

东方蝙蝠在交通噪声环境中的回声定位行为

郭 熊 赵健伦 江廷磊 冯 江*

东北师范大学环境学院, 吉林省动物资源保护与利用重点实验室 长春 130024

摘要: 环境噪声会降低动物声信号可探测性, 是动物声信号进化的压力。为了避免人工噪声干扰, 多数脊椎动物调整其叫声的频谱-时间结构, 如采用延长叫声持续时间、提高频率和增加强度等策略。本研究选择回声定位声波频率范围与交通噪声频率范围相互重叠的东方蝙蝠 (*Vespertilio sinensis*) 为研究对象, 在自然条件下开展实验, 研究交通噪声对蝙蝠回声定位声波的影响。本实验选择交通噪声强度存在差异的两个样点, 分别录制东方蝙蝠的回声定位声波, 分析其结构参数。在交通噪声强度较高的样点, 东方蝙蝠回声定位声波的持续时间、斜率均未显著改变, 但起始频率、主频、终止频率及带宽均显著提高。结果表明, 东方蝙蝠的回声定位行为在交通噪声干扰下具有明显的可塑性。

关键词: 回声定位声波; 频率; 交通噪声; 东方蝙蝠

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2015) 04-615-06

Traffic Noise Affects the Characteristics of Echolocation Pulse in Asian Parti-Colored Bat, *Vespertilio sinensis*

GUO Xiong ZHAO Jian-Lun JIANG Ting-Lei FENG Jiang*

School of Environment, Northeast Normal University, Jilin Provincial Key Laboratory of Animal Resource Conservation and Utilization, Changchun 130024, China

Abstract: Ambient noise is treated as an evaluative pressure on bats since it can reduce their detective ability for audio message. Vertebrates use a number of strategies to avoid signal masking by human making noise, including increasing call duration, frequency and amplitude. Here, we tested whether traffic noise influenced echolocation behavior in Asian parti-colored bat (*Vespertilio sinensis*) under natural condition. We recorded the echolocation pulses from two groups of bats while flying in areas with different traffic noise levels. We recorded 143 pulses at the site in which the mean amplitude of noise was 73.7 dB and 212 pulses at another site in which the mean amplitude of noise was 58.6 dB. To characterize echolocation pulse, we measured six spectral parameters (duration, starting frequency, peak frequency, ending frequency, bandwidth and slope). The results showed that only pulse frequency was shifted upward in respond to high traffic noise, including

基金项目 国家自然科学基金重点项目 (No. 31030011), 国家自然科学基金项目 (No. 31100280), 教育部新教师青年基金项目 (No. 20110043120015);

* 通讯作者, E-mail: fengj@nenu.edu.cn;

第一作者介绍 郭熊, 男, 硕士研究生; 研究方向: 动物行为学; E-mail: guox428@nenu.edu.cn.

收稿日期: 2014-11-28, 修回日期: 2015-03-31 DOI: 10.13859/j.cjz.201504014

starting frequency (T test: $t_{353} = 13.67$, $P < 0.001$), peak frequency (Mann-Whitney U : $P < 0.001$), ending frequency (Mann-Whitney U : $P < 0.001$) and bandwidth (T test: $t_{353} = 4.30$, $P < 0.05$), but not in call duration (T test: $t_{353} = 0.017$, $P > 0.05$) and slope (Mann-Whitney U : $P > 0.05$) (Table 1). These results indicate that Asian parti-colored bat can modify the features of echolocation pulses in traffic noisy environments.

Key words: Echolocation pulse; Frequency; Traffic noise; Asian parti-colored bat *Vespertilio sinensis*

自然噪声和人工噪声对动物声信号的进化有着选择压力 (Ortega 2012)。越来越多的研究证实, 人工噪声改变了许多动物声信号的频谱-时间结构, 如鸟类 (Ortega 2012)、蛙类 (Cunnington et al. 2010) 和昆虫 (Francis 2014, Lampe et al. 2014)。有效的通讯需要信号接收者成功接收到信号 (McMullen et al. 2014)。然而, 环境噪声是降低声信号可探测性的主要因素 (Ryan et al. 1985, Foote et al. 2004)。在噪声干扰下, 为了保证接收者顺利接收到声信号, 多数脊椎动物采取延长叫声持续时间 (Osmanski et al. 2009)、提高叫声频率 (McMullen et al. 2014) 和增加叫声强度 (Brumm 2004, Nemeth et al. 2013) 等策略。

