

水网互联下长江-黄河跨流域水资源系统 复杂网络特征

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:基于 PCMRI 方法以及边介数等指标,解析了水网互联背景下长江-黄河跨流域水资源系统复杂网络特征及其互联影响。结果表明:网络共包含 592 个节点和 1149 条因果连边,表现出一定的空间异质性、跨区滞后与局部聚集与级联传导并存的特征;该网络具有显著小世界特性与空间异质性,水力联系点(高影响枢纽)与社会经济缓冲节点协同作用,共同维持系统稳定;南水北调工程通过差异化协同机制驱动网络结构优化,双线互联促使缓冲节点数量增加 15%,全局传输效率提升 74%,跨区传导长链增至 7 条,其中南水北调工程形成的关键路径串环节点达 8 个,有效增强了水资源配置效能与系统协调能力。

关键词:水资源系统;复杂网络;南水北调工程;国家水网

Complex network characteristics of the Yangtze-Yellow River inter-basin water resources system under water network interconnection//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 of 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. MWR General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design (GIWP), China; 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 employs the PCMRI method, along with network metrics such as edge betweenness, to investigate the complex network characteristics and interconnection effects of the Yangtze-Yellow River inter-basin water resources system under the context of water network integration. The results reveal that: the constructed network comprises 592 nodes and 1149 causal edges, exhibiting spatial heterogeneity, interregional lags, and the coexistence of local clustering and cascading transmission; the network displays prominent small-world properties and spatial heterogeneity. Hydraulic contact nodes (high-impact hubs) and socio-economic buffering nodes interact synergistically to maintain system stability; the South-to-North Water Diversion Project, through differentiated coordination mechanisms, drives the structural optimization of the network. The dual-line interconnection increases the number of buffering nodes by 15%, enhances global transmission efficiency by 74%, and expands the number of interregional long-distance transmission chains to seven. Notably, the critical path formed by the diversion project links eight nodes in series, significantly improving the efficiency of water resources allocation and system coordination.

Key words: water resources system; complex network; South-to-North Water Diversion Project; national water network

国家水网建设是推进中国式现代化进程中的关键战略工程,其核心任务是通过跨流域水资源调配

实现水资源高效配置与系统韧性提升^[1]。长江与黄河作为国家水网的主骨架,在南水北调东线、中线

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(52379009);江苏省自然科学基金优秀青年基金项目(BK20240189);北京江河水利发展基金会(JHYC202310);水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(5240152E2)

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

等重大调水工程的驱动下,已从相对独立的运行体系逐步发展为跨流域耦合的复杂水资源系统。然而,在气候变化与人类活动双重影响下^[2],极端水文气象事件频发、广发^[3],水资源系统面临的不确定性和运行环境日益复杂,跨流域水资源系统更易出现连锁传导与系统响应变化^[4]。在此背景下,科学识别跨流域水资源系统的网络结构及其水力传导机制,已成为提升国家水网系统韧性和安全运行能力的重要课题。

长江-黄河跨流域水资源系统是由气象、水文、生态、社会经济和水利工程等多维要素共同驱动的高度耦合复杂系统^[5]。近年来,复杂网络理论已成为解析该类系统结构、功能与动态行为的重要工具。现有研究将实际水网抽象为可计算、可解析的网络模型,并采用节点度、平均特征路径长度、介数中心性、小世界系数、网络效率、网络密度等多层次指标体系^[6-8]评估节点重要性及整体结构功能。例如张鹏超^[9]以平顶山水网为例,通过度中心性、最大连通子图比例等评估了基础设施网络韧性并提出网络优化建议;万芳等^[10]通过挖掘汾河流域子系统因果网络揭示了复杂水资源系统逻辑关联,系统评估了系统间韧性水平变化;冯仲恺等^[4,11]建立了黄河流域复杂水资源系统网络,采用小世界系数等多个指标进行了拓扑特征解析并进一步开展风险传播研究;黄生志等^[12]利用平均度、接近中心度等综合评估了水网节点并融入韧性综合评价体系,得出关中地区水网建设后韧性提升 41.59%;范志鹏等^[13]采用最大连通子图、网络效率等指标对长江黄河多线路水网进行了韧性评估。

针对复杂水网系统,需准确刻画水库、断面、供水单元、受水区等节点间的物理连接与水力关系,核心在于科学界定节点间的关联关系与因果作用强度。传统因果诊断方法在水文气象序列分析中存在局限,主要表现为对线性假设的依赖、难以区分直接与间接因果、以及可解释性较弱等问题^[14-15]。相比之下,PCMCI(Peter and Clark momentary conditional independence)因果诊断方法具有处理多尺度耦合机制的能力^[16],能够通过条件独立性检验有效识别变量间的驱动关系,特别适用于水资源系统中广泛存在的间接效应与非线性反馈过程,为构建可靠的复杂水网模型提供了有效途径。综上,现有研究已逐步将复杂网络工具应用于局部水网、单一流域系统以及跨流域调水系统分析,涵盖气象、水文、社会经济、生态、基础设施等多维要素,并在长江-黄河跨流域调水机制与系统韧性研究方面取得一定进展。然而,在跨流域尺度上,仍缺乏综合南水北调、三峡工

程与引黄灌区等多要素的系统特征解析、长链传导机制揭示及水网互联效应评估研究。

基于上述研究背景与既有工作的不足,本文在已有基础上^[17],致力于以下创新性探索:①以南水北调东线、中线为核心骨架,以汉江、岷沱江等主要支流上的补水工程(如牛栏江-滇池补水)为分支节点,并以太湖蓄滞洪区、黄河小浪底水利枢纽等关键工程为调控枢纽,构建了长江-黄河跨流域水资源系统复杂网络(以下简称“长江-黄河跨流域网络”);②提出了“节点-链路-网络”三位一体的系统分析框架,系统揭示了水网互联下水资源系统特征,并从节点-链路-网络层面,解析了不同水网互联场景下跨流域网络拓扑变化,可为跨流域水资源系统网络演化规律辨识与调控策略制定提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江流域面积约 180 万 km²,长江流经青海、西藏等 11 个省(自治区、直辖市),涵盖雅砻江、岷江、嘉陵江、汉江等 9 大主要支流,多年平均降水量为 800~1 600 mm,空间上呈现由西北向东南递增的趋势,其中上游段来水过程集中、中下游段(洞庭湖、鄱阳湖等)具备天然调蓄功能。黄河流域面积约 79.5 万 km²,黄河流经青海、四川等 9 个省(自治区),降水时空分布不均显著,多年平均降水量 200~650 mm,总体表现为自东南向西北递减;流域水资源开发利用强度大,人均水资源量偏低,供需矛盾突出^[18-19]。为此,国家实施了南水北调东线工程、中线工程,形成了长江-黄河跨流域水资源调配格局,提升了系统调蓄能力与资源配置效率,为国家水网战略提供了重要支撑^[20]。

基于上述背景,本文以长江、黄河流域及南水北调等重要引调水工程为研究对象,研究区域如图 1 所示。依据水利部划分的全国水资源分区(<http://gjkj.mwr.gov.cn/>),本文将长江流域(12 个二级区)、黄河流域(7 个二级区)划分为 19 个水资源二级区,见图 1。

a. 长江流域:金沙江石鼓以上(1)、金沙江石鼓以下(2)、岷沱江(3)、嘉陵江(4)、乌江(5)、宜宾—宜昌(6)、洞庭湖水系(7)、汉江(8)、鄱阳湖水系(9)、宜昌—湖口(10)、湖口以下干流(11)、太湖水系(12)。

b. 黄河流域:龙羊峡以上(13)、龙羊峡—兰州(14)、兰州—河口镇(15)、河口镇—龙门(16)、龙门—三门峡(17)、三门峡—花园口(18)、花园口以下(19)。

