

基于近红外光谱的淡水鱼贮藏期质构品质的无损检测模型

陈远哲¹, 王巧华^{1,2*}, 高升¹, 梅璐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 为了研究贮藏期与淡水鱼鱼肉质构品质的相关关系,以武昌鱼为研究对象,建立了近红外光谱淡水鱼鱼肉质构品质的快速无损检测模型。利用 Antaris II 傅里叶变换近红外光谱仪采集武昌鱼鱼肉样本的光谱数据,并使用 TMS-PRO 型质构仪测量样本的硬度值、弹性值和咀嚼性值;采用 S-G 平滑法对原始光谱进行预处理,结合竞争性自适应重加权(CARS)算法、稳定性竞争性自适应重加权采样(SCARS)算法和连续投影(SPA)算法进行一次特征波长的提取。基于上述 3 项质构指标建立的最小偏二乘回归(PLSR)模型,在一次特征波长提取的基础上再结合 SPA 算法进行二次特征波长的提取,根据二次特征提取的最优波长建立淡水鱼鱼肉硬度、弹性和咀嚼性的最优模型,该模型校正集的相关系数 R_c 分别为 0.968、0.947、0.927,预测集的相关系数 R_p 分别为 0.964、0.939、0.926,校正集的均方根误差 RMSEC 分别为 0.753、0.827、0.986,预测集的均方根误差 RMSEP 分别为 0.846、0.897、0.964。研究表明,该方法适用于淡水鱼鱼肉贮藏期质构品质的快速无损检测,具有较高的准确度,可为后续淡水鱼鱼肉品质的在线检测提供帮助。

关键词 光谱学; 近红外光谱; 无损检测; 淡水鱼; 质构品质; 连续投影算法; 偏最小二乘回归

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1230001

Nondestructive Testing Model for Textural Quality of Freshwater Fish in Storage Using Near-Infrared Spectroscopy

Chen Yuanzhe¹, Wang Qiaohua^{1,2*}, Gao Sheng¹, Mei Lu¹

¹College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

²Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract In this study, a rapid nondestructive testing model for the textural quality of freshwater fish using near-infrared spectroscopy is developed to study the relationship between storage periods and the textural quality of freshwater fish. Spectral data for the *Parabramis pekinensis* fish samples were collected using the Antaris II Fourier transform near-infrared spectrometer, and the hardness, springiness, and chewiness values of the samples were measured using the TMS PRO type structure instrument. The S-G smoothing method was used to pretreat the raw spectra, and competitive adaptive reweighting sampling, stable competitive adaptive reweighted sampling, and successive projections algorithms were integrated to extract the characteristic wavelength for the first time. Based on the above three textural indexes, the least partial square regression (PLSR) model was established. Based on the primary characteristic wavelengths extraction, the SPA algorithm was used to extract the secondary characteristic wavelengths. Then, the optimal model of hardness, springiness and chewiness of freshwater fish was established

收稿日期: 2020-08-24; 修回日期: 2020-09-29; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(31871863)

E-mail: 462935614@qq.com

according to the extracted secondary characteristic wavelengths. The correlation coefficients R_c and R_p of the correction and prediction sets are 0.968, 0.947, and 0.927, and 0.964, 0.939, and 0.926, respectively. The root mean square error of the correction and prediction sets are 0.753, 0.827, and 0.986, and 0.846, 0.897, and 0.964, respectively. The results show that this method is suitable for rapid and nondestructive testing of the textural quality of freshwater fish in storage and has high accuracy.

Key words spectroscopy; near-infrared spectrum; non-destructive testing; freshwater fish; textural quality; successive projections algorithm; partial least squares regression

OCIS codes 120.4290; 300.1030; 310.6188

1 引言

淡水鱼是水产品重要的组成部分。鱼肉鲜美,且营养物质含量高,是动物性蛋白质、特殊氨基酸以及具有保健功能的氨基酸等重要营养因子的来源与供体^[1]。有关贮藏期间淡水鱼鱼肉品质的评价与预测一直是食品加工和保鲜领域的研究热点。淡水鱼新鲜度的评价指标有质构指标、冷藏期间的新鲜度变化、总挥发性盐基氮(TVB-N)、总需氧量(TAC)等^[2-4],这些指标在淡水鱼贮藏期会发生明显变化。目前,这些指标的检测通常以生化方法为主,但生化方法是破坏性检测方法,且存在检测周期长、过程复杂等弊端;因此,要满足快速、无损的现代化检测要求,就必须运用现代无损检测技术来实现淡水鱼鱼肉内部品质指标的无损检测。

