

城市噪声使树麻雀鸣唱的最低频率升高

王艳雯 王佳宇 苗浩宇 张娟 杨阳 万冬梅 殷江霞*

辽宁大学生命科学院, 辽宁省动物资源与疫病防治重点实验室 沈阳 110036

摘要: 随着城市化进程的不断加快, 城市噪声水平显著升高。噪声会掩盖鸟类的声音信号, 这无疑会影响鸟类的交流。在嘈杂的城市环境中, 鸟类通常以高频率鸣唱来避免声信号被掩蔽。然而, 较低的发声频率才是雄性品质的重要表征, 提高发声频率可能会影响声信号对雌性的吸引力。因此, 鸟类会在提高发声频率和保持较低频率之间进行权衡。为确定城市噪声对树麻雀 (*Passer montanus*) 鸣唱行为的影响, 在沈阳市选取 6 个研究地点, 比较了沈阳市区和近郊不同噪声水平下树麻雀繁殖期的鸣唱特征。在 2019 年 4 月至 7 月, 使用定向麦克风录制了 320 只繁殖期树麻雀的鸣唱, 并使用声级计测定噪声水平。研究结果显示, 城市研究地点的噪声水平显著高于郊区研究地点。与安静郊区相比, 城市嘈杂环境中的树麻雀鸣唱的最高频率、最低频率和主峰峰频显著较高, 频宽更大, 而时长没有差别。树麻雀鸣唱的最高频率、频宽、主峰峰频和时长均与噪声水平无显著相关, 而最低频率与研究地点的噪声水平呈显著正相关。上述结果说明, 在噪声环境中, 树麻雀选择提高最低频率以利于声信号的传输。

关键词: 城市; 噪声; 树麻雀; 声信号; 频率

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2020) 04-440-09

Urban Noise Increases the Minimum Frequency of Tree Sparrow (*Passer montanus*) Songs

WANG Yan-Wen WANG Jia-Yu MIAO Hao-Yu ZHANG Juan
YANG Yang WAN Dong-Mei YIN Jiang-Xia*

Key Laboratory of Animal Resource and Epidemic Disease Prevention, Department of
Life Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China

Abstract: With the continuous acceleration of urbanization, noise levels in urban areas have significantly increased, which could mask the communication signals and thus pose a challenge to vocal communication of birds. Because the frequency of urban noise is generally low, birds could sing at high frequencies to avoid being masked in noisy urban environments. Lower frequency of vocalizations is an important indicator of male quality, however, the higher frequency of vocalizations would reduce the attractiveness of the vocalizations to females. Consequently, there is a trade-off for birds between raising and keeping vocalization

基金项目 辽宁省科学技术计划项目 (No. 2019-ZD-0196), 辽宁省自然科学基金项目 (No. 20170520179);

* 通讯作者, E-mail: xia0615@126.com;

第一作者介绍 王艳雯, 女, 硕士研究生; 研究方向: 鸟类学; E-mail: 1328493240@qq.com.

收稿日期: 2020-02-02, 修回日期: 2020-05-28 DOI: 10.13859/j.cjz.202004004

frequency. With the aim to examine the effects of urban noise on vocalization of Tree Sparrows (*Passer montanus*), we compared the breeding songs of tree sparrows at six study sites in Shenyang with different noise levels from April to July 2019. We recorded the songs of Tree Sparrows at breeding stage using directional microphones and measured noise levels using a calibrated sound pressure level meter. Differences in song parameters and noise levels between urban and suburban sampling sites were analyzed by nested ANOVA. The Unary linear regression analysis was carried out on the mean of song parameters and the mean of noise for six study point tree sparrows, with noise level as an independent variable. Our results showed that the urban sites had higher noise levels than the suburban sites ($P < 0.01$, Table 2). Tree Sparrows in the urban sites had significantly higher maximum frequency ($P < 0.01$), higher minimum frequency ($P < 0.05$), higher peak frequency ($P < 0.01$), and wider bandwidth ($P < 0.01$) (Table 2). There was no significant difference of vocalization duration between tree sparrows in urban and suburban sites ($P > 0.05$, Table 2). The maximum frequency ($P > 0.05$), bandwidth ($P > 0.05$), peak frequency ($P > 0.05$), and duration ($P > 0.05$) were not significantly correlated with the noise ($P > 0.05$) (Fig. 3). The minimum frequency was positively correlated with the noise level ($P < 0.01$, Fig. 3). Our results indicated that, Tree Sparrows choose to increase the minimum frequency for better signal transmission in noisy environments.

