

文章编号 1004-924X(2016)增-0203-09

用于调味品中非法添加物测定的 便携式激光拉曼检测仪

张 臻¹, 杨练根^{1,2*}, 张 娜¹, 何 涛^{1,2}, 翟中生¹

(1. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北省现代制造质量工程重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘要: 为了实现调味品中的非法添加物的现场快速检测, 提出了一种基于激光拉曼原理的便携式拉曼检测仪。它主要由785 nm波长的激光器、分光镜、聚焦透镜、滤光镜、光谱仪、光谱分析软件以及便携式计算机等组成。基于拉曼原理设计了拉曼聚焦光路和收集光路, 并设计了基于免疫遗传算法和粒子群算法对拉曼光谱重叠峰进行精确解析的光谱分析软件。通过实验, 配合银离子拉曼增强剂和匹配剂, 对 1×10^{-6} 的罗丹明B和碱性橙II的混合水溶液进行了光谱采集, 获取了相应的拉曼光谱信号, 然后对这2种存在重叠峰的非法添加物进行了检测。结果表明本仪器能有效分离拉曼光谱的重叠峰, 其理论测量分辨率为 2.3×10^{-9} , 包括简单制备和仪器预热在内的检测时间小于半小时, 可辅助食品质量监督部门进行现场执法检验和取证。

关键词: 激光拉曼; 调味品; 非法添加物; 重叠峰分离; 快速检测

中图分类号: TH742 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162413.0203

A portable laser Raman detector used for detecting illegal additives in condiment

ZHANG Zhen¹, Yang Lian-gen^{1,2*}, ZHANG Na¹, HE Tao^{1,2}, ZHAI Zhong-sheng¹

(1. Mechanical Engineering School, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Key Laboratory of Modern Manufacturing and Quality Engineering, Wuhan 430068, China)

* Corresponding author, E-mail: yanglg@mail.hbut.edu.cn

Abstract: Aiming at on-line fast detection of illegal additives, a portable Raman detector, consisting of 785 nm wavelength laser, spectroscopy, focusing lens, glass filter, spectrometer, spectral analysis software and portable computer etc., was developed based on laser Raman principle. The focus light path and gathering light path were designed. Then the spectral analysis software was designed for accurate analysis on overlapping peaks of Raman spectrum by using the immune genetic algorithm and the particle swarm optimization algorithm. Subjected to silver ion Raman fortifier and matching agent, the mixed solution of 1×10^{-6} Rhodamine B and Basic Orange II was detected by the portable Raman detector experimentally. From the Raman spectrum signals, the illegal additives with overlapping peaks were identified. The instrument can effectively separate overlapping peaks of Raman spectrum

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-05.

基金项目: 湖北省科技支撑计划资助项目 (No. 2015BCE047)

with the measurement resolution ratio of 2.3×10^{-9} and detection time including simple preparation and preheating of instrument lower than half an hour, which can provide assistance for food quality supervision departments.

Key words: spectral analysis; laser raman; condiments; illegal additives; overlapping peak separation; rapid detection

1 引言

调味品可以增加菜肴的色、香、味,促进食欲,是有益于人体健康的辅助食品。调味品是人类生活所必需的,根据调味品的商品性质和经营习惯,可分为酿造类、腌菜类、鲜菜类、干货类和水产类等类别。调味品也是遭受非法添加物严重侵害的一种商品。非法添加物是指食品加工过程中所加入的非食用化学物质。GB 2760-2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定了食品添加剂的使用原则、允许使用的食品添加剂品种、使用范围及最大使用量或残留量,但在调味品中普遍存在着超范围、超量使用食品添加剂和违法添加的情况。非调味品添加剂并非可食用添加剂,而是危害性未知或者毒性较大而被禁止的化学合成物^[1]。例如在辣椒粉、辣椒酱、含辣椒类的食品中添加苏丹红;在花椒中添加罗丹明 B;在味精中添加硫化钠;在白砂糖中添加工业硫磺;在火锅底料及小吃类中添加罂粟壳;在酱油中添加毛发水;在勾兑食醋中添加工业用乙酸等。这些非法添加物会严重损害人们的健康。

目前,针对很多非法添加物,我国已经有液相色谱法^[2-4]、串联质谱法^[5]等相应的检测方法。GB/T 23496-2009《食品中禁用物质的检测碱性橙染料高效液相色谱法^[2-3]》、GB/T 19681-2005《食品中苏丹红染料的检测方法高效液相色谱法》和吉林省地方标准 DBS22/008-2012《食品安全地方标准食品中酸性橙、碱性橙 II 和碱性嫩黄的测定液相色谱-串联质谱法》已介绍了关于碱性橙、苏丹红、碱性橙 II 等非法添加物的检测方法。韦娜应用表面增强、基质固相分散技术和机制固相分散-拉曼光谱技术对辣椒制品中罗丹明 B 进行检测^[6]。海洋光学公司刘晓等介绍的典型拉曼光谱产品 R3000 拉曼光谱仪可以实现苏丹红的

