

磴口县生态网络多情景模拟研究

于强 刘智丽 岳德鹏 张启斌 牛腾 苏凯

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 复杂生态网络是近年来区域生态环境可持续研究的热点。以2016年磴口县的遥感影像数据、DEM数据等为研究素材,提出生态库伦力的概念并基于力导向算法构建生态网络多情景模拟模型,结合最小累积阻力面模型设置多个情景模式对磴口县现状生态网络的演化进行研究。研究表明:随着(1.0,0)模式到(0,1.0)模式的转换,生态源地斑块栅格逐渐消失,骨架廊道逐渐出现断裂;在(0,1.0)模式下生态网络遭到极大破坏,现状条件下若进行大规模土地经济开发会对生态网络造成极大的破坏;但在(0.9,0.1)模式下,虽沙漠边缘处出现破坏,但是在样圆内部生态网络却出现扩张,在现有自然资源的约束下,磴口县仍有发展经济的空间,但空间不大。本研究所提出的多情景模拟模型适用于生态网络的演化分析。

关键词: 生态网络;生态库伦力;力导向算法;多情景模拟模型;磴口县

中图分类号: Q141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0182-09

Multi-scenario Simulation of Ecological Networks in Dengkou County

YU Qiang LIU Zhili YUE Depeng ZHANG Qibin NIU Teng SU Kai

(Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Complex ecological network is a hotspot in the study of regional eco-environmental sustainability in recent years. The remote sensing image in 2016, DEM data and so on in Dengkou County were used as research material. The concept of ecological Coulomb force was proposed and based on the force-directed algorithm, a multi-scenario simulation model of ecological network was constructed. Furthermore, combining the minimum cumulative resistance surface model, totally 11 scenarios were set up to study the evolution of the present ecological network. The results were shown as follows: based on the current situation of ecological protection mode, the cumulative ecological resistance surface showed that the wolf mountain piedmont and the northeastern margin of the Ulan Buh Desert had great ecological resistance. In contrast, there were significantly more areas with large cumulative ecological resistance values under the economic development model. With (1.0, 0) to (0, 1.0) model conversion, ecological source grid patches gradually disappeared, the skeleton corridor was gradually broken. In the (0, 1.0) mode, the ecological network had been greatly destroyed. Under the present condition, large-scale land economic development would cause great damage to the ecological network. However, in the (0.9, 0.1) mode, although the destruction occurred on the edge of the desert, the ecological network inside the sample circle was expanded. Under the existing natural resources, there was still room for economic development in Dengkou County, but the space was limited. The multi-scenario simulation model proposed was suitable for the evolution analysis of ecological networks.

Key words: ecological network; ecological Coulomb force; force-directed algorithm; multi-scenario simulation model; Dengkou County

0 引言

土地沙漠化目前成为全球最严重的环境与社会

经济问题之一^[1]。在我国,西北地区沙漠化的迅速发展已经对社会经济和生态环境造成了很大影响,虽土地经济开发进程缓慢,但轻微程度的干扰与破

收稿日期: 2017-11-14 修回日期: 2017-12-08

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和土地评价研究,E-mail: yuedepeng@126.com

坏就会对脆弱的生态环境造成不可恢复的破坏^[2]。具有生态作用的生态用地有机结合就形成了绿色生态网络,绿色生态网络在一定程度上保证了干旱半干旱地区的生态环境稳定,虽然受到土地经济开发、沙漠化和客观环境不稳定性等的影响,但生态网络能够抵抗破坏的弹性特征使得遭到破坏后的生态网络能够得到一定程度的恢复^[3]。如何在土地经济开发的背景下保证生态网络的结构稳定从而发挥其生态功能,成为需要迫切解决的现实问题^[4]。

对区域现状生态网络进行细致分析是进行格局优化的前提。在生态网络构建分析方面,目前多数的研究是针对潜在生态网络的研究,且多集中于城市区域^[5]。首先基于景观生态学“斑块-廊道-基质”理论利用生态阻力面模型等构建区域的潜在生态网络,进而选用联通性、重要性等景观格局指数^[6],关联长度指数、介数指数等网络结构评价指标^[7],以及重力模型、形态学空间格局分析模型^[8]等对其进行分析。潜在生态网络理论上是现状生态网络的优化状态,潜在生态网络的构建是基于现状生态环境下最优的生态网络结构^[9],但其是一种最理想化的状态,在中国西北干旱半干旱区由于水资源、土壤资源等的限制^[10],这种潜在的生态网络格局并不能真正的实现,故对现状的生态网络进行分析意义更大,维持现状生态网络的稳定持续更为重要。

