



•综述• 中国野生脊椎动物鸣声监测与生物声学研究专题

被动声学监测技术在陆生哺乳动物研究中的应用、进展和展望

马海港¹, 范鹏来^{2,3*}

1. 中山大学生命科学院, 广州 510275; 2. 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西桂林 541006; 3. 广西师范大学生命科学学院, 动物生态学重点实验室, 广西桂林 541006

摘要: 被动声学监测(passive acoustic monitoring, PAM)技术指将自动录音机安装在自然环境中收集野生动物及其所在环境的声音信号的监测方法。20世纪90年代以来, PAM技术陆续被应用于翼手目和灵长目等陆生哺乳动物的监测和研究, 探究了陆生哺乳动物行为学、生态学和保护生物学等方面的科学问题。然而, 当前缺乏对这些研究的系统性总结和展望。本文从活动规律和时间分配、栖息地利用、物种分布、种群大小与密度、生物多样性、人为干扰的影响等领域综述了PAM技术在陆生哺乳动物中的研究进展, 并列举了相关应用实例。总体上, PAM技术涉及到生物学、生态学、声学、计算机科学等多学科的交叉融合, 其应用受限于声学数据的储存和管理、物种或个体自动化识别以及声学指数评估的普适性, 设备价格也相对昂贵, 这些可能是导致该技术在我国的陆生哺乳动物监测和研究方面的应用还相对滞后于其他国家的原因。最后, 本文对未来研究方向进行了展望, 并建议尽快建立和完善我国陆生哺乳动物PAM网络和数据共享平台、组织开展面对面访问调查或生物多样性保护相关的知识竞赛等公民科学项目、向更多科研机构或保护区推广PAM技术的应用, 使该技术成为陆生哺乳动物行为学、生态学、生物多样性保护等领域不可或缺的技术手段, 进一步服务于我国的生物多样性保护和生态文明建设。

关键词: 野生动物; 被动声学监测; 声音通讯; 生物多样性保护

马海港, 范鹏来 (2023) 被动声学监测技术在陆生哺乳动物研究中的应用、进展和展望. 生物多样性, 31, 22374. doi: 10.17520/biods.2022374.

Ma HG, Fan PL (2023) Application, progress, and future perspective of passive acoustic monitoring in terrestrial mammal research. Biodiversity Science, 31, 22374. doi: 10.17520/biods.2022374.

Application, progress, and future perspective of passive acoustic monitoring in terrestrial mammal research

Haigang Ma¹, Penglai Fan^{2,3*}

1 School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

2 Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Ministry of Education, Guilin, Guangxi 541006

3 Key Laboratory of Animal Ecology, School of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006

ABSTRACT

Background & Aims: Passive acoustic monitoring (PAM) is an observational method that collects acoustic signals of wildlife and the surrounding environment using automatic sound recorders. PAM itself is a multidisciplinary technique, integrating biology, ecology, acoustics, and computer science, and was developed in the 1990s first to study bats and primates. Since then, PAM has been utilized in a variety of research contexts to study animal behavior, ecology, and conservation biology. However, a systematic review of the progress of the field is lacking.

Progress: Here, we review how PAM has been used to monitor terrestrial mammal activity patterns, habitat use, species distribution, population size and density, biodiversity, and human influence. We also identify factors which prevent its wider application, such as the complexity of storing and managing acoustic data, limitations of acoustic indices,

收稿日期: 2022-07-01; 接受日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(31900335)、广西自然科学基金粤桂联合重点项目(2022GXNSFDA080004)和广西科技基地和人才专项(桂科AD21220028)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: fanpl@mailbox.gxnu.edu.cn

challenges associated with automated identification of species or individuals, and the overall cost of equipment. As a consequence, we observe limited use of PAM in terrestrial mammal research, especially in China.

Perspective: Finally, we discuss potential novel applications of PAM to study terrestrial mammals. We highlight the importance of establishing and improving standardized PAM networks and data management platforms, developing citizen science programs, encouraging participation of more scientific institutions, and expanding the presence of acoustic monitors particularly throughout protected areas. PAM is an indispensable technique which can further support efforts to conserve biodiversity and increase ecological consciousness in China.

Key words: wildlife; passive acoustic monitoring (PAM); vocal communication; biodiversity conservation

人类社会的发展对野生动物赖以生存的栖息地和食物资源造成严重威胁(Evers et al, 2018), 导致很多物种处于濒临灭绝的状态(Hui, 2022; Johnson et al, 2017)。为了更好地、有针对性地保护野生动物, 亟需采用高效的方式开展野生动物的种群动态、栖息地利用和行为等方面的监测和保护管理工作(Grooten & Almond, 2018)。声音信号可以向多个方向传播, 还可以穿过物理障碍进行远距离传播(Ma et al, 2020), 因此基于动物叫声特征开发的被动声学监测(passive acoustic monitoring, PAM)技术已成为生物多样性评估的一项重要手段(Rosenstock et al, 2002; Weir & Mossman, 2005)。该技术指将声音传感器(以下称自动录音机)安装在野外环境中收集野生动物及其所在环境的声音信号的监测方法(Parker, 1991; Sugai & Llusia, 2018)。自动录音机的数量可以是单一的, 也可以是多个的, 录音机矩阵能同步收集声音信号数据(Blumstein et al, 2011)。PAM技术在野外应用时能够根据需求选择特定时间段进行声音数据的收集(Dufourq et al, 2021)。与耗费大量的人力、物力和财力并且会侵扰动物的传统的距离抽样法(Buckland et al, 2010; 李月辉, 2021)和标志重捕法(Markolf et al, 2022)相比, PAM技术具有非侵入性, 监测成本更低, 调查物种(尤其是对人类敏感的、种群密度低的濒危物种)范围更广、时空尺度更大等优势(Froidevaux et al, 2014)。

历史上, PAM技术首先被应用于水生动物的监测和研究, 直到20世纪90年代该技术才被推广至陆生哺乳动物(Sugai et al, 2018)。相较于海洋环境, 栖息在茂密森林环境中的动物类群丰富多样、隐蔽性强、种群密度低, 声音信号传播还会受到植被影响, 这导致PAM技术监测陆生哺乳动物时收集的时空数据偏差较大(Myers et al, 2000; Zwerts et al, 2021)。另一方面, 森林中存在的声音信号特别复杂, 对信

