

DOI: 10.5846/stxb201812182748

吴旻, 陈瑾, 赵超超, 翟瑞, 苏雨秋, 郑金兴, 胡喜生. 泉三高速公路动物通道选址研究——以云豹为例. 生态学报, 2020, 40(7): 2360-2366.

Wu M, Chen J, Zhao C C, Zhai R, Su Y Q, Zheng J X, Hu X S. Site selection of animal passage on Quanzhou-Sanming expressway: a case study of *Neofelis nebulosa*. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2360-2366.

泉三高速公路动物通道选址研究 ——以云豹为例

吴 旻¹, 陈 瑾², 赵超超², 翟 瑞², 苏雨秋², 郑金兴¹, 胡喜生^{2,*}

1 福建林业职业技术学院园林系, 南平 353000

2 福建农林大学交通与土木工程学院, 福州 350002

摘要:随着高速路网不断扩大和加密,动物适宜的生存空间也不断被阻隔。动物通道作为缓解高速公路负面影响的重要手段,通道位置是其发挥效用的关键。以泉三高速公路为对象,以云豹(*Neofelis nebulosa*)为目标物种,构建了生境评价指标体系并采用专家咨询法确定相对权重,利用 GIS 对其生境适宜性进行了评价。在此基础上结合水文分析,以水流方向类比动物倾向活动路线,由此确定获得云豹的 3 处理想高速公路通道位置。研究表明,该方法能有效地模拟并确定动物运动的轨迹,可为建立合适的动物通道、有效缓解公路的阻隔效应提供重要的参考价值。

关键词:高速公路;生境适宜性;水文分析;动物通道;云豹

Site selection of animal passage on Quanzhou-Sanming expressway: a case study of *Neofelis nebulosa*

WU Min¹, CHEN Jin², ZHAO Chaochao², ZHAI Rui², SU Yuqiu², ZHENG Jinxing¹, HU Xisheng^{2,*}

1 Department of Landscape Architecture, Fujian Forestry Vocational Technical College, Nanping 353000, China

2 College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: With the continuous expansion and encryption of expressway networks, the suitable habitat for wild animals is being increasingly blocked. Construction of animal passage is an effective way to alleviate the negative impacts of expressway network on wild animals. The location of animal passage is the most important factor to contribute the effectiveness of the animal passage. Taking the Quanzhou-Sanming Expressway in Fujian Province as a case, and the *Neofelis nebulosa* as the target animal species, an assessment indicator system of the animal habitat was constructed, then the method of expert consultation was employed to decide the relative weight of each factor. As a result, the habitat suitability of the *Neofelis nebulosa* was evaluated by GIS program. On the basis of the distribution of the habitat suitability, the potential moving routes of *Neofelis nebulosa* were simulated by the hydrological analysis module of GIS platform. To this end, the direction of water flow was used to simulate the movement route of animals. Therefore, the three ideal locations of the animal passage for *Neofelis nebulosi* were determined. The results show that our method can effectively simulate and determine the trajectory of the animal movement. Therefore, this study can shed a new light on the construction of suitable animal passages for effectively alleviating the barrier effect of the highways.

Key Words: expressway; habitat suitability; hydrological analysis; wildlife passage; *Neofelis nebulosa*

基金项目:国家自然科学基金项目(31971639);国家级大学生创新训练项目(201810389016);福建省自然科学基金项目(2019J01406);福建省中青年教育科研教育项目(JZ180457)

收稿日期:2018-12-18; 网络出版日期:2019-12-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xshu@fafu.edu.cn

出于经济发展和人们出行便捷的需求,高速路网在不断完善和加密。有数据表明“十三五”期间高速公路扩张仍将延续,预计到 2020 年全国高速公路通车里程达 16 万 km^[1]。而中国的高速公路里程早在 2014 年已位居世界第一,高速公路凭借其快速、高效、容量大等特点对周边区域经济效益及社会效益产生举足轻重的作用。在一系列积极影响的大背景下也不可忽略其负面生态影响,特别是公路建设的过程和建成后的运营,对动物栖息地的破坏与切割,使其生境的数量和质量大大下降^[2]。而且高速公路强封闭性引起的阻隔效应使公路两侧甚至更大范围内的种群移动扩散受限^[3],不利于动物觅食与繁殖,从而导致种群数量减少及区域内生物多样性下降^[4]。与“7918”路网的分割一样,这也会将野生动物的栖息地切割地越来越小,只不过前者满足了我们对美好生活的需求,而后者却会导致动物种群的减少甚至灭绝^[5]。

