

声音监测技术在鄱阳湖典型湿地鸟类多样性监测中的应用

游海林¹ 吴永明¹ 徐力刚^{2*} 程俊翔² 刘丽贞¹ 姚忠¹ 辛在军¹

(¹江西省科学院鄱阳湖研究中心,南昌 330096; ²中国科学院南京地理与湖泊研究所,中国科学院流域地理学重点实验室,南京 210008)

摘要 声音是大自然的基本属性,利用声音监测技术开展鸟类多样性和丰富度的研究可以有效弥补传统鸟类调查方法的不足。本研究以鄱阳湖典型人控湖汊芳兰湖为区域,于2020年4—6月采用专业的声音仪器 Song Meter SM4 在研究区域布设的监测点采集每天00:00、06:00、12:00和18:00时刻的鸟类声音数据,借助统计软件 R 中声音处理程序包将鸟类声音数据转化为具有生物信息的声学指标——生物声学指数(BI指数),用以阐明这3个月每天凌晨、早上、中午和傍晚对应的鸟类多样性特征及活动习性强弱程度,揭示鄱阳湖典型湿地长时间序列的鸟类多样性特征,并采用 Mann-Kendall 检验法对鸟类多样性特征序列进行趋势和突变性分析,最后利用 Morlet 小波分析方法对其进行多时间尺度特征分析。结果表明:(1)3个月凌晨、早上、中午和傍晚时刻对应的 BI 指数值各有差异,分别为 5.73~63.49、5.76~67.00、3.36~60.24 和 4.91~52.62,且这4个时刻 BI 指数值在整体上均呈现增加趋势。(2)Mann-Kendall 突变性检验发现,这3个月份的 BI 指数序列在2020年4月27日06:00左右的时候发生突变,突变发生的主要原因是受人类活动的影响。(3)逐日平均 BI 指数序列在演变过程中存在着 12~30、10~18、4~9天3类时间尺度的周期性变化规律,其小波方差存在3个较为明显的峰值,分别对应24、15和7天的时间尺度。本研究属于一种探索性研究,旨在为鸟类种群特征和行为特征及多样性研究提供一种较新的技术途径,也同时为其他动物(如两栖动物、昆虫等)多样性研究提供技术参考。

关键词 声音监测技术; 生物声学指数; 鸟类多样性; 芳兰湖湿地; 鄱阳湖

Application of soundscape monitoring technology in bird diversity monitoring at the typical wetland of Poyang Lake. YOU Hai-lin¹, WU Yong-ming¹, XU Li-gang^{2*}, CHENG Jun-xiang², LIU Li-zhen¹, YAO Zhong¹, XIN Zai-jun¹ (¹Poyang Lake Research Centre, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; ²Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China).

Abstract: Sound is a fundamental attribute of nature. Using the soundscape technology to monitor bird diversity and richness can effectively overcome the deficiency of traditional methods. The sound data of wetland birds at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 of each day during April to June in 2020 were collected using Song Meter SM4, a professional collection instrument, in Fanglan Lake, a typical human-controlled lake in Poyang Lake. Using the professional sound processing packages (i.e. seewave, tuneR, and soundecology) in the statistical software R, all the collected sound data were analyzed and converted into bioacoustic index (BI). The main aims were to clarify the corresponding bird diversity and activity habits in the early morning, morning, noon and evening of each day during these three months, and to reveal the characteristics of bird diversity

江西省青年人才培养项目(20204BCJL23040)、江西省科技基础条件平台建设项目(20203CCD46006)、江西省重点研发计划(20192BBGL70042, 20192ACBL21022)和江西省科学院对外合作项目(2020-YZD-26)资助。

收稿日期: 2020-12-16 接受日期: 2021-06-03

* 通讯作者 E-mail: lgxu@niglas.ac.cn

in a long-time sequence at the typical wetland of Poyang Lake. The Mann-Kendall test method was used to analyze the trend and mutation of bird diversity characteristic sequence. The Morlet wavelet analysis method was applied to analyze its multi-temporal scale characteristics. The results showed that: (1) The BI values at 00:00, 06:00, 12:00, and 18:00 within the three months were different, with ranges of 5.73–63.49, 5.76–67.00, 3.36–60.24, and 4.91–52.62, respectively. The BI values generally showed an increasing trend. (2) The Mann-Kendall mutation test indicated that all the BI sequences for three months had a sudden change around 06:00 on April 27 in 2020, which was mainly caused by human activities. (3) The evolution of daily average BI values showed three types of periodic change scales of 12–30, 10–18, and 4–9 days. The wavelet variance had three significant peaks, corresponding to the time scales of 24, 15, and 7 days. As an exploratory research, this study could provide a new technical approach for the research on bird population, behavior characteristic and its diversity, as well as the diversity monitoring research for other animals (amphibians, insects, etc.).

Key words: soundscape monitoring technology; bioacoustic index; bird diversity; Fanglan Lake wetland; Poyang Lake.

