

基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建

朱琪^{1,3} 袁泉^{1,3} 于大炮¹ 周旺明¹ 周莉¹ 韩艳刚^{1,3} 齐麟^{1,2*}

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; ²沈阳大学生物入侵研究中心, 沈阳 110044; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 东北森林带是全国生态功能区划“两屏三带”的重要组成部分,对保障区域乃至全国的生态安全具有重要意义。构建该区域的生态安全网络是对其进行生态格局优化、功能提升的重要基础。本研究基于东北森林带生态系统服务重要性,应用 InVEST 模型中生境质量分析模块以及电路理论,对研究区生态源地、生态廊道、障碍点和夹点进行了识别,并构建了研究区的生态系统服务安全网络。结果显示:研究区内共识别出生态系统服务源地 30 处,总面积为 $16.40 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 27.3%, 以林地、湿地等生态用地为主。关键生态廊道 42 条,总长度 2475.55 km,潜在生态廊道 20 条,平均长度为 420.55 km。研究区内生态改善区的面积为 $56.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据累计电流值的提升程度,将生态修复区域分为 3 个优先级,其中一、二级改善区的面积分别占 12.8% 和 24.3%。本研究根据区域内生态源地、生态廊道、生态夹点、生态障碍点以及改善区空间分布格局构建了该区的生态系统服务安全网络,并根据其特征给出了修复和改善的建议,为东北森林带生态格局优化及功能提升提供科学依据。

关键词 生态系统服务安全网络; 生态源地; 生态廊道; 东北森林带

Construction of ecological security network of Northeast China forest belt based on the circuit theory. ZHU Qi^{1,3}, YUAN Quan^{1,3}, YU Da-pao¹, ZHOU Wang-ming¹, ZHOU Li¹, HAN Yan-gang^{1,3}, QI Lin^{1,2*} (¹Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China; ²Biological Invasion Research Center, Shenyang University, Shenyang 110044, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Northeast China forest belt is an important part of the national ecological function regionalization “two screens and three zones”, which is of regional and national significance for ecological security. The construction of ecological security network in this region is an important basis for the optimization of ecological pattern and its function improvement. We used the habitat quality analysis module in InVEST model and the circuit theory to identify the ecological sources, corridors, barriers and pinch points, and constructed the ecosystem service security network of Northeast China forest belt. The results showed that there were 30 ecosystem service sources in the study area, with a total area of $16.40 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 27.3% of the study area, and that woodland, wetland and other ecological lands were the main components. There are 42 key ecological corridors with a total length of 2475.55 km, and 20 potential ecological corridors with an average length of 420.55 km. The area of the ecological improvement zone is $56.45 \times 10^4 \text{ km}^2$. According to the improvement degree of accumulated current value, the restoration area is classified into three levels, with the first and second level restoration zones accounting for 12.8% and 24.3%, respectively. Based on distribution pattern of the ecological sources, ecological corridors, ecological pinch points, ecological barriers, and ecological restoration zones, we constructed the

国家重点研发项目课题(2018YFC0507305)资助。

收稿日期: 2021-04-30 接受日期: 2021-08-26

* 通讯作者 E-mail: qilin@iae.ac.cn

ecosystem service security network of the study area, and provided suggestions for restoration and improvement according to its characteristics. Our results would provide scientific basis for its ecological pattern optimization and function improvement in the study area.

Key words: ecosystem service security pattern; ecological source; ecological corridor; Northeast China forest belt.

20世纪90年代以来,随着我国人口和经济的高速增长,生态环境问题日益突出(肖笃宁等,2002;崔胜辉等,2005)。通过区域生态安全格局的构建与优化,改善区域生态安全状况已经成为迫切的社会需求(彭建,2017a; Wu *et al.*, 2019),生态安全格局相关研究也逐渐成为学界的热点(蒙吉军等,2012;黄木易等,2019;王晓玉等,2020)。生态安全格局的构建和优化已经成为当前我国各级政府为了保障区域经济可持续发展、协调生态系统与经济社会对立统一关系的重要政策,被确定为国土空间开发保护的三大战略格局之一(李久林等,2020)。目前,生态安全格局研究已经从早期景观组分分析(曾辉等,1999;喻红等,2001;李雁等,2004)和斑块配置的静态研究发展到注重生态过程的动态模拟和功能优化方面(杨苗等,2020;戴文渊等,2021),涉及的领域也从单一的土地利用结构调整向生态空间要素博弈、区域生态功能提升等诸多方面扩展(黄隆杨等,2019;王佳楠等,2020)。目前,生态安全格局的构建和优化方法已经日趋完善。基于“生态源地提取-生态阻力面构建-生态廊道识别”的框架逐渐成为当前生态安全格局相关研究的基本范式(彭建等,2017b;毛诚瑞等,2020)。

生态源地提取和生态廊道识别是生态安全格局构建过程中最重要的2个环节。生态源地作为区域内生态质量最高的区域,可以提供多种生态服务,也是生态系统服务向外辐射作用的源点,对保障区域生态安全起到关键作用。生态源地提取方法种类较多,如针对研究对象的特定区域直接进行识别的物种栖息地筛选法(刘壮壮等,2020),但由于生态源地是生态系统服务较高且生物种类与生物量较多的生态用地,直接识别法的筛选标准相对单一,因此该方法不具备普适性。也有研究者采用最小斑块面积阈值法(吴茂全等,2019)识别生态源地。该方法可以减少数据量并简化操作流程,但该方法阈值的划定缺乏有效的科学依据。此外,还有研究基于景观连通性(陈昕等,2017)、生态敏感性和生态系统服务重要性对生态源地进行识别(汤峰等,2018),其

中以基于生态系统服务重要性进行评估的方法应用最为广泛。阻力面的构建是生态廊道识别的前提。有学者采用景观类型赋值的方法进行生态廊道识别(彭建等,2018),虽然这种方法简单直接,但却忽略了相同土地利用类型之间的内部差异。也有研究认为,生态阻力的大小取决于生态环境的质量,生态环境质量越高,生态过程流遇到的阻力就越小,生态系统物质、能量在斑块之间的流动就越容易(郝月等,2019)。将生境质量作为阻力面构建指标与其他方法相比,更能反映对生态系统服务的需求。因此,基于生境质量构建阻力面的途径受到研究者的广泛接受。生态廊道作为生态安全格局沟通生态源地、物种间能量与信息传递的带状或线状区域,现阶段通常采用最小阻力模型(王云等,2019;谢玲等,2019)和电路理论(Gao *et al.*, 2020;倪庆琳等,2020)等方法进行识别。最小累积阻力模型因考虑了土地覆被单元之间的内在联系,在生态安全格局的研究中使用极为广泛。然而,最小累积阻力模型虽然较为清楚地显示了生态走廊的趋势,却不能识别廊道中诸如“夹点”、“障碍点”等关键节点。电路理论应用电子在电路中随机游走的特性模拟物种或生态系统服务在区域内扩散的过程,可以更好地反映生态系统服务在斑块和廊道的相对重要性,并识别出流动过程中的关键节点(宋利利等,2016; Peng *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2020)。因此,应用电路理论构建生态安全格局逐渐被更多的研究者采用。

