

DOI: 10.5846/stxb201904040660

张玥, 许端阳, 李霞, 张晓宇, 王小博, 王绍强. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别. 生态学报, 2020, 40(6): 1933-1943.

Zhang Y, Xu D Y, Li X, Zhang X Y, Wang X B, Wang S Q. Construction of ecological corridors and identification of key nodes in the core area of China-Laos transportation corridors. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1933-1943.

中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别

张 玥^{1,2}, 许端阳^{1,*}, 李 霞³, 张晓宇^{1,2}, 王小博^{1,2}, 王绍强^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035

摘要: 中-老交通走廊建设在促进中国与东盟国家互联互通的同时, 也会对区域生态安全造成巨大压力; 构建生态廊道对于修复破碎景观、保护生物多样性具有十分重要的意义。基于“源地-廊道-节点”的研究框架, 结合生态系统服务、景观连通性和生态敏感性 3 个指标划分生态斑块等级, 综合考虑生态斑块等级和中-老交通走廊核心区重点保护物种活动特性识别重要生态源地, 利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据改进基于地类赋值的基本生态阻力系数, 运用最小累积阻力模型判定生态廊道走向, 并结合水文分析方法和 Google Earth 判定关键生态节点。研究表明: ①中-老交通走廊核心区生态源地面积为 20243.74 km², 占研究区总面积的 14.13%, 以林地、灌木为主要土地覆被类型, 主要分布在云南省的普洱市以及老挝的琅南塔省和乌多姆塞省。②生态廊道总长度为 3645.81 km, 其中关键廊道长度为 1397.78 km, 主要分布在普洱市和乌多姆塞省, 生态廊道与生态源地大致构成了一个环形闭合区域, 能够有效促进生物物种迁徙和物质能量交流。③关键生态节点中战略点有 5 处, 断裂点有 9 处, 暂歇点有 16 处。

关键词: 中-老交通走廊; 生态廊道; 生态源地; 生态节点; 最小累积阻力模型

Construction of ecological corridors and identification of key nodes in the core area of China-Laos transportation corridors

ZHANG Yue^{1,2}, XU Duanyang^{1,*}, LI Xia³, ZHANG Xiaoyu^{1,2}, WANG Xiaobo^{1,2}, WANG Shaoqiang^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Foreign Cooperation and Exchange Center of Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China

Abstract: With the deepening of “The Belt and Road” strategy, the construction of China-Laos transportation corridors marked by China-Laos Railway and Kunming-Bangkok Road are developing rapidly. The construction of China-Laos transportation corridors can promote cooperation and communication between China and other ASEAN countries. Nevertheless, they may have the negative influence on regional landscape pattern, functions, services, biodiversity, and the migration of species. The ecological corridors have many service functions at different landscape scales, such as slowing down soil erosion, fixing sand and preventing flood, and maintaining biodiversity. Therefore, the construction of ecological corridors and identification of key nodes are of great significance for the restoration of the broken landscape in the core area of China-Laos transportation corridors and the protection of regional ecological security. Based on research framework of “source-corridor-node”, we divided ecological patches according to three indexes: importance of ecosystem services, landscape connectivity, and ecological sensitivity in the core area of China-Laos transportation corridors. Furthermore, we

基金项目: 绿色澜湄计划; 中老交通廊道与生态廊道建设的遥感监测; 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20010301)

收稿日期: 2019-04-04; **网络出版日期:** 2019-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xudy@igsnrr.ac.cn

identified important ecological sources on the basis of the level of ecological patches and the activity characteristics of key protected species. We used the minimum cumulative resistance model to identify the ecological corridors, and used the hydrological analysis method and Google Earth to determine the key ecological nodes. The results illustrated that the area of ecological sources was 20243.74 km², which accounted for 14.13% of the total area. The main land cover types of ecological sources were woodland and shrub, which were mainly distributed in Pu'er city, Louang Namtha Province, and Udomxai Province. The total length of the ecological corridors was 3645.81 km, of which the key corridors was 1397.78 km, mainly distributed in Pu'er city and Udomxai Province. The ecological corridors and ecological sources constituted an annular closed area, which would effectively promote the migration of biological species and the exchange of material and energy. Among the key ecological nodes, there were 5 strategic nodes, 9 breaking nodes, and 16 pause nodes.

Key Words: China-Laos transportation corridors; ecological corridor; ecological source; ecological node; MCR model

交通基础设施联通是促进中国与老挝等东盟国家协同发展的重要举措,在两国进行次区域经济合作中具有关键地位。在“一带一路”倡议深入推进过程中,以中-老铁路、昆曼公路为标志的中-老交通走廊建设快速发展。中-老交通走廊在便利城市、区域以及国家间经济文化活动互联互通的同时,也将对区域的景观格局、功能、服务以及生物多样性、物种的迁徙流动等产生剧烈影响。生态廊道在景观尺度上具有多种服务功能,如减缓水土流失、固沙防洪、维持生物多样性等。因此,以生态廊道恢复建设为重点,科学规划设计生态廊道走向,识别关键节点,提出生态环境修复与建设方案,对于修复中-老交通走廊核心区破碎景观以及保障区域生态安全具有重要意义。

生态廊道的概念最早出现在 19 世纪后期的美国;随着生态环境保护与可持续发展理念在全球范围的认可与实践,生态廊道方面的研究已经从规划绿地公园系统,进展到构建满足区域关键物种需求的廊道,成为景观生态学、保护生物学、城市规划设计等跨学科交叉研究的前沿与热点^[1-3]。国际上已经有许多国家和地区进行大规模的生态廊道工程建设,如北美生态廊道建设、泛欧绿道工程^[4-5]等。我国最早的生态廊道为上世纪“三北”防风固沙带工程;进入 21 世纪,以青藏铁路为标志的重大工程修建过程中都科学规划并设计生态廊道,在保障区域生态安全、维护生物多样性等方面发挥了重要作用^[6]。随着生态廊道研究的发展,基于景观生态学理论、以优化景观整体的生态安全格局研究逐渐形成完善,并在景观规划、旅游规划、生物多样性保护、减灾防灾与土地管理规划等领域得到广泛应用^[7-10]。国际上在生态安全格局方面的研究较多侧重社会、经济与自然系统之间的协调耦合分析,以及生态系统服务与生物多样性权衡等^[11-12];国内则多侧重于区域生态安全等级的判定与生态安全格局的规划识别等方面^[13-14]。

