

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0108

何静, 吕爱锋, 张文翔. 气候变化背景下滇中引水工程水源区与受水区降水丰枯遭遇分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1097-1108. HE J, LYU A F, ZHANG W X. Synchronous-asynchronous encounter probability of high-low precipitation between the water source and water receiving area in the Water Transfer Project in Central Yunnan under climate change[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1097-1108. (in Chinese)

# 气候变化背景下滇中引水工程水源区与受水区 降水丰枯遭遇分析

何静<sup>1</sup>, 吕爱锋<sup>2,3</sup>, 张文翔<sup>1</sup>

(1. 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南师范大学地理学部, 昆明 650500;  
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于历史实测降水数据与全球气候模型预估数据, 使用 Morlet 小波方法分析滇中引水工程水源区与受水区降水序列的周期变化和未来的降水趋势。同时, 采用 Copula 函数计算历史时期(1960—2021 年)与未来时期(2022—2100 年)水源区与受水区降水丰枯异步或丰枯同步的概率。结果表明: 1960—2021 年降水序列存在 26~39 a、18~25 a、4~7 a 的 3 类时间尺度的周期变化, 2022—2100 年降水序列存在 38~55 a、18~30 a、5~12 a 的 3 类时间尺度的周期变化, 降水量呈现“多—少—多”的循环交替, 预计未来 10~20 a 将持续处于降水较多的时期; 过去 62 a, 水源区和受水区降水丰枯异步频率 36.4%, 同期丰水年频率为 25.3%, 同期枯水年频率小于 30%, 水源区和受水区具有水量互补的引水条件, 两区域之间存在着水量补偿特征; 与历史丰枯遭遇对比, 未来降水量丰枯同步频率均呈现减小的趋势, 丰枯异步呈现增加的趋势, 同枯和源枯受丰的频率减少, 未来有利于调水的降水丰枯组合概率平均增加 3.75%; 在近、中、远期预估中, 从 SSP1-2.6 情景过渡到 SSP5-8.5 情景, SSP5-8.5 情景下降水量丰枯异步频率比 SSP1-2.6 情景大, 说明水源区与受水区的降水区域差异变大, 降水时空差异更加显著。通过对滇中引水工程水源区与受水区降水量丰枯遭遇的综合分析、定量评估和模拟预测, 为滇中引水工程水资源调度协同一体化提供数据支撑及参考依据。

**关键词:** 滇中引水工程; Copula; 丰枯遭遇; CMIP 6; 小波分析

中图分类号: TV67 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



调水工程是平衡水资源时空分布不均、保障区域水资源安全的重要途径。由于气候、下垫面和人类活动强度不同, 区域天然降水过程往往无法与经济社会需水过程相匹配, 进而影响区域水资源供需平衡<sup>[1]</sup>。通过调水工程可将水源地的水资源优势用来支撑缺水地区经济社会的可持续发展。任何区域都会存在降水丰、平、枯水年交替出现的情况, 相应就会出现水资源丰年与平年能保障社会经济发展用水, 而在枯年则会产生用水危机的现象<sup>[2]</sup>。

这种无规律的降水丰枯交替在一定程度上给区域经济可持续发展带来巨大威胁。对于调水工程来说, 水源区降水丰枯变化影响工程可调水量, 受水区降水丰枯变化影响需调水量, 水源区和受水区降水的丰枯变化与调水工程规划设计和运行调度紧密联系<sup>[3]</sup>。因此, 为了更好地发挥调水工程效能, 需分析水源区与受水区的降水丰枯同异步频率, 以此来指导调水工程建设和水资源科学调度。

云南省滇中地区 GDP 占云南省经济总量的

收稿日期: 2022-04-17 修回日期: 2022-08-15 网络出版时间: 2022-11-15  
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221114.1614.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671026)

作者简介: 何静(1998—), 女, 四川德阳人, 主要从事气候变化与水资源管理研究。E-mail: 1361597431@qq.com

通信作者: 张文翔(1979—), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事地球化学与环境变化研究。E-mail: wenxiangzhang@ynnu.edu.cn.

70%以上,但其水资源量仅占全省 12%<sup>[4]</sup>。相关资料<sup>[5]</sup>显示,滇中地区在充分挖掘内部水资源且采取节水技术情况下,年缺水量的缺口在 16 亿 m<sup>3</sup>左右。预计到 2040 年,滇中受水区年缺水量 29.3 亿 m<sup>3</sup>,缺水率达 44%。水资源禀赋条件与经济社会发展布局不相匹配,水资源空间失衡问题尤为突出。基于以上问题,为缓解滇中地区水资源危机,国务院于 2017 年批复了《滇中引水工程可行性报告》,选取位于云南北部的金沙江作为水源地,向滇中地区调水。金沙江多年平均年径流量 1 550 亿 m<sup>3</sup>,水量丰沛且水质好。

在滇中引水工程的相关研究中,主要聚焦单独分析金沙江水源地和滇中受水区的水资源量时空变化<sup>[5]</sup>、受水区用水需求<sup>[6]</sup>以及工程通水后水量水质变化<sup>[7]</sup>等方面。由于区域降水的空间差异性和时间波动性,调水工程水源区与受水区水资源量并非总是互补。如果水源区与受水区同是枯水年或者水源区连续枯水年,工程将面临受水区缺水严重而水源区无水可供的两难情形<sup>[8]</sup>。因此,为充分发挥调水工程效能,需把工程水源区与受水区降水量丰枯变化结合起来分析,在工程实际的调水过程中,可利用水源区与受水区之间降水丰枯频率特性进行灵活协调调水。

丰枯遭遇是指在同一时间内不同区域降水量的丰枯同异步组合<sup>[9]</sup>。现有研究中用于分析丰枯遭遇的方法有很多,常用的包括统计法、Moran 法、FEI 法及 Copula 函数法。其中:韩宇平等<sup>[10]</sup>利用统计方法计算了南水北调水源区与受水区之间的丰枯遭遇概率,此方法计算简单方便,但对样本序列的长度依赖性强,在样本序列较短时存在局限性。戴昌军等<sup>[11]</sup>基于正态化变换的 Moran 法,计算了南水北调优势调水频率分析, Moran 法要求将随机变量的边缘分布先转化成服从正态分布,再进行求解,其转换过程复杂且计算量较大,在转化时数据容易失真。费永法等<sup>[12]</sup>基于 FEI 法计算了黄河与长江、淮河枯水遭遇的概率,由于 FEI 方法原始公式只能求解丰-丰型或者枯-枯型的频率,对其他组合采用非参数估计对其求解,计算结果存在误差,因此可能会造成在丰枯遭遇计算时成果不稳定。Copula 函数法原理是通过观测样本将变量分别服从边缘分布,再将边缘分布拟合成联合分布函数,可用该函数构建变量间的二维联合分布,因此更接近实际概率分布<sup>[13]</sup>。Copula 函数法在克服上述计算方法不足

