

基于线性混合的光度法定量检测芝麻油掺杂

许洪¹, 杨基春^{2*}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²中国医学科学院生物医学工程研究所, 天津 300192

摘要 基于芝麻油和掺入油线性混合的原理,提出了一种利用芝麻油、掺入油和其掺混油的吸光度直接计算掺杂比的定量检测方法。利用误差分析理论对掺杂比计算公式进行分析,可知使误差最小的最佳检测波长区位于芝麻油和掺入油的吸光度差值最大的区域。利用 SpectraMax Plus 384 型光吸收酶标仪的分光光度计功能和构建的可见近红外光谱采集系统,对两种光程的芝麻油分别掺杂花生油和大豆油的样本进行了检测。对掺杂体积比为 10% 以上的芝麻花生掺混油和芝麻大豆掺混油,分光光度计检测的掺杂比计算值和实际值的相关系数分别为 0.9992 和 0.9997,标准误差分别为 0.0084 和 0.0054;可见近红外光谱采集系统检测的两种掺杂比的相关系数分别为 0.9997 和 0.9994,标准误差分别为 0.0047 和 0.0069。实验结果表明,利用线性光度法计算掺杂芝麻油的掺杂比例是准确可行的。

关键词 测量; 线性混合; 光度法; 芝麻油掺杂; 吸收光谱; 定量分析

中图分类号 O657.3; TS227 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.031201

Quantitative Determination of Adulteration in Sesame Oil Based on Linear Photometry

Xu Hong¹, Yang Jichun²

¹School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Institute of Biomedical Engineering, Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300192, China

Abstract Based on the linear mixing principle of sesame oil and adulterated oil, a photometric method for direct determination of the doping ratio is proposed by using the absorbance of sesame oil, adulterated oil and their mixed oil. The error analysis method is used to analyze the formula of doping ratio. It can be seen that the optimal detection wavelength region is the region where the absorbance difference between sesame oil and adulterated oil is the biggest. The spectrophotometer functions of the SpectraMax Plus 384 microplate reader and the assembled visible-near infrared spectral acquisition system are used to test the sesame oil doped with peanut oil and soybean oil. For the sesame oil with the doping volume ratio of peanut oil and soybean oil larger than 10%, the testing results of the spectrophotometer show that the correlation coefficients between the calculated values and the actual values of the doping ratio are 0.9992 and 0.9997, and the standard errors are 0.0084 and 0.0054, respectively. Meanwhile, the testing results of the visible-near infrared spectral acquisition system show that the correlation coefficients are 0.9997 and 0.9994, and the standard errors are 0.0047 and 0.0069, respectively. The experimental results indicate that the proposed linear photometric method for quantitative determination of doping components in sesame oil is feasible and accurate.

Key words measurement; linear mixing; photometry; sesame oil adulteration; absorption spectrum; quantitative analysis

OCIS codes 120.3930; 300.1030; 300.6170

收稿日期: 2016-10-31; **收到修改稿日期:** 2016-11-07

基金项目: 国家 863 计划(2015AA021105)

作者简介: 许洪(1975—),男,博士后,主要从事光谱分析技术和仪器方面的研究。E-mail: xuhongpost@163.com

* **通信联系人.** E-mail: yjc@tju.edu.cn

1 引言

芝麻油富含亚油酸、维生素 E 等成分,可改善血液循环,延缓人体衰老,是百姓餐桌上必不可少的调味品。由于芝麻油产量低、需求大,所以价格远高于花生油、大豆油、玉米油等食用油。市售芝麻油经常会被掺入其他低价油,如何快捷准确地定量检测芝麻油中掺杂油的组分含量成为食用油脂检测领域的一个重要问题。

目前,对芝麻油掺杂的定量检测方法主要有化学显色法、气相色谱法、紫外分光光度法和光谱结合化学计量学法等。化学显色法^[1-2]利用化学试剂将芝麻油中特有的芝麻酚显色,根据色度来检测芝麻油含量,该方法预处理繁琐,检测精度不高。气相色谱法^[3-5]通过检测芝麻油、掺入油和掺混油中的脂肪酸含量来确定掺入油的比例,包括计算公式法、标准曲线法和化学计量学法,需使用色谱仪器对复杂的脂肪酸进行分离,且需在专业实验室由专业人员操作,耗时较长。紫外分光光度法^[6-8]利用芝麻油在紫外区有特征吸收峰的特点,检测一系列不同配比的标定油样在特征波长处的吸光度,用最小二乘法定标量化曲线,过程复杂。近年来,光谱结合化学计量学技术^[9-15]在油品掺杂检测领域受到了广泛关注,该方法主要利用近红外光谱或拉曼光谱,不需要对检测油样进行化学试剂预处理,检测过程相对简单,结果较精确,但仍需标定大量油样,并且要对光谱数据进行一阶、二阶导数变换或多元散射校正等预处理,用主成分回归(PCR)、偏最小二乘(PLS)或反向传播(BP)神经网络等多元统计学方法建立定标模型。上述方法都不能满足现场的快速检测要求,有必要研究更方便易用的检测方法和仪器。

本文根据食用油的线性混合原理,利用朗伯-比尔定律推导出一种计算食用掺混油中掺杂体积比的光度法计算模型,并分别利用自行搭建的可见近红外光谱采集系统和分光光度计,通过检测分别掺杂花生油和大豆油的芝麻油样本对模型进行了验证。结果表明,该方法可实现芝麻油掺杂的快速定量检测。

