

食品脆度评价方法研究进展

黄佳玲, 曹嘉莹, 骆开璇, 高林, 陈梦玲, 刘洋*

(常熟理工学院 生物与食品工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘要: 脆度是食品质地评价中的重要属性,也是消费者非常关注的食品质量指标之一。作者分析总结了近几十年来力学评价、声音信号评价以及感官评价等食品脆度评价方法的研究进展。结论如下:1)力学评价具有较高的准确度和稳定性,但不同模式下结果也会存在不同,单独用此方法评价食品脆度不够准确;2)声音信号评价能更客观地对脆性食品产生的声音信号进行分析、评价,但也存在信号采集不稳定、易受外界噪声干扰等问题,若结合力学评价、感官评价,将能更好地评价食品脆度;3)感官评价直观、简便,但对评价人员要求高且主观性较强,容易出现偏爱型误差,需要更科学的客观评价方法进行辅助评价。该文可以为探寻最佳、通用的食品脆度评价方法提供一定线索。

关键词: 食品脆度;力学评价;声音信号评价;感官评价

中图分类号:TS 207.7 文章编号:1673-1689(2023)03-0012-08 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.03.002

Research Progress on Evaluation Methods of Food Crispness

HUANG Jialing, CAO Jiaying, LUO Kaixuan, GAO Lin, CHEN Mengling, LIU Yang*

(School of Biology and Food Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

Abstract: Crispness is an important attribute in the evaluation of food texture, and it is also one of the food quality indicators that consumers pay close attention to. This paper analyzed and summarized the research progress of food crispness evaluation methods such as mechanical evaluation, sound signal evaluation and sensory evaluation in recent decades. Following conclusions were achieved. 1) The mechanical evaluation has a high accuracy and stability. However, different results are conducted under varied modes. Thus, it is not accurate enough to evaluate the food brittleness only through this method. 2) The evaluation of sound signal can objectively analyze and evaluate the sound signal generated by the brittle food, however, there are also problems such as the unstable signal collection, easy interference from the external noise, and so on. If the mechanical evaluation and sensory evaluation are combined, the evaluation of food crispness will be better realized. 3) Sensory evaluation is intuitive and simple, but the evaluators are under high requirements and subjective, and it is easy for them to give biased errors. More scientific and objective evaluation methods are needed to assist the evaluation. This paper can provide some clues for exploring the best and universal evaluation method of food crispness.

Keywords: food crispness, mechanical evaluation, sound signal evaluation, sensory evaluation

收稿日期: 2022-07-31

基金项目: 常熟理工学院博士启动基金项目(KYZ2020045Q);2022年江苏省大学生创新训练项目(202210333085Y)。

*通信作者: 刘洋(1984—),男,博士,副教授,主要从事食品质量评价方面的研究。E-mail:liuyang84@126.com

脆度是食品质地评价的一个重要指标,是一种有利于人们享受食物的积极属性,会直接影响人们对食品的喜爱程度^[1]。食品的脆度表现在食品自身所具有的声音特征以及消费者用牙齿咀嚼食品时对听觉和触觉的综合感知^[2],常被称为“内在声音”^[3],如吃薯片的“嘎嘣声”等。“内在声音”为食物提供了更多的声学线索和信息,是评价食品品质的一个重要标志,比如消费者经常通过咀嚼的“清脆声”来衡量食品的“酥脆性”。研究表明,与听着喝咖啡的声音品评土豆片相比,听着清脆的吃土豆片的声音品评土豆片,受试者产生的愉悦感更强^[4]。也就是说,消费者接收到愉悦的听觉线索之后,对食物风味的感受会增强^[5]。

大多数研究将食品脆度定义为:食品进口后在牙齿及口等其他器官作用下咬碎样品时所需要的力、产品破碎时的崩溃过程、碎裂的声音、破碎后碎块的分布情况等。虽然仍未有较为统一、明确、通用的食品脆度评价方法,但现有研究主要围绕食品的力学特性、声学特性、感官特性3个维度对食品脆度进行评价。脆度与压缩食物裂成小块所需的机械力有关,这与结构是否易断裂或断裂的脆性有关,因此在部分研究中食品脆度是以力学指标的形式体现的。但也有更多学者认为,食品脆度隶属于感官属性,因此通常会采用感官评价方法对食品脆度进行评价^[2,6-7]。此外,脆性食品在被咀嚼或断裂过程中释放的声音信号,一定程度上也能用来进行食品脆度的客观评价^[4,8-9]。作者综述了近几十年来食品脆度定义的发展变化及脆度评价方法的演变历程,为探寻更科学、接受度更高、更贴近日常生活的食品脆度评价方法奠定理论基础。

