

DOI: 10.5846/stxb201909241998

于成龙, 刘丹, 冯锐, 唐权, 郭春玲. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(1): 290-301.

Yu C L, Liu D, Feng R, Tang Q, Guo C L. Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 290-301.

基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建

于成龙¹, 刘丹^{1,*}, 冯锐², 唐权³, 郭春玲³

1 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030

2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

3 凌海市生态建设发展中心, 凌海 121200

摘要:生态安全格局对于缓解生态保护与经济发展之间的矛盾具有积极意义。以东北地区为研究对象, 综合参考《生态保护红线划定技术指南》、《全国生态功能区划》以及东北地区自然资源禀赋和社会经济发展水平, 基于水源涵养、防风固沙、生物多样性维持与保护等功能指标和敏感性指标划分生态源地; 利用夜间灯光数据修正基本生态阻力面, 并运用最小累积阻力模型划分缓冲区、识别生态廊道和生态战略节点, 从而构建东北地区生态安全格局。结果表明: 东北地区生态源地总面积为 6.50×10^5 km², 占全区土地总面积的 45.02%, 包括 18 个生态源地, 主要分布在大兴安岭、小兴安岭、长白山脉和西部草原的部分区域; 划分了高、中、低 3 个水平缓冲区, 关键生态廊道中心线总长 11073.52km, 生态战略节点 29 个, 在东北地区形成以生态源地为中心的网状空间布局。结果可为保障区域生态系统服务功能和可持续发展政策的制定提供科学参考。

关键词:生态安全格局; 最小累积阻力模型; 东北地区

Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model

YU Chenglong¹, LIU Dan^{1,*}, FENG Rui², TANG Quan³, GUO Chunling³

1 Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China

2 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China

3 Linghai Ecological Construction and Development Center, Linghai 121200, China

Abstract: Ecological security pattern is important for alleviating contradiction between the ecological protection and economic development. In this paper, we chose Northeast China as the research object and comprehensively referred to *Technical Guideline for Demarcating the Red Line of Ecological Protection*, *National Ecological Function Division*, and the level of natural resources and socio-economic development. Firstly, the ecological sources were divided based on the functional and sensitive indicators of water conservation, windbreak and sand fixation, biodiversity maintenance and protection. Then the basic ecological resistance surface was modified by night light data, and minimum cumulative resistance (MCR) model was used to divide buffer zones, identify ecological corridors and strategic nodes, so as to construct the ecological security pattern in Northeast China. The results showed that the ecological source area of Northeast China was 650000 km², accounting for 45.02% of the whole region. The area included 18 ecological sources, which mainly distributed in Daxing'anling Mountains, Xiaoxing'anling Mountains, Changbai Mountains, and part of the western grassland. Based on MCR model, we divided high, middle, and low buffer zones. The total length of the central line of the key ecological

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019D014); 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放研究基金项目(stqx2018zd03); 中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金(2018SYIAEZD1)

收稿日期:2019-09-24; **网络出版日期:**2020-11-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nefuliudan@163.com

corridors was 11073.52 km and 29 ecological strategic nodes were identified. And all these formed a network spatial layout between ecological sources in Northeast China. We expected the results could provide some scientific reference for the regional ecosystem services and the formulation of sustainable development policies.

Key Words: ecological security pattern; MCR model; Northeast China

高强度土地利用方式以及人类对自然资源的不合理开发与利用,直接影响区域景观空间格局和生态过程,使原本脆弱的自然生态环境日渐恶化^[1],由此,以维护生态过程完整、健康和可持续发展为出发点的生态安全理念逐步受到政府和学术界的广泛关注^[2-3],经过几十年的发展,生态安全已经成为缓解自然生态保护与人类社会发展之间矛盾的重要理念之一,生态安全理论也为政府寻求区域生态保护与经济可持续发展之间的平衡提供了有力支撑。生态安全理念强调资源、环境和生态系统服务功能的健康和可持续发展^[4-5],通过构建区域生态安全格局(Ecological Security Pattern, ESP)以实现区域必要的自然资源保护与物质福祉^[6],经过多年探索和实践,区域生态安全格局已从最初的定性规划、定量格局分析^[7-8],逐步进入到空间数据演算、静态格局优化、动态格局模拟以及状态趋势分析等快速发展历程^[9-10],其研究方法则主要涉及生态适宜性/敏感性、景观格局指数、情景分析、综合指标体系等^[11-12]。

东北地区地域辽阔、地形复杂、温湿分异典型、植被分布独特、自然地理区域相对完整,拥有广袤的森林和草原,是我国东北平原、华北平原和东北亚区域的生态环境和工农业生产不可替代的生态屏障,同时该地区又是全球气候变化响应的敏感区和脆弱区,加上近几十年快速的城市化进程和人类对自然资源的不合理开发利用,导致该区域生态环境面临巨大挑战,出现诸如大气污染^[13]、黑土地退化^[14]、湿地消亡^[15]、森林生态功能衰退^[16]、草地沙化^[17]等一系列生态环境问题,因此构建科学合理的生态安全格局,已经成为本区域乃至华北和东北亚区域维持生态安全和社会经济可持续发展的迫切需求。

区域尺度是生态安全格局在空间层次上研究的重点,相对完整的自然地理区域对研究生态系统的可持续过程具有重要意义^[18-19],构建适合该区域环境特点和社会发展水平的相对完整的生态安全框架体系,对于避免因行政区的分割降低生态安全格局完整性,使特定生态过程能够得到有效保护和调控具有重要作用和积极意义。当前主流的生态安全格局构建方法是“源地—廊道”组合,生态源地的识别是生态安全格局构建的基础,缘起于俞孔坚^[20]以生物保护区为重点对生态安全格局理论的探索,生态源地构建方法和理论正在深入发展,但之前的多数方法只从生态功能重要性、生态敏感性/脆弱性等单一方面开展,直到环境保护部 2015 年发布的《生态保护红线划定技术指南》,提出了生态系统生态功能和生态敏感性的综合指标方法,给生态源地识别提供了重要依据,有研究者参照该方法开展了相关研究,取得了较好效果^[21-22],但该方法选取的指标具有较强的普适性,而我国幅员辽阔,生态系统类型多样,生态系统功能与过程对于自然和社会经济活动变化的影响与响应存在较大差异,如何结合区域特点构建符合本区域生态过程完整、生态系统健康和可持续发展、能更好地服务于当地社会经济可持续发展的生态安全格局是一个亟待解决的科学问题。本研究以东北地区为研究对象,参考《生态保护红线划定技术指南》中生态保护红线的划分方法,以《全国生态功能区划》中的生态服务功能极重要区域和生态极敏感区域作为生态源地划分的主要依据,综合东北地区自然资源禀赋和社会经济发展实际,利用最小累积阻力模型构建区域生态安全体系,探讨东北地区生态安全框架,明晰区域生态安全格局,为保障区域生态系统服务功能的正常发挥和可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

