

牟阳, 孙安. 数据融合技术在水果品质无损检测中的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 1-8. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100141

MU Yang, SUN An. Research Progress of Data Fusion Technology in Nondestructive Testing of Fruit Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 1-8. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100141

·特邀主编专栏—人工智能在食品工业中的应用（客座主编：闵巍庆、郭志明、朱金林）·

数据融合技术在水果品质无损检测中的研究进展

牟 阳¹, 孙 安^{1,2,*}

(1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川宜宾 644000;
2. 人工智能四川省重点实验室, 四川宜宾 644000)

摘要: 在水果品质无损检测中, 单一数据源得到的信息往往不够全面, 无法充分表征被测对象的相关信息, 导致检测精度较低。通过数据融合的方式将多个数据源协同互补, 可获得更丰富的信息, 在一定程度上改善检测结果的精度。目前数据融合技术已广泛应用于水果各方面指标的检测中, 具有良好的发展前景。文章总结了数据融合的方式、特点及其在水果检测领域的应用情况, 并结合当前的研究现状对数据融合技术在水果检测中的发展趋势进行展望。

关键词: 数据融合, 水果, 无损检测, 品质, 光谱

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)22-0001-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100141

本文网刊:



Research Progress of Data Fusion Technology in Nondestructive Testing of Fruit Quality

MU Yang¹, SUN An^{1,2,*}

(1. School of Automation & Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering,
Yibin 644000, China;
2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin 644000, China)

Abstract: In fruit quality non-destructive testing, information derived from a single data source often falls short in providing a comprehensive representation of the subject under scrutiny, resulting in lower accuracy in detection. Integrating multiple data sources through data fusion allows for a more comprehensive information set, enhancing the precision of the assessment to a certain extent. Currently, data fusion techniques are widely adopted in evaluating various aspects of fruits, holding promising prospects for further development. The article summarizes the methods, characteristics, and applications of data fusion in fruit assessment, and anticipates the future trends of this technology in the fruit detection domain by combining existing research findings.

Key words: data fusion; fruit; nondestructive examination; quality; spectrum

我国是水果生产大国, 果树种植面积和水果产量均居世界前列^[1]; 同时, 我国也是人口大国, 水果需求量的下限极高, 市场基础良好。随着经济发展, 人民生活水平提升, 对水果的需求量也在不断上升^[2]。在产量和需求量的双重作用下, 水果品质与安全检测

愈发重要。

传统的人工和半机械半人工检测方式由于效率低、准确度不足等原因已难以满足产业的需求。随着计算机、物理、材料等领域的发展, 诞生了一系列利用声、光、电、磁技术检测水果内部成分含量以及

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 四川省科技计划项目 (2021YFSY0060); 人工智能四川省重点实验室开放基金项目 (2018RYJ05)。

作者简介: 牟阳 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 智能检测, E-mail: 895355337@qq.com。

* 通信作者: 孙安 (1982-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 智能检测, E-mail: sunan@suse.edu.cn。

外部特征的方法^[3]。其中电子鼻、光谱技术、计算机视觉等无损检测技术凭借其高效、快速、无损的优势被广泛应用于水果品质检测中。与破坏性检测不同,无损检测不需要损坏样品便可完成检测过程,因此可以对产品进行逐件检验,最大程度确保整体品质,这对水果生产具有重要意义。

目前相关研究中通常仅使用单一检测技术来获取样品数据,这样得到的数据相对片面,无法充分表征被测对象的信息,因而在检测中容易引起误判,尤其是在多指标同时检测时,更加难以达到精度要求。通过数据融合技术将多个不同的数据源结合互补,从理论上讲可以弥补单一检测方法的不足,获得更丰富的信息,从而提升检测结果的准确率和稳定性。类似于人类和其他动物对外界事物的感知,结合眼、鼻、耳获取到的图像、气味、声音等信息进行综合判断通常会得到比基于单一信息更可靠的结果。文章总结了数据融合技术的融合方式、特点及其在水果检测领域中的应用,以期在水果检测技术的发展提供参考。

