

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.06.03

# 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

李发文<sup>1</sup>, 赵宇瑶<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 国网新能源控股有限公司  
抽水蓄能技术经济研究院, 北京 100761)

**摘要:** 河湖水系连通是指通过修建渠道、挖掘河道、改造湖泊等方式, 将不同河流、湖泊之间相互连接起来, 形成一个相互衔接的水系网络。基于复杂网络方法, 从节点和子流域两个层面对海河流域水网的连通性进行分析。在子流域层面, 用平均度指标评价流域连通度, 用网络直径等指标辅助分析流域整体水系连通情况; 在单个节点层面, 用度指标、中介中心性指标分析流域水系各节点连通度的分布情况, 实现了节点微观与流域宏观的结合。同时, 引入聚类系数指标, 获得每个子流域河网的空间分布特征。通过对研究结果的合理性评估, 认为应用复杂网络方法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。

**关键词:** 水系连通; 复杂网络; 点-面两层结构; 区域水网; 适应性评价; 海河流域

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2023)06-0016-11

## Evaluation of water network connectivity using complex network method based on node – subbasin double layer structure

LI Fawen<sup>1</sup>, ZHAO Yuyao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety of Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Pumped-Storage  
Technological & Economic Research Institute of State Grid Xinyuan Co., Ltd., Beijing 100761, China)

**Abstract:** The connectivity of the river and lake system is a new concept of water treatment proposed in the new era. According to the concept, the rivers and lakes can be connected by constructing new canals and channels, also by the transformation of lakes, by which different rivers and lakes become an interconnected water network system. Based on the complex network method, the connectivity of the water network of the Haihe River Basin was analyzed from the two levels of the node and the subbasin. At the subbasin level, the connectivity of the basin was evaluated by the average index, and the overall water system connectivity of the basin was analyzed using the network diameter, average path length, etc. as supplementary indicators. At the level of a single node, the connectivity of each node in the basin was analyzed using degree index and betweenness centrality index. Therefore, the water system connectivity was analyzed from both node and subbasin levels, which realized the combination of microscopic and macroscopic perspectives. In addition, the clustering coefficient was also introduced for a better understanding of the spatial distribution characteristics of the river network in each subbasin. According to the rationality assessment of the results, it can be seen that the complex network method is conducive to the analysis of the characteristics and connectivity of the water system in the basin, and this method has excellent application prospects.

**Key words:** water system connectivity; complex network; nodebasin double layer structure; regional water network; adaptability evaluation; Haihe River Basin

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179020, 52239004)

作者简介: 李发文(1976—), 男, 江苏连云港人, 博士, 教授, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 赵宇瑶(1998—), 女, 河北廊坊人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源。

## 1 研究背景

水体的连通格局对区域水资源分配、生态环境系统的稳定以及区域经济发展有着重要影响<sup>[1-2]</sup>。水系连通性可以提高河湖水体水循环能力,促进水体互动,增强水体流动性,建立动态水体网络,使水资源的分布格局更加协调,达到河湖水系格局的优化,并在一定程度上满足人们对水的需求。

水系连通是指水体之间存在的物理通道和生态水文的连通。目前,对水系连通主要从景观生态学、水动力学、图网络学等领域开展研究<sup>[3-5]</sup>。其中,在水文学领域,通常将连通性与景观生态学相结合,如:Calhoun等<sup>[6]</sup>从地表水连通性能的角度探讨了“孤立的湿地”含义,认为不能仅由距溪流远近对湿地景观进行简单的分类;许笑笑<sup>[7]</sup>采用 Conefor Sensinode 软件中的整体连接度指数(integral index of connectivity, IIC)和可能连接度指数(probability of connectivity, PC)来进行研究,探讨了1985—2020年间辽河口湿地景观格局的变化对水文连通性的影响;柯丁溢<sup>[8]</sup>将形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)、最小累积阻力(minimum cumulative resistance, MCR)模型与水文连通性评价相结合,构建了蓝绿基础设施(blue-green infrastructure, BGI)网络,为城市生态环境问题提供了解决方案。在水动力学领域,不少研究发现,构建水流动力模型进行模拟研究是提高河川连通能力的有效方法。冯斯安<sup>[9]</sup>通过建立 MIKE11 一维河网水动力模型解析河道内涝成因,并提出了水系连通排涝整治方案;刘东<sup>[10]</sup>应用 MIKE 模型对佛山市乐平镇水系连通工程项目进行了仿真,证明该模型在模拟工程的防洪调度方面优于其他方法,具有良好的适用性。近几年,随着拓扑网络概念的兴起,图网络的方法逐渐被应用到连通性计算中。Kupfer等<sup>[11]</sup>基于图网络方法分析了 Taxodium-Nyssa 湿地生态系统中森林沼泽与主河道连通性之间的关系;吴晶晶<sup>[12]</sup>对黄河三角洲的自然湿地景观格局进行了计算分析,并构建了该自然湿地的生态网络;冯硕等<sup>[13]</sup>通过构建河网加权邻接矩阵,对廊坊市河网水系的连通度进行了计算,可为其优化布局提供参考;危小建等<sup>[14]</sup>从水网的拓扑网特性与空间网特性两个方面评价了湖北省大悟县区域内各河流之间的连通性情况。但由于传统的图论方法只能表征其结构上是否连通,其计算结果只是一个自然数,无法模拟水流的动态传输过程,因此不少专家学者在此基础

上进行了改进,如:姜宇等<sup>[15]</sup>在应用图论法确定水系连通最优方案的基础上,将一维水动力水质数学模型运用于分析水闸调度引起的连而不通的问题;高玉琴等<sup>[16-17]</sup>将改进图论与水文模型模拟方法相结合,从水文学角度评价了平原河网的连通性。

从目前的研究来看,连通性评估多采用拓扑网络分析方法,其主要是利用河网拓扑后的节点数与河段数进行计算。但通过节点的数量和河段的数量来判断连通性,所得出的结果仅针对所选范围整体而言,并不能反映具体节点的连通情况以及流域内河网的空间分布特征,具有局限性。而近几年发展起来的复杂网络方法可以较好的弥补这一不足,该方法将每个节点作为网络中的个体,关注个体之间相互作用导致的整体变化,将微观上的点与宏观上的面相结合,进而可分析网络的空间特征<sup>[18]</sup>,已被越来越多地应用到水利工程领域中。但现阶段基于复杂网络的水网连通性研究主要侧重于河网连通性的计算与评价,很少对计算结果进行合理性分析。因此,本文以拓扑网络分析为基础,引入复杂空间网络方法,计算了海河流域水系网络连通性并分析其水系网络的空间分布情况,最后对结果的合理性进行了验证。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区域概况

