

出缸期皮蛋凝胶质构特性与品质的高光谱无损检测

陈远哲¹, 王巧华^{1, 2*}, 田文强¹, 徐步云¹, 胡建超¹

1. 华中农业大学工学院, 湖北 武汉 430070

2. 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 质构作为一种重要的品质参数,能够显著地影响出缸期皮蛋的凝胶品质,目前没有有效的快速无损检测方法。应用高光谱成像实现对出缸期皮蛋质构特性的无损预测及不同品质皮蛋的检测分级。以不同品质鸭皮蛋为研究对象,采集优质蛋、合格蛋与不合格蛋样本的高光谱数据,对比测定其凝胶质构硬度和弹性参数,对原始光谱进行单一和组合变换(多元散射校正 MSC、包络线去除 CR、一阶求导 FD、包络线去除一阶求导组合 CR-FD),分析一维光谱数据与质构硬度和弹性的相关性,发现经 CR-FD 变换后的光谱反射率与凝胶质构硬度、弹性的相关性最大,分别在波长 683 和 715 nm 达到最大值为 0.882 和 0.865;基于最优的光谱变换和二维相关光谱法,以凝胶质构硬度和弹性作为扰动因子,探寻皮蛋硬度和弹性的最优研究区域,结果显示:以硬度为扰动因子时,波长 476, 539, 647, 672, 728 和 851 nm 处存在自相关峰;在波长 483, 572, 657, 739 和 826 nm 处的光谱信号对弹性值较敏感,故最终选择 476~851 和 483~826 nm 两个敏感波段分别作为凝胶硬度和弹性的研究区域;对比连续投影算法(SPA)、竞争性自适应重加权算法(CARS)、遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、无信息消除法(UVE)5种不同变量选择方式,发现使用粒子群优化算法结合 PLSR 模型的检测精度最高:预测硬度的 R_p^2 和均方根误差 RMSEP 为 0.826 和 0.874, RPD 为 2, 预测弹性的 R_p^2 和均方根误差 RMSEP 为 0.886 和 0.402, RPD 为 1.9。使用 3 种不同分类器对不同品质皮蛋进行预测,发现对优质蛋、合格蛋与不合格蛋分类的准确率分别达到了 97%, 92% 和 100%, 基于预测结果的混淆矩阵和 ROC 曲线对模型进行评估,PLS-DA 模型的精度和泛化能力优于 BP 和 RF 模型。综上所述,使用高光谱技术可以实现皮蛋质构特性的预测及对不同品质皮蛋的无损分级。

关键词 皮蛋; 质构特性; 二维相关; 高光谱技术

中图分类号: TS253.7

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)06-1985-08

引言

皮蛋是我国特有的传统蛋制品,风味独特,营养价值丰富;皮蛋中富含不饱和脂肪酸,且氨基酸比例平衡,易消化吸收,深受人们的喜爱^[1]。传统上,皮蛋的加工通常使用铅和其他对人类有害的重金属。玄夕龙等尝试采用无铅工艺腌制皮蛋^[2]。然而,腌制液中缺乏铅等金属来控制碱性溶液渗透到鸭蛋内部,可能会造成碱伤影响皮蛋的品质^[3]。由于碱伤的存在,出缸期后皮蛋就被分为不同的等级。凝固完全富有弹性的凝胶状态属于优质蛋;轻微碱伤,剥开后有少许黏壳、糟头等现象的属于合格蛋;严重碱伤,剥开后出现烂头,局部液化的属于不合格蛋^[4]。由于蛋壳掩盖了鸭蛋基质中发

生的过程,腌制期中很难根据皮蛋的凝胶质构特性准确地调整碱性溶液的精确浓度,以避免产生碱伤的皮蛋。目前国内对皮蛋分级一致的做法是依靠人工,通过灯照、敲蛋感知振荡量等方式来估算。这种方法繁琐低效,不能满足皮蛋行业快速、可靠地检测皮蛋的凝胶质构特性与不同品质的分级要求。

高光谱图像是一种无损检测新技术,已成功应用于肉类、果蔬等品质的分析与检测^[5-6]。高光谱数据包含了丰富的光谱信息,能够精确地检测出缸期皮蛋的光谱特征,估算皮蛋的质构参数进而判断皮蛋的等级。近年来,研究人员已从皮蛋破损、凝胶状态、分级等方面做了初步研究:刘龙等根据皮蛋壳的声学特性,基于小波能量和 BP 神经网络对皮蛋的破损状况进行检测^[7];Li^[8]等根据皮蛋的介电阻抗,

收稿日期: 2021-05-08, 修订日期: 2021-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871863, 32072302), 湖北省重点研发项目(2020BBB072), 扬州市科技计划项目(YZ2020047)资助

作者简介: 陈远哲, 1996 年生, 华中农业大学工学院硕士研究生 e-mail: 462935614@qq.com

* 通讯作者 e-mail: wqh@mail.hzau.edu.cn

采用介电检测将皮蛋分为凝胶状皮蛋和非凝胶状皮蛋, BN 分类器的精度为 81%; 王巧华等^[9]利用机器视觉与近红外光谱对皮蛋进行分级, 优质蛋、次品蛋和劣质蛋的准确率分别为: 96.49%, 94.12%和 100%。目前关于皮蛋凝胶质构特性的高光谱预测的研究尚无报道。

为评价出缸期皮蛋的质构特性, 高效、可靠地对皮蛋进行分级, 本工作对采集的皮蛋高光谱数据进行多种光谱变换, 分析一维光谱、二维光谱和质构特性的相关性, 提取特征波长, 建立光谱信息与皮蛋凝胶质构特性的回归模型和分类模型, 以期今后的皮蛋内部检测提供依据。

