

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. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.013

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. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.013

陕北-关中-陕南丰枯遭遇时空演变及其对水网布局的影响

吴茂琳¹, 黄生志¹, 周伟², 黄强¹

(1. 旱区水工程生态环境全国重点实验室 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省水利水电勘察设计研究院, 陕西 西安 710005)

摘要:【目的】变化环境下, 相邻区域丰枯遭遇关系可能发生显著变化, 这对区域调水工程的实施与运行带来深远影响。然而, 丰枯遭遇的时空演变特征及其对水网布局的潜在影响尚不清晰, 亟需开展深入研究。【方法】以陕西省陕北、关中和陕南三大区域为研究对象, 基于 Copula 函数构建二维联合分布模型, 量化丰枯遭遇组合事件的发生概率, 探讨动态变化的主要影响因子, 结合未来中等排放情景预测丰枯遭遇演变趋势, 并评估其对水网布局的潜在影响, 提出优化建议。【结果】结果显示: (1) 关中-陕南丰枯同步概率最高, 为 60.71%, 而陕北-陕南丰枯同步概率最低, 为 44.93%; 在调水方面, 关中-陕南、陕北-关中、陕北-陕南三个联合区有利于调水的概率均在 45% 左右; (2) 遥相关因子北极涛动对关中-陕北和陕北-陕南丰枯遭遇的变化具有主导作用, 其次为太平洋年代际振荡; (3) 在未来中等排放情景下, 关中-陕南和陕北-关中地区有利于调水的概率较现状分别提高了 7.31% 和 2.58%, 同枯的发生概率分别下降了 3.08% 和 1.32%。【结论】关中、陕北和陕南区域间的丰枯遭遇关系在变化环境下呈现显著时空差异; 未来中等排放情景下, 关中-陕南调水适宜性有所提升, 从陕南调水在一定程度上能够缓解关中的缺水情况; 同枯情景下可能加剧区域水资源压力, 为实现更高效的水资源配置, 应进一步加强陕南水源补充能力建设, 同时推动关中和陕北黄河引水、备用水源及战略储备设施的完善, 以适应未来气候变化带来的不确定性和挑战。

关键词: 丰枯遭遇; Copula 函数; CMIP6; 动态变化; 遥相关因子; 水网; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV125; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0165-14



收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-02-12; 录用日期: 2025-02-13; 网络出版日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279026)

作者简介: 吴茂琳(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 952592647@qq.com

通信作者: 黄生志(1988—), 男, 教授, 博士, 主要从事干旱形成及传播机理、水文预报、干旱风险评估等研究。E-mail: huangshengzhi7788@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Spatiotemporal evolution of wet-dry encounters in Northern, Central, and Southern Shaanxi and their effects on water network layout

WU Maolin¹, HUANG Shengzhi¹, ZHOU Wei², HUANG Qiang¹

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710005, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] In a changing environment, the wet-dry encounter relationships between adjacent regions may undergo significant changes, profoundly affecting the implementation and operation of regional water diversion projects. However, the spatiotemporal evolution characteristics of wet-dry encounters and their potential effects on water network layout remain unclear, necessitating in-depth research. [Methods] Taking the three major regions of Northern, Central, and Southern Shaanxi as the study areas, a two-dimensional joint distribution model was established based on the Copula function to quantify the occurrence probabilities of wet-dry encounter events. The main factors driving dynamic changes were investigated, and the future evolution trends of wet-dry encounters under a moderate emission scenario were projected. Furthermore, the potential effects on water network layout were assessed, and optimization recommendations were provided. [Results] The result showed that: (1) the probability of synchronous wet-dry encounters was highest between Central and Southern Shaanxi at 60.71%, while it was lowest between Northern and Southern Shaanxi at 44.93%. In terms of water diversion, the probability of favorable water diversion conditions in the three joint regions (Central-Southern Shaanxi, Northern-Central Shaanxi, and Northern-Southern Shaanxi) was approximately 45%. (2) The Arctic Oscillation was the dominant teleconnection factor driving the changes in wet-dry encounters between Central-Northern Shaanxi and Northern-Southern Shaanxi, followed by the Pacific Decadal Oscillation. (3) Under the future moderate emission scenario, the probability of favorable water diversion conditions in Central-Southern Shaanxi and Northern-Central Shaanxi was projected to increase by 7.31% and 2.58%, respectively, while the probability of simultaneous drought was expected to decrease by 3.08% and 1.32%, respectively. [Conclusion] Significant spatiotemporal variations are observed in the wet-dry encounter relationships among Central, Northern, and Southern Shaanxi under changing environmental conditions. Under the future moderate emission scenario, the suitability for water diversion from Southern to Central Shaanxi is expected to improve, which can help alleviate water shortages in Central Shaanxi to some extent. However, simultaneous drought conditions may exacerbate regional water resource pressure. To achieve more efficient water resource allocation, it is essential to strengthen water replenishment capacity in Southern Shaanxi while improving water diversion from the Yellow River, backup water sources, and strategic reserve facilities in Central and Northern Shaanxi to cope with the uncertainties and challenges posed by future climate change.

Keywords: wet-dry encounters; Copula function; CMIP6; dynamic changes; teleconnection factors; water network; influencing factors

0 引言

陕北、关中、陕南三大区域由于所处地区不同的气候环境和下垫面条件,造成不同区域间的产业结构和水资源供需存在显著差异。尤其是关中地区,随着经济社会的快速发展和人口持续增加,水资源匮乏问题日益突出^[1-2],在此背景下水网建设对调节不同地区水资源空间分布、缓解区域性水资源短缺具有重要作用^[3],即需要及时储存丰水,并在枯水时提供稳定供给。然而,在气候变化和人类活动的影响下,区域间丰枯遭遇可能会发现显著变化,从而对区域的水资源供给以及水网布局与运行产生影响^[4]。因此,需开展区域间丰枯遭遇的时空演变与驱动力分析研

究,进而深入探究其动态变化对水网布局的影响。

丰枯遭遇指的是在同一时间段内,可能出现丰水与枯水交替变化的组合情形,这种现象源于降水在时间与空间上的不均匀分布^[5-6]。随着非线性理论的发展,Copula函数法成为研究水文丰枯遭遇的新方法,常被用来解决多变量的联合分布问题^[7]。关于水文区的丰枯遭遇问题已有许多学者进行了研究,如谢华等^[8]通过引入Copula函数构建了三维联合概率分布模型,分析了长江、淮河与黄河流域的遭遇概率及其条件概率,并与多维转化为一维的方法进行对比,结果显示三维Copula方法在多个方面具有显著优势;王利朵等^[9]采用Copula方法建立了二维与三维联合分布模型,计算了黄河、鲁东南和鲁西北区域的丰枯

遭遇概率, 研究表明这三个区域在水文上存在一定的互补性, 为山东省水资源优化配置提供了理论支持; 关帅等^[10]基于珠江流域三个控制性水文站的径流数据, 利用 Copula 函数模型分析了其丰枯遭遇概率, 为珠江流域水量的统一调配提供了重要参考依据。

全球气候正呈现以变暖为特征的显著变化^[11], 这种变化导致了水文循环的加速, 进而使得水资源的时空分布更加不均匀^[12-13]。然而, 当前的研究主要集中在对历史长序列数据进行丰枯遭遇的分析, 而对未来丰枯遭遇的演变及其可能带来的风险尚未得到足够的关注。同时, 变化环境下丰枯遭遇的动态演变也将对现有水网布局产生一定影响, 而上述文献也尚未系统研究。鉴于此, 研究利用 Copula 函数构建陕北、关中、陕南不同区域间的二维联合分布模型, 计算得到并分析丰枯遭遇概率, 研究其随时间变化的特性及影响因子, 并对未来丰枯遭遇情况预估。以为陕西省水网布局提出调整 and 优化的建议, 为跨区域间调水运行提供数据支撑及参考依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

陕西省位于中国中部, 坐落于黄河中游地区, 其南部跨越了长江支流汉江流域以及嘉陵江上游的秦巴山区^[14], 介于 $105^{\circ} 29' E-111^{\circ} 15' E$, $31^{\circ} 42' N-39^{\circ} 35' N$, 总面积 20.6 万 km^2 。按照地理、文化差异, 陕西省通常被划分为陕北、关中和陕南三大区域: 陕北地区包括位于北部黄土高原、海拔较高的榆林市和延安市; 关中地区则涵盖了中部的宝鸡市、铜川市、咸阳市、西安市和渭南市; 而陕南地区则是指秦岭以南的汉中市、安康市和商洛市。陕西水资源总量不足, 时空分布不均、降水南多北少, 年平均降水量 $340\sim 1\,240\text{ mm}$ ^[15]。立足陕西省情、水情、地形和区域经济产业布局, 结合南北狭长的地理特点、江河水系的分布状况和水利基础设施布局, 陕西水网总体布局如图 1 所示。

1.2 数据来源

本文采集陕西省内及其周边 52 个气象站 1960—2020 年逐日气象资料(中国气象数据共享网 <https://data.cma.cn/>, 前期已对缺测 5% 以上的站点进行剔除)。利用 1960—2020 年的年太阳黑子数(<http://sidc.oma.be/silso/dayssplot>)、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)指数(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/nina34.data>)、北极涛动指数(AO)数据