海河流域内拥有海河、滦河和徒骇马颊河三大水系,其中海河水系为全流域的主体水系,可分为北系和南系,北系包括流经山西省、河北省、北京市等地的海河主干流,南系则包括从河南省流经至天津市的海河支流,这些水系在流域内形成了广阔的水网,为当地的农业灌溉、城市供水和工业用水提供了重要的资源。海河流域水系在经济和社会发展中起着重要的作用,也是该地区生态环境的重要组成部分。本文将海河流域划分为8个子流域,其水系分布情况见图1。

### 2.2 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://www.webmap.cn>)提供的1:100万公众版地形数据(2021年)。

### 2.3 研究方法

复杂网络是对复杂系统的拓扑抽象,整个系统可视为由大量节点和连接节点的边所构成的集合。在分析时,通过分析系统中个体(即拓扑网络中的节点)间的相互作用,获得网络系统的结构特征。此方法已被

应用于社会互联网、交通网络、生物网络等诸多领域。在水系演化过程中,由于地形、气候等原因,河流出现大量的无规则分叉,而人工沟渠的修建进一步导致河

湖港汉或沟渠纵横交错如网,形成了复杂的网络系统。因此,可将水网视为复杂系统,应用复杂网络方法分析其拓扑特征及水系空间结构。

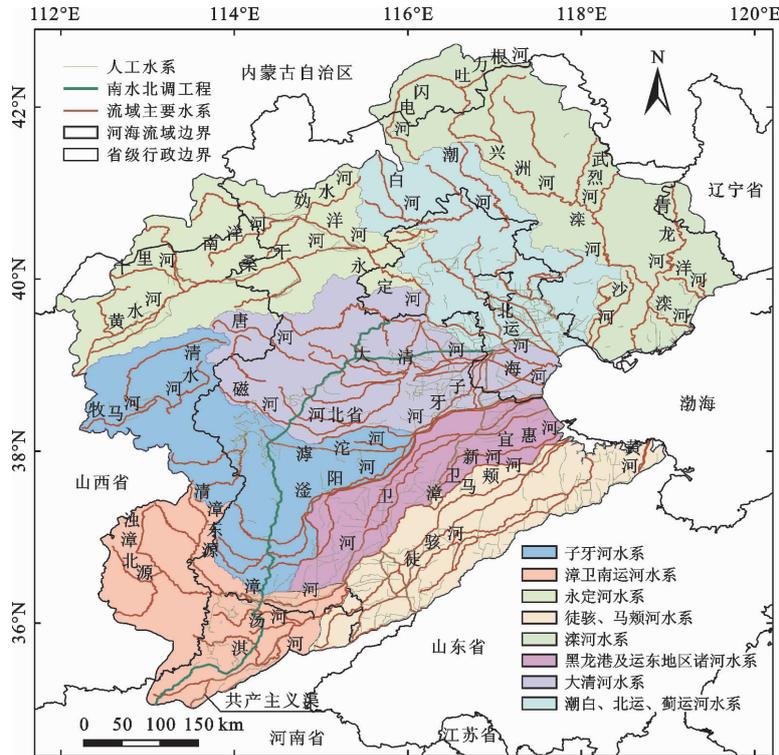


图1 海河流域子流域划分及水系分布

本文将流域水系构建为空间网络并进行网络分析。在模型建立过程中,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。与图论概化方式相同,在复杂网络方法中,水流从任意节点出发可均匀地沿着边向相邻节点移动,节点间连通性的强弱完全取决于两节点间边的数量。

在基于复杂网络的水网连通性分析中,节点层面的分析可以描述相邻河段间的连接情况,比如一个节点发生断裂后,该节点周围连通性遭受破坏的情况可被描述出来,但无法表征流域层面上整体的连通性。而在子流域层面的分析中,通过将子流域作为整体,可对各个子流域间连通性的大小进行比较,弥补了节点层面分析的不足。同时,节点层面的分析又可以找出对子流域连通性贡献最大的节点,弥补了子流域层面分析的不足,两者相得益彰。因此,本文从点和面两个层面依次分析所划分的海河流域8个子流域的连通性。

## 2.4 连通性指标

依据前人研究及各指标特点<sup>[19-20]</sup>,本文在子流域层面,引入平均度指标评价流域连通度,引入网络直径、平均聚类系数、平均路径长度指标辅助分析流

域的水系连通情况;在单个节点层面,引入聚类系数、度指数、中介中心性指数分析流域水系连通情况在空间上的变化趋势。各指标含义说明及计算公式如下。

(1) 度指数(*degree*):度指数通过与某节点相邻边的数量多少来描述该节点的连通度。度指数值大的节点对减小整体河网节点间的距离具有重要意义,是优化水系连通性的关键节点,其计算公式如下:

$$degree = \frac{N_{degree}}{n - 1} \quad (1)$$

式中: $N_{degree}$ 为某节点的度; $n$ 为流域内的节点数量。

(2) 中介中心性指数( $B_i$ ):中介中心性指数描述的是某节点担任其他两个节点最短路径桥梁的次数。最短路径表征连通性最好的路径,中介中心性指数的值越高则表明各条连通性最好的路径流经该节点的次数越多,即流量越大,其计算公式如下:

$$B_i = \sum_{o \neq d} \frac{\sigma_{od(i)}}{\sigma_{od}} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{od(i)}$ 为点 $o$ 到点 $d$ 的最短路径中经过的节点的数量; $\sigma_{od}$ 为点 $o$ 到点 $d$ 的最短路径的数量。