近年来,国内外关于生态廊道构建及关键节点识别方面的研究已取得积极进展。生态廊道的构建主要以“斑块-廊道-基质”理论为基础,除基于生态约束诊断的单要素生态安全格局叠加方法外,应用最小累积阻力模型进行廊道走向的模拟已成为生态廊道研究的主流范式,研究尺度多以省域、城市区域为主^[15-16]。识别生态源地和构建阻力面是提取生态廊道的重要前提。在生态源地的识别方法上,一般通过直接选取自然保护区、风景名胜区等区域,或从生态重要性评价、生态适宜性评价等方面展开^[17-19]。构建阻力面时一般将相应阻力系数赋予不同的土地覆被类型,或者在生态足迹或生态系统服务基础上确定^[20]。关键生态节点的提取研究主要通过形态学空间格局模型、网络分析、景观阻力分析等方法,或者基于生态阻力面模型中控制生态流的最大与最小成本路径的相交点来确定^[21-22]。以往研究为生态廊道及关键节点识别奠定了重要方法学基础,但也存在一些问题。在生态系统功能退化风险或重要性等层面识别生态源地的过程中忽略了外在环境对生态系统的影响,致使源地的选取依据略显单薄;运用地类直接赋值法提取的生态廊道缺乏客观性,虽然有学者尝试引入不透水表面指数或地形坡度等因素改进阻力系数均质性^[23],却未将人类活动影响纳入生态阻力空间格局的确定过程中。

中-老交通走廊核心区位于中国云南与老挝接壤地区,以野生动植物资源丰富为突出特点,但近年来由于

人为干扰强度的增加致使区域景观质量下降、栖息地环境区域破碎化。基于此,本文以“源地-廊道-节点”为研究框架,综合考虑生态系统服务、景观连通性与生态敏感性三个指标识别重要生态源地,利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据改进基于地类赋值的基本生态阻力系数,运用 MCR 模型规划生态廊道走向,并结合水文分析方法和 Google Earth 判定关键生态节点,为维护中-老交通走廊核心区生态安全提供科技支撑。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

中-老交通走廊核心区指中-老交通走廊(主要是昆曼公路中国—老挝段和中-老铁路)经过地区,地理坐标为 $17^{\circ}58'—24^{\circ}53'N$, $99^{\circ}09'—103^{\circ}24'E$ (图 1)。研究区包括中国云南省的玉溪市、普洱市、西双版纳傣族自治州三个地级行政区以及老挝的琅南塔省、博胶省、乌多姆塞省、琅勃拉省、万象省和万象市六个省级行政区,总人口 872 万人,土地总面积为 143099 km^2 ,中-老边境长约 710 km。地处热带季风与亚热带季风两个气候区,年平均气温约 26°C ,雨量充沛但分配不均,多年平均降雨量为 2000 mm,以夏秋两季为主。地貌类型以高原和山地为主,平均海拔为 1094 m。

中-老交通走廊核心区土地覆被类型中林地、灌木、草地和水体的面积占研究区总面积的 81.85%,居民用地仅占 0.9%(图 1);作为生物多样性热点区,该区域是亚洲象、黑冠长臂猿、猕猴等珍稀物种的主要栖息地,在开发利用珍稀野生资源方面享有独一无二的优势和地位。近年来随着交通基础设施建设的不断发展,生态压力逐渐加重,集中表现为生境面积减少和景观趋于破碎化。

1.2 数据来源与处理

本研究涉及的数据为 DEM 数据、NDVI 数据、气候数据、土壤质地数据、土地利用/覆被数据、自然保护区与夜间灯光数据。其中,中-老交通走廊核心区 DEM 数字高程数据,空间分辨率为 90 m,来源于 SRTM(<http://srtm.csi.cgiar.org/>),并由此生成坡度数据;NDVI 数据源自美国国家航空航天局 NASA 提供的 2017 年 MODIS 16 d 合成数据(MOD13Q1),空间分辨率为 500 m;年均降水数据来源于 TerraClimate 高分辨率气候栅格数据集(<https://terra.nasa.gov/data>),空间分辨率为 1000 m;土壤质地数据分辨率为 1000 m,源自世界土壤数据库(HWSD-v1.2);土地利用/覆被数据为 2017 年 30 m 分辨率的 LandsatOLI 遥感图像解译结果,影像源自美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov>);自然保护区、水系及行政区边界等数据来源于 Open Street Map(<https://www.openstreetmap.org/copyright>);DMSP_OLS 夜间灯光数据源自 DMSPF18 卫星(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>),空间分辨率为 1000 m。为便于模型运算,同时考虑到所有数据中的最低分辨率,本研究所用数据统一重采样为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的栅格数据,投影方式为 WGS_1984_UTM_Zone_47N。

