

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.02.019

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

刘为锋¹, 李云玲¹, 卢庆文², 李昕阳³, 刘 婧⁴, 刘 奇¹, 陈 娟⁵, 王永强⁶, 郭旭宁¹

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 上海市松江区水务局, 上海 201600;
3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 4. 中国南水北调集团东线有限公司, 北京 100036;
5. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 6. 长江科学院水资源综合利用研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要:基于 1980—2020 年长系列水文资料,采用多种经典统计方法分析了新形势下南水北调东线工程水源区长江下游、洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖主要水源来水的演变规律。结果表明:除洪泽湖汛期和南四湖下级湖非汛期径流量呈下降趋势、南四湖下级湖年径流量无明显变化趋势外,各水源其他时段径流量均呈上升趋势;骆马湖年、汛期径流量在 1999 年发生显著突变,南四湖下级湖非汛期径流量在 2005 年发生显著突变;大通站、洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖年径流分别存在 14、16、10、13 a 的主周期,根据周期规律预测,近期大通站、骆马湖将可能处于径流量偏多期,洪泽湖、南四湖下级湖将可能处于径流量偏少期;相邻水源径流滑动相关系数年际变化大,各相邻水源平均丰枯同步率和异步率分别为 41.8%和 21.4%。针对主要水源来水演变规律,提出充分利用预报信息调整调水计划、进行水量补偿及库容补偿联合优化调度、探索极端枯水条件下的可调水量潜力等应对策略。

关键词:南水北调东线工程;径流;时间序列分析;调水潜力;丰枯遭遇

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0165-08

Runoff evolution patterns of major water sources and adaptive strategies for the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project under new situation//LIU Weifeng¹, LI Yunling¹, LU Qingwen², LI Xinyang³, LIU Jing⁴, LIU Qi¹, CHEN Juan⁵, WANG Yongqiang⁶, GUO Xuning¹ (1. General Institute of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 2. Shanghai Municipal Water Bureau of Songjiang District, Shanghai 201600, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. China South-to-North Water Diversion Eastern Route Co., Ltd., Beijing 100036, China; 5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 6. Water Resources Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on long-term hydrological data from 1980 to 2020, the evolution patterns of water inflow from major sources in the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project, including the lower Yangtze River, Hongze Lake, Luoma Lake, and lower Nansi Lake, were analyzed using various classical statistical methods under the new situation. The results indicate that, except for the declining trends in runoff during the flood season at Hongze Lake and the non-flood season at lower Nansi Lake, as well as the absence of a significant trend in annual runoff at lower Nansi Lake, runoff in other periods for all water sources showed increasing trends. Significant mutations were observed in the annual and flood season runoff at Luoma Lake in 1999 and in the non-flood season runoff at lower Nansi Lake in 2005. The annual runoff at Datong Station, Hongze Lake, Luoma Lake, and lower Nansi Lake exhibited dominant cycles of 14, 16, 10, and 13 a, respectively. Based on cyclical pattern predictions, Datong Station and Luoma Lake are likely to enter a period of above-average runoff, while Hongze Lake and lower Nansi Lake may experience a period of below-average runoff in the near future. The sliding correlation coefficients of runoff between adjacent water sources showed significant interannual variability, with the average wetness-dryness synchronous and asynchronous rates at 41.8% and 21.4%, respectively. In response to the evolution patterns of water inflow from major sources, some strategies are proposed, including making full

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);中国南水北调集团有限公司科研项目(DXZ-2023-081-ZD-ZX);水利部水利水电规划设计总院“揭榜挂帅”项目

作者简介:刘为锋(1993—),男,高级工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:weifliu@qq.com
通信作者:郭旭宁(1983—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:guoxuning@giwp.org.cn

use of forecast information to adjust water diversion plans, implementing joint optimal scheduling of water quantity compensation and storage capacity compensation, and exploring the potential transferable water volume under extreme drought conditions.

Key words: the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project; runoff; time series analysis; potential of water transfer; wetness-dryness encounter

南水北调东线工程是国家水网主骨架和大动脉的重要组成部分^[1],在国家政策对南水北调东线后续工程高质量发展提出明确要求的新时代背景下,分析新形势下南水北调东线工程水源区长江下游、洪泽湖、骆马湖、下级湖主要水源来水的演变规律及其适应性对策,具有重要意义。受气候变化和人类活动影响,河川径流发生了显著的时空变化^[2-6],导致水资源供需矛盾日益突出^[7-8]。为充分发挥南水北调东线工程的调水效益,加强多水源统筹调度,需揭示水源区径流的时空变化规律。众多学者对径流演变特征及其丰枯遭遇特征进行了研究。夏军等^[9]采用弹性系数法和水文模拟法对汉江上游流域径流变化进行了定量分析,并计算了气候变化和人类活动对径流变化的影响贡献率。陈茜茜等^[10]采用 Mann-Kendall 秩次相关法、小波分析、云模型及 Copula 函数等方法分析了南水北调中线工程水源区和受水区的降水变化趋势和丰枯遭遇特征,结果表明水源区和受水区年降水量均明显减少,南北丰枯异步概率变大。闫宝伟等^[11]基于 Copula 理论建立了南水北调中线工程水源区与各受水区不同时间尺度的降水量联合分布,研究其丰枯遭遇特征。卞佳琪等^[12]以长江下游 3 个重要水文站为研究对象,分析三者间的径流关系、丰枯演变和丰枯遭遇特征,为识别长江下游多时空维度径流关系提供了一定的参考。综上所述,径流变化多从时间变化趋势和空间相关关系、径流丰枯遭遇两方面识别。南水北调东线工程主要湖泊水源有较大的调蓄能力,可通过蓄丰补枯优化水资源时空配置。在新来水形势下,研究南水北调东线工程各水源年、汛期和非汛期 3 个不同时段的水来演变特征可为工程实际调度运行和后续工程高质量发展提供重要支撑。

