

## 基于多光谱图像分割算法的冷冻猪肉色泽无损表征技术

葛玲<sup>1</sup>, 查靖<sup>1</sup>, 耿浩<sup>2,3</sup>, 陈光<sup>1</sup>, 刘紫琪<sup>1,2</sup>, 马飞<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>合肥工业大学食品与生物工程学院 合肥 230009

<sup>2</sup>皖南特色农产品加工技术研究与应用中心 安徽宣城 242000

<sup>3</sup>宣州区农业农村局 安徽宣城 242000)

**摘要** 色泽是冻藏肉质评价第一感官指标,构建原位评价冻肉色泽方法对稳定消费市场十分关键。本文提出一种以图像阈值分割算法为核心的冷冻肉色实时检测方法,即:利用典型判别分析和全局阈值分割两种算法对 120 个冻肉多光谱图像进行分割处理,并提取两类像素光谱,随后采用连续投影、偏最小二乘等算法建立光谱与肉色( $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$ )之间的关联性模型。结果显示:全局阈值分割算法结合连续投影和偏最小二乘 3 种计量学方法建立最佳  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值的预测模型,其决定系数( $R^2$ )分别为 0.9563,0.9593 和 0.9570,相应的剩余预测偏差(RPD)分别为 4.7745,4.6265 和 4.2126,表现出较好的精度与鲁棒性。研究结果为冷冻肉色无损、快速检测的工业实践提供了理论基础。

**关键词** 多光谱成像; 图像分割算法; 冷冻猪肉; 无损检测; 色泽

**文章编号** 1009-7848(2024)08-0414-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.08.037

色泽是肉质评价的第一感官指标,直接关联肉类其它品质特征,被肉类工业列为必检对象<sup>[1-2]</sup>。冷冻猪肉作为现代肉类食品加工的主要原料,既是国家储备和调节肉制品市场的重要筹码,也是国内外市场流通的主要形态<sup>[3-4]</sup>。为稳定冷冻猪肉市场,实施猪肉售前色泽实时评价方法十分关键。现阶段,冷冻肉色主要采用先解冻后测量的方式,不仅耗时费力,而且具有不可逆性,存在显而易见的缺陷<sup>[5-6]</sup>。开发一种无损、快速的冷冻肉色检测方法具有十分重要的工业意义。

多光谱成像(Multispectral imaging, MSI)是一种经典的光学技术,能够同时获取样品的光谱和图像信息,已成为发展无损检测方法的重要手段<sup>[7]</sup>。近些年来,该技术已大量用于肉色评价,且成效良好<sup>[8-9]</sup>,为本研究提供了理论可行性。通常情况下,MSI 系统由若干个非连续的光谱通道组成,较少的光谱通道使得该系统在数据处理速度、仪器制造成本等方面具有明显优势,显示出极强的工业在线检测应用能力。在肉类检测中,肉样多光谱

图像是一个三维(Three-dimensional, 3D)结构,包括二维像素( $x \times y$ )和一维波谱( $\lambda$ ),含有大量的物化信息<sup>[10]</sup>。然而,这些信息被大量噪音信号所干扰,需建立有效的噪音降低或消除方式。不可否认的是,复杂的多光谱图像数据结构给数据分析处理带来巨大的挑战,一直是制约 MSI 技术推广应用的瓶颈。如何深度挖掘多光谱图像中的有效信息,是本研究的重点工作。

图像阈值分割是一种经典的图像处理技术,具有计算量小,性能较稳定等优点,已在图像分析领域广泛应用<sup>[11]</sup>。在 MSI 技术研究中,图像分割是后续图像处理与数据分析的起始步骤和关键环节,对感兴趣区域(Region of interests, ROIs)提取、模型构建等十分重要<sup>[8-9]</sup>。一般来说,阈值分割主要分为全局阈值、Otsu 阈值和迭代式阈值 3 种算法,是利用灰度图像中的像素差异所实现的目标分割方法,在生物医药、环境监测等不同领域广泛应用<sup>[12]</sup>。

据报道,作为一项常用光谱成像技术,高光谱成像被用于检测冷冻猪肉色泽,建立的色泽  $L^*$ 、 $a^*$  值和  $b^*$  值预测模型决定系数( $R^2$ )分别为 0.907, 0.716 和 0.814<sup>[13-14]</sup>。然而,速度不快、精度不高、鲁棒性不强等系列缺陷,导致该技术难以满足肉类加工业在线检测需求,亟需探索新途径、新方法。本研究利用 MSI 技术和图像阈值算法的典型优