1 水果品质检测常用参数

水果品质包括内部品质(如可溶性固形物含量、酸度、糖酸比等)与外观品质(如尺寸、表面缺陷、形状和色泽等),这些参数决定了水果的口感与经济价值。目前,数据融合技术已应用于以下水果品质参数的检测中:**a.成熟度:**根据营养物质含量和外观形态大致可以将水果成熟期划分为三个阶段,即采收成熟期、食用成熟期及生理成熟期^[4]。不同成熟期对应的生长阶段不同,所呈现出的品质也有所不同。采收成熟期的水果已完成营养物质的积累,体积不再增大,达到了其采收条件,但此时口感和外观表现还未达到最佳状态,适用于长途运输和储存,并不完全适合鲜食。食用成熟期的水果食用口感以及外观表现均已达到最佳状态,适合鲜食和产地销售,但此时不再适合长途运输和储存;而生理成熟期的水果内部种子已充分成熟,表皮起皱,甚至出现果肉腐烂变质以及种子发芽的现象,失去了其食用价值^[5]。在运输和销售过程中,不同成熟度的水果混装往往也会带来不必要的麻烦。因此,探索快速、准确、无损的水果成熟度检测方法对水果采摘、储存、运输、销售等方面都具有重要意义;**b.可溶性固形物与硬度:**可溶性固形物是水果中所有水溶性化合物的总称,以糖类为主,还包含维生素、有机酸和矿物质等,其含量是衡量水果内部品质最重要的参数之一;硬度与果胶含量有关,随着果胶酶的分解,其强度会逐渐降低^[6];二者决定了果实的口感和风味,常作为水果的采收标准,在《DB61/T 1117-2017 猕猴桃采收技术规程》《NY/T 1086-2006 苹果采摘技术规范》等技术规范中均有提到;**c.尺寸:**尺寸是水果分级的重要参数,也是决定水果价值的重要因数。以红富士苹果为例,通常按最大横断面直径进行分级,形成了市面上常见的 80、

90 mm 苹果,其售价与果径成正比;**d.存放时间:**水果采摘后随着存放时间的增长,其口感、营养成分会随之变化,甚至发生果肉腐烂、内部种子发芽等现象。由于在一定贮藏期内水果外观变化不会特别明显,仅凭肉眼难以准确辨别;**e.损伤情况:**在水果的生长、采摘、运输过程中难免会出现病变、挤压、碰撞等现象。这些损伤往往发生在果皮下,短时间内表面看起来与正常果实差异不大。但随着贮存时间的增长,损伤区域会比正常区域先发生褐变甚至腐烂,若没能及时清理,腐烂滋生的微生物还会影响周围的正常水果,加快其变质速度,造成更大的损失;**f.农药残留:**许多水果的高产都离不开农药的辅助,但农药摄入量过多会对人类的身体健康产生影响甚至危及生命。因此在水果进入市场或加工前进行农药残留量检测是非常必要的;**g.产地:**适宜的地理环境和气候条件赋予了当地水果独特的风味,将同样的果树移植到别的地区,即使能够开花结果也难以复刻出相同的味道。经过长期经营,部分地区的特产水果已深入人心,倍受好评,市场需求量急剧上升,导致不法商贩以外形相似但内部成分以及口感风味相差甚远的其他产区水果来以次充好、以假乱真。消费者从外观上难以辨别,即侵害了消费者的权益也会使原产地积累的口碑受损。

2 数据融合中常用的无损检测技术

经过多年的发展,将光谱、传感器等技术结合化学计量学方法对水果各指标进行定性定量分析已成为一个相对成熟的体系,在水果检测行业中得到广泛应用。目前,用于数据融合技术中的水果品质无损检测技术主要有近红外光谱、中红外光谱、高光谱成像技术、电子鼻、计算机视觉技术等。

2.1 近、中红外光谱

红外光谱按波段可以划分为近红外光谱和中红外光谱等,通常将 780~1100 nm 波段范围称为近红外光谱,将 1100~2526 nm 称为中红外光谱。近红外光谱主要表征的是物质分子中含氢基团(C-H、N-H、O-H 等)的合频与倍频跃迁,中红外光谱主要反映物质分子的基频振动。二者都能提供物质的分子结构和组成状态等信息,具有快速、无损、高效等特点,可以用来对具有成分差异的物质进行模式识别研究^[7-8]。Eisenstecken 等^[9]采用近红外光谱结合二次判别分析(Quadratic Discriminant Analysis, QDA)较好地地区分了来自三个不同海拔地区的苹果。Li 等^[10]利用近红外光谱对苹果的品种进行了研究,以连续投影算法(Successive Projections Algorithm, SPA)筛选特征变量后建立的极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)分类模型在预测集可以达到 97.67% 的识别率。Agulheiro-Santos 等^[11]利用近红外光谱技术对草莓可溶性固形物进行了定量分析,通过偏最小二乘回归算法(Partial Least Squares Regression, PLSR)建立的预测模型相关系数为

