农业资源与环境学报 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建——以秦岭(陕西段)为例

杜雨阳, 王征强, 于庆和, 杨永崇, 张全文

引用本文:
杜雨阳,王征强,于庆和,杨永崇,张全文. 基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建——以秦岭(陕西段)为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1069-1078.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0531

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西南丘陵山区农村宅基地复垦景观格局和生态效应研究
罗友进, 余端, 韩国辉, 王武, 胡佳羽, 谢永红, 廖敦秀
农业资源与环境学报. 2015, 32(5): 429-435 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0036

基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价
荣月静, 张慧, 赵显富
农业资源与环境学报. 2015(4): 343-353 https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0359

基于FLUS和InVEST模型的南京市生境质量多情景预测
高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 汪翔, 范业婷, 朱青, 吕立刚
农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 1001-1013 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0411

乡村环境保护和管理的景观途径
张鑫, 李朋瑶, 宇振荣
农业资源与环境学报. 2015(2): 132-138 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0051

基于改进遥感生态指数的海南岛生态环境质量动态变化
付杰, 王萍, 张清, 李兴荣, 田燕芹
农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1102-1111 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0482

关注微信公众号，获得更多资讯信息

杜雨阳, 王征强, 于庆和, 等. 基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建——以秦岭(陕西段)为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1069-1078.

DU Y Y, WANG Z Q, YU Q H, et al. Construction of a regional ecological security pattern based on a habitat quality model and circuit theory: A case study of the Qinling Mountains(Shaanxi section)[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 1069-1078.

开放科学 OSID

基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建——以秦岭(陕西段)为例

杜雨阳[1], 王征强[2], 于庆和[3], 杨永崇[1*], 张全文[4]

(1.西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2.宝鸡市勘察测绘院, 陕西 宝鸡 721000; 3.黑龙江省林业设计研究院, 哈尔滨 150080; 4.商丘工学院土木工程学院, 河南 商丘 476000)

摘 要:构建区域生态安全格局是实现生态环境可持续发展的重要途径,人类活动使当前自然地域生态安全面临严重威胁。为建立自然地域生态安全格局,以具有典型山地垂直地带性的秦岭(陕西段)为研究对象,运用粒度反推法评价景观格局最佳组分,构建InVEST生境质量模型及综合阻力面,运用电路理论提取生态廊道、生态夹点、生态障碍点及生态断裂点,结合土地利用现状提出针对性修复治理建议。结果表明:研究区内66处生态源地呈现出明显的西部集聚成片、东部分散稀疏的空间分布特征。共识别出119条宽度为1 200 m的生态廊道、102处生态夹点、72处生态障碍点及58处生态断裂点;生态廊道、生态夹点和生态障碍点的用地类型仍有待整治,耕地面积占比分别为26.75%、23.80%和31.66%。结合土地利用现状,提出积极推行退耕还林、还草工作,加强城乡绿地建设,推动乡村振兴转型发展,对生态断裂点实行动态监测、设立标示牌等针对性治理措施。受自然环境及人类活动共同影响,秦岭境内生态待修复区主要集中在商洛和安康。研究结果为识别生态待修复区与构建山地区域生态安全格局提供参考。

关键词:区域生态安全格局;生态廊道;生境质量模型;最小累计阻力模型;电路理论

中图分类号:X821 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2022)05-1069-10 **doi**: 10.13254/j.jare.2021.0531

Construction of a regional ecological security pattern based on a habitat quality model and circuit theory: A case study of the Qinling Mountains(Shaanxi section)

DU Yuyang[1], WANG Zhengqiang[2], YU Qinghe[3], YANG Yongchong[1*], ZHANG Quanwen[4]

(1.College of Surveying and Mapping Science and Technology of Xi′an University of Technology, Xi′an 710054, China; 2.Baoji Survey and Mapping Institute, Baoji 721000, China; 3.Heilongjiang Forestry Design and Research Institute, Harbin 150080, China; 4.College of Civil Engineering of Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Constructing the pattern of regional ecological security is an important way to realize the sustainable development of the ecological environment, which seriously threatens the ecological security of natural areas. To establish the natural regional ecological security pattern, this study took the Qinling Mountains (Shaanxi section) with typical vertical zonality as the research object. The granularity of backstepping method was used to evaluate the best components of landscape pattern, and the InVEST habitat quality model and comprehensive resistance model were built. Ecological corridors were extracted through circuit theory, and the ecological pinch points, ecological disturbances, and ecological breakpoints were determined based on the present situation of land use repair management. The results showed that the 66 ecological sources in the study area showed obvious spatial distribution characteristics, which were concentrated in the west and scattered and sparse in the east. In addition, there were 119 ecological corridors with widths of 1 200 m, 102 ecological

收稿日期:2021-08-17 **录用日期**:2021-09-26

作者简介:杜雨阳(1998—),女,陕西西安人,硕士研究生,从事地理空间信息技术与应用研究。E-mail:2271534433@qq.com

***通信作者**:杨永崇 E-mail:yang_yongch@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41501571)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41501571)

pinch points, 72 ecological barriers, and 58 ecological breakpoints. The land types of the ecological corridors, ecological intersections, and ecological barriers still needed to be renovated, and the proportion of cultivated land area was 26.75%, 23.80%, and 31.66%, respectively. Targeted measures were suggested based on the current situation of land use, such as the need to actively return farmland to forest or grassland, strengthen the construction of urban and rural green spaces, promote the transformation and development of rural revitalization, carry out dynamic monitoring of ecological breakpoints, set up signs, and other measures. Due to the joint influence of the natural environment and human activities, the ecological restoration areas in the Qinling Mountains are mainly concentrated in Shangluo and Ankang. The research results provide the reference for identifying ecological security areas that need to be restored and for constructing ecological security patterns in mountainous areas.

