

长江和黄河流域枯水遭遇概率时空演变特征及未来趋势研究

阮俞理^{1,2}, 张建云^{1,2}, 宁忠瑞^{3,4}, 王妍^{1,2}, 王国庆^{1,2}, 刘翠善^{1,2}, 赵玮茹^{3,4}

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 2. 水利部应对气候变化研究中心;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院; 4. 河海大学水文水资源学院)

摘要:为揭示变化环境下长江和黄河流域不同区域枯水遭遇对国家水网工程的规划、设计与运行的影响,采用 Copula 函数、空间插值、冷热点分析、SWAT 模型等方法,分析了两流域枯水遭遇概率的时空演变特征并预测其未来趋势。结果表明:上游大金-兰州组合、雅江-兰州组合枯水遭遇概率以每 10 a 1.46%~1.57% 的速率显著上升,而大通-花园口组合以每 10 a 1.04% 的速率显著下降;大金站与雅江站的热点区域主要位于长江中上游与长三角地区,冷点区域位于黄河“几字弯”及长江两湖地区;兰州站与花园口站的热点区域位于黄河中游黄土高原以南,冷点区域集中于长江中下游;未来各站点组合枯水遭遇概率的多模式平均值均超过 20%,其中大金-兰州组合与大通-花园口组合呈先减小后增大的趋势,雅江-兰州组合呈线性增大趋势,黄家港-花园口组合呈先减小后缓升趋势。

关键词:枯水遭遇概率; Copula 函数; 冷热点分析; 长江流域; 黄河流域

Research on spatiotemporal variation characteristics and future trends of dry water encounter probability in the Yangtze River and Yellow River basins//Ruan Yuli^{1,2}, Zhang Jianyun^{1,2}, Ning Zhongrui^{3,4}, Wang Yan^{1,2}, Wang Guoqing^{1,2}, Liu Cuishan^{1,2}, Zhao Weiru^{3,4} (1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute*; 2. *Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources*; 3. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University*; 4. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*)

Abstract: To reveal the impact of dry water encounter in different regions of the Yangtze River and Yellow River basins on the planning, design, and operation of national water network projects under changing environments, methods such as Copula function, spatial interpolation, cold and hot spot analysis, and SWAT model were used to reveal the spatiotemporal variation characteristics of dry water encounter probability in the two basins and future trends were analyzed. The results showed that the dry water encounter probability in the upstream Dajin-Lanzhou combination and Yajiang-Lanzhou combination significantly increased at a rate of 1.46% to 1.57% per 10 a, while Datong-Huayuankou combination significantly decreased at a rate of 1.04% per 10 a. The hot spots of Dajin Station and Yajiang Station were mainly located in the upper and middle reaches of the Yangtze River and the Yangtze River Delta region, while the cold spots were located in the “Ji shaped” bend of the Yellow River and the “two lake” area of the Yangtze River. The hotspots of Lanzhou Station and Huayuankou Station were located in south of the Loess Plateau in the middle reaches of the Yellow River, while the cold spots were concentrated in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The multimodal average of dry water encounter probability in various station combinations in the future exceeds 20%. Among them, the Dajin-Lanzhou combination and Datong-Huayuankou combination showed a trend of first decreasing and then increasing, the Yajiang-Lanzhou combination showed a linear increasing trend, and the Huangjiagang-Huayuankou combination showed a trend of first decreasing and then slowly increasing.

Key words: dry water encounter probability; Copula function; cold and hot spot analysis; the Yangtze River Basin; the Yellow River Basin

在全球气候变化和强烈人类活动背景下,极端水文事件的不确定性增加^[1],干旱和枯水事件在多个空间和时间维度上更频繁地发生^[2-4],进一步增加了水资源管理的不确定性^[5-7],致使流域的水资源日益紧张^[8],对农业、工业及居民生活造成了深远影响^[9-10]。尤其在多个流域同时遭遇枯水期时,其潜

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y524007)

作者简介:阮俞理(1992—),男,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:ylruan@nhri.cn

通信作者:刘翠善(1981—),女,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:csliu@nhri.cn

在的威胁通常会比单一流域的枯水情况更为严重。特别地,这种多流域同步枯水现象对南水北调等重大调水工程构成严峻挑战,即当水源区与受水区同期遭遇枯水时,不仅会削弱工程调水能力,更可能导致区域水资源危机连锁反应。因此,多个区域同时发生枯水的概率分析成为水资源研究领域的重要课题。

枯水遭遇常用的研究方法有统计法、Moran 法、FEI 法、Copula 函数等^[11-13]。其中 Copula 函数因可以灵活选择边缘分布函数且分析结果精度较高,近年来逐渐成为主流方法^[14]。吴茂琳等^[15]利用 Copula 函数探究了陕北-关中-陕南区域的枯水遭遇对水网布局的潜在影响,发现同枯情景可能加剧区域水资源压力。刘为锋等^[16]基于滑动相关系数和 Copula 函数分析了南水北调东线工程水源区大通站和洪泽湖的径流同枯概率,结果显示大通站与洪泽湖全年、汛期和非汛期同时发生枯水的概率在 20% 以内。阮俞理等^[17]基于重构的长江和黄河流域上、中、下游不同区域 500 a 的降水资料,利用 Copula 函数分析了长江、黄河流域不同区域降水同枯遭遇概率,并探究了结果的不确定性。Ye 等^[18]采用基于 Copula 函数的联合分布分析方法,量化了汉江与渭河流域水文丰枯遭遇的概率,证明了径流的丰枯遭遇概率对调水系统具有显著的影响。Lu 等^[19]以长江、黄河流域为对象,基于表征气象干湿的标准降水指数(SPI)与表征水文干湿的标准径流指数(SRI),采用 Copula 函数构建了二维联合分布模型,定量解析了 9 种组合事件的丰枯遭遇联合概率,深入剖析了枯水遭遇情景的影响效应。

