

# 声纹识别技术支持下自然保护地鸟类多样性节律特征及监测有效性研究——以黄龙自然保护区为例

Research on Bird Diversity Rhythm Features and Monitoring Effectiveness in Natural Protected Areas with Voiceprint Recognition Technology: A Case Study of Huanglong National Scenic Area

许晓青<sup>1</sup> 余楚萌<sup>2</sup> 徐荣林<sup>3</sup> 刘 颂<sup>1\*</sup>  
XU Xiaqing<sup>1</sup> YU Chumeng<sup>2</sup> XU Ronglin<sup>3</sup> LIU Song<sup>1\*</sup>

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室, 上海 200092; 2. 四川农业大学风景园林学院, 成都 611130; 3. 黄龙国家级风景名胜区管理局, 松潘 623306)

(1. School of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Key Laboratory of Spatial Intelligent Planning Technology, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Shanghai, China, 200092; 2. School of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan, China, 611130; 3. Huanglong National Scenic Area Administration, Songpan, Sichuan, China, 623306)

文章编号: 1000-0283(2024)04-0011-08  
DOI: 10.12193/j.laing.2024.04.0011.002  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2023-12-29  
修回日期: 2024-02-06

## 摘要

生物多样性是人类赖以生存和社会可持续发展的基础, 是地球生命共同体的血脉和根基。声纹识别技术正在成为辅助生物多样性监测的重要手段, 由于声纹数据采集的特征及计算性生物声学的发展, 声学技术在物种鉴别、种群研究、环境成因研究方面正表现出优势。以黄龙自然保护区为例, 以指示性物种鸟类的鸣声为对象, 通过保护区中较高人为影响(黄龙景区)和较低人为影响(张家沟)这两个区域的被动式监测, 采集了6 303 min 声音数据。通过经典声学指数计算、人工智能物种识别与样线调查相结合的方法, 研究得出: (1) 人工智能技术下鸟类多样性及鸣声时间分布特征; (2) 声纹识别技术较之于传统调查方法更具有有效性; (3) 声学指数计算对环境的响应程度与有效性辨析。研究试验性地对数据进行了分析阐释, 以黄龙自然保护区为例作为方法的探索, 为此类保护地保护管理提供借鉴。

## 关键词

声纹识别; 鸟类多样性; 自然保护区; 声景; 保护管理

## Abstract

Biodiversity is the foundation for human survival and sustainable social development, embodying the lifeblood and foundation of the Earth's living community. Acoustic recognition technology is emerging as a significant tool in assisting biodiversity monitoring. Characterized by acoustic data collection and advanced computational bioacoustics, acoustic technology demonstrates advantages in species identification, population research, and environmental cause exploration. This study takes the Huanglong National Scenic Area as an example, collecting over 6,000 minutes of data under two distinct human impact intensities within the protected area. Through a combination of classical acoustic index calculations, artificial intelligence species identification, and line transect surveys, it is concluded that: (1) birds exhibit diverse call time distribution characteristics under artificial intelligence technology; (2) Acoustic recognition technology outperforms traditional survey methods in terms of effectiveness; (3) The calculation of acoustic indices demonstrates responsiveness to environmental factors and its validation. This study experimentally analyzes and interprets the collected data, using Huanglong as a case study to pioneer this methodological approach, making it highly valuable and applicable for conservation management in similar protected areas.

## Keywords

acoustic recognition; biodiversity; nature reserve; soundscape; conservation management

## 许晓青

1985年生/女/四川西昌人/副教授、博士生导师/自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室分实验中心副主任/研究方向为声景生态、国家公园与自然保护地规划管理、声景与健康

## 余楚萌

2001年生/女/北京人/研究方向为声景生态、国家公园与自然保护地规划管理、声景与健康

## 刘 颂

1968年生/女/山东曲阜人/教授、博士生导师/高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室数字景观模拟分实验室负责人/研究方向为城乡绿地系统规划、景观规划技术方法

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: liusong5@tongji.edu.cn

## 基金项目:

上海市科委社会发展科技攻关项目“基于生物多样性的城市困难立地高质量园林绿化智能技术及示范”(编号: 22DZ1202200); 四川省科学技术厅国际合作创新项目“后疫情背景下九寨沟世界遗产地旅游多感官感知及其健康效益研究”(编号: 2022YFH0072); 黄龙国家级风景名胜区课题“声纹识别技术下的黄龙风景名胜区生物多样性时空格局监测研究”(编号: TJW2022795401); 自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室项目(编号: 20220307); 上海市科委创新行动计划“大型文化公园全生命周期智能管控关键技术研究”(编号: 21DZ1203004); 同济大学2023年交叉科学课题“地下基础设施空间的人因环境智能感知研究”(编号: 2022-3-YB-10)

生物多样性是人类赖以生存和社会可持续发展的基础, 是地球生命共同体的血脉和根基。声景生态作为一门新兴学科, 综合了生态学、生物声学、城市环境声学等多门学科理论与方法。其目标是理解和保护生物多样性, 以及管理和改善人类活动对环境的影响。声景生态研究主要围绕生物声学和生态声学两个领域展开。现代生物声学已有近70年的历史, 随着计算性生物声学的发展, 使用人工智能辅助信号统计技术, 结合声学指数评估物种多样性和种群密度, 以及使用各种机器学习技术进行物种识别正在兴起<sup>[1]</sup>。

