

DOI: 10.5846/stxb201806231380

刘伊萌, 杨赛霓, 倪维, 何锦彪. 生态斑块重要性综合评价方法研究——以四川省为例. 生态学报, 2020, 40(11): 3602-3611.

Liu Y M, Yang S N, Ni W, He J B. Comprehensive assessment method on ecological patch importance: a case study in Sichuan Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3602-3611.

生态斑块重要性综合评价方法研究 ——以四川省为例

刘伊萌^{1,2,3}, 杨赛霓^{1,2,3,*}, 倪维^{1,2,3}, 何锦彪⁴

1 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

3 北京师范大学地理科学学部民政部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875

4 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074

摘要:生态斑块为生物提供生存和发展的场所,城市化的推进引发生态斑块面积锐减且趋于破碎化,严重威胁生态系统服务。通过对生态斑块重要性的分析,可识别对保持景观连接度有关键作用的区域,是优化有限资金配置、实现高效生态保护和分级管理的有效途径。以 2015 年的四川省为例,从景观连接度出发,基于网络建模和拓扑指标计算,结合逼近理想点排序法(TOPSIS)和有序样品聚类进行了斑块重要性的综合评估和排序。研究表明,四川省内生态斑块呈现西北部相对连续,南部和东部零散而稀疏的分布特点,在此基础上构建的生态基础设施网络具有无标度性;所选拓扑指标结合综合评价方法后可有效评估斑块重要性,所有斑块可分为 5 个重要性层级,高层级斑块主要位于相对核心的位置,低层级斑块分布于全省边缘。针对不同层级斑块的特点提出了相应规划建议,从整体角度出发引导局部生态规划,以期有限资源下省域尺度复合种群保护工作提供参考与借鉴。

关键词:生态斑块重要性;景观连接度;TOPSIS;有序样品聚类

Comprehensive assessment method on ecological patch importance: a case study in Sichuan Province, China

LIU Yimeng^{1,2,3}, YANG Saini^{1,2,3,*}, NI Wei^{1,2,3}, HE Jinbiao⁴

1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Ecological patches provide places for the survival and development of species. Urbanization processes have led to a sharp area decline of ecological patches and severe fragmentation, which seriously threaten ecosystem services. Ecological patch importance assessment can help identify the key regions of maintaining landscape connectivity. It is an effective way to achieve efficient ecological protection and hierarchical management. Based on network modeling and topological indicators, and combined with TOPSIS and ordered sample clustering, we evaluated and ranked the ecological patch importance in Sichuan Province in 2015 from the perspective of landscape connectivity. The results show that the ecological patches in Sichuan Province were relatively continuous in the northwest, while they were scattered and sparse in the south and east.

基金项目:地表过程模型与模拟创新研究群体科学基金(41621061);国家重点研发计划项目(2016YFA0602403)

收稿日期:2018-06-23; **网络出版日期:**2020-04-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangsaini@bnu.edu.cn

The comprehensive assessment method can effectively rank patch importance and patches can be divided into five importance levels. The high-level ecological patches were mainly located at core area, while low-level patches were distributed at the edge of the province. We proposed corresponding planning suggestions according to the characteristics of ecological patches at different levels, aiming at guiding local ecological planning from a holistic perspective. The results provide references for the optimization of metapopulation protection at a provincial scale with limited resources.

Key Words: ecological patch importance; landscape connectivity; TOPSIS; ordered sample clustering

快速城市化往往导致景观破碎化、内部种生境面积缩小等问题,威胁正常生态过程并降低生态系统服务^[1-3]。景观中存在一些对维持和改善生态过程具有关键意义的区域或元素(如斑块、廊道等)^[4-5],识别并保护这些重要元素可对抗景观破碎化,也是优化有限资源配置、实现高效生态保护和分级管理的有效途径。