尽管当前枯水遭遇概率研究已取得一定进展,但仍存在以下关键科学问题亟待解决:①现有研究多局限于静态概率评估,对大型流域间枯水遭遇的时空动态演变机制认识不足;特别是缺乏对气候变化背景下枯水遭遇时空异质性规律的解析,难以揭示其长期演变特征,制约了水资源系统的动态风险管理。②当前气候模型的快速发展为预测未来气候变化情景下的降雨径流过程提供了有效途径,但针对未来不同大型流域间枯水遭遇概率动态演变的研究较为匮乏,缺乏系统性分析且未能深入分析不同气候模式带来的结果不确定性。③气候模式与水文模型的耦合机制尚不完善,特别是对极端枯水事件的模拟精度不足。这些不足导致对未来枯水遭遇概率的预测结果存在较大偏差,难以支撑气候变化背景下跨流域水资源协同管理的决策需求。因此,开展对大型流域枯水遭遇时空变化特征的研究,结合气候模型和流域水文模型预测其未来趋势,对于提高水资源管理的科学性和有效性具有重要意义。

南水北调工程是国家水网主骨架和大动脉的重要组成部分,而长江和黄河是国家水网工程的主网,长江流域是南水北调工程的水源区,黄河流域则是南水北调工程的重要受水区,长江和黄河两大流域的枯水遭遇特征对南水北调工程具有重要的科学意义。因此,本文拟探讨长江和黄河流域枯水遭遇概率的时空变化特征及其未来趋势,以期为实现区域水资源的可持续管理与利用提供重要的科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江全长 6 300 km,流域面积 180 万 km²;黄河全长 5 464 km,流域面积 79.5 万 km²。长江和黄河流域是我国最重要的两大流域系统,横跨多个气候带,降水时空分布差异显著。长江流域年均降水量为 800~1600 mm,水资源总量占全国 36%;黄河流域年均降水量为 200~650 mm,属典型资源性缺水区域^[20-21]。受全球升温的影响,近年来长江流域遭受了严重的干旱^[22-24]。在自然和人类活动驱动的气候变化背景下,长江和黄河流域水循环因素之间的转换关系将变得更加复杂,这使得该地区的干旱和枯水风险充满了复杂性和不确定性^[25]。当两大流域发生枯水遭遇时,将严重影响南水北调等跨流域调水工程的运行效能。长江和黄河流域概况及水文气象站分布如图 1 所示。

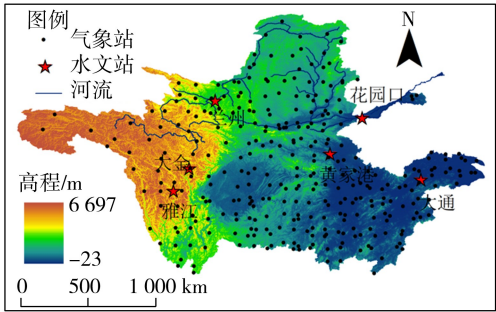


图 1 长江和黄河流域概况及水文气象站分布

Fig.1 Overview of the Yangtze River and Yellow River basins and distribution of hydro-meteorological stations

1.2 数据来源

本文在站点选择上严格遵循流域代表性、数据完整性和水文响应一致性原则,选取长江流域的大金站(上游)、雅江站(上游)、黄家港站(中游)、大通站(下游)以及黄河流域的兰州站(上游)和花园口站(下游)作为研究对象,这些水文站均具有 1963—2022 年连续完整的径流观测数据。选取长江和黄河流域 200 多个气象站降水、气温、蒸发连续时间序列数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。长江和黄河流域内水文模型运行所需数据包括数字高程模型(DEM)、土地利

用类型、土壤类型数据等。其中,DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 提供的 GDEM V2 数据产品;土地利用类型遥感数据来自武汉大学发布中国土地利用数据集 LUCD,其分辨率为 30m×30m;土壤类型数据由中国科学院资源环境科学与数据中心提供。未来气候变化数据选取 CMIP6 在历史时期(1985—2014 年)模拟中对中国区域气候特征模拟能力较好且来自不同建模中心涵盖多样化物理参数化方案的 10 个气候模式(表 1) 3 种气候情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5)的未来气候数据。其中,SSP1-2.6 代表低排放情景(2100 年辐射强迫为 2.6 W/m²),SSP2-4.5 代表中排放情景(4.5 W/m²),SSP5-8.5 代表高排放情景(8.5 W/m²)。

表 1 气候模式基本信息

Table 1 Basic information of climate models		
气候模式	网格数	所属国家
ACCESS-ESM1-5	192×144	澳大利亚
GFDL-ESM4	288×180	美国
GISS-E2-1-G	180×90	美国
INM-CM4-8	180×120	俄罗斯
MIROC-ES2L	180×90	日本
MPI-ESM1-2-LR	192×96	德国
MRI-ESM2-0	320×120	日本
NorESM2-LM	144×96	挪威
NorESM2-MM	144×96	挪威
TaiESM1	288×192	中国

研究基于以下原则选择长江和黄河流域的站点组合:①空间对应性原则,以流域为单元进行配对,构建长江上游-黄河上游与长江中下游-黄河中下游的跨流域组合,具体为大金/雅江-兰州(上游-上游)组合与黄家港/大通-花园口(中下游-中下游)组合,以保证比较在同一河段层级上进行,减少区域背景差异对丰枯遭遇信号的影响;②气候驱动一致性原则,优先选择受相似大尺度环流与天气系统影响的站点组合,使两流域在降雨、气温、蒸发等气候驱动上具有可比性,从而提升丰枯遭遇特征的可比性与可解释性基于空间对应性;③水资源管理需求导向原则,组合覆盖上、下游关键控制与代表断面,便于服务水资源调度、生态流量保障、水量分配与管理等管理目标,支撑跨流域协同管理与情景推演。采用频率分析法进行枯水等级的划分,参考王荣等^[26]的研究经验,当超越概率大于 62.5%时,降雨、径流等级定义为枯。

