

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.016

基于复杂网络理论的西藏巴宜区森林景观空间结构研究

卢杰^{1,2} 王戈³ 马骏³ 于强³ 高郊^{1,2} 牛腾³

(1. 西藏农牧学院高原生态研究所, 林芝 860000; 2. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 林芝 860000;
3. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 西藏巴宜区降水量丰富,但地质灾害频发,森林生态系统的水源涵养功能取决于森林景观空间结构的优劣,这对于区域生态稳定至关重要。以西藏巴宜区为研究区,基于复杂网络理论和景观生态学分析方法识别并构建区域森林景观空间网络,并运用复杂网络特征指标及鲁棒性分析方法分析该森林景观空间网络的拓扑结构特征及抗破坏能力。结果表明:西藏巴宜区的森林景观空间网络度分布呈现幂律分布,具有无标度性特征,该网络具有非均匀特性,网络结构稳定性较差,且随机攻击下的边与节点恢复鲁棒性优于恶意攻击下的恢复鲁棒性。

关键词: 西藏巴宜区; 最小累积阻力模型; 森林生态网络; 复杂网络分析方法; 结构鲁棒性

中图分类号: P9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0152-07 OSID: 

Forest Ecological Network Construction and Structure Evaluation Based on Complex Network Theory in Bayi District of Tibet

LU Jie^{1,2} WANG Ge³ MA Jun³ YU Qiang³ GAO Tan^{1,2} NIU Teng³

(1. *Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China*
2. *Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau (Tibet Agriculture & Animal Husbandry University), Ministry of Education, Nyingchi 860000, China*
3. *Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*)

Abstract: The Bayi District of Tibet is rich in rainfall and frequent geological disasters. The water conservation function of the forest ecosystem is vital to regional ecological stability. The stable performance of its functions depends on the spatial structure of the forest landscape. Therefore, the forest landscape should be studied accurately. The characteristics of the spatial structure are of great significance to the subsequent optimization of the layout. Taking Bayi District of Tibet as the research area, based on complex network theory and landscape ecology analysis methods, the forest ecological corridor was extracted through the least cumulative resistance model, and then the fragile ecological nodes on the forest ecological corridor were identified. It constituted a forest ecological network intertwined with “point – line – surface”. And the complex network static characteristic index and robustness analysis method were used to analyze the topological structure characteristics and anti-destructive ability of the forest landscape spatial network. The results showed that the degree distribution of the forest landscape spatial network in Bayi District of Tibet presented a power-law distribution and had the characteristics of non-scaling. The network had non-uniform characteristics, the network structure was less stable, and under random attacks, the edge and node recovery robustness was better than malicious attacks.

Key words: Bayi District of Tibet; minimum cumulative resistance model; forest ecological network; complex network analysis method; structural robustness

0 引言

西藏巴宜区森林资源极为丰富,森林覆盖率达

到46%,是中国第三大林区,拥有藏西80%的森林蓄积量,丰富的森林资源构成了西藏巴宜区独有的森林景观。西藏巴宜区雨量丰富,森林景观作为重

收稿日期: 2020-11-27 修回日期: 2020-12-28
基金项目: 西藏高原森林生态教育部重点实验室开放课题项目(XZA-JYBSYS-2019-01)
作者简介: 卢杰(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事植物保护和植物生态研究,E-mail: tibetlj@163.com
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: yuqiang@bjfu.edu.cn

要的水源涵养系统,其削洪补枯能力以及防止水土流失、降低山体滑坡风险的作用日益凸显。在较大的空间尺度上,森林景观的空间结构即空间分布格局决定其生态功能能否正常发挥。对区域森林景观结构进行准确评估是目前的研究热点与重点,目前,许多学者利用 GIS 空间分析方法、地学信息图谱法、景观生态分析法和空间格局分析法等对区域植被格局、景观生态格局和森林景观格局等进行了研究,但研究方法主要侧重于空间景观结构的分析,对景观斑块之间的关系缺乏定量化的表达,尤其是森林景观斑块之间的关联^[1-3]。虽有研究者利用耦合网络模型研究森林小班之间的联系,但利用相邻小班建立联系主观性过强,并没有从数据本身反映相邻小班是否有信息的传递和能量的交换^[4]。复杂网络可以将复杂系统简化成节点和边的集合,节点代表复杂系统的基本单元,边代表单元之间的关系。利用复杂网络理论的分析方法可以很好地反映空间节点与空间节点之间的联系,可以定量描述区域森林景观斑块之间的内在联系^[5-7]。

