

拉曼光谱在粮食检测中的应用

李 芳^{1,3}, 陆安祥^{1,2,3*}, 王纪华^{1,2,3}

(1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京市农林科学院, 北京 100097; 2. 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097; 3. 农产品产地环境监测北京市重点实验室, 100097)

摘 要: 拉曼光谱技术是一种能够实现快速、无损检测的高效检测技术, 且加上拉曼光谱仪的操作简单、结果准确等特点, 目前该技术已被广泛的应用于生物、医药、材料等诸多领域, 在粮食品质、结构检测方面同样具有良好的应用前景。数据显示, 每年受重金属污染的粮食高达 1200 万吨, 引起了人们的担忧及重视, 如何实现粮食污染的简单快速鉴别, 成为人们关心的问题。在此背景下, 本文就当前拉曼光谱这一无损检测技术在粮食检测领域中的应用进行了综述, 以期为今后粮食的快速检测方法提供相应支持。文章介绍了拉曼光谱技术的原理、分类以及拉曼光谱仪的结构, 综述了拉曼光谱技术在大米、小麦、玉米等主要粮食检测中的应用现状, 并对其今后的研究发展前景进行展望。

关键词: 拉曼光谱, 粮食, 快速检测

Application of Raman spectroscopy in grain detection

LI Fang^{1,3}, LU An-Xiang^{1,2,3*}, WANG Ji-Hua^{1,2,3}

(1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry, Beijing 100097, China; 2. Risk Assessment Lab for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China; 3. Beijing Municipal Key Laboratory of Agriculture Environment Monitoring, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: Raman spectroscopy is a kind of high-efficiency detection technology which can realize rapid and non-destructive detection. The Raman spectroscopy is widely used in many fields such as biology, medicine and materials because of its simple operation and accurate results. It also has a good application prospect in food quality and structure detection. Data show that grain which has been contaminated by heavy metals each year has reached up to 12 million ton, causing people's concerns and attention, thus how to achieve rapid and simple identification of food contamination becomes an important question. Based on this background, the application of non-destructive Raman spectroscopy technology in grain inspection was reviewed in this paper, so as to provide corresponding support for the rapid detection of grain in the future. This paper introduced the principle, classification of Raman spectroscopy and the structure of Raman spectrometer, summarized the application status of Raman spectroscopy in grain detection, including rice, wheat and corn, and discussed the future research prospects of Raman spectroscopy.

KEY WORDS: Raman spectroscopy; grain; rapid detection

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项 (201403014-04)

Fund: Supported by National Public Welfare Industry (Agriculture) Scientific Research Projects (201403014-04)

*通讯作者: 陆安祥, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品安全。E-mail: luax@nrcita.org.cn

*Corresponding author: LU An-Xiang, Ph.D., Associate Professor, Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China. E-mail: luax@nrcita.org.cn

1 引言

1928 年, 印度物理学家 Raman 发现拉曼散射(Raman scattering)效应, 通过分析入射光频率不同的散射光谱, 获得分子振动、转动信息, 从而可用于对分子结构的研究^[1]。通过观察拉曼光谱中峰的信息, 可实现定性分析, 确定物质的成分及其化学结构, 从而对相似结构的物质加以区分。拉曼光谱检测的主要优点包括操作简单, 检测时间短, 可实现无损检测或只需简单的预处理而不用化学试剂处理, 避免污染。随着各种新的拉曼光谱技术的出现, 再辅以各种化学计量学方法, 拉曼光谱应用逐渐拓宽, 已经广泛应用于食品安全、生物、材料、司法鉴定等诸多领域^[2-6]。

本文综述了拉曼光谱技术的检测原理及分类, 重点阐述了其在粮食(大米、小麦、玉米)检测中的研究应用, 以期期为粮食检测提供一种快速检测新思路提供参考。

2 拉曼光谱技术原理及检测装置

2.1 拉曼光谱技术原理

拉曼光谱为散射光谱, 当单色入射光束的光子与待测物分子相互作用时, 会产生两种碰撞, 其一是弹性碰撞, 该过程中光子与分子没有能量交换, 仅改变其运动轨迹, 称作瑞利散射(Rayleigh scattering); 另一种为非弹性碰撞, 该过程中光子与分子间存在能量交换, 运动轨迹发生变化, 且部分能量变化, 光子的部分能量转移给分子, 或分子的振动、转动能量传给光子, 因此光子的能量较原来有多有少, 同时改变光子频率, 该过程即为拉曼散射^[7,8]。