图 1 陕西水网总体布局

Fig. 1 Overall layout of water network in Shaanxi

(<http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao.php>) 及太平洋年代际振荡(PDO)数据(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>)分析丰枯遭遇动态变化的主导因子。

未来降水数据采用降尺度后的 NEX-GDDP-CMIP6 数据集, NEX-GDDP 数据集中包括 21 个模式历史时段(1950—2014 年)和预测时段(2015—2100 年)的日降水数据, 分辨率为 0.25° ^[16-17]。根据已有研究^[18], 选用数据集 BCC-CSM2-MR 模式下的逐日降水数据, 其中包括 1960—2015 年的历史降水数据以及 SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景下 2021—2060 年的未来降水数据。

2 研究方法

2.1 Copula 函数

Copula 函数是一种定义在 $[0, 1]$ 区间内的连接函数, 主要用于描述变量之间的相关性, 能够有效处理复杂的多变量联合分布问题, 并已广泛应用于水文学研究^[19], 是目前解决不同区域间丰枯遭遇分析的

常用方法。构造形式为

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)) \quad (1)$$

式中, $H(x, y)$ 为联合分布函数; $F(x), G(y)$ 为边缘分布函数; C 为 Copula 函数。

常见的二元 Copula 函数有: Clayton-Copula、Frank-Copula、Gumbel-Copula、Gaussian-Copula 以及 t -Copula 函数^[20]。Copula 函数的参数一般是由 Kendall 系数和 Copula 参数之间的关系得到的, 其关系式如表 1 所列。采用 Copula 函数是为了建立陕北、关中、陕南区域间丰枯事件的联合分布模型, 量化区域丰枯遭遇的联合概率和动态特征。

2.2 丰枯遭遇概率

本研究根据流域降水量的距平值, 将其划分为丰水、平水和枯水三个等级。其中, 距平值小于 -10% 为枯水, 距平值介于 -10% 与 10% 之间为平水, 而距平值大于 10% 则为丰水^[21]。

(1) X 和 Y 同丰 (丰丰型): $P = (X > X_{pf}, Y > Y_{pf}) = 1 - u_{pf} - v_{pf} + C(u_{pf}, v_{pf})$

(2) X 和 Y 同平 (平平型): $P = (X_{pk} < X < X_{pf}, Y_{pk} < Y < Y_{pf}) = C(u_{pf}, v_{pf}) - C(u_{pk}, v_{pf}) - C(u_{pf}, v_{pk}) + C(u_{pk}, v_{pk})$

(3) X 和 Y 同枯 (枯枯型): $P = (X < X_{pk}, Y < Y_{pk}) = C(u_{pk}, v_{pk})$

(4) X 丰 Y 平 (丰平型): $P = (X > X_{pf}, Y_{pk} < Y < Y_{pf}) = v_{pf} - v_{pk} + C(u_{pf}, v_{pk}) - C(u_{pf}, v_{pf})$

(5) X 平 Y 丰 (平丰型): $P = (X_{pk} < X < X_{pf}, Y > Y_{pk}) = u_{pf} - v_{pk} + C(u_{pk}, v_{pf}) - C(u_{pf}, v_{pf})$

(6) X 枯 Y 丰 (枯丰型): $P = (X < X_{pk}, Y > Y_{pf}) = u_{pk} - C(u_{pk}, v_{pf})$

(7) X 丰 Y 枯 (丰枯型): $P = (X > X_{pf}, Y < Y_{pk}) = v_{pk} - C(u_{pf}, v_{pk})$

(8) X 平 Y 枯 (平枯型): $P = (X_{pk} < X < X_{pf}, Y < Y_{pk}) = C(u_{pf}, v_{pk}) - C(u_{pk}, v_{pk})$

(9) X 枯 Y 平 (枯平型): $P = (X_{pk} < X, Y_{pk} < Y < Y_{pf}) = C(u_{pk}, v_{pf}) - C(u_{pk}, v_{pk})$

表 1 Copula 参数关系式
Table 1 Copula parameter equations

Copula 函数	分布函数	参数范围	参数 θ 与 τ 的关系
Gumbel-Copula	$\exp\{-[-(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$	$\theta > 1$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}$
Frank-Copula	$-\frac{1}{\theta} \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\theta > 0$	$\tau = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$
Clayton-Copula	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\theta > 0$	$\tau = \frac{\theta}{\theta + 1}$

式中, 随机变量 X, Y 分别为水源区与受水区的降水序列 (以关中-陕南为例, 陕南为水源区, 其序列为 X ; 关中为受水区, 其序列为 Y); $u_{pf}, u_{pk}, v_{pf}, v_{pk}$ 分别为 $X_{pf}, X_{pk}, Y_{pf}, Y_{pk}$ 对应的边缘分布函数值, C 为 Copula 函数。

2.3 基于 Copula 的似然比率法

Copula 函数的极大似然比检验法可以反映充分整合两个变量之间二元依赖结构的变化。研究基于 Copula 的似然比率法构建出陕北、关中、陕南两两联合区降水量存在的相依关系, 假设 Copula 类型不变, 似然比率法通过测量给定的 Copula 参数变化情况进而检测水文系列相依结构的变化^[22]。

给定序列假设 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, 假设 $H_0: \theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_n = \eta_0, H_1: \text{存在 } \lambda^*, 1 \leq \lambda^* \leq n - 1, \text{使得 } \theta_1 = \theta_{\lambda^*} = \eta_1, \theta_{\lambda^*+1} = \dots = \theta_n = \eta_2, \text{且 } \eta_1 \neq \eta_2$ 。其中, $\theta_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 为 Copula 函数参数, n 为长序列样本的长度。

如果零假设被拒绝, 则会存在一个突变点 λ^* , 假设突变的位置已知时, 即 $\lambda^* = \lambda$, 基于极大似然估计方法的 Copula 似然比统计量的对数形式为

$$-2\ln(\Lambda_\lambda) = 2\{\ln[L_\lambda(\hat{\eta}_1)] + \ln[L_{n-\lambda}^*(\hat{\eta}_2)] - \ln[L_n^*(\hat{\eta}_0)]\} \quad (2)$$

式中, $\hat{\eta}_0$ 为整个 61 a 极大似然估计的 Copula 参数值; $\hat{\eta}_1$ 为前 n 年极大似然估计的 Copula 参数值; $\hat{\eta}_2$ 为第 $n+1$ 年及以后极大似然估计的 Copula 参数值; $L_n(\cdot), L_\lambda(\cdot), L_{n-\lambda}^*(\cdot)$ 分别为整个序列、变点前 (前 n 年) 和变点后 ($n+1$ 年及以后) 序列的似然函数。

在变点 λ^* 未知的条件下, 为

$$Z_n = \max_{1 \leq \lambda \leq n-1} \{-2\ln\Lambda_\lambda\} \quad (3)$$

式中, Z_n 为二元动态相依结构。

如果得到上式的值很大, 可证实零假设被拒绝, 且突变点位置为

$$\lambda^* = \arg \max_{1 \leq \lambda \leq n-1} \{-2\ln\Lambda_\lambda\} \quad (4)$$

式中, arg 表示的是似然比统计量达到最大值时对应的变点位置。

基于 Monte Carlo 方法, 能得到 $Z_n^{1/2}$ 的分布, 过去已有文献中给出了不同样本容量以及不同显著性水平下 Z_n 的边界值^[23]。因此根据数据序列长度, 选定显著性水平为 5%, 其统计量 Z_n 的对应的边界值为 8.8。

CLR 法需将目标检测的任意两区域(如陕北、关中或陕南)的降水序列以某一特定年份作为分割点, 将数据集一分为二, 形成两个子序列。再利用 Copula 函数对这两个子序列进行联合分布的拟合, 计算出该分割点所在年份的 Z_n 值。接着将分割年份向后调整一年重复上述步骤。然而, 由于序列过短难以通过 Copula 函数拟合联合分布, 初始几年及末尾几年的 Z_n 值无法获得。

Z_n 序列能够反映陕北、关中、陕南区域降水序列的动态相依结构, 分析 Z_n 序列与遥相关因子之间的相关性, 以揭示不同丰枯组合事件的驱动机制^[24]。

2.4 小波相干性

小波相干性分析是一种用于探究两个时间序列在时频域内的局部相关性特征的有效方法。相比传统的相关分析法, 其结果更为精确和直观^[25]。该方法能够揭示太阳黑子及气候因子(如北极涛动、太平洋年代际振荡等)与丰枯遭遇事件之间的关联性, 即各因子与联合区降水序列相依结构间的相关关系, 帮助探索驱动丰枯动态变化的主要因子, 为预测未来趋势提供科学依据。小波相干谱的定义为

$$R_j^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_j^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_j^X(s)|^2)S(s^{-1}|W_j^Y(s)|^2)} \quad (5)$$

式中, S 为平滑算子; s 为伸缩尺度; $W_j^Y(s)$ 要素 Y 的连续小波变换结果。小波相干值介于 0~1 之间, 这与传统的相关性系数相类似, 可以将其视为时频域下局部相关系数, 值越大则说明相关性越高。

