

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

王宗志^{1,2}, 张安齐¹, 王 坤², 颜秉龙³, 杜慧华²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 连云港市水利规划设计院有限公司, 江苏 连云港 222006)

摘要:为定量揭示等高截水工程实施对东海县河网区水系格局及功能的影响,以东海县龙梁河-石安河河网区为研究对象,基于水系形态结构分析法、图论与景观生态学法、复杂网络方法,提出了考虑区域和节点两个层面的水系结构及连通性综合分析方法,计算了等高截水工程实施前后河网区水系的形态结构和连通性变化。结果表明:在水系结构方面,等高截水工程实施后河流的发育数量和发育长度分别提升了 76.39% 和 77.95%;在区域层面,等高截水工程通过横向连接孤立河网,使得区域河网的水系环度、节点连接率和水文连通度指数分别提高了 101.29%、37.27% 和 35.23%,水系整体结构连通性显著增加;在节点层面,由于等高截水工程具有双向连通能力,节点功能连通性显著提升,节点传播能力和重要程度的空间分布得到优化。

关键词:水系格局;河网;连通性指标;等高截水工程;东海县

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)03 - 0031 - 08

Quantitative analysis of water system pattern and connectivity changes in river network area after implementation of contour interception project in Donghai County//WANG Zongzhi^{1,2}, ZHANG Anqi¹, WANG Kun², YAN Binglong³, DU Huihua²(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Lianyungang Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Lianyungang 222006, China)

Abstract: In order to quantitatively reveal the influence of the implementation of the contour interception project on water system structure and function in the river network area in Donghai County, taking the Longliang River-Shian River network area in Donghai County as the research object, a comprehensive analysis method of water system structure and connectivity at regional and nodal levels was proposed based on the analysis method of water system morphological structure, graph theory and landscape ecology method, and complex network method. The morphological structure and connectivity changes of the river network area water system before and after the implementation of the contour water interception project were calculated. The results showed that, in terms of water system structure, the number and length of rivers increased by 76.39% and 77.95%, respectively, after the implementation of the contour interception project; in terms of regional connectivity, the contour interception project connected isolated river networks laterally, increasing the water system circularity, node connection rate, and hydrological connectivity indexes of the regional water network by 101.29%, 37.27%, and 35.23%, respectively, and significantly improving the overall structural connectivity of the water system. The nodal function connectivity was significantly improved, and the spatial distributions of node propagation ability and node importance were optimized due to the bidirectional connection ability of the contour interception project.

Key words: water system pattern; river network; connectivity index; contour interception project; Donghai County

自古以来,人类通过各种手段改造河流水系,实现兴利除害的目的。中华人民共和国成立以来经历了 70 余年的“治水兴邦”之路,实施了大量水工程建设和水系改造,深刻改变和重塑了区域河流水系格局及其特征^[1-2]。早期河流水系治理多为经验、半经验性的行为,实施了如等高截水、撇洪沟等独具特

基金项目:江苏省水利科技项目(2023014);国家自然科学基金青年科学基金项目(52409037);江苏省基础研究计划自然科学基金青年基金项目(BK20230122);江苏省自然科学基金面上项目(BK20211023);浙江省水利科技计划项目(RA2201)

作者简介:王宗志(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水资源复杂系统运行调度与管理研究。E-mail:zzwang@nhri.cn

通信作者:王坤(1992—),男,工程师,博士,主要从事流域水文水动力过程模拟与调控研究。E-mail:wangkun@nhri.cn

色的水系治理工程,在防洪与水资源利用等方面发挥了重要作用。但河流水系结构变化对区域水网格局及其功能的影响机制尚不清楚,制约了区域水系结构的优化调整。定量解析区域水系结构演变及其对区域水网功能的影响,是优化区域河网水系的基础,已成为国家水网建设背景下的热点问题^[3-4]。

水系的形态结构和连通状况是区域水网水安全、水生态和水环境功能发挥的重要表征^[5]。在水系形态结构方面的研究开展较早,1945 年 Horton^[5]提出了著名的河长定律,几十年来随着 3S(RS、GIS、GPS)技术的发展,河流水系结构特征指标趋向完善,发展了以长度、数量、宽度等表征河流形态特征,以河频率、河网密度、水面率、分形维数等表征河网结构特征的指标体系^[6-9],通过指标变化反映水系结构受外界的影响。例如:黄草等^[10]采用河频率、河网密度分析评价了洞庭湖不同片区的水系格局差异,并据此提出河道规划优化方案;马宗伟等^[11]利用分形维数分析长江中下游河流水系形态特征,并结合洪水数据分析不同水系结构特征下的洪水特点。有关水系连通的研究方法较多,目前应用较广泛的有图论与景观生态学法、水文-水动力模型、复杂网络方法等。图论法将水系简化为由点和线组成的平面图,利用连接矩阵和图的性质分析水系特征及数量关系。在景观生态学中,与连通性相关的概念最早由 Merriam^[12]在 1984 年提出,该方法将河流水系视为由各级廊道和斑块构成的网状或树状景观结构,利用景观要素之间的通达程度反映水系整体连通性^[13-14]。图论与景观生态学法采用景观生态网络连接度的概念,并依据图论的计算原理对区域水系连通性进行评价,相关指标有节点数、水系环度(α 指数)、节点连接率(β 指数)、水文连通度(γ 指数)和节点平均度等^[15-18]。例如:胡瑞媛等^[19]基于图论与景观生态学法构建水系连通评价指标体系,利用 α 、 β 、 γ 指数分析塔里木河生态输水工程对流域水系连通格局的影响;陈星等^[20]利用图论法将河网概化为图形模型,对常熟市燕泾圩平原河网区水系连通性做出定量评价;窦明等^[21]采用景观生态学法构建指标体系对淮河流域进行宏观尺度下的水系连通性评价。水文-水动力模型旨在分析径流时空分布、河网结构参数对径流和水系连通性的作用及沉积过程对连通性的影响^[22-23],但模型对数据资料的要求较高,需要研究区域河道形态的实测资料及较长时间序列的实测水文监测数据^[24]。以上方法主要针对水系整体层面,不能反映单一节点(如水库、闸坝等重要工程)的连通情况及节点在区域河网中的重要性,近年来发展起来的复杂网络方法可

