

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.01.041

# 光谱技术在乳及乳制品研究中的应用进展

## Application of Spectroscopy in dairy and dairy products

剧 柠 胡 婕

JU Ning HU Jie

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**摘要:**文章阐述了光谱技术在乳及乳制品掺假和掺伪检测、营养成分检测、抗生素检测、微生物污染检测,乳及乳制品种类的鉴定等方面的应用。综述了近红外光谱、拉曼光谱、高光谱成像技术在乳及乳制品品质检测和安全评定上的重要应用和研究进展,指出多种技术联合应用是未来研究的趋势。

**关键词:**乳及乳制品;近红外光谱;拉曼光谱;高光谱成像

**Abstract:** This paper reviewed the applications of the spectral technologies, including the adulteration detection, nutrients detection, antibiotics detection, microbial contamination detection and product types identification in dairy and dairy products. Using Near-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy and Hyperspectral imaging technique, the important applications and research advances of the quality detection and safety assessments in dairy and dairy products have been also reviewed. It was pointed out that the joint application of various technologies is the trend of future research.

**Keywords:** dairy and dairy products; Near-infrared spectroscopy; Raman spectroscopy; Hyperspectral imaging technique

乳及乳制品成分的分析及检测是乳品工业不可或缺的环节。传统对乳及乳制品成分及理化特性的检测通常采用化学分析的方法,如凯氏定氮法测定蛋白质<sup>[1]</sup>,索氏提取法测定脂肪<sup>[2]</sup>,高效液相色谱法测定乳糖<sup>[3]</sup>等;对微生物的检测则多采用平板培养的方法<sup>[4]</sup>,这些方法通常操作复杂、耗时、需要对样品预处理、对技术人员要求较高且不适合在线监测。虽然有些乳及乳制品企业配备了乳成分快速分析仪,可以做到对常规理化指标的快速检测,但设备成本较高,且乳及乳制品中微生物的检测仍需

单独操作,无法完全满足企业对检测技术快速、准确、无损的需求。光谱是光与物质相互作用后产生的特征谱线,反映了物质丰富的物理特性和所含化合物特征。测量物质光谱不需要复杂的样本准备过程,对样本基本不造成损害,而且检测成本低,甚至能实现实时测量<sup>[5-6]</sup>。随着计算机技术及机械技术的发展,光谱技术逐渐成为一种高效无损的检测技术被用于乳及乳制品的质量安全检测。本文综述了光谱检测技术近年来在乳及乳制品检测方面的应用及发展进展。

## 1 近红外光谱

### 1.1 技术原理

近红外光(near infrared, NIR)是波长在 780~2 526 nm 内的介于可见光和红外光之间的一种电磁波。近红外光谱区与有机分子中含氢基团(OH、NH、CH)的振动的倍频和合频吸收区一致,通过对样品近红外光谱的扫描,可以得到样品中有机分子含氢基团的特征信息。根据物质的含量与近红外区内的不同波长点吸收峰呈线性关系,可以利用该技术测定产品中的物质含量。该技术具有分析速度快、成本低、样品无需前处理、操作简便等优点。乳及乳制品中的有机物含有含氢基团,因此可利用近红外光谱技术实现对乳及乳制品的检测。

### 1.2 应用现状

国内外采用 NIR 法对乳及乳制品的研究主要集中在乳制品掺假、乳制品成分的定量检测等方面。研究步骤通常首先对样品进行适宜波段的光谱扫描,然后采用化学计量学算法对掺假物或主要品质指标进行定性分析或定量模型,从而实现掺假物质及原料乳成分品质的快速检测。Fazal 等<sup>[7]</sup>采用 PCA(主成分分析法)对获得的近红外光谱数据进行统计分析,对纯骆驼奶和掺假骆驼奶样品进行鉴别,得到检测限小于 1.5%。王加华等<sup>[8]</sup>采用 MLR(多元线性回归)方程对生鲜乳品质指标进行模型构建,运用外部数据集检验得到脂肪、蛋白质、干物质和乳糖模型的预测标准误差分别为 0.107 0, 0.093 0,

