doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.09.019

邯郸西部生态空间网络结构时空演变及其与固碳功能相关性研究

宋宏利[1]　王悦悦[1]　张启斌[1]　李　倩[2]　田　正[1]　于　强[3]

(1.河北工程大学地球科学与工程学院,邯郸 056038;2.河北工程大学园林与生态工程学院,邯郸 056038;
3.北京林业大学精准林业北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:构建生态空间网络是优化区域景观结构、提升生态系统服务功能的常用方法,但对于生态空间网络结构与特定生态系统服务功能间的关系鲜有报道。本研究基于多源遥感数据产品,以邯郸西部为研究区,分析了固碳功能及生态空间网络的时空演变特征,研究了生态空间网络拓扑结构特征与固碳功能之间的相关性。结果表明,2000—2020 年间,研究区植被净初级生产力总量平均值为 2.17×10^8 kg/(m^2·a),固碳功能呈上升趋势;研究区生态空间网络整体连接性较高,模块结构明显,不均匀性极强,20 年间结构变化趋势显示,网络连接性基本稳定,不均匀性略有升高;研究区节点介数、PageRank、度 3 个指标与固碳功能之间存在明显的正相关性,其中节点介数相关性最为明显,PageRank 和度次之,这 3 个指标为生态空间网络中节点固碳功能的潜在有效判断指标。研究结果对于生态空间网络构建与优化、区域固碳功能提升具有重要参考价值。

关键词:生态空间网络;时空演变;固碳功能;相关性;邯郸西部

中图分类号:K903　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)09-0226-12　　**OSID**:

Spatialtemporal Evolution of Ecological Spatial Network Structure in Western Handan Region and Its Correlation with Carbon Sequestration Function

SONG Hongli[1]　WANG Yueyue[1]　ZHANG Qibin[1]　LI Qian[2]　TIAN Zheng[1]　YU Qiang[3]

(1. *School of Earth Science and Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*
2. *School of Landscape and Ecological Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*
3. *Beijing Key Laboratory of Precision Forestry*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The construction of ecological spatial networks is a common method used to optimize the regional landscape structure and enhance ecosystem service functions. However, the relationship between the structure of ecological spatial networks and specific ecosystem service functions is still rarely explored. Based on multi-source remote sensing data products and with the western region of Handan as the study area, the spatiotemporal evolution characteristics of carbon sequestration function and ecological spatial networks were analyzed, and the correlation between the topological structure characteristics of ecological spatial networks and carbon sequestration function was studied. The results showed that from 2000 to 2020, the average NPP value in the study area was 2.17×10^8 kg/(m^2·a), which showed a significant upward trend. The overall connectivity of the ecological spatial network in the study area was high, with a clear community structure and an extreme level of unevenness. The connectivity of the network was basically stable during the research period, but the heterogeneity was slighted increased. There was a significant positive correlation between the network's topological indicators and their carbon sequestration function in the study area. Among them, the correlation of node betweenness was the most significant, followed by PageRank and degree. These three indicators may be potential effective indicators for judging the carbon sequestration function of nodes in ecological spatial networks. The research results had important reference value for the construction and optimization of ecological spatial networks and the improvement of regional carbon sequestration function.

Key words: ecological spatial network; spatialtemporal evolution; carbon sequestration function; correlation; western Handan region

收稿日期:2023-11-18　修回日期:2024-05-26

基金项目:邯郸市社科联项目(2023045)和国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(42261144747)

作者简介:宋宏利(1980—),男,副教授,博士,主要从事 3S 技术集成及应用研究,E-mail:songholi2003@163.com

通信作者:张启斌(1990—),男,讲师,博士,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail:zhangqibin@hebeu.edu.cn

0　引言

生态空间网络指在一定空间范围内，由主要生态资源斑块和连接它们的线性空间廊道构成的网络系统[1]。这一系统可将区域内离散分布的生境斑块连接起来，为区域生态过程的有效调控提供重要的生态结构，具有保障生态过程、维护生态安全和提升生态系统服务功能的作用[2]。

当前，生态空间网络构建已成为区域生态保护的关键策略，该领域的研究显著增长，研究重点通常包括生态空间网络构建、结构评估和优化等。在网络构建方面，通常以增强区域生态系统的服务功能、减轻城市化对环境的负面影响、确定生态修复的关键区域为目的。常用研究方法包括最小累积阻力(MCR)模型、景观形态分析(MSPA)以及电流理论等，如 XU 等[3]利用 PLUS 和 MSPA 模型构建了苏州市的生态空间网络，以降低城镇化对苏州市生态环境的影响；GAO 等[4]以四川省为例，利用电流理论构建了生态空间网络并识别了生态保护和重建区域。在生态空间网络结构分析方面，研究者多采用景观格局指数、GIS 空间分析方法、图论分析方法等进行，如 ANDREA 等[5]以意大利北部为研究区，利用 MSPA、景观连通性指数和图论分析方法构建了一种绿色基础设施网络连接性的分析方法。许多研究侧重于提高区域生态网络的稳定性及生态系统服务功能，以优化生态空间网络。优化策略通常涉及分析网络的结构特征并实施诸如增加生态廊道、规划和保护、增加生态源地和恢复生态障碍点等。如卢洁等[6]利用最小费用路径、电流理论和尺度嵌套等方法，构建并分层优化了长沙市的生态空间网络，识别了研究区主要廊道、生态踏脚石和生态障碍点，提出了生态空间网络优化策略。

近年来，复杂性科学的发展为生态空间网络研究提供了新的视角。复杂网络是对真实世界中的复杂系统进行抽象后得到的一种网络结构，其中节点表示真实系统中的各个组成部分，而边则表示这些组成部分之间的相互作用[7]。当只关注网络中各个节点间的连接关系而忽略其空间位置，便可得到复杂网络的拓扑结构[8]。这种拓扑结构最早源于对简单网络和随机网络的研究，但随着研究不断深入，发现大量的真实网络既不是规则网络，也不是随机网络，而是表现出与两者均不相同的拓扑结构特征，至此开始复杂网络的研究[9]。

复杂网络的拓扑结构可以通过度分布、模块度、聚类系数、平均距离等指标进行反映，其最重要的 2 个统计特征为小世界效应和无标度特性[10]。此外，真实网络有时还具备混合模式特性、度相关特性、超小世界特性等[9]。基于上述拓扑结构特征，学者们以供电网络[11]、地面交通网络[12]、航运网络[13]等众多真实世界网络为对象展开研究，对这些网络的构建和优化提供了借鉴。

将生态空间网络中的生态源地抽象为点，将连接源地的廊道抽象为边，则可将生态空间表达为复杂网络形式[14]，学者们利用复杂网络的分析方法对生态空间网络的拓扑结构展开研究，主要集中于生态空间网络的拓扑结构分析和优化方面。如 ZENG[15]采用复杂网络的相关理论对珠江三角洲地区的森林生态空间网络结构进行了模拟，为森林生态空间网络规划提供了借鉴。牛腾等[16]采用多种复杂网络拓扑结构指标分析了乌兰布和沙漠东北缘的拓扑结构特征，发现这一网络符合无标度特性且具有较大优化空间。

通过以上分析可知，生态空间网络领域已经有一套较为成熟的理论和方法体系，且目前已取得大量研究成果。然而进一步进行归纳可知，当前研究成果多聚焦于某个时间截面，极少有研究针对生态空间网络展开时间序列分析[17]，在涉及生态系统功能时，也往往将所有的生态系统功能类型统一处理，很少有研究探讨生态空间网络与某一具体生态功能间的关系[18]，致使网络优化方案容易缺乏针对性，因此，研究生态空间网络的长时间变化特征，分析网络结构与特定生态系统服务功能间的关系，可以为合理优化生态空间网络结构、提升区域生态服务功能提供重要参考。

邯郸市位于河北省南部，是京津冀协同发展和中原经济区区域性中心城市，邯郸市工矿业发达，第二产业占比较高，碳排放总量较大[19]，提升植被固碳功能是实现碳达峰与碳中和的重要手段。本研究以邯郸市西部为研究区，分析 2000—2020 年生态空间网络的结构演变规律，探讨生态空间网络结构与固碳功能间的相关性，以期为区域生态空间网络构建和优化、提升区域固碳功能提供借鉴。

1　研究区概况与数据源

研究区位于河北省邯郸市西部，西接太行山脉，东经 113°27′16″ ~ 114°26′03″，北纬 36°14′33″ ~ 37°01′17″，面积 4 356.38 km^2，包括邯郸市武安市、涉县、磁县和峰峰矿区(图 1)。属温带大陆性季风气候，年平均气温 13.5℃，多年平均降雨量 549.75 mm，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥[20]。研究区地形以山地为主，海拔 64 ~ 1 877 m，尤以中西部地形起伏较大。工矿业发达，在创造了巨大经济价

