

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.81185

近红外光谱技术在调味品检测中的应用研究进展

余欣蕾¹ 张佳汇² 刘太昂³ 尹明雨¹ 王锡昌¹

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海太太乐食品有限公司, 上海 201802;

3. 上海达星信息科技有限公司, 上海 200444)

摘要:传统检测调味品品质的方法存在耗时长、成本高及有损检测等弊端,而近红外光谱技术(NIRS)因具有快速、准确、无损、方便等特点,逐渐被应用于调味品领域中,并随着化学计量学、电子信息技术和仪器硬件等方面的发展日趋完善。文章阐述了调味品的分类及常用检测方法,概述了NIRS的原理、特点及近红外快速检测模型,综述了近年来近红外光谱技术在调味品中的研究进展,包括调味品成分检测、掺伪鉴别、品牌溯源和品质检测等,并对NIRS在调味品行业的应用发展趋势进行了展望。

关键词:近红外;调味品;预测模型;品质检测;掺伪

Research progress of near infrared spectroscopy in condiments detection

YU Xinlei¹ ZHANG Jiahui² LIU Taiang³ YIN Mingyu¹ WANG Xichang¹

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Totole Food Co., Ltd., Shanghai 201812, China; 3. Shanghai Daxing Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200444, China)

Abstract: The traditional detection methods for condiments have the disadvantages of time-consuming, high cost and destructive detection, while the near infrared spectroscopy (NIRS) is a fast, accurate, nondestructive and convenient method, which has been used in condiment industry. With the development of chemometrics, electronic information technology and instrumentation hardware, the near infrared spectroscopy is increasingly improved. This review expounds the classification and common detection methods of condiments, and summarizes the principle, characteristics and rapid detection model of NIRS. The principle, characteristics and rapid detection model of NIRS are outlined. The research progress of near infrared spectroscopy in condiment in recent years is reviewed, including ingredient detection, adulteration identification, brand traceability and quality detection. In addition, the development trend of NIRS application in the condiments industry is outlooked, with a view to providing new ideas for the efficient development of non-destructive testing technology for condiments quality.

Keywords: near infrared; condiments; prediction model; quality detection; adulteration

调味品具有调色、增鲜、去腥等功能,能够改善食品的感官品质,更好地满足人们的饮食需求。随着生活水平的提高,消费者对调味品的安全、健康和营养价值越来越关注。而传统检测调味品的方法包括色谱法、分子光谱法、原子光谱法、核磁共振法等,其中高效液相色谱法(high-performance liquid chromatography, HPLC)^[1]、气相色谱法(gas chromatography, GC)^[2]、气相质谱联用(gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS)检测法^[3]因其高精度、高灵敏度的优势被广泛应用。但由于其预处理复杂、检测耗时、维修费用高,在现场快速检验方面存在

一定缺陷。

在 20 世纪初,近红外光谱技术(near infrared spectroscopy, NIRS)已在一些领域取得应用,但是由于技术的欠缺和光谱分析知识的匮乏,NIRS的发展受到了限制,直到 1976 年,在美国农业中心 Norris 等^[4]的贡献下,近红外光谱技术才被开发为食品品质检测的实用工具并开始被广泛应用。NIRS作为一种新型的分析技术,凭借其制备简单、高效、低成本、准确性高等优点^[5],在食品行业迅速发展,适用于在调味品生产过程中的质量控制、品质检测以及市场产地、掺伪、新陈度鉴别等,在调味品质量

基金项目:国家重点研发计划重点专项(编号:2023YFD2401503);上海市嘉定区科技攻关项目(编号:D-8006-19-0079)

通信作者:王锡昌(1964—),男,上海海洋大学教授,博士。E-mail: xcwang@shou.edu.cn

收稿日期:2023-11-29 **改回日期:**2024-05-22

与安全评价中发挥着重要的作用,被应用于醋^[6-7]、酱油^[8-9]、香辛料^[10-11]等调味品的检测。

文章重点综述国内外近红外光谱技术在调味品质量控制与品质评价中的研究进展,以期对调味品无损检测的高效发展提供依据。

1 调味品

调味品被广泛应用于饮食烹调 and 食品加工中,具有增色、增香、去腥、解腻等作用,可改善食品的感官特性,从而满足消费者的饮食需求^[12]。从广义上说,调味品可分为五大类:酸味调味品、甜味调味品、咸味调味品、鲜味调味品和香辛料调味品。目前,在中国调味品的质量保障体系常以感官评价、化学检测法和生物检测法对调味品进行质量品质检测。

感官评价是基于人的感觉器官对食物的特性进行评价^[13]。但是感官评价需要有一定数量、训练有素的感官评价员参与完成,是一种主观性强、较费时间的检测方法,且结果的可靠性易受到多种因素的影响,所以人们也一直在寻找一种可以替代或辅助感官评价的方法^[14]。

化学检测法是运用化学分析方法测定调味品中非挥发性风味物质和挥发性风味物质。调味品中非挥发性风味物质主要包括氨基酸、多肽、有机酸,一般采用HPLC^[15]、超高效液相色谱—串联质谱法(ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)^[16]等进行检测;常用的挥发性风味物质检测分析方法有GC-MS^[17]、气相色谱—嗅闻—质谱技术(gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS)^[18]、电子鼻^[19]等。

生物检测法主要有聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)法^[20]、电泳法^[21]。尽管理化检测具有灵敏度高、准确度高优点,但这是一种对食品有损的检测方法,检测过程复杂且前处理耗时,所用仪器较昂贵、体积大,不易实现现场快速检测,因此有必要发展新技术满足调味品的现场快速分析检测。

2 NIRS

近红外(near infrared, NIR)是介于可见光和中红外光之间的电磁波,波长范围是780~2 526 nm^[22],是由于分子振动的非谐振性使分子振动从基态向高能级跃迁时产生的,主要反映的是C—H、O—H、N—H、S—H等含氢基团的倍频和合频振动信息^[23],也有其他基团的一些信息(如C=C、C=O等),但与含氢基团相比强度较弱^[24]。由于不同的化学官能团在振动能级跃迁时吸收的近红外波长和强度存在差异,因此当NIR照射到样品并经过多次漫反射或透射后,得到的近红外光谱图可以反映物质的不同结构和组成信息。

近红外光谱图不仅反映样品化学成分的指纹图谱,还可以间接反映其相关的物理特性。利用NIRS扫描后得到数据结果,并建立合适的数学模型,然后通过样品的近红外光谱测量结果对模型数据进行检测和验证,最终建立近红外快速分析模型^[25](如图1所示)。一旦模型被确定,样品的定量分析时间将会大大缩短,并能实现实时质量检测。