以弥补上述不足,通过将水系图转化为拓扑结构,并利用复杂网络的相关指标来分析水系连通性^[25-26],可以反映节点间相互作用对整体产生的影响。例如:李发文等^[27]利用网络直径、聚类系数、中介中心性指数等复杂网络指标从微观节点角度分析海河流域的水网连通性并获得河网的空间分布特征;吴学文等^[28]应用复杂网络方法构建海河流域网络模型,对模型内微观节点的重要性进行分析。

江苏省东海县实施的等高截水工程不仅改变了河网区水系流向,还有效连通了原本孤立的水库、河系,但其对河网整体和局部水流特性均有影响。尽管实践表明工程的实施显著提升了区域的防洪和水安全保障能力,但该类工程对区域水网功能的影响仍缺乏系统的定量评估。本文以东海县龙梁河-石安河河网区为研究对象,基于水系形态结构分析法、图论与景观生态学法和复杂网络方法等,提出考虑区域和节点两个层面的水系结构及连通性综合分析方法,计算等高截水工程实施前后河网区水系的形态结构和连通性变化,以揭示工程对河网区水系格局及功能的影响机制。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

东海县(34° 18' N ~ 34° 48' N, 118° 24' E ~ 119° 07' E)位于江苏省东北部,地处淮沭下游,境内河流均属沂、沭河下游水系。为提升洪水控制能力,减轻平原洼地防洪除涝压力,20 世纪 80 年代以来,东海县政府沿等高线开挖人工河,进行大规模河道整治,横向串联水库与天然河道,实施了等高截水防洪工程。其中龙梁河、石安河为该区域主干河道,是该区域主要行洪通道。

龙梁河自大石埠水库至石梁河水库,全长 65 km,沿 50 m 高程开挖整治,为西侧 50 m 以上山丘区 440.62 km² 区域的主要汇流河道,贯穿了徐塘、陈栈、阳春、贺庄、昌梨、羽山、磨山等中小型水库,形成“长藤结瓜”式的河库分布。石安河纵贯县境南北,北起石梁河水库,南到安峰山水库,全长 55 km,沿 18 m 高程开挖,截取等高线在 18~50 m 高程间岭地的产流,汇水面积共计 525.69 km²。磨山河、丰墩河、羽山河、汤河、石榴树河、望烟河、郑庄河、范埠河等东西向的河道被截断,确保了东海县东部平原区的防洪安全。

本文以龙梁河-石安河河网区为研究区(图 1),面积为 1 097.9 km²,共有 139 条河道,大中小型水库共有 29 座,其中石梁河水库为江苏省第一大水库。龙梁河-石安河河网区地势西高东低,从西北丘

陵区向东南平原区倾斜,区域内除石安河、龙梁河南北流向外,其余河流大都由西向东汇流入海。龙梁河、石安河两条人工河连通河网区,形成河河相连、河湖相连、湖湖相连的“串库成群”的河网格局,可实现防洪兴利横向联合调度,纵向梯级调度。在等高截水工程实施后,河网区可以将高地滚坡水沿等高线分层截取,缓解了当地非汛期灌溉用水不足的困难。

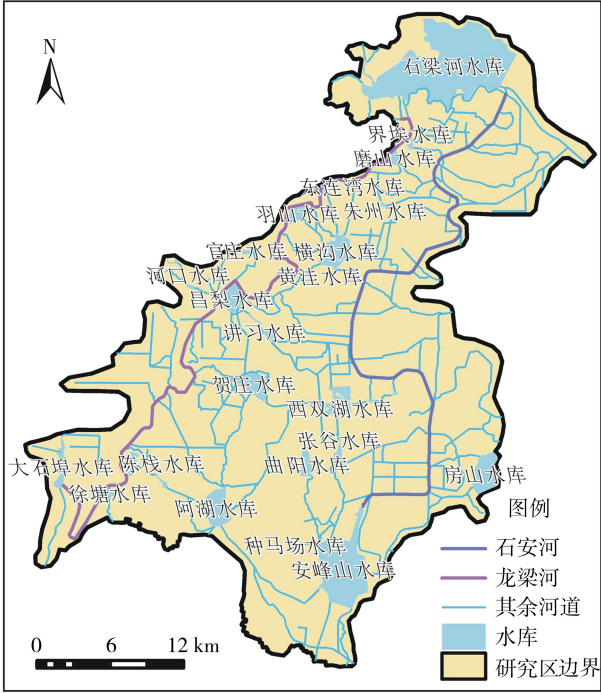


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of research area

1.2 数据来源

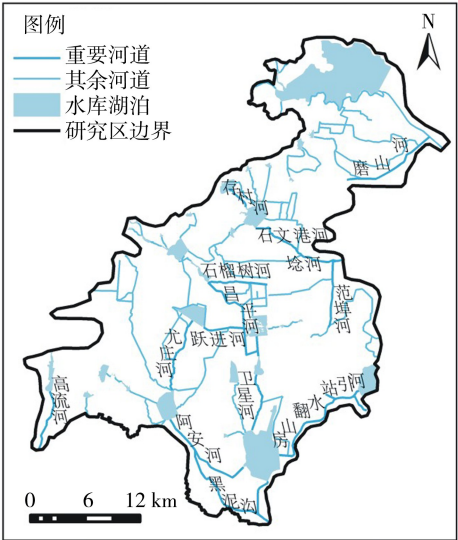
龙梁河-石安河河网区等高截水工程实施前后水系连通情况参照东海县防洪规划、龙梁河初设报告、石安河初设报告进行概化,在 Google Earth 中对研究区水系进行矢量化提取,并对其进行配准、分割、剪裁,删除工程实施后停止使用的旧河道,最终得到工程实施前后水系概化模型。如图 2 所示,工程实施后增加了龙梁河、石安河两条大的人工运河及其余新河道。

