

夏冬季五种同域蝙蝠对洞穴的利用策略

张宇琪 常诚 朱文明 张首威 李宣池
张洺瑀 卢冠军 许振文*

(长春师范大学地理科学学院, 长春 130032)

摘要: 洞穴是蝙蝠重要的栖息地, 往往成为多种蝙蝠的繁殖地、冬眠地和夜间临时栖息地, 洞穴利用研究是蝙蝠保护的关键。2023年6—8月和2023年12月至次年2月, 我们在吉林省四平市山门镇古洞开展蝙蝠种类和数量调查, 探究5种同域蝙蝠对洞穴的利用策略。日间观察发现, 马铁菊头蝠 (*Rhinolophus nippon*) 在夏季日间栖息于古洞, 1只伊氏鼠耳蝠 (*Myotis ikonnikovi*) 仅于7月15日日间栖息于古洞。马铁菊头蝠的集群大小从6—8月总体先下降后上升, 7月观察到2次马铁菊头蝠母蝠紧抱幼蝠现象。夏季通过夜间声学采样法录制到4种调频蝙蝠, 包括阿拉善伏翼 (*Hypsugo alaschanicus*)、东亚伏翼 (*Pipistrellus abramus*)、东方蝙蝠 (*Vespertilio sinensis*) 和伊氏鼠耳蝠的回声定位脉冲。Kruskal-Wallis 检验及 Bonferroni 多重比较分析表明, 东方蝙蝠、东亚伏翼和伊氏鼠耳蝠的回声定位脉冲数量在夏季不同月份间差异不显著, 阿拉善伏翼的回声定位脉冲数量在7月和8月间差异显著。在夏季的9次采样中, 马铁菊头蝠平均出飞高峰期为日落后 15~60.56 min, 平均出飞结束时间为日落后 (60.56 ± 5.27) min。东亚伏翼和伊氏鼠耳蝠分别有1次和5次在马铁菊头蝠活动高峰期出现, 阿拉善伏翼和东方蝙蝠在马铁菊头蝠活动高峰期后出现, 说明这4种蝙蝠仅夜间临时栖息于古洞。冬季未录制到5种蝙蝠的回声定位脉冲。研究结果表明, 古洞日间被马铁菊头蝠作为夏季繁殖地, 夜间则作为其他4种蝙蝠的临时栖息地, 冬季不被利用。本研究结果揭示了5种同域蝙蝠对洞穴的利用策略, 为后续蝙蝠栖息地保护与管理提供参考。

关键词: 蝙蝠; 栖息地利用; 繁殖地; 夜间临时栖息; 栖息地保护

中图分类号: Q958.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1050(2025)02-0193-10

Cave use strategies of five sympatric bat species in summer and winter

ZHANG Yuqi, CHANG Cheng, ZHU Wenming, ZHANG Shouwei, LI Xuanchi, ZHANG Mingyu, LU Guanjin, XU Zhenwen*

(School of Geographical Sciences, Changchun Normal University, Changchun 130032, China)

Abstract: Caves are important habitats for bats, often serving as breeding sites, hibernacula, and temporary nocturnal roosts for a wide range of species. Cave utilization studies are thus key to bat conservation. From June to August 2023 and from December 2023 to February of the following year, we conducted bat species and population surveys in Gu cave in Shanmen Town, Siping City, Jilin Province, to explore the cave utilization strategies of five sympatric bat species. Daytime observations revealed that *Rhinolophus nippon* roosted in Gu cave during summer, and one *Myotis ikonnikovi* roosted in the cave on July 15th only. Cluster size of *R. nippon* decreased and then increased overall from June to August. We recorded two instances of *R. nippon* mothers holding their young in July. Echolocation of four species of FM bats (*Hypsugo alaschanicus*, *Pipistrellus abramus*, *Vespertilio sinensis*, and *Myotis ikonnikovi*) was recorded during the summer by night time acoustic sampling. Kruskal-Wallis test and Bonferroni multiple comparisons analysis showed that the number of echolocation pulses of *P. abramus*, *V. sinensis*, and *M. ikonnikovi* did not differ significantly between summer months, and that of *H. alaschanicus* differed significantly between July and August. During the nine sampling occasions in summer, the average peak emergence period of *R. nippon* ranged from 15 min to 60.56 min after sunset, and the average end time of emergence was (60.56 ± 5.27) min after sunset. *Pipistrellus abramus* and *M. ikonnikovi* ap-

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究规划项目 (JJKH20230913KJ)

作者简介: 张宇琪 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事动物行为与保护研究。

收稿日期: 2024-02-26; 接受日期: 2024-10-15

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: xuzhenwen@ccsfu.edu.cn

peared at the peak of the activity of *R. nippon* on one occasion and five occasions, respectively, and *H. alaschanicus* and *V. sinensis* appeared after the peak of the activity of *R. nippon*, which suggests that the four species only temporarily roosted at night in the cave. No echolocation pulses from the five bat species were recorded during the winter. The results suggest that the Gu cave is used as a summer breeding site by *R. nippon* and as a temporary roosting site at night for the other four species of bats, and is not utilized in winter. The results of this study reveal the cave utilization strategies of the five sympatric bat species and provide a reference for subsequent bat habitat conservation and management.

Key words: Bats; Habitat utilization; Breeding grounds; Night-roosting; Habitat protection

栖息地为蝙蝠提供栖息和保护的重要场所 (Twente, 1955; Hazard *et al.*, 2023)。栖息地退化及其组成结构变化将直接或间接影响蝙蝠物种多样性 (Safitri *et al.*, 2020)。蝙蝠失去栖息地, 种群将难以维持和繁衍, 从而影响蝙蝠在农林害虫防控、植物授粉、种子传播及营养物质循环方面的功能 (Kunz *et al.*, 2011; Kasso *et al.*, 2013; Deleva *et al.*, 2023)。洞穴常被用作食虫蝠的冬季冬眠地和夏季繁殖地, 同时也是多种食虫蝠夜间临时栖息场所, 为其生长和繁衍提供必要的栖息环境 (Deleva *et al.*, 2023)。因此, 开展食虫蝠的洞穴利用研究是蝙蝠保护生物学的重要研究内容, 有助于优化洞栖栖息地的保护与管理 (Safitri *et al.*, 2020)。

已有研究证实, 诸多因素影响食虫蝠对夏季繁殖地的选择。其中, 繁殖地的可利用性是主要限制因素, 而温度和湿度是衡量繁殖地可利用性的重要指标 (刘奇, 2014)。Webb 等 (1996) 发现, 栖息环境较高的相对湿度能够降低体表蒸发失水率, 有利于成体降低能量损耗, 进而提高蝙蝠的存活率 (Kunz, 1982)。相对较高的温度使食虫蝠减少能量消耗并维持体温, 有利于孕蝠胚胎的发育和亚成体的生长发育 (Funakoshi *et al.*, 2009)。因此, 食虫蝠通常偏好温度和湿度相对较高且稳定的环境作为繁殖地 (Speakman *et al.*, 1991)。