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊,是一个典型过水性吞吐湖泊(朱海虹等,1997)。鄱阳湖湿地时令性显著的水陆交替的特殊景观,为湖滩草洲湿地生态系统发育提供了良好条件,成为珍禽、候鸟的天然乐园。每年冬季,都有成千上万只水禽来鄱阳湖越冬,尤其在20世纪80年代就已是国际濒危物种的白鹤最为著名,每年几乎全世界95%以上的白鹤都集中在鄱阳湖越冬,被誉为“候鸟天堂”和“白鹤王国”(鄱阳湖编委会,1988)。

鉴于鄱阳湖湿地鸟类的珍稀性程度和鸟类在湿地生态系统及食物链中扮演的重要角色,关于鄱阳湖湿地鸟类调查及其相关研究由来已久。早在1917年鄱阳湖就有关于鸟类调查的报道(Gee *et al.*, 1917),一直到近期的由江西省山江湖开发治理委员会办公室牵头的鄱阳湖第一次和第二次综合科考(吴玉燕,2013),以及由我国林业局和世界自然基金会驻北京办事处联合实施的长江中下游水鸟调查(马克·巴特等,2004),均较为系统地开展了鄱阳湖鸟类调查和多样性监测研究。另外,江西省鄱阳湖国家自然保护区和省内外的科研院所等也陆续开展了一些类似的研究和报道(You *et al.*, 2014; 曾南京等,2016a,b; 张娜等,2019)。

传统鸟类调查一般采用定期监测与巡护监测相结合的方法,以鄱阳湖国家级自然保护区鸟类调查为例,通常是在候鸟开始迁徙至迁徙结束的时段内(每年9月至来年4月),在每个月的8、18和28日对保护区内的9个湖泊进行全湖监测,共计监测22次,每次监测分11个组。然后以低水位时期的卫星影像为基础,用绘图软件CorelDraw画出各湖地图,

作野外工作图,然后目测鸟群的大致位置并标于图中(曾南京等,2016a; 何文韵等,2019)。该监测方法在一定程度上有助于揭示鄱阳湖湿地的鸟类群落结构和鸟类数目及其空间分布特征等,然而也存在一些不足之处,如:(1)目测观测需耗费大量的人财物力,在一些偏远的地方无法到达进行观测;(2)监测的次数有限,缺乏长期性和连续性;(3)受外界和环境因素影响较大,以气候因素为例,恶劣的天气会对观测结果有极大影响。另外,采用目测观测具有较高的主观性,观测人员需要有丰富的观鸟经验,不然会导致观测结果的不确定性。因此,此亟待发展新的监测手段和方法,提升湿地鸟类多样性监测能力。

声音是大自然的基本属性,是研究生态系统关系的有效手段,国外利用声音监测技术开展生物多样性监测研究已经有较多的相关报道。如,Celis-Murillo等(2010)利用声音录音手段估算了美国加利福尼亚州某河岸水鸟物种丰富度及丰富度组成结构,并与实地监测方法相比较,最后表明两种鸟类观测方法的观测结果存在高度一致性。Pijanowski等(2011)根据团队已有的研究较为系统地介绍了声音技术在生物多样性监测中的理论基础和方法应用等。目前国外声音监测在森林生态系统、城市生态系统、农田生态系统和湿地生态系统均有广泛的应用,具体主要应用在生物多样性监测、生物行为监测、生物丰度监测、人类-生物关系分析等方面(Bregman *et al.*, 2016)。尽管国外开展相关研究已经有一定时间,然而类似研究在国内却并不多见。利用声音监测技术开展生物多样性监测研究,可以

有效弥补传统鸟类调查方法的不足,且基于大数据手段和机器学习方法提取生物声音中携带的生物信息,能够实时了解生态系统动态和群落物种多样性变化,进而为湿地生态系统健康状况的快速诊断和健康评价提供科学依据。对此,本研究选取鄱阳湖典型湿地为对象,将较为先进的声音监测技术应用于鸟类多样性的监测研究,通过在野外实地收集长时间序列的鸟类声音基础数据,运用机器学习方法提取鸟类声音数据中转化为具有生物信息的声学指标,阐明鄱阳湖典型湿地鸟类长期演替形成的鸟类多样性特征,利用 Mann-Kendall 检验法对鸟类多样性特征进行趋势分析和突变性检验,并运用 Morlet 小波分析方法对典型湿地鸟类多样性特征进行周期性特征分析。本研究旨在为开展湿地鸟类多样性调查和监测提供一种较为新颖的技术途径,同时为开展湿地鸟类多样性定量化研究提供参照,进而为保护湿地生物多样性和珍稀候鸟以及湿地恢复工作提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