2 研究方法

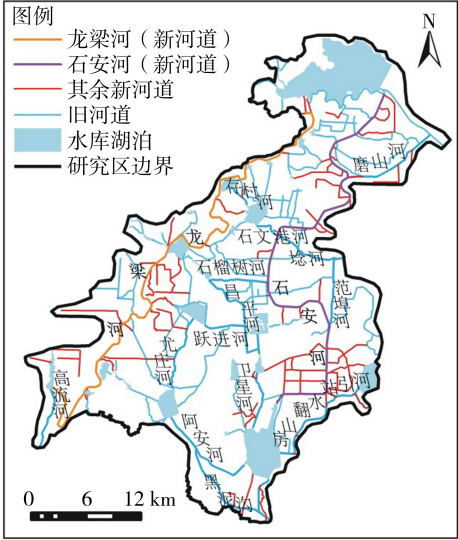
为了定量解析等高截水工程对区域水网结构的影响,构建了如图 3 所示的水系格局与连通性评价指标体系。通过分析河网区水系的数量特征、整体结构连通性变化来反映水系整体结构与连通性特征演变,通过分析节点拓扑变化评估工程自身的重要性,技术路线如图 4 所示。

2.1 区域层面

区域层面从数量特征和连通性两个方面分析。在河流数量特征分析中,平原河网地区的河流形态



(a) 工程实施前



(b) 工程实施后

图 2 龙梁河-石安河河网区等高截水工程实施前后水系概化模型

Fig. 2 Generalized model of water system of the Longliang River-Shian River network area before and after contour interception project

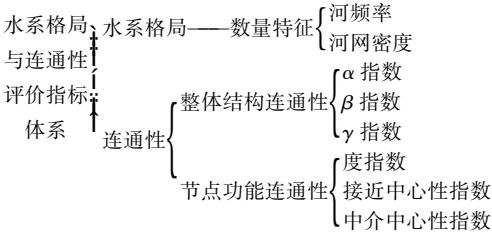


图 3 水系格局与连通性评价指标体系

Fig. 3 Evaluation index system for water system pattern and connectivity

与水系结构研究已较为成熟,本文选取河频率、河网密度两个最为常用的指标进行计算。在区域整体网络连通性分析中,采用景观生态学中景观生态网络连接度的概念,并依据图论的计算原理对区域水系

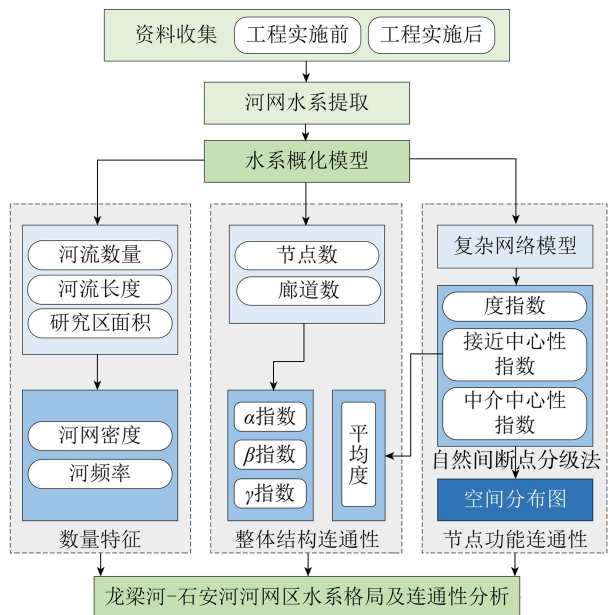


图 4 技术路线

Fig. 4 Technical route

连通性进行评价。该方法将河流和水系概化为水景观中的廊道和网络,通过比较不同时期的特征指标,反映区域水系结构连通性的变化情况。引入平均度指标评价区域的水系连通性,选用 α 、 β 和 γ 指数3个指标辅助计算河流结构连通性特征。

a. 河频率(R_f)。河频率是区域内河流数量与区域总面积的比值,表征河流数量的发育情况。河频率计算公式为

$$R_f = N_R / A \quad (1)$$

式中: N_R 为区域内河流数量; A 为区域总面积。

b. 河网密度(D_R)。河网密度指单位面积上河流的总长度,表征水系长度发育程度。河网密度越大,其对流域切割强度越大,并对降雨-径流的水文响应越快,反之则越慢。河网密度计算公式为

$$D_R = L_R / A \quad (2)$$

式中 L_R 为区域内河流的总长度。

c. α 指数。 α 指数表征河网区水系中现有节点形成的环路存在程度,计算公式为

$$\alpha = (K - N + 1) / (2N - 5) \quad (3)$$

式中: K 为连接线数,也称廊道数; N 为节点数, $N \geq 3$ 。 α 指数在0~1之间变化, $\alpha = 0$ 表示水网中无环路, $\alpha = 1$ 表示具有最大环路。

