

长江流域复杂水资源系统风险网络特征的工程影响解析

冯仲恺^{1,2,3}, 杨晓静^{1,2,3}, 牛文静⁴, 王煜⁵, 彭少明⁶, 郑小康⁷, 王永强⁸

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水文水资源学院;

3. 河海大学洪涝灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室; 4. 长江水利委员会长江水文局;

5. 水利部黄河水利委员会; 6. 水利部水利水电规划设计总院; 7. 黄河勘测规划设计研究院有限公司;

8. 长江水利委员会长江科学院)

摘要:采用复杂网络理论与因果诊断技术,构建了长江流域“气象-水文-社会经济-生态-水利工程”多维耦合风险网络,并基于节点度、小世界系数等网络拓扑指标,系统揭示了南水北调、三峡工程、引江济太及牛栏江补水等典型水利工程对系统特征的影响机制。结果表明:长江流域复杂水资源系统风险网络包含 368 个节点和 1208 条边,呈现显著的小世界网络特性,表现出“气象/生态要素驱动上游、社会经济要素驱动中下游”的差异化空间分布规律;网络存在 5 条长链,呈现“上游短链局地传导、中下游长链跨区胁迫”的双模态拓扑结构特征。通过典型情景量化分析发现:南水北调、引江济太及牛栏江补水工程分别使小世界系数提升 5.45%、4.43%、0.99%,对网络结构优化及系统稳定具有积极作用;三峡工程因重构水文路径导致小世界系数下降 1.23%,被识别为流域核心控制工程,有利于增强局部鲁棒性,提升流域系统在关键节点失效时的适应性;引江济太工程连通新因果链缓解了太湖区域生态级联效应,南水北调工程提升了跨区网络稳健性。基于此,提出了节点预警、路径阻断与网络协同的多尺度阻断策略。

关键词:复杂网络;风险阻断;水利工程影响;长江流域

Project impact analysis on risk network features of the Yangtze River Basin complex water resources system//Feng Zhongkai^{1,2,3}, Yang Xiaojing^{1,2,3}, Niu Wenjing⁴, Wang Yu⁵, Peng Shaoming⁶, Zheng Xiaokang⁷, Wang Yongqiang⁸
(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 3. Key Laboratory of Flood Disaster Risk Warning, Prevention and Mitigation, Ministry of Emergency Management, Hohai University; 4. Changjiang Hydrological Bureau of Changjiang Water Resources Commission; 5. Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources; 6. Ministry of Water Resources and Hydropower Planning and Design Institute; 7. Yellow River Survey, Planning, Design and Research Institute Co., Ltd.; 8. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission)

Abstract: This study constructed a multi-dimensional coupled risk network for the Yangtze River Basin's "meteorology-hydrology-socioeconomic-ecology-water conservancy projects" using complex network theory and causal diagnosis technology. Based on network topological indices (e.g., node degree, small-world coefficient), the influence mechanisms of typical water conservancy projects-including the South-to-North Water Diversion Project, Three Gorges Project, Water Diversion from the Yangtze River to Taihu Lake, and Niulanjiang River Water Supplement Project-on system characteristics were systematically revealed. Results show that: The risk network of the Yangtze River Basin's complex water resources system contains 368 nodes and 1208 edges, exhibiting significant small-world network characteristics. It displays differentiated spatial distribution patterns of "meteorological/ecological factors driving the upstream and socio-economic factors driving the middle and lower reaches." The network features 5 long chains, presenting bimodal topological structural characteristics: "local conduction via short chains in the upstream and cross-regional coercion via long chains in the middle and lower reaches." Quantitative analysis of typical scenarios reveals that: The South-to-North Water Diversion Project, Water Diversion from the Yangtze River to Taihu Lake, and Niulanjiang River Water Supplement Project increased the

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);国家自然科学基金项目(52441901,52379009);江苏省自然科学基金优秀青年项目(BK20240189);北京江河水利发展基金会-水利青年科技英才项目(JHYC202310);江苏省科技智库计划项目(JSKX 0225 047)

作者简介:冯仲恺(1988—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:myfellow@163.com

small-world coefficient by 5.45%, 4.43%, and 0.99%, respectively, playing positive roles in optimizing network structure and maintaining system stability. The Three Gorges Project led to a 1.23% decrease in the small-world coefficient due to hydrological path reconstruction and was identified as the core control project of the basin, which helps enhance local robustness and improve the system's adaptability to failures of key nodes. The Water Diversion from the Yangtze River to Taihu Lake alleviates the ecological cascade effect in the Taihu Lake region by connecting new causal chains, while the South-to-North Water Diversion Project enhances the robustness of the cross-regional network. Based on these findings, multi-scale blocking strategies-integrating node-level early warning, path interception, and network-wide coordination are proposed.

Key words: complex network; risk blocking; impact of water conservancy projects; the Yangtze River Basin

长江流域水资源系统受气象波动、水文变异、社会经济压力、生态退化及水利工程调控等多维要素耦合驱动^[1],呈现高度非线性、交互性、复杂性与脆弱性特征。近年来,降水异常、持续干旱、旱涝急转等跨尺度极端事件正加速重构流域水文循环过程,显著增加级联风险发生概率与损失规模^[2]。气候变异与人类活动双重胁迫下,复合极端事件发生频率持续攀升,严重威胁水资源系统安全^[3]。典型案例为2022年长江流域特大干旱,作为1961年以来最严重的旱灾^[4],其影响覆盖农业灌溉、城市供水等关键水安全领域^[5-6],流域耕地受旱面积达442万hm²,雅砻江等主要支流来水减少约50%,水电可靠性显著下降^[7]。这一事件凸显了南水北调工程、三峡工程、引江济太工程及牛栏江滇池补水工程等典型水利工程作为关键节点的核心调控作用。在此背景下,亟须解决“如何量化典型水利工程对复杂水资源系统风险网络的影响,为流域科学调控与风险应对提供科学依据”这一关键科学问题。

围绕水资源系统风险分析,国内外研究已形成“风险识别—风险评估—风险决策”的基本框架。在风险识别层面,方法已从传统故障树分析^[8]、模糊逻辑^[9]逐步转向复杂网络拓扑解析^[10]。复杂网络拓扑解析方法可有效解析复杂系统拓扑结构,成为识别关键节点与风险传递路径的核心工具;在风险评估环节,Copula函数^[11-12]、贝叶斯网络^[13]等数学工具与机器学习深度耦合,显著提升了复杂系统非线性建模能力;风险决策则依赖多准则分析(如AHP-TOPSIS^[14])实现多属性、多目标协同优化^[15]。复杂网络理论通过整合关联规则挖掘、熵权法及风险传播模型,推动水资源管理从单要素解析向多要素协同防控转变。然而,受水资源系统动态时序变异、非线性交互及多尺度耦合特征(如水利工程引发的生态链式反应)的影响,传统方法仍存在三方面瓶颈:Granger因果分析对非平稳数据适应性较差,贝叶斯网络受限于高维计算复杂度,系统动力学难以量化实时干预效应。近年来发展的PCMCI方法(Peter and Clark momentary conditional independence, peter-clark 瞬时条件独立性)^[16]通过两阶段优化策略(PC₁条

件集筛选与MCI独立性检验),结合时间窗动态划分与最大滞后阶数优化机制,有效突破了上述限制。现有研究多围绕气象、水文、社会经济、生态等维度展开,采用复杂网络等方法刻画水资源系统特征,开展风险传播、韧性调控、水-能系统特征^[17-18]等研究。如,冯仲恺等^[19-20]构建了“气象-水文-社会-经济-生态”多维关联要素框架,分别开展黄河流域复杂网络特征及风险传导分析;郑小康等^[21]指出流域水资源系统本质为气象水文-水网-经济社会-生态环境复合系统,并基于此完成1990—2022年系统韧性评价;郑小康等^[21]揭示复杂水资源系统中气象水文-经济社会-基础设施网络的关联性呈增强趋势,水网构建对流域水资源系统韧性提升效果显著。然而,已有研究在典型水利工程对复杂水资源系统风险网络的定量影响机制方面仍显薄弱,对级联传播路径的研究需要加强。

本文针对典型水利工程作用下水资源系统耦合建模与特征分析难题,以“因果诊断-拓扑演化-工程影响”为主线,统筹“气象、水文、社会经济、生态、水利工程”多维要素,构建了长江流域复杂水资源系统风险分析框架,主要工作包括:①引入DomiRank算法量化节点中心性迁移规律,揭示“节点脆弱性转移—边介数重构—网络效率调整”的级联响应过程,突破传统中心性指标对长链风险的识别局限;②通过构建典型情景,分析水利工程对长江流域复杂水资源系统特征的影响,为水资源调配优化与风险防控提供定量支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江流域作为我国水资源配置与调控的核心主干,横跨西南、华中、华东三大经济区,降水时空分布特征显著:年均降水量800~1600mm,总体呈西北向东南递增趋势,且70%~80%集中于汛期(5—9月)。基于流域地貌复杂性及水利工程调控强度,依据水利部划分的全国水资源分区(<http://gjkj.mwr.gov.cn/>)将长江流域划分为12个二级区(图1):金沙江石鼓以上(I)、金沙江石鼓以下

