doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.019

荒漠绿洲区潜在生态网络增边优化鲁棒性分析

裴燕如[1]　武英达[2]　于　强[1]　张启斌[1]　胡雅慧[1]　岳德鹏[1]
(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 中国消防救援学院, 北京 102200)

摘要: 以乌兰布和沙漠东北缘为研究区,基于复杂网络理论、景观生态学与 GIS 空间分析技术,综合考虑多种因子,构建研究区的潜在生态网络(以下简称网络),分析研究区网络鲁棒性,通过随机增边、度低者优先、节点介数低者优先与最大介数节点增加捷径等 4 种增边策略优化网络,得出网络在不同增边策略优化前后的连接鲁棒性与恢复鲁棒性。结果显示:优化前网络连接鲁棒性指数为 0.72,恶意攻击下去除 42 个节点时完全破坏网络,随机攻击下去除 469 个节点时可完全破坏网络;恢复鲁棒性可完全恢复节点数为随机攻击 75 个、恶意攻击 56 个;4 种增边策略中,按度增边优化网络连接鲁棒性较优化前提升最显著:连接鲁棒性初始指数升至 0.99,恶意攻击下去除 222 个节点时可完全破坏网络,随机攻击下去除 649 个节点时可完全破坏网络;4 种增边策略中,按度增边对网络节点恢复鲁棒性提升效果最显著,可恢复去除节点数提升至 122(随机攻击)与 235(恶意攻击),按介数增边对网络边恢复鲁棒性提升效果最显著,其可恢复去除节点数提升至 87(随机攻击)与 27(恶意攻击)。

关键词: 荒漠绿洲区; 生态网络; 鲁棒性; 增边优化
中图分类号: X171.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)02-0172-08　　**OSID**:

Robust Analysis of Potential Ecological Network Edge Enhancement in Desert Oasis Area

PEI Yanru[1]　WU Yingda[2]　YU Qiang[1]　ZHANG Qibin[1]　HU Yahui[1]　YUE Depeng[1]
(1. *Beijing Key Laboratory of Precision Forestry*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *China Fire and Rescue Institute*, *Beijing* 102200, *China*)

Abstract: Based on the northeastern margin of Ulan Buh Desert, based on complex network theory, landscape ecology and GIS spatial analysis technology, a comprehensive ecological network (hereinafter referred to as the network) was constructed by considering various factors, and the research area network was analyzed. The network was optimized by four kinds of edge-enhancing strategies, such as random, low priority, low node-first and maximum median nodes, and the connection robustness and recovery of the network before and after optimization of different edge-enhancing strategies were analyzed. The results showed that the robustness of network connection before optimization was 0.72, 42 nodes were removed under malicious attack and the network was completely destroyed. Totally 469 nodes were removed under random attack, which can completely destroy the network. Restoring robustness can completely restore the node. The number was 75 random attacks and 56 malicious attacks. Among the four edge-enhancing strategies, the robustness of network connection optimization by degree was more significant than that before optimization: the initial value of connection robustness was risen to 0.99, malicious removing 222 nodes under attack can completely destroy the network. Removing 649 nodes under random attack can completely destroy the network. Among the four edge-increasing strategies, the degree of robustness of network nodes can be maximized. The number of recovered nodes was increased to 122 (random attack) and 235 (malicious attack). The increase in the number of nodes was the most robust to network edge recovery. The number of recoverable nodes was increased to 87 (random attack) and 27 (malicious attack).

Key words: desert oasis area; ecological network; robustness; edge enhancement

收稿日期: 2019-07-05　修回日期: 2019-09-06
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLX201806)和中国博士后科学基金面上项目(2018M641218)
作者简介: 裴燕如(1995—),男,博士生,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail: peiyanru@bjfu.edu.cn
通信作者: 于强(1987—),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: yuqing@bjfu.edu.cn

0　引言

复杂网络是一种被广泛应用于多个领域的分析方法，如交通物流、信息通信等[1-3]。这种抽象研究方法将系统简化为节点与边的集合[4-8]，节点代表系统中的基本要素[9-12]，边代表各要素之间的关联以及相互作用，是当前系统研究的热点之一[13-14]。

生态网络是景观生态学中耦合景观结构、生态过程等的重要途经[15-16]，优化生态网络对于稳定生态系统、加强景观间关联与相互作用具有重要意义[17]。生态网络的构建及优化方法归为 2 种，一种是推导法，另一种是归纳法[18]。文献[19]将累积耗费距离模型应用于景观安全格局构建研究中，该模型已成为景观生态学界公认的生态网络构建及优化方法，此后，文献[20-22]基于最小累积耗费阻力模型构建并优化了生态网络。

生态网络是一个复杂系统，基于复杂网络理论分析生态网络是该领域前沿方向之一。文献[23-24]最早将复杂网络理论应用在生态网络中，其评价网络结构指标较少，网络优化多基于传统的景观格局理论，极少涉及复杂网络理论。文献[25-26]基于复杂网络理论系统分析荒漠绿洲区的生态网络，将复杂网络理论引入复杂生态网络研究，分析了网络的拓扑结构以及鲁棒性等特性。

