

基于太赫兹衰减全反射技术的花生品种快速鉴别

刘翠玲^{1,2} 邢瑞芯^{1,2} 吴静珠^{1,2} 孙晓荣^{1,2} 胡莹^{1,2}

(1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048;

2. 北京工商大学食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 利用太赫兹衰减全反射技术,结合距离匹配算法,对不同品种花生进行快速分类鉴别。实验随机采集花育36号、鲁花1号和鲁花9号共3个花生品种、总计60个花生样本在0.3~3.6 THz的太赫兹衰减全反射光谱,随后对其吸收系数进行一阶导数及归一化预处理,并建立花生品种的距离匹配快速鉴别模型。距离匹配模型结果显示:3个类别的总体识别准确率可达93.3%,仅有1个样本预测错误。研究结果表明,利用太赫兹衰减全反射技术实现花生品种快速鉴别具有一定的可行性,具有操作简单且快速高效等特点。

关键词: 花生; 品种鉴别; 距离匹配; 太赫兹衰减全反射技术

中图分类号: O657.3; O434.19 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0361-06

Rapid Discrimination of Peanut Varieties Using Terahertz Attenuated Total Reflection Spectroscopy

LIU Cuiling^{1,2} XING Ruixin^{1,2} WU Jingzhu^{1,2} SUN Xiaorong^{1,2} HU Ying^{1,2}

(1. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

2. Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Peanuts are rich in protein and lipids, which are widely cultivated in the north and south regions of China. As one of the main oil crops in China, the identification of peanut varieties is very important for breeding new varieties, improving oil production and processing quality. The commonly used detection methods such as experience identification, physical and chemical detection are all time-consuming and difficult to operate, could not meet the current rapid detection requirements well. So it is necessary to explore a rapid and efficient testing method for peanut varieties' identification. Terahertz attenuated total reflection (THz-ATR) spectroscopy combined with distance matching algorithm (DM) were used to achieve the rapid identification of different varieties of peanut. A total of 60 peanut samples' ATR spectrum in 0.3~3.6 THz which included three varieties of peanuts: Huayu 36, Luhua 1 and Luhua 9 were collected randomly. Then the first derivative of ATR absorption coefficients were normalized to establish DM model and identify different peanut varieties rapidly. The final DM model result showed that the overall recognition accuracy of the three categories can reach 93.3%, with only one sample was misclassified. The research results showed that using THz-ATR to rapid detection and identification of peanut varieties had certain feasibility, and the method can be applied to other crop variety rapid identification and quality analysis because of its simple operation and efficient characteristics.

Key words: peanut; variety discrimination; distance match; terahertz attenuated total reflection technique

0 引言

花生是我国主要油料作物之一,种植面积仅次于油菜^[1]。花生主要组成物质有脂肪、蛋白质和碳

水化合物,其中脂肪质量分数占46%~52%,饱和和脂肪酸更是高达85%以上。我国所产的花生中有55%用于制油,花生油年产量仅次于菜籽油^[2-4]。然而,花生品种不同,则其脂肪含量(含油

率)、蛋白质含量也差异显著。其中,含油率作为油料作物品质的重要参考指标之一,决定着花生的食用价值或榨取价值。在花生制油过程中,花生种子作为花生油的提取原料,其含油率不同,适合的榨油方式也不同,进而得到的花生油在气味、口感方面也良莠不齐。我国花生品种繁多、含油率参差不齐,通常情况下制油厂多采取压榨法来制油,但压榨法只适用于高含油率品种,对于含油量较低的品种应采用溶剂浸出法提油^[5-6]。由于花生品种加工特性研究的缺乏,我国尚未形成统一的、适宜加工制油的专用花生品种准则,多个品种混合应用的现状,也导致我国的花生制油产业的发展受到阻碍^[7-8]。花生品种的鉴别与选取,对于制油产量的提升至关重要。

