

鸡蛋新鲜度的可见-近红外透射光谱快速识别

赵杰文 毕夏坤 林 颢* 孙 力 管彬彬

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 哈夫单位、蛋黄指数和失重率是评价鸡蛋新鲜度的重要指标。通过采集反映鸡蛋内部品质的近红外(550~985 nm)透射光谱对其进行了无损、快速定量分析。通过 Savitzky-Golay 光谱平滑方法和一阶微分对光谱进行预处理,采用联合区间偏最小二乘法(SI-PLS)选取合适的光谱或波长区间进行建模;并将选取的特征变量通过主成分分析,获取光谱的有效信息作为反向传播人工神经网络(BP-ANN)的输入变量进行非线性建模。比较两种模型的预测效果发现 SI-PLS 模型的性能优于 BP-ANN 模型。实验结果表明:应用近红外透射光谱评价鸡蛋的新鲜度是可行的。

关键词 光谱学;近红外漫透射;偏最小二乘法;哈夫单位;蛋黄指数;失重率

中图分类号 O433.1; Q95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.053003

Visible-Near-Infrared Transmission Spectra for Rapid Analysis of the Freshness of Eggs

Zhao Jiewen Bi Xiakun Lin Hao Sun Li Guan Binbin

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The Haugh unit, yolk index and weight loss rate are important indicators to evaluate the freshness of eggs. Near-infrared (550~985 nm) transmission spectra expressing the egg internal quality are collected to make non-destructive quantitative analysis. Pretreatment of spectrum is based on Savitzky-Golay spectrum smoothness method and first-order differential. A model is established using synergic-interval partial least square (SI-PLS) method for an appropriate spectral or wavelength range. Effective information of the spectrum, obtained from the principal component analysis of characteristic variables, is input into the back propagation artificial neural network (BP-ANN) to set a nonlinear model. The comparison of the two models shows that the SI-PLS model is better than the BP-ANN model. The results prove that the application of near-infrared transmission spectrum to evaluate egg freshness is feasible.

Key words spectroscopy; near-infrared diffuse transmission; partial least square; Haugh unit; yolk index; weight loss rate

OCIS codes 300.6170;040 1880;120.7000

1 引言

新鲜度是判别鸡蛋品质的重要标准,哈夫单位、蛋黄指数和失重率则是评定鸡蛋新鲜度的主要指标。哈夫单位与鸡蛋的浓蛋白高度及其质量有关,能更加客观地反映鸡蛋的新鲜度;蛋黄指数可反映蛋黄膜的强度,判断鸡蛋的新鲜度,蛋黄膜弹性变化与蛋黄指数是反映鸡蛋新鲜程度的指标^[1],贮存期间蛋黄指数值降低表示卵黄膜弱化、卵黄液化,这主要由蛋清水分扩散引起^[2];失重率是衡量鸡蛋品质和保存经济价值的重要指标,降低失重率是鸡蛋保鲜技术的关键,蛋壳上气孔是鸡蛋呼吸和内外物质交换的主要通道,蛋内水分

收稿日期: 2013-01-04; **收到修改稿日期**: 2013-02-23; **网络出版日期**: 2013-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(31201451)、国家十二五科技支撑计划(2011BAD20B12)、镇江市科技支撑计划(10jDG118)和江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助课题。

作者简介: 赵杰文(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事食品和农产品品质快速无损检测等方面的研究。

E-mail: zhao_jiewen@ujs.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: linhaolt794@163.com

和 CO₂ 通过气孔向外逸出,鸡蛋质量减轻^[3],故随着贮藏时间的延长,鸡蛋失重率逐渐升高。

近红外(NIR)光谱技术是依据化学成分对近红外区光谱的吸收特性而进行的测定,在检测鸡蛋的新鲜度方面,国内外学者也进行了相关的探索和研究。在鸡蛋新鲜度的定性研究方面,陈斌^[4]研究了鸡蛋主要成分的光谱透射特性,人为鸡蛋属于非均匀物体,光吸收现象属于选择性吸收;吴瑞梅等^[5]运用紫外光谱等技术研究了鸡蛋蛋白高度的变化;Lin 等^[6]利用近红外光谱技术结合模式识别方法识别鸡蛋的新鲜度;Berardinelli 等^[7]等利用红外技术测定鸡蛋蛋白高度也取得了一定的研究进展;王巧华等^[8]通过选取不同新鲜程度的鸡蛋,研究了光反射特性及其新鲜度的变化关系。在定量研究方面,王凤朝等^[9]用近红外漫反射光谱仪测定保存时间不同的鸡蛋,探讨了蛋白高度、哈夫单位、气室直径和气室高度近红外模型的可行性;Liu 等^[10]以不同新鲜度的鸡蛋为研究对象,建立了鸡蛋透射率与波长、贮藏时间的相关数学模型;Giunchi 等^[11]通过选取不同饲养方式蛋鸡产的鸡蛋,研究了鸡蛋新鲜度与近红外光谱的相关性。在定量方面,研究主要集中在一个指标,而且采用的是商业化的近红外光谱仪。哈夫单位、蛋黄指数和失重率是国际上鸡蛋品质和新鲜度现场分级的衡量指标,但迄今为止,利用光谱技术对哈夫单位、蛋黄指数和失重率等品质参数的无损同步检测技术还鲜有报道,而传统检测手段的精度和效率急需提高。因此,亟需建立一种新的能够应用于蛋品质量监督和鸡蛋市场分级的快速无损检测方法。