收稿日期: 2023-08-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32372357);皖南特色农产品加工技术研究与应用中心专项基金(W2021JSFW0388)

第一作者: 葛玲,女,硕士生

通信作者: 马飞 E-mail: mafei\_2015@hfut.edu.cn

势,开发适宜于冷冻猪肉色泽检测的方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

猪的新鲜后腿肉和背最长肌,购于安徽合肥某家乐福超市。

HBS-250 切肉机,华菱钢铁股份有限公司;DZ-400-2 真空包装机,瑞利包装机械有限公司;TS7700 色差仪,三恩驰科技有限公司;Videometer A/S 多光谱成像仪,丹麦 Videometer 公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 样品制备 样品制备主要步骤如下:①新鲜猪肉经冰袋包裹后运至低温操作间( $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ );②剔除肉中的结缔组织和可视脂肪;③将肉分切成120片( $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,长 $\times$ 宽 $\times$ 厚),其中后腿肉和背最长肌各60片;④用密封袋将分切肉样单独真空包装,并随机平均分为3组(每类肉样均为20片);⑤将封装好的样品置于 $-1,-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中冷冻24 h。

1.2.2 光谱图像采集 参考 França-Silva 等<sup>[15]</sup>的方法,并略作修改。打开 MSI 系统并预热至少30 min,然后依次使用白板、黑板、几何点板和样品进行校准。该系统的曝光时间、空间分辨率和光谱分辨率分别设定为20 ms、12 PPI 和6.32 nm。为最大限度降低样品表面发生的冷凝现象,待检样品外包装在打开后3 s内完成光谱图像的采集。每个样品的3D图像由光谱(19波段)和空间(2 056像素 $\times$ 2 056像素)组成。

1.2.3 色泽测定 所有样品图像经多光谱系统采集后,置于低温操作间中( $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )解冻至中心温度达到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将色差的孔径、光源和角度分别选定为8 mm、A 和 $10^{\circ}$ ;样品测定之前,须利用黑板、白板分别进行仪器校准。每个样品随机选取3个不同位置进行测量,且每个位置重复测量3次。该肉色指标主要用于构建冷冻猪肉色泽的无损检测模型。

### 1.3 数据分析

1.3.1 图像分割与光谱提取 图像分割与光谱提取是模型构建的关键步骤,具体为:①参考 Ma 等<sup>[16]</sup>的方法,利用典型判别分析(Canonical discriminant analysis, CDA)方法,以“-10”为分割阈

值,将样品图像中的背景、可视脂肪、结缔组织等非肉区域分割除去,得到感兴趣区域1(ROIs-1),并提取相应光谱,记为 ROIs-1 光谱;②从 ROIs-1 中选取冰霜和瘦肉区域,提取相应区域的平均光谱,记为冰霜光谱和瘦肉光谱;③采用方差分析(Analysis of variance, ANOVA)对冰霜光谱和瘦肉光谱进行统计分析,以  $F$  值为假设检验, $F$  值最大值所对应的光谱波段记为特异性波段,认定为特异性图像<sup>[17]</sup>;④采用全局阈值分割(Global threshold segmentation, GTS)算法进行特异性图像分割,具体为:基于图像像素的灰度直方图,选取初始阈值  $T$  为160,将特异性图像分割成  $G_1$ (灰度值 $>T$ )和  $G_2$ (灰度值 $<T$ )区域, $G_1$  区域所有像素灰度值设置为0,获得感兴趣区域2(ROIs-2),提取的光谱数据,记为 ROIs-2 光谱。

1.3.2 特征光谱筛选 采用连续投影算法(Successive projections algorithm, SPA)和变量投影重要性分析(Variable importance in projection, VIP)提取关键波长<sup>[18]</sup>。SPA 是一种前向循环选择算法,利用迭代运算,将变量间的共线性达到最小<sup>[19]</sup>。VIP 是反映自变量对因变量的解释能力,以 VIP 值大于1为标准,选择重要的自变量;该方法对降低数据维数、减少冗余信息等十分有利<sup>[20]</sup>。

