

灯光强度对东亚伏翼觅食行为的影响研究

蒋昀珂¹ 虞红莉¹ 王静² 朱奕丞¹ Tahir Abbas¹
何孟周冉¹ 张焱榆¹ 刘汶沁² 邓迎春² 罗波^{1*}

(1 西华师范大学, 西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 南充 637002)

(2 东北师范大学, 吉林省动物资源保护与利用重点实验室, 长春 130117)

摘要: 灯光已经改变了大部分生态系统的夜间环境, 威胁生物多样性及其生态系统服务。觅食行为是动物从外界环境获取营养与能量的基础。目前, 有关灯光强度是否影响夜行性动物的觅食行为尚不明确。本研究选择东亚伏翼 (*Pipistrellus abramus*) 作为研究对象, 探究灯光强度对食虫蝙蝠觅食行为的影响。我们以三座桥梁下方 5 m 处作为研究样点, 监测每个样点的灯光强度、东亚伏翼通过次数和捕食蜂鸣数量。克鲁斯卡尔-沃利斯检验表明, 相比相对黑暗样点, 东亚伏翼在弱光样点的通过次数变化不明显, 但在强光样点的通过次数显著减少。相比相对黑暗样点, 东亚伏翼在弱光样点的捕食蜂鸣数量呈现增加趋势。与弱光样点相比, 东亚伏翼在强光样点的捕食蜂鸣数量显著下降。广义线性混合模型显示, 灯光强度对东亚伏翼的通过次数和捕食蜂鸣数量具有显著负面影响。研究结果证实, 强光能够干扰东亚伏翼的觅食行为, 这为伴人种蝙蝠生境的光污染防控提供科学依据。

关键词: 灯光; 蝙蝠; 回声定位声波; 觅食行为; 光污染

中图分类号: Q958.1

文献标识码: A

文章编号: 1000–1050 (2025) 02–0185–08

A study on the effects of artificial light intensity on the foraging behavior in Japanese pipistrelle bats (*Pipistrellus abramus*)

JIANG Yunke¹, YU Hongli¹, WANG Jing², ZHU Yicheng¹, TAHIR Abbas¹, HE Mengzhouran¹, ZHANG Hanyu¹, LIU Wenqin², DENG Yingchun², LUO Bo^{1*}

(1 China West Normal University, Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation of Ministry of Education, Nanchong 637002, China)

(2 Northeast Normal University, Jilin Provincial Key Laboratory of Animal Resource Conservation and Utilization, Changchun 130117, China)

Abstract: Artificial light has altered the nocturnal environments of most ecosystems, posing a threat to biodiversity and associated ecosystem services. Foraging behavior is essential for animals to obtain the nutrition and energy from the external environment. To date, it remains uncertain whether the intensity of artificial light affects the foraging behavior in nocturnal animals. Here, we used Japanese pipistrelle bats (*Pipistrellus abramus*) as a model for insectivorous bats to investigate the effects of artificial light intensity on their foraging behavior. We established three study sites situated 5 m below three different bridges. At each site, we monitored the intensity of artificial light and recorded the number of passes and feeding buzzes in *P. abramus*. The Kruskal-Wallis test showed no significant difference in the number of *P. abramus* passes between the relatively dark site and the site with low light intensity. However, a remarkable reduction in the number of *P. abramus* passes was observed at the site with high light intensity when compared to the relatively dark site. There was an increasing tendency in the number of feeding buzzes emitted by *P. abramus* at the site with low light intensity relative to the relatively dark site. The number of feeding buzzes in *P. abramus* was significantly diminished at the site with high light intensity relative to the site with low light intensity. Generalized linear mixed models indicated

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32271561); 西华师范大学大学生创新创业项目 (S202410638107)

作者简介: 蒋昀珂 (1998–), 男, 硕士研究生, 主要从事动物行为生态学研究。

收稿日期: 2024–12–25; **接受日期:** 2025–02–07

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: luob041@nenu.edu.cn

that the intensity of artificial light negatively influenced the number of passes and feeding buzzes in *P. abramus*. These results demonstrate that high levels of artificial illumination can disturb the foraging behavior of *P. abramus*. Our findings provide a scientific basis for the regulation of light pollution in habitats utilized by synanthropic bats.

Key words: Artificial light; Bat; Echolocation call; Foraging behavior; Light pollution

随着城市化进程加剧,泛滥的灯光改变了大部分生态系统的夜间环境,日益成为全球新兴环境污染物(Longcore and Rich, 2004; Davies *et al.*, 2014; Jägerbrand and Spoelstra, 2023)。卫星遥感影像显示,2012—2016年,灯光辐射面积的年增长率达到2.2%,灯光强度的年增长率达到1.8%,全球近1/5的陆地和沿海已经遭受一定程度的光污染(Davies *et al.*, 2014; Falchi *et al.*, 2016; Kyba *et al.*, 2017)。灯光扰乱光暗交替周期,使陆地、沿海和夜空变得异常明亮,干扰动物的睡眠、觅食和繁殖系列生活史事件,被认为是导致生物多样性丧失的关键因素(Hölker *et al.*, 2010; Davies and Smyth, 2018; Sanders *et al.*, 2021)。深入开展灯光对动物行为的影响研究,已经成为行为生态学与保护生物学的热点问题,有助于揭示动物对光污染的耐受性,服务生物多样性保护与管理。

