

基于能量释放分析探究膨化食品声学特征与感官脆度相关性

朱成凯，胡新楠，纪执立，沈汪洋，贾喜午

Correlation between Acoustic Feature and Sensory Crispness of Different Puffed Food Based on Energy Release Analysis

ZHU Chengkai, HU Xinnan, JI Zhili, SHEN Wangyang, and JIA Xiwu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020275>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模糊数学的蒲公英脆片微波真空膨化工艺的优化

Optimization of Dandelion Microwave Vacuum Puffing Crisps Based on Fuzzy Mathematics

食品工业科技. 2020, 41(20): 153–161,168 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.025>

无花果脆片膨化工艺中试研究

Pilot Study on Fig Crisp Chips Puffing Process

食品工业科技. 2020, 41(3): 193–198 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.033>

不同预干燥方式对瞬时压差膨化香菇脆品质特性的影响

Effect of Different Pre-drying Methods on the Quality Attributes of Instant Controlled Pressure Drop Puffing Dried Shiitake (*Lentinus edodes*) Crisps

食品工业科技. 2023, 44(17): 281–287 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110307>

鱼糜-淀粉脆片压差膨化加工工艺研究

Pressure Difference Puffing Process of Surimi-Starch Chips

食品工业科技. 2022, 43(16): 211–219 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110108>

基于Transformer的零样本食品图像检测

Zero-Shot Food Image Detection Based on Transformer

食品工业科技. 2024, 45(22): 18–26 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030027>

竹木筷中过氧化氢在食品模拟物中迁移量的测定及其迁移规律的研究

Determination of Hydrogen Peroxide Migration Amount from Bamboo and Wooden Chopsticks to Food Simulants and Its Migration Law

食品工业科技. 2021, 42(18): 57–63 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010084>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

朱成凯, 胡新楠, 纪执立, 等. 基于能量释放分析探究膨化食品声学特征与感官脆度相关性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 313–321. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020275

ZHU Chengkai, HU Xinnan, JI Zhili, et al. Correlation between Acoustic Feature and Sensory Crispness of Different Puffed Food Based on Energy Release Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 313–321. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020275

· 分析检测 ·

基于能量释放分析探究膨化食品声学特征与感官脆度相关性

朱成凯¹, 胡新楠¹, 纪执立^{1,*}, 沈汪洋², 贾喜午¹

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023;

2. 武汉轻工大学大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 湖北武汉 430023)

摘要: 本研究旨在寻找能快速提高膨化食品感官脆度和其声学特征相关性的方法。采用排序测试方法选取脆性区分能力较好的个体组成感官组, 对不同类型的膨化食品进行感官评价。以 1000 Hz 作为能量切分区间, 利用希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 对膨化食品的声信号进行能量分割, 观察其能量迁移过程, 研究 10 种不同类型食品的感官评价与声学特性之间的关系。感官评价结果显示具有较高“酥脆性”的样品更易获得较高的评价分数。脉冲因子 ($r=0.937$) 和峭度 ($r=0.889$) 在不同种类膨化食品之间显示出与感官脆度的极显著相关性 ($P<0.01$), 表明膨化食品的能量释放特征保持一致, 较脆的食物释放的能量会产生突然而不稳定的信号。膨化食品的声信号频率更集中在总能量占比 80% 的低频区间内, 不同类型膨化食品的低频区间与感官脆度之间无显著相关性, 但从其固有低频区间提取的声学特征与感官脆度的相关性显著提高。本研究建立了一种快速寻找膨化食品声信号最佳录制频率区间方法, 提高了声学评价在食品感官质量控制中的准确性与可靠性。

关键词: 膨化食品, 声学特征, 希尔伯特-黄变换, 能量迁移, 频率区间

中图分类号: TS210.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)03-0313-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020275

本文网刊:



Correlation between Acoustic Feature and Sensory Crispness of Different Puffed Food Based on Energy Release Analysis

ZHU Chengkai¹, HU Xinnan¹, JI Zhili^{1,*}, SHEN Wangyang², JIA Xiwu¹

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: This study sought to identify a method for swiftly improving the correlation between sensory crispness and acoustic characteristics of puffed food. The sensory group was formed by selecting individuals adept at identifying brittleness through sequencing test, with sensory assessments conducted on various puffed food. Adopting 1000 Hz as the interval for energy segmentation, the Hilbert-Huang Transform (HHT) was utilized to segment the energy of the sound signal from puffed food to observe the process of energy migration. The relationship between sensory evaluation and acoustic properties of 10 varied puffed food types was studied. The results of sensory evaluation showed that samples with higher "crispness" were more likely to obtain higher evaluation scores. The pulse factor ($r=0.937$) and kurtosis ($r=0.889$) showed an extremely significant correlation with sensory crispness between different types of puffed food, revealing that the energy release characteristics remained consistent ($P<0.01$), while the energy released by the crunchy foods led to abrupt and unstable signals. It was observed that the sound signal frequencies of puffed food predominantly concentrated in the lower frequency range, accounting for 80% of the total energy. The results showed that there was no significant

收稿日期: 2024-03-01

基金项目: 湖北省科技创新计划项目 (2024BBB097); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (T201911)。

作者简介: 朱成凯 (2000-), 男, 硕士, 研究方向: 食品科学, E-mail: 18327691515@163.com。

* 通信作者: 纪执立 (1992-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物加工, E-mail: jizhili@whpu.edu.cn。

correlation between the low frequency interval and sensory crispness among different types of puffed food, but the acoustic features extracted from the inherent low frequency interval were significantly correlated with sensory crispness. This study establishes a fast method to identify the best frequency interval of sound signal recording of puffed food, thereby enhancing the accuracy and reliability of acoustic evaluation in food sensory quality control.