检测。浙江师范大学的许峰采用高效液相色谱法和因子分析-紫外光度法^[7]来测定荧光增白剂。刘利亚利用高效液相色谱仪紫外检测法^[8]检测胭脂红,检出限为 30 ng。北京市产品质量检验监督所孙娅娜采用高效液相色谱法检测柠檬黄、日落黄和亮蓝^[9]。然而,这些方法均需要在实验室通过繁琐的制备程序,然后采用色谱仪、质谱仪等高端仪器才能完成检验,无法在执法和生产现场进行,难以固定执法证据。拉曼光谱仪的检测过程简单,可以实现物质的快速检测^[10]。国际上,各大光学公司竞相推出各种类型的拉曼光谱仪,特别推出了适应在线和现场检测的各类便携式和手持式拉曼光谱仪。如美国的必答泰克(BW-TEK)公司、美国的海洋光学(Ocean Optics)公司、法国的 Jobin Yvon 公司、荷兰的爱万提斯(Avantas)公司等逐步开发并推出了商品化的便携式拉曼光谱仪。由于它们并不是专门为食品行业开发,因此光谱范围宽、分辨率低,其拉曼光谱图库资源范围虽广,但却缺乏足够的能覆盖调味品主要食品组分、合法的食品添加剂和非法添加物的图谱,不便于食品行业的现场检测,因此,本文提出了一种适应现场检测的便携式拉曼光谱仪。

2 激光拉曼检测仪的设计

2.1 激光拉曼检测仪的硬件构成

如图 1 所示,本文提出的便携式激光拉曼检测仪主要由 785 nm 波长的激光器(输出的激光已由准直镜准直)、分光镜、聚焦透镜、滤光镜、光纤、光谱仪、拉曼光谱数据分析软件以及便携式计算机等组成。整个光路除激光器外,全部集成在一个拉曼探头内,而激光器和便携式计算机装在一个便携式机箱内。在现场测试时,将探头固定在一个小支架上,保持探头和被测物 5~7 mm 的

测量距离。被测物可以是固体粉状、颗粒状或溶于水或有机溶剂中。

2.2 便携式激光拉曼检测仪的工作原理

激光拉曼检测仪的工作原理为:激光器发射一定强度的激光,经滤光、准直后通过分光棱镜和聚焦透镜打在样品池中,样品在焦点处激发出拉曼光。拉曼光通过聚焦透镜返回到分光镜上,一部分拉曼光透过分光镜,另一部分拉曼光通过分光镜反射后被收光透镜收集。收集到的拉曼光通过准直镜头,由光纤送入到光谱仪,光谱仪与计算机是相连的,其光谱信息及液体样品的原始数据即可传输到计算机上,由电脑上的拉曼光谱仪分析软件对得到的样品拉曼光谱信息进行分析,就可以得到样品物质的拉曼光谱。但由于拉曼信号很微弱,因此,在低浓度的非法添加物检测中需要借助拉曼表面增强技术^[12-14],如在罗丹明 B、苏丹红的检测中,需要使用表面增强技术^[15-16]。

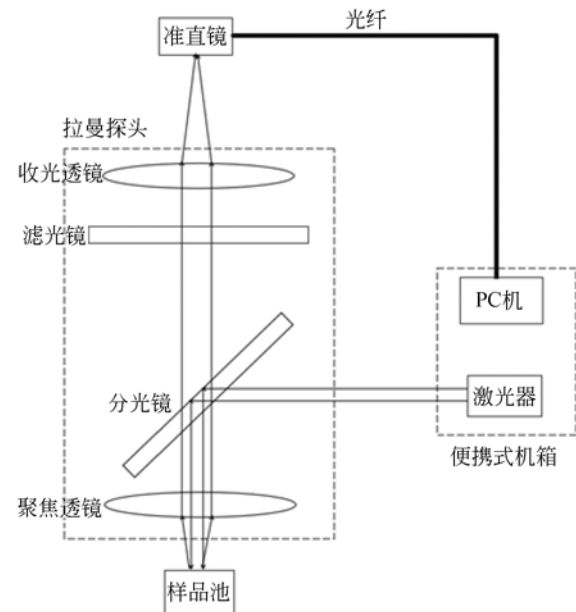


图 1 激光拉曼光谱仪原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser raman spectrometer

