

DOI: 10.20152/j.np.202311210032

覃远玉, 赵龙辉, 汪继超. 被动声学监测技术在国家公园生物多样性保护中的作用及发展趋势. 国家公园(中英文), 2023, 1(4): - - .

Qin Y Y, Zhao L H, Wang J C. Roles and development trends of passive acoustic monitoring techniques for biodiversity conservation in national parks. National Park, 2023, 1(4): - - .

被动声学监测技术在国家公园生物多样性保护中的作用及发展趋势

覃远玉, 赵龙辉, 汪继超*

热带岛屿生态学教育部重点实验室, 海南省热带动植物生态学重点实验室, 海南师范大学生命科学学院, 海口 571158

摘要:我国正着手打造全球最大的国家公园体系, 迫切需要开展大尺度的生物多样性调查和监测, 从而为国家公园建设发展提供重要支撑。新兴的被动声学监测(passive acoustic monitoring, PAM)技术, 是开展大尺度生物多样性研究的良好手段, 近年来受到越来越多的关注。本文对 PAM 技术的概念、发展和优势进行了概述, 并从声景的动态变化监测、生物多样性研究、生物与环境关系、人为活动对生物影响以及声景的生态服务和生态保护 5 个方面, 介绍了 PAM 技术在国家公园生物多样性保护中的作用。从构建大尺度声景监测网络、助力濒危物种保护、改进声学存储分析技术以及声景资源的开发利用和保护 4 个方面, 探讨了国家公园声学调查和监测的发展趋势。讨论了 PAM 技术当前所面临的挑战, 并对其发展前景进行了展望。综上所述, PAM 技术未来会成为开展生态保护和自然资源利用的重要手段, 并在我国国家公园建设和管理中发挥重要作用。

关键词:国家公园; 生物多样性; 被动声学监测; 生态保护; 声景生态

Roles and development trends of passive acoustic monitoring techniques for biodiversity conservation in national parks

QIN Yuanyu, ZHAO Longhui, WANG Jichao*

Ministry of Education Key Laboratory for Ecology of Tropical Islands, Key Laboratory of Tropical Animal and Plant Ecology of Hainan Province, College of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158 China

Abstract: China is building the largest national park system in the world. There is an urgent need to carry out large-scale biodiversity surveys and monitoring, so as to provide important support for the construction and development of national parks. The emerging technique of passive acoustic monitoring (PAM) has become an increasingly favored method for large-scale biodiversity research in recent years. This paper provides an overview of the concept, development and advantage of PAM technology, and introduces the roles of this technology in biodiversity conservation in national parks from five aspects, including dynamic change monitoring of soundscape, biodiversity research, relationship between organism and environment, impact of anthropogenic activities on organisms as well as ecological services and ecological protection of the soundscape. Additionally, the paper discusses the developmental trends of acoustic surveys and monitoring in national parks from four perspectives, that is, building a large-scale soundscape monitoring network, assisting the protection of endangered species, improving acoustic storage and analysis techniques, and the development, utilization and conservation of soundscape resources. Finally, this paper discusses the current challenges of the PAM technology and offers a perspective on its future. In summary, PAM technology will become an important method of ecological protection and natural resource utilization, and play a significant role in the construction and management of Chinese national parks.

基金项目: 海南国家公园研究院生物声学监测项目

收稿日期: 2023-11-21; 采用日期: 2024-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjc@hainnu.edu.cn

Key Words: national park; biodiversity; passive acoustic monitoring; ecological protection; soundscape ecology

生物多样性支撑着人类福祉和全球经济发展,对地球的整体健康和人类可持续发展至关重要^[1]。当前,全球生物多样性和生态系统健康面临严峻的威胁。自 1970 年以来,全球有近 70% 的野生动物种群数量下降,其中近 100 万物种濒临灭绝^[2]。目前,生物多样性保护已经成为全球关注的热点问题。《生物多样性公约》第十五次缔约方大会(COP15)制定了近期的全球生物多样性框架,呼吁全世界积极采取有关行动,共建生命共同体^[3]。

国家公园是生物多样性最富集的区域,是自然生态系统中最重要的重要组成部分之一,对于生物多样性的保护至关重要。开展国家公园自然生态系统保护,需要对生态环境和生物多样性开展长期监测研究^[4]。探索国家公园健康可持续发展,需要系统评估人与自然生态环境的相互作用。近年来,在声音传感器和分析方法(尤其是人工智能方法)的不断发展推动下,PAM 技术迅速发展,为大尺度生物多样性监测提供了新的视角,并且受到越来越多的关注^[5]。PAM 技术是开展大尺度生态研究和保护监测的有效手段,开展长期声学调查,不仅有助于了解国家公园生物多样性资源的现状和变化趋势,也能为科学有效的保护管理措施制定提供理论基础。本文简述了 PAM 技术在全国国家公园生物多样性保护中发挥的作用及其未来的发展趋势,探讨了 PAM 技术可能面临的一些挑战,并对 PAM 技术在我国的发展前景进行了展望,以期促进我国国家公园生物多样性保护和生物资源合理利用工作。