全国主体功能区规划明确了我国以“两屏三带”为主体的生态安全战略格局。东北森林带作为其中水源涵养和生物多样性维持功能区,发挥着不可替代的重要作用(王晓峰等,2016)。构建东北森林带生态安全格局,可以为区域生态功能恢复和提升打下坚实的基础,对保障国家生态安全,实现可持续发展具有重要战略意义(王晓峰等,2019)。本研究通过生态系统服务重要性结合最小面积阈值的方法提取东北森林带生态系统服务源地,基于电路理论识别生态廊道、夹点以及障碍点,并构建生态系统服务安全网络,以期对东北森林带生态格局优化、功

能提升提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

东北森林带的范围是根据东北地区具有高生态价值森林分布区,以县级行政边界划定的(欧阳志云,2008)。位于 118.80°E — 134.37°E 、 40.87°N — 53.56°N ,总面积约为60万 km^2 。研究区温带季风气候显著,自南向北地跨中温带和寒温带,四季分明,夏季温热多雨、冬季寒冷干燥,降水量400~1000 mm,土壤分布有暗棕壤、白浆土和黑土。研究区内土地利用类型以林地为主,约占总面积的66.0%。耕地次之,占总面积的20.2%,主要分布在东北森林带与东北平原和三江平原的交界处。研究区是我国沼泽湿地最丰富、最集中的区域,占总面积的8.5%(图1)。

1.2 数据获取

研究区乡镇行政边界数据来源于资源环境科学与数据中心《中国行政乡镇边界数据集》(<http://resdc.cn/data.aspx?DATAID=203>),数据格式为矢量数据。土地利用数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所的土地利用数据。该数据共包含38个土地覆盖类型,本研究根据研究区现状及研究需求,将子类型重新分为15类。

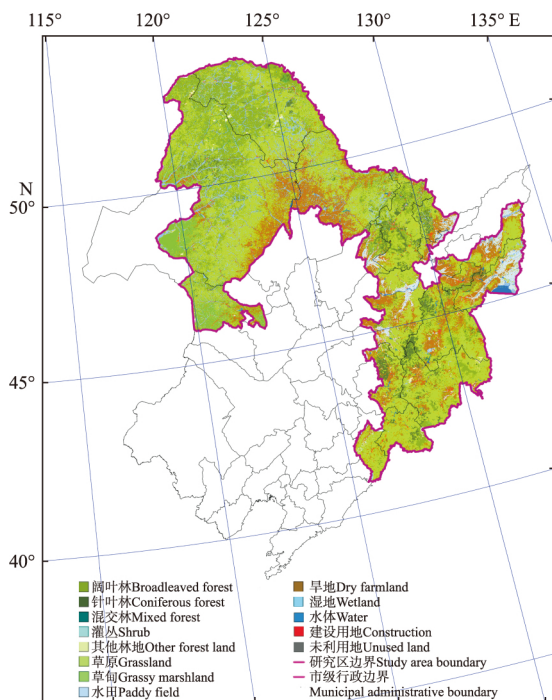


图1 研究区位置及土地利用类型

Fig.1 Location and land use type of the study area

研究区中包含全国生态功能区划中生物多样性维持重要区、水源供给重要区和粮食供给重要区,且区域内山地占主要地位,林覆盖率较高,土壤保持和固碳释氧作用明显。因此,本研究选取6种生态系统服务,包括水源涵养、生物多样性维持、土壤保持、固碳释氧、防风固沙和粮食供给服务,对其空间格局进行研究。各项生态系统服务数据从中国生态系统服务空间数据集(<http://www.sciencedb.cn/dataSet/handle/458>)获得(张路等,2018)。本研究将所得的各生态系统服务栅格数据以乡镇为基本单元进行了重新提取。各生态系统服务的评价方式和计算方法如表1所示。

1.3 研究方法

1.3.1 生态源地识别 本研究首先将以乡镇为基本单元提取的6项生态系统服务栅格数据进行归一化,利用自然断点法将各项生态系统服务分为3个重要性等级,再将6项生态系统服务进行等权叠加,得到综合生态系统服务重要性空间格局。将综合生态系统服务格局归一化后利用自然断点法将其分为5个重要性等级。将重要性等级为4级和5级的斑块定义为生态系统服务重要区。考虑到面积小的斑块辐射功能较弱,对区域整体的生态安全格局贡献较小。因此,本研究综合相关研究(彭建等,2017)、研究区空间尺度以及生态源地所涉及到的计算量,将面积大于100 km^2 的综合生态系统服务重要区作为生态源地。

1.3.2 阻力面构建 大多研究基于专家经验来分配相应土地利用类型的阻力值。由于该方法无法描述相同土地利用类型的内部差异,因此需要另外进行生境质量评估。一般来说,生境质量与区域生物多样性、物种移动速度成正比,因此可以使用生境质量的相反面(1减本身)来指定电阻值。其计算方法为:

$$D_{xj} = 1 - \sum_{r=1}^R \sum_{\gamma=1}^{\gamma_r} (W_r / \sum_{\gamma=1}^{\gamma_r} W_r) r_{\gamma} i_{rxy} \beta_x S_{jr}$$

式中: R 为胁迫因子; γ 为胁迫因子 r 栅格图层的栅格数; γ_r 为胁迫因子占栅格数; W_r 为胁迫因子的权重,表明某一胁迫因子对所有生境的相对破坏力,取值0~1,为栅格 γ 的胁迫因子值(0或1); i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫因子值 γ_r 对生境栅格 x 的胁迫水平; β_x 为栅格 x 的可达性水平,取值0~1,该值越接近1表示越容易到达; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性,取值0~1,该值越接近1表示越敏感。所需要的参数以及确定依据见表2。

