

基于生态保护红线的佳木斯市生态安全格局构建

徐德琳¹, 邹长新^{1*}, 裴文明¹, 王燕¹, 王涛¹, 赵坤宇²

(1.生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2.佳木斯市环境科学研究院, 黑龙江 佳木斯 154002)

摘要:生态保护红线是区域内生态保护的核心区块,是国家和区域生态安全的重要保障,也是生态安全格局构建的关键组分。选取佳木斯市为研究区域,以生态保护红线为生态安全格局构建的生态源地,基于最小累积阻力模型构建了佳木斯市生态安全格局构建,划分了低、中、高3种水平的生态安全格局,并对生态源地开展景观连通性评估,确定了在生态廊道构建中的核心斑块,主要集中在北部的松花江、黑龙江及乌苏里江流域,以及南部的七星峰区域。

关键词:生态保护红线;生态安全;生态源地;景观连通性

中图分类号:X321 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-6830(2019)04-0008-07

Ecological security pattern construction of Jiamusi City based on ecological protection redlines. XU De-lin¹, ZOU Chang-xin^{1*}, PEI Wen-ming¹, WANG Yan¹, WANG Tao¹, ZHAO Kun-yu² (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. Jiamusi City Environmental Science Research Institute, Jiamusi 154002, China). *Environmental Ecology*, 2019, 1(4), 8~14.

Abstract: Ecological protection redlines protect the core area of regional ecological protection. They are not only important guarantee of national and regional ecological security, but also key components of the construction of ecological security pattern. Here we chose Jiamusi City as the research area, and then selected the red line regions as sources of ecological security patterns and utilized the minimum cumulative resistance model to build comprehensive ecological security patterns. Therefore, three-level ecological function zones were recognized, which corresponded to ecological protection area and proposed construction countermeasures. In addition, we assessed the landscape connectivity of ecological sources within ecological security pattern, and then identified the core patches in the construction of ecological corridors, such as the ecological sources patches of Songhua River, Heilongjiang River and Wusuli River Basins in the North of Jiamusi City, and the ecological sources patches of Seven Star Peaks in the South of Jiamusi City.

Key words: ecological protection redline; ecological security; ecological sources; landscape connectivity

生态安全是国家安全重要的组成部分。我国生态本底较为脆弱,资源环境禀赋与生态状况空间差异显著,一些区域产业发展、城镇布局、资源开发强度与生态承载能力不相匹配,导致生态系统功能退化严重,生态安全面临严重威胁。土地承载着重要的生态过程和生态系统服务功能,也是人类社会经济发展的基础,因此,构建科学合理的生态安全格局,对保障区域生态安全和人类福祉具有关键作用^[1]。为此,学者们展开了大量探索研究^[2-5],各级政府也出台了相关政策,为生态安全格局构建提供了理论与实践支撑。

生态保护红线是指在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域,是保障和维护国家生态安全的底线和生命线,通常包括具有重要水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙、海岸生态稳定等功能的生态功能重要区域,以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境敏感脆弱区域^[6]。生态保护红线界定的是

亟需实施严格保护的国土空间,这些国土空间是区域内生态保护的核心区块,是国家和区域生态安全的重要保障,也是生态安全格局构建的关键组分^[7]。

生态源地的选择是区域生态安全格局构建的关键与首要步骤。以往多数研究选择区域内自然保护区和风景名胜区的核心区,或区域内一定面积的绿地、水体等生态斑块作为生态源地,也有部分学者从生态系统服务重要性、敏感性等方面考虑,开展生态源地选择^[8-10]。但由于目前我国许多自然保护区、重要生态斑块等的边界仍不明确,不同部门划分的各类保护区还存在着空间交叉重叠等问题,给生态

收稿日期:2019-07-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506605)。

作者简介:徐德琳(1985-),女,副研究员,主要研究生态安全格局、生态系统服务评估、生态保护红线保护成效评估等方向。

通讯作者:邹长新, E-mail: zcx@nies.org。

源地选择带来了困难^[11]。作为最严格的生态保护空间,生态保护红线反映了区域内生态保护空间的分布特征和功能定位,其对维护和控制区域内重要生态过程发挥了关键作用。因此,在生态保护红线的基础上选择生态源地,可为生态安全格局的构建提供基础和要素。