洞栖蝙蝠大多为食虫蝠 (Bhalla *et al.*, 2023; Abdullah *et al.*, 2024), 其在夜间飞行和捕食期间消耗大量能量, 因此占据夜间临时栖息地成为温带食虫蝠的常见行为 (Anthony *et al.*, 1981; Barclay, 1982; Lewis, 1994; Jaberg and Blant, 2003)。温暖的临时栖息地有助于增强食虫蝠对猎物的消化和吸收 (Barclay, 1982; Kunz, 1982; Kunz *et al.*, 2003; Funakoshi and Maeda, 2003), 距离捕食地较近的临时栖息地有助于降低捕食路程所带来的飞行成本 (刘奇, 2014)。同时, 临时栖息地还能够减轻食虫蝠面对恶劣天气和环境的压力, 保护其免

受天敌 (猫头鹰等) 的威胁 (Kunz, 1982)。因此, 夜间临时栖息地是食虫蝠栖息生境的重要组成部分, 直接决定食虫蝠的适合度 (Geluso *et al.*, 2018)。由于天然洞穴有着复杂的内部结构系统, 经常被蝙蝠利用为夏季繁殖地 (Furman and Özgül, 2002) 和冬季冬眠地 (Briggler and Prather, 2003)。探究蝙蝠不同季节对山洞的利用状况, 能够丰富蝙蝠对洞穴利用方面的相关研究和基础数据, 是蝙蝠物种多样性保护的重要方面。

为了探究食虫蝠对洞穴的利用策略, 研究组利用日间观察和夜间声学采样法, 于吉林省四平市山门镇古洞开展蝙蝠调查。此洞属于小型破碎裂隙型天然溶洞, 从主洞口向里延伸 50 m (包含深入隧道部分), 宽约 17 m, 高 1.6 ~ 3.5 m 不等, 是一个空间展布较小的近似长方形的溶洞 (张顺, 1994)。我们的前期初步调查表明, 此洞穴冬季无蝙蝠冬眠, 而夏季蝙蝠栖息现状有待进一步调查。本研究目的包括三方面, 即 (1) 明确夏季日间蝙蝠在古洞内的栖息现状; (2) 揭示夏季夜间蝙蝠临时栖息状况; (3) 探究影响冬季无蝙蝠冬眠的微气候因素。

1 研究方法

1.1 研究地点概况

古洞位于吉林省四平市山门镇 (北纬 42° 59'31", 东经 124°30'22", 海拔 302 m), 地处低山丘陵地带终端, 往西北为平原地区 (图 1A)。此区域为温带湿润季风区, 四季分明, 不同季节温差较大, 夏季湿热多雨, 冬季寒冷降水稀少 (秦天柱等, 2017)。该洞有 1 个主洞口 (图 1B), 内有一条通向山体内部的短小隧道, 隧道尽头被坍塌的碎石堵死, 右侧有 1 个侧洞口 (图 1C)。洞口周边为林地, 林下有灌木丛, 附近为农田生境。此区域自然资源较为丰富, 目前已知野生植物 362 种, 分属 93 科 (吴际, 2011)。

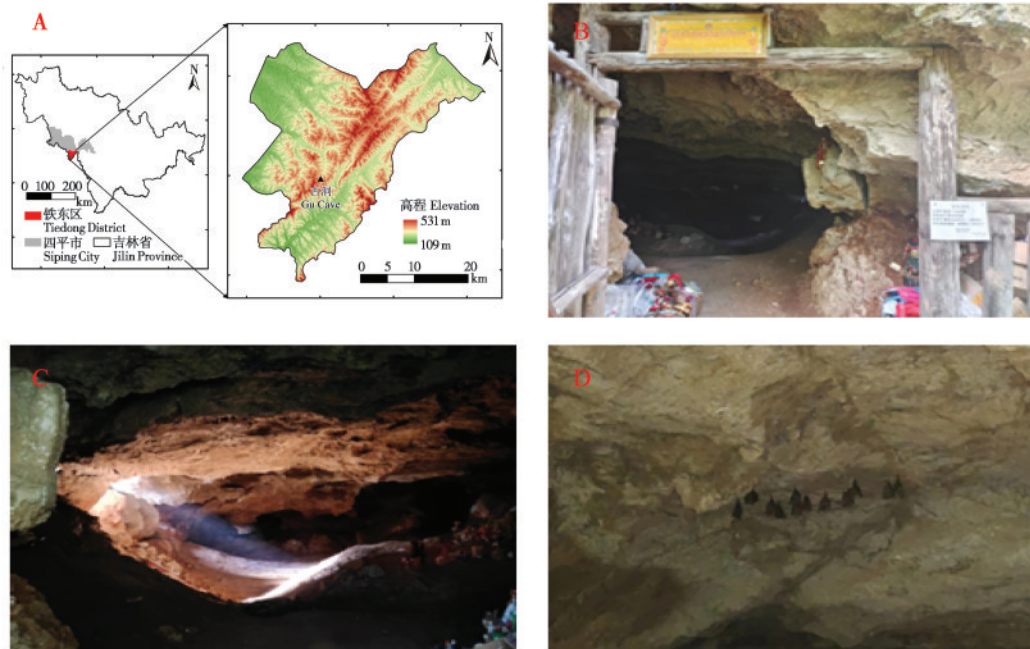


图1 古洞位置及环境特征. A: 古洞地理位置; B: 主洞口; C: 侧洞口; D: 洞内栖息的马铁菊头蝠

Fig. 1 Location and environmental characteristics of Gu Cave. A: Geographical location of Gu Cave; B: The main entrance of cave; C: The side entrance of cave; D: *Rhinolophus nippon* roosting in the cave

1.2 日间栖息蝙蝠种类与数量调查

2023年6—8月和2023年12月至次年2月期间, 每月5日、15日和25日开展1次日间栖息蝙蝠种类和数量调查, 共进行18次(3次/月)。上午09:00—12:00手持手电筒(7045B, 广东久量股份有限公司)进入洞内, 用红色胶带覆盖手电筒聚焦反射镜部分, 减弱其光照强度, 避免强光惊扰洞内蝙蝠, 并按方位顺序观察洞内蝙蝠(吴涛等, 2018)。研究者在调查过程中噤声, 脚步轻缓, 减少衣物摩擦和电子设备嗡鸣, 在确保自身影响最小的情况下, 将洞顶死角和缝隙逐一检查。因洞穴较小且洞内缝隙均较浅, 未发现蝙蝠可能栖息但调查者不能发现的缝隙。同时, 使用双筒望远镜(神匀SXVETWP 40x22旗舰版, 义乌市酷行贸易有限公司)远距离观察并鉴定蝙蝠种类, 分别记录不同种类蝙蝠个体数量。若出现蝙蝠惊飞现象, 研究人员立即停止本次调查, 推迟1 d后再重新开始上述过程。

1.3 夜间临时栖息蝙蝠声波录制与分析

在洞内中心位置, 距离地面1.5 m处, 架设超声波记录仪(Song Meter SM4BAT FS, Wildlife Acoustics, Inc.), 记录仪(采样频率: 256 kHz;

FFT: 500) 设置为始终录制(Record Always)。于日落前30 min开始录制声波, 此后实验者远离洞口避免影响蝙蝠夜间出飞和活动。每次声波录制持续到次日光照度达到300 lux的时刻, 录制的声波文件以录制时间命名。将录制声波导入电脑, 利用专业声谱分析软件Kaleidoscope Pro分析声波主频, 与已有(未发表数据)蝙蝠种类声波主频对比并鉴定种类。不同种类蝙蝠的脉冲序列数量被统计并用于后续分析。

