

基于复杂网络的流域水网关键节点识别与功能通道分类研究

李发文, 铁倩如

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室)

摘要:针对流域水网关键节点与通道的系统分类和定量识别问题,基于复杂网络理论,构建了融合度中心性、中介中心度和特征向量中心性的综合评估体系,提出控制-可达二维分类矩阵,分类识别了我国四大流域(海河、黄河、淮河、长江流域)水网结构中的关键节点与功能通道。结果表明:淮河流域核心枢纽型通道占比 22.02%,海河流域高等级节点占比 56.87%,均体现出明显的控制集中特征;黄河流域中等过渡型通道占比高达 88.10%,表现为结构均衡但缺乏强控制通道;长江流域边缘隔离型通道比例为 14.45%,凸显复杂地形下的通达性不足。

关键词:复杂网络;水网结构;关键节点;功能通道;海河流域;黄河流域;淮河流域;长江流域

Identification of key nodes and classification of functional channels in watershed water networks based on complex networks//Li Fawen, Tie Qianru (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University)

Abstract: To address the need for systematic classification and quantitative identification of key nodes and functional channels in water networks, this study develops a comprehensive evaluation framework based on complex network theory. The framework integrates degree, betweenness centrality, and eigenvector centrality measures, and introduces a two-dimensional control-reachability matrix for identifying and classifying key nodes and functional channels within the water network structures of China's four major river basins, including the Haihe River Basin, the Yellow River Basin, the Huaihe River Basin, and the Yangtze River Basin. The results indicate that the Huai River Basin has the highest proportion of core hub-type channels (22.02%), while the Hai River Basin shows significant polarization with 56.87% of nodes at higher grades. The proportion of medium transitional channels in the Yellow River Basin is as high as 88.10%, reflecting a balanced but weakly controlled structure. The proportion of marginally isolated channels in the Yangtze River Basin is 14.45%, indicating limited accessibility under complex terrain.

Key words: complex network; water network structure; key node; functional channel; the Haihe River Basin; the Yellow River Basin; the Huaihe River Basin; the Yangtze River Basin

随着国家水网“四横三纵”战略格局的加快推进,水资源的空间优化配置、区域协同调度和生态安全保障成为新时代流域治理体系的重要目标^[1]。流域水网作为水资源传输、配置与调度的核心载体,其结构类型与功能特征决定着流域水系统的运行效率与生态韧性^[2]。现有研究多集中于水网几何特征及连通性分析,对流域水网关键节点和功能通道的系统识别相对不足。识别关键节点与控制通道不仅有助于揭示水网结构与功能的耦合机制,还直接关系到跨流域调水工程的布局、防洪调度的效率以及流域综合治理的成效。因此,开展流域水网关键

节点与功能通道的系统识别已成为水资源科学管理亟须解决的重要问题。

流域水网结构研究起源于对河流分级与几何规律的探讨。Horton^[3]最早提出河流分级体系,Strahler^[4]进一步将其发展为广泛应用的等级划分方法。Rodriguez-Iturbe 等^[5]则在其经典著作中提出河网具备自组织与分形结构属性,推动了水网演化的理论建模。在国内,李华晔等^[6]以黄河流域为例,提出了基于盒维数与码尺法的河段分形测度方法;张丽等^[7]引入不均匀性参数改进 Tokunaga 模型,提高了对自然河网的拟合精度;李发文等^[8]从

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239004)

作者简介:李发文(1976—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lifawen@tju.edu.cn

通信作者:铁倩如(2001—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:tqianru@163.com

地貌单元出发,利用 Horton 定律与 Hack 定律探讨了水网几何结构与地貌类型之间的耦合特征,提出了适用于 7 类地貌单元的分支比与长度比推荐值。这些研究奠定了流域水网结构量化分析的理论基础。

近年来,图论与复杂网络理论被广泛引入水资源系统分析中,推动了水网研究从几何结构向拓扑功能演化的转变。Sivakumar 等^[9]指出复杂网络的度分布、聚类系数和路径长度可揭示水文过程的网络特性与鲁棒性;Dong 等^[10]探讨了拓扑结构对突发污染扩散的调节作用,强调了网络参数在风险响应中的作用。在国内,冯硕等^[11]构建了加权复杂网络识别廊坊平原的枢纽节点;赵进勇等^[12]建立了平原水网区结构连通度评估体系;安东等^[13]则结合塔里木河流域信息系统构建了渠系拓扑图,实现了水资源信息调度一体化;万芳等^[14]基于混沌理论构建了汾河流域水资源系统韧性评价模型,揭示了水网构建对区域系统韧性提升的显著作用;范志鹏等^[15]则针对长江-黄河跨流域水网,构建了韧性评估模型并指出维持核心节点运行对整体鲁棒性具有关键意义。这些研究表明,复杂网络不仅能够识别水网中的“关键点”与“薄弱链”,也有助于构建系统性、可调控的水资源管理模型。

除结构识别外,水网的功能研究也逐渐成为焦点。水文连通性作为水文与生态过程耦合的重要桥梁,被广泛用于评估流域系统的生态承载力^[16]。Bracken 等^[17]提出的水文连通性概念为理解水体间物质与能量交换提供了理论支持;Vannote 等^[18-20]则从生态视角出发,构建了“河流连续体”“自然流态”等理论,强调维持自然水文波动对生态系统健康的重要性。在国内,李发文等^[21]在海河流域构建了子流域与节点两级的复杂网络分析框架,提出一套基于平均度、聚类系数等指标的结构诊断方法,识别了关键控制点并分析其连通效率;刘丹等^[22]的研究表明水文连通性对水质调控、生态恢复与输水路径设计具有显著作用,为流域功能通道识别与生态调度策略制定提供了实证基础。

