

# 现代光谱技术在可食用蛋白类产品掺杂检测中的应用与发展

程 斌, 黄玉双, 陈茂贤, 吴一凡, 谭 超\*

宜宾学院过程分析与控制四川省高校重点实验室, 四川 宜宾

收稿日期: 2024年10月9日; 录用日期: 2024年11月15日; 发布日期: 2024年11月26日

## 摘 要

市场中可食用蛋白类产品掺假现象屡禁不止, 部分不良商家往产品中掺入淀粉、植物性蛋白和氮素等物质, 借此降低生产成本, 各种掺假问题层出不穷。因此, 利用现代先进的科学技术和仪器, 设计出快速、高效、高质量的掺假检测方法有着重要的研究价值。本文选取乳制品和谷物作为可食用蛋白类产品的典型代表, 对现代光谱技术中的近红外光谱、中红外光谱和高光谱成像技术进行全面综述, 总结以上检测方法在蛋白类产品掺杂检测中的应用现状与研究进展, 以推动蛋白质类产品掺杂检测技术的发展, 切实保障食品质量安全。

## 关键词

可食用, 蛋白质, 掺杂, 近红外光谱, 中红外光谱, 高光谱成像

# Application and Development of Modern Spectral Technology in the Detection of Doping in Edible Protein Products

Bin Cheng, Yushuang Huang, Maoxian Chen, Yifan Wu, Chao Tan\*

Key Laboratory of Process Analysis and Control of Sichuan Universities, Yibin University, Yibin Sichuan

Received: Oct. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 15<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 26<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The phenomenon of adulteration in edible protein products available in the market remains a persistent issue despite repeated prohibitions. Some unethical merchants add substances such as

\*通讯作者。

文章引用: 程斌, 黄玉双, 陈茂贤, 吴一凡, 谭超. 现代光谱技术在可食用蛋白类产品掺杂检测中的应用与发展[J]. 化学工程与技术, 2024, 14(6): 473-481. DOI: 10.12677/hjct.2024.146051

starch, plant-based protein, and nitrogen to their products with the intention of reducing production costs. Consequently, various adulteration problems continue to emerge. Therefore, employing modern advanced scientific technologies and instruments to design fast, efficient, and high-quality adulteration detection methods holds significant research value. In this paper, dairy products and grains are selected as typical representatives of edible protein products. A comprehensive review is conducted on the application status and research progress of near-infrared spectroscopy, mid-infrared spectroscopy, and hyperspectral imaging techniques in modern spectroscopic technology for the detection of protein product doping. The objective is to promote the development of protein product doping detection technology and effectively ensure food quality and safety.

## Keywords

Edible, Protein, Doping, NIRS, MIRS, HSI

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

蛋白质是生命的物质基础，对于维持身体的正常生理功能、生长发育和修复组织等方面起着至关重要的作用[1]。生活中常见的可食用蛋白质类产品有乳制品、谷物、肉类、类蛋白产品等，富含人体不可或缺的蛋白质、脂肪和碳水化合物等多种营养物质，既能增强机体的免疫功能，还能调节体液的酸碱平衡[2]。随着蛋白质类产品市场规模的逐步扩大，部分不良商家在产品中掺入淀粉、植物性蛋白和三聚氰胺等[3]-[5]，借此降低生产成本。市场中可食用蛋白质类产品的掺杂假冒现象也愈发增多，从“大头娃娃”到“三聚氰胺”，从“皮革奶”到“激素门”等安全事件暴露出市场上产品伪造掺杂的乱象[6]-[9]，近些年来，随着生活质量的不断提升，人们对健康与食品安全的重视程度日益增强，对蛋白质类产品的品质要求更是日趋严格。因此，建立快速、无损的可食用蛋白类产品掺杂检测技术就显得尤为重要。

传统的蛋白类产品掺杂检测主要采用感官鉴别法和化学鉴别法。感官鉴别法是指人们通过人体感官(嗅觉、触觉和味觉等)来判断蛋白质类的产品。化学鉴别法包括滴定法[10]-[13]、凯氏定氮法[14]和荧光光度法[15]等，可进行低水平的掺杂鉴别，这些方法检测精度高，但是会对检验样品存在一定的损坏[16]。化学鉴别法具有步骤繁琐、检测结果不稳定和检测速度相对较慢等缺点，难以满足食品工厂快速进行大规模检测的需求。目前亟需探索一种易于操作，并且在损坏检验样品的情况下实现快速检测的蛋白质类产品掺假检测方法。

