

基于复杂网络理论的白洋淀流域水系形态结构与连通性分析

王秀雯, 张 蕾

(河北农业大学城乡建设学院)

摘要:基于复杂网络理论量化了白洋淀流域的水系形态结构特征与连通性,利用典型相关分析揭示了水系形态结构与连通性的关系。结果表明:白洋淀流域河网密度为 0.179 km/km^2 ,河流频率为 0.006 条/km^2 ,水系盒维数为 1.129,地貌发育处于侵蚀幼年期;水系环度为 0.038,节点连接率为 1.074,水系连通度为 0.360,整体连通性属中等偏下水平;子流域中,漕河、瀑河流域结构连通性较好,萍河流域结构连通性最弱;河链重要程度分异明显,高、较高重要等级河链仅 5 条,长度占总河长的 19.8%,集中分布于主干河道及上游河段,低、较低重要等级河链占比 58.6%;度中心性与介数中心性高值节点主要聚集于南水北调工程沿线,而接近中心性高值节点主要分布于入淀口区域;流域水系形态结构主要由水系盒维数驱动,水文连通性指数是水系连通性的关键响应指标。

关键词:水系形态结构;结构连通性;功能连通性;复杂网络理论;白洋淀流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2026)05-0155-09

Analysis of water system morphological structure and connectivity in the Baiyangdian Basin based on complex network theory//Wang Xiuwen, Zhang Lei(College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University)

Abstract: Based on the complex network theory, the water system morphological structure characteristics and connectivity in the Baiyangdian Basin were quantified, and the relationship between the water system morphological structure and connectivity was revealed using canonical correlation analysis. The results show that the density of the river network in the Baiyangdian Basin is 0.179 km/km^2 , the river frequency is 0.006 per km^2 , the water system box dimension is 1.129, and the landform development is in the early stage of erosion. The water system ring degree is 0.038, the node connectivity rate is 1.074, and the water system connectivity is 0.360. The overall connectivity is at a medium to low level. In the sub-basins, the Cao River and Pu River basins have good structural connectivity, while the Ping River Basin has the weakest structural connectivity. The importance of river chains varies significantly, with only 5 high and higher importance level river chains, accounting for 19.8% of the total length, concentrated in the main river channels and upstream sections. Low and lower importance level river chains account for 58.6%. The high-value nodes of degree centrality and betweenness centrality are mainly concentrated along the South-to-North Water Diversion Project, while the high-value nodes of closeness centrality are mainly distributed in the entrance area of the Baiyangdian. The water system morphological structure of the basin is mainly driven by the water system box dimension, and the hydrological connectivity index is the key response indicator of water system connectivity.

Key words: water system morphological structure; structural connectivity; functional connectivity; complex network theory; the Baiyangdian Basin

《国家水网建设规划纲要》提出要协同推进国家水网的系统性规划与实施,重点解决国家层面水资源空间分布不均问题,实现大尺度的空间均衡。白洋淀流域作为海河流域中部的核心生态单元,是京津冀城市群水资源供给与生态屏障的关键载体,其水系形态结构影响着大清河水系的洪涝调节、生

物迁徙及水质净化^[1]。然而,在气候干旱化与高强度人类活动的双重作用下,流域尺度的水系形态结构和连通性发生了一定变化,在此背景下分析白洋淀流域的水系形态结构和连通性对流域水网建设及区域水生态系统稳定具有重要意义。

目前,国内外学者已围绕水系连通性开展了广

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2024204017);河北省省属高等学校基本科研业务费项目(KY2021001)

作者简介:王秀雯(1999—),女,硕士研究生,主要从事流域生态水文过程模拟研究。E-mail:1772780812@qq.com

通信作者:张蕾(1983—),女,副教授,博士,主要从事流域生态水文过程模拟研究。E-mail:463790357@qq.com

泛的研究。早期研究对水系连通性的认识主要依赖对水文情势序列的数理统计与对地貌形态的定性描述,仅以间接指标估计连通状况,缺乏对连通性的定量分析^[2]。近年来,多学科交叉不断深化,河流连通性的量化与评价方法日趋多元,夏继红等^[3]将河流连通性定量计算方法总结归纳为图论法、水文-水利学法、景观生态学法、生物法、综合指标评价法。其中,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,常用的指标有水系环度、节点连接率、水系连通度、节点数等^[4-6]。例如:Tian 等^[7]以图论为基础构建了东辽河流域水系网络模型;李加林等^[8]通过图论与景观生态学指标,系统评估了鄱阳湖流域的水系格局与连通性变化;李进宝等^[9]应用景观生态网络连接度分析方法与分形理论,揭示了克里雅河流域的水系连通性状况;徐志成等^[10]进一步将图论中的连通环度与节点连接率纳入全国尺度水系连通性评价体系,结合数量与水力学特征,构建了多层次评价模型。在功能连通性评价方面,水文连通性指数因能综合反映地形、植被、土地利用等因素对水流路径与泥沙输移的影响,逐渐成为评估的重要工具^[11]。水文连通性指数基于上坡贡献面积、坡度、植被覆盖率等参数,能够量化水流从源区到汇流点的潜在输移能力,尤其适用于山区-平原过渡区的水沙连通性分析^[12]。相关研究表明,水文连通性指数在识别关键源区、诊断连通瓶颈、评估人类活动干扰等方面具有较好的敏感性与适用性^[13]。

以上研究多集中于区域、流域层面开展整体水系连通性评估,对河网中节点及河链的分布和连通性评估不足。近年来,相关学者将复杂网络理论与空间分析结合,开展了识别河网关键节点及评估河链重要性的研究。例如:Huang 等^[14]采用复杂网络理论从全局尺度和局部尺度两个层面,系统评价了河网的结构连通性及其演变趋势;Yu 等^[15]构建了包含格局、结构、功能连通性的评价指标体系,并结合复杂网络理论评估了塔里木河流域水系连通性及节点重要性;李发文等^[16]通过对研究结果的合理性评估,认为应用复杂网络理论能全面分析流域水系特征及连通情况,具有良好的应用前景。

基于景观生态学法和复杂网络理论,从流域、河链、节点 3 个层次对白洋淀流域水系的结构连通性和功能连通性展开分析,识别关键控制节点与河段,以期对白洋淀流域水网的建设与优化以及京津冀水安全格局的构建提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