对鱼肉品质进行快速无损检测的新技术主要包括光谱技术、电子鼻/电子舌、生物传感技术、成像技术等^[5]。人们对鱼肉品质进行了大量研究^[6-13],在基于鱼肉质构指标的检测研究中:戴志远等^[14]采用TPA(质地多面分析)模式对不同贮藏条件下的大黄鱼进行了弹性、硬度、咀嚼性、胶黏性和恢复性测试,结果表明,随着贮藏期的延长,上述参数值都在下降;陈涛等^[15]利用理化分析、TPA实验法对东海马鲛鱼的TVB-N、质构特性进行了研究,结果表明,随着贮藏时间的延长,鱼肉的TVB-N含量增速显著,质构特性均表现出显著的下降趋势;刘铁玲等^[16]采用TPA模式对鲢鱼、鲤鱼冷冻前后的硬度、弹性、黏附性、咀嚼性、恢复性进行了测试,结果表明,随冷冻时间的延长,鱼肉的质构指标都有所下降,但下降程度不同。以上研究大多分析的是鱼肉贮藏期质构参数的变化情况,并不能准确定量地分析出鱼肉贮藏期与质构品质的相关关系。鉴于此,本文利用近红外光谱研究淡水鱼鱼肉内部质构指标,找出表征质构品质的有效光谱的最优波长组合,建立淡水鱼质构品质与近红外光谱的关系模型。

2 材料与方法

2.1 材料与仪器

试验所用样本为鳊鱼(*Parabramis pekinensis*, 又名武昌鱼、团头鲂)。样本购于武汉市悦活里生活广场,共40条,单个鱼体全重在350.3~511.6 g之间,全长为24.7~31.2 cm,经一段时间饥饿处理后,击头致死,去头尾和内脏,洗净控干。将每条鱼两侧的背部肌肉均匀地切割成两份,两份鱼肉为大小一样的长方体,尺寸为3.0 cm×3.0 cm×1.0 cm^[17]。每条鱼制成4个样本,每个样本分别放入塑料密封袋中,于1 h内快速运回实验室。然后迅速将全部样本(共160个样本)放入高精度低温试验箱中冷藏,温度控制在(4±0.5)℃。分别在当天(0 d)以及1,2,3,5,7,9,11 d后各取出20个样本,腹面去皮,进行近红外光谱采集。在进行近红外光谱采集前,所有样本表面均需用吸水纸吸干水分,采集去皮一面的近红外光谱图像,并进行质构参数的测量。在第11天时,鱼肉的新鲜度明显降低,鱼体表面黏液污浊,鱼体肌肉色泽发黄,质感松软,并散发出强烈的腥味和氨臭味,因此作为冷藏时间的终点。

试验仪器有Antaris II傅里叶变换近红外光谱仪、TMS-PRO型质构仪和高精度低温试验箱。

2.2 实验方法

2.2.1 近红外光谱的采集

将样本从高精度低温试验箱中取出,采用Antaris II傅里叶变换近红外光谱仪进行光谱的采集,选择积分球固体采样模块采集鱼肉样本的漫反射光谱。采集光谱时,将样本腹面去皮的一面朝下,扫描部位设置为直径最大处的纵向方向。测量的波数范围设置为10000~4000 cm⁻¹,扫描次数为32,分辨率为4 cm⁻¹^[18]。

2.2.2 淡水鱼质构参数的测定

利用TMS-PRO型质构仪进行TPA质地多面剖析实验,测定鱼肉的质构参数。先在质构仪上装好P/5平底柱形探头,然后在测定程序中设置好实

验参数:测试前的速度为 30 mm/min,测试速度为 60 mm/min,测试后的速度为 60 mm/min,压缩程度为 50%,测试时间间隔为 5 s。每次测定之后清洗探头,每片鱼肉重复平行测定 2 次,最终结果取测量结果的平均值。

2.2.3 模型的建立与评价方法

偏最小二乘回归(PLSR)算法是一种高效提取信息的方法,其在建模过程中集合了主成分回归、多元线性回归方法的优点,是化学计量学分析过程中最常用的多元线性建模方法^[19]。建立 PLSR 模型时,原始光谱的波段数过多,因此选择不同特征提取后的光谱数据进行建模,并将建模结果与原始光谱数据的建模结果进行对比。

预测集的相关系数 R_p 和预测均方根误差(RMSEP)是模型的主要评价标准,训练集样本的相关系数 R_c 和建模均方根误差(RMSEC)是辅助评价标准。相关系数越大,均方根误差越小,模型的稳定性越高,拟合程度越高,模型的预测性能越好。

相关系数(R)的计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

式中: x_i 为质构品质的第 i 个测量值; \bar{x} 为质构品质的平均值; y_i 为质构品质的第 i 个预测值; \bar{y} 为质构品质的平均值; n 为样本个数。