本文以荒漠绿洲区为研究区，基于复杂网络理论构建潜在生态网络，并进行增边优化，对比优化前后生态网络抗打击能力与稳定性，即生态网络的鲁棒性，通过量化优化效果，探求新的生态网络优化方法。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区为乌兰布和沙漠与河套平原交界处（东经 106° 6′ 52″ ~ 107° 22′ 6″，北纬 39° 57′ 5″ ~ 40°56′25″），面积 5 923.90 km^2，研究区从东北向西南逐渐由河套平原向乌兰布和沙漠过渡（图 1）。

研究区属于温带大陆性季风气候，冬季时间长，气温低，春秋季节时间较短，夏季温度高，降水量少。区域平均年降水量约为 140 mm；研究区水资源总量比较丰富，分布极不均匀，东北部水资源较为充沛而西南部水资源较为匮乏；研究区地势平坦，高程呈现出西北低东南高的趋势。

1.2　数据来源与处理

遥感数据为研究区 2017 年 7 月（植被最佳时段）Landsat-8 OLI 数据，通过遥感数据提取反演相关土地利用数据，计算获取研究区的归一化植被指数（NDVI）与改进型水体指数（MNDWI）；通过地理空间数据云下载分辨率为 30 m 的 DEM（数字高程模型）数据获取研究区的地形因子，计算坡度；经过实地调查与遥感数据对比，研究区在 2007 年之后景观格局无明显变化，故采用中国林业科学院沙漠林业研究中心提供的 2007 年土地利用数据，结合实地调查经验进行手动修正，在此基础上提取研究区的居民密度、水网密度与路网密度；通过中国林业科学院沙漠林业研究中心提供的 2017 年地下水数据获取研究区地下水埋深分布。

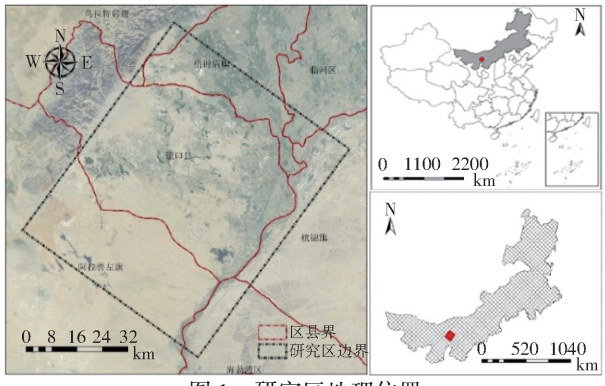

图 1　研究区地理位置

Fig. 1　Geographic location of study area

1.3　潜在生态网络提取

董雅文等[27]首次引入“生态用地”的概念，目前没有统一定义[28-29]。本文借鉴牛腾等[30]的研究，参照其潜在生态网络提取方法提取研究区的潜在生态网络（以下简称网络）。获取研究区土地利用数据，提取生态用地数据，通过斑块面积、平均 NDVI/MNDWI 比值及斑块形状指数筛选生态源地，这 3 项指标分布通过 ArcMap 软件、Zonal Statics 工具与 Fragstats 软件得出。综合评价研究区生态用地，获取其生态源地重要性评价，以此筛选生态源地。综合考虑地形因子、植被覆盖因子、水文因子、土地覆盖因子和密度因子，构建研究区的生态阻力面，基于累积耗费阻力模型提取研究区潜在生态网络（图 2）。

1.4　潜在生态网络优化

基于复杂网络增边优化策略及生态节点结构与功能协同性，利用 Matlab 软件模拟网络矩阵，通过算法模拟增边优化与鲁棒性检验，优化网络并分析其鲁棒性不同优化策略的效果。

基于生态源地评价指标评价生态斑块对应源地的生态重要性，设置薄弱生态节点生态重要性最小值。点权、介数、PageRank 值从各方面反映了潜在生态节点的结构重要性，基于上述 3 个指标综合评价网络结构重要性程度，具体算法为

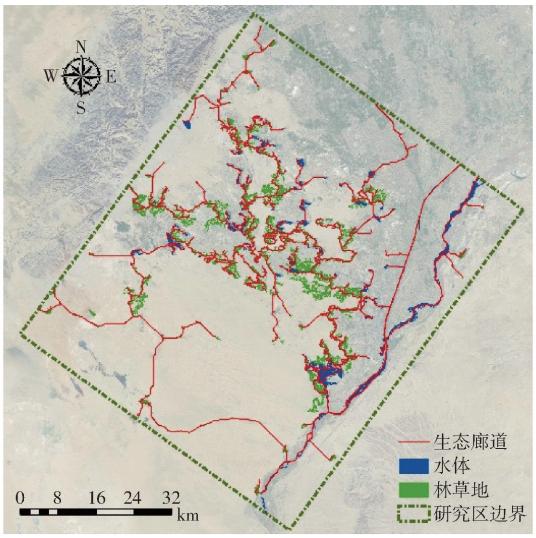

图 2 研究区潜在生态网络

Fig. 2 Potential ecological network in study area

$$Z_i = \left(\frac{S_i - \mathrm{Min}(S)}{\mathrm{Max}(S) - \mathrm{Min}(S)} + \frac{B_i - \mathrm{Max}(B)}{\mathrm{Max}(B) - \mathrm{Min}(B)} + \frac{P_i - \mathrm{Max}(P)}{\mathrm{Max}(P) - \mathrm{Min}(P)}\right) \Big/ 3 \tag{1}$$

