



散装花生和玉米中大谷蠹和谷蠹的声音识别方法初探

常菲菲¹, 杨晓军², 李 洋², 向才玉³, 郑斯竹², 鲁玉杰^{1,4*}

(1. 河南工业大学粮食和物资储备学院, 郑州 450001; 2. 南京海关动植物与食品检测中心, 南京 210001; 3. 深圳海关技术中心, 广东深圳 518045; 4. 江苏科技大学粮食学院, 江苏镇江 212000)

摘要：对大谷蠹 *Prostephanus truncatus* 和谷蠹 *Rhizopertha dominica* 成、幼虫在花生和玉米中运动的声音进行参数分析, 通过声学方法实现大谷蠹和谷蠹种类和虫态的鉴定。采用声学软件 Cool Edit PRO 对大谷蠹和谷蠹成、幼虫在花生和玉米中运动的声音进行时频域分析, 统计它们的脉冲数、虫声峰值、频率峰值及脉冲持续时间并进行分析, 最后确定特征参数。大谷蠹和谷蠹在花生中运动的声音参数中, 大谷蠹和谷蠹成虫之间、大谷蠹和谷蠹幼虫之间、大谷蠹成幼虫之间、谷蠹成幼虫之间在脉冲数、虫声峰值和脉冲持续时间上都存在显著差异, 说明脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间可以区分各虫态的大谷蠹和谷蠹。在玉米中运动的声音参数中, 大谷蠹和谷蠹成虫在脉冲数和脉冲持续时间上存在显著差异, 大谷蠹和谷蠹幼虫在虫声峰值和脉冲持续时间上存在显著差异, 说明脉冲数或脉冲持续时间可以区分大谷蠹和谷蠹成虫, 虫声峰值或脉冲持续时间可以区分大谷蠹和谷蠹幼虫。大谷蠹成幼虫之间、谷蠹成幼虫之间在脉冲数、虫声峰值和脉冲持续时间上存在显著差异, 说明通过脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间可以区分大谷蠹成幼虫、谷蠹成幼虫。通过脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间可以有效区分花生和玉米中大谷蠹和谷蠹的种类和虫态。

关键词：生物声学; 脉冲数; 虫声峰值; 频率峰值; 脉冲持续时间

中图分类号: Q968.1;

文献标识码: A

Preliminary study on the sound recognition methods for *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha dominica* in bulk peanuts

基金项目：国家重点研发计划“生物安全关键技术研究”专项（2022YFC2601501, 2023YFC2604903）；海关总署科研项目（2023HK52）；南京海关科研项目（2023KJ21）

作者简介：常菲菲，女，硕士研究生，从事食品安全检测研究，E-mail: cff20000908@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 鲁玉杰，女，博士，从事粮食储藏与品质控制研究，E-mail: luyjlyj71@just.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-10-16; 修回日期 Revision received: 2025-01-26; 接受日期 Accepted: 2025-01-27

and corn

CHANG Fei-Fei¹, YANG Xiao-Jun², LI Yang², XIANG Cai-Yu³, ZHENG Si-Zhu², LU Yu-Jie^{1,4*}

(1. School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Animal, Plant and Food Inspection Center, Nanjing Customs, Nanjing 210001, China; 3. Shenzhen Customs Comprehensive Technology Center, Shenzhen 518045, Guangdong Province, China; 4. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, Jiangsu Province, China)

Abstract: This study aims to identify *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha dominica* species and developmental stages using acoustic methods by analyzing the movement sounds of adults and larvae in peanuts and corn. The acoustic software Cool Edit PRO was employed to analyze the sound produced by adult and larvae of *P. truncatus* and *R. dominica* as they moved through peanuts and corn, by a time-frequency domain approach. The number of pulses, the peak of insect sounds, the peak of frequency and the duration of pulse of their insect sounds were counted and analyzed to determine characteristic parameters. In peanuts, there were significant differences respectively in the number of pulses, the peak of insect sounds, and pulse duration between *P. truncatus* and *R. dominica* adults, *P. truncatus* and *R. dominica* larvae, *P. truncatus* adults and larvae, *R. dominica* adults and larvae. The result indicated that number of pulses, peak of insect sounds or pulse duration could distinguish between *P. truncatus* and *R. dominica* in each stage. In corn, there were significant differences respectively in number of pulses and pulse duration between *P. truncatus* and *R. dominica* adults, and there were significant differences in peak of insect sounds and pulse duration between *P. truncatus* and *R. dominica* larvae. The result indicated that number of pulses or pulse duration could distinguish between *P. truncatus* and *R. dominica* adults, and peak of insect sounds or pulse duration could distinguish *P. truncatus* and *R. dominica* larvae. Number of pulses, peak of insect sounds and pulse duration were significant differences respectively between *P. truncatus* adults and larvae, *R. dominica* adults and larvae. It indicated that number of pulses, peak of insect sounds or pulse duration could distinguish the adults and larvae of *P. truncatus*, the adults and larvae of *R. dominica*. Sound parameters, including number of pulses, peak of insect sounds, and pulse duration, could effectively differentiate between the species and physiological states of *P. truncatus* and *R. dominica* in peanut and corn.

Key words: Bioacoustic; number of pulses; peak of insect sounds; peak of frequency; duration of pulse

大谷蠹 *Prostephanus truncatus* 和谷蠹 *Rhyzopertha dominica* 隶属于鞘翅目 Coleoptera 长蠹科 Bostrychidae, 是一类常见的钻蛀性害虫, 其成虫和幼虫都具有钻蛀寄主产生粉末的习性, 可依靠木材、竹材、贮粮的运输传播, 两种都具有重要的经济意义(特尼格尔等, 2024)。大谷蠹属于长蠹科尖帽胸长蠹属 *Prostephanu*, 原产南、北美洲, 是著名的玉米储藏特别是玉米棒储藏的毁灭性害虫, 也是禁止进境植物检疫性有害生物, 其在温度 22~35°C 和相对湿度 50%~80% 的条件下均能发育, 可蛀食玉米造成的大量粉屑, 导致玉米重量损失巨大(沈兆鹏, 2007)。谷蠹属于长蠹科谷蠹属 *Rhyzopertha*, 是典型的热带地区蛀蚀性储粮害虫。其广布于世界各地, 不仅危害谷类、豆类等粮食, 将受害的粮粒蛀成空壳, 致使粮食的质量下降(张玉荣等, 2018), 还能对各种木材制品和图书等产生危害(李丹等, 2021)。

