

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.031

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.031

孙光茹, 邱国强, 姜晓军, 等. 运河对河湖水系连通网络水文连通性的影响机制[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 167-178, 190.

SUN Guangru, QIU Guoqiang, JIANG Xiaojun, et al. Impact mechanisms of canals on hydrological connectivity of river and lake system interconnection networks[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 167-178, 190.

运河对河湖水系连通网络水文连通性的影响机制

孙光茹¹, 邱国强¹, 姜晓军², 王学为¹, 王静¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 烟台市土地储备和利用中心, 山东 烟台 264003)

摘要: [目的] 作为新建型河湖水系连通工程, 运河改变河湖水系连通网络的连通格局, 影响河湖水系连通网络内物质、能量和风险的传递路径, 但对河湖水系连通网络水文连通性的影响机制尚不清晰。[方法] 以环莱州湾地区作为研究区, 应用 SWAT+ 模型和图论方法, 分析有运河和无运河 2 种情景下河湖水系连通网络的水文连通性, 探究运河对区域内不同流域、不同水体类型的影响机制。[结果] 运河对不同流域水文连通性的影响受流域河网结构、河流流量、运河连接数量和连接位置主导, 潍河流域和弥河流域河网结构复杂, 自身水文连通性较高, 受运河影响程度较低, 黄河-广利河流域及大沽河-胶莱河流域运河连接密度较大, 水文连通性受运河影响较大, 其河流连通网络的抗退化风险能力和连通重要性程度指标值均提高 20 倍。针对不同水体类型, 低流量河段的抗干扰能力最高, 分别为湖泊水库和高流量河段平均值的 3.4、1.5 倍, 但低流量河段对运河的敏感度最低, 湖泊水库受运河的影响程度最高; 运河对不同水体类型的影响受水体与网络中心水体的距离主导。[结论] 在开展区域河湖水系连通网络规划时, 应考虑连通影响能力的“优先连接”和抗干扰能力的反“优先连接”增长机制, 以更合理地规避水文连通性非预期增长所面临的风险。

关键词: 运河; 河湖水系连通网络; 水文连通性; 图论; SWAT+ 模型

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0167-12

Impact Mechanisms of Canals on Hydrological Connectivity of River and Lake System Interconnection Networks

SUN Guangru¹, QIU Guoqiang¹, JIANG Xiaojun², WANG Xuwei¹, WANG Jing¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China;

2. Yantai Land Reserve and Utilization Center, Yantai, Shandong 264003, China)

Abstract: [Objective] As newly constructed river and lake system interconnection projects, canals change the connectivity pattern of the river and lake system interconnection network. Furthermore, it affects the pathways of material, energy and risk across the network, but the mechanism by which newly constructed canals affect the the river and lake system interconnection network is not yet clear. [Methods] The area around Laizhou Bay was selected as the study area. The SWAT+ model and graph theory method were employed to analyze the hydrological connectivity of the river and lake system interconnection network under two scenarios, with and without the canal. This was done to explore the differences in the impacts of canals on the various river basins, as well as on different types of water bodies, such as lakes, low-flow streams and high-flow streams. [Results] In comparison to other river basins, the hydrological connectivity of the Weihe River Basin and the Mihe River Basin is greater under the no-canal scenario, with the lowest degree of influence from the canal. The Yellow River-the Guangli River Basin and the Dagou River-the Jiaolai River Basin are influenced by the canal, and the greatest improvement is observed, with the values of betweenness centrality and closeness centrality indicators both increasing by more than 20 times. The impact of canals on the hydrological connectivity of diverse basins is largely

收稿日期: 2024-10-19

修回日期: 2024-11-25

录用日期: 2024-12-02

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-01-15

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42276233)

第一作者: 孙光茹 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 202221470024@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 王静 (1966—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态保护与土地资源可持续利用研究。E-mail: wangjing-bnu@bnu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

contingent upon river network structure, the number and the location of canal connections. Low-flow streams exhibited the highest value of closeness centrality indicator, which is 3.4 times and 1.5 times the average value of lakes and high-flow streams, respectively. Lakes is the most affected by the canal, while low-flow streams are the least affected. This suggests that the lower the disturbance-resistant capacity of the water body, the more sensitive it is to the canal's response. The impact of canals on different water body types is dominated by the distance of the water body from the central water bodies of the network. **[Conclusion]** The planning of regional river and lake system interconnection networks should take into account growth mechanisms, including 'preferential attachment' of betweenness centrality and anti-'preferential attachment' of closeness centrality. This will enable a more appropriate avoidance of the risk of unintended growth in hydrological connectivity.

Keywords: canal; river-lake system interconnected network; hydrological connectivity; graph theory; SWAT+ model

Received: 2024-10-19

Revised: 2024-11-25

Accepted: 2024-12-02

Online(www.cnki.net): 2025-01-15

河湖水系连通战略被确立为国家重大治水战略,具有水资源配置、防洪抗旱和水生态保护等多方面的战略意义,是中国江河治理和水资源开发利用保护的新理念^[1]。河湖水系连通为以维系不同水体间的水力联系与物质循环为目标,在自然水系的基础上通过自然和人为驱动作用,维持、重塑或构建满足特定功能与目标的水流连接通道^[2]。根据连通性质,河湖水系连通工程分为恢复型水系连通和新建型水系连通^[3]。其中,新建型河湖水系连通网络通过修建水库、大坝、运河等水利设施改变原有的自然水系格局和自然流动规律,形成“人工-自然”复杂网络系统,使区域/流域水文情势发生改变^[4]。但河湖水系连通网络在改变水文情势以满足人类经济社会发展需求的同时,也存在显性和隐含的风险,人类活动干扰和气候变化等因素都对这个复杂网络系统产生微妙或颠覆性的影响^[5]。目前河湖水系连通网络的系统脆弱性与适应能力尚不明确,为了提高河湖水系连通网络的健康保障能力,改善河湖水系连通网络应对干旱、洪水、生态入侵等风险的科学对策,亟待丰富河湖水系连通网络的相关研究。

作为新建型水系连通工程主要类型之一,运河为结构性干预工程,能够改变自然水流路径和流量分配,进而影响整个河湖水系连通网络的水文特性和生态功能^[6-7]。通过将上游的沉积物经由新建河道传输至下游,运河可以恢复退化的湿地或河道^[8]。目前新建运河对区域河湖水系连通网络的影响机制尚不清晰。运河对河流湖泊影响的多数研究主要以河流^[9]、湖泊^[10-12]、水库下游河道^[13]等局部水体为研究主体,这些研究只着眼于单一水体斑块对运河的响应,忽略运河对河湖水系连通网络的系统性影响。河湖水系连通网络内的各类型水体斑块互相连接,因此,将研究主体由单一水体斑块扩展到网络整体是必要的^[14]。

因为运河的主要目标为跨流域调水,所以区域河湖水系连通网络通常由不同流域、不同类型的水体斑块组成。考虑到不同流域具有不同的水系结构,不同类型的水体斑块具有不同的连通频率和连通通量,探究运河对不同流域和不同类型水体斑块的影响差异和影响机制,有助于推进河湖水系连通工程的合理布局研究。目前主要通过分析河道网络结构^[14-15]的变化,定量分析运河对河湖水系连通网络的影响。常用的河道网络结构指标包括网络密度、分形维数、交点数和运河比例等^[15],这些指标能够反映运河对河网结构的影响,但无法评估运河对网络内各水体斑块功能性的影响和网络缓解风险能力。相较于传统河网结构指标,图论方法有助于捕捉网络的空间关系。有学者^[14]应用图论方法以网络的全局视角分析济南小清河河道网络的风险缓解能力,为流域水资源管理提供结构化、系统化的应急方案。图论的中心性指标可以表征各水体斑块在河道网络中的相对重要性,识别网络中的关键水体斑块^[16-17]。与功能通量结合,图论方法还可以用于评估河湖水系连通网络的功能连通性^[18]。SWAT模型被广泛用于模拟河流网络的径流量等功能通量指标,且在大部分流域具有良好的适用性^[19-22]。SWAT+模型是在SWAT模型基础上改进的水文模型,虽然目前对其适用性分析较少,但已有成熟的算法基础。相较于SWAT模型,SWAT+模型在设置运河、湖泊水库与自然河流网络的连接情景时具有更大的灵活性^[23],更适用于模拟河湖水系连通网络的径流通量。综上所述,应用SWAT+模型和图论方法对河湖水系连通网络的结构连通性和功能连通性进行分析,具有方法上的优势。