2 实验原理

2.1 掺杂比的光度法计算原理

根据朗伯-比尔定律,透明液体的吸光度可表示为

$$A(\lambda) = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} = \ln I_0(\lambda) - \ln I(\lambda), \quad (1)$$

式中 λ 为照射光波长, $I_0(\lambda)$ 为入射光强度, $I(\lambda)$ 为出射光强度。

各种食用油的组分结构相近,性能稳定,其混合是一种线性混合,利用该原理可检测掺混油的掺杂比例,它在气相色谱法、分光光度法等检测方法中都有应用。基于线性混合原理,掺混油的吸光度可表示为

$$A_m(\lambda) = A_1(\lambda) \cdot K + A_2(\lambda) \cdot (1 - K), \quad (2)$$

式中 $A_1(\lambda)$ 为掺入油的吸光度, $A_2(\lambda)$ 为被掺入油(芝麻油)的吸光度, $A_m(\lambda)$ 为掺混油的吸光度, K 为掺入油所占比例, $A_1(\lambda)$ 、 $A_2(\lambda)$ 和 $A_m(\lambda)$ 都是同等光程油样的吸光度。

由(2)式计算出掺入油所占比例 K 的表达式,为

$$K = \frac{A_m(\lambda) - A_2(\lambda)}{A_1(\lambda) - A_2(\lambda)}, \quad (3)$$

式中 $A_1(\lambda)$ 、 $A_2(\lambda)$ 和 $A_m(\lambda)$ 可以由光谱仪器分别测得三者的入射光强和出射光强后按(1)式求出,或者由分光光度计直接测出。

由(3)式可知,通过检测同样光程的芝麻油、掺入油和它们的掺混油的吸光度,可方便地计算掺杂比例。该方法不同于紫外分光光度法,无需配制大量不同比例的油样来标定量化曲线。

2.2 特征波长选择

光电转换器件的暗电流噪声以及光源不稳定等因素会对实测吸光度值产生干扰,从而使掺杂比 K 的计算结果产生误差,因此需要选择受噪声影响小的波长作为检测波长。依据误差理论,从(3)式推出掺杂比 K 的误差公式为

$$\Delta K^2 = \left(\frac{\partial K}{\partial A_1} \right)^2 \cdot \Delta A_1^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial A_2} \right)^2 \cdot \Delta A_2^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial A_m} \right)^2 \cdot \Delta A_m^2. \quad (4)$$

根据(3)式计算各微分项,将其代入(4)式,可得

$$\Delta K^2 = \left[\frac{K}{A_1(\lambda) - A_2(\lambda)} \right]^2 \cdot \Delta A_1^2 + \left[\frac{1-K}{A_1(\lambda) - A_2(\lambda)} \right]^2 \cdot \Delta A_2^2 + \left[\frac{1}{A_1(\lambda) - A_2(\lambda)} \right]^2 \cdot \Delta A_m^2. \quad (5)$$

由(5)式可知,当分母项 $A_1(\lambda) - A_2(\lambda)$ 取值越大,误差 ΔK 越小,表明选择掺入油和被掺入油的吸光度差值最大的照明波长作为检测波长,可使掺杂比计算误差最小。

3 实验材料与方法

3.1 样品来源与制备

所用油样均为市售品牌食用油,共配制 2 类共 18 种掺混油样本,分别为芝麻油掺花生油和芝麻油掺大豆油。油样掺杂体积比分别为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80% 和 90%。将 18 种掺混油、纯芝麻油、纯花生油和纯大豆油分别装入平底透明实验皿(油样高度 25 mm)供可见近红外光谱采集系统检测。另外,将油样再分别装入标准 10 mm 光程石英皿,供分光光度计检测。

3.2 实验方案与仪器

设计两种实验方案对提出的检测原理进行验证:1)利用分光光度计直接检测油样的吸光度值;2)利用自行构建的可见近红外光谱采集系统进行检测。

3.2.1 分光光度计检测

SpectraMax Plus 384 型光吸收酶标仪(Molecular Devices 公司,美国)具有标准分光光度计功能,可以用来检测 10 mm 光程的石英皿中液体的吸光度,工作方式 of 光栅扫描式,连续波长为 190~1000 nm,以 1 nm 的步长递增。

3.2.2 可见近红外光谱检测

如图 1 所示,搭建的光谱采集系统包括光源、孔径光阑、准直透镜、可变光阑、平底透明实验皿(PMMA 材料)和光谱采集装置。照明光源为 20 W 卤钨灯(光谱范围为 380~820 nm),使用 1 mm 的孔径光阑和准直透镜将光准直为检测用的平行光;可变光阑用于精确调节光束口径;在光谱采集装置中使用 USB4000 光纤光谱仪(海洋光学公司,美国),工作光谱范围为 200~1100 nm,光谱分辨率为 0.3 nm,采集时间为 100 ms,平滑次数为 10 次。

