

基于改进力导向模型的生态节点布局优化

苏凯¹ 岳德鹏¹ YANG Di² 于强¹ 马欢¹ 张启斌¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 佛罗里达大学地理系, 盖恩斯维尔 FL32611)

摘要: 在西北干旱半干旱生态脆弱区, 构建生态网络可以连接破碎的生境斑块, 提高景观之间的连通性。而生态节点的布局优化能够降低能量损耗, 增加稳定性, 对维持区域生态环境安全稳定具有重要意义。以生态脆弱区典型县域磴口县为研究区, 在现有生态网络基础上, 改进了 H&V 算法的力导向 (force-directed) 模型, 通过优化生态节点的布局对生态网络进行优化。研究结果表明, 在磴口县选取的局部研究区内, 与 H&V 算法相比, 改进 force-directed 模型优化的生态节点布局覆盖率达到 90.79%, 提升了 4.08 个百分点; 平均聚类系数升高至 0.071, 是未改进 H&V 算法的 1.4 倍; 分布均匀度降低至 2.629, 比未改进 H&V 算法降低了 0.629。通过模型优化使得网络结构清晰、生态节点布局均匀, 节点覆盖率更高, 表明优化后生态网络结构更为稳定。

关键词: 生态节点; 布局优化; H&V 算法; 改进力导向模型

中图分类号: K903 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)11-0215-07

Layout Optimization of Ecological Nodes Based on Improved Force-directed Model

SU Kai¹ YUE Depeng¹ YANG Di² YU Qiang¹ MA Huan¹ ZHANG Qibin¹

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Department of Geography, University of Florida, Gainesville FL32611, USA)

Abstract: The arid and semi-arid areas of Northwest China are ecologically fragile areas, the construction of ecological networks can connect broken habitat patches and enhance connectivity between landscapes. The layout optimization of ecological nodes can reduce energy consumption and increase stability, which is of great significance to maintain the stability and security of regional ecological environment. Therefore, based on the typical ecologically vulnerable area—Dengkou County, remote sensing image interpretation data in 2015 was used as the research material. Eco existing network infrastructure, with improved H&V algorithm (force-directed model) optimized by optimizing the layout of ecological network node. The results showed that compared with the H&V algorithm, the optimized ecological node layout coverage of force-model optimization was 90.79%, which was increased by 4.08 percentage points. The average clustering coefficient was increased to 0.071, which was 1.4 times of that of the unmodified H&V algorithm. The distribution uniformity was reduced to 2.629, which was 0.629 lower than that of the unmodified H&V algorithm. By model optimization, the network structure was clear, the ecological node layout was uniform, and the node coverage was higher, indicating that the optimized ecological network structure was more stable.

Key words: ecological node; layout optimization; H&V algorithm; improved force-directed model

引言

生态安全是 21 世纪人类社会可持续发展面临的一个新主题, 人类活动的加剧与资源的不合理利

用使生态安全受到巨大挑战^[1], 尤其是在我国西北地区, 干旱少雨, 土地荒漠化日趋加剧, 景观破碎化严重且联通性低, 生态环境极其脆弱。该区域内的生态网络通过潜在线性生态廊道将分散且孤立的各

收稿日期: 2017-08-04 修回日期: 2017-09-04

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: 苏凯(1992—), 男, 博士生, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究, E-mail: sukai_mail@126.com

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和土地评价研究, E-mail: yuedepeng@126.com

类型生态节点连接起来^[2],形成一套完整的、有一定自我调节能力的区域生态网络,但是这种生态网络脆弱,自我调节能力低,抗性差,因而对生态网络的优化极其重要。在干旱半干旱生态脆弱区生态网络从结构的联通到功能的联通过生态节点实现,生态节点的空间位置及节点间的连接方式决定了生态网络的空间结构及其鲁棒性,因此对生态节点空间布局优化具有实际意义^[3]。

