白头鹎鸣唱特征的晨昏比较分析

刘源　孙浩轩　杨晓菁*

中国地质大学（武汉）环境学院　武汉　430078

摘要：鸟类的鸣唱具有保卫领域和吸引配偶的功能。很多鸟类都具有清晨和黄昏的鸣唱高峰，但大部分的鸟类鸣声研究通常只关注早晨或上午的鸣唱，而非黄昏鸣唱。因为鸟类的鸣声特征通常会受多种内、外因素的影响，一天之中晨、昏时分的环境条件变化可能导致同一物种早晨与黄昏的鸣唱声学特征、质量性状等存在差异。但这一现象目前仅在极为有限的物种中得到验证，对于大部分具有晨昏鸣唱行为的鸟类，这一点尚未可知。本研究以一种在早晨和黄昏都具有显著鸣唱行为的城市常见小型鸣禽——白头鹎（*Pycnonotus sinensis*）为研究对象，比较其早晨与黄昏的鸣唱特征差异。于 2019 年 4 月中旬至 5 月中旬，在武汉市洪山区内 15 个样点进行观察和录音。共测量白头鹎的早晨鸣唱 302 句、黄昏鸣唱 268 句。分析其鸣唱声学特征（包括频率参数、时间参数和能量参数）、质量性状参数及各参数的变异系数（体现鸣唱稳定程度），同时分析白头鹎鸣唱总体的类型（包括音节类型、鸣唱型和鸣唱型变异类型）丰富度、出现率以及鸣唱变异度等性状表现，按照领域进行晨、昏配对比较。结果显示，没有发现研究区内白头鹎鸣唱的上述各项特征参数存在晨昏显著差异，说明白头鹎在早晨和黄昏这两个时间段的鸣唱特征值水平、鸣唱稳定状况和总体质量性状表现都基本一致，因此认为研究区域内白头鹎的晨、昏鸣唱不存在特征差异。推测原因是同一生境内环境因子的晨昏变化幅度不足以引起白头鹎鸣唱特征上的显著变化，可能存在社会因素掩盖了这些环境因子的影响。本研究增补了白头鹎鸣声研究领域的空白，为理解鸟类鸣声的动态变化规律提供了新的参考。

关键词：白头鹎；鸟类鸣唱；声学特征；晨鸣；黄昏鸣唱

中图分类号：Q958　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**0250-3263（2026）01-77-14

Comparisons on the morning and dusk song characteristics of Light-vented Bulbuls (*Pycnonotus sinensis*)

LIU Yuan　SUN Hao-Xuan　YANG Xiao-Jing*

School of Environmental Studies, *China University of Geosciences*, *Wuhan*　430078, *China*

Abstract: [Objectives] Bird songs serve the functions of territory defense and mate attraction. Many bird species exhibit high singing activity both in the early morning and at dusk. However, most studies on bird songs typically focus on morning vocalizations rather than those at dusk. Since bird song characteristics are

基金项目　国家自然科学基金项目（No. 31000964）；

* 通信作者，E-mail: jogxoyang@cug.edu.cn；

第一作者介绍　刘源，男，硕士研究生；研究方向：鸟类鸣声行为生态；E-mail: 939798384@qq.com。

收稿日期：2025-01-20，修回日期：2025-05-23　　DOI: 10.13859/j.cjz.202625012　　CSTR: 32109.14.cjz.202625012

typically influenced by a range of internal and external factors, the different environmental conditions between morning and dusk may lead to variations in songs within the same species, such as differences in acoustic parameters or qualitative characteristics. However, such differences have only been verified in a limited number of species, and whether this phenomenon exists in most bird species with bimodal singing patterns remains unclear. In this study, we investigated the songs of Light-vented Bulbuls (*Pycnonotus sinensis*), a common small urban songbird with prominent singing behaviors during both morning and dusk, aiming to compare the song differences between these two periods and analyze the potential underlying causes. **[Methods]** Recordings of Light-vented Bulbul songs were collected between mid-April and mid-May 2019. Sampling was conducted on clear days during two specific time periods: morning (6:00 ~ 9:00) and dusk (16:00 ~ 19:00). The study was carried out in Hongshan District, Wuhan, where songs were recorded from 15 different territories, each separated by at least 1 km (Fig. 1). A total of 302 songs were recorded during the morning, while 268 were recorded at dusk. For each male's song, the following parameters were measured and calculated: 1) frequency parameters: maximum frequency, minimum frequency, frequency range, and peak frequency; 2) temporal parameters: song duration and between-song interval; 3) energy parameters: aggregate entropy and average entropy; 4) qualitative characteristics: number of syllables per song and number of syllable types per song. Additionally, we examined syllable type occurrence rate, song type occurrence rate, song type variants occurrence rate, and song type variability. Spectrograms for a song type example and its song type variants are shown in Fig. 2. To examine whether there were differences in the song characteristics of Light-vented Bulbuls between morning and dusk, we calculated the mean values and coefficients of variation (CVs) for each acoustic parameter of each individual. A repeated measures multivariate analysis of variance (repeated measures MANOVA) was conducted to compare the overall song parameters of Light-vented Bulbuls between morning and dusk. The syllable type occurrence rate, song type occurrence rate, song type variants occurrence rate, and song type variability were compared between morning and dusk by the Wilcoxon signed-rank test. All statistical analyses were performed in IBM SPSS Statistics for Windows, version 22.0 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA). **[Results]** There were no significant overall differences in song characteristics between the two periods (repeated measures MANOVA, Pillai's Trace, $F_{9,6} = 1.931$, $P > 0.05$). Similarly, no significant overall differences were found in the CVs of these parameters between morning and dusk (Pillai's Trace, $F_{10,5} = 1.610$, $P > 0.05$). Song parameters and their CVs between morning and dusk are presented in Tables 1 and 2. Each Light-vented Bulbul produced an average of 5.0 ± 1.4 syllable types, 1.3 ± 0.5 song types, and 3.2 ± 1.4 variants per song type during morning singing. During dusk, the averages were 5.1 ± 1.1 syllable types, 1.1 ± 0.4 song types, and 3.2 ± 2.1 variants per song type. At the same recording sites, individuals used the same song types in both morning and dusk periods (Fig. 3). There were no significant differences between morning and dusk in syllable type occurrence rate (Wilcoxon signed rank test, $Z_{14} = -0.738$, $P = 0.480$), song type occurrence rate ($Z_{14} = -0.057$, $P = 0.978$), song type variants occurrence rate ($Z_{14} = -0.966$, $P = 0.359$), or song type variability ($Z_{14} = -0.255$, $P = 0.832$). **[Conclusion]** There are no significant differences in the aforementioned acoustic parameters of Light-vented Bulbul's songs in the study area, suggesting that the characteristics, stability, and overall qualitative characteristics of the birds' songs remain consistent between the morning and dusk periods. It is hypothesized that the diurnal variations in environmental factors within the same habitat is insufficient to cause significant changes in the song characteristics of Light-vented Bulbuls, and social factors may potentially mask the

effects of these environmental changes. Therefore, it can be concluded that there are no significant difference between the morning and dusk songs of Light-vented Bulbuls in the study region. This study contributes to filling the gap in the research on the vocal behavior of Light-vented Bulbuls and provides new insights into the dynamic patterns of bird vocalizations.

