

秦巴山脉区域生态系统服务重要性评价及生态安全格局构建

宋婷, 李岱青, 张林波, 王光镇, 高艳妮, 杨春艳, 冯朝阳, 马欢

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 秦巴山脉地区生态系统的生态安全格局对维护我国中部地区生态系统结构健康、控制生态过程起着关键性的作用, 构建合理的生态安全格局是保障该地区生态安全的有效措施。本研究在对秦巴山脉地区水源涵养、物种多样性、生态固碳和土壤保持服务功能重要性评估的基础上, 根据这四项生态服务功能在生态资产价值中所占比重赋予权重, 结合生态系统敏感性分析结果, 采用景观生态的源汇理论, 利用热点分析工具识别秦巴山脉地区生态源地。运用最小累积阻力模型识别潜在生态廊道, 在此基础上结合区域内河流水系、关键物种分布特征、自然保护区分布等要素形成带状生态廊道和踏脚石生态廊道; 最终形成由6大重要生态斑块、10条河流廊道、2条生物通道, 以及26处踏脚石廊道组成的秦巴山脉地区生态安全格局。基于生态系统服务功能重要性的生态安全格局构建, 是在生态服务现状基础上提出的规划策略, 可为秦巴山脉地区国家公园规划布局, 区域生态保护规划和生态文明建设提供重要依据。

关键词: 秦巴山脉区域; 生态系统服务; 生态安全格局; 生态源地; 生态廊道

中图分类号: X37 文献标识码: A

Importance Evaluation of Ecosystem Services and Construction of Ecological Security Pattern in Qinba Mountain Area

Song Ting, Li Daiqing, Zhang Linbo, Wang Guangzhen, Gao Yanni, Yang Chunyan, Feng Chaoyang, Ma Huan

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The ecological security pattern in the Qinba Mountain Area plays a key role in maintaining a healthy ecosystem structure and regulating the ecological process in central China. Constructing a sound ecological security pattern is also an effective measure for ensuring ecological security in the Qinba Mountain Area. This study assesses the importance of four ecological service functions in the Qinba Mountain Area, namely water conservation, species diversity, ecological carbon fixation, and soil conservation. It then assigns weight to these four ecological services according to their proportion in the value of ecological assets. Based on the results of an ecosystem sensitivity analysis and the source-sink theory for landscape ecology, ecological sources of the Qinba Mountain Area are identified using optimized hot spot analysis. Moreover, potential ecological corridors are identified using the minimum cumulative

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2019-12-29

通讯作者: 李岱青, 中国环境科学研究院研究员, 主要研究方向为生态资产评估、生态质量评价、生态标准体系建设;

E-mail: lidq@craes.org.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“秦巴山脉绿色循环发展战略研究(二期)”(2017-ZD-02); 国家重点研发计划项目“中国陆地生态系统生态质量综合监测技术与规范研究”(2017YFC0503806)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

resistance model; strip corridors and stepping stone corridors are further formed according to the river system, the distribution characteristics of key species, and the distribution of nature reserves in this region. Finally, the ecological security pattern of the Qinba Mountain Area is formed, including 6 important ecological patches, 10 river corridors, 2 biological channels, and 26 stepping stone corridors. This study is conducted based on the current situation of ecosystem services and can provide an important basis for the planning and layout of national parks, regional ecological protection and planning, as well as ecological civilization construction in the Qinba Mountain Area.

Keywords: Qinba Mountain Area; ecosystem services; ecological security pattern; ecological source; ecological corridors

一、前言

城市化进程中所造成的生态环境问题正制约着区域社会经济的可持续发展,这已成为世界各国关注的焦点[1,2]。生态安全是可持续发展的基本保障[3],区域生态安全格局是保障区域生态安全和人类福祉的关键环节[4]。党的“十九大”将生态文明建设提升为“千年大计”,提出要实施重要生态系统保护和修复重大工程,优化生态安全屏障体系,构建生态廊道和生物多样性保护网络,提升生态系统质量和稳定性。合理构建生态安全格局是维护区域生态系统稳定,改善生态系统服务能力,协调发展与生态环境保护的关系,促进资源合理配置,保障区域生态安全的重要手段。

目前,“识别生态源地—构建阻力面提取廊道—判别安全格局”的方法,已成为国内外学者构建生态安全格局的基本模式[5,6],在选择生态源地时,大多采用自然保护区、风景名胜区、大面积水域、湿地和林地等重要生态用地作为生态源地,或对斑块采取多指标叠加分析进行重要性评价[7],较少有从生态系统服务功能的角度选取重要板块作为生态源地。生态系统服务是生态安全的前提和保障,生态环境良好的地区生态系统服务越强,生态安全程度越高,反之则存在生态安全隐患[8]。区域生态系统服务能力的核算,以及空间化布局结果,可以作为生态功能区划、生态环境保护决策和土地利用配置对策制定的依据和基础[9~11]。