Key words: Urban; Noise; Tree Sparrow, *Passer montanus*; Sound signal; Frequency

声信号在鸟类交流中起着至关重要的作用，可传递领域防卫、配偶吸引等重要信息 (Swaddle et al. 2007, 郑光美 2012)。随着全球城市化水平的不断提高，城市中噪声水平逐渐增加 (Slabbekoorn et al. 2008)，从而影响鸟类在城市及其周边区域进行鸣声交流的能力 (Marzluff 2001)。Bee 和 Swanson (2007) 认为，噪声会降低鸟类声音的有效传播距离，导致声信号在噪声中减弱或消失。此外，噪声会掩盖鸟类的声信号，降低声信号被正确接收的可能性 (Patricelli et al. 2006, Barber et al. 2010)，进而影响鸟类之间的交流。

鸟类拥有一些应对环境噪声的策略 (谢世林等 2016)，主要包括以下几个方面：(1) 调节鸣声频率 (Slabbekoorn et al. 2003, Potvin et al. 2015)，保证信号更好地传播 (Nemeth et al. 2013)。一项关于 9 种鸟类鸣声受城市噪声影响的研究发现，其中 8 种鸟类的鸣声主峰峰频在靠近城市的嘈杂森林区显著高于远离城市的安静森林区 (Tolentino et al. 2018)。(2) 增大鸣声振幅 (Pytte et al. 2003, Kight et al. 2011)。大多数鸟类普遍存在的 Lombard 效应

(Zollinger et al. 2011)，具体体现在当噪声水平提高时，它们会通过调节振幅、提高音量或增加信噪比以降低噪声对信号的干扰。斑胸草雀 (*Taeniopygia guttata*) (Cynx et al. 1998) 和新疆歌鸲 (*Luscinia megarhynchos*) (Brumm 2004) 等在噪声环境下均会增大鸣声的振幅。

(3) 调节鸣声时长，即增加信号冗余度，改变音节速率，增加鸣声信号被正确接收的可能性 (Brumm 2006)。鹊鸲 (*Copsychus saularis*) 在嘈杂地区中会增加其鸣唱时长，以此来提高信号被接收的机会 (Hill et al. 2017)。(4) 调节鸣声的日节律，在一天中噪声水平较低的时段发声 (Gil et al. 2014, Gentry et al. 2017)，避免高强度噪声时段干扰。生活在安静农村环境中的红翅黑鹇 (*Agelaius phoeniceus*) 会在清晨和傍晚鸣唱，而生活在嘈杂城市中的个体，则选择在噪声水平较低的中午鸣唱 (Cartwright et al. 2014)。

城市噪声属于低频高能声音，其频率一般低于 2 kHz，最高不超过 5 kHz (Skiba 2000, Rheindt 2003)。鸟类的发声频率主要分布在 1.5 ~ 9 kHz (Hu et al. 2010)。在城市噪声环境

中, 鸟类鸣声的低频信号会受到严重干扰 (Guillaume et al. 2014)。为避免声信号被掩蔽, 鸟类可能会提高最低频率 (Nemeth et al. 2013)。在城市噪声环境中, 鸟类鸣声最低频率的调节极为重要 (Guillaume et al. 2014), 这是因为低频率的声音比高频率声音衰减慢, 有效传播距离更长 (Wiley et al. 1978); 最低频率可以反映个体威胁信号的强度, 在领域防卫中占优势 (Morton 1977); 最低频率能够反映雄性的身体状况, 体型较大的雄性会以较低的频率发声 (Cardoso 2012)。例如, 较大的雄性家燕 (*Hirundo rustica*) 以较低的频率发出“卡嗒、卡嗒”的音节 (Galeotti et al. 1997)。在配偶选择中, 雌性会根据信号特征评估潜在配偶的品质 (Bee et al. 2007)。雌性大山雀 (*Parus major*) 会偏爱鸣唱低频率句子的雄性 (Halfwerk et al. 2011)。也有一些物种, 以高频率鸣唱作为性信号, 例如欧洲丝雀 (*Serinus serinus*) 更喜欢高频率鸣唱 (Cardoso et al. 2007)。大约有一半以上的鸟类使用低频率作为更相关的性信号 (Cardoso 2012)。在城市嘈杂环境中由于低频噪声的存在, 鸟类会选择提高鸣声最低频率, 使信号更好地传输, 还是保持代表优越信号的最低频率来获得异性的青睐呢? 在噪声环境下, 鸟类需要在传递声信号和传递身体质量信息两者之间进行权衡 (Smith et al. 2003, Mowles et al. 2011)。

树麻雀 (*Passer montanus*) 为广布种, 古北型留鸟 (赵正阶 2001), 是北方人类居住区鸟类群落中的优势物种 (蒋爱伍等 2009)。由于其在城市和郊区均有分布, 树麻雀成为研究环境变化对鸟类影响的良好材料 (兰敏敏等 2018)。为探究鸟类在城市噪声环境中的鸣声变化和调节方式, 本研究以树麻雀为研究对象, 比较分析了沈阳市区和郊区不同噪声水平下其鸣声行为差异。从声学角度分析鸟类对噪声环境的响应和适应, 有利于揭示鸟类在噪声环境中的适应机制。该研究可为监测环境噪声对鸟类及其他动物的影响提供借鉴, 并为鸟类鸣声

