

气相色谱结合化学计量在核桃油、菜籽油掺伪混合物含量判别分析中的应用

Application of gas chromatography combined with stoichiometry in discriminant analysis of pseudo mixtures of walnut oil and rapeseed oil

吴史博¹ 刘延奇² 李超³ 马宁¹ 姚恒¹ 王萌萌¹

WU Shibo¹ LIU Yanqi² LI Chao³ MA Ning¹ YAO Heng¹ WANG Mengmeng¹

(1. 南阳市产品质量检验检测中心, 河南 南阳 473000; 2. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南 郑州 450000; 3. 南阳理工学院河南省张仲景方药与免疫调节重点实验室, 河南 南阳 473000)

(1. Nanyang Product Quality Inspection and Testing Center, Nanyang, Henan 473000, China;

2. School of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou,

Henan 450000, China; 3. Henan Province Key Laboratory of Zhang Zhongjing Formulae and

Herbs for Immunoregulation, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473000, China)

摘要:目的: 识别核桃油中同时掺入多种其他植物油的多元掺伪。方法: 采用气相色谱技术分析核桃油、菜籽油掺伪混合物中脂肪酸含量, 结合化学计量方法对气相色谱数据进行建模, 并对不同比例核桃油、菜籽油混合物进行判别分析。结果: 主成分分析法(PCA)能快速鉴别出纯核桃油和掺伪核桃油, 并在一定程度上反映样本的掺伪比例; Bayes判别分析将83.33%的样品归入正确的分类; 偏最小二乘判别分析法(PLS-DA)的判别准确率达87.50%; 基于BP神经网络模型的判别分析, 其训练集的正确率为84.21%, 测试集的正确率为80.00%; 基于遗传算法优化支持向量机(SVM-ga)的判别分析, 其训练集和测试集的正确率均为100%。结论: 多种分析模型均能不同程度地识别核桃油、菜籽油掺伪比例, 其中SVM-ga模型的预测精度最佳。

关键词: 核桃油; 菜籽油; 掺伪混合物; 气相色谱; 化学计量; 判别分析

Abstract: Objective: This study aimed to investigate different discriminant analysis models for pseudo-mixtures of walnut oil and rapeseed oil. Methods: Gas chromatography technology was used to analyze the fatty acid content in the adulterated mixture of walnut oil and rapeseed oil. Chemical stoichiometric methods were used to model the gas chromatography data, and

discriminant analysis was performed on different proportions of walnut oil and rapeseed oil mixtures. Results: Pure walnut oil and adulterated walnut oil were distinguished by using Principal Component Analysis (PCA) identified, and percentage of adulteration in the sample was calculated. 83.33% of the samples were successfully categorized using the Bayes discriminant analysis. Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) achieved 87.50% discrimination accuracy. Based on the BP neural network model for discriminant analysis, the accuracy of the training set was 84.21% and the accuracy of the test set was 80.00%. For both the training and testing sets, the genetic algorithm-based discriminant analysis using an optimized support vector machine (SVM-ga) achieved 100% accuracy. Conclusion: Multiple analytical models can identify the adulteration ratio of walnut oil and rapeseed oil to varying degrees, among which the SVM-ga model had the best prediction accuracy.

Keywords: pseudo mixtures; walnut oil; rapeseed oil; gas chromatography; stoichiometry; discriminant analysis

核桃又名羌桃或胡桃, 含有丰富的营养物质, 其含油量为60%~70%。利用现代工艺技术提取的核桃油, 不仅具有其果仁的药理功效成分^[1], 还具备调节血压、促进新陈代谢、防止血栓形成与扩张的独特功效^[2]。因具有较高的营养价值和利润, 在流通市场, 核桃油中掺入菜籽油的现象时常发生, 由低硫苷低芥酸的“双低”油菜品种加工的菜籽油, 因其无原有的刺激性气味, 使得掺入此类菜籽油的核桃油用传统的感官方法难以辨别。核桃油的

基金项目: 河南省市场监督管理局科技计划项目(编号: 2022sj103)

作者简介: 吴史博(1983—), 男, 南阳市产品质量检验检测中心高级工程师, 硕士。E-mail: wushibo928696@163.com

收稿日期: 2023-10-18 **改回日期:** 2024-01-07

国家标准中,仅对核桃油的基本组成、主要物理参数、质量指标等进行了规定。虽能定性测量其指标,判定合格与否,但无法定量掺伪油脂中核桃油和菜籽油含量。因此出于市场监管的需要,植物油的质量检测和掺伪鉴别成了急需解决的问题^[3-6]。

