

# 高光谱成像检测煎制中调理牛肉品质的变化

## Visual detection of beef quality during frying process by hyperspectral imaging technology

谢安国 康怀彬 王飞翔 王波

XIE An-guo KANG Huai-bin WANG Fei-xiang WANG Bo

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000)

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China)

**摘要:**将牛肉混合调料后煎制到不同熟度,制成调理肉,研究调理牛肉加工中水分、色泽、嫩度等理化品质及 370~1 023 nm 波段内的光谱特征变化,并构建品质的可视化检测模型。结果表明,牛肉煎制中含水率下降,剪切力上升,且变化显著( $P<0.05$ )。由于调料混合以及煎炸加工的不均匀性,调理肉表面色泽与可见光区间光谱变化不规律,而在近红外光谱(800~1 023 nm)反射值随熟度显著增高。基于 100 块牛肉数据,采用主成分分析(PCA)降维高光谱数据,支持向量机(SVM)建模并用粒子群(PSO)优化参数,预测调理牛肉水分和剪切力  $R^2$  分别为 0.908, 0.763, RMSEP 分别为 1.096, 2.097。证实高光谱技术具备对混有各种调料的复杂食品的检测能力。

**关键词:**高光谱成像;无损检测;调理肉制品;熟度;水分

**Abstract:** In this paper, beef mixed with a variety of spices were fried to different degrees. The physical and chemical characteristics, such as moisture content, color and tenderness, and the spectra in 370~1 023 nm were measured. Then the quality detection models and visualization method were constructed. The results showed that the moisture content decreased, and the shear force increased during the frying process, and the change was significant ( $P<0.05$ ). There was no significant difference in color between the samples and visible spectrum. While NIR spectra (800~1 023 nm) increased with cooking, and the changes were significant. Based on 100 beef data, by using Principal Component Analysis to reduce the spectral data and Support Vector Machine algorithm to establish regression model, optimizing the parameters with Particle Swarm Optimization, the values of prediction  $R^2$  of beef moisture and shear force were 0.908,

0.763, and RMSEP were 1.096 and 2.097, respectively. This experiment verified the detection ability of hyperspectral imaging technology for complex food mixed with various spices. And it provides an early exploration for the intelligent production and quality monitoring of prepared meat.

**Keywords:** Hyperspectral imaging; nondestructive testing; prepared meat products; cooking degree; moisture content

高光谱成像能够提供检测对象的光谱信息和图像信息,进而提供了从内含物质成分和外观特征检测食品品质的能力。高光谱成像技术在农作物长势、病虫害预测、果蔬检测等农业食品领域<sup>[1-2]</sup>取得了很好的研究应用。在畜肉及肉制品检测方面已有报道,冷鲜肉的主要品质参数如水分、嫩度<sup>[3]</sup>、脂肪<sup>[4]</sup>、颜色、微生物<sup>[5]</sup>和新鲜度<sup>[6]</sup>等可以基于高光谱技术进行快速检测。少数学者研究了肉品加工中的品质检测,如利用高光谱技术研究腌制肉品中 NaCl 及水分的迁移变化<sup>[7]</sup>、冷冻冷藏过程中光谱及品质变化<sup>[8]</sup>、腊肉亚硝酸盐含量<sup>[9]</sup>以及肴肉新鲜度检测<sup>[10]</sup>等。高光谱研究的主要对象是生鲜肉,对熟制肉品和热加工过程的研究很少<sup>[11]</sup>。

原料肉加入调料预制到半熟或全熟,经简单处理即可食用的调理肉制品,受到越来越多的消费者青睐。加热是食品重要的加工手段,加热处理使蛋白质降解,提高食物的消化吸收率,杀灭致病微生物,还能促进诱人色泽和风味<sup>[12]</sup>的形成。但过度加热会影响产品的营养价值和食用品质<sup>[13]</sup>,如嫩度及咀嚼口感变差等。