3 结果与讨论

3.1 历史丰枯遭遇分析

3.1.1 边缘分布的优选

进行丰枯组合的频率分析之前, 首先对陕北、关中、陕南的年降水选择最优边缘分布函数。常见的边缘分布函数有 P -III 型分布、正态分布、广义极值分布、韦伯分布和对数正态分布等, 拟合得到各分布的参数。再通过均方误差 ($RMSE$) 和赤池信息准则 (AIC) 对拟合结果进行检验^[26], $RMSE$ 和 AIC 值越小, 模型拟合效果越好。其边缘分布函数的拟合优度检验结果如表 2 所列。

比较三个地区的后验概率值可知, 陕北和陕南地区边缘分布选择 P -III 型分布为最优, 关中地区选择对数正态分布为最优。

3.1.2 联合分布优选

通过 Kendall 的 τ 与 Copula 参数 θ 之间的函数关系可计算出参数 θ ^[27]。在构建三种典型 Copula 函数的二元联合分布模型后, 利用评价指标 ($RMSE$ 、 AIC) 对模型进行优选。表 3 为三个联合区的 $RMSE$ 和 AIC 值^[28] Copula 参数值, 三个联合区均表现为 Gumbel-Copula 相对最优, 因此选择 Gumbel-Copula 作为二维联合分布函数。

3.1.3 丰枯遭遇分析

基于距平法将区域降水划分为丰、平、枯三级后, 任意两区域联合区可形成 9 种组合事件, 其中丰枯同步(同丰、同平、同枯)与丰枯异步各具特征。针对关中-陕南、陕北-关中、陕北-陕南三个联合区, 以受水区-水源区为划分原则, 将受水区丰水或水源区枯水的 5 种组合归类为不利调水事件^[19-24], 其余 4 种视为有利调水事件。根据优选出的 Copula 函数类型与参数, 计算三组联合区共 9 种组合事件的丰枯遭遇概率, 结果如表 4 所列。

由表 4 可知, 在丰枯同步异步方面, 三个联合区同丰、同平、同枯的概率和相比于其他组合情况较大。据已有研究^[29], 关中和陕南的水汽来源在空

表 2 边缘分布的优选

Table 2 Optimal selection of marginal distributions

拟合函数	陕 北		关 中		陕 南	
	AIC	$RMSE$	AIC	$RMSE$	AIC	$RMSE$
P -III 型分布	-451.2	0.024	-387.4	0.040	-466.2	0.021
正态分布	-433.6	0.028	-368.4	0.047	-409.8	0.034
广义极值分布	-443.1	0.025	-380.5	0.042	-463.9	0.022
韦伯分布	-385.5	0.041	-333.1	0.063	-359.4	0.051
对数正态分布	-442.8	0.026	-388.8	0.040	-448.2	0.025

表 3 Copula 函数的优选

Table 3 Optimal selection of Copula functions

联合区	Copula 类型	Kendall 系数	参数 θ	AIC	RMSE
关中-陕南	Clayton	0.50	1.98	-392.9	0.037
	Frank	0.50	5.69	-407.6	0.033
	Gumbel	0.50	1.99	-423.2	0.029
陕北-关中	Clayton	0.33	0.97	-386.4	0.041
	Frank	0.33	3.23	-398.6	0.037
	Gumbel	0.33	1.49	-403.5	0.036
陕北-陕南	Clayton	0.22	0.57	-416.8	0.030
	Frank	0.22	2.08	-420.6	0.029
	Gumbel	0.22	1.29	-426.0	0.028

表 4 9 种组合事件的丰枯遭遇概率 %

Table 4 Probability of wet-dry encounters for nine combination events %

组合事件	关中-陕南	陕北-关中	陕北-陕南
同丰	17.31	15.06	11.86
同平	24.86	18.84	20.08
同枯	18.54	16.22	13.00
丰平	9.03	9.38	11.56
平丰	6.33	9.01	8.56
枯丰	1.12	3.45	4.35
丰枯	1.20	3.56	4.58
平枯	9.28	12.22	11.44
枯平	12.33	12.25	14.58
丰枯同步	60.71	50.13	44.93
丰枯异步	39.29	49.87	55.07
有利于调水	44.64	43.56	47.56
不利于调水	55.36	56.44	52.44

间上重叠度高,主要来自长江流域、黄河流域及南海,受东南季风影响^[30],部分气流能够跨越秦岭同时影响关中和陕南的降水。因此出现关中-陕南丰枯同步的概率相比于其他两个联合区大,结果为 60.71%。对于陕北-关中联合区,丰枯同步的概率为 50.13%,居于中等水平,且略高于丰枯异步的概率。而在陕北-陕南联合区,丰枯同步的概率最低,仅为 44.93%,丰枯异步概率则高于丰枯同步。这表明陕北与陕南地区在降水丰枯分布上存在一定的互补性。同时对比关中-陕南、陕北-关中、陕北-陕南三个联合区降水的 Kendall 秩相关系数(表 4 第三列,分别为 0.50、0.33 和 0.22),可以看出,系数越大表示两个区域降水序列的相似性越高,进而两者之间的丰枯同步的概率也会较大。也就是说,相关系数较高时,丰枯同步的概率较大。因此,丰枯同步的概率受水汽来源、地理位置以及地形、大气环流等多因素影响,需要综合考虑。

在是否有利于调水方面,三个联合区有利于调水的概率在 45%左右,对于陕南和关中地区而言,已

建的引红济石、引渭济黑、引干济石和在建的引汉济渭等从陕南调水入关中的跨流域工程可以有效利用这 45%左右的有利调水时机实施调水,这在一定程度上可缓解关中地区的水资源供需矛盾。通过对比发现,陕北-陕南联合区的有利调水概率(47.56%)高于关中-陕南联合区(44.64%)。这一差异表明,陕南能够为陕北(关中地区)提供更多的水资源支持^[31]。然而,调水方案的实施还需要综合考虑当地的人口、社会经济发展等因素,确保水资源调配的合理性与可持续性。

3.2 历史丰枯遭遇动态演变及驱动力分析

3.2.1 丰枯遭遇的动态变化规律

以 31 年为滑动窗口研究陕北、关中、陕南 9 种丰枯组合事件的动态变化规律,如图 2 所示。进而确定联合频率呈现的趋势变化^[32],用 MK 趋势检验分析丰枯组合频率非参数趋势^[33],如表 5 所列。其中, $|Z| > 1.96$,丰枯遭遇的动态变化呈显著趋势。由表 5 可知,关中-陕南联合区发生丰枯和平枯事件呈显著下降的趋势,且两种组合事件均属于不利于调水组合,因此陕南对关中调水的效益是在升高的;陕北-关中和陕北-陕南联合区同枯事件均有显著上升趋势,同枯的情况不利于调水工程的运行,这对缺水的陕北十分不利,因此在各区域(特别是陕北、关中)处于连续丰水期时,结合水网联调,需要储存一定的水资源量为陕北及关中枯水期时提供补给。

表 5 陕西省丰枯遭遇 MK 趋势检验表

Table 5 MK trend test for wet-dry encounters in Shaanxi Province

组合事件	关中-陕南	陕北-关中	陕北-陕南
同丰	0.48	1.87	-0.17
同平	0.20	2.92*	3.03*
同枯	0.24	3.50*	2.72*
丰平	-0.82	-2.28*	0.92
平丰	0.34	0.75	1.77
枯丰	1.29	-2.41*	-2.11*
丰枯	-2.24*	-3.20*	-5.74*
平枯	-3.60*	0.48	-1.22
枯平	1.77	-1.09	-0.78

