

基于 MSPA 模型和生态保护重要性评价的 市域生态空间网络构建及优化

王崑¹, 马春旭¹, 郑伊含³, 田鑫³, 洪丽¹, 刘丹²

(1.东北农业大学 园艺园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150000; 2.东北农业大学 艺术学院,
黑龙江 哈尔滨 150000; 3.哈尔滨工业大学 城市规划设计研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: [目的] 探索基于形态学空间格局分析(MSPA)和生态保护重要性评价的市域生态网络构建方法,为市域生态网络规划与建设提供科学参考。[方法] 以黑龙江省牡丹江市为例,采用 MSPA 分析结果拓扑叠加研究区生态保护重要性评价,综合得出生态源地;利用最小阻力模型提取研究区潜在生态廊道并结合重力模型进行重要度划分;从源地补充、廊道补充、增补踏脚石三方面进行生态网络结构优化。[结果] ①根据 MSPA 分析结果,牡丹江市核心区域面积在景观类型中比例最高,为 87.41%,其中林地为主要景观类型。②牡丹江市域内有主要生态源地 10 处,次要生态源地 6 处。③牡丹江市域内潜在重要生态廊道 16 条,一般生态廊道 104 条。④优化前生态网络闭合度(α 指数)为 0.53,优化后为 0.66;网络连接数(γ 指数)优化前为 0.69,优化后为 0.77,线点率(β 指数)优化前为 2.0,优化后为 2.26。[结论] 综合 MSPA 分析法和生态保护重要性评价法的生态网络构建方法运用,有助于生态网络的结构性和功能性提升。

关键词: 生态网络; 生态保护重要性评价; 形态学格局分析(MSPA); 最小累积阻力模型(MCR); 牡丹江市
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2023)04-0220-09 **中图分类号:** X117.4

文献参数: 王崑, 马春旭, 郑伊含, 等. 基于 MSPA 模型和生态保护重要性评价的市域生态空间网络构建及优化[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 220-228, 326. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.027; Wang Kun, Ma Chunxu, Zheng Yihan, et al. Consturction and optimination of urban ecological space network based on MSPA model and ecological protection importance evaluation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 220-228, 326.

Consturction and Optimination of Urban Ecological Space Network Based on MSPA Model and Ecological Protection Importance Evaluation

Wang Kun¹, Ma Chunxu¹, Zheng Yihan³, Tian Xin³, Hong Li¹, Liu Dan²

(1.College of Horticulture and Landscape Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150000, China; 2.College of Art, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150000, China; 3.Harbin Institute of Technology Urban Planning and Design Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: [Objective] The construction method for an urban ecological network based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and ecological protection importance evaluation were studied in order to provide a scientific reference for the planning and construction of urban ecological network. [Methods] The importance of ecological protection at Mudanjiang City, Heilongjiang Province was evaluated using the topological superposition of MSPA analysis results, and the birth source area was comprehensively obtained. We used the minimum resistance model to extract potential ecological corridors in the study area, and combined them with gravity models for importance classification. We optimized the ecological network structure from three aspects: source supplement, corridor supplement, and stepping stone supplement. [Results] ① The MSPA analysis results showed that the core area of Mudanjiang City had the highest proportion of landscape types (accounting for 87.41%) and that forest land was the main landscape type. ② There were 10 main ecological sources and six secondary ecological sources at Mudanjiang City. ③ There were 16 potential

收稿日期: 2022-09-05

修回日期: 2022-12-08

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目“基于 GIS 的石墨矿山生态恢复与矿区空间景观优化研究”(LH2023C012)

第一作者: 王崑(1969—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市, 博士, 教授, 主要从事风景园林规划与设计、旅游规划等研究。Email: kwlwrw@126.com。

通讯作者: 刘丹(1977—)女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市, 博士研究生, 教授, 主要从事生态景观等方向的研究。Email: 1442460795@qq.com。

important ecological corridors and 104 general ecological corridors at Mudanjiang City. ④ Ecological network closure (α index) before optimization was 0.53, and 0.66 after optimization. Number of network connections (γ index) was 0.69 before optimization, and 0.77 after optimization. Line point rate (β index) was 2.0 before optimization, and 2.26 after optimization. [Conclusion] The application of the comprehensive MSPA analysis method and the ecological protection importance evaluation method in ecological network construction can help improve the structure and functionality of the ecological network.

Keywords: ecological network; importance evaluation on ecological protection; morphological spatial pattern analysis (MSPA); minimum cumulative resistance model (MCR); Mudanjiang City, Heilongjiang Province

城市高速化发展导致城市生态系统服务功能逐渐减弱,引发了景观破碎化严重、生物多样性降低等一系列生态问题。生态网络作为生态系统物质能量循环的媒介,是城市生态安全的重要保障^[1-3]。科学合理地构建生态网络有利于提升城市生态系统的服务能力,修复城市生态脆弱区,对划定城市空间格局,实现城市生态可持续性发展具有正向推动作用。

生态网络起源于欧洲,最早用于生物保护,以景观生态学的“源—汇”理论为基本模式,衍生“生态源地—生态廊道—生态节点”的网络结构体系^[4]。生态网络由分散的栖息地斑块连接而成,栖息地斑块通常作为生态源地以及生态踏脚石出现。生态源地指生态空间中对生态流起关键作用的景观组分;生态踏脚石指大型生态斑块之间,由小型斑块所组成的生态迁移通道。构建生态网络目的是维持人类活动影响下的生态过程完整性,解决生物多样性保护问题^[5]。通过识别生态源地,构建生态廊道可以有效提升城市中生态斑块的连通性,加强城市物种的物质、能量交换能力,增补生态踏脚石可以提高斑块聚集度和稳定性,显著提升生态网络质量。国外学者提出了包括最小阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)^[6-7]、电流理论^[8]、图论法等^[9]众多生态网络构建模型。MCR模型综合考虑区域内的地形、地貌、环境、人为干扰等因素,通过对阻力面进行权重判别,提取生态网络中潜在的生态廊道^[10]。形态学格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)是在像元级尺度,结合图形学原理进行生态源地识别的一种研究方法^[11],MSPA分析法与MCR模型常进行耦合运用,已成为构建生态网络的范式,但该方法无法反映生态源地内部的生态状况。随着相关研究的深入,生态网络的构建涵盖了省域、市域等不同尺度。孔繁花等人^[12]运用遥感技术和地理信息系统,采用最小费用路径和情景分析方法,结合重力模型构建了省域城市群生态网络。王添翼等人^[13]借助MCR模型进行了生态廊道构建及生态战略点识别,通过强化廊道、优化生态踏脚石,提升了苏南水网乡村生态安全格局的稳定性。郭家新等人^[14]基于MSPA法和MCR模型,对唐山市进行生态源地识