Key words: puffed food; acoustic feature; Hilbert-Huang Transform; energy migration; acoustic frequency

膨化食品是指在高温和高压下,通过膨化技术处理后的食品。这种处理方法会使食品内部的水分在瞬间汽化成为蒸汽,形成大量气泡,从而使食品体积膨胀,质地轻脆。随着食品工业的发展,研究人员观察到消费者对膨化食品质量的满意度很大程度取决于他们对酥脆程度的感知^[1],而食用膨化食品时带来的愉悦感也可以通过声信号来调节^[2]。例如,音频和食物之间的协同效应可以增强人们对味道的感知和评价^[3-4]。膨化食品的声学特征与其脆度密切相关。然而对于“酥脆”这个词,目前虽有普遍的共识,但还缺乏一个精确的定义。

膨化食品断裂时产生的声音可用来表征膨化食品的脆度^[5]。当食物被切割和挤压时,空腔会发生变形和破裂,同时释放能量。人类通过空气或骨传导感知食品声音的本质是能量传递过程^[6]。目前许多研究探索了声信号与食物质地之间的关联,例如利用声峰的数量和声压的水平来预测薯片的脆度^[7],利用声信号的特征参数建立模型来预测感官脆度评分^[8],利用纹理特性分析仪研究声信号与香梨^[9]、可可脂^[10]和炸薯条^[11]等食物脆度之间的关联^[12]。然而,这些研究中,不同食物提取声学特征时需要应用不同的最佳记录频率区间^[13],频率区间的选取直接决定了声学特征与感官脆度的相关程度。已有研究主要基于重复实验获得最佳记录频率区间并结合声学特性

来预测感官脆度值^[14],这需要大量的时间进行数据分析^[15]。

基于上述研究动态,本研究通过严格的筛选过程建立了一个感官评估小组,用以评价不同膨化食品的感官脆度值,并与食品声学特征进行相关性分析验证其适用性。而后利用希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)对膨化食品的声信号进行能量分割,计算样品在低频区间的能量比例,观察其能量迁移过程并寻找可用于快速确定膨化食品声学属性最佳频率记录区间的方法,并从低频区间中提取声学特征,将其与全频率间隔记录的声特征进行相关性对比。最终通过验证已有声学特征与感官脆度的相关性,揭示感官脆度与声学参数之间的内在联系,深入研究声信号的能量特征以探究声学能量特性与膨化食品感官脆度的关系。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

旺旺仙贝(a)和海苔米饼(b) 中国杭州旺旺食品有限公司;脆升升原味薯条(c) 中国天津海皇食品有限公司;玉米脆片(d) 中国上海麦西恩食品有限公司;脆虾片(e) 中国福建龙海市庆丰食品有限公司;青稞米棒(f) 中国四川米老头食品工业集团有限公司;红薯片(g) 中国山东临沂汤福记食品有限公司;流心蛋卷(h) 中国安徽金富士食品有



图 1 12 种膨化产品

Fig.1 Twelve types of grain-puffed products

限公司;香蕉脆卷(i) 中国广东上好德食品有限公司;嘉顿饼干(j) 中国华嘉食品有限公司;卧龙锅巴(k) 中国湖北卧龙神厨食品股份有限公司;脆脆鲨(l) 瑞士雀巢有限公司;以上所有样品(图 1)都具有可以清晰感知的声学特性。

Plus 纹理分析仪 英国 Stable Micro Systems 公司; iSV1610 1/2 英寸自由场麦克风(10~20 kHz)、94.0 dB 和 114.0 dB 声压级声学校准器(1000 Hz) 中国杭州爱华仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 感官评价人员筛选 根据 ISO 8586-2023(感官分析-感官评估员的选择和培训), 最初从随机邀请的 50 名健康候选人(男女比例为 1:1)中选择了 42 名感官评估员。将四种不同脆度的样品(A、B、C、D 分别代表流心蛋卷、卧龙锅巴、玉米脆片和脆脆鲨)呈现给评审员, 评审员根据品尝后的脆度对编码样品进行排序。每个样本都进行了三次排序测试。此外, 采用美国烘焙学会(AIB)建立的标准化方法来评估实验样本选择的合理性^[16], 测试标准程序由中国台湾超技公司超技仪器公司提供, 测试仪器为 Plus 纹理分析仪。

由于脆度并没有明确定义为一个参数, 而是一种来自听觉的可感知特征, 因此根据 ISO 11035-1994(感官分析-多维度方法建立感官剖面描述符的识别和选择)的一致性剖面分析, 给出了感官脆度的评价标准。经过评委们的广泛讨论, 感官评价评分标准见表 1。

参照 ISO 8587-2006(感官分析-方法论-排名), 对 42 名评审员的排名结果进行 Friedman 检验, 评估评审员排名的 4 个样品的脆度评价结果之间是否存在显著差异。各评估者排名结果的 F 值由式(1)计算:

$$F = \frac{\left[12\sum_{i=1}^P R_i^2 - 3J(P+1)\right]}{JP(P+1)} \quad \text{式 (1)}$$

式中, P 为样本数量, J 为评估者数量, R_i 为每个样本的秩和。

经 Friedman 检验, 选取对不同脆度水平区分能力较好的评价者的评价结果组成新的样本池, 并对新样本池的评价结果进行方差排序。以样本池平均方差(\bar{S})为参考标准, 选取与新样本池整体评价结果偏差较小的 10 名评价员(男女比例为 1:1)组成感官评价小组。

表 1 感官评价评分标准

Table 1 Scoring criteria for sensory evaluation

评分标准		分数参考
样品在口中破碎声音所引起的愉悦度	令人反感, 口感质地较差 0~5	有一定程度满足感, 但仍有欠缺 6~14 令人愉悦, 口感质地良好 15~20
样品在口中破碎声音所激发的持续进食的欲望	厌恶并立即停止进食 0~5	不厌恶并一定程度刺激进食 6~14 刺激进食欲望强烈, 渴望持续进食 15~20
样品在口中破碎声音所传达的新鲜度	极度陈旧, 放置时间较长, 有明显陈味 0~5	无陈旧感, 但无法准确判断产品放置时间 6~14 极度新鲜, 认为放置时间较短 15~20