1 PAM 技术概述

PAM 技术是指在野外环境中安装声音传感器(自动录音机),对野生动物及其所处环境的声音信号进行记录,在无人值守的情况下自动长期录音的监测方法^[6]。传统声学研究多利用人工进行定期的观测和记录,既费时费力又会受到时间、空间及天气等不可控因素的影响。PAM 技术具有开展成本低、侵入性较弱(对生物和环境影响小)、工作周期长、记录空间范围广等优势,所以有利于长时间、大范围开展动物的保护监测研究^[7]。PAM 技术在几十年前就已经被研究者所采用,并被用于开展动物的生态保护工作。然而,早期的 PAM 设备携带不便,存储空间不够大,持续工作时间较短,记录的声音质量也较差。早期的声音分析主要通过人工完成,分析技术的限制,使得长时间大空间尺度的调研很难开展。因此,早期的 PAM 技术主要用于开展较小尺度的工作,没有被普遍应用和推广。

近年来,计算机和人工智能技术的快速进步,使得智能化语音分析成为可能,这为大尺度声学研究带来了更多可能。PAM 技术开始受到越来越多的关注,并逐渐成为生物声学领域的热点。通过该方法对鸣声类群进行长期监测,不仅可以了解动物的行为发生,还能获取它们的空间分布、种群动态等生态信息。因此,基于动物声音特征开发的 PAM 技术是生物多样性评估的有效工具^[8-9]。上世纪 90 年代起,PAM 技术开始快速发展和被应用^[10-11]。目前,该方法已被用于开展重点保护区域物种调查,以及监测物种、种群和群落的动态变化等。近年来,PAM 技术已经逐渐应用于国家公园范围,并在我国濒危物种的监测、人为活动干扰对环境的影响等工作中被采用^[12-13]。

2 PAM 技术在全国国家公园生物多样性保护中的应用

2.1 监测声景的动态变化

声景(soundscape)是特定环境中所有声音的整合,主要包括生物声(biophony)、地理声(geophony)和人为声(anthropophony)三个组分^[14]。人类活动、土地利用和气候变化等因素,都能通过影响生物和环境改变声景特征^[15-16]。因此,声景会随着环境的波动而发生变化,即声景具有时间动态性和空间异质性。生物声、地理声和人为声在振幅、时间和频率等特征上通常表现出很大的差异,有时它们还会相互重叠和干扰。例如,

Pijanowski 等^[17]对人类活动与大气动力学过程的研究表明,在自然和人为干扰影响下,生物声、地理声和人为声在生态系统中存在相互作用。应用 PAM 技术长期、大尺度监测声景的动态变化,有助于揭示生态环境的变化规律,为生物多样性的保护提供指南。例如,有研究者利用 PAM 技术,在瑞士边境的大型高山针叶林开展了为期 15 年的声景监测计划,揭示了该区域特定声景组分的年物候和日物候变化规律^[18]。国家公园作为最具国家代表性的自然生态区域,除具有丰富的生物多样性资源外,还有独特多样且能反映国家公园环境特征的声景。我们可以利用 PAM 技术的优势,长期记录国家公园的独特声景,了解国家公园的生态环境的动态变化规律。我们还可以通过 PAM 技术,监测国家公园的建设发展状况,为其健康可持续发展以及自然资源的合理高效利用保驾护航。目前,已有研究者关注我国国家公园的声景动态,并开始收集国家公园不同时期的声景变化。例如,孙翊斐等^[13]采用 PAM 技术和声学指数(acoustic indices),系统评估了我国东北虎豹国家公园声景的昼夜和季节波动,为该区域声景的保护利用收集了重要基础数据。

2.2 开展生物多样性研究

国家公园具有较高的生物多样性,它不仅是最重要的保护区域,也是国家生态保护体系管理的核心^[19]。目前,生物多样性评估是保护生物学中一项重要且紧迫的任务。在调查评估过程中,我们往往需要掌握物种的丰富度,评估生物分布的时空异质性以及群落的多样性等^[5, 20—21]。发声动物声音中不仅有自身的时间、空间和栖息地信息,还包含其行为变化和种间互动等信息^[22]。因此,可根据声音这一线索,利用 PAM 技术的优势,对国家公园等重点区域的生物多样性进行大尺度的调查研究,弥补传统调查与监测方法的不足。例如,在热带雨林中人为进行大型哺乳动物长期追踪调查费时费力,利用 PAM 技术能克服一定困难,取得相对较好的效果。早在 1993 年,就有研究人员利用 PAM 技术对雨林生物多样性进行了研究,并证明 PAM 技术是监测鸣叫动物生物多样性的有效工具^[23]。