别,提取潜在生态廊道,结合重力模型定量分析廊道重要性,构建市域生态空间网络。在国土空间规划的背景下,如何科学构建生态网络,筑全生态保护格局,优化城市空间环境,是城市发展面临的重要挑战。因此,本研究基于MSPA和生态保护重要性评价,考虑空间格局和生态格局,进行综合性生态源地识别;运用MCR模型和重力模型识别黑龙江省牡丹江市域潜在生态廊道并分级,形成牡丹江市域生态网络;综合分析牡丹江市域生态网络现状特点,提出优化策略,为牡丹江市生态网络规划与建设提供一定参考作用,充实市域生态网络的相关研究。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

牡丹江市位于黑龙江省东南部,地理坐标(128°02′—131°18′E, 43°24′—45°59′N),是东北亚陆海联运大通道和欧亚大陆桥重要节点,市域内有牡丹江、海林两个国家级经济开发区以及4个国家一类口岸。牡丹江市地形以山地、丘陵为主,内部纵横牡丹江、穆稜河和绥芬河。牡丹江市域总面积为38 834.77 km²。

1.2 数据来源与预处理

本研究数据来源包括:2020年牡丹江市土地利用数据源自(第三次全国土地调查数据与2020年土地变更调查数据);全域范围正射影像图下载于谷歌地图(<http://www.gditu.net>);研究区高程数据下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.com>),数据分辨率为30 m×30 m;累计降雨量数据源自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>);生态系统类型及分布数据源自中国生态系统评估与生态安全数据库(<https://www.ecosystem.csdb.cn>);自然保护区数据以及当地野生动植物种群名录源自牡丹江市林草局;植被覆盖度数据源自“数据禾”网站(<https://www.databox.store>);多年平均降水量数据源自牡丹江气象局;土壤类型分布矢量数据源自世界土壤数据库(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。综合考虑牡丹江市土地景观要素类型特点,参考国土资源部关于土地利用分类的相关文献^[15],将牡丹江市土

地利用数据导入 ArcGIS 软件中,选择 Arc Toolbox 当中的“spatial analyst”选项,运用重分类工具,提取出林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用地 6 类土地利用类型,并形成研究区土地利用类型图(图 1)。

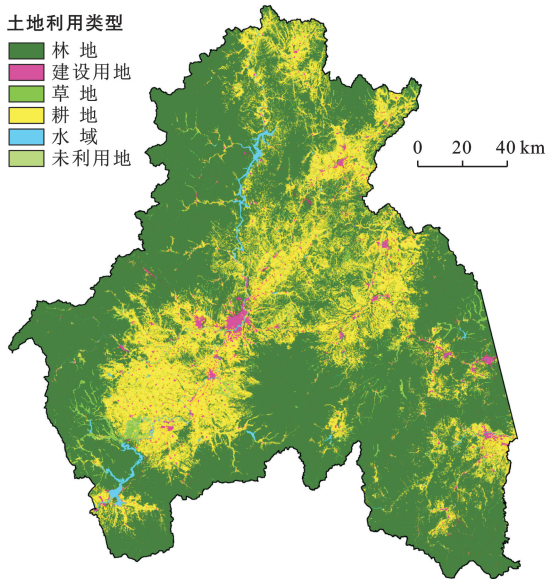


图 1 牡丹江市 2020 年土地利用类型

Fig.1 Land use types at Mudanjiang City in 2020

2 研究方法

2.1 生态源地识别

2.1.1 基于 MSPA 的景观格局分析 采用 MSPA 方法确定核心斑块以作为生态源地选取的前期基础。根据研究区土地利用现状,使用 ArcGIS 中的重分类工具,以前期生境质量最优的林地作为前景要素,赋值为 2;其他用地类型作为背景要素,赋值为 1;将数据转换为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的栅格格式文件。基于 Gidocs Toolbox 分析软件,采用八邻域图像细化分析法进行 MSPA 分析,得到 7 个不重叠的景观类型(表 1),对结果进行面积及比例的统计分析。根据实际情况选取面积较大、破碎程度小、形态完整的核心区作为生态源地选取范围的核心斑块。

2.1.2 生态保护重要性评价 参考相关技术指南与理论研究^[16-18],从区域生态安全底线出发,围绕生态系统服务功能重要性和生态脆弱性,选取水源涵养重要性、水土保持重要性、生物多样性重要性、水土流失脆弱性、土地沙化脆弱性 5 个单因子,客观评估生态保护重要性,进一步划分研究区的生态保护重要性等级。

表 1 MSPA 景观类型及其生态学意义

Table 1 MSPA landscape types and ecologic contents

景观类型	生态学意义
核心区	前景像素点远离背景像素点的距离大于指定大小的某个参数的像素集合,通常为生态网络的生态源地
桥连区	核心区之间的带状生态用地,一般作为生态网络中的生态廊道,具有连通景观、满足迁徙需求的功能
边缘区	核心区与非绿色景观区之间的边缘像素,可表现出明显的边缘效应
支线	只有一端与边缘区、桥接区、环道区或孔隙相连的区域,对廊道连接起辅助作用
孤岛	与其他斑块互不相连,孤立、破碎的小型斑块,很难与外界进行物质能量交换和传递
环道区	同一核心区内部的内部廊道,为核心区内物种迁移、能量流动、信息交流提供了捷径
孔隙	核心区的内边界和核心区的过渡区域,具有边缘效应,一定程度上阻碍外围边线对核心区的影响