动物通道的存在将破碎的生境重新连接在一起,加深种群间的联系,缓解种群交流不利的影 响,同时为动物提供一个安全的通行环境,减少穿越公路造成的死亡,从而减少种群灭绝的风险^[6],故其作为缓解公路不利影响切实可行的方法被采用。随着保护意识的增强,我国对野生动物通道的研究也愈发重视,但多数只停留在通道形式、尺寸及引导措施的理论性探讨^[7-12]。对于欧美一些起步较早的国家而言,从基础性的探讨^[13-15],已深入到通道位置^[16]及后期监测^[17-18]的研究中,并取得了丰富成果。我国对动物通道研究,尤其是通道位置确定等已引起学者的重视^[19-20],并指出应将通道位置与物种和环境结合起来^[6,21-23],以避免现在多是利用现有的涵洞桥梁兼做通道及仅考虑通道类型、尺寸的等间距布置导致通道设置主观性强、针对性差的问题。动物通道位置的设置既要符合动物活动路线,又要考虑动物活动区域所处的环境,而生境适宜性评价是将物种与环境耦合分析其对多个环境因素的不同表现,故根据生境质量评价对动物活动路线预测是动物通道科学选址的保证。

由于动物拥有趋利避害的本能,其活动是不断寻找适宜生境的过程,这种选择类似于高山流水^[23]。据此本文以泉三高速为例,在评价研究区生境适宜性的基础上,借助 GIS 的水文分析模块分析水流运动趋势即动物倾向活动路线,进而通过与高速公路路线叠加确定动物通道位置,以期在高速公路规划设计中动物通道选址提供科学依据。

1 研究区概况

泉三高速公路起自福建省晋江市苏塘村止于三明市高速路口,全长 284.5km,是福建省第一条在高速公路主线上设计并已投用的双向六车道高速公路。泉三高速是福建省“三纵八横”中不可或缺的一员,也是国家“7918”高速公路网中第十五横的一段。其连接了福建沿海和西部山区,对推动西部山区发展起到至关重要的作用;与中西部路网相连也加深了我国中西部地区与东南沿海的联系,对促进我国中东西部共同发展有重大意义。

本文研究范围为三明三元区及梅列区,如图 1 所示。三明格氏栲省级自然保护区处于公路路段周边,保护区作为世界上最大的格氏栲天然林,其优越的自然环境,为动植物的繁衍生息提供了良好的条件。保护区内生活着国家一级保护动物云豹(*Neofelis nebulosa*)、蟒蛇(*Python molurus*),国家二级重点保护动物黑熊(*Ursus thibetanus*)、猕猴(*Macaca mulatta*)等 24 种,福建省重点保护动物 14 种,动物种类丰富。泉三高速在规划修建时并未考虑设计动物通道,虽没穿过保护区,但考虑该路段在保护区野生动物的活动范围内,在路段沿线开展动物通道选址研究具有一定理论价值和借鉴意义。本文以保护区内国家一级保护动物云豹为目标物种探讨动物通道选址的技术方法。

