



解晨, 周建好, 姜群鸥, 肖辉杰, 辛智鸣. 沿黄荒漠绿洲区生态廊道与生态节点识别及景观格局优化——以磴口县为例[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(05): 135-148.

XIE Chen, ZHOU Jianyu, JIANG Qun'ou, XIAO Huijie, XIN Zhiming. Identification of ecological corridors and ecological nodes and optimization of landscape pattern in desert oasis area along the Yellow River: Taking Dengkou County as an example[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(05): 135-148.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.13

沿黄荒漠绿洲区生态廊道与生态节点识别及景观格局优化 ——以磴口县为例

解晨¹ 周建好¹ 姜群鸥^{1,2*} 肖辉杰^{1,2} 辛智鸣³

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘要 沿黄荒漠绿洲区景观格局构建及优化对防治土地荒漠化、促进生态可持续发展具有重要意义。以磴口为研究区, 分析2005—2020年磴口景观类型时空演变特征, 结合最小累积阻力(MCR)模型、电路理论和水文分析法综合识别生态廊道和生态节点, 利用重力模型和景观连接度指数判断生态廊道和生态节点重要性, 构建磴口荒漠绿洲区景观格局并提出优化建议。结果表明: 1) 2005—2020年磴口主要植被景观中, 耕地规模最大且持续扩张, 草地呈先增加后减少趋势, 林地则持续缩减; 2) 识别出重要草地生态源地8块, 重要生态廊道99条和重要生态节点345个。以耕地和草地类型为主, 均位于研究区中部和东南部; 3) 提取出需重点优化生态障碍点面积159.83 km², 需重点优化生态夹点面积81.18 km², 分别位于研究区西北部和中东部区域; 4) 最后, 从维持南部并扩大西北部生态源地规模、打通并优化重要林草生态廊道和生态节点、生态障碍点和生态夹点等多方面提出荒漠绿洲区景观格局优化建议。本研究可为荒漠绿洲区生态环境规划提供重要科学依据。

关键词 生态廊道; 生态节点; 景观格局优化; MCR模型; 空间主成分分析

中图分类号 X826

文章编号 1007-4333(2024)05-0135-14

文献标志码 A

Identification of ecological corridors and ecological nodes and optimization of landscape pattern in desert oasis area along the Yellow River: Taking Dengkou County as an example

XIE Chen¹, ZHOU Jianyu¹, JIANG Qun'ou^{1,2*}, XIAO Huijie^{1,2}, XIN Zhiming³

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China)

Abstract The construction and optimization of landscape pattern is the basis to ensure the quality of regional landscape ecology. Dengkou County, as a typical area along the yellow desert oasis zone, it is of great significance to carry out the identification of ecological corridors and nodes and the optimization of landscape pattern in order to prevent land desertification and promote the sustainable development of

收稿日期: 2023-10-22

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF1304204); 国家重点研发中美合作项目(2019YFE0116500); 国家自然科学基金项目(42371291)

第一作者: 解晨(ORCID: 0009-0000-5806-294X), 硕士研究生, E-mail: xiechen_1998@bjfu.edu.cn

通讯作者: 姜群鸥(ORCID: 0000-0002-7942-5890), 教授, 主要从事生态环境遥感、3S技术在资源环境中应用等研究, E-mail: jiangqo.dls@bjfu.edu.cn

ecology. Taking Dengkou as the study area, this study analyzed the spatial and temporal evolution of landscape types from 2005 to 2020. Then the ecological corridors and ecological nodes were identified by combining the minimum cumulative resistance (MCR) model, circuit theory and hydrological analysis method. In junction with gravity model and landscape connectivity index, the importance of ecological corridors and ecological nodes were judged as well. Finally, the landscape pattern of Dengkou desert oasis area was constructed and optimization suggestions were put forward based on the above methodology. The results showed that: 1) The area of arable land was largest and continued to expand from 2005 to 2020. The grassland showed a trend of first increasing and then decreasing, while the woodland continued to decrease in the study period in Dengkou. 2) A total of 8 important grassland ecological sources were identified in the study area. There were 99 important ecological corridors and 345 important ecological nodes, which were mainly cultivated land and grassland types, and they were located in the middle and southeast of the study area. 3) An area of 159.83 km² of ecological barrier points and 81.18 km² of ecological pinch points for key optimization were identified, which were located in the north-western and central regions, respectively. 4) Finally, this study provided suggestions for the landscape pattern optimization in desert oasis area from the aspects of maintaining the south ecological source area and expanding the scale of ecological source areas in the northwest, connecting and optimizing important forest and grassland ecological corridors and ecological nodes, ecological barrier points and ecological pinch points. These conclusions provide important scientific basis for ecological environment planning in desert oasis areas.

Keywords ecological corridor; ecological node; landscape pattern optimization; MCR model; spatial principal component analysis

土地荒漠化是由气候变化和人类不合理经济活动等因素,造成干旱、半干旱和半湿润地区发生土地退化,包括土地生产力降低、土地资源丧失,并最终在地表呈现出类似荒漠景观的过程^[1]。中国荒漠化土地面积主要分布于新疆、内蒙古、西藏、甘肃和青海等地,占全国总面积27.2%,严重威胁着我国干旱地区生态环境以及人类生存与发展^[2]。绿洲是我国西北干旱荒漠区人类赖以生存的区域,荒漠绿洲生态系统是形成我国荒漠景观的必要生态组成要素,对阻滞土壤侵蚀和土地荒漠化具有重要作用^[3]。构建荒漠绿洲区合理景观分布和组合方式,优化荒漠绿洲区生态景观格局,既是保障荒漠绿洲区景观生态质量的重要支撑,也对维护区域生态安全和生态环境可持续发展具有重要意义^[4]。

景观格局优化是在综合理解景观格局和生态过程相互作用的基础上,通过调整区域景观类型数量及空间配置等方式,实现生态要素优化配置^[5-6],从而构建区域生态安全格局(Ecological security patterns)。最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型作为目前景观格局优化最基本的方法之一^[2,7-9],最早由Knaapen等^[10]提出,用于识别物种迁移过程中受外界因素干扰最小的路径,后由俞孔坚^[6]将其引入国内景观生态研究中,结合

GIS技术,形成以“生态源地识别-生态阻力面构建-生态廊道和生态节点提取-景观生态格局构建”的主流范式,现已得到国内外多数学者认可^[11]。生态源地是能够提供生态系统服务功能的重要斑块,相关研究或选择规模较大的生态保护区^[9],或采用形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)^[12-13]、生态系统服务价值^[5]、景观连通性^[14]、生境重要性和生态敏感性^[15]等指标和方法筛选生态源地。阻力面构建可通过主成分分析法^[8,12]、层次分析法^[9,16]等方法,确定自然因素、社会因素等多因素权重,构建综合阻力面^[11],还可采用夜间灯光数据修正阻力面^[17]。生态廊道是能够促进两地间生态流迁移交换的狭带状通道^[7],多基于MCR模型实现对源地之间最小成本路径的识别和模拟,其优势在于综合考虑生态流在各景观要素之间水平方向流动,能有效识别最小成本生态廊道;综合MCR模型和水文分析原理提取生态廊道,不仅能识别生态源地之间的低阻力廊道,还能提取出山脊线、山谷线以及按累积阻力面方向展开的通道^[19]。生态节点通常位于生态廊道交汇处^[8,20],多数研究将生态廊道交点作为生态节点^[19-20],优点在于能准确识别生态廊道薄弱处,但均以“点”的形式呈现;基于电路理论提取的生态节点具有空间范围信息,通过电流

值的强弱反映相对重要性,能有效弥补其他模型难以体现生态流动过程的不足^[18-21]。整体来看,现有景观格局相关研究多基于一种方法识别生态廊道和生态节点,较少结合多种方法进行综合识别。