号的区分和识别非常困难, 也可能造成不准确的监测结果以及过高的物种识别成本等(Heinicke et al, 2015)。然而, 随着科技的发展, 近几年PAM技术在长臂猿(Vu & Tran, 2019; Vu & Doherty, 2021; 钟恩主等, 2021; Wang et al, 2022)、蝙蝠(Dubos et al, 2021)、非洲象(*Loxodonta africana*, Thompson et al, 2010)、梅花鹿(*Cervus Nippon*, Enari et al, 2017)、黑猩猩(*Pan troglodytes*, Anders et al, 2021)等陆生哺乳动物中的监测和研究逐渐增多。

目前为止, 在我国PAM技术主要被用于划分和评价声景类型(蔡学林等, 2010)、声景中鸟类生物多样性(蒋锦刚等, 2016)以及探究森林生态系统中声学指数与海拔、植被类型之间的关系(Chen et al, 2021)。然而, 该技术在陆生哺乳动物监测和研究的应用几乎处于空白状态, 仅被用于两种濒危长臂猿的监测。例如, Dufourq等(2021)使用自动录音机录制了海南长臂猿(*Nomascus hainanus*)栖息地声学数据, 开发并应用物种自动识别模型从这些声学数据中提取出了海南长臂猿的鸣叫声, 证明了PAM技术结合物种自动识别模型是长期监测海南长臂猿种群动态的有效工具。钟恩主等(2021)设计了一套包含指向性拾音器阵列的PAM系统来用于西黑冠长臂猿(*Nomascus concolor*)的监测, 该监测系统实现了太阳能供电、无线网桥实时传输声学数据。为了推动PAM技术在我国的发展, 本文简要综述了PAM技术在全球陆生哺乳动物研究中应用的历史背景和现状, 并讨论了可能面临的一些挑战以及未来的发展趋势, 以期促进我国陆生哺乳动物行为学、生态学、生物多样性保护等方面的研究工作。

1 历史背景

PAM技术的首次应用要追溯到20世纪初期的水下环境监测, 甚至还被用于军事侦察(Sousa-Lima et al, 2013; Piel et al, 2022)。20世纪50年代以来,

PAM技术开始被应用于渔业科学(Nordeide & Kjellsby, 1999; Hawkins & Amorim, 2000; Lobel, 2002)。20世纪80年代, 随着成本更低、操作更简单的水下自动录音机的出现, PAM技术开始被用于水生哺乳动物的定位和研究(Clark, 1980; Fripp et al, 2005; Mellinger & Heimlich, 2013)。PAM技术在陆地生态系统中的应用晚于水生生态系统, 直到20世纪90年代才逐渐出现在陆生哺乳动物的监测和研究中。实际上, PAM技术的发展与收集动物声音信号技术的革新呈现相辅相成的态势(Obrist et al, 2010)。从早期便携式的磁带录音机, 到数字录音机再到自动录音机, 每一次新技术的出现都极大地推动了PAM技术应用的快速发展(Parker, 1991; Vielliard, 1993)。AudioMoth和Solo这类可定制的低成本的生物声学传感器的出现预示着PAM技术新的发展阶段可能已经来临(Whytock & Christie, 2016)。PAM技术的发展也有助于研究人员更好地储存数据以及挖掘动物行为信息。

根据与PAM技术相关的科学问题、研究对象以及学科之间的交叉融合程度, PAM技术的发展被划分为3个阶段。2000年以前主要使用PAM技术调查本底资源、目标动物的活动规律以及探究动物如何利用栖息地, 称为PAM技术的建立阶段。2000–2010年期间, PAM技术开始被应用于保护生物学、群落生态学和生态声学等多个学科, 因此该阶段被称为PAM技术的扩展阶段。2010年之后, 进一步整合了前两个阶段涉及的相关科学问题, 并基于人工智能的分析方法完成了PAM技术的快速积累过程, 称为PAM技术的整合阶段(Sugai et al, 2018)。1990–2018年间, 围绕PAM技术在陆地生态系统的应用和研究发表的文章经历了一个指数增长过程(Sugai et al, 2018)。然而, 无论是从研究数量还是从研究领域的角度来看, 大多数研究都集中在翼手目和灵长目, 其他陆生哺乳动物的研究仍然较少(Wrege et al, 2017)。

2 研究现状

2.1 活动规律和时间分配

声音通讯行为是很多陆生哺乳动物最重要的行为之一(Charlton et al, 2010; Wyman et al, 2012), 叫声可以传播发声者物种、位置、数量、性别、个

体等信息(McGregor, 2005; Wilkins et al, 2013; Fan et al, 2019), 能够实现警报危险(Blumstein & Daniel, 2004)、防御领域(Ma et al, 2020)、吸引配偶(Milich et al, 2014)等功能。PAM技术能够自动记录和储存声音信号, 并且可以在野外24 h不间断地工作, 这为探究全天候的声音通讯行为提供了条件。例如, 采用PAM技术探究了圭亚那红吼猴(*Alouatta macconnelli*)昼夜鸣叫的时空模式和声音结构的异同, 发现其主要在夜间鸣叫, 而在白天绝大多数时间都不发出叫声, 夜间的叫声持续时间更长, 频率和谐波/噪音比更低(Nascimento et al, 2021)。虽然动物的行为研究可能只针对单一行为, 但研究结果往往还能对其他行为提供启示。因此, PAM技术在探究声音通讯行为的同时, 往往还能对其他行为提供一定的参考价值。基于PAM技术的研究发现考拉(*Phascolarctos cinereus*)的叫声模式受到其繁殖状态的影响, 雄性考拉的叫声在繁殖季节有清晰的日节律和周节律, 并且考拉的繁殖状态还会影响种群调查结果(Hagens et al, 2018)。

有些陆生哺乳动物的移动能力强, 活动范围较大, 栖息地环境不利于人类接近, 对人类的观察也十分敏感, 如果没有一定的习惯化基础, 科研人员几乎不可能通过直接观察获得野外种群的行为学数据。然而, PAM技术非常适用于监测和研究未习惯化、活动隐秘且数量稀少的物种, 由此获得珍贵、有效的科研数据。例如, 利用PAM技术评估了未习惯化的黑猩猩的24 h发声模式, 发现其在一天中的所有时间都会发出叫声, 但白天发出的叫声要明显多于夜间, 同时存在清晨和傍晚两个鸣叫高峰期。研究还表明黑猩猩在温度较高、湿度较低的环境中鸣叫次数更多, 且下雨和刮风对它们的鸣叫没有影响(Piel, 2018)。

2.2 栖息地利用

PAM技术是探究陆生哺乳动物如何利用栖息地及其偏好的理想工具, 该技术可以通过记录叫声的有无和强度评估动物对栖息地的利用和偏好强度(Hending et al, 2017)。例如, 使用PAM技术监测新热带蝙蝠对树冠和林下层的利用模式, 发现袋翼蝠(*Cormura brevirostris*)更喜欢在林冠层活动, 粗毛蝠(*Centronycteris maximiliani*)偏好在林下层(Gomes et al, 2020)。不同栖息地的植被结构和气候特征存在