白洋淀流域(39°01′~40°04′N, 113°39′~116°11′E)属海河流域大清河水系,总面积约 3.12 万 km²,范围涉及河北、山西两省及北京市,涵盖保定市、大同市、北京市房山区等 45 个县(市、区)(图 1)^[17]。白洋淀流域属温带大陆性季风气候,季风气候显著,雨热同期,年平均气温为 7.3~12.7℃,多年平均降水量为 564 mm,年内降水时空分布不均,多集中于 6—8 月;多年平均蒸发量为 1051~1637 mm,干旱指数为 2~3,属于半湿润-半干旱过渡带^[18]。白洋淀流域地势西高东低,呈阶梯状自西北向东南倾斜,依次分布中山、低山、丘陵、山前洪积平原及东部冲积洼淀区^[19]。流域中主要河流有漕河、萍河、潞龙河、孝义河、唐河、府河、瀑河、拒马河等,各河流从上游山地流经中游山地、平原生态过渡区到下游平原区,最终汇入白洋淀^[20]。白洋淀是大清河水系中重要的蓄水枢纽,具有缓洪、治涝和蓄水灌溉的重要功能,对当地气候调节和生物多样性保护有着不可替代的作用^[21]。

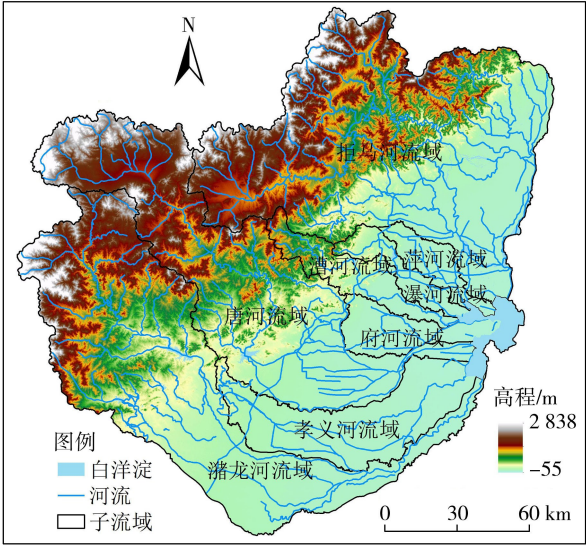


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

水系数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://mulu.tianditu.gov.cn/>)提供的 1:100 万公众版地形数据;地形数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>);土地利用数据来源于中国年度土地覆被数据集及其动态数据集(CLCD)(<https://zenodo.org/>);归一化植被指数(NDVI)数据来源于 GEE 的 Landsat 8 影像数据。

2 研究方法

2.1 水系形态结构和连通性的量化

基于复杂网络理论,将区域内水系构建为有向空间网络,将河流的端点及河流间的交汇点简化为节点,将两个交汇点之间的河段简化为边^[16],并进行拓扑关系验证。本文从面、线、点3个层面分别选取相关指标,对白洋淀流域水系形态结构和水网连通性进行分析。

面层面上,在水系形态结构方面,选取河网密度(即河流总长度与流域总面积之比,反映水系长度发育程度)、河流频率(即河流总条数与流域总面积之比,反映水系数量发育程度)和水系盒维数(即基于网格覆盖法计算的分形维数,反映水系形态的复杂程度与标度特性)3个指标,计算方法见文献[9]。在连通性方面,进一步划分为结构连通性与功能连通性:结构连通性选取基于图论的水系环度(衡量网络中闭合环状拓扑结构的发育程度)、节点连接率(反映各节点连接强度的平均水平)和水系连通度(表征河网整体连通强弱程度)3个指标,计算方法见文献[2],参考李保琦等^[22-23]的研究,依据水系环度、节点连接率、水系连通度对水系结构连通性进行等级划分,划分标准见表1(表中 α 为水系环度; β 为节点连接率; γ 为水系连通度。下同);功能连通性选取水文连通性指数1个指标,其能够综合考虑上坡贡献面积、地形坡度、地表覆盖权重及下坡流动路径长度等因素,可量化径流和泥沙沿流动路径到达汇流点的可能性^[12],计算公式为:

I_c = (w_bar * S * sqrt(A_up)) / sum_i (d_i / w_i * S_i) (1)

式中: I_c 为水文连通性指数; A_{up} 为上坡贡献面积; $\bar{w}$ 为上坡贡献面积的平均权重; $\bar{S}$ 为上坡贡献面积的平均坡度; d_i 为单元*i*沿下坡方向的流动路径长度; w_i 和 S_i 分别为单元*i*的权重和坡度。

表1 水系结构连通性等级划分标准
Table 1 Classification standard for water system structure connectivity levels

等级	α	β	γ
优	>0.5~1	>1.07~1.30	>0.37~0.50
良	>0.3~0.5	>1.05~1.07	>0.35~0.37
中	>0~0.3	>1.00~1.05	>0.30~0.35
差	-1~0	0~1.00	0~0.30

线层面上,选取河链重要程度1个指标,即移除某条河链前后河网的整体连接性指数变化比例,可评估该河链在河网中的重要程度,河链重要程度越高,代表该河链在河网中越重要,当该河链中断时对

整个河网产生的影响越大,计算公式见式(2)。当进行河链重要程度评价时,超过距离阈值的河链不连通,确定最佳距离阈值,保证既不会因阈值过小而使部分关键河链(如主干流、连通枢纽河段)的重要程度被低估,也不会因阈值过大而使河链重要性排序模糊^[24],本文的最佳距离阈值确定为1800m;河链的链接采用概率方式,本文链接概率取0.5。依据河链重要程度对河链重要性进行等级划分:>12.70~25.08、>6.78~12.70、>2.61~6.78、>0.86~2.61、0~0.86分别对应高、较高、中等、较低、低5个重要等级。

D_ij = (I_L - I_Lj) / I_L * 100 (2)

其中 I_L = sum_{j=1}^n sum_{k=1}^n (a_j a_k / (1 + n_jk)) / A^2
式中: D_{ij} 为河链*j*的重要程度; I_L 为整体连接性指数; I_{Lj} 为移除河链*j*后的整体连接性指数; a_j 、 a_k 分别为河链*j*、河链*k*的长度; n 为河链总数; n_{jk} 为河链*j*与河链*k*之间最短路径的链接数; A 为流域面积。