值的同时也引起了区域地表景观的明显变化[21]，由此带来生态环境脆弱、碳排放升高等问题[22]，研究地表景观格局的变化特征及其与固碳功能间的影响关系可为降低城市碳足迹，实现碳达峰和碳中和提供重要借鉴。

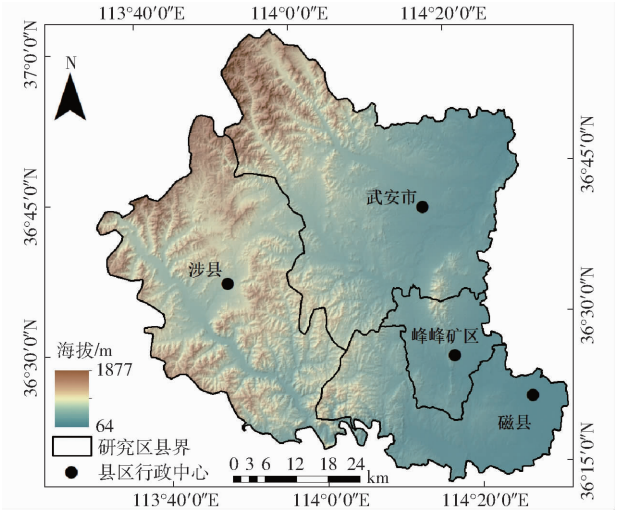

图 1 研究区空间位置

Fig. 1 Spatial location of study area

本研究原始数据包括植被净初级生产力(NPP)数据、土地覆盖数据、归一化植被指数(NDVI)数据、数字高程模型(DEM)数据、夜间灯光数据，其中NPP数据用于评估区域植被的固碳功能，其他数据用于提取研究区生态空间网络。

NPP数据为MODIS(Moderate resolution imaging spectroradiometer)传感器数据，空间分辨率为500 m，时间分辨率为1年，获取自美国国家航空航天局下属的数据开放平台(https://search.earthdata.nasa.gov/search)。土地覆盖数据来自中国30 m空间分辨率年度土地覆盖数据[23]，该数据包括9种用地类型，分别为：农田、森林、灌木、草原、水域、冰雪、裸地、不透水面、湿地，数据下载自ZENODO数据库(https://zenodo.org/record/5816591#.ZAWM3BVBy5c)。归一化植被指数为MODIS传感器16 d数据，空间分辨率为250 m，该数据与NPP数据下载源相同，原始数据经拼接裁剪后合成研究区年最大值数据。DEM数据为SRTMDEMUTM 90 m数字高程数据产品，数据下载自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)。夜间灯光数据为1992—2022中国“类DMSP-OLS”夜间灯光遥感数据集[24](https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/GIYGJU)。

所有原始数据经拼接、裁剪、重投影等预处理操作后保持原始空间分辨率不变，各项处理过程中使用输入数据最小像元作为输出数据像元，以减少处理过程中的数据丢失。

2 研究方法

2.1 一元回归趋势分析

采用一元回归趋势分析法研究植被固碳功能的时空演变趋势。以时间为自变量，逐像元对NPP进行回归分析，在每个像元处得到一元线性回归方程，通过方程斜率分析其变化趋势[25]。当斜率小于0，表示NPP呈减小趋势，当斜率大于0，表示NPP呈增加趋势。

2.2 最小累积阻力模型

最小累积阻力(Minimum cumulative resistance，MCR)模型由KNAAPEN等[26]提出，在物种保护、景观格局分析等方面应用较广。MCR模型通过考虑“源”、“阻力”和“累积代价”，可以识别出“源”之间的最小耗费路径，已成为生态网络构建的最常用方法之一[27]。MCR模型一般形式可表示为

$$R_{mc}=f_{\min}\sum D_{ij}R_i \quad (i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n) \tag{1}$$

式中 R_{mc}——最小累积阻力

$f_{\min}$——未知负函数，表示最小累积阻力与传播或扩散过程的负相关关系

D_{ij}——从源 i 到景观单元 j 的空间距离

R_i——景观单元对传播及扩散过程的阻力系数

本研究中，面积大于25 hm^2 且土地利用类型为林地、草地和水体的景观斑块被识别为生态源地。景观生态流从生态源地出发向外扩散，这一过程中需克服的阻力通过逐像元累加计算，任一像元对传播及扩散过程的阻力系数 R_i 通过高程、坡度、水体密度、归一化植被指数、夜间灯光和土地利用类型共6个因子共同决定。各因子中，高程、坡度和夜间灯光阻力为原始数据的归一化值，水体密度、归一化植被指数阻力为原始数据归一化值的倒数，土地利用数据为离散数据，其赋值方法如表1所示。该分级标准参照文献[28-30]。各因子经上述处理后进行叠加分析，得到研究区生态阻力面。

表 1 土地利用生态阻力

Tab. 1 Land use ecological resistance

土地利用类型	阻力
乔木林地、灌木林地、水体	0.1
草地	0.3
耕地	0.5
裸地	0.7
不透水表面	0.9

通过成本路径模型实现式(1)中未知负函数的功能，计算中，模型假设任意节点可通过 8 个方向(东、南、西、北、东北、东南、西北、西南)的连接线连接到邻近节点，连线上的阻力由连线所经像元阻力平均值判定，通过比较 8 个方向上的阻力，确定最短路径的延伸方向。

2.3　复杂网络拓扑结构指标

以生态空间网络中的源地为节点，以连接它们的廊道为边，可将生态空间网络的拓扑结构抽象为复杂网络的形式。本研究选取度与度分布、紧密中心性、介数、PageRank、聚类系数、核数共 6 个指标评价研究区生态空间网络的拓扑结构变化及节点重要性。

2.3.1　度与度分布

度通过某个节点连接的其他节点数量来衡量节点重要性程度，度越高，则节点越重要，对于网络整体来说，平均度、度分布可以反映网络结构特征、连通性和攻击抵抗性。所有节点度平均值称为网络平均度[31]。

网络度分布为网络中度为 k 的节点数量与总节点数量的比值。

2.3.2　紧密中心性

紧密中心性通过某个节点到网络中所有其他节点的平均距离来衡量节点的重要性程度，紧密中心性越高，表明该节点到其他节点的平均路径越短，其在网络中也越重要。网络整体紧密中心性可以反映网络效率、连通性和鲁棒性等特征，一般情况下网络整体紧密中心性越高这些特征越强[32]。将某个节点到其他所有节点的平均最短路径倒数定义为节点紧密中心性。

2.3.3　节点介数

节点介数衡量节点充当信息传递、连接其他节点的中介节点的重要程度，节点介数越高，其在网络中越重要，越有可能是中枢节点。网络整体介数分布可以反映网络结构均匀性、鲁棒性等特征。网络某个节点介数定义为通过该节点的最短路径数量与网络中所有最短路径数量的比值[19]。

2.3.4　PageRank

PageRank 通过随机游走模型确定某个节点被访问的概率，这一概率越高，则其 PageRank 值越大，节点也越重要。PageRank 分布可以反映网络结构不均匀性和对不同攻击类型的鲁棒性[33]。节点的 PageRank 值需通过迭代计算，对于无权无向图，其迭代公式为

$$R_a = \frac{1-d}{N} + d\sum_{b\in M_b}\frac{R_b}{k_b} \tag{2}$$

式中　R_a——节点 a 的 PageRank 值

d——模型阻尼因子，取 0.85

k_b——节点 b 的度

M_b——所有链接到节点 b 的节点集合

R_b——节点 P_b 的 PageRank 值

N——网络中所有节点的数量

2.3.5　聚类系数

聚类系数用来衡量某个节点的邻居节点之间的连接紧密程度，较高的聚类系数说明某个节点的邻居节点之间有较多的相互连接。网络整体的聚类系数可以反映网络整体聚集程度，聚类系数分布可以反映网络层次性等结构特征[34]。某一节点聚类系数表示该节点的邻域之间互相连接的概率，计算公式为

$$L_a = \frac{E_a}{C_{k_a}^2} \tag{3}$$

式中　L_a——节点 a 聚类系数

E_a——节点 a 的邻域节点中实际存在的边条数

$C_{k_a}^2$——节点 a 的邻域中最多可能存在的边条数

2.3.6　网络核数

在去掉网络中所有度为 k 的节点之后剩余的网络子集，被称为网络的 k 核，如果网络中某个节点属于 k 核但不属于 $k+1$ 核，则该节点核数为 k，网络中所有节点核数的最大值即为该网络的核数，核数用来表示网络中节点的核心性，高核数节点通常在网络中扮演着关键的连接和传播信息的角色，而低核数节点可能更倾向于位于网络边缘。网络整体核数可以反映网络连接性、鲁棒性等特征[35]。

