

反向传播神经网络算法结合拉曼荧光光谱法 定量检测特级初榨橄榄油掺假

王九玲^{1*}, 罗文², 李文凯³

(1. 安阳职业技术学院, 安阳 455000; 2. 郑州大学信息工程学院, 郑州 450001;
3. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100)

摘要: **目的** 建立基于反向传播神经网络算法结合拉曼荧光光谱技术定量检测低等级橄榄油掺假特级初榨橄榄油的分析方法。**方法** 制备 11 种不同掺假浓度的特级初榨橄榄油混合油样各 10 份, 在相同时间、空间及目标的前提下, 使用同台光谱探测系统, 采集样品的拉曼光谱和荧光光谱。经过卷积神经网络去除拉曼光谱的基线, 实现拉曼光谱和荧光光谱的数据预处理。根据分子光谱与电子光谱的特征差异, 人为干预并设定拉曼光谱的权重, 建立低等级橄榄油掺假特级初榨橄榄油的反向传播神经网络回归模型。**结果** 综合评估了反向传播神经网络回归模型的评价参数, 特级初榨橄榄油掺假的反向传播神经网络模型的测试集决定系数为 0.9716, 均方根误差为 0.0569, 模型预测效果较好。**结论** 本研究提出的反向传播神经网络算法结合拉曼光谱与荧光的探测方法, 满足快速检测低等级橄榄油掺假特级初榨橄榄油的定量分析需求, 为评价或跟踪特级初榨橄榄油的品质提供了一种无损伤、高效率、低成本的新检测思路。

关键词: 反向传播神经网络; 拉曼光谱; 荧光; 特级初榨橄榄油; 掺假

Quantitative detection of adulteration in extra virgin olive oil using back propagation neural network algorithm combined with Raman fluorescence spectroscopy

WANG Jiu-Ling^{1*}, LUO Wen², LI Wen-Kai³

[1. Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China; 2. School of Information and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China]

ABSTRACT: Objective To establish an analytical method based on back propagation neural network algorithm combined with Raman fluorescence spectroscopy for the quantitative detection of low-grade olive oil adulterated with extra virgin olive oil. **Methods** The 10 mixed oil samples of 11 kinds of different adulterated concentrations of extra virgin olive oil were prepared, and under the same time, space, and target conditions, the same spectral detection system was used to collect the Raman and fluorescence spectra of the samples. The convolutional neural network removed the baseline of the Raman spectrum, and the data preprocessing of the Raman spectrum and fluorescence spectrum was realized. Based on molecular and electronic spectra characteristics, human intervention and setting of Raman spectral weights were used to establish a backpropagation neural network regression model for

基金项目: 国家自然科学基金项目(62002330)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62002330)

*通信作者: 王九玲, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机技术。E-mail: 1041216969@qq.com

*Corresponding author: WANG Jiu-Ling, Master, Lecturer, Anyang Vocational and Technical College, No.461, Pingyuan Road, Development Zone, Anyang 455000, China. E-mail: 1041216969@qq.com

low-grade olive oil adulterated with extra virgin olive oil. **Results** According to the evaluation parameters of the regression model, the coefficient of determination of the test set of the backpropagation neural network model of adulterated extra virgin olive oil was 0.9716, and the root-mean-square deviation was 0.0569. The model had a good prediction effect. **Conclusion** The backpropagation neural network algorithm proposed in this study, combined with Raman spectroscopy and fluorescence detection methods, meets the quantitative analysis requirements for rapid detection of low-grade olive oil adulteration and extra virgin olive oil. It provides a new non-destructive, efficient, and low-cost detection approach for evaluating or tracking the quality of extra virgin olive oil.

KEY WORDS: back propagation neural network; Raman spectroscopy; fluorescence; extra virgin olive oil; adulteration

0 引言

特级初榨橄榄油原产于西班牙、意大利及希腊等地中海国家,具有丰富的营养物质^[1],不仅风味浓厚醇香,还具有降低胆固醇、预防心血管病、调节血糖、预防癌症、保护肝脏以及调理皮肤等功效^[2-4]。随着国民对饮食健康的关注,国内橄榄油消费市场也在不断提升,2022年我国橄榄油销售量同比增长近15%。作为一种富含单不饱和脂肪酸的天然优质油脂,我国早在20世纪60年代就开展了相关的种植推广,但要满足国内橄榄油市场仍然需要依赖大量进口橄榄油。而橄榄油掺假的问题是一种极其普遍的现象,即便在原产地也同样存在橄榄油掺假的问题^[5-7]。一方面商家在追逐利益最大化,通过将其他普通植物油掺假或替代优质橄榄油,以达到降低成本,提高利润率,另一个方面商家还通过将香精和色素等添加剂掺入低等级橄榄油中,从而提高低等级橄榄油的口感或冒充优质橄榄油。

光谱法是特级初榨橄榄油掺假检测的常用技术手段,光谱检测手段具有高效率、无需样品前处理、操作简单、成本低和适用现场原位无损探测等优势,其中紫外可见吸收光谱法^[8-11]、拉曼光谱法^[12-14]、荧光光谱法^[15-17]、红外吸收光谱法^[18-22]等是食用油检测技术常用的几种光谱技术手段。