2.3 聚焦系统设计

玻璃折射率随波长的变化称为玻璃的分散,色差源于分散的各个不同波长的透镜焦距之差,球差是入射光离光轴的距离不同而产生的焦距不同,距离越远、焦距越短。色差和球差都会对系统造成影响,两者都会造成像点弥散,即增加了耦合面积,会降低耦合效率。通常采用消色差镜片在大数值孔径时其球差会较大,可以考虑聚焦透镜

采用非球面消色差镜片来降低影响。一般来说,非球面消色差镜片比球面消色差镜片在效率上可以提高 1 倍以上。

为保证激光束与器件的光轴重合度更好,激光器安装在 4 维调整座上。激光器采用美国海洋光学的拉曼专用激光器,其发出的光是已经准直和滤波的窄带光。考虑到食品检测的特征,选择激光器的波长为 785 nm,功率为 0~500 mW 可调。激光聚焦系统与收集光系统共用分光镜和聚焦镜片(消色差镜片)。激光聚焦系统的结构示意图和激光聚焦系统性能分别如图 2 和图 3 所示。聚焦位置处的光斑应尽可能小,以满足光纤耦合的需要。

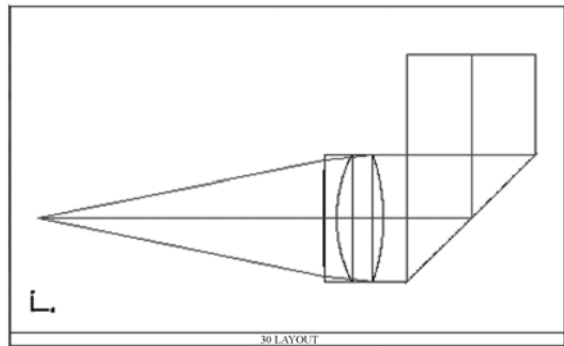


图 2 激光聚焦系统结构示意图

Fig.2 Structure diagram of laser focus system

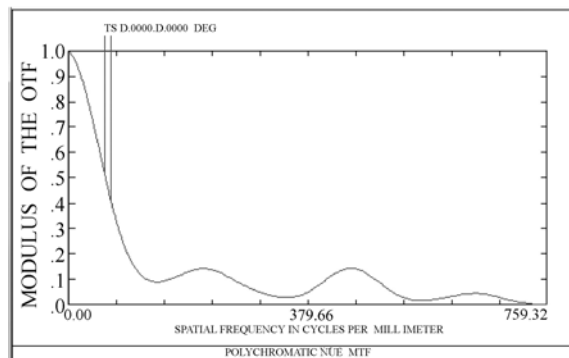


图 3 快速傅里叶变换曲线

Fig.3 Fast Fourier transform curve

2.4 收集系统设计

收集光路由聚焦透镜(消色差透镜)、分光镜、滤光镜、收集透镜(非球面消色差透镜)和准直镜组成。其中分光镜有 3 个自由度的旋转调整,大大缩短了光路调试的时间。光纤装配在 5 维调整

座上,保证光纤与拉曼光的最佳耦合。收集系统结构示意图及仿真结果如图 4 和图 5 所示,由 ZEMAX 仿真得到的点列图可知其满足要求。

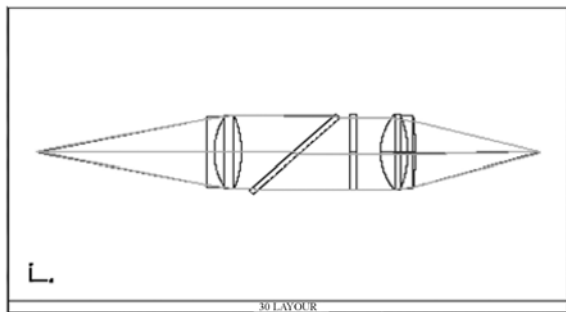


图 4 收集系统结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of collection system

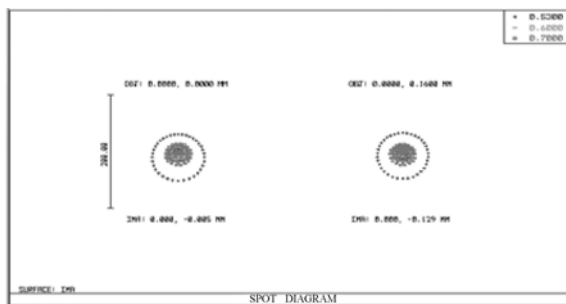


图 5 收集系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of collection system

聚焦透镜和收光透镜分别采用 Sigma 的消色差双胶合透镜 DLB-15-60PM 和 DLB-15-100PM,焦距分别为 60 和 100 mm,因为要使探头尺寸尽可能小,因此采用的透镜直径为 $\Phi 15$ mm。消色差双胶合透镜是一种由低分散的冕牌

