

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240214001

便携式光谱仪检测白酒中乙偶姻含量

刘建元, 李晓春, 张玲玲*

(太原理工大学生物医学工程学院, 生物医学精准检测与仪器研究所, 晋中 030600)

摘 要: **目的** 建立一种便携式光谱仪快速检测白酒中乙偶姻含量的分析方法。**方法** 首先利用 AS7341 光谱传感器搭建便携式光谱仪, 结合肌酸比色法, 构建一种检测白酒中乙偶姻含量的即时检测方法。接下来对肌酸比色法反应的温度和时间条件进行优化, 反应结果与酶标仪进行对比。最后通过检测 7 种白酒样本中乙偶姻的含量, 来评价本装置的准确性和实用性。**结果** 优化后肌酸比色法的最佳反应条件为 40°C 反应 30 min, 利用该装置检测到乙偶姻在 510 nm 波长下吸光度与其浓度呈正相关关系。乙偶姻的线性检测范围为 0.25~20.00 mg/L, 检出限为 0.049 mg/L。该装置检测结果与酶标仪检测结果具有很好的一致性, 相关系数为 0.9899。最后利用该装置对 7 种白酒样本中乙偶姻含量进行检测, 加标回收率为 96.90%~103.32%。**结论** 该装置具有准确、快速、便捷等特点, 适用于白酒中乙偶姻含量的即时检测。

关键词: 便携式光谱仪; 肌酸比色法; 乙偶姻; AS7341 光谱传感器; 白酒

Determination of acetoin in Baijiu by portable spectrometer

LIU Jian-Yuan, LI Xiao-Chun, ZHANG Ling-Ling*

(Institute of Biomedical Precision Testing and Instrumentation, College of Biomedical Engineering,
Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

ABSTRACT: Objective To establish a rapid and simple method for determining acetoin in Baijiu by a portable spectrometer. **Methods** A portable spectrometer was built with AS7341 spectral sensor and creatine colorimetry was used to establish a real-time method for the determination of acetoin in liquor. The temperature and time conditions of creatine colorimetric reaction were optimized, and the reaction results were compared with the enzyme-labeler. The accuracy and practicability of the device were evaluated by detecting the content of acetoin in 7 kinds of liquor samples. **Results** The optimal reaction conditions of creatine colorimetric assay were 40°C for 30 minutes. The device had a positive correlation between the concentration of acetoin and absorbance at 510 nm wavelength. The linear detection range was 0.25–20.00 mg/L, and the limit of detection was 0.049 mg/L. The detection results of the device were in good agreement with those of enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), with a correlation coefficient of 0.9899. The recovery rates of the device for 7 kinds of Baijiu samples were between 96.90% and 103.32%. **Conclusion** The device is accurate, rapid, and convenient, making it suitable for on-site

基金项目: 山西省留学基金委项目(2022-082)、山西省青年科学基金项目(202203021212214)、太原理工大学青年教师基金项目(2022QN120)

Fund: Supported by the Shanxi Scholarship Council of China (2022-082), the Shanxi Provincial Science Foundation for Young Scientists (202203021212214), and the Foundation of Young Faculties at Taiyuan University of Technology (2022QN120)

*通信作者: 张玲玲, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品安全与医疗诊断。E-mail: zhanglingling01@tyut.edu.cn

*Corresponding author: ZHANG Ling-Ling, Ph.D, Lecturer, Institute of Biomedical Precision Testing and Instrumentation, College of Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, No.209, University Street, Jinzhong 030600, China. E-mail: zhanglingling01@tyut.edu.cn

detection of acetoin in Baijiu.

KEY WORDS: portable spectrometer; creatine colorimetry assay; acetoin; AS7341 spectral sensor; Baijiu

0 引言

乙偶姻, 又名 3-羟基-2 丁酮, 是一种重要风味物质^[1-3], 主要用于奶香型、肉香型、草莓香型食用香料的制备^[4]。在中国的白酒产业, 尤其是酱香型^[5]、清香型白酒中, 乙偶姻被视为关键风味物质, 对提升白酒的品质起到不可或缺的作用^[6]。研究发现: 在芝麻风味白酒(如梅兰春)中, 乙偶姻能起到柔和其他香味使白酒风味更和谐的作用^[7]; 在清香型白酒(如草原王、汾酒)中, 乙偶姻可作为不同等级麸曲清香型白酒的质量鉴定标志物^[8-9]。因此, 建立一种有效的检测方法来检测白酒中乙偶姻的含量是非常必要的。

对于乙偶姻的检测方法, 目前主要包括高效液相色谱法^[10-14]和气相色谱-质谱方法^[15-17]。这两种方法虽然精确度和准确度较高, 但却存在仪器采购成本高, 且要求专业人员进行操作, 不适用于现场快速检测。针对现有技术存在的问题, 有研究提出了一种基于肌酸显色剂来测定血液中乙偶姻含量的比色方法^[18]: 在碱性条件下, 乙偶姻能与甲萘酚和肌酸制备的显色剂反应生成红色物质, 且在一定范围内乙偶姻的量和红色物质颜色的深浅程度成正比关系^[19-22], 检测 500~600 nm 范围内吸光度的变化就可测定样品中乙偶姻生成的量。这种利用肌酸比色检测乙偶姻的方法具有操作简单、检测快速、重复性好和检测成本低等现场检测的优势。目前, 任潇等^[23]利用肌酸比色法和紫外可见分光光度计测定发酵液中乙偶姻的含量, 满足高产乙偶姻菌株选育过程中定性定量检测的需要。王家旺等^[24]同样利用肌酸显色法和紫外可见分光光度计对 39 株 W 系列菌株以及在 6 种不同地点分离出的菌株进行筛选, 测定其乙偶姻产量。以上研究中, 均利用比色法实现多种样本中乙偶姻的定量检测, 但使用的都是传统的紫外分光光度计, 限制了其现场检测的应用潜力。酶标仪与紫外分光光度计的检测原理相似, 都是利用 Beer-Lambert 定律得到待测样品的吸光度值, 进而计算出待测物的浓度。酶标仪与紫外分光光度计相比有更高的检测通量, 但是仍存在体积较大、无法实现现场检测的局限。

