doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.026

基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究

于 强 杨 斓 岳德鹏 王宇航 苏 凯 张启斌 (北京林业大学精准林业北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:以荒漠绿洲区典型县域磴口县为研究区,将复杂网络分析方法中的点格局分析方法、网络骨架的提取算法和 空间结构鲁棒性指标根据实际空间生态网络的特点进行改造,对研究区的空间复杂生态网络的结构进行分析。研 究结果表明:7种类型的生态源地节点在较小尺度下均呈现聚集的空间分布格局,随着尺度的增大,逐渐呈现随机 分布,最后呈现均匀分布,这种分布特征保证了小尺度和大尺度上生态网络的稳定。水网廊道的密度范围为0~ 1.46,路网廊道的密度范围为0~2.27,改造 Kruskal 算法识别出的骨架廊道符合实际情况。现状生态网络初始的 连接鲁棒性仅为0.73,优化后生态网络的连接鲁棒性达到1。经过生态节点布局优化后的生态网络节点和边的抗 打击破坏能力、恢复能力增强。

关键词: 生态网络; 复杂网络分析方法; 点格局; 骨架廊道; 结构鲁棒性; 磴口县 中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0214-11

Investigation on Complex Spatial Ecological Network Structure Based on Complex Network Analysis Method

YU Qiang YANG Lan YUE Depeng WANG Yuhang SU Kai ZHANG Qibin (Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The study on the structure of complex space ecological network with spatial attribute information is a blank of the current research on complex network. Dengkou County, a typical county in the desert oasis area, was selected as the study area. The method of point pattern analysis in complex network analysis methods, the algorithm of extracting network skeletons and the robustness index of spatial structure were modified in accordance with the characteristics of the actual spatial ecological network, to analyze the structure of spatial complex ecological network in the study area. The results showed that the nodes of seven types of eco-sources exhibited aggregated spatial distribution pattern at a small scale, which was gradually distributed randomly as the scale increase, and finally distributed uniformly. This distribution feature ensured that ecological networks were stable at both small and large scales. The NDVI and MNDWI values of different types of ecological source had different distribution characteristics. The density of water corridors was ranged from 0 to 1.46, and the density of road corridors was ranged from 0 to 2.27. The framework corridor identified by Kruskal algorithm combined with the ecological network features was in accordance with the actual situation. The initial robustness of the current ecological network was only 0.73, and the robustness of the ecological network after optimization reached 1. Malicious attacks were more destructive than random attacks, but the optimized ecological networks showed stronger anti-strike capability, stronger connectivity and stronger robustness of node and edge recovery. After optimization of the ecological node layout, the ecological network nodes and edges were more resistant to attack and destruction and more resilient.

Key words: ecological network; complex network analysis method; point pattern; skeleton corridor; structural robustness; Dengkou County

收稿日期: 2017-12-15 修回日期: 2017-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41371189)和"十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAD16B00)

作者简介:于强(1987—),男,博士生,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail: yuqiang@ bjfu. edu. cn

通信作者: 岳德鹏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事景观生态学与土地评价研究, E-mail: yuedepeng@ 126. com

0 引言

荒漠化不仅是全球重要的生态环境问题之一, 更是全球重要的经济和社会问题^[1]。在我国,荒漠 化主要发生在内蒙古和西北地区,近年来虽然在整 体上得到初步遏制,但这些地区生态环境脆弱,区域 增温明显,干旱化与风蚀等现象为荒漠化提供了自 然条件,再加上以经济效益为导向的人类活动频繁 发生,荒漠化现象并没有得到根本缓解^[2]。在西北 干旱半干旱生态脆弱区,人工型和自然型两大类生 态用地是维持生态环境稳定的重要保证^[3]。生态 用地破碎斑块以及廊道型生态用地组成了荒漠绿洲 区间上的生态用地网络^[4]。这种生态用地网络具 有复杂空间结构,复杂的相互影响关系,是典型的复 杂系统。其除了具有无序性、动态性等基本特征外, 还具有多层次性^[5]。

复杂网络分析方法被广泛应用于交通网络、生 态系统网络、信息通信网络、航空网络、社会网络 等^[6]。复杂网络的抽象研究方法成为复杂系统研 究的新热点,其将复杂系统简化为节点以及连接节 点的边的集合,节点代表系统的基本单元,边代表各 个单元之间的相互作用,这种抽象方法对复杂系统 的研究起到了极大的推动作用^[7]。本文所研究的 复杂网络是空间生态网络,是具有空间属性信息的 复杂网络^[8]。可以理解为区域内生态源地、生态廊 道和生态节点3种景观格局要素所组成的复杂网 络,它的结构、功能以及两者之间的联系一直是网络 科学以及景观生态学的一个研究重点[9]。中国西 北地区生态脆弱区具有荒漠化严重、景观斑块破碎、 生态环境极其脆弱等特征,防护型生态网络能够通 过生态廊道和生态节点连接破碎生境,形成完整的 景观网络,从而保证区域生态安全^[10]。