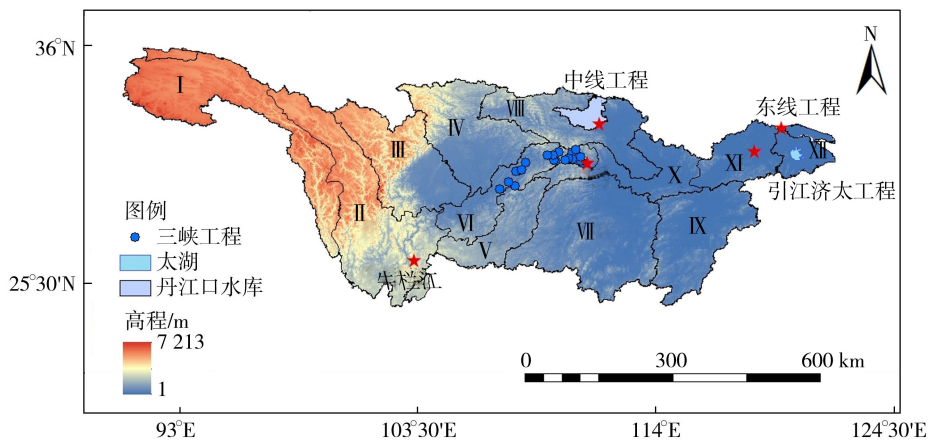


图1 长江流域概况及二级分区

Fig.1 Yangtze River Basin overview and its secondary

(II)、岷沱江(III)、嘉陵江(IV)、乌江(V)、宜宾至宜昌(VI)、洞庭湖水系(VII)、汉江(VIII)、鄱阳湖水系(IX)、宜昌至湖口(X)、湖口以下干流(XI)、太湖水系(XII)。其中,上游段涵盖分区I—VI,中游段涵盖分区VII—X,下游段涵盖分区XI—XII。以分区间断面径流量为水力联系纽带,通过有序衔接各水资源二级分区,构建长江流域水资源系统复杂网络,旨在揭示流域多维要素的时空交互机制,定量评估典型水利工程对系统结构特征的影响。

1.2 数据来源

本文以长江流域水资源二级分区为基本单元,统筹2000—2023年尺度的气象、水文、社会经济、生态和水利工程多维要素数据集,数据来源如下:

a. 气象数据。温度、相对湿度、降水等来源于中国气象局国家气象信息中心发布的地面气象观测数据(<http://data.cma.cn>);

b. 水文数据。地表水资源量、供用水量及主要控制断面径流量等来源于《长江流域及西南诸河水资源公报》,选取的关键控制断面有石鼓站、向家坝站、寸滩站等;

c. 社会经济数据。地区生产总值、居民消费、有效灌溉面积等来源于长江流域19省(市)统计年鉴。

d. 生态数据。林地、草地、湿地等土地利用指标^[22]来源于“中国1985—2022逐年30 m土地利用数据集”,并依据HJ 192—2015《生态环境状态评价技术规范》赋权计算栖息地质量指数,权重为林地0.35、水域0.28、草地0.21、耕地0.11、未利用地0.01、建设用地0.04。

e. 调水工程数据。基于数据可获取性、空间覆盖性、功能代表性原则,选择南水北调工程(SNWD)、三峡工程(TGR)、引江济太工程(YTWTP)、牛栏江-滇池补水工程(NRDL-WDP)为

典型对象,数据源于《长江流域重要控制断面水资源监测通报》《三峡工程公报》。

2 长江流域复杂水资源系统风险网络

水资源系统具有多尺度关联性、动态演变性及脆弱性-韧性协同特征,需通过系统建模定量解析不同要素之间的非线性因果关系和耦合特征^[23-24]。本文采用融合复杂网络理论与因果诊断方法的水资源系统风险分析框架:基于PCMC方法^[25]与传递熵^[25]交叉确定关键驱动要素和因果链路,构建长江流域复杂水资源系统风险网络,进而耦合DomiRank主导性值(嵌入资源竞争机制)与节点度-边介数-小世界系数多级指标,从节点、链路-网络特征刻画典型水利工程对网络拓扑结构的影响,为流域水资源安全协同调控提供理论支撑。

2.1 复杂风险网络构建

a. 关联要素辨识。复杂水资源系统在气候变化与人类活动双重胁迫下,形成气象、水文、生态、社会经济及水利工程多要素交织的交互网络。基于前期研究成果^[20,26-28],整合气象子系统(A)、水文子系统(B)、社会经济子系统(C)、生态子系统(D)及工程子系统(E)等五大核心要素,构建了“气象-水文-社会经济-生态-水利工程”多维耦合要素集合(表1),其中水利工程子系统要素^[29-34]包括:南水北调中线调水量(汉江中上游跨湖北、河南两省的丹江口水库调出水量)、南水北调东线调水量(经江都水利枢纽向华北地区的调出水量)、三峡库区来水总量(三峡水库上游汇水区域的入库流量,受上游径流与降水共同驱动)、三峡库区补水总量(三峡水库向下游的调水总量,受下游需水、库区航运水位要求共同作用)、三峡库区年发电量(三峡水库水力发电总量,受来水、补水及拦洪总量共同调控)、三峡库区泥沙淤积量(三峡水库的泥沙堆积总量,直接

表 1 “气象-水文-社会经济-生态-水利工程”多维耦合要素集合

Table 1 Multidimensional Coupling Elements Set: Meteorology-Hydrology-Socioeconomic-Ecology-Water Engineering Infrastructure

子系统	要素名称	编号	单位	子系统	要素名称	编号	单位
气象子系统(A)	气压	A1	hPa	社会经济子系统(C)	供水管道长度	C11	km
	温度	A2	°C		农业机械总动力	C12	万 kW
	相对湿度	A3	%		有效灌溉面积	C13	10 ³ hm ²
	平均风速	A4	m/s		农作物总播种面积	C14	10 ³ hm ²
	降水量	A5	亿 m ³	生态子系统(D)	森林面积比重	D1	%
水文子系统(B)	上游断面入流量	B1	亿 m ³		草地面积比重	D2	%
	地表水资源量	B2	亿 m ³		水域面积比重	D3	%
	地下水资源量	B3	亿 m ³		建筑用地面积比重	D4	%
	供用水量	B4	亿 m ³		裸地面积比重	D5	%
	下游断面出流量	B5	亿 m ³		生境质量指数	D6	
社会经济子系统(C)	GDP(地区生产总值)	C1	亿元	工程子系统(E)	南水北调中线调水量	E1	亿 m ³
	第一产业增加值	C2	亿元		南水北调东线调水量	E2	亿 m ³
	第二产业增加值	C3	亿元		三峡库区来水总量	E5	亿 m ³
	第三产业增加值	C4	亿元		三峡库区补水总量	E6	亿 m ³
	居民消费	C5	亿元		三峡库区年发电量	E7	亿 k · Wh
	城镇人口	C6	万人		三峡库区泥沙淤积	E8	亿 t
	乡村人口	C7	万人		引江济太调水量	E5	亿 m ³
	人口自然增长率	C8	%	牛栏江滇池补水量	E6	亿 m ³	
	全体居民人均可支配收入	C9	元	湖北省引调水量	E7	亿 m ³	
	供水生产能力	C10	万 m ³ /d				

影响生态环境与综合效益)、引江济太调水量(引江济太工程的调水量)、牛栏江滇池补水量(牛栏江工程向滇池的生态补水量,体现工程对局地生态系统恢复的支撑作用)、湖北省引调水量(湖北省通过跨流域/跨区域引调水工程获取或输出的水资源量)。本文选取水文断面入流量作为系统输入变量,基于断面径流量构建水力联系拓扑结构,并通过水利工程控制变量衔接长江流域各水资源二级分区,最终实现子系统间互馈机制的结构化表征。

b. 因果链路诊断。PCMCI 作为高维时间序列因果发现的核心方法^[16],通过 PC₁(第一阶段条件集筛选)算法预筛选与混合条件独立性检验(MCI)的两阶段耦合机制,实现了复杂非线性系统的因果结构精确辨识。基于样本量与序列相关性优化,本文 PCMCI 参数设置为:最大滞后阶数 τ_{\max} 为 1、显著性水平 α 为 0.05。

c. 网络结构优化。在 PCMCI 因果识别架构中引入传递熵来量化变量间因果强度^[25],解析所有有向变量对($X \rightarrow Y$)的信息传递效率,揭示非线性系统动态因果机制。针对双向显著因果关系($X \leftrightarrow Y$),遵循信息流主导原则优化网络:当传递熵值 $T_{X \rightarrow Y} > T_{Y \rightarrow X}$ 时,保留 $X \rightarrow Y$ 主导方向并剪除低熵值冗余连接,显著增强拓扑结构的单向传递特性与因果逻辑清晰度。

2.2 网络拓扑特征分析

本文基于复杂网络理论,结合已有研究^[20,35-37],

从节点关键性、边权传导效率、全局鲁棒性 3 个维度,选取节点指标(节点度、度中心性、介数中心性、接近中心性)、边指标(边介数中心性)及网络指标(集聚系数、平均特征路径长度、网络效率、网络密度、小世界系数),系统量化长江流域复杂水资源系统风险网络的拓扑结构。

为科学识别网络关键节点,本文采用熵权法-TOPSIS 组合赋权法,将度中心性(DC)、介数中心性(BC)、接近中心性(CC)综合定义为节点层内重要性 S_i , S_i 值越大,表明该节点在网络中的联系紧密程度与控制能力越突出。计算公式为^[38]:

$$S_i = aC_{D_i} + bC_{B_i} + cC_{C_i} \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为熵权法确定的权重值; C_{D_i} 、 C_{B_i} 、 C_{C_i} 分别为节点 i 的度中心性、介数中心性、接近中心性。其中,度中心性描述节点与上下游直接关联程度,介数中心性量化中介控制能力,接近中心性评估全局邻近性。