多种光谱技术联用已成为提高检测精度的有效手段,其中邓晓军等^[23]采用拉曼光谱与紫外可见融合光谱技术开展橄榄油质量等级的快速鉴定方法的研究,其核心将拉曼光谱与紫外可见光谱联用,并生成降维融合成像数据,从而为等级鉴定构建可视化标准2D源谱图。王杰^[24]实现一种基于拉曼光谱和近红外光谱的融合方法,用于植物油的掺假定性分析,探索了支持向量机分类模型、偏最小二乘支持向量机模型、多核学习支持向量机模型和偏最小二乘线性判别分析模型4种分类模型,实现了对回收油的快速检测。而莫欣欣^[25]采用近红外(near-infrared, NIR)以及Raman光谱技术结合化学计量学方法对食用植物油中反式脂肪酸含量进行了快速、无损定量检测研究并优化了定量模型。但上述多种光谱技术的联用或信息融合是基于多台设备或装置分别开展的实验测量,光谱数据的获取工作表

现出较低的效率,实验人员需经过烦琐的操作。因此,提出一种拉曼荧光同时获取的技术方案对快速无损量化检测具有重要的意义。

本研究以特级初榨橄榄油作为研究对象,采用拉曼荧光光谱技术结合反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)算法,面向过期橄榄果榨油掺假特级初榨橄榄油的问题,建立了一种基于BPNN的掺假量化预测模型,为规范国内橄榄油市场提供技术支持和理论依据。

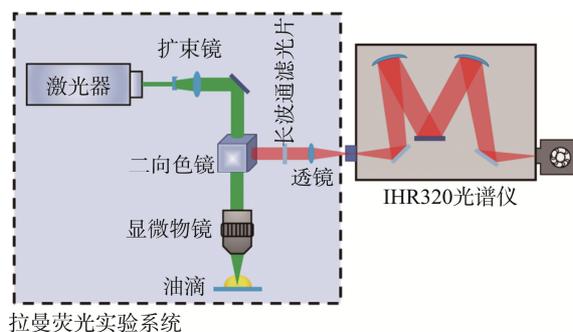
1 材料与方法

1.1 材料与试剂

特级初榨橄榄油(extra virgin olive oil, EVOO) 10份,过期橄榄果榨油(expired olive pomace oil, EOPO) 1份,其中特级初榨橄榄油基本涵盖了我国市场上常见的品牌和种类。将每份特级初榨橄榄油与过期橄榄果榨油按1:0、9:1、8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7、2:8、1:9、0:1体积比分别进行混合,每种浓度各制备10个混合油品。

1.2 仪器与设备

IHR320型光谱仪(日本HORIBA公司);Xplorer电动移液器(1000 $\mu\text{L} \pm 6 \mu\text{L}$,德国Eppendorf公司);1 mm石英片(宜兴市谱析光学元件有限公司)。根据实验需求需要单独搭建拉曼荧光实验系统,其光路系统示意图如图1所示。



拉曼荧光实验系统

图1 实验系统光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of the optical path of the experimental system

1.3 实验方法

1.3.1 混合油品的拉曼荧光光谱

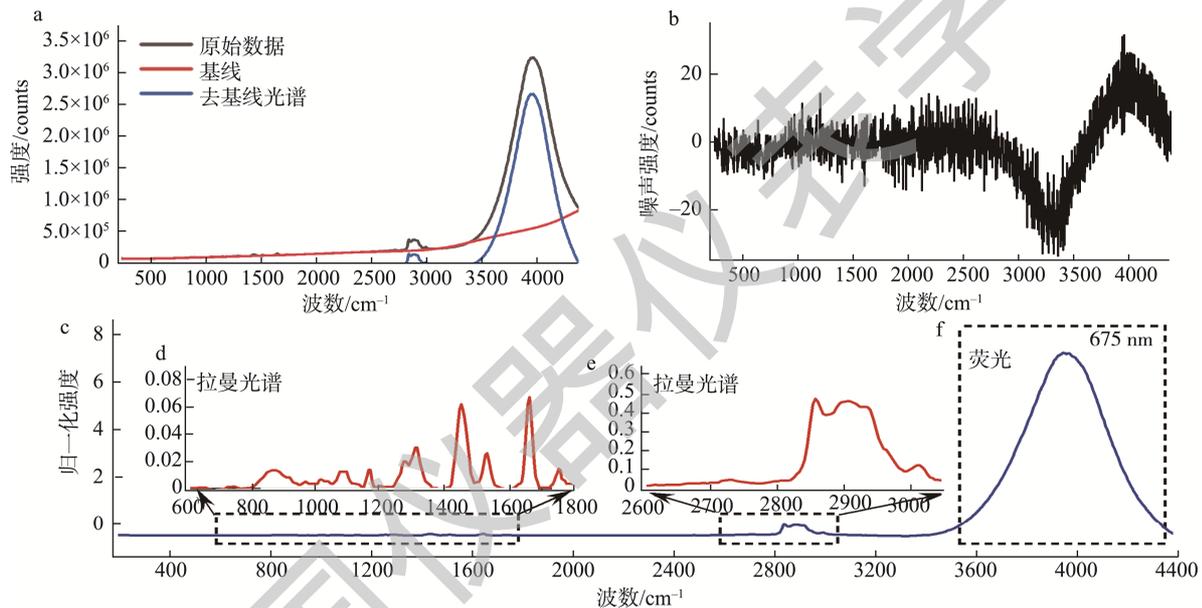
在实验室恒温恒湿的环境下开展所有实验样本的光谱采集实验, 仪器的光谱采集范围为 535~695 nm (105~4408 cm^{-1}), 光谱积分时间为 100 ms, 光谱分辨率优于 0.06 nm, 每个油品各随机采集 10 条光谱。

