

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

王虎诚¹, 魏 齐¹, 杜 伟¹, 王 菲¹, 葛秉珏¹, 鞠然然^{2*}

(1. 徐州市林业资源管理技术中心, 江苏 徐州 221009; 2. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:该文以徐州九里湖采煤塌陷地国家湿地公园自然栖居野生鸟类为对象, 基于生物声学记录仪实采的野外鸟鸣声数据, 开展了基于鸟鸣声的物种识别试验性研究。在构建徐州地区塌陷地湿地公园 14 种常见鸟类鸣声数据库的基础上, 对比分析了物种识别试验结果和相应人工野外调查情况, 结果表明所研物种识别系统可实现 95% 以上的鸟类物种识别准确率, 并且能够在植被茂密的栖息地环境下弥补人工调查监测盲区, 从而显著提高鸟类监测工作的有效性和便利性。研究成果对于被动声学监测技术在鸟类物种多样性监测与保护领域的广泛应用具有良好的推动作用。

关键词: 鸟鸣声; 物种识别; 被动声学监测; 九里湖国家湿地公园

中图分类号: Q958.15⁺5; Q959.7

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-7380.2023.03.006

鸟类是生态系统的重要一环, 是生物多样性的关键组成部分, 也是重要的环境指示性生物, 在维护环境生态平衡等方面扮演着至关重要的角色, 定期监测区域内鸟类动态对于当地自然保护管护具有重要意义^[1]。

目前, 常见的鸟类监测手段主要有人工观察、卫星追踪、雷达和声学监测等^[2-3]。传统人工鸟类调查监测法的准确度受光线、样线设置、观测设备、出勤率、鸟类隐蔽程度及现身频率等因素影响较大。而卫星追踪、雷达技术等因其成本高、实现复杂, 难以大范围推广使用。相比之下, 基于鸟鸣声的被动声学监测 (Passive Acoustic Monitoring, PAM) 技术具有观测范围广、成本低、效率高等显著优势, 因而成为鸟类资源调查的一项重要手段^[4]。

基于被动声学监测的鸟类鸣声识别方法主要分为基于模版匹配的方法、基于特征提取的方法和基于深度学习的方法 3 类。基于模版匹配的方法研究历史最久, 其中最典型的为动态时间规整算法 (Dynamic Time Warping, DTW)^[5], 但是有限的抗噪

声性能和较大的实时运算量限制了其进一步应用和发展。Anderson 等人使用 DTW 算法选择靛蓝彩鹇和斑胸草雀 2 种鸟作为研究对象, 对于变化单调的鸟鸣声可达到 97% 的识别率, 而对于变化丰富的鸣唱声识别准确率则下降为 84%^[6]。基于特征提取的识别方法是根据鸟鸣声特点, 通过获取光谱特征、倒谱特征、时频特征等不同系数, 利用传统的机器学习算法, 如支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)、隐马尔科夫模型 (Hidden Markov Model, HMM) 等进行物种分类。程金魁等人选择中国叶莺、淡眉柳莺、白头鹎莺和甘肃柳莺 4 种雀形鸟类鸣声的梅尔倒谱系数 (Mel-Frequency Cepstrum Coefficient, MFCC) 为特征参数, 基于高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model, GMM) 获得了 92.5% 识别率。基于深度学习的识别方法是近年研究的热点之一, 按照基础神经网络结构可以分为卷积神经网络 (Convolutional Neural Networks, CNN) 和循环神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN) 2 大类。谢卓钊等人利用 DenseNet121 网络结构, 融入自注意

收稿日期: 2023-03-04; 修回日期: 2023-03-29

基金项目: 江苏省林业科技创新与推广项目“面向生物多样性评估的湿地鸟鸣声学识别系统研发” (LYKJ-徐州[2021]1)

作者简介: 王虎诚 (1983-), 男, 江苏睢宁人, 林业高级工程师, 大学本科毕业。主要从事陆生野生动植物保护工作。E-mail: 547125648@qq.com