便携、低成本的比色检测装置的研究, 为现场快速检测提供了有前途的解决方案^[25-27]。目前已经采取几种方法来开发低成本的便携式光谱仪^[28]: 使用发光二极管(light emitting diode, LED)与光电探测器结合^[29]; 利用窄带滤光片阵列与互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)图像传感器结合^[30]; 搭建智能手机摄像头辅助的光谱检测的光学系统^[31-32]。尽管这些便

携式光谱仪可以实现现场快速检测, 但受限于 LED 发射波长, 因此需要额外搭配滤波片进行光谱分析, 且用到的一些部件比较昂贵, 无法实现成本效益。

本研究选择具有光谱识别功能、微型化、成本效益的 AS7341 光谱传感器为探测器, 利用操作简单的肌酸比色法检测生成的吸收峰在 510 nm 处的红色产物, 构建一种便携式光谱仪快速检测白酒中乙偶姻含量, 以期为白酒行业中乙偶姻检测提供一种实用且方便的解决方案。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

梅兰春、红星二锅头、草原王、汾酒(黄盖汾酒 2022 年产、黄盖汾酒 2015 年产、汾酒巴拿马 10、汾酒巴拿马 20), 从淘宝官网购买。

乙偶姻(分析纯, 上海易恩化学技术有限公司); 肌酸、甲萘酚(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司); NaOH(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

10% NaOH: 精确称取 10 g NaOH, 用蒸馏水溶解, 然后定容至 100 mL;

0.5%肌酸: 精确称取 0.5 g 肌酸, 用蒸馏水溶解, 然后定容至 100 mL;

5%甲萘酚: 精确称取 0.05 g 甲萘酚, 用 10% NaOH 溶解, 然后定容至 1 mL(现用现配)。

1.2 仪器与设备

A8S 3D 打印机(深圳市极光尔沃科技股份有限公司); Multiskan FC 酶标仪[赛默飞世尔(上海)仪器有限公司]; GRX-9070MBE 电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司医疗设备厂); Aurora4000 光纤光谱仪(长春新产业光电技术有限公司); XPR404S/AC 电子天平(精度 0.1 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 便携式 DIY 光谱仪的搭建

便携式自搭建(do it yourself, DIY)光谱仪由 AS7341 光谱传感器(ams)、Arduino Uno 开发板、LED 白光光源、比色皿、W-3301 迷你温控器、GYGE0009-002 PTC 陶瓷发热片、3D 打印的外壳和内部固定结构组成。其中, AS7341^[25]是一种 10 通道光谱传感器, 尺寸为 3.1 mm×2 mm×1 mm, 8 个光学通道包括可见光谱(405~425、435~455、470~490、505~525、545~565、580~600、620~640、670~690 nm)、1 个近红外光(near infrared, NIR)通道和 1 个未加滤光片的通道。该传感器拥有 6 个独立的 16 位模拟数字转换器

(analog-to-digital converter, ADC)通道, 可以并行地处理数据。

另外, 采用 SOLIDWORKS 软件(2022 版)设计开发板、传感器和比色皿的固定装置以及整体装置的外壳; 利用 3D 打印机打印黑色 PLA(聚乳酸)完成上述各装置; 最后, 利用凹槽和螺纹结构将各个打印部件组装到一起, 确保整个装置的稳定性和可靠性。

1.3.2 DIY 光谱仪的检测原理

DIY 光谱仪的检测原理与分光光度计相同, 遵循 Beer-Lambert 定律, 即在一定的吸收光程内, 样品中待测物质的浓度与吸光度 A 成正比, 计算如公式(1):

$$A = \log \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

其中, I_0 是检测波长下空白溶液的透光强度, I 是检测波长下待测溶液的透光强度, 利用 Beer-Lambert 定律实现吸光度的转换。

1.3.3 乙偶姻比色反应条件优化

将质量浓度为 0、5.00、10.00、20.00、25.00、50.00、100.00 mg/L 的乙偶姻溶液, 在室温(25±2)、35、40℃条件下分别进行反应, 从反应刚开始每隔 30 min 测量一次吸光度值, 一直测 90 min, 将每个温度时间段下得到的吸光度数据进行反应温度对乙偶姻检测影响的分析。

将质量浓度为 0、5.00、10.00、20.00、25.00、50.00、100.00 mg/L 的乙偶姻溶液, 在 40℃条件下, 从 30 min 开始每隔 15 min 测量一次吸光度值, 一直测到 60 min, 将每个时间段下得到的吸光度数据进行反应时间对乙偶姻检测影响的分析。

