

基于单积分球技术的最佳样本厚度研究 及油茶籽油鉴别

龚中良,管金伟,刘 强,李大鹏,郑文峰,胡 峰

(中南林业科技大学 机电工程学院,长沙 410004)

摘要:为减少单积分球技术采集光谱数据过程中的光损失,探索了油茶籽油检测时光损失量最小的样本厚度,并研究在此样本厚度下鉴别掺伪油茶籽油的能力。采用蒙特卡罗(MC)算法模拟单积分球技术下样本的测量,将模拟出的反射率(M_R)和透射率(M_T)作为实际值,单积分球采集的数据作为预测值,将实际值与预测值之间的平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE)作为评价指标,确定最佳的样本厚度。按不同掺伪比例制备了 230 组样本,采集最佳样本厚度的掺伪油茶籽油光谱数据,结合逆向倍增(IAD)算法得到样本的吸收系数(μ_a)和约化散射系数(μ_s')。将 μ_a 和 μ_s' 经过均值中心化预处理之后,利用 Kennard - Stone(K - S)算法以 7:3 的比例将样本划分成训练集和测试集,分别建立基于支持向量机(SVM)和随机森林(RF)的多分类定性鉴别模型。结果表明:样本厚度为 14 mm 时, M_R 和 M_T 的 MRE 和 RMSE 均相对较小; μ_a 和 μ_s' 建立的 SVM 模型鉴别准确率分别为 97.10%和 95.65%,建立的 RF 模型鉴别准确率分别为 98.55%和 97.10%。因此,基于最佳样本厚度下的单积分球技术结合 SVM 和 RF 模型,可有效实现油茶籽油的快速鉴别。

关键词:油茶籽油;鉴别;单积分球技术;光学参数;蒙特卡罗算法;样本厚度;定性模型

中图分类号:TS225.1;TS227 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)02-0095-06

Optimal sample thickness based on single integrating sphere technique and authentication of oil - tea camellia seed oil

GONG Zhongliang, GUAN Jinwei, LIU Qiang, LI Dapeng,
ZHENG Wenfeng, HU Feng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and
Technology, Changsha 410004, China)

Abstract:To reduce light loss in the spectral data acquisition process using single integrating sphere technique, the sample thickness resulting in the minimum light loss for the detection of oil - tea camellia seed oil was investigated, and the ability of distinguishing adulterated oil - tea camellia seed oil at this optimal sample thickness was researched. The Monte Carlo (MC) algorithm was used to simulate the measurement of samples under the single integrating sphere technique, and the simulated reflectance (M_R) and transmittance (M_T) were taken as the actual values, the data collected by the single integrating sphere were taken as the predicted values, and the mean relative error (MRE) and the root

mean square error (RMSE) between the actual values and the predicted values were taken as the evaluation indexes to determine the optimal sample thickness. Two hundred and thirty sets of samples were prepared with different adulteration ratios, and the spectral data of adulterated oil - tea camellia seed oil with the optimal sample

收稿日期:2023-07-12;修回日期:2024-10-10

基金项目:湖南省科技计划重点研发项目(2022NK2048);湖南省教育厅科学项目(18B192,20A515);湖南省自然科学基金(2020JJ4142);湖南省林业杰青培养科研项目(XLK202108-7)

作者简介:龚中良(1965),男,教授,研究方向为农业装备自动化(E-mail)3301249277@qq.com。

通信作者:李大鹏,讲师(E-mail)1529641542@qq.com。

thickness were collected to obtain the absorption coefficients (μ_a) and approximate scattering coefficients (μ_s') of the samples by combining with the inverse doubling (IAD) algorithm. After pre-processing the μ_a and μ_s' by mean centering, the samples were divided into training and test sets using the Kennard - Stone (K - S) algorithm in the ratio of 7:3. Multiclassification qualitative identification models based on support vector machine (SVM) and random forest (RF) were established, respectively. The results showed that the MRE and RMSE of both M_R and M_T were relatively small when the sample thickness was 14 mm. The discriminative accuracies of the SVM models established for μ_a and μ_s' were 97.10% and 95.65%, respectively, and the discriminative accuracies of the RF models established were 98.55% and 97.10%, respectively. Therefore, based on the single integrating sphere technique under the optimal sample thickness, combined with SVM and RF models, the fast authentication of oil - tea camellia seed oil can be effectively realized.

