热带雨林公路建设对野生动物的影响及保护研究进展

王 冀 王 云* 关 磊 陈 兵 曹广华 孔亚平
(交通运输部科学研究院, 北京 100029)

摘 要 热带雨林是地球上生物多样性最丰富的陆地生态系统,公路等线性基础设施建设是导致热带雨林生物多样性损失的主要因素之一。公路切割热带雨林地区野生动物栖息地,对野生动物造成致死是最为显著的影响,其次是阻隔野生动物的移动。另外,噪声、灯光和空气污染等造成野生动物回避公路,野生动物的行为特征发生改变,栖息地破碎化导致小种群的出现,当道路密度达到阈值,可能导致种群的非线性降低或损失。在野生动物保护方面,当前国际上主要措施有:合理规划路线;科学设置动物通道;针对道路致死、动物通道、路域动物活动等开展持续性监测与研究;构建多部门、多领域的合作机制,多渠道、多路径加强热带雨林公路建设中野生动物的管理。本研究提出了未来我国热带雨林公路建设野生动物保护研究需重视的4个方面:(1)加强基础研究,开展技术攻关;(2)编制标准规范,更好指导工程建设;(3)多学科团队合作,参与公路建设全过程;(4)加强管理教育,降低人为干扰。

关键词 道路致死; 栖息地; 公路回避; 公路阻隔; 动物通道; 道路生态学

A review of the impacts of highway construction on wild animals and protection in tropical rainforest. WANG Ji, WANG Yun*, GUAN Lei, CHEN Bing, CAO Guang-hua, KONG Ya-ping (*China Academy of Transportation Sciences*, *Beijing* 100029, *China*).

Abstract: Tropical rainforest is the most biodiversity-rich ecosystem on the Earth. Linear infrastructure such as highways is one of the most important causes for biodiversity loss in tropical rainforest. Highway cut through wildlife habitat in tropical rainforest area, with the most significant impact being wildlife-vehicle collision and the second impact being blocking the movement of wild animals. Moreover, noise, lighting and air pollution cause wild animals to avoid highways, and change the behavioral characteristics of wild animals. The fragmentation of habitats results in the occurrence of small wildlife population. When the road network density reaches a threshold, there would be a nonlinear reduction or loss of wildlife population. With respect to wildlife conservation, the main strategies include: reasonably planning highway routes; scientifically setting up wildlife crossing structures; carrying out continuous monitoring and research on wildlife-vehicle collision, wildlife crossing structures, and roadside wildlife activities; building up multi-sectoral and multi-field cooperation mechanisms to strengthen wildlife management during tropical rainforest road construction. Four aspects should be paid attention to in the future research of wildlife conservation during highway construction in the tropical rainforest regions in China: (1) strengthening basic research and developing technology; (2) establishing standard specifications to better guide project construction; (3) multidisciplinary teamwork and stakeholder participation in the whole process of highway construction; (4) strengthening management and education to limit human disturbance to wildlife.

Key words: wildlife-vehicle collision; habitat; highway avoidance; highway barrier; wildlife crossing structure; road ecology.

中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(20170617)和WWF项目(P03516)资助。
收稿日期: 2019-01-13 接受日期: 2019-06-17
*通讯作者 E-mail: wangyun80314@163.com

热带雨林是地球上生物多样性最丰富的陆地生态系统,生物物种占全球的三分之二,公路等线性基础设施建设是导致热带雨林生物多样性损失最主要的因素之一(Laurance *et al.*,2009;漆良华等,2014;Sloan *et al.*,2018a)。据统计,全球未来将有 90%的公路在发展中国家修建,特别是拥有丰富生物多样性的热带和亚热带区域(Alamgir *et al.*,2017;Laurance *et al.*,2019)。热带雨林公路建设一方面导致生态系统退化和破碎化,降低生物多样性;另一方面,公路建设便于人类的迁移和扩散,间接导致偷猎、森林砍伐、栖息地退化、公路回避等风险,对野生动物将带来巨大影响(Laurance *et al.*,2009;Campbell *et al.*,2017)。热带雨林公路建设环境影响有别于其他地区的环境影响,原因有二:第一、从生物学的角度来看,热带雨林内植被群落结构复杂,拥有完整的乔木层、灌木层、草本层和层间植物,其中乔木层就高达 3~5 层,小气候呈潮湿、阴暗、稳定的特点(张荣京等,2007;Pohlman *et al.*,2009)。热带雨林栖息着多种适应森林内部和林下条件的物种,包括一些强烈回避森林边缘的物种(Goosem,2007),甚至无法穿越狭窄的森林砍伐区域(Laurance *et al.*,2005)。因此,综合考虑热带雨林独特环境特征和内部物种习性的叠加影响,热带雨林物种对道路建设带来的环境变化尤其敏感(Laurance,2016);第二、从社会经济角度来看,热带雨林主要分布在发展中国家,这些国家正经历持续的人口增长、快速的经济发展和密集的自然资源开发的过程。在这些发展中国家,伐木、石油和天然气开发、农业综合企业、采矿、国际投资和贷款等驱动道路等基础设施建设的步伐(Laurance,2007;Sloan *et al.*,2019)。道路进入森林内部,为偷猎、采矿、森林开发带来了便利(Suárez *et al.*,2009;Laurance *et al.*,2017),这些偏远地区的环境法律法规执法薄弱会加剧环境问题的产生(Reid *et al.*,2005)。

