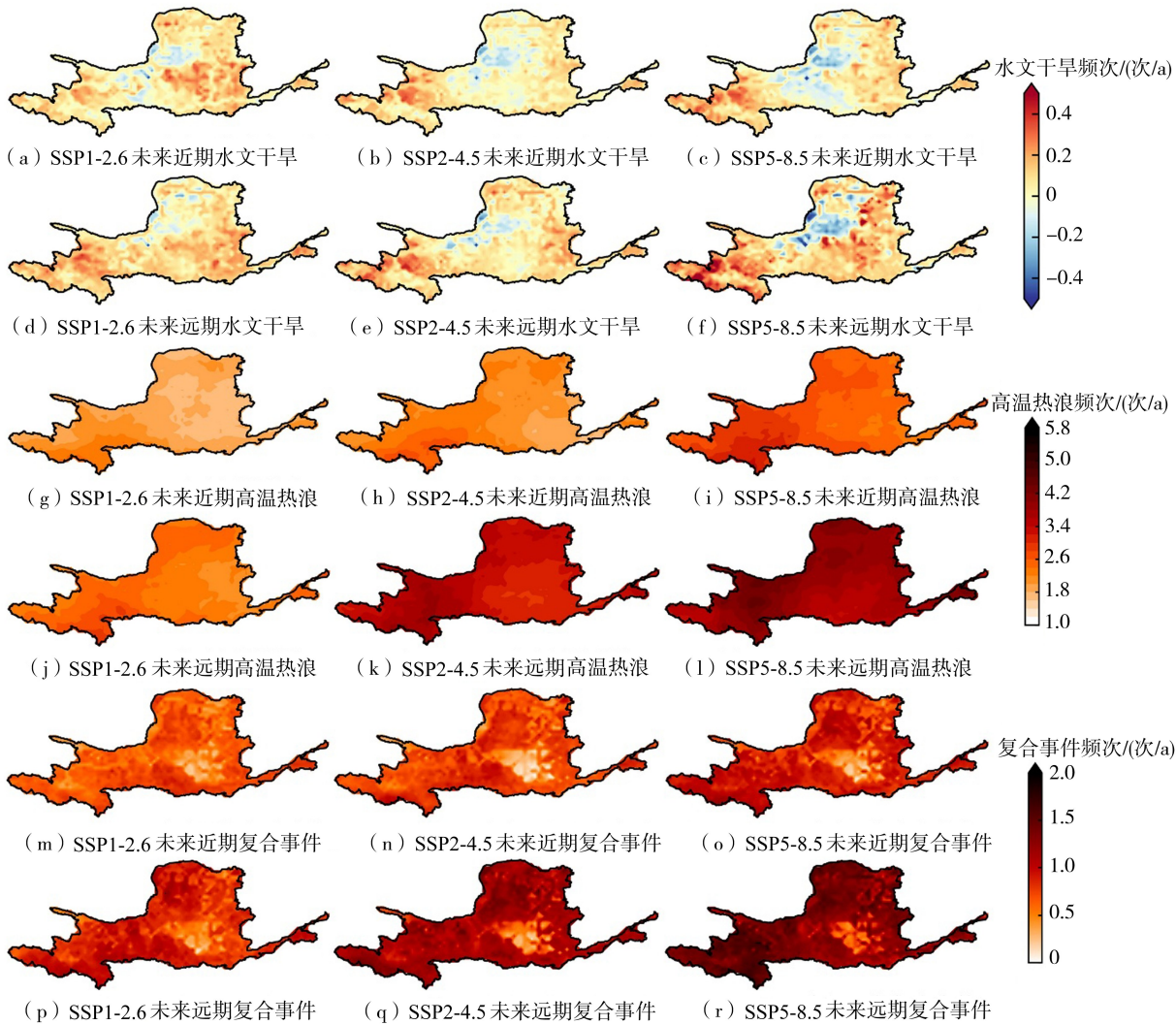


图 5 黄河流域水文干旱、高温热浪及复合事件的频次在未来不同情景下相对于历史时期的变化

Fig. 5 Frequency change of hydrological drought, heatwaves, and compound events in the Yellow River Basin under future scenarios relative to historical periods

下,高温热浪频次的增加更为剧烈,黄河流域的西南部和四川盆地需要重点关注。

由图 5(m)~(r)可见,时间变化上,未来远期黄河流域整体的复合事件频次增幅为 1~2 次/a,未来近期增幅不超过 1 次/a,这表明随着气候变化加剧,复合事件频次将提高一倍以上。空间分布上,黄河流域复合事件频次的增幅呈现西北多、东南少的特点。青藏高原和鄂尔多斯高原区域的复合事件频次增加最为显著,增幅可达 1.5 次/a。结合高温热浪历时变化,青藏高原地区未来可能面临长历时、高频次的复合事件,是黄河流域需要重点关注的区域。此外,不同气候情景下的频次变化幅度也存在差异。SSP1-2.6 情景下,黄河流域整体复合事件频次变化较缓,范围为 0~1 次/a,表明低强迫可有效降低多灾并发的风险;SSP5-8.5 情景下,复合事件频次增幅最大,平均增长 1~2 次/a,凸显了高浓度排放情景下对复合灾害的强化作用。