通过优化节点布局提升网络覆盖率、提高能量利用率降低损耗、增强生态系统的可靠性是当前网络结构性能优化的关键问题之一^[4]。目前国内外的景观生态学研究主要集中在生态网络的构建和生态节点的提取上,而关于生态节点提取后的节点布局优化研究较少,而在传感器网络、社交网络、城市物流等领域中对节点的空间布局研究较多,主要的布局方法有 force-directed 模型、BCBS 策略、遗传算法、VOR 等^[5-6]。force-directed 模型是一类基于经典力学建模的仿真类型布局算法^[7]。该布局算法将研究对象抽象为质点,通过分析研究对象间的作用关系在质点之间建立力的关系,进而模拟物理系统^[8]。通过迭代运算模拟物理系统中质点受力情况,直到达到某种平衡时质点运动趋于稳定(力平衡或系统总能量最小),从而形成一个较为合理的布局。该模型在社会网络、生物网络、3D 建模、引文网络等诸多研究领域获得了广泛应用^[9]。

本文选择生态脆弱区典型县域磴口县为研究区,利用生态阻力面模型提取出生态节点,最小成本模型提取出生态廊道,将 force-directed 模型引入到景观生态学领域,根据生态节点所含能量大小分为“源节点”与“目标节点”,物质能量通过生态廊道从“源节点”流向“目标节点”,利用能量流动方向因子改进 H&V 算法,进行模型的优化。均匀度测量函数、平均聚类系数和覆盖率等是重要评价标准,故而本文参考已有文献选取此 3 种指标对优化结果进行评价,对磴口县生态节点进行空间布局优化研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

磴口县,内蒙古自治区巴彦淖尔市下辖县,位于内蒙古西部河套平原,地处东经 107°05′、北纬 40°13′。整个地形除山区外,呈现东南高、西北低,东南逐步向西北倾斜。磴口县属温带大陆性季风气候,干旱少雨,年平均降水量 144.5 mm,区域蒸发量大,多年平均蒸发量 2 398 mm,导致土地盐渍化程度深,土地退化严重。境内生态用地总量不足,且布局结构和网络体系建设不够完善,生态环境质量不高。

1.2 数据来源与处理

本文以磴口县 2015 年 8 月份 Landsat OLI 影像及研究区空间分辨率为 30 m 的数字高程模型 (DEM) 为基础数据,磴口县 2015 年 1:50 000 植被分布图、磴口县 2015 年土地利用图以及水文地质数据等作为辅助数据。利用 ENVI 5.3 软件对研究区影像做预处理后,对遥感影像进行解译^[10],根据地表覆被状况和土地利用状况提取出磴口县的景观类型信息,景观分类如表 1 所示。然后基于 GIS 软件平台,对细碎斑块进行处理,运用叠加分析工具进行空间数据分析,利用生态阻力面模型提取生态源地,最小成本模型提取生态廊道。

表 1 景观类型

Tab.1 Landscape type

项目	属性值				
	1	2	3	4	5
景观类型	天然湖泊、河流、沟渠、水库坑塘等	荒漠灌林、防护林地、城镇绿地、天然牧草地等	耕地	城镇与建设用地	沙漠
景观服务功能	防洪、供水、排水、水净化	防风固沙、野生动物栖息地、CO ₂ 吸收和 O ₂ 释放	维护生物多样性、提供人类居住土地		

1.3 均匀度测量函数

节点分布均匀度^[11]计算方法:将图形划分为 8 个区域,从竖直、水平、45°和 135°等 4 个方向划分图形,如图 1 所示;统计落在每个区域范围内的节点数目,计算区域统计分布量的标准差。标准差越大,样本数据的离散程度越大,表明分布得越不均匀,反之分布越均匀。标准差计算公式为

$$E_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{i'} - \bar{S})^2} \quad (1)$$

式中 n ——选择的区块数量,取 8

$S_{i'}$ ——区块 i' 的节点数量

\bar{S} —— $S_{i'}$ 的算术平均值

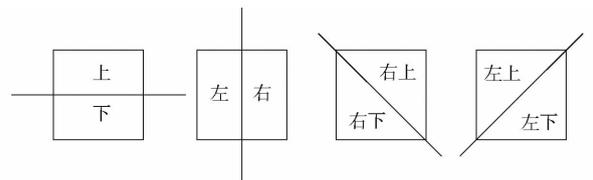


图 1 计算节点分布均匀度的区域划分

Fig.1 Section division for node distribution uniformity

1.4 覆盖率

网络的覆盖面积是衡量生态网络测量性能的一个重要指标。一般用覆盖率,即覆盖程度来表示,即

$$A_{area} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N A_i \times 100\% \quad (2)$$