对复杂空间生态网络的结构进行细致的分析是 复杂网络优化、构建等研究的基础,对复杂网络的分 析主要包括对节点重要性分析^[11]、节点的度分 析^[12]、网络边的度分析^[13]、骨架结构的分析^[14]、网 络关键区位分析^[15]和网络稳定性分析等^[16],而复 杂网络分析方法在复杂空间生态网络的结构分析方 面还未曾应用,故本研究基于复杂网络分析方法,将 其进行改造成为能够应用于实际空间生态网络的分 析中,选择中国西北典型荒漠绿洲区磴口县为研究 区,分别对磴口县的现状生态网络、生态节点和生态 廊道进行分析,并且基于前期研究成果^[17],构建适 合空间生态网络的结构鲁棒性指标,对优化前后的 生态网络空间结构的鲁棒性进行分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

磴口县地处中国西北部(东经107°05′,北纬 40°13′),位于内蒙古河套平原源头,黄河中上游,背 靠狼山山脉,西邻乌兰布和沙漠。磴口具气候干旱 少雨,水资源较为短缺,土地沙漠化严重,土地退化 严重,区域蒸发量大,导致土地盐渍化程度深,境内 海拔1030~2046 m, 整个地形除山区外, 呈东南高 西北低,逐渐倾斜。属中温带大陆性季风气候,历年 平均风速 3.0 m/s, 瞬间最大风速 28 m/s, 多年平均 降水量 143.9 mm,多年平均蒸发量 2 327 mm,多年 平均气温 7.6℃,无霜期 136 d。全县有 6 个土类,10 个 亚类,31个土属,258个土种。黄河流经磴口县 52 km,年径流量 310 亿 m³,水域面积 2 400 hm²。河 套地区地下水埋深 0.5~3 m,沙区地下水埋深 3~ 10 m,山前洪积扇地下水埋深 3~30 m,相对丰富的 地表水与地下水对磴口县发展以及生态环境改善提 供了有力保障。

1.2 数据来源与处理

本文选取磴口县 2016 年夏季成像的 Landsat OLI 影像为研究素材(来自地理空间数据云平台), 影像的空间分辨率为 30 m,云量低于 10%。利用 ENVI 5.1 软件对影像进行波段合成、图像增强和几 何校正处理,选择最大似然监督分类法对遥感影像 进行目视解译,提取磴口县的土地利用类型信息,使 用 ArcMap 10.2 进行细碎斑块处理,结合外业调查 确定出生态源地的类型共 7 类:人工草地、天然草 地、坑溏水面、有林地、园地、湖泊和灌木林地。利用 原始影像计算 NDVI(Normalized difference vegetation index)^[18]和 MNDWI(Modified normalized difference water index)^[19]。本研究中所利用的生态网络为于 强等^[17]的前期研究成果,包括优化前后的生态网 络,本研究在前期研究的基础上进行空间结构鲁棒 性的分析。

1.3 点格局分析方法

生态源地节点是实际生态网络的重要组成要素,空间上生态源地的分布格局是评价生态网络稳定性的重要指标。本文首先将磴口县的生态源地斑块按照形心进行转点处理,得到生态源地节点的空间分布数据。利用配对关联函数(Pair correlation function, PCF)计算 O-ring 函数来描述生态源地节点的空间格局。PCF 是从 K 函数衍生而来,利用圆环代替 K 函数中的圆,改进后的 PCF 算法没有累积效应^[20]。K 函数的计算公式为

$$K(t) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{W_{ij}} I_i(u_{ij}) \quad (i \neq j)$$
(1)

式中 A——面积

- n——生态源地斑块的总数
- *u_{ij}*——第*i*个与第*j*个生态源地斑块节点之 间的距离
- W.;----边界效应修正系数
- I——指示函数 t——空间尺度

*W_{ij}*为以点*i*为圆心、*u_{ij}*为半径的圆落在面积*A* 中的弧长与整个圆周的比例,以消除边界效应。

当 $u_{ij} \leq t$ 时, $I_t(u_{ij}) = 1$,当 $u_{ij} > t$ 时, $I_t(u_{ij}) = 0$; 基于 Ripley K 函数, PCF 的计算公式为

$$g(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{\mathrm{d}K(r)}{\mathrm{d}r} \tag{2}$$

式中 g(r)——生态源地节点分布函数 r——半径

当 $g(r) \equiv 1.0$ 时,生态节点分布显示为完全空间随机(Complete spatial randomness, CSR)分布,g(r) > 1.0 时为聚集分布,g(r) < 1.0 时为均匀分布。

基于 PCF 函数得到 O-ring 函数, O-ring 统计包 括单变量统计和双变量 O-ring 统计, 单变量 O-ring 统计能够分析单一目标的空间分布格局^[21]。单变 量 O-ring 统计计算公式为

$$O_{11}(r) = \frac{\sum_{i=1}^{m} \text{Point}(R_{i}^{w}(r))}{\sum_{i=1}^{m} \text{Area}(R_{i}^{w}(r))}$$
(3)