差异, 这些特征影响和塑造了动物声音信号的声学特征(Wiley & Richards, 1982; Slabbekoorn & Smith, 2002), 因此还可以通过探究动物叫声的变化了解栖息地的变化。

将PAM技术与GPS等移动传感器结合起来探究陆生哺乳动物栖息地利用和偏好模式逐渐成为一种趋势。这些研究不仅能从单一物种水平探究动物的移动模式和空间利用模式, 还可以从多物种和大数据的角度建立移动数据库, 从而更好地理解动物的时空分布和运动特征(Lynch et al, 2013; Cvikel et al, 2015; Supp et al, 2021)。例如, 利用PAM技术调查黑猩猩在热带森林和热带草原林地中的移动行为、空间分布, 及其利用和防御领域的时空变化特征, 发现黑猩猩叫声位点的空间模式和已知黑猩猩群体的空间位置几乎相同。此外, 黑猩猩在家域核心区的移动模式在不同月份间存在差异(Kalan et al, 2016)。PAM技术也被用于探索蝙蝠的飞行路径, 研究发现水鼠耳蝠(*Myotis daubentoni*)在沿河流上方飞行时总是保持恒定的高度(Wallis & Elmeros, 2020)。总体而言, 当观察时间和地点受限时, PAM技术在探究动物行为模式、时间分配以及栖息地利用等方面具有得天独厚的优势和应用前景。

2.3 物种分布

了解物种分布信息是野生动物保护的基本前提之一, 近年来PAM技术陆续被用于调查野生陆生哺乳动物的分布状况(Garland et al, 2020)。PAM技术最初主要用来调查夜间活动且具有回声定位行为的蝙蝠(Banner et al, 2018)。随着声学传感器的精度提升, 应用范围扩大到考拉(Hagens et al, 2018)、非洲象(Thompson et al, 2010; Wrege et al, 2017)、狼(*Canis lupus*, Papin et al, 2018)以及灵长类(Spillmann et al, 2015)。Papin等(2018)探索了如何使用有限的自动录音机矩阵探究狼的分布, 结果显示狼的叫声能够被至少一台自动录音机捕捉到, 表明使用低密度自动录音机矩阵也能在大面积(30 km²)范围内调查目标物种的分布。利用PAM技术调查物种分布的相关研究已经在很多物种中开展, 但不同物种间的研究依然存在偏倚, 尤以蝙蝠分布的研究突出。

2.4 种群大小与密度

PAM技术可以有效估算动物种群大小和密度,

促进物种保护和管理工作。例如, 利用PAM技术对亚洲胡狼(*Canis aureus*)的种群密度展开调查, 记录到的42个声音信号中的18个(43%)是由个体单独发出的, 而在集体鸣叫中参与的亚洲胡狼个体数最多能达到5个(Comazzi et al, 2016)。Payne等(2003)发现非洲象的发声活动随群体大小、组成的不同而不同。他们比较了59头非洲象的发声密度, 发现它们的呼叫率随着非洲象数量的增加而增加。在有些区域, 梅花鹿分布区的不断扩大带来了生态威胁, PAM技术可以监测入侵初期的梅花鹿, 从而及时采取措施预防性控制其种群密度(Enari et al, 2017)。

2.5 生物多样性

利用PAM技术不仅可以实现种群水平上的监测, 而且还可以估计某一区域动物的物种丰度(MacSwiney et al, 2008; Heinicke et al, 2015)。MacSwiney等(2020)使用PAM技术调查了墨西哥中部干旱生态系统中食虫蝙蝠的物种丰度, 通过声学分析发现了该区域存在6种蝙蝠。Heinicke等(2015)在科特迪瓦国家公园通过PAM技术调查了灵长类的物种丰度, 结合高斯混合模型等多个自动识别系统进行物种识别, 最终识别出黑猩猩、黛安娜长尾猴(*Cercopithecus diana*)、黑白疣猴(*Colobus polykomos*)、红绿疣猴(*Procolobus badius*), 且黛安娜长尾猴和黑白疣猴的识别成功率要高于另两种。

通过PAM技术获取的声学数据也可以用于揭示声音变异和系统发育之间的关系, 从而更好地理解声音信号的演化。Luo等(2017)研究了5科31种蝙蝠的攻击性叫声的声学特征是否受系统发育关系的影响, 结果发现系统发育关系决定了叫声的持续时间和最小频率。除此之外, 该研究还发现蝙蝠的社会性、形态特征也会导致叫声差异。然而, 当前探索声音变异和系统发育之间的关系依然存在诸多挑战。一方面, 研究人员很难连续地对声音信号进行记录和测量, 尤其是那些具有复杂结构的声音信号; 另一方面, 需要选择合适的系统发育比较分析方法。目前, 贝叶斯祖先状态重建和系统发育控制混合模型可能是比较先进的系统发育比较分析方法, 这些方法可以同时考虑系统发育树以及复杂的数据结构的不确定性(Odom et al, 2021)。

许多地区的物种或个体的基础声学数据库缺乏, 识别物种或个体大多数时候只能依赖于人工,

从而造成评估生物多样性等相关研究工作异常繁重。随着人工智能和生物多样性保护的发展, 生态声学或声景生态学逐渐成为突破以上研究限制的新兴领域(Pijanowski et al, 2011; Sueur & Farina, 2015)。声景生态学旨在采用全谱图方法来量化声学记录中的生物声音水平, 使用声学指数来总结声音的声谱和时间特征, 然后探索其与生物多样性、景观特征和人为干扰之间的关系, 而不仅仅限于识别单个物种或个体(Pijanowski et al, 2011; Sueur & Farina, 2015)。然而, 目前声景生态学更倾向于评估昆虫和鸟类群落中的物种丰度、多度或组成, 以及某一区域环境的声景变化, 而很少应用于陆生哺乳动物(赵莹等, 2020)。

2.6 人为干扰的影响

探究人为干扰对陆生哺乳动物声音通讯及其他行为的影响也越来越受到关注, 这些研究有助于理解人类活动和动物行为之间的关系, 为生物多样性保护提供理论基础。利用PAM技术评估了非洲中部的非洲象受到石油地震勘探噪声影响后的行为变化, 发现非洲象数量和活动的变化与炸药爆炸和人类活动产生的声波、地震信号的频率和强度有关(Wrege et al, 2010)。Duarte等(2018)检验了黑额伶猴(*Callicebus nigrifrons*)当处于不同噪音水平的环境时(一个靠近露天煤矿, 另一个不靠近)它们的叫声频率、持续时间以及日间模式是否会发生变化。结果表明, 黑额伶猴的叫声与采矿噪声具有相似的频率, 并且采矿噪声的增加可能会影响黑额伶猴的远距离声音通讯模式。