目前,利用高光谱对熟制肉品的研究较少。特别是肉品在不同程度加热变性,以及食盐、胡椒、黄油等调料混合的复杂食品体系中,高光谱技术对目标的检测能力仍未被验证。本试验拟将牛肉混合调料后煎制不同熟度,研究肉品水分、色泽等理化指标及光谱特征的变化,并建立光谱模型对肉品品质进行快速无损检测。为实现肉品的智能化、无人化加工技术提供理论依据。

**基金项目:**河南省科技攻关计划项目(编号:172102110018);河南省重点攻关项目(编号:161100110700-2)

**作者简介:**谢安国,男,河南科技大学讲师,博士。

**通信作者:**康怀彬(1963—),男,河南科技大学教授,硕士。

E-mail: khbin001@163.com

**收稿日期:**2018-06-03

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

牛背最长肌肉(外脊肉 Sirloin);西门塔尔,采购自洛阳大商新玛特超市;

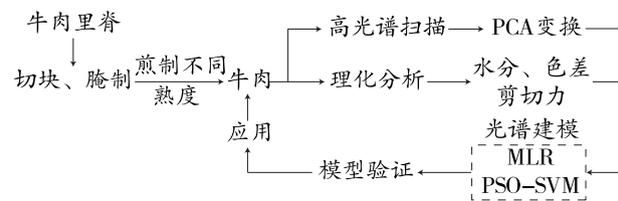
卫群精纯盐:河南省卫群盐业包装有限公司;  
黑胡椒粉:驻马店王守义十三香调味品有限公司;  
原味黄油:新西兰安佳(Anchor)公司。

### 1.2 仪器与设备

色差计:Xrite Color i5型,美国 Xrite 公司;  
电磁炉:九阳 C21-SC001型,杭州九阳生活电器有限公司;  
煎炸锅:J24D型,浙江炊大皇炊具有限公司;  
鼓风干燥箱:DHG9425A型,上海恒科学仪器有限公司;  
高光谱成像系统:IST50-3810型,德国 Inno-Spec GmbH 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 试验工艺流程



1.3.2 牛肉煎制方法 将牛肉样品在 4℃ 条件下解冻后分割成 5 cm×5 cm×3 cm 规格大小。称取食盐 1.5%,黑胡椒粉 0.15% (按原料肉的重比),与原料肉滚揉 5 min,腌制 30 min。平底煎锅中加少许黄油,温度达到 120℃ 分别煎制不同时间(30~180 s),制成不同熟度的牛肉。参照西餐加工标准对牛肉熟度判别分类<sup>[14-15]</sup>可分为一分熟(Rare)到全熟牛肉(Well Done)。

#### 1.3.3 牛肉理化指标测定方法

(1) 烹饪失水率的测定:在加工前,精确地称量样品的质量,加工处理,待样品冷却至表面没有水分再精确称量质量,按式(1)计算失水率。

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

X——失水率,%;

$m_1$ ——样品加工前的质量,g;

$m_2$ ——样品加工后的质量,g。

(2) 肉品色差的测定:用色差计测定样品表面的色泽<sup>[16]</sup>。

(3) 含水率的测定:按 GB 5009.3—2016 的直接干燥法(105℃)执行。

(4) 肉品嫩度的测定:去除样品表皮,用双面刀沿肌肉纤维走向取 5 个样品中心部分 1 cm×1 cm×3 cm 的长条,用剪切仪沿肌纤维垂直方向剪切肉柱,记录剪切力值,计算平均值。

#### 1.3.4 牛肉高光谱图像采集方法

“推式”获得光谱反射图像,先要进行黑白板校正,将试验前扫描的全黑高光谱图像设定为  $R_{黑}$ ;采集到的标准白板的高光谱图像标定为  $R_{白}$ ,扫描样品获得的图像设定为  $R_{样}$ 。校对后光谱反射值  $R$  利用式(2)计算。

$$R = \frac{R_{样} - R_{黑}}{R_{白} - R_{黑}}. \quad (2)$$

校正后,将高光谱图像放入 ENVI 5.1 软件中,利用感兴趣区域(Region of Interest, ROI)工具,选取并提取目标区域的平均光谱。

1.3.5 光谱降维处理 本试验中的高光谱成像系统可以获得样品在 370~1 023 nm 范围内 1 288 个波段丰富的光谱和图像信息。但过多的输入因子会引起“维度灾难”,增长训练时间并影响检测的精度。本试验利用主成分分析(PCA)对数据进行降维处理,将 1 288 个变量转换后,提取前 8 个主成分综合变量。