1.4 洞内温度和湿度测量

2023年6月1日至2024年2月29日, 在洞穴内4个角落和中心位置分别放置温湿度记录仪(精创RC-4HC, 江苏省精创电气股份有限公司)。首先使用手持式锂电充电钻(佳泰HABO 12V标准版, 永康市佳泰工具有限公司)在洞顶打孔并钻入螺丝。随后利用10 cm尼龙线将温湿度记录仪悬挂于螺丝下方, 记录仪设置为每30 min记录1次。分别取5个记录点中的单日最低(高)温计算洞穴月平均最低(高)温, 以上两个值的均值作为月平均温, 使用同样的方法获得月平均最低湿度、月平均最高湿度和月平均湿度。

1.5 数据处理与统计分析

在 Excel 2021 中完成数据初步整理。利用 `aov()` 函数进行单因素方差分析, 检验日间栖息蝙蝠数量的月变化, 用 TukeyHSD 多重比较分析不同月份间蝙蝠数量的差异显著性。用 Kruskal-Wallis 检验分析蝙蝠夜间活动的月变化差异显著性, 用 Bonferroni 检验比较不同月份间蝙蝠夜间活动差异显著性。用 MANOVA() 函数进行多元方差分析, 明确洞内微气候月变化整体差异, 利用 EM-MEANS() 函数分析不同月份间洞穴内微气候变化差异。用 Pearson 相关分析, 检验夏季洞穴微气候与蝙蝠数量、蝙蝠活动的相关性, 用 `corrplot()` 函数绘制相关矩阵图。用 `aov()` 函数进行单因素方差分析检验不同种类蝙蝠声波主频差异, 并通过 TukeyHSD 多重比较分析不同种类蝙蝠回声定位脉冲主频差异。统计分析均在 R4.3.3 中进行, 古洞地形图在 ArcGIS 10.7 中制作。利用 Origin 2021 绘制日间洞内蝙蝠数量变化图和不同种类蝙蝠夜间声波序列数量的堆积折线图, 并通过 Adobe Illustrator 2022 优化图形。数据以平均值 $\pm$ 标准差 (mean $\pm$ SD) 表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 夏冬季洞内日间栖息蝙蝠种类和数量

通过对蝙蝠形态的观察, 发现夏季古洞内日间栖息 2 种蝙蝠: 马铁菊头蝠 (*Rhinolophus nippon*) (图 1D) 和伊氏鼠耳蝠 (*Myotis ikonnikovi*)。马铁菊头蝠数量在夏季的 9 次调查中并不稳定, 呈现先下降后上升的趋势。6 月平均 (18 ± 1) 只 (17 ~ 19 只); 7 月最少, 平均 (13 ± 2) 只 (11 ~ 15 只); 8 月平均 (18.33 ± 3.06) 只 (15 ~ 21 只) (图 2, 图 3)。仅在 7 月 15 日的调查中发现 1 只伊氏鼠耳蝠日间栖息于洞内。在冬季的调查中 (2023 年 12 月至次年 2 月) 均未发现在洞内冬眠的蝙蝠个体。单因素方差分析显示, 夏季 3 个月内日间栖息马铁菊头蝠数量差异显著 ($df = 5, P < 0.05$); TukeyHSD 多重比较结果显示, 6 月与 8 月马铁菊头蝠数量差异不显著, 其他月份间均差异显著 (图 2)。

7 月日间调查发现 2 次马铁菊头蝠母蝠紧抱幼蝠现象, 分别是 15 日 8 只成体中有 3 只 (37.5%) 怀抱幼蝠, 25 日 10 只成体中有 5 只 (50.0%) 怀抱幼蝠 (图 3)。可以证实该洞在夏季被马铁菊头蝠利用

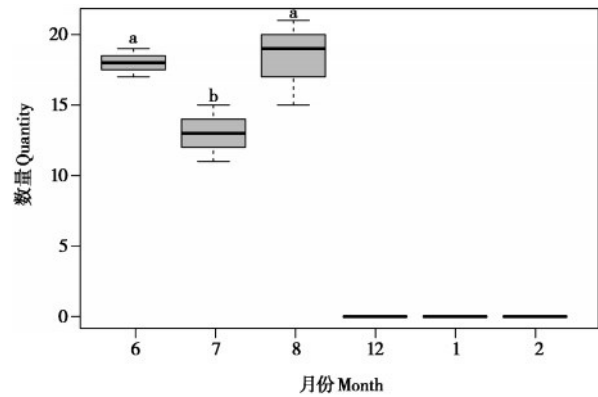


图2 夏冬季古洞栖息马铁菊头蝠数量月变化. 相同字母代表差异不显著, 不同字母代表差异显著

Fig. 2 Variation of the average number of *Rhinolophus nippon* inhabiting in Gu Cave every month in summer and winter. No significant difference between the same letters, different letters represent significant differences

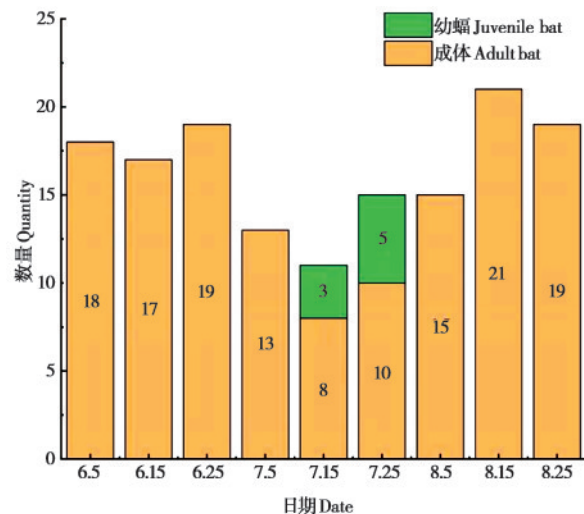


图3 古洞夏季马铁菊头蝠成体和幼蝠数量变化

Fig. 3 Changes in the number of adults and juveniles of *Rhinolophus nippon* in Gu Cave in summer

为繁殖地, 但为避免惊扰马铁菊头蝠, 未确认其他成体的性别和怀孕状态。8 月调查中幼蝠已成长为亚成体, 在不抓捕情况下难以确认亚成体, 因此未区分成体与亚成体数量。

2.2 夜间临时栖息蝙蝠活动规律

在夏季 9 次声学采样中, 除了日间洞内栖息的马铁菊头蝠外, 共记录到 4 种蝙蝠发出的 5 122 个回声定位脉冲序列。单因素方差结果显示, 阿拉善伏翼 (*Hypsugo alaschanicus*)、东亚伏翼 (*Pipistrellus abramus*)、东方蝙蝠 (*Vespertilio sinensis*)

和伊氏鼠耳蝠的回声定位声波主频差异显著 ($df = 3, P < 0.05$) (图 4A), 同时结合蝙蝠回声定位脉冲的声谱特征能够区分 4 种蝙蝠 (图 4B)。阿拉善伏翼的回声定位脉冲序列数量最多, 共 3 250 个; 东方蝙蝠和东亚伏翼的回声定位脉冲数量次之, 分别为 1 271 个和 488 个; 伊氏鼠耳蝠的回声定位脉冲数量最少, 仅 113 个。冬季未录制到蝙蝠的回声定位脉冲。Kruskal-Wallis 检验分析显示, 东方蝙蝠、东亚伏翼和伊氏鼠耳蝠的回声定位脉冲数量在夏季不同月份间差异不显著 ($df = 2, P > 0.05$),