近年来，光谱技术常用于可食用蛋白类产品掺杂的检测与鉴别，具有快速、无损、灵敏度高等优点，能够从多方面提供与掺杂样品的化学成分和微观结构相关的信息，可广泛应用于食品质量安全领域，如非法添加物的检测、营养成分的鉴定、掺伪物质的筛查等[12]-[14]。目前，应用于蛋白类产品掺杂分析检测的光谱技术主要有近红外光谱技术、中红外光谱和高光谱成像技术等[17]-[19]。本文总结归纳了以上检测方法在可食用蛋白类产品(乳制品、谷物)掺杂检测中的应用现状与研究进展，为蛋白类产品掺杂检测技术的发展提供参考，保证食品质量安全。

## 2. 光谱学分析检测技术

在特定波长的光照射下，经光谱学分析检测后，不同待测样品会产生不同的吸收、发射或散射光谱。光谱学分析检测技术能够从多方面提供与掺杂样品的化学成分和微观结构相关的信息[20]，借此可实现

对蛋白类产品掺杂的有效识别和检测分析。

## 2.1. 近红外光谱技术

近红外光谱(Near-infrared, NIR)是波长介于中红外和可见光之间, 波长范围为 780~2526 nm 的电磁波。近红外光吸收含氢基团 X-H(X=C、N、O)振动的倍频和合频, 其中包含大多数类型有机化合物的组成和分子结构信息[21]。通过测量掺杂样品在不同波长处的近红外吸收或反射光谱, 与化学计量学方法和建立的数学模型相结合, 可检测出被扫描样品混合物的组成和相关有机化合物的分子结构, 对掺杂蛋白样品中的不同掺杂成分进行快速、无损的检测分析。

关于近红外光谱技术在乳制品蛋白类产品掺假方面的应用, 彭攀等[22]往奶粉样品中分别加入了植脂末、天然大豆分离蛋白粉和麦芽糊精中的 1~3 种, 利用近红外光谱技术对奶粉中含有多种掺假物的情况进行定性判别分析。采用非线性迭代偏最小二乘法(NIPALS)提取主成分, 利用马氏距离进行线性判别分析, 建立了定性判别模型, 判别准确率达 99.28%, 测试样本的判别准确率达 100%。结果表明: 近红外光谱技术可以对奶粉中的多种掺杂样品进行定性判别, 且准确率高达 99%以上, 可快速判断出产品中的掺假情况和掺假物种类。王右军等[23]利用近红外光谱检测乳制品中掺加的水解植物蛋白, 结合偏最小二乘法建立近红外光谱与牛奶中掺假物质含量之间的定量模型。结果表明近红外光谱可快速定量检测牛奶中掺假物质, 且掺入的蛋白物质的定量预测准确度较高, 相关系数为 0.969, 预测标准差为 0.456 g/kg, 可以满足定量检测的需要。古方青等[24]采用近红外光谱技术结合化学计量学方法, 对原料乳中常见的大豆分离蛋白作为掺杂物进行定量分析研究。通过选择平滑处理结合多元散射校正光谱预处理方法结合 GRNN 建模方法, 大豆分离蛋白组模型大豆分离蛋白的建模效果最佳,  $R^2$  为 0.9994, 测试集均方根误差为 0.0031, 说明建立的模型稳定性很高, 且预测能力较强, 可为研究原料乳中其他掺杂物的近红外定量分析提供参考。Hui Chen 等[25]采用近红外光谱技术和互信息变量选择对奶粉中的蛋白质定量进行研究, 结果显示由 260 个变量选定的子集构造的偏最小二乘回归模型明显优于全光谱模型, 其相关系数  $R^2 > 0.9800$ 。Nan WU 等[26]对纯牛奶样品和四环素掺假牛奶样品(0.005~40 mg/L)进行了近红外透射光谱分析, 研究了近红外光谱技术结合偏最小二乘法检测牛奶中四环素的可行性。结果表明, 校正集和预测集中正确分类率分别为 100%和 96.3%。研究使用的偏最小二乘模型具有较好的拟合效果, 但其预测能力有限, 尤其是对四环素浓度较低的样品。Fazal Mabood 等[27]采用近红外光谱结合多元分析技术对掺有羊奶的骆驼奶进行检测和定量分析。结果显示: 对于 PLS-DA 和 PLS 模型,  $R^2$  为 0.97, RMSEC 为 0.080; 对于 PLS 回归模型,  $R^2$  为 0.97, RMSEp 为 1.32, 检测限为 $\pm 0.5\%$ , 定量限为 2%。由此可知, 合理结合近红外光谱技术与化学计量学方法具有简便、重现性好、灵敏度高等特点, 可快速、准确检测乳制品中掺杂物含量。

