

近红外光谱技术在苹果检测方面的研究与应用

马雪亭^{1,2,3}, 罗华平^{1,2*}, 高峰^{1,2}, 王长旭^{1,2}

(1. 新疆维吾尔自治区教育厅普通高等学校现代农业工程重点实验室, 阿拉尔 843300; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100000)

摘要: 随着我国苹果栽培面积不断扩大和产量不断提高, 社会经济不断发展, 人们对水果品质要求也随之提高, 其品质检测工作变得尤为重要。近红外光谱技术因其高效、无损等特点, 近年来被广泛应用在苹果检测领域, 相关文献研究整体呈递增趋势, 并有望研制出便携检测设备推广使用。为便于相关工作者快速了解该领域现状, 结合在该领域的现有研究成果, 本文主要阐述了近 10 年近红外光谱技术在苹果检测研究中的应用进展情况, 系统探讨了苹果品质预测模型建立过程(光谱获取、样品划分、光谱数据预处理、特征波长选择、模型建立等)与该技术在苹果检测(品种差异、产地溯源、货架期预测等)领域的具体应用, 并对未来发展方向提出了一定的建议, 为后续研究者对近红外光谱技术在苹果检测方面的研究(如算法改进与优化、新理论的融入)与发展方向提供一定参考。

关键词: 近红外光谱技术; 模型建立; 苹果; 品质检测

Research and application of near-infrared spectroscopy in apple detection

MA Xue-Ting^{1,2,3}, LUO Hua-Ping^{1,2*}, GAO Feng^{1,2}, WANG Chang-Xu^{1,2}

(1. *Modern Agricultural Engineering Key Laboratory at Universities of Education Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Alar 843300, China*; 2. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alar 843300, China*; 3. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100000, China*)

ABSTRACT: With the continuous expansion of the apple cultivation area and the continuous improvement of apple yield in China, coupled with the social and economic development, people's requirements for fruit quality are also improved, and its quality detection has become particularly important. Near-infrared spectroscopy technology has been widely used in the field of apple detection in recent years due to its high efficiency and non-destructive characteristics. The overall literature research is increasing, and it is expected that portable detection equipment will be developed and used. In order to facilitate relevant researchers to quickly understand the current situation in this field, combined with the existing research results in this field, this paper expounded on the research and application status of apple quality detection based on near-infrared spectroscopy in the recent 10 years, and systematically discussed the process of establishing apple quality prediction model (spectroscopy acquisition, sample division, spectral data preprocessing, characteristic wavelength selection, model establishment, etc.) and the specific application of this technology in the field of apple detection (variety difference, origin traceability, shelf life

基金项目: 国家自然科学基金项目(11964030)、自治区教育厅普通高等学校现代农业工程重点实验室开放课题项目(TDNG2021201)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11964030), and the Open Topics from Modern Agricultural Engineering Key Laboratory at Universities of Education Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region (TDNG2021201)

***通信作者:** 罗华平, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品品质无损检测技术。E-mail: luohuaping739@163.com

***Corresponding author:** LUO Hua-Ping, Ph.D, Professor, College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, No.705, Hongqiao Road, Xingfu Street, Alar 843300, China. E-mail: luohuaping739@163.com

prediction, etc.), and put forward some suggestions for the future development direction. This paper will provide certain references for subsequent researchers in the research (such as algorithm improvement and optimization, integration of new theories) and the development direction of near-infrared spectroscopy technology in apple detection.

KEY WORDS: near-infrared spectroscopy technology; model establishment; apple; quality detection

0 引言

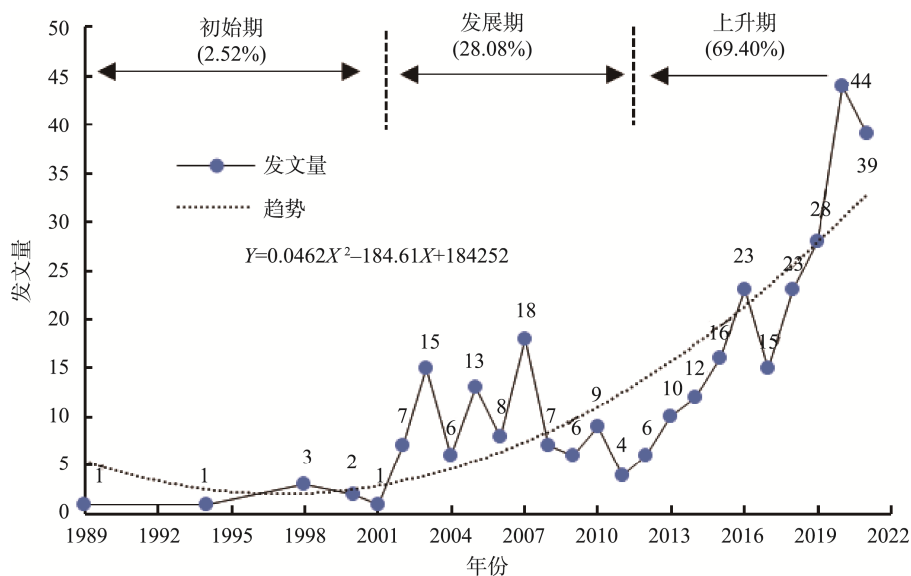
根据中国统计年鉴, 1952 年我国苹果产量只占全国果品的 4.83%, 而 2020 年此占比已达到 15%, 苹果在全国水果行业经济中占据重要地位。随着我国苹果种植面积不断扩大, 产量不断提高, 加上全球经济不断发展, 人们对苹果的品质要求也越来越高。品质检测工作在现代化农业中已成为增加林果业附加值的有力措施^[1-2]。

现有检测手段大致分为两种: 传统理化检测与无损检测。传统理化检测需采集苹果果肉或溶液作为样品, 虽检测结果准确、可靠性强, 但效率低、具有破坏性, 不适用于果农或相关工作者的大批量检测。无损检测通常借助一种或多种传感器采集所需信号(如光信号、气味信号灯), 经预测模型处理, 对苹果某一或两项特定品质做出判定^[3-6]。这些信号中, 因光学信号蕴含信息丰富, 光谱检测技术受到较多关注。其中, 高光谱技术所用设备价格昂贵、信息量过于放大^[7-8], X 射线检测易受样品形状干扰而造成误差^[9-10], 太赫兹技术为新兴光谱检测技术且尚处于起步阶段^[11]。近红外检测因理论与技术相对成熟、检测便捷, 受到众多学者青睐, 广泛应用于果蔬产地鉴别^[12]、成分分析^[13]、农药与微生物污染程度等的定性或定量分析中^[14-15]。据统计, Web of