均方根误差(RMSE, f_{RMSE})的计算公式为

$$f_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 光谱数据分析

为了清楚地展示不同贮藏时间鱼肉光谱的不同,将每天取出的 20 个鱼肉样本的近红外光谱求均

值,结果如图 1 所示(R 为反射率)。可以看出,对于不同贮藏时间的鱼肉,其光谱图的变化趋势基本相同,不同的是,随着贮藏期延长,鱼肉内部品质和新度降低,新鲜鱼肉样本的平均光谱较冷藏期间的平均光谱表现出更高的光谱吸光度,这也与 Uddin 等^[20]的研究结果基本一致。存在此差异的主要原因是因为样本中的水分不同,而水分是影响近红外光谱吸光度的最重要因素。鱼肉在贮藏过程中,其内部的部分水分会丢失,而且化学成分、质构品质和内部结构也会发生变化。从另一个角度考虑,如图 1 所示,在 5100 cm^{-1} 处有一个明显的吸收峰,这可能与鱼肉有机物中的 C—H 键的三级倍频吸收带有关,另一个重要的吸收峰位于 6900 cm^{-1} 处,此处的吸收峰与水分子中 O—H 键的二级和三级倍频吸收带有关。

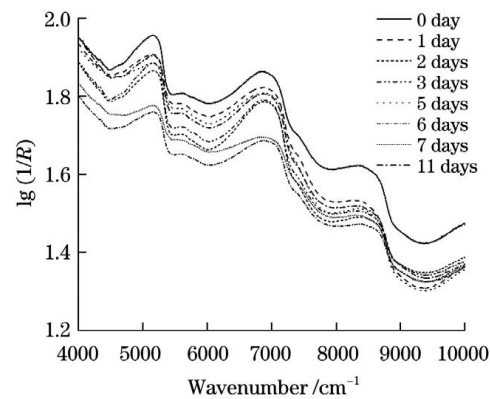


图 1 不同贮藏时间鱼肉的吸光度曲线

Fig. 1 Absorbance curves of fish for different storage time

3.2 质构品质的统计分析

采用光谱理化值共生距离(SPX)算法对测得的硬度、弹性和内聚性按 3 : 1 的比例进行校正集和预测集的划分,然后进行统计分析,计算出校正集和预测集样本的最小值、最大值和标准差。

由表 1 可知:硬度的分布范围为 2.98~9.50 N,校正集的标准差最大,为 1.82,说明鱼肉样本的硬

表 1 利用 SPXY 算法划分样本集的数据统计

Table 1 Data statistics of partitioning sample sets by SPXY algorithm

Number of samples	Textural index	Minimum	Maximum	Mean±standard deviation
Calibration set (120)	Hardness /N	3.05	9.50	5.68±1.82
	Springiness	0.16	1.35	0.71±0.27
	Chewiness /mJ	0.08	4.76	1.25±1.12
Prediction set (40)	Hardness /N	2.98	9.48	5.76±2.57
	Springiness	0.21	1.32	0.82±0.35
	Chewiness /mJ	0.11	4.58	1.54±1.83

度指标差异较大,数据较为离散;弹性和咀嚼性的标准差相对较小,数据较为集中,个体差异不大。采用 SPXY 算法划分的校正集范围较广,说明数据具有代表性。

对每天测得的 20 个样本的硬度、弹性和咀嚼性分别取平均值,得到鱼肉质构品质与贮藏期之间的关系。由于各个质构指标的量纲不同,不同量纲的指标之间难以比较,因此本文采用均一化方法对各质构指标进行无量纲处理。计算公式为

$$M'_{ij} = \frac{M_{ij}}{\bar{M}_j}, \quad (3)$$

式中: M'_{ij} 为第 i 行第 j 列的一个数值的无量纲值; M_{ij} 为第 i 行第 j 列的一个数值; \bar{M}_j 为第 j 列的平均值。

如图 2 所示,鱼肉的硬度值、弹性值和咀嚼性值随着贮藏期的延长都呈下降趋势,但下降的程度有所不同。这说明贮藏期间鱼肉的内部结构和物理特性发生了变化,其抵抗受损的能力下降,鱼肉随贮藏期延长变得疏松,分泌的黏液增多,逐渐腐烂。

3.3 光谱数据预处理

光谱数据预处理是光谱分析中的重要工作,可以解决光谱信息存在的信噪比低、光谱变动、背景复

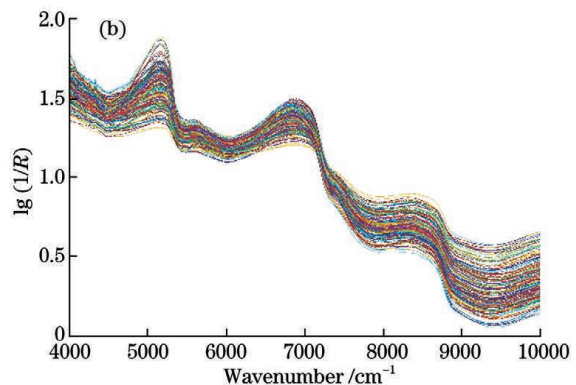
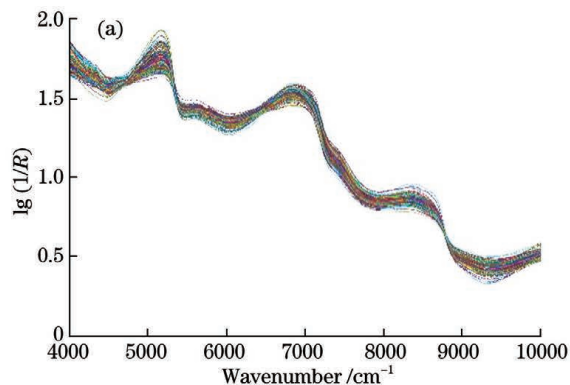