1.2.2 感官评价 根据 ISO 6658-2017(感官分析-方法论-一般导则)中的评级和评分, 对 10 种膨化食品(旺旺仙贝、海苔米饼、脆升升原味薯条、脆虾片、青稞米棒、红薯片、流心蛋卷、香蕉脆卷、嘉顿饼干、卧龙锅巴)进行感官评价。

1.2.3 声信号采集

1.2.3.1 硬件参数 根据 DIAS-FACETO 等^[12]的方法, Plus 纹理分析仪使用单叶片复合剪切头以恒定速率压缩样品, 直到样品被破坏。传感元件范围为 1000 N, 触发点载荷力为 0.15 N, 测压元件移动速度设置为 480 mm/min。使用 1/2 英寸自由场麦克风检测产生的声信号, 将声信号转换为电信号并存储在计算机中。使用声学校准器进行校准^[17]。声信号的强度与声源的振动强度、距离和位置密切相关^[18]。因此, 麦克风的位置对于测量声信号至关重要。以 0° 的角度测试了 5 个距离(2、4、6、8 和 10 cm)。每个距离测试 10 次, 使用公式(2)计算声信号强度(E), 并选取声信号强度最大的距离。

$$E = \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad \text{式 (2)}$$

式中, y_i 为时间-振幅曲线 X(n) 的纵坐标值, n 为取样点数。

1.2.3.2 软件设置 声信号的频率间隔对膨化食品的脆度感知有很强的影响^[5]。根据 Nyquist-Shannon 采样定理和硬件参数, 以 44100 Hz(32 位)的频率记录声信号。使用 Adobe Audition 2022 对声信号进行存储和编辑, 使用 MATLAB R2022b 对信号进行处理。

1.2.4 声学特征提取

1.2.4.1 声信号的去噪 对最优记录条件下记录的食品声信号 SN(n) 进行小波变换去噪, 用式(3)表示:

$$SN(n) = S(n) + N(n) \quad \text{式 (3)}$$

式中, SN(n) 为麦克风接收的食品声信号, S(n) 为食品破碎声信号, N(n) 为噪声信号。

由于在声采集环境中没有应用噪声抵消, 所以在处理之前, 所有的声信号都通过小波分析进行降噪。

根据小波分解原理, 将信号采样频率设为 f_s , 经 i 次小波分解后的信号高频带范围为 $f_s/2^i \sim f_s/2^{i-1}$, 低频带范围为 $0 \sim f_s/2^i$, 利用 MATLAB 小波分析器工具箱, 选择一维小波分析, 在选择 db2 作为分解小波基

的前提下选择合适的分解次数^[19]。

1.2.4.2 声学特征提取 通过 MATLAB 提取声学特征, 将降噪后的信号转换成时间-振幅曲线 X(n)和时间-分贝曲线 D(n)。声曲线的峰数(CP)、平均声压级(Ave)和线性距离(LD)分别代表 D(n)的极值数、平均值和积分值^[20]。这三个声学参数直接关系到人耳对声信号的感知。CP 和 LD 能反映声信号被人耳接收时的波动程度, Ave 能反映人耳接收到的声压。

信号强度(E)是利用公式计算得到的离散声信号各采样点的能量和, 它反映了破碎过程中样品释放的总能量, 使用公式(2)计算。

最大短时帧能量(E_{\max})是指声信号在帧后的短时傅里叶变换。因此, 计算每一帧的能量, 并利用公式(4)选取最大的帧能量来反映声信号的瞬时特性。

$$E_{\max} = \max|X(n)|^2 \quad \text{式 (4)}$$

振幅差(D), 即声信号在时域范围内最大和最小振幅的差值, 此参数表示声信号的波动程度。较高的振幅差通常对应更硬更脆的纹理, 而较低的振幅差对应更软的纹理, 这可以用来确定预测的纹理^[21], 用公式(5)计算。

$$D = \max X(n) - \min X(n) \quad \text{式 (5)}$$

式中, $X(n)$ 为时间-振幅曲线。

脉冲因子(pluseF), 即声信号振幅在时域范围内的最大值与振幅绝对值之比的平均值, 其作为一个无量纲量更加稳定和抽象, 较小的脉冲因子表示相对平滑的声波波形, 较大的脉冲因子表示变化和爆发更迅速的声波波形, 由式(6)计算:

$$\text{pluseF} = \frac{\max X(n)}{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |X_i|} \quad \text{式 (6)}$$

式中, X_i 为 $n=i$ 时 $X(n)$ 的取样点值。

峭度(K_4)是描述信号波形的锐度或峰度的统计度量。它用于测量信号的高频成分和尖峰部分存在的程度, 可以帮助确定分布形状是否为正态分布, 以及信号是否具有突出的峰度特征。使用公式(7)来计算。

$$K_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 / n}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n]^2} \quad \text{式 (7)}$$