3　结果与分析

3.1　NPP 时空变化特征

对 NPP 数据进行空间制图，结果如图 2 所示。由图 2 可知，20 年间研究区 NPP 的空间分布呈现相当稳定的西高东低趋势，各年份 NPP 最高值常出现于研究区西北地区，最低值则出现于建设用地、水体较为集中，不存在植被覆盖的区域。研究区 2000—2020 各年份 NPP 总量依次为 1.82×10^8、2.79×10^8、2.59×10^8、2.47×10^7、2.98×10^7、3.08×10^7、3.40×10^8、3.13×10^8 kg/(m^2·a)，20 年间平均值为 2.17×10^8 kg/(m^2·a)且呈现非常明显的上升趋势，20 年间增长率达到 41.90%，表明研究区植被固碳功能明显提升，生态环境有较明显改善。

利用斜率分析，提取研究区 NPP 变化趋势，结果如图 3 所示。由图 3 可知，20 年间研究区绝大部分区域 NPP 呈升高趋势，约占研究区总面积的

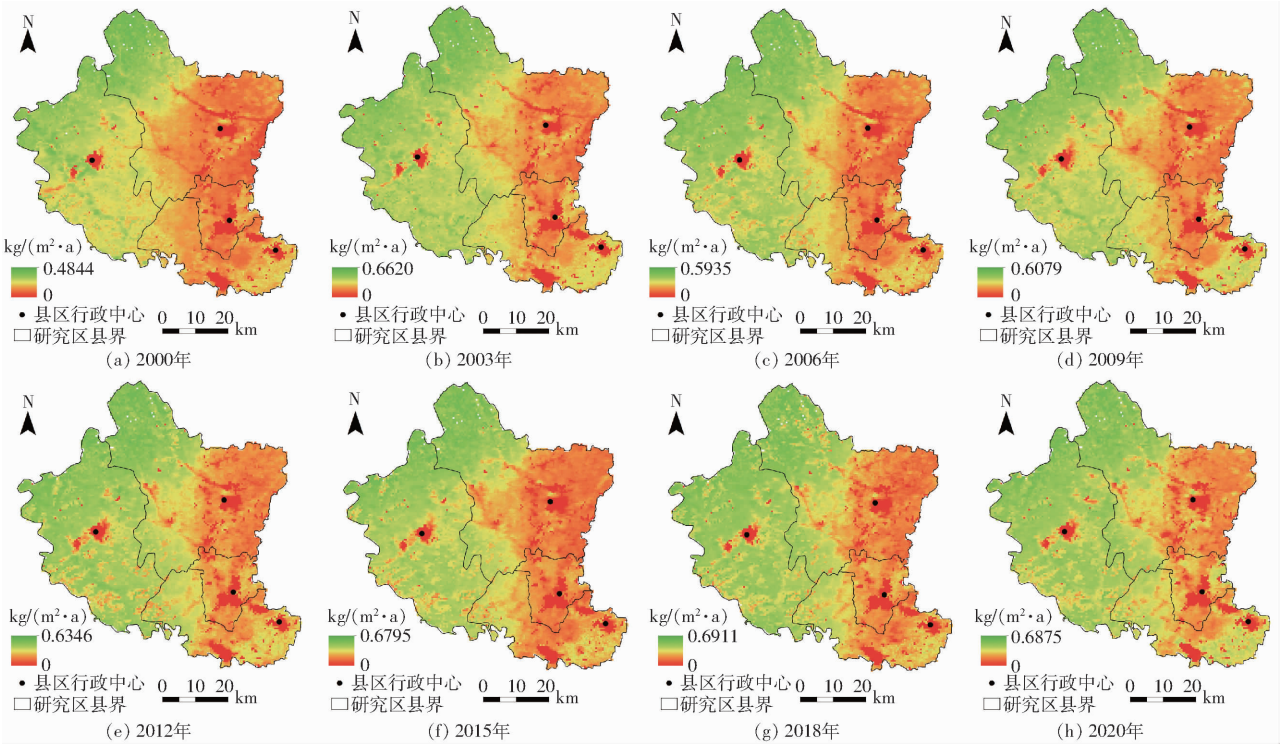

图 2 2000—2020 年研究区 NPP 空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of NPP in study area from 2000 to 2020

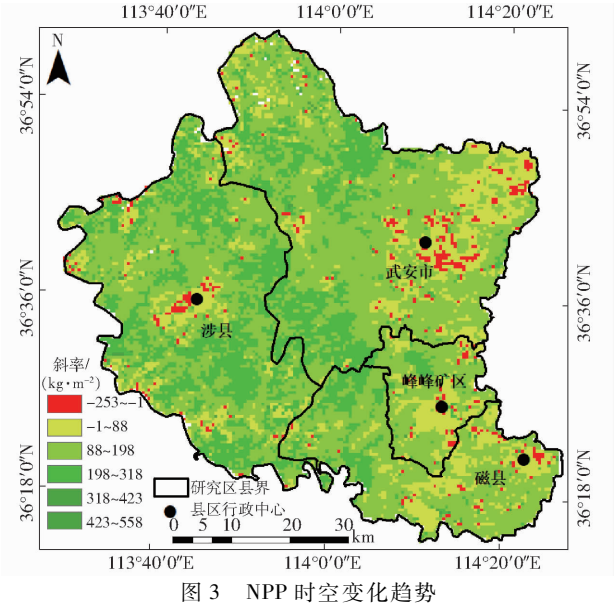

图 3 NPP 时空变化趋势

Fig. 3 Spatiotemporal variation trend of NPP

92.56%,研究区植被的固碳功能正稳步提高。NPP 降低部分主要集中于涉县、武安市、磁县和峰峰矿区的城镇中心区域,面积共 93.37 km^2,这些区域 NPP 的降低可能与城市建设用地扩张和人类活动造成的扰动相关。

3.2 生态空间网络时空变化特征

按照表 1 所示的评价体系,对研究区 2000、2003、2006、2009、2012、2015、2018、2020 年生态阻力进行评价,结果如图 4 所示。由图 4 可知,20 年间研究区生态阻力具有相似的空间格局——东部边缘为阻力最低区域,中西部阻力较高,其中阻力最高的区域主要出现于涉县中部、武安市市中心区域及市域西部、峰峰矿区中部以及磁县最东部。对各年份生态阻力平均值进行统计发现,20 年间生态阻力变化趋势不明显,在均值 2.10 附近上下波动,其最大值出现在 2009 年,平均阻力为 2.14,最小值出现在 2018 年,平均阻力为 2.05。阻力的这种变化趋势表明,近 20 年来研究区生态阻力在空间分布和时间演变上基本保持稳定。

以生态阻力为基础,按照 2.2 节方法提取生态源地和生态廊道,形成研究区生态空间网络,结果如图 5 所示。由图 5 可知,研究区生态源地在西侧较为密集,源地斑块面积较大且呈连续的空间分布,东部生态源地较为稀疏,呈离散斑块状分布。经统计,2000、2003、2006、2009、2012、2015、2018、2020 年生态源地面积依次为 1 613.62、1 598.90、1 543.74、1 579.04、1 608.41、1 552.43、1 570.72、1 567.64 km^2,各年份源地面积呈波动下降趋势,其面积最大年份为 2000 年,最小年份依次为 2006 年、2015 年和 2020 年。20 年间,研究区几条主要生态廊道均位于东部区域,研究区西部由于生态源地分布较为密集,廊道长度较短。2000、2003、2006、2009、2012、2015、2018、2020 年生态廊道长度依次为 724.88、1 015.73、986.88、1 034.08、940.58、866.99、899.11、1 187.16 km,与生态源地面积的变化相反,生态廊道长度呈现较明显的上升趋势,原因可能是

