

灯光与喷泉噪声对四种蝙蝠夜间活动的影响

谭源清 刘金艳 杨双鸿 苗雨佳 朱文明 郭思莹
卢冠军 许振文*

长春师范大学地理科学学院 长春 130032

摘要: 随着城市人工景观的持续扩展,夜间光污染与噪声污染对夜行性野生动物的干扰效应日趋显著。蝙蝠作为依赖声信号和视觉信号的生态指示类群,其活动模式对人为干扰极为敏感。目前,有关城市湿地景观改造对蝙蝠群落的长期生态效应被普遍忽视。本研究于长春一人工湖通过 7 年的蝙蝠声学监测,记录了蝙蝠通过次数、光照度以及环境噪声强度,系统解析景观灯与人工喷泉对东方蝙蝠(*Vespertilio sinensis*)、阿拉善伏翼(*Hypsugo alaschanicus*)、东亚伏翼(*Pipistrellus abramus*)及伊氏鼠耳蝠(*Myotis ikonnikovi*)夜间活动的长期影响。结果表明:(1)2018 年喷泉和景观灯改造后,2019 至 2024 年,蝙蝠总通过次数下降 93.1%,群落结构由东亚伏翼主导(59.0%)演替为阿拉善伏翼主导(73.13%),种间响应差异显著($P < 0.001$);(2)2024 年景观灯关闭后,东亚伏翼的通过次数增加到景观灯工作状态的 14.89 倍,伊氏鼠耳蝠的通过次数从 0 增加至可监测水平(均值为 0.49),阿拉善伏翼及东方蝙蝠的通过次数无显著变化。本研究证实,蝙蝠夜间活动受到景观灯光污染、喷泉噪声和水面湍流等因素的共同影响,相关研究结果可为城市湿地蝙蝠多样性保护提供一定的科学依据。

关键词: 蝙蝠活动;光污染;噪声胁迫;长期监测

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2026) 03-365-11

Effects of artificial light and fountain noise on the nocturnal activities of four bat species

TAN Yuan-Qing LIU Jin-Yan YANG Shuang-Hong MIAO Yu-Jia ZHU Wen-Ming
GUO Si-Ying LU Guan-Jun XU Zhen-Wen*

School of Geographic Science, Changchun Normal University, Changchun 130032, China

Abstract: [Objectives] With the intensification of artificial landscape modification in the process of urbanization, the disturbance effects of nocturnal light and noise pollution on nocturnal wild animals are becoming increasingly significant. Bats serve as an ecological indicator taxon relying on acoustic and visual signals, and their activity is extremely sensitive to anthropogenic disturbances. To date, the long-term ecological effects of landscape alterations on bat communities in urban wetland environments have been

基金项目 长春师范大学自然科学基金项目 (No. CSJJ2023006ZK);

* 通信作者, E-mail: xuzhenwen@ccsfu.edu.cn;

第一作者介绍 谭源清,女,硕士研究生;研究方向:动物行为与保护;E-mail: 18264633869@163.com.

收稿日期: 2025-04-20, 修回日期: 2025-09-01 DOI: 10.13859/j.cjz.202625074 CSTR: 32109.14.cjz.202625074

largely overlooked. **[Methods]** In this study, we explored the effects of landscape lighting and artificial fountains on the nocturnal activities of *Vespertilio sinensis*, *Hypsugo alaschanicus*, *Pipistrellus abramus*, and *Myotis ikonnikovi* at a man-made lake in Changchun, China, based on seven years of bat acoustic monitoring. We recorded light illuminance and noise intensity, as well as the number of passes of each bat species. Kruskal-Wallis tests were performed in R 4.4.3 to examine the differences in the number of bat passes between years for each species, followed by Bonferroni multiple comparisons. Mann-Whitney *U* tests were conducted to analyze the differences in bat activity for each species before and after the landscape lights were switched off in 2024, and to assess the significance of differences in noise intensity and light illuminance before and after the remodeling. **[Results]** (1) After the modification of the fountain and landscape lighting in 2018, the total number of bat passes decreased by 93.1% from 2019 to 2024, and the community structure shifted from being dominated by *P. abramus* (59.0%) to by *H. alaschanicus* (73.13%), with significant interspecific differences in response across the four species (Kruskal-Wallis tests, all $P < 0.001$; Fig. 4). (2) In 2024, after the landscape lights were switched off, the number of passes of *P. abramus* increased to 14.89 times of that under the working state of the landscape lights, and the number of passes of *M. ikonnikovi* increased from 0 to a monitorable level (an average value of 0.49). The number of passes of *H. alaschanicus* and *V. sinensis* did not change significantly (Fig. 5). **[Conclusion]** This study indicates that artificial lighting and fountain noise affect bat community structure, and nocturnal bat activity is jointly suppressed by disturbance factors such as light pollution from landscape lights, fountain noise, and surface water turbulence. These findings provide a scientific basis for the conservation of bat diversity in urban wetlands.

Key words: Bat activity; Light pollution; Noise stress; Long-term monitoring

随着城市化进程的加速,人工景观改造已成为城市生态系统演化的重要影响因子。其中,夜间人工照明与噪声污染因其广泛存在性和持续性,对夜行性野生动物的行为模式及栖息地利用产生了深远影响(Longcore and Rich 2004, Gaston et al. 2013, Shannont et al. 2016, Sanders et al. 2021)。蝙蝠作为生态系统的关键指示物种之一,在害虫控制、种子传播及授粉等生态功能服务中扮演重要角色(Kunz et al. 2011, 江廷磊等 2020)。然而,蝙蝠高度依赖声信号和视觉信号的生存策略使其对人为干扰尤为敏感(Jones and Rydell 1994, Bunkley et al. 2015, Rowse et al. 2016)。尽管已有研究表明,光污染与噪声会对蝙蝠活动产生短期影响(Stone et al. 2009, Luo et al. 2015, Shannon et al. 2016, Luo et al. 2021, Wang et al. 2022, Zou et al. 2024, Deng et al. 2025)。然而,关于人工景观改造(如景观照明与喷泉设施)对蝙蝠种群生