**基金项目:**宁夏自然科学基金项目(编号:NZ15016);国家自然科学基金项目(编号:C200602)

**作者简介:**剧柠(1979—),女,宁夏大学副教授,博士。

E-mail: juning1122@163.com

**收稿日期:**2018-11-03

0.136 0, 0.065 8; 相对预测误差分别为9.72, 3.66, 8.53, 2.13, 试验误差小, 可推广用于现场准确测量。倪力军等<sup>[9]</sup>采用 KNN 保形映射算法(KNN-KSR)对婴幼儿乳粉建立含量范围分别为 14.5%~23.1%(蛋白质、脂肪)、5.6~9.2 mg/g(钙)、1.29~10.20 mg/100 g(锌、V<sub>B2</sub>)、0.34~1.47 mg/g(V<sub>C</sub>)的营养物质近红外定量分析模型。结果表明, 每种营养物质的预测平均相对误差降低 0.1% 以上, 此法可对婴幼儿乳粉中主要营养成分进行快速检测, 完成乳品品质的评价。此外, 有研究者<sup>[10]</sup>通过构建 PLS(偏最小二乘法)模型对乳饮料中的单种增稠剂定量检测进行了可行性研究。同时, 通过便携式及台式 NIR 光谱仪的比较研究, 可实现乳品质的快速检测, 为便携式乳品近红外专用仪器设计提供技术参考<sup>[11]</sup>。

虽然近红外光谱技术具有快速无损检测的优势, 但该方法属于间接分析法, 检测中存在着近红外光谱信号吸收弱, 强度低, 谱带重叠严重, 背景复杂的劣势, 因此必须结合化学计量学方法进行解析, 构建相应模型, 从而实现未知样本的定量或定性分析。对不同物质的检测, 采用合适的化学计量学算法是重中之重。

## 2 拉曼光谱

### 2.1 技术原理

拉曼光谱(Raman spectroscopy)技术是一门基于拉曼散射效应而发展起来的光谱分析技术。该技术通过对与入射光频率不同的散射光谱进行分析得到分子振动或转动信息, 从而完成对不同结构分子的检测。拉曼光谱对如 C—C、C=C、N=N 和 S—S 等对称结构分子检测很有效, 与红外光谱在分析分子结构中互相补充, 一些红外吸收弱的基团, 拉曼散射反而强。拉曼光谱无需样品前处理, 样品可通过光线测量, 方法快速、简单、可重复性强, 被广泛用于食品的定性和定量分析。该技术包括表面增强拉曼光谱(SERS)、傅里叶变换拉曼光谱(FT-Raman)、激光共振拉曼光谱(RRS)和共焦拉曼光谱(CRS)等<sup>[12]</sup>。

### 2.2 应用现状

近年来, 拉曼光谱法主要用于品牌奶粉的掺伪、乳及乳制品掺假及营养成分的研究。研究者分别以不同品牌奶粉为对象利用拉曼光谱法、拉曼光谱与红外光谱融合法对奶粉掺伪进行了研究<sup>[13-15]</sup>, 结合不同的化学计量学算法, 可实现奶粉掺伪的定性及半定量检测, 为奶粉掺假识别提供了新的快速检测方法。Aleksandar 等<sup>[16]</sup>应用拉曼光谱, 采用线性判定的方法, 可检测奶油中掺假葵花油、椰子油和棕榈油。Rodrigo 等<sup>[17]</sup>采用拉曼光谱结合化学计量学的方法, 研究了不同的处理和储存条件对乳清蛋白分子中乳糖结晶的影响, 得到的脱水产物的平均 Aw 值 > 0.200。试验中储存在环境温度和湿度下的样

