

DOI: 10.20103/j.stxb.202403310678

李成, 钱天宇, 章文艳, 李明喜, 江建平. 路杀对两栖爬行动物的影响机制及保护策略. 生态学报, 2024, 44(21): 9989-9999.

Li C, Qian T Y, Zhang W Y, Li M X, Jiang J P. The Effects of Road-kills on the herpetological diversity and its conservation strategies. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9989-9999.

路杀对两栖爬行动物的影响机制及保护策略

李 成^{1,*}, 钱天宇¹, 章文艳^{1,2}, 李明喜^{1,2}, 江建平¹

¹ 中国科学院成都生物研究所, 成都 610213

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 野生动物路杀严重影响道路使用者和动物, 导致人员伤亡、重大经济损失和高昂的生物多样性成本。降低路杀死亡率在野生动物保护、平安交通和发展经济等方面具有重要意义。两栖爬行动物是受路杀影响的主要野生脊椎动物类群, 因此, 监测和评估路域两栖爬行动物多样性的变化并确定其影响机制是一个紧迫的问题。总结了路杀的关键影响因素, 展示了路杀对种群和遗传多样性的效应, 并介绍了较为有效的保护方法和工程措施。中国具有丰富的两栖爬行动物, 我国台湾地区于 2011 年构建了路杀监测网络, 统计有 123 种两栖爬行动物受到路杀影响; 中国大陆于 2021 年已建立相关路杀研究网络, 统计有 105 种两栖爬行动物受到路杀影响。为了更好地保护和恢复两栖爬行动物多样性, 努力减轻这些影响, 需应用新技术和方法, 如 DNA 条形码鉴定方法和无线电追踪技术, 改进调查质量; 加强道路的生态保护工程建设和管理措施, 提高保护效果; 推动中国生态保护和道路建设可持续发展规划, 优先保护具有重要生态系统服务功能的地区。

关键词: 两栖动物; 爬行动物; 路杀; 生态; 保护

The Effects of Road-kills on the herpetological diversity and its conservation strategies

LI Cheng^{1,*}, QIAN Tianyu¹, ZHANG Wenyan^{1,2}, LI Mingxi^{1,2}, JIANG Jianping¹

¹ Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China

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

Abstract: Wildlife-vehicle collisions (WVCs) have serious consequences for both animals and road users, resulting in fatalities and injuries, major economic losses, and high biodiversity costs. Reducing road mortality has become increasingly important for wildlife conservation, safe transport, and economic development. Among the community of vertebrate groups, amphibians and reptiles are more vulnerable to road mortality because they often migrate to the habitats for hibernation in autumn and breeding in spring. A recent assessment suggested that they accounted for almost 80% of the road mortality among vertebrates. It is clear that road-kill is a major source of their mortality and may be contributing to their global decline. Therefore, monitoring changes in the diversity of amphibians and reptiles within the road effect zone and identifying the mechanism of its influence is a pressing issue. This article reviews ecological studies on road-kill of amphibians and reptiles, summarises the main factors influencing it, shows its impact on population and genetic diversity, and presents the ingredients for an effective engineering programme. Road-kills of amphibians and reptiles is related to external factors such as weather, traffic conditions, seasonal and temporal factors, and spatial factors, as well as influenced by their own biological characteristics, life history and ecological needs. China is very rich in amphibians and reptiles, Taiwan

基金项目: 成都大熊猫繁育研究基地项目(2022CPB-B12); 国家自然科学基金项目(32370482); 保护区特有物种爬行动物保护项目资助

收稿日期: 2024-03-31; **网络出版日期:** 2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: licheng@cib.ac.cn

established an island-wide road-kill monitoring network in 2011, with 123 species of amphibians and reptiles road-killed; Chinese Mainland has developed road-kill monitoring applications in 2021, and this article shows that 105 species of amphibians and reptiles have been road-killed. In an effort to mitigate these impacts, many technologies and conservation strategies have been developed to counter anthropogenic threats. DNA barcoding and radio tracking technologies are being used to conduct biodiversity surveys; road construction needs to pay sufficient attention to minimise the pervasive impact, from design to implementation of mitigation measures. Given the slow movements of amphibians and reptiles, traffic calming and temporary road closure actions in an area of high road density may be effective options. Based on the migratory behaviour, culverts combined with fences are necessary in the road effect zone, as fences can direct them into culverts, 55% of amphibian individuals use ecological culverts to cross roads, and exclusion fences can reduce the road mortality of reptile individuals by an average of 54%. Finally, there remains an urgent need to improve and update the sustainable planning of road construction and conservation initiatives in China, to ensure that regions that support exceptional biodiversity with vital ecosystem services are protected.

Key Words: amphibians; reptiles; roadkill; ecology; conservation

1 路杀已成为野生脊椎动物的主要威胁之一

道路对经济发展和生态环境具有巨大的影响。一方面,道路联通城乡、国家,推动全球经济发展;另一方面,经济的快速增长也加速了道路建设,无道路影响的区域逐渐减少^[1-2];随之而来的野生脊椎动物死亡、栖息地退化、甚至物种灭绝等问题也愈演愈烈,尤其是动物与道路车辆碰撞(Wildlife-vehicle collisions, WVCs)导致的死亡成为越来越普遍的现象^[3-7]。道路交通造成的动物道路死亡(即路杀)严重影响道路使用者和动物,导致人员伤亡、重大经济损失和高昂的生物多样性成本。在全球范围内,由于交通基础设施的扩展、交通量和车速的增加,近十几年来路杀的数量一直在增加。例如,2003—2015年,瑞典的路杀数量增加了36%^[8];1990—2004年,美国的路杀数量增加了50%;2001—2010年,波兰的路杀数量增加了一倍^[9]。路杀是野生脊椎动物的一个重大威胁,据估计每年会导致数亿脊椎动物死亡^[10]。在美国,每年为此付出的成本为98亿美元^[9]。因此,降低路杀死亡率在野生脊椎动物生态和保护、交通管理、减少人身伤害和经济损失等方面具有重要意义。

路杀的野生脊椎动物主要包括两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类^[5-6, 11]。路杀给野生脊椎动物带来了巨大的威胁,被认为是脊椎动物非自然死亡的最重要原因,已经超过了狩猎等其它重大影响^[12-14],是导致脊椎动物种群数量下降的一个重要因素^[15-16]。大型哺乳动物路杀还会导致严重交通事故,增加社会经济成本,公众关注度高。因此,早期的路杀研究主要集中于大型哺乳动物上,而较少涉及两栖爬行动物^[17]。目前研究者和公众对大型、保护动物关注多,对小型、非保护动物关注少^[18-19]。然而这些小型、非保护动物却是受道路负面影响最大的类群,如两栖爬行动物,占有路杀动物个体数量的80%^[5],但由于两栖爬行动物的保护级别低,关注度低,且与大型动物相比,两栖爬行动物与车辆的碰撞,很少对人类的安全构成威胁^[20],因此相关研究较少,保护措施也相对缺乏,相应的建设规范和工程实践亟待加强。本文系统梳理了两栖爬行动物的路杀影响机理及效应的研究进展、中国在该领域的研究状况和降低路杀影响的保护措施,以期明晰未来的发展重点,促进路杀研究成果为交通建设和生态文明服务。