1.3.2 拉曼荧光光谱的数据预处理

所有的光谱数据均是使用 Matlab R2020a 软件进行数据处理, 所有的光谱图均是通过 Origin 9.0 软件进行绘制。通过卷积神经网络实现光谱的去噪和基线校正^[26], 如图 2 所示。图 2a、b 表明卷积神经网络不仅消除了光谱噪声, 而且还可以在去除拉曼光谱基线的同时, 进一步校正荧光谱带。图 2c 表明两种光谱特征均包含在多元光谱数据中, 但拉曼光谱强度与荧光相差 100 倍, 如不进行权重修正, 很难在建模过程

中保证拉曼光谱与荧光光谱的特征信息均被充分提取。

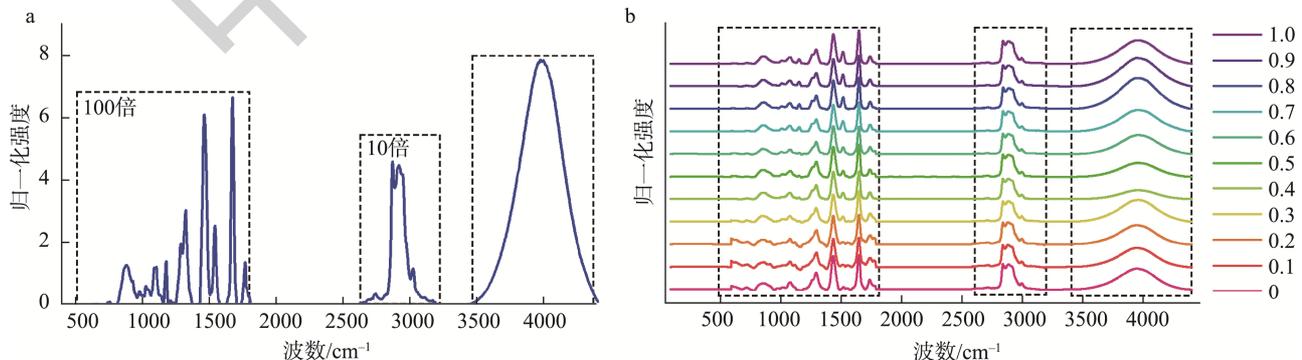
拉曼光谱反映物质成分的分子振动光谱, 荧光光谱反映物质成分的电子光谱。由于两种光谱的强度不在同一数量级, 因此在分析这种多元光谱数据时, 需要对不同的光谱谱段进行权重设置, 以确保在后续数据处理时提取所有的光谱特征均。在 500~3200 cm^{-1} 范围内的特征峰为分子振动产生的拉曼光谱, 而 3600~4400 cm^{-1} (658~695 nm) 范围内的宽峰为电子跃迁产生的荧光光谱, 为使两者达到相同的数量级, 将 500~1600 cm^{-1} 范围内的拉曼光谱放大 100 倍, 将 2600~3100 cm^{-1} 范围内的拉曼光谱放大 10 倍, 拉曼荧光光谱的数据预处理后的最终结果如图 3 所示。图 3a 为特级初榨橄榄油拉曼荧光光谱数据预处理后的最终光谱, 其中分子振动光谱的强度达到电子光谱量级。图 3b 为 11 种含有不同浓度特级初榨橄榄油混合油品的拉曼荧光光谱数据预处理后的平均光谱。



注: a为原始数据、基线及去基线光谱; b为噪声; c为去基线光谱的中值归一化; d为500~1800 cm^{-1} 范围内的拉曼光谱; e为2600~3100 cm^{-1} 范围内的拉曼光谱; f为658~695 nm范围内的荧光。

图2 EVOO拉曼荧光光谱的数据预处理过程

Fig.2 Data preprocessing process of Raman fluorescence spectroscopy of EVOO



注: a为EVOO拉曼特征峰谱段权重修正后的光谱; b为11种混合油品拉曼特征峰谱段修正后的光谱。

图3 拉曼特征峰谱段权重修正后的光谱

Fig.3 Spectras after weight correction of Raman characteristic peak spectral segment

1.3.3 特级初榨橄榄油掺假预测模型的构建

本研究共计 110 个混合油品, 每个油品各随机采集了 10 条光谱数据, 因此获得了共计 1100 条拉曼荧光光谱数据集。将数据集按照 4:1 的比例随机分为训练集和测试集, 其中训练集有 880 条光谱, 测试集有 220 条光谱。在 Matlab R2020a 数据处理软件中, 使用训练集建立 BPNN 模型, 并采用循环留一法验证 BPNN 模型, 采用测试集检验 BPNN 模型预测效果。在 BPNN 模型的训练、验证与测试过程中, 将决定系数(coefficient of determination, R^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价模型的具体指标参数。 R^2 最大为 1, 最小为 0, 当 R^2 越接近 1 时, 说明模型预测效果越好。计算公式见式(1)~(3):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