为量化网络脆弱性分布特征并识别对其他节点具有强支配性的高风险节点,通过引入含可调节参数(α 、 β 、 θ)来融合局部与全局拓扑信息,嵌入竞争机制以求解节点主导性排序的稳态收敛解。Engsig 等^[39]的研究发现,极端竞争下某些节点 DomiRank 值可能呈现负值,表明水资源短缺条件下该类节点将水资源贡献给邻近节点。通过对本文网络进行节点失效模拟发现,优先移除 DomiRank 值大于 2.0 的高风险节点对影响网络稳健性更为有效,其计算公式为:

$$\frac{d\Gamma(t)}{dt} = \alpha A[\theta \mathbf{I}_{N \times N} - \Gamma(t)] - \beta \Gamma(t) \quad (2)$$

式中： $\Gamma(t)$ 为节点中心性随时间的变化向量； $A \in \mathbb{R}_{N \times N}$ 为邻接矩阵； α, β, θ 分别表征邻居影响强度、节点衰减率、主导性阈值， $\theta = 1$ ； $\mathbf{I}_{N \times N}$ 为全1列向量。

3 结果与分析

3.1 复杂风险网络构建

长江流域依托南水北调工程、三峡工程、引江济太工程及牛栏江滇池补水工程四大水利工程，基于“气象、水文、社会经济、生态、水利工程”五维子系

统关联要素，采用复杂网络理论、PCMCI因果诊断与传递熵优化技术，构建了包含12个水资源二级分区的风险网络(图2)，图2中绿色节点代表二级区内各要素，红色节点代表水力联系点(断面径流量)。网络中关键要素以特定节点表征，典型水利工程风险变量(如三峡库区泥沙淤积量、引江济太工程调水量)被深度融合，形成5类典型情景风险网络。

表2系统展示了5类情景风险网络的结构特征，揭示水利工程对网络拓扑具有显著调控效应。以情景1(现状工程)为基准，南水北调工程的投运

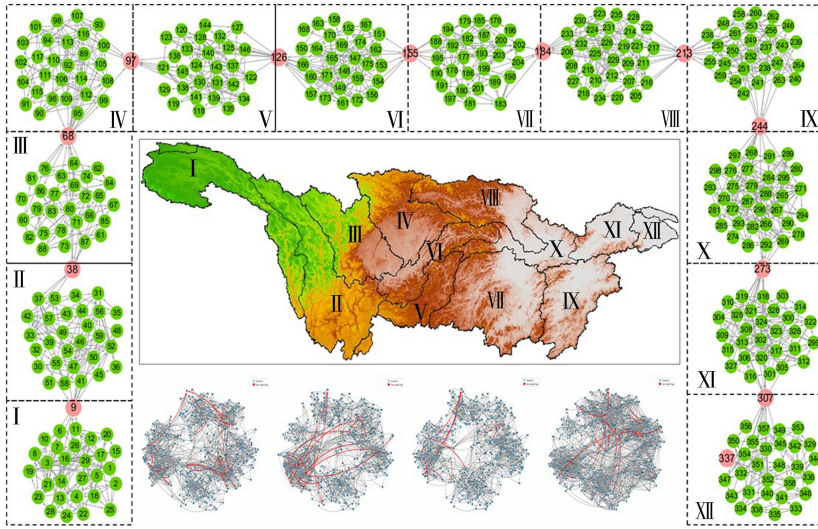


图2 长江流域复杂风险网络

Fig. 2 Complex risk network of the Yangtze River Basin

表2 不同情景下网络结构

Table 2 Network structure under different scenarios

二级分区	情景1		情景2		情景3		情景4		情景5	
	节点数	边数	节点数	边数	节点数	边数	节点数	边数	节点数	边数
长江流域	368	1208	366	1196	364	1171	367	1207	366	1196
			(-0.5%)	(-1%)	(-1.1%)	(-3.1%)	(-0.3%)	(-0.1%)	(-0.5%)	(-1%)
金沙江石鼓以上	29	102	29	102	29	102	29	102	29	102
金沙江石鼓以下	31	93	31	93	31	93	31	93	30	83
									(-3.2%)	(-10.8%)
岷沱江	30	77	30	77	30	77	30	77	30	77
嘉陵江	30	101	30	101	30	101	30	101	30	101
乌江	30	89	30	89	30	89	30	89	30	89
宜宾至宜昌	30	111	30	111	30	111	30	111	30	111
洞庭湖水系	30	96	30	96	30	96	30	96	30	96
汉江	32	105	31	108	32	106	32	106	31	103
			(-3.1%)	+1.9%					(-3.1%)	(-2.8%)
鄱阳湖水系	30	104	30	104	30	104	30	104	30	104
宜昌至湖口	34	123	34	123	30	85	34	123	34	123
					(-11.7%)	(-30.9%)				
湖口以下干流	31	120	30	105	31	120	31	120	31	120
			(-3.2%)	(-12.5%)						
太湖水系	31	87	31	87	31	87	30	85	31	87
							(-3.2%)	(-2.3%)		

注：情景1为长江流域现状；情景2为无南水北调工程情景；情景3为无三峡工程情景；情景4为无引江济太工程情景；情景5为无牛栏江补水工程情景，括号中数据为以情景1为基准，其他情景节点数、边数的变化率。

强化了湖口以下干流分区枢纽作用,驱动节点关联度(+3.2%)与跨区连接(+12.5%)同步提升,显著增强了长江中上游协同性;三峡工程(现状)聚焦宜昌-湖口分区水资源调控策略优化(调度路径冗余度提升30.9%),通过冗余路径增强系统抗扰动能力;引江济太工程(现状)以水量竞争协调机制改变太湖流域边缘节点介数分布(峰值节点位置偏移47个),利于形成新的跨区因果链,提升信息连通能力;牛栏江滇池补水工程(现状)则深化金沙江石鼓以下分区与汉江的气象水文联系,新增12%关键边,全面增强网络连通性与系统韧性(小世界系数提升0.99%),验证了水利工程对网络拓扑的定向优化作用。

3.2 典型水利工程影响分析

基于复杂网络理论,针对典型水利工程情景构建长江流域复杂风险网络(表2),以Erdős-Rényi(ER)随机模型为基准(固定节点数、边数),随机生成100个风险网络作为参照,计算得情景1~5的小世界系数7.937、7.527、7.600、8.034、7.858,均大于1。结果表明,系统具备小世界网络特性,即兼具局部高集聚性与全局短路径特征。

3.2.1 节点特征

长江流域复杂风险网络在5种情景下(情

景1~5)的节点度值分别为6.732、6.725、6.434、6.560、6.518(图3)。与基准情景(情景1)相比,情景3导致度值降幅最大($\Delta = -0.172$),印证了其在流域拓扑结构中的关键地位。结合情景1~5进行空间分异特征分析,结果表明:①上游段气象-水文要素的平均度值呈系统性降低(从9.4降至3.8),但金沙江石鼓以上、嘉陵江与宜宾至宜昌分区仍维持较高度值(>6.0),体现了自然水文禀赋的基础控制作用;②中游段洞庭湖水系分区度值稳定在6.0~9.0(工程扰动 $\leq \pm 0.3$);而汉江与宜昌至湖口分区对三峡工程缺失响应显著(度值上升0.4),汉江主导的驱动要素由气象水文转向社会经济(工业用水节点度值提升4.85%);③下游段南水北调工程缺失削弱了湖口以下干流分区的气象水文要素度值(下降16.5%),生态系统要素跃居主导;太湖水系分区则呈现强抗扰动性。由此可知,三峡工程通过重塑中游工业用水网络,产生了流域最强的拓扑效应;下游生态系统则呈现类似“海绵效应”,能够缓冲和消减跨流域调水的干扰(如南水北调东线工程引水波动)。