的同时,能够分析条件概率、概率等值线图,可以更加直观地反映降水组合状态<sup>[14]</sup>。目前, Copula 函数已被多位学者运用于丰枯遭遇研究中。闫宝伟等<sup>[15]</sup>基于 Copula 函数法探讨了南水北调中线工程中水源区与受水区的年降水量的丰枯遭遇;唐珊珊等<sup>[16]</sup>利用 Copula 函数分析了黔中调水工程水源区与受水区的降水量丰枯组合概率。

由于水资源配置是一个长期的、动态的过程,调水工程需要根据水资源时空变化进行合理配置。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指出,全球气候正呈现以变暖为特征的显著变化,水资源时空分布不均的情况会更加严峻<sup>[17]</sup>。同时,已有研究<sup>[18]</sup>证明,全球持续变暖和循环的加速将导致滇中地区水资源时空分布不均的情况更加严峻,滇中地区未来降水的时空分布格局将可能进一步发生变化。气候变化势必会导致滇中引水工程水源区与受水区降水量丰、平、枯水年发生不规律交替变化,对调水工程的运行管理带来一定的影响或风险。

在此背景下,基于历史实测降水数据与全球气候模型预估数据,使用 Morlet 小波方法分析滇中引水工程水源区与受水区降水序列的周期变化和未来的降水趋势,同时,利用 Copula 函数计算历史时期与未来时期滇中引水工程水源区与受水区同时面临枯水年、丰水年及丰枯年异步组合的发生概率。通过对滇中引水工程水源区与受水区降水量丰枯遭遇的综合分析、定量评估和模拟预测,可以为滇中引水工程水资源调度协同一体化提供数据支撑及参考依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 工程概况

滇中引水工程是西南地区规模最大的水资源配置工程。水源区取水工程从金沙江干流无坝取水,再通过引水路线将水引至滇中 34 个受水小区,设计每年平均引水量 34.03 亿 m<sup>3</sup>。以水利枢纽工程总体分布中的引水路线来划分水源区与受水区,其中,金沙江干流流域为水源区,工程路线流经的滇中区域为受水区。滇中引水工程总体布局路线见图 1。

### 1.2 基础数据

基于历史实测降水数据和全球气候模型预估数据进行分析。历史观测数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括水源区金沙江流域以及滇中受水区 6 个市的各气象站的 1960—2021 年共 62 a

的月降水量资料。根据研究区的降水特点,设定汛期为5—10月,非汛期为11月至次年4月。未来降水数据采用国际耦合比较计划(CMIP)第6阶段发布的共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)来预估 (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>),再使用历史时期的网格数据与同时段的观测站数据进行匹配校准<sup>[19]</sup>,最终选取 BCC-CSM2-MR 等4个CMIP 6全球气候模式下 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景的未来79 a(2022—2100年)的逐月降水数据,再计算4个CMIP 6的降水数据的平均值,以减小预估降水数据的误差,选取的模式见表1。其中:SSP1-2.6情景代表低缓压力和低辐射强迫影响下的未来情景,也称之为可持续发展情景,其代表的是绿色发展模式下对未来降水丰枯遭遇的预估;SSP5-8.5情景代表高辐射强迫下的未来情景,是指以化石燃料为主的高速发展路径强迫下的情景,其表征未来水源区与受水区丰枯遭遇最为极端的变化。

### 1.3 研究方法

Copula函数的确定。依据 Sklar 的定理<sup>[15]</sup>: Copula理论是指将任意一个  $n$  维联合累积分布函数分解为  $n$  个边缘累积分布和一个 Copula 函数,边缘分布函数分别为  $F(x)$  和  $F(y)$ ,  $F(x,y)$  为随机变量  $x$  和  $y$  的联合分布,若  $F(x)$  和  $F(y)$  连续,则存在唯一

的 Copula 函数  $C(u,v)$  使得

$$F(x,y) = C_\theta[F_x(x), F_y(y)], \forall x,y \quad (1)$$

式中: $\theta$  为待定参数。

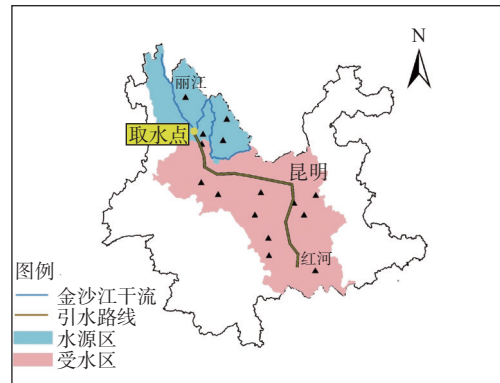


图1 滇中引水工程布局路线

Fig. 1 The canal route of the Water Transfer Project in Central Yunnan.

表1 CMIP 6 中4个模式基本信息

Tab. 1 Basic information of 4 modes in CMIP 6

模式名称	分辨率/(°)	单位及所属国家
BCC-CSM2-MR	160×320	BCC, 中国
NSEM3	96×192	NUIST, 中国
IPSL-CM6A-LR	143×144	IPSL, 法国
MIROC6	128×256	MIROC, 日本

Copula 函数包含多种类型<sup>[15]</sup>,其中 Archimedean 型函数具有较强的适用性,其函数类型及参数关系见表2。

表2 水文领域常用的3种 Copula 函数

Tab. 2 Three widely used Copula functions in hydrology.

Copula函数	分布函数	参数范围	参数 $\theta$ 与 $\tau$ 的关系
Gumbel-Hougaard	$\exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$	$\theta \geq 1$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\theta > 0$	$\tau = 1 - \frac{4}{\theta} \left[ 1 - \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{\exp(t) - 1} dt \right]$
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\theta > 0$	$\tau = \frac{\theta}{\theta + 1}$

采用非参数估计法,即用 Kendall 秩相关系数  $\tau$  和参数  $\theta$  之间的关系求得函数及参数。 $\tau$  的计算公式为

$$\tau = (C_n^2)^{-1} \sum_{i < j} \text{sign}[(x_i - x_j) \times (y_i - y_j)] \quad (2)$$

式中, sign 为符号函数,取值为

$$\text{sign} = \begin{cases} 1 & (x_i - x_j) \times (y_i - y_j) > 0 \\ 0 & (x_i - x_j) \times (y_i - y_j) = 0 \\ -1 & (x_i - x_j) \times (y_i - y_j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