注: * 表示超过 5% 的显著性水平检验。

总体而言,三个联合区,丰枯同步(同丰、同平、同枯)的概率在提升,且丰枯事件(不利于调水)均呈显著下降趋势,需要在一定程度上储存水资源以备水源区无法供给。

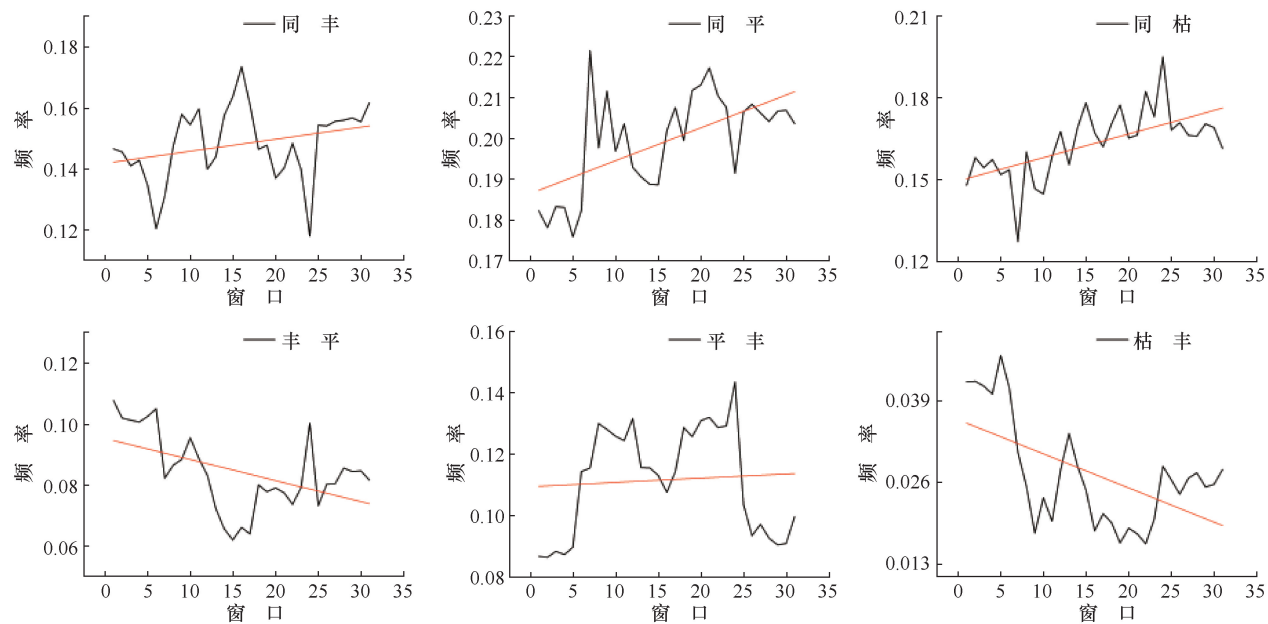
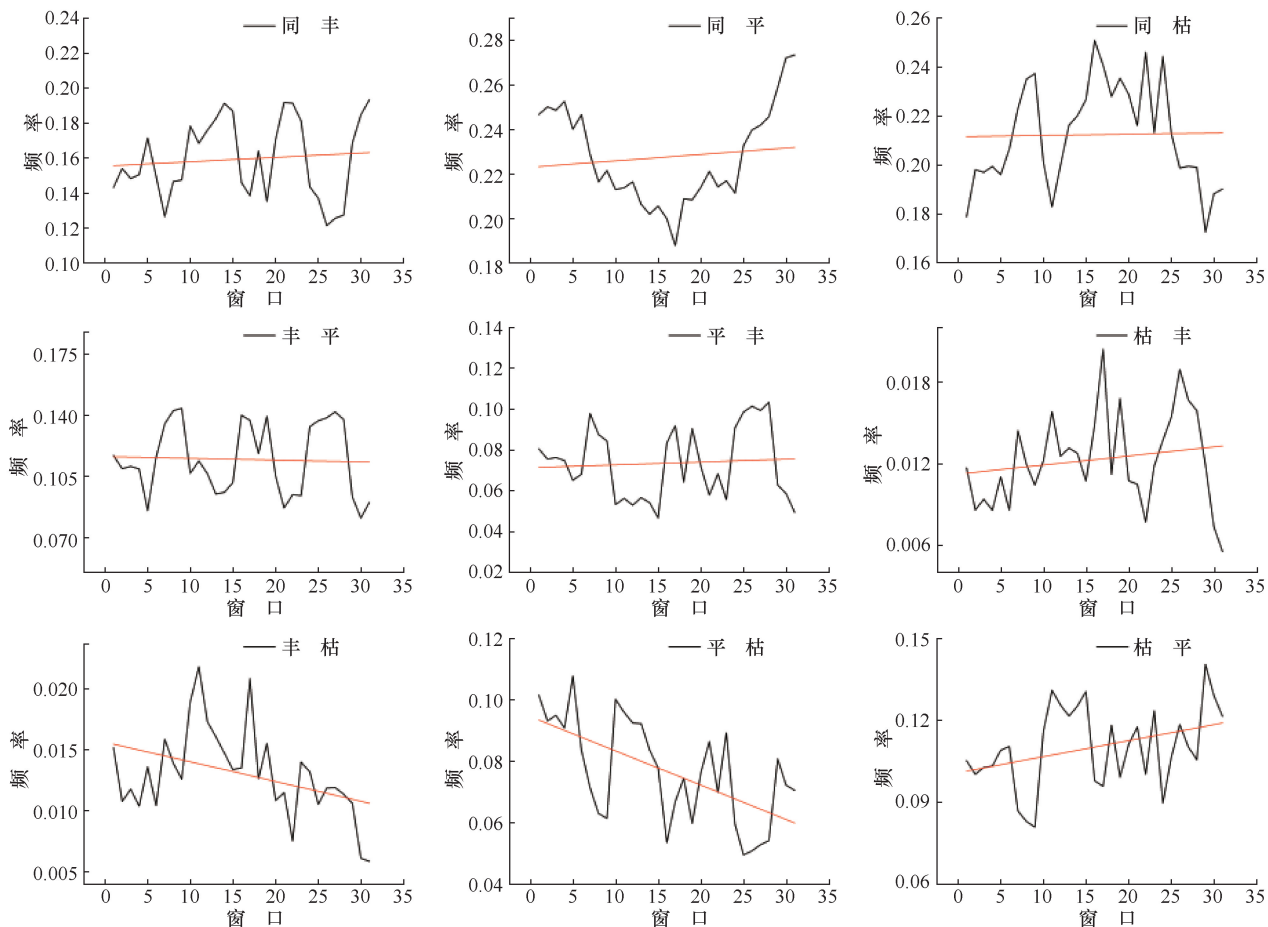
3.2.2 丰枯遭遇的驱动力分析

在不同区域内,水循环过程与太阳黑子活动及大气环流因子之间表现出显著的相关性^[34]。因此,分

析丰枯遭遇与气候变化的关系, 对于进一步揭示丰枯遭遇的关键影响因素具有重要意义。基于筛选出的最佳 Copula 函数, 采用似然比率法 (CLR) 构建联合区域降水量的相依结构, 并采用小波分析法分析遥相关因子与联合区降水序列相依结构间的相关关系, 揭示

不同丰枯组合事件的影响因子。三个联合区降水量序列相依结构的变化结果如图 3 所示。

将 AO、PDO、ENSO、太阳黑子^[34] 分别与陕北-关中、关中-陕南、陕北-陕南的 Z_n 序列进行小波相干性分析。图中右侧的色阶柱颜色越接近



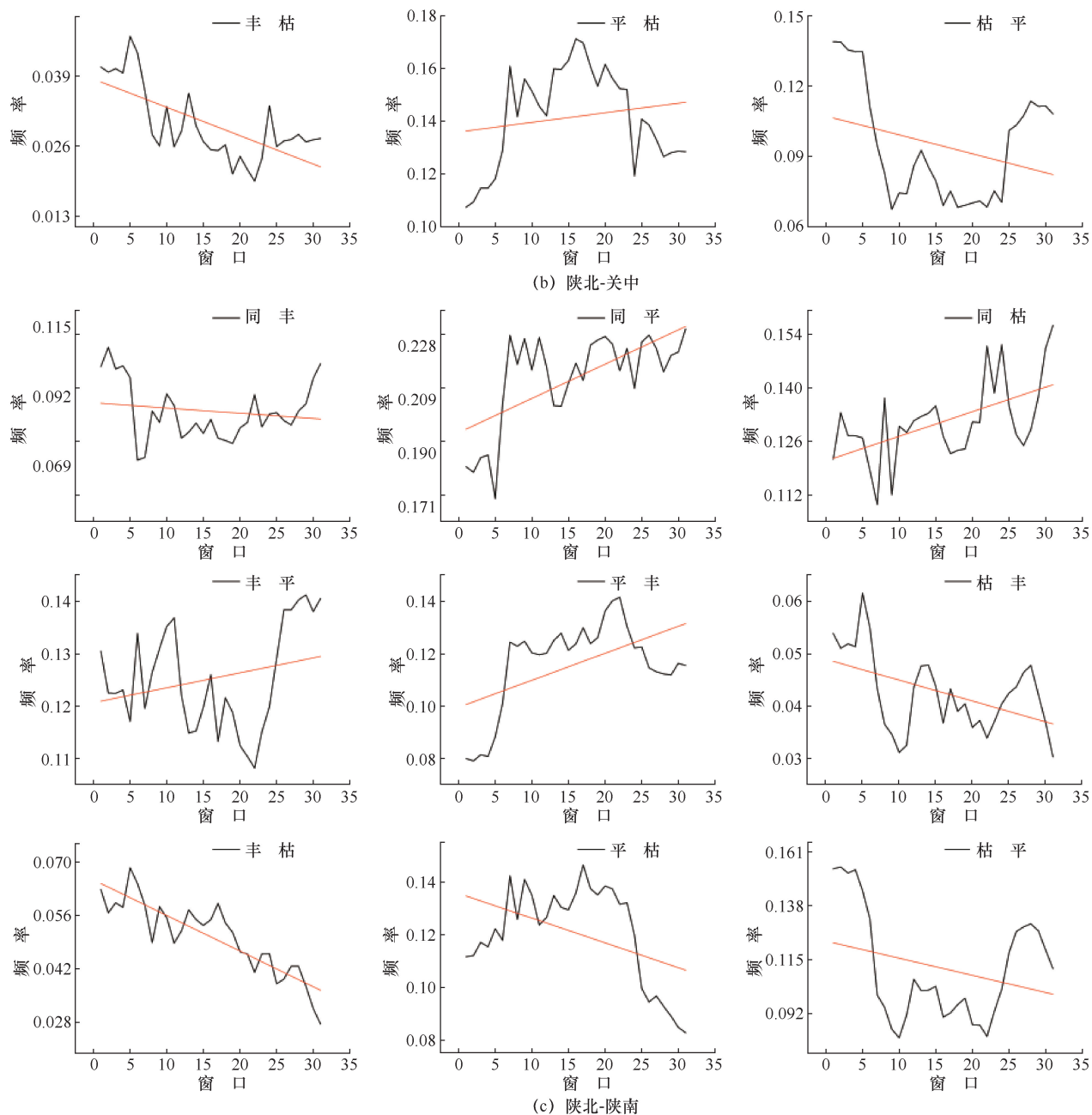


图2 关中-陕南、陕北-关中、陕北-陕南联合区的动态变化趋势

Fig. 2 Dynamic trends of Central-Southern Shaanxi, Northern-Central Shaanxi, and Northern-Southern Shaanxi joint regions