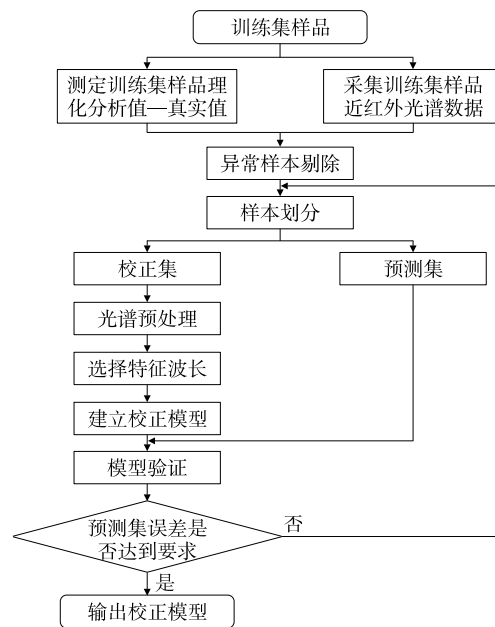


图1 NIRS分析流程图

Figure 1 Flowchart of NIRS analysis

近红外快速分析模型包括定性分析模型和定量分析模型。定性分析是指通过NIRS对样品进行分类或评估其质量等级。NIRS的定性模型根据样本类别是否已知,可以分为监督模式识别和无监督模式识别两类。监督模式识别模型包括偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)^[26]、正交偏最小二乘法判别分析(orthogonal partial least-squares discrimination analysis, OPLS-DA)法^[27]、支持向量机(support vector machines, SVM)^[28]、概率神经网络(probabilistic neural network, PNN)^[29]等。无监督模式识别模型包括主成分分析(principal component analysis, PCA)^[30]等。定量分析是通过分析样品信息与其样品特征之间的内部关系,通过建立校正模型,预测被测样品的相关属性。常用的方法包括线性校正方法和非线性校正方法,其中,线性校正方法包括多元线性回归(multiple linear regression, MLR)^[30]、偏最小二乘(partial least squares, PLS)法^[27]等。非线性校正方法包括神经网络(artificial neural network, ANN)^[30]、偏最小二乘支持向量回归(least-squares support vector machine, LS-SVM)^[31]等。

随着调味品的生产规模不断扩大、机械化和自动化程度提高,传统的理化检测方法和感官评价法,已经无法满足企业对大批量生产的调味品快速检测的需求,且对于发酵调味品生产过程的品质控制,仅依靠人工经验,难以准确掌握发酵规律。因此,需要寻求一种更高效、准确的检测方法来适应现代化调味品生产。

NIRS 因其检测速度快、无损检测、结果准确性好、分析效率高、成本低等诸多优点,可用于调味品的快速检测分析^[1]。调味品中含有大量关键呈味物质,如酸味调味品中乙酸、苹果酸、酒石酸、乳酸等有机酸^[32];甜味调味品中的乳糖、果糖等;咸味调味品中的氯化钠、咸味二肽等;鲜味调味品中常见的鲜味氨基酸包括谷氨酸、天冬氨酸等,小分子核

苷酸类物质如 5'-肌苷酸二钠(inosine 5'-monophosphate disodium salt, IMP)和 5'-鸟苷酸二钠(guanosine 5'-monophosphate disodium salt, GMP)^[33],以及香辛料调味品中的柠檬烯、香豆素等^[34](如图 2 所示)。

NIRS 能快速定位调味品中关键风味物质基团吸收峰位置,并结合数学模型对调味品进行定性分析和定量分析,用于快速鉴别调味品中的成分信息、鉴别掺假调味品和实时监测酿造类调味品的发酵状态等。因此,将 NIRS 用于调味品快速检测有着明显的优势,可以降低感官评价误差大和理化检测方法耗时长等问题,为调味品品质在线或离线检测引入一个新思路^[35],是一种准确、快速的检测手段。

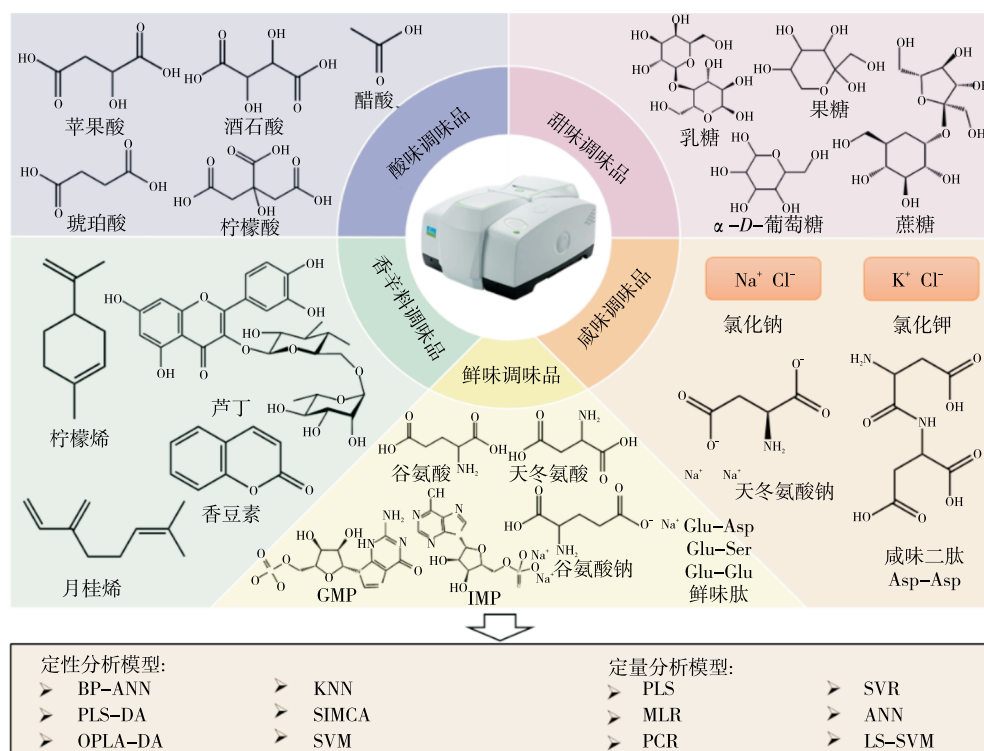


图 2 NIRS 在调味品检测中的应用

Figure 2 Application of NIRS in the detection of condiments

3 NIRS 在调味品中的应用

3.1 NIRS 在酸味调味品中的应用

食醋是一种典型的酸味调味品,富含有机酸,包括乳酸、苹果酸和酒石酸等,对食醋的风味有着重要的作用^[36],且这些有机酸均含有大量的含氢基团($\text{X}-\text{H}$),可有效加载到近红外光谱上。梁楷等^[37]随机采集 106 个不同酸度的食醋,用 NIRS 结合 PLS 模型对食醋的总酸进行快速检测分析,结果表明,食醋总酸模型的交叉验证决定系数(R^2)为 0.972 3,且预测值和实测值的绝对偏差平均值为 0.035。此外,研究者对食醋的可溶性固形物^[38]、糖