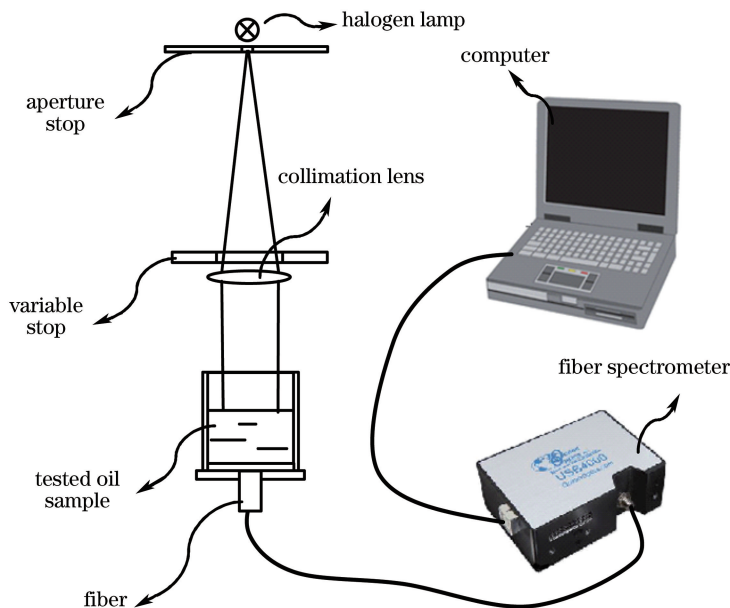


图 1 可见近红外光谱采集系统

Fig. 1 Visible-near infrared spectral acquisition system

4 结果与讨论

4.1 分光光度计检测结果

芝麻油、花生油和大豆油样的吸光度值如图 2 所示。由图 2(a)可知,芝麻油在紫外波长区的吸光度值远高于花生油和大豆油的吸光度值,在 383 nm 之前的紫外区已经接近甚至超过酶标仪的检测范围,不能作为有效检测区,故选择 383 nm 右侧的波长区作为线性有效检测区。根据图 2(b)和图 2(c)可知,芝麻油和花生油的吸光度差的峰值以及芝麻油和大豆油的吸光度差的峰值都在 383 nm 处。

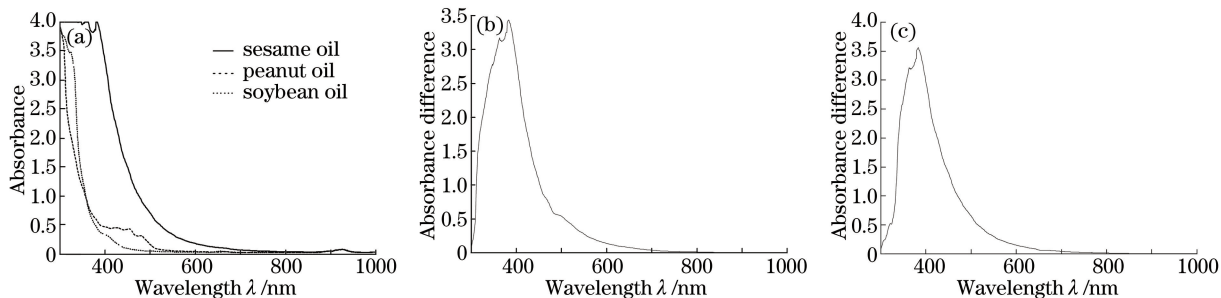


图 2 (a)芝麻油、花生油和大豆油的吸光度;(b)芝麻油和花生油的吸光度差;(c)芝麻油和大豆油的吸光度差

Fig. 2 (a) Absorbance of sesame oil, peanut oil and soybean oil; (b) absorbance difference between sesame oil and peanut oil; (c) absorbance difference between sesame oil and soybean oil

图 3 为不同掺杂比下芝麻油花生掺混油和芝麻大豆掺混油的吸光度曲线。

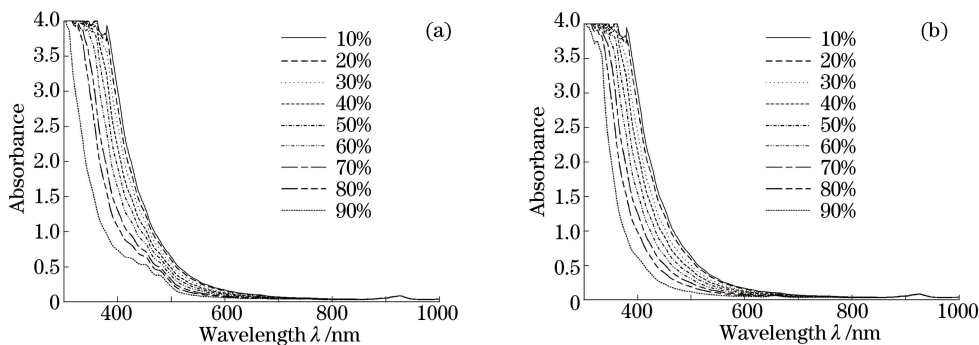


图 3 (a)芝麻花生掺混油的吸光度;(b)芝麻大豆掺混油的吸光度

Fig. 3 (a) Absorbance of sesame and peanut oil mixture; (b) absorbance of sesame and soybean oil mixture

根据测得的纯油和掺混油的吸光度值,由(3)式计算得到按波长分布的掺杂比曲线,如图 4 所示。两种掺杂比曲线的最左侧波长区由于芝麻油吸光度超过检测范围,不能用于分析;最右侧的波长区由于芝麻油和掺入油的吸光度差很小,导致信噪比很低。

