DOI: 10.20152/j.np.202312270041
吴维棉,饶胜波,葛天南.基于生态敏感性评价的公路交通优化策略研究——以海南热带雨林国家公园为例.国家公园(中英文),2024,2(3): - .
Wu W M,Rao S B,Ge T N.Research on highway traffic optimization strategies based on ecological sensitivity evaluation: taking Hainan Tropical Rainforest National Park as an example.National Park,2024,2(3): - .

基于生态敏感性评价的公路交通优化策略研究
——以海南热带雨林国家公园为例

吴维棉[1],饶胜波[2],葛天南[3,*]
1 巫山县精益诚工程勘察设计有限公司,重庆 404700
2 海南省国土空间规划设计院有限公司,海口 570100
3 中规院(北京)规划设计有限公司海南分公司,海口 570105

摘要:公路交通严重威胁沿线野生动物迁徙安全。我国公路生态学理论研究和相关规范尚处于起步阶段,对公路工程设计指导性不高。海南热带雨林国家公园在何处采用何种交通措施,从而满足民生发展和生态保护需求,是其当下面临的难题。在公路选线既定的前提下,依托 ArcGIS 空间分析技术,论述选取合适的生态敏感性因子指标,分析海南热带雨林国家公园生态敏感性,阐述各等级公路穿越不同生态敏感区的六类应对策略。面向生态保护的公路交通策略包含立体和平面,线型和点状,硬件和软件多维度,建议海南热带雨林国家公园内设置隧道 3 座,桥梁 7 座,沿线修建横跨生态桥涵通道的路段不低于 27km,沿线修建围挡设施的路段不低于 29km。突破微观点状建设横跨动物通道的传统工程做法,以面带线宏观系统考虑动物迁徙生态廊道。探索在生态保护和公路交通之间的空缺领域架起桥梁,降低高速公路穿越国家公园的生态风险。

关键词:海南热带雨林;国家公园;生态敏感性;生态保护;野生动物廊道;公路交通策略

Research on highway traffic optimization strategies based on ecological sensitivity evaluation: taking Hainan Tropical Rainforest National Park as an example

WU Weimian[1],RAO Shengbo[2],GE Tiannan[3,*]
1 *Wushan County Jingyicheng Engineering Survey and Design Co., Ltd, Chongqing* 404700,*China*
2 *Hainan Provincial National Land Spatial Planning and Design Institute Co., Ltd, Haikou* 570100,*China*
3 *Caupd Planning & Design Consultants co., ltd., Hainan Branch, Haikou* 570105,*China*

Abstract: Highway traffic poses a severe threat to the safety of migratory wildlife along its routes. For Chinese highway ecology, related theoretical research and regulations are still in their infancy, offering limited guidance for highway engineering design. The current challenge faced by the Hainan Tropical Rainforest National Park is determining where and how to implement transportation measures, in order to satisfy requirements for both livelihood development and ecological conservation. Given the predetermined highway routing, this paper relies on ArcGIS spatial analysis technology to discuss the selection of applicable ecological sensitivity factor indicators, analyze the ecological sensitivity of Hainan Tropical Rainforest National Park, and describe six response strategies for highways of different levels crossing various ecologically sensitive zones. Ecologically protective highway traffic strategies involve multiple dimensions, including three-dimensional and two-dimensional, line and point, as well as hardware and software. It is suggested that three tunnels and seven bridges should be built, with no less than 27 kilometers of road segment for the construction of cross-ecological bridge culverts and

基金项目:《热带雨林综合服务片区控制性详细规划》
收稿日期:2023-12-27; **采用日期**:2024-04-17
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: getiannan@outlook.com

no less than 29 kilometers of road segment for the construction of enclosure facilities along the routes. This paper transcends traditional engineering practice of micro-point construction across animal passages. Instead, it adopts a comprehensive and consistent macroscopic approach by considering animal migration ecological corridors as integrated systems. This aims to explore the uncharted realms between ecological conservation and highway traffic and reduce the ecological risks associated with crossing national parks on highways.

