

基于 Vine Copula 函数的黄河流域多变量复合事件风险评估

郭盛明¹, 吴海江^{2,3}, 粟晓玲^{2,3}, 屈艳萍^{4,5}, 冯 凯⁶, 姜田亮^{4,5}

(1. 黄河水利委员会黄河水资源中心; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室; 3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院; 4. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室; 5. 水利部防洪抗旱减灾技术创新中心(水旱灾害防御中心); 6. 华北水利水电大学水利学院)

摘要: 针对全球变暖背景下多变量复合事件频发趋强, 其级联灾害效应及复杂非线性影响日益突出的问题, 采用 Vine Copula 函数评估了黄河流域夏季气象干旱、高温、农业干旱三变量复合事件发生的风险, 并量化了在某一等级气象干旱和/或高温发生条件下, 轻度等级以上农业干旱的风险。结果表明: 黄河流域夏季气象干旱、高温、农业干旱同时发生的三变量“和事件”的高风险热点区域主要位于流域中下游地区; 相较于流域西北部, 东部地区发生三变量“和事件”和气象干旱/高温、农业干旱同时发生的三变量“或事件”的风险更高; 在不同等级气象干旱和高温同时发生或至少有一个发生的条件下, 流域东部发生轻度等级以上农业干旱的风险显著高于西部。

关键词: 农业干旱; 气象干旱; 高温; 复合事件; Vine Copula 函数; 风险评估; 黄河流域

Risk assessment of multivariate compound events in the Yellow River Basin based on Vine Copula functions//Guo Shengming¹, Wu Haijiang^{2,3}, Su Xiaoling^{2,3}, Qu Yanping^{4,5}, Feng Kai⁶, Jiang Tianliang^{4,5} (1. *Yellow River Water Resources Center, Yellow River Conservancy Commission*; 2. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University*; 3. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University*; 4. *State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research*; 5. *Technology Innovation Center for Flood and Drought Prevention and Disaster Reduction, Ministry of Water Resources*; 6. *College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power*)

Abstract: In response to the increasing frequency and intensity of multivariate compound events under global warming, along with their growing cascading disaster effects and complex nonlinear impacts, this study employed Vine Copula functions to assess the risk of trivariate compound events, involving meteorological drought, high temperature, and agricultural drought in summer of the Yellow River Basin. It further quantified the risk of agricultural drought at mild level or above under the conditions of specific severities of meteorological drought and/or high temperature. Results show that high-risk hotspots of the concurrent meteorological drought, high temperature, and agricultural drought (i. e., trivariate “AND events”) are primarily located in the middle and lower reaches of the basin. Compared to the northwestern regions, the eastern areas face higher risks of the “AND events” and the co-occurrence of meteorological drought/high temperature and agricultural drought (i. e., trivariate “OR events”). Under conditions where meteorological drought and high temperature of different severities occur simultaneously, or at least one of them occurs, the risk of agricultural drought at mild level or above in the eastern parts of the basin is significantly higher than that in the western regions.

Key words: agricultural drought; meteorological drought; high temperature; compound events; Vine Copula function; risk assessment; the Yellow River Basin

气候变暖加快了全球水循环过程, 导致世界各地极端事件频发且趋强, 对农业生产、生态安全和社会

会经济发展造成了灾难性的影响^[1-3]。2020 年联合国减灾办^[4]发布的研究报告指出, 全球每年受干旱

基金项目: 国家自然科学基金项目(52479027); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(XYTD2026-11); 水利部重大科技项目(SKS-2022018)

作者简介: 郭盛明(1996—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: nwafugsm@163.com

通信作者: 吴海江(1994—), 男, 教授, 博士, 主要从事干旱预测及复合水文气候极端事件风险评估研究。E-mail: haijiangwu@nwafu.edu.cn

和高温热浪影响的人口超过 7 000 万人,造成的经济损失超过了 1 280 亿美元。据统计,1978—2016 年中国平均每年由干旱导致的农业受灾面积约为 2 270 万 km², 占有所有自然灾害诱发农业受灾面积的 53%^[5-6]。可见,干旱和高温已成为制约经济可持续发展与社会公共安全的重要因素之一。此外,与单一干旱或高温事件相比,复合干旱高温事件将产生灾害的叠加放大效应^[7-12]。例如,2022 年长江流域遭遇了 1961 年以来最严重的复合干旱高温事件,出现了罕见的“主汛期反枯”现象,鄱阳湖和洞庭湖两大湖区的水体面积较多年同期平均水平减少了近七成,造成了严重的水荒、电荒和生态危机^[1,13]。因此,开展有效的多变量复合事件风险评估,对于及时发布灾害预警、减轻和规避相关灾害的潜在风险至关重要。

自然状态下,受水热收支平衡和水文循环的影响,降水亏缺伴随着气温升高和强烈的太阳辐射,使得土壤水分持续减少,从而诱发农业干旱;土壤水分亏缺和蒸散发能力增强,通过陆气正反馈使得气温进一步升高,形成高温^[14]。农业干旱、气象干旱和高温在同一地点同时或先后发生的现象被定义为多变量复合事件,其影响因素众多,复杂非线性问题更加突出^[15]。特别地,气象干旱和高温并不一定同时发生,单一的气象干旱或高温也可能诱发农业干旱。因此,如何准确评估多变量复合事件的发生风险是当前水文学领域的热点和难点问题。

Vine Copula 函数可以灵活地将多个随机变量的边缘分布函数通过双变量 Copula 函数的形式联结起来^[16-17],以构造多维联合分布函数且具有明确的解析表达式,在干旱和洪水风险评估等研究中得到了广泛应用^[18-19]。例如:Cheng 等^[20]基于 Vine Copula 函数评估了人为气候变化对美国夏季干旱和高温的影响;Hao 等^[21]基于 Gaussian Copula 函数量化了不同严重程度气象干旱和高温组合情形下美国气象干旱、高温、农业干旱的联合发生概率和条件发生概率;Zhu 等^[22]利用 Vine Copula 函数定量评估了气象干旱和前期农业干旱影响下,全球农业干旱的发生概率;张更喜等^[23]基于 Vine Copula 函数发现相较于单一干旱或高温事件,黄土高原的复合干旱高温事件进一步加剧了植被的脆弱性。以上研究均表明,Vine Copula 函数在处理高维复杂非线性问题时具有明显的优势。然而,现有研究多关注“和事件”(即多个事件同时发生)与“和条件”(即多个事件同时发生的条件下某一事件发生)情形下的多变量复合事件风险^[24-26],鲜有利用 Vine Copula 函数评估“或事件”(即多个事件中至少有一个发生)与“或