目前,核桃油掺伪鉴别方法多采用傅里叶变换红外光谱法^[7-8]、近红外光谱技术^[9]等。近年来测定各品种植物油特征脂肪酸含量^[10]并借助于统计学软件^[11]建立植物油判别分析模型的鉴别方法开始盛行。气相色谱法作为色谱测量方法中的一种,不仅具有准确度高、检出限低等优点,特别是其在脂肪酸含量鉴别中的应用更为广泛。研究拟采用气相色谱技术分析不同比例核桃油、菜籽油掺伪混合物中脂肪酸含量及变化规律,通过脂肪酸含量结合不同化学计量方法^[12-19]建立核桃油、菜籽油掺伪混合物的定性和定量掺伪模型并进行判别,以期后续核桃油中同时掺入多种其他植物油的多元掺伪研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

3 种不同品牌核桃油、菜籽油:市售;

混合脂肪酸甲酯标准品:上海安谱实验科技股份有限公司;

甲醇、异辛烷:色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

无水硫酸钠:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

气相色谱仪:Trace 1300 型,赛默飞世尔科技公司;

分析天平:XPR106DUH/AC 型,梅特勒—托利多仪器有限公司;

旋涡混合器:XW-18A 型,上海精科实业有限公司;

移液枪:0.5~10 μL ,赛默飞世尔科技公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备 将不同品牌的纯菜籽油、核桃油按不同体积比混合,利用旋涡振荡器混匀,分别制备菜籽油掺伪量为 0%,20%,40%,60%,80%,100% 的 6 种混合样本,并系统研究掺伪混合物脂肪酸含量的分布规律,共配制掺伪混合物 72 个。

1.3.2 脂肪酸含量分析 对油样进行甲酯化处理后,按 GB 5009.168—2016 第三法进行油脂脂肪酸含量分析。

1.3.3 核桃油、菜籽油混合物的主成分分析 对 72 个样品进行测试,并建立主成分分析模型。

1.3.4 Bayes 判别分析 计算某个观测对象的先验概率,然后按照一定准则构造一个判别函数,分别计算该样品落入各子域的概率,所有概率中最大的一类为该观测对

象所属的类别。将核桃油及掺伪核桃油数据代入 SPSS Statistics 软件中进行 Bayes 判别分析。

1.3.5 偏最小二乘判别分析(PLS-DA) 在主成分分析基础上,将纯核桃油与混有菜籽油的掺伪核桃油的脂肪酸数据代入 SIMCA 软件进行 PLS-DA 分析。

1.3.6 基于 BP 神经网络模型的判别分析 采用 Hold-Out 交叉验证法将原始数据分为两组,一组作为训练集,一组作为测试集,利用训练集训练分类器,利用测试集评估模型的性能。通过调整样本集的划分比例(如 4:6,5:5,6:4,7:3,8:2 等)和计算测试集的分类准确率,最终确定样本量的 80%(样品数 57 个)为训练集,样本量的 20%(样品数 15 个)为测试集。参数设置中,权值阈值范围为 $[-1,1]$,迭代次数为 2 000,通过 Matlab 软件进行训练和识别。

1.3.7 基于遗传算法优化支持向量机(SVM-ga)的判别分析 采用 Hold-Out 交叉验证法将原始数据分为训练集(80%,样本数 57 个)和测试集(20%,样本数 15 个),利用训练集挖掘信息和训练分类器,利用测试集评估模型性能和计算准确率。参数配置中核函数类型为径向基,种群数为 100,迭代次数为 500,核函数参数 g 为 1~100,交叉概率为 0.7~1.0,变异概率为 0~0.2,惩罚参数 C 为 0~100。在此基础上,利用 Matlab 软件进行识别。

2 结果与分析

2.1 核桃油、菜籽油脂肪酸含量对比分析

前处理后的核桃油和菜籽油经气相色谱测定,其脂肪酸组成及含量如图 1 和表 1 所示。由图 1 和表 1 可知,核桃油的脂肪酸主要由十六碳一烯酸($\text{C}_{16:1}$)、十八碳酸($\text{C}_{18:0}$)、十八碳一烯酸($\text{C}_{18:1}$)、十八碳二烯酸($\text{C}_{18:2}$)、十八碳三烯酸($\text{C}_{18:3}$)组成,其中不饱和脂肪酸含量 $>90\%$, $\text{C}_{18:2}$ 的含量最高,其次为 $\text{C}_{18:1}$ 和 $\text{C}_{18:3}$ 。

