

高光谱技术在葡萄品质无损检测应用上的研究进展

文 静¹, 马 雯^{1,2,3}, 张 昂^{3,4}, 金 刚^{1,2,3,*}, 徐国前^{1,2,*}

(1.宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021; 2.葡萄与葡萄酒教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021; 3.河北省葡萄酒质量安全检测重点实验室, 河北 秦皇岛 066000; 4.秦皇岛海关技术中心, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 葡萄生产作为农业经济的重要组成部分, 不仅具有显著的经济价值, 而且兼具广泛的社会效益。在葡萄生长过程中对浆果进行监测评估是生产高品质葡萄浆果的重要保证。传统检测技术费时费力且具有破坏性, 而以高光谱为代表的无损检测技术成功解决了这一难题。本文主要概述高光谱检测技术在葡萄浆果外形测量、化学物质检测、成熟度判别以及缺陷损伤认定等方面的研究进展, 并对对比分析高光谱技术在不同品质指标检测方面的优缺点以及在葡萄浆果品质检测方面的潜力和应用前景, 旨在为葡萄浆果品质无损检测技术的研究和开发应用提供参考。

关键词: 高光谱技术; 葡萄浆果品质指标; 无损检测

Research Progress on the Application of Hyperspectral Technology for Non-destructive Testing of Grape Quality

WEN Jing¹, MA Wen^{1,2,3}, ZHANG Ang^{3,4}, JIN Gang^{1,2,3,*}, XU Guoqian^{1,2,*}

(1. College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center of Grape and Wine, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. Hebei Key Laboratory of Wine Quality & Safety Testing, Qinhuangdao 066000, China; 4. Technology Centre of Qinhuangdao Customs, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Grape production is an important part of the agricultural economy, which has economic and widespread social benefits. Monitoring and evaluation of grape berries during growth is an important guarantee for the production of high-quality grape berries. Traditional testing techniques are time-consuming, laborious and destructive, while non-destructive testing techniques represented by hyperspectral technology can successfully solve this problem. This paper summarizes recent progress in the application of hyperspectral technology in grape shape measurement, chemical substance detection, ripeness discrimination and defects and damage identification. It also analyzes the advantages and disadvantages of hyperspectral technology in the detection of different quality indexes, and discusses the potential of and prospects for the application of hyperspectral technology in the detection of grape quality, which is aimed at providing a reference to the research and developing non-destructive techniques for the quality detection of grape berry.

Keywords: hyperspectral technology; grape berry quality indexes; non-destructive testing

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240204-026

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 21-0357-11

引文格式:

文静, 马雯, 张昂, 等. 高光谱技术在葡萄品质无损检测应用上的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 357-367.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240204-026. <http://www.spkx.net.cn>

WEN Jing, MA Wen, ZHANG Ang, et al. Research progress on the application of hyperspectral technology for non-destructive testing of grape quality[J]. Food Science, 2024, 45(21): 357-367. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240204-026. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-02-04

基金项目: 宁夏回族自治区农业育种专项 (NXNYYZ202101)

第一作者简介: 文静 (1997—) (ORCID: 0009-0000-8398-1948), 女, 硕士研究生, 研究方向为葡萄与葡萄酒学。

E-mail: 17395128486@163.com

*通信作者简介: 金刚 (1984—) (ORCID: 0000-0002-3012-6451), 男, 副教授, 博士, 研究方向为葡萄与葡萄酒学。

E-mail: jin.gang@nxu.edu.cn

徐国前 (1968—) (ORCID: 0000-0001-8958-3306), 男, 讲师, 博士, 研究方向为葡萄与葡萄酒学。

E-mail: xugql@163.com

葡萄 (*Vitis vinifera* L.) 是葡萄科葡萄属的木质藤本植物, 原产于西亚, 目前在世界大范围种植, 其中在北半球较为集中^[1]。随着经济发展和生活质量的提高, 人们对葡萄浆果品质的要求也在逐渐上升。对于鲜食葡萄来说, 它的品质主要由糖类物质、酸类物质、酚类物质和香气物质决定^[2-4], 其所含有的生物活性化合物有利于人体健康^[5-6]。通过检测对鲜食葡萄的品质进行分类, 将优质葡萄用于食用而劣质葡萄用于燃料或肥料, 尤其对于采后储藏期内的鲜食葡萄, 对其品质属性进行实时监测是维持葡萄浆果新鲜度、延长葡萄保质期的关键。对于酿酒葡萄而言, 可通过对其浆果品质的检测, 达到对其浆果糖酸成熟度、酚成熟度和香气成熟度判别的目的^[7]。同时, 也可以用来对葡萄浆果进行分级分类, 品质好的用于酿造优质酒, 而品质差的则可用于制作餐酒或它用。因此, 对葡萄浆果品质进行检测是保障人体健康和促进葡萄生产的重中之重。就目前来看, 用于检测葡萄浆果品质的技术大致分为两类: 传统无损检测技术和现代无损检测技术。以质谱 (mass spectrometry, MS) 法^[8]、气相色谱 (gas chromatography, GC) 法^[9]和分光光度计法^[10]为代表的传统品质检测技术具有耗时耗力且破坏性强、成本高、易受主观因素影响等缺点。因此, 需要寻找快速、无损、准确的葡萄浆果品质检测方法取代传统的方法。近年来, 以无污染、非破坏性和效率高为检测特点的无损检测技术备受好评, 常用的无损检测技术包括机器视觉^[11]、核磁共振^[12]、光谱技术^[13]和电子鼻技术^[14]等。高光谱技术作为一种将成像技术与光谱技术相结合的无损检测技术, 与其他单独获得样品的光谱信息和空间信息的光谱学和成像系统不同, 该技术能同时获取待测样品的光谱和空间信息, 所测信息包含多个具有不同分辨率的信息带。目前高光谱技术已被广泛应用于水果品质检测当中, 包括水果的硬度^[15-16]、产量^[17]、理化指标^[18-19]、成熟度^[20]、病害^[21]和缺陷度^[22-23]等方面。为了更好地了解高光谱技术在葡萄品质无损检测领域的应用情况, 本文全面分析总结高光谱技术在葡萄品质检测方面的优缺点和应用前景, 为进一步提高葡萄品质检测效率和准确度提供技术指导和参考。

1 葡萄浆果品质概述

“品质”通常被定义为消费者用不同参数进行不同评价的主观感知指标^[24]。葡萄浆果品质主要包括内部品质和外部品质。葡萄浆果的内部品质主要体现在所含可溶性固形物含量 (soluble solid content, SSC)、糖类、酸类和酚类物质上。其中糖、酸等各组分之间的平衡直接决定着葡萄浆果的感官品质, 一般情况下, 葡萄浆果中的有机酸含量相对于糖含量较低, 但却对葡萄浆果的风味有着非常重要的影响^[25]。糖和酸也是合成葡萄

浆果中色素、氨基酸等其他化学物质的必要原料^[26-27]。酚类物质是消费者在咀嚼浆果过程中感知到的香气的主要来源^[28], 相关调查表明, 葡萄浆果中的麝香香气最受消费者喜欢, 它的存在往往与单萜烯类直接相关, 例如芳樟醇、玫瑰醚、柠檬醛、香叶醇、橙花醇和香茅醇^[29]。酚类物质的种类和含量往往会随着葡萄的成熟期发生变化, 是种植者们除了糖酸比之外判断葡萄浆果成熟期的另一个重要化学指标。

外部品质对于农产品来说尤为重要, 因为它给人最直观的感受, 是产品品质最明显的体现^[30]。葡萄浆果的外部品质主要体现在形状、颜色、表面缺陷、农药残留和硬度等方面。由于葡萄浆果大都呈现为无规则椭圆状, 尺寸测量比长方形或球形水果更具挑战性^[31]。颜色有助于消费者对葡萄浆果外观进行目视检查, 是葡萄浆果外部品质最直观的体现。葡萄浆果的颜色主要由花青素决定, 它是类黄酮代谢的产物, 使葡萄浆果呈现出红色、紫色、蓝色等外观^[32]。颜色深的葡萄浆果往往品质更好, 因为它们富含丰富的酚类化合物, 可促进人体健康并带来多种生物效应^[33]。种植者们也会通过葡萄浆果颜色的变化对葡萄成熟度进行主观评估, 但这种方法存在许多干扰因素, 比如采光变化等干扰人工判断的准确性。外部缺陷是葡萄浆果外部品质检验的另一个关键参数, 主要包括过度成熟、淤伤以及在运输加工过程中由于挤压碰撞产生的人为破损。葡萄浆果的硬度也反映着葡萄的品质, 它的检测通常通过将安装在质构分析仪上的探针尖端以一定的速度和深度插入浆果组织中进行, 该方法具有明显的破坏性和依赖性。高光谱检测技术为评估葡萄浆果品质提供了一种更为便捷无损的解决方案, 可以快速准确识别葡萄浆果的品质等级。

