

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.041

基于 BCBS 模型的生态节点布局优化

于强¹ 岳德鹏¹ Yang Di² 马欢¹ 张启斌¹ 尹波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 32611)

摘要: 以生态脆弱区典型县域磴口县为研究区, 基于 2015 年遥感影像解译数据, 构建 MCR-P 模型提取县域尺度生态源地、廊道和节点, 将 Voronoi 图模型引入到生态节点布局研究中, 构建泰森盲区形心优化模型 (BCBS 模型), 进行生态节点布局优化。结果表明, 磴口县共能提取出 391 块生态源地节点和 667 个潜在生态节点, 其中需优化节点 182 个。优化后生态节点的覆盖率达到 87.79%, 较现状生态节点覆盖率提升了 22.56%。节点分布均匀性降低至 0.3978, 节点空间分布更加均匀。优化后节点构成的泰森多边形盲区的面积减小了 48446 hm², 且节点覆盖圆空间结构连片化, 优化后生态网络结构更为稳定。

关键词: 生态节点; 生态脆弱区; MCR-P 模型; BCBS 模型

中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0330-07

Layout Optimization of Ecological Nodes Based on BCBS Model

Yu Qiang¹ Yue Depeng¹ Yang Di² Ma Huan¹ Zhang Qibin¹ Yin Bo¹

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

2. Department of Geography, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA)

Abstract: In the arid and semi-arid region in Northwest China, the pattern of ecological land use is an important guarantee to maintain the regional ecological environment security and stability. Ecological network construction is of great significance. Accordingly, based on the typical ecologically vulnerable area—Dengkou county, remote sensing image interpretation data in 2015 is used as research material. The MCR-P model is constructed, and then the ecological sources, corridors and nodes in county scale are extracted. The Voronoi graph model is introduced into the study of layout of ecological nodes. Blind-zone centroid-based scheme model is constructed and ecological node layout is optimized. The results show that totally 391 ecological source nodes and 667 potential ecological nodes are extracted in Dengkou county. The number of nodes that need to be optimized are 182. After optimization, the coverage rate (C_R) of ecological nodes is 87.79%, which is increased by 22.56% compared with the current ecological node coverage rate. The node distribution uniformity (U) is reduced to 0.3978, and the node space distribution is more uniform. After optimization, the covering area of ecological node is 187003 hm², and the area of blind area of Tyson polygon is reduced to 117927 hm², which is reduced by 48446 hm². The structure and node coverage circle space tend to be contiguous, ecological network structure optimization is more stable. The BCBS model constructed by this research can improve the coverage rate of ecological nodes, which is a convenient and efficient method for the layout of regional ecological nodes. This study can provide a scientific basis for construction and management of current and future ecological security pattern.

Key words: ecological node; ecologically vulnerable area; MCR-P model; BCBS model

收稿日期: 2016-08-18 修回日期: 2016-09-08

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

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,随着人类活动的加剧和资源的不合理利用生态问题日益突出^[1-2],尤其在中国西北干旱半干旱生态脆弱区,荒漠化严重,景观斑块破碎,生态环境极其脆弱。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,区域生态网络的稳定能够保证区域生态安全。起到踏脚石作用的生态节点实现了生态网络从结构的联通到功能的联通,对生态节点进行空间布局优化意义重大^[3]。

国外的生态网络结构研究主要将景观生态的相关理论与土地规划相结合构建生态网络,包括自然 2000 网络、绿宝石网络、荷兰国家生态网络、欧盟生态网络等^[4]。近年来中国关于生态网络构建研究大多集中在森林生态网络构建、湿地生态网络构建、城市绿地生态网络构建等^[5]。在构建生态网络结构中,生态节点的提取、空间布局均为至关重要的环节,目前生态节点的提取研究主要包括景观阻力分析、网络分析、生态阻力面模型、形态学空间格局模型等^[4-6]。其中,生态阻力面模型通过提取阻碍生态流的最小耗费路径和最大耗费路径的交叉点以及生态廊道最薄弱的点来确定生态节点,被广泛应用于生态节点的提取研究中^[7]。目前,研究较多地集中于生态节点的提取,对提取后生态节点的布局优化研究极少,而在城市物流、传感器网络等领域研究中对节点的空间布局研究较多,主要的布局方法包括 VOR、遗传算法、贪婪寻优算法、BCBS 策略等^[8-9],其中,基于 Voronoi 图的 BCBS 模型具有覆盖率提升快、无需人为设置参数、鲁棒性高^[10-11]等优点。