(1) 水源涵养功能重要性。结合牡丹江市域生态基础状况,考虑到地表径流量,最终确定水源涵养功能采取水量平衡法;将累积水源涵养量最高的前 50% 区域及一级水源保护地作为水源涵养极重要区;后 50% 及二级水源保护地作为水源涵养重要区,计算公式^[10]为:

$$R = P - E - W \quad (1)$$

式中: R 表示区域水源涵养量; P 表示降水量; E 表示蒸散量; W 表示地表径流量。其中,地表径流因子根据《生态保护红线划定指南》^[19] 计算得到,计算公式为:

$$W = P \times \alpha \quad (2)$$

式中: W 表示地表径流量; P 表示降水量; α 平均地表径流系数。

(2) 水土保持功能重要性。从降雨侵蚀、土壤可侵蚀性、坡长坡度和植被覆盖度等单因子出发,采用修正通用水土流失方程(RUSLE)对水土保持服务模型开展评价,将水土保持量最高的前 50% 区域作为水土保持极重要区;后 50% 的区域作为水土保持重要区,计算公式^[20]为:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (3)$$

式中: A_c 为水土保持量; A_p 为潜在土壤侵蚀量; A_r 为实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可侵蚀因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为

植被覆盖因子。

(3) 生物多样性功能重要性。结合国家重点保护野生动植物名录、中国生物多样性红色名录等资料,考量各物种的保护价值,从生态系统、物种、遗传资源 3 个层面进行生物多样性功能评估。将原真性和完整性高的生态系统、极危、濒危物种集中分布区域、极小种群野生动植物分布区域、重要野生资源天然分布区域作为生物多样性维护极重要区;将省级重点保护物种及其他具有重要保护价值的物种集中分布区域作为生物多样性维护重要区。

(4) 水土流失脆弱性和土地沙化脆弱性。水土流失脆弱性评价选取水力侵蚀作为评价因子,以黑龙江省风力、水力侵蚀现状图为基础,提取出牡丹江市域风力和水力侵蚀分布数据,水力侵蚀强度为剧烈和极剧烈的区域确定为水土流失极脆弱区,强烈和中度区域确定为脆弱区。土地沙化脆弱性评价选取风力侵蚀作为评价因子,风力侵蚀强度为剧烈和极强烈的区域为土地沙化极脆弱区,强烈和中度的区域为土地沙化脆弱区。

(5) 生态保护重要等级划分。利用 ArcGIS 软件叠加生态系统服务功能重要性和生态脆弱性结果,得出生态保护重要性等级结果。考虑评价结果需与 MSPA 分析法识别的核心斑块进行叠加确定主、次生态源地,故将市域生态保护重要评价结果分为极重要和重要两个等级,计算公式为^[21]:

$$S_i = \max(M_i, N_i) \quad (4)$$

式中: S_i 表示单元空间内的生态重要性等级; M_i 表示生态系统服务功能重要性等级; N_i 表示生态脆弱性等级; i 表示各类生态系统服务功能重要性和脆弱性。

将生态保护重要性评价结果与 MSPA 识别的核心斑块进行拓扑叠加,得出生态源地。

2.2 基于 MCR 模型的潜在生态廊道提取

MCR 模型结合 ArcGIS 中的最小费用路径功能,通过计算生态源地与目标之间的最小累积阻力距离模拟最小成本路径,依此确定生物迁徙与扩散的最佳路径作为生态廊道^[22-23],计算公式为:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (5)$$

式中: f 为反映 MCR 与变量(D_{ij} R_i) 之间正比关系的函数; D_{ij} 为源点 j 到空间单元 i 的空间距离; R_i 为空间单元 i 的阻力系数。

通过综合加权指数法获取综合阻力面作为 MCR 模型的成本数据,根据相关研究,结合研究区自然地理条件,筛选出构建阻力面的评价因子,包括土地类型、坡度和高程,并设定因子阻力系数值在 1~100 之间^[21,24]。依据因素重要程度运用比较法确定阻力因子权重,每个阻力因子划分 5 个阻力赋值(表 2)。赋值越高,表明生物物种对扩散过程的阻力越大^[25]。

2.3 生态廊道重要性分析

重力模型通过分析生态源地中栖息的生物以及物种流量,计算生态源地间的相互作用矩阵,形成各生态源地之间相互作用强度的定量评价,判断潜在廊道在该区域的相对重要程度,明确生态网络体系中的重要生态廊道和一般生态廊道,计算公式^[26]为:

$$G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{(\frac{1}{P_i} \times \ln S_i)(\frac{1}{P_j} \times \ln S_j)}{(\frac{L_{ij}}{L_{\max}})^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln(S_i S_j)}{L_{ij}^2 P_i P_j} \quad (6)$$

式中: G_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 间的相互作用强度; N_i 、 N_j 分别为斑块 i 和斑块 j 的权系数; D_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 间潜在廊道的标准化阻值; P_i 为斑块 i 的整体阻值; S_i 为斑块 i 的面积; L_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 间潜在廊道的累积阻力值; L_{\max} 为研究区所有廊道的最大阻力值。

2.4 生态节点选择与网络结构分析

采用基于图论的空间结构分析法,识别生态源地间的最小累计阻力路径,选择其交汇点作为生态节点,运用网络结构指数的对比论证,量化分析优化程度。生态廊道网络结构分析指数包括网络闭合指数(α 指数)、网络连接度指数(β 指数)、网络连通率指数(γ 指数)(表 3),通过优化前后的数值变化对优化前后的生态廊道进行评价^[27]。

表 2 牡丹江市域综合阻力面构建体系

Table 2 Construction system of comprehensive resistance surface at Mudanjiang City

阻力因子	阻力因子(阻力值)	权重
土地利用类型	林地(1), 水域(30), 草地(40), 未利用地(40), 耕地(50), 建设用地(100)	0.5
高程/m	<200(10), 200~400(20), 400~600(30), 600~800(40), >800(50)	0.24
坡度/(°)	<5(10), 5~12(20), 12~18(30), 18~25(40), >25(50)	0.26