1.3.4 乙偶姻标准曲线拟合

酶标仪检测乙偶姻标准曲线的绘制: 配制 0.1 mg/mL 的乙偶姻标准溶液; 准备 96 孔微孔板, 向各个孔中分别加入 20 μL 10% NaOH、0.5% 肌酸、5% 甲萘酚; 再向 96 微孔板中加入 120 μL 用不同体积乙偶姻标准液配制的不同浓度乙偶姻溶液; 40℃加热 30 min 后, 酶标仪测量波长 510 nm 条件下 96 微孔板的吸光度值, 每个浓度做 3 个平行实验, 最后取平均值绘制标准曲线。其中, 高浓度标准线绘制中, 乙偶姻质量浓度分别为 0、1.25、2.50、5.00、10.00、15.00、20.00、25.00、50.00、75.00、100.00 mg/L; 低浓度标准线绘制中, 乙偶姻质量浓度分别为 0、0.25、0.50、0.75、1.00、1.25、1.50、2.00、2.50、5.00 mg/L。

DIY 光谱仪检测乙偶姻标准曲线的绘制: 配制 0.1 mg/mL 的乙偶姻标准溶液; 向离心管中分别加入 10% NaOH、0.5% 肌酸、5% 甲萘酚各 60 μL, 再向离心管中加入 360 μL 用不同体积乙偶姻标准液配制的不同浓度乙偶姻溶液; 40℃加热 30 min 后, 取 400 μL 溶液至比色皿中; 利用 DIY 光谱仪测量波长 510 nm 条件下的透光强度; 最后利用朗伯-比尔定律计算吸光度值, 每个浓度做 3 个平行实验, 取平均值绘制标准曲线。

1.3.5 白酒中乙偶姻含量检测

将白酒样品用超纯水按照酒:水(1:4, $V:V$)稀释后得到待测溶液, 溶液分成两份, 一份不做处理, 一份加标 2.5 mg/L 的乙偶姻, 将得到的溶液分别用 DIY 光谱仪和酶标仪进行检测。

1.4 数据处理

检测实验平行重复 3 次, 数据统计分析采用 Origin 2022 软件进行分析和图像处理。

2 结果与分析

2.1 DIY 光谱仪

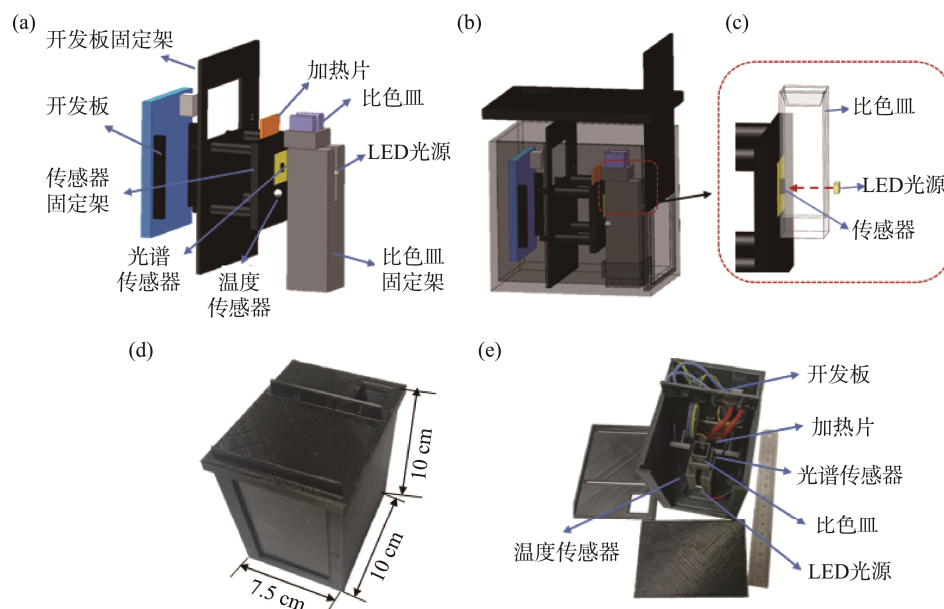
如图 1(a)所示, DIY 光谱仪以 AS7341 光谱传感器为核心, 搭配 Arduino Uno 开发板, 通过编程控制 LED 白光光源发光, LED 发出的光被待测溶液吸收一部分后到达 AS7341 传感器, 被传感器检测到不同波长光的强度, 实现实验中对光谱数据的采集和处理[图 1(c)]。其中, 为了提供稳定的光源, 设备上装配有固定的 LED 白光光源。所有组件都“集成”在一个 3D 打印框架中[图 1(b)], 最终尺寸为 7.5 cm×10 cm×10 cm[图 1(d)]。此 DIY 光谱仪内部结构紧凑[图 1(e)], 实现 DIY 光谱仪的便携化。

2.2 光路优化和装置性能分析

光源选择对装置的稳定性和灵敏度至关重要。在实验中, 选择了 4 种不同光强的光源, 用光纤光谱仪测量了光源的光谱图[图 2(a)], 发现光强过高时光谱传感器检测到的透过光强达到饱和或即将饱和, 无法进行检测。因此选择了光强最小的光源(0.2 W 白光 LED 光源), 从光谱图也可看出光源稳定, 基本无波动[图 2(a)插图]。图 2(b)为 AS7341 光谱传感器的 505~525 nm 通道检测到的开机 1 h 内透过光强随时间的变化情况, 从图中可看出从开机开始, 光源一直保持稳定, 波动很小, 这表明该光源适合用于装置中, 并且能够提供稳定的光谱信号。另外, 对装置内的控温模块进行了性能分析, 如图 2(c), 开机 8 min 后装置内环境温度逐渐趋于 40℃恒定, 并且最终温度稳定在 40℃, 误差为±0.5℃。这说明温控模块能够有效地控制装置内的温度, 并且具有很好的稳定性和可行性。综上所述, 通过对装置的光源和控温模块进行优化和性能分析, 可以提高装置的稳定性和灵敏度, 从而获得更准确和可靠的检测结果。