行为学研究提供更多参考数据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

沈阳市是辽宁省省会、东北地区最大的中心城市以及全国重要的工业基地 (姜璐等 2018), 位于辽宁省中部 (41°11'51" ~ 43°02'13" N, 122°25'09" ~ 123°48'24" E)。在沈阳市选取 6 个研究地点 (图 1), 分别为新农村 (41°59'38" N, 123°20'51" E)、恒泰骏景-高层居民区 (41°52'05" N, 123°23'47" E)、五彩园-低层居民区 (41°51'28" N, 123°24'03" E)、辽宁大学-城区校园 (41°49'54" N, 123°23'56" E)、万泉公园-城区公园 (41°47'15" N, 123°28'07" E) 和慧园新村 (41°44'29" N, 123°29'03" E)。研究地点总跨度达 50 km, 研究地点之间至少相隔 500 m。采用 Gliwicz 等 (1994) 对城市、郊区划分的方法, 通过研究地点与城市中心的距离及人为干扰因素, 将研究地点划分为城市、郊区两个不同水平。本研究地区中所选取的 6 个研究地点中, 恒泰骏景-高层居民区、五彩园-低层居民区、辽宁大学-城区校园和万泉公园-城区公园 4 个研究地点由于距离城市中心近、车流量较大、人为干扰

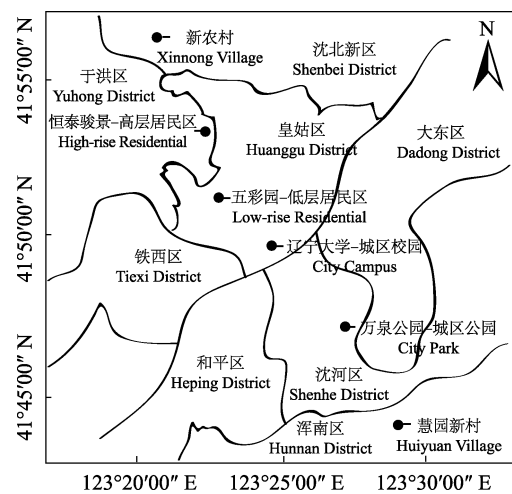


图 1 研究地点分布图

Fig. 1 Location of sampling sites

强度高，属于城市；新农村和慧园新村位于沈阳郊区，距离市中心较远、车流量少、人烟稀少，属于郊区。

1.2 城市化分数量化

采用 Liker 等 (2008) 提出的城市化分数量化方法获取每个研究地点的城市化分数。以每个研究地点为中心，选择其周围 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 区域的清晰卫星影像，将每个 1 km^2 区域均等划分为 100 个方格。根据卫星影像记录每个方格中植被覆盖、建筑覆盖和主干道数三种土地利用情况。土地利用得分计算方法如下：无植被记 0 分，植被面积低于 50% 记 1 分，植被面积超过 50% 记 2 分；无建筑记 0 分，建筑面积低于 50% 记 1 分，建筑面积超过 50% 记 2 分；无主干道记 0 分，有主干道记 1 分。得到以下 5 个变量，100 个方格的平均建筑密度得分、建筑覆盖超过 50% 的方格数、出现道路的方格数、平均建筑密度得分和植被覆盖超过 50% 的方格数。最后，通过主成分分析，提取累计贡献率大于 95% 的一组变量为主分量，每个研究地点的主成分分数为城市化分数。

1.3 噪声测量

噪声采用 SL-4001 声级计（福州福光电子有限公司）测量，声级计按国际标准，以 B&K 4231 (I 类) 校正器进行校正，测量权重为“a”。测量时，声级计距离地面高度约 1.1 m，距离墙壁或任何障碍物超过 3.0 m。每只树麻雀鸣声采集结束后立即在采集麻雀鸣声的位置测量噪声。首先，仪表指向一个随机的方向以得到一个测量值，然后声级计向右旋转 90° ，得到第二个测量值，继续此操作，直到四个方向全部测量。间隔 10 min，四个方向再重复测量一次。每次测量时，记录瞬时最大值。最后，将所有 8 个测量值取平均值，产生一个单一的噪声值。对研究地点内所有噪声值取平均值得到研究地点的噪声水平 (Minor et al. 2010)。

1.4 鸣声录制

2019 年 4 月至 7 月，每周的周末，晴朗天气条件下，于每天 6:00 ~ 11:00 时采集树麻雀

鸣声。鸣声采集仪器为日本 Tascam 公司 Tascam HD-P2 便携式数字录音机和德国 Sennheiser Electronic 公司 Sennheiser MKH416-P48 定向话筒。采样精度设置为 16 Bit，采样频率设置为 44.1 kHz。鸣声采集时，设备与树麻雀的距离 5 ~ 15 m，以获得清晰的录音 (Guo et al. 2016)。每只个体记录 5 min 或直到鸣唱停止，所有个体均在野外自然条件下记录。本研究共采集到 320 只繁殖期树麻雀的鸣声，其中，新农村地点 51 只，高层居民区地点 57 只，低层居民区地点 57 只，城区校园地点 62 只，城区公园地点 43 只，慧园新村地点 50 只。