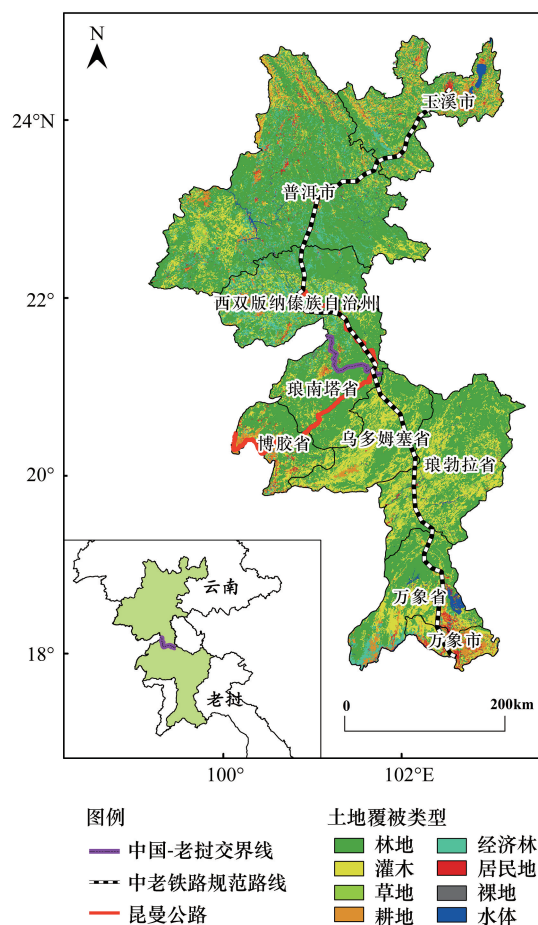


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

2 研究方法

2.1 生态源地识别

生态源地作为生物扩散和迁移的集聚点,通常具有提供重要生态系统服务、迅速响应环境变化以及维持稳定的生态系统结构等重要功能^[24]。基于此,本研究选取生态系统服务、景观连通性、生态敏感性三个指标综合识别重要生态源地。考虑到生态廊道建设需求以及中-老交通走廊核心区野生生物资源极其丰富的实际情况,将上述3个指标以0.4、0.3、0.3的权重加和,按照自然间断点分类法将计算结果划分为极重要斑块、一般重要斑块与不重要斑块三类。根据中-老交通走廊核心区重点保护物种如亚洲象、印度支那虎、黑冠长臂猿、猕猴等的适宜栖息地面积^[25-26],选取极重要斑块中栖息地面积大于100 km²的斑块作为生态源地。

$$P_i = \alpha E_i + \beta P_i + \gamma S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为生态源地重要性指数; E_i 为生态系统服务指数; P_i 为景观连通性指数; S_i 为生态系统敏感性指数; α, β, γ 为对应的权重。

2.1.1 生态系统服务

生态系统服务是指人类社会从生态系统中以各种直接或间接途径获取的利益^[27]。综合考虑中-老交通走廊核心区生态环境现状与未来发展需求,本研究选取土壤保持、水源涵养、固碳释氧、生境质量四项功能衡量生态系统服务,四项服务功能的评价均基于 InVEST 模型开展^[28-29]。综合考虑中-老交通走廊核心区的植被特征及其在调节区域气候、维持区域内独特野生动植物资源生境方面的重要作用,分别赋予固碳释氧、生境质量功能0.3、0.3的权重,赋予土壤保持、水源涵养功能0.2、0.2的权重,通过图层叠加得到综合生态系统服务质量分布。

$$E_i = aT_i + bW_i + cO_i + dL_i \quad (2)$$

式中, T_i 为土壤保持指数; W_i 为水源涵养指数; O_i 为固碳释氧指数; L_i 为生境质量指数; a, b, c, d 为对应的权重。

2.1.2 景观连通性

景观连通性是指生态流在景观基质中运行的连通程度,可通过计算可能连通性指数 (Probability of Connectivity, PC) 衡量各栖息地斑块在生态系统中物质移动和能量转化的重要程度^[30]。PC 指数的计算公式为:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} \sum_{j=1}^{j=m} H_i \times H_j \times C_{ij}}{Z^2} \quad (3)$$

式中, m 代表栖息地的数目; H_i 和 H_j 分别表示栖息地 i 和 j 的面积; Z 是指研究区面积; C_{ij} 是栖息地 i 和 j 之间潜在路径景观连通性中的最大值。

本文通过 ArcGIS10.5 和 Conefor2.6,考虑到中-老交通走廊核心区重要保护珍稀物种所需生境范围较大,选取栖息地面积大于10 km²的145个林、灌、草栖息地斑块计算景观连通性指数。

2.1.3 生态敏感性

生态敏感性是指生态系统在外界环境变化和人类干扰影响下失衡的可能性^[31]。生态敏感性评价的关键步骤是构建合适的评价体系。在充分考虑中-老交通走廊核心区实际情况的基础上,本文选取土地覆被类型、地形坡度、植被覆盖指数、水体功能、自然保护区5个因素作为生态敏感性的评价因子,以此进行定量评价。生态敏感性因子及其分级如表1所示。综合生态敏感性指数计算公式为:

$$S_i = \sum_{i=1}^n C_i W_i (i = 1, 2, 3, 4, 5; n = 5) \quad (4)$$

式中, S 指综合生态敏感性指数; C_i 为单因子生态敏感性指数; W_i 是各个生态敏感性因子的权重。

表 1 生态敏感性评价指标体系

Table 1 Ecological sensitivity evaluation index system

评价因子 The evaluation factor	权重 Weight	不敏感 Insensitivity	低度敏感 Low sensitivity	中度敏感 Moderate sensitivity	高度敏感 High sensitivity	极度敏感 Extreme sensitivity
		1	3	5	7	9
土地覆被 Land cover	0.15	建设用地	农用地	草地	灌木、水域	林地
地形坡度 Slope	0.2	0—7°	7°—14°	14°—21°	21°—28°	>28°
植被指数 NDVI (Normalized difference vegetation index)	0.2	<0.29	0.29—0.57	0.57—0.67	0.67—0.73	>0.73
水体功能 Water function	0.2	>2000 m	1500—2000 m	1000—1500 m	500—1000 m	500 m
自然保护区 Reserve	0.25	>2000 m	1000—2000 m	500—1000 m	200—500 m	200 m

1、3、5、7、9 表示敏感性等级,其中 1 表示不敏感,3 表示低度敏感、5 表示中度敏感、7 表示高度敏感、9 表示极度敏感

2.2 生态阻力面构建

具有不同植被覆盖程度的景观基质会对生物迁徙造成阻碍,根据以往研究成果,本文将中-老交通走廊核心区各土地覆被类型的基本阻力系数设定在 1—500 之间^[1-2,21-23](表 2)。

表 2 基本生态阻力系数表

Table 2 Basic ecological resistance coefficient table

生态系统类型 Ecosystem type	林地 Forest	灌木 Shrub	草地 Grassland	经济林 Economic forest	耕地 Cultivated land	水体 Water	裸地 Bare land	居民地 Residential land
基本阻力系数 Basic resistance coefficient	1	10	20	30	30	50	300	500