本文采取多种经典统计方法系统分析南水北调东线工程水源区各水源来水的时间变化趋势、周期特性以及不同水源径流的相关特性和丰枯遭遇情况,并基于研究结果提出新来水形势下的适应性对策,以期为南水北调东线工程实际调度运行及后续工程的高质量发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

南水北调东线一期工程从长江干流三江营引水,通过 13 个梯级泵站逐级提水,利用京杭大运河

及其平行的河道输水,经洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖调蓄后,分成两路:一路向北穿黄河,经小运河接七一、六五河输水至大屯水库,同时具备向河北和天津应急供水条件;另一路向东通过济平干渠、济南市区段、济东明渠段工程输水至引黄上节制闸,再利用引黄济青工程、胶东地区引黄调水工程输水至威海米山水库。调水线路总长 1 467 km,其中长江至东平湖 1 045.36 km,黄河以北 173.49 km,胶东输水干线 239.78 km,穿黄河段 7.87 km。

本文研究南水北调东线工程水源区各水源径流变化规律及适应性对策,水源区由南至北包括长江下游、洪泽湖、骆马湖和南四湖下级湖(以下简称“下级湖”)。收集的长江下游大通站、洪泽湖、骆马湖和下级湖的实测径流序列为 1980—2020 年。洪泽湖承接淮河干流来水,上游水工程调度过程改变了天然来水规律,且上游工程建设基本稳定,后续会维持同样的调度运行。为保证符合后续调水实际情况,未对洪泽湖上游水工程调度过程进行还原,采用实测入湖径流序列以满足数据一致性。

2 研究方法

基于单个水源站点的径流序列进行单站点时间变化规律分析,分别采取 Mann-Kendall 秩次相关法、Pettitt 检验法和小波分析识别径流变化趋势、突变情况和周期特性。选取相邻水源站点(大通站与洪泽湖、洪泽湖与骆马湖、骆马湖与下级湖)的同时段径流序列,采用滑动相关系数和 Copula 函数分析相邻水源之间的径流相关性和丰枯遭遇情况。

2.1 单水源时间变化规律分析

a. Mann-Kendall 秩次相关法。Mann-Kendall 秩次相关法是一种经典的非参数统计方法,用于检验数据时间序列的趋势性^[13]。其原理是通过检验时间序列中的每一个数据点与其之前数据点的相关性,判断是否存在趋势变化。Mann-Kendall 秩次相关法最初用于时间序列的趋势分析,现已广泛应用于水文、气象等非正态分布数据的分析。本文采用 Mann-Kendall 秩次相关法检验大通站、洪泽湖、骆马湖、下级湖的年、汛期和非汛期 3 个代表时段的径流趋势变化,分析各水源的来水时间演变特征。

b. Pettitt 检验法。Pettitt 检验法是一种非参数检测法,其在有效诊断水文时序突变情况的同时,还

可检验突变是否具备数学统计意义上的显著性,已广泛应用于气象、水文时间序列的分析中^[14]。本文采用 Pettitt 检验法对 4 个水源年、汛期和非汛期径流量序列进行突变检验,得到各水源不同时段径流量逐年统计量及可能突变年份,识别径流时间演变过程中的突变特征。

c. 小波分析法。小波分析是一种信号时频局部化分析方法,利用 Morlet 小波分析得到不同频率范围的信号波动,揭示水文时间序列的多尺度特性^[2,15]。本文运用该方法对径流信号进行小波分解,绘制 4 个水源小波变换系数实部等值线图,得到不同频率范围内的径流波动,以研究径流序列的多时间尺度序列变化和周期性特征。

2.2 相邻水源相关分析

a. 滑动相关系数。滑动相关系数能够诊断两个序列的相关关系随时间的变化情况,便于分析相关性的年际变化特征^[16]。本文采用基于 Pearson 相关系数的滑动相关分析方法,对于两个序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,其具体分析步骤为:①确定序列滑动步长 m ,通常取 $m > 10$,以保证结果的可靠性;②以步长逐次滑动计算 Pearson 相关系数,即计算序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 和 $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 、序列 $\{x_2, x_3, \dots, x_{m+1}\}$ 和 $\{y_2, y_3, \dots, y_{m+1}\}$ 的 Pearson 相关系数,以此类推,确定步长为 m 的相关系数序列;③取不同步长得到多组相关系数序列,并计算平均值序列,以得到 2 组径流序列相关性的年际变化规律。

b. Copula 函数。Copula 函数能够连接变量的边缘分布,构建联合分布模型来描述变量间相关关系,在水文领域得到了广泛应用^[17-18]。Sklar 定理揭示了多元联合分布可由其边缘分布连接起来^[19],为准确建立水文变量联合分布模型提供了理论依据。常见的二元 Copula 函数有 Gaussian、t、Gumbel、Clayton 和 Frank Copula 函数,本文以核密度估计法建立各站点径流边缘分布,采用广泛应用于水文分析的 Gumbel、Clayton 和 Frank Copula 函数构建相邻站点间的联合分布模型。最终,根据水文丰枯组合概率计算方法^[20]得到相邻水源的来水丰枯遭遇情况。