(3) 聚类系数( $C_i$ ):聚类系数描述水系网络的

聚集程度,该指标值越大,表示流域内节点分布越密集,节点所在河段的成环度越高,其计算公式如下:

$$C_i = \frac{E_i}{k_i(k_i - 1)/2} \quad (3)$$

式中: $k_i$ 为与节点*i*相连的边的个数; $E_i$ 为 $k_i$ 个节点间的实际边数。

(4) 平均路径长度( $La$ ):路径长度反映网络的传输效率。长度值越小,则稳定性越好,水网连通越不易受到破坏,其计算公式如下:

$$La = \frac{2}{n(n+1)} \sum_{j \leq i} D_{ij} \quad (4)$$

式中: $D_{ij}$ 为节点*i*与节点*j*间最短路径所包含边的个

数; $n$ 为流域内的节点数量。

(5) 网络直径( $D$ )。网络直径用来描述网络中任意两个节点间距离的最大值,可用来反映网络抗破坏能力,其表达式如下:

$$D = \max(d_{ij}) \quad (5)$$

式中: $d_{ij}$ 为节点*i*与节点*j*的距离。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基于子流域层面结果分析

将水网数据导入复杂网络分析软件 Gephi 中,计算各个子流域的平均度、网络直径、平均聚类系数和平均路径长度指标值,计算结果见表1。

表1 基于复杂网络的海河流域各子流域水系连通度指标计算结果

子流域名称	平均度指数	网络直径	平均聚类系数	平均路径长度
潮白、北运、蓟运河水系	2.47	53	0.044	17.679
大清河水系	2.43	58	0.043	21.730
黑龙港及运东地区诸河水系	2.71	37	0.067	14.218
滦河水系	2.02	54	0.028	19.753
徒骇、马颊河水系	2.84	77	0.072	24.962
永定河水系	2.14	58	0.051	21.686
漳卫南运河水系	2.27	45	0.046	18.551
子牙河水系	2.28	54	0.048	19.603

由表1可知,海河流域8个子流域水系按照平均度大小,其连通度由高到低依次为徒骇、马颊河水系,黑龙港及运东地区诸河水系,潮白、北运、蓟运河水系,大清河水系,子牙河水系,漳卫南运河水系,永定河水系,滦河水系。结合网络直径、平均聚类系数及平均路径长度,可进一步分析各个子流域的水系特征。从平均聚类系数指标来看,徒骇、马颊河水系和黑龙港及运东地区诸河水系的聚集程度最高,滦河水系最为分散;从网络直径和平均路径长度两个指标来看,徒骇、马颊河水系指标值最大,表明在该水系任意两个节点连通所需经过的边最多,保证水系网络结构相连通的稳定性最差,而黑龙港及运东地区诸河水系指标值最小,水系网络连通结构具有较强的抗破坏能力。综合分析可得,黑龙港及运东地区诸河水系连通度较好,且流域网络直径不大,河段最为聚集,连通结构的传输效率也最高;徒骇、马颊河水系河网分布密集,连通度最好,但网络结构的稳定性最差;潮白、北运、蓟运河水系河段间的连通度不高,但河段的数量多,河网较为密集;滦河水系虽流域面积大于潮白、北运、蓟运河水系,但因河段

密度较小,连通性最差。

#### 3.2 基于单个节点层面结果分析

从子流域层面评价的连通度,仅凭整体指标值来描述复杂系统的连接情况显然是远远不够的。为进一步分析子流域内部的连通情况,本文将每个子流域内各节点的度指数和中介中心性指数提取出来,构建数列,应用统计学方法对数列进行统计分析。

在统计学中,四分位数被视为描述数据集中趋势的测度之一,它是指将样本数值依序排列后处在3个分割点位置的数值,已被广泛应用于样本数据的分析中。为找到数据集的四分位数,本文将各水系节点的度指数和中介中心性指数做频数分布统计图,统计出流域内节点对流域连通度贡献大小的频数分布情况,计算出数列的均值( $\mu$ )和方差( $s^2$ ),并比较8个子流域各节点连通度的分布情况。但由于度指数和中介中心性指数均属于指标值越大则连通性越高的指标,故在进行分析时按照大于等于某个数值进行节点个数的统计,其频数分布呈向下累积曲线。各水系节点度指数和中介中心性指数两指标值及其累计频率分布分别见图2、3。