本文以西藏巴宜区为研究区,针对该地区多发的水土流失和滑坡泥石流现象,从森林景观网络的连通性和抗破坏能力角度出发,利用复杂网络理论的分析方法,在区域整体尺度研究其森林景观空间网络的复杂系统特性,旨在反映西藏巴宜区森林景观空间的网络特性,为后续的森林景观结构空间格局研究提供指导。

1 研究区概况

巴宜区位于西藏东南部(35°2′~95°17′E, 29°21′~30°15′N),行政区域总面积为 1.02 × 10⁴ km²。南邻米林县,西部和西北部与工布江达县相连,东北部与波密县接壤,东临墨脱县(图 1)。全区平均海拔 3 300 m,巴宜区南部地区属于冈底斯山脉的余脉,北部属于念青唐古拉山支脉的高山地段。巴宜区的气候类型为温带湿润季风气候,雨水充沛,日照时间较长。年平均温差差异较小,但是日均温

差差异则较大。雅鲁藏布江自西向东流经林芝市东南部,雅鲁藏布江支流帕隆藏布江和尼泽河由西北往东南汇入雅鲁藏布江。巴宜区森林植被受海拔和气候的影响,在分布上呈明显的规律性变化特点。

2 数据及研究方法

2.1 数据来源与处理

选取巴宜区夏季且少云的 Landsat OLI 影像(2018 年)为研究素材,空间分辨率 30 m 的地面高程数据(DEM)作为辅助数据。利用 ENVI 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,提取巴宜区的景观类型信息,使用 ArcMap 软件进行破碎斑块处理,运用叠加分析工具进行空间数据分析,最终在 Arc Info 环境下完成拓扑和改错处理,针对影像分类精度进行实地验证,分类误差在 3 个像元以内。

2.2 森林景观空间网络识别与构建

区域内森林景观斑块之间存在物质和能量的流动,即各个森林景观斑块是相互联系的,其联系的紧密程度决定了区域森林景观系统发挥生态系统服务功能^[8]。因此通过基于复杂网络理论和生态阻力面模型识别西藏巴宜区森林景观斑块之间的联系,进而构建西藏巴宜区森林景观空间网络。

2.2.1 生态阻力面模型

生态阻力面模型能够从宏观上反映生态过程的趋势,可以从地形坡度、植被覆盖、水文分布、土地覆盖类型 4 方面构建森林景观生态阻力评价体系。坡度越平缓、植被覆盖度越高、距水体越近生态能量流动越畅通,农田与建筑建设用地对生态能量流动具有刚性阻碍^[9]。按照表 1(表中 NDVI 为归一化植被指数,MNDWI 为归一化差异水体指数)将各项生态阻力划分为 5 个等级,分别用 1、3、5、7、9 来表示阻力值,利用 ArcGIS 软件制作各个因子的评价结果,进行叠加栅格计算得到生态阻力基面的综合评价结果,利用 ArcGIS 软件中 cost-distance 模块完成累积阻力面计算。

2.2.2 生态源地识别

生态源地一般是指物种栖息地,是生态安全格局中的核心区域,也是各种生态流的源头,它的提取是生态安全格局构建的第一步^[10]。通过 ArcMap 软件统计森林景观斑块面积,利用 Zonal Statics 工具进行平均 NDVI/MNDWI 提取以及采用 Fragstats 软件计算斑块的形状指数,通过熵值法确定以上 4 个要素的权重,确定计算各景观斑块重要程度,将重要性统计结果中前 15% 的森林景观斑块识别为生态源地。