Key words: *Pycnonotus sinensis*; Bird song; Song characteristic; Morning song; Dusk song

鸟类的鸣声是其主要的通讯行为之一，鸟类的鸣声可以分为简短的鸣叫（call）和复杂婉转的鸣唱（song）。鸟类的鸣唱具有保卫领域、吸引配偶等功能（Lampe and Espmark 1994，雷富民等 2003，Marler et al. 2004，Catchpole and Slater 2008）。处于繁殖季节的大多数雀形目鸟类及部分非雀形目鸟类，其一天中鸣唱行为最频繁的时段往往出现在清晨和黄昏（Armstrong 1963，Cuthill and MacDonald 1990，Marler et al. 2004，Catchpole and Slater 2008，Aubin and Mathevon 2020）。清晨其鸣唱达到高峰，随后在接下来的一段时间进入平静期，并在黄昏时出现第二次鸣唱行为高峰（Hutchinson et al. 1993，Catchpole and Slater 2008，Aubin and Mathevon 2020，Marín-Gómez and MacGregor-Fors 2021，白皓天等 2023）。这两个时期的鸣唱行为分别被称为黎明合唱（晨鸣，dawn chorus）和黄昏合唱（dusk chorus）。有研究对于鸟类为什么多集中于清晨和黄昏鸣唱给出了解释，如 Henwood 和 Fabrick（1979）指出清晨时环境噪声较低，声音传播效果最佳，有利于鸣唱的声信号传递。Marler 等（2004）指出清晨和黄昏的光线条件较暗，不利于依靠视觉识别物种和觅食，却有利于进行声学通讯。

对于鸟类在晨、昏的鸣唱现象，目前相关研究多关注于鸣唱的昼夜节律及影响因素。例如 Amrhein 等（2008）发现欧亚大山雀（*Parus major*）和青山雀（*Cyanistes caeruleus*）在日出前不久时的鸣声行为比其他时段都要频繁。郝佩佩和张雁云（2020）基于自动录音技术探究了 3 种雉类的鸣叫特征和节律，其中褐马鸡（*Crossoptilon mantchuricum*）和环颈雉（*Phasianus colchicus*）有清晨和黄昏两个鸣叫高峰期，勺鸡（*Pucrasia macrolopha*）则只存在清晨鸣叫高峰。Puswal 等（2021）研究了 4 种鸟类的昼夜鸣唱模式，包括淡尾鹪莺（*Phylloscopus soror*）、棕颈钩嘴鹛（*Pomatorhinus ruficolli*）、强脚树莺（*Horornis fortipes*）和画眉（*Garrulax canorus*），发现这 4 种鸟类的鸣唱活动都在清晨达到高峰，晨鸣开始时间大约在日出前 20 min。鸟类自身的生态习性、繁殖状态和激素水平等是影响其鸣声节律的主要因素（Schlinger and Brenowitz 2002，Harding 2004）。稀树草鹀（*Passerculus sandwichensis*）在繁殖阶段到来之前，雄性鸣唱高峰在清晨。当进入到繁殖阶段后，其晨鸣减少，雄性鸣唱变为在黄昏时达到峰值（Moran et al. 2019）。处于繁殖阶段前的青山雀，其睾酮水平与晨鸣的频次呈正相关（Foerster et al. 2002）。关于斑胸草雀（*Taeniopygia guttata*）的研究表明褪黑激素会影响其鸣唱行为的昼夜节律（Derégnaucourt et al. 2012）。捕食风险也会影响鸟类的鸣唱节律行为，Schmidt 等（2013）发现在短暂播放猫头鹰叫声后，棕夜鸫（*Catharus fuscescens*）在黄昏的鸣唱数量会减少并更早停止鸣唱。

上述鸣唱昼夜节律关注的是鸟类鸣唱活动的强度，而鸟类鸣唱本身的声学特征是否也存在类似昼夜节律的晨昏变化？现有研究已表明，鸣唱的声学特征，如频率、时间特征、声音强度等会受到多种内因如体重、喙大小及形状（Seddon 2005，Sagar et al. 2024）、激素水平等（Cynx et al. 2005）和外因，如物种间相互作用（Sorjonen 1986）、生境特征、栖息地类型（Sorjonen 1986，Seddon 2005，Bueno-Enciso et al. 2016，Sagar et al. 2024）、气候（Schäfer et al.

2017）、城市化水平（Slabbekoorn and Peet 2003，Brumm 2004，Schäfer et al. 2017，Derryberry et al. 2020）等方面的影响。例如，通常体型越大的鸟类鸣声频率相对越低（Sagar et al. 2024）。植被遮蔽和环境噪声会阻碍鸟类间的声音交流，影响鸟类的鸣声特征（Slabbekoorn and Peet 2003，Seddon 2005，Slabbekoorn and den Boer-Visser 2006）。而天气因素如温度、湿度、气压等也会对鸟类鸣声的传播和声学特征产生显著影响。例如 Schäfer 等（2017）发现，较低的气压与青山雀更窄的鸣唱频率范围有关，当空气湿度越高时，欧亚大山雀鸣唱中特定音素的持续时间越长，欧乌鸫（*Turdus merula*）的鸣唱频率范围则会随着最低土壤温度的升高而变宽。短时的高温环境可以使斑胸草雀鸣唱音节的持续时间缩短，鸣唱语句的声学结构稳定性也会发生变化（Coomes and Derryberry 2021）。一项涵盖了 578 种雀形目鸟类的研究发现，栖息于较凉爽环境中的鸟类物种其鸣唱的频率相对更高（Pearse et al. 2018）。这些研究都表明，环境温度是影响鸟类鸣唱结构和声学特征的潜在重要因素。

鸟类鸣唱需要较高的能量消耗，相较于未鸣唱的停栖状态，其耗氧量和代谢率都会提高（Oberweger et al. 2001，Ward et al. 2003）。较温暖的环境有利于鸟类节省能量来维持体温（Zheng et al. 2013），从而才可为鸣唱投入更多的能量。较高的气压意味着大气中的氧气分压越高，从而也更有利于鸟类在鸣唱中获取和消耗氧气（Schäfer et al. 2017）。而鸣唱中更大的声强、更宽的频率范围、更复杂的鸣唱类型往往意味着更高的能量和氧气消耗（Garamszegi et al. 2006，Schäfer et al. 2017）。温度和湿度还会影响声音的传播，例如较高的温、湿度可以延长特定频段声波的混响时间（Gomez-Augustina et al. 2014），从而表现出特定鸣唱单元持续时间的延长，在鸟类中这更有利于鸣声信号的传播和接收（Slabbekoorn et al. 2002）。已有研究表明，在无雨天气条件下，一个地区 24 h 内环境温度、湿度的昼夜变化规律明显（刘小凡 2015）。例如北京市区年均大气相对湿度在一天中的最高值一般出现于早上 6 点，最低值出现于下午 3 点；而年均气温在一天中的最高值和最低值分布差不多正好与湿度相反（Yang et al. 2013，2017）。可见一天之中清晨和黄昏的这些自然环境因子存在着明显变化，这可能导致鸟类晨、昏鸣唱的声学特征乃至其他性状表现存在差异。但这一现象目前仅在极为有限的物种中得到验证，对于大部分具有晨、昏鸣唱行为的鸟类，这一点尚未可知（Schmidt et al. 2013，Bustamante and Garitano-Zavala 2024）。为验证这个问题，本研究以分布于武汉市区的小型鸣禽白头鹎（*Pycnonotus sinensis*）为研究对象，探究其鸣唱在声学特征及其他鸣唱性状上是否存在晨、昏差异。

白头鹎隶属鸟纲雀形目（Passeriformes）鹎科（Pycnonotidae）鹎属，常活动于村庄及城市的公园和绿地中，在本研究区域内极为常见。白头鹎的繁殖季集中在每年的 3～7 月，其繁殖季的鸣唱行为极为显著，成年雄性个体通过鸣唱来宣誓领域和吸引配偶（姜仕仁等 1996a，杨晓菁和雷富民 2008，刘小如等 2010，林峤涵等 2024）。前人关于白头鹎的鸣声研究已覆盖了其鸣声特征、结构、功能及生物学意义（姜仕仁等 1996a）、鸣声地理变异（姜仕仁等 1996b，丁平和姜仕仁 2005，杨晓菁和雷富民 2008，Xing et al. 2013）、鸣唱型功能（林峤涵等 2024）、城市化及噪声对白头鹎鸣声行为的影响（韩轶才等 2004，Hao et al. 2024）等多个不同方面。本研究通过前期持续的观察发现，白头鹎在黄昏会出现鸣唱行为的高峰，表现出和晨鸣类似的领域鸣唱行为。张坤等（2023）已证明了白头鹎的鸣唱特征在季节的时间尺度上存在差异，白头鹎春季单个鸣唱的持续时间较秋季更长，鸣唱音节数更多，其鸣唱的时程特征相对其他鸣声特征更具季节可塑性。那么在更短的时间尺度上，例如一日的晨、昏之间