Key Words: Hainan Tropical Rainforest; National Park; ecological sensitivity; ecological conservation; wildlife corridor; highway traffic strategy

无序的人类活动对海南热带雨林国家公园的生态完整和生态安全有严重威胁[1—2]。海南热带雨林国家公园是中国为数不多有高速公路穿越的国家公园。一方面,热带雨林公路保障原住民民生发展,实现省内生产生活经济互连互通,是海南省不可缺少的重要基础设施[3]。另一方面,野生动物生性警觉,在受到高速行驶车辆的声光刺激时,应激反应常常慌不择路误闯入车行道内,造成严重的交通事故[4—5]。高速车辆撞死野生保护动物事故频发,严重威胁沿线动物迁徙安全,且公路的建成导致野外种群遗传基因库被分割,于生态保护有显著的负面影响[6]。

国外公路生态学发展早,欧美等国家在公路生态保护有大量研究,将生态通道的具体尺寸纳入标准规范,便于工程师直接应用在实际设计,减少公路对生态环境的破坏[8—10]。自美国 1955 年建立首个动物通道,日本和新加坡等亚洲国家也逐步重视公路生态保护设施的实施建设[11—12]。我国公路生态学研究尚处于起步阶段,尚未颁布充分结合“公路工程技术”和“生态保护”两方面的专业规范,散见各交通规范的环境生态章节仅有保护原则,可操作性差[13—15]。国内学者对热带雨林生态保护的研究文献多侧重敏感指标构建和影响模型分析,却对公路工程设计指导性不高[16—19]。宏观定性规划公路远离生态敏感区,但直面路线避无可避穿越生态廊道的现实难题,又缺乏定量的解决措施[20—26]。

为解决海南热带雨林国家公园“何处采用何种交通措施”的科学问题,本文旨在公路已选定线前提下,平衡民生发展和生态保护,探索各等级公路穿越不同生态敏感区的六种应对策略。通过引入生态敏感性因子指标,建立 ArcGIS 生态敏感性空间模型,定量统筹分析生态保护需求、施工技术可操作性、工程造价成本等多种因素,创新提出“公路工程”和“生态敏感级别”相匹配的动物保护交通措施,包括措施位置的布局,保护方式的选择,沿线辅助设施布置范围的总里程。探索在生态保护和公路交通之间的空缺领域架起桥梁,降低高速公路穿越国家公园的生态风险。

1 研究区概况

本文选取海南热带雨林国家公园为研究对象。海南热带雨林国家公园跨越东方市、五指山市、琼中黎族苗族自治县等九个市县,包含尖峰岭、霸王岭、吊罗山和五指山四个管理片区,总面积约 4269km^2。海南热带雨林国家公园常住人口约 2.3 万人,黎苗族原住民人口占比达 99%,分布在 129 自然村。海南热带雨林国家公园森林覆盖率高达 96%,育有约 650 种野生脊椎动物,其中有 14 种是国家一级保护野生动物,120 种是国家二级保护野生动物[3]。

海南热带雨林国家公园形成以高速公路 G9811 线、山海高速线和国道 G224 线、G361 线为骨架,多条省道和县道为主体脉络的公路体系网。现状公路体系大致沿着河谷、平原和山间垭口等较为平坦的区域布设,如图 1。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

