

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250312005

引用格式: 李梅, 智丽慧. 近红外光谱技术快速检测奶酪及其制品的核心质量指标[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 51–56.

LI M, ZHI LH. Rapid detection of core quality indicators in cheese and cheese products by near-infrared spectroscopy [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 51–56. (in Chinese with English abstract).

近红外光谱技术快速检测奶酪及其制品的核心质量指标

李梅, 智丽慧*

(上海妙可蓝多食品科技股份有限公司, 上海 201506)

摘要: **目的** 探索使用近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)技术快速检测奶酪及其制品核心质量指标的快速检测技术的应用方向, 验证 NIRS 技术对奶酪品质指标实现快速检测的可行性。**方法** 通过实验选择市场上常见的奶酪棒、芝士片、奶油芝士、马苏里拉等 4 类再制奶酪产品, 分建模组和验证组, 选择一个品牌的设备使用建模组样品进行建模实验; 使用 4 个不同厂家近红外同步开展国家标准检测与多设备近红外检测对比分析。**结果** 在建模层面, 通过对比偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)等算法的建模机制, 成功构建蛋白质、脂肪、水分及 pH 核心指标的多维预测模型, 大部分决定系数 $RSQ > 0.85$ 。在验证层面, 不同奶酪产品分别使用 4 类 NIRS 研究仪器的蛋白质、脂肪、水分项目检测结果与国家标准方法测定的奶酪营养成分的平均偏差除 1 号设备的马苏里拉的蛋白质偏差超过 10%外, 其他营养成分国标等同性实验符合要求, 且精密度符合国家标准方法要求。**结论** 基于当前 4 种设备的验证, 使用 NIRS 设备快速检测奶酪及其制品核心质量指标的快速检测技术的应用可行, NIRS 技术在奶酪组成成分的快速检测方法可作为传统化学检测方法提供有效的补充, 为高效率、低成本、环保的检测提供更多的可能性。

关键词: 奶酪; 蛋白质; 脂肪; 水分; 近红外光谱技术; 快速检测

Rapid detection of core quality indicators in cheese and cheese products by near-infrared spectroscopy

LI Mei, ZHI Li-Hui*

(Shanghai Milkground Food Technology Co., Ltd., Shanghai 201506, China)

ABSTRACT: Objective To explore the application areas of rapid detection technology for core quality indicators in cheese and its products using near-infrared spectroscopy (NIRS), and validating the feasibility of NIRS for rapid testing of cheese quality parameters. **Methods** Four types of common processed cheese products (cheese sticks, cheese slices, cream cheese, Mozzarella) were selected for experimentation and divided into modeling and validation

收稿日期: 2025-03-12

第一作者: 李梅(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为质量管理和检验分析。E-mail: mei_li@milkground.cn

*通信作者: 智丽慧(1988—), 女, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为检验技术。E-mail: lihui_zhi@milkground.cn

sets; modeling experiments were conducted using samples from the modeling set on a single-brand instrument; synchronous national standard detection and multi-instrument NIRS detection comparative analysis were performed using instruments from 4 different manufacturers on the validation sets. **Results** For modeling, multidimensional prediction models for core indicators (protein, fat, moisture, pH) were successfully constructed by comparing the modeling mechanisms of algorithms like partial least squares regression (PLSR), with the coefficient of determination exceeding 0.85. For validation, the average deviations between the NIRS detection results (protein, fat, moisture) obtained using 4 kinds of NIRS spectrometers on different cheese products and those determined by national standard methods met equivalence requirements except for the protein deviation (>10%) of Mozzarella on instrument No.1; precision also met the requirements of national standard methods. **Conclusion** The application of NIRS spectroscopy equipment for rapid detection of core quality indicators in cheese and its products is feasible; NIRS spectroscopy technology can serve as an effective supplement to traditional chemical detection methods for rapid analysis of cheese composition, offering greater potential for high-efficiency, low-cost, and environmentally friendly testing.