东北地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东部的赤峰市、通辽市、呼伦贝尔市及兴安盟^[23],位于 111.15°E—135.09°E,37.95°N—53.56°N 之间,土地面积 $1.44 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。水绕山环、沃野千里是东北地区地面结构的基本特征,东面和北面有鸭绿江、图们江、乌苏里江和黑龙江环绕,内部有大兴安岭、小兴安

岭、长白山系和东北平原(包括松辽平原、辽河平原和三江平原),海拔高度介于2—2667m之间(图1)。该区自然植被属欧亚森林—草原植物亚区和中国—日本森林植物亚区^[24]。气候型属温带季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,自东向西从湿润区、半湿润区过渡到半干旱区,近30年(数据来源:中国地面累年值日值数据集(1981—2010年),<http://data.cma.cn/site/index.html>)年平均气温 -4.04°C — 1.26°C ;最冷月为1月,平均 -28.61 — 3.64°C ;最热月为7月,平均 16.87 — 26.19°C ;年降水量 132.90 — 1314.00mm 。

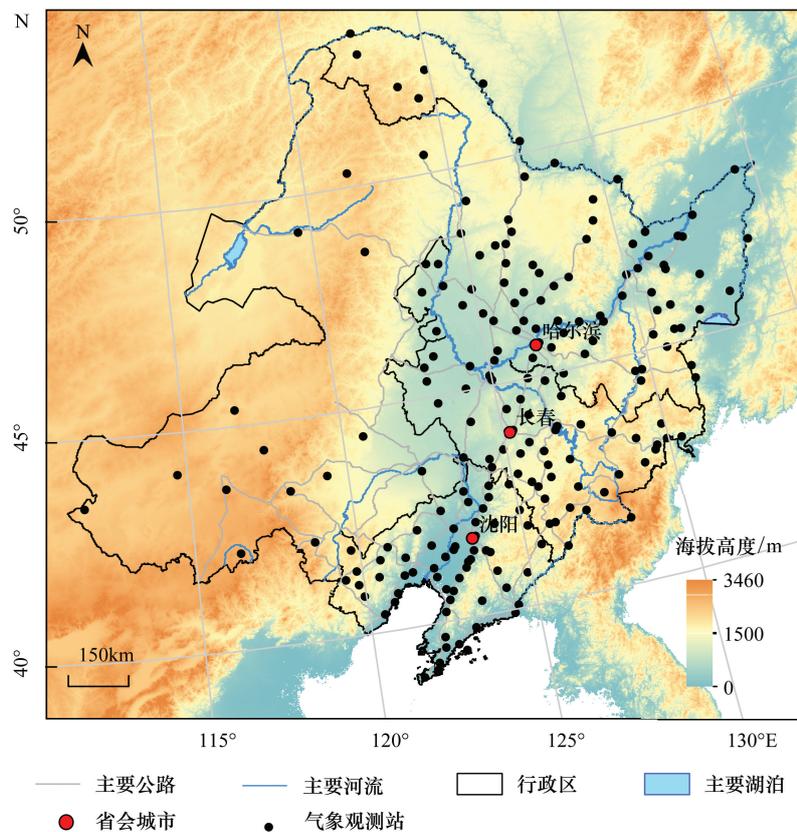


图1 研究区位置图

Fig.1 Location map of study zone

2 数据及研究方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 数字高程模型

数字高程模型(DEM)为SRTM地形产品V4.1版本数据,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为90m。利用该数据在ARCGIS软件的支持下计算研究区坡度、坡长、坡向等地形地貌因子,参与土地利用分类。

2.1.2 土地利用数据

收集2014—2018年Landsat8(数据来源为美国地质调查局官网,<https://www.usgs.gov/>)和HJ-1A/1B星数据(数据来源于中国资源卫星应用中心,<http://www.cresda.com/n16/index.html>)无云数据,提取东北地区土地利用类型,形成近期东北地区土地利用分类图。具体方法是首先对下载的一级数据进行预处理,采用Chavez等^[25]提出的最佳指数因子法(Optimum Index Factor,简称OIF)的OIF值来判断最佳波段组合,根据选取的最佳组合波段利用随机森林分类模型^[26],将东北地区分为森林、湿地、灌木林地、疏林地、草地、耕地等共

9 种土地利用类型。采用目视解译选取的验证点进行精度验证,总体分类精度为 89.08%, kappa 系数为 0.8664。

2.1.3 DMSPOLS 夜间灯光影像

相比于传统概念模型,最小累积阻力模型能够更好地表达景观格局和生态过程的相互作用关系^[19],该方法的关键在于生态阻力方面的设定,其中扩张阻力指标的选取和分级赋值又是其中的核心问题之一。土地利用类型的数据由于易获取、生态系统服务价值易区分、空间连续性好等特点,在构建生态网络和生态安全格局研究中得到较好应用^[27-29],但限于数据精度问题,土地利用类型不可能无限细分,对于同一土地覆盖类型(尤其城镇用地)内部的差异往往被忽略,均一化赋值会掩盖同一土地利用类型下人为干扰程度对生态阻力系数的影响差异^[19],而夜间灯光数据能够基于栅格水平,更细致地反映同一土地利用类型内部受人类活动的影响程度,本研究应用非辐射定标的夜间灯光影像数据集 DMSP/OLS (Version4) 作为社会影响因子之一建立生态源地扩展阻力面,从而实现对阻力面中土地利用类型因子的修正。该数据是由美国国家海洋与大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 下属的美国国家地球物理数据中心 (National Geophysical Data Center, NGDC) 发布,选取其中的“stable_lights.avg_vis”数据,该数据的 DN 值范围为 1—63, DN 值高代表人类活动强度大。