玻璃正透镜和高分散的火石玻璃负透镜粘接而成的消色差透镜。设计时,在蓝色(486.1 nm),绿色(546.1 nm)和红色(656.3 nm)3 个波长,对分散的不同值和透镜形状进行了优化,实现了最小色差。球差在设计时也进行了优化,轴外的彗差或像散也得到了良好地校正。

3 拉曼光谱及其重叠峰的解析

调味品中的非法添加成分很多,其成分的含量需要通过拉曼信号的强度来定量。一种物质的拉曼峰往往不止一个,如表 1 所示,碱性橙 II 的拉曼峰有 10 个。如图 6 所示,花椒有 24 个拉曼峰。因此反映信号拉曼强度特征的各种不同成分的拉曼谱往往会叠加甚至重合,产生重叠拉曼谱峰信号。由于调味品和非法添加物(如罗丹明 B、碱性

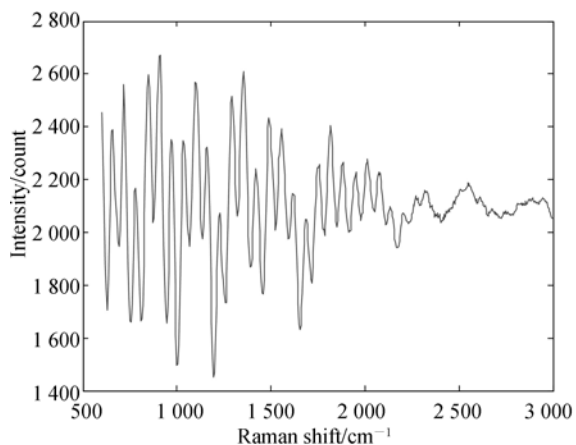


图 6 花椒拉曼光谱图(积分时间为 12 s)

Fig. 6 Raman spectrogram of pepper methanol (integral time of 12 s)

表 1 罗丹明 B、碱性橙 II、甲醇的拉曼位移

Tab. 1 Raman shifts of Rhodamine B, alkaline orange II and methanol

物质	拉曼位移							
罗丹明 B	619				1073		1196	1275
碱性橙 II		803	917	999		1150	1181	1272
甲醇					1016			
罗丹明 B		1350			1506		1646	
碱性橙 II	1290		1378		1594	1619		
甲醇				1438			2845	2961

橙 II) 的荧光往往很强,非法添加物含量很低,所以无法在现场直接对调味品进行检测,需要对它进行简单制备,即先将被测调味品研磨成粉状,然后和有机溶剂或水进行混合。由于很多非法添加物(如苏丹红 I、II、III、IV)不溶于水,因此通常采用有机溶剂。有机溶剂品种很多,考虑到现场检测的特殊性,用作调味品前置处理的溶剂常常采用水、甲醇、乙醇、丙酮、环己烷、乙酸乙酯、苯等。然而这些有机溶剂也有多个拉曼峰,例如甲醇(其拉曼峰如表 1 所示)。因此,为了得到被测物质的拉曼光谱特征信号,必须对重叠峰进行精确解析。这里采用了免疫遗传算法和粒子群算法进行解析。

3.1 免疫遗传算法

免疫遗传算法是基于生物免疫机制提出的一种改进的遗传算法。它将实际求解问题的目标函数对应为抗原,而问题的解对应为抗体^[11],这里含各个组分的混合样品就相当于抗原,它是各个组分拉曼谱叠加的混合信号。

将除溶剂外各个组分的拉曼光谱信号的混合信号作为遗传算法的目标函数,它是各个组分叠加的模拟信号,可以描述为:

$$M_0 = \sum_{i=1}^n X_i C_{0i}, \quad (1)$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^n C_{0i}, \quad (2)$$

式中: M_0 表示原始拉曼光谱混合信号; n 表示拉曼重叠信号中的组分数目; X 表示单个组分的拉曼信号; C_0 表示各组分的含量。

适应值 d 是衡量计算所得出的含量解与真实含量接近的标准,适应值越小表示分离之后各个组分的含量越准确,适应值为:

$$d = \sum_{i=1}^p (M_i - M_{0i} \times O)^2 / 1044, \quad (3)$$

式中: M 表示分离含量叠加的拉曼光谱混合信号; p 表示种群数量; O 表示 1 行 p 列的全 1 矩阵。

当 $d_{\max} < 10$, 认为满足重叠峰解析要求,即可计算并输出最优解;如果适应值不满足条件,则需要再次计算新的组分含量并再次判断,如此循环直至满足判断条件。最后是择优的过程,计算并输出历史最优解。该遗传算法的程序框图如图 7 所示。