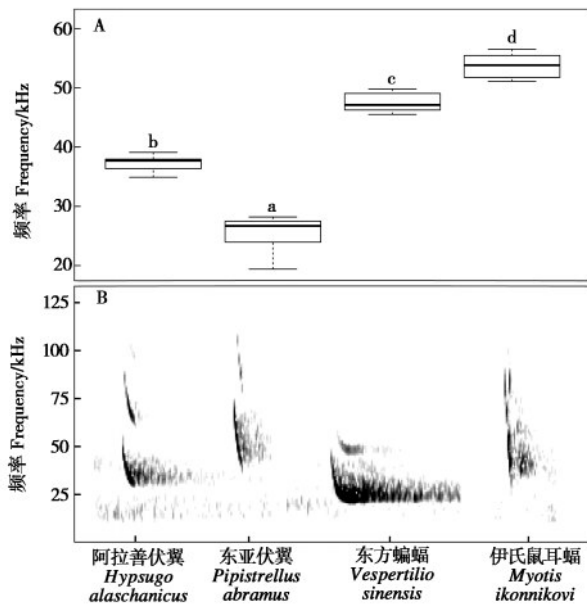


图 4 古洞 4 种蝙蝠回声定位脉冲主频差异 (A) 和声谱图 (B)。相同字母代表差异不显著, 不同字母代表差异显著

Fig. 4 The difference in dominant frequency (A) spectrum (B) and of echolocation pulses emitted by four species in Gu Cave. No significant difference between the same letters, different letters represent significant differences

Bonferroni 多重比较结果显示阿拉善伏翼的回声定位脉冲数量在 7 月和 8 月间差异显著 (表 1)。

夏季马铁菊头蝠与其他 4 种蝙蝠的夜间活动规律不一致。马铁菊头蝠在日落后平均 (27.78 ± 12.78) min (20 ~ 50 min) 时出现活跃高峰期, 随后洞内活动逐渐减少, 最后 1 只马铁菊头蝠出飞后 10 min 内未出现回声定位脉冲, 则视为该物种出飞结束。取 9 次采样中出飞结束最晚时间作为整体出飞结束时间, 即日落后 65 min (图 5A)。阿拉善伏翼 (图 5B) 和东方蝙蝠 (图 5C) 通常在马铁菊头蝠出洞后, 即第 55 min 和第 70 min 开始在洞内出现; 东亚伏翼 (图 5D) 和伊氏鼠耳蝠 (图 5E) 在马铁菊头蝠活跃高峰期分别出现 1 次 (第 35 min) 和 5 次 (1 次第 25 min、3 次第 30 min、1 次第 45 min)。图 5 明确了马铁菊头蝠日间在洞内栖息, 而其他 4 种蝙蝠在日落后出现, 将洞穴利用为夜间临时栖息地。单因素方差分析表明, 5 种蝙蝠活动水平呈现显著差异 ($df = 4, P < 0.05$), TukeyHSD 多重比较结果显示, 马铁菊头蝠 (4.98 ± 3.51) 次与阿拉善伏翼 (0.02 ± 0.04) 次、东亚蝠翼 (0.03 ± 0.10) 次、东方蝙蝠 (0 ± 0) 次、伊氏鼠耳蝠 (0.16 ± 0.33) 次的活动水平平均差异显著 ($P < 0.05$), 而其他 4 种蝙蝠的活动水平差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.3 古洞微气候与蝙蝠数量活动水平

多元方差分析显示, 2023 年 6—8 月和 2023 年 12 月至次年 2 月的 6 个月中平均最低温 ($F = 1\,754.58, P < 0.05$)、平均最高温 ($F = 1\,780.27, P < 0.05$)、平均温 ($F = 1\,851.06, P < 0.05$)、平均最低湿度 ($F = 416.78, P < 0.05$)、平均最高湿度 ($F = 541.90, P < 0.05$) 和平均湿度 ($F = 566.78,$

表 1 夏季古洞 4 种蝙蝠声波序列数 (mean $\pm$ SD)

Table 1 Number of echolocation pulse sequences of 4 bats in Gu Cave in summer (mean $\pm$ SD)

种类 Species	6 月 June	7 月 July	8 月 August	总回声定位脉冲数量 Total number of echolocation pulses
阿拉善伏翼 <i>Hypsugo alaschanicus</i>	457.33 $\pm$ 195.0 ^{ab} (264 ~ 654)	49.67 $\pm$ 47.93 ^a (21 ~ 105)	576.33 $\pm$ 375.09 ^b (343 ~ 1 009)	3 250
东亚伏翼 <i>Pipistrellus abramus</i>	88.00 $\pm$ 61.79 ^a (41 ~ 158)	54.00 $\pm$ 61.29 ^a (3 ~ 122)	20.67 $\pm$ 3.21 ^a (17 ~ 23)	488
东方蝙蝠 <i>Vespertilio sinensis</i>	116.33 $\pm$ 54.6 ^a (79 ~ 179)	51.33 $\pm$ 66.53 ^a (2 ~ 127)	256.00 $\pm$ 228.42 ^a (73 ~ 512)	1 271
伊氏鼠耳蝠 <i>Myotis ikonnikovi</i>	13.67 $\pm$ 15.53 ^a (1 ~ 31)	8.00 $\pm$ 9.64 ^a (1 ~ 19)	16.00 $\pm$ 16.09 ^a (1 ~ 33)	113

相同字母代表差异性不显著, 不同字母代表差异性显著

No significant difference between the same letters in the same row, different letters represent significant differences in the same row

$P < 0.05$) 均差异显著。多重比较结果显示, 6 个环境因子夏季各月份与冬季各月份间差异均显著 ($P < 0.05$)。夏季, 7 月与 8 月间的 6 个环境因子差异不显著 ($P > 0.05$); 6 月的 6 个环境因子与 7 月和 8 月均差异显著 ($P < 0.05$); 冬季, 12 月与 1 月间

的 3 个温度因子差异显著 ($P < 0.05$); 2 月的 3 个温度因子与 12 月和 1 月间均差异不显著 ($P > 0.05$); 3 个月份间的 3 个湿度因子均差异不显著 ($P > 0.05$) (表 2)。此结果也表明了该洞穴冬季微气候不适宜蝙蝠冬眠。