2.1.4 植被覆盖度

采用李苗苗等^[30]的像元二分模型,基于 MOD13Q1 数据中的归一化差异植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, 简称 NDVI) 计算植被覆盖度,公式如下:

$$C = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

式中,NDVI 为像元归一化植被指数,NDVI_{soil} 为裸土或无植被覆盖区的 NDVI 值,NDVI_{veg} 为完全被植被所覆盖像元的 NDVI 值。

MOD13Q1 数据源于 LAADS DAAC 官方网站(网址为:<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),该数据为 16d 合成数据,空间分辨率为 250m,本研究利用 2008—2017 年 NDVI 数据,计算每年的植被覆盖度,再取 10 年平均植被覆盖度作为植被覆盖度因子参与评价。

以上数据最终的空间分辨率均统一为 500m,将投影转换为 Albers 投影。

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地划定方法

参考环境保护部 2015 年提出的《生态保护红线划定技术指南》中生态保护红线的划分方法,选取生态服务功能(包括水源涵养功能、防风固沙功能、生物多样性维持与保护功能)和生态系统敏感性(包括沙漠化敏感性、土壤侵蚀敏感性)共 5 个指标,以《全国生态功能区划》结果中(来源于中国生态系统评估与生态安全数据库,<http://www.ecosystem.csdb.cn/>)生态服务功能极重要区域和生态极敏感区域作为生态源地划分的主要依据,同时综合东北地区自然资源禀赋和社会经济发展实际,添加自然保护区作为生物多样性维持与保护功能的极重要区域,同时考虑到东北地区 2010 年以来耕地面积占全国的 19.77% (数据来源于国家统计局 <http://data.stats.gov.cn/index.htm>),是我国永久基本农田保护的重点区域,因此剔除 2010 年以来稳定耕地区域(2000—2015 年均为耕地的区域,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,网址:<http://www.resdc.cn>),最终形成生态源地区域。

为减少生态源地的破碎化程度,在地理信息系统软件的支持下将距离小于 250m 的图斑聚合为相对完整连片的图斑,保证最小空洞为 1km²,再将面积小于 1km² 的独立图斑删除。

2.2.2 构建阻力面

以彭建和俞孔坚^[19,31]构建区域生态安全格局的思想为基础,参考杨姗姗等^[22]建立的生态源地扩张阻力和城镇用地扩张阻力因子,结合东北地区生态现状和社会经济发展水平,针对生态源地和城镇用地扩张过程,

依据不同目标选择与生态源地和城镇用地扩张过程相关程度高的影响因子(图2和图3),对评价因子采用加权求和方法构建阻力面模型(其中各评价因子的权重采用层次分析法确定),利用空间分析技术求取生态源地扩张阻力面和城镇用地扩张阻力面。

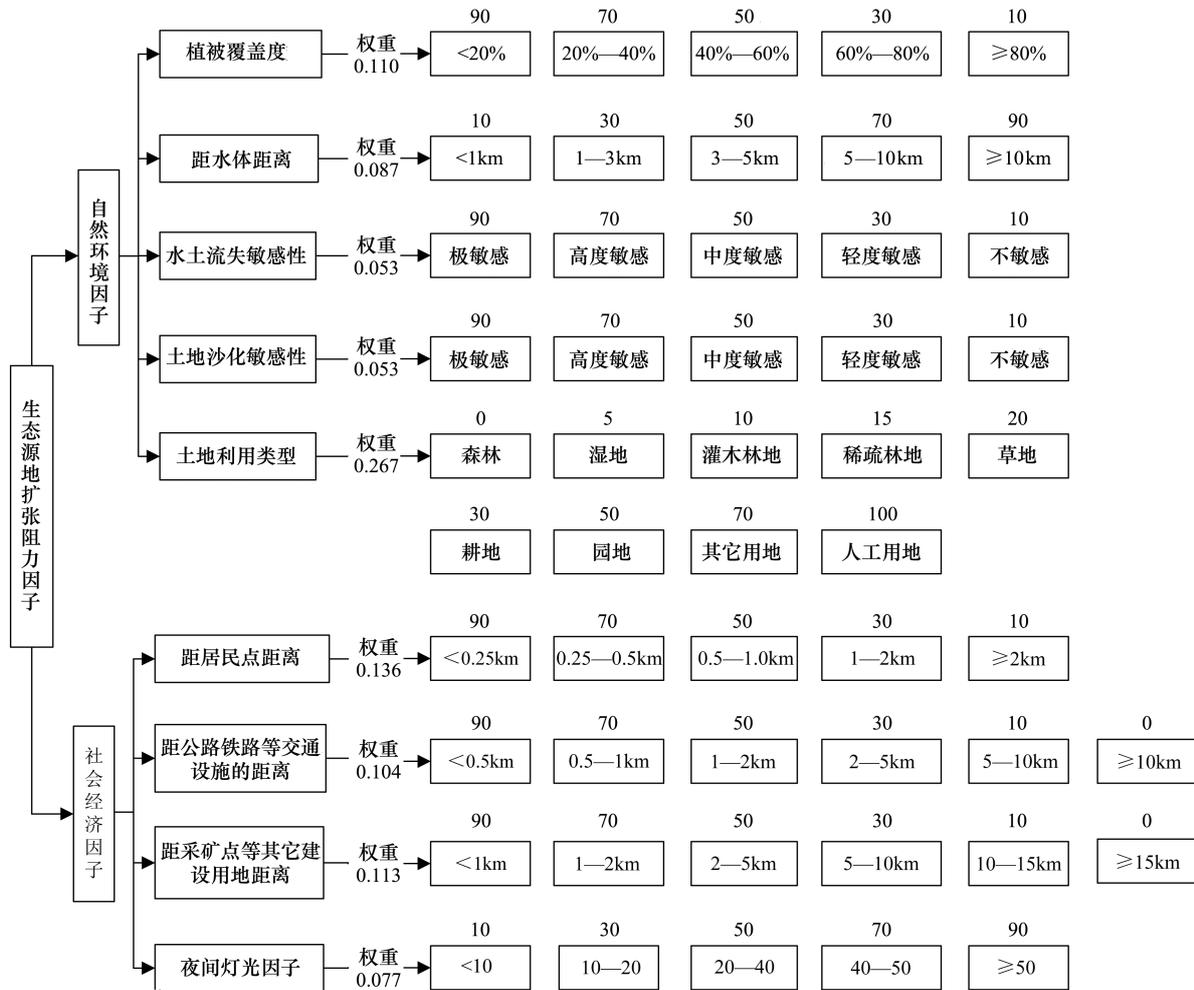


图2 生态源地扩张阻力因子权重及分级示意图

Fig.2 Weights and classification of resistance factors of ecological source expansion