度^[39]、有机酸^[40]等成分进行检测,其预测效果均良好,说明 NIRS 可以快速、简便、高效地用于食醋总酸检测,且可用于实际生产过程中。

NIRS 不仅可以检测食醋中的组分,还可以用于识别食醋发酵阶段,提高食醋的产品质量。Fan 等^[41]应用 NIRS 结合偏最小二乘回归(partial least squares regress, PLSR)模型建立镇江香醋发酵阶段预测模型,其对于镇江香醋发酵阶段判断准确率为 100%,可以实时监测镇江香醋固态发酵阶段,优化发酵工艺,提高成品醋的产量和质量。

红外光谱技术的微小型化是一个重要的方向,手持式或便携式近红外光谱仪在现场快速检测中具有更高效、更灵活、便携、低成本等特点^[42]。Sedjoah等^[43]用微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)搭载的DLP NIRscan Nano 便携式近红外光谱仪,建立桑葚果醋的总酸和总多酚含量PLS预测模型,结果表明,总酸和总多酚含量预测结果较好,其预测集决定系数分别为0.95和0.80,且与NIRQuest-512台式近红外光谱仪结果相似,说明便携式近红外光谱仪可用于桑葚果醋生产线上的在线检测,有助于食品质量监控。

NIRS结合定性分析模型可用于识别食醋产地、品牌和醋龄,管骁等^[44]比较了漫反射和透射两种近红外光谱采集模式对食醋品牌溯源模型检测的影响,结果表明漫反射模式光谱数据建模的正确识别率为86.84%,与透射模式相比对食醋品牌判别的正确识别率更高。Liu等^[7]用手持式近红外光谱仪对5个品牌60个食醋样品进行光谱扫描,结合反向传播神经网络(back-propagation neural network, BPNN)和LS-SVM模型建立食醋品牌识别模型,结果表明两种模型对食醋品牌识别率均达到100%。张志勇等^[45]采用二维相关近红外光谱与判别分析方法结合,鉴别老陈醋样品的醋龄,结果表明该模型校正集的正确识别率为97.3%,可以为老陈醋醋龄的快速鉴别提供一种精度高的分类模型。所以,诸多研究证明了NIRS既可以定量分析食醋中的成分组成,又可以定性动态识别发酵阶段,优化发酵工艺,提升成品产量和质量,实现科学检测和调控发酵过程,也可以快速判别食用醋的产地、品牌和醋龄,作为知名食醋品牌保护的一种快速、无损的新兴识别方法,后续应纳入更多不同品牌、批次和不同贮藏时间的食醋样本,提高模型的泛化、特异性和准确性。并且,随着仪器科学的发展,微小型化的近红外光谱仪更适用于酸味调味品发酵及生产过程中的快速、无损检测,具有很大的潜力,但因其成本较高、信噪比低、抗干扰性差等方面,存在许多有待提高的地方。

3.2 NIRS在甜味调味品中的应用

甜味调味品以白砂糖为主,在白砂糖生产过程中糖度、色泽等参数是保障产品质量的重要指标^[46],所以可以将NIRS应用于白砂糖厂生产过程中的实时检测。

黎庆涛等^[47]用SupNIR-4000型近红外在线分析仪,在线采集传送带上白砂糖的近红外漫反射光谱,结合主成分回归分析(principal component regression, PCR)、PLS、ANN 3种模型,对糖厂的白砂糖的色值进行在线监测研究,结果表明ANN模型表现最佳,其校正集相关系数(R_c)为0.921 5,校正均方根误差(root mean square error of calibration, RMSEC)为5.198 4。同时,采用不同的建模方法对糖厂的白砂糖二氧化硫^[48]和粒度^[49]进行在线监测研究,结果均较好,可以应用于白砂糖厂生产过程中的实时

监测。迟雅丽等^[50]对光谱预处理和建模方法提出改进,对某糖厂的白砂糖建立色值定量分析模型,运用PCA、标准正常化(standard normalized, SNV)和去偏差技术(detrend)对光谱进行预处理,然后用改进的偏最小二乘法(modified partial least squares, MPLS)建立白砂糖色度的数学模型,结果表明该模型RMSEC为4.183 8,提高了白砂糖色值模型的精确度,满足糖厂生产过程中质量控制的需要。该结果为NIRS在制糖行业在线应用提供技术支持,有应用推广前景。

然而,目前在白砂糖检测中,NIRS的应用较为有限。主要有两个原因:①白砂糖通常依据国家标准规定的方法进行检测,而NIRS作为一种快速检测方法,尚未被纳入国家标准中。②目前NIRS大多限于实验室研究,真正的应用处于初步阶段,且近红外的模型建立尚不完善,对NIRS在白砂糖调味品方面的应用有一定限制。

3.3 NIRS在咸味调味品中的应用

咸味调味品中呈咸味的物质主要是无机钠盐和钾盐等,能够赋予食物醇厚的口感和浓郁的肉香,其中最常见的是氯化钠(NaCl),即食盐,此外还有酱油、豆腐乳、豆豉等也是常用的咸味调味品。

咸味调味品中酱油是以谷物、豆类等为原料,通过微生物发酵等工艺加工而成的^[51]。酱油中的氨基酸、多肽、水等物质含有大量的C—H、O—H、N—H等含氢基团,能够使酱油样品的特征信息反映在近红外光谱上,从而对酱油中的组分进行快速鉴定。郭峰等^[52]采用便携式近红外光谱仪对酱油采集光谱数据后,用PLS模型对酱油的总酸和氨基酸态氮进行预测,结果表明其 R^2 分别为0.97和0.98,但该研究未对光谱进行预处理与波长选择,且模型较为简单。在此基础上,Xu等^[53]对近红外光谱模型进行了改进,对生抽和老抽的总氮含量分别建立了PLS、区间偏最小二乘(interval partial least squares, iPLS)法和协同区间偏最小二乘(synergy interval-PLS, Si-PLS)法,对比分析发现Si-PLS模型最佳,其生抽模型交叉验证均方根误差(root mean square error of cross validation, RMSECV)为0.019 8,预测均方根误差(root mean error of prediction, RMSEP)为0.020 3,老抽模型RMSECV为0.064 0, RMSEP为0.064 2,该模型能有效消除干扰谱区,预测精度更好,且减少了处理时间,提高了预测效率,实现了酱油中总氮含量的无损检测。Ouyang等^[54]用Si-PLS筛选特征光谱,然后比较核偏最小二乘(kernel-based partial least-squares, KPLS)法和反向传输—人工神经网络(back propagation-artificial neural network, BP-ANN)两种建模方法,结果表明用BP-ANN建模的RMSEP为0.022 1,其建模结果较好,说明近红外光谱结合多元校正模型可以检测酱油的抗氧化活性。