本研究针对秦巴山脉地区生态环境本底特征,分别对水源涵养、水土保持、生态固碳和物种多样性四种生态系统服务重要性和研究区生态敏感性进行评估,识别出能够保障区域生态安全的生态源地;同时,利用研究区生态系统服务重要性取倒数构建基本阻力面,运用最小累积阻力模型识别潜在生态廊道,在此基础上结合区域内河流水系、关键物种

分布特征、自然保护区分布情况等要素,形成带状生态廊道和踏脚石生态廊道;从而构建秦巴山脉地区生态安全格局,可为该地区建设发展及生态保护提供指导。

二、研究区域与数据来源

(一) 研究区域概况

秦巴山脉地区指长江最大支流——汉水上游的秦岭、大巴山及其毗邻地区,西起青藏高原东缘,东至华北平原西南部,面积为 $3.086 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。地跨甘肃、四川、陕西、重庆、河南、湖北五省一市,共包括120个县(市、区),其主体位于陕西南部地区。该区域地处我国地理中心,是中国南北过渡带,长江黄河两大流域分水岭,南北方的中央气候调节器,也是我国中部地区唯一规模性洁净水源地。

该区域是中国生物多样性热点地区之一,是中国最重要的特有物种分布区,区域内分布有川金丝猴、朱鹮、大熊猫、羚牛等120余种国家级保护动物和珍稀植物,也是中国唯一或最重要的大尺度生态廊道,其对维护中国生物多样性和特有性具有重要意义[12]。该区域水资源丰富,丹江、汉江、嘉陵江以及汉江最大支流堵河等均发源于此,是我国南水北调中线工程的水源地,被誉为我国的“中央水库”。

(二) 数据来源

本研究所用数据主要包括秦巴山脉地区土地利用数据(LUCC)、高程数据(DEM)、中国1:1 000 000土壤类型数据、中国1:1 000 000植被类型空间分布数据、归一化植被指数(NDVI)[13]、MOD16蒸散发数据、MOD09A1地表反照率数据、光合有效辐射数据、碳通量及其所在站点的气象观测数据、气象数据和统计数据,具体数据情况见表1。

表 1 数据来源及基本情况

数据名称	数据精度	数据来源	数据描述
土地利用数据、地形数据	空间分辨率为 30 m×30 m, 精度达 90% 以上	中国科学院资源环境科学数据中心	土地利用数据分为 6 个一级类型、24 个二级类型
植被类型空间分布数据	1 : 1 000 000		包括植被大类和植被亚类
NDVI	空间分辨率为 500 m×500 m, 时间分辨率为 8 天		该数据为能够体现植被真实季节变化轨迹的连续无云 NDVI 数据
土壤类型数据	1 : 1 000 000	中国科学院南京土壤研究所	包含土壤类型、土壤质地等数据
中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 栅格数据产品	空间分辨率为 500 m×500 m, 时间分辨率为 8 天	NASA-USGS 平台	包括 MOD16 蒸散发数据、MOD09A1 地表反照率数据, 前者用于水源涵养服务评估, 后者用于计算固碳释氧服务评估模型中的增强型植被指数 (EVI) 和陆地表面水分指数 (LSWI)
光合有效辐射数据	空间分辨率为 5 km×5 km	中国-东盟 5 km 分辨率光合有效辐射数据集	日均光合有效辐射
碳通量及其所在站点的气象观测数据	站点尺度, 每半小时数据	中国通量网	用于率定固碳释氧服务评估模型参数
气象数据	站点尺度, 每半小时数据	中国气象数据共享网	气温数据、降雨数据
统计数据	县尺度, 每年统计数据	各县市统计年鉴、林业统计数据	各地级市物种数据、县 (区) 农作物产量数据, 前者用于计算生物多样性指数 (BI), 后者用于计算生态固碳服务能力

三、研究方法

(一) 生态系统服务评估

在全国生态功能区划中, 秦巴山脉地区有 67.78% 的区域属于生态调节区、27.66% 的区域属于农林产品提供区, 区域内分布有水源涵养主导功能区、生物多样性主导功能区和土壤保持主导功能区。所以, 本研究结合秦巴山脉地区的生态环境现状, 从水源涵养、土壤保持、生态固碳和物种多样性 4 个主导服务功能角度对秦巴山脉地区生态系统服务进行评价。其中, 水源涵养采用水量平衡模型, 根据多年平均降雨量、蒸发散量和地表径流量的差值来表达; 土壤保持采用目前应用最广的通用土壤流失方程 (USLE), 采用潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀的差值来表达; 陆地生态系统固碳服务 (CF) 核算涉及三个组分, 包括总初级生产力 (GPP)、生态系统呼吸 (Re) 和农产品利用的碳消耗量 (CCUc), 其中采用 VPM 模型来表征 GPP 的变化 [14], 采用 ReRSM 模型来表征 Re 的变化 [15], 利用农产品产量、作物收获指数、含水量和含碳系数计算农产品利用的碳消耗量 [16]; 物种多样性分布以秦巴山脉地区各地

