

红外显微成像技术及其应用进展

李晓婷^{1,3}, 朱大洲², 潘立刚³, 马智宏³, 陆安祥³, 王冬³, 王纪华^{1,2*}

1. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240
2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097
3. 北京农产品质量检测与农田环境监测技术研究中心, 北京 100097

摘要 红外显微成像技术诞生于20世纪90年代中期, 该方法的应用研究在国外刚刚起步, 而在国内这项技术还未被广泛认识。它是一种快速、无损的检测技术, 具有图谱合一、微区化、可视化、高精度和高灵敏度等优点。文章概述了红外显微成像系统的组成、工作原理及工作方式, 重点介绍了其在生物医学、微生物学、法庭科学、材料学、营养饲料学以及农产品质量检测方面的研究进展, 分析了红外显微成像技术的研究难点, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词 红外; 显微成像; 光谱; 检测

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)09-2313-06

引言

化学成像技术(chemical imaging)又称光谱成像技术(spectral imaging), 是把成像技术与光谱分析结合起来。在图像领域一套数据包括各个不同波长的整幅图像, 在光谱学中记录的是每个像素间可分辨的光谱, 从而同时获得物质的光谱和空间各点的组成和结构信息。与传统的分析工具相比, 化学成像方法独特的优点是不但能够提供形态学概念的图像信息, 而且能够提供化学分析概念的成分(或含量)的定位定量信息(静态或动态)。利用人类的视觉和光谱学的客观性, 使得材料的特性表达更加直观^[1-3]。

红外显微成像技术是将显微镜技术应用到红外光谱仪中, 将显微镜的直观成像和红外光谱的官能团化学分析相结合, 它不仅能对物体进行形貌成像, 而且还能提供物体空间各个点的光谱信息^[4]。红外显微成像技术是一种快速、无损、无污染的检测技术, 具有图谱合一、微区化、可视化、高精度和高灵敏度等优点, 是了解复杂物质的空间分布和分子组成的强有力方法。制样时无需溴化钾压片, 也不需要添加任何稀释剂, 能反映样品的本质光谱。能够选择样品的不同部位的红外光谱图像进行分析, 从而得到测量位置处物质的分子结构、官能团信息及微区中某化合物含量的空间分布信息。对于非均相固体混合物, 不需要分离, 可直接测试并鉴

定各个组分^[5]。

随着计算机技术和多媒体图视功能的运用, 红外显微成像技术得以迅速发展, 其应用的领域也越来越广泛。目前该技术已经运用到生物医学、微生物学、法庭科学、材料学、营养饲料学以及农产品质量检测等研究中。

1 红外显微成像系统的工作原理

1.1 系统组成

红外显微成像系统是将红外光谱仪与光学显微镜联用的系统。它主要由红外主机、红外显微镜系统和计算机组成。红外显微系统由于其精密性, 多采用干涉原理, 主要部件包括迈克尔逊干涉仪、显微镜光学系统、检测器等。由红外光源发出的光经分束器分为两束光, 一束由动镜经分束器反射到样品后进入检测器; 另一束由定镜反射经分束器、样品后到检测器, 两束光作用于样品, 并在检测器处发生干涉。干涉仪将光源来的信号经过样品后以干涉图的形式送往计算机进行傅里叶变换的数学处理, 最后将干涉图还原为光谱图。

1.2 工作原理

样品放置在显微镜的载物台上, 光谱仪产生光束射向并聚焦到待测样品, 可以进行上下高度的光路聚焦。通过调节载物台 X 轴和 Y 轴以及调节光栅, 可以确定测试的样品以及样品中不同的微区。显微镜检测器测量出颗粒的光谱反射