1 实验部分

1.1 材料

试验用的优质蛋、合格蛋和不合格蛋均由湖北神丹健康食品有限公司生产。这些皮蛋都是采用市面上常见的青壳新鲜鸭蛋腌制, 所有皮蛋都是在相同的条件下, 按照同一的程序生产的。腌制完成后, 由经验丰富的工人挑选大小相近, 蛋壳无破损的皮蛋作为试验样本。图 1(a)所示的为完全凝胶化的优质蛋, 剥去壳后, 皮蛋小端的蛋清弹性光滑, 且含有“松花”, 不存在粘稠液体; 图 1(b)显示的是由于黏壳, 皮蛋尖端存在小部分糟头现象, 轻微碱伤, 属于合格蛋; 图 1(c)所示的皮蛋有严重烂头现象, 局部液化, 存在粘稠液体, 属于未完全凝胶的不合格蛋。其中优质蛋有 105 枚, 合格蛋有 75 枚, 不合格蛋有 60 枚。

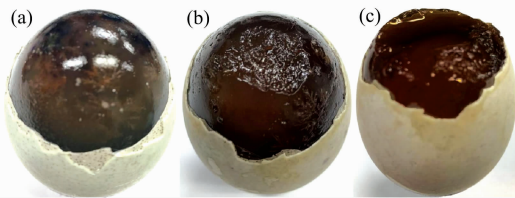


图 1 不同品质皮蛋样本图

Fig. 1 Samples of preserved eggs in different qualities

1.2 仪器

实验仪器: TMS-PRO 型专业食物物性分析仪(质构仪); Zolix Hyper SIS-VNIR-CL 高光谱图像采集系统(美国海洋光学公司)。如图 2 所示, 高光谱成像系统的组成主要有光谱仪(Spectral Imaging Ltd. 公司)、CCD 工业相机(Hamamatsu 公司)、4 个 150 W 的卤钨灯(北京卓立汉光仪器有限公司)、1 架水平移动控制台(北京卓立汉光有限公司)等部件构成。该采集系统的光谱波长范围为 400~1 000 nm(含有 520 个波段), 分辨率为 2.5 nm, 所有样本均在暗箱内采集。

1.3 高光谱图像的采集与校正

实验前, 需将仪器预热 30 min, 以消除暗电流和 CCD 工业相机芯片不稳定的影响, 之后在移动平台上放置自制带孔载物板, 打开光源, 将完整带壳皮蛋钝端朝下水平放置。高光谱数据采集的相关参数设置为: 试验样本与镜头的距离为 35 cm, 曝光时间为 0.15 s, 水平移动控制台的速度为 2 mm·s⁻¹, 移动距离为 210 nm。实验中会有光照不均、响应

时间不同等影响, 因此需对采集的原始高光谱图像进行黑白板校正^[10], 最终得到光谱反射率 I , 图像校正公式为

$$I = \frac{I_{Raw} - I_B}{I_W - I_B} \quad (1)$$

式(1)中, I_{Raw} 为原始高光谱反射率; I_B 为黑板校正反射率(反射率接近 0); I_W 为白板校正反射率(反射率接近 1)。

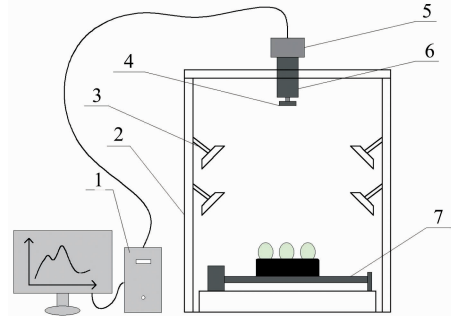


图 2 高光谱成像系统

1: 计算机; 2: 暗箱; 3: 光源; 4: 镜头;

5: 相机; 6: 光谱仪; 7: 步进电机

Fig. 2 Hyperspectral imaging system

1: Computer; 2: Dark box; 3: Lights; 4: Lens;

5: CCD camera; 6: Spectrograph; 7: Stepper motor

校正后, 利用 ENVI 软件(美国 Exelis VIS 公司)建立掩膜获取感兴趣区域, 选取反射强度最高的数值减去最低的数值作成的新灰度图像, 然后采用 Otsu 阈值分割获得二值图像, 进而提取每个样本的 ROI, 计算每个样本的 ROI 区域的平均反射光谱作为对应的原始反射光谱。

1.4 皮蛋质构特性的测定方法

利用 TMS-PRO 型专业食物物性分析仪进行 TPA 质地多面剖析法(texture profile analysis)实验。将形成凝胶之后的蛋清切成 1 cm×1 cm×1 cm 的方块, 在传感器上安装 P/5 平底柱形探头, 在凝胶测定程序中设置参数为: 测定前速度为 60 mm·min⁻¹, 测定速度为 60 mm·min⁻¹, 测定后速度为 60 mm·min⁻¹, 压缩比为 0.4, 引发距离为 20 mm, 引发力为 5 g。采用 TPA 程序进行凝胶质构测定, 得到硬度、弹性参数, 重复 3 次取平均值。

1.5 数据处理

1.5.1 一维、二维特征光谱分析

利用 Matlab2016a 软件对原始光谱反射率进行多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、去除包络线(continuum removal, CR)、一阶求导(first derivative, FD)以及包络线去除和一阶求导组合变换法(CR-FD)得到一维光谱。利用 SPSS 软件的 Pearson 相关分析法对不同预处理的一维光谱与质构特性进行相关性分析。