其鸣唱特征是否也会发生类似变化？基于上述问题，本研究采集武汉市区相同领域内白头鹎繁殖季早晨和黄昏的自然鸣唱，测量并比较白头鹎晨、昏鸣唱的频率、时间、能量和类型等特征参数，探究白头鹎鸣唱的晨、昏差异，将有助于更好地理解鸟类鸣声的动态变化规律及其原因。

1　研究方法

1.1　研究区域概况

武汉市地处中国中部、长江与汉江交汇处，地理位置为 113°41′ ~ 115°05′ E，29°58′ ~ 31°22′ N。气候类型为亚热带季风性气候，植被类型以亚热带常绿阔叶林与落叶阔叶林为主。本研究采样区域包括武汉市区内公园、风景区、公路边绿化带、居民小区以及高校校园等不同生境。本研究基于 Meteomanz 全球气象数据库（World Meteorological Organization，WMO，http://www.meteomanz.com）获得了对应录音日期（2019 年 4 月 15 日至 5 月 15 日）武汉市大气温度、相对湿度和气压每日逐 3 h 的气象数据，数据显示，在本研究录音期间武汉市早晨（5:00 ~ 8:00 时）的平均气温范围为 15.9 ~ 19.0 ℃，平均相对湿度范围为 77.7% ~ 93.4%，平均气压范围为 1 011.4 ~ 1 012.9 hPa（hPa 为大气压单位百帕，1 hPa = 100 N/m^2）；黄昏（17:00 ~ 20:00 时）的平均气温范围为 19.5 ~ 23.1 ℃，平均相对湿度范围为 61.3% ~ 77.8%，平均气压范围为 1 010.4 ~ 1 011.5 hPa。数据显示研究期间武汉市区的大气温度和湿度在早晨和黄昏处于不同的水平范围。

1.2　录音时间、地点和方法

本研究中的白头鹎鸣唱录音采集于 2019 年 4 月中旬至 5 月中旬，录音工作于天气晴好无风的日期进行。早晨、黄昏鸣唱的具体采样时间段分别为上午 6:00 ~ 9:00 时和下午 16:00 ~ 19:00 时。采样地点位于武汉市洪山区，共采集了 15 个领域的白头鹎晨、昏鸣唱，这些领域之间相隔至少 1 km（图 1）。其中早晨鸣唱共收集到 302 句，黄昏鸣唱收集到 268 句。

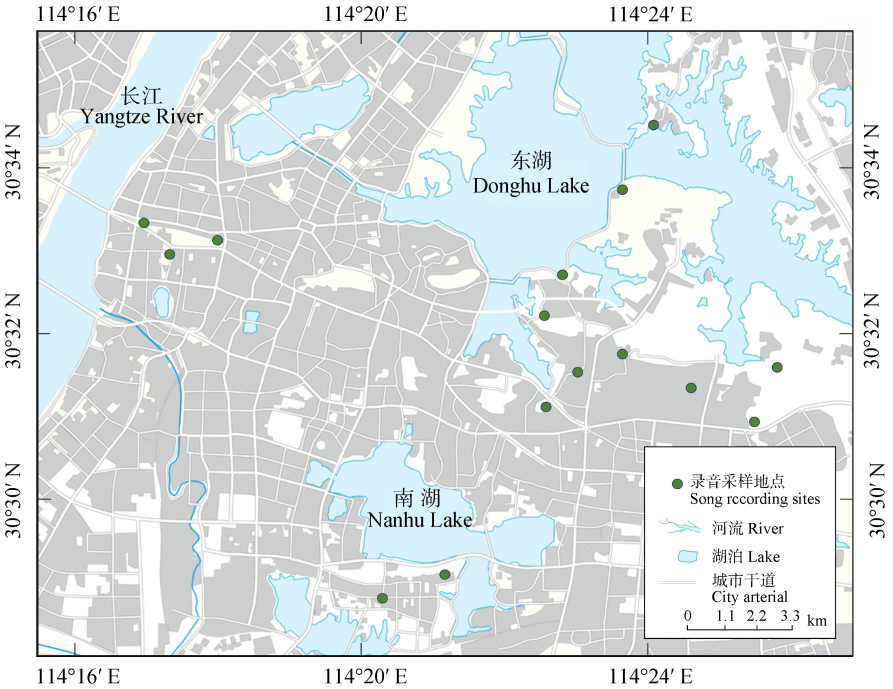

图 1　武汉白头鹎晨、昏鸣唱录音地点示意图

Fig. 1　Locations of morning and dusk song recording sites of *Pycnonotus sinensis* in Wuhan

底图审图号：鄂 S（2025）08 号，底图未修改。The review number of the base map: ES(2025)008, the base map had not been modified.

当白头鹎进入到繁殖季，它们会通过鸣唱来宣示领域，白头鹎胆大且不畏人，在鸣唱时多立于小乔木和建筑物的顶端，易于近距离观察和记录（王维禹等 2005，张坤等 2023）。白头鹎雄鸟具有领域性，且繁殖期内一般不变更其占据的领域（林峤涵等 2024）。在正式录音开始之前，实验人员对目标白头鹎鸣唱时所反复切换的栖息位置进行持续观察以确定其领域。本研究选择单独活动的个体以尽可能避免来自其他个体鸣唱的干扰。录音过程中会持续对个体进行观察，直到个体飞走或停止鸣唱，确保一段录音文件来自同一个体。每次录音结束后记录录音时间，并在 Google Map 进行录音地点标记（张坤等 2023，林峤涵等 2024）。本实验早晨、黄昏的录音地点均为相同领域，以便进行晨、昏间的配对比较。

本研究录音时所使用的观察设备为 Bosma 8 × 42 mm 双筒望远镜、图像记录设备为 Canon 7D 单反相机，录音设备为 Tascam DR 100 mkII（日本 TASCAM）录音机配 Sennheiser ME66 定向话筒（德国 SENNHEISER）。本研究的实验过程如下：录音工作开始时，一名测量人员手持录音设备与定向话筒，在距离目标白头鹎个体直线距离约 5 ~ 15 m 的位置站定，定向话筒始终指向录音个体。另一名实验人员使用望远镜和相机对录音个体进行持续观察与记录直至录音结束。录音文件格式选择波形（WAV）格式，采样率（sampling rate）44.1 kHz、采样精度（sample size）16 bits。

1.3　鸣唱测量方法

1.3.1　音节、鸣唱的划分　本研究所使用的音节、鸣唱和鸣唱型等鸣声术语的定义及划分参考杨晓菁等（2008）。白头鹎的鸣唱由多个音节组成，每个音节由一个或多个音素构成。多个音素常以特定的方式共同出现，即以音素复合体的方式来构成音节（杨晓菁和雷富民 2008）。由于很多音素并不独立出现于白头鹎的鸣唱中，而是多以复合体的形式存在，因此以音节作为白头鹎鸣唱的基本组成单位比较合适。

对全部录音样本的声谱图进行目测，通过比较各音节的形状、组成及其在频率和时间量度上的分布来区分音节类型。不同音节类型之间的差异应是显著和不连续的。如果变异是连续性的，则视为同一个音节类型，否则视为不同的音节类型（杨晓菁和雷富民 2008）。根据各个鸣唱不同的音节组成及音节排列顺序，采用 75%原则（Tracy and Baker 1999，Baker et al. 2000），即两个鸣唱间共享 75%以上音节类型且共享的音节顺序相同的视为同种鸣唱型。白头鹎的鸣唱在其基本鸣唱型的基础上会产生多种变异型，变异的方式包括 1 个或多个音节的增加、删减、替换、重复或不同基本鸣唱型的拼接组合。由不同基本鸣唱型组合而成的杂合型不视为单独的鸣唱型（杨晓菁等 2008）。