表1 生态系统服务重要性评价方法

Table 1 Methods of evaluating the importance of ecosystem services

生态系统服务类型 Ecosystem services	计算方法 Evaluation methods	计算公式 Equations	说明 Definition of indicators
水源涵养 Water conservation	水量平衡	$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3$ $R = P \times \alpha$	TQ 为总水源涵养量(m^3) P_i 为降雨量(mm) R_i 为地表径流量(mm) ET_i 为蒸散发(mm) A_i 为 i 类生态系统面积(km^2) , i 为研究区第 i 类生态系统类型 j 为研究区生态系统类型数; R 为地表径流量(mm) P 为多年平均降雨量(mm) α 为平均地表径流系数
生物多样性维持 Biodiversity maintenance	指示物种数量法	$E_a = \sum_{i=1}^n E_i$	E_a 为指示种总数量(个); E_i 为物种个数(个)
土壤保持 Soil conservation	水土流失方程	$A_e = A_p - A_R = R \times K \times L \times S \times (1 - C)$	A_e 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 为土壤可蚀性因子; L, S 为地形因子 L 表示坡长因子 S 表示坡度因子; C 为植被覆盖因子
固碳释氧 Carbon fixation	NPP 估算	$NPP = APAR(x, \lambda) \times E(x, \lambda)$	$APAR$ 表示吸收的光合有效辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot 10 d^{-1}$); E 表示像元实际光能利用率($g C \cdot MJ^{-1}$)
防风固沙 Sand storm prevention	潜在风蚀量-实际风蚀量	$SR = S_{L潜} - S_{L实}$	SR 为固沙量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$); $S_{L潜}$ 为潜在风力侵蚀量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$); $S_{L实}$ 为实际风力侵蚀量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)
粮食供给 Food supply	县域粮食产量	$E_b = \sum_{i=1}^n E_i$	E_b 为食物总供给热量($\times 4.187 kJ$); E_i 为第 i 种食物所提供的热量($\times 4.187 kJ$)。提取后的各项生态系统服务通过 ArcGIS 进行归一化以表征其重要性空间格局

表2 生境质量威胁因子

Table 2 Threats to habitat quality

威胁因子 Threat factor	最大影响距离 Maximum impact distance	权重 Weight (km)	衰减线性相关性 Attenuation linear correlation
耕地 Cropland	8	0.7	线性 Linear
居民点 Residential area	5	0.6	指数 Exponent
城镇 Town	10	1	指数 Exponent
铁路 Railway	3	1	线性 Linear
公路 Road	3	1	线性 Linear
沙地 Sand land	1	0.7	指数 Exponent

土地利用类型对各个威胁因子的敏感度。由于各个土地利用类型对威胁因子具有不同的敏感性, 所以需要对敏感性进行设置。相对来说, 在所有的土地利用类型中, 生态用地对于威胁因子具有较高的敏感性, 其次是半生态用地。在模型中, 将敏感性的范围设置为 0~1, 值越大敏感性越高(表3)。

1.3.3 生态廊道、夹点和障碍点识别 本研究基于电路理论对生态廊道进行识别。电路理论中的连接模型和随机游走模型相结合可以更好地评估最小成

表3 胁迫因子敏感性

Table 3 Sensitivity of landuse to threats

地类 Land use type	生境 Habitat	耕地 Cropland	居民点 Residential area	城镇 Town	铁路 Railway	公路 Road	沙地 Sand land
落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	1	0.80	0.85	0.90	0.60	0.60	0.80
针叶林 Coniferous forest	1	0.80	0.85	0.90	0.60	0.60	0.80
针阔混交林 Mixed broadleaf-coniferous forest	1	0.80	0.85	0.90	0.60	0.60	0.80
灌丛 Shrub	1	0.40	0.45	0.60	0.20	0.20	0.40
其他绿地 Other green space	1	0.90	0.95	1	0.70	0.70	0.80
草原 Grassland	0.80	0.40	0.45	0.60	0.20	0.20	0.50
草甸 Grassy marshland	0.80	0.40	0.45	0.60	0.20	0.20	0.50
水田 Paddy field	0.60	0.30	0.35	0.50	0.10	0.10	0.10
旱地 Dry farmland	0.60	0.30	0.35	0.50	0.10	0.10	0.10
湿地 Wetland	1	0.85	0.40	0.50	0.20	0.20	0.40
水体 Water	1	0.70	0.75	0.90	0.50	0.50	0.45
建设用地 Construction land	0	0	0	0	0	0	0
苔原 Tundra	0	0	0	0	0	0	0
沙漠 Sand land	0	0	0	0	0	0	0
裸土 Bare land	0	0	0	0	0	0	0

本路径。本研究利用 GIS 工具 linkage mapper (<https://circuitscape.org/linkagemapper/>) 中 Linkage Pathways Tool 模块对研究区中的关键生态廊道和潜在生态廊道进行识别。该工具首先将生态源地进行两两配对,再通过最小成本路径法识别每对生态源地之间的最小成本路径,最后去除经过其他生态源地的最小成本路径,生成研究区的生态廊道。

在此基础上,Linkage mapper 中 Pinch point Mapper 工具依次连接不同生态节点(源地),向其他节点输入电流进行迭代计算,所有电流必须通过的节点即为“夹点”,是表征生态服务迁移密度最大的区域,需要重点保护。

Linkage mapper 中 Barrier Mapper 工具,设定 5 km 的搜索半径,采用移动窗口法(直径为 D)识别“障碍点”区域,“障碍点”数值越大,则去除此区域后,景观连通性提升值越大。根据 Barrier Mapper 工具计算所得的改善系数,还可以指征生态质量改善的优先程度,并以此划定生态改善区。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务重要性空间格局

东北森林带水源涵养一般重要区、重要区和极重要区的面积分别为 29.90×10^4 、 26.25×10^4 和 0.26×10^4 km²。水源涵养极重要区主要分布在长白山地区,面积占东北森林带水源涵养极重要区面积的 96.0%。水源涵养重要区分布在大兴安岭中西部、小兴安岭东部和长白山西部,面积分别为 24.71×10^4 、 8.58×10^4 和 10.45×10^4 km²,分别占水源涵养重要区面积的 56.5%、19.6% 和 23.9%。生物多样性维

持极重要区面积为 5.58×10^4 km²,占东北森林带总面积的 9.30%,分布在小兴安岭东部和西北部地区(60.3%)以及长白山东南和东北两端(39.7%)。生物多样性维持重要区面积为 12.74×10^4 km²,占东北森林带总面积的 21.2%,分布在大兴安岭(59.53×10^4 km²)以及长白山地区(40.46×10^4 km²)。东北森林带土壤保持极重要区面积为 0.59×10^4 km²,占总面积的 1.0%,分布在长白山地区北部。土壤保持重要区面积为 14.48×10^4 km²,其中 56.5% 分布在大兴安岭地区,19.6% 分布在小兴安岭地区,23.9% 分布在长白山地区。东北森林带固碳释氧一般重要区、重要区和极重要区的面积分别占总面积的 28.6%、46.0% 和 25.4%。其中,固碳释氧极重要区主要分布在长白山地区(71.4%)。防风固沙重要区和极重要区均分布在大兴安岭西部和西南缘,面积为 3.75×10^4 和 2.45×10^4 km²。粮食供给重要区和极重要区分布在东北森林带与三江平原中部平原的交界处,分别占总面积的 11.8% 和 3.1%(图 2 表 4)。