Keywords: regional ecological security pattern; ecological corridor; habitat quality model; minimum cumulative resistance model; circuit theory

生态环境与人类生产、生活、生存密切相关，保护生态环境是实现人与自然共生共荣的必要条件，受人类需求增长及气候变化的影响，自然生态系统提供的生态服务能力遭受严峻挑战[1]。当前，我国城市扩张速度快、人地关系存在矛盾，亟需正确处理人类生产生活与生态环境间关系，构建生态安全格局是实现生态保护、绿色发展、民生改善三者协调统一的重要途径之一[2]。GODRON等[3]和FORMAN等[4]以景观生态学研究和可持续发展理念为出发点，开展了有关区域景观规划的研究。俞孔坚[5]基于生态系统完整性、人-地关系协调性、矛盾问题针对性原则提出生态安全格局，用以制定生态修复和环境治理政策，这对保障脆弱生态地区的生态安全具有重要意义。

生态安全格局的研究框架大致分为“供给-需求”法与“源地-阻力面-廊道”法。前者通过耦合社会经济发展与环境资源定量评估核心地区生态安全供需关系，从基础资源、生态调节、人居服务三个需求层次构建多尺度的生态安全格局[6]，将供给空间与需求空间紧密联系，着眼于供给与需求差异大的非经济发展高水平地区的生态空间保护[7]。后者在不断完善中成为当前研究的主流框架，识别源地的方法主要包括四种：一是生态系统服务集成法，通过耦合景观类型、景观格局指数、生态系统服务价值识别生态功能节点[8]，筛选具有重要生态价值的生态斑块[9]，并将服务价值较低的破碎生境作为环境修护关键区[10]；二是复合属性叠加法，该方法将自然属性与人类活动相结合构建符合“三生”空间理念的生态承载力评价体系[11-12]；三是MSPA法，是在像元级尺度将土地利用要素转化为7种独立景观斑块[13]；四是生境质量法，通过分析非生境对生境质量的威胁，设定阈值去除水体等阻碍斑块[14]，或以生态连通性反推生态源地[15]，也有学者将土地利用类型转移变化小的生态斑块定义为源地[16]。构建阻力面分为土地利用单一赋值和多源要素综合赋值，单一赋值难以辨识空间异质性且无法量化人类活动对生态阻力的影响，多源赋值加入自然影响与人类活动等指标[13,15]，并以夜间灯光数据进一步校正[11]，焦点物种的引入证实了MCR模型的可靠性[17-19]。廊道提取常用最小累积阻力模型[20]、重力模型[13]、蚁群模型[21]和电路理论[2,22]。其中电路理论融入了景观生态学，该理论借助电流在阻力面内的随机游走状态模拟物种迁徙的不确定性[23]，可通过电流强弱直观反馈廊道及节点的相对重要性，其能够识别节点位置并探究廊道宽度的优点弥补了其他模型难以有效反映生态流动性的缺陷，为构建生态安全格局提供科学依据。生态廊道是维持生态系统原真性、保护物种多样性的理论基础[24]，生态夹点和生态障碍点的空间分布是影响生态网络连通性的关键节点，当前研究侧重于确定生态廊道轨迹与节点位置[12-13]，忽视二者空间体量，未与物种迁徙所需宽度相融合，不利于确定生态待修复区具体范围。

秦岭是“引汉济渭”工程的源头，也是我国的中央水塔[25]，其特殊的地理区位和显著的自然条件造就了地理多样性，是我国具有典型生物多样性的热点地区。近年来，秦岭境内违建别墅、城镇扩张等问题广受各界关注[26]。为严守生态底线、加强秦岭生态保护禁区建设，本研究基于生境质量模型建立生态源地，依据电路理论从综合阻力面中构建生态安全格局，针对不同土地利用类型提出相应整治建议，以期为构建山地区域生态安全格局提供借鉴和参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省南部（图1），属秦巴山区的一部分（32°40′~34°35′N，105°30′~110°05′E），北接关中平原，南至汉江，西抵嘉陵江，东到伏牛山脉[27]，总面积约5.82×10^4 km^2，海拔范围为152~3 754 m。整体

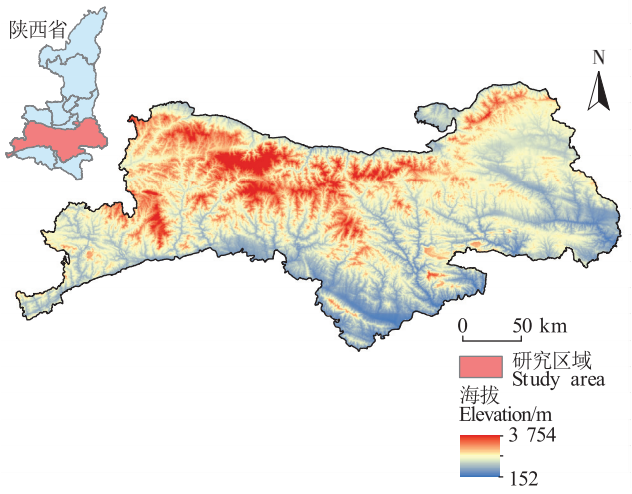


图1 研究区位

Figure 1 Location of study area

地势呈由西北向东南下倾的趋势。秦岭具有典型的山地垂直地带性特征，与淮河流域共同组成我国南北地理环境的自然分界线[28]。同时，秦岭也是以“秦岭四宝”（羚牛、金丝猴、大熊猫、朱鹮）为代表的80余种国家级濒危物种的重要栖息地，支撑着我国可持续发展生物基因库，是不可或缺的天然生态屏障之一。

1.2 数据来源

本研究使用的数据包括2018年陕西省土地利用现状及行政区划数据、陕西省境内秦岭保护区范围、空间分辨率为30 m的数字高程模型、道路交通数据、2019年夜间灯光数据及2019年陕西省统计年鉴数据。其中：土地利用现状及行政区划数据源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）；研究区范围源于秦岭生态环境保护委员会（http://qinling.shaanxi.gov.cn/qlgk.html）；数字高程模型源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）；道路交通数据源于Open Street Map平台（http://www.openstreetmap.org）；夜间灯光数据源于中国科学院空天信息创新研究院陈甫团队研制的“火石”地球夜光产品数据（http://satsee.radi.ac.cn/cfimage/nightlight）；统计年鉴数据源于陕西省统计局（http://tjj.shaanxi.gov.cn）。