2 研究方法

2.1 枯水遭遇概率评估模型

枯水遭遇概率评估模型主要由 3 部分组成:边

缘分布优选、联合分布拟合以及枯水遭遇概率计算,以大金-兰州组合为例介绍计算步骤。

步骤 1 边缘分布优选。首先选取 15 种分布函数作为大金站径流和兰州站径流序列的候选边缘分布,包括:伽马 (gamma, GA) 分布、甘贝尔 (Gumbel, GU) 分布、逆高斯 (inverse Gaussian, IG) 分布、逻辑 (logistic, LO) 分布、对数正态 (logarithmic normal, LOGNO) 分布、正态 (normal, NO) 分布、反向甘贝尔 (reverse Gumbel, RG) 分布、韦布尔 (Weibull, WEI) 分布、二参数韦布尔 (two-parameter Weibull, WEI2) 分布、三参数韦布尔 (three-parameter Weibull, WEI3) 分布、广义伽马 (generalized gamma, GG) 分布、博克斯-考克斯-科尔-格林 (Box-Cox-Cole-Green, BCCG) 分布、广义逆高斯 (generalized inverse Gaussian, GIG) 分布、幂指数 (power-exponential, PE) 分布、t 族 (t-family, TF) 分布。采用全局偏差、赤池信息量准则 (AIC) 和贝叶斯信息准则 (SBC) 判断径流序列的最优边缘分布^[27]。

步骤 2 联合分布拟合优选。设大金站径流序列为 X , 兰州站径流序列为 Y , 采用 Copula 函数构造序列的联合概率, 表达式为:

$$F_{X,Y}(X,Y,\theta) = C[F_X(X,\theta_X), F_Y(Y,\theta_Y), \theta_c] \quad (1)$$

式中: $F_{X,Y}(\cdot)$ 为联合概率函数; θ 为联合概率参数; $F_X(X,\theta_X)$ 、 $F_Y(Y,\theta_Y)$ 为序列 X 、 Y 的边缘累积分布函数; θ_X 、 θ_Y 为边缘分布参数; $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; θ_c 为 Copula 参数。

综合考虑数据特征适配性、水文过程物理意义及模型稳健性需求,采用 Gaussian、Clayton、Gumbel、Frank 4 种 Copula 函数作为大金站径流序列和兰州站径流序列的备选联合分布函数,然后采用 AIC 和均方根误差 (RMSE) 作为评价指标进行 Copula 函数优选。

步骤 3 枯水遭遇概率计算。设 X_{pd} 、 Y_{pd} 分别为大金站径流序列 X 和兰州站径流序列 Y 的枯水阈值, u_{pd} 、 v_{pd} 分别为其对应的边缘分布函数值,则大金站与兰州站的枯水遭遇概率为:

$$P = (X < X_{pd}, Y < Y_{pd}) = C(u_{pd}, v_{pd}) \quad (2)$$

2.2 枯水遭遇概率时空演变特征分析方法

时空演变特征分析中,基于动态样本理论和趋势分析方法,分析各水文站组合枯水遭遇的时间变化趋势。考虑到站点径流数据不足以及降雨-径流丰枯特征的高度相关性,研究采用空间插值法^[28]和冷热点分析法^[29-30]揭示长江和黄河流域代表水文站径流与流域内降雨的枯水遭遇概率的空间变化规律,从而近似表征不同位置径流枯水遭遇的空间特征。

冷热点分析可以表征要素高值或者低值在空间上的聚集规律,通过计算 Getis-Ord G_i^* 统计来量化要素在空间上的具体特征。其中,冷点区指枯水遭遇概率显著偏低的区域,热点区指枯水遭遇概率显著偏高的区域。冷、热点区的划分主要基于统计显著性检验指标 $Z(G_i)$ 值实现,计算公式为:

$$Z(G_i) = \frac{G_i - E(G_i)}{\sqrt{V(G_i)}} \quad (3)$$

其中 $G_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j (\sum_{j=1}^n x_j)^{-1}$ 式中: G_i 为栅格 i 的局部相关性指数; w_{ij} 为空间权重; x_j 为栅格 j 的枯水遭遇概率; n 为栅格数; $E(G_i)$ 为 G_i 的数学期望, $V(G_i)$ 为 G_i 的方差。 $Z(G_i)$ 值越大聚类程度越高,反之聚类程度越低, $Z(G_i)$ 值接近于 0 则表示要素不存在明显的空间聚类。 $Z(G_i) > 2.58$ 表征 99% 置信度热点区, $1.96 < Z(G_i) \leq 2.58$ 表征 95% 置信度热点区, $1.65 < Z(G_i) \leq 1.96$ 表征 90% 置信度热点区; $Z(G_i) < -2.58$ 表征 99% 置信度冷点区, $-2.58 \leq Z(G_i) < -1.96$ 表征 95% 置信度冷点区, $-1.96 \leq Z(G_i) < -1.65$ 表征 90% 置信度冷点区。

2.3 未来径流预估方法

基于 CMIP6 经过降尺度及偏差校正后的 10 个气候模式下 3 种气候情景 (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5) 的未来气候数据,基于 DEM 数据、土地利用数据和土壤数据构建 SWAT 模型^[31],对长江和黄河流域径流过程进行模拟。模型采用 SCS 曲线数法计算产流, Penman-Monteith 方程计算蒸散发, Muskingum 法模拟河道汇流。通过 SWAT-CUP 的 SUFI-2 算法优化径流曲线数 (CN2)、土壤蒸发补偿系数 (ESCO)、基流退水系数 (ALPHA_BF) 等关键参数,经 1 000 次迭代完成率定。模型率定期为 1963—1990 年,验证期为 1991—2022 年,采用确定系数 (R^2)、纳什效率系数 (NSE)^[32] 作为模型的评价指标。

3 结果与分析

3.1 长江和黄河流域枯水遭遇概率

根据边缘分布优选方法,对长江和黄河流域各站点径流序列的边缘分布进行了优选,结果显示大金站的最优边缘分布为 NO 分布,雅江站、黄家港站和大通站的最优边缘分布为 IG 分布,黄河流域兰州站和花园口站径流序列最优边缘分布模型为 IG 分布。在此基础上,优选出长江和黄河流域站点组合的最优 Copula 函数。大金-兰州组合的最优 Copula 函数为 Gaussian Copula,相应的 AIC 和 RMSE 值分