KEY WORDS: cheese; protein; fat; moisture; near-infrared spectroscopy technology; rapid detection

0 引言

奶酪又称芝士^[1], 是一种乳或乳制品中的蛋白质在凝乳酶或其他适当的凝乳剂的作用下^[2], 凝固或部分凝固后(或直接使用凝乳后的凝乳块为原料), 添加或不添加发酵菌种、食用盐、食品添加剂、营养强化剂, 排出不排出乳清^[3], 经发酵或不发酵等工序制得的固态或半固态产品。因奶酪中含有丰富的营养物质, 被誉为“奶黄金”^[4]。

在新消费时代^[5], 随着国民对营养健康和美味享受的需求^[6], 奶酪及其制品在市场上表现出了快速增长趋势, 销售额保持年均 20%以上的高速增长, 成为乳业中增长最快的细分赛道^[7]。很多企业均在加大投资, 建设相应的生产工厂, 而产品质量的控制则成为企业生存和发展的必要保障。

奶酪作为高附加值乳制品, 其质量评价依赖于脂肪、蛋白质等核心成分的精准检测^[8]。传统化学检测方法存在耗时长、成本高、废弃物多等问题, 难以满足快速增长的奶酪产业需求^[8]。近红外光谱技术因其快速、无损的优势^[9], 已在液态乳制品检测中广泛应用, 但其在固态/半固态奶酪中的应用仍面临以下挑战: (1)固态基质中光散射效应显著, 导致光谱信号稳定性差^[10]; (2)奶酪成分复杂(如脂肪-蛋白质相互作用、水分分布不均)对模型泛化能力提出更高要求^[11]; (3)现有研究多聚焦单一设备或单一品类, 缺乏跨仪器、跨品类的系统性对比分析^[12]。

针对上述问题, 本研究提出基于多设备协同建模的近红外光谱技术奶酪检测创新框架: 首次系统对比 4 种主流近红外光谱设备(覆盖 400~2600 nm 宽波段)在再制奶酪

检测中的适用性, 揭示不同波长范围对固态奶酪成分预测的敏感性差异; 同时提出基于物理-化学耦合的预处理算法^[13], 结合 Savitzky-Golay 平滑^[14], 有效抑制固态样品表面散射干扰; 最后通过主成分分析(principal component analysis, PCA)与偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)的联合建模^[15], 解析奶酪中脂肪、蛋白质等成分的特征吸收波段(如 1200 nm 处 C-H 键伸缩振动与蛋白质酰胺键的耦合效应)^[16], 建立成分含量与光谱特征的定量关联模型。本研究旨在为固态乳制品近红外光谱技术检测提供理论依据, 推动快检技术在奶酪工业化生产中的实际应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选择市场上常见的奶酪棒、芝士片、奶油芝士、马苏里拉等 4 类再制奶酪产品, 以上产品由妙可蓝多公司提供。这些产品的工艺生产稳定, 批内产品的均一稳定性和品质一致性较高, 每类样品采集 80 批, 共计 320 批, 作为检测对象。采集的样品在产品要求的适宜温度下储存。

1.2 仪器与设备

FOOD SCAN2 近红外光谱分析仪(波长为 400~1100 nm, 丹麦 福斯公司); DA7250 近红外光谱分析仪(波长 950~1650 nm, 瑞典珀金埃尔默公司); Unity 2600-XTR 近红外光谱分析仪(波长 680~2600 nm, 美国 KPM 公司); VIAVI Onsite W 近红外光谱分析仪(波长 900~1700 nm, 美国 VIAVI 公司); ME204E 电子天平(精度 0.01 mg)、FiveEasy F20 pH 计(瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); K1160 定氮

仪、SH520 石墨消解仪(海能未来技术集团股份有限公司); HWS-28 水浴锅、DHG-9140A 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

每类样品均分为建模组和实验组, 建模组样品每类样品 40 批, 实验组样品每类样品 40 批。奶酪棒、奶酪片和奶油芝士一般为常温贮存或冷藏贮存, 且样品组织状态均一、质地密实, 马苏里拉产品一般为冷冻和冷藏, 且样品形态常见为丁状和丝状, 在使用近红外光谱仪检测前需将冷冻样品解冻, 并对样品进行适当的研磨, 使其组织状态可实现密实状态。

1.3.2 指标的测定

每类样品的建模组和实验组均需要使用国家标准方法进行干物质、蛋白质、水分、pH 等指标的测定, 每个样品重复测试 2 次, 取算术平均值作为该指标的测定结果, 检测方法如下: 干物质(水分)含量依据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法进行测定; 脂肪含量按 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第三法进行测定; 蛋白质含量按 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法进行测定; pH 按照 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品中 pH 的测定》进行测定。