二维相关光谱(two-dimensional correlation spectra, 2DCOS)是将一维光谱数据扩展到第二维度上, 可以增加光谱的分辨率, 使得一维光谱的弱峰和重叠峰更加清晰。利用 2D shige 软件将所有波段的一维光谱两两组合生成二位相关光谱, 以质构特性作为外部扰动条件, 深度解析二维同步光谱的特征变化, 寻找与质构特性扰动相关的特征波段范围。

1.5.2 特征波长的选择

针对二维相关光谱筛选出的特征波段范围,光谱数据之间仍然存在共线严重,影响模型运算速度等问题。因此采用如下 5 种方法提取有效信息变量:连续投影算法(successive projections algorithm, SPA)是一种前向循环的特征变量选取方法,能够过滤无用信息,降低光谱数据之间的共线性,变量数的确定是根据在该范围内的最小均方根误差值(root mean square error, RMSE);竞争性自适应重加权算法(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)是由自适应重加权采样(ARS)算法提取 PLSR 模型中 R_c 绝对值大的波动点,并由交叉验证选出模型中 RMSECV 最小的子集作为最优变量子集;遗传算法(genetic algorithm, GA)是把复杂的模型用繁殖机制结合编码技术表现,不断迭代、优化来求得最优解。粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)是一种迭代启发式智能优化算法,具有容易实现、收敛效果好等特点,PSO 算法中所有粒子都有一个函数所决定的适应值,以 $F=R^2$ (R^2 为决定系数)为适应度函数筛选特征波长;无信息消除法(uninformative variables elimination, UVE)为在原始数据中随机添加一定数量级(本研究采用 $0\sim 10^{-6}$)的噪声,逐次剔除一个样本,剩下的样本作为训练集建立 PLS 回归模型,得到的回归系数 x 由可信度 Y 来判断是否选取该波长。

$$Y_i = \frac{\text{mean}(x_i)}{\text{std}(x_i)} \quad (2)$$

式(2)中, Y_i 为第 i 个波长的可信度; $\text{mean}(x_i)$ 为模型平均回归系数; $\text{std}(x_i)$ 为每个波长的方差;当 $|Y_k| > \max|Y_j|$ 时,选取该波长, k 取 $1\sim 520$, j 取 $450\sim 1\,000$ 。

1.5.3 建模方法与模型评价

采用 PLSR 建立皮蛋凝胶质构特性的检测回归模型。PLSR 是一种经典的根据最小偏差的平方对曲线进行拟合的

方法,它是将质构参数作为因变量引入到光谱自变量数据中,进行分解,使得自变量的主成分与样本的质构参数相关联。

通过化学计量法结合皮蛋凝胶质构参数找出表征出缸期不同品质皮蛋的光谱差异性,来实现对未知出缸期皮蛋样本品质的分级。本研究从监督模式判别方法建立偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminate analysis, PLS-DA),BP(back propagation)神经网络和随机森林(random forest, RF)三种分类模型进行皮蛋品质鉴别。

建立回归模型后,采用决定系数 R^2 、均方根误差和相对分析误差(relative percent deviation, RPD)作为 PLSR 模型的有效指标, R^2 越大、RMSE 越小,表明模型的预测性越好。RPD 是表示模型是否稳定,当 $RPD < 1.4$ 时,则认为模型不可靠;当 $1.4 < RPD < 2$ 时,认为该模型较可靠;当 $RPD > 2$ 时,说明模型具有极好的预测能力。

分类模型的性能基于混淆矩阵、ROC 和 AUC 对模型进行评价。混淆矩阵是用来对分类模型预测结果的一种评价方式,ROC 曲线能反应分类器在某个阈值时对样本的识别能力,其曲线下的面积(area under curve, AUC)用来作为定量数值的指标。

2 结果与讨论

2.1 皮蛋的原始光谱曲线分析

不同品质皮蛋的原始高光谱曲线如图 3(a),不同品质皮蛋的光谱曲线的走向趋势相似,表明优质蛋、合格蛋与不合格蛋样品的内部化学成分基本一致,但光谱集在 $401.3\sim 449.6$ 和 $952.5\sim 1\,000$ nm 范围存在明显的噪声,故选用波段区间($450\sim 950$ nm)的光谱作为有效波段进行分析。

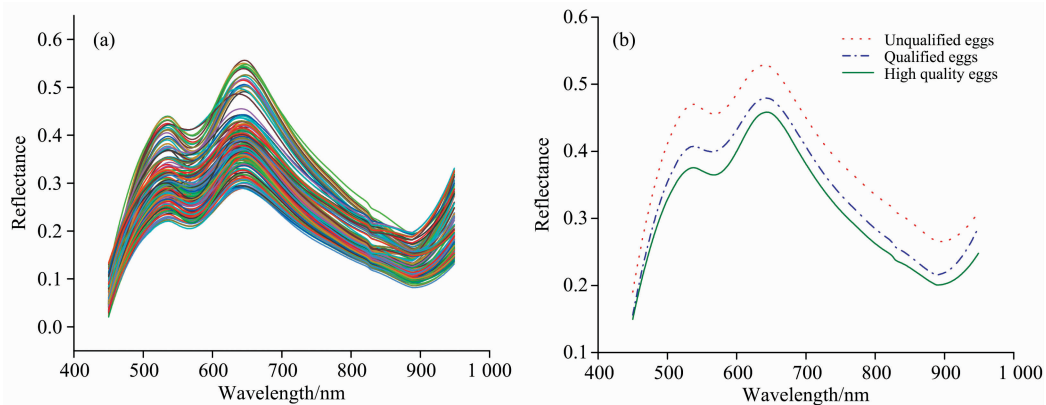


图 3 样本原始光谱(a),样本平均光谱(b)

