

生态红线区域内生物多样性声学监测网络设计与应用

李亚红

甘肃省平凉市生态环境局灵台分局

DOI:10.32629/eep.v9i4.3164

[摘要] 生态保护红线是保障国家生态安全的关键空间边界,其生物多样性动态监测长期面临人力巡护成本高、遥感技术对生物活动信号捕捉能力弱等挑战。被动声学监测技术的快速发展为破解这一困境提供了新的技术路径。本研究基于无线声学传感器网络与深度学习算法,设计一套适用于生态红线区域的生物多样性声学监测网络系统。研究在甘肃某水库保护区布设12个监测节点,系统阐述从硬件选型、算法构建到数据可视化的完整技术流程。采用融合注意力机制的卷积神经网络模型,实现对18种生物声与干扰声的智能识别,平均识别精度达到89.88%。基于6588小时有效音频数据的分析,呈现研究区域声学活动的时间分异规律,声学复杂度指数与实地样线调查物种数的Pearson相关系数为0.82。

[关键词] 生态保护红线; 声学监测; 生物多样性; 深度学习; 无线传感器网络

中图分类号: Q132.6 **文献标识码:** A

Design and Application of an Acoustic Biodiversity Monitoring Network within Ecological Redline Areas

Yahong Li

Lingtai Branch, Pingliang Municipal Bureau of Ecology and Environment

[Abstract] The red line of ecological protection is an important spatial boundary to ensure national ecological security. However, for a long time, its dynamic monitoring of biodiversity has been faced with problems such as high cost of manpower inspection and weak ability of remote sensing technology to capture biological activity signals. The rapid development of passive acoustic monitoring technology provides a new technical path to solve this dilemma. Based on wireless acoustic sensor network and deep learning algorithm, a set of biodiversity acoustic monitoring network system suitable for ecological red line area is designed in this study. In the research on the deployment of 12 monitoring nodes in a reservoir protection area in Gansu Province, the complete technical process from hardware selection, algorithm construction to data visualization was systematically explained. A convolutional neural network model combined with attention mechanism is used to realize intelligent recognition of 18 kinds of biological sounds and interference sounds, with an average recognition accuracy of 89.88%. Based on the analysis of 6588 hours of effective audio data, the temporal variation law of sound activity in the study area is displayed. Pearson correlation coefficient between sound complexity index and the number of species surveyed in field transect is 0.82.

[Key words] Ecological Redline; Acoustic Monitoring; Biodiversity; Deep Learning; Wireless Sensor Network

生态保护红线属于国土空间规划中划定的重要生态功能区域,红线区域大多处在地形复杂且交通不便的偏远地带,传统监测手段主要依靠卫星遥感以及人工样线调查方式,卫星遥感难以捕捉如动物活动这类动态声学信号,人工样线调查存在频次低覆盖有限人为干扰大等局限^[1]。被动声学监测技术通过布设自动录音设备的方式,能够长期连续且非侵入式地采集环境声学信息,该技术已在全球生物多样性监测领域展现出巨大潜力。

1 监测网络总体架构与硬件设计

1.1 网络拓扑结构与布设策略

生态红线声学监测网络采用分层分布式架构,涵盖感知层、传输层、处理层与应用层四个层级。感知层为监测网格内部署的声学传感器节点,开展环境声音连续采集。传输层借助自组织Mesh网络完成音频数据向区域网关的汇聚。处理层设置在保护区管理站的计算服务器,执行音频预处理与深度学习推理操作。应用层为面向管理人员的可视化平台,实现监测结果实时展示与预警推送^[2]。针对生态红线区域复杂地形条件,采取网格加密与热点聚焦相结合的布设方式,在甘肃某水库保护区8.68km²的红线范围内,通过GIS平台将区域划分为9个1km×1km的监测网

格,各网格依据植被类型、水源分布与历史巡护记录选取1至2个声学监测点位,鸟类栖息地、人为活动频繁的边界地带等重点区域加密布设,形成由12个采样点构成的监测网络,监测点位空间分布遵循全覆盖与代表性原则,完成不同生境类型声学信息的捕获。

1.2 声学传感器选型与技术参数

传感器节点选用户外长期监测专用的SongMeterMini型自动录音单元,设备防护等级为IP68,可在-40℃至85℃的环境温度中运行。结合内陆干旱,半湿润大陆性气候,春季雨少风大、夏季降水集中秋季光照充足的气候条件,所有设备配套安装防凝露膜与太阳能辅助供电模块,连续阴雨天气下续航时长不低于12天。音频采集参数设置平衡数据质量与存储容量,采样率固定为44.1kHz,量化精度为16bit,动态范围理论值为96dB。录音调度采用昼夜差异化模式,日间6时至18时每整点录音10分钟,夜间18时至次日6时每整点录音5分钟,单节点日均数据量控制在1.8GB以内