条件”(即多个事件中至少有一个发生条件下某一事件发生)情形下的多变量复合事件风险。为此,本文基于 Vine Copula 函数,在上述 4 种情形下评估黄河流域夏季多变量复合事件的发生风险,以期为抗旱决策提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域既是我国重要的粮食主产区之一,也是干旱灾害最为频发的区域之一。该流域地处我国中北部地区,整体上属于大陆性气候,自西向东依次横跨我国高原气候区、中温带大陆性气候区、暖温带大陆性气候区和暖温带季风性气候区(气候类型分区详见 <http://geodata.pku.edu.cn>)。流域降水空间分布极不均匀,整体呈现自东南向西北逐步减少的趋势,大部分地区年降水量在 200~650 mm 之间。如图 1 所示,内蒙古托克托县河口镇以上为黄河流域上游,郑州桃花峪以下为中游,河口镇至桃花峪为中游。

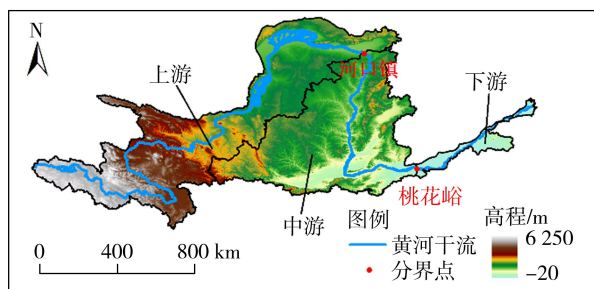


图 1 黄河流域上、中、下游划分

Fig. 1 Divisions of upper, middle, and lower reaches of the Yellow River Basin

1.2 数据来源

本文使用的 1950—2023 年逐月降水和 2 m 最高气温数据来源于 CRU 观测数据集^[27] (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.08/),其空间分辨率为 0.5°×0.5°。同时段逐月 0~10 cm、>10~40 cm、>40~100 cm 的土壤湿度数据来自 GLDAS 同化数据集 (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>),其空间分辨率为 0.25°×0.25°。同时段逐月 0~7 cm、>7~28 cm、>28~100 cm 土壤湿度数据来自 ERA5 再分析数据集 (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download>) 和 ERA5-land 再分析数据集 (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=download>),其空间分辨率分别为 0.25°×0.25°和 0.1°×0.1°。采用双线性插值法将以上各数据的空

间分辨率均统一为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

由于大部分植被的根系主要分布在顶部 $0 \sim 100$ cm 的土层中^[28], 本文主要使用 $0 \sim 100$ cm 的根区土壤湿度数据。此外, 由于模拟处理方法不同, 不同的土壤湿度再分析或同化数据产品的适用性在不同区域可能具有较大差异^[29]。因此, 本文采用 ERA5、ERA5-land 和 GLDAS 3 套数据产品 $0 \sim 100$ cm 土壤湿度逐月平均值, 以降低单一土壤湿度数据产品可能带来的较大差异。

2 研究方法

2.1 指数构建

以标准化降水指数 (SPI) 构建为例进行说明。

a. 采用非参数化经验 Gringorten 位置划分公式^[30]得到某一时间尺度下降水的经验累积概率:

$$P(x_i) = \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad (1)$$

式中: $P(x_i)$ 为特定时间尺度下降水累积平均值的经验累积概率; i 为降水 x 的秩统计量; n 为样本长度。

b. 采用正态分位数转换将式 (1) 转换为 SPI 序列:

$$I_{SP} = \varphi^{-1}(P(x_i)) \quad (2)$$

式中: I_{SP} 为 SPI 值; $\varphi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的逆函数。

类似地, 根据以上公式将降水数据替换为 2 m 最高气温或 $0 \sim 100$ cm 土壤湿度数据, 可得到标准化温度指数 (STI) 或标准化土壤湿度指数 (SSI)。本文采用 3 月时间尺度 SPI、STI 和 SSI 分别表征气象干旱、高温和农业干旱。夏季是作物和植被生长的关键时期, 也是干旱和高温多发时期^[6, 15], 因此, 本文主要关注夏季多变量复合事件的风险评估。

根据 Svoboda 等^[31] 给出的干旱等级划分标准, 与轻旱、中旱、重旱、极旱和特旱等级对应的 SPI (SSI) 值范围分别为 $> -0.8 \sim -0.5$ 、 $> -1.3 \sim -0.8$ 、 $> -1.6 \sim -1.3$ 、 $> -2.0 \sim -1.6$ 、 ≤ -2.0 , 对应的分位数范围分别为 $> 20\% \sim 30\%$ 、 $> 10\% \sim 20\%$ 、 $> 5\% \sim 10\%$ 、 $> 2\% \sim 5\%$ 、 $\leq 2\%$ 。STI 的高温等级阈值与 SPI 和 SSI 的干旱等级阈值相反, 轻热、中热、重热、极热和特热对应的 STI 值范围分别为 $0.5 \sim 0.8$ 、 $> 0.8 \sim 1.3$ 、 $> 1.3 \sim 1.6$ 、 $> 1.6 \sim 2.0$ 、 > 2.0 , 对应的分位数范围分别为 $70\% \sim 80\%$ 、 $> 80\% \sim 90\%$ 、 $> 90\% \sim 95\%$ 、 $> 95\% \sim 98\%$ 、 $> 98\%$ 。