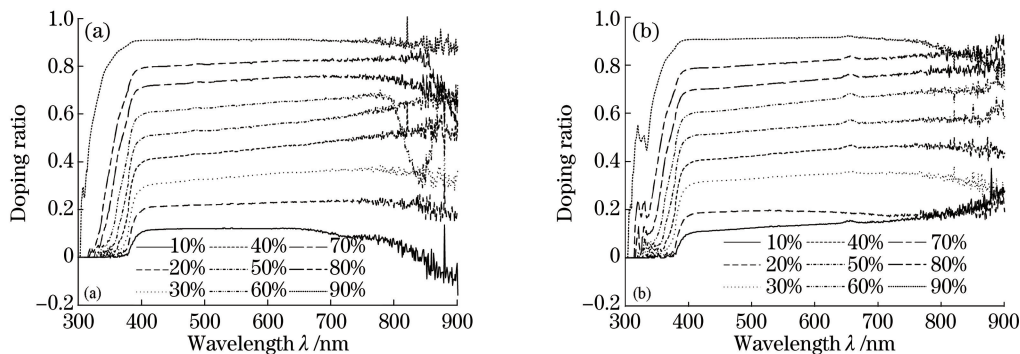


图 4 (a)芝麻油掺花生油的掺杂比计算值;(b)芝麻油掺大豆油的掺杂比计算值

Fig. 4 (a) Calculated values of peanut oil proportion adulterated in sesame oil; (b) calculated values of soybean oil proportion adulterated in sesame oil

将不同波长下的标准掺杂比与图 3 中对应波长下一系列掺混油的吸光度作相关运算,得到掺杂比和吸光度的相关系数 R 曲线,如图 5 所示。由于芝麻油吸光度比掺入油吸光度大,由(3)式可知,掺杂比和掺混油吸光度呈负线性相关。图 5(a)中标准掺杂比和芝麻花生掺混油的吸光度的相关系数峰值在波长 404 nm 处,接近 -1;图 5(b)中标准掺杂比和芝麻大豆掺混油的吸光度的相关系数峰值在波长 406 nm 处,接近 -1,说明这两个波长处的掺混油吸光度与标准掺杂比的相关性最高,在该处计算掺杂比更准确。

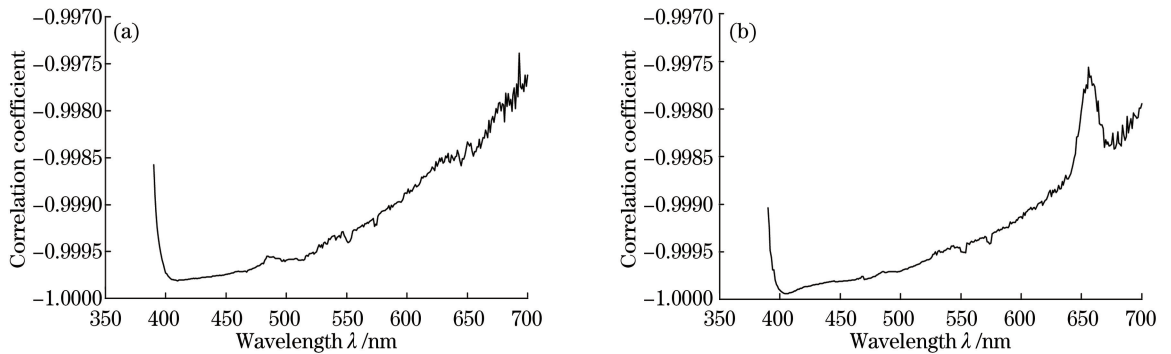


图 5 (a)标准掺杂比和芝麻花生掺混油的吸光度的相关系数;(b)标准掺杂比和芝麻大豆掺混油的吸光度的相关系数

Fig. 5 (a) Correlation coefficient between normal doping ratio and absorbance of sesame and peanut oil mixture; (b) correlation coefficient between normal doping ratio and absorbance of sesame and soybean oil mixture

作出计算掺杂比和标准掺杂比之间的平均误差曲线,即在每个波长处将计算掺杂比和对应的标准掺杂比的差值平方求和再取均值,得到如图 6 所示的曲线。可见芝麻花生掺混油的两种掺杂比的平均误差最小值在 404 nm 处,而芝麻大豆掺混油的两种掺杂比的平均误差最小值在 406 nm 处,表明应选择掺入油和被掺入油的吸光度差最大的波长作为检测波长。

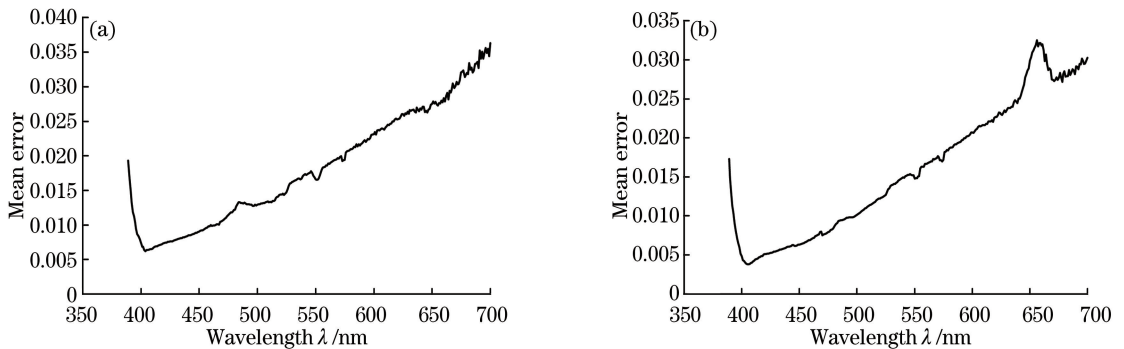


图 6 (a)芝麻花生掺混油的计算掺杂比和标准掺杂比的平均误差曲线;(b)芝麻大豆掺混油的计算掺杂比和标准掺杂比的平均误差曲线

Fig. 6 (a) Mean error curve of calculated doping ratio and normal doping ratio of sesame and peanut oil mixture; (b) mean error curve of calculated doping ratio and normal doping ratio of sesame and soybean oil mixture