关于近红外光谱技术在谷物类蛋白产品掺假方面的应用, de Almeida Duarte 等[28]采用近红外光谱技术测定小麦粉中木薯淀粉的添加量, 结合化学计量法建立预测模型, 所获得的无添加剂模型的相关系数为 0.977, 有添加剂模型的相关系数为 0.995。王杰[29]利用近红外光谱, 结合偏最小二乘回归(PLSR)和支持向量机回归(SVMR)建立定量模型, 测量了稻米中蛋白质含量。结果显示, 预测决定系数( $R_p^2$ )值分别达到 0.972 和 0.992, 预测均方根误差(RMSEp)值分别为 5.62 和 1.19。该模型在预测蛋白质含量方面准确度高、误差率低, 可广泛用于鉴别谷物类蛋白产品, 而且鉴别效果较好。纳嵘等[30]采用近红外光谱分析技术结合改进最小二乘回归法, 以 65 个不同来源的玉米 DDGS 为样品, 建立玉米 DDGS 蛋白质含量近红外光谱预测模型。该模型内部交叉验证标准误差为 0.0957, 交叉验证相关系数为 0.9888。

由此可知, 近红外光谱技术能准确检测出乳制品和谷物类产品中掺杂蛋白的含量, 结合化学计量法建立预测模型, 还可实现对掺杂蛋白样品中的不同掺杂成分进行快速、准确的检测分析。因此, 近红外光谱技术对蛋白质产品的掺杂进行定性和定量判别是可行的, 可广泛应用于蛋白类产品的实践生产中。

## 2.2. 中红外光谱技术

中红外光谱(Mid-infrared, MIR)是指波长在 2500~25,000 nm (波数 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ )的电磁波[31]。中红外光谱技术是一种基于物质对中红外光的吸收特性来进行分析和检测的技术, 可根据化合物的种类、官能团、取代基类别等大量信息, 对检测物质的性质和成分进行物质的定性和定量分析[32] [33], 与化学计量学方法结合能够用于蛋白质类产品的检测分析, 实现对掺杂的蛋白产品进行有效识别。有着测量操作方便、费用低廉、所需样品量少、检测对象限制少等优点, 目前在蛋白类食品领域已经有了大量的应用实例[33]-[35]。

关于中红外光谱技术在乳制品类蛋白产品掺假方面的应用, Feng L 等[36]采用中红外光谱法检测掺入米粉或大豆粉的奶粉, 建立分类和回归模型。使用全光谱和连续投影算法(SPA)选择的最佳波数的回归模型获得了良好的结果, 校准和预测的决定系数( $R^2$ )均超过 0.9, 预测残差(RPD)超过 3。庞佳烽等[37]采集了纯奶粉样品和不同质量浓度的掺三聚氰胺的奶粉样品的中红外光谱数据, 过程中运用多种模式识别方法(PCA、距离判别法)和非负矩阵分解法(NMF)等方法对两类奶粉进行分类鉴别, 结果出现无法实现样品鉴别和低灵敏度低特异度的结果。最后采用了非相关线性判别分析方法(ULDA)和偏最小二乘法(PLS), 成功实现了两类奶粉的鉴别, 取得很好的预测结果, 为食品的掺伪检测提供了有效的途径。杨仁杰等[38]采集牛奶中尿素掺杂物的中红外光谱, 运用尿素在牛奶中两个吸收峰的比值与牛奶中尿素浓度之间的关系来实现对牛奶中尿素的定量分析。该方法简单、快速, 为实现快速检测牛奶中掺杂物奠定了实验基础。黄明月等[39]利用中红外衰减全反射光谱结合偏最小二乘法, 建立了掺杂奶粉的定性判别模型。然后选择最佳的主成分数和最有效波数范围, 得到最优奶粉中掺杂淀粉、面粉定量分析模型。结果表明: 淀粉定量分析模型对未知样品预测相关系数  $R$  为 0.98, 预测均方根误差为 0.062; 面粉定量分析模型对未知样品预测相关系数  $R$  为 0.99, 预测均方根误差为 0.032。

关于中红外光谱技术在谷物类蛋白产品掺假方面的应用, 目前相关研究较少。但已有诸多研究表明[40]-[42], 中红外光谱与其他光谱技术结合可对蛋白质进行定性定量分析, 在掺杂蛋白品的判别和测定方面也具有很大的应用发展潜力。例如, 徐一茹等[43]以近红外光谱和中红外光谱技术为基础, 选取某面粉厂中的小麦粉, 配制成小麦粉掺杂滑石粉和玉米面的样本, 基于标准法测光谱距离建立聚类分析模型。对于含量受环境影响较小的灰分和面筋而言, 模型预测效果较好, 可以成功检验待测样本。李泽腾等[44]分别对 6 种食用淀粉的结构进行中红外光谱研究, 根据淀粉不同的特征吸收峰进行对比与分析后可知: 6 种食用淀粉均含有晶体结构及非晶体结构, 且部分淀粉的结构与其他淀粉结构存在一定的差异。

