



## 海南热带雨林国家公园生态廊道构建

徐健楠 晁碧霄 彭玲莉 李治安 张斌 郭丰毅 卞斐 遇宝成 邹全程

### Ecological Corridor Construction of Hainan Tropical Rainforest National Park

Xu Jiannan, Chao Bixiao, Peng Lingli, Li Zhian, Zhang Bin, Guo Fengyi, Bian Fei, Yu Baocheng, Zou Quancheng

引用本文:

徐健楠, 晁碧霄, 彭玲莉, 李治安, 张斌, 郭丰毅, 卞斐, 遇宝成, 邹全程. 海南热带雨林国家公园生态廊道构建[J]. 西南林业大学学报, 2023, 43(6):125–134. doi: 10.11929/j.swfu.202209004

Xu Jiannan, Chao Bixiao, Peng Lingli, Li Zhian, Zhang Bin, Guo Fengyi, Bian Fei, Yu Baocheng, Zou Quancheng. Ecological Corridor Construction of Hainan Tropical Rainforest National Park [J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2023, 43(6):125–134. doi: 10.11929/j.swfu.202209004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202209004>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 勐海热带雨林地区土壤侵蚀动态变化研究

Study on Dynamic Changes of Soil Erosion in Tropical Rainforest Area of Menghai County

西南林业大学学报. 2020, 40(6): 80–86 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201910067>

#### 普达措国家公园旅游生命周期评判

Evaluation on Life Cycle in Potatso National Park

西南林业大学学报. 2017, 37(3): 178–182 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.03.028>

#### 基于层次分析法的黑瞎子岛国家级湿地公园生态旅游资源评价

Comprehensive Evaluation of the Ecotourism Resources at Heixiazhi Island National Wetland Park Based on Analytic Hierarchy Process Yin Jingping

西南林业大学学报. 2017, 37(5): 147–151 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.05.022>

#### 浙江始丰溪国家湿地公园种子植物区系研究

A Floristic Study of Wild Seed Plants in Shifengxi National Wetland Park, Zhejiang Province

西南林业大学学报. 2020, 40(4): 47–52 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201906005>

#### 不同年龄侧柏内生真菌多样性研究

Endophytic Fungi Diversity of *Platycladus orientalis* in Different Age

西南林业大学学报. 2017, 37(3): 113–117 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.03.018>

#### 海南岛热带海岸多种乡土树种海防林的构建及群落动态研究

A Study on Construction and Dynamics of a Tropical Coast Plant Community with Multiple Native Tree Species as Windbreak on Hainan Island

西南林业大学学报. 2020, 40(3): 9–18 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201909001>

DOI: 10.11929/j.swfu.202209004

引文格式: 徐健楠, 晁碧霄, 彭玲莉, 等. 海南热带雨林国家公园生态廊道构建 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(6): 125–134.

## 海南热带雨林国家公园生态廊道构建

徐健楠<sup>1</sup> 晁碧霄<sup>1</sup> 彭玲莉<sup>1</sup> 李治安<sup>2</sup> 张斌<sup>3</sup> 郭丰毅<sup>1</sup> 卞斐<sup>1</sup> 遇宝成<sup>1</sup> 邹全程<sup>1</sup>

(1. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714; 2. 晋城市林业技术发展事务中心, 山西 晋城 048000; 3. 海南热带雨林国家公园管理局, 海南 海口 570203)

**摘要:** 以全球生物多样性保护热点地区与关键区域海南热带雨林国家公园为研究区域, 基于研究区域内高程、土壤、林分、人口、经济、归一化植被指数以及国家珍稀濒危保护野生动物分布等数据, 结合 MCR 模型与重力模型进行重要生态源地识别, 并在此基础上构建并识别国家公园内重要生态廊道。结果表明: 在研究区域内共识别出重要生态源地 13 处, 总面积 83 300.78 hm<sup>2</sup>, 构建联结各生态源斑块的生态廊道 6 条, 宽度 600 m, 总长度 327.71 km, 总面积 19 294.05 hm<sup>2</sup>, 其中包括 3 条重要廊道和 3 条一般廊道。研究构建的生态廊道具体工程包括天然林抚育和退化林修复、人工林近自然化改造、水源保护等, 并将因高速公路隔离区域重新联通, 有效减缓生境破碎化。本研究方法可为今后国家公园内生物多样性保护提供参考和落脚点, 明确了保护、修复和管理工作的方向, 对于提高生境连通性、构建结构完整的区域景观生态格局提供参考。

**关键词:** 生态廊道; 热带雨林; 国家公园; 生物多样性; MCR 模型

中图分类号: S759.91

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2023)06-0125-10

## Ecological Corridor Construction of Hainan Tropical Rainforest National Park

Xu Jiannan<sup>1</sup>, Chao Bixiao<sup>1</sup>, Peng Lingli<sup>1</sup>, Li Zhian<sup>2</sup>, Zhang Bin<sup>3</sup>, Guo Fengyi<sup>1</sup>,  
Bian Fei<sup>1</sup>, Yu Baocheng<sup>1</sup>, Zou Quancheng<sup>1</sup>

(1. Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China; 2. Jincheng Forestry Technology Development Center, Jincheng Shanxi 048000, China; 3. Administration of Hainan Tropical Rainforest National Park, Haikou Hainan 570203, China)

**Abstract:** Hainan Tropical Rainforest National Park which is the the hot spot and key area of global biodiversity conservation was taken as the research case. Based on the data as digital elevation model(DEM), soil, forest, population, economy, normalized difference vegetation index(NDVI) and rare endangered wildlife, the minimum cumulative resistance(MCR) model and gravity model were combined to identify major ecological source, and on this basis, major ecological corridors in the national park were identified and constructed. The results showed that 13 major ecological sources were identified with the total area of 83 300.78 hm<sup>2</sup>, and 6 ecological corridors with a width of 600 m, a total length of 327.71 km, and a total area of 19 294.05 hm<sup>2</sup> were constructed, including 3 mahor corridors and 3 general corridors. The ecological corridors constructed projects include natural forest tending and degraded forest restoration, artificial forest near naturalization transformation, water source protection, etc, and reconnected the areas isolated by highways in the study area, effectively reducing habitat frag-