Science (WoS)数据库收录有关基于近红外光谱的苹果检测文献达 317 篇, 且呈现增长趋势, 尤其是近 10 年来, 文献数量比例达 69.40%(见图 1), 说明各国对该技术在苹果检测领域的应用越来越重视。为了系统了解该领域的研究情况, 本文概述了近 10 年来近红外光谱技术在苹果品质检测中的应用研究状况, 在模型建立方法、定性定量检测等方面进行综述与分析, 并对未来发展方向提出了一定的建议, 以期对相关工作者提供一定参考。

1 基于近红外光谱技术的苹果品质预测模型研究现状

基于近红外光谱技术的苹果品质检测的重点是建立样本光谱数据与某一理化数据之间的预测模型, 将获取的未知样本光谱数据作为输入, 通过模型预测苹果品质情况^[16-17]。理想的预测模型不仅取决于合适的数据处理方法与稳健精准的模型算法, 还取决于所获取样本本身的特性(如样本数据的精准性、数据特征反映样本本身属性的敏感程度等)^[18-20]。通常, 建立稳健、高精度的苹果品质预测模型主要包括光谱数据与苹果理化数据获取、样本集检验与划分、光谱数据预处理、特征波长提取、建立预测模型与评估预测模型^[21-24], 具体流程如图 2 所示。



注: 数据从 WoS 数据库获取。

图 1 基于近红外光谱技术的苹果检测文献发文量统计

Fig.1 Statistics of the amount of published literature about the detection of apple based on near infrared spectroscopy

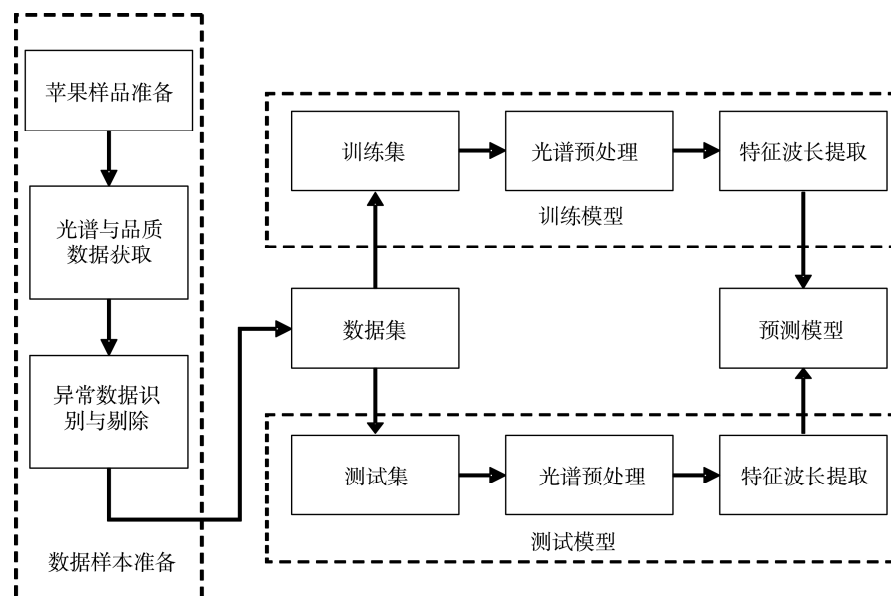


图 2 苹果品质检测模型建立流程

Fig.2 Establishment process of apple quality detection model

1.1 近红外光谱获取

近红外光谱数据采集方式共 3 种: 漫反射、漫透射与全透射。不同采集方式、不同测量位置和不同测量距离所获取的光谱数据有所差异, 对预测效果有一定影响。结合 LIU 等^[25-26]等研究结论可知, 漫反射方式下由光源发出的近红外穿至被测样品浅层再反射至探测器, 获取的光谱数据携带样品浅层信息, 基于该方式能较好预测苹果外部品质; 漫透射方式下近红外可贯穿样品, 获取的光谱数据携带样品内部信息, 基于该方式能较好预测苹果内部品质; 全透射采集方式适于均匀分布的液体样品或透明样品, 符合朗伯-比尔定律, 在苹果检测领域使用较少。傅霞萍等^[27]研究表明, 测量距离要比测量位置对糖度检测结果的影响显著。XIAO 等^[28]研究表明, 光谱探测器与光源均正对苹果赤道位置时, 预测效果最佳。针对不同种类苹果的某一品质参数的检测, 探究出合适的采集方式、最佳采集部位与距离是当前一研究热点, 同时也是预测模型推广的一大阻碍。

1.2 样品集检验与划分

获取的苹果光谱与理化数据或存在异常成分, 这对后续模型的预测会造成干扰, 因而样品检验较为重要。对明显超出合理范围的数据, 可用经验法直接剔除; 对于异常程度不明显的数据, 可通过数理统计法验证, 常用方法有欧式距离法、马氏距离法、莱依达判定法则等^[29-30]。另外, 由于近红外光谱数据的信息维度过大, 有时可结合主成分分析进行降维操作^[31]。

模型建立前需划分数据集。若样本较为充足, 可将数据集划分为训练集、验证集、测试集。其中, 训练集用于

训练模型, 验证集用于验证与优化参数, 测试集用于评判最终训练效果。若样本数相对较少, 可不设验证集, 只保留训练集与测试集。若样本数过少, 可考虑交叉验证^[32-33]。通常, 可直接按特定比例随机划分, 也可使用 KS (Kennard-Stone)算法或 SPXY (sample set partitioning based on joint x-y distance)算法^[34-35]对样本进行更为规范地划分。其中, KS 算法的样品集划分方法是把所有样本看作训练集候选样本, 基于 X 变量之间欧氏距离依次从中挑选样本进入训练集。SPXY 算法是在 KS 算法基础上发展而来的, 在计算样品间距时同时考虑光谱与理化值变量的欧式距离, 保证最大程度表征样本分布^[36]。但若样本数量较为庞大, 使用上述两种划分方法相对费时费力。