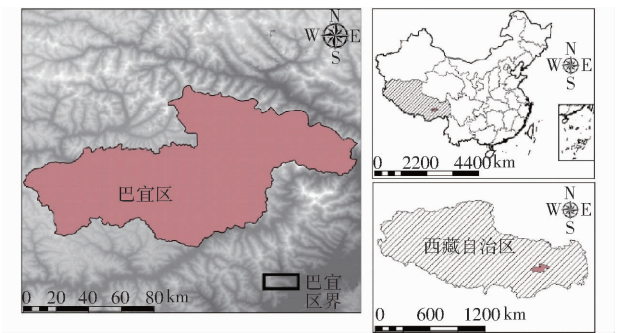


图 1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area

表 1 阻力评价体系
Tab. 1 Resistance evaluation system

一级因子	二级因子	等级	阻力值
地形坡度	DEM	0 ~ 2 500 m	1
		2 500 ~ 3 500 m	3
		3 500 ~ 4 500 m	5
		4 500 ~ 5 500 m	7
		> 5 500 m	9
植被覆盖	NDVI	< 0	9
		0 ~ 0. 15	7
		0. 15 ~ 0. 30	5
		0. 30 ~ 0. 45	3
		> 0. 45	1
水文分布	MNDWI	- 0. 56 ~ - 0. 2	9
		- 0. 2 ~ 0	7
		0 ~ 0. 25	5
		0. 25 ~ 0. 50	3
		0. 50 ~ 0. 79	1
土地覆盖	土地利用类型	乔木林地	1
		湿地、水体	3
		灌木	5
		草地	7
		建设用地、农田、裸土地、冰	9

斑块形状指数用于衡量斑块形状的复杂程度^[11]。将相同面积的规则图形(圆形或正方形)作为参照物,通过计算斑块形状与参照之间的差异程度来判断斑块形状的复杂程度。一般来说,景观斑块形状越复杂,其物质能量信息交换等生态过程越频繁^[12]。斑块形状指数计算公式为

$$S_{\text{shape}} = \frac{0.25P}{\sqrt{A}}$$

(1)

式中 S_{shape} ——斑块形状指数
 P ——斑块周长 A ——斑块面积

2.2.3 森林景观生态廊道识别

森林景观生态廊道是森林景观斑块之间的物质传递和能量流动的通道,利用最小累积阻力模型提取西藏巴宜区森林景观生态廊道^[13-14]。森林景观生态廊道具有提高生境连接度、保护生物多样性、防止水土流失等作用。根据西藏巴宜区森林景观生态阻力评价体系,构建阻力面,提取最小阻力路径,生成潜在生态廊道^[15-16]。模型一般公式为

$$V_{MCR} = f_{\min} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (D_{ij} R_i)$$

(2)

式中 V_{MCR} ——最小累积阻力值
 $f_{\min}$ ——土地单元的累积阻力最小值
 n ——生态源地数目
 m ——土地单元数目
 D_{ij} ——从生态源地 j 到土地单元 i 的空间距离
 R_i ——土地单元 i 对物种运动的阻力

2.2.4 生态脆弱节点识别

生态节点是相邻源地间连通的重要支撑点,是生态廊道中对于物质、能量流动和促进生态功能的健康循环具有重要作用的景观组分^[17-18]。脆弱节点是生态廊道累积阻力最大的区域,也就是最薄弱的区域,其生态功能相对较弱,但对于保持景观格局的连通度至关重要。本文将生态累积阻力面作为基础地形数据,利用 ArcGIS 水文分析工具提取累积生态阻力栅格面的山脊线,累积生态阻力值最大的点就位于这条山脊线上,山脊线和生态廊道的交点就是生态廊道最薄弱的区域,即为生态脆弱节点^[19]。

2.2.5 空间网络构建

基于复杂网络理论,将西藏巴宜区森林景观生态源地和生态脆弱节点作为森林景观空间的节点,将森林景观生态廊道作为森林景观空间的连接边,构成了“点-线-面”交织的森林生态网络。

2.3 森林景观空间网络特性分析

2.3.1 度及度分布

生态节点度是与该生态节点相连廊道数量,节点度越大表明该生态节点重要性越高。网络平均度是网络中每个生态节点度平均值^[20]。

在复杂生态空间网络中,节点的度在统计学上服从一定分布函数,生态节点度分布 $p(k)$ 代表在一个生态网络中,度为 k 的节点占比,度分布函数 $p(k)$ 是节点度为 k 的节点被抽到的概率。

