



•综述•

人为噪音、夜间人造光和路杀对两栖动物的影响

江艺欣¹, 时莹莹¹, 高朔², 王苏盆^{1*}

1 安徽师范大学生命科学学院, 安徽芜湖 241000; 2 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

摘要: 全球生物多样性减少是当今世界面临的重大生态问题, 两栖动物作为衡量环境的重要指示物种, 近些年受到越来越多研究者的关注。本文以脊椎动物中生物多样性受威胁最严重的两栖动物为研究对象, 通过检索2003–2021年文献, 提取并整合关键词。首先分析了当代人类活动中的人为噪音、夜间人造光、路杀等3个因子对两栖动物的影响, 发现人为噪音导致两栖动物的鸣叫行为发生改变, 并且干扰两栖动物的繁殖行为, 夜间人造光降低了两栖动物的生长速度, 减少了行为活动时间, 路杀直接影响了两栖动物的种群数量。其次归纳相应的缓解措施, 提出改进意见, 如加强道路基础设施建设, 安装隔音屏障以缓冲噪音; 控制两栖动物密集区的光照强度; 建造两栖动物通道等。最后对今后人类活动对两栖动物影响研究中亟需解决的问题进行了展望, 应加强人类活动对两栖动物影响的研究, 努力减小人类活动对两栖动物的负面影响。

关键词: 两栖动物; 人类活动; 人为噪音; 夜间人造光; 路杀

江艺欣, 时莹莹, 高朔, 王苏盆 (2023) 人为噪音、夜间人造光和路杀对两栖动物的影响. 生物多样性, 31, 22427. doi: 10.17520/biods.2022427.

Jiang YX, Shi YY, Gao S, Wang SP (2023) The impact of anthropogenic noise, artificial light at night and road kills on amphibians. Biodiversity Science, 31, 22427. doi: 10.17520/biods.2022427.

The impact of anthropogenic noise, artificial light at night and road kills on amphibians

Yixin Jiang¹, Yingying Shi¹, Shuo Gao², Supen Wang^{1*}

1 College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000

2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042

ABSTRACT

Background & Aim: Global biodiversity decline is a major ecological problem around the world today. As an important indicator for measuring the environment, amphibians have received more and more attention from researchers in recent years. In this paper, we focus on amphibians which are the most threatened species of vertebrate to analyze the existing problems and suggest the corresponding solutions.

Method: Firstly, we analyze the effects of three most prominent factors in human activities, i.e., anthropogenic noise, artificial light at night and road kills on amphibians reproduction, population growth rate, physiology, and behavior by retrieving existing literature from 2003 to 2021, and extracting and integrating key words. Secondly, the mitigation measures regarding anthropogenic noise, artificial light at night and road kills are summarized and suggestions for improvement are made.

Review Results: Amphibian calling behavior was altered by anthropogenic noise, showing variations in call rate, dominant frequency, and call duration. It is yet unclear how different amphibians calling respond to anthropogenic noise differently and whether call variations are advantageous to the amphibians' long-term growth. By obscuring the perception of male acoustic signals by females and impacting sperm count and sperm viability in males, anthropogenic noise can also affect the reproductive behavior of amphibians. Amphibian growth rates and behavioral activity time were slowed down by artificial light at night. In addition, artificial light at night can change corticosterone levels in amphibians and hence have an impact on their physiology. Amphibian population size was directly impacted by road kills. This study makes recommendations for improvement in light of the aforementioned detrimental effects, including

收稿日期: 2022-07-26; 接受日期: 2022-11-07

基金项目: 北京市自然科学基金(5192016)和重要生物资源保护与利用研究安徽省重点实验室开放基金(swzy202006)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: bullfrog2008@126.com

bolstering the road infrastructure, constructing noise barriers to muffle noise, reducing light intensity in dense amphibian areas, building amphibian corridors, etc.

Perspective: Specific conservation strategies that seek to improve protection measures, planning management and monitoring of amphibian population dynamics should be implemented in order to reduce the impact of human activities on this group of vertebrates.

Key words: amphibians; human activities; anthropogenic noise; artificial light at night; road kills

两栖动物是指幼体在水中生活、成体水陆兼栖生活的变温四足脊椎动物, 包括有尾目、无尾目和蚓螈目(费梁等, 2006)。长期以来, 两栖动物一直作为衡量环境条件的重要指示物种(Wake, 1991)。特定的生活史和栖息地要求使某些两栖动物比其他物种更容易受到环境变化的影响(Sodhi et al, 2008)。人类活动直接或间接造成的栖息地丧失和碎片化、化学污染、病原体感染、外来物种入侵、气候变化等都对两栖动物产生了影响。自1990年发现两栖动物的种群下降以来, 各国虽采取了很多保护行动, 但与面临的威胁相比, 这些行动产生的正面效果却很有限, 无论是稀有物种还是常见物种, 它们的种群丰度和规模仍在继续下降(Grant et al, 2019)。

栖息地丧失和破碎化是影响两栖动物的主要威胁之一(Hamer & McDonnell, 2008), 城市化使大面积土地利用改变, 自然栖息地被改造成住宅区和商业区以及复杂的城市道路系统的建设成为导致两栖类自然栖息地丧失以及破碎化的主要原因(江建平等, 2016)。Skidds等(2007)发现池塘1 km范围内的住宅开发量与美洲林蛙(*Rana sylvatica*)的产卵数量之间存在负相关, 这表明美洲林蛙可能对人类活动导致的栖息地丧失或破碎特别敏感。两栖动物特殊的生理特征以及生活史使得它们对环境污染也极其敏感。经常生活和繁殖在受污染的环境, 如承载城市径流的雨水湿地(Sievers et al, 2019b)和喷洒了杀虫剂和施用了化肥的农业湿地(Hazell et al, 2001), 两栖动物的活动率、繁殖率、进食以及逃避捕食的能力降低(Sievers et al, 2019a)。在重金属和高N含量的水环境中, 两栖动物的存活率很低(Casey et al, 2005; Snodgrass et al, 2007)。病原体感染也是导致两栖动物种群数量下降的重要因素, 常见的病原体包括壶菌*Batrachochytrium dendrobatidis*、*B. salamandrivorans*以及蛙病毒*Ranavirus* (Blaustein et al, 2018)。壶菌是一种真菌, 在两栖动物中有多个宿主(Olson et al, 2013), 可使感染的两栖动物皮肤

角化过度 and 增生、皮肤糜烂和溃疡(Berger et al, 1998; Blaustein et al, 2018), 导致种群数量减少甚至灭绝; 蛙病毒是双链DNA病毒, 由6种已知病毒组成, 其中3种感染两栖动物(Chinchar, 2002)。外来物种通过竞争或捕食当地两栖动物从而对它们产生影响, 例如, 从北美东部引入到西部的牛蛙(*Lithobates catesbeianus*)可能会导致一些本地两栖动物的种群数量下降(Kiesecker et al, 2001)。全球气候变化, 如降水量和温度的变化, 影响了一些两栖动物种群的繁殖期, 表现出繁殖期提前的趋势(Blaustein et al, 2001b)。环境变化导致的紫外线(UV-B)辐射增加可能导致两栖动物数量减少, 许多暴露于UV-B辐射的两栖动物受精卵比未暴露于UV-B辐射的受精卵发育率低(Blaustein et al, 2001a)。

有关上述提及的栖息地丧失和破碎化、化学污染物、病原体感染、外来物种入侵等研究方向前人已做了详细的综述研究(Blaustein et al, 2001b, 2018; Kiesecker et al, 2001; Cushman, 2006; Hamer & McDonnell, 2008; Sievers et al, 2019a)。除此之外, 现代社会发展导致的人为噪音、夜间人造光以及路杀对两栖动物的影响也越来越严重, 但却少有研究综述。因此本文以两栖动物为研究对象, 从以上3个方面综述人类活动对两栖动物的影响, 并提出相应的保护意见。

1 研究方法

在Web of Science (<http://apps.webofknowledge.com>)核心数据库中搜索截至2022年5月发表的人类活动对两栖动物影响的英文文献。主题词选择“amphibian” AND “human activities” AND “anthropogenic noise” OR “artificial light at night” OR “roadkill”, 出版年限定在2003–2021年, 文献类型为“论文”或“综述论文”。查看每篇文章的摘要和关键词, 去除不能代表某个研究领域的文章(蓝方源等, 2021)。同时通过中国知网(<https://www.cnki>。

net)搜集中文文献, 高级检索中使用主题搜索“两栖动物” AND “人类活动” AND “人为噪音” OR “夜间人造光” OR “路杀”, 补充搜索时在高级检索中使用主题搜索“两栖动物”, 发表年限定在2003–2021年, 文献类型为“研究论文”和“综述” (蓝方源等, 2021)。