1.3 光谱数据预处理

光谱数据预处理与特征波长选择是近红外光谱数据分析与建模过程中两项关键步骤。光谱数据包含基线漂移、噪声等信号成分, 建模之前须对其进行处理, 以提高光谱数据对苹果某一理化特性敏感度, 进而提高预测模型准确度。常用预处理方法有归一化、标准正态变量 (standard normal distribution, SNV)、多元散射校正 (multiplicative scatter correction, MSC)、平滑 (savitzky-golay, S-G)、去散射处理 (de-trend, D)、求导等^[37-40]。近 10 年来, 随着光谱理论进一步成熟, 一些改进的预处理算法, 如加权多元散射校正 (weighted multiplicative scatter correction, WMSC) 等相继被提出。为达到更好预处理效果, 有时将多种算法联合使用, 有助于模型精确性与稳健性。FW 等^[29]在用近红外光谱技术检测苹果时采用 SNV 变换对光谱数据进行预处理, 而 WU 等^[30]采用 MSC、ZHAO 等^[36]采用了归一化

处理。其中,归一化处理能够使测得的光谱数据有规律的分布在零点两侧,从而使得数据的分布情况和信息的变化规律得到充分的反映;SNV 可减小颗粒大小不均匀或者消除散射对光谱干扰;SNV 可避免光谱基线漂移和不重复性等的干扰,并可降低光谱中由于样品的镜面反射或不均匀而产生的干扰。其他预处理方式也各有其作用,通常需结合评价结果确定最优处理方法。

1.4 近红外光谱数据特征波长选择

由近红外光谱仪获取的光谱数据为全波段光谱,包含不敏感信号,若不经选择而全部输入模型,势必影响检测效率与精度,故从中选取有效光谱特征波长也是对苹果进行近红外光谱检测的一项重要工作。当前尚未形成较为成熟的特征波长选择手段的理论依据,一般使用经验法,或使用常见几种特征波长选择手段选取并对比,确定最优选取手段。近红外光谱常用的选取特征波长方法有无信息变量消除法(uninformative variable elimination, UVE)、连续投影法(successive projections algorithm, SPA)、竞争性自适应重加权采样法(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)等^[41-43]。TIAN 等^[38]、ZHANG 等^[43]、彭发等^[44]在基于近红外光谱检测苹果品质时均采用了 CARS 方法提取光谱特征波长,周兆永等^[45]在测苹果霉心病时采用了 SPA 提取了特征波长。与预处理方法的选择类似,在要求较为苛刻的情况下需结合评价结果确定最优特征波长选择方式。

1.5 模型建立

数据预处理完成后便进入建立预测模型环节,该环节直接关系到后续预测准确度。在基于近红外光谱技术的苹果品质定量与定性分析中,常见建模方法有主成分分析(principal component analysis, PCA)、偏最小二乘法(partial least squares, PLS)、多元线性回归(multiple linear regression, MLR)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)、支持向量机(support vector machine, SVM)等方法。在建立模型前,有时需对原始数据做无量纲化处理,以消除部分解释变量被赋予的系数较大的问题(即“大吃小”问题)。无量纲化方法有很多,大致分为平移法、伸缩法、平移伸缩法,但没有最为理想的无量纲方法,需根据预测模型进行具体评价与确定^[46]。经典 MLR 原理简单,但维度过大时,存在运算困难、变量共线等问题;PCA 可进行数据降维,对苹果品质分级使用较多;PLS 因其样本需求量少、可全波段参与建模、允许变量严重多重相关等优势应用最为普遍。NTURAMBIRWE 等^[47]在对基于近红外光谱的苹果糖酸度检测中使用 PCA 建立了预测模型,MA 等^[48]在苹果硬度检测中采用 PLS 建立了预测模型,杨晨昱等^[49]在苹果霉心病检测中采用 PCA+多层感知器神经网络建立了预测模型。随着检测技术进一步发展,一些新颖理论也融入到苹果的近红外检测领域,如分形理论,流形学习理论等^[46,50]。

1.6 预测模型评价

模型预测效果需借助算法定量评估,以便进行模型的客观评价与后续改进。模型性能评价指标主要有决定系数(R^2)、交叉验证均方根误差(root mean square error of cross validation, RMSECV)、预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)和相对分析误差(relative percent deviation, RPD)。其中, R^2 用于评估样本预测值与真实值之间的相关程度, R^2 越接近于 1,两者相关程度越高,若使用交叉验证对数据集划分,则称为交互验证决定系数(determination coefficient of cross-validation, R_{cv});RMSECV 用于测试模型对训练集样本的预测能力, RMSECV 值越小,预测能力越强;RMSEP 用于评价模型对测试集的预测能力, RMSEP 越小,模型泛化能力越强;RPD 用于评价所建模型的稳定性能, RPD 越大,模型稳定性能越好,通常要求 $RPD > 3$ ^[5-8,51]。乔正明等^[24]和 LIU 等^[25]在苹果 SSC 检测研究中,均使用 RMSEP 与 R^2 对模型进行了评价;LI 等^[52]在苹果 SSC 检测中,使用 RMSEP 对模型进行了评价;GUO 等^[53]在苹果存储期间品质检测中,使用 R^2 、RMSEP、RPD 对模型进行了评价。近红外光谱分析技术本质上属于间接分析法,在苹果品质检测过程中可做到无损、在线检测,且随着算法的逐渐优化,检测速度不断提高。但为提高品质预测准确率,需获取充足的样品理化值与光谱数据,工作量较大。另外,光谱数据在处理、建模过程中涉及到的处理环节与影响因素较多,样品种类、检测距离、背景、算法固有缺陷等都会对预测结果造成一定影响,甚至模型需随之更新。尤其是不同检测设备间的模型往往难以通用,增加了使用局限性。部分研究者将苹果产地、品种、不同年份等因素考虑在内建立苹果品质检测通用模型,有助于推动相关检测设备的研制,但存在响应慢、成本高等问题^[54-55]。

2 近红外光谱技术在苹果品质检测方面的应用

基于近红外光谱技术的苹果品质检测具体应用主要集中在内部品质(如糖度、酸度、病害等)、品种、产地溯源、货架期等定量或定性检测。由于近红外光谱区域对外部损伤相对不敏感,将其用于苹果外部品质检测的情况相对较少,该类检测更倾向于使用可见光区域^[56]。