节点重要性采用基于熵权-TOPSIS集成的层内重要性方法与DomiRank值(通过量化节点在其邻域内的支配程度,用于识别高风险节点)相结合的

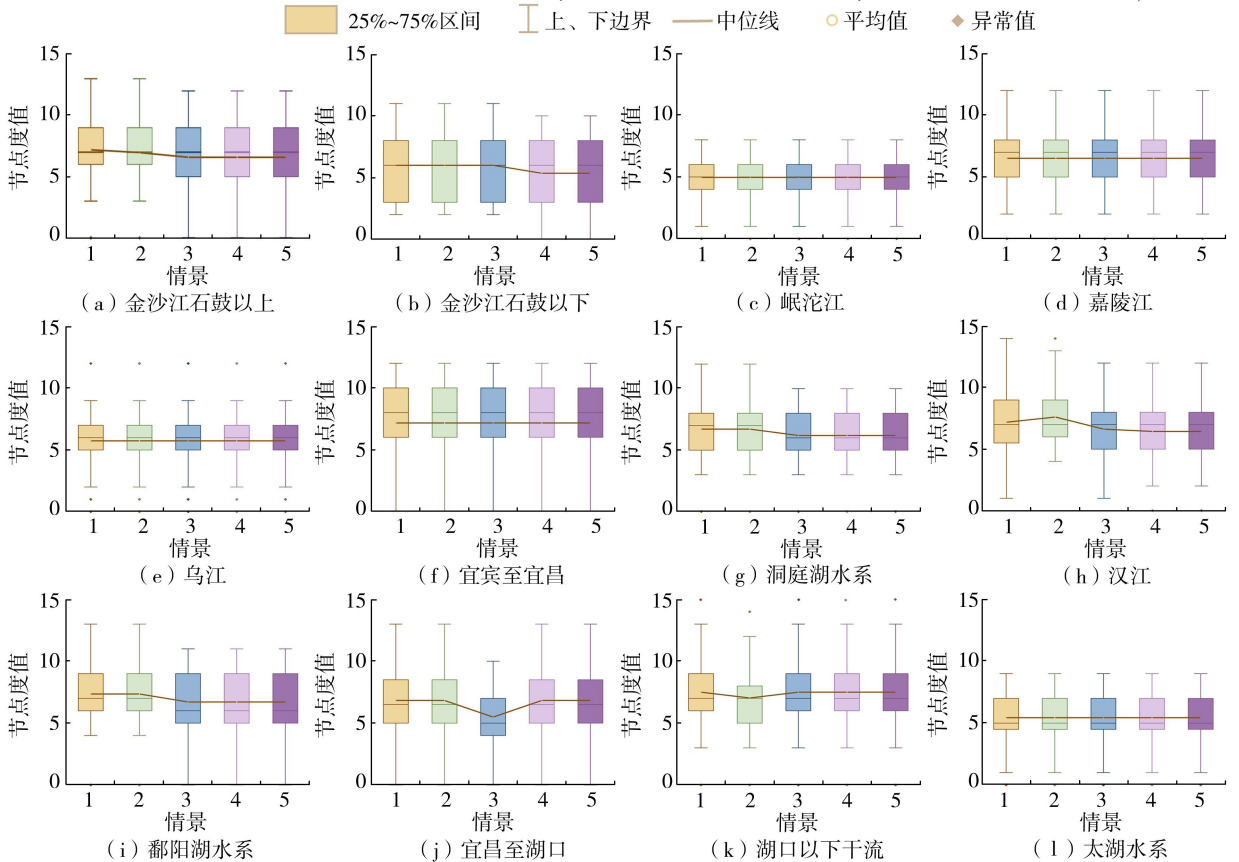


图3 不同情景下度值变化趋势

Fig. 3 Variation trend of node degree under different scenarios

综合评价体系,定量刻画节点重要性(图4、图5)。在长江流域现状工程运行情景(情景1)下,关键拓扑指标权重排序从大到小为:介数中心性(0.7058)、度中心性(0.1526)、接近中心性(0.1416)。基于TOPSIS排序筛选出的得分前10项关键要素进一步印证了气象要素在风险网络中发挥主导驱动作用,如宜宾至宜昌分区的降水量(DomiRank值为1.719)等。空间分异特征进一步揭示,水利工程调度(中游)与城市化胁迫(下游)是风险网络拓扑结构重塑的核心驱动因子。具体来看,上游段主要由生态要素(草地覆盖率 DomiRank 值为2.367)与社会经济要素(人均可支配收入 DomiRank 值为1.221)驱动^[40];其中,宜宾至宜昌段因水利工程集群开发,导致生态节点影响力平均衰减115%。该区域通过水分循环过程维系上游生态系统平衡,草地(DomiRank 值为1.757)等生态节点水资源竞争日趋激烈,同时人口类指标(如人口自然增长率 DomiRank 值为0.992)也逐渐成为影响水资源竞争的关键因素;中游段水文与社会经济要素的耦合作用凸显,如汉江地下水资源量(DomiRank 值为1.539)、人口自然增长率(DomiRank 值为1.167)共同构成风险控制的双核心;其中,三峡库区补水总量(DomiRank 值为1.347)因工程调蓄功能体现主导性;下游段降水及水文类要素的

DomiRank 值整体偏低,主要原因在于其水量变化主要受局地降水驱动^[41],对上游及其他区域的影响传导能力较弱。社会经济要素(GDP的DomiRank 值为3.462)与人工化生态要素(建设用地占比 DomiRank 值为0.796)呈现协同主导格局,且社会-生态子系统发展呈正相关关系^[42],这一特征在太湖水系中得到印证,乡村人口(DomiRank 值为1.931)与裸地(DomiRank 值为1.579)呈现竞争性共生关系,揭示了高强度城市化对自然水系的胁迫重构效应。综上,长江流域水资源竞争强度呈现从上游到下游沿程递增的特征,且与区域经济发展程度呈一定正相关关系,形成“气象/生态驱动上游→社会经济主宰中下游”的空间递变规律,其核心驱动力为水利工程开发强度、输水枢纽集中度及土地硬化率等因素的综合作用。

基于情景1分析,南水北调等典型水利工程对长江流域风险要素的空间分异效应表现为:①高风险要素稳定集聚区。金沙江石鼓以上、宜宾至宜昌、洞庭湖水系、湖口以下干流等四区持续稳居TOPSIS得分前10项的85%以上,印证其网络结构锚点地位;②上游生态抑制梯度。南水北调与三峡工程的建成一定程度上削弱了上游生态系统通过自然水文、泥沙和生物过程等对下游的影响力^[43-46],牛栏江补水工程集中影响金沙江段水文、生态系统,而引