别为 -1 012.75 和 0.013 1。雅江-兰州组合的最佳 Copula 函数也是 Gaussian Copula,相应的 AIC 和 RMSE 值分别为 -1 007.52 和 0.013 5。黄家港-花园口组合的最佳 Copula 函数为 Gumbel Copula,相应的 AIC 和 RMSE 值分别为 -968.77 和 0.018 7。大通-花园口组合的最佳 Copula 函数也是 Gumbel Copula,相应的 AIC 和 RMSE 值分别为 -985.66 和 0.015 8。从 AIC 和 RMSE 值来看,优选的 Copula 函数可以有效拟合站点组合的联合分布,且对位于流域上游区域的站点组合拟合效果优于中下游,这可能与中下游受人类活动影响较上游区域更大有关。

在跨流域调水工程中,最不利的情况是枯-枯遭遇,表明水源区和受水区都存在水资源短缺。大金-兰州组合和雅江-兰州组合的枯-枯遭遇概率表征长江和黄河流域上游区同时遇到枯水的风险;黄家港-花园口组合和大通-花园口组合的枯-枯遭遇概率表征长江和黄河流域中下游区域同时遇到枯水的风险。长江和黄河流域站点组合枯水遭遇概率结果表明,大金-兰州组合的枯-枯遭遇概率、丰-丰遭遇概率均为 21.54%,径流同步概率(枯-枯、平-平、丰-丰)(50.17%)略高于异步概率(49.83%);雅江-兰州组合的枯-枯遭遇概率为 16.16%,略高于丰-丰遭遇概率(15.69%),同步概率(38.27%)低于异步概率(61.73%);黄家港-花园口组合的枯-枯遭遇概率为 24.11%,略低于丰-丰遭遇概率(25.58%),其径流同步概率(58.29%)高于异步概率(41.71%);大通-花园口组合的枯-枯遭遇概率为 15.38%,仅次于丰-丰遭遇概率(16.08%),同步概率(37.82%)低于异步概率(62.18%)。

3.2 长江和黄河流域枯水遭遇概率时间演变趋势

基于 1963—1992 年的样本长度,分析 62.5% 枯水遭遇概率随着样本长度增加的变化,以反映枯水遭遇概率的时间演变,结果如图 2 所示。由图 2 可见,大金-兰州、雅江-兰州以及黄家港-花园口组合的枯水遭遇概率呈现增加的趋势,其增加速率分别为每 10a 1.57%、1.46%、0.947%,而大通-花园口组合则以每 10a 1.04% 的速率呈现减少的趋势。随着样本长度的增加,各站点组合的最大枯水遭遇概率范围为 0.167 3~0.248 6,最小枯水遭遇概率范围为 0.125 2~0.220 1。表 2 为长江和黄河流域站点组合径流枯水遭遇概率特征值及趋势检验结果。从平均值看,黄家港-花园口组合的枯水遭遇概率最大(0.235 1),而雅江-兰州组合的枯水遭遇概率最小(0.149 7)。从趋势检验结果看,大金-兰州、雅江-兰州以及黄家港-花园口组合枯水遭遇概率呈现显著上升趋势,而大通-花园口组合枯水遭遇概率呈显著

下降趋势。

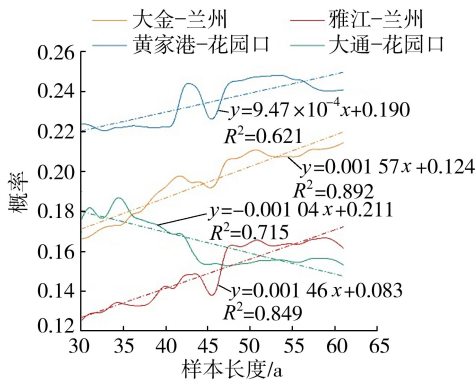


图 2 长江和黄河流域站点组合径流枯水遭遇概率随样本长度的变化

Fig. 2 Variation of dry water encounter probability of station combination runoff with sample length in the Yangtze River and Yellow River basins

表 2 长江和黄河流域站点组合径流枯水遭遇概率特征值及趋势检验结果

Table 2 Characteristic values and trend test results of dry water encounter probability of station combination runoff in the Yangtze River and Yellow River basins

站点组合	最大值	最小值	均值	趋势检验统计值	趋势检验结果
大金-兰州	0.2146	0.1663	0.1955	3.89	显著上升
雅江-兰州	0.1673	0.1252	0.1497	2.35	显著上升
黄家港-花园口	0.2486	0.2211	0.2351	5.82	显著上升
大通-花园口	0.1879	0.1526	0.1639	-9.86	显著下降