本文选择荒漠绿洲区典型城市磴口县为研究区,利用生态源地能量因子改进生态阻力面模型提取生态节点,将基于 Voronoi 图的 BCBS 模型引入到景观生态学领域,并根据生态节点的特殊性进行模型的改进,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

磴口县地处东经 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,境内海拔高度 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,共有水域面积 2 406.67 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为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

选取磴口县夏季且少云的 Landsat OLI 影像(2015 年)为研究素材,同时利用研究区 2015 年 1:50 000 植被分布图、空间分辨率 30 m 的 DEM 等作为辅助数据。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^[12],提取磴口县的景观类型信息,使用 ArcMap 10.2 进行细碎斑块处理,运用叠加分析工具进行空间数据分析,最终在 ArcInfo 10.2 环境下完成拓扑和改错处理。

1.3 生态阻力面模型

基本生态阻力模型^[13],即 MCR (Minimal cumulative resistance) 模型的基本公式为

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

式中 V_{MCR} ——最小累积阻力面值

f_{min} ——某土地单元对不同的生态用地取累积阻力最小值

k ——生态源地斑块数量

D_{ij} ——从生态用地 j 到土地单元 i 空间距离

m ——土地单元数量

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,为简化计算,按照生态源地斑块的面积对生态源地进行分级,并赋予能量值^[14]。修正后 MCR 模型考虑了 3 方面因素,即生态源地能量等级、距离和基面阻力特征,修正后公式为

$$V_{MCR-P} = f_{min} \sum_{i=1}^{i=m} \sum_{j=1}^{j=k} D_{ij} R_i P_j \quad (2)$$

式中 V_{MCR-P} ——生态用地扩展最小生态累积阻力面值

P_j ——生态源地 j 所属等级的能量因子

生态源地的等级越高,生态能量越大。

生态阻力是指对生态用地扩张有不同等级阻碍

作用的地块,考虑地块表面的固有属性和附加属性构建生态阻力评价体系,将生态阻力分为5个等级,1级表示阻力最小,5级表示阻力最大。固有属性包

括用地类型、地质地貌特征。附加属性包括生态系统服务价值^[15-16]、NDVI-水体距离。所构建的阻力评价体系如表1、表2所示^[17]。

表1 生态阻力评价体系
Tab.1 Evaluation system of ecological resistance

项目	属性等级				
	1	2	3	4	5
用地类型	天然湖泊、水库坑塘、河流沟渠等	荒漠灌林、城镇绿地、天然牧草地等	耕地	城镇与建设用地	沙漠
地形地貌	极软基质	低软基质	柔软基质	低硬基质	坚硬基质
服务功能	供水、防洪、排水、水净化、二氧化碳吸收和氧气释放	防风、阻止沙漠化、野生动物栖息地	维护生物多样性、生物量生产	为人类居住提供土地	

表2 NDVI-水体距离生态阻力评价等级
Tab.2 NDVI-water distance ecological resistance evaluation

NDVI	与水体之间的距离/km				
	0~3	3~6	6~12	12~18	>18
0.8~1.0	1	1	2	2	2
0.6~0.8	1	2	2	3	3
0.4~0.6	2	3	3	4	4
0.2~0.4	2	3	4	4	4
0~0.2	3	4	5	5	5

1.4 Voronoi 图模型

Voronoi 图是一种解决覆盖控制问题的有效方法,将生态节点集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ 进行 Delaunay 三角剖分,节点连线形成 Delaunay 三角网^[18]。每个 Delaunay 三角形各边做垂直平分线,所组成的凸多边形成为泰森多边形或者称为 Voronoi 单元,泰森多边形构成的网状图则称为 Voronoi 图。Voronoi 图中的泰森多边形与目标点的覆盖情况存在对应关系可以有效确定盲区位置^[19]。

每个生态节点都有与之对应的泰森多边形,泰森多边形与目标点覆盖情况的对应关系有3种^[19-20]。

关系1:泰森多边形内的目标点到相应生态节点的距离最近。若目标点被覆盖,则一定被该泰森多边形内的生态节点覆盖。若该泰森多边形内的节点未覆盖目标点,则该目标点处存在盲区。