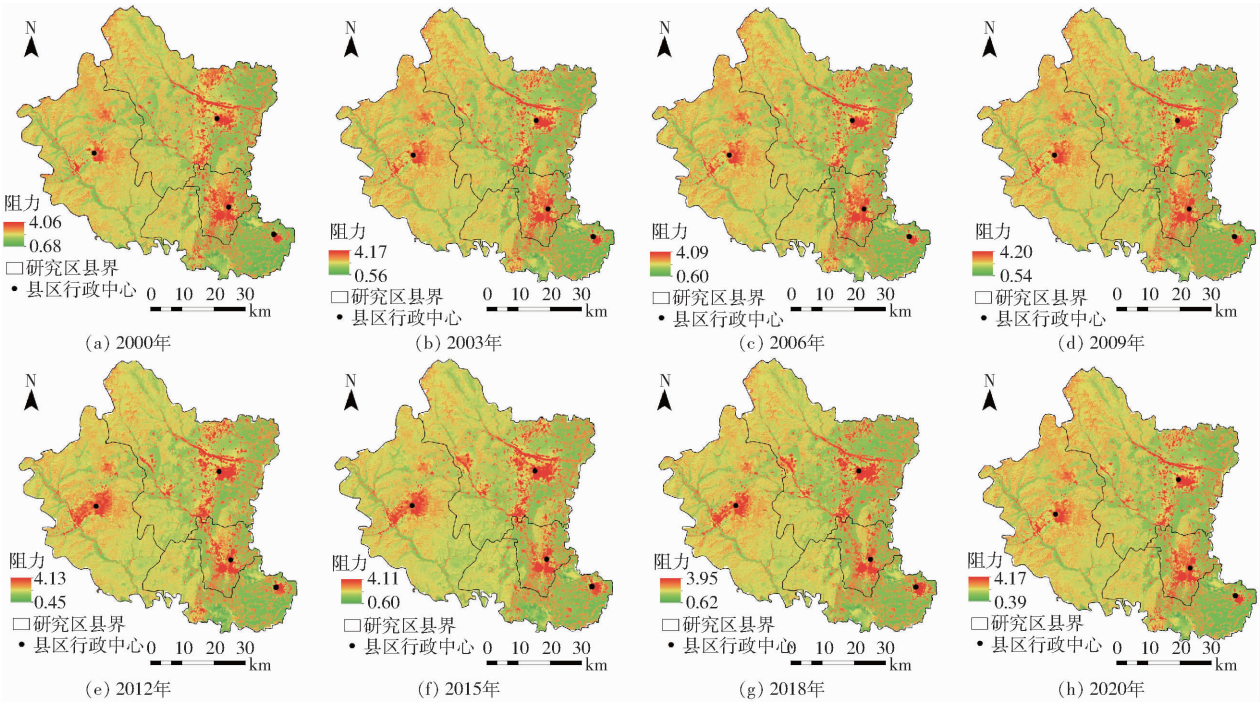

图 4　研究区生态阻力

Fig. 4　Ecological resistance in study area

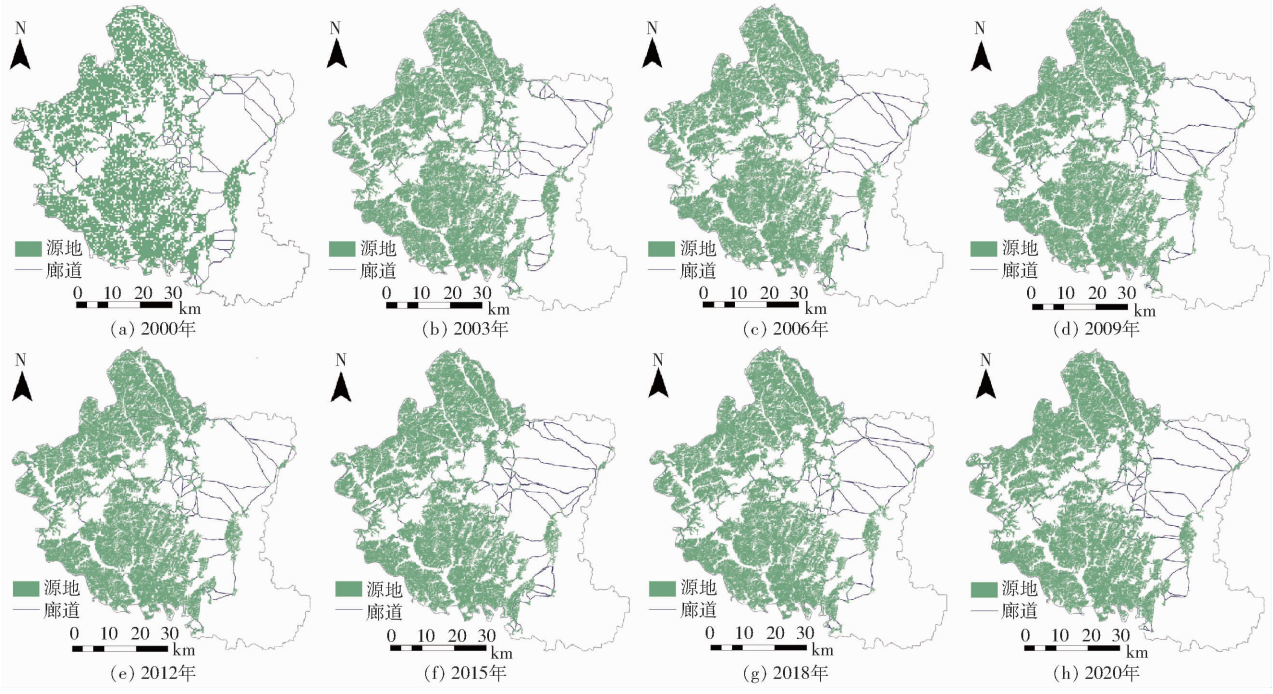

图 5　研究区生态空间网络

Fig. 5　Ecological spatial network of study area

较为稀疏的生态源地需要更多的生态廊道进行连接。

3.3　生态空间网络拓扑结构提取

将各年份生态源地抽象为节点，将生态源地间的生态廊道抽象为连接边，提取研究区生态网络拓扑结构，结果如图 6 所示。由图 6 可知，20 年间研究区生态空间网络拓扑结构较为相似，出现了较明显的模块结构，在标准的 1.0 解析度下，20 年间平均模块数量为 8 个，平均模块度指数为 0.63，各年份波动较小，表明网络中的生态节点在模块内有更多的连接，而模块之间的连接相对较少。各年份网络中均存在 2 个度明显较大的节点，这可能对应着研究区少数面积较大、位置居中，起到重要连接作用的生态源地；网络中多数节点度较小，对应着研究区面积较小、分布较为零散破碎的众多小型生态源地，网络整体呈现明显的不均匀性。

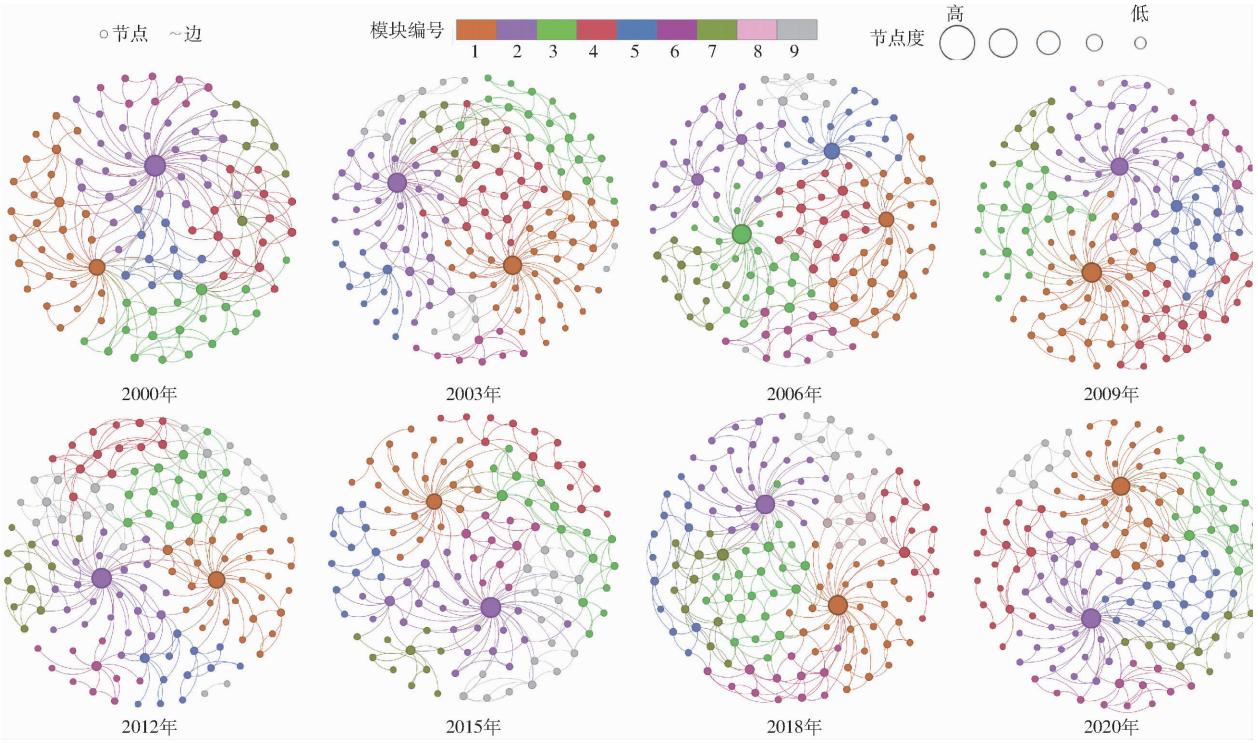

图 6 生态空间网络拓扑结构

Fig. 6 Topological structures of ecological spatial network

3.4 生态空间网络拓扑结构特征

3.4.1 度与度分布

经统计,2000、2003、2006、2009、2012、2015、2018、2020 年生态空间网络平均度依次为 4.16、3.95、4.08、4.15、4.19、4.04、3.98 和 4.20,研究期限内波动较小,表明研究区各个生态源地平均与周围 4 个其他生态源地相连,且 20 年间网络的连接性基本稳定。将各年份生态空间网络的度分布进行幂函数拟合,结果如图 7 所示。由拟合结果可知,研究区生态空间网络的度分布呈现极明显的幂律特征,各年份拟合的决定系数 R^2 均达到 0.90 以上,表明研究区极少数生态节点具有较多的连接,但绝大多数生态节点间仅有少量连接,网络具有很强的不均匀性。