式中 w——圆环宽度

011(r)——水平分布格局函数

m——研究区内某一个影像半径的生态源地 节点的数量

- *R*^w_i(*r*)——该影响半径的生态源地节点中第 *i*个点
- Point(*R^w_i*(*r*))——圆环内该影响半径的生态 源地节点的数量

Area $(R_i^w(r))$ ——圆环的面积

O(r)函数与g(r)函数之间的关系为:存在一个 系数 λ ,使得 $O(r) = \lambda g(r)$ 。随机分布情况下,在所 有尺度r下 $g(r) = 1, O(r) = \lambda$ 。当 $g(r) > 1, O(r) > \lambda$ 时,表明在尺度r下生态源地节点为聚集分布。当 $g(r) < 1, O(r) < \lambda$ 时,表明在尺度r下生态源地节 点为均匀分布。

在本研究中,生态源地节点的种类一共7种,采 用单变量 O-ring 统计对每一种生态源地节点进行点 格局分析,采用 Programita 软件(2010版)完成不同 生态源地节点类型的空间格局分析,采用单因素方 差分析法和 Duncan 法进行方差分析和多重比较,空 间尺度 0~60 km,步长 1 km,经过 19 次 Monte Carlo 模拟得到 95% 的置信区间,即上下包迹线。在某一 个空间尺度上,若 O₁₁(r)值大于上包迹线,则生态 源地节点呈聚集分布。落入到上下包迹线内部,则 呈随机分布。小于下包迹线,则呈均匀分布。

1.4 改造 Kruskal 算法的骨架廊道识别

生态廊道是生态网络的骨架结构,而生态廊道 中的骨架廊道结构能够有效的保留原始网络的全局 信息,骨架廊道是生态网络中一种具有特殊结构的 生成树,是由复杂网络中具有最大边介数之和的边 集合组成的生成树^[22]。本研究对广泛应用于提取 网络最小生成树的 Kruskal 算法进行改造,构建空间 生态网络的骨架廊道提取算法。

首先计算生态网络 G 的廊道介数,廊道介数是 经过该生态廊道的最短路径的数目占所有最短路径 总数的比例。廊道介数计算公式为

$$C(i) = \sum_{j,k} \frac{\sigma_{j,k}(i)}{\sigma_{j,k}}$$
(4)

式中 *σ_{j,k}*(*i*)——生态网络中从生态廊道*j*到廊道 *k*的最短路径通过的边的数目

 $\sigma_{i,k}$ ——生态网络中所有最短路径的数目

其次,构造新的生态网络 G',G'与 G 的网络拓 扑结构相同,每条廊道的权值为利用廊道介数算法 计算得到的廊道介数值。对 G'中的所有廊道依据 权值大小进行降序排列,得到降序排列的廊道集合 S。

最终,建立一个空的生态网络 T,依次从集合 S 中选取一条廊道 e。若加入廊道 e 后,生态网络 T 中 不产生回路,则将廊道 e 保留在生态网络 T 中,否则 不保留。重复计算直到廊道选取完毕,则生成了生 态网络 G 的骨架廊道。该骨架廊道具有最大的廊 道介数之和,也是生态网络 G 的骨架树。

生态网络骨架树的提取流程如图1所示。

1.5 网络结构鲁棒性

在干旱区生态网络是维持区域生态环境稳定的 重要保障,生态网络空间结构的维持是其发挥正常 功能的保证。生态网络结构鲁棒性用来表示复杂系 统在被干扰情况下保持其功能或性质的能力^[23]。 在遭受外界干扰或破坏时,生态网络结构鲁棒性不 但要反映网络结构本身对于破坏的抵御能力,而且 还要体现遭受破坏后结构的恢复能力^[24]。

对网络进行攻击的方式很多,比较典型的是随 机攻击和恶意攻击^[25]。在干旱区对生态网络的攻 击主要来自于沙漠化、人类活动的干扰,其导致了生 态网络中生态节点和生态廊道的消失。沙漠化类似 于随机攻击,人类活动类似于恶意攻击,与随机攻击



图 1 生态网络有采树旋取孤柱 Fig. 1 Flow chart of ecological network skeleton tree extraction

相比,恶意攻击破坏度较大的节点,对网络造成的危 害更大。

为评价生态网络的结构鲁棒性,构建实际生态 网络的表示节点关系邻接矩阵,利用 Matlab 软件将 实际的生态网络抽象生成无向无权生态网络拓扑 图,并进行随机攻击和恶意攻击。随机攻击即从网 络中随机地去除若干个节点,恶意攻击即从网络中 去除度最大的 N, 个节点及其相应的边,在破坏过程 中采用一次性破坏方式,即同时破坏 N, 个符合条件 的节点而不是依次破坏。

生态网络中某些节点在遭受攻击破坏后,剩余 的节点之间仍然能够继续保持连通的能力,称为连 接鲁棒性^[26]。连接鲁棒性的计算公式为

$$R = \frac{C}{N - N_r} \tag{5}$$

式中 N——初始网络的规模

N,——从网络中去除的生态节点个数

C——当生态节点被去除后生态网络中最大 连通子图中的节点个数

恢复鲁棒性是当一个网络中部分节点被破坏后,能够通过某些简单的策略将消失的网络结构元素(包括边和节点)进行恢复的能力^[27]。

针对节点和边两种情况,恢复鲁棒性的计算公 式分别为

$$D = 1 - \frac{N_r - N_d}{N} \tag{6}$$

$$E = 1 - \frac{M_r - M_e}{M} \tag{7}$$

- 式中 D----节点恢复鲁棒性指标
 - E----边恢复鲁棒性指标
 - N_d——通过某种策略恢复的节点个数
 - M——初始网络中边的数量
 - M,——从网络中去除的边的个数
 - *M_e*——通过某种策略恢复的边的数量