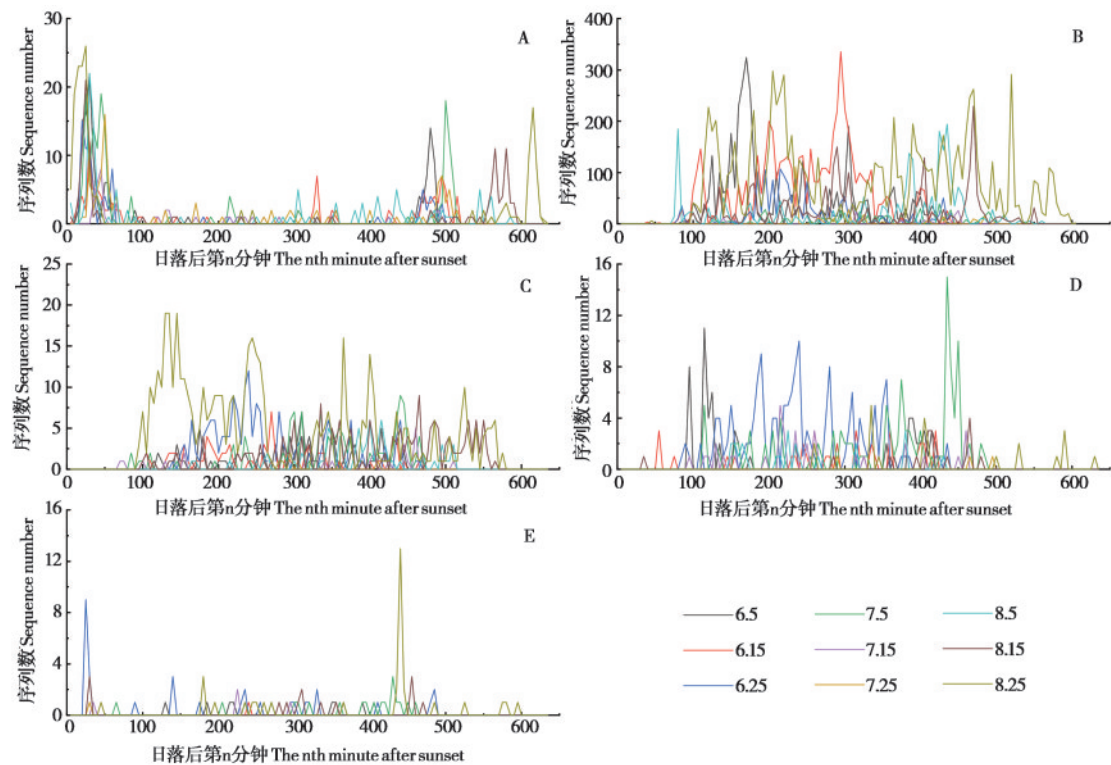


图 5 夏季 5 种蝙蝠回声定位声波数量变化. A: 马铁菊头蝠; B: 阿拉善伏翼; C: 东方蝙蝠; D: 东亚伏翼; E: 伊氏鼠耳蝠
Fig. 5 Changes in the number of echolocation sound waves varies of 5 species of bats in summer. A: *Rhinolophus nippon*; B: *Hypsugo alaschanicus*; C: *Vespertilio sinensis*; D: *Pipistrellus abramus*; E: *Myotis ikonnikovi*

表 2 不同月份古洞内部温度和湿度的变化规律 (mean $\pm$ SD)

Table 2 Variation of temperature and humidity in Gu Cave in different months (mean $\pm$ SD)

月份 Month	平均最低温 Mean minimum temperature/ $^{\circ}\text{C}$	平均最高温 Mean maximum temperature/ $^{\circ}\text{C}$	平均温 Mean temperature/ $^{\circ}\text{C}$	平均最低湿度 Mean minimum humidity/%	平均最高湿度 Mean maximum humidity/%	平均湿度 Medial humidity/%
6 月 June	13.52 $\pm$ 2.62 ^a	20.54 $\pm$ 4.05 ^a	14.98 $\pm$ 2.41 ^a	36.34 $\pm$ 5.43 ^a	98.24 $\pm$ 2.46 ^a	77.47 $\pm$ 4.83 ^a
7 月 July	17.41 $\pm$ 0.96 ^b	23.49 $\pm$ 1.52 ^b	18.99 $\pm$ 1.25 ^b	64.94 $\pm$ 7.15 ^b	99.39 $\pm$ 1.57 ^b	81.63 $\pm$ 14.25 ^b
8 月 August	17.92 $\pm$ 0.81 ^b	24.47 $\pm$ 1.77 ^b	20.16 $\pm$ 1.08 ^b	97.54 $\pm$ 9.53 ^b	99.47 $\pm$ 1.18 ^b	93.56 $\pm$ 23.14 ^b
12 月 December	-7.52 $\pm$ 5.69 ^c	2.41 $\pm$ 4.57 ^c	-2.92 $\pm$ 5.93 ^c	35.59 $\pm$ 6.86 ^c	68.49 $\pm$ 15.71 ^c	50.67 $\pm$ 14.23 ^c
1 月 January	-6.64 $\pm$ 3.32 ^d	2.7 $\pm$ 1.96 ^d	-1.97 $\pm$ 6.6 ^d	46.52 $\pm$ 3.93 ^c	76.94 $\pm$ 5.23 ^c	61.73 $\pm$ 21.51 ^c
2 月 February	-9.44 $\pm$ 5.53 ^{cd}	4.64 $\pm$ 1.40 ^{cd}	-4.8 $\pm$ 9.96 ^{cd}	34.66 $\pm$ 5.05 ^c	91.08 $\pm$ 4.94 ^c	62.87 $\pm$ 39.89 ^c
F	1 754.58	1 780.27	1 851.06	416.77	541.90	566.78
P	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05

不同月份间相同字母代表差异不显著, 不同字母代表差异显著
No significant difference between the same letters in the same column, different letters represent significant differences in the same column

由于冬季洞内无蝙蝠栖息，且夜间无蝙蝠活动，因此仅对夏季数据进行相关性检验。皮尔逊相关分析显示，夏季洞内栖息的马铁菊头蝠数量与平均最高温呈显著正相关 ($r = 0.76$, $P < 0.05$),

与其他微气候指标相关性不显著 ($P > 0.05$); 5 种蝙蝠夜间回声定位脉冲数量与古洞内微气候相关性均不显著 (all $P > 0.05$) (图 6)。

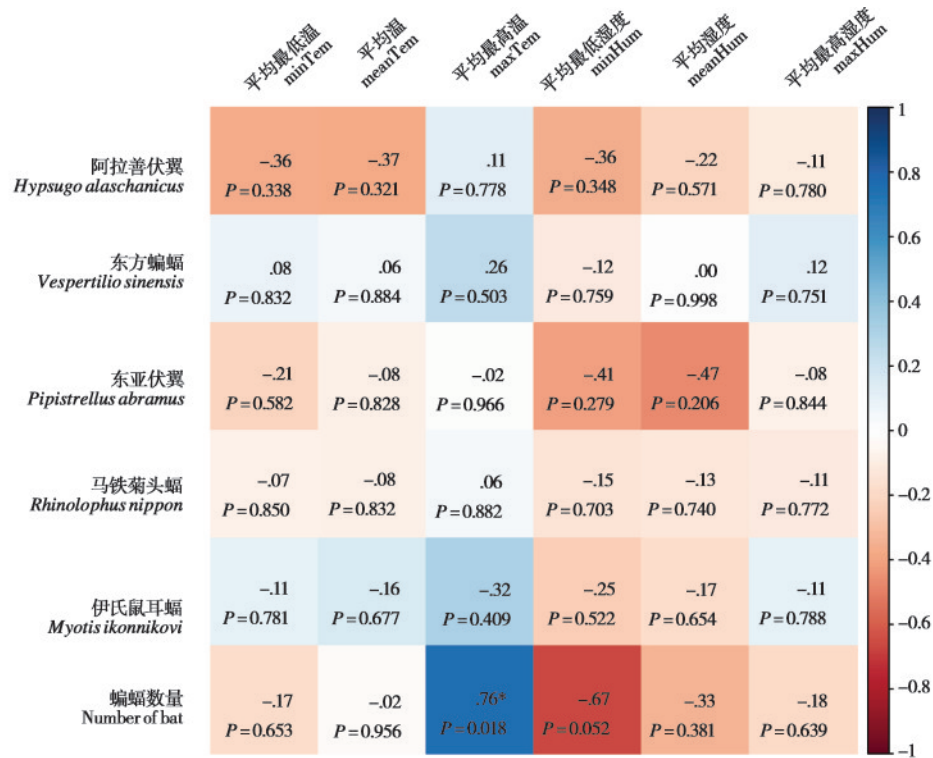


图6 夏季古洞内微气候与蝙蝠数量和活动水平的相关性矩阵

Fig. 6 Correlation matrix among microclimate, number of bats, and level of bat activity in Gu cave in summer. minTem: Mean minimum temperature; meanTem: Mean temperature; maxTem: Mean maximum temperature; minHum: Mean minimum humidity; meanHum: Mean humidity; maxHum: Mean maximum humidity