芳兰湖(图1)是鄱阳湖典型的人控湖汊(人工控制湖水位的内湖汊),水位调节方式以人工控制为主,自然调节为辅助,在丰水期时可与鄱阳湖连成一片,枯水期时可独立成湖,其性质与鄱阳湖的碟型洼地湖泊相似(毛雪慧等,2020)。芳兰湖湿地周围布有大片的“国家级九江彭泽鲫良种场”养殖基地、泥滩地及稻田等,能够为候鸟提供良好的栖息环境

和食物,因此每年该湿地有大量的候鸟来芳兰湖湿地觅食栖息停留和中转。

1.2 声音监测技术在鸟类多样性监测中的应用

(1) 鸟类声音数据的收集

在通过对鄱阳湖芳兰湖进行实地调研的基础上,在其鸟类分布较多的地方布设一个鸟类声音监测点,在声音监测点安装1台声音监测仪器对周围鸟类声音进行动态监测和收集,为了防止人为及其他因素的干扰,将仪器安装在湿地内人为干扰较少的树上。声音监测仪器为美国 Wildlife Acoustics 公司生产的专业声音采集仪器 Song Meter SM4,利用 Song Meter SM4 声音采集器可收集半径约为 500 m 范围内人耳听到的所有鸟类声音,该仪器可自主设置鸟类声音监测的频率和周期,且 Song Meter SM4 声音采集器在录制声音的时候具有一定降噪功能,可以消除仪器工作时由仪器内部发出的噪音。

(2) 声学指标计算与分析

声学指标是反映声音数据特征的常用方法,可以有效提取声音数据包含的生物信息(Sueur, 2018)。本研究选取与生物多样性相关程度较高的基本声学指标,即生物声学指数(Bioacoustics Index, BI),用以分析鸟类声学指标随时间变化的规律,阐明鄱阳湖典型湿地鸟类多样性特征(Sueur, 2018; Rajan *et al.*, 2019)。

选取 BI 指数是因为生物声音及生物声响主要频率分布范围在 2.0~11.0 kHz,而鸟类是使用 2~8 kHz 的频率范围进行通讯和交流(伦可环等,2017; Rajan *et al.*, 2019)。一般来说,背景噪声的能量在

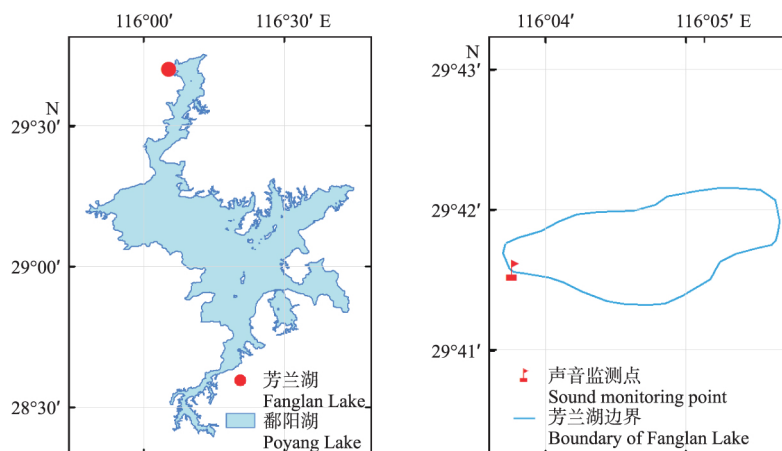


图1 芳兰湖湿地地理位置分布和鸟类声音监测点布设示意图

Fig.1 Schematic diagram of the geographical distribution of Fanglan Lake wetland and the layout of bird sound monitoring point

不同频段差异都较小,对声学指标的影响也较低,故声学指标对噪音敏感性较低,可以在高背景噪音下应用(Farina *et al.* 2011)。利用BI指数可计算2~8 kHz频率范围的总声能来估计鸟类群落的丰度,进而对鸟类多样性进行分析。BI指数的计算涉及声音数据(A)的快速傅立叶变换(FFT),BI指数值分别为取值为2~8 kHz之间的FFT面积,具体计算公式如下所示(Boelman *et al.* 2007)。

$$BI = \sum_{f=2 \text{ kHz}}^{f=8 \text{ kHz}} FFT(A) \quad (1)$$

(3) Mann-Kendall 检验法

对于长时间序列的趋势与突变分析中,Mann-Kendall 检验法是一种非参数检验方法,最初是由Mann和Kendall提出。Mann-Kendall 检验法有其样本不必遵从某一特定分布的优点,其结果也不受少数异常值的干扰,很好揭示整体时间序列的突变情况与趋势变化(Hamed 2008)。

M-K 检验方法以序列平稳为前提,针对 n 个变量 x_1, x_2, \dots, x_n , n_i 代表第 i 个样本 x_i 大于 x_j ($1 \leq j \leq i$) 的累计数。定义统计参数 d_k 计算公式如下:

$$d_k = \sum_{i=1}^k n_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (2)$$