2 研究方法

2.1 生境适宜性评价方法

2.1.1 评价指标体系构建

云豹是高度树栖性的物种,经常在树上休息和狩猎。其栖息于亚热带和热带山地及丘陵常绿林中,生活

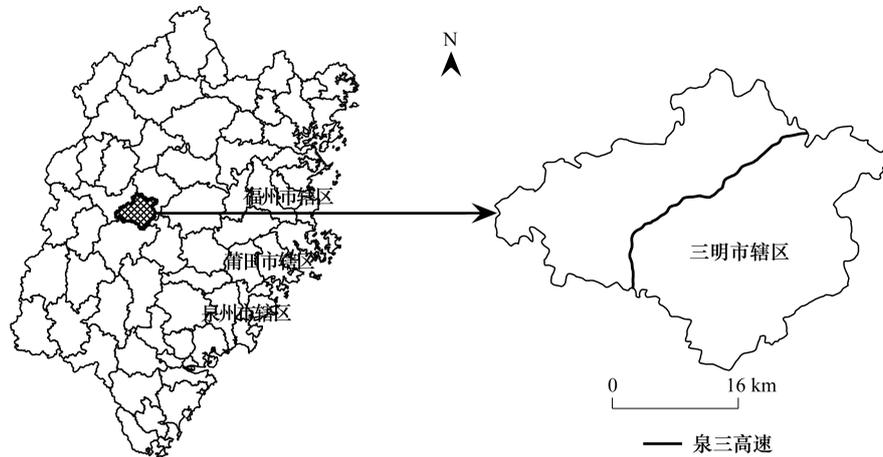


图1 研究区位置

Fig.1 Study location

的垂直高度可达海拔 1600—3000m^[3]。且有研究显示坡度越缓,豹类出现的概率越大^[24]。鉴于前人对云豹生境适应性评价指标构建鲜见报道,本文综合前人对云豹生境相关报道^[3]并借鉴生活环境较为相近的豹 (*Capreolus pygargus*) 有关生境适应性评价指标^[25]构建云豹生境适应性评价体系。主要从自然环境和人类活动干扰两方面原因构建云豹生境适宜性评价体系的指标:①土地覆盖类型,②平均胸径,③郁闭度,④道路密度,⑤道路距离,⑥水源距离,⑦海拔,⑧坡度,⑨地貌。其中土地覆盖类型、海拔、坡度、地貌的数据从中科院资源环境科学数据中心获取,平均胸径、郁闭度数据从林业二类调查数据库获取,道路网络和河流网络经百度地图矢量化获取。因子赋值是一个评价指标刻度的表征,根据评价因子对动物生境的影响进行赋值,对生境越有利则赋值越高。本文在前人研究^[6,25]基础上,进一步拓展评价因子的赋值区间,对各因子预处理实际数据进行分级赋值^[6,25](表 1),研究区域范围内各指标所对应的栅格图如图 2 所示。

表 1 评价因子赋值

Table 1 Assignment of evaluation factors

评价因子 Evaluation factor	土地覆盖 Land cover type	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	郁闭度 Crown density	道路密度 Road density (km/hm ²)	道路距离 Road distance/m	水源距离 Source distance/m	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	地貌 Landscape
赋值 Assignment	1 城镇、农村、建设用地	≤8	≤0.1	>4	≤500	>15000	113—300	>50	平原
	2 水田、旱地	8—16	0.1—0.3	3—4	500—1000	12000—15000	300—500	40—50	台地
	3 果园、低覆盖度草地	16—25	0.3—0.5	2—3	1000—1500	8000—12000	500—700	30—40	丘陵
	4 灌木林、疏林地、中覆盖度草地	25—35	0.5—0.7	1—2	1500—2000	4000—8000	700—900	20—30	小起伏山地
	5 有林地、高覆盖度草地	>35	0.7—0.9	≤1	>2000	≤4000	>900	0—20	中、大起伏山地

2.1.2 指标权重确定

通过对各因子预处理实际数据进行分级赋值,各评价因子的相对重要性在参考前人研究成果^[6,25]的基础上,根据所构建的生境适宜性评价指标体系采用专家咨询法确定(表 2),专家涉及动物学、地理学、生态学、公路设计、交通工程等领域。

2.1.3 生境适宜性指数计算

在评价因子赋值及权重确定的前提下,利用 GIS 中的栅格计算器计算生境适宜性指数,从而根据生境适宜性指数大小确定区域内生境适宜性及分布情况,其中生境适宜性指数(HSI)利用下式计算:

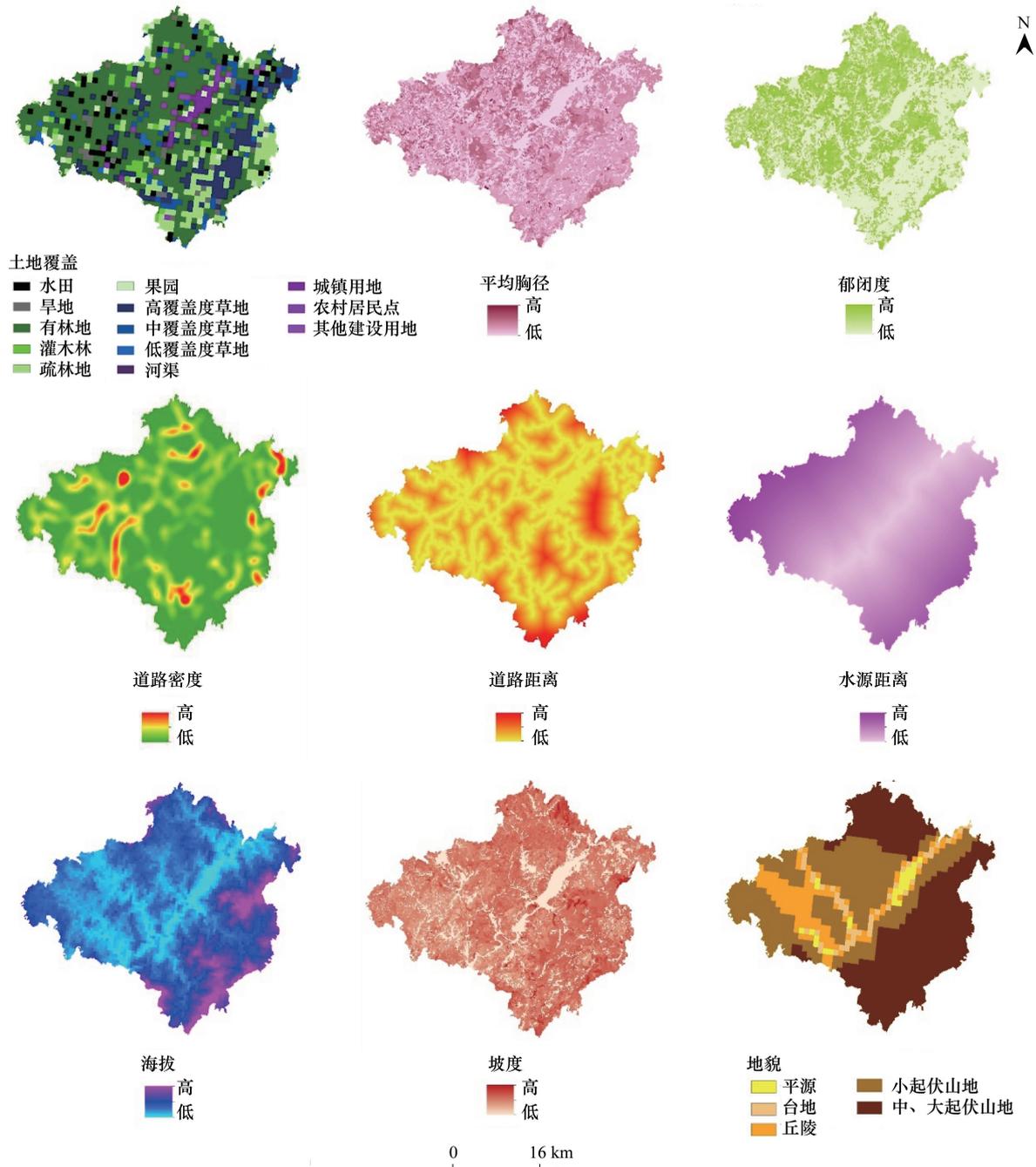


图 2 各评价因子栅格图

Fig.2 Grid of evaluation factors

表 2 评价因子相对权重

Table 2 Relative weights of evaluate factors

评价因子 Evaluation factor	土地覆盖 Land cover type	平均胸径 Mean diameter at breast height	郁闭度 Crown density	道路密度 Road density	道路距离 Road distance	水源距离 Source distance	海拔 Elevation	坡度 Slope	地貌 Landscape
权重 Weight	0.11	0.11	0.11	0.09	0.15	0.1	0.1	0.12	0.11

$$HSI = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i$$

式中, C_i 为第 i 个评价因子的分级赋值, W_i 为各评价因子的权重。

2.2 动物通道位置的确定方法

将动物倾向活动路线理解成不断寻找适宜生境的过程, 从生境适宜性指数较低向生境适宜性指数较高的区域移动。动物倾向活动路线, 可通过 GIS 中的水文分析工具模拟水流的运动情况达到目的, 因水流从高往低流的原理类似于动物由生境质量差往生境质量好的区域移动的倾向选择。水流原是在高程差异的基础上有了方向选择, 现在将生境适宜性评价结果替代高程, 以生境质量作为方向选择的基础。由于生境适宜性指数越高的区域动物往此处聚集的概率越大可对应此处高程越低水流积聚越多, 故将 HSI 的反值栅格替代高程模型建立地表水流模型, 通过填洼先确定流向, 进而确定流量, 最后得到水流运动情况。水流流量大小与动物活动的概率成正比, 将流量通过自然间隔分类法分为四个等级, 选出一、二级的水流与高速公路图层叠加, 相交的区域即可作为动物通道的理想位置。