将研究所选取的 6 项生态系统服务进行叠加后,利用自然断点法将其分为 5 级,得到东北森林带综合生态服务重要性格局。重要性 1 级至 5 级的区域面积分别占总面积的 13.3%、27.4%、31.5%、20.0% 和 7.8%。将重要性高于(不包含)3 级的区域定义为综合生态系统服务重要区,其面积为 16.69×10^4 km²,占总面积的 27.8%。东北森林带生态系统服务重要区包含 303 个斑块,平均斑块面积为 552.62 km²。长白山地区的综合生态系统服务重要区面积最大,为 9.37×10^4 km²,占综合生态系统服务重要区总面积的 57.1%,大兴安岭地区次之,面积为

表 4 6 种类型生态系统服务重要区面积(km²)
Table 4 Areas of important zones with 6 ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	大兴安岭地区 Greater Khingan Mountains			小兴安岭地区 Lesser Khingan Mountains			长白山地区 Changbai Mountains		
	一般重要区 General important zone	重要区 Important zone	极重要区 Very important zone	一般重要区 General important zone	重要区 Important zone	极重要区 Very important zone	一般重要区 General important zone	重要区 Important zone	极重要区 Very important zone
水源涵养 Water conservation	11.82	14.83	0.15	7.34	5.15	0.00	10.74	6.27	3.70
生物多样性维持 Biodiversity maintenance	19.22	7.58	0.00	9.12	0.00	3.37	13.34	5.16	2.22
土壤保持 Soil conservation	23.88	2.93	0.00	10.83	1.65	0.00	10.22	9.90	0.59
固碳释氧 Carbon fixation	8.13	16.18	2.49	4.20	6.40	1.88	4.82	5.01	10.89
防风固沙 Sand storm prevention	20.60	3.75	2.45	12.49	0.00	0.00	20.72	0.00	0.00
粮食供给 Food supply	25.11	1.69	0.00	10.41	1.31	0.77	9.65	8.77	2.29

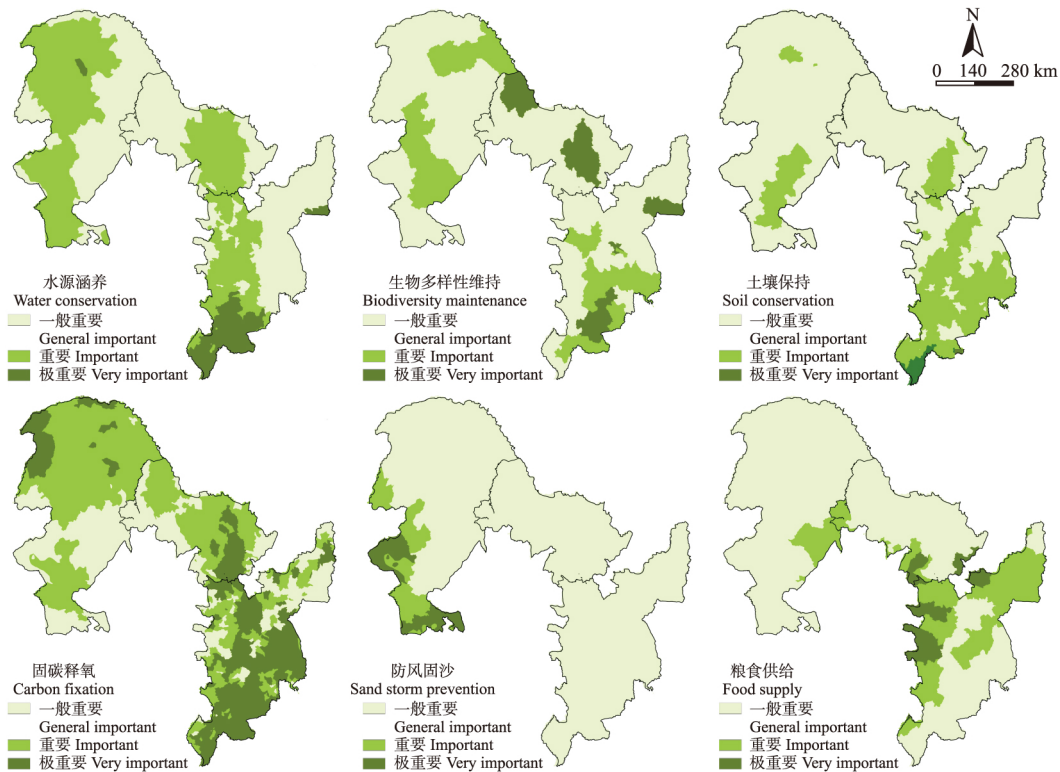


图2 东北森林带生态系统服务重要性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services importance in Northeast China forest belt

$4.82 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 29.4%, 小兴安岭地区最少, 面积为 $2.22 \times 10^4 \text{ km}^2$, 仅占 13.6% (表 4)。

2.2 生态系统服务源地与生态廊道

本研究将面积大于 100 km^2 的综合生态系统服务重要区识别为生态系统服务源地。东北森林带生态系统服务源地总面积为 $16.40 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占东北森林带总面积的 27.3%。生态系统服务源地包含 30 个斑块, 平均斑块面积为 $0.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区内生态系统服务源地呈现出“东多西少”的空间格局。长白山地区生态系统服务源地斑块数量最多 (24 个), 总面积最大 ($9.36 \times 10^4 \text{ km}^2$), 占生态系统服务源地总面积的 57.1%。大兴安岭地区生态系统服务源地斑块数量为 5 个, 总面积为 $4.82 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占生态系统服务源地总面积的 29.4%。小兴安岭地区生态系统服务源地斑块数量仅为 1 个, 面积为 $2.22 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占生态系统服务源地总面积的 13.5% (图 3)。

生态阻力面的空间格局反映了生态系统服务在研究区内流动所受到的阻力大小。研究结果显示, 东北森林带的生态阻力值受到土地利用类型空间格局的显著影响 (图 1, 图 4)。东北森林带内与东北平原和三江平原的交界处的生态阻力值较高, 这些

区域土地利用类型以耕地为主, 说明耕地对生态系统服务的流动阻碍作用较强。与之相反, 研究区内林地、水体以及湿地分布的区域的阻力值相对较低, 说明这些土地利用类型中生态系统服务物质、能量和信息流动较为通畅 (图 4)。