3 结果与分析

3.1 各水源径流年际变化

3.1.1 趋势变化分析

长江下游大通站、洪泽湖、骆马湖、下级湖各代表时段径流量的 Mann-Kendall 趋势检验结果见表 1。分析表 1 结果可知:①除洪泽湖汛期、下级湖非

汛期径流量呈下降趋势,下级湖年径流量的统计量 Z 为 0,即无明显变化趋势外,各水源其他时段径流量时序变化均为上升趋势;②取置信度为 95%,对统计量 $|Z|$ 进行临界判断,骆马湖年、汛期以及下级湖非汛期径流量超过临界值 1.96,呈现显著变化趋势,各水源其他时段径流量变化趋势均不显著。

表 1 各水源不同时段径流量 Mann-Kendall 趋势检验结果
Table 1 Mann-Kendall trend test results of runoff of each water source during different periods

水源	时段	统计量 Z	变化趋势	显著性水平
大通站	全 年	0.477	增加	不显著
	汛 期	0.112	增加	不显著
	非汛期	0.984	增加	不显著
洪泽湖	全 年	0.258	增加	不显著
	汛 期	-0.775	减少	不显著
	非汛期	1.224	增加	不显著
骆马湖	全 年	2.965	增加	显著
	汛 期	3.482	增加	显著
	非汛期	0.696	增加	不显著
下级湖	全 年	0		不显著
	汛 期	0.337	增加	不显著
	非汛期	-2.157	减少	显著

注:置信度为 95%时, $|Z|$ 的临界值为 1.96。

3.1.2 突变分析

对 4 个水源的年、汛期和非汛期径流量序列进行 Pettitt 突变检验,得到各水源不同时段径流量逐年统计量及可能突变年份,结果见表 2。由表 2 分析可知,骆马湖年、汛期径流量,下级湖非汛期径流量 Pettitt 突变检验统计量 P 值小于 0.05,均通过了显著性检验,存在显著突变点。因此,可以判断骆马湖年、汛期径流量在 1999 年发生显著突变,下级湖非汛期径流量在 2005 年发生显著突变。

表 2 各水源不同时段径流量可能突变年份及其显著性
Table 2 Potential mutation years and significant results of runoff of each water source during different periods

水源	时段	可能突变年份	P 值	显著性
大通站	全 年	1988	1.017	不显著
	汛 期	2000	1.412	不显著
	非汛期	2011	0.747	不显著
洪泽湖	全 年	1997	1.098	不显著
	汛 期	2008	0.689	不显著
	非汛期	1997	0.203	不显著
骆马湖	全 年	1999	0.002	显 著
	汛 期	1999	0.001	显 著
	非汛期	1992	0.182	不显著
下级湖	全 年	2008	0.519	不显著
	汛 期	2008	0.770	不显著
	非汛期	2005	0.026	显著