从生物声学层面来看, 声景生态关注动物行为, 研究动物个体间的声信号交流, 相关研究表明声音可以作为物种分类依据, 为观察动物行为和监测生物多样性提供了较好的机会<sup>[2-3]</sup>。Koehler等<sup>[4]</sup>发现许多鸣叫特征的定量差异在同物种个体之间存在显著变化。也有学者从信号类型角度研究了水下生物<sup>[5-6]</sup>、蝙蝠<sup>[7-8]</sup>、鸟类<sup>[9]</sup>、蛙类<sup>[10]</sup>为代表的两栖动物、哺乳动物<sup>[11]</sup>等的物种识别、丰度计算和评估方式<sup>[12]</sup>。此外, 声景生态也关注整体环境, 自然与人的交互, 其中包括动物声音、植物声音、环境声音等多方面对人的改变<sup>[13]</sup>。Farina<sup>[14]</sup>认为地球物理声、生物声和人为声是动物用来导航、交流以及将未知环境转化为熟悉栖息地的重要线索, 声音可以通过自主音频记录设备记录, 并作为定量指标而被用来评估生物多样性、环境健康和人类福祉。Do Nascimento等<sup>[15]</sup>在巴西罗赖马州Viruá国家公园的研究证明声景指数可以用来预测不同生境类型, 并且提出声景与植被结构的最佳关联指标为声音均匀度指数(AE)和偏度指数(SKEW); 声学指数是一种快速化解释的工具, 在进行环境成因分析方面具有优势。

Fuller等<sup>[16]</sup>在澳大利亚破碎森林中的研究, 提出可以作为研究区域生态监测工具的三个指标为声熵指数(H)、声音均匀度指数(AE)和标准化声景差异指数(NDSI), 它们与景观特征、生态条件和鸟类物种丰富度相关性最高。Gasc等<sup>[17]</sup>认为应用声景生态学的重点在于开发基于声景的干扰指标, 其可以适用于不同生态系统和环境条件。此外, Buxton等<sup>[18]</sup>通过对36个最具指示性的指数建模, 发现声景指数模型能准确预测生物声的高多样性和低多样性, 对于中等多样性的预测可靠性有待进一步增强。

近年来, 声景生态的研究在国内呈现出火热的趋势。肖治术等<sup>[19]</sup>阐述了现代生物声学的学科内涵和学科特征, 总结了动物生物声学、生态声学、水下生物声学、环境生物声学、保护生物声学、计算生物声学在生物多样性领域的应用前景。许晓青等<sup>[20]</sup>综述了声学手段辅助自然保护地生物多样性监测现状及应用建议, 指出了声学监测的优劣势。多名学者从指数与动物多样性、生境质量、动物活跃性之间关联的方向和程度方面进行了研究<sup>[21-22]</sup>。此外, 也有研究聚焦于机器学习以及鸣声数据库在声学监测中的运用<sup>[23]</sup>。

总之, 声学监测技术的应用具有多方面的优势: (1) 被动式声学监测技术有助于解决目前遇到的长时间、大面积、全物种动态监测难题; (2) 整合生态学、信息科学、人工智能手段, 探究生物多样性时空分布格局, 在时间、物种、区域、经济成本等尺度上满足生物多样性调查的需求。但该技术还有待于在大量的自然保护地中被验证与应用。基于此, 本研究以黄龙自然保护区(一期)声纹研究回答以下几个科学问题: (1) 声纹监测技术在物种识别方面是否更加有效; (2)

声学指数在不同的环境条件下的适用性。

## 1 研究区域和方法

黄龙自然保护区位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县境内, 是世界自然遗产地。其独特的地质景观由彩池、雪山、峡谷、森林4大景观构成, 各类物种资源丰富, 是重要的生物多样性保护单元。黄龙自然保护区总面积14 601 hm<sup>2</sup>, 包含一般控制区面积1 516 hm<sup>2</sup>, 核心保护区面积13 091 hm<sup>2</sup>。区内一部分是大熊猫的栖息地, 大熊猫国家公园黄龙园区总面积53 301 hm<sup>2</sup>, 一般控制区面积6 733 hm<sup>2</sup>, 核心保护区面积46 568 hm<sup>2</sup>。从目前红外相机监测的大熊猫轨迹看, 大熊猫的活动非常频繁。对鸟类群落的监测也从侧面反映大熊猫这个伞护种带来的伞护效应。另一方面, 监测区域是棕头歌鸲已知的极少数繁殖地之一, 人类对这种神秘的鸟类还是知之甚少。本研究为了解其种群动态提供了一种新的监测手段。

近10年来黄龙已基本形成了生物多样性监测的基础。然而, 与其他保护地类似, 黄龙自然保护区生物多样性保护工作普遍面临生物物种资源数据库信息缺乏、监测和预警系统不完善、调研工作实施难度大、投入资金有限等问题。目前黄龙自然保护区主要运用的是红外相机监测, 对于大熊猫等旗舰物种具有优势, 但对于鸟类等的监测还存在一定的局限性。因此, 需要结合综合监测工具的方式, 通过多源数据库进一步完善物种的监测。基于黄龙自然保护区在生物多样性监测中的重要地位以及黄龙自然保护区作为景区在不同人为影响程度下具有一定代表性的特点, 针对目前监测存在的问题, 本研究采取被动式监测的方式, 对黄龙自然保护区的鸟类时空分布规律进行监测并验证声学监测



图1 设备布设位置和实景照片  
Fig. 1 Equipment layout

和声学指数的适用性。

### 1.1 设备布设与数据采集、处理

为了加强对生物声的采集，本研究选取了灵感科技国产被动监测设备L-bird，该设备具有全向麦克风，可以24 h记录声音，其分辨率为16 bit。以每小时录制前10 min休眠，用时50 min的方式进行采样，音频文件通过4G网络回传到数据终端，采样率为44.1 kHz。采样时间为2023年4月29日-6月7日，包含完整的一个月数据并覆盖五一黄金周，共记录音频6 303 min。