磴口县作为沿黄生态经济带的重要节点,位于河套平原农牧交错区和乌兰布和沙漠之间的过渡区域,是“人沙斗争”最前沿阵地,涵盖沙漠、平原、山地等多种典型地貌类型,能够较为完整地呈现我国西北干旱半干旱荒漠绿洲典型脆弱区的特征规律。多年来,县域内出现的过度放牧、过度开荒和弃耕复垦等不合理利用土地现象,极大破坏着地表原有植被与表土,导致区内土地荒漠化和草地退化问题日益严重^[22-23],进行景观格局研究对维护区域生态安全和生物多样性具有重要现实意义。针对目前关于荒漠绿洲区景观格局相关研究报道较少、方法较为单一的现象,因此,本研究拟以磴口荒漠绿洲区为研究对象,基于MCR模型、水文分析原理和重力模型提取生态廊道,采用电路理论和成本路径工具,综合识别生态节点以及关键生态节点区域,构建磴口荒漠绿洲区景观生态格局并提出合理的优化建议,以期对荒漠绿洲区景观格局相关研究提供新思路,同时也为保障区域生态安全和可持续发展提供参考。

1 研究区概况

磴口县(106°09′~107°10′E, 40°09′~40°57′N),位于内蒙古巴彦淖尔市西南部,与乌海市、鄂尔多斯市、阿拉善盟交界处,是黄河中上游以及乌兰布和沙漠之间的过渡地带,占地面积约3 677 km²(图1)。研究区自西南向东北由乌兰布和沙漠向河套平原绿洲过渡,西北部为狼山脉,其余地区均为沙漠半沙漠区域,沙地、山地和平原所占比例约为7:2:1,是典型的荒漠绿洲生态脆弱区^[22]。全县位于北纬40°农作物黄金种植带,年平均气温8.8℃,年降水量143 mm,年日照时数3 300 h以上,常住人口9.1万人,有汉、蒙、回、满等24个民族,下辖5个苏木镇和5个农场公司,现已形成以草业、奶业、牧业为主、新能源产业为导向的产业格局。由于气候干旱、降水量少、蒸发量大以及人类活动不断干扰破坏,乌兰布和沙漠不断向东移动,生态环境急速恶化,不仅严重威胁着区域生态安全,还阻碍了当地社会经济发展^[4]。

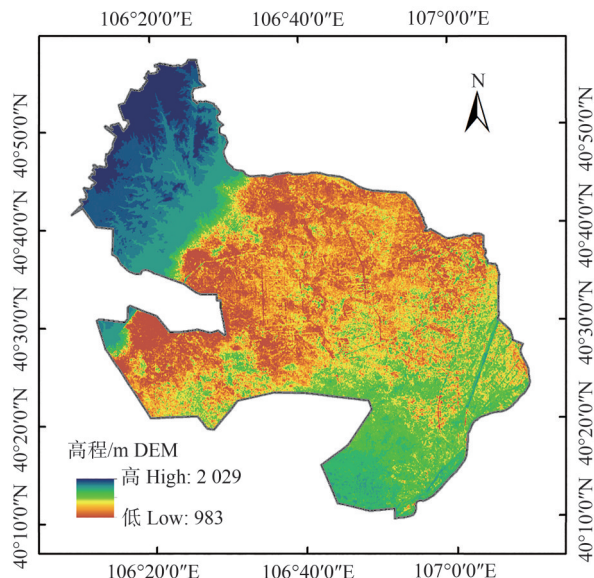


图1 研究区区位图

Fig. 1 Location map of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本研究选用2005、2010、2015和2020年土地覆盖数据,来自武汉大学研发的CLCD土地覆盖数据集(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809>)。该数据集以30万景Landsat遥感影像为基础数据,通过现有产品自动稳定样本以及目视解译样本共5 463个独立参考样本生产而得,将土地利用类型分为水体、耕地、林地、草地、裸地和不透水面等6类,经实地调研验证,总体准确率达87%以上。高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)ASTER GDEM 30M分辨率数字高程数据。归一化植被指数(NDVI)由高分二号卫星影像通过波段计算得到,空间分辨率为30 m。距主要水域距离和距主要道路距离数据来自国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)的全国DLG数据集,比例为1:250 000,筛选出国道、省道、县道、乡道和铁路等作为主要道路数据,以及河流和湖泊等面状水系作为主要水域数据。所有数据统一转换投影坐标系为WGS_1984_UTM_Zone_48N。

2.2 研究方法

2.2.1 基于成本的最小生态阻力面构建方法

生态阻力面是构建区域景观格局的基础。本研究从生态环境和社会环境两方面构建生态阻力

综合评价指标体系,所选阻力因子包括土地利用类型、DEM、坡度、NDVI、距主要水域距离和距主要道路距离,阻力值分级赋值如表1所示。基于磴口县实际情况,选择NDVI结合土地利用类型、DEM和坡度反映自然环境情况,选取距主要道路距离结合土地利用类型反映人类活动的干扰程度。基于阻力因子综合评价指标体系,采用空间主成分分析法(Spatial Principal Component Analysis,SPCA),对生态阻力因子栅格数据进行

降维处理,生成单波段主成分栅格数据,原始指标和主成分关系通过载荷矩阵表示,各主成分按其权重加权求和得到生态总成本^[12]。其计算公式如下:

$$F_c=\sum_{i=1}^n p_{ij}w_j=\sum_{i=1}^n p_{ij}\frac{F_j}{\sum_{j=1}^m F_j}$$

(1)

式中: F_c 为第*i*个单元的生态总成本; p_{ij} 为第*i*个单元的第*j*个指标; w_j 为各项指标权重; F_j 为各主成分的公因子方差。

表1 生态阻力综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of ecological resistance

因子类型 Factor type	因子名称 Factor name	阻力值赋值 Resistance value assignment				
		阻力值1 Resistance value 1	阻力值3 Resistance value 3	阻力值5 Resistance value 5	阻力值7 Resistance value 7	阻力值9 Resistance value 9
生态环境因子 Ecological factor	土地利用类型 Land use type	水体 Water area	林地 Woodland	耕地、草地 Arable land, grassland	裸地 Bare land	建设用地 Construction area
	归一化植被指数 NDVI	(0.6,1]	(0.3,0.6]	(0.2,0.3]	(0.1,0.2]	[0,0.1]
	DEM	[983,1 154]	(1 154,1 379]	(1 379,1 574]	(1 574,1 732]	(1 732,2 029]
	坡度/(°) Slope	[0,3]	(3,8]	(8,15]	(15,25]	(25,65)
社会环境因子 Social factor	距主要水域距离/m Distance from main waters	[0,500]	(500,1 000]	(1 000,1 500]	(1 500,2 000]	(2 000,5 000)
	距主要道路距离/m Distance from main roads	(1 200,5 000)	(900,1 200]	(600,900]	(300,600]	[0,300]

通过空间主成分分析,前4个主成分累积贡献率达到91.99%(>85%),表明这4个主成分能较好模拟研究区生态阻力情况,各主成分与生态阻力因子载荷矩阵如表2所示。其中,距主要水域距离在第1主成分载荷较高(0.695),表明水资源对研究区景观生态安全格局具有重要影响;距主要道路距离在第2主成分载荷较高(0.749),表明人类活动对区域生态安全有较为显著影响;坡度和高程在第3主成分载荷较高(0.535、0.636),说明地形变化对区域生态安全有较强影响;NDVI在第4主成分载荷较高(0.961),表明植被因素对于生态安全格局构建具有关键作用。根据主成分与阻力因子系数关系得到各因子权重,将各因子按权重叠加获得生态成本阻力面,利用成本距离工具获得最小累积阻力

面(图2),进一步分析研究区生态阻力分布情况可知,中部及东南等距水域越近区域,对生态流迁移的阻力越小,而西部裸地及距主要道路越近的区域,生态阻力值相对较高。

2.2.2 生态源地识别和重要性判断方法

生态源地是区域内生态功能较完善、生态稳定性和扩展性较好的区域,具有水源涵养、生物多样性保护等功能,能够推动生态过程朝正向发展^[7-8]。结合研究区实际情况,林地、草地和水域等斑块生态系统服务价值较高,对维持荒漠绿洲区生态系统功能具有重要意义,因此选取面积>10 km²景观斑块作为潜在生态源地^[2,24]。结合景观连接度计算整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC),将连通性指数较高的斑块作为生态源地并进行重