收稿日期: 2010-11-13, 修订日期: 2011-03-20

基金项目: 北京市科技计划项目(Z09090501040901)和农业部(948计划)项目(2010-S20)资助

作者简介: 李晓婷, 女, 1983年生, 上海交通大学农业与生物学院博士研究生 e-mail: lxt830407@yahoo.com.cn

* 通讯联系人 e-mail: wangjh@nrcita.org.cn

光束,从而对样品进行点、线、面的分子水平的扫描,可以快速、自动获得大量的红外光谱图,并把测量点的坐标与对应的红外光谱同时存入计算机。经过一定的数据处理便得到不同化学官能团及化合物在微区分布的三维立体图或平面图,并以彩色图像的形式显示在屏幕上。不同颜色代表该区域某一基团的吸光度不同^[6]。通过成分图像分析,可以获得样品的空间分辨红外谱图和某一微小区域内成分图像,从而可以分析样品在各扫描微区的组分及结构特征,因此可以表征样品的结构、官能团的空间分布及其变化等。

1.3 测量方式

红外显微镜按其光路系统的差异,一般分为非同轴光路(Off-Axis Optics)红外显微镜和同轴光路(On-Axis Optics)红外显微镜两大类。非同轴光路红外显微镜是较早推出使用的一类红外显微镜,具有透射式(transmission mode)和反射式(reflectance mode)两种操作功能。同轴光路红外显微镜是另一类红外显微镜,也具有透射式和反射式两种操作模式。也可以采用衰减全反射(attenuated total reflectance, ATR)模式,它采用的是硅晶体。根据所测样品的形态、性质和测试要求,可以选择透射、反射、衰减全反射三种测试模式^[7]。透射模式是测定样品的主要方法,可提供最好的信噪比,适用于测试透光性较好的样品,如厚度小于 20 μm 的薄膜、固体切片;反射模式是效率较高的一种测试方法,适用于测定背景比较光亮、光反射较强的样品,如微小颗粒样品;衰减全反射模式,在某些情况下是必不可少的一种测量方法,适用于测定需进行表面成分或表面污染物分析的样品。

2 红外显微成像技术的应用进展

2.1 生物学中的应用

肿瘤是严重威胁人类健康和生命的疾病,尽管目前肿瘤诊断技术(内窥镜技术、影象技术和肿瘤标志物检查技术等)迅速发展,但最终还是依赖于形态学的诊断来确定肿瘤的性质,分化程度及预后等。由此导致对肿瘤诊断存在一定的主观性,而红外显微成像技术是一种准确、高效、客观的方法,为肿瘤诊断技术提供了一条良好的途径。

利用红外显微成像系统,东野广智^[8]等对 50 份鼻咽癌组织及相应的正常组织进行检测分析。结果显示,癌变组织与正常组织红外谱图中蛋白质酰胺 I 带、酰胺 II 带、磷酸二酯基团、糖原等的吸收峰不仅在位置上存在明显差别,而且癌变组织与正常组织相比,1 081 cm^{-1} 处磷酸二酯基团的吸收峰在强度上增加了(1.77 \pm 0.23)倍,从侧面反映了细胞癌变过程中细胞无限增殖的特性。

章成峰等^[9]在涎腺粘液表皮样癌方面进行了探讨。实验得到了该类型肿瘤中几种常见组织的典型光谱,处理得到的红外光谱图像和组织染色结果基本一致,并且发现某眶组织病理学上认为相同的组织如粘液组织、结缔组织等,在光谱上显示出一定差异。

Yano 等^[10]对人类肺癌癌变组织的红外成像进行了分析。代表肝原和胆固醇的 1 045 和 1 467 cm^{-1} 处的特征峰(H1 045 和 H1 467)是对恶性肿瘤定量评价的指标,能够有

效的从非癌组织中辨别出癌变组织。如果谱图 H1 045/H1 467 比率大于 1.4,就可以认为该组织包含鳞状细胞癌或至少部分腺癌,并且成像图谱能够反映出组织中肿瘤细胞空间分布的微小变化。由以上可以看出,红外显微成像方法可在分子水平上将癌组织与正常组织区分开,在肿瘤诊断上显示出一定的高灵敏性。

此外,Ramesh 等^[11]则将红外显微成像技术用于血癌的诊断。他们分离了 B-细胞和 T-细胞白血病儿童患者化疗前后外周血淋巴细胞,并收集了这些细胞的红外显微光谱。结果发现,化疗后两种病人体内的核酸含量均下降,磷脂和蛋白质水平均发生变化,因此可以在分子水平上理解药物对病人的整体影响。

