

DOI: 10.5846/stxb202107051783

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.

Yang T, Zhang W Y, Dai R, Zheng P Y, Shu G C, Zou Q, Li C. Reptile road-kills in Simao District of Pu'er City, Yunnan Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2648-2656.

云南省普洱市思茅区路杀爬行动物研究

杨 韬^{1,2}, 章文艳^{1,2}, 戴 蓉³, 郑普阳^{1,2}, 舒国成⁴, 邹 琪⁵, 李 成^{1,*}

1 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

4 宜宾学院, 宜宾 644000

5 四川师范大学, 成都 610066

摘要:爬行动物是受道路影响的主要野生脊椎动物类群之一, 2019—2020 年, 采用路巡调查法对云南省普洱市思茅区爬行动物路杀现象进行了调查。结果发现, 路杀爬行动物有 7 科 22 种 100 只, 钝头蛇科的横纹钝头蛇 *Pareas margaritophorus*、眼镜蛇科的银环蛇 *Bungarus multicinctus* 是路杀数量最多的物种, 包括 2 种国家二级重点保护野生动物: 闪鳞蛇 *Xenopeltis unicolor* 和三索蛇 *Coelognathus radiatus*。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 °C 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 时的晒太阳行为可能是路杀的主要诱因。

关键词:爬行动物; 路杀; 日活动节律; 晒太阳; 思茅区

Reptile road-kills in Simao District of Pu'er City, Yunnan Province, China

YANG Tao^{1,2}, ZHANG Wenyan^{1,2}, DAI Rong³, ZHENG Puyang^{1,2}, SHU Guocheng⁴, ZOU Qi⁵, LI Cheng^{1,*}

1 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

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

3 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Nanjing 210042, China

4 Yibin University, Yibin 644000, China

5 Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China

Abstract: Among the community of vertebrates living in the natural environment, reptiles are more prone to be affected by various road conditions like vehicle collisions which severely threaten their life. From 2019 to 2020, road driving survey was conducted on the roadkill of reptiles to describe road-kill composition and to estimate the main reasons of road-kills in Simao District, Pu'er City, Yunnan Province. The results showed that there were recorded 100 carcasses of reptiles belonging to 22 species within 7 families, among them *Pareas margaritophorus* of Pareatidae and *Bungarus multicinctus* of Elapidae were more vulnerable to road mortality. It was also notable that two species of State Key Protected Wild Animal Species, *Xenopeltis unicolor* and *Elaphe radiatus*, were also been found in roadkill in this case. There were three peaks of reptile roadkill, 76 carcasses of reptiles recorded at 7:00—10:00, probably due to their higher activity, which was the hot moment of roadkill. The temperature ranges of reptiles roadkill were concentrated between 20—25 °C. Furthermore, considering the physiological needs of reptile, such as thermoregulation, reptiles roadkill were coincident with their activity rhythm,

基金项目:中国生物多样性监测与研究网络项目(Sino BON), 生态环境部生物多样性调查、观测和评估项目(2019—2023 年); 江苏省自然科学基金—青年基金项目(BK20160103); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0501 0503)

收稿日期: 2021-07-08; 采用日期: 2022-02-13

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

especially during the peak period of basking between 7:00—10:00, which made them more prone to collisions.

Key Words: reptile; roadkill; activity rhythm; basking; Simao District

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^[1]。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^[2],随之而来的野生动物死亡、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导致的死亡成为越来越普遍的现象^[3—7]。

路杀的野生动物主要包括两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类^[5—8]。道路建设给大中型野生动物带来了巨大的威胁,车辆和大中型野生动物碰撞通常被认为是动物非自然死亡的最重要来源,已经超过了狩猎等其它重大影响^[9—11],是导致大中型动物种群数量下降的一个重要因素^[12—13]。目前我国学者对大型、保护动物关注多^[14],对小型、非保护动物关注少。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 79.5%^[5],但由于我国两栖爬行动物的保护级别低,关注度低,且与大中型动物相比,两栖爬行动物与车辆的碰撞,很少对人类的安全构成威胁^[15],因此相关研究较少,保护措施也比较缺乏。