由表 1 可知,在菜籽油和核桃油的脂肪酸含量组成中, $\text{C}_{18:1}$ 的含量差别最大,菜籽油中的含量约为核桃油的 3.5 倍,随着菜籽油添加量的增大,其在掺伪核桃油中的含量也逐渐提高;其次为 $\text{C}_{18:2}$,其掺伪油脂的变化规律与

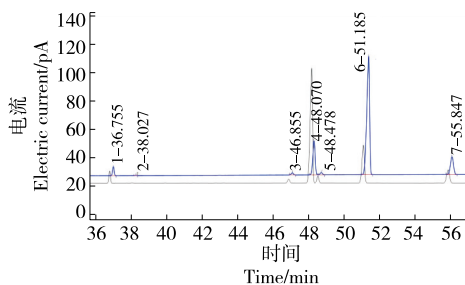


图 1 核桃油、菜籽油脂肪酸含量

Figure 1 Fatty acids content of walnut oil and rapeseed oil

表 1 不同比例核桃油、菜籽油掺伪混合物的脂肪酸含量[†]

Table 1 Fatty acids content of binary adulterated mixtures of walnut oil and rapeseed oil in different proportions %							
菜籽油掺伪量	C _{18:0}	C _{18:1}	C _{18:2}	C _{18:3}	C _{16:1}	C _{20:1}	C _{22:1}
0	0.94±0.04 ^f	17.38±0.45 ^f	67.89±0.75 ^a	11.72±0.51 ^a	0.06±0.01 ^f	/	/
20	1.23±0.07 ^e	25.93±1.11 ^e	59.11±1.29 ^b	10.63±0.29 ^b	0.12±0.01 ^e	/	/
40	1.46±0.04 ^d	35.51±1.53 ^d	49.57±1.03 ^c	9.80±0.62 ^c	0.15±0.01 ^d	/	/
60	1.70±0.08 ^c	44.26±1.39 ^c	39.68±0.98 ^d	9.02±0.64 ^d	0.19±0.01 ^c	0.27±0.03 ^c	0.26±0.03 ^c
80	2.01±0.11 ^b	53.28±1.66 ^b	30.35±0.69 ^e	7.49±0.32 ^e	0.23±0.01 ^b	0.49±0.02 ^b	0.48±0.02 ^b
100	2.38±0.07 ^a	63.76±1.36 ^a	20.50±0.74 ^f	6.23±0.53 ^f	0.28±0.01 ^a	0.65±0.04 ^a	0.65±0.04 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

C_{18:1}的相反。其余脂肪酸相对含量较小,且随菜籽油含量的增加而增加。菜籽油中检出二十碳一烯酸(C_{20:1})和二十二碳一烯酸(C_{22:1}),而核桃油中均未检出。

2.2 主成分分析

由表 2 可知,3 个主成分累计贡献率达 99.49%,能够较为全面地反映原始变量的综合信息。由图 2 可知,不同比例掺伪核桃油与纯核桃油在主成分空间中存在一定的交叉和混乱,但整体上核桃油与掺伪核桃油组间相对独立,且组内相对集中,说明不同比例掺伪核桃油和纯核桃油之间存在较大差异,与表 1 的结果相吻合,表明基于以上 7 种脂肪酸成分进行核桃油掺伪鉴别具有较高的可行性。此外,从主成分空间位点可以看出,纯核桃油和纯菜籽油的差异最为明显,分布在主成分空间的两端,随着

表 2 主成分特征值及累计可信度

Table 2 Principal component eigenvalues and cumulative credibility			
成分	初始特征值		
	特征提取	方差/%	累计/%
1	6.73	96.17	96.17
2	0.17	2.44	98.61
3	0.06	0.88	99.49

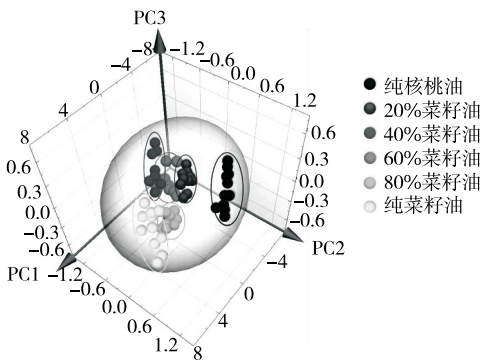


图 2 核桃油与掺伪核桃油主成分得分图

Figure 2 Principal component scores of walnut oil and adulterated walnut oil

菜籽油掺伪量的逐渐提高,其分布位置距离纯核桃油越远,距离纯菜籽油越近。因此,主成分分析在直观区别纯核桃油和掺伪核桃油的基础上,也可以反映核桃油掺伪比例的高低。整体来看,主成分分析在一定程度上可以定性鉴别核桃油的混伪和掺假,但在定量方面仍无法给予明确的解释,因此,需在判别分析和模式识别中进一步研究。