3.1.3 周期分析

选用复 Morlet 小波进行连续小波变换,得到各水源不同时段小波变换系数实部等值线图,如图 1 所示。图 1 反映了不同时段径流量序列的周期变化

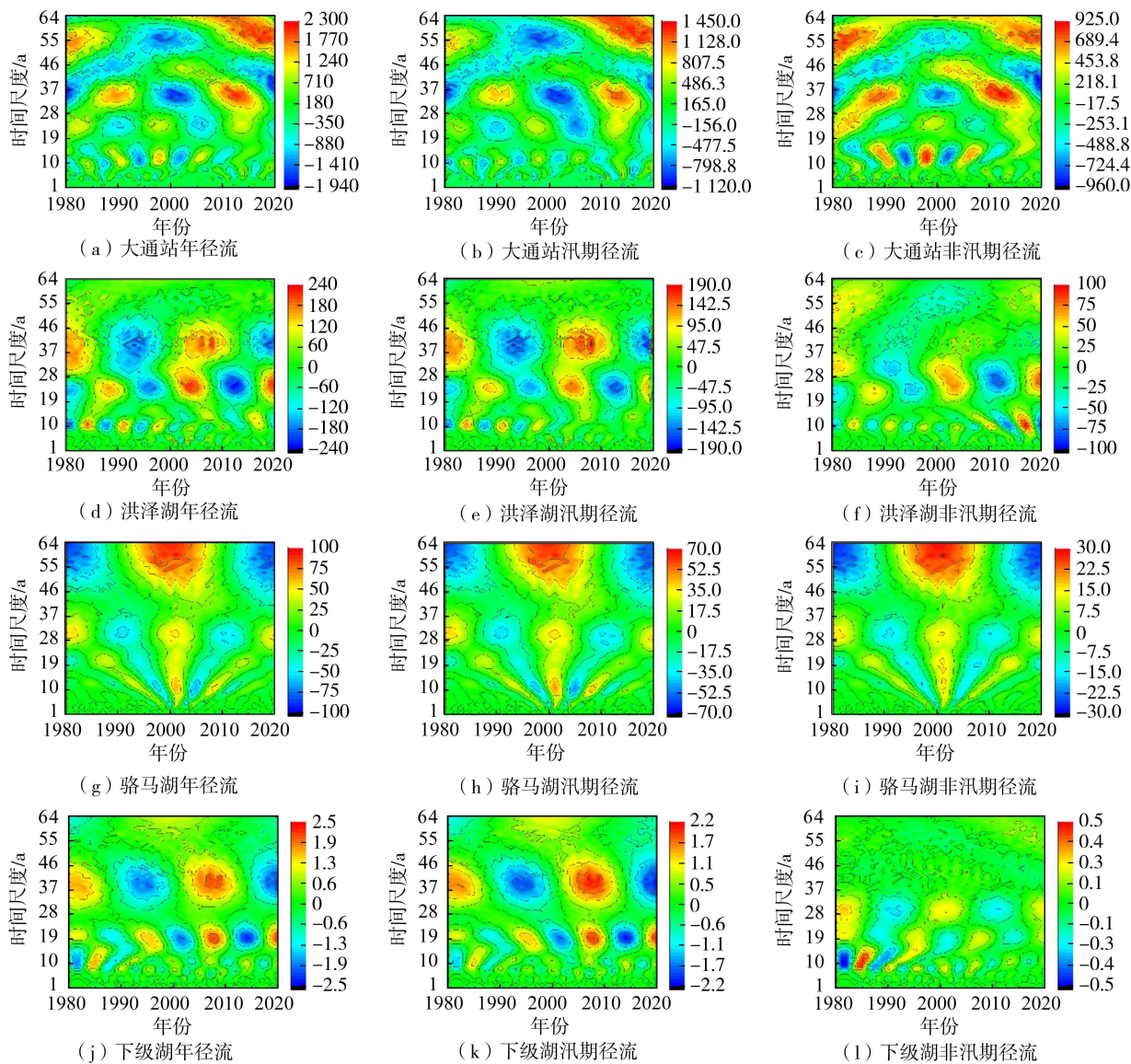


图 1 4 个水源小波变换系数实部等值线图

Fig. 1 Contour maps of real part of wavelet transform coefficient for four water sources

及其在时间域中的分布,通过该图可以判断不同时段径流量的未来变化趋势。

a. 大通站年、汛期和非汛期径流量周期变化特征相似,均表现出明显的年际变化,主要呈现 50~60、30~40、20~25、5~15 a 的周期变化规律。尺度为 30~40、20~25、5~15 a 的周期变化在整个研究期内较稳定,具有全域性。在 20~25 a 尺度上,2020 年后小波变换系数为正值,表明未来 20 年内(2020—2040 年),大通站年、汛期和非汛期径流量可能进入相对偏多的时期。

b. 洪泽湖年、汛期径流量周期变化特征相似,均表现出明显的年际变化,主要呈现 35~45、20~30、8~13 a 的周期变化规律。尺度为 35~45、20~30 a 的周期变化在整个研究期内较稳定,具有全域性。在 8~13、20~30 a 尺度上,2020 年后小波变换系数为负值;而在 35~45 a 尺度上,小波变换系数为

正值,因此,预计未来约 30 年内(2000—2050 年),洪泽湖年、汛期径流量可能仍处于相对偏少的时期,而 2050 年后,洪泽湖年、汛期径流量将逐渐增加。洪泽湖非汛期径流量主要呈现 20~40、5~15 a 的周期变化规律,这两个尺度的周期变化在整个研究期内较稳定,具有全域性。在 20~40、5~15 a 尺度上,2020 年后小波变换系数均为负值,表明未来较长一段时间内,洪泽湖非汛期径流量会持续减少。

c. 骆马湖年、汛期和非汛期径流量周期变化特征相似,均表现出明显的年际变化,主要呈现 50~60、25~35、15~25、8~15 a 的周期变化规律。尺度为 50~60、25~35 a 的周期变化在整个研究期内较稳定,具有全域性。在 15~25 a 尺度上,2020 年后小波变换系数为正值;在 25~30 a 尺度上,2020 年后小波变换系数为负值,表明未来 25 年内(2020—2045 年),骆马湖年、汛期和非汛期径流量可能进入一个相对偏多的时

期,多年后年、汛期径流量将逐渐减少。

d. 下级湖年、汛期径流量的周期变化特征相似,均表现出明显的年际变化,主要呈现 30~45、15~25、5~15 a 的周期变化规律。尺度为 30~45、15~25 a 的周期变化在整个研究期内较稳定,具有全域性。在 15~25 a 的尺度上,2020 年后小波变换系数为负值;在 30~45 a 时间尺度上,小波变换系数为正值,表明未来 30 年内(2020—2050 年),下级湖年、汛期径流量可能仍处于相对偏少的时期,2050 年后下级湖年、汛期径流量将逐渐增加。下级湖非汛期主要呈现 25~35、15~25、5~15 a 的周期变化规律,这 3 个尺度的周期变化在整个研究期内较稳定,具有全域性。在 5~15 a 尺度上,2020 年后小波变换系数为负值,因此,未来 15 年内(2020—2035 年),下级湖非汛期径流量将逐渐减少。

基于小波变换系数结果得到小波方差随时间尺度变化结果,小波方差最高峰和次高峰对应的时间尺度为第一和第二主周期对应的特征时间尺度。根据特征时间尺度得到相应的小波实部过程线,进行峰值识别并计算其平均周期,从而得到各水源不同

时段第一和第二主周期的准周期,见表 3。

表 3 各水源不同时段径流周期特征值

Table 3 Eigenvalue of runoff cycle of each water source in different periods					
水源	时段	特征时间尺度/a		准周期/a	
		第一主周期	第二主周期	第一主周期	第二主周期
大通站	全 年	24	11	14	6
	汛 期	24	11	7	7
	非汛期	14	24	8	14
洪泽湖	全 年	25	11	16	7
	汛 期	25	11	16	7
	非汛期	11	25	7	10
骆马湖	全 年	30	12	10	8
	汛 期	30	12	10	8
	非汛期	30	20	10	13
下级湖	全 年	20	10	13	7
	汛 期	20	10	13	7
	非汛期	30	10	8	6