在无趋势零假设条件下, d_k 渐渐趋于正态分布,此时期望 $E(d_k)$ 和方差 $var(d_k)$ 的计算公式如下:

$$E(d_k) = k(k-1)/4 \quad (3)$$

$$var(d_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (4)$$

在以上假设下,统计上的指标参数 $UF(d_k)$ 的计算公式如下:

$$UF(d_k) = \frac{[d_k - E(d_k)]}{\sqrt{var(d_k)}} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

其中 $UF(d_k)$ 为正序统计量,而 $UB(d_k)$ 为逆序统计量。通过绘制二者曲线,并给定一显著性水平 α_0 ,当 $\alpha_1 < \alpha_0$ 时,则拒绝原假设,表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势。如果 α_0 给定 0.05,当 $UF(d_k)$ 或 $UB(d_k)$ 超过置信区间 ± 1.96 时,拒绝零假设,趋势不显著;当 $UF(d_k) > 0$,则表示序列呈上升趋势,反之则呈下降趋势;若 $UF(d_k)$ 超过临界值时,则说明上升或下降趋势显著。当 $UF(d_k)$ 与 $UB(d_k)$ 在置信区间内发生交叉说明在此处发生突变(陈中平等 2016)。

(4) Morle 小波分析法

小波分析技术在水文、气候等要素的时间序列的多时间尺度分析中取得了较为广泛的应用,基本

原理是通过增加或减小伸缩尺度来得到信号的低频或高频信息,然后提取信号的概貌或细节,实现对信号不同时间尺度和空间局部特征的分析(Chernick, 2001)。选 Morlet 连续复小波变化分析鄱阳湖典型湿地鸟类声音声学指标的多时间尺度特征,是因为它能够同时给出声学指标序列变化的位相和振幅两方面信息(王文圣等 2002)。此外,复小波函数的实部和虚部位相差为 $\pi/2$,能够消除用实小波变化系数作为判断依据而产生的虚假震荡。Morlet 小波为复数小波,其函数表达式为:

$$\varphi(t) = e^{-t^2/2} e^{i\omega t} \quad (6)$$

(5) 数据分析

本研究以收集的鄱阳湖芳兰湖湿地的 2020 年 4、5 和 6 月份共计 3 个月的鸟类声音数据为对象,选取这 3 个月每天 00:00、06:00、12:00 和 18:00 时刻(分别表示当天凌晨、早上、中午和傍晚时间)的鸟类声音数据,基于这些时刻的鸟类声音数据提取和计算声学指标 BI 指数,分析每天凌晨、早上、中午和傍晚对应的鸟类多样性特征及习性活动,采用 Mann-Kendall 检验法对长时间序列声学指标进行趋势和突变性分析,并利用 Morlet 小波分析方法对其进行周期性特征分析。声音数据文件处理与声学指标值计算在统计软件 R 中实现,声学指标值的 Mann-Kendall 检验和 Morlet 小波周期性特征分析在 Matlab2016 中实现,声学指标值作图与分析在统计 Origin 8.5 中进行。

2 结果与分析

2.1 典型湿地鸟类声音数据的 BI 指数变化特征

图 2 为在典型湿地 2020 年 4—6 月份每天 00:00、06:00、12:00 和 18:00 鸟类声音数据的声学指标 BI 指数变化特征示意图,分别代表了一天凌晨、早上、中午和傍晚鸟类多样性特征及活动习性等,一般来说,鸟类群落发出的声音强度越大,频段越多,BI 指数值越高,鸟类群落丰度也越大。

4—6 月 00:00 时刻的 BI 指数值在 5.73 ~ 63.49,平均值为 32.5。BI 指数最大值发生在 4 月 25 日,说明当天凌晨获得鸟类丰度较高,活动的鸟类数量也较多。最小值出现在 4 月 19 日,说明这天凌晨活动的鸟类数目较少。早上 06:00 时刻的 BI 指数值在 5.76 ~ 67.00, BI 指数最大值发生在 6 月 3 日,说明当天早上活动的鸟类丰度和数量都较大;最小值出现在 4 月 18 日,说明这天早上活动的鸟类数