不同型号的枪支射击时的声音存在差异, PAM技术可以监测环境中的枪声等人造声音从而监测非法盗猎活动。在喀麦隆的库尔鲁普国家公园中的非法盗猎者大多使用12号霰弹枪, 采用PAM技术记录并分析了该国家公园南部地区的枪声信号以此来评估了当地的非法盗猎活动(Astaras et al, 2015)。PAM技术还被用来监测和评估生态系统受干扰后生态恢复过程中的声景变化、动物对生态系统恢复的反应以及评估恢复工作的有效性, 然而目前这方面的证据更多来自于鸟、水生生物和昆虫, 陆生哺乳动物类群相关研究还未见报道。例如, 已有研究利用PAM技术记录并评估了哥斯达黎加瓜纳卡斯特保护区的鸟类群落, 发现鸟类物种多样性、丰富

度和丰度随着森林的不断恢复而增加(Owen et al, 2020)。

由人类造成的物种灭绝或引入可能影响生态系统的结构和服务功能, PAM技术也被用于评估物种入侵过程中生物多样性变化的动态过程。例如, 基于PAM技术的数据分析发现, 经入侵种北美河狸(*Castor canadensis*)改造产生的池塘和草地栖息地中的鸟类声音信号多样性会变高(Francomano et al, 2021)。

3 挑战和展望

3.1 挑战

首先, 声学数据的储存和管理可能会是未来PAM技术应用的挑战之一。PAM技术经常被应用于长时间尺度的研究和保护, 自动录音机会在长期监测过程中通常按时间顺序收集大量声学数据(Sugai & Llusia, 2018)。为了确保声学数据不被损害或丢失, 未来需要高端的大数据储存设备(Dena et al, 2018)。虽然在线储存声学数据已经成为趋势, 但扩大储存空间、保障网络数据安全仍需关注(Kasten et al, 2012; Aide et al, 2013)。另外, 可能还需要聘请专业人员负责管理大量的声学数据(Riede, 2018)。

其次, 实现自动化物种或个体识别是当前PAM技术在陆生哺乳动物应用中的另一重大挑战。物种或个体识别是进行很多行为学和生物多样性保护研究的重要前提, 无法实现自动化识别将严重制约研究的进展(刘雪华等, 2018)。当前, 基于PAM的半自动化物种或个体识别技术已经在部分陆生哺乳动物应用, 但其应用范围窄、应用过程严重依赖科研人员的丰富经验和巨大的时间成本(Andreassen et al, 2014; Heinicke et al, 2015; Newson et al, 2015)。从事动物相关研究的学者往往不具备人工智能方向的知识积淀, 很多智能识别工具的开发权和使用权限限制在部分商业机构而不能开源使用, 因此已有工具的准确性和稳定性缺乏有效的评估和优化是制约自动化识别物种或个体的主要原因。未来, 应进一步鼓励学科之间的交叉融合, 在陆生哺乳动物的声音通讯行为研究的基础之上建立声音数据库, 开发并评估自动化的物种或个体识别开源软件, 以有效应对这一挑战。

最后, 如何评估已有声学指数在特定生态系统

中的普适性也是PAM技术应用面临的一个重要挑战。虽然声学指数为评估生物多样性以及声景动态提供了很多见解(Lomolino et al, 2015), 但声学指数与实际的生物多样性之间的关系仍需有效评估(王言一等, 2023), 声学指数在不同生态系统和类群中的总体有效性仍不清楚(Gasc et al, 2013; Lellouch et al, 2014)。这意味着仍需使用PAM技术之外的其他方法收集生物多样性数据(Harris et al, 2016)。更重要的是, 天气条件、背景噪音等外部环境会对声学指数的应用产生不可忽视的影响(Farina et al, 2011), 从而限制声学指数的适用性(Fairbrass et al, 2017)。通过多种方式与PAM技术同步收集生物多样性数据并对其关系进行有效性评估, 在此基础上发展稳健的、广适性的声学指数是应对该挑战的必要策略(Pekin et al, 2012)。同时, 需要制定统一标准的PAM技术应用指南。录音时间、地点、范围等标准应该成为指南中必不可少的内容, PAM技术应用所需要的自动录音机和后期数据分析的软件介绍也应该成为该指南的重要内容(Brandes, 2008; Roch et al, 2016)。

3.2 展望

随着我国生物多样性就地保护和管理体系的建立以及多项严格的生物多样性保护恢复措施的实施, 大熊猫(*Ailuropoda melanoluca*)、川金丝猴(*Rhinopithecus roxellanae*)等多种珍稀濒危物种得到了有效保护(魏辅文, 2016)。然而, 由于调查方法的局限性, 我国依然有很多种陆生哺乳动物的种群数量未调查清楚, 未实现持续性监测。比如, 采用直接观察、红外相机等方法很难确定东黑冠长臂猿(*Nomascus nasutus*)、白头叶猴(*Trachypithecus leucocephalus*)等栖息在喀斯特石山森林中的珍稀濒危灵长类动物的种群数量、动态和栖息地利用状况。PAM技术在监测和研究这些树栖、能够发出鸣叫(唱)声的物种方面具有得天独厚的优势。尽管PAM技术的发展及其在陆生哺乳动物中的应用已经过去了几十年, 但国内很多保护区、科研机构或公众对该技术仍然非常陌生, 其内在的理论和应用前景仅被少数人所熟知。因此, 应快速推进PAM技术在国内一线科研团队和保护地操作和应用。

公民科学已经是生物多样性保护的关键力量, 极大地促进了物种分布、种群大小等信息库的建立

(Heigl et al, 2019)。公民科学被认为是生物多样性监测网络的扩展, 尤其是一些缺少自动化监测的非科研热点区域。然而, 由于绝大多数公民对PAM技术尚不了解, 国内尚未设立PAM技术与公民科学相结合的项目。因此, 本文建议国内科研团队或保护区印刷相关的宣传册、悬挂宣传标语的指示牌、定期开展面对面访问调查、组织举办相关知识竞赛, 在其所在的单位、社区、学校推广PAM技术, 宣传生物多样性保护的重要性。科研团队或保护区还可以依靠网络平台开展相关线上讲座, 撰写推送科普文章、音频或短视频, 招募志愿者和科研人员或保护区工作人员一起安装自动录音机等, 进而全方位多层次促进社会大众对PAM技术和生物多样性保护重要性的了解。