式中 A_{area} ——覆盖率, %

A ——整个覆盖区域的面积

A_i ——第 i 个节点的覆盖面积

N ——节点数目

1.5 平均聚类系数

聚类系数^[12]是表示网络图形中节点聚集程度大小的系数: 节点 i 的相邻节点之间所实际具有的边数与可能有的边数的比值, 即

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

式中 K_i ——节点 i 的度, 即节点的相邻节点数

E_i ——相邻节点之间实际具有的边数

由于单个节点的移动路径对聚类系数的影响很大, 所以可以通过计算所有节点聚类系数的平均值来观察整个网络的节点聚集情况。

1.6 改进 force-directed 模型

力导向布局算法模型有多种, 如 Spring 算法^[13]、K&K 算法^[14]、D&H 算法^[15]、F&R 算法^[16]等, 近些年 HOLTEN 等^[17]提出 H&V 算法, 该算法假定节点位置保持固定, 由边模拟柔性弹簧相互吸引。该算法能够很快地进行边的聚合优化, 但对节点的优化并未涉及, 故布局效果不合理。

本研究改进 H&V 算法, 将生态源地按照面积大小分成 4 个等级, 定义“源节点”与“目标节点”, 物质能量从高等级“源节点”流入下一等级“目标节点”, 引入能量流因子, 同“流”节点相互吸引, 两者间距离靠近; 异“流”节点相互排斥, 两者间距离远离。高级“源节点”对目标节点的吸引力越大, 距离越小, 否则反之。通过引入力学中静电力模拟植被群落间受自然环境影响的相互作用, 由此建立改进 force-directed model 优化模型, 构建生态节点的新部署策略^[18]。

1.6.1 节点初始布局

首先, 利用生态阻力面模型^[19]提取出磴口县的生态节点, 研究区内确定生态节点 124 个, 其集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{124}\}$ 。考虑到研究区位于西北地区, 生态环境较为脆弱, 一旦关键重要源地破坏可能导致该地区生态的破坏, 造成不可估量的损失。故本次节点优化模型中将生态等级较高的 3、4 等级共 19 块生态源地的质心人为设置为不可移动节点, 即节点位置保持固定; 对重要性较低的, 影响当地生态环境较小的 1、2 等级生态源地共 105 块不固定, 进行节点布局优化。

节点初始布局: 由于生态节点在实际中就具有

一定面积, 为简便运用, 将生态节点斑块按照质心的空间位置抽象为该生态节点的空间位置。

1.6.2 节点的移动

在这个阶段中, 每个中间节点将与一个或多个其他节点相互作用。这种作用力称为静电力, 描述为

$$F_e(P_i, Q_i) = \frac{-1}{\|P_i - Q_i\|} \widehat{(P_i - Q_i)} \quad (4)$$

式中 P_i ——当前节点 P 的向量

Q_i ——相连节点 Q 的向量

符号“ $\| \cdot \|$ ”和“ $\widehat{\cdot}$ ”表示求解法向量和单位向量。 m_{q_i} 和 m_{p_i} 分别是节点 Q 和 P 的能量, 如果 $m_{q_i} > m_{p_i}$, 节点 Q 将被 P 节点吸引。

1.6.3 吸引力

当水肥条件不再成为制约植被生长发展的限制因素, 植被会发展形成群落, 具有稳定结构和能量流, 它们之间会协同生长, 互相促进^[20]。故引入一组吸引力, 使生态节点间保持均匀的位置。

$$F_s(P_i) = P_{i-1} - P_{i+1} \quad (5)$$

P_{i-1} 和 P_{i+1} 分别代表 P_i 前一个和后一个节点向量。此力趋向于将每个节点偏移至直线形成 (见图 2)。当节点有 2 个或多个节点时 (图 3), 应用公式

$$F_s(P_i) = P_{i-1} - P_i + \sum_{s \in S_{p_i}} \frac{m_s}{m_{p_i}} (P_i - S) \quad (6)$$