d. β 指数。 β 指数表征河网区水系中每个节点与其他节点连接难易程度,反映河流的结构形态。 β 指数在0~6之间变化, $\beta \leq 2$ 表示水系为树枝状结构, $\beta > 2$ 表示水系为格状结构或回路结构, $\beta = 0$ 表示没有网络存在。 β 指数计算公式为

$$\beta = K / N \quad (4)$$

e. γ 指数。 γ 指数表征河网区水系中廊道间相

互连接数与最大可能廊道连接数之比,计算公式为

$$\gamma = K / K_{\max} = K / [3(N - 2)] \quad (5)$$

式中 $K_{\max}$ 为最大可能廊道连接数。 γ 指数在0~1之间变化, γ 越大表示水系连通性越好, $\gamma = 0$ 表示各节点之间不连接, $\gamma = 1$ 表示每个节点都与其他节点互相连接。

f. 平均度($\bar{C}$)。平均度为区域内所有节点度指数的平均值。平均度越大,流域整体结构连通性越好,计算公式为

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^N C_i / N \quad (6)$$

式中 C_i 为节点 i 的度指数。

2.2 节点层面

采用复杂网络方法,将区域内水系构建为空间网络,并进行网络分析。在建立网络模型时,将河道视作边,将河道的交点及端点视作节点,并手动修正水库、河道中冗余的拓扑关系。将系统可视为由大量节点和连接节点的边构成的集合,构建出图5所示的拓扑网络模型。图5(a)为工程实施前的节点和河道,包括99个节点和115条边;为了研究工程对网络的影响,建立了工程实施后的网络模型(图5(b)),包括240个节点和392条边。模型建立后,运用复杂网络方法描述相邻河段间的连接情况,识别对区域连通性贡献较大的节点。依据各指标特点,引入度指数、接近中心性指数、中介中心性指数分析河网区水系节点功能连通性在空间上的变化。

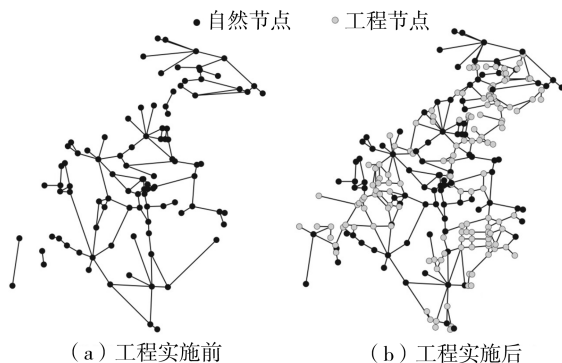


图 5 龙梁河-石安河河网区等高截水工程实施前后水系网络模型

Fig. 5 Network model of the Longliang River-Shian River network area before and after contour interception project

a. 度指数。节点的度表征一个节点在网络中与其他节点相连的边的数量。度指数越大,该节点在网络中的作用越大。

b. 接近中心性指数。接近中心性指数指节点到其他所有节点的平均最短距离的倒数,反映该节点在网络中的辐射范围和可达性。该值越大,表示

节点与相连节点的距离越近,该节点在网络中的重要性越强。接近中心性指数计算公式为

$$C_{Ci} = (N - 1) / \sum_{j=1}^N k_{ij} \tag{7}$$

式中: C_{Ci} 为节点 i 的接近中心性指数; k_{ij} 为节点 i 与 j 间最短路径所包含边的数量。

c. 中介中心性指数。中介中心性表示拓补网络中任意两个节点之间的最短路径经过某一节点的次数与最短路径数量的比值之和。值越大,反映该节点瘫痪将会对整个水系网络产生的影响越大。中介中心性指数计算公式为

$$C_{Bi} = \sum_{a \neq b \neq i} n_{abi} / R_{ab} \tag{8}$$

式中: C_{Bi} 为节点 i 的中介中心性指数; R_{ab} 为连接节点 a 和 b 的最短路径的数量; n_{abi} 为连接节点 a 和 b 时经过节点 i 且为最短路径的路径数量。

值得注意的是,在节点层面所使用的复杂网络方法中,河流与流域边界线的交点及河流端点均视作节点(图 5),而区域层面使用图论与景观生态学法计算 α 、 β 、 γ 指数时,节点数由水系概化模型(图 2)得到,河流与流域边界线的交点及河流端点并不算作节点,故区域层面与节点层面涉及节点计算时,因存在方法差异性,所得出的节点数略有不同。

3 结果与分析

3.1 水系数量特征

等高截水工程实施前后水系数量特征见表 1。龙梁河-石安河河网区西北部为低山丘陵,东南部为平原坡地,河流因势能作用基本由西北流向东南。由图 2(a)可见,工程实施前,水网的连接主要依靠各水库间的串联,各河流间直接联系少,连接不紧密,研究区内水系具有流向单一、连接松散的特点。工程实施后,龙梁河-石安河河网区水系各指标值与工程实施前相比大幅增加,水系分布更为密集。等高截水工程大幅提升了区域河流数量与河流长度,龙梁河与石安河开挖长度达 120 km,工程还开挖了连接龙梁河、石安河与各水库的沟渠,区域原有河流连通状况得到优化,河频率和河网密度也随之增加。

表 1 等高截水工程实施前后水系数量特征
Table 1 Characteristics of water system quantity before and after contour interception project

时期	河长/km	河流数量/条	河频率/(条/km ²)	河网密度/(km/km ²)
工程实施前	418.1	79	0.072	0.381
工程实施后	744.5	139	0.127	0.678