1.5 鸣声参数提取

将所采集到的鸣声文件采用德国 Avisoft Bioacoustics 公司的声音分析软件 Avisoft SAS Lab Pro 生成语图。测量的鸣声参数包括语句的最高频率、最低频率、主峰峰频、频宽和时长。每只个体测量 5 个句子，句子是由一个或多个音节重复构成的连续段落，句子之间通常具有明显的空白形成的间隔 (郑光美 2012)。计算 5 个句子鸣声各参数的平均值，得到个体值 (Lindholm et al. 2007)。所有参数提取都是由同一个观察者 (王艳雯) 进行测量，为避免个人主观因素影响，将鸣声文件提取顺序随机打乱。为了降低测量误差，删除噪音干扰较大以及不止一只个体鸣唱的录音文件。为保持较高的测量分辨率，测量过程中使用快速傅里叶变换 (FFT length) 1 024 points, Flat Top 窗口，帧长 (frame length) 100%，重叠 (overlap) 50%，频率分辨率 (frequency resolution) 172 Hz，并通过动态调整语图的灰度以充分显示整个频率范围 (Verzijden et al. 2010, Cardoso et al. 2012) (图 2)。

1.6 统计分析

首先对各研究点树麻雀鸣声参数和噪声水平数据进行正态分布检验。采用 Nested-ANOVA 对城市、郊区采样点间各鸣声参数和噪声水平进行差异分析。以噪声水平为自变量，对六个研究点树麻雀鸣唱参数均值与噪声均值进行一元线性回归分析。显著性水平 (P) 设置为 0.05。

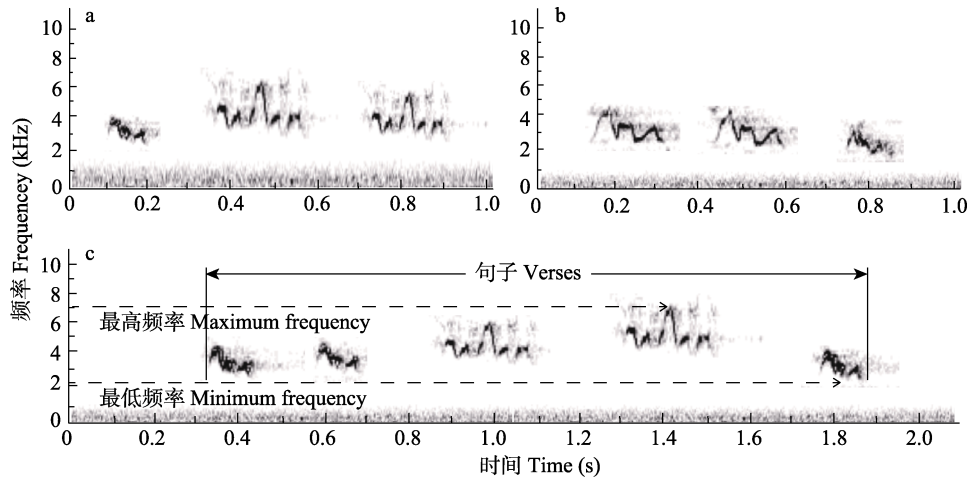


图 2 树麻雀鸣声的语图

Fig. 2 Sound spectrograms of *Passer montanus*

a. 城市嘈杂环境; b. 郊区安静环境; c. 测量方法示意图。
 a. Urban environment; b. Suburban environment; c. Schematic diagram of measurement method.

所有统计分析均利用统计软件 SPSS 21.0 完成。文中数据以平均值 ± 标准误 (Mean ± SE) 表示。

2 研究结果

2.1 城市化分数

通过量化获得城市化分数, 恒泰骏景-高层居民区、五彩园-低层居民区、辽宁大学-城区校园、万泉公园-城区公园 4 个研究地点的城市化程度较高, 而新农村和慧园新村地点的城市化程度较低 (表 1)。恒泰骏景-高层居民区、

五彩园-低层居民区、辽宁大学-城区校园、万泉公园-城区公园 4 个研究地点为城市研究地点, 新农村和慧园新村为郊区研究地点。

2.2 噪声水平和鸣声参数城市郊区差异比较

噪声水平在城市和郊区之间存在显著差异, 城市噪声水平极显著高于郊区 ($P < 0.01$, 表 2), 城市噪声均值为 (44.81 ± 0.52) dB, 噪声范围 31 ~ 68 dB, 郊区噪声均值 (36.34 ± 0.52) dB, 噪声范围 30 ~ 52 dB, 整体噪声范围 30 ~ 68 dB。

