

母羊 3 种应激行为下叫声信号的对比分析

刘艳秋¹ 武佩^{1*} 宣传忠¹ 马彦华¹ 张丽娜^{1,2} 王晶¹

(1. 内蒙古农业大学 机电工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古师范大学 物理与电子信息学院, 呼和浩特 010022)

摘要 为研究母羊在不同应激行为下叫声信号所具有的特征, 选择体重相近、年龄在 2~3 岁的小尾寒羊母羊 20 只, 分别录取其在 3 种应激行为(产羔、寻羔、饥饿)下的叫声信号。利用 LabVIEW 软件设计母羊发声信号特征提取与识别系统, 对母羊发声信号进行时域分析、频域分析(Yule-Walker 法估计功率谱、Welch 法估计功率谱、线性坐标功率谱和倒谱分析)和时频域分析, 提取发声信号的时间间隔、持续时间、主峰频率、能量集中范围和基音周期等特征参数。结果表明: 母羊 3 种不同类型声音的持续时间以及主峰频率均存在显著差异($P < 0.05$)。母羊在寻羔和饥饿时发声的持续时间是产羔时的 1.93 和 1.82 倍, 饥饿叫声的主频分别为产羔和寻羔时的 34.77 和 38.81 倍, 母羊叫声信号 Yule-Walker 法功率谱在饥饿出现 1 个峰值, 寻羔时出现 2 个峰值, 而产羔时无明显峰值。叫声信号能量在产羔时集中在 400~600 Hz, 寻羔和饥饿时集中在 0~900 Hz, 3 种叫声基音周期接近为 0.1 ms。证明母羊叫声信号在 3 种应激行为下有明显的不同, 因此可以作为评价其健康状况及福利化养殖水平的重要指标之一。

关键词 母羊; 发声; 信号处理; 特征提取; 功率谱

中图分类号 TN 713

文章编号 1007-4333(2016)11-0057-07

文献标志码 A

Comparative analysis of ewe's vocal signals under three stress reactions

LIU Yan-qiu¹, WU Pei^{1*}, XUAN Chuan-zhong¹, MA Yan-hua¹, ZHANG Li-na², WANG Jing¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. College of Physics and Electronic Information Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract To investigate the characteristics of ewe's vocal signals under different stress behaviors, twenty 2-3 year-old small-tail Han sheeps with similar body weight were chosen and their vocal signals were collected respectively under three stress behaviors including delivering, seeking for lamb, and hungry. A system to process and identify the vocal signals was designed with LabVIEW, by which the signals were analyzed in time domain, frequency domain (power spectrum estimation of Yule-Walker method, Welch method, linear coordinate power spectrum and cepstrum method) and time-frequency domain. And then the characteristic parameters of vocal signals were extracted including time interval, duration, main peak frequency, energy concentration range, etc. The results demonstrated that the ewe's call signals under three stress reactions showed significant differences in duration and peak frequency ($P < 0.05$). The duration of ewe's vocalization when seeking for baby and hungry was 1.93 and 1.82 times respectively than that of lambing; while the main peak frequency when hungry was 34.77 and 38.81 times higher respectively than lambing and seeking for baby. The Yule-Walker power spectrum detected one peak when hungry, two peaks when seeking for baby, and no apparent peak when lambing. The sound signal energy of ewe was concentrated within the range of 400~600 Hz when lambing, 0~900 Hz when seeking for baby and hungry; the pitches of three sounds are all close to 0.1 ms. In conclusion, the call signals can reflect the changes of the external environment and physiological conditions of ewes, and it can be used as one of the important evidence for sheep health monitoring and welfare evaluation.

Keywords ewe; vocalization; signal processing; feature extraction; power spectrum

收稿日期: 2015-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11364029); 内蒙古自然科学基金资助项目(2012MS0720); 内蒙古“草原英才”产业创新人才团队项目(内组通字[2014]27号); 内蒙古农业大学科技创新团队(NDTD2013-6)

第一作者: 刘艳秋, 博士研究生, E-mail: lyq13514413846@163.com

通讯作者: 武佩, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程测试与控制的研究, E-mail: jdwp@imau.edu.cn