3 结果与分析

3.1 生境适宜性评价

基于 GIS 技术根据 HIS 计算模型计算栅格生境适宜性指数并绘制其分布图(图 3), 由图 3 可知, HSI 较高区域集中在研究区中部、北部及南部高海拔山区, 这些地区多为高大的天然林和人工林, 郁闭度较高, 能为云豹提供较好的隐蔽、捕食、繁殖环境。同时, 此区域道路密度小, 距道路距离远, 受人类活动干扰小, 是云豹适宜的生境。HSI 中等地区主要位于研究区中、西部低海拔缓坡地带, 地形以小起伏山地和丘陵为主。此区域虽道路密度较小且与道路有一定距离, 但区域内林分较为稀疏, 林分平均胸径较小, 导致生境适宜性相对较差。HSI 最差区域位于研究区中、西部低海拔台地或平原, 其形成的原因由于西部是农村居民点及大片水田和旱地, 中部则为三明市的市中心, 有一定的城市化规模, 再加上密集的路网支撑便利的交通, 由于此处受到人类活动干扰大, 导致植被覆盖度低, 不适合动物在此栖息。

3.2 通道位置的确定

根据水文分析结果(图 4), 通过将水流流量大小分级并与高速公路图层叠加, 其水文流量潜在流向路线在生境适宜性评价图(图 3)形成一定规律, 即从较不适宜生境至适宜生境的活动规律。活动路线与高速公路路段形成的潜在交点即云豹穿越高速公路的 3 个潜在通道位置(图 5), 通道①位于三明市台江伐木场附近, 通道②位于三明市梅列区叶坑村附近, 通道③位于三明市三元区莘口镇坂头村附近。三者都是通道的理想位置, 其中通道①是高速公路与水流二级汇流的交点, 通道②、③是高速公路与水流一级汇流的交点, 这意味着通道②、③的利用率会高于通道①。研究结果表明, 本研究基于 GIS 技术采用生境适宜性评价结合水文分析探讨高速公路云豹通道选址具有一定可行性, 所确定的 3 个通道位置符合云豹活动的生境要求, 从而为高速公路动物通道选址提供了方法。