由此可见, 通过各结构之间的差异性, 近红外光谱技术能够用于不同蛋白类产品的掺杂分析判别, 且基于近红外光谱技术建立的模型具有良好的稳定性、精度和预测能力, 为奶粉的掺伪识别与质量控制提供了有效的途径, 可拓展应用到其他蛋白食品的真伪优劣的鉴别中, 不仅能为蛋白产品掺杂检测的高质量发展提供了一种快速便捷的检测方法, 还可以为食用蛋白产品在食品工业中的应用提供一定的理论依据。

## 2.3. 高光谱成像技术

高光谱成像技术(Hyperspectral imaging, HSI)是一种基于高光谱仪的成像技术, 其可在紫外到近红外(200~2252 nm)光谱覆盖范围内, 以几十至数百个波长同时对物体连续成像, 实现物体的空间信息、光谱信息和光强度信息的同步获得[45]。当蛋白类产品中存在掺杂物时, 这些掺杂成分的光谱特征与纯正的蛋白质有所差异。通过对高光谱图像中每个像素点的光谱数据进行分析, 可以识别出与正常蛋白质光谱特征不相符的区域, 从而判断蛋白类产品样品是否存在掺杂。高光谱成像能够获取从可见光到光谱范围内多个连续且狭窄波段的光谱信息[46], 具有快速、精准的优点, 广泛应用于食品掺杂的检

测分析[47]-[49]。

关于高光谱成像技术在乳制品蛋白类产品掺假方面的应用, Fu 等[50]使用近红外高光谱成像系统采集了三聚氰胺奶粉、全脂奶粉、脱脂奶粉以及三聚氰胺和每种奶粉的混合物的图像三聚氰胺,结果显示:三聚氰胺的像素数量与脱脂牛奶和全脂奶粉中的三聚氰胺浓度线性相关系数分别为 0.980 和 0.970,相关性较好,可快速定量分析奶粉中的三聚氰胺。王婧茹等[51]将豌豆蛋白按照 1%~30% (w/w)的浓度梯度掺入牛肉糜中(掺入浓度间隔 1%),利用高光谱成像技术,结合近红外光谱技术,通过建立偏最小二乘模型对牛肉掺入豌豆蛋白进行了快速、无损检测。Serranti 等[52]利用高光谱图像技术,对掺入了荞麦仁的燕麦进行检测分析,该技术可以准确识别燕麦和燕麦单粒(预测准确率接近 100%)。

关于高光谱成像技术在谷物类蛋白产品掺假方面的应用,孙俊等[53]使用高光谱成像仪对大米的水分含量进行检测,利用多元散射校正算法对光谱进行预处理,并引入遗传算法(GA)和思维进化算法(MEA)优化 BP 神经网络的权值和阈值,比较了 BP、GA-BP、MEA-BP 三种模型的预测效果,结果表明 MEA-BP 具有最佳的预测效果,预测集的决定系数达到 0.9663,均方根误差为 0.81%。Jin 等[54]使用高光谱成像仪对大米品质进行鉴别,利用多元散射校正算法(MSC)对光谱进行预处理,利用主成分分析算法(PCA)对数据降维,结合 K-最近邻算法(KNN)、偏最小二乘支持向量机(LS-SVM)和支持向量机(SVM)等机器学习算法进行分类,最终得到的交叉验证准确率和预测准确率均在 90%以上。LI 等[55]提出一种基于 NIR-HSI 技术的小麦灰分识别方法,利用 SPA 提取 16 个特征波长建立深度卷积生成对抗网络(DCGAN)、卷积神经网络(CNN)、决策树(DT)和 SVM 模型,其中 DCGAN 和 CNN 的联合模型  $R_p^2$  为 0.989,具有良好的性能。许学等[56]基于高光谱成像技术,融合光谱、颜色和形态特征建立的小麦品种 BPNN 鉴定模型,可有效区分出 5 个小麦品种,在鉴别中起到了一定的作用,从而实现小麦品种的快速、无损鉴定。李斌等[20]基于高光谱技术对蛋白粉中的玉米粉、大米粉和小麦粉三类掺假物进行定性和定量检测,比较并筛选不同预处理方法下的各模型之间的性能后,建立分析模型。模型的定性识别准确率可达 100%,且最小二乘支持向量机(LSSVM)模型在定量预测方面效果最佳,对应  $R_p^2$  分别为 0.9910、0.9946 和 0.9991。