2 两栖爬行动物的路杀影响机理及效应

两栖爬行动物路杀既与外部因素,如天气因素、交通状况、季节和时间因素、空间因素具有密切的关系,又受到两栖爬行动物自身的生物学特点、生活史需求、生态习性的驱动。

2.1 两栖动物的路杀影响机理及效应

两栖动物是动物进化史上从水到陆的过渡类群,既能适应水生生活又能适应陆生生活,需要在水生和陆生栖息地之间迁徙,而且具有高度渗透的皮肤,因此常被作为生态指示物种。第一次全球范围内的两栖动物评估表明,两栖动物比哺乳动物和鸟类等受到的环境威胁更严重,是灭绝风险最高的脊椎动物,并且正在以更高比例的速度下降^[21]。全球气候的改变、紫外线辐射的增加、外来物种的入侵、病原体的侵入、人为捕捉、栖息地的破碎化和环境的污染是导致两栖动物下降的主要原因^[22-23]。此外,两栖动物由于具有非常敏感的皮肤、缓慢的移动速度和特定的迁徙行为,使其比其它脊椎动物更易受到路杀的威胁^[24-26];越来越多的研究表明,两栖动物种群数量下降与路杀有关^[27],路杀是一个新的影响两栖动物生存的原因^[28]。

两栖动物因为具有卵、蝌蚪、成体的三阶段的生活史,长期在繁殖地和冬眠地之间迁徙,行动缓慢,并且对迎面而来的车辆通常保持静止^[29-33]。同时现代道路的黑色路面会从太阳辐射中吸收相当多的热量,而在天气比较凉爽的时候,两栖动物容易受到温暖道路的吸引上路,导致了相当高的路杀事件^[12]。随着道路网的扩增和交通量的增加,两栖动物路杀成为愈加严重和普遍的现象^[34-35]。Coelho 等^[36]在大西洋生物圈保护区南边的 389 国道,选取 4.4 km 进行了为期 16 个月的两栖动物路杀调查,发现每年的两栖动物路杀数为 9002 只/km。Garriga 等^[5]在欧洲的比利牛斯山脉附近选择了 7 条道路,一年内调查了 3360 km 的道路,共发现 2228 只脊椎动物死亡,其中两栖动物占死亡总数的 66%。

目前,两栖动物路杀的外部因素主要集中在天气因素、交通状况、季节和时间因素、空间因素。(1)天气因素,两栖动物的皮肤对温度和湿度等天气因素的改变非常敏感,当天气条件改变时,常常引起蛙类鸣叫或进行繁殖活动等反应,两栖动物在雨后比晴天更容易遭受路杀的危害^[37],两栖动物路杀率和相对湿度成正相关^[5]。(2)交通状况,通常交通量越高,造成两栖动物的路杀率越高^[29, 34];道路越宽两栖动物穿过道路花费的时间越长,更容易与车辆发生碰撞,Gu 等^[38]对影响若尔盖湿地两栖动物路杀率的因素进行分析,发现宽的道路比窄的道路导致的路杀率更高。此外车速越高,道路密度越大,路杀率越高^[39-40];当车流量在 24—40 台/h,会导致穿越道路 50%的大蟾蜍(*Bufo bufo*)死亡;当车流量在 60 台/h,会导致 90%的大蟾蜍死亡^[40]。(3)季节和时间因素,两栖动物路杀主要集中在 4 月、6 月和 7 月,夜行性物种多,夜间车流量才是导致两栖动物路杀的关键因素^[41]。(4)空间因素,当路边栖息地能提供两栖动物完成水陆两栖的生活条件时,路杀的高频地点就集中在靠近繁殖点的路段上,尤其是如虎纹钝口螈(*Ambystoma tigrinum*)^[42]、华西蟾蜍(*B. andrewsi*)和中国林蛙(*Rana chensinensis*)^[41]便有相当高的路杀率。

两栖动物路杀的内部因素主要集中在生物学特点、生活史需求、生态习性上面。(1)生物学特点,不同的两栖动物繁殖能力差异大,产卵量越大的物种一般种群越多。Orlowski^[31]研究发现,影响下西里西亚省道路上的大蟾蜍路杀率的主要因素是该种在本地繁殖种群的大小;章文艳^[43]在四川省平武县王朗自然保护的调查发现,路杀物种的种群数量与道路影响区物种的种群数量具有较密切的关系。道路影响区的华西蟾蜍占比 76.7%,中国林蛙占比 23.3%,而该区域路杀的华西蟾蜍占比 85.2%,中国林蛙占比 14.8%。(2)生活史需求,两栖动物路杀在时间和空间上的分布模式与其生活史密切相关^[36];从时间分布看,两栖类路杀高峰期通常与两栖动物的繁殖、育肥、越冬等季节性迁徙有着密切联系^[41, 44-46];而从空间分布看,两栖动物路杀热点区域主要发生在靠近水体周边的路段上^[5, 31, 41, 47]。(3)生态习性,采用无线电追踪技术对王朗自然保护区的中国林蛙和华西蟾蜍的运动、家域、生境选择的研究发现:中国林蛙选择森林作为主要的生境,活动位置离道路的距离较远,家域与道路的重叠度较低;华西蟾蜍主要选择道路附近的灌丛作为生境,活动位置离道路的距离较近,家域与道路的重叠度较高,是两者的路杀数量存在种间差异的主要原因^[48]。

路杀对两栖动物的丰度和分布具有严重的负面影响,并导致遗传多样性的下降^[35, 39, 49]。Jackson 和 Fahrig^[50]将之命名为:耗损效应(depletion effects)和障碍效应(barrier effects);前者是因为路杀降低了动物的丰度和种群大小,导致动物种群大量的耗损;后者是由于大多数动物对道路有避让行为,并且道路也限制了动物的迁徙扩散,导致了种群之间基因交流的障碍,降低了有效种群的大小,使种群的遗传多样性显著下降;总

体上遗传多样性的丧失更多是由于损耗效应而非屏障效应决定的。例如,棕色锄足蛙(*Pelobates fuscus*)每年大约有 10% 的成蛙死于路杀,主要是由于道路的损耗效应导致种群数量的下降^[29];破碎化生境中的小种群更易发生遗传漂变,导致稀有的等位基因完全从本地基因库中丢失,降低了种群的遗传多样性^[51]。