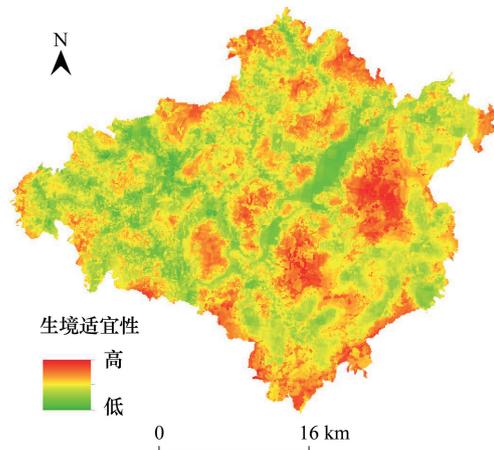


图 3 生境适宜性评价

Fig.3 Assessment of habitat suitability

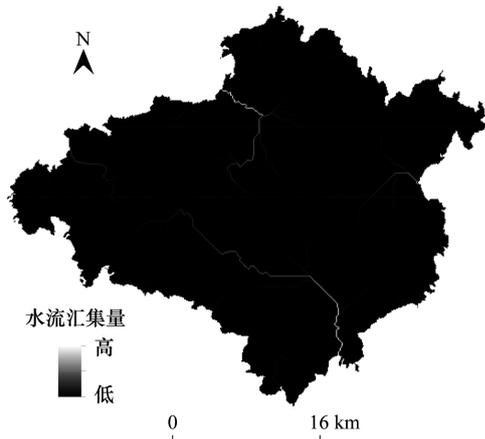


图4 水文分析

Fig.4 Hydrological analysis

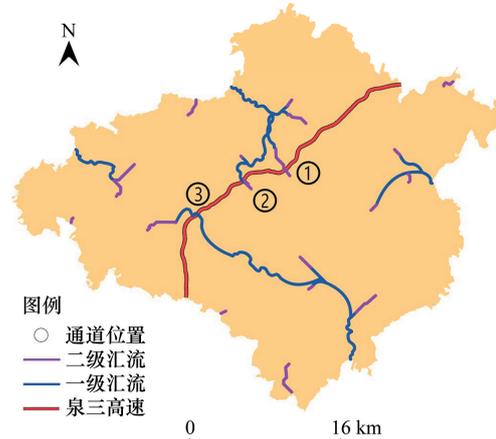


图5 通道位置

Fig.5 Channel location

4 结论与讨论

本文采用生境适宜性评价,通过目标物种对不同生境因子的依赖性及生境因子对其活动的影响程度构建生境适宜性指数模型定量评价生境质量,再结合水文分析得到动物倾向活动路线,进而与高速公路图层叠加确定通道位置。这种方法将动物活动与环境因素综合考虑,通过将生境质量量化的方式增强通道选址的客观性,是对费时费力进行野外监测^[26]和有地区限制及主观影响的专家咨询^[11]的有效弥补。经生境适宜性评价模拟出的路线是基于生境模拟的一种大概率事件,或许与自然界动物活动路径的真实情况有所偏差,但对动物通道选址仍具有重要参考意义。本文以云豹为例,对其在研究区域范围内的高速公路通道选址模拟表明,在泉三高速与三明市台江伐木场、三明市梅列区叶坑村、三明市三元区莘口镇坂头村等3处交错处应建立云豹高速公路通道,此3处均与格氏栲自然保护区生境相联系,是云豹活动的重要区域范围交错区。由此,可以认为本研究提出的动物通道选址理论具有一定理论性,可在高速公路动物通道选址设计中借鉴应用。

评价因子的选择和赋值作为生境适宜性评价的重要基础^[27-29],本文生境适宜性评价因子的选择既综合了前人对其他动物通道选址研究中的指标,也有针对性地融合了云豹种群活动的生境生态学、地理学要求,比较符合云豹生境适宜性评价实际。赋值则根据目标物种云豹喜高海拔,适山地的生境倾向选择进行分级赋值,是一种普遍适用的相对重要性赋值。因子权重是基于参考前人对其他动物通道选择时的指标及其权重,采用专家咨询法经过4轮问卷调查获得本研究适宜性评价指标体系的权重结构。因此,在适宜性评价体系的构建及其权重的确定过程中,既参考了前人有关研究,也充分采纳了动物学、地理学、生态学、公路设计、交通工程等领域专家的意见和建议,具有一定的理论基础。

本研究基于生境适宜性评价,确定了云豹的3处高速公路通道选址位置。经现场勘查,目前未设立动物通道。因此,可在所选地址周边设置红外相机等手段进行监测,观察是否有野生保护动物尤其是云豹出入。若发现存在野生动物活动,则需要结合实际条件优化建立动物通道,以维护野生动物的活动需求、保证野生动物的生存需求。

动物通道选址仅为高速公路建设过程中的一个环节,通道选址建成后仍需配合后期监测落实动物利用的情况,以验证模拟设计路线与动物实际活动路线的吻合性。通过长期监测和验证,了解动物对通道的使用效率,对动物利用率高的通道要定期维护,对选址存在偏差的方案进行修正,以期在高速公路设计和建设时提供准确的动物通道位置,充分发挥其应有的生态效能。

参考文献 (References):