Key words: oil - tea camellia seed oil; authentication; single integrating sphere technique; optical parameters; Monte Carlo algorithm; sample thickness; qualitative model

油茶籽油具有很高的营养价值,可为人体提供必需脂肪酸和脂溶性维生素^[1]。个别不法商贩为了牟取更多的利润,在油茶籽油中掺入廉价植物油,这损害了消费者的合法权益,因此对油茶籽油进行鉴伪十分必要。

目前,国内外针对植物油鉴伪的方法主要有色谱法、核磁共振法、光谱法等^[2-3],其中:色谱法具有样品用量少、分析速度快、应用范围广等优点,但是对于热不稳定或者难以挥发的物质难以分析且其定性能力较弱;核磁共振法可获得其他方法难以得到的各种成分和微观结构的信息,但其设备操作复杂;光谱法可依靠各类检测技术快速、无损地对样本进行检测。与以上技术相比,积分球技术是一种测量物质光学特性的方法,可以提供有关化学成分、微观结构和纹理的信息,并且有关研究表明积分球技术可用于检测液体样本^[4]。逆向倍增(IAD)算法是处理积分球数据的一种方法,该算法需要考虑光通过样本和积分球端口发生的损失,且过多的光损失会导致光学性质估计的误差较大,影响试验结果的准确性。

研究表明,样品厚度对光学性质有一定的影响^[5]。Beek等^[6]使用小尺寸的光斑和一个高端口-光束尺寸比限制了通过样本一侧的光损失,得出了样本两侧的光损耗会导致吸收系数(μ_a)偏高,以及所获得的光学性质对样本厚度有一定依赖性的结论。Pickering等^[7-8]探讨了使用双积分球技术测定组织的光学性质,发现样本端口直径更大或光学深度更深可以减少光的损失。Sardar等^[9-10]将反射

率(M_R)和透射率(M_T)的测量结果与蒙特卡罗(MC)算法模拟的结果进行了比较,发现 M_R 和 M_T 的测量值和估计值之间存在差异,造成这种差异的原因与组织的光学特性有关。庞妍妍等^[11]利用自主开发的双积分球系统采用分步建模的方法,先利用 μ_a 对山茶油掺伪种类进行区分,然后利用约化散射系数(μ_s')建立不同掺伪比例的定性判别模型,其中 μ_s' 对掺假比例分类效果较优,但是没有对样本厚度进行研究。

本文在试验数据采集过程中,为减少光的损失,首先以油茶籽油为研究对象,利用MC算法模拟出的 M_R 和 M_T 作为实际值,试验采集的 M_R 和 M_T 作为预测值,计算不同样本厚度下 M_R 及 M_T 实际值与预测值的平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE),对比得出油茶籽油检测时的最佳样本厚度。再利用IAD算法得出最佳样本厚度下掺伪油茶籽油的 μ_a 和 μ_s' ,用均值中心化方法对 μ_a 和 μ_s' 进行预处理后,利用Kennard - Stone(K - S)算法以7:3的比例将样本划分成训练集和测试集,再结合支持向量机(SVM)和随机森林(RF)建立不同种类掺伪油茶籽油的多分类定性鉴别模型,分别以准确率(ACC)、灵敏度(TPR)和特异性(FPR)为指标对模型进行评价,以期为单积分球技术鉴别掺伪油茶籽油提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

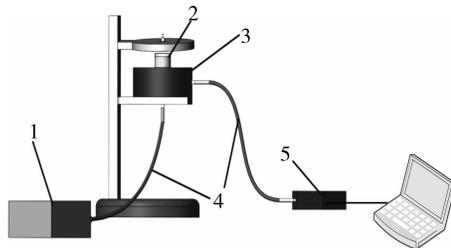
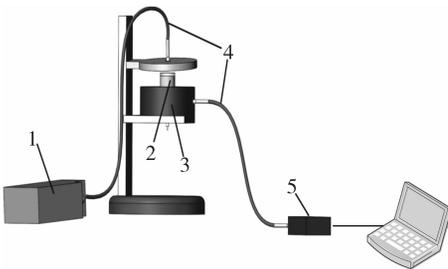
市售植物油,其种类、品牌名称和产地信息如表1所示。