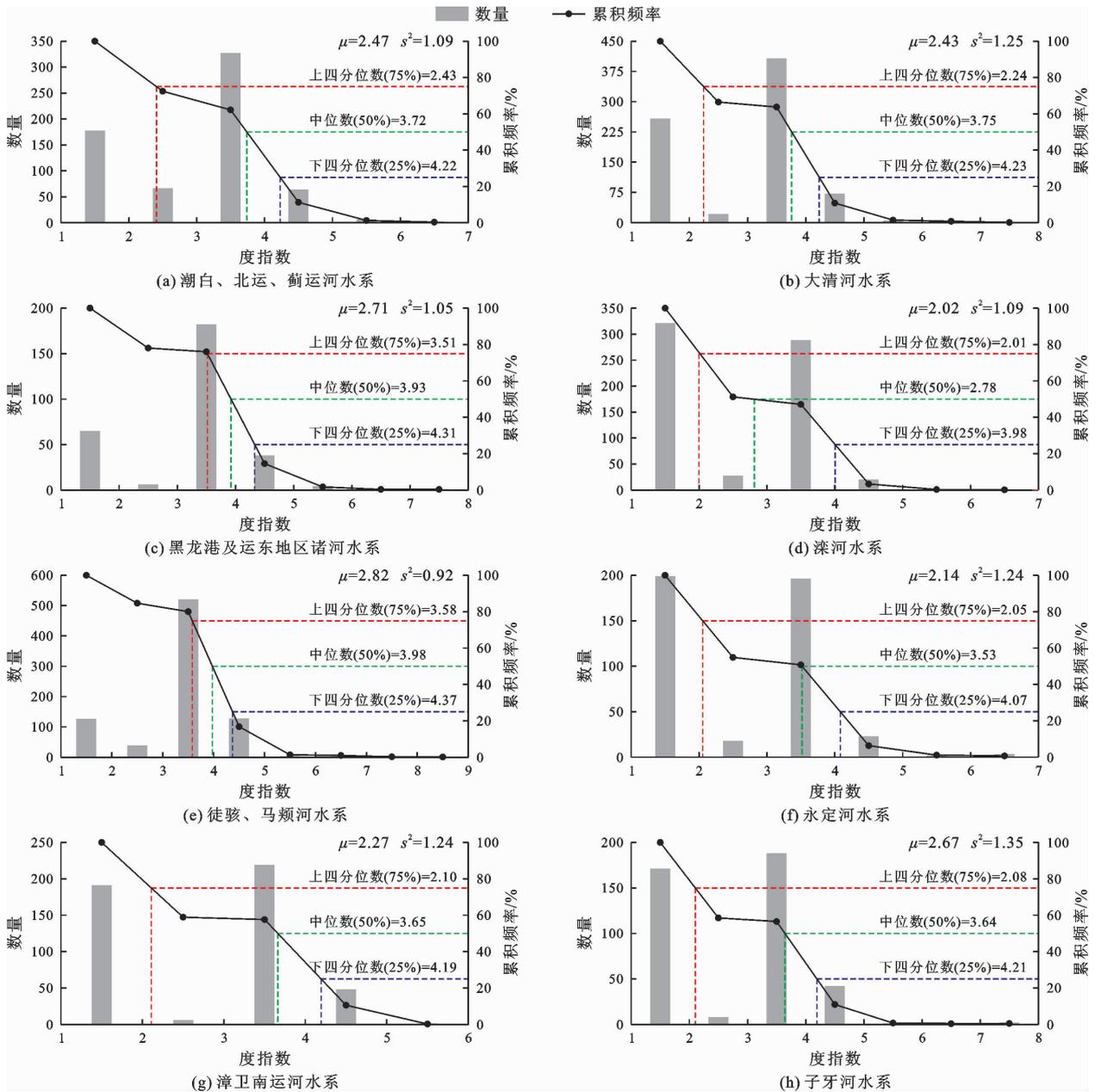


图2 各子流域水系节点度指数及其累积频率分布

图2中各子流域水系节点的度指数表征节点间的连通度,从整体上看,度指数值为1~3的节点占大多数,其中黑龙港及运东地区诸河水系以及徒骇、马颊河水系有75%的点连通度可达到3.5,流域内节点的连通度普遍较高,其余水系度指数上四分位数值均在3.0以下。徒骇、马颊河水系度指数的方差最小,为0.92,表明其连通性贡献程度的空间分布最为均匀;子牙河水系度指数的方差最大,达到1.35,表明该流域内存在对连通性贡献相对大的关键节点,河段呈树状分叉形态;其余水系节点的度指数均值则稳定在2.3附近,且数列中位数分布较为均匀。

图3中各水系节点的中介中心性指数表征最短

路径经过的次数,其中徒骇、马颊河水系每个节点的平均流经次数最高,有75%的点达到了8388,有25%的点达到了14814,且其方差也较大,约为黑龙港及运东地区诸河水系(方差最小)的25.6倍,可见该流域内的各个节点对流域整体连通性影响差别较大;深河水系的平均中介中心性指数最小,只有25%的点达到1696,该值甚至低于徒骇、马颊河水系的上四分位数,说明该流域内节点的连通性普遍较差;其余水系节点的中介中心性指数值则较稳定。