黄色, 表明相关性越强; 黑色细实线为小波影响锥的边界, 其内部区域为有效谱值区; 锥线内的粗黑线表示超过 95% 显著性水平的置信区间。图中箭头用来表示遥相关因子与 Z_n 序列的相位关系: 箭头由左向右表示正相关相位, 由右向左表示负相关相位; 箭头向上表明遥相关因子的变化领先于 Z_n 序列的变化, 而箭头向下则表示遥相关因子的变化滞后于 Z_n 序列的变化^[35]。

图4 为陕北-关中的 Z_n 序列和 AO、PDO、ENSO 及太阳黑子相干小波变换谱, 其中 AO 对丰

枯遭遇变化的影响最大。分析表明, AO 与其 Z_n 值在 2000—2015 年间有 1~4 a 周期的正相关关系, 在 1975—1980 年间有 1~3 a 周期的负相关关系; PDO 与其 Z_n 值在 1973—1978 年间有 1~2 a 周期的正相关关系, 在 2003—2015 年间有 4~7 a 周期的正相关关系。

图5 为关中-陕南的 Z_n 序列与 AO、PDO、ENSO、太阳黑子相干小波变换谱, 其中 AO 对丰枯遭遇变化的影响最大。分析表明, AO 与其 Z_n 值在 1965—2015 年间有 13~16 a 周期的正相关关系, 在

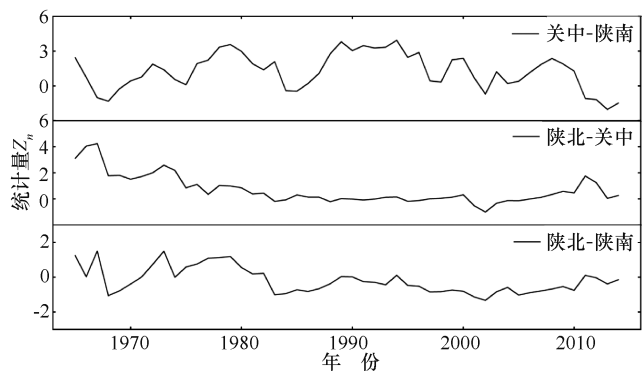
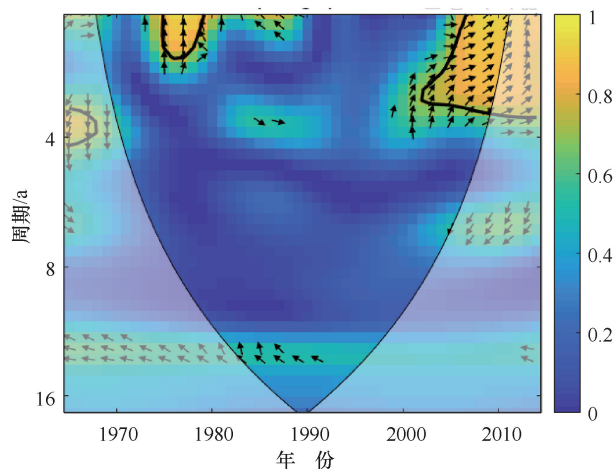


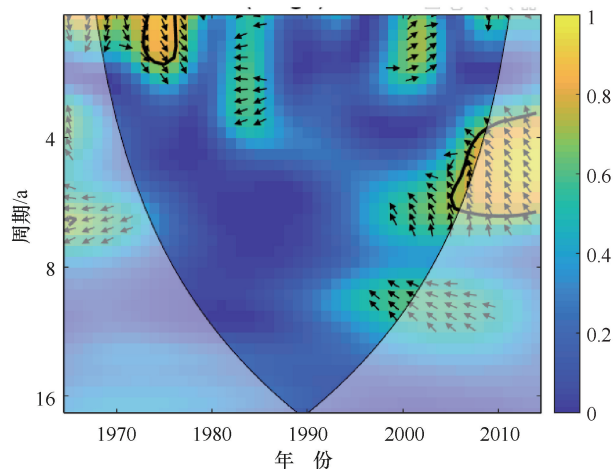
图3 关中-陕南、陕北-关中、陕北-陕南联合区相依结构的变异点分析

Fig. 3 Variation point analysis of dependence structure in Central-Southern Shaanxi, Northern-Central Shaanxi, and Northern-Southern Shaanxi joint regions

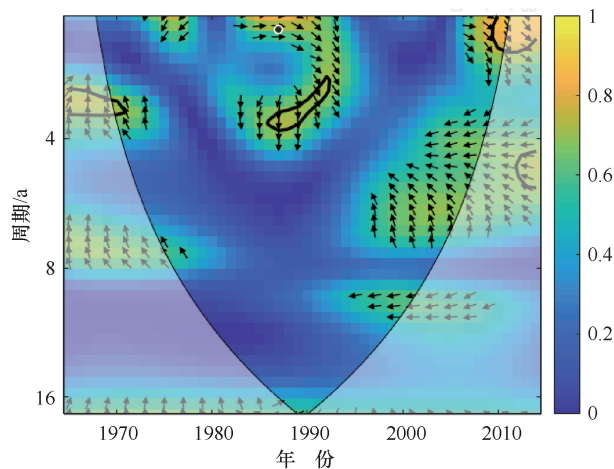
1993—1998 年间有 1~3 a 周期的正相关关系; PDO 与其 Z_n 值在 1974—1988 年间有 1~4 a 周期的正相关



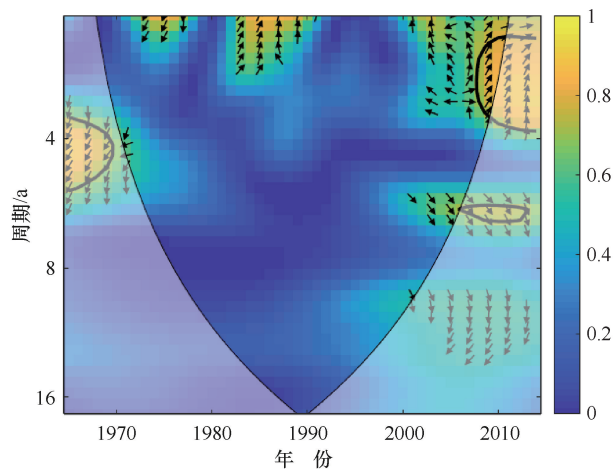
(a) Z_n 序列与AO



(b) Z_n 序列与PDO



(c) Z_n 序列与ENSO



(d) Z_n 序列与太阳黑子

图4 陕北-关中 Z_n 序列与 AO、PDO、ENSO、太阳黑子各因子小波相关性

Fig. 4 Wavelet correlation of Z_n sequence in Northern-Central Shaanxi with AO, PDO, ENSO, and sunspots

关系; ENSO 与其 Z_n 值在 1993—2002 年间有 4~6 a 周期的负相关关系。

图 6 为陕北-陕南的 Z_n 序列与 AO、PDO、ENSO、太阳黑子相干小波变换谱, 其中 AO 对丰枯遭遇变化的影响最大, 其次是 PDO。分析表明, AO 与其 Z_n 值在 1965—2015 年间有 13~16 a 周期的正相关关系, 在 1965—1978 年间有 1~2 a 周期的正相关关系, 在 1991—2015 年间有 1~5 a 周期的正相关关系; PDO 与其 Z_n 值在 1965—1990 年间有 13~16 a 周期的负相关关系, 在 1981—1987 年间有 1~3 a 周期的负相关关系, 在 1990—1997 年间有 4~6 a 周期的负相关关系。

3.3 未来丰枯遭遇变化与水网规划响应

3.3.1 NEX-GDDP 数据集历史数据检验

本研究以 1960—2014 年作为评估时段, 这与在前文中实测数据起始年份一致, 接下来, 将陕北、关中、陕南三个区域 BCC-CSM2-MR 模式下的历史模拟