野生动物道路致死是对生物多样性的一个重要威胁^[8,16—17]。其中,爬行动物是濒危程度最高的脊椎动物类群之一^[18],已经受到道路的严重影响^[19—24]。而且爬行动物相比于其他脊椎动物更容易发生直接碰撞死亡^[25],通常与该类群特定的生态、生活史特征、行为和运动模式有关^[1,23,26]。龟类通常进行季节性迁徙,导致了高的道路致死率^[19,27];在温暖的月份,蛇类开始繁殖和觅食,增加了它们使用道路的可能性^[22];同时,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,这种行为延长了暴露于道路的时间,增加了被碾压的可能性^[11,28—30];而且,部分爬行动物会对迎面而来的车辆保持静止^[31],缓慢的移动速度和长长的身体是爬行动物容易发生路杀事件的原因之一^[25];此外,研究表明一些司机故意碾压蛇类和乌龟,增加了对爬行动物的威胁^[32—34]。

近年来,全球道路网络不断地扩增,到 2050 年,全世界还将新建 2500 万 km 的道路^[35]。与此同时,我国的道路建设和运营里程也在不断增加,截止到 2020 年末,我国的公路总里程约为 5.20×10^6 km,比上年末增加 18.56×10^4 km,公路密度为 $54.15 \text{ km}/(100 \text{ km}^2)$,比上年末增加 $1.94 \text{ km}/(100 \text{ km}^2)$ ^[36]。道路的扩增伴随着交通车辆的增加,据统计,2020 年末全国汽车保有量为 2.81 亿辆,这一数据还在呈上升趋势^[37]。

目前,随着道路网络的扩散,我国的道路网络建设正逐渐延伸到生态脆弱地区。越来越多车辆进入西部山区,风景秀丽和野生动植物丰富的云南、四川已经逐渐成为旅游热点。相关研究显示:生态优良地区的游客数量年均增长速度超过 20%^[38],不可避免地引发了道路建设、旅游活动和动物保护之间的冲突^[14,39—43]。

云南省是我国的生物多样性最丰富的省份,爬行动物的路杀现象已引起科学家的重视^[44]。目前,对爬行动物路杀的研究主要集中在交通量、道路宽度、道路旁的生境类型和环境因子(湿度、温度和降雨量等)等方面^[24,44—45],但对造成爬行动物路杀的热点时段及其诱因缺乏研究。本研究团队于 2019—2020 年对云南省普洱市思茅区爬行动物路杀现象进行了调查,综合分析爬行动物路杀的热点时段与环境因子(温度)的关系,深入探讨爬行动物独特的活动节律对路杀的影响;结合研究结果提出防范和减缓爬行动物路杀的保护措施。

1 材料与方法

1.1 研究区域

思茅区($22^{\circ}27'—23^{\circ}06'N$, $100^{\circ}19'—101^{\circ}27'E$)位于云南省南部、澜沧江中下游,无量山南部,东连江城县,西接澜沧县和景谷县,南邻西双版纳傣族自治州景洪市,北临宁洱县。全区东西长 118 km,南北宽 72 km,面积 3928 km^2 ,山区、半山区面积 3802 km^2 ,最高点大芦山仙人洞山顶海拔 2138 m,最低点小橄榄坝黑河口海拔 574 m。全境河流均属澜沧江水系,南亚热带季风气候区,年平均气温 20.1°C ,降雨量 774.4 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 路巡调查法(Road Driving Survey)