觅食行为是动物从外界环境获取营养与能量的日常活动,在维持个体适合度、种群繁衍和群落稳定方面扮演着关键作用(Lemon, 1991; Greene *et al.*, 2016)。先前研究表明,灯光对一些夜行性动物的觅食行为造成负面影响。例如灯光扰乱夜行性昆虫的传粉,影响虫媒植物的授粉(Knop *et al.*, 2017);研究者将海蟾蜍(*Rhinella marina*)分组暴露于黑暗和灯光条件,发现强光组个体减少夜间活动,并且活动高峰延迟(Secondi *et al.*, 2021);随着白色LED(light-emitting diode)灯光的出现,五趾跳鼠(*Orientallactaga sibirica*)增加警惕时间,减少觅食时间和食物消耗(Zhang *et al.*, 2020)。这些研究暗示,灯光可能作为一种捕食风险线索,诱导小型夜行性动物远离灯光环境,因而导致觅食活动下降。

食虫蝙蝠白天栖息于洞穴、岩缝和建筑缝隙等黑暗环境,日落后出飞觅食,大部分物种对灯光敏感,可作为光污染研究的理想类群(Stone *et al.*, 2015; Voigt *et al.*, 2021)。行为学和分子生物学研究证实,食虫蝙蝠的视力虽然较弱,但其视觉系统能够探测到可见光(Winter *et al.*, 2003; Simões *et al.*, 2018)。野外研究表明,白光、绿光

和黄光诱导小菊头蝠(*Rhinolophus pusillus*)、鼠耳蝠(*Myotis* sp.)和长耳蝠(*Plecotus* sp.)减少夜间活动,但导致伏翼(*Pipistrellus* sp.)增强夜间活动(Stone *et al.*, 2009, 2012; Spoelstra *et al.*, 2017)。Zou等(2024)在室内开展灯光控制实验,发现白光、蓝光、绿光及红光诱导东方蝙蝠(*Vespertilio sinensis*)增加冻结时间,缩短觅食时间,减少食物消耗。Azam等(2018)通过野外调查,发现鼠耳蝠的通过次数随着高压钠灯光强度增大而下降。当高压钠灯光强度为1~5 lux时,普通伏翼(*Pipistrellus pipistrellus*)的通过次数较多;当高压钠灯光强度超过5 lux后,普通伏翼的通过次数下降(Azam *et al.*, 2018)。这些研究表明,灯光可能对食虫蝙蝠产生两方面影响:一方面,环境风险假说认为,灯光可能增大环境照度,增加环境风险,导致食虫蝙蝠减少觅食活动(Stone *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2024);另一方面,觅食机遇假说认为,灯光可能吸引夜间昆虫在光源附近聚集,导致食虫蝙蝠增加觅食活动(Rydell, 1992; Stone *et al.*, 2015)。目前,有关灯光强度对食虫蝙蝠觅食行为的影响尚无定论。国内相关研究尚处于萌芽阶段(Luo *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2024; Zou *et al.*, 2024)。

本研究以食虫蝙蝠东亚伏翼(*Pipistrellus abramus*)作为研究对象,探究灯光强度对食虫蝙蝠觅食行为的影响。东亚伏翼隶属蝙蝠科(Vespertilionidae)伏翼属(*Pipistrellus*),是常见的伴人种蝙蝠。它们喜爱栖息于人工建筑缝隙,日落后飞往河流、公园和农地附近捕捉双翅目、鞘翅目和膜翅目昆虫(Funakoshi *et al.*, 2009)。东亚伏翼一般在日落后30~40 min出飞,其觅食活动时间与夜间照明时间重叠,导致它们容易遭受灯光干扰(Hiryu *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2022)。我们选择南充市顺庆区西溪河的三座桥梁下方5 m处作为研究样点,通过超声录制与环境监测,检验东亚伏翼觅食活动与灯光强度的关系。根据环境风险假说,我们预测东亚伏翼的通过次数和捕食蜂鸣数量随着灯光强度增大而减少。相反,根据觅食机遇假说,我

们预测东亚伏翼的通过次数和捕食蜂鸣数量随着灯光强度增大而增多。

1 研究方法

1.1 研究地点

2021年4月初至5月末,我们在南充市顺庆区西溪河的三座桥梁下方5 m处开展野外实验。每座桥梁周边有河流、草丛和植被,这些微生境富集大量的双翅目昆虫,为东亚伏翼提供食物资源。第一座桥梁长113.81 m,宽5.50 m,距河道高14.89 m,桥上未安装路灯,无交通车辆通行,

日落后处于相对黑暗环境(图1A)。第二座桥梁长141.13 m,宽36.83 m,距河道高11.33 m,桥上安装有4盏白色LED路灯,有交通车辆通行(图1B)。第三座桥梁长100.68 m,宽25.35 m,距河道高8.93 m,桥上安装有8盏白色LED路灯,有交通车辆通行(图1C)。第三座桥梁两侧扶栏还安装有蓝色和黄色的LED灯,但实验期间并未打开。三座桥梁的间距为400~1 000 m。每座桥梁起点有走廊通往下方的河道,附近均有东亚伏翼活动(Wang *et al.*, 2022),是开展本研究的理想样点。