3.2 相邻水源间径流相关关系

3.2.1 相关性演变

滑动步长 m 分别取 12、14、16、18、20,得到各时段大通站与洪泽湖、洪泽湖与骆马湖、骆马湖与下级湖的径流滑动相关系数及其平均值,如图 2 所示。

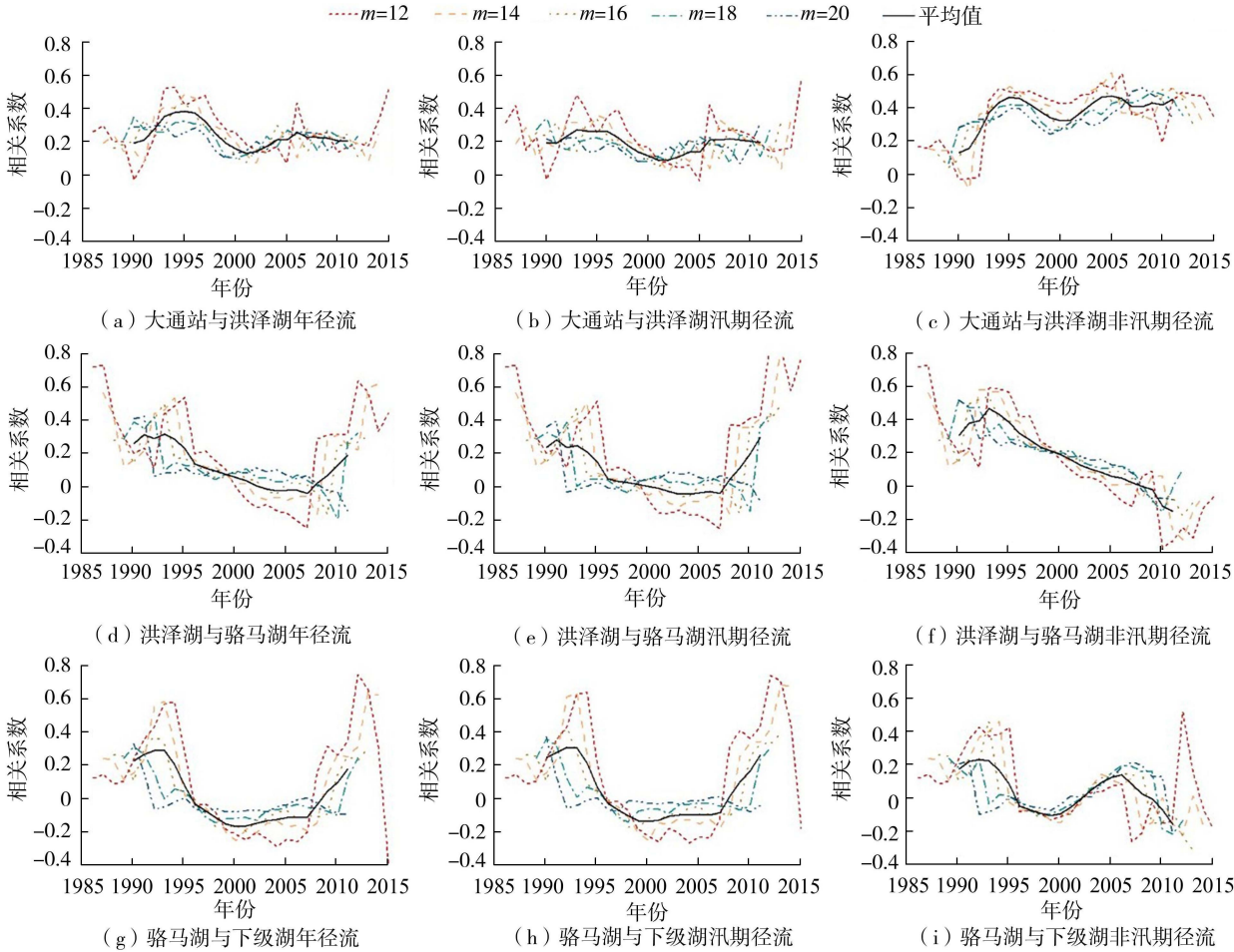


图 2 相邻水源间径流滑动相关系数

Fig. 2 Sliding correlation coefficient of runoff between adjacent water sources

从图 2(a) ~ (c) 可以看出,大通站与洪泽湖的年、汛期和非汛期径流滑动相关系数分别为-0.03~0.53、-0.03~0.58 和-0.09~0.62,各时段径流滑动相关系数的年际变化较剧烈,不同时段径流相关性均在 1995—2002 年呈下降趋势,其余年份呈周期性上升。

从图 2(d) ~ (f) 可以看出,洪泽湖与骆马湖的年、汛期和非汛期径流滑动相关系数分别为-0.25~0.74、-0.25~0.87 和-0.36~0.74,整体而言,各时段径流相关性呈下降趋势,其中,年、汛期相关系数在 2007 年后呈回升趋势。

从图 2(g) ~ (i) 可以看出,骆马湖与下级湖的年、汛期和非汛期径流滑动相关系数分别为-0.40~0.75、-0.27~0.74 和-0.31~0.52,各时段径流相关性在 1990—1993 年呈短期上升趋势,1993—2000 年呈下降趋势,2000 年后,年、汛期径流滑动相关系数呈平稳回升趋势,但非汛期为先上升后下降。

3.2.2 径流联合分布

基于 Gumbel、Clayton 和 Frank Copula 函数构建了各相邻水源年、汛期和非汛期径流二维联合分布,表 4 给出了各 Copula 函数拟合参数值、赤池信息准