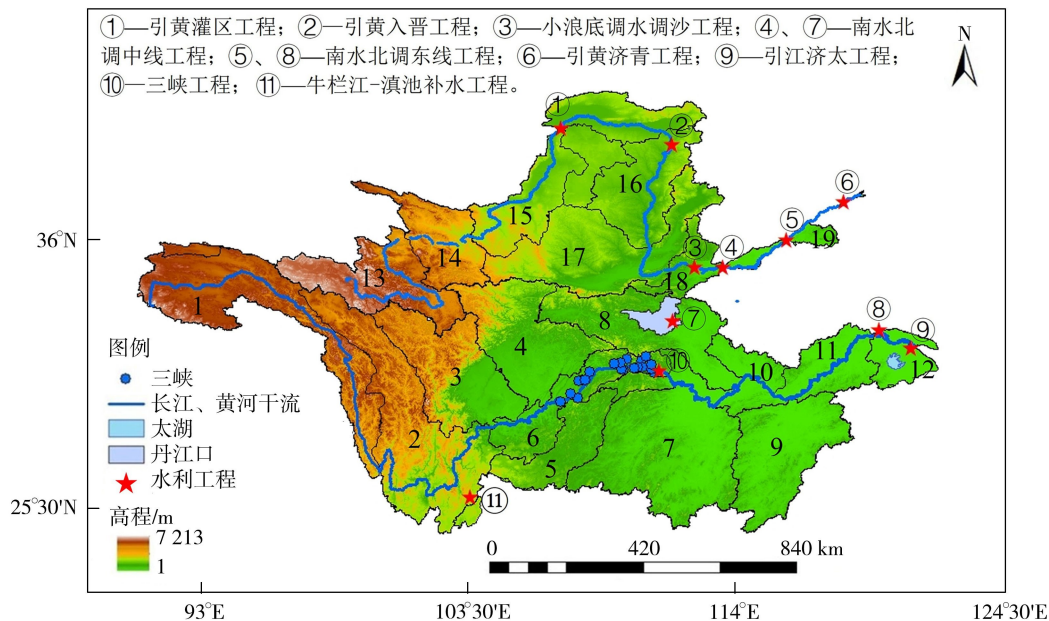


图1 研究区域概况

Fig. 1 Study area overview

以南水北调东线、中线实际调水量及各分区断面多年平均径流量为水力联系要素,构建涵盖 19 个二级区的长江-黄河跨流域网络。

1.2 数据来源

本文基于气象、水文、社会经济、生态与工程调水多维数据开展研究,表 1 为各子系统数据来源。

2 水网互联下长江-黄河跨流域网络

为科学评估水网互联背景下长江-黄河跨流域水资源系统的网络特性,本文采用 PCMCI 因果诊断方法与传递熵理论交叉验证,识别并提取系统关键因果关系;以各分区断面径流量作为表征水力联系的核心纽带,基于复杂网络理论,以气象、水文、社会经济及工程调水等多维要素为节点,构建长江-黄河跨流域网络;构建“节点-链路-网络”多层次指标体系,综合评估水网互联条件下跨流域水资源系统的

复杂网络特征;并通过设置不同水网互联场景(包括中线与东线连通、仅中线、仅东线、无中线与东线),量化揭示水网互联效应;研究框架见图 2。

2.1 复杂网络构建

长江-黄河跨流域网络的构建主要包括多维要素筛选、因果链路诊断与双向因果关联剪枝 3 个关键步骤^[26]。首先,以断面径流量和跨流域调水量为核心水力连接变量,整合长江与黄河流域的 19 个二级分区;依托南水北调中线、东线工程的实际调水数据,建立两大流域的耦合关联模型。参考文献[11],本文涵盖气象、水文、社会经济、生态及工程调水五大子系统,具体要素及其相互作用关系见表 2。其次,采用 PCMCI 因果诊断方法识别要素间的直接因果关系。为解决传统因果检验对高维非线性数据的局限性,PCMCI 通过 PC₁ 阶段(Peter and Clark algorithm, stage 1)条件集筛选与瞬时条件独

表 1 气象、水文、社会经济、生态与工程调水数据来源

Table 1 Sources for meteorological, hydrological, socio-economic, ecological, and engineering water diversion data

子系统数据	说明	数据来源
气象数据(气压、温度、相对湿度等)	刻画气候条件对流域蒸散发、降水及水汽输送的影响。	中国气象数据网(http://data.cma.cn)
水文数据(断面出流量、地表水资源量、供用水量)	综合反映水循环过程、水资源供需平衡状态及区域水安全形势。	《长江流域及西南诸河水资源公报》《黄河水资源公报》
社会经济数据(地区生产总值、三次产业增加值等 ^[21-22])	涵盖工农业及生活用水等多方面需求,可用于量化评估人类活动对水资源系统的压力及其时空分异。	流域流经省份的统计年鉴(2000—2023 年)
生态数据(森林覆盖率、生境质量指数等 ^[23])	利于分析生态要素与水资源网络的耦合关系及功能稳定性。	《中国 1985—2022 逐年 30m 土地利用数据集》 ^[11,24] 、HJ192—2015《中华人民共和国国家环境保护标准》
工程数据(东线/中线调水量、三峡水库来水量等 ^[25])	涵盖多种调水工程调度信息,用于识别对网络空间配置与系统连通性的影响。	《长江流域重要控制断面水资源监测通报》《三峡工程公报》《湖北省统计年鉴》

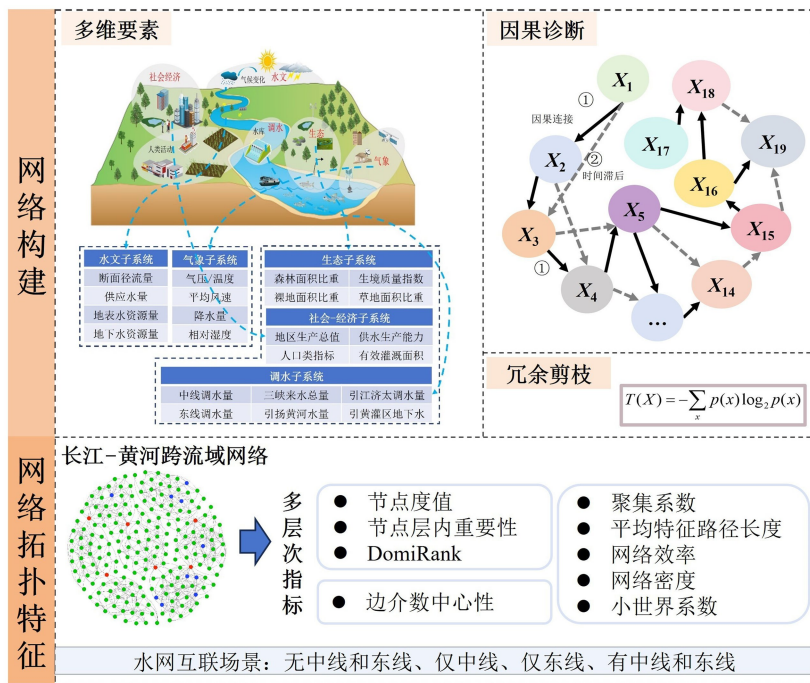


图2 研究框架

Fig. 2 Study framework

立性检验 MCI 两步实现:①PC₁ 阶段:基于最大滞后阶数 $\tau_{\max} = 1$ 和显著性水平 $\alpha = 0.05$,筛选变量历史状态的条件独立集;②MCI 检验通过消除时间滞后与空间异质性干扰,提取直接因果关系。最后,引入传递熵^[27]量化因果关系的显著性,通过阈值筛选剪除冗余关联,保留关键因果路径,从而构建结构精简、物理机制清晰的跨流域水资源系统网络模型。

2.2 网络拓扑特征分析

基于复杂网络理论,本文从节点、链路和网络3个层次选取相应的指标,系统分析跨流域网络的结构特征与关键脆弱环节。

2.2.1 节点指标

包括节点度^[28]、节点层内重要性^[29]、DomiRank (dominance-based ranking) 指标^[30]。

a. 节点度表示节点的入度与出度之和,取值区间为 $[0, +\infty)$ 。该值越大,表明节点在水资源网络中的直接关联越广泛,反映其接收外部输入(如上游来水、跨流域调水及经济约束)与对下游输出(如径流变化、灌溉需求等)的能力越强。

b. 节点层内重要性基于熵权法与 TOPSIS 模型,通过综合度中心性、介数中心性和接近中心性等指标计算得出,取值区间为 $[0, 1]$ 。该值越大,表明节点在局部水资源子系统内的调控能力、中介作用与响应效率越突出。该指标通过度中心性反映节点与上下游的连接紧密程度,由介数中心性衡量节点在水力连通中的桥梁作用(如断面流量调控),由接近中心性表征节点到网络中其他节点的平均最短

距离。

c. DomiRank 指标通过可调参数融合局部与全局拓扑信息,该值越大,表明节点在跨流域水资源网络中的综合影响力越强,越可能成为系统脆弱性的关键节点或调控关键点。

2.2.2 链路-网络指标

链路指标选取边介数中心性描述链路(如调水通道、径流联系)在网络水力连通中承担的资源传输功能。基于此,采用边介数中心性的标准化形式作为网络连边权重,按照权重排序识别关键核心短链。

网络指标选取集聚系数^[31]、平均特征路径长度、网络效率、网络密度、小世界系数^[32]、度同配性^[33]。

a. 集聚系数度量节点相邻节点间的连接紧密程度,值越大,表明局部水资源分区内节点间联系越紧密,子区域协同调度与响应能力越强。

b. 平均特征路径长度表示所有节点对之间最短路径长度的平均值,值越大,表明节点间信息与资源的响应传递速度越迟缓,系统在极端条件下的脆弱性越高,水资源调配效率越低。

