DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 001

复杂流域水资源系统风险多链路网络研究(Ⅰ):网络构建

冯仲恺[1,2,3],高浩宇[1,2,3],牛文静[4],王 煜[5],彭少明[6],郑小康[7]

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;
3. 河海大学流域水土过程省高校重点实验室,江苏 南京 210098; 4. 长江水利委员会长江水文局,湖北 武汉 430010;
5. 水利部黄河水利委员会, 河南 郑州 450003; 6. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120;
7. 黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003)

摘要:为探明水资源多维风险要素及其关联机制,统筹黄河流域气象、水文、社会经济、生态等多维要素,利用因果诊断、传递熵等方法,构建了黄河流域水资源系统风险多链路网络。运用度中心性、介数中心性、边介数、聚集系数等指标,解析了节点、边和网络特征信息,识别了重要关联要素及其链路。结果表明:黄河流域水资源系统自身具有社区结构特性,且与其所辖 6 个分区(除龙门-三门峡分区)的水资源系统均具有较高的聚集性和耦合性,不同关联要素之间具有较为密切的反馈关系,对应的复杂网络呈小世界特性;在不考虑水力联系要素(断面流量、水资源量、总降水量)时,温度、第三产业增加值等关联要素以及第三产业增加值→人口自然增长率等链路在水资源系统中发挥重要作用。

关键词:水资源系统;风险多链路网络;因果诊断;复杂网络分析;黄河流域

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0001 - 11

Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (Ⅰ): network construction//FENG Zhongkai[1,2,3], GAO Haoyu[1,2,3], NIU Wenjing[4], WANG Yu[5], PENG Shaoming[6], ZHENG Xiaokang[7]

(1. *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 3. *Key Laboratory of Soil and Water Process in Watershed*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 4. *Bureau of Hydrology*, *Changjiang Water Resources Commission*, *Wuhan* 430010, *China*; 5. *Yellow River Conservancy Commission*, *Ministry of Water Resources*, *Zhengzhou* 450003, *China*; 6. *General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design*, *Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100120, *China*; 7. *Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.*, *Zhengzhou* 450003, *China*)

Abstract: To explore the multidimensional risk factors of water resources and their interrelationships, this study integrated meteorological, hydrological, socio-economic, and ecological factors in the Yellow River Basin. Using causal diagnosis, transfer entropy, and other methods, the risky multi-link network of water resource system in the Yellow River Basin was constructed. Metrics such as degree centrality, betweenness centrality, edge betweenness, and clustering coefficient were employed to analyze node, edge, and network characteristics, identifying key associated factors and their linkages. The results show that the water resources system of the Yellow River Basin exhibits community structure characteristics and demonstrates high clustering and coupling with the water resources systems of its six sub regions (except for the Longmen-Sanmenxia sub region). There are close feedback relationships among different associated factors, and the corresponding complex network exhibits small-world properties. When excluding hydraulic connection factors (section flow, water resource volume, and total precipitation), associated factors such as temperature and the added value of the tertiary industry, as well as linkages like "added value of the tertiary industry → natural population growth rate", play significant roles in the water resources system.

Key words: water resources system; risky multi-link network; causal diagnosis; complex network analysis; the Yellow River Basin

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, 52441901);江苏省优秀青年基金项目(BK20240189);北京江河水利发展基金会水利青年科技英才项目(JHYC202310);湖北省自然科学基金三峡联合基金项目(2023AFD203);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

作为典型的复杂系统,流域水资源系统同时受到气象[1]、水文、社会经济[2]、生态[3]等复合系统综合影响,不同系统之间存在着信息屏障、时滞传递、振荡分异等复杂关系[4-5]。与此同时,受全球气候变化[6-8]和强烈人类活动[9-10]影响,流域水循环过程发生显著变化,导致流域径流性水资源衰减、水文节律非稳态增强,特枯和连枯等极端水文干旱事件不断加剧,呈受灾范围大、持续时间长、发生频次高等趋势,水危机日益凸显,如何解析变化条件下复杂流域水资源系统特性是亟待解决的重大科学难题。国内外学者认为水资源系统关联要素具有较好的一致性,大都聚焦单链路视域,采用定量或定性方法评估水资源系统关联要素及其影响,取得了丰硕成果[11-12]。然而,水资源系统关联要素在时间和空间上均呈动态变化特征,而且不同关联要素之间存在着复杂的依赖关系和层级作用[13],上层关联要素通过链式传播结构对下层要素产生即时影响或滞后干扰[14-15],导致传统静态分析方法未能考虑复合系统不同要素的多链路影响,难以满足变化条件下水资源系统风险动态评估需求。

近年来,考虑多维要素交互作用及其传递规律的复杂网络得到学者广泛关注,如肖盛燮[16]解析了崩裂滑移、周期循环、支干流域等各类灾害链式结构,探究了灾害链式规律及孕源断链减灾机制;刘文方等[17]提出了表征灾害要素和要素相互作用的自然灾害链复合体系,阐述了灾害链式传导过程;Qin等[18]构建了基于互馈机制的黄淮海流域水土资源系统网络,发现系统风险呈先升后降趋势;Wyrwoll等[19]研究了粮食-能源-环境-水资源的系统性威胁,评估了因果模型及参与式风险评估在国家政策制定中的作用,提出了融合选择评估的风险决策方法,对风险反馈结果进行了定量识别。不同要素之间的因果关系及依赖结构是构建复杂网络的基础,PCMCI(Peter-Clark momentary conditional independence)因果诊断方法能够有效辨识高维变量的线性或非线性时滞依赖关系,具有较强的假阳性控制能力,在地球系统科学、气象学等领域得到广泛应用。如 Lu 等[20]采用 PCMCI 方法识别了植被对饱和水气压差和湿度的响应关系及因果效应;兰志洋等[21]利用 PCMCI 方法构建了黄河流域叶面积指数复杂因果网络,揭示了影响流域叶面积指数变化的关键要素及其空间分布特征。

鉴于此,本文选取黄河流域为研究区,以复杂网络分析为基础,识别气象、水文、社会经济、生态等复合系统的关联要素集合,运用 PCMCI 因果诊断方法探究不同关联要素的因果关系和传播链路,构建复杂流域水资源系统风险多链路网络,以期为黄河流域水资源风险管理提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域地处干旱、半干旱地区,涵盖黄土高原、黄淮海平原、内蒙古高原、青藏高原等 4 个地貌单元,横跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等 9 个省区,东西部地区的海拔高度、地形地貌和气候特征存在显著差异,加之环境变化影响,近年来黄河流域总体呈气温升高、降水减少的趋势。作为我国第二长河,黄河流域水资源总量 647.0 亿 m^3,富有水能、煤炭、天然气等能源资源,拥有三江源、祁连山等多个国家公园和重点生态功能区以及全国 12.5% 的耕地面积(如河套平原、引黄灌区等),是我国重要的经济地带、生态屏障和农业基地。然而,黄河流域水资源时空分布不均,开发利用率偏高,人均水资源量低于国际现行严重缺水标准,而且与经济社会发展格局、用水方式和管理制度等方面不相匹配,经济社会缺水与生态保障不足并存,难以满足日益旺盛的用水需求[22]。本文按照二级流域将黄河流域(除内流区)划分为 7 个分区:龙羊峡以上(分区Ⅰ)、龙羊峡-兰州(分区Ⅱ)、兰州-河口(分区Ⅲ)、河口-龙门(分区Ⅳ)、龙门-三门峡(分区Ⅴ)、三门峡-花园口(分区Ⅵ)和花园口以下(分区Ⅶ),如图 1 所示。