在公路上开车慢速调查是一种很有效的爬行动物调查方法^[20,46-47],调查路段以思茅区境内的二级公路:S214 思江(思茅-江城)公路、S309 思澜(思茅-澜沧)公路为主要调查公路,以思江公路为例,路基宽度 9 m,设计时速 40—80 km/h,车流量 5000—15000 辆/d;辅以周边的部分三级(路基宽度 7.5 m,设计时速 30—60 km/h,车流量 2000 辆/d)或四级公路(路基宽度 5.5 m,设计时速 20—40 km/h,车流量 400 辆/d),每日调查平均里程约 200 km。调查日期为 2019 年 7 月 19—27 日、9 月 24—28 日、11 月 3—8 日和 2020 年 6 月 21—27 日,每天调查时间从 7:30 到 22:00,车速 30—40 km/h,当遇到被路杀的爬行动物时,拍照、鉴别路杀的爬行动物,记录种类、经纬度、海拔,参考孙戈和张立^[44]根据标本的形态特征(完整程度、新鲜程度等),推测其大概的路杀时间。

1.2.2 分析方法

通过统计每个物种的死亡数量,发现易受道路影响的爬行动物种类;利用 ArcGIS 10.2 制作出爬行动物的路杀分布图,比较不同等级道路的路杀爬行动物数量,分析道路等级对爬行动物路杀的影响。

以 100 m 为一个海拔梯度(如 900—999 m 为一个海拔梯度),统计每个海拔梯度中路杀的爬行动物的种类和数量,分析海拔梯度与路杀爬行动物的种类和数量的关系。

为了揭示爬行动物路杀和环境因子的关系,在监测期间,于思茅区万掌山林场植物园(22°50′33.144″N, 100°56′9.852″E, 1375 m)布设野外自动温湿度计(TP-2200,北京安伏电子技术有限公司)记录温度和湿度,每 10 min 记录一次。将爬行动物的死亡时间与温度进行统计分析,得出路杀热点时段;进一步分析爬行动物的路杀数量与气温的关系,将所记录到的温度与爬行动物被路杀的时间相对应,统计每个温度区间(以 1 °C 为区间,例 20.00—20.99 °C 为一个单位区间)爬行动物路杀的数量,进行温度与路杀个体数的多项式回归分析,得到爬行动物路杀数量与温度的关系。

本研究所有数据统计均在 Excel 2016 和 R 4.1.0 中进行。

2 结果

2 年内在思茅区累计记录路杀爬行动物 100 只,隶于 1 目 7 科 20 属 22 种(表 1,图 1)。其中游蛇科路杀物种最多,共 13 种;钝头蛇科的横纹钝头蛇 *Pareas margaritophorus* (36 只)、眼镜蛇科的银环蛇 *Bungarus multicinctus* (21 只)是路杀个体数量最多的物种。路杀物种中包括 2 种国家二级重点保护动物:闪鳞蛇 *Xenopeltis unicolor* 和三索蛇 *Coelognathus radiatus* (图 1)。

表 1 2019—2020 年在思茅区的路杀爬行动物种类和数量

Table 1 Species and numbers of reptile road-kills in Simao from 2019—2020

序号 No.	目 Order	科 Family	种 Species	保护级别 Protection levels	路杀个体数 Number of roadkills	二级公路路 杀个体数 Road kills on second- class highways	三、四级 公路路杀 个体数 Road kills on third- class and fourth-class highways
1	有鳞目 Squamata	鬲蜥科 Agamidae	丽棘蜥 <i>Acanthosaura lepidogaster</i>		2	1	1
2	有鳞目 Squamata	鬲蜥科 Agamidae	棕背树蜥 <i>Calotes emma</i>		4	2	2
3	有鳞目 Squamata	石龙子科 Scincidae	铜蜓蜥 <i>Sphenomorphus indicum</i>		1	1	0