表 3 生态廊道网络结构分析指标

Table 3 Analysis indicators of network structure of ecological corridors

判定指标	指标释义	公式	参数
网络闭合度	表示网络中回路出现的程度,一般用 α 表示 ^[27] 。	$\alpha = \frac{L-V+1}{2V-5}$ (7)	L 为廊道数; V 为节点数; α 值变化范围为 $[0,1]$, α 值增大表示生态网络中回路增多
线点率	指网络中每个节点的平均连线数,反映网络中廊道与节点之间的关系,用来衡量网络的通达度,一般用 β 表示 ^[27] 。	$\beta = \frac{L}{V}$ (8)	L 为廊道数; V 为节点数; β 指数取值范围为 $[0,3]$, $\beta=0$,表示网络不存在, β 值增大表示生态网络复杂性增加
网络连接度	表示网络中所有节点被连接的程度,一般用 γ 表示 ^[27] 。	$\gamma = \frac{L}{3(V-2)}$ (9)	L 为廊道数; V 为节点数; γ 指数变化范围为 $[0,1]$, 当 $\gamma=0$ 时,表示没有节点相连; $\gamma=1$ 时表示每个节点都彼此相连, γ 值增大表示生态网络中各节点相互连接度增强

3 结果与分析

3.1 基于 MSPA 和生态保护重要性评价的源地识别

如牡丹江市域 MSPA 分类结果统计结果(表 4)和研究区景观类型图(图 2)所示,基于 MSPA 分析的牡丹江市域景观类型共 7 种。核心区所占比例最大,达到 61.78%,聚集分布在市域西北及东南部,西南部分布分散。桥连区所占比例 0.54%,说明研究区景观格局中结构性廊道少,不利于物种迁移,需要进行廊道优化。

表 4 牡丹江市域 MSPA 分类结果统计结果

Table 4 Statistical results of MSPA classification results at Mudanjiang City

景观类型	总面积/ km ²	比例/ %	景观类型	总面积/ km ²	比例/ %
核心区	23 992.00	61.78	环道区	207.18	0.54
桥连区	210.22	0.54	支线	325.12	0.85
孤岛	167.44	0.43	孔隙	614.53	1.58
边缘区	1 331.21	3.43			

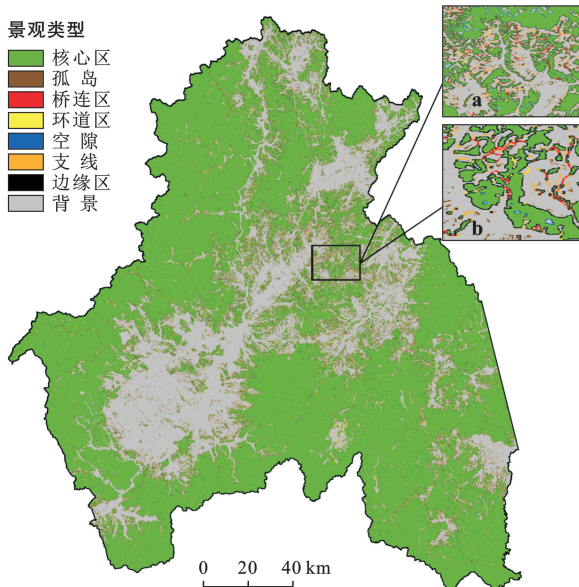


图 2 基于 MSPA 的牡丹江市景观类型分布

Fig.2 Landscape type distribution of Mudanjiang City based on MSPA

孤岛分布零散,所占比例仅 0.43%,后续可设置为踏脚石斑块,增加生态网络稳定性。边缘区和孔隙所占比例分别为 3.43%和 1.58%,说明牡丹江市域生态斑块破碎化严重,需加强斑块连通性。环道区比例 0.54%,说明牡丹江市域生态斑块内部景观异质性较弱。支线比例 0.85%,说明核心区与外界物质交流受阻。参考相关研究,综合考虑牡丹江市域自然条件,为保证核心斑块的完整性和连通性,将核心斑块占牡丹江市域面积比例控制在 20%左右^[28]。如研究区核心斑块分布图所示(图 3),根据 MSPA 分析结果选取前 7 个面积较大、连通性较好的核心区作为核心斑块,合计 10 757.23 km²,占研究区总面积的 20.77%,包括自然保护地及生态状况较好的林地,主要分布在研究区西部、西北部以及东南部。

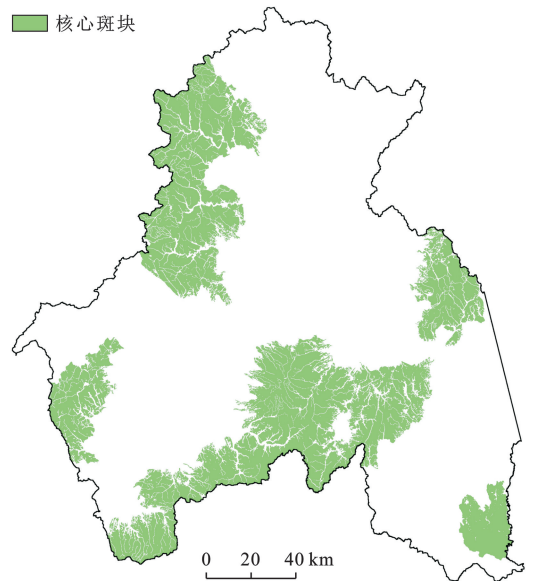


图 3 牡丹江市核心斑块分布

Fig.3 Distribution of core plaques of Mudanjiang City

通过以上评价方法,得出牡丹江市域生态保护重要性评价(图 4)。其中牡丹江市域内生态保护极重要区面积 9 073 km²,占市域面积的 23.2%;生态保护重要区面积 15 016 km²,占市域总面积 38.6%。结果表

明,牡丹江市域水源涵养能力受牡丹江影响,重要区与极重要区集中分布在市域西侧,市域中部无水源涵养极重要区;水土保持重要区与极重要区多为坡度较大的林区和山区,主要分布在市域北部和东南部;生物多样性极重要区和重要区多分布于市域西部和南部的林区,该区域植被覆盖率较高,斑块连通性好,受人为干扰较小,多为国家保护动植物的迁徙路径和栖息地;市域生态脆弱性程度较低,生态脆弱区域总面积 3 225 km²,占市域面积的 8.3%;主要分布在市辖