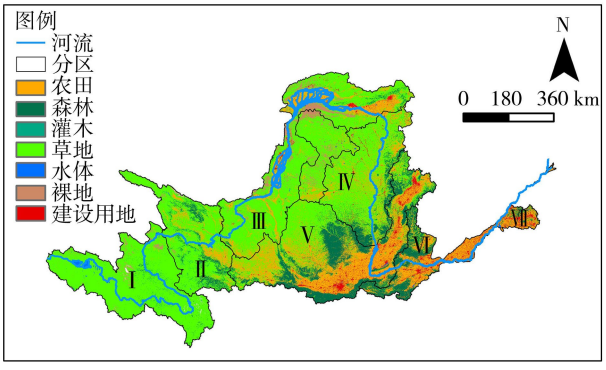


图 1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

1.2 数据来源

本文气象数据包括气温、气压、风速等,均来自中国气象数据(http://data.cma.cn)的地面气象站基本气象要素观测数据集;水文数据包括降水量、地表水资源量、地下水资源量等,来自黄河和各省《水资源公报》;社会经济数据包括人口、城镇化率、生产总值、产业增加值等,反映社会用水情况变化,来自各省历年统计年鉴和统计年报;生态数据包括土地利用类型、生境质量指数等,通过中国 1985—

2022 年逐年 30 m 土地利用数据集[23]计算得到黄河流域农田、森林、草地、水域以及建设用地面积占比，依据 HJ192—2015《中华人民共和国国家环境保护标准》得到生境质量指数。此外，通过线性插值法对缺失年尺度数据、指标进行插补延长，进而建立了黄河流域气象-水文-社会经济-生态 2000—2021 年尺度数据库。

2　复杂流域水资源系统风险多链路网络

现实世界中的复杂系统具有难解耦、随机性、灰色性、未知性等特征[24]，风险具有客观性、损失性以及不确定性，多维要素时空交织、牵一发而动全身，导致系统与风险的关系密不可分。虽然水资源系统要素的关系分析与风险传播关系并不完全等价，但是前者可为后者提供支撑[25-26]，水资源系统各要素的复杂特征可以服务于风险传播过程的定量解析[27]。因此，本文采取网络构建和特征解析的思路展开研究，首先识别影响流域水资源安全的关联要素，进而运用因果诊断和信息熵理论等方法，构建黄河流域水资源系统风险多链路网络，最后通过度中心性、介数中心性、聚集系数等指标，解析节点（要素）、链路（要素间的因果关系）、子集网络（分区水资源系统）和复杂网络（黄河流域水资源系统）特性，为风险传播研究奠定基础。

2.1　关联要素识别

流域水资源系统是气象、水文、社会经济、生态等子系统要素及其内蕴关系的有机整体，即以水为纽带构成的复杂系统。图 2 为流域水资源系统抽象为复杂风险多链路网络的示意图。将黄河流域水资源系统分为气象、水文、社会经济、生态等 4 个子系统，根据相关文献[28-36]和资料收集确定各子系统关联要素，如表 1 所示。此外，所有子系统的关联要素统一编号，研究过程中分区内要素编号采用 x-y 的形式，表示第 x 个子系统序号为 y 的关联要素，例如Ⅰ-10 和Ⅱ-1 分别指分区Ⅰ的下游断面出流量（要素 10）和分区Ⅱ的上游断面入流量（要素 1），均为唐乃亥断面流量，即为同一节点。

2.2　因果链路诊断

因果关系在自然界普遍存在，可以反映复杂系统不同关联要素的内在逻辑关系。Runge 等[37]提出的 PCMCI 因果诊断方法可以通过多次对目标变量在不同滞时下的时间序列开展相关性和条件独立性选择，去除与目标变量不相关的冗余变量，初步识别目标变量可能的因果父母集合；然后对高度相关的变量进行假阳性控制，判断识别的因果关系是否合理，进而确定目标变量最终的因果父母集合。本

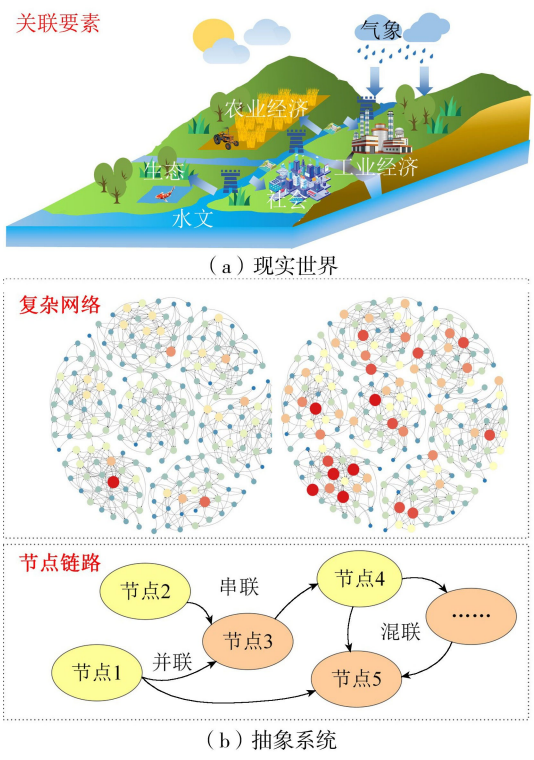


图 2　流域水资源系统抽象为复杂风险多链路网络的示意图

Fig. 2　Schematic diagram of abstracting watershed water resources system as complex risky multi-link network

文以水资源系统关联要素为目标变量，运用 PCMCI 因果诊断方法解析不同关联要素之间的因果关系，为构建水资源系统风险多链路网络奠定基础。诊断过程主要包括 PC（Peter-Clark）算法的简化版本 PC_1 条件选择算法[38]和瞬时条件独立性（momentary conditional independence，MCI）检验两个步骤，具体为：

步骤 1　PC_1 算法旨在辨识变量 $R_T(s)$ 所有可能的因果父母集合，记为 $P\{R_T(s)\}$，其中 R_T 为一个时序系统，s 表示不同的变量类型，T 为时间。在 PC_1 算法中，首先初始化各个变量的因果父母集合，在首轮迭代中，设置 $R_T(s)$ 与时滞为 τ 的时间序列 $R_{T-\tau}(t)$ 相互独立的零假设和显著性水平 α，通过非条件独立性检验移除在显著性水平上可以接受的变量；而后在各次迭代都对因果关系最强的 k 个父节点进行条件独立性检验，从因果父母集合 $P\{R_T(s)\}$ 中逐步移除不相关的变量，直至算法收敛。此时不存在无关变量，可以得到变量的初始因果父母集合。