内蒙古及周边西部地区是我国养羊业的主产区。近年来,为促进退化草地的治理和草原生态环境的修复,实行了禁牧轮牧政策,集约化设施养殖得到了很大的发展。由于养殖密度较高,使得羊只的活动空间受限,无法完全满足其运动条件,导致羊的发病率大幅度提升^[1-3];同时所采用的栓系、围栏以及漏缝地板等工程设施,也会使羊出现啃吃异物、相互撕咬等异常行为,严重影响动物的健康^[4]。有研究表明^[5],在不同的应激情况下羊会发出不同的声音,如母羊在产羔时,会发出嘶哑的叫声;生病时会发出低微的呻吟声等。因此母羊发出的声信号可作为评价其生理心理需求、福利状况及实现智能化管理的辅助方法。

对于家畜发声信号作为福利评价方法,国外学者研究较早^[6-9]。早在20世纪中期,Grauvogld等^[10]对猪的发声进行了研究,对猪的23种不同发声类型进行区分,并利用声谱图仪技术分析声音信息的特征,总结了家猪与野猪发声特征的不同。21世纪初期,德国的Dummer Storf家畜生物学研究所,监测并识别了猪的发声信息,所得到的研究成果应用到自主开发的软件中,利用该软件搭配其他设备可以对猪的应激反应进行判断,甚至可以准确预测母猪的发情时间^[11]。同一时期,Julio等^[12]通过监测放牧绵羊咬草与咀嚼时发出声音的不同,来预估其采食频率以及干物质的摄入量。

国内对家畜声信号的研究起步相对较晚。20世纪80年代,韩联宪等^[13]对白腹锦鸡的呼唤声、啼叫声、召唤雏鸡声、惊叫声、威胁叫声及恐惧叫声6种发声进行了声谱分析,探讨各种鸣声与其对应行为之间的关系。滕光辉课题组针对蛋鸡,建立蛋鸡发声信号的数据库,探索采用不同的去噪算法、特征提取算法、分类识别算法分析蛋鸡的发声信号,进行蛋鸡养殖的福利化评价,为蛋鸡的健康养殖和安全生产提供了理论依据和先进手段^[14-18]。目前,国内外对母羊在不同应激行为下的发声信号进行特征提取的研究鲜有报道,而且羊的声音信号存在一定的变异性,因此很难对不同行为下的声音特征值进行固化^[19-21]。

英国哥伦比亚大学教授丹尼尔·鲍利在2006年曾预言,人类会发明一种装置用来探测和翻译动物们的表情和声音,将它变成相对应的人类表情与大脑思维,人类就可以与动物进行交流^[22]。因此本研究借助LabVIEW软件,建立母羊发声信号特征提取与识别系统,能够对母羊在寻羔、产羔、饥饿3

种应激行为下声音信号进行时域处理、频域处理、时频域处理,提取对应的特征参数,并分析母羊叫声的含义及其对应的心理状态和生长需求,旨在为设施母羊的福利化养殖提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用爱国者R5578录音笔,其录音频率范围为20 Hz~20 kHz,采样率为32 kHz,信噪比大于87 dB,录音类型为128 kbps,即每秒钟音频信号的传输速率为16 kB。录音文件为WAV格式。声音分析软件为Audacity 2.0.0和LabVIEW2010。

1.2 试验动物与饲养管理

试验在呼和浩特市托克托县养大圈圃村的肉羊养殖基地进行。选取体重相近、年龄在2~3岁的小尾寒羊母羊20只进行叫声信号录制。试验环境为半封闭式羊舍,饲养管理模式为圈养。试验过程中对动物采取的应激行为已经征得养殖场负责人的许可。

1.3 声音采集

采集母羊叫声信号时,录音笔固定在羊的脖子下,录取时间为2014年11月8日—12月16日,分别在8:00—10:00和18:00—19:00进行。

声音信号采集环境如下:录取饥饿叫声,夜间不供给料草,在第2天8:00—10:00录取饥饿叫声;录取寻羔叫声,正常供给料草的前提下,在18:00—19:00把小羊羔与母羊分离进行寻羔声音录取;录取产羔叫声,在母羊生产时进行录制。录取每段声音信号的同时人工记录该发声信号所对应的应激行为,方便后续声音信号的处理。

1.4 数据分析

录取的母羊叫声信号是一段连续的声音,通过Audacity声音编辑软件将母羊叫声分割为单句叫声,分割后进行扩音、去噪和滤波等预处理。对20只母羊进行采集,一只母羊每种行为下随机抽取50句叫声,每只母羊共得到150句叫声。由LabVIEW设计的母羊声信号处理程序对每只羊随机抽取的150个声音信号进行时域分析、频域分析和联合时频域分析,并总结母羊在不同应激行为下声音信号的特征。由于受到外部环境条件以及动物自身条件变化的影响,动物发声在时间上存在着不确定性和随机性^[23-25],因此同种应激行为下母羊发声信号分析所得的数据中也会出现一些较大的偏差,将偏差较大的数据剔除,剩下数据用来作为分析