2.1 定量检测研究

苹果定量检测是指针对苹果某一理化指标,与光谱数据建立对应关系,通过光谱数据反演理化值。常见的定量检测模型有 PLS、经典 MLR、神经网络等。

2.1.1 可溶性固形物与酸度检测研究

口感是人们挑选苹果的重要依据之一,可溶性固形物(soluble solids content, SSC)与酸度值是影响口感的重要因素。同时,由于苹果不同的成熟度对应着不同酸度值,故酸度检测也可用于苹果成熟度的判定。传统检测多用破坏性检测方式,耗时耗力,基于近红外光谱技术可实现在

线、快速、便捷检测, 相关研究案例见表 1。实践证明, 对于苹果可溶性固形物与酸度检测, PLS 建立的预测模型效果较好, 准确度高, 应用较为普遍。

2.1.2 脆度与硬度检测研究

苹果质地主要包括脆度、硬度等, 反映了水果的物理特性与组织结构, 直接关系到其食用口感, 与货架期也具有密切关联。传统苹果质地检测方法采用压力硬度计或质构分析仪等破坏性检测方法, 效率低下, 且使检测后苹果的商品价值受损。基于近红外光谱技术的苹果质地的无损检测方式受到重视, 相关研究案例见表 2。在研究过程中, 部分学者将诸如品种、产地等影响融入进去, 但除此之外, 苹果质地还受到病害、损伤等不良因素影响, 这些影响会对获取的光谱数据造成一定干扰。鉴于此, 在后续研究中, 可考虑基于机器视觉技术搭建检测平台, 精准获取无干扰因素区(即无病害、损伤等区域)的光谱信号, 提高预测模型质量, 也可为研究人员探究苹果质地与光谱的关系提供便利。

2.1.3 外部损伤检测研究

在人工采摘、搬运或运输过程中, 苹果由于其皮薄且脆弱, 易因受磕碰、摔伤、挤压导致表皮淤烂或破裂。较为微弱的损伤不易被肉眼识别, 经进一步发展最终会导致变色、腐烂。提前发现与剔除是当前解决该问题的主要措施, 部分学者开始探究近红外光谱与外部损伤之间的关系。由于常规近红外光谱所属波段对外部损伤相对不敏感, 苹果损伤的检测多用于信息量更大的近红外高光谱检测设备。陈姗姗等^[63]基于近红外高光谱技术, 选定 900~1700 nm 作为特征波段, 使用不均匀二次差分方法建立苹果轻微损伤检测模型, 检测准确率达 92%。但高光谱设备价格昂贵, 信息处理处理烦琐, 需进一步降低成本与优化算法。

2.2 定性检测研究

苹果定性研究常用到判定算法, 主要有 PLS-DA、ANN、SVM、K-近邻法等。

2.2.1 货架期检测研究

苹果货架期是在一定的存储条件下, 使苹果具有较为满意的感官(如色泽)特性、理化特性、营养价值等的一段时间, 是衡量其寿命的重要指标。准确判断苹果货架期可使工作人员更好掌握苹果存放寿命与品质信息, 为销售规划提供重要参考。当前, 基于近红外光谱检测技术对苹果货架期的研究相对较少, 且多为定性研究, 这或与对苹果货架期的准确度和效率要求不高、可采用更精确的无损检测方式有关, 加之相隔时间过短时, 不同存放时间的苹果的光谱信号差别不大。张鹏等^[64]基于近红外光谱技术, 使用 SNV+D+一阶导数预处理光谱数据, 通过 PCA 建立预测货架期的模型, 模型 R^2_{cv} 为 0.866, SECV 为 0.171, 同时表明由苹果品种不同对光谱带来的影响可以忽略。刘辉军等^[65]基于神经网络法建立了近红外光谱预测苹果货架期模型, 通过 PCA 方法获取光谱主成分并作为神经网络输入, 识别率为 100%。

2.2.2 病害检测研究

病害影响苹果品质, 在病害初期往往不易被人察觉, 且部分病害有一定感染性。如较为普遍的霉心病, 发病时从苹果心室向外扩展直至严重腐烂。预防病害与及时剔除病害果是当前有力措施。过去, 该病害在初期需把苹果切开方可察验。通过近红外光谱技术建立较为精准的无损检测病害模型是一种较为理想的手段(见表 3)。通过表 3 可看出, 该技术在苹果霉心病检测方面判别率略偏低, 这或与该病害位于苹果中心、现有硬件水平所获取的光谱信号敏感度较低有关。

表 1 基于近红外光谱对苹果 SSC 与酸度检测研究

Table 1 Study on the detection of SSC and acidity of apple based on near-infrared spectroscopy

品种	项目	主要方法	模型效果
富士	SSC	6 个固定位置+1 个随机位置检测+PLS	R^2 为 0.906, RMSEP 为 0.370% ^[28]
富士	SSC	SNV 预处理+PLS+深度学习	R^2 为 0.8431, RMSEP 为 0.8984 ^[44]
金冠、青苹等	酸度	MSC 预处理+遗传算法+PLS	模型评价数值均在理想范围 ^[51]
富士	SSC	SNV 预处理+遗传算法+PLS	R^2 为 0.9333, RMSEP 为 0.4765 ^[57]
富士	酸度	S-G、微分、MSC 等预处理+PLS	R^2 为 0.925, RMSEP 为 0.0395 ^[58]

表 2 基于近红外光谱对苹果脆度与硬度检测研究

Table 2 Study on the detection of brittleness and hardness of apple based on near-infrared spectroscopy

品种	项目	主要方法	模型效果
富士	硬度	CARS 提取特征波长+PLS	R^2 为 0.970, RMSEP 为 0.2% ^[48]
富士	脆度	二阶微分预处理+PLS	R^2 为 0.927, RMSEP 为 0.392 ^[59]
多品种混合	硬度	全波段输入+PLS	R^2 为 0.8481 ^[60]
富士	硬度	MSC+PLS	R^2 为 0.9852, RMSEP 为 0.0395 ^[61]
富士	脆度	一阶导数+WMSC 预处理+PLS	R_{cv} 为 0.8752, RMSECV 为 7.6239N ^[62]

表 3 基于近红外光谱对苹果病害检测研究
Table 3 Study on the disease detection of apple based on near-infrared spectroscopy