1.3.3 模型构建 偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)是一种集主成分分析、典型相关分析和多元线性回归于一体的多变量线性分析方法<sup>[21-22]</sup>;通过投影将光谱值( $X$ )和肉色参数( $Y$ )投影到一个新空间,经有效特征分析与潜在变量提取后,构建协方差结构模型。本研究将120个样本随机取出80个为训练集,40个为预测集。选取  $R^2$ 、均方根误差(Root mean squared error, RMSE)和性能偏差比(Ratio of performance to deviation, RPD)用于模型评价,具体计算公式如下:

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

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

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

$$\text{bias} = \frac{1}{I_p} \sum_{i=1}^{I_p} (\hat{y}_i - y_i)$$

$$\text{RPD} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{\text{RMSE}_p} \quad (4)$$

式中： $i$ 为样本数量， $\hat{y}$ 为样本预测值， $y$ 为样本测量值， $\bar{y}$ 为样本测量平均值， $I_c$ 为校准集样本数量， $I_p$ 为预测集样本数量， $\text{bias}$ 为预测值与真实值之间的偏差。

模型评价中， $R^2$ 和RPD越大越好，RMSE越小越好。

#### 1.4 分析软件

CDA算法利用VideometerLab 2.1软件(Videometer A/S, 丹麦)完成, ANOVA利用SPSS

Statistics 24.0软件(IBM Corp, 美国), Origin 9.6软件(OriginLab, 美国)用于绘图; 其它分析算法均在MATLAB 9.1软件(MathWorks, 美国)中完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 色差值统计分析

根据样本集划分原则, 训练集样本数据范围应当覆盖预测集样本的数据范围, 且覆盖程度越完全越合理。由表1可知, 训练集样本色泽 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 值在数据范围、平均值和标准差等内容上基本与总体样本一致, 预测集样本颜色值均在训练集样本颜色值的数据范围之内, 表明预测集样本与训练集样本的分类选取方式较为合理。

表1 色度值样本集的划分统计

Table 1 Division and statistics of colorimeter values for sample sets

项目	样本数量	指标	最小值	最大值	平均值	标准差
总样本	120	$L^*$	22.43	37.80	28.87	3.72
		$a^*$	8.00	11.06	9.17	0.66
		$b^*$	8.87	11.89	10.34	0.79
训练集	80	$L^*$	24.06	37.80	28.21	3.62
		$a^*$	8.00	11.06	9.15	0.64
		$b^*$	8.87	11.89	10.06	0.77
预测集	40	$L^*$	25.02	36.41	30.24	3.31
		$a^*$	8.62	10.62	9.39	0.63
		$b^*$	10.21	11.67	10.96	0.39

### 2.2 原始光谱分析

不同温度处理条件下的冷冻与解冻猪肉光谱如图1所示, 所有样品的光谱变化趋势基本相同, 呈先升高后降低的特点, 较强的吸收波段主要体现在430, 550, 780, 970 nm处; 其中, 位于430 nm和550 nm处的2个吸收波段分别代表血红蛋白和肌红蛋白<sup>[23]</sup>, 750~970 nm范围的吸收波段主要是由水分子对称和反对称的O-H建拉伸及弯曲模式所引起<sup>[24-25]</sup>。尽管波谱形态较为相似, 但在吸收强度方面具有较大差异, 特别在色素蛋白吸收波段区域(430~550 nm)和水分子波段吸收区域(750~970 nm); 上述光谱特征及其差异性为肉色无损检测提供了理论支撑。

与未处理猪肉相比, 冷冻猪肉(-1~-80℃)在680~970 nm范围的光谱反射率较高, 且温度越

低、反射率越高, 表明冷冻温度对光谱特征具有较大影响, 其原因可能取决于冰晶态变化、温度大小等因素。由图1也不难发现, 经-1℃和-80℃处理的冻融猪肉, 在680~970 nm光谱范围内的反射率明显低于未处理组和冷冻处理组, 导致该现象的原因可能归因于肌肉组织结构、汁液损失等因素。

### 2.3 特异性波段筛选

利用ANOVA对冰霜光谱和瘦肉光谱进行差异性统计分析, 以 $F$ 值选取特异性单波段,  $F$ 值越大越能体现两类光谱的差异性<sup>[17, 26]</sup>。由图2可知, 随着波长的增加,  $F$ 值呈先上升后下降的趋势, 在波长660 nm处达到最大, 其值为199.693。在该波段的图像中, 灰度区域的差异性在视觉上难以分辨, 似乎影响分割的精准度与有效性。然而, 在统计分析中, 冰霜光谱与瘦肉光谱具有差异的最大