式中, \bar{X} 为离散级数的平均振幅。

衰减时间(t)是声信号在瞬时域从最大振幅 t 值衰减到 0.1 倍最大值所需的时间^[22]。如果取声信号的最大值, $x_1 = \max|X(n)|$, 其中对应的采样点在 $x_2 = 0.1x_1$, 则计算公式如下:

$$t = \frac{(x_2 - x_1)}{f_s} \quad \text{式 (8)}$$

1.2.5 声学特性与感官脆性的相关性分析 在提取

1.2.2 中 10 种样品声信号的声学特征后, 与感官分数(SS)进行 Pearson 相关分析, 以评估声学特征对各种膨化食品脆度的预测程度。

1.2.6 基于 Hilbert-Huang 变换(HHT)的时频分析 食物声信号作为非线性非平稳信号, 在使用快速傅里叶变换(FFT)处理时误差较大^[23]。在本研究中, 采用 HHT 作为声信号的频率分析手段, 与传统方法不同, 它适用于处理非线性非平稳信号。HHT 不受海森堡不确定度的影响, 在时域和频域都能达到比 FFT 更高的精度^[24], 这使得 HHT 适用于食物声信号。它可以有效地揭示隐藏在动态信号中的非平稳和非线性特征^[25]。HHT 由经验模态分解(EMD)和希尔伯特变换两部分组成。EMD 根据信号的局部特征将信号分解为模态函数。通过 MATLAB 将信号分解为多个模态函数的叠加, 可以更好地表征非线性和非光滑信号的动态^[26]。

采用 HHT 分析方法, 利用 EMD 从样本碎片的声信号中得到各 IMF(Intrinsic Mode Function, 固有模态函数)分量的瞬时频率能量分布, 并利用 MATLAB 将数据转换成完整的时频能量分布图(图 2)。根据 1000 Hz 将能量区间划分为 0~20000 Hz^[27], 并根据希尔伯特谱计算各频段的能量。计算总能量在该频段内的能量占比。若所得比例超过 80%, 则认为属于高频区间。低于此阈值的能量分配到低频区间。

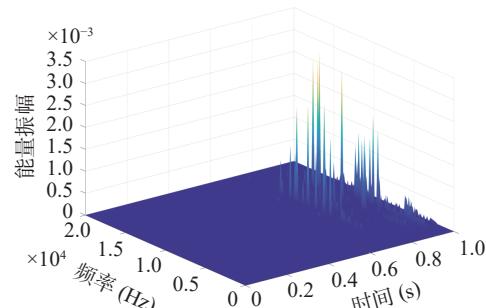


图 2 时频能量分布图示例

Fig.2 Example of time-frequency energy distribution diagram

1.2.7 低频区间下的声学相关性分析 低通滤波器(Low-pass filter)是一种电子滤波器, 它允许低频信号通过, 而阻止或减弱高频信号的通过。由于食品破碎声信号属于非稳态信号, 本研究选用有限脉冲响应(FIR)滤波器^[9], 对不同样品的声信号进行过滤, 只保留低频区间信号。对获取的低频区间声信号进行声学特征提取和相关性分析, 方法参考 1.2.4 及 1.2.5。

1.3 数据处理

每个实验重复 5 次, 结果以均数±标准差表示。对提取的声学特征进行 Pearson 相关分析, 观察各声学特征与感官评价分数的相关性。 $P < 0.05$ 被认为具有统计学意义。所有统计分析均使用 IBM SPSS Statistics 27 进行。

2 结果与分析

2.1 感官人员的选拔

根据 AIB 测试结果, 流心蛋卷、卧龙锅巴、玉米脆片和脆脆鲨四种样品的平均脆度值分别为 21024.38、1993.44、293.87、3600.13 g, 差异较大。表 2 为 42 名受试者感官结果的 F 值, 由 Friedman 秩和检验近似临界值表可知 P 、 J 、 $\alpha(4, 3, 0.01)$ 对应的临界值为 8.20^[28]。42 名受试者中有 30 人 F 值大于 8.20, 即认为四种类型的样本具有可分辨的感官脆度差异, 说明样本的选择是成功的。然而, 使用 AIB 测试的顺序与感官结果有显著差异。因此, 描述饼干类产品脆度值的 AIB 标准可能不适用于膨化食品。

表 2 42 名受试者感官结果的 F 值

Table 2 F-values of sensory results for 42 subjects

受试者编号	F值	受试者编号	F值	受试者编号	F值
1	8.1	15	8.1	29	8.1
2	9	16	9	30	9
3	9	17	9	31	9
4	9	18	9	32	8.1
5	9	19	8.1	33	8.1
6	9	20	9	34	5.4
7	8.1	21	9	35	9
8	9	22	9	36	9
9	9	23	9	37	9
10	9	24	9	38	9
11	9	25	9	39	9
12	9	26	9	40	8.1
13	9	27	9	41	8.1
14	9	28	8.1	42	8.1

表 3 显示了 30 名脆性分化能力较好的受试者的感官脆度方差值。当方差过小时, 评审员的感官分数可能区分度较低, 而方差过大时, 评审员的感官分数可复现性可能较差, 因此选取与样本平均方差 ($S=135.96$) 偏差较小的 2、4、6、10、12、16、20、27、31、37 号受试者(男女比例为 1:1)组成感官评估组。

表 3 30 名受试者感官脆度值的方差

Table 3 Variance of sensory crispness values for 30 subjects

受试者 编号	方差	受试者 编号	方差	受试者 编号	方差
2	98.91±9.94	13	336.66±18.34	25	69.66±8.34
3	58.66±7.65	14	24.66±4.96	26	20.66±4.54
4	150.91±12.28	16	111.33±10.55	27	146.66±12.11
5	241.58±15.54	17	96.25±9.81	30	37.66±6.13
6	137.58±11.72	18	3.58±1.89	31	155±12.44
8	253.58±15.92	20	149.66±12.23	35	94.25±9.7
9	49.66±7.04	21	249.58±15.79	36	44.25±6.65
10	149.58±12.23	22	276.91±16.64	37	178.91±13.37
11	59.58±7.71	23	299.58±17.3	38	200.91±14.17
12	102.91±10.14	24	8.91±2.98	39	270.91±16.45