点层面上,选取度中心性(即与节点直接连接的邻居节点数,反映局部连接广度)、接近中心性(即节点到其他所有节点的最短路径距离之和的倒数,反映节点在河网中的几何中心程度)、介数中心性(河网中任意两个节点之间的最短路径经过该节点的比例,反映节点作为河网中桥梁的控制作用)3个指标,计算方法见文献[15]。度中心性取值为1、2、3、4分别表示端点节点、过境节点、三岔交汇节点、多岔枢纽节点。依据接近中心性和介数中心性对节点进行等级划分:>0.50~1、>0.25~0.50、>0.11~0.25、>0.04~0.11、0~0.04和>3960~7220、>2355~3960、>1017~2355、>348~1017、0~348分别对应高、较高、中等、较低、低5个重要等级。

2.2 典型相关分析

为揭示白洋淀流域水系形态结构与连通性之间的内在联系,基于典型相关分析方法对水系形态结构与连通性进行分析。典型相关分析是研究两组变量之间整体相关性的多元统计方法^[25],该方法通过提取两组变量的线性组合,形成若干对典型变量,使每一对典型变量之间的相关系数达到最大,同时保证不同对典型变量之间互不相关,从而全面揭示两组多变量数据集之间的综合关联特征。具体而言,本文将反映水系形态结构的河网密度、河流频率和水系盒维数3个指标作为第一组变量(形态结构组),将表征水系连通性的水系环度、节点连接率、水系连通度和水文连通性指数4个指标作为第二组变量(连通性组);通过典型相关分析,构建两组变

量的典型相关结构,识别两组变量之间的主要耦合关系及其主导因子,量化形态结构组指标对连通性组指标的综合解释程度,从而揭示白洋淀流域水系形态结构对连通性的影响机制。

3 结果与分析

3.1 水系形态结构特征

图2为白洋淀流域及各子流域的水系形态结构指标。白洋淀流域共计199条河流、421条廊道、392个节点。其中,拒马河流域水系数量最多,包括84条河流、165条廊道、159个节点;漕河流域水系数量最少,包括3条河流、6条廊道、5个节点。白洋淀流域的河网密度为 0.179 km/km^2 ,河流频率为 0.006 条/km^2 ,水系盒维数为1.129。8个子流域中,萍河流域的河网密度和河流频率最大,分别为 0.245 km/km^2 和 0.012 条/km^2 ;瀑河流域河网密度次之,为 0.220 km/km^2 ;孝义河流域河网密度最小,为 0.150 km/km^2 ;漕河流域的河流频率最小,为 0.003 条/km^2 。在发育程度上,拒马河流域的水系盒维数最大,为1.136,漕河流域的水系盒维数最小,为1.082。可见,拒马河流域内水系数量较多、河网交织复杂,水系盒维数也相对较大;而孝义河、漕河等流域河网密度较小,水系结构相对简单,水系盒维数也较小。

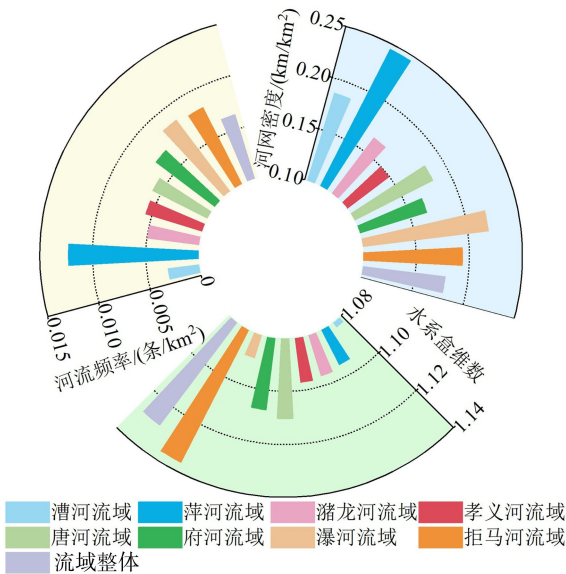


图2 白洋淀流域及各子流域的水系形态结构指标

Fig.2 Water system morphology and structural indicators in the Baiyangdian Basin and each sub-basin

3.2 水系连通性

3.2.1 结构连通性

图3为白洋淀流域及各子流域的结构连通性指标。由图3可见,白洋淀流域的水系环度、节点连接率、水系连通度分别为0.038、1.074、0.360,评价等

级分别为中、优、良,表明流域河网水系中每个节点的物质交换能力和连接水系的能力较弱,河网水系之间的结构连通性和水分转移能力一般。各子流域中,漕河流域的水系环度为0.400,评价等级为良,其余子流域的水系环度评价等级均为中。漕河、瀑河、孝义河、唐河、府河流域的节点连接率分别为1.200、1.300、1.250、1.128、1.071,评价等级均为优;潞龙河、拒马河流域的节点连接率分别为1.037、1.038,评价等级为中;萍河流域的节点连接率为0.952,评价等级为差。漕河、瀑河、孝义河、唐河、府河流域的水系连通度分别为0.667、0.542、0.454、0.386、0.417,评价等级均为优;潞龙河、拒马河、萍河流域的水系连通度分别为0.354、0.350、0.351,评价等级均为良。总体上,漕河、瀑河、孝义河、唐河流域的结构连通性指标值高于白洋淀流域整体,结构连通性较好;萍河流域在所有子流域中结构连通性最弱。

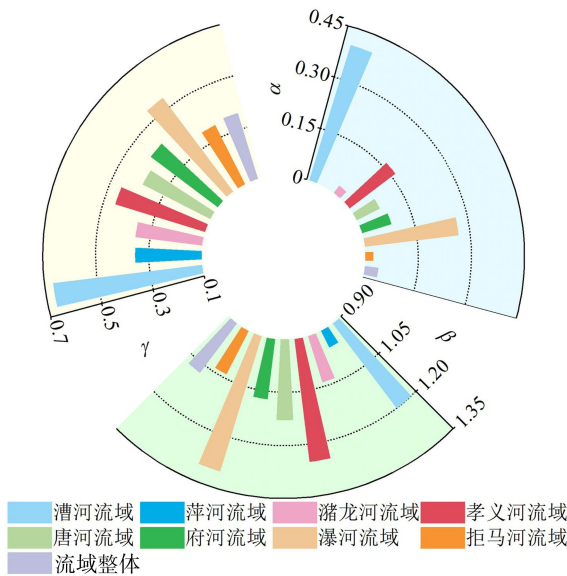


图3 白洋淀流域及各子流域的结构连通性指标

Fig.3 Structural connectivity indexes in the Baiyangdian Basin and each sub-basin