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2022-10-29

第 1 作者: 徐健楠 (1989—), 男, 工程师。研究方向: 自然保护地管理、生态保护修复等。Email: 1959829801@qq.com。

通信作者: 邹全程 (1984—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 林草规划设计、森林经营与管理等。  
Email: 379776298@qq.com。

mentation. This proposed method can provide a reference and landing point for future biodiversity conservation in national parks, clarify the direction of conservation, restoration and management work, and provide a reference for improving habitat connectivity and building a structural integrity of the regional landscape ecological pattern.

**Key words:** ecological corridor; tropical rainforest; national park; biodiversity; MCR model

随着国家生态保护意识的逐步提高,越来越多以保护当地重要生态系统和珍稀濒危物种为主要任务的自然保护地被设立。但由于缺少顶层设计,目前国内的自然保护地体系存在着诸如面积规划不合理、自然保护地破碎化、孤岛化及空间与功能交叉重叠等多方面问题<sup>[1]</sup>。为解决这些问题,建立国家公园体制这一任务于 2013 年被首次提出,截至目前已设立了 10 个国家公园及体制试点区。国家公园作为保护当地生态系统原真性和完整性、生物多样性、景观多样性的重要保护地类型,是我国优化及整合目前自然保护地体系,合理平衡生态环境保护与资源开发利用关系,实现自然生态保护领域治理体系和治理能力现代化的必然选择。

纵观国内外自然保护地体系由单一保护地发展为如今的国家公园这一过程可以发现,生态连通性保护已经成为 21 世纪的重要生态保护方式之一<sup>[2]</sup>。21 世纪以来,全球生物多样性下降问题日益严峻,生态系统连通性面临严重威胁,构建生态廊道成为应对这一问题最为有效的手段<sup>[3]</sup>。构建生态廊道作为沟通生态斑块的桥梁,可以改善破碎化景观对生物多样性的影响并提高景观连通性,促进斑块之间的遗传物质和物种交换,从而有效提高自然生态系统的服务功能<sup>[4-5]</sup>。截至目前,生态廊道构建已经形成了“识别生态源地-构建阻力面-廊道构建-重要廊道识别”的主流方法<sup>[6]</sup>,在提高自然保护地生态连通性方面取得了一定成效<sup>[7-8]</sup>。识别重要生态源地是进行廊道构建的基础,在以往的研究中通常仅根据经验直接选取自然保护地作为生态源地,其选取标准相对单一,忽略了那些分布在自然保护地外的高价值生态区域,导致最终构建的生态廊道体系完整性降低,可采用生态系统服务功能叠加分析进行识别<sup>[9-10]</sup>。最小阻力模型(MCR 模型)通过计算不同景观和土地利用类型的生态源物种所产生的成本用以模拟最小累积阻力路径,从而构建生态廊道。该模型可以综合考虑研究区域的地形、地貌、环境、人为干扰等因素,具有数据量小、可视化清晰的优点。重力模型通过构建生态源地间

的相互作用矩阵计算其强度,从而定量表征潜在廊道的重要性和有效性<sup>[11-12]</sup>,可将其与 MCR 模型结合使用以在区域潜在生态廊道的基础上筛选重要性较高的生态廊道,目前被广泛应用于生态廊道模拟和区域生态安全格局构建<sup>[13-15]</sup>。

海南省是我国唯一的热带岛屿省份,分布着以热带雨林生态系统为主体的复杂多样的生态系统,是全国生物多样性最为丰富的地区之一,具有极高的保护价值<sup>[16]</sup>。海南热带雨林国家公园位于全球生物多样性保护热点地区与关键区域,拥有我国分布最完好的大面积连片热带雨林和完整的热带植被垂直带谱<sup>[17]</sup>,同时还是海南岛主要江河源头、饮用水源地以及水源涵养地的分布区<sup>[18-19]</sup>,于 2021 年正式设立。恢复生境规模、连通破碎生境斑块、优化森林生态系统服务功能是保护和修复热带雨林急需采取的措施<sup>[20-21]</sup>。

因此,本研究选取海南热带雨林国家公园作为研究对象,结合 MCR 模型和重力模型构建并识别国家公园内重要生态廊道,以期对相关保护管理部门构建国家公园内生态廊道、提高生境连通性、构建结构完整的区域景观生态格局提供参考。

## 1 研究区概况

为保证生态系统成本阻力分析结果可以科学且客观地反映海南热带雨林国家公园的实际情况,因此选取海南热带雨林国家公园涉及到的周边 9 个市县(昌江黎族自治县、白沙黎族自治县、东方市、琼中黎族苗族自治县、万宁市、五指山市、乐东黎族自治县、保亭黎族苗族自治县和陵水黎族自治县)作为研究区域。海南热带雨林国家公园位于海南岛中部山脉的穹隆构造山区,包括中南部山脉东支五指山山脉和西支黎母岭(黎母山-鹦哥岭-尖峰岭、霸王岭-雅加大岭)山脉的大部分区域。地处热带北缘,气候类型为热带海洋性季风气候,光照充足,日照时间长,年均气温 22.5~26.0℃,年平均降雨量为 1759 mm,时空分布不均匀,干湿季节明显<sup>[22]</sup>。基带土壤为砖红壤,随地势变高,土壤垂直带谱