1.3.2　鸣唱的特征参数及其测量方法　本研究鸣唱测量方法参考林峤涵等（2024）。测量的基本单位为鸣唱，各鸣唱参数的测量具体操作如下：本研究的声学分析基于 Raven Pro 1.6.1（Ithaca, NY: Cornell Lab of Ornithology），将白头鹎鸣唱录音文件转换为声谱图（spectrograms）。声谱图参数设置为：窗口类型 Hann，窗口分辨率 1 024，重叠率（overlap）50%。以白头鹎的单个鸣唱为基本测量单位，在声谱图窗口中逐个框定录音文件中的全部鸣唱，框定的上下范围对应该鸣唱的最高、最低频率，框定的左右范围对应该鸣唱的起止时间，进而获取以下参数：1）频率参数：最高频率（maximum frequency）、最低频率（minimum frequency）、频率范围（frequency range）和峰频率（peak frequency）；2）时间参数：鸣唱持续时间（song duration）和鸣唱间隔（between-song interval）；3）能量参数：聚合熵（aggregate entropy）和平均熵（average entropy）。熵反映的是鸣唱能量在各频率上分布的无序性，熵值越大说明鸣唱能量分布越杂乱；4）质量性状参数：鸣唱音节数（No. syllables per song）和鸣唱音节类型数（No.

syllable types per song），这两个参数需人工进行统计并记录。为了解白头鹎鸣唱的各项特征参数的变异程度是否存在晨、昏间的差异，本研究还计算了每只白头鹎上述各项鸣唱参数的变异系数（coefficient of variation，CV），即每只个体各鸣唱参数值的标准差与其均值的比值。

除了分析鸣唱本身的各项特征参数，为比较所采集白头鹎晨、昏间的总体鸣唱质量性状表现，包括音节类型、鸣唱型丰富度、出现频率及其变异程度等，本研究还统计了每只白头鹎的鸣唱音节类型出现率（syllable type occurrence rate，即每只个体录音样本中总鸣唱音节类型数与鸣唱个数的比值）、鸣唱型出现率（song type occurrence rate，即每只个体录音样本中鸣唱型数与鸣唱个数的比值）、鸣唱型变异型出现率（song type variants occurrence rate，即每只个体录音样本中鸣唱型变异型数与鸣唱个数的比值）、鸣唱型变异度（song type variability，即每只个体录音样本中的鸣唱型变异型数与鸣唱型数的比值，衡量每种鸣唱型的变异大小）。本研究测量的部分鸣唱型、鸣唱型变异型及示例声谱图见图 2。

1.4　数据统计

为检验白头鹎晨、昏的鸣唱特征是否存在差异，在获取每只白头鹎个体各项鸣唱特征参数均值及其变异系数之后，先采用重复测量多元方差分析（repeated measures multivariate analysis of variance，repeated measures MANOVA）进行晨、昏的组间总体比较。对鸣唱总体质量性状表现参数：鸣唱音节类型出现率、鸣唱型出现率、鸣唱型变异型出现率、鸣唱型变异度进行配对样本非参数检验（Wilcoxon signed rank test，均为非正态分布）。统计软件为 IBM SPSS Statistics for Windows, version 22.0（IBM Corp., Armonk, N.Y., USA）。所测量的各项鸣唱参数及其变异系数以平均值 ± 标准差（mean ± SD）表示。所有统计检验均选用精确选项的 P 值（Exact P-value），显著性水平为 $P < 0.05$。

2　结果

对白头鹎晨、昏的鸣唱样本测量参数进行组间总体比较，晨、昏间的鸣唱特征总体上不存在显著差异（repeated measures MANOVA，Pillai's Trace，$F_{9,6} = 1.931$，$P > 0.05$）。晨、昏间鸣唱参数的变异系数总体上也不存在显著差异（repeated measures MANOVA，Pillai's Trace，$F_{10,5} = 1.610$，$P > 0.05$）。白头鹎晨、昏间各鸣唱参数及其变异系数见表 1 和 2。

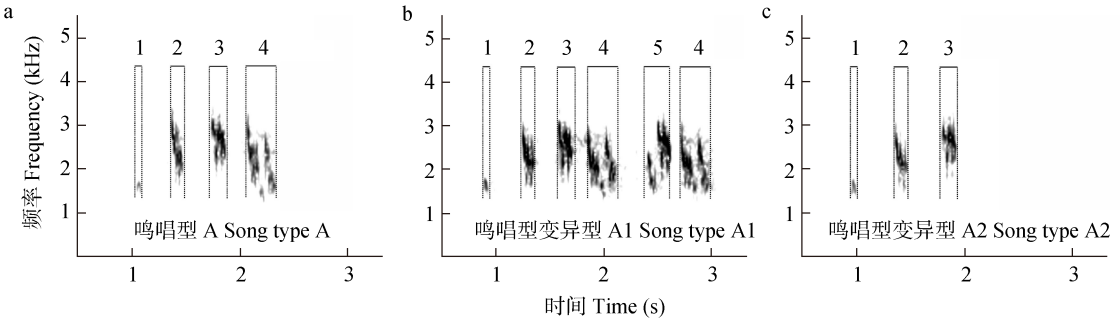

图 2　武汉白头鹎鸣唱型及鸣唱型变异型声谱图示例

Fig. 2　Spectrograms of a song type and its variants of *Pycnonotus sinensis* in Wuhan

a. 录音地点为中国地质大学（武汉）东区的白头鹎鸣唱型 A；b、c. 该 A 鸣唱型的变异型 A1 和 A2；阿拉伯数字 1 ~ 5 代表组成该鸣唱型的音节。

a. Song type A of a Light-vented Bulbul recorded at the East Campus of China University of Geosciences (Wuhan); b and c. Variants A1 and A2 of song type A. Numbers 1 ~ 5 represent the syllables that constitute this song type.

表 1　武汉地区白头鹎晨、昏鸣唱参数

Table 1　Morning and dusk song parameters of Light-vented Bulbuls (*Pycnonotus sinensis*) in Wuhan

鸣唱参数 Song parameter	早晨 Morning (n = 15)		黄昏 Dusk (n = 15)	
	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range
最高频率 Maximum frequency (kHz)	3.39 ± 0.16	3.09 ~ 3.80	3.40 ± 0.18	3.10 ~ 3.75
最低频率 Minimum frequency (kHz)	1.41 ± 0.08	1.29 ~ 1.56	1.39 ± 0.05	1.27 ~ 1.47
频率范围 Frequency range (kHz)	1.98 ± 0.20	1.66 ~ 2.41	2.02 ± 0.15	1.73 ~ 2.29
峰频率 Peak frequency (kHz)	2.70 ± 0.13	2.55 ~ 3.03	2.74 ± 0.28	2.04 ~ 3.16
鸣唱持续时间 Song duration (s)	1.21 ± 0.14	1.06 ~ 1.55	1.27 ± 0.23	0.94 ~ 1.80
鸣唱间隔 Between-song interval (s)	7.49 ± 2.75	3.30 ~ 12.72	6.12 ± 1.26	4.08 ~ 8.55
聚合熵 Aggregate entropy (bits)	4.74 ± 0.16	4.52 ~ 5.00	4.81 ± 0.17	4.52 ~ 5.13
平均熵 Average entropy (bits)	3.89 ± 0.11	3.72 ~ 4.11	3.83 ± 0.11	3.66 ~ 4.03
鸣唱音节数 No. syllables per song	4.2 ± 0.6	3.0 ~ 4.9	4.2 ± 0.8	3.0 ~ 5.9
鸣唱音节类型数 No. syllable types per song	4.0 ± 0.6	3.0 ~ 4.9	4.1 ± 0.7	3.0 ~ 5.5
鸣唱音节类型出现率 Syllable type occurrence rate	0.37 ± 0.26	0.11 ~ 1.00	0.41 ± 0.28	0.12 ~ 1.00
鸣唱型出现率 Song type occurrence rate	0.10 ± 0.07	0.03 ~ 0.25	0.09 ± 0.06	0.02 ~ 0.20
鸣唱型变异型出现率 Song type variants occurrence rate	0.21 ± 0.13	0.08 ~ 0.63	0.22 ± 0.14	0.04 ~ 0.50
鸣唱型变异度 Song type variability	2.43 ± 0.90	1.00 ~ 5.00	2.93 ± 2.06	1.00 ~ 8.00