2.2 概率乘法因子

概率乘法因子 (PMF) 可用来表征两个极端事件同时发生的概率是否具有紧密联系, 其定义为两个关联事件的联合发生概率与它们相互独立事件概

率的比值^[9, 32]。分别用连续随机变量 X 、 Y 和 Z 表示 SPI、STI 和 SSI, 则两两极端事件组合的 PMF 表达式分别为^[33]:

$$F_{SPI-SSI} = \frac{P(X \leq x_d, Z \leq z_d)}{P(X \leq x_d)P(Z \leq z_d)} = \frac{C(u_d, w_d)}{u_d w_d} \quad (3)$$

$$F_{SPI-STI} = \frac{P(X \leq x_d, Y > y_h)}{P(X \leq x_d)P(Y > y_h)} = \frac{u_d - C(u_d, v_h)}{u_d(1 - v_h)} \quad (4)$$

$$F_{SSI-STI} = \frac{P(Z \leq z_d, Y > y_h)}{P(Z \leq z_d)P(Y > y_h)} = \frac{w_d - C(w_d, v_h)}{w_d(1 - v_h)} \quad (5)$$

其中 $u_d = P(X \leq x_d)$ $v_h = P(Y \leq y_h)$

$$w_d = P(Z \leq z_d)$$

式中: $F_{SPI-SSI}$ 、 $F_{SPI-STI}$ 、 $F_{SSI-STI}$ 分别为气象干旱与农业干旱的 PMF 值、气象干旱与高温的 PMF 值以及农业干旱与高温的 PMF 值, 且 $F \geq 0$; $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; x_d 、 y_h 、 z_d 分别为某一等级气象干旱、高温和农业干旱对应的指数值; u_d 、 v_h 、 w_d 分别为某一等级气象干旱、高温和农业干旱对应的累积概率阈值。本文在计算 PMF 时, 取 $x_d = -1.3$ 、 $y_h = 1.3$ 、 $z_d = -1.3$ (即 $u_d = 0.1$ 、 $v_h = 0.9$ 、 $w_d = 0.1$)。 $F > 1$ 表明两个极端事件关联紧密, 而 $F \leq 1$ 表明两个极端事件关联较弱^[9]。

2.3 多变量复合事件联合发生概率和条件发生概率计算

气象干旱和高温通过水文循环和干旱传播可能诱发农业干旱, 造成级联灾害放大效应^[15, 34-36]。因此, 量化气象干旱、高温和农业干旱三者之间的复合影响以及评估由气象干旱和高温诱发的农业干旱风险, 可为利益相关者制定合理有效的管理措施提供理论参考。

利用 Vine Copula 函数可以推导出某一等级气象干旱、高温和农业干旱同时发生的三变量“和事件”的联合发生概率为^[21]:

$$P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d \wedge Y > y_h) = P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d) - P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d \wedge Y \leq y_h) = C(w_d, u_d) - C(w_d, u_d, v_h) \quad (6)$$

气象干旱和高温并不一定同时发生, 单一的气象干旱或高温也可能诱发农业干旱, 因此, 某一等级气象干旱或高温出现的同时, 发生某一等级农业干旱的三变量“或事件”的联合发生概率为:

$$P(Z \leq z_d \wedge (X \leq x_d \vee Y > y_h)) = P((Z \leq z_d \wedge X \leq x_d) \vee (Z \leq z_d \wedge Y > y_h)) = P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d) + P(Z \leq z_d \wedge Y > y_h) -$$

$$\begin{aligned}
& P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d \wedge Y > y_h) = \\
& P(Z \leq z_d) - P(Z \leq z_d \wedge Y \leq y_h) + \\
& P(Z \leq z_d, X \leq x_d, Y \leq y_h) = \\
& w_d - C(w_d, v_h) + C(w_d, u_d, v_h) \quad (7)
\end{aligned}$$

在某一等级气象干旱和高温同时出现的“和条件”下,某一等级农业干旱的条件发生概率为:

$$\begin{aligned}
& P(Z \leq z_d | (X \leq x_d \wedge Y > y_h)) = \\
& \frac{P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d) - P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d \wedge Y \leq y_h)}{P(X \leq x_d) - P(X \leq x_d \wedge Y \leq y_h)} = \\
& \frac{C(w_d, u_d) - C(w_d, u_d, v_h)}{u_d - C(u_d, v_h)} \quad (8)
\end{aligned}$$

在某一等级气象干旱或高温出现的“或条件”下,某一等级农业干旱的条件发生概率为:

$$\begin{aligned}
& P(Z \leq z_d | (X \leq x_d \vee Y > y_h)) = \\
& \frac{P(Z \leq z_d \wedge (X \leq x_d \vee Y > y_h))}{P(X \leq x_d \vee Y > y_h)} = \\
& \frac{P((Z \leq z_d \wedge X \leq x_d) \vee (Z \leq z_d \wedge Y > y_h))}{1 - P(Y \leq y_h) + P(X \leq x_d \wedge Y \leq y_h)} = \\
& \frac{P(Z \leq z_d) - P(Z \leq z_d \wedge Y \leq y_h) +}{1 - P(Y \leq y_h) +} \rightarrow \\
& \leftarrow \frac{P(Z \leq z_d \wedge X \leq x_d \wedge Y \leq y_h)}{P(X \leq x_d \wedge Y \leq y_h)} = \\
& \frac{w_d - C(w_d, v_h) + C(w_d, u_d, v_h)}{1 - v_h + C(u_d, v_h)} \quad (9)
\end{aligned}$$

多变量复合事件的联合发生概率和条件发生概率的计算步骤如下:

a. 基于最小 AIC 信息准则从备选 Copula 函数族中 (包括 Gaussian、Clayton、Gumbel、Frank、Joe、Student t 、BB1、BB6、BB7 和 BB8) 选择最优的 Vine Copula 函数 $C(w_d, u_d, v_h)$, 并利用极大似然估计法得到相应的 Copula 函数参数^[37]。

b. 使用 Vine Copula 函数在区间 $[0, 1]$ 内随机模拟生成 10 万个 u_d, v_h 和 w_d 边际分布函数的累积概率值。

c. 利用经验 Copula 函数分别统计得到 $C(w_d, u_d)$ 、 $C(w_d, v_h)$ 、 $C(u_d, v_h)$ 和 $C(w_d, u_d, v_h)$ 的联合边际概率值^[38-41]。