续表

序号 No.	目 Order	科 Family	种 Species	保护级别 Protection levels	路杀个体数 Number of roadkills	二级公路路 杀个体数 Road kills on second- class highways	三、四级 公路路杀 个体数 Road kills on third- class and fourth-class highways
4	有鳞目 Squamata	盲蛇科 Typhlopidae	钩盲蛇 <i>Ramphotyphlops braminus</i>		1	0	1
5	有鳞目 Squamata	闪鳞蛇科 Xenopeltidae	闪鳞蛇 <i>Xenopeltis unicolor</i>	II	2	0	2
6	有鳞目 Squamata	钝头蛇科 Pareatidae	横纹钝头蛇 <i>Pareas margaritophorus</i>		36	31	5
7	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	繁花林蛇 <i>Boiga multomaculata</i>		1	1	0
8	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	尖尾两头蛇 <i>Calamaria pavementata</i>		6	3	3
9	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	翠青蛇 <i>Cyclophiops major</i>		2	1	1
10	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	过树蛇 <i>Dendrelaphis pictus</i>		2	1	1
11	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	白链蛇 <i>Lycodon septentrionalis</i>		1	1	0
12	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	紫灰锦蛇 <i>Oreocryptophis porphyracea</i>		1	1	0
13	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	三索蛇 <i>Coelognathus radiatus</i>	II	1	1	0
14	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	黑眉锦蛇 <i>Elaphe taeniura</i>		1	0	1
15	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	白眉腹链蛇 <i>Hebius boulengeri</i>		1	1	0
16	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	崇安斜鳞蛇 <i>Pseudoxenodon karlschmidtii</i>		4	4	0
17	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	缅甸颈斑蛇 <i>Plagiopholis nuchalis</i>		1	0	1
18	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	红脖颈槽蛇 <i>Rhabdophis subminiatus</i>		5	1	4
19	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	黑领剑蛇 <i>Sibynophis collaris</i>		2	0	2
20	有鳞目 Squamata	游蛇科 Colubridae	云南华游蛇 <i>Trimerodytes yunnanensis</i>		3	0	3
21	有鳞目 Squamata	眼镜蛇科 Elapidae	银环蛇 <i>Bungarus multicinctus</i>		21	16	5
22	有鳞目 Squamata	眼镜蛇科 Elapidae	孟加拉眼镜蛇 <i>Naja kaouthia</i>		2	0	2

统计有 66 只爬行动物路杀发生在二级公路上, 隶于 5 科 14 属 15 种; 34 只爬行动物路杀发生在三级和四级公路上, 隶于 6 科 14 属 15 种(表 1, 图 2)。

路杀爬行动物集中在 1200—1500 m 的海拔区间, 计有 85 只, 占总路杀个体数的 85.0%; 隶于 21 种, 占总路杀物种数的 95.5%(图 3)。

爬行动物的路杀有 3 个高峰, 分别是 7:00—10:00 时、11:00—13:00 时和 18:00—20:00 时; 其中早上的 7:00—10:00 时, 有 76 只, 是最集中的路杀时间段(图 4)。

对爬行动物的路杀个体数和路杀死亡时的气温进行多项式回归分析, 发现爬行动物的路杀个体数与气温



图 1 路杀的国家重点保护蛇类(闪鳞蛇和三索蛇)

Fig.1 Road killed snakes of State Key Protected Wild Animal Species (*Xenopeltis unicolor* and *Coelognathus radiatus*)