2.2 样品感官评价结果

表 4 展示了 10 种样品的感官评价分数。评价分数及其标准偏差提供了每个样本感官质量的定量

测量。标准偏差表明评价人员对产品的口味或质地有不同的期望, 为正常个体差异。仙贝获得最高的感官评分 (56.9 ± 2.42), 具有较理想的脆度。这可能归因于仙贝在烘焙过程中形成的薄而脆的质地。相比之下, 脆升升原味薯条的得分 (43.0 ± 5.73) 略低于仙贝, 这可能基于两种产品不同加工方式导致的差异。脆升升薯条采用油炸工艺制成, 而旺旺仙贝制作采用烘焙工艺, 因此脆升升薯条在破碎时会有更湿润的口感。香蕉脆卷 (33.4 ± 4.14) 较于红薯片 (39.5 ± 6.92) 得分较低, 一方面可能是由于其较厚的质地使其在咀嚼破碎时产生大而硬的碎块, 导致“脆度”评价不理想。另一方面, 香蕉脆卷表面可能覆有糖涂层, 增加了破碎所需的力量, 降低了感官脆度评分。而嘉顿饼干 (18.6 ± 3.63) 的脆度评分较低, 可能是由于其成分和烘焙方法使其具有更紧密的咬合力, 导致口感偏硬。因此在考虑产品开发时, 应综合考虑涂层厚度或水分含量等因素。质地的一致性对于消费者的饮食体验至关重要, 其影响消费者是否会重复购买该产品。根据感官小组的描述, 声音分贝通常与“干脆性”相关, 目前多通过力学特性来表征, 而声学信号特征值更多偏向于“酥脆性”的表征。具有较高“酥脆性”的样品在破碎时发出的声音不具有尖锐性, 而红薯片、香蕉脆卷和嘉顿饼干等样品破碎时的声音较为尖锐, 其质地更多体现为“硬”的力学特性; 而青稞米棒 (13.6 ± 2.00) 和流心蛋卷 (24.1 ± 3.90) 得分较低, 可能是因为在口腔咀嚼过程中的非均匀破碎导致。此外, 旺旺仙贝和海苔米饼在成分、结构和含水量等方面几乎一致, 但仙贝获得了更高的分数, 这可能意味着在评价同类型样品的脆度时, 感官小组更青睐体积较小的样品。

表 4 10 种样品感官评价分数

Table 4 Sensory evaluation scores of 10 samples

样品	感官分数
旺旺仙贝	56.9±2.42
海苔米饼	52.1±3.80
脆升升原味薯条	43.0±5.73
红薯片	39.5±6.92
香蕉脆卷	33.4±4.14
脆虾片	29.2±4.83
流心蛋卷	24.1±3.90
卧龙锅巴	21.5±2.21
嘉顿饼干	18.6±3.63
青稞米棒	13.6±2.00

2.3 麦克风录制距离

图 3 为声信号能量随麦克风放置距离的变化情况。信号能量反映了声信号的强度, 随着放置距离的减小, 能量逐渐增加。此外, 在 2 cm 的记录距离处测得的能量值有较大的误差值, 这可能是由于麦克风与声音信号源之间的距离较近造成的声染色效应^[29]。因此, 选择 4 cm 作为声信号采集距离。

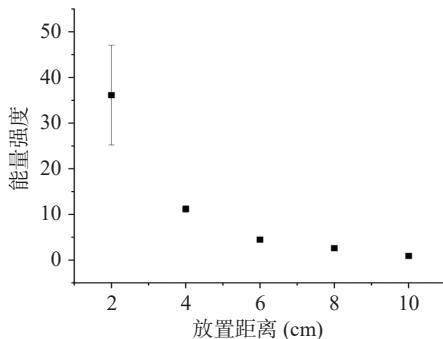


图 3 不同记录距离下的信号能量强度

Fig.3 Acoustic signal energy intensity at different recording distances

2.4 声信号去噪

图 4 显示了仙贝的原始声信号经过六次小波分解后的波形。图中 S 代表原始声信号, An 代表小波分解 n 次后的低频部分, Dn 代表第 n 次分解的高频部分, 横坐标表示信号采样点数, 纵坐标代表声信号振幅。第 6 次分解信号 A6 幅值的低频部分下降到 0.04, 表明没有明显的有用信息。D6 波形的高频部分更偏向 A6, 被舍弃^[30]。因此, 小波分解次数为 5 次。

2.5 声特征提取结果

表 5 为不同种类食物的声学特性与感官分数的 Pearson 相关矩阵。瞬态特征 E_{\max} (与感官分数的相关系数 0.440) 和 t (与感官分数的相关系数 -0.242) 受不同样品间结构差异较大的影响, 相关性和重现性较差。能量释放集中在较短的周期内, 如图 2 所示。

Ave(与感官分数的相关系数 0.410) 作为整个过程的度量, 在除以时间坐标后, 与感官分数组值没有显著相关性。此外, 人们感知食物声音信号的方式不仅包括空气传输, 还涉及骨传导等复杂的多模态传输, 这对感知食物声压级也有很大的影响。线性距离(与感官分数的相关系数 0.542) 作为幅值差(与感官分数的相关系数 0.518) 绝对数值表示, 二者在全频率区间下有着极显著的相关性($r=0.946, P<0.01$), 但其与感官上的脆度未表现出良好的相关性。

脉冲因子(与感官分数的相关系数 0.937, $P<0.01$) 和峭度(与感官分数的相关系数 0.889, $P<0.01$) 显示出与不同种类食物感官脆度之间极显著的相关性。这表明, 虽然结构的变化会影响总能值, 导致大部分特征参数发生变化, 但膨化食品的能量释放特征保持一致。较脆的食物释放的能量会产生突然而不稳定的信号。尽管 pulseF 和 K_4 在声信号中作为定量量没有实际的物理意义, 但趋势变化表明, 样品越脆, 能量释放过程中的偶然性信号越不规则, 但峰值变得更尖锐、更集中^[31]。当结构不同时, 空腔尺寸分布也会明显不同。样品抵抗破碎而产生振动时, 释放的总能量存在显著差异。观察局部声学特征或直接平均所有声学特征的适用性较差, 而描述声能释放模式的抽象参数则具有相对稳定的性能。因此, 从能量相关性的角度对提取方法进行优化, 食品的声学特征可能具有更好的相关性。