3.2.3 烈度变化

图 6 为黄河流域水文干旱、高温热浪及复合事件的烈度在未来不同情景下相对于历史时期的变化。由图 6(a)~(f)可见,黄河流域水文干旱烈度与历时呈现正相关关系,即干旱历时越长,相应的烈度越大。黄河流域大部分区域未来近、远期的水文干旱烈度变幅为-50%~50%。中游无定河和泾河区间水文干旱烈度有所减小,变幅为-20%~50%;鄂尔多斯高原及其周边区域的水文干旱烈度明显增加,变幅为 20%~50%;宁夏平原水文干旱烈度出现了小范围的增强,增幅为 10%~50%。整个黄河流域在 SSP5-8.5 情景下,未来远期相比近期的水文干旱烈度呈现“干更干,湿更湿”的变化趋势,与 Zhou 等^[48]的研究结果一致。

由图 6(g)~(l)可见,不同气候情景下黄河流域未来的高温热浪烈度变化与历时相似,但烈度的变化幅度更大。未来远期的高温热浪烈度显著高于

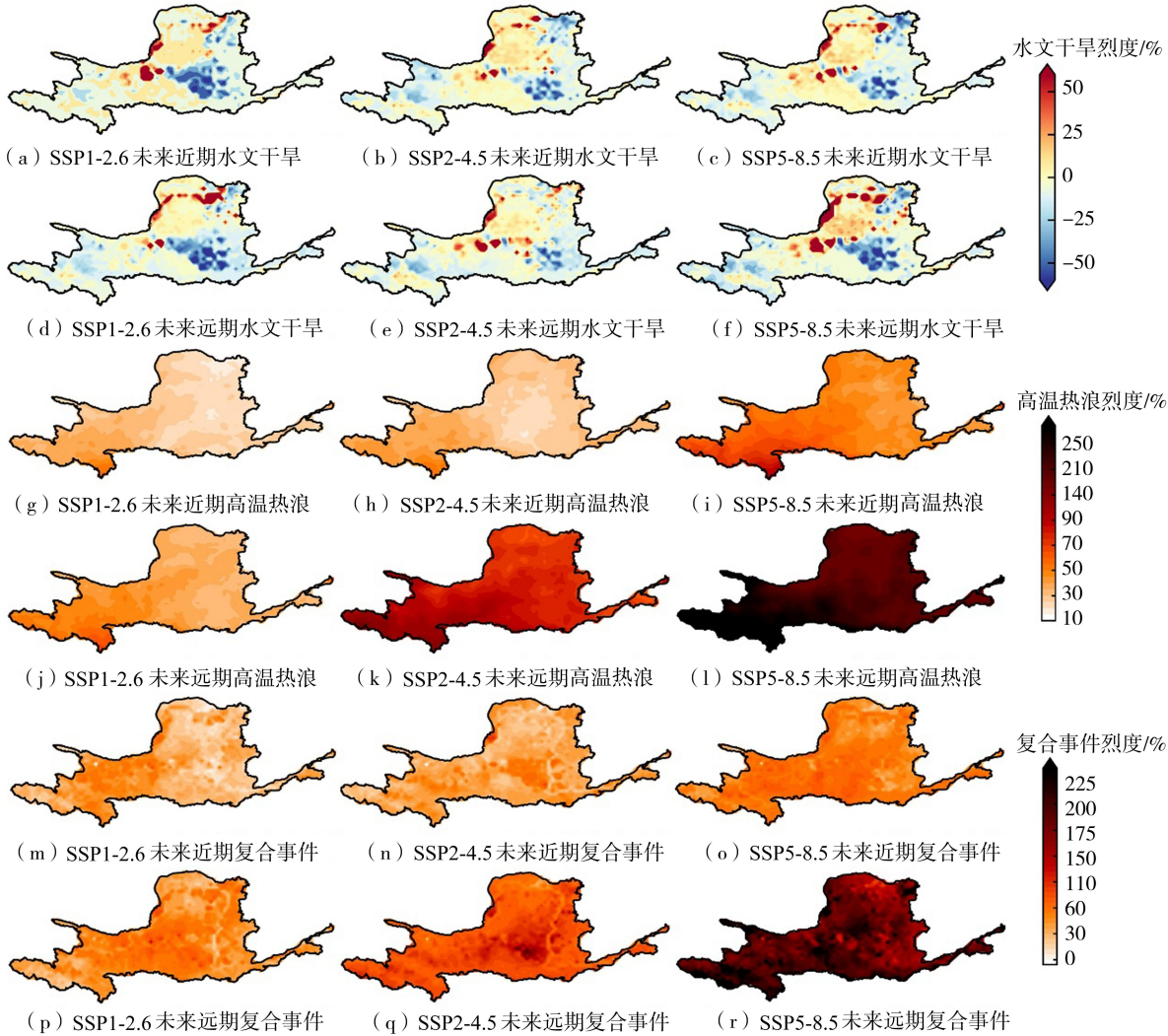


图 6 黄河流域水文干旱、高温热浪及复合事件的烈度在未来不同情景下相对于历史时期的变化

Fig. 6 Intensity change of hydrological drought, heatwaves, and compound events in the Yellow River Basin under future scenarios relative to historical periods