害虫侵染是造成储粮损失的主要原因之一, 在虫害发生早期进行实时检测, 提早发现虫害发生位置, 有助于及时以虫害中心为重点控制害虫, 实施虫害综合治理, 防止经济损失。现场早期检测能力、成本、有效性、可靠性和劳动力需求是选择该方法时考虑的主要因素。目前可以做到早期发现虫害的技术主要有图像识别、声音信号识别、气味识别以及近红外光谱技术等(Adedeji *et al.*, 2020; Anukiruthika *et al.*, 2021)。图像识别能识别粮堆表面的害虫, 但无法识别粮粒内部害虫, 且受光线影响严重(陈梅香等, 2015; 王凡, 2014)。气体识别具有取样方便、检测快捷、监测灵敏等多种独特优势, 但存在传感器适应性和专一性不足、易与周围气体分子结合发生化学反应等问题(陈亨利等, 2022)。红外光谱法的在线检测成本低、计数准确, 但对体态相近的害虫区分程度不高(鲁玉杰等, 2021)。

害虫的声学检测方法是利用声学传感器通过放大和过滤害虫运动的声音来识别害虫的非破坏性即时检测方法, 与其他检测方法相比声学方法通过从原始声音(环境声音或其他害虫)中识别并提取目标声音的独特特征, 如时域、频域来进行害虫识别, 例如, 红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus*(Mankin, 2011)、米象 *Sitophilus oryzae* 成虫和幼虫(Fleurat-Lessard *et al.*, 2006; Eliopoulos *et al.*, 2015)的最高频率分别在 1~3.8 k Hz、2~3 k Hz 及以上、1.3~2 k Hz 近年来, 储粮害虫的生物声学发展迅速(Banga *et al.*, 2019; Sutin *et al.*, 2019; Adedeji *et al.*, 2020)。如用声学方法对米象的成、幼虫进行了鉴定并取得成功(Mankin *et al.*, 2011)。除储粮害虫外, 该方法还成功地鉴定了木材(Siriwardena *et al.*, 2010; Sutin *et al.*, 2019)、土壤(Mankin *et al.*, 2002; Goerres and Chesmore, 2019)、水果和蔬菜(Adedeji *et al.*, 2020; Banlawe and Cruz, 2020)等中的害虫。大谷蠹和谷蠹作为长蠹科下主要危害花

生和玉米的害虫，具有相似的外型和大小，形态鉴定时极易混淆，但关于它们的生物声学研究却很少（Eliopoulos *et al.*, 2015）。因此，本研究选择常用于储粮害虫检测的压电传感器（Mankin and Hagstrum, 2011），通过声音信号识别方法对在不同寄主中的大谷蠹和谷蠹成、幼虫进行声音特征采集并分析它们的声音参数差异，目的是研究通过声音是否可以实现大谷蠹和谷蠹的早期发现和鉴定，为后续建立虫声声波数据库提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

实验所用试虫均由苏州海关国家仓储有害生物检疫重点实验室提供，在温度为 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $70\% \pm 5\%$ 的恒温培养箱（上海博讯医疗生物仪器股份有限公司）内培养。用养虫罐隔离饲养一个月，获得大量供试成虫和 3 龄幼虫（约 11~13 d）。相比于 1 龄、2 龄幼虫，3 龄幼虫的体型更大，相比于末龄幼虫，3 龄幼虫取食频率相对频繁，数据量也会更多。所有试虫均以市场购置的未检出杀虫剂残留的饲料进行饲养。所有实验均在苏州海关国家仓储有害生物检疫重点实验室隔离养虫仓中进行。选用压电传感器，研制了容量约为 10 kg 的声音屏蔽箱，箱型为矩形。箱内放置 PU 泡沫（图 1），在绝缘系数为 35 m W/Mk 的情况下，该泡沫能够降低空气中的噪声，吸收外界振动和噪声避免被麦克风捕获（Njoroge *et al.*, 2016）。

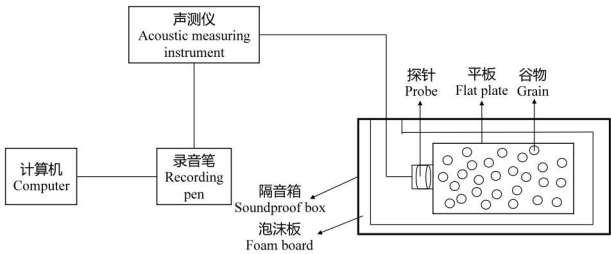


图 1 声学害虫检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acoustic pest detection system

1.2 录制方法

将粮食平铺一层至平板，选取 10 头试虫释放到粮食的中心，让其自由活动 30 min 后进行录制，避免由于粮食干扰而降低害虫活动。每次记录持续 3 min，生物重复 3 次，技术重复 3 次，以确保实验结果的可靠性和有效性，每次生物重复时更换实验样本，采样点设置为 44 100 Hz。每次释放试虫前进行一次空白录音以便后期消除杂音。

1.3 时频域分析

本文采用的快速傅里叶变换是离散傅里叶变换（Discrete fourier transform, DFT）的快

速算法。推导过程是先将傅里叶变换公式 $F(w) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$ 反变换为 $f(t) = F^{-1}[F(w)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w)e^{j\omega t} dw$ ，其中 w 代表频率， t 代表时间， $e^{j\omega t}$ 为复变函数。接下来对连续信号 $x(t)$ 进行时域采样，得到一组离散样本 $x(n)$ ，进行傅里叶变换得到离散时间傅里叶变换公式 $X(w) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}$ 。继续对频域信号进行采样，即得到 DFT 公式 $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}$ 。

1.4 虫声提取

无虫屏蔽箱中未处理的波形图如图 2-A 所示，使用声音处理软件 Cool Edit PRO 对录制声音进行滤波处理如图 2-B，通过无虫录音的波形图确定录音处理参数为高通截至频率 4 000 Hz、音量阈值线 -15 dB。图 2-B 中横坐标为时间（s），纵坐标为振幅（dB），表现了声音音量的变化规律。所有录音文件均采用 “.wav” 格式。

1.5 声音参数提取

害虫的每个生物声信号都是脉冲的集合，分析脉冲信号的过程就是时域分析。根据滤波后波形图，对大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中运动所有的脉冲数进行统计，分析大谷蠹和谷蠹运动时发出声音次数的差异。对每个脉冲持续的时间进行统计，体现了害虫发出声音一次所持续时间的长短。使用软件对滤波后的录音进行波形统计分析，读取虫声峰值，分析大谷蠹和谷蠹发出声音的最高音量差异。