式中 Z_i——网络某一生态节点的结构重要性指数

S_i——节点 i 的点权

B_i——节点 i 的介数

P_i——节点 i 的 PageRank 值

S——网络每一节点的点权形成的数列

B——网络每一节点的介数形成的数列

P——网络每一节点的 PageRank 值形成的数列

网络中某一潜在生态节点 i 的结构与功能协同性指数计算公式为

$$H_i = \frac{I_i}{Z_i} \tag{2}$$

式中 I_i——生态节点生态功能重要性指数

$H_i < 1$，节点 i 的拓扑结构重要性大于其生态功能重要性；$H_i > 1$，节点 i 的生态功能重要性大于其拓扑结构重要性；$H_i = 1$，节点 i 的结构与功能是协同的。

复杂网络的拓扑结构对网络的鲁棒性及传输性能具有重要影响，潜在生态网络作为复杂网络的一种，其拓扑结构同样影响着生态流动。复杂网络的拓扑结构优化策略包括增边策略、重连边策略及多层网络优化中的删边机制。潜在网络中的边实际为利用最小累积阻力模型识别出的最小耗费路径，是连接任意两个生态源地的生态廊道，删边即为廊道破坏，故删边机制不适用网络的优化。重连边策略在执行中同样需要先删边，再重连，不适用于网络的拓扑结构优化。增边策略是适合本研究的优化策略，其增边可通过修建引水渠、增加行道树等方式实现。

基于复杂网络理论的增边策略为：

(1)随机增边策略：在网络中两个随机不相连的节点之间增边。

(2)度低者优先策略：统计所有生态节点度值，按从小到大顺序排序，在度值最小且未相连的两个节点之间增边。

(3)节点介数低者优先策略：统计所有节点介数并按从小到大顺序排列，在介数最小且未相连的两个节点之间增边。

(4)最大介数节点增加捷径策略：选取网络介数最大的节点，将与之相连的边按介数从小到大排序，选择边介数最小且另一端节点未相连的两个节点增边。

鲁棒性指的是当系统发生了结构或者大小等变化后，其维持原有性能的能力。而潜在生态网络的鲁棒性可以认为是当网络的结构发生变化后，例如节点或边的去除，网络可维持其正常结构与功能的能力，这一能力被称为网络的连接鲁棒性。与连接鲁棒性相对应，网络的结构在遭到破坏后的恢复能力被称为恢复鲁棒性。

复杂网络连接鲁棒性指数计算公式为

$$R = \frac{C}{N - N_r} \tag{3}$$

式中 C——去除部分生态节点后网络的最大连通子图中节点的数量

N——网络节点总数

N_r——被去除的节点数目

网络的恢复鲁棒性可用边恢复鲁棒性和节点恢复鲁棒性来度量，它们分别代表了网络中生态廊道的恢复能力和生态节点的恢复能力。边恢复鲁棒性指数和节点恢复鲁棒性指数计算公式为

$$D = 1 - \frac{N_r - N_d}{N} \tag{4}$$

$$E = 1 - \frac{M_r - M_e}{M} \tag{5}$$

式中 N_d——网络在去除节点后恢复的节点数目

M_r——网络中去除的边数量

M_e——边的恢复数量

M——网络中的边总数

2 结果与分析

为评价本研究中随机增边策略、度低者优先策略、节点介数低者优先策略以及最大介数节点增加捷径策略对网络的优化效果，分析优化前后的网络在随机攻击和恶意攻击下的变化，对比 4 种增边策

略优化后生态网络的连接鲁棒性、节点恢复鲁棒性和边恢复鲁棒性遭受两种攻击后的变化。

2.1　优化前后连接鲁棒性分析

2.1.1　优化前连接鲁棒性

网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，其连接鲁棒性发生变化(图 3)。优化前的网络，网络连接鲁棒性指数的初始值为 0.72，其初始连接性较差，鲁棒性较低。在恶意攻击下，网络的鲁棒性急剧下降，当去除的节点数量为 39 时，网络的鲁棒性指数已低于 0.1，当去除数目达到 42 时，网络鲁棒性指数仅为 0.08，此时网络结构已经被完全破坏，生态网络的连接功能几乎完全丧失，如图 3 所示。网络是一个无标度网络，故随机攻击下网络的鲁棒性高于恶意攻击。在随机攻击下，网络的鲁棒性下降速率较恶意攻击更缓，在去除 469 个节点后，网络的鲁棒性指数低于 0.1，网络结构遭到彻底破坏，连接性基本丧失。

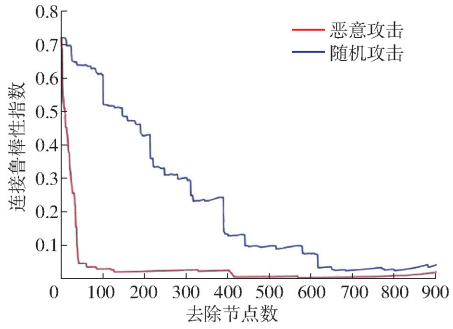

图 3　优化前潜在生态网络连接鲁棒性变化曲线

Fig. 3　Connection robustness change of potential ecological networks before optimization