式中 S_{p_i} ——节点 P_i 的集合

m_{p_i} ——当前节点能量

m_s ——当前节点连接的两个或多个节点能量

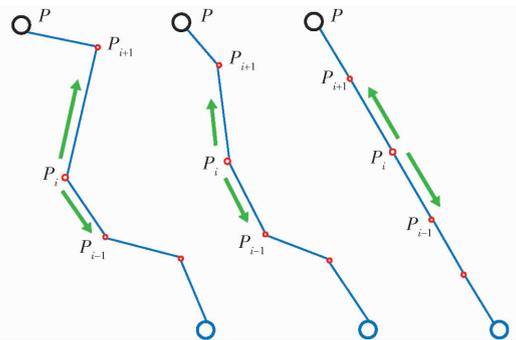


图 2 施加在流动中间节点上的应力

Fig. 2 Stress force applied to intermediate nodes of a flow

对于每个迭代的生态节点, 移动节点的力等于上述力的和。

1.6.4 排斥力

当资源短缺时植物间会发生竞争, 资源的改变将会影响植物的个体形态、种群数量和群落结构等^[21]。尤其是在干旱半干旱生态脆弱区, 植被之间竞争的主要资源是对水资源的竞争, 此外还有养分、光照等。植被之间会有一定的排斥作用。故引入一组排斥力, 此力借鉴物理学中的静电力, 作用力方向

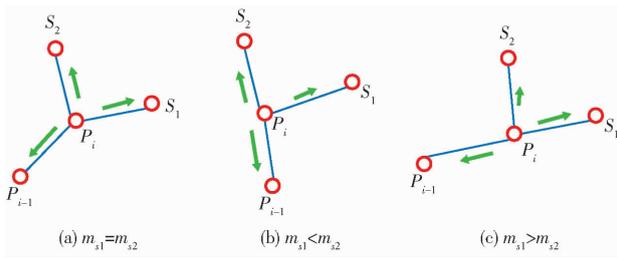


图3 考虑子节点能量大小的不同吸引力情况

Fig.3 Different cases of stress force taking into account of flow magnitude of child nodes

与吸引力的方向相反(图4)。只有接近一定距离的中间节点才受此力的影响。在这种情况下,对于每次迭代和每对节点,计算公式为

$$F_j(P_i) = \sum_{s \in I_{p_i}} F_e(P_i, s) + \sum_{t \in T} F_r(P_i, t) + F_s(P_i) \quad (7)$$

式中 F_r ——静电力

I_{p_i} ——同“流”节点 P_i 的集合

T ——异“流”节点的集合

为了平衡所有的力,为每个力引入一个常数。最后,2个最终算法为

$$F_{f_1}(P_i) = k_e \sum_{s \in I_{p_i}} F_e(P_i, s) + k_r \sum_{t \in T} F_r(P_i, t) + k_s F_s(P_i) \quad (8)$$

$$F_{f_2}(P_i) = k_e \sum_{s \in I_{p_i}} F_e(P_i, s) + k_s F_s(P_i) \quad (9)$$

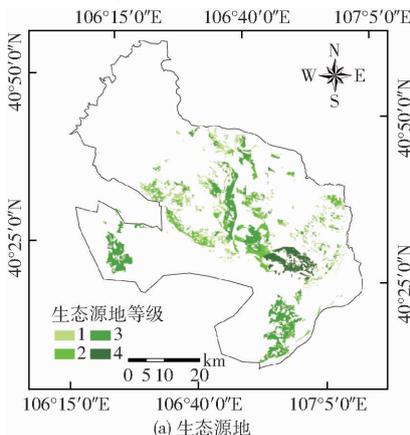
k_e 和 k_s 为比例系数。 k_r 可以被指定为 $2k_e$,排斥力大于吸引力。排斥力和吸引力相互作用,最终形成光滑的直线段。在这个阶段中计算所有节点的位移(相应的力),然后这些位移被施加到节点。