目前针对花生品种的鉴别技术主要有:形态学鉴定、生化鉴定、DNA 分子标记鉴定、图像处理技术等^[9-10]。其中,形态学鉴定技术主要是花生在田间生长期间,根据荚果形状经验性地判定品种及纯度;生化鉴定包括同工酶和种子储藏蛋白电泳技术,主要通过鉴定蛋白质的种类、含量、结构的不同来鉴定花生品种;DNA 分子标记鉴定技术直接以花生种子的 DNA 作为检测对象来鉴别花生品种;图像处理技术通过扫描仪等成像器件采集花生荚果图像,结合模式识别方法来识别花生品种。这些技术虽然操作方法不同,但都存在操作过程复杂、专业性强、不易实现等特点。太赫兹 (THz) 作为一种新兴的光谱技术,是指波长为 0.03 ~ 30 mm (频率 0.1 ~ 10 THz) 范围内的电磁波。太赫兹波段包含大多数生物大分子的振-转能级跃迁,具有穿透性能好、光子能量低损耗小、承载信息更多等优于其他光谱技术的特点,已被证明在农产品及食品,特别是植物选种、品质检测及食品加工等方面能够起重要的作用^[11-12]。

太赫兹在农业领域的研究和应用刚起步,因此在农产品品质检测方面的应用仍然受到一些限制,限制之一就是难以检测高含水率样品,特别是对新鲜果蔬等含水率较高的农产品的品质检测研究非常少见^[13-14]。但对于含水率很低油料作物,太赫兹光谱检测技术存在巨大潜能^[15-16]。本文利用太赫兹衰减全反射技术 (Terahertz attenuated total reflection, THz-ATR) 研究不同花生品种的太赫兹光谱,并结合多种预处理方法及建模算法来研究花生品种的快速鉴别方法。

1 实验

1.1 样品制备

实验所用花生种子样本均购自某种子公

司,包括 3 个花生品种:鲁花 9 号、鲁花 1 号和花育 36 号。每一个品种随机选取 20 粒,并制作成厚度约 1 mm、切片尺寸约 1 cm × 1 cm 的花生仁切片,样本数量共计 60 个。为防止花生仁发生氧化等反应,该操作要尽可能快速准确。为保证仪器系统稳定性,实验的环境温度控制在 22℃。

1.2 实验装置

实验仪器为剑桥 Tera View 公司生产的太赫兹脉冲光谱仪,型号为 TeraPulse 4000,如图 1a 所示。光谱范围 2 ~ 133 cm⁻¹ (0.06 ~ 4 THz)、信噪比最高达到 70 dB。

实验利用太赫兹脉冲光谱仪和入射角为 35° 的单晶硅 ATR 模块。ATR 的工作范围在 10 ~ 120 cm⁻¹ (0.3 ~ 3.6 THz) 的电磁频谱区域内,能够测量固体和液体样本,具有采样面积小、样品量小 (固体一般为 1 mg)、样品制备及采集方式简单等特点^[17]。ATR 采样技术示意图见图 1b。

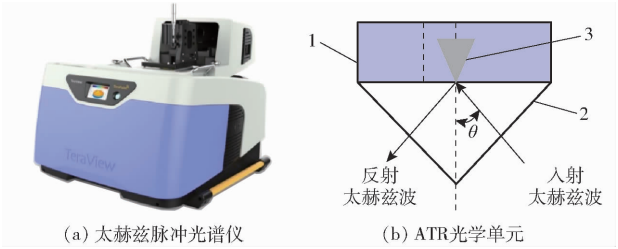


图 1 实验仪器
Fig. 1 Experiment instrument
1. 样品 2. ATR 晶体 3. 衰减波

1.3 光谱采集

实验采集 60 个花生样本切片的 ATR 光谱。采集方法为:首先,确保 ATR 晶体未放置任何样品并干净无污染,进行 ATR 采集,得到参考信号;其次,将制作好的花生仁切片置于 ATR 采集部位,为确保样品和 ATR 晶体之间有良好的光学接触,需拧紧压力螺钉。一旦螺杆达到 20 kg 的负荷,没有更多的压力施加到窗口,螺杆将自由旋转,最大限度地提高吸光度^[17]。逐一采集所有花生仁切片的 ATR 光谱。其中,为提高精确度,ATR 采集参数设置为:分辨率 0.94 cm⁻¹,每次快速扫描的平均次数为 450。

3 个品种的花生仁切片样本的时域信号如图 2 所示。从图中可以看出,由于空气中的水分干扰,样本信号的波形均存在较小抖动。此外,3 个品种样本的脉冲波形相似,差异细微,说明了系统的稳定性。进一步将主脉冲放大进行对比,发现不同品种的花生仁切片对 THz 波的吸收强度不同,表现在主脉冲的相位和幅度上均存在一定程度的延迟和衰减,吸收强度从高到低依次为:鲁花 1 号、鲁花 9 号、花育 36 号。含油率较高的 2 个品种的信号更强一