3 讨论

3.1 马铁菊头蝠夏季繁殖地

古洞夏季洞内温度低于洞外温度，而洞内湿度高于洞外湿度，这有助于降低蝙蝠活跃时的蒸发失水率，为胚胎的正常发育及幼蝠生长提供适宜环境 (Kunz, 1982)。本研究发现，夏季洞穴内存在马铁菊头蝠新生幼蝠，说明该洞被该物种作为夏季繁殖地。古洞所处地区夏季湿热多雨，洞内温、湿条件适宜，雌蝠不需要消耗额外能量保持恒定体温，从而能够利用更多的能量养育幼蝠 (Barclay, 1982)。并且洞穴所在区域周边分布大片树林和农田，具有较高的食物可获得性，约 30 m 处有一条狭窄但水量稳定的溪流，利于蝙蝠补充

水分。因此，古洞周边优质的环境能够提供丰富的食物资源和水源，成为马铁菊头蝠理想的夏季繁殖地。

除了被用作繁殖地，洞穴在温带蝙蝠栖息生态中还有另一个重要的作用，即作为冬眠地 (Zukal *et al.*, 2017)。冬眠行为是避免冬季极寒环境和食物短缺的适应性机制，稳定低温和高湿度的洞内微气候环境有助于降低蝙蝠体温及其代谢率 (Briggler and Prather, 2003)。Ransome (1968) 研究发现，阿肯色州西北部的马铁菊头蝠冬眠温度维持在 7 °C 左右，这有助于降低其体内储存能量的消耗速度；另一项研究同样发现，马铁菊头蝠在 7 ~ 8 °C 的环境冬眠状态最稳定 (Ransome, 1971)。本研究中，冬季未发现在洞穴内冬眠的食虫蝠，可能

由于大型洞穴内部温湿度梯度较大, 季节间变化较小, 适合蝙蝠选择冬眠栖息地 (Briggler and Prather, 2003), 但古洞面积较小, 本次调查的洞穴微气候数据显示, 冬季平均最低温达到 $(-9.44 \pm 5.53) ^\circ\text{C}$, 难以保存热量维持洞内适宜蝙蝠冬眠的温度, 因此马铁菊头蝠并未选择此洞作为冬眠地。

蝙蝠体表面积和体积比相对较高, 热量容易散失且蒸发失水率通常较高 (Webb *et al.*, 1995)。失水率高和频繁地苏醒转移 (Twente, 1955; Dwyer, 1968), 不仅提高热量消耗, 还降低越冬存活率。干燥的洞穴环境不利于保护蝙蝠脆弱的翼膜 (王艺霖等, 2021), 冬眠期间常因干燥的环境而觉醒 (Ben-Hamo *et al.*, 2013), 蝙蝠通常选择靠近水源 (Entwistle *et al.*, 1997) 或湿度较大的洞穴作为冬眠地 (王艺霖等, 2021)。Ransome (1971) 调查发现, 一只马铁菊头蝠在 76% 的相对湿度下连续冬眠 10 d 未觉醒。Paolo 和 Stefano (2013) 认为, 马铁菊头蝠在冬眠期间选择的栖息地具有相对较高的湿度。Winter 等 (2020) 发现地中海地区马铁菊头蝠栖息地的冬季相对湿度在 86% ~ 93% 之间。然而, 本研究区域冬季降水稀少, 空气干燥, 冬季洞穴内部湿度较低, 平均最低湿度 34.66%, 平均湿度仅 58.42%。同时, 冬季较低的气温导致附近小溪或零星水洼完全结冰, 难以保证蝙蝠觉醒后补充水分。因此, 冬季干燥的古洞环境不能为马铁菊头蝠提供理想的冬眠场所。

3.2 夜间蝙蝠临时栖息地

夜间临时栖息地研究有助于了解动物在夜间选择栖息地的策略, 对于野生动物种群保护及生态系统管理至关重要 (Barclay, 1982)。已有研究证实, 阿拉善伏翼、东亚伏翼、东方蝙蝠和伊氏鼠耳蝠在夜间捕食期间均存在利用临时栖息地的行为。阿拉善伏翼常选择老旧房屋的天花板 (Fukui *et al.*, 2015)、洞穴 (Fukui *et al.*, 2015; Funakoshi *et al.*, 2022) 和桥梁 (Chung *et al.*, 2009) 作为夜间临时栖息地; 东亚伏翼通常利用周围环境温暖的建筑物 (房屋或桥梁) (Funakoshi *et al.*, 2009), 也有学者在洞穴中发现临时栖息的东亚伏翼 (Liu *et al.*, 2019); 东方蝙蝠偏好桥梁下的缝隙 (Luo *et al.*, 2017; Zou *et al.*, 2024) 或旧建筑 (屋顶和屋檐) (Jin *et al.*, 2012), 更喜欢狭窄的空间而不是宽阔的洞

穴 (Sun *et al.*, 2020); 伊氏鼠耳蝠选择桥梁和高大的树木作为临时栖息地 (Kim *et al.*, 2014)。古洞内岩壁光滑, 没有隐蔽的缝隙供蝙蝠隐匿, 回声定位脉冲由于具有明显的物种特异性可作为监测蝙蝠活动的可靠指标 (赵建伦, 2016; Wang *et al.*, 2022; Zou *et al.*, 2022)。本研究声学监测设备在夜间共记录到 5 种蝙蝠回声定位声波, 因此, 对比马铁菊头蝠和其他蝙蝠在洞内发出的回声定位脉冲以及不同回声定位声波脉冲的出现时间, 可以判断夜间临时栖息的蝙蝠种类。本研究结果与 Fukui 等 (2015) 和 Liu 等 (2019) 的研究一致, 表明东亚伏翼夜间利用洞穴作为临时栖息场所。此外, 本研究结果还进一步证实东方蝙蝠和伊氏鼠耳蝠也将洞穴作为临时栖息地。

3.3 夏季蝙蝠数量变化与蝙蝠保护

诸多学者认为, 蝙蝠种群数量先减少后增加可能由多种因素造成, 如化学污染物扩散、栖息地干扰和破坏、气候变化、食物资源减少和竞争等 (Arlettaz *et al.*, 2000; Bontadina *et al.*, 2000; Zahn *et al.*, 2007; Van der Meij *et al.*, 2015)。Dahal 等 (2024) 在研究尼泊尔食虫蝠对气候变化的响应中发现, 平均最高温下降影响食物资源可用性, 并对蝙蝠的栖息地质量和繁衍产生影响。Węgiel 等 (2021) 也证实, 栖息地质量影响蝙蝠的种群动态。我们的野外调查发现, 马铁菊头蝠数量随着洞内温度降低而减少, 因此温度的降低可能是马铁菊头蝠数量减少的原因之一。