生态廊道通过连接生态系统服务源地, 增加区域内景观连通性并增加生态效益。本研究中, 共识别出关键生态廊道 42 条, 总长度 2475.55 km。其中, 长度在 10 km 以内的关键廊道 26 条, 长度在 10~50 km 的关键廊道 8 条, 长度在 50~100 km 的关键廊道 1 条, 长度在 100~500 km 的关键廊道 6 条, 长度大于 500 km 的关键廊道 1 条, 长度为 544.55 km。较短的关键生态廊道主要位于长白山地区, 连接了一些面积较小且距离较近的生态系统服务源地。较长的关键廊道连接了面积较大的生态系统服务源地, 甚至将大兴安岭、小兴安岭和长白山的生态系统服务源地连接起来。本研究还识别出 20 条潜在生态廊道, 平均长度为 420.55 km。在一些生态阻力值较小的区域, 存在潜在廊道和关键廊道重合的现象 (图 3)。

2.3 东北森林带生态系统服务安全网络构建

生态夹点是生态源地之间的活跃区域, 对于维

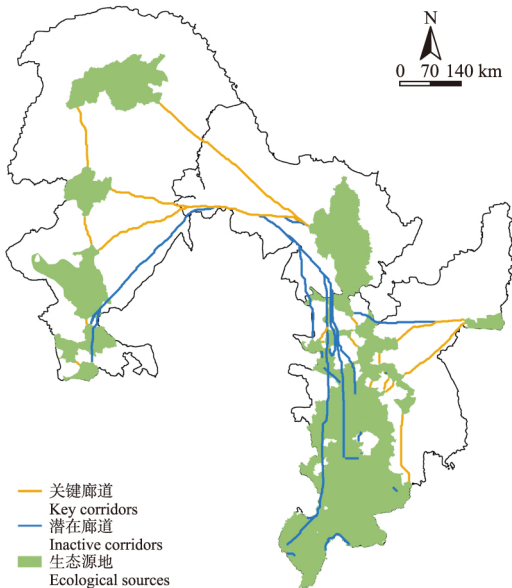


图3 生态系统服务源地与生态廊道空间分布
Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service sources and corridors

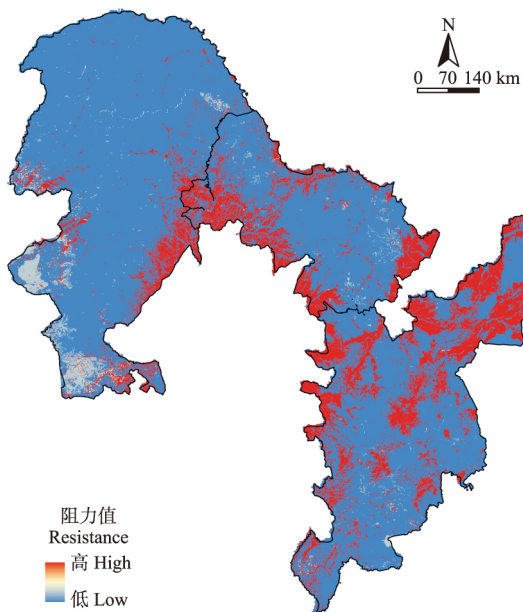


图4 东北森林带生态阻力面
Fig.4 Ecological resistance surface of Northeast China for-est belt

持区域生态系统服务安全格局的连通度具有至关重要的作用。本研究利用自然断点法将研究区电流(生态系统服务流)大小分为4级,其中较大的3级即为夹点区。按照其生态系统服务在廊道中密度从大到小依次划分为一级夹点区、二级夹点区和3级夹点区,面积分别为1240、10474和54377 km²,总面积占东北森林带面积的11.0%。由于流经的生态系

统服务流(电流)在斑块截面内数量相同,因此在夹点区较窄的部分生态系统服务流的密度较高。大兴安岭地区存在4个夹点斑块,连接了其内部的5个生态系统服务源地。大兴安岭地区的生态服务源地中,有3个与小兴安岭的生态系统服务源地相连通。小兴安岭和长白山之间存在两个生态系统服务流密度较高的生态夹点斑块(图5)。由此可见,尽管小兴安岭生态系统服务源地数量很少,但却起到了西连大兴安岭,东接长白山的“中转站”作用,对东北森林带的生态系统服务安全起到了关键作用。

生态障碍区是生态廊道内电流密度相对较高、生态阻力值偏大的区域,是阻碍生态系统服务流动的重点区域。本研究中,生态障碍区面积为4.65×10⁴ km²,一、二、三级障碍区的面积比例分别为:4.8%、14.6%和80.6%。一级障碍区9个,其中2个分布在连接大兴安岭和小兴安岭的夹点区。在连接小兴安岭和长白山的生态夹点区域中均存在生态障碍区。在长白山内部存在的生态障碍点最多,数量为5个(图6)。

基于东北森林带阻力值和电流密度计算出其改善系数,并利用自然断点法将其划分为3个等级的改善区。改善区的总面积为56.45×10⁴ km²,占东北森林带面积的94.1%。一级改善区的改善系数介于105880~199997,占改善区总面积的12.8%,主要分布在东北森林带边缘和距生态系统服务源地相对较远的区域,是东北森林带生态恢复的重点区域。二

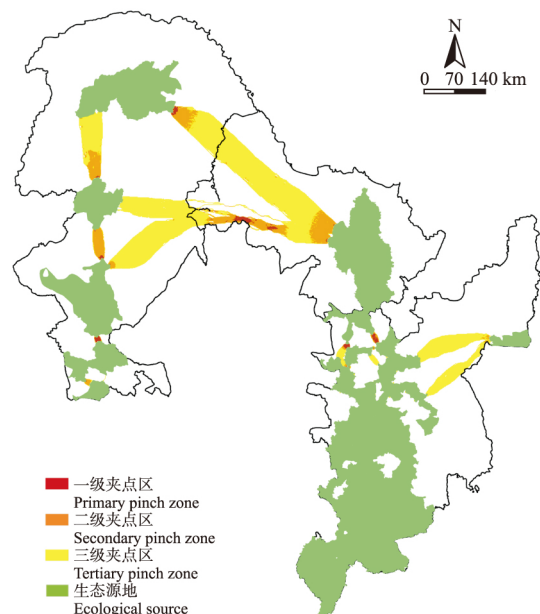


图5 夹点区域空间分布
Fig.5 Spatial distribution of pinch zone

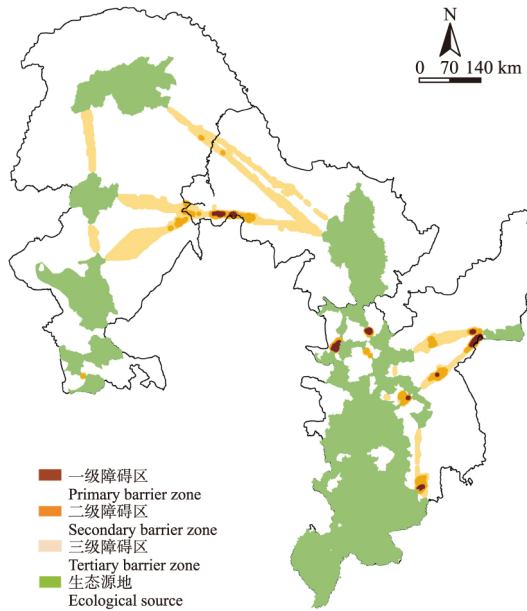


图6 生态系统服务流动障碍区
Fig.6 Barriers to ecosystem services flow

级改善区改善系数介于 40783~105880 ,面积占改善区总面积的 24.3% ,分布在一级改善区内缘。三级改善区的改善系数介于 0~40783 ,面积占改善区面积的 63.0% ,分布于东北森林带的中部地带(图7)。该区土地利用类型以林地为主 ,生态环境条件良好。