为更加直观地显示流域连通度空间分布特征,在节点层面,本文增加了聚类系数指标,以度指数反映流域节点的连通程度,以中介中心性指数反映流域节点

的重要程度(担任最短桥梁的次数),以聚类系数反映流域节点的聚集程度,并将 Gephi 软件计算出的各个指标值重新导入到 ArcGIS 当中,采用克里金插值法将

节点指标值插值到整个流域,得到各个子流域的指标值空间变化趋势,从而综合分析海河流域的水系特征,各子流域水系节点指标值的空间分布见图 4。

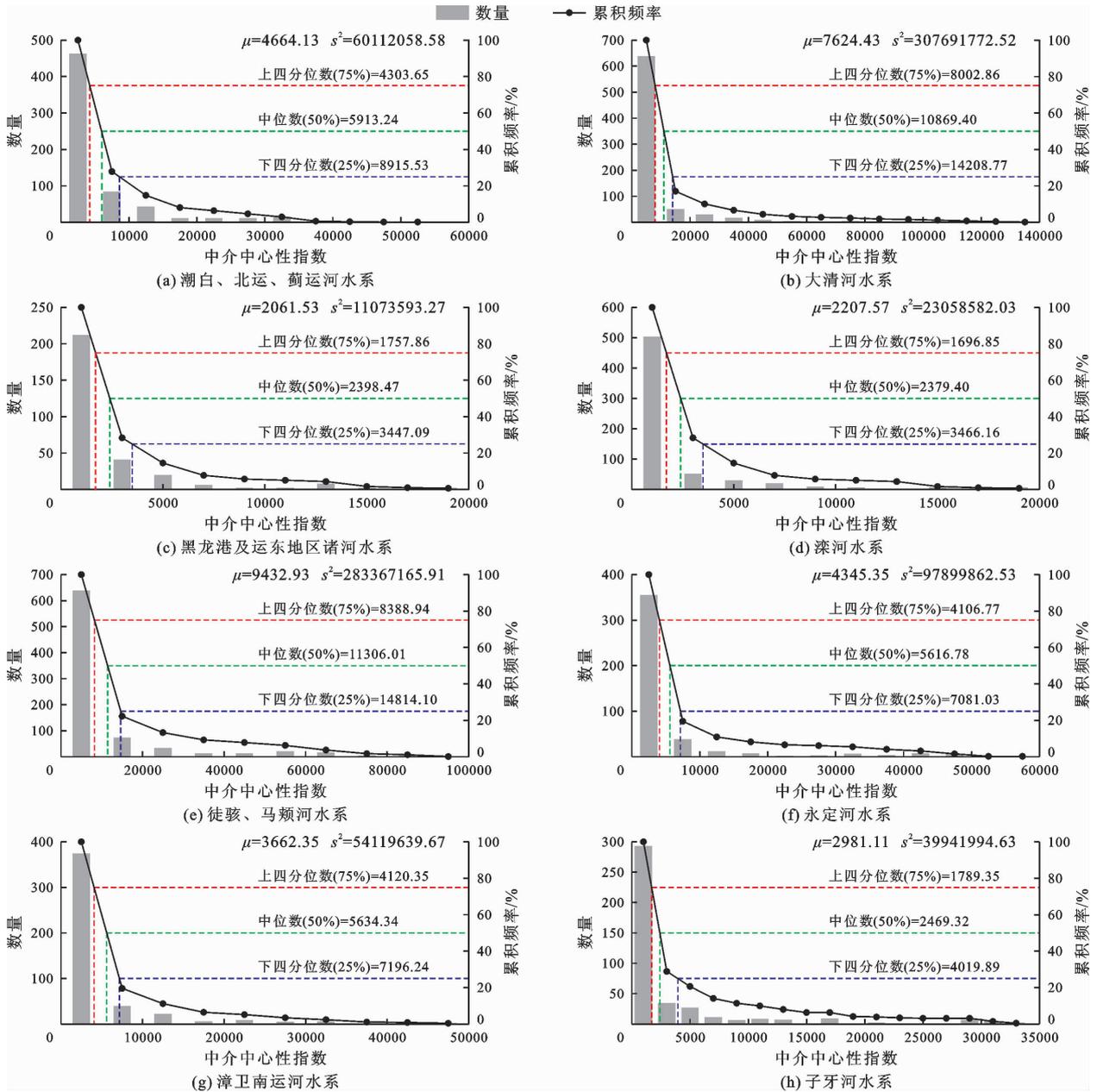


图 3 各子流域水系节点中介中心性指数及其累计频率分布

分析图 4 可得出如下结论:

- (1) 潮白、北运、蓟运河水系中,北京市、廊坊市和天津市河网的度指数值较大,节点之间的连通度较高,连通性较好。以天津段的河网分布最为密集,且概化后的河段主要为三角形分布,聚集程度最高。
- (2) 黑龙江及运东地区诸河水系河段的成环程度较高,整个子流域的度指数值均较大,中部地区的聚集程度最高。
- (3) 滦河水系中,中介中心性最大的节点主要

分布在滦河主河道,流域内河段分布较为分散,且连通性指标值的离散程度较大。

- (4) 徒骇、马颊河水系总体来说河段分布较为聚集,流域西部河网聚集程度最高,连通性好,但指标值频率分布的方差最大,说明流域内河段的空间聚集程度两级分化较为严重。