虽然 PAM 技术为生物多样性调查和生态保护研究提供了一种有效手段,但相关工作也存在一些挑战。例如,野外布设自动录音机对目标地区声学调查往往持续数月甚至数年,后续需要通过大量的检测、识别和分类进行数据解析,这无疑是一项艰巨的任务。随着人工智能的发展和信息科学技术的进步,不同学科研究人员逐步进入到声学研究领域开展合作,并陆续开发了许多用于分析量化声学数据的方法。这些方法的应用使得海量数据集能够快速得到分析量化,大大促进了声学研究的进步。目前,自动识别和分类的方法已经在一些动物类群中得到了应用。许多研究者开始尝试通过声音多样性指数,对不同类群开展鸣声调查研究^[24—27]。

近年来,声学分析技术的进步也促进了 PAM 技术在国家公园、森林等重点区域生物多样性研究中的应用。例如,边琦等^[28]对城市森林的 50 个调查地点进行了声景采集分析,发现声音的多样性指数与鸟类的丰富度高度相关,即鸟类的物种数目越多,声景的复杂性越低。上述结果表明,PAM 技术在城市森林生物多样性调查研究中有很大的应用潜力。郭安琪等^[29]利用 PAM 技术在海南热带雨林国家公园霸王岭片区采集海南长臂猿连续 9 个月的声学数据,提取其鸣叫节律,并分析了鸣叫节律与温度、湿度、降水量和太阳净辐射 4 个气象因子的关系。王虎诚等^[30]在九里湖国家湿地公园基于 PAM 技术实采的野外鸟鸣声数据,开展了基于鸟鸣声的物种识别实验研究。PAM 技术开始成为国家公园生物多样性调研的重要手段,通过开展大尺度的声学监测,我们可以了解国家公园生物的活动规律、运动行为、栖息地变化、物种的分布动态、种群的波动变迁等。

2.3 揭示生物与环境的关系

许多动物依赖鸣声进行交流,鸣声不仅包含动物活动的时空信息,还与环境特征密切相关。例如,动物能够根据环境中发生的微小变化调节发声行为和声音信号特征,促进鸣声在栖息环境中的远距离传播^[31]。国家公园中的各种环境因子,例如植被、光照、温度、风力和降雨等,都可能与动物的发声行为有关。我们可通过动物声音的调查和监测,了解环境变化以及动物与环境的关系。例如,有研究者利用 PAM 技术监测了坦桑尼亚黑猩猩(*Pan troglodytes*) 24 h 的鸣叫活动,发现黑猩猩在温度较高、湿度较低的环境条件中鸣叫次数更多,但下雨和刮风对它们的鸣叫活动没有影响^[32]。Wang 等^[33]应用 PAM 技术研究了海南热带雨林大树蛙

(*Rhacophorus dennysi*)繁殖期的合唱行为,发现雄蛙可以根据温湿度的变化调节它们的发声行为。声音还能反映动物对生物环境的适应。Páez 等^[34]对草莓箭毒蛙(*Dendrobates pumilio*)的研究表明,间歇性的蝉鸣对同域分布的雄性鸣叫活动有抑制作用。因此,PAM 技术也可以作为评估动物与环境关系的有效方法。近期,肖治术等^[35]提出了环境生物声学的概念,其核心内容之一是研究环境变化对生物和生态系统的影响。在国家公园内开展大尺度生物声学监测,将有助于掌握生物的生存、繁衍和发展状况以及生物与环境的相互关系。

2.4 评估人为干扰对生物的影响

目前,人为干扰被认为是导致生物多样性下降的主要原因之一^[36]。人为活动产生的噪音可以直接改变栖息地的声景,并对环境中的生物及其生态系统构成不同程度的威胁。人为噪声污染对生物的影响受到了较多关注,已经被证明可以改变从交流到觅食甚至繁殖的各种生物学过程^[37-39]。此外,这种影响还能从动物个体或种群水平上升到群落水平,甚至是更大尺度的范围^[40]。国家公园承担一定的社会服务功能,所以会不可避免受到一定程度的人为干扰。我们可以利用 PAM 技术的优势,在较为广泛的空间范围内同期采集声学数据,并利用自动化分析优势来避免观察者引入的偏差。Marín-Gómez 等^[41]利用 PAM 技术对城郊森林的研究发现,在人为干扰下鸟类黎明合唱表现出明显的时空差异。Wrege 等^[42]利用 PAM 方法评估了石油地震勘探噪声对非洲象(*Loxodonta cyclotis*)的影响,发现人类活动产生的声波导致非洲象更加喜欢在夜间活动。PAM 技术还可用于评估国家公园的非法盗猎活动。例如,Astaras 等^[43]采用 PAM 技术,通过监测环境中的枪声评估了库尔鲁普国家公园当地的非法盗猎活动强度。此外,还有人员将 PAM 技术应用于实时监测非法毁林活动。一旦监测到链锯声,检测系统就会发出警报,这一技术成功帮助 Tembé 社区林业保护者逮捕超过千数的非法伐木者^[1]。