2.2 爬行动物的路杀影响机理及效应

爬行动物路杀的外部因素主要集中在天气因素、交通状况、季节和时间因素、空间因素。(1)天气因素,因为爬行动物是变温动物,其生理生态活动受自然环境条件影响而变化,其中温度因子作用最显著^[52-55]。在温暖的月份,蜥蜴开始繁殖和觅食,增加了它们使用道路的可能性^[56];蛇喜欢在温暖的路面上晒太阳以吸收辐射热,进行体温调节,这种行为延长了它们暴露于道路的时间,增加了被碾压的可能性^[57-58]。(2)交通状况,蛇类缓慢的移动速度和细长的身体,在交通量大和道路较宽的情况下,更易发生路杀^[32]。(3)季节和时间因素,龟类通常进行季节性迁徙,导致了高的路杀率^[59-60]。(4)空间因素,许多研究表明,动物的路杀现象并不是随机发生的,而是空间聚集的,部分路段的路杀数量占了相当大的比例。在西双版纳的小磨道路及周边道路的研究发现,农田附近蛇的路杀数量显著高于天然林^[61],这都表明爬行动物的路杀现象受到人类活动的影响。海拔是道路死亡事故的重要决定因素,在云南省普洱市思茅区的研究发现,85.0%的爬行动物路杀个体数集中在海拔 1200—1500 m 区间^[62]。此外,一些司机故意碾压蛇类和龟类,增加了对爬行动物的威胁^[63-65]。

爬行动物路杀的内部因素主要集中在独特的活动节律、生活史需求、行为习性和运动模式^[1, 56, 66]。(1)活动节律,爬行动物具有明显的活动节律,每日具有 2—3 个活动高峰,对云南省普洱市思茅区爬行动物路杀现象调查发现,爬行动物的路杀有 3 个高峰时间段,7:00—10:00 时是最集中的路杀时间段。温度 20—25℃ 是最集中的路杀温度范围。进一步的分析发现,爬行动物的路杀与其活动节律有关,7:00—10:00 时的晒阳行为可能是路杀的主要诱因^[62]。(2)生活史需求,蛇类的活动也随季节模式而变化,蛇类是外温动物,其生理生态活动受自然环境条件,尤其是温度因子的显著影响,随着气温升高,其繁殖和觅食活动逐渐频繁;而且,很多蛇在道路上晒太阳以调节体温,这使它们更容易受到路杀的影响^[32],因此,夏天和秋天的路杀率更高^[67]。(3)行为习性和运动模式,部分爬行动物,尤其是蛇类,会对迎面而来的车辆卷曲身体,静止不动而遭到车辆碾压^[68-69]。

爬行动物路杀也通过损耗效应和障碍效应引起了种群数量下降和遗传多样性降低^[35]。爬行动物已经受到路杀的严重影响^[32, 56, 60-62, 70-73],引起了多种爬行动物种群数量下降^[74-76],使爬行动物成为濒危程度最高的脊椎动物类群之一^[77]。

3 中国的两栖爬行动物路杀现状

中国面临着经济发展和生态保护的双重压力,截至 2019 年底,中国两栖动物 515 种,爬行动物 511 种^[78]。中国的路杀研究是随着经济发展和路网规模扩展,首先在生物多样性丰富的南方地区开展起来,台湾地区于 2011 年构建了动物路杀观察网(Taiwan Roadkill Observation Network),统计有 123 种两栖爬行动物受到路杀影响^[67];中国大陆于 2021 年构建相关路杀监测网络(<https://transportecology.net>),经过查阅文献^[38, 41, 61-62, 79-82]及本文作者在四川省都江堰市熊猫谷、浙江省开化县古田山自然保护区和西藏自治区米林市雅鲁藏布大峡谷调查统计,中国大陆有 105 种两栖爬行动物受到路杀影响(表 1)。

105 种两栖爬行动物隶属 3 目(有尾目、无尾目、有鳞目)24 科。3 目中,有鳞目 15 科 73 种;无尾目 8 科 31 种;有尾目 1 科 1 种。24 科中,游蛇科 23 种;水游蛇科 15 种;蛙科 14 种。值得关注的是有 6 种国家二级重点保护物种(极北鲵 *Salamandrella keyserlingii*、虎纹蛙 *Hoplobatrachus chinensis*、闪鳞蛇 *Xenopeltis unicolor*、极北蝮 *Vipera berus*、眼镜王蛇 *Ophiophagus hannah*、三索蛇 *Coelognathus radiatus*)受到路杀影响。初步的结果显示,两栖爬行动物路杀是亟待缓解的生物多样性威胁之一。

表 1 2010—2023 年中国大陆路杀两栖爬行动物物种名录

Table 1 Species of amphibians and reptiles road-killed in Chinese Mainland from 2010 to 2023

序号 No.	目 Order	科 Family	种 Species	保护级别 Protection levels
1	有尾目 Caudata	小鲵科 Hynobiidae	极北鲵 <i>Salamandrella keyserlingii</i>	II
2	无尾目 Anura	铃蟾科 Bombinatoridae	东方铃蟾 <i>Bombina orientalis</i>	
3	无尾目 Anura	角蟾科 Megophryidae	崇安髭蟾 <i>Leptobranchium liui</i>	
4	无尾目 Anura	角蟾科 Megophryidae	宽头短腿蟾 <i>Megophrys carinense</i>	
5	无尾目 Anura	角蟾科 Megophryidae	短肢角蟾 <i>Megophrys brachykolos</i>	
6	无尾目 Anura	蟾蜍科 Bufonidae	中华蟾蜍 <i>Bufo gargarizans</i>	
7	无尾目 Anura	蟾蜍科 Bufonidae	黑眶蟾蜍 <i>Duttaphrynus melanostictus</i>	
8	无尾目 Anura	雨蛙科 Hylidae	日本雨蛙 <i>Hyla japonica</i>	
9	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	中国林蛙 <i>Rana chensinensis</i>	
10	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	东北林蛙 <i>Rana dybowskii</i>	
11	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	高原林蛙 <i>Rana kukunoris</i>	
12	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	峨眉林蛙 <i>Rana omeimontis</i>	
13	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	镇海林蛙 <i>Rana zhenhaiensis</i>	
14	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	林芝湍蛙 <i>Amolops nyingchiensis</i>	
15	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	华南湍蛙 <i>Amolops ricketti</i>	
16	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	弹琴蛙 <i>Nidirana adenopleura</i>	
17	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	沼水蛙 <i>Hylarana guentheri</i>	
18	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	大绿臭蛙 <i>Odorrana graminea</i>	
19	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	绿臭蛙 <i>Odorrana margaretae</i>	
20	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	花臭蛙 <i>Odorrana schmackeri</i>	
21	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	竹叶蛙 <i>Odorrana versabilis</i>	
22	无尾目 Anura	蛙科 Ranidae	黑斑侧褶蛙 <i>Pelophylax nigromaculatus</i>	
23	无尾目 Anura	叉舌蛙科 Dicroglossidae	虎纹蛙 <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	II
24	无尾目 Anura	叉舌蛙科 Dicroglossidae	泽陆蛙 <i>Fejervarya multistriata</i>	
25	无尾目 Anura	叉舌蛙科 Dicroglossidae	福建大头蛙 <i>Limnonectes fujianensis</i>	
26	无尾目 Anura	叉舌蛙科 Dicroglossidae	倭蛙 <i>Nanorana pleskei</i>	
27	无尾目 Anura	叉舌蛙科 Dicroglossidae	棘腹蛙 <i>Quasipaa boulengeri</i>	
28	无尾目 Anura	树蛙科 Rhacophoridae	凹顶泛树蛙 <i>Polypedates impresus</i>	
29	无尾目 Anura	树蛙科 Rhacophoridae	斑腿树蛙 <i>Polypedates megacephalus</i>	
30	无尾目 Anura	树蛙科 Rhacophoridae	大树蛙 <i>Zhangixalus dennysi</i>	
31	无尾目 Anura	树蛙科 Rhacophoridae	棕褶树蛙 <i>Zhangixalus feae</i>	
32	无尾目 Anura	姬蛙科 Microhylidae	小弧斑姬蛙 <i>Microhyla heymonsi</i>	
33	有鳞目 Squamata	石龙子科 Scincidae	铜蜓蜥 <i>Sphenomorphus indicus</i>	
34	有鳞目 Squamata	石龙子科 Scincidae	中国石龙子 <i>Plestiodon chinensis</i>	
35	有鳞目 Squamata	石龙子科 Scincidae	蓝尾石龙子 <i>Plestiodon elegans</i>	
36	有鳞目 Squamata	蜥蜴科 Lacertidae	北草蜥 <i>Takydromus septentrionalis</i>	
37	有鳞目 Squamata	蜥蜴科 Lacertidae	丽斑麻蜥 <i>Eremias argus</i>	
38	有鳞目 Squamata	鬣蜥科 Agamidae	拉萨岩蜥 <i>Laudakia sacra</i>	
39	有鳞目 Squamata	鬣蜥科 Agamidae	丽棘蜥 <i>Acanthosaura lepidogaster</i>	
40	有鳞目 Squamata	鬣蜥科 Agamidae	棕背树蜥 <i>Calotes emma</i>	
41	有鳞目 Squamata	鬣蜥科 Agamidae	变色树蜥 <i>Calotes versicolor</i>	
42	有鳞目 Squamata	盲蛇科 Typhlopidae	钩盲蛇 <i>Indotyphlops braminus</i>	
43	有鳞目 Squamata	闪鳞蛇科 Xenopeltidae	闪鳞蛇 <i>Xenopeltis unicolor</i>	II
44	有鳞目 Squamata	钝头蛇科 Pareidae	平鳞钝头蛇 <i>Pareas boulengeri</i>	
45	有鳞目 Squamata	钝头蛇科 Pareidae	中国钝头蛇 <i>Pareas chinensis</i>	