0.9277。Hssaini 等^[12] 尝试将中红外光谱与 PLSR 结合对无花果果皮与果肉中酚酸和黄酮类化合物含量进行预测, 结果表明该方法具有一定可行性。近、中红外光谱技术作为一种成熟的无损检测方法, 为水果品质的检测提供了一种高效、准确的解决方案。未来随着数据处理算法的改进, 有望实现其他精细化指标的检测, 进一步提升水果品质检测的水平。

2.2 高光谱成像技术

高光谱成像结合了成像技术和光谱技术两个方面的内容, 其采集的数据由二维空间信息以及一维光谱信息构成, 能够反应出待测样品的形状、颜色、纹理等外部特征和内部分子结构、组成状态等信息^[13]。Liu 等^[14] 采用高光谱成像技术对草莓机械损伤和真菌感染进行识别, 准确率为 92.59%, 表明该方法具有识别缺陷草莓的潜力。Wang 等^[15] 基于高光谱成像技术对苹果硬度、可溶性固形物含量进行预测, 通过稳定性竞争自适应重新加权采样 (Stability Competitive Adaptive Reweighted Sampling, SCARS) 提取特征波长后建立 PLSR 模型, 预测模型的相关系数分别为 0.783、0.901。该检测技术在获取水果信息的同时不会对其造成物理损伤或污染, 确保了样品的完整性。将其集成到自动化生产线上, 可实现对水果品质的实时监测与控制, 对大规模生产和高效率的质量管控具有重要意义。

2.3 电子鼻

电子鼻是一种模仿生物嗅觉机理研制的新型检测仪器, 由传感器阵列, 信号处理和模式识别模块三部分组成。具有操作简单、检测速度快、便携、无需对样品做前处理及实验重复性好等优点^[16]。电子鼻的传感器阵列可对特定的挥发性化合物产生指纹响应, 结合模式识别算法能起到较好的识别效果^[17]。杨晨昱等^[18] 通过电子鼻结合多层感知器 (Multi-Layer Perceptron, MLP) 神经网络对苹果霉心病进行识别, 所建模型正确识别率为 86.2%, 可以较好的分辨出病变苹果。刘旭等^[19] 开发了一种基于虚实融合微热板气体传感器阵列的电子鼻系统用于监测苹果在贮藏期间的气味信息, 结合 K 最近邻 (K-Nearest Neighbor, KNN) 算法可以很好的识别出瑕疵苹果, 最高识别率达 98.3%。Du 等^[20] 从电子鼻响应信号中提取

特征后采用随机森林算法 (Random Forest, RF) 分别建立了猕猴桃成熟度、可溶性固形物含量以及硬度的预测模型; 结果表明, 电子鼻信号与采后猕猴桃的成熟特性具有高度相关性, 三个预测模型的相关系数分别为 0.9928、0.9134、0.929。综上可知, 电子鼻能灵敏的感知到水果气味信息的变化情况, 基于这些信息可实现水果成熟度、病变情况等方面的分类以及部分品质指标的定量分析。

2.4 计算机视觉技术

计算机视觉技术通过图像传感器和计算机技术模拟人类的视觉功能, 以图像处理技术为核心, 从图像中提取被测物的形状、颜色、纹理等特征信息进行分析^[21]。具有高效、无损以及检测结果精度高等优点^[22], 在水果品质无损检测领域具有良好的应用前景。Sabzi 等^[23] 提取苹果图像的颜色和纹理特征后使用人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 分别建立其硬度、可溶性固形物、淀粉以及可滴定酸度的预测模型, 并根据这些理化参数判定苹果成熟度, 获得了 97.86% 的正确识别率。Nithya 等^[24] 结合计算机视觉技术与卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN) 对芒果表皮缺陷进行检测, 所建模型准确率为 98%。上述研究表明, 对于生长过程中外表特征变化明显的水果, 计算机视觉技术可以较好的识别到相关信息, 另外可以得知水果部分理化参数的含量与其外表特征具有一定的相关性。

2.5 各检测技术的特点

光谱和传感器技术等常用检测方法都具有各自的优点和局限性, 暂时未见报道证实哪种检测方法能全方位的优于其他方法。表 1 总结了各方法的特点以及在水果检测领域的应用情况。

3 数据融合的方式及特点

3.1 数据融合方式

根据数据融合阶段在整个分析过程中的位置, 可以将融合方式大致划分为三类: 数据层融合、特征层融合和决策层融合^[30]。以两个数据源为例, 其各层次的融合结构如图 1 所示。

数据层融合属于低层次的融合, 将不同来源的数据简单拼接后作为下一阶段的输入^[31]。由于数据采集时容易受到仪器噪声、外界环境等因数的影响,

表 1 各检测方法的特点比较及其应用情况

Table 1 Comparison of characteristics and application of various detection methods