1 脆性食品的分类

食品的微观结构对食品脆度有显著的影响。以未经加工的高水分含量的果蔬为例,研究发现细胞圆形度、孔隙密实度、细胞等效直径对质构特性都有显著影响^[10]。同时,采用激光扫描共聚焦显微镜(confocal laser scanning microscope, CLSM)对微观结构分析表明,随贮藏时间的延长,细胞的间距增大、细胞黏附性下降,相应地带来苹果断裂韧度与剪切能的变化^[11-12]。加工后的脆性食品,如薯片、饼干等,其结构与苹果等未经加工的食品原料存在显著差异,水分的去除使其结构中充满大量的空

腔,进而对食品的脆度产生显著影响^[13]。一个复杂结构的食品中,细胞、化学键、杂质和裂纹的排列都会影响食品脆度。因此,为了便于评价食品脆度,可以根据水分含量将脆性食品大致分为湿脆性食品与干脆性食品两类。细胞中含有较多水分的为湿脆性食品,如苹果、胡萝卜等;水分含量较少且结构中含有大量空腔的为干脆性食品,如薯片、饼干等^[13-14]。

1.1 干脆性食品

干脆性食品一般是指食品原料经过煎炸、烘焙、挤压等特殊工艺加工后形成的内部充满网格空腔的食品,如膨化食品等加工产品。干脆性食品一般不具备生物活性,当充满空气的网格空腔结构受到外力作用破坏而产生声音信号,声音信号源较为简单,仅与食品加工后的结构、加工特性等因素息息相关。当牙齿咬断干脆性食品时,空腔壁几乎不产生弯曲而直接破碎,破碎后残留的空腔壁及碎片有恢复原有状态的趋势,这一过程中产生振动效应,咀嚼干脆性食品时产生的声波即来源于此^[15]。多数研究均证实^[16-18],原料与加工方法的改变均会对干脆性食品的微观结构产生影响。而干脆性食品的微观结构则是影响其脆度的重要因素。

1.2 湿脆性食品

湿脆性食品指具有膨胀的植物活细胞的水果及蔬菜等农产品,如苹果、胡萝卜、芹菜等。与干脆性食品不同,湿脆性食品的脆性产生机理可以用细胞模型进行解释:当受到外力作用时,细胞破裂,内容物迅速膨胀而产生声音,每个声音对应于一个细胞或一组细胞的破裂。因此,农产品的水分、糖、果胶等营养物质的含量会影响细胞的坚实度,进而对农产品的脆度产生影响。经贮藏后,果蔬细胞中的多种营养物质会逐渐损失而导致萎蔫现象,使脆度下降^[10-12]。有关果蔬产品的细胞尺寸、细胞间隙与断裂韧性、断裂能高度的实验表明,对于蔬菜类的湿脆性食品,水分是影响其脆度最重要的因素,水可以通过改变细胞壁中液体的向外压力,进而增大细胞壁的反作用力,从而影响脆度^[19-20]。王明慧等测试了土豆、地瓜、胡萝卜和白萝卜等果蔬的水分质量分数与质构断裂力,相关性分析结果表明,随着水分质量分数的减少,食物的断裂能力直线下降。在水分质量分数大约下降到8%时,马铃薯的声音信号已不能被明显捕捉^[21]。

2 脆度评价方法

食品脆度的评价方法总体可以归纳为力学评价、声音信号评价和感官评价3类。3种评价方法的

基本信息见表1。3种方法各有优劣,所以在实验中经常被结合使用,从而充分发挥每种方法的优势,使脆度评价方法更加精准和完善。

表1 食品脆度评价的3种主要方法

Table 1 Three evaluation methods of food crispness

评价方法	定义	特点
力学评价	力学评价研究的是食品的力学特性,包括质量、应力、硬度、振动以及冲击作用下的各种响应等,用质构仪来进行评价	优点:客观、稳定、操作简便 缺点:不同测试模式影响较大,仅从力学一个角度评价脆度,过于单一
声音信号评价	食品在受到外力的作用时会由于振动、破裂等机械特性变化而产生声音信号,对声音信号进行采集处理,研究产生的声音信号特征值与食品脆度之间的相关性	优点:客观,更贴近食品脆度的感官特性,易于获取、较为方便 缺点:声音信号获取不够稳定,易受外界噪声影响,仅从声学一个角度评价脆度,过于单一
感官评价	感官评价是能通过视觉、嗅觉、触觉、味觉和听觉进行产品感官特性评价的一种科学方法	优点:操作简单、灵敏度高、直观准确 缺点:易受人们的喜好、情绪、环境等因素的影响