2 结果与分析

2.1 优化前后生态网络变化分析

2.1.1 生态网络构建

结合磴口县实际情况,从3方面考虑:生态区



(a) 生态源地

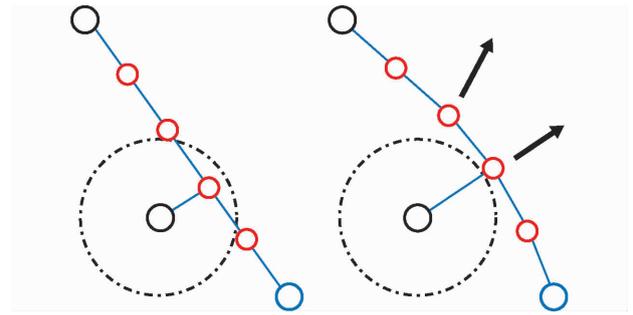


图4 排斥力作用示意图

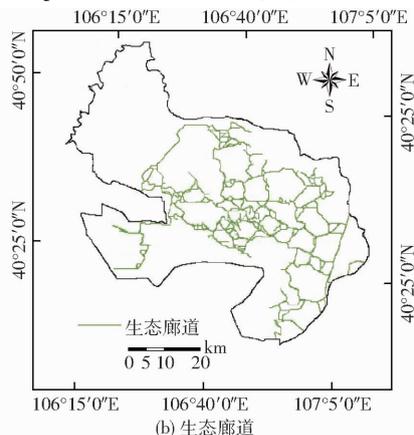
Fig.4 Rejected force applied to intermediate nodes of a flow

位、自然条件、发展现状,将境内面积大于 0.1 km^2 的荒漠灌林地和所有绿洲区湿地提取出来作为生态源地^[21],共提取出 226 块生态源地,根据生态源地的面积值对生态源地进行等级划分,并对每个生态源地斑块进行能量因子 P_j 赋值。1~4 级生态源地面积总和分别为 $8\ 270.78$ 、 $8\ 462.18$ 、 $15\ 301.84$ 、 $3\ 010.19 \text{ km}^2$ (图 5a)。利用修正后的生态阻力面模型,构建基于生态阻力评价体系的生态累积阻力面。使用 ArcGIS 10.2 软件编写 Python 脚本语言提取出生态廊道(图 5b),在磴口县境内共提取出潜在生态廊道 288 条。以此形成通过廊道链接生态节点(生态源地地质质化)的生态网络。

2.1.2 生态节点布局优化

选取境内中部 124 个生态节点,163 条廊道组成的生态网络加以研究(图 6a)。通过源地等级确定有保持区域生态稳定重要生态源地 19 块,地面积总和为 $8\ 404.76 \text{ km}^2$,可优化源地 105 块,块地面积总和约为 $3\ 177.65 \text{ km}^2$ 。即固定节点 19 个,待优化节点 105 个(图 6b)。现状节点的覆盖率为 62.35% 、分布均匀度 5.273 、平均聚类系数为 0.034 。

在构建的生态网络基础上,利用 force-directed 模型 H&V 算法和改进 H&V 算法对现状待优化节点进行布局优化(图 7),将数据导入网络分析软件 Gephi 中进行布局运算,在分别运算 144 s 和 132 s



(b) 生态廊道

图5 磴口县生态格局要素图

Fig.5 Ecological pattern factor map of Dengkou County

时节点停止移动,节点布局趋于稳定,此时优化布局完成。最终优化后生态节点的覆盖率分别为 86.71% 和 90.79%, 相比较现状生态节点覆盖率有很大提升;节点分布均匀度分别为 4.258 和 3.629,