考虑到对相同土地覆被类型赋予唯一生态阻力系数将模糊不同强度人类活动的影响,本文选取对人为干扰程度具有较高代表性的夜间灯光数据改进初步设定的生态阻力面^[32]。

$$Y_i' = Y_i \times \frac{D_i}{D_a} \tag{5}$$

式中, Y_i' 指通过夜间灯光数据改进的阻力值; D_i 代表景观单元 i 的夜间灯光指数; D_a 是景观单元 i 所在土地覆被类型 a 的平均夜间灯光指数; Y_i 为表 2 所示的基本阻力系数。

2.3 生态廊道判定

在综合分析以往学者提出的生态廊道提取方法基础上,本文借助 Knaapen 创立的 MCR (Minimum Cumulative Resistance)模型识别生态廊道。该模型的核心算法是在生态阻力面基础上计算生物从“源”移动到“汇”需要花费的成本,从而模拟物种通过景观基质的潜在路径^[33]。

$$X = y \min \sum_{j=n}^{i=m} A_{ij} \times Y_i' \tag{6}$$

式中, X 表示最小累积阻力值; A_{ij} 指生态源地 j 与景观单元 i 之间的空间距离; Y_i' 与公式 5 含义相同; y 为生态过程与最小累积阻力的函数。

分别将每个源地斑块的中心点看作“源”,将其余的中心点看作“汇”,通过 ArcGIS 10.5 中的成本距离模块计算源地斑块之间的最小成本路径,即潜在生态廊道。根据重要生态源地分布与研究区域土地利用方式,将连接主要生态源地以及能够构建区域生态安全网络的廊道定义为关键廊道。

2.4 关键生态节点识别

生态节点是指景观基质中对于生物的扩散或移动过程起到关键作用的位置^[24]。本研究中生态节点主要包括战略点、断裂点和暂歇点三类。战略点通常是指生态系统中生态流运行的最薄弱地段,即最小成本路径与最大成本路径的交汇点,对于物质流动与能量迁移具有控制意义,本文采用水文分析模块中提取分水岭的

方法获得生态流在景观阻力面运行中需要穿越的“山脊线”,并将其与生态廊道的交汇处定义为战略点;断裂点是生态廊道中人类活动较频繁、机动车流通较多的地段,本文结合研究区主要交通廊道(昆曼公路和中-老铁路)分布图识别生态断裂点;暂歇点是指连接较多生态廊道、能够为生物迁移扩散提供暂息功能的地段,在廊道网络中起到踏脚石和增加景观连接度的作用,本文选取各潜在生态廊道与廊道相交处作为暂歇点。将识别出的生态节点图层与 Google Earth 影像相叠加,以进一步明确关键节点附近区域的生态环境状况。

3 结果分析

3.1 生态源地识别

3.1.1 单一生态要素空间格局

中-老交通走廊核心区生态系统服务、景观连通性与生态敏感性分别呈现出明显的空间异质性(图2)。在生态系统服务方面,区内平均土壤保持量为 380 t/hm^2 ,其中普洱市、琅勃拉邦省在 430 t/hm^2 以上;平均水源涵养量为 991 mm ,其中西双版纳傣族自治州、琅勃拉邦省、乌多姆塞省、万象市和万象省高于 1000 mm ;平均固碳释氧量为 849 t/hm^2 ,其中西双版纳傣族自治州、普洱市、琅南塔省和博胶省均在 900 t/hm^2 以上;生境质量指数均在 0.6 以上,其中普洱市、琅勃拉邦省、乌多姆塞省和琅南塔省在 0.8 以上。研究区总体生态系统服务质量较高,平均生态系统服务指数为 0.52,这与该区域水热条件优越、植被茂密等自然情况相符。生态系统服务高值区主要分布在中-老交通走廊核心区中部地带,经济发展较快、人为活动干扰较大的地区生态系统服务指数较低。在景观连通性方面,中-老交通走廊核心区平均景观连通性指数为 30.74,以中-老边界为分界线,景观连通性高值区主要分布在研究区南部的老挝境内,低值区位于云南省涉及地区。就各行政区统计结果而言,老挝的乌多姆塞省、琅勃拉邦省和博胶省为景观连通性指数较高的地区,景观连通性指数均在 60 以上,这些地区植被呈集中连片分布,能够满足区域内大型哺乳动物的空间需求;普洱市、玉溪市、西双版纳傣族自治州以及万象市为景观连通性指数较低地区,不足 20,受人类活动与地形条件的影响,这些地区植被面积较少且零散分布。在生态敏感性方面,除万象市外,其他地区均有较多的林地覆盖;地形坡度大于 28° 的地区主要分布在无量山、哀牢山与老挝川圹高原附近;NDVI 大于 0.73 的地区基本位于中-老接壤地带;水体功能极度敏感地区分布在抚仙湖、景洪水库、糯扎渡水库、湄公河和南俄湖周围;自然保护区则主要位于西双版纳傣族自治州和琅南塔省。中-老交通走廊核心区平均生态敏感性指数为 3.94,生态敏感性高值区分布在中-老接壤地区中部地区,低值区主要位于人为干扰强度较大、建成区密度大的北部和南部地区。

3.1.2 重要生态源地

根据不同等级斑块面积统计结果可知极重要斑块面积为 41653.48 km^2 ,占研究区总面积的 29.08%(图3)。从空间分布上看,极重要斑块主要位于研究区的中-老边界附近,这些区域人为干扰较小,自然生态环境优越。除玉溪市和万象市外,其余行政区均有较多的极重要斑块分布,尤其是老挝境内的琅南塔省和乌多姆塞省。云南省普洱市由于无量山、哀牢山等地形因素作用,极重要斑块分布较为零散;西双版纳傣族自治州植被覆盖度较高但极重要斑块面积不多,主要是由于该行政区是我国第二大橡胶生产基地,大量橡胶林集中连片分布。将中-老交通走廊核心区 35 个国家级自然保护区与斑块等级分布叠加可发现,自然保护区基本都落入研究区极重要斑块范围内(图3)。