方法	优势	局限性	在水果检测中的应用
近红外光谱	无损、分析速度快、适用范围广、检测效率高、可实现多种组分同时检测等	吸收信号弱、谱峰信息重叠严重、易受外界环境干扰 ^[25]	产地溯源 ^[9] 、品种 ^[10] 以及可溶性固形物含量 ^[11] 检测等
中红外光谱	检测速度快、高效、无损等	易受水的干扰, 测试灵敏度相对较低, 不适于做微量组份的测定 ^[26]	病变 ^[27] 、成熟度 ^[28] 等方面的检测
高光谱成像技术	快速、无损、精度高	信息冗余	水果外部缺陷 ^[14] 、可溶性固形物含量以及硬度等参数 ^[15] 的定性定量分析
电子鼻	无损、检测速度快、灵敏度高、低成本等	精度和抗干扰性能不足	病变 ^[18] 、硬度以及成熟度 ^[20] 等方面的检测
计算机视觉技术	高效、无损以及检测结果精度高等	难以获取物体内部信息	成熟度 ^[23] 、外观缺陷 ^[24] 、果径 ^[29] 的检测

表 2 列出了近年来这些结合方式在水果检测中的部分应用情况。

4.1 光谱结合计算机视觉技术

光谱技术可采集待测样品内部的化学成分和结构信息,计算机视觉技术能提取样品的图像特征(颜色、纹理等),将两种检测技术结合使用可以充分发挥各自的优点。在瓜果类水果检测方面,孙静涛^[38]结合光谱和计算机视觉技术对哈密瓜的成熟度进行了研究,通过 RGB(Red Green Blue)和 HSV(Hue Saturation Value)颜色空间提取了哈密瓜图像的颜色特征,以灰度共生矩阵法获得了图像的纹理特征,利用 SPA 从近红外光谱中筛选出特征波长,之后将光谱与图像的特征数据融合作为 ELM 的输入实现了对哈密瓜成熟度的检测,所建模型在预测集样本中的正确识别率高达 98%,优于使用单一数据源的结果。刘超^[41]将蜜瓜图像的颜色信息、体积和果形指数作为外部特征与其近红外光谱的特征波长结合建立了哈密瓜糖度定量模型;结果表明,融合外部特征可改善蜜瓜形态差异对光谱的影响,极大提高预测精度。

在浆果类水果检测方面,蔡德玲等^[39]通过草莓的 RGB 图像各分量获取了其色泽参数,联合蒙特卡罗无信息变量消除(Monte-Carlo Uninformative Variable Elimination, MC-UVE)和 SPA 从近红外光谱中提取特征变量,然后以最小二乘支持向量机 LS-SVM 分别建立基于光谱以及光谱融合色泽参数的草莓可溶性固形物定量模型;光谱特征变量融合色泽参数后,使模型在预测集样本中的相关系数从 0.9329 提升到 0.9885。王南南^[43]采用 LS-SVM 分别建立基于光谱特征波长以及图像特征的香蕉叶绿素含量、硬度、色泽参数(L^* , a^* , b^*)以及可溶性固形物含量预测模型,通过模糊神经网络 FNN 融合两模型的预测结果得出最终的预测值;相比之下,融合光谱和图像特征的 FNN 模型精度高于单一的光谱数据模型以及图像特征模型。

在柑橘类水果检测方面,Xu 等^[40]通过可见近红外光谱与计算机视觉融合数据实现了对萝岗橙总可溶性固形物含量的检测,采用 Savitzky-Golay 滤波器、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和 CNN 减少数据噪声、冗余信息以及提取特征变量后利用 PLSR 构建定量模型;与使用单一数据相比,明显提升了检测精度。刘燕德等^[44]采用 LS-SVM 基于光谱数据、图像特征以及二者融合数据对脐橙架货期进行识别,误判率分别为 5.33%、20%、1.33%,可见经数据融合后误判率明显降低。

在仁果类水果检测方面,倪福鹏^[42]融合外观图像与光谱信息对苹果脆性进行了研究,利用 PLS 分别基于苹果表皮 RGB 颜色分量和光谱信息建立苹果脆性预测模型,根据两模型预测结果的误差对光谱所建模型的预测值进行补偿,补偿后准确率达

90.12%,相对误差的均值以及标准差都有所下降,结果更为精确。

上述研究从多个方面验证了光谱技术与计算机视觉技术结合使用的有效性,表明光谱与图像结合不仅可以改善水果外形差异对光谱检测的影响,还可以利用水果颜色等外表特征与其品质参数之间的相关性提高检测精度。