1.3.6 光谱建模与可视化检测 样品光谱经过 PCA 变换后,采用多元线性回归(MLR)和支持向量机(SVM)2种方法建立光谱模型。MLR 是一种简单快速的线性建模方法,SVM 是一种非线性机器学习算法,将输入空间中的低维线性上不开样品映射到高维特征空间,使其线性可分。影响 SVM 性能的参数包括核函数,误差惩罚参数“C”和内核参数“ $\sigma$ ”。本试验使用径向基函数(RBF),它能够处理光谱和目标属性之间的非线性关系,并降低训练过程的计算复杂度。使用粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法搜索“C”和“ $\sigma$ ”参数的最佳值。PSO 是一种模仿昆虫和鸟群等合作觅食行为的进化算法,它随机解启动,通过迭代搜索优化,具有精度高、收敛快等优点。支持向量机参考 Chang 等<sup>[17]</sup>的 libsvm 工具箱,PSO-SVM 详细算法原理及实现可参考文献<sup>[18]</sup>和<sup>[19]</sup>。算法程序在 Matlab2014a 编写和运行,用  $R^2$  和残差 RMSE 衡量模型精确率。

样品高光谱图像下每个像素的光谱值 PCA 变换后,将前 8 个 PC 数值带入建立好的 SVM 预测模型,可以得到每个点的品质指标值。通过 Matlab 的伪彩命令可绘制含水率等指标的分布情况,实现肉品品质的可视化检测<sup>[7-8]</sup>。

### 1.4 数据处理

每个样品的理化指标测量 3 次,取平均值。不同组的数据表示为平均值±标准差,数据显著性分析依据 Least-Significant Difference (LSD)即最小显著差异法。数据分析在 SPSS 和 Matlab2014a 软件中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 牛肉理化特性的分析

对 100 块不同熟度牛肉样品按照国标法进行理化指标的测量,得到样品烹饪失水率、含水率、色差如表 1 所示。

水分是食品中主要成分,影响着肉品嫩度、风味、多汁性等多项口感品质,烹饪失水率还影响着企业的经济效益。食品中的水分有自由水和结合水 2 种状态<sup>[20]</sup>,加热时牛肉中自由水不断蒸发;同时大部分的肌浆蛋白、肌原纤维蛋白在不同的温度区间发生聚集<sup>[20]</sup>,蛋白热变性将一部分结合水排出。从表 1 中可以得出,牛肉从 30 s 加热到 180 s 的过程

表 1 不同熟度牛肉的理化指标<sup>†</sup>

Table 1 Physical and chemical indexes of beef with different cooking degrees

烹饪时间/s	烹饪失水率/%	含水率/%	$L^*$	$a^*$	$b^*$	剪切力/N
30	11.92±1.12 <sup>e</sup>	64.05±0.95 <sup>e</sup>	55.23±1.48 <sup>a</sup>	8.05±0.35 <sup>a</sup>	24.84±0.67 <sup>c</sup>	31.60±1.87 <sup>bc</sup>
60	13.62±1.35 <sup>d</sup>	61.89±1.15 <sup>d</sup>	54.28±0.69 <sup>ab</sup>	7.89±0.23 <sup>a</sup>	25.09±0.40 <sup>c</sup>	25.02±2.31 <sup>a</sup>
90	15.85±1.16 <sup>c</sup>	59.40±0.97 <sup>c</sup>	53.59±1.03 <sup>b</sup>	7.84±0.18 <sup>a</sup>	25.58±0.36 <sup>b</sup>	28.38±1.71 <sup>ab</sup>
120	18.93±1.57 <sup>b</sup>	56.91±1.24 <sup>b</sup>	51.85±1.03 <sup>c</sup>	7.83±0.29 <sup>a</sup>	26.59±0.39 <sup>a</sup>	29.33±0.58 <sup>ab</sup>
180	25.04±1.82 <sup>a</sup>	52.97±0.86 <sup>a</sup>	51.23±0.79 <sup>c</sup>	7.40±0.21 <sup>b</sup>	26.48±0.40 <sup>a</sup>	35.31±0.71 <sup>c</sup>

