

南水北调西线工程不同调水方案下径流丰枯遭遇特征及其对调水的影响

王智元,刘欢,胡鹏,王建华,贾仰文,王小辣,王宣宣

(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,北京 100038)

摘要:为量化评估南水北调西线工程不同调水方案下的径流丰枯遭遇及其影响,聚焦西线工程 3 种主要调水方案,构建了基于 Vine Copula 函数的上下线断面径流丰枯联合分布模型,系统分析了各调水方案下的径流丰枯遭遇特征,提出了调水适配度指标,开展了不同调水方案下有利调水概率分析,多维度探究了不同调水方案对西线工程整体效果的影响。结果表明:方案 1(上线、下线调水量分别为 80 亿、90 亿 m³)的丰枯同步概率为 52.0%,大于异步概率,调水适配度波动较大,为 56.3%~66.0%,有利调水概率最低,为 62.3%,调水稳定性较差;方案 2(上线、下线调水量分别为 40 亿、130 亿 m³)因断面数量的增加使得丰枯同步概率下降为 47.8%,调水适配度和有利调水概率分别为 68.3%~74.9%和 63.3%,均优于方案 1;方案 3(下线调水量为 170 亿 m³)的丰枯同步概率为 50.4%,近似等于丰枯异步概率,调水适配度最大可达 76.0%,且波动幅度最小,调水适配性最佳,有利调水概率达 69.3%,方案 3 可更有效利用断面间的径流资源,更有利于保障工程整体的稳定性。

关键词:南水北调西线工程;丰枯遭遇;调水适配度;Vine Copula 函数

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0105-10

Runoff wetness-dryness encountering characteristics under different water diversion schemes and their impacts on water diversion in the South-to-North Water Diversion Western Route Project//WANG Zhiyuan, LIU Huan, HU Peng, WANG Jianhua, JIA Yangwen, WANG Xiaola, WANG Xuanxuan (*State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: To quantitatively evaluate the characteristics of runoff wetness-dryness encountering and their impacts under different water diversion schemes for the South-to-North Water Diversion Western Route Project, this study focused on three main water diversion schemes. A runoff wetness-dryness joint distribution model at the upper- and lower-line sections was constructed based on the Vine Copula function, and the runoff wetness-dryness encountering characteristics under each water diversion scheme were analyzed. Furthermore, a water diversion adaptability index was proposed, and an analysis of the probability of favorable water diversion conditions was conducted to explore the impacts of different schemes on the overall effectiveness of the Western Route Project from a multidimensional perspective. The results showed that, for scheme 1 (with the upper and lower route intakes of 8 billion m³ and 9 billion m³, respectively), the synchronous wetness-dryness encountering probability was 52.0%, exceeding the asynchronous probability. Its water diversion adaptability fluctuated significantly, ranging from 56.3% to 66.0%. The favorable water diversion probability was the lowest at 62.3%, and its water diversion stability was poor. For scheme 2 (with the upper and lower route intakes of 4 billion m³ and 13 billion m³, respectively), due to an increased number of sections, the synchronous wetness-dryness encountering probability decreased to 47.8%. It exhibited superior performance to scheme 1, with water diversion adaptability ranging from 68.3% to 74.9% and a favorable water diversion probability of 63.3%. Scheme 3 (with the lower route intake of 17 billion m³) had a synchronous wetness-dryness encountering probability of 50.4%, approximately equal to the asynchronous probability. Its water diversion adaptability was optimal, reaching a maximum of 76.0% with the smallest fluctuation. The favorable water diversion probability for scheme 3 was the highest at 69.3%. Consequently, scheme 3 can more effectively utilize the runoff

基金项目:国家自然科学基金项目(52394233,52122902,U2240202);中国科协青年人才托举工程项目(2023QNRC001);流域水循环与水安全全国重点实验室自主研究项目(WR110146B0022024)

作者简介:王智元(1999—),男,博士研究生,主要从事水资源保护研究。E-mail:wang15245779105@163.com

通信作者:刘欢(1992—),男,高级工程师,博士,主要从事水资源保护研究。E-mail:liuhuan@iwhr.com

resources between sections and is more conducive to ensuring the overall stability of the project.

Key words: the South-to-North Water Diversion Western Route Project; wetness-dryness encountering; water diversion adaptability; Vine Copula function

南水北调西线工程(以下简称“西线工程”)是我国“四横三纵”国家水网主骨架和“大动脉”建设的最后一环,对解决黄河流域水资源短缺和发展制约问题意义重大。多年来,围绕西线工程调水规模、调水线路及其影响,学界已开展大量深入的研究和讨论,但仍未达成共识^[1-3]。西线工程涉及多种调水方案,不同方案的调水断面不一,导致各方案的水源区径流时空分布与丰枯遭遇特性不同,直接影响工程可调水量和调水稳定性。定量识别西线工程不同调水方案下径流丰枯遭遇特征变化及其对调水的影响,是支撑西线工程规划设计的基础,对西线工程的科学论证与建设运行具有重要意义。

分析西线工程调水断面的径流丰枯遭遇,本质就是求解具有线性或非线性关系的多维变量联合分布问题。目前,水文多变量研究方法主要有回归分析法^[4]、多元分布函数法^[5]、Copula 函数法^[6]等。回归分析法通过拟合水文变量间的关系来预测未来水文事件,但该方法在处理多变量、非线性关系时存在局限性,易忽略变量间的相互作用影响,难以准确描述变量之间的依赖结构^[7]。多元分布函数法则通过建立多变量联合分布模型来描述变量间的相互关系,包括正态分布^[8]、极值分布^[9]、Gamma 分布^[10]、指数分布^[11]等。该方法能有效刻画变量间的联合概率分布,更准确地揭示水文变量间的依赖关系与潜在规律,从而提供更为丰富的水文信息,但通常假设变量间具有相同的边际分布类型。由于自然环境和水文过程中的随机性,不同变量往往呈现出不同的边际分布,导致通常难以满足这一假设条件,影响结果的可靠性,亟须更加灵活和适应性强的方法来提高分析的准确性与适用性。