续表

序号 No.	目 Order	科 Family	种 Species	保护级别 Protection levels
46	有鳞目 Squamata	钝头蛇科 Pareidae	台湾钝头蛇 <i>Pareas formosensis</i>	
47	有鳞目 Squamata	钝头蛇科 Pareidae	横纹钝头蛇 <i>Pareas margaritophorus</i>	
48	有鳞目 Squamata	钝头蛇科 Pareidae	福建钝头蛇 <i>Pareas stanleyi</i>	
49	有鳞目 Squamata	蝰科 Viperidae	极北蝰 <i>Vipera berus</i>	II
50	有鳞目 Squamata	蝰科 Viperidae	原矛头蝰 <i>Protobothrops mucrosquamatus</i>	
51	有鳞目 Squamata	蝰科 Viperidae	察隅烙铁头蛇 <i>Ovophis zayuensis</i>	
52	有鳞目 Squamata	蝰科 Viperidae	墨脱竹叶青蛇 <i>Viridovipera medoensis</i>	
53	有鳞目 Squamata	蝰科 Viperidae	福建竹叶青蛇 <i>Viridovipera stejnegeri</i>	
54	有鳞目 Squamata	蝰科 Viperidae	西伯利亚蝰 <i>Gloydius halys</i>	
55	有鳞目 Squamata	水蛇科 Homalopsidae	中国水蛇 <i>Myrrophis chinensis</i>	
56	有鳞目 Squamata	水蛇科 Homalopsidae	铅色水蛇 <i>Hypsiscopus plumbea</i>	
57	有鳞目 Squamata	屋蛇科 Lamprophiidae	紫沙蛇 <i>Psammodynastes pulverulentus</i>	
58	有鳞目 Squamata	眼镜蛇科 Elapidae	银环蛇 <i>Bungarus multicinctus</i>	
59	有鳞目 Squamata	眼镜蛇科 Elapidae	舟山眼镜蛇 <i>Naja atra</i>	
60	有鳞目 Squamata	眼镜蛇科 Elapidae	孟加拉眼镜蛇 <i>Naja kaouthia</i>	
61	有鳞目 Squamata	眼镜蛇科 Elapidae	眼镜王蛇 <i>Ophiophagus hannah</i>	II
62	有鳞目 Squamata	眼镜蛇科 Elapidae	中华珊瑚蛇 <i>Sinomicrurus macclellandi</i>	
63	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	金花蛇 <i>Chrysopelea ornata</i>	
64	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	过树蛇 <i>Dendrelaphis pictus</i>	
65	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	绿林蛇 <i>Boiga cyanea</i>	
66	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	绞花林蛇 <i>Boiga kraepelini</i>	
67	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	繁花林蛇 <i>Boiga multomaculata</i>	
68	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	紫棕小头蛇 <i>Oligodon cinereus</i>	
69	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	中国小头蛇 <i>Oligodon chinensis</i>	
70	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	翠青蛇 <i>Cyclophiops major</i>	
71	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	灰鼠蛇 <i>Ptyas korros</i>	
72	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	灰腹绿锦蛇 <i>Gonyosoma frenatum</i>	
73	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	白环蛇 <i>Lycodon aulicus</i>	
74	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	黄链蛇 <i>Lycodon flavozonatus</i>	
75	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	黑背白环蛇 <i>Lycodon ruhstrati</i>	
76	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	赤链蛇 <i>Lycodon rufozonatus</i>	
77	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	白链蛇 <i>Lycodon septentrionalis</i>	
78	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	三索蛇 <i>Coelognathus radiatus</i>	II
79	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	玉斑锦蛇 <i>Euprepiophis mandarinus</i>	
80	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	紫灰锦蛇 <i>Oreocryptophis porphyraceus</i>	
81	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	王锦蛇 <i>Elaphe carinata</i>	
82	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	白条锦蛇 <i>Elaphe dione</i>	
83	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	黑眉锦蛇 <i>Elaphe taeniura</i>	
84	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	棕黑锦蛇 <i>Elaphe schrenckii</i>	
85	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	红纹滞卵蛇 <i>Oocatochus rufodorsatus</i>	
86	有鳞目 Squamata	两头蛇科 Calamariidae	尖尾两头蛇 <i>Calamaria pavimentata</i>	
87	有鳞目 Squamata	两头蛇科 Calamariidae	钝尾两头蛇 <i>Calamaria septentrionalis</i>	
88	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	草腹链蛇 <i>Amphisma stolum</i>	
89	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	白眉腹链蛇 <i>Hebius boulengeri</i>	
90	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	棕黑腹链蛇 <i>Hebius sauteri</i>	
91	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	颈棱蛇 <i>Pseudoagkistrodon rudis</i>	