近期,表明随着气候变化的加剧,高温热浪事件在时间进程上的影响将进一步加大。且随着排放浓度的增加,整个黄河流域的热浪烈度亦有不同程度的增加;SSP1-2.6 情景下增幅为 10%~70%;SSP2-4.5 情景下增幅为 20%~120%;SSP5-8.5 情景下增幅最大,为 70%~260%。高温热浪烈度在空间分布上呈现从上游至下游递减的趋势,青藏高原区域预估的高温热浪烈度较大,增幅可达 50%~200%。

由图 6(m)~(r) 可见,未来近期复合事件的烈度变化范围为 10%~80%,未来远期与近期相比增加幅度更为突出。SSP1-2.6 情景下未来远期的复合事件烈度变化范围为 30%~120%;SSP2-4.5 情景下为 50%~160%;SSP5-8.5 情景下大部分区域则超过 160%。黄河流域复合事件烈度变化在空间分布上呈现从上游至下游逐渐增强的趋势。复合事件集中体现了水文干旱和高温热浪的特性,黄河流域整体的复合事件烈度随着时间推进和排放浓度升高而增大。

3.3 复合事件不确定性分析

图 7 为不同气候情景下黄河流域在历史时期及未来近、远期的复合事件特征指标箱线图,箱线范围可用来表征复合事件的不确定性。由图 7(a)可见,历史时期的复合事件历时较为稳定,范围为 4~6 d;随着排放浓度增加和年份推移,历时的不确定性逐渐增大。SSP1-2.6 情景下,未来近期和远期略有波动,整体变幅为 5~8 d;SSP2-4.5 情景下,近期预估历时范围为 5~8 d,远期历时范围升至 5~10 d,模式间差异明显增大;SSP5-8.5 情景下,四分位间距显著增大,不确定性范围比 SSP1-2.6 情景增加约 4 倍,极值间距达到 7~12 d。由图 7(b)可见,黄河流域历史时期复合事件频次范围为 0.6~1.0 次/a。SSP1-2.6 情景下,未来近期复合事件频次变化范围为 1.0~1.8 次/a,远期复合事件频次的离散程度增加,整体变化不大。SSP2-4.5 情景下,四分位间距相较历史时期有所扩大,近期频次为 1.2~1.8 次/a,远

期阶段模式间差异明显增大,频次范围扩大为 1.5~2.3 次/a。SSP5-8.5 情景下,近期频次为 1.4~1.8 次/a,远期为 2.0~2.6 次/a。由图 7(c)可见,历史时期复合事件烈度的四分位间距较小,为 5%~10%。SSP1-2.6 情景下,近期复合事件烈度范围为 10%~13%,远期的四分位间距有所扩大,烈度范围为 11%~17.5%。SSP2-4.5 情景下,近期复合事件烈度相比历史时期不确定性增加,预估范围为 10%~17.5%,远期烈度略有增加,不确定性变化不大。SSP5-8.5 情景下,近期复合事件烈度为 10%~16%,远期烈度差异明显增大,范围进一步扩大为 15%~30%,表明高排放浓度情景下的复合事件烈度及其不确定性显著增加。

3.4 水文干旱、高温热浪与交互作用对复合事件的相对贡献

图 8 为单一事件及交互作用对复合事件变化的相对贡献空间分布。由图 8 可见,在所有气候情景下水文干旱的相对贡献为 0~60%。SSP1-2.6 情景下,近期水文干旱的相对贡献较高,黄河大部分区域为 10%~30%;未来远期相对贡献逐渐减弱,通常在 20%以下。SSP5-8.5 情景下,水文干旱的相对贡献在近期和远期均较低;高温热浪的相对贡献在所有气候情景下均表现出明显的增加趋势。未来近期,流域南部和西部高温热浪的相对贡献较高,平均超过 65%;未来远期高温热浪的相对贡献进一步扩大,尤其在 SSP5-8.5 情景下,几乎整个流域均达到较高水平,部分区域甚至接近 100%。交互作用对于复合事件变化的相对贡献较小,总体在 20%以下,随着未来排放浓度的升高略有增加。在空间分布上,水文干旱的相对贡献在未来近、远期均表现出了一定的空间异质性;流域中部和北部相对贡献稍高,但随着未来排放浓度的升高,相对贡献逐步降低。SSP5-8.5 情景下,高温热浪的高贡献区域几乎覆盖整个流域,上中游部分区域尤为显著。交互作