佳木斯市地处三江平原腹地,是黑龙江省东北部地区最大的综合性区域中心城市^[12]。本文以佳木斯市为研究区域,以生态保护红线区域作为生态安全格局构建的生态源地,利用最小累积阻力模型构建佳木斯市生态安全格局体系,以期改进传统的生态安全格局构建方法,并为保障区域生态安全,实现社会经济可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况

佳木斯位于我国东北的松花江、黑龙江、乌苏里江汇流而成的三江平原腹地,南起北纬 $45^{\circ}56'$ ~ $48^{\circ}28'$,西起东经 $129^{\circ}29'$ ~ $135^{\circ}5'$ 。幅员面积 3.27 万 km^2 ,东西长约 340 km,南北宽约 190 km,国境(界江)线总长 449 km。东邻双鸭山市,西依哈尔滨市、伊春市,南接牡丹江市、七台河市、鸡西市,北邻鹤岗市。佳木斯市是黑龙江省东部地区的政治、经济、文化中心和重要的交通枢纽,有巨大的投资发展优势。全市土地总面积 3.27 万 km^2 ,占全省土地总面积的 7.2% 。全市耕地面积大,分布集中连片,是国家重要的商品粮基地^[13](图1)。

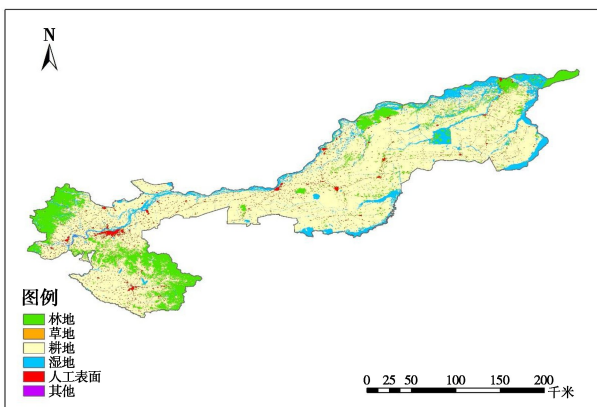


图1 2015年佳木斯市土地利用分类图

Fig.1 Land use map of Jiamusi City in 2015

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文所采用的数据包括佳木斯市土地利用数

据,NDVI数据,NPP数据,土壤属性数据、DEM数据、气象数据(气温、降水)、道路图、水系图等。其中土地利用类型数据来源为全国生态环境6年变化(2010—2015年)遥感调查与评估项目数据,本文使用的是2015年土地利用类型数据;NDVI数据使用MODIS16天合成的NDVI数据产品,分辨率为 250 m;NPP数据使用CASA光能利用率模型计算得到;土壤属性数据来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界和谐土壤数据库(HWSD),中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 $1:100$ 万土壤数据。

2.2 研究方法

2.2.1 生态安全格局构建

本文采用最小累积阻力模型^[14]建立生态源地与城镇扩张用地这两个生态变化过程的最小累积阻力面,以最小累积阻力差值结果作为构建佳木斯市生态安全格局的基础数据,其计算公式如下:

$$MCR_{\text{差值}} = MCR_{\text{生态源地}} - MCR_{\text{城镇用地}} \quad (1)$$

式中, $MCR_{\text{生态源地}}$ 表示生态源地扩张的最小累积阻力值, $MCR_{\text{城镇用地}}$ 表示城镇用地扩张的最小累积阻力值。当 $MCR_{\text{差值}}$ 为正值时,标识该区域城镇源地扩张阻力小,而生态扩张阻力大,适合城镇源地扩张;而当 $MCR_{\text{差值}}$ 为负值时,值越大越适合生态源地扩张。当 $MCR_{\text{差值}}$ 为零时,则是该区域生态源地扩张与城镇用地扩张的分界线^[15]。