人类干扰是影响蝙蝠生存的主要威胁之一, 强烈的人为干扰严重影响蝙蝠正常的栖息、繁殖和冬眠, 迫使洞内栖息的蝙蝠离开洞穴重新寻找新的栖息场所 (Speakman *et al.*, 1991; Ho and Lee, 2003)。本研究期间发现 2 次人为干扰事件: (1) 据当地村民介绍, 7 月 2—4 日、7 月 12—14 日期间, 多人在古洞内频繁进行祭祀活动; 我们在 7 月 15 日的调查中也发现古洞内摆放大量祭祀物品, 地面有祭祀焚烧的残余灰烬。(2) 7 月 15 日夜间声学采样时, 在距离洞穴约 200 m 处有矿车开采矿石, 噪音持续约 2 ~ 3 h, 据当地村民所述已经采石 2 d, 采石一直持续了 4 d。人为干扰因素可能是迫使洞内栖息的部分蝙蝠个体离开 (Luo *et al.*, 2012), 导致 7 月洞内马铁菊头蝠个体数量减少的另一个原因。8 月马铁菊头蝠亚成体出现, 同时 7 月暂离的部分

个体可能陆续回到古洞, 使洞内蝙蝠数量呈增加的趋势。

本研究结合日间调查和夜间声学调查, 探究5种同域蝙蝠对古洞的利用策略。尽管古洞冬季的微气候不适合蝙蝠冬眠, 但是夏季被马铁菊头蝠、阿拉善伏翼、东亚伏翼、东方蝙蝠及伊氏鼠耳蝠作为繁殖地或夜间临时栖息地, 因此具有重要的保护价值。本研究发现, 洞穴周边村民祭祀和开矿活动能够减少日间蝙蝠栖息数量。因此, 建议野生动物保护管理部门加强针对古洞的日常保护与管理。例如在洞口设置仅允许蝙蝠进出的栅栏铁门, 并加强宣传蝙蝠不可代替的生态价值, 以减缓人为干扰对古洞栖息蝙蝠的负面影响。

致谢: 感谢四平市相关部门在野外调查中给予的支持与帮助。感谢长春师范大学研究生葛禹、周延泽及朱红靓在野外调查及数据收集上提供的帮助和建议, 感谢本科生吴科毅和戴承荣参与野外调查工作。

参考文献:

- Abdullah N I, Elias N A, Ohte N, Vincenot C. 2024. Resource partitioning among bat species in Peninsular Malaysia rice fields. *PeerJ*, **12**. DOI: 10.7717/peerj.16657.
- Anthony E, Stack M, Kunz T. 1981. Night roosting and the nocturnal time budget of the little brown bat, *Myotis lucifugus*: effects of reproductive status, prey density, and environmental conditions. *Oecologia*, **51**: 151–156.
- Arlettaz R, Godat S, Meyer H. 2000. Competition for food by expanding pipistrelle bat populations (*Pipistrellus pipistrellus*) might contribute to the decline of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*). *Biological Conservation*, **93** (1): 55–60.
- Barclay R M. 1982. Night roosting behavior of the little brown bat, *Myotis lucifugus*. *Journal of Mammalogy*, **63** (3): 464–474.
- Ben-Hamo M, Muñoz-García A, Williams J B, Korine C, Pinshow B. 2013. Waking to drink: rates of evaporative water loss determine arousal frequency in hibernating bats. *Journal of Experimental Biology*, **216** (4): 573–577.
- Bhalla I S, Razgour O, Rigal F, Whittaker R J. 2023. Insectivorous bats in Indian rice fields respond to moonlight, temperature, and insect activity. *Landscape Ecology*, **38** (11): 2947–2963.
- Bontadina F, Arlettaz R, Fankhauser T, Lutz M, Mühlethaler E, Theiler A, Zingg P. 2000. The lesser horseshoe bat *Rhinolophus hipposideros* in Switzerland: present status and research recommendations. *Le Rhinolophe*, **14** (May 2014): 69–83.
- Briggler J T, Prather J W. 2003. Seasonal use and selection of caves by the eastern pipistrelle bat (*Pipistrellus subflavus*). *The American Midland Naturalist*, **149** (2): 406–412.
- Chung C U, Han S H, Lee C I. 2009. Use of bridges as roosting site by bats (Chiroptera). *Korean Journal of Environment and Ecology*, **23** (4): 294–301.
- Dahal D, Thapa S, Singh N. 2024. Responses of insectivorous bats to climate change in Nepal. *Journal of Zoology*, **323** (1): 29–44.
- Deleva S, Toshkova N, Kolev M, Tanalogo K. 2023. Important underground roosts for bats in Bulgaria: current state and priorities for conservation. *Biodiversity Data Journal*, **11**. DOI: 10.3897/BDJ.11.e98734.
- Dwyer P. 1968. The biology, origin and adaptation of the *Miniopterus australis* (Chiroptera) in New South Wales. *Australian Journal of Zoology*, **16** (1): 49–68.
- Entwistle A, Racey P, Speakman J. 1997. Roost selection by the brown long-eared bat *Plecotus auritus*. *Journal of Applied Ecology*, **34**: 399–408.
- Fukui D, Hill D A, Kim S S, Han S H. 2015. Echolocation call structure of fourteen bat species in Korea. *Animal Systematics, Evolution and Diversity*, **31** (3): 160–175.
- Funakoshi K, Cheng H C, Tamura H, Hsu C W. 2022. A new record of *Hypsugo pulveratus* on Amami-Oshima Island, Japan and comparison with *H. alaschanicus*. *Mammal Study*, **47** (4): 1–9.
- Funakoshi K, Katahira R, Ikeda H. 2009. Night-roost usage and nocturnal behavior in the Japanese house-dwelling bat, *Pipistrellus abramus*. *Mammal Study*, **34** (3): 131–139.
- Funakoshi K, Maeda F. 2003. Foraging activity and night-roost usage in the Japanese greater horseshoe bat, *Rhinolophus ferrumequinum nippon*. *Mammal Study*, **28** (1): 1–10.
- Funakoshi K, Uchida T. 1982. Age composition of summer colonies in the Japanese house-dwelling bat, *Pipistrellus abramus*. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, **27** (1/2): 55–64.
- Furman A, Özgül A. 2002. Distribution of cave-dwelling bats and conservation status of underground habitats in the Istanbul area. *Ecological Research*, **17**: 69–77.
- Geluso K, Keele E C, Pauley N M, Gomez I R, Tye S P. 2018. Night-roosting behaviors for the northern long-eared myotis (*Myotis septentrionalis*) under a bridge revealed by time-lapse photography. *The American Midland Naturalist*, **179** (2): 287–293.
- Ho Y Y, Lee L L. 2003. Roost selection by Formosan leaf-nosed bats (*Hipposideros armiger terasensis*). *Zoological Science*, **20** (8): 1017–1024.
- Hazard Q C, Froidevaux J S, Yoh N, Moore J, Senawi J, Gibson L, Palmeirim A F. 2023. Foraging guild modulates insectivorous bat responses to habitat loss and insular fragmentation in peninsular Malaysia. *Biological Conservation*, **281**: 110017.
- Jin L, Wang J, Zhang Z, Sun K, Kanwal J S, Feng J. 2012. Postnatal development of morphological and vocal features in Asian particolored bat, *Vespertilio sinensis*. *Mammalian Biology*, **77**: 339–344.
- Jaberg C, Blant J D. 2003. Spatio-temporal utilisation of roosts by the parti-coloured bat *Vespertilio murinus* L., 1758 in Switzerland. *Mammalian Biology*, **68** (6): 341–350.
- Kasso M, Balakrishnan M. 2013. Ecological and economic impor-