表 2　武汉地区白头鹎晨、昏鸣唱参数变异系数

Table 2　Coefficients of variation (CVs) of morning and dusk song parameters of Light-vented Bulbuls (*Pycnonotus sinensis*) in Wuhan

鸣唱参数 Song parameter	变异系数 Coefficient of variation (CV)			
	早晨 Morning (n = 15)		黄昏 Dusk (n = 15)	
	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range
最高频率 Maximum frequency	0.04 ± 0.02	0.01 ~ 0.08	0.04 ± 0.02	0.01 ~ 0.07
最低频率 Minimum frequency	0.05 ± 0.02	0.03 ~ 0.13	0.06 ± 0.02	0.02 ~ 0.09
频率范围 Frequency range	0.08 ± 0.03	0.04 ~ 0.14	0.08 ± 0.03	0.03 ~ 0.13
峰频率 Peak frequency	0.07 ± 0.04	0.02 ~ 0.13	0.09 ± 0.03	0.04 ~ 0.17
鸣唱持续时间 Song duration	0.17 ± 0.07	0.02 ~ 0.28	0.14 ± 0.08	0.03 ~ 0.29
鸣唱间隔 Between-song interval	0.42 ± 0.17	0.08 ~ 0.74	0.47 ± 0.26	0.10 ~ 0.91
聚合熵 Aggregate entropy	0.04 ± 0.01	0.01 ~ 0.07	0.04 ± 0.02	0.02 ~ 0.08
平均熵 Average entropy	0.03 ± 0.01	0.02 ~ 0.06	0.03 ± 0.01	0.02 ~ 0.05
鸣唱音节数 No. syllables per song	0.13 ± 0.08	0.00 ~ 0.28	0.13 ± 0.10	0.00 ~ 0.31
鸣唱音节类型数 No. syllable types per song	0.08 ± 0.07	0.00 ~ 0.20	0.12 ± 0.10	0.00 ~ 0.31

通过对全部样本的鸣唱声谱图进行观察统计，平均每只白头鹎早晨鸣唱中的总音节类型数为 5.0 ± 1.4，鸣唱型数为 1.3 ± 0.5，每个鸣唱型的变异型数为 3.2 ± 1.4；每只白头鹎黄昏鸣唱的总音节类型数为 5.1 ± 1.1，鸣唱型数为 1.1 ± 0.4，鸣唱型变异型数为 3.2 ± 2.1。相同地点的白头鹎其晨、昏使用相同的鸣唱型（图 3）。仅个别个体因录音样本量的原因，会出现早晨

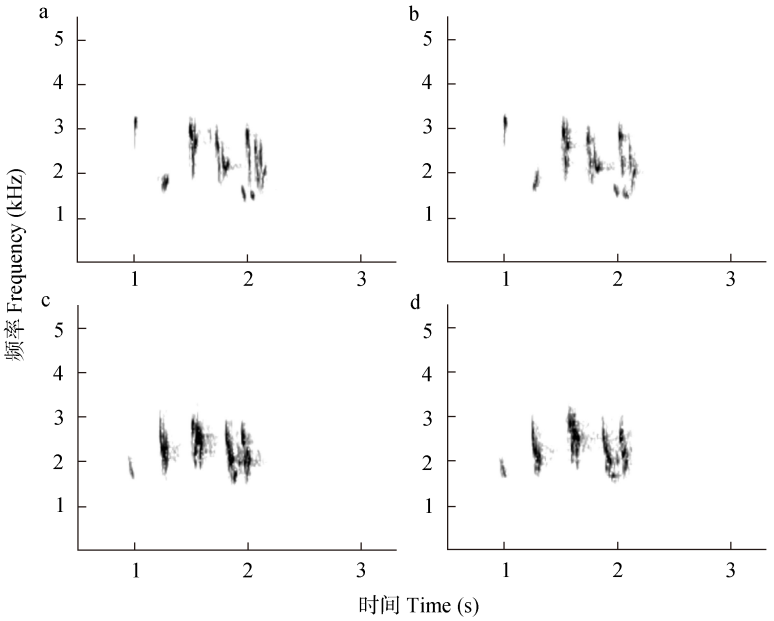

图 3　武汉两个采样点的白头鹎晨、昏鸣唱型声谱图示例

Fig. 3　Example spectrograms of morning and dusk song types of *Pycnonotus sinensis* from two sampling sites in Wuhan

a、c. 早晨录音中的鸣唱型；b、d. 黄昏录音中的鸣唱型。a、b 录音地点为东湖磨山；c、d 录音地点为中国地质大学（武汉）东区。

a and c. Song types recorded in the morning; b and d. Song types recorded at dusk. Recordings a and b were recorded at Moshan, East Lake; recordings c and d were recorded at the East Campus of China University of Geosciences (Wuhan).

的鸣唱型数多于黄昏，或者反之。晨、昏间白头鹎的鸣唱音节类型出现率（Wilcoxon signed rank test，$Z_{14} = -0.738$，$P = 0.480$）、鸣唱型出现率（$Z_{14} = -0.057$，$P = 0.978$）、鸣唱型变异型出现率（$Z_{14} = -0.966$，$P = 0.359$）以及鸣唱型变异度（$Z_{14} = -0.255$，$P = 0.832$）均不存在显著差异（$P > 0.05$）。

3　讨论

本研究通过对武汉地区白头鹎早晨、黄昏两时间段内的鸣唱特征进行比较分析，发现采样个体的鸣唱声学特征，包括频率参数、时间参数和能量参数，以及质量性状参数在晨、昏之间均不存在显著差异，说明白头鹎的鸣唱特征值在这两个时间段间保持一致。各特征参数的变异程度在晨、昏间也不存在显著差异，说明白头鹎早晨或黄昏的鸣唱特征表现并不比另一个时间段内的更加稳定。音节类型、鸣唱型以及鸣唱型变异型的出现率、鸣唱型变异度也同样未发现存在晨昏差异，说明白头鹎在这两个时间段的鸣唱总体质量表现，包括其鸣唱类型的丰富度、使用情况和变异情况也都保持一致。总体认为研究区域白头鹎的晨、昏鸣唱没有特征差异。

尽管研究已证实鸟类鸣唱的声学特征会受到生境（Sorjonen 1986，Seddon 2005，Bueno-Enciso et al. 2016，Sagar et al. 2024）、气候（Schäfer et al. 2017）以及激素水平（Cynx et al. 2005）等多种内、外因素的影响，张坤等（2023）也证实了白头鹎鸣唱的时程特征受季节影响，但这些鸣唱特征似乎并不受晨、昏节律影响。张坤等（2023）发现，春季白头鹎的鸣唱持续时间比秋季更长、鸣唱音节数更多，意味着春季单位时间内鸣唱输出量更大，鸣唱行为更活跃，春季是繁殖季，此时鸟类的领域性更强、为繁殖成功投入更多。季节造成的鸣唱特征差

异实际取决于白头鹎是否处于繁殖状态。而本研究均在白头鹎的繁殖季中进行，录音时间处于白头鹎繁殖阶段中期，此时白头鹎多处于产卵或孵卵期。晨、昏的时间变化尺度过短，繁殖季中白头鹎同一天不会存在类似季节之间繁殖状态的巨大差异。白头鹎在繁殖期内的领域是固定的（林峤涵等 2024），因此其所处生境的植被条件不会发生晨昏变化。根据本研究录音过程中的实际野外观察，白头鹎个体在早晨和黄昏进行领域鸣唱时多立于小乔木树顶，鸣唱回合之间会在领域内不同树木上切换停栖点，其行为状态也并未出现可察觉的显著晨昏差异。