本文的选取自然环境、动植物栖息地和村庄分布点作为建模基础数据,原始资料源于《海南热带雨林国

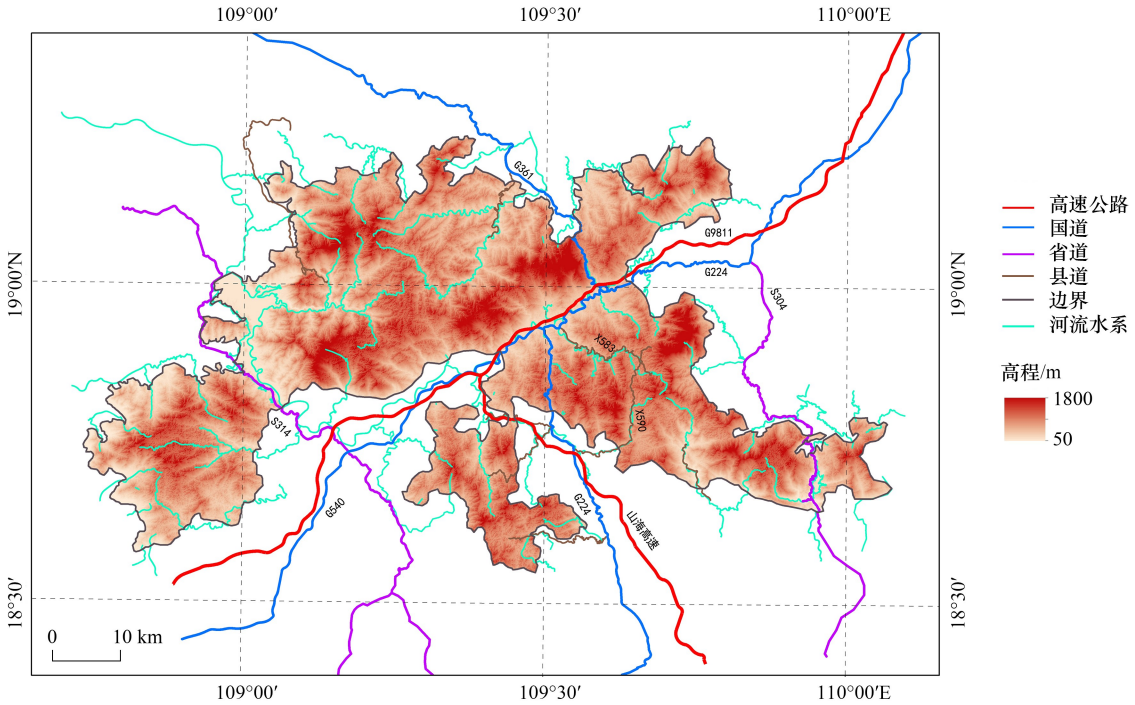

图 1　海南热带雨林国家公园公路体系图

Fig.1　The road system diagram of the National Park of Hainan Tropical Rainforest

家公园总体规划(2023—2030)》和“第三次全国土地调查”的统计报告。

2.2　研究方法

本文采用层次分析法和 ArcGIS 空间分析技术。通过提取强相关影响因子,以专家打分法计算影响因子权重,利用 ArcGIS 软件空间栅格计算、空间缓冲区分析和空间叠合分析。将研究区域的地理空间按同一尺度分割,并根据其携带的坐标数据、属性数据栅格运算成为一个评价的基本单位。进一步建立地物空间联系,将同一区域的不同性质数据值进行叠加运算,生成可视化的空间属性数据,构建生态敏感性分级模型。

2.2.1　指标体系构建

选取合适的评价指标是构建海南热带雨林国家公园生态敏感性评价模型的基础。参照热带雨林生态敏感性和公路影响相关文献的推荐指标[16—22],结合热带雨林实际情况,采用层次分析法和专家打分法。构建以生态敏感性为目标层,自然环境、动植物生态和人类活动为因子层的评价指标体系,确定各指标取值层次等级和权重值如表 1。

表 1　指标因子分级权重表

Table 1　Index factor grading weight

准则层 Criterion layer	因子层指标(权重) Factor layer indicators (weight)	指标层(权重) Indicator layer (weight)	总权重值 Total weight value
生态敏感性 Ecological sensitivity	自然环境因子(0.33)	地形坡度(0.33)	0.11
		河流水域(0.67)	0.22
	动植物生态因子(0.42)	植被类型(0.32)	0.13
		森林自然度(0.46)	0.19
		重点保护动物栖息点(0.22)	0.09
	人类活动因子(0.26)	村镇聚落点(1)	0.26