关系2:泰森多边形各边上的目标点至与其共边的泰森多边形内的节点的距离相等。若目标点被覆盖,则一定被共边的2个泰森多边形内的节点同时覆盖。若这2个节点未覆盖目标点,则该目标点处存在盲区。

关系3:泰森多边形顶点至共点的3个泰森多边形内的节点的距离相等。若顶点被覆盖,则一定被共点的3个泰森多边形内的节点同时覆盖。若这

3个节点未覆盖顶点,则该顶点处存在盲区。

1.5 BCBS 模型

生态源地、生态节点等生态作用明显的生态斑块的影响范围是有一定限度的,利用 Voronoi 图模型所构建的生态节点泰森多边形,并不一定能被生态节点的影响范围完全覆盖,这就形成了泰森盲区。盲区面积过大则不利于区域的生态环境稳定,且盲区面积过大会导致生态网络稳定性差,生态格局安全性低^[21]。本研究建立泰森盲区多边形形心优化模型(Blind-zone centroid-based scheme, BCBS)构建生态节点的新部署策略^[19],具体步骤如下:

首先,利用生态阻力面模型提取磴口县的生态节点,研究区域 T 内确定生态节点数目 N ,确定生态节点的集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 。对研究区域 T 利用 Voronoi 图模型进行划分,确定泰森多边形的集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 。

然后,计算当前生态节点 s_i 所对应的 v_i 的顶点覆盖情况,若顶点全部被覆盖,在节点集合中去除 s_i ,剩余生态节点重构泰森多边形,即 $V_{new} = \{v_{new}^1, v_{new}^2, \dots, v_{new}^n\}$,并计算新产生的泰森多边形顶点的覆盖情况。不存在盲区则更新该节点坐标为泰森盲区形心的坐标,保证生态节点均匀覆盖。若顶点未全部被覆盖,则说明存在泰森盲区。计算生态节点 s_i 在 v_i 内的泰森盲区多边形,计算该泰森盲区多边形的形心^[22] $C_i = (C_x^i, C_y^i)$ 。 n 边形顶点坐标按顺时针方向记为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ 。 n 边形形心 (C_x, C_y) 的计算公式为

$$C_x = \frac{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^n (X_i + X_{i+1}) (X_i + Y_{i+1} - X_{i+1} + Y_i)}{M} \tag{3}$$

$$C_y = \frac{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^n (Y_i + Y_{i+1}) (X_i + Y_{i+1} - X_{i+1} + Y_i)}{M} \tag{4}$$

其中 $M = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (X_i + Y_{i+1} - X_{i+1} + Y_i)$ (5)

式中 M —— n 边形面积

确定泰森盲区形心后, 计算泰森盲区形心至其同一泰森多边形内的生态节点的距离 d , 其计算公式为

$$|d| = \sqrt{(C_x - S_x)^2 + (C_y - S_y)^2} \quad (6)$$

设生态节点的影响半径为 R , 若 $|d| > 2R$, 则说明该生态节点在泰森盲区形心处没有产生生态影响, 添加生态节点也不能和其他生态节点相联通, 在实际的生态网络构建以及生态格局优化中, 该形心处不具有构建生态节点的条件, 故不能将生态节点移动至该形心处。若 $|d| \leq 2R$, 说明若将生态节点移动至该形心处, 能够保证和其他节点相联通。通过距离判别, 提取出研究区域内可以进行优化的生态节点。

最后, 计算可移动生态节点 s_i 在形心 C_i 处对 v_i 的覆盖率 Q_{cen}^i 。计算当前可移动生态节点 s_i 在当前位置 (x_i, y_i) 对 v_i 的覆盖率 Q_{cur}^i 。对覆盖率 Q_{cen}^i 和 Q_{cur}^i 进行比较, 如果 $Q_{cen}^i \geq Q_{cur}^i$ 则更新节点位置使 $s_i = (C_x^i, C_y^i)$, 否则保留当前的节点位置。重复计算直至所有节点比较结束。

模型的结果评价选择覆盖率 C_R 和节点分布均匀性 U ^[19]。覆盖率 C_R 计算公式为

$$C_R = \frac{\sum_{j=1}^{ab} Q_j}{ab} \quad (7)$$

其中 $Q_j = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p(s_i, t_j))$ (8)