* 通信作者: 鞠然然 (1998-), 女, 山东济南人, 硕士研究生。研究方向: 电子系统理论与技术 E-mail: juranran@njust.edu.cn

力模块与中心损失函数进行鸟鸣声识别,在 Xeno-Canto 公开的 10 种鸟类数据集上达到了 96.9% 的准确率^[7]。

本研究选取煤矿塌陷地生态修复典型——徐州九里湖国家湿地公园为研究区域,基于生物声学记录仪实采的野外鸟鸣声数据,开展了基于鸟鸣声的物种识别试验性研究。结合上述国内外研究现状,本文选择了基于深度学习的方法进行鸟鸣识别系统的开发。在构建徐州地区塌陷地湿地公园常见鸟类鸣声数据库的同时,通过对比同期人工野外鸟类普查结果,验证了基于实地采鸟鸣声数据进行物种分类的有效性和可靠性,为湿地及公园重点监测鸟类的保护和规划提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

徐州九里湖国家湿地公园位于徐州城区西北部(北纬 34°20′9.35″,东经 117°6′43.85″),总面积为 250.6 hm²,其中沼泽地 35.76 hm²,陆地 75.08 hm²,水域 139.78 hm²。通过对煤矿塌陷地的综合改造和多年的保护,区域的生态得到较好修复,生物多样性较为丰富,已成为国家重点保护鸟类鸭科、鹭科等迁徙驿站,世界濒危鸟种震旦鸦雀(*Paradoxornis heudei*)也经常在这里栖息。

1.2 鸟鸣研究方法

本研究所用鸟鸣声录音数据均采集于九里湖国家湿地公园,并采用 Cool Edit Pro-2.1 软件进行录音回放。在人工辨听的同时,截取潜在物种的鸟鸣片段,建立相关鸟类物种数据库。相关技术人员利用神经网络模型实现识别算法软件设计,进而完成鸟种分类识别任务。与此同时,数位鸟类专家同步开展湿地公园鸟类野外普查,掌握公园内鸟类的大体分布、种类、数量等基础信息。本研究旨在比较鸟类识别和人工野外调查模式,记录和标记鸟类物种数量差距,从而探究被动声学监测技术在鸟类物种监测工作中的作用。

1.2.1 监测设备及点位布设 监测设备采用美国 Wildlife Acoustics 公司 Song Meter SM4 生物声学记录仪,是目前最新一代 Song Meter 系列产品。该声学记录仪能耐受恶劣天气,可在任意自然环境下定期、季节性或长期监控野生动物,共 4 台。本着水

体、林间 2 种生境兼顾的原则,经现场实地调查,公园东、西湖均初步布设 4 点(东①北纬 34°19′44″,东经 117°6′17″,东②北纬 34°19′58″,东经 117°6′15″;西①北纬 34°20′18″,东经 117°6′54″,西②北纬 34°20′22″,东经 117°6′56″),使用铁丝将采集器安装到树上(距地面约 2 m 处),先进行连续 5 d 全天候不间断试采集。通过对试采集数据进行分析,对采样点位置进行优化调整,经再次连续试采集数据分析后,最终确定在九里湖湿地公园东湖和西湖各设置 1 个采样点,即东①和西①2 点。其中西湖采样点选择在景区幽静的林间,东侧是一个小水塘,距离行人散步的小路 50 m。东湖采样点位于东湖湖心岛,湖心岛以栈道与湖岸相连,四面环水,岛上芦苇、柳树植被,大量水鸟栖息于此。

1.2.2 采集模式 基于采集数据分析结果,并参考近年来国内外相关研究成果,确定后续长期鸟鸣声采集最佳时段为以每天日出、午时、日落、午夜 4 个时刻为中心,分别采集相应时刻前后共 2/h,如表 1 所示。

表 1 鸟鸣声数据采集策略

	采集时间	采集方式	数据样本时长/个
方案 1	全天(每月初 3 d)	连续采集	60 min
方案 2	以日出、午时、日落、午夜为中心,各采集 2 h	采集 1 min 休眠 1 min	1 min