频率是事件发生在特定时间内的强度，分析频率相关参数的过程就是频域分析。通过软件对录音进行 FFT 变换后，按时间（s）为 x 轴，频率（Hz）为 y 轴绘制声谱图，用于分析声音频率的变化规律。通过软件上的频谱分析器按频率为 x 轴（Hz），音量（dB）为 y 轴绘制功率谱图，分析并统计出最高频率（频率峰值），分析大谷蠹和谷蠹发出声音时的最高频率差异。

1.6 数据分析

实验原始数据用 Excel 记录，采用 SPSS 20.0 软件对大谷蠹和谷蠹成、幼虫在花生或玉米中的声音参数，以及分别在花生和玉米中的声音参数进行单因素方差分析，并采用 Tukey HSD 进行事后多重比较分析（ $P < 0.05$ ）。采用独立样本 t 检验（Student's t -test）方法对虫声峰值、脉冲数、脉冲持续时间和频率峰值进行差异显著性分析（ $P < 0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中运动的图形分析

两种粮食在不加害虫的情况下，使用声音处理软件 Cool Edit PRO 对录制声音进行滤波处理后的声音波形图基本一致（图 2-B）。

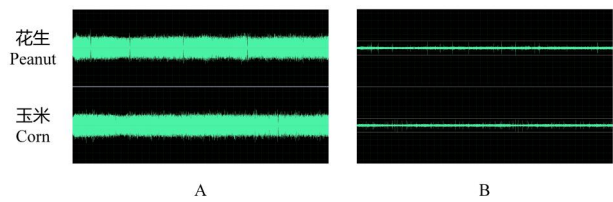


图 2 花生和玉米中无害虫声音滤波前后波形图

Fig. 2 Peanut and corn without pests sound waveform before and after filtering

注：A，滤波前；B，滤波后。Note: A, Before filtering; B, After filtering.

在声音录制的过程中，时间是一个不变量。采用上述数值对在花生和玉米中运动的大谷蠹和谷蠹的声谱进行滤波处理，结果如图 3，整体可以看出大谷蠹和谷蠹的成虫和幼虫在花生和玉米中运动的波形图存在差异，判断通过声音可以实现大谷蠹和谷蠹的早期发现和鉴定。接下来对它们的图形特征进行分析。

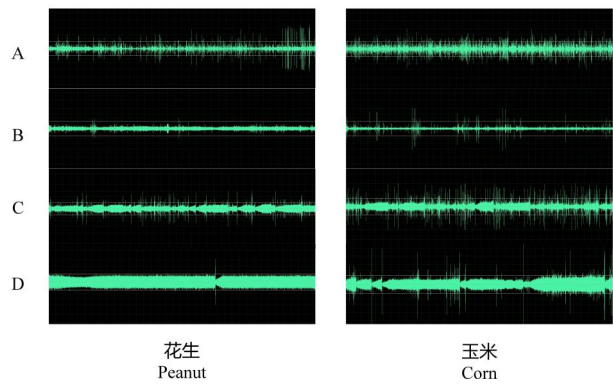


图 3 花生和玉米中大谷蠹和谷蠹运动声音滤波后波形图

Fig. 3 Waveforms of *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha dominica* motion sound in peanut and corn after filtering

注：A，大谷蠹成虫；B，大谷蠹幼虫；C，谷蠹成虫；D，谷蠹幼虫。Note: A, Adults of *P. truncatus*; B, Larvae of *P. truncatus*; C, Adults of *R. dominica*; D, Larvae of *R. dominica*.

分析大谷蠹和谷蠹的成幼虫在花生和玉米中运动声音的波形图（图 4），发现均为不连续的单个脉冲，波形包络前大后小，逐渐收敛。分析大谷蠹和谷蠹的成幼虫在花生和玉米中运动声音的声谱图（图 5），发现均属于离散谱，且频带较宽，从声谱图上可见，均表现一条短时间的宽带谱线。

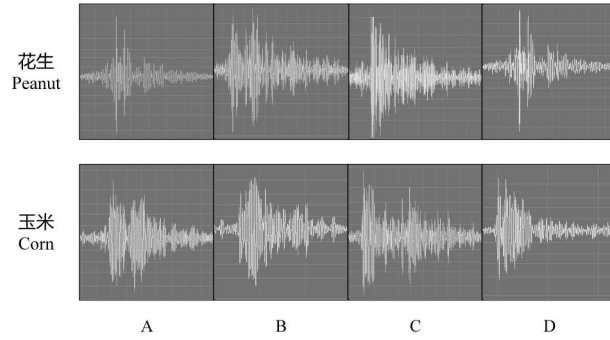


图4 大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中运动声音的局部波形图

Fig. 4 Local waveforms of *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha dominica* motion sound in peanut and corn

注：A，大谷蠹成虫；B，大谷蠹幼虫；C，谷蠹成虫；D，谷蠹幼虫。Note: A, Adults of *P. truncatus*; B, Larvae of *P. truncatus*; C, Adults of *R. dominica* ; D, Larvae of *R. dominica*.

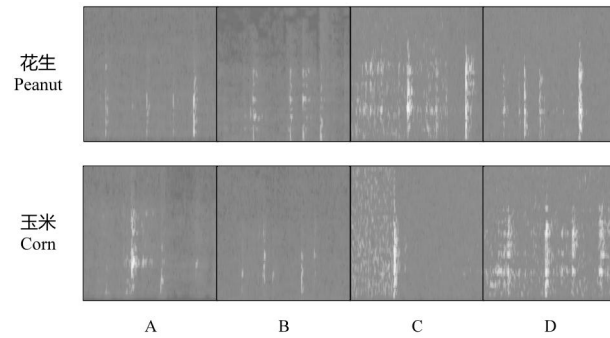


图5 大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中运动的局部频谱图

Fig. 5 Local spectra of *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha dominica* motion sound in peanut and corn

注：A，大谷蠹成虫；B，大谷蠹幼虫；C，谷蠹成虫；D，谷蠹幼虫。A, Adults of *P. truncatus*; B, Larvae of *P. truncatus*; C, Adults of *R. dominica*; D, Larvae of *R. dominica*.