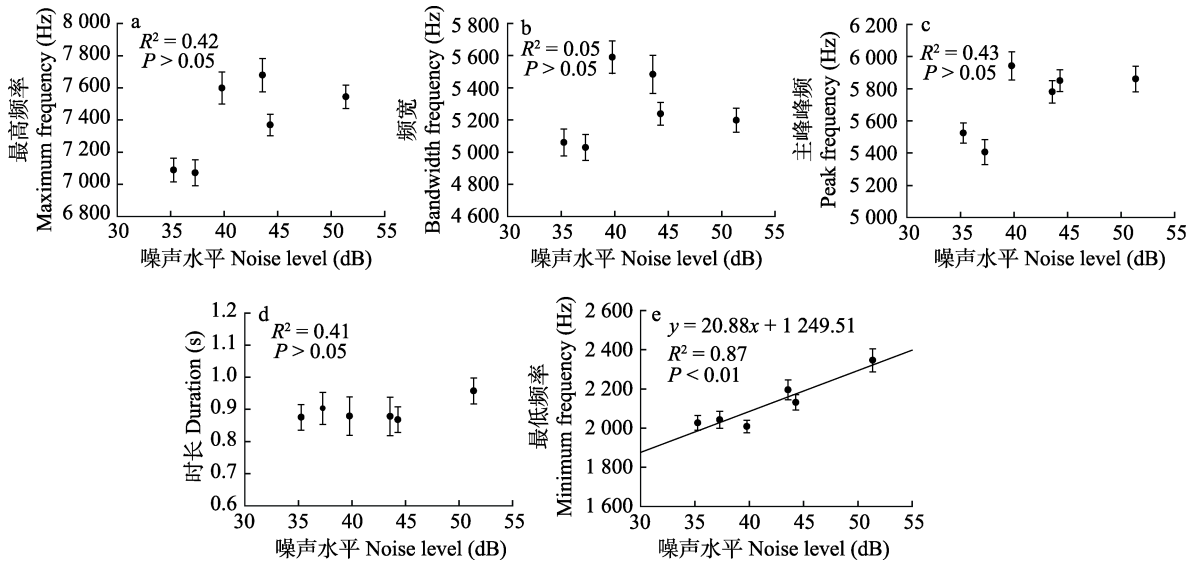
表 1 各研究地点城市化分数

Table 1 Urbanization fraction of each sampling point

研究地点 Sampling sites	平均建筑面 积得分 The score on average building area	建筑面积超过 50%的方格数 The number of grids with building area >50%	具干道的 方格数 The number of grids with arterial roads	平均植被 面积得分 The score on average vegetation area	植被覆盖超过 50%的方格数 The number of grids with vegetation area >50%	城市化 分数 Urbaniza- tion fraction
新农村 Xinnong Village	0.65	14	25	1.57	64	- 1.76
恒泰骏景-高层居民区 High-rise Residential	1.65	65	36	1.28	28	1.01
五彩园-低层居民区 Low-rise Residential	1.55	55	28	1.20	20	0.85
辽宁大学-城区校园 City Campus	1.04	12	35	1.32	43	0.00
万泉公园-城区公园 City Park	1.47	48	29	1.31	40	0.21
慧园新村 Huiyuan Village	1.46	49	31	1.37	50	- 0.32

表 2 城市和郊区环境下噪声水平和树麻雀鸣唱各参数的比较 (平均值 \pm 标准误)Table 2 Comparison of noise level and parameters of tree sparrow songs in urban and suburban environments (Mean \pm SE)

	城市地点 Urban sites	郊区地点 Suburban sites	<i>F</i>	<i>df</i> ₁	<i>df</i> ₂	<i>P</i>
噪声水平 Noise level (dB)	44.81 \pm 0.52	36.34 \pm 0.52	100.82	1	253	< 0.01
树麻雀鸣唱 Tree sparrow songs	最高频率 Maximum frequency (Hz)	7 540.47 \pm 43.11	37.27	1	253	< 0.01
	最低频率 Minimum frequency (Hz)	2 177.69 \pm 25.50	5.81	1	253	< 0.05
	频宽 Bandwidth frequency (Hz)	5 362.77 \pm 46.55	19.11	1	253	< 0.01
	主峰峰频 Peak frequency (Hz)	5 864.95 \pm 39.83	27.00	1	253	< 0.01
	时长 Duration (s)	0.90 \pm 0.03	0.89 \pm 0.03	0.03	1	253

图 3 各采样点树麻雀鸣唱参数均值与噪声水平之间的关系 (平均值 \pm 标准误)Fig. 3 The relationship between mean values of different parameters of tree sparrow songs and noise levels at each sampling point (Mean \pm SE)

在嘈杂的城市中,树麻雀鸣唱的最高频率、频宽、主峰峰频均极显著高于安静的郊区(均 $P < 0.01$, 表 2),最低频率也显著高于安静的郊区($P < 0.05$, 表 2),而时长无显著差异($P > 0.05$, 表 2)。