上述研究表明高光谱图像技术用于乳制品和谷物的掺假检测是可行的,具有操作简单,能够快速、有效、无损地检测出的掺假问题,可广泛应用于食品掺假方面的检测。

**Table 1.** Recent applications of spectroscopic techniques for identification of Dairy and cereal protein products adulteration  
**表 1.** 近年来现代光谱技术在乳制品、谷物蛋白产品掺杂鉴别方面的应用

检测技术	应用	样品形态	波数与波长范围	数据处理与建模方法	相关系数 ( $R^2$ )	准确性	参考文献
乳制品 近红外光谱	奶粉中掺入植脂末、天然大豆分离蛋白粉和麦芽糊精(1~3种)	粉末状	10,000~4000 $\text{cm}^{-1}$	SNV、MSC、NIPALS	—	32.63%~100%	[22]
	牛奶中掺入水解植物蛋白粉(0.3~50 g/kg) 乳清粉(0.03~30 g/kg) 植脂末(0.03~30 g/kg)	液态	600~1100 nm	SNV、MSC、PLSR	0.9058 0.9690	—	[23]
	牛奶中掺入四环素(0.005~40 mg/L)	液态	4000~10,000 $\text{cm}^{-1}$	PLS	0.871 0.998	96.3%、100%	[26]
	奶粉中的蛋白质含量分析	粉末状 液态	4000~10,000 $\text{cm}^{-1}$	PCA、MRMR、PLS-DA、PLSR	—	100%	[25]

续表

	原料乳中掺入大豆分离蛋白 (质量分数 0.1%~5.0%)	液态	4000~12,501 cm <sup>-1</sup>	PLS、LNN、BP RBF、GRNN	0.9505~0.9 989	—	[24]
	骆驼奶中掺入羊奶	液态	4000~10,000 cm <sup>-1</sup>	PCA、PLS-DA	0.9740 0.9400	—	[27]
中 红 外 光 谱	奶粉中掺入米粉或大豆粉	粉末状	500~3500 cm <sup>-1</sup>	PLS、SVM ELM、PCA	>0.9	>90%	[36]
	奶粉中掺入三聚氰胺 (质量浓度 0.01%~0.2%)	粉末状	400~4000 cm <sup>-1</sup>	PCA、NMF、 PLS-DA LDA、ULDA	—	52.8%~ 100%	[37]
	牛奶中掺入尿素	液态	4000~10,000 cm <sup>-1</sup>	PLS-DA、SNV	0.999	100%	[38]
	幼儿奶粉中掺入淀粉 (质量百分比浓度 0.1%~30%) 和面粉(质量分数 0.1%~40%)	粉末状	800~4000 cm <sup>-1</sup>	MCCV、PLS-DA IPLS	0.98 0.99	92%	[39]
高 光 谱 成 像	牛肉中掺入豌豆蛋白	牛肉糜 粉末状	900~1700 nm	PLS、GFS、SPA	0.900	—	[51]
	燕麦中掺入荞麦仁	粉末状	1006~1650 nm	PLS-DA、PCA	—	100%	[52]
	小麦粉中木薯淀粉添加量	粉末状	1100~2500 nm	—	0.977 0.995	—	[28]
近 红 外 光 谱	稻米中蛋白质含量	粉末状	4000~12,000 cm <sup>-1</sup>	PLS-DA、SVM、 RF SNV、UVE、 LAR	0.972 0.992	98.06%	[29]
	玉米 DDGS 蛋白质含量	粉末状	400~2498 nm	MPLS、SNV	0.9888	—	[30]
	小麦粉中掺入滑石粉	粉末状	500~4500 cm <sup>-1</sup>	SNV、MSC	>0.950	—	[43]
谷 物 产 品	大米水分含量	稀释液	20~1749 nm	GA、MEA、 MSC	>0.920	—	[43]
	小麦品种鉴别	籽粒	405~970 nm	SNV、PCA BPNN、LS-SVM	—	—	[56]
高 光 谱 成 像	蛋白粉中掺入玉米粉、大 米粉和小麦粉	粉末状	397.5~1014 nm	SG、Normalize、 MSC Baseline、SNV LSSVM、 CARS、SPA	0.6992 0.9979	100%	[20]

由表 1, 以近红外光谱、中红外光谱、高光谱成像为代表的现代光谱技术可实现对蛋白质类产品中的多种掺假样品进行快速准确识别。将各光谱技术互相结合使用, 结合化学计量学建立分析判别模型, 能更准确地定性判别蛋白产品是否掺杂和定量测定产品的掺杂量, 为可食用蛋白类产品质量与生产过程中的鉴别检测提供有力支持, 对于维护蛋白产品市场稳定和消费者权益具有重要的意义。