环莱州湾地区是中国调水工程建设的密集区,受季风气候影响,降水和径流补给不足使得区域内包括湿地和间歇性河流在内的水体均面临着严峻的

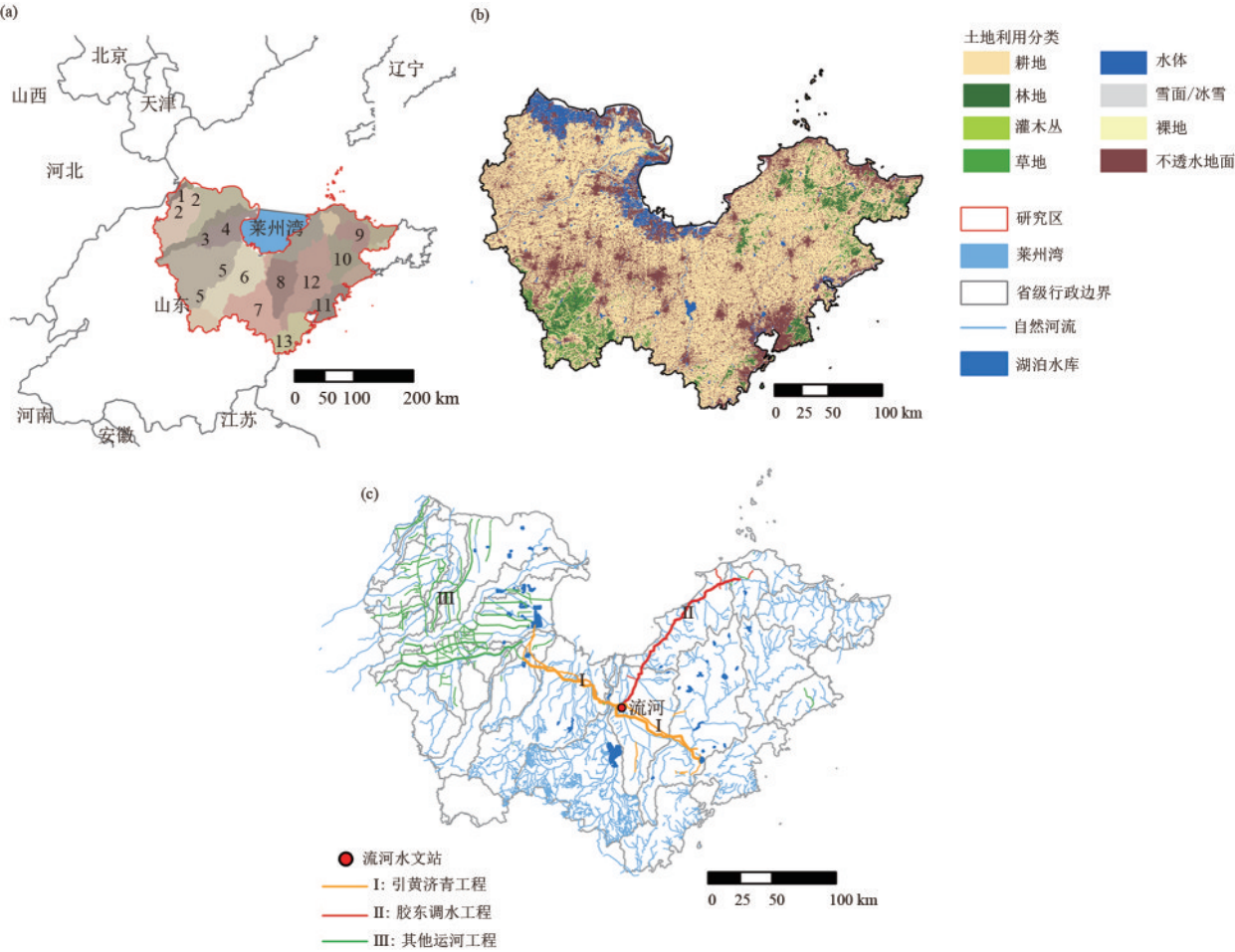
退化风险^[24],区域水系的流向和连通状况在运河影响下发生较大的改变。本研究应用SWAT+模型模拟河段径流量,根据有无运河分别构建有运河情景和无运河情景的河湖水系连通网络,并采用图论方法分析河湖水系连通网络的结构连通性和功能连通性,分别探究运河对区域内不同流域河湖水系连通网络的水文连通性的影响差异,以及运河对湖泊水库、低流量河段和高流量河段等不同水体类型水文连通性的影响差异。以期为河湖水系连通网络的系统风险和适应能力研究提供新的视角和理论支持,并为区域河湖水系连通网络的规划提供指导。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

莱州湾岸线及海域分属山东省东营市的垦利

区、东营区、广饶县,潍坊市的寿光市、寒亭区、昌邑市,烟台市的莱州市、招远市和龙口市。因此,本研究区环莱州湾区域为以上这些行政区的集合,位于山东省的北部(36°25′~37°47′N,118°17′~120°44′E),总面积10 114 km²,沿莱州湾海岸呈半环状(图1a)。莱州湾以南为潍北冲海积平原,以西为黄河三角洲平原。环莱州湾区域地势低平,大部分土地利用类型为耕地(图1b)。环莱州湾区域位于温带季风气候区,降水量年际和年内变化大,6—9月多年平均降水量为3.907 mm,10月到翌年5月多年平均降水量为0.495 mm。区域内径流量空间差异明显,黄河流域年平均径流量为424 m³/s,小清河流域年平均径流量为12.9 m³/s,大沽河流域年平均径流量为0.5 m³/s,部分流域和河段年均径流量为0 m³/s。



注:图1(a)的省级行政边界底图基于审图号GS(2020)4619号的标准地图制作,边界无修改。

图 1 环莱州湾区域的位置、土地利用类型和水系分布

Fig. 1 Location, landuse types and spatial distribution of water systems in the study area

本研究以注入莱州湾的自然河流、湖泊水库及河
入莱州湾,从西至东分别为黄河、小清河、支脉河、弥
流间的运河为研究对象,河流中共有9条主要河流注
河、白浪河、潍河、虞河、胶莱河、界河等河流;3条河流
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

注入胶州湾,分别为洋河、大沽河和白沙河。研究区域内面积>1 km²的湖泊水库共有 49 处,其中 5 处为《中华人民共和国水文年鉴》记录在册的调节水库,分别为峡山水库、白浪河水库、产芝水库、尹府水库和王屋水库。区域内的运河是在 1951—2020 年陆续建设完成的,根据建设目的,主要分为调水和防洪抗汛 2 类工程。其中,供水型运河主要包括引黄济青工程和胶东调水工程(图 1c),引黄济青工程在 1986—1991 年建成,流经黄河、小清河、支脉河、弥河、白浪河、潍河,向南连接胶莱河,胶东调水工程在 2015—2020 年完成,在原有引黄济青线路上由胶州分叉点向北扩建,引水至平度、招远、烟台和威海。而抗汛型运河主要为黄河支流流域的运河,多属于季节性排水河道,其建成可以追溯到 1951 年,其后经历大量的修缮和扩建,发展至