步骤 2　MCI 检验旨在利用条件独立性测试来识别变量之间存在的直接或间接的因果关系。在 PC_1 算法基础上，构建目标变量 $R_T(s)$ 在去除 $R_{T-\tau}(t)$ 后的因果父母集合 $P\{R_T(s)\}\setminus\{R_{T-\tau}(t)\}$，检验其与因变量 $R_{T-\tau}(t)$ 的独立性，对高度相关的变量进

表 1　黄河流域水资源系统关联要素

Table 1　Associated elements of water resources system in the Yellow River Basin

类别	编号	要素名称	单位	要素解释
系统输入	1	上游断面入流量	亿 m^3	区域汇入水量,可反映气象、流域下垫面、人类活动等影响
气象子系统	2	气压	hPa	作用在单位面积上的大气压力,气压和大气流动影响降水量
	3	温度	℃	温度变化影响蒸发和水汽凝结,进而影响降水过程
	4	相对湿度	%	相对湿度影响水汽饱和,进而影响降水过程
	5	平均风速	m/s	风速影响大气流动、蒸发等,进而影响降水过程
	6	总降水量	亿 m^3	降水量与区域面积乘积,直接影响径流量
水文子系统	7	地表水资源量	亿 m^3	地表水中逐年更新的淡水量,是水资源系统的重要组成
	8	地下水资源量	亿 m^3	地下含水层接收降水、地表水体、侧向径流及人工回灌等渗透补给量的总和,是水资源系统的重要组成
	9	供用水量	亿 m^3	供水单位能够供给用水户使用的水量
	10	下游断面出流量	亿 m^3	河流下断面水量,反映气象、流域下垫面、人类活动等影响
社会经济子系统	11	地区生产总值	亿元	一定时期内地区生产总值,影响工业、农业、生活、生态用水量
	12	第一产业增加值	亿元	农业(包括林业、牧业、渔业等)产值增加值,衡量农业发展情况的指标,影响农业用水量
	13	第二产业增加值	亿元	工业和建筑业等产值增加值,衡量工业和建筑业发展情况的指标,影响工业、建筑业等用水量
	14	第三产业增加值	亿元	服务业、金融业等产值增加值,衡量现代社会经济发达程度的重要标志,影响城乡用水量
	15	居民消费	亿元	常住人口对货物和服务的全部最终消费支出,影响生活用水量
	16	城镇人口	万人	反映城市人口规模,影响城镇生活用水量
	17	乡村人口	万人	反映乡村人口规模,影响乡村生活用水量
	18	人口自然增长率	‰	反映人口规模增幅,影响生活用水量
	19	人均可支配收入	元	居民能够自由支配的收入,反映不同社会收入水平下的生活用水量
	20	供水生产能力	万 m^3/d	由供水设施取水、净化、送水等推求得到的综合生产能力,影响供水量
	21	供水管道长度	km	从送水泵至用户水表所有管道的长度,影响供水能力和供水量
	22	农业机械总动力	万 kW	主要用于农、林、牧、渔业等机械动力总和,反映农业现代化水平,影响农业用水量等
	23	有效灌溉面积	km^2	正常灌溉的耕地面积和园林草地等面积,反映农作物种植规模,影响农业用水量等
	24	农作物总播种面积	km^2	实际播种或移植有农作物的面积,反映农作物种植规模,影响农业用水量等
生态子系统	25	草地面积占比	%	生长草本和灌木植物为主并适宜发展畜牧业生产的土地,反映草地生态系统,影响草地生态用水量
	26	森林面积占比	%	由乔木树种构成、郁闭度大于或等于 0.2 的林地,反映森林生态系统,影响森林生态用水量
	27	建筑用地面积占比	%	建筑群实际占用的土地面积,反映城市生态系统,影响城市生态用水量
	28	水域面积占比	%	江河、湖泊等面积,反映水域生态系统,影响水资源量和蒸发量
	29	裸地面积占比	%	表层为岩石、石砾的未利用土地,反映裸地生态系统,影响生态用水量和地下水补水量
	30	生境质量指数		反映生态环境适合自然生态条件的能力,影响生态用水量

行假阳性控制,确保识别的因果关系能够通过多重检验,最终得到目标变量的因果父母集合。因果网络的拓扑模型构建过程见图 3。

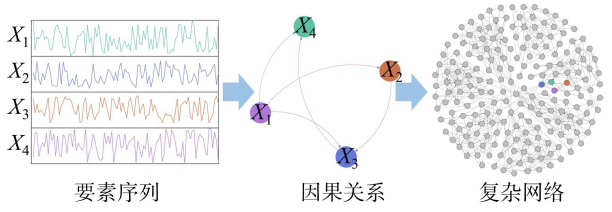


图 3　因果网络的拓扑模型构建过程

Fig. 3　Topological modeling process for causal networks

2.3　复杂网络构建

复杂网络是可以从系统整体角度描述多维变量耦合关系的拓扑模型[39],其将关联要素视为节点,将不同关联要素之间的有向因果链路视为边,将一定节点和链路集结形成网络,并通过分析节点、边及网络特征,评估关联要素、链路及网络的非线性动力特征[40]。本文首先以各分区水资源系统为子单元,利用 PCMCI 因果诊断方法识别不同关联要素之间的链路关系,进而汇集形成子网络;而后通过水力联系对各子网络进行集成,形成流域水资源系统风险多链路网络。其中,分区内降水量与径流量呈强相关关系,因此将总降水量→下游断面出流量作为分区内的水力联系,将水文站点的断面流量作为连接各分区的水力联系要素,将上游断面入流量→地表水资源量、地下水资源量、下游断面出流量等作为分区间的水力联系。通常情况下,构建的网络会有较大可能存在重复边、环形边等冗余链路,如节点 X 指向自身(即 $X\rightarrow X$)或节点 X 和 Y 互相指正(即 $X\rightarrow Y$、$Y\rightarrow X$),会导致网络产生循环反馈,难以解析链路传播关系,需要予以删除。为此,通过量化不同关联要素之间的信息传递熵来明确环形链路的因果关系。传递熵来源于信息熵理论,是指一个变量提供的信息用于降低另一变量的不确定性程度[41],计算公式为

$$H(X)=-\sum_{a=1}^{n}p(x_a)\log_2 p(x_a) \tag{1}$$

$$H(X,Y) = -\sum_{a=1}^{n}\sum_{b=1}^{m} p(x_a,y_b)\log_2 p(x_a,y_b) \quad (2)$$

$$H(X_{t-\tau} > Y_t) = H(X_{t-\tau},Y_{t-\tau}) + H(Y_t,Y_{t-\tau}) - H(Y_{t-\tau}) - H(X_{t-\tau},Y_{t-\tau},Y_t) \quad (3)$$

