

## 研究简报 RESEARCH NOTES

## 普通鸭鸣声特征的时空差异分析

孙雪颖<sup>1</sup>, 朱井丽<sup>2</sup>, 吴庆明<sup>1\*</sup>, 沙力瓦·拍依祖拉木<sup>3</sup>, 邹红菲<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040;

2. 黑龙江生态工程职业学院, 哈尔滨 150025;

3. 新疆维吾尔自治区林业规划院, 乌鲁木齐 830049)

## 稿件运行过程

收稿日期: 2024-10-25

修回日期: 2024-12-02



## 摘要

关键词: 普通鸭;

鸣声参数;

季节差异;

空间差异

**Keywords:** Eurasian nuthatch (*Sitta europaea*);

Song parameters;

Seasonal differences;

Spatial differences

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-03-0681-07

DOI: 10.12375/ysdwxb.20250323

随着城市化水平的不断提升,城市扩张给城市野生动物带来一定影响。鸟类鸣声是其适应环境的显著行为表达,城市背景下鸟类鸣声参数的时空差异规律可能反映城市扩张对鸟类的影响,为此,以黑龙江省典型留鸟普通鸭(*Sitta europaea*)为研究对象,在2017—2019年采集其鸣声数据,以城市林业基地(东北林业大学城市林业示范基地)为城市干扰数据,以城郊实验林场(东北林业大学帽儿山实验林场)和偏远自然保护区(黑龙江凉水国家级自然保护区)为自然生态环境数据,分别探析城市与城郊和偏远自然保护区自然生态环境中普通鸭繁殖季和越冬季的鸣声差异。结果显示:(1)城市林业基地普通鸭鸣声参数单音节双音素的持续时间存在季节差异( $P = 0.035$ ),繁殖季鸣唱时间长于越冬季;(2)在繁殖季,城市和城郊普通鸭鸣声参数存在空间差异,其中城市普通鸭单音节三音素持续时间( $P < 0.001$ )、最低频率( $P = 0.003$ )显著高于城郊,单音节四音素持续时间更长( $P < 0.001$ )、最高频率更低( $P = 0.017$ )、最低频率更高( $P = 0.001$ );(3)在越冬季,城市普通鸭的鸣声参数仅单音节双音素的最低频率( $P = 0.007$ )显著低于偏远自然保护区。综合分析发现,城市背景下普通鸭具备多维度的声学适应性行为。城市鸟类通过调整鸣声频率和持续时间等参数,能更好地适应城市化发展的挑战。研究结果可为城市化进程中鸟类声学适应研究提供重要参考。

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk1203-4)

第一作者简介: 孙雪颖(1992—),女,博士研究生;主要从事鸟类生态学研究。E-mail: xueyingsun@nefu.edu.cn

\* 通信作者: 吴庆明, E-mail: qingmingwu@126.com

## Analyzing the Spatio-temporal Differences in the Song Characteristics of the Eurasian Nuthatch

SUN Xueying<sup>1</sup>, ZHU Jingli<sup>2</sup>, WU Qingming<sup>1\*</sup>, Shaliwa·Paiyizulamu<sup>3</sup>, ZOU Hongfei<sup>1</sup>

(1. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, Harbin 150025, China;

3. Forestry Planning Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830049, China)

**Abstract:** With the continuous improvement of urbanization levels, urban expansion is having certain impacts on urban wildlife. Bird song is a significant behavioral adaptation to the environment, the spatiotemporal differences in bird song parameters in urban context may reflect the impacts of urban expansion on birds. To investigate this, taking the Eurasian nuthatch (*Sitta europaea*), a typical resident bird in Heilongjiang Province, as the research object, its song data were collected from 2017 to 2019. Taking the urban forestry base (Urban Forestry Demonstration Base of Northeast Forestry University) as the urban disturbance data, and the suburban experimental forest farm (Maoer Mountain Experimental Forest Farm of Northeast Forestry University) and the remote nature reserve (Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve) as the natural environment data, this study explores the differences in the songs of the Eurasian nuthatch between the breeding season and the overwintering season in urban, suburban, and remote natural environments. The results show that (1) in the urban forestry base, there are seasonal differences in the duration of the monosyllabic disyllabic elements of the Eurasian nuthatch's song ( $P = 0.035$ ), with longer singing time in the breeding season than in the overwintering season. (2) in the breeding season, significant spatial differences in the song parameters of the Eurasian nuthatch were observed between urban and suburban areas. Specifically, in urban environments, the duration of monosyllabic trisyllabic song ( $P < 0.001$ ) and minimum frequency ( $P = 0.003$ ) were significantly higher than those in suburban areas. Additionally, the duration of monosyllabic tetrasyllabic song was longer ( $P < 0.001$ ), the maximum frequency was lower ( $P = 0.017$ ), and minimum frequency was higher ( $P = 0.001$ ) in urban areas compared to suburban ones. (3) In the overwintering season, the minimum frequency of monosyllabic disyllabic songs in urban areas was significantly lower than that in remote nature reserves ( $P = 0.007$ ). These findings suggest that the Eurasian nuthatch exhibits multidimensional acoustic adaptive behaviors in urban environments. Urban birds adjust song parameters such as frequency and duration to better adapt to the challenges of urbanization. This study provides important insights into the acoustic adaptation in birds during urbanization.

