

长江黄河跨流域多线路水网韧性评估

范志鹏¹, 李云玲², 马睿², 付湘¹

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要:为评估长江黄河跨流域水网运行的可靠性与整体韧性,构建了长江黄河跨流域水网结点概化图,基于复杂网络理论,采用度中心性、介数中心性和 PageRank 值作为评估指标,利用 D-S 证据理论融合多源信息的优势,对跨流域多线路水网结点的重要性进行了评估,并基于网络效率和最大连通子图构建了跨流域多线路水网韧性评估模型,对长江黄河跨流域水网韧性进行了评估。结果表明:长江黄河跨流域水网在结点“失效”数量增加时,出现了结点簇孤立和连通性下降的现象;当结点“失效”数量占比为 6.5%时,水网韧性约为 0.6,当结点“失效”数量占比为 10.9%时,度中心性算法得到的水网韧性最低,不足 0.4;维持 47.8%重要结点正常运行,水网韧性将提高至 0.83。

关键词:复杂网络理论;D-S 证据理论;水网韧性;跨流域水网;长江;黄河

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)01-0027-08

Resilience evaluation for the Yangtze River and Yellow River inter-basin multi-route water network//FAN Zhipeng¹, LI Yunling², MA Rui², FU Xiang¹ (1. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 2. *General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China*)

Abstract: To evaluate the reliability and overall resilience of the Yangtze River and Yellow River inter-basin water network, a generalized node diagram of the inter-basin multi-route water network was established. Based on the complex network theory, a comprehensive assessment of node importance in the inter-basin multi-route water network was conducted by taking the advantages of D-S evidence theory in fusing multi-source information and integrating the indexes of the degree centrality, betweenness centrality, and PageRank value. Additionally, a resilience evaluation model for the inter-basin multi-route water network was constructed based on network efficiency and the largest connected subgraph, and the resilience of the Yangtze River and Yellow River inter-basin water network was evaluated. The results indicate that as the number of “failed” nodes increases, phenomena such as clustering of isolated nodes and decreased connectivity occur. Specifically, when the failure rate of nodes reaches 6.5%, the network’s resilience drops to 0.6, and when this rate increases to 10.9%, the resilience obtained by the degree centrality algorithm falls below 0.4. Notably, maintaining the normal operation of the top 47.8% most important nodes can elevate the network’s resilience to 0.83.

Key words: complex network theory; D-S evidence theory; water network resilience; inter-basin water network; the Yangtze River; the Yellow River

水资源空间不均导致了水资源供需矛盾突出、生态环境承载能力不足等问题,对我国的可持续发展构成了重大挑战^[1-2]。国务院于 2023 年 5 月发布了《国家水网建设规划纲要》,旨在到 2035 年建立一个基本完善的国家水网总体架构,统筹解决水资源、水生态、水环境、水灾害问题。长江黄河跨流域水网是以长江、黄河为基础,通过跨流域调水工程等多元化基础设施构建而成的流域多线路巨型水网,其水资源管理与调配对整个国家水资源格局具有重

要影响^[3]。

全球频繁发生极端气候事件及管理风险可能导致水网结点“失效”^[4-5],准确识别出具有较大影响力的关键结点至关重要。复杂网络理论从数量巨大的结点和结点之间错综复杂关系的角度出发,研究网络中结点之间的复杂关系^[6-7]。针对复杂网络关键结点的识别方法主要有基于结点邻近、基于特征向量和基于路径的算法。基于结点邻近的算法中,度中心性算法是一种较为直观的方式^[8-9],其认为结

基金项目:国家重点研发计划重点项目(2022YFC3202300);国家自然科学基金项目(U21A2002)

作者简介:范志鹏(1999—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:fzpengg@whu.edu.cn

通信作者:付湘(1971—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:xfu@whu.edu.cn

点的重要性与“邻居”的数量有关;基于特征向量的算法认为结点的重要程度由“邻居”结点信息量决定,较为经典的是 Google 公司针对网页排序问题提出的 PageRank 算法^[10];基于路径的算法中,介数中心性算法是较为常用的算法,其主要判断依据是穿过一个结点的最短路径数量越多,该结点就越重要^[11]。复杂网络理论在水网中的应用已经取得了一定的研究进展。如李发文等^[12-13]采用复杂网络理论对水网可达性和连通性进行评估,实现了复杂网络在大尺度区域的应用;杨元媛等^[14]在长距离输水系统中从结点的局部属性、全局属性和位置属性 3 个方面筛选指标,对结点重要性进行综合评估,发现 34% 的结点“失效”后会导致水网迅速崩溃;李锋等^[15]针对不同灾害情形下网络破坏对水网整体韧性的影响进行分析,结果表明,水网在蓄意攻击下,结点“失效”50% 左右就会导致系统崩溃。

目前复杂网络关键结点识别研究侧重于利用单一指标评估其结点重要性,无法全面准确地描述结点重要性,对水网韧性大多局限于单一流域内的韧性研究,对跨流域水网关联的韧性研究相对薄弱。本文通过构建长江黄河跨流域水网结点概化图,运用 D-S (Dempster-Shafer) 证据理论与复杂网络理论,综合评估长江黄河跨流域水网的结点重要性和水网韧性,为跨流域水网韧性评价提供参考。

1 研究方法

1.1 跨流域多线路水网概化

本文基于复杂网络理论对跨流域多线路水网进行概化。《国家水网建设规划纲要》要求构建国家水网的“纲目结”,综合提升防灾和配置能力。其中,“纲”代表大江大河大湖自然水系、重大引调水工程和骨干输排水通道,可视为复杂网络中的“线”;“目”则指区域性河湖水系连通工程和供水渠道,考虑到本文涉及长江、黄河两个流域,研究范围尺度较大,为简化网络结构,更加突出重要的连通性和传输功能,仅考虑较为重要的“目”,同样视为复杂网络中的“线”;“结”则代表具有控制性地位和功能的水资源调蓄工程,视为复杂网络中的“结”。