2 葡萄浆果品质检测技术概述

2.1 传统检测技术

目前, 用于检测葡萄浆果品质的技术主要包括传统无损检测技术和现代无损检测技术。其中传统无损检测技术主要包括各种理化检测方法, 它们都属于分子水平的诊断方法, 包括MS^[34]、GC^[35]、GC-MS^[36]和高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC)^[37]等, 它们结合图像和光谱技术被广泛应用于水果品质检测中。但是由于传统品质检测方法往往需要对葡萄浆果进行榨汁, 具有破坏性, 且复杂困难的操作方式以及费时费力的测量方法严重制约了葡萄浆果品质分析, 不适用于快速大规模葡萄品质检测。随着科学技术的进步, 以高光谱为代表的无损检测技术将逐渐取代传统检测方法, 在不破坏葡萄浆果组织的前提下检测其化学成分和结构特性, 具有快速、准确和高通量等优势。

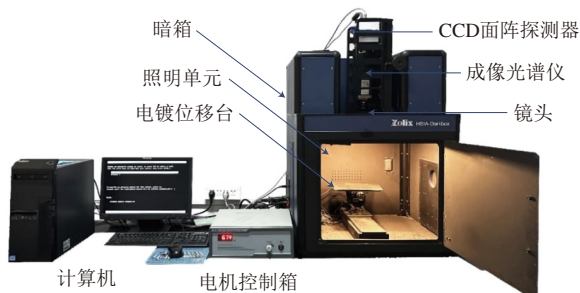
2.2 现代无损检测技术

现代无损检测技术在葡萄浆果品质检测方面更具优势,它提供了一种更加高效客观的品质评估方法^[38]。这种快速有效的检测技术对于葡萄浆果外形测量、缺陷损伤认定、化学物质含量检测以及成熟度判别等起着十分重要的作用。常见的无损检测技术主要有光谱技术、成像技术以及其他无损检测技术等^[39]。其中光谱技术主要包括拉曼光谱和近红外(near-infrared, NIR)光谱,成像技术主要包括高光谱成像、多光谱成像、核磁共振成像和荧光成像等。还有其他无损检测技术比如电子鼻、电子舌和声学技术。目前应用最广泛的无损检测技术主要为高光谱成像技术,已被广泛应用于食品工业^[40]和农业^[41]等方面。

3 高光谱技术在葡萄品质无损检测中的研究

3.1 高光谱检测技术概述

由于高光谱成像技术不需要复杂的样品前处理且需要的样品数量较少,目前已经被广泛应用于食品品质无损检测研究中。它集中了光谱技术和成像技术,可同时获得物体的空间信息和光谱信息^[42],以此识别许多成分复杂的非均质样本,获取样品的外部 and 内部品质特征^[43]。高光谱仪器的结构组成如图1所示,其图像的捕获方式主要有3种,分别是点对点扫描、线扫描和区域扫描,它们的区别在于像素的收集方式不同,分为逐像素收集光谱、逐行获取像素光谱和通过扫描一个波长的所有像素获得光谱,然后对每个所需的波长进行重复扫描。由于不同类型的图像捕获方式所使用的应用程序和价格相差颇大,因此选择的时候要根据所测样品进行多方面判别。



CCD.电荷耦合器件(charge-coupled device)。

图1 高光谱仪器示意图

Fig. 1 Photograph of hyperspectral instrument

在葡萄浆果品质评估中,高光谱成像技术是一种相对较新的无损检测技术^[44],该技术的检测原理与高光谱仪器采集到的光谱信息和葡萄样本的品质指标相关。高光谱所采集的三维超立方体数据中包含了大量信息,其中一个用于光谱信息,两个用于空间信息^[45]。光谱信息主要包含样本中H—O、H—C和H—N等含氢基团振动

的合频信息和倍频信息,这些含氢基团几乎包含了葡萄浆果中所有有机分子的组成状态和结构信息,因此将高光谱成像技术与化学计量技术相结合,可以实现葡萄浆果品质的快速无损检测。需要对高光谱采集的光谱信息通过数学统计方法和化学计量方法建模,所建立的模型可能具有较大的维度,因此常常需要进行降维处理^[46]。光谱的预处理则是通过基线去除、散射校正和平滑等方法纠正和减少由于基线重叠、散射、漂移带来的相关干扰^[47],然后应用变量选择技术简化模型,通过遗传算法、无信息变量等方法选择最佳波长进行数据分析。最后通过偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)、主成分回归(principle component regression, PCR)等方法进行模型的分类、预测和验证。利用高光谱预测葡萄浆果品质的过程如图2所示。目前,高光谱检测技术已经成为分析和评价农产品品质的常用工具,在解决消费者所关注的葡萄浆果品质和安全问题的同时,也将提升高光谱技术的应用频率和发展速度。

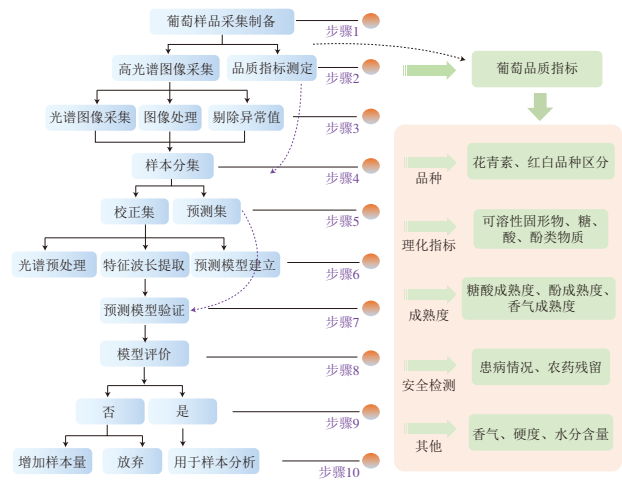


图2 高光谱检测技术路线图

Fig. 2 Roadmap for hyperspectral detection

3.2 高光谱在葡萄浆果品质无损检测中的应用

3.2.1 葡萄浆果的糖酸品质检测

葡萄浆果中的糖酸含量决定着葡萄的感官品质。过去,葡萄浆果的感官品质通常由训练有素的品鉴小组进行描述分析,这就造成了许多由个人喜好带来的主观误差。而高光谱成像技术能很好地解决这一问题。由目前研究成果发现,利用高光谱技术对葡萄浆果包括糖、酸在内的感官指标进行检测的最佳波长范围处于400~1 000 nm之间。Baiano等^[48]采用PLSR模型对葡萄浆果的pH值、总酸度和SSC进行检测分析,同时通过训练有素的品鉴小组对葡萄浆果进行感官描述,结果发现光谱信息与葡萄浆果各项理化指标具有良好的相关性,且各项指标的预测决定系数均大于0.80,