2.3.2 聚类系数

聚类系数 C_i 被定义为节点 v_i 的 k_i 个邻居节点之间实际存在边数 E_i 和总可能边数 $C_{k_i}^{(2)}$ 之间比值^[21]。平均聚类系数 C 为所有生态节点聚类系数平均值。

复杂生态网络平均聚类系数为 $0 \sim 1$, $C = 0$ 表明所有节点没有任何边连接; $C = 1$ 表明网络中任意两节点均直接相连; C 越大,表明生态网络中节点联系越紧密,聚集系数越大的网络小世界特性越强,反之越弱^[22]。

2.3.3 空间网络生态节点介数

网络生态节点介数是生态网络中任意两个生态节点之间最短生态廊道路径所通过的生态节点数量,生态节点介数可以反映生态网络中生态节点的重要性^[23]。生态节点介数 B_i 计算公式为

$$B_i = \sum_{\substack{1 \leq j \leq l \leq N \\ j \neq i \neq l}} n_{jl}(i) / n_{jl}$$

(3)

式中 n_{jl} ——生态节点 v_j 与 v_i 之间的最短生态廊道数量
 $n_{jl}(i)$ ——生态节点 v_j 与 v_i 之间最短生态廊道路径经过生态节点 v_i 数量
 N ——节点个数

2.3.4 空间网络结构鲁棒性

森林景观空间网络是维持区域生态环境稳定的重要保障,完整的空间结构能保证其发挥正常功能^[24]。森林景观空间网络结构鲁棒性是用来衡量森林景观空间网络在遭受到外界干扰破坏时,维持其正常结构和功能的能力,即潜在森林景观空间网络抵抗能力,与之相对应的就是潜在森林景观空间网络恢复能力。在其空间结构遭到破坏后,潜在森林景观空间网络能够恢复的能力即鲁棒性。结构鲁棒性指数公式为

$$R = c / (N - N_r) \tag{4}$$

式中 N_r ——从森林景观空间网络中去除的节点个数
 c ——当节点被去除后森林景观空间网络最大连通子网络中的生态节点数量

针对生态节点和生态廊道,恢复鲁棒性指数计算公式分别为

$$D = 1 - (N_r - N_d) / N \tag{5}$$

$$E = 1 - (M_r - M_e) / M \tag{6}$$

式中 D ——节点恢复鲁棒性指数
 N_d ——通过某种策略恢复节点个数
 E ——边恢复鲁棒性指数
 M_r ——从网络中去除的边个数
 M_e ——通过某种策略恢复的边数量
 M ——初始网络中边的数量

通过构建实际森林景观空间网络表示节点关系的邻接矩阵来评价森林景观空间网络的结构鲁棒性,制作无向无权网络拓扑图,并对网络进行随机攻击和恶意攻击^[25]。随机攻击即从网络中随机去除若干个节点,恶意攻击即从潜在森林景观空间网络中,同时去除度最大的 N_r 个节点及其对应边。

3 结果与分析

3.1 森林景观空间网络构建

3.1.1 生态源地提取

基于 2018 年遥感影像分类结果共提取出森林景观斑块共 453 个,面积为 3 085 km²,并根据熵值法计算得到影响森林生态源地的斑块面积指数、斑块形状指数和 NDVI 的熵值权重分别为 0.5、0.3 和 0.2。依据熵值法统计各景观斑块重要程度,确定出巴宜区森林生态源地 68 个(图 2),巴宜区森林生态源地分布很不平衡,主要分布在尼洋河附近以及东北方向的山谷,海拔为 1 000 ~ 2 600 m。