现状生态网络是一个动态变化的网络,对现状生态网络进行破坏模拟意义重大。在西北干旱半干旱地区,生态网络的发展最大的影响就是在水资源有限的前提下的土地经济开发,经济开发需要大量水资源,则导致用于生态环境保护的水资源不足^[11]。基于此,本研究设置多种情境对现状生态网络的演化特征进行模拟分析,生态网络的演化不同于土地利用的演化,其不仅受到生态基质的影响,其自身结构特点也对演化产生影响,即生态网络中存在生态力,对此生态力进行定量描述对于生态网络的演化模拟至关重要。生态网络是复杂网络的一种,针对社交网络、无线传感器网络、生物网络等复杂网络的布局研究目前较多,其中力导向算法被广泛的应用于这些复杂网络的自动布局,对具有空间信息的生态网络应用极少^[12]。故本研究以中国西北荒漠绿洲区典型县域为研究区,对力导向算法进行改造,构建出可应用于生态网络演化的力导向模型,结合最小累积阻力面模型对研究区现状生态网络进行模拟分析。模拟并预测不同程度生态保护和土地经济开发情景设置下区域生态网络格局的演变特点,为区域可持续发展提供理论支持。

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,背靠狼山脉,西邻乌兰布和沙漠。磴口县气候干旱少雨,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 1 030 ~ 2 046 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^[13]。

1.2 数据来源与处理

选取磴口县 2016 年夏季且少云的 30 m 分辨率的 Landsat OLI 影像为研究素材(来自地理空间数据云平台),提取 NDVI、MNDWI 指数。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。为满足研究需要,利用从内蒙古自治区巴彦淖尔市国土局获得的 2015 年二级土地利用精细分类数据对影像解译的 2016 年土地利用数据进行修正,结合外业调查数据得到准确的 2016 年土地利用精细分类数据,土地利用类型包括:采矿用地、村庄、风景名胜及特殊用地、公路用地、沟渠、灌木林地、果园、河流、河滩地、湖泊湿地、湖泊水面、建制镇、交通用地、坑塘水面、林带、落地、其他草地、人工草地、沙地、设施农用地、水工建设用地、水浇地、水库水面、天然牧草地、盐碱地和有林地 26 类^[14]。

用于构建最小累积阻力面的 DEM 数据来自地理空间数据云平台,分辨率 30 m。利用 ArcGIS 10.2 软件根据 DEM 数据提取坡度数据。地下水埋深的空间分布数据来自马欢等^[15]的研究成果,其为本研究的前期研究成果。通过土地利用数据提取水网和路网,利用 ArcGIS 10.2 软件中的多重缓冲区分析模块获得距离因子数据。通过土地利用数据提取居民点、路网、水网,利用 ArcGIS 10.2 软件中的密度分析模块获得密度因子数据。

1.3 最小累积阻力面模型

基本最小累积阻力面模型,即 MCR (Minimal cumulative resistance) 的基本公式为

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

式中 V_{MCR} ——最小累积阻力面

f_{\min} ——某土地单元的累积阻力最小值

D_{ij} ——从生态源地 j 到土地单元 i 空间距离

R_i ——用地单元 i 对运动过程的阻力系数

不同生态源地有不同的生态能量,即不同生态源地的影响力是不同的,引入不同等级生态源地的能量因子 P_j ,修正 MCR 模型^[16]。根据生态源地生态系统的类型不同,磴口县的生态源地可概括为绿色和蓝色两种类型,分别利用 NDVI 和 MNDWI 两个指数描述两种生态源地的特征^[17-18],并结合各个生态源地斑块的大小构建能量因子 P_j 修正系数,能量因子 P_j 的计算公式为

$$P_j = A_j I_{jr} \quad (2)$$

式中 A_j ——第 j 块生态源地斑块的面积

I_{jr} ——第 j 块生态源地斑块的第 r 个归一化指数

在本研究中选择了两种归一化指数描述生态源地,故 r 分别取值 1 和 2, I_{j1} 为第 j 块生态源地的 NDVI 均值, I_{j2} 为第 j 块生态源地的 MNDWI 均值。

修正后 MCR 模型考虑了 4 方面因素,即生态源地、生态源地能量等级、距离和基面阻力特征,修正后公式为

$$V_{MCR-P} = f_{\min} \sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} (D_{ij} R_i P_j) \quad (3)$$

式中 V_{MCR-P} ——生态用地扩展最小生态累积阻力面

P_j ——生态源地 j 的能量因子,其值越大代表生态源地斑块的生态能量越大

由于基面特征的不同,生态源地中产生的生态能量在生态网络以及区域内的扩展过程中所受到的阻力是不同的。阻力系数反映了生态景观覆盖控制其他景观的难易程度。本研究在构建阻力面时设置两种磴口县的发展模式,第 1 种模式是经济发展模式,第 2 种是生态保护模式。针对两种模式构建相对应的阻力面,赋予不同的阻力系数。最终利用 ArcGIS 软件中的 cost-distance 模块完成 7 种类型生态源地的累积阻力面的计算,由于计算量较大,故利用 Python 脚本语言编写程序完成该计算。通过对计算生成的累积阻力面进行叠加分析,计算各个栅格单元的最小值,最终得到 2 种模式下的 2 个最小生态累积阻力面。