Fig. 3 Original (a) and mean (b) spectra of egg samples

图 3(b)所示为混合样本集 105 枚优质蛋、75 枚合格蛋和 60 枚不合格蛋的 ROI 平均光谱曲线。不同品质的皮蛋表现出一定的差异,不合格皮蛋的的反射强度最高,合格蛋次之,优质蛋最低。其中,不合格蛋的第一个平均反射率波峰在 $534\sim 561$ nm,合格蛋和优质蛋的反射率波峰有所前移,

在 $523\sim 558$ nm 附近。由于可见/近红外波段的主要的吸收带是由强泛音和含氢键 $O-H$ (多来自于水分子)、 $C-H$ (多来自于有机分子)、 $N-H$ (多来自于蛋白质)的吸收产生的,因此这些差异可能与皮蛋在腌制期蛋壳气孔数量和内膜结构特性对凝胶品质造成的影响有关,使出缸期不同品质皮蛋的

光谱有明显差异。

2.2 样本集的划分

试验样本中共有 240 枚皮蛋, 利用光谱理化值共生距离法 (sample set partitioning based on joint X-Y distances, SPXY) 结合光谱信息按照 3 : 1 比例对质构硬度和弹性进行校正集和预测集划分, 统计出校正集和预测集的最大值、最

小值、平均值和标准差如图 4 所示。在图 4(a)中, 硬度的分布范围 2.1~11.1 N, 校正集和预测集的标准差分别为 1.414 3 和 1.402 5; 在弹性统计分类图 4(b)中, 弹性值在 12.47%~39.72% 范围内, 校正集和预测集的标准差为 3.015 4 和 2.985 4; 通过 SPXY 法划分的凝胶质构校正集的分布范围要广于预测集, 因此数据具有代表性。

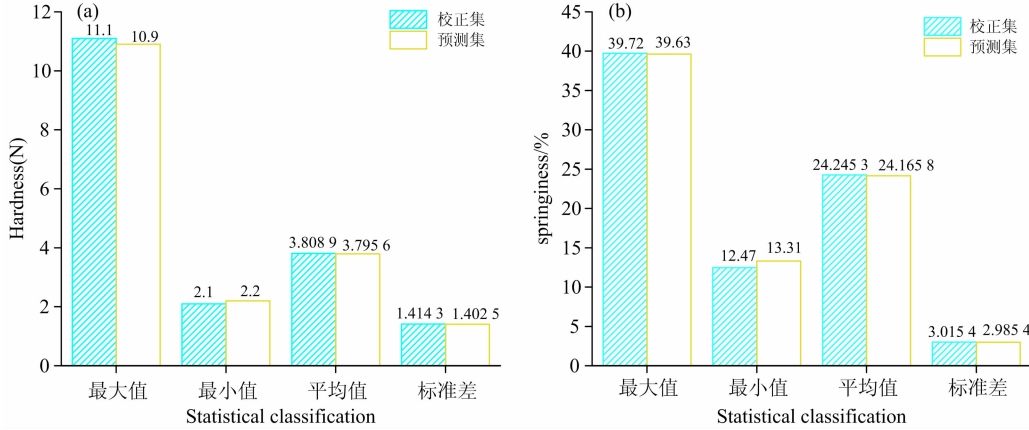


图 4 样本凝胶质构参数统计
Fig. 4 Parameter statistics of gel texture

2.3 一维光谱特征与质构特性的相关性分析

对原始光谱平滑预处理后, 进行多元散射校正、包络线去除、一阶求导、包络线去除和一阶求导组合变换, 获取不同光谱变换后的光谱变量与皮蛋凝胶质构参数的相关性, 得到皮蛋质构参数和光谱变换的相关系数图以及最大相关系数和敏感波段表, 由图 5 和表 1 所示。

由图 5(a)可知, MSC 和 CR 变换后的光谱和硬度的相关性走势相似, 由 MSC、CR 变换的光谱在 541~778 和 537~803 nm 波段与凝胶质构硬度的相关性达到了 0.01 极显著相关水平, 分别在 714 和 726 nm 处光谱变换的反射率与凝胶质构硬度的相关性最大, 为 -0.832 和 -0.871, 且 CR 变换后的相关性整体大于 MSC 变换后的; 由 FD 和 CR-FD 变换后的光谱与质构硬度的相关性曲线呈正负起伏变化, 两者变换后的光谱在 541~601, 652~731, 742~753 和 802~842 nm 波段附近与凝胶质构硬度的相关性达到 0.01 极显著相关水平, 分别在 657 和 683 nm 处光谱变换的反射率与凝胶质

构硬度相关性最大, 为 0.813 和 0.882。同理, 如图 5(b)所示, 对不同变换后的光谱反射率与凝胶质构弹性进行相关性分析, 由 MSC 和 CR 变换后的光谱相关性相似, 两者分别在 450~523 和 450~519 nm 波段的光谱变换反射值与质构弹性达到 0.01 极负显著相关水平, 在 739~942 和 714~946 nm 波段的光谱变换反射率与质构弹性达到 0.01 极正显著相关水平, 在 806 和 817 nm 处光谱变换的反射值与质构弹性相关性最高, 分别为 0.714 和 0.782; 由 FD 和 CR-FD 变换后的光谱与质构弹性的相关性曲线表现为正负交叉, 同时波峰波谷增多, 在 472~491 和 517~603 nm 波段附近达到 0.01 极负显著相关水平, 在 654~821 和 846~950 nm 波段附近达到 0.01 极正显著相关水平, 分别在 713 和 715 nm 处的光谱变换反射值与质构弹性相关性最高, 为 0.862 和 0.865; 由此可见, 经 CR-FD 变换的光谱反射率与凝胶质构参数的相关性较其他变换方法的相关性有所提高。

表 1 皮蛋凝胶质构特性最大相关系数和敏感波段

Table 1 Maximum correlation coefficient and sensitive band of texture properties of preserved egg gel