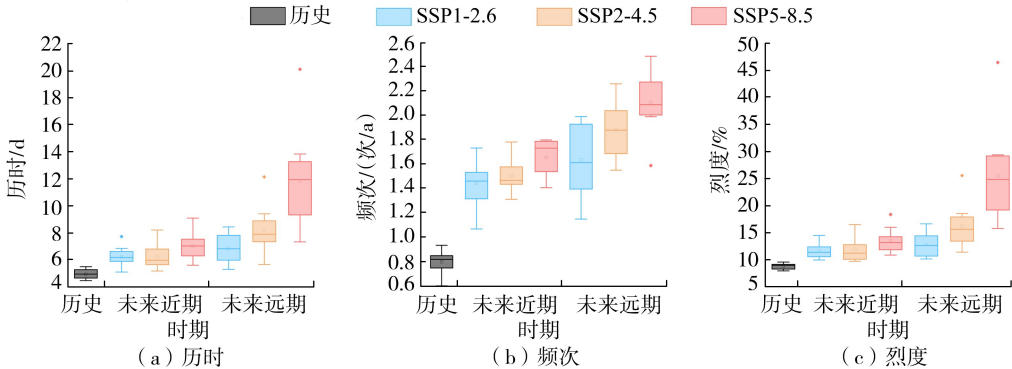


图 7 不同气候情景下黄河流域在历史时期及未来近、远期及的复合事件特征指标箱线图

Fig. 7 Boxplots of compound event characteristic indexes of the Yellow River Basin in historical period and near, long term of future under different climate scenarios

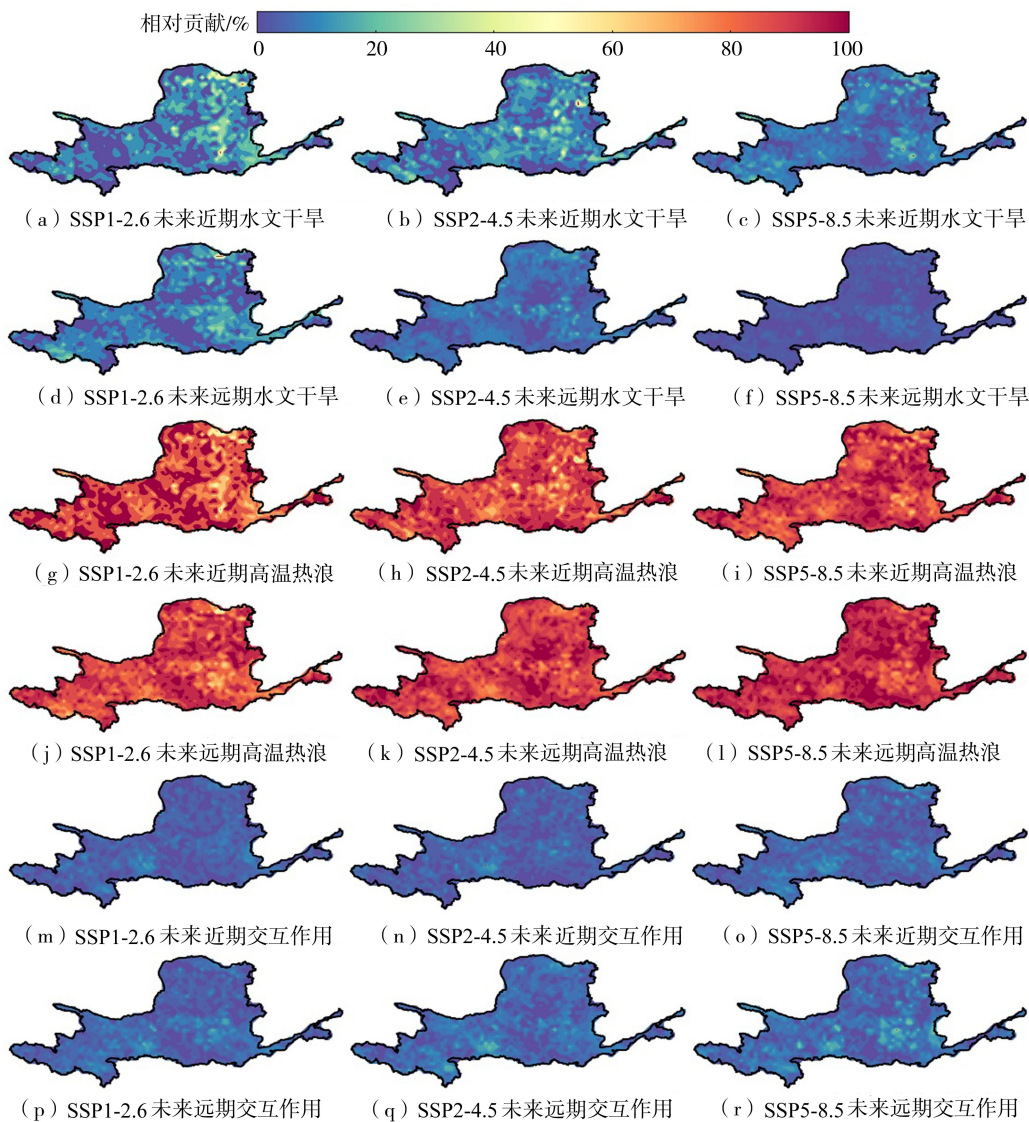


图 8 单一事件及交互作用对复合事件变化的相对贡献空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of relative contribution of single events and interaction effect to compound event change