品, 3 周后拉曼光谱发生变化; 储存在干燥剂中的样品, 直到 1 年之后才观察到变化, 本试验为乳制品浓缩和干燥的研究提供了重要的工具。

表面增强拉曼光谱(SERS)技术使用经特殊处理的均匀纳米颗粒芯片作为基板, 使入射光子、基质和分子三者间相互作用, 从而产生大幅增强待测分子拉曼信号的类共振增强效应, 克服了传统拉曼光谱信号弱的缺点。近年来成为快速检测技术的研究热点。中国利用 SERS 技术主要对奶粉中三聚氰胺的检测进行研究。常规 SERS 技术对乳及乳制品中的三聚氰胺只能做到定性检测, 定量检测很难达到国标要求。因此, 学者探索采用不同前处理方式提高其检测灵敏度, 收到了不错的效果。王琳等<sup>[18]</sup>用柠檬酸钠还原氯金酸的方法制备胶体金溶液作为 SERS 的增强试剂, 建立了 SERS 检测牛奶中三聚氰胺的方法, 检测限为 1 μg/mL, 牛奶前处理与检测时间一共只需 5 min, 试剂稳定, 配合手持式或便携式拉曼光谱仪, 适合现场快速筛查。陈小曼等<sup>[19]</sup>将待测物经乙腈提取、活性炭吸附及氢氧化钠溶液洗脱后进行 SERS 检测, 建立了固相萃取—表面增强拉曼光谱法(SPE-SERS)测定奶粉中三聚氰胺的分析方法, 检出限达为 0.100 mg/kg。雷皓宇等<sup>[20]</sup>将奶粉样品用 15% 三氯乙酸溶液提取, 中性氧化铝吸附杂质后进行检测, 建立了奶粉中同时检测三聚氰胺及二聚氰胺的表面增强拉曼光谱法, 使三聚氰胺检出限达到 0.001 5 mg/L; 二聚氰胺检出限达到 0.15 mg/L。赵蕊池等<sup>[21]</sup>以多元醇法合成、流体流动法组装制备的有序纳米银线作为三聚氰胺的 SERS 增强基底, 实现了样品中痕量三聚氰胺的快速灵敏检测, 检测限为 0.05 mg/L。Dong 等<sup>[22]</sup>用适体修饰的 SERS 纳米传感器和寡核苷酸芯片建立了一种独特的纳米探针, 用于检测牛奶中的三聚氰胺, 可检测极限达到了 1 pg/mL。上述研究为三聚氰胺的监控提供了更加快速的方法, 具有良好的应用潜力。

在抗生素检测方面, Shi 等<sup>[23]</sup>通过采用侧向流胶体金免疫法结合 SERS 法实现了对新霉素的快速灵敏检测。通过制备抗新霉素单克隆抗体与 4-氨基苯硫酚偶联的拉曼探针分子的胶体金的方法, 新霉素的 IC<sub>50</sub> 和检测极限分别为 0.04 ng/mL 和 0.216 pg/mL。该方法高度专一、敏感、稳定且重复性好, 可用于乳样中抗生素残留的快速检测。此外, Wang 等<sup>[24-25]</sup>应用 SERS 法对乳制品中的细菌、沙门氏菌等微生物快速检测进行了研究, 对细菌的检测极限可达到 10<sup>3</sup> 个/mL。

其它拉曼光谱的研究中, Tomasz 等<sup>[26]</sup>采用 FT-Raman 结合 PLS 模型对酸奶中的脂肪、乳糖和蛋白质进行了测定, 建立了快速定量酸奶中营养物质的方法。Paulo 等<sup>[27]</sup>使用 FT-Raman 结合 PLS-DA(最小二乘判别法)模型, 可正确将所有全乳糖和低乳糖奶粉进行快速分

类。Yao 等<sup>[28]</sup>通过采用 CRS 技术来快速确定人、牛和山羊乳脂肪球之间的差异,为奶粉配方的改进和发展奠定了基础。

### 3 高光谱成像

#### 3.1 技术原理

高光谱成像(Hyperspectral imaging, HSI)同时含有图像信息和光谱信息,是融合了传统成像技术获取物体空间数据信息和光谱技术获取物质原子、分子光谱特征的一门技术,可对物体内部品质、外部特征进行全面检测<sup>[29]</sup>。目前主要有 3 种基本的 HSI 系统,分别为点扫描成像系统,线扫描成像系统和面扫描结构<sup>[30]</sup>。HSI 分析通常先对采集的图像进行降维、降噪处理,提取其特征光谱,尔后采用化学计量学算法构建相应的数据学模型。通过模型的构建最终完成对样品所需的快速检测。HSI 技术在果蔬及肉制品的无损检测上应用较多,近年来开始逐渐应用于乳及乳制品。其应用研究近年来国内外主要集中在乳中掺假物检测、乳的营养物质检测、乳中致病菌的检测及干酪品质的监测方面。