复杂网络由大量结点及其连边组成,以 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示所有结点的集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_l\}$ 表示所有连边的集合^[16]。采用邻接矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 作为复杂网络的概化方式,若点 v_i 与点 v_j 邻接,则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。

1.2 跨流域多线路水网结点重要性评估

1.2.1 结点重要性评价指标

考虑到基于单个属性识别算法存在不足,如介

数中心性算法无法评估不在最短路径的结点,因此,本文采用吴果等^[17]提出的基于 D-S 证据理论的多指标综合复杂网络结点重要性评估方法,对跨流域多线路水网结点重要性进行评估。选取度中心性、介数中心性、PageRank 值作为评价指标。度中心性衡量每个结点直接连接的数量,更加重视结点的度数;介数中心性则更注重结点在网络中的中介作用;PageRank 算法则考虑了结点的链接质量和结点之间的传播关系。D-S 证据理论从整体网络视角出发,能够从不同角度综合评估每个结点在网络中的重要性,不仅反映结点的局部连接特性(如度中心性所反映的直接连接性),也可体现结点在整个网络中的战略位置(如介数中心性所体现的中介作用)和影响力(如 PageRank 值反映的网络影响力)。

a. 度中心性。复杂网络中,结点的“度”代表结点连边的数量,连边越多则结点的“度”越大,该结点也越重要。结点的“度”计算公式为

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

式中 D_i 为第 i 个结点的“度”。

b. 介数中心性。结点介数是用来衡量网络结点重要性的指标,它反映了结点在网络中对信息传递的程度。结点介数定义为网络中通过该结点的最短路径数的比例,计算公式为

$$B_i = \sum_{i \neq j \neq g} N_{jgi} / N_{jg} \quad (2)$$

式中: B_i 为第 i 个结点的介数; N_{jgi} 为结点 j 和 g 之间经过结点 i 的最短路径数; N_{jg} 为结点 j 和 g 之间最短路径数。

c. PageRank 值。PageRank 算法基于网络结点之间的链接关系评估结点的影响力,反映“结”的影响力。PageRank 值较高的结点被视为在网络中有更大的影响力,其链接会对其他结点有更大的影响。PageRank 值计算公式为

$$P_i = (1 - \varepsilon) / n + \varepsilon \sum_{j \in N_{li}} P_j / N_{oi} \quad (3)$$

式中: P_i 为结点 i 的 PageRank 值; ε 为阻尼系数,取值为 0.85^[18]; N_{li} 为结点 i 的入链结点集; N_{oi} 为结点 i 的出链结点数。

1.2.2 基于 D-S 证据理论的多指标评估

与结点 i 对应的评价指标集可表示为

$$I_i = \{D_i, B_i, P_i\} \quad (4)$$

考虑到各指标量级不一致,为避免采用 D-S 证据理论融合计算时误差较大,需对各指标进行标准化处理。将标准化处理后的指标集记为

$$I'_i = \{D'_i, B'_i, P'_i\} = \{I_{i1}, I_{i2}, I_{i3}\} \quad (5)$$

根据 D-S 证据理论,将网络中结点 i 的第 j 个指

标的样本空间记为

$$\Theta = (H_{ij}, h_{ij}, \bar{h}_{ij}) \quad (6)$$

式中: H_{ij} 为结点 i 的第 j 个指标的不确定程度; h_{ij} 为结点 i 的第 j 个指标的重要性支持程度; $\bar{h}_{ij}$ 为结点 i 的第 j 个指标的不重要性支持程度。

基于 D-S 证据理论的结点重要性评估是将网络中每个结点 3 个指标的概率分配函数 m_{ij} 进行融合的过程^[17]。以结点 i 的第 1、2 个指标概率分配函数融合计算为例, 根据 Dempster 合成规则进行融合计算, 计算公式为

$$k_{i12} = m_{i1}(h_{i1})m_{i2}(\bar{h}_{i2}) + m_{i1}(\bar{h}_{i1})m_{i2}(h_{i2}) \quad (7)$$

$$m_{i12}(h) = [m_{i1}(h_{i1})m_{i2}(h_{i2}) + m_{i1}(h_{i1})m_{i2}(H_{i2}) + m_{i1}(H_{i1})m_{i2}(h_{i2})] / (1 - k_{i12}) \quad (8)$$

$$m_{i12}(\bar{h}) = [m_{i1}(\bar{h}_{i1})m_{i2}(\bar{h}_{i2}) + m_{i1}(\bar{h}_{i1})m_{i2}(H_{i2}) + m_{i1}(H_{i1})m_{i2}(\bar{h}_{i2})] / (1 - k_{i12}) \quad (9)$$

式中: k_{i12} 为概率分配函数 m_{i1} 和 m_{i2} 的冲突系数; $m_{ij}(H_{ij})$ 、 $m_{ij}(h_{ij})$ 、 $m_{ij}(\bar{h}_{ij})$ 分别为结点 i 的第 j 个指标的不确定评估值、重要性评估值和不重要性评估值; $m_{i12}(h)$ 、 $m_{i12}(\bar{h})$ 分别为结点 i 的第 1、2 个指标融合后的重要性评估值和不重要性评估值。根据吴果等^[17]的研究, $m_{ij}(H_{ij}) = 0$, $m_{ij}(h_{ij}) = I_{ij}$, $m_{ij}(\bar{h}_{ij}) = 1 - I_{ij}$ 。

将 Dempster 融合计算得到的 $m_{i12}(h)$ 、 $m_{i12}(\bar{h})$ 作为新的概率分配函数参与下一轮次的融合, 经过两次融合计算之后得到结点 i 的 3 个指标融合后的重要性评估值 $m_{i123}(h)$, 即为结点 i 的重要性程度。 $m_{i123}(h)$ 值越大, 说明该结点越重要。