景观连接度指景观促进或阻碍生物体或生态过程在斑块间运动的程度^[6-7]。在基于图论法的景观连接度模型中,节点表示栖息地斑块,连边表示生物在斑块之间的潜在扩散能力^[8-10]。该模型可通过一系列指数定量分析每一斑块对维持景观连接度的贡献,从而评价斑块的重要性。近年来,国内外学者提出了多种基于景观网络的景观连接度度量方法,并延伸出斑块重要性评价方法。Urban 和 Keitt^[11]提出使用种群增长潜力(R)、扩散通量(F)和可通过性(T)评价生态网络的景观连接特征,并基于移除各个斑块后指标的变化量衡量斑块的重要性。Jordán 等^[12]从节点的度值、集聚系数、平均拓扑距离和去除该节点后网络中存留的最大连通种群量四个方面识别生态网络中的关键斑块。Pascual-Hortal 和 Saura^[13]提出了基于图论的景观功能连接度指数:整体连通性指数(IIC)、可能连通性指数(PC),同样基于“斑块移除”实验,根据移除斑块后指数的降低程度对斑块重要性排序。Minor 和 Urban^[14]则基于介数、度值、流入/流出通量等网络拓扑属性确定了斑块的优先保护顺序,并证明该结果与空间显示种群模型(SEPM)的斑块重要性评价结果有很好的 consistency,验证了图论法在景观生态学研究中的有效性。国内评价斑块重要性主要基于功能连接度指数法,近年来国内学者们也在不断探索新的指标或方法。陈杰等^[15]运用功能连接度指数评价了欲恢复为森林景观的农业斑块的重要性值,确定了巩义市农业斑块恢复的顺序。冯珊珊等^[16]基于可能连通性指数(PC),评价了徐州市采煤塌陷地生态恢复的优先级;张宇等^[17]基于介数中心性指标确定了滇金丝猴栖息地的优先保护顺序。邱瑶等^[18]从斑块面积和连接度两个维度,识别了对维持深圳市景观生态功能具有重要意义的斑块。吴银鹏等^[19]运用层次分析法(AHP)构建斑块重要性评价指标体系,识别出成都市绿色基础设施中的关键斑块。学者们日益注重纳入新指标和使用多个指标评价斑块的重要性,以克服传统单指标评价的局限性,但尚缺乏客观综合评价方法的运用。

四川省各类自然资源充沛,不仅是长江上游的重要生态屏障,也是世界生物多样性保护研究的热点地区之一。省内现有包括国家公园、自然保护区等在内的各类自然保护地 519 处,共 11.35 万 km²^[20-21]。四川省城镇化速度高于全国平均水平^[22],人类活动对于生态环境的影响日益加剧。省内自然灾害频发,水土流失和土地石漠化问题严峻^[23-24]。高速的城市化进程和频发的自然灾害对当地生态环境造成威胁,生态保育和生态建设成为当地紧要重任。四川省全境分布有以森林和草地为主要栖息地的野生动物约 1300 种,其中 154 种是国家重点保护物种,占全国的 39.6%,比例居全国之首^[25]。近年来,省内森林等生态用地大面积减少^[26],针对省级尺度的野生动物栖息地保护研究十分值得关注。本文基于四川省森林和草地斑块,结合最低成本路径和最小生成树方法,为野生动物复合种群构建栖息地保护网络,并运用网络科学和综合评价方法定量分析生态斑块的重要性,量化识别对生态保护起到关键作用的区域,以期对未来景观规划和复合种群保护提供科学评估方法。

1 研究区概况

四川省(97°21'—108°31'E, 26°03'—34°19'N)地跨多个地貌单元,处于中国大陆第一、二级阶梯的过渡

带,地势西高东低,整体上由西北到东南倾斜。受复杂地形和季风的影响,四川省气候复杂多样且不同区域差异显著^[27],形成了种类繁多且数量庞大的自然资源,如动植物资源、水能资源和地质矿产资源等。

四川省辖区面积 48.5 万 km²,是中国面积第五大省,其土地利用格局大致以“胡焕庸线”为界,西北部以林地(16.9 万 km²)、草地(16.9 万 km²)为主,两种地类面积相当,分布广袤,总和约占全省 70%;东南部人类活动密集,耕地(11.95 万 km²)、建设用地(0.56 万 km²)集中分布。此外,四川省还分布有 0.46 万 km²水域和 1.75 万 km²未利用地。四川省也是我国西部重要工业基地。改革开放之后,四川省进入快速城市化阶段^[28]。2010 年末四川省城镇化率为 40.18%,2015 年达 47.69%^[29],表明“十二五”规划时期四川省由城市化加速期步入城市成长关键期,尤其需要注重合理规划和区域协调^[30]。

自然灾害种类多、发生频、影响广是四川省的又一特点。其中,地震灾害发生最为频繁,造成的损失最为严重。2008 年汶川特大地震造成了巨大的人口经济损失和严重生态破坏,生态破坏重灾区覆盖汶川县、彭州市等 10 县市,地震导致的生态系统丧失面积超过 1200 km²^[31]。此外,频发的滑坡、泥石流等地质灾害加剧了当地水土流失和山地石漠化等生态环境问题。