c. 网络效率用于衡量节点间资源或信息传递的整体效率,值越大,表明节点间资源或信息的传递效率越高,系统应对供需失衡与优化调配的能力越强。

d. 网络密度定义为实际连边数与最大可能连边数之比,值越大,表明系统连接越紧密,水资源调

Table 2 Multidimensional factors of meteorological, hydrological, socioeconomic, ecological, engineering water diversion			
子系统	要素名称	编号	单位
水文子 系统(A)	上游断面入流量	A1	亿 m ³
	地表水资源量	A2	亿 m ³
	地下水资源量	A3	亿 m ³
	供用水量	A4	亿 m ³
	下游断面出流量	A5	亿 m ³
	三峡库区来水总量	A6	亿 m ³
	三峡库区补水总量	A7	亿 m3
	三峡库区年发电量	A8	亿 KW · h
	三峡库区泥沙淤积	A9	亿 t
气象子 系统(B)	气压	B1	hPa
	温度	B2	℃
	相对湿度	B3	%
	平均风速	B4	m/s
	降水量	B5	亿 m ³
社会经济 子系统(C)	GDP(地区生产总值)	C1	亿元
	第一产业增加值	C2	亿元
	第二产业增加值	C3	亿元
	第三产业增加值	C4	亿元
	居民消费	C5	亿元
	城镇人口	C6	万人
	乡村人口	C7	万人
	人口自然增长率	C8	‰
	全体居民人均可支配收入	C9	元
社会经济 子系统(C)	供水生产能力	C10	万 m ³ /d
	供水管道长度	C11	km
	农业机械总动力	C12	万 kW
	有效灌溉面积	C13	10 ³ hm ²
	农作物总播种面积	C14	10 ³ hm ²
生态子 系统(D)	森林面积比重	D1	%
	草地面积比重	D2	%
	水域面积比重	D3	%
	建筑用地面积比重	D4	%
	裸地面积比重	D5	%
	生境质量指数	D6	
调水子 系统(E)	南水北调中线调水量	E1	亿 m ³
	陶岔渠首调水量	E2	亿 m ³
	南水北调东线调水量	E3	亿 m ³
	中线供水量	E4	亿 m ³
	东线供水量	E5	亿 m ³
	引江济太调水量	E6	亿 m ³
	牛栏江滇池补水量	E7	亿 m ³
	湖北省引调水量	E8	亿 m ³
	引扬黄河水量	E9	亿 m ³
	引黄灌区地下水资源量	E10	亿 m ³
	引黄入晋调水量	E11	亿 m ³
	小浪底输沙量	E12	亿 t
	引黄济青调水量	E13	亿 m ³

配路径选择越丰富,区域供水保障能力及可调节性越高。

e. 小世界系数用于评判网络是否同时具备短平均路径长度与高集聚性特征。短平均路径长度反映跨流域调度的快速响应特征,高集聚性体现节点

间相互依赖程度高。若该值大于 1,表明网络具有小世界特性;值越大,说明网络在全局响应速度与局部协同能力方面的表现越突出。

f. 度同配性用于衡量高度值节点倾向于连接其他高度值节点(同配,对应值为正)还是低度值节点(异配,对应值为负)的结构特性,取值区间为 $[-1,1]$ 。该值越大,同配性越强,表明网络抗随机干扰能力越强;值越小,异配性越强,网络更倾向于异配连接,遭受蓄意攻击时可能表现出更高稳健性;该指标中的度分布距离 e_{jk} 反映了网络节点连接的均衡程度。

3 结果与分析

3.1 长江-黄河跨流域网络

基于表 2,整合各水资源分区的断面径流量、南水北调工程向黄河流域龙门—三门峡、三门峡—花园口及花园口以下分区的实际调水量等要素,构建出长江-黄河跨流域网络(图 3、表 3),实现了跨流域水力联系与系统响应路径的可视化及结构化表达。图 3 中,绿色节点代表水资源二级分区内各要素节点(序号 1-B1 至 19-E13),红色节点代表分区间水力联系点(共 22 个);紫色节点代表南水北调工程中线、东线调水节点;灰色线条代表不同节点对间的有向因果联系;蓝色线条代表南水北调跨流域调水通道。

3.2 复杂网络特征

基于 2.2 节选取的节点指标、链路-网络指标,本文剖析并归纳出网络的 3 项核心结构特征:①空间异质性,即流域内各子系统的要素节点在连接度、中心度及其全局影响力上存在显著的空间分异;②跨区迟滞与局部聚集效应,体现为扰动易在局部聚集并被系统韧性吸纳,而跨区传播则因路径复杂与能量耗散产生迟滞;③级联传导效应,即单一节点受扰后可通过网络因果路径引发大范围的连锁响应。这些特征共同阐明了跨流域水网在结构拓扑与动态功能上的内在复杂性,明晰了扰动在系统中的传播路径。

3.2.1 空间异质性

长江-黄河跨流域网络关键要素在空间分布上具有显著异质性,节点度值等拓扑指标清晰反映了上、中、下游各段在要素构成与网络主导性方面的差异。除水力联系点外,系统上、中、下游的社会经济要素(如地区生产总值、居民消费与收入)均与跨区域水通量(如外部来水、下游灌溉需求)存在广泛的空间关联,见图 4。

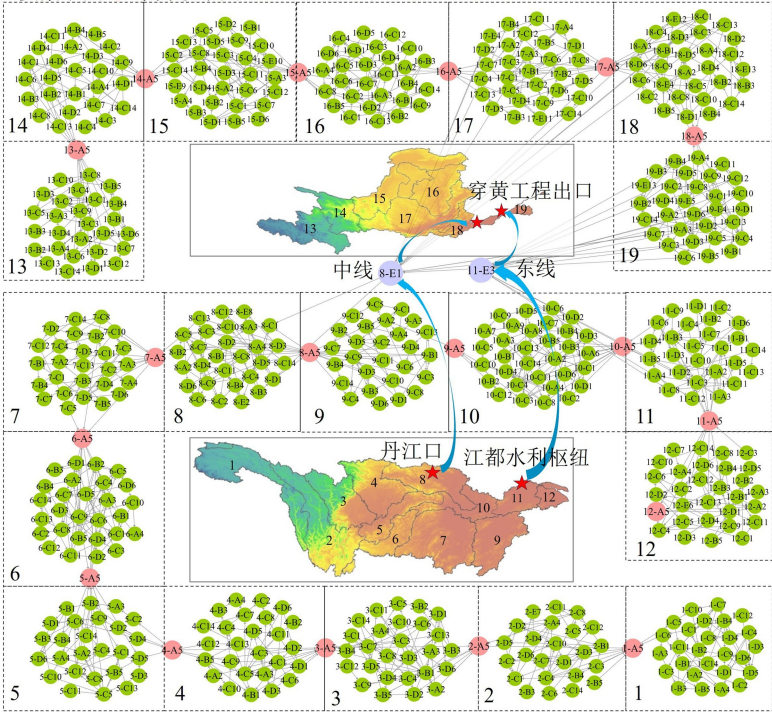


图 3 长江-黄河跨流域网络

Fig. 3 The Yangtze-Yellow River inter-basin network

表 3 长江-黄河跨流域网络结构

Table 3 Structure of the Yangtze-Yellow River inter-basin network

网络	编号	分区名称	节点数	边数
长江-黄河跨流域网络	1~19	金沙江石鼓以上—花园口以下	592	1 149
长江子网络	1	金沙江石鼓以上	29	56
	2	金沙江石鼓以下	31	49
	3	岷沱江	30	64
	4	嘉陵江	30	55
	5	乌江	30	55
	6	宜宾—宜昌	30	74
	7	洞庭湖水系	30	53
	8	汉江	33	73
	9	鄱阳湖水系	30	50
	10	宜昌—湖口	34	78
	11	湖口以下干流	31	55
	12	太湖水系	31	55
黄河子网络	13	龙羊峡以上	29	52
	14	龙羊峡—兰州	30	50
	15	兰州—河口	32	65
	16	河口—龙门	30	63
	17	龙门—三门峡	33	59
	18	三门峡—花园口	34	63
	19	花园口以下	35	80

a. 流域上游段:长江上游气象子系统内部要素(气压、温度、降水量)协同作用并影响区域水资源量^[34],尤其是宜宾—宜昌分区,生态子系统受牛栏江补水工程调控影响,其裸地面积要素节点与其他要素的直接关联较为密切。黄河上游以平均风速为

代表的局地动力因子对关键水文过程起主导作用^[35],地表水资源量、宏观经济指标和水域面积比重在网络中表现出广泛的直接连接关系,反映出地表水资源承担着社会经济用水需求的核心供给功能,水域面积变化直接反映区域水资源开发利用的强度与综合效应^[36]。

b. 流域中游段:长江中游气压、平均风速节点直接影响区域水资源平衡并驱动水文过程(如供用水量变化),社会经济活动进一步强化了对水资源的反馈作用,其中南水北调中线调水量的高节点度值凸显其核心桥梁作用,提升了长江与黄河流域的连通性。黄河中游具有高度连接特征的社会经济要素,在河口—龙门分区呈现空间集聚特征,关键性节点涵盖第三产业、居民消费及人口结构等多维指标。

c. 流域下游段:长江下游气象因子(气压、相对湿度)通过调控蒸发与水分再分配过程共同作用于地表水资源量,同时南水北调东线工程与引江济太等调水工程构成人为调控节点,其中引江济太工程更是保障太湖流域供水安全与改善水环境的关键。黄河下游的温度要素与多项生态指标(如水域面积、裸地面积、生境质量指数)均具有较高的节点度值,同时以南水北调中线工程、东线工程供水量及小浪底输沙量为代表的调水与工程调控节点具有极高的连接度。表明下游自然与工程节点对上游或外部驱动因素具有高度敏感性,可通过生态修复与协同