态影响的系统研究仍然较少。此外,关于不同物种对这些干扰的响应差异,也缺乏深入探讨。尤其在东亚温带城市生态系统中,连续的长期监测数据仍相对缺乏。

现有研究表明,人工光源会改变昆虫的空间分布、增加蝙蝠的捕食风险,慢速飞行的林栖蝙蝠因避光行为可能面临栖息地隔离与迁徙路线受阻的威胁(Lewanzik and Voigt 2014, Rowse et al. 2016, Pauwels et al. 2021);而持续性噪声则可能通过掩蔽声学信号或引发应激反应,影响蝙蝠的觅食效率与栖息地选择(Bunkley et al. 2015, Song et al. 2020)。然而,这些研究多聚焦于单一干扰因子的短期效应,对多因素协同作用及长期适应动态的解析仍相对缺少。此外,城市湿地作为蝙蝠重要的饮水与觅食生境,其景观设计常忽视人为噪声污染和夜间光污染的生态阈值,亟需基于长期实证数据的保护策略优化。

本研究以长春市翠柳湖湿地作为样地，探究灯光与喷泉噪声对东方蝙蝠（*Vespertilio sinensis*）、阿拉善伏翼（*Hypsugo alaschanicus*）、东亚伏翼（*Pipistrellus abramus*）以及伊氏鼠耳蝠（*Myotis ikonnikovi*）夜间活动的长期影响。我们于 2016 ~ 2024 年期间，利用超声波记录仪、照度计和噪声计，在翠柳湖湿地开展超声波、光照度及噪声强度的监测，检验 4 种蝙蝠的通过次数在翠柳湖湿地改造前后的变化。本文研究结果能够揭示人工景观改造对蝙蝠夜间活动和群落组成的影响，为城市湿地的蝙蝠保护与景观美学设计提供数据支撑。

1 研究方法

1.1 研究地点

2016 年至 2024 年，每年的 4 月至 7 月期间，于长春师范大学翠柳湖（43°17'48" N，125°51'71" E）开展实验，由于疫情封控，2020、2022 年未能开展实验。2016 年至 2018 年期间，翠柳湖仅南侧设有凉亭作为观赏景观。2018 年 8 月份校园改造期间，南侧凉亭安装了白色 LED 照明灯，沿湖泊边缘布置了黄色 LED 灯带，后文统称为景观灯，并在湖中心增设 3 个 24 h 不间断运行的喷泉。

1.2 环境数据监测

2024 年 4 月至 7 月，于日落前 30 min，使用照度计（DT-1309，深圳市华盛昌科技实业股份有限公司）分别在翠柳湖 A 点和 B 点进行光照度监测（图 1）。A 点位于北侧车行道路旁，同时受高杆路灯和景观灯双重光源影响；B 点设置于南侧凉亭处，仅受景观灯单一光源照射。监测过程中每 10 min 记录一次数据，整个监测过程维持 3 h，共计采样 10 d。2024 年 7 月 8 日起景观灯暂时关闭，采用相同监测方法对光照度进行测定，共计采样 10 d。由于改造前缺少灯光数据，因此将此时测量的结果作为改造前的光照特征。因日落后 0.5 h 受自然光影响，翠柳湖光照度不稳定，影响景观灯光照度监测，故分析时使用后两个小时的监测值。

2024 年 4 月至 7 月在 A 点距离地面 1.5 m 处设置在线式数字噪声计（SM550，东莞三量量具有限公司），从日落前 30 min 开始每 10 min 记录一次环境噪声强度，监测时长为 3 h，共计采样 6 d。同一时间，将广场 C 点设为对照点，定于翠柳湖北侧边缘向东延长线上，距其北侧边缘中心点 77 m 处（图 1）。该点与喷泉距离较远，不受喷泉噪声影响。此外，C 点背景声环境与实验组 A 点一致，均主要受到北侧道路

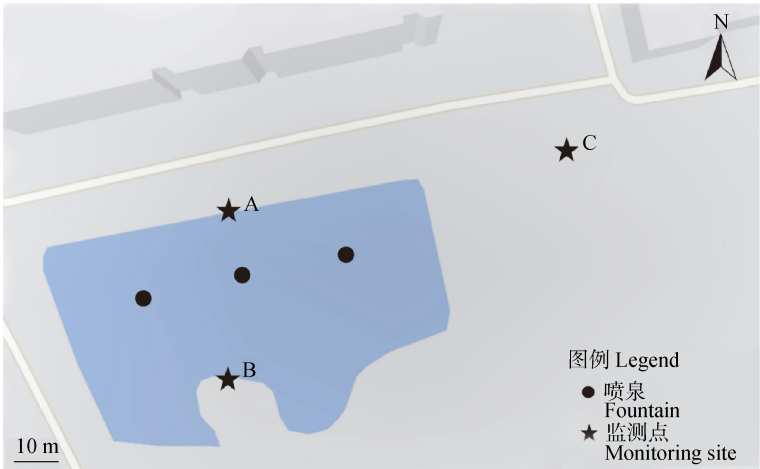


图 1 翠柳湖实验点设置

Fig. 1 Experimental site setup at Cuiliu Lake

底图审图号：GS（2025）1508 号，来源于天地图（<https://www.tianditu.gov.cn/>），底图未修改。
The base map is from Tianditu (<https://www.tianditu.gov.cn/>), with approval No. GS(2025)1508, the base map was not modified.