4.2 光谱结合电子鼻技术

电子鼻通过分析待测样品散发的气味来获取其相关信息,具有类似鼻子的功能。水果往往散发着独特的果香,因而电子鼻在水果检测分析方面具有巨大潜力。与光谱技术相比,电子鼻采集的信息是截然不同的,将这两种技术结合使用也可以充分发挥它们的优势。徐赛等^[45]以不同机械损伤程度的番石榴为研究对象,通过高光谱仪和 PEN3 型电子鼻采集其高光谱反射率数据和挥发性气体信息,分别将高光谱数据、电子鼻数据以及二者融合数据进行线性判别分析,以得到的第 1 和第 2 线性判别因子作为 FCM 算法的输入数据;结果表明,数据融合后对番石榴机械损伤的识别率由高光谱的 89.74% 和电子鼻的 82.05% 提升到 97.44%,比使用单一数据具有更好的识别效果,验证了数据融合技术在提升水果机械损伤识别率方面的可行性。乔琦^[46]结合高光谱成像和电子鼻技术实现了对苹果表面多菌灵残留量的检测,分别提取各仪器所测得数据的特征后将其融合并采用遗传算法-偏最小二乘法(Genetic Algorithm-Partial Least Squares, GA-PLS)提取最终的融合特征,以经粒子群算法优化后的支持向量机进行判别;融合数据中包含了苹果图像、光谱以及气味三个方面的信息,检测精度高达 98.33%。综上可知,通过光谱以及电子鼻技术均可体现出被测样品间的差异,而数据融合策略可以将这些不同方面的差异结合,从更多角度对其进行评估,进而改善模型的性能。

4.3 多种光谱技术结合

为了获得更多待测样品的信息以及更高的准确率,将不同光谱的数据融合使用也是一种可行的方式。郭甜甜^[47]结合 FLAME-NIR 光谱仪(波段范围:900~1700 nm)和 USB2000+光谱仪(波段范围:200~1100 nm)进一步提高了基于单一仪器数据所建模型对猕猴桃可溶性固形物含量预测结果的准确性,采用竞争性自适应重加权采样法(Competitive Adaptive Reweighted Sampling, CARS)提取特征变量后通过 PLS 分别建立猕猴桃可溶性固形物定量模型,再由共识融合策略融合两个模型的预测结果得到最终结论;融合后预测集相关系数为 0.934,相比融合前两模型的 0.844 和 0.713 有了明显提升。Hu 等^[48]利用可见/近红外和短波红外高光谱成像系统检测了四种哈密瓜常用农药(虫脒,马拉硫磷,苯醚甲环唑和高效氯氰菊酯)在果皮表面的残留情况,并对比了单光谱与融合光谱在不同农药检测中的有效性;

结果表明,基于融合光谱数据结合一维卷积神经网络(1D Convolutional Neural Network, 1D-CNN)建立的模型效果相对最好,识别率达 94%。李亚惠等^[49]使用近、中红外光谱技术对黑果枸杞的产地进行了判定,利用 PCA 对原始光谱做降维处理后采用 LS-SVM 建立分类模型;相比之下,基于近、中红外光谱融合数据建立的模型识别率优于单一光谱所建立的模型,在预测集样本中识别率达 99.17%。可见使用多光谱技术获取样本数据虽会得到一些重复的信息,但依然有部分是可以互补的。近年来,多光谱技术结合应用的相关报道逐渐增多,在设备开发上,已有多光谱一体机面市。

4.4 计算机视觉技术结合电子鼻

传统的水果检测主要依赖于人工视觉,不仅费时费力还存在主观性和不稳定性。引入计算机视觉技术可以极大提高效率,减少人工操作,使检测过程更加标准化。对于生长过程中外表特征变化明显的水果,计算机视觉技术可以轻易识别到相关信息,但无法直接获取其挥发性物质的变化情况,结合电子鼻技术可以很好的弥补这一点。王俊平等^[50]对比了计算机视觉技术与电子鼻以及二者特征融合数据所建立的 LS-SVM 模型对番茄成熟度、硬度、番茄红素的预测能力;相比之下,经融合数据后模型的预测效果均有了一定程度的提升。该研究表明在图像特征的基础上结合气味特征可以弥补单一检测技术的不足,使检测结果更加可靠。

5 结论与展望

光谱技术具有快速、无损、高效等特点,能够提供物质的分子结构和组成状态等信息,是一种成熟可靠的检测方法;电子鼻和计算机视觉技术分别可以获取水果挥发性物质与外表的变化情况;将它们结合使用能充分发挥各自的优点。目前来看,以光谱技术为主其他检测技术为辅的结合方式是发展的趋势。