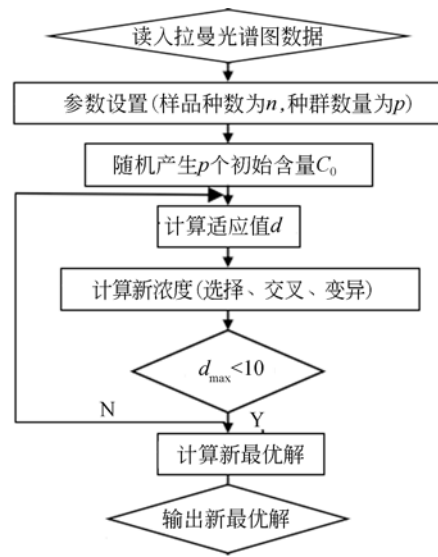


图 7 免疫遗传算法程序框图

Fig. 7 Flow chart of immune genetic algorithm

3.2 粒子群算法

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是另外一种解析拉曼重叠峰的常用算法,它是模仿鸟群捕食行为的一种优化算法。粒子群算法的核心部分就是按照计算公式对粒子的速度和位置进行更新。速度更新公式为:

$$v = \omega v_0 + c_1 (g_{\text{best}} - c_0) + c_2 (p_{\text{best}} - c_0), \quad (4)$$

式中: v 表示粒子速度; v_0 表示粒子的初始速度; g_{best} 表示全局最优解; p_{best} 表示局部最优解; ω 表示惯性权重,为 1; c_1 表示全局速度权重,为 2; c_2 表示全局速度权重,为 2。粒子位置的更新可计算公式为:

$$c = c_0 + rv, \quad (5)$$

式中: c 表示当前粒子位置; c_0 表示粒子的初始粒子位置; r 表示约束因子,为 1。

粒子群算法适应值的计算同样用 d 表示,其表达式如式(6)所示;当局部适应值小于全局适应值时即可得到最优解,可以用式(7)表示。

$$d = \sum_{i=1}^p (M_i - M_{0i} \times O)^2 / 1044, \quad (6)$$

$$p_dbest < g_dbest, \quad (7)$$

式中: M 表示分离浓度叠加的拉曼光谱混合信号; p 表示种群数量; O 表示 1 行 p 列的全 1 矩阵; p_dbest 表示局部适应值; g_dbest 表示全局适应值。其程序框图如图 8 所示。

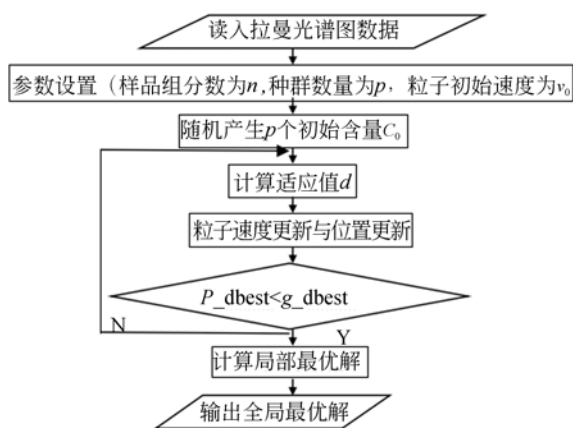


图 8 粒群算法框图

Fig. 8 Flow chart of particle swarm algorithm

4 实验结果及分析

非法添加剂种类很多,其溶解特性也有差别。苏丹红不溶于水,但溶于苯。罗丹明 B 和碱性橙既溶于水,又溶于甲醇。因此,需要根据被测非法添加物的特性,选择合适的溶剂。甲醇作为有机溶剂得到广泛的使用,其积分时间为 30 s 的拉曼光谱如图 9 所示,有 4 个拉曼峰。用分度值为 0.1 mg 的分析天平准确称取罗丹明 B 和甲醇,先配制 1×10^{-6} (质量浓度,下同) 的罗丹明 B 溶液,然后将它和银离子拉曼增强剂、匹配剂按 1:1:1 的比例混合,其积分时间为 12 s 的原始拉曼光谱如图 10 所示。由于罗丹明 B 有比较强的荧光,因此光谱图前段有比较明显的凸起。由于罗丹明 B 和甲醇的第一个拉曼峰的拉曼位移分别为 619,