同时,利用近红外光谱中酱油样品的指纹图谱和物

理特性,结合模式识别相关的算法,可以对酱油进行准确的定性分析,包括品牌识别、产品品质分级等。童晓星等^[55]用近红外光谱测得透射光谱曲线结合 PCA 和 ANN,建立酱油品牌鉴别模型,结果表明,该模型对 8 种酱油品牌共 242 个样品的识别正确率达 98.75%,说明 NIRS 可以准确、快速对酱油品牌进行鉴别。Chen 等^[8]采用可见光—近红外光谱结合 K-最近邻分类(K-nearest neighbor, KNN)模型建立了酱油品牌的四类判别模型,优化了波长筛选方法,确定波长数少、精度高的最优模型为基于移动窗口(moving-window, MW)结合波长逐步淘汰(wavelength step by-step phase-out, WSP)波长筛选后的 MW-WSP-KNN 模型,且比较了短光程和长光程(1, 10 mm)对模型精度的影响,结果表明短光程的模型总体识别准确率更高,达 100%,具有较好的实际应用价值,为不同测量模式的小型近红外光谱仪提供了参考。

Hu 等^[56]对预处理算法进行改进,用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)筛选特征波长并用 SVM 建模,评价酱油的品质,并对品牌进行分类,结果表明与其他预处理相比,PSO-SVM 模型预测效果较好,其 PSO-SVM 模型预测酱油中氨基酸态氮、盐、总酸和色比的预测集相关系数(R^2)分别为 0.999 7, 0.946 0, 0.999 6, 0.999 8,用来防止酱油市场出现错误标签的情况,有助于提高酱油市场的质量。在此基础上,Chen 等^[57]研究了酱油的感官评价与近红外光谱信息之间的关系,通过检测国内 24 种酱油样品,用 PLSR 模型对各成分与酱油感官品质的关系进行建模。结果表明,其对酱油水分含量的预测决定系数(coefficient of determination for prediction, R_p^2)为 0.825, RMSEP 为 1.73,对氨基酸氮含量的 R_p^2 为 0.785, RMSEP 为 0.071,对口味评分的 R_p^2 为 0.733, RMSEP 为 11.93,说明模型构建效果良好,并明确了氨基酸氮含量与酱油口味的相互作用,以此鉴别高品质酱油。在实际生产过程中,有望将 NIRS 应用于实际生产过程中品质参数的快速检测,提高酱油成品品质,为酱油级别分类提供参考。

此外,许多研究者也将 NIRS 应用于其他咸味调味品中。Xu 等^[58]采用近红外漫反射光谱法对豆瓣酱发酵过程中的水分、总酸和氨基酸态氮进行定量预测,结果表明用适应提升算法(AdaBoost)建模预测效果最好,该模型对水分、总酸、氨基酸态氮的 R_p^2 分别为 0.963, 0.917, 0.908。Tanzilli 等^[59]用近红外光谱仪结合 PLS 模型建立在线检测生产过程中香蒜酱的稠度和总脂含量模型,结果表明香蒜酱的稠度和总脂含量 RMSECV 分别为 0.64 和 1.59,因此可以利用 NIRS 对生产过程中的香蒜酱进行在线定量分析。

综上所述,在智能优化算法的帮助下,NIRS 可以有效捕捉咸味调味品中大量的氨基酸、多肽等关键性滋味组

分,并构建特征波长与不同品质指标之间的关系,可用于实时在线检测生产过程中的产品质量,并鉴别产品品牌、产品质量等,后续可进一步优化波长的选择和建模方法,提出适用于 NIRS 在咸味调味品中检测的新算法。

3.4 NIRS 在鲜味调味品中的应用

鲜味调味品中的呈鲜物质包括氨基酸类、核苷酸类、肽类、有机酸类和有机碱类等物质,其中谷氨酸钠(monosodium glutamate, MSG)和 IMP 是鲜味物质的代表^[60]。Wang 等^[61]研究表明,采用可见光—近红外光谱结合 PLSR 模型,可以建立一种快速预测增味产品感官品质的模型,但该模型 R_p^2 为 0.47,预测精度较差,不足以实际应用,还需进一步对预处理和建模方法进行改进。Ritthiruangdej 等^[62]采用 NIRS 结合区间组合移动窗口偏最小二乘(searching combination moving window partial least squares, SCMWPLS)法用于准确定量分析鱼露中的总氮含量、pH 值、密度、折射率和糖度。采用该建模方法结合 4 种不同的监督模式识别方法,对鱼露近红外光谱信息区域进行优化组合,可以准确对鱼露进行分类,其中 KNN 模型结果较好,其正确率为 95%。

但目前 NIRS 在鲜味调味品中的应用研究较少,特别是对于鲜味调味品中有代表性的呈鲜物质的 MSG 和 IMP 研究,仅有对 MSG 和 IMP 混合溶液的鲜味物质质量检测 and 鲜味强度的快速检测^[52],而对于复杂体系的鲜味调味品中鲜味物质检测,需要进一步研究。

3.5 NIRS 在香辛料调味品中的应用

NIRS 在香辛料调味品上的应用主要分为两类:定性分析和定量分析。定性分析包括掺伪香辛料调味品的快速掺伪鉴别、香辛料产地溯源和新陈度鉴别等;定量分析包括香辛料调味品中组分含量、掺伪含量、产品质量分级等快速检测。

香辛料调味品市场掺假现象较为常见,为实现掺伪香辛料调味品的快速定性鉴别,可以采用 NIRS 结合化学计量学方法(如表 1 所示),生成特征图谱,有效鉴别香辛料调味品掺伪。根据香辛料调味品的种类不同,结合化学计量学筛选有效的掺伪特征变量,并选取适合的评价模型,提高模型精度。且掺伪样本从一元掺伪到三元或更复杂的掺伪,使其更贴合实际情况,进一步提高香辛料调味品的掺伪检测精度,保证香辛料调味品的安全和品质。

NIRS 可用于香辛料调味品产地溯源和新陈度鉴别。吴习宇^[71]通过采集 8 个不同产地的 205 个花椒样品,结果表明 SNV、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)预处理后的判别偏最小二乘(discriminant partial least squares, DPLS)法判别模型效果最好,其识别准确率为 97.56%,检测结果较为理想,可以有效识别和追溯花椒产地。同时,花椒的新鲜度是其分级和定价的重要依据