级市生物多样性指数 (BI) 为基础, 选取对物种多样性空间分布格局产生影响的土地利用 / 覆被变化 (LUCC)、植被类型空间分布 (VT)、地形特征 (DEM) 和植被指数 (NDVI), 共同构建栅格像元尺度上的秦巴山脉地区物种多样性空间分布格局。各生态系统服务按照自然断点法分为高、较高、中、较低、低五个级别, 以全球生态系统服务价值估算中各项生态系统服务在生态资产中的比重构成为依据 [17], 确定各项生态系统服务的权重, 并进行加权叠加分析, 得到秦巴山脉地区生态系统服务重要性空间分布结果。

(二) 生态敏感性分析

根据秦巴山脉地区山地资源、河流资源丰富的特征, 依据主导因素综合性和代表性原则, 选取年降水量、地形坡度、植被覆盖度、土壤质地和土地利用类型 5 个因子, 建立秦巴生态敏感性指标体系, 具体分级标准主要参考国家生态环境部颁发的《生态功能区暂行规程》《生态保护红线划定技术指南》、国家有关生态功能区划工作生态敏感性指标体系分级标准以及相关研究 [18,19], 各因子权重根据层次分析法 (AHP) 获得, 具体分级

标准见表 2。生态敏感性评价总分等于各单因子评分值加权求和结果。

(三) 生态安全格局构建

区域生态系统安全格局的构建,对维护区域生态系统安全,维持区域生态系统结构健康、生态过程完整起关键作用 [20,21]。本文在对秦巴山脉地区主要的生态系统服务进行重要性评估的基础上,结合生态敏感性分析,借鉴景观安全格局理论,通过冷热点分析,提取高值区三种置信水平的结果,作为秦巴山脉地区的生态源地,利用最小累积阻力(MCR)模型,计算源地对应的潜在生态廊道,共同构建秦巴山脉地区的生态安全格局。

1. 生态源地识别

生态源地的识别,以生态系统服务重要性和生态敏感性为基础,将生态重要性强、且生态敏感的斑块作为源地斑块。将生态敏感区和生态系统服务重要性评价结果进行叠加,利用 ArcGIS 空间分析模块的热点分析工具识别叠加后的生态系统重要性冷热区域,提取置信度 90% 以上的热点区域作为秦巴山脉区域生态源地备选地。由于生态源地需要达到一定规模才能发挥作用 [22,23],结合秦巴山脉地区的区域特征,选取备选地大于 5 km² 的斑块作为生态源地。

2. 生态廊道构建

在确定生态源地的基础上,依据最小阻力累积模型,将每个栅格单元的生态系统服务价值视为服务流动的阻力,价值越高阻力越小。对生态系统服务重要性取倒数,得到各源地之间的累积阻力最小的路径,即潜在的生态廊道。充分考虑秦巴山脉地区生态安全格局构建的可行性,结合现状河流分布,指示物种生活习性,形成秦巴山脉地区的生态廊道。

四、结果分析

(一) 生态系统服务评估

通过模型计算,核算出秦巴山脉地区水源涵养量、水土保持量、生态固碳量和生物多样性空间分布情况。结果表明,利用水量平衡法计算得到秦巴山脉地区水源涵养总量为 6.9425×10^{10} m³,折合径流深度为 226.14 mm,水源涵养量总体呈现以神农架、大巴山山脉、秦岭山脉为中心向周围辐射状递减的趋势,水源涵养能力较大的地区主要分布在山地区域,东部、北部的城市分布区域和西部地区水源涵养能力较小。利用通用土壤流失方程可以得到秦巴山脉土壤保持量为 4.1786×10^7 t/a,从空间分布上来看,土壤保持量高值区主要分布在秦岭、大巴山脉和神农架地区。秦巴山脉地区生态系统固碳功能约为 108.60 TgC/a,地均固碳量约为 $368.18 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,高值区广泛分布于秦岭、米苍山和大巴山地区。