3 结果与分析

3.1 多变量复合事件之间的相关性及其耦合强度

在黄河流域大部分区域,夏季气象干旱与农业干旱之间呈显著正相关关系, Kendall 相关系数 $r_{\text{SPL-SSI}}$ 均值为 0.33 (图 2(a)); 气象干旱与高温之间呈显著负相关关系, $r_{\text{SPL-STI}}$ 均值为 -0.25 (图 2(b)); 农业干旱与高温之间呈显著负相关关系, $r_{\text{SSI-STI}}$ 均值为 -0.26 (图 2(c))。图 2(a)~(c) 中打点区域表示相关系数通过 $p < 0.1$ 显著性检验。以上结果表明, 农业干旱与气象干旱常伴随发生, 而高温的加剧往

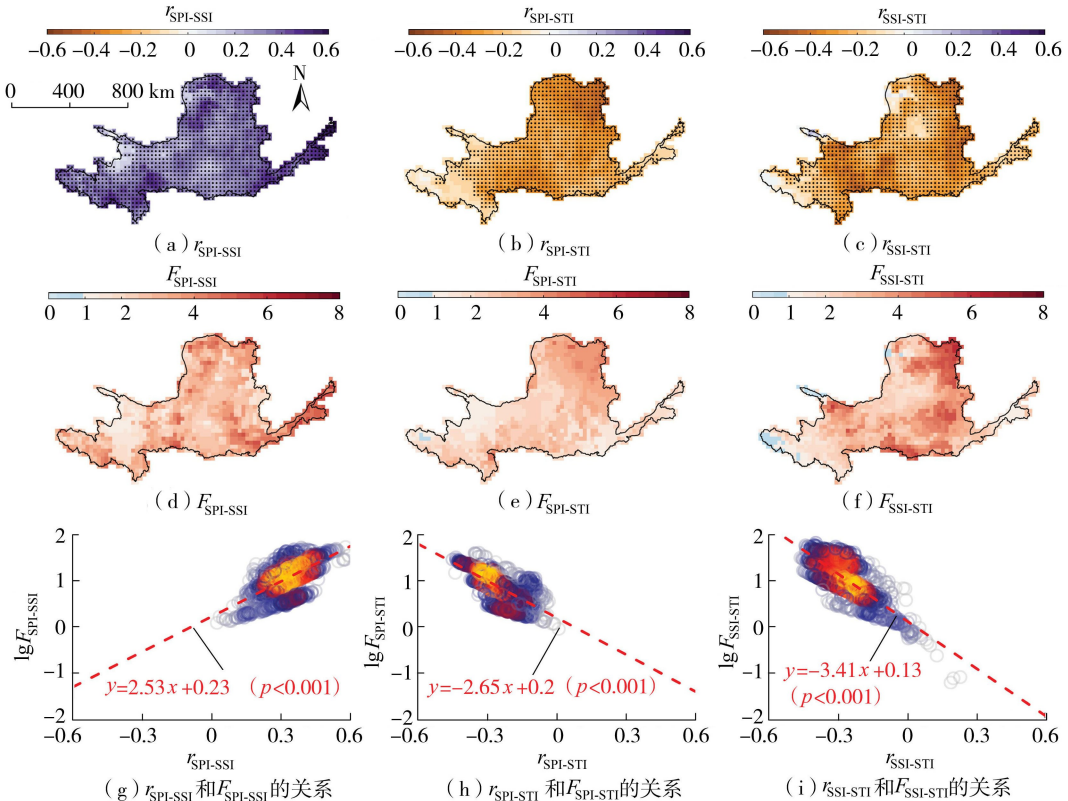


图 2 不同指数间的 Kendall 相关系数、PMF 及两者之间的关系

Fig. 2 Kendall correlation coefficients and PMF between different indexes and their relationships

往伴随着气象干旱和农业干旱的恶化。在黄河流域源区小部分地区 $r_{SPI-STI}$ 和 $r_{SSI-STI}$ 未通过 $p < 0.1$ 显著性检验。这一现象可能与源区独特的水文气候特征有关,该地区较低的气温限制了蒸散发过程,可能削弱了高温对干旱的加剧作用^[42-43]。

黄河流域大部分区域气象干旱与农业干旱、气象干旱与高温、农业干旱与高温之间的 PMF 值均大于 1(图 2(d)~(f)), $F_{SPL-SSI}$ 、 $F_{SPL-STI}$ 、 $F_{SSI-STI}$ 在整个黄河流域的均值分别为 3.03、2.49 和 2.98。表明极端气象干旱、极端农业干旱与极端高温三者之间并非相互独立,两两之间伴随发生的可能性较大。此外,PMF 与气象干旱、高温和农业干旱三者之间的相关性具有很强的线性响应关系, $r_{SPL-SSI}$ 、 $r_{SPL-STI}$ 和 $r_{SSI-STI}$ 的绝对值越大,气象干旱与农业干旱、气象干旱与高温以及农业干旱与高温两两之间的耦合关系越强(图 2(g)~(i))。以上结果均表明气象干旱、高温和农业干旱三者之间具有紧密的耦合关系。

3.2 多变量复合事件联合发生概率及分区评价

如图 3 所示,在黄河流域大部分区域,轻度等级以上的农业干旱($Z \leq -0.5$)与不同等级气象干旱和/或高温同时出现的联合发生概率均明显大于 3 个事件单独发生的概率(图 3 中打点区域),表明农业干旱的发生风险与气象干旱和/或高温紧密关联。当不同等级气象干旱和高温与轻度等级以上农业干旱同时出现时,发生三变量“和事件”的热点区域主要位于黄河流域东部(图 3(a)~(d)),表明这些区域更易遭受“和事件”风险。此外,随着气象干旱和高温严重程度的加剧,三变量“和事件”的发生风险逐渐降低。例如, $P(Z \leq -0.5 \wedge X \leq -0.5 \wedge Y > 0.5)$ 和 $P(Z \leq -0.5 \wedge X \leq -1.3 \wedge Y > 1.3)$ 在

整个黄河流域的概率平均值分别为 0.090 和 0.018 (图 3(a)(c))。该现象主要是由于气象干旱和高温的严重程度等级越高,其对应的气象干旱和高温的发生风险越低,由此计算的三变量“和事件”联合发生概率越低,即为低概率高影响型的多变量复合事件。