1.3 跨流域多线路水网韧性评估模型

高效的水网能够更有效地传输和调配水资源, 在水旱灾害发生时能够更及时地进行应对和调度, 从而减轻灾害的影响。在水网运行过程中, 受到自然灾害和人类活动的影响, 例如洪涝、地震, 或对某个调水工程断面进行维护检修等^[19-20], 可能会导致某些结点“失效”。水网韧性可被理解为网络在受到攻击或出现故障时所表现出的恢复能力和适应性, 即在部分结点“失效”情况下仍能够继续提供服务。当水网在受到攻击并移除少量结点后, 剩余结点仍能保持连通, 说明该水网对此类攻击具有较强的韧性。

1.3.1 水网韧性评估

本文基于网络效率和最大连通子图构建跨流域多线路水网韧性评估模型, 对复杂水网韧性进行测算^[21-22]。网络效率可反映水网对水旱灾害的防御能力, 最大连通子图可反映水网的水资源优化配置能力。

a. 网络效率。网络效率为结点之间最短路径倒数和的平均值, 用于评估复杂水网的连通能力。网络结点或者边“失效”后会产生孤立的点, 形成非连通的网络, 该结点到其他任意结点的最短路径长度都是无穷大, 会导致整体网络的平均距离变成无穷大。网络效率计算公式为

$$f = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j \in n} \frac{1}{d_{ij}} \quad (10)$$

式中: f 为网络效率; d_{ij} 为结点 i 至结点 j 的最短路径长度。

b. 最大连通子图。在有向图中选取一个子集作为子图, 使得该子图中的顶点之间存在有向路径可达, 且无法再添加其他顶点来扩展该子图, 则该子图称为最大连通子图。复杂水网中的结点或者边“失效”后, 网络有可能被分为两个或者多个子网络, 则所有子网络中结点数最多的最大连通子图即为该复杂水网的最大连通子图。最大连通子图结点数越多, 表示水网对水资源的优化配置能力越强。以最大连通子图结点数量在复杂水网结点总数中的占比作为最大连通子图的评价指标:

$$S = L/n \quad (11)$$

式中: S 为最大连通子图的评价指标; L 为最大连通子图的结点数量。

c. 将网络效率和最大连通子图相结合,采用加权平均算法计算复杂水网的韧性:

$$R_k = \alpha f_k / f_0 + \beta S_k / S_0 \quad (12)$$

式中: R_k 为 k 个结点“失效”后的水网韧性; f_k 、 S_k 分别为 k 个结点“失效”后复杂水网的网络效率和最大连通子图评价指标; f_0 、 S_0 分别为初始状态下复杂水网的网络效率和最大连通子图评价指标; α 、 β 为权重, 且 $\alpha + \beta = 1$ 。

1.3.2 水网结点“失效”模拟

为了评估结点“失效”对水网韧性的影响, 按照得到的水网结点重要性程度顺序逐一移除结点, 评估结点“失效”对整个水网韧性的影响, 主要步骤包括: ①按照结点重要性进行降序排列, 选择排序最前的结点进行“失效”操作; ②移除“失效”结点及所有相关的连边; ③根据得到的新的水网结构计算水网韧性, 并输出; ④返回步骤①, 对下一个结点进行“失效”操作, 直到网络中只剩一个结点, 模拟结束。