2 研究方法

2.1 粒度反推法

粒度反推法是在构建多尺度粒度图的前提下，以单个斑块、斑块生态类型及整体景观三种尺度评价景观格局指数，对比各尺度景观格局指数变化趋势，以最佳粒度为景观组分并作为构建生态源地的基础。本研究中生态用地包括林地、草地及水域，依次建立30、50、100、150、200、300、400、600、800、1 000、1 200 m粒度栅格图，计算各粒度5项景观聚散性指标，包括景观形状指数、蔓延度、分割指数、分离度指数及聚集指数，结合主成分分析法得到不同粒度下的景观综合得分。

2.2 生境质量模型

InVEST是借助土地利用数据对生态系统的功能价值进行量化评估的模型系统，广泛应用于农业生产、土壤侵蚀、海洋渔业等研究领域[29]，其中生境质量模块可评估区域生境适宜性。本研究基于LUCC分类体系，将林地、草地及水域三种自然属性高的地类作为生态用地，将耕地、建设用地及未利用地三种以人类活动为主导的地类作为威胁源。参考前人研究成果[30-31]并结合研究区实际情况构建威胁源及敏感性参数表（表1、表2）。生境质量计算公式如下：

$$Q_{xj}=H_j\times[1-(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z})] \quad (1)$$

式中：Q_{xj}为土地利用类型j中栅格像元x对应的生境质量；H_j为土地利用类型j对应的生境适宜性；z为常数，固定值为2.5；D_{xj}为土地利用类型j中栅格像元x对应的所有威胁源的加权平均值；k为半饱和常数，本研究设置为0.5。

2.3 最小累积阻力模型

最小累积阻力模型（MCR）是描述物种从“源地”向“目的地”迁徙过程中受到的空间阻力，量化了阻止物种迁徙与扩张的难易程度，可有效预测和评估区域内生态风险。选取产生阻力值的主要影响因子并考虑数据可获取性，本研究以土地利用类型、地形起伏度、坡度、坡向、人口密度及距主要道路（铁路、高速、国道）距离作为构建MCR模型的指标，评估物种迁徙所受阻力。参照以往研究成果[32-34]，赋予阻力系数（1、3、5、7、9）及权重（表3），阻力系数越高，表明扩散时物种受到的阻力值越大。最小累积阻力模型原理

表1 威胁源参数

Table 1 Threat source parameter

威胁源 Threat source	最大影响距离 Maximum influence distance/km	权重 Weight	衰变关系 Decay relationship
耕地	4	0.6	线性衰变
城镇用地	10	1.0	指数衰变
农村居民点	6	0.8	指数衰变
其他建设用地	8	0.9	指数衰变
未利用地	4	0.4	线性衰变

表2 各土地利用类型对应生境适宜性及敏感性参数

Table 2 The habitat suitability and sensitivity parameters of each land use

土地利用类型 Land use	适宜性参数 Suitability parameter	敏感性参数 Sensitivity parameter				
		耕地 Cultivated land	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural residential land	其他建设用地 Other construction land	未利用地 Unutilized land
耕地	0.3	0	0.5	0.6	0.7	0.4
有林地	1.0	0.6	0.6	0.7	0.8	0.3
灌木林	0.9	0.6	0.8	0.7	0.7	0.2
疏林地	0.7	0.5	0.7	0.6	0.8	0.1
其他林地	0.6	0.8	1.0	0.7	0.7	0.1
高覆盖度草地	0.9	0.3	0.5	0.5	0.4	0.6
中覆盖度草地	0.8	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6
低覆盖度草地	0.7	0.5	0.7	0.5	0.6	0.6
河渠	1.0	0.7	0.9	0.9	0.9	0.2
湖泊	1.0	0.7	0.9	0.8	0.8	0.2
水库坑塘	0.9	0.7	0.7	0.7	0.8	0.2
滩地	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.4
城乡、工矿及居民用地	0	0	0	0	0	0
未利用地	0	0	0	0	0	0

表3 综合阻力面阻力系数及权重设定

Table 3 Comprehensive resistance surface drag coefficient and weight setting

影响因子 Impact factor	阻力因子 Resistance factor	阻力系数 Drag coefficient	权重 Weight	影响因子 Impact factor	阻力因子 Resistance factor	阻力系数 Drag coefficient	权重 Weight
土地利用类型	耕地	5	0.40	坡向	阳坡	1	0.10
	林地	1			平地	3	
	草地、水域	3			半阳坡	5	
	建设用地	9			半阴坡	7	
	未利用地	7			阴坡	9	
起伏度	<25°	1	0.15	人口密度（人·km^{-2}）	<80	1	0.13
	25°~50°	3			80~200	3	
	50°~75°	5			200~500	5	
	75°~100°	7			500~900	7	
	>100°	9			>900	9	
坡度	<8°	1	0.10	距主要道路距离（m）	<1 000	9	0.12
	8°~15°	3			1 000~2 000	7	
	15°~25°	5			2 000~3 000	5	
	25°~35°	7			3 000~4 000	3	
	>35°	9			>4 000	1	

如下：

$$MCR = f_{\min}\sum_{j=n}^{i=m}(D_{ij} \times R_i) \quad (2)$$

式中：MCR为最小累积阻力；$f_{\min}$为最小累积阻力与生态过程之间存在的某一正相关函数；D_{ij}为生态源地j与景观空间单元i在空间属性的距离；R_i为景观空间单元i在扩散过程中的阻力系数。

考虑到城市扩张和经济活动往往会占用生态用地和其他类型的用地，使土地利用类型呈现空间异质性，因此本研究采用能够在一定程度上反映生态用地被占用情况的夜间灯光数据，对土地利用类型阻力面进一步修正，原理如下：

$$R' = \frac{L_i}{L_a} \times R \quad (3)$$

式中：R'为经夜间灯光数据校正后的土地利用类型阻力面；L_i为栅格像元i对应的夜间灯光指数；L_a为土

地利用类型a对应平均夜间灯光指数；R为修正前土地利用类型对应阻力面。

2.4 基于电路理论的生态网络构建

2.4.1 生态廊道提取

生态廊道是维系生态源地间物质流动的纽带，具有适宜宽度的生态廊道可创造有机景观结构，进而有效维持物种的流动性及多样性。受光照、土壤、气候、地形等条件造成的边缘效应影响，当前确定廊道宽度的标准不一，结合研究区现状及前人研究成果[24,35]，本研究构建宽度为1 200 m的带状生态廊道。