图 3 样本的原始光谱和 S-G 预处理后的光谱。(a)原始光谱;(b)S-G 预处理后的光谱

Fig. 3 Raw spectra of samples and spectra after S-G pretreatment. (a) Raw spectra; (b) spectra after S-G pretreatment

3.4 一次有效特征波长的提取

3.4.1 CARS 和 SCARS 法提取特征波长

竞争性自适应重加权(CARS)算法是先通过自适应重加权采样(ARS)技术选择出偏最小二乘(PLS)模型中回归系数绝对值大的波动点,去掉权重小的波动点,再利用交互验证选出 RMSECV 值最小的子集,以有效寻找出最优的变量组合。稳定性竞争自适应重加权采样(SCARS)算法延续了 CARS 算法的变量筛选流程,可以建立简洁、稳定的

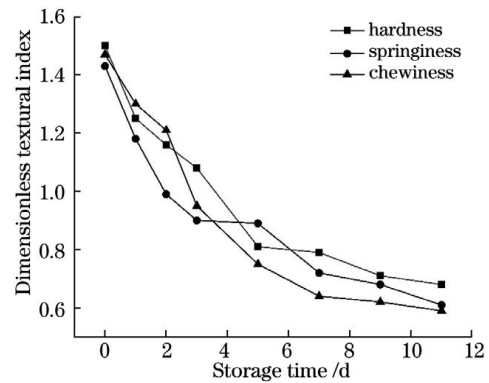


图 2 无量纲化质构指标与储藏期的关系

Fig. 2 Dimensionless textural index versus storage time

杂及光谱重叠等问题,从而提高模型的准确性。平滑处理^[21]是一种能够对数据进行降噪处理并能够降低光谱重叠的方法,可以有效消除基线漂移、倾斜等噪声。在 Savitzky-Golay(S-G)平滑算法中,平滑点数的多少会影响模型的精度:若平滑点数过少,容易产生计算误差;若平滑点数过多,则包含鱼肉样本的光谱信息会被过度平滑,丢失原有信息,降低模型的准确性。因此,需要选择合适的平滑点数,以确保模型的精度。本研究采用 S-G 平滑算法^[22]对光谱数据进行预处理。如图 3 所示,预处理后,近红外光谱重叠部分明显改善,效果较为理想,这就确保了后续的建模精度。

模型。因 CARS 和 SCARS 算法相似,因此本文以硬度指标和 CARS 算法为例,阐述 CARS 算法对特征波长的提取过程。

采用蒙特卡罗法采样,采样次数设定为 50,用 5 折交叉验证法计算^[23]。如图 4(a)所示,随着采样次数的增加,样本变量的数量骤然下降,然后缓慢减少,最终趋于稳定状态。这表明 CARS 对样本变量先进行粗略选择然后再进行精确选择,提高了筛选近红外光谱波长特征变量的效率^[24]。从图 4(b)中

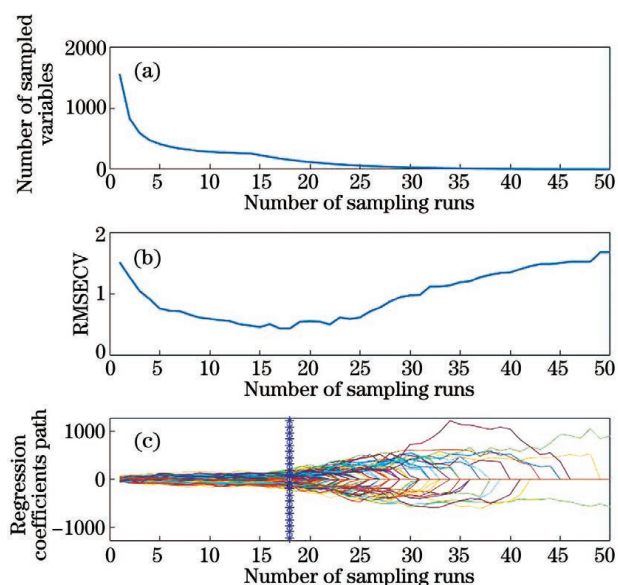
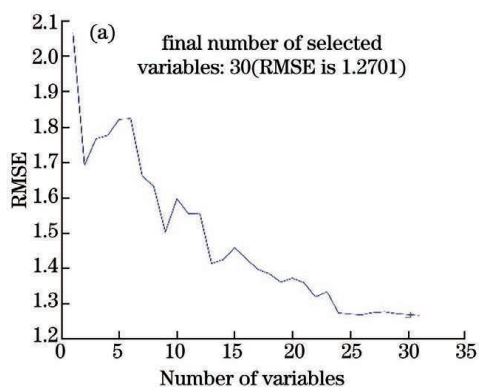