表 2 水资源、人类活动、地形、植被主成分与阻力因子载荷矩阵

Table 2 Water resources, human activities, topography, vegetation principal components and resistance factor load matrix

阻力因子 Resistance coefficient	主成分载荷 Principal component (PC) load					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
距主要道路距离 Distance from main roads	−0.628	0.749	−0.136	0.150	−0.025	0.052
距主要水域距离 Distance from main waters	0.695	0.498	−0.510	−0.002	0.056	−0.078
高程 Altitude	0.253	0.339	0.636	−0.098	−0.613	−0.175
坡度 Slope	0.143	0.269	0.535	−0.149	0.772	0.051
土地利用类型 Land use type	0.150	0.039	0.080	0.147	−0.133	0.965
归一化植被指数 NDVI	0.124	−0.045	0.155	0.961	0.081	−0.166

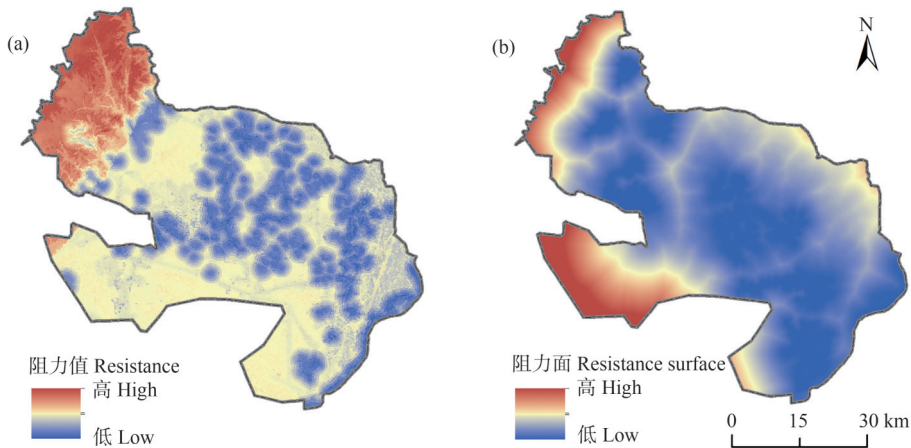


图 2 磴口生态成本阻力面(a)和最小累积阻力面(b)空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of ecological cost resistance surface (a) and minimum cumulative resistance surface (b) in Dengkou County

要性分级,从而识别出对生态系统稳定性和整体连接度起重要作用的景观斑块^[12-13,16,25]。

2.2.3 生态廊道识别和重要性判断方法

生态廊道是生态源地之间物质循环和能量流动的低阻力通道,是构建区域景观生态安全格局的基础^[8]。识别重要生态廊道对维护生态要素流动、增强区域生物多样性、改善生境质量具有重要意义^[2]。本研究基于MCR模型和成本路径工具,将生态成本阻力面作为成本数据提取生态廊道。利用重力模型(Gravity model)构建生态源地间相互作用矩阵,计算各生态源地间相互作用强度,根据相互作用指数选取阈值>500廊道作为重要廊道,定量评价生态廊道重要性^[12,19]。具体公式如下:

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^m} = \frac{\left[\frac{1}{p} \times \ln(S_i) \right] \left[\frac{1}{p} \times \ln(S_j) \right]}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}} \right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \times \ln(S_i S_j)}{L_{ij}^2 \times p_i \times p_j} \quad (2)$$

式中: G_{ij} 为源地*i*与源地*j*之间相互作用指数; N_i 和 N_j 分别为源地*i*和源地*j*的权重系数; D_{ij} 为源地*i*与源地*j*的潜在生态廊道标准化阻力值; p_i 和 p_j 分别为源地*i*和源地*j*的整体阻力值; S_i 和 S_j 分别为源地*i*和源地*j*的面积; L_{ij} 为源地*i*和源地*j*之间的生态廊道累积阻力值; $L_{\max}$ 为所有生态廊道累积阻力最大值。

2.2.4 生态节点和关键生态节点区域识别方法

生态节点是对生态系统各生态要素流动起关键

作用的节点或区域,大多分布于生态廊道汇合处^[19]。本研究基于水文分析原理,识别研究区生态阻力面上潜在山脊线,并提取生态廊道交点、廊道与山脊线交点作为生态节点。筛选景观连通性前10%节点以及重要生态廊道附近节点作为重要生态节点。考虑到生态节点的全面性和准确性,本研究基于电路理论^[18-19]和Linkage Mapper Toolkit^[20],识别了生态夹点和生态障碍点作为关键生态节点区域。生态夹点是对景观连通性有重要作用的区域,应当优先考虑保护,采用光栅中心识别方法进行识别^[20];生态障碍点是通过检测影响生物在通道中迁移扩散的障碍物进行提取,可识别出原本拥有较好景观连通性、有一定阻力但不会完全阻碍生态流动的区域,以及修复后能产生更大生态效益、更好提升区域内景观连通性的区域^[26]。本研究设置成本加权距离为2 km,提取高密度电流区域作为关键生态节点区域,采用自然断点分级法将等级划分为I~V级。

3 结果与分析

3.1 荒漠绿洲区生态源地及重要性识别

分析2005—2020年研究区景观类型时空演变特征,结果见图3和表3。可见:第一,耕地面积最大且呈持续扩张态势,所占比例从2005年18.11%增加至2020年33.16%,主要由草地和裸地转移而来,以西南部、中部和北部区域耕地扩张速度最快,包括沙金套海苏木、隆盛合镇、包尔盖农场和乌兰布和农场等。第二,草地呈现先增后减趋势。2005—2010年其面积所占比例增至峰值26.33%,主要为裸地向草地转移;2010—2020年草地面积所占比例降至19.28%,逐渐被裸地或耕地替代,主要体现在沙金套海苏木以及各个农场所在区域,草地空间分布离散程度逐渐提高,但东南部巴彦高勒镇的草地规模开始有所扩大。第三,林地在现有植被景观中分布规模最小,其面积所占比例由3.89%持续缩减至

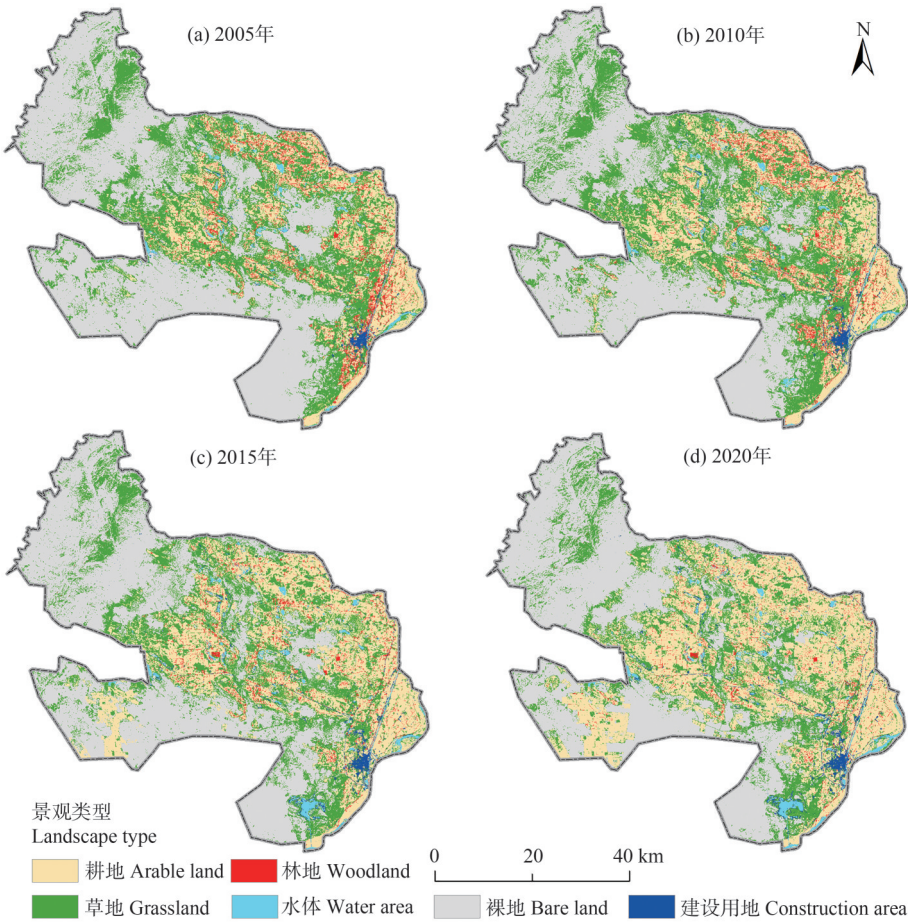


图3 磴口县2005年、2010年、2015年和2020年景观格局空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of landscape pattern in Dengkou County in 2005, 2010, 2015 and 2020