为克服传统多元分布函数法的局限性,可采用基于 Copula 函数的方法。Copula 函数是模拟与分析多元水文变量的有效工具,它可以灵活地构造任意边际分布形式的水文变量联合分布,将变量的边际分布和依赖结构分开考虑^[12]。自 2003 年首次引入水文学领域以来,Copula 函数得到广泛应用,已应用于降雨^[13]、干旱^[14]、洪水^[15]等多变量间的研究。例如:Suresh 等^[16]通过 Copula 函数量化降雨强度、持续时间与频率之间的复杂关系,并结合未来气候变化评估印度东北部某城市集水区降雨强度-历时-频率曲线的变化情况;Yang 等^[17]应用 Copula 函数,结合干旱特征变量研究中国西北地区干旱事件

的时空分布,从而更准确地评估干旱事件的影响范围及持续时间;Klaho 等^[18]使用伊朗 Dez Dam 水文站多年洪水数据,通过 Copula 函数进行多元洪水频率分析,建立考虑洪峰、洪水体积与洪水持续时间的耦合模型,并计算研究区域洪水的重现期,以提高洪水预警的准确性。Copula 函数通常用于描述两个随机变量之间的依赖结构,尽管高维情况下可以采用多变量 Copula 函数,但此类方法往往假定每对随机变量的依赖结构相同,从而限制了对多元变量复杂依赖关系的刻画能力^[19]。为此,Joe 等^[20-21]提出了 Vine Copula 函数,通过将多个随机变量的边际分布函数以 Copula 对的形式连接起来,构造多维联合分布函数,并借助藤状(Vine)结构表征变量间的依赖关系,从而有效描述高维变量间的复杂依赖特性^[22]。

西线工程水源区涉及多条河流与调水坝址断面,是典型的多维变量依赖关系解析问题。本文采用 Copula 函数分析西线工程调水坝址断面间的径流补偿规律,构建基于 Vine Copula 函数的上下线断面径流丰枯遭遇联合分布模型,定量评估不同调水方案下的径流丰枯遭遇概率,并通过调水适配度评估不同方案下的调水稳定性,为科学制定调水方案和策略提供支持。

1 研究区概况

西线工程是将长江上游支流雅砻江、大渡河等水系的水资源调至黄河中上游区域的跨流域调水工程,以解决黄河上游缺水问题,设计多年平均调水量为 170 亿 m³。在具体调水线路选择和调水量分配方面,目前主要有 3 种方案,如图 1 所示。方案 1 结合上线和下线两条调水线路,其中上线岗托、热巴、阿安、仁达、珠安达、霍那、克柯断面共调水 80 亿 m³,下线两河口、双江口断面分别调水 50 亿、40 亿 m³;方案 2 将上线热巴、阿安、仁达、珠安达、霍那、克柯断面总调水量缩减至 40 亿 m³,下线叶巴滩、两河口、双江口断面分别调水 50 亿、40 亿、40 亿 m³;方案 3 则完全依赖下线调水,叶巴滩、两河口、双江口断面调水量分别为 70 亿、60 亿、40 亿 m³。

本文采用的径流数据为 1980—2020 年月径流数据。由于西线工程部分坝址断面缺乏长序列实测径流资料,本文综合采用水文比拟法和模型模拟法对相关数据序列进行插补:①选取邻近国家基本水

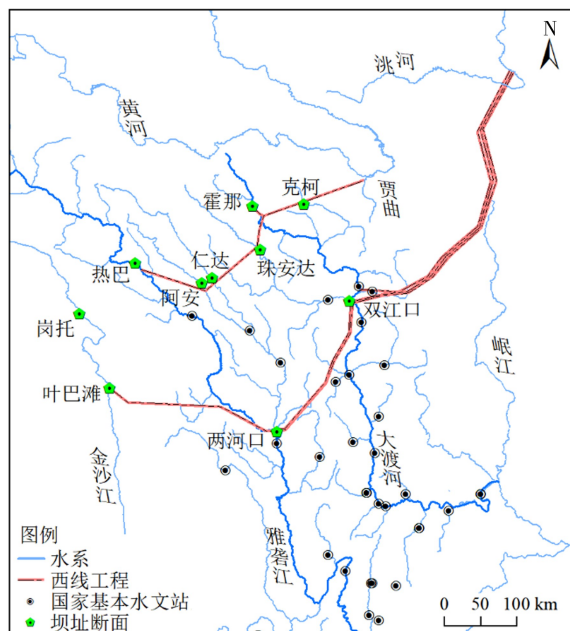


图1 西线工程调水线路

Fig.1 Water diversion route of the Western Route Project

文站的月径流数据,基于水文相似性原则推算各坝址断面的流量^[23];②利用前期构建并充分验证后的长江上游分布式水文模型,对坝址断面缺失数据的时段进行模拟^[2]。

2 研究方法

2.1 边际分布拟合

在构建不同调水方案的联合分布模型前,需要确定各调水方案坝址断面径流序列的边际分布函数。本文选取在水文分析中广泛应用的几种常见分布,包括正态分布(Norm)、对数正态分布(Logn)、伽马分布(Gamma)、韦伯分布(Weibull)、逻辑斯蒂分布(Logis)以及广义极值分布(Gev),分别对3种调水方案下的断面径流序列进行边际分布拟合。采用极大似然估计(MLE)法对各分布的参数进行估计,并通过赤池信息准则(AIC)、均方根误差(RMSE)和Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验评估拟合效果,避免单一指标带来的选择偏差。K-S检验采用显著性水平大于0.05作为标准,并根据AIC和RMSE的最小值确定最优边际分布函数,从而确保所选分布能更准确地反映实际情况。

2.2 基于Vine Copula函数的多元依赖关系建模

1959年统计学家Sklar提出Copula理论,用于将多维分布函数与其边际分布函数联系起来,适用于描述变量间的依赖结构^[24]。传统的多元Copula函数将 n 维随机变量 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的联合分布函数分解成一个Copula函数和 n 个边际分布函数,但这种构建方式要求变量之间都具有相同的依赖结