### 3. 结果与讨论

可食用蛋白类产品掺假现象屡禁不止,在此背景下,建立快速、无损的蛋白类产品掺杂检测技术就显得尤为重要。相较于速度慢且结果不精准的传统蛋白质类产品检测方法,现代光谱技术能够检测到蛋白产品中微量的掺杂物,且在检测过程中避免了对样品的破坏,有利于后续进一步分析,具有快速、无损、准确等优点。该检测方法可广泛应用于可食用食品领域,对于整顿蛋白品市场秩序具有重要的实际意义和广阔的应用前景。本文选取乳制品和谷物作为可食用蛋白质类产品的典型代表,综述了现代光谱技术中的近红外光谱、中红外光谱和高光谱成像技术在蛋白类产品掺杂检测中的应用现状与研究进展。其目的在于推动蛋白质类产品掺杂检测技术的发展,为不断探索和研究出更加准确、快速、绿色的蛋白质产品检测方法提供参考,切实保障食品质量安全。

### 基金项目

2024 年省级大学生创新创业训练计划项目(S202410641163)。

### 参考文献

- [1] 朱小东. 科学控糖合理饮食[N]. 大众健康报, 2023-12-22(016).
- [2] 张淑飞. CrossFit 运动的合理营养膳食研究[J]. 食品安全导刊, 2023(26): 125-127.
- [3] Lohumi, S., Lee, S., Lee, W.H., Kim, M.S., Mo, C., Bae, H. and Cho, B.K. (2014) Detection of Starch Adulteration in Onion Powder by FT-NIR and FT-IR Spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **62**, 9246-9251.
- [4] Yang, J., Zheng, N., Yang, Y., *et al.* (2018) Detection of Plant Protein Adulterated in Fluid Milk Using Two-Dimensional Gel Electrophoresis Combined with Mass Spectrometry. *Journal of Food Science and Technology*, **55**, 2721-2728.
- [5] 刘小莉. 应用傅利叶近红外光谱定性、定量检测鱼粉中掺杂三聚氰胺的研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [6] Scholl, P.F., Bergana, M.M., Yakes, B.J., Xie, Z., Zbylut, S., Downey, G., *et al.* (2017) Effects of the Adulteration Technique on the Near-Infrared Detection of Melamine in Milk Powder. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **65**, 5799-5809. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02083>
- [7] 姜毓君, 庄柯瑾, 张微, 等. 我国婴幼儿配方乳粉质量安全监管政策现状与趋势分析[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(5): 1-6.
- [8] 胡军, 徐振, 李茂鹏, 等. 基于神经网络算法与太赫兹光谱检测技术的奶粉三聚氰胺含量测定[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 370-377.
- [9] 张燕. 雅培收巨额罚单: 婴幼儿奶粉检出香兰素[J]. 中国食品工业, 2021(10): 52-53.
- [10] 阮雁春. 滴定分析法在食品中蛋白质含量测定中应用研究[J]. 饮食科学, 2018(4): 170-171.
- [11] 张林祥, 杜广华, 葛秀元, 等. 检验食品中蛋白质含量标准测定方法的改进[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2016, 36(1): 36-39.
- [12] Ahmadifard, N., Murueta, J.H.C., Abedian-Kenari, A., Motamedzadegan, A. and Jamali, H. (2015) Comparison the Effect of Three Commercial Enzymes for Enzymatic Hydrolysis of Two Substrates (rice Bran Protein Concentrate and Soy-Bean Protein) with SDS-Page. *Journal of Food Science and Technology*, **53**, 1279-1284. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2087-6>
- [13] Nowak, K.W., Markowski, M. and Daszkiewicz, T. (2016) A Modified Ultrasonic Method for Determining the Chemical Composition of Meat Products. *Journal of Food Engineering*, **180**, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.010>
- [14] Silva Muniz, A., Cavalcanti, A., Muniz Brito, A., Dantas, L., De Brito, A.F., Ramos, I., *et al.* (2015) Loss on Drying, Calcium Concentration and Ph of Fluoride Dentifrices. *Contemporary Clinical Dentistry*, **6**, 72-76. <https://doi.org/10.4103/0976-237x.152962>
- [15] Feng, X., Lin, Z., Yang, L., Wang, C. and Bai, C. (1998) Investigation of the Interaction between Acridine Orange and Bovine Serum Albumin. *Talanta*, **47**, 1223-1229. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(98\)00198-2](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(98)00198-2)
- [16] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB50095-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- [17] 王陈嘉, 高丽, 叶发银, 等. 基于近红外光谱与支持向量机的甘薯粉丝掺假快速检测[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(11): 211-218.
- [18] 吴月蛟, 董刚, 张盛林, 等. 中红外光谱法快速鉴别掺杂羟丙基淀粉的魔芋粉[J]. 食品科学, 2013, 34(24): 140-143.
- [19] 鲍倩. 基于反射光谱和高光谱成像的小麦粉掺杂检测[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2022.
- [20] 李斌, 殷海, 张烽, 等. 基于高光谱技术的蛋白粉掺假检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(8): 2380-2386.