2.2 大谷蠹和谷蠹在花生中运动的声音参数比较

对大谷蠹和谷蠹在花生中运动的声音参数进行统计学分析。从种类分析，大谷蠹成虫和谷蠹成虫在脉冲数（图 6-A）、虫声峰值（图 6-B）和脉冲持续时间（图 6-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），大谷蠹成虫脉冲数 $[(312.10 \pm 9.34)\text{个}]>$ 谷蠹成虫脉冲数 $[(182.40 \pm 13.77)\text{个}]$ ，大谷蠹成虫虫声峰值 $(-1.74 \pm 0.75\text{ dB})>$ 谷蠹成虫虫声峰值 $(-5.06 \pm 0.20\text{ dB})$ ，大谷蠹成虫脉冲持续时间 $(33.26 \pm 1.77\text{ ms})>$ 谷蠹成虫脉冲持续时间 $(27.43 \pm 3.01\text{ ms})$ ，大谷蠹幼虫和谷蠹幼虫在脉冲数（图 6-A）、虫声峰值（图 6-B）和脉冲持续时间（图 6-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），大谷蠹幼虫脉冲数 $(49.89 \pm 4.40\text{ 个})>$ 谷蠹幼虫脉冲数 $(24.89 \pm 3.41\text{ 个})$ ，大谷蠹幼虫虫声峰值 $(-7.83 \pm 0.60\text{ dB})>$ 谷蠹幼虫虫声峰值 $(-11.31 \pm 1.12\text{ dB})$ ，大谷蠹幼虫脉冲持续时间 $(20.63 \pm 2.73\text{ ms})>$ 谷蠹幼虫脉冲持续时间 $(17.16 \pm 2.73\text{ ms})$ 。

说明可以通过脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间对大谷蠹和谷蠹的种类进行区分。

从虫态分析，大谷蠹成虫和幼虫在脉冲数（图 6-A）、虫声峰值（图 6-B）和脉冲持续时间（图 6-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），谷蠹成虫和幼虫在脉冲数（图 6-A）、虫声峰值（图 6-B）和脉冲持续时间（图 6-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），且大谷蠹成虫脉冲数、虫声峰值和脉冲持续时间均大于大谷蠹幼虫，谷蠹成虫脉冲数、虫声峰值和脉冲持续时间均大于谷蠹幼虫，说明可以通过脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间对大谷蠹和谷蠹的虫态进行区分。此外，分析大谷蠹和谷蠹在花生中运动的声音参数频率峰值可知（图 6-C），通过频率峰值无法进行两种害虫种类和虫态的区分。

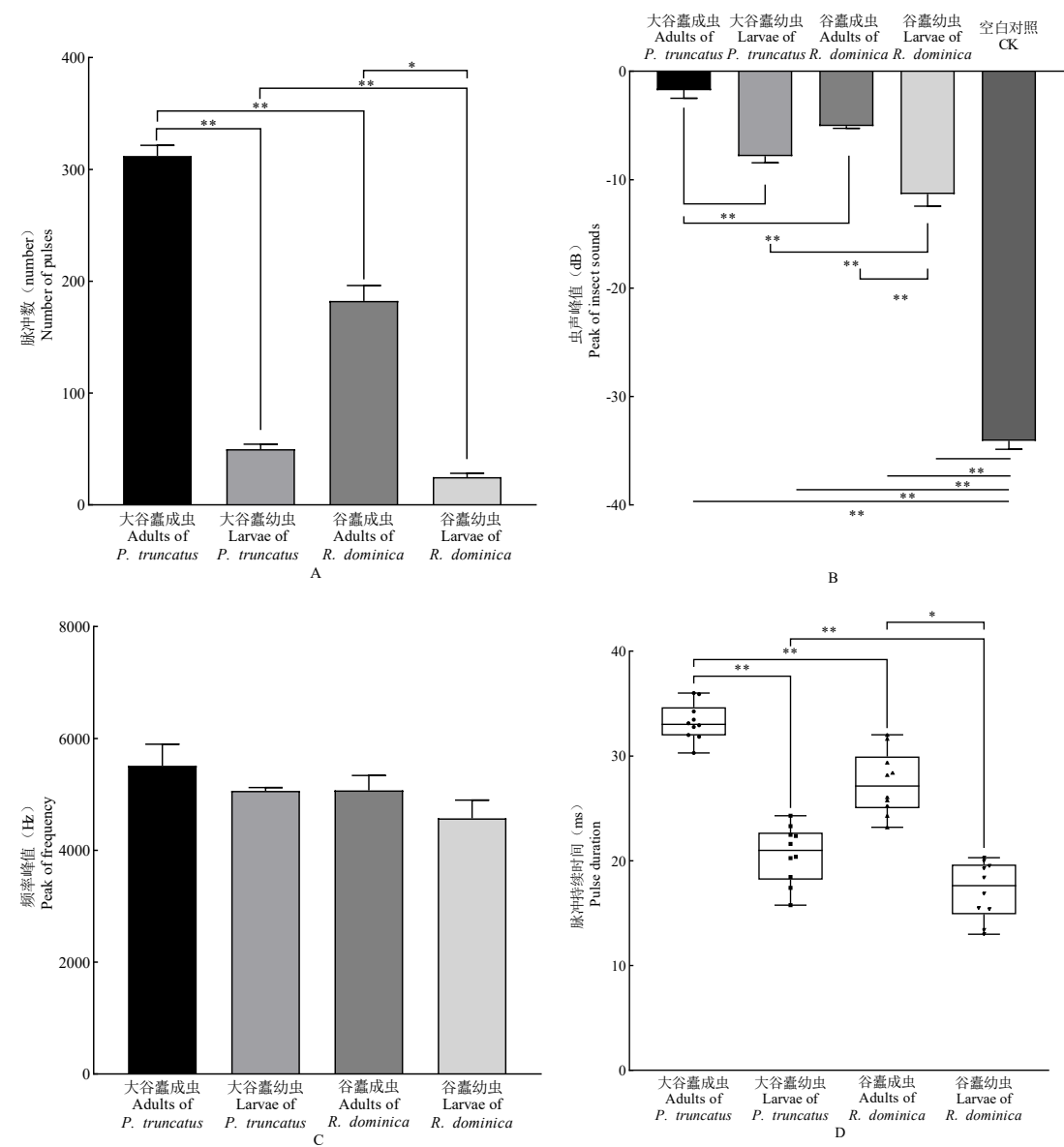


图 6 大谷蠹和谷蠹在花生中运动产生的声音参数差异

Fig. 6 Difference of sound parameters produced by the movement of *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha*

注：A，脉冲数；B，虫声峰值；C，频率峰值；D，脉冲持续时间。数据以平均值±标准误表示，*表示统计学差异显著（*表示 $P<0.05$ ；**表示 $P<0.01$ ）。下图同。Note: A, Number of pulses; B, Peak of insect sounds; C, Peak of frequency; D, Duration of pulse. Data in the figure are presented as the means $\pm$ SE and asterisks above bars indicate statistical differences (* represented $P<0.05$; **represented $P<0.01$). The same below.