2.1.2　优化后连接鲁棒性

随机增边后网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，其连接鲁棒性发生变化(图 4)，其连接鲁棒性指数的初始值为 0.72，与优化前网络相同。恶意攻击下，优化后网络的连接鲁棒性几乎与优化前一致，当去除的节点数量为 40(仅比优化前多 1 个)时，网络的鲁棒性指数已低于 0.1。随机攻击下，网络的鲁棒性与优化前的下降速率几乎一样，在去除 476 个节点后，网络的鲁棒性指数低于 0.1，较优化前无明显提升，故随机增边策略优化后，网络的连接鲁棒性提升极其微弱。

按度增边后网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，其连接鲁棒性发生变化(图 5)，连接鲁棒性指数初始值为 0.99，较优化前明显提高。恶意攻击下，优化后网络的连接鲁棒性下降速率较优化前明显降低，在去除 222 个节点后，网络的连接鲁棒性指数低于 0.1，网络连通能力彻底破坏，该去除节点数是优化前的 5.69 倍；随机攻击下，网络连接鲁棒性

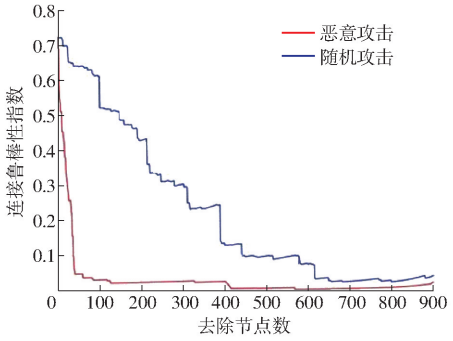

图 4　随机增边生态网络连接鲁棒性变化曲线

Fig. 4　Connection robustness change of random edge-enhanced ecological network

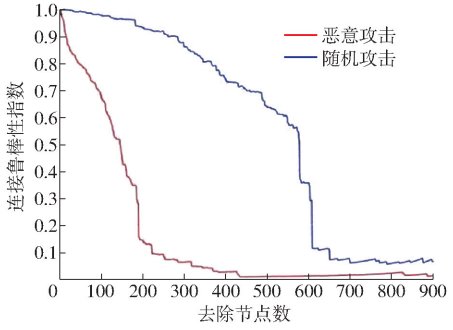

图 5　按度增边生态网络连接鲁棒性变化曲线

Fig. 5　Connection robustness change of ecological network with increasing degree of edge

的初始下降速率较低，去除节点数量达到 571 个时急剧下降，去除节点数为 649 个时，网络的连接鲁棒性指数降低到了 0.1 以下，该去除节点数明显高于优化前的 469 个；故按度增边后网络连接鲁棒性有了明显上升。

按介数增边后网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，其连接鲁棒性发生变化(图 6)，连接鲁棒性指数初始值为 0.93，较优化前明显提高。恶意攻击下，优化后网络连接鲁棒性下降，去除 42 个节点后，网络连接鲁棒性指数低于 0.1，网络连通能力彻底破坏，该去除节点数与优化前几乎一致。随机攻击下，网络连接鲁棒性下降速率较优化前慢，去除节点数为 623 个时，网络连接鲁棒性指数维持在 0.1 左右，直至去除节点数为 701 时，网络连接鲁棒性指数低于 0.1，去除节点数明显高于优化前。故按介数增边后网络连接鲁棒性恶意攻击下没有明显变化，随机攻击下有明显提高。

按最大介数节点增加捷径增边网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，其连接鲁棒性发生变化(图 7)，连接鲁棒性指数初始值为 0.73，较优化前无明显提升。恶意攻击下，网络连接鲁棒性下降，去除 44 个节点后，网络的连接鲁棒性指数低于 0.1，网络连通能力彻底破坏，较优化前无显著提升。随机攻击下，网络连接鲁棒性的下降速率较优化前明

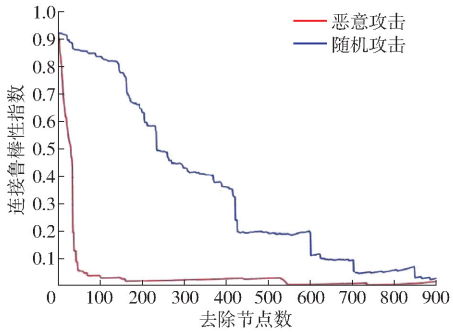

图 6 按介数增边生态网络连接鲁棒性变化曲线

Fig. 6 Connection robustness change of ecological network based on number of added edges

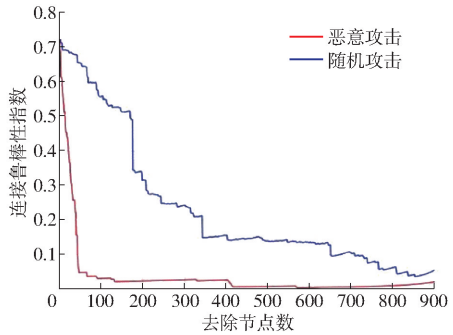

图 7 最大介数节点增加捷径增边生态网络连接鲁棒性变化曲线

Fig. 7 Connection robustness change of maximum median node to increase shortcut and increase edge ecological network