构,当维度上升时,易导致建模的准确性降低。而Vine Copula函数可有效解决该问题,它通过将高维联合分布分解为一系列二元Copula函数来表述多变量间的复杂依赖关系。常用的Vine Copula函数结构包括C-Vine、D-Vine和R-Vine Copula函数结构,前两种函数结构适用于描述特定变量节点间的依赖关系,而R-Vine Copula函数结构更具一般性,可用来描述任意变量间的依赖关系。为此,本文基于R-Vine Copula函数构建西线工程不同调水方案下断面径流丰枯遭遇联合分布模型,其步骤为:

a. 确定变量的连接顺序。R-Vine Copula函数未事先确定树的形状,而是根据变量间的实际情况决定最终结构,这使其每一层树都可能具有不同的结构,模型结构的确定与参数估计更为复杂。当变量维数较低时,可以对所有R-Vine Copula函数进行遍历搜索,但随着变量维数的升高,其需要遍历的数量将呈指数增长,使得建模耗费时间较长,实用性降低。因此,本文采用Brechmann等^[25]提出的最大生成树法则,以每层树的Kendall秩相关系数绝对值之和作为优化目标,通过最大化目标函数确定每一层树的最优结构。

b. 选择二元Copula函数。以AIC和贝叶斯信息准则(BIC)为选择标准,从Gaussian、Student- t 、Frank、Clayton、Gumbel、Joe和BB Copula(包括 0° 、 90° 、 180° 、 270° 旋转形式)等31种备选Copula函数中筛选出最优的二元Copula函数。

c. 估计Vine Copula函数的参数。使用MLE法逐层估计Vine Copula函数的参数。首先对第一层树的二元Copula函数参数进行估计,再利用第一层树中得到的参数,通过条件分布 $F(x|\mathbf{e})$ 计算第二层树的观测值,并基于第二层树获得的观测值估计第二层树的参数。重复以上过程,逐步完成每一层树的参数估计,实现Vine Copula函数的多元依赖关系建模。 $F(x|\mathbf{e})$ 表达式为

$$F(x|\mathbf{e}) = \frac{\partial C_{x e_j | \mathbf{e}_{-j}}[F(x|\mathbf{e}_{-j}), F(e_j|\mathbf{e}_{-j})]}{\partial F(e_j|\mathbf{e}_{-j})} \quad (1)$$

式中: x 为当前层树中待建模的变量; $\mathbf{e}_j$ 为 n 维向量 $\mathbf{e}$ 中第 j 个分量; $\mathbf{e}_{-j}$ 为 $\mathbf{e}$ 中除 e_j 外的 $n-1$ 维向量; $C_{x e_j | \mathbf{e}_{-j}}[F(x|\mathbf{e}_{-j}), F(e_j|\mathbf{e}_{-j})]$ 为 $F(x|\mathbf{e}_{-j})$ 和 $F(e_j|\mathbf{e}_{-j})$ 二元Copula函数。

2.3 丰枯遭遇概率的计算

本文将丰枯状态划分为丰水、平水和枯水3种水文情景,取丰水、枯水划分的频率分别为 $P_f = 25\%$ 和 $P_k = 75\%$ 。以3个水文站为例,设其对应的径流数据分别为 X, Y, Z ,其边际分布函数分别为 u, v, w 。则对于任意给定的径流阈值 x, y, z ,其丰枯遭遇的联

合分布模型可以表示为

$$P(X < x, Y < y, Z < z) = C(u, v, w) \tag{2}$$

式中: $P(X<x,Y<y,Z<z)$ 为 3 个水文站同时小于各自阈值的联合分布概率; $C(u, v, w)$ 为三元 Copula 函数。

当水文站均处于丰水状态时,其丰水事件同步的联合分布概率计算公式为

$$P(X > x_{p_f}, Y > y_{p_f}, Z > z_{p_f}) = 1 - u_{p_f} - v_{p_f} - w_{p_f} + C(u_{p_f}, v_{p_f}) + C(u_{p_f}, w_{p_f}) + C(v_{p_f}, w_{p_f}) - C(u_{p_f}, v_{p_f}, w_{p_f}) \tag{3}$$

式中: x_{p_f} 、 y_{p_f} 、 z_{p_f} 分别为 3 个水文站的丰水阈值; u_{p_f} 、 v_{p_f} 、 w_{p_f} 分别为 3 个水文站在丰水状态下的累积分布函数值; $C(u_{p_f}, v_{p_f})$ 、 $C(u_{p_f}, w_{p_f})$ 、 $C(v_{p_f}, w_{p_f})$ 分别为两个水文站同时处于丰水状态下的二元 Copula 函数; $C(u_{p_f}, v_{p_f}, w_{p_f})$ 为 3 个水文站处于丰水状态下的三元 Copula 函数。根据概率容斥原理,其余丰枯遭遇情景的联合概率计算公式均可依据类似方式推导。其中,丰丰丰型、平平平型、枯枯枯型为丰枯同步状态,其余为丰枯异步状态。四元或更高维情景的联合概率计算采用类似方法。

2.4 调水适配度及其评价

在调水工程中,水源区调水断面在不同丰枯条件下的来水量存在显著差异,为了更科学地量化水源区不同调水方案在调水过程中的适应程度,提出调水适配度评价指标,旨在统一度量坝址断面实际来水条件与工程调水方案间的匹配程度,其计算公式为

$$I_i = \frac{W_{ci} - W_{ri}}{W_{ci}} \times 100\% \tag{4}$$

式中: I_i 为第 i 个方案的调水适配度; W_{ci} 为不同丰枯组合情景下第 i 个方案的来水量; W_{ri} 为第 i 个方

表 2 3 种调水方案的 R-Vine Copula 函数结构与参数

Table 2 R-Vine Copula function structures and parameters for three water diversion schemes

调水方案	树结构	连接边	Copula 函数类型	参数估计值	Kendall 秩系数	AIC	BIC
方案 1	1	2,1	Gaussian	0.8	0.6	-86.0	-80.9
		3,2	Gumbel	2.4	0.6		
	2	3,1;2	Gumbel	1.2	0.2		
方案 2	1	3,2	Gaussian	0.9	0.7	-214.0	-202.0
		1,3	Joe-Clayton	3.7,2.1	0.7		
		4,1	Gaussian	0.9	0.8		
	2	1,2;3	Survival Joe	1.2	0.1		
		4,3;1	Clayton 90°	-0.3	-0.1		
	3	4,2;1,3	Gumbel 270°	-1.5	-0.3		
方案 3	1	2,1	Gaussian	0.9	0.7	-97.2	-92.1
		3,2	Gumbel	2.4	0.6		
	2	3,1;2	Gumbel 270°	-1.2	-0.2		