2 结果与分析

2.1 长江黄河跨流域水网概化

根据长江和黄河流域当前水网和未来规划调水线路, 绘制长江黄河跨流域水网结点概化图^[23], 见图 1。图中 3 种线路分别为河流水系、已建调水工

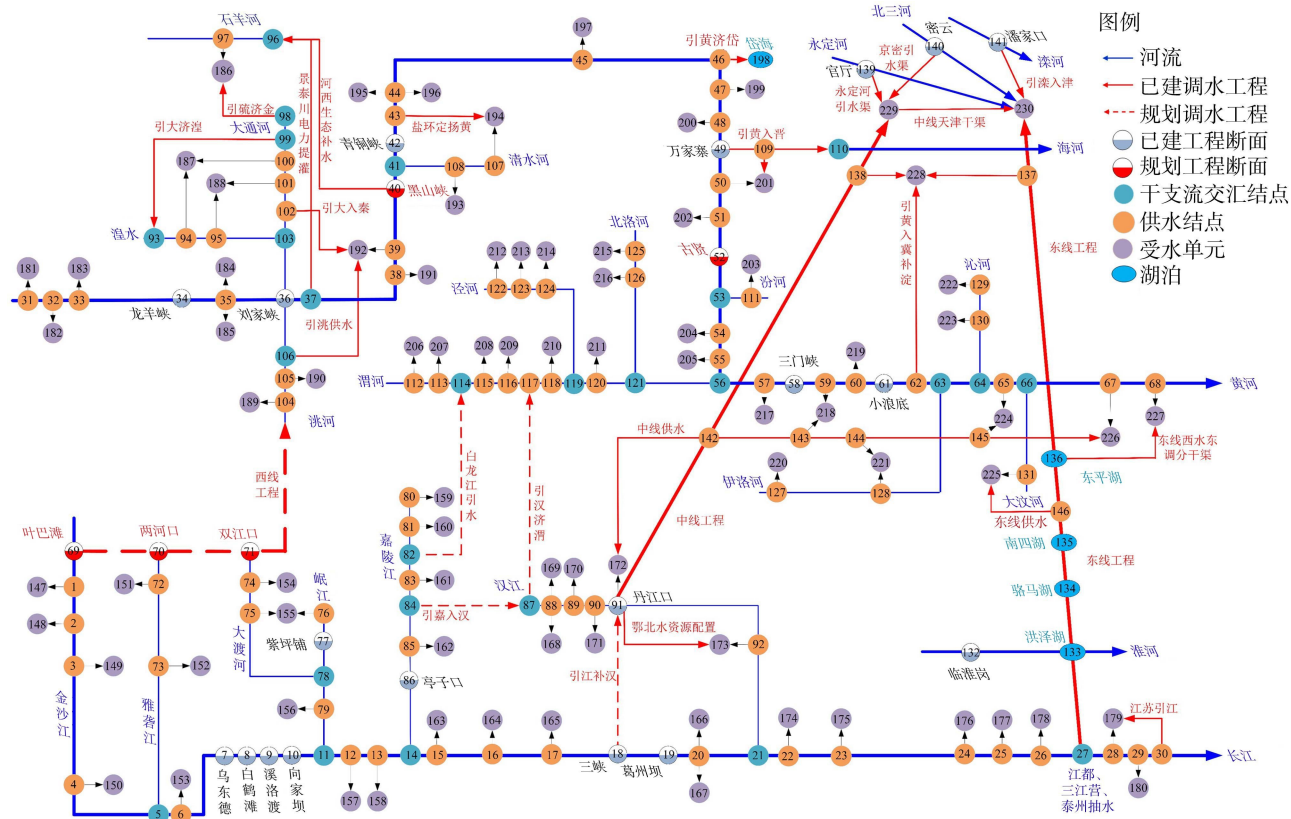


图1 长江黄河跨流域水网结点概化图

Fig.1 Generalized node diagram of the Yangtze River and Yellow River inter-basin water network

程和规划调水工程。图中共有 230 个结点,包括 6 种结点类型,分别为已建工程断面、规划工程断面、干支流交汇结点、供水结点、受水单元和湖泊。按照“先干流、后支流,先整体、后区域,先线路、后单元”的规则进行编号。长江干流的结点编号范围为 1~30,黄河干流的结点编号范围为 31~68,其他河流水系和调水线路的结点编号范围为 69~150,供水单元的结点编号范围为 151~230。

整体来看,长江和黄河两条干流是主要的核心骨架,各二级河流则是该骨架的延伸。调水线路在连接两个流域以及流域内部分区域方面起到了重要的作用。此外,部分用水结点也在一定程度上构建了网络连接,如京津冀地区(编号为 228~230)和中东线受水区结点等。长江、黄河两个流域主要通过南水北调东中西线、白龙江引水、引汉济渭等供水线路连接。长江流域内有引嘉入汉、引江补汉等调水工程;黄河流域内有引大济湟、盐环定扬黄等调水工程。此外,京津冀地区除了东中线调水工程,还包括永定河引水渠、引黄入冀补淀、引滦入津等调水工程。总体而言,长江黄河跨流域水网呈现出多线路复杂的形态。

2.2 水网结点重要性评估

采用度中心性、介数中心性、PageRank 算法和 D-S 证据理论进行水网结点重要性评估。基于 4 种

方法分别计算前 30、50、100 个最重要结点在不同区域中的占比,结果见图 2。从图 2 中可以看出,黄河干流不同数量最重要结点数占比比较高,除了度中心性算法得到的前 50 个最重要结点数占比略低于长江干流之外,其他情况下都位居首位。不同方法的结果略有差异,D-S 证据理论和介数中心性算法的结果表明,黄河干流和长江干流不同数量最重要结点数占比都分别超过了 50% 和 30%,显示出这两个区域的重要性;而度中心性和 PageRank 算法考虑了更广泛的区域重要性,除了黄河干流、长江干流外,还考虑了黄河流域受水单元、长江流域受水单元以及京津冀等区域。

基于 D-S 证据理论得到最重要的 10 个结点见表 1。10 个重要结点中处于长江干流、黄河干流、京津冀区域的结点数分别为 6 个、3 个和 1 个,长江干流的结点数占比最大。长江流域作为供水区,其水网结构为有向网络,必须从长江流域指向黄河流域才能实现连通。因此,长江干流至关重要,在重要性结点总数较少的情况下,其最重要结点数在整个研究区中占比也较高。天津(编号为 230)是 D-S 证据理论获得的最重要的结点,从图 1 可以看出,天津市有多个供水工程,包括南水北调东线和南水北调中线天津干渠等,还有永定河、北三河和滦河向其供水,因此该结点对整个网络的重要性尤为显著。