随着数字录音技术、大数据和人工智能等多学科的快速发展,使得生物声学发展迅速,动物声学的研究应用日益广泛<sup>[1-2]</sup>。鸟类鸣声在鸟类生活史中有着重要意义<sup>[3]</sup>,其包含十分丰富的生物信息,并受多种因素影响,如种群数量、个体或环境因素<sup>[4-5]</sup>。鸟类鸣声是鸟类集群、取食、求偶及保卫领域等活动的重要通讯工具<sup>[6-8]</sup>。随着城市化的发展,生态环境变化成为各国面临的重大问题<sup>[9-10]</sup>。一系列环境变化的发生,如城市植被结构改变、光和噪声污染以及气候变化等,势必会给野生动物的生存繁衍带来一定的影响<sup>[11-16]</sup>。鸟类是城市野生动物中显示度较高的群体,分布广泛且对环境变化敏感<sup>[17]</sup>。

通常来说,鸟类的的生活史具有明显的繁殖季和越冬季之分,繁殖季多集中在春季,鸣声也会发生相应的季节变化<sup>[18]</sup>。大部分雄鸟会在繁殖季前开始鸣唱,而雌鸟和雄鸟在其生活史的任何时期都能发出鸣叫<sup>[19-22]</sup>。鸟类鸣声的最高频率、最低频率、主频率和持续时间都可能随季节变化或环境变化而发生变动。稀树草鹀(*Passerculus sandwichensis*)繁殖季的鸣唱行为比越冬季更频繁,输出量更大,这表明鸣唱主要与繁殖活动有关<sup>[18,23]</sup>。鸟类鸣唱的部分特征参数存在季节差异,如雄性棕顶王森莺(*Basileuterus rufifrons*)在繁殖季的鸣唱持续时间明显长于非繁殖季<sup>[24]</sup>。也有研究发现,城市环境中的鸟类鸣声频率

发生了变化,如麻雀(*Passer montanus*)选择提升最低频率以便于声信号的传输<sup>[25]</sup>。Alcock<sup>[26]</sup>指出鸟类的不同基因可能通过调控鸣唱器官的构造而引发鸣声特征参数的差异,食物、声音学习经历等非遗传因素也可能影响鸣唱系统的进化进而导致鸣声的不一致。故而有必要比较城市背景下鸟类鸣声参数的时空差异,分析规律并推测原因,从而为城市发展对鸟类鸣声的影响提供新的证据。

普通鹀是雀形目(Passeriformes)小型鸣禽,不怕人,鸣声类型多样,可分为11种音节型,鸣声参数各异,包括鸣声持续时间、发声频率以及范围等<sup>[27]</sup>。因普通鹀的形态、体色、习性和分布较其他鸟类更具优势,所以是进行鸣声差异研究的较好对象。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

普通鹀的鸣声数据采集地点分别为城市林业基地(东北林业大学城市林业示范基地)、城郊实验林场(东北林业大学帽儿山实验林场)和偏远自然保护区(黑龙江凉水国家级自然保护区)。以城市林业基地数据为城市干扰数据,以城郊实验林场和偏远自然保护区为自然生态环境数据,分别探析城市与城郊、偏远自然保护区自然生态环境中普通鹀繁殖季和越冬季的鸣声差异。城市林业基地是哈尔滨市唯一的林业示范基地(45°43'10" N, 126°37'15" E),总面积约0.44 km<sup>2</sup>;城郊实验林场位于哈尔滨市尚志市,地处张广才岭西坡(45°20'—45°25' N, 127°30'—127°34' E),总面积264.96 km<sup>2</sup>;偏远自然保护区位于黑龙江省伊春市,地处小兴安岭山脉(47°06'49"—47°16'10" N, 128°47'08"—128°57'19" E),总面积121.33 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据收集