本研究将生态系统服务源地划归为保护区 ,将1、2级改善区划为改善区 ,将1、2级夹点区划为关键区 ,将1、2级障碍区划为修复区 ,将长度大于

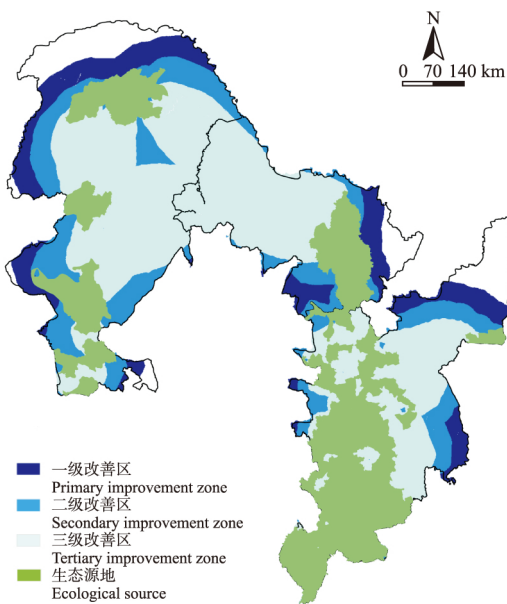


图7 东北森林带生态改善区分布
Fig.7 Distribution of ecological improvement zones of Northeast China forest belt

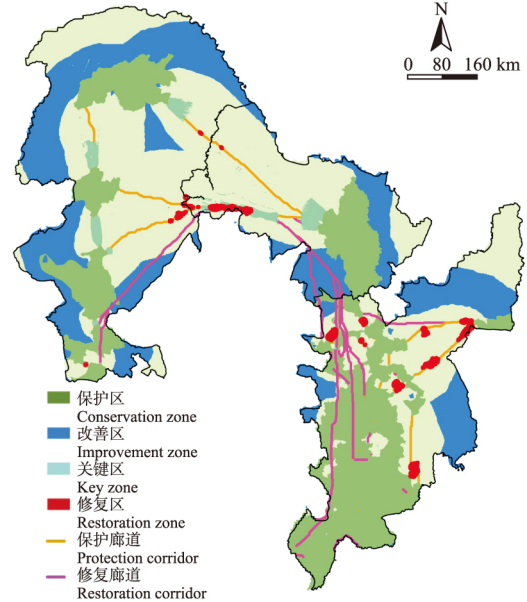


图8 东北森林带生态系统服务安全格局
Fig.8 Ecological security pattern of Northeast China forest belt

10 km 的关键廊道划为保护廊道 ,将长度大于 10 km 的潜在廊道划为修复廊道 ,构建了东北森林带生态系统服务安全格局。保护区的面积为 $16.40 \times 10^4 \text{ km}^2$,占东北森林带总面积的 27.3%。改善区的面积为 $20.91 \times 10^4 \text{ km}^2$,占 34.9%。关键区的面积为 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$,占 1.9%。修复区的面积为 $0.90 \times 10^4 \text{ km}^2$,占 1.5%。保护廊道 16 条 ,总长度 2426.90 km。修复廊道 17 条 ,总长度 7982.80 km。生态系统服务安全网络格局如图 8 所示。

3 讨论

3.1 东北森林带生态安全网络构建

从研究结果可以看出 ,东北森林带生态系统服务安全网络已经初步形成。研究区内生态系统服务功能整体较好 ,生态系统服务源地是在区域内生态系统服务质量相对更好的地区。这些地区土地覆盖以林地、自然水体、湿地等可以提供多种生态系统服务的高质量生态用地为主。这些区域森林覆盖率高、生物多样性丰富是维持区域生态安全的主体 ,应加强对原有生态功能的保护。

改善区主要由质量相对较低的森林、耕地构成。改善区受到的采伐、耕作等人类干扰强度较高 ,加之个别区域气候环境条件不好 ,生态系统服务质量偏低 ,需要通过生态恢复等手段提升其生态功能。对改善区的恢复和修复 ,不仅可以增加生态系统服务

源地的数量和面积,还可以减小生态阻力,增加景观连通性,进一步提高研究区生态系统服务网络稳定性和抗干扰能力。

尽管研究区生态系统服务源地之间均有生态廊道连接,但生态廊道数量较少,特别是大兴安岭地区的生态源地,呈现出“串珠状”连接,而非“网状”连接,生态服务网络稳定性和连通度有待进一步提高。大兴安岭和小兴安岭之间的生态源地距离较远,生态廊道数量较少且长度过长,导致这些生态廊道较为敏感,对干扰的抵抗能力较弱。本研究识别出多条未被“激活”的潜在生态廊道,即每个生态源地到达周围所有生态系统服务源地存在的可能路径。对潜在生态廊道的恢复和修复可以大幅增加研究区生态服务安全网络的连通性和稳定性。此外,在关键生态廊道上分布的夹点和障碍点,在一定程度上阻碍了生态系统服务源地之间的物质能量流动。大兴安岭内部以及其与小兴安岭的生态廊道中存在较多的生态夹点。生态夹点的存在显示出此区域生态廊道的宽度相对狭窄的地段,应适当降低其周边地区生态阻力,以加宽生态服务流动的通道的通畅程度。在长白山地区存在较多的障碍点。生态障碍点表明,尽管此廊道的累积成本最低,但该区域生态阻力值相对廊道内其他区域偏高,应改善其生态环境质量以降低其对生态系统服务流动的阻力。

3.2 东北森林带生态安全网络的优化措施

合理的生态格局是保障区域生态过程、发挥生态功能的前提,生态网络是生态格局中的骨架,生态网络修复,是恢复区域核心生态资源的基础(方莹等,2020)。恢复东北森林带复杂多样、抗干扰强的生态网络,可以有效合理配置区域自然资源,为绿色基础设施提供通道,提高自然资源的可持续利用性。因此,本研究提出以下建议:

(1) 目前大兴安岭及小兴安岭地区的生态系统服务源地和生态廊道呈现“串珠状”分布,虽然生态源地之间被有效串联,但尚未形成闭合的网状结构,景观结构稳定性尚需进一步提高。因此,通过在改善区优化森林结构,在大兴安岭地区增加落叶针叶林,在小兴安岭地区增加阔叶红松林等生态系统服务质量较高的原生植被,以增加生态源地的数量和面积,使之成为原有生态源地之间的“中转站”,促使景观结构形成闭合网络结构。

(2) 将位于东北森林带与东北平原交汇区的潜在廊道建设为关键廊道,使区域内网状结构呈现刚

性多边形模式,形成刚性有效链路,进一步稳定生态系统服务安全网络。

(3) 通过改善大兴安岭与小兴安岭生态系统服务源地之间生态廊道夹点区周边的生态质量,拓宽生态廊道宽度,提高生态廊道的抗干扰能力。

(4) 研究区内障碍点的土地覆盖类型多为质量较低的耕地,应对这些区域实行退耕还林等措施,降低障碍点内生态阻力,增加生态系统服务流动的连通性。

本文以生态系统服务重要性为基础确定生态源地,以最小成本路径结合的电路理论识别关键生态廊道与潜在生态廊道,结合生态改善区、生态夹点和生态障碍点共同构建生态安全格局进而提出优化策略,保障研究区生态安全,对国家生态屏障带生态格局优化具有重要参考意义。但研究仍有需要进一步深入探讨和提升之处。本研究根据东北森林带自然特征和生态环境状况,选取水源涵养、生物多样性维持、土壤保持、固碳释氧和粮食供给6个区域关键生态系统服务进行定量评估,基于综合生态系统服务重要性结合最小面积阈值法提取生态源地,具有一定的理论性和科学性,但这一筛选依据(阈值)的确定多为经验型,其合理性并未得到充分验证。最小成本路径方法只能识别生态系统服务源地之间的最小成本路径,不能有效识别对景观连接性有重要影响的“障碍点”和“夹点”区域,电路理论突破了此限制,能为区域生态保护规划和生态廊道设计提供科学依据,不过对于不同阻力阈值的廊道分布中阈值的选取需要更多的科学依据和论证。此外,有关生态安全格局的多尺度研究还有待深入探讨。

参考文献

- 陈 昕,彭 建,刘焱序,等. 2017. 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. *地理研究*, **36**(3): 471-484. [Chen X, Peng J, Liu YX, et al. 2017. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. *Geographical Research*, **36**(3): 471-484.]
- 崔胜辉,洪华生,黄云凤,等. 2005. 生态安全研究进展. *生态学报*, **25**(4): 861-868. [Cui SH, Hong HS, Huang YF, et al. 2005. Progress of the ecological security research. *Acta Ecologica Sinica*, **25**(4): 861-868.]
- 戴文渊,陈年来,李金霞,等. 2021. 基于 SENCE 概念框架的区域水生态安全评价研究——以甘肃地区 17 流段为例. *生态学报*, **41**(4): 1332-1340. [Dai WY, Chen NL, Li JX, et al. 2021. Regional water ecological security evaluation based on SENCE conceptual framework: Taking 17

- flow sections in Gansu Province as an example. *Acta Ecologica Sinica*, **41**(4): 1332-1340.]
- 方莹,王静,黄隆杨,等. 2020. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例. *自然资源学报*, **35**(1): 190-203. [Fang Y, Wang J, Huang LY, et al. 2020. Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: A case study of Yantai city. *Journal of Natural Resources*, **35**(1): 190-203.]
- 郝月,张娜,杜亚娟,等. 2019. 基于生境质量的唐县生态安全格局构建. *应用生态学报*, **30**(3): 1015-1024. [Hao Y, Zhang N, Du YJ, et al. 2019. Construction of ecological security pattern based on habitat quality in Tang County, Hebei, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **30**(3): 1015-1024.]
- 黄隆杨,刘胜华,方莹,等. 2019. 基于“质量-风险-需求”框架的武汉市生态安全格局构建. *应用生态学报*, **30**(2): 615-626. [Huang LY, Liu SH, Fang Y, et al. 2019. Construction of Wuhan's ecological security pattern under the quality-risk-requirement framework. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **30**(2): 615-626.]
- 黄木易,岳文泽,冯少茹,等. 2019. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. *自然资源学报*, **34**(4): 771-784. [Huang MY, Yue WZ, Feng SR, et al. 2019. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area. *Journal of Natural Resources*, **34**(4): 771-784.]
- 李雁,赵坤,方精云,等. 2004. 城市湖泊地区的土地利用变化——以武汉东湖为例. *长江流域资源与环境*, **13**(3): 229-233. [Li Y, Zhao K, Fang JY, et al. 2004. Land use change in urban lake watershed: A case study at Donghu Lake, Wuhan. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **13**(3): 229-233.]
- 李久林,徐建刚,储金龙. 2020. 基于Circuit理论的城市生态安全格局研究——以安庆市为例. *长江流域资源与环境*, **29**(8): 1812-1824. [Li JL, Xu JG, Chu JL. 2020. Constructing the urban ecological security pattern of Anqing City by circuit theory. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **29**(8): 1812-1824.]
- 刘壮壮,吴未,刘文锋,等. 2020. 基于“源地-廊道”生态安全格局构建逻辑范式的建设用地减量量化研究. *生态学报*, **40**(22): 8230-8238. [Liu ZZ, Wu W, Liu WF, et al. 2020. Study on construction land reduction based on “Source-Corridor” ecological security pattern paradigm. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(22): 8230-8238.]
- 毛诚瑞,代力民,齐麟,等. 2020. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例. *生态学报*, **40**(18): 6486-6494. [Mao CR, Dai LM, Qi L, et al. 2020. Constructing ecological security pattern based on ecosystem services: A case study in Liaohe River Basin, Liaoning Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(18): 6486-6494.]
- 蒙吉军,朱利凯,杨倩,等. 2012. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. *生态学报*, **32**(21): 6755-6766. [Meng JJ, Zhu LK, Yang Q, et al. 2012. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos, Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, **32**(21): 6755-6766.]
- 倪庆琳,侯湖平,丁忠义,等. 2020. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. *自然资源学报*, **35**(1): 204-216. [Ni QL, Hou HP, Ding ZY, et al. 2020. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang district of Xuzhou city as an example. *Journal of Natural Resources*, **35**(1): 204-216.]
- 欧阳志云. 2008. 全国生态功能区划. 北京: 中国科技教育出版社: 21-22. [Ou-Yang ZY. 2008. National ecological function regionalization. Beijing: China Science and Technology Education Press: 21-22.]
- 彭建,郭小楠,胡熠娜,等. 2017a. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. *应用生态学报*, **28**(2): 627-635. [Peng J, Guo XN, Hu YN, et al. 2017. Constructing ecological security patterns in mountain areas based on geological disaster sensitivity: A case study in Yuxi City, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **28**(2): 627-635.]
- 彭建,贾靖雷,胡熠娜,等. 2018. 基于地表湿润指数的农牧交错带地区生态安全格局构建——以内蒙古自治区杭锦旗为例. *应用生态学报*, **29**(6): 1990-1998. [Peng J, Jia JL, Hu YN, et al. 2018. Construction of ecological security pattern in the agro-pastoral ecotone based on surface humid index: A case study of Hangjin Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **29**(6): 1990-1998.]
- 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 2017b. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, **36**(3): 407-419. [Peng J, Zhao HJ, Liu YX, et al. 2017. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, **36**(3): 407-419.]
- 宋利利,秦明周. 2016. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别. *应用生态学报*, **27**(10): 3344-3352. [Song LL, Qin MZ. 2016. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **27**(10): 3344-3352.]
- 汤峰,张蓬涛,张贵军,等. 2018. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. *应用生态学报*, **29**(8): 2675-2684. [Tang F, Zhang PT, Zhang GJ, et al. 2018. Construction of ecological corridors in Changli County based on ecological sensitivity and ecosystem service values. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **29**(8): 2675-2684.]
- 王云,潘竟虎. 2019. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. *生态学报*, **39**(10): 3455-3467. [Wang Y, Pan JH. 2019. Establishment of ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland

- basin: A case study of the Ganzhou District, Zhangye City, Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, **39**(10): 3455–3467.]
- 王佳楠, 陈庆锋, 程启先, 等. 2020. 1999—2019 年我国生态安全格局研究进展与热点综述. *环境保护前沿*, **10**(6): 845–854. [Wang JN, Chen QF, Chen QX, et al. 2020. Summary of research progress and hotspots of Chinese ecological security pattern from 1999 to 2019. *Advances in Environmental Protection*, **10**(6): 845–854.]
- 王晓峰, 勒斯木初, 张明明. 2019. “两屏三带”生态系统格局变化及其影响因素. *生态学杂志*, **38**(7): 2138–2148. [Wang XF, Lesi MC, Zhang MM. 2019. Ecosystem pattern change and its influencing factors of “two barriers and three belts”. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(7): 2138–2148.]
- 王晓峰, 尹礼唱, 张 园. 2016. 关于生态屏障若干问题的探讨. *生态环境学报*, **25**(12): 2035–2040. [Wang XF, Yin LC, Zhang Y. 2016. Discussion on some issues of ecological barrier. *Ecology and Environmental Sciences*, **25**(12): 2035–2040.]
- 王晓玉, 陈甜倩, 冯 喆, 等. 2020. 基于地类边界分析的江苏省生态安全格局构建. *生态学报*, **40**(10): 3375–3384. [Wang XY, Chen TQ, Feng Z, et al. 2020. Construction of ecological security pattern based on boundary analysis: A case study on Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(10): 3375–3384.]
- 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪 涛, 等. 2019. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. *生态学报*, **39**(13): 4720–4731. [Wu MQ, Hu MM, Wang T, et al. 2019. Recognition of urban ecological source area based on ecological security pattern and multi-scale landscape connectivity. *Acta Ecologica Sinica*, **39**(13): 4720–4731.]
- 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 2002. 论生态安全的基本概念和研究内容. *应用生态学报*, **13**(3): 354–358. [Xiao DN, Chen WB, Guo FL. 2002. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **13**(3): 354–358.]
- 谢 玲, 邓晓军, 卢月燕, 等. 2019. 广西石漠化地区土地利用空间变化的生态风险研究. *中国农业资源与区划*, **40**(8): 113–121. [Xie L, Deng XJ, Lu YY, et al. 2019. Ecological risks caused by land use variations in the rocky desertification mountainous area in Guangxi Province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, **40**(8): 113–121.]
- 杨 苗, 龚家国, 赵 勇, 等. 2020. 白洋淀区域景观格局动态变化及趋势分析. *生态学报*, **40**(20): 7165–7174. [Yang M, Gong JG, Zhao Y, et al. 2020. Analysis of dynamic changes and trends in the landscape pattern of the Baiyangdian Region. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(20): 7165–7174.]
- 喻 红, 曾 辉, 江子瀛. 2001. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究. *地理科学*, **21**(1): 64–69. [Yu H, Zeng H, Jiang ZY. 2001. Study on distribution characteristics of landscape elements along the terrain gradient. *Scientia Geographica Sinica*, **21**(1): 64–69.]
- 曾 辉, 唐 江, 郭庆华. 1999. 珠江三角洲东部地区常平镇景观组分转移模式及动态变化研究. *地理科学*, **19**(1): 74–78. [Zeng H, Tang J, Guo QH. 1999. Study on the transfer model and dynamic changes of landscape components in Changping Town in the east of the Pearl River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, **19**(1): 74–78.]
- 张 路, 肖 燚, 郑 华, 等. 2018. 2010 年中国生态系统服务空间数据集. *中国科学数据(中英文网络版)*, **3**(4): 11–23. [Zhang L, Xiao Y, Zheng H, et al. 2018. A spatial dataset of ecosystem services in China (2010). *China Scientific Data*, **3**(4): 11–23.]
- Gao JB, Du FJ, Zuo LY, et al. 2020. Integrating ecosystem services and rocky desertification into identification of karst ecological security pattern. *Landscape Ecology*, **36**: 2113–2133.
- Huang JM, Hu YC, Zheng FY. 2020. Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: A case study of Jinan City. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**: 12414–12427.
- Peng J, Yang Y, Liu YX, et al. 2018. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, **644**: 781–790.
- Wu X, Liu SL, Sun YX, et al. 2019. Ecological security evaluation based on entropy matter-element model: A case study of Kunming city, southwest China. *Ecological Indicators*, **102**: 469–478.
-
- 作者简介 朱 琪,男,1992 年生,博士研究生.主要从事生态系统服务与生态安全格局优化研究. E-mail: qizhuahau@163.com
- 责任编辑 魏中青
-

朱琪,袁泉,于大炮,周旺明,周莉,韩艳刚,齐麟. 2021. 基于电路理论的东北森林带生态安全网络构建. *生态学杂志*, **40**(11): 3463–3473.

Zhu Q, Yuan Q, Yu DP, Zhou WM, Zhou L, Hang YG, Qi L. 2021. Construction of ecological security network of Northeast China forest belt based on the circuit theory. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(11): 3463–3473.