母羊发声信号特征的样本。

试验数据用 Excel 2007 进行预处理,然后采用 SPSS 19.0 对试验数据进行单因素方差分析 (ANOVA),以 $P < 0.05$ 作为显著性判断标准。

2 结果

2.1 3 种应激行为下母羊叫声信号的时域分析

通过 LabVIEW 开发的软件对 3 种应激行为下

母羊叫声信号进行时域统计分析提取特征值,如信号持续时间、信号最大值、信号间隔时间和信号方差等。结果显示,产羔时发声信号的持续时间最短而间隔时间很长,平均持续时间与平均间隔时间分别为 592 ms 和 13.4 s;寻羔时发声信号的持续时间最长而间隔时间却最短,分别为 894 ms 和 6.4 s。母羊在 3 种应激行为下的发声信号的间隔时间、持续时间以及信号最大值见表 1。

表 1 不同应激行为下母羊叫声信号时域特征参数

Table 1 Characteristic parameters of ewe's vocal signal in time domain under different stress conditions

应激行为 Stress condition	间隔时间/s Time interval	持续时间/ms Duration time	信号最大值/v Maximum value
产羔 Delivery	13.4	453~731	0.003~0.017
寻羔 Seeking lamb	6.4	801~987	0.210~0.670
饥饿 Hungry	14.2	720~964	1.510~1.760

2.2 3 种应激行为下母羊叫声信号的频域分析

系统采用功率谱和倒谱分析方法对母羊在 3 种应激行为下的叫声信号进行频域分析。

2.2.1 功率谱分析

功率谱估计是通过观测一定数量的样本数据来估计一个平稳随机信号的功率谱。母羊叫声信号是由多个“咩”声组成,具有一定的周期性,而功率谱能够将信号的周期成分很好的凸显出来,因此采用功率谱估计提取母羊叫声信号的频域特征参数^[26]。

1) Yule-walker 法估计功率谱。现代谱估计法较经典谱估计法所得谱平滑且分辨率高。本研究主

要采用 Yule-walker 法,从随机信号的自相关序列中计算出在指定阶数下的 AR(Auto-regressive)模型参数,从而得到该随机信号序列的功率谱估计,所得到的谱曲线较光滑且方差特性较好。分析结果如图 1 所示。

由图 1 得到母羊在 3 种应激行为下叫声信号的 Yule-Walker 法功率谱图均为平滑曲线且呈下降趋势。母羊在饥饿时叫声信号的平均振幅最大,且整体出现一个峰值,下降速度较快;寻羔时叫声信号出现 2 个明显峰值且下降速度最快;而产羔时叫声信号无明显峰值且下降非常平缓。

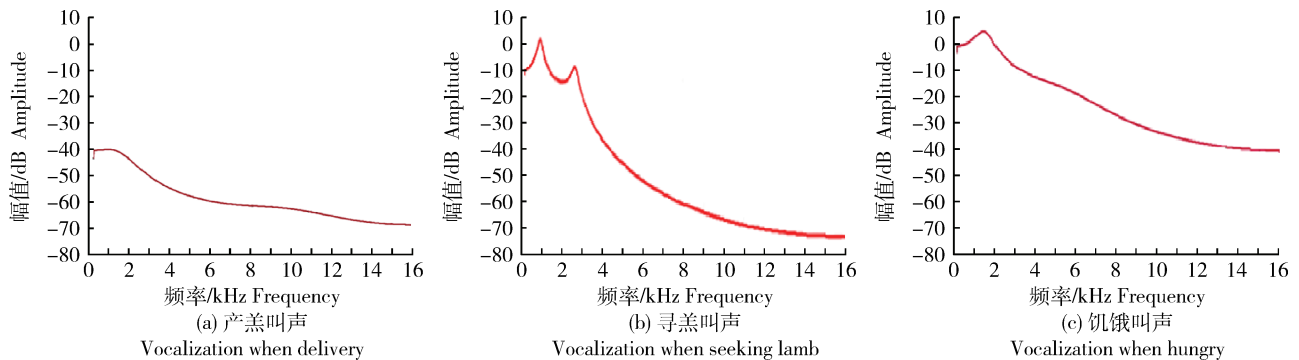


图 1 母羊叫声信号的 Yule-Walker 法估计功率谱分析

Fig. 1 Power spectrum estimation analysis of Yule-Walker method for ewe's vocal signal