综上所述,对芝麻油掺花生油和芝麻油掺大豆油 2 类油样分别选择 404 nm 和 406 nm 附近 10 个点的掺杂比计算值取均值,作为检测结果,并计算相对误差,如表 1 所示。由表 1 可知,芝麻油掺花生油的掺杂比计算值的相对误差位于 $-5.563\% \sim 2.108\%$ 之间,芝麻油掺大豆油的掺杂比计算值的相对误差位于 $-4.645\% \sim 0.624\%$ 之间,基本在 5% 以内。分别作出计算掺杂比和实际标准掺杂比的散点图,如图 7 所示,可见计算值与实际值的相关性很好,相关系数分别为 0.9992 和 0.9997,标准误差分别为 0.0084 和 0.0054。

表 1 芝麻油掺花生油和大豆油的掺杂比计算均值和相对误差

Table 1 Mean values and relative errors of peanut oil and soybean oil proportions in adulterated sesame oil %

Normal doping ratio	Calculated doping ratio (relative error)	
	Peanut oil	Soybean oil
10	10.211 (2.108)	9.688 (-3.117)
20	19.198 (-4.008)	19.071 (-4.645)
30	28.331 (-5.563)	29.522 (-1.593)
40	39.174 (-2.064)	38.656 (-3.360)
50	49.311 (-1.379)	49.536 (-0.928)
60	59.360 (-1.067)	59.213 (-1.311)
70	70.797 (1.138)	69.085 (-1.307)
80	78.979 (-1.276)	80.187 (0.233)
90	90.801 (0.889)	90.562 (0.624)

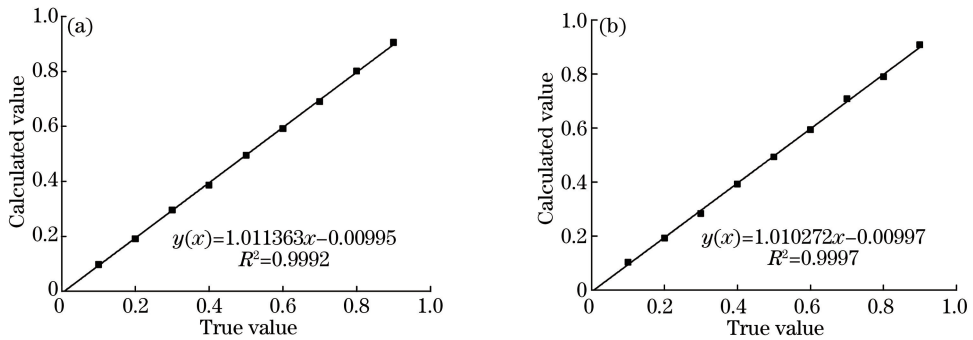


图 7 (a)芝麻油掺花生油的掺杂比计算值对实际值;(b)芝麻油掺大豆油的掺杂比计算值对实际值

Fig. 7 (a) Calculated value versus true value of peanut oil proportion adulterated in sesame oil; (b) calculated value versus true value of soybean oil proportion adulterated in sesame oil

4.2 可见近红外光谱采集系统检测结果

使用可见近红外光谱采集系统测量 25 mm 光程的芝麻油、花生油和大豆油样的吸收光谱强度,并根据(1)式求出芝麻油、花生油和大豆油的吸光度,结果如图 8 所示。图 8(b)中芝麻油的吸光度值远高于花生油和大豆油,其吸光度有效取值区在 495 nm 右边区域,而 495 nm 左边波长区由于芝麻油的强吸收导致被吸收后的光强信号淹没于系统噪声中,无法使用。

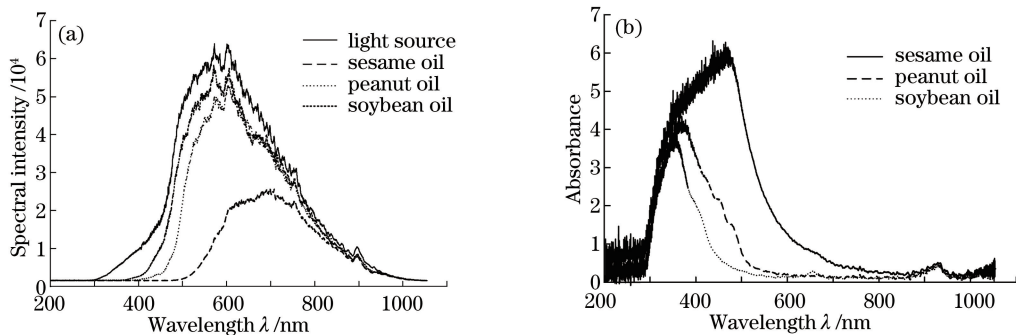


图 8 (a)光源光谱强度和芝麻油、花生油及大豆油的吸收光谱强度;(b)芝麻油、花生油和大豆油的吸光度

Fig. 8 (a) Spectral intensity of light source and absorption spectral intensity of sesame oil, peanut oil and soybean oil; (b) absorbance of sesame oil, peanut oil and soybean oil