生态源地面积为 20243.74 km^2 ,占中-老交通走廊核心区总面积的 14.13%。从行政区划上看,生态源地主要位于云南省的普洱市以及老挝的琅南塔省和乌多姆塞省,分别占生态源地面积的 14.69%、19.09% 和 29.75%;玉溪市和万象市由于作为该区域的经济发展中心,且具有较多的耕地、经济林、居民地分布,使得极重要斑块面积非常少而零散分布,因此无生态源地分布(图4)。从土地覆被类型来看,生态源地以林地、灌木为主,两者占生态源地面积的 98.37%;草地次之,但仅占 1.09%;人为活动用地基本为不重要斑块。从图3可以看出,各行政区生态源地均以林地、灌木为主,只有乌多姆塞省有较多的草地分布。

3.2 生态廊道识别

在识别重要生态源地基础上,通过构建生态阻力面识别出中-老交通走廊核心区生态廊道空间走向

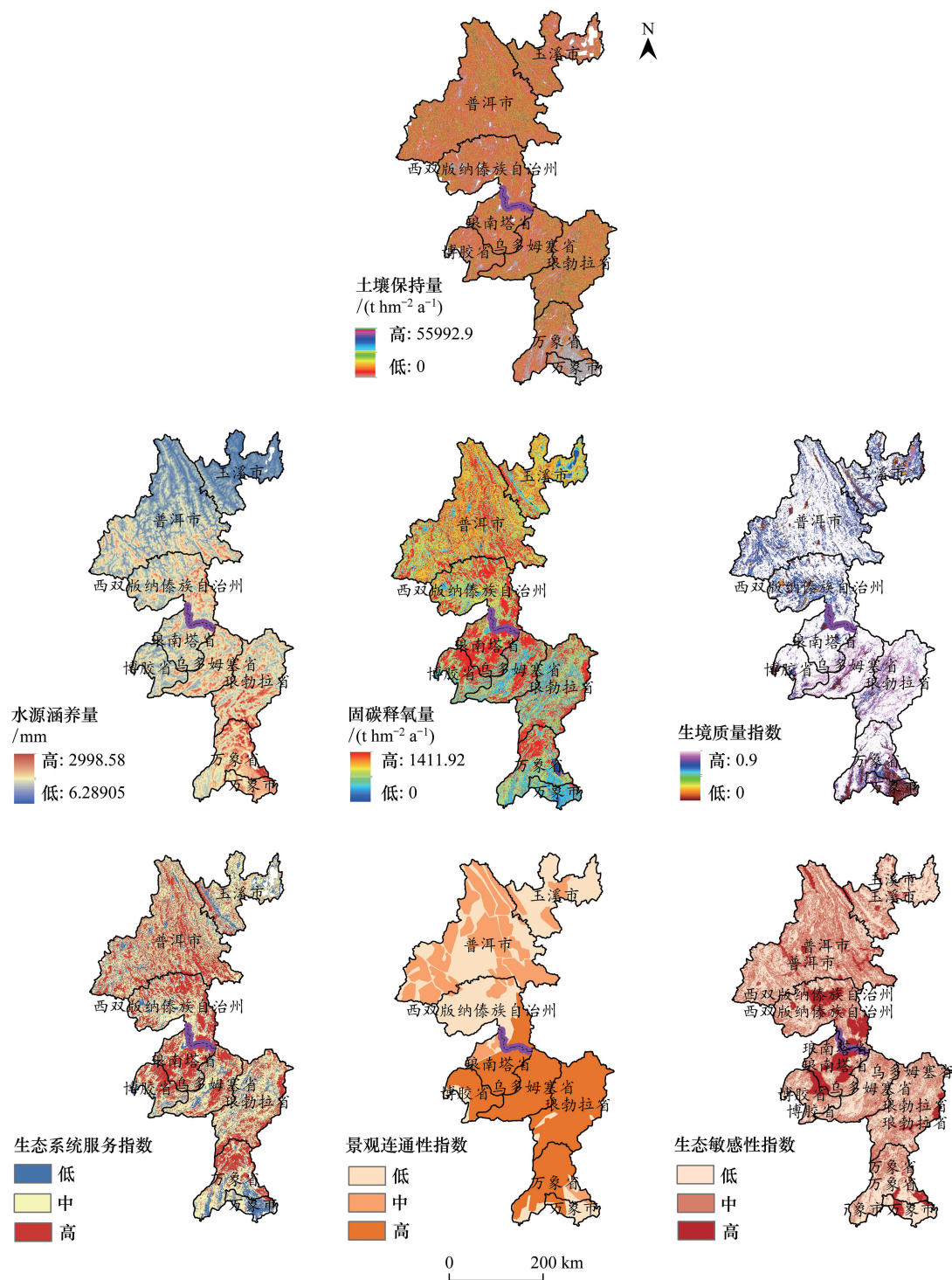


图2 中-老交通走廊核心区单一生态要素空间格局

Fig.2 Spatial pattern of single ecological elements in study area

(图4)。生态廊道大致为南北走向,贯穿整个研究区。具体可以分为两个主要组团,以中国-老挝分界线为中点,在中国境内和老挝境内分别形成两个环形闭合结构,其中涉及中国部分为岛屿型生态阻力面,玉溪市和西双版纳傣族自治州的南部为高阻力值地区,生态廊道主要分布在普洱市;涉及老挝部分为高原型阻力面,琅勃

拉邦省和万象市为高阻力值地区,生态廊道主要分布在乌多姆塞省和东部边缘地区。根据统计结果,中-老交通走廊核心区潜在生态廊道总长度为 3645.81 km,其中关键生态廊道总长度为 1397.78 km。各行政区潜在生态廊道长度分别为:普洱市 940.89 km,西双版纳傣族自治州 768.63 km,乌多姆塞省 546.24 km,琅勃拉邦省 537.07 km,万象省 366 km,琅南塔省 187.29 km。