2.3 Bayes 判别分析

根据分析所得分类函数系数,得判别函数式:

$$Y_1 = 2.07X_1 - 0.19X_2 + 80.89X_3 + 3\ 102.63X_4 - 210.70X_5 - 2\ 840.21, \quad (1)$$

$$Y_2 = 97.32X_1 + 7.06X_2 + 68.95X_3 + 4\ 147.92X_4 - 169.02X_5 - 2\ 434.69, \quad (2)$$

$$Y_3 = 185.96X_1 + 15.01X_2 + 55.27X_3 + 4\ 482.60X_4 - 79.52X_5 - 2\ 098.48, \quad (3)$$

$$Y_4 = 313.69X_1 + 24.06X_2 + 40.22X_3 + 4\ 666.08X_4 + 719.07X_5 - 2\ 128.00, \quad (4)$$

$$Y_5 = 466.80X_1 + 33.00X_2 + 25.87X_3 + 4\ 933.88X_4 + 1\ 392.41X_5 - 2\ 620.33, \quad (5)$$

$$Y_6 = 587.47X_1 + 42.61X_2 + 11.01X_3 + 5\ 519.95X_4 + 1\ 881.15X_5 - 3\ 538.52, \quad (6)$$

式中:

$Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ ——纯核桃油、20%掺伪核桃油、40%掺伪核桃油、60%掺伪核桃油、80%掺伪核桃油、纯菜籽油;

X_1 ——C_{18:0}脂肪酸含量, %;

X_2 ——C_{18:1}脂肪酸含量, %;

X_3 ——C_{18:2}脂肪酸含量, %;

X_4 ——C_{16:1}脂肪酸含量, %;

X_5 ——C_{20:1}脂肪酸含量, %。

将用于验证判别模型的样品数据代入判别式中,求得各类的评分即 Y 值, Y 值最大的即为该记录所属的类别。验证结果显示, 83.33% 的样品归入正确的分类。

2.4 偏最小二乘判别分析(PLS-DA)

在主成分分析的基础上,将纯核桃油与混有菜籽油

的掺伪核桃油的脂肪酸数据代入 SIMCA 软件进行 PLS-DA 分析。由表 3 可知,PLS 模型共提取到 4 个主成分,其变量的累计 R^2Y 值和 Q^2 值分别为 98.82%,94.78%,说明该模型的拟合效果较好。

随机选取核桃油与混有菜籽油的掺伪核桃油样品借助 PLS 模型进行预测,结果(表 4)显示,87.50% 的样品被正确分类。掺伪 60% 的样品中有 4 个分类为 40% 集合,掺伪 80% 的样品中有 5 个分类为 60% 集合。错误分类主要因为在掺伪 60%、40% 比例中, $C_{18:3}$ 与 $C_{16:1}$ 的含量相近。掺伪 80%、60% 比例中, $C_{16:1}$ 的含量相近。

表 3 基于 PLS 的解释变量和预测变量				
Table 3 Explanatory and predictive variables based on PLS				
主成分	解释变量	累计变量	预测变量	累计变量
	R^2Y	$R^2Y(cum)$	Q^2	$Q^2(cum)$
PC1	39.96	39.96	34.59	34.59
PC2	28.72	68.68	30.42	65.01
PC3	16.10	84.78	18.37	83.38
PC4	14.04	98.82	11.40	94.78

表 4 PLS 判别分类结果								
Table 4 PLS discriminant classification results								
掺伪量/%	样品数量	正确率/%	预判组成员					
			0	20%	40%	60%	80%	100%
0	12	100.00	12	0	0	0	0	0
20	12	100.00	0	12	0	0	0	0
40	12	100.00	0	0	12	0	0	0
60	12	66.67	0	0	4	8	0	0
80	12	58.33	0	0	0	5	7	0
100	12	100.00	0	0	0	0	0	12
总计	72	87.50	12	12	16	13	7	12