共收集到95篇文献, 其中英文文献85篇, 中文文献10篇, 关于人为噪音、夜间人造光、路杀的文章年份分布见图1。3个方面的文章数量随着年份的增加而增加, 特别是最近8年, 表明人类活动对两栖动物的影响越来越受到关注, 但大部分为英文文献, 中文文献较少, 可以看出我国的研究人员对这些方面的关注还有所欠缺。

2 人为噪音对两栖动物的影响

无尾目是两栖动物中主要的发声物种, 关于人为噪音影响的研究主要限于无尾目 (Simmons & Narins, 2018)。大多数无尾目是合唱物种, 其中雄性形成密集的集群合唱, 通常包含同种和异种合唱, 以吸引雌性交配, 它们的交配行为是一种雌性选择, 因此雌性必须能够定位雄性合唱, 并在这些合唱中区分出同种和异种的发声特征 (Simmons & Narins, 2018)。目前, 道路等交通网络扩张的速度高于人口

增长的速率, 道路噪音被视为在空间上传播最广泛的人为噪音, 已有研究表明, 人为噪音会对无尾目产生影响 (Yi & Sheridan, 2019)。

2.1 人为噪音对鸣叫行为的影响

雄性无尾目的鸣声受人为噪声影响已在多个研究中得到证明, 不同物种对交通等人为噪音的影响反应是不一致的: 某些物种的鸣叫在暴露于人为噪音时显著改变, 而另一些物种的鸣叫则不受影响 (表1)。不同物种的鸣叫在面对人为噪音时表现不同的机制以及鸣叫改变对物种长期的发展是否有利目前仍不清楚。

Sun和Narins (2005)研究了在泰国半常绿季雨林中飞机飞越池塘上方时的噪音和低频摩托车的噪音对4种无尾两栖动物鸣叫行为的影响。他们记录了噪音播放前、播放中和播放后无尾目的鸣叫, 结果显示, 粗皮姬蛙 (*Microphly butleri*)、黑带蛙 (*Rana nigrovittata*)、花狭口蛙 (*Kaloula pulchra*) 3种无尾目在噪音播放期间显著降低了鸣叫频次, 而雄性台北蛙 (*Rana taipehensis*) 却提高了鸣叫频次。他们认为人为噪音可能通过抑制一些合唱参与者的集群鸣叫从而刺激剩下物种的鸣叫来间接影响无尾目的鸣叫行为, 即台北蛙鸣叫频次的改变是对其他3个降低鸣叫频次物种的反应而不是对人为噪音

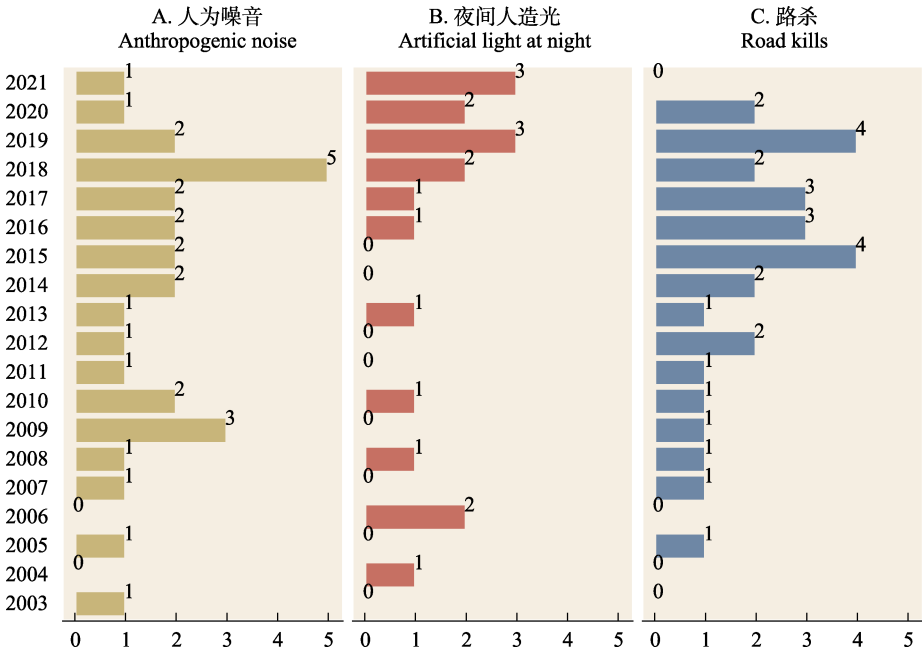


图1 2003–2021年人为噪音、夜间人造光、路杀的文章年份分布
Fig. 1 Year distribution of literature on anthropogenic noise, artificial light at night, and road kills from 2003 to 2021

表1 雄性无尾目面对人为噪音时的鸣声特征参数变化
Table 1 Changes of vocal characteristic parameters of male Anura in the face of anthropogenic noise

物种 Species	鸣叫频次 Call rate	鸣叫主频 Dominant frequency	鸣叫时长 Call duration	参考文献 Reference
粗皮姬蛙 <i>Microphly butleri</i>	减少 Decrease			Sun & Narins, 2005
黑带蛙 <i>Rana nigrovittata</i>	减少 Decrease			Sun & Narins, 2005
花狭口蛙 <i>Kaloula pulchra</i>	减少 Decrease			Sun & Narins, 2005
台北蛙 <i>Rana taipehensis</i>	增加 Increase			Sun & Narins, 2005
雨蛙 <i>Hyla arborea</i>			减少 Decrease	Lengagne, 2008
蜂黄雨蛙 <i>Dendropsophus triangulum</i>	增加 Increase			Kaiser & Hammers, 2009
豹蛙 <i>Rana pipiens</i>	减少 Decrease	增加 Increase		Cunnington & Fahrig, 2010
变色灰雨蛙 <i>Hyla versicolor</i>	减少 Decrease	不变 No change		Cunnington & Fahrig, 2010
美洲蟾蜍 <i>Bufo americanus</i>	不变 No change	不变 No change		Cunnington & Fahrig, 2010
绿池蛙 <i>Rana clamitans</i>	减少 Decrease	增加 Increase		Cunnington & Fahrig, 2010; Vargas-Salinas et al, 2014
牛蛙 <i>Lithobates catesbeianus</i>	减少 Decrease			Vargas-Salinas et al, 2014
赞氏树蛙 <i>Kurixalus chaseni</i>	不变 No change	不变 No change		Yi & Sheridan, 2019
太平洋岸雨蛙 <i>Pseudacris regilla</i>	不变 No change		不变 No change	Nelson et al, 2017
银瞬红眼蛙 <i>Agalychnis moreletii</i>	不变 No change			Kaiser et al, 2011
斑雨蛙 <i>Tlalocohyla picta</i>	不变 No change			Kaiser et al, 2011
浜岸蟾蜍 <i>Incilius valliceps</i>	不变 No change			Kaiser et al, 2011
丽红眼蛙 <i>Agalychnis callidryas</i>	增加 Increase			Kaiser et al, 2011
红后股雨蛙 <i>Tlalocohyla loquax</i>	增加 Increase			Kaiser et al, 2011
小头雨蛙 <i>Dendropsophus microcephalus</i>	增加 Increase			Kaiser et al, 2011

的反应。这项研究表明在考虑人为噪音对无尾目鸣叫行为的影响时不能忽略集群鸣叫。

Lengagne (2008)在研究交通噪音对雨蛙(*Hyla arborea*)声学交流的影响时就把集群鸣叫考虑在内。雄性雨蛙既可以单独鸣叫也可以在多个物种存在时进行集群鸣叫, Lengagne (2008)使用交通噪音回放的方式把雨蛙置于两种不同的环境(单独播放噪音和在合唱中播放噪音), 以71 dB和88 dB两种不同的级别播放交通噪音。结果表明, 与单独置于交通噪音相比, 在合唱情况下, 雄性雨蛙受交通噪音的影响较小; 在单独播放交通噪音时, 与播放前相比, 噪音播放后雄性的鸣叫时长减少, 噪音播放的强度越高, 鸣叫时长降低的程度越高。