本文重点聚焦于水网结构与功能的分类识别,以复杂网络理论为基础,提出度中心性、中介中心度、特征向量中心性 3 项中心性指标联合的节点识别方法,识别网络中不同功能层级的关键枢纽,并构建控制-可达二维功能分类模型,对水网通道进行系统划分,旨在通过关键节点与通道的功能分类揭示水网在结构调控与资源输送中的分工体系。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海河、黄河、淮河和长江流域地处 23°N~43°N、90°E~125°E,总面积约 341.8 万 km²,占全国国土面积的 32.8%,覆盖 23 个省级行政区,是国家水网主骨架“四横三纵”布局的核心组成。海河流域地处华北,是我国城市化和工业化程度最高的区域之一,年均径流量仅约 200 亿 m³,水资源供需矛盾突出;黄河流域跨越青藏高原至华北平原,水资源总量有限但人口密集,是生态治理与水量调配重点区域^[23];淮河流域位于长江与黄河之间,是我国重要的农业生产基地,地势平坦,水系密布,分布广泛的水利工程构建了典型的渠化网络;长江流域为全国最大水系,年均径流量达 9 600 亿 m³^[24],是我国经济发展最为活跃、生态系统最为复杂的区域^[25]。

1.2 数据来源

本文所采用的数字高程模型数据下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),选取 ASTER GDEM 30 m 分辨率数据提取水系与水网建模。包含自然水网和人工水网的水网数据和水利及附属设施数量及分布数据下载自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>),选取 1:100 万公众版基础地理信息数据,与其他数据产品相比,该数据更加符合流域实际水网,同时分辨率也较高,数据现势性与更新使用的数据源一致,数据整体现势性达到 2020 年。上述数据经统一坐标转换、拓扑结构校验与空间精度修正后,构建水网图模型,节点为交汇点与工程设施,边为河段连线。为确保水系提取结果的真实性与适用性,本文采用 SAGA GIS 与 ArcGIS 联合处理,基于 ASTER GDEM 30 m 分辨率数据设定 200 km² 最小汇流面积阈值提取主河道,并叠加 1:100 万水系矢量图进行对比验证。对比结果表明,提取的水系与实测河流在主干道走向与支流连接结构上保持高度一致,重叠精度超 85%,可有效支撑后续网络模型构建与指标计算。针对淮河流域存在的水系与流域边界不匹配问题,本文在建模过程中采用人工水网矢量补足错位区域,并设置空间缓冲区纠正交界误差。

2 研究方法

2.1 枢纽节点识别

本文基于复杂网络理论,构建水网图结构模型,并通过度中心性、中介中心度、特征向量中心性 3 项中心性指标量化节点的拓扑功能^[26]。具体方法为:首先,利用与节点 v 直接连接的河段数量 D_v 表征节

点度中心性 C_{D_e} , 识别在局部范围内具有较强交互能力的节点; 节点度中心性反映了节点的局部连接数量, 是评价其局部交互能力的重要指标, 数值越高说明该节点在水网中承担更多的汇流或分流作用。其次, 利用中介中心度反映节点在最短路径上的中介作用, 突出其对网络流动的控制能力, 计算公式见式(1); 中介中心度刻画了节点在网络中作为“桥梁”的作用, 值越大表示节点越频繁地出现在其他节点对之间最短路径上, 该节点对流域通道的控制力越强。再次, 利用特征向量中心性衡量节点在全局网络中的影响力, 尤其适用于识别“隐性关键”节点, 计算公式见式(2); 特征向量中心性不仅考虑节点自身的重要性, 还受邻近高重要性节点影响, 能够识别在整体网络中位置突出的关键枢纽。

$$C_{Bv} = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{D_{st,v}}{D_{st}} \tag{1}$$

$$C_{Ev} = \frac{1}{\lambda} \sum_{u \in N_v} C_{Eu} \tag{2}$$

式中: C_{Bv} 为中介中心度; D_{st} 为从节点 s 到节点 t 的路径的数量; $D_{st,v}$ 为从节点 s 通过节点 v 到节点 t 的路径的数量; C_{Ev} 为特征向量中心性; N_v 为节点 v 的直接邻居集合; λ 为最大特征值, 为常数; C_{Eu} 为邻居节点 u 的特征向量中心性。

在节点综合评估方面, 采用加权分位数法对 3 项中心性指标进行标准化分级^[27], 构建 6 级分类体系, 便于多维度比较。具体来说: 针对度中心性, 依据节点实际连接数量直接划分为 1~6 级; 针对中介中心度与特征向量中心性, 基于四大流域全部节点的数据分布, 采用自然间断点分级法将其划分为 1~6 级; 基于节点的度中心性、中介中心度和特征向量中心性的分级结果, 划分节点综合重要度等级, 表 1 为水网节点综合重要度等级及管理策略。

2.2 功能通道分类

为揭示河段的功能类型, 构建了控制-可达二维分类体系, 以实现对水网通道功能类型的系统识别。选取河段度中心性 C_{D_e} 作为通道的局部控制能力表征指标, 该指标数值上等于河段 e 直接连接的节点数量, 反映其在局部网络中的交互潜力和辐射能力^[28], 能够用于识别重要的辐射型枢纽河段。河段

表 1 水网节点综合重要度等级及管理策略

Table 1 Comprehensive important level and management strategy of water network nodes

综合重要度等级	节点类别	定义	管理策略
1	普通节点	3 项指标均为 1 级	基础维护
2	潜在关键节点	1~2 项指标为 2 级且其他指标为 1 级	常规监测
3	次级枢纽	至少 1 项指标高于 2 级且无指标高于 3 级	区域调控重点
4	重要枢纽	至少 1 项指标高于 3 级或 2 项指标高于 2 级	跨区域协调
5	核心控制节点	2 项指标高于 3 级或 1 项指标高于 4 级	专项保护
6	战略级节点	3 项指标均高于 4 级或 2 项指标为 6 级	国家级管控

度中心性与节点度中心性的计算方法相似, 但其计算对象与物理意义不同, 前者刻画节点通过相连河段实现的局部连接数, 后者刻画河段通过端点节点实现的局部控制力。

利用接近中心度作为评估通道全局可达效率的核心指标, 该指标基于通道到所有节点的平均最短路径长度计算, 可用于衡量某一河段在整个网络中的通达性和资源传播效率, 特别适用于发育程度较高、节点密度较大的流域, 计算公式为:

$$C_{Ce} = (n - 1) / \sum_{u \neq v} d_{uv} \tag{3}$$

式中: C_{Ce} 为河段 e 的接近中心度; d_{uv} 为河段 e 上节点 u 到节点 v 的最短路径长度; n 为网络中节点总数。 C_{Ce} 能有效反映河段在全网范围内的资源传输效率, 对于长江等网状结构流域具有更高的解释力。