表 4 相邻水源径流 Copula 函数拟合结果

Table 4 Fitting results of Copula functions for adjacent water source runoff					
相邻水源	Copula 函数	时段	参数	AIC	RMSE
大通站与洪泽湖	Gumbel	全 年	1.098	1.381	0.031
		汛 期	1.207	-0.276	0.030
		非汛期	1.219	-1.207	0.029
	Clayton	全 年	0.234	0.815	0.030
		汛 期	0.450	-1.318	0.030
		非汛期	0.405	2.846	0.036
	Frank	全 年	1.055	0.752	0.028
		汛 期	1.827	-1.512	0.027
		非汛期	1.378	-0.100	0.033
洪泽湖与骆马湖	Gumbel	全 年	1.305	-2.824	0.022
		汛 期	1.225	-1.043	0.025
		非汛期	1.214	-0.360	0.024
	Clayton	全 年	0.498	-1.919	0.029
		汛 期	0.367	0.083	0.030
		非汛期	0.496	-1.867	0.022
	Frank	全 年	2.014	-1.989	0.026
		汛 期	1.410	0.071	0.029
		非汛期	1.762	-1.133	0.022
骆马湖与下级湖	Gumbel	全 年	1.068	1.690	0.036
		汛 期	1.150	0.428	0.028
		非汛期	1.000	2.000	0.027
	Clayton	全 年	0.038	1.971	0.037
		汛 期	0.159	1.229	0.032
		非汛期	0.145	1.469	0.028
	Frank	全 年	0.339	1.888	0.037
		汛 期	0.831	1.334	0.030
		非汛期	-0.035	1.999	0.028

则(AIC)和均方根误差(RMSE)。AIC 和 RMSE 值越小,说明拟合效果越好。从表 4 可以看出,Gumbel Copula 函数描述洪泽湖与骆马湖、骆马湖与下级湖年、汛期和大通站与洪泽湖非汛期径流联合分布最优;Frank Copula 函数描述大通站与洪泽湖年、汛期径流联合分布最优;Clayton Copula 函数描述洪泽湖与骆马湖、骆马湖与下级湖非汛期径流联合分布最优。

各相邻水源径流 Copula 函数拟合值与 Copula 函数经验值的皮尔逊乘积矩相关系数平方(r^2)的平均值为 0.98,说明两者基本呈完全正相关关系,Copula 函数拟合效果较好。

3.2.3 丰枯遭遇特征

将各水源径流分为丰、平、枯 3 个等级,以累积概率 $p = 62.5\%$ 作为丰水与平水的分割频率, $p = 37.5\%$ 作为平水与枯水的分割频率,即 $p < 37.5\%$ 为枯水, $37.5\% \leq p < 62.5\%$ 为平水, $p \geq 62.5\%$ 为丰水,得到相邻水源径流的丰枯遭遇概率,如表 5 所示。

a. 大通站与洪泽湖年、汛期和非汛期径流丰枯同步的概率分别为 40.30%、44.60%、43.03%;洪泽湖与骆马湖年、汛期和非汛期径流丰枯同步的概率分别为 45.76%、43.33%、43.82%;骆马湖与下级湖年、汛期和非汛期径流丰枯同步的概率分别为 37.38%、40.58%、37.51%。其中,年、汛期和非汛期径流同枯(不利于调水)的平均概率分别为 17.88%、18.69%、15.96%。各相邻水源径流丰枯同步率平均为 41.8%,且不同时段的不同步率差异较小。

b. 大通站与洪泽湖年、汛期和非汛期径流丰枯异步的概率分别为 22.46%、18.64%、20.40%;洪泽湖与骆马湖年、汛期和非汛期径流丰枯异步的概率分别为 18.12%、20.24%、19.54%;骆马湖与下级湖年、汛期和非汛期径流丰枯异步的概率分别为 25.38%、22.52%、25.20%。各相邻水源径流丰枯异步率平均为 21.4%,且不同时段的不同步率差异较小。

4 对策建议

4.1 充分利用预报信息适时调整调水计划

考虑到东线工程除洪泽湖汛期和下级湖非汛期径流量呈下降趋势、下级湖全年径流量无明显变化趋势外,各水源其他时段径流量均呈上升趋势,未来在实际调度时要加强气候及气象预报信息的获取与分析,识别影响东线工程沿线水源径流量的关键气象因素,如降水量、蒸发量、气温等,为来水预报提供科学依据。同时,基于气候及气象预报信息,构建适

表 5 相邻水源径流丰枯遭遇概率

Table 5 Wetness-dryness encounter probabilities of adjacent water source runoff

相邻水源	径流丰枯	年丰枯遭遇概率/%			汛期丰枯遭遇概率/%			非汛期丰枯遭遇概率/%		
		丰	平	枯	丰	平	枯	丰	平	枯
大通站与洪泽湖	丰	16.96	9.31	11.23	18.99	9.19	9.32	18.61	8.68	10.20
	平	9.31	6.38	9.31	9.19	6.62	9.19	8.68	6.72	9.60
	枯	11.23	9.31	16.96	9.32	9.19	18.99	10.20	9.60	17.70
洪泽湖与骆马湖	丰	19.96	8.48	9.06	18.71	8.67	10.12	17.70	10.03	9.77
	平	8.48	6.94	9.58	8.67	6.73	9.60	10.03	6.68	8.29
	枯	9.06	9.58	18.86	10.12	9.60	17.78	9.77	8.29	19.44
骆马湖与下级湖	丰	15.69	9.12	12.69	17.37	8.87	11.26	15.26	9.65	12.60
	平	9.12	6.38	9.50	8.87	6.55	9.58	9.65	6.35	9.01
	枯	12.69	9.50	15.31	11.26	9.58	16.66	12.60	9.01	15.90