1.2.3 鸟鸣声数据库构建 从 2022 年 7 月开始,按照设置的采样模式进行录制,每月更换 1 次电池和 2 次内存卡。将内存卡中的录音数据按月份和采集模式进行分类保存,清空后重新放入记录仪中。截至 2023 年 2 月,共连续采集 8 个月,录音数据累积 2 500.3 G,其中 60 min 录音数据 2 301 条,1 min 录音数据 66 390 条。每 2 个月梳理所得数据,结合录音数据的谱图,根据鸟类物种鸣叫声的时频分布特征筛选并截取出潜在的目标鸟声片段。然后,鸟类专家对上述已筛选数据进一步多次辨听,结合湿地公园常见鸟类物种范畴,并辅助野外调查、网站信息搜索等方法,最终确定并标记鸟类物种。此后,相关技术人员根据专家确定的物种及相应的时频谱图特征,广泛地进行辨听和数据截取,从而构建相应鸟类物种的鸣声数据库。

1.2.4 识别算法实现 在深度学习方法中,常用的分类模型有 VGG、ResNet、AlexNet 等,本研究采用的

是 ECAPA-TDNN 网络模型^[8]。ECAPA-TDNN 是由比利时根特大学在 2020 年提出改进的一种时延神经网络模型,通过引入通道注意力机制,强调通道传播与特征聚合^[8]。其最初应用于声纹识别领域,在 2020 年国际声纹识别比赛中获得了第 1 名,成为最为主流的声纹识别模型之一。如图 1 所示,模型结构主要包括一维卷积层、SE-Res2Block 层、ASP 注意力统计池化层、特征聚合层等。本研究将 ECAPA-TDNN 网络模型应用于鸟鸣识别方向,更好的提取、学习不同物种的鸟鸣声特性,从而获得较高的准确率。

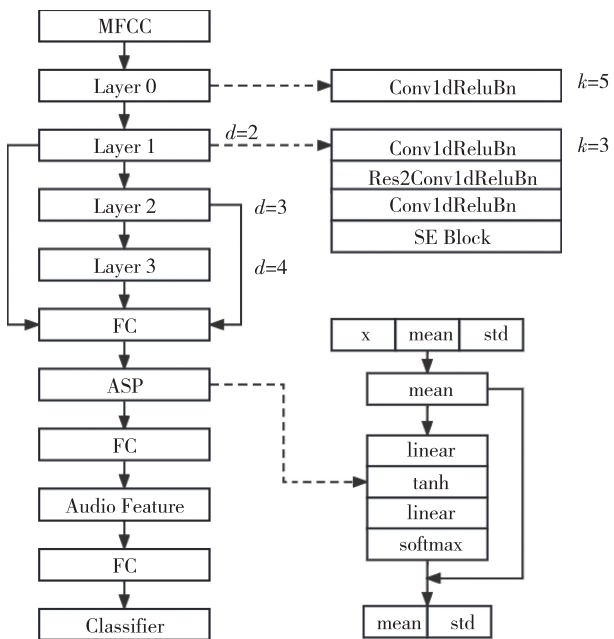


图 1 ECAPA-TDNN 网络模型结构

在 pytorch 开发环境下,构建了鸟鸣物种识别系统,如图 2 所示。

首先,将鸟鸣片段通过添加噪声,调节信噪比,增强音量及音调、拉伸速度等信号处理技术进一步实现数据增广。随后将数据集按照 80% 和 20% 的比例划分为训练集和测试集。其中,针对训练集数据,首先做快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),并取绝对值再平方,得到能量谱图。然后,通过构造梅尔频率滤波器,并与能量谱进行点积运算,得到梅尔频谱图。进而对梅尔频谱图取对数,并做离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT),取前 80 个元素作为 MFCC 特征。最后,将得到的 MFCC 特征送入 ECAPA-TDNN 网络进行训练,更新模型并保存最优参数。