显降低,去除节点 172 个时急剧下降,去除节点数为 198 个时,网络连接鲁棒性下降速率放缓,直至去除节点数为 652 个时,网络连接鲁棒性指数维持在 0.1 左右。故优化后网络连接鲁棒性恶意攻击下无明显提升,随机攻击下有一定程度的提升。

2.1.3 优化后生态网络连接鲁棒性对比

对比 4 种不同增边策略优化后网络连接鲁棒性(图 4 ~ 7),按度增边与按介数增边后网络较优化前网络初始连接鲁棒性值均有较明显提升,按度增边策略优化后网络初始连接鲁棒性指数最高,为 0.99。恶意攻击与随机攻击下,随着去除节点数增大,不同增边策略优化网络连接鲁棒性以不同速率下降,其中随机增边策略优化网络连接鲁棒性下降最快,按度增边策略优化后网络连接鲁棒性下降速率最慢。

综上所述,在 4 种不同的复杂网络模型增边策略对网络进行优化后,按度增边策略在连接鲁棒性指数初始值与随机攻击、恶意攻击下鲁棒性下降速率上的优化最为明显,其对于网络在恶意攻击下的连接鲁棒性优化效果是 4 种策略中最好的,其对于网络在随机攻击下的连接鲁棒性优化效果仅次于按介数增边策略。整体来看,按度增边是 4 种增边策略中对网络连接鲁棒性优化最好的增边策略。

2.2 优化前后恢复鲁棒性分析

2.2.1 优化前恢复鲁棒性

对优化前生态网络进行随机攻击与恶意攻击去除节点,其恢复鲁棒性发生一系列变化(图 8)。在随机攻击与恶意攻击下,当去除节点的数目不大时(随机攻击 75 个,恶意攻击 56 个),优化前网络中被破坏的节点可完全恢复,随着网络节点的继续去除,网络中不可恢复的节点开始出现并逐渐增多,两种攻击下的节点恢复鲁棒性均呈下降趋势,其中随机攻击的下降曲线为明显的凸曲线,恶意攻击的曲线更趋于线性且整体斜率大于随机攻击,当去除节点数达到 900 个时,两种攻击下的节点恢复鲁棒性指数分别降低为 0.29 和 0.12;对于网络的边恢复鲁棒性,当去除节点数目小于 52 和 21 个时,随机攻击和恶意攻击下消失的边可完全恢复,伴随去除节点数目的增加,两种攻击下的边恢复鲁棒性持续降低,当节点数目达到 900 个时,两种攻击下的边恢复鲁棒性指数分别降低为 0.17 和 0.07。

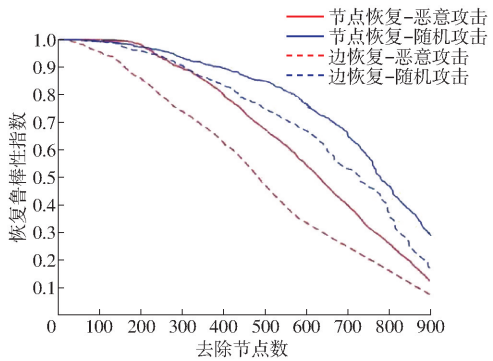

图 8 研究区生态网络恢复鲁棒性变化曲线

Fig. 8 Restoration robustness change of ecological network in study area

2.2.2 优化后恢复鲁棒性

随机增边网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点,恢复鲁棒性发生变化(图 9),随机攻击下去除节点数小于 74 个,恶意攻击下去除节点数小于 69 个时,可完全恢复被去除节点,较优化前恶意攻击下去除节点数有所提升。随着去除节点数提高,网络节点恢复鲁棒性下降,去除节点数为 900 个时,随机攻击和恶意攻击下恢复鲁棒性指数分别降低到 0.43 和 0.13,高于优化前的 0.29 和 0.12;网络边恢复鲁棒性在随机攻击下去除节点数小于 33,恶意攻击下去除节点数小于 3 时,可完全恢复被去除的边,相比优化前有较大程度下降,去除节点数为 900 个时,两种攻击下的边恢复鲁棒性指数分别为 0.14 与 0.05,较优化前网络边恢复鲁棒性有所下降。故在随机增边策略下,网络的节点恢复鲁棒性有所提升,其边恢复鲁棒性下降。