采用 AIC(Akaike information criterion)信息准则法和离差平方和(OLS)最小准则2种方法进行 Copula 函数的拟合优度检验,选取 OLS 和 AIC 值最小的 Copula 函数作为联结函数<sup>[16]</sup>。OLS 值( $V_{OLS}$ )的计算公式为

$$V_{OLS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ei} - p_i)^2} \quad (4)$$

式中: $p_{ei}$  为经验频率; $p_i$  为理论频率。

AIC 值( $V_{AIC}$ )的计算公式<sup>[20]</sup>为



$$V_{AIC} = n \lg \left( \frac{S_{RS}}{n} \right) + 2m \quad (5)$$

式中:  $S_{RS}$  为残差平方和;  $n$  为样本的个数;  $m$  为参数的个数。

我国水文分析的边缘分布一般假定服从皮尔逊 P-III 型分布, 常用均值、变差系数、偏态系数 3 个统计参数来描述 P-III 曲线。其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} (x - \alpha_0)^{\alpha-1} e^{-(x-\alpha_0)/\beta}, x > \alpha_0 \quad (6)$$

丰枯遭遇概率的确定。丰枯标准按照《地表水资源调查和统计分析细则》规定划分, 见表 3。

表 3 降水丰、平、枯等级划分标准

Tab. 3 Classification for wet year, normal year and dry year

项目	丰水年	平水年	枯水年
降水量/mm	$X \geq X_{pf}$	$X_{pk} < X < X_{pf}$	$X \leq X_{pk}$

设 2 组数据分别为  $X$  和  $Y$ ,  $X_{pk}$ 、 $X_{pf}$ 、 $Y_{pk}$ 、 $Y_{pf}$  分别为  $X$  和  $Y$  枯平、平丰的分界值, 其对应的边缘分布结果为  $u_{pk}$ 、 $u_{pf}$ 、 $v_{pk}$  和  $v_{pf}$ ,  $C(u, v)$  指  $u$  和  $v$  的 Copula 函数<sup>[21]</sup>, 由此可得到水源区与受水区降水量各类丰枯遭遇组合:

$$X \text{ 丰 } Y \text{ 丰}, P_1(X \geq X_{pf}, Y \geq Y_{pf}) = 1 - u_{pf} - v_{pf} + C(u_{pf}, v_{pf}) \quad (7)$$

$$X \text{ 丰 } Y \text{ 平}, P_2(X \geq X_{pf}, Y_{pk} < Y < Y_{pf}) = v_{pf} - v_{pk} + C(u_{pf}, v_{pk}) - C(u_{pf}, v_{pf}) \quad (8)$$

$$X \text{ 丰 } Y \text{ 枯}, P_3(X \geq X_{pf}, Y \leq Y_{pk}) = v_{pk} - C(u_{pf}, v_{pk}) \quad (9)$$

其他丰枯组合依此类推。

其中,  $X_{pf}=37.5\%$ ,  $X_{pk}=62.5\%$  为丰枯划分频率的标准。

降水量周期变化的确定。小波分析法能够分析出降水时间序列的频率特征, 突出各时间尺度的分布以及强弱情况, 进而分析降水时间序列的周期变化。对于特定的小波函数  $\varphi(t)$  水文时间序列的连续小波变换<sup>[22]</sup> 为

$$w_f(a, b) = |\alpha|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\varphi} \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (10)$$

式中:  $a$  为尺度因子, 反映小波的周期长度;  $b$  为时间因子, 反映时间上的平移。

## 2 结果分析

### 2.1 水源区与受水区降水特征分析

水源区与受水区的水资源量影响调水工程的可调水量和需调水量。从长期实测降水数据中探究降水量的周期变化和趋势, 并捕捉降水周期变化的时间分布和未来的降水趋势, 以此来制定调水工程全年的水资源调度计划。金沙江干流水源区及滇中受水区 1960—2021 年实测降水量及气候变化情景下 2022—2100 年的 Morlet 小波变换时频图如图 2。由图 2 可见, 水源区与受水区 1960—2021 年降水序列存在 26~39 a、18~25 a、4~7 a 的 3 类时间尺度的周期变化, 并在 26~39 a 时间尺度上振荡周期最为显著。降水量经历了“多—少—多”的循环交替, 到 21 世纪初, 降水量处于多雨期中期, 预计未来 10~20 a 还将维持在降水较多的时期。SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下的 Morlet 小波变换时频图显示, 2022—2100 年降水序列存在 38~55 a、18~30 a、5~12 a 的 3 类时间尺度的周期变化, 且 2022—2040 年正是处于降水较多时期, 与历史实测降水序列预测的周期变化趋势吻合。

### 2.2 基于历史数据的丰枯遭遇分析

采用线性矩法估计边缘分布参数, 得出水源区与受水区的均值、变差系数、偏态系数 3 个统计参数。如表 4 所示, 水源区年降水量大于受水区, 水源区变差系数(0.12~0.24)小于受水区(0.14~0.35), 说明水源区降水量年际变化相对较小, 降水量年内分配比受水区均匀, 具有较强的供水保障能力, 能够满足滇中缺水地区的刚性需水需求。

水源区与受水区不同时间尺度组合的 Copula 参数及评价指标的计算结果见表 5。由表 5 可知, 除全年的 OLS 值和汛期的 AIC 值使用 Frank Copula 函数最优, 其他情况均使用 Clayton Copula 最优。考虑到 Frank Copula 函数在全年的 OLS 值和汛期的 AIC 值与 Clayton Copula 函数在全年的 OLS 值和汛期的 AIC 值相差较小, 为保持统一, 选取 Clayton Copula 函数作为实测水源区与受水区降水量的联结函数。

根据上文所选取的最优的 Clayton Copula 函数拟合水源区与受水区降水量的联合分布见图 3。根据上文所建立的联合分布, 绘出了水源区与受水区降水量的联合分布等值线图, 根据联合分布等值线