- [21] 邢素霞, 王睿, 郭培源, 等. 高光谱成像及近红外技术在鸡肉品质无损检测中的应用[J]. 肉类研究, 2017, 31(12): 30-35.
- [22] 彭攀, 林慧, 杜如虚. 利用近红外光谱技术同时检测奶粉中的多个掺假成分[J]. 计算机与应用化学, 2011, 28(3): 307-310.
- [23] 王右军, 朱大洲, 屠振华, 等. CCD 短波近红外光谱快速检测牛奶中掺假物质的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(6): 135-138.
- [24] 古方青, 管骁, 刘静, 杨永健, 张仲源. 近红外光谱技术快速检测原料乳中掺杂物[J]. 生物加工过程, 2013, 11(6): 73-77.
- [25] Chen, H., Tan, C., Lin, Z. and Wu, T. (2018) Classification and Quantitation of Milk Powder by Near-Infrared Spectroscopy and Mutual Information-Based Variable Selection and Partial Least Squares. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **189**, 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.08.034>
- [26] Wu, N., Xu, C., Yang, R., Ji, X., Liu, X., Yang, F., *et al.* (2018) Detection of Tetracycline in Milk Using NIR Spectroscopy and Partial Least Squares. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **113**, Article ID: 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012004>
- [27] Mabood, F., Jabeen, F., Hussain, J., Al-Harrasi, A., Hamaed, A., Al Mashaykhi, S.A.A., *et al.* (2017) FT-NIRS Coupled with Chemometric Methods as a Rapid Alternative Tool for the Detection & Quantification of Cow Milk Adulteration in Camel Milk Samples. *Vibrational Spectroscopy*, **92**, 245-250. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2017.07.004>
- [28] Duarte, E.S.d.A., de Almeida, V.E., da Costa, G.B., de Araújo, M.C.U., Vêras, G., Diniz, P.H.G.D., *et al.* (2022) Feasibility Study on Quantification and Authentication of the Cassava Starch Content in Wheat Flour for Bread-Making Using NIR Spectroscopy and Digital Images. *Food Chemistry*, **368**, Article ID: 130843. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130843>
- [29] 王杰. 基于近红外光谱的稻米理化品质快速检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江科技大学, 2024.
- [30] 纳嵘, 胡波, 尹慧, 等. 玉米 DDGS 蛋白质含量近红外光谱预测模型的建立[J]. 饲料博览, 2023(1): 42-45.
- [31] 胡皆汉, 郑学仿. 实用红外光谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [32] 李丽华, 杨红兵, 周原, 等. 仪器分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014.
- [33] Gordon, R., Chapman, J., Power, A., Chandra, S., Roberts, J. and Cozzolino, D. (2018) Unfrazzled by Fizziness: Identification of Beers Using Attenuated Total Reflectance Mid-Infrared Spectroscopy and Multivariate Analysis. *Food Analytical Methods*, **11**, 2360-2367. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1225-y>
- [34] 蓝蔚青, 周大鹏, 刘大勇, 孙晓红, 冯豪杰, 谢晶. 中红外光谱技术在食品检测中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(17): 266-271.
- [35] 叶沁, 赵紫薇, 徐明雅, 张丞彦, 孙佳, 孟祥河. 基于中红外漫反射光谱技术测定精米中直链淀粉含量的研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(2): 115-119, 127.
- [36] Feng, L., Zhu, S., Chen, S., Bao, Y. and He, Y. (2019) Combining Fourier Transform Mid-Infrared Spectroscopy with Chemometric Methods to Detect Adulterations in Milk Powder. *Sensors*, **19**, Article 2934. <https://doi.org/10.3390/s19132934>
- [37] 庞佳烽, 汤谦, 李艳坤, 等. 中红外光谱计量学模型检测奶粉中的三聚氰胺[C]//中国化学会(ChineseChemicalSociety). 2019 中国化学会第十五届全国计算(机)化学学术会议论文集. 2019: 1.
- [38] 杨仁杰, 刘蓉, 徐可欣. 基于近红外光谱对牛奶中掺杂尿素的判别分析[J]. 食品科学, 2012, 33(16): 120-123.
- [39] 黄明月, 赵晨, 吴海云, 等. 掺杂婴幼儿奶粉的中红外光谱检测[J]. 天津农学院学报, 2022, 29(4): 60-64.
- [40] 江艳, 武培怡. 大豆蛋白的中红外和近红外光谱研究[J]. 化学进展, 2009, 21(4): 705-714.
- [41] Tapia, N.E., Barbero, H.A., Marquina, M., *et al.* (2024) Comparative Analysis of Different Methods for Protein Quantification in Donated Human Milk. *Frontiers in Pediatrics*, **12**, Article 1436885.
- [42] Saxton, R. and McDougal, O.M. (2021) Whey Protein Powder Analysis by Mid-Infrared Spectroscopy. *Foods*, **10**, Article 1033. <https://doi.org/10.3390/foods10051033>