2 声学数据处理与智能识别算法

2.1 音频预处理与声学特征提取

原始音频数据传输至处理层服务器后执行预处理操作,采用4阶巴特沃斯高通滤波器,滤除100Hz以下的风噪与机械振动干扰,开展语音活动检测并剔除长时间静音片段,对有效音频实施分帧加窗处理,帧长设定为46ms、对应2048个采样点,帧移比例为50%。开展声学特征提取工作,提取对数梅尔谱、线性谱、一阶与二阶差分系数三类特征,通过40个梅尔滤波器组完成对数梅尔谱的频率映射处理,针对每帧46ms的音频信号,提取128维特征向量,特征提取完成后对所有特征执行标准化处理,将数据调整为均值0、方差1,统一不同频带的能量分布状态。

2.2 基于注意力机制的卷积神经网络模型

声学事件分类模型采用融合通道注意力的卷积神经网络架构,以128×128二维时频谱图为网络输入,对应时长约6s的音频片段。模型设置4个卷积模块,各模块依次配置卷积层、批归一化层、最大池化层,卷积核尺寸3×3,步长1,采用尺寸不变填充方式,通道数量由首层32个逐层递增至128个。在第四卷积模块后接入挤压激励注意力机制,通过全局平均池化压缩空间信息,经两个全连接层学习特征通道权重,将权重与原特征图逐通道相乘完成特征重标定。分类层使用全局平均池化替代传统全连接层,输出层设置18个节点,对应8种目标鸟类、4种蛙类与昆虫类、6种人为活动干扰声类别。模型训练选用Adam优化器,初始学习率0.001,每10个训练轮次学习率衰减为原值0.1倍,损失函数采用交叉熵损失,批量大小32。训练数据集为现场采集并人工标注的21600条音频片段,按8:1:1比例划分训练集、验证集与测试集,测试集总体分类精度89.88%,各类别识别精度详见表1:

3 实地应用与数据分析

3.1 研究区域与数据采集概况

研究区域确定为甘肃某水库及其周边生态保护红线范围,

地处陇东黄土高原丘陵沟壑区,植被覆盖率高,树木多为乔木和灌木。监测时段设定为2025年4月至9月,覆盖春季迁徙期与夏季繁殖期。监测期间,12个监测节点累计有效工作时长6588 h,采集原始音频数据约82TB。对原始音频进行预处理与活动检测后,得到有效音频片段约46万条,从中选取21600条标注作为模型训练样本。

表1 各类别识别精度表

声学类别	精确率(%)	召回率(%)	F1 分数(%)
白鹭鸣声	91.23	89.87	90.54
绿头鸭鸣声	88.46	87.92	88.19
麻雀鸣声	86.91	88.13	87.51
猫头鹰鸣声	87.34	86.78	87.06
梅花鹿鸣声	90.12	91.03	90.57
豹猫鸣声	92.01	91.45	91.73
柳莺鸣声	88.78	86.94	87.85
白骨顶鸡鸣声	86.23	85.67	85.95
黑斑蛙鸣声	93.12	94.01	93.56
中华蟾蜍鸣声	91.45	92.33	91.89
蟋蟀鸣声	94.23	95.12	94.67
纺织娘鸣声	93.67	94.02	93.84
交通工具声	88.12	89.34	88.73
农田机械声	86.45	84.98	85.71
人类谈话声	87.92	88.45	88.18
犬吠声	89.34	90.12	89.73
风雨声	84.56	82.34	83.44
雷声	85.67	86.01	85.84
宏平均	89.26	88.98	89.11
加权平均	89.94	89.88	89.89

3.2 声学活动时空分异特征

依据分类模型识别结果开展各物种声学活动时空规律统计分析,对白鹭鸣声检测频次进行记录,形成日出前1h、日落后1h两次检测峰值数据。对黑斑蛙鸣声活动时段进行统计,划定夜间20时至24时为集中活动时段,采集6月至8月气温与湿度数据,记录夜间气温高于15℃且相对湿度超过80%时鸣声概率72%,气温低于14℃时检测概率11%。对人为干扰声开展分类统计,监测期间记录交通工具声2137次,核算监测节点空间分布与干扰声占比,距离主干道500m范围内人为干扰声占总量76%,距离居民点300m范围内人类谈话声与犬吠声占比89%。

3. 3声学指数与生物多样性相关性验证

本研究选取12个典型监测点位同步开展每月一次的样线法鸟类调查,每次调查记录样线两侧50m范围内听到或看到的鸟类种类与数量。同时计算各点位监测时段的声学复杂度指数与生物声学指数。