3.1.2 累积阻力面构建

基于研究区基本情况,选取高程、土地利用类型、归一化差异水体指数(MNDWI)、归一化植被指

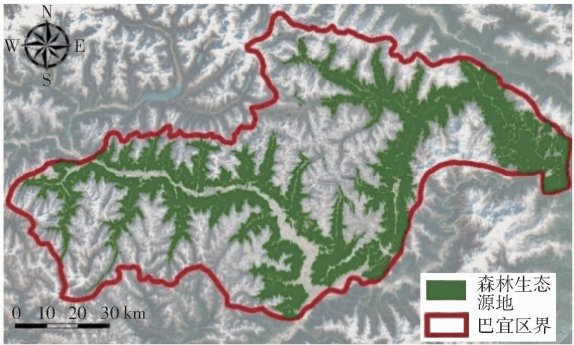


图2 森林生态源地分布

Fig. 2 Forest ecological source distribution

数(NDVI)来构建巴宜区生态阻力评价体系(图 3)。巴宜区高程为 1 032 ~ 7 326 m,中部和南部海拔较高,东部海拔较低。巴宜区森林景观主要分布在河流两岸,尼洋河横穿巴宜区在东南部汇入雅鲁藏布江,未利用地主要为常年积雪的高海拔山地,积雪融化导致在未利用地周围形成大量水体景观。研究区内高山积雪区 MNDWI 最高,尼洋河附近 MNDWI 较高,草地景观 MNDWI 较低。巴宜区内森林景观 NDVI 较高,水体景观与积雪区 NDVI 最低。

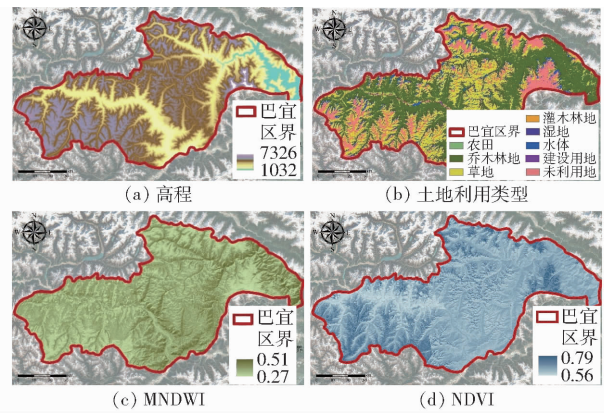


图3 生态阻力因子分布图

Fig. 3 Distribution diagrams of ecological resistance factors

考虑 4 方面阻力因子进行森林生态阻力面模拟,并叠加生成巴宜区生态阻力面(图 4),森林景观生态阻力值较低,东部生态阻力值最低,为 10,积雪区生态阻力值较高,最高为 32。基于已识别的森林生态源地斑块和生态阻力面,运用 cost - distance 模型进行生态能量最小累积阻力模拟。

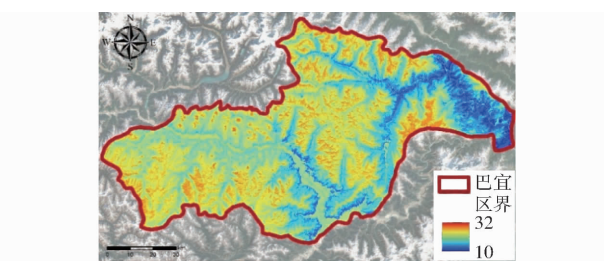


图4 生态阻力值分布图

Fig. 4 Distribution diagram of ecological resistance value

3.1.3 生态廊道提取

基于最小累积阻力面与森林生态源地,运用 cost - path 模型模拟生态能量从源地出发,克服生态阻力到达另一个生态源地的最大概率流动路径。研究区内共提取 66 条森林生态廊道(图 5),在南部与东部源地斑块距离较近、生态廊道较短,中部与西南部廊道较长。

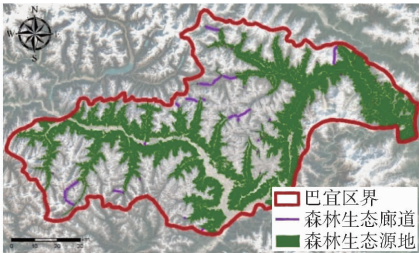


图 5 潜在生态廊道分布图

Fig. 5 Distribution map of potential ecological corridors

3.1.4 生态节点提取

生态廊道与最小累积阻力面的阻力值山脊线的交点即确定为生态节点,是生态网络的最薄弱、最至关重要的点。研究区内共提取出潜在生态节点 22 个(图 6),主要分布在研究区中部与东南部附近。