经计算,一致性比例 CR(consistency ratio)<0.1,判断矩阵的一致性可以接受。

2.2.2 影响因子赋值

将基础自然资源、人类活动及公路线形等原始资料,清洗无关数据后提取生态敏感性评价因子,并将其转化为 CAD 矢量数据导入 ArcGIS 软件。栅格化地形坡度、河流水域、森林自然度、植被类型、重点保护动物栖息点和村镇聚落点六个基础图层,见表 2。

表 2 生态敏感性影响因子分值

Table 2 Ecological sensitivity impact factor scores

分值 Score	1	2	3	4	5	属性 Attribute
地形坡度 Terrain slope	<3%	3%—8%	8%—15%	15—25%	>25%	正
河流水域 River bodies	>2km	0.2—2km	<0.2km	—	—	正
森林自然度 Forest naturalness	人工林	次生林	原始林	—	—	正
植被类型 Vegetation type	经济园地	灌丛草地	乔木林地	—	—	正
重点保护动物栖息点 Key protected animal habitats	>3km	2—3km	1—2km	0.5—1km	<0.5km	正
村镇聚落点 Village and town settlement points	>3km	2—3km	1—2km	0.5—1km	<0.5km	负

分级依据野生动物一般活动范围半径以及相关专业规范的推荐范围。村镇聚落点属性为负值,代表离人类生活聚落越近,生态敏感性越低

3 研究结果

3.1 生态敏感因子分析

各生态敏感因子空间缓冲区按照 200m×200m 的尺度栅格化处理,赋予各图层相应数值分数。计算得出各生态敏感因子可视化分析图(图 2):