声学复杂度指数计算公式为:

$$ACI = \sum_{k=1}^n \frac{\sum_{i=1}^{m-1} |I_{i,k} - I_{i+1,k}|}{\sum_{i=1}^m I_{i,k}} \quad (1)$$

公式中,ACI表示声学复杂度指数,用于量化音频频谱的时变异性。n为频率通道总数,本研究中设定为256个。m为时间帧总数。 $I_{i,k}$ 表示第i帧第k个频率通道的频谱能量值。

生物声学指数计算公式为:

$$BI = \sum_{f=1}^F \left(E_f \times \frac{N_f}{N_{total}} \right) \quad (2)$$

公式中,BI表示生物声学指数,用于评估生物声在整体声景中的贡献。F为预设的生物声频率范围通道数。 E_f 为第f个频率通道的归一化能量值。 N_f 为第f个频率通道内被模型识别为生物声的事件数量。 N_{total} 为所有频率通道的生物声事件总数。

相关性分析结果显示,声学复杂度指数与样线调查物种数的Pearson相关系数为0.82,生物声学指数与物种数的相关系数为0.79。对12个监测点位的声学指数和样线调查结果展开对比,数据涵盖5种生境类型,其中水库浅滩的点位E01、E02声学复杂度指数分别达到147.23、152.67,生物声学指数为0.82、0.86,样线物种数达23、24种且均处于较高水平。乔木林地点位E07、E08声学复杂度指数为134.89、128.34,生物声学指数为0.73、0.69,样线物种数有19、18种,略低于水库浅滩区域。灌草丛点位E13、E14声学复杂度指数为112.45、108.92,生物声学指数为0.58、0.54,样线物种数为14、13种。农田边缘点位E19、E20声学复杂度指数为96.78、103.23,生物声学指数为0.47、0.51,样线物种数为11、12种。人工林点位E25、E26声学复杂度指数为118.56、122.89,生物声学指数为0.61、0.64,样线物种数为15、16种。居民周边点位E31、E32声学指数最低,声学复杂度指数为7

8.34、82.91,生物声学指数为0.32、0.36,样线物种数仅7、8种,整体呈现出生境质量越好声学指数与样线物种数越高的关联特征。

4 监测平台与管理应用

4.1 实时数据可视化与预警系统

监测数据经处理层分析后,实时推送至保护区管理站数据可视化平台。平台采用WebGIS技术开发,主界面叠加生态红线边界图层与监测点位分布信息,各监测点位通过不同颜色图例实时呈现声学活动状态。点击单个点位,可调取近24h各类声学事件频次分布直方图、主要物种鸣声活动时间谱及人为干扰声实时监测数据。平台内置两类预警触发条件,检测到黑脸琵鹭、黄嘴白鹭等珍稀物种鸣声时,向管理人员发送短信提醒。单点位小时段内交通工具声超6次或施工机械声超3次,判定为异常侵扰事件,在电子地图高亮对应点位并推送核查任务。

4.2 监测效能评估与管理决策支持

本研究区域内,传统样线调查每月投入8人次,累计巡护里程约120km,获取物种出现记录约300条。声学监测网络单日获取的音频数据量,相当于人工调查3个月的总量,且数据格式统一、可回溯验证、分析结果客观。依托声学监测积累的长时序数据,保护区依据人为干扰声空间分布热点图明确侵扰来源与路径,调整巡护路线,将人力资源集中部署在高风险区域^[3]。结合物种鸣声活动季节变化规律划定季节性禁入区,在黑斑蛙繁殖高峰期对核心繁殖水域实施临时封闭。将生物声学指数下降趋势作为生态退化早期预警信号,启动深入实地调查与生态修复评估。

5 结语

本研究面向生态保护红线区域的生物多样性监管需求,设计并实现一套完整的声学监测网络系统。从硬件布设、数据采集到智能识别与可视化应用,各环节的技术方案均经过实地验证。在甘肃某水库保护区的应用中,该系统能够识别多种目标物种的声学活动,量化人为干扰的时空分布,声学指数与实地调查结果呈现高度相关性。

[参考文献]

- [1]杨露.面向湿地声学监测的鸟类物种识别方法研究[D].南京理工大学,2023.
- [2]周海建,周红梅.智能声学技术在农业生态系统监测与生产力优化中的协同作用[J].湖南农业,2025,(06):34-35.
- [3]肖治术.被动声学技术在生物多样性监测与研究中的应用[J].生物多样性,2024,32(10):4-8.

作者简介:

李亚红(1988—),女,汉族,甘肃灵台人,甘肃省平凉市生态环境局灵台分局,大学本科,职称:助理工程师,研究方向:环境监测。