Kretlow 等^[12]还分析了被朊病毒感染的神经组织的红外光谱图像,发现被感染组织的 β -折叠结构含量增加,并且还有一些错误折叠的二级结构。

上述研究表明,红外显微成像技术能够在分子水平上反映组织中生物大分子结构组成及官能团振动方式的改变。分子水平上的变化一般早于细胞形态学方面的变化和机体症状的出现,所以这种变化可提供非常有意义的信息。但红外显微成像技术在生物学上的鉴别诊断研究还处于探索阶段,主要是通过各吸收峰的峰形、峰位和峰强的比较来实现的,尚缺少更客观的量化标准。随着研究的逐步深入,病例及研究数据的不断积累完善,计算机辅助解析方法的进一步发展,化学计量学方法的合理应用,该方法有望成为医学早期诊断的辅助方法。

2.2 微生物学中的应用

由于人类念珠菌病与念珠菌属酵母菌多样性的不断增加,因此对其早期的识别和诊断是必不可少的,这样有利于降低与念珠菌感染相关的发病率和死亡率。Mohammed 等^[13]从医院收集了 57 个临床分离出的念珠菌通过红外显微成像技术成功的将它们区分成白色念珠菌、光滑念珠菌、近平滑念珠菌、热带念珠菌、克鲁斯氏念珠菌、乳酒念珠菌这六种类型。

Orsinia 等^[14]也在微生物学方面做了研究,区别了白色念珠菌单一微菌落的不同区域的差异,结果发现在同一群体的中央和周围区域,碳水化合物的特征吸收区域(1 200~850 cm^{-1})的吸收光谱有重要的差别;改变固体琼脂培养基中葡萄糖的浓度,可以观察到光谱的异质性与葡萄糖摄取的不同相关。在菌落中央衰老细胞的吸收谱峰低于在菌落周围新陈代谢快的细胞的吸收谱峰。

Ngo 等^[15]则在微生物群体中细胞生长异质性的红外显微成像方面进行了调查研究。由此可见,显微红外成像技术具有巨大识别和区分潜力,为人类病理学上遇到的最常见微生物的鉴定开发了一种快速、早期、节约时间和金钱的方法。

Vitaly 等^[16]用红外显微成像技术区分了与人类和动物感染有关的各种不同的细菌与真菌,得到了具有显著差异的细菌、真菌以及细菌、真菌混合物的特征谱带。细菌在 1 450 cm^{-1} 处有一个明显的尖峰,而真菌的特征谱带则在 1 377 cm^{-1} 处,细菌与真菌混合物分别在 1 377 和 1 400 cm^{-1} 处各

有一个特征峰。由此可见红外显微成像技术可用于细菌和真菌感染物或污染物的快速鉴定。

2.3 法庭科学上的应用

红外显微成像技术已成为法庭科学领域进行比对分析的主要方法之一,广泛应用于刑事案件、交通肇事等有关物证分析,为侦察工作提供线索,为法庭审判提供佐证。其中包括油漆、塑料与橡胶、油墨、指纹、油画等证物的鉴定与分析。

马华成等用红外显微成像技术对汽车表面的油漆和交通肇事中受害人衣服上所蹭汽车的油漆进行比对分析。结果显示,受害人衣服上所蹭汽车油漆的红外谱图与汽车表面油漆的红外谱图相同,两者有机成分一致。进一步发现存在 $1\ 728\ \text{cm}^{-1}$ 的酯基峰以及 $3\ 394, 1\ 271, 1\ 126, 1\ 070\ \text{cm}^{-1}$ 等特征峰,说明样品为汽车常用的醇酸漆。