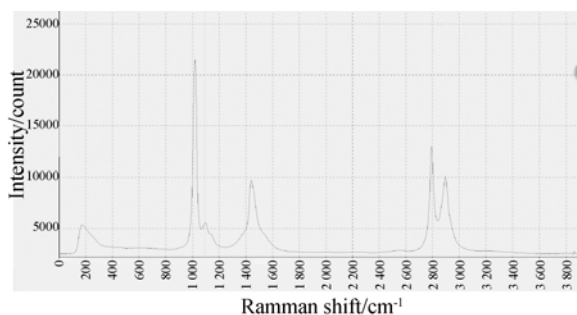
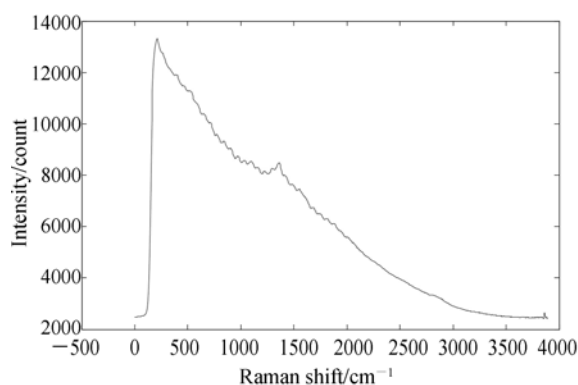
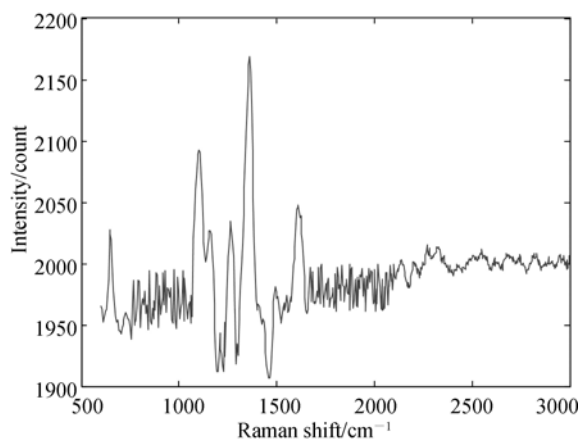


图 9 甲醇的拉曼光谱图 (积分时间为 30s)

Fig. 9 Raman spectrogram of methanol (integral time of 30 s)

1016 cm^{-1} ,故只需要对 500 cm^{-1} 以后的部分光谱图进行处理。采用 10 阶多项式拟合去掉基底后的拉曼光谱如图 11 所示。从图 11 可知,其拉曼位移为 1362 cm^{-1} 的主峰幅值(相对值)为 442 cd,由此推算,理论上对罗丹明 B 的分辨率可以达到 2.3×10^{-9} 。为验证光谱分析软件解析重叠峰的性能,配置了浓度为 0.5% 的罗丹明 B 和碱性橙 II 混合水溶液,测得其 3 s 的光谱图如图 12 所示。采用遗传算法分解后的碱性橙 II、罗丹明 B 的光谱如图 13、图 14 所示。

图 10 1×10^{-6} 罗丹明 B 甲醇溶液的光谱图 (积分时间为 12 s)Fig. 10 Spectrogram of methanol solution with 1×10^{-6} rhodamine B (integral time of 12 s)图 11 去基底后的 1×10^{-6} 罗丹明 B 甲醇溶液光谱图 (积分时间为 12 s)Fig. 11 Spectrogram of methanol solution 1×10^{-6} rhodamine B after basement eliminated by ten-order polyomals (integral time of 12 s)

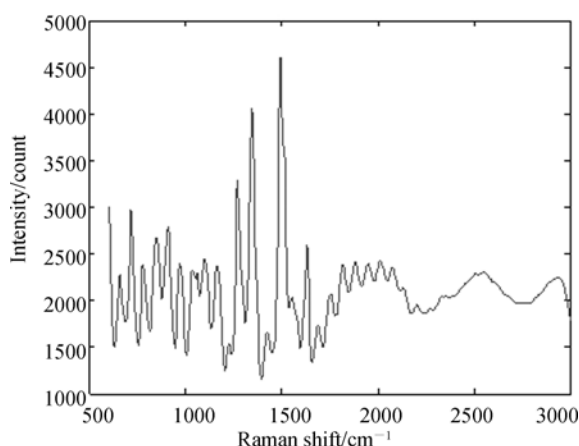


图 12 0.5%浓度的罗丹明 B 和碱性橙 II 水溶液光谱图(积分时间为 3 s)

Fig. 12 Spectrogram of 0.5% rhodamine B aqueous solution with concentration of 0.5% and alkaline orange II (integration time of 3 s)