化,其主要原因可能是 660 nm 处比低波段区域更能与理化分子发生相互作用。有研究表明,660 nm 处的光谱强度变化主要与肌红蛋白及其衍生物的动态转换和降解有关,是色素感知的最主要光谱波段<sup>[27]</sup>。因此,选择 660 nm 处的光谱图像用于图像分割具有明显优势,对后续肉色的预测模型构建十分有利。

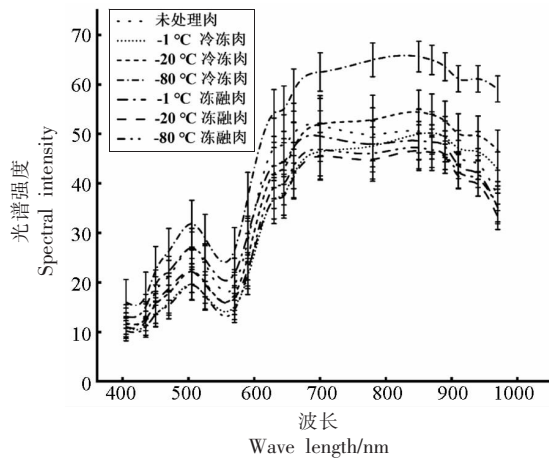


图 1 ROIs-1 光谱曲线

Fig.1 ROIs-1 spectra curve

基于特异性单波段图像的 GTS 处理结果见图 3,黑色部分代表冰霜( $G_1$ )、背景等非瘦肉区域,高亮部分代表瘦肉区域( $G_2$ );整个  $G_2$  图像呈离散型分布,像素灰度较为均匀,阈值分割误差较小。与多波段图像处理相比,实施单波段图像分割在数据处理速度、分割有效性等提升方面具有较好的优越性。

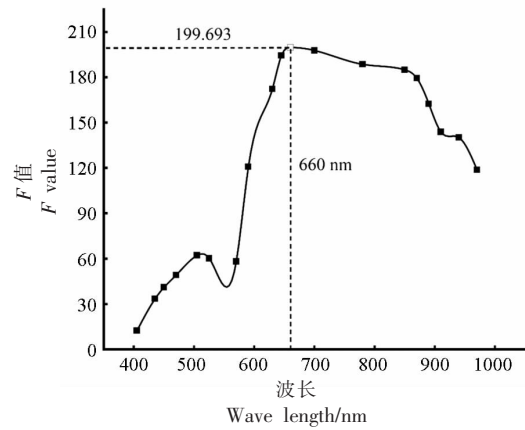


图 2 基于 F 值导向型 ANOVA 选择提特异性单波段图像

Fig.2 Specific single band image was selected based on ANOVA of  $F$ -values

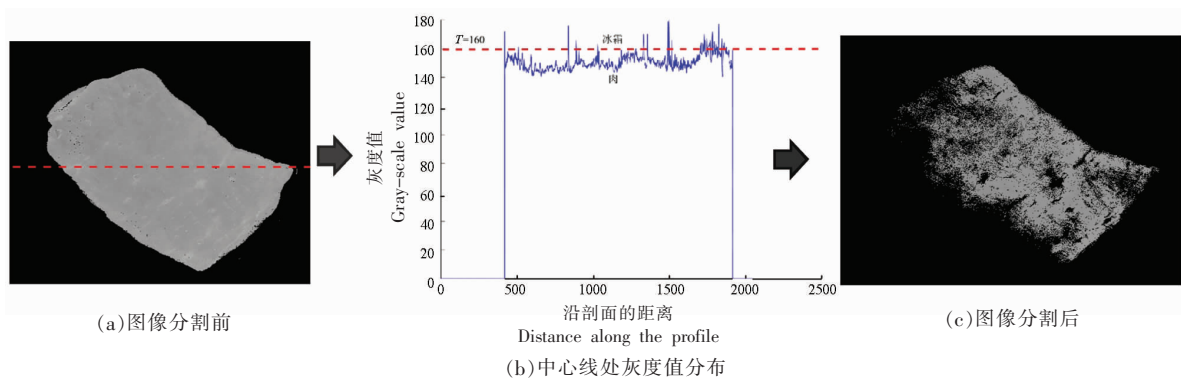


图 3 GTS 处理过程

Fig.3 GTS processing

### 2.4 全光谱建模分析

由图 4 可知,与 ROIs-1 光谱相比(图 1),ROIs-2 光谱的形态及趋势特征没有改变,各波段处的平均光谱标准偏差明显减小,显示出 GTS 算法具有良好消除冰霜干扰的能力,且最大程度保留了瘦肉的原始光谱特征。此外,平均光谱标准偏差的减小,不仅使得同类样本集更易于聚类,也为