黄娟娟等^[17]从全国收集了市场上常见的黑色中性笔,共15个厂家32个牌号,用收集到的不同生产厂家或牌号的黑色中性笔在纸张上书写,室温放置两天后,进行测定。结果表明,各牌号的黑色中性笔墨水的组成基本相似,主要为水、各种醇类物质(乙醇、乙二醇、丙三醇等),水溶性染料或颜料和水溶性树脂。因此,从谱图上看,整体比较相似,但在部分峰位、峰数及峰强度上有差别,可以作为鉴别的依据。王俭等^[18]做了相同的研究,测定了纸张上圆珠笔油墨所形成的字迹色痕的衰减全反射显微红外光谱,获得了十种不同圆珠笔字迹的显微红外光谱图。结果表明,笔迹色痕的微区衰减全反射谱图可明显地识别色料和溶剂的结构组成;快速地分辨各生产厂家油墨的差异;同时,纸张的不同、字迹书写的深浅均可快速、准确地进行无损分析。

Ricci等^[19]用BVDA明胶提取犯罪现场指纹,通过红外显微成像深度剖析了指纹信息,脂质特征峰的指认,指纹形状特征清晰可见,这对刑侦的证据的快速采集与准确判断给予了很大的帮助。

同样的,红外显微成像还可以用于对古代油画的成分分析,将油画艺术品的横断面进行红外成像,依据不同区域的特征官能团的分布,定性的判断每层油画颜料成分,这一方法为艺术品真迹和赝品的鉴定开辟了一条新的道路^[20, 21]。

2.4 材料学中的应用

虽然各种材料有其固定的表面形态,但其内部组成不同、所含特征基团不同,引起红外光谱的特征不同。因此,通过峰位、峰强度进行特征峰的指认和归属,可将各种不同的材料区分开来。李波阳^[22]利用红外显微成像技术对1.3 cm长的丙纶和腈纶纤维样品进行比较判定。结果发现,不同种类纤维的吸收谱带,光谱差别很大。二者在 $1\ 453\ \text{cm}^{-1}$ 附近都有亚甲基的吸收峰,但后者在 $2\ 243\ \text{cm}^{-1}$ 处有腈基的特征吸收峰,判定为腈纶;前者既无此峰,又无 $690\ \text{cm}^{-1}$ 附近的C—Cl振动吸收峰,故判定为丙纶。

红外显微光谱具有很高的灵敏度,可以准确地对纤维大分子结构的变化进行分析和表征。熊磊^[23]等应用红外显微成像光谱分析了拉伸羊毛纤维大分子结构的变化,通过对特征谱带的分析,得到了羊毛大分子链段结构和大分子构象随拉伸率的变化情况。

应用红外显微成像技术还可以对一些原材料的质量及成分进行监控。如柳洪超^[24]等就采用此方法对聚合物复合膜进行了定性分析。结果表明,该复合膜为7层对称结构,分别由(乙烯/丙烯)共聚物、聚丙烯、聚对苯二甲酸乙二酯、聚氨酯等组成。由此可见该技术可以实现对聚合物多层复合膜的快速准确的定性分析。

红外显微成像技术在材料学检测中有非常独特的优势,其应用也非常广泛,但目前还处在一个低层次应用阶段。目前纺织纤维多组分分析、纺织品中有害金属的鉴定以及材料中的各种添加剂的检测都无法进行,这主要是由于红外显微镜的放大倍数和分辨率不够高等原因导致的,限制了红外显微成像技术的应用。相信随着仪器的不断普及、性能的提高及化学计量学的发展,红外显微成像技术必将在材料学检测分析中得到更加充分的应用。

2.5 营养饲料学中的应用

红外显微成像能够对饲料组织的分子化学结构进行细胞水平或亚细胞水平上的研究,从而分析饲料固有的微观结构和不同饲料原料或同一饲料不同结构之间的化学结构信息。

Yu^[25]收集了来自于饲料内部果皮、糊粉、胚乳这三种固有结构和不同品种饲料的光谱数据,用层序聚类分析(hierarchical cluster analysis, CLA)和主成分分析法(principal components analysis, PCA)分析饲料微观结构的特征图谱。主成分分析和层序聚类分析方法都取得了令人满意的结果,能够将不同饲料或同一饲料不同结构区分并分类,这有助于了解饲料的质量和养分供应。