在全球气候变化和人为干扰不断加剧的背景下, 围绕PAM技术建立多维度的监测网络与数据共享平台(声学传感器网络、跨区域监测网络、跨类群监测网络、多技术同步网络), 在更广的时空尺度上收集多动物类群及其所栖息的生态系统中的声学数据应是生物多样性保护的优先发展方向。整体而言, PAM技术在不同国家或地区的应用程度参差不齐。法国、日本、加拿大等国家已经开始大规模地利用PAM技术监测生物多样性(Cosentino et al, 2014; Saito et al, 2015; Jeliakov et al, 2016)。我国作为全球生物多样性最为丰富的国家之一, 物种数量多, 特有物种的比例高(魏辅文等, 2021)。然而, 当前我国搭建的PAM技术监测网络非常少(赵莹等, 2020), 很难做到对珍稀濒危物种和区域生态系统的长期有效监测。因此, 为了更好地推动中国PAM技术应用网络的建立, 国内不同动物类群的研究团队以及声学数据自动识别研发团队之间可以积极开展合作。建议由历史悠久、科研实力雄厚的科研单位牵头, 其他高校科研院所参与, 以保护区或国家公园为基本单元, 统一布设自动录音机, 完善生物多样性监测管理系统。在系统运行之前, 各个团队之间可以签署数据和技术共享协议, 定期培训相关人员, 在数据收集方案设计、调查指南、数据格式等方面实现统一化和标准化。在系统运行之后, 成立生物、生态声学相关的专业性学术组织, 定期开展学术研讨会议, 集中力量解决共同关注的科学问题, 实时沟通在研究过程中遇到的理论性和技术性难题。海

南长臂猿是全球最濒危的灵长类之一, 它们可以发出洪亮、传播距离远的鸣叫声, 具备采用PAM技术开展研究的良好理论和实践基础。因此我们建议率先在海南长臂猿栖息的热带雨林中开展PAM试点研究。

虽然PAM技术在一些陆生哺乳动物的研究领域得到应用, 但该技术仍然存在一定的局限性。例如, 有些物种虽然具有声音通讯行为, 但这些声音信号的发生频次和声响都很低, 声音信号也易受到环境噪音的干扰, 不利于自动录音机收集声音信号。使用或开发PAM技术之前应了解目标类群和它们的栖息环境。在海洋生态系统中应用PAM技术时受到的噪声影响更多来自渔船、客船或货船, 而陆生环境中的噪音可能更多地来自人的交谈声、伐木声、广播声、交通噪声等。有些陆生哺乳动物会产生超声波和次声波, 开发自动录音机时也应考虑录音机的频率响应范围。最后, 当前大部分自动录音机的价格仍然比较昂贵, 科研人员或保护地工作者很难承担相应的设备购买费用。为了更好地推动PAM技术在陆生哺乳动物中的应用, 建议国内或国际技术公司研发更多可定制的、低成本的自动录音机, 智能手机公司亦可开发形式多样、便于操作的声学APP。

致谢: 感谢中山大学生命科学学院范鹏飞教授对本文构思给予的建议, 以及张璐副教授、汪巧云、陈涛、郑凯丹、韩普、郭亭妍、王子荻等对完善本文写作的建议和无私支持!

ORCID

范鹏来  <https://orcid.org/0000-0002-3471-8294>

参考文献

- Aide TM, Corrada-Bravo C, Campos-Cerqueira M, Milan C, Vega G, Alvarez R (2013) Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ*, 1, e103.
- Anders F, Kalan AK, Kühl HS, Fuchs M (2021) Compensating class imbalance for acoustic chimpanzee detection with convolutional recurrent neural networks. *Ecological Informatics*, 65, 101423.
- Andreassen T, Surlykke A, Hallam J (2014) Semi-automatic long-term acoustic surveying: A case study with bats. *Ecological Informatics*, 21, 13–24.
- Astaras C, MacDonald DW, Wrege P, Linder JM (2015) Darwin Initiative Annual Report: Improving Anti-Poaching Patrol Evaluation and Design in African Rainforests. <https://www.darwininitiative.org.uk/project/DAR20012/>. (accessed on 2022-06-09)
- Banner KM, Irvine KM, Rodhouse TJ, Wright WJ, Rodriguez RM, Litt AR (2018) Improving geographically extensive acoustic survey designs for modeling species occurrence with imperfect detection and misidentification. *Ecology and Evolution*, 8, 6144–6156.
- Blumstein DT, Daniel JC (2004) Yellow-bellied marmots discriminate among the alarm calls of individuals and are more responsive to the calls from juveniles. *Animal Behaviour*, 68, 1257–1265.
- Blumstein DT, Mennill DJ, Clemins P, Girod L, Yao K, Patricelli G, Deppe JL, Krakauer AH, Clark C, Cortopassi KA, Hanser SF, McCowan B, Ali AM, Kirschel ANG (2011) Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: Applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48, 758–767.
- Brandes ST (2008) Automated sound recording and analysis techniques for bird surveys and conservation. *Bird Conservation International*, 18, S163–S173.
- Buckland ST, Plumptre AJ, Thomas L, Rexstad EA (2010) Line transect sampling of primates: Can animal-to-observer distance methods work? *International Journal of Primatology*, 31, 485–499.
- Cai XL, Liao WM, Zhang TH, Li XM, Chen FP, Deng RG (2010) Classification and evaluation of forest soundscape types. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 32, 1195–1201. (in Chinese with English abstract) [蔡学林, 廖为明, 张天海, 李小毛, 陈飞平, 邓荣根 (2010) 森林声景类型的划分与评价初探. *江西农业大学学报*, 32, 1195–1201.]
- Charlton BD, Keating JL, Li R, Huang Y, Swaisgood RR (2010) Female giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) chirps advertise the caller's fertile phase. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277, 1101–1106.
- Chen YF, Luo Y, Mammides C, Cao KF, Goodale E (2021) The relationship between acoustic indices, elevation, and vegetation, in a forest plot network of southern China. *Ecological Indicators*, 129, 107942.
- Clark CW (1980) A real-time direction finding device for determining the bearing to the underwater sounds of southern right whales, *Eubalaena australis*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68, 508–511.
- Comazzi C, Mattiello S, Friard O, Filacorda S, Gamba M (2016) Acoustic monitoring of golden jackals in Europe: Setting the frame for future analyses. *Bioacoustics*, 25, 267–278.
- Cosentino BJ, Marsh DM, Jones KS, Apodaca JJ, Bates C, Beach J, Beard KH, Becklin K, Bell JM, Crockett C, Fawson G, Fjelsted J, Forsys EA, Genet KS, Grover M,