† 不同字母表示差异性显著,  $P < 0.05$ 。

中,烹饪失水率逐渐增加,牛肉中含水率逐渐降低。通过 LSD 差异性分析可知,样品的烹饪失水率和含水率的差异显著,并且相邻熟度的肉品之间差异也达到了显著水平( $P < 0.05$ )。牛肉的质构也发生了显著性的变化,剪切力有逐渐增加的趋势;剪切力存在显著差异( $P < 0.05$ )。牛肉色泽也会因加热而变化,随着加热时间延长, $L^*$  值整体呈下降趋势, $a^*$  值下降, $b^*$  值上升。说明加热使样品亮度下降,黄度增加。LSD 差异分析表明,虽然不同熟度牛肉色泽存在差异,但相邻熟度的样品之间的差异往往没有达到显著水平。

## 2.2 煎制牛肉的光谱特征

用高光谱成像仪对 100 块牛肉进行扫描,获得样品 370~1 023 nm 内 1 288 个波段的光谱信息。经过黑白板校正处理后,用 ROI 工具提取光谱曲线。从图 1 可以看出,不同熟度的牛肉在大部分波段上(370~800 nm)光谱是相近的,有差异但不显著。其原因是,加热会使水分蒸发、蛋白变性以及产生焦糖化变色,虽然牛肉内部的生熟度有很大差异,但牛肉表皮都会受到直接加热,蛋白变性和变色充足。此外,牛肉煎制中食盐、黑胡椒和黄油等调料都附于表面,降低了不同牛肉表面的颜色差异。370~800 nm 恰好属于人类视觉的可见光区间,此区间的光谱分析和 2.1 中的 Lab 色差分析相互印证。说明了不同熟度,尤其相邻熟度牛肉的颜色差异不显著。牛肉熟度与表面色泽并不是一一对应的关系,而传统烹饪方法中根据牛肉的外观颜色对牛肉进行熟度判断,控制烹饪时间并不是非常准确的方法。

牛肉光谱的差异主要存在于 800 nm 以后区间,特别是 809~956 nm 时,随着加热时间的延长,光谱反射值逐渐增

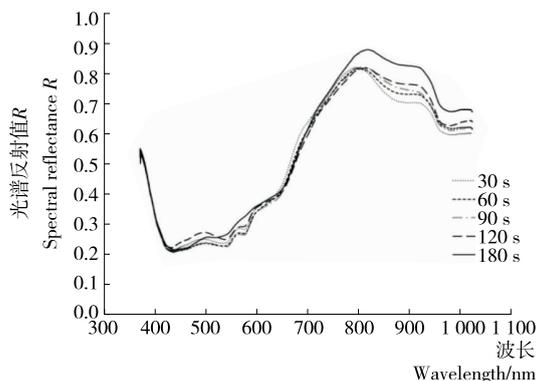


图 1 不同熟度牛肉的平均光谱曲线

Figure 1 Average spectra of beef with different cooking degrees

高,光谱强度与牛肉熟度呈正比。此前的研究工作显示,腌制<sup>[7]</sup>、冷冻<sup>[8]</sup>和干燥<sup>[21]</sup>等工艺使肉品水分排出,自由水对近红外光的吸收减少,近红外光谱反射值将增加<sup>[22]</sup>。本团队<sup>[23]</sup>另一项工作中,研究了在高温处理中牛肉蛋白质组分及其降解过程,结果显示水溶性蛋白和盐溶性蛋白均随加热温度的升高和时间的延长而急剧下降,凝胶电泳中肌球蛋白重链条带逐渐变淡消失。牛背最长肌中的蛋白质降解与本研究中牛肉样品的光谱变化显著相关。因此 809~956 nm 区间光谱变化与样品含水量、蛋白构象相关。近红外光谱能很敏锐地捕捉到了不同熟度牛肉样品的差异。