Kaiser和Hammers (2009)将蜂黄雨蛙(*Dendropsophus triangulum*)分别置于连续的摩托车噪音、音乐(当地流行歌曲)以及间歇性摩托车噪音环境下, 并对合唱噪音(多个蜂黄雨蛙鸣叫)和人为噪音对雄性蜂黄雨蛙鸣叫的影响, 比较了噪音播放前、播放中和播放后雄性蜂黄雨蛙的鸣叫反应。该物种在连续和间歇性播放噪音期间的鸣叫频次均有所增加, 而当合唱噪音和人为噪音以相同的强度呈现时, 雄性蜂黄雨蛙的鸣叫频次对两者的反应没有显著

差异。

为了检验在不同交通噪音水平地区无尾目的鸣声特征是否不同, Cunnington和Fahrig (2010)在加拿大安大略省东部用4种无尾目进行测试, 分别是绿池蛙(*Rana clamitans*)、豹蛙(*R. pipiens*)、变色灰雨蛙(*Hyla versicolor*)、美洲蟾蜍(*Bufo americanus*)。他们比较了交通噪音低(< 50 dB)和交通噪音高(> 60 dB)的两个无尾目繁殖地点无尾目的鸣声情况, 发现绿池蛙、豹蛙、变色灰雨蛙在交通噪音低的地区的鸣叫频次明显高于交通噪音高的地区; 绿池蛙和豹蛙在交通噪音高的地区的鸣叫主频高于交通噪音低的地区, 绿池蛙在高噪音地区鸣声的振幅更低; 而繁殖季节最短的两个物种, 变色灰雨蛙和美洲蟾蜍, 并没有鸣叫主频上的差异。造成这些差异的原因, 一方面是由于它们的繁殖策略不同, 美洲蟾蜍和变色灰雨蛙是爆炸性的繁殖策略, 这意味着雄性积极寻找配偶, 而绿池蛙和豹蛙采用长期繁殖策略, 雌性积极寻找配偶; 另一方面, 没有改变鸣声特征的物种可能是因为它们原本的发声没有被环境噪音掩盖, 这些原因都有待进一步验证。除此之外, Cunnington和Fahrig (2010)还在交通噪音低的地区播放交通噪音, 并对播放噪音之前和期间的

无尾目鸣声特征,在播放噪音期间,绿池蛙和豹蛙的鸣叫频次与鸣声振幅和未播放噪音相比显著降低,但鸣叫主频更高;变色灰雨蛙的鸣叫频次较低,但鸣叫主频和鸣声振幅没有显著差异;美洲蟾蜍则没有鸣声改变。作者认为绿池蛙和豹蛙对交通噪音的声学响应是权衡利弊的结果,由于鸣叫的能量消耗大,无尾目通常会节省能量以便让它们的鸣声传播得更远。呼叫频次和鸣声振幅的降低伴随着鸣叫主频的增加,而鸣叫主频的增加伴随着能量消耗的增加,但此成本应远低于增加鸣声振幅和鸣叫频次的成本。

在同一地点的后续研究中,Vargas-Salinas等(2014)假设4种无尾目(美洲蟾蜍、变色灰雨蛙、绿池蛙、牛蛙 *Lithobates catesbeianus*)在交通噪音强度较低时更频繁地鸣叫,而在噪音强度增加时停止鸣叫(即间隙鸣叫行为),并对其进行了测试。这一假设在鸣叫频次低的两个物种(绿池蛙、牛蛙)中得到验证,它们在交通噪音强度相对较低时更频繁地鸣叫,这可能会增加它们的信噪比,使它们能够在交通噪音存在的情况下进行交流,而鸣叫频次高的两个物种(美洲蟾蜍、变色灰雨蛙)在交通噪音强度方面随机鸣叫。结果证明低频信号更容易被人为噪声掩盖,因此需要调整行为(间隙鸣叫行为)来改善这种影响。

与Cunnington和Fahrig (2010)的研究结果相反,Yi和Sheridan (2019)观察到雄性赞氏树蛙(*Kurixalus chaseni*)暴露于高交通噪音地区时发声的平均鸣声振幅增加。他们的研究区域位于马来西亚拿笃区的丹浓谷保护区,是婆罗洲为数不多的低地森林地区之一和东南亚最大的受保护森林之一。将雄性赞氏树蛙分别暴露于低交通噪音(48.2–70.0 dB声压级)和高交通噪音(56.3–83.7 dB声压级)的回放中,并记录噪音播放前、中、后期赞氏树蛙的鸣声。暴露于高或低交通噪音下都没有对雄性赞氏树蛙的鸣叫频次或鸣叫主频造成显著影响,但暴露于高交通噪音下鸣声振幅有所增加。由于交通噪音和雄性赞氏树蛙的鸣叫之间没有频率重叠,因此没有改变鸣叫频次和主频也在情理之中,但Cunnington和Fahrig (2010)的研究结果却发现,绿池蛙和豹蛙的鸣叫主频和交通噪音之间没有重叠,但增加了鸣叫主频且降低了鸣叫振幅,这其中的机制尚不清楚,还需要

继续研究。此外,能量成本随鸣声振幅的增加呈指数上升,幅度每增加3 dB,能量成本大约翻倍,雄性赞氏树蛙暴露于高交通噪音地区时鸣声振幅增加导致了其能量消耗的增加,这可能会限制它们的生长从而进一步影响繁殖(Parris, 2002)。

然而,有些无尾目在面对交通噪音时的鸣声并不会发生改变。Nelson等(2017)选择了位于美国俄勒冈州威拉米特山谷附近的8个地点对道路噪音水平进行声学监测并记录了太平洋岸雨蛙(*Pseudacris regilla*)的鸣声情况。道路噪音水平因不同的地点而异,靠近交通量大的道路地点的平均噪音水平为52.27 dB,远离道路地点的平均噪音为37.48 dB,在这些地点,太平洋岸雨蛙的鸣声特征(鸣叫频次、鸣叫时长)并没有随着噪音水平的改变而有所变化,他们认为太平洋岸雨蛙会改变其鸣声特征以应对道路噪音的想法并没有得到验证。

Kaiser等(2011)在伯利兹Las Cuevas研究站附近研究了交通噪音对7种无尾目鸣叫行为的影响。他们比较了无尾目在面对汽车噪音和白噪音时的发声情况,分别记录噪音播放前、汽车噪音播放时、阳性对照(播放白噪音)、阴性对照(无声)以及播放噪音后的鸣叫,在测试的物种中,银瞬红眼蛙(*Agalychnis moreletii*) (无干扰)、斑雨蛙(*Tlalocohyla picta*) (受干扰地区)和浜岸蟾蜍(*Incilius valliceps*) (受干扰地区) 3种无尾目物种面对汽车噪音和白噪音时均没有改变鸣叫频次;相比之下,丽红眼蛙(*Agalychnis callidryas*) (无干扰)、红后股雨蛙(*Tlalocohyla loquax*) (受干扰地区)和小头雨蛙(*Dendropsophus microcephalus*) (受干扰地区)都增加了鸣叫频次以响应人为噪声和白噪声,但响应白噪音和汽车噪音之间没有显著差异,由此得出两栖动物的栖息地是否受到干扰与它们对交通噪音的响应之间没有必然联系。除此之外,Kaiser等(2011)还监测了小头雨蛙的合唱情况以确定噪音是否影响合唱水平,实验池塘播放发动机噪音(60–70 dB声压级),对照池塘未播放噪音且噪音水平低于50 dB。与对照组相比,实验组小头雨蛙合唱长度(给定夜晚的合唱持续时间)和整个季节的总合唱时间显著缩短,这些可能会对其繁殖率产生影响。

2.2 人为噪音对繁殖的影响

在大多数蛙类中,成功繁殖的关键取决于声学

交流(Gerhardt & Huber, 2003)。人为噪音会通过掩盖雌性对雄性声学信号的感知来干扰两栖动物的繁殖行为。Bee和Swanson (2007)对人为噪音会干扰雌性对雄性声学信号的感知进而影响两栖动物的繁殖行为的假设进行了检验。研究对象为雌性金肋雨蛙(*Hyla chrysoscelis*), 研究人员使用趋声性分析, 向雌性呈现不同信号水平(37–85 dB)的广告鸣叫, 分别为无背景噪音、繁殖合唱声、道路交通噪音, 结果显示在43–79 dB之间, 与无背景噪音相比, 存在合唱噪音和交通噪音时雌性对雄性鸣叫的响应率较低, 只有在高信号水平(79–85 dB)下, 3种条件下的雌性反应相似。Tennessen等(2014)使用雌性美洲林蛙(*Lithobates sylvaticus*)检验了交通噪音是否影响自然环境中的雌性繁殖迁徙行为。结果表明, 随着信噪比的降低(更多的交通噪音, 更少的合唱声), 雌性的繁殖迁徙行为受到影响, 运动减少。Kaiser等(2015)假设交通噪音不利于两栖动物的繁殖并进行了实验, 在实验中, 将雄性绿雨滨蛙(*Litoria caerulea*)单独暴露于同种合唱声或暴露于合唱声和交通噪音中, 与只暴露于合唱声的对照组相比, 暴露于合唱声和交通噪音的雄性绿雨滨蛙的精子数量和精子活力明显下降。