在数据处理过程中, 提取每条河段的度中心性与接近中心度指标值, 采用四分位数法对 2 项指标分别进行分级: 高于上四分位数的值定义为高水平, 低于下四分位数的值定义为低水平, 其余为中等水平。河段度中心性表征控制力, 接近中心度表征可达性, 在此基础上构建二维指标体系, 将水网通道划分为 5 种功能类型, 如表 2 所示。

基于上述分类方法, 借助 GIS 平台对各种通道功能类型进行空间叠加与可视化表达, 并与实际调水工程路径进行匹配分析, 验证模型结构与实际管理实践的一致性。

表 2 水网通道 5 种功能类型

Table 2 Five functional types of water network channels

功能类型	二维指标	特点
核心枢纽型	高控制-高可达	兼具强辐射能力与高传输效率, 通常为水资源配置和流域调度中的战略主通道
局部瓶颈型	高控制-低可达	虽然具有较强的控制力, 但整体通达性受限, 往往形成流域系统运行中的潜在制约点
通达服务型	低控制-高可达	具备良好的连通性与流通效率, 主要承担支撑性输送功能, 适用于生态补水与区域水交换通道
边缘隔离型	低控制-低可达	控制性和通达性均较低, 常位于网络边缘区域或水系末端, 功能作用相对有限
中等过渡型	中等控制-中等可达	控制力和可达性处于中间区间的河段, 在网络中具有过渡和连接作用, 功能较为均衡

3 结果与分析

3.1 流域枢纽节点识别结果

3.1.1 度中心性分布特征

将四大流域进行子流域划分,具体见表 3。针对各子流域的水网节点进行研究,图 1 为水网节点度中心性分级的空间分布。由图 1 可见,海河流域 3 级节点占比最高(43.15%),显示渠系连接分布相对均匀,形成网格化结构;黄河流域 1 级节点占比显著偏高(35.17%),呈现典型的“树状主干+末梢分支”格局;淮河流域中高连接度节点比例相对突出,4 级节点占比最高(11.57%),表明其人工枢纽节点作用显著;长江流域则表现出 1 级与 3 级节点均衡分布的特征,是典型的多中心混合型水网。不同的度中心性结构特征实质上反映了流域在演化过程中形成的连接逻辑与功能布局。黄河上游水系天然分叉少,支流独立性强,导致度数结构偏于末端化;长江则因支流广泛分布,流量多源汇集,形成广布连接的中等级节点;淮河水系因枢纽调控需求大,工程性连接高度集中,强化了局部连通性;海河流域的渠系连通形式受规划工程主导,其均质连接结构则凸显典型的人为设计痕迹。度中心性作为节点局部交互强度的指示器,可用于识别关键交汇点和水利控制

节点,为局地调度管理和连接冗余度优化提供支持。图 2 为水网节点度中心性的分级统计。从整体分布特征来看,低链接性节点(1、2 级)占比超过 50%,构成网络末端与支线;中等链接性节点(3 级)约占 40%,承担局部集散与过渡功能;而高等链接性节点(4 级及以上)仅占 5%左右,作为核心枢纽支撑网络整体连通。四大流域节点度中心性呈现“金字塔型”结构,这一结构符合复杂网络理论中异质性或无标度特性的普遍规律,表明该水网系统的连接性分布极不均衡,网络功能高度依赖于少数关键枢纽节点,整体结构表现出显著的非均匀性与层级化特征。

3.1.2 中介中心度分布特征

图 3 为水网节点中介中心度分级的空间分布,图 4 为水网节点中介中心度频率累积曲线。由图 3、图 4 可见,四大流域中,长江与淮河流域中介中心度分布表现出典型的低值主导型特征,94%以上的节点集中在 1 级区间,表明多数节点处于非枢纽位置,具备冗余路径结构,流动控制权分散;其中,长江流域干支流交织密布,淮河流域以湖泊-主渠为主干构建流通路径,均强化了流域整体的拓扑冗余性。相比之下,黄河与海河流域节点的中介中心度分布则呈现出较强的极化特征,高等级节点占比较

表 3 子流域划分结果

Table 3 Division results of sub-basins

编号	名称	编号	名称	编号	名称
S ₁	徒骇马颊河	S ₂₆	玛曲至龙羊峡	S ₅₁	汉江丹江口以下
S ₂	黑龙港运东	S ₂₇	河源至玛曲	S ₅₂	唐白河
S ₃	漳卫河	S ₂₈	湟水	S ₅₃	汉江丹江口以上
S ₄	子牙河	S ₂₉	吴堡右岸	S ₅₄	洞庭湖环湖区
S ₅	大清河	S ₃₀	石嘴山至河口镇干流	S ₅₅	澧水
S ₆	永定河	S ₃₁	渭河	S ₅₆	宜宾至宜昌长江干流
S ₇	北三河	S ₃₂	淮河干流蚌洪区间	S ₅₇	赤水河
S ₈	滦河	S ₃₃	小清河	S ₅₈	渠江
S ₉	内流区	S ₃₄	胶东诸河	S ₅₉	涪江
S ₁₀	花园口以下干流区间	S ₃₅	沂沭河	S ₆₀	沱江
S ₁₁	大汶河	S ₃₆	里下河	S ₆₁	青衣江和岷江干流
S ₁₂	金堤河和天然文岩渠	S ₃₇	淮河干流王蚌区间	S ₆₂	大渡河
S ₁₃	小浪底至花园口干流区间	S ₃₈	淮河干流王家坝以上	S ₆₃	石鼓以下长江干流
S ₁₄	伊洛河	S ₃₉	通南及崇明岛诸河	S ₆₄	雅砻江
S ₁₅	沁丹河	S ₄₀	青弋江和水阳江及沿江诸河	S ₆₅	长江干流直门达至石鼓
S ₁₆	三门峡至小浪底区间干流	S ₄₁	巢滁皖及沿江诸河	S ₆₆	通天河
S ₁₇	龙门至三门峡干流区间	S ₄₂	城陵矶至湖口右岸	S ₆₇	太湖
S ₁₈	泾河张家山以上	S ₄₃	武汉至湖口左岸	S ₆₈	赣江
S ₁₉	北洛河状头以上	S ₄₄	宜昌至武汉左岸	S ₆₉	湘江
S ₂₀	汾河	S ₄₅	清江	S ₇₀	资水冷水江
S ₂₁	下河沿至石嘴山干流	S ₄₆	鄱阳湖环湖区	S ₇₁	沅江
S ₂₂	清水河与苦水河	S ₄₇	饶河	S ₇₂	乌江
S ₂₃	兰州至下河沿干流	S ₄₈	信江	S ₇₃	嘉陵江
S ₂₄	龙羊峡至兰州干流区间	S ₄₉	抚河		
S ₂₅	大夏河与洮河	S ₅₀	修水		