拉曼散射包括两种, 一种是斯托克斯散射(Stokes scattering), 即能量交换时, 处于基态(E_0)的待测物分子跃迁至激发态(E_1), 使得散射光频率小于入射光的现象; 另一种为反斯托克斯散射(anti-Stokes scattering), 即处于激发态(E_1)的待测物分子将部分能量传递给入射光, 返回基

态(E_0), 使得散射光频率大于入射光频率的现象。通常用于检测分析的为斯托克斯散射^[9]。拉曼位移频率与入射光频率无关, 每种物质有特征拉曼光谱, 拉曼位移的大小、数目及强度与待测物分子振动和转动能级密切相关, 可据此进行定性分析, 分析分子结构, 且可利用峰强与待测物浓度的正相关进行半定量分析^[10-12]。

2.2 拉曼光谱仪结构

拉曼光谱仪种类较多, 但都具有激发光源及分光、收集、检测、信号处理和控制系统, 其结构示意图见图 2^[10]。拉曼光谱仪在定性分析、高度定量分析、测定分子结构方面优势显著, 有较高的分辨率和转移精度, 且操作简便^[13,14]。

3 拉曼光谱技术分类

3.1 傅里叶拉曼光谱技术(FT-Raman)

FT-Raman 采集信号的方法是基于傅里叶变换, 采取叠加的方法提高信噪比, 待测物经 1064 nm 近红外光源激发, 很好地削弱了发色基团的荧光干扰, 主要优点是分析速度快、检测精度高、对样品损伤小等, 常用于样品结构分析^[15,16]。游婷婷等^[17]利用 FT-Raman 对芦竹碱木质素进行无损结构分析, 结果表明苯醇抽提前后芦竹拉曼特征木质素 SGH 型木质素峰强度降低, 方法可以快速准确的分析木质素结构。

3.2 共聚焦显微拉曼光谱技术(CRS)

CRS 技术综合了拉曼光谱分析技术和显微分析技术, 低功率激光器辅以高倍光学显微镜, 可进行逐点扫描, 最终得到高分辨率的三维拉曼图像, 主要优点是空间分辨率高、多相态、原位微观检测、无需预处理或预处理简单等^[18,19]。许可等^[20]通过 CRS 区分打印墨粉, 可以很好地将 30 种样品分为 5 大类, 结果表明该方法区分不同种类激光打印墨粉简单可行。

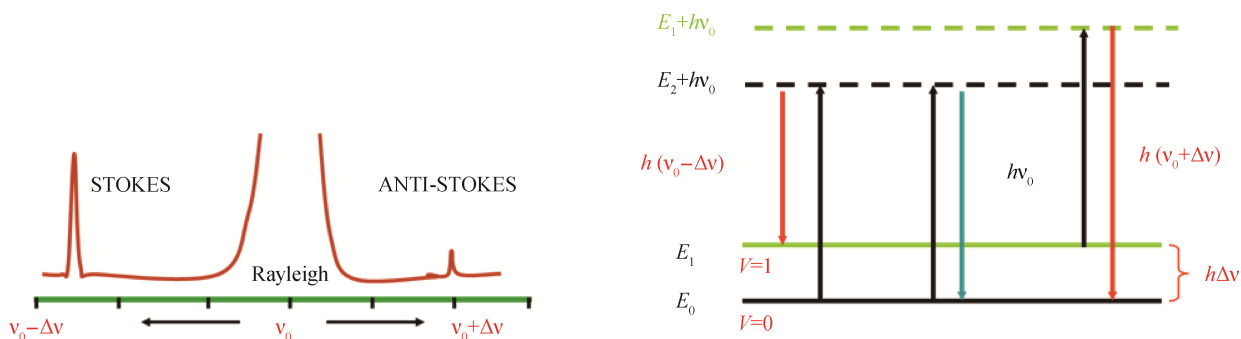


图 1 拉曼散射的原理与能级图
Fig. 1 Principle and the energy level diagram of Raman scattering