2.3 人为噪音对生理的影响

皮质酮浓度的短期升高有助于生物储存能量、抑制不必要的活动来应对压力源(Romero, 2004)。然而, 长期升高的皮质酮浓度会对生存、繁殖、生长和免疫功能产生有害影响(Sapolsky et al, 2000)。Tennessen等(2014)比较了暴露于合唱声和交通噪音的雌性美洲林蛙的皮质酮浓度, 结果显示, 与单独暴露于合唱声相比, 暴露于合唱声和交通噪音的雌性美洲林蛙的皮质酮浓度增加了5倍。在脊椎动物中, 糖皮质激素(皮质酮/皮质醇)的增加是压力的一种体现, Kaiser等(2015)检验了交通噪音会对两栖动物造成压力的假设。与只暴露于合唱声的对照组相比, 暴露于合唱声和交通噪音的雄性绿雨滨蛙的皮质酮浓度增加。这些都表明交通噪音会影响两栖动物的繁殖、生理, 长此以往甚至于影响整个种群数量。

3 夜间人造光对两栖动物的影响

城市化正在迅速改变自然环境, 其后果之一是生态光污染, 即由于夜间人造光而改变自然光水平

(Longcore & Rich, 2004)。夜间人造光有多种形式, 包括公共街道照明, 以及来自广告、公共建筑和车辆的照明。2016年, 23%的地球表面、88%的欧洲和近50%的美国区域夜间光照值高于自然阈值(Falchi et al, 2016)。据估计, 在过去的100年里, 全球夜间人造光每年增长近6% (从0到20%) (Hölker et al, 2010), 这是过去几十年城市化、郊区化的水平提高、交通基础设施等发展的结果(Gaston et al, 2013)。大多数无尾目部分或完全在夜间活动, 因此很可能受到人为高亮度或波动照明的影响(Perry et al, 2008)。

3.1 夜间人造光对繁殖的影响

雄性鸣叫是保证种群繁衍的重要部分。关于夜间人造光对雄性鸣叫影响的研究近些年逐渐受到关注。Baker和Richardson (2006)量化了繁殖季节人工照明对雄性绿池蛙野外鸣叫的影响, 与在自然光条件下观察到的雄性绿池蛙相比, 接受人工光照的雄性鸣叫减少, 移动更加频繁。结果表明人工照明可能会对繁殖产生影响, 从而影响种群数量。

除了雄性的鸣叫, 雌性的选择在无尾目的繁殖中同样重要。光线水平会影响雌性对雄性鸣叫的反应, Rand等(1997)将雌性水泡窄口蛙(*Physalaemus pustulosus*)分别置于黑暗条件下和3 lux光照条件下并播放雄性鸣叫来评估雌性的选择, 在黑暗中雌蛙向雄性鸣叫移动的频率比在光照条件下更频繁, 当光照水平增加时, 雌性对配偶的选择性较低, 可能更喜欢快速交配以避免交配活动所增加的捕食风险。总体上, 雌性水泡窄口蛙的择偶行为受光照条件的影响较大。

雌性变色灰雨蛙的择偶行为则不受光照条件的影响。Underhill和Höbel (2018)模拟静态光污染(路灯)和动态光污染(连续和间断性光照)来测试雌性变色灰雨蛙的择偶行为。静态光污染实验包含3种光照强度的对比, 分别为0.2 lux (自然夜间)、5 lux (相当于距离路灯3.5 m)和15 lux (相当于路灯正下方); 动态光实验使用相同的光照强度(15 lux)但时间不同, 一个为恒定光源, 另一个则是黑暗条件和15 lux交替进行。结果与预测相反, 无论是在静态光还是在动态光的实验中, 雌性变色灰雨蛙择偶行为的选择都几乎没有受到光照处理的影响。这说明人工照明对雌性择偶选择的影响具有高度的物

种特异性, 这一方面需要更多的研究探索。

Touzot等(2020)将雄性大蟾蜍(*Bufo bufo*)置于3种夜间人造光强度(0.01 lux、0.1 lux、5 lux对应不同地区两栖动物生活的夜间光照水平)下, 研究了大蟾蜍的繁殖行为和受精成功率。与对照组(0.01 lux)相比, 暴露于0.1 lux和5 lux的雄性大蟾蜍需要更长的时间才能成功抱对, 初步抱对成功后, 经过1–7 d后, 发现对照组抱对成功率为100%, 而暴露于0.1 lux和5 lux雄性的分离率分别为20%和10%, 此外, 实验组中的平均受精率也远低于对照组。这些结果证明了暴露于夜间人造光下会影响雄性大蟾蜍的交配行为和受精成功率, 但这些改变的生理机制尚不清楚。

3.2 夜间人造光对生长与生理的影响

两栖动物的生活史中有两个显著不同的阶段: 水中生活的幼体阶段(蝌蚪)和能在陆地生活的成体阶段, 幼体经过变态发育转为成体。大多数夜间人造光的研究都集中在单一的生命阶段, 而Dananay和Benard (2018)对美洲蟾蜍的两个生命阶段都进行了研究, 以探究夜间人造光对发育和生长的影响。在幼体阶段, 经过夜间人造光处理的美洲蟾蜍蝌蚪变态发育时间约减少30%; 在登陆之后, 幼蟾暴露于夜间人造光的美洲蟾蜍生长速度降低15%。生长速度的降低会导致繁殖力降低、存活率降低等负面后果。May等(2019)为了了解光照条件改变的影响, 将美洲林蛙置于3种不同的光照条件下(对照组、增强的日间光照强度、夜间人造光), 经过加强的日间光照和夜间人造光处理的两组美洲林蛙卵的受精率明显低于对照组。与Dananay和Benard (2018)的结果不同, 此实验未发现对变态发育时间的影响, 造成结果的不同可能是由于实验方法的差异, 即不同的光照周期、光照强度以及模型物种, 未来的研究应关注不同的光照条件及物种的差异。

夜间人造光会打乱自然环境中的明暗循环并破坏昼夜节律, 这些都可以改变两栖动物的糖皮质激素水平(Forsburg et al, 2021)。长期的干扰可能导致糖皮质激素的持续升高或下降, 这可能是有害的(Cyr & Romero, 2009)。Forsburg等(2021)探究了190–250 lux夜间人造光对两种常见无尾目伯兰豹蛙(*Rana berlandieri*)和滨岸蟾蜍生理、生长的影响。他们对两种无尾目的幼体蝌蚪进行收集, 在12L:

12D光照下7 d, 再移至恒定夜间人造光(24L:0D)或脉冲夜间人造光(12L:夜间间隔12 h开启或关闭)进行观察。与对照组相比, 伯兰豹蛙在恒定和脉冲夜间人造光下的皮质酮激素释放率增加, 而滨岸蟾蜍降低, 但伯兰豹蛙和滨岸蟾蜍的生长没有受到影响。恒定和脉冲夜间人造光都是伯兰豹蛙和滨岸蟾蜍蝌蚪的压力源, 但两种无尾目蝌蚪应对压力源的方式不同。

3.3 夜间人造光对活动行为的影响

两栖动物在夜间的视觉敏感性高, 它们的夜间活动会受到光照水平变化的影响(Buchanan, 2006)。光照水平的增加可以阻碍两栖动物进出繁殖区的运动。有研究提到在夜间足球比赛期间, 由于附近体育场的灯光增加了夜间光照水平, 导致实验围栏中的蛙类停止交配活动, 只有当围栏被覆盖蛙类不受光线照射时, 交配活动才恢复(Longcore & Rich, 2004)。Touzot等(2019)将大蟾蜍随机暴露于3种光照强度(0.1 lux、5 lux、20 lux)中的一组, 记录每只蟾蜍24 h的活动持续时间以及食物摄入量和能量消耗。与对照组0.1 lux夜间人造光相比, 暴露于5 lux和20 lux下的大蟾蜍平均总移动时间分别减少了56.7%、73.9%, 夜间活动时间分别减少了73.4%、77.4%, 白天活动没有显著差异, 食物摄取量和体重均无影响。暴露于夜间人造光下大蟾蜍的能量进行了重新分配, 总能量消耗分为标准能量消耗(维持机体功能所需的最小能量)和活动能量消耗, 与对照组相比, 5 lux和20 lux下的大蟾蜍平均标准能量分别增加了28.1%、58.1%, 平均活动能量消耗分别下降了18.8%和38.9%。夜间人造光对大蟾蜍的活动和能量代谢产生了较大影响, 这些可能对大蟾蜍种群的适应性产生负面影响。