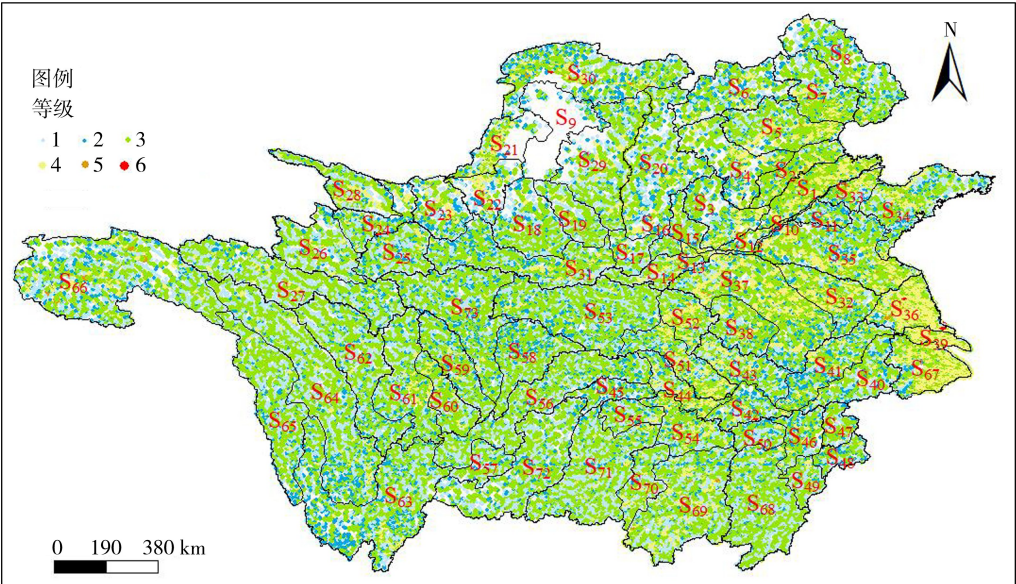


图 1 水网节点度中心性分级的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of degree centrality grading for water network nodes

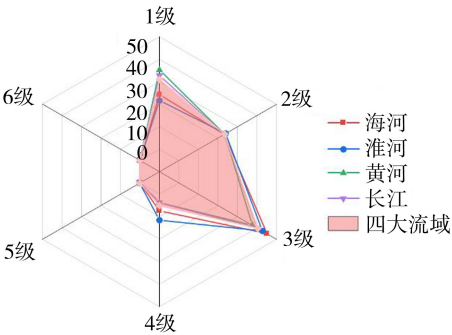


图 2 水网节点度中心性分级统计

Fig. 2 Statistics of degree centrality grading for water network nodes

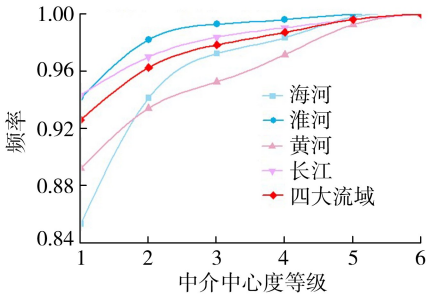


图 4 水网节点中介中心度频率累积曲线

Fig. 4 Frequency cumulative curves of betweenness centrality for water network nodes

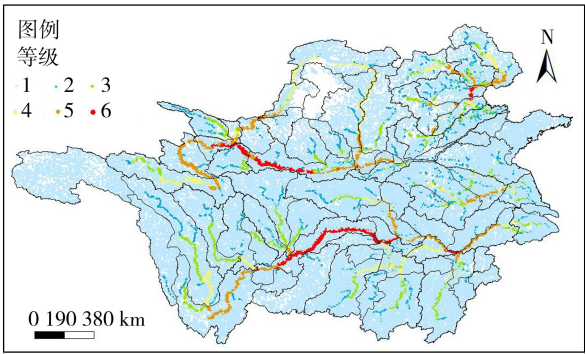


图 3 水网节点中介中心度分级的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of betweenness centrality grading for water network nodes

大,特别是黄河流域6级节点占比达0.72%,远高于其他流域,这表明该流域的水流传输路径较少、控制点集中,一旦关键节点受阻,可能对全网连通性产生明显影响。这种流域间的结构差异可归因于地貌格局、水系形态与人工干预程度的综合作用。长江、淮河流域支流众多,水流路径灵活,可替代性强;而黄

河流域中游峡谷段地势狭窄,支流稀少,天然形成了水流的集聚控制点。此外,海河流域渠系密布,水利枢纽高度集中,进一步强化了人工控制结构的极化程度。中介中心度的结构异质性反映了各流域水网在调度韧性、分流能力和节点冗余方面的系统差异,也为精准识别控制瓶颈提供了定量依据。

3.1.3 特征向量中心性分布特征

特征向量中心性综合考虑了节点本身连接数量以及其连接对象的重要性,是识别网络中高影响力、低显性度节点的重要指标。该指标能有效揭示那些虽非直接枢纽,但与高中心节点强关联的隐性控制点。图5为水网节点特征向量中心性分级的空间分布,图6为水网节点特征向量中心性分级占比。由图5、图6可见,四大流域节点特征向量中心性呈现出差异明显的结构特征。海河流域的节点呈“阶梯式衰减型”结构,3~6级节点占比逐级下降,体现出较为清晰的分层控制体系。黄河流域则以1~2级节点为主导,占比合计超过85%,其余等级节点占比显著偏低,反映出其以末端流动为主,结构单中心