3.2.2 功能连通性

图4为白洋淀流域水文连通性指数的空间分布。由图4可见,水文连通性指数最小值为-6.58,最大值为5.42,平均值为-3.45,整体呈现山区高、平原低的空间分异特征。大清河山区以森林、草地等自然植被覆盖为主,植被截留与水土保持能力较强,但受地形影响,海拔落差为300~800 m,地势起伏显著提升了坡面径流速度与河道水力梯度,使得水沙在重力驱动下的运移能力增强,进而导致水文连通性指数较高。而大清河淀西区域主要以建设用地、未利用地及耕地为主,为典型平原地貌,海拔多为5~20 m,地形平坦导致水流速度减缓,水文连通

性指数集中在 $-6.58 \sim -1.50$ 的低值区间,功能连通性整体较低。

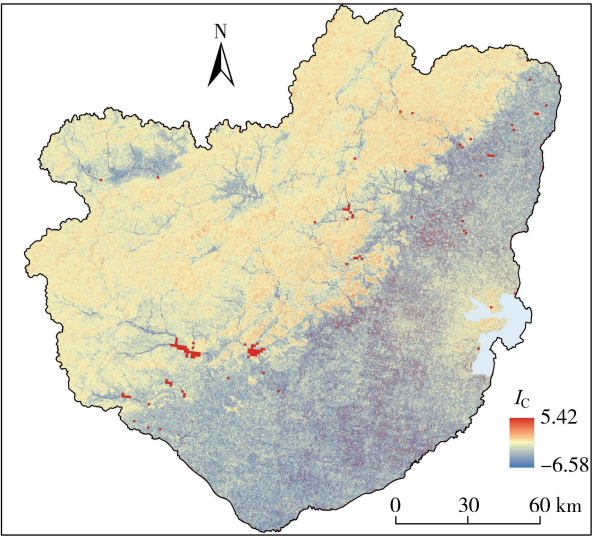


图 4 白洋淀流域水文连通性指数的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of hydrological connectivity index in the Baiyangdian Basin

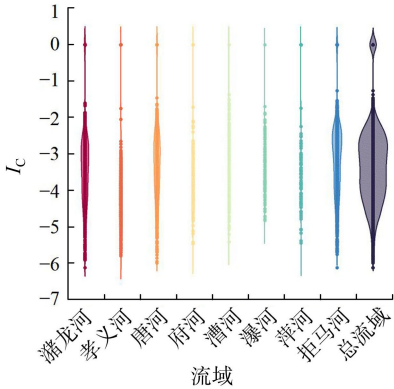


图 5 白洋淀流域及各子流域水文连通性指数小提琴图
Fig. 5 Violin plot of hydrological connectivity index in the Baiyangdian Basin and each sub-basin

图 5 为白洋淀流域及各子流域水文连通性指数小提琴图。由图 5 可见,白洋淀流域及各子流域的水文连通性指数分布范围为 $-5 \sim -2$, 均为负值,表明流域的功能连通性整体处于偏弱水平。水文连通性指数较大的区域主要分布在水库、流域出口等,各子流域的水文连通性指数峰值集中在 $-4 \sim -3$,说明多数区域的功能连通性处于弱连通区间,且与整个流域分布规律基本一致;水文连通性指数接近 0 的区域偏少。府河流域、孝义河流域、瀑河流域及萍河流域的水文连通性指数范围为 $-4 \sim -3$,拒马河流域、唐河流域、潞龙河流域水文连通性指数范围较大,为 $-5 \sim -2$,均值为 -3 左右。在空间差异上,拒马河流域的功能连通性整体略高于其他子流域。

3.3 重要河链及节点识别

3.3.1 河链重要等级空间分布

图 6 为白洋淀流域河链重要等级空间分布。由

图 6 可见,白洋淀流域高重要等级的河链仅有 3 条,为沙河、唐河及南水北调工程,长度之和为 792.74 km,占流域总河长的 14.2%;较高重要等级河链也仅有 2 条,为磁河和拒马河,长度之和为 314.59 km,占流域总河长的 5.6%;低重要等级、较低重要等级河链长度为 3273.03 km,占流域总河长的 58.6%,其中较低重要等级河链长度占比为 27.2%,低重要等级河链长度占比为 31.4%。空间上,重要等级为较高及以上的河链主要分布于主干河道。

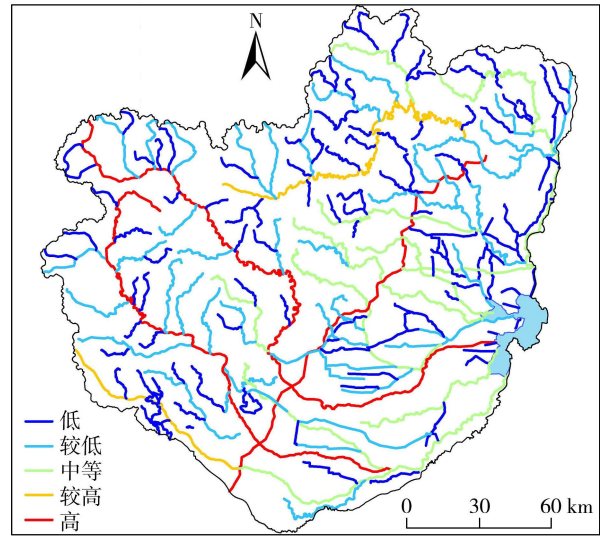


图 6 白洋淀流域河链重要等级空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of river link importance level in the Baiyangdian Basin