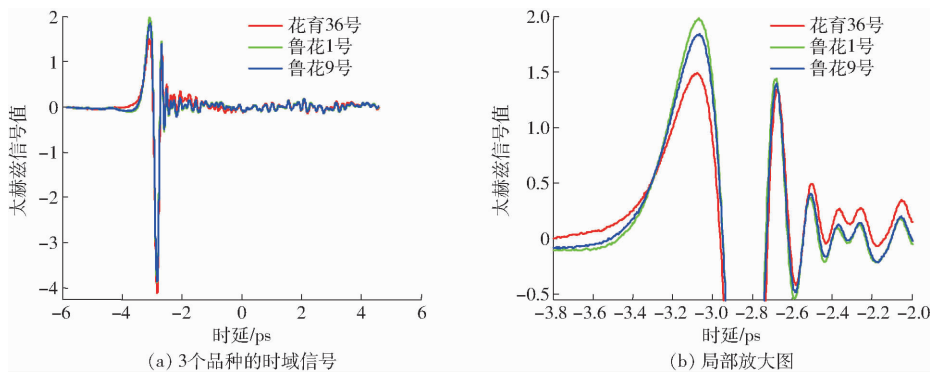


图 2 时域信号
Fig. 2 Time domain signal

些,这可能是由于高含油率的花生品种对太赫兹波的吸收小于低含油率品种^[18]。

2 结果与讨论

由于实验仪器存在噪声和空气中水分对太赫兹波的吸收,所采集的样本信号存在一定幅度范围的波动,难以达到仪器理想的信噪比,不易直接通过太赫兹特征光谱来有效鉴别某一花生样本的真实品种。因此,采集得到的时域信号需要进一步处理,提取出更有效的光学常数进行分析,或借助模式识别方法建立鉴别模型。

2.1 太赫兹光谱数据预处理

2.1.1 光学常数提取

光学常数是表征物质宏观光学性质的重要物理量。在从采集到的 THz 电场的时域波形中提取这些光学常数前,需要利用快速傅里叶变换 (FFT) 将参考信号和样本的时域光谱进行转换,得到对应的频域光谱,进而利用频域信号的幅值和相位 (实部和虚部) 信息计算得到所需的光学常数^[19]。此外,在获得信号频域谱的过程中,为避免信号数据开头和结尾不连续造成信号频谱显示的失真,必须对信号执行一个切趾 (加窗) 的过程,减少时域信号截断所带来的误差^[20]。切趾函数的种类多样,比如 Boxcar 用于高分辨率,Blackman Harris 用于高信噪比,本研究选择最常用的 Happ Genzel,因为它兼顾了信噪比和分辨率。

THz 光谱分析中常用的光学常数是吸光系数和折射率。其中,吸收系数定义为该样本单位厚度的吸光度。折射率是光在真空中的传播速度与光在该介质中的传播速度之比,可以通过不同样本在时域信号上的延迟反映出来。图 3 和图 4 分别是样本的吸收系数图和折射率图。