本文通过自行搭建的近红外光谱检测平台对贮藏梯度时间的鸡蛋进行光谱采集,同步追踪鸡蛋内部品质变化(哈夫单位、蛋黄指数和失重率),并通过光谱区间筛选的方法,找出鸡蛋新鲜度变化后各个指标在近红外透射光谱区域的表征及其相关关系,为在无损状态下检测鸡蛋内部品质、评价鸡蛋新鲜度的研究提供理论依据。

2 材料与方 法

2.1 仪器及参数设置

采用自行搭建的近红外光谱检测平台进行鸡蛋品质检验。使用的器件有光谱仪(Maya 2000,美国海洋光学公司)、光源(卤素灯,功率 20 W,欧司朗)、游标卡尺(分辨率 0.01 mm,上海量程公司)和电子天平(JA2003,分辨率 1 mg,上海上平仪器公司)。

2.2 实验材料

实验材料为同批罗曼蛋鸡所产褐壳新鲜蛋,共选取 105 枚无污染裂纹蛋,均为镇江养鸡场提供。鸡蛋收集完成后小心清除蛋体表面污物并记录蛋品的外观形态参数(鸡蛋的横径、纵径和质量),如表 1 所示,编号后按照小头朝下大头朝上规则放置于蛋托中室温保存,并每隔一天(即第 1、3、5、7、9、11、13 天)各取 15 枚鸡蛋进行近红外透射光谱检测及失重率、哈夫单位和蛋黄指数测定。

表 1 鸡蛋的形态参数

Table 1 Morphological parameters of eggs samples

	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
Transverse diameter /mm	40.91	44.62	42.80105	0.831612
Longitudinal diameter /mm	51.99	58.94	55.44	1.528882
Mass /g	50.08	66.271	57.40883	3.200679

2.3 鸡蛋近红外透射光谱采集

探索和比较不同检测模式(漫反射和漫透射)下检测器所能接收到的光信号是获取鸡蛋新鲜度有效信息的基础。同一个鸡蛋的蛋体(完整鸡蛋)和蛋壳(空蛋壳)在不同检测器下的原始光谱如图 1 所示,可知近红外漫透射能较好地透过蛋体,检测信号较强;而近红外漫反射区分蛋体与蛋壳不是很明显,检测信号较弱。因此本研究优先采用近红外漫透射检测鸡蛋新鲜度。

采用自行搭建的近红外光谱检测平台进行光谱采集。检测系统如图 2 所示,光谱仪主要工作参数为:采集谱区范围 550~985 nm;分辨率 0.21 nm;积分时间 50 ms;平滑度 6 点。近红外光谱透射检测由光源直接照射钝端透过蛋体至检测器进行光谱检测。采集前光谱仪预热 30 min,先输入参比光谱(背景光谱和暗光谱),每次测量保持其他条件不变将鸡蛋钝端朝上采集光谱数据,每一枚鸡蛋获取 5 个不同位置的光谱数据