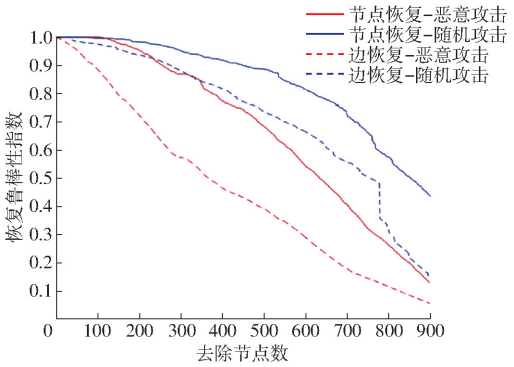

图 9　随机增边生态网络恢复鲁棒性变化曲线

Fig. 9　Restoration robustness change of random edge-enhancing ecological network

按度增边网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，其恢复鲁棒性发生变化（图 10），随机攻击下去除节点数小于 122，恶意攻击下去除节点数小于 235 时，可完全恢复被去除节点，较优化前网络有明显提升。去除节点数提高，网络的节点恢复鲁棒性下降速率较优化前更缓慢，当去除节点数为 900 时，随机攻击与恶意攻击下网络节点恢复鲁棒性指数分别下降至 0. 29 与 0. 14，较优化前恶意攻击下节点恢复鲁棒性有所提升；网络边恢复鲁棒性在随机攻击下去除节点数小于 56 个，恶意攻击下去除节点数小于 23 个时，可完全恢复被去除的边，随机攻击下较优化前略有提升，恶意攻击下较优化前提升微弱。去除节点数增大，优化后网络恢复鲁棒性下降速率较优化前更慢，去除节点数为 900 时，随机攻击与恶意攻击下网络边恢复鲁棒性指数分别下降至 0. 2 与 0. 07，较优化前随机攻击下边恢复鲁棒性有所上升，与优化前恶意攻击下的边恢复鲁棒性持平。故按度增边策略优化后的生态网络在节点恢复鲁棒性上有较明显提升，边恢复鲁棒性在随机攻击下的抵抗能力有所提升。

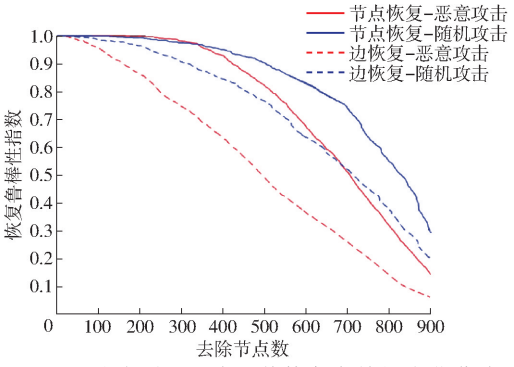

图 10　按度增边生态网络恢复鲁棒性变化曲线

Fig. 10　Restoration robustness change of ecological network with increasing degree of edge

按介数增边网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，恢复鲁棒性发生变化（图 11），随机攻击下去除节点数小于 128 个，恶意攻击下去除节点数小于 126 个时，可完全恢复被去除节点，较优化前有明显提升。去除节点数上升，网络节点恢复鲁棒性下降速率较优化前更慢。去除节点数为 900 时，网络节点恢复鲁棒性指数随机攻击与恶意攻击下分别降至 0. 29 与 0. 15，较优化前，恶意攻击下的节点恢复鲁棒性有所提升；网络边恢复鲁棒性随机攻击下去除节点数小于 87 个，恶意攻击下去除节点数小于 27 个时，可完全恢复被去除的边，较优化前有所提升。去除节点数上升，网络边恢复鲁棒性下降，去除节点数为 900 时，网络边恢复鲁棒性指数在随机攻击与恶意攻击下分别下降至 0. 19 与 0. 07，较优化前随机攻击有所上升，与优化前恶意攻击的恢复鲁棒性持平。故按介数增边策略优化网络，节点恢复鲁棒性有明显提升，边恢复鲁棒性上对于随机攻击的抵抗能力有所加强。

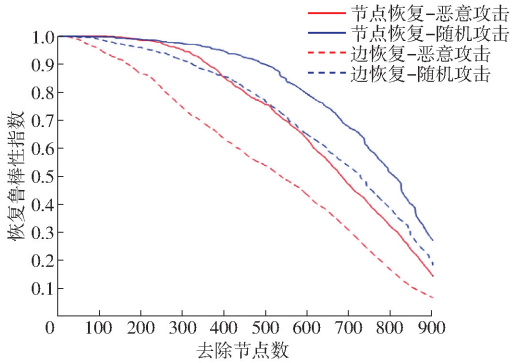

图 11　按介数增边生态网络恢复鲁棒性变化曲线

Fig. 11　Restoration robustness change of ecological network based on number of added edges

按最大介数节点增加捷径增边网络在随机攻击与恶意攻击下去除节点，其恢复鲁棒性发生变化（图 12），随机攻击下去除节点数小于 116 个，恶意攻击下去除节点数小于 124 个时，可完全被恢复被去除节点，去除节点数上升，网络节点恢复鲁棒性下降，去除节点数为 900 时，网络随机攻击下节点恢复鲁棒性指数降至 0. 27，恶意攻击下节点恢复鲁棒性

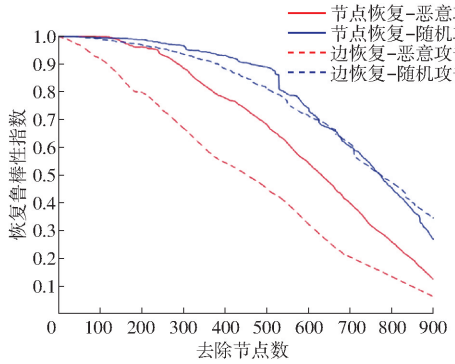

图 12　按最大介数节点增加捷径增边生态网络恢复鲁棒性变化曲线

Fig. 12　Restoration robustness change of shortcut-enhanced ecological network based on maximum median