图可以定量分析不同降水量的联合分布概率。如图4所示,例如,当水源区为枯水年时(降水量小于

1106.40 mm),受水区为枯水年(降水量小于 875.40 mm)的概率为 28.3%。

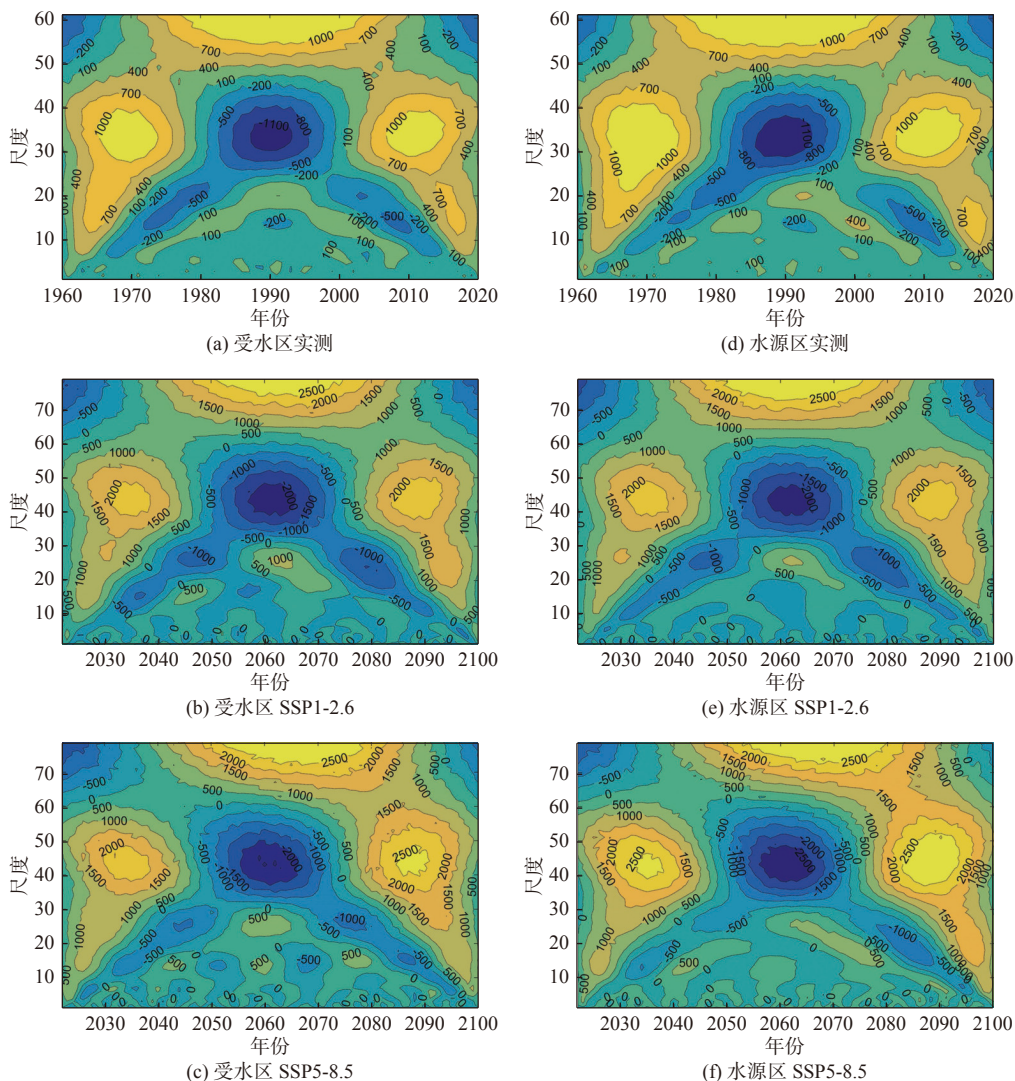


图2 降水序列的小波变换实部时频分布

Fig. 2 The real part time-frequency distribution of wavelet coefficients for precipitation series

表4 水源区与受水区降水分布参数估计结果

Tab. 4 Estimated parameters for precipitation distribution in the water source area and the water receiving area

时间尺度	区域	$\bar{x}$	$c_v$	$c_s$	$X_{37.5\%}$	$X_{62.5\%}$
全年	受水区	931.41	0.16	0.28	975.14	875.40
	水源区	1094.21	0.12	0.41	1192.51	1106.40
汛期	受水区	772.42	0.14	0.26	831.60	724.45
	水源区	986.46	0.14	0.55	1021.23	918.50
非汛期	受水区	136.00	0.35	0.62	142.66	112.34
	水源区	126.42	0.24	0.62	122.53	100.08

根据年、汛期及非汛期不同时间尺度的 Copula 函数,得到了不同丰枯遭遇组合的概率。由表6可知:在全年时间尺度上,水源区和受水区丰枯异步频率达到 36.7%,两地同丰频率为 25.3%,同平频率为 9.7%;汛期时,水源区和受水区丰枯异步频率达

33.4%,同丰频率为 26.7%,同平频率为 13.3%;非汛期时,水源区和受水区丰枯异步频率达到 35.1%,两地同丰频率为 21.6%,同平频率为 13.3%。水源区与受水区同枯和源枯受丰的概率小于 30%,有利于调水的降水组合概率较大,具备从水资源较丰富的金沙江引水致滇中缺水区的

表5 各 Copula 函数拟合优度检验

Tab. 5 Goodness of fit for each Copula function

时间尺度	检验方法	Clayton	Gumbel-Hougaard	Frank
全年	OLS	0.34	0.37	<b>0.33</b>
	AIC	<b>-44.81</b>	-41.29	-44.41
汛期	OLS	<b>0.36</b>	0.40	0.39
	AIC	-27.02	-35.91	<b>-41.90</b>
非汛期	OLS	<b>0.37</b>	0.44	0.60
	AIC	<b>-60.41</b>	-43.26	-55.56

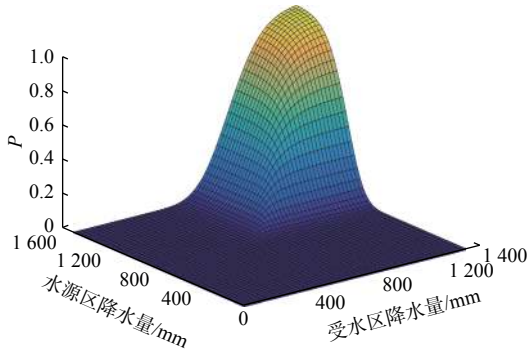


图 3 水源区与受水区降水量二维联合分布

Fig. 3 Two dimensional joint distribution of precipitation in water source area and water receiving area

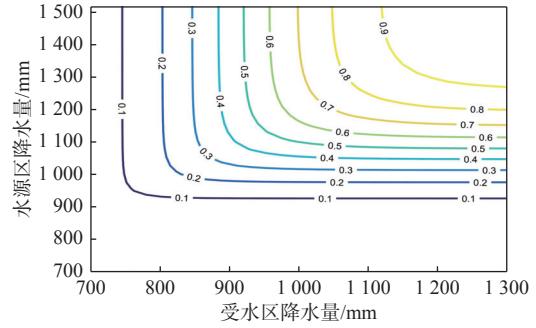


图 4 水源区与受水区年降水遭遇的联合分布等值线

Fig. 4 Joint distribution isoline of annual precipitation in water source area and receiving area

表 6 水源区与受水区降水丰枯遭遇频率

Tab. 6 Frequency of wet and dry precipitation in water source area and receiving area