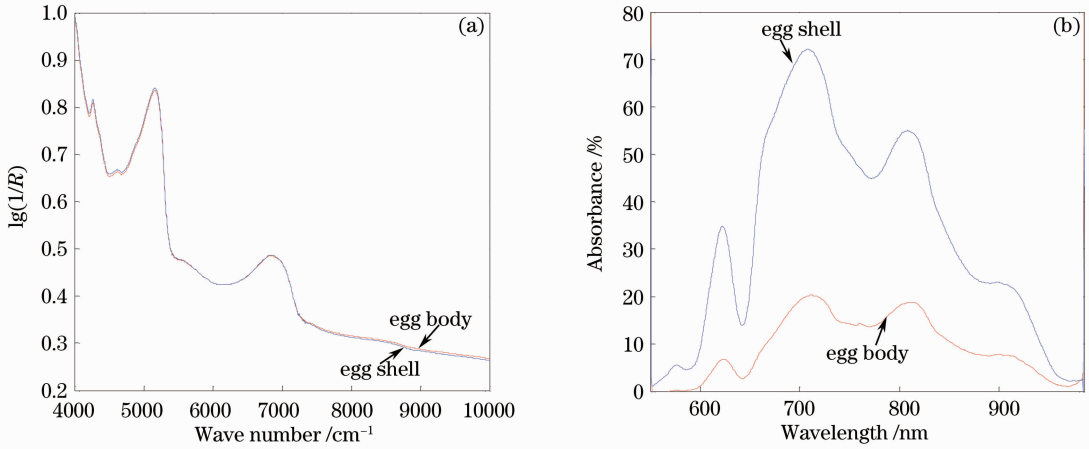


图1 同一个鸡蛋不同位置的(a)反射光和(b)透射光光谱图

Fig. 1 (a) Reflection and (b) transmission spectra of the same egg at different positions

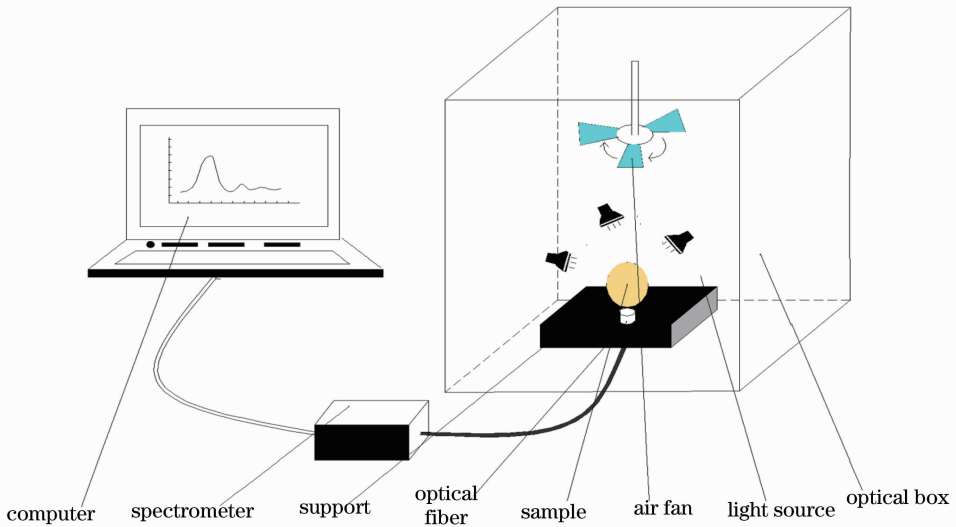


图2 近红外光谱检测系统

Fig. 2 Schematic diagram of the setup for NIR spectral measurement

取平均值,光谱数据由 SpectraSuite 软件进行采集和转换。

2.4 鸡蛋新鲜度指标常规分析

2.4.1 失重率

采集完光谱后,将样本放置于电子天平中称重,每个样本测量 3 次取平均值为样本的实测值,运用测得的样本初始质量对应计算鸡蛋的失重率。计算公式为

$$R_1 = (W_{\text{orig}} - W_{\text{meas}}) / W_{\text{orig}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 R_1 为失重率, W_{orig} 为鸡蛋保存初期蛋重, W_{meas} 为鸡蛋测定日期蛋重。

2.4.2 哈夫单位

将称重完的各个鸡蛋打破后平铺于水平放置的培养皿上,用游标卡尺分别在不同位置测其浓蛋白高度 4 次并取平均值为样本浓蛋白高度测量值,由样本质量和浓蛋白高度可计算其哈夫单位 U_H 。计算公式为

$$U_H = 100 \lg(H + 7.57 - 1.7m^{0.37}), \quad (2)$$

式中 H 为浓蛋白高度, m 为鸡蛋质量。

2.4.3 蛋黄指数

测量鸡蛋浓蛋白高度的同时对应测量其蛋黄直径和蛋黄高度,每个样本用游标卡尺分别在不同位置测量 4 次并取平均值,作为样本蛋黄直径和蛋黄高度的测量值,用蛋黄直径和蛋黄高度算出蛋黄指数 I_y 。计算