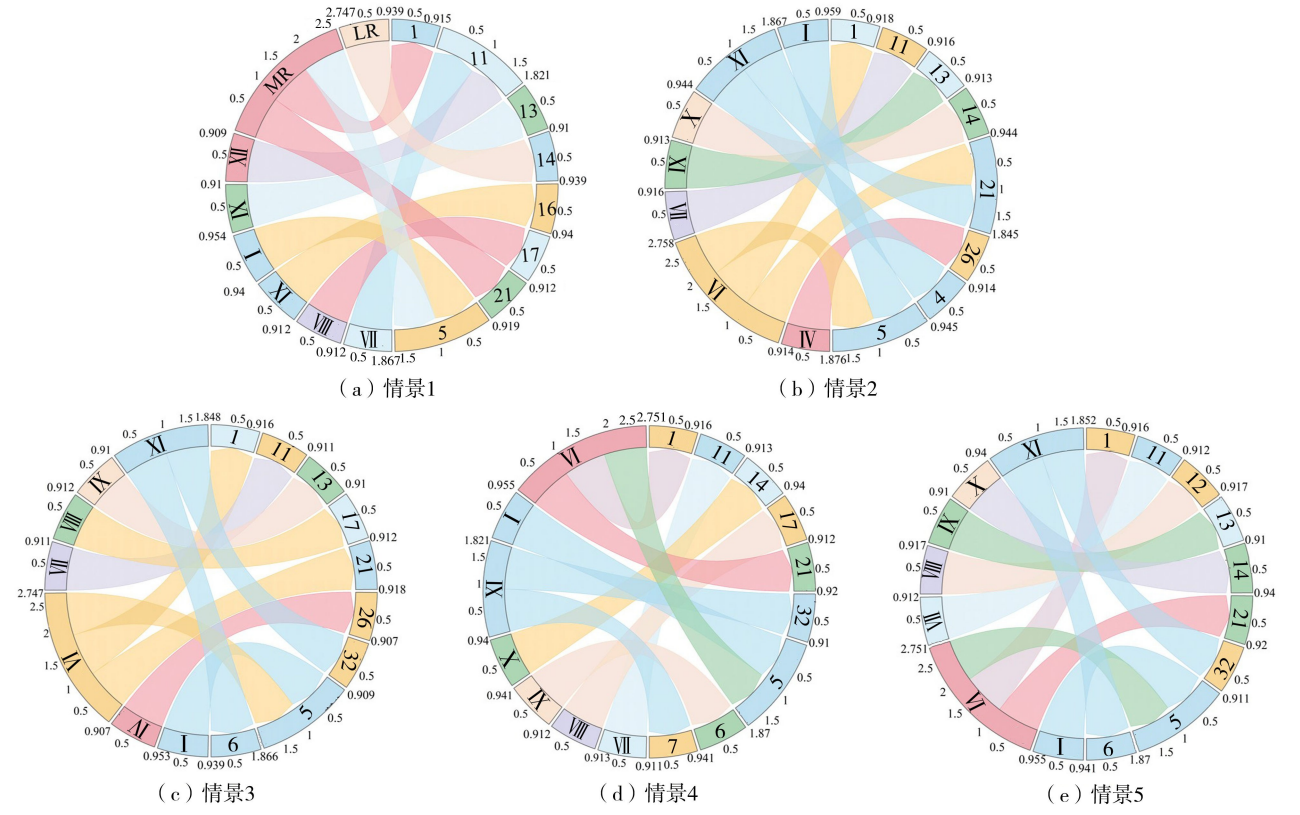


图4 不同情景下TOPSIS得分前10项
Fig.4 Top 10 TOPSIS scores under different scenarios

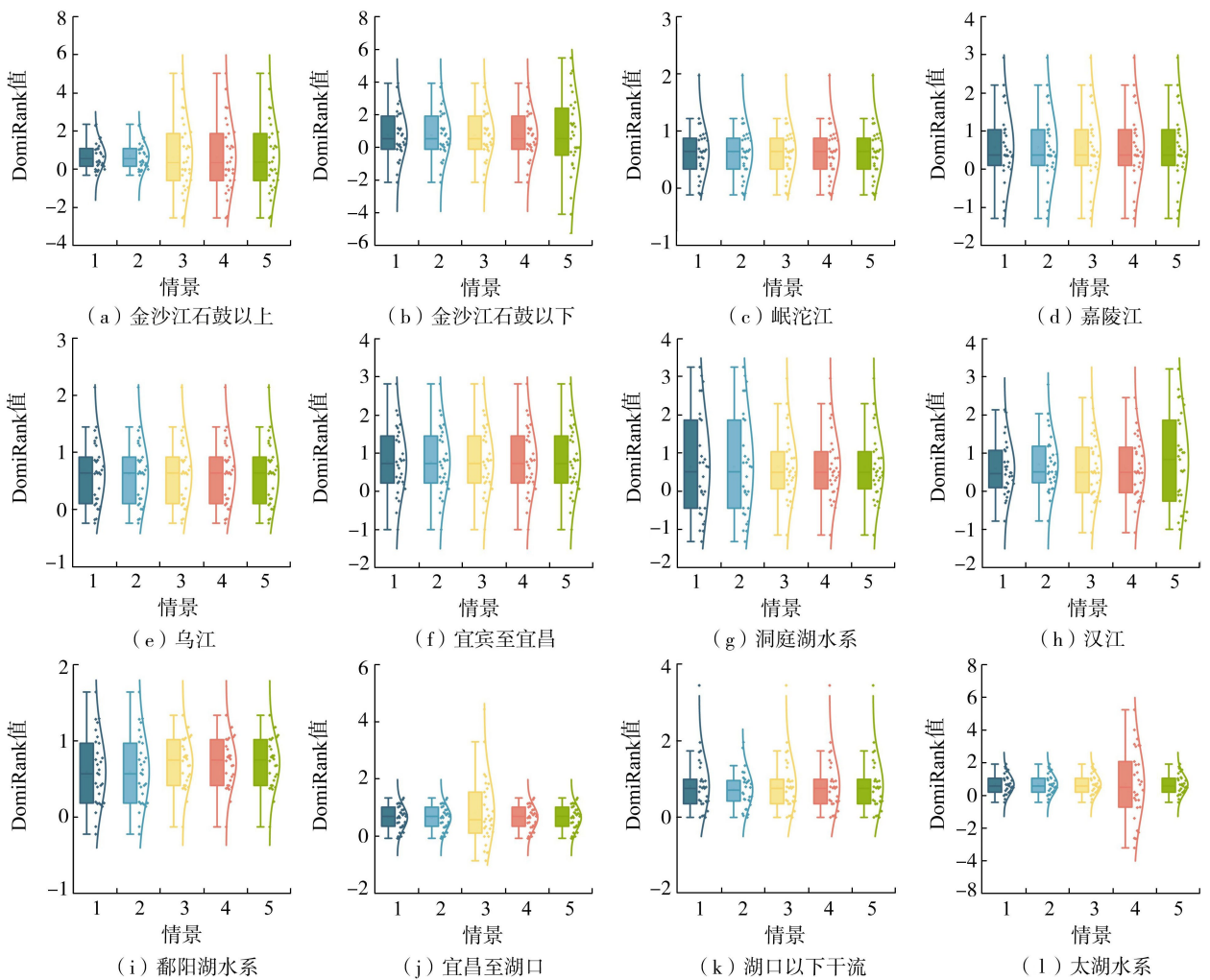


图5 不同情景下各子分区 DomiRank 值

Fig. 5 DomiRank values across subregions under different scenarios

江济太工程扰动微弱,以上揭示出跨流域水利工程对自然基底拓扑结构的更强约束^[47-48];③中游社会经济主控机制。5种情景下宜宾至宜昌分区降水量(TOPSIS 均值 0.916)与下游断面出流量(TOPSIS 均值 0.914)稳居前四,直接反映人类活动对中游网络的核心控制作用^[49];④下游水文极化效应。三峡工程、牛栏江补水工程通过调蓄功能改变水量时空分配,导致下游水文要素 TOPSIS 值显著分化(三峡工程使 TOPSIS 值下降 18.2%、牛栏江补水工程使 TOPSIS 值下降 2.7%),呈现区域差异扩大与要素响应分异的特征。

相比于情景 1,典型水利工程对长江流域的差异化影响呈现明确空间梯度特征(图 5~6):①上游段南水北调工程对拓扑结构的影响微弱(各节点 DomiRank 值波动均小于 ± 0.3);三峡工程与引江济太工程共同增强了气象-生态要素的主导地位(有引江济太工程工况时,金沙江石鼓以上分区气象-生态要素 DomiRank 均值 0.89 大于社会经济要素 0.65);相比之下,牛栏江补水工程对岷沱江分界区

生态节点影响力产生略有衰减(DomiRank 均值下降约 0.4)。②中游段汉江分区与宜昌至湖口分区在情景 2~5 下均维持生态-水利工程协同主导格局(两要素 DomiRank 均值均大于等于 0.6);其中三峡工程导致宜昌至湖口分区 DomiRank 值出现波动(波动方差为 6.3%),反映库区调蓄功能对水文过程的重构作用^[50]。③下游段南水北调工程投运后,生态要素 DomiRank 均值较社会经济要素高出 0.2 以上;引江济太工程则使太湖水系关键节点呈现敏感响应特征^[51](DomiRank 值随工况变化幅度超 15%)。

3.2.2 链路-网络特征

长江流域风险网络的核心传导链路通过边介数中心性精准识别,其中宜宾至宜昌、宜昌至湖口、湖口以下干流及汉江分区因三峡工程、南水北调等枢纽设施密集分布形成高介数核心边集群。上游段水文、生态系统主导的短链风险路径表现为:金沙江石鼓以上(I)出流量→裸地面积比重(边介数 116.50)、嘉陵江(IV)入流量→供用水量(边介数

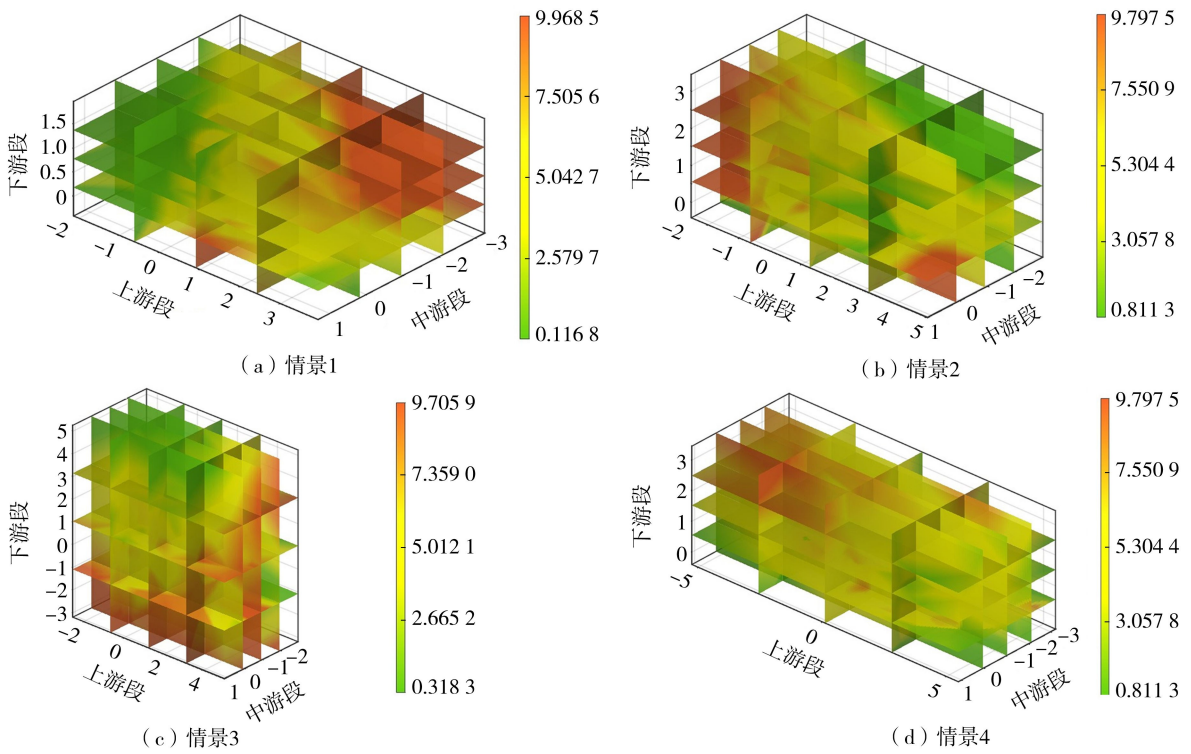


图 6 典型水利工程 DomiRank 值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of DomiRank values under typical hydraulic engineering

77.67)、宜宾至宜昌(Ⅵ)降水量→森林面积比重(边介数 105.28),体现区域水循环与水利工程开发用地扩张相互作用的关键路径^[52];中下游段则呈现社会经济要素驱动的关键边;洞庭湖(Ⅶ)第二产业增加值→第三产业增加值(边介数 74.58)、汉江(Ⅷ)居民收入→湖北省引水量(边介数 68.66)、鄱阳湖(Ⅸ)供水管网→第三产业增加值(边介数 113.18)、太湖(Ⅻ)居民收入→工业增值(边介数 90.89),揭示不同地区工业化进程与水资源之间呈结构性依赖关系^[53]。全流域尺度验出 5 条跨子系统级联传递主干链(表 2),表现为“短链局地传导(上游)+长链跨区胁迫(中下游)”,凸显人类工程活动(如三峡工程蓄水调度、南水北调工程配额机制)对水资源风险网络复杂性的影响。

表 3 与图 7 揭示了长江流域 5 条跨区调水长链的级联风险机制:①链条 2(嘉陵江-乌江顶托链):北碚站出流量下降→长江干流重庆段水位波动加剧→乌江入江口顶托效应强度减弱→触发嘉陵江与

乌江两大流域水位变化(需对武隆节点实施动态监测)。②链条 3(太湖-汉江旱灾传导链):太湖出流量减少→引江济太工程调水量增加→中低流量时期长江与汉江水力联动性削弱→汉江地下水水位下降→触发三峡工程应急补水机制(2022 年消落期累计补水 217.76 亿 m³)。③链条 4(调水-鄱阳湖反馈链):引江济太工程调水量增加→湖口站出流量下降叠加鄱阳湖供水量上升(湖口水道负反馈作用)→需通过赣江补水实施干预。④链条 5(汉口-太湖警戒链):汉口站出流量下降→太湖水位超下泄控制线→太浦河出流量增加→杭嘉湖地区汛情风险升级。2022 年长江流域特大干旱事件实证^[54](印证链条 3,水量变化以 2021 年《水资源公报》数据为基准):太湖水系降水量减少 22.6%→地表径流量下降 43.5%→YTWTP 调水量激增 61.1%→汉口站流量下降 22.2%→农作物减产面积达 442 万 hm²,呈现“降水短缺→调水加剧→水文-农业压力传导”的传导路径,验证了拓扑长链风险预警的科学价值。