3.3.2 节点重要等级空间分布

图 7 为白洋淀流域节点重要等级空间分布。由图 7(a)可见,白洋淀流域节点度中心性值以 1、3 为主,其中值为 1 的节点数为 171,占总节点数的 43.5%,主要为各河道的源头或入淀口末端;值为 3 的节点数为 161,占总节点数的 41.0%,主要分布在沙河流域、唐河流域中部、萍河流域、瀑河流域及拒马河流域;值为 4 的节点数为 26,占总节点数的 6.6%,主要集中在南水北调工程线,部分集中在萍河流域。高度中心性的节点是多条河道的交汇点,实现了不同支流径流的汇聚与分流,成为流域上游、中游支流水系的汇流中心,保障了支流水系与干流的连通性。由图 7(b)可见,白洋淀流域节点接近中心性以低重要等级为主,低重要等级的节点数为 282,占总节点数的 71.8%;高重要等级的节点数为 23,占总节点数的 5.9%,零星分布于拒马河下游、白洋淀入淀口及潞龙河流域。低接近中心性节点多为上游支流节点,由于路径迂回、传输距离长,对下游变化响应迟缓,物质能量交换效率低;高接近中心性节点作为流域水系的通达核心,其优越的空间通

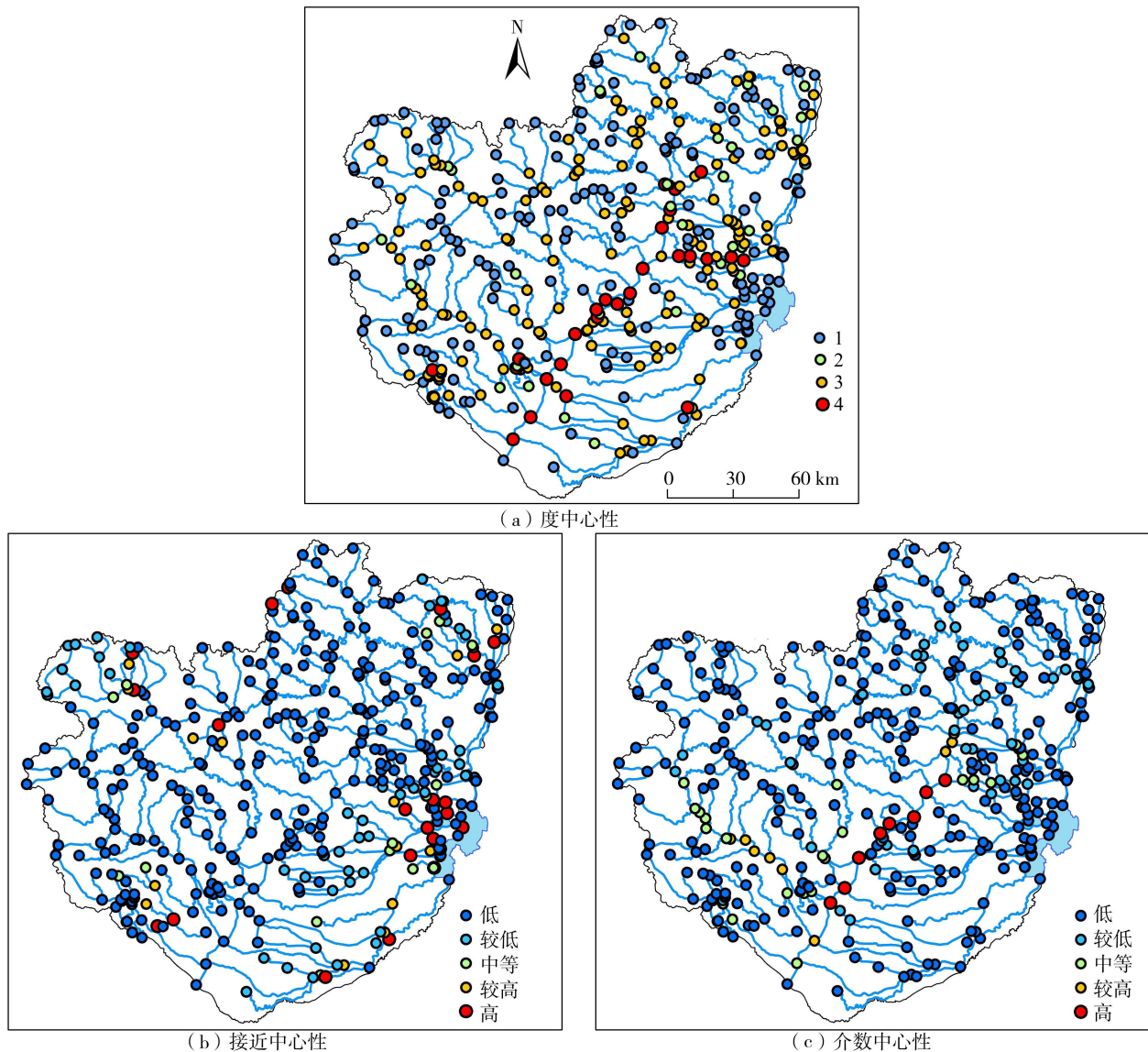


图 7 白洋淀流域节点重要等级空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of node importance level in the Baiyangdian Basin

达性使其成为上游径流向下游淀区汇聚的关键中枢,尤其是淀区入淀口节点,对淀区生态安全具有决定性影响。由图 7(c)可见,白洋淀流域节点介数中心性同样以低重要等级为主,低重要等级节点数为 305,占总节点数的 77.6%;高重要等级的节点数为 6,占总节点数的 1.5%,主要集中在南水北调工程线;较高重要等级的节点数为 12,占总节点数的 3.1%,主要集中在潞龙河上游沙河区域。高介数中心性节点是流域水系的中介核心,南水北调工程线主导人工调水的流域内分配,控制补水覆盖范围与效率,其连通状态决定流域局部乃至整体水系的稳定性。作为多指标高值叠加节点,南水北调工程沿线节点整合了连接、通达、控制三重功能,构成流域水系的核心枢纽综合体,对白洋淀流域水资源优化配置、生态补水保障及水系连通性维持具有重要作用。