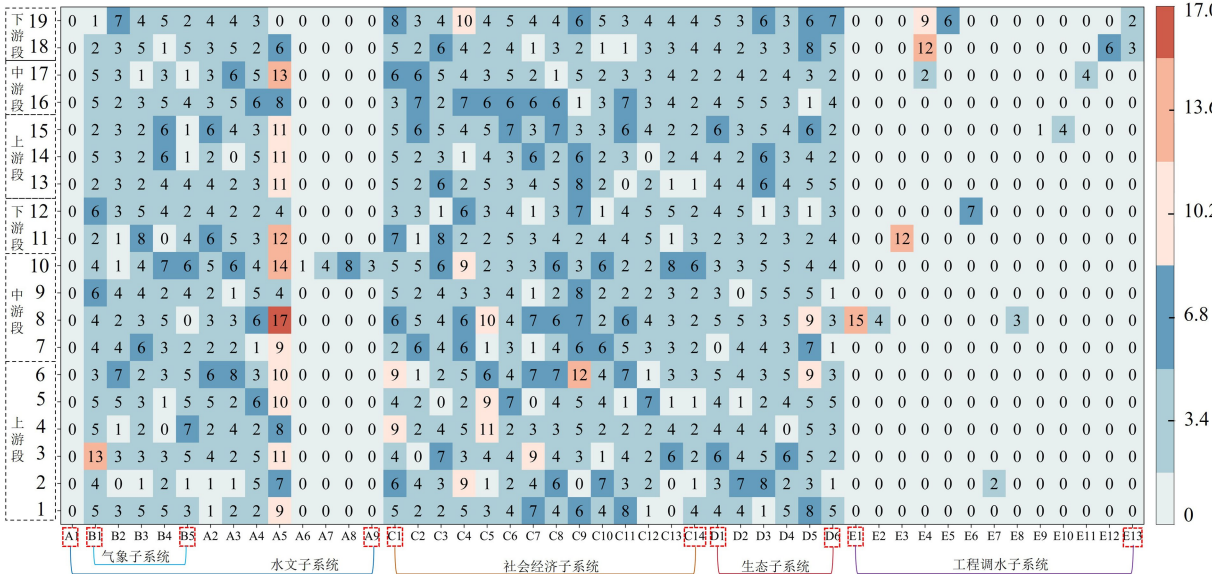


图 4 长江-黄河跨流域网络各分区节点度值

Fig. 4 Node degree values of each subregion in the Yangtze-Yellow River inter-basin network

调度增强系统韧性及可持续性。

采用熵权-TOPSIS 与 DomiRank 指标从局部和全局角度综合多维属性及跨流域拓扑影响,系统识别长江-黄河跨流域网络中的关键节点。其中,节点层内重要性的度中心性、介数中心性与接近中心性的权重分别为 0.071、0.753 和 0.176,表明节点的桥梁功能与断面调控能力在枢纽节点识别中起主导作用。基于 TOPSIS 模型得到的关键节点空间分布如图 5 所示,其中 A5(断面出流量)、E1(南水北调中线工程调水量)、E5(南水北调东线工程供水量)在水力连通中更为重要。除上述水力联系节点外,各子系统要素呈现空间异质性特征:流域上、中游段由社会经济要素主导,上游以居民消费(C5)、城镇人口(C6)及产业结构与收入(C2/C3/C9)为主;中游则以 GDP 等宏观经济指标(C1~C4)、供水生产能力(C10)为核心。流域下游段转为以水文节点为主,凸显地下水资源(A3)与供用水过程(A4)的关

键作用,而黄河中游地表水资源量(A2)的出现也表明水文要素重要性向下游延伸的趋势。

为揭示长江-黄河跨流域网络拓扑特征,本文基于 DomiRank 值开展节点失效模拟,并将节点划分为以下 3 个等级:DomRank 值大于 2.0 为高影响节点,此类节点易成为系统变化传播的起始节点且具有较强的扩散能力,加剧系统脆弱性;DomRank 值在[0,2.0]为中等节点;DomRank 值小于 0 为缓冲节点,该类节点在极端竞争下倾向于将自身所需水资源贡献于邻近节点,对维持系统韧性具有积极作用。结合图 5~7 分析可知,TOPSIS 模型识别出的前 30 个重要节点中:中线调水量、断面出流量及有效灌溉面积为高影响节点,其中汉江分区中线调水量(E1)作为关键人工干预工程影响汉江下游自然径流量并显著改变流域自然水文情势^[37];宜昌—湖口分区宜昌站出流量(A5)反映长江下游整体供用水及生态需求的刚性约束总量;龙门—三门峡分区

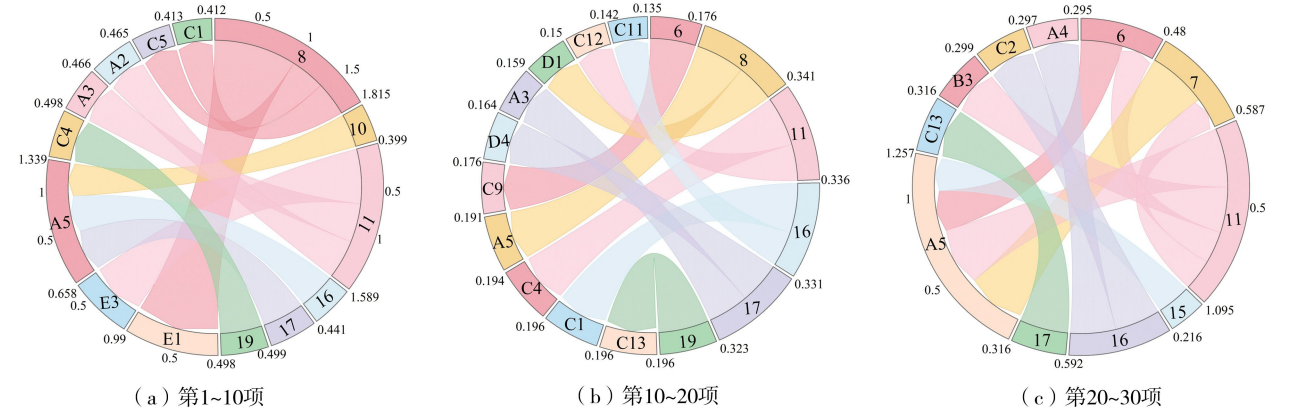


图 5 长江-黄河跨流域网络 TOPSIS 得分值(前 30 项)

Fig. 5 TOPSIS scores of the Yangtze-Yellow River inter-basin network (Top 30)

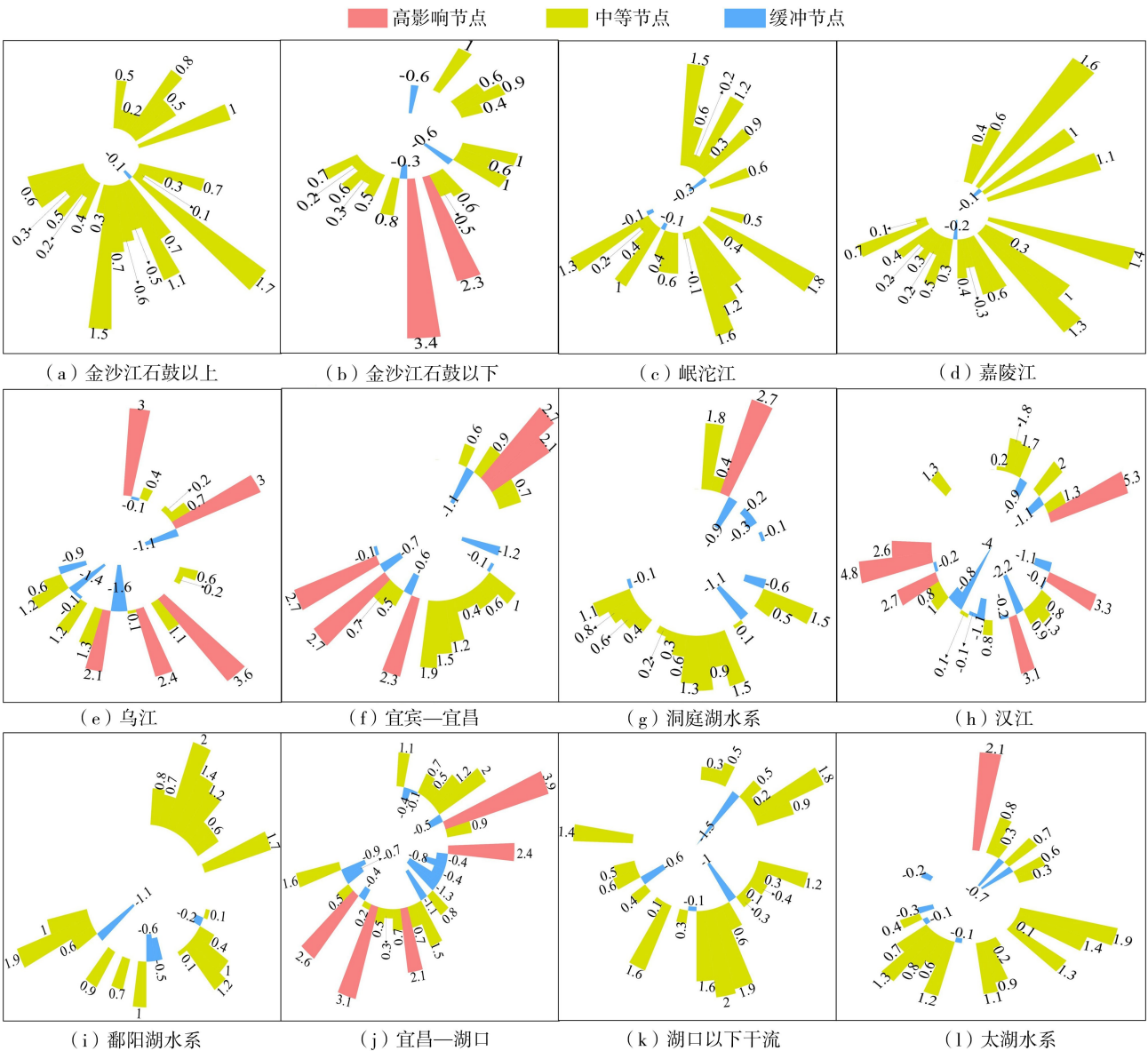


图6 水网互联下长江流域 DomiRank 值分布

Fig. 6 Distribution of DomiRank values in the Yangtze River Basin under water network interconnection