#### 3.2 应用现状

在牛奶掺假检测方面,Huang 等<sup>[31]</sup>研究近红外高光谱技术(NIR HIS)和简单波段比的组合,Jongguk 等<sup>[32]</sup>应用 NIR HIS 结合 PLSR(偏最小二乘回归法)模型对奶粉中三聚氰胺进行了快速检测,证明了 NIR HIS 技术可作为检测奶粉中三聚氰胺的有效工具。Débora 等<sup>[33]</sup>应用 NIR HSI 和多元曲线分辨方法(MCR)对奶粉掺假进行检测。对奶粉和单一掺假 5%~30% 浓度不等的乳清粉、淀粉、尿素和三聚氰胺的奶粉进行研究,开发校准模型。分别采用掺假最高 0.05% 三聚氰胺,1%~10% 的淀粉尿素混合物和淀粉尿素乳清粉混合物对模型进行评估。结果表明该方法能够对光谱提供识别和量化,且绝对误差 < 5%。

拉曼高光谱成像技术用于检测三聚氰胺也成为近年来的研究热点。不同于近红外光谱下三聚氰胺特征峰不易被分辨,拉曼光谱下三聚氰胺具有显著的特征峰信息。刘宸等<sup>[34]</sup>搭建的线扫描式拉曼高光谱检测系统,对奶粉和三聚氰胺颗粒混合样本实现了大面积无损快速检测。Qin 等<sup>[35]</sup>采用大规模拉曼光谱图像法检测奶粉中包括硫酸铵、双氰胺、三聚氰胺和尿素在内的多种掺假物质的可能性,结果表明使用自模拟混合分析创建拉曼化学图像,可有效地用于识别奶粉中的多种掺假物。

HIS 技术用于牛奶中营养成分检测研究方面,张倩倩等<sup>[36]</sup>采用 VIR/NIR HSI 技术,通过不同预处理方法得到特征波段,所构建的最小二乘支持向量机(LS-SVM)模型预测精度高于主成分回归(PCR)模型,可为牛奶真蛋白质含量检测提供快速无损的新方法。赵紫竹等<sup>[37]</sup>应用

图像处理技术分析高光谱数据,所构建的 N-PLS(多维偏最小二乘)模型精度高于 PLS 模型,可精确预测牛奶中脂肪质量浓度。

在牛奶中致病菌的检测方面,赵紫竹等<sup>[38]</sup>应用 HSI 技术,构建的牛奶中蜡样芽孢杆菌污染度 N-PLS 预测模型能够实现对污染菌的定量分析。刘佳丽等<sup>[39]</sup>采用 HSI 结合纹理特征快速检测牛奶中是否含有致病菌,采用主成分分析后进行聚类分析,结果可以较好地地区分含菌样本及无菌样本,且可将不同浓度、不同菌种的样本按菌落种类区分开。

在干酪品质监测方面,Livia 等<sup>[40]</sup>对表面不平整的半硬质干酪进行 HSI 监测,检测半硬干酪谷氨酰胺转氨酶在成熟过程中的作用,结果表明该方法可通过透明真空箔对产品进行远程检测。Nadya 等<sup>[41]</sup>采用反射光 HIS 对 40 种瑞士干酪样品及其成熟期进行了监测,对光谱分布和干酪的硬度值进行了建模,结果证明所构建的 ANN(人工神经网络)模型优于 PLSR 模型,可用于预测瑞士干酪在整个成熟期的质地特性。

### 4 展望

快速、无损、重复性好、灵敏度高的检测技术的开发对乳及乳制品的科研、生产及贸易等方面显得尤为重要。就上述的光谱检测技术而言,研究者在乳及乳制品安全检测方面开展了广泛的研究,无论掺假物检测、乳及乳制品成分检测以及微生物监控都取得了很大的进展。但每种检测技术都存在着自身的局限,如所用设备价格昂贵,应用在线检测还不现实;针对带检样品需要寻找合适的数学模型等。另外,实验室检测下建立的模型应用于在线质量监控还需要深入研究。通过多种检测技术联合应用并综合评价,弥补单一技术的缺陷,利用多元信息,从而更加全面、准确、快速地对样本进行检测是未来研究的趋势。