表 1 植物油种类、品牌及产地信息

Table 1 Vegetable oil types, brand and origin information

种类	品牌	产地
油茶籽油	大三湘	湖南衡阳
菜籽油	金浩	湖南永州
葵花籽油	金龙鱼	上海浦东新区
大豆油	福临门	江苏苏州
玉米油	营养家	安徽蚌埠
花生油	鲁花	山东烟台

单积分球系统,装置见图 1。该系统由 ISP-R 积分球、HL1000 卤钨灯、Ocean 光纤光谱仪、光纤、反射皿($\varnothing 35 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$)和计算机组成。将单积分球系统置于暗箱中进行样本的采集工作。

a) 反射采集方式
a) Reflection acquisition modeb) 透射采集方式
b) Transmission acquisition mode

注:1. HL1000 卤钨灯;2. 样本;3. ISP-R 积分球;4. 光纤;
5. Ocean 光纤光谱仪

Note: 1. HL1000 tungsten halogen lamp; 2. Sample; 3. ISP-R integrating sphere; 4. Optical fiber; 5. Ocean fiber spectrometer

图 1 单积分球系统

Fig. 1 Single integrating sphere system

1.2 试验方法

1.2.1 掺伪样本的制备

制备不同样本厚度(2、4、6、8、10、12、14、16、18、20 mm)的纯油茶籽油。将菜籽油、玉米油、大豆油、葵花籽油、花生油按不同的比例(1%、2%、3%、4%、5%、7%、9%、10%、15%、20%、30%、40%)分别加入到油茶籽油中制作样本。每种掺伪比例制作 3 组样本,即同一类掺伪油共 36 组样本,共 5 类不

同种类的掺伪油。最终得到不同掺伪比例样本 180 组、纯油茶籽油样本 50 组,共 230 组样本。

1.2.2 光学参数的采集及计算

取不同样本厚度纯油茶籽油和掺伪样本,采用单积分球系统,设置积分时间为 37 ms,平均次数为 100,在 200~1 100 nm 波段采集样本的反射和透射光谱强度信息。光谱采集前,打开光源,预热 30 min。根据式(1)、式(2)计算 M_R 、 M_T 。然后结合 IAD 算法^[12]得出样本的 μ_a 和 μ'_s ,其计算公式分别如式(3)、式(4)所示。

$$M_R = \frac{R - R_{\text{DARK}}}{R_{\text{ref}} - R_{\text{DARK}}} \quad (1)$$

$$M_T = \frac{T - T_{\text{DARK}}}{T_{\text{ref}} - T_{\text{DARK}}} \quad (2)$$

$$\mu_a = \frac{\ln I_0 - \ln T}{d} \quad (3)$$

$$\mu'_s = \frac{(\ln I_0 - \ln T)(1 - g)}{d} \quad (4)$$

式中: R 为所采集的样本的反射强度; R_{DARK} 为反射时的暗场光谱强度; R_{ref} 为积分球采集的标准白板的反射强度; T 为所采集样本的透射强度; T_{ref} 为积分球采集的透射强度; T_{DARK} 为透射时的暗场光谱强度; I_0 为入射光的强度; d 为介质的厚度; g 为各向异性系数。

1.2.3 数据预处理及定性鉴别模型建立

在最佳样本厚度下,对结合 IAD 算法得出的掺伪样本的 μ_a 和 μ'_s 采用均值中心化进行预处理。具体为首先对采集到的样本光谱数据按列进行均值计算,然后将计算得到的均值从原始光谱数据中剔除,获得其平均光谱数据信息^[13]。之后,利用 Kennard-Stone(K-S)算法以 7:3 的比例将样本划分成训练集和测试集,采用 μ_a 和 μ'_s 数据结合 SVM 和 RF 建立不同种类掺伪油茶籽油的定性鉴别模型。