式中 Q_j ——联合感知概率

$p(s_i, t_j)$ ——感知概率, 若目标点被覆盖则感知概率为 1, 未被覆盖则感知概率为 0

t_j ——目标点, 其位置记为 $t_j = (x_j, y_j)$
节点分布均匀性 U 计算公式为

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (9)$$

其中 $U_i = \left[\frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} (M_i - D_{i,j}) \right]^{1/2}$ (10)

$$M_i = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} D_{i,j} \quad (11)$$

$$D_{i,j} = d(s_i, z_j) \quad (12)$$

式中 k_i ——第 i 个生态节点的邻居节点个数

M_i ——第 i 个生态节点与邻居节点平均距离

$D_{i,j}$ ——第 i 个生态节点 s_i 与第 j 个邻居节点 z_j 之间的距离

U_i ——生态节点 s_i 与其邻居节点之间距离的标准差

2 结果与分析

2.1 生态节点提取

首先, 确定生态源地。在荒漠绿洲区湿地和荒漠灌林地的生态作用巨大, 以磴口县生态区位、自然条件、发展现状 3 个方面考虑, 将面积大于 10 hm² 的荒漠灌林地和所有湿地提取出来作为生态源地^[10], 共确定出 391 块生态源地(图 1a), 根据生态源地的面积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 级生态源地面积分别为 8 270.78、8 462.18、15 301.84、3 010.19 hm²。

然后, 提取生态廊道。利用 MCR-P 模型, 基于生态阻力评价体系构建生态累积阻力面^[23], 使用 ArcGIS 10.2 软件 Python 脚本语言提取生态廊道(图 1b)。县域尺度内共提取出满足实际建设条件的 47 466 条潜在生态廊道。最短的生态廊道为 30 m, 最长的潜在生态廊道为 10 679 m。

最后, 提取生态节点。生态廊道与生态累积阻

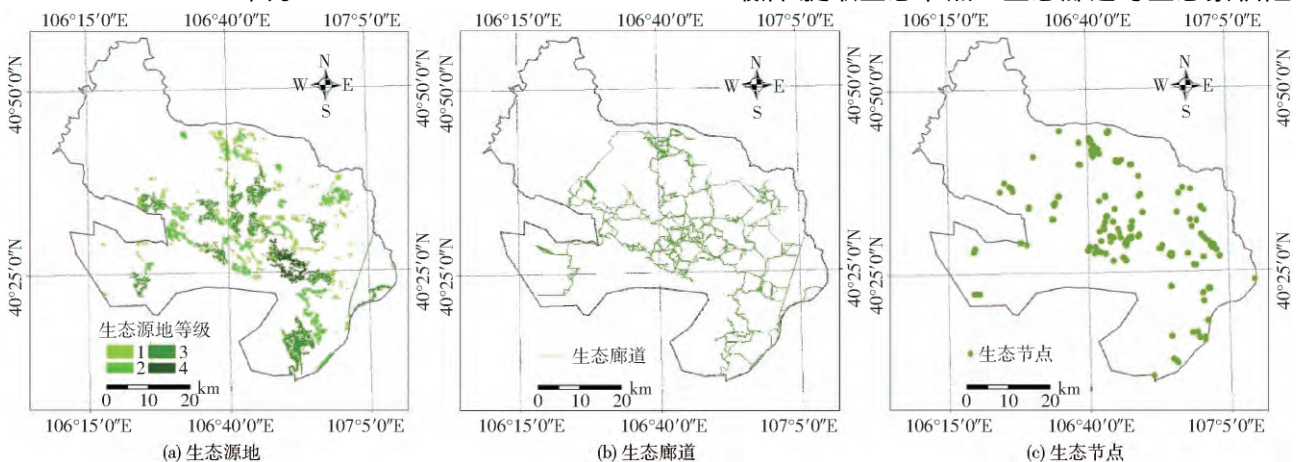


图 1 磴口县生态格局要素图
Fig. 1 Ecological pattern factor maps of Dengkou county

力方面的阻力值“山脊线”的交点即确定为生态节点(图1c),其是生态网络的最薄弱最重要的点。共提取出潜在生态节点667个。

2.2 泰森多边形构建

在生态网络中,生态源地实质上是生态作用显著、对周边有明显影响的特殊的生态节点。利

用 ArcGIS 10.2 软件,将生态源地斑块按照质心转换成点,并与所提取的生态节点一同构建泰森多边形(图2a)。在干旱区生态节点的影响范围较小,假定所有生态节点的辐射半径相同,根据研究区实际情况将生态节点影响半径设置为 1.5 km(图2b)。