#### 参考文献

- [1] 薛建龙. 牛羊乳中蛋白质和脂肪的差异比较研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2015: 3-6.
- [2] 李秀花. 酸水解法测定食品中脂肪含量与索氏抽提法的比较[J]. 山西医科大学学报, 1999(4): 383-384.
- [3] 岳虹, 赵贞, 刘丽君, 等. 高效液相色谱法测定发酵乳饮料中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖及乳糖含量[J]. 乳业科学与技术, 2017, 40(2): 23-26.
- [4] 剧柠, 柴佳丽, 黄小晶. 宁夏奶产区不同季节 不同规模牧场原料乳的微生物和理化指标分析[J]. 农产品加工: 学刊, 2013(16): 114-115, 118.
- [5] FRANS Van Den Berg, CHRISTIAN B Lyndgaard, KLAUS M Sørensen, et al. Process analytical technology in the food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013.

- 31(1): 27-35.
- [6] 郭培源, 刘硕, 杨昆程, 等. 色谱技术、光谱分析法和生物检测技术在食品安全检测方面的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(8): 3 217-3 223.
- [7] FAZAL Mabooba, FARAH Jabeenb, JAVID Hussaina, et al. FT-NIRS coupled with chemometric methods as a rapid alternative tool for the detection & quantification of cow milk adulteration in camel milk samples[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2017, 92: 245-250.
- [8] 王加华, 张晓伟, 王军, 等. 基于便携式近红外技术的生鲜乳品质现场评价[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2 678-2 684.
- [9] 倪力军, 董笑笑, 陶庆璇, 等. 利用近红外光谱进行婴幼儿乳粉中营养物质含量的快速检测[J]. 食品科技, 2017, 42(4): 264-270.
- [10] 王会, 陆建良. 近红外光谱法快速测定含乳饮料中增稠剂含量[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(24): 132-134.
- [11] LIU Ning-jing, HECTOR Aya Parra, ANNEMIEKE Pustjens, et al. Evaluation of portable near-infrared spectroscopy for organic milk authentication[J]. *Talanta*, 2018, 184: 128-135.
- [12] 陈倩, 李沛军, 孔保华. 拉曼光谱技术在肉品科学研究中的应用[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 307-313.
- [13] 张正勇, 沙敏, 刘军, 等. 基于高通量拉曼光谱的奶粉鉴别技术研究[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(6): 49-51.
- [14] 王海燕, 宋超, 刘军, 等. 基于拉曼光谱-模式识别方法对奶粉进行真伪鉴别和掺伪分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1): 124-128.
- [15] 陈达, 黄志轩, 韩汐, 等. 奶粉掺假拉曼光谱成像检测新方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(1): 26-30.
- [16] ALEKSANDAR Nedeljkovic, IGOR Tomasevic, JELENA Miacinovic, et al. Feasibility of discrimination of dairy creams and cream-like analogues using Raman spectroscopy and chemometric analysis[J]. *Food Chemistry*, 2017, 232, 487-492.
- [17] RODRIGO Stephani, KAMILA De Sá Oliveira, CARLOS Eduardo Rocha De Almeida, et al. Raman spectroscopy as a tool to identify modification of whey protein concentrate (WPC) during shelf life[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2017, 11: 1-9.
- [18] 王琳, 王雪, 田静秒, 等. 表面增强拉曼光谱检测牛奶中三聚氰胺[J]. 中国农业科学, 2014, 47(11): 2 224-2 232.
- [19] 陈小曼, 雷皓宇, 胡玉玲, 等. 固相萃取-表面增强拉曼光谱法测定奶粉中三聚氰胺[J]. 分析测试学报, 2016, 35(10): 1 343-1 346.
- [20] 雷皓宇, 陈小曼, 李攻科, 等. 表面增强拉曼光谱法同时检测奶粉中三聚氰胺和二聚氰胺[J]. 分析科学学报, 2017, 33(3): 312-316.
- [21] 赵蕊池, 王培龙, 石雷, 等. 自组装有序纳米银线表面增强拉曼光谱检测牛奶中三聚氰胺[J]. 分析化学, 2017, 45(1): 75-82.
- [22] DONG Ning, HU Yong-jun, YANG Kang, et al. Development of aptamer-modified SERS nanosensor and oligonucleotide chip to quantitatively detect melamine in milk with high sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 228: 85-93.
- [23] SHI Qiao-qiao, HUANG Jie, SUN Ya-ning, et al. Utilization of a lateral flow colloidal gold immunoassay strip based on surface-enhanced Raman spectroscopy for ultrasensitive detection of antibiotics in milk[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 197: 107-113.
- [24] WANG Chong-wen, WANG Jun-feng, LI Min, et al. A rapid SERS method for label-free bacteria detection using polyethylenimine-modified Au-coated magnetic microspheres and Au@Ag nanoparticles[J]. *Analyst*, 2016, 141(22): 6 226-6 238.
- [25] WANG Pan-xue, SHINTARO Pang, BROOKE Pearson, et al. Rapid concentration detection and differentiation of bacteria in skimmed milk using surface enhanced Raman scattering mapping on 4-mercaptophenylboronic acid functionalized silver dendrites[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 409(8): 2 229-2 238.
- [26] TOMASZ Czaja, MARIA Baranowska, SYLWESTER Mazurek, et al. Determination of nutritional parameters of yoghurts by FT Raman spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 196: 413-417.
- [27] PAULO Henrique Rodrigues Júnior, KAMILA De Sá Oliveira, CARLOS Eduardo Rocha De Almeida, et al. FT-Raman and chemometric tools for rapid determination of quality parameters in milk powder: Classification of samples for the presence of lactose and fraud detection by addition of maltodextrin[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 584-588.
- [28] YAO Yun-ping, ZHAO Guo-zhong, YAN Yuan-yuan, et al. Milk fat globules by confocal Raman microscopy: Differences in human, bovine and caprine milk[J]. *Food Research International*, 2016, 80: 61-69.
- [29] GARINI Y, YOUNG I T, MCNAMARA G. Spectral imaging: Principles and applications[J]. *Cytometry Part A*, 2006, 69A(8): 735-747.
- [30] AMIGO J M, MART I, GO WEN A. Hyperspectral imaging and chemometrics: a perfect combination for the analysis of food structure, composition and quality[J]. *Data Handling in Science and Technology*, 2013, 2: 343-370.
- [31] HUANG Min, MOON S Kim, STEPHEN R Delwiche, et al. Quantitative analysis of melamine in milk powders using nearinfrared hyperspectral imaging and band ratio[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 181: 10-19.
- [32] JONGGUK Lim, GIYOUNG Kim, CHANGYEUN Mo, et