尽管太赫兹衰减全反射技术具有诸多其他光谱技术无法比拟的优势,但对于太赫兹光谱信号缺乏深入研究。目前对于仪器、样本特征和测量环境变

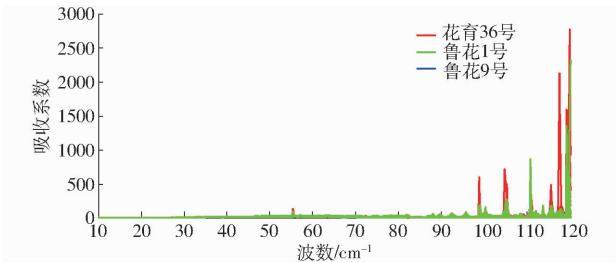


图 3 吸收系数
Fig. 3 Absorption coefficient

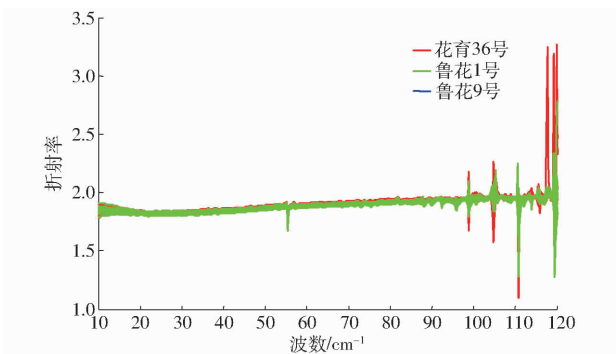


图 4 折射率
Fig. 4 Refractive indices

化带来的信号干扰,并没有通用的解决方法,缺乏对于处理效果进行评定的指标,通常只能对采集的光谱进行简单处理来解决一些主要的问题,包括:提高信噪比、过滤噪声影响、有效光谱范围筛选等。本研究所用实验仪器信噪比在一定范围内高达 70 dB,在对样本信号进行 FFT 变换前也选取了特定的切趾函数去除噪声影响,但实验过程中仍然受到各种随机噪声的干扰。本次实验采集到的花生样本信号,是在较低和较高频域 (即在 10 cm^{-1} 以下和 120 cm^{-1} 以上),受噪声干扰严重,信噪比下降剧烈,光谱振荡明显。因此,需要人为地对样本信号进行有效光谱范围筛选。

2.1.2 光谱范围筛选

本研究使用的 THz 脉冲光谱仪 ATR 模块工作范围在 $10 \sim 120\text{ cm}^{-1}$ 频域内,但是通过观察实验数据发现,所有样本的吸收系数和折射率均在

116 cm⁻¹左右就开始受到随机噪声干扰,因此,本研究通过对有效光谱范围筛选,即手动选择10~116 cm⁻¹作为吸收系数和折射率数据的有效频域进行后续研究分析,简单有效地剔除了噪声信息干扰。

在10~116 cm⁻¹频域内,随着频率的增加,所有样本的吸收系数整体呈水平趋势,折射率则呈现微弱上升趋势,但重叠度较高,难以分辨。局部区域放大发现,3个品种的样本之间的存在明显差异。图5为所有样本在25~40 cm⁻¹的吸收系数图,由上往下依次为花育36号、鲁花9号和鲁花1号,吸收系数越来越低,虽然与含油率没有明显的线性关系,但较高含油率的2个品种的吸收系数小于低含油率的花育36号。相比蛋白质,脂肪在太赫兹波段的吸收很弱,因此可以推测,含油率较高的花生品种对太赫兹波的吸收有可能小于含油率较低的品种。这一点也与时域信号大致相符。

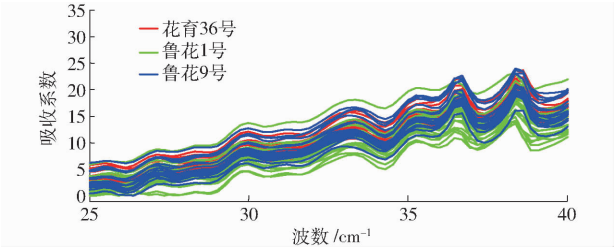


图5 吸收系数局部图

Fig. 5 Local graph of absorption coefficient

图6a、6b分别为3种样本在10~20 cm⁻¹、20~116 cm⁻¹的折射率图,其中,20 cm⁻¹是一个转折点。在20 cm⁻¹以下,由上往下分别为鲁花1号、鲁花9号和花育36号,折射率依次降低,且与吸收系数变化方向相反;在20 cm⁻¹以上,由上往下依次为花育36号、鲁花9号和鲁花1号,这与吸收系数变化方向一致。虽然相比吸收系数,含油率均较高的鲁花9号和鲁花1号界限不是十分清晰,但与低含油率的花育36号差异明显。因此,3种样本在其吸收系数和折射率上存在的差异,可为花生品种鉴别模型的建立提供可能。

2.2 花生品种的定性分析

如图5、6所示,难以直观地从图中曲线来区分样本所属的品种,因此有必要借助定性方法来建立定性模型,实现对花生品种进行快速鉴别的目的。本研究选取所有样本的吸收系数数据,结合距离匹配(Distance match, DM)定性算法,建立基于吸收系数花生品种快速鉴别模型。距离匹配是一种常用的定性算法,通过计算每个样本到各自类别中心点的距离,来判别一个未知样本到两个或更多已知样本类别的匹配程度。本研究中