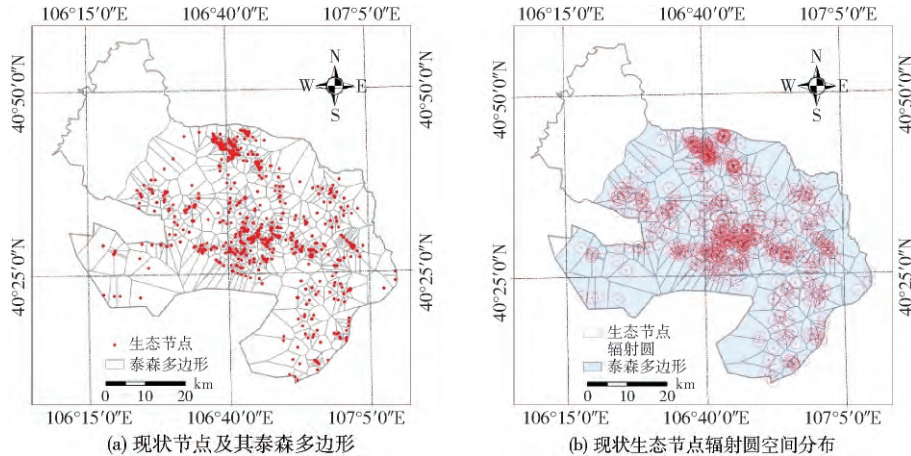


图2 磴口县现状生态节点及泰森多边形图

Fig.2 Status of ecological nodes and Tyson polygon map of Dengkou county

利用 Voronoi 图模型构建的生态节点泰森多边形涵盖了前文提到的3种关系。设定所有生态源地和生态节点的生态辐射半径均为 1.5 km,由图3a可知,目标点1被生态节点覆盖,不存在盲区。目标点2与目标点1在同一个泰森多边形中,但未被生态节点覆盖,则在目标点2处存在生态盲区。图3b和

图3c为关系2,目标点3未被两侧的生态节点覆盖,则在目标点3处形成盲区,而目标点4则同时被两侧的生态节点覆盖。图3d和图3e为关系3,其中目标点5处存在生态盲区,与其同距离的3个生态节点均未将其覆盖。目标点6则被共点的3个泰森多边形内的生态节点同时覆盖,不存在生态盲区。

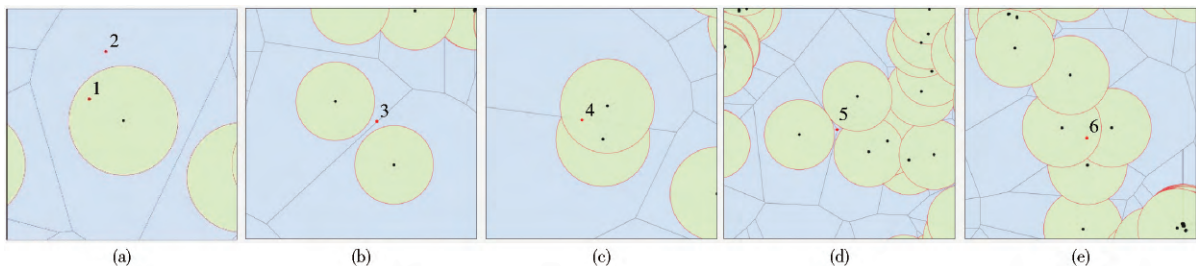


图3 目标点与生态盲区关系图

Fig.3 Relationship diagrams between target point and ecological blind area

2.3 生态节点布局优化

研究区节点总数为 1 058 个,包括 391 个生态源地节点和 667 个生态节点。本在进行节点优化布局中,假设生态源地节点和生态节点的影响范围相同,统称为生态节点。利用 ArcGIS 10.2 使用 Python 脚本语言编写程序筛选需要优化的生态节点,共筛选出待优化节点 182 个。现状生态节点的覆盖面积总计为 138 557 hm^2 ,所形成的泰森盲区面积总计为 166 373 hm^2 。现状节点的覆盖率为 65.23%,现状节点分布均匀性为 0.537 8(图4)。