组合	同丰	同平	同枯	源丰受平	源丰受枯	源平受枯	源平受丰	源枯受丰	源枯受平	%
全年	25.3	9.7	28.3	10.3	1.9	6.3	10.0	1.4	6.8	
汛期	26.7	13.3	26.6	8.3	3.4	5.0	8.3	3.4	5.0	
非汛期	21.6	13.3	30.0	10.0	5.0	1.7	11.7	1.6	5.1	

### 2.3 未来气候变化情景下丰枯遭遇分析

采用线性矩法估计边缘分布参数, 得出了在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下水源区与受水区的均值、变差系数、偏态系数 3 个统计参数。如表 7 所示, SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下, 水源区降水量均大于受水区降水量, 变差系数小于受水区, 说明未来水源区的降水年际变化小于受水区, 具备为滇中缺水地区供水的优势。

表 7 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下水源区与受水区降水分布参数估计结果

Tab. 7 Estimated parameters for precipitation distribution in water source and receiving areas under SSP1-2.6 and SSP5-8.5.

情景模式	区域	$\bar{x}/\text{mm}$	$c_v$	$c_s$	$X_{37.5\%}/\text{mm}$	$X_{62.5\%}/\text{mm}$
SSP1-2.6	受水区	1447.03	0.12	0.19	1515.68	1378.52
	水源区	1507.32	0.11	0.31	1585.77	1416.74
SSP5-8.5	受水区	1530.38	0.14	0.12	1654.03	1439.20
	水源区	1577.94	0.10	0.23	1674.56	1357.92

SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下水源区与受水区 Copula 参数及评价指标的计算结果见表 8。由表 8 可知, SSP1-2.6 情景下 OLS 值和 AIC 值在 Frank Copula 函数下的值最优, 选用 Frank Copula 函数作为水源区与受水区降水量的联结函数, SSP5-8.5 情景下 OLS 值和 AIC 值在 Clayton Copula 函数下最优, 选用 Clayton Copula 函数作为水源区与受水区降水量的联结函数。

表 8 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下各 Copula 函数拟合优度检验

Tab. 8 Goodness of fit for each Copula function under SSP1-2.6 and SSP5-8.5

情景模式	检验方法	Clayton	Gumbel-Hougaard	Frank
SSP1-2.6	OLS	0.03	0.03	<b>0.02</b>
	AIC	-30.46	-30.82	<b>-40.21</b>
SSP5-8.5	OLS	<b>0.02</b>	0.04	0.03
	AIC	<b>-40.32</b>	-40.19	-30.83

根据上文所选取的最优的 Clayton Copula 和 Frank Copula 函数, 分别拟合 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下的降水量联合分布见图 5。根据上文所建立的联合分布, 图 6 绘出了 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下水源区与受水区降水量的联合分布等值线图, 根据联合分布等值线图可以定量分析不同降水量的联合分布概率。例如, 在 SSP1-2.6 情景下, 当水源区为枯水年时(降水量小于 1416.74 mm), 受水区为枯水年(降水量小于 1378.52 mm)的概率为 20.1%。

根据上文所构建的不同情景下的水源区与受水区的 Copula 函数, 得到了未来时期降水丰枯遭遇频率及变化趋势。从表 9 得出: SSP1-2.6 情景下, 降水丰枯异步频率达 49%, 同丰、同平和同枯遭遇概率分别为 24.7%、6.2% 和 20.1%。与历史实测丰枯遭遇相比, 丰枯同步概率呈现为减小的趋势, 具体表现为同丰、同平和同枯遭遇概率分别减小 0.6%、3.5% 和 8.2%, 同枯的减小趋势最大, 丰枯异步频率



增加 12.3%。SSP5-8.5 情景下,降水丰枯异步频率为 44.4%,同丰、同平和同枯遭遇概率分别为 22.2%、8.4% 和 25.0%。与历史丰枯遭遇相比,丰枯同步频率均呈现减小的趋势,其中,同丰、同平和同枯遭遇概率分别减小 4.5%、1.3% 和 3.3%,丰枯异步频率增加 7.7%。根据以往文献对于工程调水的频率做如下界定:当水源区与受水区同为枯水或水源区为枯水状态而受水区为平水或丰水状态时,此类降水组合情况是为不利于工程调水,除此之外的其他降水组合情况视为有利于工程调水。因此,与历史

丰枯遭遇对比,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下降水量丰枯同步频率均呈现减小的趋势,丰枯异步呈现增加的趋势,同枯和源枯受丰的频率减少,未来有利于调水的降水丰枯组合概率平均增加 3.75%。

为了进一步分析各时间段的丰枯变化,将未来降水预估分为 3 个时间段,分别是近期(2022—2049 年)、中期(2050—2079 年)和远期(2080—2100 年),针对性突出不同时间段的丰枯遭遇的差异。如表 10 和表 11 所示,在各时间段总体上均呈现出丰枯同步频率下降,丰枯异步频率上升趋势。近期预估中,降水量同枯和丰枯异步的概率均增加。SSP1-2.6 情景(可持续发展模式)过渡到 SSP5-8.5

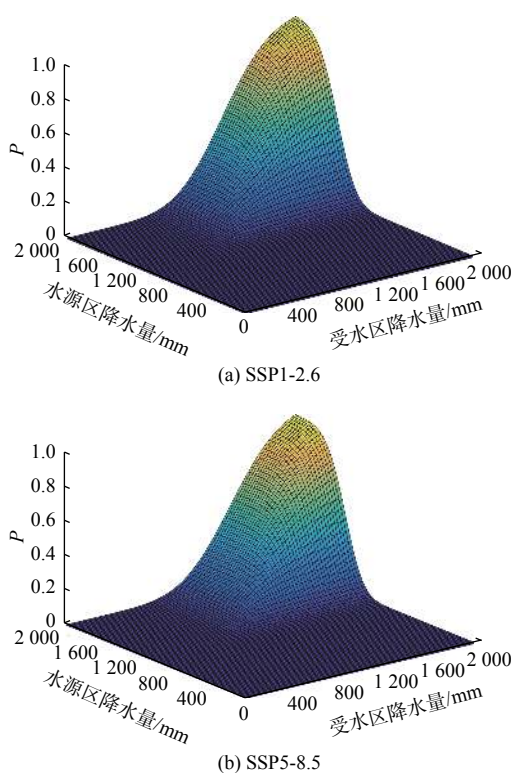


图 5 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下水源区与受水区降水量二维联合分布

Fig. 5 Two-dimensional joint distribution of precipitation in the water source and receiving areas under SSP1-2.6 and SSP5-8.5