蝙蝠是唯一真正会飞的哺乳动物, 主要依赖声信号在黑暗的环境中活动, 其声信号极易受到噪声的影响, 因此可作为研究噪声对动物影响的关键模型。当背景噪声出现时, 例如昆虫噪声 (Gillam et al. 2007), 蝙蝠调整自身回声定位声波的频率避免噪声的干扰。研究表明, 不同频率范围和强度的噪声对蝙蝠回声定位声波的影响不尽相同 (Tressler et al. 2009, Hage et al. 2014)。距离公路越近的地方, 蝙蝠出现的种类和活动次数越少 (Berthinussen et al. 2012)。此外, 交通噪声降低了大鼠耳蝠 (*Myotis myotis*) 捕食的效率和准确度, 这主要是因为交通噪声干扰了蝙蝠的回声定位声波, 从而降低了蝙蝠利用回声探测和定位猎物的能力 (Siemers et al. 2011)。

交通噪声是典型的人工噪声, 声波频率范围主要是 0 ~ 50 kHz, 能量主要分布在低频段 (0 ~ 20 kHz) (Schaub et al. 2008)。有关听力阈值的研究表明, 调频蝙蝠能够感知交通噪声

(Bohn et al. 2006)。背景噪声的频率范围与动物声信号的频率范围重叠程度越高, 就越容易引起动物改变叫声参数 (Rheindt 2003, Slabbekoorn et al. 2006, Tressler et al. 2009)。很多调频蝙蝠回声定位声波频率范围与交通噪声频率范围存在重叠, 它们对人工噪声的响应值得深入探讨。

本研究选择回声定位声波频率范围与交通噪声部分重叠的东方蝙蝠 (*Vespertilio sinensis*) 为研究对象 (图 1), 在自然条件下开展实验, 研究交通噪声对回声定位声波的影响。在本研究中, 我们假设交通噪声影响东方蝙蝠的回声定位行为。并预测, 与虎皮鹦鹉 (*Melopsittacus undulatus*) (Osmanski et al. 2009)、知更鸟 (*Erithacus rubecula*) (McMullen et al. 2014) 应对噪声的策略一样, 在高强度交通噪声的干扰下, 东方蝙蝠会延长回声定位声波的持续时间, 提高频率。

1 研究方法

1.1 研究地点

东方蝙蝠春秋两季都栖息在哈尔滨阿城立交桥底面缝隙中, 距离地面约 7 m, 雌雄混居。A 样点 (45°32'N, 127°0'E) 和 B 样点 (45°32'N, 127°32'E) 分别位于立交桥两端, 两样点相距约 200 m。A 样点侧面 2 m 处有公路穿过桥底, 实验期间有持续车流; B 样点其旁边无公路经过, 其他环境相似, 桥底下除桥墩外无任何障碍物。两样点噪声频率为 0 ~ 70 kHz, 能量主要集中在 1 ~ 20 kHz, 但是强度相差较大。按照中华人民共和国国标《声环境质量标准》(GB3096-2008) (环境保护部 2008) 测定道路交通噪声强度, 每 5 s 读取 1 个数据, 一共

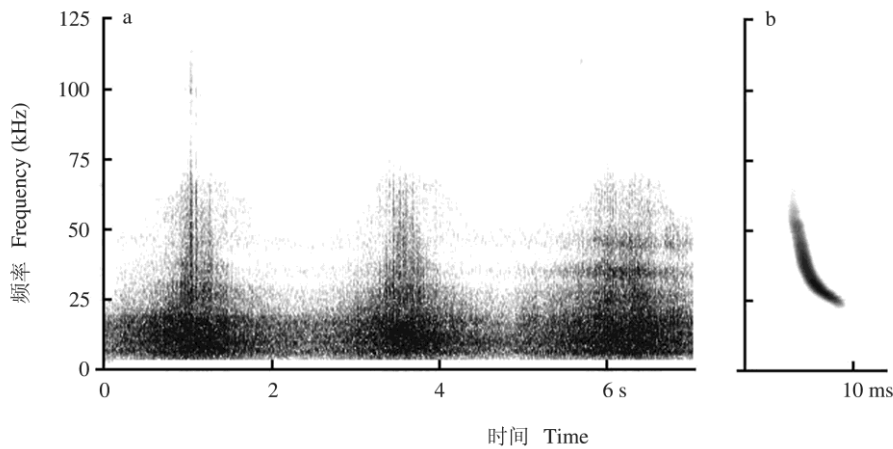


图 1 交通噪声 (a) 和东方蝙蝠回声定位声波 (b) 的频谱图

Fig. 1 The spectrogram of traffic noise (a) and echolocation call (b) of Asian parti-colored bat