有效灌溉面积 (C13) 反映黄河中游农业用水规模, 其面积变化会通过影响下游径流量进而改变流域水资源配置^[38]。缓冲节点主要由社会经济要素构成, 如地区生产总值 (C1)、第三产业增加值 (C4) 及有效灌溉面积 (C13) 等。这些节点在极端水资源短缺条件下通过主动或被动的削减自身需求^[39], 将自身水资源量贡献给网络中的支配性节点。这可能与以下机制相关: 干旱时期农业部门常被限灌, 其削减的用水量会被重新配置, 以保障城市生活用水和重点工业用水; 区域经济则通过承受局部增长压力或调整产业结构, 避免系统性缺水危机的发生, 从而实现对水资源系统韧性的积极调控作用。

由图 6、图 7 可知 (沿顺时针方向), 高影响节点多集中在南水北调工程、三峡工程建设分区, 如汉江、宜昌—湖口、龙门—三门峡、三门峡—花园口、花

园口以下分区。基于此类分区的分析表明, 除断面出流量、调水工程等水文主导因子外, 长江流域内社会经济要素 (第一产业增加值、有效灌溉面积等) 以及生态要素 (裸地面积比重、草地面积比重) 在系统内发挥枢纽作用^[40]。其中宜昌—湖口分区内三峡库区年发电量为高影响节点, 这可能与以下原因相关: 三峡工程的运行方式直接决定下游水文情势及生态流量^[41-42], 对中下游农业生产、土地利用等产生约束或驱动作用; 中上游人口增长等社会经济需求通过用水竞争反馈影响水库调度决策及发电效益。

由图 7 可知, 黄河流域内高影响节点呈自然禀赋与人类活动深度耦合特征。其形成机制如下: 在自然层面, 气象要素 (温度、平均风速) 驱动蒸散发过程, 直接控制水资源空间分布并影响土地利用状态 (水域、裸地)。在社会层面, 有限的水资源对农

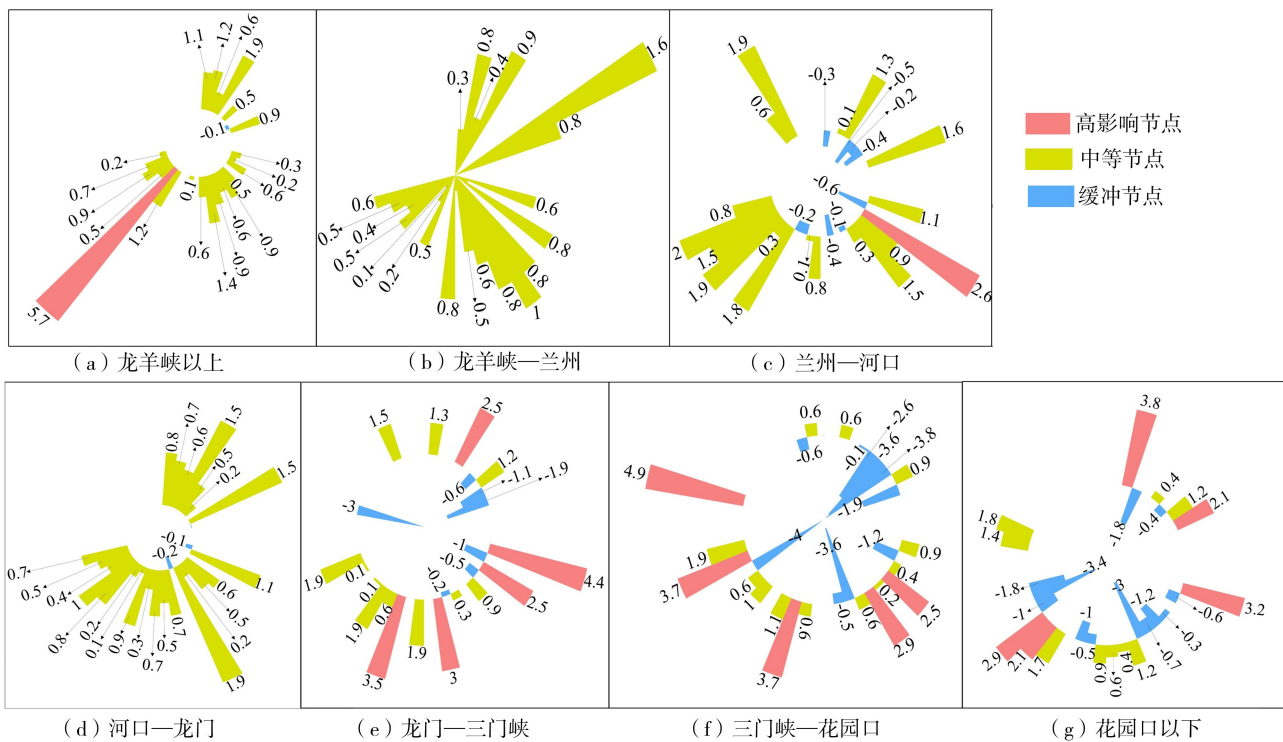


图 7 水网互联下黄河流域 DomiRank 值分布

Fig. 7 Distribution of DomiRank values in the Yellow River Basin under water network interconnection

业发展形成刚性约束,其影响进一步传导并渗透至第二、三产业等社会经济系统。而高强度的社会经济活动则通过取用水与土地利用变化产生反馈效应,重构流域的生态水文格局与局地气候环境。

3.2.2 跨区迟滞及局部聚集效应

长江-黄河跨流域网络整体呈现出低集聚性(集聚系数为 0.074)、高路径阻滞性(平均最短路径长度为 10.765)、低传输效率(全局效率 0.033)和弱连接性(网络密度 0.004)的结构特征。长江、黄河流域的要素节点分别呈现出微弱正相关(0.018)与负相关(-0.016)的差异化关联特性。整体上,长江流域节点连接关系呈现随机均衡特征,而黄河流域节点则呈现更显著的空间集聚特征。南水北调工程构建了长江与黄河两大流域间的水资源战略性通道,使跨流域网络的平均最短路径长度(10.765)显著高于各内部分区均值(通常为 1~3),表明南水北调中线工程、东线工程节点成为跨流域连接的核心枢纽,改善了网络系统的资源调配路径。该网络小世界系数达 19.011,具有显著的小世界特性,并呈现出“跨区迟滞与局部集聚”的系统特征:在局部子分区内,节点连接紧密、互动频繁,形成快速响应的强耦合结构(局部集聚);而在整体尺度上,跨分区水资源要素需经较长路径实现相互作用,导致传导时间滞后(跨区迟滞)。这一结构使得系统在面临外部扰动时,重要灌区、城市群和调水枢纽等关键区

域更易表现出脆弱性并具备扰动传播潜能。

针对局部聚集效应分析,本文基于以边系数为权重的有效因果边,识别出由双节点核心短链(图 8)。结果表明,上游核心短链呈现自然约束与社会响应刚性耦合特征;中游段长江-黄河跨流域核心短链分布广泛,且多条短链的起点与终点集中在少量节点(如地区生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、有效灌溉面积),同时调水类要素开始参与构成核心短链;下游核心短链在复合驱动下具有产业升级与生态协同特征。具体分析如下:

上游宜宾—宜昌分区核心短链反映社会经济与资源环境响应关系:人均收入→地区生产总值的正向增长反馈关系、人均收入→地表水资源量的水资源需求依赖关系、地区生产总值→裸地面积比重的土地利用扰动关系。兰州—河口分区核心短链反映水资源刚性约束下农业发展路径:地表水资源可用量约束城镇开发利用水平,通过有限建设用地与第一产业的融合发展提升农业附加值。中游洞庭湖水系分区供水生产能力影响工农业发展,表明工业化进程成为生态环境变化的关键压力源^[43];汉江分区中线调水量直接作用于区域经济及农业灌溉,经济发展推动居民收入与消费水平提升;宜昌—湖口分区灌溉农业的发展有利于促进区域 GDP;河口—龙门分区核心短链反映:经济增长驱动农业现代化,进而显著增加水资源需求,而城镇化进程则最终表现