2.5 基于 BP 神经网络模型的判别分析

BP 神经网络中预测值和真实值的分布情况见图 3。由表 5 可知,BP 神经网络算法中训练集的正确率为 84.21%,测试集的正确率为 80.00%,整体效果欠佳。其中,在训练集中,第 6 类的 9 个样品均被误判至第 5 类,其他样品分类归属正确;在测试集中也出现相似的结果,即第 6 类的 3 个样品均被误判至第 5 类,其他样品分类归属正确。说明第 5 类样品与第 6 类样品的相似度较高,现有的评估模型在梯度搜索过程中识别程度不足,与主成分分析的结果较为相似。总体来说,BP 神经网络模型对

掺伪混合物的鉴别效果欠佳,尤其是第 5 类和第 6 类出现较多误判,该判别方法有待进一步调试和优化。

2.6 基于遗传算法优化支持向量机(SVM-ga)的判别分析

SVM-ga 算法中预测值和真实值的分布情况见图 4。由表 6 可知,SVM-ga 算法中训练集和测试集的正确率均为 100%,判别效果理想。说明基于气相色谱技术结合 SVM-ga 模型可以有效地识别核桃油、菜籽油掺伪混合物的掺假比例。这可能是 SVM-ga 算法能够有效地针对混伪掺假问题进行概率意义的全局搜索,并可提供混伪掺假方面的独立启发式,从而保证算法的有效性。

表 5 BP 神经网络算法的鉴别效果												
Table 5 Identification effect of BP neural network algorithm												
类别	训练集						测试集					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	9	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
2	0	8	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
3	0	0	9	0	0	0	0	0	5	0	0	0
4	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	2	0
6	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	3	0
正确率/%	84.21						80.00					