- [43] 徐一茹, 刘翠玲, 孙晓荣, 等. 基于近红外和中红外光谱技术的小麦粉品质检测及掺杂鉴别方法[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 128-132.
- [44] 李泽腾, 郭雨欣, 于佳琳, 等. 食用淀粉结构中红外光谱研究[J]. 江苏调味副食品, 2023(2): 34-38.
- [45] Dixit, Y., Casado-Gavaldà, M.P., Cama-Moncunill, R., Cama-Moncunill, X., Markiewicz-Keszycka, M., Cullen, P.J., *et al.* (2017) Developments and Challenges in Online NIR Spectroscopy for Meat Processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **16**, 1172-1187. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12295>
- [46] 许张弛, 郭宝峰, 吴文豪, 等. 一种引入注意力机制的多尺度高光谱图像特征提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(4): 577-587.
- [47] Zhang, J., Guo, Z., Ren, Z., Wang, S., Yue, M., Zhang, S., *et al.* (2023) Rapid Determination of Protein, Starch and Moisture Content in Wheat Flour by Near-Infrared Hyperspectral Imaging. *Journal of Food Composition and Analysis*, **117**, Article ID: 105134. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105134>
- [48] Zhang, Y. and Guo, W. (2019) Moisture Content Detection of Maize Seed Based on Visible/Near-Infrared and Near-Infrared Hyperspectral Imaging Technology. *International Journal of Food Science & Technology*, **55**, 631-640. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14317>
- [49] Aulia, R., Kim, Y., Zuhrotul Amanah, H., Muhammad Akbar Andi, A., Kim, H., Kim, H., *et al.* (2022) Non-Destructive Prediction of Protein Contents of Soybean Seeds Using Near-Infrared Hyperspectral Imaging. *Infrared Physics & Technology*, **127**, Article ID: 104365. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104365>
- [50] Fu, X., Kim, M.S., Chao, K., Qin, J., Lim, J., Lee, H., *et al.* (2014) Detection of Melamine in Milk Powders Based on NIR Hyperspectral Imaging and Spectral Similarity Analyses. *Journal of Food Engineering*, **124**, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.023>
- [51] 王婧茹, 何鸿举, 朱亚东, 等. 基于近红外高光谱技术快速检测豌豆蛋白掺假牛肉[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 312-317.
- [52] Serranti, S., Cesare, D., Marini, F. and Bonifazi, G. (2013) Classification of Oat and Groat Kernels Using NIR Hyperspectral Imaging. *Talanta*, **103**, 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.10.044>
- [53] 孙俊, 唐凯, 毛罕平, 等. 基于 MEA-BP 神经网络的大米水分含量高光谱技术检测[J]. 食品科学, 2017, 38(10): 272-276.
- [54] Jin, X.M., Sun, J., Mao, H.P., Jiang, S.Y., Li, Q.L. and Chen, X.X. (2015) Discrimination of Rice Varieties Using LS-SVM Classification Algorithms and Hyperspectral Data. *Advance Journal of Food Science and Technology*, **7**, 691-696. <https://doi.org/10.19026/ajfst.7.1629>
- [55] Li, H., Zhang, L., Sun, H., Rao, Z. and Ji, H. (2022) Discrimination of Unsound Wheat Kernels Based on Deep Convolutional Generative Adversarial Network and Near-Infrared Hyperspectral Imaging Technology. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **268**, Article ID: 120722. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120722>
- [56] 许学, 马卉, 王钰, 等. 基于多光谱成像技术的小麦品种快速无损鉴定[J]. 中国农学通报, 2019, 35(15): 14-19.