2.2.1.1 源地识别

佳木斯市于2017年6月全面启动了佳木斯市生态保护红线划定工作,全市生态保护红线初步划定面积为 6143.48 km^2 ,占全市土地总面积的 18.9% 。佳木斯市生态保护红线包含自然保护区、风景名胜区、森林公园、地质遗迹保护区、湿地公园、饮用水源保护区、湿地公园等多种生态保护类型用地。本研究选取佳木斯市范围内的生态红线区为生态源地,进行区域生态安全格局研究。

城市扩张源地的现状为城市建设用地,同时为了剔除小面积农村居民点的影响,对城镇建设用地面积设置阈值,仅提取面积阈值大于 0.3 km^2 的城镇建设用地单元作为城市扩张源(图2)。

2.2.1.2 阻力面建立

不同地形、植被覆盖、土壤、水文条件、土地利用现状等因素对城市扩张以及生态保护用地扩张具有不同作用。由于构建生态安全格局需要对两个过程

的累积阻力表面进行栅格运算,因此需要统一城市扩张与生态源地扩张的阻力标准值。

本研究采用德尔菲法确定阻力表面。城市扩张阻力因子包含高程、坡度、土壤类型、土地利用现状、距离铁路距离以及距离公路距离 6 个指标,生态源地扩张因子包括高程、坡度、水源涵养、土壤保持、土地利用现状、全年 NDVI 指数均值、植被覆盖度、距离铁路距离以及距离公路距离 9 个指标。为了更好

地反映区域生态环境变化特点及适宜程度,将评价因子的原始信息等级化、数量化。单因子阻力按照五级标准分类,用 5、4、3、2、1 表示对城市扩张与生态源地扩张阻力的高低。由于各单一因子对城市及生态扩张的影响程度不同,根据影响程度大小赋予不同的权值。使用 yaahp 层次分析法软件确定各阻力因子权重。评价标准和权重分析结果见表 1、表 2。

表 1 生态源地扩张阻力因子分级及权重

Table 1 Resistance assignment and weight of factors for ecological sources zone expansion

评价因子	1	2	3	4	5	权重
高程/m	250~883	150~200	100~150	50~100	23~50	0.032 2
坡度/°	0~3	3~5	5~10	10~20	20~38	0.043 8
水源涵养	120~148.74	90~120	60~90	30~60	0.49~30	0.079 5
土壤保持	400~552	300~400	200~300	100~200	9.4~100	0.068 2
土地利用现状	林地	湿地	草地	耕地	人工表面、其他	0.173 0
全年 NDVI 指数均值	0.9~0.8	0.8~0.65	0.65~0.4	0.4~0.25	0.25~0.132	0.146 4
植被覆盖度	0.89~0.8	0.8~0.65	0.65~0.4	0.4~0.25	0.25~0	0.225 0
距离铁路距离/km	>3	2~3	1~2	0.5~1	0~0.5	0.133 8
距离公路距离/km	>1.2	0.9~1.2	0.6~0.9	0.3~0.6	0~0.3	0.098 3

表 2 城市扩张阻力因子分级及权重

Table 2 Resistance assignment and weight of factors for urban expansion

评价因子	1	2	3	4	5	权重
高程/m	23~50	10~50	50~100	100~250	250~883	0.072 2
坡度/°	0~3	3~5	5~10	10~15	15~42	0.057 3
土壤类型	壤土	粘壤土、砂质粘壤土	砂质壤土、壤质砂土	粉砂粘壤土、粉质壤土	粘土、砂土	0.227 2
土地利用现状	人工表面、其他	草地	耕地	林地	湿地	0.327 7
距离铁路距离/km	0~0.5	0.5~1	1~2	2~3	>3	0.165 3
距离公路距离/km	0~0.3	0.3~0.6	0.6~0.9	0.9~1.2	>1.2	0.150 2