公式为

$$I_y = h/d, \quad (3)$$

式中 h 为蛋黄高度, d 为蛋黄直径。

3 结果与讨论

3.1 鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数和失重率随储藏时间的变化

由于鸡蛋贮藏时间不同及个体的不同,其组成成份有显著差异,光的透射率也会有所不同。同一个鸡蛋贮藏不同的时间或不同鸡蛋贮藏相同的时间在同一波长光的照射下,透射率有很大差异,这种差异也为我们用光学特性检测鸡蛋内部品质提供了可能性。

由图 3 可见,随着贮存时间的延长,哈夫单位呈下降趋势,保存至第 7 天鸡蛋哈夫单位下降明显;同时,蛋黄指数逐渐下降,失重率呈上升趋势,说明此时鸡蛋新鲜度有显著降低。综上,随着贮藏时间的变化,鸡蛋内部的浓蛋白、蛋黄膜厚度、蛋黄浓度、蛋清水分和蛋内水分等都发生不可逆转的变化,这些变化是导致鸡蛋哈夫单位降低、蛋黄指数减小和失重率上升的关键;同时,由于近红外光谱是 C-H、O-H 基团的和频与倍频吸收,鸡蛋内部成分的变化必然会导致其近红外透射光谱的变化,每个鸡蛋样本的光谱都具有明显的差异,这也为近红外透射光谱定量预测鸡蛋的哈夫单位、蛋黄指数和失重率提供了可能性。

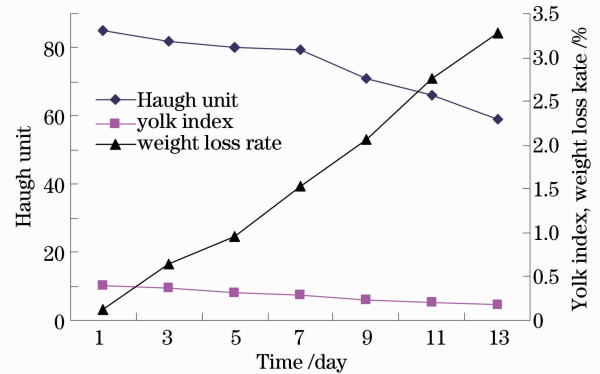


图 3 鸡蛋新鲜度随贮藏时间的变化

Fig. 3 Indicators of egg freshness versus storage period

实验鸡蛋分为校正集和预测集两组,校正集 70 个,预测集 35 个,其所对应的化学组分信息如表 2 所示。

表 2 校正集和预测集中鸡蛋新鲜度的指标

Table 2 Statistics of egg freshness in calibration and prediction sample sets

Composition	Sample set	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
Haugh unit	Calibration	56.3314	90.5536	74.6953	8.4442
	Prediction	59.1990	91.2563	75.2363	8.3697
Yolk index	Calibration	0.1363	0.4368	0.2836	0.0824
	Prediction	0.1533	0.4288	0.2834	0.0824
Weight loss rate / %	Calibration	0.0914	4.13	1.62	1.11
	Prediction	0.0953	3.92	1.62	1.12

3.2 鸡蛋的近红外透射光谱

采集光谱应保证在相同的实验条件下进行,分辨率大小和扫描次数的不同对试验结果会有较大的影响。只有在严格控制实验条件的基础上才能获得较好的光谱图。本实验采用一个专门用于鸡蛋的漫透射测试系统(图 2),可以得到曲线较好的光谱图。图 4 为同一个鸡蛋不同角度测得的原始光谱图。

从图 4 可知,同一个鸡蛋由于其内部组织有所差异,光谱图稍有变化,但其光谱形状具有相似性,位置的差异性不明显。这些图谱在 630~850 nm 范围内较为明显,包含信息丰富。光谱在 635 nm 处有比较强的吸收峰,吸收峰主要与水、醇分子的 O-H 基团的和频与倍频吸收有关。700~850 nm 处的吸收峰可能与 C-H 基团的和