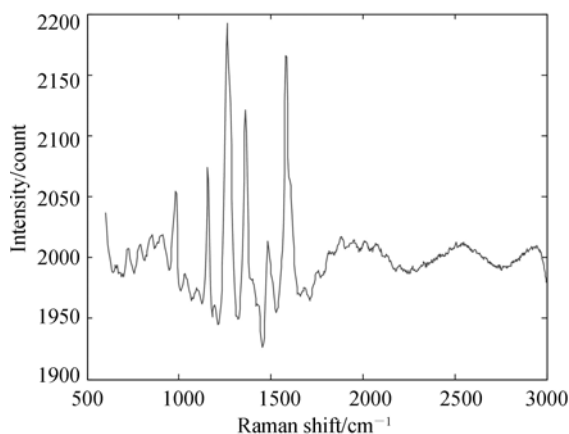


图 13 分离后 0.5%碱性橙 II 水溶液的光谱图(积分时间为 3 s)

Fig. 13 Spectrogram of 0.5% aqueous alkaline orange II after separation (integration time of 3 s)

由于罗丹明 B 和碱性橙 II 属于工业染料,具有很强的荧光,因此当积分时间较强时光谱仪会饱和,因此只能采用比较短的积分时间。而且荧光使拉曼光谱前段凸起,必须滤除拉曼光谱的基底,这会使最终用来分析的光谱的幅值产生变化,从而带来一定的误差。而且无论是水溶液还是甲醇溶液,其部分拉曼峰会掩盖,从而并不是所有被测成分都能用拉曼主峰进行量化。

现场检测时,只需要提前将光谱仪打开预热 20~30 min,然后将被测调味品研磨成粉状,选择合适的有机溶剂按 1:1 的比例混合。20~30 min 后,抽取溶液 2~3 mL,过滤掉样品后注入比色皿。然后采用本光谱仪就能进行非法添加物的检测,包括样品制备和光谱仪预热时间在内的检测时间不超过半小时。

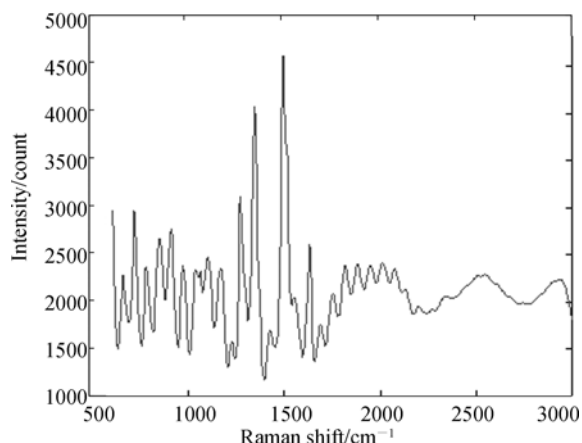


图 14 分离后 0.5%罗丹明 B 水溶液的光谱图(积分时间为 3 s)

Fig. 14 Spectrogram of 0.5% rhodamine B aqueous solution after separation (integration time of 3 s)

5 结 论

本文提出了一种基于激光拉曼原理的便携式光谱仪,将罗丹明 B 甲醇溶液和银离子拉曼增强剂、匹配剂按 1:1:1 的比例混合后进行检测。理论上该光谱仪对罗丹明 B 甲醇溶液的分辨率为 2.3×10^{-9} 。完全满足调味品中罗丹明 B 的测定要求。从罗丹明 B 和碱性橙 II 混合水溶液的光谱分离效果看,基于遗传算法的软件能较好地实现重叠峰的分。由此逐步建立非法添加物的拉曼光谱图库,确定其拉曼特征。本光谱仪能实现非法添加物的现场快速检测,包括样品制备和光谱仪预热时间在内的检测时间不超过半小时,可用于食品质量监督部门现场的执法监督检验和取证。

参考文献:

- [1] 叶兴乾,张献忠,刘东红. 食品中非法添加物检测及分析技术进展[J]. 北京工商大学学报,2012,30(6):19-23.
YE X Q, ZHANG X ZH, LIU H D. Review of detection technologies of illegal chemical additives in food [J]. *Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 2012, 30(6):19-23. (in Chinese)
- [2] 鄢兵,胡海山,赵淑城,等. 高效液相色谱法测定食品中禁用物质碱性橙染料[J]. 现代科学仪器,2013 6(3):133-135.
YAN B, HU H SH, ZHAO SH E, *et al.*. High performance liquid chromatography determination of banned substances in food alkaline orange dye[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2013 6(3): 133-135. (in Chinese)
- [3] 佟永薇. 高效液相色谱法检测食品中碱性橙染料[J]. 食品研究与开发,2012,33(11):165-167.
TONG Y H. High performance liquid chromatography to detect alkaline orange dye in food[J]. *Food research and Development*, 2012, 33(11): 165-167. (in Chinese)
- [4] 欧阳立群,吴富忠. 食品中苏丹红染料的高效液相色谱测定方法[J]. 卫生研究,2007, 36(2):202.
OUYANG L Q, WU F ZH. Sudan red dye in food of high performance liquid chromatographic method [J]. *Journal of Health Research*, 2007, 36(2): 202. (in Chinese)
- [5] 刘思洁,范明,姜楠,等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定食品中酸性橙 II、碱性橙 II 和碱性嫩黄[J]. 中国卫生检验杂志,2013,23(12):2593-2594.
LIU S J, FANG M, JIANG N, *et al.*. Super high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry determination of alkaline orange II in food, 2 and alkaline alkaline orange yellow [J]. *Chinese Journal of Health Examination*, 2013, 23(12): 2593-2594. (in Chinese)
- [6] 韦娜. 拉曼光谱法检测辣椒制品中罗丹明 B 和掺兑地沟油的花生油[D]. 辽宁:沈阳农业大学,2013.
WEI N. *Raman Spectroscopy Detection Pepper Products of Rhodamine B and Mixed Against the Illegal Cooking Oil, Peanut Oil* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University. 2013. (in Chinese)
- [7] 许峰,马磊,高忠林. 高效液相色谱法和因子分析——紫外光度法测定荧光增白剂中两种成分[J]. 分析实验室,1997,16(5):10-13.
XU F, MA L, GAO ZH L. High performance liquid chromatography (HPLC) method and factor analysis, ultraviolet method determination of two components in fluorescent whitening agent [J]. *Journal of Analysis Laboratory*, 1997, 16(5):10-13. (in Chinese)
- [8] 刘利亚,张卫国,王娅芳. 液相色谱法测定饮料中胭脂红的质量控制[J]. 贵阳医学院学报,2010, 35(2):154-156.
LIU L Y, ZHANG W G, WANG Y F. Liquid chromatography determination of the quality control of carmine in beverage [J]. *Journal of Guiyang Medical College*, 2010, 35(2):154-156. (in Chinese)
- [9] 孙娅娜,朱蕾,崔芳. 高效液相色谱法测定糕点中的柠檬黄、日落黄和亮蓝[J]. 食品科技, 2011, 12: 310-312.
SUN Y N, ZHU L, CUI F. High performance liquid chromatography (HPLC) method for determination of lemon yellow, sunset yellow and light blue in pastry [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2011, 12:310-312. (in Chinese)
- [10] 伍林, 欧阳兆辉, 曹淑超, 等. 拉曼光谱技术的应用及研究进展[J]. 光散射学报, 2005, 17(2): 180-186.
WU L, OUYANG ZH H, CAO SH CH, *et al.*. The application of Raman spectroscopy technology and research progress [J]. *Journal of Light Scattering*, 2005, 17(2):180-186. (in Chinese)
- [11] 刘燕德, 靳昱昱, 王海阳. 基于拉曼光谱的三组分食用调和油快速定量检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9):2390-2396.
LIU Y D, JIN Y Y, WANG H Y. Rapid quantitative determination of components in ternary lended edible oil based on Raman spectroscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9):2390-2396. (in Chinese)
- [12] 黄亚伟, 张令, 王若兰, 等. 表面增强拉曼光谱在食品非法添加物检测中的应用进展[J]. 粮食与饲料工业, 2014, 9(7):24-27.
HUANG Y W, ZHANG L, WANG R L, *et al.*. Surface enhanced Raman spectrogram of the progress in the application of illegal additives in food detection[J]. *The Food and Feed Industry*, 2014, 9(7):24-27. (in Chinese)
- [13] LAI K Q, ZHANG Y Y, LI CH Y. Analyses of Illegal Food additives with surface enhanced Raman spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2013, 34(8):161-163.
- [14] LAARIEDH F, SOW I, FERCHICHI A. Large-ar-

ea, cost-effective Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS) substrates fabrication[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 145(3): 124-127.

- [15] LIANG F H, JIN D H, MA P Y. Rapid determination of rhodamine B in chili powder by surface-enhanced raman spectroscopy[J]. *Analytical Let-*

ters, 2015, 48(12): 1918-1929.

- [16] JAHN M, PATZE S, BOCKLITZ T, *et al.*. Towards SERS based applications in food analytics: Lipophilic sensor layers for the detection of Sudan III in food matrices[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, 860(20): 43-50.

作者简介:



张 溱(1990—),女,湖北荆门人,硕士研究生,主要从事精密测量仪器的研究。E-mail: 849779675@qq.com

通讯作者:



杨练根(1965—),男,湖南平江人,博士,教授,1986年、1991年于华中理工大学分别获得学士、硕士学位,2004年于华中科技大学获得博士学位,主要从事精密测量与仪器、传感器技术等方面的研究。E-mail: yanglg@mail.hbut.edu.cn