如今的“人工-自然”河网分布。

1.2 数据来源

本研究所需的数据包括气象数据和流河站实测流量数据,土地利用数据、土壤数据、DEM 数据和数字水系,用于 SWAT+ 模型建模和参数率定,以及哨兵 2 号(Sentinel-2)遥感影像数据用于湿地斑块的提取。数据具体描述及数据源见表 1。SWAT+ 模型需要统一输入数据的边界和坐标系,需预处理模型输入数据。其中,气象数据为矢量点数据,利用泰森多边形将其转化为栅格数据,并将其与土地利用、土壤、DEM 等栅格数据裁剪为统一边界,转换为投影坐标系 WGS 1984 UTM Zone 50N。其次,提取后的湿地斑块需根据几何中心转换为点矢量,以便在 SWAT+ 模型中标识湖泊水库位置。

表 1 研究数据描述与来源

Table 1 Description and sources of data

数据	描述	来源
DEM	ASTER GDEM 30 m, 2020 年	地理空间数据云 https://www.gscloud.cn/search
土地利用	30 m, 2020 年	武汉大学 CLCD 数据集 ^[25]
土壤数据	675 m, 2020 年	SWAT 全球数据集(Global Data) https://swat.tamu.edu/data/
气象数据	Temperature、precipitation、wind、solar、relative humidity, 2008—2017 年	国家青藏高原数据中心 CMADS 数据集 ^[26] https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/
数字河网		OpenStreetMap(OSM) https://www.openstreetmap.org/
遥感数据	Sentinel-2, 2020 年	地理空间数据云 https://www.gscloud.cn/search
行政边界		Echarts Map https://hxxj.vip/demo/echartsMap/
实测径流	2008—2017 年	《中华人民共和国水文年鉴》黄河/淮河流域

1.3 研究框架

为定量分析运河对河湖水系连通网络水文连通性的影响,本文的研究流程见图 2。主要包括:1)应用 SWAT+ 模型模拟环莱州湾区域的河流径流量;2)组合运河、高流量河段、低流量河段、湖泊水库等不同类型的水体斑块,构建无运河和有运河两种情景下的河湖水系连通网络;3)结合 SWAT+ 模型模拟的径流量,应用图论方法分析河湖水系连通网络的结构连通性和功能连通性;4)分别研究运河对区域内不同流域和不同水体斑块类型的影响差异。

1.4 河湖水系连通网络情景设置

河湖水系连通网络是河流所能到达和连接的一切水体,包括运河、湖泊水库和河流等水体斑块构成的网络,其中河流包括高流量河流和低流量河流。通过组合水体斑块,根据有无运河连接,本文分别构建有运河和无运河的 2 种河湖水系连通网络情景。

1.4.1 提取湖泊水库斑块 根据中国现行湿地分类系统及山东省自然保护区和风景名胜区名单,确认本研究的湖泊水库为面积>1 km²的水体斑块。基于遥感影像的 MNDWI 指数^[27]提取水体斑块并采用目视法对湿地进行识别和形状校正。

1.4.2 基于 SWAT+ 模型模拟自然河流流量 基于河段径流量识别低流量河段和高流量河段,本研究应用 SWAT+Editor v2.6.8 软件构建 2008—2017 年环莱州湾区域的 SWAT+ 模型。SWAT+ 模型的输入数据包括 DEM、土地利用和土壤数据及气象等数据。经调试,当 burn-in strength=90, SWAT+ 所提取的水系更接近于实际数字水系。使用 Sobol 法^[28]对选取的 11 个参数开展一阶灵敏度分析,得到 5 个响应较为明显的参数,分别为水文响应单元(hru)组别的 cn2、esco 和 canmx,河道演算(rte)组别的 chk 和土壤(sol)组别的 awc。10 a 的实测流量数据分为预

热期(2008—2009年)、率定期(2009—2014年)和验证期(2014—2017年)。率定后得到的最优模拟结果

为NSE值为0.520,PBIAS值为9.357,模型模拟结果可用。

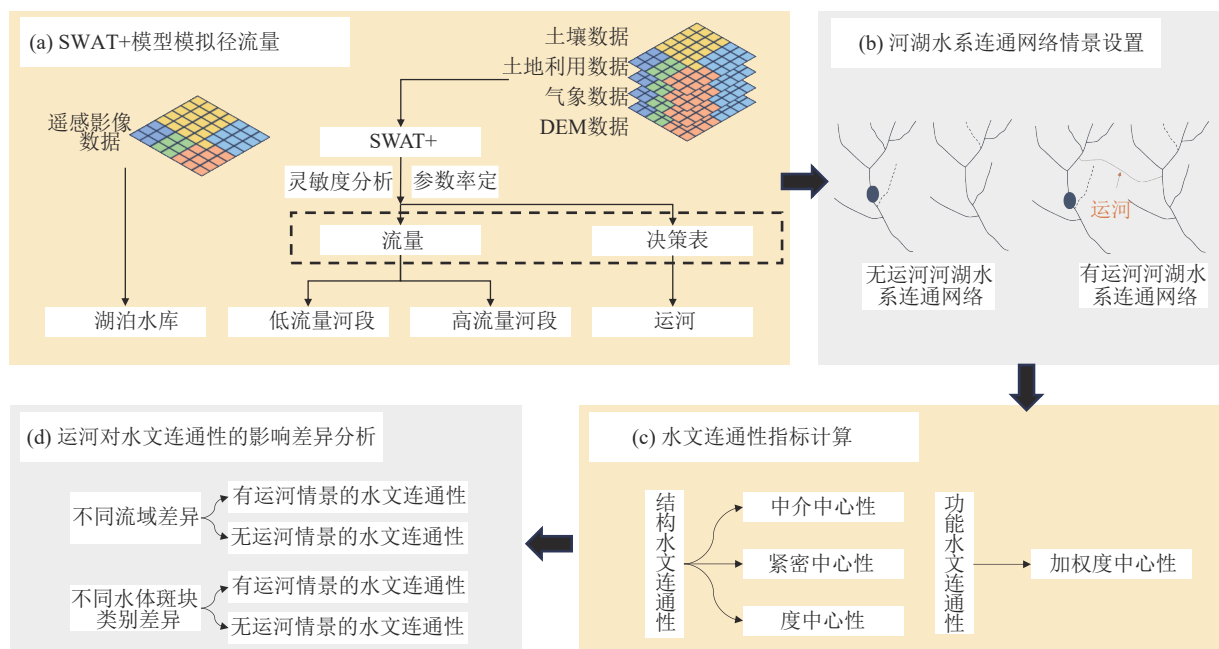


图2 研究流程

Fig. 2 Flow chart of the research

1.4.3 确定运河流向和流量 本研究使用SWAT+中的决策表(decision table)功能^[29]在自然河流的基础上设置运河的流向和流量。运河的调水河段的流向通常情况下根据坡向识别,由于研究区大部分位于平原地区,坡向难以识别,因此,运河流向根据流量梯度(即从流量大的河段流向流量低的河段)设置。运河的流量则根据其河道宽度与相连自然河道的宽度的比值确定。

$$\frac{Q_{\text{canal}}}{Q_{\text{near}}} = \frac{W_{\text{canal}}}{W_{\text{near}}} \quad (1)$$

式中: Q_{canal} 为运河的流量值, m^3/s ; Q_{near} 为运河相邻自然河段的流量值, m^3/s ; W_{canal} 为运河的河道宽度, m ; W_{near} 为运河相邻自然河道的宽度, m 。