式中:$H(X)$ 为关联要素 X 的信息熵;$H(X,Y)$ 关联要素 X、Y 的联合信息熵;$H(X>Y)$ 为关联要素 X 对关联要素 Y 的传递熵;n、m 分别为关联要素 X、Y 的序列划分的区间数量;x_a、y_b 分别为关联要素 X 的第 a 个区间和关联要素 Y 的第 b 个区间;$p(x_a)$ 为关联要素 X 在区间 x_a 的概率;$p(x_a,y_b)$ 为关联要素 X 在区间 x_a 且关联要素 Y 在区间 y_b 的联合概率;$X_{t-\tau}$、$Y_{t-\tau}$ 为关联要素 X 和 Y 在 $t-\tau$ 时刻的时间序列。通过整理可得:

$$H(X_{t-\tau_1} > Y_t) = -\sum_{x_{t-\tau_1}\in X_{t-\tau_1}}\sum_{y_{t-\tau_2}\in Y_{t-\tau_2}}\sum_{y\in Y_t} p(x_{t-\tau_1},y_{t-\tau_2},y_t)\cdot \log_2\{p(x_{t-\tau_1},y_{t-\tau_2})p(y_{t-\tau_2},y_t)/[p(y_t)p(x_{t-\tau_1},y_{t-\tau_2},y_t)]\} \quad (4)$$

此时,通过比较 $H(X_{t-\tau}>Y_t)$ 和 $H(Y_{t-\tau}>X_t)$ 的信息传递熵数值来判定 X 和 Y 的因果关系:若 $H(X_{t-\tau}>Y_t)>H(Y_{t-\tau}>X_t)$,则认为存在因果关系 $X\rightarrow Y$;若 $H(Y_{t-\tau}>X_t)>H(X_{t-\tau}>Y_t)$,则有因果关系 $Y\rightarrow X$;若二者相等,则认为 X 和 Y 不存在因果关系。

2.4 复杂网络指标

2.4.1 节点指标

a. 度。度指所有与目标节点相连的节点总数,用以描述变量之间的关联程度。入度是指从其他节点进入该节点的边的总数,其值越大,表明该节点被其他节点影响的程度越大;出度是指从该节点进入其他节点的边的总数,其值越大,表明该节点对其他节点的影响程度较大;度中心性是节点度的标准化指标,其值越大,表示该节点与其他节点的关联程度较大,更易参与复杂网络的风险传播过程。计算公式为

$$K_i = K_{\mathrm{in}i} + K_{\mathrm{out}i} \quad (5)$$

$$C_{\mathrm{d}i} = K_i/(N-1) \quad (6)$$

式中:K_i 为节点 i 的度;$K_{\mathrm{in}i}$、$K_{\mathrm{out}i}$ 分别为节点 i 的入度和出度;N 为节点总数;$C_{\mathrm{d}i}$ 为节点 i 的度中心性。

b. 介数中心性。介数中心性是描述目标节点作为其他节点连接中介的指标,其值越大,表示节点在网络中起"桥梁"的作用越大,更易承担较多的风险传播过程。计算公式为

$$C_{\mathrm{b}i} = \sum_{i\neq j\neq k}^{N} \sigma_{jki}/\sigma_{jk} \quad (7)$$

式中:$C_{\mathrm{b}i}$ 为节点的介数中心性;σ_{jk} 为从节点 j 到节点 k 的最短路径数目;σ_{jki} 为从节点 j 到节点 k 的所有链路中,经过节点 i 的最短路径数目。其中,不同节点间的路径可能有多条,最短路径指连接两节点的最短的一条或几条路径;在最短路径中,边的数量称为两节点之间的距离。

c. 接近中心性。接近中心性是反映目标节点与其他节点的距离的指标,其值越大,表示节点越接近网络的中心位置,更易参与网络的风险传播。计算公式为

$$C_{ci} = (N-1)/\sum_{j=1}^{N} d_{ij} \quad (8)$$

式中:C_{ci} 为节点 i 的接近中心性;d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短距离。

若某些节点不可达,则其接近中心性的计算公式为

$$C_{ci} = [N_{ai}/(N-1)]^2/S_i \quad (9)$$

式中:N_{ai} 为节点 i 到达的节点数;S_i 为节点 i 到其他节点的最短路径长度总和。

2.4.2 边指标

边介数是表征边在网络中作为其他节点中介的指标,即两节点间最短路径占所有最短路径的比例,其值越大,表示该边越重要,承担了更多的风险传播过程。计算公式为

$$C_{\mathrm{bev}} = \sum_{i,j\in V_G} \sigma_{ijv}/\sigma_{ij} \quad (10)$$

式中:C_{bev} 为边 v 的边介数;V_G 为网络 G 下的节点集合;σ_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的最短路径数目;σ_{ijv} 为从节点 i 连接至节点 j,经过边 v 的最短路径数目。

2.4.3 网络指标

a. 特征路径长度。特征路径长度为网络中任意节点间距离的平均值,当节点 i 和节点 j 之间不存在路径时可将其距离视为较大的值(本文将该值记为网络节点数),特征路径长度反映了网络中的信息传递效率。

b. 网络密度。网络密度用于刻画网络的节点密集程度,其值越大,表示节点关系越复杂。计算公式为

$$D = M/[N(N-1)] \quad (11)$$

式中:D 为网络密度;M 为网络中边的总数。

c. 聚集系数。聚集系数是节点 i 实际相连的边数与网络中最大相连边数的比值,反映了节点 i 作为聚类中心的程度。复杂网络的聚集系数是所有节点聚集系数的平均值,其值越大,表示网络越紧密、发生系统性风险的概率越大。计算公式为

$$C = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} 2w_i/[K_i(K_i-1)] \quad (12)$$

式中:C 为聚集系数;K_i 为节点 i 的聚类度,若 K_i 为 0 或 1,则节点 i 的聚集系数 C_i 为 0;w_i 为与节点 i

相连的所有节点中,不同节点相互连接的边数。当 $C=1$ 时说明网络中所有节点都相连。

d. 网络效率。网络效率反映链路或网络遭受破坏时系统的抗毁性,其值越大,表示网络中节点之间传播距离较近、风险可达性较高。两节点间的效率通常采用节点距离的倒数计算,复杂网络的效率是所有节点效率的平均值。计算公式为

$$E = \sum_{i \neq j} 2d_{ij}^{-1} / [N(N-1)] \tag{13}$$

式中 E 为网络效率。

e. 小世界系数。小世界系数反映网络是否具有小世界网络特征,即网络中的大部分节点并不直接相连,但可经过少数节点即可到达,其值若大于1,则具有小世界网络特性。计算公式为

$$W_G = (C_G/C_R)/(L_G/L_R) \tag{14}$$

式中:W_G、C_G、L_G 分别为网络 G 的小世界系数、聚集系数和特征路径长度;C_R、L_R 分别为与网络 G 相同规模的随机网络 R 的聚集系数和特征路径长度。

f. 模块度。模块度反映了网络社区结构强度[42],其值越大,表明网络社区划分效果越好,即模块内部连接紧密、模块间连接稀疏。计算公式为

$$Q_G = \frac{1}{2M} \sum_{i,j \in V_G} [A_{ij} - K_i K_j/(2M)]\delta_{ij} \tag{15}$$