为从宏观上预防和应对城市化进程和自然灾害可能带来的生态问题,本文选取 2015 年的四川省作为研究区域,对省内生态斑块的重要性进行评价,并提出分级管制建议,以期为下一阶段生态文明建设提供决策依据。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文所使用的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、陆地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)遥感影像产品来自 NASA EOS/MODIS 2015 年的 MOD13A3 数据和 MOD17A3 数据(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search/>)。道路数据来自于国家基础地理信息中心 1:25 万全国行政区划矢量化电子地图。土地利用/土地覆盖数据来自地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn>)提供的 2015 年 30 米分辨率产品,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地在内的 6 个一级分类和 25 个二级分类,研究中涉及的水域、建设用地、生态斑块等数据均由此提取。对研究数据的预处理包括统一坐标系、拼接、裁剪,将栅格分辨率统一为 250 m×250 m。所有数据以年为时间分辨率,根据相关研究^[32-33],我国植被在 8 月份生长最好,故用 8 月份年 NDVI、NPP 最大值表示全年植被生长状况。

2.2 生态基础设施网络构建

生态基础设施(Ecological Infrastructure, EI)是相互连接的自然区域和其他开阔空间,也是一种优化的自然生态系统保育措施^[34],其拓扑结构可指征对景观连接度起关键作用的区域,为生态保护和恢复的优先级提供依据。EI 通常由节点和连边组成,其中节点是栖息地单元(如斑块、保护区等),连边表示生物在两个栖息地单元之间扩散的潜在能力。构建生态基础设施网络分为两步:1)识别节点,即生态斑块;2)合理构建边以连接节点,本研究中边是两点间的最低成本路径。

2.3 生态斑块识别

生态斑块是生态系统中物质、能量、信息甚至功能的源头或汇集,本研究中各个生态斑块既是源地,又互为其他斑块的到达目标。参考相关文献^[35],综合考虑土地覆盖类型和面积,确定提取生态斑块的原则有以下三个:①土地覆盖类型为林地或草地,因这两种土地覆盖类型能为物种提供生存和发展的资源,且受人为干扰较少;②斑块面积应大于 20 km²;③本文假设若两斑块间存在公共点或公共边,它们将自发进行物质能量信息交换而不需要额外增加廊道,故有公共点或公共边的斑块可以融合。最终生态网络中的斑块应在空间上相互孤立,即斑块之间没有任何公共点或公共边。

依据以上原则,运用 ArcGIS 10.2 空间分析模块,按属性提取出四川省 231 个离散的生态斑块,即生态基础设施的节点。

2.4 景观阻力面构建

生态基础设施的构建要考虑基底对生态过程的综合作用^[36]。景观阻力面(又称成本面)实际上量化表征了基底对物质、能量、信息流动的阻碍程度,每个栅格单元值的高低代表通过的难易程度^[37]。植被群落特征和人为干扰强度在成本面的计算中起着决定性作用^[38],本研究从这两个角度出发,考虑植被覆盖度、NPP、道路密度、水体分布和建筑分布 5 种因素构建成本面。参照已有研究^[35],对于成本因素进行如表 1 所示的阻力赋值:

表 1 景观阻力赋值

Table 1 Landscape resistance assignments

	初级生产力 NPP Net primary productivity	植被覆盖度 Vegetation coverage	公路密度 Road density	建设用地 Construction area	水域 Open waters
景观阻力 Landscape resistance	[100,0]	[100,0]	[0,100]	300	300

植被群落特征与成本值负相关,用 NPP、植被覆盖度两个指标表征。二者值越大的地方生境质量越高,物种经过时承受的阻力越小,即穿越所花费的成本越小。故而对于这两种数据,其数值高的地方赋予较低成本值。

建设用地和公路是人为建造的非渗透表面,人为干扰强度最大,且植被覆盖率低;水域虽受人为干扰强度小,但不适宜动物迁徙穿越,故这三种覆盖类型均与成本值正相关,其数值高的地方赋予较高成本值。

2.5 基于最低成本路径与最小生成树的生态基础设施识别

相关研究表明在识别斑块重要性方面,最低成本路径优于欧氏距离,理论上能有效降低外界干扰从而成为物种迁移、扩散的最佳路径^[39-42]。本文基于 ArcGIS 10.2 平台中的成本距离与成本路径工具,计算各斑块边界到边界的最低成本路径,形成一个规模为 231 × 231 的成本距离矩阵。

考虑到实际生态保护工作中的资源限制,本研究拟为四川省构建以最低的总成本满足所有斑块全连通的生态基础设施。最小生成树的原理与这一要求相吻合,它包含原图所有节点并具有让节点保持全连通的总成本最小的边。本文选取 Prim 算法^[43]作为最小生成树实现算法,利用上述成本距离矩阵作为输入,求解出四川省生态基础设施网络。