2) Welch 法估计功率谱。Welch 法是对周期图法的改进,它的原理是把一长度为 N 的数据 $x_N(n)$ 分成 L 段,分别对每一段数据求功率谱,然后加以平均^[27]。

图 2 显示出母羊在产羔时叫声信号能量随频率

变化较平缓,在 14 kHz 处信号能量直线下降后趋于平缓;寻羔时叫声信号能量随频率变化较快,在 9 kHz 频率附近出现明显峰值;饥饿时叫声信号的幅值最大,无明显峰值,信号能量随频率变化较平缓。

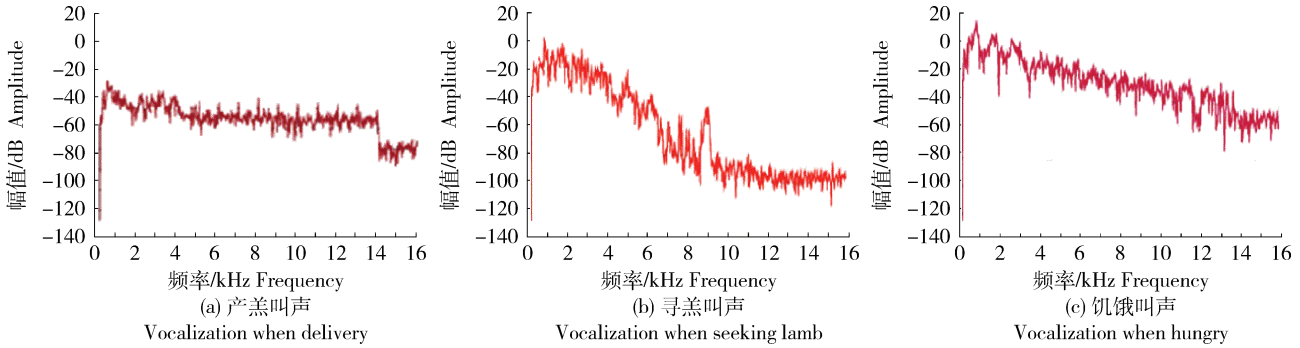


图 2 母羊叫声信号的 Welch 法估计功率谱分析

Fig. 2 Power spectrum estimation analysis of Welch method for ewe's vocal signal

3)线性坐标功率谱。线性坐标功率谱分析可以体现信号能量的分布。由图 3 总结得到:母羊产羔时叫声信号能量主要集中在低频段,最大值出现在 400~600 Hz 区间,且在 900~1 000 Hz 区间与 1 100~1 200 Hz 区间分别出现较明显的次峰;寻羔时叫声信号能量主要集中在 0~900 Hz 区间内,且

在 130 Hz 及 1 700 Hz 附近出现较明显的次峰;饥饿时呈现 2 次较大峰值分别在 700 Hz 附近与 1 600 Hz 附近,能量主要集中在 0~900 Hz 区间内,少量集中在 1 400~1 800 Hz 区间内。3 种应激行为下母羊叫声信号的线性坐标功率谱分析见图 3。