2.6 基于 HHT 的能量迁移分析

表 6 给出了不同感官脆度值的样品在不同频率

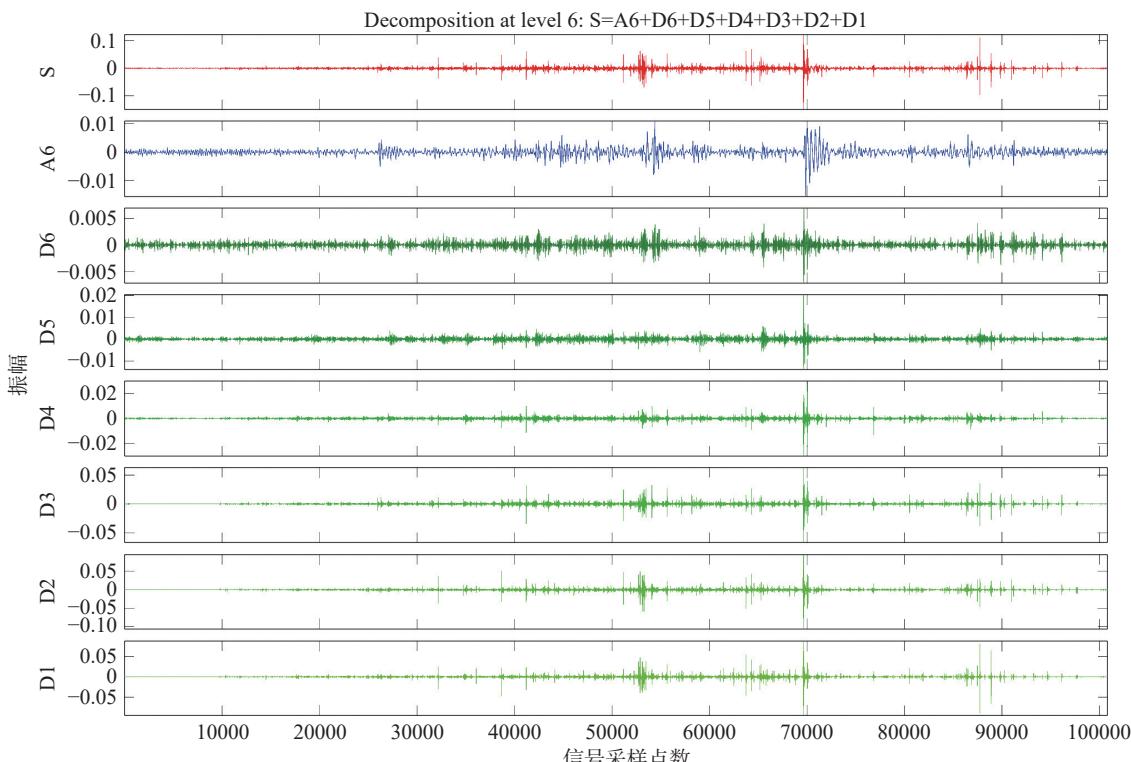


图 4 仙贝原始声信号经六次小波分解后波形

Fig.4 Waveform of Senbei original acoustic signal with six wavelet decomposition

表 5 全频率下不同样品声学特性与感官分数 Pearson 相关性矩阵

Table 5 Pearson correlation matrix between acoustic characteristics and sensory score of different samples at full frequency

指标	SS	E	E_{max}	D	pluseF	K_4	t	CP	Ave	LD
SS	1									
E	0.842**	1								
E_{max}	0.440	0.537	1							
D	0.518	0.645*	0.922**	1						
pluseF	0.937**	0.767**	0.457	0.464	1					
K_4	0.889**	0.859**	0.654*	0.656*	0.821**	1				
t	-0.242	0.015	-0.120	0.045	-0.138	-0.401	1			
CP	0.095	-0.079	0.153	0.297	0.062	0.034	0.189	1		
Ave	0.410	0.137	0.089	0.188	0.184	0.454	-0.630	0.393	1	
LD	0.542	0.605	0.903**	0.946**	0.432	0.702*	-0.163	0.258	0.402	1

注: *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$, 表7同。

表 6 不同样品在不同频率范围内的相对能量比

Table 6 Relative energy ratios of different samples in different frequency ranges

频率区间(Hz)	样品									
	旺旺仙贝	海苔米饼	脆升升薯条	红薯片	香蕉脆卷	脆虾片	流心蛋卷	卧龙锅巴	嘉顿饼干	青稞米棒
0~1k	0.15	0.10	0.37	0.27	0.22	0.25	0.55	0.26	0.35	0.17
1k~2k	0.04	0.08	0.11	0.04	0.07	0.01	0.05	0.06	0.04	0.03
2k~3k	0.07	0.10	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.09	0.07	0.07
3k~4k	0.05	0.09	0.14	0.07	0.09	0.11	0.05	0.07	0.08	0.08
4k~5k	0.13	0.09	0.03	0.07	0.08	0.09	0.04	0.04	0.06	0.10
5k~6k	0.13	0.09	0.05	0.08	0.09	0.11	0.08	0.08	0.09	0.10
6k~7k	0.09	0.12	0.06	0.07	0.09	0.02	0.02	0.04	0.03	0.06
7k~8k	0.11	0.08	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06	0.06	0.03
8k~9k	0.02	0.07	0.06	0.03	0.04	0.03	0.02	0.05	0.04	0.05
9k~10k	0.04	0.07	0.04	0.06	0.05	0.05	0.03	0.08	0.05	0.08
10k~11k	0.05	0.05	0.02	0.07	0.05	0.06	0.02	0.05	0.04	0.09
11k~12k	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.04	0.02	0.04
12k~13k	0.02	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03
13k~14k	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01
14k~15k	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02
15k~16k	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01
16k~17k	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
17k~18k	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
18k~19k	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
19k~20k	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
能量占比总和	0.80	0.81	0.81	0.84	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82	0.85