节点恢复策略是如果节点 *i* 和节点 *j* 直接相连, 那么当节点 *i* 被去除时,如果 *j* 还在剩余网络中,那 么可以通过 *j* 的信息将节点 *i* 及它们之间的边进行 恢复。一般地,网络的节点恢复鲁棒性要高于边恢 复鲁棒性。因为要完全破坏一个节点使之不能恢 复,必须要将网络中与之相关的信息全部去除,即要 同时破坏所有与之相连的边。而使网络中的一条边 无法恢复,则只需要将这条边连接的两个节点去除 即可,因为该边在网络中的相关信息仅保留在其两 端的节点上。

2 结果与分析

2.1 生态源地提取与分析

对生态网络中的生态源地进行提取及分析至关 重要。生态源地能够维护现有景观过程的完整性, 能够保证生态系统服务的可持续性,能够防止生态 系统退化带来的各种生态问题。在干旱半干旱生态 脆弱区,林地、草地、水体的生态地位均至关重要。 本文根据 Landsat OLI 影像利用监督分类获得磴口 县 2016 年的土地利用二级分类数据,并通过详细的 外业调查,确定了人工草地、其他草地、坑塘水面、有 林地、果园、湖泊和灌木林地7种适合作为磴口县生态源地的用地类型,如图2所示。



Fig. 2 Spatial distribution map of ecological source

磴口县的生态源地可以综合为绿色生态源地和 蓝色生态源地 2 大类。绿色生态源地包括有林地、 果园、灌木林地、人工草地和其他草地。蓝色生态源 地包括湖泊和坑塘水面。其中有林地斑块 161 个, 果园斑块 17 个,灌木林地斑块 141 个,人工草地斑 块 36 个,其他草地斑块 619 个。湖泊斑块 544 个, 坑塘水面斑块 11 个。生态源地斑块的总面积达到 390.49 km²,共1 529 个生态源地斑块,其中小于 4 个像元的破碎板块 471 个,在进行生态源地分析 时为保证结果准确,破碎的生态源地也进行了分析, 但在生态网络抽象成为拓扑结构时为简化计算,较 为破碎的生态源地被合并或删除。

为分析磴口县生态源地的特征,利用 2016 年的 多光谱遥感影像提取磴口县的 NDVI 和 MNDWI,如 图 3 所示。其中计算 NDVI 利用了 OLI 的红波段和 近红外波段,计算 MNDWI 利用了 OLI 的绿波段和 短波红外波段。磴口县 MNDWI 最小值为 - 0.82, 最大为 1,水体呈现高亮显示,比较明显的是奈伦 湖、黄河等。NDVI 最小值 -0.3,最大值 0.63,耕地 区域的植被指数较大。

利用 ArcGIS 10.2 的分区统计工具,分别统计 不同类型生态源地斑块所对应的 NDVI 和 MNDWI 值,如图4所示。灌木林地型生态源地斑块的 NDVI 值较为集中在 0.14~0.25 之间,在干旱区灌木林地 的覆盖并不完全, NDVI 值也较低。有林地型生态 源地斑块的 NDVI 值较为集中在 0.20~0.30 之间, 比灌木林地的植被覆盖大。人工草地型生态源地斑 块的 NDVI 值主要分布在 0.17~0.25 之间。其他 草地型生态源地斑块较多,其 NDVI 值主要分布在 0.13~0.33之间。草地型生态源地的植被覆盖程 度相比于林地型生态源地较大。果园是一种人工林 地,其 NDVI 值分布在 0.30 左右。坑塘水面型生态 源地斑块的 MNDWI 值分布较为分散, 斑块数量也 较少。磴口县的湖泊型生态源地斑块较多, MNDWI 值从0到1均有分布,但是0~0.22之间有较多的 分布,0.8~1.0之间也有一定量的分布。

2.2 生态源地节点空间格局分析

为评判不同类型的生态源地节点在空间上的分 布特征,采用 O-ring 函数来描述其随着空间尺度的 变化。在 Programita 软件中完成计算并绘图,如图 5 所示,横坐标为空间尺度,纵坐标为 $O_{11}(r)$ 值。灌 木林地、其他草地、湖泊、人工草地和有林地 5 种类 型的生态源地节点的分布格局曲线趋势较为一致, 均呈持续下降趋势,且出现随机分布的情况较少。 其中灌木林地、其他草地、有林地和人工草地随着空 间尺度的递增, $O_{11}(r)$ 的下降幅度基本相同。湖泊 在 $0 \sim 5$ km 尺度随着空间尺度的增加, $O_{11}(r)$ 的下 降幅度较大, $O_{11}(r)$ 从 0.62 下降到 0.33。灌木林地 和人工草地均在 35 ~ 37 km 尺度左右呈现随机分 布,在 $0 \sim 35$ km 尺度呈现聚集分布,在大于 37 km 尺度后出现均匀分布。湖泊出现随机分布的空间尺