2.6 生态斑块重要性排序与分级

2.6.1 测度指标选取与计算

本文将生态基础设施网络抽象为相对单调直观的“图”,并从节点的结构和功能特性出发,选取度中心性(Degree Centrality)、介数中心性(Betweenness Centrality)、接近中心性(Closeness Centrality)、脆弱性(Vulnerability)等四个图论中的测度指标(表 2),定量评价节点在网络中的重要性。这些测度指标反映了节点的连接程度,可用于表征节点的相对重要性^[44]。指标计算时所用距离指斑块间的成本距离。

这些指标具有在生态学中实际的意义。在生态网络中,度中心性表征了斑块抵御扰动的能力:如果一个斑块的度较小,表示它相对孤立于其他斑块,在面对扰动时难以与其他斑块建立联系,易受侵害。反之一个斑块的度值较大,表明其能够与其他斑块发生充分的物质、能量和信息交流,其对抗扰动的能力相对较强^[12]。介数中心性表示一个斑块在其他两个斑块的最短路径上担任“桥梁”的次数。介数值高的斑块所经历的生物流不仅来自附近的斑块,还可能来自相当远的斑块^[45],故而它们对生态网络中的生物流拥有着最强的控制能力,拥有更多机会获取其他斑块对其的物种补充。接近中心性指示着生态网络中物质、能量和信息传递的便捷程度^[46]。接近数数值小表示该节点与其他节点平均距离小,表明它处于网络中相对中心的位置,传递信息能力强且速度快,是生态系统中重要而可靠的垫脚石。节点脆弱性指标侧重于节点功能的评价^[47]。它基于网络效率计算,反映了某个斑块从生态网络中移除后对生物流传输效率的影响。节点脆弱性值高的斑块被移除后,生态网络的效率急剧下降,生态过程受到威胁,生态系统服务质量降低。

表 2 测度指标及其含义

Table 2 Indicators and explanations

指标名称 Names	符号 Symbols	公式 Equations	公式释义 Explanations	指标含义 Definitions
度中心性 <i>DC</i> Degree centrality	$DC(i)$	$DC(i) = \frac{k_i}{N-1}$	k_i :第 i 个节点的度; N :网络中包含的节点总数	该节点相连的其他节点的数目
介数中心性 <i>BC</i> Betweenness centrality	$BC(i)$	$BC(i) = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}}$	g_{st} :节点 s, t 之间的最短路径的条数; n_{st}^i :节点 s, t 之间的最短路径通过节点 i 的条数	网络中任意两个节点间的最短路径通过节点 i 的次数
接近中心性 <i>CC</i> Closeness centrality	$CC(i)$	$CC(i) = \frac{\sum_y d(y, i)}{N-1}$	$d(y, i)$:节点 y, i 之间的距离	节点 i 到网络中其他所有节点的距离之和
脆弱性 <i>V</i> Vulnerability	$V(i)$	$V_i = \frac{E - E_i}{E}$ $E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$	E :整个网络的效率; E_i :去除节点 i 后的网络效率; d_{ij} :节点 i, j 之间的成本距离	去除节点 i 后的网络效率,基于整个网络的效率 E 和去除该节点后的效率 E_i 算出

2.6.2 基于 TOPSIS 的斑块重要性排序

逼近理想点排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, 简称 TOPSIS) 是一种有效的多指标综合分析方法, 被广泛应用于地质灾害危险性评价、电网安全评价、地下水质量评价、企业竞争力评价等多领域的绩效、质量评价中^[48-51]。其基本原理是: 基于标准化后的数据矩阵, 在每个指标维度确定一个正理想点和一个负理想点, 计算各评价对象到两种理想点的距离, 获得各评价对象与负理想点相对接近程度, 并作为衡量相对优劣的依据^[52]。本研究应用 TOPSIS 方法对斑块维持景观连接度的重要性进行综合评价。

2.6.3 基于有序样品聚类的斑块重要性分级

有序样品聚类方法 (又称最优分割法) 要求分割时样品保持已知次序, 同类样品相互邻接^[53]。它在不打乱样品顺序的前提下对其进行最优层级划分, 适用于具有特定排序的数据分析, 目前的应用涉及地层单位划分、植物生长节律、健康指标参考值制定^[53-55]等方面。这种最优分割的基本思想是: 确定包含 n 个样品的序列被划分的类别数目 L , 并确定每类含有的样品数量 n_k , 以使得类别划分后, 各类内离差平方和 (W) 最小且各类间离差平方和 (B) 最大。

$$W = \sum_{k=1}^L \sum_j^{n_k} (X_{kj} - \bar{X}_k)^2 \quad (7)$$

$$B = \sum_{k=1}^L \sum_j^{n_k} (X_k - \bar{X})^2 \quad (8)$$

式中, X_{kj} 表示第 k 类第 j 个样品对应的指标, \bar{X}_k 是第 k 类指标的均值, \bar{X} 为所有样品的均值。使用 TOPSIS 方法得到斑块重要性序列后, 应用有序样品聚类进行分类划级, 以满足不同资源条件下的生态保护需求, 便于生态区域分级管理。