式中:Q_G 为网络 G 的模块度,取值范围为 $-0.5 \sim < 1$;A_{ij} 为两节点的关联关系,当网络中存在 $i \rightarrow j$ 时,A_{ij} 为1,否则 A_{ij} 为0;δ_{ij} 表示两节点是否在同一社区,若在同一社区,则 δ_{ij} 为1,否则 δ_{ij} 为0。

3 结果与分析

首先采取 PCMCI 因果诊断方法识别黄河流域7个分区中不同关联要素的因果关系,计算比较不同要素之间的传递熵,从而绘制各分区关联要素的传递熵关系,如图4所示。进而得到各分区对应的子系统网络,并通过水力联系将所有子系统合并为黄河流域水资源系统风险多链路网络,如图5所示,其中,红色节点表示断面流量关联要素,分别对应图中唐乃亥站、兰州站、头道拐站、龙门站、三门峡站和花园口站的断面流量,用于连接各分区对应的子系统网络,绿色节点为其他关联要素。

3.1 节点特征分析

表2为各子系统关联要素的节点特征指标,其中指标值为网络中所有分区对应关联要素的平均值。由表2可见,城镇人口、断面流量、第三产业增加值等要素的入度较高,表明受其他关联要素影响较大;断面流量、草地面积、有效灌溉面积等要素的出度较高,表明对其他关联要素的影响较大。在网

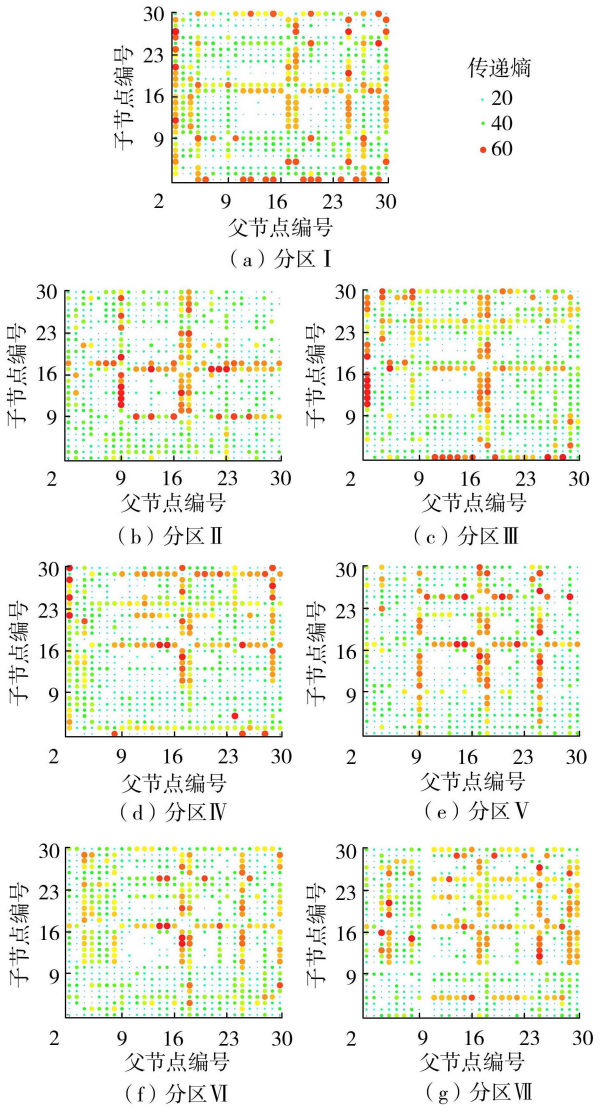


图4 各分区内要素间传递熵关系

Fig. 4 Transfer entropy relationships between elements within subdivisions

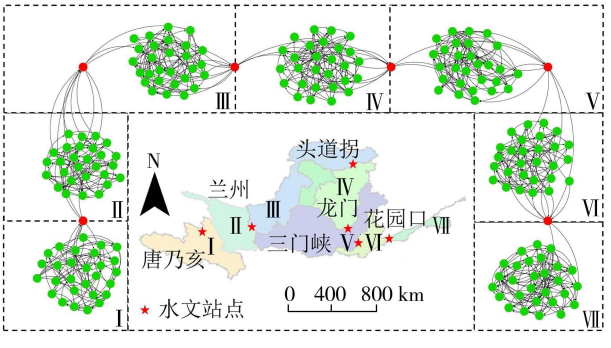


图5 黄河流域水资源系统风险多链路网络

Fig. 5 Risky multi-link networks for water resources systems in the Yellow River Basin

络构建过程中,将断面流量、地表水资源量、地下水资源量、总降水量作为水力联系纽带,实现不同分区间子系统的有机连接,因此其介数中心性和接近中心性较高;温度、第三产业增加值、草地面积等要素

表 2　各子系统关联要素的节点特征指标

Table 2　Node characteristic indexes of associated elements of each subsystem

关联要素	入度	出度	度中心性	介数中心性	接近中心性/10^{-3}	关联要素	入度	出度	度中心性	介数中心性	接近中心性/10^{-3}
上游断面入流量	4.000	6.333	0.051	7394.124	0.748	城镇人口	4.571	3.143	0.038	241.435	0.403
气压	2.000	2.000	0.020	144.124	0.321	乡村人口	3.000	3.857	0.034	307.972	0.469
温度	3.714	3.571	0.036	494.579	0.484	人口自然增长率	2.429	3.714	0.030	241.722	0.374
相对湿度	2.571	2.429	0.025	128.139	0.420	人均可支配收入	3.143	2.571	0.028	246.080	0.446
平均风速	3.571	1.857	0.027	336.961	0.312	供水生产能力	2.714	1.857	0.023	200.620	0.416
总降水量	2.429	3.286	0.028	377.672	0.527	供水管道长度	2.714	3.714	0.032	387.618	0.474
地表水资源量	3.429	3.571	0.035	899.021	0.467	农业机械总动力	3.571	2.429	0.030	252.456	0.394
地下水资源量	3.429	3.143	0.033	1203.307	0.482	有效灌溉面积	3.571	4.286	0.039	332.016	0.447
供用水量	3.857	3.286	0.035	258.609	0.455	农作物总播种面积	2.000	2.857	0.024	209.273	0.449
下游断面出流量	4.000	6.333	0.051	7394.124	0.748	草地面积占比	2.714	4.429	0.035	484.267	0.433
地区生产总值	3.000	3.143	0.030	219.277	0.369	森林面积占比	3.000	2.857	0.029	356.487	0.377
第一产业增加值	2.857	2.286	0.025	370.945	0.368	建筑用地面积占比	3.571	3.714	0.036	261.221	0.443
第二产业增加值	3.714	3.000	0.033	233.085	0.428	水域面积占比	3.000	2.571	0.028	229.362	0.439
第三产业增加值	4.286	3.714	0.040	512.494	0.471	裸地面积占比	3.143	3.286	0.032	249.609	0.349
居民消费	2.857	2.714	0.028	135.132	0.441	生境质量指数	3.143	2.714	0.029	188.126	0.436