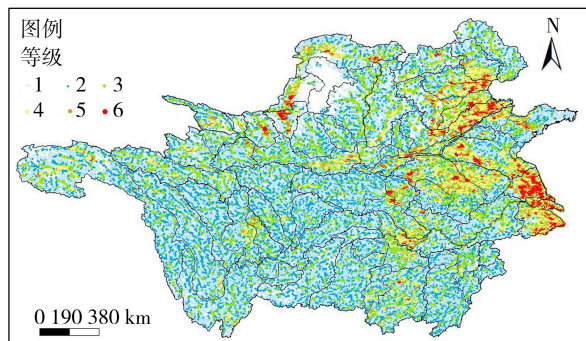


图5 水网节点特征向量中心性分级的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of eigenvector centrality grading for water network nodes

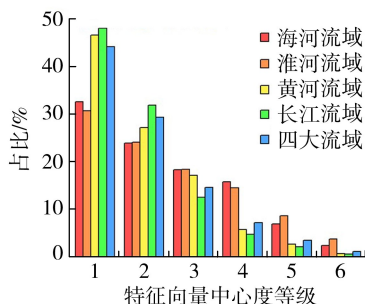


图6 水网节点特征向量中心性分级占比
Fig.6 Proportion of eigenvector centrality grading for water network nodes

导向明显。淮河流域呈高等级节点为中心的尖顶型结构,5级和6级节点合计占比达9.07%,高于其他流域,表明其局部控制节点作用尤为显著,与大型枢纽工程集群高度重合。长江流域则形成“底座膨胀型”结构,1级节点占比高达59.03%,而高等级(4级及以上)节点占比不足2%,显示其网络控制力量发散,影响范围广,具备高度分布式特征。这些结构特征可归因于自然演化与工程塑形的共同作用。长江流域支流多、节点广布,强化了基础节点的结构稳定性;黄河流域则以主干控制为主,支流参与度有限;淮河流域则依赖于集中枢纽的单点辐射控制;而海河流域渠系工程强调层级调控,形成了均匀影响力梯度。特征向量中心性所揭示的结构特征为不同流域管理提供了重要启示:在控制节点高度集中的流域(如淮河流域),应建立核心节点的专项调度机制;在基础节点分布密集的流域(如长江流域),需加强冗余节点功能维护,以保障网络整体稳定性;而在结构极化明显的流域(如黄河流域),则应强化主控干道节点的资源传导效率和生态风险防控能力。

3.1.4 节点综合重要度等级与工程耦合分析

图7为水网节点综合重要度分级的空间分布,图8为水网节点综合重要度分级占比。由图7、图8可见,四大流域普遍以4级节点为主,占比分别为海河流域50.68%、黄河流域39.24%、淮河流域

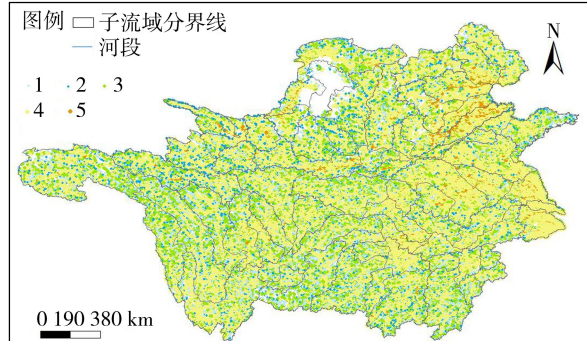


图7 水网节点综合重要度分级的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of comprehensive importance degree for water network nodes

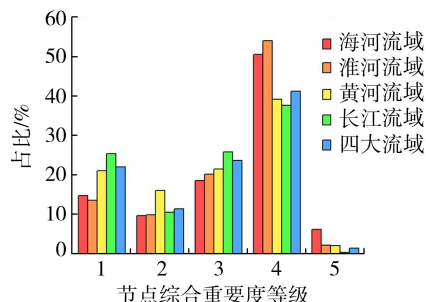


图8 水网节点综合重要度分级占比
Fig.8 Proportion of comprehensive importance degree for water network nodes

54.16%、长江流域37.77%,体现出中高等级节点在各流域内普遍的主导地位,可见多数节点在至少1项指标上具有较高表现,具备一定的区域调控能力或网络协调价值。然而,各流域的分级结构仍呈现出明显差异。海河与淮河流域4~5级的高等级节点占比较高,分别为56.87%与56.34%,表明其网络结构具有中心性极化特征,控制节点相对集中。相较之下,长江流域1~3级的中低等级节点合计占比达61.89%,呈现更为均衡的等级分布,表明其网络控制体系趋于分散、调控节点分布广泛。黄河流域则介于两者之间,表现出一定程度的过渡性特征,既存在一定数量的高等级控制节点,又保留较大比例的基础节点,具备多层级调控的结构基础。分析表明,淮河与海河流域存在高等级节点明显聚集的趋势,反映出工程性渠化水系下集中控制模式的典型特征。相比之下,长江流域则体现出典型的分散-平衡式等级布局,其主干道与次级支流之间存在较强的均衡连接结构,有利于提高流域系统的冗余性与调度灵活性。值得注意的是,四大流域中均未观测到6级战略极枢纽节点。这一现象可能反映了自然水网对极端中心化节点的结构约束,也可能受到人为规划均衡控制目标的影响。整体来看,综合重要度等级的空间分布揭示了水网结构在不同尺度上的异质性与流域管理策略的差异化。