4 路杀对两栖动物的影响

近年来, 全球道路系统不断扩张, 2050年预计全球至少将新建2,500万km的道路(Laurance et al, 2014)。道路的快速建设加速了全球景观破碎的程度, 并对生态系统和野生动物造成复杂且持久的影响(Coffin, 2007; 阿卜杜赛麦提·买尔迪亚力等, 2022)。两栖动物是在道路上死亡最多的脊椎动物(Beebee, 2013), 它们独特的生活史或行为特征, 如季节性迁移、相对缓慢的运动和在面对迎面而来的车辆时保

持不动,这些都让它们比其他脊椎动物更容易受到道路的影响(Zhang et al, 2018)。此外,由于自身体型较小,驾驶员很难看到它们,增加了碰撞的概率(Arévalo et al, 2017)。与车辆的致命碰撞,即路杀(road-kill),是对两栖动物的数量最直接的负面影响(Rytwinski & Fahrig, 2015)。

4.1 数据收集

对两栖动物路杀的研究主要集中在欧洲、北美等一些发达国家的温带地区(Puky, 2005)。原先评估路杀对两栖动物影响的方法是沿着一定的路线定期收集数据(Shilling et al, 2015),但这种方法成本高且耗时(Costa et al, 2015)。现在多使用公众科学方法(citizen science approach),即让公众报告路杀事件,志愿者通过骑行或步行的方式在一条预先设定的路线监测路杀情况,并把监测情况填写在专门的应用程序中,包括现场坐标、动物照片、物种名称和个体数量(Heigl et al, 2017)。这些数据可能存在空间偏差,其偏差的来源包括:(1)志愿者倾向于在公路上进行调查,这些记录并不能完全代表两栖动物种群的现状;(2)一些离居住区较近、容易到达、危险性小的路段更有可能被志愿者选择;(3)道路具有不同的监测能力,不同的交通量、交通高峰期导致了不同的路杀分布(Petrovan et al, 2020)。为了检测公众科学方法所获得的数据是否具有代表性,Petrovan等(2020)将公众科学项目获得的数据与其他途径获得的数据进行了对比,结果表明这些数据具有代表性,可以与其他现有数据集进行比较。

在过去的20年中,公众科学项目的数量和志愿者工作量一直在增加(O'Donnell & Durso, 2014),大多数项目侧重于数据收集,这些数据可用于评估两栖动物的分布趋势(Petrovan & Schmidt, 2016)。在两栖动物迁徙期间,常发生大规模路杀事件,它们的迁徙繁殖活动为公众科学项目提供了保护机会,志愿者在两栖动物迁徙期间捕获它们并将它们带离公路(Beebe, 2013)。Sterrett等(2019)评估了以道路为基础的公众科学项目对缓解两栖动物路杀事件的贡献,与没有志愿者的保护相比,志愿者参与保护减少了两栖动物的路杀数量。

4.2 路杀对繁殖的影响

路杀率随着道路网络的扩大而增加,导致两栖动物数量减少(Cosentino et al, 2014)。Sutherland等

(2010)研究发现两栖动物路杀率随着交通量的增加而增加。近些年来,我国也加强了对两栖动物的路杀研究,大多在保护区、高速公路等附近(杨韬等, 2022)。例如对广州郊区30条样线的调查,共记录94只死亡两栖动物,周围生境为水体的公路造成两栖动物公路死亡的数量最多,个体数量和种类随着车流量的增长而增长^①。除此之外,湖南莽山国家级自然保护区、长白山国家级自然保护区、王朗国家级自然保护区的公路上有两栖动物死亡个体的报道(莫吉伟, 2009^②; 罗玉梅等, 2015; Zhang et al, 2018)。路杀在一年中的分布各有不同,两栖动物繁殖期间的路杀率最高,其他时间段路杀率较低,其空间分布也不是随机的,具有聚集性,多分布在繁殖池附近(Zhang et al, 2018)。不利的天气条件同样对路杀有影响(Kazemi et al, 2016),由于强降水、大雾造成能见度低会影响司机和动物的视觉感知,从而增加发生碰撞的可能性(Santos et al, 2011)。当降水量增加时,无尾目的活动增加,路杀率也随之增加(Coelho et al, 2012),这些都会影响两栖动物的繁殖,造成种群数量下降。这些影响因素研究多集中在保护区附近,城市道路的路杀影响因素还有待继续研究。

4.3 缓解措施

为了降低路杀对两栖动物的严重影响,欧洲已经制定和实施了40多年的道路缓解措施(Helldin & Petrovan, 2019),包括改变驾驶员行为和改变动物行为两方面(Rytwinski et al, 2016)。前者包含各种类型的野生动物警告标志、减少交通量、限制车速以及临时封路等,后者包括在道路沿线设置围栏、地下通道等(Huijser et al, 2007),但关于两栖动物道路缓解措施的实际有效性方面仍然知之甚少。在瑞典斯德哥尔摩,春季两栖动物迁徙期间会出现大量的路杀,Helldin和Petrovan (2019)选择3个地点建造了两栖动物通道,在通道建设前后记录了道路上、围栏沿线和通道中的两栖动物数量以评估道路缓解措施的有效性。3个地点的监测结果表明,实施道路缓解措施可以有效减少春季迁徙期间两栖动物的路杀,且通过通道的两栖动物数量在不同站点间差

① 谷颖乐 (2008) 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. 硕士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙.

② 莫吉伟 (2009) 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. 硕士学位论文, 中南林业科技大学, 长沙.

异很大。

与无尾目不同, 有尾目使用通道以秋季为主。[Jarvis等\(2019\)](#)在春季和秋季对英国约克郡附近的4种两栖动物利用通道的情况进行监测发现, 不同物种使用通道情况不同, 与春季相比, 秋季通道内冠欧螈(*Triturus cristatus*)数量明显增加, 而大蟾蜍多在春季使用隧道。对于冠欧螈而言, 在通道监测开始(3月中旬)时, 个体可能已接近繁殖池, 不需要通过通道再到达繁殖池, 秋季大量的冠欧螈通过通道可能是由于繁殖后和变态发育后的扩散分布从而寻找新的栖息地([Jehle & Arntzen, 2000](#))。大蟾蜍在春季采用爆炸性繁殖策略, 到达池塘并在几天内离开([Reading, 1998](#)), 与英国其他两栖动物相比, 普通蟾蜍的越冬地点距离池塘更远([Daversa et al, 2012](#)), 这可能是它们春季通道使用率高的原因。在今后道路缓解措施评估中应把一年四季都考虑在内进行监测, 使结果更具准确性。

在中国, 对两栖动物的监测研究始于1997年对若尔盖湿地两栖动物的监测([Fellers et al, 2003](#)), 至今已开展了25年, 早期以地区性监测为主, 自2011年起开展全国性的两栖动物监测([李成等, 2017](#)), 但监测地点大多在自然保护区等地, 城市道路监测还较少。如, 我国研究人员对韶赣高速公路(粤境段)两种类型动物通道(人水同过通道和过水涵洞)进行了为期12个月的连续监测, 对两种动物通道对两栖动物的保护效果进行比较, 并研究了两栖动物使用动物通道的规律, 结果表明: (1)两栖动物对人水同过通道的使用效果优于过水涵洞; (2)两栖动物的生态类型可以作为动物通道类型的选择依据, 且通道内环境是决定两栖动物是否使用动物通道的首要因素; (3)两栖动物使用动物通道主要集中在繁殖期^①。在未来应加强两栖动物的通道建设以及监测。

5 展望

5.1 人为噪音

人为噪音可影响无尾目的繁殖和社会行为([Simmons & Narins, 2018](#)), 而无尾目通过改变它们的鸣叫特征以及繁殖模式来应对人为噪音所带来的负面影响, 且结果因物种而异。这种行为的改变