- (5) 永定河流域东、西两部分水系节点的连通性好,且该子流域节点间的聚集程度在空间上差别较大,河段主要沿洋河和桑干河两个主干河流分叉。

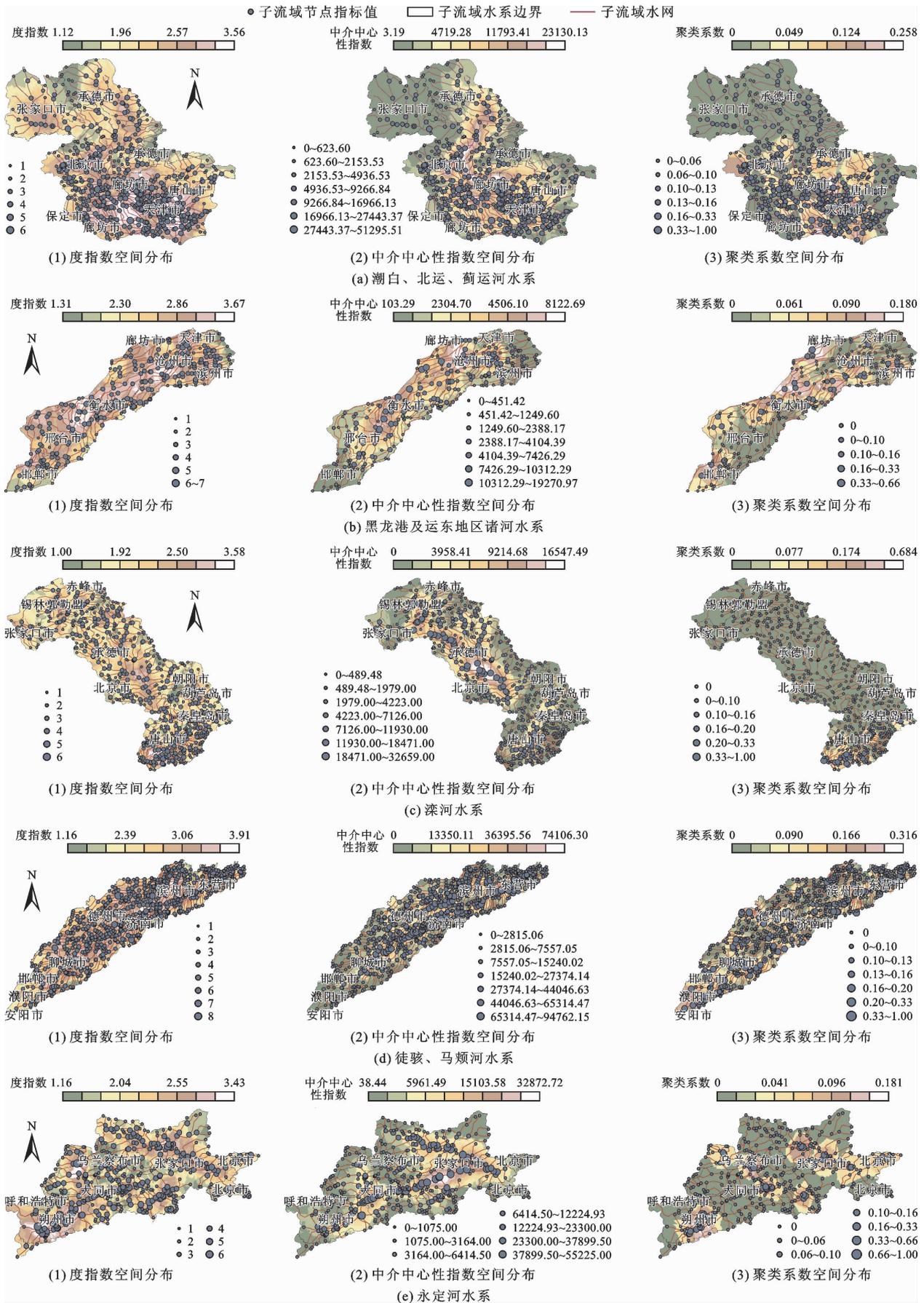


图4 各子流域水系节点指标值的空间分布

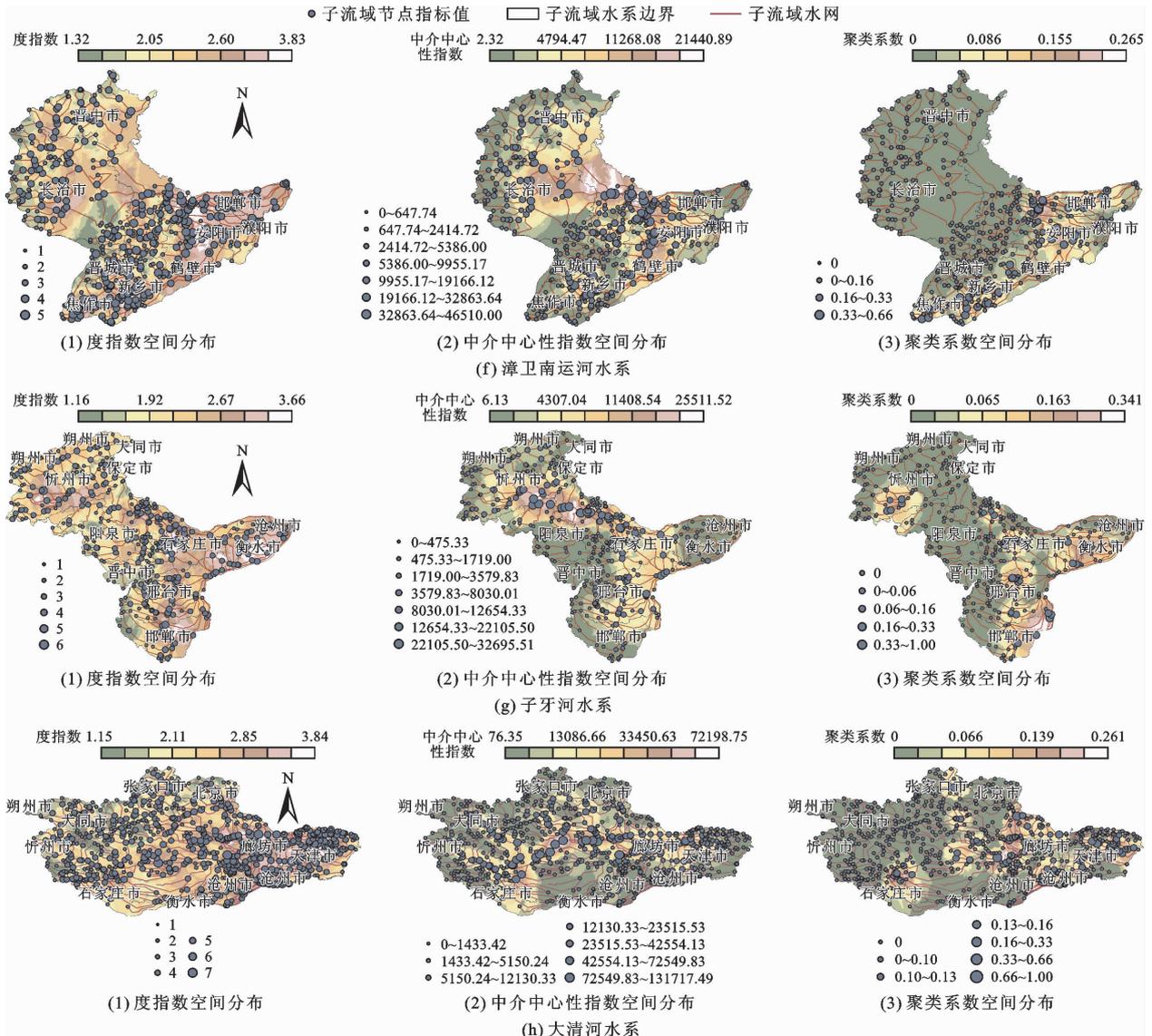


图 4(续) 各子流域水系节点指标值的空间分布

(6) 漳卫南运河水系东部河网密集,成环度较高;西部河网河段分叉较多,呈树状结构;中部河网节点度较低,连通性差,且河段数量较少。

(7) 子牙河水系东部和西北部连通度较高,河段分布密集;中部节点的中介中心度指数较高,沿主干河道分布的节点对该子流域连通性贡献最大。

(8) 大清水系东部节点的度指数和聚集程度较高,主要集中在廊坊市、沧州市和天津市,连通度受人工水系的修建影响较大。

### 4 合理性分析

依据复杂网络计算结果,将 8 个子流域所有节点的聚类系数、中介中心性指数、度指数值汇总到一起,统计节点落于各指标值区间的频数分布情况,为

了便于分析,本文将节点落于相应区间的频数作归一化处理。

图 5 为海河流域各节点聚类系数值空间分布,通过 ArcGIS 提取出水系图中的成环河段如图 6 所示。相应河段上包含共计 1 986 个节点,统计各节点的聚类系数值频数分布情况,结果见表 2。由表 2 可知,流域共有 536 个节点的聚类系数大于 0,其中成环分布河段所包含的节点达 478 个,占 89%;在聚类系数大于 0.3 的节点中,基本上 75% 以上的节点所在河段成环分布,说明聚类系数较大区域内河网基本上均为成环分布。由图 5 可以看出,聚类系数空间分布与成环河网的空间分布较为一致,水系越聚集的区域则水网成环程度越高,与实际河网情况相符。

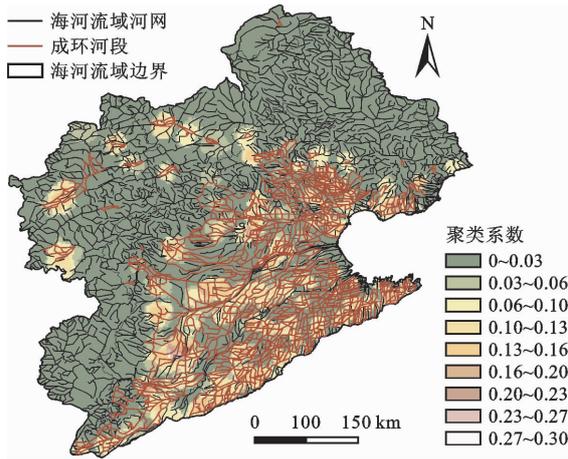


图5 海河流域各节点聚类系数值空间分布

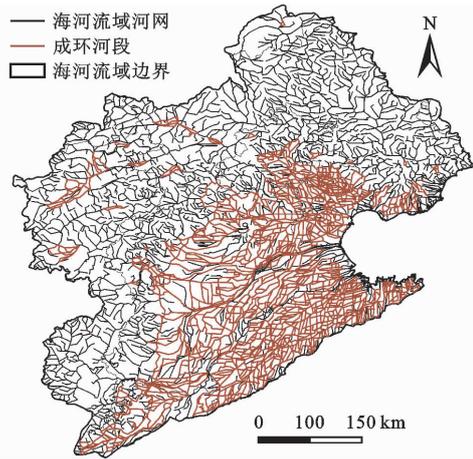


图6 海河流域水网成环部分

表2 海河流域水系节点聚类系数值频数分布统计

聚类系数值	总节点数	成环分布节点数	占比/%
0	4002	1508	37.7
0.07	5	3	60.0
0.10	9	7	77.8
0.13	3	2	66.7
0.17	170	153	90.0
0.20	2	1	50.0
0.33	318	289	90.9
0.50	8	6	75.0
0.67	9	7	77.8
1.00	12	10	83.3