品种	项目	主要方法	模型效果
富士	霉心病	投影法降维+深度信念网络建模	预测集识别率为 88.0% ^[45]
富士	霉心病	PCA+多层感知器神经网络	检验集正确判别率为 87.7% ^[48]
富士	霉心病	PCA+Fisher 判别	检验集正确判别率为 87.8% ^[66]
富士	水心病	MSC 预处理+地标等距映射降维+K 最近邻法模型	预测集识别率为 96.3% ^[67]
富士	霉心病	校正受苹果大小影响的新算法预处理+SVM 建模	预测集识别率为 90.2% ^[68]

2.2.3 产地溯源研究

完善的农产品追溯体系可较大程度上保证苹果质量,促进苹果销售。近年,研究者基于近红外光谱技术对苹果溯源问题展开了细致研究。研究主要是基于不同产地的苹果因受不同气候、环境等外界因素影响而使其内部主要成分含量存在一定差异,从而导致获取的近红外光谱数据有所不同(见表 4)。由表 4 可看出,基于近红外光谱技术对苹果产地溯源的判别率较高,但多数研究的辨别对象来自环境差异较大、相隔较远的地区,对于地理位置或环境相近的苹果产地溯源研究相对较少,识别效果有待探究。

2.2.4 品种识别研究

苹果品种繁多,常见的有红富士、金冠、元帅、青香蕉、红夏、红丽、花牛、加纳、嘎啦等,不同品种苹果的组成成分与成分含量有所不同,使各品种理化特性有所差异,进而使获取的不同品质苹果的光谱信号有所区分。基于此,为了快速辨别苹果品种,众多研究者基于近红外光谱技术对其品种鉴定做了一定的工作,并取得了良好效果(见表 5)。但研究文献多集中在有显著区别的苹果品种,对于地理环境相近、品质相似的品种间的鉴别或存在一定困难,需进一步提高检测精度与算法可靠性。

另外,理论与技术的成熟通常需转化成宜人化设备才能将其真正落地。随着基于近红外光谱的苹果检测技术发展成熟,众多研究者逐渐研制出不同的苹果品质检测

设备,并在一定范围内投入生产活动,给果农和其他相关工作者带来诸多便利。孙旭东等^[75]研制了一款苹果糖度近红外光谱在线检测装置,重点对传送部分、采集处理部分、自动控制部分等展开设计,获取 550~850 nm 范围的短波近红外光谱,借助 PLS 算法成功对苹果糖度进行了在线检测,并用 30 个样品对模型进行验证, RMSEP 为 0.67。

3 结束语

近红外光谱技术固然已在苹果品质检测领域得以较好发挥,但仍存在部分问题:(1)与理化检测数据相比仍有一定偏差;(2)通用的近红外光谱数据库尚需建立和完善;(3)光谱整个流程的检测效率尚需提高,需从硬件与软件入手;(4)近红外光谱检测设备价格昂贵,不利于推广;(5)相关理论与技术尚有一定发展空间,如对苹果霉心病识别率低的问题、产地溯源多针对显著不同的地理位置与环境。结合精简、高效的检测算法,建立稳定、准确的预测模型以及研制便携、低价、可靠的近红外光谱检测设备仍是该领域的重要方向。另外,近几年物联网、大数据、云计算等领域逐渐兴起并成熟,这也让近红外光谱检测技术迎来契机,有望借助上述技术建立强大的近红外光谱数据库,推动苹果品质评价与检测进入全面信息化时代。

表 4 基于近红外光谱技术对苹果产地溯源研究
Table 4 Study on the origin traceability of apple based on near-infrared spectroscopy

产地	主要方法	模型效果
阿克苏、洛川、烟台	扩散映射降维+K 最近邻法建模	检验集正确判别率为 92.30% ^[69]
天津、陕西、北京	一阶导与散射处理+PCA 建模	检验集正确判别率为 98.33% ^[70]
阿克苏、栖霞、宜川	CARS 预处理+PLS-DA 建模	检验集正确判别率为 98.1% ^[71]

表 5 基于近红外光谱对苹果品种识别研究
Table 5 Study on the variety identification of apple based on near-infrared spectroscopy

品种	主要方法	模型效果
红富士、花牛、加纳	PCA 降维+模糊聚类建模	检验集正确判别率为 97.2% ^[72]
富士、嘎啦、蛇果等	PCA 降维+二次判别分析	检验集正确判别率为 98.00% ^[73]
嘎啦、红星、乔纳金	主成分分析预处理+多层感知神经网络	检验集正确判别率为 97.8% ^[74]