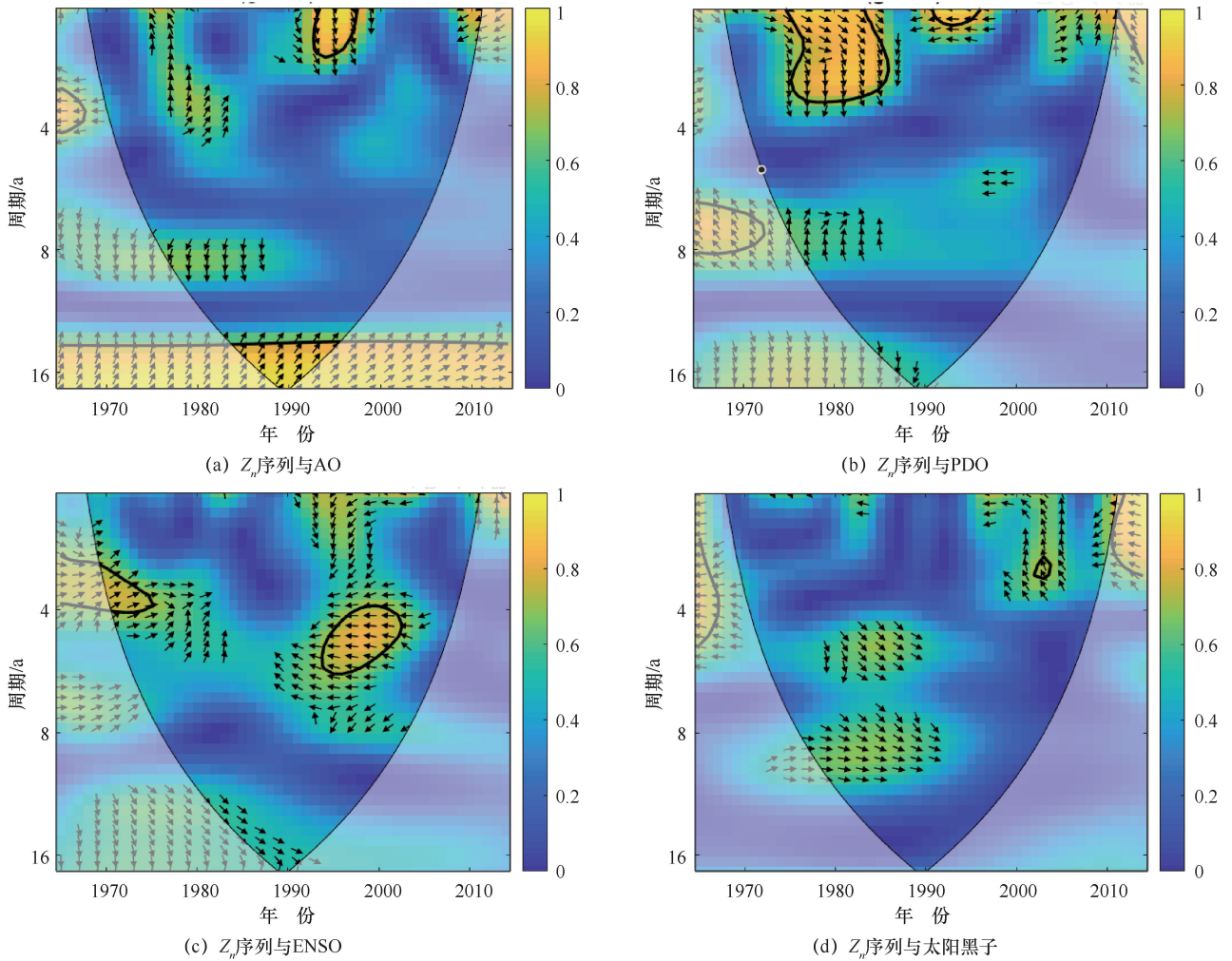


图5 关中-陕南 Z_n 序列与 AO、PDO、ENSO、太阳黑子各因子小波相关性

Fig. 5 Wavelet correlation of Z_n sequence in Central-Southern Shaanxi with AO, PDO, ENSO, and sunspots

月降水数据与站点实测月降水数据进行线性拟合, 得到其相关性在 0.7 左右(见图 7)。且现已有文章将模型模拟的历史降水和温度趋势与观测值进行了比较^[18], 得到 BCC-CSM2-MR 模式下的降水误差相比于其他模式较小, 由此选择该气候模式的下的数据进行分析。

3.3.2 未来丰枯遭遇概率预测

基于 BCC-CSM2-MR 模式下 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 排放情景下未来日降水数据, 得到各区域的未来 40 a 的年降水值, 对其进行边缘分布拟合得并进行 KS 检验, 选择最优的边缘分布, 方法同 3.1 节。SSP2-4.5 情景下, 陕南选择对数正态分布, 陕北选择韦伯分布, 关中选择正态分布; SSP5-8.5 情景下, 陕南区域选择正态分布, 陕北区域选择 P-III 型分布, 关中地区选择广义极值分布。接下来选择最佳的 Copula 函数(陕北、陕南两区域未来降水量相关性

低, 且无调水工程布局, 所以不考虑陕北-陕南联合区的丰枯遭遇), 在 SSP2-4.5 情景下, 陕北-关中联合区选择 Clayton-Copula, 关中-陕南联合区选择 Frank-Copula; 在 SSP5-8.5 情景下, 陕北-关中和关中-陕南联合区均选择 Clayton-Copula。

将区域降水量进行丰、平、枯划分后, 对陕北-关中和关中-陕南两个联合区的未来的降水数据进行丰枯遭遇分析, 结果如表 6 所列。

由表 6 可知, SSP2-4.5 情景下, 关中-陕南联合区丰枯同步概率由历史的 60.71% 增至 65.85% (增幅 5.41%), 有利于调水的概率由 44.64% 增至 51.95% (增幅 7.31%), 同枯概率略降至 15.46%; 陕北-关中联合区丰枯同步概率保持稳定, 有利于调水的概率由 43.56% 增至 46.14% (增幅 2.58%), 同枯概率为 14.90%。SSP5-8.5 高胁迫情景下, 关中-陕南丰枯同步概率下降, 陕北-关中概率显著上升, 但由于

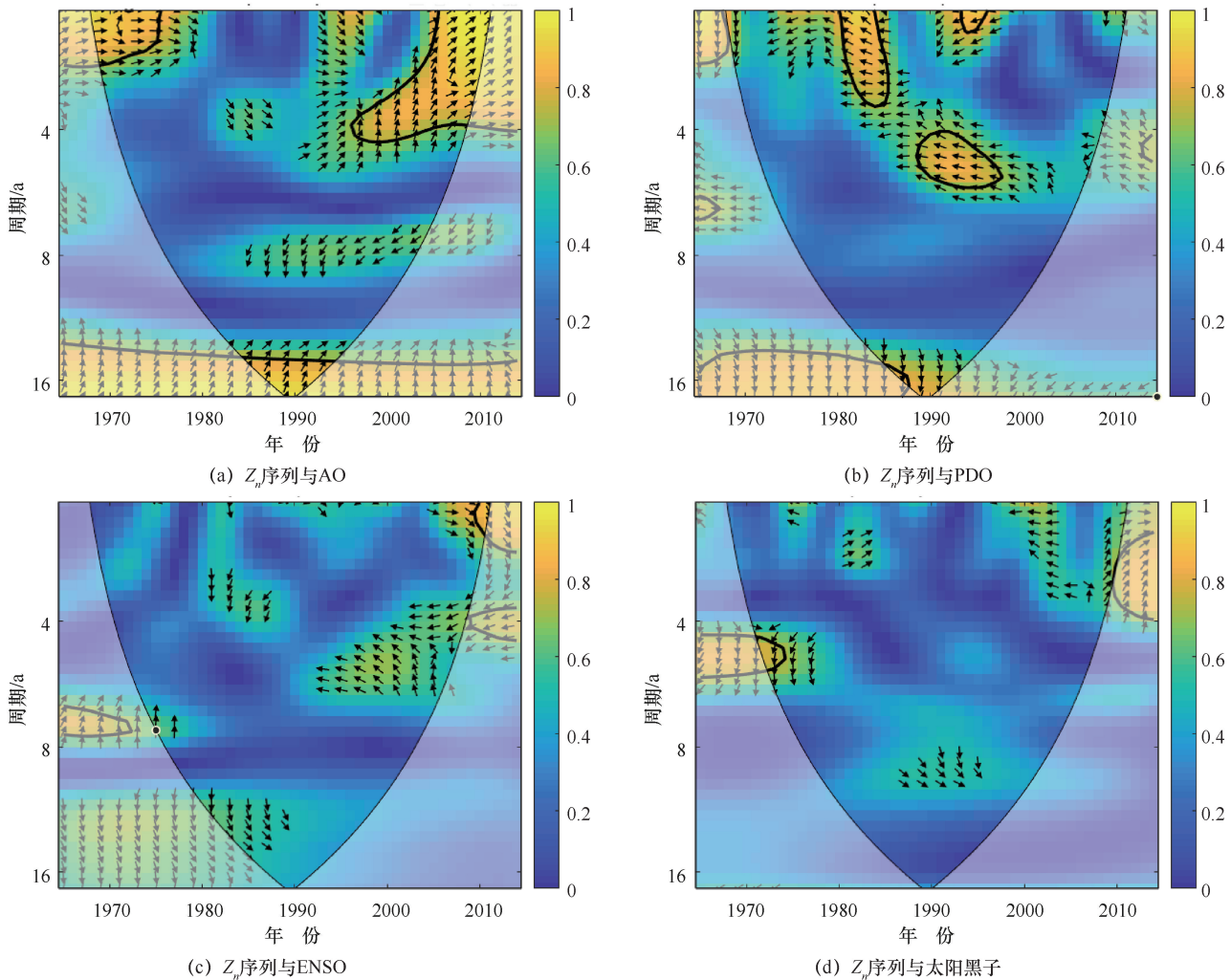


图6 陕北-陕南 Z_n 序列与 AO、PDO、ENSO、太阳黑子各因子小波相关性

Fig. 6 Wavelet correlation of Z_n sequence in Northern-Southern Shaanxi with AO, PDO, ENSO, and sunspots