1.4.4 河湖水系连通网络情景设置 环莱州湾区域在1951—2020年陆续建设引黄济青、胶东调水及防洪抗汛等运河工程。因其时间跨度较大,且工程建设的具体时间数据难以获得,因此本研究简化情景设置的时间跨度背景,只讨论有运河情景和无运河情景下的河湖水系连通网络。为定量研究运河对河湖水系连通网络不同流域和不同类型水体斑块水文连通性的影响差异,本研究不考虑时间差异,以2020年环莱州湾区域实际河湖水系连通网络为有运河情景,以2020年环莱州湾区域除运河之外的自然河湖水系连通网络为无运河情景。

1.5 河湖水系连通网络的水文连通性指标计算

1.5.1 图论的网络构建原理 应用图论构建河湖水系连通网络时,将湖泊水库、高流量河段和低流量河段等水体斑块简化为节点,用点集 V 表示,将水文斑块之间的连接位置用边集 E 表示,得到河湖水系连通网络图模型 $G=(V, E)$ 。其中, $V=\{v_i\}, i=1, \dots, N, N$ 为节点数; $E=\{e_i\}, i=1, \dots, M, M$ 为边数,每个 e_i 对应1组 $\langle u, v \rangle, u, v \in V; (u, v)$ 表示方向为 u 到 v ,连接两节点的边。图论可以用矩阵表示,邻接矩阵 $A=\{a_{ij}\}$, a_{ij} 表示 v_i 到 v_j 的边数, $a_{ij}=1$,表示以水体为载体的物质、能量和信息可以从 v_i 流向 v_j ,否则 $a_{ij}=0$;加权邻接矩阵 $W=\{w_{ij}\}$, w_{ij} 表示 v_i 流向 v_j 的权重,在本研究中量化河湖水系连通网络的功能水文连通性,以水文连通强度因子(index of hydrological connectivity intensity, IHCI)表征。水文连通强度因子(IHCI)基于1.4.2部分所模拟的河段径流量确定,根据自然断点法将径流量分为5个等级,分别为急流、快速流、中速流、缓流和断流,并分别赋值为4、2、1、0.5和0。其中断流为发生间歇性断流的河流。

1.5.2 中心性指标 中心性指标是图论分析中最常用的指标,通过表征各节点在网络流中的重要性被用于评估水文连通性^[30]。本研究中心性指标的计算应用Pajek64 5.18^[31]软件,因为研究区大部分地势平缓,其大部分河流的流速为2~3 m/s,水流缓慢,河湖水系连通网络在本研究中被设定为无向网络。

$$DC = \frac{D_i}{n-1} (i \in N) \quad (2)$$

$$CC = \frac{n-1}{\sum_{i=1}^n d_{i,j}} (j \neq i, j, i \in N) \quad (3)$$

$$BC = \frac{\sum_{j,k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}}{(n-1)(n-2)} (j \neq k \neq i, j, k, i \in N) \quad (4)$$

式中: D_i 为节点 i 的度数; n 为网络中节点的数量; $d_{i,j}$ 为节点 i 和节点 j 之间的图论距离, 即最短路径的长度; g_{jk} 为节点 j 和节点 k 之间的最短路径; $g_{jk}(i)$ 为节点 j 和节点 k 之间经过节点 i 的最短路径。

度中心性(DC)[公式(2)], 紧密中心性(CC)[公式(3)]和中介中心性(BC)[公式(4)]这3个中心性指标被认为是更适合基础设施网络的中心性指标^[30], 分别能够从局地位置优势、全局位置优势和全局影响力的角度提供关于节点在网络中的角色信息^[32]。当应用于现实系统时, 图论的中心性指标可以通过排名节点的重要性的网络的连通效率^[33]表征系统的脆弱性和稳定性^[34]。度中心性越高, 与其相连的边越多, 加权后的

度中心性在河流网络中可用于评价流量强度; 紧密度中心性越高, 该节点的物质(能量、信息)传播到网络其他节点的效率最高, 在河流网络中可用于评价河段或湿地的抗退化风险能力; 中介中心性越高, 受该节点影响的网络节点越多, 影响力越高, 在河流网络中可用于评价河段或湿地对网络健康的重要性。

1.6 相关性分析

本研究采用 Pearson 相关性分析法, 分析不同情景下的中心性指标及河流数量、运河数量等指标之间的相关性, 进而分析运河连接后水文连通性各中心性指标的增长规律。图论中心性指标变化呈幂律分布, 在开展相关性分析之前, 需对其进行对数变换处理。

2 结果与分析

2.1 有运河和无运河河湖水系连通网络空间布局

本研组合运河、湖泊水库、高流量河段和低流量河段等水体斑块构建环莱州湾区域的无运河河湖水系连通网络(图 3a)和有运河河湖水系连通网络(图 3b)。

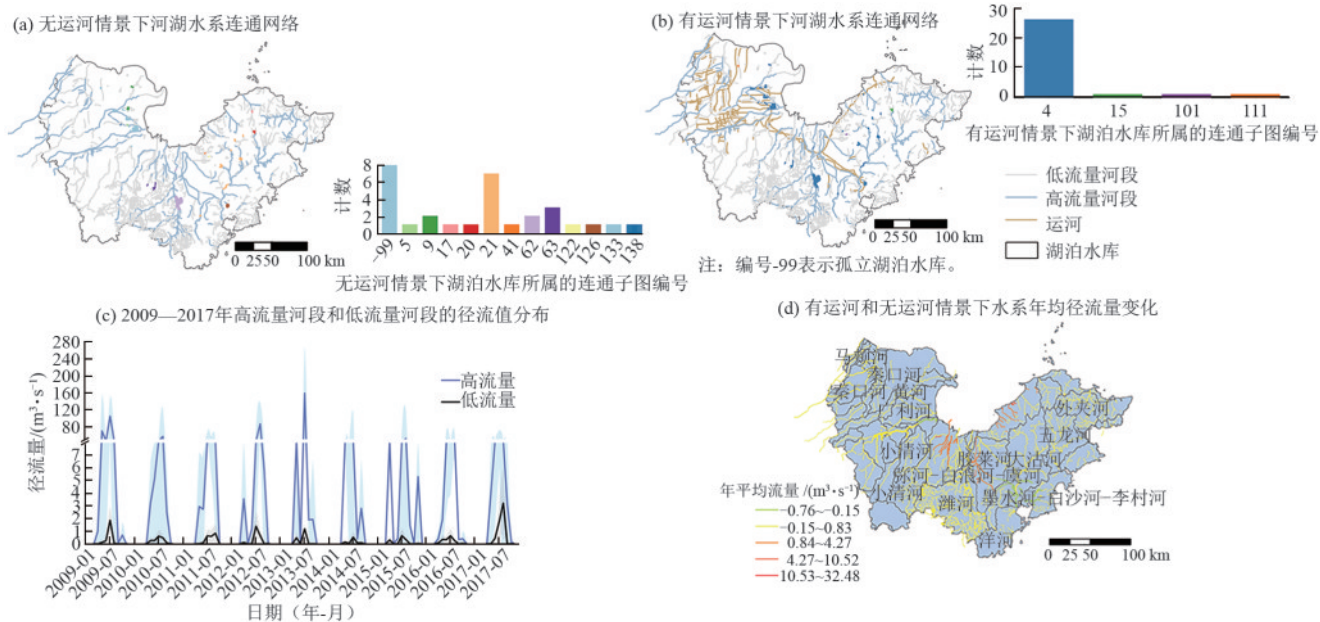


图 3 环莱州湾区域河湖水系连通网络空间布局

Fig. 3 Spatial layout of the river and lake system interconnection networks around the Laizhou Bay