3.3 长江和黄河流域枯水遭遇概率空间分异特征

图 3 为长江和黄河流域代表水文站径流与流域内降雨的枯水遭遇概率空间分布。由图 3 可见,长江流域大金站、雅江站、黄家港站、大通站径流与长

枯水遭遇概率 0~0.12 >0.12~0.16 >0.16~0.20 >0.20~0.24 >0.24~0.26 >0.26~0.28

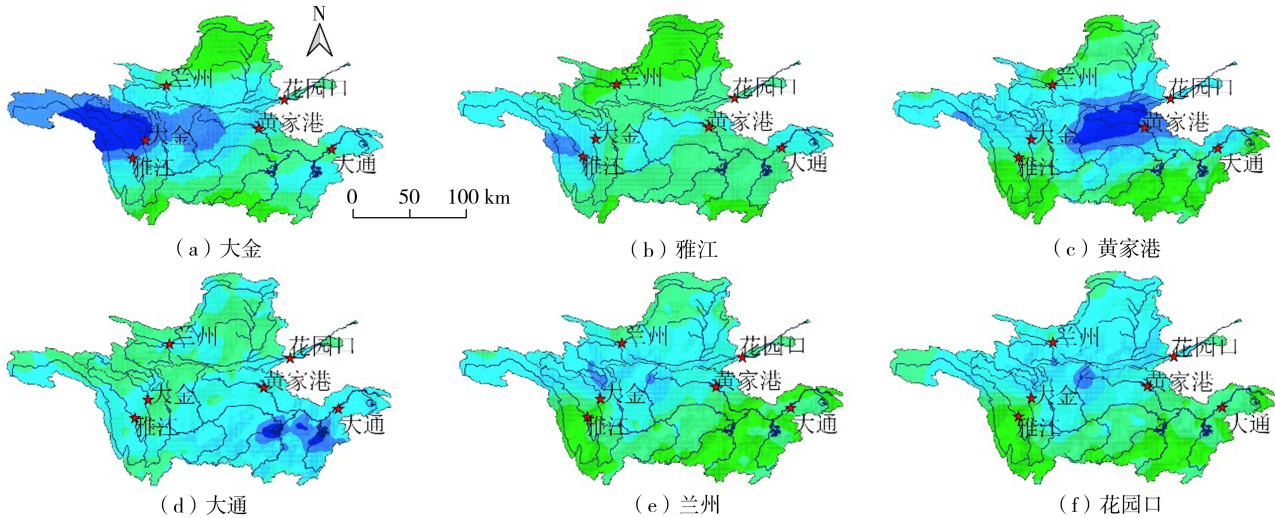


图 3 长江和黄河流域代表水文站径流与流域内降雨的枯水遭遇概率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of dry water encounter probability between representative hydrological station runoff and watershed precipitation in the Yangtze River and Yellow River basins

江和黄河流域的各气象站降水量序列之间的枯水遭遇概率在黄河流域内总体呈现由南向北递减的规律。枯水遭遇概率最大值主要出现在上游附近区域,而最小值主要出现在南北部边缘地带。黄河流域兰州站、花园口站与长江和黄河流域的各气象站降水量序列之间的枯水遭遇概率在长江流域内总体呈现由南向北递增的规律。兰州站枯水遭遇概率最大值出现在站点附近区域,花园口站枯水遭遇概率最大值主要出现在离站点较远的上游区域,这可能与黄河流域人类活动的差异有关。

图 4 为长江和黄河流域代表水文站径流与流域内降雨的枯水遭遇概率冷热点分析结果,图中热点表示枯水遭遇概率高值聚集,冷点表示枯水遭遇概率低值聚集。由图 4 可见,大金站热点主要分布在长江黄河源区、长江流域的汉江水系和嘉陵江水系区域,冷点分布在黄土高原北部黄河“几字弯”区域以及长江两湖(鄱阳湖和洞庭湖)地区。雅江站热点主要分布在长江上游、嘉陵江水系和长三角地区,冷点分布在黄土高原和长江两湖地区。黄家港站热点主要分布在长江流域的汉江水系和嘉陵江水系区域以及黄河中下游,冷点则分布在长江两湖地区和南部边缘地区。大通站热点主要分布在长江流域中下游及两湖地区,而冷点分布在整个黄河流域以及长江上游。兰州和花园口站的热点主要分布在黄河中游黄土高原中南部以及长江流域北部边缘地区,冷点分布在长江中下游。

3.4 长江和黄河流域枯水遭遇概率未来趋势预测

采用长江和黄河流域代表水文站逐月径流数据对 SWAT 模型进行率定和验证,结果表明长江和黄

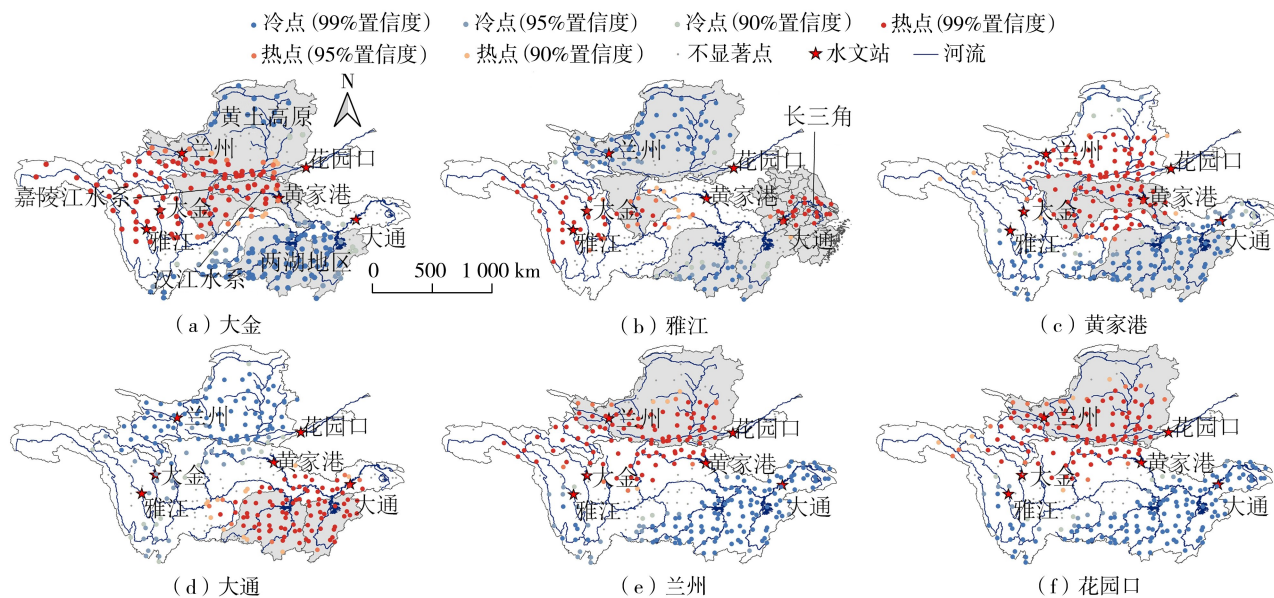


图 4 长江和黄河流域代表水文站径流与流域内降雨的枯水遭遇概率冷热点分析结果

Fig. 4 Analysis results of cold and hot spots of dry water encounter probability between representative hydrological station runoff and watershed precipitation in the Yangtze River and Yellow River basins