当前,国外在热带雨林地区公路对野生动物影响及保护方面的研究相对较多,主要围绕野生动物道路致死、环境污染、公路边缘效应、阻隔作用、偷猎、栖息地破碎化等方面开展(Laurance *et al.*,2001;Gubbi *et al.*,2012;Jeganathan *et al.*,2018)。对比国外,中国热带雨林公路建设对野生动物影响及保护的研究还处于起步阶段。中国的热带雨林呈斑块状、断续分布,为湿润雨林、季雨林和山地雨林类型,主要分布在广东、广西、海南、云南、西藏、台湾等省区的热带范围,最具代表性的有云南的西双版纳、海南的尖峰岭、吊罗山、五指山、鹦哥岭、霸王岭、藏东南雅鲁藏布江下游地区和台湾的垦丁等(陈建伟,2015)。我国仅在西双版纳自然保护区公路建设对亚洲象(*Elephas maximus*)及蛇类的影响、亚洲象对思小高速公路动物通道的利用等方面取得了一定的进展(Pan *et al.*,2009;孙戈等,2010)。

本文通过系统梳理国内外热带雨林公路建设对野生动物的道路致死、栖息地破碎化、公路回避、公路阻隔、动物行为改变、累积和时滞效应等各种影响,全面总结公路建设中保护野生动物的原则和有效措施,以期对未来我国热带雨林公路建设中野生动物保护工作提供借鉴。

1 热带雨林公路建设对野生动物的影响

1.1 道路致死

在公路对野生动物的所有影响中,野生动物道路致死是最显著的负面影响,主要包括车辆碰撞致死与动物偷猎两方面。野生动物与车辆碰撞主要由野生动物试图穿过公路或被公路吸引(如路面适宜的温度、路面的动物尸体、路侧的食物等)所引起,道路致死野生动物种类复杂多样,从蛇类、小型啮齿类到大型猫科动物和食草类动物等(孙戈等,2010)。以亚洲象与车辆碰撞致死为例,2006 年 3 月—10 月,思小高速公路上共记录亚洲象活动 44 次,约 40 次发生在晚间至凌晨,其中一次造成车象相撞事故(Pan *et al.*,2009)。印度火车导致大象致死也已有较多记录(Joshi,2010),过去 25 年间,超过 200 头亚洲象被火车撞死(WTI,2013),西高止山脉热带雨林区野生动物道路致死率为 21.2(± 3.87)头 · 10 km^{-2}(Jeganathan *et al.*,2018)。此外,还记录到孟加拉虎(*Panthera tigris*)、亚洲狮(*Panthera leo perslca*)、金钱豹(*Panthera pardus*)等珍稀濒危物种道路致死(WTI,2013)。

热带雨林地区公路还为偷猎者提供了入口,过去十年,约有三分之二的非洲象由于其珍贵的象牙被猎杀,在马来半岛(Peninsular Malaysia)约 90%的偷猎陷阱和偷猎营地分布于公路路侧 5 km 范围内,刚果盆地的公路扩张和随之而来的偷猎活动加剧了一系列大型野生动物的生存压力(Wilkie *et al.*,2000;Clements *et al.*,2014)。