- tance of bats (Order Chiroptera). *ISRN Biodiversity*, **2013** (1): 1–9.
- Kim S S, Fukui D, Han S H, Hur W H, Oh D S. 2014. Habitat characteristics of *Myotis ikonnikovi*. *Korean Journal of Ecology and Environment*, **47** (1): 41–52.
- Kunz T H. 1982. Roosting ecology of bats. In: Kunz T H ed. *Ecology of bats*. Springer, 1–55.
- Kunz T H, Braun de Torrez E, Bauer D, Lobova T, Fleming T H. 2011. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1223** (1): 1–38.
- Kunz T H, Lumsden L F, Fenton M. 2003. Ecology of cavity and foliage roosting bats. *Bat Ecology*, **1**: 3–89.
- Lewis S E. 1994. Night roosting ecology of pallid bats (*Antrozous pallidus*) in Oregon. *The American Midland Naturalist*, **132** (2): 219–226.
- Liu Q. 2014. Habitat selection and nest characteristics of *Cynopterus sphinx*. Master thesis. Shanghai: East China Normal University. (in Chinese)
- Liu Y, Wang Y, Zhang Z, Bu Y, Niu H. 2019. Roost selection and ecology of *Stoliczka's* trident bat, *Aselliscus stoliczkanus* (Hipposideridae, Chiroptera) in China. *Mammalian Biology*, **95**: 143–149.
- Luo B, Lu G, Chen K, Guo D, Huang X, Liu Y, Feng J. 2017. Social calls honestly signal female competitive ability in Asian particoloured bats. *Animal Behaviour*, **127**: 101–108.
- Luo J, Lu G, Feng J. 2012. Diurnal capture reduces the colony size of *Hipposideros armiger* (Chiroptera: Hipposideridae). *Mammalia*, **76** (4): 447–449.
- Paolo A, Stefano C. 2013. Where and at what time? Multiple roost use and emergence time in greater horseshoe bats (*Rhinolophus ferrumequinum*). *Acta Chiropterologica*, **15** (1): 113–120.
- Ransome R. 1968. The distribution of the Greater horse-shoe bat, *Rhinolophus ferrum-equinum*, during hibernation, in relation to environmental factors. *Journal of Zoology*, **154** (1): 77–112.
- Ransome R. 1971. The effect of ambient temperature on the arousal frequency of the hibernating greater horseshoe bat, *Rhinolophus ferrumequinum*, in relation to site selection and the hibernation state. *Journal of Zoology*, **164** (3): 353–371.
- Safitri Z, Prayogo H, Erianto E. 2020. Keanekaragaman Jenis Kelelawar (Chiroptera) di Kawasan Universitas Tanjungpura Kota Pontianak. *Jurnal Hutan Lestari*, **8** (2): 429–440.
- Speakman J, Webb P, Racey P. 1991. Effects of disturbance on the energy expenditure of hibernating bats. *Journal of Applied Ecology*, **28**: 1087–1104.
- Sun D, Li Y, Yin Z, Zhang K, Liu H, Liu Y, Feng J. 2020. Behavioural patterns and postnatal development in pups of the Asian particoloured bat, *Vespertilio sinensis*. *Animals*, **10** (8): 1325.
- Twente J W. 1955. Some aspects of habitat selection and other behavior of cavern-dwelling bats. *Ecology*, **36** (4): 706–732.
- Van der Meij T, Van Strien A, Haysom K, Dekker J, Russ J, Biala K, Bihari Z, Jansen E, Langton S, Kurali A. 2015. Return of the bats? A prototype indicator of trends in European bat populations in underground hibernacula. *Mammalian Biology*, **80**: 170–177.
- Wang W, Gao H, Li C, Deng Y, Zhou D, Li Y, Zhou W, Luo B, Liang H, Liu W. 2022. Airport noise disturbs foraging behavior of Japanese pipistrelle bats. *Ecology and Evolution*, **12** (6). DOI: 10.1002/ece3.8976.
- Webb P I, Speakman J R, Racey P A. 1996. How hot is a hibernaculum? A review of the temperatures at which bats hibernate. *Canadian Journal of Zoology*, **74** (4): 761–765.
- Węgiel A, Grzywiński W, Kosicki J Z, Tryjanowski P, Nowak J, Węgiel J. 2021. Long-term population trends of *Rhinolophus hipposideros* and *Myotis myotis* in Poland. *The European Zoological Journal*, **88** (1): 1189–1200.
- Winter R, Mantilla-Contreras J, Schmidt S. 2020. Usage of buildings in the life cycle of two endangered *Rhinolophus* species in the Mediterranean region: implications for roost protection. *European Journal of Wildlife Research*, **66**: 1–13.
- Wu J. The study on the protection countermeasure of geological heritage of Volcanic Natural Reserves of Siping Shanmen in Mesozoic. Master thesis. Changchun: Jilin University. (in Chinese)
- Wu T, Gong X Y, Huang T F, Peng L, Zhang Y X, Liu Z X. 2018. Preliminary investigation on species diversity of cave dwelling bats in Xiangxi Prefecture. *Chinese Journal of Wildlife*, **39** (4): 775–781. (in Chinese)
- Zahn A, Rodrigues L, Rainho A, Palmeirim J M. 2007. Critical times of the year for *Myotis myotis*, a temperate zone bat: roles of climate and food resources. *Acta Chiropterologica*, **9** (1): 115–125.
- Zhao J L. 2016. Identification of bat species by echolocation calls. Master thesis. Changchun: Northeast Normal University. (in Chinese)
- Zou W, Liang H, Wu P, Luo B, Zhou D, Liu W, Wu J, Fang L, Lei Y, Feng J. 2022. Correlated evolution of wing morphology and echolocation calls in bats. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **10**. DOI: 10.3389/fevo.2022.1031548.
- Zou W, Wu P, Wei X, Zhou D, Deng Y, Jiang Y, Luo B, Liu W, Huo J, Peng S. 2024. Artificial light affects foraging behavior of a synanthropic bat. *Integrative Zoology*, **19** (4): 710–720.
- Zukal J, Berková H, Bandouchová H, Kováčová V, Pikula J. 2017. Bats and caves: activity and ecology of bats wintering in caves. *Cave Investigation*. Rijeka: InTech, 51–75.
- 刘奇. 2014. 犬蝠 (*Cynopterus sphinx*) 栖息地选择及巢特征. 上海: 华东师范大学硕士学位论文.
- 吴际. 2011. 四平山门中生代火山自然保护区地质遗迹保护对策研究. 长春: 吉林大学硕士学位论文.
- 吴涛, 龚小燕, 黄太福, 彭乐, 张佑祥, 刘志霄. 2018. 湘西州洞栖性蝙蝠物种多样性的初步调查. *野生动物学报*, **39** (4): 775–781.
- 张顺. 1994. 四平市山门古洞喀斯特特征与旅游景点的开发利用问题. *松辽学刊: 自然科学版*, **23** (1): 94–97.
- 赵建伦. 2016. 运用回声定位声波鉴定蝙蝠种类研究. 长春: 东北师范大学硕士学位论文.
- 秦天柱, 陈长胜, 李德恒. 2017. 吉林省四平地区农业气候资源特征分析. *气象灾害防御*, **24** (2): 43–48.