节点等级的空间组织不仅受网络自身结构影响,也受到大型水利工程的干预调控。在此基础上,本文进一步选取具有代表性的工程枢纽与高中心性节点开展空间耦合分析,识别人工控制设施在网络重构中的作用机制,结果如图 9 所示。由图 9 可见,多数高等级节点空间上与重要水利工程高度重合,形成节点-设施耦合控制格局。具体而言,淮河流域的王家坝闸-洪泽湖系统通过控制-滞蓄-分流路径调节区域洪水;江都水利枢纽作为南水北调东线起点,集泵站、闸坝与引渠于一体,是典型的复合型枢纽节点。黄河中游的小浪底水库在拓扑网络中居于控制-可达双高区段,其调蓄能力与中游生态修复功能叠加,构成流域中下游的关键传输节点。长江流域的三峡水库因具备巨大调蓄能力和地理通道控制优势,成为网络结构意义上的“超级节点”,对干流水量调控与下游生态补水起决定性作用;而位于支流汉江的丹江口水库,作为南水北调中线源头,不仅提升了区域水资源配置能力,也通过跨流域连接打通了长江、淮河、黄河、海河流域的水文联系,具有典型的结构边界突破功能。此外,洞庭湖口与鄱阳湖口等湖区枢纽节点则通过闸坝系统实现水量调控与干支流交互效率控制,是分布式多枢纽系统中的典型代表。空间耦合分析还发现,部分节点虽在自然网络结构中处于边缘位置,但因工程作用跃升为控制核心,例如海河流域的枣林庄枢纽,其不仅调节区域生态需水,还在南水北调中线东线联合调度中承担着调蓄、分流与输水控制的重要职能。这类“跃迁型枢纽”打破了拓扑结构中控制权与地理位置的传统一致性,为人工设施对网络结构的塑形作用提供了实证支撑。

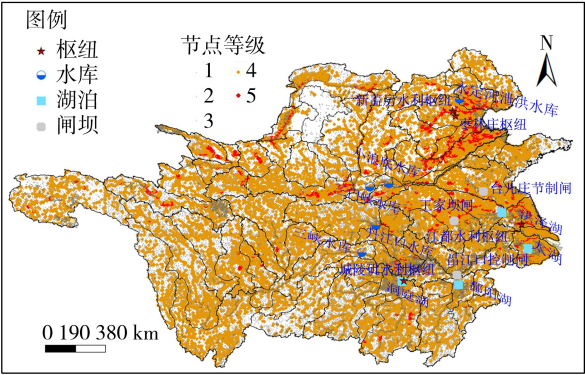


图 9 流域枢纽节点与人工控制工程的空间耦合分析结果
Fig. 9 Spatial coupling analysis results of watershed hub nodes and artificial control engineering

3.2 通道可达性分析及调水工程路径匹配分析

本文选用莫兰指数对流域中心性指标(河段度中心性和接近中心度)进行空间自相关分析,莫兰

指数取值范围为 $-1 \sim 1$,正值表示高值或低值在空间上的聚集,负值表示空间异质性增强,接近 0 则表示随机分布。流域中心性指标的空间自相关分析结果如图 10 所示,可见四大流域水网结构存在显著分异特征。度中心性呈现明显的空间集聚格局,其莫兰指数 I 达到 0.349 4(统计值 $z = 594.71$,概率值 $p < 0.001$),显著高于期望值(-0.000011),表明流域网络连接性具有典型的“枢纽-边缘”结构特征,高值区与低值区分别形成显著集聚。相比之下,接近中心度(图 11)虽然同样表现出显著的空间自相关性($I = 0.1314, z = 223.75, p < 0.001$),但其空间分布呈现更强的离散特征,这种差异反映了流域通达性更易受局部水利工程等人类活动干预。

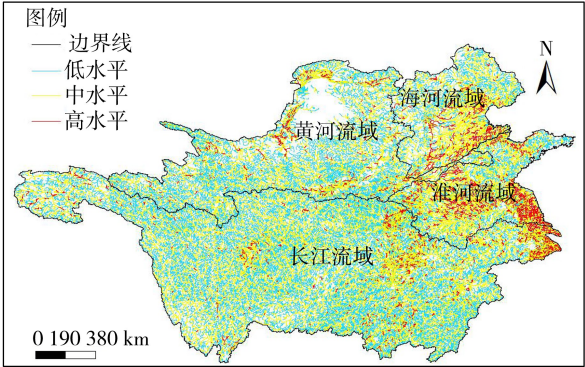


图 10 流域度中心性空间分布图
Fig. 10 Spatial distribution of watershed degree centrality

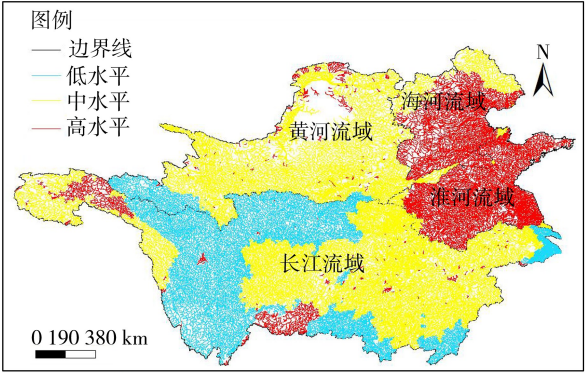


图 11 流域接近中心度空间分布图
Fig. 11 Spatial distribution of watershed closeness centrality

基于各流域河段度中心性和接近中心度,划分水网通道的功能类型,基于上述二维分类标准,提取各河段的功能通道类型,并绘制其空间分布,结果如图 12 所示。由图 12 可见,水网通道功能类型具有明显的空间差异性,中等过渡型通道在表现出绝对主导地位,广泛分布于四大流域的干流与主要连接线上。而核心枢纽型、通达服务型、边缘隔离型与局部瓶颈型通道则在空间上呈现出显著的异质性与区域聚集特征。可见,水网连接性主要受自然地理条

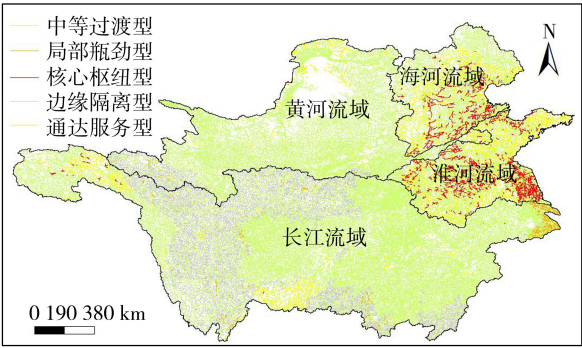


图 12 水网通道功能类型的空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of functional types for water network channels