1.4 多情景模拟模型

磴口县的现状生态网络主要由生态源地节点和生态廊道组成,是一个有权的复杂网络。生态能量在生态网络中的流动是双向的,即生态源地与生态源地之间能够互相影响,互相传递能量。由于在干旱区水资源相对短缺,生态源地之间不仅存在着相互依存的关系,在水资源、土壤资源利用等方面还存在着竞争的关系。距离因素决定了 2 个生态源地之间的关系,距离过近则竞争现象凸显,距离过远则不能够相互补充能量,这种现象类似于物理学中的真空中 2 个电子之间的库伦效应,故本文将生态源地之间的这种现象称为生态源地类库伦效应。这种效应可以解释为:当 2 个生态源地距离过近,则它们之间存在着排斥力,随着 2 个生态源地距离的增加,这种排斥力逐渐转变为吸引力,直到距离过大导致 2 个生态源地之间影响力消失。

故本文将物理学领域电子之间的库伦力引入到景观生态学领域,将生态源地之间的这种类库伦力称为生态库伦力,并给出生态库伦力的定义:在一定的土地空间内,假设生态绿地所能利用的资源是有一定限度的,则 2 个生态绿地之间存在随距离的变化而变化的作用力,即生态库伦力。

根据牛顿第三定律:相互作用的 2 个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等,方向相反,作用在同一条直线上。而牛顿第三定律同样适用于生态库伦力。如图 1 所示,在生态网络中,生态库伦力与最小生态累积阻力是一对相互作用力,它们大小相等且方向相反。当 2 个生态源地节点相互作用产生生态库伦力后,生态库伦力又导致了生态能量在生态网络中的流动,从而产生了生态流。而生态流在流动的过程中所做的功就等于最小累积生态阻力克服生态流的流动而做的功,故可以用最小累积生态阻力来反映生态库伦力。

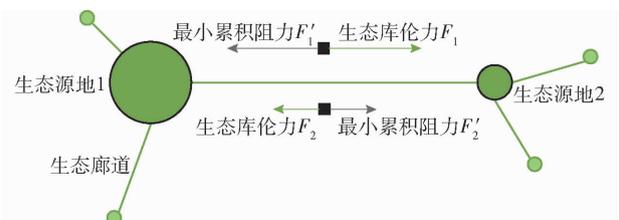


图 1 生态源地间相互作用力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interaction forces between ecological sources

生态源地能量的大小决定了生态库伦力的强弱,生态库伦力的变化引起了生态网络格局的改变。基于力导向模型 (Force directed model, FDM) 的图形绘制方法是网络图节点自动布局研究中应用最广的

一类算法^[19]。FDM 将图形假想为一个物理系统, 每个节点都受到其他节点的拉力或斥力, 所有的节点在相互作用力下运动, 当系统达到力平衡而静止时, 即获得了最佳布局^[20]。

本研究利用复杂网络力导向算法进行磴口县生态网络的布局模拟研究, 采用 $\{V, H\}$ 代表复杂生态网络, 其中 V 是生态网络节点集合, 而 H 是廊道的集合。借鉴 Noack 所提出的 LL(LinLog) 模型, 该模型在图形进行节点自动布局的同时, 完成节点聚类^[21]。该模型定义复杂生态网络动态系统的能量为

$$E = \sum (\| p_i - p_j \| - \ln(\| p_i - p_j \|)) \quad (4)$$

式中 E ——复杂生态网络能量

p_i —— V 中第 i 个生态节点

p_j —— V 中第 j 个生态节点

$|\cdot|$ ——节点 p_i 与 p_j 之间的欧氏距离

$|p_i - p_j|$ ——节点 p_i 与 p_j 之间的图论距离 (即跳数)

式中前半部分代表了邻接节点的引力, 后半部分代表了任意节点之间的斥力。

本研究中的生态库伦力借鉴了物理学中电子的引力与斥力, 借鉴 Fruchterman 的研究将电子斥力引入生态网络力导向布局模型^[22-23], 定义任意 2 个生态源地节点之间存在的斥力和引力的计算公式为

$$F_c = \frac{K^2}{\| p_i - p_j \|} \quad (5)$$

$$F_y = \frac{\| p_i - p_j \|^2}{K} \quad (6)$$

式中 F_c ——斥力 F_y ——引力

K ——生态库伦力常数

公式表明生态源地节点之间的距离越小则互相斥力越大, 这可以有效的解决生态源地节点之间重叠覆盖引发资源竞争的问题。

在斥力与引力以及最小累积阻力的共同作用下, 实际中的生态网络会逐渐的发生演化。生态源地节点、生态廊道会发生小幅度的位置变化以及面积的变化, 本研究假设当所有生态源地节点的动力和最小时, 生态源地节点就达到了平衡状态, 即最佳布局。但是因为实际中最小累积阻力的限制, 生态网络只能是最大可能地趋于最佳的布局。本研究生态网络力导向多情景模拟模型的具体算法流程如下:

(1) 将磴口县内的所有生态节点划分为 k 个子区域, 并进行编号。

(2) 计算各个生态源地节点与 k 个子区域之间的受力情况, 计算 p_i 受到第 j 子区域所有生态源地

节点的作用力之和。

(3) 计算最大作用生态库伦力, 结合最小累积阻力面数据获得最小累积阻力, 判断在空间上该生态节点能够移动的距离与方向, 改变节点 p_i 的位置, 评判是否可以改变节点 p_i 的区域编号, 若阻力过大不能将节点 p_i 加入到最大作用力子区域, 则在空间上将节点 p_i 的位置移动到距离子区域最能达到的位置。

(4) 将生态网络拓扑图与实际生态网络栅格数据对应, 获得生态源地斑块栅格的生态库伦力, 根据阻力大小进行生态源地斑块、生态廊道斑块的扩张或缩减模拟。

(5) 重复计算, 直到整个生态网络系统的能量 E 之和最小, 则生态网络达到了平衡状态, 最终得到生态网络空间分布栅格模拟结果。

设置了两种演化模式, 基于现状生态网络的生态保护模式和与之相对应的纯粹的经济发展模式。在现实中磴口县的发展是兼顾生态保护和经济发展两方面, 磴口县生态环境极其脆弱, 生态环境的稳定是经济发展的基础, 生态保护模式是磴口县目前的主要模式。生态保护模式可理解为磴口县现状模式, 通过调整两种模式的转换完成情景模拟, 分析磴口县未来多情境下生态网络的演变规律。

在干旱半干旱区, 水资源以及经济状况决定发展模式, 且水资源和经济投资是有限的, 基于此假设生态保护模式的权重为 M , 经济发展模式的权重为 N , 则有 $M + N = 1$ 。设定步长为 0.1, 分别设置 $M = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$, 则有 $N = \{1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0\}$ 。 $M = 0$ 代表纯粹的经济发展模式, $M = 1.0$ 则代表现状的生态保护模式。利用该权重体系最终获得 11 幅最小累积阻力面图, 即 11 种不同程度生态发展模式和经济发展模式的磴口县基面阻力特征, 利用力导向算法最终模拟出 11 种情境下的生态网络演化结果。

2 结果与分析

2.1 最小累积阻力面构建

从地形坡度、植被覆盖、水文分布、土地覆盖、距离因子、密度因子 6 方面建立生态阻力的评价体系。按照表 1 将各项生态阻力划分为 5 个等级, 针对生态保护模式和经济发展模式, 分别用 1、3、5、7、9 来表示程度, 考虑各个因子对于现状生态网络的维持与发展都有必不可少的贡献, 故各个因子具有相同的权重。地下水埋深的空间分布对地上植被的空间格局起着决定性作用, 地下水埋深小易于植被的生

表1 生态阻力评价指标体系
Tab.1 Ecological resistance evaluation index system

一级因子	二级因子	等级	生态阻力 赋值	经济阻力 赋值
地形坡度	DEM	0 ~ 1 000 m	1	1
		1 000 ~ 1 300 m	3	3
		1 300 ~ 1 500 m	5	5
		1 500 ~ 1 700 m	7	7
		> 1 700 m	9	9
坡度		0 ~ 3	1	1
		3 ~ 9	3	3
		9 ~ 18	5	5
		18 ~ 27	7	7
		> 27	9	9
植被覆盖	NDVI	< 0	9	1
		0 ~ 0.2	7	3
		0.2 ~ 0.33	5	5
		0.33 ~ 0.6	3	7
		> 0.6	1	9
水文分布	MNDWI	< 0	9	1
		0 ~ 0.22	7	3
		0.22 ~ 0.6	5	5
		0.6 ~ 0.8	3	7
		> 0.8	1	9
地下水埋深		0 ~ 2 m	1	9
		2 ~ 4 m	3	7
		4 ~ 6 m	5	5
		6 ~ 8 m	7	3
		> 8 m	9	1
土地覆盖	土地利用类型	建制镇、村庄、交通用地、公路用地、沙地、裸地	9	1
		采矿用地、设施农用地、水工建筑用地、风景名胜及特殊用地	7	3
		天然牧草地、水浇地、盐碱地	5	5
		沟渠、河流、河滩地	3	7
		有林地、人工草地、其他草地、坑塘水面、林带、果园、水库水面、湖泊水面、湖泊湿地、灌木林地	1	9
距离因子	与水体廊道距离	0 ~ 100 m	1	9
		100 ~ 200 m	3	7
		200 ~ 300 m	5	5
		300 ~ 400 m	7	3
		> 400 m	9	1
密度因子	路网廊道密度	0 ~ 100 m	1	9
		100 ~ 200 m	3	7
		200 ~ 300 m	5	5
		300 ~ 400 m	7	3
		> 400 m	9	1
居民点密度		0 ~ 0.10	1	9
		0.10 ~ 0.32	3	7
		0.32 ~ 0.64	5	5
		0.64 ~ 1.06	7	3
		> 1.06	9	1
路网廊道密度		0 ~ 0.20	9	1
		0.20 ~ 0.52	7	3
		0.52 ~ 0.85	5	5
		0.85 ~ 1.25	3	7
		> 1.25	1	9
水网廊道密度		0 ~ 0.13	9	1
		0.13 ~ 0.37	7	3
		0.37 ~ 0.62	5	5
		0.62 ~ 0.90	3	7
		> 0.90	1	9