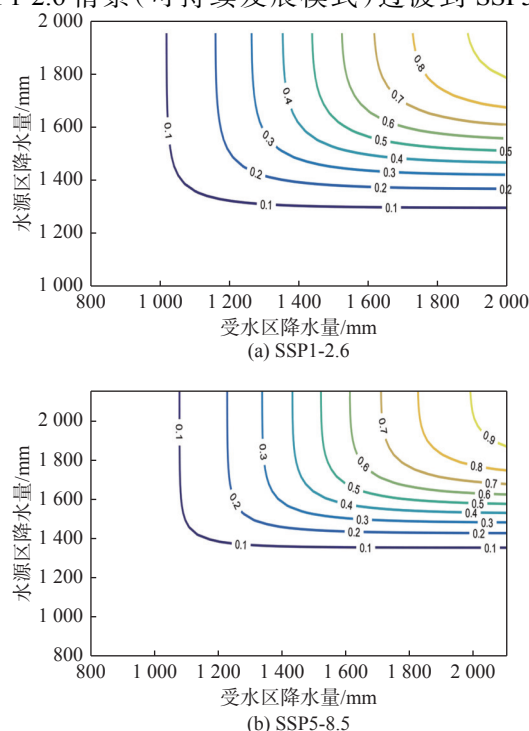


图 6 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下水源区与受水区年降水遭遇的联合分布等值线

Fig. 6 Joint distribution contours of annual precipitation encounters in the water source and receiving areas under SSP1-2.6 and SSP5-8.5

表 9 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下水源区与受水区降水丰枯遭遇频率

Tab. 9 Frequency of precipitation abundance encounters in water source and receiving areas under SSP1-2.6 and SSP5-8.5

情景模式	组合	遭遇频率/%	相对变化/%	情景模式	组合	遭遇频率/%	相对变化/%
SSP1-2.6	同丰	24.7	-0.6	SSP5-8.5	同丰	22.2	-4.5
	同平	6.2	-3.5		同平	8.4	-1.3
	同枯	20.1	-8.2		同枯	25.0	-3.3
	源丰受平	8.3	-2.0		源丰受平	9.9	-0.4
	源丰受枯	4.9	+3.0		源丰受枯	4.9	+3.0
	源平受枯	9.9	+3.6		源平受枯	6.2	-0.1
	源平受丰	9.9	-0.1		源平受丰	12.3	+2.3
	源枯受丰	3.7	+2.3		源枯受丰	2.5	+1.1
	源枯受平	12.3	+5.5		源枯受平	8.6	+1.8

情景(高强度发展模式),同枯概率增加了 10%,说明经济社会的高强度发展将导致降水量的减少。中期预估中,SSP1-2.6 情景下降水量丰枯异步频率变化不大,但在 SSP5-8.5 情景下丰枯异步频率显著

增加,说明随着人类活动对环境的影响加深,降水的时空分布更加不均。远期预估中,与历史丰枯遭遇相比,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下,降水丰枯异步频率均呈现显著增加趋势。

表 10 SSP1-2.6 情景下不同时间段水源区与受水区降水丰枯遭遇频率

Tab. 10 Frequency of precipitation abundance encounters in water source and receiving areas during different time periods under SSP1-2.6

时间段	组合	遭遇频率/%	相对变化/%	时间段	组合	遭遇频率/%	相对变化/%
2022—2049	同丰	19.4	-5.9	2050—2079	源平受枯	7.2	+0.9
	同平	3.9	-5.8		源平受丰	4.5	-5.5
	同枯	20.0	-8.3		源枯受丰	2.7	+1.3
	源丰受平	12.7	+2.4		源枯受平	10.3	+3.5
	源丰受枯	3.3	+1.4	2080—2100	同丰	14.3	-11.0
	源平受枯	13.9	+7.6		同平	5.8	-3.9
	源平受丰	11.2	+1.2		同枯	28.1	-0.2
	源枯受丰	6.7	+5.3		源丰受平	14.3	+4.0
	源枯受平	8.9	+2.1		源丰受枯	9.6	+8.0
	2050—2079	同丰	30.0		+4.7	源平受枯	1.3
同平		7.4	-2.3		源平受丰	17.7	+7.7
同枯		26.3	-2.0		源枯受丰	4.1	+2.7
源丰受平		5.9	-4.4	源枯受平	4.8	-2.0	
源丰受枯		5.7	+3.8				

表 11 SSP5-8.5 情景下不同时间段水源区与受水区降水丰枯遭遇频率

Tab. 11 Frequency of precipitation abundance encounters in water source and receiving areas during different time periods under SSP5-8.5

时间段	组合	遭遇频率/%	相对变化/%	时间段	组合	遭遇频率/%	相对变化/%
2022—2049	同丰	23.4	-1.9	2050—2079	源平受枯	4.7	+0.6
	同平	16.7	+7.0		源平受丰	7.9	-2.1
	同枯	30.0	+1.7		源枯受丰	3.2	+1.8
	源丰受平	4.9	-5.4		源枯受平	17.7	+10.9
	源丰受枯	6.6	+4.7	2080—2100	同丰	20.1	-5.2
	源平受枯	1.9	-4.4		同平	13.3	-6.4
	源平受丰	10.0	0.0		同枯	6.6	-11.7
	源枯受丰	3.1	+1.7		源丰受平	12.6	+2.3
	源枯受平	3.4	-3.4		源丰受枯	4.4	-2.5
	2050—2079	同丰	27.3		+2.0	源平受枯	9.5
同平		6.9	-2.8		源平受丰	12.5	+2.5
同枯		19.4	-8.9		源枯受丰	8.5	+7.1
源丰受平		10.7	+0.4	源枯受平	12.5	+5.7	
源丰受枯		2.2	+0.3				

### 3 结论与讨论

基于实测降水数据与全球气候模型预估数据,分别对滇中引水工程水源区与受水区的降水序列进行了 Morlet 小波分析,对两水区的历史期及未来

降水量变化趋势及特征进行分析。通过 Copula 函数方法,对滇中引水工程水源区与受水区的降水量进行丰枯遭遇分析,得到两区域降水丰枯遭遇的概率,在此基础上进一步预估了水源区与受水区未来



降水丰枯遭遇的变化,这与文献[23]中作者用贝叶斯仿真模型得到的云南省调水条件丰枯遭遇分析频率大体一致,因此可以认为,用 Copula 联合分布来描述滇中引水工程水源区与受水区降水量的丰枯遭遇是可行的。主要结论如下:

从降水特征来看,水源区具备为滇中缺水地区调水的水资源条件,未来 10~20 a 将维持在降水较多的时期。滇中引水工程水源区降水量大于受水区,水源区降水量年际变化相对较小且年内分配比受水区均匀,这些特点都有利于调水工程的水量补偿调节。