## 2.3 调理牛肉光谱模型的建立

采用主成分分析处理高光谱图像有效浓缩信息量。前 3 个主成分累积信息量依次达到 52.42%, 81.06%, 97.14%, 当含有 8 个主成分时,涵盖了全光谱 99.89% 的信息量。图 2 展示了同一牛肉高光谱图像的前 6 个主成分图,它从不同侧面突出了调理牛肉的特点。PC-1 和 PC-2 图像很接近肉品生鲜牛肉的图像,偏向于刻画肉品纹理和基本组分的特征。PC-3 和 PC-4 图像偏向于描绘肉品加热中褐变或焦糊区域的变化,而 PC-5 和 PC-6 图像则突出了黑胡椒等调味品在产品表面的分布情况。PC-7 和 PC8 图像变得模糊,而 PC-8 以后的图像基本是无规律的噪音信息。PCA 处理不仅突出了有效信息,还可去除大量干扰信号,加快运算速度。

从 100 块样品中随机选 65 块样品作为校正集,剩余 35 块样品为验证集。PCA 变换后用 MLR 和 SVM 算法对调理牛肉的含水量和剪切力建立回归模型,模型预测结果如表 2 所示。SVM 模型优于 MLR,非线性算法的优势得到了体现。光谱模型对调理肉色差进行检测,但测量结果精度较低

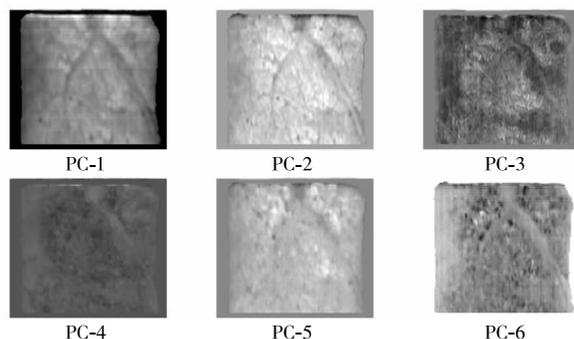


图 2 同一调理牛肉前 6 个主成分图像

Figure 2 The first 6 principal components image of a piece of processed beef meat

表2 不同光谱模型预测调理牛肉品质的效果

Table 2 The predicted result for quality of processed beef meat by different models

理化参数	建模方法	校正集		验证集	
		$R_c^2$	RMSEC	$R_p^2$	RMSEP
含水率	MLR	0.901	1.136	0.878	1.265
	PSO-SVM	0.927	0.978	0.908	1.096
剪切力	MLR	0.727	2.223	0.691	2.381
	PSO-SVM	0.820	1.817	0.763	2.097

分别为  $L^*$  ( $R_p^2 = 0.701$ )、 $a^*$  ( $R_p^2 = 0.573$ ) 和  $b^*$  ( $R_p^2 = 0.693$ )，色差可视化的图像也比较模糊。由此来看，煎制过程中调料和肌肉蛋白发生复杂的美拉德反应、焦糖化变色等对肉品颜色预测造成了较强干扰。同时 Lab 色差仪是选取肉品中 3 个点进行测量，取样不均匀也会对光谱模型对色差的预测效果造成负面影响。高光谱对调理牛肉含水率的预测结果好于剪切力，与此前许多研究结果<sup>[3,7-8]</sup>相似。