用在空间特征上结合了水文干旱与高温热浪的相对贡献特点,西部青藏高原地区与中游无定河和泾河区间的相对贡献略高于其他地区。

图 9 为黄河流域单一事件及交互作用对复合事件变化的相对贡献占比箱线图。在所有气候情景

下,未来近期水文干旱的相对贡献占比为 40% 及以下,未来远期逐渐减弱至 30% 以下,因此高温热浪的相对贡献占比逐渐增加。时间的推移会进一步放大气候情景的影响,尤其是在高排放浓度情景下,高温热浪的相对贡献在未来远期几乎完全主导了复合

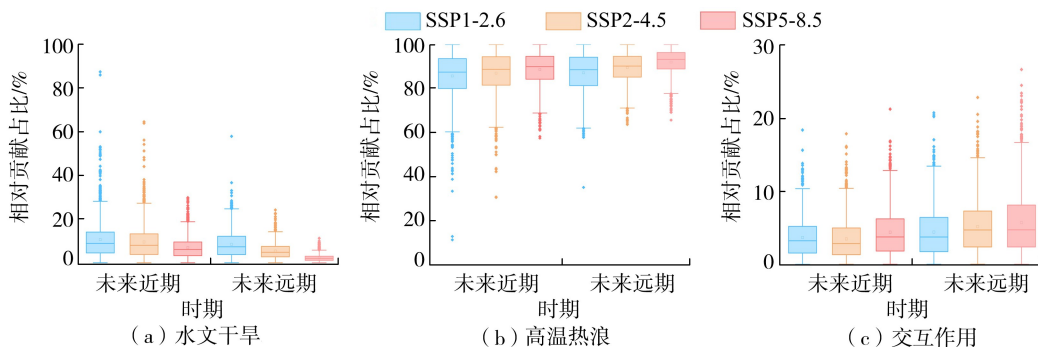


图 9 黄河流域单一事件及交互作用对复合事件变化的相对贡献占比箱线图

Fig. 9 Boxplots of relative contribution proportion of single events and interactions to compound event change in the Yellow River Basin

事件变化。未来远期 SSP5-8.5 情景下,高温热浪的相对贡献占比达到了 80%及以上,即对于黄河流域整体而言,高温热浪在复合事件变化中起主要作用。交互作用对于流域整体的相对贡献占比较低,未来近期占比为 0~10%,未来远期有所增加,部分区域相对贡献占比升至 15%左右。

表 2 为交互作用对水文干旱和高温热浪贡献度的影响对比。由表 2 可见,交互作用的相对贡献虽然占比不高,但会对单一事件贡献度产生一定影响。对于水文干旱,SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下,考虑交互作用的贡献度普遍低于不考虑的情形,但 SSP2-4.5 与 SSP5-8.5 情景的未来近期呈现反向变化。高温热浪贡献度在考虑交互作用后则呈现一致的下降趋势。这种差异表明,水文干旱与高温热浪的交互作用会对单一事件的贡献度产生稀释效应。忽略事件之间的交互作用可能导致对单一事件作用的高估,而考虑交互作用能更真实地反映两者协同作用下的贡献机制,为复合事件的风险评估提供更可靠的量化依据。

表 2 交互作用对水文干旱和高温热浪贡献度的影响对比
单位: %

Table 2 Comparison of interaction effects on hydrologic drought and heat wave contribution unit: %							
单一事件	交互作用影响	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		近期	远期	近期	远期	近期	远期
水文干旱	有	10.6	8.5	9.5	5.4	6.9	2.3
	无	11.6	10.5	7.7	9.4	6.0	2.6
高温热浪	有	85.7	87.1	87.0	89.4	88.7	92.0
	无	87.4	88.6	91.4	89.7	93.0	96.4

3.5 讨论

牟莎^[19]的研究表明,经偏差校正的气候模式数据可为复合事件的未来变化预估提供有效支撑。有些研究采用双线性插值法统一模式数据的分辨率,假设变量在空间中呈均匀变化,而实际中由于受到地形、土地利用类型等条件限制,变量不会完全呈线性特征,偏差的逐步积累可能会对模型结果造成一定的影响^[49-50]。本文采用分位数映射法对 GCMs 数据进行偏差校正,利用累积分布函数构建映射关系,将模拟值转换到观测值的分布上,完整保留概率分布特征,避免误差累积,得到了较好的校正效果。后续可考虑引入海拔数据调整插值方法,使变量分辨率提高的同时亦能反映出随地形的变化。