1.2.4 评价指标计算

利用 MC 算法^[14]分别模拟出不同样本厚度下的 M_R 和 M_T ,以此为实际值,以试验得出的 M_R 和 M_T 为预测值,分别计算 MRE 和 RMSE, MRE 用来衡量油茶籽油检测实际值和预测值之间的误差, RMSE 是模型预测值与实际值之间的差异。MRE 及 RMSE 计算公式如式(5)、式(6)所示。ACC 为预测正确的样本数占总样本数的比例;TPR 为某一类油预测正确的样本数占该类油总样本数的比例;FPR 为不是某一类油预测正确的样本数占不是该类油样本总数的比例,三者计算公式分别如

式(7)、式(8)、式(9)所示。

$$E_{MR} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{(p_i - a_i)}{a_i} \right| \times 100\% \quad (5)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$C = \frac{(T_P + T_N)}{(T_P + T_N + F_P + F_N)} \quad (7)$$

$$R_{TP} = \frac{T_P}{(T_P + F_N)} \quad (8)$$

$$R_{FP} = \frac{T_N}{(F_P + T_N)} \quad (9)$$

式中： E_{MR} 为 MRE 值； E_{RMS} 为 RMSE 值； C 为 ACC 值； R_{TP} 为 TPR 值； R_{FP} 为 FPR 值； n 为数据的个数； p_i 为第 i 个样本的预测值， a_i 为第 i 个样本的实际值； T_P 为实际是某类油且预测为该类油的样本数； F_N 为实际是某类油但预测不为该类油的样本数； F_P 为实际不是某类油但预测为该类油的样本数； T_N 为实际不是某类油且预测不是该类油的样本数。

2 结果与讨论

2.1 不同样本厚度的 MRE 和 RMSE

不同样本厚度下 M_R 和 M_T 的 MRE 和 RMSE 如图 2 所示。

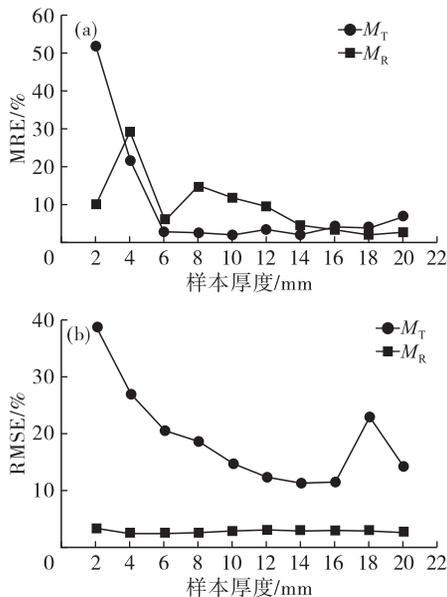


图 2 不同样本厚度下 M_R 和 M_T 的 MRE 和 RMSE
Fig. 2 MRE and RMSE of M_R and M_T under different sample thicknesses

由图 2a 可以看出， M_R 的 MRE 随样本厚度增加呈先升高后降低再升高然后再降低的趋势，样本厚度在 4 mm 和 8 mm 时均有明显提升，表明此时光的损失较多。 M_T 的 MRE 在 10 mm 之前随着样本厚度的增加逐渐减小，说明随着样本厚度的增加，光的损失

逐渐减小。在样本厚度为 12 mm 时 M_T 的 MRE 又有小幅升高，之后呈小幅波动状态，而 M_T 的 MRE 在样本厚度为 10 mm 和 14 mm 时较小。由图 2b 可以看出，随样本厚度增加， M_R 的 RMSE 趋于一个相对稳定的状态，且均不超过 5%， M_T 的 RMSE 逐渐降低，在样本厚度为 14 mm 时 RMSE 降至最低，然后又有上升趋势，样本厚度为 18 mm 时，RMSE 有明显的提升，表明此时光的损失较多。

综上，样本厚度过大或过小都会导致油茶籽油检测中光的损失，综合来看，样本厚度在 14 mm 时，MRE 和 RMSE 均较低。因此，选择 14 mm 作为最佳的样本厚度。