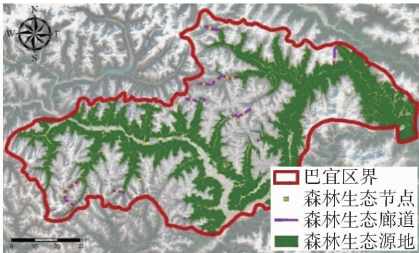


图 6 生态节点分布图

Fig. 6 Distribution map of ecological nodes

3.2 森林生态网络结构评价

3.2.1 度及度分布

由图 7 可知,该森林生态网络的度为 1 的节点最多,有 38 个,即该 38 个森林生态源地只与一条生态廊道连接。度最大值为 19,仅有一个森林生态源地。对森林生态网络度分布散点图进行曲线拟合,拟合结果表明幂律分布特征更为明显,Poisson 分布特征不明显,表明该森林生态网络无标度性特征要强于均匀性特征。

3.2.2 森林生态网络节点重要性分析

由图 8 可知,该森林生态网络中大部分森林生态源地的介数较小,有 38 个森林生态源地介数为 0,介数为 0 的森林生态源地度为 1,当其中任意一个遭到破坏时不会对整个森林生态网络的连通性造成影响。介数在 0 ~ 400 之间的森林生态源地有 29 个,介数大于 400 的森林生态源地有 1 个,其度为

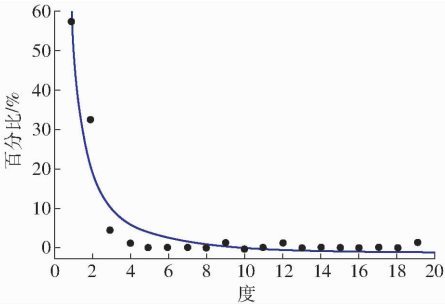


图 7 度分布

Fig. 7 Degree distribution

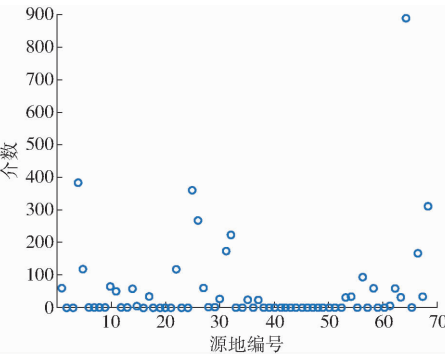


图 8 介数分布

Fig. 8 Distribution of betweenness

19,在整个森林生态网络中重要性最高。

3.2.3 聚类系数

由图 9 可知,该森林生态网络聚类系数为 0 的森林生态源地斑块占 95%,达到 65 个,这些森林生态源地与其他森林生态源地不具有集群特点。该网络中聚类系数最大值为 0.35,具有集群特点,表明该网络具有非均匀特性,网络结构稳定性较差。

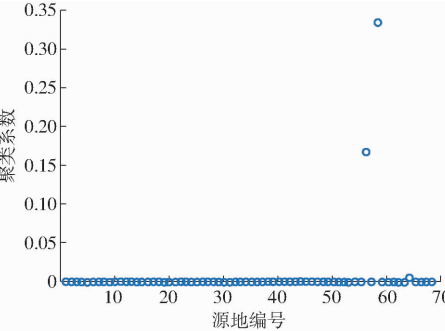


图 9 聚类系数分布

Fig. 9 Distribution of clustering coefficients

3.2.4 森林生态网络结构鲁棒性分析

恶意攻击和随机攻击下的边恢复鲁棒性均呈现下降趋势(图 10),随机攻击下,当去除的边小于 18 时,其网络结构能够恢复。而随机攻击下随着边去除数目的增加,边恢复鲁棒性的下降呈现增加的趋势。在恶意破坏下,当去除的边小于 3 时,网络完全可以恢复,对森林生态网络边进行恶意攻击对其网络结构的破坏非常明显。