2.3 比色反应条件优化

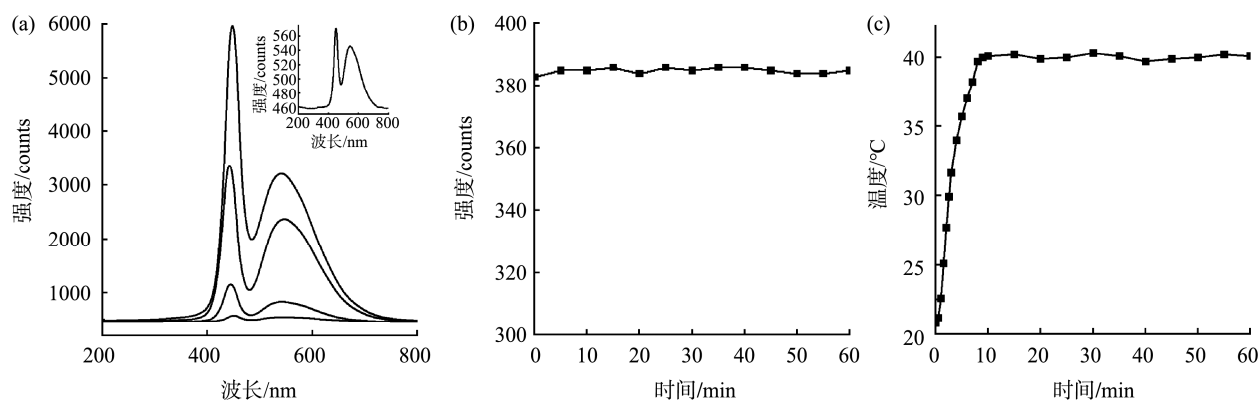
对反应的温度和时间进行优化, 根据文献中的反应条件^[32], 选择了室温(25±2)、35、40℃进行实验。图 3(a)、(b)和(c)分别为反应 30、60 和 90 min 时吸光度随乙偶姻浓度的变化情况, 可以看出, 在相同的反应时间下, 温度越高, 吸光度越大, 说明温度高反应速度快; 40℃时



注: (a)装置内部结构图; (b)整体结构图; (c)局部放大图; (d)实物图; (e)俯视图。

图1 乙偶姻比色检测装置设计图

Fig.1 Schematic diagrams of acetoin colorimetric detection device



注: (a)LED光源选择; (b)装置稳定性结果; (c)温控稳定性结果。

图2 装置性能优化结果

Fig.2 Optimization results of device performance

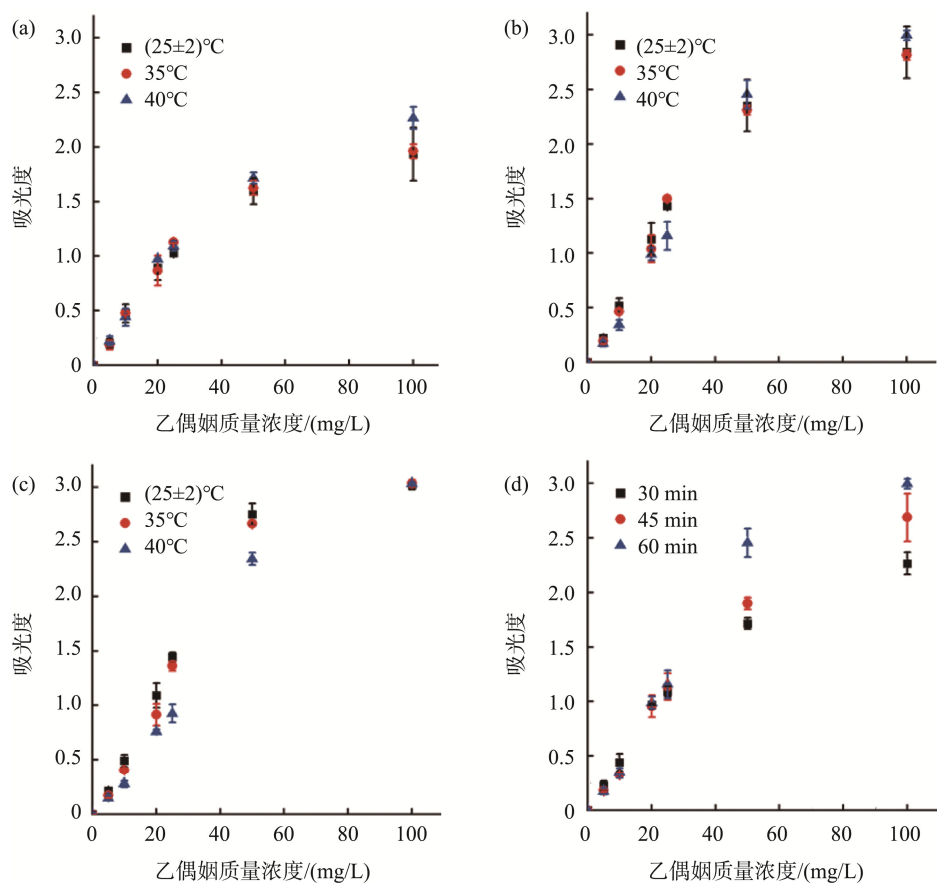
反应速度最快,在这个温度下,分子动能更高,促进了肌酸与乙偶姻的反应,加快反应速率,有利于缩短反应时间。从图 3(d)中可以看出:在 40℃时,反应 30 min 后质量浓度小于 20.00 mg/L 的乙偶姻吸光度基本饱和;质量浓度大于 20.00 mg/L 的乙偶姻吸光度随着反应时间的延长逐渐增加;但是质量浓度小于 20.00 mg/L 的乙偶姻在反应较长时间(60 min)时的吸光度会发生下降,这可能是反应时间过长使甲萘酚变质影响实验结果。综合考虑,最终选择 40℃反应 30 min 作为反应条件,将文献报道中反应 60 min 缩短了一半^[23]。