表 3 长江流域长链条关系(情景 1)

Table 3 Long-chain relationships in the Yangtze River Basin (Scenario 1)

链条序号	链条关系
1	C1(Ⅰ)→B2(Ⅲ)→C1(Ⅲ)
2	B5(Ⅳ)→C13(Ⅴ)→B5(Ⅴ)
3	A5(Ⅶ)→B5(Ⅻ)→E5(Ⅻ)→B5(Ⅺ)→C14(Ⅺ)→B5(Ⅹ)→A5(Ⅹ)→B1(Ⅹ)→D5(Ⅸ)→B1(Ⅸ)→C3(Ⅷ)
4	A5(Ⅶ)→E5(Ⅻ)→B5(Ⅺ)→B5(Ⅹ)→B5(Ⅸ)→B4(Ⅸ)
5	B5(Ⅺ)→A4(Ⅻ)→B5(Ⅻ)→D1(Ⅻ)

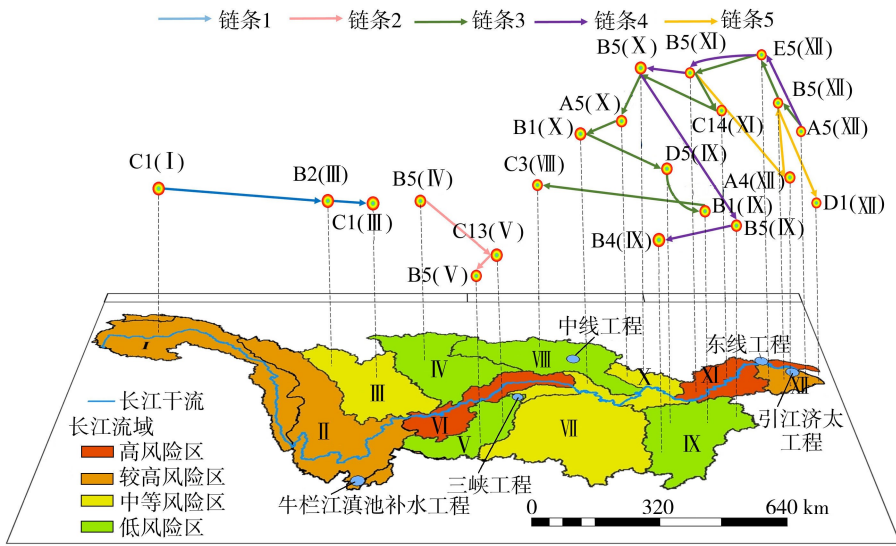


图7 长江流域长链条与二级分区关系

Fig.7 Relationships between long chains and second subregion in the Yangtze River Basin

长链分布特征进一步印证了典型水利工程的调控作用(表4):相较于情景1的5条长链,情景2的长链数量减少至4条(最长链含10个节点);情景3的长链数量增至6条(最长链暴露11个节点的高风险路径);情景4的5条长链均包含5个节点(拓合同构率达92%);情景5存在6条长链,且最长链包含7个节点。

由表4、图8分析表明:①引江济太工程主要作用于下游生态系统,通过打破原有链长均一的因果关联,有效缓解了生态节点的级联效应;②三峡工程建成后,网络拓扑复杂度降低,链路节点的风险暴露性减弱^[55];③南水北调工程投运后,级联因果路径的长度与数量均有所增加,系统整体调度连通性提升(边介数均值较原情景上升1%)。

长江流域低集聚特性(集聚系数0.1~0.3)暴露了水资源风险网络拓扑结构稀疏特征:节点连接匮乏使单一失效事件即可触发局部功能瓦解。核心参数验证系统性脆弱——网络效率(0.1808)与网络密度(0.0189)不足分区均值50%,特征路径长度(8.5133)超子分区基准3倍(子分区特征路径长度为1~3),揭示跨区调配阻滞与级联延迟效应。水利工程通过重构长江流域水系拓扑连接模式,系统性地缩短了特征路径长度,显著增强跨区域网络连

通性。以三峡工程为典型代表(情景3),建成后其路径长度缩短(8.816→8.513),反映其通过库容调控实现纵向水文连通强化与洪枯过程均衡化的功能协同,有助于缓解洪旱胁迫并稳定沿岸湿地生态格局。

进一步针对识别出的长链开展失效模拟,量化级联脆弱性梯度变化。以情景1为例,链条3出现效率损失峰值(36.1%)、网络密度降幅极值(3.24%)及集聚系数反常增益(0.85%);链条5则表现为局部结构弱化,集聚系数下降0.1%。这些表明长链失效后,网络效率与网络密度普遍下降,直接体现了级联传播的跨区扩散特征;集聚系数的非线性变异(部分工况上升0.5%、部分下降0.3%)则反映了网络重组的分岔特性。具体而言,三峡工程通过库容调度主导全域网络重构(节点-层级关系),在缩短主干传递路径的同时,驱动次级路径的功能跃升,使其在多元路径耦合中承担更高频次的调蓄任务;引江济太工程则通过生态-水文反馈机制重塑区域级联路径,打破了原有的同质化链长结构,降低了生态子系统的潜在风险,有助于提升核心子系统抗干扰能力。

3.3 多尺度风险阻断策略

a. 节点层面。通过节点失效模拟确定DomiRank值大于2.0的节点在风险网络中具有显

表4 不同情景下最长链(情景2~5)

Table 4 Longest chains under different scenarios (Scenario 2-5)

情景	最长链关系
2	C14(XI) → D5(XI) → C10(XII) → B5(XI) → B1(X) → D3(IX) → A1(IX) → C10(IX) → A2(VIII) → A5(VIII)
3	D1(XI) → D6(XI) → C10(XII) → D6(X) → C4(XI) → B1(X) → C9(X) → A1(IX) → C10(IX) → A2(VIII) → A5(VIII)
4	B4(XI) → B1(XI) → C14(XI) → B1(X) → D2(X)
5	D2(XI) → D6(XI) → C10(XII) → B5(XI) → C4(XI) → B1(X) → C7(X)

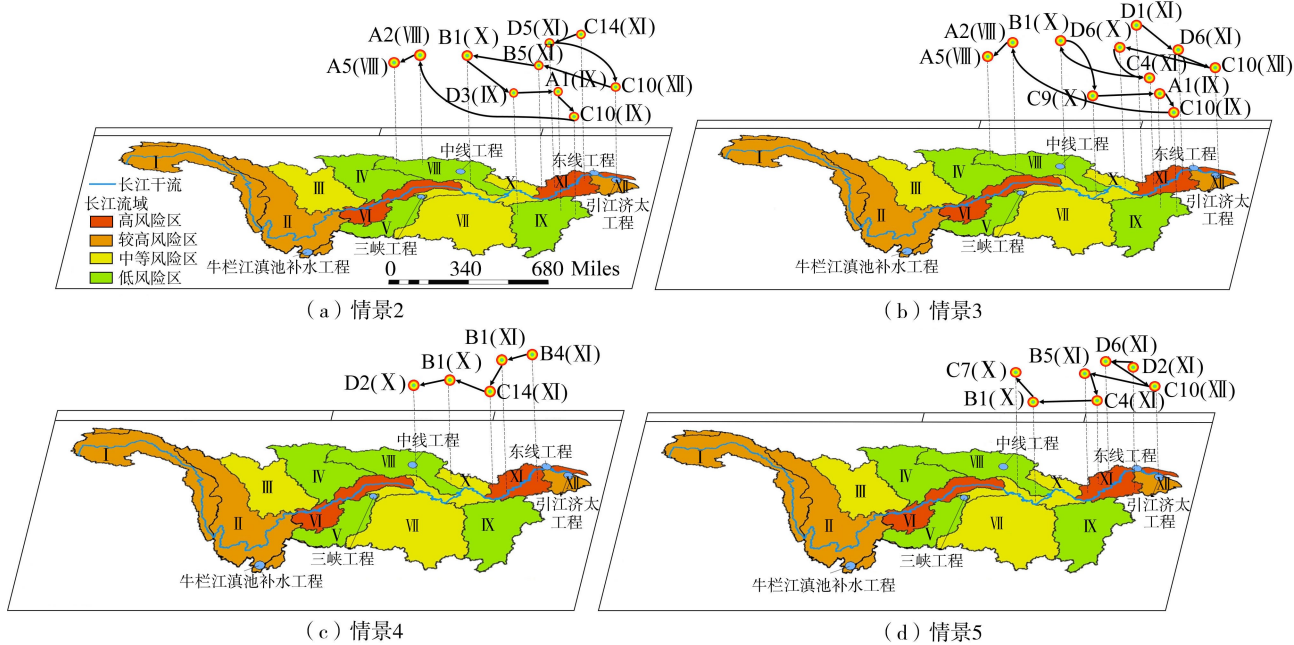


图8 不同场景下最长链空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the longest chains under different scenarios