是否会对其自身的能量消耗以及健康产生影响尚不清楚。人为噪音对两栖动物生理影响的研究较少, 需要更多的研究来记录和量化暴露于人为噪音的长期后果, 以便对两栖动物有更好的了解和保护。

为了降低人为噪音对两栖动物特别是无尾目的影响, 可以加强道路旁基础设施的改进([Nelson et al, 2017](#))。在交通量密集、噪音较大的公路旁安装隔音屏障以缓冲噪音, 隔音屏障可以是人工建筑材料([Sanchez-Perez et al, 2002](#))或是以植被形成的天然屏障([van Renterghem et al, 2012](#))。除此之外, 编制可能受噪音影响的两栖动物清单, 了解其生物学要求, 对其分布地区附近的道路进行声学监测, 掌握并调节附近的噪音水平以确定无尾目受人为噪音影响的程度([Dutta, 2018](#))。

5.2 夜间人造光

夜间人造光的亮度通常远高于夜间自然光(月光、星光), 在城市地区尤为普遍([Deng et al, 2019](#))。两栖动物的繁殖、生长、生理、活动等行为均受到夜间人造光的影响, 但采取的缓解措施却很少。两栖动物对不同波长的光具有不同的敏感性([Jägerbrand & Bouroussis, 2021](#)), 已有研究表明路灯会影响普通蟾蜍的迁移, 它们在迁移途中避开了白光和绿光的路段, 红光对其迁移没有影响([van Grunsven et al, 2017](#)), 因此可以使用具有低光照水平短波长的红光来减轻影响。除此之外, 在敏感地区控制照明强度或在一定时间内关闭照明尤为重要, 许多两栖动物都适应黑暗, 控制或关闭照明有利于提高它们的存活率, 从而加强对物种种群的保护([Jägerbrand & Bouroussis, 2021](#))。树木也有助于减轻夜间人造光的影响, 树冠覆盖率的变化会影响光的穿透([Dutta, 2018](#)), 较高的树冠覆盖率能够对光的穿透起到遮蔽作用, 因此, 适当的增加树木种植也是缓解光污染的有效途径之一。

5.3 路杀

道路交通对两栖动物种群构成威胁([Taylor et al, 2002](#)), 尽管一些缓解措施很有效果, 但世界范围内仍有大量死亡事件。在过去的几十年里, 公众科学方法作为研究世界各地两栖动物的工具得到了广泛应用([McKinley et al, 2017](#); [Sterrett et al, 2019](#))。为了更好地监测和保护两栖动物, 减少路杀情况的发生, 应加强两栖动物保护宣传, 鼓励更多的群众参

^① 李斌 (2012) 韶赣高速公路野生动物通道两栖动物保护效果及改进措施研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

与公众科学项目, 增强对城市环境中两栖动物的了解。在监测和保护过程中, 把两栖动物各个生命阶段纳入在内, 避免只关注两栖动物成年阶段而忽视幼年阶段(Petrovan & Schmidt, 2019), 对所有物种均应认真记录, 避免只专注于珍稀濒危物种。其次, 应将各个地区的监测考虑在内, 缓解个别地区两栖动物数据缺乏的困境。

路杀的缓解措施多种多样, 目前已经证明围栏、地下通道等措施能够有效减少两栖动物的死亡数量(Helldin & Petrovan, 2019), 但仍有两个问题需要考虑: (1) 围栏的末端效应, 即在围栏末端发现大量的两栖动物死亡(Helldin & Petrovan, 2019)。不考虑围栏末端问题可能高估了缓解措施的有效性, 研究人员应对紧邻末端的区域以及区域外的路杀情况进行评估(Rytwinski et al, 2016)。(2) 经济效益, 建造两栖动物通道成本昂贵, 在建造时应充分了解需建造缓解措施道路的路杀情况以及如何更好地设计通道, 并监测缓解措施前后两栖动物的数量(Rytwinski et al, 2016)。除此之外, 张贴野生动物警告标志、降低行驶速度、限制夜间交通量(Zhang et al, 2018)等相对经济的措施应受到重视, 目前关于它们的缓解路杀效果研究较少。

综上所述, 随着全球城市化进程不断加快, 两栖动物受人类活动的影响巨大, 我国应加强人为噪音、夜间人造光、路杀等方面的研究, 重视减少两栖动物死亡的缓解措施, 持续规划、管理和监测两栖动物种群动态, 建设和利用好自然环境, 助力我国“绿水青山就是金山银山”的生态文明理念建设。

致谢: 感谢安徽师范大学赵娜老师指导作图, 感谢生态环境部南京环境科学研究所吴军老师对初稿的建议与修改。

ORCID

江艺欣  <https://orcid.org/0009-0003-9106-8237>

王苏盆  <https://orcid.org/0000-0002-9522-9005>

参考文献

Arévalo JE, Honda W, Arce-Arias A, Häger A (2017) Spatiotemporal 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*,

65, 1261–1276.

Baker BJ, Richardson JML (2006) The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melanota*. *Canadian Journal of Zoology*, 84, 1528–1532.

Bee MA, Swanson EM (2007) Auditory masking of anuran advertisement calls by road traffic noise. *Animal Behaviour*, 74, 1765–1776.

Beebe TJ (2013) Effects of road mortality and mitigation measures on amphibian populations. *Conservation Biology*, 27, 657–668.

Berger L, Speare R, Daszak P, Green DE, Cunningham AA, Goggin CL, Slocumbe R, Ragan MA, Hyatt AD, McDonald KR, Hines HB, Lips KR, Marantelli G, Parkes H (1998) Chytridiomycosis causes amphibian mortality associated with population declines in the rain forests of Australia and Central America. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 95, 9031–9036.

Blaustein AR, Belden LK, Hatch AC, Kats LB, Hoffman PD, Hays JB, Marco A, Chivers DP, Kiesecker JM (2001a) Ultraviolet radiation and amphibians. In: *Ecosystems, Evolution and Ultraviolet Radiation* (eds Cockell CS, Blaustein AR), pp. 63–79. Springer, New York.

Blaustein AR, Belden LK, Olson DH, Green DM, Root TL, Kiesecker JM (2001b) Amphibian breeding and climate change. *Conservation Biology*, 15, 1804–1809.

Blaustein AR, Urbina J, Snyder PW, Reynolds E, Dang T, Hoverman JT, Han B, Olson DH, Searle C, Hambalek NM (2018) Effects of emerging infectious diseases on amphibians: A review of experimental studies. *Diversity*, 10, 81.

Buchanan BW (2006) Observed and potential effects of artificial night lighting on anuran amphibians. In: *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (eds Rich C, Longcore T), pp. 192–220. Island Press, Washington, DC.

Casey RE, Shaw AN, Massal LR, Snodgrass JW (2005) Multimedia evaluation of trace metal distribution within stormwater retention ponds in suburban Maryland, USA. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74, 273–280.

Chinchar VG (2002) Ranaviruses (family Iridoviridae): Emerging cold-blooded killers. *Archives of Virology*, 147, 447–470.

Coelho IP, Teixeira FZ, Colombo P, Coelho AVP, Kindel A (2012) Anuran road-kills neighboring a peri-urban reserve in the Atlantic Forest, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 112, 17–26.

Coffin AW (2007) From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography*, 15, 396–406.