2.4 乙偶姻标准品标准曲线拟合

在确定最佳实验条件的基础上,建立乙偶姻的检测标准

线。首先进行宽检测范围实验,图 4(a)为不同浓度乙偶姻溶液反应后的显色情况,图 4(b)和(c)分别是酶标仪和 DIY 光谱仪检测到的吸光度随乙偶姻浓度变化情况图。由图 4(b)和(c)可知:乙偶姻的质量浓度和吸光度之间的关系并非一直是线性的,在乙偶姻质量浓度小于 20.00 mg/L 时线性关系良好;在乙偶姻质量浓度大于 20.00 mg/L 时 DIY 光谱仪检测到的吸光度开始趋于饱和,乙偶姻质量浓度为 50.00 mg/L 时吸光度达到饱和。通过比较酶标仪和 DIY 光谱仪的乙偶姻线性范围内的相关性[图 4(d)],发现相关性良好($r^2=0.9991$)。

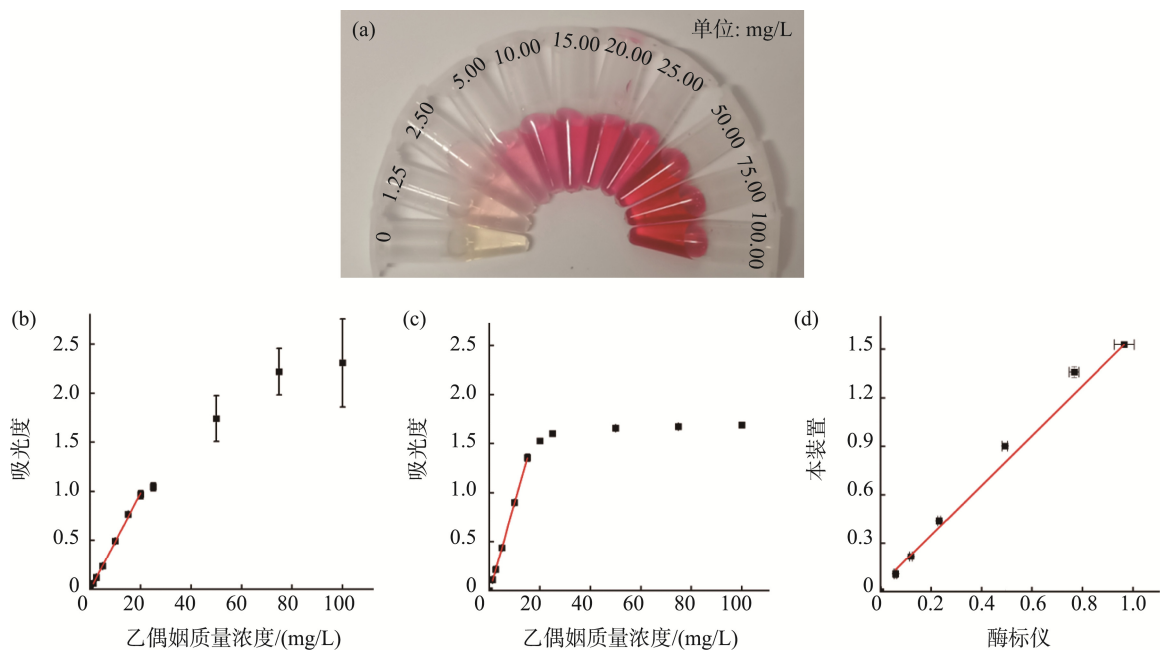
考虑到有的白酒中乙偶姻浓度较低,为了使检测结果更加准确,进行了低浓度检测范围的实验,低浓度乙偶姻溶液反应后的显色情况如图 5(a)。从图 5(b)和(c)中可以



注: (a)室温(25±2)、35、40℃反应30 min; (b)室温(25±2)、35、40℃反应60 min; (c)室温(25±2)、35、40℃反应90 min; (d) 40℃反应不同时间。