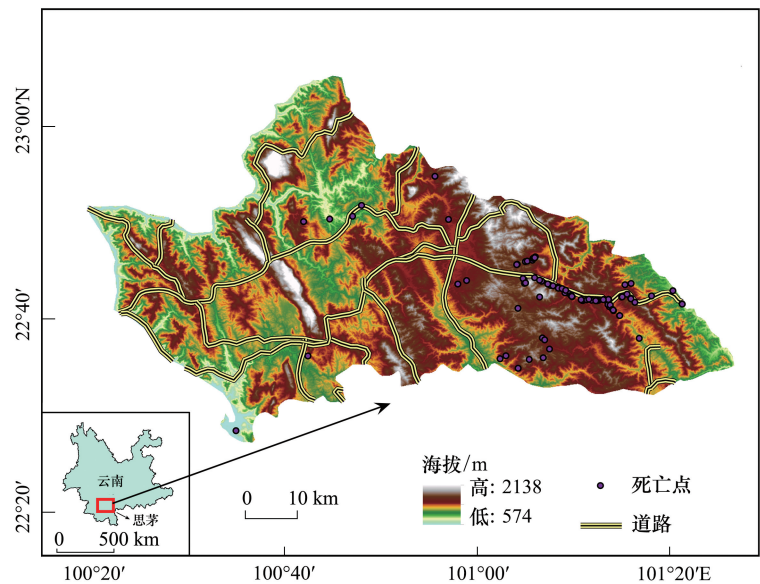


图 2 路杀爬行动物在云南省普洱市思茅区的分布图

Fig.2 Map of the study area in the Simao District of Pu'er City, Yunnan Province, China. A road-killed reptiles is represented by a collection point along the roads

存在显著的相关性($r^2=0.8722, P=0.0275<0.05$), 且主要集中在 20—25 ℃ 之间。这与每天早上气温上升, 爬行动物有一个活动高峰期相对应(图 5)。

3 讨论

我国位于亚洲的东部, 地跨古北界和东洋界, 自然环境复杂多变, 蕴藏了丰富的爬行动物资源, 截至 2019 年 12 月 31 日, 爬行动物种类有 511 种, 居世界第 7 位^[48]。然而, 不容忽视的是: 我国爬行类受威胁物种达到 29.7%, 栖息地质量退化及生境破碎化成为了中国爬行动物的首要致危因子^[49], 其中公路建设是主要影响因素之一。

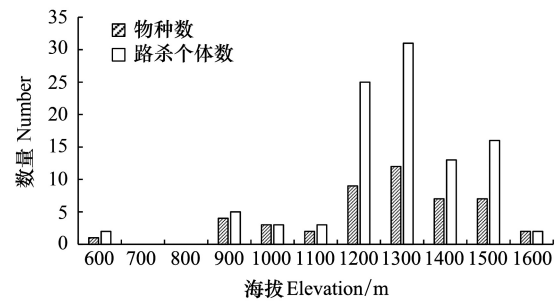


图 3 不同海拔的爬行动物路杀个体数与物种数

Fig.3 Road kill and species number of reptiles at different elevations in Simao

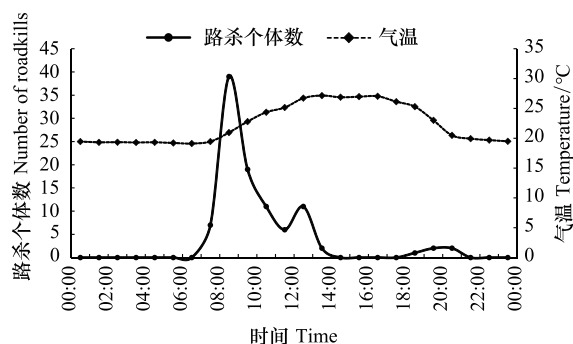


图4 爬行动物路杀个体数随时间和气温的变化

Fig.4 The individuals of road-killed reptiles with the temperature in the days

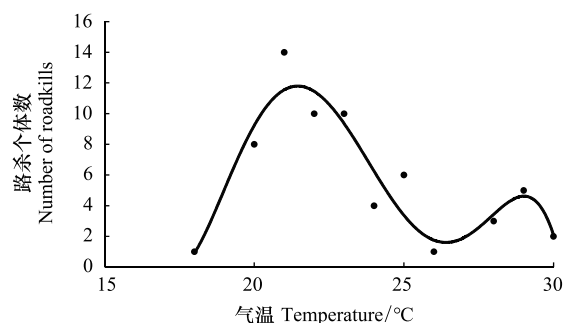


图5 爬行动物路杀个体数与气温回归分析

Fig.5 Regression analysis of reptiles roadkill and temperature

道路是推动全球经济发展的必要条件,资源和贸易需求推动了全球道路的快速扩增。道路密度的增加一方面给社会经济发展带来便利,同时也对生态景观造成了分割、干扰、破坏、退化和污染等各种负面影响,直接或间接地危害了生物多样性和生态系统的功能。