质构指标	硬度/N		弹性/%	
	最大相关系数	波长范围/nm	最大相关系数	波长范围/nm
光谱 MSC 变换	-0.832	541~778	0.714	450~523
光谱 CR 变换	-0.871	537~803	0.782	450~519
光谱 FD 变换	0.813	541~601, 652~731, 742~753, 802~842	0.862	472~491, 517~603, 654~821, 846~950
光谱 CR-FD 变换	0.882	541~599, 654~726, 728~741, 799~840	0.862	474~490, 513~599, 657~825, 851~950

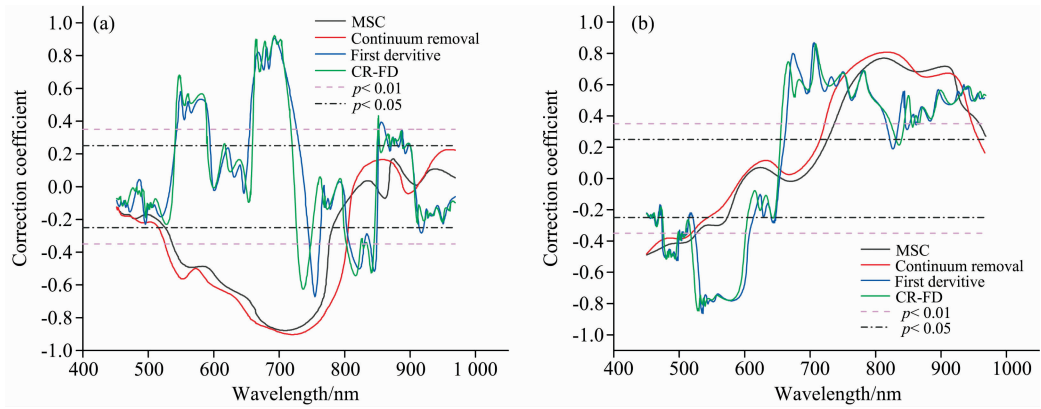


图 5 硬度与光谱变换数据的相关性 (a), 弹性与光谱变换数据的相关性 (b)

Fig. 5 Correlation between hardness and spectral data transfer (a), correlation between springiness and spectral data transfer (b)

2.4 二维相关光谱的图谱特征

对 CR-FD 变换后的光谱采用二维相关光谱技术, 表征以凝胶质构硬度和弹性为扰动因子时, 高光谱信号变化的协同程度, 绘出的样本 2DCOS 同步谱、三维立体图和自相关谱, 如图 6 所示。2DCOS 同步谱图 6(a) 存在自相关和交叉峰, 对角线上的自相关峰与质构硬度和弹性相关, 表征该波段处光谱信号在质构硬度和弹性改变时的变化程度; 对角线外的交叉峰反映了在质构硬度和弹性变化时各吸收峰之间的

相关程度。在自相关谱图 6(c) 中, 以硬度为扰动因子时, 波长 476, 539, 647, 672, 728 和 851 nm 处存在自相关峰, 表明该波长处的光谱信号对硬度值较敏感, 在波长 483, 572, 657, 739 和 826 nm 处的光谱信号对弹性值较敏感, 说明上述变量是与凝胶质构相关的敏感变量波长。因此, 本文选择 476~851 nm 作为皮蛋凝胶硬度的研究区域, 选择 483~826 nm 作为皮蛋凝胶弹性的研究波长范围。

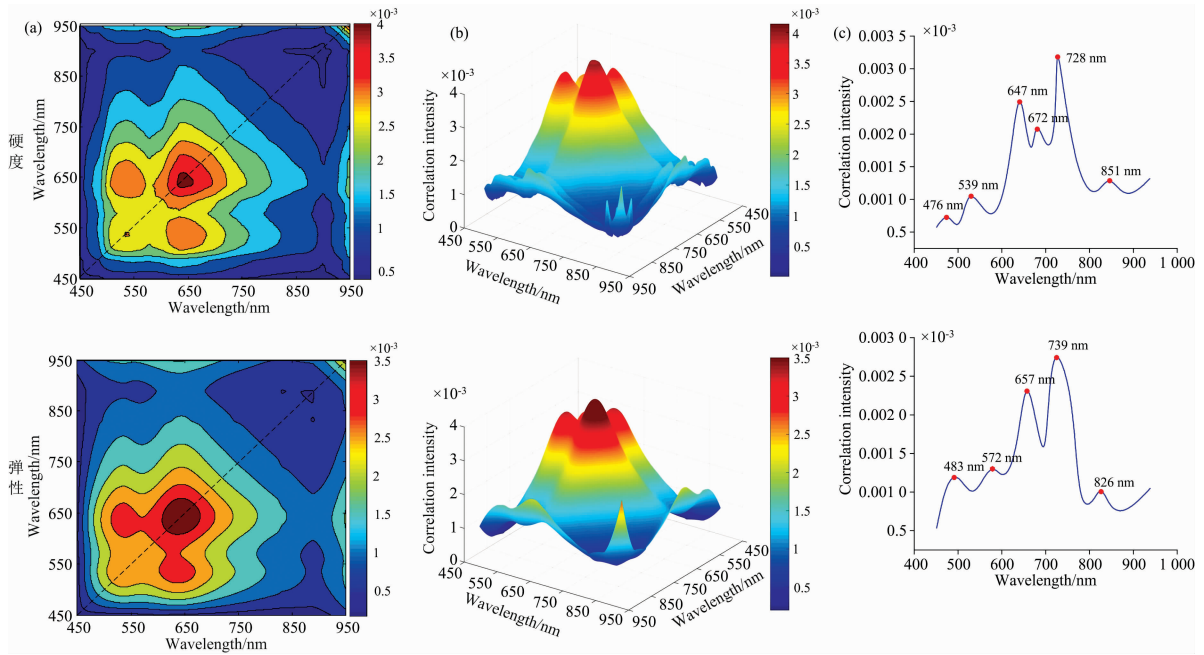


图 6 皮蛋凝胶质构特性二维相关同步谱 (a), 三维立体图 (b), 自相关谱 (c)