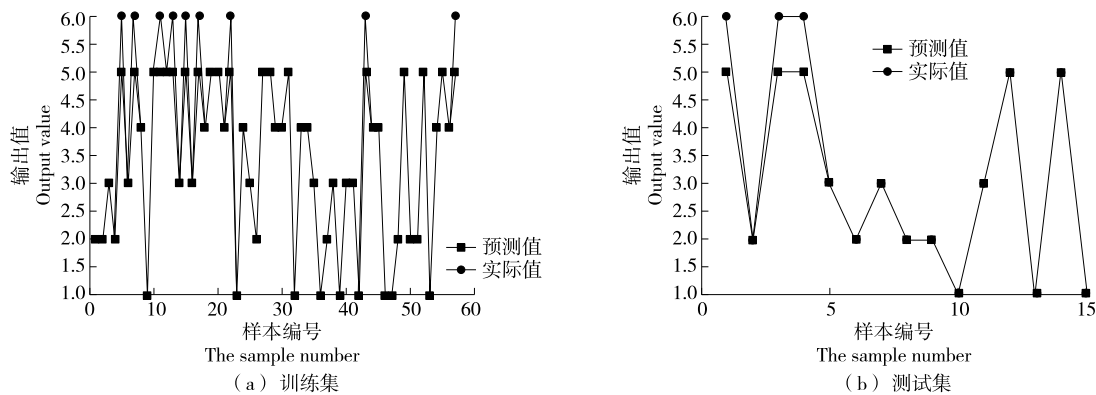


图 3 BP 神经网络中预测值和真实值的分布情况

Figure 3 Distribution of predicted and true values in BP neural network

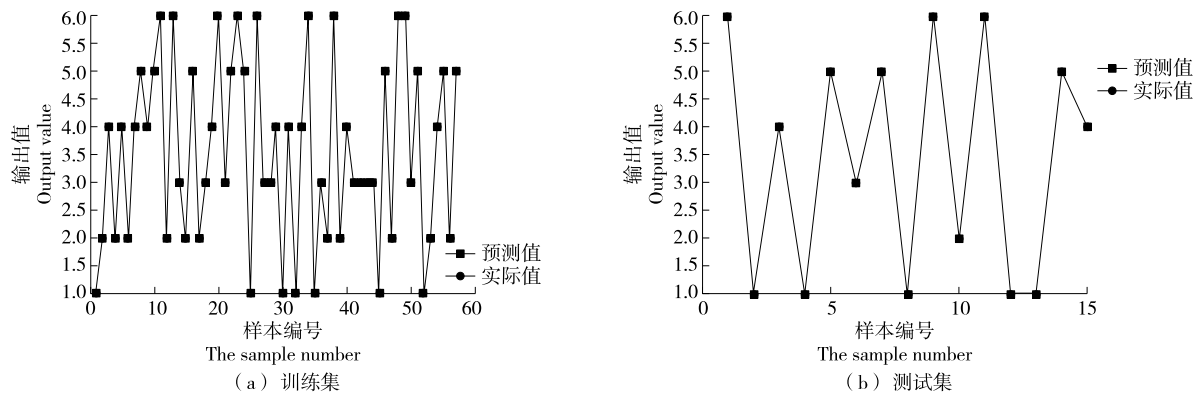


图 4 SVM-ga 算法中预测值和真实值的分布情况

Figure 4 Distribution of predicted and true values in the SVM-ga algorithm

表 6 SVM-ga 算法的鉴别效果

Table 6 Identification effect of SVM-ga algorithm

类别	训练集						测试集					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	7	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0
2	0	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	10	0	0	0	0	0	2	0	0
5	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	3	0
6	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	3
正确率/%	100						100					

3 结论

试验表明,选择菜籽油作为掺伪植物油混入核桃油中,其脂肪酸含量会发生相应变化,在主成分分析中,通过构建核桃油与掺伪核桃油样品的主成分分布图,发现不同掺伪量的掺伪核桃油样品分布相对独立,说明基于主成分分析的数据处理适用于核桃油及其掺伪样品的判别与分类。在此基础上,除采用较为常见的 Bayes 判别分析、PLS-DA 判别分析外,尝试使用基于 BP 神经网络模型的判别分析、基于遗传算法优化支持向量机(SVM-ga)

的判别分析方法构建模型并进行预测。其中,SVM-ga 的判别分析效果更佳,此模式识别方法的建立,可有效识别核桃油、菜籽油掺伪混合物的掺假比例。

气相色谱结合化学计量在核桃油、菜籽油掺伪混合物含量判别分析中取得了一定的效果,其建模方法比较成熟,通过操作软件就可以在相关性较强的一系列数据中提取主要信息,预测未知样品的种类和信息,不仅拓宽了色谱分析等传统分析方法的应用范围,也为产品的质量

中的判别模型均建立在样本分析基础上。样本量较少,样品代表性不足是判别模型的最大弊端,模型的准确性、科学性还需要更多真实样品数据进行校正。此外,在核桃油二元掺伪混合物进行定性、定量研究的基础上,多元掺伪的判别还有待进一步探讨。