最后,根据各阻力因子构成及其权重,在 GIS 中将各因子进行赋值,对赋值栅格加权求和运算。

2.2.1.3 适宜性分区

生态安全格局主要由生态源地、缓冲区、生态廊道、生态战略节点等组分组成。基于这些组分的空间分布组合,构成区域生态安全格局。本文在源地识别、阻力面建立的基础上,利用最小累积阻力模型分别计算生态源地和城市扩张源地的最小累积阻力值,计算两者最小累积阻力的差值。

绘制累积阻力值与栅格数的关系曲线,运用 Regime Shift Detection 软件进行突变检测得到累积阻力值的突变点。关系曲线的突变点处累积阻力差

值变化剧烈,是潜在的分区界限^[4,16]。通过分区为 5 类不同适宜性的区域,包括低生态安全水平格局、中生态安全水平格局、高生态安全水平格局、优化开发地区和重点开发地区;同时将生态源地纳入低生态安全水平格局,城市扩张源地纳入优化开发区,最终构建佳木斯市生态安全适宜性分区。

2.2.2 生态源地景观连通性评估

使用 Conefor Sensinode 2.6 评估生态源地的景观连通性,即某个生态源地在保持整个景观系统连通性中所起的作用^[17]。Conefor Sensinode 2.6 软件包提供的评估连通性指标包括整体连通性指数 IIC (Integral Index of Connectivity)、流量 F(Flux)、可能

连通性指数 PC (Probability of Connectivity), 3 个指数的计算公式分别见公式(2)、公式(3)和公式(4)。将生态保护红线的重要性定义为去除某一源地的情况下,系统整体连通性变化率,计算公式见(5)。同时,对生态源地斑块面积比例进行计算,计算公式见(6)。

$$IIC = [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_i a_j) / (1 + nl_{ij})] / A_L^2 \quad (2)$$

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n P_{ij} \quad (3)$$

$$PC = (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j P_{ij}^*) / A_L^2 \quad (4)$$

$$dI = (I - I_{remove}) / I \quad (5)$$

$$dA = a_i / A_c \quad (6)$$

式中, I 表示景观系统某项指数 (IIC 、 F 、 PC) 的全局指数值, I_{remove} 表示去除某个斑块后景观系统该指数的全局指数值。 a_i 表示单个源地斑块的面积, A_c 表示景观系统内所有源地斑块的面积之和。 dI 值或者 dA 值越大, 表示该斑块或者节点在景观系统连接中发挥的作用越大, 其重要性程度越高。

3 结果与分析

3.1 源地识别与累积阻力面构建

本文选取的生态源地面积为 6 137. 86 km², 占研究区总面积的 18. 75%; 城镇扩张用地的源地为研究区面积大于 0. 3 km² 的城镇建设用地单元, 总面积为 442. 58 km², 占研究区总面积的 1. 35%。利用最小累积阻力模型计算, 分别得到生态源地和城市源地扩张的最小累积阻力面及其最小累积阻力差值, 结果如图 3、图 4 和图 5 所示。由图 5 得出, 研究区中部地区及西部地区最小累积阻力差值最大, 是由于这里地形相对平坦, 人类活动较为密集, 适合城