温、湿度和气压等天气因素也能通过影响鸟类能量代谢、氧气消耗和声音传播等方面来影响鸟类鸣唱的声学特征（Ward et al. 2003，Garamszegi et al. 2006，Zheng et al. 2013，Gomez-Augustina et al. 2014，Schäfer et al. 2017）。在 Schäfer 等（2017）的研究中，欧乌鸫的鸣唱频率范围则会随着最低土壤温度的升高而变宽，注意这里是土壤温度而非大气温度，较高的土壤温度仍对应着较高的气温，温暖的环境有助于欧乌鸫节省能量维持体温。而且较高的土壤温度使得土壤动物，如欧乌鸫的主要食物蚯蚓的活动性更高，更有利于欧乌鸫取食，欧乌鸫可以获取更多能量唱出频率范围更广、能耗相对更高的鸣唱。本研究期间武汉市的气象数据已表明，当地的气温和相对湿度存在着明显的晨昏变化，气压数据则未表现出明显差异。虽然录音采集和气象数据记录时段未完全吻合，但总体仍可得知早晨较黄昏气温更低、空气相对湿度更高。按照理论预测，因为低温，加上夜间缺乏进食，早晨白头鹎投入鸣唱的能量储备比黄昏时会相对较低。而且已有研究表明，白头鹎体温、体重及其基础代谢率存在显著的日节律变化，其体温和体重均在凌晨 4:00 时达到最小值，在下午 18:00 时达到最大值（周围等 2010）。由此可推测，白头鹎黄昏时的鸣唱可能比早晨具有更宽的频率范围或更高的质量性状表现，即更丰富的鸣唱曲目、音节类型或更多的变异类型。然而结果与预测不符，本研究区域内白头鹎的鸣唱似乎未受到晨、昏温度变化的影响。推测除了环境因子和自身代谢水平等因素，还有其他更关键的因素决定着白头鹎鸣唱声学特征的晨昏稳定性，例如社会因素，雄鸟为了维持领域和配偶关系，繁殖期内保证稳定鸣唱表现的需求会掩盖上述因子的影响。

Schäfer 等（2017）还发现，当空气湿度越高时，欧亚大山雀鸣唱中的最短音节因为混响时间延长而表现为持续时间延长。白头鹎与欧亚大山雀这两个物种不同的鸣唱结构和声学特征可能是受空气湿度影响与否的关键因素。欧亚大山雀的鸣唱结构相对简单，其音节多为单音素构成，频率范围较窄，结合其所处的频段（平均值约 4.6 kHz），这样的声学结构在传播过程中更容易受到空气湿度的影响（Schäfer et al. 2017）。相对于欧亚大山雀，白头鹎音节结构大多相对复杂，多为多个音素组成的复合体，在频率范围上跨度较广。因此不认为空气湿度在声音传播中会对白头鹎这样的音节结构产生显著的效果。此外，欧亚大山雀研究中湿度变化范围是从 3 月初到 6 月中旬的 40% ~ 90%，欧乌鸫研究中土壤最低温度的变化幅度为 5 ~ 25 ℃（Schäfer et al. 2017），远大于本研究中一天之内晨昏的温、湿度变化范围。Coomes 和 Derryberry（2021）发现，在实验室内短时的高温（35 ~ 43 ℃）处理可以改变斑胸草雀的鸣唱结构，这也超出了一般鸟类繁殖季正常自然环境中的温度变化范畴。因此，本研究中同一环境一天之内的温、湿度晨昏变化幅度可能不足以引起白头鹎表现出鸣唱特征的显著变化。

还有研究表明，一些鸟类在噪声环境下会提高鸣唱声强（Brumm and Todt 2002），或提高鸣唱的最低频率（Slabbekoorn and Peet 2003，Derryberry et al. 2020）。作为城市鸟类，白头鹎所栖息生境的环境噪声水平变化也可能会对其晨昏鸣唱特征产生影响。根据《2023 年武汉市

生态环境状况公报》（武汉市生态环境局 2024）的数据，2023 年武汉市区昼间平均等效声级为 57.1 dB，夜间平均等效声级为 51.1 dB，昼夜噪声等效声级差值为 6 dB，推测晨、昏两个时间段内噪声水平的差异只会比昼夜差异更小。根据前期在研究区域获取的部分环境噪声数据，中国地质大学（武汉）校园及周边环境中 6 个监测点的平均噪声等效声级在早晨 6 时为 49.8 dB，9 时为 52.7 dB，下午 16 时为 54.8 dB，傍晚 19 时为 54.6 dB，可见晨、昏间噪声水平虽有变化，但变化幅度较小，且晨昏时段区间内也存在噪声水平的实时变化（未公开发表数据）。韩轶才等（2004）发现，环境噪声使临安和阜阳两地白头鹎鸣唱的主频升高，该研究中两个地点高噪声区的噪声声级均值分别为 65.1 和 65.5 dB，低噪声区噪声均值为 43.3 和 43.9 dB，两类区域的噪声水平差值达到约 21 dB。Slabbekoorn 和 Peet（2003）发现，在不同噪声水平的生境中（42 ~ 63 dB），环境噪声会使欧亚大山雀鸣唱的最低频率升高，噪声水平差异幅度与韩轶才等（2004）研究地的噪声差异相当。Derryberry 等（2020）发现，环境噪声的减弱可使白冠带鹀（*Zonotrichia leucophrys*）的鸣唱表现增强，音量减小，该研究区域中城市地区的环境噪声声强约为乡村地区的 3 倍（城、乡噪声等效声级平均差值为 9 dB）。本研究关注的是同一环境中的噪声水平在一天内的变化，而非城乡或者其他不同类型生境之间的差异，其变化幅度无法与上述研究相比。因此，结合前面温、湿度因子中同样存在的变化幅度问题，可以得出这样的结论：尽管已知这些天气、噪声等环境因子可能影响鸟类的鸣声特征，但本研究仍证实了同一生境内上述因子的晨昏变化幅度不足以引起白头鹎鸣唱特征上的显著变化，推测还有其他因素，如社会因素，会掩盖这些环境因子的影响。

众多关于鸟类鸣声行为昼夜节律的研究多关注鸟类晨、昏鸣唱的活动强度，而非鸣唱特征本身（Hutchinson et al. 1993，Catchpole and Slater 2008，Aubin and Mathevon 2020，Marín-Gómez and MacGregor-Fors 2021，白皓天等 2023）。对鸣唱声学特征进行晨昏比较分析的研究案例目前仅有 Bustamante 和 Garitano-Zavala（2024）对秘鲁鸫（*Turdus chiguanco*）的研究。该研究在城市环境与非城市环境的两组地点进行，结果表明两种环境中秘鲁鸫早晨鸣唱的频次都比黄昏更多。并且与黄昏的鸣唱相比，秘鲁鸫在早晨的鸣唱具有更长的鸣唱持续时间、更大的频率范围和更高的音量。秘鲁鸫具有异常丰富的音节单元组合和即兴鸣唱，鸣唱曲目库极大。使用多变的鸣唱曲目可能是导致其晨、昏间鸣唱声学特征存在差异的原因。与个体内、个体间鸣唱变化多样的秘鲁鸫不同，白头鹎每只个体只能产生 1 ~ 3 种鸣唱型（杨晓菁和雷富民 2008，林峤涵等 2024）。本研究中所涉及的白头鹎鸣唱曲目更是均未超过 2 种鸣唱型，个体音节类型数为 5 个左右，白头鹎在晨、昏间没有多少不同的鸣唱型和音节类型可供选择，且本研究已证实了它们在这两个时间段会使用相同的鸣唱型，尽管还存在一些鸣唱型的变异型，但有限的音节类型仍然限制了其频率范围，因此鸣唱曲目的丰富程度差异可能是导致白头鹎鸣唱声学特征不像秘鲁鸫那样存在晨、昏间显著差异的原因之一。此外，尽管早晨气温会相对较低和缺乏夜间进食，秘鲁鸫鸣唱的晨昏差异显示其在早晨的鸣唱行为中能量投入更多，推测也是社会因素而非晨昏的自然环境因素决定了其鸣唱表现（Bustamante and Garitano-Zavala 2024）。