交通噪声的影响。因翠柳湖改造前后声环境差异仅体现为喷泉工作状态的改变,故使用 C 点监测数据作为改造前环境噪声强度,后续分析中与 A 点噪声强度进行对比。

1.3 蝙蝠活动监测与分析

2016 年至 2024 年,每年的 4 月至 7 月期间,选择天气晴朗且风速低于 7 m/s 的夜晚,于日落前 40 min,将超声波记录仪器(Echo Meter Touch 2 Pro, Wildlife Acoustics)固定在三脚架上,放置于翠柳湖北侧边缘中心点 A 点,距离地面 1.5 m (图 1)。日落前 30 min 开始录制,每晚持续 3 h,每年记录 10~12 次(2~3 次/月),共记录 77 次,总录制时长为 231 h。录音采样频率为 384 kHz,采样精度为 16 位。2024 年 7 月 8 日起,校内电路检修,临时关闭景观灯,因此在仅有喷泉工作条件下记录蝙蝠活动。由于 8 月份连续降水对监测环境的影响,数据采集工作中断于 7 月 30 日,期间共记录了 15 d 蝙蝠活动。所有的数据采集均选择无雨且风速低于 7 m/s 的夜晚进行。

录制完成后,将声波数据导入电脑,利用 Avisoft-SASLab Lite (Version 5.2.10, 2016 年 10 月 27 日;频谱图参数设置:FFT = 256, Frame size = 100%, overlap = 50%) 分析蝙蝠声波数

据。通过对比蝙蝠声波主频和结构进行种类鉴定,记录不同种蝙蝠声波脉冲序列数,1 个脉冲序列代表 1 次蝙蝠通过,蝙蝠活动被定义为蝙蝠通过的次数(Pauwels et al. 2021)。

1.4 统计分析

通过 Shapiro-Wilk 检验证实四种蝙蝠的通过次数(W 为 0.89~0.95, $P < 0.05$)、光照度($W = 0.91$, $P < 0.05$)及噪声强度($W = 0.93$, $P < 0.05$)数据均为非正态分布,选择非参数检验方法。使用 Kruskal-Wallis 检验比较每种蝙蝠不同年际通过次数的差异显著性,并通过 Bonferroni 进行多重比较。采用 Mann-Whitney U 检验分析 2024 年景观灯关闭前后每种蝙蝠活动、光照度的差异显著性以及改造前后噪声强度的差异显著性。数据预处理、统计分析与可视化在 R 4.4.3 中完成,并基于 ggplot2 绘图。

2 结果

2.1 光照度和噪声强度的变化

Mann-Whitney U 检验表明,景观灯有无在光照度上存在显著差异(A 点: $U_A = 100$, $P_A < 0.001$, $r_A = 0.86$; B 点: $U_B = 100$, $P_B < 0.001$, $r_B = 0.88$),喷泉不同工作状态在噪声强度上也存在显著差异($U = 36$, $P < 0.01$, $r = 0.81$)(图 2)。

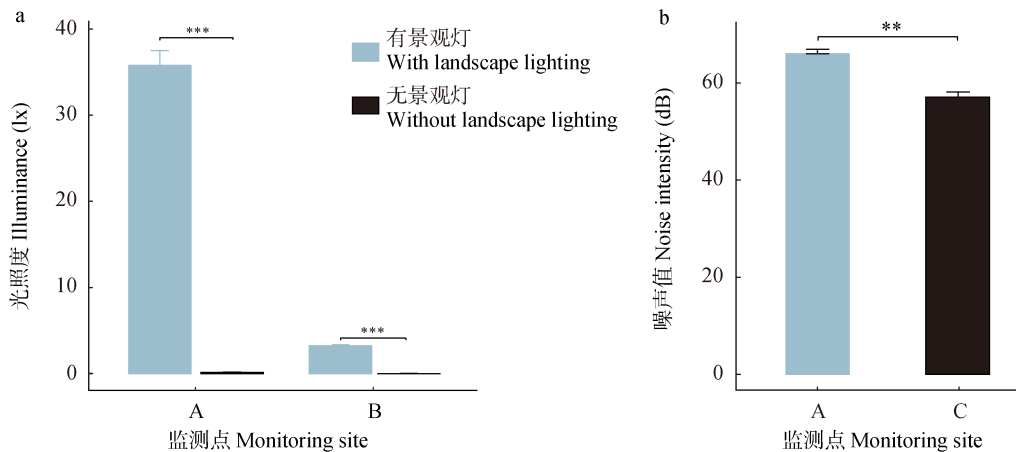


图 2 改造前后的光照度 (a) 与噪声强度 (b) 对比

Fig. 2 Comparison of light illuminance (a) and noise intensity (b) before and after remodeling

数据以平均值表示,误差线表示平均值上方的标准误(+SEM)。** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

Data are expressed as mean, and error bars indicate the standard error of the mean (SEM) above the mean. ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

景观灯关闭状态下，A 点平均光照度为 $(0.14 \pm 0.02) \text{ lx}$ ($0.1 \sim 0.2 \text{ lx}$)，B 点平均光照度为 $(0 \pm 0.001) \text{ lx}$ 。景观灯工作状态下，A 点与 B 点的平均光照度分别提升至 $(35.79 \pm 1.71) \text{ lx}$ ($33.7 \sim 37.5 \text{ lx}$) 与 $(3.22 \pm 1.22) \text{ lx}$ ($3.2 \sim 3.5 \text{ lx}$)，均远高于改造前的水平。C 点噪声强度代表增设喷泉之前，平均噪声强度为 $(57.08 \pm 1.10) \text{ dB}$ ($51.7 \sim 63.0 \text{ dB}$)。A 点噪声强度代表喷泉增设之后，平均噪声强度跃升至 $(66.04 \pm 0.90) \text{ dB}$ ($61.4 \sim 70.5 \text{ dB}$)，噪声污染显著增加。

2.2 蝙蝠活动水平差异性

在本研究中，依据蝙蝠回声定位声波的主频率特征鉴定出 4 种蝙蝠。每种蝙蝠随机选 10 个声波脉冲分析声波主频，按照声波主频从小到大依次为东方蝙蝠 $(24.96 \pm 1.22) \text{ kHz}$ 、阿拉善伏翼 $(38.15 \pm 1.27) \text{ kHz}$ 、东亚伏翼 $(43.90 \pm 1.37) \text{ kHz}$ 以及伊氏鼠耳蝠 $(53.42 \pm 2.43) \text{ kHz}$ (图 3)。

Kruskal-Wallis 检验与 Bonferroni 多重比较结果表明，4 个蝙蝠种群在改造前（2016 年至 2018 年）与改造后 4 年（2019 年、2021 年、2023 年及 2024 年）的蝙蝠通过次数均存在显著性差异 ($P < 0.001$ ，图 4)。