- [1] 蓝兰. “十三五”末全国高速公路通车里程将超 16 万 km. 工程机械文摘, 2016, (2): 70-72.
- [2] 王成玉, 陈飞. 山区高速公路对野生动物的影响及保护措施探讨. 公路, 2007, (12): 97-102.
- [3] 梁霞, 晏晓林, 戴泉玉, 叶凯, 刘宁宁. 高速公路设置野生动物通道初探. 公路交通科技: 应用技术版, 2009, 5(2): 166-168.
- [4] 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁. 道路生态研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(3): 447-452.
- [5] 武昌, 刘志民. 生境破碎化对生物多样性的影响研究综述. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1946-1952.
- [6] 梁健超, 丁志锋, 肖荣波, 邹洁建, 胡慧建. 基于物种运动路径识别的动物通道选址——以武深高速为例. 生态学报, 2016, 36(24): 8145-8153.
- [7] 宋秀全, 彭重华. 汝郴高速公路不同生境动物通道设置. 北方园艺, 2011, (10): 99-102.
- [8] 张洪峰, 车利锋, 封托, 朱云, 蔡琼, 苏丽娜, 胡罕, 刘艳, 吴晓民. 秦岭林区公路野生动物通道设计与监测. 公路, 2016, 61(3): 200-204.
- [9] 侯凌, 谈卓著. 户县至洋县高速公路动物通道设置. 山西建筑, 2009, 35(25): 281-282.
- [10] 李虎, 叶建军, 王冠海, 詹鼎, 张良, 肖衡林, 王志, 朱兆华, 徐国钢. 自然保护区公路野物动物穿行保障措施进展. 湖南生态科学学报, 2017, 4(2): 55-60.
- [11] 张晏, 费世江. 公路建设中野生动物通道的设置研究. 辽宁科技大学学报, 2009, 32(1): 93-98.
- [12] 朱玉峰, 董博昶, 沈毅. 环境影响评价阶段公路工程野生动物通道设置研究. 公路交通科技: 应用技术版, 2016, 12(5): 329-331.
- [13] 王云, 李海峰, 崔鹏, 吴浩. 卧龙自然保护区公路动物通道设置研究. 公路, 2007, (1): 99-104.
- [14] Olsson M P O, Widén P, Larkin J L. Effectiveness of a highway overpass to promote landscape connectivity and movement of moose and roe deer in Sweden. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 85(2): 133-139.
- [15] Clevenger A P, Waltho N. Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals. *Biological Conservation*, 2005, 121(3): 453-464.
- [16] Cushman S A, Lewis J S, Landguth E L. Evaluating the intersection of a regional wildlife connectivity network with highways. *Movement Ecology*, 2013, 1(1): 12.
- [17] Dussault C, Ouellet J P, Laurian C, Courtois R, Poulin M, Breton L. Moose movement rates along highways and crossing probability models. *Journal of Wildlife Management*, 2007, 71(7): 2338-2345.
- [18] Meisingset E L, Loe L E, Brekkum Ø, Van Moorter B, Mysterud A. Red Deer habitat selection and movements in relation to roads. *The Journal of Wildlife Management*, 2013, 77(1): 181-191.
- [19] 余小林, 周友兵, 徐文婷, 谢宗强. 保护地旅游公路的野生动物通道设计原则与技术参数. 生物多样性, 2015, 23(6): 824-829.
- [20] 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.
- [21] 李帅, 张相锋, 石建斌, 董世魁, 高晓霞. 蒙新高速公路对阿拉善荒漠区有蹄类野生动物生境适宜性的影响. 生态学杂志, 2018, 37(1): 103-110.
- [22] 李玉强, 邢韶华, 刘生强, 罗爱东, 崔国发. 陆生野生动物通道设计方法. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 137-143.
- [23] 宋波, 倪婷玉, 王瑾. 基于迁移意愿的动物迁移廊道修正——以德化县云豹为例. 生态学报, 2010, 30(17): 4571-4577.
- [24] Thomas M M, Todd K F, Bariusha M. Movements and activities of snow leopards in Southwestern Mongolia. *Biological Conservation*, 2005, 124(4): 527-537.
- [25] Güleci S, Akay A E. Assessment of ecological passages along road networks within the Mediterranean forest using GIS-based multi criteria evaluation approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(12): 779.
- [26] 韩立鹤. 戈壁荒漠区铁路工程野生动物通道设置研究. 铁道标准设计, 2014, 58(7): 63-67.
- [27] 金龙如, 孙克萍, 贺红土, 周宇飞. 生境适宜度指数模型研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(5): 841-846.
- [28] 李莹, 徐文轩, 杨维康, 乔建芳, 刘伟, 夏参军. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鹅喉羚生境适宜性评价. 兽类学报, 2010, 30(1): 11-20.
- [29] 林杰, 徐文轩, 杨维康, 夏参军, 刘伟. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴生境适宜性评价. 生物多样性, 2012, 20(4): 411-419.