由于干旱和高温并不总是同时发生,气象干旱或高温也可单独诱发农业干旱,即发生气象干旱/高温、农业干旱三变量“或事件”。与“和事件”的联合发生概率相比(图 3(a)~(d)),三变量“或事件”的联合发生概率明显增大(图 3(e)~(h)),这是因为“和事件”对各组合事件的要求比“或事件”更严格。例如, $P(Z \leq -0.5 \wedge X \leq -0.8 \wedge Y > 0.8)$ 和 $P(Z \leq -0.5 \wedge (X \leq -0.8 \vee Y > 0.8))$ 在整个黄河流域的概率平均值分别为 0.055 和 0.174 (图 3(b)(f))。随着气象干旱或高温的严重程度逐渐加剧,三变量“或事件”的联合发生概率逐渐降低(图 3(e)~(h))。除黄河流域源区外,轻度等级以上农业干旱与至少有一个不同等级气象干旱和高温同时发生的风险在黄河流域其他区域均较高(图 3(e)~(h))。这是因为相较于水量充沛的黄河流域东部地区,农业干旱对气象干旱或高温的响应关系在受水分限制的黄河流域源区可能不明显^[43],导致该地区发生“或事件”的风险小于其他地区。

三变量“和事件”在黄河流域上、中、下游的联合发生概率均明显小于“或事件”(图 4)。从上游到下游,轻度等级以上农业干旱与不同等级气象干旱和/或高温同时发生的风险逐渐增大。例如,对于“或事件”情形, $P(Z \leq -0.5 \wedge (X \leq -0.8 \vee Y > 0.8))$

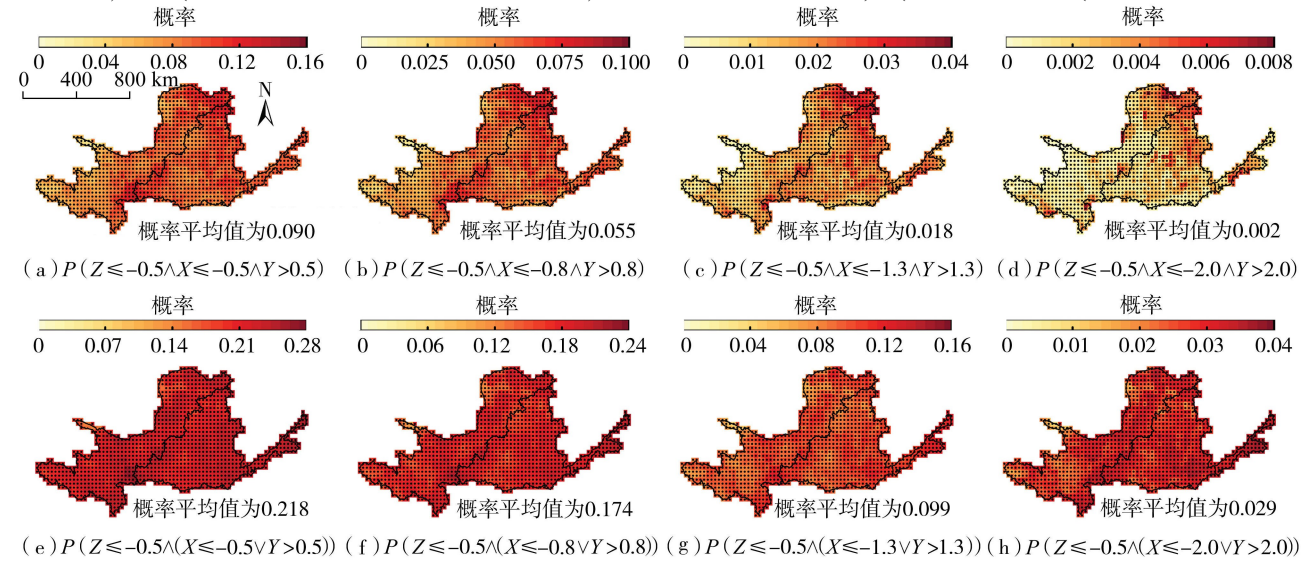


图 3 黄河流域三变量“和事件”和“或事件”的联合发生概率

Fig. 3 Joint occurrence probability of trivariate “AND events” and “OR events” in the Yellow River Basin

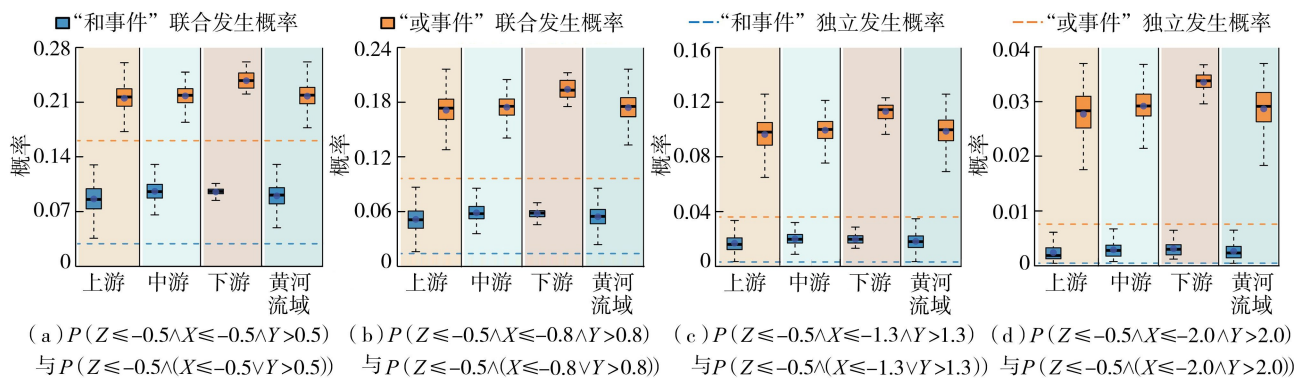


图4 黄河流域三变量“和事件”和“或事件”联合发生概率分区对比

Fig. 4 Comparisons of joint occurrence probability of trivariate “AND events” and “OR events” in different regions of the Yellow River Basin