数据融合技术已被证实可以改善单一检测方法的局限性,得到更加可靠的判定结果,在水果品质和安全检测中具有良好的应用前景,但也还存在以下一些问题:a.数据处理以及特征提取:数据集中每个数据点对判定结果的贡献是相对的,某些数据点在单独的数据集中属于冗余信息,但当数据集中融合进新数据时便有了变化的可能性。在数据层融合和特征层融合之间如何处理这部分数据之间的关联性还需要进一步研究;b.成本和便携性:数据融合技术带来的最直观的影响便是会影响整个检测系统的体量并增加数据采集设备的成本;c.设备稳定性:一些精密设备对操作环境要求较高,易受外界环境影响,而在实际农业生产中往往是达不到这种条件的;d.融合方式的选择:由于水果成分会受地理环境等诸多因数的影响并且不同厂家生产的设备采集的数据也会有一定差异,很多标准是难以统一的,因此是否进行数据融合以及选择哪种融合方式需要根据所测对象以及

所测得数据的实际情况进行判断和尝试。

未来,在软件方面可基于已有算法开发包括多种数据处理以及融合方式的操作平台,仅需导入数据便可轻易组合,提高效率的同时也降低操作人员的知识储备门槛;在硬件方面可设计集成多种检测技术的一体化设备,提高便携性与稳定性,便于将理论研究应用到实际生产中。

© The Author(s) 2024. 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

- [1] 李赞,刘思雨,朱川,等.基于深度学习的水果识别系统设计[J].*农机化研究*,2023,45(10):187-191. [LI Y, LIU S Y, ZHU C, et al. Design of fruit recognition system based on deep learning[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(10): 187-191.]
- [2] 雷琦,周建军,邵阳.基于消失点的果树行中心线获取方法研究[J].*北京石油化工学院学报*,2022,30(3):51-56. [LEI Q, ZHOU J J, SHAO Y. Research on the method of obtaining the center line of fruit tree row based on vanishing point[J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2022, 30(3): 51-56.]
- [3] 刘非凡.水果无损检测技术综述[J].*食品安全导刊*,2023(6):136-138. [LIU F F. A review of fruit nondestructive testing technology[J]. *China Food Safety Magazine*, 2023(6): 136-138.]
- [4] 林雄,林鸿,杨炳昆,等.不同品种、成熟度带壳莲子营养品质研究[J].*食品工业科技*,2019,40(11):126-132. [LIN X, LIN H, YANG B K, et al. Nutritional quality of shelled lotus seeds in different species at different maturation stages[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(11): 126-132.]
- [5] 黎丽莎,刘燕德,胡军,等.近红外无损检测技术在水果成熟度判别中的应用研究[J].*东交通大学学报*,2021,38(6):95-105. [LI L S, LIU Y D, HU J, et al. Application of near infrared nondestructive testing technology in fruit maturity discrimination[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2021, 38(6): 95-105.]
- [6] 赵文哲,陈修德,邓文鹏,等.外源硅处理对草莓果实果胶物质降解的影响[J].*植物生理学报*,2021,57(10):1926-1936. [ZHAO W Z, CHEN X D, DENG W P, et al. Effect of exogenous silicon treatment on pectin degradation of strawberry[J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(10): 1926-1936.]
- [7] 冯海智,李龙,王冬,等.中红外及近红外光谱在小杂粮品质检测中的应用进展[J].*光谱学与光谱分析*,2023,43(1):16-24. [FENG H Z, LI L, WANG D, et al. Progress of the application of MIR and NIR spectroscopies in quality testing of minor coarse cereals[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(1): 16-24.]
- [8] 王巧,熊丰,王游游,等.红外光谱结合化学计量学鉴别西红柿的产地[J].*化学试剂*,2023,45(3):112-119. [WANG Q, XIONG F, ZHANG Y Y, et al. Identification of origin of crocus sativus by infrared spectroscopy combined with stoichiometry[J]. *Chemical Reagents*, 2023, 45(3): 112-119.]
- [9] EISENSTECKEN D, STÜRZ B, ROBATSCHER P, et al. The potential of near infrared spectroscopy (NIRS) to trace apple origin: Study on different cultivars and orchard elevations[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 123-131.
- [10] LI C H, LI L L, WU Y, et al. Apple variety identification us-