在单一事件的筛选中,本文采用 SRI 小于 -0.5 作为水文干旱的识别标准^[37,41],历史暖季(5—9月)气温的第 90 百分位数作为高温热浪的阈值^[18,39-40]。上述阈值的选择平衡了复合事件样本量与极端性的需求,并参考了已有的对黄河流域干旱

热浪特征分析,增加了研究的可信度。未来可考虑在多阈值条件下进行干旱事件的判别,逐步调整 SRI 识别水文干旱的标准与高温热浪的判断阈值,进一步对不同等级干旱进行深入研究。

针对单一事件对复合事件变化的相对贡献研究结果表明,高温热浪的相对贡献占比较大,即温度上升会极大程度影响复合事件的严重度,这与 Wu 等^[20]的研究结果一致。但随着温室气体排放浓度的增高,黄河流域部分区域未来远期高温热浪占比接近 100%,现有研究指出这可能存在阈值效应^[1]。当气温突破某个临界值后,高温热浪事件的强度和影响将显著增加,进而影响复合事件,未来可针对此问题进一步研究阈值效应的计算方法并探讨其在不同流域的差异。

4 结 论

a. 黄河流域未来水文干旱与气候情景关系密切。不同气候情景下,水文干旱的历时、烈度变化相似,SSP2-4.5 情景相较于 SSP1-2.6 情景历时更长、烈度更大,SSP5-8.5 情景下则出现了“干更干、湿更湿”的变化特征,频次的变化和空间分布与前两者在大部分地区呈现负相关关系。空间分布上,未来近、远期的水文干旱变化具有明显的地域特征,上游鄂尔多斯高原的水文干旱风险较高。

b. 随着温室气体排放浓度的增加,黄河流域高温热浪历时、频次和烈度均显著增加。相较于历史时期,SSP1-2.6 情景下,预计高温热浪历时将延长 0.5~2 d,频次增加 1~3 次/a,烈度增强 10%~70%; SSP2-4.5 情景下,历时延长 0.5~5 d,频次增加 2~4.5 次/a,烈度增强 20%~120%; SSP5-8.5 情景下,历时延长 3~16 d,频次增加 2.5~6 次/a,烈度增强 60%~260%。空间分布上,黄河流域上游青藏高原为受高温热浪影响最强的地区,中下游依次减弱。

c. 从未来近期到远期,黄河流域复合事件历时、频次及烈度逐渐增强。在不同气候情景下未来近期复合事件的历时较历史时期延长 0.1~3 d,频次增加 0.1~1 次/a,烈度增强 10%~80%;未来远期历时延长 2~12 d,频次增加 1~2 次/a,烈度增强 30%~230%。结合水文干旱与高温热浪的预测结果,青藏高原的未来复合事件风险处于较高的状态,应加强防范。

d. 高温热浪是未来复合事件的变化的主导因素,且随着时间的增加以及排放浓度的升高,高温热浪的相对贡献占比进一步提高。在不同气候情景下,未来近期黄河流域大部分高温热浪的相对贡献占比 60%及以上,远期升至 75%。空间分布上,高

温热浪对流域西部青藏高原地区复合事件变化的主导作用更强,中部地区稍弱。水文干旱与高温热浪的交互作用相对贡献较低,随着排放浓度的升高占比会略有增加,整体在 20% 及以下。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] 张长征,沈婷,徐慎晖,等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济, 2023, 41 (1): 55-61. (Zhang Changzheng, Shen Ting, Xu Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41 (1): 55-61. (in Chinese))

[3] Zhang Ke, Li Zhilin, Shi Wuzhi, et al. Spatiotemporal changes and interconnections between meteorological and hydrological droughts in China over past 34 years [J]. Water Science and Engineering, 2025, 18 (3): 274-287.

[4] 孟长青,董子娇,刘柯莹,等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4): 23-30. (Meng Changqing, Dong Zijiao, Liu Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4): 23-30. (in Chinese))

[5] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53 (1): 10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (1): 10-17. (in Chinese))

[6] Wang Wen, Wang Hao. Rethinking drought definition and classification [J]. Water Science and Engineering, 2025, 18 (2): 125-128.

[7] 夏军,陈进,余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报, 2022, 53 (10): 1143-1153. (Xia Jun, Chen Jin, She Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (10): 1143-1153. (in Chinese))

[8] 熊少堂,赵铜铁钢,郭成超,等. 我国各大流域复合高温干旱事件变化趋势与归因分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54 (1): 83-96. (Xiong Shaotang, Zhao Tongtiegang, Guo Chengchao, et al. Evaluation and attribution of trends in compound dry-hot events for major river basins in China [J]. Scientia Sinica Terrae, 2024, 54 (1): 83-96. (in Chinese))

[9] 瞿德业,杨明月,刘婷婷,等. 基于 SPEI 的洮河流域气

象干旱时空特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (5): 32-40. (Qu Deye, Yang Mingyue, Liu Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (5): 32-40. (in Chinese))