在改造前（2016 年至 2018 年），东亚伏翼为数量最多的物种，记录通过次数为 6 395 次

（占总量的 59%）；数量最少的物种是东方蝙蝠，通过次数仅为 318 次（占比 2.94%）；阿拉善伏翼以及伊氏鼠耳蝠的通过次数分别为 3 162 次（29.19%）和 958 次（8.84%）。自 2019 年起，蝙蝠通过次数整体有所减少，阿拉善伏翼的通过次数在 4 个物种中占据数量优势，为 547 次（占比 73.13%）；东方蝙蝠以及伊氏鼠耳蝠的数量最少，分别检测到 9 次（占比 1.20%）和 6 次（占比 0.80%）；东亚伏翼的通过次数为 186 次，占比 24.87%。

伊氏鼠耳蝠的活动水平受到最大负面影响，2019 年后通过次数减少量达到 2019 年前活动次数的 99.37%；其次是东方蝙蝠（97.17%）以及东亚伏翼（97.09%）；相比之下，阿拉善伏翼的通过次数变化波动较小，减少 2 615 次通过，占比 82.7%。

2.3 景观灯关闭后的蝙蝠活动恢复

2024 年研究中，对比景观灯不同工作状态下（喷泉保持工作状态）4 种蝙蝠的活动情况。结果显示，东亚伏翼的通过次数在景观灯工作和关闭两种状态下存在显著性差异 ($U = 9, P < 0.001, r = 0.75$)，景观灯关闭状态 (1.64 ± 1.75) 下的通过次数是工作状态 (17.87 ± 17.23) 下的 14.89 倍。阿拉善伏翼的通过次数在景观灯工作和关闭状态下未表现出显著性差异 ($U = 78, P >$

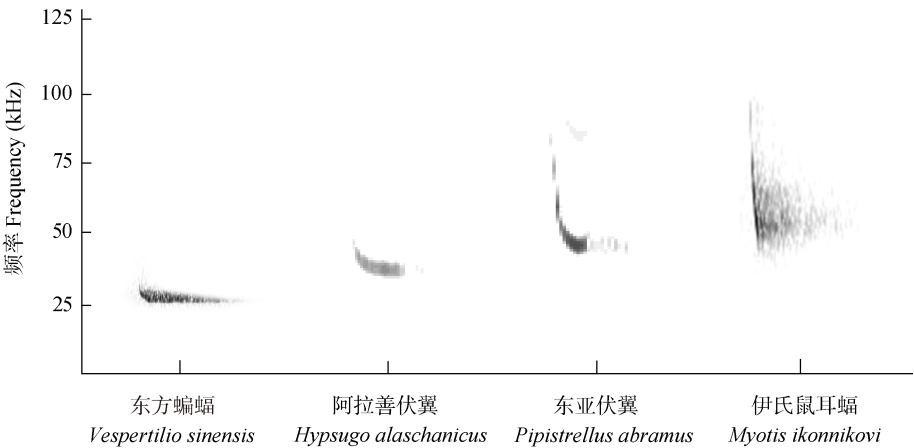


图 3 四种蝙蝠回声定位声谱图

Fig. 3 Spectrograms of echolocation calls of four bat species

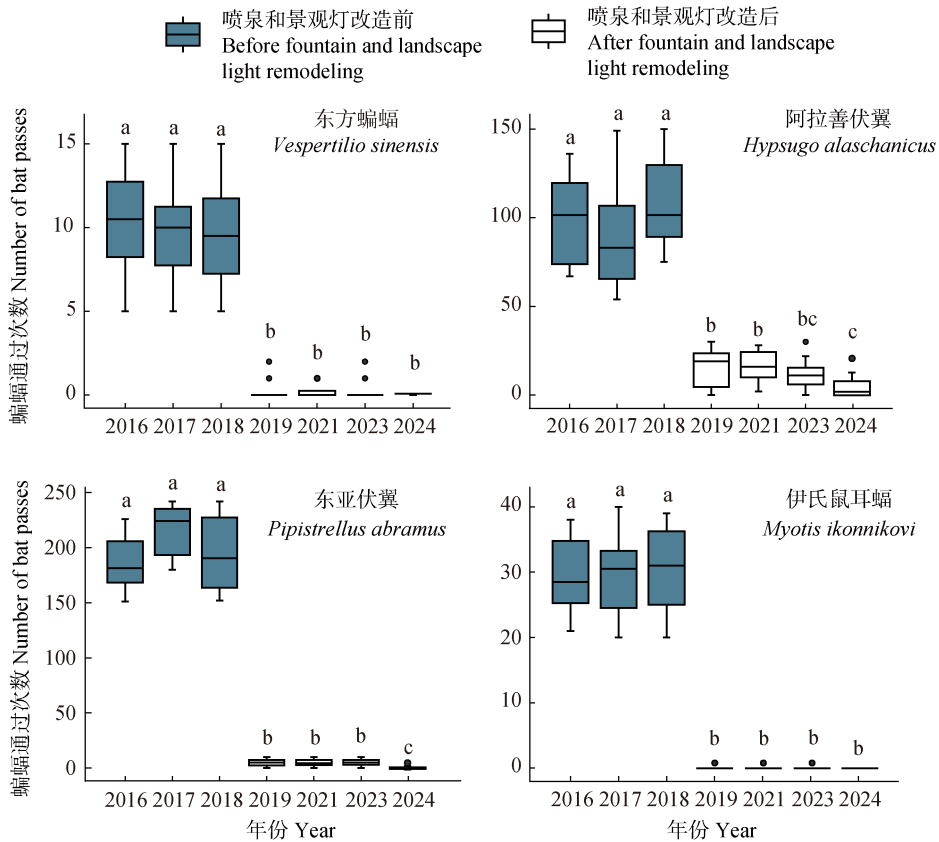


图 4 四种蝙蝠在不同年份的夜间活动比较

Fig. 4 Comparison of the nocturnal activity of four bat species in different years

箱线图显示蝙蝠通过次数的年际变化。不同字母表示 Kruskal-Wallis 检验及 Bonferroni 事后比较结果差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Boxplots show the interannual variations in bat passes. Different letters indicate significant differences among years according to the Kruskal-Wallis test with Bonferroni post hoc comparisons ($P < 0.05$), while the same letters denote no significant difference ($P > 0.05$).