2.3 大谷蠹和谷蠹在玉米中运动的声音参数比较

对大谷蠹和谷蠹在玉米中运动的声音参数进行统计学分析。从种类分析，大谷蠹成虫和谷蠹成虫在脉冲数（图 7-A）和脉冲持续时间（图 7-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），大谷蠹成虫脉冲数（ 598.40 ± 35.94 个）>谷蠹成虫脉冲数（ 186.70 ± 18.23 个），大谷蠹成虫脉冲持续时间（ 33.53 ± 1.56 ms）>谷蠹成虫脉冲持续时间（ 27.45 ± 1.86 ms），说明可以通过脉冲数或脉冲持续时间区分大谷蠹成虫和谷蠹成虫。大谷蠹幼虫和谷蠹幼虫在虫声峰值（图 7-B）和脉冲持续时间（图 7-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），大谷蠹幼虫虫声峰值（ -5.39 ± 0.58 dB）>谷蠹幼虫虫声峰值（ -10.83 ± 1.11 dB），大谷蠹幼虫脉冲持续时间（ 20.83 ± 3.45 ms）>谷蠹幼虫脉冲持续时间（ 16.99 ± 3.42 ms），说明可以通过虫声峰值或脉冲持续时间区分大谷蠹幼虫和谷蠹幼虫。

从虫态分析，大谷蠹成虫和幼虫在脉冲数（图 7-A）、虫声峰值（图 7-B）和脉冲持续时间（图 7-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），大谷蠹成虫脉冲数>大谷蠹幼虫脉冲数（ 60.11 ± 6.26 ms），大谷蠹成虫虫声峰值（ -0.93 ± 0.06 dB）>大谷蠹幼虫虫声峰值，大谷蠹成虫脉冲持续时间>大谷蠹幼虫脉冲持续时间。谷蠹成虫和幼虫在脉冲数（图 7-A）、虫声峰值（图 7-B）和脉冲持续时间（图 7-D）上均存在显著差异（ $P<0.05$ ），谷蠹成虫脉冲数>谷蠹幼虫脉冲数（ 35.33 ± 4.36 ms），谷蠹成虫虫声峰值（ -1.24 ± 0.68 dB）>谷蠹幼虫虫声峰值，谷蠹成虫脉冲持续时间>谷蠹幼虫脉冲持续时间，说明可以通过脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间对大谷蠹和谷蠹的虫态进行区分。此外，分析大谷蠹和谷蠹在玉米中运动的声音参数频率峰值可知（图 7-C），通过频率峰值无法进行两种害虫种类和虫态的区分。

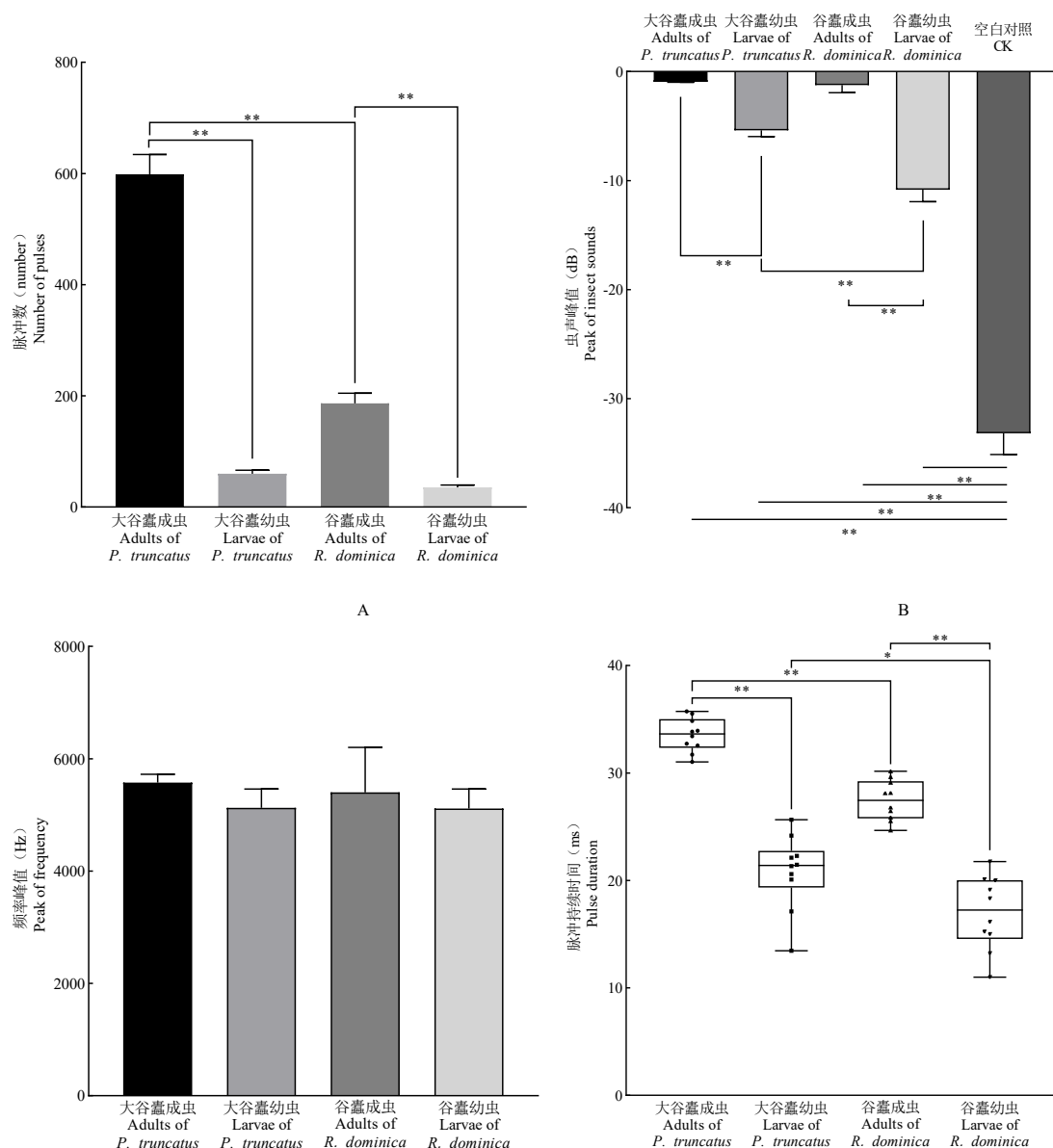


图 7 大谷蠹和谷蠹在玉米中运动产生的声音参数差异

Fig. 7 Difference of sound parameters produced by the movement of *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha dominica* in corn

注：A，脉冲数；B，虫声峰值；C，频率峰值；D，脉冲持续时间。Note: A, Number of pulses; B, Peak of insect sounds; C, Peak of frequency; D, Duration of pulse.