的基本组成为砖红壤-赤红壤-黄壤-草甸土<sup>[23]</sup>。海南热带雨林国家公园的森林面积为4205.68 km<sup>2</sup>，森林覆盖率为95.56%，天然林面积为3294.36 km<sup>2</sup>，占国家公园面积的74.85%。其中，天然原始林面积为1885.39 km<sup>2</sup>，仅占整个天然林面积的57.2%，且多为碎片化分布。截至2019年，公园内记录到野生维管束植物3653种（国家Ⅰ级重点保护6种，海南特有419种）；陆栖脊椎动物540种（国家Ⅰ级重点保护12种，海南特有24种），生物多样性指数最高达6.28，与巴西亚马逊雨林相当。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究中高程数据（分辨率为90 m）、土壤类型数据（分辨率为1 km）来自资源环境科学与数据中心（<http://www.resdc.cn/>），坡度、坡向数据由高程数据通过ArcGIS软件分析得到；土地利用类型数据、林地分布数据来自2019年海南省土地变更数据库，距水体（河湖）距离、距人口聚集区距离（分辨率为30 m）由土地利用类型数据通过ArcGIS软件计算欧氏距离得到；天然林分布数据、郁闭度数据、林分结构数据来源于海南省国土二调数据库；归一化植被指数（分辨率为30 m）数据由Landsat 8卫星遥感数据计算得到，来源于地理国情监测云平台；国家珍稀濒危保护野生动物分布数据由海南省林业局提供；保护地功能分区空间位置数据来源于海南省自然保护地数据库，距保护地（核心区/保育区）距离（分辨率为30 m）由该数据通过ArcGIS软件计算欧氏距离得到；人口密度数据和经济密度数据（分辨率为1 km）由海南省统计局提供的2019年海南

省统计年鉴计算得到。

### 2.2 生态源地识别

生态源地是物种维持和扩散的源点，是物种集中分布的区域<sup>[24]</sup>。基于全面保护生态系统完整性、原真性和生物多样性的目标，热带雨林国家公园内的生态源斑块应当具备提供重要生态服务功能、在区域中被需求程度较高、能够维持生态格局健康完整等特点，是生态系统相对完整、生物多样性较高、比较适宜多种物种栖息、能够满足物种繁衍和种群扩大需求的具有一定规模的集中连片区域。

根据生态源斑块的特点和功能，选取林地分布、天然林分布、郁闭度、归一化植被指数（NDVI）、土壤类型5个指标，结合国家重点保护野生动植物分布及自然保护地功能分区，利用ArcGIS软件的叠加分析功能识别热带雨林国家公园内的生态源斑块。

### 2.3 综合成本阻力面构建

当物种在进行移动和扩散时需穿越异质景观空间，在该过程中将克服一定的阻力或消耗一定的成本，因此更倾向于选择阻力小或成本低的区域作为迁徙通道<sup>[25-27]</sup>。本研究综合成本阻力面构建以阻力模型理论为基础<sup>[28]</sup>，选取土地利用类型、归一化植被指数（NDVI）、林分结构、人口密度、经济密度、距人口聚集区距离、距保护地（核心区/保育区）距离、距水体（河湖）距离、坡度和坡向10个阻力因子<sup>[29-30]</sup>，结合层次分析法和专家咨询法，选取10个专家对阻力因子影响程度进行打分，取其平均值进行层次分析，确定各项指标的相对阻力和权重（表1），在ArcGIS软件中进行空间叠加分析，生成综合成本阻力面<sup>[31]</sup>。综合成本阻力值计算公式如下：

表1 海南热带雨林国家公园生态因子阻力和权重

Table 1 Resistance and weight of ecological factors in Hainan Tropical Rainforest National Park

编号	指标	详细指标	阻力值	权重
1	土地利用类型	林地	1	0.63
		草地	10	
		河渠/河流	20	
		果园	40	
		园地	40	
		耕地	50	
		坑塘/水库	70	
		公路（高速公路/国道及省道/其他）	90/80/60	
		其他用地	80	
		村庄	100	
城镇	100			

续表 1

编号	指标	详细指标	阻力值	权重
2	距离人口聚集区距离	0 ~ 1.5 km	100	0.02
		1.5 ~ 3 km	80	
		3 ~ 5 km	60	
		5 ~ 10 km	40	
		>10 km	20	
3	距保护地（核心区/保育区）距离	0 ~ 1.5 km	20	0.04
		1.5 ~ 3 km	40	
		3 ~ 5 km	60	
		5 ~ 10 km	80	
		>10 km	100	
4	距水体（河湖）距离	<100 m	20	0.02
		100 ~ 500 m	40	
		500 ~ 1000 m	60	
		1000 ~ 2000 m	80	
		>2000 m	100	
5	归一化植被指数（NDVI）	按模型分析值	按模型分析值	0.09
6	林分结构	天然林	1	0.12
		人工林	10	
		其他林地	30	
		非林地	60	
7	坡度	0° ~ 15°	1	0.02
		15° ~ 25°	20	
		25°	40	
8	坡向	南	1	0.03
		东南、西南	10	
		东、西	20	
		东北、西北	30	
		北	60	
9	人口密度	按模型分析值	按模型分析值	0.02
10	经济密度	按模型分析值	按模型分析值	0.01

$$R_i = \sum_{j=1}^n (C_{ij} \times W_{ij}) \quad (1)$$

式中： $R_i$ 是景观单元*i*的综合阻力值； $C_{ij}$ 是景观单元*i*对应的阻力因子*j*阻力值； $W_{ij}$ 是景观单元*i*对应的阻力因子*j*权重值； $n$ 为阻力因子的总数<sup>[32-33]</sup>。

#### 2.4 生态廊道构建

生态廊道是生态源地间物质能量流动和生物物种迁徙运动的重要通道<sup>[34]</sup>。生态源地是廊道构成的一部分，是其内乃至整个生态格局中的关键节点<sup>[35]</sup>。最小累积阻力模型（MCR）可以计算出物种从生态源地出发到目标区域经过不同景观类型所克服的最小阻力值，是模拟生态廊道的常用方法。MCR 计算公式如下：