1.99%，2010—2015 年减少速度最快，磴口东南部和北部区域较多林地逐渐被耕地代替，以巴彦高勒镇、渡口镇、补隆淖镇、隆盛合镇最为显著，但在磴口中部区域林地逐渐由分散发展到聚集形态。第四，裸地也是磴口主要景观类型之一，位于西北部

的裸地不断侵占草地，对生态流动过程阻碍作用增强。研究区东南部建设用地规模持续增加，主要由耕地和草地转移而来。此外，水体规模整体略有增加，于 2010 年前后在磴口南部出现明显扩张区域，为维持草地规模提供有利条件。

表 3 磴口县 2005—2020 年土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix of Dengkou County from 2005 to 2020 km²

2005 年土地利用类型 Land use type area in 2005	2020 年土地利用类型 Land use type in 2020						合计 Total	转移 Transfer
	耕地 Arable land	林地 Wood- land	草地 Grass- land	水域 Water area	裸地 Bare land	建设用地 Construction area		
耕地 Arable land	605.34	26.43	16.69	11.50	0.75	5.10	665.81	60.47
林地 Woodland	98.48	23.59	13.19	0.47	0.16	6.95	142.84	119.25
草地 Grassland	287.20	18.03	407.03	6.99	145.70	17.30	882.25	475.22
水域 Water area	10.58	0.27	1.33	29.61	0.91	1.13	43.83	14.22
裸地 Bare land	216.28	4.41	270.37	9.96	1410.61	7.18	1918.81	508.20
建设用地 Construction area	1.04	0.59	0.36	0.57	0.06	19.99	22.61	2.62
合计 Total	1218.93	73.33	708.98	59.10	1558.19	57.65	3676.18	
新增 Addition	613.59	49.74	301.95	29.49	147.58	37.66		

基于磴口景观类型及景观连接度指数(IIC),识别出 12 块生态源地及 8 块重要生态源地,结果见图 4。可见:在磴口中部和东南部生态阻力值较低区域,生态源地规模较大且呈聚集分布特征,对区域整体生态廊道和生态节点建设最为重要;西北部裸地区域阻力值较高,生态源地分布更为分散,生态要素迁移扩散强度相对较低。1 号生态源地是唯一水域生态源地,位于渡口镇东南边界,其余均为草地生态源地。2、3、4 号生态源地位于研究区西北侧沙金套海苏木内裸地区域。识别重要生态源地共 8 块(I~Ⅲ级),其中,5、6、7 号生态源地位于沙金套海苏木与巴彦套海农场交界处,也是耕地和裸地之间的过渡区域;8、10、11 号生态源地重要性较高,附近草地、林地、耕地和水体均有分布,位于研究区中部巴彦套海农场、纳林套海农场及沙漠林业试验中心农场,是连接西北和东南区域生态源地的关键,对整个区域生态要素流动过程尤为重要;9 号和 12 号生态源地重要性等级最高且后者面积最大,分别位于纳林套海农场及巴彦高勒镇,连接耕地、水体、建设用地和裸地斑块,距离水域源地较近,对荒漠绿洲植物生长和物种迁移扩散具有重要作用。

3.2 荒漠绿洲区生态廊道提取及重要性识别

基于 MCR 模型和成本路径工具提取生态廊道

共 553 条,结果见图 5。可见:磴口生态廊道主要呈西北-东南走向分布于中部和东南部区域,这些区域生态阻力值较小,生态源地数量较多且分布较为集中,利于生态流动过程以及生态廊道和生态节点构建。北线廊道连接 1 号和 4 号生态源地,途径区域大多为耕地,水源地较少,构建难度相对较大,需要避免耕地无序扩张并加强草地植被生态恢复。

从构成来看,磴口生态廊道主要以耕地和草地廊道为主,林地廊道和水域廊道数量很少。其中,耕地廊道共 219 条,占有廊道总长度 65.84%,主要分布于磴口中部和东南部区域,如渡口镇、巴彦高勒镇东北部、沙金套海苏木和包尔盖农场均有耕地廊道集中分布。水域廊道共 57 条,占有廊道总长度 4.44%,主要分布于巴彦套海农场、纳林套海农场等中部地区,磴口西北部区域几乎没有水域廊道,所以林地和草地廊道极少分布,水分利用条件是研究区生态廊道建设的限制因素之一。

林地廊道和草地廊道作为动植物生存、迁徙的必要途经地,应当着重加以保护和恢复。研究共识别出草地廊道 255 条,占有廊道总长度 29.19%,主要分布于磴口中部和南部草地生态源地附近,在沙金套海苏木东南部、巴彦套海农场、沙漠林业实验中心农场附近均有较为密集的草地廊道分布,而

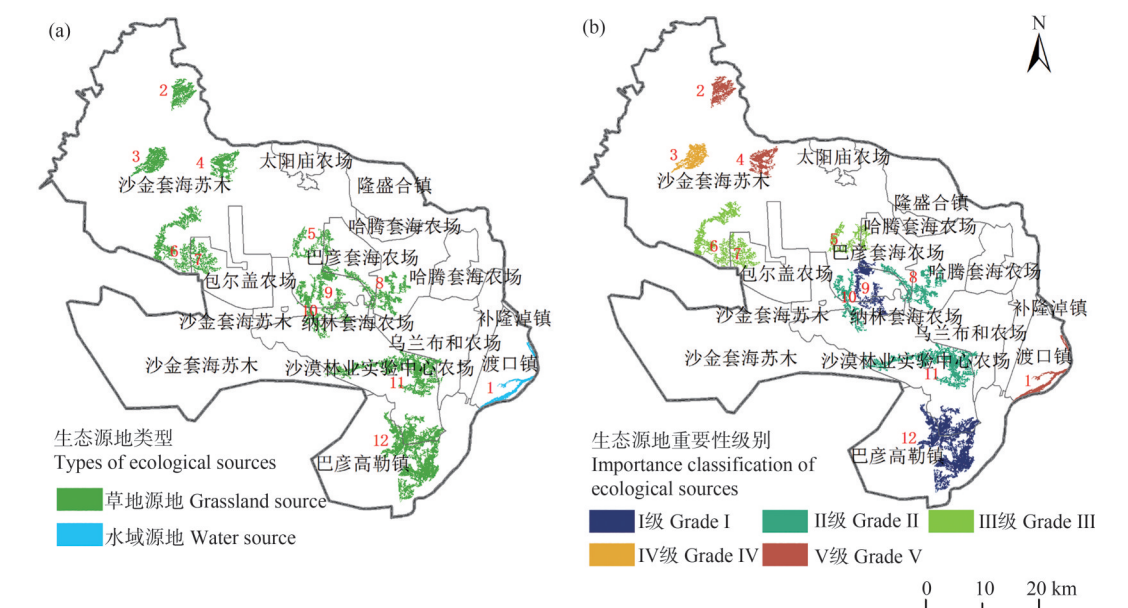


图4 磴口县生态源地类型(a)及重要性级别(b)空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of ecological sources types (a) and importance classification (b) in Dengkou County