件形成的结构性约束,而通达性特征则更多受到人为改造活动的影响,这种双重作用机制共同塑造了流域水网的空间格局。表 4 为四大流域不同通道功能类型占比。由表 4 可见,海河与淮河流域具备较多的核心枢纽型与通达服务型通道,说明其水网结构更具人工调控性与连通性,符合其密集渠系和工程设施分布特点;黄河与长江流域则以中等过渡型通道为主,尤其黄河流域占比达 88.10%,表明其网络结构整体趋于均衡但缺乏高度集聚功能节点;长江流域存在明显的边缘隔离型与局部瓶颈型通道,反映其支流众多、地形复杂,部分节点受限于地理与水文条件,通达性与控制力均较弱。从功能特征看,各类型通道各有其典型代表:核心枢纽型以长江武汉航运枢纽为代表,体现其强控制力与高连通效率;局部瓶颈型以黄河小浪底坝下河段为典型,体现局部控制力强但整体通达受限的特征;通达服务型如海河北运河调水渠道,其主要承担辅助连通与服务

功能;边缘隔离型以长江金沙江孤立支流为例,处于网络边缘且功能相对受限;中等过渡型则如淮河自然河段,其各项中心性居于中等水平,在网络中承担基础连接与过渡作用。

表 4 四大流域不同通道功能类型占比 单位: %

Table 4 Proportion of different channel functional types in four major river basins unit: %					
流域	核心枢纽型	通达服务型	中等过渡型	局部瓶颈型	边缘隔离型
海河	14.29	17.42	68.29	0	0
黄河	0.78	6.30	88.10	1.34	3.48
淮河	22.02	18.71	58.08	1.20	0
长江	0.31	2.74	78.75	3.76	14.45

控制-可达二维矩阵不仅揭示了河段在网络结构中的功能定位,也反映了流域内部治理结构的差异。例如,长江三角洲虽经济发达、水网密集,但因调度机制复杂、节点层级分明,局部瓶颈现象依然存在,显示出工程与自然因素共同作用下的空间结构不平衡。本文采用的水网数据中包含南水北调中线、东线及引黄济青、引黄济烟等主要调水工程路径,通过将调水通道与控制-可达二维功能通道分类结果进行空间叠加,统计其所穿越河段的结构类型,结果如图 13 所示,可见调水路径具有显著的结构功能富集性。具体而言,核心枢纽型河段在南水北调中线通道中占比达 75.42%,东线通道中为 62.58%,引黄济青及引黄济烟干渠中则高达 80.25%,表明调水通道在路径布局上对网络关键节点具有明显倾向性。与此同时,中等过渡型通道仍占其余路径的主要部分,而通达服务型通道在调水线路中的占比相对较低,进一步反映出调水通道以

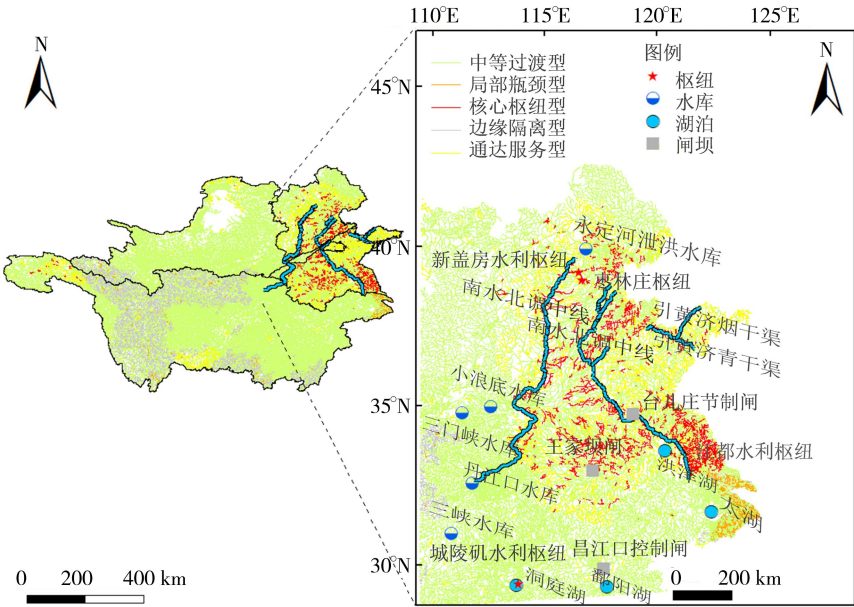


图 13 调水工程通道路径与通道功能类型空间匹配结果

Fig. 13 Spatial matching diagram of channel paths and channel functional types in water transfer project

控制力强、连通效率高的结构类型为主导。

综上所述,当前调水工程路径在结构上高度匹配水网的控制-可达系统,已成为资源输送与调配的网络主骨架。这些通道不仅具备较强的控制能力,也位于整体网络的高通达性区,说明调水工程设计过程中充分考虑了结构支撑与路径效率,体现出强烈的结构嵌入性。从拓扑角度看,调水工程有效地强化了原有核心枢纽之间的直接连通,构建出覆盖面广、传输效率高、响应灵敏的水资源主通道体系,为水资源空间调度与系统鲁棒性提供了结构保障。

4 结 论

- a. 四大流域水网结构空间分异明显。长江流域1~3级节点占比达61.89%,显示分散型结构;海河与淮河流域以高等级节点为主(均超56%),体现集中控制;黄河流域则兼具一定比例的高等级与低等级节点,表现出过渡性。多数高等级节点与三峡、小浪底、江都等枢纽工程重合,形成明显的节点-设施耦合格局。
- b. 四大流域水网功能通道分布差异突出。淮河流域核心枢纽型通道占比22.02%,凸显流域人工调控集中;黄河流域中等过渡型通道占比88.10%,表明流域水网通道均衡但缺乏强控制通道;长江流域边缘隔离型与局部瓶颈型通道合计占比18.21%,表明流域通道受复杂地形制约;海河流域以核心枢纽型和通达服务型通道为主(31.71%),凸显渠化工程作用。
- c. 四大流域调水路径嵌入性强。南水北调东线、中线及引黄济青/济烟工程中核心枢纽型通道比例分别为62.58%、75.42%、80.25%,远高于流域平均水平,显示调水工程高度依托高控制-高可达的主骨架体系,构成国家水资源调度主干网络。

参考文献:

[1] 赵勇,王浩,马浩,等. 中国“双T”型水网经济格局建设构想[J]. 水利学报,2022,53(11):1271-1279. (Zhao Yong,Wang Hao, Ma Hao, et al. Conception of China's "Double T"-shaped water network economic pattern construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(11):1271-1279. (in Chinese))

[2] 郭旭宁,何君,张海滨,等. 关于构建国家水网体系的若干考虑[J]. 中国水利,2019(15):1-4. (Guo Xuning, He Jun, Zhang Haibin, et al. Considerations on forming national water networks[J]. China Water Resources,2019(15):1-4. (in Chinese))

[3] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative

morphology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1945,56(3):275-370.