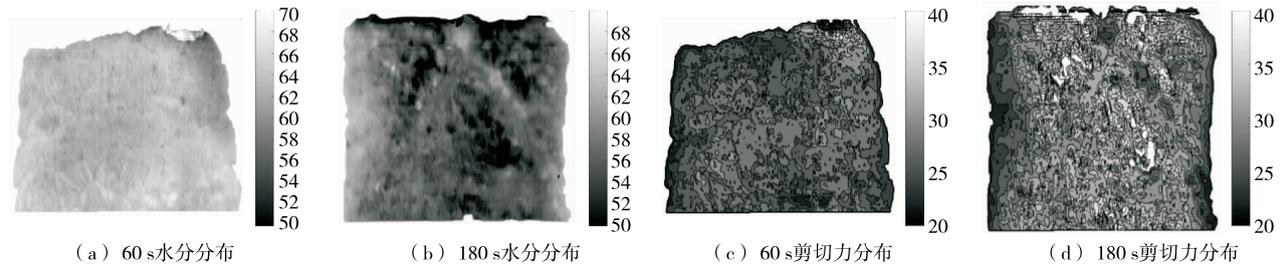


图3 调理牛肉在煎制过程中的水分含量和剪切力变化图

Figure 3 Distribution Images of moisture content and shear force of the processed beef during the frying process

### 3 结论

在熟制过程中肉品组织成分会短小时内发生剧烈变化，目前煎制牛排主要还是通过外表颜色判断熟度和品质。在本研究通过 Lab 色差分析和可见区间光谱显示，在多种调料混合下，相邻熟度牛肉的颜色差异不明显。加热使肉品中水分不断减少，不同熟度牛肉的水分和嫩度差异显著 ( $P < 0.05$ )。加热中牛肉水分和蛋白变性信息充分反映在了近红外区间的光谱曲线上，近红外波段光谱反射值随熟度增加逐渐增高。采用 PCA 对高光谱数据进行变换，不仅减少了运算数据量，而且主成分图像凸显了调理肉不同的品质特征。SVM 建立回归模型并用 PSO 优化参数，对煎制过程中的 100 块牛肉构建快速检测模型，牛肉水分和剪切力预测相关系数  $R^2$  分别为 0.908, 0.763。可视化检测可反映出肉品熟化中每个区域的水分迁移和嫩度变化特征，还反映出不同加热方式的特点。

当前高光谱在工业应用中遇到的主要障碍依然是光谱与图像的数据庞大、运算速度慢。从本研究中看出，肉品在热加工中只有少数波段的光谱发生显著变化。今后针对某一种食品，开发基于特征波段的高光谱专用设备和分析模型，将能够尽早推广高光谱的工业化应用。

### 参考文献

[1] 叶旭君, KENSHI Sakai, 何勇. 基于机载高光谱成像的柑橘产

这是因为影响剪切力的因素较多，且剪切力的测量较复杂。最佳含水率预测模型结果为  $R_p^2 = 0.908$ ,  $RMSEP = 1.096$ ，剪切力最佳结果为  $R_p^2 = 0.763$ ,  $RMSEP = 2.097$ 。需要注意，所建立的快速检测模型对牛肉瘦肉部分通用性很好，如里脊肉、臀肉等；而对牛腩等肥肉部分适用性降低，需要训练新模型。

### 2.4 调理牛肉煎制过程的可视化

每个像素下数值带入建立好的 SVM 预测模型，可得到每个点的指标值。通过 Matlab 的伪彩命令绘制调理牛肉在煎制过程中水分含量和剪切力的变化图(图 3)。图中的亮色表示数值高，暗色表示数值低。变化图显示随着加热时间的延长，肉品水分含量逐渐减少，肉品剪切力逐渐增加。本实验中，煎锅置于电磁炉上，中部火力较强而周围较弱。变化图如实地反映了煎炸的加热特点：肉品中部的的水分降低较快，剪切力增加较快。肉品在熟制中短小时内发生剧烈变化，指标测量费时、困难。通过光谱运算及可视化技术有望对调理肉加工进行准确、高效、动态的品质检测。

量预测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(5): 1 295-1 300.