3.1 爬行动物路杀与道路等级、海拔的关系

不同等级的道路,其路基宽度、车流量和速度等存在差异,是路杀的重要影响因子^[42,50-51],也是造成动物路杀数在空间上存在差异的主要原因^[20,52-54]。本研究表明爬行动物的路杀数量主要集中在二级公路(S214思江公路)上,占总路杀数的66.0%。在其他动物的路杀研究中也存在着相似的现象,Canal等^[6]在西班牙南部进行的脊椎动物的路杀研究表明:脊椎动物在不同类型的道路上的致死率存在显著差异,高速公路记录的路杀数最高(占总数的50.8%),其次是国道(31.5%)和乡村公路(17.7%)。王超等^[55]在长白山选择海拔、路缘植被、地势等环境条件基本相似的三段公路为调查样带对爬行动物的致死率进行研究发现,头道公路致死率最高,为 (0.670 ± 0.176) 条/10km,其次分别为白山公路的 (0.268 ± 0.059) 条/10km和环区公路的 (0.05 ± 0.037) 条/10km,环区公路与头道公路、白山公路爬行动物的道路致死率存在显著差异,说明不同类型道路的路杀现象存在差异性。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^[56-59]。

本研究发现,85.0%的爬行动物路杀个体数集中在海拔1200—1500 m区间,主要是由于在这个海拔梯度内,公路沿途的居民点、农田较多,这与孙戈和张立^[44]在西双版纳的小磨公路及周边道路的研究结果相似,即农田附近蛇的致死率显著高于天然林;这都表明爬行动物的路杀现象受到人类活动的影响。

3.2 爬行动物路杀与活动节律的关系

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发生变化,其中温度因子作用最显著。王培潮^[60]对杭州4种蜥蜴(中国石龙子 *Eumeces chinensis*、蓝尾石龙子 *E. elegans*、铜蜓蜥 *Sphenomorphus indicus*、北草蜥 *Takydromus septentrionalis*)观测发现,7:00—11:00气温23—28 °C时,4种蜥蜴的活动频繁;中午气温高于35 °C,活动趋于低潮;随气温下降,14:00—16:00活动又增强。秦岭蝮 *Gloydius Qinlingensis* 则有3个活动高峰,在8:00—11:00,气温23—27 °C活动频率高,30—35 °C,活动受到抑制;随温度下降,14:30—17:30,活动增加;因觅食鸟类等活动,在夜间20:00—21:00时出现第三个活动高峰^[61];六盘山蝮 *G. liupanensis* 在气温20 °C时出洞活动,9:00—11:30是第一个活动高峰期,超过25 °C,其活动受到抑制;随温度下降,在15:30—17:30时出现第二个活动高峰^[62]。莽山原矛头蝮 *Protobothrops mangshanensis* 的活动高峰期有3个,分别为5:00—7:00、9:00—11:00和18:00—20:00,其中5:00—7:00和18:00—20:00与食物的活动周期有关,9:00—11:00为晒阳时间,最适活动温度为22—26 °C,气温低于16 °C或高于31 °C时处于静息状态^[63]。

综上所述发现:爬行动物具有明显的活动节律,每日具有 2—3 个活动高峰,7:00—10:00 时,为日间活动最高峰,14:00—16:00 时为第二活动高峰,18:00—20:00 时为第三活动高峰^[60—63]。而本文研究发现,思茅区爬行动物的路杀也具有 3 个较集中的时间段,与爬行动物的活动高峰时间段比较一致。

3.3 活动节律中的晒阳行为是路杀的主要诱因

现代公路主要为沥青路和混凝土路,由于其反光率较低并且路面呈现暗黑色容易吸收热量;爬行动物需要吸收太阳辐射增加体温提高代谢活动,公路为爬行动物晒阳提供了理想场所。云南省普洱市思茅区因地理位置偏南,爬行动物路杀时间主要集中在 7:00—10:00 时,气温 20—25 ℃。该时间段以及这个时间段的温度与爬行动物晒阳行为的时间段以及活动时的温度较一致。因此,晒阳行为可能是爬行动物路杀的主要诱因。