指数降至0.12,较优化前随机攻击下节点恢复鲁棒性有所降低,恶意攻击下节点恢复鲁棒性持平。随机攻击下去除节点数小于89个,恶意攻击下去除节点个数小于4个时,可完全恢复被去除的边,较优化前随机攻击有所提升,恶意攻击明显下降。去除节点数增加,网络边恢复鲁棒性下降,去除节点数为900时,随机攻击下网络边恢复鲁棒性指数下降至0.35,恶意攻击下网络边恢复鲁棒性指数下降至0.07,较优化前随机攻击下边恢复鲁棒性有明显提升,恶意攻击下边恢复鲁棒性持平。

2.2.3 优化后生态网络恢复鲁棒性对比

对比不同策略优化后恢复鲁棒性(图9~12),节点恢复鲁棒性上,随机增边策略优化效果较好,按度增边在恶意攻击下优化效果最好;边恢复鲁棒性上,随机增边策略优化网络可恢复性下降,按度增边对网络的可恢复性提升较小,按介数增边对网络的可恢复性有较大提升,网络恶意攻击下的可恢复性会减小。随着去除节点数增加,网络恢复鲁棒性逐渐下降,按度增边与按介数增边两种策略优化网络恢复鲁棒性下降速率较慢,按度增边策略对节点恢复鲁棒性优化较好,按介数增边对边恢复鲁棒性优化较好。去除节点数为900时,随机攻击下,随机增边节点恢复鲁棒性指数最高,最大介数节点增加捷径有所降低;恶意攻击下,按介数增边与按度增边有较小程度提升;边恢复鲁棒性在随机攻击下,随机增边网络边恢复鲁棒性下降,最大介数节点增加捷径增边网络边恢复鲁棒性指数提升最大;恶意攻击下,随机增边后边恢复鲁棒性指数均有所下降,其他策略均无较明显提升。

综上所述,4种增边策略优化网络,按介数增边与按度增边网络恢复鲁棒性综合优化效果最为稳定,随机增边与最大介数节点增加捷径策略存在负优化效果;按度增边与按介数增边对网络恢复鲁棒性优化各有侧重:按度增边网络节点恢复鲁棒性提升较大;按介数增边网络边恢复鲁棒性提升较大。

3 结论

(1)基于复杂网络模型增边优化策略对潜在生态网络进行增边优化,通过随机攻击与恶意攻击检验网络的连接鲁棒性与恢复鲁棒性,并对优化前后不同增边策略的优化效果进行了对比。

(2)按度增边优化网络连接鲁棒性较优化前提升效果最显著,按度增边优化对研究区生态网络节点恢复鲁棒性提升效果最显著,按介数增边优化对研究区生态网络边恢复鲁棒性提升效果最显著。

(3)去除节点数为900个时,随机攻击下,随机增边与最大介数节点增加捷径策略分别对节点恢复鲁棒性与边恢复鲁棒性有较大提升;恶意攻击下,4种增边策略对于恶意攻击下网络恢复鲁棒性均无较大提升。

参 考 文 献

[1] 叶立国. 国内外系统科学文献综述[J]. 太原师范学院学报(社会科学版),2011,10(4):25-32.
YE Liguo. Summary of literature on systems science in China and abroad[J]. Journal of Taiyuan Normal University(Social Science Edition),2011,10(4):25-32. (in Chinese)

[2] 周涛,柏文洁,汪秉宏,等. 复杂网络研究概述[J]. 物理,2005,34(1):31-36.
ZHOU Tao, BAI Wenjie, WANG Binghong, et al. A brief review of complex networks[J]. Physics,2005,34(1):31-36. (in Chinese)

[3] MINATI G, PESSA E, ABRAM M. Systemics of emergence: research and development[M]. Boston:Springer US, 2006.

[4] LUTTERER W. Systemics: the social aspects of cybernetics[J]. Kybernetes, 2005, 34(3-4):497-507.

[5] SHENGYUE F, LIHUA Z. Desertification control in China: possible solutions[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2001, 30(6):384-385.

[6] SHUBIN L, QINGYI Z, QIAONING H, et al. Resource utilization of microalgae from biological soil crusts: biodiesel production associated with desertification control[J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 116:189-197.

[7] 刘海燕,李琳,李雪蓉.《系统工程理论与实践》1981—2015年文献计量分析[J]. 系统工程理论与实践,2017,37(3):805-816.
LIU Haiyan, LI Lin, LI Xuerong. Scientometric analysis of Systems Engineering—Theory & Practice from 1981 to 2015[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2017,37(3):805-816. (in Chinese)

[8] 苗东升. 论系统思维(六):重在把握系统的整体涌现性[J]. 系统科学学报,2006,14(1):1-5,81.
MIAO Dongsheng. Onsystematic thoughts (6): to focus the attention on the emergent propertes of the whole[J]. Chinese Journal of Systems Science,2006,14(1):1-5,81. (in Chinese)

[9] 魏宏森. 复杂性研究与系统思维方式[J]. 系统辩证学学报,2003,11(1):7-12.
WEI Hongsen. Complexity research and systematic thinking approach[J]. Chinese Journal of Systems Science,2003,11(1):7-12. (in Chinese)

[10] 李曙华. 生成论与"还元论"——生成科学的自然观与方法论原则[J]. 河池学院学报,2008,28(1):1-5.
LI Shuhua. "Theory of emergence" and "theory of re-arche"—the view of nature and principle of methodology for the emerging science[J]. Journal of Hechi University,2008,28(1):1-5. (in Chinese)