表1 NIRS在香辛料调味品掺伪鉴别中的应用

Table 1 Application of NIRS in identification of spices and seasonings adulteration

掺伪种类	样品数量	光谱范围	建模方法	模型精度	参考文献
姜黄粉掺假玉米淀粉	224	1 400~1 550, 1 900~2 050 nm	PLSR	$R^2=0.97$	[63]
姜黄掺假间胺黄	120	780~2 500 nm	PLSR	$R^2=0.98$	[64]
肉桂掺假桂皮	60	940~1 640 nm	PNN	正确判别率为100%	[65]
八角茴香掺假莽草	48	400~1 000 nm	PLS-DA	准确率为98.4%	[66]
洋葱粉掺假玉米淀粉	180	1 000~2 500 nm	PLSR	$R_p^2=0.98$	[67]
白胡椒粉掺假玉米粉和全麦面粉	250	1 300~2 600 nm	PLS	$R^2=0.996$	[68]
孜然粉掺假木薯淀粉和玉米粉	40	1 100~2 500 nm	MLR	$R^2>0.97$	[30]
辣椒粉掺假马铃薯淀粉、阿拉伯胶和胭脂树红	315	900~1 700 nm	PLS-DA	$R_p^2=0.95$	[11]
花椒粉掺假麦麸粉、稻糠粉、玉米粉、松香粉	30	800~2 500 nm	DPLS	准确率为100%	[69]
大蒜粉掺假滑石粉、麦芽糊精、玉米淀粉等多种掺假物	117	12 000~4 000 cm^{-1}	OPLS-DA	$R^2=0.985$	[70]

之一,该作者通过稀疏表示分类(square representation based classification, SRC)与DPLS、SVM和径向基核函数(radical basic function neural network, RBF-NN)3种模型比较后发现, SRC模型测试速度快且鉴别准确率高,其对于红花椒和青花椒的新陈度鉴别准确率分别为97.50%, 100.00%,是一种方便、高效且值得推广的建模方法。

此外, NIRS还可用于香辛料的定量分析。黎强等^[70]采用PLS建立八角中反式茴香脑和莽草酸含量的近红外光谱定量分析模型,结果表明该模型能较准确测定八角中反式茴香脑($R^2=90.86\%$)和莽草酸($R^2=93.13\%$)的含量。Lim等^[72]通过测量来自韩国14个地区的149个红辣椒粉,用可见光-NIRS结合PLSR模型,建立预测红辣椒粉中辣椒素模型,结果表明在450~950 nm有效波长内,预测模型的验证决定系数为0.985,能有效定量无损检测红辣椒粉的辛辣程度。在此基础上, Jing等^[73]在940~1 660 nm波长范围内,采用NIRS结合PLSR和极限学习机(extreme learning machine regression, ELM)建立干辣椒粉中辣椒素含量定量模型,结果表明PLSR结果较好, RMSEP为1.033 8 g/kg。

NIRS能有效识别香辛料调味品中的酚类、萜类、含硫化物、生物碱等,因此,其在产品生产过程中的掺伪鉴别、品质分级方面有着重要的作用和优势,具有良好的应用前景。

4 结论与展望

随着5G通信、人工智能、大数据、云计算等信息技术向纵深推进,以及计算机信息化、数学、化学和化学计量学的交叉发展,近红外光谱技术在调味品方面被广泛应用。通过选取合适的预处理方式和建模方法,近红外光谱技术可以快速高效地分析调味品中的组分、建立调味

品品质预测模型和鉴别调味品真伪,对提高食品品质质量与安全,保证市场秩序有重要的意义和应用价值。

但近红外光谱技术在检测的稳定性、微型化、准确性、普适性等方面还存在一些亟待改进的问题:①目前,中国近红外光谱技术与国外仍有较大差距,相关的仪器主要依赖进口,国内企业在相关近红外光谱仪的研发方面仍有待提高。②近红外光谱仪的微型化还需要更多投入,开发出更适合现场检测的便携式或手提式微型近红外仪,且提升光谱仪精度和分辨率以提升检测准确度。③近红外光谱的数字模型还需要进一步研究,进一步优化预处理算法,并针对不同的调味品,建立可靠性强、易操作的数字模型,提高模型的准确率。④进一步开发近红外光谱仪相关软件,用户可通过手机应用程序就能在线实时查看调味品的光谱强度、吸收率等信息,并通过预先写入的预测模型对光谱信息进行计算,得到相应的结果。并且将近红外光谱技术与人工智能、大数据、物联网等结合构建专用的近红外光谱数据库,实现光谱数据共享,模型在线升级和远程更新等。

参考文献

- [1] 鲍守民, 陈生蓉, 田海宁, 等. 超高效液相色谱—三重四级杆线性离子阱质谱联用仪结合化学计量学方法对不同大小虹鳟鱼肉中游离氨基酸含量与滋味相关性的研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(20): 238-243.
- BAO S M, CHEN S R, TIAN H N, et al. Study on the correlation between free amino acid content and taste of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with different sizes based on UPLC-Q-Trap-MS combined with chemometrics[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(20): 238-243.
- [2] 肖雪, 吴惠勤, 陈啸天, 等. 全二维气相色谱在食品风味化学成分分析中的应用[J]. 分析测试学报, 2019, 38(1): 122-128.