3.4.2 紧密中心性

研究时段内,研究区生态空间网络紧密中心性平均值依次为 0.31、0.31、0.28、0.31、0.31、0.31、0.34 和 0.29,取值在 0.31 附近波动且整体呈下降趋势,表明研究区生态空间网络中各节点间距离较远,且在研究时段内这一距离有继续增大趋势,这对网络的性能和传播效率可能产生负面影响。各年份紧密中心性分布特征如图 8 所示。由图 8 可知,各年份网络紧密中心性基本呈负偏态分布,多数节点紧密中心性较低,仅存在少量节点具有较高的紧密中心性,表明网络中存在少数核心节点且不均匀性较强。

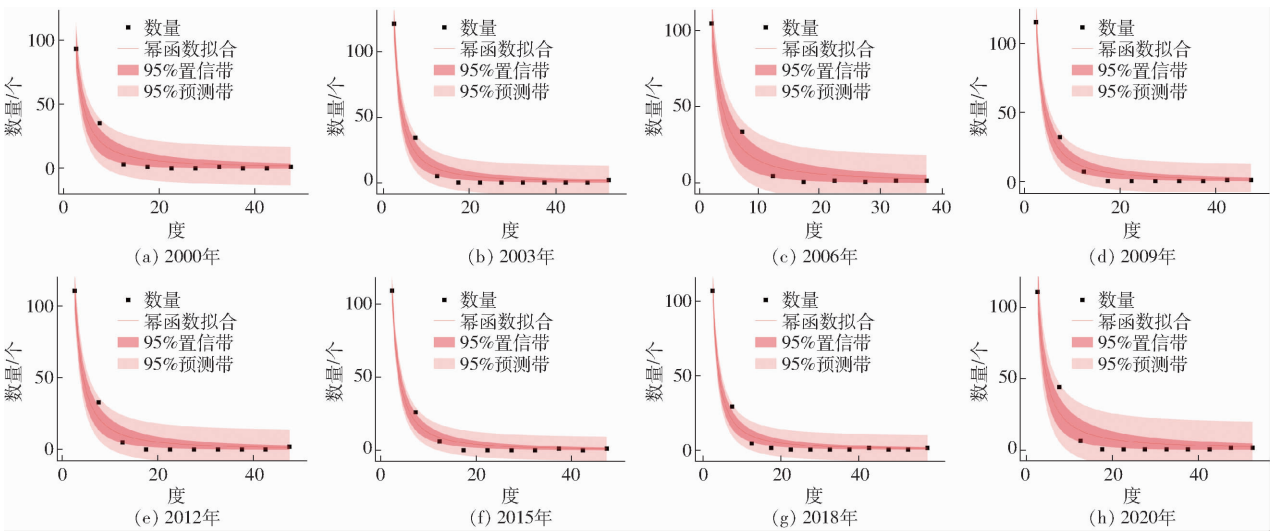

图 7 生态空间网络度分布

Fig. 7 Degree distributions of ecological spatial network

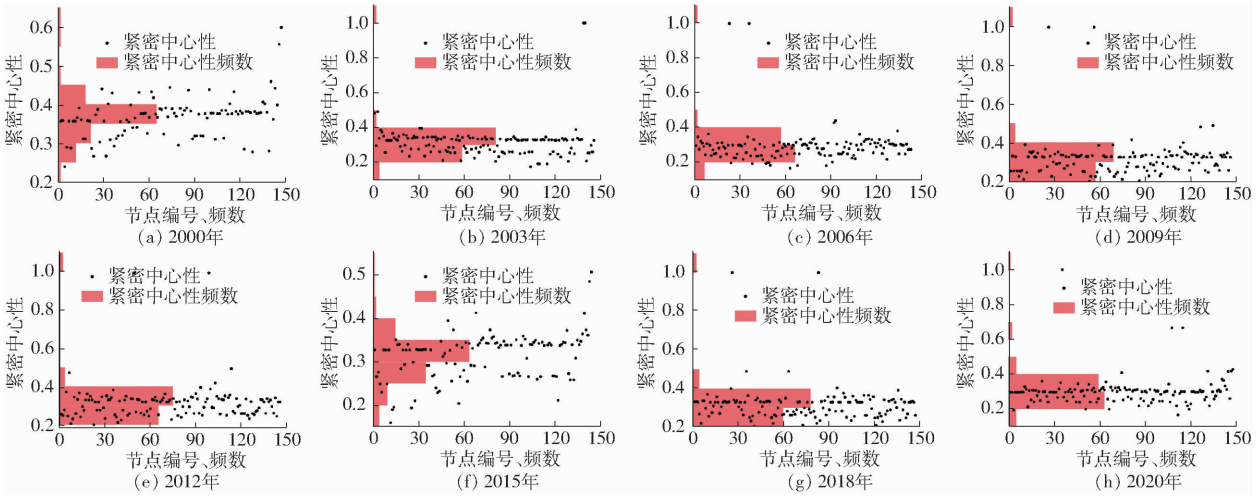

图 8　生态节点紧密中心性

Fig. 8　Closeness centrality of ecological nodes

3.4.3　节点介数

计算研究区各生态节点介数并绘制散点分布图，结果如图 9 所示。由图 9 可知，研究区生态空间网络节点介数分布极不均匀，网络中绝大多数节点介数位于 1 000 以下，且有约 50% 节点介数为 0。而极个别节点介数达到 5 000 以上。这表明网络整体的连通大量依靠少数几个生态源地进行，网络不均匀性极强，对于恶意攻击的抵抗力较弱，但对于偶发的小范围自然灾害的抵抗力较强。经统计，2000、2003、2006、2009、2012、2015、2018、2020 年介数平均值依次为 153.76、187.41、188.27、180.22、168.56、163.95、146.10、202.77，整体为微弱的上升趋势，表明与更早的时间相比，网络连接更多依靠介数较高的节点进行，网络对恶意攻击的鲁棒性有所降低。

3.4.4　PageRank

计算研究区各生态节点的 PageRank 并绘制散点分布图，结果如图 10 所示。由图 10 可知，网络中各生态节点 PageRank 呈现极不均匀分布，网络多数节点 PageRank 值小于 0.02，仅有个别节点可达到 0.06 以上。这同样显示出研究区生态空间网络的非均匀特性，网络中少数节点在整个网络中发挥了极为关键的作用。统计各年份 PageRank 标准差，整体表现微弱的上升趋势，这表明节点 PageRank 的差异性有所增大，网络不均匀性可能有所升高。

3.4.5　聚类系数

2000、2003、2006、2009、2012、2015、2018、2020 年研究区各年份生态空间网络节点的聚类系数平均值依次为 0.54、0.50、0.53、0.57、0.57、0.57、0.55、0.55，整体为小幅上升趋势，表明研究区生态空间网络的聚类程度有微弱升高。各年份聚类系数分布如图 11 所示，由图 11 可知，网络聚类系数呈现较明显的双峰分布，聚类系数为 0 以及聚类系数为 1 的节点占比较多，取值为其他值的节点相对较少。聚类系数的这种分布特征表明，一方面网络中出现了较明显的模块结构，模块内部的连接较为紧密，形成了高度聚集的子网络，另一方面，网络中又存在众多缺