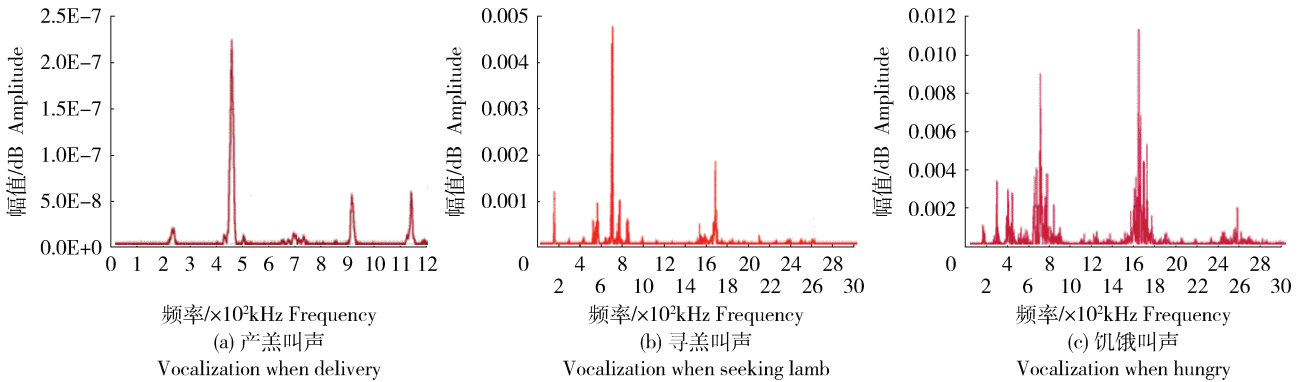


图 3 母羊叫声信号的线性坐标功率谱分析

Fig. 3 Linear power spectrum analysis of ewe's vocal signal

通过 LabVIEW 系统对母羊叫声信号的主频及主峰频率进行了提取,得出产羔时主频为 31 Hz,主峰值范围为 -54.4~-37.8 dB;寻羔时主频范围为 781~1 375 Hz,主峰值范围为 -9.4~6.1 dB;饥饿时主频在 781~1 625 Hz 范围内,主峰值范围为 6.9~9.7 dB。

2.2.2 倒谱域分析

倒频谱的周期与基音周期相同,所以易于准确

地求出声音信号的基音周期。

通过母羊声音信号处理与分析系统,获得母羊在 3 种应激行为下叫声信号的倒谱图(图 4)。

图 4 显示母羊在 3 种应激行为下叫声信号的倒谱图均出现周期成分。母羊寻羔时叫声信号的倒谱图幅值最高,在起始阶段出现 1 个明显的峰值,从图中可以求得母羊叫声信号的基音周期约为 0.16 ms;产羔时叫声信号在起始阶段出现 3 个明显

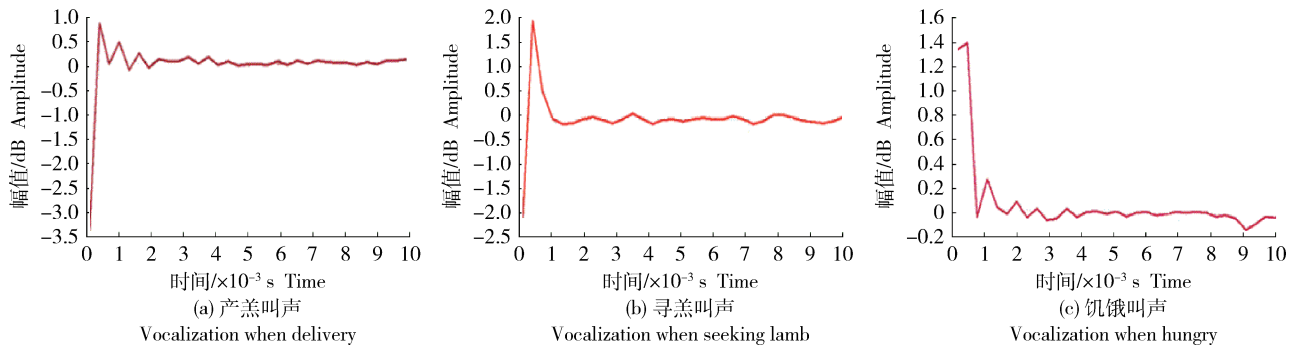


图 4 母羊叫声信号的倒谱图分析

Fig. 4 Cepstrum analysis of ewe's vocal signal

的峰值,基音周期约为 0.09 ms;饥饿状态下母羊声音信号无明显峰值,基音周期约为 0.1 ms。

2.3 3 种应激行为下母羊叫声信号的时频域分析

时频分析利用短时傅里叶变换计算出不同时刻信号的功率谱,得出母羊发声信号功率谱随时间的

变化情况。通过时频域分析可以得到频率和信号强度随时间的变化规律。时频分析图反映了振幅、时间、频率三方面的信息,横坐标表示时间,纵坐标表示频率,图中颜色深浅程度表示信号的强度大小。