- ing near-infrared spectroscopy[J]. *Journal of Spectroscopy*, 2018, 2018.
- [11] AGULHEIRO-SANTOS A C, RICARDO-RODRIGUES S, LARANJO M, et al. Non-destructive prediction of total soluble solids in strawberry using near infrared spectroscopy[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(11): 4866–4872.
- [12] HSSAINI L, RAZOUK R, BOUSLIHIM Y. Rapid prediction of fig phenolic acids and flavonoids using mid-infrared spectroscopy combined with partial least square regression[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 429.
- [13] CHENG J H, NICOLAI B, SUN D W. Hyperspectral imaging with multivariate analysis for technological parameters prediction and classification of muscle foods: A review[J]. *Meat Science*, 2017, 123: 182–191.
- [14] LIU Q, SUN K, PENG J, et al. Identification of bruise and fungi contamination in strawberries using hyperspectral imaging technology and multivariate analysis[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 11(5): 1518–1527.
- [15] WANG F, ZHAO C J, YANG H, et al. Non-destructive and in-site estimation of apple quality and maturity by hyperspectral imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 195: 106843.
- [16] 王兴亚, 庞广昌, 李阳. 电子舌与真实味觉评价的差异性研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(1): 213–216, 220. [WANG X Y, PANG G C, LI Y. Research progress of difference between electronic tongue and real taste evaluation[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(1): 213–216, 220.]
- [17] WESOŁY M, PRZEWODOWSKI W, CIOSEK-SKIBIŃSKA P. Electronic noses and electronic tongues for the agricultural purposes[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023: 117082.
- [18] 杨晨昱, 袁鸿飞, 马惠玲, 等. 基于傅里叶近红外光谱和电子鼻技术的苹果霉心病无损检测[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(7): 211–216. [YANG C Y, YUAN H F, MA H L, et al. Nondestructive detection of apple moldy core based on FT-NIR and electronic nose technology[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(7): 211–216.]
- [19] 刘旭, 余隽, 李中洲, 等. 用于苹果品质监测的多温度扫描电子鼻系统[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(10): 72–76. [LIU X, YU J, LI Z Z, et al. Multi-temperature scanning electronic nose system for apple quality monitoring[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(10): 72–76.]
- [20] DU D D, WANG J, WANG B, et al. Ripeness prediction of postharvest kiwifruit using a MOS e-nose combined with chemometrics[J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 419.
- [21] WANG H, GU J, WANG M. A review on the application of computer vision and machine learning in the tea industry[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1172543.
- [22] 张艳丽. 新型无损检测技术在肉品品质检测中的应用[J]. *现代食品*, 2023, 29(8): 104–106. [ZHANG Y L. Application of new nondestructive testing technology in meat quality testing[J]. *Modern Food*, 2023, 29(8): 104–106.]
- [23] SABZI S, NADIMI M, ABBASPOUR-GILANDEH Y, et al. Non-destructive estimation of physicochemical properties and detection of ripeness level of apples using machine vision[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2022, 22(1): 628–645.
- [24] NITHYA R, SANTHI B, MANIKANDAN R, et al. Computer vision system for mango fruit defect detection using deep convolutional neural network[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3483.
- [25] 鲁祥凯, 杨彪, 樊保民, 等. 白酒地域特征鉴别技术研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 278–284. [LU X K, YANG B, FAN B M, et al. Advances in technologies for identification of geographical characteristics of Baijiu[J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 278–284.]
- [26] 赵秀琴. 中红外光谱分析及研究进展[J]. *安庆师范学院学报(自然科学版)*, 2012, 18(4): 94–97. [ZHAO X Q. Technology and development of middle infrared spectrometer[J]. *Journal of Anqing Normal University(Natural Science Edition)*, 2012, 18(4): 94–97.]
- [27] HILL G N, EVANS K J, BERESFORD R M, et al. Near and mid-infrared spectroscopy for the quantification of botrytis bunch rot in white wine grapes[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2013, 21(6): 467–475.
- [28] LUIZ L C, NASCIMENTO C A, BELL M J V, et al. Use of mid infrared spectroscopy to analyze the ripening of Brazilian bananas[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 42: e74221.
- [29] 李硕, 胡家坤. 基于计算机视觉的苹果在线分级[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 123–128, 153. [LI Q, HU J K. Research on apple online classification based on machine vision[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(8): 123–128, 153.]
- [30] CASTANEDO F. A review of data fusion techniques[J]. *The Scientific World Journal*, 2013: 704504.
- [31] BARBEDO J G A. Data fusion in agriculture: Resolving ambiguities and closing data gaps[J]. *Sensors*, 2022, 22(6): 2285.
- [32] 元培锋, 孟庆浩, 井雅琪, 等. 电子鼻中预处理算法选择及阵列优化[J]. *数据采集与处理*, 2015, 30(5): 1099–1108. [QI P F, MENG Q H, JING Y Q, et al. Preprocessing algorithm selection and optimization of sensor array in electronic nose[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 30(5): 1099–1108.]
- [33] BORRÀS E, FERRÉ J, BOQUÉ R, et al. Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment—A review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, 891: 1–14.
- [34] 李会. 仿生嗅觉感知下的数据降维及处理方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022. [LI H. Bionic olfactory perception: research on dimensionality reduction and processing of odor fingerprints[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.]
- [35] 王怡. 基于多特征融合的语音情感识别方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021. [WANG Y. Research on speech emotion recognition method based on multi-feature fusion[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.]
- [36] 杨巧玲, 邓晓军, 孙晓东, 等. 光谱数据融合技术在食品检测中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(18): 324–329. [YANG Q L, DENG X J, SUN X D, et al. Application and research progress of spectral data fusion technology in food testing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 324–329.]
- [37] 邓烨文, 陈喆, 付家顺, 等. 数据融合策略在食品产地溯源中的应用进展[J]. *分析化学*, 2023, 51(1): 11–21. [DENG Z W, CHEN Z, FU J S, et al. Application progress of data fusion strategy in food origin traceability[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(1): 11–21.]
- [38] 孙静涛. 基于光谱和图像信息融合的哈密瓜成熟度无损检测研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017. [SUN J T. Study on non-destructive detection of hami melon maturity based on information fusion of spectrum and image[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.]
- [39] 蔡德玲, 唐春华, 梁玉英, 等. 融合近红外光谱和颜色参数的草莓可溶性固形物含量定量分析模型构建[J]. *食品与发酵工业*,