用于东线工程沿线水源的来水预测预报模型,通过不断验证和修正模型参数,提高预测结果的准确性和可靠性。根据来水预测预报结果,实施动态调水优化策略,在满足东线工程沿线水源湖泊周边用水需求的基础上,根据预测到的水源径流量变化情况,灵活调整调水计划,如在水源充沛时段,可适时增加当前湖泊向北供水的提水量,减少南边抽江水或湖水的提水量,以进一步降低提水成本。

4.2 基于水量补偿及库容补偿联合优化调度

考虑到东线工程沿线存在多个调蓄湖泊,且各相邻水源丰枯存在异步规律,未来在实际调度中可充分利用沿线水源丰枯互补特性和湖泊库容的调蓄功能,精准预测和分析各水源的来水情况,结合沿线湖泊的实时库容信息及未来变化趋势,动态调整各调蓄湖泊的蓄放水计划及向北调水策略。在湖泊来水较多时,充分利用湖泊的调蓄能力,为后期来水较少时储备充足水源,以减少南边水源向北提水量,从而降低提水成本;而在沿线湖泊来水较少时,则可充分利用沿线湖泊的调蓄库容,提前抽取南边水源,并存储于湖泊中,以应对北边调水需求,减少因水源不足导致的缺水量,确保沿线用户的用水安全与稳定。

4.3 极端枯水条件下东线可调水量挖潜研究

为应对全球气候变化与人类活动加剧共同引发的复合型极端水文事件频发问题,针对南水北调东线工程,需深入探索极端枯水条件下的可调水量潜力及应对策略。鉴于东线工程涉及多个水源地,可能面临同步枯水的风险,未来可能出现北部受水区迫切需水,而南部多个水源同时遭遇枯水的严峻形势,这将直接威胁南水北调东线工程的供水稳定性。因此,研究应聚焦于构建不同情景模式,特别是长江下游及东线沿线湖泊同时出现极端枯水的极端情况,并在此基础上,综合分析长江下游地区的多目标用水需求、生态下泄流量保障要求以及东线工程沿线各受水区的需水状况。同时,利用东线工程的湖泊调控能力与双线输水机制,科学评估极端枯水条

件下的可调水量阈值,量化极端枯水对调水工程的综合影响。通过一系列前瞻性分析与定量评估,旨在为气候变化背景下可能遭遇的极端枯水情景提供应对策略,确保在不利条件下仍能维持南水北调东线工程的水资源调配能力,保障区域水资源安全与可持续发展。

5 结 论

a. 除洪泽湖汛期和下级湖非汛期径流量呈下降趋势、下级湖年径流量无明显变化趋势外,各水源其他时段径流量均呈上升趋势;骆马湖年、汛期径流量在 1999 年发生显著突变,下级湖非汛期径流量在 2005 年发生显著突变。

b. 大通站、洪泽湖、骆马湖、下级湖年径流分别存在 14、16、10、13 a 的主周期,汛期径流分别存在 7、16、10、13 a 的主周期,非汛期径流分别存在 8、7、10、8 a 的主周期。根据周期规律预测,近期大通站、骆马湖将可能处于径流量偏多期,洪泽湖、下级湖将可能处于径流量偏少期。

c. 相邻水源径流滑动相关系数波动显著,表现出较强的时变特征,各相邻水源丰枯同步率和异步率平均值分别为 41.8%和 21.4%,不同时段丰枯遭遇概率差异较小。其中,对调水最为不利的水源同枯情况,其平均发生概率为 17.51%。

d. 新的来水形势下,可根据主要水源来水规律适时调整南水北调东线工程水量调度方案,基于不同水源间的丰枯遭遇进行水量补偿及库容补偿联合优化调度,探索极端枯水条件下的可调水量潜力及应对策略。

参考文献:

[1] 刘为锋,郭旭宁,李昕阳,等. 南水北调东线工程调水潜力分析 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (1): 42-48. (LIU Weifeng, GUO Xuning, LI Xinyang, et al. Analysis of water transfer potential of the Eastern Route of South-to-North

- Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 42-48. (in Chinese))
- [2] 蓝云龙,黎曙,李霞,等. 1956 年~2020 年黄河源区径流变化规律分析[J]. 陕西水利, 2022(6): 33-36. (LAN Yunlong, LI Shu, LI Xia, et al. Analysis on the change law of runoff in the source region of the Yellow River from 1956 to 2020[J]. Shaanxi Water Resources, 2022(6): 33-36. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 龙爱华,邓铭江,谢蕾,等. 气候变化下新疆及咸海流域河川径流演变及适应性对策分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 377-387. (LONG Aihua, DENG Mingjiang, XIE Lei, et al. Exploring analysis on the adaptive countermeasures to water resources evolvement under the climate change in Xinjiang and Aral Sea Basin[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 377-387. (in Chinese))
- [5] HOU Bingfei, JIANG Chao, SUN O J. Differential changes in precipitation and runoff discharge during 1958-2017 in the headwater region of Yellow River of China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(9): 1401-1418.
- [6] 刘晶,鲍振鑫,刘翠善,等. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(4): 31-41. (LIU Jing, BAO Zhenxin, LIU Cuishan, et al. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(4): 31-41. (in Chinese))
- [7] 郭旭宁,酆建强,李云玲,等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 62-66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))
- [8] 杨荣雪,王丰,王红瑞,等. 国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 130-136. (YANG Rongxue, WANG Feng, WANG Hongrui, et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 130-136. (in Chinese))
- [9] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 1-6. (XIA Jun, MA Xieyi, ZOU Lei, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 1-6. (in Chinese))
- [10] 陈茜茜,屈艳萍,吕娟,等. 南水北调中线工程水源区和受水区的降水时空变化特征及丰枯遭遇[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 136-146. (CHEN Xixi, QU Yanping, LYU Juan, et al. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation and drought-waterlogging encounter probability in water source and receiving areas of middle route project of south-to-north water diversion project [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 136-146. (in Chinese))
- [11] 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 Baowei, GUO Shenglian, XIAO Yi. 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))
- [12] 卞佳琪,于慧,李强,等. 长江下游多维径流丰枯遭遇及丰枯演变分析[J]. 人民长江, 2021, 52(10): 120-127. (BIAN Jiaqi, YU Hui, LI Qiang, et al. Analysis on wetness-dryness encounter and evolution of multi-dimensional runoff in lower reaches of Changjiang River [J]. Yangtze River, 2021, 52(10): 120-127. (in Chinese))
- [13] HAMED K H, RAO A R. A modified Mann-Kendall trend test for auto-correlated data [J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1/2/3/4): 182-196.
- [14] 张应华,宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 652-665. (ZHANG Yinghua, SONG Xianfang. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: advances and evaluation [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 652-665. (in Chinese))
- [15] 山成菊,董增川,付晓花,等. 近 50 年来滦河流域径流演变规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 5-8. (SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Rules of runoff variation in Luanhe River Basin in recent 50 Years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 5-8. (in Chinese))
- [16] 陈广圣,王义民,刘登峰,等. 基于滑动相关系数法的流域径流变异诊断[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(1): 11-18. (CHEN Guangsheng, WANG Yimin, LIU Dengfeng, et al. Detection of basin runoff variation based on moving correlation coefficient method [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1): 11-18. (in Chinese))

(下转第 192 页)

[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):27-35. (in Chinese))

[11] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护,2023,39(4):79-85. (XU Lili, SHU Longcang, LI Wei, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):79-85. (in Chinese))

[12] 门宝辉,李晨,尹世洋. 基于减法集对势的大兴区地下水开采强度评价与诊断[J]. 水资源保护,2022,38(5):17-25. (MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang. Evaluation and diagnosis of groundwater exploitation intensity in Daxing District based on subtraction set pair potential[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):17-25. (in Chinese))

[13] 张婧,马贵宏,高雅,等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):21-28. (in Chinese))

[14] 牛欣怡,鲁程鹏,卢佳赟,等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):74-82. (NIU Xinyi, LU Chengpeng, LU Jiayun, et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):74-82. (in Chinese))

[15] ZHANG Chong, DUAN Qingyun, YEH P J F, et al. Sub-regional groundwater storage recovery in North China Plain after the South-to-North water diversion project [J]. Journal of Hydrology,2021,597:126156.

[16] 代志雪. 沧州市地下水数值模拟研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.

[17] 王慧军. 河北省粮食综合生产能力研究[M]. 石家庄:河北科学技术出版社,2010.

[18] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京:中国农业科技出版社,1993.

[19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.

[20] BLANK J, DEB K. Pymoo: multi-objective optimization in Python[J]. IEEE Access,2020,8:89497-89509.

[21] 曹国亮. 华北平原地下水系统变化规律研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.

[22] 丁蓓蓓,张雪靓,赵振庭,等. 华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的 Meta 分析[J]. 灌溉排水学报,2021,40(12):7-17. (DING Beibei, ZHANG Xueliang, ZHAO Zhenting, et al. Change in winter wheat yield and its water use efficiency as affected by limited irrigation in North China Plain: a Meta-analysis [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2021,40(12):7-17. (in Chinese))

[23] 巨龙,王全九,王琳芳,等. 灌水量对半干旱区土壤盐分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(1):86-90. (JU Long, WANG Quanjiu, WANG Linfang, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(1):86-90. (in Chinese))

[24] 沧州市水务局. 沧州市水务局坚持综合施策确保完成年度压采任务[EB/OL]. (2022-11-22) [2024-06-01]. <http://slt.hebei.gov.cn/a/2023/11/22/01039099F715499F8B01ABC8ABBD1471.html>.

[25] 沧州市水务局. 沧州去年压减地下水超采量 3190 万立方米[EB/OL]. (2024-01-04) [2024-06-01]. <http://slt.hebei.gov.cn/a/2024/01/04/FED20618EE23489E95FFA03F10751EED.html>.

[26] 冯战洪,苏建平. 多措并举推进河北地下水超采治理[J]. 中国水利,2022(6):15-16. (FENG Zhanhong, SU Jianping. Control of groundwater over-exploitation in Hebei with multiple measures[J]. China Water Resources,2022(6):15-16. (in Chinese))

(收稿日期:2024-06-03 编辑:施业)

(上接第 172 页)

[17] GRIMALDI S, SERINALDI F. Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis [J]. Advances in Water Resources,2006,29(8):1155-1167.

[18] LU Qingwen, ZHONG Ping'an, XU Bin, et al. Multi-objective risk analysis for flood control operation of a complex reservoir system under multiple time-space correlated uncertainties[J]. Journal of Hydrology,2022,606:127419.

[19] LEE T, SALAS J D. Copula-based stochastic simulation of hydrological data applied to Nile River flows [J]. Hydrology Research,2011,42(4):318-330.

[20] 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 Yuejiao, HUANG Shengzhi, NIE Mingqiu, 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. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-20 编辑:施业)