一些研究探讨了鸟类晨鸣和黄昏鸣唱的具体功能。鸟类的晨鸣与繁殖、领域防卫等行为有关（Kroodsma and Miller 1996，Staicer et al. 1996，Otter et al. 1997，Liu 2004，Amrhein et al. 2008，Foote et al. 2011，Aubin and Mathevon 2020），黄昏鸣唱也具有类似的功能。Erne 和 Amrhein（2008）在对鹪鹩（*Troglodytes troglodytes*）的研究证明了其晨、昏鸣唱在保卫领域和强化与雌鸟联系等方面的功能。龚玉杰

等（2020）认为，大杜鹃（*Cuculus canorus*）雌鸟晨、昏鸣声行为的主要作用为宣示领域和吸引异性。在整个繁殖季，可以经常观察到白头鹎个体间的对唱现象，白头鹎邻近个体间的鸣声对抗在早晨和黄昏这两个时间段都普遍存在。现有的白头鹎相关研究证实，其鸣唱和大多数鸣禽一样，同时具有宣示领域和吸引配偶的作用（姜仕仁等 1996a，杨晓菁和雷富民 2008，刘小如等 2010，林峤涵等 2024）。白头鹎在晨、昏间无差别的鸣唱特征可能支持了其晨、昏鸣唱功能的统一性。一天中的晨、昏对于白头鹎而言可能都是非常重要的节点。除了清晨的鸣声交流以外，在夜晚来临前的黄昏时段，白头鹎会用和清晨一样的鸣唱方式来继续进行领域宣誓并加强与配偶的联系。

参 考 文 献

Amrhein V, Johannessen L E, Kristiansen L, et al. 2008. Reproductive strategy and singing activity: blue tit and great tit compared. Behavioral Ecology and Sociobiology, 62(10): 1633–1641.

Armstrong E A. 1963. A study of Bird Song. Vol. 335. London: Oxford University Press.

Aubin T, Mathevon N. 2020. Coding Strategies in Vertebrate Acoustic Communication. Vol. 7. Berlin: Springer Nature.

Baker M C, Howard T M, Sweet P W. 2000. Microgeographic variation and sharing of the gargle vocalization and its component syllables in black-capped chickadee (Aves, Paridae, *Poecile atricapillus*) populations. Ethology, 106(9): 819–838.

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

Brumm H, Todt D. 2002. Noise-dependent song amplitude regulation in a territorial songbird. Animal Behaviour, 63(5): 891–897.

Bueno-Enciso J, Ferrer E S, Barrientos R, et al. 2016. Habitat structure influences the song characteristics within a population of Great Tits *Parus major*. Bird Study, 63(3): 359–368.

Bustamante N, Garitano-Zavala Á. 2024. Natural patterns in the dawn and dusk choruses of a neotropical songbird in relation to an urban sound environment. Animals, 14(4): 646.

Catchpole C K, Slater P J B. 2008. Bird Song: Biological Themes and Variations. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Coomes C M, Derryberry E P. 2021. High temperatures reduce song production and alter signal salience in songbirds. Animal Behaviour, 180: 13–22.

Cuthill I C, MacDonald W A. 1990. Experimental manipulation of the dawn and dusk chorus in the blackbird *Turdus merula*. Behavioral Ecology and Sociobiology, 26(3): 209–216.

Cynx J, Bean N J, Rossman I. 2005. Testosterone implants alter the frequency range of zebra finch songs. Hormones and Behavior, 47(4): 446–451.

Derégnaucourt S, Saar S, Gahr M. 2012. Melatonin affects the temporal pattern of vocal signatures in birds. Journal of Pineal Research, 53(3): 245–258.

Derryberry E P, Phillips J N, Derryberry G E, et al. 2020. Singing in a silent spring: Birds respond to a half-century soundscape reversion during the COVID-19 shutdown. Science, 370(6516): 575–579.

Erne N, Amrhein V. 2008. Long-term influence of simulated territorial intrusions on dawn and dusk singing in the Winter Wren: spring versus autumn. Journal of Ornithology, 149(4): 479–486.

Foerster K, Poesel A, Kunc H, et al. 2002. The natural plasma testosterone profile of male blue tits during the breeding season and its relation to song output. Journal of Avian Biology, 33(3): 269–275.

Foote J R, Fitzsimmons L P, Mennill D J, et al. 2011. Male black-capped chickadees begin dawn chorusing earlier in response to simulated territorial insertions. Animal Behaviour, 81(4): 871–877.

Garamszegi L Z, Moreno J, Møller A P. 2006. Avian song complexity is associated with high field metabolic rate. Evolutionary Ecology Research, 8(1): 75–90.

Gomez-Agustina L, Dance S, Shield B. 2014. The effects of air temperature and humidity on the acoustic design of voice alarm systems on underground stations. Applied Acoustics, 76: 262–273.

Hao Z Z, Zhang C Y, Li L, et al. 2024. Anthropogenic noise and habitat structure shaping dominant frequency of bird sounds along urban gradients. iScience, 27(2): 109056.

Harding C F. 2004. Hormonal modulation of singing: hormonal modulation of the songbird brain and singing behavior. Annals of the New York Academy of Sciences, 1016(1): 524–539.

Henwood K, Fabrick A. 1979. A quantitative analysis of the dawn

chorus: temporal selection for communicatory optimization. The American Naturalist, 114(2): 260–274.

Hutchinson J M C, McNamara J M, Cuthill I C. 1993. Song, sexual selection, starvation and strategic handicaps. Animal Behaviour, 45(6): 1153–1177.

Kroodsma D E, Miller E H. 1996. Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds. Ithaca, New York: Cornell University Press.

Lampe H M, Espmark Y O. 1994. Song structure reflects male quality in pied flycatchers, *Ficedula hypoleuca*. Animal Behaviour, 47(4): 869–876.

Liu W C. 2004. The effect of neighbours and females on dawn and daytime singing behaviours by male chipping sparrows. Animal Behaviour, 68(1): 39–44.

Marín-Gómez O H, MacGregor-Fors I. 2021. A global synthesis of the impacts of urbanization on bird dawn choruses. Ibis, 163(4): 1133–1154.

Marler P, Slabbekoorn H. 2004. Nature's Music: The Science of Bird Song. California, San Diego: Elsevier Academic Press.

Moran I G, Lukianchuk K C, Doucet S M, et al. 2019. Diel and seasonal patterns of variation in the singing behaviour of Savannah Sparrows (*Passerculus sandwichensis*). Avian Research, 10: 26.

Oberweger K, Goller F. 2001. The metabolic cost of birdsong production. The Journal of Experimental Biology, 204(19): 3379–3388.

Otter K, Chruszcz B, Ratcliffe L. 1997. Honest advertisement and song output during the dawn chorus of black-capped Chickadees. Behavioral Ecology, 8(2): 167–173.

Pearse W D, Morales-Castilla I, James L S, et al. 2018. Global macroevolution and macroecology of passerine song. Evolution, 72(4): 944–960.

Puswal S M, Mei J J, Liu F L. 2021. Effects of temperature and season on birds' dawn singing behavior in a forest of Eastern China. Journal of Ornithology, 162(2): 447–459.

Sagar H S S C, Anand A, Persche M E, et al. 2024. Global analysis of acoustic frequency characteristics in birds. Proceedings Biological Sciences, 291(2034): 20241908.

Schäfer J E, Janocha M M, Klaus S, et al. 2017. How weather instead of urbanity measures affects song trait variability in three European passerine bird species. Ecology and Evolution, 7(13): 4868–4880.

Schlinger B A, Brenowitz E A. 2002. Neural and hormonal control of birdsong. Hormones, Brain and Behavior: 799–839.