2017—2019年,在3个采集地对鸟类发声个体进行鸣声数据收集。结合鸟类学基础知识和鸟类生活史信息,将城郊实验林场的鸣声数据(于2017年6—8月、2018年4—8月和2019年4—8月采集)划分为繁殖季鸣声数据,偏远自然保护区的鸣声数据(于2017年9—12月、2018年9—12月和2019年9—12月采集)划分为越冬季鸣声数据,城市林业基地的鸣声数据(于2017年6—12月、2018年4—12月和2019年4—12月采集)划分为繁殖季和越冬季鸣声数据。在记录过程中尽量保持距离目标个体直线距离5~15 m,保证鸣声音频质量且不会惊扰普通鹀<sup>[18,28]</sup>。选择目

标个体活动高峰期的上午采集样本数据,原则上同一发声个体采集8~10个鸣声数据,以便日后进行室内分析和筛选。所有鸣声数据均由TASCAM Linear PCM Recorder DR100MK III和Rod NTG4定向麦克风获取。一旦获得足够的鸣声数据或当目标物种从最优采样区域中离去时,便会终止该目标物种的鸣声数据收集。每个鸣声样本的数据长度保持在1~2 min,极少超过5 min。在采集鸣声数据时,详细记录鸟类发声个体的鸣声数据编号、日期、时间和位置。

### 1.3 数据处理

把收集到的鸣声数据输入电脑,筛选出清晰、完整的高品质鸣声数据,使用Avisoft-SASLab声音分析软件解析。所有鸣声数据按照音节音素数划分类别,然后在R中进行正态分布检验,符合正态分布的数据用单因素方差分析,否则依据样本数目,将仅针对两组的样本执行Mann-Whitney *U*检验,样本数超过2个的,用Kruskal Wallis *H*检验。同时,采用斯皮尔曼等级相关进行分析,当 $P < 0.05$ 时,表明两个变量之间存在显著相关;当 $P < 0.01$ 时,表明两个变量之间存在极显著相关。

## 2 结果

### 2.1 繁殖季、越冬季城市普通鹀鸣声参数差异

对城市林业基地普通鹀繁殖季( $n = 86$ )和越冬季( $n = 81$ )的鸣声参数进行差异分析,发现城市普通鹀的鸣声参数单音节双音素的鸣唱时长季节差异显著( $P = 0.035$ ),繁殖季鸣唱持续时间更长,但鸣声频率参数差异不显著( $P > 0.05$ )(图1);单音节单音素、单音节三音素、单音节四音素的鸣声频率和持续时间季节间差异均不显著( $P > 0.05$ )。

### 2.2 繁殖季城市与城郊普通鹀鸣声参数的空间差异

对城市林业基地( $n = 18$ )和城郊实验林场( $n = 20$ )繁殖季普通鹀的鸣声参数进行差异分析,发现繁殖季普通鹀的鸣声参数存在显著的空间差异,其中,单音节三音素的鸣声持续时间( $P < 0.001$ )、最低频率( $P = 0.003$ )空间差异显著,城市林业基地普通鹀的鸣声持续时间更长、最低频率更高,而最高频率、主频率( $P > 0.05$ )空间差异不显著(图2);单音节四音素鸣声的持续时间( $P < 0.001$ )、最高频率( $P = 0.017$ )和最低频率( $P = 0.001$ )空间差异显著,城市林业基地普通鹀的鸣声持续时间更长、最低频率更高、最高频率更低,而主频率( $P > 0.05$ )空间差异不显著(图3)。