与品鉴小组的感官描述结果相关性较低。Gomes^[49]、Gao Sheng^[50]和Xu Min^[51]等分别采用高光谱成像技术对葡萄浆果中的可溶性固形物进行检测,所采集的光谱皆处于380~1 100 nm波长范围之间,他们分别采用了不同的预处理方法和数学模型对光谱数据进行分析,相比之下,Gao Sheng等^[50]所得结果的相关系数较高,达到0.97以上。高升等^[52]采用标准正态变量(standard normal variate, SNV)、卷积平滑(savitzky-golay, SG)、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、竞争自适应加权重(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)、连续投影法(successive projections algorithm, SPA)等不同的预处理方法对葡萄浆果的理化指标总酸(total acid, TA)和感官指标硬度进行建模,结果表明TA的最佳预测模型为MSC-CARS-SPA-PLSR,该模型的相关系数为0.985 1,而硬度的最佳预测模型为SG-CARS-PLSR,其相关系数 $r=0.929$ 1。Xu Min等^[51]利用可见光/NIR高光谱对葡萄浆果的pH值和硬度进行预测,通过对光谱进行预处理,选择出硬度的最佳的预测模型为堆栈式自动编码器最小二乘支持向量机(stacked auto encoder-least squares support vector machine, SAE-LSSVM),其预测决定系数 $R_p^2=0.923$ 2, pH值的最佳预测模型为SAE-PLSR,其预测决定系数 $R_p^2=0.900$ 5。

3.2.2 葡萄浆果的多酚物质检测

葡萄浆果中酚类物质的种类和含量是影葡萄浆果品质的重要因素之一,主要涉及葡萄浆果的花色苷、单宁以及一些其他的酚类物质含量的检测。研究人员对葡萄浆果中花青素含量的研究仅次于可溶性固形物,采集花青素光谱的波长范围大多介于900~1 700 nm之间,Silva^[53]、Fernandes^[54]、Gomes^[55]、Gutiérrez^[56]等同时研究葡萄浆果中pH值、糖、花青素含量的最佳检测模型,所选波长范围均介于380~1 100 nm之间,从研究结果来看,Fernandes等^[54]建立的神经网络(neural network, NN)模型对糖和花青素含量的预测精确度最高,其决定系数(R^2)分别为0.92和0.95,而Silva等^[53]建立的支持向量回归(support vector regression, SVR)模型对pH值的预测能力最强, $R^2=0.81$ 。还有一些研究者对葡萄浆果包括酚类物质在内的多个理化指标同时进行检测分析,从而找出最佳的建模方法,以达到对葡萄浆果品质进行全方面和多角度分析的目的。Nogales-Bueno等^[57]使用NIR高光谱采集了900~1 700 nm波长范围内有关葡萄浆果品质参数的光谱数据,利用修正偏最小二乘回归(modified partial least squares, MPLS)方法对葡萄浆果的总酚、可滴定酸、糖以及pH值进行预测分析,所得模型的决定系数 R^2 介于0.89~0.99之间。Zhang Ni等^[58]采集了865~1 712 nm葡萄浆果的单宁和总铁活性酚类

(total iron-reactive phenolics, TIRP)的光谱数据,利用SVR、PLSR和PCR方法对光谱数据进行分析,结果表明,SVR对种子单宁含量的预测能力更优秀。

3.2.3 葡萄浆果的成熟度预测

高光谱成像技术已经被广泛运用到葡萄浆果成熟度监测当中。葡萄浆果的成熟度通常表现为糖酸成熟度和酚成熟度,且用于成熟度检测的光谱最佳波长范围大多分布在400~1 000 nm之间。利用高光谱对葡萄浆果成熟状况进行动态监测可以帮助葡萄栽培者确定最佳采收期。Benelli等^[59]采用PLSR方法预测酿酒葡萄浆果中SSC,并通过偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)方法将葡萄浆果分为成熟葡萄和未成熟葡萄,所得结果 $R^2=0.77$,样本正确分类的准确度在86%~91%之间,表明高光谱成像技术作为葡萄浆果采收期预测工具的潜力。除SSC之外,浆果成熟过程中产生的香气成分也可被用来判别葡萄浆果的成熟度。Marín-San Román等^[60]利用红外和短波NIR高光谱采集了236个光谱,并建立偏最小二乘的校准、交叉验证和预测模型,研究结果显示葡萄浆果中的可溶性固形物和苯类化合物的交互验证相关系数(r_{cv})均大于0.70,表现出了良好的预测潜力。Fernández-Navales等^[61]采用动态高光谱成像技术对葡萄园中的144簇葡萄浆果进行总可溶性固形物(total soluble solids, TSS)、可滴定酸度、pH值、酒石酸、苹果酸、花青素和总多酚等理化指标的无损评估,所建立的PLSR模型在TSS、可滴定酸度、苹果酸和花青素测量中显示出了较好的预测性能,其外部验证系数均大于0.81,其他成分的外部验证系数在0.55~0.62之间。Courand等^[62]采用RoBoost-PLSR和PLSR方法对3个不同品种的葡萄浆果成熟度进行监测,经过对比分析发现RoBoost-PLSR方法在存在异常值的情况下预测性能优于PLSR,且该模型对浆果含糖量的预测结果最佳。

3.2.4 葡萄浆果的品种判别

葡萄的品种决定了与葡萄浆果相关制品的品质和价格,是葡萄酒风味最主要的影响因素之一。花青素是葡萄果皮中酚类物质的重要组成成分,已被作为葡萄酒分类的化学标记。Nogales-Bueno等^[63]利用高光谱成像技术对西班牙的4个葡萄品种进行区分,采集了900~1 700 nm波长范围内花青素的光谱图像,建立逐步线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)模型,通过与花青素色谱分析和彩色图像分析结果对比发现,在内部验证过程中,高光谱的正确分辨率高达100%,而花青素色谱分析和彩色图像分析的准确率分别为88%和54%,在留一交叉验证过程中,高光谱的准确率为86%,与花青素色谱分析结果一致。Diago等^[64]采用可见光和短波NIR高光谱图像对8种不同品种的葡萄浆果进行色素指纹鉴别,所建立的MPLS预测模型的预测决定系数

$R_p^2=0.86$ 。Xu Min等^[65]利用高光谱仪器采集了波长范围为400.68~1 001.61 nm的葡萄浆果光谱数据,并采用集成经验模态分解和离散小波变换(ensemble empirical mode decomposition-discrete wavelet transform, EEMD-DWT)对原始光谱进行降噪处理,最后建立出最优检测模型CARS-SPA-支持向量机(support vector machine, SVM)的识别准确率高达99.312 5%,证明该模型具有成为葡萄品种鉴别工具的潜力。成云玲^[66]采用高光谱成像技术对6种白葡萄和6种红葡萄品种进行预测,采用SG进行预处理后建立SVM预测模型,该模型对红葡萄的预测准确率高于白葡萄,红、白葡萄的预测准确率分别为90.01%和81.09%。

3.2.5 葡萄浆果安全性及病害检查

食品安全一直是消费者最关心的问题,因此迫切需要发展非接触式检测技术对葡萄浆果的品质安全进行检测。葡萄浆果的安全检查包括葡萄浆果中的农药残留以及葡萄的患病情况分析等。Ye Weixin等^[67]利用可见近红外(visible and near-infrared, Vis-NIR)和NIR高光谱对喷洒过不同级别杀虫剂的3种葡萄浆果建立了不同的预测模型并进行分析,结果表明:Vis-NIR高光谱的最佳预测模型为残差神经网络(residual neural network, RNN)模型,NIR高光谱的最佳预测模型为逻辑回归(logistic regression, LR)模型,两种模型的准确率分别为93%和97%。Mohite等^[68]利用高光谱技术对葡萄浆果中农药的残留程度进行判别,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)、最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)和Elastic Net预处理方法提取特征光谱后,分别建立了人工神经网络(artificial neural network, ANN)、SVM、随机森林(random forest model, RF)模型和XGBoost模型,将农药残留等级分为无残留、一倍残留和两倍残

留,结果表明采用LASSO-SVM算法建立的农药残留判别结果最准确,准确率为91.98%。红斑病是一种延迟葡萄成熟、减少葡萄糖分积累的病毒性疾病,严重影响着葡萄的品质。Velez-Reyes等^[69]利用便携式高光谱通过训练SVM分类器的方式对健康葡萄和患有红斑病的葡萄进行区分,取得了较好的结果。Pérez-Roncal等^[70]采集了900~1 700 nm波长范围的高光谱图像,采用3种组合预处理方法SNV、SG和中心化(mean centering, MC)对光谱进行预处理,然后建立PLS-DA判别模型对15串感染白粉病葡萄和15串健康葡萄进行分类,模型的准确率高达85.33%,表明该技术可用于葡萄白粉病的检测。Knauer等^[71]利用高光谱成像技术采集30簇葡萄浆果的光谱图像并对其感染水平进行区分,根据葡萄浆果的感染程度可分为健康、感染、严重病变3类,他们首先采用LDA方法对光谱降维后,利用改进的RF进行分类,其分类准确率为87%。