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

式中：MCR 表示从生态源地*j*在空间中扩散至某点的最小累积阻力值； $f$ 为反应 MCR 与变量 $D_{ij}$ 和 $R_i$ 之间正比关系的函数； $D_{ij}$ 表示生态源地从*j*至*i*所经过的空间距离； $R_i$ 表示物种穿越某景观表面

*i*的阻力值<sup>[36]</sup>。

重力模型可计算各生态源地间的相互作用程度，从而定量判断区域内廊道的相对重要性<sup>[37]</sup>，其计算公式如下：

$$G_{ab} = \frac{N_a N_b}{D_{ab}^2} = \frac{\left( \frac{1}{P_a} \times \ln S_a \frac{1}{P_b} \times \ln S_b \right)}{\frac{L_{ab}^2}{L_{\max}^2}} = \frac{L_{\max}^2 \ln S_a \ln S_b}{L_{ab}^2 P_a P_b} \quad (3)$$

式中： $G_{ab}$ 是生态斑块*a*和*b*之间的相互作用力， $N_a$ 和 $N_b$ 是2斑块的权重值， $D_{ab}$ 是*a*、*b*2斑块间潜在廊道阻力的标准化值， $P_a$ 、 $P_b$ 为斑块*a*、*b*阻力值， $S_a$ 、 $S_b$ 是斑块*a*、*b*的面积， $L_{ab}$ 是斑块*a*、*b*之间廊道的累积阻力值， $L_{\max}$ 是研究区中所有廊道累积阻力的最大值。

研究表明，廊道宽度对其生态功能的发挥有着十分重要的影响。宽度过于狭窄的廊道会引发边缘效应，对敏感物种产生不利影响，同时也会限制廊道中物种的迁移<sup>[38]</sup>。考虑到海南热带雨林

国家公园生态廊道需满足包括爬行类、两栖类、鸟类、小型哺乳类等多种物种的迁徙，并结合目前已有的相关研究<sup>[38-40]</sup>，尽可能减少建造成本，最终将廊道宽度设置为 600 m。

### 3 结果与分析

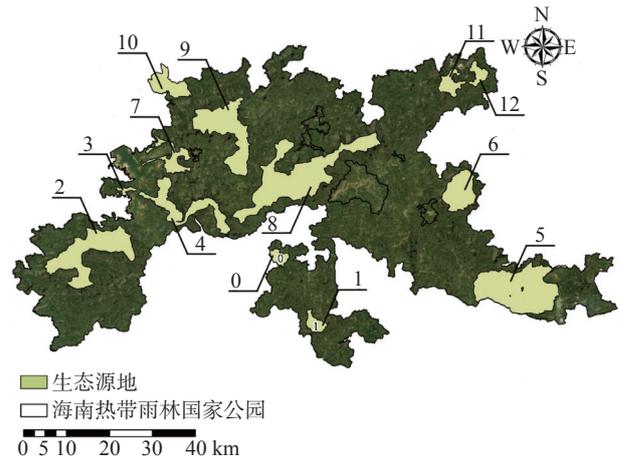
#### 3.1 生态源地分析

根据叠加分析的结果，热带雨林国家公园内共识别出生态源地 13 个，主要分布在尖峰岭、霸王岭、猴猕岭、黎母山、吊罗山、五指山、鹦哥岭等在过去几十年内保护较为严格的区域，总面积 83 300.78 hm<sup>2</sup> (图 1)。根据海南省 2020 年林地变更森林资源管理“一张图”数据库，这些生态源地涵盖了热带雨林国家公园大部分集中连片的天然原始林，平均郁闭度在 0.6 以上，多为碎片化分布，以仅占整个国家公园 18.9% 的面积承载了绝大部分天然群落类型。生态源斑块内单位面积上野生动植物种类占海南省物种总数比例较高，国家重点保护动植物种类和数量较多，包含了海南长臂猿 (*Nomascus hainanus*)、坡鹿 (*Cervus eldii hainanus*) 等旗舰物种集中栖息的区域。识别的结果同生态源斑块的基本特征和预期发挥功能较为一致。

#### 3.2 综合阻力面构建结果

以土地利用分布格局、林分质量、地形和社会经济要素为基础，选取 10 个阻力因子进行加权叠加分析构建海南热带雨林国家公园综合阻力面 (图 2)。从综合景观阻力面可视化的结果可以看出，热带雨林国家公园阻力值较低的区域相对集中，且彼此之间具有一定联系，呈现出“东西

高、中间低”的趋势。其中，高阻力区域主要集中在诸如东方市八所镇、乐东黎族自治县佛罗镇和抱由镇、陵水黎族自治县三才镇、万宁市万城镇等人口聚集区，人为干扰影响较大。值得注意的是，在高阻力值区域中，乐东黎族自治州的万冲镇和五指山市的番阳镇、毛阳镇同时也是位于生态源地间的生态阻力冷热点交界区，应着重关注该区域的生态环境保护，避免由于其经济发展促使生态阻力热点进一步扩散，从而对生态廊道造成影响，阻碍物种扩散迁徙。



0: 卡法岭北生态源斑块; 1: 卡法岭南生态源斑块; 2: 尖峰岭生态源斑块; 3: 猴猕岭西生态源斑块; 4: 猴猕岭东生态源斑块; 5: 吊罗山生态源斑块; 6: 五指山生态源斑块; 7: 俄贤岭生态源斑块; 8: 鹦哥岭生态源斑块; 9: 霸王岭东生态源斑块; 10: 霸王岭西生态源斑块; 11: 黎母山西生态源斑块; 12: 黎母山东生态源斑块。

图 1 海南热带雨林国家公园生态源地空间分布  
Fig. 1 Spatial distribution of ecological source of Hainan Tropical Rainforest National Park