2.3 噪声水平与鸣声参数的关系

树麻雀鸣声最高频率、频宽、主峰峰频和时长与噪声水平均不相关(最高频率: $\beta = 29.33$, $R^2 = 0.42$, $F_{1,4} = 2.90$, $P > 0.05$; 频宽: $\beta = 8.54$, $R^2 = 0.05$, $F_{1,4} = 0.20$, $P > 0.05$; 主

峰峰频: $\beta = 23.96$, $R^2 = 0.43$, $F_{1,4} = 2.97$, $P > 0.05$; 时长: $\beta = 0.004$, $R^2 = 0.41$, $F_{1,4} = 2.82$, $P > 0.05$, 图 3a ~ d)。最低频率与噪声水平呈极显著正相关($\beta = 20.88$, $R^2 = 0.87$, $F_{1,4} = 46.58$, $P < 0.01$, 图 3e)。

3 讨论

本研究结果表明,树麻雀在嘈杂的城市中鸣唱最低频率显著提高。这种现象与以往研究中观测到的城市中其他鸟类在嘈杂栖息地中最

低频率上升的趋势相一致 (Barber et al. 2010, Brumm et al. 2013)。鸟类通过提高最低频率, 来减少与低频城市噪声的频率重叠, 增加信号有效传输和可检测性。本研究结果显示, 树麻雀鸣唱的最低频率与噪声水平之间呈显著的正相关关系。Mendes (2011) 对乌鸫 (*Turdus merula*) 的研究得到一致结果, 鸣唱最低频率随噪声水平的增加而增加。这说明鸟类鸣唱最低频率在噪声水平上的线性变化, 是应对环境噪声的一种有效调节方式。

鸣唱最低频率的提高在增加声信号可检测性的同时, 也会降低信号对异性的吸引力 (Guillaume et al. 2014)。如果在噪声水平高的地区发出更高最低频率的鸣声, 那么这些个体可能在吸引异性方面处于不利地位。根据声学适应理论, 鸟类频宽的增加会提高对潜在配偶的吸引力 (Halfwerk et al. 2011)。因此, 在高噪声水平地区, 最低频率提高造成的后果, 可以由鸣声频宽的增加来解决。树麻雀鸣唱最高频率、频宽和主峰峰频在高噪声水平地区都显著提高, 支持鸟类应对噪声环境的频域调节方式。将频域整体提高, 即鸟类鸣唱最高频率和最低频率不同步提高, 以避免低频噪声的影响, 频域调节也是鸟类应对噪声影响的有效措施 (Aubin et al. 2002, Sun et al. 2005)。

在本研究的不同噪声环境中, 尚未发现树麻雀改变鸣唱时长, 说明树麻雀可能未选择通过延长鸣唱持续时间来增加信号检测的机会。但对不同动物类群的研究中有发现在噪声环境中音节长度增加以及鸣唱时长增加的证据 (Brumm 2004, Rioschelen et al. 2013)。这些变化与“信号检测理论”的预测相一致, 该理论认为在噪声情况下, 动物通常会增加信号时长来增加声信号被检测和区分的可能性 (Wiley 2006)。不过, 本研究结果与这一理论不相符。鸣唱往往会使鸟类暴露于危险之中, 有可能面临被捕食的风险 (Krams 2001)。有研究表明, 在播放捕食者叫声时, 灰颊夜鸫 (*Catharus fuscescens*) 鸣唱的句子变少, 甚至缩短鸣唱时

间 (Schmidt et al. 2013)。鸣唱的时长编码重要信息, 如果鸣唱时长发生改变, 就可能导致信号信息的不准确 (Brumm et al. 2005)。Brumm 等 (2009) 对家禽鸣声可塑性的研究发现, 鸣唱时长可能代表重要信息, 在噪声环境中, 家禽未改变鸣唱时长。这也可能也是树麻雀未选择在噪声环境中延长鸣唱时长的一种解释。

除声学因素之外, 城市中其他生态因素也可能导致鸟类在城市和非城市地区发声频率上的差异。例如, 城市环境导致鸟类体型发生变化, 也可能会使其发声改变 (Brumm et al. 2017)。在本研究中, 没有测定所记录树麻雀鸣唱个体对应的体型状况, 无法建立个体体型与其鸣唱特征的直接关系。但在另一项相关研究中, 我们曾对这 6 个研究地点的树麻雀体型进行了测定, 没有发现其体型在不同地点存在显著变化 (未发表数据)。因此, 在本研究涉及的 6 个地点中, 树麻雀体型大小的差异可能不是鸣声频率变化的可靠解释。

本研究结果发现, 在城市嘈杂的噪声环境中, 树麻雀提高鸣唱最低频率, 且最低频率的增加与噪声水平呈正相关关系, 这表明树麻雀应对城市噪声的调节方式之一是提高最低频率。另外, 最高频率、频宽和主峰峰频也发生显著提高, 表明树麻雀将频域整体提高来避开噪声的干扰, 频域调节也是应对噪声的有效调节方式。未来将进一步研究城市化其他因素对鸟类鸣声变化的影响。