方框内的内容为指标或各指标分级,方框外数字为各分级指标的阻力值

以最小累积阻力(Minimum cumulative resistance, 简称 MCR)模型来建立阻力面, MCR 模型为俞孔坚^[32]在 Knaapen 等^[33]的模型和地理信息系统中常用的费用距离(Costdistance)模型的基础上修改而来, MCR 模型考虑了源、距离和景观界面特征,阻力面反映了物种运动的潜在可能性及趋势。再将生态源地与城镇扩张用地的最小累积阻力面代入最小累积阻力差值公式,以两个阻力面的差值为基础,划分东北地区生态安全格局。最小累积阻力差值公式如下:

$$MCR_{\text{差值}} = MCR_{\text{生态源地}} - MCR_{\text{城镇用地}}$$

当 $MCR_{\text{差值}} < 0$ 时,表示该区域生态源地扩张阻力小,适合生态源地扩张,反之适合城镇用地扩张, $MCR_{\text{差值}} = 0$ 的区域为生态源地扩张与城镇用地扩张的分界线。

2.2.3 缓冲区判别

以生态源地为中心,基于 $MCR_{\text{差值}}$,利用 ArcGIS 软件的成本距离工具计算 $MCR_{\text{差值}}$ 的成本距离变率,并利用分位数法选择生态源地扩张成本的分界线,将东北地区生态安全格局分为高水平缓冲区、中水平缓冲区、低

水平缓冲区和其它区域。

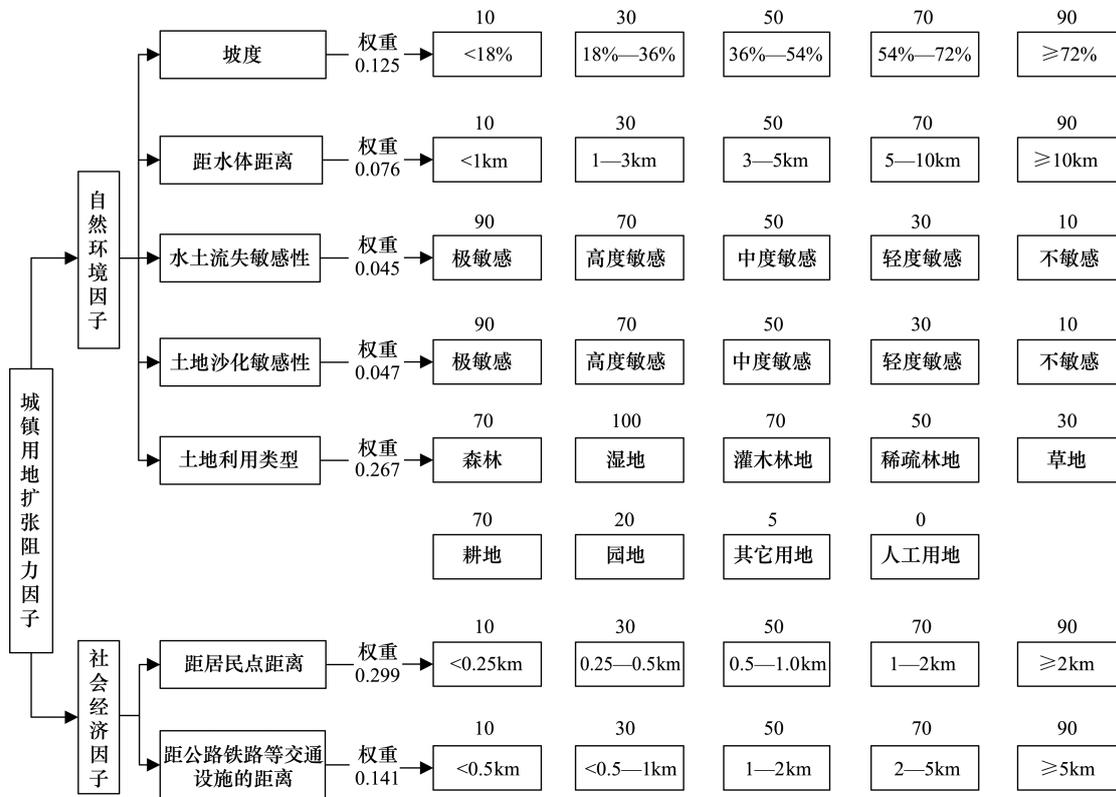


图 3 城镇用地扩张阻力因子权重及分级示意图

Fig.3 Weights and classification of resistance factors of urban land expansion

方框内为指标及各指标分级,方框外数字为各分级指标的阻力值

2.2.4 生态廊道和生态战略节点确定

生态廊道实际上是 $MCR_{差值}$ 面上相邻两个源地之间的阻力低谷,是生态系统物质和能量之间流动的低阻力通道,本研究参照蔡青等^[34]的基于栅格数据的最短路径算法思想,识别物种在每 2 个生态源地之间迁移的最小累积阻力路径(以下简称“路径”),本文共划定了 24 个生态源地,因此会产生出 C_{24}^2 条路径,其中很多路径之间距离很小或有交叉,而划分过多的生态廊道实际上并不利于建立有针对性的保护措施,为使生态廊道识别结果更清晰和有操作性,本文只保留相邻生态源地之间的最短路径,并对最短路径周边 100km 范围内的其他路径进行合并,保留对于生态源地整体通达性具有关键意义的生态廊道。再参照蔡青等^[34]关于动物迁徙廊道宽度的分析结果,以确定的路径为中心,选取阻抗值为 $Min+5\%$ 的区域,并把宽度控制在 600m 以内,得到生态廊道。