1.3.3 光谱采集

目标仪器开机预热 30 min。使用设备自带校准块/程序校准。将适量待测样品填装到样品杯内, 尽量让测量面平整、均匀、无明显气泡或明显空隙、无明显颗粒。选择 Unity 2600-XTR 近红外光谱分析仪(波长 680~2600 nm)分别建模组奶酪棒、马苏里拉、芝士片、奶油芝士 4 类样品进行光谱采集, 每台仪器对每个样品检测 10 次得到平均光谱。检测完成后得到的各样品的平均光谱数据各 40 个, 用于近红外光谱仪器的检测模型的建立。

1.3.4 建立初模型

将上述 1.3.2 指标测定和 1.3.3 光谱采集信息进行一对一匹配后, 按照 3:1 将 40 组建模样品划分为训练集和预测集, 采用 Savitzky-Golay 滤波平滑去噪^[17]后, 再将全波段光谱数据整理为矩阵(样本×波长点)^[18]进行标准化处理, 运用训练集样品使用 PLSR^[19]建立初模型。每类产品形成一个初模型。

1.3.5 国家标准等同性实验

将 FOOD SCAN2 近红外光谱分析仪(波长为 400~1100 nm); DA7250 近红外光谱分析仪(波长 950~1650 nm); Unity 2600-XTR 近红外光谱分析仪(波长 680~2600 nm); VIAVI Onsite W 近红外光谱分析仪(波长 900~1700 nm) 4 个设备

依次进行 1~4 编号, 分别对 40 组实验组样本进行检测, 同一样本分别使用 4 类设备进行检测, 每个样品重复检测 2 次, 取平均值。

1.3.6 重复性实验

从奶酪棒、马苏里拉、芝士片、奶油芝士 4 类产品的实验组样品中分别随机选取 1 批产品使用 4 类研究仪器连续检测 6 次。

1.4 数据处理

使用 USCAN 进行 6 个图谱的叠加显示, 使用 Ucal 3.4.0.8 建模软件建立初模型并由软件自动计算相关系数(R-squared, RSQ)^[20]、交叉验证的相关系数(R-squared cross-validation, RSQV)、标准偏差(standard error of calibration, SEC)、预测标准偏差(standard error of prediction, SEP)。国家标准等同性实验和重复性实验数据采用 Excel 2019 软件^[21]计算平均值和相对标准偏差。