[11] 黄欣荣. 复杂性科学的方法论研究[D]. 北京:清华大学,2005.
HUANG Xinrong. Studies on the methodology of complexity sciences[D]. Beijing: Tsinghua University,2005. (in Chinese)

[12] 郭元林. 复杂性科学知识论[D]. 北京:中国社会科学院,2003.
GUO Yuanlin. The theory of knowledge of the sciences of complexity[D]. Beijing: Chinese Academy of Social Sciences, 2003. (in Chinese)
[13] 王博. 网络组织治理关键要素及其关联机理研究[D]. 太原:山西财经大学,2013.
[14] 刘涛,陈忠,陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程,2005,23(6):1-7.
LIU Tao, CHEN Zhong, CHEN Xiaorong. A brief review of complex networks and its application[J]. Systems Engineering, 2005,23(6):1-7. (in Chinese)
[15] 李中才,徐俊艳,吴昌友,等. 生态网络分析方法研究综述[J]. 生态学报,2011,31(18):5396-5405.
LI Zhongcai, XU Junyan, WU Changyou, et al. A review of studies using ecological network analysis[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(18):5396-5405. (in Chinese)
[16] 傅强,宋军,毛锋,等. 青岛市湿地生态网络评价与构建[J]. 生态学报,2012,32(12):3670-3680.
FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al. Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(12):3670-3680. (in Chinese)
[17] 刘世梁,侯笑云,尹艺洁,等. 景观生态网络研究进展[J]. 生态学报,2017,37(12):3947-3956.
LIU Shiliang, HOU Xiaoyun, YIN Yijie, et al. Research progress on landscape ecological networks[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):3947-3956. (in Chinese)
[18] AHERN J. Greenways as ecological networks in rural areas[M]//COOK E, VAN LIER H N. Landscape planning & ecological networks. Amsterdam:Elsevier Science Publisher, 1994:159-177.
[19] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报,1999,19(1):10-17.
YU Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica,1999,19(1):10-17. (in Chinese)
[20] 于强,岳德鹏,张启斌,等. 磴口县景观格局演变特征及生态网络构建[J]. 中国沙漠,2017,37(3):601-609.
YU Qiang, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. The evolution of landscape pattern and the construction of ecological infrastructure network in Dengkou[J]. Journal of Desert Research,2017,37(3):601-609. (in Chinese)
[21] 吴晶晶,栗云召,高猛,等. 四种河流水系阻力下的黄河三角洲湿地生态网络构建及对比研究[J]. 湿地科学,2018,16(4):493-501.
WU Jingjing, LI Yunzhao, GAO Meng, et al. Construction of wetland ecological networks under four kinds of resistance of rivers in the Yellow River Delta and their comparison[J]. Wetland Science,2018,16(4):493-501. (in Chinese)
[22] 吴未,张敏,许丽萍,等. 基于不同网络构建方法的生境网络优化研究——以苏锡常地区白鹭为例[J]. 生态学报,2016,36(3):844-853.
WU Wei, ZHANG Min, XU Liping, et al. Habitat network optimization based on different network building methods: a case study of *Egretta garzetta* in the Su-Xi-Chang area[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(3):844-853. (in Chinese)
[23] PASCUAL-HORTAL L, SAURA S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the priorization of habitat patches and corridors for conservation[J]. Landscape Ecology, 2006, 21(7):959-967.
[24] 贾振毅,陈春娣,童笑笑,等. 三峡沿库城镇生态网络构建与优化——以重庆开州新城为例[J]. 生态学杂志,2017,36(3):782-791.
JIA Zhenyi, CHEN Chundi, TONG Xiaoxiao, et al. Developing and optimizing ecological networks for the towns along the Three Gorges Reservoir: a case of Kaizhou New Town, Chongqing[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(3):782-791. (in Chinese)
[25] YU Q, YUE 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.
[26] 于强,杨斓,岳德鹏,等. 基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):214-224.
YU Qiang, YANG Lan, YUE Depeng, et al. Investgation on complex spatial ecological network structure based on complex network analysis method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):214-224. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.026. (in Chinese)
[27] 董雅文,赵荫薇. 城市现代化发展的生态防护研究——以南京市为例[J]. 城市环境与城市生态,1996,9(1):20-23.
DONG Yawen,ZHAO Yinwei. Study on the ecological protection of urban modernization development—taking Nanjing as an example[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 1996,9(1):20-23. (in Chinese)
[28] 刘建华,王戈,杨斓,等. 包头市草原景观斑块耦合网络结构特征研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):196-203.
LIU Jianhua, WANG Ge, YANG Lan, et al. Structural characteristics of coupling network of grassland landscape patches in Baotou City[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):196-203. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190321&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.021. (in Chinese)
[29] 王甫园,王开泳,陈田,等. 城市生态空间研究进展与展望[J]. 地理科学展,2017,36(2):207-218.
WANG Fuyuan, WANG Kaiyong, CHEN Tian, et al. Progress and prospect of research on urban ecological space[J]. Progress in Geography,2017,36(2):207-218. (in Chinese)
[30] 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/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):166-175.
NIU Teng, YUE Depeng, ZHANG Qibin, et al. Study on the spatial structure and characteristics of potential ecological networks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):166-175. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190819&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.019. (in Chinese)