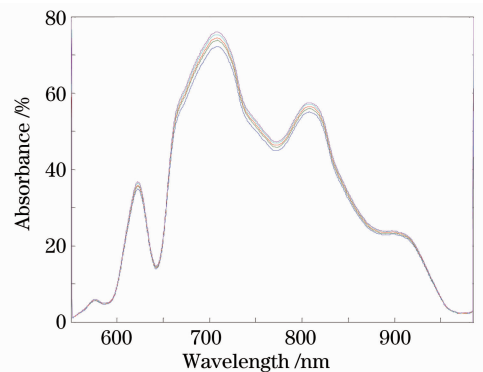


图 4 同一个鸡蛋不同位置的透射光谱图

Fig. 4 Transmission spectra of the same egg at different positions

频吸收和 O—H 基团的倍频吸收有关。

3.3 确定最佳光谱预处理方法

为了去除来自高频随机噪声、基线漂移、样本不均匀和光散射等的影响,需要进行光谱预处理来消除噪声。图 5 为鸡蛋原始光谱图。与原始光谱相比,一阶导数光谱具有消除原始光谱平移误差(也称基线误差)的功能,二阶导数光谱具有消除原始光谱旋转误差的功能,导数光谱同时还具有分离多组分物质的光谱重叠现象的作用,为了减少光谱噪声的影响首先对光谱进行 Savitzky-Golay 滤波平滑处理。本研究在 550~985 nm 波段范围,为了比较不同的光谱预处理方法对预测模型的影响,通过偏最小二乘(PLS)方法分别比较了多元散射校正(MSC)、标准正态变量变换(SNV)、一阶导数(1st Der)和二阶导数(2nd Der)4 种不同光谱处理方法^[12],从分析结果来看,各种方法的校正结果接近,相比较而言,一阶导数结果最好,其校正模型相关系数较高,预测标准偏差较低。图 6 为经过预处理后的光谱图。

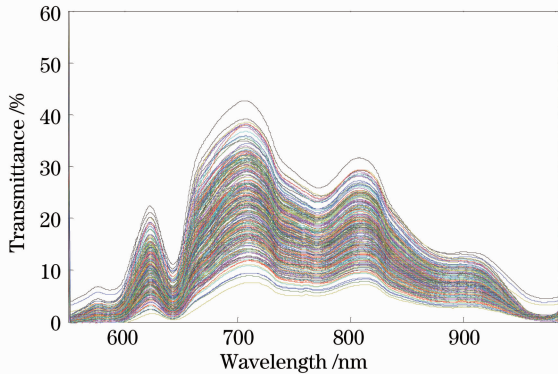


图 5 105 个鸡蛋样本的原始光谱图

Fig. 5 Original NIR spectra of 105 egg samples

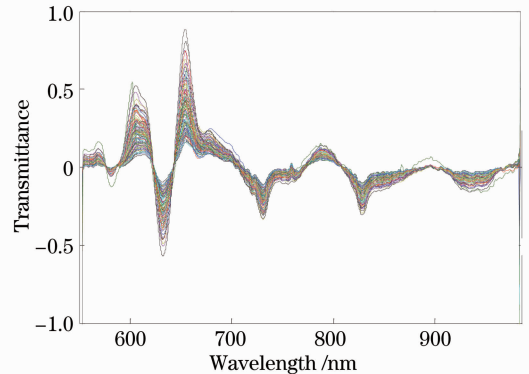


图 6 105 个鸡蛋样本的一阶导数预处理光谱图

Fig. 6 Typical first-order derivative spectra of 105 egg samples

3.4 选择组分相关的特征变量

由图 6 知鸡蛋内部品质与近红外透射光谱有明显的相关性,光谱全波段 550~985 nm 共有 2068 个点,如采用全光谱计算,计算量大,而且有些区域样本的光谱信息很弱,与样本的组成或性质间缺乏相关性^[13]。因此有必要选取合适的光谱区间或波长进行建模,可以减小建模运算时间,剔除噪声过大的谱区,使最终建立的农产品品质近红外光谱模型的预测能力和精度更高。联合区间偏最小二乘法(SI-PLS)是一种有效的波长筛选方法^[14]。该方法将整个光谱等分成若干个子区间,然后联合其中的几个子区间建立局部模型,利用验证均方根误差(RMSECV)和预测样本均方根误差(RMSEP)来评价与对比各个局部模型的准确度,准确度最好的局部模型所对应的联合子区间即为最优子区间^[15]。本实验将整个光谱区域分别划分为 10、11、12、……、25 个子区间,以考查不同数目的子区间划分对模型性能以及最佳波长区间的影响。在数据处理过程中,在划分为相同子区间的情况下,又尝试分别联合 2 个、3 个和 4 个子区间对哈夫单位、蛋黄指数和失重率分别建立局部预测模型。哈夫单位反映的是鸡蛋的浓蛋白高度及其质量,蛋白质和水的变化是引起哈夫单位变化的主要因素,在近红外光谱中主要表现在 C—H、O—H 基团,由此得到的鸡蛋哈夫单位的特征区间为划分 20 个区间,联合第 6、17、18、19 这 4 个区间,对应的特征波长区间为[666.83 nm,689.38 nm]、[905.19 nm,965.56 nm]。蛋黄指数的变化主要由蛋清水分扩散引起,鸡蛋贮藏期间,蛋白内的水分通过蛋黄膜向蛋黄扩散使蛋黄逐渐变稀,同时蛋黄膜弹性降低,体积增大,蛋黄指数逐渐减小,在近红外光谱中主要表现在 N—H、O—H 基团,特征区间为划分 14 个区间,联合第 4、7、12、13 这 4 个区间,对应特征波长区间为[650.08 nm,682.39 nm]、[746.58 nm,777.79 nm]、[899.41 nm,957.05 nm]。失重率主要与鸡蛋的质量有关,蛋壳上的气孔是鸡蛋呼吸和内外物质交换的主要通道,蛋内水分和 CO₂ 通过气孔向外逸出,鸡蛋质量减轻,在近红外光谱中主要表现在 O—H 基团,特征区间表现在划分 18 个区间,联合第 6、7、8、9 这 4 个区间,特征波长区间在[678.89 nm,777.57 nm]。表 3 为用联合区间偏最小二乘法模型分析鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数和失重率的结果。图 7 为联合区间偏最小二乘法选取的最优区间。