图7为海河流域各节点中介中心性指数值空间分布,从水系数据中提取出1~5级水系如图8所示。将主要水系中节点的中介中心性指数值按大小均匀划分为10个区间并统计频数,结果见表3。由表3可知,在中介中心性指数值大于15 000的各个区间内,均有65%以上的节点沿主要水系分布,而当指数值小于15 000时,仅有9.5%的节点是沿主要水系分布的,绝大多数节点落于更低级别的水系中。这说明水系的级别越高,水系节点的中介中心性指数值越大。各节点中介中心性指数值空间分布图(图7)可进一步证实,沿主要水系分布节点的中介中心性指数值较大,最短路径流经这些河段的频率较高,与实际情况相符。

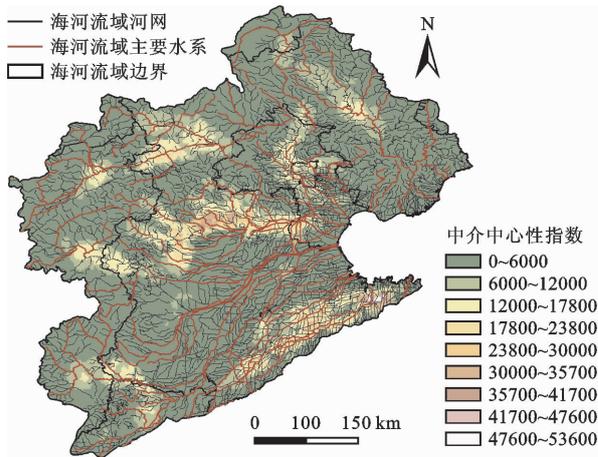


图7 海河流域各节点中介中心性指数值空间分布

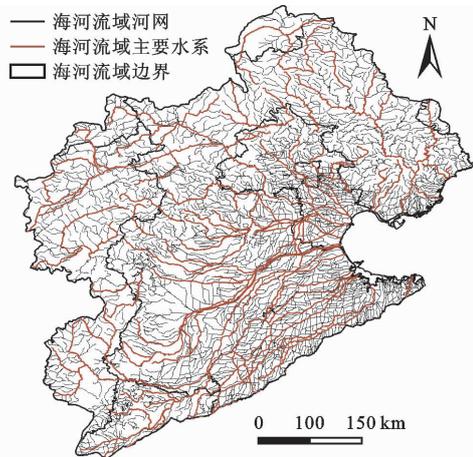


图8 海河流域主要水系分布

图9为海河流域各节点度指数值空间分布,从河网数据中提取出的干渠、支渠、运河等人工水系见图10。将人工水系所包含节点的度指数值分类统计,结果见表4。表4中人工水系节点的度指数值普遍大于1,其中有62%的节点度指数值在3以上,在度指数值

为5的23个节点中,有17个落于人工水系,说明人工水系河网的连通度普遍较高。各节点度指数值空间分布图(图9)也证实,沿人工水系分布节点的度指数值较大且节点的连通性较高,体现了人工水系具有连通各个河网的作用,与实际情况相符。

表 3 海河流域水系节点中介中心性指数值频数分布统计

中介中心性指数值	总节点数	落于主要水系的节点数	占比/%
0 ~ 15000	4151	393	9.5
15000 ~ 30000	236	216	91.5
30000 ~ 45000	71	59	83.1
45000 ~ 60000	39	33	84.6
60000 ~ 75000	20	17	85.0
75000 ~ 90000	10	8	80.0
90000 ~ 105000	6	4	66.7
105000 ~ 130000	3	2	66.7
130000 ~ 145000	1	1	100
145000 ~ 160000	1	1	100

表 4 海河流域水系节点度指数值频数分布统计

度指数值	总节点数	落于人工水系的节点数	占比/%
1	1542	225	14.6
2	190	90	47.4
3	2326	902	38.8
4	434	235	54.1
5	23	17	73.9
6	17	6	35.3
7	5	2	40.0
8	1	0	0