3.4 爬行动物路杀的保护措施

本文研究表明,爬行动物的路杀现象既与道路等级和气候因子等外部因子相关,也受到自身生理生态活动,主要是活动节律的影响;这为防范爬行动物路杀,制定针对性的减缓措施提供了一定的理论指导。首先,思茅区的爬行动物路杀主要发生在二级公路段,而三级或四级公路致死率较低,建议针对较高等级的公路,修建涵洞为爬行动物提供交流通道;而三四级公路路基窄,车流量小,在公路上设置野生动物出没等提示性路牌和减速行驶就可以减少爬行动物的路杀现象。其次,爬行动物的路杀现象与活动节律存在一定的关系,公路升温快的特性为爬行动物晒阳行为提供了理想场所,也成为路杀的原因;建议加强保护宣传,在爬行动物活动较频繁的热点时段,提醒司机注意爬行动物上路活动,减少路杀数量。

致谢:中国科学院成都山地灾害与环境研究所宋孟强研究员提供思茅区地图,云南省普洱市思茅区林草局李娅、杨雄伟给予帮助,特此致谢。

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.
- [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] 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.
- [9] Forman R T T, Alexander L E. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 207-231.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Collins C, Kays R. Causes of mortality in North American populations of large and medium-sized mammals. *Animal Conservation*, 2011, 14(5): 474-483.
- [14] 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.
- [15] Danks Z D, Porter W F. Temporal, spatial, and landscape habitat characteristics of moose—vehicle collisions in western Maine. *The Journal of Wildlife Management*, 2010, 74(6): 1229-1241.

- [16] Carvalho C F, Custódio A E I, Junior O M. Wild vertebrates roadkill aggregations on the BR-050 highway, state of Minas Gerais, Brazil. *Bioscience Journal*, 2015, 31(3): 951-959.
- [17] Morelli F, Benedetti Y, Delgado J D. A forecasting map of avian roadkill-risk in Europe: a tool to identify potential hotspots. *Biological Conservation*, 2020, 249: 108729.
- [18] 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, Böhme W, Broadley D, Brown R, Burgess J, Captain A, Carreira S, del Rosario Castañeda M, Castro F, Catenazzi A, Cedeño-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, França F G R, Frost D, Gadsden H, Gamble T, Ganesh S R, García 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, Köhler G, Kuchling G, Kumlutaş 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, Métraiiller S, Milton D A, Montgomery C, Morato S A A, Mott T, Muñoz-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, Rödel 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, Üzümlü N, Buurt G, Van Sluys M, Velasco A, Vences M, Veselý 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.
- [19] Gibbs J P, Shriver W G. Estimating the effects of road mortality on turtle populations. *Conservation Biology*, 2002, 16(6): 1647-1652.
- [20] Rosen P C, Lowe C H. Highway mortality of snakes in the Sonoran Desert of southern Arizona. *Biological Conservation*, 1994, 68(2): 143-148.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1438-1445.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Beaudry F, deMaynadier P G, Hunter Jr M L. Identifying road mortality threat at multiple spatial scales for semi-aquatic turtles. *Biological Conservation*, 2008, 141(10): 2550-2563.
- [28] Sullivan B K. Observed differences in body temperature and associated behavior of four snake species. *Journal of Herpetology*, 1981, 15(2): 245-246.
- [29] Kioko J, Kiffner C, Jenkins N, Collinson W J. Wildlife roadkill patterns on a major highway in northern Tanzania. *African Zoology*, 2015, 50(1): 17-22.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Ashley E P, Kosloski A, Petrie S A. Incidence of intentional vehicle-reptile collisions. *Human Dimensions of Wildlife*, 2007, 12(3): 137-143.
- [33] Beckmann C, Shine R. Do drivers intentionally target wildlife on roads? *Austral Ecology*, 2012, 37(5): 629-632.