基于秦巴山脉地区物种多样性评估结果,从土地利用/覆被变化、植被类型、海拔高度以及 NDVI 数据等评价指标识别出研究区域内物种多样性优先保护的关键区域和物种多样性分布的规律。结果表明秦巴山脉地区物种多样性空间分异特征明显,物种多样性的关键区域主要分布在秦岭、伏牛山、米仓山、大巴山以及神农架林区,海拔约为 1000~2000 m 的中高山林地区域,这些地区物种高度丰富、植被覆盖好、生态环境质量水平高、人类活动干扰较少、生态系统类型多样,且多为自然保护区、森林生态系统集中区域,是珍稀动植物或国家重点保护动植物分布关键区域。

结合秦巴山脉地区土地利用特征,参考全球生态系统服务价值估算结果,核算研究区内主要生态系统服务能力的占比,结果表明,生态环境质量维

表 2 生态敏感性评价指标

生态敏感因子	权重	一般敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
坡度 /°	0.25	< 2	2~5	5~15	15~25	> 25
植被覆盖度 /%	0.19	< 20	20~40	40~60	60~80	> 80
年降水量 /mm	0.18	< 500	500~600	600~700	700~800	> 800
土壤类型	0.15	石砾、砂	粗砂土、细砂土、黏土	面砂土、壤土	砂壤土、粉黏土、壤黏土	砂粉土、粉土
土地利用类型	0.23	建设用地	未利用地	耕地、园地、草地	水域	林地

持为该区域最重要的生态功能，占生态服务价值总量的 59.85%，第二为水源涵养功能，占生态服务价值总量的 14.24%，第三为生态产品供给功能，占生态服务价值总量的 11.49%，第四为气候调节功能，占生态服务价值总量的 9.79%，最后为水土保持功能，占生态系统服务价值总量的 4.63%。以此为依据，在进行生态系统服务重要性综合评价时，将本研究涉及到的水源涵养、水土保持、生态固碳和物种多样性服务能力的权重分别设定为 0.17、0.07、0.13 和 0.63。加权叠加后得到秦巴山脉地区生态系统服务重要性分级评价图（见图 1）。从图 1 可以看出，生态系统服务极重要和非常重要的区域主要分布在秦岭、伏牛山、米仓山、大巴山和神农架林区，这五处山脉形成了秦巴山脉地区的主体骨架，符合高生态服务能力区域主要分布在林地、水域、湿地等地区的特征。一般重要和比较重要的地区主要分布于汉中盆地、南阳盆地和四川盆地内，这些区域分布了秦巴山脉地区的大量建设用地，受人类活动干扰严重，生态系统服务能力较低。

（二）生态敏感性

在 ArcGIS10.2 中，依据表 1 的敏感性评价指标，计算出秦巴山脉地区生态敏感性评价图

（见图 2）。从图 2 可以看出，秦巴山脉地区大部分区域属于高度敏感和极敏感区域，面积约为 $2.117 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占研究区域面积的 68.96%，主要分布在秦岭、岷山、米仓山、大巴山和伏牛山，这些区域地势复杂，生态环境良好，自然资源丰富，是秦巴山脉地区的生态资源核心区域，若受到干扰或破坏，会给整个区域的生态环境造成巨大的压力和影响，因而其生态敏感性高，需要进行重点保护。生态不敏感、轻度敏感和中度敏感的区域较少，主要分布在区域内地势较为平坦的盆地区域，这与区域内建设用地和农用地空间分布相关，人类活动的影响导致生态敏感性降低。

（三）基于生态系统服务的区域生态安全格局

1. 重要生态源地

综合考虑秦巴山脉地区生态系统服务重要性和生态敏感性来确定生态源地，将生态系统服务重要性和生态敏感性评价结果进行叠加，在 ArcGIS10.2 中对叠加后得到的生态系统重要性空间分布进行冷热点识别，得到研究区生态保护重要性高低值的空间分布（见图 3）。根据区域冷热点的识别结果，以最大程度保护研究区内重要的生态区域为原则，选取在 90% 置信水平以上的生态保护重要热点区作