考虑自然保护地土地覆盖情况、冬季鸟类游荡性强的特点，以及4G网络和太阳能供电需求，本研究选择在自然保护区中核心保护区内的张家沟和核心保护区外的黄龙景区各布设一台设备（图1）。张家沟拥有丰富的生物多样性资源，作为严格保护区，其受到较少的干扰和破坏，可以更好地反映生态系统内部的自然状况。偶尔产生的人为利用影响为放牧影响。在核心保护区张家沟中，生

物声（主要是鸟类和蛙类等动物发出的声音）是主要的监测对象，这些生物声是生态系统健康状况的重要指标。而作为非保护区的黄龙景区则是人类活动较为频繁的区域，该点位受到的人为利用噪声包含游客的喧哗、交谈、脚步声以及外放录音机所产生的噪声（表1）。通过两者的对比，可以看出人为利用强度对鸟类多样性的影响。

本研究通过传统样线样方调查结合声纹检测的方式，对采集数据进行智能识别，实现黄龙自然保护区的生物物种的监测。在实地调查工作包括了鸟类调查和植被调查，对于鸟类调查样线设置，选取张家沟与黄龙景区两条样线，每条长度2 km，沿着样线以1.5 ~ 2 km/h的速度行进，记录两侧50 m范围内观察到或听到的野生鸟类种类和数量。每条样线在早上和傍晚各调查一次。对于植被调查，分别选取20 m×20 m、5 m×5 m、1 m×1 m的样方，进行了植物种类、高度、盖度、数量、冠幅、胸径、物候期、所属层级等数据的记录。

### 1.2 研究方法

本文采用了声纹监测法和样线样点采样法两种方式对张家沟和黄龙景区进行了物种识别调查与分析：在两条监测样线附近进行采样，并对采集的样本进行分类和数据分析，并计算香农多样性指数（ $H$ ），见公式（1）。式中， $Ln$ 为自然对数， $P_i$ 为由物种 $i$ 组成的整个群落的比例。

$$H = -\sum P_i \times \ln(P_i) \quad (1)$$

在完成声纹数据处理与分离后，采用卷积神经网络（CNN）技术提取声音的时频特征，并将其转化为可以输入到分类器中的向量，通过大量物种声音数据为输入进行模型训练以及物种识别，最终结合大数据爬取和专家知识图谱的方式对识别结果进行复核和校验（图2）。为了更加直观显示数值变动表现两个点位鸟类鸣声的时空分布规律，本研究通过Tableau进行数据可视化，在环形热图中以颜色变化来展示数据分布情况，其清晰地显示出不同时间段内张家沟核心区和黄龙景区缓冲区的生物声和人为声的情况，并用曲线可视

表1 设备布设选点环境条件、主要声源、人为影响程度  
Tab. 1 Environmental conditions, main sound sources, and human impact degree of equipment location

设备点位 Equipment location	环境条件 Environmental conditions	主要声源 Main sound sources	人为影响程度 Human impact degree
张家沟	自然生态环境, 周边有较为丰富植被条件	生物声 (鸟类、蛙类等动物声)、环境声	低, 人为影响主要为放牧
黄龙景区内部	自然生态环境、旅游建设环境, 有旅游景区栈道经过这个区域, 造成一定的人为影响	生物声、环境声、人为活动声	高, 人为影响主要为旅游观光

表2 指数计算公式及其生态学意义  
Tab. 2 Formula for index calculation and its ecological significance

指数名称 Index	公式 Formula	生态学意义 Ecological significance
声复杂性指数 (Acoustic Complexity Index) <sup>[24]</sup>	$ACI = \frac{D}{\sum_{k=1}^n I_k}$ <i>D</i> 为同一个频率相邻帧间的声强绝对差值, <i>I<sub>k</sub></i> 为声强	<i>ACI</i> 测量声音频率变化多样性
声多样性指数 (Acoustic Diversity Index) <sup>[18]</sup>	$ADI = \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$ <i>p<sub>i</sub></i> 为声信号在第 <i>i</i> 个频段所占比例, <i>s</i> 为频段数量	<i>ADI</i> 允许每个频段代表一个特定的“物种”
声均匀性指数 (Acoustic Evenness Index) <sup>[25]</sup>	$AEI = Gini(x)$ <i>x</i> 为每个频带高于特定声压阈值 (默认为-50dBFS) 的声信号比例	<i>AEI</i> 引用基尼系数的算法, 以衡量声音在不同频段分布的均匀情况
声熵指数 (Acoustic Entropy Index) <sup>[26]</sup>	$H = H_t \times H_f$ $H \in [0, 1]$ <i>H<sub>t</sub></i> 为时间熵, <i>H<sub>f</sub></i> 为频谱熵	<i>H</i> 共同考虑 <i>H<sub>t</sub></i> 和 <i>H<sub>f</sub></i> , 对于单个纯音, <i>H</i> 趋于0; 对于随机噪声, <i>H</i> 趋于1; 如果群落多样性程度越高, 其不定性也就越大
归一化差异声景指数 (Normalised Difference Soundscape Index) <sup>[27]</sup>	$NDSI = \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha}$ $NDSI \in [-1, 1]$ <i>β</i> 是生物声功率谱密度, <i>α</i> 是人类声功率谱密度	<i>NDSI</i> 计算人类声与生物声成分的比率, 当 <i>NDSI</i> =1时表明无人声
生物声学指数 (Bio-acoustic Index) <sup>[28]</sup>	$BIO = \sum_{i=1}^l (S_i - S_{min}) \times \Delta f$ <i>S<sub>i</sub></i> 是特定频率 <i>i</i> 上的振幅, <i>S<sub>min</sub></i> 是在所有考虑的频率中声音的最小振幅, <i>Δf</i> 是频率的增量	<i>BIO</i> 为采集群落内物种数量及其相对丰度, 其数值越大, 生物多样性越高。在本次研究中, <i>BIO</i> 通过2 000 Hz以上每1 000 Hz振幅差异之和得出