Baeten等^[26]利用红外显微成像区分动物源饲料如肉骨粉、鱼粉、畜禽血液、畜禽羽毛等与蔬菜、矿物等其他来源的饲料。研究表明,动物源饲料的特征峰主要在 $1\ 945, 2\ 045, 2\ 175, 2\ 290\ \text{nm}$,所有动物源饲料的谱峰范围都在 $1\ 700\sim 2\ 500\ \text{nm}$ 之间。通过此方法可以检查饲料中是否滥用动物源蛋白,以此监控饲料的安全性。

红外显微成像还能对饲料蛋白质中 α -螺旋和 β -折叠二级结构的构象进行谱图分析,以区分不同饲料来源的蛋白质二级结构的差异。Yu等^[27]用此方法区分大小不同两类饲料种子的蛋白质分子化学结构的组成和特性差异,结果表明在 α -螺旋(24.1%)和 β -折叠(37.0%)的百分比方面两类种子没有显著差异($P>0.05$)。然而较大种子的 β -转角的百分比($P<0.05$), β -转角与 α -螺旋的比率以及 β -转角与 β -折叠的比率较低。

Yu等^[28]还用此方法研究了羽毛饲料的蛋白质二级结构化学特征,并与大麦、燕麦、小麦等其他来源饲料的蛋白质二级结构进行了比较。结果显示,羽毛蛋白酰胺I带位于 $1\ 630\ \text{cm}^{-1}$ 处,而其他饲料蛋白酰胺I带则位于 $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 处;羽毛蛋白质的二级结构包含88%的 β -折叠和4%的 α -螺旋,大麦蛋白质中包含17%的 β -折叠和71%的 α -螺旋,燕麦蛋白质中包含2%的 β -折叠和92%的 α -螺旋,小麦蛋白质中包含42%的 β -折叠和50%的 α -螺旋。这些信息可以作为理解不同饲料在动物中的消化行为及其营养品质的指导。

饲料的微观分子结构与饲料质量、营养价值和消化行为具有高度的相关性。红外显微成像能够快速无损地探索在饲

料组织细胞内的微观分子化学结构, 辨别并分类饲料内在的蛋白质结构, 区分饲料品种之间的微观结构差异。但现阶段只是对蛋白质的二级结构做了相对的比较而并非对其含量做了准确的测定。随着红外显微成像技术的成熟, 有必要对此进行深入的研究。进一步量化不同种类饲料如大麦、燕麦和小麦等蛋白质二级结构以及同一种类不同蛋白质二级结构之间与质量、消化行为等的关系。

2.6 农产品质量检测方面的应用

红外显微成像技术能直接地、无破坏性地分析农产品, 可以探测生物组织微结构的分子化学组分而无须破坏其原始构成。因此可以在分子水平上分析玉米、小麦、大麦等农产品的化学结构信息, 进而对农产品的纯度、质量和安全性等进行分析评价。

Yu 在农产品的红外显微成像研究方面做了许多的工作。如揭示了各种不同大麦蛋白的分子结构之间的差异, 表明不同种类大麦的 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角、无规卷曲等二级结构的比例和比率存在明显的差异。大麦蛋白质大约包含 18-34% 的 α -螺旋、14-25% 的 β -折叠和 44%~69% 的其他二级结构。不同的大麦品种包含不同的 α -螺旋与 β -折叠的比率, 范围在 1.4~2.0 之间, α -螺旋与其他结构的比率, β -折叠与其他结构的比率在不同品种间也不同。蛋白质结构的相对差异, 可以用来解释不同大麦品种生物学的区别^[29]。

此外, 他还研究了大麦木质素、纤维素、蛋白质、脂肪、碳水化合物等生物成分的结构化学分布以及这些生物成分之间的比率, 并提供了光谱、化学和官能团的特征^[30, 31]。蛋白质的结构影响大麦的质量、发酵、以及在人类和动物体内的消化行为, 所以 YU 的研究为大麦的优选提供了良好可靠的依据。