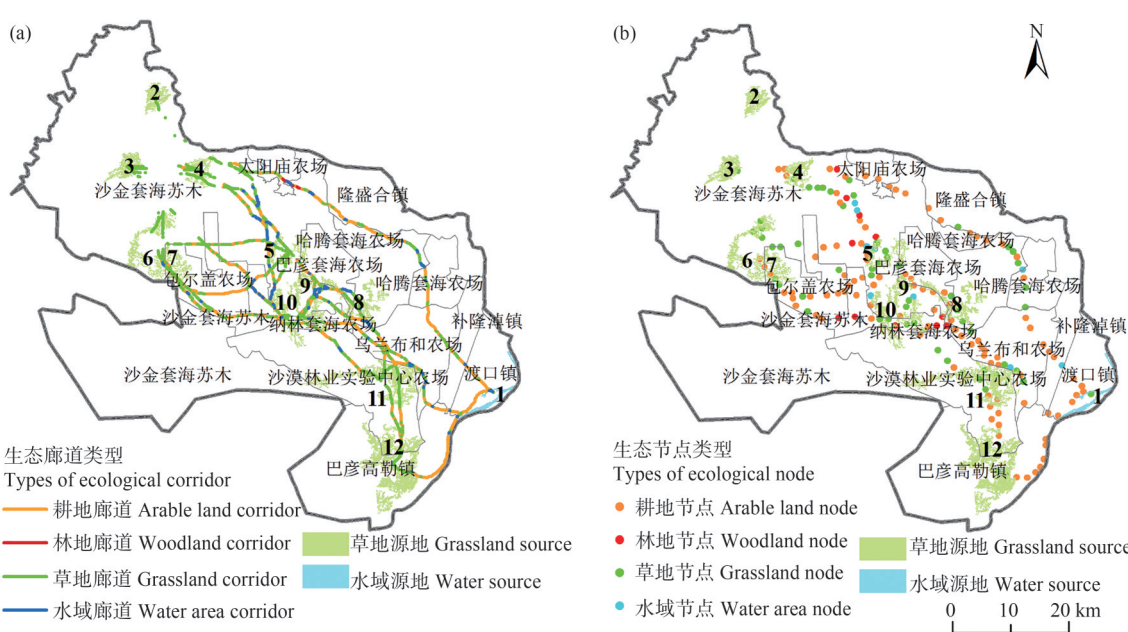


图5 磴口县生态廊道(a)和生态节点(b)空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of ecological corridors (a) and ecological nodes (b) in Dengkou County

在西北部沙金套海苏木的草地廊道分布相对较少，对生态流动阻碍较大。林地廊道共22条，占有廊道总长度0.54%，主要分布在磴口北部太阳庙农场与沙金套海苏木交界处，在纳林套海农场西北部与包尔盖农场交界处也有极少量林地廊道分布，这与磴口荒漠绿洲区林地生长适宜性和人为活动干扰有关。

基于重力模型判别廊道重要性，共获得99条重要生态廊道(图6)。可见：磴口重要生态廊道包括耕地廊道43条，林地廊道2条，草地廊道28条和水域廊道26条，长度所占比例分别为69.07%、0.11%、21.54%和9.28%。重要生态廊道是重点优化区域，主要分布于磴口中部和东南部，包括巴彦套海农场、纳林套海农场、沙漠林业实验中心林

场,以及包尔盖农场西北部与沙金套海苏木交界区域,是连接1号水域源地与中部、东南部草地源地的重要纽带。

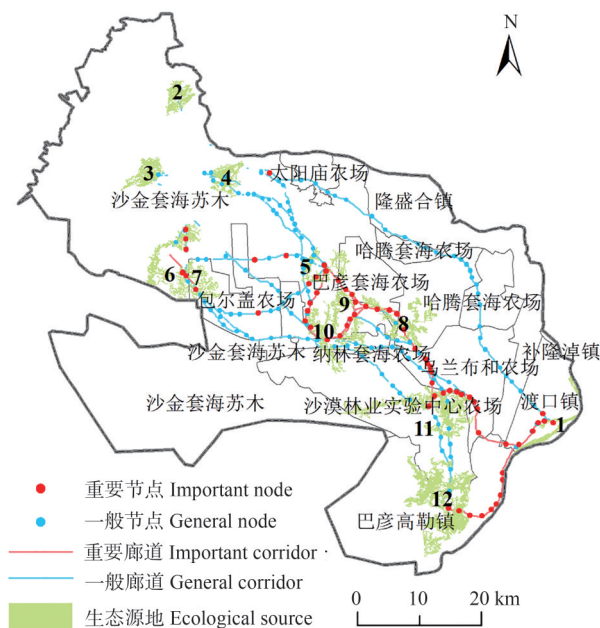


图6 磴口县生态廊道和生态节点重要性分级图

Fig. 6 Importance classification of ecological corridors and ecological nodes in Dengkou County

3.3 荒漠绿洲区生态节点识别及重要性判断

基于水文分析法及生态廊道提取结果识别生态节点948个,结果见图5。可见:耕地节点580个,所占比例为61.18%,主要集中在磴口中部和东南部区域。草地节点264个,所占比例为27.85%,位于沙金套海苏木东南部的草地节点,不仅能提升裸地与草地交界处生态廊道连通性,促进中部区域物种迁移向西北部扩散,还对生态源地规模扩大具有重要意义;位于巴彦套海农场、纳林套海农场等中部区域的草地节点,对维持现有生态源地规模、提升生物多样性起到关键作用;位于哈腾套海农场附近草地节点能够加强北线生态廊道建设,扩大草地规模形成生态源地。林地节点共61个,所占比例为6.43%,主要分布于沙金套海苏木西南部、纳林套海农场周边区域,林草地生态节点对提升区域景观连接度、改善生境质量具有重要意义。水域节点43个,所占比例为4.54%,主要分布于沙金套海苏木西南部区域,在巴彦套海农场和沙漠林业实验中心农场内也有分布,水域节点有助于林草地生态节点建设。筛选景观连通性前10%节点以及重要生

态廊道附近节点,共识别重要生态节点345个(图6)。可见:重要生态节点主要位于磴口中部和东南部,包括沙金套海苏木东南部、巴彦套海农场、乌兰布和农场、巴彦高勒镇等地,有助于提升局部薄弱处生态功能,促进中部和东南部生态廊道建设。其中,耕地重要节点234个,所占比例为67.83%;林地重要节点23个,所占比例为6.67%;草地重要节点62个,所占比例为17.97%;水域重要节点26个,所占比例为7.54%。

基于电路理论和Linkage Mapper Toolkit,本研究还识别了生态障碍点(图7)和生态夹点(图8)作为关键生态节点区域。由图7可见:当考虑改进得分相对于LCD百分比时,提取生态障碍点总面积为30.16 km²,I级、II级、III级障碍点面积分别为0.61、0.60和1.16 km²,主要分布于巴彦套海农场西南部和沙金套海苏木南部,这些区域原本具有较好的景观连通性,对生态流动过程有一定阻力但不会完全阻碍,应尽可能维持现状避免受到破坏。当不考虑改进得分相对于LCD百分比时,提取生态障碍点总面积为159.83 km²,I级、II级、III级障碍点面积分别为4.44、9.63和19.33 km²,主要分布于研究区西北部沙金套海苏木,这些区域电流密度值更高,修复后产生生态价值更大,能够更好提升区域景观连通性^[20],应作为需重点优化的生态障碍点区域。

荒漠绿洲区生态夹点识别结果如图8所示。可见:当采用pairwise模式时,提取生态夹点总面积为81.18 km²。其中,I级、II级、III级生态夹点面积分别为0.10、2.69、6.21 km²,主要分布于沙金套海苏木南部与巴彦套海农场交界区域;当采用All-to-one模式时,提取生态夹点总面积为170.97 km²,其中I级、II级、III级生态夹点面积分别为0.78、6.95、25.52 km²,主要分布于沙金套海苏木西北部以及巴彦套海农场附近区域。本研究采用电流值最高的pairwise模式提取的生态夹点,作为重点优化生态夹点区域,对提升景观连通性起到至关重要的作用,应当优先考虑采取保护措施。