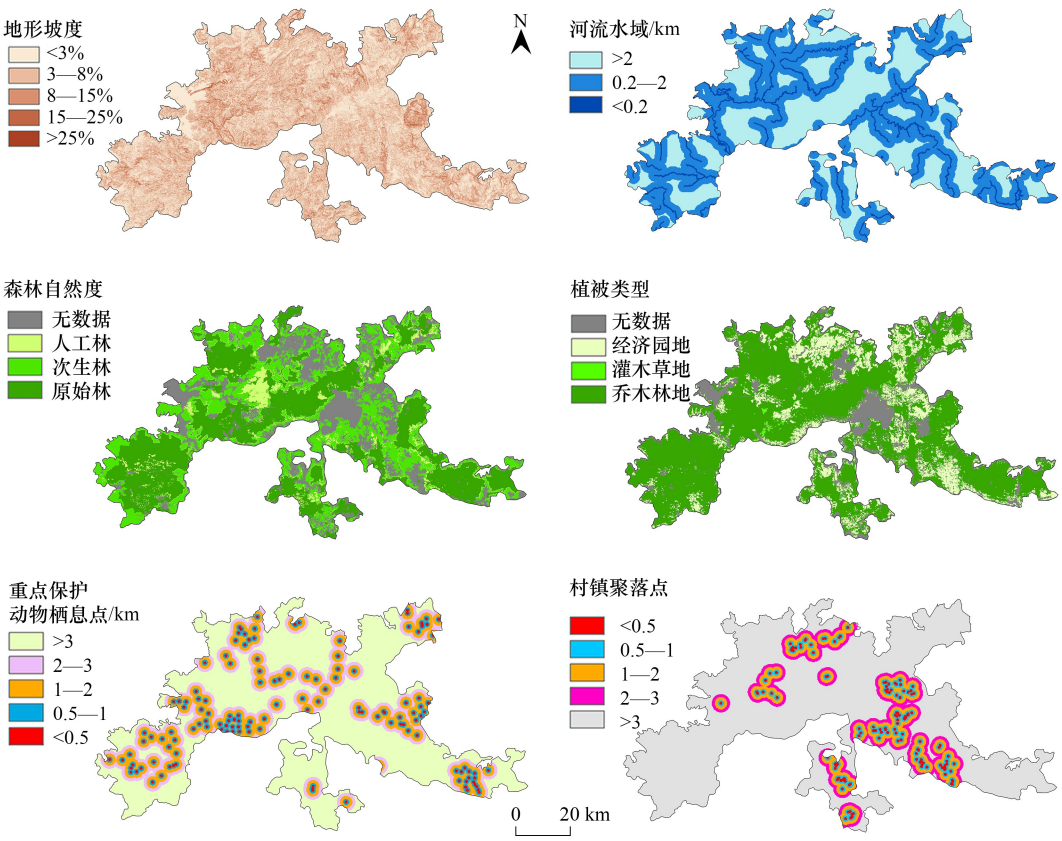

图 2 各生态敏感性影响因子分析图

Fig.2 Ecological sensitivity factor analysis diagram

地形坡度:陡坡断崖多沿霸王岭、吊罗山等山脉分布,腹部的山谷、河谷较为平坦。自然地形坡度越小,越有利于公路展线建设;陡坡路段不宜深挖高填,可考虑桥隧方案。

河流水域:海南热带雨林国家公园水系发达。小溪河谷是陆生动物重要饮水地,也是众多水生动物、两栖动物的繁衍栖息空间,生态价值高。

森林自然度:海南热带雨林国家公园尚有超六万公顷人工林;原始林沿猕猴岭、尖峰岭和吊罗山等山脉连接成片,保护价值最高;次生林多位于在原始林与人工林之间。

植被类型:海南热带雨林国家公园以乔木林地为主,村镇聚落点周边存在槟榔、橡胶等经济园地,零星分布的灌木草地较少。

重点保护动物栖息点:以海南长臂猿、海南坡鹿、海南孔雀雉等珍稀濒危保护动物等栖息点多集中成片分布,离重点保护动物栖息点越近,生态敏感性越高。

村镇聚落点:集中成片分布在河谷洼地。与重点保护动物栖息点的分布区域呈显著负相关,村镇聚落集中的片区,几乎无珍稀动物栖息,生态敏感性低,适合公路布线。

3.2　海南热带雨林国家公园生态敏感性分析

在 ArcGIS 平台中将各生态敏感因子图层栅格叠加运算,从而实现多级空间数据的同一性评价。各生态敏感因子图层的每一栅格数值,乘以表 1 中各影响因子指标总权重值,并进行加权求和运算,数据可视化即可得出海南热带雨林国家公园生态敏感性热力分析图(图 3)。

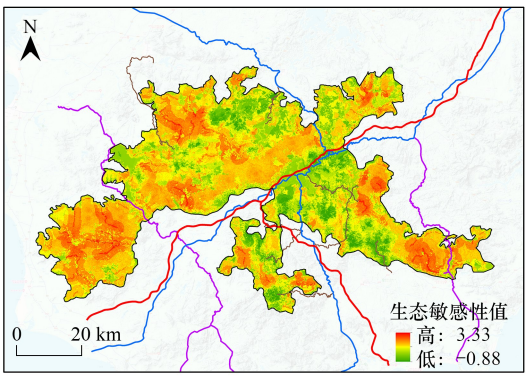

图 3　海南热带雨林国家公园生态敏感性热力分析图

Fig.3　Ecological sensitivity thermal analysis of the National Park of Hainan Tropical Rainforest

高速公路、国道大部分选线都分布在生态敏感性较低的区域,只有局部路段难以避免的穿过高敏感区。两条省道均大面积的穿过高敏感生态区,需要提出相应的交通改善措施,以减少省道对动物迁徙空间的割裂。海南热带雨林国家公园内的多条县道以连接居民聚落点为主要目的,大部分展线在低生态敏感区,少数路段穿过生态高敏感区。

4　海南热带雨林国家公园公路交通优化方案

4.1　优化策略与方法

根据海南热带雨林国家公园生态敏感性热力分析数值,在 ArcGIS 平台重分类生成“低敏感区”,“中敏感区”和“高敏感区”三种区域。

高等级公路对纵坡度和转弯曲线半径等技术指标要求严格,采用深挖高填的方式构建常规地表路基对生态破坏大[11]。同时,高等级公路的车流量大,车速快,对动物迁徙威胁严重。生态高敏感区段应强调保护优先,高等级公路采用桥梁、隧道立体空间物理错层的硬性措施,从根本上解决动物和车辆的交通冲突。