3.2.6 其他

高光谱技术除了可应用在葡萄浆果理化指标、感官品质、成熟度以及品种预测等方面之外,还被用于水分和香气成分判别。靳雪梅等^[72]利用高光谱成像技术采集了贝达葡萄浆果400~1 000 nm波长范围的光谱图像,通过建立SPA-PLSR模型得到与葡萄浆果香气有关的3种主要物质——酮类、酚类和烷烃,其预测相关系数分别为0.984 3、0.992 8和0.989 6。蔡正云等^[73]采集同样波长范围的高光谱图像,通过MSC方法进行预处理后建立赤霞珠葡萄浆果含水量的PLSR预测模型,所得葡萄浆果含水量的相关系数 $r=0.806$,证明高光谱技术可用于葡萄浆果含水量的检测。表1总结了有关高光谱技术在葡萄浆果品质检测中的应用。这些研究表明,将高光谱成像技术与化学计量技术相结合,可以实现葡萄浆果品质的快速无损检测。

表1 高光谱技术在葡萄浆果品质评估中的应用
Table 1 Application of hyperspectral imaging for grape quality detection

| 葡萄品种 | 检测内容 | 品质指标 | 光谱范围/nm | 预处理 | 预测模型 | 检测结果 | 参考文献 |
|--------|------|-------------|-------------------------|---|--|--|------|
| 汤普森等 | 理化指标 | TA、SSC、pH值 | 400~1 000 | SG、MSC、FD、SD | PLSR | 白葡萄: R^2 (TA) = 0.95, R^2 (SSC) = 0.94, R^2 (pH) = 0.80 红葡萄: R^2 (TA) = 0.82, R^2 (SSC) = 0.93, R^2 (pH) = 0.90 | [48] |
| 红地球 | 理化指标 | TA、硬度 | 450~1 000 | SNV、SG、MSC、normalization | TA: MSC-CARS-SPA-PLSR; 硬度: SG-CARS-PLSR | r_p (TA) = 0.985 1, r_p (硬度) = 0.929 1 | [52] |
| 巨峰 | 理化指标 | TSS | 400.68~1 001.61 | VMD-RC | LSSVM | $R^2_p=0.93$ | [51] |
| 法国杜丽佳等 | 理化指标 | pH值、糖 | 80~1 028 | MSC、normalization、SG | CNN | RMSEP (糖) = 1.396, RMSEP (pH) = 0.223 | [74] |
| 魏可等 | 理化指标 | SSC、TA | 370~1 100, 400~1 000 | FD、SG | SSC: PSO-LSSVM; TA: ANN | r_p (SSC) = 0.705, r_p (TA) = 0.853 | [75] |
| 法国杜丽佳 | 理化指标 | 糖 | 380~1 028 | MSC、SNV | PLSR、NN | R^2 (2012) = 0.92, R^2 (2013) = 0.92 | [49] |
| 红地球 | 理化指标 | SSC | 391~1 043 | SPA、PCA | PLSR | $r_c=0.977 5$, $r_p=0.976 2$ | [50] |
| 巨峰 | 理化指标 | pH值、硬度 | 400.68~1 001.61 | SAE | LSSVM、PLSR | R^2 (硬度) = 0.923 2, R^2 (pH) = 0.900 5 | [65] |
| 红地球 | 理化指标 | SSC | 500~1 000 | MSC、SNV、1-Der、2-Der、SG | PLSR、SMLR | r_p (PLSR) = 0.962 0 r_p (SMLR) = 0.947 2 | [76] |
| 赤霞珠等 | 理化指标 | TIRP、花青素、单宁 | 865~1 712 | MSC、normalization、SG Filter、Z-score、FD、SD | PCR、PLSR、SVR | R^2 (花青素) = 0.878 9, R^2 (单宁) = 0.924 3, R^2 (TIRP) = 0.879 0 | [58] |

续表1

| 葡萄品种 | 检测内容 | 品质指标 | 光谱范围/nm | 预处理 | 预测模型 | 检测结果 | 参考文献 |
|-------|-------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------|---|------|
| 霞多丽等 | 理化指标 | 单宁 | 900~1 300 | SG | SVR | R^2 (黑比诺) = 0.896, R^2 (霞多丽) = 0.855 | [77] |
| 赤霞珠等 | 理化指标 | 单宁 | 978~1 625 | SG、MSC、SNV、FD、SD | SVR | R^2 (红葡萄) = 0.896 0, R^2 (白葡萄) = 0.918 7 | [78] |
| 丹魄 | 理化指标 | 花青素 | 900~1 700 | PCA | MPLS | R^2 = 0.72 | [79] |
| 丹魄等 | 理化指标 | 花青素 | 900~1 700 | PCA | MPLS | R^2 = 0.86 | [80] |
| 赤霞珠 | 理化指标 | 花青素 | 400~1 000 | PCA | NN | R^2 (花青素) = 0.65 | [81] |
| 法国杜丽佳 | 理化指标 | pH值、花青素、糖 | 380~1 028 | PCA | SVR | R^2 (花青素) = 0.89, R^2 (pH) = 0.81, R^2 (糖) = 0.90 | [53] |
| 法国杜丽佳 | 理化指标 | pH值、糖、花青素 | 380~1 028 | PCA | NN | R^2 (pH) = 0.73, R^2 (糖) = 0.92, R^2 (花青素) = 0.95 | [54] |
| 法国杜丽佳 | 理化指标 | pH值、糖、花青素 | 380~1 028 | L&NL-PAC框架、SG-FD | PLSR | RPD (糖) = 2.008~3.321, RPD (pH) = 1.654~2.085, RPD (花青素) = 2.393~2.947 | [55] |
| 丹魄 | 理化指标 | TSS、花青素 | 400~1 000 | SG、SNV | PLSR | R_p^2 (TSS) = 0.92, R_p^2 (花青素) = 0.83 | [56] |
| 丹魄等 | 理化指标 | TP、TA、pH值、糖 | 900~1 700 | PCA、MSC、SNV | MPLS | R^2 (TP) = 0.89, R^2 (糖) = 0.99, R^2 (TA) = 0.98, R^2 (pH) = 0.94 | [57] |
| 桑娇维赛 | 成熟度预测 | SSC | 400~1 000 | SNV、FD、MC、PCA | PLSR | R^2 (SSC) = 0.77, 准确率 = 86%~91% | [59] |
| 西拉等 | 成熟度预测 | 糖 | 400~1 000 | SAM | RoBoost-PLSR | R^2 (Syrah) = 0.990, R^2 (Fer-Servadou) = 0.848, R^2 (Mauzac) = 0.927 | [62] |
| 丹魄等 | 成熟度预测 | SSC、TP | 400~1 000 | SNV、SG、FD、SD、PCA | PLSR | $r \geq 0.70$ | [60] |
| 丹魄 | 成熟度预测 | TSS、TA、pH值、TP、酒石酸、苹果酸、花青素 | 400~1 000 | SNV、DT、SG、FD、SD、PCA | PLSR | R_p^2 (酒石酸) = 0.62, R_p^2 (苹果酸) = 0.84, R_p^2 (花青素) = 0.88, R_p^2 (TP) = 0.55 | [61] |
| 赤霞珠等 | 品种判别 | 花青素 | 800~1 000 | MSC、SNV | MPLS | R^2 = 0.70~0.93, R_p^2 = 0.86 | [64] |
| 巨峰等 | 品种判别 | 品种 | 400.68~1 001.61 | EEMD、DWT、CARSSPA | SVM | 准确率 = 99.312 5% | [82] |
| 赤霞珠等 | 品种判别 | 颜色 | 900~1 700 | SG | SVM | 准确率 (红) = 90.01%, 准确率 (白) = 81.09% | [66] |
| 贝塔 | 香气判别 | 酮类、酚类、烷烃 | 400~1 000 | SPA | PLSR | r_p (酮类) = 0.984 3, r_p (酚类) = 0.992 8, r_p (烷烃) = 0.989 6 | [72] |
| 赤霞珠 | 水分检测 | 含水量 | 400~1 000 | MSC | PLSR | r = 0.806 | [73] |
| 木纳格等 | 安全检测 | 农药残留 | Vis-NIR: 376~1 044, NIR: 915~1 699 | SG、SNV、PCA | LR、SVM、RF、CNN、RNN | 准确率 (Vis-NIR) = 93%, 准确率 (NIR) = 97% | [67] |
| 佳利酿 | 安全检测 | 白粉病 | 900~1700 | SM、SNV、MC | PLS-DA | 准确率 = 85.33% | [70] |
| 霞多丽 | 安全检测 | 白粉病 | Vis-NIR: 400~1 000, SWIR: 970~2 500 | LDA、PCA | SVM | 准确率 = 87% | [71] |