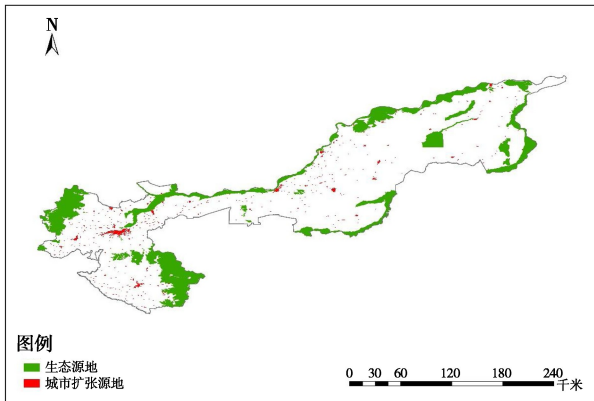


图 2 佳木斯市生态源地和城市扩张源地分布图

Fig.2 Distributions of ecological sources and urban expansion sources

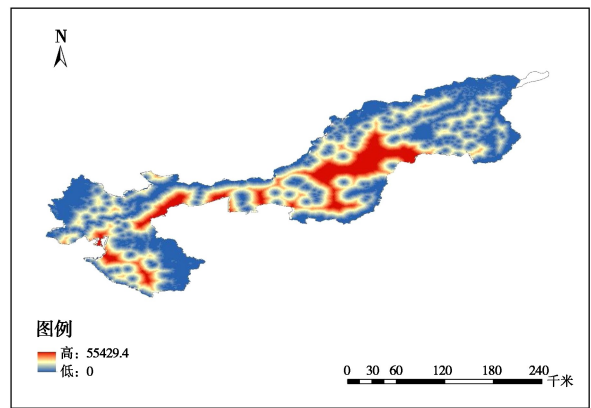


图 3 生态源地累积阻力面分布图

Fig.3 Accumulative resistance surface of ecological sources

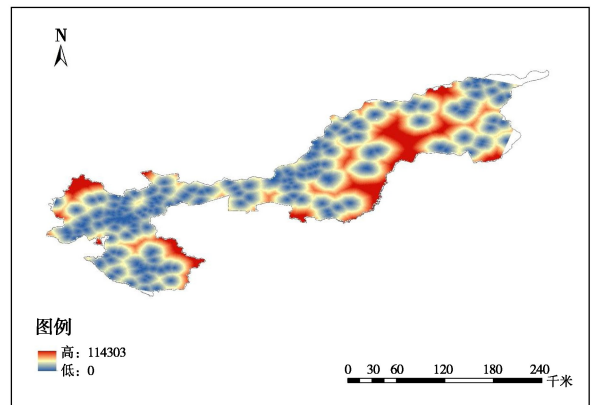


图 4 城市扩张累积阻力面分布图

Fig.4 Accumulative resistance surface of urban expansion sources

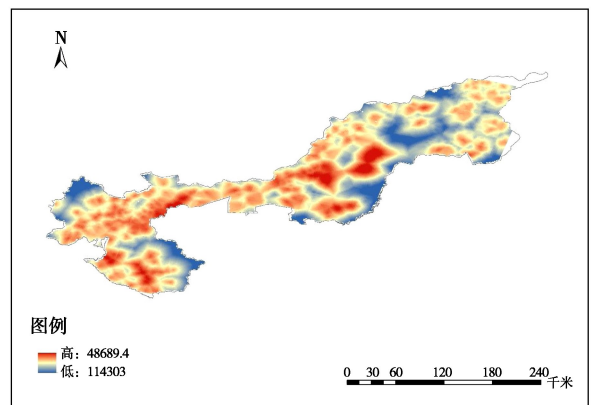


图 5 累计阻力差值分布图

Fig.5 Margin of minimum accumulative resistance surface

镇源地扩张。而周边地区地形相对复杂, 人类影响相对较少, 生态流的扩张阻力在此处形成低值谷地。

3.2 适宜性分区

根据累积阻力值与栅格数的关系曲线, 运用突变检测方法, 共检测出 4 个稳态突变点 (图 6)。将

研究区域分为5类不同适宜性的区域,包括低生态安全水平格局、中生态安全水平格局、高生态安全水平格局、优化开发地区和重点开发地区;同时将生态源地纳入低生态安全水平格局,城市扩张源地纳入优化开发区,最终区域生态安全格局构建结果见图7。其中,低水平生态安全格局面积为6 351.85 km²,占佳木斯市总面积的19.41%;中、高水平生态安全格局面积分别为1 795.15 km²和19 231.96 km²,占佳木斯市总面积的5.48%和58.75%。重点开发区和优化开发区面积分别为3 762.41 km²和1 591.55 km²,占佳木斯市总面积的11.49%和4.86%。