0.05, $r = 0.04$)。伊氏鼠耳蝠在景观灯工作状态下通过次数为 0, 但在景观灯关闭状态下开始通过 (0.47 ± 0.34)。东方蝙蝠景观灯关闭前后两组数据均为 0 (图 5)。

3 讨论

本实验连续 7 年监测了长春市翠柳湖周围的蝙蝠夜间活动, 主要探究围湖景观灯照明以及人造喷泉噪声对 4 种蝙蝠夜间活动的影响。翠柳湖的景观灯以及喷泉已设置了 6 年, 我们的监测实验提供了一个独特的机会探究 4 种蝙蝠如何应对人工照明与人为噪声干扰, 以及人工光照与人为噪声对蝙蝠群落的影响。

3.1 景观灯对蝙蝠夜间活动的影响

LED 光源的光谱特性因颜色而异, 例如白色 LED (光谱范围 380 ~ 780 nm, 峰值波长 425.6 nm) 和黄色 LED (光谱范围 460 ~ 780 nm, 峰值波长 565.8 nm) 虽然具有宽谱特性, 但与传统高压钠灯 (HPS, 光谱集中于 589 nm 窄带黄光) 相比, LED 光源短波长紫外线 (< 400 nm) 的发射显著减少 (Elvidge et al. 2010, Zhou et al. 2024), 这在一定程度上降低了对昆虫的吸引作用, 但仍可能在局部区域形成“昆虫陷阱效应” (Stone et al. 2012), 即在光源附近聚集大量昆虫, 从而间接影响捕食者的活动模式。邹文玉等 (2021) 在南京地区的研究发现, 菲菊

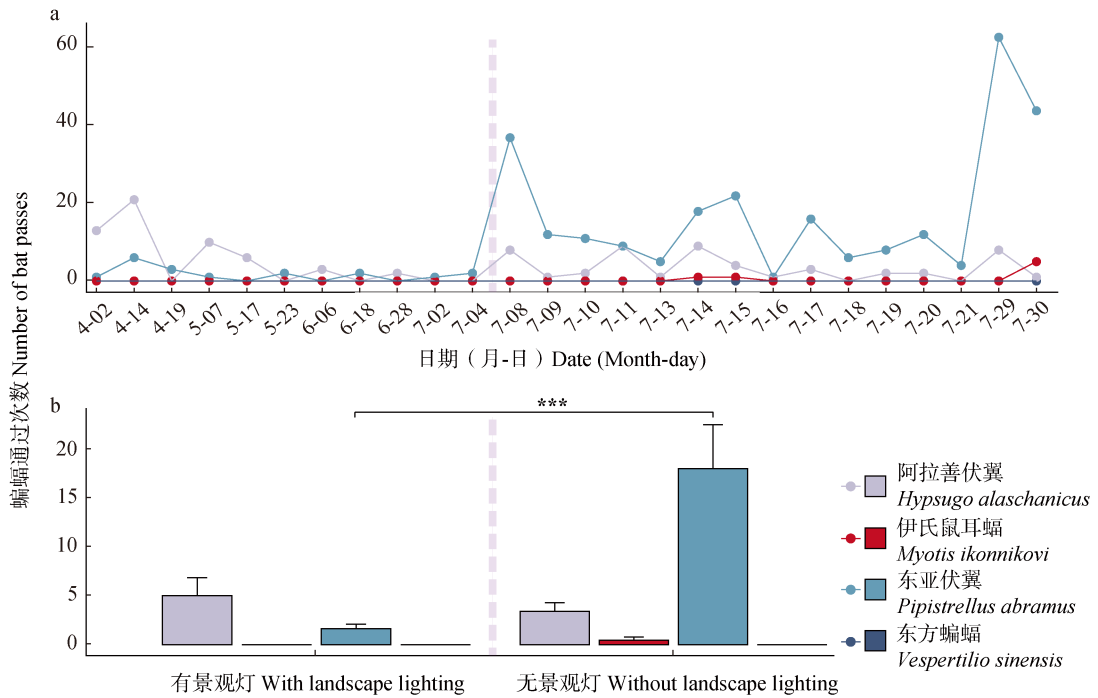


图5 2024 年 4 种蝙蝠的通过次数 (a) 及在景观灯不同工作状态下 (喷泉保持工作状态) 活动水平 (b)

Fig. 5 Number of bat passes (a) and activity levels of four species of bats in different operating conditions of landscape lights (fountains kept in operating condition) (b) in 2024

虚线左侧为景观灯工作状态，右侧为景观灯关闭状态。*** $P < 0.001$

The left side of the dotted line shows the working state of the landscape light, and the right side shows the off state of the landscape light. *** $P < 0.001$

头蝠 (*Rhinolophus pusillus*) 集群活动具有明显的时空变化，推测包括光照在内的外部环境因素可能通过影响蝙蝠集群大小与觅食稳定性，间接限制其空间使用范围。此外，先前的研究表明，人工照明能够为快速飞行的蝙蝠物种创造出额外的觅食机会 (Rydell 2006)，如伏翼 (*Pipistrellus* spp.) 和山蝠 (*Nyctalus* spp.)；而减少了缓慢飞行的鼠耳蝠 (*Myotis* spp.) 的觅食可能性 (Kuijper et al. 2008, Dzal et al. 2011, Azam et al. 2015)。由于对栖息地丧失与破坏高度敏感，鼠耳蝠被视为重要的保护对象 (von Frenckell and Barclay 1987, Safi and Kerth 2004, Azam et al. 2015)。伊氏鼠耳蝠作为典型的慢速飞行且依赖复杂空间结构的物种 (Rowse et al. 2016, Maki et al. 2021)，具有低翼载比与高机动性的形态特征，使其更倾向于