著的信息集中度与风险放大潜力。此类节点(如太湖水系的引江济太调水枢纽、宜昌至湖口分区的断面流量控制节点及关键生态调节节点)作为输入、传导及风险累积的核心枢纽,其扰动可引发局部连通格局改变,进而对系统稳定性产生级联影响。据此提出两级防控机制:①针对高 DomiRank 值节点构成的脆弱性子链,制定极端事件响应预案(如调减引江济太工程调水量峰值、暂缓下游分水工程引流),阻断多节点级联失效通道;②基于水资源二级分区构建“上游-中游-下游分区联动”机制,以高 DomiRank 值节点为中心划定核心响应区,辐射周边形成“节点-链路-分区”复合风险防御网络。

b. 链路层面。重点识别长江流域5条具有跨系统(水文、生态、经济子系统)与跨区域(上中下游衔接)特征的主干长链,其级联传播呈现传染性强、空间波及广等特征。具体策略包括:①基于边介数中心性和长链条拓扑特征锁定中高风险传导节点,设计动态调控策略(强调末端节点状态优先保障与风险反向扩散抑制);②强化“长链条-高经济价值”耦合敏感区(如宜昌至湖口通江湖泊群、太湖水系分区)的刚性约束——严格实施生态保护红线管控与用水总量边界控制,推动水利、生态环境、自然资源等多部门协同治理平台建设;③通过长链级联故障场景仿真(涵盖水文极值、工程失效等情景),生成差异化阻断方案。上述调控根据节点系统功能(资源调配枢纽度/生态屏障功能)和场景承载需求(水源供给/生态基流保障),形成“风险识别-路径靶向削弱-反馈动态调节”的精细化断链策略。

c. 网络层面。以平均特征路径长度为核心评价指标,系统量化大型水利工程对网络连通性的干预效应。研究表明,工程调度呈现显著的权衡特性:三峡库区建成后,网络平均特征路径长度缩短3.4%,在提升全局连通效率的同时,也使各分区相邻中介节点(如库区周边输水枢纽)的功能枢纽作用更加凸显,其承载的系统性依赖度提升了约30%。基于此,提出以下优化策略:①构建工程调控敏感节点清单,实施动态阈值预警(重点监控负荷增幅大于30%的中介节点);②将南水北调工程、引江济太工程等重大水利工程纳入网络韧性框架,结合丰枯转换等典型水文情景模拟,优化水量分配与调度时序;③通过路径结构优化(如关键边添加、冗余路径构建)与网络效率熵值评估,设计包含级联传播抑制、多工程协同阻断、网络功能快速恢复的多级干预机制。

4 结论

a. 节点维度。气象要素驱动上游风险源,中游水利工程调度与下游城市化胁迫共同驱动风险网络拓扑结构重塑;流域水资源竞争强度呈现沿程(上游→下游)递增特征,核心驱动要素集中于水利工程开发强度、输水枢纽空间集中度及土地硬化率等关键指标。

b. 链路-网络维度。关键短链介数边主要分布于上游水文-生态子系统及下游社会经济子系统;识别出5条跨分区长链,网络呈现显著小世界特性与级联延迟效应。基于情景1的网络结构,设定了无

南水北调工程、无三峡工程、无引江济太工程、无牛栏江补水工程 4 类典型水利工程缺失情景(对应情景 2~5),研究发现,节点维度,三峡工程为流域核心水利工程;链路-网络维度,南水北调工程拓展了风险级联传导路径,三峡工程有效降低了关键节点的高暴露性,引江济太工程通过生态-水文反馈机制连通新的级联因果路径。

本文发现了典型水利工程对风险网络拓扑结构与风险传导路径的差异化重塑作用;三峡工程通过水力杠杆效应显著优化了中游工业-水文耦合路径结构;引江济太工程驱动了下游水文极化现象工程与生态反馈响应,缓解太湖生态暴露风险;南水北调与牛栏江补水工程则分别发挥枢纽控制与季节调蓄功能,形成了互补性的风险防控屏障。提出以下建议:①构建枢纽节点动态防御机制,建立“监测-预警-调控”响应机制,强化极端气候条件下多节点协同应对能力;②实施风险传导路径断链策略,建立分段级联熔断机制,同步推进河湖生态修复工程,遏制链式风险扩散。

本文初步探索了水利工程影响下长江流域水资源风险网络的拓扑特征,基于 PCMC1 与传递熵交叉识别稳健因果路径,并辅以文献验证链路物理逻辑。然而,受限于样本长度与插补方法的影响,未来应拓展水利工程关联要素维度,并加强与 SWAT 等机理模型的直接耦合,以提升风险级联模拟与水资源管理能力。

参考文献:

[1] Zhang Lijuan, Yang Jianghua, Zhang Yong, et al. eDNA biomonitoring revealed the ecological effects of water diversion projects between Yangtze River and Tai Lake [J]. *Water Research*, 2022, 210: 117994.

[2] Liu Yuxin, Fang Jian, Mu Sha, et al. Evaluation and future projection of compound extreme events in China using CMIP6 models[J]. *Climatic Change*, 2025, 178(2): 11.

[3] 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 Yu, Peng Shaoming, Zheng Xiaokang, 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. (in Chinese))

[4] 董蓉蓉,粟晓玲,屈艳萍,等. 2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 61-70. (Dong Rongrong, Su Xiaoling, Qu Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 61-70. (in

Chinese))

[5] Lyu Zhuozhuo, Gao Hui, Gao Rong, et al. Extreme characteristics and causes of the drought event in the whole Yangtze River Basin in the midsummer of 2022[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2023, 14(5): 642-650.

[6] 王传扬,张小玲,兰琳惠,等. 2022 年夏季高温干旱对四川盆地污染物浓度变化的影响分析[J]. *生态环境学报*, 2024, 33(1): 80-91. (Wang Chuanyang, Zhang Xiaoling, Lan Linhui, et al. Analysis of the impact of high temperature and drought on the concentration changes of pollutants in the Sichuan Basin in summer of 2022[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(1): 80-91. (in Chinese))

[7] 郝增超,张璇,郝芳华,等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6): 46-52. (Hao Zengchao, Zhang Xuan, Hao Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 46-52. (in Chinese))

[8] 周建方,唐椿炎,许智勇. 事件树、故障树、决策树与贝叶斯网络[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(3): 351-355. (Zhou Jianfang, Tang Chunyan, Xu Zhiyong. Event tree, fault tree, decision-making tree and Bayesian network [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(3): 351-355. (in Chinese))

[9] Sun Hai, Zhang Xiaowei, Wang Jun, et al. A geospatial-based framework for rapid simulation of storm-induced flooding and comprehensive risk assessment leveraging GWDD and fuzzy-SWARA[J]. *Urban Climate*, 2025, 60: 102373.

[10] Wang Lihu, Liu Xuemei, Liu Yang, et al. Multimodal knowledge graph construction for risk identification in water diversion projects [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 635: 131155.

[11] 任立良,万仪欣,袁山水,等. 基于网格聚合理论和 Copula 函数的流域极端降水三维识别及时空动态演变研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41(5): 151-159. (Ren Liliang, Wan Yixin, Yuan Shanshui, et al. Three-dimensional identification and spatiotemporal dynamic evolution study of extreme precipitation in river basins based on grid aggregation theory and Copula function[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(5): 151-159. (in Chinese))

[12] 薛联青,潘桐,刘远洪. 基于 C-Vine Copula 的城市洪涝多致灾因子遭遇风险分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(2): 77-87. (Xue Lianqing, Pan Tong, Liu Yuanhong. Encounter risk analysis of multi-hazard factors of urban flood based on C-Vine Copula [J]. *Water Resources*

- Protection, 2025, 41(2): 77-87. (in Chinese))
- [13] 张申, 李锦, 王群敏, 等. 基于贝叶斯网络的富水砂层深基坑渗漏动态风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 60-68. (Zhang Shen, Li Jin, Wang Qunmin, et al. Dynamic risk analysis of deep foundation pit leakage in water-rich sand layer based on Bayesian network [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 60-68. (in Chinese))
- [14] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 20-25. (Li Shaopeng, Zhao Heng, Wang Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20-25. (in Chinese))
- [15] Hung Chungchun, Chen Yanhua, Yeh Shincheng. Optimizing climate risk management practices: a hierarchical classification of TCFD risks in Taiwan's electronics industry [J]. Climate Policy, 2025, 26(1): 136-150.
- [16] Runge Jakob, Nowack Peer, Kretschmer Marlene, et al. Detecting and quantifying causal associations in large nonlinear time series datasets [J]. Science Advances, 2019, 5(11): eaau4996.
- [17] 冯仲恺, 蒋林佚, 牛文静, 等. 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究 (I): 特征解析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 160-172. (Feng Zhongkai, Jiang Linyi, Niu Wenjing, et al. Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin (I): characterization analysis [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 160-172. (in Chinese))
- [18] 冯仲恺, 蒋林佚, 牛文静, 等. 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究 (II): 演化规律[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 52-65. (Feng Zhongkai, Jiang Linyi, Niu Wenjing, et al. Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin (II): evolution law [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 52-65. (in Chinese))
- [19] 冯仲恺, 高浩宇, 牛文静, 等. 复杂流域水资源系统风险多链路网络研究 (II): 风险传播[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 1-12. (Feng Zhongkai, Gao Haoyu, Niu Wenjing, et al. Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (II): risk propagation [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 1-12. (in Chinese))
- [20] 冯仲恺, 高浩宇, 牛文静, 等. 复杂流域水资源系统风险多链路网络研究 (I): 网络构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 1-11. (Feng Zhongkai, Gao Haoyu, Niu Wenjing, et al. Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (I): network construction [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 1-11. (in Chinese))
- [21] 郑小康, 王煜, 张迪, 等. 黄河流域水资源系统韧性驱动要素与调控策略[J]. 水利学报, 2025, 56(10): 1253-1266. (Zheng Xiaokang, Wang Yu, Zhang Di, et al. Driving factors and regulation strategies for resilience of water resources system in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(10): 1253-1266. (in Chinese))
- [22] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [23] 吴维, 吴泽萱, 王兴隆. 机场飞行区多层异质链序风险传播模型研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(7): 2225-2236. (Wu Wei, Wu Zexuan, Wang Xinglong. Research on multi-layer heterogeneous chain sequence risk propagation model in airport movement area [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(7): 2225-2236. (in Chinese))
- [24] Zhou Xiyin, Lu Gang, Xu Zhicheng, et al. Influence of Russia-Ukraine War on the Global Energy and Food Security [J]. Resources Conservation and Recycling, 2023, 188: 106657.
- [25] 王丽馨, 王思宇, 杨德友, 等. 基于 KDE 传递熵因果分析的强迫功率振荡扰动源定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 1-12. (Wang Lixin, Wang Siyu, Yang Deyou, et al. A method for locating the disturbance source of forced power oscillation based on KDE transfer entropy causal analysis [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 1-12. (in Chinese))
- [26] 吴志勇, 范思琦, 何海, 等. 湖南省农业干旱灾害风险区划研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 31-39. (Wu Zhiyong, Fan Siqi, He Hai, et al. Study on risk regionalization of agricultural drought disaster in Hunan Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(02): 31-39. (in Chinese))
- [27] Sandhu G, Weber O, Wood M O, et al. An interdisciplinary water risk assessment framework for sustainable water management in ontario, canada [J]. Water Resources Research, 2023, 59(5): e2022WR032959.
- [28] Peng Yuting, Welden Natalie, Renaud F G. A framework for integrating ecosystem services indicators into vulnerability and risk assessments of deltaic social-ecological systems [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326(A): 116682.
- [29] 刘万新, 刘洋, 王瑶. 南水北调中线受水区 2001—2023 年水资源量与用水量变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(05): 18-25. (Liu Wanxin, Liu Yang, Wang Yao. Changes in water resources and water consumption in receiving areas along the middle route of the South-to-North Water Diversion Project from 2001 to 2023 [J]. Journal of Hohai University (Natural