图 3 NDVI 和 MNDWI 空间分布图 Fig. 3 Spatial distribution map of NDVI and MNDWI



图 4 不同生态源地 NDVI 和 MNDWI 值统计

Fig. 4 NDVI and MNDWI index charts of different types of ecological sources



Fig. 5 Horizontal distribution pattern functions change curves with spatial scale

度较灌木林地和人工草地略小,在 31~34 km 尺度 呈现随机分布,在 0~31 km 尺度呈现聚集分布,在 大于 34 km 尺度后呈现均匀分布格局。其他草地和 有林地呈现随机分布格局的空间尺度较为接近,在 42~43 km 尺度呈现随机分布。果园在 0~18 km 尺 度呈现聚集分布,在18~49 km 尺度呈现随机分布, 大于49 km 尺度呈现均匀分布格局,果园是一种人 工生态源地类型,人为因素是决定果园位置的最重 要的原因,果园的位置并不是自然发展的结果,故果 园在大多数尺度下都呈现空间随机分布格局。坑塘 水面在 0~34 km 尺度呈现聚集分布,在 34~45 km 尺度呈现随机分布,大于 45 km 尺度呈现均匀分布 格局。

坑塘水面的 O₁₁(r)曲线波动较为强烈,在 0~2 km 尺度呈现上升趋势,2~4 km 尺度出现下降趋势,在 4~7 km 尺度呈现上升趋势后持续呈现下降 趋势,直到 19 km 尺度后出现小幅度的上升趋势。

7 种类型的生态源地节点在较小尺度下均呈现 聚集的空间分布格局,且随着尺度的增大,逐渐呈现 随机分布,后呈现均匀分布。除了坑塘水面,其他6 种 类型的生态源地节点的聚集分布是空间尺度越小则 越聚集,而在聚集分布格局下,坑塘水面的聚集峰值 出现在 7 km 尺度下。

在磴口县生态源地的空间分布状态决定了其是 否能稳定发展与存在,乌兰布和沙漠随时扩张危险 的影响、地下水空间分布的不稳定状态、降雨匮乏的 风险等均直接影响着生态源地的存活,经过分析发 现小尺度下磴口县现状生态源地存在空间高集聚的 特点,这种空间高集聚的特点能够使得生态源地之 间互相依存、互相影响,形成稳定的生态网络,若生 态源地空间分布不够聚集,则会导致其存活的可能 性大大降低。

在大尺度上,7种类型的生态源地节点又均呈 现出均匀分布格局,表明生态源地节点基本能够影 响磴口县整个县域。现状的生态源地分布状态是多 年人为因素、自然条件下植被演替因素、地下水空间 分布因素、气候因素、沙漠化因素共同作用的结果, 根据 YU 等^[24]的研究成果,磴口县的生态环境在逐 渐的改善,并且在稳定地发展。在干旱半干旱荒漠 绿洲生态脆弱区,生态源地节点这种小尺度高度聚 集、大尺度趋于均匀的分布格局,一方面能够保证生 态源地的稳定发展,另一方面又能保证区域的环境 稳定。

2.3 生态廊道骨架结构分析

生态廊道是指景观中与相邻两侧环境不同的线 状或带状结构,根据磴口县的生态系统类型,磴口县 的生态廊道可分为河流廊道、道路廊道、人工沟渠廊 道。河流廊道主要是流经磴口县的黄河,其侧渗是 磴口县地下水补给的重要来源。道路廊道两侧的带 状绿地和人工沟渠两侧的带状绿地对于磴口县生态 网络中生态能量的传递作用巨大。基于磴口县 MNDWI空间分布数据,结合土地利用数据提取出磴 口县的路网和水网数据,并利用 ArcGIS 软件进行空 间密度分析,如图 6 所示。

由沟渠和河流组成的水网是磴口县生态作用显 著的廊道类型,水网廊道不仅能够传递生态能量,还



图 6 水网和路网及其密度、骨架空间分布 Fig. 6 Spatial distribution of water network, road network and their density and skeleton

能够显著影响其周边环境,改善植被分布格局,是一 种输出型的生态廊道。由带有防护林的道路组成的 路网也是磴口县最为主要且稳定的生态廊道,水网 廊道由于季节、灌溉等原因会出现断裂,而道路廊道 可以持续稳定的传递生态能量,另外在磴口县道路 廊道能够起到阻隔沙漠扩张的作用。由图 6b 可知, 水网密度最大值为1.46,巴彦高勒镇东北部黄河河 道、总干渠以及东风渠之间的区域水网密度较大,磴 口县中西部乌沈干渠连接的包尔盖农场、纳林套海 农场等区域水网密度较大,磴口县的中东部温都尔 毛道嘎查区域水网密度较低,该区域有较大面积的 沙漠分布。乌兰布和沙漠的东北缘水网密度低,基 本没有水网的分布。路网密度最大值为2.27,位于 磴口县城区部分,整体来看路网的分布要比水网更 密,且分布更为广泛。乌兰布和沙漠东北缘的穿沙 公路以及其沿线的农场是阻碍乌兰布和沙漠向河套 平原扩张的第一道防线。