参考文献

- [1] AMARAL J S, CASAL S, PEREIRA J A, et al. Determination of sterol and fatty acid compositions, oxidative stability, and nutritional value of six walnut (*Juglans regia* L.) cultivars grown in Portugal[J]. *J. Agric Food Chem*, 2003, 51(26): 7 698-7 702.
- [2] RAHIMI P, KABIRI N, ASGARY S, et al. Anti-diabetic effects of walnut oil on alloxan-induced diabetic rats [J]. *Afr J Pharm Pharmacol*, 2011, 5(17): 1 967-1 978.
- [3] 李桂仙, 李晔, 张春丹. 基于脂肪酸谱法分析山茶油掺伪[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(22): 277-281.
LI G X, LI Y, ZHANG C D. Adulteration analysis of camellia oil based on fatty acid spectrometry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(22): 277-281.
- [4] 王道兵, 岳红卫, 高冠勇, 等. 基于稳定氢氧同位素技术的花生油掺假检测技术研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(8): 118-122.
WANG D B, YUE H W, GAO G Y, et al. Research on detection of adulterated peanut oil by stable hydrogen/oxygen isotope analysis [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(8): 118-122.
- [5] 傅纤雯, 金铭浩, 花磊, 等. 高气压光电离飞行时间质谱用于食用油掺假的快速定性定量鉴别[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(8): 235-243.
FU Q W, JIN M H, HUA L, et al. The rapid qualitative and quantitative adulteration detection of edible oils by high-pressure photoionization time-of-flight mass spectrometry[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(8): 235-243.
- [6] 韩玉泽, 王兴瑞, 董国鑫, 等. 基于甘三酯指纹图谱及化学计量学的青海亚麻籽油掺假识别研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 158-165.
HAN Y Z, WANG X R, DONG G X, et al. Identification of Qinghai flaxseed oil adulteration based on triacylglycerol fingerprint and chemometrics [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(7): 158-165.
- [7] 梁鹏娟, 赵声兰, 陈朝银, 等. 傅里叶变换红外光谱法鉴别纯核桃油并定量检测掺伪含量[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(2): 122-126, 130.
LIANG P J, ZHAO S L, CHEN C Y, et al. The application of fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy for detection and quantification of adulteration in pure walnut oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(2): 122-126, 130.
- [8] 唐佳妮, 刘东红. 食用植物油掺假鉴别方法研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(11): 158-162.
TANG J N, LIU D H. Research progress on authentication methods of edible vegetable oils[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2009, 24(11): 158-162.
- [9] 吴成招, 王一韬, 胡栋, 等. 近红外光谱技术在食用油掺伪检测中的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(3): 685-691.
WU C Z, WANG Y T, HU D, et al. Research progress of near-infrared spectroscopy in the detection of edible oil adulteration[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(3): 685-691.
- [10] 杨振东, 任雪梅, 王健, 等. 基于特征脂肪酸含量的橄榄油掺假快速鉴定模型的建立[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(16): 5 357-5 362.
YANG Z D, REN X M, WANG J, et al. Establishment of rapid adulteration identification model of olive oil based on fatty acid profile [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(16): 5 357-5 362.
- [11] 孙艳辉, 李双芳, 郭玉宝, 等. 基于荧光光谱技术的菜籽油氧化状态智能评价[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(1): 137-141.
SUN Y H, LI S F, GUO Y B, et al. Intelligent evaluation of rapeseed oil oxidation state based on fluorescence spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(1): 137-141.
- [12] 王召滢, 桂丽静, 曹冰, 等. 茶油中脂肪酸指纹图谱的分析与评价[J]. *南方林业科学*, 2020, 48(2): 8-12.
WANG Z Y, GUI L J, CAO B, et al. Analysis and evaluation of fatty acid fingerprints in Camellia oil[J]. *South China Forestry Science*, 2020, 48(2): 8-12.
- [13] 王梓笛, 李双妹, 李艳, 等. 基于拉曼光谱—支持向量机的乳制品快速智能鉴别技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(10): 157-158.
WANG Z D, LI S M, LI Y, et al. Rapid and intelligent identification of dairy products based on Raman spectroscopy and support vector machine[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(10): 157-158.
- [14] 周密, 王小花, 朱芊, 等. 氢核磁共振结合支持向量机鉴别蜂蜜植物源[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(1): 16-21.
ZHOU M, WANG X H, ZHU Q, et al. Identification of the botanic source of honey by ¹H nuclear magnetic resonance and support vector machine[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(1): 16-21.
- [15] 朱金艳. 基于 BP 神经网络的电子鼻、电子舌和色差仪多信息融合技术预测蓝莓汁中花青素含量[J]. *食品科技*, 2021, 46(9): 289-295.
ZHU J Y. Using e-nose, e-tongue and colorimeter multi-information integration to predict the anthocyanin content in blueberry juice based on back propagation neural network[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(9): 289-295.
- [16] 周密, 冯灏, 刘杰, 等. 基于 ICP-MS 截尾数据与支持向量机优化模型鉴别蜂蜜植物源[J]. *分析测试学报*, 2021, 40(7): 1 011-1 017.
ZHOU M, FENG H, LIU J, et al. Identification of the botanical source of honey based on optimized SVM model with censored data of ICP-MS[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2021, 40(7): 1 011-1 017.

(下转第 73 页)