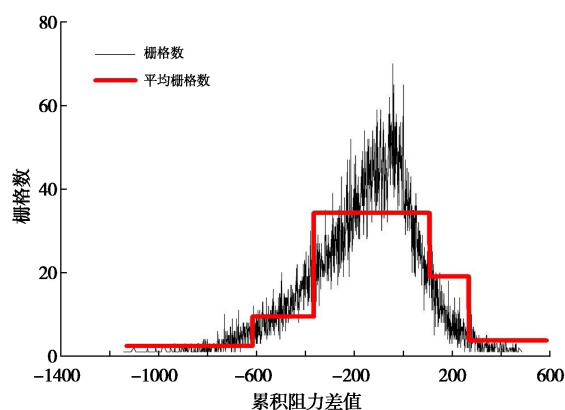


图6 累积阻力差值与栅格数的关系曲线

Fig.6 Curve of relationship between cumulative drag difference and grid number

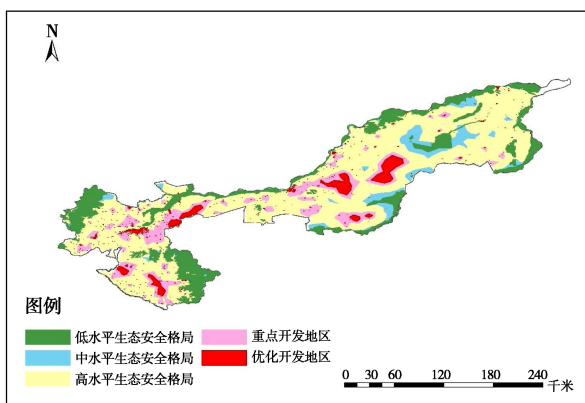


图7 佳木斯市生态安全格局分布图

Fig.7 Ecological security pattern of Jiamusi City

生态保护红线是低水平生态安全格局的主要组成,占其面积的96.63%,是区域生态安全的核心,也是需要严格保护和重点生态恢复的区域。由低安全水平和中安全水平的生态安全格局叠加的国土部分构成了佳木斯市生态安全的满意格局,总面积为8 147.00 km²,占佳木斯市总面积的24.89%,在底线格局的基础上增加了更多的保护区域。由低

安全水平、中安全水平和高安全水平的生态安全格局叠加的国土部分构成了佳木斯市的理想生态安全格局,总面积为27 378.96 km²,占佳木斯市面积的83.64%,包含了现有的大量农业用地和生态用地,它在最大限度上保护了关键生态过程和生态基础设施的完整性。

3.3 生态源地景观连通性评价

对生态源地的景观连通性评价结果显示,位于佳木斯市北部的松花江、黑龙江流域生态源地和南部的七星峰生态源地的景观连通重要性最高,表明其对区域系统连通性贡献最大(图8)。东部乌苏里江流域生态源地、南部接力河流域、西北部青黑山生态源地的景观连通重要值也相对较高,说明其对系统的连通性贡献也较大。此外,大型湖泊湿地的景观连通重要值也相对较高,如大力加湖等。

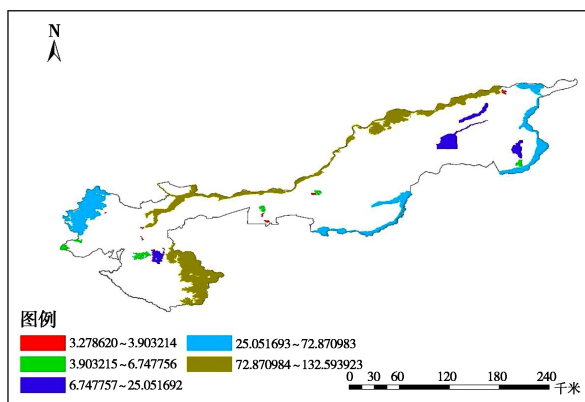


图8 佳木斯市生态源地景观连通重要性分布图

Fig.8 Distribution map of landscape connectivity importance of ecological sources in Jiamusi City