3.2 水系整体结构连通性

参考 SL 431—2008《城市水系规划导则》和已

有研究^[10,16,21],将整体结构连通性指标划分为优、良、中、差 4 个等级, α 指数对应的取值范围分别为 $>0.5 \sim 1$ 、 $>0.3 \sim 0.5$ 、 $>0.1 \sim 0.3$ 、 $0 \sim 0.1$, β 指数对应的取值范围分别为 $>3 \sim 6$ 、 $>2 \sim 3$ 、 $>1.2 \sim 2$ 、 $0 \sim 1.2$, γ 指数对应的取值范围分别为 $>0.55 \sim 1$ 、 $>0.4 \sim 0.55$ 、 $>0.25 \sim 0.4$ 、 $0 \sim 0.25$ 。

表 2 给出了等高截水工程实施前后水系整体结构连通性特征。由表 2 可知,工程实施前河网区水系的 α 、 β 、 γ 指数等级分别为中、优和良;工程实施后区域水系节点数和廊道数大幅度提升。沿等高线开挖的龙梁河、石安河具有双向流动的特点,考虑双向性后的河网区节点共计 188 个、廊道共计 392 条,与工程实施前相比分别增加了 137.97%、226.67%。工程实施后河网区水系的 α 、 β 、 γ 指数分别为 0.553、4.170、0.703,与工程实施前相比,分别提高了 101.29%、37.27%、35.23%,其中, α 指数和 γ 指数等级达到优。可见,等高截水工程增加了河库间的连接通道,区域内河道交错形成的网络更为密集,工程提升了水系连通性。 β 指数可以反映水系形态,其值在工程实施前后均大于 2,说明河网区河流形态在工程实施前后均为格状结构。

表 2 等高截水工程实施前后水系整体结构连通性特征
Table 2 Connectivity characteristics of overall water system structure before and after contour interception project

时期	节点数	廊道数	平均度	α 指数	β 指数	γ 指数
工程实施前	79	120	2.323	0.275	3.038	0.519
工程实施后	188	392	3.267	0.553	4.170	0.703

对指标的变化进一步分析,3 个指标中 α 指数的变化与 β 、 γ 指数相比更为显著,这是因为等高截水工程增加的节点与廊道实现了小片孤立河网间的连接,改变了原河网的空间分散与不均匀性,河网区水系实际成环水平有较大提升。对比图 2(a)与(b)可见,大石埠水库、徐塘水库在工程实施前均单独向南方泄洪出流,彼此之间无河道连接,但工程实施后大石埠水库与徐塘水库由龙梁河相连,由孤立状态转化为连通状态。此外,等高截水工程实施后,水系的节点和廊道数均增加,新开挖的人工河道之间交叉过多,节点间相连接时最大可能廊道数增加,单一节点与其他节点连接变难,对 β 、 γ 指数的增加存在一定负面影响,故 β 、 γ 指数增加较少。工程实施后区域整体的平均度由 2.323 提升为 3.267,提升比例 40.64%。说明工程实施后水系整体结构连通性更好。

以上分析表明,等高截水工程对龙梁河-石安河河网区的水系整体结构连通性有较好的改善效果,对水系的防洪排涝起到积极的效果。

3.3 水系节点功能连通性

表 3 统计了等高截水工程实施前后节点功能连通性情况,采用自然间断点分级法对指标重要程度进行划分,指标计算时均考虑了等高截水工程河道可产生双向路径的特点。图 6 给出了等高截水工程实施前后水系节点功能连通性指标值的空间分布。

由表 3 可知,工程实施前度指数 $C \geq 4$ 的节点有 7 个,占全部节点的 7.14%;从度指数空间分布(图 6(a))来看,度指数高值节点全部位于水库,其中石梁河水库、昌梨水库、横沟水库、安峰山水库、阿湖水库 5 个节点的度指数数值最大。由于度指数高的地区是水系节点功能连通性较好的地区,由结果可知,工程实施前河网区内水库及周边地区的连通性较好,距离水库远的地区连通性较差。工程实施后区域内 $C \geq 4$ 的节点有 86 个,是工程实施前的 12.29 倍,且 $C \geq 4$ 的节点占全部节点的比例由 7.14% 提升至 35.83%,增加了 4.02 倍,说明工程实施后水系功能连通性更好;从空间分布(图 6(d))来看,工程实施后度指数重要程度最高的节点位置

表 3 等高截水工程实施前后水系节点功能连通性特征
Table 3 Nodal function connectivity characteristics of water system before and after contour interception project

指标	重要程度	工程实施前		工程实施后	
		指标范围	节点/个	指标范围	节点/个
度指数	最低	1	36	1	55
	较低	2	10	2	13
	中等	3	45	3	86
	较高	4	2	4~5	67
	最高	≥ 5	5	>5	19
接近中心性指数	最低	0~0.14	26	0~0.079	41
	较低	$>0.14 \sim 0.17$	27	$>0.079 \sim 0.092$	62
	中等	$>0.17 \sim 0.22$	20	$>0.092 \sim 0.105$	55
	较高	$>0.22 \sim 0.44$	18	$>0.105 \sim 0.116$	56
	最高	$>0.44 \sim 1.00$	7	$>0.116 \sim 1.000$	26
中介中心性指数	最低	0~29.00	45	0~411.99	104
	较低	$>29.00 \sim 127.67$	17	$>411.99 \sim 1403.80$	85
	中等	$>127.67 \sim 298.70$	18	$>1403.80 \sim 3351.46$	27
	较高	$>298.70 \sim 724.38$	13	$>3351.46 \sim 5928.65$	12
	最高	$>724.38 \sim 1455.95$	5	$>5928.65 \sim 11339.78$	2