在利用 Voronoi 图模型构建现状生态节点泰森多边形的基础上,利用 BCBS 模型对现状生态节点

进行重新布局(图5)。利用 Python 脚本语言编写程序在 ArcGIS 10.2 中进行迭代运算,在迭代次数为 274 次时生态节点平均覆盖率趋于稳定,最终优化后生态节点的覆盖率为 87.79%,相比较现状生态节点覆盖率有很大提升。优化节点分布均匀性为 0.397 8,节点分布的均匀性有较大下降,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。优化生态节点的覆盖面积总计为 187 003 hm^2 ,所形成的泰森盲区面积总计为 117 927 hm^2 ,经过生态节点布局优化盲区的面积减少了 48 446 hm^2 。

利用 Voronoi 图模型对优化后的生态节点构建泰森多边形。在生态网络格局中,相邻生态节点之



图 4 现状泰森盲区、节点覆盖区及需优化节点图

Fig. 4 Current Tyson blind area ,node coverage area and nodes need to be optimized



图 5 优化后节点分布及其盲区图

Fig. 5 Optimized node distribution and its blind area map

间的辐射圆能够相互覆盖,则表明景观生态流的流动性强,生态网络也更为稳定。将生态节点布局优化后构建的泰森多边形与原始泰森多边形进行对比(图 6a),在磴口县西北部那仁布鲁格嘎查附近,中部包尔盖农场至狼山山前、磴口县北部包勒浩特嘎查至中部纳林套海农场以及东北部哈腾套海农场至南部奈伦湖附近,优化后的泰森多边形更接近圆形,

生态节点的覆盖率大,生态节点的辐射圆相互覆盖且连片化,表明优化后的生态网络结构更为稳定(图 6b)。与 2015 年的土地利用数据进行叠加分析,优化后的泰森盲区中,乌兰布和沙漠东北边缘部分、狼山山前洪积扇部分、以及磴口县东南部城区至东部团结村至东北部同兴村的基本农田呈弧形的地带,泰森多边形呈狭长形,生态节点的覆盖率较低。

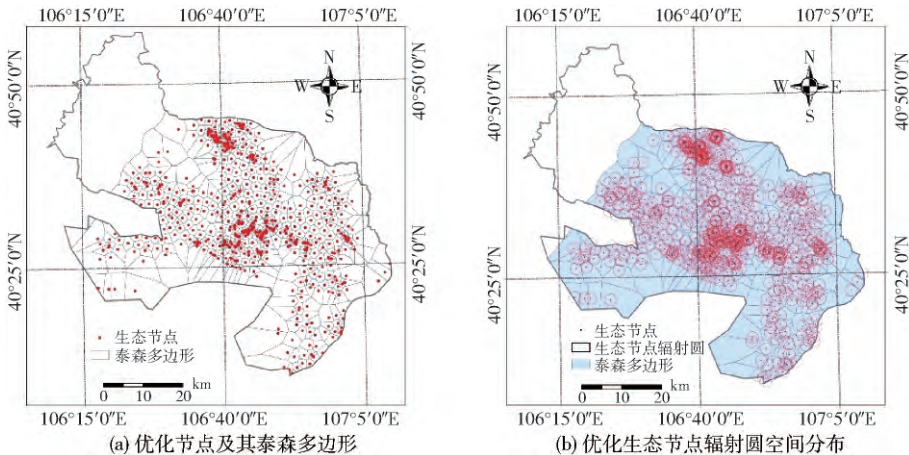


图 6 磴口县优化生态节点及泰森多边形图

Fig. 6 Optimization of ecological nodes and Tyson polygon map of Dengkou county

3 结论

(1) 以磴口县为研究区,利用 MCR-P 模型,在县域尺度共提取出 391 块生态源地,47 466 条潜在生态廊道,潜在生态节点 667 个。生态源地、生态廊道和生态节点构成点-线-面交织的生态网络,是磴口县生态环境稳定的重要保证。

(2) 基于生态节点的泰森多边形盲区形心构建生态节点空间布局优化模型,共筛选出需要优化的生态节点 182 个,优化后生态节点的覆盖率达到 87.79%,较现状生态节点覆盖率提升了 22.56%。优化节点分布均匀性降低至 0.3978,优化后生态节点在磴口县区域内的空间分布更加均匀。