系统对母羊声音信号联合时频分析如图 5 所示。

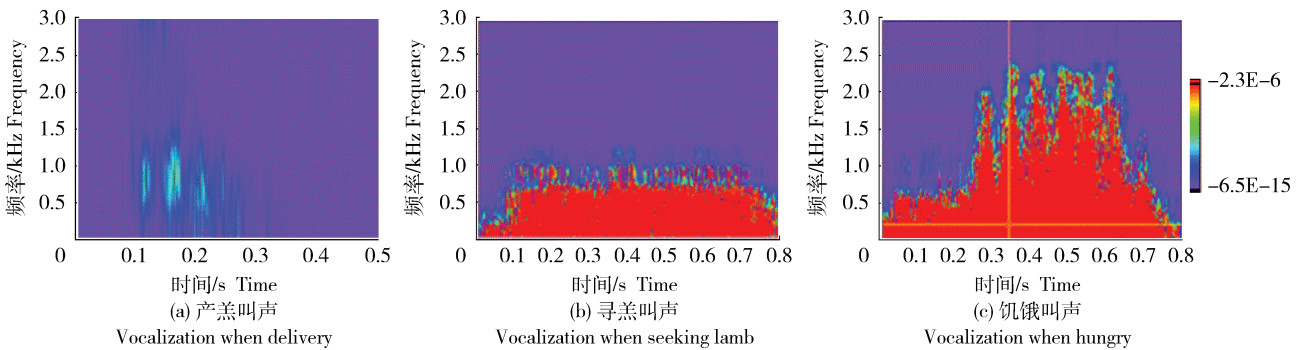


图 5 母羊叫声信号的时频域分析

Fig. 5 Time-frequency analysis of ewe's vocal signal

分析图显示母羊产羔时发声信号强度最弱,主要分布在 0~1.3 kHz 范围内;饥饿时叫声信号能量最强,主要集中在 5.0~12.5 kHz 区间内;寻羔时声音信号能量均匀分布在 0~4 kHz 范围内,能量较强。

2.4 3 种发声类型的对比分析

运用单因素方差分析得到母羊在 3 种应激行为

下发声信号的持续时间、主峰频率均存在显著差异。母羊寻羔和饥饿时声音信号的持续时间均极显著高于产羔;而寻羔与饥饿声音信号之间不存在显著差异;对主峰频率而言,寻羔和饥饿时声音信号极显著高于产羔,寻羔与饥饿之间不存在显著差异(表 2)。

表 2 母羊的不同应激行为下发声类型的声学特征

Table 2 Characteristic parameters of vocalization types of ewes under different stress conditions

应激行为类型 Types of stress condition	产羔 Delivering	寻羔 Seeking for lamb	饥饿 Starving
持续时间/s	0.453±0.14 a	0.873±0.06 b	0.826±0.08 b
主峰频率/Hz	31.00±6.53 a	995.36±169.10 b	997.26±254.52 b

注:同行不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: In the same row, the values with different small letter superscripts mean the difference is significant ($P<0.05$), while with same-letter superscripts mean the difference is insignificant ($P>0.05$).

3 讨论

受到试验环境及条件的限制,本试验选择录音笔对母羊叫声信号进行录制,并随机选取一定数量样本信号对母羊叫声进行分析,而且是在总结分析大量样本的前提下得到母羊叫声信号特征值的范围,因此对于录音笔在录音过程中出现的少量数据的丢失对试验结果不会产生影响。

母羊在3种应激行为(产羔、寻羔、饥饿)下的发声信号在时域、频域和时频域的特征参数值差别较明显。在时域,母羊在产羔和饥饿时发声的平均时间间隔分别是寻羔时的2.13和2.22倍;而饥饿和寻羔发声的持续时间显著长于产羔;并且母羊饥饿和寻羔时的声音信号最大值分别是产羔的163.5和44.0倍。在频域,Welch法功率谱显示在寻羔时信号能量随频率变化较快,而产羔和饥饿时信号能量变化平缓;Yule-Walker法功率谱图分析结果显示3种应激行为下信号能量呈整体下降趋势,并出现了多个信号峰值;由线性坐标功率谱图可知,发声信号的能量主要集中在低频段,而寻羔和饥饿叫声信号有少部分能量是分布在1.4~1.8 kHz;但饥饿发声信号会出现多个能量峰值。通过对母羊叫声信号的倒谱分析,3种应激行为下母羊叫声的基音周期相近,平均约为0.12 ms,是母羊发声信号的固有属性,随着母羊应激行为的不同而有所差异,不过差异较小。时频域:母羊产羔和饥饿时叫声信号能量分布不均匀,而寻羔时能量较强且均匀分布在0~4 kHz范围内。

以上数据表明母羊寻羔时叫声信号时域和频域特征参数与其他叫声有明显区别,分析原因可能为母羊在呼唤羔羊时会得到羔羊的回应,因此会表现出较长的持续时间及较高的频率^[28]。饥饿状态下声音信号的频率参数较其他特征参数变化较明显^[29]。饥饿时动物会充分利用自身的能量去呼唤饲养人员,因此即使在未进食的情况下动物发出的声音依然具有较高的频率且包含较高的能量。母羊产羔时会因为阵痛而不断发出较微弱的叫声,因此产羔叫声持续时间较短且频率较低。