图1 野外研究样点. A: 样点1位于无路灯的桥梁下方5 m处; B: 样点2位于有4盏路灯的桥梁下方5 m处; C: 样点3位于有8盏路灯的桥梁下方5 m处

Fig. 1 Study sites in the field. A: Site 1 is located 5 m below a bridge in the absence of street lamp; B: Site 2 is located 5 m below a bridge, which is equipped with four street lamps; C: Site 3 is located 5 m below a bridge, which is equipped with eight street lamps

1.2 野外监测

通过便携式GPS定位仪(彩途K30S, 华辰北斗信息技术股份有限公司, 北京), 查询实验期间的日落时间。待日落后40 min, 我们在三座桥梁的起点下方5 m处安装超声波探测仪(UltraSound Gate 116H; Avisoft Bioacoustics, Berlin, Germany)(图2A), 以10 min间隔作为一个实验周期, 录制东亚伏翼在觅食期间发出的回声定位声波(图2B)。录音频率设为375 kHz, 精度16 bit, 以满足奈奎斯特-香农采样定理(Nyquist-Shannon sampling theorem)。每个录音文件时长设为1 min, 储存于笔记本电脑(Inspiron 5580, 戴尔有限公司, 厦门)指定文件夹。麦克风(UltraSoundGate CM16, Avisoft Bioacoustics, Berlin, Germany)采用小三脚架支撑, 距地面0.5 m并呈45°角摆放, 指向桥梁下方的河流方向。录音期间, 以3 m间距安装两个马氏网(1.6 m × 0.6 m × 1.0 m)(图2A), 监测每个样点的

昆虫丰度。间隔10 min记录马氏网中的昆虫数量, 每次计数后清空网中昆虫, 10 min后再次重新计数。借助照度计(SW582; 吉格机电设备有限公司, 深圳)和噪声计(AR854, A-计权模式; 旭常工业设备有限公司, 上海), 间隔10 min分别测量麦克风东、西、南、北4个方向的灯光强度和环境噪声强度, 然后取均值用于后续分析。通过便携式气象站(ZK-BX5A, 中科正奇科技有限公司, 北京), 间隔10 min记录每个样点的环境温度和相对湿度。通过lunar程序包(Lazaridis, 2014), 根据样点经纬度和实验日期(表1), 提取实验期间的月相。每晚仅在1个样点开展野外实验, 每次实验持续60 min, 每个样点随机重复9次实验。

1.3 数据分析

选择录制的声波文件, 利用超声波分析软件(Avisoft-SASLab Pro; Avisoft Bioacoustics, Berlin, Germany), 分析东亚伏翼的通过次数和捕食蜂鸣

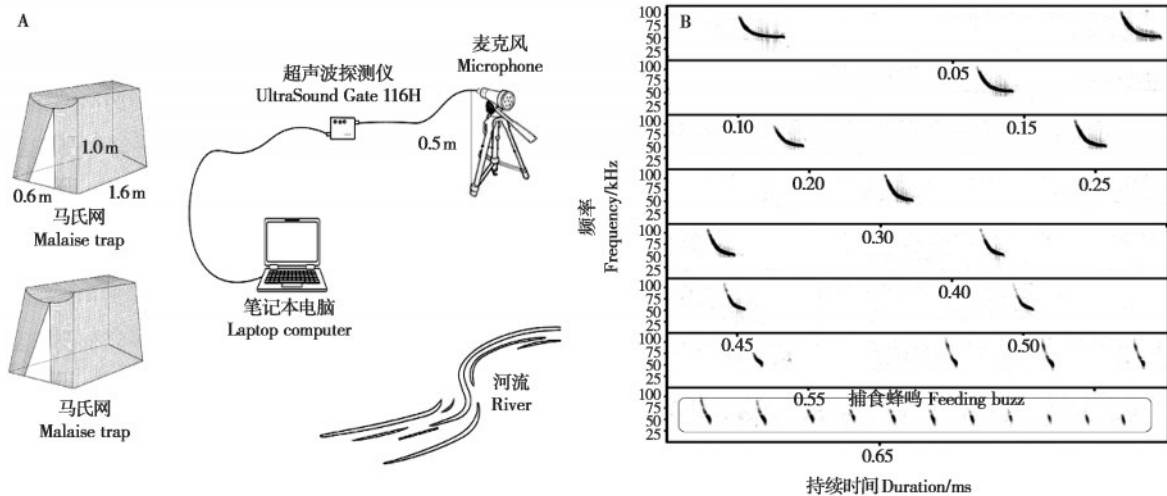


图2 实验装置 (A) 和东亚伏翼的回声定位声波声谱图 (B)。方框内的回声定位声波为东亚伏翼捕食蜂鸣

Fig. 2 The experimental apparatus (A) and spectrogram (B) of echolocation calls emitted by Japanese pipistrelle bats. Echolocation calls inside the box indicate the feeding buzz of Japanese pipistrelle bats