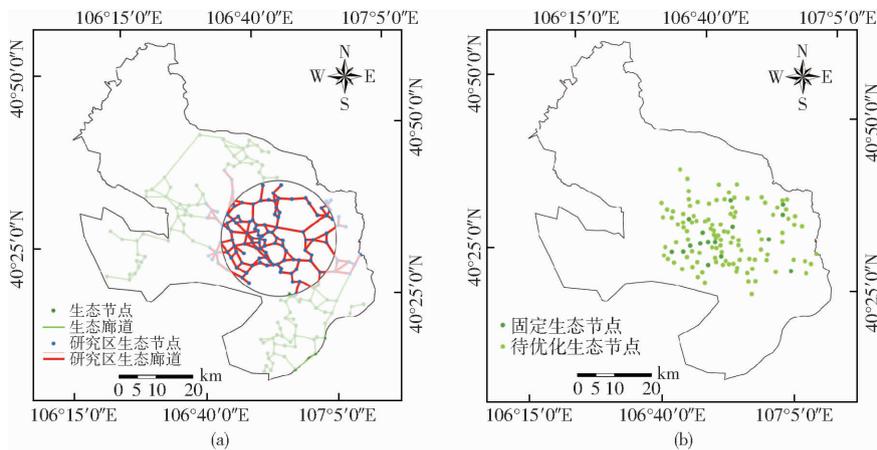


图 6 研究区现状生态网络及待优化节点布局图

Fig. 6 Ecological network map of study area and layout of node to be optimized

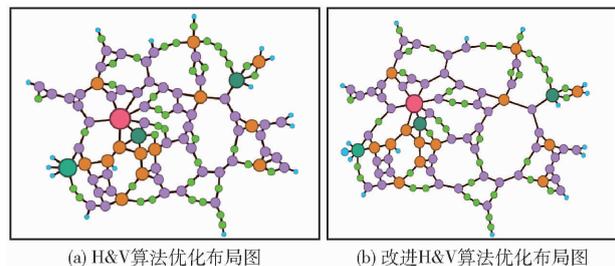


图 7 优化前后对比图

Fig. 7 Optimization of ecological nodes and network map of study area

根据前后研究区生态节点布局图,进行节点分布均匀度与平均聚类系数计算,得到结果见表 2。

表 2 优化结果对比

Tab. 2 Comparison of optimization results

方法	节点覆盖率/%	节点分布均匀度	平均聚类系数
优化前	62.35	5.273	0.034
H&V 算法	86.71	3.258	0.051
改进 H&V 算法	90.79	2.629	0.071

由于本模型假设河流水面、湖泊水面等水域用地在空间上是保持不变动的,因此本文重点分析和生境密切相关的林地生态节点等的情况。

(1) 节点覆盖率

根据表 2 知,经过两种布局优化后,研究区的生态网络节点覆盖率均有明显提升,表明通过优化提高了生态源地覆盖率,改善环境。本文所改进 H&V 算法的 force-directed 模型提升更高,达到 90.79%,较现状生态节点覆盖率提升了 28.44 个百分点。

(2) 节点分布均匀度

根据表 2 可知,研究区生态网络节点的分布均

节点分布的均匀性有较大下降,表明优化后生态节点在研究区内的空间分布更加均匀;平均聚类系数分别为 0.051 和 0.071,节点的集聚效应更明显,生态源地间的联系更加紧密。

匀度是减小的,从 5.273 减小至 2.629,约减少到原来的 1/2。经过优化,使得生态节点的分布更加均匀,将提高植被覆盖度。

(3) 平均聚类系数

根据表 2 可知,研究区生态网络节点的平均聚类系数优化后相比优化前有明显提高,表明经过优化节点的聚集程度在增加,在生态网络格局中,表明景观生态流的流动性强,生态网络也更为稳定,下一步将发展成为连片源地区域。本文所改进 H&V 算法的 force-directed 模型比 H&V 算法的提升更多,约是优化前的 2 倍,为 0.071。

2.2 优化结果分析

根据现状,利用生态阻力面模型获取生态源地,最短路径法得到生态廊道构建磴口县现状生态网络。基于 force-directed 模型通过优化生态节点布局进而实现对生态网络的优化。优化结果(详见图 7、表 2)如下:通过引入群落间竞争水分、养分等的排斥力,与群落协同生长、互相促进的吸引力构建 force-directed 模型,模拟磴口县研究区内生态节点布局。总体而言,研究区内的生态网络结构清晰,网络布局均匀,节点分布均匀度为 2.629,节点聚类明显,平均聚类系数为 0.071,节点覆盖率明显提升,生态网络更加稳定。优化后节点并未发生重大改变。发生变化主要是东部边缘区域的生态节点,由于节点间连接的生态廊道较少,节点间所受吸引力小于排斥力,节点受合力向东发生移动,同时使得生态网络覆盖范围扩大。中部区域由于 97 号、200 号、120 号、119 号等生态节点有多条生态廊道与多个生态节点有能量与物质的传递,连接较为紧密,故