区、宁安、海林及林口中心城区地带。综上所述,牡丹江市生态系统服务功能相对较好但分布不均,主要以市域西侧外围为主,市域中部及东北部生态系统服务功能较差,其生态环境有待提高。通过对核心斑块和生态保护极重要区、重要区进行空间拓扑叠加选取生态源地共计 16 处(图 5)。其中,1—9 号源地、16 号源地为核心斑块和生态保护极重要区相交得到的主要生态源地,共 10 处;10—15 号源地为核心斑块与生态保护重要区相交得到的次要生态源地,共 6 处。

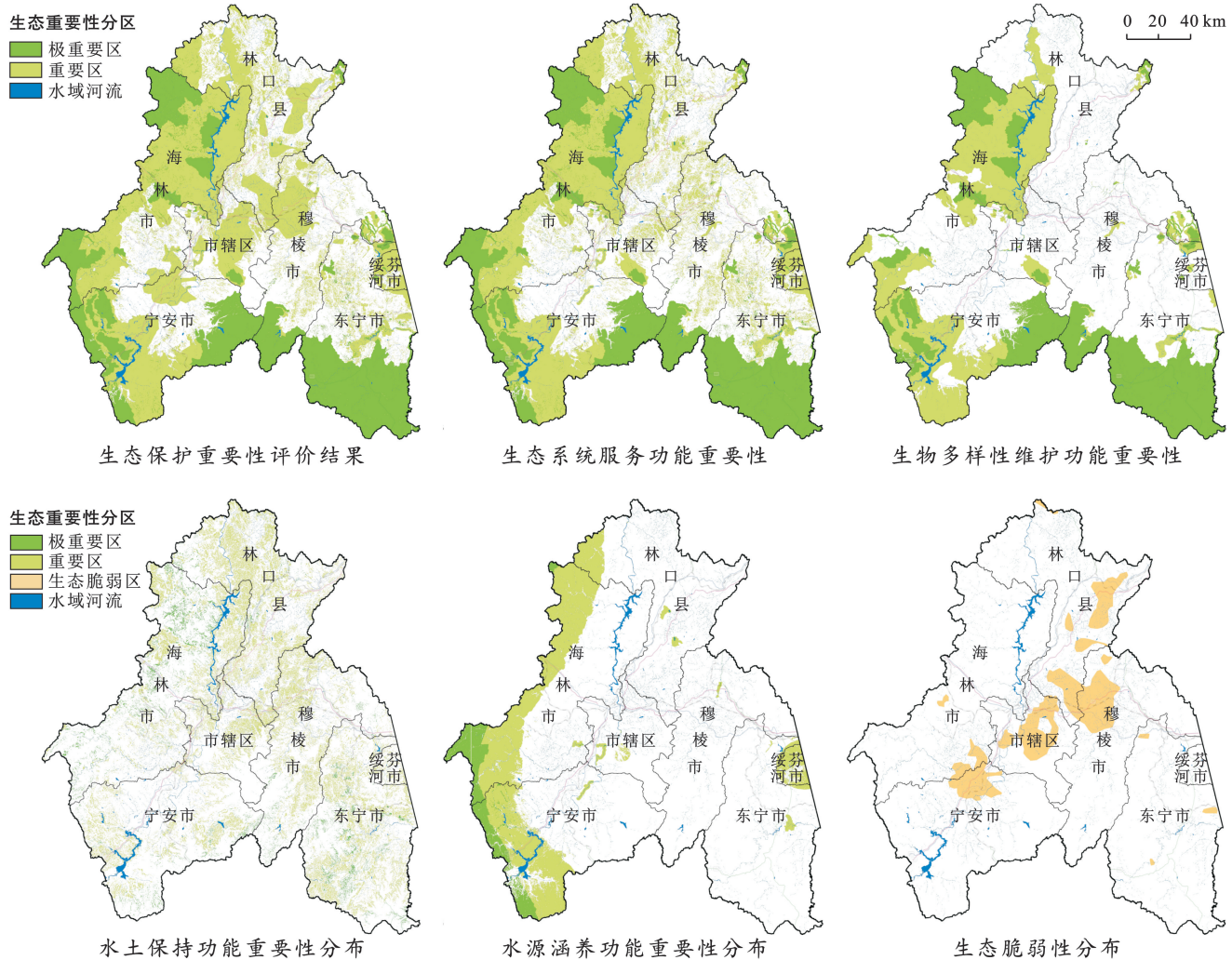


图 4 牡丹江市域生态保护重要性评价结果

Fig.4 Evaluation results of ecological protection importance at Mudanjiang City

3.2 阻力面构建与潜在生态廊道提取

按照阻力因子建立单因子阻力面,以此为基础叠加得出研究区综合阻力面。由图 6 可知,牡丹江市域中部阻力值相对较高,四周范围阻力值相对较小,原因是牡丹江市四周多林地,生态流动性好,中部为各市县的中心城区,道路和建筑用地影响物质流通,阻力值相对较大,因此牡丹江市生态网络建设的过程中应重点关注市域内网络构建。基于 MCR 模型,根据

研究区生态源地以及综合阻力面,在 ArcGIS 中通过计算源地间的累计阻力,得出耗费成本最小的路径作为生态廊道,共提取出 120 条潜在生态廊道。建立重力模型生成生态源地间的相互作用矩阵(表 5),以分析潜在廊道的重要程度,将相互作用力大于 150 的廊道提取作为重要生态廊道,共 16 条,其余廊道作为一般廊道,共 104 条,最终得到牡丹江市域潜在生态网络结构(图 7)。牡丹江市域生态廊道呈现西密东疏

的特征,整体呈 A 字形。研究区北部及各县市中

部 廊道,为构建更合理的国土空间生态安全格局,需要对其进行重点优化。

表 5 生态源地间相互作用重力模型矩阵

Table 5 Gravity model matrix for interaction between ecological sources

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	56.6	38.3	132.9	38.1	49.0	72.7	3 812.6	1 282.5	68.5	696.3	62.6	118.0	265.1	11.3	3 063.5
2		0	64.9	578.0	15.0	47.6	38.2	86.1	213.2	198.6	0.6	213.6	156.1	2.1	36.5	1.2
3			0	1 463.1	26.3	24.1	2 325.9	1.4	46.3	129.3	226.3	136.2	103.3	26.4	15.6	56.2
4				0	11.3	9.2	16.3	56.4	258.2	47.2	588.5	656.2	825.9	89.2	138.6	129.5
5					0	269.8	138.2	3.6	1.5	364.9	16.3	166.9	6.2	7.7	0.6	0.5
6						0	129.9	155.8	1.0	459.2	0.8	15.7	0.8	2.2	15.3	0.7
7							0	1.4	0.6	42.6	50.3	187.3	86.2	48.2	6.2	9.6
8								0	0.5	1.3	37.4	0.8	56.9	119.2	78.2	1 596.1
9									0	489.4	158.6	0.5	296.3	57.6	629.2	129.2
10										0	114.6	246.3	86.3	1.5	2.6	6.4
11											0	129.6	632.9	386.15	159.3	412.8
12												0	89.8	1.6	0.3	0.6
13													0	384.1	129.1	396.8
14														0	339.2	115.9
15															0	208.5