注:方案 1 中的连接边序号 1、2、3 分别为上线断面 1 和两河口、双江口断面流量;方案 2 中的连接边序号 1、2、3、4 分别为上线断面 2 和叶巴滩、两河口、双江口断面流量;方案 3 中的连接边序号 1、2、3 分别为叶巴滩、两河口、双江口断面流量。参数估计值为构成 R-Vine Copula 函数的二元 Copula 函数依赖参数。

案的实际调水量。

3 结果与分析

3.1 边际分布函数的确定

采用不同边际分布函数对各坝址断面流量序列进行拟合,得到各断面最优边际分布拟合结果(表 1)。考虑到 3 种调水方案中,上线调水量普遍低于下线调水量,为了简化分析过程,将涉及上线的调水区域统一概化为一个大断面,并根据是否包含金沙江的岗托断面,区分为上线断面 1 和上线断面 2,以减少模型的复杂性和计算负荷。在多数情况下,Gamma 分布能最准确描述断面的径流特性。但上线断面 1 由于包含岗托断面的流量数据,导致其流量分布特性发生变化,使得 Logn 分布成为最佳拟合边际分布,其拟合参数分别为 5.7 和 0.2,表明其流量数据在对数变换后呈现近似正态分布的特性。

表 1 断面最优边际分布拟合结果

Table 1 Fitting results of optimal marginal distribution of cross-sections

断面	拟合函数	参数 1	参数 2
上线断面 1	Logn	5.7	0.2
上线断面 2	Gamma	31.5	3.7
叶巴滩	Gamma	32.4	8.3
两河口	Gamma	37.9	5.6
双江口	Gamma	34.7	4.5

注:上线断面 1 指岗托、热巴、阿安、仁达、珠安达、霍那、克柯断面的概化断面;上线断面 2 指热巴、阿安、仁达、珠安达、霍那、克柯断面的概化断面。参数 1 为边际分布的均值,反映数据的中心趋势;参数 2 为边际分布的形状参数,影响数据的分布宽度。

3.2 不同调水方案的 R-Vine Copula 函数

基于 Vine Copula 函数的多元依赖关系建模,分别构建 3 种调水方案的最优 R-Vine Copula 函数,并计算相关参数,结果见表 2。

表 2 结果显示,方案 1 的 R-Vine Copula 函数在第 1 层树中使用 Gaussian 和 Gumbel Copula 函数作为连接边,第 2 层树则选择 Gumbel Copula 函数,结构整体的 AIC 和 BIC 值分别为-86.0 和-80.9。方案 2 的依赖结构较为复杂,共构建 3 层树结构,并采用多样化的 Copula 函数,包含 Gaussian、Joe-Clayton、Survival Joe、Clayton 90° 和 Gumbel 270° Copula 函数,R-Vine Copula 函数的 AIC 和 BIC 值分别为-214.0 和-202.0,拟合效果较优。方案 3 的 R-Vine Copula 函数在第 1 层树中使用 Gaussian 和 Gumbel Copula 函数,第 2 层树使用 Gumbel 270° Copula 函数,其 Copula 函数的确定与方案 1 有相似之处,AIC 和 BIC 值分别为-97.2 和-92.1。

从表 2 也可以看出,第 1 层树的确定对于 Vine Copula 函数建模至关重要,它决定整个模型的结构与依赖关系的核心特性。方案 1 和方案 3 的第 1 层树均以节点 2 为中心,形成典型的 C-Vine 结构,且在这 2 种方案中,节点 2 代表的都是两河口断面,表明该断面在工程调水过程中具有关键性作用,是整个调水系统对水文变动较为敏感的节点,该断面的丰枯变化将会直接影响其余断面,从而对整个调水工程的稳定性产生影响。相比之下,方案 2 的第 1 层树则展现节点间较为均衡的依赖关系,形成链状的 D-Vine 结构,各节点之间没有明显的中心节点,每个断面在调水工程中都能独立响应相邻断面的变化,不会过度依赖某个关键断面。

3.3 不同调水方案的丰枯遭遇概率

根据丰枯遭遇概率计算方法,利用基于 R-Vine Copula 函数构建的不同调水方案的联合分布模型,分别计算 3 种调水方案下的丰枯遭遇概率,结果见表 3~5。

不同调水方案下的丰枯遭遇概率呈现出显著差异。方案 1 的丰枯同步概率达到 52.0%,丰枯异步

表 3 方案 1 的丰枯遭遇概率

Table 3 Wetness-dryness encountering probability for scheme 1				
断面水文状态		丰枯遭遇概率/%		
两河口	双江口	上线断面 1 丰水状态	上线断面 1 平水状态	上线断面 1 枯水状态
丰	丰	14.7	3.1	0.2
	平	2.3	4.0	0.0
	枯	0.1	0.4	0.0
平	丰	2.5	3.7	0.2
	平	4.1	25.0	4.6
	枯	1.0	5.9	2.7
枯	丰	0.0	0.3	0.1
	平	0.6	4.0	4.9
	枯	0.0	3.3	12.3

表 4 方案 2 的丰枯遭遇概率

Table 4 Wetness-dryness encountering probability for scheme 2					
断面水文状态			丰枯遭遇概率/%		
叶巴滩	两河口	双江口	上线断面 2 丰水状态	上线断面 2 平水状态	上线断面 2 枯水状态
丰	丰	丰	13.9	0.6	0.0
		平	0.1	2.3	0.0
		枯	0.5	0.1	0.0
	平	丰	0.0	0.2	0.1
		平	0.4	0.0	0.0
		枯	0.8	0.6	0.3
	枯	丰	0.3	0.0	0.0
		平	1.2	0.1	0.0
		枯	0.0	0.0	0.0
平	丰	丰	6.9	0.8	0.0
		平	0.4	1.7	0.1
		枯	0.8	0.0	0.1
	平	丰	2.7	2.3	0.0
		平	0.9	22.5	0.7
		枯	0.0	2.9	3.5
	枯	丰	0.0	0.2	0.0
		平	0.0	1.9	0.5
		枯	0.0	0.5	3.2
枯	丰	丰	0.0	0.0	0.6
		平	1.1	0.1	0.0
		枯	0.0	0.1	0.0
	平	丰	0.0	1.0	0.0
		平	0.0	3.3	0.8
		枯	0.0	0.2	1.0
	枯	丰	0.1	0.4	0.0
		平	0.0	3.1	2.4
		枯	0.0	0.3	11.4