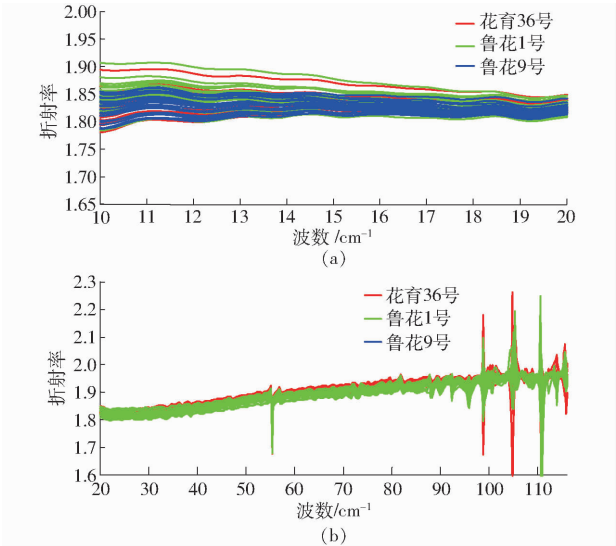


图6 折射率局部图

Fig. 6 Local graphs of index of refractive indices

得到的不同的3种花生切片样本的吸收系数和折射率曲线差异较小难以分辨,主要的不同仅体现在曲线的上下分布。在这种情况下,距离匹配算法可以很好地建立不同含油率的分类模型,能用于测试单个样本的种类和等级。

利用距离匹配算法具体的建模过程为^[21]:假设3种花生样本各自的平均光谱为 $\bar{x}_c$,标准偏差光谱为 x_{csd} ,当输入一个未知样本时,首先用该样本光谱 x_i 分别减去各个类别的平均光谱,得到相应的3条残差光谱,再用残差光谱除以对应类别的标准偏差光谱,得到3条新光谱 x_{inew} 。计算式为

$$x_{inew} = \frac{x_i - \bar{x}_c}{x_{csd}} \tag{1}$$

最后计算距离匹配值,即计算新光谱中超出距离匹配限(设为4.9)的波长点所占总波长点的百分比,便可得到该未知样本与每个类别之间的匹配值。匹配值在0~100%之间,匹配值越接近于0,表示该样本距某个类别越近,因此会被归属到这个类别。

本研究为放大和分辨重叠信息,并减小随机噪声和提高信噪比,对2.1.2节中的光谱使用一阶导数和归一化处理,建立基于吸收系数的距离匹配模型。随机挑选15个样本对模型进行测试,剩余45个作为建模集样本。模型结果如图7所示,横、纵坐标分别代表样本与不同类别的马氏距离。图中箭头所指为1个错误预测样本,剩余14个测试样本都准确地被划分到自身所属类别当中。因此,模型预测准确率为93.3%。