生态战略节点的确定方法是首先提取生态廊道之间的交点,如果两节点之间的距离小于 1.20km(2 倍生态廊道宽度),则保留所在生态廊道较长的节点。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务功能评价

分析图 4 可见,水源涵养功能极重要区域主要分布在大兴安岭和长白山北部地区,总面积为 2.60×10^5 km^2 ,主要土地覆盖类型为森林,占东北地区总面积的 17.99%;防风固沙功能极重要区域主要分布于科尔沁沙地、浑善达克沙地和松嫩沙地的部分地区(图 4),总面积为 $1.07 \times 10^4 km^2$,以草地、沙地和灌木林为主,占东北

地区总面积的 0.74%;生物多样性维持与保护功能的极重要区域分布比较零散(图 4),其中面积较大的有大兴安岭北部和中部、小兴安岭南、长白山的部分区域,总面积为 $2.07 \times 10^5 \text{ km}^2$,主要为森林和草地,占东北地区总面积的 14.34%;土壤侵蚀极敏感区域主要分布于科尔沁沙地的部分地区(图 4),总面积为 $9.50 \times 10^3 \text{ km}^2$,以草地和沙地为主,占东北地区总面积的 0.66%;沙漠化极敏感区域主要分布于浑善达克沙地、科尔沁沙地和呼伦贝尔草原的大部分地区(图 4),总面积为 $2.69 \times 10^5 \text{ km}^2$,以沙地和草地为主,占东北地区总面积的 18.64%。

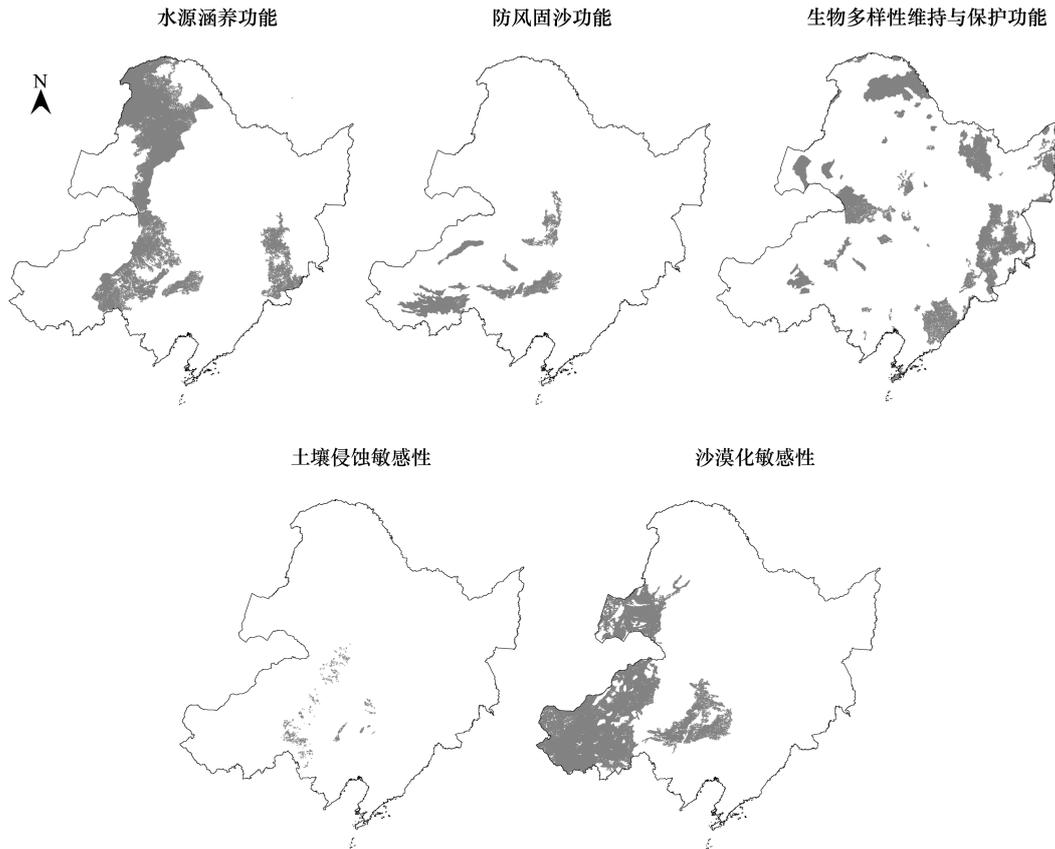


图 4 东北地区生态系统服务功能极重要区域和生态极敏感区域分布意图

Fig.4 Distribution intention of extremely important areas and extremely sensitive areas of ecosystem services in Northeast China

进一步分析可见,各指标的空间位置有相互重叠现象,表 1 统计了两两指标之间重叠区域的面积比例,其中水源涵养功能区与其他指标之间的重叠面积比例最大,占水源涵养功能区总面积的 54.05%,期间有 22.67%的水源涵养功能区与生物多样性与保护功能区重叠,有 21.55%与土壤侵蚀敏感区重叠。防风固沙功能区域其他指标重叠区域较少,只占该功能区总面积的 17.28%。

3.2 生态源地分布

根据 2.2.1 条中生态源地划分方法,将东北地区生态源地按主导生态系统功能归类,确定 18 个生态源地,总面积为 $6.50 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全区土地总面积的 45.02%,各生态源地类型空间分布如图 5,生态源地类型统计如表 2。分析各类生态源地区的空间分布特征和保护方向如下:

大兴安岭水源涵养源地(图 5 中编号 11 区和 12 区)位于黑龙江省北部和内蒙古自治区东北部,是嫩江、额尔古纳河、呼玛河、绰尔河、阿伦河、诺敏河、甘河等诸多河流的源头,是重要水源涵养区,该区的北部植被类

表 1 生态系统服务功能极重要区域和生态极敏感区域重叠的面积比例/%

Table 1 Proportion of overlapping areas of extremely important and ecologically sensitive areas of ecosystem services

指标 Indicator	水源涵养	防风固沙	生物多样性 维持与保护	土地沙化	土壤侵蚀
水源涵养 Water conservation	100.00	4.36	22.67	5.47	21.55
防风固沙 Windbreak and sand fixation		100.00	1.31	11.46	0.14
生物多样性维持与保护 Biodiversity conservation and protection			100.00	4.84	4.01
土地沙化 Land Desertification				100.00	0.09
土壤侵蚀 Soil erosion					100.00