- [34] 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.
- [35] Laurance W F, Clements G R, Sloan S, O'Connell C S, Mueller N D, Goosem M, Venter O, Edwards D P, Phalan B, Balmford A, Van Der Ree R, Arrea I B. A global strategy for road building. *Nature*, 2014, 513(7517): 229-232.
- [36] 交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报. 中国交通报, 2021-05-19.
- [37] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报. 中国统计, 2021, (3): 8-22.
- [38] 张昊楠, 秦卫华, 周大庆, 范鲁宁, 李中林, 蒋明康. 中国自然保护区生态旅游活动现状. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(1): 24-29.
- [39] 戴强, 袁佐平, 张晋东, 杨勇, 张明, 张强, 顾海军, 刘志君, 蹇依, 王跃招. 道路及道路施工对若尔盖高寒湿地小型兽类及鸟类生境利用的影响. *生物多样性*, 2006, 14(2): 121-127.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 王卓聪, 王云, 王超, 罗玉梅, 黄利亚, 张睿, 邹志娟, 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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: 24.
- [46] Klauber L M. Studies of reptile life in the arid southwest, Part 1. Night collecting on the desert with ecological statistics. *Bulletin of the Zoological Society of San Diego*, 1939, 14: 2-64.
- [47] Mendelson III J R, Jennings W B. Shifts in the relative abundance of snakes in a desert grassland. *Journal of Herpetology*, 1992, 26(1): 38-45.
- [48] 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.
- [49] 蔡波, 李家堂, 陈跃英, 王跃招. 通过红色名录评估探讨中国爬行动物受威胁现状及原因. *生物多样性*, 2016, 24(5): 578-587.
- [50] Morelle K, Lehaire F, Lejeune P. Spatio-temporal patterns of wildlife-vehicle collisions in a region with a high-density road network. *Nature Conservation*, 2013, 5: 53-73.
- [51] Zuberogitia I, del Real J, Torres J J, Rodríguez L, Alonso M, Zabala J. Ungulate vehicle collisions in a peri-urban environment: consequences of transportation infrastructures planned assuming the absence of ungulates. *PLoS One*, 2014, 9(9): e107713.
- [52] Drews C. Road kills of animals by public traffic in Mikumi National Park, Tanzania, with notes on baboon mortality. *African Journal of Ecology*, 1995, 33(2): 89-100.
- [53] Jones M E. Road upgrade, road mortality and remedial measures: impacts on a population of eastern quolls and Tasmanian devils. *Wildlife Research*, 2000, 27(3): 289-296.
- [54] 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.
- [55] 王超, 王卓聪, 罗玉梅, 黄乃伟, 黄利亚, 张睿, 邹长胜, 朴正吉, 牛丽君. 长白山国家级自然保护区爬行动物道路致死特征的初步分析. *四川动物*, 2016, 35(1): 123-128.
- [56] Puglisi M J, Lindzey J S, Bellis E D. Factors associated with highway mortality of white-tailed deer. *The Journal of Wildlife Management*, 1974, 38(4): 799-807.
- [57] Hubbard M W, Danielson B J, Schmitz R A. Factors influencing the location of deer-vehicle accidents in Iowa. *The Journal of Wildlife Management*, 2000, 64(3): 707-713.
- [58] Clevenger A P, Chruszcz B, Gunson K E. Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions. *Wildlife Society Bulletin*, 2001, 29(2): 646-653.
- [59] Joyce T L, Mahoney S P. Spatial and temporal distributions of moose-vehicle collisions in Newfoundland. *Wildlife Society Bulletin*, 2001, 29(1): 281-291.
- [60] 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, (2): 70-76.
- [61] 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.
- [62] 龚大洁, 李万江, 孙呈祥, 郑智, 赵海斌. 六盘山蝮蛇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.
- [63] 丁向运. 极危种莽山原矛头蝮野外行为节律初步研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.