PAM 技术还可以用于监测国家公园外来物种的入侵动态。目前,由人类引起的外来物种入侵会对生物多样性和生态系统功能构成威胁,国家公园也不可避免受到外来物种的影响。外来入侵物种能通过多种途径来影响当地的生物多样性,如捕食、竞争、疾病传播、栖息地特征改变等^[44]。PAM 技术可以在广泛的空间区域内,对发声动物进行快速评估和长期监测。因此,可以应用该方法在外来入侵物种成为重大威胁之前对它们进行识别和评估。近期,有研究者使用 PAM 技术,快速获得了波多黎各群岛外来入侵物种的基础信息,并对其开展了长期监测^[45]。国家公园建设和管理过程中,会不可避免受到上述人为活动以及其它因素干扰,PAM 技术不仅有助于了解人为干扰对国家公园野生动物的影响,也有助于制定合理的管控策略。

2.5 助力生态服务和生态保护

国家公园以生态资源保护和适度旅游发展为基本战略,以小范围适度利用和大面积保护为目的^[46]。因此,国家公园还发挥着休闲游憩等生态服务功能^[47]。声景概念于 20 世纪 60 年代由 Schaffer 所推广,他认为声音作为一种独特的资源,承载着自然、人文、社会等信息,可以作为人类与生态环境沟通的媒介^[48]。因此,丰富且独特的声景是国家公园重要的生态服务资源。随着对声景认识的加深,人们开始思考声景与我们自身的关系。Thompson^[49]指出,声景可以给人类提供一些重要的社会文化价值,包括创造地域归属感、提供历史和文化体验、创造与自然地独特互动、加强人与自然的联系等。因此,国家公园声景具有重要的生态服务价值。

声景的声音类型多种多样,既有令人类和动物厌恶的人为噪声(交通噪音、机械噪音等),也有令人类感知为美好的自然声(树叶的沙声、潺潺的溪流声等)。从生态学角度出发,自然声景是生态系统的重要组成部分,可以作为生态系统健康评估的可靠指标^[37]。例如,在退化的珊瑚礁中人为播放正常生境的声景,能够募集到更多的珊瑚礁鱼类,从而加快珊瑚礁生态系统的恢复^[50]。从精神文化角度出发,自然声景可以帮助人们建立地方感,并使人类在感知自然的同时建立与自然的联系^[51-52]。然而,随着以人类为主导的声音不断扩张,自然声景的多样性也正在逐渐丧失^[14, 53]。通过 PAM 技术收集国家公园的自然声景,并将其应用于我们的休闲游憩等,有助于发挥国家公园的人文生态价值。此外,记录国家公园的自然声景还有助于环境保护,对发生衰退的生态系统的修复有一定意义。

3 国家公园声学调查和监测的发展趋势

3.1 构建大尺度声景监测网络

随着技术发展,在更大的时间和空间尺度上收集多种动物类群及其栖息地声音数据成为可能,通过 PAM 技术监测和评估生物多样性将变得越来越可靠^[54]。建立大规模多维度的声景监测网络,以此对生物多样性进行系统评估已成为发展趋势。目前,国内外相继建立了一些区域性的声景监测网络,如日本建立的 Cyberforesta 森林声景监测网络^[55]、中国科学院植物研究所在钱江源国家公园建立的声景监测平台^[56]等。然而,这些监测网络开展时间相对较短,声景采集地点数量相对较少。我国是全球生物多样性最为丰富的国家之一^[57],当前正着手打造全球最大的国家公园体系。未来将充分利用 PAM 技术的优势,统一监测标准和规范,大力推进建立覆盖范围广、针对性强、运营周期长的国家公园声景监测网络,积极推动并助力国家公园建设,为我国珍稀濒危物种保护、区域生态文明建设等做出应有的贡献。

3.2 开展濒危物种保护

国家公园是许多濒危保护物种的栖息地,如海南热带雨林国家公园是海南长臂猿(*Nomascus hainanus*)的栖息地,大熊猫国家公园是大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、小熊猫(*Ailurus fulgens*)的分布地等。在生物多样性保护中,濒危物种的保护是需要重点关注的对象。濒危物种一旦灭绝,当地的生物多样性可能也会受到影响。保护濒危物种首先需要开展基础生态调查,掌握该物种的种群数量、分布范围等等,然后方能制定合理的保护策略。传统的调查方法面临一些挑战,尤其是在那些生活环境恶劣、人类难以观测的物种中。此外,调查时过多的人类侵入可能会给动物带来一些干扰,影响动物的正常生命活动。例如,海南长臂猿有相对稳定的活动范围,它们对人类的靠近特别敏感^[58],科研人员很难在无任何干扰下进行长期调查。PAM 技术具有开展这些工作的优势,可以很大程度上解决传统方法的不足。Dufourq 等^[59]在海南长臂猿栖息地布设自动录音机,对海南长臂猿开展了长期声学监测,从录制的声学数据中提取出了海南长臂猿的物种信息,证明了 PAM 技术是监测海南长臂猿种群动态的有效方法。因此,生物声学方法具有很大的应用前景,将在国家公园和保护区等濒危物种的保护中被普遍应用。