不同行为下母羊叫声信号不同,可反映母羊自身健康状况及对当前环境的适应情况,也可用于亲缘关系鉴定及不同种属研究。因此,研究不同物种的叫声信号特征利于更好的理解动物行为及其进化特点^[20],同时验证了本研究提出假设的可行性。

4 结论

通过观测母羊行为,获取特定条件下母羊叫声信号特征规律,在一定程度上能够反馈母羊自身状态及外部环境变化对其的影响,可以作为评价母羊福利的一个指标。在研究母羊叫声信号含义基础上,利用声音信号无应激、无接触的优点,建立实时监测系统了解母羊对周围环境的适应情况,结合羊舍环境调控系统,有利于提高舍饲环境调控效率,对羊只疾病的预防、监控提供一定的预警信息,同时可以找出适合母羊特点的饲养方式,实现智能化管理,为提高母羊的生长速度、抗病能力有明显的现实意义。目前,利用动物发声信息评价动物福利已经有一定的应用,但是由于尚未完全了解动物发声的含义,因此该技术还未完全成熟,需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 赵天章,张慧鲜,王文义,陈怀森,蒋红琴,马勇,罗海玲.集约化饲养模式下巴美肉羊与小尾寒羊产肉性能的比较研究[J].中国农业大学学报,2014,19(4):121-128
Zhao T Z,Zhang H X,Wang W Y,Chen H S,Jiang H Q,Ma Y,Luo H L.Comparison of meat-productivities between Bamei sheep and small-tail Han sheep under intensive feeding pattern [J]. *Journal of China Agricultural University*,2014,19(4):121-128 (in Chinese)
- [2] 朱宁,秦富,马骥.蛋鸡规模养殖环境评估及治理对策分析[J].中国农业大学学报,2015,20(3):258-263
Zhu N,Qin F,Ma J.Environmental assessment of scaled layers'farms and the countermeasures analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*,2015,20(3):258-263 (in Chinese)
- [3] 方雷.饲养方式对夏季牦牛生长性能、屠宰性能、牛肉品质和瘤胃细菌多样性的影响[D].北京:中国农业大学,2015
Fang L.Effects of feeding patterns in summer on yaks' growth performance,carcass traits,meat quality and rumen bacteria diversity[D].Beijing:China Agricultural University,2015 (in Chinese)
- [4] 吕慎金.家畜行为与生产及遗传的关系[J].中国农业大学学报,2014,19(5):133-139
Lu S J.Relationship of livestock behavior with production and genetics[J]. *Journal of China Agricultural University*,2014,19(5):133-139 (in Chinese)
- [5] Manteuffel G,Puppe B,Peter C S.Vocalization of farm animals as a measure of welfare [J]. *Applied Animal Behaviour Science*,2004,88(1):163-182
- [6] Placer J,Slobodchikoff C N.A fuzzy-neural system for identification of species-specific alarm calls of Gunnison's prairie dogs[J]. *Behavioral Processes*,2000,52(10):1-9
- [7] Ikeda Y,Ishii Y.Recognition of two psychological conditions of