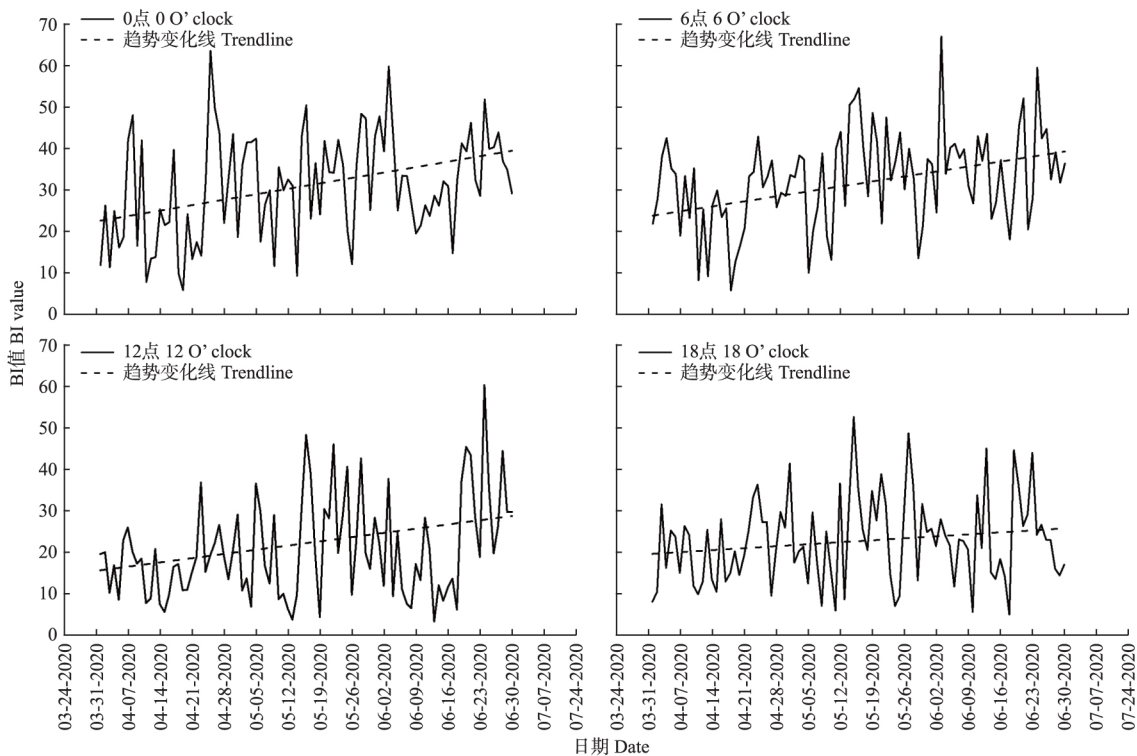


图 2 2020 年 4—6 月份中每一天不同时刻的 BI 指数变化特征

Fig.2 Changes in BI index at different times of each day from April to June in 2020

目较少。在监测的 3 个月内,06:00 时刻对应的 BI 值大于 00:00 时刻对应的 BI 值比例为 58.24%,表明早上的鄱阳湖芳兰湖湿地鸟类多样性和鸟类活动高于凌晨,究其原因 00:00 是大部分鸟类休息的时段,而早上 06:00 时刻许多鸟类已经逐渐苏醒并进行开始白天的活动,如鸣唱、交流、哺育幼鸟和觅食等。12:00 时刻的 BI 指数值在 3.36~60.24,平均值为 20.75。BI 指数最大值发生在 6 月 24 日,最小值出现在 6 月 13 日,说明 6 月 24 日中午声音监测点附近的鸟类数目较多,活动性程度也较高,而 6 月 13 日这天则刚好与之相反。18:00 时刻的 BI 指数值在 4.91~52.62,平均值为 22.79。BI 指数最大值发生在 5 月 15 日,说明当天傍晚活动的鸟类数目较多;最小值出现在 6 月 18 日,说明这天傍晚活动的鸟类数目较少。18:00 时刻对应的 BI 值大于 12:00 时刻对应的 BI 值比例为 60.44%,说明傍晚的鄱阳湖芳兰湖湿地鸟类丰度、鸟类数目和活动性程度高于中午,因为傍晚时分大部分白天在外面活动的鸟类逐渐返回休息地休息,故此时鸟类群落丰度、数量和活动性程度均是相对较强的,中午的时候由于温度较高和光照较强对鸟类丰度和活动能力具有一定的影响作用。

另外,从图 2 可以看出,4 个时刻的 BI 指数均呈现增加的趋势,分析其原因是 4—6 月整个鄱阳湖湿地气候和水情等外部环境条件都变得更加有利于生物成长,湿地生物多样性增加,为鸟类提供更多的食物来源,从而有利于鸟类群落数目、鸟类丰度及活动性程度增强,这一结果与前人报道一致(Mammides *et al.*, 2017)。

2.2 典型湿地鸟类声音数据 BI 指数突变性检验

由于本研究时间序列起始时间为 2020 年 4 月 1 日 00:00,后面的时间序列以每 6 h 递增,故之后的时间可以用 X 轴序数乘以 6 h 加上起始时间来表示(图 3)。利用 Mann-Kendall 检验法对鄱阳湖典型湿地 3 个月鸟类声音数据的声学指标进行突变性分析。经计算,Mann-Kendall 统计量为 1.91,突变检验发现 BI 指数序列约在 X 轴横坐标约为 105 的时候发生突变(即 UF 和 UB 相交时),也就是 BI 指数在 2020 年 4 月 27 日 06:00 左右的时候发生突变,在此之前有一段时间 2020 年 4 月 7 日 00:00(对应 X 轴横坐标为 40)到 4 月 29 日 12:00(对应 X 轴横坐标为 90)期间的 BI 指数呈现微弱的下降趋势(UF < 0),但是在此之后 BI 指数则明显的上升趋势,尤其是到 2020 年 5 月 16 日 00:00 时候(对应 X 轴横