[10] 邓振镛,文小航,黄涛,等. 干旱与高温热浪的区别与联系 [J]. 高原气象, 2009, 28 (3): 702-709. (Deng Zhenyong, Wen Xiaohang, Huang Tao, et al. Relationship and difference between drought and high temperature heat waves [J]. Plateau Meteorology, 2009, 28 (3): 702-709. (in Chinese))

[11] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (1): 1-9. (Wu Zhiyong, Bai Boyu, He Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (1): 1-9. (in Chinese))

[12] 薛倩,谢苗苗,郭强,等. 地理学视角下城市高温热浪脆弱性评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39 (4): 685-694. (Xue Qian, Xie Miaomiao, Guo Qiang, et al. Research progress on urban heat wave vulnerability assessment: a geographical perspective [J]. Progress in Geography, 2020, 39 (4): 685-694. (in Chinese))

[13] Bevacqua E, Maraun D, Haff I H, et al. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in Ravenna (Italy) [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21 (6): 2701-2723.

[14] Sadegh M, Moftakhari H, Gupta H V, et al. Multihazard scenarios for analysis of compound extreme events [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45 (11): 5470-5480.

[15] 方建,陶凯,牟莎,等. 复合极端事件及其危险性评估研究进展 [J]. 地理科学进展, 2023, 42 (3): 587-601. (Fang Jian, Tao Kai, Mu Sha, et al. Progress of research on compound extreme event and hazard assessment [J]. Progress in Geography, 2023, 42 (3): 587-601. (in Chinese))

[16] Hao Zengchao, Hao Fanghua, Singh V P, et al. Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13 (12): 124022.

[17] Li Jun, Wang Zhaoli, Wu Xushu, et al. A standardized index for assessing sub-monthly compound dry and hot conditions with application in China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25 (3): 1587-1601.

[18] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 70-77. (Jiang Yutong, Hao Zengchao, Feng Sifang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound

- hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 70-77. (in Chinese))
- [19] 牟莎. 基于 CMIP6 的中国复合极端事件时空变化及未来预估[D]. 武汉: 华中师范大学, 2023.
- [20] Wu Yi, Miao Chiyuan, Sun Ying, et al. Global observations and CMIP6 simulations of compound extremes of monthly temperature and precipitation [J]. *GeoHealth*, 2021, 5(5): e2021GH000390.
- [21] 姜慧妍. 基于 CMIP6 多模式数据的中国极端复合干热事件变化特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [22] 徐宗学, 姜瑶. 变化环境下的径流演变与影响研究: 回顾与展望[J]. *水利水运工程学报*, 2022(1): 9-18. (Xu Zongxue, Jiang Yao. Studies on runoff evolution mechanism under changing environment: a state-of-the-art review[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1): 9-18. (in Chinese))
- [23] Liang Xu, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [24] 鲍振鑫, 张建云, 王国庆, 等. 基于水文模型与机器学习集合模拟的水沙变异归因定量识别: 以黄河中游窟野河流域为例[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 485-496. (Bao Zhenxin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, et al. Quantitative assessment of the attribution of runoff and sediment changes based on hydrologic model and machine learning: a case study of the Kuye River in the Middle Yellow River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 485-496. (in Chinese))
- [25] 张珂, 戴钰, 刘林鑫, 等. 考虑植被根系深度动态变化的 VIC 径流模拟模型[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 28-34. (Zhang Ke, Dai Yu, Liu Linxin, et al. VIC model for runoff simulation considering dynamic changes of vegetation root depth [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 28-34. (in Chinese))
- [26] Wu Xinying, Hao Zengchao, Zhang Xuan, et al. Evaluation of severity changes of compound dry and hot events in China based on a multivariate multi-index approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124580.
- [27] Guo Shuyao, Liu Wenbin, Wang Tingting, et al. Century-long variations of growing-season compound dry-hot extremes and their links with large-scale climate patterns in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2023, 43(16): 7481-7495.
- [28] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1048-1058. (Huang Jianping, Zhang Guolong, Yu Haipeng, et al. Characteristics of climate change in the Yellow River basin during recent 40 years [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1048-1058. (in Chinese))
- [29] 巩杰, 高秉丽, 李焱, 等. 1960—2020 年黄河流域气候干湿状况时空分异及变化趋势[J]. *中国农业气象*, 2022, 43(3): 165-176. (Gong Jie, Gao Bingli, Li Yan, et al. Spatiotemporal variation of climate dry-wet condition and its potential trend in the Yellow River Basin from 1960 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(3): 165-176. (in Chinese))
- [30] 牛玉国, 张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J]. *水利经济*, 2023, 41(2): 1-4. (Niu Yuguo, Zhang Jinpeng. Research on building the Yellow River's large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2023, 41(2): 1-4. (in Chinese))
- [31] 薛联青, 肖颖, 刘远洪, 等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 32-41. (Xue Lianqing, Xiao Ying, Liu Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 32-41. (in Chinese))
- [32] 童尧, 韩振宇, 高学杰. QM 和 QDM 方法对中国极端气候的高分辨率气候变化模拟的误差订正对比[J]. *气候与环境研究*, 2022, 27(3): 383-396. (Tong Yao, Han Zhenyu, Gao Xuejie. Bias correction in climate extremes over China for high-resolution climate change RegCM4 simulations using QM and QDM methods [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2022, 27(3): 383-396. (in Chinese))
- [33] 华科, 王智超, 姚遥, 等. 基于分位数映射法的太阳能精细化分布评估及长时预测[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(4): 198-205. (Hua Ke, Wang Zhichao, Yao Yao, et al. Refined distribution evaluation and long term prediction of solar energy based on quantile mapping method [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(4): 198-205. (in Chinese))
- [34] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102-1111. (Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1102-1111. (in Chinese))
- [35] Miao Chiyuan, Gou Jiaojiao, Fu Bojie, et al. High-quality reconstruction of China's natural streamflow[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(5): 547-556.
- [36] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. *Geophysical*