3.4 荒漠绿洲区生态景观格局优化技术

荒漠绿洲区景观格局优化从生态源地保护、生态廊道与生态节点优化多个层面进行。具体而言,依据生态源地结构、规模和空间关系等属性特征,设计针对性保护方案。首先,为充分发挥生态源地生态效益,应保护面积较大的生态源地规模不减。研

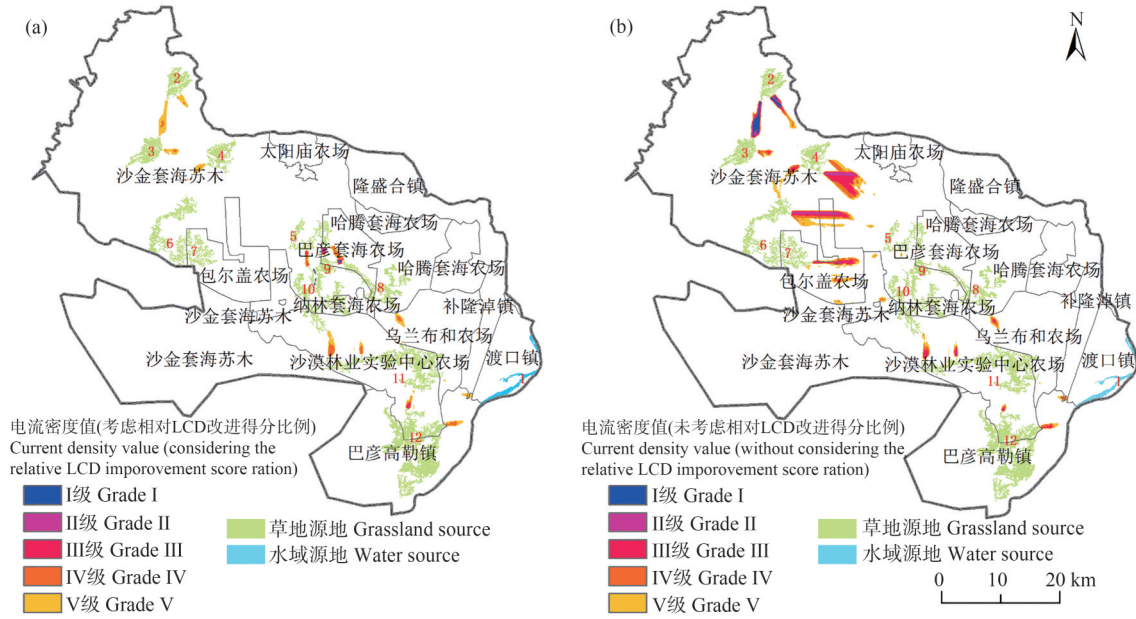


图7 考虑(a)和未考虑(b)相对LCD改进得分比例模式下磴口县生态障碍点空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of ecological barrier points in Dengkou County considering (a) and without considering (b) the relative LCD improvement score ratio

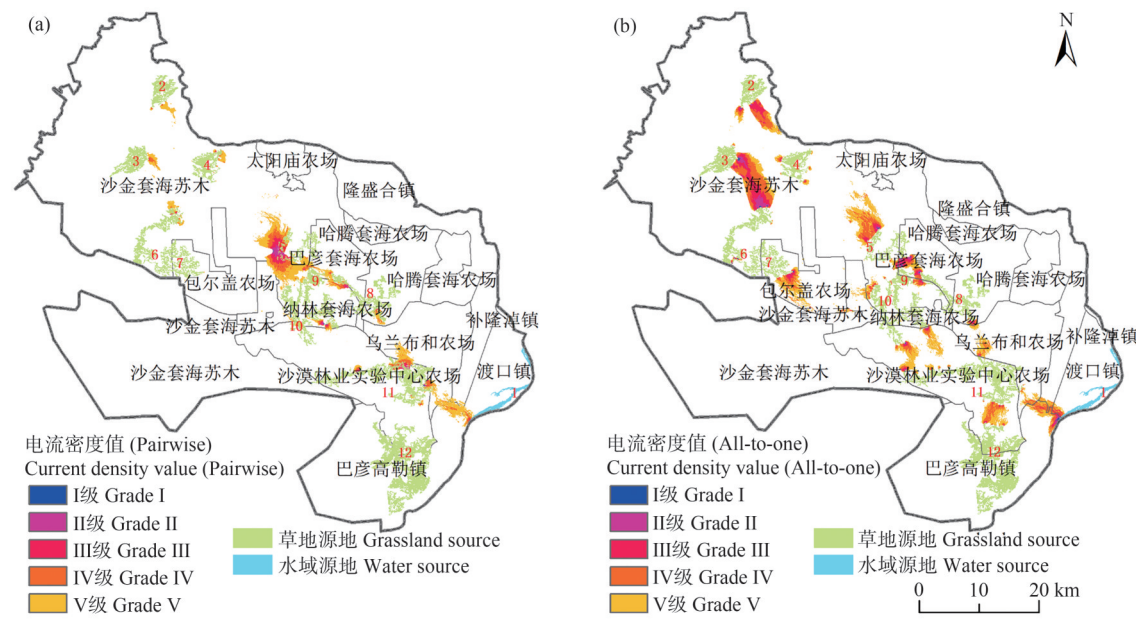


图8 Pairwise (a) 和 All-to-one (b)模式下磴口县生态夹点空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of ecological pinch points in Dengkou County under Pairwise (a) and All-to-one (b) models

究区东南部11和12号生态源地是全域面积最大的两块源地,分别位于沙漠林业试验中心农场和巴彦高勒镇。由于近年来耕地和建设用地规模扩张速度很快,这两块源地附近草地和林地规模呈减少态势,因此,应严格控制建设用地总量并加强用地监管,尽量维持原有生态源地规模不减,促进现有源地生态

功能发挥。同时还需结合生态廊道和生态节点优化措施,增加相邻源地之间连通性,稳固并扩大生态源地规模。对于沙金套海苏木北部的2、3、4号生态源地,由于规模较小,空间距离相隔较远,位于生态结构单一、稳定性较弱的裸地区域,应当结合生态障碍点优化进行封沙育草,为裸地景观转向草地景观创

造适宜条件。对于5号、6号和7号草地源地,主要位于沙金套海苏木南部与包尔盖、巴彦套海农场交界处,也是耕地和裸地交界处,应当在现有植被中增加耐旱固沙植物物种,结合生态廊道优化措施在源地边缘设置保护屏障,提高其生态结构丰富度,增强源地生态稳定性,阻碍草地转变为裸地。

生态廊道和生态节点优化需充分考虑生态要素的重要性和景观属性,重点优化重要生态廊道和生态节点(图9)。生态廊道优化重点是打通重要廊道,并优化周围重要生态节点,实现磴口东南部水域源地与南部、中部草地生态源地连通,降低生态

流迁移过程中的生态阻力。具体而言,东南部乌兰布和农场、沙林中心农场、巴彦高勒镇东部等地分布大面积耕地,应在农区建设农田防护林带,并结合“适地适树”原则,在草地廊道和林地廊道两侧设置保护屏障或缓冲区,搭配适宜的旱生和超旱生灌草植物物种,提高生态群落结构丰富度,限制不合理耕作方式等人为干扰入侵;中部纳林套海农场、巴彦套海农场等地位于农田、绿洲和沙地的过渡区域,除了农田防护林带之外,还应以耐旱灌草植物营造防沙固沙林,可选择沙棘、梭梭、花棒等植物进行合理搭配。