图 4 CARS-PLS 法提取特征波长。(a) 采样变量数；
(b) RMSECV；(c) 回归系数路径

Fig. 4 Selection of characteristic wavelengths by CARS-PLS model. (a) Numbers of sampled variables; (b) RMSECV; (c) regression coefficients path

可以看出:随着采样次数的增加, RMSECV 值在逐渐减小,并在采样次数达到 18 次时, RMSECV 值达到最小,为 0.4401;自第 18 次采样之后,预测模型的 RMSECV 值又逐渐增大。这表明在前 18 次的采样运算中过滤掉了大量与样本鱼肉硬度指标无关的光谱信息,而在第 18 次之后的采样运算中,一些



与鱼肉样本硬度指标相关的重要波长变量被剔除,致使模型的预测能力下降。因此, RMSECV 达到最小值时的结果最优。由图 4(c)可知,当 RMSECV 达到最小值时,各变量的回归系数位于该图的竖直线位置,采样进行了 18 次。

3.4.2 SPA 算法提取特征波长

连续投影(SPA)算法能够从光谱信息中充分寻找含有最低限度冗余信息的变量组,使得变量之间的共线性达到最小,同时能大大减少建模所用变量个数,提高建模的速度和效率^[25]。基于 SPXY 算法划分的淡水鱼鱼肉样本集以及 S-G 卷积平滑算法处理后的光谱数据,采用 SPA 算法分别优选出与淡水鱼鱼肉样本硬度、弹性和咀嚼性相应的特征波长序列组合,并建立淡水鱼质构品质与近红外光谱关系的 PLSR 模型。

下面以硬度指标为例,阐述 SPA 算法提取特征波长序列组合的过程。由 SPA 算法的原理可知,均方根误差(RMSE)决定着所建模型的优劣,均方根误差越小,模型越稳定,精度越高。随着模型中变量个数的增加, RMSE 值会逐渐减小,并最终趋于稳定。如图 5(a)所示,当 RMSE 值最小时,模型中变量的个数为 30,即采用 SPA 算法提取的最优特征波长数量为 30 个,优选出的特征波长的位置如图 5(b)所示,所选波长数量仅占总波长数量的 1.92%。

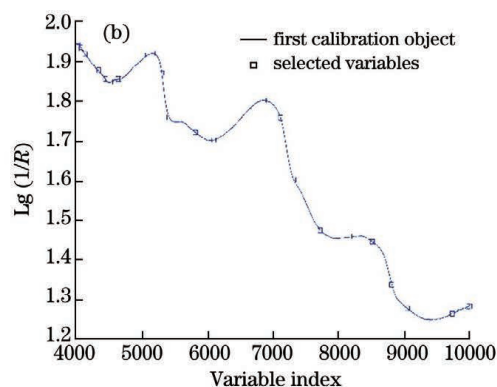


图 5 模型 RMSE 的变化以及特征波长的选择。(a) RMSE 的变化; (b) 特征波长的选择

Fig. 5 Variation of model RMSE and selection of characteristic wavelengths. (a) Variation of RMSE; (b) selection of characteristic wavelengths

3.4.3 基于一次特征波长建立 PLSR 模型

采用三种不同的特征波长优选方法,分别对硬度、弹性和咀嚼性建立一次特征波长的 PLSR 模型。由表 2 可以看出:与原始光谱(RAW)的建模结果相比,一次特征波长可以消除过拟合效应;与原始光谱相比,基于 CARS 和 SCARS 建立的 3 项质构指标

的 PLSR 模型的校正集和预测集的相关系数都显著提高,基于 SPA 算法建立的 3 项质构指标的 PLSR 模型预测值的相关系数有了较大提高;对比 CARS 算法、SCARS 算法、SPA 算法建立的 3 项质构指标的预测模型可以看出,前者的相关系数更高,且均方根误差更小。

表 2 一次特征波长提取方法建立的 PLSR 模型的结果

Table 2 Results of PLSR model established by the method of primary characteristic wavelength extraction

Textural index	Feature band extraction method	Number of characteristic wavelength	Factor	Calibration set		Prediction set	
				R_c	RMSEC	R_p	RMSEP
Hardness	RAW	1557	10	0.782	2.368	0.753	3.543
	CARS	73	7	0.954	0.440	0.947	0.538
	SCARS	132	10	0.946	0.657	0.934	0.875
	SPA	30	7	0.863	1.254	0.837	1.254
Springiness	RAW	1557	12	0.827	3.226	0.804	4.215
	CARS	84	9	0.936	1.027	0.927	2.193
	SCARS	97	7	0.915	1.345	0.897	1.547
	SPA	35	9	0.849	2.658	0.814	3.012
Chewiness	RAW	1557	8	2.658	2.658	0.704	3.214
	CARS	65	10	0.905	0.425	0.897	0.587
	SCARS	74	7	0.897	0.483	0.905	1.153
	SPA	44	11	1.239	0.756	0.756	1.547