3.3 改进声学存储分析技术

近年来,PAM 技术和声景生态学(soundscape ecology)研究正逐步开展,涉及的动物类群也越来越丰富^[60]。与传统的手动记录不同,自动记录通常按时间顺序长期收集,在监测过程中会产生大量的声学数据^[6],这给声学数据的储存和深入分析带来了挑战,也是影响 PAM 技术未来应用的最主要因素。为了面对这些挑战,我们需要在传输和储存硬件上进行突破,努力做到以最小的空间存储多的录音,并且能够完成数据的自动传输和整理。同时,我们还需要在软件和分析技术上不断突破,来满足不同类型和不同层次的声音解析需求。针对一些大规模的声学数据,可能还需要有针对性的开发自动化处理分析方法。研究者已经开发了一些可处理声学数据的平台,如 ARBIMON^[61]和 REAL^[62]等,但是这些平台功能还不够强大。目前,声学分析领域尚有许多技术难题。例如,有些物种聚集程度高或者鸣声十分复杂多变,通过声音进行个体自动化识别较为困难,这限制了后续自动化识别的实现。此外,动物声音识别容易受到背景噪声的干扰,精细的声学分析和复杂的计算有时难以实现等^[63-65]。未来,将会有更多不同研究领域者密切合作,大力进行学科交叉研究,大大推动声学存储、传输和分析技术设备进步,进而大力推动 PAM 技术在全国等各种环境的应用。

3.4 声景资源的开发利用和保护

随着经济社会快速发展,现代生活节奏不断加快,生态保健逐渐成为人们的重要需求。为了躲避城市的喧嚣,人们开始寻找返璞归真的生活。国家公园是生态环境的保障,具有其独特的自然景观、丰富的物种资源、良好的生态环境和优越的保健功能,所以逐渐成为人们休闲旅游、回归自然的首选目的地。长久以来,旅游景观开发一直将注意力集中于视觉景观的色彩构成、空间形态、功能布局等特征,而忽视了中国其他形式的景观开发^[66]。在声景涉及领域不断延伸的背景下,声景也逐渐被应用于旅游业^[67]。有研究表明,声景能提供给

人类与视觉景观截然不同的感知体验,这有助于提高景区的环境价值和文化魅力^[68]。在景区中,声景有时能够直接影响游客对环境的满意度。因此,在国家公园建设和开发过程中,可以将声景视为一种新的生态旅游资源而予以更多的重视和保护^[68-69]。

美国国家公园管理局提出,声景的本质是人与声音及周围环境的相互作用,强调无人工干扰的自然声景是国家公园管理的重点^[70]。人类在自然声景中可以更清楚地感知大自然,并将自身感官体验与大自然联系起来^[51]。然而,随着旅游景区不断发展,游客数量激增,国家公园中风声、流水声、鸟鸣声等自然声与景区内各种人类活动发出的声音发生重叠^[71],导致人类更偏爱的自然声景逐渐丧失。正如《纽约时报》所描述的那样,由于青蛙和蟾蜍物种的严重减少,优胜美地国家公园现在笼罩着一种“可怕的安静”^[72]。我们国家的国家公园建设起步晚,在人文生态服务方面还处于起步阶段。未来需要大力推进 PAM 技术的运用,对自然保护区进行持续调查和监测,加快促进保护地声景类型的识别管理和保护,推进生态旅游声景资源的开发和利用,更好的实现国家公园保护和利用的双重目标。

4 PAM 技术的挑战与展望

PAM 技术具有较好的应用前景,但当前仍存在一些挑战。首先,该方法依赖高效的自动化处理系统,需要人工智能和计算机技术的支持。然而,熟练掌握计算机技能的专业人才往往缺乏生物学和生态学背景,而生物学和生态学方向研究人员又不熟悉智能化分析流程。因此,这种学科差异一定程度上限制了 PAM 技术的广泛运用。其次,PAM 技术会采集海量的声学数据,需要高效传送、存储和整理原始资料,这对硬件和软件技术都提出了更高的要求。目前,声学调查和监测普遍还采用人工维护、固定存储的方式,这会限制大尺度研究的开展。再者,PAM 技术需要开展声音的自动化分析。然而,野外环境的声场往往比较复杂,生物与生物、生物与非生物之间存在信号重叠,多物种(或多个)聚集或非生物噪声较大时信号会相互干扰,对目标信号进行批量分离和量化仍存在困难。声学指数被普遍用于评估生物多样性及其动态变化情况,但是有些指数准确性低、普适性差^[73],所以还需要开发更好的衡量指标。最后,不同类群、不同区域的调查研究缺乏统一标准。研究人员在应用 PAM 技术时设定的声学传感器的位置和密度、麦克风输入增益、背景噪音过滤值等不尽相同,迫切需要建立指南为研究人员提供统一参考。