注: normalization.归一化; R^2 .决定系数; r .相关系数; r_c .校正集相关系数; r_p .预测集相关系数; R_p^2 .预测集决定系数; RPD.预测偏差 (residual predictive deviation); RMSEP.预测均方根误差 (root mean square error of prediction); 1-Der.一阶微分 (first order differential); 2-Der.二阶微分 (second order differential); L&NL-PAC.线性和非线性预测分析比较 (linear and non-linear predictive analytics comparison); Z-score. Z分数; CARSSPA.竞争自适应重加权抽样与连续投影算法的耦合 (competitive adaptive reweighed sampling coupled with successive projections algorithm); SAM.光谱角度制图 (spectral angle mapper); VMD-RC.变分模态分解和回归系数 (variational mode decomposition and regression coefficients); SMLR.逐步多元线性回归 (stepwise multiple linear regression); CNN.卷积神经网络 (convolutional neural network); SWIR.短波近红外 (short-wave infrared)。

4 结 语

高光谱所吸收的C—H、O—H、N—H等含氢基团的信息都包含在葡萄浆果的理化指标当中,因此在葡萄浆果理化指标检测方面的应用最为广泛,将逐渐替代传统的高效液相色谱技术。其次是在葡萄浆果成熟度、品种判别以及葡萄安全检测方面的应用。

然而高光谱过度依赖于葡萄浆果的一般理化性质,如糖、酸、pH值等,对其他影响葡萄浆果品质的因素比如营养物质、矿物质、维生素等检测缺乏重视。因此在检测内容方面,应扩大评估范围,将其应用在各种葡萄浆果不同品质属性的评估中,以增强高光谱技术的检测性能,扩大该技术的适用范围。其次,该技术与感官数据的相关性较小,在消费者喜好预测方面存在不足,对感官的预测大都处于间接预测阶段,即通过检测葡萄浆

果中花青素含量以及葡萄浆果糖酸比和质地来预测葡萄浆果的感官品质,需要通过开发多光谱成像系统^[83]不断验证更多模型实现感官预测。

在葡萄品质安全检测方面,尤其是在葡萄浆果染病情况的判别分析方面存在一定的挑战性,人类通过视觉对葡萄健康状况的判断往往会和葡萄浆果的真实染病情况存在差异,因为存在于葡萄上方空气中的分生孢子和隐藏在葡萄串中的稀疏菌丝一般很难通过肉眼察觉。除此之外,研究发现在选择检测样品时,红葡萄的研究热度远高于白葡萄,由于红葡萄具有转色期而白葡萄没有,且白葡萄与叶片颜色相近,在成长过程中颜色变化不明显,对白葡萄品质的研究更具挑战性。因此在对所有高光谱技术的研究成果进行对比分析时,除了比较它们的预测准确率和预测决定系数的大小之外,还应关注葡萄品种、采集环境、数据质量和处理时间等额外标准。

在高光谱对葡萄浆果品质检测的最佳波长选择方面, 预测糖和SSC所选用的最佳波长范围通常在380~1 100 nm之间, 采集预测花青素的光谱最佳波长范围大多介于900~1 700 nm之间。同时研究葡萄浆果的pH值、糖和花青素含量的最佳波长范围通常介于380~1 100 nm之间, 有关成熟度检测的最佳波长范围大多分布在400~1 000 nm之间, 利用高光谱技术对葡萄浆果感官指标检测的最佳波长范围处于400~1 000 nm之间。

在数据采集过程中, 研究人员所采集的数据通常有限且特殊, 缺乏足够的与葡萄浆果品质相关的数据集, 不具有普遍性与可比性, 因此只有建立全球葡萄品质指标数据库, 才会使众多研究成果的相互对比分析成为可能。因为准确而稳定的模型即使应用在不同季节、产地和气候条件下的葡萄浆果都会产生令人满意的预测结果。

在数据处理方面, 由于高光谱成像系统可以同时获取样品的光谱信息和空间图像信息, 因此, 当使用葡萄浆果的光谱信息建立预测模型时, 为了提高模型的准确性, 通常选用SPA算法来提取光谱的特征波长。当使用空间图像信息建立预测模型时, 为了提高模型的精确度, 人们通常选择PCA对所采集的信息进行降维。同时为了使所建立的模型检测性能更加优秀, 除了使用各种预处理方法之外, 还需要考虑到葡萄品种、所处地理位置以及气候条件对模型稳定性的影响。

在数据建模方面, 除了工作中普遍使用的偏最小二乘算法之外, 神经网络算法也表现出较好的模型优势。目前神经网络最常用的算法为Levenberg-Marquardt算法, 相较反向传播算法来说计算效率更高, 出现的网络误差更小。偏最小二乘法和神经网络算法在不同测试集中的预测误差都较小, 两者在统计学上并没有明显的显著性差异。

在葡萄浆果品质无损检测方面, 除高光谱技术之外, 机器视觉技术也被广泛应用在该领域中。然而机器视觉技术在葡萄浆果品质检测的过程中更依赖于视觉属性, 在葡萄浆果成熟度预测方面大都停留在糖含量以及SSC的预测^[84]。葡萄浆果在成熟过程中除了浆果变大、质地变软之外, 还包含着一系列复杂的化学变化, 比如糖增多、酸降低, 还有酚类物质的变化等^[85]。而高光谱技术能够通过各个角度对葡萄浆果的成熟度进行全方位判别。除此之外, 机器视觉技术在数据处理过程中常使用的深度学习算法对所检测的样本量要求较高^[86], 通常样本量越大识别准确率越高。而高光谱技术只需要较少的样本量就能对葡萄浆果的品质进行精准的预测。但是机器视觉在葡萄浆果大小、尺寸和数量等外部特征的评估方面优于高光谱技术, 目前已有研究者将机器视觉与高光谱技术^[74]相结合, 从而使其检测范围更广, 检测结果更加精确。

高光谱技术最早用于美国陆军的情报收集和陆地侦察^[87], 因此作为全球最大的高光谱仪器生产地的北美拥有最先进的产品和技术。在设备研发方面, 我国高光谱仪器研发仍有很长的路要走, 国内使用的大部分高光谱仪器进口自美国。随着高光谱仪器的质量和分辨率逐渐提升, 该技术的应用范围也在逐渐扩大, 在水果品质检测方面取得了众多成果^[40]。但目前国内外在葡萄浆果品质检测方面仍然使用二维成像光谱仪, 造成高光谱传感器硬件设备发展缓慢。因此, 如何在使用高光谱获取葡萄浆果二维光谱数据的基础上, 增加对其空间信息的研究, 是国内外葡萄浆果品质检测水平提高的关键所在^[87]。在数据分析方面, 目前发达国家已进入了ChatGPT先进人工智能模型的研发阶段^[88], 未来我国在该领域需要努力追赶。

过去, 人们对葡萄浆果外在品质分析大多是通过视觉评估, 内在品质分析则是通过感官鉴定, 然后逐渐发展为通过人工采样后对样品进行化学分析, 近年来发展起来的快速、无损、高效的高光谱技术解决了农业检测中的很多难题。但是目前高光谱仪器成本高, 储存图像数量有限, 尤其是对彩色图像的储存, 有限的图像储存数量使得可应用于田间并能进行实时图像处理的深度学习方法无法应用。因此更大的储存容量、更灵敏的探测器以及更快的处理单元将是未来高光谱技术改进的重点。