以上表明,基于一次特征波长建立的 PLSR 模型可以剔除光谱和质构品质信息量较少的波段,简化了模型。

3.4.4 二次特征波长建立的 PLSR 模型的效果

用 CARS、SCARS 和 SPA 算法选取的特征波长建立模型,尽管能有效减少近红外光谱的波长个数,但选取的波长数仍然较多,仍不能使模型更简洁,也不能大幅提高模型的运算速度。为了降低光谱的冗余性和高维性,提升模型的计算速度和准确性,应选择一些携带有重要信息的关键波段来代替全波段进

行分析和预测。因此,本研究继续在 CARS 和 SCARS 提取的最优波长的基础上,利用 SPA 算法进行二次特征波长的提取。这里以 CARS 算法结合 SPA 算法提取二次特征波长为例,最终选取的特征波长如表 3 所示。可知,硬度值优选出的最优波长个数为 10 个,弹性值优选出的最优波长个数为 8 个,咀嚼性优选出的最优波长个数为 6 个。对比优选的一次特征波长个数来看,二次特征波长的提取可以在原先最优波长个数的基础上进一步减少波长个数,这对于模型的简化和运算速度的提升有很大帮助^[26]。

表 3 基于 CARS 算法和 SPA 算法提取的二次特征波长

Table 3 Secondary characteristic wavelength extracted by CARS and SPA algorithms

Textural index	Wavelength /nm
Hardness	401.12, 433.13, 476.46, 580.85, 679.97, 760.20, 824.22, 873.21, 895.58, 999.71
Springiness	418.48, 514.13, 586.25, 621.73, 659.15, 743.88, 812.65, 918.33
Chewiness	430.82, 492.91, 602.06, 707.74, 826.15, 988.15

表 4 是基于 CARS+SPA 和 SCARS+SPA 算法提取的最优波长建立的鱼肉硬度、弹性和咀嚼性的 PLSR 模型的结果,可以看出:基于 CARS+SPA 算法提取的二次特征波长建立的硬度和弹性指标的 PLSR 模型,其校正集和预测集的相关系数均大于 0.935,且高于一次特征波长模型的相关系数;基于 SCARS+SPA 算法提取的二次特征波长建立的咀嚼性指标的 PLSR 模型,其校正集和预测集的相关

系数均大于 0.925,也高于一次特征波长模型的相关系数。这表明,基于二次特征波长建立的质构参数的 PLSR 模型更优,且在保证波长数较少的情况下,准确率更高。

3.5 基于最优特征波长组合建立的硬度、弹性和咀嚼性值的 PLSR 模型

分别采用最优特征波长组合建立 3 项质构指标(硬度、弹性和咀嚼性值)的 PLSR 模型。以硬度指

表 4 基于二次特征波长提取方法建立的 PLSR 模型的结果

Table 4 Results of PLSR model based on quadratic characteristic wavelength extraction method

Textural index	Characteristic band extraction method	Number of characteristic wavelength	Calibration set		Prediction set	
			R_c	RMSEC	R_p	RMSEP
Hardness	CARS+SPA	10	0.968	0.753	0.964	0.846
	SCARS+SPA	13	0.926	0.857	0.928	0.983
Springiness	CARS+SPA	8	0.947	0.827	0.939	0.897
	SCARS+SPA	9	0.913	0.746	0.904	1.689
Chewiness	CARS+SPA	6	0.908	0.659	0.915	0.875
	SCARS+SPA	8	0.927	0.986	0.926	0.964

标为例,模型预测集样本的预测值和实际值之间的散点图如图 6 所示。结合表 4 可知,所建立的最优 PLSR 模型的校正集相关系数 R_c 分别为 0.968、0.947 和 0.927,预测集相关系数 R_p 分别为 0.964、0.939 和 0.926。与其他特征变量一次特征波长提取方法相比,基于最优二次特征波长建立的 PLSR 模型具有更高的相关系数(R_c 和 R_p),且均方根误差 RMSEC 和 RMSEP 更小。这表明,最优二次特征波长组合在一次特征波长组合的基础上进一步削减了光谱的波段数,找到了表征质构品质有效光谱的最优波长组合,提升了模型的运算速度,使模型得到了简化与优化,模型的准确性和稳定性也得到了较大提高。

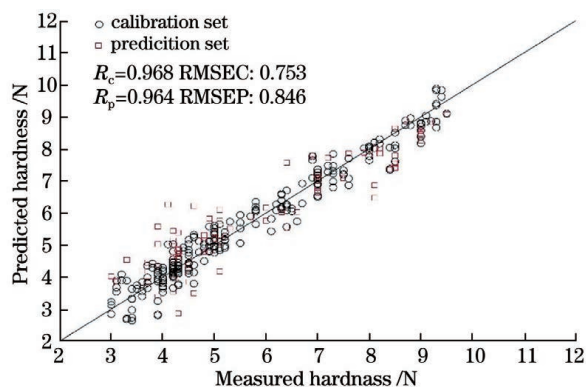


图 6 样本硬度预测值和实测值散点图

Fig. 6 Scatter plot of predicted and measured values of sample hardness

4 结 论

利用近红外光谱对淡水鱼贮藏期间的质构品质(硬度、弹性和咀嚼性)进行无损检测。结果表明:随着贮藏期的延长,淡水鱼的质构品质指标都在下降;在近红外光波段范围内,吸收峰的位置基本相同,只有光谱的吸光度存在较为明显的差异;在 10000~