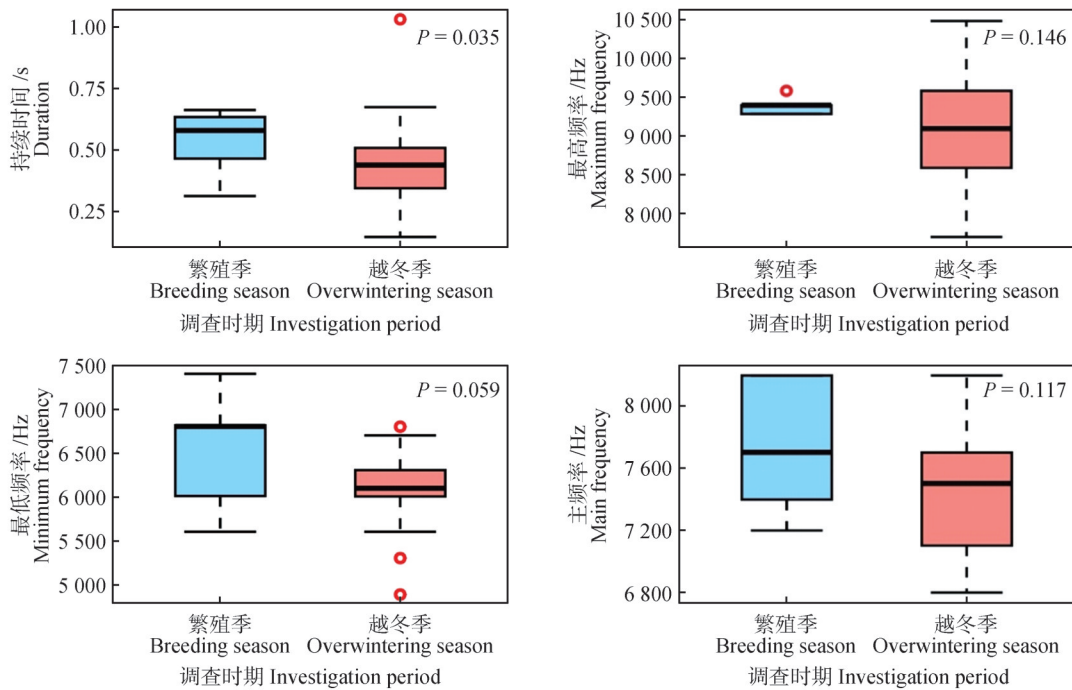


图1 城市林业基地普通鸭单音节双音素鸣声参数季节差异

Figure 1 The seasonal differences in the parameters of monosyllabic disyllabic song of the Eurasian nuthatch in urban forestry base

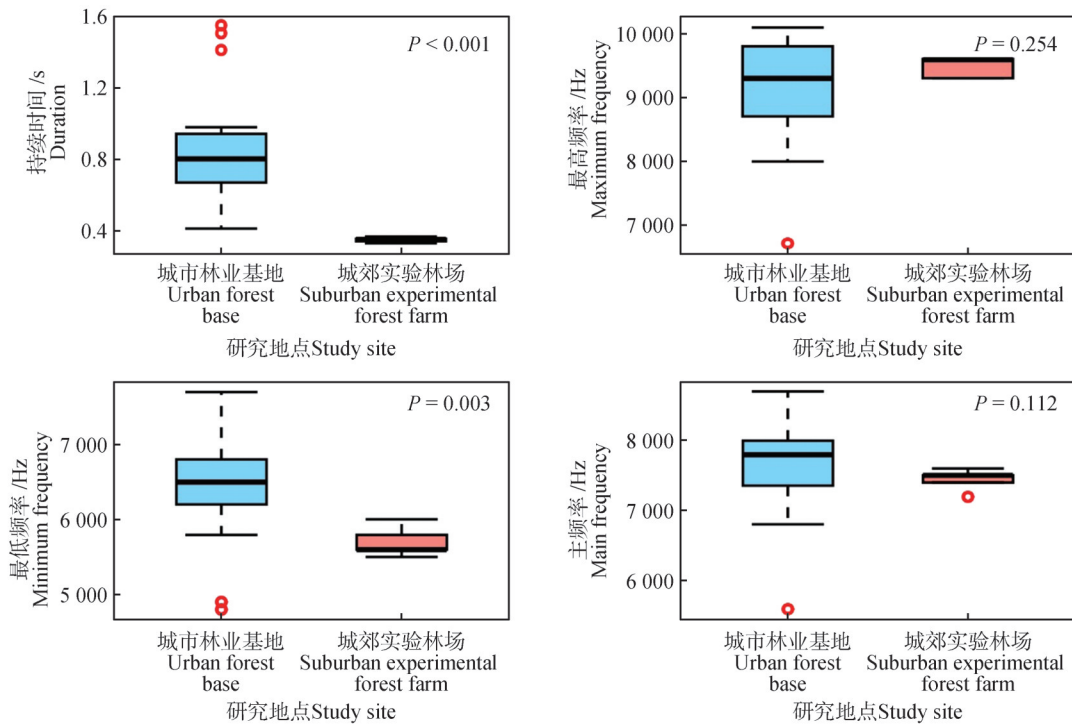


图2 繁殖季普通鸭单音节三音素鸣声参数空间差异

Figure 2 The spatial differences in the parameters of monosyllabic trisyllabic songs of the Eurasian nuthatch during the breeding season

### 2.3 越冬季城市与偏远自然保护区普通鸭鸣声参数的空间差异

对城市林业基地 ( $n = 73$ ) 和偏远自然保护区 ( $n = 20$ ) 越冬季普通鸭的鸣声参数进行差异分析, 发现越冬季普通鸭的鸣声参数中仅单音节双音素的最

低频率 ( $P = 0.007$ ) 存在显著的空间差异, 城市林业基地普通鸭的鸣声最低频率更低 (图4); 单音节单音素、单音节三音素的鸣声频率和持续时间以及单音节双音素的最高频率、主频率和持续时间均未表现出显著的空间差异 ( $P > 0.05$ )。