图3 反应条件优化

Fig.3 Optimization of reaction conditions



注: (a) 40℃下反应30 min后不同浓度乙偶姻的显色情况; (b)酶标仪检测结果; (c)本装置检测结果; (d)相关性分析; 图5同。

图4 高浓度乙偶姻检测标准线

Fig.4 Standard curves of high concentration acetoin

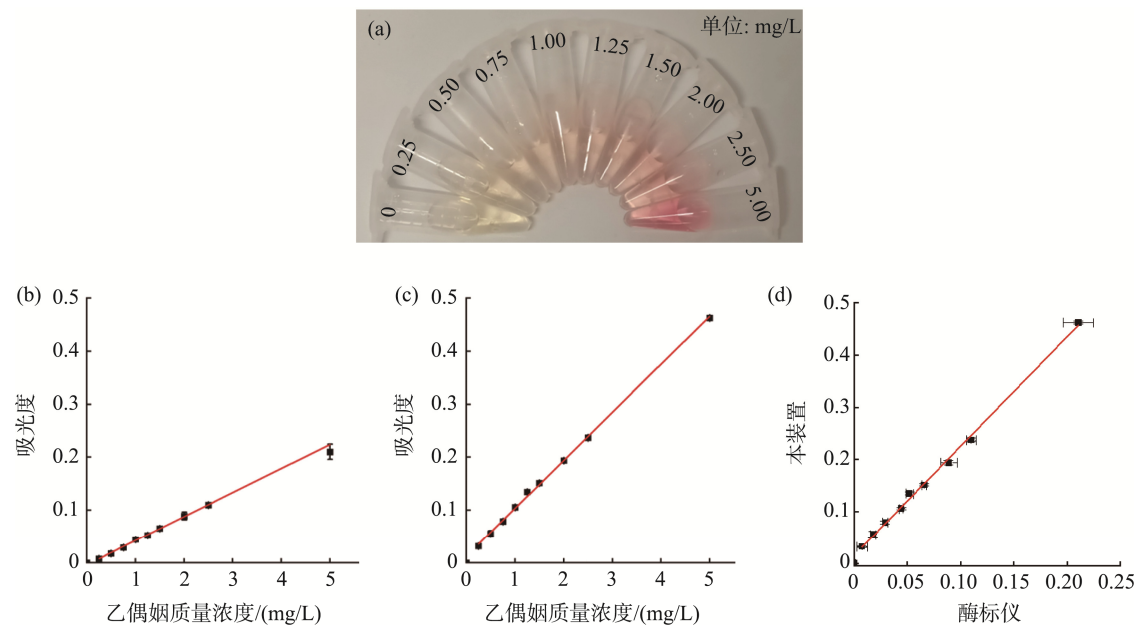


图5 低浓度乙偶姻检测标准线
Fig.5 Standard curves of low concentration acetoin

看出,乙偶姻质量浓度在0.25~5.00 mg/L时线性关系良好。其中,酶标仪的线性拟合方程为 $Y=0.0456X-0.0033$,检出限为0.074 mg/L (3σ 原则);DIY光谱仪的线性拟合方程为 $Y=0.0907X+0.0125$,检出限为0.049 mg/L。图5(d)为酶标仪和DIY光谱的相关性结果,结果表明这两种方法具有较好的相关性($r^2=0.9899$)。综上所述,该DIY光谱仪检测乙偶姻在0.25~20.00 mg/L具有良好的线性关系,与酶标仪有相当的检测范围和检出限。

2.5 白酒中乙偶姻含量测定

为了验证DIY光谱仪在实际样本检测中的准确性和实用性,选择了7种白酒样本进行乙偶姻检测,并将结果与酶标仪进行比较。为了减少白酒样本表面张力低造成易粘壁对实验的影响,将白酒样本用超纯水1:4 (V:V)稀释后

进行实验分析。表1中DIY光谱仪的检测结果在95.25%的置信水平上与酶标仪检测获得的结果一致。通过加标回收实验,对本方法测定白酒样本中乙偶姻的准确性进行验证。向各种白酒样本中加标2.50 mg/L的乙偶姻,结果表明,使用DIY光谱仪检测的回收率在96.90%~103.32%之间,相对标准偏差在1.47%~5.48%之间。表明该方法可以有效地定量白酒样品中的乙偶姻含量,而不会受到基质中其他组分的显著干扰。

2.6 DIY乙偶姻检测光谱仪性能评测

表2为DIY光谱仪检测乙偶姻的方法和文献中报道的一些利用色谱法、电化学法和比色法检测乙偶姻的检出限和检测范围比较。相较于其他方法,本方法具有更低的检出限,同时操作更简单、快速,适用于白酒中乙偶姻的快速检测。

表 1 不同种类白酒中乙偶姻含量的检测结果(乙偶姻加标质量浓度为 2.50 mg/L)
Table 1 Detection results of acetoin content in different types of Baijiu (the acetoin concentration of the standard addition was 2.50 mg/L)

样本	白酒种类	酶标仪		本装置		一致性/%
		检测结果/(mg/L)	加标回收率/%	检测结果/(mg/L)	加标回收率/%	
1	梅兰春	12.14±0.22	97.80±5.40	11.86±0.23	98.84±4.06	97.69
2	草原王	20.65±0.35	104.24±3.76	19.67±0.13	103.32±3.28	95.25
3	红星二锅头	18.98±0.32	97.08±4.84	19.43±0.07	100.36±5.48	97.68
4	汾酒(2022 年)	4.39±0.04	96.64±1.32	4.35±0.04	99.39±3.02	99.09
5	汾酒(2015 年)	7.72±0.17	95.62±8.93	7.71±0.04	98.66±1.94	99.87
6	汾酒(10)	1.00±0.03	104.24±0.67	0.95±0.12	98.78±1.47	98.78
7	汾酒(20)	3.52±0.34	102.63±2.68	3.46±0.09	96.90±5.31	98.30

表 2 本方法和其他乙偶姻检测的方法的比较

Table 2 Comparison between this method and other acetoin detection methods

检测方法	线性范围	检出限	参考文献
电化学	(10~90)×10 ⁻⁶ mol/L	-	[33]
高效液相色谱法	0.5~2 mg/mL	6.78 μg/mL	[14]
肌酸比色法	0~12.5 mg/L	-	[23]
气相色谱-质谱法	1~100 μg/mL	0.5 mg/kg	[16]
肌酸比色法	0.25~20.00 mg/L	0.049 mg/L	本方法

注: -表示文献中没有提及检出限。

3 结 论

本研究开发了一种新型的便携式光谱仪, 以具有高灵敏度和准确性的 AS7341 光谱传感器和 Arduino Uno 开发板为核心组件, 利用肌酸比色法实现白酒样品中乙偶姻的定量检测, 线性检测范围为 0.25~20.00 mg/L, 检出限为 0.049 mg/L。并且对 7 种白酒样本中乙偶姻含量进行了定量检测和加标实验, 加标回收率在 96.90%~103.32%之间。本装置与酶标仪进行比较检测结果有较好的一致性, 且本装置具有操作简便、成本低的优点, 未来可应用于其他体系的现场快速检测, 有很大发展空间。在后续的改进中, 可以提高装置的检测通量和增加自动进样的功能, 从而提高装置的检测效率和易操作性, 使其在现场检测领域有更好的应用价值。

参考文献

[1] XIAO Z, LU JR. Generation of acetoin and its derivatives in foods [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(28): 6487–6497.