2.4.2 生态夹点及生态障碍点提取

生态夹点表征物种流动过程中的“必经之路”，该区域的破坏及退化降低了生态网络的连通性。生态障碍点是阻碍物种在生态源地间流动的重点区域。生态夹点与生态障碍点均通过基于电路理论的Circuitscape开源程序模拟。其中，生态夹点的识别分为成对模式（Pairwise）和多对一模式（All-to-one）：前者将两处生态源地斑块归为一组，一处斑块输入1 A电流值，另一处斑块接地，计算二者间电流值，叠加各组电流值最终得到整体累积电流密度；后者依次以一处生态源地斑块作为接地节点，其余斑块以1 A电流值流动迭代，经过每个像元时都留有一定电流值，实现所有斑块接地后得到累积电流密度[14,34]。累积电流密度高值区即为生态夹点，具有不可替代性，是生态保护的关键区域之一。多对一模式能够度量夹点的连通性，故本研究以该模式识别生态夹点。生态障碍点通过基于一定搜索半径的移动窗口法获取，计算移除障碍点后的累积电流恢复值，值越大表示该区域对物种活动的阻碍程度越高。生态夹点和生态障碍点是生态待修复区的重要组成部分，二者的划定能够为生态修复提供针对性策略，进而有效提高生态网络的稳定性。

3 结果与分析

3.1 生态源地识别

不同粒度景观格局指标及综合得分趋势如图2所示。当粒度指标大于400 m时，各指标趋势明显趋于平稳，说明此时斑块数量与连通程度达到动态平衡，景观整体连通性最佳。

秦岭（陕西段）生境质量平均值为0.76。宝鸡市、西安市、渭南市境内生境质量平均值高于研究区整体平均值，分别为0.88、0.82、0.78，林地、草地占土地利用现状近90%，该三市地处山势陡峻的秦岭北麓，除较易开发的边界浅山地区，其他区域受林场及各保护区管辖，因此开发程度较低；汉中市、商洛市、安康市生境质量平均值低于整体平均值，分别为0.75、0.72、0.71，该区域内耕地及建设用地对生态环境起到威胁作用的面积占比高于平均水平，主要集中在汉中市宁强县、安康市汉滨区及商洛市柞水县。该三市近年来以中心城市带动、辐射周边区域的经济发展模式和以煤炭为主的能源消费结构在一定程度上造成了土地不当利用与环境污染。据此分析，研究区内生态环境仍有待修复的空间。

以自然分级法将生境质量分为5级，级别越高说明该范围内物种生存的适宜性越强，选取最高级范围内的斑块作为初步生态源地，共计1 338处，总面积2.10×10^4 km^2，约占研究区总面积36.00%。本研究以20 km^{2}为面积阈值剔除初步生态源地内零星斑块，筛选后共提取66处生态源地，总面积约1.87×10^4 km^2，总体呈西部集聚成片、东部分散稀疏的格局。生态源地面积占比较大的地市是商洛市和宝鸡市，分别为29.23%和23.03%。

3.2 综合阻力面构建

研究区综合阻力值在0.60~11.94之间，平均阻力为3.28，呈现出中间低、南北高的分布特点。以宝鸡市太白县、商洛市洛南县等为代表的低阻力值区以林地和草地此类生态用地为主，地形较为平缓，人口密度相对较低，且交通主干道分布较少，是自然环境良好且适宜物种生存的生态空间。以安康市汉滨区、商洛市商州区等为代表的高阻力值区地形相对平缓，以耕地和建设用地为主要用地类型，同时也是多条交通主干道的交汇区，是适宜人类活动和生存的空间。值得注意的是，西安市长安区、渭南市华州区等处于秦岭北麓边界的地区是以林地、草地为主的浅山地带，人口密度高、受人类活动影响大，因而该地区阻力值较高，生态安全受到极大威胁。

3.3 区域生态安全格局构建

基于电路理论提取生态廊道能够考虑物种间交流的多路径性。在生态源地与阻力面基础上剔除长度小于1 000 m的细碎廊道，最终共识别出119条生态廊道，集中分布于商洛市柞水县及镇安县、汉中市略阳县等地区。由于宝鸡市生态源地斑块内部连通，无需搭建额外生态廊道。对生态廊道的连通性进行评价分级，成本加权距离与最小成本路径比值越小，说明生态廊道连通性越强，进而可得到生态廊道更关键的结论。最终得到32条关键生态廊道、60条重要生态廊道和27条一般生态廊道。