[2] 张保华, 李江波, 樊书祥, 等. 高光谱成像技术在果蔬品质与安全无损检测中的原理及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2 743-2 751.

[3] ZHAO Juan, PENG Yan-kun. Distribution of beef tenderness grading based on texture features by hyperspectral image analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 279-286.

[4] XIONG Zheng-jie, SUN Da-wen, PU Hong-bin, et al. Non-destructive prediction of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value for freshness evaluation of chicken meat using hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2015, 179(1): 175-181.

[5] HUANG Lin, ZHAO Jie-wen, CHEN Quan-sheng, et al. Rapid detection of total viable count (TVC) in pork meat by hyperspectral imaging[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 821-828.

[6] TAO Fei-fei, PENG Yan-kun. A method for nondestructive prediction of pork meat quality and safety attributes by hyperspectral imaging technique[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 126(1): 98-106.

[7] LIU Dan, SUN Da-wen, QU Jia-hua, et al. Feasibility of using hyperspectral imaging to predict moisture content of porcine meat during salting process[J]. Food Chemistry, 2014, 152(2): 197-204.

(下转第 54 页)

致香物质总量变化数据可见,感官质量得分与其变化并不完全一致,可能是感官评吸除受常规化学成分、中性致香物质影响外,还受其他香味物质含量、pH 值等的影响<sup>[15-16]</sup>,但总体上讲,均以 25.40~42.00 mm 片烟质量最高,且该规格片烟制成的烟丝结构优、填充性能好<sup>[3]</sup>,6.35~12.70 mm 和 2.36~6.35 mm 片烟整体质量最低,且 2.36~6.35 mm 片烟成丝性能较差,经制丝工序后大部分转变为碎末及尘土<sup>[17]</sup>。

### 3 结论

浓香型烤烟打叶后不同尺寸片烟的主要化学成分、中性致香物质含量和感官质量均存在明显差异,其中,尺寸为 25.40~42.00 mm 片烟的综合质量最好,有望作为高等级原料的替代品;尺寸 >42.0 mm 的内在质量仅次于 25.40~42.00 mm 的;尺寸为 2.36~6.35 mm 的内在质量较差,因此在打叶复烤时尽量将该尺寸规格的片烟筛除,并作为再造烟叶的原料,不仅减少制丝卷制过程原料损耗,而且能够提高打叶复烤后片烟的整体质量。总体而言,将片烟筛分后得到的不同尺寸片烟进行分类使用,能够进一步拓宽原料的使用范围,提升烟叶整体使用价值。本次试验选取的材料是河南上部和中部烟叶模块,所得结论对不同地区其他部位烟叶的适用性还有待进一步研究。

### 参考文献

[1] 余娜,夏艺丰,朱文魁,等. 叶片结构与叶丝结构关系模型研究[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2013,28(3):24-28.  
 [2] 唐军,邱昌桂,周冰,等. 不同尺寸片烟及不同长度成品烟丝化学成分的变化[J]. 烟草科技,2016,49(11):42-55.  
 [3] 罗登山,曾静,刘栋,等. 叶片结构对卷烟质量影响的研究进展[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2010,25(2):13-17.