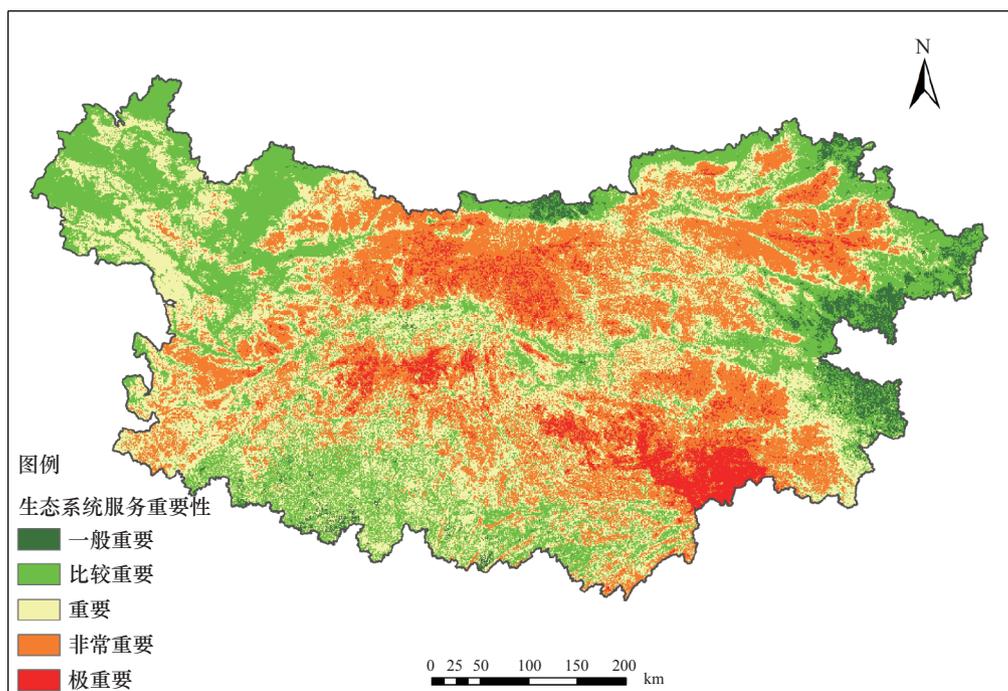


图 1 秦巴山脉地区生态系统服务重要性分级图

为生态源地备选区域，剔除面积小于 5 km^2 的斑块后，得到秦巴山脉地区的生态源地斑块，面积为 $1.356 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占研究区面积的 44.17%。

2. 生态廊道

生态廊道是生态源地之间的连接，作为能量

和物质流动的载体，是保持生态流、生态过程、生态功能、能量在区域内连续和连通的关键生态用地 [24]。连续性的带状廊道是促进破碎景观或生态斑块连通的重要措施 [25]，而以小型斑块生态环境构成的踏脚石廊道，由于包含有一定的食物资源