4000 cm^{-1} 波数范围内,采用 S-G 卷积平滑法对原始光谱进行处理,可以改善光谱的重叠效应。与基于一次特征波长建立的 PLSR 模型相比,基于二次特征波长建立的 PLSR 模型更优,且运行速度、模型的准确性和稳定性都得到了提高。硬度指标和弹性指标的最佳波段的选取方法为 CARS+SPA 算法的组合,其预测集的相关系数分别为 0.964 和 0.939,而咀嚼性指标的最佳波段的选取方法为 SCARS+SPA 算法的组合,其预测集的相关系数为 0.926。基于二次特征波长建立的 PLSR 模型不仅能够同时对质构品质的硬度、弹性和咀嚼性进行无损检测,而且可以定量分析出鱼肉贮藏期与质构品质的相关关系。实验所用样本是在单一销售点购买的同一批样本,有可能是同一鱼塘同样喂养条件下的样品,后续的研究需增加样品的多样性,如收集不同产地、不同鱼龄、不同生长季节、不同喂养条件和不同养殖环境的武昌鱼,进一步扩大样本数目,以提高武昌鱼鱼肉内部品质检测的稳定性和适用性。

参 考 文 献

- [1] Iglesias J, Medina I. Solid-phase micro extraction method for the determination of volatile compounds associated to oxidation of fish muscle[J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1192(1): 9-16.
- [2] Liu H, Xu W J, Liu Y M, et al. Establishment of quantitative model to predict the freshness of crucian carp (*carassius auratus*) based on near-infrared spectroscopy[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(7): 173-182.
刘欢, 徐文杰, 刘友明, 等. 鲫鱼新鲜度近红外定量预测模型的建立[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 173-182.
- [3] Cheng N, Li X Y, Zhao S M, et al. Comparison of

- the methods to detect fish freshness based on near-infrared technology [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2013, 4(2): 427-432.
- 程旒, 李小昱, 赵思明, 等. 鱼体新鲜度近红外光谱检测方法的比较研究 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(2): 427-432.
- [4] Li T T, Liu J X, Li X P, et al. Freshness evaluation of turbot (*scophthalmus maximus*) during refrigerated storage [J]. *Food Science*, 2014, 35(18): 190-195.
- 李婷婷, 刘剑侠, 李学鹏, 等. 大菱鲆冷藏过程中新鲜度评价 [J]. *食品科学*, 2014, 35(18): 190-195.
- [5] Cheng J H. Non-destructive and rapid detection of fish freshness using hyperspectral imaging technique [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- 成军虎. 基于高光谱成像鱼肉新鲜度无损快速检测方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [6] Yang M Y, Cai Y Y, Xie J, et al. Research progress on rapid detection technology of fish freshness [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(9): 334-339, 347.
- 杨明远, 蔡杨杨, 谢晶, 等. 鱼体新鲜度快速检测技术的研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 334-339, 347.
- [7] Zhou J P, Zhu M, Zhang W, et al. Effect of different freezing methods on the quality of freshwater fish [J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 247-254.
- 周俊鹏, 朱萌, 章蔚, 等. 不同冷冻方式对淡水鱼品质的影响 [J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 247-254.
- [8] Wang L, Yang F, Gao P, et al. Effect of processing technology on quality of freshwater-fish surimi product [J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(8): 127-131.
- 王璐, 杨方, 高沛, 等. 加工工艺对淡水鱼脯品质的影响 [J]. *食品科技*, 2018, 43(8): 127-131.
- [9] Ding J, Zhao X M, Zhu J Y, et al. Principal component, factor analysis and cluster analysis of the effect of freshwater fish species on the quick-frozen highland barley fish noodle quality [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(1): 34-40, 51.
- 丁捷, 赵雪梅, 朱金艳, 等. 基于主成分、因子和聚类分析淡水鱼品种对速冻青裸鱼面品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(1): 34-40, 51.
- [10] Song M, Xu Y S, Xia W S, et al. Effects of different freezing methods on the quality of channel catfish fillets [J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(8): 154-159.
- 宋敏, 许艳顺, 夏文水, 等. 冻结方式对鲶鱼片品质的影响 [J]. *食品科技*, 2017, 42(8): 154-159.
- [11] Tinacci L, Armani A, Guidi A, et al. Histological discrimination of fresh and frozen/thawed fish meat: European hake (*Merluccius merluccius*) as a possible model for white meat fish species [J]. *Food Control*, 2018, 92: 154-161.
- [12] Prabhakar P K, Vatsa S, Srivastav P P, et al. A comprehensive review on freshness of fish and assessment: analytical methods and recent innovations [J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109157.
- [13] Wang H, He H J, Liu L, et al. Recent progress in hyperspectral imaging for nondestructive evaluation of fish quality [J]. *Food Science*, 2019, 40(5): 329-338.
- 王慧, 何鸿举, 刘璐, 等. 高光谱成像在鱼肉品质无损检测中的研究进展 [J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 329-338.
- [14] Dai Z Y, Cui Y N, Wang H H. Changes of textural properties of cultured *Pseudosciaena crocea* muscle under different frozen storage conditions [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2008, 34(8): 188-191.
- 戴志远, 崔雁娜, 王宏海. 不同冻藏条件下养殖大黄花鱼肉质构变化的研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2008, 34(8): 188-191.
- [15] Chen T, Lu Y F, Ye X F, et al. Changes of textural properties of *Scomberomorus niphonius* muscle from East China sea under different frozen storage conditions [J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(9): 129-132.
- 陈涛, 陆云飞, 叶晓峰, 等. 不同贮藏条件下东海马鲛鱼肉质构变化研究 [J]. *食品科技*, 2012, 37(9): 129-132.
- [16] Liu T L, He X Y, Li Y. Effect comparison of frozen storage on texture properties between silver carp and carp fish muscles [J]. *Food & Machinery*, 2010, 26(2): 13-14, 18.
- 刘铁玲, 何新益, 李昀. 冻藏对鲢鱼、鲤鱼鱼肉质构影响的比较研究 [J]. *食品与机械*, 2010, 26(2): 13-14, 18.
- [17] Zhu F L. Rapid and non-destructive detection of marine fish quality based on spectroscopy and hyperspectral imaging technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- 朱逢乐. 基于光谱和高光谱成像技术的海水鱼品质快速无损检测 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [18] Gao S, Wang Q H, Li Q X, et al. Non-destructive detection of vitamin C, sugar content and total acidity of red globe grape based on near-infrared spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(6): 941-949.
- 高升, 王巧华, 李庆旭, 等. 基于近红外光谱的红提维生素 C 含量、糖度及总酸含量无损检测方法 [J].