他还用聚类分析(cluster analysis)和主成分分析(PCA)这两种分析方法解析了转基因苜蓿与非转基因苜蓿的红外成像图, 分析了二者蛋白质二级结构的差异, 结果表明转基因苜蓿的 α -螺旋和 β -折叠的百分比相对较低, 但是 β -转角和无规卷曲的百分比相对较高; α -螺旋和 β -折叠的比例无显著差异, α -螺旋与其他结构和 β -折叠与其他结构的比例均较高; 蛋白质酰胺 I 带和酰胺 II 带的震动强度和比率均表现出较高的相关性。这为转基因植物的分析提供了一种新途径^[32]。

Dokken^[33]等则将红外显微成像应用于用苯并三唑液体培养基培养后的向日葵根部剖析研究, 用苯并三唑处理和未用苯并三唑处理的根组织光谱的变化主要在 750 cm^{-1} , $1\ 000\sim 1\ 100\text{ cm}^{-1}$, $1\ 250\text{ cm}^{-1}$ 区域。得出的结论是苯并三唑与植物根部组织发生了不可逆转的结合; 木质素结构发生了变化, 峰型变得更加明显; 碳水化合物含量增加, 并采用主成分分析法(PCA)对成像结果进行了分析。

Sully 等^[34]用红外显微成像技术研究小麦淀粉胚乳中细胞壁多糖的形成。最终细胞化、细胞分化和胚乳成熟这三个阶段是细胞壁形成的关键阶段。红外显微成像结果显示, 在最终细胞化阶段胚乳细胞壁的主要组成是 β -1, 3, 1, 4-葡聚糖; 红外特征谱图说明了阿拉伯木聚糖(AX)的出现开始于细胞分化阶段, 当到胚乳成熟阶段时阿拉伯木聚糖的特征谱峰是红外谱图的主要特征峰, 因此细胞壁细胞分化和胚乳成

熟这两个阶段可以通过阿拉伯木聚糖的特征谱峰来区分。并且在细胞分化阶段小麦的中央和周围区域阿拉伯木聚糖的含量不同, 中间区域的含量比较少。

红外显微成像技术在不破坏农产品结构和生物特性的条件下, 能够测定其生物成分的组成、化学分布及蛋白质二级结构等, 并且在转基因与非转基因植物蛋白质二级结构的区分及植物有机污染物的鉴定上得到了应用。由于该技术的发展才刚刚起步, 在农产品的应用上还处于探索阶段, 红外显微成像技术还无法解决种子萌发的特性、生物降解功能、营养成分有效性、消化和发酵行为等与蛋白质结构之间的关系这些问题。相信随着红外显微成像仪器自身性能的提高, 数学模型算法的开发及放射性标记的应用, 将有助于解决这些问题。

3 红外显微成像技术的研究难点

3.1 工作方式

不同的测试样品, 它们的形态、结构、性质各有不同。因此在测试之前有必要对所测样品充分了解, 根据样品自身的特点选择适合的采集图像和光谱的工作方式, 以便获得高质量的图谱信息。

3.2 图谱影响因素

红外显微成像技术具有图谱合一的特点, 而影响图谱质量的因素很多且具有不确定性。光源位置、光源强度、采集背景及分辨率的选择、样品的均匀及平整度等对图谱都会有不同程度的影响。由于红外显微成像是一种新兴的技术, 所以关于图谱影响因素的研究还不够透彻。因此有必要进行更深入的理论研究, 积累丰富的经验, 尽量消除对图谱影响的不利因素, 获得更准确可靠的图谱信息。

3.3 数据分析方法

红外显微成像技术能够获得大量的数据, 对于 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的微区, $50\ \mu\text{m}$ 像素分辨率的显微图像可以包含 40 000 条光谱。这就增加了数据存储和分析的难度。面对不同的测试样品, 其对应的特征波段和数学处理方法不完全相同, 所以需要选取合适的特征波段和数据处理方法进行数据分析。