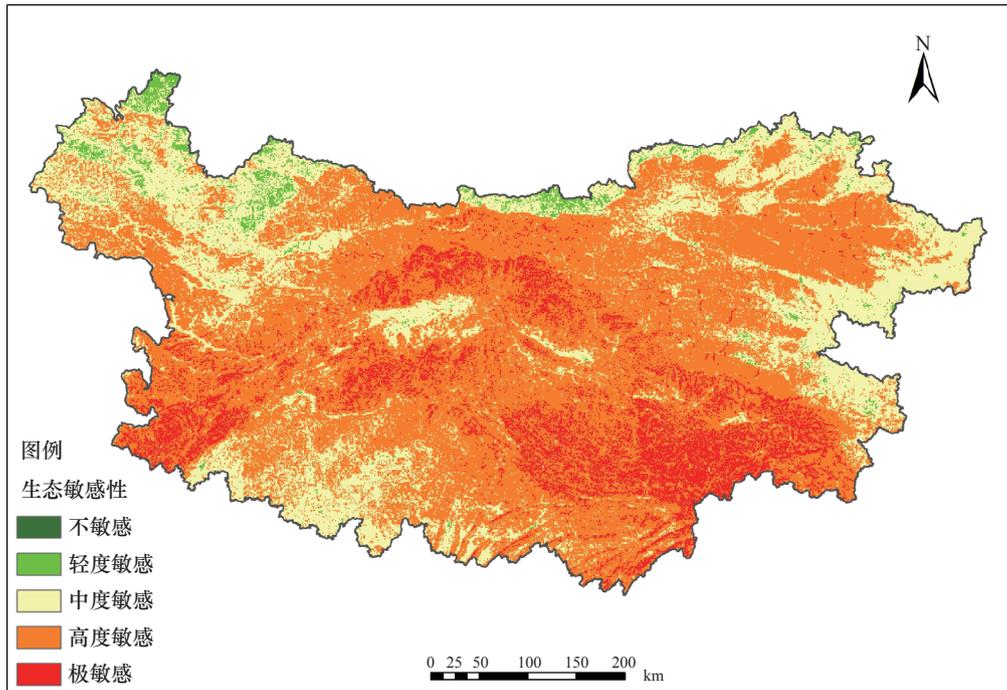


图2 秦巴山脉地区生态系统敏感性分级图

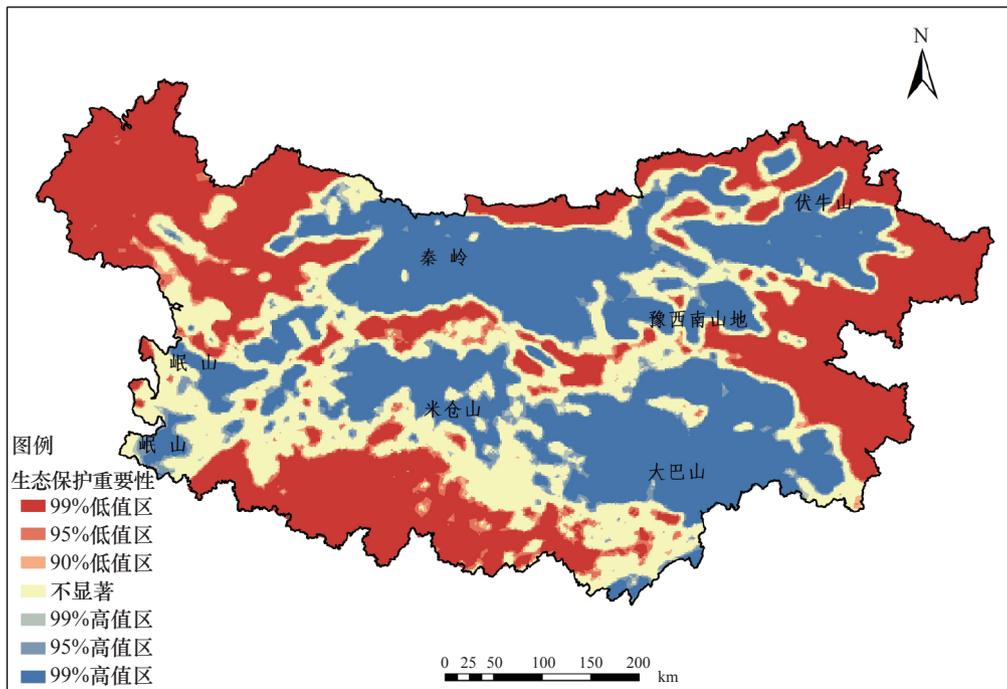


图3 秦巴山脉地区生态保护重要性高低值分布图

和隐蔽条件，可为动物迁徙扩散提供暂时栖居场所，是破碎景观连通的重要辅助措施 [26,27]。利用 ArcGIS 10.2 中的 Cost Distance 工具，基于生态源地和阻力面（阻力面为生态系统服务重要性取倒数），构建最小累积耗费廊道，为了提高生态廊道建设的可行性，以及尊重研究区内有 7 个与水生生物保护相关的国家级自然保护区的现状，结合区域内四级以上河流，以连通重要生态斑块为目的，设置 10 条河流带状廊道（见图 4）。结合研究区 I 级保护动物的分布现状，如川金丝猴在神农架、西秦岭地区都有分布的特征 [28]；林麝、豹、大鲵等在秦岭、大巴山均有分布的特征 [29,30]；大熊猫栖息地主要分布于秦岭，但破碎化严重的特征 [31]；沿岷山—秦岭—伏牛山、岷山—米仓山—大巴山 2 条生物通道设置生物带状廊道（见图 4）。结合研究区内自然保护区分布情况，在带状廊道之间、以及相邻生态源地之间共设计 26 处踏脚石廊道，这些基于省、市级自然保护区设置的踏脚石廊道，生态环境质量优越，可满足物种利用带状廊道之间的地带迁移与交流。

秦巴山脉地区生态安全格局由 6 大重要生态源地、12 条关键带状生态廊道和 26 处踏脚石廊道组成，生态源地主要围绕岷山、秦岭、伏牛山、豫西

南山地、米仓山和大巴山展开分布，这些斑块包含了研究区内重要的自然保护地。其生态用地比例高、生态环境质量良好，连接生态源地的带状廊道呈树状辐射分布，生物廊道保障了东西方向上物种生态环境的完整性，河流廊道实现全区域南北方向上生态过程的连贯性和生态功能的延续性。

五、结语

通过将研究区内的 108 个自然保护区与生态安全格局叠加可发现，70% 以上的自然保护区都包含到了生态源地范围内。秦巴山脉地区内有 54 个国家级自然保护区，除了南阳恐龙蛋化石群国家级自然保护区、青龙山恐龙蛋化石群国家级自然保护区两处地质类自然保护区外，90% 以上的保护区都被纳入生态安全格局中，包含地质遗迹、内陆湿地、森林生态、野生动植物等保护类型，主要保护对象涉及水资源、湿地生态系统、山地森林生态系统及特有珍稀物种，如大熊猫、朱鹮、川金丝猴、羚牛、豹、华南虎、金钱豹、白鹳、黑鹳、林麝、豹、云豹、扭角羚、金雕、黑熊、鬃羚、血雉、金鸡、红腹角雉、黄喉貂、秃鹫、大灵猫、大鲵、珙桐、银杏、伯乐树、珙桐红豆杉、南方红豆杉、独叶草、华山新麦草等。