0.8))在黄河流域上、中、下游的联合发生概率平均值分别为0.171、0.175和0.194(图4(b))。

3.3 多变量复合事件条件发生概率及分区评价

在不同等级气象干旱和高温同时发生(“和条件”)或至少有一个发生(“或条件”)的情形下,黄河流域东部轻度等级以上农业干旱的条件发生概率明显高于西部,表明共同发生的气象干旱和高温事件在黄河流域东部更易诱发农业干旱(图5)。在高温严重程度等级不变的条件下,通过比较轻度等级以上农业干旱的发生概率随气象干旱严重程度等级的变化情况,可以识别出农业干旱受气象干旱严重程度影响的热点区域。例如,在高温等级不变的条件下,通过比较图5(a)(b)或图5(e)(f),可以发现农业干旱的发生风险在黄河流域大部分区域随着气象干旱严重程度等级的加剧明显增大,其热点区域主要位于黄河流域的中游和下游地区。在气象干旱等级不变的条件下,通过比较图5(a)(c)或图5(e)(g),可以发现农业干旱的发生风险在黄河流域大部分区

域随着高温严重程度等级的加剧而明显增大,其热点区域主要位于黄河流域东部。

此外,轻度等级以上农业干旱的发生风险在黄河流域大部分区域随着气象干旱和/或高温严重程度等级的加剧而增大。例如: $P(Z \leq -0.5 | (X \leq -0.5 \wedge Y > 0.5))$ 和 $P(Z \leq -0.5 | (X \leq -1.3 \wedge Y > 1.3))$ 在整个黄河流域的概率平均值分别为0.615和0.748(图5(a)(d)); $P(Z \leq -0.5 | (X \leq -0.5 \vee Y > 0.5))$ 和 $P(Z \leq -0.5 | (X \leq -1.3 \vee Y > 1.3))$ 在整个黄河流域的平均值分别为0.464和0.585(图5(e)(h))。与某一等级气象干旱和高温同时出现条件下的农业干旱发生风险相比,某一等级气象干旱和高温至少有一个出现的条件下,发生轻度等级以上农业干旱的风险明显偏低(如图5(c)(g))。这主要是由于农业干旱的发生风险在气象干旱和高温同时出现的情形下明显大于气象干旱和高温至少有一个出现的情形。

在三变量“和条件”和“或条件”两种情形下,黄

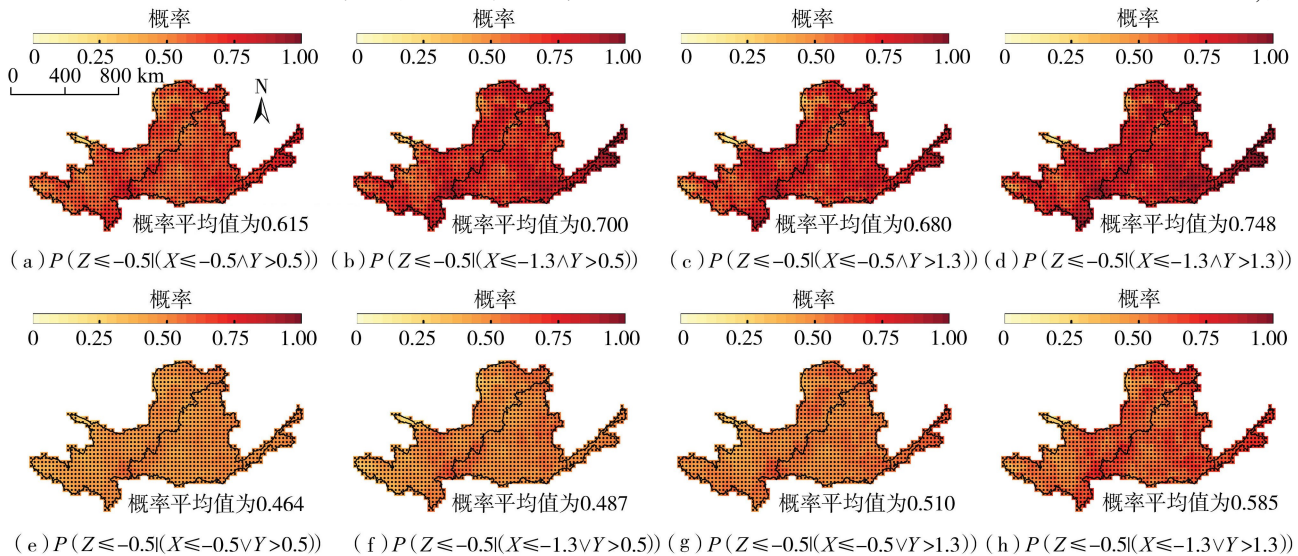


图5 黄河流域农业干旱的条件发生概率

Fig. 5 Conditional occurrence probability of agricultural droughts in the Yellow River Basin

河流域上、中、下游轻度等级以上农业干旱的条件发生概率均大于气象干旱和/或高温与农业干旱相互独立时的条件发生概率(图6)。与不同等级气象干旱和高温至少有一个发生时的情形相比,在不同等级气象干旱和高温同时出现的情形下,整个黄河流域及其上、中、下游轻度等级以上农业干旱的条件发生概率均较高。同样地,对于三变量“和条件”与“或条件”两种情形,从上游到下游,轻度等级以上农业干旱的条件发生概率均逐渐增大。例如,对于“和条件”情形, $P(Z \leq -0.5 | (X \leq -1.3 \wedge Y > 1.3))$ 在黄河流域上、中、下游的条件发生概率平均值分别为0.722、0.758和0.907(图6(d))。