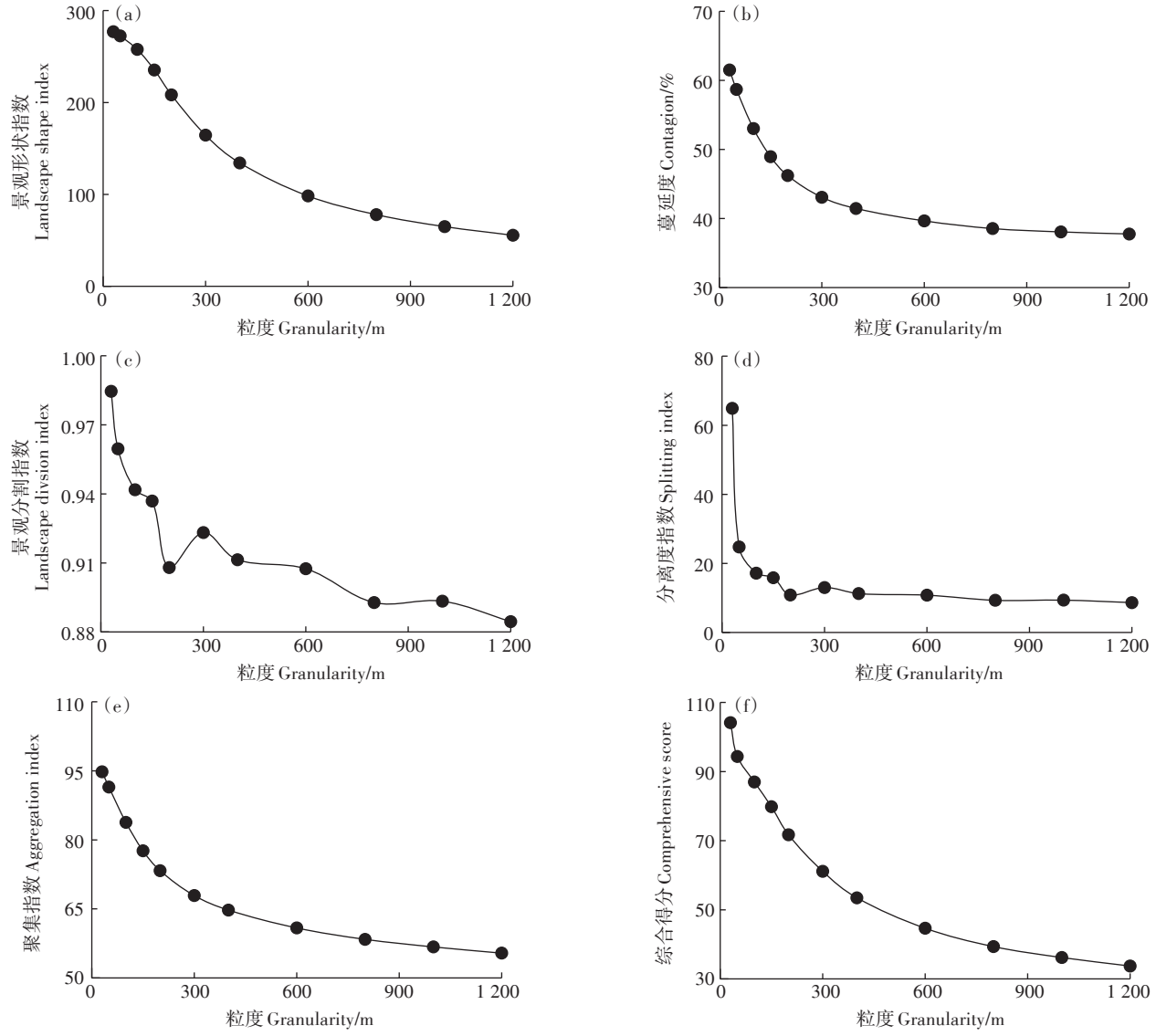


图2 不同粒度景观格局指数及综合得分趋势线

Figure 2 Landscape pattern index and comprehensive score trend line of different granularity

经统计，研究区域内生态廊道总面积2 457.43 km²，廊道分布如图3所示。其中：关键生态廊道600.12 km²，占比24.42%；重要生态廊道1 534.30 km²，占比62.44%；一般生态廊道323.01 km²，占比13.14%。廊道按重要性等级大体呈环状分布：关键廊道主要分布在生态源地中心，重要、一般廊道依次向外扩散。

3.4 生态待修复区提取

3.4.1 生态夹点提取

研究区内累积电流密度分布如图4所示，红色高值区即为生态夹点。与生态廊道叠加分析后共得到102处生态夹点，总面积302.89 km²，其中23处位于关键生态廊道，55处位于重要生态廊道，24处位于一般生态廊道。商洛市内生态夹点数量最多，有63处，总面积为190.69 km²，占所有生态夹点总面积的62.96%，这是由于该市南部人类活动区分布零散且活动强度大，物种迁徙路径有限。生态夹点数量次多的是汉中市，包含22处生态夹点，总面积约82.14 km²，占所有生态夹点总面积的21.57%。两市生态夹点数量及面积占总体的80%以上，说明境内物种流动的路径较多，是维持生态稳定的重点修护区。

3.4.2 生态障碍点提取

以400、800、1 200 m为搜索半径计算各像元最大改进得分。如图5所示，红色区域为改进得分的高值区，也是生态障碍点覆盖范围。经分析共得到72处生态障碍点，总面积379.37 km²，其中2处位于关键生

态廊道，44处位于重要生态廊道，26处位于一般生态廊道。从市域角度统计生态障碍点，商洛市内生态障碍点数量最多，有36处，占生态障碍点总面积的35.81%，城市化、重工业分布等原因致使商洛生态空间保护压力加剧，物种生存环境遭受严重威胁，且该市本身污染治理与环保投入不足，在很大程度上阻碍物种迁徙的流动性；安康市内障碍点有12处，面积占比（36.57%）最高。整体上看，半数生态障碍点处在重要生态廊道上，移除此类障碍点将有助于廊道重要程度由重要向关键转化。

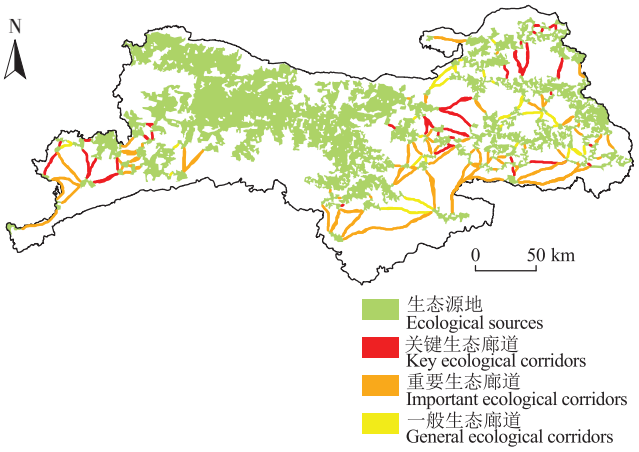


图3 生态廊道分布

Figure 3 Spatial distribution of ecological corridors

3.4.3 生态断裂点识别

经统计共得到58处生态断裂点，分布位置见图6，其中26处位于重要生态廊道，32处位于一般生态廊道，关键生态廊道上不存在生态断裂点，说明研究区内大型交通主干道分布较为合理。从大型交通主干道类型出发分析生态断裂点数量，发现有22处位于铁路，21处位于高速公路，15处位于国道。连接商洛市内破碎生境的廊道较多，且道路交通发达，致使该市生态断裂点数量最多。