续表

序号 No.	目 Order	科 Family	种 Species	保护级别 Protection levels
92	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	喜山颈槽蛇 <i>Rhabdophis himalayanus</i>	
93	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	缅甸颈槽蛇 <i>Rhabdophis leonardi</i>	
94	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	黑纹颈槽蛇 <i>Rhabdophis nigrocinctus</i>	
95	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	红颈颈槽蛇 <i>Rhabdophis subminiatus</i>	
96	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	虎斑颈槽蛇 <i>Rhabdophis tigrinus</i>	
97	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	渔游蛇 <i>Xenochrophis piscator</i>	
98	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	莽山后棱蛇 <i>Opisthotropis cheni</i>	
99	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	山溪后棱蛇 <i>Opisthotropis latouchii</i>	
100	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	环纹华游蛇 <i>Trimerodytes aequifasciatus</i>	
101	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	乌华游蛇 <i>Trimerodytes percarinatus</i>	
102	有鳞目 Squamata	水游蛇科 Natricidae	云南华游蛇 <i>Trimerodytes yunnanensis</i>	
103	有鳞目 Squamata	斜鳞蛇科 Pseudoxenodontidae	崇安斜鳞蛇 <i>Pseudoxenodon karlschmidti</i>	
104	有鳞目 Squamata	斜鳞蛇科 Pseudoxenodontidae	大眼斜鳞蛇 <i>Pseudoxenodon macrops</i>	
105	有鳞目 Squamata	剑蛇科 Sibynophiidae	黑领剑蛇 <i>Sibynophis collaris</i>	

4 降低两栖爬行动物路杀的关键措施研究

针对路杀对两栖爬行动物的影响,科学家开展了越来越多的研究并取得显著进展,为制订保护措施奠定了科学基础。道路的生态保护工程和管理措施可有效地降低路杀死亡率,提高保护效果,降低路杀对两栖爬行动物造成的影响^[32, 83]。同时,中国的路杀研究仍然不适应生物多样性保护的需求,需要新的技术创新和应用^[48, 84]。

4.1 形态学与 DNA 条形码融合的鉴定方法

目前,绝大部分研究人员通过形态学方法确定路杀物种,但大多数路杀个体的形态特征和器官因车轧已损坏或不完整,有相当比例的路杀动物无法鉴定到物种水平,如南京市路杀动物研究,记录路杀个体 293 只,其中有 128 只无法鉴定到物种水平,占比 43.7%^[82]。DNA 条形码(DNA barcoding)提供了可信息化的分类学标准和有效的分类学手段,实现了生物多样性研究中分子鉴定技术的创新^[84],通过采集路杀个体或破碎器官组织,提取其 DNA 进行测序,与国际 NCBI 基因库比对,结合形态学鉴定,可以有效地确定路杀个体的物种信息。

4.2 无线电追踪技术对物种生态习性的研究

当前无线电追踪技术主要应用于两栖爬行动物的运动模式、家域和生境选择与利用等生态学研究,而针对路杀的研究仅局限在通过传统的方法(步行、骑车和驾车慢速行驶等),无法得到路域两栖爬行动物的运动模式、家域和生境选择等数据。通过无线电追踪技术研究在道路周边生活的两栖爬行动物,不仅能深入了解其活动节律、运动模式、家域以及生境选择与利用等生态学问题,还能追踪和监测两栖爬行动物的行为习性,研究其与环境因素(温度、湿度和降雨量等)的关系,揭示随季节变化的栖息地选择,探明其关键栖息地和生态廊道,从而进一步探索路杀的原因和制订更加有针对性的保护措施,目前已在四川省平武县王朗保护区利用无线电追踪技术开展了两栖动物的路杀研究^[48]。

4.3 道路的生态保护工程和管理措施

生态保护工程和管理措施主要分为 2 个方面:一是改变动物的行为,研究表明生态涵洞和栅栏系统对减缓两栖动物的路杀非常有效,55%的两栖动物会利用生态涵洞穿越道路^[40, 85]。涵洞宽度和高度都大于 0.4 m,栅栏高 0.5—0.9 m,长 100—200 m,就能有效地引导两栖动物进入生态涵洞^[86]。建设隔离围栏对降低爬行动物路杀效果最好,可以将爬行动物的道路致死率平均降低 54%^[10];针对蛇类运动能力和攀爬能力较强的特

点,100 cm 高的带挡板的围栏对降低大型蛇类路杀具有极高的效率,可以阻止 93.3%的蛇类穿越^[87]。二是改变人类的行为,采取树立警告牌、暂时性的关闭道路和交通减速等措施^[27,88]。德国在每年的 3—4 月的两栖动物繁殖期,自 17:00 至次日 07:00 期间禁止车辆在保护区内通行,对减少两栖动物路杀效果显著^[88]。在中国四川省平武县王朗自然保护区的两栖动物路杀研究发现,夜间车流量才是导致两栖动物路杀的关键因素,与白天的车流量无关^[41];结合动物保护和生态旅游协调发展,提出了道路分时利用的措施:白天游客利用道路,晚上动物利用道路,人与动物的“错峰出行”^[89]。目前,该措施主要在自然保护区内实施,对于生物多样性保护有很好的应用前景。

道路建设仍然是中国未来几十年内的重要基础工程项目,在规划和建设过程中,生态学家和道路规划者应该紧密合作,通过识别全国不同地域的经济效益和生态效益,在经济效益高的地区修建道路,而在生态损害高的地区少建或不建道路,制订中国的“道路建设与生态保护规划图”。中国生态学家通过评估交通网络对 21 个重点保护物种的栖息地破碎化的影响,划定了 17 个重点影响区域,建议作为生态保护的关键区域^[90]。下一步需选择这些关键区域开展国家层面的路杀调查,解析敏感物种的生态需求和行为模式,全面掌握路杀对两栖爬行动物影响的范围和程度,评估两栖爬行动物路杀的原因与后果;系统阐述环保工程降低路杀死亡率的形式和幅度,构建绿色道路设计的方法和模式,提高生态保护工程和管理措施的保护效果。

参考文献 (References):