利用植被覆盖的暗区进行通勤和觅食。与先前研究结果一致，在有灯的夜晚，鼠耳蝠的通勤活动明显减少，通勤开始时间推迟 (Stone et al. 2009)。人工照明会减少照明区域周围为避光物种提供的食物资源，使伊氏鼠耳蝠这类无法在光源下捕食聚集昆虫的物种处于竞争劣势；此外，人工照明还会增加其捕食风险，即使光照关闭，蝙蝠也可能需要更长时间重新评估环境安全性 (Pauwels et al. 2021)。这与 Stone 等 (2012) 发现光回避型蝙蝠在 LED 光强度降低情况下，其回避行为依旧持续数周的结果相似。

阿拉善伏翼与东方蝙蝠在景观灯关闭后同样未表现出显著的活动恢复，其响应差异可能与物种特异性生态适应策略有关。阿拉善伏翼作为开阔空间觅食者，其长而窄的翼型和高翼载比使其能够相对更好地适应光照强度较高的

环境（如路灯周边）（Jung and Kalko 2010, Jung and Threlfall 2016），从而在人工照明胁迫下维持稳定的觅食效率。东方蝙蝠作为典型的晨昏性物种，其核心活动窗口通常集中于日落后 30 min 至 2 h，即黄昏至午夜前与其觅食、通勤等关键生态行为高度关联。翠柳湖景观灯运行时间与晨昏性蝙蝠的自然活动高峰显著重叠，长期光污染可能迫使东方蝙蝠永久性迁移至替代栖息地（Azam et al. 2015）。即使景观灯关闭，个体可能因路径记忆或栖息地忠诚度延迟返回原区域（Kerth et al. 2011）。此外，东方蝙蝠繁殖率低，30 d 的恢复期无法覆盖其繁殖周期，难以通过幼体补充实现种群反弹。

东亚伏翼作为光敏感的边缘觅食者，在 2024 年景观灯关闭后，其通过次数显著增加，这一现象与光敏感物种对人工照明的普遍回避行为高度吻合（Reusch et al. 2024）。此外，尽管关闭景观灯对东亚伏翼行为产生了正向影响，但恢复至景观改造前 8.72% 的比例提示，这一措施可能并不能完全弥补之前光污染和噪声污染造成的负面效应。

本研究结果一定程度上验证了人工照明对蝙蝠群落的筛选效应，光耐受物种（如阿拉善伏翼）通过行为可塑性维持种群稳定，而光敏感物种（如伊氏鼠耳蝠）则面临局部栖息地丧失的风险（Rowse et al. 2016）。此外，2024 年景观灯关闭后 4 种蝙蝠的恢复水平显示，除了人工照明之外，光污染可能与噪声污染（或者其他环境因素存在协同效应）通过双重感官干扰（视觉与听觉）引发行为抑制（Lehrer et al. 2021）。

3.2 喷泉对蝙蝠活动的影响

本研究发现，人工喷泉的运行显著改变了翠柳湖水域的声学环境和物理特征，与景观灯带的光污染效应有所不同，喷泉产生的持续性低频噪声（6~25 kHz）及其引发的水面湍流可能通过多重机制干扰蝙蝠的觅食、饮水及栖息地风险评估等关键生态行为（Voigt and Kingston 2016, Finch et al. 2020）。

3.2.1 喷泉噪声对蝙蝠声学感知的干扰 蝙蝠主要依赖高频声呐信号（通常大于 20 kHz）进行空间导航和猎物定位。本研究结果显示，喷泉运行显著提高了翠柳湖区域的环境噪声水平（ $\Delta \approx 9$ dB），使其平均噪声值达到 66.04 dB。作为低频回声定位物种，东方蝙蝠的声信号极易受到喷泉低频噪声（< 25 kHz）谐波的干扰（Araya-Ajoy et al. 2009），这一结果与 Kern 和 Radford（2016）的研究结果一致。此外，蝙蝠对环境噪声的敏感性可能影响其对栖息地风险的评估，从而改变觅食策略。伊氏鼠耳蝠作为典型的拾遗式觅食蝙蝠，其捕食策略与近缘种，如大耳鼠耳蝠（*M. myotis*）类似，依赖于被动听觉与主动回声定位的共同作用（Arlettaz et al. 2001）。在光污染与噪声污染环境环境下，伊氏鼠耳蝠活动减少了 99.37%，而景观灯关闭后仅恢复至先前蝙蝠通过数量的 2.19%，可能反映了其对声学线索依赖较强的觅食策略，依赖昆虫翅膀振动声来定位猎物（Miller and Surlykke 2001, Wang et al. 2022），喷泉的机械噪声可能掩盖昆虫翅膀振动或地面猎物活动产生的低频线索（< 5 kHz），导致蝙蝠搜索时间延长或捕食效率下降（Siemers and Schaub 2011, 朱红靛等 2022），环境噪声的增加提高了信息获取成本，迫使其转移至干扰较小的区域。与依赖主动回声定位的边缘生境觅食型蝙蝠（如东亚伏翼）不同，伊氏鼠耳蝠更易受低频噪声污染的直接干扰。此外，喷泉噪声也可能对蝙蝠的饮水产生负面影响（Domer et al. 2021）。

3.2.2 喷泉引发的水面湍流对蝙蝠觅食的影响 除了噪声干扰，喷泉运行还导致水面产生持续波动（振幅约 3~5 cm），其效应类似于自然溪流的湍流（von Frenckell and Barclay 1987）。我们的结果表明，鼠耳蝠倾向于回避湍流水域，因为水面波纹会产生高频回声杂波（> 20 kHz），干扰猎物定位（Rydell et al. 1999）。水面波纹还可能通过镜面反射效应产生大量无序回声（Siemers et al. 2001），导致目标昆虫（如水面漂浮的鞘翅目幼虫）发出的孤立回声信号

被掩盖 (MacKey and Barclay 1989)。本研究中, 伊氏鼠耳蝠通过次数下降了 99.37%, 除了人工照明对其的干扰外, 可能与其作为“杂乱空间觅食者”(clutter specialist) 对回声杂波高度敏感的特性相关 (Jones et al. 2009)。