2 结果与分析

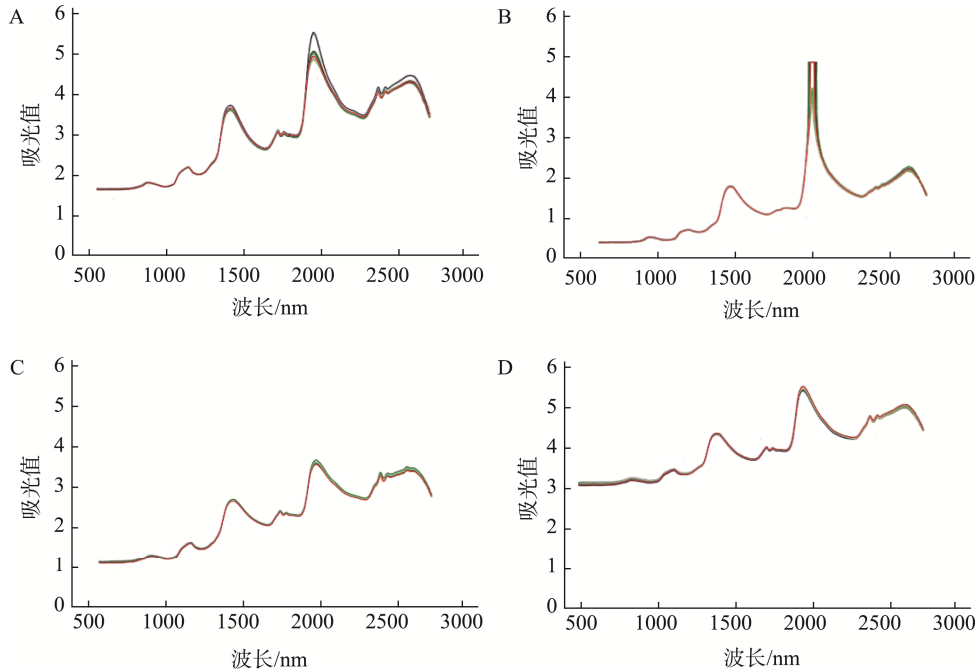
2.1 光谱谱图分析

近红外光谱图的特征归属主要包括 O-H 基团、C-H 基团、N-H 基团。O-H 基团(水、醇、碳水化合物等)在 1450 nm(约 6897 cm^{-1})处 O-H 伸缩振动的一级倍频, 在 1940 nm(约 5155 cm^{-1})处 O-H 伸缩振动与弯曲振动的合频, 在 970 nm(约 10300 cm^{-1})处 O-H 的二级倍频。C-H 基团(脂肪、烃类)在 1210 nm(约 8264 cm^{-1})处 C-H 伸缩振动的第三倍频, 在 1720 nm(约 5814 cm^{-1})处 C-H 的二级倍频, 在 2300 nm(约 4348 cm^{-1})处 C-H 伸缩与弯曲振动的合频。N-H 基团(蛋白质、胺类)在 1500 nm(约 6667 cm^{-1})处 N-H 伸缩振动的一级倍频, 在 2050 nm(约 4878 cm^{-1})处 N-H 伸缩与弯曲振动的合频。

图 1 是 4 类再制奶酪未经预处理的光谱图。从图 1 可以看出, 不同品类的再制奶酪光谱变化趋势基本一致, 在 980、1200 和 2500 nm 处有明显吸收峰; 在 1400~1500 nm、1900~2000 nm 处有强吸收峰; 在 1700~1800 nm 和 2300~2400 nm 处有高频小幅振动; 每一类再制奶酪因使用的原辅料、生产工艺等差异, 所含的如干物质、蛋白质、糖、有机酸等成分差异大, 所以不同品类的再制奶酪光谱图中吸收峰强度存在差异, 说明光谱吸收峰的强度差异与其中质量指标的组分含量有关。

2.2 全波段光谱主成分分析

全波段光谱经 PCA 后, RSQ 用于评估仪器测定值与标准方法测定值之间的相关程度, RSQV 用于评估模型对样本的预测值与标准方法测定值之间的相关程度, 越接近于 1, 则仪器测定值或预测值与标准方法测定值的相关程度越好, SEC 用于评估定标样品近红外光谱法测定值



注: A. 马苏里拉近红外光谱图; B. 奶酪棒近红外光谱图; C. 奶酪片近红外光谱图; D. 奶油芝士近红外光谱图。

图 1 奶酪近红外光谱图

Fig.1 Near-infrared spectrum of cheese

与标准方法测定值之间残差的标准差, SEC 值越小, 表明分析模型的预测能力越强; SEP 用于评价验证样品成分的测定值与标准方法测定值之间的标准差, 分析模型对新样本的适用能力, SEP 越小, 表明模型的泛化能力越高。

表 1 为检测初模型参数评价, 分析初模型的参数发现, 整体模型性能良好, 大多数奶酪类型和项目的 RSQ>0.85, SEC/SEP<0.5, 尤其在脂肪和干物质项目上表现优秀。pH 项目所有奶酪类型中 RSQ 最低(平均 0.811), 尤其芝士片(RSQ=0.504), 考虑 pH 的物理化学机制限制的原因。pH 反映的是溶液中 H⁺的活度, 近红外光谱主要检测的是 C-H、O-H、N-H 等基团的振动倍频与合频信号, 而 H⁺本身在近红外区域(780~2500 nm)没有直接吸收峰。

2.3 国标等同性实验分析

表 2 为不同奶酪产品分别使用 4 类近红外光谱研究仪器的蛋白质、脂肪、水分项目检测结果与国家标准方法测定的奶酪营养成分的平均偏差。表中数据显示不同奶酪产品的蛋白质项目近红外光谱研究仪器和国家标准方法平均偏差最大 6.9%, 最小值 2.0%; 不同奶酪产品的脂肪项目近红外光谱研究仪器和国家标准方法平均偏差最大 2.9%, 最小值 1.8%; 不同奶酪产品的干物质项目近红外光谱研究仪器和国家标准方法平均偏差最大值 2.34%, 最小值 0.95%, 除 1 号设备的马苏里拉的蛋白质偏差超过 10%外, 其他营养成分国标等同性实验符合要求。