构建高质量肉色检测模型提供了良好数据基础。

基于 ROIs-1 和 ROIs-2 光谱所建立的 PLSR 模型结果见表 2。与 ROIs-1 光谱相比,由 ROIs-2 光谱所建立的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值预测模型具有更好的精准度和鲁棒性;其中  $L^*$  值预测模型的  $R^2_p$  和 RPD 分别由 0.8839 和 3.3419 提升至 0.9515 和 4.4606,  $a^*$  值预测模型的  $R^2_p$  和 RPD 分别由 0.9124

和3.3387提升至0.9461和4.2927,  $b^*$  值预测模型的  $R^2_p$  由0.9099提升至0.9441, RPD由3.2410提升至4.2963。结果显示, 冷冻猪肉色泽的预测模型

RPD均大于4, 表明该系列模型具有优越的鲁棒性, 可用于定量分析检测<sup>[28]</sup>。

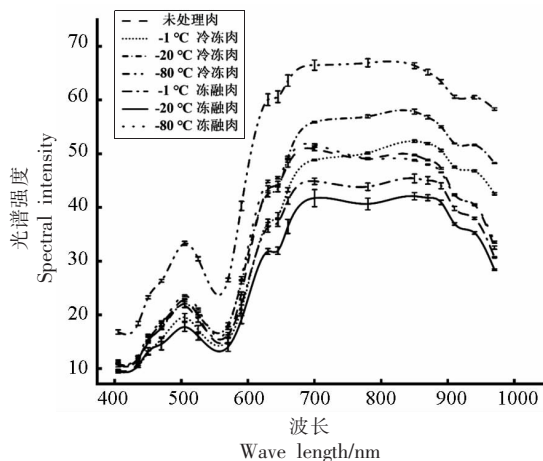


图4 ROIs-2 光谱曲线

Fig.4 ROIs-2 spectral curve

表2 ROIs-1 和 ROIs-2 光谱所构建的冷冻肉色预测模型结果

Table 2 Prediction results of color of frozen pork established by ROIs-1 and ROIs-2 spectral data

指标	迟滞变量 (LVs)	校准集			预测集		
		$R^2_c$	RMSE <sub>c</sub>	$R^2_p$	RMSE <sub>p</sub>	RPD	
ROIs-1	$L^*$	10	0.9001	2.6104	0.8839	2.2313	3.3419
	$a^*$	10	0.9324	2.1435	0.9124	1.6869	3.3387
	$b^*$	10	0.9178	0.3412	0.9099	0.4233	3.2410
ROIs-2	$L^*$	8	0.9638	1.4546	0.9515	1.6717	4.4606
	$a^*$	8	0.9643	1.0619	0.9461	1.3121	4.2927
	$b^*$	8	0.9643	0.2642	0.9441	0.2785	4.2963

## 2.5 特征光谱建模分析

为提高数据的处理速度和降低工业在线检测的应用成本, 进一步减少波段数量十分必要。本文采用 SPA 和 VIP 进行特征光谱筛选, 结果如图 5 所示。2 种特征波长的筛选方法具有较大差异性, VIP 筛选获得的特征波长主要集中在波长 600 nm 以下, 而 SPA 筛选获得的特征波长基本实现可见光与近红外全覆盖。与  $L^*$  和  $a^*$  值相比, SPA 和 VIP 针对  $b^*$  值筛选的特征波长具有较多重合, 表现出一定的通用特征。

以 SPA 和 VIP 筛选的特征波长为输入变量, 建立了 PLSR 肉色预测模型, 结果见表 3。与 VIP

相比, SPA 更加适用于针对  $L^*$  和  $a^*$  值的特征波长筛选, 所构建的 PLSR 模型具有较高的精准度和鲁棒性,  $R^2_p$  分别为 0.9565 和 0.9593, RPD 分别为 4.7745 和 4.6265, 均略高于 ROIs-2 全光谱所构建的预测模型。对于肉色特征  $b^*$  值, SPA-PLSR 模型的  $R^2_p$  略低于 VIP-PLSR 模型, 而前者 RPD 值高于后者, 表现出良好鲁棒性。在 SPA 筛选的特征波长中, 435~660 nm 光谱区域内的特征波长主要与肌红蛋白、血红蛋白等色素蛋白的吸收有关<sup>[29-30]</sup>, 750~970 nm 光谱区域内的特征波长主要与水及其状态密切相关<sup>[27-28]</sup>。综上所述, SPA 在冷冻肉色的特征光谱筛选方面更加合适。