参考文献

- [1] 柯杨, 马瑜, 李勃, 等. 农产品质量安全现状及检测与追溯技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 315–319, 324.
KE Y, MA Y, LI B, *et al.* Reviews on the present situation and progress of testing and traceability technologies in quality safety of agricultural products [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(24): 315–319, 324.
- [2] 何文斌, 魏爱云, 明五一, 等. 基于机器视觉的水果品质检测综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(11): 10–16.
HE WB, WEI AIY, MING WY, *et al.* Survey of fruit quality detection based on machine vision [J]. *Comput Eng Appl*, 2020, 56(11): 10–16.
- [3] YAN T, DUAN L, CHEN X, *et al.* Application and interpretation of deep learning methods for the geographical origin identification of *Radix glycyrrhizae* using hyperspectral imaging [J]. *RSC Adv*, 2020, 10(68): 41936–41945.
- [4] POWER A, TRUONG VK, CHAPMAN J, *et al.* From the laboratory to the vineyard—evolution of the measurement of grape composition using NIR spectroscopy towards high-throughput analysis [J]. *High-Throughput*, 2019, 8(4): 1–9.
- [5] LU Y, LI X, LI W, *et al.* Detection of chlorpyrifos and carbendazim residues in the cabbage using visible/near-infrared spectroscopy combined with chemometrics [J]. *Spectrochim Acta A*, 2021, 257: 119759.
- [6] YAZICI A, TIRVAKI GY, AYYAZ H. Determination of pesticide residual levels in strawberry (*Fragaria*) by near-infrared spectroscopy [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(5): 1980–1989.
- [7] YU X, WHBCD E, SFBCD E, *et al.* Effect of spectral measurement orientation on online prediction of soluble solids content of apple using Vis/NIR diffuse reflectance [J]. *Infrared Phys Technol*, 2019, 97(3): 467–477.
- [8] FAN S, WANG Q, TIAN X, *et al.* Non-destructive evaluation of soluble solids content of apples using a developed portable Vis/NIR device [J]. *Biosyst Eng*, 2020, 193(4): 138–148.
- [9] DU Z, HU Y, BUTTAR NA, *et al.* X-ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: A review [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(10): 3146–3160.
- [10] KASAMPALIS DS, TSOUVALTZIS P, NTOUROS K, *et al.* The use of digital imaging, chlorophyll fluorescence and Vis/NIR spectroscopy in assessing the ripening stage and freshness status of bell pepper fruit [J]. *Comput Electron Agric*, 2021, 187(15): 106265.
- [11] RONG D, WANG H, YING Y, *et al.* Peach variety detection using Vis/NIR spectroscopy and deep learning [J]. *Comput Electron Agric*, 2020, 175(2): 105553.
- [12] 孙晓林, 周童童, 孙志忠, 等. 光学特性在果蔬品质无损检测中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(4): 209–218.
SUN XL, ZHOU TT, SUN ZZ, *et al.* Research progress into optical property-based nondestructive fruit and vegetable quality assessment [J]. *Food Res Dev*, 2022, 43(4): 209–218.
- [13] ATB A, GM B, LB B, *et al.* Determination of pectin content in orange peels by near infrared hyperspectral imaging [J]. *Food Chem*, 2020, 323(9): 1–9.
- [14] YU GW, MA BX, CHEN JC, *et al.* Vis/NIR spectra discriminant of pesticide residues on the Hami melon surface by gadf and multi-scale CNN [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2022, 41(12): 3701–3707.
- [15] 张建超, 张鹏, 薛友林, 等. 基于电子鼻表征霉心病苹果特征气味及无损检测模型建立[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(2): 267–273.
ZHANG JC, ZHANG P, XUE YL, *et al.* Characterization of characteristic odor and establishment of nondestructive detection model of core rot apples based on electronic nose [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(2): 267–273.
- [16] EDUARDO B, LAURA F, FRANCISCO C, *et al.* Application of near-infrared spectroscopy/artificial neural network to quantify glycosylated norisoprenoids in Tannat grapes [J]. *Food Chem*, 2022, 387(4): 132927.
- [17] SAAD AG, AZAM MM, AMER B. Quality analysis prediction and discriminating strawberry maturity with a hand-held Vis/NIR spectrometer [J]. *Food Anal Methods*, 2021, 15(3): 689–699.
- [18] DENGFEI J, MENG C, LIJUAN X, *et al.* Improving precision of soluble solid content predictive model by adopting suitable detective position of watermelon based on near infrared spectroscopy [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, 30(9): 229–234.
- [19] LIU Y, YU S, CAI L, *et al.* On-line nir detection model optimization of soluble solids content in navel orange based on CARS [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, 44(9): 138–144.
- [20] MISHRA P, PASSOS D. A synergistic use of chemometrics and deep learning improved the predictive performance of near-infrared spectroscopy models for dry matter prediction in mango fruit [J]. *Chemometr Intell Lab*, 2021, 212(5): 1–8.
- [21] ELIEN D, MATTIAS D, JANOS K, *et al.* Assessment of bruise volumes in apples using X-ray computed tomography [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2017, 128(6): 24–32.
- [22] VICENT V, VERBOVEN P, NDOYE FT, *et al.* A new method developed to characterize the 3D microstructure of frozen apple using X-ray micro-CT [J]. *J Food Eng*, 2017, 212(11): 154–164.
- [23] GONG ZY, DENG D, SUN XD, *et al.* Non-destructive detection of moisture content for ginkgo biloba fruit with terahertz spectrum and image: A preliminary study [J]. *Infrared Phys Technol*, 2022, 120(12): 1–9.
- [24] 乔正明, 詹成. 基于近红外光谱和 SSA-ELM 的苹果糖度预测[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 121–126.
QIAO ZM, ZHAN C. Prediction of apple sugar content based on near infrared spectroscopy and SSA-ELM [J]. *Food Mach*, 2021, 37(9): 121–126.
- [25] LIU YD, WANG JZ, JIANG XG, *et al.* Research on Vis/NIR detection of apple's SSC based on multi-mode adjustable optical mechanism [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2021, 41(7): 2064–2070.
- [26] LIU YD, ZHANG Y, JIANG XG, *et al.* Detection of the quality of juicy peach during storage by visible/near infrared spectroscopy [J]. *Vib Spectrosc*, 2020, 111(11): 1–8.
- [27] 傅霞萍, 应义斌, 刘燕德. 苹果糖度近红外光谱检测的初步试验研究[J]. 中国食品学报, 2005, (2): 114–118.
FU XP, YING YB, LIU YD. Primary study on the sugar content measurement of apples by near infrared technique [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2005, (2): 114–118.
- [28] XIAO X, XU H, XIE L, *et al.* Effect of measurement position on prediction of apple soluble solids content (SSC) by an on-line near-infrared (NIR) system [J]. *J Food Meas Charact*, 2018, 13(1): 506–512.
- [29] FW A, YZ B, JZ A, *et al.* Estimation model of soluble solids content in bagged and non-bagged apple fruits based on spectral data [J]. *Comput Electron Agric*, 2021, 191(11): 1–9.
- [30] WU X, ZHOU H, WU B, *et al.* Determination of apple varieties by near infrared reflectance spectroscopy coupled with improved possibilistic Gath-Geva clustering algorithm [J]. *J Food Process Preserv*, 2020, 44(8):