将待辨别鸟鸣声录音数据输入模型,调用保存的参数,可得到最相似的物种标签和相似度。本文设置相似度阈值为 60%,即当相似度低于 60% 时,认为该物种不在已有的鸟鸣物种数据库中,并标记为“未知”新物种,后续邀请专家进一步反复辨听,从而可实现已有鸟类物种鸣声数据库的不断扩充和完善。

1.3 野外普查

为验证该监测技术准确度并实现数据互补,全面了解研究区域鸟类资源状况,野外普查与鸟鸣声采集工作同步进行。鸟类专家借助观鸟镜、红外相机等专业设备在采集点及周边区域,对九里湖湿地公园的野生鸟类进行调查,记录、收集所观察鸟的种类、数量、鸣声,拍摄照片,了解其大概分布。调查频次根据季节、气候等均匀设置在 1 a 内,全年调查不低于 15 次;调查时段与 SM4 鸟鸣采集设备设置的时段吻合,早上 4:00—6:00,中午 11:00—13:00,傍晚 18:00—20:00;调查线路分别为九里湖湿地公园的东湖与西湖沿线,线路长度不少于 3 km。

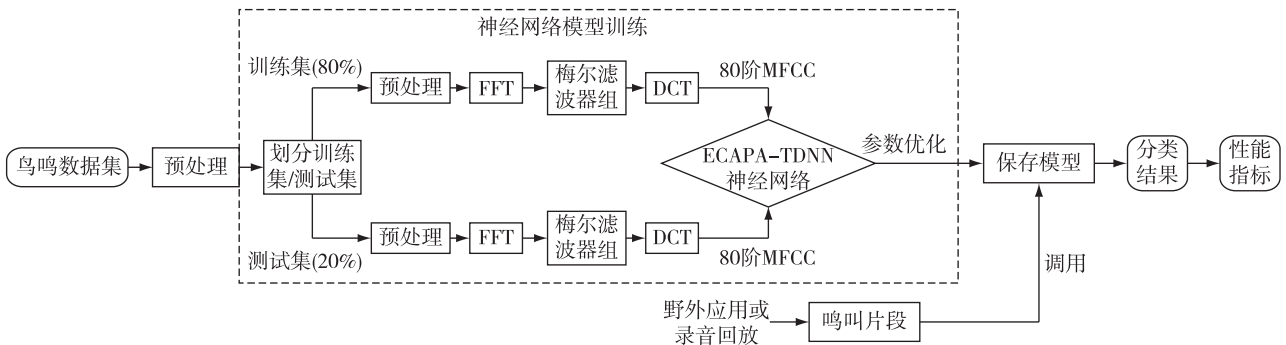


图 2 鸟鸣物种识别系统流程

2 结果与分析

2.1 鸟鸣声自动识别结果

按照鸟鸣声数据库构建的步骤,共有 27 种鸟类在录音文件中被标记。其中,经多位专家联合讨论后已确定 14 种,每种鸟类均人工截取约 280 条干净的鸣声保存入库,相应谱图类型和片段数量如表 2 所示。

表 2 已构建的 14 种鸟类鸣声数据库

物种名称	学名	片段数量
东方大苇莺	<i>Acrocephalus orientalis</i> (A-O)	273
棕扇苇莺	<i>Cisticola juncidis</i> (C-J)	283
灰喜鹊	<i>Cyanopica cyanus</i> (C-C)	273
游隼	<i>Falco peregrinus</i> (F-P)	282
棕头鸦雀	<i>Paradoxornis webbianus</i> (P-W)	275
大杜鹃	<i>Cuculus canorus bakeri</i> (C-C-B)	269
噪鹛	<i>Eudynamys scolopaceus</i> (E-S)	153
田鸫	<i>Emberiza rustica</i> (E-R)	283
褐柳莺	<i>Phylloscopus fuscatus</i> (P-F)	291
红尾鸲	<i>Turdus naumanni</i> (T-N)	279
北红尾鸲	<i>Phoenicurus aureus</i> (P-A)	284
白头鹎	<i>Pycnonotus sinensis</i> (P-S)	280
乌鸫	<i>Turdus merula</i> (T-M)	284
银喉长尾山雀	<i>Aegithalos glaucogularis</i> (A-G)	303