型以兴安落叶松为代表的寒温带落叶针叶林为主;长白山水源涵养源地(13区)和长白山水源涵养与生物多样性保护源地(14区)位于长白山北部,是拉林河、第二松花江、松花江、穆稜河、图们江、鸭绿江等众多支流的源头,同时也是“长白植物区系”的中心地带,植被类型包括以落叶松林为代表的寒温带山地落叶针叶林,云杉、冷杉林为代表的温带山地常绿针叶林,落叶阔叶—红松混交林为代表的温带落叶阔叶—常绿针叶混交林,以落叶栎林、椴、榆、桦杂木林等为代表的温带落叶阔叶林等。

呼伦贝尔草原防风固沙源地(21区)位于内蒙古自治区北部,在内蒙古自治区的呼伦贝尔;浑善达克沙地防风固沙源地(22区)和浑善达克沙地防风固沙与生物多样性保护源地(23区)地处阴山北麓东部半干旱农牧交错带、燕山山地、坝上高原,23区还包含了浑善达克沙地柏自然保护区;科尔沁沙地防风固沙与水源涵养源地(24区)、科尔沁沙地防风固沙源地(25区)位于内蒙古自治区东南部,防风固沙功能重要,同时是西拉木伦河、老哈河、教来河和乌尔吉木伦河的众多支流的源头,

植被类型以草原沙地锦鸡儿、柳、蒿灌丛为代表的温带落叶灌丛矮林、温带禾草、杂类草草原,温带丛生禾草草原,温带草甸为主;松嫩沙地防风固沙与生物多样性保护源地(26区)、松嫩沙地防风固沙源地(27区)位于黑龙江省和吉林西部,防风固沙功能重要,同时包含扎龙湿地等重要自然保护区。

大兴安岭生物多样性保护源地(31区)位于黑龙江省北部,毗邻俄罗斯,是兴安落叶松为代表的寒温带落叶针叶林的主要分布区域;呼伦贝尔草原生物多样性保护源地(32区)包含鄂温克旗辉河、呼伦湖自然保护区;三江平原生物多样性保护源地(33区)位于黑龙江省松花江下游,是我国平原地区沼泽分布最大、最集中的地区之一,自然湿地面积大,湿地生态系统类型多样,有多处国际重要湿地;小兴安岭生物多样性保护源地(34区)位于黑龙江省中北部,以红松、黄菠萝、胡桃楸、水曲柳、白桦等为主,生物多样性丰富;长白山生物多样性保护源地(35区)是“长白植物区系”的中心地带,暖温带植被类型丰富。

科尔沁沙地水土保持源地(41区)和松嫩沙地水土保持源地分别位于科尔沁沙地和松嫩沙地边缘,水土保持功能重要。

3.3 生态安全格局

分析图 6 可见,最小阻力差值较大的区域主要分布在东北平原,分布趋势与主要公路、城镇用地、山谷、河

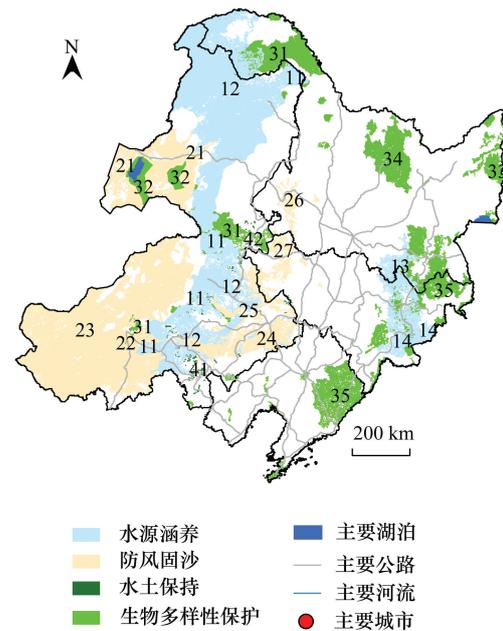


图 5 东北地区生态源地分布示意图

Fig.5 Distribution of the ecological sources in Northeast China

图中的编号对应表 2 的“分区编号”字段

流走向相关性较高,原因是交通便利、地势平坦、有水系分布的区域有利于人类活动,而地形复杂、水系分布较少的区域人类活动较少,生态流扩张阻力在这里形成谷地。

表 2 东北地区生态源地分区

Table 2 Partitions of ecological sources in Northeast China

主导分区编号 Primary partition number	主体功能 Subject function	分区编号 Partition number	分区 Partition	面积/km ² Area
1	水源涵养	11	大兴安岭水源涵养、生物多样性保护区	32479.23
		12	大兴安岭水源涵养区	175239.93
		13	长白山水源涵养、生物多样性保护区	16608.93
		14	长白山水源涵养区	15567.27
2	防风固沙	21	呼伦贝尔草原防风固沙区	43135.96
		22	浑善达克沙地防风固沙、生物多样性保护区	4742.77
		23	浑善达克沙地防风固沙区	159837.87
		24	科尔沁沙地防风固沙、水源涵养区	8660.40
		25	科尔沁沙地防风固沙区	31187.77
		26	松嫩沙地防风固沙、生物多样性保护区	7571.63
		27	松嫩沙地防风固沙区	7749.03
3	生物多样性保护	31	大兴安岭生物多样性保护区	37585.23
		32	呼伦贝尔草原生物多样性保护区	11365.08
		33	三江平原生物多样性保护区	10122.10
		34	小兴安岭生物多样性保护区	24975.39
		35	长白山生物多样性保护区	60105.83
4	水土保持	41	科尔沁沙地水土保持区	2170.73
		42	松嫩沙地水土保持区	449.68