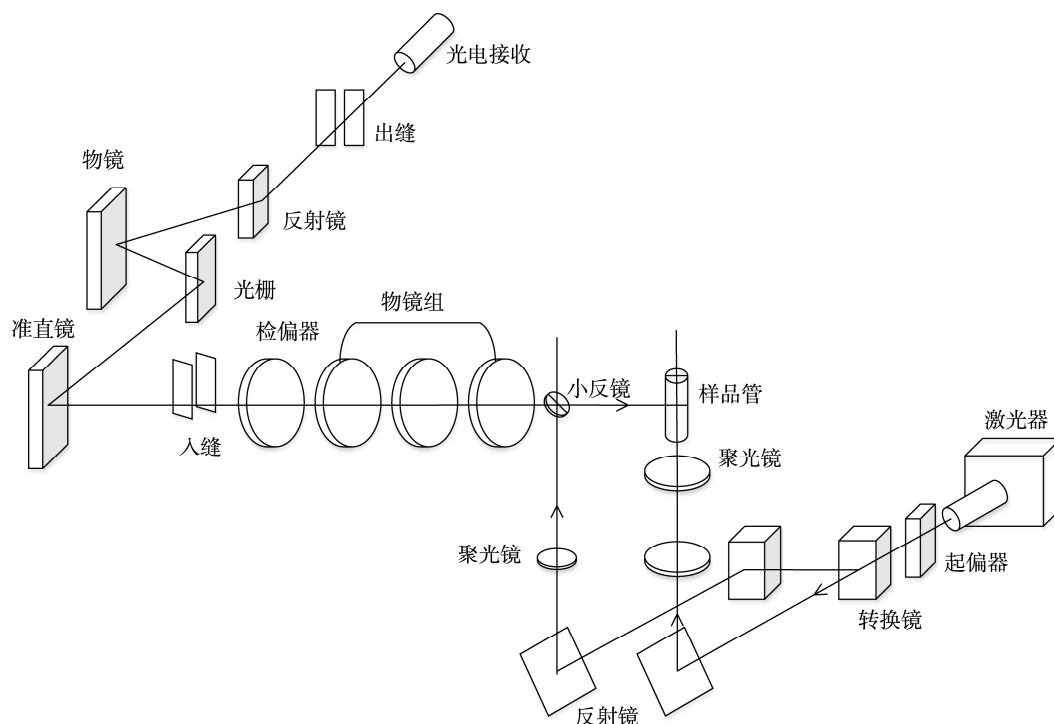


图2 拉曼光谱仪结构示意图

Fig. 2 Schematic of Raman spectroscopy

3.3 表面增强拉曼光谱技术(SERS)

基底或介质选用粗糙化的金、银等金属或纳米材料, 吸附于其表面的吡啶分子具有很强的拉曼散射效应, 另外活性载体表面选择吸附分子可以抑制荧光发射, 大大提高了信噪比, 被吸附样品的拉曼强度可提高 $10^4 \sim 10^6$ 倍^[21]。主要优点是灵敏度高、所需样品浓度很低、检测时间短等, 广泛应用于分子的理化研究, 病理、药物、食品分析等诸多领域^[22-24]。Di Anibal 等^[25]运用普通拉曼光谱技术、FT-Raman、SERS 技术检测了烹饪香料中的苏丹红, 结果显示 SERS 检测结果最优, 表明 SERS 结合适当的光谱预处理方法可以快速区分出苏丹红掺假香料。

3.4 激光共振拉曼光谱技术(RRS)

激光频率与被测物分子中某个电子吸收峰靠近或重合时, 这一分子的某个或几个特征拉曼强度可高出 4~6 个数量级, 检出限达到 10^{-8} mol/L, 能够观察到正常拉曼效应中难以出现的、强度可与基频相比拟的泛音及组合振动光谱^[26]。RRS 灵敏度高, 特别适合生物大分子的检测, 结合 SERS 灵敏度可达到单分子检测水平^[27]。张莹莹等^[28]综述了 RRS 在单壁碳纳米管几何结构表征、形变测量、缺陷测量和温度测量中的应用和进展。马婧等^[29]运用 RRS 对 25 种不同浓度苯的样品进行分析, 结果表明, 在 184.8~0.264 g/L 浓度范围内, 苯的振动拉曼光谱强度与

其浓度呈线性关系。

3.5 高温拉曼光谱技术

该方法主要用来研究固体的高温相变过程、熔体的键合结构等, 多用于冶金、玻璃、地质化学、晶体生长等领域^[30]。刘晓伟等^[31]对 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 二元系含和不含 LiF 和 CaF_2 添加剂的两种样品进行原位升温拉曼光谱实验。结果表明添加剂对 Al_2O_3 的溶解有促进作用; 溶解 Al_2O_3 中的氧已转化成为 $\text{Al}_2\text{OF}_6^{2-}$ 中的桥氧, 并得到理论计算模拟结果的解释和确认。

4 拉曼光谱技术在粮食检测中的应用

4.1 拉曼光谱技术在大米检测中的应用

大米的品质会随着产地土壤环境、气候、生长条件等变化改变, 市售大米种类多, 存在大量以次充好、假冒优质产地大米以及假冒优质品牌大米的现象, 很多时候消费者在购买时无法区别, 造成利益受损, 加上我国水稻种植范围广大及品种多样化, 给市场监管带来了很大阻碍。传统的检测方法主要是化学检测法(高效液相色谱法、质谱联用法、电感耦合等离子体质谱法), 化学检测方法准确度高、检出限低, 但是需要繁琐的前处理过程、检测时间长、检测成本高; 另外一种感官检测法, 该方法主观性强, 需要丰富的经验才能识别, 且识别准确率不高^[32-34]。拉曼光