致谢 感谢中国科学院沈阳应用生态研究所吕晓涛研究员在文章撰写中的指导, 感谢辽宁省林业厅对数据收集工作的支持, 感谢辽宁大学生命科学学院唐浩森同学在数据收集中的帮助。

参 考 文 献

- Aubin T, Jouventin P. 2002. How to vocally identify kin in a crowd: The penguin model. *The Study of Behavior*, 31(2): 243–277.
- Barber J R, Crooks K R, Fristrup K M. 2010. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology &*

- Evolution, 25(3): 180–189.
- Bee M A, Swanson E M. 2007. Auditory masking of anuran advertisement calls by road traffic noise. *Animal Behaviour*, 74(6): 1765–1776.
- Brumm H. 2004. The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Animal Ecology*, 73(3): 434–440.
- Brumm H. 2006. Signalling through acoustic windows: nightingales avoid interspecific competition by short-term adjustment of song timing. *Journal of Comparative Physiology A*, 192(12): 1279–1285.
- Brumm H, Goymann W. 2017. On the natural history of duetting in white-browed Coucals: sex-and body-size-dependent differences in a collective vocal display. *Journal of Ornithology*, 158(3): 669–678.
- Brumm H, Schmidt R, Schrader L. 2009. Noise-dependent vocal plasticity in domestic fowl. *Animal Behaviour*, 78(3): 741–746.
- Brumm H, Slabbekoorn H. 2005. Acoustic communication in noise. *Advances in the Study of Behavior*, 35: 151–209.
- Brumm H, Zollinger S A. 2013. Avian vocal production in noise. *Animal Communication and Noise*, 2(6): 187–227.
- Cardoso G C. 2012. Paradoxical calls: the opposite signaling role of sound frequency across bird species. *Behavioral Ecology*, 23(2): 237–241.
- Cardoso G C, Atwell J W. 2012. On amplitude and frequency in birdsong: a reply to Zollinger et al. *Animal Behaviour*, 84(4): e10–e15.
- Cardoso G C, Mota P G, Depraz V. 2007. Female and male serins (*Serinus serinus*) respond differently to derived song traits. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 61(9): 1425–1436.
- Cartwright L A, Taylor D R, Wilson D R, et al. 2014. Urban noise affects song structure and daily patterns of song production in Red-winged Blackbirds (*Agelaius phoeniceus*). *Urban Ecosystems*, 17(2): 561–572.
- Cynx J, Lewis R, Tavel B, et al. 1998. Amplitude regulation of vocalizations in noise by a songbird, *Taeniopygia guttata*. *Animal Behaviour*, 56(1): 107–113.
- Galeotti P, Saino N, Sacchi R, et al. 1997. Song correlates with social context, testosterone and body condition in male barn swallows. *Animal Behaviour*, 53(4): 687–700.
- Gentry K E, Luther D A. 2017. Spatiotemporal patterns of avian vocal activity in relation to urban and rural background noise. *Journal of Ecoacoustics*, 1: 1–18.
- Gil D, Honarmand M, Pascual J, et al. 2014. Birds living near airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise. *Behavioral Ecology*, 26(2): 435–443.
- Gliwicz J, Goszczynski J, Luniak M. 1994. Characteristic features of animal populations under synurbanization—the case of the Blackbirds and the striped field mouse. *Physical Review B: Condensed Matter*, 39(14): 10047–10055.
- Guillaume H D A, Slabbekoorn H, Nagle L, et al. 2014. Urban noise undermines female sexual preferences for low-frequency songs in domestic canaries. *Animal Behaviour*, 87: 67–75.
- Guo F, Bonebrake T C, Dingle C. 2016. Low frequency dove coos vary across noise gradients in an urbanized environment. *Behavioural Processes*, 129: 86–93.
- Halfwerk W, Bot S, Buix J, et al. 2011. Low-frequency songs lose their potency in noisy urban conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 108(35): 14549–14554.
- Hill S D, Aryal A, Pawley M D M, et al. 2017. So much for the city: Urban–rural song variation in a widespread Asiatic songbird. *Integrative Zoology*, 13(2): 194–205.
- Hu Y, Cardoso G C. 2010. Which birds adjust the frequency of vocalizations in urban noise? *Animal Behaviour*, 79(4): 863–867.
- Kight C R, Swaddle J P. 2011. How and why environmental noise impacts animals: an integrative, mechanistic review. *Ecology Letters*, 14(10): 1052–1061.
- Krams I. 2001. Communication in crested tits and the risk of predation. *Animal Behaviour*, 61(6): 1065–1068.
- Liker A, Papp Z, Bókony V, et al. 2008. Lean birds in the city: body size and condition of house sparrows along the urbanization gradient. *Journal of Animal Ecology*, 77(4): 789–795.
- Lindholm A, Linden A. 2007. Some notes on the distribution and songs of two Oriental Cuckoo taxa, *Cuculus (saturatus) saturatus* and *Cuculus (saturatus) optatus*. *Forktail*, 23: 12–16.
- Marzluff J M. 2001. Worldwide urbanization and its effects on birds // Marzluff, J M, Bowman R, Donnelly R. *Avian Ecology and Conservation in an Urbanizing World*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 19–47.