在海南热带雨林国家公园生态低敏感区段,综合考虑生态保护需求,施工技术难度和工程造价,协调匹配在常规地基路面段采用围挡,降速等平面软性管控方式,减少动物闯入车行道的概率和降低碰撞事故伤亡程度。

保护效果由好到差排序的六种基于生态保护视角的公路交通措施[15]如下:

一级:常规地表路基新/改建为隧道型式。隧道可穿越山体,克服悬崖峭壁,实现山体两侧之间最短直线距离,弥补常规地表路基深挖高填的缺点。车辆在山体内通行,动物利用山表迁徙。虽然施工难度大,工程造价高,但生态廊道完整,保护效果最好。

二级:常规地表路基新/改建为桥梁型式。适用于跨越河流谷地等陡坡地形。桥墩桥台等结构需占地,动物利用桥跨通行。车辆通行产生声光变化,对桥下野生动物迁徙有一定刺激。施工难度中等,工程造价较高,但仍能取得较好的保护效果。

三级:结合动物迁徙兽道修建横跨公路的地下涵洞或生态天桥。动物种群特有的活动规律,会形成固定的迁徙兽道。在动物经常横穿常规地表路基公路的兽道处,点状修建地下涵洞或生态天桥,帮助动物立体化通过公路。通过建立迁徙通道,连接公路两侧的动物分布栖息地,减少人类交通活动对野外种群遗传基因库的分割。

四级:公路路基两侧设置隔离栅,防护网,护栏等围挡设施。为降低动物在车辆声光刺激下误闯入车行道的概率,可在常规地表路基两侧设置动物围挡设施。通过小成本动物屏障管控动物活动范围,可以取得野生动物防碰撞良好成效。

五级:野生动物出没标志牌,局部减速带,限速标志牌等交通提示设施。提高司机驾驶警惕性,在野生动物经常出没路段降低行车车速,在发现公路前方有野生动物穿行时及时刹停。车速越慢,撞击野生动物冲击度越小,动物的伤亡程度越轻。

六级:无管控措施。在野生动物很少出没,或车流量较少的一般路段,通行车辆对野生动物的威胁很小,可以不采用管控措施,驾驶员正常行驶。

在工程实践中,不同公路穿越各级生态敏感区,采用哪种生态防护等级,我国尚无统一规定。面向生态保护的公路规划设计,本文探索性提出矩阵表3的防护策略,建议设计单位综合统筹生态保护、地形坡度,工程造价和施工难度等多因素,选用不低于(表3)保护措施级别。

表3 海南热带雨林国家公园公路分区与分级

Table 3 The division and classification of roads in National Park of Hainan Tropical Rainforest

分区/分级 Partition/Grading	高速 high speed	国道 national highway	省道 Provincial Road	县道及以下 County road and below
高敏感区 High sensitive area	一级	二级	三级	四级
中敏感区 Medium sensitive area	二级	三级	四级	五级
低敏感区 Low sensitive area	四级	五级	五级	六级

可灵活组合多种级别的交通措施,如在省道穿越高敏感区段,可同时采用(三级)结合动物迁徙兽道修建横跨公路的地下涵洞或生态天桥,(四级)公路路基两侧设置隔离栅,防护网,护栏等围挡设施和(五级)野生动物出没标志牌,局部减速带,限速标志交通提示设施等多种措施。

4.2 海南热带雨林国家公园公路优化建议

根据表3的防护策略,将通过海南热带雨林国家公园的公路交通网叠加至生态敏感性分析模型,由ArcGIS软件自动判定、输出各等级公路所应采用的交通措施,如图4所示:

建议设置新/改隧道3座,分别位于高速G9811线和山海高速线穿过高敏感区段。建议设置新/改桥梁7座,其中3座位于高速G9811线穿过中敏感区段,4座位于国道G361线和G540线穿过高敏感区段。