河流域代表水文站在全时段的 $R^2 > 0.65$, NSE 大于 0.60。除黄家港站模拟效果较差以外,其他站点 $R^2 > 0.83$, NSE 大于 0.81。总体而言,构建的 SWAT 模型适用于长江和黄河流域的径流模拟。将不同气候情景的数据输入率定后的 SWAT 模型,模拟得到代表水文站未来的径流过程,进一步采用枯水遭遇概率评估模型预测各站点组合的枯水遭遇概率。图 5 为长江和黄河流域各站点组合径流枯水遭遇概率在历史时期 (1985—2014 年) 及未来不同气候情景下的变化趋势。整体而言,所有站点组合的枯水遭遇概率在未来都表现出明显的变化趋势,有不同程度的上升或下降。对比不同的气候情景,SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景下大金-兰州以及大通-花园口组合的枯水遭遇概率呈先减小后增大的趋势,起涨时间点分别为 2030 年和 2040 年左右,雅江-兰州组合的枯水遭遇概率呈类线性增加的趋势,而黄家港-花园口组合的枯水遭遇概率呈先下降后

缓升的趋势,缓升时间点为 2080 年左右。总体而言,SSP5-8.5 情景枯水遭遇概率大于 SSP1-2.6 情景,SSP2-4.5 情景的枯水遭遇概率最小。

图 6 为长江和黄河流域各站点组合径流在不同气候情景下的枯水遭遇概率在 2015—2100 年的预测结果。由图 6 可见,2015—2100 年大金-兰州组合在 SSP5-8.5 情景下枯水遭遇概率最大,多模式平均值为 0.2483,其次是 SSP1-2.6 情景,最后是 SSP2-4.5 情景;就不确定而言,SSP2-4.5 情景的不确定性较大,最大枯水遭遇概率和最小枯水遭遇概率值相差 0.1090。雅江-兰州组合在 SSP5-8.5 情景下的枯水遭遇概率最大,多模式平均值为 0.2202,其次是 SSP1-2.6 情景,最后是 SSP2-4.5 情景;就不确定而言,SSP2-4.5 情景的不确定性较大,最大枯水遭遇概率和最小枯水遭遇概率值相差 0.1397。黄家港-花园口组合在 SSP5-8.5 情景下的枯水遭遇概率最大,多模式平均值为 0.2172,其次是 SSP1-2.6 情

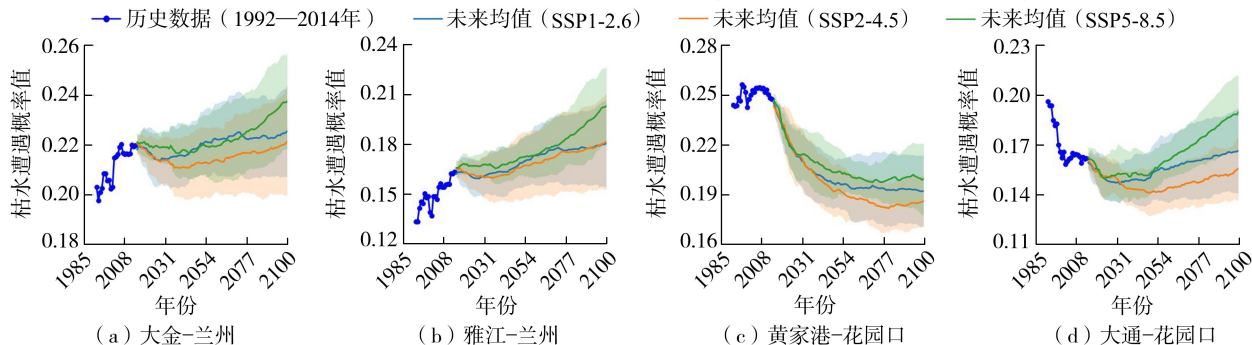


图 5 长江和黄河流域各站点组合径流枯水遭遇概率在历史时期及未来不同气候情景下的变化趋势

Fig. 5 Changing trend of dry water encounter probability of various station combination runoff in the Yangtze River and Yellow River basins in historical period and under different climate scenarios in future

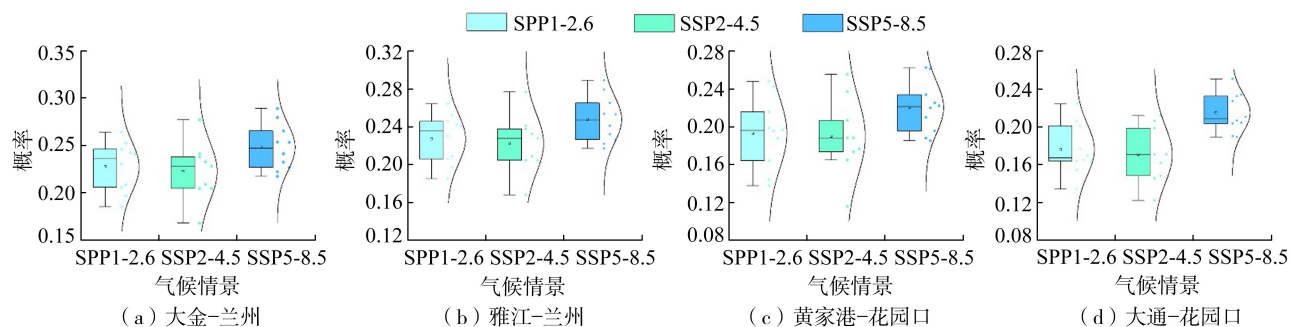


图 6 长江和黄河流域各站点组合径流在不同气候情景下的枯水遭遇概率预测结果

Fig. 6 Forecast results of dry water encounter probability of various station combination runoff in the Yangtze River and Yellow River basins

景,最后是 SSP2-4.5 情景;就不确定性而言,SSP1-2.6 情景的不确定性较大,最大枯水遭遇概率和最小枯水遭遇概率值相差 0.078 7。大通-花园口组合在 SSP5-8.5 情景下的枯水遭遇概率最大,多模式平均值为 0.2140,其次是 SSP1-2.6 情景,最后是 SSP2-4.5 情景;就不确定性而言,SSP1-2.6、SSP2-4.5 情景的不确定性较大,最大枯水遭遇概率和最小枯水遭遇概率值均相差 0.09。