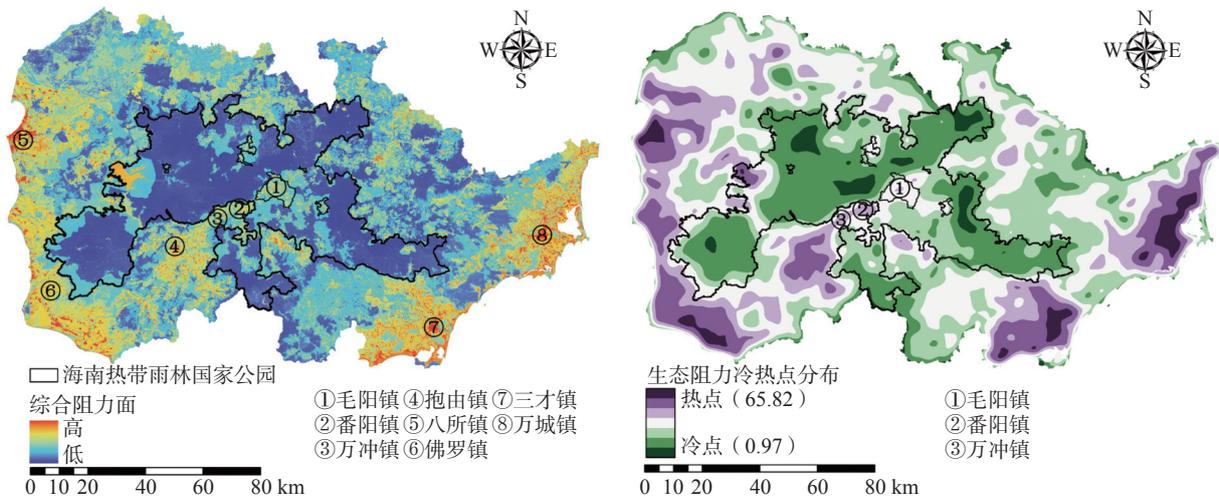


图 2 海南热带雨林国家公园综合阻力面及生态阻力冷热点分布

Fig. 2 Comprehensive resistance surface and ecological resistance cold hot spot distribution of Hainan Tropical Rainforest National Park

### 3.3 生态廊道构建

生态廊道作为物种可利用的条带状生态用地,可实现促进物种基因交流、实现生境连接和保护生物多样性等重要作用。基于最小累积阻力模型计算结果,本研究初步得到潜在廊道 78 条(图 3)。

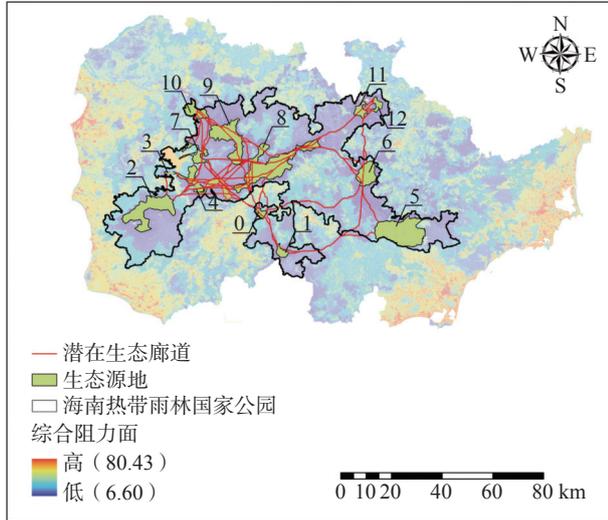


图 3 海南热带雨林国家公园潜在生态廊道分布  
Fig. 3 Distribution of potential ecological corridors in Hainan Tropical Rainforest National Park

在此基础上应用重力模型,分析两两生态源地间的引力差异,得到 13 个生态源地间的相互作用矩阵(表 2),定量评价不同生态源地之间的相互作用强度,从而更科学地判断研究区域内廊道的相对重要性。分析结果表明,13 个生态源地共构成了 3 组相互作用力较强的区块,分别为以源地 2、3、4 构成的区块一,源地 7、8、9、10 构成的区块二,以及源地 11、12 构成的区块三,表明物种在 3 个区块内具有更大的迁徙可能性,同时区块内各源地间的物质和能量的交流和传递更简单。值得注意的是,源地 4、7 之间具有极强的相互作用力,使得廊道 4~7 成为了沟通区块一和区块二的重要桥梁。因此,应重点加强对以上廊道的构建保护,避免因人类活动对其造成破坏,影响物种的迁徙和交流。源地 1、5、6 位于研究区域的东西部,与其余源地相距较远且相互作用力较低,因此应以源地 0 和 8 为基点,在研究区域东西部之间建立物质和能量交换的桥梁,以保证研究区域整体连通性,促进物种实现东西方向迁移。

表 2 基于重力模型的生态源地相互作用矩阵

Table 2 Interaction matrix of ecological sources based on gravity model

生态源地	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	—	91.02	12.89	7.46	79.43	4.75	9.29	8.95	48.36	20.04	5.30	5.30	3.82
1		—	11.78	6.93	26.99	21.76	16.10	6.90	27.77	16.12	6.11	6.65	4.97
2			—	297.18	264.75	2.78	5.29	36.19	31.35	39.47	15.72	5.38	4.25
3				—	19562.63	1.81	3.50	34.01	23.31	31.65	11.51	3.56	2.79
4					—	3.28	7.27	572.65	171.09	122.48	27.10	7.42	5.42
5						—	130.25	1.76	21.52	5.94	2.84	17.59	11.84
6							—	3.74	117.56	14.15	5.57	117.58	51.61
7								—	66.44	603.57	43.52	3.82	2.85
8									—	891.02	34.42	131.27	54.72
9										—	225.96	15.16	10.57
10											—	7.29	5.64
11												—	3498.57
12													—