表6 未来情景下丰枯遭遇概率 %

Table 6 Probability of wet-dry encounters under future scenarios %

组合事件	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	关中-陕南	陕北-关中	关中-陕南	陕北-关中
同丰	14.61	12.06	14.56	12.60
同平	35.78	22.95	23.51	34.15
同枯	15.46	14.90	18.39	16.60
丰平	7.46	17.62	14.10	10.19
平丰	9.28	9.70	10.40	13.74
枯丰	0.29	2.41	1.86	0.48
丰枯	0.25	2.56	0.80	0.37
平枯	8.47	6.72	3.57	5.80
枯平	8.41	11.07	12.81	6.08
丰枯同步	65.85	49.91	56.46	63.35
丰枯异步	34.15	50.09	43.54	36.65
有利于调水	51.95	46.14	41.98	54.44
不利于调水	48.05	53.86	58.02	45.56

该情景的极端性, 研究聚焦 SSP2-4.5 情景, 其更契合中国“碳达峰”(2030年)与“碳中和”(2060年)目标, 且黄河流域及汉江流域碳达峰时间均集中于2030年前后^[36], 符合国家中长期发展战略。同时, 对比发现, SSP5-8.5 情景下的同枯概率比 SSP2-4.5 情景高, 辐射以及未来温室气体排放量的增强可能导致同枯概率升高。同枯是对调水最不利的事件, 需针对同枯概率优化水网调蓄工程布局, 以降低同枯带来的不利影响。

3.3.3 丰枯遭遇对水网规划和运行的影响

陕南、关中、陕北降水呈阶梯分布(陕南 > 关中 > 陕北), 且空间不均显著。对于水网规划而言, 需要根据丰枯遭遇情况, 分析水资源在时间和空间上的分布特点, 尤其是区域间丰枯遭遇的情况。重点分析有利于调水的概率和同时发生枯水的概率, 为水网工程布局提供理论依据:

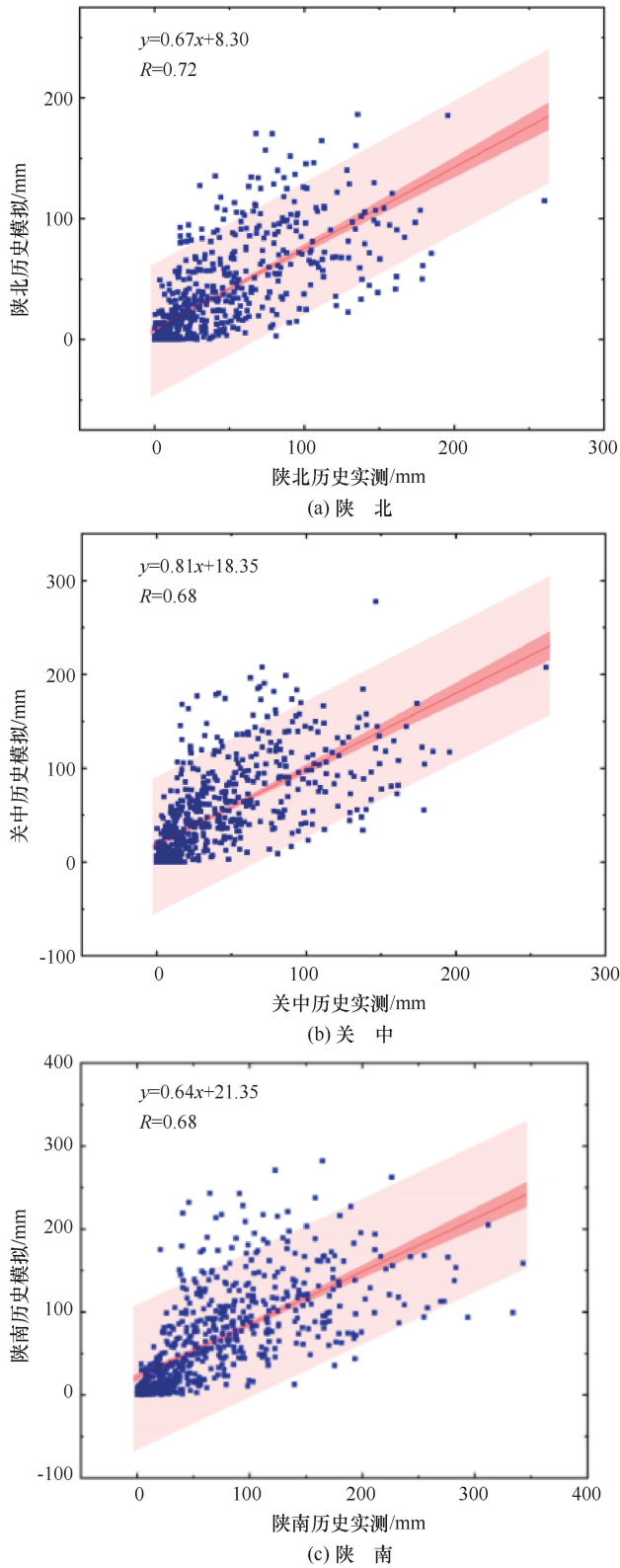


图7 陕北关中陕南历史实测与历史模拟降水线性拟合
Fig.7 Linear fitting of historical measured and simulated precipitation in Northern, Central, and Southern Shaanxi

如图8所示, 关中-陕南联合区有利于调水的概率为51.95%, 较历史实际增加7.31%。这将有

利于调水的概率为51.95%, 较历史实际增加7.31%。这将有利于规划的跨流域调水工程, 从陕南向关中调水; 两区域未来同枯的概率较过去减少3.08%, 但仍有15.46%的概率同时经历枯水年。汉江、渭河面临同枯的风险, 这说明陕南和关中同时发生干旱的概率依然不低, 需做好极端枯水情况下的应对准备, 尤其是关中地区。针对关中-陕南枯水遭遇, 提出调水区“引嘉入汉”补源、受水区应急保障与战略储备能力建设, 加强联合调配的建议。

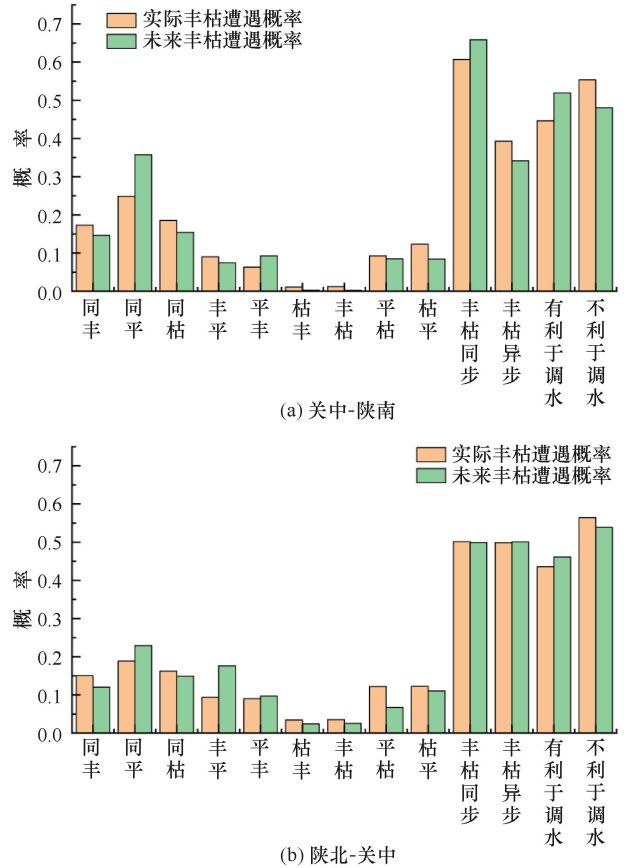


图8 关中-陕南、陕北-关中实际与未来SSP2-4.5情景下丰枯遭遇概率
Fig.8 Probability of wet-dry encounters in Central-Southern Shaanxi and Northern-Central Shaanxi under actual and future SSP2-4.5 scenarios

利于调水的概率由过去43.56%增加到46.14%。结合全省实际情况, 受关中平原城市群和西安都市圈的“虹吸现象”和“溢出效应”等因素影响, 关中地区的用水较为紧张, 不具备向陕北调水的条件。两区域未来同枯的概率较过去减少1.32%, 但仍有14.90%的概率会同时经历枯水年, 渭河、北洛河、延河、无定河面临同枯的风险。针对陕北-关中枯水遭遇, 提出在陕北榆林地区完善东西双向引黄、延安地区完善东部引黄和

西部引白龙江的水网规划, 同步加强多水源联合调配, 建立极端枯水条件下供水安全保障体系。

4 结 论

(1) 关中-陕南联合区丰枯同步概率最高, 为 60.71%, 而陕北-陕南丰枯同步概率最低, 为 44.39%; 在调水方面, 关中-陕南、陕北-关中、陕北-陕南三个联合区有利于调水的概率在 45% 左右。

(2) 北极涛动(AO)与关中-陕北和陕北-陕南两个联合区丰枯遭遇变化具有相对较高的相干性, 其次是太平洋年代际振荡(PDO)。

(3) 在中等排放情景(SSP2-4.5)下, 关中-陕南丰枯同步的情况较实际情况提高了 5.14%, 而陕北-关中丰枯同步的情况较实际情况略有下降(约 0.22%); 关中-陕南和陕北-关中联合区有利于调水的概率较实际情况分别提高了 7.31% 和 2.58%, 同枯的发生概率分别下降了 3.08% 和 1.32%。

参考文献(References):

[1] 麻蓉, 武连洲, 黄瑜璐, 等. 陕西省水资源时空匹配研究[J]. 陕西水利, 2024(7): 34-36.
MA R, WU L Z, HUANG Y X, et al. Research on spatiotemporal matching of water resources in Shaanxi Province[J]. Shaanxi Water Resources, 2024(7): 34-36.