3.5 讨论

本文对长江和黄河流域的枯水遭遇概率进行了深入分析,揭示了气候变化对水资源的潜在影响。首先,枯水遭遇概率的上升趋势与气候变化密切相关。气温的升高、降水模式的变化以及极端气候事件的频发都在加剧干旱的发生,使得流域内的水资源供需不平衡,这与马明卫等^[9]在特大干旱事件的影响研究中提到的现象相符。其次,枯水遭遇概率在不同地区的空间分布呈现明显的冷热点差异的聚集特征,这可能与地域气候、地形和土地利用等多种因素有关。因此,具体的管理措施需要结合各地实际情况,制定差异化的政策与应对方案。针对长江和黄河流域枯水遭遇热点的区域(如汉江/嘉陵江水系、黄河中游),建议实施生态流量预警与水库群联合调度,严格限制高耗水活动;对冷点区域(如长江两湖区、长江上游),应重点建设洪水资源化储备工程并发展节水农业。同时,通过数字孪生系统实现枯水预报,在秦岭-淮河过渡带布局战略水库群,形成“热点保底线,冷点调余缺”的协同管理格局。

对未来的研究表明,不同气候情景下长江和黄河流域的枯水概率表现出显著的差异性,尤其在 SSP5-8.5 情景下,水资源安全的风险明显增加。枯水概率在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 情景下相对较低,表明采取有效减排措施可以对水资源管理带来积极影响。然而,随着排放水平的提高,其枯水遭遇概率显著上升,特别是在 SSP5-8.5 情景下,中位数上升至接近 0.30。这一现象预示着持续的气候变化将对

流域水资源产生重大压力,可能会导致供水不足和生态系统退化。针对提高的枯水遭遇概率,建议实施有效的气候适应策略和水资源管理措施,以减轻潜在的影响。此外,加强对水文气候变化的监测,提前预警,从而提高应对能力。值得注意的是,枯水遭遇概率在未来各气候情景下的变化趋势(图 5)的阴影区域反映了预测模型的不同气候情景所带来的不确定性。这种不确定性随着时间逐渐加大,特别是在高排放情景下,这意味着对未来水资源状况的预测存在较大的变数,在制定水资源管理政策时应当有一定的灵活性,采用多气候情景分析提高政策的适应性。

4 结 论

a. 长江与黄河流域的枯水遭遇概率表现出明显的时空异质性。上游地区(包括大金-兰州、雅江-兰州组合)的枯水期遭遇概率以每 10 a 1.46%~1.57%的速率递增,而中下游地区(大通-花园口组合)则呈现出每 10 a 1.04%的递减趋势。

b. 在空间分布上,枯水期的热点区域主要集中在水系交汇地带,如汉江-嘉陵江流域和晋陕峡谷,而冷点区域则分布在长江两湖地区以及黄河“几字弯”区域。

c. 在 SSP5-8.5 高排放情景下,枯水遭遇风险将显著增加。大金-兰州组合和大通-花园口组合的枯水遭遇概率呈先减小后增大的趋势,预计分别在 2030 年和 2040 年开始上升;而雅江-兰州组合呈线性增大趋势;黄家港-花园口组合在初期减小后缓慢上升,缓升时间在 2080 年左右;长江和黄河流域在 SSP5-8.5 高排放情景下的枯水遭遇概率最大,中位数为 0.214~0.248;不同气候情景下枯水遭遇概率的不确定性存在显著差异,其中 SSP2-4.5 中排放情景的不确定性普遍较大。

参考文献:

[1] Yang Y H, Zhao R Y, Biswas A. Delineating dynamic

- hydrological response units to improve simulations of extreme runoff events in changing environments [J]. Journal of Hydrology, 2025, 656: 133000.
- [2] Bevacqua E, Rakovec O, Schumacher D L, et al. Direct and lagged climate change effects intensified the 2022 European drought[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(11): 1100-1107.
- [3] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 40-49. (Yang Xiaoli, Ma Huijun, Wu Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 40-49. (in Chinese))
- [4] 郑博福, 肖德利, 万炜, 等. 长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 18-28. (Zheng Bofu, Xiao Deli, Wan Wei, et al. Research progress on assessment indicators, spatiotemporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 18-28. (in Chinese))
- [5] 王云, 李文鑫, 张建云, 等. 长江上游流域水文干旱历史演变及未来预估[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 157-168. (Wang Yun, Li Wenxin, Zhang Jianyun, et al. Historical evolution and future prediction of hydrological droughts in the Upper Yangtze River Basin [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6): 157-168. (in Chinese))
- [6] 张丹, 梁瀚续, 何小聪, 等. 基于 CMIP6 的金沙江流域径流及水文干旱预估[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 53-62. (Zhang Dan, Liang Hanxu, He Xiaocong, et al. Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 53-62. (in Chinese))
- [7] Jiang Z, Johnson F, Sharma A. Do derived drought indices better characterize future drought change? [J]. Earth's Future, 2023, 11(7): e2022EF003350.
- [8] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8. (Wang Guoqing, Zhang Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))
- [9] 马明卫, 韩宇平, 严登华, 等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 11-21. (Ma Mingwei, Han Yuping, Yan Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 11-21. (in Chinese))
- [10] 王磊, 曾思栋, 阳林翰, 等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 39-45. (Wang Lei, Zeng Sidong, Yang Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 39-45. (in Chinese))
- [11] 戴昌军, 管光明, 孙浩, 等. 南水北调东线工程优势调水频率分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 100-102. (Dai Changjun, Guan Guangming, Sun Hao, et al. Advantaged frequency analysis of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 100-102. (in Chinese))
- [12] 费永法, 王德智, 邵善忠. 几种除涝水文计算方法的比较与分析[J]. 水利规划与设计, 2015(1): 24-25. (Fei Yongfa, Wang Dezhi, Shao Shanzong. Comparison and analysis of several hydrological calculation methods for waterlogging removal [J]. Water Resources Planning and Design, 2015(1): 24-25. (in Chinese))
- [13] 许才琳, 莫淑红, 张兰, 等. 基于 Copula 函数的嘉陵江流域水沙丰枯遭遇关系探究[J]. 中国农村水利水电, 2024(8): 120-127. (Xu Cailin, Mo Shuhong, Zhang Lan, et al. Exploration of water and sediment abundance encounter relationship in Jialing River basin based on copula function [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(8): 120-127. (in Chinese))
- [14] 罗煜宁, 张珂, 王宇昊, 等. 金沙江上游降雨-融雪径流模拟与洪水风险评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 93-100. (Luo Yuning, Zhang Ke, Wang Yuhao, et al. Simulation of rainfall-snowmelt runoff and flood risk assessment in upper reaches of the Jinsha River [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 93-100. (in Chinese))
- [15] 吴茂琳, 黄生志, 周伟, 等. 陕北-关中-陕南丰枯遭遇时空演变及其对水网布局的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 165-178. (Wu Maolin, Huang Shengzhi, Zhou Wei, et al. Spatiotemporal evolution of wet-dry encounters in Northern, Central, and Southern Shaanxi and their effects on water network layout [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 165-178. (in Chinese))
- [16] 刘为锋, 李云玲, 卢庆文, 等. 新形势下南水北调东线工程主要水源来水演变规律及适应性对策[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 165-172. (Liu Weifeng, Li Yunling, Lu Qingwen, et al. Runoff evolution patterns of major water sources and adaptive strategies for the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project under new situation [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 165-172. (in Chinese))
- [17] 阮俞理, 张建云, 王乐扬, 等. 长江和黄河流域降水丰枯遭遇及不确定性分析[J]. 水科学进展, 2024, 35(6): 865-876. (Ruan Yuli, Zhang Jianyun, Wang Yueyang, et al. Analysis of precipitation wetness-dryness encountering