为更清楚地说明预测结果,样本距离各个类别的匹配值和具体预测结果如表1所示。其中,类别1为花育36号样本,类别2为鲁花1号样本,类别3为鲁花9号样本。

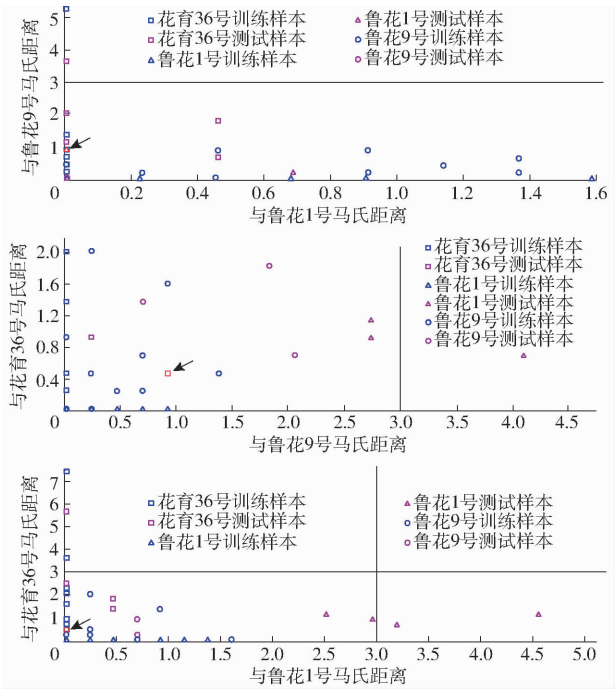


图 7 距离匹配定性识别结果

Fig. 7 Qualitative identification results of DM

3 结束语

花生品种鉴别对于新品种的选育、榨油方式选取和提高制油产量以及食用加工品质等都起着至关重要的作用。利用太赫兹衰减全反射技术研究了花育 36 号、鲁花 1 号和鲁花 9 号 3 个花生品种在 0.3 ~ 3.6 THz 波段的时域谱、吸收系数谱和折射率

表 1 距离匹配定性识别结果

Tab. 1 Qualitative identification result of distance match

序号	与花育 36 号 马氏距离	与鲁花 1 号 马氏距离	与鲁花 9 号 马氏距离	实际 类别	预测 类别
1	0.680 3	2.947 8	2.947 8	1	1
2	1.133 8	4.535 1	4.761 9	1	1
3	0.907 0	3.174 6	3.401 4	1	1
4	0.907 0	2.494 3	2.721 1	1	1
5	0.226 8	0.453 5	0.907 0	1	1
6	0.453 5	0	1.814 1	2	2
7	1.814 1	0.453 5	2.267 6	2	2
8	2.494 3	0	1.360 5	2	2
9	6.576 0	0	3.401 4	2	2
10	1.814 1	0.453 5	0.680 3	2	2
11	1.814 1	0.680 3	0.226 8	3	3
12	0.226 8	0.680 3	0	3	3
13	0.453 5	0.226 8	0	3	3
14	0.907 0	0.680 3	0.226 8	3	3
15	0.907 0	0	0.907 0	3	2

谱。通过比较,发现 3 种花生在此频率范围内的吸收系数谱和折射率谱都存在显著差异。因此通过一阶导数及归一化处理,结合距离匹配算法,建立了相应的吸收系数分类模型。结果表明,距离匹配算法对未知样本的总体识别准确率高达 93.3%,可以实现对不同花生品种进行快速分类鉴别,这说明利用太赫兹衰减全反射光谱技术结合一定的分类算法快速鉴别花生品种具有可行性。

参 考 文 献

1 王丽,刘红芝,刘丽,等.油用花生品质评价模型的建立及其加工适宜性研究[J].食品科学技术学报,2016,34(1):21-27.
WANG Li,LIU Hongzhi,LIU Li,et al. Research on evaluation model and processing suitability of oil-used peanut[J]. Journal of Food Science and Technology,2016,34(1):21-27. (in Chinese)

2 马寅斐,何东平,王文亮,等.我国花生品种加工特性与品质评价技术研究进展[J].中国食物与营养,2011,17(6):29-31.
MA Yinfei,HE Dongping,WANG Wenliang,et al. Research advancement of processing character and quality assessment technology of Chinese peanut cultivars[J]. Food and Nutrition in China,2011,17(6):29-31. (in Chinese)

3 王丽,王强,刘红芝,等.花生加工特性与品质评价研究进展[J].中国粮油学报,2011,26(10):122-128.
WANG Li,WANG Qiang,LIU Hongzhi,et al. Research process on peanut processing characteristics and quality evaluation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2011,26(10):122-128. (in Chinese)

4 沈一,鄂志国,刘永惠,等.中国花生品种及其系谱数据库的构建[J].中国油料作物学报,2015,37(4):571-575.
SHEN Yi,E Zhiguo,LIU Yonghui,et al. Database construction of Chinese peanut varieties and their genealogy[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2015,37(4):571-575. (in Chinese)

5 刘玉兰,刘瑞花,钟雪玲,等.不同制油工艺所得花生油品质指标差异的研究[J].中国油脂,2012,37(9):6-10.
LIU Yulan,LIU Ruihua,ZHONG Xueling,et al. Differences of quality indexes of peanut oil obtained with different processes[J]. China Oils and Fats,2012,37(9):6-10. (in Chinese)

6 魏振承,唐小俊,张名位,等.花生油加工和相关技术研究进展及展望[J].中国粮油学报,2011,26(6):118-122.
WEI Zhencheng,TANG Xiaojun,ZHANG Mingwei,et al. Advances in peanut oil processing and related technology research[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2011,26(6):118-122. (in Chinese)

7 周瑞宝.中国花生生产、加工产业现状及发展建议[J].中国油脂,2005,30(2):5-9.
ZHOU Ruibao. Present situation and development suggestion on China peanut processing industry[J]. China Oils and Fats,2005,30(2):5-9. (in Chinese)

8 杨伟强,王秀贞,张建成,等.我国花生加工产业的现状、问题与对策[J].山东农业科学,2006(3):105-107.