表 3 鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数和失重率的特征区间的 SI-PLS 模型分析结果

Table 3 Feature spectra of SI-PLS for determination of Haugh unit, yolk index and weight loss rate of egg

Components	Feature spectral range /nm	Models	Number of principal components	Calibration set RMSECV	Prediction set RMSEP
Haugh unit	666.83~689.38, 905.19~965.56	SI-PLS	10	3.82	5.25
Yolk index	650.08~682.39, 746.58~777.79, 899.41~957.05	SI-PLS	8	0.0267	0.0377
Weight loss rate	678.89~777.57	SI-PLS	7	0.00355	0.00543

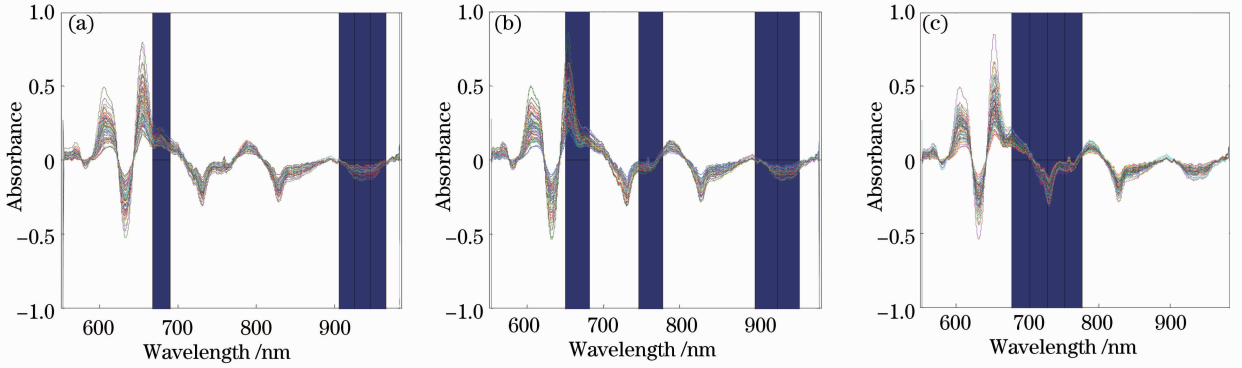


图 7 通过 SI-PLS 对鸡蛋(a)哈夫单位、(b)蛋黄指数和(c)失重率的特征光谱区域进行筛选

Fig. 7 Optimal feature spectral regions selected by SI-PLS of the (a) Haugh unit, (b) yolk index and (c) weight loss rate in egg samples

3.5 定标模型确定及验证

通过采用 SI-PLS 和反向传播神经网络(BP-ANN)两种校正方法进行讨论,找出了适合本研究的最佳校正模型。BP-ANN 采用 3 层拓扑结构分别构建鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数和失重率的预测模型。以鸡蛋近红外光谱数据中提取的光谱信息特征变量,进行主成分分析,并对模型相关参数进行优化,以训练集和预测集的预测结果与实测值的相关系数为指标来优化主成分数^[16]。实验设定的相关参数为:输出层单元数为 1,即为哈夫单位、蛋黄指数或失重率的实测值;传递函数为双曲正切函数(tanh);训练过程中的学习因子和动量因子都置为 0.1,初始权重为 0.3,训练迭代 1000 次,模型输入层的最佳主成分数通过训练结果来优化。两种不同定量校正模型的结果比较如表 4 所示。比较两种不同校正模型的结果,可以得出 SI-PLS 模型的预测性能要优于 BP-ANN 方法。为了检验校正模型的可靠性,通过未知样本结果的预测考查建立的校正模型的准确性。图 8(a)~(c)分别为用建立的校正模型对未知样本的哈夫单位、蛋黄指数和失重率的预测值及其与实测值的比较。其中 R_c 为校正集的相关系数, R_p 为预测集的相关系数。从结果综合分析认为,采用 SI-PLS 校正方法建立的校正模型具有比较高的预测准确度。