- and its uncertainty in the Yangtze River and Yellow River basins[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(6): 865-876. (in Chinese))
- [18] Ye Xiangmin, Wang Yimin, Guo A J, et al. Optimal operation of inter basin water transfer under the form of water sources interconnection with connected tunnel[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 45: 101320.
- [19] Lu Jie, Qin Tianling, Yan Denghua, et al. Drought and wetness events encounter and cascade effect in the Yangtze River and Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 639: 131608.
- [20] 刘宁. 对长江流域防洪规划的认识[J]. *人民长江*, 2006, 37(9): 1-4. (Liu Ning. The understanding on the flood control plan of the Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2006, 37(9): 1-4. (in Chinese))
- [21] 王浩, 严登华, 秦大庸, 等. 近 50 年来黄河流域 400 mm 等雨量线空间变化研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 649-655. (Wang Hao, Yan Denghua, Qing Dayong, et al. A study of the spatial shift of 400 mm-rainfall contours in the Yellow River Basin during recent 50 years [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(6): 649-655. (in Chinese))
- [22] 袁星, 王钰森, 周诗琦, 等. 气候变化下 2022 年长江特大骤旱的多尺度成因分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(8): 2690-2702. (Yuan Xing, Wang Yumiao, Zhou Shiyu, et al. Multiscale causes of the 2022 Yangtze mega-flash drought under climate change [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2024, 54(8): 2690-2702. (in Chinese))
- [23] 熊立华, 李姝仪, 查悉尼. 基于多源数据的长江流域 1982—2022 年骤旱事件时空演变[J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 24-37. (Xiong Lihua, Li Shuyi, Zha Xini. Temporal and spatial evolution of flash drought events in the Yangtze River Basin from 1982 to 2022 based on multi-source data [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(1): 24-37. (in Chinese))
- [24] 许继军, 袁喆. 2022 年长江流域干旱特征分析与新时期抗旱减灾应对模式探讨[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4): 1-8. (Xu Jijun, Yuan Zhe. Drought characteristics of Changjiang River Basin in 2022 and drought mitigation response pattern under new circumstances [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(4): 1-8. (in Chinese))
- [25] 舒章康, 张建云, 金君良, 等. 1961—2018 年中国主要江河枯季径流演变特征与成因[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(3): 340-351. (Shu Zhangkang, Zhang Jianyun, Jin Junliang, et al. Evolution characters and causes of the dry season runoff for the major rivers in China during 1961-2018 [J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(3): 340-351. (in Chinese))
- [26] 王荣, 杜孝忠, 巢清尘, 等. 南水北调西线工程水源区和受水区降水变化及丰枯遭遇特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20(5): 571-580. (Wang Rong, Du Xiaozhong, Chao Qingchen, et al. Trends of precipitation and characteristics of wetness-dryness encountering in the Water Source and receiving areas of the West Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. *Climate Change Research*, 2024, 20(5): 571-580. (in Chinese))
- [27] 鲁帆, 江明, 蒋云钟, 等. 变化环境下海河流域天然河川径流丰枯概率演变规律[J]. *水科学进展*, 2023, 34(1): 12-20. (Lu Fan, Jiang Ming, Jiang Yunzhong, et al. Evolution law of wet and dry probability of natural river runoff in Haihe River basin under changing environment [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(1): 12-20. (in Chinese))
- [28] 王生鑫, 闫文晶, 张海涛, 等. 三种插值方法在降水等值线绘制中的对比分析[J]. *水文*, 2023, 43(4): 21-26. (Wang Shengxin, Yan Wenjing, Zhang Haitao, et al. Comparative analysis of three interpolation methods in precipitation contour drawing [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(4): 21-26. (in Chinese))
- [29] 王硕, 盛艳, 范淑花, 等. 基于 InVEST 模型的窟野河流域碳储量变化对土地利用格局的响应[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3): 149-158. (Wang Shuo, Sheng Yan, Fan Shuhua, et al. Response of carbon storage changes to land use pattern in Kuye River Basin based on InVEST model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3): 149-158. (in Chinese))
- [30] 戴睿, 闫岩, 周迎平, 等. 合肥都市圈地表温度时空变化及其驱动因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(5): 1073-1084. (Dai Rui, Yan Yan, Zhou Yingping, et al. Spatial-temporal Variation of land surface temperature and driving factors in Hefei metropolitan area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, 34(5): 1073-1084. (in Chinese))
- [31] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 9-17. (Li Fawen, Tao Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-04-18 编辑: 王芳)