其中, y_i 表示真实值, \hat{y}_i 表示预测值。

2 结果与分析

2.1 拉曼荧光光谱分析

为进一步阐明 EVOO 与 EOPO 拉曼荧光光谱特征峰对应其组分的分子信息, 将主要拉曼荧光特征峰进行一一解译, 如图 4 所示。在 EVOO 的拉曼荧光光谱中, 包含了脂肪酸分子和类胡萝卜素产生的拉曼光谱以及叶绿素产生的荧光光谱。脂肪酸分子产生的丰富拉曼特征峰是解译油品中脂肪酸种类及其所含比例的重要依据, 类胡萝卜素分子产生的拉曼特征峰和叶绿素分子产生的荧光光谱是解译 EVOO 物理冷榨工艺保留下天然营养物质的重要指标。这

也是两种技术联用综合评判 EVOO 品质的主要依据。

2.2 特级初榨橄榄油拉曼光谱分析结果

各个拉曼特征峰代表的官能团信息^[27-30], 如表 1 所示。其中 869 cm^{-1} 和 1085 cm^{-1} 是由亚甲基链骨架的伸缩振动产生, 966 cm^{-1} 与 $\text{trans}(\text{C}=\text{C})$ 的弯曲振动有关, 强度相对弱, 1164 cm^{-1} 是由类胡萝卜素的 C-C 伸缩振动产生, 1272 cm^{-1} 是由不饱和脂肪酸的顺式碳氢键 $[\text{cis}(\text{C}-\text{H})]$ 的基团振动产生, 1312 cm^{-1} 是由亚甲基的卷曲振动产生, 1451 cm^{-1} 是亚甲基的剪切振动产生的强拉曼信息, 1526 cm^{-1} 是由类胡萝卜素分子碳碳双键伸缩振动产生, $2790\sim 2990 \text{ cm}^{-1}$ 是甲基与亚甲基中(C-H)产生的混合叠加谱。两种油品的拉曼特征峰都是由类似的官能团产生, 但不同油品间脂肪酸的种类及含量存在一定差异, 即这种差异可通过相应官能团振动谱峰的强度表示。

通过分析处理后的光谱(图 4), 可以发现 EVOO 与 EOPO 之间几乎是含有相同的拉曼特征峰, 最明显的差异主要集中在类胡萝卜素分子产生的拉曼谱峰, 而两种植物油脂肪酸分子产生的拉曼光谱差异主要体现在峰值强度的不同。

2.3 特级初榨橄榄油荧光光谱分析结果

叶绿素是植物和藻类中发现的一种绿色色素。在新鲜的油橄榄果实中富含这种天然生物色素, 而橄榄油的冷榨工艺将这种卟啉类化合物尽可能的保留下来。叶绿素分子由一个大的环状结构和镁离子构成, 该结构使得叶绿素分子可以吸收短波光并将其转化为化学能。短波长激发光照射叶绿素分子时, 处于低能级的电子跃迁到高能级, 由于高能级的电子极不稳定, 会迅速跃迁至低能级, 该过程会释放出长波长的光, 该信号就是荧光。叶绿素荧光现象在植物学、生态学等研究领域中具有广泛的应用潜力, 可以通过其强度和光谱特征研究植物的光合作用、健康状况等。

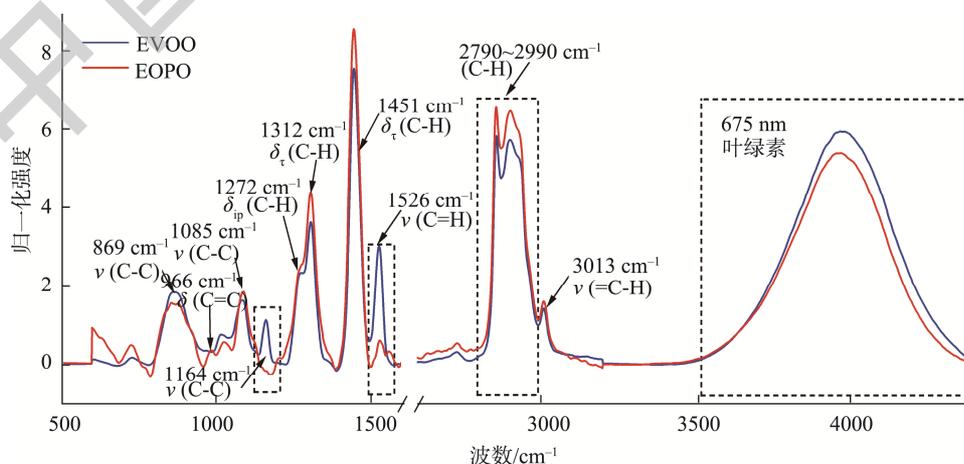


图4 EVOO拉曼荧光特征峰所对应的成分信息

Fig.4 Component informations corresponding to EVOO Raman fluorescence characteristic peaks

表1 拉曼峰位及其官能团信息
Table 1 Raman peak positions and their functional group information

峰位/cm ⁻¹	振动模式	官能团/组	强度
869	ν (C-C)	-(CH ₂) _n -	中等
966	δ (C=C)	反式 RHC=CHR	弱
1085	ν (C-C)	-(CH ₂) _n -	中等
1164	ν (C-C)	-(C-C) _n -	中等
1272	δ_{sp} (=C-H)	非共轭顺式(RHC=CHR)	中等
1312	δ_t (C-H)	亚甲基(CH ₂)	中等
1451	δ_t (C-H)	亚甲基(CH ₂)	强
1526	ν (C=C)	C=C	中等