Cosentino BJ, Marsh DM, Jones KS, Apodaca JJ, Bates C, Beach J, Beard KH, Becklin K, Bell JM, Crockett C, Fawson G, Fjelsted J, Forsy EA, Genet KS, Grover M, Holmes J, Indeck K, Karraker NE, Kilpatrick ES, Langen TA, Mugel SG, Molina A, Vonesh JR, Weaver RJ, Willey A (2014) Citizen science reveals widespread negative effects

- of roads on amphibian distributions. *Biological Conservation*, 180, 31–38.
- Costa AS, Ascensão F, Bager A (2015) Mixed sampling protocols improve the cost-effectiveness of roadkill surveys. *Biodiversity and Conservation*, 24, 2953–2965.
- Cunnington GM, Fahrig L (2010) Plasticity in the vocalizations of anurans in response to traffic noise. *Acta Oecologica*, 36, 463–470.
- Cushman SA (2006) Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: A review and prospectus. *Biological Conservation*, 128, 231–240.
- Cyr NE, Romero LM (2009) Identifying hormonal habituation in field studies of stress. *General and Comparative Endocrinology*, 161, 295–303.
- Dananay KL, Benard MF (2018) Artificial light at night decreases metamorphic duration and juvenile growth in a widespread amphibian. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285, 20180367.
- Daversa DR, Muths E, Bosch J (2012) Terrestrial movement patterns of the common toad (*Bufo bufo*) in central Spain reveal habitat of conservation importance. *Journal of Herpetology*, 46, 658–664.
- Deng K, Zhu BC, Zhou Y, Chen QH, Wang TL, Wang JC, Cui JG (2019) Mate choice decisions of female serrate-legged small treefrogs are affected by ambient light under natural, but not enhanced artificial nocturnal light conditions. *Behavioural Processes*, 169, 103997.
- Dutta H (2018) Insights into the impacts of three current environmental problems on amphibians. *European Journal of Ecology*, 4, 15–27.
- Falchi F, Cinzano P, Duriscoe D, Kyba CCM, Elvidge CD, Baugh K, Portnov BA, Rybnikova NA, Furgoni R (2016) The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2, e1600377.
- Fei L, Hu SQ, Ye CY, Huang YZ (2006) *Fauna Sinica•Amphibian* (Vol. 1). Science Press, Beijing. (in Chinese) [费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭 (2006) 中国动物志•两栖纲(上卷). 科学出版社, 北京.]
- Fellers GM, Wang YZ, Liu SY (2003) Status of amphibians at the Zoige wetlands, Sichuan Province, China. *Froglog*, 58, 1.
- Forsburg ZR, Guzman A, Gabor CR (2021) Artificial light at night (ALAN) affects the stress physiology but not the behavior or growth of *Rana berlandieri* and *Bufo valliceps*. *Environmental Pollution*, 277, 116775.
- Gaston KJ, Bennie J, Davies TW, Hopkins J (2013) The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, 88, 912–927.
- Gerhardt HC, Huber F (2003) Acoustic communication in insects and anurans: Common problems and diverse solutions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114, 559.
- Grant EHC, Muths E, Schmidt BR, Petrovan SO (2019) Amphibian conservation in the Anthropocene. *Biological Conservation*, 236, 543–547.
- Hamer AJ, McDonnell MJ (2008) Amphibian ecology and conservation in the urbanising world: A review. *Biological Conservation*, 141, 2432–2449.
- Hazell D, Cunningham R, Lindenmayer D, Mackey B, Osborne W (2001) Use of farm dams as frog habitat in an Australian agricultural landscape: Factors affecting species richness and distribution. *Biological Conservation*, 102, 155–169.
- Heigl F, Horvath K, Laaha G, Zaller JG (2017) 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*, 17, 1–11.
- Helldin JO, Petrovan SO (2019) Effectiveness of small road tunnels and fences in reducing amphibian roadkill and barrier effects at retrofitted roads in Sweden. *PeerJ*, 7, e7518.
- Hölker F, Moss T, Griefahn B, Kloas W, Voigt CC, Henckel D, Hänel A, Kappeler PM, Völker S, Schwoppe A, Franke S, Uhrlandt D, Fischer J, Klenke R, Wolter C, Tockner K (2010) The dark side of light: A transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society*, 15, 13.
- Huijser MP, McGowan P, Hardy A, Kociolek AL, Clevenger AP, Smith D, Ament R (2007) *Wildlife-vehicle Collision Reduction Study: Report to Congress* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Jägerbrand AK, Bouroussis CA (2021) Ecological impact of artificial light at night: Effective strategies and measures to deal with protected species and habitats. *Sustainability*, 13, 5991.
- Jarvis LE, Hartup M, Petrovan SO (2019) Road mitigation using tunnels and fences promotes site connectivity and population expansion for a protected amphibian. *European Journal of Wildlife Research*, 65, 27–38.
- Jehle R, Arntzen JW (2000) Post-breeding migrations of newts (*Triturus cristatus* and *T. marmoratus*) with contrasting ecological requirements. *Journal of Zoology*, 251, 297–306.
- Jiang JP, Xie F, Zang CX, Cai L, Li C, Wang B, Li JT, Wang J, Hu JH, Wang Y, Liu JY (2016) Assessing the threat status of amphibians in China. *Biodiversity Science*, 24, 588–597. (in Chinese with English abstract) [江建平, 谢锋, 臧春鑫, 蔡蕾, 李成, 王斌, 李家堂, 王杰, 胡军华, 王燕, 刘炯宇 (2016) 中国两栖动物受威胁现状评估. 生物多样性, 24, 588–597.]
- Kaiser K, Devito J, Jones CG, Marentes A, Perez R, Umeh L, Weickum RM, McGovern KE, Wilson EH, Saltzman W (2015) Effects of anthropogenic noise on endocrine and reproductive function in White's treefrog, *Litoria caerulea*. *Conservation Physiology*, 3, cou061.
- Kaiser K, Hammers J (2009) The effect of anthropogenic noise on male advertisement call rate in the neotropical treefrog, *Dendropsophus triangulum*. *Behaviour*, 146, 1053–1069.
- Kaiser K, Scofield DG, Alloush M, Jones RM, Marczak S, Martineau K, Oliva MA, Narins PM (2011) When sounds collide: The effect of anthropogenic noise on a breeding assemblage of frogs in Belize, Central America. *Behaviour*,

- 148, 215–232.
- Kazemi VD, Jafari H, Yavari A (2016) Spatio-temporal patterns of wildlife road mortality in Golestan National Park, northeast of Iran. *Open Journal of Ecology*, 6, 312–324.
- Kiesecker JM, Blaustein AR, Miller CL (2001) Potential mechanisms underlying the displacement of native red-legged frogs by introduced bullfrogs. *Ecology*, 82, 1964–1970.
- Lan FY, Ma XJ, Lu JY, Li YG, Chai RS, Li X, Luo YO, Zhang YZ, Ye ZL, Fu CJ, Bao WS, Li L, Xing XY (2021) Effects of urbanization on bird nesting: A review. *Biodiversity Science*, 29, 1539–1553. (in Chinese with English abstract) [蓝方源, 马行健, 逯金瑶, 李雨果, 柴汝松, 李翔, 罗亦欧, 张宇泽, 叶子凌, 付昌健, 暴文爽, 李立, 邢晓莹 (2021) 城市化对鸟类筑巢的影响研究综述. *生物多样性*, 29, 1539–1553.]
- Laurance WF, Clements GR, Sloan S, O'Connell CS, Mueller ND, Goosem M, Venter O, Edwards DP, Phalan B, Balmford A, van der Ree R, Arrea IB (2014) A global strategy for road building. *Nature*, 513, 229–232.
- Lengagne T (2008) Traffic noise affects communication behaviour in a breeding anuran, *Hyla arborea*. *Biological Conservation*, 141, 2023–2031.
- Li C, Xie F, Che J, Jiang JP (2017) Monitoring and research of amphibians and reptiles diversity in key areas of China. *Biodiversity Science*, 25, 246–254. (in Chinese with English abstract) [李成, 谢锋, 车静, 江建平 (2017) 中国关键地区两栖爬行动物多样性监测与研究. *生物多样性*, 25, 246–254.]
- Longcore T, Rich C (2004) Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 191–198.
- Luo YM, Wang ZC, Wang C, Piao ZJ, Li Z, Huang LY, Zhang R, Sui YC (2015) Survey and conservation of amphibian populations losses in roadside of Changbai Mountain. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 16, 108–112. (in Chinese with English abstract) [罗玉梅, 王卓聪, 王超, 朴正吉, 李卓, 黄利亚, 张睿, 睢亚橙 (2015) 长白山路域两栖类动物损失调查及保护. *北华大学学报 (自然科学版)*, 16, 108–112.]
- Maierdiyali A, Wang Y, Tao SC, Kong YP, Wang H, Lü Z (2022) Research status and challenges of road impacts on wildlife in China. *Biodiversity Science*, 30, 22209. (in Chinese with English abstract) [阿卜杜赛麦提·买尔迪亚力, 王云, 陶双成, 孔亚平, 王昊, 吕植 (2022) 我国道路对野生动物影响研究的现状与挑战. *生物多样性*, 30, 22209.]
- May D, Shideman G, Melnick-Kelley Q, Crane K, Hua J (2019) The effect of intensified illuminance and artificial light at night on fitness and susceptibility to abiotic and biotic stressors. *Environmental Pollution*, 251, 600–608.
- McKinley DC, Miller-Rushing AJ, Ballard HL, Bonney R, Brown H, Cook-Patton SC, Evans DM, French RA, Parrish JK, Phillips TB, Ryan SF, Shanley LA, Shirk JL, Stepenuck KF, Weltzin JF, Wiggins A, Boyle OD, Briggs RD, Chapin SF III, Hewitt DA, Preuss PW, Soukup MA (2017) Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biological Conservation*, 208, 15–28.
- Nelson DV, Klinck H, Carbaugh-Rutland A, Mathis CL, Morzillo AT, Garcia TS (2017) Calling at the highway: The spatiotemporal constraint of road noise on Pacific chorus frog communication. *Ecology and Evolution*, 7, 429–440.
- O'Donnell RP, Durso AM (2014) Harnessing the power of a global network of citizen herpetologists by improving citizen science databases. *Herpetological Review*, 45, 151–157.
- Olson DH, Aanensen DM, Ronnenberg KL, Powell CI, Walker SF, Bielby J, Garner TWJ, Weaver G, Fisher MC (2013) Mapping the global emergence of *Batrachochytrium dendrobatidis*, the amphibian chytrid fungus. *PLoS ONE*, 8, e56802.
- Parris KM (2002) More bang for your buck: The effect of caller position, habitat and chorus noise on the efficiency of calling in the spring peeper. *Ecological Modelling*, 156, 213–224.
- Perry G, Buchanan B, Fisher R, Salmon M, Wise S (2008) Effects of artificial night lighting on amphibians and reptiles in urban environments. *Herpetological Conservation*, 3, 211–228.
- Petrovan SO, Schmidt BR (2016) Volunteer conservation action data reveals large-scale and long-term negative population trends of a widespread amphibian, the common toad (*Bufo bufo*). *PLoS ONE*, 11, e0161943.
- Petrovan SO, Schmidt BR (2019) Neglected juveniles; a call for integrating all amphibian life stages in assessments of mitigation success (and how to do it). *Biological Conservation*, 236, 252–260.
- Petrovan SO, Vale CG, Sillero N (2020) Using citizen science in road surveys for large-scale amphibian monitoring: Are biased data representative for species distribution? *Biodiversity and Conservation*, 29, 1767–1781.
- Puky M (2005) Amphibian road kills: A global perspective. In: *Proceedings of the 2005 International Conference on Ecology and Transportation* (eds Irwin CL, Garrett P, McDermott KP), pp. 325–338. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh.
- Rand AS, Bridarolli ME, Dries L, Ryan MJ (1997) Light levels influence female choice in túngara frogs: Predation risk assessment? *Copeia*, 2, 447–450.
- Reading CJ (1998) The effect of winter temperatures on the timing of breeding activity in the common toad *Bufo bufo*. *Oecologia*, 117, 469–475.
- Romero LM (2004) Physiological stress in ecology: Lessons from biomedical research. *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 249–255.
- Rytwinski T, Fahrig L (2015) The impacts of roads and traffic on terrestrial animal populations. In: *Handbook of Road Ecology* (eds van der Ree R, Smith DJ, Grilo C), pp. 237–246. Springer, New York.