目前逐渐兴起的简单、灵活、自我驱动的光谱传感方法不仅可以解决台式机器在运输过程中的局限性, 还可以解决便携式机器价格昂贵且功耗大等问题。比如Luo Dongjie等^[89]开发的一种只有芯片尺寸大小的光谱传感器能很好地解决台式光谱仪运输困难等问题, Wang Meng等^[90]开发的灵活可穿戴光学无线传感系统可以解决手动抓取和传感器固定等问题。该团队后来又开发的一种基于摩擦电-电磁混合发电机的自供电柔性无线传感系统在检测香蕉中的可溶性固形物时, 从周围环境中收集能量, 从而解决了台式机器功耗高的问题^[91]。在数据分析方面, 最新的人工智能模型将解决以往模型建立过程中产生的数据驱动的性能依赖性, 如Martins等^[92]提出了一种基于协方差模式搜索的自学习人工智能方法, 可以很好地解决由于矩阵效应和光谱干扰带来的影响。未来这些机器改进技术和数据处理方法的运用, 对高光谱技术在葡萄浆果品质检测领域的应用效果将会有很好的提升。

综上所述, 高光谱技术在葡萄浆果品质检测方面发挥着重要作用, 使快速检测葡萄浆果品质成为了可能, 极大程度上减少了人工成本和时间成本, 可以作为生产实践中葡萄浆果品质快速无损检测的常规技术。将该技术运用在葡萄浆果品质的实时在线监测和商业化生产线将会产生很好的经济效益, 并为消费者筛选出具有品质保证的健康产品。

展望未来, 高光谱技术在葡萄和葡萄酒生产中的应用应将消费者需求和市场发展规律相结合, 致力于可适用于不同地区、不同季节和不同环境商业生产线中稳定模型的开发。进一步利用高光谱技术与葡萄浆果化学变化和感官反应之间的关系, 为建立葡萄园新的管理模式及在实际生产中减少分析处理的时间和成本, 提高大规模样品的处理能力奠定基础。同时开发更加轻便易携带、检测过程更简单更智能、功能更完善更强大的高光谱设备是未来发展的趋势。未来该技术在葡萄与葡萄酒生产的应用过程中, 需全方面考虑检测过程中存在的影响因素, 不断开发出更加完整的预测模型以提升高光谱技术的检测优势。

参考文献:

- [1] SANTOS J A, FRAGA H, MALHEIRO A C, et al. A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3092. DOI:10.3390/app10093092.
- [2] ALEM H, RIGOU P, SCHNEIDER R, et al. Impact of agronomic practices on grape aroma composition: a review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(3): 975-985. DOI:10.1002/jsfa.9327.
- [3] GUTIÉRREZ-GAMBOA G, ROMANAZZI G, GARDE-CERDÁN T, et al. A review of the use of biostimulants in the vineyard for improved grape and wine quality: effects on prevention of grapevine diseases[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(3): 1001-1009. DOI:10.1002/jsfa.9353.
- [4] UNTERKOFER J, MUHLACK R A, JEFFERY D W. Processes and purposes of extraction of grape components during winemaking: current state and perspectives[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(11): 4737-4755. DOI:10.1007/s00253-020-10558-3.
- [5] BAIANO A, TERRACONE C. Effects of bud load on quality of Beogradska besemena and Thompson seedless table grapes and cultivar differentiation based on chemometrics of analytical indices[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(3): 645-653. DOI:10.1002/jsfa.4625.
- [6] LUTZ M, JORQUERA K, CANCINO B, et al. Phenolics and antioxidant capacity of table grape (*Vitis vinifera* L.) cultivars grown in Chile[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(7): C1088-C1093. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02298.x.
- [7] PALLIOTTI A, TOMBESI S, SILVESTRONI O, et al. Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 178: 43-54. DOI:10.1016/j.scienta.2014.07.039.
- [8] AIELLO D, DE LUCA D, GIONFRIDDO E, et al. Review: multistage mass spectrometry in quality, safety and origin of foods[J]. *European Journal of Mass Spectrometry*, 2011, 17(1): 1-31. DOI:10.1255/ejms.1114.
- [9] FENG T, SUN M, SONG S Q, et al. Gas chromatography for food quality evaluation[M]//ZHONG J, WANG X C. Evaluation technologies for food quality. Amsterdam: Elsevier, 2019: 219-265. DOI:10.1016/b978-0-12-814217-2.00012-3.
- [10] MA W, WAFFO-TÉGUO P, JOURDES M, et al. First evidence of epicatechin vanillate in grape seed and red wine[J]. *Food Chemistry*, 2018, 259: 304-310. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.03.134.
- [11] PALACIOS F, DIAGO M P, MELO-PINTO P, et al. Early yield prediction in different grapevine varieties using computer vision and machine learning[J]. *Precision Agriculture*, 2023, 24(2): 407-435. DOI:10.1007/s11119-022-09950-y.
- [12] 赵玉立, 王丽, 谭丹, 等. 基于核磁共振氢谱的葡萄酒真实性鉴别技术研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 305-313. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220322-258.
- [13] KALOPESE A E, KARYOTIS K, TZIOLAS N, et al. Estimation of sugar content in wine grapes via *in situ* VNIR-SWIR point spectroscopy using explainable artificial intelligence techniques[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1065. DOI:10.3390/s23031065.
- [14] QIAO J L, SU G Q, YUAN L, et al. Effect of swelling agent treatment on grape fruit quality and the application of electronic nose identification detection[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 14: 1292335. DOI:10.3389/fpls.2023.1292335.
- [15] XIANG Y, CHEN Q J, SU Z J, et al. Deep learning and hyperspectral images based tomato soluble solids content and firmness estimation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 860656. DOI:10.3389/fpls.2022.860656.
- [16] MOGOLLON R, TORRES C A, MCCORD P, et al. Relationships between fruit firmness assessed by compression and penetration in 'Skeena' sweet cherries and skin reflectance from hyperspectral images[C]//2023 ASHS Annual Conference. ASHS, 2023.
- [17] DUNG C D, TRUEMAN S J, WALLACE H M, et al. Hyperspectral imaging for estimating leaf, flower, and fruit macronutrient concentrations and predicting strawberry yields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 114166-114182. DOI:10.1007/s11356-023-30344-8.
- [18] KIM M J, YU W H, SONG D J, et al. Prediction of soluble-solid content in *Citrus* fruit using visible-near-infrared hyperspectral imaging based on effective-wavelength selection algorithm[J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1512. DOI:10.3390/s24051512.
- [19] LI X L, WEI Z X, PENG F F, et al. Non-destructive prediction and visualization of anthocyanin content in mulberry fruits using hyperspectral imaging[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1137198. DOI:10.3389/fpls.2023.1137198.
- [20] DAVUR Y J, KÄMPER W, KHOSHELHAM K, et al. Estimating the ripeness of hass avocado fruit using deep learning with hyperspectral imaging[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(5): 599. DOI:10.3390/horticulturae9050599.
- [21] HU Y Y, CHANG J, LI Y T, et al. High zoom ratio foveated snapshot hyperspectral imaging for fruit pest monitoring[J]. *Journal of Spectroscopy*, 2023, 2023: 2286867. DOI:10.1155/2023/2286867.
- [22] MIN D D, ZHAO J S, BODNER G, et al. Early decay detection in fruit by hyperspectral imaging: principles and application potential[J]. *Food Control*, 2023, 152: 109830. DOI:10.1016/j.foodcont.2023.109830.
- [23] LIU Y S, ZHOU S B, WAN Z Y, et al. A self-supervised anomaly detector of fruits based on hyperspectral imaging[J]. *Foods*, 2023, 12(14): 2669. DOI:10.3390/foods12142669.
- [24] BAIARDI D, PUGLISI R, SCABROSETTI S. Individual attitudes on food quality and safety: empirical evidence on EU countries[J]. *Food Quality and Preference*, 2016, 49: 70-74. DOI:10.1016/j.foodqual.2015.11.011.
- [25] DAI Z W, WU H, BALDAZZI V, et al. Inter-species comparative analysis of components of soluble sugar concentration in fleshy fruits[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 649. DOI:10.3389/fpls.2016.00649.
- [26] NOWICKA P, WOJDYŁO A, LASKOWSKI P. Principal component analysis (PCA) of physicochemical compounds' content in different