4 展望

从目前的研究情况来看, 红外显微成像技术已经逐渐成为人们关注的热点, 但它还是一项刚刚起步的技术方法, 因此有许多方面需要完善和发展。例如红外显微镜的放大倍数一般不超过 35, 使得该技术不能用于更加微观的研究, 提高红外显微镜的放大倍数是一个发展方向。

红外显微成像技术的定量分析需要利用红外显微图谱信息与标准方法(如 HPLC)所获得的参考值建立模型, 但是由于红外显微成像技术测量的样品一般是微小微量的, 而标准方法却无法对那么微小微量的样品进行分析, 所以目前红外显微成像技术很少在定量分析方面有所应用。但随着现代分析方法的进步, 标准方法测量微小微量的样品的精度将逐步提高, 因此红外显微成像技术的另一个发展趋势是微区定量

分析。

目前, 红外显微成像系统比较昂贵, 进行相关技术研究的单位还不多, 限制了这项技术的广泛应用, 因此有必要开发价格低廉的红外显微成像系统。此外, 红外显微成像技术

还应该朝着加快扫描速度, 提高图像、光谱的分辨率与信噪比, 获得更高效、快捷的光谱、图像数据的处理算法, 扩展红外成像系统的应用范围这些目标发展。如此发展, 红外显微成像技术将有更加广阔的应用前景。

References

- [1] DIAO Zhong-wen, WANG Song-cai, WANG Gui-qiang, et al(刁中文, 王松才, 王桂强, 等). Forensic Science and Technology(刑事技术), 2009, 4: 28.
- [2] HUANG Wei, WANG Gui-qiang, XU Xiao-jing, et al(黄威, 王桂强, 许小京, 等). Chinese Journal of Forensic Sciences(中国司法鉴定), 2008, 4: 35.
- [3] Lobinski R, Moulinb C, Ortegac R. Biochimie, 2006, 88(11): 1591.
- [4] SU Xing, TIAN Wei-jian, ZHANG Chun-min(苏星, 甜维坚, 张淳民). Optical Technique(光学技术), 2006, 32(6): 820.
- [5] LI Jing, LI Mei-chao, MO Wei-min(李静, 李美超, 莫卫民). Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Analysis)(理化检验·化学分册), 2009, 45(10): 1245.
- [6] Fumière O, Pascal V, Boix A, et al. Biotechnol. Agron. Soc. Environ., 2009, 13: 59.
- [7] ZHU Wei, FANG Jiang-lin(朱卫, 方江邻). Testing Research and Analysis: Jiangsu Province Measurement and Test Academic Papers(测试研究与分析: 江苏省计量测试学术论文集), 2005. 340.
- [8] DONGYE Guang-zhi, ZHANG Yue-fei, MENG Qing-yong, et al(东野广智, 张月飞, 孟庆勇, 等). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2002, 19(5): 670.
- [9] ZHANG Cheng-feng, LIU Yu-hai, XU Yi-zhuang, et al(章成峰, 刘毓海, 徐怡庄, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(11): 23.
- [10] Yano K, Ohoshima S, Gotou Y, et al. Analytical Biochemistry, 2000, 287: 218.
- [11] Ramesh J, Kapelushnik J, Mordehai J, et al. J. Biochem. Biophys. Methods, 2002, 51: 251.
- [12] Kretlow A, Wang Q, Kneipp J, et al. Biochimica et Biophysica Acta, 2006, 1758: 948.
- [13] Mohammed E, Toubas D, Mohamed B, et al. Biochimica et Biophysica Acta, 2005, 1724: 239.
- [14] Orsinia F, Ami D, Villa A M, et al. Journal of Microbiological Methods, 2000, 42: 17.
- [15] Ngo N A, Naumann Thi D. Anal. Bional. Chem., 2007, 387: 1769.
- [16] Vitaly E, Pavlov V, Marina T, et al. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2005, (37): 1105.
- [17] HUANG Juan-juan, LIU Zhong-liang, MEI Yi(黄娟娟, 刘忠良, 梅毅). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2009, 2: 96.
- [18] WANG Jian, SUN Su-qin, ZHOU Qun(王俭, 孙素琴, 周群). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学), 1999, 27(6): 697.
- [19] Ricci C, Bleay S, Kazarian S G. Anal. Chem., 2007, 79: 5771.
- [20] Keune k, Boon J. J. Anal. Chem., 2004, 76: 1374.
- [21] Loon A V, Boon J J. Spectrochimica Acta Part B, 2004, (59): 1601.
- [22] LI Bo-yang(李波洋). Journal of Chinese People's Public Security University(中国人民公安大学学报), 2000, 2: 48.
- [23] XIONG Lei, LIU Hong-ling, YU Wei-dong(熊磊, 刘红玲, 于伟东). Journal of Dong Hua University(东华大学学报), 2005, 31(3): 5.
- [24] LIU Hong-chao, YOU Yu-sheng, WU Li-jun(柳洪超, 尤瑜生, 吴立军). Engineering Plastics Application(工程塑料应用), 2010, 38(3): 59.
- [25] Yu P. J. Agric. Food Chem., 2005, 53: 7115.
- [26] Baeten V, Holst C V, Garrido A, et al. Anal. Bioanal. Chem., 2005, 382: 149.
- [27] Yu P, Wang R, Bai Y. J. Agric. Food Chem., 2005, 53: 9297.
- [28] Yu P, Mckinnon J J, Christensen C R, et al. J. Agric. Food Chem., 2004, 52: 7353.
- [29] Yu P. Wiley InterScience, 2006, 85(4): 308.
- [30] Yu P, Mckinnon J J, Christensen C R, et al. J. Agric. Food Chem., 2004, 52: 1484.
- [31] Yu P, Mckinnon J J, Christensen C R, et al. J. Agric. Food Chem., 2003, 51: 6062.
- [32] Yu P, Jonker A, Gruber M. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2009, 73: 846.
- [33] Dokken K M, Davis L C, Erickson L E, et al. Microchemical Journal, 2004, 81: 86.
- [34] Sully P, Paul R, Luc S, et al. J. Agric. Food Chem., 2006, 54: 2303.