- XIAO X, WU H Q, CHEN X T, et al. Application of comprehensive two-dimensional gas chromatography in analysis on chemical components of food flavor[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2019, 38(1): 122-128.
- [3] 陶森, 杨华, 郑奕柔, 等. SPE-GC-MS 法测定固态调味品中 3-氯-1,2-丙二醇[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(3): 237-242.
- TAO S, YANG H, ZHENG Y R, et al. Determination of 3-chloro-1, 2-propanediol in solid condiments by SPE-GC-MS [J]. *China Food Additives*, 2023, 34(3): 237-242.
- [4] NORRIS K H, BARNES R F, MOORE J E, et al. Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Animal Science*, 1976, 43(4): 889-897.
- [5] GRASSI S, ALAMPRESE C. Advances in NIR spectroscopy applied to process analytical technology in food industries[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 22: 17-21.
- [6] PHANOMSOPHON T, SIRISOMBOON P, LAPCHAROENSUK R, et al. Evaluation of acetic acid and ethanol concentration in a rice vinegar internal venturi injector bioreactor using Fourier transform near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2019, 27(6): 416-423.
- [7] LIU F, YUSUF B L, ZHONG J, et al. Variety identification of rice vinegars using visible and near infrared spectroscopy and multivariate calibrations[J]. *International Journal of Food Properties*, 2011, 14(6): 1 264-1 276.
- [8] CHEN J M, FU C L, PAN T. Modeling method and miniaturized wavelength strategy for near-infrared spectroscopic discriminant analysis of soy sauce brand identification[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 277: 121291.
- [9] ZHAO J W, OUYANG Q, CHEN Q S, et al. Simultaneous determination of amino acid nitrogen and total acid in soy sauce using near infrared spectroscopy combined with characteristic variables selection[J]. *Food Science and Technology International*, 2013, 19(4): 305-314.
- [10] MAYR S, BEĆ K B, GRABSKA J, et al. Near-infrared spectroscopy in quality control of *Piper nigrum*: a comparison of performance of benchtop and handheld spectrometers[J]. *Talanta*, 2021, 223: 121809.
- [11] OLIVEIRA M M, CRUZ-TIRADO J P, ROQUE J V, et al. Portable near-infrared spectroscopy for rapid authentication of adulterated paprika powder[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, 87: 103403.
- [12] 于海燕, 刘新广, 李永, 等. 调味品减盐增鲜的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 375-382.
- YU H Y, LIU X G, LI Y, et al. Progress in reducing salt and enhancing umami in condiments[J]. *Food Science*, 2023, 44 (5): 375-382.
- [13] 周琳. 浓香型高色度甜面酱加工技术及其新产品的开发[D]. 成都: 成都大学, 2020: 36.
- ZHOU L. Studies on processing and new product development of sweet flour paste with thick aroma and high chroma[D]. Chengdu: Chengdu University, 2020: 36.
- [14] 曹世宁. 香菇、金针菇呈味物质提取工艺及呈味特性的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016: 7-11.
- CAO S N. Studies on the characteristics of taste of *lentinula edodes*, *flammulina velutipes* and extract non-volatile taste components[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016: 7-11.
- [15] KONG Y, ZHANG L L, ZHANG Y Y, et al. Evaluation of non-volatile taste components in commercial soy sauces[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1 854-1 866.
- [16] 魏宇涛, 温泉, 唐维英, 等. UPLC-MS/MS 法同时测定蛋白饮料和液体调味品中 36 种防腐剂[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(1): 279-285.
- WEI Y T, WEN Q, TANG W Y, et al. Simultaneous determination of 36 preservatives in protein drinks and liquid condiments by UPLC-MS/MS[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(1): 279-285.
- [17] KANEKO S, KUMAZAWA K, NISHIMURA O. Studies on the key aroma compounds in raw (Unheated) and heated Japanese soy sauce[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(14): 3 396-3 402.
- [18] 何天鹏, 赵镭, 钟葵, 等. 气相色谱—嗅闻/质谱联用分析酵母菌发酵酱油中香气物质[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 259-265.
- HE T P, ZHAO L, ZHONG K, et al. Analysis of aroma compounds in yeast-fermented soy sauce by GC-O/MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(16): 259-265.
- [19] 田怀香, 张雅敬, 吴灏, 等. 气相色谱—质谱联用和电子鼻用于鉴别鸡精调味品香气成分[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 191-197.
- TIAN H X, ZHANG Y J, WU X, et al. Identification of flavor components of chicken bouillon flavor components by gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. *Food Science*, 2017, 38(2): 191-197.
- [20] 朱永清, 李治华, 李华佳, 等. 基于 PCR-DGGE 分析不同品牌郫县豆瓣酱真菌多样性[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 104-108.
- ZHU Y Q, LI Z H, LI H J, et al. Analysis of fungal diversity of different commercial brands of Pixian broad bean paste using PCR-DGGE method[J]. *Food Science*, 2017, 38(2): 104-108.
- [21] 孙潇慧, 李新玲, 霍胜楠, 等. 十二烷基硫酸钠—聚丙烯酰胺凝胶电泳技术及国内外蜂蜜掺伪检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(16): 5 288-5 292.
- SUN X H, LI X L, HUO S N, et al. Research progress on sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis technology and honey adulteration detection technology at home and abroad[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(16): 5 288-5 292.