- Holmes J, Indeck K, Karraker NE, Kilpatrick ES, Langen TA, Mugel SG, Molina A, Vonesh JR, Weaver RJ, Willey A (2014) Citizen science reveals widespread negative effects of roads on amphibian distributions. *Biological Conservation*, 180, 31–38.
- Cvikel N, Levin E, Hurme E, Borissov I, Boonman A, Amichai E, Yovel Y (2015) On-board recordings reveal no jamming avoidance in wild bats. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, 20142274.
- Dena S, Rebouças R, Augusto-Alves G, Toledo LF (2018) Lessons from recordings lost in Brazil fire: Deposit and back up. *Nature*, 563, 473.
- Duarte MH, Kaizer MC, Young RJ, Rodrigues M, Sousa-Lima, RS (2018) Mining noise affects loud call structures and emission patterns of wild black-fronted titi monkeys. *Primates*, 59, 89–97.
- Dubos N, Kerbiriou C, Julien JF, Barbaro L, Barre K, Claireau F, Froidevaux J, Le Viol I, Lorrilliere R, Roemer C, Verfaillie F, Bas Y (2021) Going beyond species richness and abundance: Robustness of community specialisation measures in short acoustic surveys. *Biodiversity and Conservation*, 30, 343–363.
- Dufourq E, Durbach I, Hansford JP, Hoepfner A, Ma H, Bryant JV, Stender CS, Li WY, Liu Z W, Chen Q, Zhou ZL, Turvey ST (2021) Automated detection of Hainan gibbon calls for passive acoustic monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7, 475–487.
- Enari H, Enari H, Okuda K, Yoshita M, Kuno T, Okuda K (2017) Feasibility assessment of active and passive acoustic monitoring of sika deer populations. *Ecological Indicators*, 79, 155–162.
- Evers CR, Wardropper CB, Branoff B, Granek EF, Hirsch SL, Link TE, Olivero-Lora S, Wilson C (2018) The ecosystem services and biodiversity of novel ecosystems: A literature review. *Global Ecology and Conservation*, 13, e00362.
- Fairbrass AJ, Rennett P, Williams C, Titheridge H, Jones KE (2017) Biases of acoustic indices measuring biodiversity in urban areas. *Ecological Indicators*, 83, 169–177.
- Fan PL, Liu RS, Grueter CC, Li F, Wu F, Huan, TP, Yao H, Liu DZ, Liu XC (2019) Individuality in coo calls of adult male golden snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus roxellana*) living in a multilevel society. *Animal Cognition*, 22, 71–79.
- Farina A, Pieretti N, Piccioli L (2011) The soundscape methodology for long-term bird monitoring: A Mediterranean Europe case-study. *Ecological Informatics*, 6, 354–363.
- Francomano D, Valenzuela A, Gottesman BL, González-Calderón A, Anderson CB, Hardiman BS, Pijanowski BC (2021) Acoustic monitoring shows invasive beavers *Castor canadensis* increase patch-level avian diversity in Tierra del Fuego. *Journal of Applied Ecology*, 58, 2987–2998.
- Fripp D, Owen C, Quintana-Rizzo E, Shapiro A, Buckstaff K, Jankowski K, Wells R, Tyack P (2005) Bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) calves appear to model their signature whistles on the signature whistles of community members. *Animal Cognition*, 8, 17–26.
- Froidevaux JSP, Zellweger F, Bollmann K, Obrist MK (2014) Optimizing passive acoustic sampling of bats in forests. *Ecology and Evolution*, 4, 4690–4700.
- Garland L, Crosby A, Hedley R, Boutin S, Bayne E (2020) Acoustic vs. photographic monitoring of gray wolves (*Canis lupus*): A methodological comparison of two passive monitoring techniques. *Canadian Journal of Zoology*, 98, 219–228.
- Gasc A, Sueur J, Jiguet F, Devictor V, Grandcolas P, Burrow C, Depraetere M, Pavoine S (2013) Assessing biodiversity with sound: Do acoustic diversity indices reflect phylogenetic and functional diversities of bird communities? *Ecological Indicators*, 25, 279–287.
- Gomes D, Appel G, Barber JR (2020) Time of night and moonlight structure vertical space use by insectivorous bats in a neotropical rainforest: An acoustic monitoring study. *PeerJ*, 8, e10591.
- Grooten M, Almond REA (2018) Living Planet Report 2018: Aiming Higher. <https://www.worldwildlife.org/pages/living-planet-report-2018>. (accessed on 2022-06-09)
- Hagens SV, Rendall AR, Whisson DA (2018) Passive acoustic surveys for predicting species' distributions: Optimising detection probability. *PLoS ONE*, 13, e0199396.
- Harris SA, Shears NT, Radford CA (2016) Ecoacoustic indices as proxies for biodiversity on temperate reefs. *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 713–724.
- Hawkins AD, Amorim MCP (2000) Spawning sounds of the male haddock, *Melanogrammus aeglefinus*. *Environmental Biology of Fishes*, 59, 29–41.
- Heigl F, Kieslinger B, Paul KT, Uhlik J, Dörler D (2019) Opinion: Toward an international definition of citizen science. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 116, 8089–8092.
- Heinicke S, Kalan AK, Wagner OJJ, Mundry R, Lukashevich H, Kuehl HS (2015) Assessing the performance of a semi-automated acoustic monitoring system for primates. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 753–763.
- Hending D, Holderied M, McCabe G (2017) The use of vocalizations of the Sambirano mouse lemur (*Microcebus sambiranensis*) in an acoustic survey of habitat preference. *International Journal of Primatology*, 38, 732–750.
- Hui A (2022) Listening to extinction: Early conservation radio sounds and the silences of species. *The American Historical Review*, 126, 1371–1395.
- Jeliazkov A, Bas Y, Kerbiriou C, Julien JF, Penone C, Le Viol I (2016) Large-scale semi-automated acoustic monitoring allows to detect temporal decline of bush-crickets. *Global Ecology and Conservation*, 6, 208–218.
- Jiang JG, Shao XY, Wan HB, Qi JG, Jing CW, Cheng TY