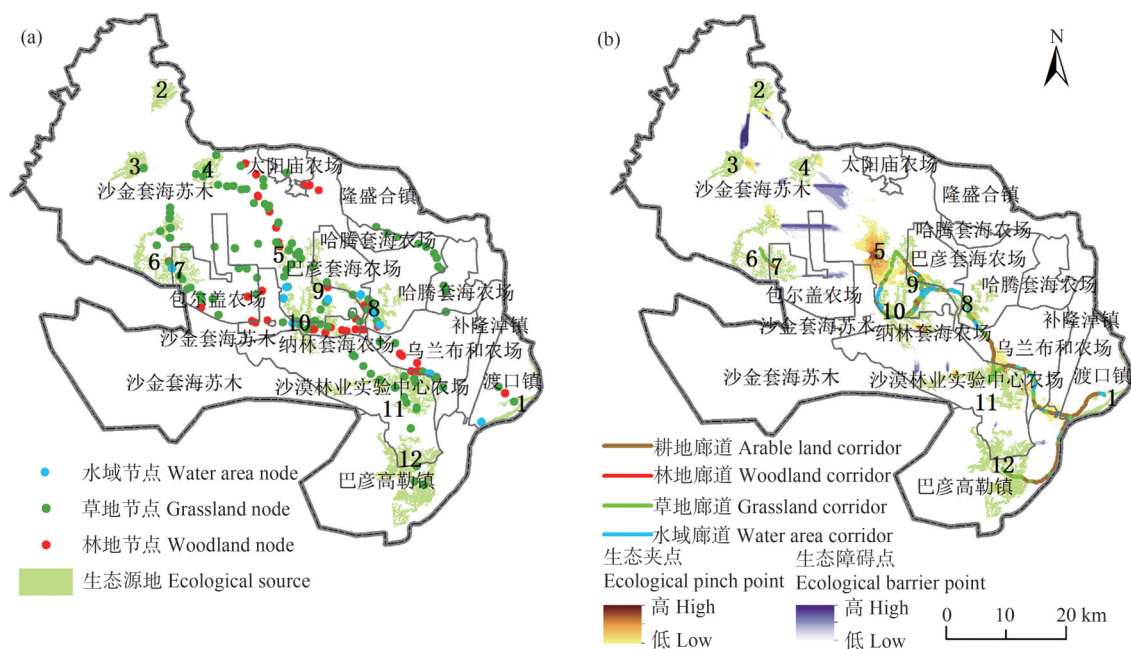


图9 磴口县生态节点(a)和生态廊道(b)优化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ecological nodes (a) and ecological corridors (b) optimization in Dengkou County

对于生态节点优化,应重点关注林地节点、草地节点、生态障碍点和生态夹点区域,目标在于通过生态修复,大幅提升这些关键局部区域生态效益。林地和草地节点应在原有防护林体系基础上进行重点优化。巴彦套海农场、纳林套海农场等中部区域生态源地和水源地相对更丰富,应充分利用节水灌溉措施,合理搭配乔灌草,提升整体生态功能;位于包尔盖农场、太阳庙农场以及沙金套海苏木的林地和草地节点,应在防护林体系构建中着重搭配耐旱沙生植物,如梭梭、怪柳、柠条等,有助于向西部和北部区域延伸,恢复原有防风固沙屏障,同时结合草方格固沙、封沙育草等方法,优化西北

部草地节点,巩固西北部与中部生态源地间连接通道;位于哈腾套海农场、巴彦套海农场东北部的草地节点,多位于耕地周边,应规范耕作措施,尽可能减少人为干扰,提升关键局部生态功能。需重点优化生态障碍点区域主要位于西北部沙金套海苏木裸地区域,应结合防风固沙、封沙育草等手段,为现有生态源地间生态要素流动过程创造条件。需重点优化生态夹点区域主要位于巴彦套海农场西北部,处于草地与裸地斗争前沿,应当配合中部区域林草地生态廊道和生态节点建设,优先采取生态修复措施,能大幅提升西北部与中部区域景观连通性。

4 讨论与结论

荒漠绿洲区景观空间格局和空间结构对实现区域生态安全以及可持续发展具有重要影响^[5,7,20]。本研究以荒漠绿洲典型脆弱区磴口县为研究区,识别重要生态廊道和生态节点,所得结果与于强^[4]基本一致。磴口县生态廊道和生态节点中,耕地和草地类型相对较多,林地类型相对较少。这主要是由于2005—2020年以来耕地大面积扩张,不断侵占草地和林地用地所致。耕地面积所占比例从2005年的18.10%增长至2020年的33.15%,尤其是东北部隆盛合镇、东南部巴彦高勒镇、渡口镇及周边区域林地面积锐减最为明显,磴口中部的草地也出现显著减少,均被耕地替代,这也在一定程度上增加了耕地廊道数量。由于研究区地处荒漠绿洲区,降水量少,地表蒸发量大,植被生长主要受水分利用条件限制,草本植物根系主要利用土壤表层0~30 cm内土壤水分^[27]。此外,研究发现磴口中部和东南部多分布有草地生态源地,适宜进行草地生态廊道建设和优化,并且中部区域水源地相对丰富且林地逐渐呈现聚集趋势,具备林地生态廊道和生态节点建设的基础;磴口西北和西南部主要为裸地区域,乔木根系较难利用到深层土壤水分以维持正常生存,生态廊道和节点建设难度较大,应合理搭配灌草植被,以生态障碍点和生态节点优化为主。因此,有必要重点优化磴口中部和东南部林草生态廊道和生态节点,提升东南部水域源地与中部、东南部草地源地连通性。

本研究将MCR模型和电路理论相结合,实现了生态节点的综合识别。已有研究基于电路理论识别关键生态节点区域,较少应用于荒漠绿洲区景观格局相关研究^[21,28],本研究为荒漠绿洲区景观格局优化提供了新思路。电路理论基于景观生态学原理,通过借助电流在阻力面随机游走特征,精准模拟生态流实际迁移过程,通过高电流密度值确定生态节点的空间分布范围,从而识别需要重点保护或修复的关键区域^[11],较好补充了MCR模型在生态过程模拟方面的不足,但在设定生态流路径的宽度信息时,需要根据实际情况而定。本研究结果显示:生态障碍点高值区域主要分布在研究区西北部沙金套海苏木和包尔盖农场,这是由于该区域景观类型多为草地转化而来的裸地和耕地,目前对生

态廊道连接和生态流动过程阻碍较大;生态夹点高值区主要分布于研究区中部,这是因为该区域位于生态源地附近,本身生态阻力值较低,植被类型相对更丰富,生态流动过程密切且频繁,适宜林地、草地和水域节点建设,对于维持区域景观连通性具有重要作用^[27]。

本研究虽然在生态廊道、生态节点识别及景观格局优化方面取得一定成果,但也存在一些不足之处:首先,受论文篇幅限制,本研究仅构建了2020年磴口荒漠绿洲区景观格局,未来可基于动态视角^[17,21],考虑更长时间序列,构建多期景观格局,进一步探讨景观格局演变特征和主要驱动因素;其次,本研究主要选择自然环境和社会环境等因子构建阻力面,未来还可以加入夜间灯光指数进一步修正阻力面^[17];另外,因研究区东南部分布有大量耕地廊道,相关优化范围、优化手段和措施需要结合地区最新国土空间规划和基本农田保护红线范围进行进一步探讨。

本研究以内蒙古自治区磴口县为研究区,综合MCR模型、电路理论和重力模型等方法,构建了荒漠绿洲区景观格局并提出优化建议,主要结论如下:1)2005—2020年,磴口荒漠绿洲区耕地面积持续扩张,草地规模呈先增后减趋势,林地则持续缩减,为保障区域生态安全,需识别出关键景观要素并进行优化;2)本研究识别出重要生态源地8块,重要生态廊道99条,重要生态节点345个,生态障碍点159.83 km²,生态夹点81.18 km²,这些景观要素对提升区域景观连通性具有重要作用,需要重点优化;3)景观格局优化应保证重要生态源地规模不减并扩大西北部生态源地规模,减少草地源地周边耕地无序扩张,打通重要林草生态廊道,重点优化林草地生态节点、生态障碍点和生态夹点区域,增加西北部与中部源地之间连通性。研究结果可为荒漠绿洲区生态环境保护相关政策和规划提供科学依据,为保障区域生态安全和可持续发展提供参考。

参考文献 References

- [1] 朱震达. 中国土地荒漠化的概念、成因与防治[J]. 第四纪研究, 1998, 18(2): 145-155
Zhu Z D. Concept, cause and control of desertification in China [J]. *Quaternary Sciences*, 1998(2): 145-155 (in Chinese)
- [2] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 干旱区城市生态安全格局优化研究: 以内蒙古