- [22] 薛莉沁. 小型近红外光谱仪的开发及在酿酒原料中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 2.
- XUE L Q. Development of a small near-infrared spectrometer and its application in brewing raw materials[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021: 2.
- [23] 徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 现代近红外光谱技术及应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2000(2): 134-142.
- XU G T, YUAN H F, LU W Z, et al. Development of modern near infrared spectroscopic techniques and its applications[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2000(2): 134-142.
- [24] AFARA I O, FLOREA C, OLUMEGBON I A, et al. Characterizing human subchondral bone properties using near-infrared (NIR) spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9 733.
- [25] 陈方方, 丁悦武, 杨友, 等. 近红外光谱波长选择及定量分析模型方法研究[J]. 长江信息通信, 2022, 35(8): 45-48, 52.
- CHEN F F, DING Y W, YANG Y, et al. Study on the wavelength selection and quantitative analysis model method of near-infrared spectra[J]. Changjiang Information & Communications, 2022, 35(8): 45-48, 52.
- [26] SUN F, CHEN Y, WANG K Y, et al. Identification of genuine and adulterated pinellia ternata by mid-infrared (MIR) and near-infrared (NIR) spectroscopy with partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) [J]. Analytical Letters, 2020, 53(6): 937-959.
- [27] MA H L, WANG J W, CHEN Y J, et al. Rapid authentication of starch adulterations in ultrafine granular powder of Shanyao by near-infrared spectroscopy coupled with chemometric methods[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 108-115.
- [28] SHEN G H, KANG X C, SU J S, et al. Rapid detection of fumonisin B₁ and B₂ in ground corn samples using smartphone-controlled portable near-infrared spectrometry and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132487.
- [29] XU S, LU H Z, FAN C X, et al. Visible and near-infrared hyperspectral imaging as an intelligent tool for parasite detection in sashimi[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 181: 114747.
- [30] DE LIMA A B S, BATISTA A S, DE JESUS J C, et al. Fast quantitative detection of black pepper and cumin adulterations by near-infrared spectroscopy and multivariate modeling[J]. Food Control, 2020, 107: 106802.
- [31] HAN Z G, CAI S G, ZHANG X L, et al. Development of predictive models for total phenolics and free p-coumaric acid contents in barley grain by near-infrared spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 342-348.
- [32] KONG Y, ZHANG L L, SUN Y, et al. Determination of the free amino acid, organic acid, and nucleotide in commercial vinegars[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(5): 1 116-1 123.
- [33] 于海燕, 刘新广, 李永, 等. 调味品减盐增鲜的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 375-382.
- YU H Y, LIU X G, LI Y, et al. Progress in reducing salt and enhancing umami in condiments[J]. Food Science, 2023, 44(5): 375-382.
- [34] 邹浩, 李正杰, 杨艺, 等. 浓香型天然香辛料风味特征及对肉制品风味形成影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 355-365.
- ZOU H, LI Z J, YANG Y, et al. Research progress on flavor characteristics of strong fragrance spices and their effects on flavor formation of meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 355-365.
- [35] NAGY M M, WANG S, FARAG M A. Quality analysis and authentication of nutraceuticals using near IR (NIR) spectroscopy: a comprehensive review of novel trends and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 290-309.
- [36] AL-DALALI S, ZHENG F P, XU B C, et al. Processing technologies and flavor analysis of Chinese cereal vinegar: a comprehensive review[J]. Food Analytical Methods, 2023, 16(1): 1-28.
- [37] 梁楷, 闫裕峰, 郎繁繁, 等. 食醋总酸近红外快速检测方法的研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(2): 94-97.
- LIANG K, YAN Y F, LANG F F, et al. Rapid detection method of total acid in vinegar by near infrared spectroscopy[J]. China Brewing, 2020, 39(2): 94-97.
- [38] 李子文, 熊雅婷, 王健, 等. 遗传算法联合LS-SVM的苹果原醋成分定量分析[J]. 中国酿造, 2016, 35(1): 120-124.
- LI Z W, XIONG Y T, WANG J, et al. Quantitative analysis of apple vinegar compositions based on genetic algorithm combined with LS-SVM[J]. China Brewing, 2016, 35(1): 120-124.
- [39] 王莉, 李增芳, 何勇, 等. 应用近红外光谱技术快速检测果醋糖度[J]. 光谱学与光谱分析, 2008(8): 1 810-1 813.
- WANG L, LI Z F, HE Y, et al. Fast detection of sugar content in fruit vinegar using NIR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008(8): 1 810-1 813.
- [40] 张林. 近红外光谱对食醋有机酸含量快速、无损测定方法研究[J]. 中国调味品, 2016, 41(8): 118-120.
- ZHANG L. Research on rapid and nondestructive detection method for organic acids content in vinegar by NIRS[J]. China Condiment, 2016, 41(8): 118-120.
- [41] FAN S W, PAN T H, LI G Q. Evaluation of the physicochemical content and solid-state fermentation stage of Zhenjiang aromatic vinegar using near-infrared spectroscopy [J]. International Journal of Food Engineering, 2020, 16(12): 20200127.
- [42] 霍学松, 陈瀑, 戴嘉伟, 等. 微小型近红外光谱仪的应用进展与展望[J]. 分析测试学报, 2022, 41(9): 1 301-1 313.
- HUO X S, CHEN P, DAI J W, et al. Progress and prospect of application of miniaturized near infrared spectrometers[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2022, 41(9): 1 301-1 313.

- [43] SEDJOAH R C A A, MA Y, XIONG M, et al. Fast monitoring total acids and total polyphenol contents in fermentation broth of mulberry vinegar using MEMS and optical fiber near-infrared spectrometers[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 260: 119938.
- [44] 管晓, 刘静, 古方青, 等. 基于 NIRS 技术的食用醋品牌溯源研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(9): 2 402-2 406.
- GUAN X, LIU J, GU F Q, et al. Study on brand traceability of vinegar based on near infrared spectroscopy technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(9): 2 402-2 406.
- [45] 张志勇, 韩宁, 周涛, 等. 基于二维相关近红外光谱的老陈醋醋龄鉴别[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(8): 389-395.
- ZHANG Z Y, HAN N, ZHOU T, et al. Identification of the age of aged vinegar based on two-dimensional correlation near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(8): 389-395.
- [46] PHUPHAPHUD A, SAENGPRACHATANARUG K, POSOM J, et al. Prediction of the fibre content of sugarcane stalk by direct scanning using visible-shortwave near infrared spectroscopy[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2019, 101: 71-80.
- [47] 黎庆涛, 王远辉, 卢家炯. 近红外光谱技术在线测定白砂糖色值[J]. *食品科技*, 2011, 36(1): 271-274.
- LI Q T, WANG Y H, LU J J. Online determination of white granulated sugar color by near infrared spectroscopy technique [J]. *Food Science and Technology*, 2011, 36(1): 271-274.
- [48] 黎庆涛, 王远辉, 潘路路, 等. 近红外光谱法在线测定白砂糖二氧化硫的研究[J]. *食品科技*, 2010, 35(9): 324-327.
- LI Q T, WANG Y T, PAN L L, et al. Study on determination of white granulated sugar SO₂ by on-line near infrared spectroscopy[J]. *Food Science and Technology*, 2010, 35(9): 324-327.
- [49] 陈刚, 王远辉, 黎庆涛, 等. 人工神经网络—近红外光谱法在线测定白砂糖粒度[J]. *食品科技*, 2011, 36(5): 268-271.
- CHEN G, WANG Y H, LI Q T, et al. On-line determination of white granulated sugar granularity by artificial neural network-near infrared spectroscopy[J]. *Food Science and Technology*, 2011, 36(5): 268-271.
- [50] 迟雅丽, 赵亚红, 杨丽, 等. 近红外技术用于白砂糖色值检测模型的建立[J]. *现代食品*, 2020(10): 195-199.
- CHI Y L, ZHAO Y H, YANG L, et al. Near-infrared technology for the establishment of detection model for color of white granulated sugar[J]. *Modern Food*, 2020(10): 195-199.
- [51] 许洁. 酿造调味品的营养和健康价值[J]. *中国酿造*, 2013, 32(9): 6-8.
- XU J. The nutrition and health value of brewing condiments [J]. *China Brewing*, 2013, 32(9): 6-8.
- [52] 郭峰, 王斌, 陆洋. 酱油中总酸和氨基酸态氮成分的快速检测及研究[J]. *食品科学*, 2006(12): 699-703.
- GUO F, WANG B, LU Y. Total acid and amino acid nitrogen prediction of chinese sauce using near infrared spectroscopy [J]. *Food Science*, 2006(12): 699-703.
- [53] XU J, HUANG F R, LI Y P, et al. Rapid detection of total nitrogen content in soy sauce using NIR spectroscopy[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2015, 33(6): 518-522.
- [54] OUYANG Q, ZHAO J W, CHEN Q S, et al. Rapid measurement of antioxidant activity in dark soy sauce by NIR spectroscopy combined with spectral intervals selection and nonlinear regression tools[J]. *Analytical Methods*, 2012, 4(4): 940.
- [55] 童晓星, 鲍一丹, 何勇. 应用近红外光谱技术快速检测酱油品牌的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008(3): 597-601.
- TONG X X, BAO Y D, HE Y. Study on fast discrimination of brands of soy sauce using near infrared spectra[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(3): 597-601.
- [56] HU L Q, YIN C L, MA S, et al. Vis-NIR spectroscopy combined with wavelengths selection by PSO optimization algorithm for simultaneous determination of four quality parameters and classification of soy sauce[J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(3): 633-643.
- [57] CHEN X Q, LI C W, LIU X F, et al. Near-infrared spectroscopy of Chinese soy sauce for quality evaluation[J]. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 2023, 15(1): 139-151.
- [58] XU M, WANG Y, WANG X, et al. Fermentation process monitoring of broad bean paste quality by NIR combined with chemometrics[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(4): 2 929-2 938.
- [59] TANZILLI D, D' ALESSANDRO A, TAMELLI S, et al. A feasibility study towards the on-line quality assessment of pesto sauce production by NIR and chemometrics[J]. *Foods*, 2023, 12(8): 1 679.
- [60] 胡建, 冯耀泽, 王益健, 等. 基于近红外光谱的鲜味物质与鲜味强度检测[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 246-253.
- HU J, FENG Y Z, WANG Y J, et al. Detection of umami substances and umami intensity based on near-infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 246-253.
- [61] WANG S, LIU X F, TAMURA T, et al. Rapid detection of the quality of miso (Japanese fermented soybean paste) using visible/near-infrared spectroscopy[J]. *Analytical Letters*, 2021, 54(14): 2 304-2 314.
- [62] RITTHIRUANGDEJ P, KASEMSUMRAN S, SUWONSICHON T, et al. Determination of total nitrogen content, pH, density, refractive index, and brix in Thai fish sauces and their classification by near-infrared spectroscopy with searching combination moving window partial least squares[J]. *The Analyst*, 2005, 130(10): 1 439.
- [63] KAR S, TUDU B, JANA A, et al. FT-NIR spectroscopy coupled with multivariate analysis for detection of starch adulteration in turmeric powder[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2019, 36(6): 863-875.