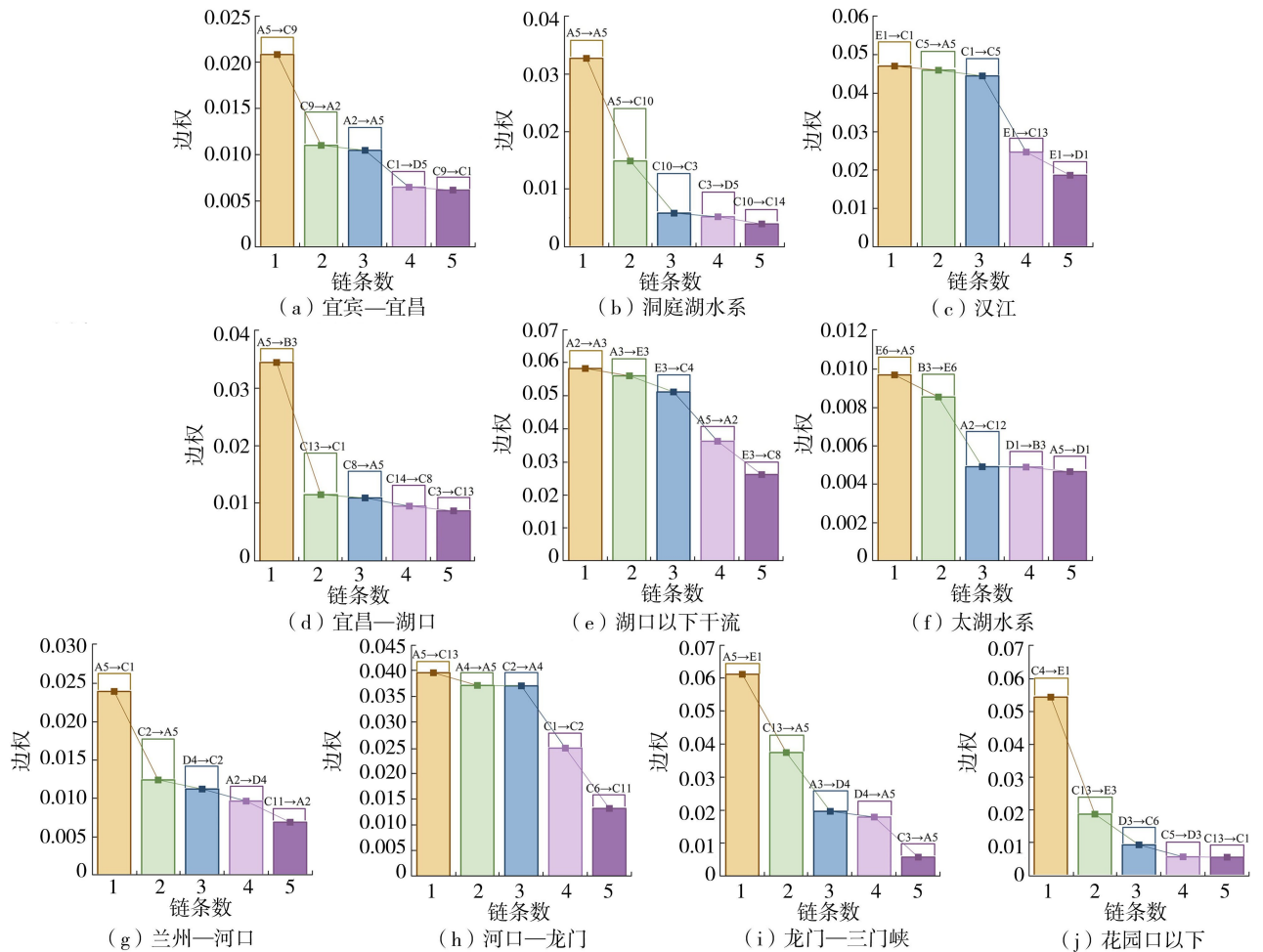


图 8 长江-黄河跨流域网络核心短链

Fig. 8 Core short chains in the Yangtze-Yellow River inter-basin network

为供水基础设施的扩容压力。下游湖口以下干流分区呈现自然水资源循环与外调水协同支撑高附加值产业发展^[44],具体路径体现为“地表水资源量→地下水资源量”、“中线供水量→第三产业增加值”。太湖水系分区表现资源驱动与生态调节特征;水资源自然禀赋为灌溉农业提供基础支撑条件,进而驱动农业机械化进程,同时区域内森林植被通过水文效应调节区域局地气候。

3.2.3 跨流域级联传导效应

为揭示长江-黄河跨流域网络的级联传播机制,本文基于 PCMC1 方法与传递熵分析,通过水力联系

识别出的 7 条具有显著因果关系与高传递熵值的跨流域长链条(表 4),图 9 展示了网络最长链(链条 2)与跨流域长链(链条 7)的空间分布特征。具体传导过程详述如下:

a. 链条 1(气象-水文-社会经济响应链)。宜昌—湖口分区内,气温变化通过驱动流域蒸散发过程,调控河道实际径流量^[45],进而制约高耗水工业的发展。

b. 链条 2(土地利用-气象-水资源跨区反馈链)。下垫面变化与水文循环相互作用共同影响宜昌—湖口分区产汇流条件及水资源承载力水平^[46],

表 4 长江-黄河跨流域网络长链条特征

Table 4 Characteristics of long chains in the Yangtze-Yellow River inter-basin network

序号	长链条
链条 1	B2(10)→A1(10)→C3(10)
链条 2	D4(10)/B5(10)/A2(10)→A5(10)→C6(11)/B3(11)→A5(11)→C4(12)→A5(12)→D1(12)
链条 3	C13(7)/B3(7)/C11(7)/C2(7)/D5(7)→A5(7)→A5(6)→A3(6)
链条 4	C13(5)/C12(5)→A5(5)→D5(5)
链条 5	C10(14)/C2(14)→A5(14)→C2(14)
链条 6	C7(19)→E5(19)→C12(19)/C9(19)
链条 7	E1(8)→E12(18)/D2(17)/D3(18)/A3(17)/C1(18)/B4(17)→A5(17)→B3(18)/B1(17)

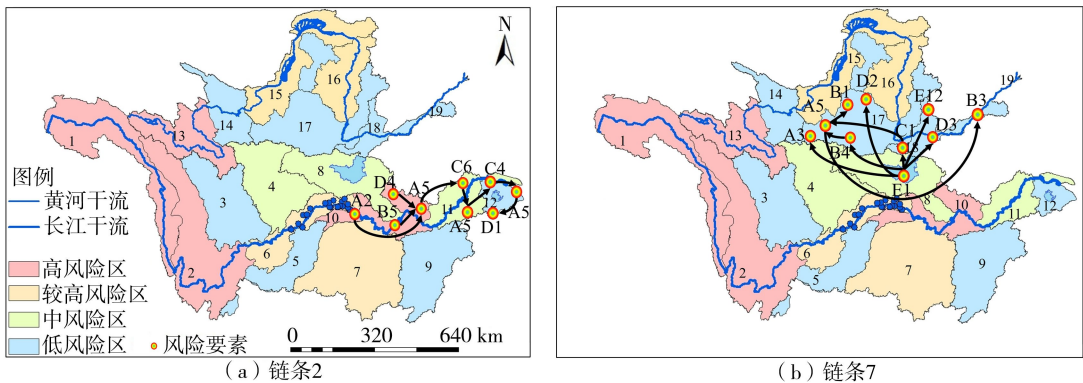


图9 水网互联下长江-黄河跨流域网络长链条

Fig. 9 Long chains in the Yangtze-Yellow River inter-basin network under water network interconnection

进而支撑区域城镇化发展进程;同时,三峡水库通过调节局地湿度,经水力联系传导至下游太湖分区,调控其以第三产业为主的产业布局,并通过产业用水影响太湖流域的森林生态状况^[47]。

c. 链条3(人类活动-水资源链)。洞庭湖水系内,自然气候条件(相对湿度)与高强度人类活动(农业、土地利用、城镇取水)相互作用成为主导河川径流量变化的关键因素,地表水文过程与地下水文过程通过下渗、补给与排泄等机制构成的转化通量,直接决定地下水资源量的丰枯状况^[48]。

d. 链条4(乌江分区内农业现代化潜在传导路径)。有效灌溉面积的扩张及农业机械化水平的提升显著改变流域用水结构,影响分区断面出流量,进而通过水力连接传递至生态子系统,可能改变区域土地利用情况,表现为裸地面积比重呈动态响应。

e. 链条5(跨区水资源竞争链)。上游龙羊峡—兰州地区通过取水基础设施支撑农业用水,形成对自然径流的竞争性消耗^[49];这种消耗通过水力联系传导至下游,导致可用水量减少,从而对下游兰州河口分区的农业生产构成基础性约束。

f. 链条6(人口压力-工程干预-经济发展链)。人口增长构成水资源需求的刚性约束,通过引入外调水提升农业生产效率,进而驱动产业多元化与区域经济发展。

g. 链条7(工程干预响应链)。南水北调中线工程引发受水区多个子系统多层级响应过程。水文子系统,外调水增加黄河下游河道径流,有效提升水流挟沙能力,并通过下渗有效回补地下水,利于实现

水源涵养^[50]。社会经济子系统,稳定的供水直接缓解了工农业发展的资源约束,成为区域经济增长的关键驱动力。气象子系统,生态补水通过改变下垫面状况,对局地气候要素如相对湿度与平均风速产生了微尺度调节作用^[51]。

基于上述长链路传导路径特征,建议采取分区协同的管理策略:上游着力于发展节水农业与绿色产业,以缓解竞争性用水;中游侧重于统筹生态经济需求并协同节水;下游致力于循环经济与再生水利用。三者协同,共同构建流域水资源高效可持续利用的优化路径。