长,能够保证生态网络不断裂,故将地下水埋深空间分布加入评价体系。与水体廊道和道路廊道的距离大小,描述的是生态能量水平运动过程的难易,廊道密度以及居民地密度决定了大尺度空间上的生态能量传递的难易。利用 ArcGIS 软件制作各个单因子的评价结果,进行叠加栅格计算得到生态保护模式和经济发展模式下的生态阻力基面的综合评价结果,如图 2 所示。

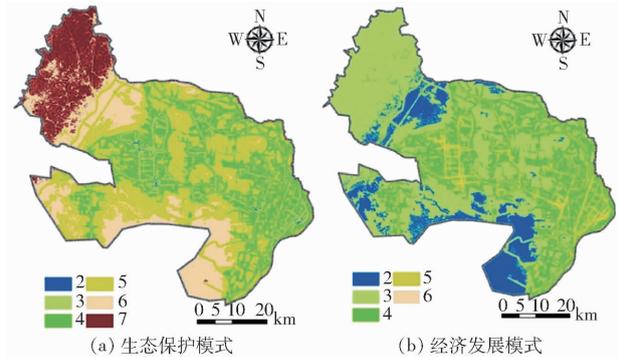


图 2 生态保护模式与经济发展模式生态阻力面
Fig. 2 Ecological protection and economic development model ecological resistance surfaces

经过叠加栅格计算得到生态保护模式下和经济发展模式下生态能量在区域内流动的基面阻力。在生态保护模式下,经过叠加运算得到 6 个阻力,阻力 2 的区域面积很少,阻力 3 的区域主要位于道路廊道和水网廊道,阻力 4 的区域位于道路廊道周围,阻力 5 的面积最大,阻力 6 主要分布在乌兰布和沙漠东北缘以及狼山山前。在生态保护模式下生态能量在生态源地与生态廊道附近有较低的阻力值。但是在经济发展模式下,乌兰布和沙漠东北缘以及狼山山前洪积扇区域反而生态阻力较小,在生态廊道以及生态源地周边生态阻力反而较大,这反映了在现状的基础上大力发展经济会极大破坏生态网络,因为在磴口县发展经济离不开水及交通运输,所以在阻力面上反而荒漠地带有相对较低的生态阻力值,这也反映出若基于现状纯粹的经济开发会严重地增大生态阻力,严重地阻碍生态能量的流动。

基于改进的最小累积阻力面模型,利用 ArcGIS 软件中的 cost-distance 模块分别计算人工草地、其他草地、坑塘水面、有林地、果园、湖泊和灌木林地 7 种类型生态源地的生态累积阻力面,进行叠加栅格计算得到在磴口县现状基础上生态保护模式和经济发展模式下的综合生态累积阻力面。由图 3 可知,在生态保护模式下磴口县大部分区域的生态累积阻力较低,最低为 23 971,狼山山前最大生态累积阻力为 512 433,在乌兰布和沙漠东北缘的最大阻力值达到 809 998。在经济发展模式下生态累积阻力相对

较小的区域明显减少,在磴口县西北的那仁布鲁格嘎查地区阻力较大,在磴口县东南的渡口镇附近区域阻力明显有所升高,整体最低生态累积阻力为 24 057。

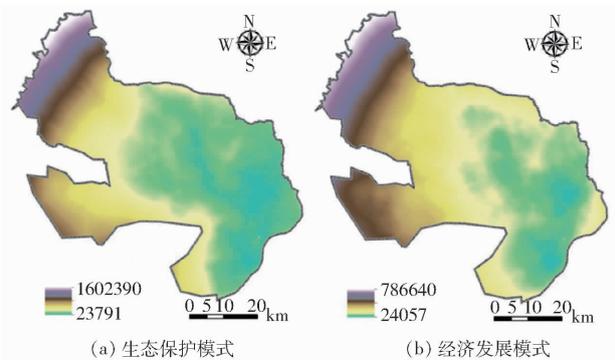


图 3 生态保护模式与经济发展模式累积生态阻力面
Fig. 3 Cumulative ecological resistance surfaces of ecological protection and economic development model

2.2 生态网络多情景模拟

通过多情景模拟分析不同发展模式对现状生态网络的影响作用。 (M, N) 共设置 $(0, 1.0)$ 、 $(0.1, 0.9)$ 、 $(0.2, 0.8)$ 、 $(0.3, 0.7)$ 、 $(0.4, 0.6)$ 、 $(0.5, 0.5)$ 、 $(0.6, 0.4)$ 、 $(0.7, 0.3)$ 、 $(0.8, 0.2)$ 、 $(0.9, 0.1)$ 、 $(1.0, 0)$ 11 种情景, $(0, 1.0)$ 模式即经济发展模式下的生态阻力面, $(1.0, 0)$ 模式即生态保护模式下的生态阻力面,利用 ArcGIS 软件的 Raster Calculator 模块得到其他 9 种模式的生态累积阻力面。如图 4 所示,由 $(0.1, 0.9)$ 模式到 $(0.9, 0.1)$ 模式,随着生态保护模式生态累积阻力面的权重增加,生态保护的效果能够被反映出来,9 种模式的累积阻力值范围分别为 24 763 ~ 864 906、24 661 ~ 943 172、24 560 ~ 1 021 440、24 458 ~ 1 104 420、24 357 ~ 1 187 410、24 255 ~ 1 270 410、24 154 ~ 1 353 410、24 052 ~ 1 436 400、23 929 ~ 1 519 400。结合图 3 可明显看出随着经济发展模式到生态保护模式的转换,象征较低生态累积阻力的蓝色和绿色区域逐渐增多。