进一步作出芝麻油和花生油以及芝麻油和大豆油的吸光度差值曲线,如图 9 所示,两种吸光度差峰值都在 480 nm 左右,由前面分析可知只能使用 495nm 右边的波长区来计算掺杂比。

不同掺杂比的芝麻花生掺混油以及芝麻大豆掺混油的吸收光谱强度如图 10 所示。

由(1)式求出掺混油的吸光度,再根据(3)式求出花生油和大豆油的掺杂比值,计算结果如图 11 所示。

图 12 为每个波长处的计算掺杂比和标准掺杂比的平均误差曲线,如图可见在 500~520nm 波长区,两

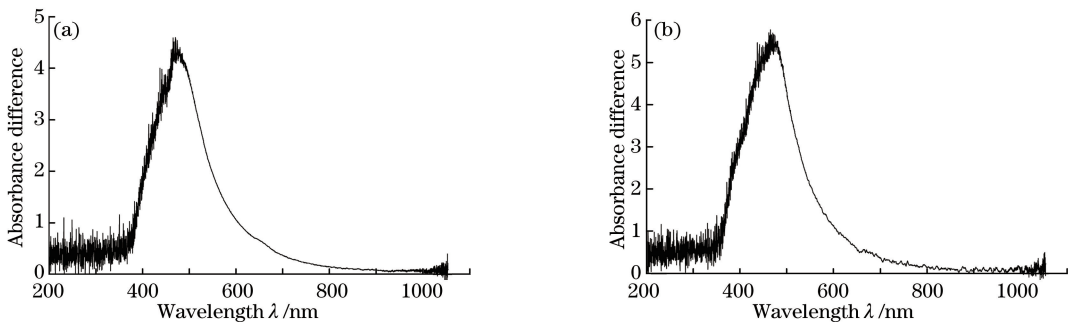


图 9 (a) 芝麻油和花生油的吸光度差; (b) 芝麻油和大豆油的吸光度差

Fig. 9 (a) Absorbance difference between sesame oil and peanut oil; (b) absorbance difference between sesame oil and soybean oil

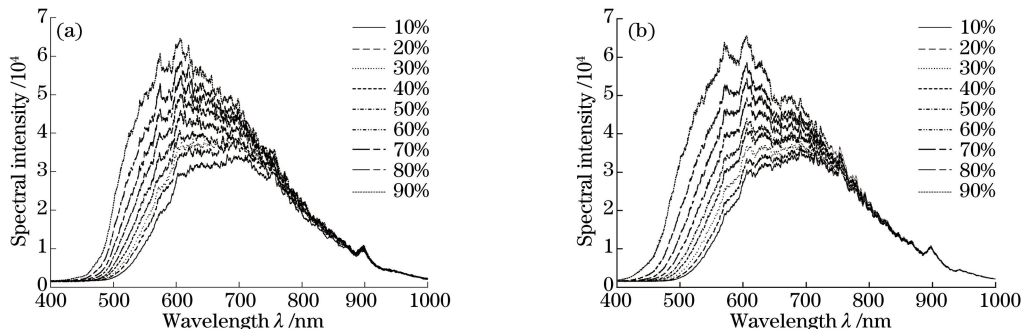


图 10 (a) 芝麻花生掺混油的吸收光谱强度; (b) 芝麻大豆掺混油的吸收光谱强度

Fig. 10 (a) Absorption spectral intensity of sesame and peanut oil mixture; (b) absorption spectral intensity of sesame and soybean oil mixture

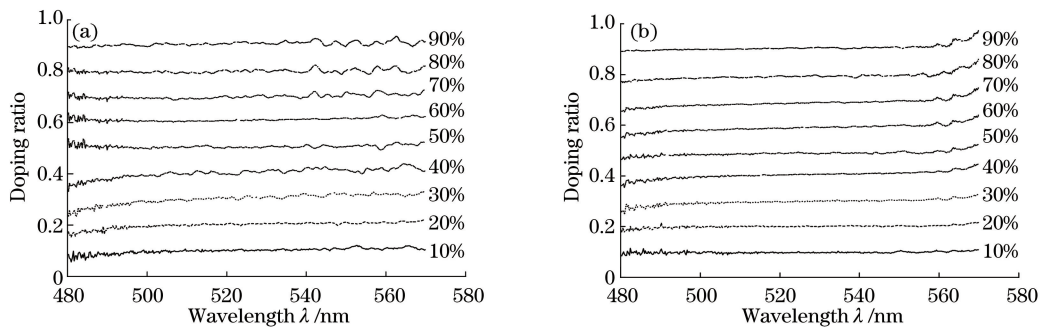


图 11 (a) 芝麻油掺花生油的掺杂比计算值; (b) 芝麻油掺大豆油的掺杂比计算值

Fig. 11 (a) Calculated value of doping ratio of peanut oil adulterated in sesame oil; (b) calculated value of doping ratio of soybean oil adulterated in sesame oil