2.1 力学评价

食品的力学特性评价作为判断食品质量的重要研究方法,已经被普遍应用于食品质量检测中,主要通过质构仪来进行检测。其使用范围广泛,可以用于果蔬、肉制品、谷类、糖类、粮油等各类食品的质地分析,包括硬度、脆度、黏性、拉伸强度等多种指标。根据制备样品的特点,常见的质构仪测试模式包括压缩模式、剪切模式和穿刺模式(见图1)。

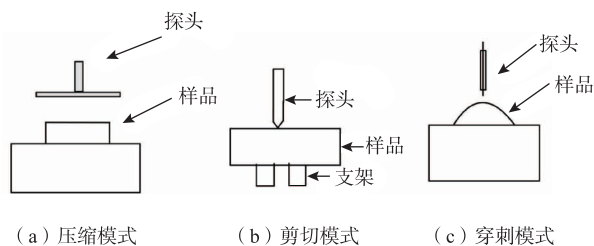


图1 食品质地力学测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical test of food texture

压缩模式是食品质地评价中较为常用的方式,按照压缩周期分为单循环压缩与二次循环压缩。其中的二次循环压缩也被称为全质构测试(texture profile analysis, TPA)模式,通过模拟人的咀嚼行为对食品质地进行测定。经过二次循环压缩后可以绘制样品的TPA曲线(见图2)。Bourne等通过TPA得到力学曲线图,计算曲线与横坐标形成的曲面面积、部分曲面面积的比值以及样品断裂需要的最大

力等指标,推算出样品的硬度、脆度、弹性、黏性、内聚性、胶黏性、回复性等多种质地指标^[22]。在第一次压缩过程中,样品在完全断裂之前会出现显著破裂力(图2中虚线部分),此力的峰值就定义为样品的脆度(断裂性)。国内外研究学者利用TPA模式,从获得的力学曲线图中提取多种力学参数特征值,从而实现了对食品脆度的力学评价^[23-24]。胡璇等利用压缩模式评价剁椒的脆度,发现压缩模式下测得的力峰值能很好地表征剁椒的脆度^[25]。Arimi等利用力学方法评价饼干脆度,结果证实力的峰值与饼干脆度呈现正比例关系^[26],而这一结论也在苹果、胡萝卜等其他农产品的脆度评价中得到证实^[27-28]。因此,利用压缩模式测试样品获得的部分力学参数,可以有效地评价食品脆度。压缩模式更偏向于模拟食物在人口腔中臼齿位置的咀嚼过程,而人在真实的咀嚼过程中,门齿咬断食物才是判定食品脆度的第一步,该过程更接近剪切模式。

剪切模式是另外一种常见的力学测试模式,该方法模拟了样品被门齿咬断的过程,用于测量样品硬度和剪切力等机械性能(见图1(b))。国内外多项有关采用该模式评价食品脆度的研究中,都将食品脆度描述为:当用门齿第一次咬断脆性食品时,产生伴有高频声音的清脆断裂,以及第一口咬断时感觉到的力。食品脆度是力、声的结合,即短的咬合声和长时间的爆裂声^[29-30]。孟陆丽等使用TA-XT2i物理性能分析仪对梨子进行质构检测,结果表明,剪

切实验曲线很好地反映了梨子的脆度^[31]。刘洋研究发现,剪切模式下测定的胡萝卜硬度与脆度呈现出良好的相关性^[32]。

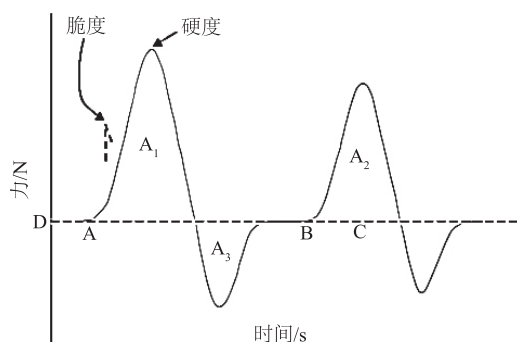


图2 TPA 质地测试曲线图^[22,32]

Fig. 2 TPA texture test curve^[22,32]

穿刺模式也常用于评价样品的质地。该方法主要模拟人牙齿刺穿样品的过程(见图1(c))。张平等利用穿刺模式对沙窝萝卜进行质构特性研究,结果表明沙窝萝卜的屈服力、平均硬度和脆性等5项指标能够较好地反映出沙窝萝卜质地^[33]。Chang等对采收时和冷藏8周后的苹果进行穿刺测定和感官评价,证实了穿刺模式下的力学指标对苹果脆度的预测能力^[12]。