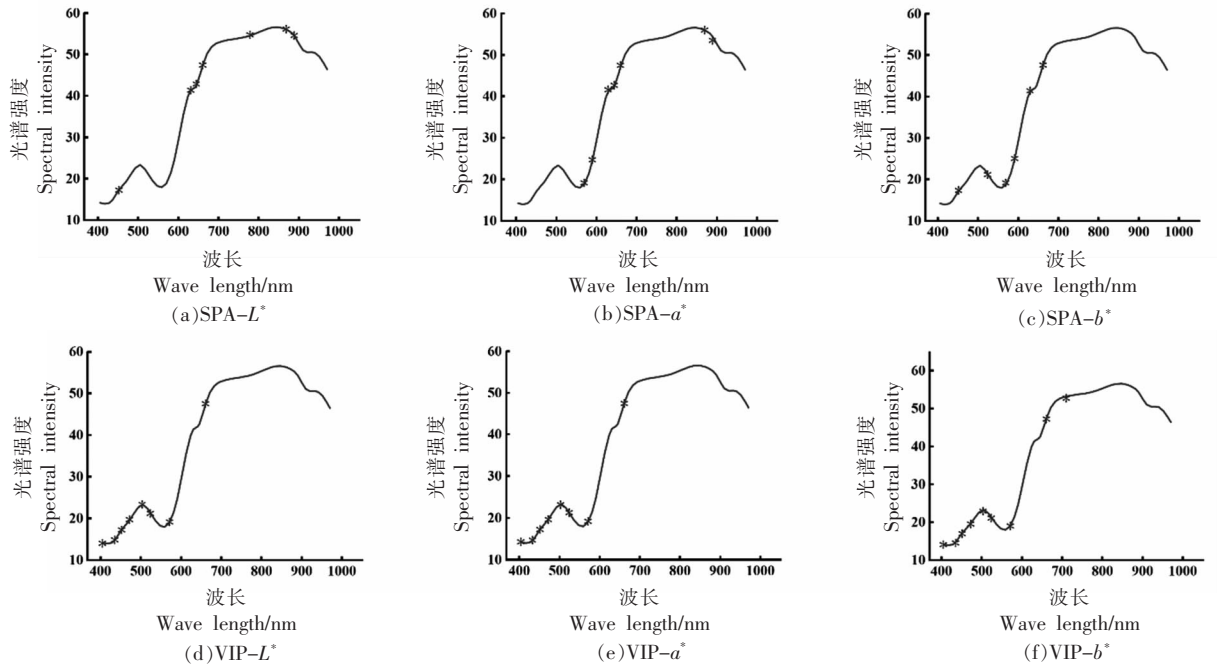


图 5 基于 SPA 和 VIP 算法的特征波长选择

Fig.5 Selection of key wave length based on SPA and VIP algorithms

表 3 基于特征波长建立的猪肉色泽 PLSR 模型结果

Table 3 Results of PLSR models for evaluating the pork color based on characteristic wave length

筛选方法	指标	变量数	LVs	校准集		预测集		
				$R^2_c$	RMSE <sub>c</sub>	$R^2_p$	RMSE <sub>p</sub>	RPD
SPA	$L^*$	9	9	0.9725	1.2802	0.9565	1.5618	4.7745
	$a^*$	7	7	0.9666	1.0385	0.9593	1.2174	4.6265
	$b^*$	6	6	0.9384	0.3507	0.9570	0.3257	4.2126
VIP	$L^*$	8	8	0.9669	1.4061	0.9419	1.8397	4.0532
	$a^*$	8	8	0.9479	1.2988	0.9525	1.5261	3.6907
	$b^*$	9	9	0.9669	0.2893	0.9590	0.3475	3.9490