谱检测法作为一种高效快速的检测方法已经被应用到大米分类及产地鉴别、结构分析等领域。

孙娟等^[35]运用拉曼光谱技术结合化学计量学,对3个产地采集的123份样品进行无损检测,通过主成分分析和偏最小二乘判别分析,对不同种类、产地、品种进行判别,训练集正确判别率均达到100%,校正集依次为100%、100%、94.12%,实现快速有效鉴别。黄嘉荣等^[36]综合拉曼光谱技术与化学计量学方法实现对大米种类的区分,分类准确率为97.9%。张克勤等^[37]采用激光拉曼技术检测了五谷中的营养成分(糖类、蛋白质),可以明确看到营养物质的特征峰,且碳水化合物含量高于蛋白质。Guo等^[38]比较了新鲜和老化大米中白蛋白的拉曼光谱,酰胺I特征峰从 1662 cm^{-1} 移至 1660 cm^{-1} ,说明大米老化后主要二级结构中的 α -螺旋增加,观察谱图中 $528/526\text{ cm}^{-1}$ 特征峰强减弱, 510 cm^{-1} 特征峰增强,可判断老化快,快速区分新鲜大米和老化大米。

4.2 拉曼光谱技术在小麦检测中的应用

我国小麦种植面积约为3.6亿亩,是主要的粮食作物,主要由碳水化合物、蛋白质、水分、维生素、矿物质、脂肪等成分组成,是饮食结构的重要组成部分,其中水分、灰分是否达标尤其受到关注^[39]。面粉中水分的多少决定了面制品柔软程度和保鲜时间,当其含量过高时,易产生结块甚至发霉;灰分是指经高温灼烧处理过的面粉残留的无机成分,灰分的多少直接影响面制品的口感和外观色泽;面制品的弹性和黏性受湿面筋含量影响^[40,41]。面粉的品质好坏直接决定了面制品的加工处理方法。目前市场上存在以过期或储藏时间较长的面粉加工制作后用于销售的现象,损害了消费者的利益,并存在一定的健康隐患,而消费者却无法判别。常用的检测方法根据国标方法进行,但方法费时费力。另外为了面制成品美观,面粉中常加入过量的面粉增白剂,其有效成分为过氧化苯甲酰,长时间食用会危害健康,卫生部2011年第4号文件规定自2011年5月1日起,禁止在面粉中添加过氧化苯甲酰^[42]。但是,有些企业为了追求利润,提高面粉的白度,依然在面粉中添加大量的过氧化苯甲酰。

窦颖等^[43]提出了基于拉曼光谱技术的面粉中水分、灰分和湿面筋的定量检测模型,相关系数依次为0.9457、0.9934和0.9817,相关性较高,表明拉曼光谱技术可以完成对面粉品质的无损快速检测;同时建立面粉距离匹配分析模型,可快速鉴定过期面粉,准确率高达100%。宋瑜等^[44]运用拉曼光谱技术结合最小二乘法,也成功建立了面粉中水分、灰分、面筋的定量检测模型。赵娟等^[45]研究了面粉中过氧化苯甲酰的快速无损检测,分别获取面粉及过氧化苯甲酰纯品的拉曼光谱,并配置不同质量比的过氧化苯甲酰-面粉混合样,谱线经降噪、基线校正等预处理后,选用 1001 cm^{-1} 出谱峰作为特征峰,结果很明显地观察到各样

品在此处的特征峰,表明该检测方法简单可行。Czaja等^[46]通过FT-Raman技术结合最小二乘法,建立了面粉中面筋的定量检测模型,训练集、校正集、验证集的相对预测标准误差范围为3.2%~3.6%,同时与红外光谱、近红外光谱结果进行比对,结果表明拉曼光谱可以简单、快速、准确测定面粉中的面筋含量。

4.3 拉曼光谱技术在玉米检测中的应用

玉米在世界范围内是产量最高的粮食作物,因其兼备粮食、饲料、工业原料等多种功用,而成为国家储备粮的重要构成,且成为可加工程度最高、产业链最长的粮食品种,但是玉米本身储藏性能不佳,在运输、贮藏的过程中容易发生不可逆裂变,破坏玉米新鲜度^[47]。随着粮食流通运输体制的深入改革,粮油价格的波动,玉米的新鲜度越来越受到重视。我国玉米仓储标准依据GB/T 20570-2006规则进行储存。常用的玉米新鲜度判别方法主要为感官评价,该方法主观性强,难以获得准确结果,还有一些化学检验方法(气质联用技术、湿法检验、愈创木酚法、盐酸对二氨基苯法等染色方法),这些方法检测结果准确,但是前处理过程繁冗,操作耗时,检测速度慢,难以满足实际检测需求^[48-50]。