表 4 鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数和失重率的 SI-PLS、BP-ANN 检测模型

Table 4 Models of SI-PLS and BP-ANN for determination of the Haugh unit, yolk index and weight loss rate of egg samples

Components	Model	Number of principal components	Calibration set resolution	Prediction set resolution
Haugh unit	SI-PLS	10	0.8948	0.8163
	BP-ANN	8	0.8759	0.765
Yolk index	SI-PLS	8	0.9456	0.9081
	BP-ANN	6	0.9323	0.8756
Weight loss rate	SI-PLS	7	0.9469	0.8778
	BP-ANN	3	0.9413	0.8303

随着贮藏时间的延长,蛋体中的蛋黄变稀,浓蛋白减少,造成鸡蛋哈夫单位和蛋黄指数降低,失重率增高;而利用自制的近红外光谱检测设备进行相应检测时,其光的透射率增高,光谱的吸收峰则随之降低(如图 5 所示)。由此可看出,光谱变化与鸡蛋的哈夫单位、蛋黄指数及失重率之间存在特定的线性相关性。SI-

PLS 是一种线性回归运算而 BP-ANN 为非线性运算方法,因此,SI-PLS 所建模型对鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数及失重率的预测效果均优于 BP-ANN 模型。

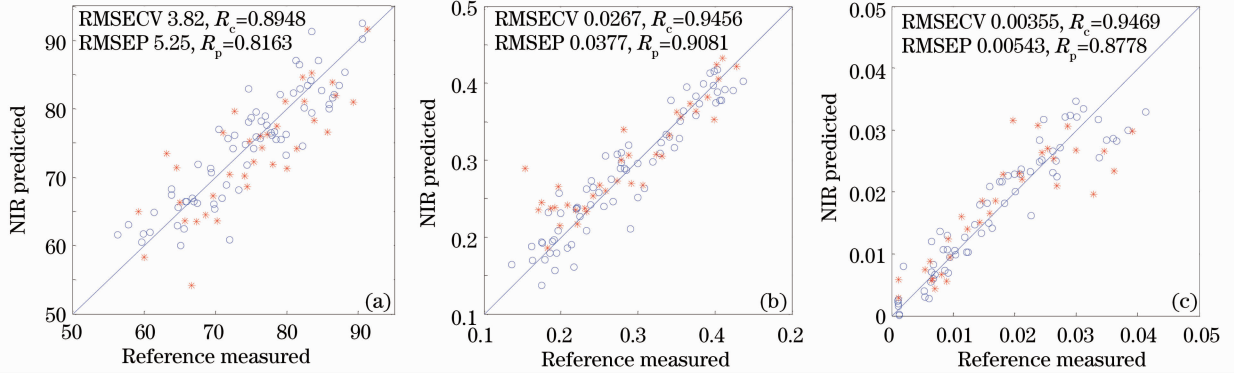


图 8 鸡蛋(a)哈夫单位、(b)蛋黄指数和(c)失重率的预测值与实测值的散点图

Fig. 8 Correlation between NIR predicted results and reference measured of the (a) Haugh unit, (b) yolk index and (c) weight loss rate in egg samples

4 结 论

本研究尝试通过近红外透射光谱检测技术同步测量鸡蛋的哈夫单位、蛋黄指数和失重率来评判鸡蛋的新鲜度,采用联合区间偏最小二乘法对鸡蛋近红外光谱进行了特征谱区或特征波长的筛选,并用 SI-PLS 和 BP-ANN 方法建立预测模型,两种模型都表达了近红外透射光谱对鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数和失重率较好的预测能力,其中,SI-PLS 模型对鸡蛋哈夫单位、蛋黄指数和失重率的预测效果均优于 BP-ANN 模型。结果表明,通过筛选合适的光谱或波长区间并选取最优方法进行建模,可以减小建模运算时间,剔除噪声过大的谱区,并最终完成对农产品内部品质的同步预测。