(下转第 218 页)

- [72] TAVASSOLI M, KHEZERLOU A, MOGHADDAM T N, et al. Sumac (*Rhus coriaria* L.) anthocyanin loaded-pectin and chitosan nanofiber matrices for real-time monitoring of shrimp freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 125044.
- [73] HUANG J Y, LIU J L, CHEN M Y, et al. Immobilization of roselle anthocyanins into polyvinyl alcohol/hydroxypropyl methylcellulose film matrix: study on the interaction behavior and mechanism for better shrimp freshness monitoring[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 666-677.
- [74] 刘黎. 基于蝶豆花花青素的东方对虾新鲜度指示膜研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 1-75.
- LIU L. Research on the freshness indicator film of Oriental shrimps based on pterostilbene anthocyanins[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 1-75.
- [75] 王欣, 李婷婷, 冯龙斐, 等. 负载蓝莓花青素的壳聚糖基智能指示膜监测花蛤新鲜度的研究[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 10-19.
- WANG X, LI T T, FENG L F, et al. Chitosan-based smart indicator film loaded with blueberry anthocyanins for monitoring clam freshness[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(11): 10-19.
- [76] 卢立新, 贾代涛, 潘嘹. 基于改性玫瑰茄花青素的新鲜度指示膜研制及其在鲳鱼包装中的应用[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 1-6.
- LU L X, JIA D T, PAN L. Development of freshness indicator film based on modified rosehip anthocyanin and its application in pomfret packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 1-6.
- [77] WANG S C, LI R, HAN M J, et al. Intelligent active films of sodium alginate and konjac glucomannan mixed by *Lycium ruthenicum* anthocyanins and tea polyphenols for milk preservation and freshness monitoring[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126674.
- [78] KUSWANDI B, ASIH N P N, PRATOKO D K, et al. Edible pH sensor based on immobilized red cabbage anthocyanins into bacterial cellulose membrane for intelligent food packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2020, 33(8): 321-332.
- [79] 岳崇泽, 王远哲, 王桂英. 蝶豆花青素智能指示标签的制备及其对牛奶新鲜度的监测[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(3): 37-44.
- YUE C Z, WANG Z Y, WANG G Y. Preparation of smart indicator labels for butterfly bean anthocyanins and their monitoring of milk freshness[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(3): 37-44.
- [80] 蒋庆玥. 壳聚糖/花青素智能标签的制备及应用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022: 21-36.
- JIANG Q Y. Preparation and application of chitosan/anthocyanin smart labels[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022: 21-36.
- (上接第 208 页)
- [64] RUKUNDO I R, DANA O M-G C, WELLER C L, et al. Use of a handheld near infrared spectrometer and partial least squares regression to quantify metanil yellow adulteration in turmeric powder[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2020, 28(2): 81-92.
- [65] CANTARELLI M Á, MOLDES C A, MARCHEVSKY E J, et al. Low-cost analytic method for the identification of Cinnamon adulteration[J]. Microchemical Journal, 2020, 159: 105513.
- [66] 王伟, 赵昕, 褚璇, 等. 基于可见/近红外高光谱的八角茴香与莽草无损鉴别[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 373-379.
- WANG W, ZHAO X, CHU X, et al. Nondestructive identification of star anise and shikimmi by visible/near infrared hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 373-379.
- [67] LOHUMI S, LEE S, LEE W H, et al. Detection of starch adulteration in onion powder by FT-NIR and FT-IR spectroscopy[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(38): 9 246-9 251.
- [68] LI X W, LU R, WANG Z X, et al. Detection of corn and whole wheat adulteration in white pepper powder by near infrared spectroscopy[J]. American Journal of Food Science and Technology, 2018, 6(3): 114-117.
- [69] GALVIN-KING P, HAUGHEY S A, ELLIOTT C T. Garlic adulteration detection using NIR and FTIR spectroscopy and chemometrics[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103757.
- [70] 黎强, 周颖, 刘佳明, 等. 基于偏最小二乘法的近红外光谱测定八角中反式茴香脑和莽草酸[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(4): 38-46.
- LI Q, ZHOU Y, LIU J M, et al. Determination of trans-anethole and shikimic acid content in star anise by near infrared spectroscopy based on partial least squares method[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2023, 43(4): 38-46.
- [71] 吴习宇. 花椒产地、新陈度及掺伪的近红外光谱鉴别方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 79-86.
- WU X Y. Identification of geographical origin, freshness and adulteration of Huajiao by near infrared spectroscopy[D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 79-86.
- [72] LIM J, MO C, KIM G, et al. Development of models for the prediction of domestic red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder capsaicinoid content using visible and near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2015, 40(1): 47-60.
- [73] JING B W, SONG W S, GAO X, et al. A feasibility quantification study of capsaicin content in chili powder for rapid evaluation using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(5): 4 405-4 414.