- al. Detection of melamine in milk powders using near-infrared hyperspectral imaging combined with regression coefficient of partial least squares regression model [J]. *Talanta*, 2016, 151: 183-191.
- [33] DÉBORA A P Forchetti, RONEI J Poppi. Use of NIR hyperspectral imaging and multivariate curve resolution (MCR) for detection and quantification of adulterants in milk powder [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 76: 337-343.
- [34] 刘宸, 王庆艳, 黄文倩, 等. 拉曼高光谱成像系统中光在奶粉层的穿透深度研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(10): 3 103-3 107.
- [35] QIN Jian-wei, CHAO Kuang-lin, MOON S Kim. Simultaneous detection of multiple adulterants in dry milk using macro-scale Raman chemical imaging[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138: 998-1 007.
- [36] 张倩倩, 谭琨. 基于高光谱的牛奶中真蛋白质含量反演[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(12): 3 436-3 439.
- [37] 赵紫竹, 卫勇, 张乃迁, 等. 基于高光谱的牛奶脂肪质量浓度预测模型建立与评价[J]. *中国乳品工业*, 2018, 46(2): 45-48.
- [38] 赵紫竹, 卫勇, 常若葵, 等. 牛奶中蜡样芽孢杆菌高光谱检测模型构建与分析[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(12): 249-254.
- [39] 刘佳丽, 吴海云, 卫勇, 等. 基于高光谱技术结合纹理特征分析牛奶致病菌[J]. *农技服务*, 2017, 34(5): 1-3.
- [40] DARNAY Livia, KRÁLIK Flóra, OROS Gergely, et al. Monitoring the effect of transglutaminase in semi-hard cheese during ripening by hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 196: 123-129.
- [41] VASQUEZ Nadya, MAGAN Claudia, OBLITAS Jimmy, et al. Comparison between artificial neural network and partial least squares regression models for hardness modeling during the ripening process of Swiss-type cheese using spectral profiles[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 219: 8-15.