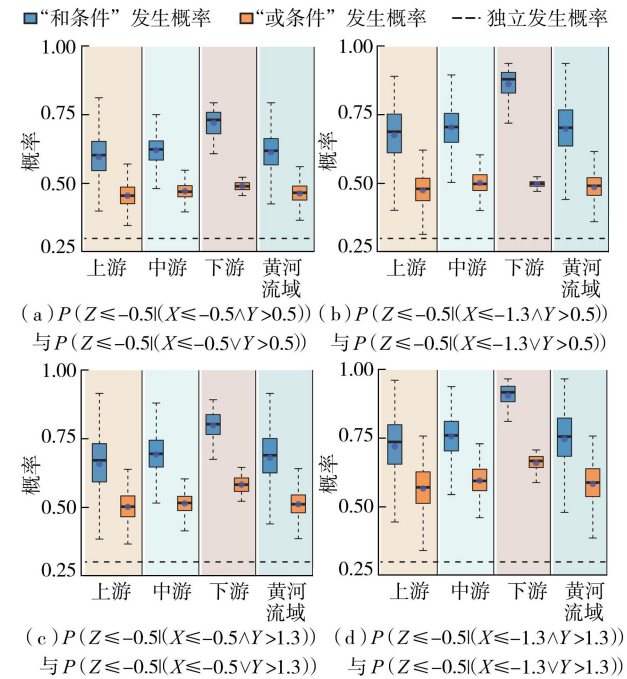


图6 黄河流域农业干旱条件发生概率分区对比

Fig. 6 Comparisons of conditional occurrence probability of agricultural droughts in different regions of the Yellow River Basin

3.4 讨论

传统缓慢发生干旱的持续时间可能较长(对应于季节尺度或更长的时间尺度),而高温持续时间可能较短(对应于候尺度或周尺度),因此,本文采用3月时间尺度标准化干旱和高温指数,是干旱和高温对应时间尺度的折中选择^[44]。后续研究可进一步在其他时间尺度和不同季节评估多变量复合事件的发生风险。

复合事件一般可分为4种类型,包括前期影响型复合事件、多变量型复合事件、时间关联型复合事件和空间关联型复合事件^[45]。考虑到复合事件在全球气候变暖背景下所表现出的新特征^[46-48],其他类型复合气候事件的发生风险也需要重点关注。例

如,世界多个粮食主产区同时遭受复合干旱高温事件(空间关联型复合事件)的影响,可能会加剧复合干旱高温事件对水资源管理和农业生产的不利影响^[49-50]。因此,未来研究需进一步厘清不同类型复合气候事件的发生机理和影响机制,以减轻其对全球关联系统的灾难性影响。

4 结论

a. PMF与气象干旱、高温和农业干旱三者之间的相关性具有很强的线性响应关系,且随着 $r_{SPI-SSI}$ 、 $r_{SPI-STI}$ 和 $r_{SSI-STI}$ 绝对值的增大,气象干旱、农业干旱和高温两两之间的耦合关系也更为紧密。

b. 黄河流域夏季发生三变量“和事件”风险较高的热点区域主要位于黄河流域中下游地区。相较于黄河流域西北部,东部区域发生三变量“和事件”和“或事件”的风险更高。与三变量“和事件”相比,黄河流域大部分区域发生“或事件”的风险更高。

c. 在不同等级气象干旱和高温同时发生的“和条件”或至少有一个发生的“或条件”情形下,黄河流域东部发生轻度等级以上农业干旱的风险明显高于西部,表明气象干旱和/或高温在黄河流域东部更易诱发农业干旱。与“和条件”相比,“或条件”情形下发生轻度等级以上农业干旱的概率明显偏小。

参考文献:

[1] 董蓉蓉, 粟晓玲, 屈艳萍, 等. 2022年长江流域不同类型干旱时空响应关系[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 61-70. (Dong Rongrong, Su Xiaoling, Qu Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 61-70. (in Chinese))

[2] 杨肖丽, 罗定, 叶周兵, 等. 基于SPI-RRV指数中国气象干旱及其风险时空演变特征研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 44-51. (Yang Xiaoli, Luo Ding, Ye Zhoubing, et al. Study on spatio-temporal evolution characteristics of meteorological drought and its risk in China based on SPI-RRV index[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 44-51. (in Chinese))

[3] 郑帅, 翁白莎, 严登华, 等. 基于水循环全过程的旱涝级联效应研究框架[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 60-70. (Zheng Shuai, Weng Baisha, Yan Denghua, et al. Research framework of drought-food cascade effect based on water cycle processes[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 60-70. (in Chinese))

[4] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, United Nations Office for Disaster Risk Reduction. The human cost of disasters: an overview of the last 20 years