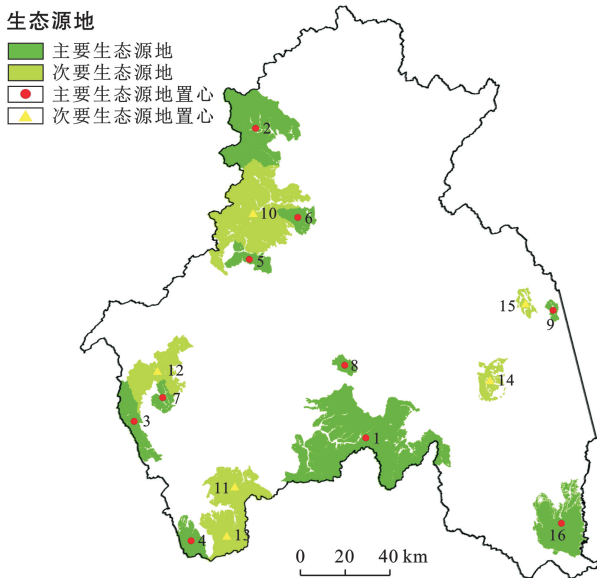


图 5 牡丹江市生态源地分布

Fig.5 Distribution of ecological source areas at Mudanjiang City

3.3 牡丹江市域生态网络优化

运用网络结构分析得出牡丹江市域生态网络 α 指数、 β 指数、 γ 指数分别为 0.53, 2.00, 0.69。基于前期研究结果,选择核心区中除生态源地外,与生态保护极重要区和重要区重合面积相对较大的 4 处生态斑块作为补充生态源地,与原有 16 个生态源地共同进行生态廊道构建。基于 MCR 模型计算得出最小成本路径,除与原有生态廊道重复的补充廊道,新增补充生态廊道共 70 条。综合市域踏脚石增补原则,除

生态廊道交汇处外,选出 84 个市域范围内生态踏脚石斑块,其中原踏脚石斑块 60 个,补充踏脚石斑块 24 个,形成优化后的牡丹江市域生态网络结构(图 8)。生态网络结构优化后的 α 指数、 β 指数、 γ 指数分别为 0.66, 2.26, 0.77(表 6); α 指数的提升,表明优化后生态网络内部连通性增强,加深了物种交流度; β 指数的提升,代表廊道中的生态节点增多,生态网络通达性提高; γ 指数的提升,表明优化后形成了更加稳定的生态网络结构。