4 结论与讨论

本文以生态安全格局理念为指导,以佳木斯市为例,以生态保护红线作为生态源地,采用最小累积阻力模型对佳木斯市开展生态适宜性分区,进而构建低、中、高3种水平生态安全格局。在此基础上,对生态源地开展景观连通性评价,为生态廊道构建及生态空间规划等研究提供依据。研究结果表明:(1)佳木斯市低、中、高水平生态安全格局面积分别为6 351.85 km²、1 795.15 km²和19 231.96 km²,分别占佳木斯市总面积的19.41%、5.48%和58.75%;(2)生态源地的连通重要性程度表现为北部松花江-黑龙江流域、南部山地斑块高,中部地区斑块较低的趋势。

生态源地是区域生态安全格局构建的基础,其

准确性和科学性直接影响生态格局构建的结果^[18]。生态保护红线的划定对象是区域内生态保护的核心区块,具有重要的生态功能或高度生态敏感性、脆弱性,且具有明晰的地理边界,空间上互不重叠,因此,以生态保护红线作为区域生态安全格局的生态源地,为生态安全格局的构建与优化提供了新思路。我国生态保护红线划定工作已取得显著进展,全国31省(区、市)生态保护红线划定方案均已通过省级政府常务会审议,目前正处于优化调整阶段。本文使用的佳木斯市生态保护红线划定方案于2018年5月完成报批,目前也处于优化调整阶段。虽然不是生态保护红线的最终划定方案,但其已基本涵盖了佳木斯市生态系统服务的极重要区和敏感区、脆弱区等,可为探索构建基于生态保护红线的区域生态安全格局提供重要的基础数据资源。

生态安全格局划定为区域城镇发展的用地选择提供控制依据^[19]。已有的研究多集中于快速城镇化地区,其生态保护与城市建设用地的矛盾日益突出^[4,20,21]。目前,虽然佳木斯市人地关系与城镇建设用地矛盾并不尖锐,但其是世界上仅有的三块黑土平原之一,是松花江、黑龙江、乌苏里江三江汇流之地,也是我国东北生态安全格局构建中的关键节点城市,因此佳木斯市的生态安全格局的构建对于构建我国东北生态安全屏障具有重要意义。对于以生态保护红线为主体的低水平生态安全格局,应将其视为佳木斯市生态安全的底线格局,严格限制开发建设活动。中水平生态安全格局所占佳木斯市国土空间面积的比例不高(5.48%),可作为低水平生态安全格局的缓冲区。高水平生态安全格局占据佳木斯市国土空间面积的58.75%,不可忽略的是其中耕地占有相当大的比例。在实施东北老工业基地振兴和黑龙江两大平原土地管制制度改革的政策背景下,如何合理地保障国家粮食安全和生态安全,以及如何处理好经济发展与生态安全的关系等是今后需要进一步探讨的方向^[22]。

生态安全格局构建不仅关注区域生态系统功能、质量,也关注生态系统自身的空间组织结构、景观连通等。维持良好的连通性有利于生态系统的稳定和生物多样性,从而为区域内充足的生态系统服务和良好的人居环境提供基本的格局保障。生态保护红线在划定时侧重对生态系统服务重要性和生态敏感性评估,红线斑块在空间上存在破碎化、连通性差的不足^[23]。通过对景观连通性的评估可以看出,

松花江、黑龙江及乌苏里江流域以及南部的七星峰生态保护红线斑块在区域整体生态安全格局中占据重要地位。基于这些连通性高的生态保护红线斑块构建的生态网络将会有效改善当前生态保护红线斑块连通性低的问题。

生态安全格局的构建是对景观生态学“功能-过程-格局”核心思想的理论延伸。然而,理论格局如何应用到城市规划和生态保护等实践中,能否达到预期效果,还需要实际检验。此外,在构建基于生态保护红线的生态安全格局的基础上,还需根据各类生态安全格局的性质和保护目标配套相应的管控政策,建立完善的评估、预警与考核制度等,从而更加系统地保障区域生态安全。