2.2 光谱分析

最佳样本厚度下经 IAD 算法计算和均值中心化预处理的纯油茶籽油和不同种类掺伪油的 μ_a 和 μ_s' 曲线图如图 3 所示。

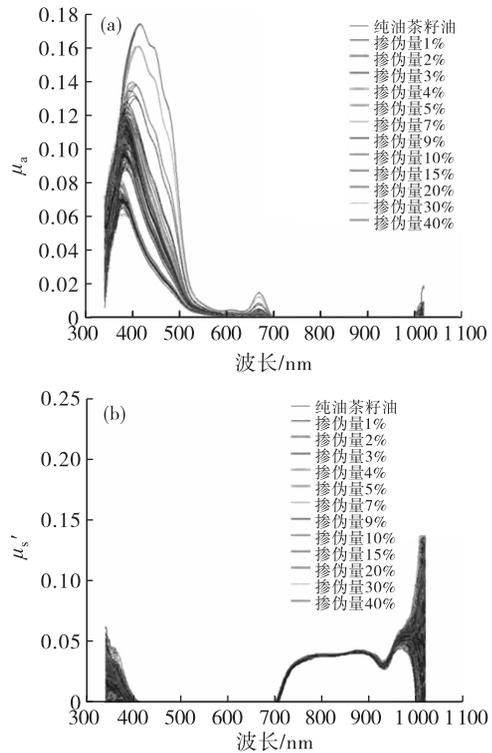


图 3 纯油茶籽油和掺伪油的 μ_a 和 μ_s' 曲线图
Fig. 3 Profiles of μ_a and μ_s' of pure and adulterated oil - tea camellia seed oils

由图 3a 可知，在 350 ~ 500 nm 波长范围内纯油茶籽油和掺伪油的 μ_a 曲线相差较大，且在 440 nm 左右较为明显。由图 3b 可知，在 300 ~ 1 100 nm 波长范围内，纯油茶籽油和掺伪油的 μ_s' 曲线相差较小。

2.3 建模结果

2.3.1 SVM 建模结果

SVM 是一种有监督学习模式的识别算法^[15]。该算法是基于统计学理论的机器学习方法，它成功

解决了机器学习中高维度和局部极值问题,并且该算法的决策边界是对学习样本求解的最大边距超平面,可以将问题化为一个求解凸二次规划的问题,目前已经在很多领域有应用^[16-18]。SVM 能够处理高维数据,并且具有良好的泛化能力和鲁棒性。按 1.2.3 方法建立 μ_a 和 μ_s' 的 SVM 定性鉴别模型,其数据预处理前后准确率结果对比如表 2 所示,预处理后灵敏度和特异性结果如表 3 所示。

表 2 预处理前后 μ_a 和 μ_s' SVM 模型的准确率结果对比

Table 2 Comparison of accuracy results of μ_a and μ_s' SVM models before and after preprocessing

参数	预处理方法	准确率/%	
		训练集	测试集
μ_a	无处理	98.14	95.65
	均值中心化	99.38	97.10
μ_s'	无处理	96.89	94.20
	均值中心化	99.38	95.65

表 3 预处理后 μ_a 和 μ_s' SVM 模型的灵敏度和特异性结果

Table 3 Sensitivity and specificity results of μ_a and μ_s' SVM models after preprocessing

样本	μ_a		μ_s'	
	灵敏度	特异性	灵敏度	特异性
纯油茶籽油	100.00	100.00	100.00	100.00
掺伪大豆油	100.00	100.00	91.67	100.00
掺伪菜籽油	91.67	100.00	100.00	98.28
掺伪葵花籽油	100.00	98.28	100.00	98.28
掺伪花生油	91.67	100.00	91.67	98.28
掺伪玉米油	100.00	98.28	91.67	100.00

由表 2 可以看出,在测试集中,未经过预处理的 μ_a 和 μ_s' 建立的 SVM 定性鉴别模型的准确率相对较高,且均没有出现拟合和欠拟合现象,经过均值中心化预处理之后, μ_a 和 μ_s' 模型测试集的准确率均提升了 1.45 百分点,分别为 97.10% 和 95.65%。由表 3 可以看出,经过预处理后 μ_a 建立的 SVM 定性鉴别模型对菜籽油和花生油的鉴别能力较弱,而 μ_s' 建立的 SVM 定性鉴别模型对大豆油、花生油和玉米油的鉴别能力较弱。

2.3.2 RF 建模结果

RF 是一种用于分类和回归的机器学习方法。它是一个树状预测器的组合,每棵树都是基于自主抽样的数据子集进行训练的,该算法的优点是对数据集集中的噪声有较强的鲁棒性^[19]。按 1.2.3 方法建立 μ_a 和 μ_s' 的 RF 定性鉴别模型,其数据预处理前后准确率结果对比如表 4 所示,预处理后灵敏度和特异性结果如表 5 所示。