- (2016) Bird diversity research using audio record files and the spectrogram segmentation method. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 7713–7723. (in Chinese with English abstract) [蒋锦刚, 邵小云, 万海波, 齐家国, 荆长伟, 程天 (2016) 基于语谱图特征信息分割提取的声景中鸟类生物多样性分析. *生态学报*, 36, 7713–7723.]
- Johnson CN, Balmford A, Brook BW, Buettel JC, Galetti M, Guangchun L, Wilmschurst JM (2017) Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene. *Science*, 356, 270–275.
- Kalan AK, Piel AK, Mundry R, Wittig RM, Boesch C, Kühl HS (2016) Passive acoustic monitoring reveals group ranging and territory use: A case study of wild chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Frontiers in Zoology*, 13, 34.
- Kasten EP, Gage SH, Fox J, Joo W (2012) The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics*, 12, 50–67.
- Lellouch L, Pavoine S, Jiguet F, Glotin H, Sueur J (2014) Monitoring temporal change of bird communities with dissimilarity acoustic indices. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 495–505.
- Li YH (2021) A review on estimating population size of large and medium-sized mammals. *Biodiversity Science*, 29, 1700–1717. (in Chinese with English abstract) [李月辉 (2021) 大中型兽类种群数量估算的研究进展. *生物多样性*, 29, 1700–1717.]
- Liu XH, Wu PF, He XB, Zhao XY (2018) Application and data mining of infra-red camera in the monitoring of species. *Biodiversity Science*, 26, 850–861. (in Chinese with English abstract) [刘雪华, 武鹏峰, 何祥博, 赵翔宇 (2018) 红外相机技术在物种监测中的应用及数据挖掘. *生物多样性*, 26, 850–861.]
- Lobel PS (2002) Diversity of fish spawning sounds and the application of passive acoustic monitoring. *Bioacoustics*, 12, 286–289.
- Lomolino MV, Pijanowski BC, Gasc A (2015) The silence of biogeography. *Journal of Biogeography*, 42, 1187–1196.
- Luo B, Huang XB, Li YY, Lu GJ, Zhao JL, Zhang KK, Zhao HB, Liu Y, Feng J (2017) Social call divergence in bats: A comparative analysis. *Behavioral Ecology*, 28, 533–540.
- Lynch E, Angeloni L, Fristrup K, Joyce D, Wittemyer G (2013) The use of on-animal acoustical recording devices for studying animal behavior. *Ecology and Evolution*, 3, 2030–2037.
- Ma HG, Ma CY, Fei HL, Yang L, Fan PF (2020) Cao vit gibbons (*Nomascus nasutus*) sing at higher elevation but not in peripheral areas of their home range in a karst forest. *International Journal of Primatology*, 2, 1–13.
- MacSwiney GMC, Avila-Flores R, Pech-Canché JM (2020) Richness and activity of arthropodophagous bats in an arid landscape of central México. *Therya*, 11, 1–10.
- MacSwiney GMC, Clarke FM, Racey PA (2008) What you see is not what you get: The role of ultrasonic detectors in increasing inventory completeness in neotropical bat assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 45, 1364–1371.
- Markolf M, Zinowsky M, Keller JK, Borys J, Cillov A, Schuelke O (2022) Toward passive acoustic monitoring of lemurs: Using an affordable open-source system to monitor *Phaner* vocal activity and density. *International Journal of Primatology*, 43, 409–433.
- McGregor PK (2005) *Animal Communication Networks*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mellinger DK, Heimlich SL (2013) Introduction to the special issue on methods for marine mammal passive acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134, 2381–2382.
- Milich KM, Bahr JM, Stumpf RM, Chapman CA (2014) Timing is everything: Expanding the cost of sexual attraction hypothesis. *Animal Behaviour*, 88, 219–224.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Da Fonseca GA, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Nascimento LD, Granados CP, Beard KH (2021) Passive acoustic monitoring and automatic detection of diel patterns and acoustic structure of howler monkey roars. *Diversity*, 13, 566.
- Newson SE, Evans HE, Gillings S (2015) A novel citizen science approach for large-scale standardised monitoring of bat activity and distribution, evaluated in eastern England. *Biological Conservation*, 191, 38–49.
- Nordeide J, Kjellsby E (1999) Sound from spawning cod at their spawning grounds. *ICES Journal of Marine Science*, 56, 326–332.
- Obrist MK, Pavan G, Sueur J, Riede K, Llusia D, Marquez R (2010) Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. In: *Manual on Field Recording Techniques and Protocols for All Taxa Biodiversity Inventories*, Vol. 8 (Part I) (eds Eymann J, Degreaf J, Häuser C, Monje JC, Samyn Y, Vandenspiegel D), pp. 68–99. ABC Taxa, Belgium.
- Odom KJ, Araya-Salas M, Morano JL, Ligon RA, Leighton GM, Taff CC, Dalziel AH, Billings AC, Germain RR, Pardo M, de Andrade LG, Hedwig D, Keen SC, Shiu Y, Charif RA, Webster MS, Rice AN (2021) Comparative bioacoustics: A roadmap for quantifying and comparing animal sounds across diverse taxa. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 96, 1135–1159.
- Owen KC, Melin AD, Campos FA, Fedigan LM, Gillespie TW, Mennill DJ (2020) Bioacoustic analyses reveal that bird communities recover with forest succession in tropical dry forests. *Avian Conservation and Ecology*, 15, 25.
- Papin M, Pichenot J, Guérol F, Germain E (2018) Acoustic localization at large scales: A promising method for grey wolf monitoring. *Frontiers in Zoology*, 15, 1–10.
- Parker TA (1991) On the use of tape recorders in avifaunal surveys. *Auk*, 108, 443–444.