(3) 优化后生态节点的覆盖面积达 187 003 hm²,

泰森盲区面积降低至 117 927 hm²,比现状泰森盲区的面积减少了 48 446 hm²。利用生态节点泰森多边形盲区形心的布局策略(BCBS模型)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

- 张虹波,刘黎明.土地资源生态安全研究进展与展望[J].地理科学进展,2006,25(5):77-85.
ZHANG Hongbo, LIU Liming. Main progress and prospects of land resource ecological security research [J]. Progress in Geography 2006 25(5):77-85. (in Chinese)
- 任艳敏,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].农业机械学报,2016,47(5):321-327.
REN Yanmin, TANG Xiumei, LIU Yu, et al. Layout method of cereal field based on production-ecology-location in metropolitan area [J]. 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)
- 张蕾,苏里,汪景宽,等.基于景观生态学的鞍山市生态网络构建[J].生态学杂志,2014,33(5):1337-1343.
ZHANG Lei, SU Li, WANG Jingkuan, et al. Establishment of ecological network based on landscape ecology in Anshan [J]. Chinese Journal of Ecology 2014 33(5):1337-1343. (in Chinese)
- 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,DOI:10.5846/stxb201504270870.
ZHANG Yuanjing, YU Binyang. Analysis of urban ecological network space and optimization of ecological network pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, DOI:10.5846/stxb201504270870. (in Chinese)
- 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 model: a case study in Bazhong western new district [J]. Acta Ecologica Sinica 2015 35(19):6425-6434. (in Chinese)
- 胡道生,宗跃光,许文雯.城市新区景观生态安全格局构建——基于生态网络分析的研究[J].城市发展研究,2011,18(6):37-43.
HU Daosheng, ZONG Yueguang, XU Wenwen. Research on the construction of landscape ecological security pattern in the new urban region development based on ecology network analysis [J]. Urban Studies 2011 18(6):37-43. (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 Physica Sinica 2012 61(12):95-104. (in Chinese)
- 刘京,常庆瑞,刘淼殷,等.基于SVR算法的苹果叶片叶绿素含量高光谱反演[J].农业机械学报,2016,47(8):260-265,272.
LIU Jing, CHANG Qingrui, LIU Miaoyin, et al. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for apple leaves based on support vector regression algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016 47(8):260-265, 272. (in Chinese)
- 熊义,魏建华,胡波,等.基于液压无源性理论的电液系统非线性鲁棒控制方法[J].农业机械学报,2015,46(11):383-391.
XIONG Yi, WEI Jianhua, HU Bo, et al. Hydraulic passivity based nonlinear robust control for electrohydraulic system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2015 46(11):383-391. (in Chinese)
- 武星,沈伟良,楼佩煌,等.视觉导引AGV鲁棒特征识别与精确路径跟踪研究[J].农业机械学报,2016,47(7):48-56.
WU Xing, SHEN Weiliang, LOU Peihuang, et al. Robust feature recognition and precise path tracking for vision-guided AGV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2016 47(7):48-56. (in Chinese)
- 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].农业机械学报,2015,46(增刊):267-273.
ZHANG Yonghan, SUN Ruizhi, LI Lin, et al. Research of remote sensing evaluation model library platform of ecological environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2015 46(Supp.):267-273. (in Chinese)
- 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)
- 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].农业机械学报,2016,47(9):285-293.
YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Simulation on ecological land use expansion based on EnKF-MCRP model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2016 47(9):285-293. (in Chinese)
- 唐秀美,郝星耀,刘玉,等.生态系统服务价值驱动因素与空间异质性分析[J].农业机械学报,2016,47(5):336-342.
TANG Xiumei, HAO Xingyao, LIU Yu, et al. Driving factors and spatial heterogeneity analysis of ecosystem services value [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016 47(5):336-342. (in Chinese)

(下转第329页)