将上述 14 种鸟类鸣声数据库随机划分 80% 作为训练集进行预处理和数据增广,提取出 MFCC 特征,送入 ECAPA-TDNN 网络模型,设置训练次数为 100。使用 Early Stopping 函数,当连续 6 轮模型训

练损失没有下降时,则提前终止训练并保存参数。训练日志显示,第 64 轮时启动 Early Stopping,训练停止。

将剩余的 20% 鸣声片段作为测试集输入模型中,通过对比预测标签和真实标签,计算准确率 (Precision)、召回率 (Recall) 和 F1-score,作为衡量物种识别性能的指标,相应各个指标的计算表达式为

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F1 - score = \frac{2PR}{P + R}$$

其中,TP 为本身为正样本并被识别为正样本的个数;FP 为本身为负样本并被识别为正样本的个数;FN 为本身为正样本并被识别为负样本的个数。

如图 3 所示,14 种鸟类的 3 个物种识别性能指标均在 0.95 以上。其中东方大苇莺 (A-O) 和白头鹎 (P-S) 的识别效果略低于其他物种,这可能是由于 2 个物种的鸣声富于变化,频谱种类多样,增加了准确识别的难度。

2.2 野外调查结果

按照人工野外调查方法,研究区域内共记录到鸟类 50 种,隶属于 12 目 28 科,其中雀形目鸟类 29 种,占 58%;非雀形目 21 种,占 42%,具体如表 3 所示。

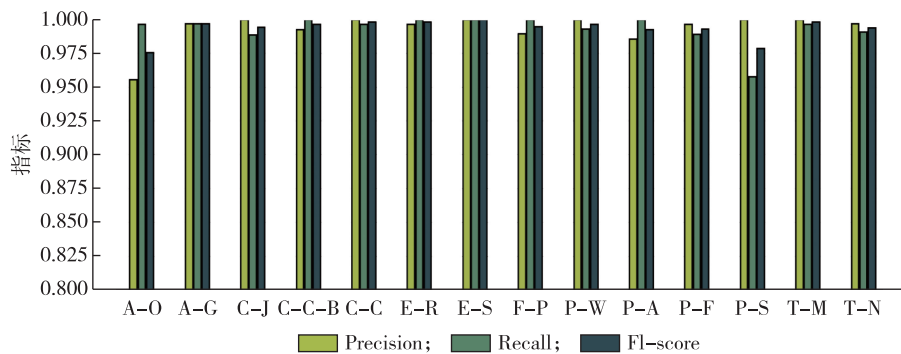


图 3 徐州地区 14 种常见鸟类识别性能

3 讨论

通过人工截取、录音回放、专家辨听,已对湿地公园 27 种鸟类物种实行标记。其中,14 种数量较多、质量较高的鸟鸣片段已入库分析,在测试中均获得 95% 以上的识别准确率。对比野外调查数据,约 90% 已标记物种在人工调查工作中得以记录,2 种监测方式相互印证的结果表明基于鸟鸣声的物种识别具有很高的准确性和有效性。

棕扇尾莺 (*Cisticola juncidis*)、中华攀雀 (*Remiz consobrinus*)、游隼 (*Falco peregrinus*) 等藏身隐匿、体型较小鸣禽或飞行迅速、偶尔出没的猛禽等尚未在高频次人工野外调查中发现,可排除偶然性因素。许多鸟类,尤其是在植被茂密的栖息地,观鸟者往往只闻其声而难见其身影,即便现身,也常常一闪而过,肉眼难以辨识。因此,研究结果表明被动声学监测技术可有效弥补人工调查监测盲区,形成优势互补。

鸟类鸣声具有物种特异性,这是根据鸣声辨识鸟类的基础。假如观鸟者熟悉所调查地区鸟类的鸣声,与只通过目视观察辨识相比,被动声学监测技术与人工野外调查相结合可以记录到更为完备的鸟类物种信息。而且有些类群的物种外形相似,但鸣声差别较大,如杜鹃、莺类等,因此,基于鸟鸣声的物种识别方法可以为鸟类监测工作带来更大的便利。