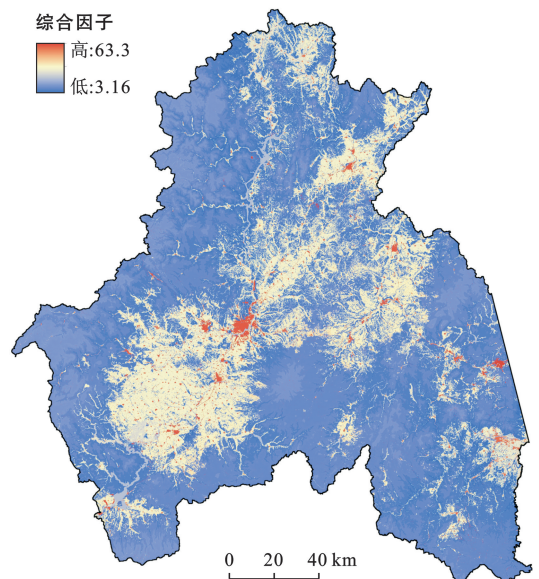


图 6 牡丹江市域综合阻力面分布

Fig.6 Distribution of comprehensive resistance surface at Mudanjiang City

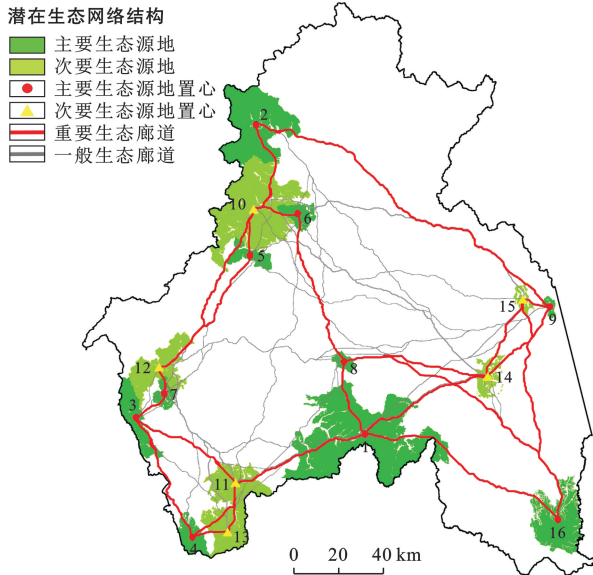


图 7 牡丹江市域潜在生态网络结构

Fig.7 Potential ecological network structure of Mudanjiang City

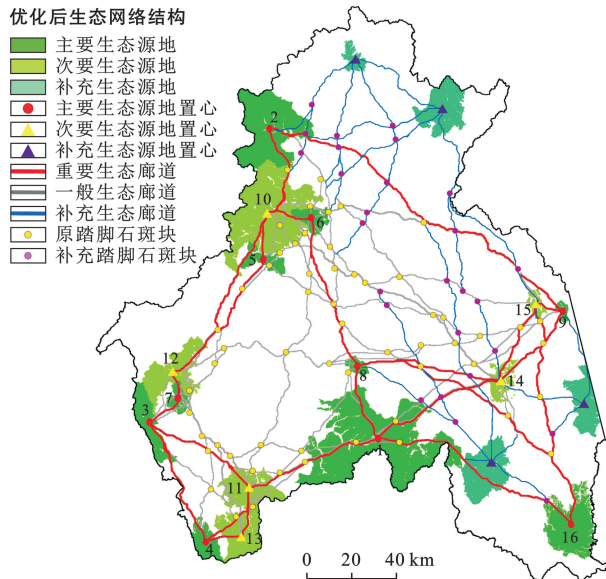


图 8 牡丹江市域生态网络结构优化

Fig.8 Optimization of ecological network structure at Mudanjiang City

表 6 牡丹江市域生态网络结构指数分析

Table 6 Analysis on ecological network structure index at Mudanjiang City

生态网络	廊道数量	节点数	α 指数	β 指数	γ 指数
潜在廊道	120	60	0.53	2.00	0.69
优化网络	190	84	0.66	2.26	0.77

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 生态源地识别方法的确定。本研究运用

MSPA 分析法结合生态保护重要性评价进行牡丹江市域生态保护源地的识别,结果包含三道关国家森林公园、六峰山国家森林公园、镜泊湖世界地质公园等多样化的生态系统。可见识别结果较为合理。研究方法综合考虑生态斑块的内置生态功能与外置空间形态,可为同尺度生态网络构建以及生态保护重要性评价提供一定参考价值。

(2) 生态阻力系数研究。生态阻力面的构建涉及到对不同阻力因子进行赋值,目前还未有相关文献对各因子的阻力系数进行明确的规定,且本研究中阻力面的构建仅考虑到自然要素的阻力影响,缺少人类活动等方面的影响因子,未来需要进一步精进研究。

(3) 生态廊道的构建。本文选取 MCR 模型进行生态廊道的构建,并结合重力模型确定廊道的相对重要性,所形成的生态廊道以生境走廊和生物通道等形式设置在研究区域当中,可以有效提升物种交流度,加强生态系统的服务功能。但本研究缺少针对廊道宽度的规划,后续需继续深入有关廊道的附加功能以及廊道可持续性发展相关的研究。

(4) 基于国土空间规划的生态保护建议。牡丹江市域范围现有相关生态研究多以单体资源为对象进行保护与规划,还未有生态网络、生态廊道构建等区域关联性较强的生态研究出现,单体研究的问题在于不能良好反映出牡丹江市域的综合生态情况和生态空间格局,对国土空间规划等上位空间研究的帮助具有一定限制性。本研究所构建的生态网络有助于识别各类生态空间和生产空间,对城市农业空间规划具有参考价值,所构建的生态廊道增加了农业空间物种多样性,间接提升农业生产力。研究结果结合相关规划政策,能够为牡丹江市生态保护、牡丹江市用地规划提供一定帮助。

本研究在构建科学生态网络的同时兼顾城市生态服务功能。在识别出潜在生态网络的基础上进行优化设计,填补了区域生态网络空白,优化重点在于建立城市内部与周边自然环境的生态连接,解决城市生态功能不平衡问题,形成更稳定的市域生态结构,营造更舒适的人居环境。本研究与东北地区同为森林资源型城市的伊春市、吉林市在生态网络构建的基本目的与优化策略上具有一定的相似性^[29-30]。

4.2 结论

(1) 通过拓扑叠加生态保护重要性评价结果,识别出牡丹江市域 16 块生态源地,生态源地分布呈不均衡状态,西北方向生态源地分布集中,西南方向生态源地数量多且面积大,东部生态源地小而分散,东北方向无生态源地,东南方向生态源地独立存在,这

与牡丹江市林地资源以及河流分布有关。

(2) 牡丹江市域阻力值较高, 四周阻力值较小; 基于 MCR 模型共提取出牡丹江市域潜在生态廊道 120 条, 呈现出西密东疏的分布特征, 重要廊道主要分布在研究区四周, 城市中心城区廊道缺失, 研究区中部、北部以及各市县中心出现了廊道空白。这是由于以上地区多为阻力值较高的建成区, 人为活动因素干扰生态系统物质能量的流通, 导致生态网络空间分布不均衡。

(3) 通过对生态网络进行结构优化和空间优化, 共补充生态源地 4 块, 生态廊道 70 条, 在市域内增设 24 个补充踏脚石斑块, 填补了牡丹江市域北部生态廊道的缺失。通过对比优化前后的网络结构可以看出, α 指数、 β 指数、 γ 指数分别增加了 0.13、0.26 和 0.08, 说明优化后的牡丹江市域生态网络整体分布相比之前更为均衡, 市域内生态网络连接复杂程度提升, 形成了更加稳定且丰富的生态网络格局。

[参 考 文 献]