化表达鸟类鸣声规律。此外, 利用点状图对周围单位的声学指数监测数据的最大值以及方差进行表达, 直观反映指数的波动和变异程度。本研究通过R软件计算了经典指数*ACI*、*ADI*、*H*、*BIO*、*NDSI*、*AEI* (表2), 以进一步研判指数所阐释的生态学意义以及背后的成因。

## 2 研究结果

### 2.1 声纹监测与样点样线在物种识别上的差别

经样线调查分析, 2条样线4次调查共记

录鸟类19种, 其中黄龙景区12种, 张家沟12种, 5种为2条样线均有记录。国家二级重点保护野生动物2种: 橙翅噪鹛和喜山鸫; 中国特有种1种: 橙翅噪鹛。记录数量最多的鸟类前5位分别为烟腹毛脚燕、戴菊、霍氏旋木雀、黑冠山雀和橙翅噪鹛 (图3)。

收集了两台声学监测设备经AI识别和人工复核的数据, 共筛选出高置信度鸟类鸣声2 973条, 共识别出鸟类43种, 隶属于2目16科; 其中两处共有的鸟类16种。国家二级保

护动物2种: 橙翅噪鹛和大噪鹛。鸣声数量最多的物种前5位分别为橙翅噪鹛、乌嘴柳莺、棕眉柳莺、锈胸蓝姬鹛和黄眉柳莺。为了进一步确定鸟类的多样性, 计算香农多样性指数, 结合物种判断多度。

对两种监测方法下的调查结果比较分析 (表3), 发现从物种角度声纹监测已经展现出了较强的优势。声学监测得到的物种数 (43种) 多于4次样线调查得到的物种数 (19种)。样线调查的19种中有11种在声学监测中也记

录到了。将两种监测方式进行对比，能明显确定的是黄龙景区和张家沟在声纹监测中记录了更多的鸟类种数和个体数。比较其与样点样线方法在物种识别上的差别，发现虽然通过两种研究方法得到的规律相似，但使用声学检测技术分析得到的种数和个体数量均远超样线样点调查法所得结果，显示出较高的准确性。因此，声纹库和训练模型是影响物种识别精准性的重要因素之一，而深度学习算法则是实现高精度物种识别的关键。

## 2.2 不同程度人为利用影响下的鸟类声景时空分布对比

选择了代表物种丰富度的  $BIO$  (图4, 图5), 代表人为影响与生物声的  $NDSI$  (图6, 图7), 以及反映声音丰富度的  $ACI$  (图8, 图9) 进行两个点位的指数计算, 并用环形热图的形式进行可视化。通过对比  $BIO$  指数数值可知, 黄龙景区 (代表人为干扰较大) 的鸣声高峰与张家沟 (代表几乎无人声干扰) 存在一致性, 高峰都发生在6:30-9:30左右, 但由于黄龙景区人为影响因素较强, 黄龙景区内 (缓冲区) 的鸣声高峰持续的时间较张家沟 (核心区) 更短, 大约在8:30左右结束。通过识别张家沟这个时段最多的是橙翅噪鹛、鹪鹩、锈胸蓝姬鹩、乌嘴柳莺。结合鸟类活动节律曲线 (图10) 来看, 以乌嘴柳莺为例的鸟类鸣声整体呈现早晚两个活动高峰, 符合森林生境下的鸟类活动规律, 但曲线波动较大。但因监测密度较低、监测周期较短, 总体有效数据量较少, 日活动节律的规律性不够明显, 存在偶然记录。

$NDSI$  指数反映了生物声和人类声的影响。在环形热图中, 红色部分代表的是生物声, 蓝色部分代表人为声。张家沟和黄龙景区相比, 在某些时段, 生物声更为主导, 但是作