[4] 堵劲松,申晓锋,李跃锋,等. 烟丝结构对卷烟物理指标的影响[J]. 烟草科技,2008(8):8-13.  
 [5] 申晓锋,李华杰,王锐亮,等. 烟丝结构与卷烟单支重量和烟支密度及其稳定性的灰色关联分析[J]. 中国烟草学报,2009,15(6):23-26.  
 [6] 李善莲,申晓锋,李华杰,等. 烟丝结构对卷烟端部落丝量的影响[J]. 烟草科技,2010(2):5-7,10.  
 [7] 蔡联合,邹克兴,孙建生,等. 打叶框栏尺寸对烤烟打叶过程中叶片结构及出片率的影响[J]. 湖南农业科学,2017(8):78-80.  
 [8] 徐大勇,李新锋,范明登,等. 复烤温度对片烟收缩率及大小分布的影响[J]. 烟草科技,2013(3):12-16.  
 [9] 邱承宇,管仕栓,褚智国,等. 片烟筛分提质试验研究[J]. 安徽农学通报,2012,18(19):187-188.  
 [10] 王瑞新. 烟草化学品质分析法[M]. 郑州:河南科学技术出版社,1999:43-120.  
 [11] 陈胜可. SPSS 统计分析从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2010:187-191.  
 [12] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 8 版. 北京:科学出版社,2017:541-578.  
 [13] 陈征,任志广,范艺宽,等. 基于灰色关联分析模型的烟叶化学成分评价研究进展[J]. 中国农业科技导报,2017,19(5):129-137.  
 [14] 王彦亭,谢剑平,李志宏,等. 中国烟草种植区划[M]. 北京:科学出版社,2010:3-4.  
 [15] 江厚龙,陈涛,马红辉,等. 重庆烟区烤烟感官品质主要影响因素分析[J]. 烟草科技,2014(6):87-92.  
 [16] 邵惠芳,郑聪,许自成,等. 西南烟区烤烟 pH 分布特点及与感官品质的关系[J]. 中国烟草科学,2010,31(3):18-22,32.  
 [17] 李新学. 降低烟叶损耗 提高经济效益[J]. 烟草科技,1990(5):4.

(上接第 23 页)

[8] XIE An-guo, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei, et al. Nondestructive Measurements of Freezing Parameters of Frozen Porcine Meat by NIR Hyperspectral Imaging[J]. Food & Bioprocess Technology, 2016, 9(9): 1444-1454.  
 [9] 杨昆程,郭培源,刘硕,等. 高光谱技术在腊肉亚硝酸盐含量检测的应用[J]. 科技通报,2016,32(11):70-74.  
 [10] 邹小波,李志华,石吉勇,等. 高光谱成像技术检测猪肉新鲜度[J]. 食品科学,2014,35(8):89-93.  
 [11] LIU Yu-wei, SUN Da-wen, CHENG Jun-hu, et al. Hyperspectral imaging sensing of changes in moisture content and color of beef during microwave heating process[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(9):1-13.  
 [12] 温斯颖. 不同种类动物肌肉蛋白质消化产物比较研究[D]. 南京:南京农业大学,2015:44-50.  
 [13] 李诗义,诸晓旭,陈从贵,等. 肉和肉制品的营养价值及致癌风险研究进展[J]. 肉类研究,2015,29(12):41-47.  
 [14] 李祥睿. 西餐中肉类的烹调成熟度及其辨别方法[J]. 中国食品,2007(5):42-43.  
 [15] 刘登勇,周光宏,徐幸莲. 西餐中肉类烹调程度的控制[J]. 扬州大学烹饪学报,2004,21(3):37-40.

[16] MOYANO P C, RIOSECO V K, GONZÁLEZ P A. Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated French fries[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(3):249-255.  
 [17] CHANG Chih-chung, LIN Chih-jen. LIBSVM: A library for support vector machines[M]. Taipei: [s.n.], 2011:22-30.  
 [18] 穆朝聚,张瑞民,孙长银. 基于粒子群优化的非线性系统最小二乘支持向量机预测控制方法[J]. 控制理论与应用,2010,27(2):164-168.  
 [19] 史峰,王小川,郁磊,等. MATLAB 神经网络:30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:122-132.  
 [20] TORNERBERG E. Effects of heat on meat proteins; Implications on structure and quality of meat products[J]. Meat Science, 2005, 70(3):493-508.  
 [21] LIU Yun-hong, SUN Yun, XIE An-guo, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of anthocyanin content of purple-fleshed sweet potato slices during drying process[J]. Food Analytical Methods, 2017(10):1-11.  
 [22] 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,2016:97-104.  
 [23] 邹良亮,康怀彬,张慧芸,等. 高温处理对牛肉蛋白质组分及其降解的影响[J]. 食品与机械,2017,33(11):18-22.