本研究通过叶绿素产生的荧光光谱,探究橄榄油掺假过程中叶绿素荧光光谱特征的变化规律,为实现EVOO的掺假量化的反演提供理论依据。图5为不同EVOO含量的混合油品中叶绿素分子产生的荧光光谱,根据图5反映出的信息可以发现:在EVOO与EOPO的混合油品中,随着EVOO浓度的提高,叶绿素分子产生的荧光强度整体表现为先增强,后减弱,再增强的现象。

2.4 基于BPNN算法的EVOO掺假的预测模型

本研究采用的BPNN网络包含2个隐藏层,2个隐藏层的节点数均为25,训练次数为1000,训练目标设置为0.001。为防止在最佳临界点出现振荡,导致无法收敛的问题,学习率的值应较小,模型将其设置为0.0001。将权重修正后的光谱数据(图3)作为输入变量,输入特征谱段为

500~1600、2600~3100及3600~4400 cm⁻¹的数据(共560个特征值),用以预测混合油品中EVOO的浓度(即模型的输出量)。由输入层、隐藏层与输出层组成的神经网络可以以任意精度拟合一个非线性映射关系。理论上神经元数量越多,BPNN解决复杂问题的能力越强,因此,只要拥有足够多的神经元数量便可以以任意精度拟合非线性函数。但过度的神经元数量不仅会引起过拟合现象,从而造成BPNN的泛化能力下降,而且会占用过多的计算内存,从而造成训练速度的下降。

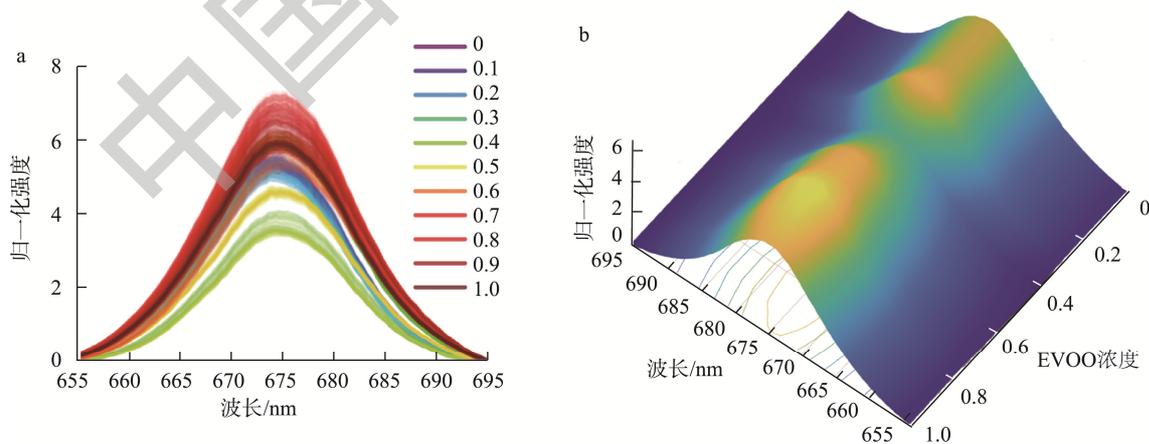
神经元数量的设置可根据经验公式(4)^[31]:

$$N = \sqrt{n_1 + n_2} + \alpha \quad (4)$$

其中, N 为隐含层神经元数, n_1 是输入层神经元数, n_2 为输出层神经元数, α 为1~10之间的常数。

因此,本研究采用BPNN的网络结构为560-25-25-1,此外还对比了560-20-20-1、560-22-22-1、560-28-28-1 3种网络结构。

将训练集用于BPNN网络的构建,并采用留一法验证模型预测效果,可分别得到训练集和测试集的模型预测的评价参数(R^2 、 $RMSE_v$ 、 R_t^2 、 $RMSE_t$),通过训练集的评价参数选择最优网络模型,并最终用于测试集的预测值和实际值的比较。由表2可以发现隐藏层神经元数量越多,训练集在模型构建的过程中表现出更优的非线性映射性能。但在验证评价过程中发现神经元数在达到一定值后,会出现泛化能力下降的现象,即决定系数趋于恶化。因此,本研究最终选定隐藏层神经元数量为25,即BPNN的网络模型为560-25-25-1,如图6所示。



注: a为不同EVOO浓度产生的荧光二维谱图; b为不同EVOO浓度产生的荧光三维谱图。

图5 叶绿素分子荧光强度随EVOO浓度的变化

Fig.5 Changes in fluorescence intensity of chlorophyll molecules with EVOO concentration

在确定网络结构后, 通过训练集构建的 BPNN 网络模型预测测试集, 如图 7 所示。BPNN 模型在预测 EOPO 掺假 EVOO 的浓度方面具有较好的表现。该方法在测试集样本的真实值与预测值的 R^2 大于等于 0.9716, RMSE 小于等于 0.0569。综合训练集中训练评价参数与

验证评价参数的表现, BPNN 算法结合拉曼荧光光谱技术对 EVOO 的掺假定量分析表现出较强的技术优势。拉曼荧光光谱技术相比于传统的拉曼光谱或荧光光谱技术具有更丰富的特征维度信息, 可为 EVOO 的市场监测提供强有力的手段。