注: 灰色阴影表示不同样品的低频区间上限值。

范围及其低频范围(旺旺仙贝、海苔米饼和嘉顿饼干(8001~9000 Hz)、脆升升薯条(6001~7000 Hz)、红薯片、脆虾片和青稞米棒(10001~11000 Hz)、香蕉脆片和卧龙锅巴(9001~10000 Hz)、流心蛋卷(5001~6000 Hz))内的相对能量比。膨化食品的声信号能量主要集中在低频范围, 其声信号的高频占比较低, 其与希尔伯特-黄图谱(图 2)表现出的趋势相一致。这也进一步解释了为何过于尖锐的声音会使感官小组给予更低的分数(2.2 节)。当膨化食品在口中破碎时, 低频、密集、不均匀的信号会使人产生“酥脆”的口感评价。表中样品排列以感官脆度分值由高到低进行顺序, 可以发现随着样品感官脆度分值的下降, 不同样本的低频区间与感官脆度分值的变化趋势无明显相关性。这可能是由于破碎过程中不同样品的微观结构和振动频率决定了其能量释放的主频区

间。该现象同样为 2.5 节中当结构发生变化时一些声学特性不再适用提供了依据。随脆度逐渐降低, 不同样品的低频区间和高频区间能量分布并未呈现出规律性, 这可能需要进一步对低频或高频区间应用新的信息处理方式和统计分析手段以探究能量分布方式与样品感官脆度的关系。另外, 不同样品在破碎过程中释放的能量总量具有较大差异, 这可能是结构不同导致的很多声学特征不再适用。因此在应用声学特征评价不同结构产品时, 对其声学特征进行归一化处理可能会有更好的效果。

表 7 显示了在低频区间记录的声学特征与不同样本的感官分数之间的相关性。从表中可以看出, 并非每个变量在不同样本中都与感官评价分数高度相关。例如, t、CP、Ave 与感官脆度的相关性均小于 0.5。Ave 可能受多模传输的影响相关性较差, 而 t、

表 7 低频区间下不同样品声学特性与感官分数 Pearson 相关矩阵

Table 7 Pearson correlation matrix between acoustic characteristics and sensory score of different samples at low frequency range

指标	SS	E	E_{\max}	D	pluseF	K_4	t	CP	Ave	LD
SS	1									
E	0.966**	1								
E_{\max}	0.687*	0.726*	1							
D	0.896**	0.879**	0.704*	1						
pluseF	0.976**	0.925**	0.625	0.893**	1					
K_4	0.951**	0.940**	0.744*	0.928**	0.968**	1				
t	0.011	-0.082	0.347	0.094	-0.095	-0.075	1			
CP	0.095	0.007	0.124	-0.245	0.119	0.027	0.019	1		
Ave	0.410	0.338	-0.022	0.177	0.458	0.401	-0.431	0.393	1	
LD	0.711*	0.742*	0.640*	0.737*	0.708*	0.751*	-0.094	0.123	0.360	1

CP 在食物声释放过程中更倾向于表达局部结构特征, 不同样品的结构差异可能是主要原因。此外, 对比(仅评估低频时)表 7 与表 5, LD 与感官脆度的相关性从 0.542(不显著)上升到 0.711(显著), E 与感官脆度的相关性从 0.842(极显著)上升至 0.966(极显著), D 与感官脆度的相关性从 0.518(不显著)上升至 0.896(极显著)。结合 pluseF 和 K_4 与感官脆度的极显著相关性, 这表明对整体特征进行评价并归一化后的声能特征在评价不同产品时可能会有更好的表现。此外, 低频声能特征与感官评分的相关性高于全频声能特征。这可能是由于在记录声信号时无法避免环境噪声, 而小波去噪的效果有限。高频区间的能量主要来自环境声, 而低频区间的能量主要来自食品破碎振动释放的能量。因此, 全频记录方式可能会对声学特性产生一定干扰, 而低频记录方式可以消除环境高频信号的干扰, 提高信噪比, 从而提高声能特性与感官脆度值的相关性。

3 结论

本研究通过 Friedman 和方差排序检验筛选出具有高分辨脆度能力的个体, 并通过 Pearson 分析验证膨化食品的声学能量特征与感官脆度值之间的相关性。研究发现较脆的膨化食物释放的能量会产生突然而不稳定的信号, 为食品声学属性的最佳记录频率区间的快速计算提供了一种方法。在分析一种新型食品的感官脆度和预测消费者的反应时, 首先记录其在 44100 Hz 下的声音信号。然后使用 HHT 对能量区间进行切片并确定其低频区间, 在此频率区间提取声学特征来分析声学相关性。由于不同膨化食品的微观结构不同, 其低频区间与感官脆度没有明显的联系, 但在低频区间录制的声信号的能量特征与感官脆度的相关性更高。

本研究创新性地将能量切分信息处理手段与膨化食品感官评价相结合, 揭示了声学信号能量特征与感官脆度之间的关联。并提出“低频区间”的概念, 建立了一种快速寻找膨化食品声信号最佳录制频率区间方法, 为食品质量控制提供了新的研究思路和方法。但由于研究局限性, 提取样本种类过少, 本方法