表 5 方案 3 的丰枯遭遇概率

Table 5 Wetness-dryness encountering probability for scheme 3				
断面水文状态		丰枯遭遇概率/%		
两河口	双江口	叶巴滩 丰水状态	叶巴滩 平水状态	叶巴滩 枯水状态
丰	丰	13.9	4.1	0.0
	平	3.9	2.1	0.4
	枯	0.5	0.3	0.0
平	丰	0.7	4.6	1.1
	平	4.3	25.1	4.2
	枯	1.5	6.8	1.2
枯	丰	0.0	0.0	0.3
	平	0.6	2.4	6.5
	枯	0.0	4.1	11.4

概率为 48.0%。在丰枯同步情况下,断面均为丰水状态的概率为 14.7%,为最理想的调水情况,此时各断面水量充足,不仅能够有效满足工程调水需求,还能将多余水资源补充到下游缺水地区;断面均为枯水状态的概率为 12.3%,为最不利的调水情况。在枯水状态下,各断面水资源供给不足,优先确保当地经济与生活用水需求是首要任务,这使得可用于

调水的水量有限,进而对调水工程的正常运行带来不利影响。在丰枯异步情况下,上线断面 1、两河口和双江口断面分别处于平平枯状态发生概率最高,约为 5.9%。

方案 2 的丰枯同步概率略小于丰枯异步概率,丰枯同步概率为 47.8%,丰枯异步概率为 52.2%。在丰枯同步情况下,各断面均处于丰水、平水或枯水状态的概率分别为 13.9%、22.5%和 11.4%。这表明,方案 2 所涉及的 4 个断面在丰枯情况上存在较大差异,其径流一致性表现不如方案 1,丰枯异步概率显著提升。断面水文状态受到地形、气候、植被等因素的综合影响,方案 2 断面数量的增加将加剧断面间水文状态的异质性,从而使得方案 2 的丰枯同步概率降低。从统计学角度来看,断面数量的增加提升了水文状态组合的复杂性,使得丰枯同步状态难以维持^[26]。因此,丰枯同步概率下降、异步概率上升是断面间水文异质性和水文状态组合复杂性提升的必然结果。

方案 3 中的丰枯同步概率与丰枯异步概率近似相等,分别为 50.4%和 49.6%。断面同丰、同平、同枯的概率依次为 13.9%、25.1%和 11.4%,其断面同平概率为所有方案中最高,约为方案 2 的 1.1 倍。在丰枯异步状态中,叶巴滩、两河口与双江口断面处于平平枯状态时的概率最高,约为 6.8%;而 3 个断面分别处于枯丰丰、枯丰枯、丰枯丰、平枯丰和丰枯枯状态的概率较低,均趋近于 0。

断面间的水文异质性与水文状态组合复杂性对丰枯状态概率的影响并非互相独立。尽管方案 1 和方案 3 都涉及 2 个相同的断面,但它们的丰枯概率情况却存在明显差异。具体而言,方案 1 的断面分布涉及西线工程上线与下线两条线路,而方案 3 仅涉及下线线路,两方案断面间的气候、下垫面条件等存在差异,加剧了水文异质性,进而影响到不同方案的丰枯概率变化。对于方案 2,断面数量的增加导致水文状态组合复杂性的提升,也会影响丰枯概率变化,但这种影响的作用十分有限。在实际水文系统中,各要素并非独立存在,而是受到自然地理、气候等条件的约束。已有研究表明,气候与下垫面条件的变化是影响流域水文过程的关键因素^[27-28]。因此,断面间水文异质性的差异是影响该区域丰枯概率变化的主要因素。

3.4 不同调水方案的调水适配度

基于丰枯状态划分方法,确定各断面丰水与枯水期的划分阈值。由于平水期的累计分布概率介于 25%~75%之间,难以给出一个固定的值。本文选取累计分布概率为 50%时的来水量作为典型平水期

的代表值。基于此,得到各断面在不同水文状态下的典型来水量,结果见表 6。各断面在不同水文条件下的来水量存在显著差异,从丰水期到枯水期断面来水量减少最明显的为上线断面 1,表明该断面对水文变化的敏感性较高,表现出较大的季节性波动。

表 6 各断面在不同水文状态下的典型来水量
Table 6 Typical inflow of each section under different hydrological conditions

断面	来水量/亿 m ³		
	丰水状态	平水状态	枯水状态
上线断面 1	326.70	283.69	246.35
上线断面 2	128.10	113.81	100.63
叶巴滩	299.37	266.39	235.94
两河口	232.92	209.09	186.94
双江口	174.62	155.99	138.74

单纯分析断面来水量的差异不足以全面评估调水工程的适应性及其对当地水资源系统的影响,本文进一步计算各调水方案在不同丰枯状态下的调水适配度,结果见表 7~9。

不同方案的调水适配度介于 56.3%~76.0%。方案 1 的调水适配度变化最为显著,其最大值为 66.0%,最小值为 56.3%,两者相差 9.7%。这表明无论在何种丰枯水文情景下,调水量始终占来水量的 1/3 以上,这种调水活动可能对区域水资源系统的稳定性构成潜在威胁,导致剩余水量不足以满足当地经济社会发展与河道生态用水需求。因此,方案 1 在水量供应稳定性方面表现出较大的不确定性,可能导致在特定情况下水资源供给不足或生态破坏严重,从而对调水工程的正常运行产生不利影响。方案 2 的调水适配度介于 68.3%~74.9%之间,调水适配度的波动幅度显著降低。这表明方案 2 可以更好地平衡区域不同水文状况的变化,调水工程的稳定性与适应性优于方案 1。方案 3 的调水适配度最大值为 76.0%,最小值为 69.7%,其波动幅度范围最小且整体适配度最高。这表明方案 3 因

表 7 方案 1 的调水适配度

Table 7 Water diversion adaptability for scheme 1

断面水文状态		调水适配度/%		
两河口	双江口	上线断面 1 丰水状态	上线断面 1 平水状态	上线断面 1 枯水状态
	丰	66.0	63.8	61.8
丰	平	65.1	62.8	60.7
	枯	64.2	61.9	59.6
	丰	64.8	62.5	60.3
平	平	63.9	61.5	59.1
	枯	62.9	60.4	57.9
	丰	63.7	61.3	58.9
枯	平	62.7	60.1	57.6
	枯	61.7	59.0	56.3