- [1] 张亚丽, 尹伟特, 胡希军, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的资源节约型生态网络构建: 以福建省东山岛为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 254-261.
- [2] 胡长生, 胡宇喆. 习近平新时代生态文明观的理论贡献[J]. 求实, 2018, 39(6): 4-20, 107.
- [3] 中共中央国务院. 关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见[N]. 人民日报, 2019-05-24(1).
- [4] Csermely P. The wisdom of networks: a general adaptation and learning mechanism of complex systems; the network core triggers fast responses to Known Stimulus innovations require the slow network periphery and are encoded by core-remodeling [J]. *Bioessays*, 2017, 40(1): 1700150.
- [5] 陈静, 左翔, 彭建松, 等. 基于 MSPA 与景观连通性分析的城市生态网络构建: 以保山市隆阳区为例[J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 118-123, 141.
- [6] Teng Mingjun, Wu Changguang, Zhou Zhixiang, et al. Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a least-cost path model [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1): 1-14.
- [7] Klar N, Herrmann M, Henning H M, et al. Between ecological theory and planning practice: reconnecting forest patches for the wildcat in Lower Saxony, Germany [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(4): 376-384.
- [8] Jing Yang, Chen Zeng, YiJiao Cheng, Spatial influence of ecological networks on land use intensity [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137151.
- [9] Walker N J, Schaffer S D, Swenson J J, et al. Improved connectivity analysis using multiple low-cost paths to evaluate habitat for the endangered San Martin titi monkey (*Plecturocebus oenanthe*) in North-central Peru [J]. *Landscape Ecology*, 2019, 34(8): 1859-1875.
- [10] Kaaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape [J]. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 12-16.
- [11] 周英, 施成超, 刘滢, 等. 基于 MSPA-MCR 模型的云南德昂族乡景观生态安全格局构建[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2022, 6(1): 54-62.
- [12] 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.
- [13] 王添翼, 丁金华. 基于 MCR 模型的苏南水网乡村生态安全格局构建[J]. 中国城市林业, 2022, 20(4): 58-65.
- [14] 郭家新, 胡振琪, 李海霞, 等. 基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 275-284.
- [15] 自然资源部办公厅. 自然资源部办公厅关于印发《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南(试行)》的通知 [EB/OL]. [2020-11-17] (2022-03-04). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-11/22/content_5563311.html.
- [16] 自然资源部国土空间规划局. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行) [EB/OL]. [2020-11-17] (2019-03-04). <https://www.docin.com/p-2469075664.html>.
- [17] 黑龙江省生态环境厅. 黑龙江省生态保护红线监管试点工作方案 [EB/OL]. [2020-11-17] (2021-11-02). http://sthj.hlj.gov.cn/sthj/c112149/202111/c00_30833580.shtml 2021.11.02.
- [18] 自然资源部. 自然生态空间用途管制办法(试行) [EB/OL]. [2020-11-17] (2022-03-04). https://www.mnr.gov.cn/gk/tzgg/201704/t20170424_1992172.html 2017.03.24.
- [19] 生态环境部. 生态保护红线划定指南 [EB/OL]. [2020-11-17] (2022-03-04). https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm 2017.07.20.
- [20] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展 [J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5246-5261.
- [21] 牛晓楠, 倪欢, 陈国光, 等. 福建省生态保护重要性评价 [J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1130-1141.
- [22] 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.
- [23] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法: 景观空间负荷对比指数 [J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [24] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化: 以张掖市甘州区为例 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.

- 2017,81:243-251.
- [22] 闵庆文,刘寿东,杨霞.内蒙古典型草原生态系统服务功能价值评估研究[J].草地学报,2004,12(3):165-169.
- [23] 张瑞君,邸利,黄海霞,等.定西市安家沟小流域生态经济系统健康定量评价[J].甘肃农业大学学报,2009,44(1):132-137.
- [24] 许炳心.黄土高原生态环境建设的若干问题与研究需求[J].水土保持研究,2000,7(2):10-13.
- [25] Duan H, Yan C, Tsunekawa A, et al. Assessing vegetation dynamics in the Three-North Shelter Forestregion of China using AVHRR NDVI data [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,64(4):1011-1020.
- [26] Liu Jianguo, Li Shuxin, Ou Zhiyun, et al. Ecological and socioeconomic effects of China, spolicies for ecosystem services [J]. Proceeding of the National Academy of Sciences, 2008,105(28):9477-9482.
- [27] 朱建佳,彭晓伟,刘耀亮,等.基于 InVEST 模型的太行山区土壤侵蚀与土壤保持[J].河北科技师范学院学报,2021,35(1):58-66.
- [28] 陈瑾,张佰林,王琨.安家沟流域地面监测数据质量及合理性评价[J].中国水土保持,2018(9):61-62.
- [29] 李金昌,姜文来,靳乐山,等.生态价值论[M].重庆:重庆大学出版社,1999.
- [30] 缪建群,杨文亭,杨滨娟,等.崇义客家梯田区生态系统服务功能及价值评估[J].自然资源学报,2016,31(11):1817-1831.
- [31] 缪建群,王志强,杨文亭,等.崇义客家梯田生态系统服务功能[J].应用生态学报,2017,28(5):1642-1652.
- [32] 许爱霞,吴军.定西市农村土地资源利用现状调查研究[J].农经管理,2019(16):52-54.
- [33] 侯元兆.森林环境价值核算[M].北京:中国科学技术出版社,2002.
- [34] 林家淮,欧书丹,刘良源.东江源区森林涵养水源、固碳制氧价值估算[J].江西科学,2009,27(2):247-250.
- [35] 周国逸,闫俊华.生态公益林补偿理论与实践[M].北京:气象出版社,2000,198-226.
- [36] 高月明,吴文俊,蒋洪强,等.基于全球陆地生态系统的水源涵养服务价值时空变化分析[J].环境科学研究,2021,34(11):2696-2705.
- [37] Costanza R, De-groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. Global Environmental Change, 2014,26:152-158.
- [38] 张瑜,赵晓丽,左丽君,等.黄土高原生态系统服务价值动态评估与分析[J].水土保持研究,2018,25(3):170-176.
- [39] Yu Miaozi, Zhang Lulu, Xu Xuexuan, et al. Impact of land use changes on soil hydraulic properties of calcare regosols on the Loess Plateau, NW China[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015,178:486-498.
- [40] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [41] 李志沛,张宇清,朱清科,等.中国平原林业工程涵养水源生态服务功能价值估算[J].水土保持研究,2012,19(3):242-244.
- [42] 马海霞.不同利用方式和坡位变化对高寒草甸保水固土的影响[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2021,75-79.
- [43] 杨青,刘耕源.湿地生态系统服务价值能值评估:以珠江三角洲城市群为例[J].环境科学学报,2018,38(11):4527-4538.

(上接第 228 页)

- [25] 史瑶.基于 MSPA 和 MCR 模型的资兴市生态网络构建研究[D].湖南 长沙:中南林业科技大学,2019.
- [26] 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.
- [27] Forman R T, Baudry J. Hedgerowsand hedgerow networksin landscape ecology [J]. Environmental Management, 1984,8(6):495-510.
- [28] 蒋大林,曹晓峰,匡鸿海,等.生态保护红线及其划定关键问题浅析[J].资源科学,2015,37(9):1755-1764.
- [29] 吕东,王云才,彭震伟.基于适宜性评价的快速城市化地区生态网络格局规划:以吉林长白朝鲜族自治县为例[J].风景园林,2013(2):54-59.
- [30] 黄锰,蔡新冬,李光皓,等.山·水·林·城—伊春市中心城新区南区城市设计[J].城市规划,2009,33(11):93-96.