- Payne KB, Thompson M, Kramer L (2003) Elephant calling patterns as indicators of group size and composition: The basis for an acoustic monitoring system. *African Journal of Ecology*, 41, 99–107.
- Pekin BK, Jung J, Villanueva-Rivera LJ, Pijanowski BC, Ahumada JA (2012) Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest. *Landscape Ecology*, 27, 1513–1522.
- Piel AK (2018) Temporal patterns of chimpanzee loud calls in the Issa Valley, Tanzania: Evidence of nocturnal acoustic behavior in wild chimpanzees. *American Journal of Physical Anthropology*, 166, 530–540.
- Piel AK, Cruncheon A, Knot IE, Chalmers C, Fergus P, Mulero-Pázmány M, Wich SA (2022) Noninvasive technologies for primate conservation in the 21st century. *International Journal of Primatology*, 43, 133–167.
- Pijanowski BC, Villanueva-Rivera LJ, Dumyahn SL, Almo F, Krause BL, Napoletano BM, Gage SH, Nadia P (2011) Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. *BioScience*, 61, 203–216.
- Riede K (2018) Acoustic profiling of Orthoptera: Present state and future needs. *Journal of Orthoptera Research*, 27, 203–215.
- Roch MA, Batchelor H, Baumann-Pickering S, Berchok CL, Cholewiak D, Fujioka E, Garland EC, Herbert S, Hildebrand JA, Oleson EM, Van Parijs S, Risch D, Širović A, Soldevilla MS (2016) Management of acoustic metadata for bioacoustics. *Ecological Informatics*, 31, 122–136.
- Rosenstock SS, Anderson DR, Giesen KM, Tony L, Carter MF (2002) Landbird counting techniques: Current practices and an alternative. *Auk*, 119, 46–53.
- Saito K, Nakamura K, Ueta M, Kurosawa R, Fujiwara A, Kobayashi HH, Nakayama M, Toko A, Nagahama K (2015) Utilizing the cyberforest live sound system with social media to remotely conduct woodland bird censuses in central Japan. *Ambio*, 44, 572–583.
- Slabbekoorn H, Smith TB (2002) Habitat-dependent song divergence in the little greenbul: An analysis of environmental selection pressures on acoustic signals. *Evolution*, 56, 1849–1858.
- Sousa-Lima RS, Norris TF, Oswald JN, Fernandes DP (2013) A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals. *Aquatic Mammals*, 39, 23–53.
- Spillmann B, van Noordwijk MA, Willems EP, Mitra ST, Wipfli U, van Schaik CP (2015) Validation of an acoustic location system to monitor Bornean orangutan (*Pongo pygmaeus wurmbii*) long calls. *American Journal of Primatology*, 77, 767–776.
- Sueur J, Farina A (2015) Ecoacoustics: The ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics*, 8, 493–502.
- Sugai LSM, Llusia D (2018) Bioacoustic time capsules: Using acoustic monitoring to document biodiversity. *Ecological Indicators*, 99, 149–152.
- Sugai LSM, Silva TSF, Ribeiro JW, Llusia D (2018) Terrestrial passive acoustic monitoring: Review and perspectives. *BioScience*, 69, 15–25.
- Supp SR, Bohrer G, Fieberg J, Sorte FAL (2021) Estimating the movements of terrestrial animal populations using broad-scale occurrence data. *Movement Ecology*, 9, 60.
- Thompson ME, Schwager SJ, Payne KB (2010) Heard but not seen: An acoustic survey of the African forest elephant population at Kakum Conservation Area, Ghana. *African Journal of Ecology*, 48, 224–231.
- Vielliard J (1993) Recording wildlife in tropical rainforest. *Bioacoustics*, 4, 305–311.
- Vu TT, Doherty PF (2021) Using bioacoustics to monitor gibbons. *Biodiversity and Conservation*, 30, 1189–1198.
- Vu TT, Tran LM (2019) An application of autonomous recorders for gibbon monitoring. *International Journal of Primatology*, 40, 169–186.
- Wallis D, Elmeros M (2020) Tracking European bat species with passive acoustic directional monitoring. *Bioacoustics*, 30, 418–436.
- Wang Y, Ye J, Borchers DL (2022) Automated call detection for acoustic surveys with structured calls of varying length. *Methods in Ecology and Evolution*, 13, 1–16.
- Wang YY, Zhang YM, Xia CW, Møller AP (2023) A meta-analysis of the effects in alpha acoustic indices. *Biodiversity Science*, 31, 22369. (in Chinese with English abstract) [王言一, 张屹美, 夏灿玮, Anders Pape Møller (2023) Alpha声学指数效用的meta分析. 生物多样性, 31, 22369.]
- Wei FW (2016) Research progress in conservation biology of endangered mammals in China. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 255–269. (in Chinese with English abstract) [魏辅文 (2016) 我国濒危哺乳动物保护生物学研究进展. 兽类学报, 36, 255–269.]
- Wei FW, Ma TX, Hu YB (2021) Research advances and perspectives of conservation genetics of threatened mammals in China. *Acta Theriologica Sinica*, 41, 571–580. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 马天笑, 胡义波 (2021) 中国濒危兽类保护遗传学研究进展与展望. 兽类学报, 41, 571–580.]
- Weir LA, Mossman MJ (2005) North American amphibian monitoring program (NAAMP). In: *Amphibian Declines: The Conservation Status of United States Species* (ed. Lanoo M), pp. 307–313. University of California Press, Berkeley, CA.
- Whytock RC, Christie J (2016) Solo: An open source, customisable and inexpensive audio recorder for bioacoustic research. *Methods in Ecology and Evolution*, 8, 308–312.
- Wiley RH, Richards DG (1982) Adaptations for acoustic communication in birds: Sound transmission and signal

- detection. In: *Acoustic Communication in Birds* (Vol. 1) (eds Kroodsma DE, Miller EH), pp. 131–181. Academic Press, New York.
- Wilkins MR, Seddon N, Safran RJ (2013) Evolutionary divergence in acoustic signals: Causes and consequences. *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 156–166.
- Wrege PH, Rowland ED, Keen S, Shiu Y (2017) Acoustic monitoring for conservation in tropical forests: Examples from forest elephants. *Methods in Ecology & Evolution*, 8, 1292–1301.
- Wrege PH, Rowland ED, Thompson BG, Batruch N (2010) Use of acoustic tools to reveal otherwise cryptic responses of forest elephants to oil exploration. *Conservation Biology*, 24, 1578–1585.
- Wyman MT, Mooring MS, Mccowan B, Penedo M, Reby D, Hart LA (2012) Acoustic cues to size and quality in the vocalizations of male North American bison, *Bison bison*. *Animal Behaviour*, 84, 1381–1391.
- Zhao Y, Shen XL, Li S, Zhang YY, Peng RH, Ma KP (2020) Progress and outlook for soundscape ecology. *Biodiversity Science*, 28, 806–820. (in Chinese with English abstract) [赵莹, 申小莉, 李晟, 张雁云, 彭任华, 马克平 (2020) 声景生态学研究进展和展望. *生物多样性*, 28, 806–820.]
- Zhong EZ, Guan ZH, Zhou XC, Zhao YJ, Hu KR (2021) Application of passive acoustic monitoring technology in the monitoring of western black crested gibbons. *Biodiversity Science*, 29, 109–117. (in Chinese with English abstract) [钟恩主, 管振华, 周兴策, 赵友杰, 胡坤融 (2021) 被动声学监测技术在西黑冠长臂猿监测中的应用. *生物多样性*, 29, 109–117.]
- Zwerts JA, Stephenson PJ, Maisels F, Rowcliffe M, Astaras C, Jansen PA, Waarde J, Sterck LEHM, Verweij PA, Bruce T, Brittain S, Kuijk M (2021) Methods for wildlife monitoring in tropical forests: Comparing human observations, camera traps, and passive acoustic sensors. *Conservation Science and Practice*, 3, e568.

(责任编委: 李晟 责任编辑: 周玉荣)