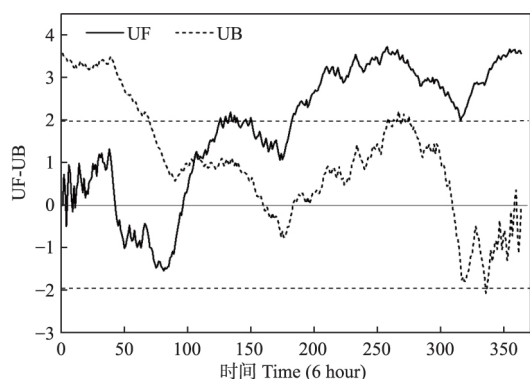


图3 BI指数的Mann-Kendall突变性检验
Fig.3 The Mann-Kendall mutation test of BI index

坐标为180),其上升趋势更是达到了0.05的显著性水平($UF > 1.96$)。经查证鄱阳湖当天星子站水位(4月27日)为12.17 m(吴淞高程),水位波动并无异常变化,因此可排除水位是导致BI指数发生突变的原因。进一步调查发现,由于芳兰湖湿地公园建设的需要,建筑施工队(主要为中国中铁四局)在声音监测点附近的地方驻扎并开始进行施工建设,大量的人类活动以及工地机器发出声响是导致芳兰湖湿地鸟类声音BI指数发生突变的直接原因。从整体来看,2020年4—6月份BI指数呈现增加趋势,研究结果与图2展示结果一致,证实了鸟类数目和丰度等鸟类多样性特征及活动习性,随着气候逐渐变暖,湖泊水位上升、日照时间延长,湿地生物包括植物、动物及微生物等种类和数目增多等外部环境因素变化而逐渐增强(Campos-Cerqueira *et al.* 2017)。

2.3 典型湿地鸟类声音数据BI指数周期性特征分析

将3个月份每天4个时刻的BI指数值进行平均计算,求得鄱阳湖典型湿地鸟类声音数据BI指数的逐日平均序列,利用Morlet复小波函数对其进行多时间尺度特征分析,结果如图4所示。小波系数实部等值线图能反映BI指数序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,进而能判断在不同时间尺度上,BI指数的未来变化趋势。当小波系数实部值为正数时,代表BI指数值增加;反之,小波系数实部值为负数时,代表BI指数值减小。图4结果显示逐日平均BI指数序列演化过程中存在的多时间尺度特征。总体说来,逐日平均BI指数演变过程中存在着12~30、10~18、4~9天3类时间尺度的周期变化规律。其中,在12~30天时间尺度上出现了“减-增”交替的准3次震荡;在10~18天时间尺

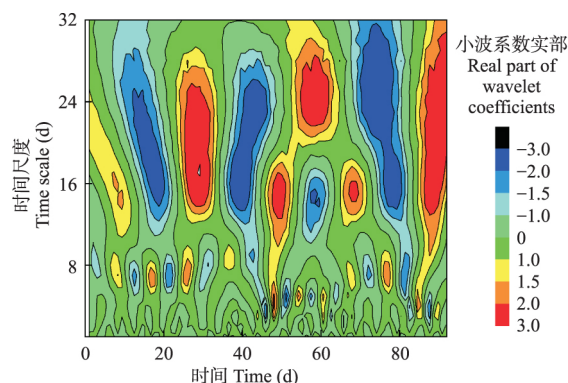


图4 BI指数的小波系数实部等值线图
Fig.4 Contour plot of the real part of the wavelet coefficients of BI index

度上存在准1次震荡;在4~9天时间尺度上存在交替的多次震荡。同时可以看出12~30天和4~9天2种时间尺度的周期变化在整个分析时段表现的非常稳定,具有全域性;而10~18天时间尺度的周期变化,在第45天(5月16日)至第70天(6月10日)的时间内较为稳定。

小波方差图能反映BI指数时间序列的波动能量随时间尺度的分布情况,用来确定BI指数演化过程中存在的主周期。逐日平均BI指数序列的小波方差图中(图5)存在3个较为明显的峰值,依次对应着24、15和7天的时间尺度。其中,最大峰值对应着24天的时间尺度,说明24天左右的周期震荡最强,为鄱阳湖芳兰湖湿地逐日平均BI指数序列变化的第一主周期;15天时间尺度对应着第二峰值,为BI指数序列变化的第二主周期;第三峰值对应着7天的时间尺度,为BI指数序列的第三主周期。这说明上述3个周期的波动控制着鄱阳湖芳兰湖湿地逐日平均BI指数在整个时间域内的变化特征。