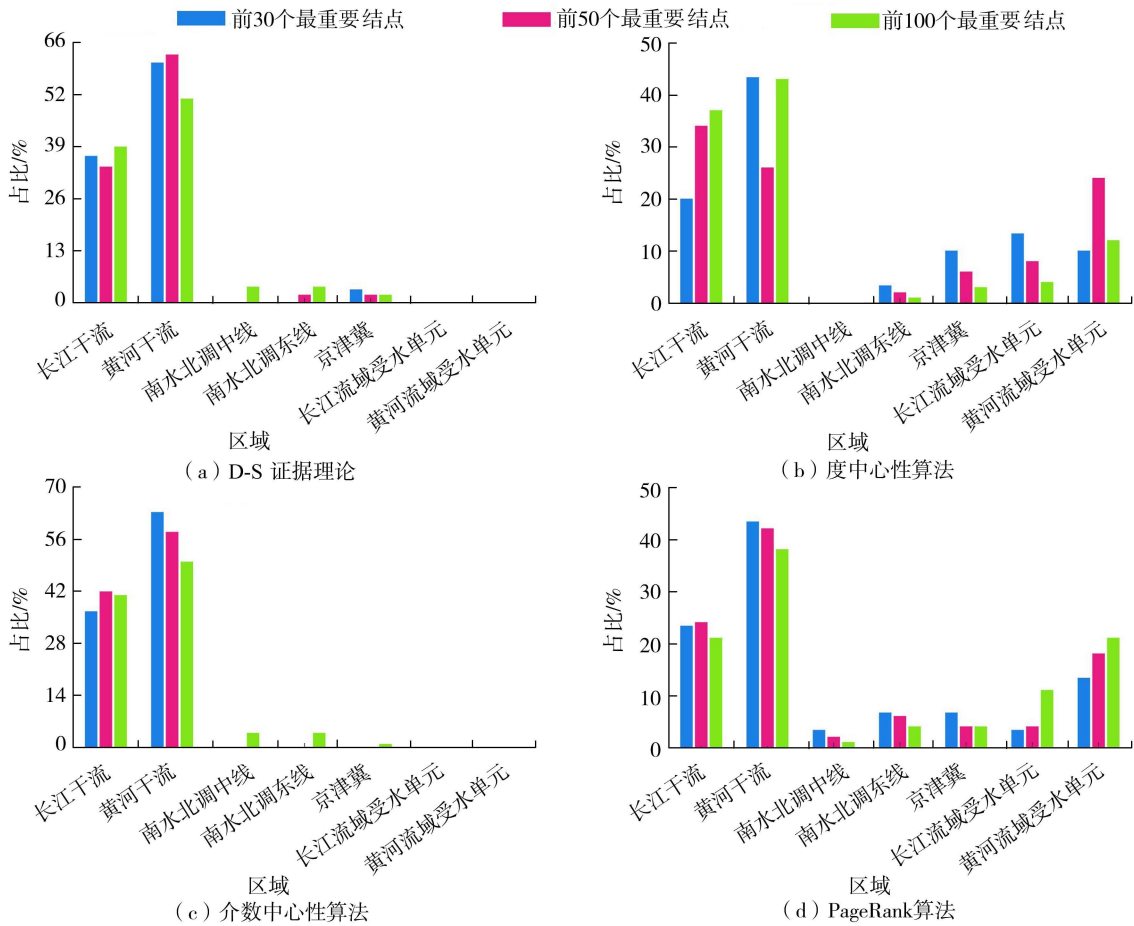


图 2 最重要结点数量在不同区域的占比

Fig. 2 Proportion of the most critical nodes across different regions

表 1 基于 D-S 证据理论的最重要的 10 个结点

Table 1 Ten most important nodes based on D-S evidence theory

序号	结点编号	水资源分区	结点名称	结点属性	所属区域
1	230		天津	受水单元	京津冀
2	15	宜宾至宜昌	四川	供水结点	长江干流
3	14	宜宾至宜昌	嘉陵江—长江	干支流交汇结点	长江干流
4	11	宜宾(上游)	岷江—长江	干支流交汇结点	长江干流
5	36	玛曲至龙羊峡、龙羊峡至兰州干流区间	刘家峡	水库	黄河干流
6	16	宜宾至宜昌	重庆	供水结点	长江干流
7	56	龙门至三门峡干流区间	渭河—黄河	干支流交汇结点	黄河干流
8	12	宜宾至宜昌	云南	供水结点	长江干流
9	17	宜宾至宜昌	湖北	供水结点	长江干流
10	37	玛曲至龙羊峡、龙羊峡至兰州干流区间	石羊河	景泰川电力提灌调水点	黄河干流

编号为 11 和 14 的结点分别对应岷江—长江和嘉陵江—长江干支流交汇结点,而岷江和嘉陵江两条水系都较为复杂,特别是嘉陵江内有白龙江引水和引嘉入江等调水工程,因此整个水网与长江的交汇点也显得尤为重要。黄河干流的一个重要结点是刘家峡水库(结点编号 36),该水库位于黄河干流,也是大通河、湟水和洮河的交汇点,连接了黄河干流的多个供水线路、受水单元以及南水北调西线等,其在整个水网中起着关键的枢纽作用。

2.3 水网韧性评估

图 3 给出在不同结点“失效”数量下,长江黄河

跨流域水网的韧性变化情况。在计算过程中,权重 α, β 均取 0.5。在相同结点“失效”数量的情况下,韧性结果较差的方法更能精确识别跨流域水网中的关键结点,具有更强的有效性。

从图 3 可以看出,PageRank 算法在长江黄河跨流域水网韧性评价中性能最差,其得到的整体韧性较高,未能准确辨识出关键结点。度中心性算法在前 50 个(占比 21.7%)结点“失效”情况下表现最佳,但在第 80~230 个(占比 34.8%~100%)结点“失效”情况下的表现不及 D-S 证据理论和介数中心性算法。D-S 证据理论和介数中心性算法的结果

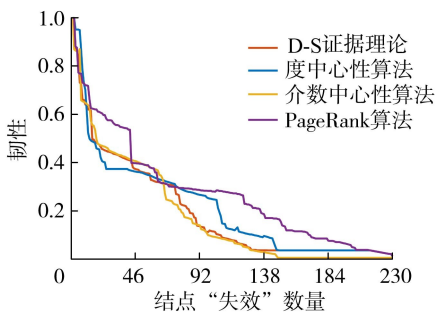


图3 长江黄河跨流域水网的韧性变化

Fig.3 Resilience changes of the Yangtze River and Yellow River inter-basin water network

非常接近,在前 80 个(占比 34.8%)结点“失效”情况下,D-S 证据理论表现较佳;但在 80~230 个(占比 34.8%~100%)结点“失效”情况下,介数中心性算法表现更优。当结点“失效”数量约为 15 个(占比 6.5%)时,各方法得到的跨流域水网的韧性仅为 0.6 左右,这说明少数关键结点对整个水网韧性影响很大。根据度中心性算法的结果,当结点“失效”数量达到 25 个(占比 10.9%)时,跨流域水网韧性不到 0.4,在各方法中下降最快;当结点“失效”数量达到 50 个(占比 21.7%)时,各方法得到的跨流域水网的韧性结果相差不大,基本为 0.3~0.4。