参 考 文 献

- 1 W. J. Stadelman. Quality Identification of Shell Eggs. In: Egg Science and Technology [M]. New York: Haworth Press, 1995. 39
- 2 Chen Changxiu. Effect of chitosan-coating on egg quality [J]. *Food Science*, 2010, **31**(24): 453~456
陈常秀. 壳聚糖涂膜对鸡蛋品质的影响[J]. *食品科学*, 2010, **31**(24): 453~456
- 3 Fu Xing, Ma Meihu, Cai Chaoxia *et al.*. A comparative study of use of coating agents for preservation of eggs [J]. *Food Science*, 2010, **31**(2): 260~263
付 星, 马美湖, 蔡朝霞 等. 不同涂膜剂对鸡蛋涂膜保鲜效果的比较研究[J]. *食品科学*, 2010, **31**(2): 260~263
- 4 Chen Bin. Study on photoelectric detection of egg quality [J]. *J. Jiangsu University of Science and Technology*, 1996, **17**(6): 1~5
陈 斌. 鸡蛋品质光电检测的研究[J]. *江苏理工大学学报*, 1996, **17**(6): 1~5
- 5 Wu Ruimei, Yan Linyuan, Qiao Zhenxian. Correlation between freshness and optical property of different kinds of eggs [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, **26**(5): 781~784
吴瑞梅, 严霖元, 乔振先. 不同品种鸡蛋新鲜度与其光特性的相关关系[J]. *江西农业大学学报*, 2004, **26**(5): 781~784
- 6 Lin Hao, Zhao Jiewen, Sun Li *et al.*. Freshness measurement of eggs using near infrared (NIR) spectroscopy and multivariate data analysis [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2011, **12**(2): 182~186
- 7 A. Berardinelli, A. Giunchi, A. Guarnieri *et al.*. *Trans. ASAE*, 2005, **48**(4): 1423~1430
- 8 Wang Qiaohua, Zhou Ping, Xiong Lirong *et al.*. Spectral reflectance characteristic and freshness of chicken egg [J]. *J. Huazhong Agricultural University*, 2008, **27**(2): 140~143
王巧华, 周 平, 熊利荣 等. 鸡蛋光反射特性及其与新鲜度的关系[J]. *华中农业大学学报*, 2008, **27**(2): 140~143
- 9 Wang Fengchao, Liu Xingtang, Huang Shucui. Target fusion detection with multi-feature based on fuzzy evidence theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 713~719
王凤朝, 刘兴堂, 黄树采. 基于模糊证据理论的多特征目标融合检测算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 713~719

- 10 Liu Yan-de, Ying Yi-bin, Ouyang Ai-guo *et al.*. Measurement of internal quality in chicken eggs using visible transmittance spectroscopy technology [J]. *Food Control*, 2007, **18**(1): 18~22
- 11 Alessandro Giunchi, Annachiara Berardinelli, Luigi Ragni *et al.*. Non-destructive freshness assessment of shell eggs using FT-NIR spectroscopy [J]. *J. Food Engineering*, 2008, **89**(2): 142~149
- 12 Zhao Jiewen, Zhang Yanhua, Chen Quansheng *et al.*. Measurement of TVB-N content by multi-information fusion technique based on spectroscopy and imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 063003
赵杰文, 张燕华, 陈全胜 等. 光谱和成像融合技术检测猪肉中挥发性盐基氮[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(6): 063003
- 13 Guo Weiliang, Wang Dan, Song Jia *et al.*. Simultaneous and rapid quantitative analysis of four components in *Cordyceps militaris* mycelium powder using near infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0230002
郭伟良, 王丹, 宋佳 等. 近红外光谱法同时快速定量分析蛹虫草菌丝体中4种有效成分[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0230002
- 14 Z. A. Obanu, A. A. Mpieri. Efficiency of dietary vegetable oils in preserving the quality of shell eggs under ambient tropical conditions [J]. *Science Food Agriculture*, 1984, **35**(12): 1311~1320
- 15 Guo Zhiming, Chen Liping, Huang Wenqian *et al.*. Application of genetic algorithm-least squares support vector regression with near infrared spectroscopy for prediction of nicotine content in tobacco [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 021201
郭志明, 陈立平, 黄文倩 等. 近红外光谱结合 GA-LSSVR 分析烟草尼古丁含量[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(2): 021201
- 16 Li Shuo, Wang Shanqin, Zhang Meiqin. Comparison among principal component regression, partial least squares regression and back propagation neural network for prediction of soil nitrogen with visible-near infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0830001
李硕, 汪善勤, 张美琴. 基于可见-近红外光谱比较主成分回归、偏最小二乘回归和反向传播神经网络对土壤氮的预测研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 0830001