- cultivars of peach fruits, including qualification and quantification of sugars and organic acids by HPLC[J]. *European Food Research and Technology*, 2019, 245(4): 929-938. DOI:10.1007/s00217-019-03233-z.
- [27] ZUANAZZI C, MACCARI P A, BENINCA S C, et al. White grape juice increases high-density lipoprotein cholesterol levels and reduces body mass index and abdominal and waist circumference in women[J]. *Nutrition*, 2019, 57: 109-114. DOI:10.1016/j.nut.2018.05.026.
- [28] RUIZ-GARCÍA L, HELLÍN P, FLORES P, et al. Prediction of Muscat aroma in table grape by analysis of rose oxide[J]. *Food Chemistry*, 2014, 154: 151-157. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.01.005.
- [29] YUE X F, REN R H, MA X, et al. Dynamic changes in monoterpene accumulation and biosynthesis during grape ripening in three *Vitis vinifera* L. cultivars[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109736. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109736.
- [30] NI J B, QIAN M J, LI J Z, et al. Editorial: regulation of horticultural fruits and vegetables quality: internal or external factors[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1264533. DOI:10.3389/fpls.2023.1264533.
- [31] MORI D, HANYA N, KANAMARU H, et al. Electrical stimulation as a potential technique for enlarging table grape berry size by enhancing cell division[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2022, 73(2): 106-115. DOI:10.5344/ajev.2021.21043.
- [32] EYDURAN S P, AKIN M, ERCISLI S, et al. Sugars, organic acids, and phenolic compounds of ancient grape cultivars (*Vitis vinifera* L.) from Iğdir province of Eastern Turkey[J]. *Biological Research*, 2015, 48(1): 2. DOI:10.1186/0717-6287-48-2.
- [33] CARRIERI C, MILELLA R A, INCAMPO F, et al. Antithrombotic activity of 12 table grape varieties. relationship with polyphenolic profile[J]. *Food Chemistry*, 2013, 140(4): 647-653. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.10.132.
- [34] ROMANO A, CAPOZZI V, KHOMENKO I, et al. Advances in the application of direct injection mass spectrometry techniques to the analysis of grape, wine and other alcoholic beverages[J]. *Molecules*, 2023, 28(22): 7642. DOI:10.3390/molecules28227642.
- [35] REVEL J S, ALCÁZAR MAGAÑA A, MORRÉ J, et al. Gas chromatography coupled to atmospheric pressure chemical ionization high-resolution mass spectrometry for metabolite fingerprinting of grape (*Vitis vinifera* L) berry[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2022, 2396: 85-99. DOI:10.1007/978-1-0716-1822-6_8.
- [36] GUO Y Y, WANG Z, HE Y, et al. Profiling of volatile compounds in 'Muscat hamburg' contaminated with *Aspergillus carbonarius* before OTA biosynthesis based on HS-SPME-GC-MS and DLLME-GC-MS[J]. *Molecules*, 2024, 29(3): 567. DOI:10.3390/molecules29030567.
- [37] ALMEIDA J, MACEDO R, DA CUNHA A, et al. Determination of trifloxystrobin in soy grape juice and natural water by photo-induced fluorescence and high-performance liquid chromatography[J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2023, 34(12): 1877-1886. DOI:10.21577/0103-5053.20230080.
- [38] YE W X, XU W, YAN T Y, et al. Application of near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging combined with machine learning algorithms for quality inspection of grape: a review[J]. *Foods*, 2022, 12(1): 132. DOI:10.3390/foods12010132.
- [39] SUN J T, LUO Y J, SHI X W, et al. Research progress on non-destructive detection technology for grape quality[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(9): 2713-2720. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2020)09-2713-08.
- [40] XU H Y, REN J, LIN J D, et al. The impact of high-quality data on the assessment results of visible/near-infrared hyperspectral imaging and development direction in the food fields: a review[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, 17(3): 2988-3004. DOI:10.1007/s11694-023-01822-x.
- [41] ZHANG J, LIU Z H, PU Y Y, et al. Identification of transgenic agricultural products and foods using NIR spectroscopy and hyperspectral imaging: a review[J]. *Processes*, 2023, 11(3): 651. DOI:10.3390/pr11030651.
- [42] BARRETO A, CRUZ-TIRADO J P, SICHE R, et al. Determination of starch content in adulterated fresh cheese using hyperspectral imaging[J]. *Food Bioscience*, 2018, 21: 14-19. DOI:10.1016/j.fbio.2017.10.009.
- [43] SHI C, QIAN J P, ZHU W Y, et al. Nondestructive determination of freshness indicators for tilapia fillets stored at various temperatures by hyperspectral imaging coupled with RBF neural networks[J]. *Food Chemistry*, 2019, 275: 497-503. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.09.092.
- [44] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Rapid and non-destructive detection of chicken adulteration in minced beef using visible near-infrared hyperspectral imaging and machine learning[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 170: 8-15. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.08.023.
- [45] FENG Y Z, SUN D W. Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(11): 1039-1058. DOI:10.1080/10408398.2011.651542.
- [46] 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.09.017.
- [47] OLIVERI P, LÓPEZ M I, CASOLINO M C, et al. Partial least squares density modeling (PLS-DM): a new class-modeling strategy applied to the authentication of olives in brine by near-infrared spectroscopy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2014, 851: 30-36. DOI:10.1016/j.aca.2014.09.013.
- [48] BAIANO A, TERRACONE C, PERI G, et al. Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-chemical and sensory characteristics of table grapes[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 87: 142-151. DOI:10.1016/j.compag.2012.06.002.
- [49] GOMES V M, FERNANDES A M, FAIA A, et al. Comparison of different approaches for the prediction of sugar content in new vintages of whole Port wine grape berries using hyperspectral imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 140: 244-254. DOI:10.1016/j.compag.2017.06.009.
- [50] GAO S, XU J H. Hyperspectral image information fusion-based detection of soluble solids content in red globe grapes[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 196: 106822. DOI:10.1016/j.compag.2022.106822.
- [51] XU M, SUN J, YAO K S, et al. Nondestructive detection of total soluble solids in grapes using VMD-RC and hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(1): 326-338. DOI:10.1111/1750-3841.16004.
- [52] 高升, 徐建华. 高光谱成像的红提总酸与硬度的预测及其分布可视化[J]. *食品科学*, 2023, 44(2): 327-336. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220306-078.
- [53] SILVA R, GOMES V, MENDES-FAIA A, et al. Using support vector regression and hyperspectral imaging for the prediction of oenological parameters on different vintages and varieties of wine grape berries[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 312. DOI:10.3390/rs10020312.
- [54] FERNANDES A M, FRANCO C, MENDES-FERREIRA A, et al. Brix, pH and anthocyanin content determination in whole Port wine