3 结果分析

本研究共识别出 231 个生态斑块, 总面积 18.65 万 km^2 , 占全省面积的 38.5%, 斑块空间分布如图 1 所示。西部高原、山地地区生态斑块面积大而个数少, 但东部生态斑块面积小, 且出现了大片空洞。整体上, 四川西北部的生态斑块相对连续, 南部和东部的生态斑块分布零散而稀疏。

全省景观阻力值 (图 1) 分布在 19.38 至 596.51 之间, 不同地区的阻力值差异大。阻力值的高低程度反映了各物种穿越该地区时受到下垫面的综合阻碍大小, 图中红色区域表示迁徙经过时阻力大, 可达性低; 蓝色区域表示通过阻力小, 可达性高。在四川省东部出现生态斑块空洞的地方, 相应地出现了成本高值区, 因为四

川省东部城市建成区密集,该处生态用地多被建筑用地取代,人类干扰强烈,生物迁徙成本高。而西部生态斑块分布广泛的区域生境质量高,适宜物种穿越,阻力值普遍较低。水体、建筑物、道路集中的区域成本值也明显高于斑块广布的地区。

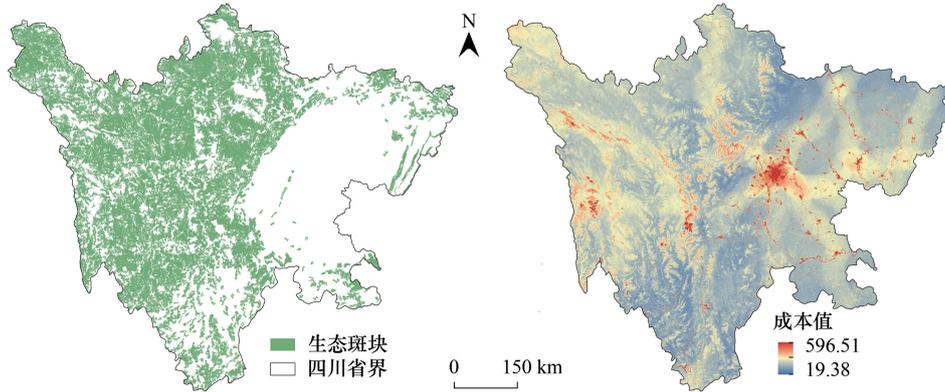


图1 生态斑块分布图和成本值分布图

Fig.1 Distribution of ecological patches and cost value

图2是生态基础设施网络的实际分布情况,复杂的现实景观格局使得计算出的不同路径之间长短相去甚远,显示不够清晰直观。为更加明晰地展示网络结构,本文提取各斑块的重心来抽象代表斑块本身,并将生态廊道用直线表示(图2)。

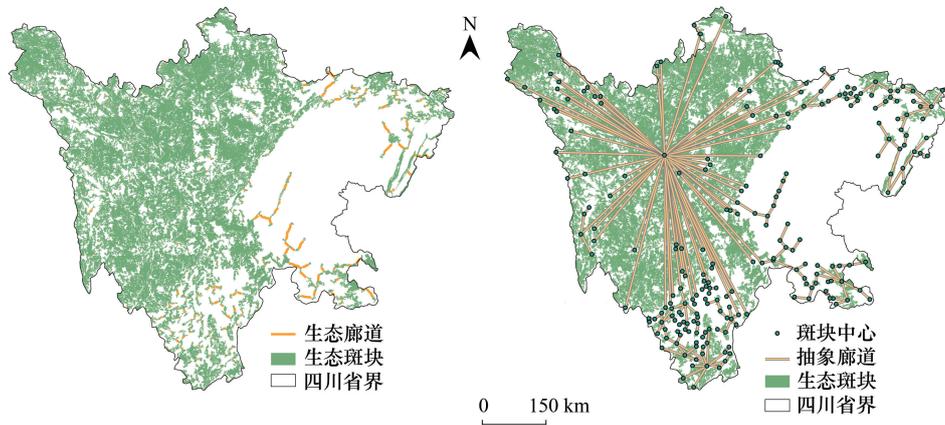


图2 生态廊道分布图与抽象示意图

Fig.2 Distribution of ecological corridors and its schematic diagram

对所有斑块分别进行度、介数、接近数和脆弱性指标计算,所得结果作为 TOPSIS 的输入,得到斑块重要性序列。基于该序列进行有序样品聚类时,首先以类内离差平方和 (W) 最优为确定分级数目 (L) 的依据。当 L 较小时, W 随 L 的增大而迅速降低,而在 L 大于 6 后, W 基本不随 L 增大而发生改变。考虑到分级评价往往采用单数级别,以便直观认识评价对象的上、中、下等级。我们将类间差异较小的第 5、6 层级的斑块合并为同一层级,最终形成 5 级斑块重要性层次(表 3),层级排名越靠前的斑块重要程度越高。