图 4 给出了 D-S 证据理论得到的跨流域水网连通情况。图 4(a)为整个水网的初始状态,可以看出整个网络的结构非常复杂。当结点“失效”数量为 30 个时,由于部分结点与其他结点不再连接,因此被迫“失效”,整个水网仅有 117 个结点,连通情况见图 4(b),此时只有少数结点簇孤立分布,更多的结点仍然保持在整个水网上。当结点“失效”数量增加到 50 个时,整个水网中有 97 个结点,连通情况见图 4(c),此时,尽管整个水网的结点数量仍然相当大,但是水网中结点簇的数量占比很高,只有少部分结点之间保持互相连通。图 4 也解释了图 3 中前 30 个结点“失效”导致整个水网韧性出现断崖式下降的现象。当结点“失效”数量为 30 个时,理论上整个水网中还应 有 200 个结点,但实际结点数量降低至 117 个,这主要是因为结点“失效”不仅对该结点自身产生影响,还会影响其周围结点的连通情况。当结点“失效”数量增加到 50 个时,水网结点数量为 97 个,说明在结点“失效”数量达到一定阈值后,后续结点“失效”更多地影响自身,对整个水网的影响较小。

为进一步探究网络效率和最大连通子图的不同权重组合对跨流域水网韧性的影响,根据 D-S 证据理论得到的结点重要性顺序,分析不同权重组合下结点“失效”数量对跨流域水网韧性的影响,结果见

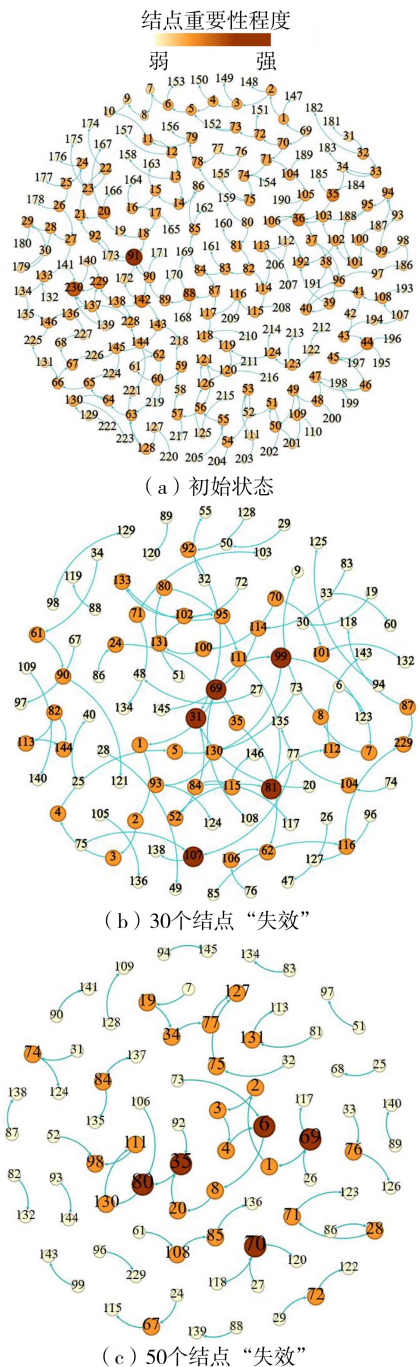


图4 长江黄河跨流域水网连通图

Fig.4 Graph of connectivity of the Yangtze River and Yellow River inter-basin water network

图 5。从图 5 可以看出,在结点“失效”数量较少(1~15 个)和较多(90~230 个)的情况下,韧性与权重组合的变化关系不大。当结点“失效”数量为 15~30 个时,随着最大连通子图权重的增加,跨流域水网的韧性呈现出下降趋势;当结点“失效”数量为 30~90 个时,增加最大连通子图的权重会显著提升跨流域水网的韧性。这表明在不同的结点“失效”数量区间内,最大连通子图的权重对跨流域水网韧性有着不同的影响。鉴于跨流域水网环境动态变化的特点,为了全面捕捉其不同状态下的韧性,本文

采用均衡的权重分配策略,将最大连通子图的权重设置为 0.5,在不同水网状态下提供一个平衡的韧性评估,从而更好地适应跨流域水网的动态变化。

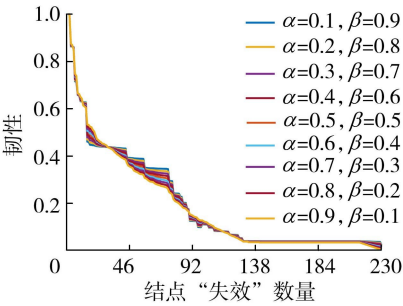


图 5 不同权重组合下长江黄河跨流域水网韧性变化
Fig. 5 Resilience changes of the Yangtze River and Yellow River inter-basin water network under different weight combinations

2.4 不同结点“失效”数量对水网韧性的影响

考虑到不同结点“失效”数量对水网韧性的影响程度不同,进一步探究在维持不同数量结点正常运行的情况下水网韧性的变化情况。根据不同方法获得的结点重要性排序,分别维持前 10、30、50、70、90、110 个(分别占比 4.3%、13.04%、21.7%、30.4%、39.1%、47.8%)结点正常运行,采用结点“失效”模拟方法对其余结点进行失效模拟,得到维持不同结点数量正常运行时水网韧性的变化情况,结果见图 6。