为合理有效的构建生态廊道,考虑到建设成本及环境保护和经济发展之间的冲突,最终将廊道调整至 6 条(图 4),宽度设置为 600 m,总长

度 327.71 km,总面积 19294.05  $\text{hm}^2$ ,包括 3 条重要廊道和 3 条一般廊道。其中,重要廊道包括 2-3-4-7、4-7-9-8-10 和 11-12,总长 93.97 km,

总面积 5637.34 hm<sup>2</sup>；一般廊道包括 0-1-5-6、0-4-8 和 6-8-11，总长 233.74 km，总面积 13656.71 hm<sup>2</sup>。

森林质量是维持生态廊道功能的基础，在进行生态廊道管理时，应根据廊道重要性和其内部林分质量采取相应保护措施。根据海南省 2020 年林地变更森林资源管理“一张图”数据库，海南热带雨林国家公园生态廊道土地利用类型以林地为主（96.21%），其中天然林为 72.04%，人工林为 27.96%。在重要廊道中，天然林面积占该类廊道总面积的 86.00%，人工林为 13.04%，主要以 II 级保护林地（63.56%）为主，其次为 I 级保护林地（24.70%）；在一般廊道中，天然林面积占该类廊道总面积的 65.72%，人工林为 33.97%，II 级保护林地占该类廊道林地总面积的 36.66%，其次为 III 级保护林地（11.71%）（表 3、图 5）。

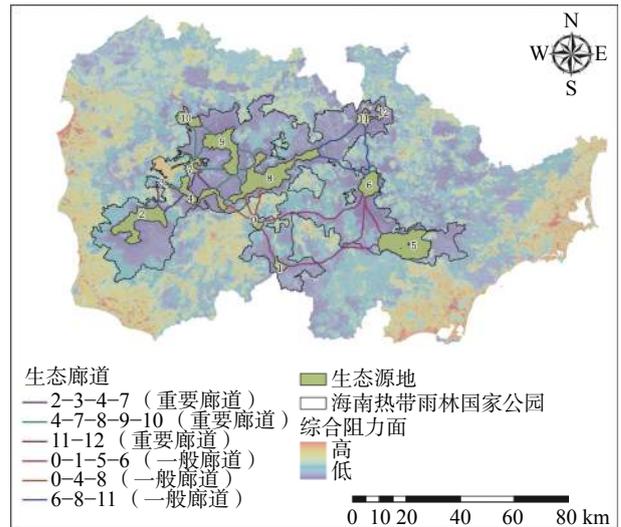


图 4 海南热带雨林生态廊道分布格局  
Fig. 4 Distribution pattern of tropical rainforest ecological corridor in Haina

表 3 生态廊道内林地保护等级统计表

Table 3 Statistics of forest land protection level in the ecological corridor

廊道分类	林地类型	I	II	III	IV	其他	总计
重要廊道	乔木林	1327.09	3443.09	16.75	15.02	571.43	5373.38
	灌木林	10.38	0.00	0.05	3.13	0.03	13.59
	未成林造林地	0.00	0.00	0.00	0.00	14.74	14.74
	宜林地	9.71	23.03	0.00	1.09	18.15	51.98
	林业辅助生产用地	0.00	0.49	0.00	0.00	0.00	0.49
	小计	1347.18	3466.61	16.80	19.24	604.35	5454.18
一般廊道	乔木林	1287.66	4785.61	1464.70	240.47	5075.87	12854.31
	竹林	0.00	0.76	0.05	0.12	3.05	3.97
	灌木林	0.00	0.68	41.92	0.00	118.23	160.84
	未成林造林地	0.00	5.74	16.60	1.75	24.07	48.15
	宜林地	2.03	12.08	10.95	0.61	11.87	37.54
	无立木林地	0.00	0.72	0.07	0.00	2.23	3.01
	小计	1289.69	4805.60	1534.29	242.95	5235.31	13107.84
总计		2636.87	8272.21	1551.09	262.19	5839.67	18562.02