表 2 不同网络结构对 BPNN 模型预测效果的影响
Table 2 Influences of different network structures on the prediction performance of BPNN models

输入层 神经元数	隐藏层 神经元数	隐藏层神经 元数	输出层 神经元数量	训练评价		验证评价		测试集	
				R_t^2	RMSE _t	R_v^2	RMSE _v	R_{cv}^2	RMSE _{cv}
560	20	20	1	0.9443	0.0846	0.9315	0.0941	0.9329	0.1232
560	22	22	1	0.9564	0.0654	0.9419	0.0791	0.9579	0.0987
560	25	25	1	0.9846	0.0394	0.9865	0.0431	0.9744	0.0543
560	28	28	1	0.9942	0.0159	0.9446	0.1139	0.9487	0.8794

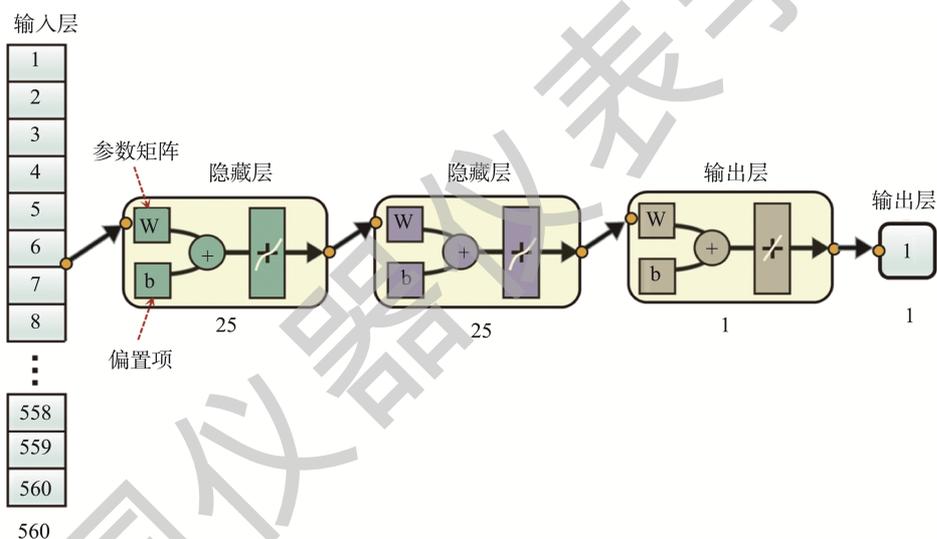


图6 BPNN的结构示意图
Fig.6 Structure diagram of BPNN

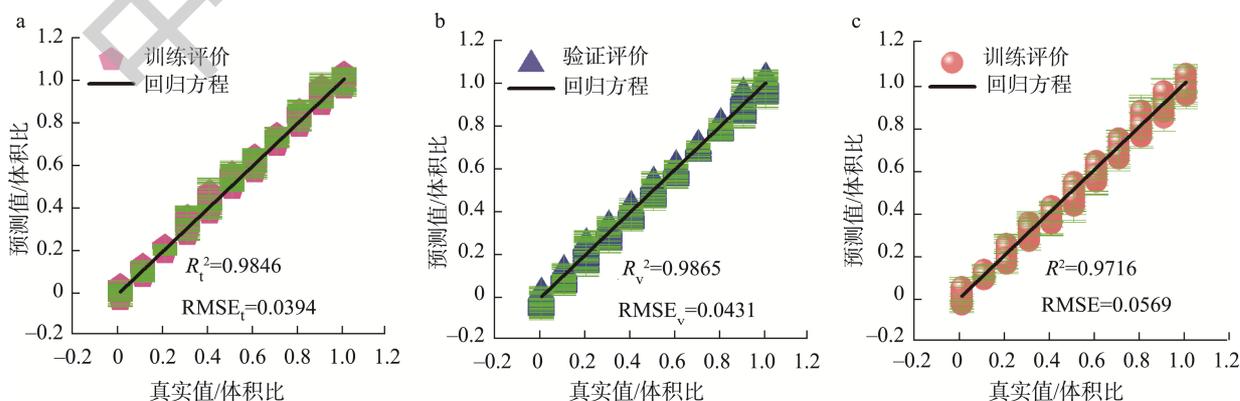


图7 BPNN模型的预测效果评价
Fig.7 Evaluation of the prediction effect of BPNN model

3 结 论

本研究制备了从低到高不同 EVOO 掺假浓度的 11 种混合油品, 采集了 1100 条典型混合油品的拉曼荧光光谱, 按照 4:1 的比例随机生成了 880 条拉曼荧光光谱的训练集和 220 条拉曼荧光光谱的测试集, 并采用留一法验证法, 验证模型的网络结构。通过训练集构建了 EOPO 掺假 EVOO 的 BPNN 定量反演模型, 综合评估了 BPNN 回归模型的评价参数, 特级初榨橄榄油掺假的 BPNN 模型的测试集决定系数为 0.9716, 均方根误差为 0.0569, 模型预测效果较好, 模型整体预测效果良好。结果表明该方法可以应用于过期或不同等级橄榄油掺假 EVOO 的定量分析。BPNN 算法结合拉曼荧光光谱助力特级初榨橄榄油掺假定量检测方案是可行的, 该类快速无损的检测技术既结合了分子振动光谱技术, 又融合了电子光谱技术, 通过多维光谱信息提高检测效率和精度。本研究提出的 BPNN 算法结合拉曼光谱与荧光的探测方法, 满足快速检测低等级橄榄油掺假特级初榨橄榄油的定量分析需求, 为评价或跟踪特级初榨橄榄油的品质提供了一种无损伤、高效率、低成本的新检测思路。