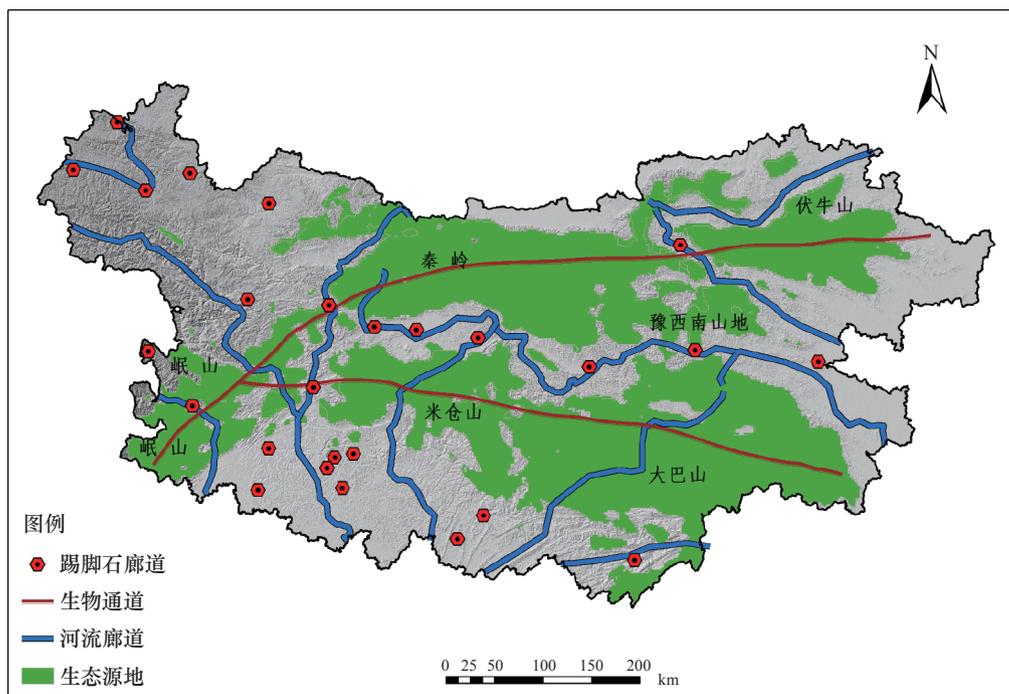


图 4 秦巴山脉地区生态系统安全格局

与生态源地识别所采用的物种多样性、水源涵养重要性、生态敏感性等目标高度契合,说明生态安全格局的构建结果较为可靠。

生态安全格局主体集中在研究区内的主要山脉(秦岭、伏牛山、大巴山、岷山、米仓山)以及河谷区域,对秦巴山脉地区的生态安全起到了重要的保障和支撑作用,重要生态源地和生态廊道是未来发展过程中需要重点保护和进行生态建设的区域。基于生态系统服务功能重要性构建的秦巴山脉地区生态安全格局,是基于生态系统服务现状提出的区域空间生态规划策略,是识别生态保护底线,划定生态红线的基础和重要支撑,可为秦巴山脉地区国家公园规划布局,区域生态保护规划和生态文明建设提供重要依据;有助于秦巴山脉地区各省市在规划发展中充分考虑区域重要生态空间,以提高区域公共性生态产品供给为目标,进行行政单元内的生态空间建设和修复,以及省市间生态补偿机制的建立。在未来的研究中,如何确定最佳的带状生态廊道宽度、踏脚石廊道的最小面积,以及如何处理野生动物通道与公路的关系等,都是下一步需要研究的方向。