- YANG Weiqiang, WANG Xiuzhen, ZHANG Jiancheng, et al. Present situation, problems and countermeasures of peanut processing industry in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2006(3):105–107. (in Chinese)
- 9 张建成, 江玉萍, 王传堂, 等. 花生品种鉴定技术研究进展[J]. 花生学报, 2006, 35(2):24–28.
ZHANG Jiancheng, JIANG Yuping, WANG Chuantang, et al. Review of variety identification in peanut (*Arachis hypogae* L.) [J]. Journal of Peanut Science, 2006, 35(2):24–28. (in Chinese)
- 10 韩仲志, 邓立苗, 于仁师. 基于图像处理的花生荚果品种识别方法研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(2):100–104.
HAN Zhongzhi, DENG Limiao, YU Renshi. Study on variety identification of peanut pods based on image processing[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(2):100–104. (in Chinese)
- 11 QIN Jianyuan, YING Yibin, XIE Lijuan. The detection of agricultural products and food using terahertz spectroscopy: a review [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2013, 48(6):439–457.
- 12 GOWEN A A, O'SULLIVAN C, O'DONNELL C P. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: emerging techniques for food process monitoring and quality control[J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 25(1):40–46.
- 13 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2):1–6.
ZHAO Guozhong. Progress on terahertz science and technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2):1–6. (in Chinese)
- 14 谢丽娟, 徐文道, 应义斌, 等. 太赫兹波谱无损检测技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(7):246–255. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130743&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.043.
XIE Lijuan, XU Wendao, YING Yibin, et al. Advancement and trend of terahertz spectroscopy technique for non-destructive detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):246–255. (in Chinese)
- 15 戚淑叶, 张振伟, 赵昆, 等. 太赫兹时域光谱无损检测核桃品质的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12):3390–3393.
QI Shuye, ZHANG Zhenwei, ZHAO Kun, et al. Evaluation of walnut by terahertz nondestructive technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(12):3390–3393. (in Chinese)
- 16 李斌, WANG Ning, 张伟立, 等. 基于太赫兹光谱技术的山核桃内部虫害检测初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5):1196–1200.
LI Bin, WANG Ning, ZHANG Weili, et al. Preliminary research on insect damage detection in pecans using terahertz spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5):1196–1200. (in Chinese)
- 17 NEWNHAM D A, TADAY P F. Pulsed terahertz attenuated total reflection spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2008, 62(4):394.
- 18 戚淑叶, 韩东海. 太赫兹时域光谱技术无损检测高油玉米研究[C]//中国食品科学技术学会第九届年会, 2012.
QI Shuye, HAN Donghai. An overview of analytical approaches for determining the geographical origin of plant-derived foods[C]//The 9th Annual Meeting of CIFST, 2012. (in Chinese)
- 19 韩晓惠, 张瑾, 杨晔, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的光学参数提取方法的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(11):3449–3454.
HAN Xiaohui, ZHANG Jin, YANG Ye, et al. Review on the methodology for optical parameter extraction with terahertz time-domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(11):3449–3454. (in Chinese)
- 20 张娣. 基于太赫兹时域光谱的生物小分子检测与分析[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
ZHANG Di. Detection and analysis of small bio-molecules on terahertz time domain spectroscopy[D]. Chengdu: School of Physics and Electronics, 2015. (in Chinese)
- 21 吴静珠, 张宇靖, 石瑞杰, 等. 拉曼光谱结合距离匹配法快速鉴别掺伪食用油[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(9):119–122.
WU Jingzhu, ZHANG Yujing, SHI Ruijie, et al. Rapid detection of adulterated edible oil using raman spectroscopy and distance match method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(9):119–122. (in Chinese)