目前,声景生态学受到了普遍关注,已陆续搭建了一些学习交流平台。例如,2023 年我国研究者首次在《生物多样性》期刊组织了“中国野生脊椎动物鸣声监测与生物声学研究专题”。2023 年 8 月,召开了我国第一届全国动物声学科学与应用大会。因此,PAM 技术在我国遇到了良好的发展机遇。未来,PAM 技术会有更广泛的运用。一方面,不同学科背景的研究人员将广泛合作,开展学科交叉研究,将声学方法应用到生物多样性和生态保护利用的诸多领域。另一方面,学科的发展将带来技术方法的革新,例如数据存储和传输技术等。在学科交叉和计算机等技术的推动下,PAM 技术的广泛应用将日渐成熟,未来会有更多标准化的大尺度多物种研究开展。2021 年,我国宣布成立三江源、大熊猫、东北虎豹、海南热带雨林、武夷山等首批国家公园,未来将打造全球最大的国家公园体系。预期 PAM 技术未来也会全方位多层次应用于国家公园建设发展,成为生态保护和自然资源利用的重要手段。

参考文献(References):

- [1] Batist C H, Campos-Cerqueira M. Harnessing the power of sound & AI to track Global Biodiversity Framework targets. Rainforest Connection (RFCx) White Paper series. 2023, 1-20.
- [2] World Wide Fund For Nature. Living Planet Report 2022. Gland: WWF, 2022.
- [3] 刘思远. 全球连线|生物多样性大会通过“昆明宣言”. 新华社. (2021-10-14) [2023-11-21]. http://www.news.cn/world/2021-10/14/c_1127954708.htm.
- [4] 马克平. 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. 生物多样性, 2011, 19(2): 125-126.
- [5] Pimm S L, Alibhai S, Bergl R, Dehgan A, Giri C, Jewell Z, Joppa L, Kays R, Loarie S. Emerging technologies to conserve biodiversity. Trends in Ecology & Evolution, 2015, 30(11): 685-696.
- [6] Sugai L S M, Llusia D. Bioacoustic time capsules: using acoustic monitoring to document biodiversity. Ecological Indicators, 2019, 99: 149-152.