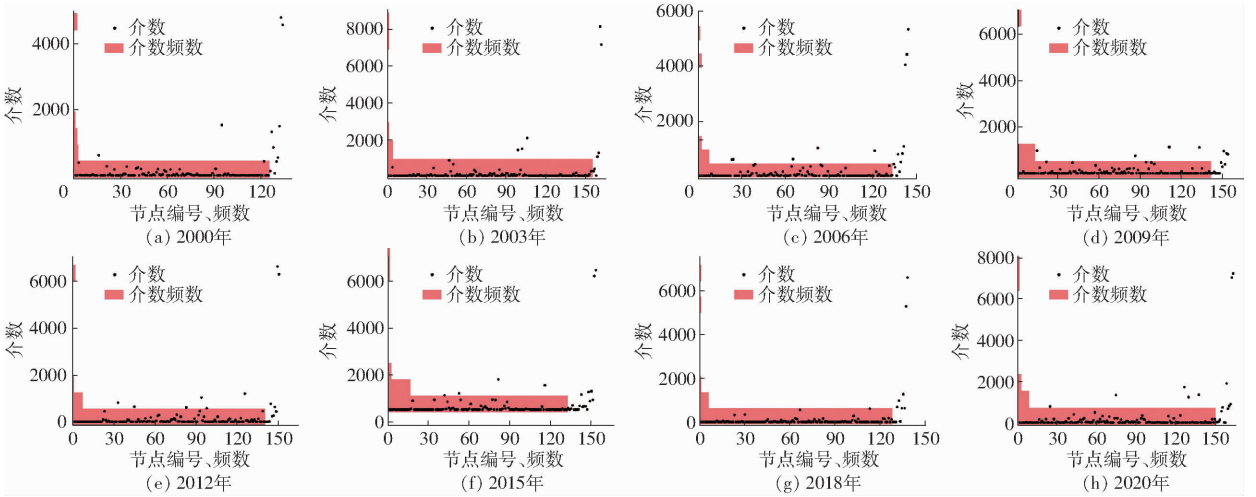

图 9　生态节点介数

Fig. 9　Betweenness of ecological nodes

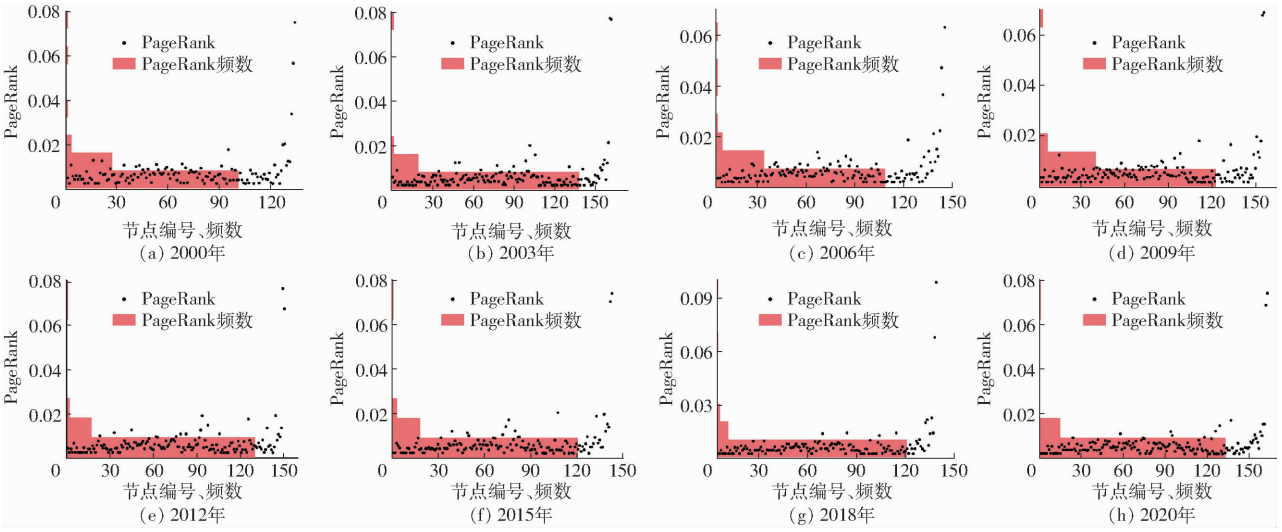

图 10 生态节点 PageRank

Fig. 10 PageRank of ecological nodes

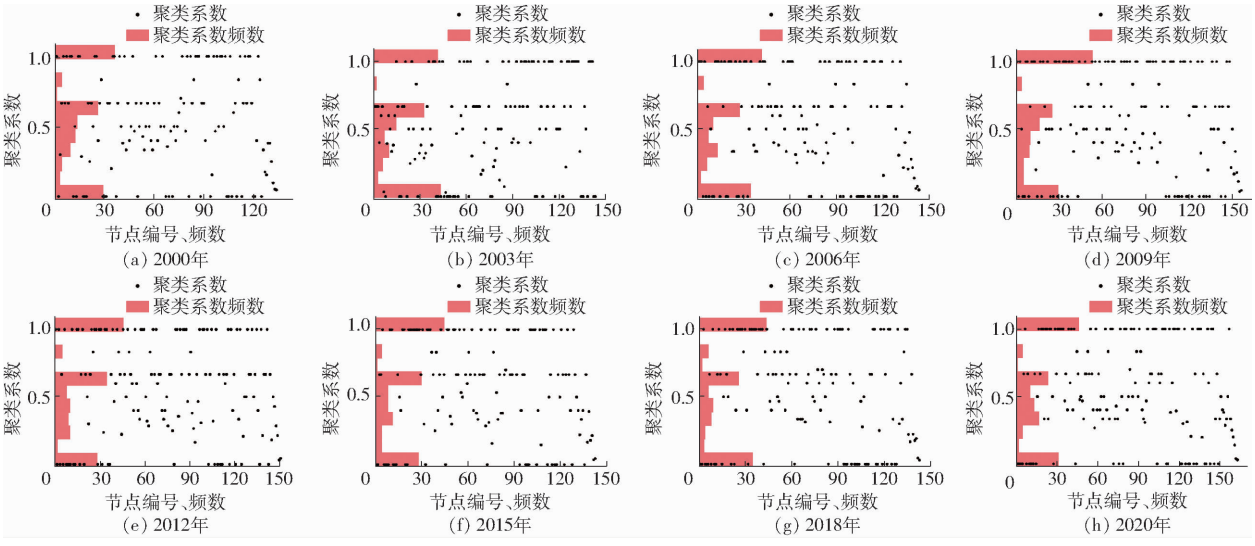

图 11 生态节点聚类系数

Fig. 11 Clustering coefficient of ecological nodes

乏连接的节点,这些节点可能位于网络的边缘位置,网络结构表现出多样性,既存在高度聚集部分,又存在相对孤立部分。

3.4.6 核数

2000—2020 年,网络核数维持在 4,且分布基本呈正态分布(图 12),网络中多数节点核数为 2 或者 3,少量节点核数为 1 或 4。就研究区较小的空间范围及网络规模来说,网络核数较高,各年份生态空间网络中都至少存在一个 4 核子图,这些子图中的节点之间紧密连接,在整个网络中发挥核心作用,网络整体具有较强的连接性与鲁棒性。研究时段各年份网络核数为 4 的节点数量依次为 23、36、21、28、30、19、23、41,表明网络连接性与鲁棒性整体稳定但有小幅波动。

3.5 生态空间网络拓扑结构与固碳功能相关性

计算各节点所对应生态源地的 NPP 与度、紧密中心性、介数、PageRank、聚类系数、核数共 6 个复杂网络指标的相关系数,结果如图 13 所示。由图 13 可知,各网络指标中,节点的度、介数和 PageRank 与 NPP 具有非常明显的相关性。其中节点介数各年份相关系数平均值达 0.92,最高值为 2015 年的 0.94,最低值为 2020 年的 0.91。各年份 PageRank 相关系数平均值为 0.89,在 2006 年与 NPP 的相关系数最高,达到 0.91,在 2000 年最低,为 0.85。节点度与 NPP 的相关系数也较高,多年平均值达 0.88。除以上 3 个相关性明显的指标外,节点核数和紧密中心性在 20 年间与 NPP 的平均相关系数分别为 0.75 和 0.43,也呈现较明显的正相关性。网络节点聚类系数与 NPP 的相关性不明显。