水网和路网组成了磴口县的廊道网络,为了分 析廊道网络的稳定机理,利用改造的 Kruskal 算法进 行磴口县骨架廊道的提取,在 Matlab 软件中实现骨 架树的筛选生成。在生成骨架廊道之前,首先根据 生态源地斑块与生态廊道的空间位置确定出每条廊 道的起点与终点,确定每条廊道与生态节点之间的 连接关系,并且抽象成为生态网络图谱结构,最终得 出磴口县现状生态网络的骨架廊道,如图 6d 所示。 骨架廊道是生态网络稳定的最基本保证,所提取出 来的骨架廊道与实际情况较为吻合,水网中的黄河 以及黄河奈伦湖分枝、乌沈干渠、总干渠、大滩渠、东 风渠建设二干渠、乌拉河、团结渠北二支渠、五支渠、 四支沟、玛弥吐渠等关键的河流沟渠都被确定为骨 架廊道。路网中的磴哈公路、穿沙公路、京藏高速、 包银公路、沙巴公路、S312 省道等关键的路段都被 确定为骨架廊道。在现实中这些骨架廊道具有不易 发生大规模变动的特点,其极高的稳定性也保证了 磴口县生态网络的稳定。

2.4 生态网络优化前后鲁棒性对比

基于现状生态网络以及于强等^[17]利用改进 BCBS(Blind-zone centroid-based scheme)模型优化得 到的生态网络,进行磴口县生态网络的优化前后空 间结构鲁棒性对比分析。利用复杂网络分析理论, 根据生态网络的节点之间的连接关系,构建邻接矩 阵,矩阵的对角线元素均为0,矩阵行、列均代表节 点,矩阵元素为1代表2个节点是相连的。为简化 计算,将少于4个像元的生态源地破碎斑块合并到 就近斑块或直接删除,最终确定出1058个满足条 件的生态节点,利用 Matlab 软件编程在二维平面内 生成1058个散点并编号,根据构建的邻接矩阵将 实际生态网络抽象为生态网络拓扑图。图7为现状 的生态网络拓扑图,图8为采用 BCBS 模型优化后 的生态网络拓扑图,由图中可知优化后的拓扑图节 点之间的拓扑关系更为复杂。



为评判生态节点布局优化前后生态网络结构的 稳定性,利用恶意攻击和随机攻击分别对现状生态 网络和优化后生态网络进行攻击,分别分析生态网 络的连接鲁棒性、节点恢复鲁棒性和边恢复鲁棒性。 在 Matlab 软件中实现恶意攻击和随机攻击的模拟 仿真。

如图 9 所示,对于现状生态网络,其初始的连接 鲁棒性仅为 0.73,表明现状生态网络的自身联通能 力较差,随着恶意攻击和随机攻击下节点打击规模 的增加,现状生态网络的连接能力在去除节点数目 100~300之间下降的很快,表现出"涌现"现象。随 机攻击下的连接鲁棒性要优于恶意攻击,去除节点 数目在 300 以上后,恶意攻击下的连接鲁棒性低于 0.1,生态网络结构的联通能力极差。而去除节点数 目在 300 以上后,随机攻击下的连接鲁棒性低于 0.4,在节点数目去除 900 后,连接鲁棒性在 0.1 左 右,可见恶意攻击对现状生态网络的联通能力破坏 十分明显。





如图 10 所示,对于优化后生态网络,初始连接 鲁棒性为1,表明优化后网络的结构十分稳定,连通 能力强。随机攻击下的网络连接鲁棒性要优于恶意 攻击,在恶意攻击 300 个节点后,连接鲁棒性出现下 降,在恶意攻击 520 个节点后,表现出迅速的"涌 现"现象。在随即攻击 660 个节点后优化后网络的 连接鲁棒性才出现下降,并随后出现迅速的"涌现" 现象。表明经过优化后的生态网络的联通能力有了 很大幅度的提升,度大的节点数目增多,稳定性有了 极大的提升。

首先对节点恢复鲁棒性进行分析。如图 11 所 示,对于现状网络,当去除节点的数目较小时,遭到 破坏的节点可以完全恢复。随着破坏的节点数目的 增加,恶意攻击和随机攻击的节点恢复鲁棒性均呈 下降趋势,且均为凸曲线。随着网络中随机攻击去 除的节点数目超过 200 个,越来越多的丢失节点得 不到恢复。而恶意攻击下去除超过 100 个节点后越





来越多的丢失节点得不到恢复。随机攻击下的节点 恢复鲁棒性要优于恶意攻击。

如图 12 所示,对于优化生态网络,当恶意攻击 丢失的节点数目小于 400,随机攻击丢失的节点数 目小于 650,遭到破坏的节点可以完全恢复。超过 临界数目后,随机攻击和恶意攻击的节点恢复鲁棒 性均呈下降趋势,且下降幅度较大。综上可知,经过 优化后的生态网络结构节点恢复性强,网络结构稳 定性增加。