- [7] Froidevaux J S P, Zellweger F, Bollmann K, Obrist M K. Optimizing passive acoustic sampling of bats in forests. *Ecology and Evolution*, 2014, 4 (24): 4690-4700.
- [8] Rosenstock S S, Anderson D R, Giesen K M, Leukering T, Carter M F. Landbird counting techniques: current practices and an alternative. *The Auk*, 2002, 119(1): 46-53.
- [9] Weir L A, Mossman M J. North American amphibian monitoring program (NAAMP). *Amphibian Declines*. California: University of California Press, 2005: 307-313.
- [10] Parker T A. On the use of tape recorders in avifaunal surveys. *The Auk*, 1991, 108(2): 443-444.
- [11] Viellard J. Recording wildlife in tropical rainforest. *Bioacoustics*, 1993, 4(4): 305-311.
- [12] 金彦君, 赵光辉, 覃远玉, 汪继超. 海南国家公园霸王岭片区无尾两栖类鸣声多样性: 基于自动录音技术. *生物多样性*, 2023, 31(1): 101-110.
- [13] 孙翊斐, 王士政, 冯佳伟, 王天明. 东北虎豹国家公园森林声景的昼夜和季节变化. *生物多样性*, 2023, 31(1): 70-86.
- [14] Pijanowski B C, Villanueva-Rivera L J, Dumyahn S L, Farina A, Krause B L, Napoletano B M, Gage S H, Pieretti N. Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 2011, 61(3): 203-216.
- [15] Opdam P, Luque S, Jones K B. Changing landscapes to accommodate for climate change impacts: A call for land-scape ecology. *Landscape Ecology*, 2009, 24(6): 715-721.
- [16] Jennings M D, Harris G M. Climate change and ecosystem composition across large landscapes. *Landscape Ecology*, 2017, 32(1): 195-207.
- [17] Pijanowski B C, Farina A, Gage S H, Dumyahn S L, Krause B L. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, 2011, 26(9): 1213-1232.
- [18] Grinfeder E, Hauptert S, Ducretet M, Barlet J, Reynet M P, Sèbe F, Sueur J. Soundscape dynamics of a cold protected forest: dominance of aircraft noise. *Landscape Ecology*, 2022, 37(2): 567-582.
- [19] 隋智鑫. 国家公园发展的意义和建设探讨. *河北企业*, 2023(5): 16-18.
- [20] Peet R K. The measurement of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1974, 5: 285-307.
- [21] Pimm S L, Lawton J H. Planning for biodiversity. *Science*, 1998, 279(5359): 2068-2069.
- [22] Kershenbaum A, Blumstein D T, Roch M A, Akçay Ç, Backus G, Bee M A, Bohn K, Cao Y, Carter G, Cäsar C, Coen M, DeRuiter S L, Doyle L, Edelman S, Ferrer-i-Cancho R, Freeberg T M, Garland E C, Gustison M, Harley H E, Huetz C, Hughes M, Hyland Bruno J, Ilany A, Jin D Z, Johnson M, Ju C H, Karnowski J, Lohr B, Manser M B, McCowan B, Mercado E III, Narins P M, Piel A, Rice M, Salmi R, Sasahara K, Sayigh L, Shiu Y, Taylor C, Vallejo E E, Waller S, Zamora-Gutierrez V. Acoustic sequences in non-human animals: a tutorial review and prospectus. *Biological Reviews*, 2016, 91(1): 13-52.
- [23] Riede K. Monitoring biodiversity: analysis of Amazonian rainforest sounds. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 1993, 22(8): 546-548.
- [24] Lellouch L, Pavoine S, Jiguet F, Glotin H, Sueur J. Monitoring temporal change of bird communities with dissimilarity acoustic indices. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(6): 495-505.
- [25] Aide T, Hernández-Serna A, Campos-Cerqueira M, Acevedo-Charry O, Deichmann J. Species richness (of insects) drives the use of acoustic space in the tropics. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1096.
- [26] Xie J, Towsey M, Zhu M Y, Zhang J L, Roe P. An intelligent system for estimating frog community calling activity and species richness. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 13-22.
- [27] Plenderleith T L, Stratford D, Lollback G W, Chapple D G, Reina R D, Hero J M. Calling phenology of a diverse amphibian assemblage in response to meteorological conditions. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62(5): 873-882.
- [28] 边琦, 王成, 程贺, 韩丹, 赵伊琳, 殷鲁秦. 声学指数在城市森林鸟类多样性评估中的应用. *生物多样性*, 2023, 31(1): 167-178.
- [29] 郭安琪, 陈艳, 刘昱坤, 张旭, 于新文, 罗丽, 高家军, 杨蔡芸. 海南长臂猿鸣叫节律及其与气象因子的关系. *陆地生态系统与保护学报*, 2022, 2(6): 40-50.
- [30] 王虎诚, 魏齐, 杜伟, 王菲, 葛秉珏, 鞠然然. 被动声学监测技术在九里湖湿地公园鸟类监测中的应用研究. *江苏林业科技*, 2023, 50(3): 30-36.
- [31] Ey E, Fischer J. The “acoustic adaptation hypothesis” —a review of the evidence from birds, anurans and mammals. *Bioacoustics*, 2009, 19(1/2): 21-48.
- [32] Piel A K. Temporal patterns of chimpanzee loud calls in the Issa Valley, Tanzania: evidence of nocturnal acoustic behavior in wild chimpanzees. *American Journal of Physical Anthropology*, 2018, 166(3): 530-540.
- [33] Wang J C, Cui J G, Shi H T, Brauth S E, Tang Y Z. Effects of body size and environmental factors on the acoustic structure and temporal rhythm of calls in *Rhacophorus dennysi*. *Asian Herpetological Research*, 2012, 3(3): 205-212.
- [34] Paez V P, Bock B C, Rand A S. Inhibition of evoked calling of *Dendrobates pumilio* due to acoustic interference from cicada calling. *Biotropica*, 1993, 25(2): 242.
- [35] 肖治术, 崔建国, 王代平, 王志陶, 罗金红, 谢捷. 现代生物声学的学科发展趋势及中国机遇. *生物多样性*, 2023, 31(1): 9-31.
- [36] 樊正球, 陈鹭真, 李振基. 人为干扰对生物多样性的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(2): 31-34.
- [37] Barber J R, Crooks K R, Fristrup K M. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(3): 180-189.
- [38] Slabbekoorn H, Bouton N, van Opzeeland I, Coers A, ten Cate C, Popper A N. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(7): 419-427.
- [39] Simpson S D, Purser J, Radford A N. Anthropogenic noise compromises antipredator behaviour in European eels. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 586-593.