但在实际的应用中,针对不同类型食品脆度进行测定,应根据材料的性质、类型、特性和形状选用不同的测定模式,不同模式得出的结论可能也会存在差别。力学评价方法虽然具备客观、稳定等优势,但不同测试模式对结果影响较大。仅从力学一个角度,在一定程度上不能准确地评价食品脆度。

2.2 声音信号评价

声学方法因成本低、无危害、无污染、灵敏度高、适应性强的特点,特别适用于农产品质量评价和分类。通过分析食品受外力作用产生的声音信号,可以实现对食品质量的检测,如食品分级、食品质地特性测定、食品成熟度测定等多种有效应用(见表2)。Taniwaki等通过声音信号对6种卷心菜的质构特征进行了定量分析,结果显示不同品种的卷心菜质构指标值存在差异^[34]。Jakubczyk等通过力学方法和声学方法测量了含有不同添加物的复合挤压谷物产品的质构特性,结果发现,与添加了果冻的食品相比,添加奶油的食品较脆,而添加果冻的产品更加有韧性^[35]。吕吉光等用手机采集不同成熟度哈密瓜的拍打声信号并进行分析,通过对哈密

瓜的未熟、适熟和过熟3种成熟度判别结果的混淆矩阵分析,确定最适合判别哈密瓜成熟度的指标^[36]。

表2 声音信号评价的应用

Table 2 Application of sound signal evaluation

实验方法	实验对象	应用	参考文献
声音信号评价方法	卷心菜	食品分级	[34]
	谷物产品	食品质地特性测定	[35]
	哈密瓜	食品成熟度测定	[36]

声音信号在食品脆度评价中同样发挥着至关重要的作用。当脆性食品受到外力咬合或敲击力的作用时,食品结构会发生断裂或振动而释放出特定的声音信号。声音信号中某些特征值可以直接反映出脆性食品的脆度强弱。按照施加外力作用的不同,可以将食品产生的声音信号分为断裂声音信号、咀嚼声音信号及振动声音信号。

2.2.1 断裂声音信号 食品的断裂声音信号多利用质构仪测定食物质地时采集,具体采集流程见图3。利用声音信号分析理论,可以从采集到的食品断裂声音信号中提取出不同的特征值,并将特征值与食品脆度进行有效分析,从而探索利用断裂声音信号评价食品脆度的方法。张子涵等采用质构仪测定薯片断裂时的硬度和脆度,并采集、分析了断裂声音信号,从而建立脆度与声学特征的关系^[37]。刘洋采用时域分析与希尔伯特黄变换理论共同提取食品断裂声音信号的时域、频域特征值,对食品断裂声音信号时域、频域的特征值变化情况进行了有效分析,从而基于断裂声音信号对胡萝卜脆度进行评价^[32]。胥慧丽等建立了一套基于机械压缩与声学性能测试的实验平台,对3种马铃薯干脆片的脆度进行评价,对薯片在机械压缩到破裂过程中的力学和声学特征进行了分析,并从声学对薯片进行了脆性分类^[9]。通过断裂声音信号可以有效地评价食品脆度,但该方法多是通过质构仪等测试仪器获取声音信号,采集不够便利。

2.2.2 咀嚼声音信号 与断裂声音信号相比,咀嚼声音信号获取途径更为便利。当人们咀嚼食物的时候,可以直接利用声音信号传感器或手机等便携设备采集咀嚼声音信号,进而分析与食品脆度相关性较好的声音信号特征值,以对食品脆度进行评价。1965年,Drake首次利用声音信号检测食品品质,并将普通面包、脆皮面包、饼干等18种食物的声学特

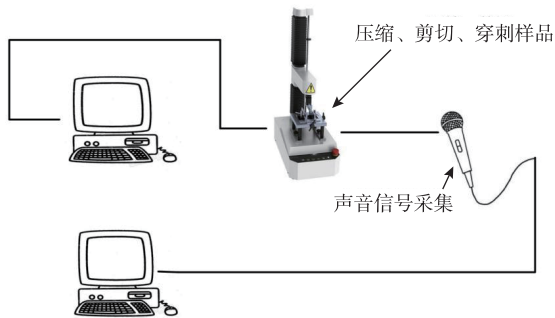


图3 断裂声音信号采集流程

Fig. 3 Fracture sound signal acquisition process

征进行对比,发现咀嚼不同的食物时,在声音的振幅、频率等方面存在差异,进而得出脆性与食物被咀嚼、挤压时发出的声响有关^[38]。而这一发现也促使国内外诸多学者开始尝试利用咀嚼声音信号评价干脆性及湿脆性食品的脆度。