李占龙等^[51]运用拉曼光谱分析了玉米种子中类胡萝卜素和蛋白质的分布情况,结果显示类胡萝卜素的含量从外层到里层逐渐减少,胚中的蛋白质含量较其他部位要高,表明拉曼光谱可以帮助快速全面了解混合物成分及其相对含量。黄亚伟等^[52]采用拉曼光谱结合判别分析法对新陈玉米进行判别研究,光谱经预处理后,分别采用主成分马氏距离判别分析和偏最小二乘判别分析建立相应的判别模型,模型的正确识别率均较高,表明拉曼光谱可用于玉米新陈度的快速鉴别,在粮食仓储品质评价中应用潜力巨大。Lee等^[53]通过拉曼光谱检测玉米种的黄曲霉毒素,在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下干燥玉米样品,以银作为表面增强拉曼基底,获取7个不同位置上的平均拉曼光谱。发现 939 cm^{-1} 波段处有黄曲霉毒素的样品与非污染样品差别较大,故将此峰作为其特征拉曼光谱,实现快速鉴别。黄晓仪等^[54]运用激光拉曼广谱技术对玉米淀粉与酪蛋白复合物的热力学性质和分子结构的变化进行了研究,结果显示淀粉和酪蛋白分子间由于相互作用不同其微观结构不同,当酪蛋白含量为40.0%时淀粉特征峰消失, CH_2 弯曲振动信号大幅增强,C-H伸缩振动峰偏移,酰胺I和酰胺III均观察到明显的 α 螺旋和 β 转角结构,二硫键形成的扭曲-扭曲-反式构象(g-g-t)发生较大变化,此时玉米淀粉与酪蛋白形成了复合凝胶体系,拉曼光谱技术可以简单快速的完成判别。

5 结论与前景展望

拉曼光谱技术因其快速、简单、高效、无损等优点得到了广泛的关注,其应用与发展涉及到诸多领域,在

粮食检测领域中的运用已经初步展开,但相关研究与果蔬、食用油等其他食品相比要少很多。粮食作为人们生活中必不可少的重要组成,其品质好坏直接影响到人们的健康,需要开发快速检测方法完成检测并应用到实际中去,目前常用的粮食品质检测方法虽然能够准确地获得相关结果,但是大都费时费力,无法满足实际需求,拉曼光谱技术则可实现快速无损检测,在粮食检测领域中应用前景广泛,便携式拉曼光谱仪的出现也为粮食的现场检测提供了更大的方便,将推进拉曼光谱技术在粮食检测中的应用。