表 4 预处理前后 μ_a 和 μ_s' RF 模型的准确率结果对比

Table 4 Comparison of accuracy results of μ_a and μ_s' RF models before and after preprocessing

参数	预处理方法	准确率/%	
		训练集	测试集
μ_a	无处理	100.00	95.65
	均值中心化	100.00	98.55
μ_s'	无处理	100.00	95.65
	均值中心化	100.00	97.10

表 5 预处理后 μ_a 和 μ_s' RF 模型的灵敏度和特异性结果

Table 5 Sensitivity and specificity results of μ_a and μ_s' RF models after preprocessing

样本	μ_a		μ_s'	
	灵敏度	特异性	灵敏度	特异性
纯油茶籽油	100.00	100.00	100.00	100.00
掺伪大豆油	100.00	100.00	91.67	100.00
掺伪菜籽油	100.00	100.00	100.00	98.28
掺伪葵花籽油	91.67	100.00	100.00	100.00
掺伪花生油	100.00	100.00	100.00	98.28
掺伪玉米油	100.00	98.28	91.67	100.00

由表 4 可以看出,无预处理和预处理 μ_a 和 μ_s' 的 RF 定性鉴别模型的训练集准确率均为 100%。经过预处理之后, μ_a 和 μ_s' 的测试集准确率分别提升了 2.90 百分点和 1.45 百分点,准确率分别为 98.55% 和 97.10%。由表 5 可以看出,经过预处理之后 μ_a 建立的 RF 定性鉴别模型对葵花籽油的鉴别能力较弱, μ_s' 建立的 RF 定性鉴别模型对大豆油和玉米油的鉴别能力较弱。

3 结 论

基于单积分球技术采集油茶籽油光谱数据时,在样本厚度为 14 mm 时,光的损失最小。在最佳样本厚度下,采用单积分球技术采集不同种类掺伪油茶籽油的光谱数据,结合 IAD 算法得到样本的 μ_a 和 μ_s' ,经均值中心化预处理后,建立 SVM 和 RF 定性鉴别模型。结果显示,经过预处理之后, μ_a 和 μ_s' 的鉴别准确率均有明显提升,其中 SVM 模型鉴别准确率均提升 1.45 百分点,RF 模型鉴别准确率分别提升 2.90 百分点和 1.45 百分点。因此,基于最佳样本厚度下的单积分球技术结合 SVM 和 RF 模型,可有效实现油茶籽油的快速鉴别。

参考文献:

- [1] 柯城. 茶油主要营养物质组成和保健功能[J]. 现代食品, 2019(13): 105-108.
- [2] WANG T, WU H L, LONG W J, et al. Rapid identification and quantification of cheaper vegetable oil adulteration in