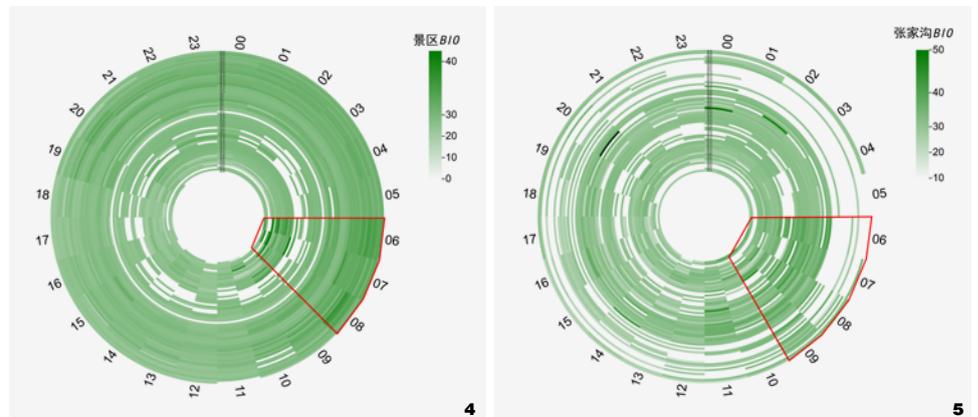
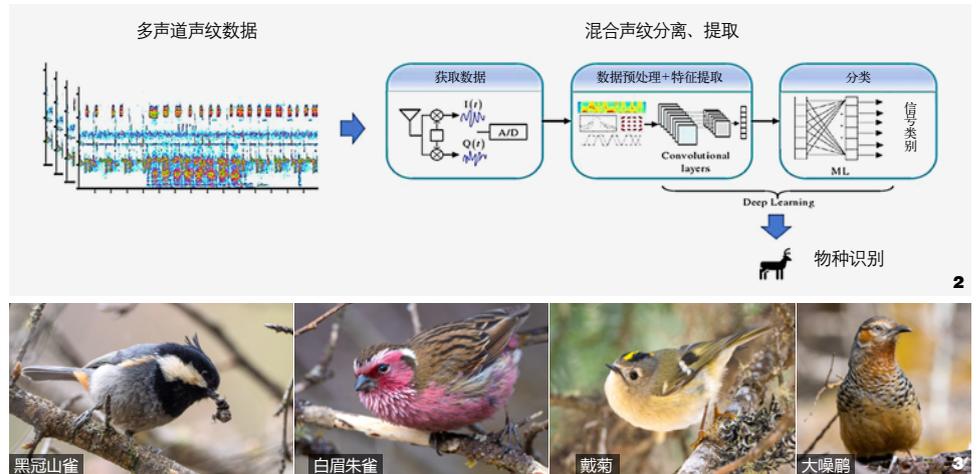


图2 声纹数据处理流程  
Fig. 2 Voiceprint data processing process

图4 黄龙景区  $BIO$  值  
Fig. 4  $BIO$  value of the scenic area

图3 鸟类实地调查照片  
Fig. 3 Field survey photos of birds

图5 张家沟  $BIO$  值  
Fig. 5  $BIO$  value of Zhangjiagou

表3 两种监测方式调查结果  
Tab. 3 Investigation results of two monitoring methods

	样线调查结果 Results of the sample survey			声学监测结果 Results of acoustic monitoring		
	种数	个体数	香农多样性指数 $H_2'$	种数	个体数	香农多样性指数 $H_2'$
黄龙景区	12	84	3.00	29	590	3.56
张家沟	12	102	2.07	30	2 383	2.76

为黄龙景区的缓冲区, 几乎没有生物声主导的时间。从声音丰富度角度讲, 5月1日-9日, 黄龙景区  $ACI$  的值变化波动较大, 频谱显示这一段时间产生了更为丰富的声音变化和波动, 从时间上看, 正好与黄金周黄龙景区的高到访率吻合。

## 3 讨论

### 3.1 黄龙自然保护区的鸟类时空规律

对两个点位的声学指数  $BIO$ 、 $NDSI$ 、 $ACI$  数值进行可视化表达, 比较发现黄龙景区内, 鸟类的空间活跃度由于不同人为利用梯度而呈现差异; 共性是时间节律上呈现早晚两个