(上接第 163 页)

- [12] 郑慧, 陈希平, 尤祯丹, 等. 蜂花粉可溶性膳食纤维酶法提取工艺优化及其理化分析[J]. *食品与机械*, 2016, 32(12): 184-188.
- [13] 郑慧, 陈希平, 常新利, 等. 响应面优化蜂花粉可溶性膳食纤维提取工艺[J]. *湖南中医药大学学报*, 2015, 35(2): 20-24.
- [14] 郑慧, 陈希平, 胡熙, 等. 蜂花粉可溶性膳食纤维碱提工艺[J]. *食品科技*, 2015, 35(9): 222-226.
- [15] ADOM K K, LIU Rui-hai. Antioxidant activity of grains[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2002, 50(21): 6 182-6 187.
- [16] 旷慧, 冯建文, 范倩, 等. 红树莓多酚的组分分析及体外抗氧化过氧化活性[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 83-89.
- [17] 余有贵, 李忠海, 黄国华, 等. 菌质可溶性膳食纤维对肠道菌群体外生长的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(2): 34-38.
- [18] 颜才植, 叶发银, 赵国华. 食品中多酚形态的研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(15): 249-254.
- [19] 左丹, 廖霞, 李瑶, 等. 基于肠道吸收机制的膳食多酚代谢研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(7): 266-271.
- [20] MOSELE J I, MACIÀ A, ROMERO M P, et al. Application of in vitro, gastrointestinal digestion and colonic fermentation models to pomegranate products (juice, pulp and peel extract) to study the stability and catabolism of phenolic compounds [J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 14: 529-540.

(上接第 220 页)

- [68] HOU Min-zhi, CHENG Zhi-qiang, SHEN Hong-wei, et al. High expression of CTHRC1 promotes EMT of epithelial ovarian cancer (EOC) and is associated with poor prognosis[J]. *Oncotarget*, 2015, 6(34): 35 813-35 829.
- [69] DA Chun-li, LIU Yu-ting, ZHAN Yi-yi, et al. Nobiletin inhibits epithelial-mesenchymal transition of human non-small cell lung cancer cells by antagonizing the TGF- $\beta$ 1/Smad3 signaling pathway[J]. *Oncology Reports*, 2016, 35(5): 2 767-2 774.
- [70] FENG Sen-ling, YUAN Zhong-wen, YAO Xiao-jun, et al. Tangeretin, a citrus pentamethoxyflavone, antagonizes ABCB1-mediated multidrug resistance by inhibiting its transport function [J]. *Pharmacological Research*, 2016, 110: 193-204.
- [71] LAI C S, HO M H, TSAI M L, et al. Suppression of adipogenesis and obesity in high-fat induced mouse model by hydroxylated polymethoxyflavones[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43): 10 320-10 328.
- [72] CHAROENSINPHON N, QIU P, PING D, et al. 5-Demethyltangeretin inhibits human nonsmall cell lung cancer cell growth by inducing G<sub>2</sub>/M cell cycle arrest and apoptosis[J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2013, 57(12): 2 103-2 111.
- [73] ZHENG Jin-kai, SONG Ming-yue, DONG Ping, et al. Identification of novel bioactive metabolites of 5-demethyl-Nobiletin in mice[J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2013, 57(11): 1 999-2 007.
- [74] HEIM K E, TAGLIAFERRO A R, BOBILYA D J. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2002, 13(10): 572-584.
- (本文系 2018 年湖南省研究生创新论坛一等奖论文)