表 8 方案 2 的调水适配度

断面水文状态			调水适配度/%		
叶巴滩	两河口	双江口	上线断面 2 丰水状态	上线断面 2 平水状态	上线断面 2 枯水状态
丰	丰	丰	74.9	74.4	74.0
		平	74.3	73.8	73.4
		枯	73.7	73.2	72.8
	平	丰	74.1	73.7	73.2
		平	73.5	73.0	72.6
		枯	72.9	72.4	71.9
	枯	丰	73.4	72.9	72.4
		平	72.7	72.2	71.7
		枯	72.1	71.9	71.1
平	丰	丰	73.8	73.3	72.9
		平	73.2	72.7	72.2
		枯	72.6	72.1	71.6
	平	丰	73.0	72.5	72.0
		平	72.4	71.8	71.3
		枯	71.7	71.2	70.6
	枯	丰	72.2	71.7	71.2
		平	71.5	71.0	70.4
		枯	70.8	70.3	69.7
枯	丰	丰	72.8	72.3	71.8
		平	72.1	71.6	71.1
		枯	71.5	70.9	70.4
	平	丰	71.9	71.4	70.8
		平	71.2	70.6	70.1
		枯	70.5	69.9	69.3
	枯	丰	71.1	70.5	69.9
		平	70.3	69.7	69.1
		枯	69.6	68.9	68.3

表 9 方案 3 的调水适配度

断面水文状态			调水适配度/%		
两河口	双江口	叶巴滩 丰水状态	叶巴滩 平水状态	叶巴滩 枯水状态	
丰	丰	76.0	74.8	73.6	
	平	75.3	74.1	72.8	
	枯	74.7	73.4	72.0	
平	丰	75.1	73.9	72.6	
	平	74.4	73.9	71.7	
	枯	73.7	72.3	70.9	
枯	丰	74.3	72.9	71.6	
	平	73.5	72.1	70.6	
	枯	72.8	71.3	69.7	

其充足的来水量使之具有最佳的调水适配性,能够最大限度降低水资源分配不均衡或缺水等不利因素的影响,确保调水工程的平稳运行。

3.5 各调水方案的有利调水概率

将有利调水条件定义为:至少一个断面处于丰水期,且处于枯水期的断面数量不超过所有断面数量的一半,或者所有断面均处于平水期。这一标准的设定是基于调水工程对水资源供应稳定性与均衡性的需求。断面处于丰水期时可为调水工程提供足

够的水源,保证水量供应;而限制枯水断面的数量是为避免因枯水断面过多导致水量不足,从而增加调水风险。平水期作为一个调节阶段,能够有效缓解水资源的不均衡分配,既不会出现丰水期的过多水量,也不会面临枯水期的水量不足,因此也视为一种有利的调水状态。

按照此标准,3 种方案的有利调水概率分别为 62.3%、63.3%和 69.3%。方案 1 的有利调水概率在 3 种方案中最低,该方案虽具有一定的可行性,但在实际应用中可能面临较高的不确定性。方案 2 的有利调水概率优于方案 1,尽管该方案下的水文状态组合情况较为复杂,会增加调水工程管理的难度,但它提高了工程的径流互补能力。尤其在丰枯异步状态下,可有效弥补单一断面水量不足的缺点,从而提高工程的整体稳定性。方案 3 的有利调水概率最高,较方案 1 和方案 2 分别提升了 7%与 6%,该方案的调水线路能够充分利用不同坝址断面的水资源分布特性,确保在多数情况下提供稳定且充足的调配水量,显著增强了调水稳定性。综合各方案的调水适配度与有利调水概率,方案 3 表现最优。

3.6 结果不确定性分析

径流丰枯遭遇研究是当前水文水资源研究领域的一个热点,其分析结果受到数据来源、径流时间序列长度、丰枯频率界定标准等多因素影响^[29]。现有研究中,使用 Copula 函数进行丰枯遭遇分析多局限于二维联合分布^[30-31]。研究表明,常规的 Copula 函数不适用于三元变量及以上的联合分布建模^[19],当变量维度升高时,其建模精度会显著降低^[31-32]。基于此,本文对西线工程 3 种备选调水方案的丰枯遭遇概率进行了系统性评估,采用 Vine Copula 函数对多维变量间的依赖关系进行更为精准的刻画,克服了前人研究在多变量耦合分析方面的不足。相关研究表明,Vine Copula 函数在构建多元联合分布时具有显著优势,其拟合效果优于常规 Copula 函数,可有效提高丰枯遭遇分析的准确性^[33]。本文还进一步探讨了各调水方案的调水适配度与有利调水概率,明确不同调水方案对工程整体调水效果的影响。尽管本文结果与冯平等^[34]研究得出的丰枯遭遇概率在定量结果上存在一定差别,但从定性分析角度而言,研究结论基本一致,且本文结论更为全面、系统。此外,本文有利调水概率分析结果与 Huang 等^[35]的研究较为一致,可信度较高。Vine Copula 函数尤其适用于数据有限的情况,是水文学中分析缺失数据的一种常用方法^[36-37]。针对西线工程坝址断面因缺乏长序列径流数据而面临的挑战,Vine Copula 函数可为研究提供可靠的建模工具与分析方

法。因此,采用 Vine Copula 函数分析西线工程不同调水方案的丰枯遭遇研究是可行的,研究成果可为今后工程设计优化、决策调度和区域生态保护与高质量发展提供强有力的支撑。

根据统计学中的独立性假设,若 3 个断面的径流状态相互独立,则丰枯同步概率理论值应为 15.6%;若 4 个断面的径流状态相互独立,则丰枯同步概率理论值为 7.0%。而依据 Vine Copula 函数计算得到的概率值都显著高于理论值,这是因为断面间的地理位置相近、气候条件相似,导致各断面的径流状态具有较高的一致性,即当某个断面出现丰水、平水或枯水状态时,其余断面也可能处于相似的水文状态,这种丰枯状态的同步性将显著增加区域径流调控的风险。在以长江上游作为唯一水源区群的情况下,丰枯状态的同步变化可能会增加水资源管理中的风险。如在丰水期会出现洪水叠加效应,而在枯水期则会出现区域水资源短缺的风险,出现无水可调的困境。因此,可考虑逐步引入澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等河流,通过多水源区联合调配,缓解丰枯同步变化对调水工程的影响,增强工程的韧性与抗风险能力。