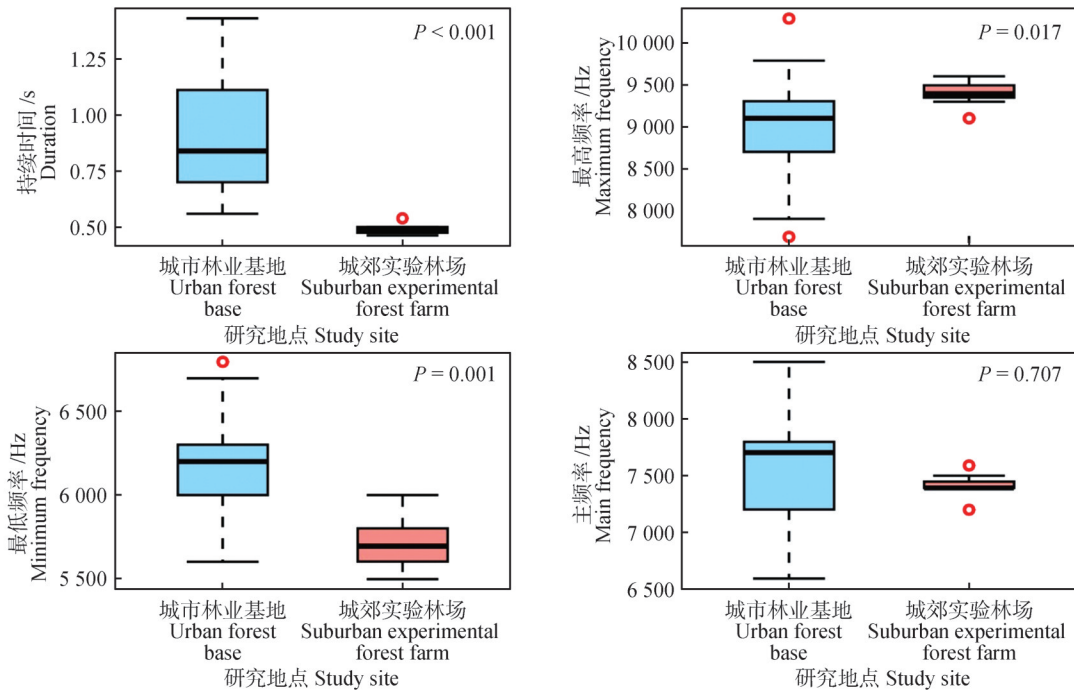


图3 繁殖季普通鸫单音节四音素鸣声参数空间差异

Figure 3 The spatial differences in the parameters of monosyllabic tetrasyllabic songs of the Eurasian nuthatch during the breeding season

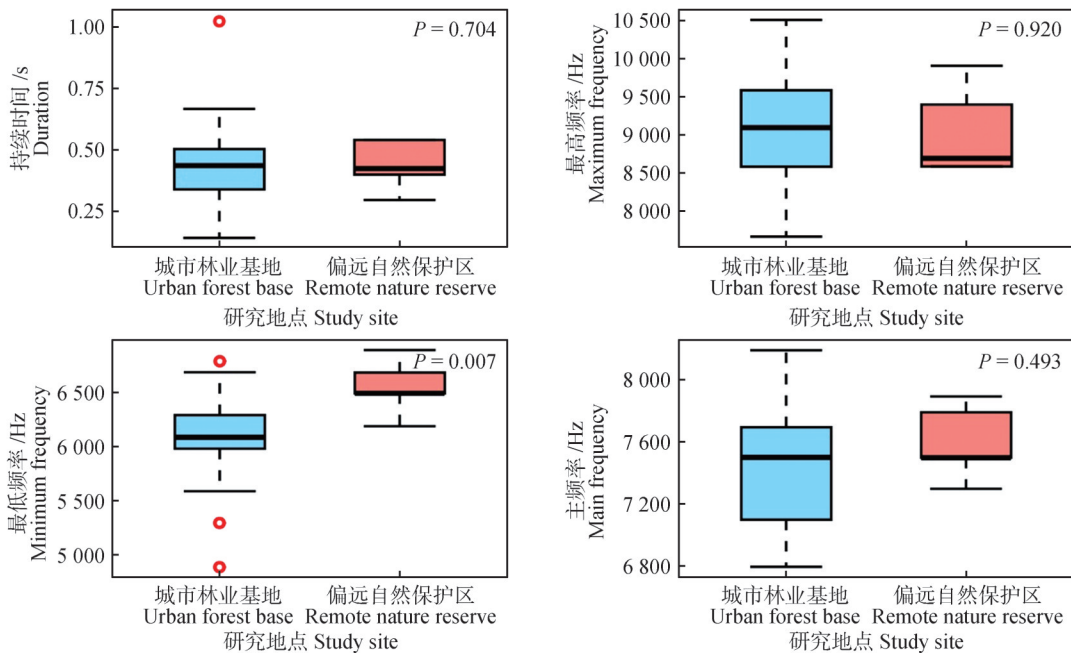


图4 越冬季普通鸫单音节双音素鸣声参数空间差异

Figure 4 The spatial differences in the parameters of monosyllabic disyllabic songs of the Eurasian nuthatch during the overwintering season