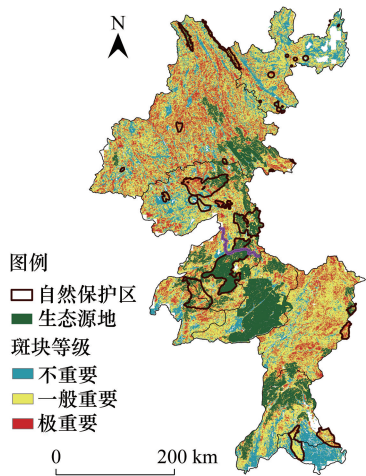


图 3 中-老交通走廊核心区生态源地分布

Fig.3 Distribution of ecological sources sources in study

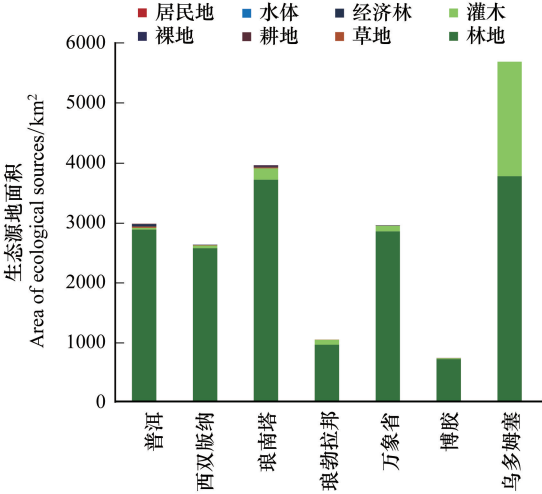


图 4 各行政区生态源地用地构成

Fig.4 Composition of ecological sources in each region

本研究在考虑研究区重要保护物种活动特征的基础上,参考前人研究成果并结合当地野生动物迁徙特征及需求^[34-36],将生态廊道宽度设为 1200 m。在确定的廊道最佳宽度范围内,将生态廊道与该区域土地覆被类型进行叠加分析,得到生态廊道用地构成如表 3 所示。潜在廊道覆盖地区 96%以上为林地、灌木和草地,还有少部分由经济林组成,极少部分穿过经济林、耕地、居住地等人为活动用地;关键廊道的组成与潜在廊道基本一致。在各行政区潜在生态廊道土地覆被类型组成中(图 5),老挝境内的琅南塔省、琅勃拉邦省、万象省以及乌多姆塞省几乎全部由林地、灌木和草地构成;西双版纳傣族自治州和普洱市大部分由林地、灌木和草地构成,还有少部分由经济林和耕地组成。

表 3 生态廊道用地构成/%

Table 3 Composition of ecological corridors

生态系统类型 Ecosystem type	林地 Forest	灌木 Shrub	草地 Grassland	经济林 Economic forest	耕地 Cultivated land	水体 Water	裸地 Bare land	居民地 Residential land
潜在廊道 Potential corridors	84.2	9.78	2.39	2.36	0.75	0.28	0.03	0.21
关键廊道 Key corridors	85.75	10.01	2.02	1.52	0.27	0.24	0.07	0.12

3.3 关键节点识别

本文判定出的关键生态节点如图 6 所示。其中,战略点有 5 处,主要位于云南省生态廊道附近耕地较多的区域;断裂点有 9 处,其中潜在生态廊道与昆曼公路相交形成的断裂点有 2 处,与中-老铁路规划路线交叉有 7 处;暂歇点有 16 处,主要分布在关键生态廊道区域,行政区划上主要位于西双版纳傣族自治州和乌多姆塞省。在战略点方面,生态战略点附近区域有较多的耕地分布,使之成为生态廊道中较难通过的地段;在断裂点方面,断裂点附近土地覆被类型大多以林地为主,但由于昆曼公路的建设造成的人为用地线性分布格局使