咀嚼干脆性食品过程中,食品物料无论是受到门齿还是臼齿的咬合力破坏,释放的声音信号都能很好地评价脆度。Zampini 等的实验中,受试者用门牙咀嚼 180 个薯片,由评价人员通过耳机接收声音反馈并对其脆度进行评定,研究发现,当声音较大时,评价人员觉得薯片更脆、更新鲜;反之,评价人员会觉得薯片比较软^[8]。于立波同时针对 3 种干脆性食品,采集受试者咀嚼干脆性食品时的声音信号和骨振动信号,对信号进行分析研究,提取信号时域、频域特征值,并综合声音信号和骨振动信号特征值构建干脆性食品脆度识别与预测模型,为研究干脆性食品脆度提供新方法^[39]。

湿脆性食品的结构虽然与干脆性食品不同,但咀嚼声音信号同样可以用于食品脆度的评价。有研究者采用主成分分析法对咀嚼时产生的声音进行了分析,以便区分不同品种苹果的脆度,结果显示,在正常贮藏和缺氧贮藏状态下,通过苹果的咀嚼声可以很好地分辨出苹果的脆度^[40]。孙钟雷等利用声级仪对磨牙、切齿下的声音信号进行声学分析,获取了声波的变化曲线以及落峰时间、咀嚼周期、差值 3 项指标,发现差值与感官得分之间存在极强的相关性,且相关系数大于 0.900,符合脆性实验的精度^[41]。

但无论是断裂声音信号还是咀嚼声音信号,都是在食品物料受到外力破坏或断裂后产生的,属于破坏性检测方法。而非破坏性的振动声音信号是否

也可以用于食品脆度的评价呢?

2.2.3 振动声音信号 当物体受到外力撞击时会产生相应的振动声音信号。振动声音信号的传导与物体本身的硬度、脆度、水分等指标息息相关。因此,根据振动声音信号的部分特性可鉴别出某些物体的属性变化或缺陷,从而实现无损检测。该方法主要应用于农产品的质量评价(见表 3)。毛建华通过声学探测设备的敲击声和声学参数分析对麒麟瓜的声学特性参数进行了提取,并对其成熟度进行了初步预测^[42]。Taniwaki 等采用激光多普勒振动仪测量了梨的二次振动共振频率,从而实现对梨成熟度的无损检测^[43]。潘秀娟应用敲击共振无损检测法与质构仪穿孔实验对苹果质地进行检测,研究表明二者可以共同反映苹果的硬度^[44]。Abbaszadeh 等利用敲击西瓜产生的声音信号并采用频率响应函数方法,确定了西瓜的硬度^[45]。Subedi 等将声波与可见光相结合,以检测各类水果的脆度,研究发现脆度与破损检测参数相关性良好,芒果、桃子的渗透仪和声速检测结果都很差($R^2 < 0.75$),香蕉的渗透仪检测结果例外($R^2 = 0.76$),不建议用可见短波近红外交互光谱技术来评估水果的脆度^[46]。Iwatani 等采用振动声音信号分析方法,将 9 种葡萄划分为脆、比较脆和不脆 3 个类别,并成功量化了果肉的质构特性^[47]。该方法虽然可以应用于农产品的脆度评价,实现无损检测,但大多数都仅限于湿脆性的农产品,而不适用于以加工食品为主的干脆性食品脆度评价。

表 3 食品脆度的振动声音信号评价方法

Table 3 Vibration sound signal evaluation method for food crispness

实验对象	实验方法	测量指标	参考文献
麒麟瓜、梨	敲击共振法	成熟度	[42-43]
苹果、西瓜	敲击共振法	硬度	[44-45]
香蕉、芒果、桃子	渗透仪,声波与可见光结合	脆度	[46]

综上,虽然采用断裂声音信号评价的结果较为准确、可靠,但采集需要质构仪等仪器辅助,不够便携且破坏性较大,无法实现无损检测。而振动声学无损检测法可以检测农产品结构的变化,而且还能用于预测内部品质,减少对产品的破坏,但应用范围较为局限。采用咀嚼声音信号进行评价虽然也是破坏性的分析方法,但本身也是食品脆度评价中的重要参考依据,且信号采集较为方便,应用范围较