基于最小累积阻力差值,分析生态源地的扩张成本,并利用分位数法选择生态源地扩张成本的分界线,在生态源地外划分低、中、高 3 个水平缓冲区(图 7)。从生态安全水平缓冲区所占面积来看,低水平缓冲区面积最大,占东北地区总面积的 11.07%,是保障生态源地安全的最后防御区域,需要重点保护和严格限制人类建设用地的扩张;中水平缓冲区占 4.24%,需要限制开发,实行适当保护措施,对原有生态系统实行保护与修复并重的策略;高水平缓冲区占 5.37%,是保护区域生态安全的理想的区域,在这个范围内可以根据当地具体情况进行有条件的建设活动;从空间分布上看,东北地区生态安全格局形成了以生态源地为中心,生态安全水平由低到高依次向外扩展的分布格局,其中“低水平缓冲区”和“中水平缓冲区”的合围区域把很多分布零散的生态源地连接起来,基本形成了东西两块生态屏障。

生态廊道把相互独立的生态源地在空间上连接起来,总面积 6744.11km²,廊道中心线总长 11073.52km,形成了东北地区生态源地之间的网状空间布局,从而增加了各个生态源地之间的空间连通性。分析生态廊道的分布格局可见,多数生态源地之间的生态廊道明显偏

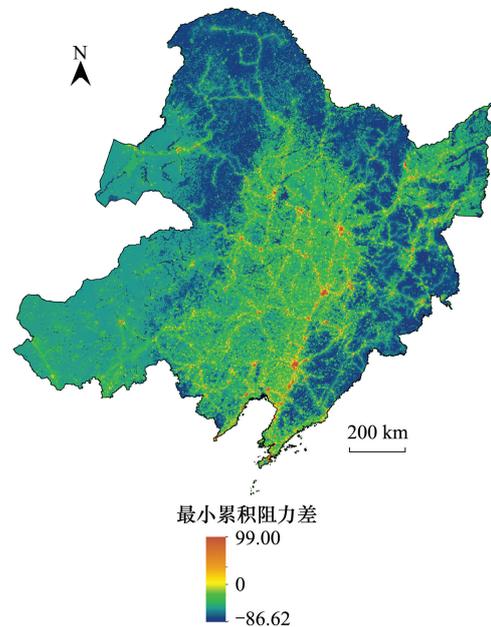


图 6 东北地区最小累积阻力差值分布

Fig.6 Distribution of MCR difference in Northeast China

离了二者的最短几何直线距离,并尽量避开了主要城市,但有些西部与东部地区生态源地之间的廊道不可避免地要穿越人类活动频繁的耕地或城市边缘区域,随着城市的扩张,这些廊道可能会受到进一步胁迫,而且这些廊道无法绕开已有的交通路线,因此建议在生态廊道与交通路线相交的节点处布设如高架桥、涵洞等生态通道,在一定程度上减缓这种截断效应。

产生 29 个生态战略节点,其中有 27 个落入生态源地,有 1 个落入低水平缓冲区,有 1 个落入中水平缓冲区。进一步统计发现,有 13 个生态战略节点落入自然保护区内,这些自然保护区多为面积较小而且地理位置上独立于大面积生态源地,可见这些生态战略节点是生态廊道得以畅通的关键区域,对于维持区域生态系统结构和功能完整性具有重要作用,应该给予重点生态保护和建设。

4 讨论

构建生态安全格局的目的是在保护东北地区生态屏障、恢复生物多样性、维持自然生态系统结构过程完整性的基础上强化生态系统功能的空间分布格局,为社会经济可持续发展提供重要生态保障^[34-35],生态安全格局理论认为景观中的生态空间格局是由一系列关键因素、这些关键因素的空间位置及其相互联系共同组成,基于格局与过程互馈原理,对维护生态系统过程及其可持续发展起着重要作用^[32]。生态源地、缓冲区、生态廊道和生态战略节点是生态安全格局的主要组成部分,分析东北地区生态源地的土地利用类型组成及所占比例发现,生态源地中面积最大的土地利用类型为草地,为 $2.99 \times 10^5 \text{ km}^2$,占生态源地总面积的 46.02%;其次是森林,面积为 $2.62 \times 10^5 \text{ km}^2$,占生态源地总面积的 40.28%;从缓冲区的土地利用类型组成看,森林和草地面积所占比例随着缓冲区级别的增高而降低;生态廊道覆盖了东北地区的主要土地利用类型,各土地利用类型面积占全部生态廊道面积的比例由大到小依次为森林、草地、耕地、未利用地、水域和建筑用地;在生态战略节点中,有 48.28%是森林,17.24%是草地。因此从土地利用类型组成比例看,能够为维护区域生态安全提供有效空间。

从生态安全格局各组成部分的地理空间位置看,东北地区的生态源地主要分布在大兴安岭、小兴安岭、长白山脉和西部草原,在西面、北面和东面对东北平原形成了 3 个方位的类似于马蹄形的半包围态势,这些区域天然植被覆盖度高,野生动植物资源丰富,生态系统服务功能价值高,对区域生态安全具有极其重要的意义;关键生态廊道在各生态源地之间成网状分布,把大兴安岭、小兴安岭、长白山脉和西部草原几个大片的生态源地连接为一个整体,尤其值得注意的是多数分布在东北平原中面积较小的生态源地成为关键生态战略节点,减小了单条贯通型生态廊道的长度,降低了生态廊道阻断的风险,对生态廊道的维持与保护具有积极意义,由此进一步验证了生态安全格局构建的合理性。

本研究将东北地区作为整体区域划分生态安全格局,得到很多成片的生态源地分属不同省份,例如“大兴安岭水源涵养区”在黑龙江省和内蒙古自治区境内、“长白山水源涵养、生物多样性保护区”和“松嫩沙地防风固沙区”均在黑龙江省和吉林省境内,如果单纯根据行政区划构建生态安全格局,可能会将本来完整的生态源地人为割裂开来,更会减少具有贯通意义的关键生态廊道。但这并不排斥小区域内生态安全格局的细化,本研究结果的意义更在于给东北地区构建一个总体生态安全格局框架,各个小区域可以在不破坏生态安全格局整体性的基础上根据当地自然环境特点和社会发展水平进一步细化各个要素的时空量序格局。