与历史丰枯遭遇对比,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下,降水量丰枯同步频率均呈现减小的趋势,丰枯异步呈现增加的趋势,同枯和源枯受丰的频率减少,未来有利于调水的降水丰枯组合概率平均增加 3.75%。

在近、中、远期预估中,从 SSP1-2.6 情景过渡到 SSP5-8.5 情景,SSP5-8.5 情景下降水量丰枯异步频率比 SSP1-2.6 情景大,说明水源区与受水区的降水区域差异变大,降水时空差异更加显著。随着经济社会发展强度的加大和气候的不稳定性,降水时空分布会更加不均。

调水工程的水量调配是“来水-调水-输水-配水-用水”多节点动态联动配合的过程。在实际调水过程中,通过水源区与受水区的降水丰枯组合状态,可灵活参考降水丰枯变化来进行水量调配。当水源区与受水区同为丰水年或其他有利于工程调水的降水组合年份或季节时,可考虑增设一定的调节水库或沿线湖泊等配套调蓄工程,将多余的水资源通过调节水库和沿线湖泊储存。水源区与受水区同为枯水年时,可利用水库和湖泊水资源向滇中受水区进行水量补偿,以此来全面提高区域供水保障能力和防范风险能力。

基于历史实测资料及全球气候模型预估数据,通过小波分析和 Copula 函数,采用多种拟合精度的方法,分别优选出拟合度最高的 Copula 函数,定量分析和预估滇中引水工程水源区与受水区的丰枯遭遇频率,同时对气候变化背景下不同情景的丰枯遭遇与历史丰枯遭遇进行了对比,分析其变化趋势,研究结果具有可靠性。虽然现有的 CMIP 6 全球气候模式在数值计算、物理过程等方面有了很大的提高,由于模式本身的不确定性,且只选用了 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种情景,对于未来可能发生的丰

枯遭遇变化特征不一定能精确描述,只能作为一种情景假设来解释,而并不是对未来结果的预报,存在着一定误差。另外,主要从水源区与受水区降水丰枯遭遇角度出发,对滇中引水工程调水的有利不利条件进行分析。对于调水工程来说,调水的机制复杂,还涉及地形、蓄水工程建设等其他因素影响。因此,在未来的工作中会更全面、深入地考虑其他影响因子对调水工程水资源调度的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] 李海涛,孙丽君.关于跨流域调水工程运行管理体制的策略与思考[J].*珠江水运*,2022(1):61-63.(LI H T, SUN L J. Strategies and thoughts on the operation and management system of inter-basin water transfer projects[J]. *Pearl River Water Transport*, 2022(1): 61-63. (in Chinese)) DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2022.01.018.
- [2] 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(2):173-175.(HE Q F, LI H, LI Y L. Exploration of the relationship between temporal and spatial in the South-to-North Water Transfer Project in China[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2022(2): 173-175. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2022.02.045.
- [3] 徐国鑫.引汉济渭工程水源区和受水区丰枯遭遇规律分析[J].*陕西水利*,2017(4):25-27.(XU G X. Analysis of plentiful and scanty encountering regulation in the water source area and water receiving area of Hanjiang to Wei River Project[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2017(4): 25-27. (in Chinese)) DOI: 10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2017.04.011.
- [4] 程超,童绍玉,彭海英,等.滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究[J].*资源科学*,2016,38(8):1561-1571.(CHENG C, TONG S Y, PENG H Y, et al. Ecological carrying capacity of water resources in the central Yunnan urban agglomeration area[J]. *Resources Science*, 2016, 38(8): 1561-1571. (in Chinese)) DOI: 10.18402/resci.2016.08.14.
- [5] 李波,曹正浩.滇中引水工程水资源配置方案研究[J].*水利水电快报*,2020,41(1):13-16.(LI B, CAO Z H. Study on water resources allocation for Central Yunnan Water Diversion Project[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2020, 41(1): 13-16. (in Chinese)) DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2020.01.003.
- [6] 张辛,杨爱明,姜本海,等.滇中引水工程测量控制系统精度与等级论证研究[J].*人民长江*,2022,53(2):72-76.(ZHANG X, YANG A M, JIANG B H, et al.

- Study on the accuracy and grade demonstration of survey control system for Water Diversion Project in Central Yunnan[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(2): 72-76. (in Chinese) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.02.012](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.02.012).
- [7] 朱赟. 滇中高原经济区农业水资源承载能力评估研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2021. (ZHU Y. Assessment study on agricultural water resources carrying capacity in central Yunnan economic area [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)) DOI: [10.27352/d.cnki.gylgu.2021.001811](https://doi.org/10.27352/d.cnki.gylgu.2021.001811).
- [8] 余江游, 夏军, 余敦先, 等. 南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 63-68, 194. (YU J Y, XIA J, SHE D X, et al. The analysis of encounter probability of drought between the water source area and the Hai River water receiving area in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project in China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(1): 63-68, 194. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.20180010](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.20180010).
- [9] 郑红星, 刘昌明. 南水北调东中两线不同水文区降水丰枯遭遇性分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 10. (ZHENG H X, LIU C M. Analysis on asynchronism-synchronism of regional precipitation in South-to-North Water Transfer planned areas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 10. (in Chinese)) DOI: [10.3321/j.issn:0375-5444.2000.05.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:0375-5444.2000.05.002).
- [10] 韩宇平, 蒋任飞, 阮本清. 南水北调中线水源区与受水区丰枯遭遇分析[J]. *华北水利水电学院学报*, 2007, 28(1): 8-11. (HAN Y P, JIANG R F, RUAN B Q. Analysis on wetness-dryness encountering of runoff flow between water source region and receiving water region in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*, 2007, 28(1): 8-11. (in Chinese)) DOI: [10.19760/j.ncwu.zk.2007.01.003](https://doi.org/10.19760/j.ncwu.zk.2007.01.003).
- [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 C J, GUAN G M, SUN H, 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)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.01.028](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2008.01.028).
- [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, 62. (FEI Y F, WANG D Z, SHAO S Z. Comparison and analysis of several hydrological calculation methods for flood removal[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2015(1): 24-25, 62. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1672-2469.2015.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2469.2015.01.010).
- [13] 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. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-0852.2008.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0852.2008.03.001).
- [14] 熊其玲, 何小聪, 康玲. 基于Copula函数的南水北调中线降水丰枯遭遇分析[J]. *水电能源科学*, 2009, 27(6): 9-11, 112. (XIONG Q L, HE X C, KANG L. Synchronous asynchronous encounter probability of rich poor precipitation between water source area and water receiving area based on Copula theory in middle route of South to North Water Transfer Project[J]. *Water Resources and Power*, 2009, 27(6): 9-11, 112. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-7709.2009.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7709.2009.06.003).
- [15] 闫宝伟, 郭生练, 肖义. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(10): 1178-1185. (YAN B W, GUO S L, XIAO Y. 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]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1178-1185. (in Chinese)) DOI: [10.3321/j.issn:0559-9350.2007.10.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:0559-9350.2007.10.005).
- [16] 唐姗姗, 廖卫红, 宋万祯, 等. 黔中调水工程降雨丰枯遭遇分析[J]. *人民珠江*, 2016, 37(12): 22-28. (TANG S S, LIAO W H, SONG W Z, et al. Synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation about the Guizhou Water Transfer Project[J]. *Pearl River*, 2016, 37(12): 22-28. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1001-9235.2016.12.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9235.2016.12.004).
- [17] DAI A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58. DOI: [10.1038/nclimate1633](https://doi.org/10.1038/nclimate1633).
- [18] 任梦熊, 郭云波, 宗廷学. 云南省滇中引水工程生态环境保护措施分析[J]. *云南水力发电*, 2021, 37(6): 182-184. (REN M X, GUO Y B, ZONG T X. Analysis on ecological environment protection measures of Yunnan Water Diversion Project[J]. *Yunnan Water Power*, 2021, 37(6): 182-184. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1006-3951.2021.06.044](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-3951.2021.06.044).
- [19] 冷险险. 气候变化下云南省干旱时空演变及预估[D]. 云南: 昆明理工大学, 2020. (LENG X X. Evolution and prediction of dry spatial and temporal conditions in Yunnan Province under climate change[D]. Yun-