[4] Strahler A N. Hypsometric (area altitude) analysis of erosional topology[J]. Bulletin of the Geological Society of America,1952,63(11):1117-1142.

[5] Rodriguez-Iturbe I,Rinaldo A. Fractal river basins; chance and self-organization [M]. Cambridge: Cambridge University Press,1997.

[6] 李华晔,赵庆云. 河流水系分形的初步研究[J]. 水科学进展,1998,9(3):218-223. (Li Huaye,Zhao Qingyun. The preliminary study for fraction of river system[J]. Advances in Water Science,1998,9(3):218-223. (in Chinese))

[7] 张丽,王光谦,魏艳荣. 基于Tokunaga网络的河网形态特征量化研究[J]. 水科学进展,2009,20(5):700-706. (Zhang Li, Wang Guangqian, Wei Yanrong. The quantization of river network morphology based on Tokunaga network[J]. Advances in Water Science,2009,20(5):700-706. (in Chinese))

[8] 李发文,刘慧婉,仇昊雨,等. 流域水系地貌定律的适应性与异质性研究[J]. 水资源保护,2025,41(2):19-29. (Li Fawen, Liu Huiwan, Qiu Haoyu, et al. Study on adaptability and heterogeneity of water system geomorphic laws in watersheds[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):19-29. (in Chinese))

[9] Sivakumar B, Woldemeskel F M. Complex networks for streamflow dynamics [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2014,18(11):4565-4578.

[10] Dong Y Y, Hua Z L, Wang P, et al. Insights into the effects of river network topology on sudden pollution risks [J]. Journal of Hydrology,2025,648:132316.

[11] 冯硕,李想,丁灿林,等. 基于加权边连通度和复杂网络方法的多闸坝平原河网连通性分析[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(3):81-87. (Feng Shuo, Li Xiang, Ding Chanlin, et al. Connectivity analysis of plain river network with multiple dams based on weighted edge connectivity and complex network method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2021,32(3):81-87. (in Chinese))

[12] 赵进勇,高俊峰,吴雪峰. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水利学报,2017,48(2):157-165. (Zhao Jinyong, Gao Junfeng, Wu Xuefeng. Connectivity evaluation technology for plain river network regions based on edge connectivity from graph theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(2):157-165. (in Chinese))

[13] 安东,宋倍,吴宝国. 塔里木河流域信息化资源整合实践与成效[J]. 水资源保护,2021,37(5):68-74. (An Dong, Song Bei, Wu Baoguo. Practices and benefits of integrating information resources in Tarim River Basin [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):68-74. (in

- Chinese))
- [14] 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))
 - [15] 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))
 - [16] 陆永军,赵雅慧,左利钦,等. 弱混合陆相河口三角洲水文连通性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 129-140. (Lu Yongjun, Zhao Yahui, Zuo Liqin, et al. Research progress on hydrological connectivity in weakly mixed land-dominated estuarine deltas [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 129-140. (in Chinese))
 - [17] Bracken L J, Croke J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(13): 1749-1763.
 - [18] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, et al. The river continuum concept[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(1): 130-137.
 - [19] Ward J V, Stanford J A. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1995, 11(1): 105-119.
 - [20] Poff N L, Allan J D, Bain M B, et al. The natural flow regime[J]. BioScience, 1997, 47(11): 769-784.
 - [21] 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 and Water Engineering, 2023, 34(6): 16-26. (in Chinese))
 - [22] 刘丹,刘春霞,张兆吉. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1561-1572. (Liu Dan, Liu Chunxia, Zhang Zhaoji. Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: a review[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1561-1572. (in Chinese))
 - [23] 孙伟. 黄河流域城市能源生态效率的时空差异及其影响因素分析[J]. 安徽师范大学学报(人文社会科学版), 2020, 48(2): 149-157. (Sun Wei. Analysis on the spatial and temporal differences of urban energy eco-efficiency in the Yellow River basin and its influencing factors[J]. Journal of Anhui Normal University (Hum. & Soc. Sci.), 2020, 48(2): 149-157. (in Chinese))
 - [24] 杨荣钦,穆振侠,黄婉婷,等. 基于生态系统可持续的塔里木河流域生态安全格局构建[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7329-7343. (Yang Rongqin, Mu Zhenxia, Huang Mianting, et al. Construction of ecological security pattern of Tarim River Basin based on ecosystem sustainability [J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 7329-7343. (in Chinese))
 - [25] 吴文庆. 加快构建国家水网推动水利高质量发展[J]. 中国水利, 2024(24): 7-9. (Wu Wenqing. Accelerating construction of the national water network and promote high-quality development of water resources [J]. China Water Resources, 2024(24): 7-9. (in Chinese))
 - [26] 王宗志,张安齐,王坤,等. 等高截水工程实施后东海县河网区水系格局及连通性变化定量分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 31-38. (Wang Zongzhi, Zhang Anqi, Wang Kun, et al. Quantitative analysis of water system pattern and connectivity changes in river network area after implementation of contour interception project in Donghai County[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 31-38. (in Chinese))
 - [27] 刘辉风. 基于流域地貌特征的水系结构及河网片段化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
 - [28] 朱长富,甘郝新,何宝根. 数字孪生水利工程建设动态智能监测系统研发与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 41-47. (Zhu Changfu, Gan Haoxin, He Baogen. Development and application of dynamic intelligent monitoring system for digital twin hydraulic engineering construction [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 41-47. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-07-07 编辑: 王芳)