- 呼和浩特市为例[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 336-341
- Feng Y W, Zhen J H, Ma C Y. Analysis of spatial optimization of urban ecological security pattern in arid area: A case study of Hohhot City, Inner Mongolia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 336-341 (in Chinese)
- [3] 王根绪, 程国栋. 荒漠绿洲生态系统的景观格局分析: 景观空间方法与应用[J]. 干旱区研究, 1999, 16(3): 6-11
- Wang G X, Cheng G D. Study on the landscape pattern of a desert-oasis ecological system: A spatial grid method and its application [J]. *Arid Zone Research*, 1999, 16(3): 6-11 (in Chinese)
- [4] 于强. 基于复杂网络理论的荒漠绿洲区生态网络研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018
- Yu Q. Research on ecological network of desert oasis based on complex network theory [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018 (in Chinese)
- [5] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419
- Peng J, Zhao H J, Liu Y X, Wu J S. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419 (in Chinese)
- [6] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15
- Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15 (in Chinese)
- [7] 吴静, 黎仁杰, 程根根. 城市生态源地识别与生态廊道构建[J]. 测绘科学, 2022, 47(4): 175-180
- Wu J, Li R J, Cheng P G. City ecological source recognition and ecological corridor construction[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(4): 175-180 (in Chinese)
- [8] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 谭敏, 渠俊峰. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1036-1045
- Li H H, Ma T H, Wang K, Tan M, Qu J F. Construction of ecological security pattern in northern Peixian based on MCR and SPCA [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8): 1036-1045 (in Chinese)
- [9] 汤鹏, 王浩. 基于MCR模型的现代城市绿地海绵体适宜性分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(3): 116-122
- Tang P, Wang H. Analysis on the suitability of green sponge space in modern city based on MCR model [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2019, 43(3): 116-122 (in Chinese)
- [10] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16
- [11] 李权荃, 金晓斌, 张晓琳, 韩博, 李寒冰, 周寅康. 基于景观生态学原理的生态网络构建方法比较与评价[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1461-1473
- Li Q Q, Jin X B, Zhang X L, Han B, Li H B, Zhou Y K. Comparison and evaluation of the ecological network construction method based on principles of landscape ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1461-1473 (in Chinese)
- [12] 范春苗, 王志泰, 汤娜, 邓国平. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6620-6632
- Fan C M, Wang Z T, Tang N, Deng G P. Construction of ecological network in downtown of Guiyang City based on morphologically spatial pattern and spatially principal component analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6620-6632 (in Chinese)
- [13] 武子豪, 张金懿, 帕茹克·吾斯曼江, 郝晋珉. 县域生态网络构建与优化研究: 以河北省曲周县为例[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(7): 221-234
- Wu Z H, Zhang J Y, WUSIMANJIANG P, Hao J M. Construction and optimization of county ecological network: A case study of Quzhou County in Hebei Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(7): 221-234 (in Chinese)
- [14] 于超月, 王晨旭, 冯喆, 吴克宁, 赵华甫. 北京市生态安全格局保护紧迫性分级[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2020, 56(6): 1047-1055
- Yu C Y, Wang C X, Feng Z, Wu K N, Zhao H F. Urgency classification of Beijing ecological security pattern protection [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(6): 1047-1055 (in Chinese)
- [15] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484
- Chen X, Peng J, Liu Y X, Yang Y, Li G C. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 471-484 (in Chinese)
- [16] Wei Q Q, Halike A, Yao K X, Chen L M, Balati M. Construction and optimization of ecological security pattern in Ebinur Lake Basin based on MSPA-MCR models[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108857
- [17] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710
- Peng J, Li H L, Liu Y X, Hu Y N, Yang Y. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong' an New Area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 701-710 (in Chinese)
- [18] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352
- Song L L, Qin M Z. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3344-3352 (in Chinese)
- [19] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 徐凯恒, 朱满乐, 刘路云. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2995-3009
- Wei B J, Su J, Hu X J, Xu K H, Zhu M L, Liu L Y. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2995-3009 (in Chinese)
- [20] 张美丽, 齐跃普, 张利, 陈影, 周亚鹏, 陈亚恒, 王树涛. 基于Linkage Mapper与粒度反推法的太行山中北段生态节点识别与分析: 以河北省阜平县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(12): 1569-1578
- Zhang M L, Qi Y P, Zhang L, Chen Y, Zhou Y P, Chen Y H, Wang S T. Identification and analysis of ecological nodes based on linkage mapper and granularity inverse method in the middle and northern sections of Taihang Mountain: A case study of Fuping County, Hebei Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(12): 1569-1578 (in Chinese)
- [21] Qiao Q, Zhen Z L, Liu L M, Luo P P. The construction of ecological security pattern under rapid urbanization in the Loess Plateau: A case study of Taiyuan City [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1523
- [22] 李秀明. 基于RS和GIS的磴口县生态环境研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016
- Li X M. Study on ecology evolution in Dengkou County based on remote sensing and GIS methods [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016 (in Chinese)
- [23] 牛腾, 岳德鹏, 张启斌, 于强, 于佳鑫, 苏凯. 潜在生态网络空间结构与特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 166-175

- Niu T, Yue D P, Zhang Q B, Yu Q, Yu J X, Su K. Spatial structure and characteristics of potential ecological networks [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 166-175 (in Chinese)
- [24] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文. 生物多样性保护优先区生态网络构建与优化: 以太行山片区为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 61-67
Han R Y, Zhao Z P, Xiao N W. The eco-network construction and optimization in biodiversity conservation priority area: A case study of the Taihang Mountain area [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(2): 61-67 (in Chinese)
- [25] 李志英, 李媛媛, 李文星, 薛梦柯. 基于形态学空间格局分析与最小累积阻力模型的昆明市生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(1): 69-79
Li Z Y, Li Y Y, Li W X, Xue M K. Study on the construction of ecological security pattern in Kunming based on MSPA and MCR model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(1): 69-79 (in Chinese)
- [26] 朱莹莹, 陈耀, 马玉红, 徐恩凯, 张淑梅, 张艺鸽, 田国行. 洪涝风险胁迫下登封市蓝绿基础设施网络构建研究[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(5): 175-188
- Zhu Y Y, Chen Y, Ma Y H, Xu E K, Zhang S M, Zhang Y G, Tian G H. Construction of blue-green infrastructure network in Dengfeng City under flooding risk stress [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(5): 175-188 (in Chinese)
- [27] 陈斌, 鲁延芳, 占玉芳, 甄伟玲, 滕玉凤, 李鸿儒, 张纯曦. 荒漠绿洲过渡带土壤水分空间分布特征及对植被的影响[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 25-32
Chen B, Lu Y F, Zhan Y F, Zhen W L, Teng Y F, Li H R, Zhang C X. Spatial distribution characteristics of soil moisture and its influence on vegetation in desert-oasis ecotone [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2): 25-32 (in Chinese)
- [28] 黄丽萍, 向芳芳, 陈荣清. 基于生态安全格局的县域国土空间生态保护修复关键区域识别: 以抚州市宜黄县为例[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1334-1344
Huang L P, Xiang F F, Chen R Q. Identification of key areas for ecological protection and restoration of county territorial space based on ecological security pattern: A case study in Yihuang County of Fuzhou City [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1334-1344 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 解晨, 硕士研究生, 现就读于北京林业大学, 学士毕业于北京林业大学。硕士期间获得专业一等奖学金。参加科技部政府间国际科技创新合作重点专项(2019YFE0116500, 2023YFF1304204)。



通讯作者简介: 姜群鸥, 博士, 教授, 博士生导师。现任北京林业大学地理教研室主任、党支部书记, 澳大利亚国立大学访问学生, 美国德州农工大学访问学者。主要从事生态环境遥感、3S技术在资源环境中应用、大数据建模等方面的研究。发表论文100余篇, SCI论文50余篇, 出版专著3部。主持承担国家自然科学基金项目、国家重点研发计划、国家水体污染控制与治理科技重大专项等研究课题10余项。