读取 100 个数据。测得 A 样点噪声等效连续 A 声级为 73.7 dB, B 样点噪声等效连续 A 声级为 58.6 dB。实验区域光线良好, 观察发现, 蝙蝠直接飞过麦克风, 并不绕其旋转; 在 Avisoft-SASLab Pro USGH version 5.0 软件 (Avisoft Bioacoustics, Berlin, Germany) 窗口中只留下一个脉冲串 (Echolocation call sequences)。因此, 我们认为录音文件中脉冲串的数量等于蝙蝠的数量。脉冲串是指蝙蝠为了实现感知的需要在短时间内发出的多个连续脉冲的集合 (Ratcliffe et al. 2011)。根据录音文件中叫声串的数量, 我们估计, A 样点和 B 样点蝙蝠数量分别约为 160 和 230 只。

1.2 回声定位声波的录制和测量

在录音前 4 个晚上, 我们在黄昏时观察两个样点蝙蝠由大桥缝隙飞往捕食地的出飞时间和路径, 以确定放置麦克风的位置, 调整录音设备的阈值设置。采用超声波探测仪 (Ultra Sound Gate 116, Avisoft Bioacoustics, Berlin) 录制从栖息地飞往捕食地的东方蝙蝠的回声定位声波, 在 A 样点 (45°32'N, 127°0'E) 和 B 样点 (45°32'N, 127°32'E) 分别安装麦克风, 麦克风固定于距离立交桥底面 2 m 距地面 5 m 处。A 样点声波录制时间为 2014 年 8 月 31 日 18:50 ~ 19:20 时, B 样点声波录制时间 9 月 1

日 18:50 ~ 19:20 时, 每个样点只录制一晚。A 样点录音期间天气晴朗, 温度为 21.2°C, 湿度为 42%; B 样点录音期间天气晴朗, 温度为 21.0°C, 湿度为 41%。采样频率为 250 kHz, 分辨率为 16 bit。每只蝙蝠在出飞过程中直接从麦克风上端飞过, 并不绕麦克风盘旋, 因而基本能够保证录到的每个脉冲串能代表 1 个蝙蝠通过 (pass)。

从录制的声波文件中, 选择性噪比较好、结构完整的脉冲串, 从第 5 ~ 10 个脉冲中, 随机选取 1 个脉冲用于声波分析, 由于每个脉冲串能够代表 1 个个体, 这样就能避免统计学上的假重复问题。采用 Avisoft 配套的 Avisoft-SASLab Pro version 5.1.20 软件 (Avisoft Bioacoustics, Berlin, Germany) 分析回声定位声波参数, 包括脉冲持续时间 (duration)、起始频率 (starting frequency)、主频 (peak frequency)、终止频率 (ending frequency)、带宽 (bandwidth) 和斜率 (slope)。在测量参数之前, 将脉冲标准化到 0.75 V。分析声谱图的哈密窗 (hamming window) 参数为 FFT = 512, overlap = 93.75%, 该条件下的频率分辨率为 488 Hz, 时间分辨率为 0.128 ms。

1.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 for Windows 统计软件进行

数据处理与分析。首先对数据进行正态分布检验，脉冲持续时间、起始频率、带宽的数据呈正态分布 (Kolmogorov-Smirnov test, 所有 $P > 0.05$)，主频、终止频率、斜率的数据呈非正态分布 (Kolmogorov-Smirnov test, 所有 $P < 0.05$)。统计结果均以平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示。用独立样本 T 检验 (Independent-Sample T test) 比较不同强度交通噪声干扰下回声定位持续时间、起始频率、带宽的差异，用 Mann-Whitney U 检验比较不同强度交通噪声干扰下回声定位主频、终止频率、斜率的差异。显著水平设为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

交通噪声强度对回声定位参数特征的影响见表 1。东方蝙蝠回声定位声波的持续时间和斜率在不同强度噪声干扰条件下无显著差异，但其起始频率、主频、终止频率和带宽在噪声强度更高的 A 样点均显著提高。

3 讨论

蝙蝠发出回声定位声波，依靠回声感知周围世界。本文研究结果发现，为了减少交通噪声的干扰，获得性噪比高的回声，提高目标定位的精度，东方蝙蝠提高回声定位声波的频率，

包括起始频率、主频、终止频率。我们的研究结果与其他动物研究结果一致，如鸟类 (Osmanski et al. 2009, Ortega 2012, McMullen et al. 2014)、蛙类 (Cunnington et al. 2010) 和昆虫 (Francis 2014, Lampe et al. 2014)。因此，在噪声干扰下，提高叫声频率是很多动物采取的主要策略之一。