为广泛。只是尚未统一该方法的采集、分析流程,若能解决上述问题,将可以与感官评价技术结合使用,更为有效地评价食品脆度。

2.3 感官评价

感官评价是食品质量评价中应用最为广泛的主观评价方法,具有操作简单、灵敏度高、直观、准确等优点。虽然采用感官评价法评价食物的质量时,由于人们的喜好、情绪及环境等因素的影响而呈现较低的准确性,但是在评价食物的质量时,感官评价依然是一个不容忽视的重要指标。当人们咀嚼食物时,会发生一系列的改变,其中包括食物的变形、流动、混合、温度、大小、形状和粗糙程度等。这些用仪器测量很困难,都需依靠人类敏锐的感官来感知。因而许多新食品的开发^[50]、配方工艺的改良^[51]、农产品的快速检测^[52]等都是用感官评价的方法来辅助进行。因此,大多数对食品脆度的评价也多采用感官评价方法进行,常用的感官评价方法包括评分法、描述分析法以及排序法。

2.3.1 评分法 感官评分法被认为是商业领域中最有效的评价方法之一,一般由专业评价人员依据评分标准对样品进行打分。由于食品脆度评价目前缺少相应的行业标准,大多数研究中多采用评分法进行评价。

目前研究中对食品脆度的评价多采用9点评价法,感官评价人员从咀嚼食品产生的力、声和断裂性3个维度对食品脆度进行打分,评分标准见表4^[32,39,51]。脆度最终得分为3个维度得分的平均值。孙钟雷等采用评分法对食品脆度进行评价分级,并探索咀嚼模拟系统对食品脆度评价的准确性,此外利用此方法对胡萝卜、花生、薯片、饼干、榨菜等食品的脆裂声音与食品脆度的关系进行了研究^[41,51]。刘洋等采用9点评价法对胡萝卜的脆度进行评价,并发现断裂声音信号可以用于评价胡萝卜的脆度^[32]。于立波也利用了9点评价法对饼干、薯片等干脆性食品的脆度进行评价,构建了基于骨传导声音信号的干脆性食品脆度评价方法^[39]。

2.3.2 定量描述分析法 定量描述分析方法是指评价员对构成样品感官特征的各个指标强度进行完整、准确地评价。该方法已经广泛应用于各类食品的感官评价中^[52]。食品脆度的定量描述分析方法是让受试者咀嚼食品,根据建立的脆度定量标准进行描述,总结得出脆度评价结果。有研究者利用定量

表4 食品脆度感官评分表

Table 4 Sensory score scale of food crispness

评价维度	描述
力	磨牙咀嚼时的力。最大值为9分,最小值为1分
声	咀嚼样品时产生的声音。声音大、脆、音调较高为9分,最小值为1分
断裂性	磨牙咀嚼后样品的断裂程度。样品断裂较少为9分,断裂较多为1分

描述分析法对7种面包的22个属性进行评估^[53]。何引等以阿克苏红富士苹果为研究对象,参考有关苹果量化描述的感官评定方法,从脆度、纤度、咀嚼时的粒度等角度建立了阿克苏红富士苹果的定量描述分析方法,构建了适宜的描述参数和参照物、标度设置等^[54]。顾熟琴等参考国外的质地描述分析方法,在量值估计法的基础上对现行量值估算方法进行了改进,利用15 cm的直尺测量了描述词语和样本的自由量值。根据中国的实际情况,选取了国内有一定市场需求的知名品牌食品作为样本,选定了硬度、黏附力、脆性、咀嚼性4大指标。在对参考体系评估、统计等方法的基础上,对其进行了较为详尽地阐述,并初步形成了一套符合我国实际的质地特性参考体系^[55]。目前,感官评价仍然是非常重要的食品脆度评价方法,但感官评价主观性较强、操作较为复杂,即使评价人员均经过培训,个体与个体之间的感知差异仍无法消除,需要后期经过多次数据处理减少误差。但若结合部分力学、声学等仪器辅助分析,将会大大提高食品脆度评价的准确性。

3 展望

目前的食品脆度评价方法优缺点都较为突出。1)力学评价具有较高的准确度和稳定性,但不同模式下结果也会存在不同。力学评价上,质构仪操作方便且效率高,但是要根据食品特性选择适宜模式且噪声等干扰项较多。2)声音信号评价能更客观地对脆性食品产生的声音信号进行分析、评价,但也存在信号采集不稳定、易受外界噪声干扰等问题,若在后续研究中将这些问题解决,结合力学评价、感官评价,将能更好地用于评价食品脆度。随着现代科学技术的发展和更多传感器的出现,声学方法的应用必将越来越广泛。3)感官评价直观、简便、应用广泛,但对评价人员要求高,该方法主观性较强,