3.3 水网互联对长江、黄河流域水资源系统的影响

为揭示水网互联对网络结构的影响,本文设定四种水网互联场景:无中线和东线、仅中线、仅东线、有中线和东线。由表5可知,南水北调东线工程、中线工程通过协同强化区域连接与跨流域辐射,驱动水网结构从局部密集向多中心、路径多元化形态演进。双线互联在提升系统传输效率、规避时滞风险的基础上,保持了局部集群优势,并通过均衡节点负荷显著增强了网络整体的互济能力、调度弹性及结构稳健性。

a. 节点方面。除水力联系点外,无南水北调工程干预时,关键节点广泛分布于长江各大支流与湖区,黄河流域影响力较弱,网络呈现多核驱动格局。单一调水工程形成差异化影响:中线工程通过构建长江-黄河输水主轴,驱动关键节点向汉江、洞庭湖及黄河中上游段集聚;东线工程则通过强化区域互联,显著提升了鄱阳湖、岷沱江及黄河下游段节点的

表5 水网互联场景下网络拓扑指标

场景	平均度值	平均集聚系数	网络效率	网络密度	平均特征路径长度	小世界系数	度分布距离
无中线+无东线	4.1444	0.0742	0.0192	0.00373	10.5477	20.0638	0.1187
仅中线	4.0659	0.0752	0.0261	0.00374	11.6239	17.6570	0.0934
仅东线	4.0766	0.0755	0.0203	0.00373	15.6105	13.7454	0.1106
中线+东线	4.1302	0.0738	0.0329	0.00375	10.7645	19.0107	0.0802

枢纽地位,增强跨流域水资源协同能力。南水北调东线工程、中线工程互联运行进一步优化关键节点的空间分布与功能协同,形成以长江干流枢纽段和黄河中下游核心区为主骨架的网络结构,通过功能协同保障了网络稳定。DomiRank 值量化分析表明:南水北调东线工程通过将部分高影响节点(如 11-C10、11-C14、19-C2 等)转化为中等节点,促进网络结构扁平化,降低了枢纽依赖风险;而南水北调中线工程通过增加缓冲节点量(如 19-D5、19-C2、19-C7 等),增强了系统对极端事件的消纳能力;二者协同将缓冲节点由原有的 98 提升为 113,显著提高了跨流域水资源系统韧性。

b. 链路方面。表 5 和图 10 结果表明,不同调水场景下流域因果链结构具有系统性差异。无工程干预时,因果链集中分布于子分区内部,呈现典型的短链化特征,如长江形成“第二产业增加值(10)→居民消费(10)→断面出流量(11)→森林面积比重(11)/引江济太调水量(12)”等局部链式结构。南水北调工程的实施则改变了这一格局:南水北调中线工程通过汉江分区调水节点(E1)构建了跨越长江与黄河的长链式因果路径,形成“断面出流量(8)→森林面积比重(8)→中线调水量(8)→断面出流量(17)→中线供水量(18)/有效灌溉面积(18)→断面出流量(18/16)→供用水量(16)/第一产业增加值(19)/水域面积比重(19)”等传导路径,表明其以水力联系为纽带,显著贯通了黄河流域中下游的水文与社会经济过程;南水北调东线工程则仅形成较短的跨流域链“东线调水量(11)→断面出流量(18)→裸地面积比重(18)/有效灌溉面积(18)”,反映出其对区域内部连接的强化作用。双线互联场景下,系统形成 7 条具有跨流域、多要素耦合特征的长因果链,反映出工程协同运行显著拓展了因果链的空间尺度与结构复杂性,同时节点关联从单一要素向自然-社会多维转变。

c. 网络方面。无中线工程、东线工程场景下,长江-黄河跨流域网络平均路径长度为 10.55,网络效率仅为 0.019,节点分布不均,系统连通性显著不足。单一工程运行呈差异化调控效应:中线工程通过构建南北向输水主轴,将网络效率提升至 0.026,节点均衡性显著改善,但特征路径长度略有提升,可能是因为路径迂回性略有增加;南水北调东线工程拓展网络辐射范围,但路径长度大幅延长至 15.61,节点均衡性改善有限,总体可能存在传输迟滞风险。双线互联协同利于实现系统性优化,网络效率显著提高至 0.033,平均特征路径长度恢复至 10.76,节点分布均衡度达到最佳状态。这表明,在保持较高

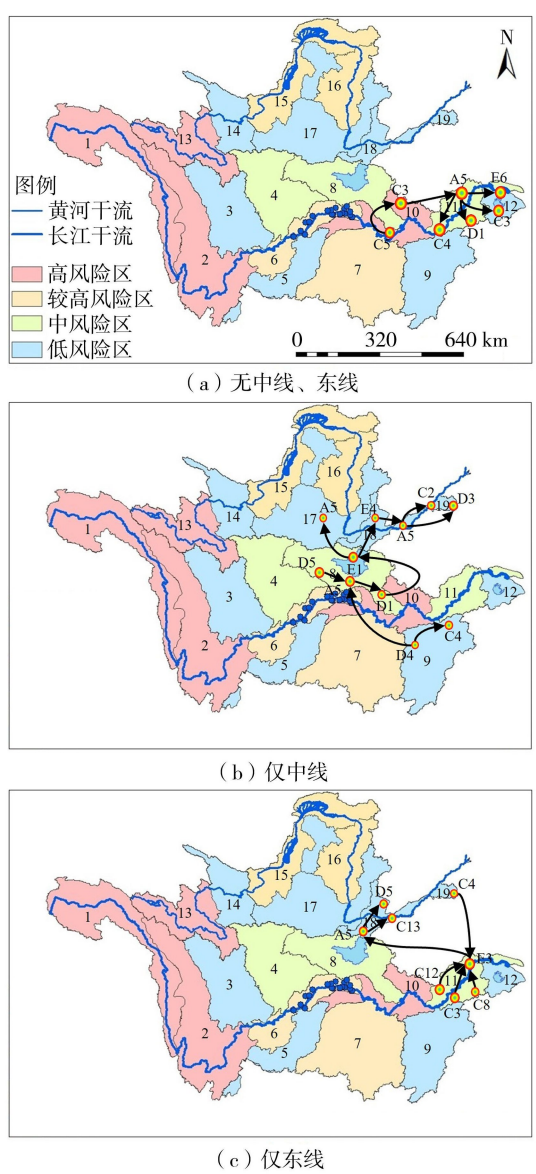


图 10 不同场景下长链条特征

Fig. 10 Characteristics of long-chain structures under different scenarios

局部集群特性基础上,全局连通能力与结构稳定性同步增强。综上,南水北调工程通过战略性水力连接与路径互补,驱动流域网络从低效松散结构向高效均衡、韧性增强的一体化复杂系统演进,显著提升水资源配置的整体效能与系统协调能力。

4 结论

a. 长江-黄河跨流域网络具有显著的小世界特性,其小世界系数高达 19.011,揭示了系统同时具备高度的局部聚类与较短的全局平均路径长度。关键水力联系点(如断面径流)与社会经济节点(如地区生产总值)的协同作用,是维持系统结构稳定的重要基础。研究进一步辨识出 7 条高传递熵值的跨流域级联传导路径,从气象、水文、社会经济耦合视角揭示了单一扰动引发系统性响应的内在动力学机制。

b. 南水北调工程作为关键调控手段,通过差异化协同机制驱动网络结构实现性能优化与功能提升。在节点层面,东线工程、中线工程双线互联使缓冲节点数量增加 15%,增强了系统对扰动风险的消纳能力;在链路层面,催生了 7 条跨流域、多维度耦合的长因果链,提升了传导过程的结构复杂性;在网络层面,全局传输效率由 0.019 提升至 0.033(增幅 74%),标志着网络结构从低效松散向高效协同的系统性演进,增强了跨流域水资源配置效能与系统韧性。

本文联合 PCMCi 因果诊断、传递熵方法并与既有研究成果相互印证,对识别出的有向因果边进行了交叉验证,增强了网络模型物理机制的可解释性。然而,受限于实测数据的完备性,未来研究需融合多源数据以提升序列信息的完整性,并深化因果识别与物理机理模型的耦合。

参考文献：

[1] 赵勇,何凡,何国华,等. 国家水网基础认知与建构准则[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6): 1049-1054. (Zhao Yong,He Fan,He Guohua,et al. Basic cognition and construction criteria of national water network[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21 (6): 1049-1054. (in Chinese))

[2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [R/OL]. Switzerland:IPCC,2021:31- 67. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

[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] 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))

[5] 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))

[6] Deng Ye, Wu Jun. Power law of path multiplicity in

complex networks. [J]. PNAS Nexus,2024,3(6):228.

[7] Mondal S, Mishra A K, Leung R, et al. Global droughts connected by linkages between drought hubs[J]. Nature Communications ,2023,14(1):144.

[8] Song Jinghua, Ding Jianfeng, Gui Xuechen, et al. Assessment and solutions for vulnerability of urban rail transit network based on complex network theory: a case study of Chongqing[J]. Heliyon,2024,10(5): e27237.

[9] 张鹏超. 关联基础设施网络节点重要性及网络韧性研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2024.