- [1] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, Clevenger A P, Cutshall C D, Dale V D, Fahrig L, France R, Goldman C R, Heanue K, Jones J A, Swanson F J, Turrentine T, Winter T C. Road Ecology: Science and Solutions. Washington: Island Press, 2003, 1-481.
- [2] Ibisch P L, Hoffmann M T, Kreft S, Pe'er G, Kati V, Biber-Freudenberger L, DellaSala D A, Vale M M, Hobson P R, Selva N. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 2016, 354(6318): 1423-1427.
- [3] Taylor B D, Goldingay R L. Wildlife road-kills on three major roads in north-eastern New South Wales. *Wildlife Research*, 2004, 31(1): 83-91.
- [4] Hobday A J, Minstrell M L. Distribution and abundance of roadkill on Tasmanian highways: human management options. *Wildlife Research*, 2008, 35(7): 712-726.
- [5] Garriga N, Franch M, Santos X, Montori A, Llorente G A. Seasonal variation in vertebrate traffic casualties and its implications for mitigation measures. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157: 36-44.
- [6] Canal D, Camacho C, Martín B, de Lucas M, Ferrer M. Magnitude, composition and spatiotemporal patterns of vertebrate roadkill at regional scales: a study in southern Spain. *Animal Biodiversity and Conservation*, 2018, 41(2): 281-300.
- [7] Pagany R. Wildlife-vehicle collisions-Influencing factors, data collection and research methods. *Biological Conservation*, 2020, 251: 108758.
- [8] Gren I, Jägerbrand A. Calculating the costs of animal-vehicle accidents involving ungulate in Sweden. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 70: 112-122.
- [9] Borowik T, Ratkiewicz M, Maslanko W, Kowalczyk R, Duda N, Zmihorski M. Temporal pattern of moose-vehicle collisions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 92: 102715.
- [10] Rytwinski T, Soanes K, Jaeger J A G, Fahrig L, Findlay C S, Houlihan J, van der Ree R, van der Grift E A. How effective is road mitigation at reducing road-kill? A meta-analysis. *PLoS One*, 2016, 11(11): e0166941.
- [11] D'Amico M, Román J, de los Reyes L, Revilla E. Vertebrate road-kill patterns in Mediterranean habitats: who, when and where. *Biological Conservation*, 2015, 191: 234-242.
- [12] Forman R T T, Alexander L E. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 207-231.
- [13] Laurance W F, Croes B M, Guissouegou N, Buij R, Dethier M, Alonso A. Impacts of roads, hunting, and habitat alteration on nocturnal mammals in African rainforests. *Conservation Biology*, 2008, 22(3): 721-732.
- [14] Laurance W F, Goosem M, Laurance S G W. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(12): 659-669.
- [15] Dique D S, Thompson J, Preece H J, Penfold G C, de Villiers D L, Leslie R S. Koala mortality on roads in south-east Queensland: the koala speed-zone trial. *Wildlife Research*, 2003, 30(4): 419-426.
- [16] Collins C, Kays R. Causes of mortality in North American populations of large and medium - sized mammals. *Animal Conservation*, 2011, 14(5): 474-483.
- [17] Clevenger A P, Chruszcz B, Gunson K E. Spatial patterns and factors influencing small vertebrate fauna road-kill aggregations. *Biological*

- Conservation, 2003, 109(1): 15-26.
- [18] 连新明, 李晓晓, 徐图. 可可西里四种有蹄类动物对道路的回避距离及保护建议. 生态学杂志, 2012, 31(1): 81-86.
- [19] 阿卜杜赛麦提·买尔迪亚力, 王云, 陶双成, 孔亚平, 王昊, 吕植. 我国道路对野生动物影响研究的现状与挑战. 生物多样性, 2022, 30(11): 233-250.
- [20] Danks Z D, Porter W F. Temporal, spatial, and landscape habitat characteristics of moose-vehicle collisions in western Maine. Journal of Wildlife Management, 2010, 74(6): 1229-1241.
- [21] Stuart S N, Chanson J S, Cox N A, Young B E, Rodrigues A S L, Fischman D L, Waller R W. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. Science, 2004, 306(5702): 1783-1786.
- [22] Pounds J A, Bustamante M R, Coloma L A, Consuegra J A, Fogden M P L, Foster P N, La Marca E, Masters K L, Merino-Viteri A, Puschendorf R, Ron S R, Sánchez-Azofeifa G A, Still C J, Young B E. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. Nature, 2006, 439(7073): 161-167.
- [23] Becker C G, Fonseca C R, Haddad C F B, Batista R F, Prado P I. Habitat split and the global decline of amphibians. Science, 2007, 318(5857): 1775-1777.
- [24] Gibbs J P, Shriver W G. Can road mortality limit populations of pool-breeding amphibians? Wetlands Ecology and Management, 2005, 13(3): 281-289.
- [25] Gryz J, Krauze D. Mortality of vertebrates on a road crossing the Biebrza Valley (NE Poland). European Journal of Wildlife Research, 2008, 54(4): 709-714.
- [26] Hamer A J, Langton T E, Lesbarrères D. Making a safe leap forward: Mitigating road impacts on amphibians. In Van der Ree R, ed. Handbook of road ecology. Wiley, Chichester, 2015, 261-270.
- [27] Beebee T J C. Effects of road mortality and mitigation measures on amphibian populations. Conservation Biology, 2013, 27(4): 657-668.
- [28] Heigl F, Horvath K, Laaha G, Zaller J G. Amphibian and reptile road-kills on tertiary roads in relation to landscape structure: using a citizen science approach with open-access land cover data. BMC Ecology, 2017, 17(1): 24.
- [29] Hels T, Buchwald E. The effect of road kills on amphibian populations. Biological Conservation, 2001, 99(3): 331-340.
- [30] Mazerolle M J, Huot M, Gravel M. Behavior of amphibians on the road in response to car traffic. Herpetologica, 2005, 61(4): 380-388.
- [31] Orłowski G. Spatial distribution and seasonal pattern in road mortality of the common toad *Bufo bufo* in an agricultural landscape of south-western Poland. Amphibia-Reptilia, 2007, 28(1): 25-31.
- [32] Andrews K M, Nanjappa P, Riley S P D. Roads and ecological infrastructure: concepts and applications for small animals. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2015.
- [33] Lima S L, Blackwell B F, DeVault T L, Fernández-Juricic E. Animal reactions to oncoming vehicles: a conceptual review. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2015, 90(1): 60-76.
- [34] Fahrig L, Pedlar J, Pope S, Taylor P, Wegner J. Effect of road traffic on amphibian density. Biological Conservation, 1995, 73(3): 177-182.
- [35] Andrews K M, Gibbons J W, Jochimse D M. Ecological effects of roads on amphibians and reptiles: A literature review. In Mitchell J C, Brown R E J, Bartholomew B. eds. Urban Herpetology. Society of the Study of Amphibians and Reptiles, 2008, 121-143.
- [36] Coelho I P, Teixeira F Z, Colombo P, Coelho A V P, Kindel A. Anuran road-kills neighboring a peri-urban reserve in the Atlantic Forest, Brazil. Journal of Environmental Management, 2012, 112: 17-26.
- [37] Cairo S L, Zalba S M. Effects of a paved road on mortality and mobility of red bellied toads (*Melanophryniscus* sp.) in Argentinean grasslands. Amphibia-Reptilia, 2007, 28(3): 377-385.
- [38] Gu H J, Dai Q, Wang Q, Wang Y Z. Factors contributing to amphibian road mortality in a wetland. Current Zoology, 2011, 57(6): 768-774.
- [39] Garcia-Gonzalez C, Campo D, Pola I G, Garcia-Vazquez E. Rural road networks as barriers to gene flow for amphibians: species-dependent mitigation by traffic calming. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(2): 171-180.
- [40] Lesbarrères D, Lodé T, Merilä J. What type of amphibian tunnel could reduce road kills? Oryx, 2004, 38(2): 220-223.
- [41] Zhang W Y, Shu G C, Li Y L, Xiong S, Liang C P, Li C. Daytime driving decreases amphibian roadkill. PeerJ, 2018, 6: e5385.
- [42] Glista D J, DeVault T L, DeWoody J A. Vertebrate road mortality predominantly impacts amphibians. Herpetological Conservation and Biology, 2008, 3(1): 77-87.
- [43] 章文艳. 王朗自然保护区内道路对两栖动物的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [44] Carvalho F, Mira A. Comparing annual vertebrate road kills over two time periods, 9 years apart: a case study in Mediterranean farmland. European Journal of Wildlife Research, 2011, 57(1): 157-174.
- [45] 王卓聪, 王云, 王超, 罗玉梅, 黄利亚, 张睿, 邵志娟, 朴正吉. 长白山国家级自然保护区两栖类动物道路致死特征分析. 动物学杂志, 2015, 50(6): 866-874.