参考文献

- [1] 田国辉, 陈亚杰, 冯清茂. 拉曼光谱的发展及应用[J]. 化学工程师, 2008, 148(1): 34–36.
Tian GH, Chen YJ, Feng QM. Development and application of Raman technology [J]. Chem Eng, 2008, 148(1): 34–36.
- [2] 韦娜, 冯叙桥, 张孝芳, 等. 拉曼光谱及其检测时样品前处理的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 694–698.
Wei N, Feng XQ, Zhang XF, *et al.* Research progress in Raman spectra and its test sample pretreatment [J]. Spectrosc Spect Anal, 2013, 33(3): 694–698.
- [3] Craig AP, Franca AS, Irudayaraj J. Surface-enhanced Raman spectroscopy applied to food safety [J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2013, 4: 369–380.
- [4] 周明辉, 廖春艳, 任兆玉, 等. 表面增强拉曼光谱生物成像技术及其应用[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 633–642.
Zhou MH, Liao CY, Ren ZY, *et al.* Bioimaging technologies based on surface enhanced Raman spectroscopy and their applications [J]. Chin Optic, 2013, 6(5): 633–642.
- [5] Ferrari AC, Basko DM. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of grapheme [J]. Nat Nanotechnol, 2013, 8(4): 235–246.
- [6] Braz A, López-López M, García-Ruiz C. Raman spectroscopy for forensic analysis of inks in questioned documents [J]. Forensic Sci Int, 2013, 232(1): 206–212.
- [7] Colthup N. Introduction to infrared and Raman spectroscopy [M]. New York: Elsevier, 2012.
- [8] Smith E, Dent G. Modern Raman spectroscopy: a practical approach [M]. West Sussex, John Wiley & Sons, 2013.
- [9] 何勇, 刘飞, 李晓丽, 等. 光谱及成像技术在农业中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
He Y, Liu F, Li XL, *et al.* Spectroscopy and imaging technology in agriculture [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] 刘宸, 黄文倩, 王庆艳, 等. 拉曼光谱在食品无损检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(8): 2981–2987.
Liu C, Huang WQ, Wang QY, *et al.* Application of Raman spectroscopy technique in food non-destructive determination[J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(8): 2981–2987.
- [11] Eckmann A, Felten A, Mishchenko A, *et al.* Probing the nature of defects in graphene by Raman spectroscopy [J]. Nano Lett, 2012, 12(8): 3925–3930.
- [12] Boyac IH, Temiz HT, Uysal RS, *et al.* A novel method for discrimination of beef and horsemeat using Raman spectroscopy [J]. Food Chem, 2014, 148: 37–41.
- [13] Li DW, Zhai WL, Li YT, *et al.* Recent progress in surface enhanced Raman spectroscopy for the detection of environmental pollutants [J]. Microchim Acta, 2014, 181(1–2): 23–43.
- [14] 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.
Chen Q, Li PJ, Kong BH. Application of Raman spectroscopy technique in meat science: a review [J]. Food Sci, 2012, 33(15): 307–313.
- [15] Tay HL, Kajitani S, Zhang S, *et al.* Inhibiting and other effects of hydrogen during gasification: Further insights from FT-Raman spectroscopy [J]. Fuel, 2014, 116: 1–6.
- [16] Mohan PRK, Sreelakshmi G, Muraleedharan CV, *et al.* Water soluble complexes of curcumin with cyclodextrins: Characterization by FT-Raman spectroscopy [J]. Vib Spectrosc, 2012, 62: 77–84.
- [17] 游婷婷, 马建锋, 郭思勤, 等. 傅里叶变换拉曼光谱对芦竹碱木质素的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8): 2112–2116.
You TT, Ma JF, Guo SQ, *et al.* Study of alkaline lignin from arundo donax linn based on FT Raman spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2014, 34(8): 2112–2116.
- [18] Franzen L, Selzer D, Fluhr JW, *et al.* Towards drug quantification in human skin with confocal Raman microscopy [J]. Eur J Pharm Biopharm, 2013, 84(2): 437–444.
- [19] Viridis B, Harnisch F, Batstone DJ, *et al.* Non-invasive characterization of electrochemically active microbial biofilms using confocal Raman microscopy [J]. Energ Environ Sci, 2012, 5(5): 7017–7024.
- [20] 许可, 梁鲁宁, 连园园. 线聚焦显微激光拉曼光谱技术区分激光打印墨粉[J]. 中国司法鉴定, 2011, 2: 27–30+79.
Xu K, Liang LN, Lian YY. Classification toners of laser printers with micro Raman spectroscopy [J]. Chin Jud Forens, 2011, 2: 27–30+79.
- [21] Cialla D, März A, Böhme R, *et al.* Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS): progress and trends [J]. Anal Bioanal Chem, 2011, 403(1): 27–54.
- [22] Panikkanvalappil SR, Mackey MA, El-Sayed MA. Probing the unique dehydration-induced structural modifications in cancer cell DNA using surface enhanced Raman spectroscopy [J]. J Am Chem Soc, 2013, 135(12): 4815–4821.
- [23] Xie W, Schlücker S. Medical applications of surface-enhanced Raman scattering [J]. Phy Chem, 2013, 15(15): 5329–5344.
- [24] Liu B, Zhou P, Liu X, *et al.* Detection of pesticides in fruits by surface-enhanced Raman spectroscopy coupled with gold nanostructures [J]. Food Bioprocess Technol, 2013, 6(3): 710–718.
- [25] Di Anibal CV, Marsal LF, Callao M P, *et al.* Surface Enhanced Raman Spectroscopy (SERS) and multivariate analysis as a screening tool for detecting Sudan I dye in culinary spices [J]. Spectrochim Acta A: Mol Biomol Spectrosc, 2012, 87: 135–141.
- [26] Del Corro E, Terrones H, Elias A, *et al.* Excited excitonic states in 1L, 2L, 3L, and bulk WSe₂ observed by resonant Raman spectroscopy [J]. ACS Nano, 2014, 8(9): 9629–9635.