- grape berries by hyperspectral imaging and neural networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 88-96. DOI:10.1016/j.compag.2015.05.013.
- [55] GOMES V, RENDALL R, REIS M S, et al. Determination of sugar, pH, and anthocyanin contents in port wine grape berries through hyperspectral imaging: an extensive comparison of linear and non-linear predictive methods[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 10319. DOI:10.3390/app112110319.
- [56] GUTIÉRREZ S, TARDAGUILA J, FERNÁNDEZ-NOVALES J, et al. On-the-go hyperspectral imaging for the in-field estimation of grape berry soluble solids and anthocyanin concentration[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2019, 25(1): 127-133. DOI:10.1111/ajgw.12376.
- [57] NOGALES-BUENO J, HERNÁNDEZ-HIERRO J M, RODRÍGUEZ-PULIDO F J, et al. Determination of technological maturity of grapes and total phenolic compounds of grape skins in red and white cultivars during ripening by near infrared hyperspectral image: a preliminary approach[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 586-591. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.12.030.
- [58] ZHANG N, LIU X, JIN X D, et al. Determination of total iron-reactive phenolics, anthocyanins and tannins in wine grapes of skins and seeds based on near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 811-817. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.06.007.
- [59] BENELLI A, CEVOLI C, RAGNI L, et al. In-field and non-destructive monitoring of grapes maturity by hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2021, 207: 59-67. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2021.04.006.
- [60] MARÍN-SAN ROMÁN S, FERNÁNDEZ-NOVALES J, CEBRIÁN-TARANCÓN C, et al. Monitorization of varietal aroma composition dynamics during ripening in intact *Vitis vinifera* L. tempranillo blanco berries by hyperspectral imaging[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(5): 2616-2627. DOI:10.1021/acs.jafc.2c07425.
- [61] FERNÁNDEZ-NOVALES J, BARRIO I, DIAGO M P. Non-invasive monitoring of berry ripening using on-the-go hyperspectral imaging in the vineyard[J]. Agronomy, 2021, 11(12): 2534. DOI:10.3390/agronomy11122534.
- [62] COURAND A, METZ M, HÉRAN D, et al. Evaluation of a robust regression method (RoBoost-PLSR) to predict biochemical variables for agronomic applications: case study of grape berry maturity monitoring[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2022, 221: 104485. DOI:10.1016/j.chemolab.2021.104485.
- [63] NOGALES-BUENO J, RODRÍGUEZ-PULIDO F J, HEREDIA F J, et al. Comparative study on the use of anthocyanin profile, color image analysis and near-infrared hyperspectral imaging as tools to discriminate between four autochthonous red grape cultivars from La Rioja (Spain)[J]. Talanta, 2015, 131: 412-416. DOI:10.1016/j.talanta.2014.07.086.
- [64] DIAGO M P, FERNÁNDEZ-NOVALES J, FERNANDES A M, et al. Use of visible and short-wave near-infrared hyperspectral imaging to fingerprint anthocyanins in intact grape berries[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(40): 7658-7666. DOI:10.1021/acs.jafc.6b01999.
- [65] XU M, SUN J, YAO K S, et al. Developing deep learning based regression approaches for prediction of firmness and pH in Kyoho grape using Vis/NIR hyperspectral imaging[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 120: 104003. DOI:10.1016/j.infrared.2021.104003.
- [66] 成云玲. 基于近红外高光谱成像技术的酿酒葡萄分类及单宁含量检测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2020.001300.
- [67] YE W X, YAN T Y, ZHANG C, et al. Detection of pesticide residue level in grape using hyperspectral imaging with machine learning[J]. Foods, 2022, 11(11): 1609. DOI:10.3390/foods11111609.
- [68] MOHITE J, KARALE Y, PAPPULA S, et al. Detection of pesticide (Cyantraniliprole) residue on grapes using hyperspectral sensing[C]// Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety IX. Anaheim, California, USA. SPIE, 2017. DOI:10.1117/12.2261797.
- [69] VELEZ-REYES M, MESSINGER D. Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XXII[C]// Proceedings of SPIE 0277-786X, V. 10189. Bellingham, 2016.
- [70] PÉREZ-RONCAL C, LÓPEZ-MAESTRESALAS A, LOPEZ-MOLINA C, et al. Hyperspectral imaging to assess the presence of powdery mildew (*Erysiphe necator*) in cv. Carignan Noir Grapevine Bunches[J]. Agronomy, 2020, 10(1): 16. DOI:10.3390/agronomy10010088.
- [71] KNAUER U, MATROS A, PETROVIC T, et al. Improved classification accuracy of powdery mildew infection levels of wine grapes by spatial-spectral analysis of hyperspectral images[J]. Plant Methods, 2017, 13: 47. DOI:10.1186/s13007-017-0198-y.
- [72] 靳雪梅, 刘丽华, 刘玉娇, 等. 高光谱成像技术对不同成熟期葡萄香气成分的无损检测[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 324-328.
- [73] 蔡正云, 吴龙国, 王菁, 等. 宁夏赤霞珠葡萄水分含量的高光谱无损检测研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 79-83; 88. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.007.
- [74] GOMES V, MENDES-FERREIRA A, MELO-PINTO P. Application of hyperspectral imaging and deep learning for robust prediction of sugar and pH levels in wine grape berries[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3459. DOI:10.3390/s21103459.
- [75] 刘宝花. 基于高光谱成像技术的鲜食葡萄内部品质无损检测研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. DOI:10.27277/d.cnki.gsdnu.2020.000572.
- [76] 徐丽, 杨杰, 王运祥, 等. 采后葡萄可溶性固形物含量的高光谱成像检测研究[J]. 河南农业科学, 2017, 46(3): 143-147. DOI:10.15933/j.cnki.1004-3268.2017.03.028.
- [77] 黄云. 基于高光谱的酿酒葡萄单宁含量反演模型建立[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [78] 李晨. 基于高光谱成像技术的酿酒葡萄果皮中单宁含量检测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [79] MARTÍNEZ-SANDOVAL J R, NOGALES-BUENO J, RODRÍGUEZ-PULIDO F J, et al. Screening of anthocyanins in single red grapes using a non-destructive method based on the near infrared hyperspectral technology and chemometrics[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(5): 1643-1647. DOI:10.1002/jsfa.7266.
- [80] HERNÁNDEZ-HIERRO J M, NOGALES-BUENO J, RODRÍGUEZ-PULIDO F J, et al. Feasibility study on the use of near-infrared hyperspectral imaging for the screening of anthocyanins in intact grapes during ripening[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(41): 9804-9809. DOI:10.1021/jf4021637.
- [81] FERNANDES A M, OLIVEIRA P, MOURA J P, et al. Determination of anthocyanin concentration in whole grape skins using hyperspectral imaging and adaptive boosting neural networks[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(2): 216-226. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.02.018.
- [82] XU M, SUN J, ZHOU X, et al. Research on nondestructive identification of grape varieties based on EEMD-DWT and hyperspectral image[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(5): 2011-2023. DOI:10.1111/1750-3841.15715.
- [83] WANG B, SUN J F, XIA L M, et al. The applications of hyperspectral imaging technology for agricultural products quality analysis: a review[J]. Food Reviews International, 2023, 39(2): 1043-1062. DOI:10.1080/87559129.2021.1929297.

- [84] FRAGA H, GUIMARÃES N, SANTOS J. Vintage Port prediction and climate change scenarios[J]. *OENO One*, 2023, 57(4): 1-16. DOI:10.20870/oeno-one.2023.57.4.7694.
- [85] JIA H R, ZHANG Z B, ZHANG S H, et al. Effect of the methylation level on the grape fruit development process[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(7): 2099-2115. DOI:10.1021/acs.jafc.9b07740.
- [86] NAVARRO P J, MILLER L, DÍAZ-GALIÁN M V, et al. A novel ground truth multispectral image dataset with weight, anthocyanins, and Brix index measures of grape berries tested for its utility in machine learning pipelines[J]. *GigaScience*, 2022, 11: giac052. DOI:10.1093/gigascience/giac052.
- [87] 陈龙跃, 段丹丹, 王凡, 等. 高光谱成像技术在水果品质无损检测中的研究进展[J]. *广东农业科学*, 2023, 50(7): 83-94. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2023.07.009.
- [88] NASCIMENTO C M C, PIMENTEL A S. Do large language models understand chemistry? a conversation with ChatGPT[J]. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2023, 63(6): 1649-1655. DOI:10.1021/acs.jcim.3c00285.
- [89] LUO D J, WANG M, ZHANG X S, et al. Vis/NIR based spectral sensing for SSC of table grapes[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(7): 2146-2152. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2023)07-2146-07.
- [90] WANG M, LUO D J, LIU M X, et al. Flexible wearable optical wireless sensing system for fruit monitoring[J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2023, 8(2): 100555. DOI:10.1016/j.jsamd.2023.100555.
- [91] MENG W, YANG Y Y, ZHANG R H, et al. Triboelectric-electromagnetic hybrid generator based self-powered flexible wireless sensing for food monitoring[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 473: 145465. DOI:10.1016/j.cej.2023.145465.
- [92] MARTINS R C, BARROSO T G, JORGE P, et al. Unscrambling spectral interference and matrix effects in *Vitis vinifera* Vis-NIR spectroscopy: towards analytical grade 'in vivo' sugars and acids quantification[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 194: 106710. DOI:10.1016/j.compag.2022.106710.