- Research Letters,2008,35(2):102405.
- [37] Gu Lei, Chen Jie, Yin Jiabo, et al. Responses of precipitation and runoff to climate warming and implications for future drought changes in China [J]. *Earth's Future*,2020,8(10):e2020EF001718.
- [38] 李敏,李建柱,冯平,等.变化环境下时变标准化径流指数的构建与应用[J]. *水利学报*,2018,49(11):1386-1395. (Li Min, Li Jianzhu, Feng Ping, et al. Construction of time-dependent drought index under changing environment and its application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2018,49(11):1386-1395. (in Chinese))
- [39] Padalino C, Lickley M, Solomon S. Heat wave time of emergence patterns: a matter of definition [J]. *Environmental Research Communications*, 2024, 6(5): 051005.
- [40] 门宝辉,吕行,陈仕豪,等.基于CMIP6耦合WRF的黄河上游复合干旱热浪事件演变规律[J]. *水利学报*, 2024, 55(8): 908-919. (Men Baohui, Lyu Xing, Chen Shihao, et al. Evolution law of compound drought and heatwave events in the upper Yellow River basin based on CMIP6 coupled WRF [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2024,55(8):908-919. (in Chinese))
- [41] Yin Jiabo, Slater L, Gu Lei, et al. Global increases in lethal compound heat stress: hydrological drought hazards under climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(18): e2022GL100880.
- [42] Shieh G. Clarifying the role of mean centring in multicollinearity of interaction effects [J]. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 2011, 64(3): 462-477.
- [43] Price G A V, Stauber J L, Jolley D F, et al. Development and validation of multiple linear regression models for predicting chronic zinc toxicity to freshwater microalgae [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2023, 42(12):2630-2641.
- [44] 王有恒,谭丹,韩兰英,等.黄河流域气候变化研究综述[J]. *中国沙漠*,2021,41(4):235-246. (Wang Youheng, Tan Dan, Han Lanying, et al. Review of climate change in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2021,41(4):235-246. (in Chinese))
- [45] 王康,张廷军,牟翠翠,等.从第三极到北极:气候与冰冻圈变化及其影响[J]. *冰川冻土*,2020,42(1):104-123. (Wang Kang, Zhang Tingjun, Mu Cuicui, et al. From the Third Pole to the Arctic: changes and impacts of the climate and cryosphere [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2020,42(1):104-123. (in Chinese))
- [46] 程玉佳,张珂,晁丽君.青藏高原复合干热事件及其对植被的影响[J]. *水资源保护*,2023,39(4):52-58. (Cheng Yujia, Zhang Ke, Chao Lijun. Compound dry-hot events on Qinghai-Tibet Plateau and their effects on vegetation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4):52-58. (in Chinese))
- [47] 刘玉针,魏长寿,李志进.1961—2020年黄河流域干旱演变分析和大气响应[J]. *水资源开发与管理*,2022,8(10):7-17. (Liu Yuzhen, Wei Changshou, Li Zhijin. Analysis of drought evolution and atmospheric response in the Yellow River Basin from 1961 to 2020 [J]. *Water Resources Development and Management*,2022,8(10):7-17. (in Chinese))
- [48] Zhou Sha, Williams A P, Lintner B R, et al. Diminishing seasonality of subtropical water availability in a warmer world dominated by soil moisture-atmosphere feedbacks [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5756.
- [49] 代劲松,曹林,汪贵斌.中国气候数据的长期模拟:动态自由尺度模型的构建和验证[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*,2013,37(6):82-88. (Dai Jinsong, Cao Lin, Wang Guibin. Long-term simulation of China's climate data-establishment and validation of the dynamic free-scale model [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*,2013,37(6):82-88. (in Chinese))
- [50] 谈灿灿,张润润,邓志民,等.基于暴雨空间自相关性的降水量插值方法比较[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2024,52(6):8-14. (Tan Cancan, Zhang Runrun, Deng Zhimin, et al. Comparison of precipitation interpolation methods considering spatial autocorrelation of rainstorm precipitation [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2024,52(6):8-14. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-21 编辑:王芳)