1.2 公路阻隔

公路切割热带雨林地区野生动物栖息地,阻隔

野生动物的移动(Goosem,2007),在更大的尺度上,会降低景观的渗透性和连通性,最终导致栖息地破碎化,威胁到小种群的生存。印度学者建立了 2 车道和 4 车道公路对虎、豹、印度野牛(*Bos gaurus*)穿越的影响模型,考虑如下影响因素:体长、行为、种群规模、穿越公路平均耗时、路面宽度、交通量和构成等,研究显示当交通量达到 452 辆 · h^{-1}将对野生动物造成明显的阻隔效应(Habib *et al.*,2015)。

公路的阻隔效应受公路宽度、交通量、路侧植被覆盖度的影响,并与动物的扩散能力、活动节律以及生理状况有关(Pan *et al.*,2009)。例如,亚马逊河林下的鸟类中,雄鸟能够穿越 75 m 宽的公路回到自己的栖息地并进行交配,却会被 250 m 宽的林间伐木廊道完全阻挡;在澳大利亚昆士兰州的热带雨林地区,啮齿动物在 6~12 m 宽的公路上迁移效率下降 67%~90%,而在更宽(20~60 m)的公路上下降 90%~100%(Laurance *et al.*,2009)。

1.3　公路回避

野生动物还会对公路产生回避,这与热带雨林地区野生动物习性有关。第一、热带雨林中栖息着许多树栖或适于在茂密林地中飞行的动物;第二、大多数热带物种偏爱阴暗潮湿的小气候;第三、许多热带物种表现出对公路的强烈回避,包括交通噪声、灯光、空气污染等(Laurance *et al.*,2009)。公路对鸟类会造成路面回避、交通干扰回避、车辆干扰回避和吸引效应(食腐鸟)(McClure *et al.*,2015)。野生动物回避的行为会使公路周边栖息地利用率下降,可能会使动物家域和种群结构发生变化,进一步破坏热带雨林地区的物种多样性。

1.4　动物行为改变

公路的建设可通过多种方式影响野生动物分布范围、迁移路线、活动特征等行为。以交通噪声对野生动物的影响为例,热带雨林中许多野生动物是依赖于听觉信号来维持、防御和繁殖,一般来说野生动物可以适应规律性的火车噪声,但如果噪声足够大且持续时间长就会对野生动物产生严重和显著的负面影响(McClure *et al.*,2015)。

公路可以通过改变环境条件来影响野生动物栖息地偏好,和改变野生动物移动并利用当前栖息地资源的能力(Wadey *et al.*,2018)。通过思小高速建设前后亚洲象的活动规律对比研究,发现思小高速建设前,在勐养自然保护区内有 28 处亚洲象的活动通道,思小高速开始建设后,有 6 处活动通道不再被亚洲象使用,由此证明,公路建成后,该区域内亚洲象的活动停止或显著减少(Pan *et al.*,2009)。此外,由于野生动物的公路回避行为,亚洲象在公路活动的时间绝大多数发生于夜晚至黎明等车辆较少的时间段。

1.5　栖息地破碎化

公路建设会吸引外来人口的进入和公路沿线区域的进一步发展,从而导致公路建设后路侧一定范围的植被进一步清除,扩大栖息地破碎化的范围。公路建设导致栖息地破碎化已成为全球性的问题,成为全球生物多样性下降的主要因素之一(Laurance,2018)。印尼苏门答腊岛北部 2017 年被发现的猩猩种群——达班努里猩猩(*Pongo tapanuliensis*),其栖息地正面临多重威胁,已成濒危物种。森林破碎化、栖息地减少、土地类型的改变是关系苏门答腊猩猩(包括达班努里猩猩)生存至关重要的因素。目前尽管栖息地内公路密度不大,但有超过五分之一的栖息地被划为农业区,同时由于栖息地缺乏保护措施,苏门答腊岛森林与动物生境的退化将持续下去,种群有濒临灭绝的风险(Sloan *et al.*,2018b)。

1.6　累积和时滞效应

公路对野生动物种群影响(栖息地损失、栖息地质量降低、道路致死率上升、栖息地连通性降低等)一般以不同速率发生。栖息地损失会很快展示出来,因为栖息地直接转化为公路用地,可以计算出损失的种群数量。然而,栖息地质量的降低却不然,如边缘效应对森林内部物种的影响。进而,当公路密度到达阈值,可能导致种群的非线性降低或损失(Forman *et al.*,2003)。

2　热带雨林公路建设中野生动物的保护措施

2.1　原则

为了避免和减少公路建设对野生动物的影响,应遵守三个原则:

(1)目标明确。保护措施应聚焦于最容易灭绝的、最为敏感的、顶级的或旗舰物种(如虎豹等)及其栖息地。

(2)措施应考虑轻重缓急。首先,路线要避免穿越野生动物栖息地,因为这些区域的破坏是不可恢复的;其次,不得不穿越的情况下,只能通过各种措施尽量减小负面影响;再次,恢复受损的栖息地;最后,对于不可避免的损伤和不能减小的影响,通过

补偿手段加以弥补。

(3)措施应成为项目规划的重要组成部分,同时注重前瞻性、长期性、整体性和针对性。在项目规划阶段越早考虑越好;应考虑到项目发展10~20年之后的效果,即累积效应;措施虽然仅仅在小尺度上发生,但应考虑到整体景观效果;必须考虑到每个物种都是独特的,针对不同的生态需求、行为格局和交通响应特征而设计相应保护措施。

2.2 减少热带雨林公路对野生动物影响的措施

2.2.1 合理规划路线 公路规划设计人员与政府、科研人员、环保学者合作,在对野生动物分布、活动(尤其是迁徙和迁移路径)及生活习性等规律充分调研的基础上合理规划选择公路路线。

严格划定热带雨林野生动物保护区,将保护区最大化,控制野生动物保护区的公路网规模,尽量避免公路穿越野生动物集中活动区,保护区内的已建公路选择性地在野生动物集中活动区域和时段关闭部分路段。

控制车道数量,尽可能减少热带雨林公路升级改造及其对野生动物栖息地连续性的破坏;控制路面宽度,维持公路上空连续的树冠层,为树栖动物活动提供空中廊道;因地制宜在公路下修建大型桥涵通道,缓解洪水并维持河道流量,减轻水流对水生动物造成的阻碍。

2.2.2 科学设置动物通道 对野生动物活动规律、活动路径、生活习性进行充分调查,并征求动物学家的意见,确定动物通道的形式和位置。同时,通过合理设计增强野生动物通道的吸引力,如为了便于蝙蝠移动,将地下通道设置在蝙蝠沿溪流、树篱的飞行路线上且保持宽敞(Van der Ree *et al.*,2015)。野生动物对通道的偏好性是动物通道成功的关键,将亚洲象通道设置在其历史移动路线上有助于其利用人工设置的动物通道(Pan *et al.*,2009)。

2.2.3 加强持续性监测与研究 严谨的研究、试验和持续的监测将确保缓解措施在生态和经济效益上的最大化(Van der Ree *et al.*,2015)。将现场监测与电子监控相结合来开展野生动物沿热带雨林公路活动的监测;对动物通道有效性进行监控,促进野生动物栖息地的连通;开展道路致死野生动物的系统监测,为评估和减轻公路交通对野生动物影响提供基础数据(Gubbi *et al.*,2012)。

野生动物种群对景观破碎化的响应时间可能长达几十年。如果当前公路建设对动物种群无重大破坏影响,并不意味着该种群在以后的公路建设中可以幸存,下一条新建的公路很可能就会促进种群突破阈值并导致灭绝,而当种群已经超过阈值并开始下降时,任何补救的措施都是无效的(Van der Ree *et al.*,2015)。因此,在监测研究中应考虑公路建设对野生动物的累积效应,研究种群与阈值的接近程度,进行长期的监测与研究至关重要。

2.2.4 建立有效管理机制 构建交通主管部门、环保部门、司法部门、科研院所、社会环保人士等多部门、多领域的合作机制,多渠道、多路径加强热带雨林公路建设中野生动物的管理。在野生动物保护区及野生动物频繁活动的区域,在夜间、周末等特定时段采取公路限流、限速、关闭等措施,降低道路致死率。通过对印度西高止山脉热带雨林道路致死季节性变化的研究,发现道路致死在周末、节假日中随着交通量的增加更为频繁,致死率在交通量大的主干道更高,针对特定时段及交通高峰采取控制管理措施更为有效(Jeganathan *et al.*,2018)。

通过强化野生动物栖息地保护与管理来减少栖息地破碎化,避免野生动物在公路旁集中,严格划定热带雨林野生动物保护区,恢复目前破碎化状态的野生动物栖息地为动物廊道,必要时可关闭野生动物保护区内部分路段或取消动物栖息地内规划的其他基础设施。例如,在印度尼西亚的北苏门答腊地区,公路及河谷将濒危野生动物达班努里猩猩的东、西两大栖息地分割,通过关闭猩猩栖息地东、西区块间已建的5~9 km公路路段,显著提高了达班努里猩猩种群的连续性(Sloan *et al.*,2018b)。