4 结 论

a. 不同调水方案下的丰枯遭遇概率和调水适配度有显著差异,方案 1 的丰枯同步概率较高,其在理想条件下具有较好的调水效益,但其调水适配度波动较大,水资源供应稳定性较差。方案 2 的丰枯异步概率更高,对于调水工程稳定供水能起到较好的弥补与风险规避作用。方案 3 的丰枯同步概率与异步概率近似相等,调水适配度最大且波动幅度最小,表现出最佳调水适配性。

b. 方案 3 的有利调水概率最高,达到 69.3%,显著高于方案 1 的 62.3%和方案 2 的 63.3%。说明方案 3 能更有效利用不同断面的径流资源,提升调水工程的稳定性,并在丰枯水文情境变化下降低枯水期水量不足的风险,在调水适应性和工程稳定性方面具有一定优势。而方案 1 和方案 2 在应对不利水文条件时的不确定性较高。

c. 为提高调水工程的韧性与抗风险能力,未来可以考虑整合澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等西南河流进行联合调配,以缓解丰枯同步变化对西线工程的影响。

参考文献:

[1] 景来红,严登明,崔萌,等.南水北调西线工程生态环境影响及应对的关键科学问题[J].水科学进展,2024,35

(4): 521-529. (JING Laihong, YAN Dengming, CUI Meng, et al. Key scientific issues related to the ecological-environmental impacts of the South-to-North Water Diversion Western Route Project[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(4) :521-529. (in Chinese))

[2] 胡鹏,王浩,赵勇,等.南水北调西线工程水源区可调水量“十问”[J].中国工程科学,2024,26(2):210-223. (HU Peng, WANG Hao, ZHAO Yong, et al. Ten questions on adjustable water volume of the Western Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2) :210-223. (in Chinese))

[3] 陈传友,沈镭,胡长顺,等.我国大西线“江河连通”调水新格局的设想与评析[J].水利水电科技进展,2019,39(6):1-8. (CHEN Chuanyou, SHEN Lei, HU Changshun, et al. Analysis of and preliminary comments on new pattern of rivers-connected water transfer along Great Western Line of China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6) :1-8. (in Chinese))

[4] DESAI S, OUARDAT B M J. Regional hydrological frequency analysis at ungauged sites with random forest regression[J]. Journal of Hydrology, 2021, 594:125861.

[5] GOEL N K, SETHS M, CHANDRA S. Multivariate modeling of flood flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(2) :146-155.

[6] WEI Xingchen, ZHANG Hongbo, SINGH V P, et al. Coincidence probability of streamflow in water resources area, water receiving area and impacted area: implications for water supply risk and potential impact of water transfer [J]. Hydrology Research, 2020, 51(5) :1120-1135.

[7] TODOROVIC P. Stochastic models of floods [J]. Water Resources Research, 1978, 14(2) :345-356.

[8] LI Jinshu, ZHOU Qing, YEH W G. A Bayesian hierarchical model for estimating the statistical parameters in a three-parameter log-normal distribution for monthly average streamflows[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125265.

[9] SHARMA S, MUJUMDARP P. Modeling concurrent hydroclimatic extremes with parametric multivariate extreme value models [J]. Water Resources Research, 2022, 58(2) :e2021WR031519.

[10] YUE S, OUARDA T B M J, BOBÉE B. A review of bivariate gamma distributions for hydrological application [J]. Journal of Hydrology, 2001, 246(1/2/3/4) :1-18.

[11] LUO Yun, DONG Zengchuan, LIU Yuhuan, et al. Safety design for water-carrying Lake flood control based on copula function: a case study of the Hongze Lake, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597:126188.

[12] 张琦,梁丙臣,邵珠晓.基于 Copula 函数的黄海波高周期联合统计分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4) :108-114. (ZHANG Qi, LIANG Bingchen, SHAO Zhuxiao. Joint statistical analysis of wave height