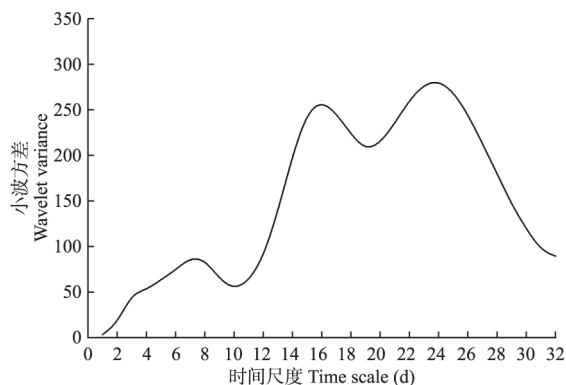


图5 BI指数的小波方差图
Fig.5 The wavelet variance graph of BI index

3 结 论

本研究以我国“候鸟天堂”和“白鹤王国”鄱阳湖的典型人控湖汊芳兰湖湿地为分析对象,针对传统鸟类调查方法存在的一些局限性,提出利用声音监测技术在野外实地收集长时间序列的鸟类声音数据,并通过利用机器学习方法和大数据手段提取鸟类声音数据中所携带的生物信息,开展鄱阳湖鸟类多样性调查研究。结果表明,声音监测技术受气候因素及环境因素影响较小,同时可以避免由人为因素导致的鸟类观测精度较低的情况发生,且鸟类观测频率和观测时长不受限制,因此将声音监测技术应用于鸟类多样性调查研究,可以较为真实反映鄱阳湖典型湿地鸟类多样性特征及其变化趋势。本研究主要取得以下结论:

(1) 在 2020 年 4 月至 6 月份这 3 个月份内 00:00、06:00、12:00 和 18:00 时刻的对应的 BI 指数值各有差异,4 个时刻对应的 BI 指数的极大值和极小值发生时间也各不相同,说明芳兰湖湿地的鸟类多样性特征及活动性强弱程度在不同时刻也有所不同,早上的鸟类多样性和活动性强弱程度高于凌晨,傍晚的鸟类多样性和活动性强弱程度高于中午。

(2) 经 Mann-Kendall 突变性检验发现,芳兰湖湿地鸟类声音数据 BI 指数序列在 2020 年 4 月 27 日 06:00 左右的时候发生突变,突变原因主要是人类活动导致。

(3) 芳兰湖湿地的鸟类声音数据逐日 BI 指数平均序列演变过程中存在 12~30、10~18 和 4~9 天这 3 类尺度的周期变化规律,依次对应着 24、15 和 7 天的时间尺度。

(4) 将较为经典的 Mann-Kendall 检验法和 Morlet 小波分析方法对鸟类多样性特征进行定量化研究,可以有效揭示鄱阳湖典型湿地鸟类多样性序列的变化趋势、突变性及多时间尺度变化特征。

(5) 通过实地收集鸟类群落声音来分析鄱阳湖典型湿地鸟类多样性特征,旨在为鸟类多样性及其他生物多样性监测及研究提供一种较新的技术途径,属于探索性研究。可以预测,在鸟类原位调查的基础上,辅助以人工智能、大数据技术和机器学习及深度学习等新颖化的综合性研究手段,是未来有效开展鸟类多样性及其他生物多样性调查的发展趋势。然而,尽管本研究具有一定的科学性、合理性和创新性,仍然存在一定的提升空间,如本研究结果主

要是基于鸟类群落,对单一的鸟种尤其是珍贵的鸟类并未开展深入研究,同时对鸟类群落具体数量、组成和结构的研究也未作进一步开展;另外,处于不同情绪状态鸟类所发出声音的特征及差异性研究也未涉及,这些内容都是借助声音监测技术手段开展鸟类多样性调查研究必须面对和解决的关键性问题。

参考文献

- 陈中平,徐强. 2016. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征. 科技通报, 32(6): 47-50. [Chen ZP, Xu Q. 2016. Analysis of precipitation characteristics in Jinhua by Mann-Kendall test method. *Bulletin of Science and Technology*, 32(6): 47-50.]
- 何文韵,邵明勤,植毅进,等. 2019. 鄱阳湖三个垦殖场的水鸟多样性. 生态学杂志, 38(9): 2765-2771. [He WY, Shao MQ, Zhi YJ, et al. 2019. Waterbird diversity in three reclamation regions of Poyang Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 38(9): 2765-2771.]
- 伦可环,张雁云,夏灿玮. 2017. 基于声音指数的鸟类多样性监测. 生物学通报, 52(11): 1-5. [Lun KH, Zhang YY, Xia CW. 2017. Bird diversity monitoring based on sound index. *Chinese Biological Bulletin*, 52(11): 1-5.]
- 马克·巴特,陈立伟,曹磊,等. 2004. 长江中下游水鸟调查报告. 北京: 中国林业出版社. [Barter M, Chen LW, Cao L, et al. 2004. Waterbird Survey of the Middle and Lower of the Yangzte River Floodplain. Beijing: China Forestry Press.]
- 毛雪慧,林静,王永秀,等. 2020. 江西某湖补水湿地工程设计案例解析. 河北环境工程学院学报, 30(1): 42-46. [Mao XH, Lin J, Wang YX, et al. 2020. Analysis on the design of a lake water replenishing wetland project in Jiangxi Province. *Journal of Hebei University of Environmental Engineering*, 30(1): 42-46.]
- 鄱阳湖编委会. 1988. 鄱阳湖研究. 上海: 上海科学技术出版社. [Poyang Lake Editorial Board. 1988. Poyang Lake Research. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press.]
- 王文圣,丁晶,向红莲. 2002. 小波分析在水文学中的应用研究及展望. 水科学进展, 13(4): 515-520. [Wang WS, Ding J, Xiang HL. 2002. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology. *Advances in Water Science*, 13(4): 515-520.]
- 吴玉燕. 2013. 鄱阳湖科学考察数据共享服务平台设计与初步实现(硕士学位论文). 南昌: 江西师范大学. [Wu YY. 2013. The Design and Preliminary Realization of the Poyang Lake Scientific Expedition Data Sharing Service Platform (Master's Thesis). Nanchang: Jiangxi Normal University.]
- 曾南京,朱奇,刘观华,等. 2016a. 2015 年鄱阳湖区夏季水鸟多样性初步研究. 湿地科学, 14(6): 773-780. [Zeng NJ, Zhu Q, Liu GH, et al. 2016. A preliminary study on diversity of summer waterbirds in Poyang Lake