的介数中心性较高，表明这些节点作为传播路径的次数较多，较大可能起风险“桥梁”作用；温度、第三产业增加值、供水管道长度等要素则是网络中处于“中心”的节点，更易参与关联要素的相互反馈作用。进一步对中心性指标归一化处理，利用层次分析法评估关联要素的综合中心性，计算公式为

$$l_i = 0.339C'_{di} + 0.529C'_{bi} + 0.132C'_{ci} \quad (16)$$

式中：l_i 为关联要素 i 的中心性综合值；C'_{di}、C'_{bi}、C'_{ci} 分别为要素 i 的度中心性、介数中心性和接近中心性对应的归一化值。

当关联要素中心性综合值较大时，表明关联要素在水资源系统中较重要。图 6 为关联要素中心性评估结果，可见对黄河流域水资源系统而言，在考虑水力联系时，断面流量、地表水资源量、地下水资源量、总降水量等要素与水资源系统密切相关，尤为重要；在不考虑水力联系时，温度、第三产业增加值、有效灌溉面积等要素较为重要。分析其原因，温度是影响水循环（如区域蒸发量）的关键要素，在很大程度上决定了水资源系统的输入量（降水量），其重要性在气候变化背景下愈加凸显；第三产业增加值与地区经济发展水平密切相关，近年来黄河流域社会经济得到快速发展，增大了城乡用水量；有效灌溉面积反映了农作物种植规模，土地管理政策等措施为黄河流域农业发展提供了有利条件，影响了农业用水量。

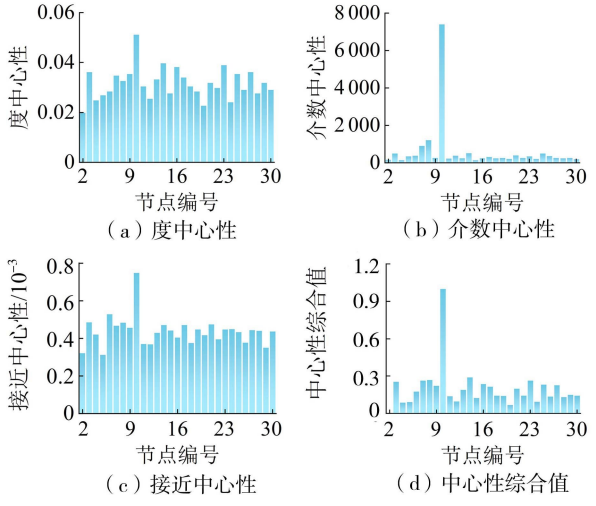


图 6　关联要素中心性评估结果

Fig. 6　Assessment results of centrality of associated elements

图 7 为各分区关联要素的中心性综合值。由图 7 可见，在气象子系统中，除下游地区温度的中心性较高，上下游地区差异不明显。在水文子系统中，中游地区承上启下，因此断面流量、地表水资源量等关联要素中心性较高。在社会经济子系统，大部分地区居民消费、城镇人口和乡村人口占据了较高的中心性。在生态子系统中，上游地区的草地面积占比中心性较高，需要加强对典型水源涵养区草地的治理；中游地区森林及建筑用地面积较为重要，需要巩固退耕还林等生态治理成效，避免水土流失和环境污染；下游地区侧重于森林及草地面积，需要加强

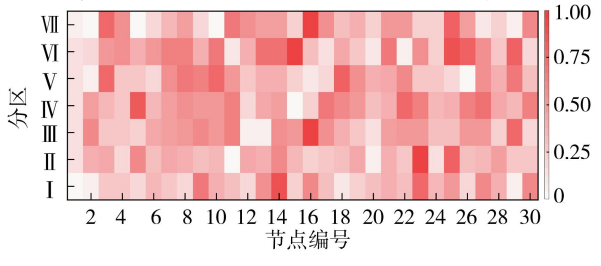


图 7　各分区关联要素的中心性综合值

Fig. 7　Centrality composite values of associated elements in subregions

森林保护、植被恢复，推进山水林田湖草沙一体化保护和系统治理。

3.2 链路特征分析

按节点指标的计算方法，除水力联系关联要素外，各子系统的节点指标与黄河流域的指标相似，因此主要分析各分区网络中的边的指标。图 7 仅能展示关联要素在各分区的特征，但因空间拓扑划分和水力联系，难以识别黄河流域水资源系统的重要链路。因此，将各分区相同的关联要素进行合并、相同边出现的次数作为权重，绘制了分区水资源系统的加权复杂网络，如图 8 所示，图中节点颜色越偏向红色，表示节点度越大，越偏向蓝色表示节点度越小。考虑到边在各分区水资源系统出现的频数可以有效反映其在网络中的重要性，因此将边的出现频数与边介数的乘积作为边权重，计算得到复杂网络的加权边介数指标，如图 9 所示。由图 9 可见，除编号 1（上游断面入流量→地表水资源量）、编号 2（上游断面入流量→地下水资源量）、编号 3（上游断面入流量→下游断面出流量）和编号 65（总降水量→下游断面出流量）的边为水力联系边外，边介数较大的边为有编号 76（地表水资源量→温度）、编号 196（第三产业增加值→人口自然增长率）、编号 325（有效灌溉面积→温度）等。分析其原因，上游断面入流量是下游水资源子系统的关键输入，直接影响区域水资源量和出流量；地表水资源量的变化会影响陆面、水面面积，灌溉和农作物种植亦会改变下垫面条件，进而改变区域蒸散发、水汽含量和地面光照反射等，从而对温度造成反馈效用；服务业等第三产业代表了经济发展程度，会影响居民收入水平、消费意愿，进而影响整体生育意愿和人口增长程度。此外，较高的边介数也表明水资源系统风险更易经过重要链路进行传播。