3.2.3 喷泉对蝙蝠饮水行为的影响 在夜间觅食活动中, 蝙蝠通常偏好在平静水面进行俯冲饮水, 将下颌下垂, 同时避免身体接触水面 (Voigt and Kingston 2016, Kloepper et al. 2019), 而喷泉产生的垂直水柱 (高度约 1.5 m) 及水面湍流可能增加饮水过程中的物理接触风险。实验研究表明, 当水面波纹高度大于 2 cm 时, 蝙蝠的饮水成功率下降 67% (Greif and Siemers 2010)。喷泉引发的水面扰动破坏了水体的镜面反射效应, 依赖水面反射的声呐回波来定位饮水的蝙蝠 (Voigt and Kingston 2016), 受到喷泉造成的水纹扩散影响, 显著增加其饮水行为的能量消耗。此外, Voigt 等 (2011) 的研究指出, 相较于保持干燥状态的个体, 毛皮湿润的蝙蝠在单位时间内表现出更高的代谢率, 能量消耗显著增加。研究认为, 毛皮湿润会降低水分蒸发效率, 从而提高蝙蝠在飞行过程中维持体温所需的调节成本。喷泉喷溅的水花可能直接导致飞行中的蝙蝠体毛被淋湿, 加剧其体温调控负担。喷泉引起的水体扰动不仅破坏了蝙蝠依赖水面反射获取声呐信息的环境, 还通过提高接触水面的风险和能量开销, 干扰其正常饮水行为。这种由行为干扰与能量代价叠加所构成的综合压力, 可能是导致翠柳湖蝙蝠夜间活动频次下降的潜在因素之一。

本研究结果表明, 人工灯光及噪声干扰对 4 种蝙蝠的活动均产生了显著的负面影响, 不同物种对人为干扰的响应呈现显著分异, 且长期的人工照明以及噪声干扰显著改变了蝙蝠群落的组成。与先前研究结果一致, 夜间人工照明与人为噪声可作为一种环境压力源, 影响蝙蝠等夜行物种的觅食行为、通勤路线及栖息地使用模式 (Stone et al. 2009, 郭熊等 2015, 吴秀等 2020, Reusch et al. 2024, Zou et al. 2024),

不同物种对人为干扰的敏感性差异会促进栖息地蝙蝠物种的同质化 (Azam et al. 2015)。本研究的局限性在于未能完全解耦噪声与光污染的交互效应。例如, 喷泉运行时同步增强的水面反光可能加剧光污染对蝙蝠的复合压力。未来研究需通过控制实验 (如关闭喷泉但保持灯带运行) 进一步厘清不同胁迫因子的独立作用。尽管如此, 本研究为城市湿地景观设计中声学环境的优化提供了线索, 将景观灯和喷泉运行时间限制在蝙蝠活动低谷可能有效缓解其对夜行性动物的生态影响。

参 考 文 献

- Araya-Ajoy Y M, Chaves-Campos J, Kalko E K V, et al. 2009. High-pitched notes during vocal contests signal genetic diversity in ocellated antbirds. *PLoS One*, 4(12): e8137.
- Arlettaz R, Jones G, Racey P A. 2001. Effect of acoustic clutter on prey detection by bats. *Nature*, 414(6865): 742–745.
- Azam C, Kerbiriou C, Vernet A, et al. 2015. Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? *Global Change Biology*, 21(12): 4333–4341.
- Bunkley J P, McClure C J W, Kleist N J, et al. 2015. Anthropogenic noise alters bat activity levels and echolocation calls. *Global Ecology and Conservation*, 3: 62–71.
- Deng Y C, Luo B, Liu W Q, et al. 2025. Behavioral and transcriptomic responses of wild least horseshoe bats to artificial light. *iScience*, 28(5): 112525.
- Domer A, Korine C, Slack M, et al. 2021. Adverse effects of noise pollution on foraging and drinking behaviour of insectivorous desert bats. *Mammalian Biology*, 101(4): 497–501.
- Dzal Y, McGuire L P, Veselka N, et al. 2011. Going, going, gone: the impact of white-nose syndrome on the summer activity of the little brown bat (*Myotis lucifugus*). *Biology Letters*, 7(3): 392–394.
- Elvidge C D, Keith D M, Tuttle B T, et al. 2010. Spectral identification of lighting type and character. *Sensors*, 10(4): 3961–3988.
- Finch D, Schofield H, Mathews F. 2020. Traffic noise playback reduces the activity and feeding behaviour of free-living bats.