本研究针对九里湖湿地公园鸟类开展以鸣禽为主的鸟类鸣声物种识别方法研究,开发出可用于九里湖湿地生物多样性评估的鸟鸣声学监测系统,并构建了九里湖湿地公园鸟类鸣声数据库。通过将人工野调与机器学习相结合,一方面,借助鸟类专家的专业知识,确保物种种类辨识的准确性;另一方面,充分发挥被动声学监测非侵入性、可监测时空覆盖范围广的优势,实现长期数据积累,从而不断丰富鸟类鸣声数据库。开发的鸟鸣声学监测系统极大改善了管理人员对鸟类分类不精的问题。设置的“相似度阈值”也将为城市公园中发现濒危珍稀物种给予一种提示和途径,通过反复回放相似度较低片段可以发现野外调查中因出现频次较少而易被忽略的、未进入已有鸟鸣物种数据库的新物种。研究成果对九里湖湿地生物多样性中指标性物种鸟类日常监测及生态效能评估能够起到重要作用,对徐州其他自然保护地的生物多样性监测也

具有引导和示范作用,对建设美丽徐州具有重要意义。

目前本研究所使用的生物声学记录仪已连续录制 8 个月,横跨春夏秋冬 4 个季节,能够收录到记录仪所在位置方圆 200 m 内的所有生物声。随着人工截取和专家辨听的持续进行,鸟鸣物种库也将不断扩展,可识别鸟类物种范围将继续扩大。

九里湖国家湿地公园栖息着丰富的鸟类群落,在晨间合唱与黄昏合唱等时段,不同的鸟类声音叠在一起,给识别和分类造成了一定难度。陈斌杰等人建立双麦克风时延—衰减模型,结合二值掩蔽的方法对混合语音进行了分离^[9]。应用麦克风阵列的相位差信息进行鸟鸣声源定位与分离也成为下一步研究的改进方向。

以声学多样性指数 (Acoustic Diversity Index, ADI)^[10]、声学复杂性指数 (Acoustic Complexity Index, ACI)^[11] 等为代表的声学指数研究也成为近年来生态监测领域的热点方向。该方向基于声学复杂性有可能随着鸣叫个体和物种数量增加而增加的假设,从利用声学指数衡量群落鸣叫声时频分布复杂度的角度而不是特定物种识别和计数的角度来实现区域内生物多样性的快速评估。应用本研究不同月份、不同季度下采集的录音数据,结合鸟类种群迁徙和繁衍规律,从群落声学复杂度的角度评估物种声学多样性,进而分析生物多样性与生态系统的健康程度,也是未来研究工作重点之一。

4 小结

本研究以徐州九里湖采煤塌陷地国家湿地公园作为研究区域,利用 SM4 声学记录仪和深度学习方法搭建了基于被动声学监测技术的鸟类物种识别系统,并构建了 14 种徐州常见鸟类的鸟鸣数据库。系统利用 ECAPA-TDNN 网络模型进行鸟类物种识别,获得了 95% 以上的识别准确率。此外,物种识别结果和相应人工野外调查成果的对比分析表明,基于被动声学监测技术的鸟类物种识别系统能够在植被茂密的栖息地环境下有效弥补人工调查监测盲区,显著提高鸟类监测工作的有效性和便利性。本研究为林业和野生动物保护从业者的工作方式提供了一种新的思路,也对徐州其他湿地公园或国家森林公园起着示范引领作用。

参考文献:

- [1] 韩九皋.河北衡水湖湿地水鸟调查[J].四川动物,2008(5):