结构上, 当 2 个湖泊通过一系列河段与运河的相互连接而实现彼此相通时, 即被视为处于同一个连通子图中, 共享着一种紧密的关联性和可达性。运河建设前, 最大连通子图中仅有 7 个湖泊水库彼此连通(图 3a), 而在运河建设后, 最大连通子图中有 27 个湖泊水库彼此连通(图 3b), 表明运河使得区域内大部分水体斑块相互连通, 归属于同一个河湖水系连通网络。基于运河的跨流域调水功能, 运

河建设后增加不同流域之间的连通路程。借由这一增加的连通路程, 不同流域内的水系组合成为同一个河湖水系连通网络。仅就引黄济青工程而言, 便连通自黄河流域至胶莱河流域共 7 个流域内的水系。

功能上, 通过 SWAT+ 模型模拟的 2009—2017 年多年平均径流量 $\leq 6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的河段识别为低流量河段, $> 6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的河段则被识别为高流量河段。其中高

流量河段大部分位于河流的干流,峰值期径流量平均值为 $158.64 \text{ m}^3/\text{s}$,而低流量河段位于低级(1~3级)支流,峰值期径流量平均值为 $3.22 \text{ m}^3/\text{s}$ (图 3c)。运河连接后,流量增加较为明显的河段主要为莱州湾东部沿海小流域,胶莱河流域干流部分及弥河-白浪河-虞河流域下游(图 3d)。主要是因为胶东调水工程及引黄济青工程的调水。

2.2 运河对河湖水系连通网络不同流域水文连通性的影响

使用图论中的中心性指标——中介中心性、紧密中心性、度中心性和基于流量加权的度中心性指标分析河湖水系连通网络的水文连通性。应用 Pajek64 5.18 得到的无运河河湖水系连通网络和有运河河湖水系连通网络的水文连通性空间分布见图 4。

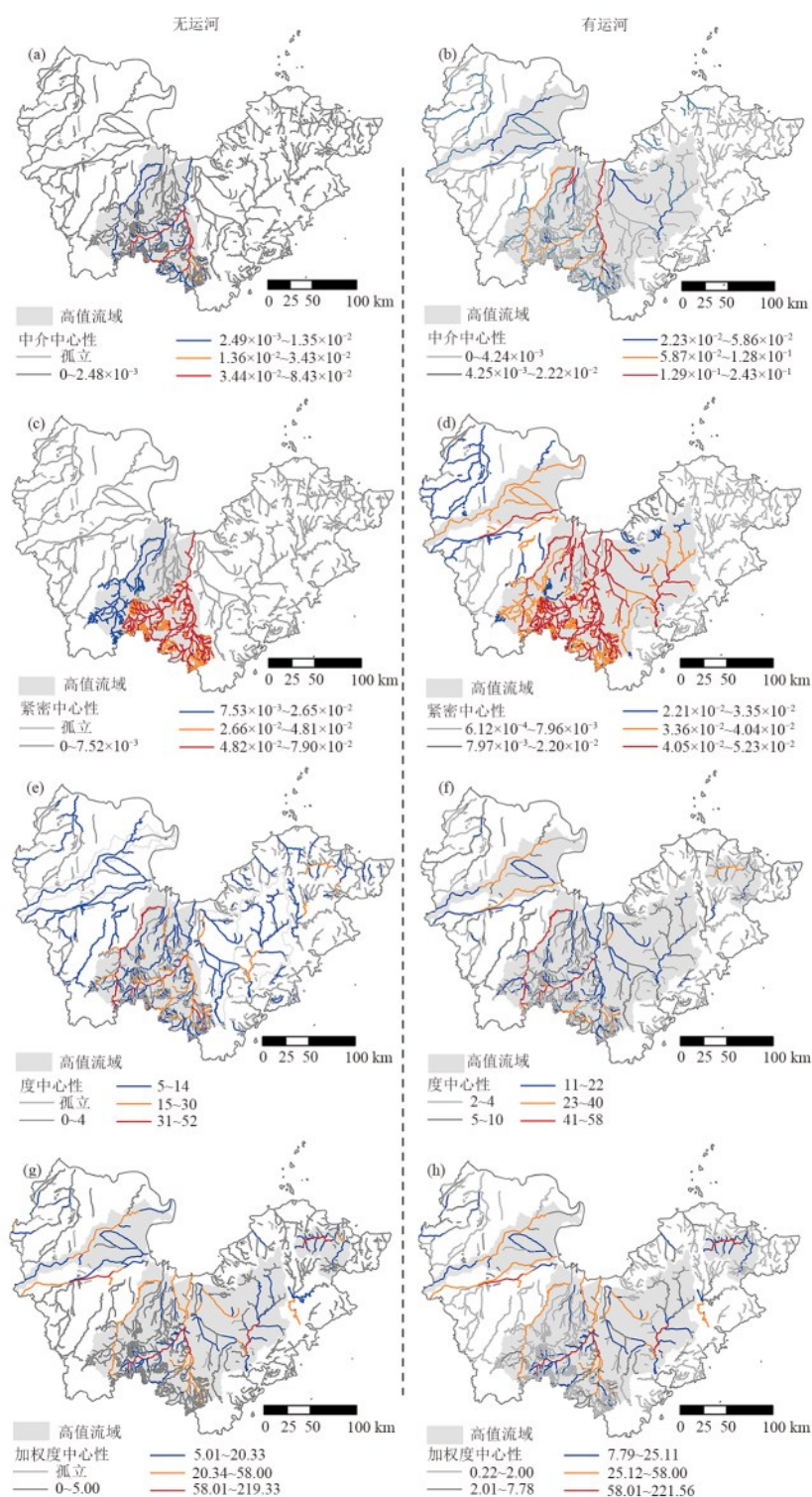


图 4 无运河和有运河河湖水系连通网络水文连通性空间布局

Fig. 4 Spatial layout of hydrological connectivity of river and lake system interconnection networks without and with canals

区域内的河湖水系连通网络各流域中,淮河流域的水文连通性在运河建设前后均维持高值,无运河情景和有运河情景下中介中心性指标最大值分别为 0.08 和 0.24,紧密中心性指标平均值分别为 0.046 和 0.039(图 5),表明淮河流域内水体斑块同时具有较强的影响力和抗干扰能力,该流域的健康度为区域中最高的。除此之外,淮河流域的水文连通性变化受运河影响最小,是因为淮河流域本身水文连通

性很高,所以运河对淮河流域影响程度较低。

运河大幅度提升黄河-广利河流域和大沽河-胶莱河流域的水文连通性,中介中心性和紧密中心性指标值均提高 20 倍(图 4 和图 5)。有 2 个可能的主要因素:其一是黄河-广利河流域的运河连接数量和密度较高;其二是大沽河-胶莱河流域被运河与水文连通性较高的淮河水系和弥河水系连通,受淮河水系的影响而具有高水文连通性。