参考文献

- [1] 伍美军, 蒲红争, 勾瑶, 等. 橄榄油有效成分及应用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(10): 34–35.
WU MJ, PU HZ, GOU Y, *et al.* Research progress on active ingredient and application of olive oil [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2020, 26(10): 34–35.
- [2] 成珍. 初榨橄榄油中酚醛抗菌、抗氧化和抗炎的研究进展[J]. 食品科技, 2014, 39(2): 182–185.
CHENG Z. Antimicrobial, antioxidant and anti-inflammatory phenolic activities in extra virgin olive oil [J]. Food Sci Technol, 2014, 39(2): 182–185.
- [3] 孙曼, 杨艳. 橄榄油应用于肛周皮肤护理的疗效观察[J]. 实用中西医结合临床, 2014, 14(9): 79–80.
SUN M, YANG Y. Observation on the therapeutic effect of olive oil on perianal skin care [J]. Pract Clin J Integrat Tradit Chin West Med, 2014, 14(9): 79–80.
- [4] 郑恒光, 翁敏劼, 汤葆莎, 等. 橄榄油保健和疾病预防功效研究进展[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 196–199.
ZHENG HG, WENG MJ, TANG BS, *et al.* Research progress on health promotion and disease prevention of olive oil [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(10): 196–199.
- [5] 周盛敏, 姜元荣. 橄榄油掺伪检测研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(4): 93–96.
ZHOU SM, JIANG YR. Research progress of olive oil adulteration detection [J]. Grain Sci Technol Econ, 2020, 45(4): 93–96.
- [6] 林远辉, 高蓓, 李玉玉, 等. 橄榄油掺假鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 279–283.
LIN YH, GAO B, LI YY, *et al.* Research progress in identification of olive oil adulteration [J]. Food Sci, 2013, 34(5): 279–283.
- [7] FRANKEL EN. Chemistry of extra virgin olive oil: Adulteration, oxidative stability, and antioxidants [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(10): 5991–6006.
- [8] 卢聪慧, 胥玲花, 黄新异, 等. 基于紫外可见光谱技术和色素组成区分橄榄油与其他食用油[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 130–137.
LU CH, XU LH, HUANG XY, *et al.* Distinguishing olive oil from other edible oils based on ultraviolet-visible spectroscopy and pigment compositions [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(5): 130–137.
- [9] 王泓鹏, 万雄. 基于植物油可见吸收光谱的相关系数鉴别特级初榨橄榄油[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2814–2819.
WANG HP, WAN X. Distinguishing extra virgin olive oil based on the correlation coefficient of visible absorption spectrum of vegetable oil [J]. Spectrosc Spect Anal, 2018, 38(9): 2814–2819.
- [10] 李辰, 梁添旺, 杨伟杰, 等. 红外和紫外可见分光光谱法初步鉴别餐饮废油[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(5): 1371–1376.
LI C, LIANG TW, YANG WJ, *et al.* Preliminary identification of waste cooking oil by the infrared spectrum and ultraviolet-visible spectrum [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(5): 1371–1376.
- [11] 曹晨鹏, 郝仕国, 罗宁宁, 等. 基于受激布里渊散射及紫外-可见吸收光谱的橄榄油等级鉴别与分析[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 165–170.
CAO CP, HAO SG, LUO NN, *et al.* Authentication and analysis of olive oil based on stimulated Brillouin scattering and UV-visible absorption spectrum [J]. Chin J Laser, 2018, 45(9): 165–170.
- [12] 王利军, 王红, 谢乐, 等. 拉曼光谱快速鉴别花生油掺棕榈油的研究[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(5): 604–607.
WANG LJ, WANG H, XIE L, *et al.* Rapid authentication of palm oil in pure peanut oil by Raman spectroscopy [J]. Chin J Oil Crop Sci, 2013, 35(5): 604–607.
- [13] 匡俊豪, 罗宁宁, 郝中骐, 等. 基于近红外拉曼光谱的山茶油掺假检测技术研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 104–110.
KUANG JH, LUO NN, HAO ZQ, *et al.* Study on the adulteration detection of camellia oil based on near-infrared Raman spectroscopy [J]. J Nanchang Hangkong Univ (Nat Sci Ed), 2022, 36(3): 104–110.
- [14] 马金鸽, 杨巧玲, 邓晓军, 等. 基于便携式拉曼光谱的进口散装橄榄油品质现场快速无损鉴别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(9): 2789–2794.
MA JG, YANG QL, DENG XJ, *et al.* On-site rapid and non-destructive identification method for imported bulk olive oil quality based on portable Raman spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2021, 41(9): 2789–2794.
- [15] 牟涛涛, 陈思颖, 张寅超, 等. 常见食用油和煎炸食用油的激光诱导荧光光谱特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2448–2450.
MU TT, CHEN SY, ZHANG YC, *et al.* Laser induced fluorescence spectrum characteristics of common edible oil and fried cooking oil [J]. Spectrosc Spect Anal, 2013, 33(9): 2448–2450.
- [16] 李昊, 陈明惠. 荧光光谱分析法在地沟油鉴别中的应用研究[J]. 激光