数量, 量化其在每个样点的觅食活动。参考先前研究 (Wang *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2024), 将东亚伏翼的一串连续回声定位声波视为一次通过, 东亚伏翼在觅食终止阶段发出的一串急促回声定位声波视为捕食蜂鸣 (图 2B)。声波分析显示, 东亚伏翼在日落后 40 ~ 60 min 期间几乎没有在 3 个研究样点活动。因此, 我们仅选择东亚伏翼在日落后 60 ~ 70 min、70 ~ 80 min、80 ~ 90 min、90 ~ 100 min 4 个时间段的活动数据用于统计分析。

通过 dunn. test 程序包的克鲁斯卡尔-沃利斯检验 (Kruskal-Wallis test) 及其事后多重比较, 分析 3 个研究样点的灯光强度、东亚伏翼通过次数及捕食蜂鸣数量是否存在差异。由于东亚伏翼通过次数和捕食蜂鸣数量为离散变量, 故利用 lme4 程序包, 拟合负二项分布的广义线性混合模型 (GLMM), 检验灯光强度对东亚伏翼觅食活动的影响。拟合广义线性混合模型时, 将东亚伏翼通过次数和捕食蜂鸣数量分别作为因变量, 灯光强度、环境噪声强度、环境温度、相对湿度、风速、月相编码、昆虫丰度及其显著交互作用作为预测变量, 实验日期作为随机变量。所有预测变量进行标准化处理, 以消除量纲的影响。根据修正样本大小的赤池信息准则 (AICc), 筛选最优广义线性混合模型。选择 AICc 最小的广义线性混合模型作为最优模型 (Luo *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2024)。所有统计分析在 R 3.6.1 中进行。下文数据采用均

值 $\pm$ 标准误 (mean $\pm$ SE) 表示, $P < 0.05$ 表示显著差异, $P < 0.001$ 表示极显著差异。

2 结果

野外监测发现, 3 个研究样点的平均灯光强度为 (3.72 ± 0.45) lux ($n = 108$), 其中样点 1 的平均灯光强度为 (0.57 ± 0.16) lux ($n = 36$), 样点 2 的平均灯光强度为 (2.83 ± 0.33) lux ($n = 36$), 样点 3 的平均灯光强度为 (7.77 ± 0.99) lux ($n = 36$)。3 个研究样点的灯光强度呈现极显著差异 ($\chi^2 = 64.31$, $df = 2$, $P < 0.0001$) (图 3A, 表 1)。

东亚伏翼在 3 个研究样点的平均通过次数为 (27.30 ± 2.56) 次 ($n = 108$), 在样点 1、样点 2 和样点 3 的平均通过次数分别为 (37.78 ± 4.66) 次 ($n = 36$)、 (26.47 ± 4.86) 次 ($n = 36$) 和 (17.64 ± 3.00) 次 ($n = 36$)。东亚伏翼在 3 个研究样点的通过次数呈现显著差异 ($\chi^2 = 7.09$, $df = 2$, $P = 0.030$) (图 3B, 表 1)。与样点 1 相比, 东亚伏翼在样点 2 的通过次数变化不明显 (mean differences = -1.88 , $P = 0.089$), 在样点 3 的通过次数显著减少 (mean differences = -2.57 , $P = 0.015$) (图 3B)。

东亚伏翼在 3 个研究样点的平均捕食蜂鸣数量为 (1.80 ± 0.40) 个 ($n = 108$), 在样点 1、样点 2 和样点 3 的平均捕食蜂鸣数量分别为 (1.19 ± 0.47) 个 ($n = 36$)、 (3.56 ± 1.00) 个 ($n = 36$) 和 (0.64 ± 0.36) 个 ($n = 36$)。东亚伏翼在 3 个研究样点的捕食

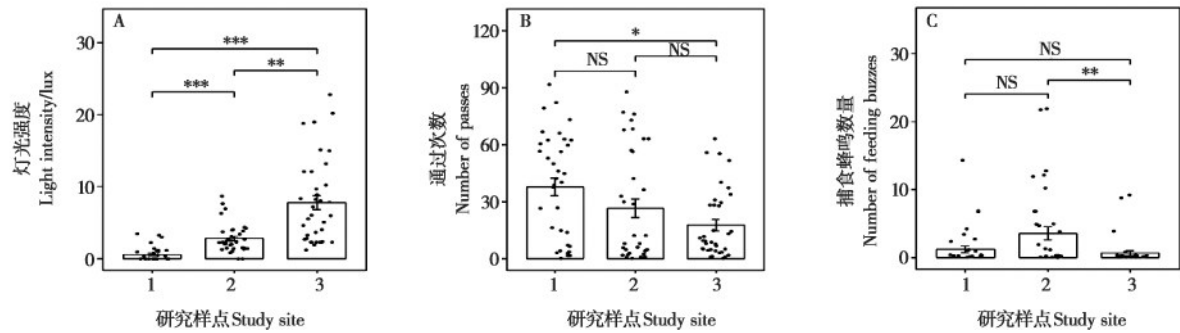


图3 三个研究样点的灯光强度和东亚伏翼觅食活动差异. A: 灯光强度; B: 东亚伏翼通过次数; C: 东亚伏翼捕食蜂鸣数量. NS: 差异不显著, $*P < 0.05$, $**P < 0.01$, $***P < 0.0001$