网络结构较为稳定,节点移动也相对较少。

2.3 优化结果的合理性验证

对模型的优化结果进行进一步分析可知:

(1)生态网络并非真实存在的网络,而是抽象、模拟地通过生态节点与连接生态节点间的生态廊道组成,生态廊道是生态源地等级从高到低进行生态源地间的连接。在模拟过程中同源节点间吸引力大于排斥力,廊道长度较短,生态源地与周边的节点分布呈连片趋势,故节点呈现聚集效应,源地等级越高与周边物质能量流动性越强,对周边的辐射越强,节点集聚效应越明显;非同源节点间排斥力大于吸引力,廊道长度较长,故节点分布相对分散,节点间的距离相对较远。这与群落发展规律一致。

(2)由于网络中存在不少的冗余节点,通过适当合理的移动策略,优化节点布局,扩大其覆盖范围。东部区域生态源地联系不紧密,在模拟优化后生态网络较之前有所扩大,节点位置发生移动。探究其原因发现节点并未移动出其所在生态源地范围,仅向源地边缘靠近。从维持生态结构连接度角度考虑,通过合理植被保育的措施,种植适合干旱区生长的植被,防风固沙,提高源地等级以及斑块的面积使得源地质心移动,使之与外界源地形成结构上的新联系,增强景观生态流动性,增加生态环境的稳定性。

(3)在此次布局优化过程中,边缘部分节点位置偏离原来位置较远,移动较大。究其原因是由于

研究范围选择的是磴口县境内的部分区域,边缘生态节点与研究区外生态节点的原有链接被舍弃,破坏原有网络结构的稳定。这也是本模型在今后需要更近一步完善的地方。

3 结束语

在荒漠绿洲典型区——磴口县内选取部分区域作为研究区,利用生态阻力面模型以及最短路径提取出124个生态源地、163条廊道。筛选出具有保持区域生态稳定的重要生态源地19块、可优化源地105块。通过构建改进H&V算法的force-directed模型的生态节点空间布局优化,生态节点的节点分布均匀度有了明显下降。而优化后生态节点的覆盖率达到90.79%,较现状生态节点覆盖率提升了28.44个百分点,比未改进H&V算法提升了4.08个百分点。经过优化节点的平均聚类系数升高至0.071,是未改进H&V算法的1.4倍,分布均匀度降低至2.629,比未改进H&V算法降低了0.629。表明优化后生态节点在磴口县区域内的空间分布更加均匀且更加集聚,优化效果更好。生态源地、生态节点与生态廊道构成由点到线,由线到面,纵横交织,在西北生态脆弱区形成复杂的生态网络,生态网络的稳定是磴口县生态环境稳定的重要保证。研究结果表明利用改进的force-directed模型的生态节点布局优化能够使生态节点的布局得到优化,使生态网络更为稳定。

参 考 文 献

- 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?flag=1&file_no=20161241&journal_id=jcsam. 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)
- 任敏敏,唐秀美,刘玉,等.基于“生产-生态-区位”的都市区粮田布局方法[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):321-327.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160544&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.044.
REN Yanmin, TANG Xiumei, LIU Yu, et al. Layout method of cereal field based on production-ecology-location in metropolitan area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):321-327. (in Chinese)
- 杨倩倩,陈英,金生霞,等.西北干旱区土地资源生态安全评价——以甘肃省古浪县为例[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):195-199,241.
YANG Qianqian, CHEN Ying, JIN Shengxia, et al. Evaluation of ecological security of land resources in arid areas of Northwest China—a case study of Gulang County in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(4):195-199, 241. (in Chinese)
- 靳立忠.无线传感器网络有效覆盖与拓扑控制关键技术研究[D].沈阳:东北大学,2011.
JIN Lizhong. Research on key technologies of effective coverage and topology control for wireless sensor networks[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese)
- 王翥,王祁,魏德宝,等.无线传感器网络中继节点布局算法的研究[J].物理学报,2012,61(12):95-104.
WANG Zhu, WANG Qi, WEI Debao, et al. Relay node placement and addition algorithms in wireless sensor networks[J]. Acta Phys Sinica, 2012, 61(12):95-104. (in Chinese)
- 水超,陈涛,李慧,等.基于力导向模型的网络图自动布局算法综述[J].计算机工程与科学,2015,37(3):457-465.