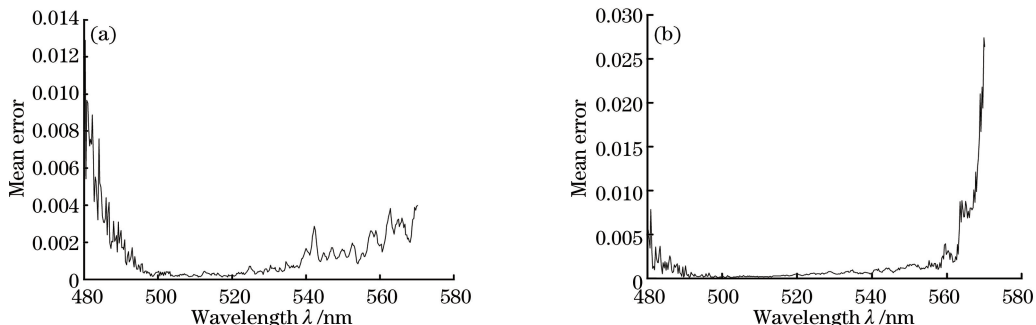


图 12 (a) 芝麻花生掺混油的计算掺杂比和标准掺杂比的平均误差曲线; (b) 芝麻大豆掺混油的计算掺杂比和标准掺杂比的平均误差曲线

Fig. 12 (a) Mean error curve of calculated doping ratio and normal doping ratio of sesame and peanut oil mixture; (b) mean error curve of calculated doping ratio and normal doping ratio of sesame and soybean oil mixture

种掺杂比的平均误差比较小,而这个区域正好是光谱采集系统线性工作区内芝麻油和掺入油的吸光度差较大的区域,说明按照掺入油和被掺入油的吸光度差最大的原则选取检测波长的方法是正确的。

分别对两种掺混油 500~510 nm 波长区的掺杂比计算值取均值,作为掺杂比检测结果,并计算相对误差,如表 2 所示。由表 2 可知,芝麻油掺花生油的掺杂比计算值的相对误差位于-0.499%~2.995%之间,芝麻油掺大豆油的掺杂比计算值的相对误差位于-3.061%~0.514%之间,都在 5%以内。分别作出计算掺杂比和实际标准掺杂比的散点图,如图 13 所示,可见计算值与实际值的相关性很好,相关系数分别为 0.9997 和 0.9994,标准误差分别为 0.0047 和 0.0069。

表 2 芝麻油掺花生油和大豆油的掺杂比计算均值和相对误差

Table 2 Mean values and relative errors of proportions of peanut oil and soybean oil adulterated in sesame oil %

Normal doping ratio	Calculated doping ratio (relative error)	
	Peanut oil	Soybean oil
10	10.299 (2.995)	9.694 (-3.061)
20	20.524 (2.621)	20.034 (0.172)
30	30.762 (2.539)	29.651 (-1.164)
40	40.696 (1.740)	40.206 (0.514)
50	50.433 (0.865)	48.750 (-2.501)
60	60.934 (1.557)	58.645 (-2.259)
70	69.651 (-0.499)	68.556 (-2.063)
80	79.419 (-0.727)	79.115 (-1.106)
90	90.239 (0.266)	90.222 (0.246)

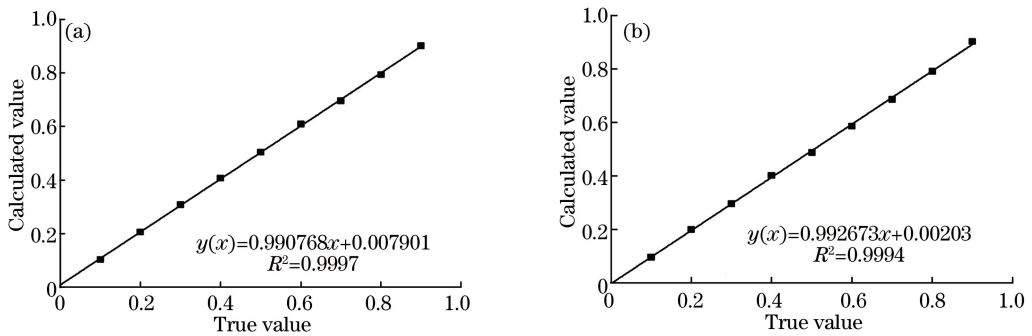


图 13 (a)芝麻油中花生油的掺杂比计算值对实际值;(b)芝麻油中大豆油的掺杂比计算值对实际值

Fig. 13 (a) Calculated value versus true value of peanut oil proportion adulterated in sesame oil; (b) calculated value versus true value of soybean oil proportion adulterated in sesame oil

根据上述实验结果可知,利用分光光度计和光谱采集系统可实现对不同光程样本的芝麻油掺杂的定量检测,在仪器有效工作范围内选取芝麻油和掺入油的吸光度差值最大的波长区作为最佳检测波长区,掺杂比计算值的相对误差基本可控制在 5%以内。光谱采集系统的检测结果要略好于分光光度计的检测结果,这是因为光谱采集系统所用光源强度较强,光谱仪的动态范围较大,信噪比提升,所以检测范围增加,检测精度有所提高。

5 结 论

根据线性混合原理,从掺混油的吸光度线性表达式中推导出掺杂比的计算公式,利用误差分析理论得知最佳检测波长即为芝麻油和掺入油吸光度差最大的波长。实验利用两种检测装置对两种芝麻油掺杂的不同光程的油样进行验证。利用分光光度计对芝麻油分别掺杂花生油和大豆油的油样进行检测,在仪器线性工作范围内,吸光度差最大波长区的检测结果最好,花生油和大豆油的掺杂体积比计算值和实际值的相关系数分别为 0.9992 和 0.9997,标准误差分别为 0.0084 和 0.0054。利用可见近红外光谱采集系统对芝麻油掺杂样本进行检测,在吸光度差最大波长区得到的花生油和大豆油的掺杂体积比计算值和实际值的相关系数分别