2.4 大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中运动的声音参数比较

比较大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中的声音参数并进行统计学分析。在脉冲数上(图 8-A)，大谷蠹成虫在花生和玉米中运动所产生的脉冲数存在显著差异 ($P<0.05$)，大谷蠹幼虫、谷蠹成虫、谷蠹幼虫在花生和玉米中运动的脉冲数无统计学差异，总体表现为在花生中的脉冲数少于在玉米中的脉冲数，说明在玉米中运动所产生的声音次数更多。在虫声峰值上(图

8-B)，大谷蠹幼虫、谷蠹成虫在花生和玉米中运动所产生的虫声峰值均存在显著差异（ $P<0.05$ ），大谷蠹成虫、谷蠹幼虫在花生和玉米中运动的虫声峰值无统计学差异，总体表现为在花生中的虫声峰值低于在玉米中的虫声峰值，说明在玉米中运动所产生的声音音量更大。在频率峰值上（图 8-C），大谷蠹成虫、大谷蠹幼虫、谷蠹成虫、谷蠹幼虫在花生和玉米中运动的频率峰值无统计学差异，在花生中的频率峰值低于在玉米中的频率峰值，说明在玉米中运动所产生的声音音调更高。在脉冲持续时间上（图 8-D），大谷蠹成虫、大谷蠹幼虫、谷蠹成虫、谷蠹幼虫在花生和玉米中运动的脉冲持续时间无统计学差异，且在花生和玉米中所产生的脉冲持续时间相同，说明害虫的脉冲持续时间不因寄主的改变而改变。

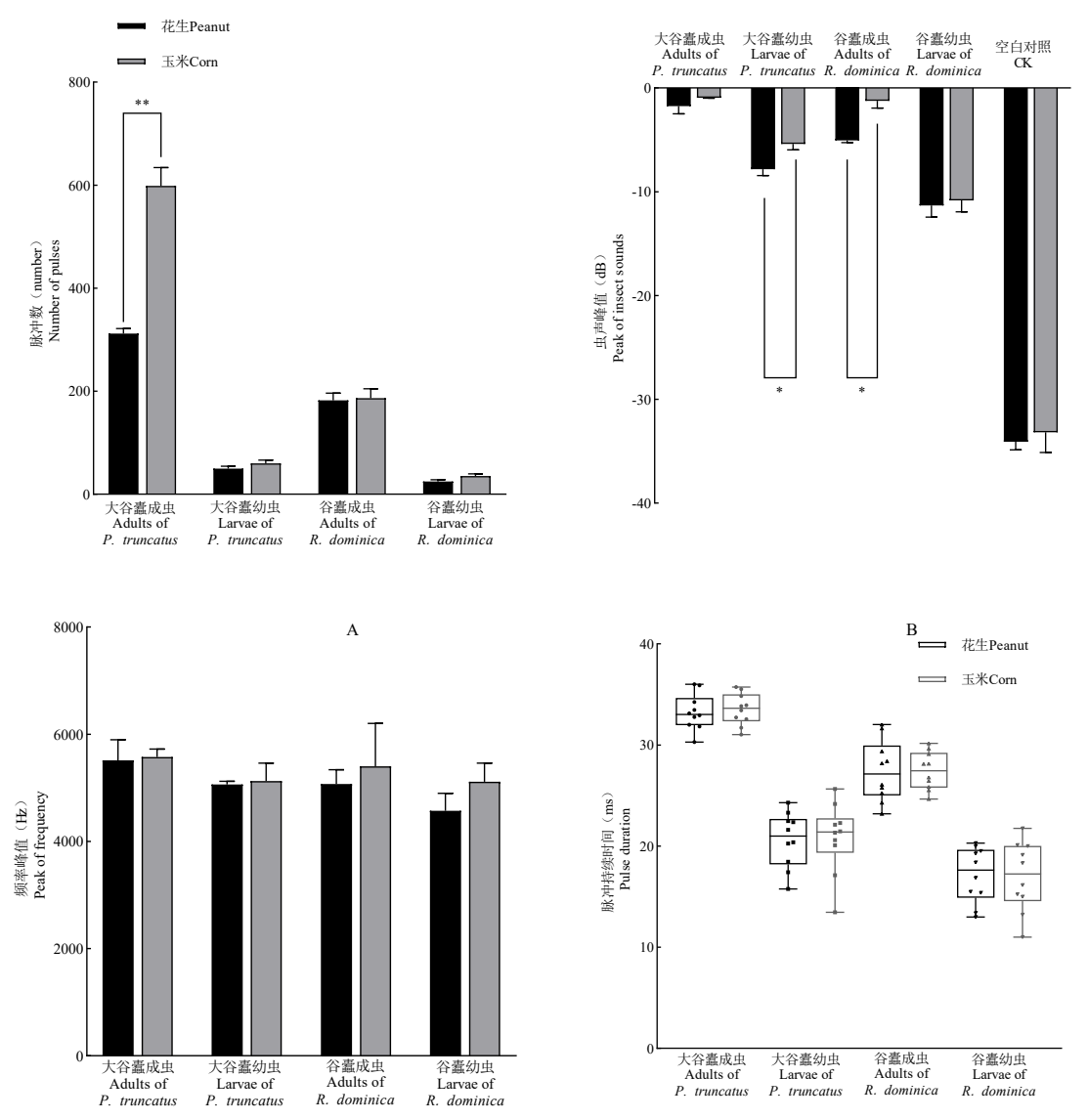


图 8 大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中运动产生的声音参数差异

Fig. 8 Difference of sound parameters produced by the movement of *Prostephanus truncatus* and *Rhizopertha dominica* in peanut and corn

注: A, 脉冲数; B, 虫声峰值; C, 频率峰值; D, 脉冲持续时间。Note: A, Number of pulses; B, Peak of insect sounds; C, Peak of frequency; D, Duration of pulse.