Fig. 3 The differences in artificial light intensity and foraging activity of Japanese pipistrelle bats at three study sites. A: The number of passes in Japanese pipistrelle bats; B: The number of feeding buzzes in Japanese pipistrelle bats. NS: no significant difference, $*P < 0.05$, $**P < 0.01$, $***P < 0.0001$

表1 三个研究样点的东亚伏翼觅食活动和环境变量

Table 1 The foraging activity of Japanese pipistrelle bats and environmental variables at three study sites

研究样点 Study site	样点 1 Site 1	样点 2 Site 2	样点 3 Site 3
经纬度 Longitude and latitude	30. 8088° N, 106. 0741° E	30. 8174° N, 106. 0761° E	30. 8114° N, 106. 0739° E
实验日期 Experimental date	2021-04-02, 2021-04-10, 2021-04-13, 2021-04-24, 2021-04-28, 2021-05-14, 2021-05-15, 2021-05-27, 2021-05-28	2021-04-01, 2021-04-03 2024-04-16, 2021-04-21, 2021-05-04, 2021-05-10, 2021-05-21, 2021-05-24 2021-05-29	2021-04-11, 2021-04-14, 2021-04-18, 2021-04-20, 2021-05-06, 2021-05-12, 2021-05-23, 2021-05-26, 2021-05-31
东亚伏翼的平均通过次数 Mean number of passes in Japanese pipistrelle bats	37. 78 ± 4. 66 (<i>n</i> = 36)	26. 47 ± 4. 86 (<i>n</i> = 36)	17. 64 ± 3. 00 (<i>n</i> = 36)
东亚伏翼的平均捕食蜂鸣数量 Mean number of feeding buzzes in Japanese pipistrelle bats	1. 19 ± 0. 47 (<i>n</i> = 36)	3. 56 ± 1. 00 (<i>n</i> = 36)	0. 64 ± 0. 36 (<i>n</i> = 36)
平均灯光强度 Mean intensity of artificial light/lux	0. 57 ± 0. 16 (<i>n</i> = 36)	2. 83 ± 0. 33 (<i>n</i> = 36)	7. 77 ± 0. 99 (<i>n</i> = 36)
平均环境噪声强度 Mean intensity of ambient noise/dB	56. 06 ± 1. 05 (<i>n</i> = 36)	60. 26 ± 0. 71 (<i>n</i> = 36)	62. 86 ± 0. 70 (<i>n</i> = 36)
平均环境温度 Mean ambient temperature/°C	25. 49 ± 0. 56 (<i>n</i> = 36)	22. 47 ± 0. 86 (<i>n</i> = 36)	27. 12 ± 0. 41 (<i>n</i> = 36)
平均相对湿度 Mean relative humidity	80. 36% ± 1. 36% (<i>n</i> = 36)	87. 08% ± 0. 59% (<i>n</i> = 36)	78. 06% ± 0. 85% (<i>n</i> = 36)
平均风速 Mean wind speed/(m/s)	0. 064 ± 0. 044 (<i>n</i> = 36)	0. 43 ± 0. 210 (<i>n</i> = 36)	0. 28 ± 0. 091 (<i>n</i> = 36)
平均昆虫丰度 Mean insect abundance	10. 44 ± 1. 58 (<i>n</i> = 36)	35. 53 ± 5. 67 (<i>n</i> = 36)	7. 83 ± 1. 15 (<i>n</i> = 36)
实验期间的月相 Moon phase during the experiment	残月, 新月, 新月, 满月, 满月, 新月, 娥眉月, 满月, 满月 Waning crescent moon, New moon, New moon, Full moon, Full moon, New moon, Waxing crescent moon, Full moon, Full moon	残月, 残月, 娥眉月, 娥眉月, 残月, 新月, 娥眉月, 满月, 满月 Waning crescent moon, Waning crescent moon, Waxing crescent moon, Waxing crescent moon, Waning crescent moon, New moon, Waxing crescent moon, Full moon, Full moon	新月, 新月, 娥眉月, 娥眉月, 残月, 新月, 满月, 满月, 残月 New moon, New moon, Waxing crescent moon, Waxing crescent moon, Waning crescent moon, New moon, Full moon, Full moon, Waning crescent moon

数值为平均值 $\pm$ 标准误. n 表示样本大小

The data in table 1 are shown as means $\pm$ standard error (SE). n denotes the sample size

蜂鸣数量呈现显著差异 ($\chi^2 = 9.38$, $df = 2$, $P = 0.010$) (图 3C, 表 1)。与样点 1 相比, 东亚伏翼在样点 2 的捕食蜂鸣数量呈现增加趋势, 但差异并不显著 (mean differences = 1.67, $P = 0.140$) (图 3C)。与样点 1 相比, 东亚伏翼在样点 3 的捕食蜂鸣数量无显著变化 (mean differences = -1.39, $P = 0.250$)。与样点 2 相比, 东亚伏翼在样点 3 的捕食蜂鸣数量显著减少 (mean differences = -3.06, $P = 0.003$) (图 3C)。

根据修正样本大小后的赤池信息准则, 灯光强度和环境温度是东亚伏翼通过次数的最佳预测因子, 灯光强度、环境温度、相对湿度、月相、灯光强度与环境温度的交互作用是东亚伏翼捕食蜂鸣数量的最佳预测因子, 其他环境因子未选入