然后对边恢复鲁棒性进行分析。如图 13 所示, 恶意攻击和随机攻击下的边恢复鲁棒性均呈现下降 趋势。对于现状生态网络,随机攻击下的边恢复鲁 棒性曲线为凸曲线,而恶意攻击下的变恢复鲁棒性 曲线为凹曲线。随机攻击下,当去除的边的数目小于 50 时,其网络结构能够恢复。而恶意攻击下随着 边去除数目的增加,边恢复鲁棒性的下降呈现一定 的"涌现"现象,对现状生态网络的边进行恶意攻击 对其网络结构的破坏非常明显。



如图 14 所示,对于优化网络,随机攻击下的边恢复鲁棒性曲线与优化前较为相似,但优化后的生态网络边恢复鲁棒性略优于优化前。恶意攻击下的边恢复鲁棒性则较优化前改善很大,表明优化后的生态网络结构抵御恶意破坏攻击的能力强,优化后的生态网络的联通能力、节点抗打击破坏能力达的抗打击破坏能力均有很大程度的提升。



Fig. 14 Edge recovery robustness of optimized eco-network

3 结论

(1)磴口县生态源地包括绿色生态源地和蓝色 生态源地两大类,包含有林地、果园、灌木林地、人工 草地、其他草地、湖泊和坑塘水面7个用地类型,总 面积达到 390.49 km²。不同类型的生态源地的 NDVI 值和 MNDWI 值的分布特征不同,其中绿色生 态源地的 NDVI 值的分布均主要集中在一定的范围 内,如有林地的 NDVI 值主要集中分布在 0.20 ~ 0.30 之间。蓝色生态源地的 MNDWI 值则在大于 0 的区域均有分布。

(2) 生态源地斑块按形心转点后得到生态源地

节点,磴口县的7种类型的生态源地节点在较小尺 度下均呈现聚集的空间分布格局,且随着尺度的增 大,逐渐呈现随机分布,后呈现均匀分布。现状生态 网络中的生态源地节点的点格局特征表现为小尺度 的空间高集聚格局和大尺度的空间均匀分布格局。 这种分布特征保证了处于干旱半干旱区的生态源地 斑块之间能够相互依存并且又能够覆盖控制整个区 域,对小尺度和大尺度上生态网络的稳定作用巨大。

(3)水系和道路两侧的带状防护绿地组成了磴 口县现状生态网络中的廊道结构。水网廊道的密度 范围为0~1.46,路网廊道的密度范围为0~2.27。 在乌兰布和沙漠的东北缘水网密度低,基本没有水 网的分布。水网中的黄河以及黄河奈伦湖分枝、乌 沈干渠等关键的河流沟渠都被确定为骨架廊道,路 网中的磴哈公路、穿沙公路、京藏高速等关键的路段 都被确定为骨架廊道,骨架廊道的稳定存在是生态 网络稳定存在的基础。

(4)对优化前后的网络结构进行了结构鲁棒性 分析。现状生态网络初始的连接鲁棒性仅为 0.73, 优化后生态网络的连接鲁棒性达到 1。在恶意攻击 和随机攻击下发现,恶意攻击要比随机攻击的破坏 性大,但优化后的生态网络表现出更强的抗打击能 力,更强的联通能力,且节点和边的恢复鲁棒性更 强。随机攻击下的节点恢复鲁棒性和边恢复鲁棒性要 优于恶意攻击,经过生态节点布局优化后的生态网络 节点和边的抗打击破坏能力以及恢复能力更强。

参考文献

- 1 GE Xiaodong, DONG Kaikai, ALBERT E L, et al. Impact of land use intensity on sandy desertification: an evidence from Horqin Sandy Land, China [J]. Ecological Indicators, 2016, 61(2): 346-358.
- 2 段翰晨,王涛,薛娴,等.科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局——以内蒙古自治区奈曼旗为例[J].地理学报, 2012,67(7):917-928.

DUAN Hanchen, WANG Tao, XUE Xian, et al. Spatial-temporal evolution of desertification and landscape pattern in Horqin Sandy Land: a case study of Naiman Banner in Inner Mongolia [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 917 - 928. (in Chinese)

3 唐秀美,郝星耀,潘瑜春,等.基于生态需求评价的北京市生态区位划分研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(1):170-176.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160122&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j.issn.1000-1298.2016.01.022.

TANG Xiumei, HAO Xingyao, PAN Yuchun, et al. Ecological regionalization based on ecological demanding evaluation in Beijing City[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):170-176. (in Chinese)

- 4 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.
 PENG Jian, ZHAO Huijuan, LIU Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction
 [J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419. (in Chinese)
- 5 傅强,顾朝林. 基于 CL PIOP 方法的青岛市生态网络结构要素评价[J]. 生态学报,2017,37(5):1729-1739. FU Qiang, GU Chaolin. Evaluation of the structure elements of Qingdao ecological network based on the CL - PIOP method[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1729-1739. (in Chinese)
- 6 甄茂成,张景秋,杨广林.基于复杂网络的商业银行网点布局特征——以北京市中国银行为例[J].地理科学进展,2013, 32(12):1732-1741.

ZHEN Maocheng, ZHANG Jingqiu, YANG Guanglin. Characteristics of commercial bank branch networks based on complex networks theory: a case study on Bank of China in Beijing[J]. Progress in Geography, 2013, 32(12): 1732 - 1741. (in Chinese)
7 苏凯,岳德鹏, YANG Di,等.基于改进力导向模型的生态节点布局优化[J/OL].农业机械学报,2017,48(11):215 - 221.

http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171126&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/ j.issn.1000-1298.2017.11.026.