不再仅限于水库,其中有 72.22% 的节点在龙梁河与石安河上。综合分析可得,龙梁河与石安河两条人工河流的开挖改变了区域内度指数高值区的空间

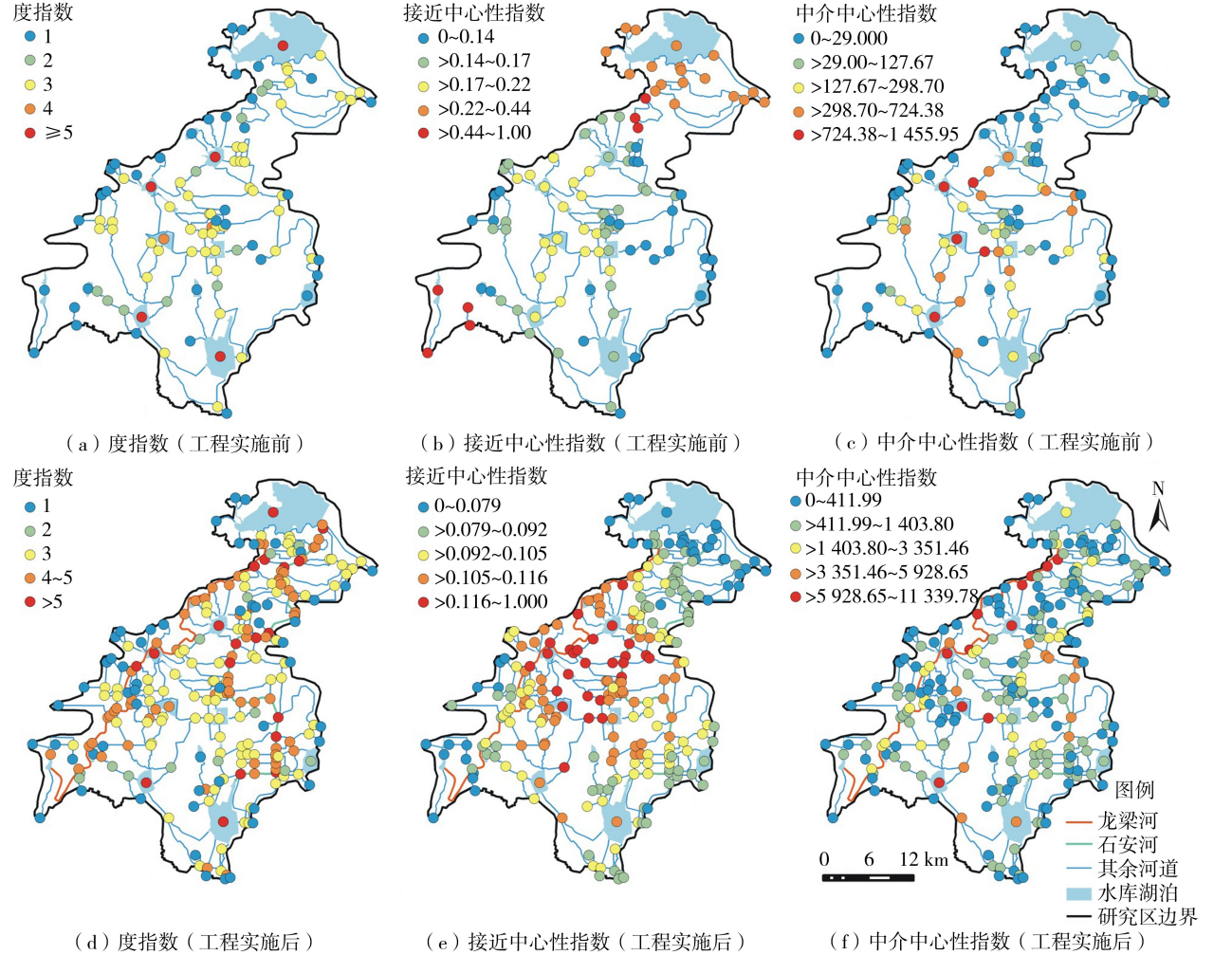


图 6 等高截水工程实施前后水系节点功能连通性指标的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of water system nodal function connectivity indexes before and after contour interception project

分布,等高截水工程使整个区域节点功能连通性显著提高。

从接近中心性指数计算结果来看,工程实施前接近中心性指数重要程度最高的节点有 7 个,均出现在孤立环路中,分别为大石埠水库、徐塘水库、磨山水库、朱州水库及其连接线交点(图 6(b))。接近中心性指数值越大,表示该节点到可连接的其他节点的平均路径长度越短,在其环路中影响其他节点的能力越强,而接近中心性指数重要程度最高的节点均出现在路径长度最短的孤立网络内,这表明工程实施前水系河段分布较为分散。由表 3 指标范围的变化可见,工程实施前 25.63% 的节点位于 0~0.14 区间内,而工程实施后 90.83% 的节点位于 0~0.116 之间,研究区节点的接近中心性指数显著降低,说明工程实施后各节点到可连接的其他节点的平均路径长度显著增加,河网区汛期行洪通道更多。如表 3 所示,工程实施后接近中心性指数重要程度最高的节点共有 26 个,结合空间分布(图 6(e))来看,全部分布于水系的地理中心位置,并且数值呈现出中间高、四周低的规律,说明孤立河网被串联,区域中心位置的节点与其他节点的平均距离更近。接近中心性指数高的地区为水网高效传播区,说明等高截水工程提升了区域水系间连通效率。综上,龙梁河与石安河将孤立水库和河道连接起来,河流间连接通道增加,连接紧密性增强,区域水系的聚集程度提高。