- 890-891.
- [2] COPPEE T, PAQUET J Y, TITEUX N, et al. Temporal transferability of species abundance models to study the changes of breeding bird species based on land cover changes[J]. *Ecological Modeling*, 2022, 473: 1-11.
- [3] 周文扬.面向鸟类鸣叫声指数的麦克风阵列信号处理[D].南京:南京理工大学, 2020.
- [4] 马海港,范鹏来.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[J]. *生物多样性*, 2023, 31(1): 1-11.
- [5] TAN L N, ALWAN A, KOSSAN G, et al. Dynamic time warping and sparse representation classification for birdsong phrase classification using limited training data[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 137(3): 1069-1080.
- [6] ANDERSON S E, DAVE A S, MARGOLASH D. Template-based automatic recognition of birdsong syllables from continuous recordings[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1996, 100(2): 1209-1219.
- [7] 谢卓钊,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(1): 137-144.
- [8] DESPLANQUES B, THIENPOND T, DEMUYNCK K. ECAPA-TDNN: Emphasized channel attention, propagation and aggregation in TDNN based speaker verification[J]. *arXiv preprint arXiv:2005.07143*, 2020.
- [9] 陈斌杰,陆志华,周 宇,等.基于双麦克风的室内语音分离与声源定位系统[J]. *计算机应用*, 2018, 38(12): 3643-3648.
- [10] 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.
- [11] 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*, 2011, 11(3): 868-873.

(上接第 20 页)

参考文献:

- [1] 刘 军,陈益泰,姜景民,等.香椿属种质资源及其开发利用[J]. *林业实用技术*, 2010(5): 56-57.
- [2] 钱崇澍,陈焕镛. *中国植物志*[M]. 北京:科学出版社, 1978.
- [3] 沈 莉.香椿的优良品种及科学繁殖[J]. *新农村*, 2012(2): 21-22.
- [4] 王 江.广西香椿类型差异性研究[D]. 南宁:广西大学, 2017.
- [5] 刘 军,陈益泰,罗阳富,等.毛红椿天然林群落结构特征研究[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(1): 93-97.
- [6] 刘 军,姜景民,邹 军,等.中国特有濒危树种毛红椿核心和边缘居群的遗传多样性[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(1): 52-60.
- [7] 张春华.红椿及其近缘种特征与适生区分布研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2018.
- [8] 张 丽,张 露,胡松竹.贮藏方法对毛红椿种子发芽能力的影响[J]. *林业科技开发*, 2007(4): 57-59.
- [9] 胡松竹,张 露,杜天真,等.晾晒对毛红椿苗木活力的影响[J]. *江西农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 26(5): 666-669.
- [10] 张 丽,张 露.毛红椿种子萌发影响因素初探[J]. *林业科技开发*, 2011(6): 54-56.
- [11] 卢胜芬.红花香椿群落间联结性研究[J]. *武夷学院学报*, 2016, 35(6): 10-13.
- [12] 沈熙环. *林木育种学*[M]. 北京:中国林业出版社, 1990: 56-61.
- [13] 王明庥. *树木育种学概论*[M]. 北京:中国林业出版社, 1989: 126-129.
- [14] 怀特 TL, 亚当斯 WT, 尼尔 B. 崔建国, 译. *森林遗传学*[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [15] 范林元,赖焕林,季孔庶,等.马尾松实生种子园建园家系遗传值估算与优良家系评选[J]. *东北林业大学学报*, 2004, 32(4): 3-5.
- [16] 钟伟华,何昭珩,周 达,等.149 个火炬松自由授粉家系的生长表现[J]. *华南农业大学学报*, 1998, 19(1): 82-87.
- [17] 翟思万,陈启贵,代 毅,等.华山松半同胞子代测定遗传力分析及优良家系选择[J]. *种子*, 2007, 26(12): 5-8.
- [18] 白天道,徐立安,王章荣,等.马尾松实生种子园自由授粉子代测定及亲本家系选择增益估算[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(4): 449-455.
- [19] 黄崇辉,杨朝辉,陈文平,等.尾叶桉家系遗传力评估和选择研究[J]. *广东林业科技*, 2008, 24(6): 41-45.
- [20] 赖标祯.马尾松子代测定及优良家系选择[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2015, 16(4): 529-533.