FTIR Microspectroscopy and Its Progress in Application

LI Xiao-ting^{1, 3}, ZHU Da-zhou², PAN Li-gang³, MA Zhi-hong³, LU An-xiang³, WANG Dong³, WANG Ji-hua^{1, 2*}

1. Shanghai Jiao Tong University School of Agriculture and Biology, Shanghai 200240, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. Beijing Research Center for Agri-food Testing and Farmland Monitoring, Beijing 100097, China

Abstract FTIR microspectroscopy technique was born in the mid-nineties. The research on this technique has just began abroad, and this technology has not yet been widely recognized in China. It is a rapid, nondestructive testing technology, has the advantages of microdomain, visualization, high precision and high sensitivity. In the present study, the composition, operational principle and working mode of FTIR microspectroscopy were summarized. The progress in application of FTIR microspectroscopy technique was investigated in some fields, including biomedicine, microbiology, forensic science, materials science, nutrition and feed science and agricultural products. The difficulty of FTIR microspectroscopy research and the prospects of this technique were also discussed.

Keywords Infrared; Microscopic imaging; Spectrum; Detection

(Received Nov. 13, 2010; accepted Mar. 20, 2011)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者, 本刊要求作者重写, 这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文, 要求言简意明、确切地论述文章的主要内容, **突出创新之处**。

2. 应拥有与论文同等量的主要信息, 包括四个要素, 即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素, 例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下, 英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围, 以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据, 如检测限、相对标准偏差等; 结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。

3. 句型力求简单, 尽量采用被动式, 通常应有 2000 个印刷字符, 300 个英文单词为宜, 不能太短; 也不要太长。用 A4 复印纸单面隔行打印。

4. 摘要不应有引言中出现的内容, 换言之, 摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论, 不得简单重复题名中已有的信息; 不用非公知公用的符号和术语; 不用引文, 除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号, 除相邻专业的读者也能清楚地理解外, 在首次出现时必须加以说明, 例如用括号写出全称。