### 3 讨论

#### 3.1 城市普通鸫鸣声参数的季节差异

本研究通过对城市林业基地普通鸫繁殖季和越冬季的鸣声参数进行比较分析,发现城市林业基地普通鸫鸣声单音节双音素的鸣唱持续时间季节差异显著,繁殖季的鸣唱持续时间较越冬季更长,但鸣唱最

高频率、最低频率和主频率季节差异均不显著,这与张坤等<sup>[18]</sup>对武汉地区白头鸫(*Pycnonotus sinensis*)鸣唱特征季节差异的研究结果一致。繁殖季鸣唱时间较非繁殖季长的现象在鸟类研究中并不少见,例如对棕顶王森莺<sup>[24]</sup>和卡罗苇鹪鹩(*Thryothorus ludovicianus*)<sup>[29]</sup>的野外观察研究中也类似发现。本研究普通鸫的鸣声频率参数没有明显的季节差异。在大部分

情况下,鸟类繁殖季与非繁殖季的鸣唱频率相似,特殊的鸣唱通常仅出现于繁殖初期,即求偶期间<sup>[27]</sup>,本研究的数据采集时间多在普通鸫的繁殖后期,因此即便是在城市化情境下,城市林业基地的普通鸫繁殖后期与越冬季的鸣声频率参数也没有表现出显著差异。

### 3.2 城市与自然生境普通鸫鸣声参数的空间差异

本研究通过对城市林业基地和城郊实验林场繁殖季普通鸫的鸣声参数进行比较分析,发现繁殖季普通鸫的鸣声参数表现出空间差异,主要体现在最高频率、最低频率和持续时间的变化上。城市林业基地普通鸫的鸣声持续时间更长,最低频率更高、最高频率更低。有研究表明,分布在城市地区的鸟类鸣声参数确实发生了变化,如为了避免城市低频噪声的掩蔽效应,欧亚大山雀(*Parus major*)选择提高其鸣叫的最低频率进行鸣声通讯<sup>[30-31]</sup>。鸟类应对城市环境变化的方式并不完全相同,如在应对城市噪声影响时,橙黄雀鹀(*Sicalis flaveola*)选择缩短鸣叫持续时间<sup>[32]</sup>,而棕脸鹟莺(*Abroscopus albogularis*)则是选择延长鸣叫持续时间、提升高频和频宽<sup>[28]</sup>。另外,城市鸟类可能会减少其鸣叫的频宽,以减少能量消耗,增加其鸣声通讯有效性<sup>[33-35]</sup>,然而,不同研究地点的普通鸫鸣声主频率差异不显著,这与王爱真等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。以上均说明普通鸫应对城市环境变化的鸣声适应策略呈现多态性。

本研究通过对城市林业基地和偏远自然保护区越冬季普通鸫的鸣声参数进行比较分析,发现越冬季普通鸫的鸣声除单音节双音素的最低频率外,其他参数均未表现出显著的空间差异。虽然两采集地的城市化水平存在差异,但城市林业基地始建于1948年,已形成了小面积的针阔叶混交林<sup>[37]</sup>,生境类型与偏远自然保护区相似度较高<sup>[38]</sup>,从而可能导致两采集地普通鸫鸣声差异不显著。李东风等<sup>[39]</sup>研究也发现,虎皮鹦鹉(*Melopsittacus undulatus*)生活在相同环境时鸣声差异不显著,在不同环境时鸣声会有一定差异。此外,也可能是越冬季气温较低,人类活动相对较少,以及食物资源限制等因素,弱化了城市化对鸟类鸣声的影响,或者越冬季普通鸫鸣声差异本就不大。本研究结果可为越冬季鸟类鸣声空间差异的研究提供新的参考。

### 参考文献:

[1] ROE P, EICHINSKI P, FULLER R A, *et al.* The Australian

acoustic observatory [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 12(10): 1802-1808.