- curve [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1923–1927. (in Chinese)
- 9 贾伟宽, 赵德安, 阮承治 等. 苹果夜视图像小波变换与独立成分分析融合降噪方法[J]. *农业机械学报* 2015, 46(9): 9–17.
JIA Weikuan, ZHAO Dean, RUAN Chengzhi, et al. Combined method for night vision image denoising based on wavelet transform and ICA [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 9–17. (in Chinese)
- 10 SONG Dongmei, LIU Bin, CHEN Shouchang, et al. Classification of the different thickness of the oil film based on wavelet transform spectrum information [J]. *International Oil Spill Response Technical Seminar, Aquatic Procedia*, 2015, 3: 133–143.
- 11 CHEN Hui, LIN Zan, MO Lin, et al. Continuous wavelet transform-based feature selection applied to near-infrared spectral diagnosis of cancer [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015, 151: 286–291.
- 12 ŁUKASZ J, JOZEF J. Early fault detection in gearboxes based on support vector machines and multilayer perceptron with a continuous wavelet transform [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 30: 636–641.
- 13 GB/T 20769—2008 水果和蔬菜中 450 中农药及相关化学品残留量的测定 液相色谱-串联质谱法 [S]. 2008.
- 14 GB/T 2763—2014 食品安全国家标准-食品中农药最大残留限量 [S]. 2014.
- 15 EHRENTREICH F. Wavelet transform applications in analytical chemistry [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2002, 372(1): 115–121.
- 16 ZHANG Chunlin, LI Bing, CHEN Binqiang, et al. Weak fault signature extraction of rotating machinery using flexible analytic wavelet transform [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 4(24): 162–187.
- 17 ROBOTHAM H, BOSCH P, GUTIERREZ-ESTRADA J C, et al. Acoustic identification of small pelagic fish species in Chile using support vector machines and neural networks [J]. *Fisheries Research* 2010, 102(1–2): 115–122.
- 18 ASHOK M, MANOJ T, HARI O G. SVM based zonal setting of Mho relay for shunt compensated transmission line [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 78: 422–428.
- 19 孙金英, 曹宏鑫, 黄云. 油菜叶片气孔导度与冠层光谱植被指数的相关性 [J]. *作物学报*, 2009, 35(6): 1131–1138.
- 20 WORKMAN Jerry, WEYER Lois. 近红外光谱解析实用指南 [M]. 褚小立, 许育鹏, 田高友, 译. 北京: 化学工业出版社, 2009: 31–35.

(上接第 336 页)

- 16 李虹, 唐秀美, 赵春江 等. 基于力矩平衡点法的北京市生态系统服务价值时空分布 [J]. *农业机械学报* 2015, 46(11): 151–156.
LI Hong, TANG Xiumei, ZHAO Chunjiang, et al. Temporal and spatial distribution of ecosystem service value in Beijing based on torque balance point method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 151–156. (in Chinese)
- 17 YU Q, YUE D P, WANG J P, 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*, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.014.
- 18 何雪军, 王进, 陆国栋 等. 基于约束 Delaunay 三角网的茶鲜叶几何参数识别 [J]. *农业机械学报* 2014, 45(9): 66–71.
HE Xuejun, WANG Jin, LU Guodong, et al. Geometric parameters recognition of fresh tea leaf based on constrained Delaunay triangulation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 66–71. (in Chinese)
- 19 方伟, 宋鑫宏. 基于 Voronoi 图盲区的无线传感器网络覆盖控制部署策略 [J]. *物理学报* 2014, 63(22): 132–141.
FANG Wei, SONG Xinhong. A deployment strategy for coverage control in wireless sensor networks based on the blind-zone of Voronoi diagram [J]. *Acta Physica Sinica* 2014, 63(22): 132–141. (in Chinese)
- 20 ZHAO Q H, LI Y, HE X J, et al. Multi-look SAR image segmentation based on voronoi tessellation technique and EM/MPM algorithm [J]. *Journal of Remote Sensing* 2013, 17(4): 841–854.
- 21 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 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2016, 27(5): 1611–1618. (in Chinese)
- 22 宋鑫宏, 方伟, 熊伟丽. 形心导向虚拟力的无线传感器网络部署算法 [J]. *江南大学学报: 自然科学版* 2015, 14(5): 549–555.
SONG Xinhong, FANG Wei, XIONG Weili. Centroid-based virtual force algorithm in wireless sensor networks [J]. *Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition* 2015, 14(5): 549–555. (in Chinese)
- 23 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 Hongou, et al. Ecological resistance surface model and its application in urban expansion simulations [J]. *Acta Geographica Sinica* 2014, 69(4): 485–496. (in Chinese)