Fig. 6 (a) Two-dimensional correlation synchronization spectra of texture properties of preserved egg gel, (b) 3D stereo plots, (c) Autocorrelation spectra

2.5 特征波长提取

由二维相关光谱得出结果可以看出, 两种质构指标的敏感波段数量依然较多。采用 5 种方法对经 CR-FD 变换的质构硬度光谱 476~851 nm 波段和质构弹性 483~826 nm 波段

筛选特征波长, 其分布情况如图 7 所示。对于图 7(a) 硬度波长的筛选, 由 SPA 算法选择的波长最少, 使用 CARS 算法选择的波长数量最多, 使用 GA 选择的波长分布在特定的波段区域, 而使用 PSO 和 UVE 算法选择的波长相对均匀涉及整

个波段。经特征波长选择后, 硬度波长数量最少占整个波段的 2.4%, 最多占波段的 6.7%。对于图 7(b) 弹性波长的筛选, 使用 SPA 算法选择波长数最少, 使用 GA 选择的波长最多, 运用不同方法选择的波长分布较分散且不连续, 弹性波

长数量最少占整个波段的 2.3%, 最多占 7.6%。可以看出, 不同方法提取的波长的数量也不同, 因此确定特征波长可以有效减少光谱数据冗余, 提高模型的运行速度。

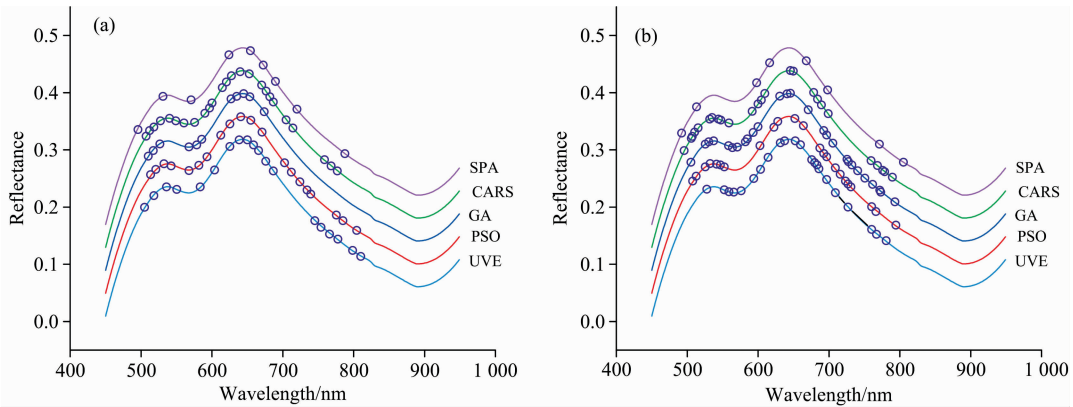


图 7 硬度特征波长分布 (a), 弹性特征波长分布 (b)

Fig. 7 Hardness characteristic wavelength distribution (a), springiness characteristic wavelength distribution (b)

2.6 PLSR 模型的建立与预测

采用 5 种不同波长选择方法 SPA, CARS, GA, PSO 和 UVE 筛选的特征波长作为 PLSR 模型的自变量, 皮蛋凝胶

质构硬度和弹性分别作为因变量, 建立回归模型。将全光谱数据用于建模对比, 分析波长筛选的效果, 模型的预测效果如表 2 所示。

表 2 皮蛋质构硬度和弹性的 PLSR 模型预测结果

Table 2 Prediction results of PLSR models for hardness and springiness of preserved egg

质构指标	降维方法	波长数量	因子数	校正集		预测集		RPD
				R_c^2	RMSEC	R_p^2	RMSEP	
硬度/N	无	434	20	0.732	0.985	0.693	1.327	1.7
	SPA	9	8	0.782	0.846	0.723	1.105	1.6
	CARS	25	12	0.823	0.893	0.786	0.876	1.8
	GA	11	8	0.767	0.754	0.745	0.943	1.7
	PSO	20	10	0.872	0.815	0.826	0.874	2.0
	UVE	19	13	0.834	1.164	0.804	1.254	1.8
弹性/%	无	434	19	0.752	0.357	0.731	0.486	1.8
	SPA	8	7	0.836	0.364	0.792	0.435	1.6
	CARS	25	18	0.875	0.248	0.848	0.356	2
	GA	26	10	0.843	0.372	0.823	0.417	1.9
	PSO	23	12	0.926	0.318	0.886	0.402	1.9
	UVE	22	13	0.834	0.367	0.815	0.476	1.8

从表 2 可以看出, 5 种变量选择方法所建立的预测模型较全光谱 PLSR 模型的预测效果有不同程度的提升, 质构硬度和弹性的预测集 R_p^2 分别在 0.693~0.826 和 0.731~0.886 之间, 全光谱模型数据冗余, 且模型准确率相对低; 硬度建立的模型经特征变量选择后的 5 种模型预测集的 R_p^2 分别提高了 3%, 9.3%, 5.2%, 13.3% 和 11.1%, 弹性建立的模型预测集 R_p^2 分别提高了 6.1%, 11.7%, 9.2%, 15.5% 和 8.4%; 从模型精度来看, 质构硬度和弹性的 PSO-PLSR 模型的 R^2 最高, 均方根误差 RMSE 最低, 且相对分析误差 RPD 最大, 因此选择 PSO-PLSR 模型来估算皮蛋凝胶质构的硬度和弹性值。图 8 为建立的硬度和弹性的 PLSR 模型校正和预测图, 可以看出, PSO 方法结合 PLSR 模型分别对质