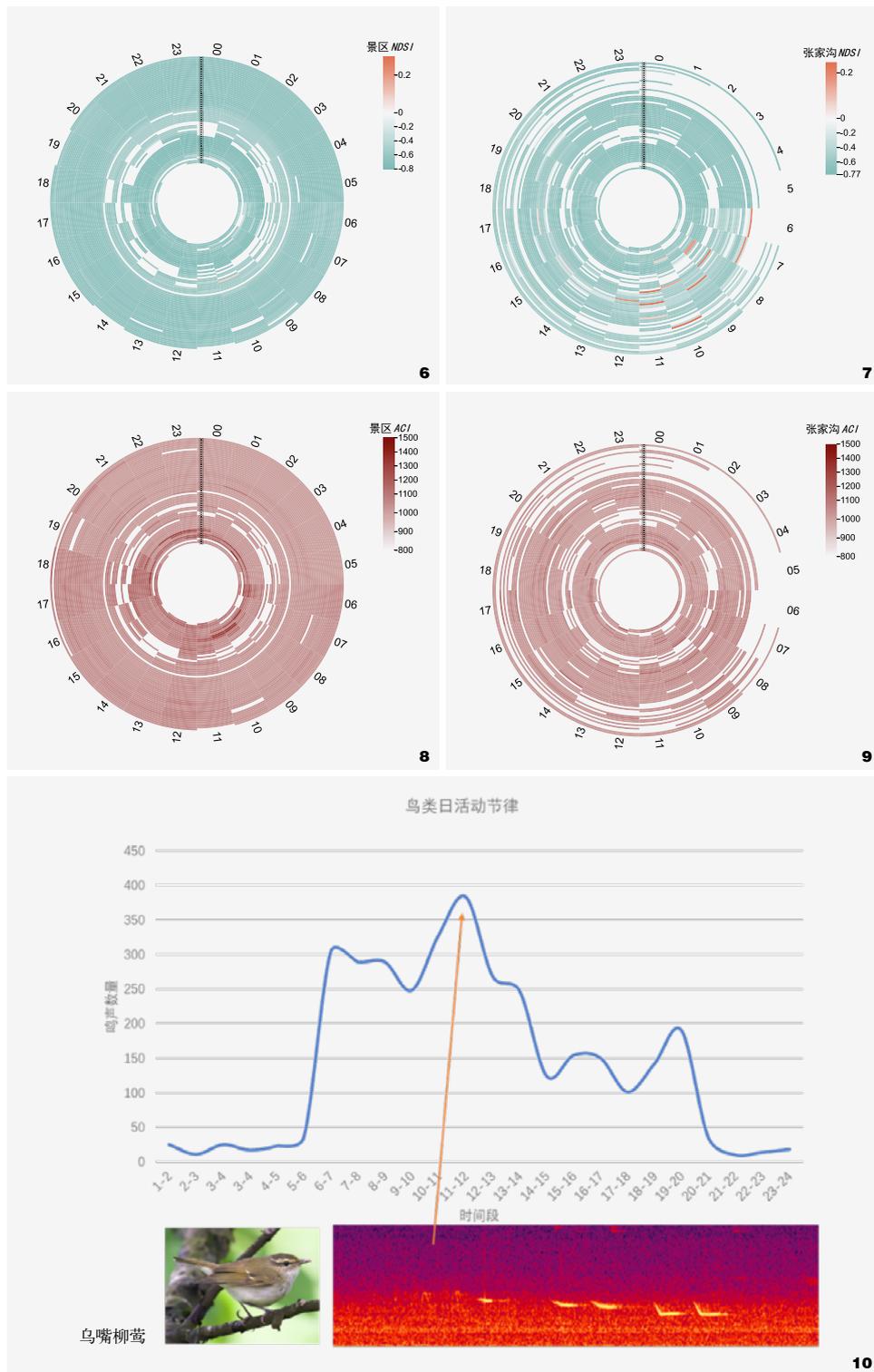


图6 黄龙景区NDSI值  
Fig. 6 NDSI value of the scenic area

图8 黄龙景区ACI值  
Fig. 8 ACI value of the scenic area

图10 鸟类日活动节律  
Fig. 10 Bird activity rhythm on a daily basis

图7 张家沟NDSI值  
Fig. 7 NDSI value of Zhangjiagou

图9 张家沟ACI值  
Fig. 9 ACI value of Zhangjiagou

活动高峰的现象，黄龙景区（代表人为干扰较大）的鸣声高峰与张家沟（代表几乎无人为声干扰）存在一致性，高峰都发生在6:30至9:30左右，但由于黄龙景区内（缓冲区）的鸣声高峰持续的时间较张家沟（核心区）更短，大约在8:30左右结束。人声干扰程度会降低鸣声高峰的持续时间。

### 3.2 指数运用的适用性

鉴于单个物种识别的难度挑战以及精细化探索产生的大量数据，越来越多研究走向了数据可以被相对快速、大批量处理的声景指数评估。但声景指数的计算不考虑单个物种，在监测中要求必须严格理解指数与生物多样性真实测量值间的关系，即通过其他方式收集的生物群落信息对其进行验证和校准。目前尚未形成对指数普适性应用场景的综合性研究，对于声景指数的可扩展性和广泛适用性还存在一些争议。

尽管如此，声景指数仍可以被用作突显或过滤某些声源的指标以帮助监测数据的筛选和排除。由于每种声源的特性不同，一些声源的变化和浮动可以在声学指数中反映出来。例如鸟类群落的高频快速鸣叫相比于汽车飞机等恒定频率的人为噪声，在ACI中会产生更高值<sup>[29]</sup>。本研究通过抽样一周的声学指数验证，张家沟与黄龙景区的声纹特征形成较为鲜明的对比（图11，图12），黄龙景区内各声学指数以周为单位波动较小，但张家沟（核心区）以周为单位的声学指数波动都较大。其原因可能是张家沟（核心区）几乎是处于无人为打扰的状态，一定程度上会导致声学反映更为灵敏，指数的变异性更大。

由于单个样点的环境特征基本不变，声

景指数可以通过不同时间序列的数值大小比较来判断不同时间切片下动物群落的声音活动和干扰前后的声景变化,未来可针对气候变化,物种入侵,人为活动干扰<sup>[30-31]</sup>,管理部门保护工作干预成效等因素对保护地所面临问题进行具体分析。

#### 4 展望

本文以黄龙自然保护区为例,基于为期一个月的6 303 min的声音数据采集作为试验,通过物种识别结合声音指数分析的方式,选择了人为干扰两种不同梯度条件下的鸣声特征进行分析。研究发现了鸣声特征的一般规律,证实了声纹监测的有效性,声学指数的使用特征,并希望未来在物种识别能力、时空规律揭示方面产生更新的突破。未来的研究将在以下两方面进行突破:

(1) 物种识别的精准性进一步提升。本研究完成了岷山地区鸟类声纹库建立,通过大数据爬取和专家知识图谱的方式进行核验,此工作融合了专家知识与大数据,具有不可替代性。该数据库包含了从 xeno-canto.org 开源数据收集的 82 406 条声音数据。从已经收集得到 6 303 多条数据中选取了置信度较高的 2 973 条进行物种标签识别。通过卷积神经网络技术结合人工辨识,建立了初步的置信度较高的黄龙鸟类声纹识别模型。有研究表明,卷积神经网络技术辅助声学监测可以保证物种识别准确率达到 94%<sup>[32]</sup>,但还应通过语图样本集的建立和计算对模型进行训练,进一步提高识别准确率<sup>[33]</sup>。