在海南热带雨林国家公园内,结合动物迁徙兽道修建横跨公路的地下涵洞或生态天桥,沿线路段合计约27km。其中,沿着国道G224线、G361线和G540线穿过中敏感区段约13km;沿着省道S314线、S304线穿过高敏感区段约14km。

在县道穿过高敏感区段和经常有野生动物误闯入高等级公路局部路段,在公路路基两侧设置隔离栅,防护网,护栏等围挡设施,合计里程不低于29km。

5 结论

5.1 主要论点

本文基于生态保护视角提出生态敏感区和公路等级相匹配的交通策略,并形成以下论点:

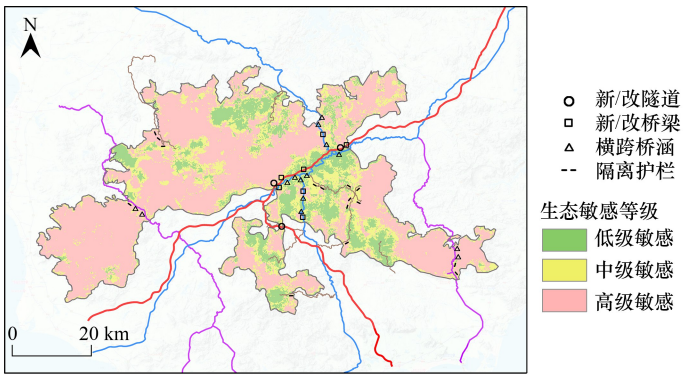

图 4　海南热带雨林国家公园不低于三级生态保护交通措施分布图

Fig.4　The distribution map of ecological conservation traffic measures in National Park of Hainan Tropical Rainforest, with no fewer than three levels

(1)大部分的高等级道路(高速公路、国道)布线在海南热带雨林国家公园低生态敏感区,模型数据与实际工程情况相吻合。

(2)适当的交通措施能降低公路对动物威胁性。立体化交通措施保护效果好,成本高,在生态高敏感区段优先采用。平面交通措施保护效果一般,成本低,适用于生态低敏感区段。

(3)高等级公路难以避免穿越高生态敏感区的局部路段,建议共设置 3 座隧道,7 座桥梁。点状开辟横跨公路的地下涵洞或生态天桥,沿线路段合计约 27km。

5.2　讨论与不足

我国正处在公路生态学的起步阶段,少有高速公路直接穿越国家公园的研究案例,各行业学者尚未达成保护共识。如交通工程学家往往更重视技术层面,不愿为动物迁徙付出过多成本;动物学家以生态保护为先,却又难以设计出恰当的工程措施。面对专业学科各自为战困境,本文交叉融合民生发展、环境敏感生态和交通工程等多学科领域技术,创新提出六种包含立体和平面,线型和点状,硬件和软件多维度、复合型的公路生态策略,解决了海南热带雨林国家公园“何处采用何种措施”的科学难题。

在已见报道的文献中,有少许公路生态学探索性成果运用在实际工程中,如西藏青藏铁路的藏羚羊通道和云南思小高速公路的亚洲象通道[7]。然而,上述成果对于生态保护和工程技术融合深度不够,受限于微观局部“点”状建设横跨通道的思维桎梏。本文建立空间模型,识别高生态敏感区“面”域,突破性将常规地表路面整体新/改建为“线”状立体隧道、桥梁,更宏观系统考虑动物迁徙生态廊道。在低生态敏感区,兼顾工程经济性和动物保护需求,灵活组合应用多种平面保护措施,降低车辆撞击动物风险。

本文对动物迁徙习性研究不足,未能结合动物常行兽道进一步给出横跨公路的地下通道和生态天桥的精确点位、分布距离和通道尺寸。此外,在基础数据处理过程中,栅格尺度划分精度不高,存在一定的测量误差。海南省环热带雨林国家公园旅游公路项目即将开始选线建设,期待本文能够给同行研究者们些许启发。

参考文献(References):

[1] 欧阳志云, 徐卫华. 整合我国自然保护区体系, 依法建设国家公园. 生物多样性, 2014, 22(4): 425-427.