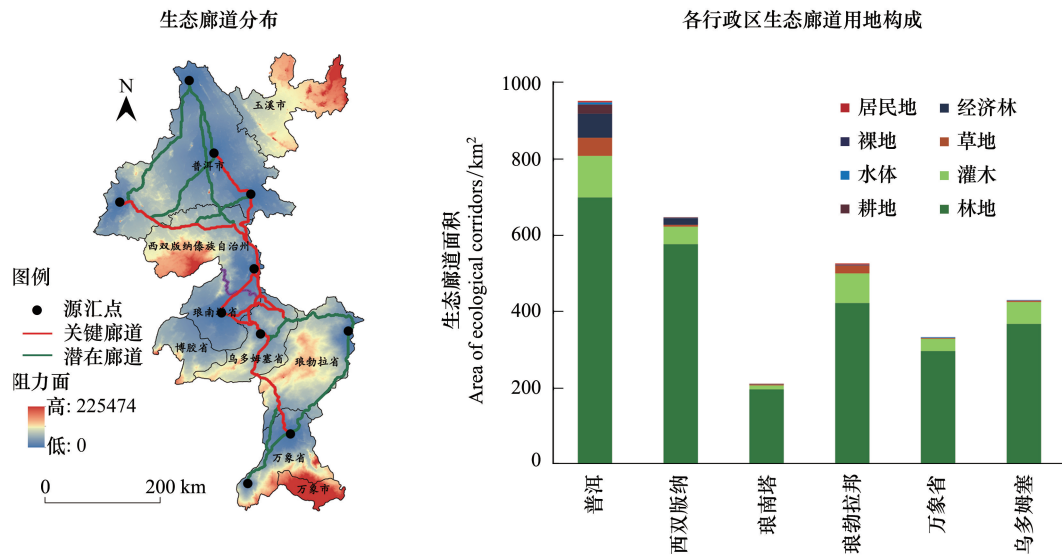


图5 研究区生态廊道分布

Fig.5 Distribution of ecological corridors

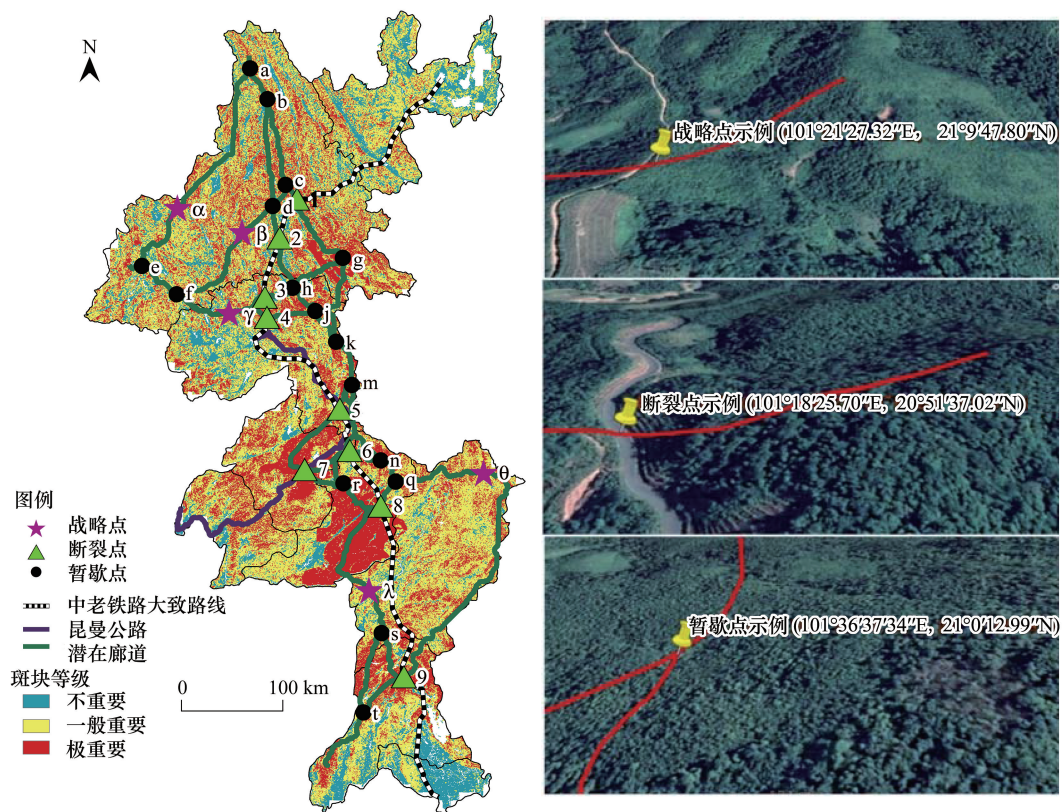


图6 研究区生态节点空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological points in study area

$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \lambda$ 表示战略点; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 表示断裂点; a, b, c, d, e, f, g, h, j, k, m, n, q, r, s, t 表示暂歇点

得原本完整的生境被隔离,区域破碎化的栖息地将会对生物迁移造成障碍;在暂歇点方面,暂歇点附近的土地覆被类型与断裂点相似,大多以林地为主,然而也有少数暂歇点分布在经济林、耕地等人类活动干扰较大的区

域,尤其是在橡胶林分布较多的西双版纳傣族自治州和普洱市。

4 讨论

本文识别的生态源地面积占比与前人研究结果相比较少^[37-40],主要是考虑了研究区重要保护物种的活动特征,从而依据斑块面积对识别出的极重要斑块进行筛选确定生态源地。中-老交通走廊核心区土地覆被类型中林、灌、草所占比例较大,野生动植物资源丰富,本文在生态源地基础上构建的生态廊道仅仅是满足该区域保护生物多样性的最低要求,生态廊道建设成本较低。此外,本文考虑到研究区亚洲象、印度支那虎、黑冠长臂猿等大中型哺乳动物迁徙需求,设定的生态廊道宽度略大于其他地区。

为区域内生物的迁徙移动提供可利用的安全路径是生态廊道最重要的功能,因此在实际建设生态廊道中应构建以林地为主的景观类型,灌木和草地为辅,尽量采用乡土植物,合理搭配不同树种,形成复层结构群落,充分发挥群落生态效益并具有景观美学价值。此外,研究区内原有的河道和植被廊道亦是物种移动的重要渠道,可与本文中提取的生态廊道交织起来,加强生态廊道缓冲区的保护与管理,形成网络状的生态廊道体系。生态战略点作为生态流的重要地段,应通过现存自然景观的维护与受破坏较大地段的修复实现景观流通的连续性。在生态节点附近区域,应尽量减少人类干扰,战略点附近可通过设立生态保护区、划定生态红线等方法保证完整性;断裂点范围内可借鉴相关实践经验,如中国青藏铁路修建过程中为保护牦牛、藏野驴等动物修建桥梁,通过设置天桥和地下通道等设施帮助动物迁移,同时加强警示标志、限速装置、声屏障、地形营造、人工水体和红外监测等野生动物通道配套设施建设;暂歇点范围内尽量不设置人工设施,此处生态廊道宽度应大于一般廊道地区,维护其生态功能的正常发挥。

不同生物对同一阻力值具有各异的反应,对于栖息地斑块、迁徙路径等均有不同的需求,由于难以获取中-老交通走廊核心区具体物种生活习性方面的资料,本文构建的生态廊道未必适合所有物种。在设定生态廊道宽度时未考虑特定物种的空间需求,可能会出现因宽度过窄或过宽影响生物迁移的问题。此外,在关键生态节点方面,应在考虑其空间位置的基础上增强节点面积、形态等方面的研究,提高实用性与客观性。未来应加强对中-老交通走廊核心区生物资料的收集和分析,进一步深入对关键生态节点规模和形状等空间形态的研究。

5 结论

本文在景观生态学中过程与格局耦合作用的原理基础上,以中-老交通走廊核心区为研究区,综合生态系统服务、景观连通性和生态敏感性 3 个指标识别重要生态源地,基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据改进基于地类赋值的基本生态阻力系数,运用 MCR 模型规划生态廊道走向,并结合水文分析方法和 Google Earth 判定关键生态节点。中-老交通走廊核心区极重要斑块面积为 41653.48 km²,占研究区总面积的 29.08%。生态源地面积为 20243.74 km²,占研究区总面积的 14.13%,主要位于云南省的普洱市以及老挝的琅南塔省和乌多姆塞省,分别占生态源地面积的 14.69%、19.09%和 29.75%,以林地、灌木为主要土地覆被类型,两者占生态源地总面积的 98.37%。生态廊道总长度为 3645.81 km,其中关键廊道长度为 1397.78 km,生态廊道与生态源地大致构成了一个环形闭合区域。关键生态节点中战略点有 5 处,断裂点有 9 处,暂歇点有 16 处。