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 Kruskal 算法^[24]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。基于介数计算的 Kruskal 算法成熟、稳定且计算量小。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,结果如图 5 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

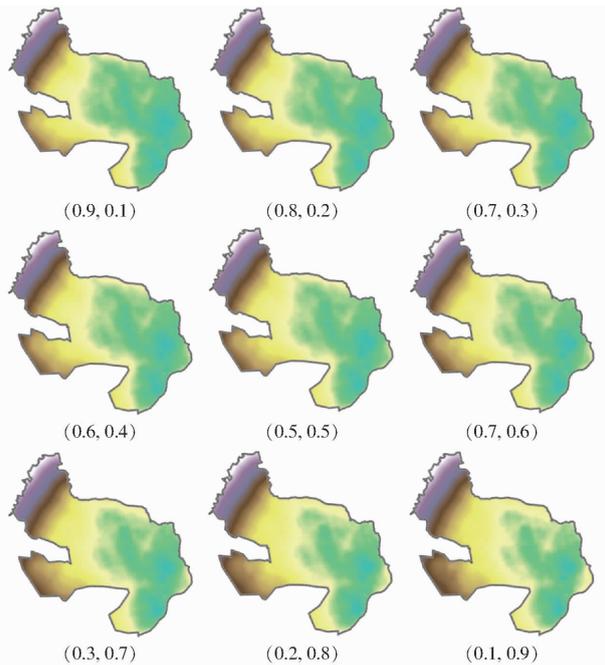


图4 多情景模式累积生态阻力面

Fig.4 Cumulative ecological resistance surface under multi scenarios

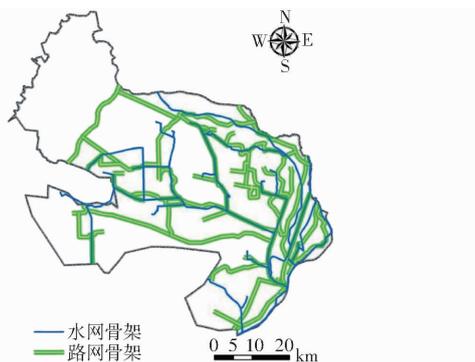


图5 水网和路网骨架空间分布

Fig.5 Spatial distribution of water network and road network skeleton

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。

在利用本研究所构建的生态网络力导向算法进行多情景模拟之前给出模型假设。(1.0,0)模式是根据2016年研究区现状进行阻力体系赋值,故假设代表现状生态网络的(1.0,0)模式为初始模式。现状生态网络是多年的生态环境演变的结果,假设初始模式下生态网络处于基本稳定状态且其生态库伦力与最小累积阻力相同。在生态网络中生态库伦力的作用下,随着最小累积阻力值的变化,生态网络也

随之发生变化,从而完成多情景模拟。利用Python脚本语言基于ArcGIS软件中编写程序完成力导向模型在不同阻力面上的模拟,为便于分析,利用自然断点法按照生态库伦力大小对栅格生态网络数据进行分级,共分为5个等级。(1.0,0)模式下的初始生态网络以及(0,1.0)模式下的生态网络模拟结果如图6所示。

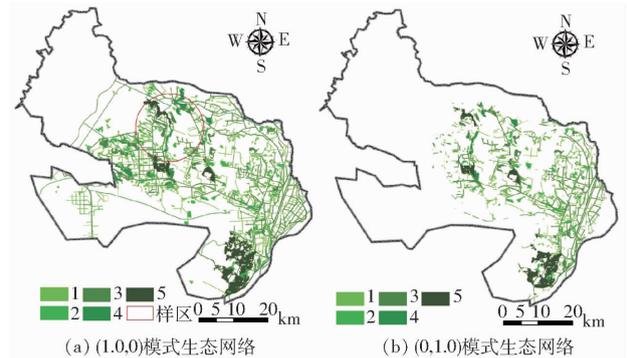


图6 初始模式及最终模式生态网络模拟结果

Fig.6 Ecological network simulation results of initial model and final model

随着(1.0,0)模式到(0,1.0)模式的转换,部分区域内最小累积生态阻力逐渐增大,导致现状生态网络遭到巨大破坏,在磴口县北部、西部和东南部破坏最为严重,生态网络中生态库伦力为1级、2级的栅格大量消失,5级栅格也有较多消失,网络的骨架廊道也遭到了致命的破坏。为了更为准确的分析从(1.0,0)模式到(0,1.0)模式转换过程中生态网络变化的细节,选择了生态网络被破坏较大的沙金套海苏木周边的区域进行细致研究,划定了面积接近310 km²的样圆(图6)。样圆内包含了5个等级的生态网络栅格、7个种类的生态源地斑块类型,也包含水网和路网两种类型廊道的骨架结构以及非骨架结构。