3 结论与讨论

声学方法是基于接收和识别害虫摄取和运动声音的一种检测方法。声音参数的分析可以提供有关害虫行为特征的有用信息,以通过声学检测实现害虫的早期发现和鉴定。大谷蠹和谷蠹的成虫和幼虫均会对粮食造成严重损害,但使用声音方法对其进行检测的相关研究却很少。因此,本研究使用自制隔音设备和声测仪对大谷蠹和谷蠹的成、幼虫在花生和玉米中运动的声音进行研究。结果表明大谷蠹和谷蠹在花生中运动的声音参数中,脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间可以区分大谷蠹和谷蠹的种类和虫态。在玉米中运动的声音参数中,脉冲数或脉冲持续时间可以区分大谷蠹和谷蠹成虫的种类,虫声峰值或脉冲持续时间可以区分大谷蠹和谷蠹幼虫的种类,脉冲数、虫声峰值或脉冲持续时间可以区分大谷蠹和谷蠹的虫态。说明通过声学方法,可以实现大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中的早期发现和鉴定。此外,与花生相比,玉米更适合作为大谷蠹和谷蠹的寄主进行声学研究。

早期关于害虫生物声分析的研究已经发现,在绿豆和鹰嘴豆中,四纹豆象 *Callosobruchus maculatus* 成虫和绿豆象 *Callosobruchus chinensis* 成虫可以通过声音参数进行分类和鉴定 (Banga *et al.*, 2019)。比较大谷蠹和谷蠹在同种粮食上的参数差异可以发现,大谷蠹成虫和幼虫在花生和玉米中运动的声音参数均高于谷蠹成虫和幼虫,这可能与它们的体型差异有关。大谷蠹幼虫体长可达 10 mm (曾力和饶如勇, 1997),成虫平均体长约 3.5 mm (沈兆鹏, 2007)。谷蠹幼虫平均体长约 3.5 mm,成虫平均体长约 2.6 mm (暴洁, 2016)。在粮食中,大尺寸的害虫如米象和赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 比小尺寸的锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 和谷蠹更容易检测到 (Hagstrum and Flinn, 1993; Mankin *et al.*, 2011)。

单独就大谷蠹和谷蠹进行分析,可以发现在花生和玉米中成虫运动的声音参数均高于幼虫。这与 Njoroge (2017) 在菜豆象 *Acanthoscelides obtectus* 中发现其成虫的脉冲数低于幼虫结果不同,与实验室之前在花斑皮蠹 *Trogoderma variabile* 和谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 上的研究也不同。猜测可能是因为在进行幼虫的声音录制时,是直接将幼虫放置于粮粒的表面进行录制的,而大谷蠹和谷蠹的幼虫均需要在粮粒内羽化为成虫后才从粮粒内钻出,直接将放置于粮粒表面会导致其取食困难,且大谷蠹和谷蠹的成虫会钻蛀粮粒表面,不断取食粮粒并寻找合适的产卵区域 (Hodges *et al.*, 1987; 陈彤彤, 2024)。

单独比较大谷蠹和谷蠹在花生和玉米中运动的声音参数,发现成、幼虫在花生中运动的

声音参数均低于在玉米中运动的声音参数,说明大谷蠹和谷蠹在玉米中运动发出的声音音量更大、次数更多、音调更高、持续时间更长,更适合进行大谷蠹和谷蠹种类和虫态的鉴定。大谷蠹主要为害储藏的玉米和木薯干,在适宜条件下,玉米棒储藏6个半月后,其危害率可达80%,造成30%的重量损失,其对玉米的危害远高于对花生的危害(沈兆鹏,2007;曹俊等,2016)。谷蠹是玉米流通和储藏过程中常见的蛀食性害虫,危害可使玉米造成许多粉屑,使粮堆发热至40℃以上并有一股使人厌恶的特殊气味(沈兆鹏,2007;韩晓珍等,2023),在饲养过程中可以发现其对花生的危害远小于对玉米的危害。综上所述,与花生相比,玉米是谷蠹和大谷蠹的偏好性寄主。Banga等(2019)在绿豆象和四纹豆象的生物声研究中发现,由于豆象的偏好性选择,导致绿豆象成虫在绿豆中的虫声峰值高于在鹰嘴豆中,四纹豆象成虫在绿豆中的虫声峰值低于在鹰嘴豆中。说明在利用生物声进行害虫的早期识别和鉴定时,不同寄主可能会影响鉴定结果,因此在后续建库过程中需要对数据集进行更加细致的分类。

本研究证实了声学方法在不同害虫种类(大谷蠹和谷蠹)、不同生长阶段(幼虫和成虫)早期发现和鉴定中的巨大潜力,为后续数据库的建立提供了数据支撑。在下一步研究中,我们将丰富数据库的种类范围,建立虫声声波数据库,开发声音识别算法,建立适用于隐藏在粮食中害虫的早期鉴定,实现通过智能声音识别技术对粮食中的害虫进行早期发现和鉴定。

参考文献 (References)

- Adedeji AA, Ekramirad N, Rady A, *et al.* Non-destructive technologies for detecting insect infestation in fruits and vegetables under postharvest conditions: A critical review [J]. *Foods*, 2020, 9 (7): 927.
- Anukiruthika T, Jian F, Jayas DS. Movement and behavioral response of stored product insects under stored grain environments - a review [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2021, 90: 101752.
- Banga KS, Kotwaliwale N, Mohapatra D, *et al.* Bioacoustic detection of *Callosobruchus chinensis* and *Callosobruchus maculatus* in bulk stored chickpea (*Cicer arietinum*) and green gram (*Vigna radiata*) [J]. *Food Control*, 2019, 104: 278-287.
- Banlawe IAP, Cruz JCD. Acoustic Sensors for Mango Pulp Weevil (*stretchenus frigidus* sp.) Detection [C]. Malaysia: 2020 IEEE 10th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), 191-195.
- Bao J. Research of Quality Change Mechanism of Wheat Damaged by *Rhyzopertha dominica* [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology Master Thesis, 2016. [暴洁. 谷蠹侵害后小麦品质变化机理研究 [D]. 郑州: 河南工业大学硕士论文, 2016]
- Cao J, Liu X, Chen WR, *et al.* Research progress in the mechanism of physiological metabolism and quality changes in corn during storage [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37 (3): 379-383, 388. [曹俊, 刘欣, 陈文若, 等. 玉米储藏过程中生理代谢与品质变化机理研究进展 [J]. 食品工业科技, 2016, 37 (3): 379-383, 388]
- Chen MX, Yang XT, Shi BC, *et al.* Research progress and prospect of technologies for automatic identifying and counting of pests [J].