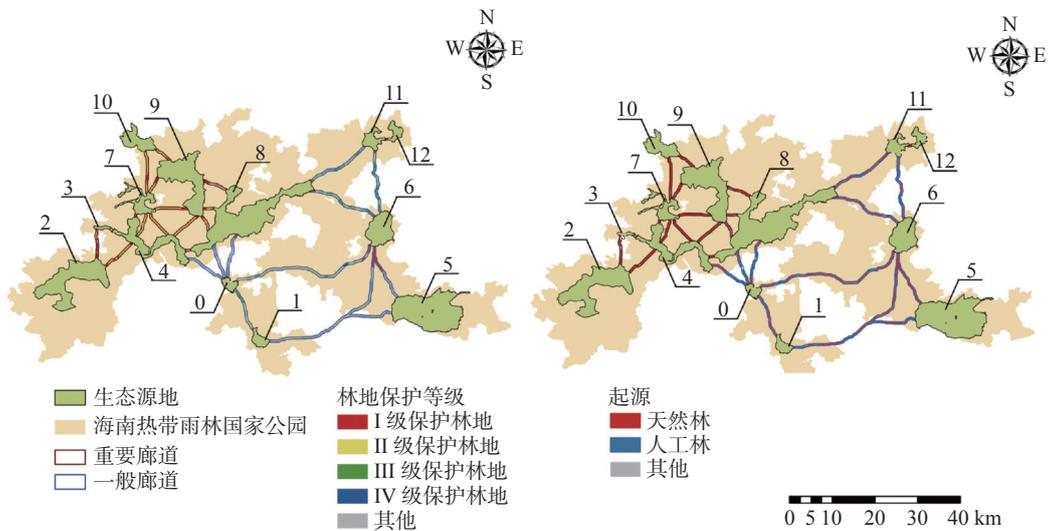


图 5 生态廊道内林地保护等级和起源

Fig. 5 Protection level and origin of forestland in the ecological corridor

## 4 结论与讨论

本研究综合使用 MCR 模型和重力模型构建生态廊道,不仅可以提升区域生态系统连通性、减轻生境破碎化对生物多样性的影响,还可以构建更为完整的区域生态模式,有效促进区域可持续发展<sup>[12,37]</sup>。海南热带雨林国家公园分布有生态源斑块 13 个,主要分布在尖峰岭、霸王岭、猴猕岭、黎母山、吊罗山、五指山、鹦哥岭等保护较为严格的区域,总面积 83 300.78 hm<sup>2</sup>。联结各生态源斑块的生态廊道共 6 条,宽度 600 m,总面积 19 294.05 hm<sup>2</sup>,包括 3 条重要廊道和 3 条一般廊道。生态廊道的构建立于热带雨林生态系统的整体保护,通过识别生物多样性热点地区及栖息地以及构建有利于物种迁移和扩散的关键区域,明确保护、修复和管理工作的方向。

### 4.1 构建生态廊道完善国家公园生态安全格局

通过构建海南热带雨林国家公园生态廊道体系,可显著提升区域生态系统质量并缓解目前国家公园所面临的人为干扰影响,完善区域整体生态安全格局。

提升森林质量是构建国家公园生态廊道的基础,诸如天然林等本身具有高生态服务价值的自然资源其保护价值更为突出<sup>[41]</sup>。在进行生态廊道构建时,可通过对廊道周边森林辅以保育、优化森林结构等措施,从根本上改善区域生态系统结构和功能,从而达到以旗舰种及伞护种为保护目标进而完善区域整体生态安全格局的目的,具体工程包括天然林抚育和退化林修复<sup>[42]</sup>、人工林近自然化改造<sup>[43]</sup>、有效合理保护水源水域<sup>[42]</sup>等。

道路作为人为扰动的重要表现形式,是当前国家公园设立需要面临的普遍问题<sup>[17,44]</sup>,其造成的生境隔离问题可能存在长期累积作用,具体表现为可导致栖息地生境破碎化、改变区域景观格局,同时也会造成污染和外来物种入侵等问题<sup>[45-46]</sup>。海南热带雨林国家公园是我国目前唯一分布有高速公路的国家公园<sup>[47]</sup>,目前国家公园内的道路密度和对景观的影响呈明显的增长趋势<sup>[47-48]</sup>。海南中线高速(G9811)横穿国家公园,自东北—西南方向将其划分为 2 块,对生态系统连通性和景观完整性造成一定影响<sup>[45,49]</sup>。本研究通过构建 4-8-0 和 6-8-11 两条生态廊道将原本被高速公路隔离的两区域重新联通,有效减缓了因道路修建造成的生境破碎化。

### 4.2 生态廊道管控建议

严格保障生态廊道机制特性。根据《全国林地保护利用规划纲要(2010—2020年)》<sup>[50]</sup>建议不同保护等级的林地应实行不同的管控措施,I级保护林地实行全面封禁保护,禁止生产性经营活动,禁止改变林地用途;II级保护林地实施局部封禁管护,鼓励和引导抚育性管理,改善林分质量和森林健康状况,禁止商业性采伐;III级保护林地严格控制征占用森林;IV级保护林地严格控制林地非法转用和逆转,限制采石取土等用地。

通过抚育天然次生林、改造人工林结构、防治林业有害生物、保护水源地等措施,优化森林生态系统的生态系统服务功能,并提升生态廊道范围内森林的质量,提高其内部生境的适宜性和生物多样性,进而提高野生动物对这些林地的利用率。

针对已有道路,建议对位于生态廊道范围内、国家公园核心保护区内且邻近珍稀濒危野生动物种栖息地的低等级道路,予以封禁;对位于生态廊道范围的省级及以上公路,应加强流量监控,对于邻近野生动物栖息地的,在野生动物交配、繁殖、育幼的季节采取必要的限流和分流措施;完善穿过生态廊道的公路网络的监控系统,一方面加强对交通量的监测,另一方面加强对周边野生动物活动情况的监测,为管控和研究提供数据保障<sup>[49]</sup>。

强化监测与科研保障。应采取适应性管理理念,加大生物多样性动态监测力度,强化相关研究的深度,根据监测数据制定最适合的保护方案,并在管理的过程中积极主动地学习,适时调整保护方案和措施,使生态廊道的建设和热带雨林的全面保护工作发挥作用落到实处。

### [参 考 文 献]

- [1] 欧阳志云,杜傲,徐卫华.中国自然保护地体系分类研究[J].生态学报,2020,40(20):7207-7215.
- [2] 余付勤,张百平,王晶,等.国外大尺度生态廊道保护进展与秦岭国家公园建设[J].自然资源学报,2021,36(10):2478-2490.
- [3] Lidicker W, Keeley A, Hilty J, et al. Corridor ecology, second edition linking landscapes for biodiversity conservation and climate adaptation[J]. The Journal of Wildlife Management, 2020, 84(4): 829-829.
- [4] Brose U. Improving nature conservancy strategies by ecological network theory[J]. Basic and Applied Eco-