由图7可知,(0.9,0.1)模式下,样圆西部非骨架廊道出现了断裂,5级栅格有部分消失,但是在样圆中部阻力值降低,源地栅格和廊道栅格都有所扩张。(0.8,0.2)模式下样圆西部阻力继续增大,生态网络中生态源地栅格出现破碎现象,非骨架廊道破坏程度增加,骨架廊道中的三支渠出现了断裂。(0.7,0.3)模式下样圆的中部阻力值增加幅度较大,3、4、5级生态网络栅格破碎消失的比较严重,西部骨架廊道新四支渠出现了比较严重的破坏,非骨架廊道出现了严重断裂。(0.6,0.4)模式下西部骨架廊道新四支渠基本完全破坏,中部骨架廊道三支渠破坏程度增加,但是东部骨架廊道北二支渠并没有遭到破坏。(0.5,0.5)模式下样圆南部随着阻力值增大,纳林套海农场附近生态网络栅格破碎严重,

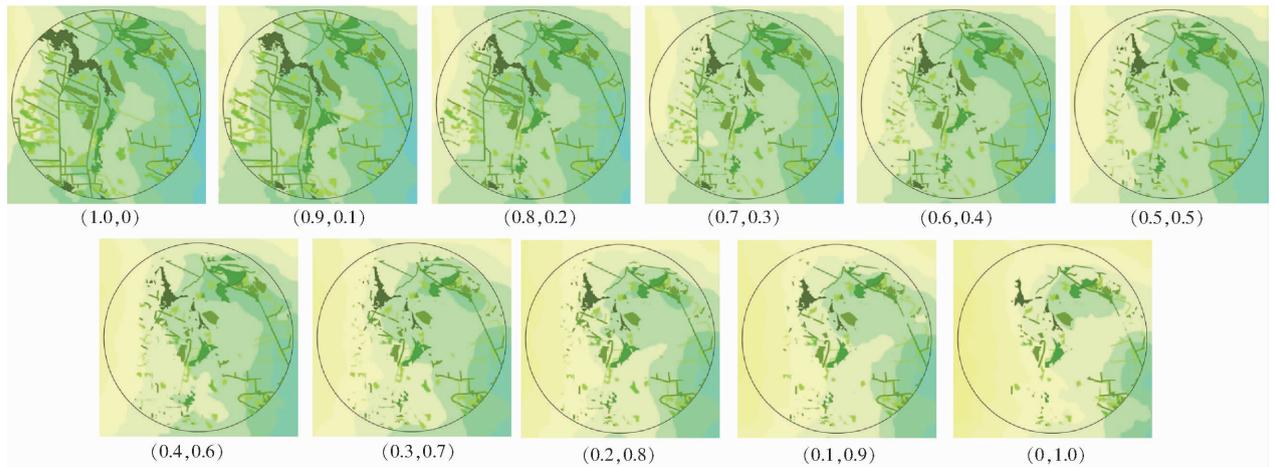


图7 多情景生态网络模拟结果

Fig. 7 Simulation results of sentimental landscape ecological network

部分生态源地栅格完全消失。(0.4,0.6)模式下样圆西部和南部骨架廊道基本完全破坏,生态网络破碎化严重。(0.3,0.7)模式下样圆北部太阳庙农场附近生态网络栅格逐渐消失,西部和南部生态网络破碎栅格进一步消失,东部非骨架廊道也遭到了破坏。(0.2,0.8)模式下样圆东部骨架廊道北二支渠出现了断裂,西部和南部生态网络破碎栅格进一步消失。(0.1,0.9)模式下骨架廊道北二支渠断裂增大,北部骨架廊道玛弥吐渠也遭到破坏。(0,1.0)模式生态网络破碎栅格大量消失,主要骨架廊道基本完全断裂,生态源地斑块之间几乎不相连,生态网络在结构上已经完全丧失其功能。现状生态网络是适应目前磴口县生态环境而演化形成的,随着生态保护模式阻力面权重的降低,区域内阻力值逐渐增大,生态网络也逐渐的遭受破坏,生态源地萎缩,生态廊道断裂,表明在现有条件下若进行较大规模的土地经济开发会对磴口县生态网络造成不可恢复的破坏。但是在多种模式中,(0.9,0.1)模式虽在沙漠边缘处出现破坏,但是在样圆内部生态网络却出现扩张,而此后的模式生态网络则呈现持续破坏状态,表明磴口县仍有进一步发展经济的空间,但空间不大。