3 展 望

3.1 加强基础研究,开展技术攻关

加强对我国热带雨林野生动物生活习性及活动规律的基础研究,包括野生动物道路致死、公路对野生动物栖息地破碎化影响、公路对野生动物的阻隔和回避规律、野生动物对公路交通的行为反应等,我国在公路交通对野生动物影响的累积和时滞效应方面还是空白。在影响规律研究的基础上,开展技术研发,包括公路建设项目对野生动物影响的不同尺度评价(项目层面和景观层面)、野生动物通道设计技术、野生动物监测技术、公路动物探测警示系统、栖息地质量的遥感动态监测等。

3.2 编制标准规范,更好指导工程建设

当前我国交通运输行业还没有一部野生动物保

护相关的标准规范,导致公路建设野生动物保护工作无法可依、无章可循,破坏野生动物栖息地、阻隔野生动物移动、车辆碾压野生动物致死等事件时有发生。基于我国热带雨林地区公路建设实际,尽快吸收国外成功经验,编制我国热带雨林公路建设野生动物保护相关的标准规范,可在交通行业层面更好地规范和指导公路建设,将使得野生动物保护从过去的被迫做法转变为工程建设者的主动行为。

3.3　多学科团队合作,参与公路建设全过程

联合动物保护专家学者、政府管理部门、公路建设部门共同参与到公路建设的全过程。在公路规划及可研阶段在路线设计中考虑野生动物栖息地的连通性和完整性以避免栖息地破碎化;在公路设计阶段注重对野生动物迁徙和迁移路径及栖息地偏好的考虑,科学设置野生动物通道,将公路阻隔影响最小化;在公路施工阶段充分了解野生动物的生活习性,减小工程建设对动物生活的干扰及栖息地的破坏;在公路运行阶段加强对道路致死、动物通道利用效果的监测,合理设置、调整相应缓解措施,同时减少车辆噪声等对野生动物的干扰。

3.4　加强管理教育,降低人为干扰

加强对动物栖息地保护管理,避免野生动物在公路路边集中;加强野生动物频繁活动区域的巡逻及针对野生动物猎杀的控制管理措施,遏制野生动物偷猎率;加强公路运营管理,通过警示标志、减速设施、制度条例等加强公路限速管理,降低道路致死;加强公众参与及对行人的管理教育,通过改变、规范、引导司机、行人、游客的行为方式降低公路交通对野生动物的影响。

致谢　感谢中国科学院西北高原生物研究所曲家鹏博士在文章撰写方面提供的帮助和美国蒙大拿州立大学西部交通研究所 Marcel P. Huijser 博士在摘要润色方面提供的帮助。

参考文献

陈建伟. 2015. 特殊多样的中国热带雨林. 森林与人类, (7): 24-33.

漆良华, 梁昌强, 毛　超, 等. 2014. 海南岛甘什岭热带低地次生雨林物种组成与地理成分. 生态学杂志, **33**(4): 922-929.

孙　戈, 张　立. 2010. 西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响. 生态学报, **31**(24): 7079-7086.

张荣京, 刑福武. 2007. 热带雨林的生态特点. 生物学通报, (4): 21-23.

Alamgir M, Campbell MJ, Sloan S, *et al*. 2017. Economic, socio-political and environmental risks of road development in the tropics. *Current Biology*, **27**: 1130-1140.

Campbell M, Alamgir M, Laurance W. 2017. Roads to ruin: Can we build roads that benefit people while not destroying nature. *Australian Science*, **3**: 40-41.

Clements GR, Lynam AJ, Gaveau D, *et al*. 2014. Where and how are roads endangering mammals in Southeast Asia's forests. *PLoS ONE*, **9**: e115376.

Forman RTT, Sperling D, Bissonette JA, *et al*. 2003. Road Ecology: Science and Solutions. Washington DC: Island Press.

Gubbi S, Poornesha HC, Madhusudan MD. 2012. Impact of Vehicular traffic on the use of highway edges by large mammals in a South Indian wildlife reserve. *Current Science*, **102**: 1047-1051.

Goosem M. 2007. Fragmentation impacts caused by roads through rainforests. *Current Science*, **93**: 1587-1595.