- SHUI Chao, CHEN Tao, LI Hui, et al. Survey on automatic network layouts based on force-directed model [J]. *Computer Engineering & Science*, 2015, 37(3):457-465. (in Chinese)
- 7 张永瀚, 孙瑞志, 李林, 等. 生态环境遥感评价模型库系统平台构建研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊):267-273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S043&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.043.
- ZHANG Yonghan, SUN Ruizhi, LI Lin, et al. Research of remote sensing evaluation model library platform of ecological environment[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.):267-273. (in Chinese)
- 8 徐琴, 王旭, 孙文远. 虚拟力导向的无线传感器网络覆盖策略[J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(3):890-894.
- XU Qin, WANG Xu, SUN Wenyuan. Virtual force-oriented covering optimization strategy in wireless sensor networks[J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(3):890-894. (in Chinese)
- 9 HUR S W, CAO T, RAJAGOPAL K, et al. Force directed Mongrel with physical net constraints [C] // *Design Automation Conference*, 2003. Proceedings. IEEE, 2003:214-219.
- 10 岳德鹏, 王计平, 刘永兵, 等. 京郊西北地区农地利用与景观格局时空特征[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6):89-95.
- YUE Depeng, WANG Jiping, LIU Yongbing, et al. Spatial and temporal characteristics of agricultural land-use and landscape pattern changes in northwest of Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(6):89-95. (in Chinese)
- 11 朱海峰, 赵春晖. 图像特征点分布均匀性的评价方法[J]. *大庆师范学院学报*, 2010, 30(3):9-12.
- ZHU Haifeng, ZHAO Chunhui. Evaluation method of uniformly-distribution of image characteristic points[J]. *Journal of Daqing Normal College*, 2010, 30(3):9-12. (in Chinese)
- 12 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京:北京高等教育出版社, 2009.
- 13 EADES P. A heuristic for graph drawing[J]. *Congressus Numerantium*, 1984(42):149-160.
- 14 KAMADA T, KAWAI S. An algorithm for drawing general undirected graphs[J]. *Information Processing Letters*, 1989, 31(1):7-15.
- 15 FRUCHTERMAN T M J, REINGOLD E M. Graph drawing by force-directed placement [J]. *Software—Practice and Experience*, 1991, 21(11):1129-1164.
- 16 DAVIDSON R, HAREL D. Drawing graphs nicely using simulated annealing [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1996, 15(4):301-331.
- 17 HOLTEN D, VAN WIJK J J. Force-directed edge bundling for graph visualization[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 28(3):983-990.
- 18 刘大勇, 陈平, 范志平, 等. 氮、磷添加对半干旱沙质草地植被生长和养分吸收的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(6):612-616.
- LIU Dayong, CHEN Ping, FAN Zhiping, et al. Effects of N and P fertilization on nutrient dynamics of semi-arid sandy grassland vegetation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(6):612-616. (in Chinese)
- 19 于强, 岳德鹏, YANG Di, 等. 基于 EnKF-MCRP 模型的生态用地扩张模拟研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9):375-383. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160939&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.039.
- YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Simulation on ecological land use expansion based on EnKF-MCRP model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9):375-383. (in Chinese)
- 20 王平, 王天慧, 周道玮, 等. 植物地上竞争与地下竞争研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(8):3489-3499.
- WANG Ping, WANG Tianhui, ZHOU Daowei, et al. A literature review on the above and below ground competition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8):3489-3499. (in Chinese)
- 21 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. *地理学报*, 2014, 69(4):485-496.
- YE Yuyao, SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, et al. Ecological resistance surface model and its application in urban expansion simulations [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(4):485-496. (in Chinese)