参考文献

- [1] Li Y F, Sun X, Zhu X D, et al. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China [J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19): 2251–2260.
- [2] Lovell S T, Taylor J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States [J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447–1463.
- [3] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架 [J]. *地理科学*, 2018, 38(3): 1447–1463.
Peng B F, Zheng Y, Liu Y. Coupling Ecosystem Services and Regional Ecological Security Pattern [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38 (3): 1447–1463.
- [4] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 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, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. *Geographical Research*, 2017, 36 (3): 407–419.
- [5] Klar N, Herrmann M, Henning-Hahn M, et al. Between ecological theory and planning practice: (Re-)Connecting forest patches for the wildcat in Lower Saxony, Germany [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(4): 376–384.
- [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.
- [7] 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, 33 (13): 4125–4133.
Wu J S, Zhang L Q, Peng J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (13): 4125–4133.
- [8] 王晓峰, 吕一河, 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全 [J]. *自然杂志*, 2012, 34 (5): 273–276, 298.
Wang X F, Lu Y H, Fu B J. Ecosystem services and ecological security [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2012, 34 (5): 273–276, 298.
- [9] Daily G C. The value of nature and the nature of value [J]. *Science*, 2000, 289(5478): 395–396.
- [10] Wainger L A, King D M, Mack R N, et al. Can the concept of ecosystem services be practically applied to improve natural resource management decisions? [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69: 978–987.
- [11] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30 (8): 1243–1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254.
- [12] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38 (3): 305–311.
Zhang B P. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone [J]. *Progress in Geography*, 2019, 38 (3): 305–311.
- [13] Liu R G, Shang R, Liu Y, et al. Global evaluation of gap-filling approaches for seasonal NDVI with considering vegetation growth trajectory, protection of key point, noise resistance and curve stability [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 189: 164–179.
- [14] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 519–534.
- [15] Gao Y N, Yu G R, Li S G, et al. A remote sensing model to estimate ecosystem respiration in Northern China and the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Modelling*, 2015, 304: 34–43.
- [16] 朱先进, 王秋凤, 郑涵, 等. 2001~2010年中国陆地生态系统农林产品利用的碳消耗的时空变异研究 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34 (4): 762–768.
Zhu X J, Wang Q F, Zheng H, et al. Researches on the spatio-temporal variation of carbon consumption by agricultural and forestry utilization in Chinese terrestrial ecosystems during 2000s [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34 (4): 762–768.
- [17] Groot R, Brander L, Ploeg S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units [J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1), 50–61.
- [18] 杨志峰, 徐俏, 何梦常, 等. 城市生态敏感性分析 [J]. *中国环境科学*, 2002, 22 (4): 360–364.
Yang Z F, Xu X, He M C, et al. Analysis of city ecosenstivity [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(4): 360–364.
- [19] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨昉, 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.
Du Y Y, Hu Y N, Yang Y, et al. Building ecological security patterns in southwestern mountainous areas based on ecological

- importance and ecological sensitivity: A case study of Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8241–8253.
- [20] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 等. 基于景观安全格局分析的生态用地研究: 以北京市东三乡为例 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (8): 1932–1939.
Yu K J, Qiao Q, Li D H, et al. Ecological land use in three towns of eastern Beijing: A case study based on landscape security pattern analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (8): 1932–1939.
- [21] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (5): 1444–1449.
Chen L D, Fu B J, Zhao W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (5): 1444–1449.
- [22] Balvanera P, Pfister A B, Buchmann N, et al. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services [J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146–1156.
- [23] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例 [J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1157–1166.
Sun X B, Liu H Y. Optimization of wetland landscape patterns based on ecological function evaluation: A case study on the coastal wetlands of Yancheng, Jiangsu Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1157–1166.
- [24] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning [J]. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1–17.
- [25] Chetkiewicz C L B, Clair C C, Boyce M S. Corridors for conservation: Integrating pattern and process [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37: 317–342.
- [26] Saura S, Bodin O, Fortin M J. Stepping stones are crucial for species' long-distance dispersal and range expansion through habitat networks [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51: 171–182.
- [27] Yang D, Song Y, Ma J, et al. Stepping-stones and dispersal flow: Establishment of a meta-population of Milu (*Elaphurus davidianus*) through natural re-wilding [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27297.
- [28] 彭红兰. 气候变化对川金丝猴栖息地的影响研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院(硕士学位论文), 2010.
Peng H L. Projected Impacts of Climate Change on Habitat of Golden Monkey [D]. Beijing: Chinese academy of forestry (Master's thesis), 2010.
- [29] 肖宇, 姜海瑞, 薛文杰, 等. 陕西凤县林麝生境破碎化及其景观指数评估 [J]. *浙江林学院学报*, 2008, 25 (3) 331–335.
Xiao Y, Jiang H R, Xue W J, et al. Evaluation of habitat fragmentation and landscape index for *Moschus berezovskii* in Fengxian County, Shaanxi Province [J]. *Journal of Zhenjiang Forestry College*, 2008, 25 (3) 331–335.
- [30] 吴方同, 苏秋霞, 李文健, 等. 壶瓶山大鲵栖息地水环境因子的调查分析 [J]. *长沙理工大学学报 (自然科学版)*, 2007, 4 (4): 94–98.
Wu F T, Su Q X, Li W J, et al. Water environment factors of Chinese giant salamander habitat in Hupingshan natural reserve [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2007, 4 (4): 94–98.
- [31] 金学林, 邓怀庆, 胡德夫. 30年来秦岭大熊猫栖息地变化研究 [J]. *动物学杂志*, 2012, 47 (5): 41–45.
Jin X L, Deng H Q, Hu D F. Habitat changing of the Giant Panda in Qinling Mountain over 30 years from 1976 to 2007 [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2012, 47 (5): 41–45.