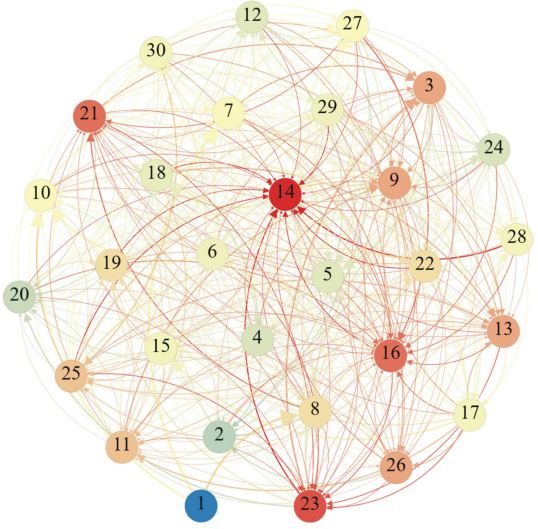


图 8 分区水资源系统加权复杂网络

Fig. 8 Weighted complex network for water resources system of subregions

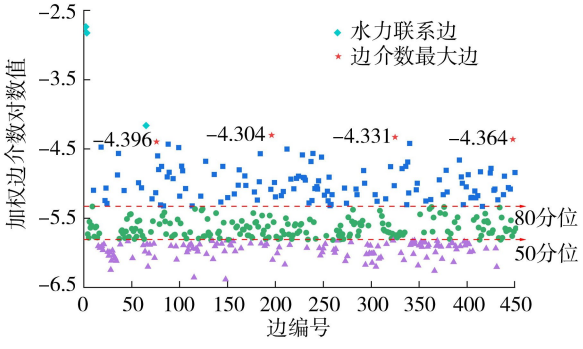


图 9 复杂网络加权边介数指标

Fig. 9 Weighted edge mediator metrics for complex networks

3.3 网络特征分析

表 3 为黄河流域及各分区水资源系统风险多链路网络特征指标。由表 3 可见，黄河流域水资源系统风险多链路网络共有 202 个节点和 640 条边，网络密度为 0.015 7，复杂度较低，说明网络的节点关系较稀少，发生风险传递时节点之间的相互影响较少；各分区水资源系统的网络密度大致相同且高于黄河流域，表明在各分区子系统内的风险传递快于黄河流域。进一步，随机生成 100 个节点和边数量均与本文网络相同的复杂网络（记为随机网络），取其指标平均值，表 4 为本文网络与随机网络特征指标对比。由表 4 可见，本文网络多个分区网络聚集系数大于随机网络，特征路径长度均小于随机网络。在此基础上，计算得到黄河流域及分区Ⅰ～Ⅶ的小世界系数分别为 56.180 0、5.465 0、3.763 2、1.665 6、1.461 2、0.892 6、2.584 1、2.692 8。可见，除分区Ⅴ外，其他分区及黄河流域系统的聚集系数较大，小世界系数均大于 1，满足小世界网络特性，即网络中任意两节点可通过较少的中间节点实现连接，网络具有较高的信息传递效应，表明水资源系统具有高聚集、高耦合特征以及较高的网络传播效率和风险可达性，即不同关联要素之间更易发生风险传播，同时增大了系统整体风险。此外，黄河流域水资源系统的模块度为 0.830 1，接近 1，符合社区结构特性，表明各分区关联要素具有共同承担风险的群体行为，同时网络中存在多个内部聚集度较高的子网络，但不同子网络之间具有松散联系。因此，黄河流域水资源系统具有多要素、多链路、多子集等特征，部分关联要素易在分区内完成风险演化，而后会拓展至其他分区，甚至导致系统崩溃与瘫痪，需要从整体安全出发及时处理风险隐患。

表 3　黄河流域及各分区水资源系统风险多链路网络特征指标

Table 3　Characteristic indexes of risky multi-link networks of water resources systems in the Yellow River Basin and subregions

区域	节点数	边数	网络密度	聚集系数	网络效率	特征路径长度
黄河流域	202	640	0.015 7	0.098 5	0.170 6	3.243 0
分区Ⅰ	29	81	0.099 8	0.120 9	0.386 4	2.225 3
分区Ⅱ	30	86	0.098 8	0.132 0	0.441 5	2.606 9
分区Ⅲ	30	91	0.104 6	0.067 6	0.493 5	2.512 6
分区Ⅳ	30	99	0.113 8	0.089 6	0.542 9	2.857 5
分区Ⅴ	30	89	0.102 3	0.038 0	0.490 7	2.979 3
分区Ⅵ	30	94	0.108 0	0.106 9	0.494 1	2.281 6
分区Ⅶ	29	100	0.123 2	0.137 6	0.522 3	2.275 9

表 4　本文网络与随机网络特征指标对比

Table 4　Comparison of charateristic indexes between this paper network and random network

区域	本文网络		随机网络	
	聚集系数	特征路径长度	聚集系数	特征路径长度
黄河流域	0.098 5	3.243 0	0.012 7	23.490 7
分区Ⅰ	0.120 9	2.225 3	0.068 7	6.910 5
分区Ⅱ	0.132 0	2.606 9	0.081 0	6.020 0
分区Ⅲ	0.067 6	2.512 6	0.083 7	5.181 6
分区Ⅳ	0.089 6	2.857 5	0.102 3	4.767 2
分区Ⅴ	0.038 0	2.979 3	0.082 1	5.745 3
分区Ⅵ	0.106 9	2.281 6	0.089 0	4.908 7
分区Ⅶ	0.137 6	2.275 9	0.099 5	4.431 6

4　结　论

a. 统筹黄河流域气象、水文、社会经济、生态等复杂系统多维关联要素,运用 PCMCI 因果诊断方法识别了关联要素的因果链路关系,运用传递熵对冗余链路进行精简,构建了复杂流域水资源系统风险多链路网络,解析了黄河流域水资源系统风险多链路网络特征。

b. 黄河流域水资源系统风险多链路网络中,温度、第三产业增加值、有效灌溉面积等要素较为重要,城镇人口、断面流量、第三产业增加值等要素易受其他要素影响,断面流量、草地面积占比、有效灌溉面积等要素具有较强的辐射影响,水力联系要素以及温度、第三产业增加值、草地面积占比等较大可能担任风险传播“桥梁”,温度、第三产业增加值、供水管道长度等要素在网络中影响程度较大。

c. 黄河流域以及除龙门-三门峡分区(分区Ⅴ)外的分区水资源系统具有高聚集性和高耦合性,各分区的节点风险可达性和网络密度均高于黄河流域;黄河流域水资源系统满足小世界特征,即网络中存在较高的信息传递效应和共同承担风险的群体行为,而且第三产业增加值→人口自然增长率等链路在网络中也有较大可能充当风险传播“桥梁”。

参考文献:

[1] BABEL M S,SHINDE V R,SHARMA D,et al. Measuring water security:a vital step for climate change adaptation [J]. Environmental Research,2020,185:109400.

[2] 陈莉,张安安. 黄河流域水资源与社会经济协同评价及影响因素分析[J]. 水资源保护,2023,39(2):1-8. (CHEN Li, ZHANG An’an. Synergistic evaluation of water resources and social economy in the Yellow River Basin and analysis of influencing factors [J]. Water Resources Protection,2023,39(2):1-8. (in Chinese))

[3] 普拉提·莫合塔尔,祖拜代·木依布拉,倪明霞,等. 南疆于田绿洲水资源系统演变的生态网络分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2022,30(5):1138-1151. (MUHTAR Polat,MUYIBUL Zubaida,NI Mingxia,et al. Ecological network analysis of water resources system evolution in Yutian Oasis of Southern Xinjiang[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2022,30(5):1138-1151. (in Chinese))

[4] 江恩慧,王远见,田世民,等. 流域系统科学初探[J]. 水利学报,2020,51(9):1026-1037. (JIANG Enhui,WANG Yuanjian,TIAN Shimin,et al. Exploration of watershed system science [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(9):1026-1037. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 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))