- and wave period of Yellow Sea based on Copula function [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4) : 108-114. (in Chinese))
- [13] 吕振豫,穆建新. 基于 Copula 函数的流域内降雨丰枯遭遇研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(6) : 62-69. (LYU Zhenyu, MU Jianxin. Study on wetness-dryness encountering probability of basin precipitation based on Copula function[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6) : 62-69. (in Chinese))
- [14] 隆院男,黄崇荣,李正最,等. 基于 Copula 函数的湘江流域气象干旱向水文干旱传播特性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21) : 66-78. (LONG Yuannan, HUANG Chongrong, LI Zhengzui, et al. Characteristics of the transmission from meteorological drought to hydrological drought in the Xiangjiang River Basin of China using Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(21) : 66-78. (in Chinese))
- [15] 王文圣,覃光华,梁瀚续,等. 基于 Copula 函数推求的管运洪水防洪标准探讨[J]. 水资源保护, 2023, 39(1) : 79-82. (WANG Wensheng, QIN Guanghua, LIANG Hanxu, et al. Probe on flood control standards of manage-flood based on Copula function [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1) : 79-82. (in Chinese))
- [16] SURESH A, PEKKAT S. Importance of copula-based bivariate rainfall intensity-duration-frequency curves for an urbanized catchment incorporating climate change [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2023, 28(7) : 05023012.
- [17] YANG Peng, XIA Jun, ZHANG Yongyong, et al. Comprehensive assessment of drought risk in the arid region of Northwest China based on the global Palmer drought severity index gridded data [J]. Science of the Total Environment, 2018, 627: 951-962.
- [18] KLAHO M H, SAFAVI H R, GOLMOHAMMADI M H, et al. Comparison between bivariate and trivariate flood frequency analysis using the Archimedean copula functions, a case study of the Karun River in Iran [J]. Natural Hazards, 2022, 112(2) : 1589-1610.
- [19] HUANG Kangdi, YE Lei, CHEN Lu, et al. Risk analysis of flood control reservoir operation considering multiple uncertainties [J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 672-684.
- [20] JOE H. Families of m -variate distributions with given margins and $m(m-1)/2$ bivariate dependence parameters [J]. Lecture Notes-Monograph Series, 1996, 28: 120-141.
- [21] BEDFORD T, COOKER M. Vines: a new graphical model for dependent random variables [J]. The Annals of Statistics, 2002, 30(4) : 1031-1068.
- [22] 李继清,谢宇韬,孙凤玲. 基于 Vine Copula 的梯级水库短期发电调度风险估计[J]. 水资源保护, 2024, 40(4) : 17-26. (LI Jiqing, XIE Yutao, SUN Fengling. Risk estimation of short-term power generation operation of cascade reservoirs based on Vine Copula [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4) : 17-26. (in Chinese))
- [23] 王玉莲,杨泽凡,闫龙,等. 基于多方法综合比较的南水北调西线工程水源区生态需水研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(4) : 137-147. (WANG Yulian, YANG Zefan, YAN Long, et al. Research on ecological water demand in water source area of west route of South-to-North Water Diversion Project based on multi-method comprehensive comparison [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4) : 137-147. (in Chinese))
- [24] NELSEN R B. An introduction to copulas [M]. New York: Springer, 2006.
- [25] BRECHMANN E C, SCHEPSMEIER U. Modeling dependence with C- and D-vine copulas: the R package CDVine [J]. Journal of Statistical Software, 2013, 52(3) : 1-27
- [26] 吴海鸥,涂新军,杜奕良,等. 基于 Copula 函数的鄱阳湖水系径流丰枯遭遇多维分析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3) : 801-813. (WU Haiou, TU Xinjun, DU Yiliang, et al. Multi-dimensional analysis of wetness-dryness encountering of streamflow based on the Copula function in Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(3) : 801-813. (in Chinese))
- [27] ZHANG Ling, NAN Zhuotong, XU Yi, et al. Hydrological impacts of land use change and climate variability in the headwater region of the Heihe River Basin, Northwest China [J]. PLoSOne, 2016, 11(6) : e0158394.
- [28] ZHENG Jinghua, WANG Hailong, LIU Bingjun. Impact of the long-term precipitation and land use changes on runoff variations in a humid subtropical river basin of China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 42: 101136.
- [29] 刘章君,郭生练,许新发,等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. 水科学进展, 2021, 32(1) : 148-159. (LIU Zhangjun, GUO Shenglian, XU Xinfa, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1) : 148-159. (in Chinese))
- [30] 范敏韬,余贞燕,余飞龙,等. 珠江三角洲河网区极端水位事件风险传递规律[J]. 水资源保护, 2024, 40(2) : 81-89. (FAN Mintao, SHE Zhenyan, YU Longfei, et al. Risk transfer law of extreme water level events in river network area of the Pearl River Delta [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2) : 81-89. (in Chinese))
- [31] TAHROUDI M N, RAMEZANI Y, DE MICHELE C, et al. Trivariate joint frequency analysis of water resources deficiency signatures using vine copulas [J]. Applied Water Science, 2022, 12(4) : 67.
- [32] LI Huawei, HUANG Guohe, LI Yongping, et al. A C-vine copula-based quantile regression method for streamflow

forecasting in Xiangxi River Basin, China [J]. Sustainability,2021,13(9):4627.

[33] WANG Sen,ZHONG Pingan,ZHU Feilin, et al. Analysis and forecasting of wetness-dryness encountering of a multi-water system based on a Vine Copula function-Bayesian network[J]. Water,2022,14(11):1701.

[34] 冯平,牛军宜,张永,等. 南水北调西线工程水源区河流与黄河的丰枯遭遇分析[J]. 水利学报,2010,41(8): 900-907. (FENG Ping, NIU Junyi, ZHANG Yong, et al. Analysis of wetness-dryness encountering probability among water source rivers and the Yellow River in the Western Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(8): 900-907. (in Chinese))

[35] HUANG Hu,NIU J Y. Compensative operating feasibility analysis of the west route of South-to-North Water Transfer Project based on M-copula function[J]. Water Resources Management,2015,29(11):3919-3927.

[36] DANESHKHAH A,REMESAN R,CHATRABGOUN O, et al. Probabilistic modeling of flood characterizations with parametric and minimum information pair-copula model [J]. Journal of Hydrology,2016,540:469-487.

[37] AISSIA M A B,CHEBANA F,OUARDA T B M J. Multivariate missing data in hydrology: review and applications [J]. Advances in Water Resources,2017,110:299-309.

(收稿日期:2024 - 12 - 11 编辑:施业)

(上接第 86 页)

[21] DENG Xinyuan,SONG Chunqiao,LIU Kai, et al. Remote sensing estimation of catchment-scale reservoir water impoundment in the upper Yellow River and implications for river discharge alteration [J]. Journal of Hydrology,2020,585:124791.

[22] CONGALTON R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment,1991,37(1):35-46.

[23] 汪柳皓,魏显虎,张宗科,等. 青藏高原地区植被指数变化及其与温湿度因子的关系[J]. 森林与环境学报,2022,42(2): 141-148. (WANG Liuhao, WEI Xianhu, ZHANG Zongke, et al. NDVI variation and its relationship with temperature and precipitation on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Forest and Environment,2022,42(2): 141-148. (in Chinese))

[24] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报,2012,67(3):388-397. (WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan Drainage Basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(3):388-397. (in Chinese))

[25] 何振芳,牟婷婷,郭庆春,等. 1979—2019 年大汶河流域湿地时空演变与分异研究[J]. 水资源保护,2024,40(2): 134-140. (HE Zhenfang, MOU Tingting, GUO Qingchun, et al. Spatial-temporal evolution and differentiation study of wetlands in the Dawen River Basin from 1979 to 2019[J]. Water Resources Protection,2024,40(2):134-140. (in Chinese))

[26] 江维,李英杰,邓彦,等. 红碱淖水面面积演变及其原因[J]. 人民黄河,2018,40(4): 72-75. (JIANG Wei, LI Yingjie, DENG Yan, et al. Water area changing of Hongjiannao lake and its reasons[J]. Yellow River,2018,40(4):72-75. (in Chinese))

[27] ZHANG Yangchengsi, DU Jiaqiang, GUO Long, et al. Long-term detection and spatiotemporal variation analysis of open-surface water bodies in the Yellow River Basin from 1986 to 2020[J]. Science of The Total Environment,2022,845:157152.

[28] ZHANG Wenxia,FURTADO K,WU Peili, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world[J]. Science Advances,2021,7(31): eabf8021.

[29] LIU Qiang,YANG Zhifeng. Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Hydrology,2010,395(3/4):226-234.

[30] WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, JIN Junliang, et al. Impacts of climate change on water resources in the Yellow River basin and identification of global adaptation strategies [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2017,22(1): 67-83.

(收稿日期:2024 - 12 - 09 编辑:王芳)