[2] 陈元元, 吴岩, 刘晓光. 乙偶姻生物合成代谢调控及其应用[J]. 生物学杂志, 2014, (5): 76–80.

CHEN YY, WU Y, LIU XG. The regulation and application of acetoin biosynthesis [J]. J Biol, 2014, (5): 76–80.

[3] 杨铭, 郝晓娜, 罗天淇, 等. 功能基因分析辅助筛选产双乙酰和乙偶姻乳酸菌[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 117–123.

YANG M, HAO XN, LUO TQ, *et al.* Analysis of functional genes related to production of diacetyl and acetoin by lactic acid bacteria [J]. Food Sci, 2020, 41(10): 117–123.

[4] TIAN J, YU J, CHEN X, *et al.* Determination and quantitative analysis of acetoin in beer with headspace sampling-gas chromatography [J]. Food Chem, 2009, 112(4): 1079–1083.

[5] JABLONSKI M, MÜNSTERMANN F, NORK J, *et al.* Capacitive field-effect biosensor applied for the detection of acetoin in alcoholic beverages and fermentation broths [J]. Phys Status Solidi A, 2021, 218(13): 2000765.

[6] 韩旭, 巩子路, 刘曼曼, 等. 气相色谱法测定白酒中乙偶姻[J]. 酿酒, 2023, 50(3): 94–96.

HAN X, GONG ZL, LIU MM, *et al.* Determination of acetoin in Baijiu by gas chromatography [J]. Liquor Mak, 2023, 50(3): 94–96.

[7] SUN J, LI Q, LUO S, *et al.* Characterization of key aroma compounds in

Meilanchun sesame flavor style Baijiu by application of aroma extract dilution analysis, quantitative measurements, aroma recombination, and omission/addition experiments [J]. Rsc Adv, 2018, 8(42): 23757–23767.

[8] WANG J, MING Y, LI Y, *et al.* Characterization and comparative study of the key odorants in Caoyuanwang mild-flavor style Baijiu using gas chromatography-olfactometry and sensory approaches [J]. Food Chem, 2021, 347: 129028.

[9] WANG L, WU L, XIANG D, *et al.* Characterization of key aroma compounds in aged Qingxiangxing Baijiu by comparative aroma extract dilution analysis, quantitative measurements, aroma recombination, and omission studies [J]. Food Chem, 2023, 419: 136027.

[10] 毛林静, 孟武, 王莹, 等. 高效液相色谱法检测枯草芽孢杆菌发酵液中乙偶姻和 2,3-丁二醇含量[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 253–257.

MAO LJ, MENG W, WANG Y, *et al.* Detection of acetoin and 2,3-butanediol in fermentation broth of *Bacillus subtilis* by high performance liquid chromatography [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(17): 253–257.

[11] 杨宇霞, 杨林娥, 张磊, 等. 山西老陈醋中乙偶姻和川芎嗪的高效液相色谱法测定[J]. 中国酿造, 2014, 33(1): 123–126.

YANG YX, YANG LE, ZHANG L, *et al.* Determination of acetoin and tetramethylpyrazine in Shanxi aged vinegar by HPLC [J]. China Brew, 2014, 33(1): 123–126.

[12] 余书奇, 晏日安, 陈文锐, 等. 2,4-二硝基苯肼衍生/高效液相色谱法测定葡萄酒中总乙偶姻的含量[J]. 分析测试学报, 2013, 32(2): 223–227.

YU SQ, YAN RAN, CHEN WR, *et al.* Determination of total acetoin in wine after derivatization with 2,4-dinitrophenylhydrazine by high performance liquid chromatography [J]. J Instrum Anal, 2013, 32(2): 223–227.

[13] MOSTAFA R, MEHRORANG G, ALI D. Optimisation of ultrasound-assisted reverse micelles dispersive liquid-liquid micro-extraction by Box–Behnken design for determination of acetoin in butter followed by high performance liquid chromatography [J]. Food Chem, 2014, 161: 120–126.

[14] 刘学彬, 古明亮, 汪平, 等. 高效液相色谱法快速检测麸曲中乙偶姻[J]. 酿酒科技, 2018, (7): 112–115.

LIU XB, GU ML, WANG P, *et al.* Rapid detection of acetoin in Fuqu by HPLC [J]. Liquor-Making Sci Technol, 2018, (7): 112–115.

[15] 蒲璐璐, 戴怡凤, 李豆南, 等. 电子鼻和气质联用技术分析不同酒龄酱香型白酒挥发性成分[J]. 中国酿造, 2021, 40(7): 171–175.

PU LL, DAI YF, LI DN, *et al.* Analysis of volatile components in sauce-flavor Baijiu with different ages by electronic nose and GC-MS [J]. China Brew, 2021, 40(7): 171–175.