构硬度和弹性的预测取得了不错的估算结果。

2.7 皮蛋品质的预测

为了准确预测不同品质的皮蛋, 采用以弹性为标准值回归模型较优的 PSO 算法提取特征波长, 将得到的 20 个波长变量作为输入量分别导入到 PLS-DA, BP 和 RF 分类模型。对样本集按照 2:1 划分, 得到皮蛋测试集(优质蛋 35 枚、合格蛋 25 枚、不合格蛋 20 枚), 其预测效果与 ROC 曲线如图 9 所示, PLS-DA 模型的性能表现最好, 优质蛋与合格蛋的准确率在 0.92 以上, 不合格蛋的准确率达到 1.00; 相较之下, BP 分类模型的泛化能力较弱, 对优质蛋的分类 RF 分类模型效果略优于 BP 模型。

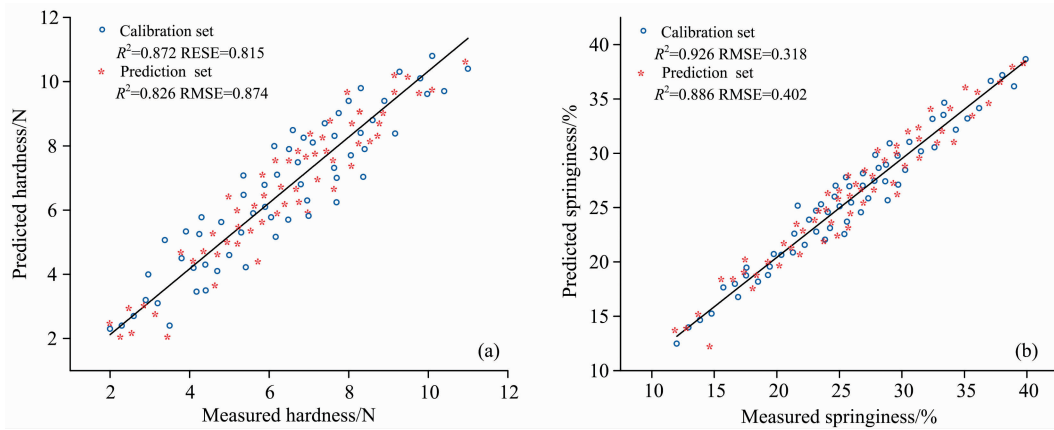


图 8 质地硬度验证散点图 (a), 弹性验证散点图 (b)

Fig. 8 Scatter plot of textural hardness prediction (a), scatter plot of springiness prediction (b)