- Environmental Pollution, 263: 114405.
- Gaston K J, Bennie J, Davies T W, et al. 2013. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, 88(4): 912–927.
- Greif S, Siemers B M. 2010. Innate recognition of water bodies in echolocating bats. *Nature Communications*, 1: 107.
- Jones G, Jacobs D S, Kunz T H, et al. 2009. Carpe noctem: the importance of bats as bioindicators. *Endangered Species Research*, 8: 93–115.
- Jones G, Rydell J. 1994. Foraging strategy and predation risk as factors influencing emergence time in echolocating bats. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 346(1318): 445–455.
- Jung K, Kalko E K V. 2010. Where forest meets urbanization: foraging plasticity of aerial insectivorous bats in an anthropogenically altered environment. *Journal of Mammalogy*, 91(1): 144–153.
- Jung K, Threlfall C G. 2016. Urbanisation and its effects on bats—a global meta-analysis // Voigt C, Kingston T. *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Cham: Springer International Publishing, 13–33.
- Kern J M, Radford A N. 2016. Anthropogenic noise disrupts use of vocal information about predation risk. *Environmental Pollution*, 218: 988–995.
- Kerth G, Perony N, Schweitzer F. 2011. Bats are able to maintain long-term social relationships despite the high fission-fusion dynamics of their groups. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1719): 2761–2767.
- Kloepper L N, Simmons A M, Simmons J A. 2019. Echolocation while drinking: Pulse-timing strategies by high- and low-frequency FM bats. *PLoS One*, 14(12): e0226114.
- Kuijper D P J, Schut J, van Dulleman D, et al. 2008. Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (*Myotis dasycneme*). *Lutra*, 51(1): 37.
- Kunz T H, Braun de Torrez E, Bauer D, et al. 2011. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1223(1): 1–38.
- Lehrer E W, Gallo T, Fidino M, et al. 2021. Urban bat occupancy is highly influenced by noise and the location of water: Considerations for nature-based urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 210: 104063.
- Lewanzik D, Voigt C C. 2014. Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. *Journal of Applied Ecology*, 51(2): 388–394.
- Longcore T, Rich C. 2004. Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4): 191–198.
- Luo B, Xu R, Li Y C, et al. 2021. Artificial light reduces foraging opportunities in wild least horseshoe bats. *Environmental Pollution*, 288: 117765.
- Luo J H, Siemers B M, Koselj K. 2015. How anthropogenic noise affects foraging. *Global Change Biology*, 21(9): 3278–3289.
- MacKey R L, Barclay R M R. 1989. The influence of physical clutter and noise on the activity of bats over water. *Canadian Journal of Zoology*, 67(5): 1167–1170.
- Maki T, Yasui S, Kamijo T. 2021. Clear-cut stands provide foraging habitats for open-space foraging bats in Japanese evergreen conifer plantations. *Journal of Forest Research*, 26(6): 437–447.
- Miller L A, Surlykke A. 2001. How some insects detect and avoid being eaten by bats: tactics and counter-tactics of prey and predator: evolutionarily speaking, insects have responded to selective pressure from bats with new evasive mechanisms, and these very responses in turn put pressure on bats to “improve” their tactics. *BioScience*, 51(7): 570–581.
- Pauwels J, Le Viol I, Bas Y, et al. 2021. Adapting street lighting to limit light pollution’s impacts on bats. *Global Ecology and Conservation*, 28: e01648.
- Reusch C, Vindas-Picado J B, Scholz C, et al. 2024. Light-averse behaviour of attic-dwelling bats when commuting through urban areas. *Global Ecology and Conservation*, 54: e03112.
- Rowe E G, Lewanzik D, Stone E L, et al. 2016. Dark matters: the effects of artificial lighting on bats // Voigt C, Kingston T. *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Cham: Springer International Publishing, 187–213.
- Rydell J. 2006. Bats and their insect prey at streetlights // Rich C, Longcore T. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Washington D.C.: Island Press, 3: 43–60.
- Rydell J, Miller L A, Jensen M E. 1999. Echolocation constraints of Daubenton’s bat foraging over water. *Functional Ecology*, 13(2):

- 247–255.
- Safi K, Kerth G. 2004. A comparative analysis of specialization and extinction risk in temperate-zone bats. *Conservation Biology*, 18(5): 1293–1303.
- Sanders D, Frago E, Kehoe R, et al. 2021. A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night. *Nature Ecology & Evolution*, 5(1): 74–81.
- Shannon G, McKenna M F, Angeloni L M, et al. 2016. A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. *Biological Reviews*, 91(4): 982–1005.
- Siemers B M, Schaub A. 2011. Hunting at the highway: traffic noise reduces foraging efficiency in acoustic predators. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1712): 1646–1652.
- Siemers B M, Stitz P, Schnitzler H U. 2001. The acoustic advantage of hunting at low heights above water: behavioural experiments on the European ‘trawling’ bats *Myotis capaccinii*, *M. dasycneme* and *M. daubentonii*. *The Journal of Experimental Biology*, 204(22): 3843–3854.
- Song S J, Chang Y, Wang D P, et al. 2020. Chronic traffic noise increases food intake and alters gene expression associated with metabolism and disease in bats. *Journal of Applied Ecology*, 57(10): 1915–1925.
- Stone E L, Jones G, Harris S. 2009. Street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology*, 19(13): 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(8): 2458–2465.
- Voigt C C, Kingston T. 2016. Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World. Cham: Springer, 215–225.
- Voigt C C, Schneeberger K, Voigt-Heucke S L, et al. 2011. Rain increases the energy cost of bat flight. *Biology Letters*, 7(5): 793–795.
- von Frenckell B, Barclay R M R. 1987. Bat activity over calm and turbulent water. *Canadian Journal of Zoology*, 65(2): 219–222.
- Wang W W, Gao H M, Li C R, et al. 2022. Airport noise disturbs foraging behavior of Japanese pipistrelle bats. *Ecology and Evolution*, 12(6): e8976.
- Zhou D Y, Deng Y C, Wei X Y, et al. 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: 170339.
- Zou W Y, Wu P, Wei X Y, et al. 2024. Artificial light affects foraging behavior of a synanthropic bat. *Integrative Zoology*, 19(4): 710–720.
- 郭熊, 赵健伦, 江廷磊, 等. 2015. 东方蝙蝠在交通噪声环境中的回声定位行为. *动物学杂志*, 50(4): 615–620. [Guo X, Zhao J L, Jiang T L, et al. 2015. Traffic noise affects the characteristics of echolocation pulse in Asian parti-colored bat, *Vespertilio sinensis*. *Chinese Journal of Zoology*, 50(4): 615–620.]
- 江廷磊, 赵华斌, 何彪, 等. 2020. 中国蝙蝠生物学研究进展及其保护对策. *兽类学报*, 40(6): 539–559. [Jiang T L, Zhao H B, He B, et al. 2020. Research progress of bat biology and conservation strategies in China. *Acta Theriologica Sinica*, 40(6): 539–559.]
- 吴秀, 罗波, 王维维, 等. 2020. 降雨噪声对菲菊头蝠出飞行为的影响. *兽类学报*, 40(2): 129–134. [Wu X, Luo B, Wang W W, et al. 2020. The effect of rain noise on emergence behavior in least horseshoe bats. *Acta Theriologica Sinica*, 40(2): 129–134.]
- 朱红靓, 杨保东, 高志宽, 等. 2022. 入宅蝙蝠的驱赶策略研究. *动物学杂志*, 57(4): 521–527. [Zhu H L, Yang B D, Gao Z K, et al. 2022. Study on the strategy of how to repel a bat out of human house. *Chinese Journal of Zoology*, 57(4): 521–527.]
- 邹文玉, 徐榕, 王楨, 等. 2021. 雄性菲菊头蝠夏季集群大小的变化及其影响因素. *动物学杂志*, 56(3): 330–337. [Zou W Y, Xu R, Wang Z, et al. 2021. Variation in colony size and its influencing factors in male least horseshoe bats during summer. *Chinese Journal of Zoology*, 56(3): 330–337.]