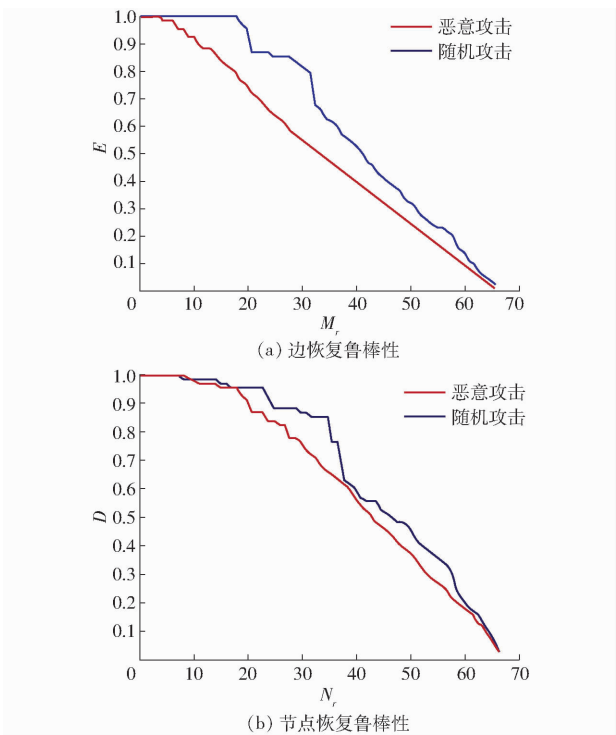


图 10 恢复鲁棒性

Fig. 10 Restores robustness

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 58 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 60 个节点后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。

4 结论

(1) 基于西藏巴宜区具体情况,选取斑块面积指数、斑块形状指数、NDVI 和 MNDWI 4 方面指标,运用熵值法共筛出 68 个森林生态斑块作为生态源地。

(2) 选取高程、NDVI、MNDWI 与土地利用类型作为阻力因子进行空间叠加分析,基于最小累积阻力模型提取 66 条森林生态廊道,识别森林生态廊道上脆弱生态节点 22 个,在县域范围内构成了“点—线—面”交织的森林生态网络。

(3) 基于复杂网络原理构建西藏巴宜区森林生态复杂网络,对森林生态网络结构进行评价。结果表明,该地区森林生态网络度分布呈现幂律分布,具有无标度性特征;该网络具有非均匀特性,网络结构稳定性较差;在随机攻击下,边与节点的恢复鲁棒性优于恶意攻击下的恢复鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 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. Establishment of ecological network based on MSPA and minimum path method in the central and western cities of Bazhong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6425–6434. (in Chinese)
- [2] 张远景,俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化[J]. 生态学报,2016, 36(21): 6969–6984.
ZHANG Yuanjing, YU Binyang. Urban ecological network space evaluation and its pattern optimization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): 6969–6984. (in Chinese)
- [3] FATH B D, SCHARLER U M, ULANOWICZ R E, et al. Ecological network analysis; network construction[J]. Ecological Modelling, 2007, 208(1): 49–55.
- [4] FOSTER J A, KRONE S M, FORNEY L J. Application of ecological network theory to the human microbiome[J]. Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases, 2008(Special Issue): 839501.
- [5] BRUINDERINK G G, SLUIS T V D, LAMMERTSMA D, et al. Designing a coherent ecological network for large mammals in Northwestern Europe[J]. Conservation Biology, 2003, 17(2): 549–557.
- [6] LINEHAN J, GROSS M, FINN J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach[J]. Landscape and Urban Planning, 1995, 33(1): 179–193.
- [7] 陈剑阳,尹海伟,孔繁花,等. 环太湖复合型生态网络构建[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 3113–3123.
CHEN Jianyang, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Construction of a complex ecological network around the Taihu Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 3113–3123. (in Chinese)
- [8] 彭建,杨畅,谢盼,等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4562–4572.
PENG Jian, YANG Wei, XIE Pan, et al. The division of green space ecological network construction in Guangdong Province based on ecosystem service supply and demand[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4562–4572. (in Chinese)
- [9] ULANOWICZ R E. Quantitative methods for ecological network analysis[J]. Computational Biology & Chemistry, 2004, 28(5–6): 321–339.
- [10] 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. Progress in landscape ecological network research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 3947–3956. (in Chinese)
- [11] 傅强,顾朝林. 基于生态网络的生态安全格局评价[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1021–1029.
FU Qiang, GU Chaolin. Evaluation of ecological security pattern based on ecological network[J]. Chinese Journal of Applied