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.

Seddon N. 2005. Ecological adaptation and species recognition drives vocal evolution in neotropical suboscine birds. Evolution, 59(1): 200–215.

Slabbekoorn H, den Boer-Visser A. 2006. Cities change the songs of birds. Current Biology, 16(23): 2326–2331.

Slabbekoorn H, Ellers J, Smith T B. 2002. Birdsong and sound transmission: the benefits of reverberations. The Condor, 104(3): 564–573.

Slabbekoorn H, Peet M. 2003. Birds sing at a higher pitch in urban noise. Nature, 424(6946): 267.

Sorjonen J. 1986. Factors affecting the structure of song and the singing behaviour of some northern European passerine birds. Behaviour, 98(1/4): 286–304.

Staicer C A, Spector D A, Horn A G. 1996. the dawn chorus and other diel patterns in acoustic signaling // Kroodsma D E, Miller E H. Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds. Ithaca, New York: Cornell University Press, 426–453.

Tracy T T, Baker M C. 1999. Geographic variation in syllables of house finch songs. The Auk, 116(3): 666–676.

Ward S, Speakman J R, Slater P J B. 2003. The energy cost of song in the canary, *Serinus canaria*. Animal Behaviour, 66(5): 893–902.

Xing X Y, Alström P, Yang X J, et al. 2013. Recent northward range expansion promotes song evolution in a passerine bird, the Light-vented Bulbul. Journal of Evolutionary Biology, 26(4): 867–877.

Yang P, Ren G Y, Hou W. 2017. Temporal-spatial patterns of relative humidity and the urban dryness island effect in Beijing City. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56(8): 2221–2237.

Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(8): 1803–1816.

Zheng W H, Lin L, Liu J S, et al. 2013. Physiological and biochemical thermoregulatory responses of Chinese bulbuls *Pycnonotus sinensis* to warm temperature: Phenotypic flexibility in a small passerine. Journal of Thermal Biology, 38(5): 240–246.

白皓天, 胡珂, 余上, 等. 2023. 鸟类的“黎明合唱”声纹监测探秘南岭国家公园. 森林与人类 (4): 64–75. [Bai H T, Hu K, Yu S, et al. 2023. A probe into the voiceprint monitoring of “dawn chorus” of birds in Nanling National Park. Forest & Humankind, (4): 64–75.]

丁平, 姜仕仁. 2005. 杭州市区白头鹎鸣声的微地理差异. 动物学研究, 26(5): 453–459. [Ding P, Jiang S R. 2005. Microgeographic song variation in the Chinese bulbul (*Pycnonotus sinensis*) in urban areas of Hangzhou City. Zoological Research, 26(5): 453–459.]

龚玉杰, 王萌萌, 周冰, 等. 2020. 大杜鹃雌鸟鸣声的日节律. 动物学杂志, 55(5): 560–565. [Gong Y J, Wang M M, Zhou B, et al. 2020. Daily vocal pattern of female common cuckoo (*Cuculus canorus*). Chinese Journal of Zoology, 55(5): 560–565.]

韩轶才, 姜仕仁, 丁平. 2004. 环境噪声对临安和阜阳两地白头鹎鸣声频率的影响. 动物学研究, 25(2): 122–126. [Han Y C, Jiang S R, Ding P. 2004. Effects of ambient noise on the vocal frequency of Chinese bulbuls, *Pycnonotus sinensis* in Lin’an and Fuyang city. Zoological Research, 25(2): 122–126.]

郝佩佩, 张雁云. 2020. 基于自动录音技术研究三种雉类鸣叫特征和节律. 动物学杂志, 55(5): 552–559. [Hao P P, Zhang Y Y. 2020. Acoustic characteristics and vocal rhythms of three pheasant species using automatic recording in Xiaolongmen, Beijing. Chinese Journal of Zoology, 55(5): 552–559.]

姜仕仁, 丁平, 施青松, 等. 1996b. 白头鹎方言的初步研究. 动物学报, 42(4): 361–367. [Jiang S R, Ding P, Shi Q S, et al. 1996. Studies on the song dialects in Chinese bulbuls. Acta Zoologica Sinica, 42(4): 361–367.]

姜仕仁, 丁平, 诸葛阳, 等. 1996a. 白头鹎繁殖期鸣声行为的研究. 动物学报, 42(3): 253–259. [Jiang S R, Ding P, Zhuge Y, et al. 1996. Characteristics of songs of the Chinese bulbul (*Pycnonotus sinensis*) in the breeding season. Acta Zoologica Sinica, 42(3): 253–259.]

雷富民, 王钢, 尹祚华. 2003. 鸟类鸣唱的复杂性和多样性. 动物分类学报, 28(1): 163–171. [Lei F M, Wang G, Yin Z H. 2003. On complexity and diversity of bird songs. Acta Zootaxonomica Sinica, 28(1): 163–171.]

林峤涵, 刘源, 杨晓菁, 等. 2024. 同一种群白头鹎不同鸣唱型比较分析及其回放实验. 动物学杂志, 59(6): 828–842. [Lin Q H, Liu Y, Yang X J, et al. 2024. Comparison of different song types in a population of light-vented bulbuls with song playback experiments. Chinese Journal of Zoology, 59(6): 828–842.]

刘小凡. 2015. 武汉城区温湿度观测和相关性分析. 科技创新导报, 12(24): 252–254. [Liu X F. 2015. Wuhan city temperature and humidity observation and correlation analysis. Science and Technology Innovation Herald, 12(24): 252–254.]

刘小如, 丁宗苏, 方伟宏, 等. 2010. 台湾鸟类志. 台北: 台湾地区农业事务主管机关林务局. [Severinghaus L L, Ding T S, Fang W H. 2010. The Avifauna of Taiwan. Taipei: Forestry Bureau, Taiwan, China.]

王维禹, 郭延蜀, 胡锦矗, 等. 2005. 白头鹎春季食性及取食空间生态位的初步研究. 四川动物, 24(4): 466–468. [Wang W Y, Guo Y S, Hu J C, et al. 2005. Preliminary study on feeding and spatial niche of *Pycnonotus sinensis* in spring. Sichuan Journal of Zoology, 24(4): 466–468.]

武汉市生态环境局. 2024. 2023 年武汉市生态环境状况公报. [EB/OL]. (2024-06-17) [2025-01-20]. https://hbj.wuhan.gov.cn/fbjd_19/xxgkml/zwgk/hjjc/hjzkgb/202406/t20240617_2417052.html. [Wuhan Ecological Environment Bureau. 2024. Bulletin on the ecological environment status of Wuhan in 2023. [EB/OL]. (2024-06-17) [2025-01-20]. https://hbj.wuhan.gov.cn/fbjd_19/xxgkml/zwgk/hjjc/hjzkgb/202406/t20240617_2417052.html.]

杨晓菁, 雷富民. 2008. 白头鹎的鸣唱结构及其鸣唱微地理变异. 动物学报, 54(4): 630–639. [Yang X J, Lei F M. 2008. Song structure and its microgeographic variation in the Chinese bulbul *Pycnonotus sinensis*. Acta Zoologica Sinica, 54(4): 630–639.]

张坤, 杨晓菁, 赵世东, 等. 2023. 白头鹎鸣唱特征的季节差异分析. 动物学杂志, 58(2): 161–172. [Zhang K, Yang X J, Zhao S D, et al. 2023. Seasonal variations in the song characteristics of light-vented bulbuls *Pycnonotus sinensis*. Chinese Journal of Zoology, 58(2): 161–172.]

周围, 王玉萍, 陈德汉, 等. 2010. 白头鹎体温、体重及能量代谢的昼夜节律. 生态学杂志, 29(12): 2395–2400. [Zhou W, Wang Y P, Chen D H, et al. 2010. Diurnal rhythms of Chinese bulbul (*Pycnonotus sinensis*) body temperature, body mass, and energy metabolism. Chinese Journal of Ecology, 29(12): 2395–2400.]