3.5 生态待修复区恢复策略及建议

生态廊道、生态夹点、生态障碍点以及生态断裂点共同构成秦岭生态待修复区。遵循区域生态安全

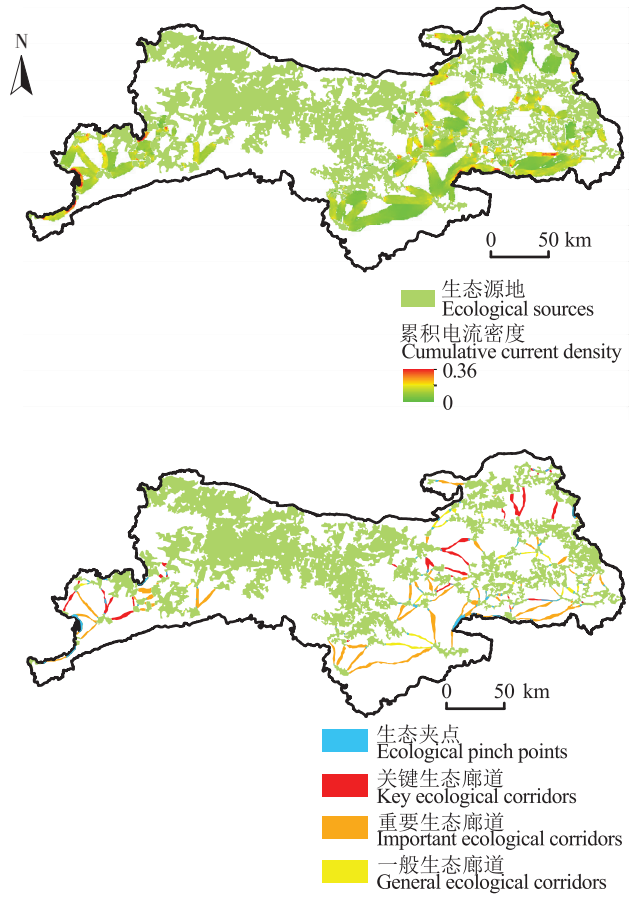


图4 生态夹点累积电流密度及位置分布

Figure 4 Cumulative current density and spatial distribution of ecological pinch point

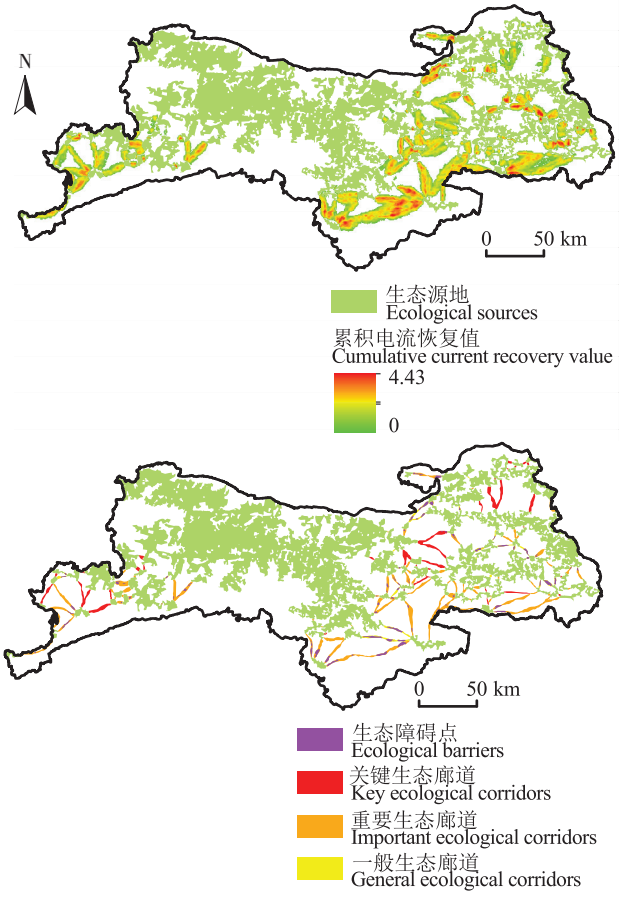


图5 生态障碍点累积电流恢复值及位置分布

Figure 5 Cumulative current recovery value and spatial distribution of ecological barriers

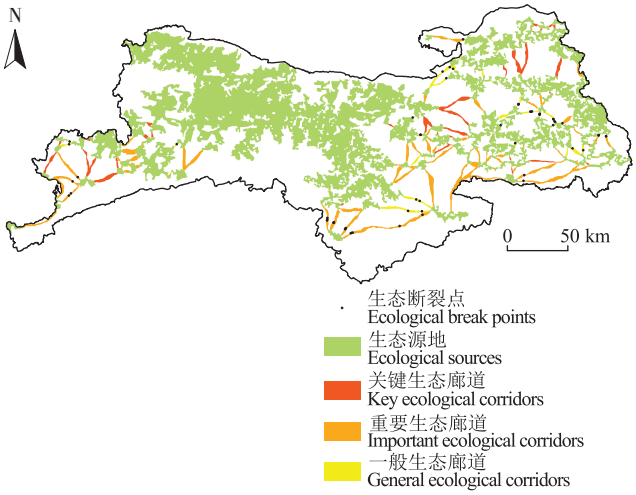


图6 生态断裂点分布

Figure 6 Spatial distribution of ecological breakpoints

格局保护原则，本研究提出“保护生态廊道、修护生态夹点、去除生态障碍点及改进生态断裂点”的生态恢复策略，结合土地利用现状对生态廊道、生态夹点和生态障碍点统计面积（表4）提出整治建议，实地监测生态断裂点。