- a single cow by her voice[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2008, 62(1): 67-72
- [8] Chan W Y, Cloutier S, Newberry R C. Barking pigs: Differences in acoustic morphology predict juvenile responses to alarm calls[J]. *Animal Behaviour*, 2011, 82(4): 767-774
- [9] Diego H M, Julio R G, Carlos A C. Automatic recognition of ingestive sounds of cattle based on hidden Markov models[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 87(3): 51-55
- [10] 李志忠, 滕光辉. 基于发声信息的动物福利评价研究现状[C]//中国农业工程学会. 中国农业工程学会 2005 年学术年会论文集. 北京: 中国农业出版社, 2005: 446-450
- Li Z Z, Teng G H. Research progress of measuring animal welfare based on vocalizations [C]. In: Chinese Society of Agricultural Engineering. Chinese Society of Agricultural Engineering Annual Conference Proceeding of 2005. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 446-450 (in Chinese)
- [11] Norman D. An ear for stress in the pig barn[J]. *Pig Progress*, 2004, 20(1): 9-12
- [12] Julio R G, Carlos A C, Diego H M, Emilio A L. Acoustic monitoring of short-term ingestive behavior and intake in grazing sheep[J]. *Livestock Science*, 2011, 140(2): 32-41
- [13] 韩联宪, 杨岚, 郑宝赟. 白腹锦鸡鸣声的声谱分析[J]. *动物学研究*, 1988, 02: 127-132
- Han L X, Yang L, Zheng B L. The sound spectrographic analysis on the calls of lady amherst's pheasant [J]. *Zoological Research*, 1988(2): 127-132 (in Chinese)
- [14] 李志忠, 滕光辉. 基于改进 MFCC 的家禽发声特征提取方法[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 202-205
- Li Z Z, Teng G H. Feature extraction for poultry vocalization recognition based on improved MFCC[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(11): 202-205 (in Chinese)
- [15] 李志忠, 滕光辉. 子带特征参数在家禽应激发声识别中的应用[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(3): 183-186
- Li Z Z, Teng G H. Application of subband feature of poultry vocalization for identifying their status[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(3): 183-186 (in Chinese)
- [16] 余礼根, 滕光辉, 李保明, 劳凤丹, 邢永正. 蛋鸡发声音频数据库的构建与应用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 150-156
- Yu L G, Teng G H, Li B M, Lao F D, Xing Y Z. Development and application of audio database for laying hens [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(24): 150-156 (in Chinese)
- [17] 余礼根, 滕光辉, 李保明, 劳凤丹, 曹晏飞. 栖架养殖模式下蛋鸡发声分类识别[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 236-242
- Yu L G, Teng G H, Li B M, Lao F D, Cao Y F. Classification methods of vocalization for laying hens in perch system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 236-242 (in Chinese)
- [18] 曹晏飞, 滕光辉, 余礼根, 李乔伟. 含风机噪声的蛋鸡声音信号去噪方法比较[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 212-218
- Cao Y F, Teng G H, Yu L G, Li Q W. Comparison of different de-noising methods in vocalization environment of laying hens including fan noise[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(2): 212-218 (in Chinese)
- [19] 曹晏飞, 陈红茜, 滕光辉, 赵淑梅, 李乔伟. 基于功率谱密度的蛋鸡声音检测方法[J]. *农业机械学报*, 2015(2): 276-280, 300
- Cao Y F, Chen H Q, Teng G H, Zhao S M, Li Q W. Detection of laying hens vocalization based on power spectral density[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015(2): 276-280, 300 (in Chinese)
- [20] 韦力, 邵伟伟, 林植华. 饰纹姬蛙求偶鸣声特征分析[J]. *动物学研究*, 2013(1): 14-20
- Wei L, Shao W W, Lin Z H. Characteristics of courtship calls of *Microhyla ornata* (Anura: Microhylidae) [J]. *Zoological Research*, 2013(1): 14-20 (in Chinese)
- [21] Briefer E, McElligott A G. Indicators of age, body size and sex in goat kid calls revealed using the source-filter theory[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2011, 133 (S3/S4): 175-185
- [22] 郝王元. 50 年内人类可与动物交谈? [J]. *发明与创新: 学生版*, 2007(8): 11
- Hao W Y. Do human and animals can talk in fifty years? [J]. *Invention & Innovation*, 2007(8): 11 (in Chinese)
- [23] Frédéric S, Thierry A, Amélie B, Pascal P. Mother-young vocal communication and acoustic recognition promote preferential nursing in sheep[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211(22): 3554-3562
- [24] Mcelligott A G. Mother goats do not forget their kid's calls [J]. *Proceedings of The Royal Society B*, 2012, 279: 3749-3755
- [25] 张妍琰, 刘建芳, 郭力争. 基于频段 ABAP 谱减法的鸟叫声分类研究[J]. *信阳师范学院学报: 自然科学版*, 2015(1): 127-132
- Zhang Y Y, Liu J F, Guo L Z. Study of the bird sound classification based on ABAP multi-band spectral subtraction [J]. *Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition*, 2015(1): 127-132 (in Chinese)
- [26] 宣传忠, 武佩, 马彦华, 张丽娜, 韩丁, 刘艳秋. 基于功率谱和共振峰的母羊发声信号识别[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 219-224
- Xuan C Z, Wu P, Ma Y H, Zhang L N, Han D, Liu Y Q. Vocal signal recognition of ewes based on power spectrum and formant analysis method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 219-224 (in Chinese)
- [27] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- Hu G S. *Digital Signal Process* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese)
- [28] Anna V K. Chick begging calls reflect degree of hunger in three auk species (Charadriiformes; Alcidae)[J]. *Plos One*, 2015, 10(11): 1-12
- [29] Searby A, Jouventin P. Mother-lamb acoustic recognition in sheep: A frequency coding [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2003, 270(1526): 1765-1771