其中, 国标等同性实验中蛋白质项目的平均偏差为

6.9%(马苏里拉), 虽然符合方法的误差要求, 但偏差相对于其他成分较高, 分析原因为马苏里拉奶酪的形状(丝状)和质地(如水分分布、脂肪球大小、蛋白质网络结构)导致样品研磨的匀一性差异, 需要在样品制备时关注研磨的颗粒度和密实度。

表 1 检测初模型参数评价

Table 1 Evaluation of initial model parameters for detection					
类型	项目	马苏里拉	奶酪棒	奶油芝士	芝士片
RSQ	干物质	0.845	0.958	0.676	0.988
	脂肪	0.964	0.992	0.893	0.984
	蛋白质	0.980	0.990	0.730	0.999
	pH	0.916	0.916	0.908	0.504
RSQV	干物质	0.825	0.937	0.640	0.982
	脂肪	0.955	0.990	0.838	0.973
	蛋白质	0.975	0.984	0.645	0.997
	pH	0.912	0.766	0.869	0.379
SEC	干物质	0.489	0.366	0.245	0.275
	脂肪	0.433	0.205	0.191	0.349
	蛋白质	0.340	0.117	0.649	0.127
SEP	pH	0.038	0.026	0.030	0.054
	干物质	0.507	0.434	0.261	0.327
	脂肪	0.471	0.223	0.229	0.420
	蛋白质	0.380	0.143	0.676	0.166
	pH	0.029	0.029	0.035	0.060

表 2 仪器和国标检测结果对比数据(%)
Table 2 Comparative data of instrument and national standard test results (%)

项目	样品	1 号	2 号	3 号	4 号
蛋白质	奶油芝士	7.30	1.80	2.10	3.60
	芝士片	1.30	0.90	1.30	1.60
	马苏里拉	14.80	2.70	2.00	2.20
	奶酪棒	4.10	3.20	2.40	4.60
	平均值	6.90	2.20	2.00	3.00
脂肪	奶油芝士	2.70	2.29	2.79	2.13
	芝士片	1.50	1.16	1.14	1.50
	马苏里拉	2.70	3.76	1.42	0.95
	奶酪棒	4.60	2.47	1.86	4.39
	平均值	2.90	2.40	1.80	2.20
干物质	奶油芝士	1.30	0.95	1.51	2.04
	芝士片	1.80	2.34	1.89	1.66
	马苏里拉	2.00	1.35	1.96	1.26
	平均值	2.00	1.80	1.80	1.80

2.4 重复性实验分析

表 3 为蛋白质、脂肪、干物质项目分别在 4 类近红外光谱研究仪器连续 6 次重复检测数据的相对标准偏差。表中数据显示使用 4 类近红外光谱研究仪器检测不同奶酪产品的蛋白质项目重复性偏差最大 1.88%，最小值 0.02%；使用 4 类近红外光谱研究仪器检测不同奶酪产品的脂肪项目重复性偏差最大 4.15%，最小值 0.05%；使用 4 类近红外光谱研究仪器检测不同奶酪产品的水分项目重复性偏差最大 0.57%，最小值 0.03%，各指标符合重复检测偏差要求。

表 3 重复性实验数据(%)
Table 3 Experimental data of repeatability (%)

检测项目	样品名称	1 号	2 号	3 号	4 号
蛋白质	奶油芝士	1.88	0.37	0.53	1.49
	芝士片	0.14	0.68	0.02	0.33
	马苏里拉	0.80	0.13	0.10	1.00
	奶酪棒	0.61	0.13	0.49	0.75
脂肪	奶油芝士	1.13	0.34	0.21	0.42
	芝士片	0.05	0.07	0.42	0.27
	马苏里拉	0.31	0.11	0.05	0.08
	奶酪棒	0.31	0.11	0.65	4.15
干物质	奶油芝士	0.30	0.17	0.28	0.37
	芝士片	0.03	0.29	0.57	0.43
	马苏里拉	0.07	0.05	0.28	0.15
	奶酪棒	0.11	0.04	0.13	0.09