容易出现偏爱型误差。为克服感官评价的局限性,具有快速、科学、客观特点的仪器分析法可以弥补感官评价中存在的局限性。作者分析近几十年来有

关食品脆度的研究现状,清晰地阐述了食品脆度的定义及评价方法的演变历程,为探寻最佳、通用的食品脆度评价方法提供一定的线索。

参考文献:

- [1] BELKOVA B, HRADECKY J, HURKOVA K, et al. Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil[J]. **Food Chemistry**, 2018, 241: 51-59.
- [2] 周婷, 莫小明, 查志华, 等. 基于力声信号锯齿化多特征融合的香梨脆度评价[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 305-312.
- [3] 余习德, 张小娟, 鲁成, 等. 声音影响饮食行为: 实证进展与理论构思[J]. *心理科学进展*, 2017, 25(6): 955-969.
- [4] SEO H, HUMMEL T. Auditory-olfactory integration: congruent or pleasant sounds amplify odor pleasantness[J]. **Chemical Senses**, 2011, 36(3): 301-309.
- [5] FELIPE R C, QIAN W, RAYMOND V, et al. The influence of soundscapes on the perception and evaluation of beers[J]. **Food Quality and Preference**, 2016, 52: 32-41.
- [6] 戈振扬. 食品脆性和酥性的物理特征[J]. *云南农业大学学报*, 1992(2): 116-121.
- [7] VALLÈS-PÀMIES B, ROUDAUT G, DAAREMONT C, et al. Understanding the texture of low moisture cereal products: mechanical and sensory measurements of crispness[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2000, 80: 1679-1685.
- [8] ZAMPINI M, SPENCE C. The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips[J]. **Journal of Sensory Studies**, 2004, 19: 347-363.
- [9] 胥慧丽, 吴中华, 董晓林, 等. 马铃薯片脆性的力学和声学测量[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 22-27.
- [10] 侯聚敏. 基于微观结构和模态分析的苹果质地研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [11] ALVAREZ M D, SAUNDERS D, VINCENT J. Fracture properties of stored fresh and osmotically manipulated apple tissue[J]. **European Food Research and Technology**, 2000, 211(4): 284-290.
- [12] CHANG H Y, VICKERS Z M, TONG C B S. The use of a combination of instrumental methods to assess change in sensory crispness during storage of a "Honeycrisp" apple breeding family[J]. **Journal of Texture Studies**, 2018, 49(2): 228-239.
- [13] TUNICK M H, ONWULATA C I, THOMAS A E, et al. Critical evaluation of crispy and crunchy textures: a review [J]. **International Journal of Food Properties**, 2013, 16(5): 949-963.
- [14] 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.
- [15] CHAUVIN M, YOUNCE F, ROSS C, et al. Standard scales for crispness, crackliness and crunchiness in dry and wet foods: relationship with acoustical determinations[J]. **Journal of Texture Studies**, 2008, 39(4): 345-368.
- [16] LEE W E, DEIBEL A E, GLEMBIN C T, et al. Analysis of food crushing sounds during mastication: frequency-time studies[J]. **Journal of Texture Studies**, 1988, 19(1): 27-38.
- [17] RODRIGUEZ-GARCIA J, LAGUNA L, PUIG A, et al. Effect of fat replacement by inulin on textural and structural properties of short dough biscuits[J]. **Food and Bioprocess Technology**, 2013, 6(10): 2739-2750.
- [18] LYU J, YI J Y, BI J F, et al. Impacts of explosion puffing drying combined with hot-air and freeze drying on the quality of papaya chips[J]. **International Journal of Food Engineering**, 2017, 13(2): 1-22.
- [19] ALVAREZ M D, SAUNDERS D E J, VINCENT J F V. Fracture properties of stored fresh and osmotically manipulated apple tissue[J]. **European Food Research and Technology**, 2000, 211(4): 284-290.
- [20] HOU J, SUN Y, CHEN F, et al. Analysis of microstructures and macrottextures for different apple cultivars based on parenchyma morphology[J]. **Microscopy Research and Technique**, 2016, 79(4): 304-312.
- [21] 王明慧. 基于声音信号的食品脆度鉴别研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [22] BOURNE M C. *Food texture and viscosity*[M]. New York: Academic Press, 2002, 183-185.
- [23] 解伟妮, 陈建杨. 食品脆度的客观表征及其通用测量公式的研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(3): 150-152.
- [24] 黄碧竹. 基于声音信号食品脆性检测方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [25] 胡璇, 夏延斌, 邓后勤. 利用质构仪测定剁椒脆度方法的研究[J]. *辣椒杂志*, 2010, 8(3): 39-43.
- [26] ARIMI J M, DUGGAN E O, OSULLIVAN M et al. Effect of water activity on the crispiness of a biscuit (Crackerbread):