- (2000-2019) [R]. Geneva:UNDRR,2020.
- [5] 王丹丹,潘东华,郭桂祯. 1978—2016 年全国分区农业气象灾害灾情趋势分析[J]. 灾害学,2018,33(2):114-121. (Wang Dandan, Pan Donghua, Guo Guizhen. Regional analysis of agro-meteorological disasters loss tendency variation from 1978 to 2016 in China[J]. Journal of Catastrophology,2018,33(2):114-121. (in Chinese))
- [6] Wu Haijiang, Su Xiaoling, Singh V P, et al. Agricultural drought prediction based on conditional distributions of vine Copulas [J]. Water Resources Research, 2021, 57 (8) : e2021WR029562.
- [7] Ribeiro A F S, Russo A, Gouveia C M, et al. Drought-related hot summers: a joint probability analysis in the Iberian Peninsula [J]. Weather and Climate Extremes, 2020,30:100279.
- [8] Schumacher D L, Keune J, Van Heerwaarden C C, et al. Amplification of mega-heatwaves through heat torrents fuelled by upwind drought[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(9) :712-717.
- [9] Zhou Sha, Williams A P, Berg A M, et al. Land-atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(38) :18848-18853.
- [10] 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.
- [11] Zscheischler J, Martius O, Westra S, et al. A typology of compound weather and climate events[J]. Nature Reviews Earth & Environment,2020,1(7) :333-347.
- [12] Zscheischler J, Seneviratne S I. Dependence of drivers affects risks associated with compound events[J]. Science Advances,2017,3(6) :e1700263.
- [13] 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))
- [14] 袁星,马凤,李华,等. 全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J]. 大气科学学报,2020,43(1) :225-237. (Yuan Xing, Ma Feng, Li Hua, et al. A review on multi-scale drought processes and prediction under global change[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1) :225-237. (in Chinese))
- [15] Wu Haijiang, Su Xiaoling, Singh V P, et al. Predicting compound agricultural drought and hot events using a cascade modeling framework combining Bayesian model averaging ensemble with Vine Copula (CaMBMAViC) [J]. Journal of Hydrology,2024,642:131901.
- [16] Aas K, Czado C, Frigessi A, et al. Pair-copula constructions of multiple dependence [J]. Insurance: Mathematics and Economics,2009,44(2) :182-198.
- [17] Bedford T, Cooke R M. Vines: a new graphical model for dependent random variables[J]. The Annals of Statistics, 2002,30(4) :1031-1068.
- [18] Wang Wenzhuo, Dong Zengchuan, Lall U, et al. Monthly streamflow simulation for the headwater catchment of the Yellow River Basin with a hybrid statistical-dynamical model[J]. Water Resources Research,2019,55(9) :7606-7621.
- [19] Xiong Lihua, Yu Kunxia, Gottschalk L. Estimation of the distribution of annual runoff from climatic variables using copulas [J]. Water Resources Research, 2014, 50 (9) : 7134-7152.
- [20] Cheng Linyin, Hoerling M, Liu Zhiyong, et al. Physical understanding of human-induced changes in U. S. hot droughts using equilibrium climate simulations[J]. Journal of Climate,2019,32(14) :4431-4443.
- [21] Hao Zengchao, Hao Fanghua, Singh V P, et al. A multivariate approach for statistical assessments of compound extremes[J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 87-94.
- [22] Zhu Ye, Liu Yi, Wang Wen, et al. A global perspective on the probability of propagation of drought: from meteorological to soil moisture [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603:126907.
- [23] 张更喜,王慧敏,粟晓玲,等. 复合干热胁迫下黄土高原夏季植被脆弱性评估 [J]. 农业工程学报,2024,40(6) : 339-346. (Zhang Gengxi, Wang Huimin, Su Xiaoling, et al. Assessing the vegetation vulnerability of Loess Plateau under compound dry and hot climates [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40 (6) : 339-346. (in Chinese))
- [24] 杜鸿,曾思栋,韦晓福,等. 嘉陵江流域气象干旱向水文干旱传播特征研究 [J]. 水资源保护,2025,41(3) :134-143. (Du Hong, Zeng Sidong, Wei Xiaofu, et al. Study on propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought in the Jialing River Basin [J]. Water Resources Protection,2025,41(3) :134-143. (in Chinese))
- [25] 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))
- [26] 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)
- [27] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1) : 109.
- [28] Kumar S, Dewes C F, Newman M, et al. Robust changes in North America's hydroclimate variability and predictability [J]. *Earth's Future*, 2023, 11(4) : e2022EF003239.
- [29] Wang Yumiao, Yuan Xing. Anthropogenic speeding up of South China flash droughts as exemplified by the 2019 summer-autumn transition season [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(9) : e2020GL091901.
- [30] Gringorten I I. A plotting rule for extreme probability paper [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(3) : 813-814.
- [31] Svoboda M, LeComte D, Hayes M, et al. The drought monitor [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8) : 1181-1190.
- [32] Zhou Sha, Zhang Yao, Williams A P, et al. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events [J]. *Science Advances*, 2019, 5(1) : eaau5740.
- [33] Wu Haijiang, Su Xiaoling, Singh V P, et al. Compound climate extremes over the globe during 1951-2021: changes in risk and driving factors [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 627 : 130387.
- [34] Aghakouchak A, Chiang F, Huning L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2020, 48(1) : 519-548.
- [35] Hao Zengchao, Hao Fanghua, Xia Youlong, et al. Compound droughts and hot extremes: characteristics, drivers, changes, and impacts [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 235 : 104241.
- [36] Yin Jiabo, Gentile P, Slater L, et al. Future socio-ecosystem productivity threatened by compound drought-heatwave events [J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6(3) : 259-272.
- [37] Dißmann J, Brechmann E C, Czado C, et al. Selecting and estimating regular vine copulae and application to financial returns [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2013, 59 : 52-69.
- [38] Aas K, Berg D. Models for construction of multivariate dependence: a comparison study [J]. *The European Journal of Finance*, 2009, 15(7/8) : 639-659.
- [39] Kao S C, Govindaraju R S. A copula-based joint deficit index for droughts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(1/2) : 121-134.
- [40] Nelsen R B. *An introduction to copulas* [M]. 2nd ed. New York : Springer, 2006.
- [41] Wang Wenzhuo, Dong Zengchuan, Zhang Tianyan, et al. Mixed D-vine copula-based conditional quantile model for stochastic monthly streamflow simulation [J]. *Water Science and Engineering*, 2024, 17(1) : 13-20.
- [42] 吴海江, 粟晓玲, 祁继霞, 等. Vine Copula 与贝叶斯模型平均结合的月径流预测及应用 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(24) : 73-82. (Wu Haijiang, Su Xiaoling, Qi Jixia, et al. Prediction and application of monthly streamflow based on Vine Copula coupled Bayesian model averaging [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(24) : 73-82. (in Chinese))
- [43] Qian Tanrui, Su Xiaoling, Wu Haijiang, et al. An agricultural drought early warning threshold model with considering copula combined with diminishing marginal benefit theory: a case study in the Yellow River basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 316 : 109582.
- [44] Bevacqua E, Zappa G, Lehner F, et al. Precipitation trends determine future occurrences of compound hot-dry events [J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(4) : 350-355.
- [45] IPCC. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation* [R]. Cambridge : Cambridge University Press, 2012.
- [46] Wu Haijiang, Su Xiaoling, Singh V P. Increasing risks of future compound climate extremes with warming over global land masses [J]. *Earth's Future*, 2023, 11(9) : e2022EF003466.
- [47] Zhang Qin, She Dunxian, Zhang Liping, et al. High sensitivity of compound drought and heatwave events to global warming in the future [J]. *Earth's Future*, 2022, 10(11) : e2022EF002833.
- [48] Xu Zongxue, Zhang Rui. Compound extreme events in YarlungZangbo River Basin from 1977 to 2018 [J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(1) : 36-44.
- [49] Gaupp F, Hall J, Hochrainer-Stigler S, et al. Changing risks of simultaneous global breadbasket failure [J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(1) : 54-57.
- [50] Zhou Sha, Yu Bofu, Zhang Yao. Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change [J]. *Science Advances*, 2023, 9(10) : eabo1638.

(收稿日期: 2025-08-06 编辑: 施业)