- 生物学报, 2014, 23(5): 472–476.
- LI H, CHEN MH. Application of fluorescence spectrum analysis in identification of waste oil [J]. *Acta Laser Biol Sin*, 2014, 23(5): 472–476.
- [17] 耿红蕊, 曹文明, 江明. 荧光光谱结合模式识别技术鉴别地沟油[J]. 食品科技, 2015, 40(12): 275–279.
- GENG HR, CAO WM, JIANG M. Identification of gutter oils based on fluorescence spectrum combined with pattern recognition technology [J]. *Food Sci Technol*, 2015, 40(12): 275–279.
- [18] 李雪, 杨瑞楠, 原喆, 等. 油菜籽叶绿素含量近红外光谱快速检测[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 126–129.
- LI X, YANG RN, YUAN Z, *et al*. Rapid detection of chlorophyll content in rapeseed based on near infrared spectroscopy [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41(1): 126–129.
- [19] 彭星星, 陈文敏, 乔茜华, 等. 近红外光谱技术鉴别核桃油中掺入菜籽油、大豆油及玉米油的研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(12): 106–113.
- PENG XX, CHEN WM, QIAO QH, *et al*. Study on quantitative determination of walnut oil adulteration with repressed oil and soybean oil by near infrared spectroscopy [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2015, 30(12): 106–113.
- [20] 沈乐丞, 曾秀英, 温志刚, 等. 基于近红外光谱技术的赣南茶油掺假快速鉴别[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 62–67.
- SHEN LC, ZENG XY, WEN ZG, *et al*. Rapid identification of Gannan oil-tea camellia seed oil adulteration based on near infrared spectroscopy [J]. *China Oils Fats*, 2022, 47(6): 62–67.
- [21] 洗瑞仪, 黄富荣, 黎远鹏, 等. 可见和近红外透射光谱结合区间偏小二乘法(iPLS)用于橄榄油中掺杂煎炸老油的定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2462–2467.
- XIAN RY, HUANG FR, LI YP, *et al*. Quantitative analysis of deep-frying oil adulterated virgin olive oil using Vis-NIR spectroscopy with iPLS [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2016, 36(8): 2462–2467.
- [22] 吴双, 涂斌, 陈志, 等. 近红外光谱结合蒙特卡洛交互验证奇异样本筛选的橄榄油掺假定性定量分析[J]. 食品科技, 2016, 41(10): 277–282.
- WU S, TU B, CHEN Z, *et al*. Qualitative and quantitative analysis of olive oil adulteration by laser near infrared spectroscopy based on Monte Carlo cross validation [J]. *Food Sci Technol*, 2016, 41(10): 277–282.
- [23] 邓晓军, 马金鸽, 杨巧玲, 等. 基于拉曼-紫外可见融合光谱技术的进口橄榄油质量等级可视化快速鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(4): 1117–1125.
- DENG XJ, MA JG, YANG QL, *et al*. Visualized fast identification method of imported olive oil quality grade based on Raman-UV-visible fusion spectroscopy technology [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2023, 43(4): 1117–1125.
- [24] 王杰. 近红外-拉曼单光谱及多光谱融合鉴别植物油品种[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2018.
- WANG J. Identification of plant oil varieties using near-infrared Raman single spectrum and multispectral fusion [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2018.
- [25] 莫欣欣. 食用植物油中反式脂肪酸含量的近红外及拉曼光谱快速检测研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- MO XX. Rapid determination of *trans* fat acid in edible vegetable oil by near infrared and Raman spectroscopy [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.
- [26] 焦青亮, 刘明, 于坤, 等. 基于卷积神经网络的光谱预处理方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(1): 292–297.
- JIAO QL, LIU M, YU K, *et al*. Spectral pre-processing based on convolutional neural network [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2022, 42(1): 292–297.
- [27] 黎远鹏. 基于拉曼光谱法的食用油性鉴别与掺伪含量检测研究[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- LI YP. Identification of edible oil and detection of its adulteration via Raman spectroscopy [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [28] SILVIA P, CHIARA A, LUCA L, *et al*. Lutein/ β -carotene ratio in extra virgin olive oil: An easy and rapid quantification method by Raman spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2022, 404(Pt B): 134748.
- [29] ZHU JJ, RONG YW, JIANG X, *et al*. Raman spectroscopy coupled with metaheuristics-based variable selection models: A method for rapid determination of extra virgin olive oil content in vegetable blend oils [J]. *J Food Compos Anal*, 2023, 123: 105503.
- [30] ZHAO HF, ZHAN YL, XU Z, *et al*. The application of machine-learning and Raman spectroscopy for the rapid detection of edible oils type and adulteration [J]. *Food Chem*, 2022, 373(PB): 131471.
- [31] 张丹宁, 吴巧丽, 张博. 基于 BP 神经网络的 PM_{2.5} 浓度值预测模型[J]. 建筑技术与应用, 2023, (2): 9–13.
- ZHANG DN, WU QL, ZHANG B. PM_{2.5} concentration prediction model based on BP neural network [J]. *Res Appl Build Mater*, 2023, (2): 9–13.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



王九玲, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机技术。

E-mail: 1041216969@qq.com