- camellia oil by using excitation - emission matrix fluorescence spectroscopy combined with chemometrics [J]. *Food Chem*, 2019, 293: 348 - 357.
- [3] DU Q, ZHU M, SHI T, et al. Adulteration detection of corn oil, rapeseed oil and sunflower oil in camellia oil by in situ diffuse reflectance near - infrared spectroscopy and chemometrics[J/OL]. *Food Contr*, 2021, 121: 107577 [2023 - 07 - 12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107577>.
- [4] 庞妍妍. 基于双积分球技术的掺伪及劣变植物油检测方法研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2021.
- [5] ZHU D, LU W, ZENG S, et al. Effect of light losses of sample between two integrating spheres on optical properties estimation[J/OL]. *J Biomed Opt*, 2007, 12(6): 064004 [2023 - 07 - 12]. <https://doi.org/10.1117/1.2815691>.
- [6] BEEK J F, BLOKLAND P, POSTHUMUS P, et al. *In vitro* double - integrating - sphere optical properties of tissues between 630 and 1 064 nm[J]. *Phys Med Biol*, 1997, 42 (11): 2255 - 2261.
- [7] PICKERING J W, PRAHL S A, VAN WIERINGEN N, et al. Double - integrating - sphere system for measuring the optical properties of tissue[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(4): 399 - 410.
- [8] PICKERING J W, MOES C J M, STERENBORG H J C M, et al. Two integrating spheres with an intervening scattering sample[J]. *J Opt Soc Am A*, 1992, 9(4): 621 - 631.
- [9] SARDAR D K, SALINAS F S, PEREZ J J, et al. Optical characterization of bovine retinal tissues [J]. *J Biomed Opt*, 2004, 9(3): 624 - 631.
- [10] SARDAR D K, MAYO M L, GLICKMAN R D. Optical characterization of melanin[J]. *J Biomed Opt*, 2001, 6 (4): 404 - 411.
- [11] 庞妍妍, 陈敏, 王蓓, 等. 基于吸收与散射特性的掺伪山茶油检测研究[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45 (11): 90 - 94, 130.
- [12] PRAHL S A, VAN GEMERT M J C, WELCH A J. Determining the optical properties of turbid media by using the adding - doubling method[J]. *Appl Opt*, 1993, 32 (4): 559 - 568.
- [13] 于智海. 基于近红外光谱的南疆红枣水分动态无损检测模型研究[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [14] WANG L, JACQUES S L, ZHENG L. MCML: Monte Carlo modeling of light transport in multi - layered tissues[J]. *Comp Meth Progr Bio*, 1995, 47(2): 131 - 146.
- [15] CORTES C, VAPNIK V. Support - vector networks[J]. *Mach Learn*, 1995, 20(3): 273 - 297.
- [16] GAO Z, FANG S C, LUO J, et al. Akernel - free double well potential support vector machine with applications [J]. *Eur J Oper Res*, 2021, 290(1): 248 - 262.
- [17] DING S, ZHANG N, ZHANG X, et al. Twin support vector machine: Theory, algorithm and applications[J]. *Neural Comput Appl*, 2017, 28(11): 3119 - 3130.
- [18] LIU Y, DING H, HUANG Z, et al. Distributed and robust support vector machine[J]. *Int J Comput Geom Appl*, 2020, 30: 213 - 233.
- [19] BREIMAN L. Random forests[J]. *Mach Learn*, 2001, 45: 5 - 32.
- (上接第 75 页)
- [30] ZHANG T T, XU J, WANG Y M, et al. Health benefits of dietary marine DHA/EPA - enriched glycerophospholipids [J/OL]. *Prog Lipid Res*, 2019, 75: 100997 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2019.100997>.
- [31] 黄玉洁, 郝仪铭, 周梦晴, 等. 磷脂型二十二碳六烯酸和二十碳五烯酸对脂多糖所致小鼠急性肝损伤的保护作用及机制[J]. *食品科学*, 2022, 43(19): 151 - 157.
- [32] CHE H, LI H, SONG L, et al. Orally administered DHA - enriched phospholipids and DHA - enriched triglyceride relieve oxidative stress, improve intestinal barrier, modulate inflammatory cytokine and gut microbiota, and meliorate inflammatory responses in the brain in dextran sodium sulfate induced colitis in mice[J/OL]. *Mol Nutr Food Res*, 2021, 65(15): e2000986 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202000986>.
- [33] VAN A L, BERNOUD - HUBAC N, LAGARDE M. Esterification of docosahexaenoic acid enhances its transport to the brain and its potential therapeutic use in brain diseases[J/OL]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4550 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.3390/nu14214550>.
- [34] WANG C C, GUO Y, ZHOU M M, et al. Comparative studies of DHA - enriched phosphatidylcholine and recombination of DHA - ethyl ester with egg phosphatidylcholine on ameliorating memory and cognitive deficiency in SAMP8 mice [J]. *Food Funct*, 2019, 10 (2): 938 - 950.
- [35] YALAGALA P C R, SUGASINI D, ZALDUA S B, et al. Lipase treatment of dietary krill oil, but not fish oil, enables enrichment of brain eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid[J/OL]. *Mol Nutr Food Res*, 2020, 64(12): e2000059 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202000059>.
- [36] AHMMED M K, HACHEM M, AHMMED F, et al. Marine fish - derived lysophosphatidylcholine: Properties, extraction, quantification, and brain health application[J/OL]. *Molecules*, 2023, 28(7): 3088 [2023 - 08 - 09]. <https://doi.org/10.3390/molecules28073088>.