- Sciences), 2025, 53(5): 18-25. (in Chinese))
- [30] 马浩平. 新水沙条件下三峡库区泥沙淤积变化规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [31] 朱伟, 薛宗璞, 章元明, 等. “引江济太”对2016年后太湖总磷反弹的直接影响的分析[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1432-1445. (Zhu Wei, Xue Zongpu, Zhang Yuanming, et al. Effect of water diversion from the Yangtze River to Lake Taihu on total phosphorus rebound after 2016[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1432-1445. (in Chinese))
- [32] 王艺颐. 牛栏江-滇池补水工程运行后滇池环境改善的效果研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [33] 赵小丹, 付湘, 彭少明, 等. 长江黄河跨流域多线路成网互济的调水机制研究 II: 应用[J]. 水利学报, 2025, 56(9): 1189-1200. (Zhao Xiaodan, Fu Xiang, Peng Shaoming, et al. Study on water transfer mechanisms of the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route networking mutualism II: Application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(9): 1189-1200. (in Chinese))
- [34] 叶宗超, 王卫光, 邢万秋, 等. 三峡库区湖北段降水氢氧稳定同位素季节性特征及水汽来源研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 65-74. (Ye Zongchao, Wang Weiguang, Xing Wanqiu, et al. Seasonal characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and water vapor sources in Hubei section of the Three Gorges Reservoir Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 65-74. (in Chinese))
- [35] 范志鹏, 李云玲, 马睿, 等. 长江黄河跨流域多线路水网韧性评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 27-34. (Fan Zhipeng, Li Yunling, Ma Rui, et al. Resilience evaluation for the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route water network [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 27-34. (in Chinese))
- [36] 张鑫, 陈燕, 李桃迎. 基于改进 PageRank 的多属性水网节点综合评价[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(12): 3659-3663. (Zhang Xin, Chen Yan, Li Taoying. Multi-attribute comprehensive evaluation in water network based on improved PageRank [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(12): 3659-3663. (in Chinese))
- [37] 刘忠华, 于华, 杨方廷. 基于复杂网络理论的水网节点重要性评价研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(12): 1280-1294. (Liu Zhonghua, Yu Hua, Yang Fangting. Evaluate the node importance for water network based on complex network theory [J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(12): 1280-1294. (in Chinese))
- [38] Li Jiaqi, Yang Nian, Shen Zhenyao. Evaluation of the water quality monitoring network layout based on driving-pressure-state-response framework and entropy weight TOPSIS model: A case study of Liao River, China [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 361: 121267.
- [39] Engsig M, Tejedor A, Moreno Y, et al. DomRank Centrality reveals structural fragility of complex networks via node dominance [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 56.
- [40] Ni Zhongyun, Zhao Yinbing, Liu Jingjing, et al. Navigating Ecological-Economic Interactions: Spatiotemporal Dynamics and Drivers in the Lower Reaches of the Jinsha River [J]. Land, 2024, 13(12): 2159.
- [41] 胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰. 1990—2019年江苏片区入太湖水量变化及原因分析[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 797-805. (Xu Ruichen, Pang Yong, Hu Zhibing. Analysis on the water quantity changes from Jiangsu section entering Lake Taihu from 1990 to 2019 [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 797-805. (in Chinese))
- [42] Wang Gaoyuan, Wang Liuying, Jia Mengyuan, et al. Dynamic evolution and interaction mechanisms of socio-ecological systems and water constraints within an adaptive cycle framework: A case study of the Lower Yangtze River Basin [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2025, 114: 107937.
- [43] Guo Shuhui, Xiong Lihua, Zha Xini, et al. Impacts of the Three Gorges Dam on the streamflow fluctuations in the downstream region [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126480.
- [44] Yang Shilun, Milliman J D, Xu Kehui, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 469-486.
- [45] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. Science, 2005, 308(5720): 405-408.
- [46] 董增川, 梁忠民, 李大勇, 等. 三峡工程对鄱阳湖水资源生态效应的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 13-18. (Dong Zengchuan, Liang Zhongmin, Li Dayong, et al. Influences of Three Gorges Project on water resources and ecological effects in Poyang Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 13-18. (in Chinese))
- [47] Wang L, He F, Zhao Y, et al. Complex network-based analysis of inter-basin water transfer networks [J]. Ecological Indicators, 2023, 156: 111197.
- [48] Zhang X Y, Li F W, Zhao Y. Impact of changes in river network structure on hydrological connectivity of watersheds [J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109848.
- [49] Yang X H, Hu Y, Sun Z H, et al. Human interventions alter morphodynamics of meandering channels: Insights from decadal to pre-industrial observations in the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2024, 634: 131067.

(下转第 56 页)

- resolution merging precipitation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5) : 125-134. (in Chinese))
- [17] 阮惠华, 张钧民, 许剑辉, 等. 考虑降水时间相关性的地面观测-雷达-卫星遥感逐时降水融合方法研究[J]. *热带气象学报*, 2023, 39(3) : 300-312. (Ruan Huihua, Zhang Junmin, Xu Jianhui, et al. An XGBoost-based geostatistical data fusion method for integrating hourly gauge-radar-satellite precipitation data by considering the temporal correlation characteristics of precipitation [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2023, 39(3) : 300-312. (in Chinese))
- [18] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data [C]//*Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*. New York: ACM, 1968: 517-524.
- [19] 李建通, 杨维生, 郭林, 等. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨[J]. *大气科学*, 2000, 24(2) : 263-270. (Li Jiantong, Yang Weisheng, Guo Lin, et al. A study of improving precision of measuring regional precipitation in optimum interpolation method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(2) : 263-270. (in Chinese))
- [20] 周雪, 彭涛, 董晓华, 等. 资水流域多源降水数据融合精度评估及径流模拟应用[J]. *中国农村水利水电*, 2026(2) : 107-113. (Zhou Xue, Peng Tao, Dong Xiaohua, et al. Accuracy assessment of multi-source precipitation data fusion and streamflow simulation application in the Zishui Basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2026(2) : 107-113. (in Chinese))
- [21] 赵人俊. *流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型* [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [22] 石朋, 丁松, 司伟, 等. 新安江模型敏感参数动态变化规律研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(3) : 1-6. (Shi Peng, Ding Song, Si Wei, et al. Study on dynamic variations of sensitive parameters in Xin'anjiang model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(3) : 1-6. (in Chinese))
- [23] 吴洪石. 基于洪水相似性的实时洪水预报精度提升技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2024.
- [24] Qu Simin, Bao Weimin, Shi Peng, et al. Evaluation of runoff responses to land use changes and land cover changes in the upper Huaihe River Basin, China [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(7) : 800-806. (收稿日期: 2025-08-09 编辑: 王芳)

(上接第 22 页)

- [50] Dai X, Wang L C, Hu Z Y, et al. Runoff and sediment dynamics induced by the "grain for green" programme: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2025, 49(6) : 773-796.
- [51] 黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(1) : 22-31. (Huang Chunlin, Li Xi, Sun Yongyuan. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water Transfer Project on the water age [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1) : 22-31. (in Chinese))
- [52] Gao W, Liu Y, Du Z, et al. Hedging effect alleviates the impact of land use on mainstream hydrological regimes: Evidence from Jinsha River, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(10) : 2011-2030.
- [53] Zhang X, Tian Y, Dong N, et al. The projected futures of water resources vulnerability under climate and socioeconomic change in the Yangtze River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109933.
- [54] 许继军, 袁喆. 2022 年长江流域干旱特征分析与新时期抗旱减灾应对模式探讨[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4) : 1-8. (Xu Jijun, Yuan Zhe. Drought characteristics of Changjiang River Basin in 2022 and Drought mitigation response pattern under new circumstances [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(4) : 1-8. (in Chinese))
- [55] 宋继鹏, 龚磊强, 王晓龙, 等. 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征: 回顾与展望[J]. *湖泊科学*, 2025, 37(3) : 716-733. (Song Jipeng, Gong Lei, Wang Xiaolong, et al. Changes in hydrological conditions and ecological environment in Lake Poyang before and after the construction and operation of the Three Gorges Project: Retrospect and prospect [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(3) : 716-733. (in Chinese)) (收稿日期: 2025-10-27 编辑: 彭桃英)