耕地直接影响生态安全格局的构建，应严格执行《秦岭生态修复工作方案（2019—2021年）》，在保持基本农田基础上积极推行退耕还林、还草工作。研究区内分布有几十种野生动物，林地组成的生态屏障是其重要的生存空间。现今林地保护工作仍有待加强，可在商洛市东部、汉中市西北部林地密集区设立保护区，加强林业巡护工作，严厉打击违法采伐行为及毁林种田现象。草地兼具生态效益、经济效益和社会效益，也是生态待修复区占比最多的用地类型。据统计，生态廊道、生态夹点、生态障碍点三者草地利用类型对应中低覆盖度草地占比分别为62.72%、59.98%、66.58%，草地覆盖度有极大提升空间，应因地制宜制定修复方案，提高退化草地治理强度，强化对高覆盖度草地的合理保护利用。研究区内河流主要包括嘉陵江、汉江、丹江、灞河及各自支流，应在生态待修复区范围内有针对性地开展河道清淤工作及河道保护宣传活动，在河道周围设立绿化范围，检查并遏制工业废水、生活废水排放。生态廊道的建设用地中87.47%的区域为农村居民点，其中11.82%属于生态夹点，43.19%属于生态障碍点，应加强城乡绿地建设，推动乡村振兴转型发展，建立生态宜居型社会。生态廊道内包含0.59 km^2裸岩石质地及0.04 km^2的裸土地，而生态夹点与生态障碍点并不涉及此区域，因而可评估该区域对生态格局影响，积极探索开发方向，实现未利用地向生态用地的转换。

生态断裂点对廊道连贯性的影响程度与交通道路直接相关。针对研究区地形复杂、大型交通设施难以改道的现状，建议实地考察生态断裂点处生境情况，结合实际情况提出改进建议。对于有改道可能性的断裂点，可采取修建隧道、桥梁等措施保证廊道连贯性，并设立标示牌，实行动态监测，严禁设立妨碍动物活动的人工设施，严禁捕杀动物。

4 讨论

秦岭是我国重要的生态安全屏障，对该区域开展生态安全格局构建研究，有助于保护物种多样性、提升生态修复能力。本研究融合生境质量模型与景观格局指数识别生态源地，弥补以往研究方法与物种活动联系不够密切[8-10]、识别方式单一、缺乏理论支撑[16]的不足。引入多源要素综合赋值构建阻力面，并以同期夜间灯光数据加以修正，避免传统数据无法体现空间异质性的缺陷[13]，但阻力因子及量化标准仍需以主观方式进行选择，考虑到难以划定研究区河流影响范围的情况，本研究阻力因子并未涉及河网数据，今后可在小尺度区域生态安全格局中加以考虑。电路理论具有模拟物种随机游走和识别节点的优势，能有效表达生态流动性，直观反映生态活动的空间范围，但当前有关生态廊道宽度阈值的研究较少[35]，本研究以1 200 m作为实现秦岭境内物种长期向好的生态廊道宽度，实际应用中该阈值有待进一步调整。

当前，区域生态安全格局的研究对象逐步由城市转向自然地域，针对生态结构复杂、物种多样的山区

表4 生态廊道、生态夹点、生态障碍点各土地利用类型面积统计（km^2）

Table 4 Land use area statistics of ecological corridor, ecological pinch point and ecological barriers（km^2）

项目 Item	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land	总面积 Total area
生态廊道	657.36	662.34	1 116.77	5.72	14.61	0.63	2 457.43
生态夹点	72.08	76.76	151.22	1.18	1.65	0	302.89
生态障碍点	120.09	81.15	168.71	2.67	6.75	0	379.37

的研究仍然较少，本研究可为构建山地生态安全格局提供参考。在今后研究中考量城市与自然两类环境的生态评估差异，探究廊道宽度的有效阈值，将有助于构建更加科学且具有针对性的生态安全格局。

5　结论

本研究以我国具有典型山地垂直地带性的秦岭（陕西段）为研究对象，建立研究区生境质量模型，识别生态源地，提取生态待修复区，结合2018年土地利用现状提出整治建议，得到以下结论：

（1）研究区共提取66处生态源地，空间特征明显，西部源地少而聚集，东部源地多而分散，主要是由于东部地区人类活动干扰较大。商洛市生态源地总面积最大，占总生态源地面积的29.23%；其次是宝鸡市，占总生态源地面积的23.03%，该市域内生态源地斑块整体性强，无需构建生态廊道，故不存在待修复区。

（2）生态待修复区包括119条生态廊道、102处生态夹点、72处生态障碍点及58处生态断裂点。生态廊道宽度设定为1 200 m，按重要程度呈由内向外逐渐递减的环状分布。生态夹点多分布于生态源地与生态廊道连接处。同时，生态廊道、生态夹点和生态障碍点中耕地面积占比相对较高，分别为26.75%、23.80%和31.66%，退耕还林、还草措施有待进一步落实。

（3）以“保护生态廊道、修护生态夹点、去除生态障碍点及改进生态断裂点”为全局治理策略，根据不同土地利用现状提出针对性整治建议，加强城乡绿地建设，有助于拓宽廊道宽度，进而稳固生态源地内在种群结构。

参考文献：

[1] PECL G T, ARAUJO M B, BELL J D, et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being [J]. *Science*, 2017, 355(6332): 1389-1399.

[2] PENG J, YANG Y, LIU Y, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.

[3] GODRON M, LI X Z. Some questions about landscape modelling[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, 13(4): 459-465.

[4] FORMAN R T T, REINEKING B, HERSPERGER A M. Road traffic and nearby grassland bird patterns in a suburbanizing landscape[J]. *Environmental Management*, 2002, 29(6): 782-800.

[5] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 10-17. YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 10-17.

[6] 卢慧婷, 严岩, 赵春黎, 等. 雄安新区多尺度生态安全格局构建框架[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7105-7112. LU H T, YAN Y, ZHAO C L, et al. Framework of constructing multi-scale ecological security pattern in Xiong′an New Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7105-7112.

[7] 张豆, 渠丽萍, 张桀滈. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7525-7537. ZHANG D, QU L P, ZHANG J H. Ecological security pattern construction method based on the perspective of ecological supply and demand: A case study of Yangtze River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7525-7537.

[8] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于“功能节点-关键廊道”的城市生态安全格局构建——以深圳市为例[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1663-1671. WU J S, MA H K, PENG J. Improving urban ecological security pattern based on functional nodes-key corridors: A case study of Shenzhen City[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(12): 1663-1671.

[9] 付凤杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3406-3414. FU F J, LIU Z H, LIU H. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3406-3414.

[10] 方莹, 王静, 黄隆杨, 等. 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[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203. FANG Y, WANG J, HUANG L Y, et al. 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[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 190-203.