噪声不利于声信号的传递，降低动物个体间定位和交流的效率。研究表明，知更鸟声信号的复杂性与噪声强度显著负相关，且其选择远离噪声源的距离随噪声强度的增强而增大 (McLaughlin et al. 2013)；同样地，野外调查显示，随着噪声强度升高，知更鸟选择距离噪声源更远的鸣唱地点 (Polak 2014)。本研究结果表明，交通噪声使东方蝙蝠的回声定位声波频率显著提高，与交通噪声的主频域产生差异，从而避免了噪声的干扰。

叫声频率的提高是适应声环境的主动改变，还是叫声强度增大的副产物，在不同的物种中，研究结果不一致。乌鸫 (*Turdus merula*) 叫声频率与叫声强度显著正相关，叫声频率的提高很可能是强度增大的副产物 (Nemeth et al. 2013)。但是，灰蓝灯草鹀 (*Junco hyemalis*) 的最小频率和声音强度呈显著负相关，最大频率与强度不相关 (Cardoso et al. 2011)。粉红噪

表 1 交通噪声强度对东方蝙蝠回声定位声波参数的影响 (平均值 \pm 标准差)

Table 1 The effects of traffic sound level on the echolocation pulse parameters of Asian parti-colored bat (Mean \pm SD)

参数 Parameters	样点 A Site A (n = 143)	样点 B Site B (n = 212)	检验方法 Test	检验值 Test value	P
持续时间 Duration (ms)	5.7 \pm 0.9	5.7 \pm 0.9	T test	0.017	0.897
起始频率 Starting frequency (kHz)	50.4 \pm 3.6	49.2 \pm 2.7	T test	13.67	< 0.001
主频 Peak frequency (kHz)	32.4 \pm 2.6	31.3 \pm 2.6	Mann-Whitney U	10 969	< 0.001
终止频率 Ending frequency (kHz)	25.1 \pm 1.1	24.5 \pm 1.2	Mann-Whitney U	11 289	< 0.001
带宽 Bandwidth (kHz)	25.3 \pm 3.3	24.6 \pm 2.6	T test	4.30	< 0.05
斜率 Slope (kHz/ms)	4.5 \pm 0.9	4.3 \pm 0.9	Mann-Whitney U	13 835	0.163

样点 A 和样点 B 的交通噪声强度分别为 73.7 dB, 58.6 dB。The level of traffic noise of site A and B is 73.7 dB and 58.6 dB, respectively.

声 (pink noise) 是大自然中存在最为广泛的噪音, 具有较宽的频率范围, 并在每一个相同比例频带内的噪声具有相同的能量; 功率谱密度与频率成反比, 随着频率的增加能量逐渐衰减 (吕鹏等 2012)。在粉红噪声干扰下, 马铁菊头蝠 (*Rhinolophus ferrumequinum*) 回声定位声波频率与叫声强度的改变不相关 (Hage et al. 2013), 即调整叫声频率和调整叫声强度是独立进行的 (Cardoso et al. 2011, Hage et al. 2013)。本研究, 因为是在野外录制蝙蝠的回声定位声波, 很难控制蝙蝠与麦克风的距离, 难以量化东方蝙蝠叫声强度的改变。因此, 未来的研究应该设计室内实验, 关注东方蝙蝠能否独立地改变叫声的频率和强度。

蝙蝠回声定位行为能够依据环境噪声的带宽、频率范围和强度而变化。巴西犬吻蝠 (*Tadarida brasiliensis*) 依据背景噪声的频率范围来调整自身的回声定位行为, 宽频率范围的噪声对主频没有影响, 使强度升高; 然而, 某些窄频率范围的噪声使主频提高, 对强度没有影响 (Tressler et al. 2009)。在野外回放昆虫发出的超声噪音, 发现巴西犬吻蝠发出声波的频率与回放的噪声频率正相关 (Gillam et al. 2007)。宽频噪声会延长大棕蝠 (*Eptesicus serotinus*) 回声定位声波的持续时间, 而窄频噪声不改变大棕蝠回声定位声波的持续时间 (Bates et al. 2008)。不同频率范围和强度的粉红噪声对马铁菊头蝠的回声定位主频和强度有着不同的影响 (Hage et al. 2013)。蝙蝠的回声定位声波在噪声干扰下具有较强的可塑性。将来的研究应关注蝙蝠在噪声干扰下调整回声定位行为的生态适应性和进化。

致谢 感谢吉林省动物资源保护与利用重点实验室的卢冠军和罗波同学在数据收集过程中的热心帮助与支持。

参 考 文 献

Bates M E, Stamper S A, Simmons J A. 2008. Jamming avoidance response of big brown bats in target detection. *The Journal of*

Experimental Biology, 211(1): 106–113.