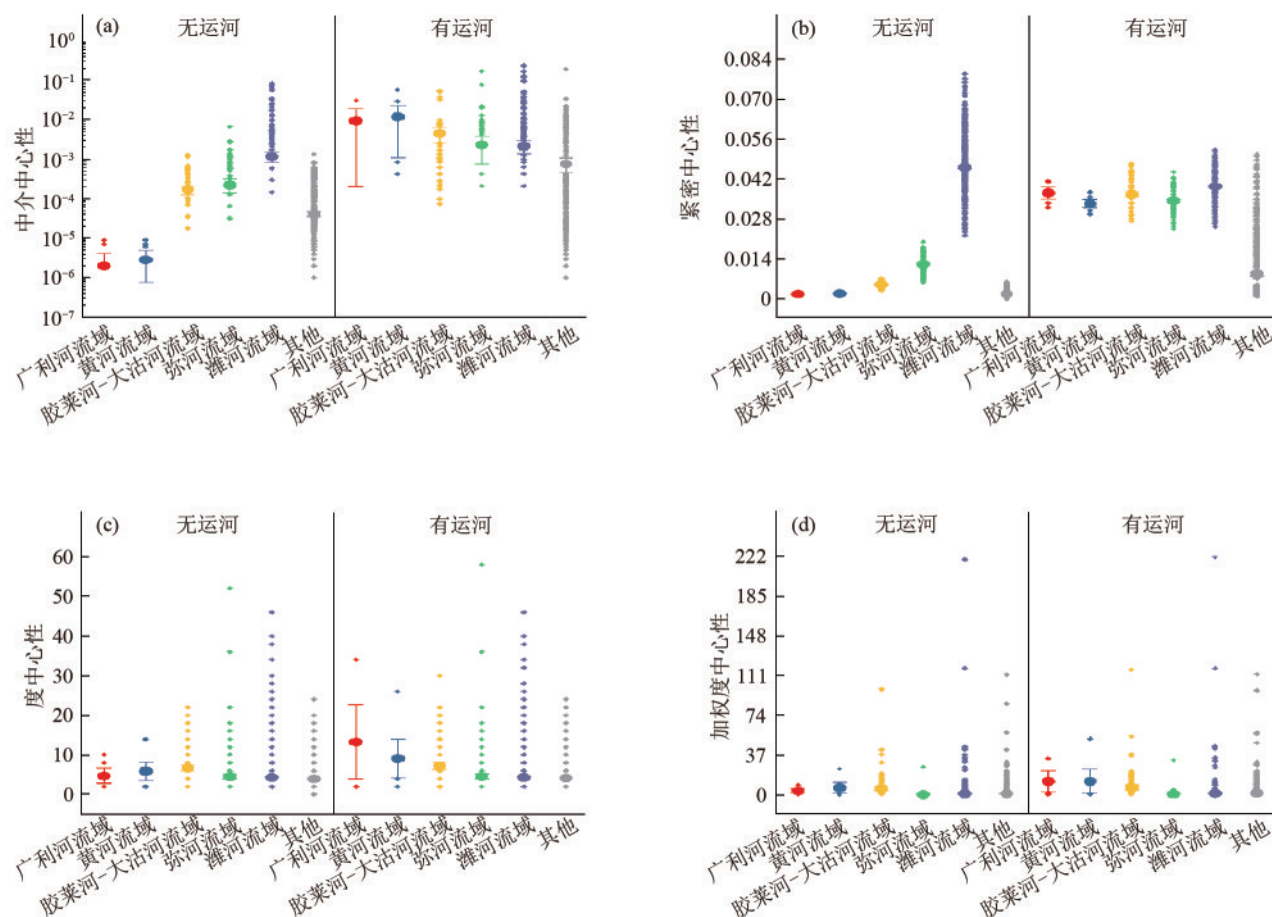


图 5 主要流域水文连通性在无运河和有运河情景下的数值分布

Fig. 5 Distribution of values of hydrological connectivity of major basins under scenarios without and with canals

2.3 运河对河湖水系连通网络不同水体斑块水文连通性的影响

为探究运河连接后河湖水系连通网络内各类水体斑块的响应差异,本研究分析各类水体斑块水文连通性的数值分布特征(图 6)。运河全面提升网络内各类水体斑块的影响力和抗干扰能力,中介中心值与紧密中心值在各水体斑块类别中均有所增加(图 6)。度中心性和加权重中心性表征的是局地水文连通性,因此,运河与未直接连接的水体斑块并未对运河产生响应。

运河连接后湖泊水库的抗干扰能力提升幅度最大,高流量河段次之,低流量河段提升幅度最小。湖泊水库、高流量河段和低流量河段的紧密中心性指标平均值分别提高 3.83、0.97、0.15 倍。但运河建设前,低

流量河段相较于湖泊水库和高流量河段具有更高的抗干扰能力,其紧密中心性指标平均值为 0.021,分别为湖泊水库和高流量河段平均值的 3.40、1.54 倍,表明运河建设前抗干扰能力更高的水体斑块,其水文连通性的提升对运河的响应越不敏感。运河连接后,湖泊水库、低流量河段和高流量河段的最高值和平均值之差分别由 0.070、0.040 和 0.060 降低至 0.020、0.024 和 0.025,表明紧密中心性的数值分布在运河连接后更为集中。在河湖水系连通网络这一现实网络中,具有高抗干扰能力的水体通常具有 2 种情景,一种是孤立水体,或持续性或间接地与其他水体发生物理连接,因此,在其他水体发生变化时,其受干扰程度较低;另一种是在网络中持续性与其他水体发生物理连接的水体,如