- [46] Arevalo J E, Honda W, Arce-Arias A, Häger A. Spatio-temporal variation of roadkills show mass mortality events for amphibians in a highly trafficked road adjacent to a National Park, Costa Rica. *Revista De Biología Tropical*, 2017, 65(4): 1261-1276.
- [47] Seo C, Thorne J H, Choi T, Kwon H, Park C H. Disentangling roadkill: the influence of landscape and season on cumulative vertebrate mortality in South Korea. *Landscape and Ecological Engineering*, 2015, 11(1): 87-99.
- [48] 杨韬. 应用无线电追踪技术揭示两栖动物路杀的物种差异和季节差异的原因[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [49] Fahrig L, Rytwinski T. Effects of roads on animal abundance: an empirical review and synthesis. *Ecology and Society*, 2009, 14: art21.
- [50] Jackson N D, Fahrig L. Relative effects of road mortality and decreased connectivity on population genetic diversity. *Biological Conservation*, 2011, 144(12): 3143-3148.
- [51] Holderegger R, Di Giulio M. The genetic effects of roads: a review of empirical evidence. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(6): 522-531.
- [52] 王培潮. 杭州四种蜥蜴的生态研究 I. 分布状况、活动规律及食性. *动物学杂志*, 1964, 6(2): 70-76.
- [53] 邵发道, 李晓晨, 张富兴, 方荣盛. 秦岭蝮蛇的活动节律和反捕行为研究. *动物学杂志*, 1998, 33(4): 14-18.
- [54] 龚大洁, 李万江, 孙呈祥, 郑智, 赵海斌. 六盘山蝮活动节律与食性研究. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 51(3): 79-83.
- [55] 丁向运. 极危种莽山原矛头蝮野外行为节律初步研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- [56] Baxter-Gilbert J H, Riley J L, Lesbarrères D, Litzgus J D. Mitigating reptile road mortality: fence failures compromise ecopassage effectiveness. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0120537.
- [57] Sullivan B K. Observed differences in body temperature and associated behavior of four snake species. *Journal of Herpetology*, 1981, 15(2): 245.
- [58] McCardle L D, Fontenot C L. The influence of thermal biology on road mortality risk in snakes. *Journal of Thermal Biology*, 2016, 56: 39-49.
- [59] Beaudry F, de Maynadier P G, Hunter M L Jr. Identifying road mortality threat at multiple spatial scales for semi-aquatic turtles. *Biological Conservation*, 2008, 141(10): 2550-2563.
- [60] Gibbs J P, Shriver W G. Estimating the effects of road mortality on Turtle populations. *Conservation Biology*, 2002, 16(6): 1647-1652.
- [61] 孙戈, 张立. 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*, 2010, 30(24): 7079-7086.
- [62] 杨韬, 章文艳, 戴蓉, 郑普阳, 舒国成, 邹琪, 李成. 云南省普洱市思茅区路杀爬行动物研究. *生态学报*, 2022, 42(7): 2648-2656.
- [63] Ashley E P, Kosloski A, Petrie S A. Incidence of intentional vehicle-Reptile collisions. *Human Dimensions of Wildlife*, 2007, 12(3): 137-143.
- [64] Beckmann C, Shine R. Do drivers intentionally target wildlife on roads? *Austral Ecology*, 2012, 37(5): 629-632.
- [65] Secco H, Ratton P, Castro E, da Lucas P S, Bager A. Intentional snake road-kill: a case study using fake snakes on a Brazilian road. *Tropical Conservation Science*, 2014, 7(3): 561-571.
- [66] Maschio G F, Santos-Costa M C, Prudente A L C. Road-kills of snakes in a tropical rainforest in the central Amazon Basin, Brazil. *South American Journal of Herpetology*, 2016, 11(1): 46-53.
- [67] Chyn K, Lin T E, Chen Y K, Chen C Y, Fitzgerald L A. The magnitude of roadkill in Taiwan: patterns and consequences revealed by citizen science. *Biological Conservation*, 2019, 237: 317-326.
- [68] Andrews K M, Gibbons J W. How do highways influence snake movement? behavioral responses to roads and vehicles. *Copeia*, 2005, (4): 772-782.
- [69] Jacobson S L, Bliss-Ketchum L L, de Rivera C E, Smith W P. A behavior-based framework for assessing barrier effects to wildlife from vehicle traffic volume. *Ecosphere*, 2016, 7(4): e01345.
- [70] Rosen P C, Lowe C H. Highway mortality of snakes in the Sonoran Desert of southern Arizona. *Biological Conservation*, 1994, 68(2): 143-148.
- [71] Row J R, Blouin-Demers G, Weatherhead P J. Demographic effects of road mortality in black ratsnakes (*Elaphe obsoleta*). *Biological Conservation*, 2007, 137(1): 117-124.
- [72] Jochimsen D M, Peterson C R, Harmon L J. Influence of ecology and landscape on snake road mortality in a sagebrush-steppe ecosystem. *Animal Conservation*, 2014, 17(6): 583-592.
- [73] Gonçalves L O, Alvares D J, Teixeira F Z, Schuck G, Coelho I P, Esperandio I B, Anza J, Beduschi J, Bastazini V A G, Kindel A. Reptile road-kills in Southern Brazil: composition, hot moments and hotspots. *The Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1438-1445.
- [74] Capula M, Rugiero L, Capizzi D, Milana G, Vignoli L, Franco D, Petrozzi F, Luiselli L. Long-term, climate change-related shifts in monthly patterns of roadkilled Mediterranean snakes (*Hierophis viridiflavus*). *Herpetological Journal*, 2014, 24(2): 97-102.
- [75] Rugiero L, Capula M, Capizzi D, Amori G, Milana G, Lai M, Luiselli L. Long-term observations on the number of roadkilled *Zamenis longissimus* (Laurenti, 1768) in a hilly area of central Italy. *Herpetozoa*, 2018, 30(3/4): 212-217.
- [76] Meek R. Temporal trends in *Podarcis muralis* and *Lacerta bilineata* populations in a fragmented landscape in western France; results from a 14 year time series. *Herpetological Journal*, 2020, 30(1): 20-26.
- [77] Böhm M, Collen B, Baillie J E M, Bowles P, Chanson J, Cox N, Hammerson G, Hoffmann M, Livingstone S R, Ram M, Rhodin A G J, Stuart S N, van Dijk P P, Young B E, Afuang L E, Aghasyan A, García A, Aguilar C, Ajtic R, Akarsu F, Alencar L R V, Allison A, Ananjeva N,