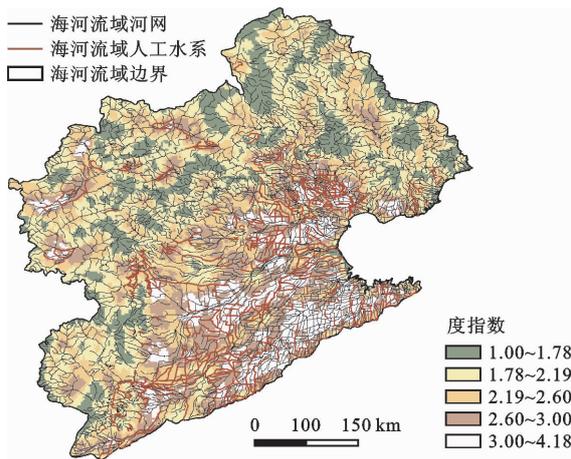


图 9 海河流域各节点度指数值空间分布

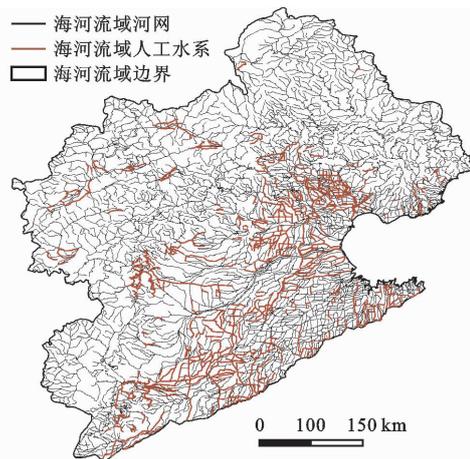


图 10 海河流域人工水系分布

## 5 讨论

本文计算分析结果表明,将水系概化成网络,运用网络方法计算出的水系节点连通度可以较好地反映区域水系连通性,从而为流域水利规划提供理论依据。同时,通过对节点重要性的分析,找出关键节点,对维持水系网络的安全及稳定性具有重要意义,此结论与吴学文等<sup>[21]</sup>针对海河流域节点重要度分析所得结论一致,证明采用复杂网络方法评估水系的连通性有广泛的应用前景。通过结果的合理性分析可以看出,河段的成环程度、河道等级以及人工渠道修建均会对水系的连通性产生影响,这与高婷等<sup>[22]</sup>对白洋淀水系结构连通性评价的研究结果及冯硕<sup>[23]</sup>对廊坊市河网水系连通布局的研究结果一致,证明采用复杂网络方法计算水系网络连通性有较强的适用性。

随着拓扑网络理论的发展,复杂网络被广泛应用于水利等多学科领域。近些年越来越多的专家学

者将水系概化为由节点和边构成的集合,探究其网络特性。而目前运用复杂网络方法评价水系网络连通性仍然存在不足的方面,为此提出以下展望:

(1)在水系概化过程中,由于河流错综复杂,需要对河流进行简化。本文依据河流级别将较低级别的河流进行了省略,虽便于计算,但对节点的连通度将产生一定影响,尤其是将连通两河流之间的河段省略会对结果产生较大影响,故在今后研究中建议对概化方法进行优化,保证水系概化的准确性。

(2)本文重点研究节点在网状结构中的连接方式,忽略了河流的流向,并假设任意河段间的过水能力等特性相同,即水流从任意节点出发均匀地沿着边向相邻节点移动,这与实际情况存在一定差异,今后在研究时应全面考虑各方面因素,还原真实工况。

(3)目前,应用复杂网络方法对流域连通性的研究分析中,主要侧重于城市内部水系或者局部水系,缺少大范围联合分析。故今后需要从多角度全面分析区域水系连通情况。

## 6 结 论

本文以海河流域为研究对象,为弥补传统拓扑网络分析的不足,引入了复杂空间网络的方法,从节点和子流域两个层面来判断流域的连通性并分析流域水系空间网络特征,主要结论如下:

(1)在子流域层面,本文选取平均度指数为评价指标,对各个子流域的连通性大小按照从大到小的顺序进行了计算。

(2)在节点层面,本文计算了子流域内节点的度指数和中介中心性指数值,并统计了指标值的频数分布情况,结合应用统计学中的四分位数、均值、方差等指标对各个子流域的连通性进行评价。同时,将节点的度指数(反映连通程度)、中介中心性指数(反映重要程度)和聚类系数(反映聚集程度)指标值插值到流域中,分析各个子流域内河网的空间分布特征,实现了节点微观评价与流域宏观评价的结合。

(3)本文对复杂网络计算结果进行了合理性分析,其中,流域内聚类系数大于0的节点有89%落于成环分布的河段内,表明河网中聚类系数较大区域内的河段基本上都是成环分布的;对于中介中心性指数值大于15 000的区间,均有65%以上的节点沿级别较高的水系分布,表明水系中节点的中介中心性指数值与水系的级别呈正相关关系;在人工水系河段所包含的节点中,有62%的节点度指数值在3以上,表明人工水系河段连通性较高。以上计算分析结果均与实际情况相符,应用复杂网络方法分析流域水系特征及连通情况具有良好的适用性。

### 参考文献:

- [1] 崔广柏,陈星,向龙,等.平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J].水利学报,2017,48(12):1429-1437.
- [2] 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.
- [3] 何理,李恒臣,赵文仪,等.水系连通工程综合效应评价体系研究——以“引江济巢”工程为例[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):1-6.
- [4] 姜宇,张琼海,严萌.改进图论法在河湖水系连通规划中的应用研究[J].人民珠江,2022,43(6):58-64.
- [5] 窦明,石亚欣,于璐,等.基于图论的城市河网水系连通方案优选——以清溪河许昌段为例[J].水利学报,

- 2020,51(6):664-674.
- [6] 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: 801-806.
- [7] 许笑笑.辽河口湿地景观格局演变及其对水文连通性的影响[D].沈阳:沈阳大学,2022.
- [8] 柯丁溢.基于MSPA及水系连通性评价的嘉兴市蓝绿基础设施构建研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [9] 冯斯安.基于MIKE11模型的南方感潮区城镇内涝整治方案研究与应用[J].吉林水利,2022(6):17-22.
- [10] 刘东.MIKE模型在佛山乐平镇水系连通工程河道防洪中的运用[J].水科学与工程学报,2022(3):18-21.
- [11] KUPFER J A, MEITZEN K M, GAO P. Flooding and surface connectivity of Taxodium-Nyssa stands in a southern floodplain forest ecosystem [J]. River Research and Applications, 2015, 31(10):1299-1310.
- [12] 吴晶晶.黄河三角洲自然湿地生态网络构建[D].烟台:中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所),2018.
- [13] 冯硕,赵进勇,张晶,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].水利水电技术(中英文),2021,52(5):53-63.
- [14] 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.
- [15] 姜宇,张琼海,严萌.改进图论法在河湖水系连通规划中的应用研究[J].人民珠江,2022,43(6):58-64.
- [16] 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.
- [17] 高玉琴,汤宇强,肖璇,等.基于改进图论与水文模拟方法的河网水系连通性评价模型[J].水资源保护,2018,34(6):33-37.
- [18] 杜祥军.基于复杂网络的大数据分析方法研究与应用[D].青岛:青岛大学,2018.
- [19] 王柳艳.太湖流域腹部地区水系结构、河湖连通及功能分析[D].南京:南京大学,2013.
- [20] 项杨雪,陈雪颂,李佳.城市水环境质量监测:基于复杂网络模型的研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(S1):328-332.
- [21] 吴学文,李玲,方国华.复杂河流网络节点重要度分析[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):145-150.
- [22] 高婷,尹心安,何山.白洋淀水系结构连通性评价[J].水生态学杂志,2020,41(5):63-69.
- [23] 冯硕.多闸坝平原河网水系连通度定量评价——以廊坊市为例[D].保定:河北农业大学,2020.