Habib B, Saxena A, Mondal I, *et al*. 2015. Proposed mitigation measures for maintaining habitat contiguity and reducing wild animal mortality on NH 6&7 in the Central Indian Landscape. Technical Report. TR 2015/006. https://www.researchgate.net/publication/293813360_Proposed_Mitigation_Measures_for_Maintaining_Habitat_Contiguity_and_Reducing_Wild_Animal_Mortality_on_NH_6_7_in_the_Central_Indian_Landscape(2019-6-10).

Jeganathan P, Mudappa D, Kumar MA, *et al*. 2018. Seasonal variation in wildlife roadkills in plantations and tropical rainforest in the Anamalai Hills, Western Ghats, India. *Current Science*, **144**: 619-626.

Joshi R. 2010. Train accidental deaths of leopards *Panthera pardus* in Rajaji National Park: A population in threat. *World Journal of Zoology*, **5**: 156-161.

Laurance WF, Cochrane MA, Bergen S, *et al*. 2001. The future of the Brazilian Amazon. *Science*, **291**: 438-439.

Laurance SG, Gomez MS. 2005. Clearing width and movements of understory rainforest birds. *Biotropica*, **37**: 149-152.

Laurance WF. 2007. Forest destruction in tropical Asia. *Current Science*, **93**: 1544-1550.

Laurance WF, Goosem M, Laurance SGW. 2009. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, **24**: 659-669.

Laurance WF. 2016. Lessons from research for sustainable development and conservation in Borneo. *Forests*, **7**: 2-6.

Laurance WF, Campbell MJ, Alamgir M, *et al*. 2017. Road expansion and the fate of Africa's tropical forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **5**: 1-7.

Laurance WF. 2018. Conservation and the global infrastructure tsunami: Disclose, debate, delay. *Trends in Ecology & Evolution*, **33**: 568-571.

Laurance WF. 2019. The thin green line: Scientists must do more to limit the toll of burgeoning infrastructure on nature and society. *The Ecological Citizen*, **3**: in press.

McClure CJW, Ware HE, Carlisle J, *et al*. 2015. An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: Avoiding the phantom road. *Proceedings of*

the Royal Society B, **280**: 1-9.

Pan WJ, Lin L, Luo AD, *et al*. 2009. Corridor use by Asian elephants. *Integrative Zoology*, **4**: 220-231.

Pohlman C, Turton SM, Goosem MW. 2009. Temporal variation in microclimatic edge effects near powerlines, highways and streams in Australian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**: 84-85.

Reid J, Junior WCS. 2005. Infrastructure and conservation policy in Brazil. *Conservation Biology*, **19**: 740-746.

Sloan S, Campbell MJ, Alamgir M, *et al*. 2018a. Infrastructure development and contested forest governance threaten the Leuser Ecosystem, Indonesia. *Land Use Policy*, **77**: 298-309.

Sloan S, Supriatna J, Campbell MJ, *et al*. 2018b. Newly discovered orangutan species requires urgent habitat protection. *Current Biology*, **28**: 1-3.

Sloan S, Campbell MJ, Alamgir M, *et al*. 2019. Hidden challenges for conservation and development along the Trans-Papuan economic corridor. *Environmental Science and Policy*, **92**: 98-106.

Suárez E, Morales M, Cueva R, *et al*. 2009. Oil industry, wild meat trade and roads: Indirect effects of oil extraction activities in a protected area in North-Eastern Ecuador. *Animal Conservation*, **12**: 364-373.

Van der Ree R, Smith DJ, Grilo C. 2015. Handbook of road ecology. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.

Wadey J, Beyer HL, Saaban S, *et al*. 2018. Why did the elephant cross the road? The complex response of wild elephants to a major road in Peninsular Malaysia. *Biological Conservation*, **218**: 91-98.

Wilkie D, Shaw E, Rotberg F, *et al*. 2000. Roads, development, and conservation in the Congo Basin. *Conservation Biology*, **14**: 1614-1622.

WTI. 2013. Staying connected: addressing the impacts of linear intrusions on wildlife in Western Ghats. Presentation made at Five Year Participatory Assessment of CEPF Workshop. http://indiabiodiversity.org/project/show/89. (2019-6-10).

作者简介 王 冀,女,1989年生,硕士,副研究员,主要从事公路景观规划与生态学研究。E-mail: 15843347@qq.com

责任编辑 李凤芹