最优广义线性混合模型。灯光强度对东亚伏翼通过次数具有显著负面影响 (GLMM: Estimate = -0.38, $z = -2.57$, $P = 0.010$) (图 4A)。东亚伏翼捕食蜂鸣数量受到灯光强度 (GLMM: Estimate = -0.85, $z = -2.22$, $P = 0.026$) (图 4B)、相对湿度 (GLMM: Estimate = 1.66, $z = 3.11$, $P = 0.002$)、月相 (GLMM: Estimate = -2.01, $z = -2.37$, $P = 0.018$)、灯光强度与环境温度交互 (GLMM: Estimate = -0.97, $z = -2.26$, $P = 0.024$) 的显著作用。环境温度对东亚伏翼通过次数 (GLMM: Estimate = 0.26, $z = 1.56$, $P = 0.120$) 和捕食蜂鸣数量 (GLMM: Estimate = -0.36, $z = -0.57$, $P = 0.570$) 的影响均未达到统计学显著水平。

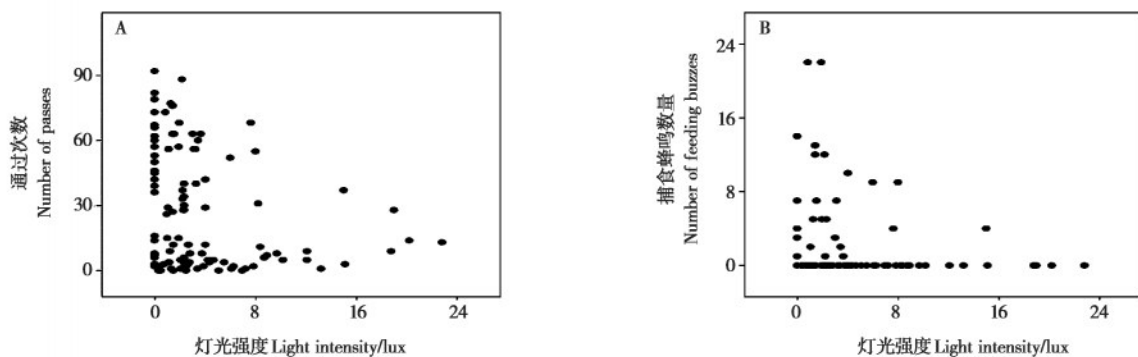


图4 灯光强度与东亚伏翼觅食活动的关系. A: 灯光强度与东亚伏翼通过次数的关系; B: 灯光强度与东亚伏翼捕食蜂鸣数量的关系
Fig. 4 Relationship between artificial light intensity and foraging activity in Japanese pipistrelle bats. A: Relationship between artificial light intensity and the number of passes in Japanese pipistrelle bats. B: Relationship between artificial light intensity and the number of feeding buzzes in Japanese pipistrelle bats

3 讨论

本研究利用超声探测与环境监测, 在野外探究灯光强度对食虫蝙蝠东亚伏翼觅食行为的影响。结果表明, 与相对黑暗样点相比, 东亚伏翼在弱光样点的通过次数变化并不明显, 但在强光样点的通过次数显著减少。与相对黑暗样点相比, 东亚伏翼在弱光样点的捕食蜂鸣数量呈现增加趋势, 但差异未达到统计学显著水平。与弱光样点相比, 东亚伏翼在强光样点的捕食蜂鸣数量明显更少。整体而言, 东亚伏翼的通过次数和捕食蜂鸣数量随着灯光强度的增大而下降。因此, 本研究表明, 尽管弱光导致东亚伏翼捕食蜂鸣数量呈现增加趋势, 但强光仍然对该物种的觅食行为造成负面

影响。

本研究发现, 东亚伏翼的通过次数和捕食蜂鸣数量随着灯光强度的增大而减少, 这说明高强度灯光能够削弱东亚伏翼的觅食活动。与本研究结果类似, Azam等 (2018) 在黑暗样点和高压钠灯光照射样点监测蝙蝠活动, 发现普通伏翼在弱光 (1~5 lux) 条件下通过次数最多, 当灯光强度超过 5 lux 后通过次数减少。灯光强度对鼠耳蝠和长耳蝠的夜间活动具有负面影响, 对高音伏翼 (*Pipistrellus pygmaeus*)、库氏伏翼 (*Pipistrellus kuhlii*) 和褐山蝠 (*Nyctalus noctula*) 的夜间活动具有正面影响, 对纳氏伏翼 (*Pipistrellus nathusii*) 的夜间活动无显著影响 (Lacoeuilhe et al., 2014; Azam et al., 2018; Barré et al., 2022)。Seewagen等 (2023) 在野

外开展灯光控制实验,发现距离白色LED灯75 m处的弱光仍然干扰莹鼠耳蝠(*Myotis lucifugus*)的夜间活动,但并不影响大棕蝠(*Eptesicus fuscus*)的夜间活动。这些研究表明,食虫蝙蝠对灯光强度的耐受性呈现物种特异性。