4 讨论

4.1 网络拓扑结构特征及其与固碳功能相关性

本文中的生态空间网络具有明显的模块结构,

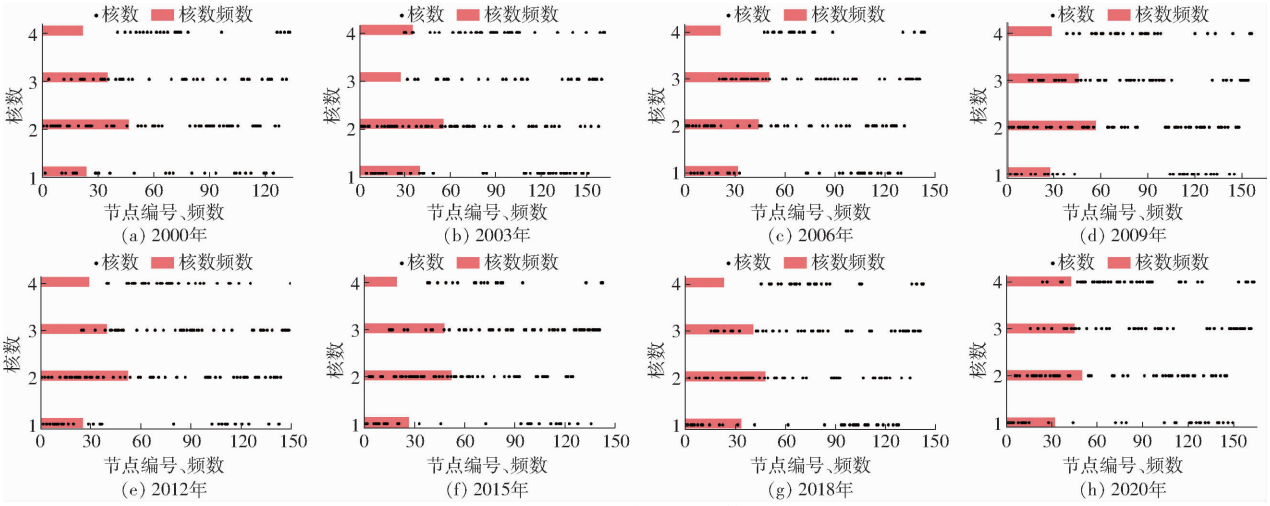

图 12　生态节点核数

Fig. 12　Coreness of ecological nodes

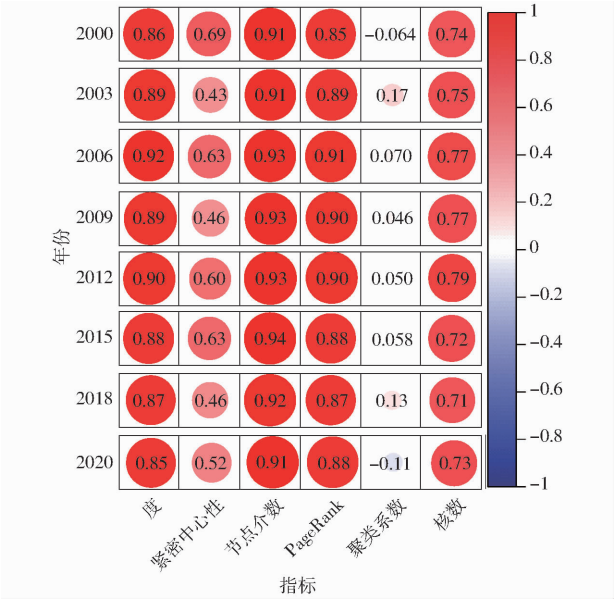

图 13　复杂网络指标与 NPP 间相关系数

Fig. 13　Correlation coefficient between complex network metrics and NPP

20 年间平均模块化指数为 0.63，这与文献[36－37]的研究结论一致。本研究中生态空间网络幂律特征明显，不均匀性很强，网络多年的平均度略大于 4，这与其他研究结论也较为接近[38]。本研究中度分布的幂函数指数平均值为 －1.45，其他研究中[38]，该值通常小于 －1.5，表明本研究中生态空间网络不均匀性略小于其他研究。本研究中节点介数、PageRank 分析结果与现有研究也较为接近，然而核数明显高于其他研究[39]，出现这一差别的原因可能与研究区地理区位的不同有关，其他研究区多位于我国西北干旱半干旱地区，生态源地分布稀疏，本研究区位于华北半湿润地区，生态源地分布较为密集，因此网络核数较高，且这也有可能是造成本研究中度分布幂函数指数较高，网络不均匀性较其他研究较低的原因。

现有研究中，WANG 等[37]的研究结论显示网络固碳功能与节点介数相关性极强，这与本研究结论相似。然而不同点在于，本研究介数与 NPP 为正相关关系，而 WANG 等[37]的研究中为负相关，且本研究中 PageRank、度与 NPP 的相关性也较强。研究结论的差异可能由以下原因造成：①本研究使用 NPP 评估固碳功能，与 WANG 等[37]的研究中所计算的净生物群区生产力(NBP)可能存在差异。②本研究为长时间序列研究，介数与 NPP 间的相关性较为稳定，WANG 等[37]的研究仅使用了一年数据，结果可能存在偶然性。③研究区的不同特点可能也会引起结果的变化。

综上节点介数、PageRank 和度为生态空间网络中节点固碳功能的潜在有效判断指标，但这一指标与固碳功能之间的影响规律有待更多研究进行揭示，同时介数、PageRank 等指标在相关性方面的差异也需进一步探讨。

4.2　基于固碳功能的生态空间网络优化

本研究结果表明，研究区生态空间网络的节点介数、PageRank 和度与固碳功能具有较强的正相关性，因此在生态空间网络优化中可以对比不同增边策略对网络介数、PangeRank 和度的提升效应，在多种策略中选取提升效应最明显的策略，以提升区域固碳功能。以本研究中 2020 年生态空间网络为例，分别采用点度中心度、介数中心度和特征向量中心度的度低增边和捷径增边策略对邯郸西部生态空间网络进行 10% 的增边优化，统计优化后平均度、平均介数和平均 PageRank 3 个与固碳功能高度相关的结构指标变化，结果如表 2 所示。由表 2 可知，3 种增边策略均使得网络平均度和平均介数有所上升，而平均 PageRank 在 3 种策略中均保持不变。对

比不同策略中各项指标的变化幅度发现,基于特征向量中心度的度低增边策略使得网络介数和度上升最为明显,由此可以推断,基于特征向量中心度的度低增边策略为邯郸西部生态空间网络结构优化的最优方案。

表 2 优化后网络拓扑结构指标

Tab. 2 Topological indicators after optimization

网络增边指标	增边策略	增边比例/%	平均度	平均介数	平均 PageRank
点度中心度	度低增边	10	4.59	189.87	0.01
	捷径增边	10	4.60	170.39	0.01
介数中心度	度低增边	10	4.62	158.78	0.01
	捷径增边	10	4.61	153.87	0.01
特征向量中心度	度低增边	10	4.63	190.26	0.01
	捷径增边	10	4.62	146.35	0.01

5 结论

(1)2000—2020 年,研究区 NPP 总量平均值为 2.17×10^8 kg/(m^2·a),且增长趋势明显。通过斜率分析可知,除各区县的城镇中心区域外,邯郸西部绝大部分区域 NPP 升高明显,约占研究区总面积的 92.56%。

(2)20 年间,邯郸西部生态空间网络各年份平均度为 4.10、核数为 4,网络整体连接性较高。网络模块化指数和聚类系数较高,模块结构明显,但也存在相对孤立节点,网络结构呈现多样性。网络度分布幂律性明显,且紧密中心性、节点介数和 PageRank 分布差异性大,网络不均匀性极强。各指标的时间变化趋势表明网络连接性基本稳定但不均匀有小幅升高。

(3)研究区节点介数、PageRank 与节点度与固碳功能之间存在明显的正相关性,其中节点介数相关性最为明显,相关系数多年平均值为 0.92,其次为 PageRank 和度,多年平均值为 0.89 和 0.88。节点介数、PageRank 和度为生态空间网络中节点固碳功能的潜在有效判断指标。

参 考 文 献

[1] 张启斌,李倩. 内蒙古防沙带生态空间网络结构演变[J]. 北京林业大学学报,2023,45(9):116 - 126.
ZHANG Qibin, LI Qian. Evolution of ecological spatial network structure in sand-prevention belts of Inner Mongolia, Northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(9): 116 - 126. (in Chinese)

[2] SHI Q, QIANG Y, TENG N, et al. Restoration and renewal of ecological spatial network in mining cities for the purpose of enhancing carbon sinks: the case of Xuzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 143(1): 109313.

[3] XU X, WANG S, RONG W. Construction of ecological network in Suzhou based on the PLUS and MSPA models[J]. Ecological Indicators, 2023, 154(11): 110740.

[4] GAO C, PAN H, WANG M, et al. Identifying priority areas for ecological conservation and restoration based on circuit theory and dynamic weighted complex network: a case study of the Sichuan Basin[J]. Ecological Indicators, 2023, 15(4): 1015 - 1025.

[5] ANDREA S, SEBASTIAN C, JAROSLAV M. Mapping a green infrastructure network: a framework for spatial connectivity applied in Northern Italy[J]. Environmental Science and Policy, 2022, 131(7): 57 - 67.

[6] 卢洁,焦胜,胡加琦,等. 基于多尺度协同的长沙市生态网络构建与层级优化[J]. 生态学报, 2023, 43(15):6332 - 6344.
LU Jie, JIAO Sheng, HU Jiaqi, et al. Construction and hierarchical optimization of Changsha ecological network based on multi-scale collaboration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6332 - 6344. (in Chinese)

[7] 吴金闪,狄增如. 从统计物理学看复杂网络研究[J]. 物理学进展,2004,24(1):18 - 46.
WU Jinshan, DI Zenru. Complex networks in statistical physics[J]. Progress in Physics, 2004, 24(1): 18 - 46. (in Chinese)

[8] CHEN W D, XU H, GUO Q. Dynamic analysis on the topological properties of the complex network of international oil prices[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 4514 - 4523.

[9] 周涛,柏文洁,汪秉宏,等. 复杂网络研究概述[J]. 物理,2005(1):31 - 36.
ZHOU Tao, BO Wenjie, WANG Binghong, et al. A brief review of complex networks[J]. Physics, 2005(1): 31 - 36. (in Chinese)

[10] WANG X F, CHEN G. Complex networks: small-world, scale-free and beyond[J]. IEEE Circuits & Systems Magazine, 2003, 3(1): 6 - 20.