(2) 通过声纹识别辅助生物多样性保护与管理。通过黄龙自然保护区的声纹与生物多样性研究,已经初步证实了声纹技术的有效性。未来将在如何通过声纹技术辅助保护

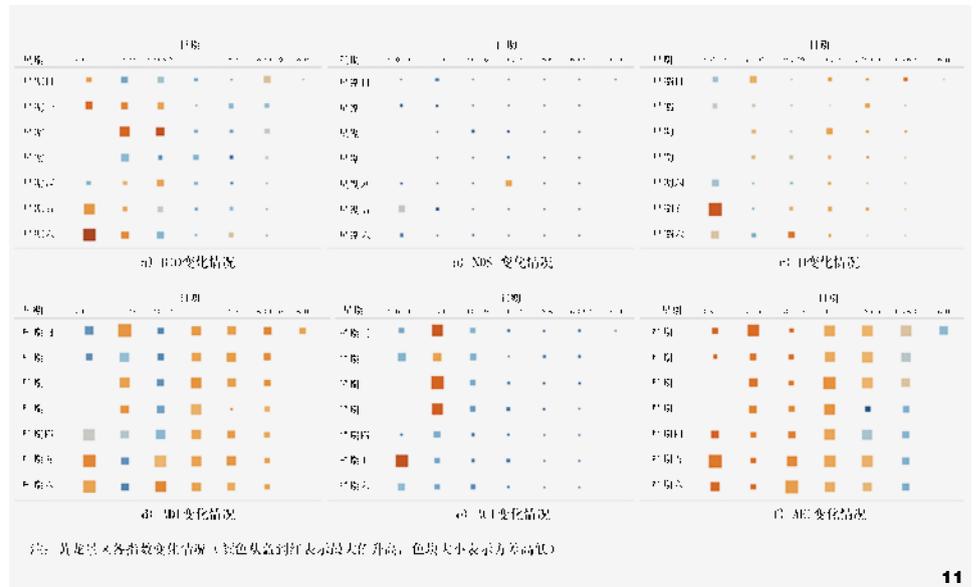


图11 黄龙景区各指数变化情况  
Fig. 11 Changes in each index of the scenic area

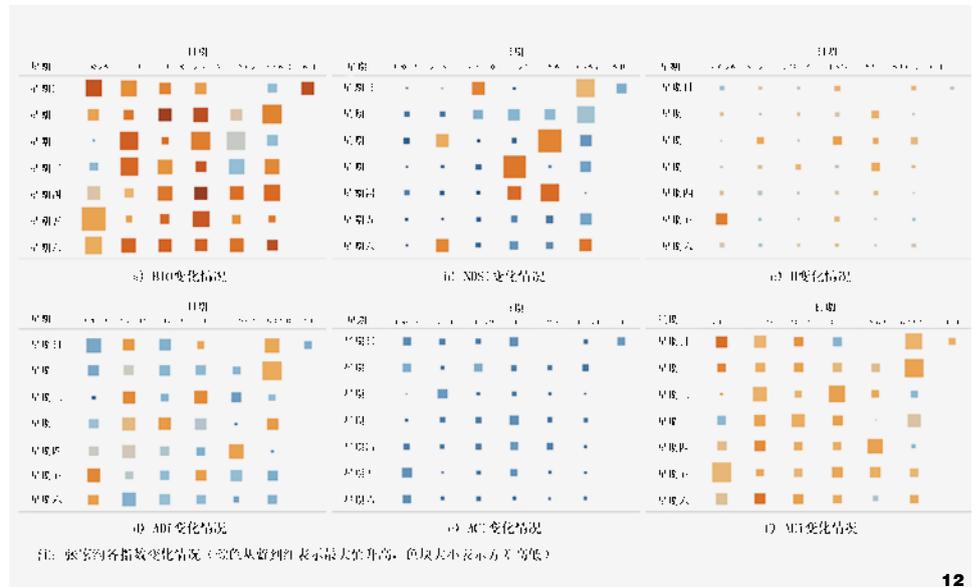


图12 张家沟各指数变化情况  
Fig. 12 Changes in each index of Zhangjiagou

地管理方面进一步努力,结合对自然保护区的已有研究基础<sup>[34-35]</sup>,对人为产生的影响定量化分析,从而更为精准地对保护地的人为影响进行管控,更好地实现生物多样性保护与地方发展。

注:文中图表均由作者自绘/摄。

#### 参考文献

- [1] KVS N R R, MONTGOMERY J, GARG S, et al. Bioacoustics Data Analysis — A Taxonomy, Survey and Open Challenges[J]. IEEE Access, 2020, 8: 57684-57708.
- [2] LAIOLO P. The Emerging Significance of Bioacoustics in Animal Species Conservation[J].