- 1–10.
- [31] LI C, LI L, WU Y, *et al.* Apple variety identification using near-infrared spectroscopy [J]. *J Spectrosc*, 2018, 2018(8): 1–7.
- [32] 张娟. 基于 SPXY-WT-CARS 算法的草莓糖度近红外光谱检测研究[J]. *食品与发酵科技*, 2020, 56(6): 136–139, 142.
ZHANG J. Study on near infrared spectroscopy detection of strawberry sugar degree based on SPXY-WT-CARS algorithm [J]. *Food Ferment Technol*, 2020, 56(6): 136–139, 142.
- [33] GUO W, LIANG S, ZHU X, *et al.* Nondestructive detection of soluble solids content of apples from dielectric spectra with ANN and chemometric methods [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2015, 8(5): 1126–1138.
- [34] ROBERTO KHG, MARIO CUA, GLEDSON EJ, *et al.* A method for calibration and validation subset partitioning [J]. *Talanta*, 2005, 67(4): 736–740.
- [35] 于慧春, 姜楠, 殷勇, 等. 基于高光谱技术及 SPXY 和 SPA 的玉米毒素检测模型建立[J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 328–335.
YU HC, LOU N, YIN Y, *et al.* Establishment of corn toxin detection model based on hyperspectral technology and SPXY and SPA [J]. *Food Sci*, 2018, 39(16): 328–335.
- [36] ZHAO X, ZHAO XK, HUANG M, *et al.* An uncertainty sampling strategy based model updating method for soluble solid content and firmness prediction of apples from different years [J]. *Chemometr Intell Lab*, 2021, 217(10): 1–11.
- [37] WANG F, ZHAO C, YANG G. Development of a non-destructive method for detection of the juiciness of pear via Vis/NIR spectroscopy combined with chemometric methods [J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1–15.
- [38] TIAN G, LI X, ZHANG B, *et al.* Comparative study of two different strategies for determination of soluble solids content of apples from multiple geographical regions by using FT-NIR spectroscopy [J]. *IEEE Access*, 2019, 7(12): 1–1.
- [39] BARTHEL D, DORDEVIC N, FISCHNALLER S, *et al.* Detection of apple proliferation disease in *Malus domestica* by near infrared reflectance analysis of leaves [J]. *Spectrochim Acta A*, 2021, 263(7): 1–17.
- [40] LIU C, YANG S, QIAO Y, *et al.* Effects of the molluscicide candidate PPU06 on alkaline phosphatase in the golden apple snails determined using a near-infrared fluorescent probe [J]. *Chin Chem Lett*, 2021, 32(5): 1809–1813.
- [41] 王立琦, 刘亚楠, 葛慧芳, 等. 食用油脂酸值近红外光谱特征波长优选[J]. *食品科学*, 2016, 37(16): 205–210.
WANG LQ, LIU YN, GE HF, *et al.* Optimization of characteristic wavelength of near infrared spectrum of acid value of edible oil [J]. *Food Sci*, 2016, 37(16): 205–210.
- [42] CHEN Y, CUI C Y, WU Y. Nondestructive detection model of soluble solids content of an apple using visible/near-infrared spectroscopy combined with CARS and MPGA [J]. *Appl Optics*, 2021, 60(27): 8400–8407.
- [43] ZHANG Y, CHEN Y, WU Y, *et al.* Accurate and nondestructive detection of apple brix and acidity based on visible and near-infrared spectroscopy [J]. *Appl Optics*, 2021, 60(13): 4021–4028.
- [44] 彭发, 王震, 刘双喜, 等. 基于偏最小二乘法和深度学习的近红外糖度预测[J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(2): 196–204.
PENG F, WANG Z, LIU SX, *et al.* Near infrared sugar content prediction based on partial least square method and deep learning [J]. *J Jilin Agric Univ*, 2021, 43(2): 196–204.
- [45] 周兆永, 何东健, 张海辉, 等. 基于深度信念网络的苹果霉心病病害程度无损检测[J]. *食品科学*, 2017, 38(14): 297–303.
ZHOU ZY, HE DJ, ZHANG HH, *et al.* Non-destructive detection of moldy core in apple fruit based on deep belief network [J]. *Food Sci*, 2017, 38(14): 297–303.
- [46] 高晓红, 李兴奇. 多元线性回归模型中无量纲化方法比较[J]. *统计与决策*, 2022, 38(6): 5–9.
GAO XH, LI XQ. Comparison of dimensionless methods in multiple linear regression models [J]. *Stat Decis*, 2022, 38(6): 5–9.
- [47] NTURAMBIRWE J, NIEUWOUDT HH, PEROLD WJ, *et al.* Non-destructive measurement of internal quality of apple fruit by a contactless NIR spectrometer with genetic algorithm model optimization [J]. *Sci Afr*, 2019, 3(5): 1–11.
- [48] MA T, XIA Y, INAGAKI T, *et al.* Rapid and nondestructive evaluation of soluble solids content (SSC) and firmness in apple using Vis/NIR spatially resolved spectroscopy [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2020, 173(3): 1–12.
- [49] 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 CY, YUAN HF, MA HL, *et al.* Nondestructive detection of apple mycoheart disease based on Fourier near infrared spectroscopy and electronic nose technology [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(7): 211–216.
- [50] WEIJIE L, BENOIT J, ALEXANDRE L, *et al.* A new application of NIR spectroscopy to describe and predict purees quality from the non-destructive apple measurements [J]. *Food Chem*, 2020, 310(11): 1–10.
- [51] HARPREET K, RAINER K, ANDREW M. Investigating aquaphotomics for temperature-independent prediction of soluble solids content of pure apple juice [J]. *J Near Infrared Spec*, 2020, 28(2): 103–112.
- [52] LI LS, JANG XG, LI B, *et al.* Wavelength selection method for near-infrared spectroscopy based on standard-sample calibration transfer of mango and apple [J]. *Comput Electron Agric*, 2021, 190(9): 1–10.
- [53] GUO Z, WANG M, SHUJAT A, *et al.* Nondestructive monitoring storage quality of apples at different temperatures by near-infrared transmittance spectroscopy [J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(7): 3793–3805.
- [54] WLODARSKA K, PIASECKI P, LOBO-PRIETO A, *et al.* Rapid screening of apple juice quality using ultraviolet, visible, and near infrared spectroscopy and chemometrics: A comparative study [J]. *Microchem J*, 2021, 164(3): 1–9.
- [55] 徐海. 苹果糖度可见/近红外漫透射光谱在线检测通用模型研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
XU H. Study on general model for on-line detection of apple sugar content by visible/near infrared diffuse transmission spectroscopy [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [56] 吉纳玉, 韩东海. 苹果近红外预测模型的传递研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(3): 712–717.
JI NY, HAN DH. Study on the transfer of apple near infrared prediction model [J]. *J Food Saf Qual*, 2014, 5(3): 712–717.
- [57] 冯尚坤, 徐海菊. 基于可见/近红外光谱无损检测苹果可溶性固形物的光照优化[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(16): 64–66.
FENG SK, XU HJ. Light optimization for nondestructive detection of apple soluble solids based on visible/near infrared spectroscopy [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(16): 64–66.
- [58] 孙炳新, 匡立学, 徐方旭, 等. 苹果有效酸度的近红外无损检测研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(15): 298–301.
SUN BX, KUANG LX, XU FX, *et al.* Near infrared nondestructive testing