为 0.9997 和 0.9994, 标准误差分别为 0.0047 和 0.0069。本文方法无需对油样进行复杂处理, 数据处理过程简单, 可以设计出简单易行的芝麻油掺杂定量检测设备, 适合质检人员在芝麻油加工场所的监督执法以及油料企业实时掌控芝麻调和油加工过程中的混合比例。

参 考 文 献

- [1] Zhu Zhiguang, Tang Xuerong, Li Jianping. Quick analytical method of “SA developer” for adulterated sesame oil[J]. Journal of Zhengzhou Grain College, 1993(2): 75-78.
朱之光, 唐雪蓉, 李建平. 掺伪芝麻油“SA 显色剂”快速分析法的研究[J]. 郑州粮食学院学报, 1993(2): 75-78.
- [2] Du Lianqi. Study on a new rapid method of testing adulteration in sesame oil[J]. China Oils and Fats, 1997, 22(3): 44-46.
杜连起. 芝麻油掺假快速检测新方法的研究[J]. 中国油脂, 1997, 22(3): 44-46.
- [3] Chen Huasong, Deng Sue, Zhou Ximan, *et al.* General detection method of adulterated sesame oil[J]. Journal of Zhengzhou Grain College, 1996, 17(1): 24-27.
陈华松, 邓素娥, 周喜满, 等. 芝麻油掺伪通用检验方法研究[J]. 郑州粮食学院学报, 1996, 17(1): 24-27.
- [4] Xiao Changzhen, Wu Yu, Gan Dongsheng, *et al.* Adulteration detected in vegetable oil[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 1999, 21(1): 63-66.
肖昌珍, 吴 渝, 甘东生, 等. 食用植物油掺伪检测[J]. 中国油料作物学报, 1999, 21(1): 63-66.
- [5] Wei Ming, Liao Chenghua. Research on detection of adulteration of common edible vegetable oils by gas chromatography[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2003, 18(3): 57-60.
魏 明, 廖成华. 食用植物油掺伪的气相色谱检测方法研究[J]. 西南科技大学学报, 2003, 18(3): 57-60.
- [6] Zhu Xingdong, Wang Kaixiong, Zang Rongchun, *et al.* Study on ultraviolet spectrometry method for detection of adulteration sesame oil[J]. China Oils and Fats, 2000, 25(1): 50-51.
朱杏东, 王凯雄, 臧荣春, 等. 芝麻油掺伪检测的紫外分光光度法研究[J]. 中国油脂, 2000, 25(1): 50-51.
- [7] Zhang Jihong, Guo Hua, Wang Yan, *et al.* Study on method of determination of the content of sesame oil by second derivative ultraviolet spectrophotometry[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2004, 30(4): 367-370.
张继红, 郭 华, 王 燕, 等. 用二阶导数紫外分光光度法直接测定芝麻油含量[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(4): 367-370.
- [8] Feng Zhiyong, Gu Keren. Study on the extraction of sesamin from sesame oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, 21(3): 296-300.
冯志勇, 谷克仁. 紫外光谱法测定芝麻素与芝麻林素含量[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(3): 296-300.
- [9] Yang Jia, Wu Yanwen, Li Bingning, *et al.* Fourier transform near infrared spectroscopy in the authentication and adulteration of sesame oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(3): 114-119.
杨 佳, 武彦文, 李冰宁, 等. 近红外光谱结合化学计量学研究芝麻油的真伪与掺伪[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(3): 114-119.
- [10] Wang Wei, Chen Pan, Liu Binghong, *et al.* Research on hollow fiber Raman detection system for edible and fried oils [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906003.
王 为, 陈 盼, 刘炳红, 等. 食用油和煎炸油空芯光纤拉曼检测系统研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906003.
- [11] Ding Qingzhen, Liu Lingling, Wu Yanwen, *et al.* Authentication and adulteration analysis of sesame oil by FTIR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2690-2695.
丁轻针, 刘玲玲, 武彦文, 等. 基于 FTIR 的芝麻油真伪鉴别和掺伪定量分析模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2690-2695.
- [12] Sun Tong, Wu Yiqing, Li Xiaozhen, *et al.* Discrimination of camellia oil adulteration by NIR spectra and subwindow permutation analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0630005.
孙 通, 吴宜青, 李晓珍, 等. 基于近红外光谱和子窗口重排分析的山茶油掺假检测[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630005.
- [13] Liu Yande, Wan Changlan, Cai Lijin. Rapid determination of the content of adulteration in edible oil using confocal microscope Raman spectroscopy[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(9): 199-202.

- 刘燕德, 万常澜, 蔡丽金. 共焦显微拉曼光谱法快速检测食用油掺假的研究[J]. 农机化研究, 2012(9): 199-202.
- [14] Ouyang Aiguo, Tang Tianyi, Huang Zhihong, *et al.* Study on the quality of methanol diesel oil by Raman spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 113002.
- 欧阳爱国, 唐天义, 黄志鸿, 等. 甲醇柴油品质的拉曼光谱检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 113002.
- [15] Liu Yande, Jin Tantan, Wang Haiyang. Rapid quantitative determination of components in ternary blended edible oil based on Raman spectroscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(9): 2490-2496.
- 刘燕德, 靳昙昙, 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): 2490-2496.