- [27] Hirschmann TC, Araujo PT, Muramatsu H, *et al.* Characterization of bundled and individual triple-walled carbon nanotubes by resonant Raman spectroscopy [J]. ACS Nano, 2013, 7(3): 2381–2387.
- [28] 张莹莹, 张锦. 共振增强拉曼光谱技术在单壁碳纳米管表征中的应用[J]. 化学学报, 2012, 22: 2293–2305.
Zhang YY, Zhang J. Application of resonance raman spectroscopy in the characterization of single-walled carbon nanotubes [J]. Acta Chim Sin, 2012, 22: 2293–2305.
- [29] 马靖, 黄蓉. 激光拉曼光谱对苯的低浓度探测研究[J]. 光学技术, 2014, 40(3): 195–198.
Ma J, Huang R. Low-concentration detection of benzene using laser Raman spectroscopy [J]. Optic Technol, 2014, 40(3): 195–198.
- [30] Liu S, Zhang G, Wan S, *et al.* High-temperature Raman spectroscopy of microstructure around the growing β -BaB₂O₄ crystal in the BaO-B₂O₃-Na₂O system [J]. J Appl Crystallogr, 2014, 47(2): 739–744.
- [31] 刘晓伟, 尤静林, 王媛媛, 等. Na₃AlF₆-Al₂O₃ 系熔盐结构的计算模拟与高温拉曼光谱[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(1): 286–292.
Liu XW, You JL, Wang YY, *et al.* Calculation simulation and high temperature Raman spectroscopic on structure of Na₃AlF₆-Al₂O₃ molten salt system [J]. Chin J Nonfer Met, 2014, 24(1): 286–292.
- [32] Tang YY, Lin HY, Chen YC, *et al.* Development of a quantitative multi-mycotoxin method in rice, maize, wheat and peanut using UPLC-MS/MS [J]. Food Anal Meth, 2013, 6(3): 727–736.
- [33] Wakuta S, Hamada S, Ito H, *et al.* Identification of a β -glucosidase hydrolyzing tuberonic acid glucoside in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Phytochemistry, 2010, 71(11): 1280–1288.
- [34] Narukawa T, Inagaki K, Kuroiwa T, *et al.* The extraction and speciation of arsenic in rice flour by HPLC-ICP-MS [J]. Talanta, 2008, 77(1): 427–432.
- [35] 孙娟, 张晖, 王立, 等. 基于拉曼光谱的大米快速分类判别方法[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 41–45.
Sun J, Zhang H, Wang L, *et al.* Method for rapid discrimination of varieties rice by using Raman spectroscopy [J]. Food Mach, 2016, 32(1): 41–45.
- [36] 黄嘉荣, 伍博迪, 詹求强. 基于拉曼光谱和化学计量学方法判别大米分类的研究[J]. 激光生物学报, 2015, 24(3): 237–241.
Huang JR, Wu BD, Zhan QQ. Identification and classification of rice by Raman spectra and chemometrics methods [J]. Acta Laser Biol Sin, 2015, 24(3): 237–241.
- [37] 张克勤, 杨雪梅. X 射线荧光光谱及拉曼光谱法研究五谷营养成分[J]. 光谱实验室, 2011, 28(3): 1198–1201.
Zhang KQ, Yang XM. Analysis of corn nutritious components by X-ray fluorescence spectrum and laser Raman spectrometry [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2011, 28(3): 1198–1201.
- [38] Guo Y, Cai W, Tu K, *et al.* Infrared and Raman spectroscopic characterization of structural changes in albumin, globulin, glutelin, and prolamin during rice aging [J]. J Agric Food Chem, 2012, 61(1): 185–192.
- [39] Kumar SB, Prabhaskar P. Low glycemic index ingredients and modified starches in wheat based food processing: A review [J]. Trend Food Sci Technol, 2014, 35(1): 32–41.
- [40] Rauch RE, Cun G, Nader GA, *et al.* Effects of rice straw versus wheat straw as ingredients in a total mixed ration on intake, digestibility and growth of Holstein heifers [J]. Anim Prod Sci, 2014, 54(8): 1047–1055.
- [41] Khan I, Yousif A, Johnson S K, *et al.* Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta [J]. Food Res Int, 2013, 54(1): 578–586.
- [42] 李东森, 曹维让, 杨磊. 我国面粉行业技术进步与发展的思考[J]. 粮食加工, 2015, 40(1): 1–11.
Li DS, Cao WR, Yang L. Consideration of the flour industry, technological progress and development of China [J]. Food Proc, 2015, 40(1): 1–11.
- [43] 窦颖, 孙晓荣, 刘翠玲, 等. 基于拉曼光谱技术的面粉品质快速检测[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 185–189.
Dou Y, Sun XR, Liu CL, *et al.* Fast determination of flour quality based on Raman spectroscopy [J]. Food Sci, 2014, 35(22): 185–189.
- [44] 宋瑜, 孙晓荣, 刘翠玲, 等. 拉曼光谱和近红外光谱在小麦粉品质定量分析中的应用[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(2): 24–27.
Song Y, Sun XR, Liu CL, *et al.* Quantitative analysis of wheat flour quality using Raman spectroscopy and near infrared spectroscopy [J]. J Food Sci Technol, 2014, 32(2): 24–27.
- [45] 赵娟, 彭彦昆. 基于拉曼光谱的面粉中过氧化苯甲酰的非接触检测[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(5): 33–39.
Zhao J, Peng YK. Non-touching detection on benzoyl peroxide added in wheat flour using Raman scattering spectroscopy [J]. J Agric Sci Tech, 2015, 17(5): 33–39.
- [46] Czaja T, Mazurek S, Szostak R. Quantification of gluten in wheat flour by FT-Raman spectroscopy [J]. Food Chem, 2016, 211: 560–563.
- [47] 代养勇, 董海洲, 王志刚, 等. 我国玉米深加工产业现状及发展趋势[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(4): 37–39.
Dai YY, Dong HZ, Wang ZG, *et al.* Current situation and developing trend of corn deep processing industry in China [J]. Food Nutr Chin, 2011, 17(4): 37–39.
- [48] 周显青, 张玉荣, 张雪梅, 等. 玉米新鲜度快速检测方法初探[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2006, 27(4): 51–54.
Zhou XQ, Zhang YR, Zhang XM, *et al.* Initial study on rapid determination methods of maize freshness [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2006, 27(4): 51–54.
- [49] 周显青, 张玉荣, 张勇. 储藏玉米陈化机理及挥发物与品质变化的关系[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 242–246
Zhou XQ, Zhang YR, Zhang Y. Aging mechanism of stored maize and the relationship between its volatile components and quality [J]. Trans CSAE, 2008, 24(7): 242–246
- [50] 黄淑霞, 蔡静平, 田海娟. 主要粮食品种储藏期间霉菌活动特性研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(1): 99–127
Huang SX, Cai JP, Tian HJ. Mould development characters of different stored grains [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2010, 25(1): 99–127.
- [51] 李占龙, 周密, 左剑, 等. 红外光谱和拉曼光谱法分析玉米种子的成分[J]. 分析化学, 2007, 35(11): 1636–1638.
Li ZL, Zhou M, Zuo J, *et al.* Infrared and Raman spectral analysis for the corn seed [J]. Chin J Anal Chem, 2007, 35(11): 1636–1638.
- [52] 黄亚伟, 张令, 王若兰. 新陈玉米的拉曼光谱快速判别研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(12): 149–152.
Huang YW, Zhang L, Wang RL. Rapid discrimination of fresh and stale