- Ecology, 2017, 28(3): 1021 – 1029. (in Chinese)
- [12] 古璠,黄义雄,陈传明,等. 福建省自然保护区生态网络的构建与优化[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 1013 – 1020. GU Fan, HUANG Yixiong, CHEN Chuanming, et al. Construction and optimization of ecological network in nature reserve of Fujian Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 1013 – 1020. (in Chinese)
- [13] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771 – 784. HUANG MUYI, YUE WENZE, FENG SHAORU, et al. The heterogeneity and optimization of ecological security pattern in the core area of Dabieshan based on MCR model[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 771 – 784. (in Chinese)
- [14] 张妍,郑宏媚,陆韩静. 城市生态网络分析研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4258 – 4267. ZHANG Yan, ZHENG Hongmei, LU Hanjing. Progress in urban ecological network analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 4258 – 4267. (in Chinese)
- [15] 苏凯,于强,YANG Di,等. 基于多场景模型的沙漠-绿洲交错带林草生态网络模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 243 – 253. SU Kai, YU Qiang, YANG Di, et al. Simulation of forest-grass ecological network in desert – oasis ecotone based on multi-scenario model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 243 – 253. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190929&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.029. (in Chinese)
- [16] 卿凤婷,彭羽. 基于 RS 和 GIS 的北京市顺义区生态网络构建与优化[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(6): 1074 – 1081. QING Fengting, PENG Yu. Construction and optimization of ecological network in Shunyi District of Beijing based on RS and GIS[J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(6): 1074 – 1081. (in Chinese)
- [17] 杨志广,蒋志云,郭程轩,等. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367 – 3376. YANG Zhiguang, JIANG Zhiyun, GUO Chengxuan, et al. The construction of Guangzhou ecological network based on morphological spatial pattern analysis and minimum cumulative resistance model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3367 – 3376. (in Chinese)
- [18] 王海珍,张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 144 – 152. WANG Haizhen, ZHANG Liquan. Ecological network planning of Xiamen Island based on GIS, landscape pattern and network analysis method[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(1): 144 – 152. (in Chinese)
- [19] 胡炳旭,汪东川,王志恒,等. 京津冀城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4383 – 4392. HU Bingxu, WANG Dongchuan, WANG Zhiheng, et al. Construction and optimization of the ecological network of Beijing – Tianjin – Hebei urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4383 – 4392. (in Chinese)
- [20] 王戈,于强,YANG Di,等. 基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 258 – 266, 312. WANG Ge, YU Qiang, YANG Di, et al. Research on hierarchical ecological network structure based on complex network analysis method[J/OL]. Transactions for the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 258 – 266, 312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190728&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.028. (in Chinese)
- [21] 汪小帆,李翔,金弟,等. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [22] 高宇,李际平,袁晓红,等. 基于森林景观斑块耦合网络节点关键程度评价方法对比分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(7): 43 – 47, 54. GAO Yu, LI Jiping, YUAN Xiaohong, et al. Comparative analysis of key degree evaluation methods based on forest landscape patch coupling network nodes[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(7): 43 – 47, 54. (in Chinese)
- [23] 袁晓红. 森林景观斑块耦合网络及动力学研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2012. YUAN Xiaohong. Coupling network and dynamics of forest landscape patches [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012. (in Chinese)
- [24] 唐涛,李际平,袁晓红,等. 基于邻接关系的森林景观斑块耦合网络结构特性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10): 114 – 118. TANG Tao, LI Jiping, YUAN Xiaohong, et al. Analysis of structural characteristics of forest landscape patch coupling network based on adjacency relation[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2016, 36(10): 114 – 118. (in Chinese)
- [25] 赵春燕,李际平,郑柳. “森林景观斑块耦合体”的构建研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(7): 41 – 44. ZHAO Chunyan, LI Jiping, ZHENG Liu. Study on the construction of “couplings of forest landscape patches”[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2014, 34(7): 41 – 44. (in Chinese)