[10] 万芳,王煜,王威浩,等. 水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响[J]. 水资源保护,2025,41(1): 19-26. (Wan Fang,Wang Yu,Wang Weihao,et al. Influences of water network construction on water resources system resilience evolution in the Fenhe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1): 19-26. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 黄生志,闫俊,郭怿,等. 面向关中地区水网韧性提升的水库群优化调配研究[J]. 水资源保护,2025,41(5): 258-267. (Huang Shengzhi, Yan Jun, Guo Yi, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection,2025,41(5): 258-267. (in Chinese))

[13] 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))

[14] Liu Yangxiaoyue, Yang Yaping, Song Jia. Variations in global soil moisture during the past decades: climate or human causes? [J]. Water Resources Research,2023,59(7):e2023WR034915.

[15] Murray D S, Moges E, Larsen L, et al. Synchrony of nitrogen wet deposition inputs and watershed nitrogen outputs using information theory [J]. Water Resources Research,2023,59(10):e2023WR034794.

[16] Runge J, Nowack P, Kretschmer M, et al. Detecting and quantifying causal associations in large nonlinear time series datasets [J]. Science Advances, 2019, 5 (11): eaau4996.

[17] 李云玲,宋秋波,刘为锋,等. 国家水网调度指挥体系构建思路与路径探讨[J]. 中国水利,2025(11): 1-7. (Li

- Yunling, Song Qiubo, Liu Weifeng, et al. Discussion on the construction ideas and pathways of the national water network dispatching and command system [J]. China Water Resources, 2025(11): 1-7. (in Chinese))
- [18] 黄珊珊,董前进. 长江流域上中下游基流演变规律及与降水量关联分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 10-13. (Huang Shanshan, Dong Qianjin. Evolution of baseflow in the upper, middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and its correlation analysis with precipitation [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(7): 10-13. (in Chinese))
- [19] 阮俞理,张建云,宁忠瑞,等. 长江黄河流域枯水遭遇概率时空演变特征及未来趋势研究[J]. 水资源保护, 2026, 42(1): 13-21. (Ruan Yuli, Zhang Jianyun, Ning Zhongrui, et al. Research on spatiotemporal variation characteristics and future trends of dry water encounter probability in the Yangtze River and Yellow River basins [J]. Water Resources Protection, 2026, 42(1) 13-21. (in Chinese))
- [20] 赵勇,王浩,邓铭江,等. 黄河几字弯水网:南水北调西线配套东延工程构想[J]. 水利学报, 2023, 54(9): 1015-1024. (Zhao Yong, Wang Hao, Deng Mingjiang, et al. Jiziwan water network in the Yellow River Basin: conceptualizing the east extension project of the west route of the South-to-North Water Diversion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(9): 1015-1024. (in Chinese))
- [21] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))
- [22] 王慧丽,李妞,刘英,等. 黄河流域水资源-生态韧性动态耦合与层级障碍解析[J]. 干旱区地理, 2025, 49(3): 569-580. (Wang Huili, Li Niu, Liu Ying, et al. Dynamic coupling and hierarchical obstacle analysis of water resources and ecological resilience in the Yellow River Basin [J]. Arid Land Geography, 2025, 49(3): 569-580. (in Chinese))
- [23] 史娜娜,王琦,韩煜,等. 中国陆域生态系统生境质量时空特征及驱动因子探测分析[J]. 环境科学, 2026, 47(6): 3748-3757. (Shi Nana, Wang Qi, Han Yu, et al. Spatiotemporal variation characteristics and driver factors of habitat quality in terrestrial ecosystems of China [J]. Environmental Science, 2026, 47(6): 3748-3757. (in Chinese))
- [24] 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.
- [25] 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))
- [26] 兰志洋,梁伟,傅伯杰,等. 基于因果网络的黄河流域植被变化归因分析[J]. 地理科学进展, 2022, 41(12): 2342-2355. (Lan Zhiyang, Liang Wei, Fu Bojie, et al. Attribution analysis of vegetation change in the Yellow River Basin based on causal network [J]. Progress in Geography, 2022, 41(12): 2342-2355. (in Chinese))
- [27] 王海军,王宁,练继建. 基于传递熵的水电站厂房振动传递路径识别[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 732-740. (Wang Haijun, Wang Ning, Lian Jijian. Vibration transfer path identification of the hydropower house based on transfer entropy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 732-740. (in Chinese))
- [28] 杨泽俊. 基于链路预测的网络节点中心性预测研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2021.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Huang Shanheng, Wang Peng, Hua Zulin, et al. Structural characteristics and spatiotemporal changes of a reticular river network based on complex network theory [J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131577.
- [32] Ban Qingqing, Tian Guiliang, Xia Qing, et al. Resilience assessment of city-level virtual water flow network in the Yellow River Basin, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 130: 106529.
- [33] 周方. 社交网络用户影响力和易感性的量化方法及其应用研究 [D]. 成都:电子科技大学, 2024.
- [34] 高攀,秦川,武思远,等. 机理数据混合驱动的气象敏感负荷需求响应潜力评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 85-92. (Gao Pan, Qin Chuan, Wu Siyuan, et al. Mechanism-data hybrid driven assessment method for demand response potential of meteorologically sensitive load [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 85-92. (in Chinese))
- [35] 张鑫. 全球陆地地表水资源及入海水量演变机理研究 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2024.

- [36] 黄李东,叶爱中,张正亥,等. 近 30 年中国典型区域水体面积变化与归因[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(6):138-147. (Huang Lidong,Ye Aizhong,Zhang Yihai, et al. Changes and attribution of water surface area in typical regions of China in the past 30 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019,17(6): 138-147. (in Chinese))
- [37] 曹圣洁,夏瑞,张远,等. 南水北调中线工程调水前后汉江下游水生态环境特征与响应规律识别[J]. 环境科学研究,2020,33(6):1431-1439. (Cao Shengjie, Xia Rui,Zhang Yuan, et al. Characteristics and response of ecological environment in downstream of Hanjiang River before and after running of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Research of Environmental Sciences,2020,33(6): 1431-1439. (in Chinese))
- [38] 吕美霞,马柱国,李明星. 气候变化、植被改变及人类用水与黄河流域水循环的研究进展[J]. 大气科学学报,2023,46(6):801-812. (Lyu Meixia, Ma Zhuguo, Li Mingxing. A review on the changing water cycle of the Yellow River Basin under changes in climate,vegetation, and human water use [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2023,46(6): 801-812. (in Chinese))
- [39] Li Chuanjian,Qian Siyu,Liu Jianxu,et al. Analysis on the decoupling of China's economic development and water resource utilization under the rigid constraint of water resources [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2025,9:1498807.
- [40] Xie Zeyang, He Liujie, Mao Zhun, et al. Spatial heterogeneity of natural and socio-economic features shape that of ecosystem services: a large-scale study on the Yangtze River economic belt, China [J]. Ecological Indicators,2024,159:111729.
- [41] Yang Linhan,Zeng Sidong,Xia Jun, et al. Effects of the Three Gorges Dam on the downstream streamflow based on a large-scale hydrological and hydrodynamics coupled model[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies,2022,40:101039.
- [42] Zeng Sidong, Liu Xin, Xia Jun, et al. Evaluating the hydrological effects of the Three Gorges Reservoir based on a large-scale coupled hydrological-hydrodynamic-dam operation model [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023,33(5):999-1022.
- [43] Yuan Lige,Geng Mingming,Li Feng,et al. Spatiotemporal characteristics and drivers of ecosystem service interactions in the Dongting Lake Basin[J]. Science of the Total Environment,2024,926:172012.
- [44] Yang Shuhui, Li Zhigang, Zhang Zixuan, et al. Coordinating high-quality economic development and water resources carrying capacity in the Yangtze River Basin cities: achieving sustainable development goals [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 60: 102502.
- [45] Huang Ying, Salama M S, Krol M S, et al. Estimation of human-induced changes in terrestrial water storage through integration of GRACE satellite detection and hydrological modeling: a case study of the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Research,2015,51(10):8494-8516.
- [46] Li Wei, Li Lu, Chen Jie, et al. Impacts of land use and land cover change and reforestation on summer rainfall in the Yangtze River Basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(8):4531-4548.
- [47] Zhang Peipei, Mao Jingqiao, Tian Mingming, et al. The impact of the three gorges reservoir on water exchange between the Yangtze River and Poyang Lake [J]. Frontiers in Earth Science,2022,10:876286.
- [48] Mensah J K, Ofori E A, Yidana S M, et al. Integrated modeling of hydrological processes and groundwater recharge based on land use land cover, and climate changes: a systematic review [J]. Environmental Advances,2022,8:100224.
- [49] Yin Zun, Otle C, Ciais P, et al. Irrigation, damming, and streamflow fluctuations of the Yellow River [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(3):1133-1150.
- [50] Yang Wenting, Long Di, Scanlon B R, et al. Human intervention will stabilize groundwater storage across the north china plain [J]. Water Resources Research,2022,58(2):e2021WR030884.
- [51] Deng Haodong, Wang Qingming, Zhao Yong, et al. Impacts of continuous water diversions by the South-to-North Water Diversion Project on increased precipitation and decreased temperature in water-receiving areas [J]. Geophysical Research Letters, 2025, 52 (7): e2024GL113549.

(收稿日期:2025-09-16 编辑:彭桃英)