果其连通路径的较多,其受某条路径的干扰程度同样为前者,而高流量河段和湖泊水库抗干扰能力增加的原因则为后者。

较低。本研究中,低流量河段抗干扰能力较强的原因

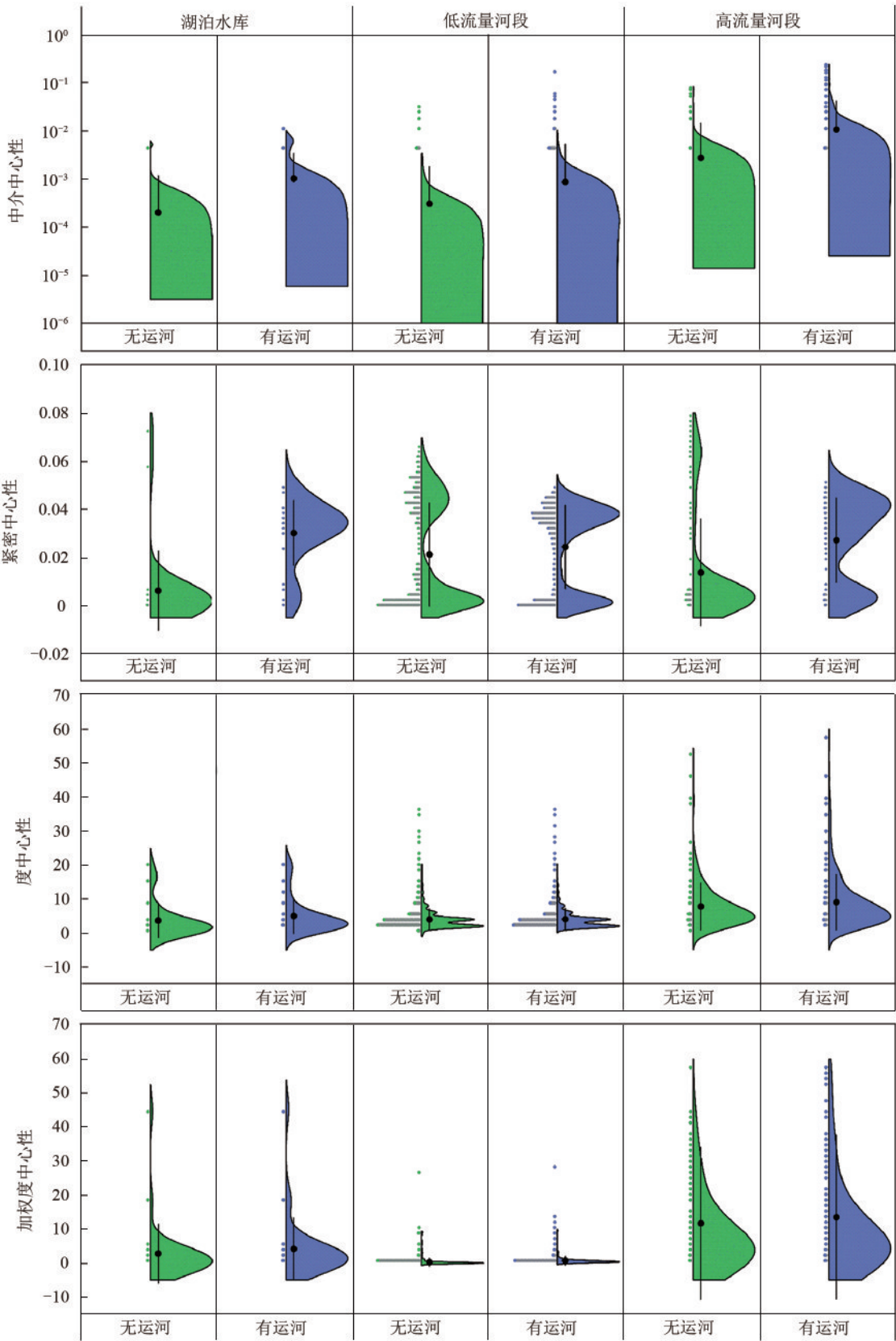


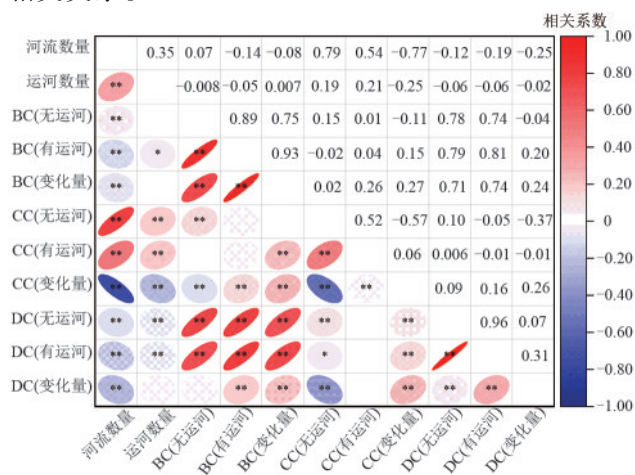
图 6 湖泊水库、低流量河段和高流量河段水文连通性在有运河和无运河情景下的水文连通性指标数值分布

Fig. 6 Distribution of values of hydrological connectivity of lakes, low-flow streams and high-flow streams under scenarios without and with canals

2.4 水文连通性指标变化的相关因素分析

为进一步研究河湖水系连通网络水文连通性的辐射性和扩展性增长机制,对中心性变化值和相关指标作 Pearson 相关性分析(图 7)。分析结果发现,中介中心性变化值与中介中心性初始值存在高度正相关关系,相关值为 0.75。表明中介中心性初始值越高的水体,运河连接后该水体中介中心性的增长幅度越大,更易成为关键的水体或保持其关键性地位。这种现象被称为“马太效应”或是“优先连接”机制^[35]。

ABBASI 等^[35]研究发现,在许多现实的社会网络中,具有更高中介中心性的节点能够控制沟通和信息流,从而吸引更多的新伙伴加入网络,新节点更倾向于与已具有高中介中心性的节点建立连接,将导致这些节点的中介中心性进一步增加,形成所谓的“富者愈富”现象。本研究中,河湖水系连通网络中各水体对运河连接后的中介中心性响应变化也支持“优先连接”机制这一增长规律。与中介中心性相反,紧密中心性的变化值则与其初始值呈负相关,相关值为-0.57,具有反“优先连接”机制。紧密中心性作为抗干扰能力的表征,意味着初始抗干扰能力越高的水体对于运河连接的响应越不敏感。低流量河段的紧密中心性增长幅度最小反映这种相关关系。



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$ 。

图 7 相关性分析

Fig. 7 Graph of correlation analysis results

3 讨论

运河对河湖水系连通网络的影响在流域之间具有巨大的空间差异,此差异除与各流域的自身属性相关,还与运河的连接属性相关。已有研究^[36-37]表明,分形几何理论及河湖覆盖度、分形维数和分枝维数等河网结构指标与河湖结构连通性具有相关关

系,淮河流域的水系具有更高的分形维数和分枝维数。因此,淮河流域的河湖水系连通网络具有更高的水文连通性。运河连接属性包括运河连接数量和运河连接位置 2 个因素。运河连接数量越多,局部水体的连接度越高,进而增加河湖水系连通网络整体的水文连通性。尽管如此,天然河流网络比由大量运河连接的河流网络水文连通性好^[38]。相较于运河连接数量的“以量取胜”,当运河与网络内影响力较高的中心水体相连时,河湖水系连通网络整体的水文连通性提高幅度更大。运河的连接位置不只作用于流域内部,跨流域新建运河将流域与具有稳定河网结构的另一流域连接后,2 个流域将被接入同一个连通子图内,受另一流域河湖水系连通网络高水文连通性的影响,原流域的水文连通性同样会大幅提高。大沽河-胶莱河流域河湖水系连通网络水文连通性的增长便与这一机制相符。

紧密中心性的反“优先连接”机制为在河湖水系连通网络这一现实网络中的特有机制。在其他中心性演变规律的理论网络研究中,紧密中心性均没有显现出反“优先连接”机制,如道路网络中紧密中心性的演变呈正态分布^[39]。尽管本研究中紧密中心性在运河建设后数值分布也呈更为集中的趋势,但紧密中心性变化值与初始值呈负相关。之所以存在这种差异,源于道路网络和河湖水系连通网络不同的现实属性。道路网络虽然也存在边缘节点,但在经济发展和城镇化进程中,处于边缘位置的低度节点不断被连接。而河湖水系连通网络处于边缘位置的源头水体,易因为气候变化和人类活动等原因发生断流成为孤立水体^[40],且恢复连通难度较大^[41]。

对于区域河湖水系连通工程的建设,应当考虑局地连通对网络内其他水体水文连通性的外部性影响,以系统性的观念合理布局河湖水系连通工程。在考虑河湖水系连通网络的水文连通性需求时,并不能仅依赖于单一指标数值的高低,而需综合考虑多维度、多层次的复杂因素和规划诉求。过度追求连接数量的增加,可能一定程度上削弱河湖水系连通网络低流量河段的抗干扰能力,从而引入生物入侵、病毒快速传播等潜在风险^[42]。而高度分隔的网络却可能被赋予更高的抗破碎能力,提供另一种形式的抵抗力。因此,在依托水文连通性中心性指标进行区域河湖水系连通网络布局规划时,应当全面审视各项指标的现实意义与具体布局的实际需求,进而构建一个融合多元因素、科学合理的综合评价体系,以确保规划方案的全面性与实效性。

4 结论

1)区域内的运河将大部分水体斑块连接入同一个最大连通子图中,其中,彼此连通的湖泊水库最大数量由7个增加到27个。现有的运河使得区域内原本各自分离的运河实现彼此连通。

2)在区域河湖水系连通网络中,相较于其他流域,淮河流域和弥河流域在有运河和无运河2种情景下均具有高水文连通性,且对运河的响应相较于其他流域敏感度更低。

3)运河对黄河-广利河流域和胶莱河-大沽河流域的水文连通性影响最为明显,中介中心性和紧密中心性2个指标的平均值均提高20倍,表明在运河连接后,2个流域的影响力和抗干扰能力整体均有较大幅度的提升。

4)在湖泊水库、低流量河段和高流量河段3种水体斑块类别中,低流量河段的中介中心性指标和紧密中心性指标对运河的响应程度最低,是因为在无运河情景下低流量河段的紧密中心性指标平均值分别为湖泊水库和高流量河段平均值的3.4、1.5倍,抗干扰能力强。与河湖水系连通网络中影响能力的“优先连接”机制和抗干扰能力的反“优先连接”机制一致。