整体上高层级斑块主要位于全省西北部和中部,低层级斑块分布于全省边缘,主要集中于南部和东部的城市建成区周边(图 3)。斑块重要性层级的空间分布受到生态斑块和景观阻力值分布的共同影响。在四川西北部和中部,生态斑块分布广袤,较低的景观阻力值促进了斑块之间的生态过程,斑块对于景观连接度的贡献较高,因此高层级斑块多集中于此,成为生物的主要栖息地和物质能量交换的场所。对于全省边缘地区尤

击有着较强的抵御力,而难以承受对中枢节点的蓄意攻击。

层级 1 的斑块位于四川省西北部,植被覆盖广袤,是生态网络中的中枢斑块(图 2)。该层级斑块大而连片,可为多物种提供生境。但近几十年来,川西北地区约占全省 5% 的物种已灭绝,10%—20% 的物种濒危^[26]。根据中枢节点难以承受蓄意扰动的特点,这里需要减少人类活动的影响以维护生态环境稳定。建议制定严格的保护措施,减少人为扰动以保存该地区斑块的天然状态,以便其为物种提供稳定的活动范围和避难所^[57],以及持续的生态系统服务,并对生态斑块的破碎程度等性质进行动态监测。层级 2 斑块对景观连接度贡献较高,处在层级 1 斑块的南缘,建议通过修建生态廊道以促进其与周边斑块的物质、能量、信息交流,巩固该层级斑块现有的生态优势。层级 3、4 包含的斑块的空间分布相近,主要分布于东部和南部城市密集区周边。建议该区域协调经济发展和生态保护,优化产业结构和布局,注重扶持对环境破坏小、附加值高的绿色产业。此外,对于此类位于城区周边的生态斑块,还可考虑构建生态公园,发挥其观赏功能的同时帮助缓解城市热岛效应。层级 5 斑块数量达 190 个,但面积仅占全部生态斑块的 10% 左右。该层级斑块细碎,分布零散,主要分布在全省边缘地区。它们在大尺度生态网络中对网络整体发挥的连接性作用有限,且易受外界扰动影响而发生损失或消亡。针对这类斑块的管理应基于更精细尺度的研究和分析,探寻斑块的局部生态效益。例如,本研究从宏观角度出发,发现层级 5 中分布于高层级斑块四周的斑块,可通过建立生态廊道成为大斑块之间的垫脚石并起到阻止生态干扰传播的作用,但具体决策应综合考量区域生态和资金的实际情况。

4 结论与讨论

(1) 本研究提供了一套定量分析生态斑块重要性的新思路和新方法。本文结合最低成本路径和最小生成树构建了四川省野生动物复合种群栖息地保护网络,基于复杂网络理论选取 4 个连接度测度指标,结合综合评价方法对斑块在网络中对景观连接度的重要性进行了层级划分。整体上高层级斑块主要位于全省西北部和中部,植被覆盖广泛,成为生物物种的主要栖息地,需要严格保护并减少人为扰动;低层级斑块分布于全省边缘,主要集中于南部和东部的城市建成区周边,斑块细碎且分布零散,易受外界扰动影响,需要各地通过发展绿色产业、建设生态公园等措施协调经济发展和生态保护。研究结果可为有限资源下的生态保护工作提供依据。

(2) 本文关注省级尺度的生态斑块重要性评价,旨在从宏观和整体视角认识四川省的斑块重要性空间分布,明确对景观连接度起关键作用的区域,为未来四川省物种保护和景观规划提供参考。在不同尺度下构建和优化生态网络,是维持与改善区域生态环境的有效方法之一^[58]。本研究框架亦具有迁移灵活性,可扩展至其他尺度的生态空间评价研究。

(3) 对于未来研究,可在以下方面进行探讨:①本研究中所用指标在评价景观要素连接度的重要性方面代表性较强,能在一定程度上为区域斑块重要性探索提供思路。今后可根据实际需要,在指标体系中加入如景观指数等的其他指标,以实现更为灵活、全面的斑块重要性评价,协助区域可持续发展;②本研究在进行有序样品聚类时,从类内离差平方和最优的角度建议对生态斑块划分为 5 个层级,但在实际生态保护工作中,还可以根据资源量、工期要求等实际因素灵活调整分级数目,从而科学引导不同资源水平下的分级管理规划。