Berthinsen A, Altringham J. 2012. The effect of a major road on bat activity and diversity. *Journal of Applied Ecology*, 49(1): 82–89.

Bohn K M, Moss C F, Wilkinson GS. 2006. Correlated evolution between hearing sensitivity and social calls in bats. *Biology Letters*, 2(4): 561–564.

Brumm H. 2004. The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology*, 73(3): 434–440.

Cardoso G C, Atwell J W. 2011. On the relation between loudness and the increased song frequency of urban birds. *Animal Behaviour*, 82(4): 831–836.

Cunnington G M, Fahrig L. 2010. Plasticity in the vocalizations of anurans in response to traffic noise. *Acta Oecologica*, 36(5): 463–470.

Footo A D, Osborne R W, Hoelzel A R. 2004. Environment: whale-call response to masking boat noise. *Nature*, 428(6986): 910–910.

Francis C D. 2014. Road noise and signal divergence via developmental plasticity in an arthropod. *Functional Ecology*, 28(3): 547–548.

Gillam E H, McCracken G F. 2007. Variability in the echolocation of *Tadarida brasiliensis*: effects of geography and local acoustic environment. *Animal Behaviour*, 74(2): 277–286.

Hage S R, Jiang T L, Berquist S W, et al. 2013. Ambient noise induces independent shifts in call frequency and amplitude within the Lombard effect in echolocating bats. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(10): 4063–4068.

Hage S R, Jiang T L, Berquist S W, et al. 2014. Ambient noise causes independent changes in distinct spectro-temporal features of echolocation calls in horseshoe bats. *The Journal of Experimental Biology*, 217(14): 2440–2444.

Lampe U, Reinhold K, Schmoll T. 2014. How grasshoppers respond to road noise: developmental plasticity and population differentiation in acoustic signalling. *Functional Ecology*, 28(3): 660–668.

McLaughlin K E, Kunc H P. 2013. Experimentally increased noise levels change spatial and singing behaviour. *Biology Letters*,

- 9(1): 20120771.
- McMullen H, Schmidt R, Kunc H P. 2014. Anthropogenic noise affects vocal interactions. *Behavioural Processes*, 103(3): 125–128.
- Nemeth E, Pieretti N, Zollinger S A, et al. 2013. Bird song and anthropogenic noise: vocal constraints may explain why birds sing higher-frequency songs in cities. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1754): 20122798.
- Ortega C P. 2012. Effects of noise pollution on birds: A brief review of our knowledge. *Ornithological Monographs*, 74(1): 6–22.
- Osmanski M S, Dooling R J. 2009. The effect of altered auditory feedback on control of vocal production in budgerigars (*Melopsittacus undulatus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(2): 911–919.
- Polak M. 2014. Relationship between traffic noise levels and song perch height in a common passerine bird. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 30: 72–75.
- Ratcliffe J M, Jakobsen L, Kalko E K V, et al. 2011. Frequency alternation and an offbeat rhythm indicate foraging behavior in the echolocating bat, *Saccopteryx bilineata*. *Journal of Comparative Physiology A*, 197(5): 413–423.
- Rheindt F E. 2003. The impact of roads on birds: does song frequency play a role in determining susceptibility to noise pollution? *Journal für Ornithologie*, 144(3): 295–306.
- Ryan M J, Brenowitz E A. 1985. The role of body size, phylogeny, and ambient noise in the evolution of bird song. *American Naturalist*, 126(1): 87–100.
- Schaub A, Ostwald J, Siemers B M. 2008. Foraging bats avoid noise. *The Journal of Experimental Biology*, 211(19): 3174–3180.
- 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.
- Slabbekoorn H, Den Boer-Visser A. 2006. Cities change the songs of birds. *Current Biology*, 16(23): 2326–2331.
- Tressler J, Smotherman M S. 2009. Context-dependent effects of noise on echolocation pulse characteristics in free-tailed bats. *Journal of Comparative Physiology A*, 195(10): 923–934.
- 环境保护部. 2008. 声环境质量标准 GB3096-2008. 北京: 中国环境科学出版社, 1–13.
- 吕鹏, 周强, 谭雅丽. 2012. 生成粉红噪声的 ARMA 模型. *数据采集与处理*, 26(6): 728–732.