- Area in 2015. *Wetland Science*, **14**(6): 773–780.]
- 曾南京,朱奇,俞长好,等. 2016b. 江西省鸟类种类的最新统计与分析. *野生动物学报*, **37**(1): 39–45. [Zeng NJ, Zhu Q, Yu CH, et al. Discussions on the number of bird species in Jiangxi Province. *Chinese Journal of Wildlife*, **37**(1): 39–45.]
- 张娜,李言阔,单继红,等. 2019. 鄱阳湖枯水期延长背景下越冬水鸟群落结构、丰富度及其空间分布格局. *湖泊科学*, **31**(1): 183–194. [Zhang N, Li YK, Shan JH, et al. 2019. Community structure, abundance and spatial distribution of water birds wintering in Poyang Lake wetland. *Journal of Lake Sciences*, **31**(1): 183–194.]
- 朱海虹,张本. 1997. 鄱阳湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社. [Zhu HH, Zhang B. 1997. Poyang Lake. Hefei: University of Science and Technology of China Press.]
- Boelman NT, Asner GP, Hart PJ, et al. 2007. Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecology Applications*, **17**: 2137–2144.
- Bregman MR, Patel AD, Gentner TQ. 2016. Songbirds use spectral shape, not pitch, for sound pattern recognition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**: 1666–1671.
- Campos-Cerqueira M, Aide TM. 2017. Changes in the acoustic structure and composition along a tropical elevational gradient. *Journal of Ecoacoustics*, **1**: 1–13.
- Celis-Murillo A, Deppe JL, Allen MF. 2010. Using soundscape recordings to estimate bird species abundance, richness, and composition. *Journal of Field Ornithology*, **80**: 64–78.
- Chernick MR. 2001. Wavelet Methods for Time Series Analysis. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- Gee NG, Moffett LI. 1917. A Key to the Birds of the Lower Yangtze Valley, with Popular Descriptions of the Species Commonly Seen. Shanghai: Shanghai Mercury Limited, Print.
- Hamed KH. 2008. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, **349**: 350–363.
- Mammides C, Goodale E, Dayananda SK, et al. 2017. Do acoustic indices correlate with bird diversity? Insights from two biodiverse regions in Yunnan Province, south China. *Ecological Indicators*, **82**: 470–477.
- Pijanowski BC, Farina A, Gage SH, et al. 2011. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, **26**: 1213–1232.
- Rajan SC, Athira K, Jaishanker R, et al. 2019. Rapid assessment of biodiversity using acoustic indices. *Biodiversity and Conservation*, **28**: 2371–2383.
- Sueur J. 2018. Sound Analysis and Synthesis with R. Culemborg, Netherlands: Springer.
- You HL, Xu LG, Jiang JH, et al. 2014. The effects of water level fluctuations on the wetland landscape and waterfowl habitat of Poyang Lake. *Fresenius Environmental Bulletin*, **23**: 1650–1661.
-
- 作者简介 游海林,男,1985年生,博士,副研究员,研究方向为湖泊水文与湿地生态。E-mail: youhailin1985@163.com
责任编辑 魏中青
-

- 游海林,吴永明,徐力刚,程俊翔,刘丽贞,姚忠,辛在军. 2021. 声音监测技术在鄱阳湖典型湿地鸟类多样性监测中的应用. *生态学杂志*, **40**(9): 3025–3032.
- You HL, Wu YM, Xu LG, Cheng JX, Liu LZ, Yao Z, Xin ZJ. 2021. Application of soundscape monitoring technology in bird diversity monitoring at the typical wetland of Poyang Lake. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(9): 3025–3032.