- prediction model of K value of channel catfish filet during freeze-thaw cycle[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 137-142.
- [7] 曹念念, 刘强, 彭菁, 等. 基于近红外光谱技术的黄桃脆片可溶性固形物和硬度定量检测方法[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 51-57.
- CAO N N, LIU Q, PENG J, et al. Quantitative detection method of soluble solids and hardness of yellow peach chips based on near-infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 51-57.
- [8] 褚小立, 史云颖, 陈瀑, 等. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展[J]. 分析测试学报, 2019, 38(5): 603-611.
- CHU X L, SHI Y Y, CHEN P, et al. Advances in research and application of near-infrared spectroscopy in China in recent five years[J]. Chinese Journal of Analytical and Testing, 2019, 38(5): 603-611.
- [9] 孙晓荣, 郑冬钰, 刘翠玲, 等. 小麦粉品质在线无损快速检测系统设计与实现[J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 87-91.
- SUN X R, ZHENG D Y, LIU C L, et al. Design and implementation of online non-damage and rapid testing system for wheat flour quality[J]. Food & Machinery, 2021, 38(12): 87-91.
- [10] 夏长杙, 冉乾松, 李芮, 等. 红茶发酵过程中品质评价技术研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 233-240.
- XIA C Y, RAN Q S, LI R, et al. Research progress on quality evaluation technology of black tea during fermentation[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 233-240.
- [11] 黄积微, 李洋, 袁迪, 等. 基于便携式近红外光谱仪的蓝莓热风干燥过程模型的建立[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 283-290.
- HUANG J W, LI Y, YUAN D, et al. Establishment of blueberry hot air drying process model based on portable near infrared spectrometer[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(16): 283-290.
- [12] 姜洪喆, 杨雪松, 李兴鹏, 等. 油茶果自然霉变程度的可见/近红外与中短波近红外光谱检测[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 272-277.
- JIANG H Z, YANG X S, LI X P, et al. Detection of natural mildew degree of Camellia oleifera fruit by visible/near infrared and short wave near infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2023, 44(4): 272-277.
- [13] 黄志伟, 郭拓, 黄文静, 等. 近红外光谱技术在名贵中药材质量评价中的研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(20): 6328-6336.
- HUANG Z W, GUO T, HUANG W J, et al. Research progress of near-infrared spectroscopy in quality evaluation of rare Chinese medicinal materials[J]. Chinese Herbal Medicine, 2022, 53(20): 6328-6336.
- [14] 褚小立, 陈瀑, 李敬岩, 等. 近红外光谱分析技术的最新进展与展望[J]. 分析测试学报, 2020, 39(10): 1181-1188.
- CHU X L, CHEN P, LI J Y, et al. Recent progress and prospect of near-infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analysis and Testing, 2020, 39(10): 1181-1188.
- [15] 张静, 郭榛, 王思花, 等. 便携式近红外和可见光光谱仪检测水稻水分含量方法比较研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(7): 2059-2066.
- ZHANG J, GUO Z, WANG S H, et al. Comparative study on the detection methods of rice water content by portable near-infrared and visible light spectrometers[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(7): 2059-2066.
- [16] 苏鹏飞, 刘丽丽, 闫宗科, 等. 基于近红外高粱水分的快速分析研究[J]. 酿酒, 2021, 48(1): 87-90.
- SU P F, LIU L L, YAN Z K, et al. Rapid analysis of sorghum moisture based on near infrared[J]. Brewing, 2021, 48(1): 87-90.
- [17] 王超, 王春圻, 徐黎莉, 等. 基于近红外光谱的玉米水分含量快速检测研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022, 34(4): 93-99.
- WANG C, WANG C Q, XU L L, et al. Rapid detection of corn moisture content based on near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Heilongjiang Baiyi Agricultural University, 2021, 34(4): 93-99.
- [18] 赵艳莉, 赵倩, 李志强. 基于近红外光谱的 SSA-RELM 的菠萝含水率快速检测[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 79-86.
- ZHAO Y L, ZHAO Q, LI Z Q. Rapid detection of water content of pineapple by SSA-RELM based on near-infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 79-86.
- [19] 段学, 赵小波, 邹胜琼, 等. 近红外分析技术快速检测白酒基酒中的总酯含量[J]. 酿酒科技, 2021(3): 105-108.
- DUAN X, ZHAO X B, ZOU S Q, et al. Rapid detection of total ester content in liquor base liquor by near infrared analysis[J]. Brewing Technology, 2021(3): 105-108.
- (上接第 68 页)
- [17] 李超, 李孟芝, 崔占虎, 等. 艾粉及常见混伪品的紫外—可见—近红外指纹图谱鉴别研究[J]. 南阳理工学院学报, 2021, 13(6): 98-103.
- LI C, LI M Z, CUI Z H, et al. Study on UV-VIS-NIR fingerprint identification of artemisia argyi powder and common counterfeits[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2021, 13(6): 98-103.
- [18] 张思敏, 张也, 伍红年, 等. 不同产地竹节参中 7 种皂苷含量测定及化学计量学评价[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 65-70, 79.
- ZHANG S M, ZHANG Y, WU H N, et al. Determination of seven kinds of saponins in Panax japonicus C. A. Mey from different regions by chemometric evaluation[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 65-70, 79.
- [19] 杨莉, 夏阿林, 张榆, 等. 基于低场核磁共振技术的奶粉品牌快速判别[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 105-109.
- YANG L, XIA A L, ZHANG Y, et al. Fast identification of milk powder brand based on low field nuclear magnetic resonance technology[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 105-109.