参考文献 (References):

- [1] Tan KW. A greenway network for singapore. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 76(1/4): 45-66.
- [2] Rinaldo A, Gatto M, Rodriguez-Iturbe I. River networks as ecological corridors: a coherent ecohydrological perspective. *Advances in Water Resources*, 2018, 112: 27-58.
- [3] Chung M Y, López-Pujol J, Chung M G. The role of the Baekdudaegan (Korean Peninsula) as a major glacial refugium for plant species: a priority for conservation. *Biological Conservation*, 2017, 206: 236-248.
- [4] Jongman R H G, Bouwma R M, Griffioen A, Jones-Walters L, Van Doorn A M. The pan European ecological network: PEEN. *Landscape Ecology*, 2011, 26(3): 311-326.

- [5] Bowers K, McKnight M. Reestablishing a healthy and resilient North America-linking ecological restoration with continental habitat connectivity. *Ecological Restoration*, 2012, 30(4): 267-270.
- [6] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿锂. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [7] Peng J, Yang Y, Liu Y, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [8] 黄鑫, 曹学章, 张明, 邹娟. 基于最小累积阻力模型的内蒙古胜利煤田景观生态安全格局构建. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(1): 55-62.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Liu J G, Mooney H, Hull V, Davis S J, Gaskell J, Hertel T, Lubchenco J, Seto K C, Gleick P, Kremen C, Li S X. Systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347(6225): 1258832.
- [12] Motesharrei S, Rivas J, Kalnay E, Asrar G R, Busalacchi A J, Cahalan R F, Cane M A, Colwell R R, Feng K S, Franklin R S, Hubacek K, Miralles-Wilhelm F, Miyoshi T, Ruth M, Sagdeev R, Shirmohammadi A, Shukla J, Srebric J, Yakovenko V M, Zeng N. Modeling sustainability: population, inequality, consumption, and bidirectional coupling of the Earth and Human Systems. *National Science Review*, 2016, 3(4): 470-494.
- [13] Bai Y, Jiang B, Wang M, Li H, Alatalo J M, Huang S F. New ecological redline policy (ERP) to secure ecosystem services in China. *Land Use Policy*, 2016, 55: 348-351.
- [14] 黄隆杨, 刘胜华, 方莹, 邹磊. 基于“质量-风险-需求”框架的武汉市生态安全格局构建. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 615-626.
- [15] Li F, Ye Y P, Song B W, Wang R S. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: a case study from Changzhou, China. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 194-203.
- [16] Santos J S, Leite C C C, Viana J C C, dos Santos A R, Fernandes M M, de Souza Abreu V, do Nascimento T P, dos Santos L S, de Moura Fernandes M R, da Silva G F, de Mendonça A R. Delimitation of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 414-424.
- [17] Pierik M E, Dell'Acqua M, Confalonieri R, Bocchi S, Gomarasca S. Designing ecological corridors in a fragmented landscape: a fuzzy approach to circuit connectivity analysis. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 807-820.
- [18] Liang J, He X Y, Zeng G M, Zhong M Z, Gao X, Li X, Li X D, Wu H P, Feng C T, Xing W L, Fang Y L, Mo D. Integrating priority areas and ecological corridors into national network for conservation planning in China. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 22-29.
- [19] Closset-Kopp D, Wasof S, Decocq G. Using process-based indicator species to evaluate ecological corridors in fragmented landscapes. *Biological Conservation*, 2016, 201: 152-159.
- [20] Feist S E, Buhle E R, Baldwin D H, Spromberg J A, Damm S E, Davis J W, Scholz N L. Roads to ruin: conservation threats to a sentinel species across an urban gradient. *Ecological Applications*, 2017, 27(8): 2382-2396.
- [21] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化. *生态学报*, 2016, 36(21): 6969-6984.
- [22] 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.
- [23] 李晖, 易娜, 姚文璟, 王思琪, 李志英, 杨树华. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. *生态学报*, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [24] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [25] 刘鹏, 代娟, 曹大藩, 李志宏, 张立. 普洱市亚洲象栖息地适宜度评价. *生态学报*, 2016, 36(13): 4163-4170.
- [26] 程峰. 中国西黑冠长臂猿 (*Nomascus concolor*) 生境破碎化研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [27] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [28] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, Arrow K, Dasgupta P, Ehrlich P R, Folke C, Jansson A, Jansson B O, Kautsky N, Levin S, Lubchenco J, Mäler K G, Simpson D, Starrett D, Tilman D, Walker B. The value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, 289(5478): 395-396.
- [29] Bouguerra S, Jebari S. Identification and prioritization of sub-watersheds for land and water management using InVEST SDR model: Rmelriver basin, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(15): 348.
- [30] Bishop-Taylor R, Tulbure M G, Broich M. Evaluating static and dynamic landscape connectivity modelling using a 25-year remote sensing time series. *Landscape Ecology*, 2018, 33(4): 625-640.
- [31] Bergengren J C, Waliser D E, Yung Y L. Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change. *Climatic Change*, 2011, 107(3/4): 433.
- [32] Hoffmann J, Palme R, Eccard J A. Long-term dim light during nighttime changes activity patterns and space use in experimental small mammal populations. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 844-851.
- [33] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [34] Forman R T T, Baudry J. Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology. *Environmental Management*, 1984, 8(6): 495-510.
- [35] Shen Z H, Wang Y L, Fu B J. Corridors and networks in landscape: structure, functions and ecological effects. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(1): 1-4.
- [36] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. *生态学报*, 2005, 25(9): 2406-2412.
- [37] 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 黄光庆, 叶玉瑶, 吴旗韬, 黄宁生, 匡耀求. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案. *生态学报*, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [38] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [39] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 73(4): 701-710.
- [40] 李维平, 包衡, 张明海. 中国东北虎栖息地分析与潜在生态廊道构建. *兽类学报*, 2017, 37(4): 317-326.