- [40] Francis C D, Kleist N J, Ortega C P, Cruz A. Noise pollution alters ecological services; enhanced pollination and disrupted seed dispersal. *Proceedings Biological Sciences*, 2012, 279(1739): 2727-2735.
- [41] Marín-Gómez O H, Dútillo W, Sosa-López J R, Santiago-Alarcon D, MacGregor-Fors I. Where has the city choir gone? Loss of the temporal structure of bird dawn choruses in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 194: 103665.
- [42] Wrege P H, Rowland E D, Thompson B G, Batruch N. Use of acoustic tools to reveal otherwise cryptic responses of forest elephants to oil exploration. *Conservation Biology*, 2010, 24(6): 1578-1585.
- [43] Astaras C, MacDonald D W, Wrege P, Linder J M. Passive acoustic monitoring as a law enforcement tool for Afrotropical rainforests. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(5): 233-234.
- [44] Simberloff D. *Invasive species: what everyone needs to know*. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [45] Ribeiro J W Jr, Harmon K, Leite G A, de Melo T N, LeBien J, Campos-Cerqueira M. Passive acoustic monitoring as a tool to investigate the spatial distribution of invasive alien species. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4565.
- [46] Tang X P. The establishment of National Park system: a new milestone for the field of nature conservation in China. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2020, 8(4): 195-202.
- [47] 曾瑜哲, 钟林生, 虞虎, 周彬. 生态系统游憩服务功能维度及其形成——以三江源国家公园为例. *生态学报*, 2022, 42(14): 5653-5664.
- [48] Schafer R M. *The soundscape: our sonic environment and the tuning of the world*. Rochester, Vt.: Destiny Books 1993, 1994.
- [49] Thompson E A. *The soundscape of modernity: architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900-1933*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2002.
- [50] Gordon T A C, Radford A N, Davidson I K, Barnes K, McCloskey K, Nedelec S L, Meekan M G, McCormick M I, Simpson S D. Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat. *Nature Communications*, 2019, 10: 5414.
- [51] Fisher J A. The value of natural sounds. *Journal of Aesthetic Education*, 1999, 33(3): 26.
- [52] Dumyahn S L, Pijanowski B C. Soundscape conservation. *Landscape Ecology*, 2011, 26(9): 1327-1344.
- [53] Ward E. An introduction to acoustic ecology. *Soundscape: The Journal of Acoustic Ecology*, 2000, 1(1): 10-13.
- [54] Servick K. Eavesdropping on ecosystems. *Science*, 2014, 343(6173): 834-837.
- [55] Saito K, Nakamura K, Ueta M, Kurosawa R, Fujiwara A, Kobayashi H H, Nakayama M, Toko A, Nagahama K. Utilizing the Cyberforest live sound system with social media to remotely conduct woodland bird censuses in Central Japan. *Ambio*, 2015, 44(4): 572-583.
- [56] 余建平, 陈小南, 陈声文. 钱江源国家公园生物多样性监测体系研究. *自然保护地*, 2021, 1(2): 58-67.
- [57] 魏辅文, 马天笑, 胡义波. 中国濒危兽类保护遗传学研究进展与展望. *兽类学报*, 2021, 41(5): 571-580.
- [58] 江海声. 海南长臂猿. *大自然*, 1996, (5): 18-19.
- [59] Dufourq E, Durbach I, Hansford J P, Hoepfner A, Ma H D, Bryant J V, Stender C S, Li W Y, Liu Z W, Chen Q, Zhou Z L, Turvey S T. Automated detection of Hainan gibbon calls for passive acoustic monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2021, 7(3): 475-487.
- [60] 赵莹, 申小莉, 李晟, 张雁云, 彭任华, 马克平. 声景生态学研究进展和展望. *生物多样性*, 2020, 28(7): 806-820.
- [61] Aide T M, Corrada-Bravo C, Campos-Cerqueira M, Milan C, Vega G, Alvarez R. Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ*, 2013, 1: e103.
- [62] Kasten E P, Gage S H, Fox J, Joo W. The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: an archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics*, 2012, 12: 50-67.
- [63] Parsons S, Jones G. Acoustic identification of twelve species of echolocating bat by discriminant function analysis and artificial neural networks. *Journal of Experimental Biology*, 2000, 203(Pt 17): 2641-2656.
- [64] Chesmore E D. Application of time domain signal coding and artificial neural networks to passive acoustical identification of animals. *Applied Acoustics*, 2001, 62(12): 1359-1374.
- [65] Chen Z X, Maher R C. Semi-automatic classification of bird vocalizations using spectral peak tracks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120(5 Pt 1): 2974-2984.
- [66] 毛建西, 王增欣. 基于声生态学的城市景观设计策略探讨. *环境科学与技术*, 2006, 29(1): 94-96, 120-121.
- [67] 聂愿青. 文旅融合视域下广西旅游声景开发研究. *旅游纵览*, 2021(20): 28-30.
- [68] Bernat S. Soundscapes and tourism-towards sustainable tourism. *Problemy Ekorozwoju-Problems of Sustainable Development*, 2014, 9(1): 107-117.
- [69] Jiang J D, Zhang J, Zhang H L, Yan B J. Natural soundscapes and tourist loyalty to nature-based tourism destinations: the mediating effect of tourist satisfaction. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 2018, 35(2): 218-230.
- [70] National Park Service. *Management Policies 2006*. National Park Service, (2023-10-28) [2023-11-21]. https://www.nps.gov/subjects/policy/upload/MP_2006.pdf.
- [71] 翁孜. 听觉景观设计. *中国园林*, 2007, 23(12): 46-51.
- [72] Carol Kaesuk Yoon. "Eerie Quiet of Frogs and Toads Isn't Part of Normal Cycle, Study Says," *The New York Times*, 1996-4-30 [2023-11-21]. <https://www.nytimes.com/1996/04/30/science/eerie-quiet-of-frogs-and-toads-isn-t-part-of-a-normal-cycle-studysays.html>.
- [73] Eldridge A, Casey M, Moscoso P, Peck M. A new method for ecoacoustics? Toward the extraction and evaluation of ecologically-meaningful soundscape components using sparse coding methods. *PeerJ*, 2016, 4: e2108.