### 3 结论

本研究结合可见/近红外多光谱成像技术和图像阈值分割算法,开展了多算法融合的冷冻猪肉色泽无损评测技术研究。经 CDA 和 GTS 分割算法处理后,与 ROIs-1 相比,ROIs-2 全光谱 PLSR 模型的预测精度和鲁棒性明显提升。为了进一步降低数据的处理时间,SPA 算法比 VIP 算法在筛选特征波长方面更为优越,针对色泽  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值构建了 3 个最佳预测模型,其  $R^2$  分别为 0.9565, 0.9593, 0.9570, 相应的 RPD 值分别为 4.7745, 4.6265, 4.2126。本研究结果表明,基于 MSI 技术可实现冷冻猪肉色泽的快速、无损测定,有利推动

该技术在冷冻食品中的应用,具有重要的工业意义。

### 参 考 文 献

[1] SEIQUER I, PALMA-GRANADOS P, HARO A, et al. Meat quality traits in longissimus lumborum and gluteus medius muscles from immunocastrated and surgically castrated Iberian pigs [J]. Meat Science, 2019, 150: 77-84.

[2] TOMASEVIC I, DJEKIC I, FURNOL M, et al. Recent advances in meat color research [J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 41: 81-87.

[3] 范璐璐, 葛雨萱, 涂宝峰, 等. 冷冻猪肉不同解冻

- 技术的试验分析[J]. 肉类工业, 2021, 484(8): 32-35.
- FAN L L, GE Y X, TU B F, et al. Experimental analysis of different thawing technology for frozen pork[J]. Meat Industry, 2021, 484(8): 32-35.
- [4] PIETRASIK Z, JANZJA M. Influence of freezing and thawing on the hydration characteristics, quality and consumer acceptance of whole muscle beef injected with solutions of salt and phosphate[J]. Meat Science, 2009, 81(3): 523-532.
- [5] ZHUANG Q B, PENG Y K, YANG D Y, et al. Detection of frozen pork freshness by fluorescence hyperspectral image[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 316: 110840.
- [6] XIE A, SUN D W, XU Z, et al. Rapid detection of frozen pork quality without thawing by Vis-NIR hyperspectral imaging technique[J]. Talanta, 2015, 139: 208-215.
- [7] 朱明, 郑晓卫, 殷红, 等. 白酒生产中快速检测技术的研究进展[J]. 酿酒科技, 2023(2): 95-101, 106.
- ZHU M, ZHENG X W, YIN H, et al. Research progress in rapid detection technology in Baijiu production[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(2): 95-101, 106.
- [8] 孙宗保, 李君奎, 梁黎明, 等. 高光谱成像技术的三文鱼多品质指标的预测与分布可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2591-2597.
- SUN Z B, LI J K, LIANG L M, et al. Prediction and distribution visualization of salmon quality based on hyperspectral imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2591-2597.
- [9] CHAUDHRY M, HASAN M M, ERKINBAEV C, et al. Bison muscle discrimination and color stability prediction using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209: 1-13.
- [10] ZHANG J X, LIU Y, ZHANG X N, et al. Evaluation and consistency calibration of hyperspectral imaging system based on liquid crystal tunable filter for fabric color measurement[J]. Color Research and Application, 2022, 47(2): 401-415.
- [11] LEI B, FAN J L. Multilevel minimum cross entropy thresholding: A comparative study[J]. Applied Soft Computing, 2020, 96: 106588.
- [12] 颜世利. 灰度图像阈值分割的自适应滤波和快速算法研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
- YAN S L. Study on the adaptive filtering and fast algorithm of gray scale image thresholding[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- [13] 谢安国. 冷冻冷藏过程中猪肉的光谱特性研究及其品质的快速检测[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- XIE A G. Spectral characteristics of pork meat during the freezing process and cold storage and rapid detection of product quality[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [14] XIE A G, SUN D W, XU Z Y, et al. Rapid detection of frozen pork quality without thawing by Vis-NIR hyperspectral imaging technique[J]. Talanta, 2015, 139: 208-215.
- [15] FRANÇA-SILVA F, REGO C, GOMES-JUNIOR F G, et al. Detection of *Drechslera avenae* (Eidam) sharif [*Helminthosporium avenae* (Eidam)] in black oat seeds (*Avena strigosa* Schreb) using multispectral imaging[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(12): 3343.
- [16] MA F, QIN H, SHI K F, et al. Feasibility of combining spectra with texture data of multispectral imaging to predict heme and non-heme iron contents in pork sausages[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 142-149.
- [17] 赵海峰, 高天驰. 基于 ANOVA 的特征选择方法及其在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 内燃机与配件, 2017(6): 110-113.
- ZHAO H F, GAO T C. Feature selection method based on ANOVA and its application in gearbox fault diagnosis[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2017(6): 110-113.
- [18] LIU D, SUN D W, ZENG X A. Recent advances in wavelength selection techniques for hyperspectral image processing in the food industry[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7: 307-323.
- [19] FAN Y M, MA S C, WU T T. Individual wheat kernels vigor assessment based on NIR spectroscopy coupled with machine learning methodologies[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 105: 103213.
- [20] WOLD S, JOHANSSON A, COCHI M. PLS-partial least squares projections to latent structures[M]. Leiden: ESCOM Science Publishers, 1993: 523-550.
- [21] SUBAIHI A, ALMANQUR L, MUHAMADALI H, et al. Rapid, accurate, and quantitative detection of propranolol in multiple human biofluids via surface-enhanced raman scattering[J]. Anal Chem, 2016, 88