3.4 水系形态结构与连通性的关系

采用典型相关分析方法探究白洋淀流域水系形态结构与连通性之间的内在联系,共获得 3 对典型变量,其中只有 1 对典型变量的相关系数(0.997)通过 0.05 显著性水平检验,记为 (U_1, V_1) ,选择其进行分析,得到水系形态结构与连通性的典型相关结构,如图 8 所示。 U_1 代表水系形态结构,水系盒维数的典型载荷系数最高,为 0.723,说明水系结构的复杂程度是构成水系形态结构典型变量的核心正向指标;河流频率的典型载荷系数为-0.640,对 U_1 产生负向贡献,这与流域内短小、低级别支流较多有关;河网密度的典型载荷系数为-0.283,对 U_1 产生负向贡献,但影响较弱。 V_1 代表连通性,水文连通性指数的典型载荷系数最高,为 0.506,对 V_1 产生正向贡献,说明当水文连通性指数增大时,汇流路径实际长度增加,地形更趋于汇集水流,局部水力坡降

减缓,蓄水能力和水文连通性增强;节点连接率、水系环度、水系连通度的典型载荷系数分别为 0.244、0.229、0.176,对 V_1 有一定的正向贡献,但未呈现主导作用。

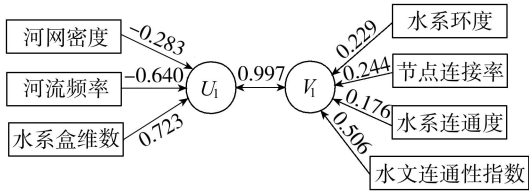


图 8 水系形态结构与连通性的典型相关结构
Fig. 8 Typical correlation structures between water system morphology structure and connectivity

4 讨论

4.1 白洋淀流域水系特征归因

本文分析表明,白洋淀流域各子流域在水系形态结构和连通性方面存在显著的空间异质性,其核心指标的分异特征与自然地理背景及人类活动密切相关。在水系形态结构方面,从全流域尺度看,河网密度为 0.179 km/km^2 ,河流频率为 0.006 条/km^2 ,表明流域整体水系发育尚不成熟,河网分布相对稀疏,水系结构相对简单^[26];整体水系盒维数小于 1.6,表明白洋淀全流域地貌仍处于侵蚀发育初期^[27]。空间上,拒马河水系盒维数最大,其流经山区地形保留了相对完整的自然水系分形特征,复杂的地形起伏为水系分支拓展提供了天然条件,进而具备较强的水文调蓄能力^[28]。相比之下,府河、孝义河、漕河流域等的水系结构趋于简单,水系盒维数与河网密度均较低,这与下游平原区长期的人工渠化、围垦及城乡建设用地扩张密切相关,自然水系的空間连续性受到显著破坏,水系分支被截断或改造为单一功能渠道,导致水系发育受限^[29]。萍河流域河网密度和河流频率均为各子流域最大,但其水系环度、节点连接率均处于较低水平,呈现出“密度高但连通性差”的特征,这可能与萍河流域内存在大量围堤围埝阻隔、人工渠道改造等强烈人为干扰有关,人类活动对水系结构产生了一定的碎片化效应^[30]。本文分析结果中白洋淀流域水系形态结构特征与丁越岗等^[31]研究中“上游山区段呈树枝状,中部平原段呈编织状”的论述高度吻合。

在功能连通性方面,白洋淀流域子流域中,漕河、瀑河、孝义河流域地处大清河淀西,虽具有复杂的分支结构,但漕河流域、瀑河流域的水文连通性指数在 $-5 \sim -4$ 范围占比最高,表明其受平原地形影响,水流速度减缓,水沙输移受阻,功能连通性仍处于偏弱水平,说明线性连通性与功能连通性存在差异

的核心驱动因素是地形地貌与水流动力条件^[32]。拒马河、潞龙河、唐河流域上游均为山区,山区复杂的分形水系为水流提供了多元路径与调蓄空间,通过地形起伏增强水流动力异质性,为功能连通性的维持提供了基础条件,揭示了地形地貌通过调控水流动力条件,间接影响结构-功能协同效率的机制^[33]。

水系形态结构及连通性典型相关分析结果揭示了白洋淀流域水系发育度与连通度存在极强的正向关联,水系盒维数作为发育度的核心正向因子,与功能连通性作为连通度的主导指标,共同构成了协同演化的核心。这一发现明确了结构复杂度是功能连通性高效发挥的前提,而功能连通性的提升又会提高水系发育的质量,与窦明等^[34]的研究结果一致。

4.2 关键廊道与枢纽节点主导的白洋淀流域水系连通性格局

从河链重要性分析结果可以看出,白洋淀流域高重要等级的河流仅 3 条,较高重要等级的河流仅 2 条,二者总长度占流域总河长不足 20%,但构成了流域连通的核心框架;而低、较低重要等级河链占比高达 58.6%,这些支流多以局部汇流为主要功能,对全流域连通性的贡献有限。

对节点中心性的分析进一步揭示了节点层面的枢纽控制效应与层级分化^[35]。节点度中心性以 1 和 3 为主,值为 1 的节点多分布于上游源头或入淀口末端,仅承担单一汇流或输水功能,值为 3 的节点广泛分布于主要子流域,而值为 4 的高连接性节点集中于南水北调工程线,体现了人工枢纽对节点连接效率的提高效果^[36]。接近中心性与介数中心性的层级分化更显著,71.8% 的节点接近中心性值处于低重要等级,77.6% 的节点介数中心性值处于低重要等级,而高重要等级节点占比极低,且高介数中心性节点主要聚集于南水北调工程线及潞龙河上游沙河区域,成为维持流域连通性的中介核心。

这一格局本质是自然拓扑结构与人工干预共同作用的结果,自然水系的树状向网状过渡特征,促使多数支流与节点边缘化^[37],而南水北调工程等人工与自然主干廊道的叠加,进一步强化了核心与边缘的分化。值得注意的是,高重要等级河链与节点的空间耦合形成了连通性的关键支撑网络,其功能发挥直接决定全流域结构-功能协同的效率。核心廊道的结构完整性与节点的高连接性是促进结构复杂度向功能连通性转化的重要纽带,而多数边缘河链与低重要性节点的弱连通状态,则成为制约全流域协同提升的主要瓶颈^[38]。