由图 6(c)可见,工程实施前,阿湖水库、横沟水库、黄洼水库、西双湖水库、贺庄水库 5 个节点的中介中心性指数重要程度最高,重要程度较高的 13 个节点也多出现在水库周边位置。中介中心性指数高的地区为河网网络传输的主要流经区域,说明对工程实施前的河网区而言,水库节点的重要程度最高,对该地区的连通性贡献最大。工程实施后水系中介中心性指数重要程度最高的节点数量增加到 12 个,其中 50% 位于龙梁河,50% 位于水库(图 6(f))。重要程度较高和中等的节点分别为 17、27 个,各有 47.05%、59.27% 的节点位于龙梁河、石梁河沿线,这主要是由于等高截水工程具有双向连通功能,其上节点对该河网区水系连通性贡献大,节点在整个水系中起到枢纽作用,如果节点被破坏会对整个水系产生极大影响。从工程实施前后的中介中心性指数空间分布来看,指数高值区向北延伸,说明等高截水工程优化了河网区南北向的主干传输路径。

综上,在水系格局及连通性的变化中,龙梁河和石安河起到了重要作用。龙梁河贯穿了 7 个水库,石安河将 8 条东西向的主河道截断,均增强了石梁

河水库与安峰山水库之间所有水库、河道的连通性,河库之间连接紧密,防洪通道增加,等高截水工程对改善水系的功能连通性起到了积极影响。

4 结 论

a. 在水系数量特征方面,等高截水工程实施后,东海县龙梁河-石安河河网区河流的发育数量和发育长度均增加,河频率和河网密度指标分别增加了 76.39% 和 77.95%,水系特征从原有的河流流向单一、连接松散变为分布密集,表明等高截水工程提升了河网区的河流发育状况。

b. 在整体结构连通性方面,等高截水工程实施后河网区水系环度(α 指数)提高了 101.29%,等级从中提升为优,河网区水系实际成环水平有较大提升;节点连接率(β 指数)在工程实施前后均大于 2,河网区的河流形态在工程实施前后均为格状结构;水文连通度(γ 指数)提高了 35.23%,等级从良提升为优,并且平均度提升了 40.64%,证明具有双向连通能力的等高截水工程对河网区水系整体结构连通性改善明显。

c. 在节点功能连通性方面,工程实施前龙梁河-石安河河网区节点的连通性与水库的距离呈负相关关系,度指数、中介中心性指数高值节点全部位于水库;工程实施后,龙梁河与石安河将孤立水库和河道连接起来,河流间连接通道增加,河网区重要节点位置由水库向等高截水工程转变,龙梁河与石安河上的度指数、中介中心性指数高值节点比例分别为 72.22%、50%;总体来看,等高截水工程实施可优化提升工程沿线的水力传输路径,实现区域水系连片成面,有效提升区域水系节点功能连通性。

参考文献:

[1] GAO Yuqin, LIU Yunping, LU Xiaohua, et al. Change of stream network connectivity and its impact on flood control [J]. Water Science and Engineering, 2020, 13(4): 253-264.

[2] 司雨,王英. 习近平治水思路的系统哲学基础[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 41-46. (SI Yu, WANG Ying. System philosophy foundation of Xi Jinping's thought on water governance [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 41-46. (in Chinese))

[3] 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))

- [4] 侯佳明,曾庆慧,胡鹏,等. 基于改进阻隔系数法的全国主要河流纵向连通性评价[J]. 水资源保护,2024,40(6):181-187. (HOU Jiaming,ZENG Qinghui,HU Peng, et al. Assessment of longitudinal connectivity of major rivers across China based on enhanced barrier coefficient method[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):181-187. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] 窦明,宋孙娟,石亚欣,等. 结构-功能耦合下的城市水系连通方案两阶段优化[J]. 水科学进展,2022,33(1):79-90. (DOU Ming,SONG Sunjuan,SHI Yaxin, et al. Two-stage optimization of urban water system connectivity scheme under structure-function coupling[J]. Advances in Water Science,2022,33(1):79-90. (in Chinese))
- [7] WU Yunqi,XU Yu,ZHAO Yan, et al. Evolution of river network due to urbanization in the Southeast Yinzhou Plain of Yongjiang River Basin, China [J]. Journal of Cleaner Production,2022,379:134718.
- [8] 李景保,于丹丹,杨波,等. 长江荆南三口水系调蓄能力演变及其与水系结构的关联性[J]. 水资源保护,2019,35(5):19-26. (LI Jingbao,YU Dandan,YANG Bo, et al. Regulation capacity changing trend and its relation with river network structure in Jingnan Three Port of Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2019,35(5):19-26. (in Chinese))
- [9] MARTINEZ F, MANRIQUEZ H, OJEDA A, et al. Organization patterns of complex river networks in Chile: a fractal morphology [J]. Mathematics, 2022, 10 (11): 1806.
- [10] 黄草,陈叶华,李志威,等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. 水科学进展,2019,30(5):661-672. (HUANG Cao,CHEN Yehua,LI Zhiwei, et al. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake area [J]. Advances in Water Science,2019,30(5):661-672. (in Chinese))
- [11] 马宗伟,许有鹏,李嘉峻. 河流形态的分维及与洪水关系的探讨:以长江中下游为例[J]. 水科学进展,2005,16(4):530-534. (MA Zongwei,XU Youpeng,LI Jiajun. River fractal dimension and the relationship between river fractal dimension and river flood:case study in the middle and lower course of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science,2005,16(4):530-534. (in Chinese))
- [12] MERRIAM G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern [C]//Proceedings of the 1st International Association of Landscape Ecology. Roskilde,Roskilde University Center,1984.
- [13] LANE S N, REANEY S M, HEATHWAITE A L. Representation of landscape hydrological connectivity using a topographically driven surface flow index [J]. Water Resources Research,2009,45(8):W08423.
- [14] 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.
- [15] 杨志,冯民权. 基于图论的强人工干扰流域综合连通性量化的改进方法[J]. 水资源保护,2020,36(4):52-59. (YANG Zhi,FENG Minquan. An improved method based on graph theory to quantify comprehensive connectivity of basins with strong artificial disturbance [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):52-59. (in Chinese))
- [16] 孟祥永,陈星,陈栋一,等. 城市水系连通性评价体系研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):24-28. (MENG Xiangyong,CHEN Xing,CHEN Dongyi, et al. Evaluation system of urban water system connectivity[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2014,42(1):24-28. (in Chinese))
- [17] CALHOUN A J K, MUSHET D M, ALEXANDER L C, et al. The significant surface-water connectivity of “geographically isolated wetlands” [J]. Wetlands,2017,37(4):801-806.
- [18] 高玉琴,肖璇,丁鸣鸣,等. 基于改进图论法的平原河网水系连通性评价[J]. 水资源保护,2018,34(1):18-23. (GAO Yuqin,XIAO Xuan,DING Mingming, et al. Evaluation of plain river network hydrologic connectivity based on improved graph theory [J]. Water Resources Protection,2018,34(1):18-23. (in Chinese))
- [19] 胡瑞媛,畅建霞,邓铭江,等. 生态输水工程对水系连通的多维影响:以塔里木河为例[J]. 水利学报,2023,54(11):1359-1370. (HU Ruiyuan,CHANG Jianxia,DENG Mingjiang, et al. Multi-dimensional response of hydrological connectivity to ecological water conveyance project [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(11):1359-1370. (in Chinese))
- [20] 陈星,许伟,李昆朋,等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价:以常熟市燕泾圩为例[J]. 水资源保护,2016,32(2):26-29. (CHEN Xing,XU Wei,LI Kunpeng, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City [J]. Water Resources Protection,2016,32(2):26-29. (in Chinese))
- [21] 窦明,张远东,张亚洲,等. 淮河流域水系连通状况评估[J]. 中国水利,2013(9):21-23. (DOU Ming,ZHANG Yuandong,ZHANG Yazhou, et al. Assessment on the water system interconnection degree of Huaihe River Basin[J]. China Water Resources,2013(9):21-23. (in Chinese))