[11] ARIANOS S, BOMPARD E, CARBONE A, et al. Power grid vulnerability: a complex network approach[J]. Chaos, 2009, 19(1): 175.

[12] FENG J, LI X, MAO B, et al. Weighted complex network analysis of the Beijing subway system: train and passenger flows[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 474(C): 213 - 223.

[13] PEREZ Q M J, TANCREZ J, LANGE J. Express shipment service network design with complex routes[J]. Computers and Operations Research, 2020, 114(2): 104810.

[14] 张启斌.乌兰布和沙漠东北缘生态网络构建与优化研究[D].北京:北京林业大学,2020.
ZHANG Qibin. Study on the construction and optimization of ecological network in the northeastern margin of Ulanbuhe desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. (in Chinese)

[15] ZENG Y. Complex network simulation of forest network spatial pattern in pearl river delta[J]. Copernicus GmbH, 2017(7): 1445 - 1449.

[16] 牛腾,岳德鹏,张启斌,等.潜在生态网络空间结构与特性研究[J].农业机械学报,2019,50(8):166 - 175.
NIU Teng, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Spatial structure and characteristics of potential ecological networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 166 - 175. (in Chinese)

[17] 于强,张启斌,牛腾,等.绿色生态空间网络研究进展[J].农业机械学报,2021,52(12):1 - 15.
YU Qiang, ZHANG Qibin, NIU Teng, et al. Research progress and prospect of green ecological space network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 1 - 15. (in Chinese)

[18] ZENG Y, CHEN X, YANG Z, et al. Study on the relationship between ecological spatial network structure and regional carbon use efficiency: a case study of the Wuding River Basin[J]. Ecological Indicators, 2023, 155(28): 110909.

[19] 边宇,蔺雪芹,周笑,等.京津冀工业碳排放时空演化特征及影响因素[J].环境科学与技术,2021,44(11):37 - 47.
BIAN Yu, LIN Xueqin, ZHOU Xiao, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emissions in Beijing - Tianjin - Hebei region[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(11): 37 - 47. (in Chinese)

[20] 张鹏. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的多尺度土地利用与生态系统服务时空分布研究[D].邯郸:河北工程大学,2022.
ZHANG Peng. Spatiotemporal distribution of multi-scale LULC and ecosystem services based on the InVEST and PLUS models [D]. Handan: Hebei University of Engineering,2022. (in Chinese)

[21] 温利华.资源型城市生态脆弱性综合评价——以河北省邯郸市为例[D].武汉:华中农业大学,2021.
WEN Huali. Comprehensive evaluation of ecological vulnerability of resource-based cities—a case study of Handan, Hebei [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[22] 周鹏.太行山区国土空间格局优化与功能提升路径研究[D].成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所),2020.
ZHOU Peng. Investigation on the optimization of territorial space pattern and function enhancement path in Taihang Mountain region[D]. Chendu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)

[23] 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.

[24] WU Y, SHI K, CHEN Z, et al. Developing improved time-series DMSP - OLS-like data (1992—2019) in China by integrating DMSP - OLS and SNPP - VIIRS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1 - 14.

[25] 洪辛茜,黄勇,孙涛.我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力时空演变[J].生态学报,2021,41(24):9836 - 9846.
HONG Xinqian, HUANG Yong, SUN Tao. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the Karst region of southwest China from 2001 to 2018[J]. Acta Ecological Sinica, 2021, 41(24): 9836 - 9846. (in Chinese)

[26] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1 - 16.

[27] 李航鹤,马腾辉,王坤,等.基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(8):1036 - 1045.
LI Hanghe, MA Tenghui, WANG Kun, et al. Construction of ecological security pattern in Northern Peixian based on MCR and SPCA[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 1036 - 1045. (in Chinese)

[28] 弓灏洁,常金生,杜雨阳.基于 MCR 和重力模型的县域生态网络构建[J].测绘通报, 2023(11): 23 - 29.
GONG Haojie,CHANG Jinsheng,DU Yuyang. The construction of county ecological network based on MCR and gravity model [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(11): 23 - 29. (in Chinese)

[29] 刘维,于强,裴燕如,等.黄河流域生态空间网络特征[J].北京林业大学学报,2022,44(12):142 - 152.
LIU Wei, YU Qiang, PEI Yanru, et al. Characteristics of spatial ecological network in the Yellow River Basin of Northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(12): 142 - 152. (in Chinese)

[30] 石晶,石培基,王梓洋,等.基于复杂网络理论和电路模型的酒泉市生态网络优化[J].应用生态学报,2024,35(1):237 - 246.
SHI Jing, SHI Peiji, WANG Ziyang, et al. Ecological network optimization of Jiuquan City, Gansu, China based on complex network theory and circuit model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1): 237 - 246. (in Chinese)

[31] CHEN B, ZHU W X, LIU Y. Algorithm for complex network diameter based on distance matrix[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 336 - 342.

(下转第 248 页)

senescence rate in bread wheat[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 809.
[42] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95 - 107.
[43] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1 - 2): 195 - 213.
[44] KHALIFANI S, DARVISHZADEH R, AZAD N, et al. Prediction of sunflower grain yield under normal and salinity stress by RBF, MLP and, CNN models[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189: 115762.
[45] 胡涵清,李政勋,吴竹南. Batch-attention:深度学习中一种新的协调过拟合与欠拟合的方法[J]. 科技导报,2023,41(13):100 - 108.
HU Hanqing, LI Zhengxun, WU Zhunan. Batch-attention: a method for reconciling overfitting and underfitting in deep learning [J]. Science and Technology Herald, 2023,41(13):100 - 108. (in Chinese)
[46] 许雯婷,龚晓峰. 基于深度全卷积神经弹性网络 WCGAN - GP 模型的语音增强研究[J]. 计算机应用与软件,2024,41(2):130 - 137.
XU Wenting, GONG Xiaofeng. Speech enhancement based on deep fully convolutional neuro elastic network WCGAN - GP model[J]. Computer Application and Software, 2024,41(2):130 - 137. (in Chinese)
[47] 康敬德,黄嘉驷,乔磊,等. 基于弹性网络回归的实际采暖热指标估算方法[J]. 热力发电,2024,53(2):114 - 123.
KANG Jingde, HUANG Jiaqiang, QIAO Lei, et al. Estimation method of actual heating heat index based on elastic network regression model[J]. Thermal Power Generation, 2024,53(2):114 - 123. (in Chinese)
[48] MUTANGA O, ADAM E, CHO M A. High density biomass estimation for wetland vegetation using Worldview - 2 imagery and random forest regression algorithm[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 399 - 406.
[49] MUTANGA O, MASENYAMA A, SIBANDA M. Spectral saturation in the remote sensing of high-density vegetation traits: a systematic review of progress, challenges, and prospects[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2023,198:297 - 309.

(上接第 237 页)

[32] 安沈昊,于荣欢. 复杂网络理论研究综述[J]. 计算机系统应用,2020,29(9):26 - 31.
AN Shenhao, YU Ronghuan. Review on complex network theory research[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(9): 26 - 31. (in Chinese)
[33] QI K, ZHANG H, ZHOU Y, et al. A community partitioning algorithm for cyberspace[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 19021.
[34] MENG H, ZHAO X R, WANG Y, et al. Pedogenesis of typical zonal soil drives belowground bacterial communities of arable land in the Northeast China Plain[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 14555.
[35] 侯宏冰,郭红琼,于强,等. 基于 LMBA 策略的鄂尔多斯市生态空间网络优化[J]. 农业机械学报,2021,52(1):219 - 227.
HOU Hongbing, GUO Hongqiong, YU Qiang, et al. Ecospatial network optimization in Ordos based on LMBA strategy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 219 - 227. (in Chinese)
[36] YU Q, YUEU D, WANG Y, et al. Optimization of ecological node layout and stability analysis of ecological network in desert oasis:a typical case study of ecological fragile zone located at Deng Kou County(Inner Mongolia)[J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 304 - 318.
[37] WANG F, YU Q, QIU S, et al Study on the relationship between topological characteristics of vegetation ecospatial network and carbon sequestration capacity in the Yellow River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4926 - 4926.
[38] 张启斌,刘冬悦,李倩,等. 荒漠绿洲交错区生态空间网络粒度效应研究[J]. 农业机械学报,2022,53(4):199 - 207.
ZHANG Qibin, LIU Dongyue, LI Qian, et al. Grain-size effect of potential ecological spatial network in desert oasis ecotone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(4):199 - 207. (in Chinese)
[39] 黄心怡. 鹰潭市土地利用景观格局与生态网络结构的关联分析[D]. 南昌:江西农业大学,2023.
HUANG Xinyi. Correlation analysis of land use landscape pattern and ecological network structure in Yingtan City[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2023. (in Chinese)