corn using Raman spectroscopy [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(12): 149–152.

[53] Lee KM, Herrman TJ, Bisrat Y, *et al.* Feasibility of surface-enhanced Raman spectroscopy for rapid detection of aflatoxins in maize [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62: 4466–4473.

[54] 黄晓仪, 李晓玺, 林静韵, 等. 玉米淀粉/酪蛋白复合物凝胶的质构特性和结构研究[J]. *现代食品科技*, 2011, 27(12): 1428–1431+1456.
Huang XY, Li XX, Lin JY, *et al.* Textural properties and structure analysis of corn starch/casein compound gels [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2011, 27(12): 1428–1431+1456.

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



李 芳, 硕士, 主要研究方向为农产品安全。

E-mail: lifang19890927@163.com



陆安祥, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品安全。

E-mail: luax@nercita.org.cn

“食品营养与安全”专题征稿函

随着经济发展和人民消费水平的提高, 消费者对于食品不再单一注重食品的种类、外观和口味等, 食品本身的营养和安全性受到越来越多的关注和重视。食品能够为人体提供多种营养, 通过摄取和利用食品中的营养成分, 人体能够获得生命活动所需的能量, 保证人体健康。食品中的营养物质种类和食品本身的安全性与人体的健康密切相关。

鉴于此, 本刊特别策划了“食品营养与安全”专题, 由合肥工业大学生物与食品工程学院刘健研究员担任专题主编, 主要围绕食品中所含营养成分(包括蛋白质、脂类和碳水化合物等)对机体的影响及作用机制、食品营养成分监测和安全性评价、食品营养成分在食品加工、贮藏和摄入过程中的转化规律和相互作用及相关的安全隐患等方面或您认为有意义的相关领域展开论述和研究, 本专题计划在 2017 年 3 月出版。

鉴于您在该领域的成就, 本刊编辑部及本专题主编刘健研究员特别邀请您为本专题撰写稿件, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。综述及研究论文均可, 请在 2017 年 1 月 31 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并优先发表。

同时, 希望您能够推荐该领域的相关专家并提供电话和 E-mail。

感谢您的参与和支持!

投稿方式:

网站: www.chinafoodj.com

E-mail: jfoodsq@126.com

《食品安全质量检测学报》编辑部