应用在评估其他类型食品脆度时的适用性还有待验证。且尚未深入探讨声学信号与感官脆度关联的微观机理, 限制了对相关原因的深入理解。未来可以扩大样本规模和引入更多不同类型的食品样品, 以验证研究结论的普适性和可靠性。同时, 可以结合先进的成像技术和微观分析手段, 深入探究食品微观结构与声学特性之间的关系, 从而揭示声学信号与感官脆度之间的更深层次联系。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- VAN HECKE E, ALLAF K, BOUVIER J M. Texture and structure of crispy-puffed food products part ii: Mechanical properties in puncture[J]. *Journal of Texture Studies*, 1998, 29(6): 617–632.
- LIN Y H T, HAMID N, SHEPHERD D, et al. Sound pleasantness influences the perception of both emotional and non-emotional foods[J]. *Food Research International*, 2022, 162: 111909.
- VICKERS Z M. Relationships of chewing sounds to judgments of crispness, crunchiness and hardness[J]. *Journal of Food Science*, 1982, 47(1): 121–124.
- VICKERS Z M. Pleasantness of food sounds[J]. *Journal of Food Science*, 1983, 48(3): 783–786.
- ZAMPINI M, SPENCE C. Assessing the role of sound in the perception of food and drink[J]. *Chemosensory Perception*, 2010, 3(1): 57–67.
- KÖRZENDÖRFER A. Vibrations and ultrasound in food processing-Sources of vibrations, adverse effects, and beneficial applications-An overview[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 324: 110875.
- SALVADOR A, VARELA P, SANZ T, et al. Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(3): 763–767.
- LASHGARI M, IMANMEHR A, TAVAKOLI H. Fusion of acoustic sensing and deep learning techniques for apple mealiness detection[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(6): 2233–2240.
- 张金阁. 香梨果肉脆度的力声同步法检测研究[D]. 石河子:

- 石河子大学, 2022. [ZHANG Jing. A study on the force sound synchronous method for detecting the fragility of pear flesh[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.]
- [10] GREGERSEN S B, POVEY M J W, KIDMOSE U, et al. Identification of important mechanical and acoustic parameters for the sensory quality of cocoa butter alternatives[J]. *Food Research International*, 2015, 76: 637–644.
- [11] SADEGHI R, LIN Y, PRICE W J, et al. Instrumental indicators of desirable texture attributes of French fries[J]. *LWT*, 2021, 142: 110968.
- [12] DIAS-FACETO L S, SALVADOR A, CONTI-SILVA A C. Acoustic settings combination as a sensory crispness indicator of dry crispy food[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(2): 232–241.
- [13] TANIWAKI M, KOHYAMA K. Fast Fourier transform analysis of sounds made while swallowing various foods[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(4): 2478–2482.
- [14] ANDREANI P, DE MORAES J O, MURTA B H P, et al. Spectrum crispness sensory scale correlation with instrumental acoustic high-sampling rate and mechanical analyses[J]. *Food Research International*, 2020, 129: 108886.
- [15] LIU Y X, CAO M J, LIU G M. 17-Texture analyzers for food quality evaluation[M]. ZHONG J, WANG X. Evaluation technologies for food quality. Woodhead Publishing, 2019: 441–463.
- [16] DEMPSTER R, OLEWNICK M, SMAIL V. American Institute of Baking, 1213 Bakers Way, Manhattan, KS 66502[C]//Using Cereal Science and Technology for the Benefit of Consumers: Proceedings of the 12th.
- [17] VARELA P, SALVADOR A, FISZMAN S. On the assessment of fracture in brittle foods II. Biting or chewing?[J]. *Food Research International*, 2009, 42(10): 1468–1474.
- [18] BERTELSEN A S, ZENG Y, MIELBY L A, et al. Cross-modal effect of vanilla aroma on sweetness of different sweeteners among Chinese and Danish consumers[J]. *Food Quality and Preference*, 2021, 87: 104036.
- [19] OSADCHIY A, KAMENEV A, SAHAROV V, et al. Signal processing algorithm based on discrete wavelet transform[J]. *Designs*, 2021, 5(3): 41.
- [20] GOUYO T, MESTRES C, MARAVAL I, et al. Assessment of acoustic-mechanical measurements for texture of French fries; Comparison of deep-fat frying and air frying[J]. *Food Research International*, 2020, 131: 108947.
- [21] DE BELIE N, DE SMEDT V, DE BAERDEMAEKER J. Principal component analysis of chewing sounds to detect differences in apple crispness[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 18(2): 109–119.
- [22] 刘洋. 基于断裂声音信号的胡萝卜质地评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016. [LIU Y. Texture evaluation of carrot based on fracture sound signal[D]. Changchun: Jilin University, 2016.]
- [23] MARUYAMA T T, ARCE A I C, RIBEIRO L P, et al. Time-frequency analysis of acoustic noise produced by breaking of crisp biscuits[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86(1): 100–104.
- [24] 王慧. HHT 方法及其若干应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011. [WANG H. Research on HHT method and some applications[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.]
- [25] SOUZA U B de, ESCOLA J P L, BRITO L da C. A survey on Hilbert-Huang transform: Evolution, challenges and solutions[J]. *Digital Signal Processing*, 2022, 120: 103292.
- [26] RATO R T, ORTIGUEIRA M D, BATISTA A G. On the HHT, its problems, and some solutions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(6): 1374–1394.
- [27] PAN Z, ATUNGULU G G, WEI L, et al. Development of impact acoustic detection and density separations methods for production of high quality processed beans[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(3): 292–300.
- [28] SHELDON M R, FILLYAW M J, THOMPSON W D. The use and interpretation of the Friedman test in the analysis of ordinal-scale data in repeated measures designs[J]. *Physiotherapy Research International*, 2010, 1(4): 221–228.
- [29] HALMRAST T. Orchestral timbre: Comb-filter coloration from reflections[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 232(1): 53–69.
- [30] NGUI W K, LEONG M S, HEE L M, et al. Wavelet analysis: Mother wavelet selection methods[C]//Applied Mechanics and Materials, 2013, 393: 953–958.
- [31] MÜLLER R A J, VON BENDA-BECKMANN A M, HALVORSEN M B, et al. Application of kurtosis to underwater sound[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(2): 780–792.