- Biological Conservation, 2010, 143(7): 1635-1645.
- [3] MARQUES T A, THOMAS L, MARTIN S W, et al. Estimating Animal Population Density Using Passive Acoustics[J]. *Biological Reviews*, 2013, 88(2): 287-309.
- [4] KOEHLER J, JANSEN M, RODRIGUEZ A, et al. The Use of Bioacoustics in Anuran Taxonomy: Theory, Terminology, Methods and Recommendations for Best Practice[J]. *Zootaxa*, 2017, 4251(1): 1-124.
- [5] HORNE J K. Acoustic Approaches to Remote Species Identification: A Review[J]. *Fisheries Oceanography*, 2000, 9(4): 356-371.
- [6] KORNELIUSSEN R J, HEGGELUND Y, MACAULAY G J, et al. Acoustic Identification of Marine Species Using a Feature Library[J]. *Methods in Oceanography*, 2016, 17: 187-205.
- [7] DE AGUIAR SILVA C, MACHADO R B, SILVEIRA M, et al. Listening in The Dark: Acoustics Indices Reveal Bat Species Diversity in a Tropical Savannah[J]. *Bioacoustics*, 2023, 32(1): 17-32.
- [8] ARIAS-AGUILAR A, HINTZE F, AGUIAR L M S, et al. Who's Calling? Acoustic Identification of Brazilian Bats[J]. *Mammal Research*, 2018, 63: 231-253.
- [9] WANG H, XU Y, YU Y, et al. An Efficient Model for a Vast Number of Bird Species Identification Based on Acoustic Features[J]. *Animals*, 2022, 12(18): 2434.
- [10] BRODIE S, ALLEN-ANKINS S, TOWSEY M, et al. Automated Species Identification of Frog Choruses in Environmental Recordings Using Acoustic Indices[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106852.
- [11] TAYLOR A M, REBY D. The Contribution of Source — Filter Theory to Mammal Vocal Communication Research[J]. *Journal of Zoology*, 2010, 280(3): 221-236.
- [12] OBRIST M K, PAVAN G, SUEUR J, et al. Bioacoustics Approaches in Biodiversity Inventories[J]. *Abc Taxa*, 2010, 8: 68-99.
- [13] SUEUR J, FARINA A. Ecoacoustics: The Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound[J]. *Biosemiotics*, 2015, 8: 493-502.
- [14] FARINA A. Ecoacoustics: A Quantitative Approach to Investigate the Ecological Role of Environmental Sounds[J]. *Mathematics*, 2018, 7(1): 21.
- [15] DO NASCIMENTO L A, CAMPOS-CERQUEIRA M, BEARD K H. Acoustic Metrics Predict Habitat Type and Vegetation Structure in the Amazon[J]. *Ecological Indicators*, Elsevier, 2020, 117: 106679.
- [16] FULLER S, AXEL A C, TUCKER D, et al. Connecting Soundscape to Landscape: Which Acoustic Index Best Describes Landscape Configuration?[J]. *Ecological Indicators*, Elsevier, 2015, 58: 207-215.
- [17] GASC A, FRANCOMANO D, DUNNING J B, et al. Future Directions for Soundscape Ecology: The Importance of Ornithological Contributions[J]. *The Auk: Ornithological Advances*, 2017, 134(1): 215-228.
- [18] BUXTON R T, MCKENNA M F, CLAPP M, et al. Efficacy of Extracting Indices from Large-scale Acoustic Recordings to Monitor Biodiversity[J]. *Conservation Biology*, Wiley Online Library, 2018, 32(5): 1174-1184.
- [19] 肖治木, 崔建国, 王代平, 等. 现代生物声学的学科发展趋势及中国机遇[J]. *生物多样性*, 2023, 31(01): 9-31.
- [20] 许晓青, 蒲宝婧, 余楚萌, 等. 声学手段辅助自然保护区生物多样性监测现状及应用建议[J]. *自然保护区*, 2023, 3(4): 34-44.
- [21] 王言一, 张屹美, 夏灿玮, 等. Alpha声学指数效应的meta分析[J]. *生物多样性*, 2023, 31(01): 145-158.
- [22] 张屹美, 王言一, 何衍, 等. Beta声学指数的特征和应用[J]. *生物多样性*, 2023, 31(01): 159-166.
- [23] 谢卓飏, 李鼎昭, 孙海信, 等. 面向鸟鸣声识别任务的深度学习技术[J]. *生物多样性*, 2023, 31(01): 137-144.
- [24] FARINA A, LATTANZI E, MALAVASI R, et al. Avian Soundscapes and Cognitive Landscapes: Theory, Application and Ecological Perspectives[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(9): 1257-1267.
- [25] VILLANUEVA-RIVERA L J, PIJANOWSKI B C, DOUCETTE J, et al. A Primer of Acoustic Analysis for Landscape Ecologists[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(9): 1233-1246.
- [26] SUEUR J, PAVOINE S, HAMERLYNCK O, et al. Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal[J]. *PLoS One*, 2008, 3(12): e4065.
- [27] KASTEN E P, GAGE S H, FOX J, et al. The Remote Environmental Assessment Laboratory's Acoustic Library: An Archive for Studying Soundscape Ecology[J]. *Ecological Informatics*, 2012, 12: 50-67.
- [28] BRADFER-LAWRENCE T, BUNNEFELD N, GARDNER N, et al. Rapid Assessment of Avian Species Richness and Abundance Using Acoustic Indices[J]. *Ecological Indicators*, Elsevier, 2020, 115: 106400.
- [29] PIERETTI N, FARINA A, MORRI D. A New Methodology to Infer the Singing Activity of an Avian Community: The Acoustic Complexity Index (ACI) [J]. *Ecological Indicators*, Elsevier, 2011, 11(3): 868-873.
- [30] BURIVALOVA Z, ORNDORFF S, TRUSKINGER A, et al. The Sound of Logging: Tropical Forest Soundscape Before, During, and After Selective Timber Extraction[J]. *Biological Conservation*, Elsevier, 2021, 254: 108812.
- [31] IGLESIAS-MERCHAN C, DIAZ-BALTEIRO L, SOLIÑO M. Transportation Planning and Quiet Natural Areas Preservation: Aircraft Overflights Noise Assessment in A National Park[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, 2015, 41: 1-12.
- [32] LIU J, ZHANG Y, LV D, et al. Classification Method of Birdsong Based on Gabor\_WT Feature Image and Convolutional Neural Network[C]// 2021 4th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (PRAI). IEEE, 2021: 134-140.
- [33] JIANGJIAN X, WENBIN L, JUNGUO Z, et al. Bird Species Recognition Method Based on Chirplet Spectrogram Feature and Deep Learning[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(3): 122-127.
- [34] 许晓青, 冯婧捷, 孔德军. 云南大山包自然保护区人为噪声分布预测及其对黑颈鹤的潜在影响[J]. *中国园林*, 2020, 36(08): 41-46.
- [35] 许晓青, 金云峰, 钟乐. 基于声景资源时空分布特征的自然保护地自然宁静管理与规划[J]. *风景园林*, 2021, 28(12): 5862.