- 分析化学, 2019, 47(6): 941-949.
- [19] Li G W, Gao X H, Xiao N W, et al. Estimation of soil organic matter content based on characteristic variable selection and regression methods [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 361-371.
李冠稳, 高小红, 肖能文, 等. 特征变量选择和回归方法相结合的土壤有机质含量估算 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 361-371.
- [20] Uddin M, Okazaki E, Turza S, et al. Non-destructive visible/NIR spectroscopy for differentiation of fresh and frozen-thawed fish [J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(8): c506-c510.
- [21] Zhan X R, Zhu X R, Shi X Y, et al. Determination of hesperidin in tangerine leaf by near-infrared spectroscopy with SPXY algorithm for sample subset partitioning and Monte Carlo cross validation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 964-968.
展晓日, 朱向荣, 史新元, 等. SPXY 样本划分法及蒙特卡罗交叉验证结合近红外光谱用于橘叶中橙皮苷的含量测定 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 964-968.
- [22] Xu F, Fu D D, Wang Q H, et al. Nondestructive detection of sugar content and acidity in red globe table grapes using visible near infrared spectroscopy based on Monte-Carlo cross validation-competitive adaptive reweighted sampling-random forest(MCCV-CARS-RF) [J]. *Food Science*, 2018, 39(8): 149-154.
许锋, 付丹丹, 王巧华, 等. 基于 MCCV-CARS-RF 建立红提糖度和酸度的可见-近红外光谱无损检测方法 [J]. *食品科学*, 2018, 39(8): 149-154.
- [23] Ran S, Ding J Z, Ge X Y, et al. Estimation method of Vis-NIR spectroscopy soil organic matter based on sparse networks [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 242803.
冉思, 丁建丽, 葛翔宇, 等. 基于稀疏网络的可见光/近红外反射光谱土壤有机质含量估算 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 242803.
- [24] Chen Y, Zhang C, Xiao C Y, et al. Study on prediction model of soil cadmium content moisture content correction based on GWO-SVR [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1030002.
陈颖, 张灿, 肖春艳, 等. 基于 GWO-SVR 的土壤镉元素含量含水率校正预测模型研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1030002.
- [25] Fu D D, Wang Q H, Ma M H, et al. Correlation analysis between egg freshness indexes and S-ovalbumin content during storage [J]. *Food Science*, 2018, 39(19): 1-6.
付丹丹, 王巧华, 马美湖, 等. 贮藏期鸡蛋新鲜度指标与 S-卵白蛋白含量的相关关系 [J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 1-6.
- [26] Gao S, Wang Q H, Fu D D, et al. Nondestructive detection of sugar content and firmness of red globe grape by hyperspectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1030004.
高升, 王巧华, 付丹丹, 等. 红提糖度和硬度的高光谱成像无损检测 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1030004.