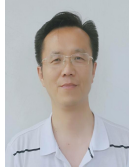
- of apple effective acidity [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(15): 298–301.
- [59] 孙炳新, 匡立学, 徐方旭, 等. 苹果脆度的近红外无损检测[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(5): 185–189.
SUN BX, KUANG LX, XU FX, *et al.* Near infrared nondestructive testing of apple brittleness [J]. *Food Ferment Ind*, 2013, 39(5): 185–189.
- [60] 李志成, 王文昌. 近红外光谱法快速无损检测苹果硬度[J]. *中国果菜*, 2018, (11): 23–25.
LI ZC, WANG WC. Rapid and nondestructive detection of apple firmness by near infrared spectroscopy [J]. *China Fruit Veget*, 2018, (11): 23–25.
- [61] 李桂峰, 赵国建, 刘兴华, 等. 苹果硬度的傅里叶变换近红外光谱无损检测[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(1): 120–123.
LI GF, ZHAO GJ, LIU XH, *et al.* Using FT-NIR spectra in non-invasive measurements of apple firmness [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2009, 40(1): 120–123.
- [62] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 苹果质地的近红外光谱无损检测模型研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(4): 79–83, 88.
ZHANG P, LI JK, CHEN SH. Study on nondestructive measurement model of apple fruit texture by near infrared spectroscopy [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(4): 79–83, 88.
- [63] 陈姗姗, 宁纪锋, 彭艺伟, 等. 基于近红外高光谱图像的苹果轻微损伤检测[J]. *智能系统学报*, 2013, 8(4): 356–360.
CHEN SS, NING JF, PENG YW, *et al.* Apple slight damage detection based on near infrared hyperspectral images [J]. *CAAI Trans Intell Syst*, 2013, 8(4): 356–360.
- [64] 张鹏, 陈帅帅, 李江阔, 等. 采用近红外光谱进行采后苹果品种及货架期定性判别[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 200–205.
ZHANG P, CHEN SS, LI JK, *et al.* Near-infrared spectroscopy for qualitative identification of postharvest apple varieties and shelf life [J]. *Food Fermentat Ind*, 2019, 45(19): 200–205.
- [65] 刘辉军, 孙斌, 陈华才. 基于近红外光谱的不同产地苹果货架期鉴别方法[J]. *光电工程*, 2011, 38(5): 86–91.
LIU HJ, SUN B, CHEN HC. Shelf-life identification method of different origin apples based on near infrared spectroscopy [J]. *Opto-electron Eng*, 2011, 38(5): 86–91.
- [66] 李顺峰, 张丽华, 刘兴华, 等. 基于主成分分析的苹果霉心病近红外漫反射光谱判别[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 158–161.
LI SF, ZHANG LH, LIU XH, *et al.* Near infrared diffuse reflectance spectroscopy discrimination of apple mycoheart disease based on principal component analysis [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2011, 42(10): 158–161.
- [67] 郭俊先, 马永杰, 郭志明, 等. 流形学习方法及近红外透射光谱的新疆冰糖心红富士水心鉴别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(8): 2415–2420.
GUO JX, MA YJ, GUO ZM, *et al.* Identification of Xinjiang Bingtangxin red Fuji water core by manifold learning method and near infrared transmission spectrum [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2020, 40(8): 2415–2420.
- [68] TIAN S, ZHANG J, ZHAO J, *et al.* Effective modification through transmission Vis/NIR spectra affected by fruit size to improve the prediction of moldy apple core [J]. *Infrared Phys Technol*, 2019, 100(8): 117–124.
- [69] 马永杰, 郭俊先, 郭志明, 等. 基于近红外透射光谱及多种数据降维方法的红富士苹果产地溯源[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(6): 303–309.
MA YJ, GUO JX, GUO ZM, *et al.* Origin tracing of red fuji apple based on near infrared transmission spectrum and various data dimensionality reduction methods [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(6): 303–309.
- [70] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧, 等. 近红外光谱用于鉴别苹果产地的研究[J]. *食品科技*, 2014, 39(11): 305–309.
ZHANG P, LI JK, CHEN SH, *et al.* Study on identification of apple origin by near infrared spectroscopy [J]. *Food Sci Technol*, 2014, 39(11): 305–309.
- [71] LI X, HUANG J, XIONG Y, *et al.* Determination of soluble solid content in multi-origin ‘Fuji’ apples by using FT-NIR spectroscopy and an origin discriminant strategy [J]. *Comput Electron Agric*, 2018, 155(12): 23–31.
- [72] 武斌, 武小红, 贾红雯. 苹果近红外光谱的聚类分析[J]. *食品科技*, 2014, 39(9): 280–284.
WU B, WU XH, JIA HW. Cluster analysis of apple near infrared spectra [J]. *Food Sci Technol*, 2014, 39(9): 280–284.
- [73] CORTÉS V, CUBERO S, BLASCO J, *et al.* In-line application of visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy to identify apple varieties [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2019, 12(6): 1021–1030.
- [74] 李光辉, 任亚梅, 任小林, 等. 苹果品种及损伤苹果的 FT-NIR 鉴别研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(16): 251–256.
LI GH, REN YM, REN XL, *et al.* Discrimination and identification of bruised apples and apple varieties by FT-NIR [J]. *Food Sci*, 2012, 33(16): 251–256.
- [75] 孙旭东, 龚志远, 蔡丽君, 等. 水果糖度近红外光谱在线检测装置[J]. *中国农机化*, 2012, (2): 116–120.
SUN XD, GONG ZY, CAI LJ, *et al.* Equipment of online detection for sugar content in fruit based on near infrared spectroscopy [J]. *Chin Agric Mach*, 2012, (2): 116–120.

(责任编辑: 郑 丽 张晓寒)

作者简介



马雪亭, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为农产品品质评价与农业装备设计。
E-mail: xtjxgc@163.com



罗华平, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品品质无损检测技术。
E-mail: luohuaping739@163.com