[11] 张亮, 岳文泽, 陈阳. 基于斑块复合属性特征的城市生态安全格局构建——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4632-4640. ZHANG L, YUE W Z, CHEN Y. Construction of urban ecological security pattern based on of patch composite characteristics: A case study of Hangzhou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4632-4640.

[12] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1096-1110. FENG Y W, ZHEN J H, MA C Y. Evaluation of ecological carrying capacity and optimization of ecological security pattern in Inner Mongolia[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 1096-1110.

[13] 陈南南, 康帅直, 赵永华, 等. 基于MSPA和MCR模型的秦岭（陕西段）山地生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1545-1553. CHEN N N, KANG S Z, ZHAO Y H, et al. Construction of ecological network in Qinling Mountains of Shaanxi, China based on MSPA and MCR model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1545-1553.

[14] 李涛, 巩雅博, 戈健宅, 等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建——以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2555-2564. LI T, GONG Y B, GE J Z, et al. Construction of urban landscape ecological security pattern based on circuit theory: A case study of Hengyang City, Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2555-2564.

[15] 高阳, 刘悦忻, 钱建利, 等. 基于多源数据综合观测的生态安全格局构建——以江西省万年县为例[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 2010-2021. GAO Y, LIU Y X, QIAN J L, et al. Improving ecological security pattern based on the integrated observation of multiple source data: A case study of Wannian County, Jiangxi Province[J]. *Resources Science*, 2020, 42(10): 2010-2021.

[16] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文. 生物多样性保护优先区生态网络构建与优化——以太行山片区为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 61-67. HAN R Y, ZHAO Z P, XIAO N W. The eco-network construction and optimization in biodiversity conservation priority area: A case study of the Taihang Mountain area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(2): 61-67.

[17] 程璐璐. 珲春市物种保护生态安全格局构建研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017: 6-14. CHENG L L. Research on construction of landscape ecological security patterns in biological conservation in Hunchun[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences), 2017: 6-14.

[18] 喻小钗. 基于生物安全格局的自然保护地功能区划研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020: 44-58. YU X C. Study on functional zoning optimization of Wulongkou area of the national nature reserve of Taihang Mountain macaque in Jiyuan City[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020: 44-58.

[19] 王丽容, 冯晓蕾, 常青, 等. 基于InVEST-MCR复合模型的城市绿色空间生境网络格局构建研究[J]. 中国园林, 2020, 36(6): 113-118. WANG L R, FENG X L, CHANG Q, et al. Pattern consyruction of habitat network for urban green space based on the compound model of InVEST and MCR[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2020, 36(6): 113-118.

[20] LIU X Y, WEI M, ZENG J. Simulating urban growth scenarios based on ecological pattern: A case study in Quanzhou, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(19): 7282.

[21] 王海鹰, 秦奋, 张新长, 等. 基于蚁群优化算法的城市生态用地空间规划模型[J]. 地理科学, 2017, 37(3): 426-436. WANG H Y, QIN F, ZHANG X C, et al. The spatial planning model of urban ecological land based on ant colony optimization algorithm[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(3): 426-436.

[22] HUANG J M, HU Y C, ZHENG F Y. Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: A case study of Jinan City[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2020, 27(11): 12414-12427.

[23] DICKSON B G, ALBANO C M, ANANTHARAMAN R, et al. Circuit-theory applications to connectivity science and conservation[J]. *Conservation Biology*, 2019, 33(2): 239-249.

[24] 郑好, 高吉喜, 谢高地, 等. 生态廊道[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(2): 137-144. ZHENG H, GAO J X, XIE G D, et al. Ecological corridor[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(2): 137-144.

[25] 李瑞农. 为什么说秦岭是我国的中央水塔[N]. 学习时报, 2020-05-25(5版). LI R N. Why is Qinling the central water tower of our country[N]. Study Times, 2020-05-25(5th Edition).

[26] 周煜杰, 赵永华, 李宛莹. 秦岭北麓生态问题及土壤修复研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2218-2227. ZHOU Y J, ZHAO Y H, LI W Y. A brief introduction to ecological problems and the research progress of soil remediation in the northern foot of Qinling Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2218-2227.

[27] 马新萍, 白红英, 贺映娜, 等. 基于NDVI的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1616-1621. MA X P, BAI H Y, HE Y N, et al. The vegetation remote sensing phenology of Qinling Mountains based on NDVI and it's response to temperature: Taking within the territory of Shaanxi as an example[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1616-1621.

[28] 刘康, 马乃喜, 胥艳玲, 等. 秦岭山地生态环境保护与建设[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 157-160. LIU K, MA N X, XU Y L, et al. Protection and construction of eco-environment in Qinling Mountainous area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(3): 157-160.

[29] 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等. InVEST模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学, 2013, 33(4): 58-62. WU Z, CHEN X, LIU B B, et al. Research progress and application of InVEST model[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2013, 33(4): 58-62.

[30] 高庆彦, 潘玉君, 刘化. 基于InVEST模型的大理州生境质量时空演化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(3): 402-408. GAO Q Y, PAN Y J, LIU H. Spatial-temporal evolution of habitat quality in the Dali Bai Autonomous Prefecture based on the InVEST model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 402-408.

[31] 张华, 韩武宏, 宋金岳, 等. 祁连山国家公园生境质量时空演变[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1419-1430. ZHANG H, HAN W H, SONG J Y, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Qilian Mountain national park[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1419-1430.

[32] 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. GUO J X, HU Z Q, LI H X, et al. Construction of municipal ecological space network based on MCR model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 275-284.

[33] 龙欢. 城镇化背景下森林景观格局变化及绿色网络的构建[D]. 西安: 西北大学, 2020: 45-50. LONG H. Changes in forest landscape patterns and the construction of green networks under the background of urbanization[D]. Xi'an: Northwest University, 2020: 45-50.

[34] 张美丽, 李智, 张益琛, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以河北省阜平县为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 299-307, 插1. ZHANG M L, LI Z, ZHANG Y C, et al. Identification of key areas of ecological restoration of land and space based on ecological security pattern: Taking Fuping County of Hebei Province as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 299-307, Insert 1.

[35] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2406-2412. ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2406-2412.