(下转第64页)

- temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 79-85. (in Chinese))
- [22] 何伟军,孟旭,孔阳,等.时空异质性视角下长江经济带水环境承载力评估及其驱动因子探究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 215-223. (HE Weijun, MENG Xu, KONG Yang, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of Yangtze River Economic Belt and its driving factors exploration from perspective of spatial-temporal heterogeneity [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 215-223. (in Chinese))
- [23] 王秀伟,李晓军.中国乡村旅游重点村的空间特征与影响因素[J]. *地理学报*, 2022, 77(4): 900-917. (WANG Xiuwei, LI Xiaojun. Characteristics and influencing factors of the key villages of rural tourism in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 900-917. (in Chinese))
- [24] 陈述云.论经济变量相关分析的统计方法[J]. *上海统计*, 1994(6): 15-17. (CHEN Shuyun. On statistical methods of correlation analysis of economic variables [J]. *Shanghai Statistics*, 1994(6): 15-17. (in Chinese))
- [25] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [26] 胡文翰,张质明,赵鑫,等.基于 VSD 模型和地理探测器的北京城市内涝脆弱性评估及驱动机制分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(10): 86-100. (HU Wenhan, ZHANG Zhiming, ZHAO Xin, et al. VSD model and geodetector-based assessment on urban waterlogging vulnerability in Beijing and analysis of its driving mechanism [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(10): 86-100. (in Chinese))
- [27] ZHANG Qifei, WU Zhifeng, ZHANG Hui, et al. Identifying dominant factors of waterlogging events in metropolitan coastal cities: the case study of Guangzhou, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110951.
- [28] 张晨钰,王伟,黄莉,等.高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2): 35-45. (ZHANG Chenyu, WANG Wei, HUANG Li, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2): 35-45. (in Chinese))
- [29] 李海宏,吴吉东.2007—2016 年上海市暴雨特征及其与内涝灾情关系分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2136-2148. (LI Haihong, WU Jidong. Rainstorm characteristics and its relationship with waterlogging disaster in Shanghai during 2007-2016 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2136-2148. (in Chinese))
- (收稿日期:2024-10-26 编辑:施业)
-
- (上接第 38 页)
- [22] 孙文宇,姚成,刘志雨,等.秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 26-33. (SUN Wenyu, YAO Cheng, LIU Zhiyu, et al. Hydrological and hydrodynamic model of Qinhuai River and real-time correction [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(4): 26-33. (in Chinese))
- [23] 高学平,胡泽,闫晨丹,等.考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 41-47. (GAO Xueping, HU Ze, YAN Chendan, et al. Construction and application of water system connectivity evaluation index system considering hydraulic connectivity [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 41-47. (in Chinese))
- [24] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等.上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 329-334. (YAN Yu, YUAN Sai, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(4): 329-334. (in Chinese))
- [25] CARRARO L, ALTERMATT F. Optimal Channel Networks accurately model ecologically-relevant geomorphological features of branching river networks[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 125.
- [26] 张兴源,李发文,赵勇.基于小世界网络的海河流域河网结构及功能响应[J]. *水科学进展*, 2023, 34(4): 541-552. (ZHANG Xingyuan, LI Fawen, ZHAO Yong. Structural characteristics of the river network and its functional responses in the Haihe River Basin based on small-world networks [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(4): 541-552. (in Chinese))
- [27] 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))
- [28] 吴学文,瞿永钢,李玲.基于复杂网络理论的河流网络建模与分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 177-182. (WU Xuewen, QU Yonggang, LI Ling. River network modeling and analysis based on complex network theory [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(2): 177-182. (in Chinese))
- (收稿日期:2024-12-15 编辑:施业)