[2] 国务院. 国务院关于《海南省国土空间规划(2021—2035 年)》的批复. 中华人民共和国国务院公报, 2023(28): 5-6.

[3] 一图读懂《海南热带雨林国家公园总体规划(2023-2030 年)》.海南日报,2023-08-22(A03).DOI:10.28356/n.cnki.nhlrb.2023.004470

[4] 董清福, 洪丽娟, 唐建军, 陈水华, 徐礼根, 陈欣. 高速公路建设对路域生态系统中生物的影响及生物廊道设计的意义. 科技通报, 2007, 23(2): 289-293.

[5] 徐碧华, 郑志华, 刘令峰, 陈兴龙. 高速公路建设对野生动物生境破碎化分析与生态廊道构建. 交通建设与管理, 2007(8): 50-53.

[6] 李细伟, 何智勇, 薛承鹏. 高速公路动物通道的研究. 公路, 2014, 59(8): 137-139.

[7] 王云, 关磊, 周红萍, 王玉滴, 孔亚平. 公路哺乳动物通道设置方法的研究. 公路, 2018, 63(4): 253-257.
[8] Forman R, Sperling D, Bissonette J, Clevenger A, Cutshall C D, Dale V, Fahrig L, Goldman C, Heanue K, Jones J A, Swanson F, Turrentine T, Winter T C. Road ecology: science and solutions. 2002;64-71
[9] Van D R R, Smith D J, Grilo C. The ecological effects of linear infrastructure and traffic: challenges and opportunities of rapid global growth. Handbook of road ecology, 2015: 32-38.
[10] Ng S J, Dole J W, Sauvajot R M, Riley S P D, Valone T J. Use of highway undercrossings by wildlife in southern California. Biological Conservation, 2004, 115(3): 499-507.
[11] Boon S. Coexistence at the crossroads Crossings: how Road Ecology Is Shaping the Future of Our Planet Ben Goldfarb Norton, 2023.384 pp. Science, 2023, 381(6661): 953.
[12] Alexander S M, Waters N M. The effects of highway transportation corridors on wildlife: a case study of Banff National Park. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2000, 8(1/2/3/4/5/6): 307-320.
[13] 国家林业局. 陆生野生动物廊道设计技术规程: LY/T 2016—2012. 北京: 中国标准出版社, 2012.
[14] 中华人民共和国交通运输部. 公路路线设计规范: JTG D20—2017. 北京: 人民交通出版社, 2017.
[15] 交通运输部. 高速公路改扩建设计细则: JTG/T L11—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
[16] 赵迁乔, 宋夫才. 热带雨林地区高速公路建设生态评价指标的探讨. 公路, 2005, 50(11):160-164.
[17] 孙晓杰, 王倩, 宋淑霞, 郭晨辉. 辽河源自然保护区不同森林类型草本群落谱系结构及其环境影响. 河北林业科技, 2022(1): 1-7.
[18] 肖敬坤. 基于生态影响评价的吉林市东山片区道路优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
[19] 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. 热带林业, 2022, 50(1): 68-72.
[20] 姚小兰. 海南热带雨林国家公园高速公路穿越段的生态风险与对策研究[D]. 海口: 海南大学, 2023.
[21] 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. 热带生物学报, 2022, 13(2): 101-111.
[22] 杜乐山, 刘海鸥, 刘文慧, 王槐睿, 张颖, 全占军. 热带雨林区水源涵养服务时空演变及驱动因素分析:以海南热带雨林国家公园为例. 环境科学研究, 2023, 36(9): 1716-1727.
[23] 朱华, 谭运洪. 中国热带雨林的群落特征、研究现状及问题. 植物生态学报, 2023, 47(4): 447-468.
[24] 刘阳. 海南热带雨林国家公园生态保护治理研究. 资源与人居环境, 2023(7): 61-64.
[25] 李昂. 旅游发展视角下海南热带雨林国家公园用地优化研究[D]. 海口: 海南大学, 2023.
[26] 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. 西南林业大学学报: 自然科学, 2023, 43(6): 125-134.