- logy, 2010, 11(1): 1-5.
- [5] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2995-3009.
- [6] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文, 等. 基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 95-102.
- [7] 陈强强, 李美玲, 王旭, 等. 新疆塔什库尔干野生动物自然保护区马可波罗盘羊潜在生态廊道识别 [J]. 生物多样性, 2019, 27(2): 186-199.
- [8] Ye H, Yang Z P, Xu X L. Ecological corridors analysis based on MSPA and MCR model—A case study of the tomur world natural heritage region [J]. Sustainability, 2020, 12(3): 959.
- [9] 李晟, 李涛, 彭重华, 等. 基于综合评价法的洞庭湖区绿地生态网络构建 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2687-2698.
- [10] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建 [J]. 生态学报, 2021, 41(1): 290-301.
- [11] 古璠. 福建省自然保护区生态网络构建研究 [D]. 福州: 福建师范大学, 2017.
- [12] 徐伟振, 黄思颖, 耿建伟, 等. 基于 MCR 和重力模型下的厦门市生态空间网络构建 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 264-272.
- [13] Clergeau P, Burel F. The role of spatio-temporal patch connectivity at the landscape level: an example in a bird distribution [J]. Landscape and Urban Planning, 1997, 38(1/2): 37-43.
- [14] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [15] Lookingbill T R, Elmore A J, Engelhardt K A M, et al. Influence of wetland networks on bat activity in mixed-use landscapes [J]. Biological Conservation, 2010, 143(4): 974-983.
- [16] 黄金城, 苏文学, 莫燕妮, 等. 海南生物多样性保护现状与对策 [J]. 热带林业, 2012, 40(3): 4-7.
- [17] 姚小兰, 周琳, 吴挺勋, 等. 海南热带雨林国家公园高速公路穿越段景观动态与生态风险评估 [J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6695-6703.
- [18] 毋茜, 傅国华. 生态旅游对当地居民的影响: 以海南热带雨林国家公园尖峰岭自然保护区为例 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49(16): 97-102, 129.
- [19] 唐玮璐, 毕玉, 金崑. 海南热带雨林国家公园海南长臂猿食源植物组成 [J]. 野生动物学报, 2021, 42(3): 675-685.
- [20] 田蜜, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 热带雨林国家公园旅游发展存在的问题及对策 [J]. 热带林业, 2019, 47(4): 73-76.
- [21] 肖书文, 詹晨, 王梦桥, 等. 国家公园资源利用体系优化策略: 以海南热带雨林国家公园霸王岭片区为例 [J]. 北京林业大学学报 (社会科学版), 2021, 20(2): 35-43.
- [22] 张超. 海南热带雨林国家公园森林健康评价及经营优化研究 [J]. 热带林业, 2022, 50(1): 68-72.
- [23] 李国华, 郭向阳, 李霖明, 等. 海南热带雨林国家公园不同植被类型的大型真菌多样性 [J]. 生物多样性, 2022, 30(7): 180-192.
- [24] 李宗尧, 杨桂山, 董雅文. 经济快速发展地区生态安全格局的构建: 以安徽沿江地区为例 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 106-113.
- [25] 戴立峰, 陈雄志, 杜遂, 等. 武汉市朱家河生态廊道空间控制标准研究及制定 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(24): 43-46.
- [26] 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.
- [27] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.
- [28] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化: 以张掖市甘州区为例 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [29] 韦家怡, 李铖, 吴志峰, 等. 粤港澳大湾区生态安全格局及重要生态廊道识别 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 652-662.
- [30] 罗言云, 谭小昱, 何柳燕, 等. 大熊猫国家公园邛崃山大相岭片区生态网络构建及优化 [J]. 风景园林, 2022, 29(8): 93-101.
- [31] Vettorazzi C A, Valente R A. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources [J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 255-267.
- [32] 徐威杰, 陈晨, 张哲, 等. 基于重要生态节点独流减河流域生态廊道构建 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 805-813.
- [33] 祁巍锋, 董剑利. 基于耗费距离模型的沿黄生态带景观格局优化 [J]. 建筑与文化, 2018(6): 112-114.
- [34] 陈德权, 兰泽英, 李玮麒. 基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 826-835.

- [35] 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.
- [36] 陈群, 刘平辉, 朱传民. 基于 MCR 模型的江西省抚州市生态安全格局构建 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 210-218.
- [37] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 青海省保护地生态网络构建与优化 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1910-1916.
- [38] Lees A C, Peres C A. Conservation value of remnant riparian forest corridors of varying quality for Amazonian birds and mammals [J]. Conservation Biology, 2008, 22(2): 439-449.
- [39] 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.
- [40] 康敏明. 基于不同生物多样性支撑功能需求的森林廊道宽度 [J]. 林业与环境科学, 2018, 34(3): 42-46.
- [41] 景艳宾, 孙旭, 刘军, 等. 基于 MCR 模型的内蒙古鄂托克旗生态廊道构建 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 170-177.
- [42] 侯晓云, 许戈, 王疆评, 等. 基于 MCR 模型的天府新区生态廊道构建 [J]. 四川林业科技, 2022, 43(4): 17-23.
- [43] 明安刚. 南亚热带针叶人工林近自然化改造过程中群落结构与碳动态研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [44] 周侃, 张健, 虞虎, 等. 国家公园及周边地区人为扰动强度的时空变化与驱动因素: 以三江源国家公园为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5574-5585.
- [45] Saunders S C, Mislivets M R, Chen J Q, et al. Effects of roads on landscape structure within nested ecological units of the Northern Great Lakes Region, USA [J]. Biological Conservation, 2002, 103(2): 209-225.
- [46] Pohlman C L, Turton S M, Goosem M. Temporal variation in microclimatic edge effects near powerlines, highways and streams in Australian tropical rainforest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(1): 84-95.
- [47] 吴挺勋, 姚小兰, 任明迅. 海南热带雨林国家公园道路分布及其对景观完整性的影响 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(2): 101-111.
- [48] 范朋飞. 中国长臂猿科动物的分类和保护现状 [J]. 兽类学报, 2012, 32(3): 248-258.
- [49] 叶超, 李陆勋, 刘宏波, 等. 海南热带雨林国家公园交通体系规划布局分析 [J]. 科技和产业, 2021, 21(3): 206-209.
- [50] 国家林业和草原局. 《全国林地保护利用规划纲要 (2010—2020 年)》[DB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/uploadfile/main/2010-8/file/2010-8-25-782d45db-deea41398ff31b1023814c13.pdf>.

(责任编辑 陆 驰)