[2] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.
WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.

[3] 何奇峰, 李慧, 李云玲. 南水北调统筹时间和空间关系的思路探讨[J]. 水利技术监督, 2022, 30(2): 173-175.
HE Q F, LI H, LI Y L. Discussion on the relationship between time and space in south-to-north water diversion project[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2022, 30(2): 173-175.

[4] 王煜, 彭少明, 郑小康, 等. 水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 11-23.
WANG Y, PENG S M, ZHENG X K, et al. Key scientific issues of dealing with extreme dry events in the Yellow River Basin under the layout of water network[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 11-23.

[5] 陈锋, 谢正辉. 气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇的影响[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(2): 139-148.
CHEN F, XIE Z H. Effects of climate change on synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the middle route of south-to-north water transfer project[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(2): 139-148.

[6] SOBKOWIAK L, PERZ A, WRZESIŃSKI D, et al. Estimation of the river flow synchronicity in the upper Indus River Basin using

copula functions[J]. Sustainability, 2020, 12(12): 5122.

[7] YE X M, WANG Y M, 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.

[8] 谢华, 罗强, 黄介生. 基于三维 copula 函数的多水文区丰枯遭遇分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 186-193.
XIE H, LUO Q, HUANG J S. Synchronous asynchronous encounter analysis of multiple hydrologic regions based on 3D copula function[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 186-193.

[9] 王利朵, 齐春三, 曹升乐, 等. 黄河干流、鲁东南和鲁西北地区水资源丰枯互补关系[J]. 水电能源科学, 2017, 35(9): 33-36.
WANG L D, QI C S, CAO S L, et al. Analysis of wetness-dryness compensation of the Yellow River, the southeast and northwest of Shandong Province[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(9): 33-36.

[10] 关帅, 查悉妮, 丁波, 等. 基于 Copula 函数的珠江流域河川径流丰枯遭遇[J]. 热带地理, 2015, 35(2): 208-217.
GUAN S, ZHA X N, DING B, et al. Wetness-dryness encountering of runoff of the Pearl River Basin based on copula functions[J]. Tropical Geography, 2015, 35(2): 208-217.

[11] DAI A G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.

[12] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献; 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 1-12.
LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 1-12.

[13] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展; 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.

[14] 周瑶. 陕西省 2011—2020 年用水结构变化及各产业节水措施探讨[J]. 地下水, 2022, 44(6): 114-116.
ZHOU Y. Discussion on the changes in water use structure and water-saving measures in various industries in Shaanxi Province from 2011 to 2020[J]. Ground Water, 2022, 44(6): 114-116.

[15] 杜佳, 宋令勇, 何兴军. 陕西省降水时空分布与变化特征分析[J]. 地下水, 2012, 34(6): 128-131.
DU J, SONG L Y, HE X J. Analysis on spatial and temporal distribution of precipitation variation in Shaanxi Province[J]. Ground Water, 2012, 34(6): 128-131.

[16] JIANG F S, WEN S S, GAO M N, et al. Assessment of NEX-GDDP-CMIP6 downscale data in simulating extreme precipitation over the Huai River Basin[J]. Atmosphere, 2023, 14(10): 1497.

[17] 王倩之, 刘凯, 汪明. NEX-GDDP 降尺度数据对中国极端降水指数模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(1): 31-

43.
WANG Q Z, LIU K, WANG M. Evaluation of extreme precipitation indices performance based on NEX-GDDP downscaling data over China[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(1): 31-43.
- [18] ZHANG Y Q, YOU Q L, ULLAH S, et al. Substantial increase in abrupt shifts between drought and flood events in China based on observations and model simulations [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 876: 162822.
- [19] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. *水文*, 2008, 28(3): 1-7.
GUO S L, YAN B W, XIAO Y, et al. Multivariate hydrological analysis and estimation[J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(3): 1-7.
- [20] YOU Q Y, LIU Y, LIU Z. Probability analysis of the water table and driving factors using a multidimensional copula function[J]. *Water*, 2018, 10(4): 472.
- [21] 王飞宇, 张彦, 王偲, 等. 基于 Copula 函数的汉江流域降水径流丰枯遭遇研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 95-105.
WANG F Y, ZHANG Y, WANG C, et al. Using copula model to analyze consecutive wetting-drying occurrence in rainfall-runoff in Hanjiang Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 95-105.
- [22] XIONG L H, JIANG C, XU C Y, et al. A framework of change-point detection for multivariate hydrological series [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(10): 8198-8217.
- [23] 李蓉蓉, 于坤霞, 熊斌. 基于 Copula 似然比检验凌汛多变量序列变点诊断[J]. *人民黄河*, 2021, 43(8): 33-38.
LI R R, YU K X, XIONG B. Change-point detection of multivariate ice flood series using copula-based likelihood ratio test [J]. *Yellow River*, 2021, 43(8): 33-38.
- [24] 高月娇, 黄生志, 聂明秋, 等. 引汉济渭工程水源区与受水区的丰枯遭遇及动态变化[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(6): 162-173.
GAO Y J, HUANG S Z, NIE M Q, et al. Wetness-dryness encounters and dynamic changes in water source and demand areas of Hanjiang to Weihe River Project [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(6): 162-173.
- [25] 王敏会, 常桂娟. 基于小波方法的时频域分析[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(3): 229-233.
WANG M H, CHANG G J. Time-frequency domain analysis based on wavelet method [J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2021, 38(3): 229-233.
- [26] 汪海航, 李帆, 吴兴祥, 等. 基于 Copula 函数的区域雨潮遭遇风险概率分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(4): 425-435.
WANG Haihang, LI Fan, WU Xingxiang, et al. Research on the joint probability of rainstorm and tidal level based on the Copula function [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(4): 425-435.
- [27] 许丹, 郭丹丹, 孙亚楠. 考虑径流非一致性的渭河径流丰枯遭遇研究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(5): 161-168.
XU D, GUO D D, SUN Y N. Study of basin-scale abundance and depletion encounters under non-conforming conditions [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(5): 161-168.
- [28] JOE H. *Multivariate Models and Multivariate Dependence Concepts* [M]. London: Chapman&Hall, 1997.
- [29] 畅俊斌, 吴广涛, 元佳飞, 等. 水汽源区变化对陕西关中降水稳定同位素的影响[J]. *水文*, 2019, 39(5): 71-77.
CHANG J B, WU G T, YUAN J F, et al. Effect of moisture source variation on stable isotopes of precipitation in Guanzhong Region, Shaanxi Province [J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(5): 71-77.
- [30] 杜一博, 李双双, 冯典, 等. 全球变暖背景下陕西省夏季极端降水及其大尺度环流特征[J]. *高原气象*, 2024, 43(2): 342-352.
DU Y B, LI S S, FENG D, et al. Characteristics of extreme summer precipitation and large-scale circulation in Shaanxi Province under global warming [J]. *Plateau Meteorology*, 2024, 43(2): 342-352.
- [31] 王政祥, 张明波. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇分析[J]. *人民长江*, 2008, 39(17): 103-105.
WANG Z X, ZHANG M B. Analysis of precipitation abundance and drought in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project and in the water-receiving areas [J]. *Yangtze River*, 2008, (17): 103-105.
- [32] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [33] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 490-496.
ZHANG D W, CONG Z T, NI G H. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 490-496.
- [34] 张迎, 黄生志, 黄强, 等. 基于 Copula 函数的新型综合干旱指数构建与应用[J]. *水利学报*, 2018, 49(6): 703-714.
ZHANG Y, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(6): 703-714.
- [35] 马川惠, 黄生志, 黄强. 渭河流域水文干旱历时-烈度相依结构动态变化与驱动力分析[J]. *水利学报*, 2022, 53(10): 1180-1193.
MA C H, HUANG S Z, HUANG Q. Dynamic change and driving force analysis of hydrological drought duration-severity dependency structure in the Weihe River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1180-1193.
- [36] 岳紫莹, 邓玉, 倪福全, 等. 未来气候情景下汉江流域中上游径流量变化[J]. *中国农业气象*, 2024, 45(7): 715-728.
YUE Z Y, DENG Y, NI F Q, et al. Change of runoff volume in the middle and upper reaches of Han River Basin under future climate scenarios [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(7): 715-728.
- [37] MA Y S, SHI J, PAN J C. Joint optimal operation of complex inter-basin water transfer systems: Taking Jialingjiang River to Hanjiang River Water Transfer Project as an example [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(5): 142-148.

(责任编辑 王海锋)