目前,有关灯光强度对东亚伏翼觅食行为的影响机制仍不清楚。环境风险假说认为,灯光能够照亮黑暗环境,从而增大环境风险,干扰食虫蝙蝠的觅食活动(Davies *et al.*, 2013; Luo *et al.*, 2021)。环境风险假说预测,灯光是一种可靠的捕食风险线索,能够诱导东亚伏翼远离灯光照射的环境,最终导致其通过次数和捕食蜂鸣数量减少(Stone *et al.*, 2009; Polak *et al.*, 2011; Barré *et al.*, 2021)。本研究结果与环境风险假说的预测结果相符,因而支持环境风险假说。相反,觅食机遇假说认为,灯光能够吸引夜间昆虫在光源附近聚集,导致昆虫的丰度和密度增大,因而有利于增强蝙蝠的觅食活动(Rydell, 1992; Stone *et al.*, 2015)。觅食机遇假说预测,东亚伏翼的通过次数和捕食蜂鸣数量随着灯光强度增大而增多。然而,本研究结果并不支持觅食机遇假说。

食虫蝙蝠在夜间害虫防控和物质循环方面有极其重要的作用,减缓灯光对它们夜间活动的负面影响有助于维持生态系统稳定(Kunz *et al.*, 2011; Jägerbrand and Spoelstra, 2023)。由于低强度灯光照亮的区域相对有限,并且随着距离增加逐渐变暗(Gaston *et al.*, 2012)。因此,降低食虫蝙蝠觅食地周边的路灯强度能够有效控制灯光辐射面积,有助于减弱灯光对其夜间活动的负面作用(Azam *et al.*, 2018)。本研究发现,当白色LED灯光的强度超过8 lux后,东亚伏翼的觅食活动随之下降。Stone等(2012)发现,小菊头蝠和鼠耳蝠在3.6 lux的白色LED灯光条件下减少通勤活动。Azam等(2018)证实,鼠耳蝠对高压钠灯光的敏感距离为25 m,对高压钠灯光的敏感强度为1 lux。基于这些研究结果,我们建议城建部门在安装路灯时,不仅要考虑公众的夜间照明需求,而且应当根据当地食虫蝙蝠的灯光耐受范围,降低路灯强度以维持更多满足食虫蝙蝠活动需求的黑暗和弱光环境。

综上所述,我们利用野外监测,证实灯光强度对东亚伏翼的觅食行为具有负面影响。虽然东

亚伏翼在弱光条件下捕食蜂鸣数量有增加趋势,但高强度的白色LED灯光仍然对其觅食活动构成威胁。本研究在3个样点开展录音与环境监测,阐明了东亚伏翼觅食活动与灯光强度的关系。后续研究将选择更多样点,在野外操控不同梯度的灯光强度,进一步探究东亚伏翼对灯光强度的耐受性阈值。鉴于人工生态系统中存在严重的光污染,我们建议城建部门和野保部门加强伴人种蝙蝠觅食生境的灯光管理,并将其纳入路灯规划和蝙蝠保护管理体系。本研究丰富了光污染对伴人种蝙蝠的影响研究内容,为全球光污染背景下蝙蝠保护提供理论借鉴。

致谢: 感谢西华师范大学梁海英、魏心怡、李子艺及李桃红同学参与野外实验。

参考文献:

- Azam C, Viol I L, Bas Y, Zissis G, Vernet A, Julien J F, Kerbiriou C. 2018. Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity. *Landscape & Urban Planning*, **175**: 123–135.
- Barré K, Kerbiriou C, Ing R K, Bas Y, Azam C, Le Viol I, Spoelstra K. 2021. Bats seek refuge in cluttered environment when exposed to white and red lights at night. *Movement Ecology*, **9**: 3.
- Barré K, Vernet A, Azam C, Le Viol I, Dumont A, Deana T, Vincent S, Challéat S, Kerbiriou C. 2022. Landscape composition drives the impacts of artificial light at night on insectivorous bats. *Environmental Pollution*, **292**. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118394.
- Davies T W, Bennie J, Inger R, de Ibarra N H, Gaston K J. 2013. Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Global Change Biology*, **19**: 1417–1423.
- Davies T W, Duffy J P, Bennie J, Gaston K J. 2014. The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **12**: 347–355.
- Davies T W, Smyth T. 2018. Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century. *Global Change Biology*, **24**: 872–882.
- Falchi F, Cinzano P, Duriscoe D, Kyba C, Elvidge C, Baugh K, Portnov B, Rybnikova N, Furgoni R. 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, **2**. DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- Funakoshi K, Katahira R, Ikeda H. 2009. Night-roost usage and nocturnal behavior in the Japanese house-dwelling bat, *Pipistrellus abramus*. *Mammal Study*, **34**: 131–139.
- Gaston K J, Davies T W, Bennie J, Hopkins J. 2012. Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and