[7] GRADIYANTO Fernaldi, PARMANTORO Priyo Nugroho, SUHARYANT O. Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan, Indonesia [J]. Water Science and Engineering, 2025,18(1): 69-77.
[8] WEI Jia, WANG Weiguang, HUANG Yin, et al. Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin[J]. Water Science and Engineering, 2021,14(1): 1-16.
[9] REN Liliang, YUAN Shanshui, YANG Xiaoli, et al. Initiatives to clarify mechanisms of hydrological evolution in human-influenced Yellow River Basin [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2): 117-121.
[10] 左其亭. 人水关系学的基本方程及模型构建[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 1-12. (ZUO Qiting. Basic equations and model construction of human-water relationship discipline [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 1-12. (in Chinese))
[11] ZHENG Chuanxing, YANG Weichao, JIANG Xuelian, et al. A novel integrated urban flood risk assessment approach coupling GeoDetector-Dematel and clustering method[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 354:120308.
[12] ULLAH S, YOU Q L, SACHINDRA D A, et al. Spatiotemporal changes in global aridity in terms of multiple aridity indices: an assessment based on the CRU data[J]. Atmospheric Research, 2022, 268:105998.
[13] KHILWANI N, TIWARI M K, SABUNCUOGLU I. Hybrid Petri-nets for modelling and performance evaluation of supply chains [J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(15):4627-4656.
[14] XU Yang, ZHANG Xuan, WANG Xiao, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579:124147.
[15] 张璇, 许杨, 郝芳华, 等. 滦河流域气象干旱向水文干旱传播特征及风险分析[J]. 水利学报, 2022, 53(2):165-175. (ZHANG Xuan, XU Yang, HAO Fanghua, et al. Characteristics and risk analysis of drought propagation from meteorological drought to hydrological drought in Luanhe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(2):165-175. (in Chinese))
[16] 肖盛燮. 生态环境灾变链式理论原创结构梗概[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2593-2602. (XIAO Shengxie. Originality structure sketch on chain-styled theory of disaster in eco-environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1):2593-2602. (in Chinese))
[17] 刘文方, 肖盛燮, 隋严春, 等. 自然灾害链及其断链减灾模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2675-2681. (LIU Wenfang, XIAO Shengxie, SUI Yanchun, et al. Analysis of natural disaster chain and chain-cutting disaster mitigation mode [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup1):2675-2681. (in Chinese))
[18] QIN Tianling, FENG Jianming, LI Chenhao, et al. Risk assessment and configuration of water and land resources system network in the Huang-Huai-Hai watershed [J]. Ecological Indicators, 2023, 154:110712.
[19] WYRWOLL P R, QUENTIN GRAFTON R, DANIELL K A, et al. Decision-making for systemic water risks: insights from a participatory risk assessment process in Vietnam [J]. Earth's Future, 2018, 6(3):543-564.
[20] LU Jie, QIN Tianling, YAN Denghua, et al. Response of vegetation to drought in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers based on causal analysis[J]. Remote Sensing, 2024, 16(4):630.
[21] 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))
[22] 王煜, 彭少明, 郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 614-624. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5):614-624. (in Chinese))
[23] 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.
[24] 左其亭, 吴泽宁, 赵伟. 水资源系统中的不确定性及风险分析方法[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 116-121. (ZUO Qiting, WU Zening, ZHAO Wei. Uncertainties in water resources system and risk analysis method[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(2):116-121. (in Chinese))
[25] 覃璇, 李仲学, 赵怡晴. 尾矿库风险演化复杂网络模型及关键隐患分析[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(6): 1648-1653. (QIN Xuan, LI Zhongxue, ZHAO Yiqing. A complex network model for analyzing risks and major hazards of tailing impoundments [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(6):1648-1653. (in Chinese))
[26] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45

(1):1-9. (in Chinese))
[27] 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))
[28] 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(2): 31-39. (in Chinese))
[29] 唱彤,郦建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护,2020,36(1):44-51. (CHANG Tong,LI Jianqiang,JIN Juliang,et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function [J]. Water Resources Protection,2020,36(1):44-51. (in Chinese))
[30] 魏亚斌,方泽华,陶辉. 中巴经济走廊气象水文灾害综合风险评估[J]. 农业工程学报,2023,39(17):107-115. (WEI Yabin,FANG Zehua,TAO Hui. Integrated risk assessment of meteorological and hydrological disasters in China-Pakistan Economic Corridor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39 (17):107-115. (in Chinese))
[31] 姜秋香,周智美,王子龙,等. 基于水土资源耦合的水资源短缺风险评价及优化[J]. 农业工程学报,2017,33(12):136-143. (JIANG Qiuxiang,ZHOU Zhimei,WANG Zilong,et al. Risk assessment and optimization of water resources shortage based on water and land resources coupling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (12): 136-143. (in Chinese))
[32] 董洁芳,李德山,张亮林. 中国农业用水效率区域差异与空间交互机理研究[J]. 水生态学杂志,2023,44(3): 26-34. (DONG Jiefang, LI Deshan, ZHANG Lianglin. Regional disparities and spatial interactions of agricultural water use efficiency in China[J]. Journal of Hydroecology,2023,44(3):26-34. (in Chinese))
[33] 王春艳,张景翔,龙洁,等. 基于面板数据回归模型的家庭水-能消费时空特征与影响因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 614-626. (WANG Chunyan,ZHANG Jingxiang,LONG Jie,et al. Panel data regression model for identifying the spatiotemporal characteristics and key factors influencing household water-energy consumption [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022,62(3):614-626. (in Chinese))
[34] HUANG Tianming, PANG Zhonghe, YANG Shuo, et al. Impact of afforestation on atmospheric recharge to groundwater in a semiarid Area [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125 (9): e2019JD032185.
[35] 王菲,陈敏,曹永强,等. 黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):31-37. (WANG Fei, CHEN Min, CAO Yongqiang, et al. Network characteristics of water-land-energy-carbon correlation system of nine provinces along the Yellow River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):31-37. (in Chinese))
[36] 徐翔宇,郦建强,金菊良,等. 基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1): 1-9. (XU Xiangyu, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(1):1-9. (in Chinese))
[37] 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.
[38] SPIRTES P,GLYMOUR C. An algorithm for fast recovery of sparse causal graphs [J]. Social Science Computer Review,1991,9(1):62-72.
[39] CIMINI G, SQUARTINI T, SARACCO F, et al. The statistical physics of real-world networks [J]. Nature Reviews Physics,2019,1(1):58-71.
[40] CHEN Zhenhao, WU Jiajing, XIA Yongxiang, et al. Robustness of interdependent power grids and communication networks: a complex network perspective [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,2018,65(1):115-119.
[41] 冯双,杨浩,崔昊,等. 基于 Copula 传递熵的设备级和网络级宽频振荡传播路径分析及振荡源定位方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 4996-5010. (FENG Shuang,YANG Hao,CUI Hao,et al. Device and network level wideband oscillations propagation path analysis and source localization method based on copula transfer entropy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(16):4996-5010. (in Chinese))
[42] NEWMAN M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks [J]. Physical Review E, 2004, 69 (6):066133.

(收稿日期:2024-10-29 编辑:王芳)