[16] 潘文建, 李剑政, 徐潇, 等. 一种同时测定电子烟油中 2,3-丁二酮、2,3-

- 戊二酮、乙偶姻的方法[J]. 广东化工, 2020, 47(24): 123–124, 129.
- PAN WJ, LI JZ, XU X, *et al.* A method for simultaneous determination of 2, 3-butanedione, 2,3-pentadione, and acetoin in E-liquids [J]. Guangdong Chem Ind, 2020, 47(24): 123–124, 129.
- [17] 杨海玉, 李剑政, 徐潇. 丁二酮、乙偶姻在电子烟中的稳定性研究[J]. 当代化工研究, 2021, (14): 32–33.
- YANG HY, LI JZ, XU X. Research on stability of butanedione and acetoin in electronic cigarettes [J]. Mod Chem Res, 2021, (14): 32–33.
- [18] WESTERFELD WW. A colorimetric determination of blood acetoin [J]. J Biol Chem, 1945, 161(2): 495–502.
- [19] 范恩帝, 黄魏, 谢丹, 等. 酱香大曲中高产四甲基吡嗪微生物的选育及应用研究[J]. 酿酒科技, 2022, (11): 45–50, 71.
- FAN END, HUANG W, XIE D, *et al.* Breeding and application of microorganisms with high yield of tetramethylpyrazine in Jiangxiang Daqu [J]. Liquor-Making Sci Technol, 2022, (11): 45–50, 71.
- [20] 赵洪源, 俞建民, 邵晓庆, 等. 凉州熏醋酿造中高产乙偶姻醋酸菌菌株筛选及其发酵条件优化[J]. 食品科学, 2015, 36(15): 98–104.
- ZHAO HY, YUN JM, SHAO XQ, *et al.* Isolation of acetic acid bacterium with high acetoin-producing ability from aerobic solid-fermentation culture of Liangzhou fumigated vinegar and optimization of its fermentation conditions [J]. Food Sci, 2015, 36(15): 98–104.
- [21] 郭文逸, 潘学玮, 尤甲甲, 等. 紫外诱变筛选低自溶高产 2,3-丁二醇的地衣芽孢杆菌突变子[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(6): 41–46.
- GUO WY, PAN XW, YOU JJ, *et al.* Screening of low autolysaccharide and high yield of 2,3-butanediol by ultraviolet mutagenesis [J]. Food Ferment Ind, 2015, 41(6): 41–46.
- [22] 刘卓非, 陆震鸣, 张晓娟, 等. 陈酿温度和乙偶姻含量对镇江香醋川芎嗪含量变化的影响[J]. 中国调味品, 2023, 48(1): 69–74, 79.
- LIU ZF, LU ZM, ZHANG XJ, *et al.* Effects of aging temperature and acetoin content on the content of ligustrazine in Zhenjiang aromatic vinegar [J]. China Cond, 2023, 48(1): 69–74, 79.
- [23] 任潇, 纪晓俊, 孙世闻, 等. 肌酸比色法快速测定发酵液中 3-羟基丁酮的含量[J]. 食品科技, 2009, 34(8): 260–263.
- REN X, JI XJ, SUN SW, *et al.* Creatinine colorimetric assay of acetoin in fermentation broth [J]. Food Sci Technol, 2009, 34(8): 260–263.
- [24] 王家旺, 邓利廷, 孙健, 等. 产 2,3-丁二醇的酿酒酵母菌的筛选及其鉴定[J]. 中国酿造, 2020, 39(1): 21–25.
- WANG JW, DENG LT, SUN J, *et al.* Screening and identification of 2, 3-butanediol-producing *saccharomyces cerevisiae* [J]. China Brew, 2020, 39(1): 21–25.
- [25] CADEADO ANS, SILVA SG. Development of a portable optical device with a multi-channel spectrometer sensor for quantification of glycerol in wine: A maker approach for on-site analysis [J]. Anal Method, 2023, 15(35): 4477–4484.
- [26] ROALES J, MOSCOSO FG, VARGAS AP, *et al.* Colorimetric gas detection using molecular devices and an RGB sensor [J]. Chemosensors, 2023, 11(2): 92.
- [27] ZHU L, YANG S, XIAO Z, *et al.* A portable raspberry Pi-based spectrometer for on-site spectral testing [J]. Anal Methods, 2023, 15(25): 3092–3100.
- [28] 董一童, 许润琦, 黄越, 等. 便携拉曼光谱快速无损定量检测酱料中山梨酸钾[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 68–75.
- DONG YT, XU RQ, HUANG Y, *et al.* Rapid nondestructive detection of potassium sorbate in sauces by portable Raman spectroscopy [J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(4): 68–75.
- [29] BEHERA AR, KUMAR A, SURESH H, *et al.* An ultra-portable vis-NIR spectrometer with an integrated light source for chemometric applications [J]. J Electrochem Soc, 2020, 167(16): 167515.
- [30] PARK Y, KIM UJ, LEE S, *et al.* On-chip Raman spectrometers using narrow band filter array combined with CMOS image sensors [J]. Sensor Actuators B-Chem, 2023, 381: 133442.
- [31] TIAN Y, SUN Y, WANG Y, *et al.* Development of a handheld system for liquor authenticity detection based on laser spectroscopy technique [J]. J Spectrosc, 2022, 2022: 4404749.
- [32] KONG L, GAN Y, LIANG T, *et al.* A novel smartphone-based CD-spectrometer for high sensitive and cost-effective colorimetric detection of ascorbic acid [J]. Anal Chim Acta, 2020, 1093: 150–159.
- [33] MOLINNUS D, MUSCHALLIK L, GONZALEZ LO, *et al.* Development and characterization of a field-effect biosensor for the detection of acetoin [J]. Biosens Bioelectron, 2018, 115: 1–6.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



刘建元, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测。
E-mail: 18834197835@163.com



张玲玲, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品安全与医疗诊断。
E-mail: zhanglingling01@tyut.edu.cn