白洋淀流域修复工作需坚守结构优化优先于数量扩张原则,聚焦结构、功能协同提升,自然水系保

留区侧重保护分形结构与地形-水系耦合关系,维护水流动力异质性;平原区通过增设分支、构建闭合环路,辅以生态护岸、地形微改造等动力调控措施,破解线性连通性强而功能性弱的问题。同时,依托核心廊道与枢纽节点,通过主干廊道分支拓展、枢纽节点功能升级,推动全流域从树状向网状结构转型,提高结构优化、功能强化的转化效率。

5 结 论

a. 白洋淀流域河网密度为 0.179 km/km^2 ,河流频率为 0.006 条/km^2 ,水系盒维数为 1.129,整体处于侵蚀幼年期。拒马河流域因山区地形保留完整,自然水系分形特征显著,水系形态结构较复杂;萍河流域的河网密度最高,但受围堤围埝阻隔等人为干扰,连通性受限;漕河、孝义河流域受平原区人工渠化、围垦影响,水系结构相对简单。

b. 白洋淀流域水系环度为 0.038(中),节点连接率为 1.074(优),水系连通度为 0.360(良)。子流域中,漕河、瀑河流域的结构连通性较优,萍河流域结构连通性最弱。功能连通性上,水文连通指数呈山区高、平原低的空间分布特征,山区地形提升了水流动力,促进水沙输移,平原区地形平坦导致水流速度减缓,功能连通性偏弱。

c. 河链与节点重要等级空间分布差异明显,高及较高重要等级河链仅 5 条,占总河长的 19.8%,集中于主干河道及上游河段;低及较低重要等级河链占比 58.6%。高重要等级节点聚集性明显,南水北调工程沿线节点由人工调水功能主导连接与调控,白洋淀入淀口节点保障入淀水流,共同构成流域连通核心枢纽。

d. 水系形态结构与连通性相关性强,水系盒维数是水系形态结构的正向核心驱动指标,水文连通性指数是连通性的关键响应指标,二者协同支撑流域水系结构、功能演化。

参考文献:

[1] 易雨君,林楚翘,唐彩红. 1960s 以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. 湖泊科学, 2020, 32(05): 1333-1347. (Yi Yujun, Lin Chuqiao, Tang Caihong, et al. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1333-1347. (in Chinese))

[2] 王朝宇. 浑河水系连通性评价:以抚顺市境内水系为例[J]. 水利技术监督,2020(6):192-195. (Wang Chaoyu. Connectivity evaluation of Hunhe river system: a case study of Fushun water system[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2020(6):192-195. (in Chinese))

[3] 夏继红,陈永明,周子晔,等. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 780-787. (Xia Jihong, Chen Yongming, Zhou Ziye, et al. Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 780-787. (in Chinese))

[4] 顾莉,蔡尚,褚克坚,等. 融合水系结构与闸坝动态调控的水系连通性新指标构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 231-237. (Gu Li, Cai Shang, Chu Kejian, et al. New indicators construction of river system connectivity integrating river system structure and dynamic control of dams[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 231-237. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 李凯轩,李志威,胡旭跃,等. 洞庭湖区水系连通工程指标体系与评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 6-10. (Li Kaixuan, Li Zhiwei, Hu Xuyue, et al. An index system and evaluation method for water network connection projects in Dongting Lake area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 6-10. (in Chinese))

[7] Tian Naixu, Zhang Yue, Li Jianwei, et al. Evaluation and optimization of hydrological connectivity based on graph theory: a case study in Dongliao River basin, China[J]. Water, 2022, 14(23): 3958.

[8] 李加林,杨佳铭,刘永超,等. 鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析[J]. 水资源保护, 2026, 42(1): 30-38. (Li Jialin, Yang Jiaming, Liu Yongchao, et al. Analysis of water system pattern and connectivity change in the Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2026, 42(1): 30-38. (in Chinese))

[9] 李进宝,何学敏,黄鹏程,等. 克里雅河流域水系结构及连通性特征[J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(3): 232-240. (Li Jinbao, He Xuemin, Huang Pengcheng, et al. Characterization of water system structure and connectivity in the Kriya River Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(3): 232-240. (in Chinese))

[10] 徐志成,唐贤琪,王敏,等. 全国水资源分区尺度水系连通性评价[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(10): 40-47. (Xu Zhicheng, Tang Xianqi, Wang Min, et al. Evaluation of river system connectivity on scales of water resource zones in China[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(10): 40-47. (in Chinese))