- nan: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese) DOI: [10.27200/d.cnki.gkm lu.2020.000659](https://doi.org/10.27200/d.cnki.gkm lu.2020.000659).
- [20] 姚曼飞, 党素珍, 孟美丽, 等. 基于Copula函数的泾河流域水沙丰枯遭遇频率分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 192-196+202. (YAO M F, DANG S Z, MENG M L. Copula-based analysis of occrent probability on rich-scare runoff and sediment in the Jinghe River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 192-196+202. (in Chinese) ) DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2019.01.027](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2019.01.027).
- [21] 刘翊竣, 徐国宾, 段宇. 基于Copula函数淮河流域水沙联合分布研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(6): 494-501. (LIU Y J, XU G B, DUAN Y. Study on joint distribution of water and sediment in Huaihe River basin based on Copula function[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(6): 494-501. (in Chinese) ) DOI: [10.14188/j.1671-8844.2021-06-003](https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2021-06-003).
- [22] 汤成友, 缈韧. 基于小波变换的水文时间序列分解及周期识别[J]. *人民长江*, 2006(12): 32-34. (TANG C Y, MIAO R. Hydrological time series decomposition and period identification based on wavelet transform[J]. *Yangtze River*, 2006(12): 32-34. (in Chinese) ) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2006.12.011](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2006.12.011).
- [23] 张亚鹏. 基于贝叶斯仿真模型的云南省调水条件丰枯遭遇分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. (ZHANG Y P. Synchronous-asynchronous encounter probability of the diversion condition in Yunnan Province based on the Bayesian simulation model[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017(in Chinese) ) DOI: [10.7666/d.D01304921](https://doi.org/10.7666/d.D01304921).

## Synchronous-asynchronous encounter probability of high-low precipitation between the water source and water receiving area in the Water Transfer Project in Central Yunnan under climate change

HE Jing<sup>1</sup>, LYU Aifeng<sup>2,3</sup>, ZHANG Wenxiang<sup>1</sup>

( 1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environment Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China )

**Abstract:** The analysis of synchronous-asynchronous encounter probability of high-low precipitation between the water source and water receiving area is an important basis for regulation of water resources project and rational water resources allocation. The inter-annual precipitation variation cycles and trends were analyzed by Morlet wavelet analysis of water source and receiving area of the Water Transfer Project in Central Yunnan (WTPCY) from 1960 to 2021. A Copula function was used to construct a joint distribution model of precipitation between the water source and the receiving area of WTPCY based on the historical measured and the shared socio-economic path (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) of the International Coupled Model Comparison Program Phase 6 (CMIP 6) precipitation data from 2022 to 2100. The probability of asynchronous or synchronous precipitation was calculated in the two regions. The results show that: (1) annual precipitation in the water source area of the WTPCY was larger than that in the receiving area, the inter-annual variation of precipitation was relatively small and the intra-annual distribution was more uniform than that in the receiving area. The precipitation sequence from 1960 to 2021 had periodic changes on three time scales of 26~39 a, 18~25 a and 4~7 a, respectively, and the precipitation sequence from 2022 to 2100 has periodic changes on three time scales of 38~55 a, 18~30 a and 5~12 a. The precipitation showed a cycle of "more-less-more" alternately. It is expected that the next 10~20 a will continue to be a period of high precipitation. (2) In the past 62 years, the precipitation asynchronous encounter probability between the water source area and the water receiving area was 36.4% and the precipitation synchronous encounter probability of high precipitation years was 25.3%. The precipitation synchronous encounter probability of low precipitation years was less than 30%, and the WTPCY have complementary water transfer conditions. (3) Compared with the baseline, the probability of precipitation synchronous encounters will decrease but asynchronous encounters will increase by different degrees in the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios. Especially, the precipitation synchronous encounter probability of low precipitation years showed a decreasing trend, and the water source area had low precipitation



years but the water receiving area had high precipitation years and encounter probability showed a decreasing trend. In summary, the probability conducive to water transfer of synchronous-asynchronous encounter probability about the WTPCY will increase obviously by 3.75%. (4) With the increase in economic development and intensity of human activities, it will lead to climate instability and more uneven spatial and temporal distribution of precipitation. In the near, medium, and long-term projections, the transition from the SSP1-2.6 scenario (sustainable development model) to the SSP5-8.5 scenario (high-intensity development model), the probability of precipitation asynchronous encounter under the SSP5-8.5 scenario may larger than SSP1-2.6 scenario, indicating that the regional differences in precipitation between the water source area and the water receiving area become larger and the spatial and temporal differences in precipitation become more significant. In the future, the precipitation and the probability conducive to water transfer of synchronous-asynchronous encounter probability about the WTPCY will increase obviously. These characteristics are conducive to the operation of the WTPCY. Through comprehensive analysis, quantitative assessment, and simulation prediction of the synchronous-asynchronous encounter probability about the WTPCY under climate change, it provides data support and a reference basis for the synergistic integration of water resources regulation in the WTPCY.

**Key words:** Water Transfer Project in Central Yunnan; Copula; synchronous-asynchronous encounter; CMIP 6; wavelet analysis.

## 推进美丽中国建设

### 坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理