- Rytwinski T, Soanes K, Jaeger JAG, Fahrig L, Findlay CS, Houlahan J, van der Ree R, van der Grift EA (2016) How effective is road mitigation at reducing road-kill? A meta-analysis. *PLoS ONE*, 11, e0166941.
- Sanchez-Perez JV, Rubio C, Martinez-Sala R, Sanchez-Grandia R, Gomez V (2002) Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. *Applied Physics Letters*, 81, 5240–5242.
- Santos SM, Carvalho F, Mira A (2011) How long do the dead survive on the road? Carcass persistence probability and implications for road-kill monitoring surveys. *PLoS ONE*, 6, e25383.
- Sapolsky RM, Romero LM, Munck AU (2000) How do glucocorticoids influence stress responses? Integrating permissive, suppressive, stimulatory, and preparative actions. *Endocrine Reviews*, 21, 55–89.
- Shilling F, Perkins SE, Collinson W (2015) Wildlife/roadkill observation and reporting systems. In: *Handbook of Road Ecology* (eds van der Ree R, Smith DJ, Grilo C), pp. 492–501. John Wiley & Sons, New York.
- Sievers M, Hale R, Parris KM, Melvin SD, Lanctôt CM, Swearer SE (2019a) Contaminant-induced behavioural changes in amphibians: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 693, 133570.
- Sievers M, Hale R, Swearer SE, Parris KM (2019b) Frog occupancy of polluted wetlands in urban landscapes. *Conservation Biology*, 33, 389–402.
- Simmons AM, Narins PM (2018) Effects of anthropogenic noise on amphibians and reptiles. In: *Effects of Anthropogenic Noise on Animals* (eds Slabbekoorn H, Dooling R, Popper A, Fay R), pp. 179–208. Springer, New York.
- Skids DE, Golet FC, Paton PWC, Mitchell JC (2007) Habitat correlates of reproductive effort in wood frogs and spotted salamanders in an urbanizing watershed. *Journal of Herpetology*, 41, 439–450.
- Snodgrass J, Casey R, Massal L (2007) Nitrogen pollution of stormwater ponds: Potential for toxic effects on amphibian embryos and larvae. *Applied Herpetology*, 4, 19–29.
- Sodhi NS, Bickford D, Diesmos AC, Lee TM, Koh LP, Brook BW, Sekercioglu CH, Bradshaw CJA (2008) Measuring the meltdown: Drivers of global amphibian extinction and decline. *PLoS ONE*, 3, e1636.
- Sterrett SC, Katz RA, Fields WR, Grant EHC (2019) The contribution of road-based citizen science to the conservation of pond-breeding amphibians. *Journal of Applied Ecology*, 56, 988–995.
- Sun JWC, Narins PM (2005) Anthropogenic sounds differentially affect amphibian call rate. *Biological Conservation*, 121, 419–427.
- Sutherland RW, Dunning PR, Baker WM (2010) Amphibian encounter rates on roads with different amounts of traffic and urbanization. *Conservation Biology*, 24, 1626–1635.
- Taylor SK, Buerget CD, Roelke-Parker ME, Homer BL, Rotstein DS (2002) Causes of mortality of free-ranging Florida panthers. *Journal of Wildlife Diseases*, 38, 107–114.
- Tennessen JB, Parks SE, Langkilde T (2014) Traffic noise causes physiological stress and impairs breeding migration behaviour in frogs. *Conservation Physiology*, 2, cou032.
- Touzot M, Lengagne T, Secondi J, Desouhant E, Théry M, Dumet A, Duchamp C, Mondy N (2020) Artificial light at night alters the sexual behaviour and fertilisation success of the common toad. *Environmental Pollution*, 259, 113883.
- Touzot M, Teulier L, Lengagne T, Secondi J, Théry M, Libourel PA, Guillard L, Mondy N (2019) Artificial light at night disturbs the activity and energy allocation of the common toad during the breeding period. *Conservation Physiology*, 7, coz002.
- Underhill VA, Höbel G (2018) Mate choice behavior of female Eastern Gray Treefrogs (*Hyla versicolor*) is robust to anthropogenic light pollution. *Ethology*, 124, 537–548.
- van Grunsven RHA, Creemers R, Joosten K, Donners M, Veenendaal EM (2017) Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphibia-Reptilia*, 38, 49–55.
- van Renterghem T, Botteldooren D, Verheyen K (2012) Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. *Journal of Sound and Vibration*, 331, 2404–2425.
- Vargas-Salinas F, Cunningham GM, Amézquita A, Fahrig L (2014) Does traffic noise alter calling time in frogs and toads? A case study of anurans in Eastern Ontario, Canada. *Urban Ecosystems*, 17, 945–953.
- Wake DB (1991) Declining amphibian populations. *Science*, 253, 860.
- Yang T, Zhang WY, Dai R, Zheng PY, Shu GC, Zou Q, Li C (2022) Reptile road-kills in Simao District of Pu'er City, Yunnan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 42, 2648–2656. (in Chinese with English abstract) [杨韬, 章文艳, 戴蓉, 郑普阳, 舒国成, 邹琪, 李成 (2022) 云南省普洱市思茅区路杀爬行动物研究. *生态学报*, 42, 2648–2656.]
- Yi YZ, Sheridan JA (2019) Effects of traffic noise on vocalisations of the rhacophorid tree frog *Kurixalus chaseni* (Anura: Rhacophoridae) in Borneo. *Raffles Bulletin of Zoology*, 67, 77–82.
- Zhang WY, Shu GC, Li YL, Xiong S, Liang CP, Li C (2018) Daytime driving decreases amphibian roadkill. *PeerJ*, 6, e5385.

(责任编辑: 江建平 责任编辑: 闫文杰)