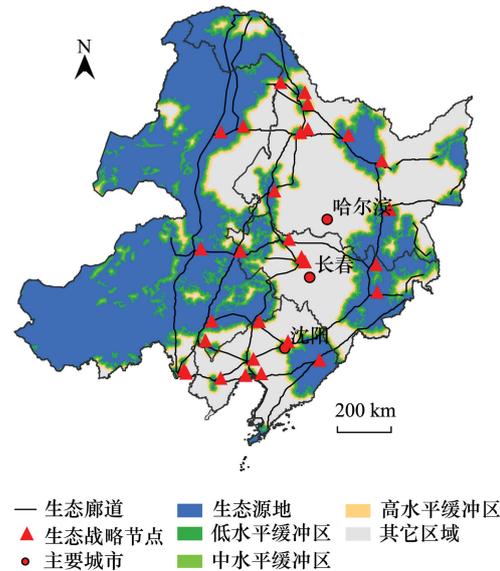


图 7 东北地区生态安全格局

Fig.7 Ecological security pattern of Northeast China

另外,生态学理论研究如何转化为应用仍处于探索阶段,而且本研究划分的生态源区域并未进行实地勘查,也未考虑包括区内人口、社区数量与分布、土地权属、所在区域产业类型、产业结构与布局等因素,因此所得结果虽然可为区域生态安全格局构建提供新思路,但应用到实践还存在一定差距。

5 结论

生态安全格局是保障区域生态安全,实现区域可持续发展的重要途径,综合东北地区自然资源禀赋和社会发展实际,探讨在一个相对完整的自然地理区域内构建生态安全格局的合理性和技术方法具有一定的现实意义。本研究在东北地区划分了水源涵养、防风固沙、生物多样性保护和水土保持共4个主体功能区和18个生态源地,总面积为 $6.50 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全区土地总面积的45.02%,主要分布在大兴安岭、小兴安岭、长白山脉和西部草原,从西面、北面和东面对东北平原形成了3个方位的类似于马蹄形的半包围态势;形成了高、中、低3个水平缓冲区,其中低水平缓冲区面积最大,占东北地区总面积的11.07%,是保障生态源地安全的最后防御区域;确立了总面积 6744.11 km^2 、廊道中心线总长 11073.52 km 的关键生态廊道,形成了东北地区生态源地之间的网状空间布局;产生了29个生态战略节点,为维系生态廊道得以贯通、保护生态系统结构和功能完整性发挥重要作用。

参考文献 (References):

- [1] Azam M, Khan A Q. Urbanization and environmental degradation: evidence from four SAARC countries-Bangladesh, India, Pakistan, and Sri Lanka. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2016, 35(3): 823-832.
- [2] Ahern J. Greenways as a planning strategy. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33(1/3): 131-155.
- [3] Fábos J G, Ryan R L. International greenway planning: an introduction. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 68(2/3): 143-146.
- [4] Wu J G. Urban ecology and sustainability: the state-of- the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 209-221.
- [5] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, de Vries W, de Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [6] Harvey E, Gounand I, Ward C L, Altermatt F. Bridging ecology and conservation: from ecological networks to ecosystem function. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(2): 371-379.
- [7] MacMillan R A, Moon D E, Coupé R A. Automated predictive ecological mapping in a forest region of B.C., Canada, 2001-2005. *Geoderma*, 2007, 140(4): 353-373.
- [8] Huck M, Jędrzejewski W, Borowik T, Jędrzejewska B, Nowak S, Mysłajek R W. Analyses of least cost paths for determining effects of habitat types on landscape permeability: wolves in Poland. *Acta Theriologica*, 2011, 56(1): 91-101.
- [9] Sutton-Grier A E, Wovk K, Bamford H. Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 2015, 51: 137-148.
- [10] Zhao X Q, Xu X H. Research on landscape ecological security pattern in a *Eucalyptus* introduced region based on biodiversity conservation. *Russian Journal of Ecology*, 2015, 46(1): 59-70.
- [11] Shaikh F, Ji Q, Fan Y. An ecological network analysis of the structure, development and sustainability of China's natural gas supply system security. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 235-246.
- [12] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [13] 符传博, 丹利. 大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响. *科学通报*, 2018, 63(25): 2655-2665.
- [14] Zhu G Y, Tang Z S, Shanguan Z P, Peng C H, Deng L. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(3): 737-749.
- [15] Mao D H, Wang Z M, Wu J G, Wu B F, Zeng Y, Song K S, Yi K P, Luo L. China's wetlands loss to urban expansion. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(8): 2644-2657.
- [16] Du H B, Liu J, Li M H, Büntgen U, Yang Y, Wang L, Wu Z F, He H S. Warming-induced upward migration of the alpine treeline in the Changbai Mountains, Northeast China. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1256-1266.
- [17] Liang C, Michalk D L, Millar G D. The ecology and growth patterns of *Cleistogenes* species in degraded grasslands of eastern Inner Mongolia,

- China. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 39(4): 584-594.
- [18] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4): 761-768.
- [19] 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. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [20] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [21] 田野, 冯启源, 唐明方, 郑拴宁, 柳彩霞, 吴迪, 王丽娜. 基于生态系统评价的山水林田湖草生态保护与修复体系构建研究——以乌梁素海流域为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8826-8836.
- [22] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 沈润平, 徐德琳. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例. *生态学杂志*, 2016, 35(1): 250-258.
- [23] 王士君, 宋飏. 中国东北地区城市地理基本框架. *地理学报*, 2006, 61(6): 574-584.
- [24] 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系. *植物生态学与地植物学学报*, 1986, 10(4): 254-263.
- [25] Chavez Jr P S, Berlin G L, Sowers L B. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 1982, 8(1): 23-30.
- [26] Van der Linden S, Rabe A, Held M, Jakimow B, Leitão P J, Okujeni A, Schwieter M, Suess S, Hostert P. The EnMAP-Box: a toolbox and application programming interface for EnMAP data processing. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11249-11266.
- [27] 彭建, 贾靖雷, 胡熠娜, 田璐, 李慧蕾. 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*, 2018, 29(6): 1990-1998.
- [28] 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. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484.
- [29] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨旸, 彭建. 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. *生态学报*, 2017, 37(24): 8241-8253.
- [30] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159.
- [31] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长前景. *生态学报*, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [32] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1): 8-15.
- [33] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [34] 蔡青, 曾光明, 石林, 梁婕, 黄璐, 韦安磊. 基于栅格数据和图论算法的生态廊道识别. *地理研究*, 2012, 31(8): 1523-1534.
- [35] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. *生态学报*, 2009, 29(10): 5163-5175.