从图 6 可以看出,D-S 证据理论在 4 种方法中表现最好,能够在维持相同数量结点正常运行的前提下,进一步提高水网的韧性水平。这表明,D-S 证

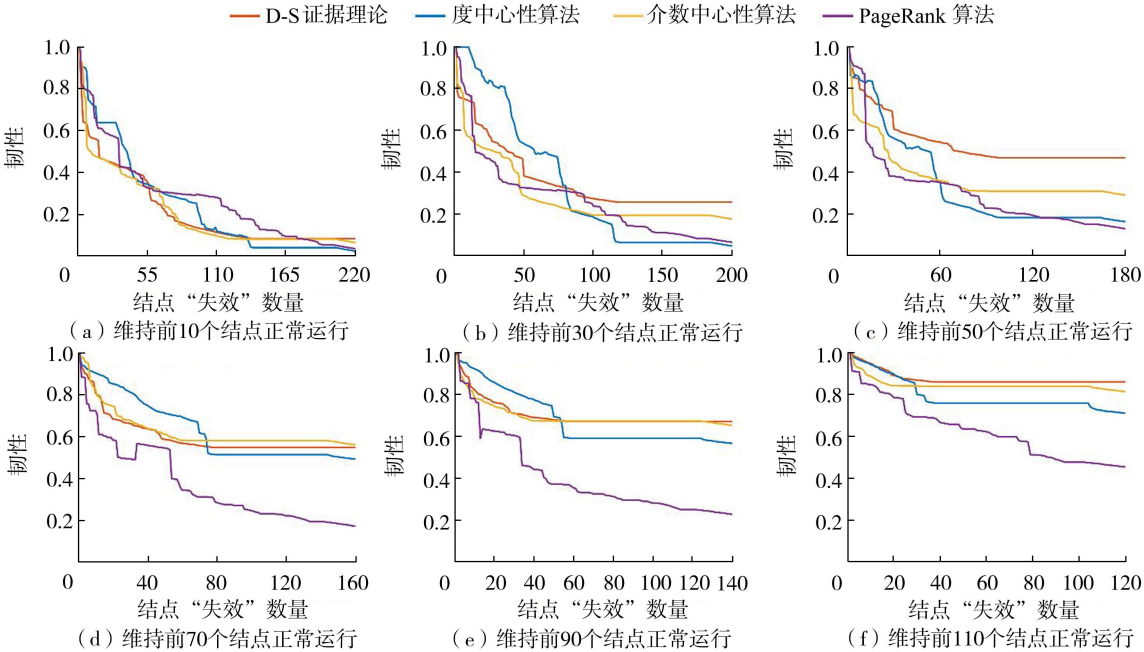


图 6 维持不同结点数量正常运行下水网韧性的变化

Fig. 6 Water network resilience changes under different numbers of nodes running normally

据理论所得的结点重要性排序相较其他方法能更准确地反映出对水网韧性影响较大的结点。当仅保持最重要的 10 个结点正常运行时,4 种方法的表现都相对较差,由于关键结点数量有限,难以形成有效网络结构,对水网韧性提升效果不明显。当保持最重要的 30 个结点正常运行时,D-S 证据理论方法得到的最大韧性仅为 0.25 左右,网络整体仍然陷入瘫痪状态。当保持最重要的 50 个结点正常运行时,整个水网络的结点韧性可以提升至 0.45。而在保持最重要的 70~110 个结点正常运行时,D-S 证据理论和介数中心性算法表现相近,均能够维持水网韧性处于较高水平。在维持最重要的 110 个结点正常运行时,水网韧性达到 0.83。因此,通过合理选择和维持水网中的关键结点,采用有效的理论方法进行结点重要性排序,可以大大提高水网韧性。

3 结 论

a. 基于 D-S 证据理论对长江黄河跨流水网结点重要性进行综合评估,揭示了不同结点“失效”数量下区域网络结构的变化趋势,克服了单一指标评估结果的片面性,使得水网结点重要性评估更加科学合理。

b. 运用复杂网络理论的网络效率与最大连通子图评价指标,综合分析不同结点“失效”数量对水网韧性的影响。结果表明,维持重要结点的正常运行能够有效提升水网韧性,维持 47.8%的结点数量正常运行可将水网韧性提高至 0.83;当结点“失效”数量占总结点数的 6.5%时,水网韧性降至 0.6;当

结点“失效”数量占总结点数的10.9%时,度中心性算法得到的水网韧性最低,不足0.4。

参考文献:

[1] 吴成国,王晓宇,金菊良,等. 基于有序联系度熵的水资源空间均衡综合评价方法[J]. 水利学报,2022,53(11):1304-1316. (WU Chengguo, WANG Xiaoyu, JIN Juliang, et al. Ordered correlation degree entropy based approach for comprehensive evaluation analysis of water resource spatial equilibrium system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (11) : 1304-1316. (in Chinese))

[2] 张金良. 构建黄河流域水网的思考[J]. 水资源保护,2022,38(4):1-5. (ZHANG Jinliang. Thoughts on construction of water network in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4) : 1-5. (in Chinese))

[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] 仇越,柳长顺,蒋晓辉,等. 国家水网工程可持续运行风险研究进展[J]. 人民黄河,2024,46(3):148-155. (QIU Yue, LIU Changshun, JIANG Xiaohui, et al. Research progress on sustainable operation risk of national water network project [J]. Yellow River, 2024, 46 (3) : 148-155. (in Chinese))

[5] 孙浩夫. 抽水泵站机电设备安全运行与管理风险研究[J]. 地下水,2021,43(3):286-288. (SUN Haofu. Safety operation and management risk research on electromechanical equipment of pumping stations [J]. Groundwater, 2021, 43 (3) : 286-288. (in Chinese))

[6] 李磊,商鹏,赵亮. 谈南水北调山东干线机电设备的维护管理[J]. 山东水利,2020(12):38-39. (LI Lei, SHANG Peng, ZHAO Liang. On the maintenance and management of mechanical and electrical equipment in Shandong main line of South-to-North Water Diversion Project [J]. Shandong Water Resources, 2020 (12) : 38-39. (in Chinese))

[7] 安沈昊,于荣欢. 复杂网络理论研究综述[J]. 计算机系统应用,2020,29(9):26-31. (AN Shenhao, YU Ronghuan. Review on complex network theory research [J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29 (9) : 26-31. (in Chinese))

[8] BONACICH P. Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification[J]. The Journal of Mathematical Sociology,1972,2(1):113-120.

[9] FREEMAN L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. Social networks,1978,1(3):215-239.

[10] BRIN S, PAGE L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine [J]. Computer networks and ISDN Systems,1998,30(1/2/3/4/5/6/7):107-117.

[11] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. Sociometry,1977,40(1):35-41.