3 结论

(1)本研究给出了生态库伦力的概念,将复杂网络分析方法应用于实际生态网络的分析中,结合最小累积阻力模型所构建的生态网络多情景模拟模型可行。基于现状构建的生态保护模式累积生态阻力面显示出狼山山前和乌兰布和沙漠的东北缘生态阻力较大,与之相对应的经济发展模式累积生态阻力值较大区域明显增多。

(2)基于复杂生态网络力导向模型的11种情景模式下,随着(1.0,0)模式到(0,1.0)模式的转换,生态网络出现了逐渐的破坏。以局部样圆为例,随着模式的转换,生态源地斑块栅格逐渐消失,骨架廊道逐渐出现断裂,最终(0,1.0)模式下生态网络遭到极大破坏,结构上已经不具备生态网络的特征,表明现状条件下干旱半干旱区若进行大规模土地经济开发会对生态网络造成极大的破坏。

(3)在(0.9,0.1)模式下,沙漠边缘处出现破坏,但是在样圆内部生态网络却出现扩张,在现有自然资源的约束下,磴口县仍有发展经济的空间,但空间不大。这个现象对未来利用本研究所提出的多情景模拟模型进行经济发展空间阈值界定提供了一个研究方向。

参 考 文 献

- 1 GE Xiaodong, DONG Kaikai, LULOFF A E, 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[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 917 - 928. (in Chinese)
- 3 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)
- 4 陈雯, 孙伟, 段学军, 等. 以生态-经济为导向的江苏省土地开发适宜性分区[J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 312 - 317.
CHEN Wen, SUN Wei, DUAN Xuejun, et al. Regionalization of potential land use in Jiangsu Province under eco-economic

- approach[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 312–317. (in Chinese)
- 5 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863–2874.
YIN Haiwei, KONG Fanhua, QI Yi, et al. Developing and optimizing ecological networks in urban agglomeration of Hunan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2863–2874. (in Chinese)
 - 6 陈小平, 陈文波. 鄱阳湖生态经济区生态网络构建与评价[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1611–1618.
CHEN Xiaoping, CHEN Wenbo. Construction and evaluation of ecological network in Poyang Lake Eco-economic Zone, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1611–1618. (in Chinese)
 - 7 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)
 - 8 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711–1719.
KONG Fanhua, YIN Haiwei. Developing green space ecological networks in Ji'nan City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1711–1719. (in Chinese)
 - 9 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.
 - 10 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): 285–293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160939&flag=1. 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): 285–293. (in Chinese)
 - 11 YU Qiang, YUE Depeng, WANG Jiping, et al. The optimization of urban ecological infrastructure network based on the changes of county landscape patterns; a typical case study of ecological fragile zone located at Dengkou (Inner Mongolia) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S54–S67.
 - 12 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)
 - 13 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)
 - 14 张启斌, 岳德鹏, 于强, 等. 基于 AES-LPI-CA 模型的磴口县景观格局演化模拟研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 128–134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170515&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.015.
ZHANG Qibin, YUE Depeng, YU Qiang, et al. Simulation of landscape pattern evolution in Dengkou County using AES-LPI-CA model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 128–134. (in Chinese)
 - 15 马欢, 岳德鹏, YANG Di, 等. 基于数据同化的地下水埋深插值研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 206–214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170427&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.027.
MA Huan, YUE Depeng, YANG Di, et al. Interpolation of groundwater depth based on data assimilation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 206–214. (in Chinese)
 - 16 叶玉瑶, 苏泳娟, 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)
 - 17 张甜, 王仰麟, 刘焱序, 等. 1987—2015 年深圳市主城区景观演变过程多时相识别[J]. *地理学报*, 2016, 71(12): 2170–2184.
ZHANG Tian, WANG Yanglin, LIU Yanxu, et al. Multi-temporal detection of landscape evolution in western Shenzhen City during 1987—2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2170–2184. (in Chinese)
 - 18 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)
 - 19 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)
 - 20 DEBIASI A, SIMOES B, de AMICIS R. Force directed flow map layout [C] // *International Conference on Information Visualization Theory and Applications*, 2014: 170–177.
 - 21 NOACK A. Energy models for graph clustering[J]. *Journal of Graph Algorithms & Applications*, 2007, 11(2): 453–480.
 - 22 水超, 陈洪辉, 陈涛, 等. 力导向模型的复杂网络社区挖掘算法[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(4): 163–168.
SHUI Chao, CHEN Honghui, CHEN Tao, et al. A community detect algorithm on force-directed model[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(4): 163–168. (in Chinese)
 - 23 FRUCHTERMAN T M J, REINGOLD E M. Graph drawing by force-directed placement[J]. *Software-Practice and Experience*, 1991, 21(11): 1129–1164.
 - 24 鲍捷, 陆林, 吉中会. 基于最小生成树 Kruskal 算法的皖北地区旅游交通优化与线路组织[J]. *人文地理*, 2010(3): 144–148.
BAO Jie, LU Lin, JI Zhonghui. Tourism transportation optimization and tour route designing of north Anhui Province based on the Kruskal algorithm of graph-theory[J]. *Human Geography*, 2010(3): 144–148. (in Chinese)