- [11] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment[J]. Catena, 2008, 75(3): 268-277.
- [12] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small alpine catchments[J]. Geomorphology, 2013, 188: 31-41.
- [13] Heckmann T, Cavalli M, Cerdan O, et al. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 187: 77-108.
- [14] Huang Shanheng, Wang Peng, Hua Zulin, et al. Structural characteristics and spatiotemporal changes of a reticular river network based on complex network theory[J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131577.
- [15] Yu Junyuan, Chen Yaning, Zhu Chenggang, et al. Evaluation of water system connectivity based on node centrality in the Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Water, 2024, 16(21): 3031.
- [16] 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))
- [17] 周昱辰, 尹丹, 黄庆旭, 等. 基于生态系统服务参与式制图的“三生”空间优化建议: 以白洋淀流域为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(8): 1988-2003. (Zhou Yuchen, Yin Dan, Huang Qingxu, et al. Spatial optimization based on ecosystem services and the participatory mapping: a case study in Baiyangdian watershed[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(8): 1988-2003. (in Chinese))
- [18] 刘丛伟, 胡珊珊, 张涛, 等. 基于SPI指数的白洋淀流域干旱演变特征分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 254-259. (Liu Congwei, Hu Shanshan, Zhang Tao, et al. Spatial and temporal characteristics of drought in Baiyangdian Basin based on SPI[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 254-259. (in Chinese))
- [19] 李苗, 周家亮, 杨薇, 等. 白洋淀流域水域空间格局变化及维持机制[J]. 地理科学, 2024, 44(6): 1102-1110. (Li Miao, Zhou Jialiang, Yang Wei, et al. Shift of water bodies pattern and its maintenance mechanism in the Baiyangdian Lake Basin, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(6): 1102-1110. (in Chinese))
- [20] 余杰, 李祎飞, 王衫允, 等. 白洋淀流域岸边带土壤全程氨氧化菌的分布特征及其生态网络研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(4): 359-367. (Yu Jie, Li Yifei, Wang Shanyun, et al. Distribution characteristics and ecological network analysis of complete ammonia oxidizers and other nitrifiers in the riparian zone of Baiyangdian Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(4): 359-367. (in Chinese))
- [21] 李千卉, 陈彦祺, 王葆华. 流域地方性视角下白洋淀人居环境特征与优化策略研究[C]//2025中国城市规划年会论文集. 沈阳: 中国城市规划学会, 2025: 224-233.
- [22] 李保琦, 郭一, 张少雄, 等. 河北省水系发育状况与连通能力及其相关性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(3): 660-668. (Li Baoqi, Guo Yi, Zhang Shaoxiong, et al. Development status and connectivity of water system in Hebei Province and their correlation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(3): 660-668. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 刘金芳. 资源型城市绿色基础设施节点的识别与配置研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [25] 王欲敏, 曾德芳, 阙思思, 等. 三峡库区水质及影响因素的典型相关分析[J]. 净水技术, 2022, 41(4): 41-47. (Wang Yumin, Zeng Defang, Que Sisi, et al. Water quality of the three gorges reservoir area and canonical correlation analysis of influencing factors[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4): 41-47. (in Chinese))
- [26] 闫欣, 牛振国. 白洋淀流域湿地连通性研究[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9200-9210. (Yan Xin, Niu Zhenguo. Preliminary study on wetland connectivity in Baiyangdian basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9200-9210. (in Chinese))
- [27] 何建华, 潘越, 刘殿锋. 生态网络视角下武汉市湿地生态格局分析[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3590-3601. (He Jianhua, Pan Yue, Liu Dianfeng. Analysis of the wetland ecological pattern in Wuhan City from the perspective of ecological network[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3590-3601. (in Chinese))
- [28] 王乐扬, 李清洲, 王艳君, 等. 海河南拒马河流域水文特性及HBV模型的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 70-75. (Wang Yueyang, Li Qingzhou, Wang Yanjun, et al. Hydrological characteristics and application of the HBV model in the South Juma River catchment in the Hai River Basin[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 70-75. (in Chinese))

173-185. (in Chinese))

[36] Li Jianzhu, Shi Yi, Zhang Ting, et al. Radar precipitation nowcasting based on ConvLSTM model in a small watershed in North China[J]. Natural Hazards, 2024, 120(1):63-85.

[37] Su Yihong, Cheng Qiming, He Yang, et al. An Evolution-Unet-ConvNeXt approach based on feature fusion for enhancing the accuracy of short-term precipitation forecasting [J]. Atmospheric Research, 2025, 317: 107984.

[38] 薛丰昌,章超钦,王文硕,等. 基于自注意力和门控循环神经网络的雷达回波外推算法研究[J]. 气象学报, 2024, 82(1):127-135. (Xue Fengchang, Zhang Chaoqin, Wang Wenshuo, et al. Improving radar echo extrapolation algorithms based on self-attention and gated recurrent neural networks [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2024, 82(1):127-135. (in Chinese))

[39] Cheng Yongyun, Chang C T, Chen B F, et al. Extracting 3D radar features to improve quantitative precipitation estimation in complex terrain based on deep learning neural networks [J]. Weather and Forecasting, 2023, 38(2):273-289.

(收稿日期:2025-10-14 编辑:施业)

+++++

(上接第 163 页)

[29] 邓晓军, 许有鹏, 韩龙飞, 等. 城市化背景下嘉兴市河流水系的时空变化[J]. 地理学报, 2016, 71(1):75-85. (Deng Xiaojun, Xu Youpeng, Han Longfei, et al. Spatial-temporal changes of river systems in Jiaxing under the background of urbanization[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1):75-85. (in Chinese))

[30] 田凯, 赵彦伟, 白洁, 等. 多源补水格局下白洋淀换水周期与示踪剂传输时间的时空特征[J]. 湖泊科学, 2025, 37(4):1302-1313. (Tian Kai, Zhao Yanwei, Bai Jie, et al. Spatio-temporal characteristics of water renewal cycle and tracer transport time in Lake Baiyangdian Wetland under multi-source water supply pattern [J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(4):1302-1313. (in Chinese))

[31] 丁越崙, 张洪, 单保庆. 海河流域河流空间分布特征及演变趋势[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):47-54. (Ding Yuekui, Zhang Hong, Shan Baoqing. The spatial distribution and evolution trend of rivers in Hai River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1):47-54. (in Chinese))

[32] Zhang Yinghu, Huang Chenyang, Zhang Wenqi, et al. The concept, approach, and future research of hydrological connectivity and its assessment at multiscales [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(38):52724-52743.

[33] 贺蔚, 黄金雅莹, 蒋爱丽, 等. 人工湿地对平原河网水动力与水质的影响效应[J]. 水科学进展, 2025, 36(5):869-881. (He Wei, Huang Jinyaxuan, Jiang Aili, et al. Effects of constructed wetlands on hydrodynamic conditions and water quality in urban plain river networks [J]. Advances in Water Science, 2025, 36(5):869-881. (in Chinese))

[34] 窦明, 余佳琦, 关键, 等. 基于水资源分区的中国水系发育度与连通度相关性[J]. 水科学进展, 2023, 34(6):877-886. (Dou Ming, Yu Jiaqi, Guan Jian, et al. Study on relationship between water system development and connectivity in China based on water resource zoning [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(6):877-886. (in Chinese))

[35] 危小建, 江平, 陈竹安, 等. 基于拓扑结构和空间网络结构的水系连通性评价[J]. 人民长江, 2019, 50(5):76-81. (Wei Xiaojian, Jiang Ping, Chen Zhu'an, et al. Connectivity evaluation on water system based on topological structure and spatial network structure [J]. Yangtze River, 2019, 50(5):76-81. (in Chinese))

[36] Li Fawen, Yang Yang. Impacts of the middle route of China's South-to-North Water Diversion Project on the water network structure in the receiving basin [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(10):15611-15626.

[37] Jacome R S, Anchieta T, Brentan B M, et al. Core-periphery structure for district metered area partitioning in urban water distribution systems[J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(3):262-273.

[38] 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))

(收稿日期:2025-11-15 编辑:王芳)