- Mendes S, Colinarabanal V J, Peris S J. 2011. Bird song variations along an urban gradient: The case of the European blackbird (*Turdus merula*). *Landscape and Urban Planning*, 99(1): 51–57.
- Minor E, Urban D. 2010. Forest bird communities across a gradient of urban development. *Urban Ecosystems*, 13(1): 51–71.
- Morton E S. 1977. On the occurrence and significance of motivation-structural rules in some bird and mammal sounds. *The American Naturalist*, 111(981): 855–869.
- Mowles S L, Cotton P A, Briffa M. 2011. Flexing the abdominals: do bigger muscles make better fighters? *Biology Letters*, 7(3): 358–360.
- 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): 2012–2798.
- Patricelli G L, Blickley J L. 2006. Avian communication in urban noise: causes and consequences of vocal adjustment. *The Auk*, 123(3): 639–649.
- Potvin D A, MacDougall-Shackleton S A. 2015. Experimental chronic noise exposure affects adult song in zebra finches. *Animal Behaviour*, 107: 201–207.
- Pytte C L, Rusch K M, Ficken M S. 2003. Regulation of vocal amplitude by the blue-throated hummingbird, *Lampornis clemenciae*. *Animal Behaviour*, 66(4): 703–710.
- Rheindt F E. 2003. The impact of roads on birds: does song frequency play a role in determining susceptibility to noise pollution? *Journal of Ornithology*, 144(3): 295–306.
- Rioschelen A A, Quirosguerrero E, Gil D, et al. 2013. Dealing with urban noise: vermilion flycatchers sing longer songs in noisier territories. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 67(1): 145–152.
- Schmidt K A, Belinsky K L. 2013. Voices in the dark: predation risk by owls influences dusk singing in a diurnal passerine. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 67(11): 1837–1843.
- Skiba R. 2000. Possible rain call selection in the Chaffinch (*Fringilla coelebs*) by noise intensity—an investigation of a hypothesis. *Journal of Ornithology*, 141(2): 160–167.
- Slabbekoorn H, Peet M. 2003. Ecology: Birds sing at a higher pitch in urban noise. *nature*, 424(6946): 267–267.
- Slabbekoorn H, Ripmeester E A P. 2008. Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. *Molecular Ecology*, 17(1): 72–83.
- Smith J M, Harper D. 2003. *Animal Signals*. Oxford: Oxford University Press.
- Sun J W C, Narins P M. 2005. Anthropogenic sounds differentially affect amphibian call rate. *Biological Conservation*, 121(3): 419–427.
- Swaddle J P, Page L C. 2007. High levels of environmental noise erode pair preferences in zebra finches: implications for noise pollution. *Animal Behaviour*, 74(3): 363–368.
- Tolentino V C D M, Baesse C Q, Melo C D. 2018. Dominant frequency of songs in tropical bird species is higher in sites with high noise pollution. *Environmental Pollution*, 235: 983–992.
- Verzijden M N, Ripmeester E A P, Ohms V R et al. 2010. Immediate spectral flexibility in singing chiffchaffs during experimental exposure to highway noise. *Journal of Experimental Biology*, 213(15): 2575–2581.
- Wiley R H, Richards D G. 1978. Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: Implications for the evolution of animal vocalizations. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 3(1): 69–94.
- Wiley R H. 2006. Signal detection and animal communication. *Advances in the Study of Behavior*, 36(6): 217–247.
- Zollinger S A, Brumm H. 2011. The Lombard effect. *Current Biology*, 21(16): R614–R615.
- 姜璐, 陈兴鹏, 韩彬, 等. 2018. 辽宁省城市化发展格局与过程研究. *兰州大学学报: 自然科学版*, 54(4): 560–568.
- 蒋爱伍, 于家捷, 杨浪, 等. 2009. 河池学院校园鸟类初步调查. *河池学院学报*, 29(5): 69–75.
- 兰敏敏, 范龙梅, 刘方庆, 等. 2018. 树麻雀表型的环境适应进化. *生态学报*, 38(4): 1392–1400.
- 谢世林, 曹垒, 逯非, 等. 2016. 鸟类对城市化的适应. *生态学报*, 36(21): 6696–6707.
- 赵正阶. 2001. *中国鸟类志*. 吉林: 吉林科学技术出版社, 773–782.
- 郑光美. 2012. *鸟类学*. 2 版. 北京: 北京师范大学出版社, 422–436.