SU Kai, YUE Depeng, YANG Di ,et al. Layout optimization of ecological nodes based on improved force-directed model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):215-221. (in Chinese)

8 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.

XU Feng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Developing ecological networks based on MSPA and the least-cost path method: a case study in Bazhong western new district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6425-6434. (in Chinese)

9 陈影,哈凯,贺文龙,等. 冀西北间山盆地区景观格局变化及优化研究——以河北省怀来县为例[J]. 自然资源学报, 2016,31(4):556-569.

CHEN Ying, HA Kai, HE Wenlong, et al. Study on the change and optimization of landscape pattern in the basin of Northwest Hebei Mountains—a case study of Huailai County, Hebei Province[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(4): 556 - 569. (in Chinese)

10 潘竟虎,刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.

PAN Jinghu, LIU Xiao. Assessment of landscape ecological security and optimization of landscape pattern based on spatial principal component analysis and resistance model in arid inland area: a case study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3126-3136. (in Chinese)

- 11 任卓明,邵凤,刘建国,等. 基于度与集聚系数的网络节点重要性度量方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12):522-526. REN Zhuoming, SHAO Feng, LIU Jianguo, et al. Node importance measurement based on the degree and clustering coefficient information[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12):522-526. (in Chinese)
- 12 王甲生,吴晓平,廖巍,等.改进的加权复杂网络节点重要度评估方法[J].计算机工程,2012,38(10):74-76.
 WANG Jiasheng, WU Xiaoping, LIAO Wei, et al. Improved method of node importance evaluation in weighted complex networks
 [J]. Computer Engineering, 2012, 38(10):74-76. (in Chinese)
- 13 朱涛,张水平,郭戎潇,等.改进的加权复杂网络节点重要度评估的收缩方法[J].系统工程与电子技术,2009,31(8): 1902-1905.

ZHU Tao, ZHANG Shuiping, GUO Rongxiao, et al. Improved evaluation method for node importance based on node contraction in weighted complex networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8):1902-1905. (in Chinese)

- 14 林志峰. 无线传感器网络的骨架提取及应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015. LIN Zhifeng. Skeleton extraction and its applications in wireless sensor networks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- 15 张志东,杨挺. 基于复杂网络的电力通信骨干网络关键点甄别[J]. 电力信息与通信技术,2015(12):19-23. ZHANG Zhidong, YANG Ting. Power communication backbone network critical elements recognition algorithm based on complex network theory [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2015(12):19-23. (in Chinese)
- 16 高洋,李丽香,彭海朋,等. 多重边复杂网络系统的稳定性分析[J]. 物理学报,2008,57(3):1444-1452.
 GAO Yang, LI Lixiang, PENG Haipeng, et al. Stability analysis of complex networks with multi-links[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3):1444-1452. (in Chinese)
- 17 于强,岳德鹏,YANG Di,等.基于 BCBS 模型的生态节点布局优化[J/OL].农业机械学报,2016,47(12):330-336, 329.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20161241&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.041.

YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Layout optimization of ecological nodes based on BCBS model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 330 - 336, 329. (in Chinese)

- 18 MA X, TONG X, LIU S, et al. Optimized sample selection in SVM classification by combining with DMSP-OLS, Landsat NDVI and GlobeLand30 products for extracting urban built-up areas[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3):236.
- 19 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.
 XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J].
 Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese)
- 20 ERFANIFARD Y, SABOROWSKI J, WIEGAND K, et al. Efficiency of sample-based indices for spatial pattern recognition of wild pistachio (*Pistacia atlantica*) trees in semi-arid woodlands[J]. Journal of Forestry Research, 2016, 27(3): 583 - 594.
- 21 NGUYEN H, WIEGAND K, GETZIN S. Spatial patterns and demographics of Streblusmacrophyllus trees in a tropical evergreen forest, Vietnam[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2014, 26(3): 309-319.
- 22 曹珍. 复杂网络分形特性的统计研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013. CAO Zhen. Statistical research on fractal characteristic of complex networks[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- 23 SUDOW M, OWSIANIAK M, SZCZEPANIAK Z, et al. Evaluating robustness of a diesel-degrading bacterial consortium isolated from contaminated soil[J]. New Biotechnology, 2016,33: 852 - 859.
- 24 YU Qiang, YUE Depeng, WANG Yuhang, 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 Dengkou County(Inner Mongolia)[J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 304 - 318.
- 25 BRAVARD C, CHARROIN L, TOUATI C. Optimal design and defense of networks under link attacks [J]. Journal of Mathematical Economics, 2017,68: 62 - 79.
- 26 杜巍,蔡萌,杜海峰. 网络结构鲁棒性指标及应用研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4):93-97. DU Wei, CAI Meng, DU Haifeng. Study on indices of network structure robustness and their application[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4):93-97. (in Chinese)
- 27 BENDORY T, DEKEL S, FEUER A. Robust recovery of stream of pulses using convex optimization [J]. Journal of Mathematical Analysis & Applications, 2016, 442(2):511-536.