3 结论与讨论

基于当前 4 种不同品牌近红外光谱设备的验证, 构建

了覆盖多品类再制奶酪的 NIR 快检数据库, 并提出基于物理-化学耦合的预处理算法^[22], 使脂肪、蛋白质检测平均偏差分别降至 1.8%和 2.3%, 验证近红外光谱技术对奶酪品质指标^[23]实现快速检测的可行性。理论层面, 通过 PCA^[24]与 PLSR 的联合建模^[25], 解析奶酪中脂肪、蛋白质等成分^[26]的特征吸收波段^[27](如 1200 nm 处 C-H 键伸缩振动与蛋白质酰胺键的耦合效应^[28]), 建立成分含量与光谱特征的定量关联模型, 揭示了固态奶酪中成分-光谱的协同响应机制, 为复杂基质 NIR 建模提供新思路。

尽管本研究仅在 4 个品牌设备上验证, 但算法框架本身具备良好的可扩展性, 未来将结合深度学习算法^[29](如卷积神经网络)进一步优化模型泛化能力^[30]。在今后的研究中, 将继续对奶酪品类中其他产品进行分析, 建立更为完善的快速分析模型, 让近红外光谱技术在奶酪组成成分的快速检测方法为传统化学检测方法提供有效的补充, 为高效率、低成本、环保的检测提供更多的可能性。

参考文献

- [1] RINNAN Å, MISHRA P, FERRARI C. Recent advances in chemometric methods for spectral data processing in near-infrared spectroscopy [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 158: 116899.
- [2] 王海燕, 李伟, 张强, 等. 多模态近红外光谱融合算法研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(2): 345-351.
WANG HY, LI W, ZHANG Q, *et al.* Research progress on multimodal near-infrared spectroscopy fusion algorithms [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(2): 345-351.
- [3] KIM S, LEE M, PARK J, *et al.* Cross-platform calibration for multi-brand NIR instruments [J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3298.
- [4] 苗钧魁, 张雅婷, 金永霁, 等. 近红外技术在南极磷虾油关键品质指标快速检测中的应用研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 267-273.
MIAO JK, ZHANG YT, JIN YP, *et al.* Application of near-infrared technology in rapid detection of key quality indicators of Antarctic krill oil [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(2): 267-273.
- [5] LI X, ZHANG Y, WANG T, *et al.* Band selection strategies for portable NIR devices [J]. *Spectrochim Acta A*, 2022, 270: 120844.
- [6] 陈晓峰, 王磊, 刘洋, 等. 便携式近红外仪器的交叉验证方法[J]. *分析化学*. 2021, 49(7): 1021-1028.
CHEN XF, WANG L, LIU Y, *et al.* Cross-validation methods for portable near-infrared instruments [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 49(7): 1021-1028.
- [7] BARBONI T, ROSSI F, GARCÍA-NAVARRO J, *et al.* Industrial applications of NIR in dairy quality control [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 316: 110841.
- [8] CAPUTO F, PELLEGRINI A, RICCI E, *et al.* Streamlined chemometric modeling for on-site NIR analysis of cheese composition using portable spectrometers [J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(2): 975-987.
- [9] 褚小立, 陈瀑, 李敬岩, 等. 近红外光谱分析技术的最新进展与展望[J]. *分析测试学报*, 2020, 39(10): 1181-1188.
CHU XL, CHEN P, LI JY, *et al.* Recent advances and future perspectives in near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020,