5)运河对不同流域的影响主要受流域自身的河网结构、运河连接数量和运河连接位置3个因素主导,流域河网结构越不稳定,流域内运河连接数量越多,且运河连接水体越接近网络中心位置,运河对流域河湖水系连通网络水文连通性的影响程度越大。运河对不同水体斑块抗干扰能力的影响主要受水体与网络中心水体的距离影响,水体斑块距离网络中心水体越近,受运河影响水文连通性的提升幅度越高。

参考文献:

- [1] 陈雷.关于几个重大水利问题的思考:在全国水利规划计划工作会议上的讲话[J].中国水利,2010(4):1-7.
CHEN L. Thought about several major problems of hydraulic engineering: Speech on the national water resources planning programming conference [J]. China Water Resources, 2010(4):1-7.
- [2] 徐宗学,庞博,冷罗生.河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):757-764.
XU Z X, PANG B, LENG L S. Research on the construction of river-lake system connectivity and national water network [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2022, 20(4):757-764.
- [3] 李宗礼,郝秀平,王中根,等.河湖水系连通分类体系探讨[J].自然资源学报,2011,26(11):1975-1982.
LI Z L, HAO X P, WANG Z G, et al. Exploration on classification of interconnected river system network [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11):1975-1982.
- [4] 刘昌明,李宗礼,王中根,等.河湖水系连通的关键科学问题与研究方向[J].地理学报,2021,76(3):505-512.
LIU C M, LI Z L, WANG Z G, et al. Key scientific issues and research directions of the interconnected river system network [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3):505-512.
- [5] 王德旺,何萍,张馨予,等.苏干湖流域冰川、湿地对气候变化的响应研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(8):107-116.
WANG D W, HE P, ZHANG X Y, et al. Response of glaciers and wetlands to climate change in Sugan Lake basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(8):107-116.
- [6] PERKIN J S, GIDO K B, AL-TA'ANI O, et al. Simulating fish dispersal in stream networks fragmented by multiple road crossings [J]. Ecological Modelling, 2013, 257:44-56.
- [7] 李永乐,余小光.南水北调西线工程对黄河流域生态环境的影响分析[J].水土保持学报,2005,19(4):160-163.
LI Y L, SHE X G. Impact of project of water diversion from south to north via western course to ecological environment in Yellow River basin [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(4):160-163.
- [8] ALLISON M A, MESELHE E A. The use of large water and sediment diversions in the lower Mississippi River (Louisiana) for coastal restoration [J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(3/4):346-360.
- [9] 姜月华,陈立德,向芳,等.长江演化及其对洪涝灾害防治的启示[J].中国地质,2023,50(4):975-1003.
JIANG Y H, CHEN L D, XIANG F, et al. Evolution of the Yangtze River and its implications for prevention and control to flood disaster [J]. Geology in China, 2023, 50(4):975-1003.
- [10] 熊斌,卓云强,许崇育,等.1956—2022年鄱阳湖枯水情势演变及驱动机制分析[J].水利学报,2024,55(3):313-324.
XIONG B, ZHUO Y Q, XUN C Y, et al. Analysis on the evolution and driving mechanism of low flow regime from 1956 to 2022 in Poyang Lake, China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3):313-324.
- [11] 姚仕明,胡呈维,渠庚,等.长江通江湖泊演变及其影响效应研究进展[J].长江科学院院报,2022,39(9):15-23.
YAO S M, HU C W, QU G, et al. Research advances in morphological evolution of lakes connecting the Yangtze River and its influences [J]. Journal of Changjiang

- River Scientific Research Institute, 2022, 39(9):15-23.
- [12] HUANG A P, LIU X B, PENG W Q, et al. Spatiotemporal characteristics, influencing factors and evolution laws of water exchange capacity of Poyang Lake[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: e127717.
- [13] 赵伟, 毛继新, 关见朝, 等. 三峡水库运用后荆南三口分流演变规律及驱动因子[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 1005-1014.
- ZHAO W, MAO J X, GUAN J Z, et al. Evolution law and driving factors of three outlets along Jingjiang River after operation of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(8): 1005-1014.
- [14] CUI B S, WANG C F, TAO W D, et al. River channel network design for drought and flood control: A case study of Xiaoqinghe River basin, Jinan City, China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11): 3675-3686.
- [15] ZHANG X Y, LI F W. Study on the correlation between river network patterns and topography in the Haihe River basin[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: e1124124.
- [16] LI X, MO X B, ZHANG C, et al. Unraveling the impacts of river network connectivity on ecological quality dynamics at a basin scale[J]. Remote Sensing, 2024, 16(13): e2370.
- [17] TIWARI S, BRIZUELA S R, HEIN T, et al. Water-controlled ecosystems as complex networks: Evaluation of network-based approaches to quantify patterns of connectivity[J]. Ecohydrology, 2024, 17(7): e2690.
- [18] JAHANISHAKIB F, SALMANMAHINY A, MIRKARIMI S H, et al. Hydrological connectivity assessment of landscape ecological network to mitigate development impacts[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 296: e113169.
- [19] 张晨, 郑云鹤, 刘殷竹, 等. 湖泊水力调控对河湖连通伴生洪水风险的缓释影响[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 316-324.
- ZHANG C, ZHENG Y H, LIU Y Z, et al. Mitigation of the lake hydraulic regulation on the accompanied flood risk in an interconnected river system network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 316-324.
- [20] KARIM F, KINSEY-HENDERSON A, WALLACE J, et al. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in a tropical floodplain in north Queensland, Australia[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(18): 2710-2723.
- [21] 汪飞, 洪林, 马田遥, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化条件下诺敏河流域径流变化研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 67-77.
- WANG F, HONG L, MA T Y, et al. Study on runoff change of Nuomin River basin under climate change conditions based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 67-77.
- [22] 王辉源, 宋进喜, 吴琼. 基于 SWAT 模型的秦岭北麓渭河流域水源涵养功能综合评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 307-315.
- WANG H Y, SONG J X, WU Q. Comprehensive evaluation of water source conservation function in the Bahe River basin at the northern foot of Qinling Mountains based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 307-315.
- [23] BIEGER K, ARNOLD J G, RATHJENS H, et al. Introduction to SWAT+, A completely restructured version of the soil and water assessment tool[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2017, 53(1): 115-130.
- [24] GUO Y, SUN T, DONG L, et al. Remote sensing analysis of landscape pattern evolution and eco-environmental effects of coastal wetlands in Shandong Province[J]. Wetland Science, 2023, 21(6): 850-859.
- [25] YANG J, HUANG X. 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.
- [26] 孟现勇, 王浩. SWAT 模型中国大气同化驱动数据集 (CMADS V1.1) (2008—2016) [DS/OL]. 时空三极环境大数据平台. DOI: 10.3972/westdc.002.2016.db. CSTR: 18406.11.westdc.002.2016.db.
- MENG X Y, WANG H. China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model Version 1.1 (2008—2016) [DS/OL]. A Big Earth Data Platform for Three Poles. DOI: 10.3972/westdc.002.2016.db. CSTR: 18406.11.westdc.002.2016.db.
- [27] XU H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [28] NOSSENT J, ELSSEN P, BAUWENS W. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model [J]. Environmental Modelling and Software, 2011, 26(12): 1515-1525.
- [29] ARNOLD J G, BIEGER K, WHITE M J, et al. Use of decision tables to simulate management in SWAT+ [J]. Water, 2018, 10(6): e713.
- [30] BORGATTI S. Centrality and network flow [J]. Soc Networks, 2005, 27: 55-71.
- [31] MRVAR A, BATAGELJ V. Analysis and visualization of large networks with program package Pajek [J]. Complex Adaptive Systems Modeling, 2016, 4(1): e6.
- [32] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness [J]. Sociometry, 1977, 40(1): 35-41.

(下转第 190 页)