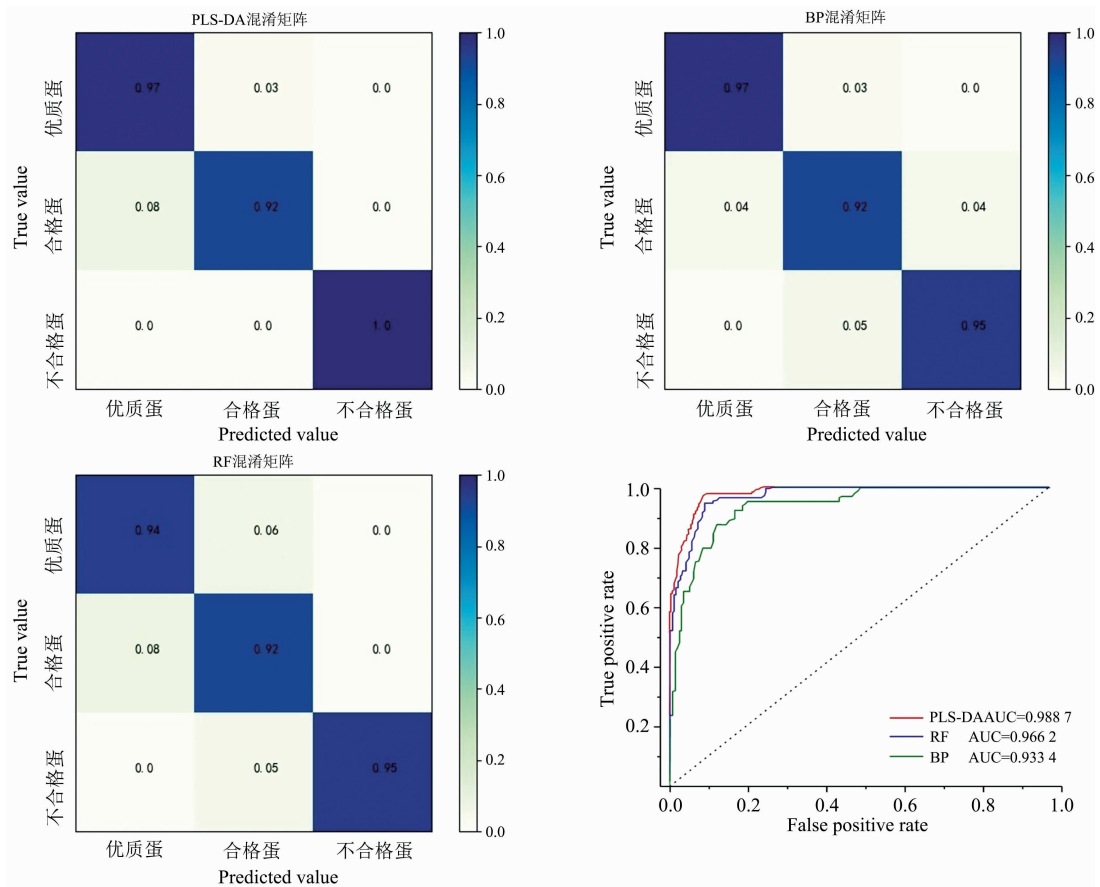


图 9 不同模型预测结果的混淆矩阵与 ROC 曲线

Fig. 9 Confusion matrix of prediction results and ROC curves of different models

3 结论

(1) 经不同变换的一维光谱数据，可以提高凝胶质构硬度、弹性与光谱变量的相关性。由 CR-FD 变换后的光谱反射率与凝胶质构硬度、弹性相关性最大，分别在 683 和 715 nm 处取到最大值为 0.882 和 0.865。基于二维相关光谱方法，以皮蛋凝胶质构硬度和弹性为扰动因子，选择 476~851 和

483~826 nm 两个敏感波段分别作为凝胶硬度和弹性的研究区域。

(2) 对比 SPA, CARS, GA, PSO 和 UVE 这 5 种特征波长筛选方法，预测质地硬度的最优模型为 PSO-PLSR，预测集 R_p^2 和 RMSEP 为 0.826 和 0.874，RPD 为 2，对于弹性的预测，PSO-PLSR 模型最好， R_p^2 和 RMSEP 分别为 0.886 和 0.402，RPD 为 1.9。

(3) 基于 PSO 提取的特征波长建立的不同分类模型对不

同品质皮蛋进行预测,以测试结果的混淆矩阵和 ROC 曲线 确分类。
作为综合指标,选择 PLS-DA 模型可实现不同品质皮蛋的准

References

- [1] YU Pei, WANG Xiu-jun, XU Wen, et al(于 沛,王修俊,徐 雯,等). Food Science(食品科学), 2021, 42(19): 65.
- [2] XUAN Xi-long, WANG Zhi-wei, HUANG Ai-lan, et al(玄夕龙,王志威,黄爱兰,等). Journal of Anhui Science and Technology University(安徽科技学院学报), 2017, 31(3): 38.
- [3] Ai Minmin, Zhou Quan, Guo Shangguang, et al. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 11.
- [4] ZHAO Yan, XU Ming-sheng, YAO Yao, et al(赵 燕,徐明生,姚 瑶,等). Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology(中国食品学报), 2019, 19(6): 36.
- [5] LIU Gui-shan, ZHANG Chong, FAN Nai-yun, et al(刘贵珊,张 翀,樊奈昀,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(8): 2558.
- [6] TIAN You-wen, WU Wei, LU Shi-qian, et al(田有文,吴 伟,卢时铅,等). Food Science(食品科学), 2021, 42(19): 260.
- [7] LIU Long, FU Mei-zhang, WANG Shu-cai(刘 龙,付美章,王树才). Journal of Huazhong Agricultural University(华中农业大学学报), 2012, 31(4): 524.
- [8] Li C H, Hsieh C H, Hung C H, et al. Foods, 2021, 10(2): 394.
- [9] WANG Qiao-hua, MEI Lu, MA Mei-hu, et al(王巧华,梅 璐,马美湖,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2019, 35(24): 314.
- [10] ZHANG Xiao-min, ZHANG Yan-ning, JIANG Hai-yi, et al(张小敏,张延宁,姜海益,等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2021, 52(6): 232.

Nondestructive Determinations of Texture and Quality of Preserved Egg Gel by Hyperspectral Method

CHEN Yuan-zhe¹, WANG Qiao-hua^{1,2*}, TIAN Wen-qiang¹, XU Bu-yun¹, HU Jian-chao¹

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

Abstract As an important quality parameter, texture can significantly affect the gelatin quality of preserved eggs. There is no effectively rapid detection method at present. In this study, hyperspectral imaging technology was used to predict preserved eggs' textural characteristics and classify different qualities. Hyperspectral data of high-quality eggs, qualified eggs and unqualified eggs were collected. The original spectra were transformed by single and combined transformation to analyze the correction between one-dimensional spectral and textural hardness and springiness. It was found that the spectral reflectance after CR-FD transformation was most correlated with the hardness and springiness of the gel texture, and the maximum values were 0.882, 0.865 at 683, 715 nm, respectively; The hardness and springiness were taken as disturbance factors to explore the optimal research area of the hardness and springiness, the results showed that: When hardness was used as disturbance factor, autocorrelation peaks existed at 476, 539, 647, 672, 728 and 851 nm, Spectral signals at 483, 572, 657, 739 and 826 nm were more sensitive to springiness value. Therefore, two sensitive bands, 476~851 and 483~826 nm, were finally selected as the study regions for gel hardness and springiness, respectively. Comparing five different variable selection methods(SPA, CARS, GA, PSO and UVE), it was found that PSO-PLSR model had the highest detection accuracy: the R_p^2 and RMSEP for predicted hardness were 0.826 and 0.874 with an RPD of 2. The R_p^2 and RMSEP for predicted springiness were 0.886 and 0.402 with an RPD of 1.9. Three different classifiers were used to predict preserved eggs, and the classification accuracy of high-quality eggs, qualified eggs and unqualified eggs reached 97%, 92% and 100%, respectively. The accuracy and generalization ability of the PLS-DA model were better than the BP and RF model based on the confusion matrix and ROC curves of prediction results. In conclusion, the hyperspectral technique can be used to predict preserved eggs' textural characteristics and classify different quality of preserved eggs.

Keywords Preserved eggs; Textural feature; Two-dimensional correlation; Hyperspectral technique

* Corresponding author

(Received May 8, 2021; accepted Jul. 26, 2021)