- 39(10): 1181–1188.
- [10] WANG L, ZHANG Y, LIU H, *et al.* Chemometric optimization of NIR spectral preprocessing for dairy products [J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(3): 1567–1578.
- [11] 黄敏, 王芳, 刘杰, 等. 近红外光谱预处理方法对比研究[J]. *食品与机械*, 2022, 38(11): 89–94.
HUANG M, WANG F, LIU J, *et al.* Comparative study of near-infrared spectral preprocessing methods [J]. *Food and Machinery*, 2022, 38(11): 89–94.
- [12] GONZÁLEZ-MARTÍN I, BLANCO M, RINNAN Å, *et al.* Rapid determination of moisture in cheese using handheld NIR [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 147: 111629.
- [13] 高峰, 邢雅阁, 罗华平, 等. 基于可见/近红外光谱与化学计量学的杏品种无损鉴别方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(1): 123–128.
GAO F, XING YG, LUO HP, *et al.* Non-destructive identification of apricot varieties using visible/near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(1): 123–128.
- [14] 周雨婷, 张伟, 李明, 等. 奶酪 pH 值近红外实时监测系统的设计与验证[J]. *食品工业科技*. 2022, 43(14): 367–373.
ZHOU YT, ZHANG W, LI M, *et al.* Design and validation of a real-time near-infrared monitoring system for cheese pH [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 367–373.
- [15] 陈迎丽, 何钰, 龚会琴, 等. 基于欧式距离法或因子化法的近红外光谱技术对牛肉掺假鉴定的研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(15): 141–146.
CHEN YL, HE Y, GONG HQ, *et al.* Authentication of beef adulteration using near-infrared spectroscopy with Euclidean distance or factorization methods [J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(15): 141–146.
- [16] GARCÍA-NAVARRO J, BARBONI T, ROGGO Y, *et al.* Dynamic weighting algorithms in multimodal spectral analysis [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 1205: 339678.
- [17] 王靖, 丁佳兴, 郭中华, 等. 基于近红外高光谱成像技术的宁夏羊肉产地鉴别[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 250–254, 260.
WANG J, DING JX, GUO ZH, *et al.* Origin identification of Ningxia lamb using near-infrared hyperspectral imaging technology [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(2): 250–254, 260.
- [18] 刘振华, 王海燕, 李伟, 等. 基于迁移学习的多品牌近红外仪器模型共享方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(5): 1287–1293.
LIU ZH, WANG HY, LI W, *et al.* Model sharing strategy for multi-brand near-infrared instruments based on transfer learning [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(5): 1287–1293.
- [19] ROSSI F, BARBONI T, GARCÍA-NAVARRO J, *et al.* Real-time monitoring of pH in dairy matrices via NIR [J]. *Food Control*, 2023, 145: 109432.
- [20] PASQUINI C, ARAUJO CU, FERREIRA MMC. Near-infrared spectroscopy in pharmaceutical and food analysis: Recent advances with deep learning and chemometric integration [J]. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 2023, 16: 351–379.
- [21] 李志强, 张伟, 王磊, 等. 动态加权融合在乳制品检测中的应用[J]. *食品科学*, 2022, 43(18): 312–319.
LI ZQ, ZHANG W, WANG L, *et al.* Application of dynamic weighted fusion in dairy product detection [J]. *Food Science*, 2022, 43(18): 312–319.
- [22] TAO F, SMITH J, WANG L, *et al.* Deep learning for multi-modal spectral data fusion [J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 158: 116878.
- [23] SMITH J, TAO F, WANG L, *et al.* Multi-source data fusion for food quality prediction using NIR spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2023, 405(Pt A): 134802.
- [24] 郭涛, 黄右琴, 郭龙, 等. 利用近红外光谱技术快速预测苜蓿干草营养成分含量[J]. *草业科学*. 2020, 37(11): 2374–2381.
GUO T, HUANG YQ, GUO L, *et al.* Rapid prediction of nutrient content in alfalfa hay using near-infrared spectroscopy [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(11): 2374–2381.
- [25] 徐浩然, 周雨婷, 张伟, 等. 多源光谱特征融合的奶酪脂肪含量快速检测模型优化[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(9): 215–221.
XU HR, ZHOU YT, ZHANG W, *et al.* Optimization of rapid detection model for cheese fat content based on multi-source spectral feature fusion [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(9): 215–221.
- [26] RINNAN Å, VAN-DEN-BERG F, ENGELSEN SB, *et al.* Data pre-processing in chemometrics [J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2009, 28(10): 1201–1210.
- [27] 张伟, 陈晓峰, 李志强, 等. 奶酪成分的 PLS 建模优化策略[J]. *中国乳品工业*, 2023, 51(3): 45–50.
ZHANG W, CHEN XF, LI ZQ, *et al.* PLS modeling optimization strategy for cheese composition [J]. *China Dairy Industry*, 2023, 51(3): 45–50.
- [28] NICOLAI BM, ROSSI F, SMITH J, *et al.* NIR spectroscopy for food quality evaluation [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2014, 5: 325–348.
- [29] 李鹏程, 王静, 孙晓荣. 高光谱成像技术在肉品安全检测中的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(5): 1421–1428.
LI PC, WANG J, SUN XR, *et al.* Advances in rapid detection of fresh meat quality and safety using spectral technology [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(5): 1421–1428.
- [30] MÜLLER C, NICOLAI BM, RINNAN Å, *et al.* Comparative study of PLS and ANN in cheese composition modeling [J]. *Talanta*, 2021, 234: 122623.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)