- [2] 肖治术, 崔建国, 王代平, 等. 现代生物声学的学科发展趋势及中国机遇[J]. *生物多样性*, 2023, 31(1): 9-31.  
XIAO Z S, CUI J G, WANG D P, *et al.* Interdisciplinary development trends of contemporary bioacoustics and the opportunities for China[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(1): 9-31.
- [3] 郑光美. 鸟类学[M]. 2版. 北京: 北京师范大学出版社, 2012: 424.  
ZHENG G M. *Ornithology*[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Normal University Press, 2012: 424.
- [4] 赵婷婷. 环境和个体因素对杂色山雀鸣声特征的影响[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2017.  
ZHAO T T. The impacts of environmental and intrinsic factors on the song traits of *Parus varius* [D]. Shenyang: Liaoning University, 2017.
- [5] 边琦, 王成, 程贺, 等. 声学指数在城市森林鸟类多样性评估中的应用[J]. *生物多样性*, 2023, 31(1): 167-178.  
BIAN Q, WANG C, CHENG H, *et al.* Exploring the application of acoustic indices in the assessment of bird diversity in urban forests[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(1): 167-178.
- [6] DE KORT S R, ELDERMIRE E R B, CRAMER E R A, *et al.* The deterrent effect of bird song in territory defense [J]. *Behavioral Ecology*, 2009, 20(1): 200-206.
- [7] SEARCY W A, ANDERSON R C, NOWICKI S. Bird song as a signal of aggressive intent [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2006, 60(2): 234-241.
- [8] PUSWAL S M, MEI J J, LIU F L. Effects of temperature and season on birds' dawn singing behavior in a forest of eastern China [J]. *Journal of Ornithology*, 2021, 162(2): 447-459.
- [9] ARROW K, BOLIN B, COSTANZA R, *et al.* Economic growth, carrying capacity, and the environment [J]. *Ecological Economics*, 1995, 15(2): 91-95.
- [10] 史永姣. 中国城市化进程中植被覆盖的时空演变及影响研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.  
SHI Y J. Temporal and spatial evolution and influence of vegetation cover in the process of urbanization in China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [11] 谢世林, 曹垒, 逯非, 等. 鸟类对城市化的适应[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6696-6707.  
XIE S L, CAO L, LU F, *et al.* Adaptation of birds to urbanization [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6696-6707.
- [12] 赵伊琳, 王成, 白梓彤, 等. 城市化鸟类群落变化及其与城市植被的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 479-489.  
ZHAO Y L, WANG C, BAI Z T, *et al.* Changes of bird community under urbanization and its relationship with urban vegetation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 479-489.
- [13] 郝庆丽, 任卓菲, 刘刚, 等. 光和噪声污染胁迫下城市生态斑块鸟类风险评价[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2186-2201.  
HAO Q L, REN Z F, LIU G, *et al.* Bird risk assessment in urban ecological patch under light pollution and noise pollution stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2186-2201.
- [14] GIL D, HONARMAND M, PASCUAL J, *et al.* Birds living near

- airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise[J]. *Behavioral Ecology*, 2015, 26(2): 435-443.
- [15] MEILLÈRE A, BRISCHOUX F, ANGELIER F. Impact of chronic noise exposure on antipredator behavior: an experiment in breeding house sparrows[J]. *Behavioral Ecology*, 2015, 26(2): 569-577.
- [16] 颜尉珂, 雷宇, 王磊, 等. 人为引入和气候变化对灰喜鹊未来分布的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(24): 10387-10398.  
YAN W K, LEI Y, WANG L, *et al.* Effects of artificial introduction and climate change on the future distribution of *Cyanopica cyanus* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10387-10398.
- [17] LIU J, KANG J, BEHM H. Birdsong as an element of the urban sound environment: a case study concerning the area of Warmünde in Germany[J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2014, 100(3): 458-466.
- [18] 张坤, 杨晓菁, 赵世东, 等. 白头鹀鸣唱特征的季节差异分析[J]. *动物学杂志*, 2023, 58(2): 161-172.  
ZHANG K, YANG X J, ZHAO S D, *et al.* Seasonal variations in the song characteristics of light-vented bulbuls *Pycnonotus sinensis*[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2023, 58(2): 161-172.
- [19] 雷富民, 王爱真, 尹祚华, 等. 鸟类鸣唱曲目与复杂性[J]. *动物分类学报*, 2004, 29(3): 406-414.  
LEI F M, WANG A Z, YIN Z H, *et al.* Bird song repertoire and complexity[J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2004, 29(3): 406-414.
- [20] KONISHI M. Birdsong: from behavior to neuron[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 1985, 8: 125-170.
- [21] EENS M, PINXTEN R. Female song for mate attraction: an overlooked phenomenon? [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(8): 322-323.
- [22] AUBIN T, MATHEVON N. Coding strategies in vertebrate acoustic communication[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 276-277.
- [23] MORAN I G, LUKIANCHUK K C, DOUCET S M, *et al.* Diel and seasonal patterns of variation in the singing behaviour of savannah sparrows (*Passerculus sandwichensis*) [J]. *Avian Research*, 2019, 10: 26.
- [24] DEMKO A D, MENNILL D J. Rufous-capped warblers *Basileuterus rufifrons* show seasonal, temporal and annual variation in song use[J]. *Ibis*, 2019, 161(3): 481-494.
- [25] 王艳雯, 王佳宇, 苗浩宇, 等. 城市噪声使树麻雀鸣唱的最低频率升高[J]. *动物学杂志*, 2020, 55(4): 440-448.  
WANG Y W, WANG J Y, MIAO H Y, *et al.* Urban noise increases the minimum frequency of tree sparrow (*Passer montanus*) songs[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2020, 55(4): 440-448.
- [26] ALCOCK J. *Animal behavior: an evolutionary approach* [M]. 6th ed. Sunderland: Sinauer Associates, 1998: 254; 263.
- [27] 夏长君. 普通鹀(*Sitta europaea*)鸣声声谱特征及生物学意义分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.  
XIA C J. Birdsong spectrographic and biological meaning analysis on nuthatch (*Sitta europaea*) [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- [28] 徐康宁, 李树然, 赵成, 等. 城市化噪音对棕脸鹟莺鸣声的影响[J]. *宜宾学院学报*, 2023, 23(6): 95-98; 108.  
XU K N, LI S R, ZHAO C, *et al.* Effect of urbanization noise on the song of rufous-faced warbler[J]. *Journal of Yibin University*, 2023, 23(6): 95-98; 108.
- [29] KEATING H R, REICHARD D G. Seasonal song variation in male Carolina wrens (*Thryothorus ludovicianus*) [J]. *The Wilson Journal of Ornithology*, 2021, 133(2): 365-371.
- [30] LANGEMANN U, GAUGER B, KLUMP G M. Auditory sensitivity in the great tit: perception of signals in the presence and absence of noise[J]. *Animal Behaviour*, 1998, 56(3): 763-769.
- [31] FRANCIS C D, ORTEGA C P, CRUZ A. Different behavioural responses to anthropogenic noise by two closely related passerine birds[J]. *Biology Letters*, 2011, 7(6): 850-852.
- [32] LEÓN E, BELTZER A, QUIROGA M. El jilguero dorado (*Sicalis flaveola*) modifica la estructura de sus vocalizaciones para adaptarse a hábitats urbanos[J]. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 2014, 85(2): 546-552.
- [33] 郝泽周, 张承云, 李乐, 等. 城市鸟类多样性被动声学监测与评价技术应用[J]. *生物多样性*, 2024, 32(10): 24123.  
HAO Z Z, ZHANG C Y, LI L, *et al.* Applications of passive acoustic monitoring and evaluation in urban bird research [J]. *Biodiversity Science*, 2024, 32(10): 24123.
- [34] MOCKFORD E J, MARSHALL R C. Effects of urban noise on song and response behaviour in great tits[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 276(1669): 2979-2985.
- [35] CHO D H, LEE J H, JANG J U, *et al.* The adaptation and fitness costs to urban noise in the calls of the tree sparrow (*Passer montanus*) [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 5359.
- [36] 王爱真, 吴君, 王稳, 等. 金翅雀对城市噪音的非预期鸣唱响应模式[J]. *四川动物*, 2022, 41(2): 162-167.  
WANG A Z, WU J, WANG W, *et al.* Unexpected song response pattern of grey-capped greenfinches to urban noise[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2022, 41(2): 162-167.
- [37] 孙元, 兰晓萍, 邵红涛, 等. 东北林业大学城市林业示范基地弹尾虫水平分布研究[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2013, 4(3): 51-54.  
SUN Y, LAN X P, SHAO H T, *et al.* Horizontal distribution of Collembola in urban forest foundation of Northeast Forest University [J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2013, 4(3): 51-54.
- [38] 于美辰, 陈俊达, 司雨蕙, 等. 阔叶红松林中黑啄木鸟的取食生境偏好[J]. *野生动物学报*, 2024, 45(2): 328-337.  
YU M C, CHEN J D, SI Y H, *et al.* Foraging habitat preference of black woodpeckers in broad-leaved Korean pine forests [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2024, 45(2): 328-337.
- [39] 李东风, 张丹荔. 野生虎皮鹦鹉与家养虎皮鹦鹉鸣声比较和声谱分析[J]. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(2): 214-221.  
LI D F, ZHANG D L. Comparison and sound spectrum analysis of the calls of wild budgerigars and domestic budgerigars [J]. *Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 44(2): 214-221.