- mechanical and acoustic evaluation[J]. **Food Research International**, 2010, 43(6):1650-1655.
- [27] LIU Y, HUANG B Z, SUN Y H, et al. Relationship of carrot sensory crispness with acoustic signal characteristics[J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2015, 50(7):1574-1582.
- [28] LIU Y, CAI M, ZHANG W, et al. Feasibility of non-destructive evaluation for apple crispness based on portable acoustic signal [J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2021, 56:2375-2383.
- [29] DUIZER L. A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures[J]. **Trends in Food Science and Technology**, 2001, 12:17-24.
- [30] VOONG K Y, NORTON-WELCH A, MILLS T B, et al. Understanding and predicting sensory crispness of deep-fried battered and breaded coatings[J]. **Journal of Texture Studies**, 2019, 50(6):456-464.
- [31] 孟陆丽, 张谦益, 吴洪华, 等. 剪切实验测试梨果肉质地研究[J]. 食品工业科技, 2006, 27(11):55-57.
- [32] 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.
- [33] 张平, 李志文, 王莉, 等. 基于穿刺测试的沙窝萝卜质构特性分析[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(10):196-199.
- [34] TANIWAKI M, SAKURAI N. Texture measurement of cabbages using an acoustical vibration method[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2008, 50(2):176-181.
- [35] JAKUBCZYK E, GONDEK E, TRYZNO E. Application of novel acoustic measurement techniques for texture analysis of co-extruded snacks[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2017, 75:582-589.
- [36] 吕吉光, 吴杰. 基于智能手机声信号哈密瓜成熟度的快速检测[J]. 食品科学, 2019, 40(24):287-293.
- [37] 张子涵, 冯涛, 梁义, 等. 薯片断裂声学特性与硬度、脆度相关性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(12):27-30.
- [38] DRAKE B K. Food crushing sounds: comparisons of objective and subjective data[J]. **Journal of Food Science**, 1965, 30(3):556-559.
- [39] 于立波. 干脆性食品咀嚼过程中振动信号的分析研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [40] 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.
- [41] 孙钟雷, 张长平, 段建礼, 等. 咀嚼脆裂声音与食品脆性的关系研究[J]. 食品科技, 2017, 42(6):95-98.
- [42] 毛建华. 西瓜成熟度和内部空心的声学检测技术及装置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [43] TANIWAKI M, HANADA T, TOHRO M, et al. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2008, 51(3):305-310.
- [44] 潘秀娟. 苹果采后质地变化的破坏与非破坏检测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
- [45] ABBASZADEH R, RAJABIPOUR A, YING Y, et al. Nondestructive determination of watermelon flesh firmness by frequency response[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2015, 60(1):637-640.
- [46] SUBEDI P P, WALSH K B. Non-invasive techniques for measurement of fresh fruit firmness[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2009, 51:297-304.
- [47] IWATANI S, YAKUSHIJI H, MITANI N, et al. Evaluation of grape flesh texture by an acoustic vibration method[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2011, 62(3):305-309.
- [48] FELFOLDI Z, RANGA F, SOCACI S A, et al. Physico-chemical, nutritional, and sensory evaluation of two new commercial tomato hybrids and their parental lines[J]. **Plants**, 2021, 10(11):1-27.
- [49] 王喜庆, 尹超, 石俊姣. 模糊数学感官评价法优化玉米面条制作工艺[J]. 通化师范学院学报, 2022, 43(4):111-116.
- [50] 项丹丹, 王云冰, 陈梦微, 等. 不同草莓品种果实品质的感官指标评价[J]. 中国蔬菜, 2022(4):62-66.
- [51] 孙钟雷. 基于咀嚼模拟的食品质地评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [52] 陈梦玲, 权英, 詹月华. 食品感官评价项目化教程[M]. 南京: 南京大学出版社, 2016.
- [53] GARCIA-GOMEZ B, FERNANDEZ-CANTO N, VAZQUEZ-ODERIZ M L, et al. Sensory descriptive analysis and hedonic consumer test for Galician type breads[J]. **Food Control**, 2022, 134:1-9.
- [54] 何引, 朱丽霞, 卫鑫. 阿克苏红富士苹果感官定量描述分析方法的构建[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(13):4347-4351.
- [55] 顾熟琴, 段慧玲, 赵镭, 等. 建立食品质地参照物体系中量值估计法的改进[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(1):95-100.