参考文献 (References):

- [1] Canedoli C, Crocco F, Comolli R, Padoa-Schioppa E. Landscape fragmentation and urban sprawl in the urban region of Milan. *Landscape Research*, 2018, 43(5): 632-651.
- [2] 吴昌广,周志翔,王鹏程,肖文发,滕明君. 景观连接度的概念、度量及其应用. *生态学报*, 2010, 30(7): 1903-1910.
- [3] 尹海伟,孔繁花,祈毅,王红扬,周艳妮,秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [4] 张景华,吴志峰,吕志强,刘晓南,程兰. 基于景观连接度的斑块分级的尺度效应. *生态环境*, 2008, 17(5): 1926-1930.
- [5] Ayram C A C, Mendoza M E, Etter A, Salicrup D R P. Potential distribution of mountain cloud forest in michoacan, mexico: prioritization for conservation in the context of landscape connectivity. *Environmental Management*, 2017, 60(1): 86-103.

- [6] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 童笑笑, 周文佐, 陈若漪, 张超林. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展. 生态学报, 2017, 37(10): 3243-3255.
- [7] Herrera J M, Alagador D, Salgueiro P, Mira A. A distribution-oriented approach to support landscape connectivity for ecologically distinct bird species. PLoS One, 2018, 13(4): e0194848.
- [8] Foltete J C. A parcel-based graph to match connectivity analysis with field action in agricultural landscapes: is node removal a reliable method? Landscape and Urban Planning, 2018, 178: 32-42.
- [9] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [10] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. 生态学报, 2014, 34(1): 190-200.
- [11] Urban D, Keitt T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. Ecology, 2001, 82(5): 1205-1218.
- [12] Jordán F, Báldi A, Orci K M, Rácz I, Varga Z. Characterizing the importance of habitat patches and corridors in maintaining the landscape connectivity of a *Pholidoptera transsylvanica* (Orthoptera) metapopulation. Landscape Ecology, 2003, 18(1): 83-92.
- [13] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. Landscape Ecology, 2006, 21(7): 959-967.
- [14] Minor E S, Urban D L. Graph theory as a proxy for spatially explicit population models in conservation planning. Ecological Applications, 2007, 17(6): 1771-1782.
- [15] 陈杰, 梁国付, 丁圣彦. 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例. 生态学报, 2012, 32(12): 3773-3781.
- [16] 冯姗姗, 常江, 侯伟. GI 引导下的采煤塌陷地生态恢复优先级评价. 生态学报, 2016, 36(9): 2724-2731.
- [17] 张宇, 李丽, 吴巩固, 周跃, 覃顺萍, 王小明. 基于生境斑块的滇金丝猴景观连接度分析. 生态学报, 2016, 36(1): 51-58.
- [18] 邱瑶, 常青, 王静. 基于 MSPA 的城市绿色基础设施网络规划——以深圳市为例. 中国园林, 2013, 29(05): 104-108.
- [19] 吴银鹏, 王倩娜, 罗言云. 基于 MSPA 的成都市绿色基础设施网络结构特征研究. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 260-265.
- [20] 方懿. 四川省林业自然保护区的土地利用现状. 四川林业科技, 2019, 40(2): 80-83.
- [21] 王成栋. 四川摸清“生态禁区”家底: 自然保护区 519 处, 占全省面积的 23.3%. [2019-06-28]. http://www.sohu.com/a/301420360_207224.
- [22] 陈俐谋. 四川人口城市化与土地城市化耦合发展关系研究. 成都师范学院学报, 2017, 33(9): 58-63.
- [23] 张颖, 陈尚书, 汪晓龙. 四川水土保持依托改革开放持续发展. 中国水土保持, 2018, 436(7): 3-6.
- [24] 徐梦佳, 刘冬, 葛峰, 林乃峰. 长江经济带典型生态脆弱区生态修复和保护现状及对策研究. 环境保护, 2017, 45(16): 50-53.
- [25] 李荔, 廖成云, 王撼, 桂林华. 四川省生物多样性保护现状与对策. 四川林勘设计, 2008, (4): 54-57.
- [26] 王芳. 四川省生物多样性保护. 环境研究与监测, 2008, 21(1): 50-52, 55-55.
- [27] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 张殿芳. 气候变化背景下四川省气候资源变化趋势分析. 资源科学, 2011, 33(7): 1310-1316.
- [28] 罗强. 城乡统筹背景下的四川省城市化发展研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [29] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [30] 袁春霞, 杨莉芸. 新型城镇化背景下四川城镇化发展路径选择. 成都行政学院学报, 2016, (3): 47-52, 81-81.
- [31] 尚志海, 刘希林. 自然灾害生态环境风险及其评价——以汶川地震极重灾区次生泥石流灾害为例. 中国安全科学学报, 2010, 20(9): 3-8.
- [32] 姚镇海, 邱新法, 施国萍, 张喜亮. 我国近 10 年月平均 NDVI 空间分布特征分析. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 181-186.
- [33] 郑杰, 冯文兰, 牛晓俊, 何炳伟. 四川省植被变化及其与气象因子的相关性分析. 水土保持通报, 2016, 36(2): 99-104.
- [34] 杜士强, 于德永. 城市生态基础设施及其构建原则. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1646-1654.
- [35] Yu D Y, Xun B, Shi P J, Shao H B, Liu Y P. Ecological restoration planning based on connectivity in an urban area. Ecological Engineering, 2012, 46: 24-33.
- [36] 刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 成方妍, 张月秋, 董世魁. 景观生态网络研究进展. 生态学报, 2017, 37(12): 3947-3956.
- [37] 许文雯, 孙翔, 朱晓东, 宗跃光, 李杨帆. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别. 生态学报, 2012, 32(4): 1264-1272.
- [38] Matthews M J, O'connor S, Cole R S. Database for the New York State urban wildlife habitat inventory. Landscape and Urban Planning, 1988, 15(1/2): 23-37.
- [39] Gurrutxaga M, Rubio L, Saura S. Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: a transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). Landscape and Urban Planning, 2011, 101(4): 310-320.
- [40] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [41] 陈春娣, 吴胜军, Douglas M C, 吕明权, 温兆飞, 姜毅, 陈吉龙. 阻力赋值对景观连接模拟的影响. 生态学报, 2015, 35(22): 7367-7376.
- [42] Weber T, Sloan A, Wolf J. Maryland's Green Infrastructure Assessment: development of a comprehensive approach to land conservation. Landscape