- 2020, 46(7): 218–224. [CAI D L, TANG C H, LIANG Y Y, et al. Establishment of quantitative analysis model for detecting the soluble solids content in strawberry by merging near infrared spectroscopy and color parameters[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(7): 218–224.]
- [40] XU S, LU H, FERENEC C, et al. An accuracy improvement method based on multi-source information fusion and deep learning for tss and water content nondestructive detection in 'luogang' orange[J]. *Electronics*, 2021, 10(1): 80.
- [41] 刘超. 基于可见近红外光谱与计算机视觉信息融合的河套蜜瓜糖度检测方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014. [LIU C. Research the brix detection method of Hetao melon based on nears and machine vision information fusion[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.]
- [42] 倪福鹏. 基于光谱与计算机视觉融合的苹果脆性无损检测装置研制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020. [NI F P. Development of nondestructive detection device for apple crispness based on the fusion of spectroscopy and machine vision[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2020.]
- [43] 王南南. 基于高光谱成像技术的多指标综合决策香蕉品质等级研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. [WANG N N. Determination of banana quality levels based on hyperspectral imaging combined with multi-index comprehensive decision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.]
- [44] 刘燕德, 王舜. 基于图像和光谱融合的脐橙货架期高光谱成像无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(6): 1792–1797. [LIU Y D, WANG S. Research on non-destructive testing of navel orange shelf life imaging based on hyperspectral image and spectral fusion[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(6): 1792–1797.]
- [45] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 等. 基于高光谱与电子鼻融合的番石榴机械损伤识别方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 214–219. [XU S, LU H Z, ZHOU Z Y, et al. Identification for guava mechanical damage based on combined hyper-spectrometer and electronic nose[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 214–219.]
- [46] 乔琦. 基于高光谱-电子鼻的苹果农残自动化检测研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021. [QIAO Q. Research on automatic detection of pesticide residues in apple based on hyperspectral and electronic nose[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021.]
- [47] 郭甜甜. 基于近红外光谱和数据融合的水蜜桃内部品质检测研究[D]. 温州: 温州大学, 2020. [GUO T T. Research on internal quality inspection of juicy peach based on near infrared spectroscopy and data fusion[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020.]
- [48] HU Y T, MA B X, WANG H T, et al. Detecting different pesticide residues on Hami melon surface using hyperspectral imaging combined with 1D-CNN and information fusion[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1105601.
- [49] 李亚惠, 李艳肖, 谭伟龙, 等. 基于近、中红外光谱法融合判定黑果枸杞产地及品质信息[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3878–3883. [LI Y H, LI Y X, TAN W L, et al. Rapid identification and evaluation of lycium ruthenicum murr. by near-infrared and Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(12): 3878–3883.]
- [50] 王俊平, 徐刚. 计算机视觉和电子鼻融合的番茄成熟度检测方法[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 148–152. [WANG J P, XU G. Research on tomato maturity detection method based on machine vision and electronic nose fusion[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 148–152.]