- Journal of Environmental Entomology*, 2015, 37 (1): 176-183. [陈梅香, 杨信廷, 石宝才, 等. 害虫自动识别与计数技术研究进展与展望 [J]. 环境昆虫学报, 2015, 37 (1): 176-183]
- Chen TL, Wang TN, Yang YT, *et al.* Research review of odor recognition technology [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2022, 9: 43-45, 51. [陈亨利, 王天娜, 杨雨婷, 等. 气味识别技术研究综述 [J]. 科技与创新, 2022, 9: 43-45, 51]
- Chen TT. Differences in Microbial Diversity and the Effects of Intracellular Symbiont on the Growth of *Rhyzopertha dominica* [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology Master Thesis, 2023. [陈彤彤. 谷蠹体内微生物多样性及胞内共生菌对其生长发育影响研究 [D]. 郑州: 河南工业大学硕士论文, 2023]
- Eliopoulos PA, Potamitis I, Kontodimas DC, *et al.* Detection of adult beetles inside the stored wheat mass based on their acoustic emissions [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108 (6): 2808-2814.
- Fleurat-Lessard F, Tomasini B, Kostine L, *et al.* Acoustic Detection and Automatic Identification of Insect Stages Activity in Grain Bunks by Noise Spectra Processing Through Classification Algorithms [C]. 9th International Working Conference on Stored Product Protection, 2006: 476-486.
- Goerres CM, Chesmore D. Active sound production of scarab beetle larvae opens up new possibilities for species-specific pest monitoring in soils [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 10115.
- Hagstrum DW, Flinn PW. Comparison of acoustical detection of several species of stored-grain beetles (Coleoptera: Curculionidae, Tenebrionidae, Bostrichidae, Cucujidae) over a range of temperatures [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1993, 86 (4): 1271-1278.
- Han XZ, Yuan QQ, Wang MW, *et al.* Effects of *Rhyzopertha dominica* infestation on starch and oil quality in corn [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38 (7): 1-6. [韩晓珍, 袁晴晴, 王梦韦, 等. 谷蠹蛀食对玉米中淀粉及油脂品质的影响 [J]. 中国粮油学报, 2023, 38 (7): 1-6]
- Hodges RJ, Liu YP. A review on the biology and control of *Prostephanus truncatus* [J]. *Plant Quarantine*, 1987, 3: 220-223. [Hodges RJ, 刘永平. 大谷蠹的生物学和防治研究综述 [J]. 植物检疫, 1987, 3: 220-223]
- Li DD, Zhou Q, Yan XP, *et al.* Geographical distribution characteristics research of *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) in different grain storage environments [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2021, 36 (2): 121-125. [李丹丹, 周庆, 严晓平, 等. 不同储粮环境下谷蠹的地理分布特征研究 [J]. 中国粮油学报, 2021, 36 (2): 121-125]
- Lu YJ, Wang WJ, Ren TY, *et al.* Research progress of intelligent monitoring and early warning system for stored grain pests [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29 (3): 208-214. [鲁玉杰, 王文敬, 任天一, 等. 储藏物害虫智能化监测与预警系统研究进展 [J]. 粮油食品科技, 2021, 29 (3): 208-214]
- Mankin RW, Hagstrum DW, Smith MT, *et al.* Perspective and promise: A century of insect acoustic detection and monitoring [J]. *American Entomologist*, 2011, 57 (1): 30-44.

- Mankin RW, Hagstrum DW. Acoustic monitoring of insects [J]. *Agricultural and Food Sciences*, 2011: 269-276.
- Mankin RW. Recent developments in the use of acoustic sensors and signal processing tools to target early infestations of red palm weevil in agricultural environments [J]. *Florida Entomologist*, 2011, 94: 761-765.
- Njoroge AW, Affognon H, Mutungi C, *et al.* Bioacoustics of *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) on *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae) [J]. *Florida Entomologist*, 2017, 100 (1): 109-115.
- Njoroge AW, Affognon H, Mutungi C, *et al.* Frequency and time pattern differences in acoustic signals produced by *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) and *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae) in stored maize [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2016, 69: 31-40.
- Shen ZP. Four Pests of Bostrichidae - four insects that harm stored grains and buildings [J]. *Heilongjiang Grain*, 2007, 2: 32-35. [沈兆鹏. 长蠹四害——危害储粮及建筑物的四种昆虫 [J]. 黑龙江粮食, 2007, 2: 32-35]
- Siriwardena KAP, Fernando LCP, Nanayakkara N, *et al.* Portable acoustic device for detection of coconut palms infested by *Rynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. *Crop Protection*, 2010, 29 (1): 25-29.
- Sutin A, Yakubovskiy A, Salloum HR, *et al.* Towards an automated acoustic detection algorithm for wood-boring beetle larvae (Coleoptera: Cerambycidae and Buprestidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112 (3): 1327-1336.
- Te NGE, Li ZQ, Yang XK, *et al.* Taxonomic overview and renewed catalogue of the Bostrichidae in China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (1): 26-31. [特尼格尔, 李志强, 杨星科, 等. 中国长蠹科分类概况及最新名录 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (1): 26-31]
- Wang F. Study of Feature Extraction and Recognition of Stored Product Pests [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology Master Thesis, 2014. [王凡. 藏储物害虫特征提取与识别分类研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学硕士论文, 2014]
- Zeng L, Rao RY. The identification of eight species of storage-materials beetle larvae [J]. *Journal of Henan University of Technology* (Natural Science Edition), 1997, 3: 46-49. [曾力, 饶如勇. 8种仓储甲虫幼虫的鉴别 [J]. 郑州粮食学院学报, 1997, 3: 46-49]
- Zhang YR, Tian T, Bao J. Effect of *Rhizopertha dominica* of different growth stages infestation on wheat lipids [J]. *Journal of Henan University of Technology* (Natural Science Edition), 2018, 39 (3): 8-14. [张玉荣, 田甜, 暴洁. 小麦被不同生长发育阶段的谷蠹侵害后其脂类的变化 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2018, 39 (3): 8-14]