- and Urban Planning, 2006, 77(1/2): 94-110.
- [43] 蔡娇楠, 孟妮娜, 柴壮壮, 王安东. 基于最小生成树算法的建筑物聚类. 测绘, 2017, 40(6): 247-250.
- [44] 任晓龙, 吕琳媛. 网络重要节点排序方法综述. 科学通报, 2014, 59(13): 1175-1197.
- [45] Estrada E, Bodin Ö. Using network centrality measures to manage landscape connectivity. Ecological Applications, 2008, 18(7): 1810-1825.
- [46] 司晓静. 复杂网络中节点重要性排序的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [47] 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络. 北京: 高等教育出版社, 2009: 123-124.
- [48] 张义国. 基于逼近理想点法电网运行安全性评价. 电气技术, 2011, (8): 25-28.
- [49] 常颖. 基于 AHP-TOPSIS 的 Z 物流公司核心竞争力评价及提升策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [50] 刘德玉, 丛凯, 魏洁, 张伟, 侯燕军, 何斌. 基于理想点法的武都区北山泥石流危险度评价. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(2): 7-11.
- [51] 潘俊, 李虹雪, 李常虹. 基于区间型逼近理想点法的水环境安全评价. 水资源保护, 2013, 29(1): 6-9.
- [52] 黄广远, 徐程扬, 朱解放, 毛斌. 基于层次分析法和逼近理想解排序法的高校校园绿地景观评价. 东北林业大学学报, 2012, 40(9): 113-115, 123-123.
- [53] 李守奎, 杨柳扬, 赵庆红, 王明明. 有序样品聚类分析方法在花开左组划分中的应用. 云南地质, 2017, 36(3): 327-331.
- [54] 赵宏林, 王风英, 王丽梅, 孙红, 钟宏伟. 用有序样品聚类法建立蒙古族 7—18 岁学生腰围的参考值. 数理医药学杂志, 2016, 29(9): 1330-1332.
- [55] 翁国庆. 基于有序样本聚类分析法和 Logistic 模型的闽楠苗高年生长规律研究. 安徽农学通报, 2016, 22(16): 82-83, 122-122.
- [56] 苏子友. 川西南山地区生态足迹和生态承载力动态变化分析. 四川林业科技, 2016, 37(4): 39-42.
- [57] Forman R T T. Land Mosaics: the Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 223-234.
- [58] 颜文涛, 黄欣, 王云才. 绿色基础设施的洪水调节服务供需测度研究进展. 生态学报, 2019, 39(4): 1165-1177.