[12] 李发文,高菲. 基于网络分析的水网可达性评估[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(3):127-139. (LI Fawen, GAO Fei. Accessibility evaluation of water networks based on network analysis [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55 (3) : 127-139. (in Chinese))

[13] 李发文,赵宇瑶. 基于点-面两层结构的复杂网络方法评估海河流域水网连通性[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(6):16-26. (LI Fawen, ZHAO Yuyao. Evaluation of water network connectivity using complex network method based on node-subbasin double layer structure [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023, 34 (6) : 16-26. (in Chinese))

[14] 杨元媛,朱昊彧,杜云彬,等. 基于复杂网络的长距离输水系统节点重要性评估[J]. 中国农村水利水电,2022(2):179-183. (YANG Yuanyuan, ZHU Haoyu, DU Yunbin, et al. Node importance evaluation of long-distance water delivery system based on complex networks [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (2) : 179-183. (in Chinese))

[15] 李锋,张鹏超,李慧敏,等. 水网结构对多灾害情景的韧性响应研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(1):63-72. (LI Feng, ZHANG Pengchao, LI Huimin, et al. Research on the resilience response of water network structure to multiple disaster scenarios [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45 (1) : 63-72. (in Chinese))

[16] 徐云帆. 基于复杂网络理论的公路网脆弱性识别方法研究[D]. 济南:山东交通学院,2023.

[17] 吴果,房礼国,李中. 基于多指标综合的复杂网络节点重要性评估[J]. 计算机工程与设计,2016,37(12):3146-3150. (WU Guo, FANG Ligu, LI Zhong. Node importance estimation in complex networks based on multi-index comprehension [J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37 (12) : 3146-3150. (in Chinese))

[18] 宋客,巩在武. 基于云模型和 PageRank 算法的社会网络群决策方法[J]. 运筹与管理,2023,32(5):56-61. (SONG Ke, GONG Zaiwu. Social network group decision-making method based on cloud model and PageRank algorithm [J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32 (5) : 56-61. (in Chinese))

(下转第 75 页)

Zhonghua. Development and application of grid-based Xinanjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35 (2): 131-134. (in Chinese))

[30] 刘昌军,周剑,文磊,等. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 99-114. (LIU Changjun, ZHOU Jian, WEN Lei, et al. Research on spatio-temporally-mixed runoff model and parameter regionalization for small and medium-sized catchments [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19 (1): 99-114. (in Chinese))

[31] 王维, 冯忠伦, 杨伟, 等. 基于 SCE-UA 算法的新安江模型与垂向混合产流模型参数优化应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 26-30. (WANG Wei, FENG Zhonglun, YANG Wei, et al. The application of SCE-UA algorithm to optimization of Xin' anjiang and vertically-mixed runoff model parameters[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(3): 26-30. (in Chinese))

[32] FATICHI S, OR D, WALKO R, et al. Soil structure is an important omission in earth system models[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 522.

[33] 陆文, 唐家良, 章熙锋, 等. 山地流域水文模拟研究进展与展望[J]. 山地学报, 2020, 38(1): 50-61. (LU Wen, TANG Jialiang, ZHANG Xifeng, et al. Hydrological simulation in mountainous region: present state and perspectives[J]. Mountain Research, 2020, 38 (1): 50-61. (in Chinese))

[34] 刘家福, 蒋卫国, 占文凤, 等. SCS 模型及其研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 120-124. (LIU Jiafu, JIANG Weiguo, ZHAN Wenfeng, et al. Processes of SCS model for hydrological simulation: a review [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 120-124. (in Chinese))

[35] 申红彬, 徐宗学, 曹兵, 等. 分布式 SCS-CN 有效降雨修正模型建立及应用[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 553-561. (SHEN Hongbin, XU Zongxue, CAO Bing, et al. A distributed SCS-CN model with revised effective precipitation[J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (4): 553-561. (in Chinese))

[36] 邓培德. 城市雨水道设计洪峰径流系数法研究及数学模型法探讨[J]. 给水排水, 2014, 50(5): 108-112. (DENG Peide. Study on the flood -peak runoff coefficient method of urban storm water pipe design and mathematic model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 50 (5): 108-112. (in Chinese))

[37] 陆海明, 邹鹰, 孙金华, 等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexingiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))

[38] 刘曾美, 谢建麟, 黎智良, 等. 中山市三乡镇水利综合规划[R]. 中山: 中山市水利水电勘测设计咨询有限公司, 2014.

[39] 刘曾美, 谢建麟, 黎智良, 等. 中山市坦洲镇水利规划[R]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[40] 韩超, 梅青, 刘曙光, 等. 平原感潮河网水文水动力耦合模型的研究与应用[J]. 水动力学研究与进展, 2014, 29(6): 706-712. (HAN Chao, MEI Qing, LIU Shuguang, et al. Research and application on a coupled hydrological and hydrodynamic model in plain tidal river network[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 706-712. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-09 编辑:彭桃英)

(上接第 34 页)

[19] 陈晓楠, 靳燕国, 许新勇, 等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 46-55. (CHEN Xiaonan, JIN Yanguo, XU Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (5): 46-55. (in Chinese))

[20] 郭旭宁, 李云玲, 唱彤, 等. “荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 1-7. (GUO Xuning, LI Yunling, CHANG Tong, et al. Construction thought and implementation pathway of “Jingchu’ anlan” modern water network [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 1-7. (in Chinese))

[21] HONG Wuyang, GUO Renzhong, LI Xiaoming, et al. Measuring urban ecological network resilience: a disturbance scenario simulation method[J]. Cities, 2022, 131:104057.

[22] HUANG Longyang, WANG Jing, CHENG Hongguang. Spatiotemporal changes in ecological network resilience in the Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 339:130681.

[23] 方国华, 赵文萃, 李鑫, 等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 1-8. (FANG Guohua, ZHAO Wencui, LI Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 1-8. (in Chinese))

(收稿日期:2024-04-24 编辑:施业)