- (22): 10884–10892.
- [22] CHOUDHARY R, PALIWAL J, JAYAS D S. Classification of cereal grains using wavelet, morphological, colour, and textural features of non-touching kernel images[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 330–337.
- [23] ZHU F L, ZHANG D R, HE Y, et al. Application of visible and near infrared hyperspectral imaging to differentiate between fresh and frozen-thawed fish fillets[J]. Food Bioprocess Technol, 2012, 6(10): 2931–2937.
- [24] CHENG J H, SUN D W. Rapid and non-invasive detection of fish microbial spoilage by visible and near infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis[J]. LWT – Food Sci Technol, 2015, 62(2): 1060–1068.
- [25] LIU D, QU J H, SUN D W, et al. Non-destructive prediction of salt contents and water activity of porcine meat slices by hyperspectral imaging in a salting process[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 20: 316–323.
- [26] CHO B K, KIM M S, BAEK I S, et al. Detection of cuticle defects on cherry tomatoes using hyperspectral fluorescence imagery[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 76: 40–49.
- [27] PRIETO N, ROEHE R, LAVÍN P, et al. Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: A review[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 175–186.
- [28] 潘健. 基于光谱的微藻藻种鉴别及内部信息(色素、油)检测的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- PAN J. Study on spectrum based microalgae species identification and internal information (pigment and oil) detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [29] PANAGOU E Z, PAPADOPOULOU O, CARSTENSEN J M, et al. Potential of multispectral imaging technology for rapid and non-destructive determination of the microbiological quality of beef filets during aerobic storage[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 174: 1–11.
- [30] CHENG L J, LIU G S, HE J G, et al. Non-destructive assessment of the myoglobin content of Tan sheep using hyperspectral imaging[J]. Meat Science, 2019, 167: 107988.

### Non-destructive Characterization of Frozen Pork Color Based on Multispectral Image Segmentation Algorithm

Ge Ling<sup>1</sup>, Zha Jing<sup>1</sup>, Geng Hao<sup>2,3</sup>, Chen Guang<sup>1</sup>, Liu Ziqi<sup>1,2</sup>, Ma Fei<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009

<sup>2</sup>South Anhui Distinctive Agricultural Product Processing Technology Research and Application Center, Xuancheng 242000, Anhui

<sup>3</sup>Xuanzhou District Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Xuancheng 242000, Anhui

**Abstract** Color is the first perceptual indicator for evaluating frozen meat quality, and establishing an *in-situ* method for evaluating the color of frozen pork will be critical to stabilize the consumer market. This work proposed a real-time method for detecting the color of frozen pork based on the image threshold segmentation algorithms including canonical discriminant analysis (CDA) and global threshold segmentation (GTS). A total of 120 multispectral images of frozen pork were segmented. These segmented images were then converted into corresponding spectra, which were applied to establish calibration models for predicting the color characteristics ( $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$ ) of frozen pork by using various algorithms such as successive projections algorithm (SPA) and partial least squares regression (PLSR). The results showed that three optimal models for predicting  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  values were built by combining the GTS with SPA and PLSR, and their corresponding determination coefficients ( $R^2$ ) and residual prediction deviations (RPD) were 0.9565 and 4.7745, 0.9593 and 4.6265, and 0.9570 and 4.2126, respectively. Results of high accuracy and robustness would provide a theoretical basis for non-destructive and rapid detection of the color of frozen pork in industrial practice.

**Keywords** multispectral imaging; image segmentation algorithm; frozen pork; nondestructive testing; color