- developments. *Journal of Applied Ecology*, **49**: 1256–1266.
- Greene J S, Brown M, Dobosiewicz M, Ishida I G, Macosko E Z, Zhang X, Butcher R A, Cline D J, McGrath P T, Bargmann C I. 2016. Balancing selection shapes density-dependent foraging behaviour. *Nature*, **539**: 254–258.
- Hölker F, Wolter C, Perkin E K, Tockner K. 2010. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*, **25**: 681–682.
- Hiryu S, Hagino T, Fujioka E, Riquimaroux H, Watanabe Y. 2008. Adaptive echolocation sounds of insectivorous bats, *Pipistrellus abramus*, during foraging flights in the field. *Journal of the Acoustical Society of America*, **124**: 51–56.
- Jägerbrand A K, Spoelstra K. 2023. Effects of anthropogenic light on species and ecosystems. *Science*, **380**: 1125–1130.
- Knop E, Zoller L, Ryser R, Gerpe C, Hörler M, Fontaine C. 2017. Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, **548**: 206–209.
- Kunz T H, Braun de Torrez E, Bauer D, Lobo T, Fleming T H. 2011. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1223**: 1–38.
- Kyba C C, Kuester T, Sánchez de Miguel A, Baugh K, Jechow A, Hölker F, Bennie J, Elvidge C D, Gaston K J, Guanter L. 2017. Artificially lit surface of earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, **3**. DOI: 10.1126/sciadv.1701528.
- Lacoeuilhe A, Machon N, Julien J F, Le Bocq A, Kerbiriou C. 2014. The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context. *PLoS ONE*, **9**. DOI: 10.1371/journal.pone.0103042.
- Lazaridis E. 2014. lunar: lunar phase & distance, seasons and their environmental factors (version 0.1–04). Available from <http://statisticslazaridiseu>.
- Lemon W C. 1991. Fitness consequences of foraging behaviour in the zebra finch. *Nature*, **352**: 153–155.
- Longcore T, Rich C. 2004. Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **2**: 191–198.
- Luo B, Xu R, Li Y C, Zhou W Y, Wang W W, Gao H M, Wang Z, Deng Y C, Liu Y, Feng J. 2021. Artificial light reduces foraging opportunities in wild least horseshoe bats. *Environmental Pollution*, **288**. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117765.
- Polak T, Korine C, Yair S, Holderied M W. 2011. Differential effects of artificial lighting on flight and foraging behaviour of two sympatric bat species in a desert. *Journal of Zoology*, **285**: 21–27.
- Rydell J. 1992. Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, **6**: 744–750.
- Sanders D, Frago E, Kehoe R, Patterson C, Gaston K J. 2021. A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night. *Nature Ecology & Evolution*, **5**: 74–81.
- Secondi J, Mondy N, Gippet J M W, Touzot M, Gardette V, Guillard L, Lengagne T. 2021. Artificial light at night alters activity, body mass, and corticosterone level in a tropical anuran. *Behavioral Ecology*, **32**: 932–940.
- Seewagen C L, Nadeau-Gneckow J, Adams A M. 2023. Far-reaching displacement effects of artificial light at night in a North American bat community. *Global Ecology and Conservation*, **48**. DOI: 10.1016/j.gecco.2023.e02729.
- Simões B F, Foley N M, Hughes G M, Zhao H, Zhang S, Rossiter S J, Teeling E C. 2018. As blind as a bat? Opsin phylogenetics illuminates the evolution of color vision in bats. *Molecular Biology and Evolution*, **36**: 54–68.
- Spoelstra K, van Grunsven R H A, Ramakers J J C, Ferguson K B, Raap T, Donners M, Veenendaal E M, Visser M E. 2017. Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light. *Proceedings of the Royal Society B*, **284**. DOI: 10.1098/rspb.2017.0075.
- Stone E L, Harris S, Jones G. 2015. Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and solutions. *Mammalian Biology*, **80**: 213–219.
- Stone E L, Jones G, Harris S. 2009. Street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology*, **19**: 1123–1127.
- Stone E L, Jones G, Harris S. 2012. Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Global Change Biology*, **18**: 2458–2465.
- Voigt C C, Dekker J, Fritze M, Gazaryan S, Hölker F, Jones G, Lewanzik D, Limpens H J G A, Mathews F, Rydell J, Spoelstra K, Zagmajster M. 2021. The impact of light pollution on bats varies according to foraging guild and habitat context. *Bioscience*, **71**: 1103–1109.
- Wang W W, Gao H M, Li C R, Deng Y C, Zhou D Y, Li Y Q, Zhou W Y, Luo B, Liang H Y, Liu W Q, Wu P, Jing W, Feng J. 2022. Airport noise disturbs foraging behavior of Japanese pipistrelle bats. *Ecology and Evolution*, **12** (6). DOI: 10.1002/ece3.8976.
- Winter Y, López J, von Helversen O. 2003. Ultraviolet vision in a bat. *Nature*, **425**: 612–614.
- Zhang F S, Wang Y, Wu K, Xu W Y, Wu J, Liu J Y, Wang X Y, Shuai L Y. 2020. Effects of artificial light at night on foraging behavior and vigilance in a nocturnal rodent. *Science of the Total Environment*, **724**. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138271.
- Zhou D Y, Deng Y C, Wei X Y, Li T H, Li Z Y, Wang S R, Jiang Y K, Liu W Q, Luo B, Feng J. 2024. Behavioral responses of cave-roosting bats to artificial light of different spectra and intensities: Implications for lighting management strategy. *Science of The Total Environment*, **916**. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170339.
- Zou W Y, Wu P, Wei X Y, Zhou D Y, Deng Y C, Jiang Y K, Luo B, Liu W Q, Huo J H, Peng S C, Feng J. 2024. Artificial light affects foraging behavior of a synanthropic bat. *Integrative Zoology*, **19**: 710–720.