参考文献

- [1] 杨天荣,匡文慧,刘卫东,等.基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局[J].地理研究,2017,36(3):441-452.
- [2] 高吉喜.区域生态学核心理论探究[J].科学通报,2018,63(8):693-700.
- [3] 李潇然,李阳兵,王永艳,等.三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例[J].生态学杂志,2015,34(7):1959-1967.
- [4] 蒙古军,朱利凯,杨倩,等.鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J].生态学报,2012,32(21):6755-6766.
- [5] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等.佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J].生态学报,2013,33(5):1524-1534.
- [6] 邹长新,徐梦佳,林乃峰,等.生态保护红线的内涵辨析与统筹推进建议[J].环境保护,2015,43(24):54-57.
- [7] 邹长新,王丽霞,刘军会.论生态保护红线的类型划分与管控[J].生物多样性,2015,23(6):716-724.
- [8] 吴健生,张理卿,彭建,等.深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J].生态学报,2013,36(13):4125-4133.
- [9] 潘竞虎,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.
- [10] 张玉虎,李义禄,贾海峰.永定河流域门头沟区景观生态安全格局评价[J].干旱区地理,2013,36(6):1049-1057.
- [11] 徐德琳,邹长新,徐梦佳,等.基于生态保护红线的生态安全格局构建[J].生物多样性,2015,23(6):740-746.
- [12] 姜秋香,董鹤,付强,等.基于SD模型的城市水资源承

- 承载力动态仿真——以佳木斯市为例[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):827-831.
- [13] 宋戈,郑浩.黑龙江省地级市土地集约利用评价及驱动力——以佳木斯市为例[J].经济地理,2008(2):297-929,307.
- [14] 王琦,付梦娣,魏来,等.基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以安徽省宁国市为例[J].环境科学学报,2016,36(12):4546-4554.
- [15] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等.基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J].生态学杂志,2016,35(1):250-258.
- [16] 吴健生,岳新欣,秦维.基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例[J].地理研究,2017,36(3):429-440.
- [17] 陈昕,彭建,刘焱序,等.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.
- [18] 岳德鹏,于强,张启斌,等.区域生态安全格局优化研究进展[J].农业机械学报,2017,48(2):1-10.
- [19] 彭建,汪安,刘焱序,等.城市生态用地需求测算研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(2):333-346.
- [20] 杜悦悦,胡熠娜,杨旸,等.基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例[J].生态学报,2017,37(24):8241-8253.
- [21] 蒙古军,王雅,王晓东,等.基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1052-1061.
- [22] 焦红,汪洋.基于PSR模型的佳木斯市土地生态安全综合评价[J].中国农业资源与区划,2016,37(11):29-36.
- [23] 王成新,万军,于雷,等.基于生态网络格局的城市生态保护红线优化研究——以青岛市为例[J].中国人口·资源与环境,2017,27(S1):9-14.

(上接第7页)

- [18] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.
- [19] 张庆费,周晓峰.黑龙江省汤旺河和呼兰河流域森林对河川年径流量的影响[J].植物资源与环境学报,1999,8(1):22-27.
- [20] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等.基于InVEST模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J].应用生态学报,2013,24(1):183-189.
- [21] 文志,赵赫,刘磊,等.土地利用变化对海南土壤水源涵养功能的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4025-4033.
- [22] 张立伟,傅伯杰,吕一河,等.基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究[J].地理学报,2016,71(5):768-780.
- [23] 高吉喜.区域生态学[M].北京:科学出版社,2015.
- [24] 张海波,张明阳,王克林,等.南方丘陵山地带水源涵养功能变化特征[J].农业现代化研究,2014,35(3):345-348.
- [25] 刘璐璐,曹巍,吴丹,等.国家重点生态功能区生态系统服务时空格局及其变化特征[J].地理科学,2018,38(9):1508-1515.
- [26] 赵同谦,欧阳志云,郑华.中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J].自然资源学报,2004,19(4):480-491.
- [27] 朱连奇,许叔明,陈沛云.山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].地理研究,2003,22(4):432-438.
- [28] 青海省环境保护厅.三江源生态保护和建设生态效果评估技术规范:DB 63/T1342—2014[S].青海:青海省质量技术监督局,2014.