Anderson S, Andrén C, Ariano-Sánchez D, Arredondo J C, Auliya M, Austin C C, Avci A, Baker P J, Barreto-Lima A F, Barrio-Amorós C L, Basu D, Bates M F, Batistella A, Bauer A, Bennett D, Bhme W, Broadley D, Brown R, Burgess J, Captain A, Carreira S, del Rosario Castaeda M, Castro F, Catenazzi A, Cedeo-Vázquez J R, Chapple D G, Cheylan M, Cisneros-Heredia D F, Cogalniceanu D, Cogger H, Corti C, Costa G C, Couper P J, Courtney T, Crnobrnja-Isailovic J, Crochet P A, Crother B, Cruz F, Daltry J C, Daniels R J R, Das I, de Silva A, Diesmos A C, Dirksen L, Doan T M, Dodd C K, Doody J S, Dorcas M E, de Barros Filho J D, Egan V T, El Mouden E H, Embert D, Espinoza R E, Fallabrino A, Feng X, Feng Z J, Fitzgerald L, Flores-Villela O, Frana F G R, Frost D, Gadsden H, Gamble T, Ganesh S R, Garcia M A, García-Pérez J E, Gatus J, Gaulke M, Geniez P, Georges A, Gerlach J, Goldberg S, Gonzalez J C T, Gower D J, Grant T, Greenbaum E, Grieco C, Guo P, Hamilton A M, Hare K, Hedges S B, Heideman N, Hilton-Taylor C, Hitchmough R, Hollingsworth B, Hutchinson M, Ineich I, Iverson J, Jaksic F M, Jenkins R, Joger U, Jose R, Kaska Y, Kaya U, Keogh J S, Khler G, Kuchling G, Kumluta Y, Kwet A, La Marca E, Lamar W, Lane A, Lardner B, Latta C, Latta G, Lau M, Lavin P, Lawson D, Le Breton M, Lehr E, Limpus D, Lipczynski N, Lobo A S, López-Luna M A, Luiselli L, Lukoschek V, Lundberg M, Lymberakis P, Macey R, Magnusson W E, Mahler D L, Malhotra A, Mariaux J, Maritz B, Marques O A V, Márquez R, Martins M, Masterson G, Mateo J A, Mathew R, Mathews N, Mayer G, McCranie J R, Measey G J, Mendoza-Quijano F, Menegon M, Métrailler S, Milton D A, Montgomery C, Morato S A A, Mott T, Muoz-Alonso A, Murphy J, Nguyen T Q, Nilson G, Nogueira C, Núñez H, Orlov N, Ota H, Ottenwalder J, Papenfuss T, Pasachnik S, Passos P, Pauwels O S G, Pérez-Buitrago N, Pérez-Mellado V, Pianka E R, Pleguezuelos J, Pollock C, Ponce-Campos P, Powell R, Pupin F, Díaz G E Q, Radder R, Ramer J, Rasmussen A R, Raxworthy C, Reynolds R, Richman N, Rico E L, Riservato E, Rivas G, da Rocha P L B, Rdel M O, Schettino L R, Roosenburg W M, Ross J P, Sadek R, Sanders K, Santos-Barrera G, Schleich H H, Schmidt B R, Schmitz A, Sharifi M, Shea G, Shi H T, Shine R, Sindaco R, Slimani T, Somaweera R, Spawls S, Stafford P, Stuebing R, Sweet S, Sy E, Temple H J, Tognelli M F, Tolley K, Tolson P J, Tuniyev B, Tuniyev S, Bzüm N, Buurt G, Van Sluys M, Velasco A, Vences M, Vesel M, Vinke S, Vinke T, Vogel G, Vogrin M, Vogt R C, Wearn O R, Werner Y L, Whiting M J, Wiewandt T, Wilkinson J, Wilson B, Wren S, Zamin T, Zhou K Y, Zug G. The conservation status of the world's reptiles. *Biological Conservation*, 2013, 157: 372-385.

- [78] 王凯, 任金龙, 陈宏满, 吕植桐, 郭宪光, 蒋珂, 陈进民, 李家堂, 郭鹏, 王英永, 车静. 中国两栖、爬行动物更新名录. *生物多样性*, 2020, 28(2): 189-218.
- [79] 谷颖乐. 广州市郊区公路交通系统对两栖爬行动物公路死亡的影响及对策[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008.
- [80] 莫吉炜. 湖南莽山国家级自然保护区两栖爬行动物公路死亡研究及生物通道设计[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [81] 王云, 朴正吉, 关磊, 孔亚平. 环长白山旅游公路对野生动物的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 425-435.
- [82] Wu Q, Sun T Z, Zhao Y M, Yu C, Hu J H, Li Z Q. Temporal and spatial patterns of small vertebrate roadkill in a supercity of Eastern China. *PeerJ*, 2023, 11: e16251.
- [83] Damarad T, Bekker G J. COST 341-Habitat fragmentation due to transportation infrastructure: Findings of the COST Action 341. Office for official publications of the European Communities, Luxembourg, 2003.
- [84] 刘山林, 邱娜, 张纾意, 赵竹楠, 周欣. 基因组学技术在生物多样性保护研究中的应用. *生物多样性*, 2022, 30(10): 334-354.
- [85] Woltz H W, Gibbs J P, Ducey P K. Road crossing structures for amphibians and reptiles: informing design through behavioral analysis. *Biological Conservation*, 2008, 141(11): 2745-2750.
- [86] Patrick D A, Schalk C M, Gibbs J P, Woltz H W. Effective culvert placement and design to facilitate passage of amphibians across roads. *Journal of Herpetology*, 2010, 44(4): 618-626.
- [87] MacPherson M R, Litzgus J D, Weatherhead P J, Lougheed S C. Barriers for big snakes: incorporating animal behaviour and morphology into road mortality mitigation design. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01471.
- [88] Schmidt B R, Zumbach S. Amphibian road mortality and how to prevent it: A review. In Mitchell J C, Brown R E J, Bartholomew B. eds. *Urban Herpetology*. Society of the Study of Amphibians and Reptiles. 2008, 157-167.
- [89] 李成, 章文艳. 劳驾, 请给动物借个道. *大自然*, 2019, (2): 58-61.
- [90] Zhang L, Dong T J, Xu W H, Ouyang Z Y. Assessment of habitat fragmentation caused by traffic networks and identifying key affected areas to facilitate rare wildlife conservation in China. *Wildlife Research*, 2015, 42(3): 266-279.