

基于高光谱成像技术的金银花与山银花快速鉴别

Rapid identification of *Lonicerae Japonicae Flos* and *Lonicerae Flos* based on hyperspectral imaging

冯洁¹ 刘云宏^{1,2} 王庆庆¹ 于慧春^{1,2} 石晓微¹

FENG Jie¹ LIU Yun-hong^{1,2} WANG Qing-qing¹ YU Hui-chun^{1,2} SHI Xiao-wei¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南省食品原料工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;
2. Henan Engineering Technology Research Center of Food Materials, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:利用高光谱成像技术,研究一种快速、准确、无损的鉴别金银花与山银花的方法。通过对比3种预处理方法对偏最小二乘算法(Partial Least Squares, PLS)建模效果的影响,得到SNV为建模最优预处理方法。使用回归系数法(Regression Coefficient, RC)和连续投影算法(Successive Projection Algorithm, SPA)选择经预处理后光谱的特征波长,并分别建立极限学习机(Extreme learning machine, ELM)和最小二乘支持向量机(Last Squares Support Vector Machine, LS-SVM)的判别分析模型。结果表明,光谱经SNV预处理后,应用SPA提取特征波长并建立LS-SVM判别分析模型为金银花和山银花最优判别模型,其建模集与预测集识别率均达到了100.00%。因此,利用高光谱成像技术能够无损、有效地鉴别金银花与山银花,并且在全光谱和特征波长下均能实现金银花与山银花的快速判别分析。

关键词:金银花;山银花;高光谱;快速鉴别

Abstract: In order to identify *Lonicerae Japonicae Flos* and *Lonicerae Flos* rapidly and precisely, a hyperspectral imaging technology combined with chemometric methods was applied to develop the nondestructive identification models for *Lonicerae Japonicae Flos* and *Lonicerae Flos*. Firstly, the original spectral data were analyzed by three pretreatment methods including Savitzky-Golay (SG) convolution smoothing, Multiple Scatter Correct (MSC) and Standard Normal Variate Transformation (SNV). A comparison was made among SG, MSC and SNV based on Partial Least Squares (PLS), of

which the best pretreatment method was SNV. The Regression Coefficient (RC) and Successive Projection Algorithm (SPA) were used to extract the characteristic wavelengths after SNV pretreatment. Extreme learning machine (ELM) and Last Squares Support Vector Machine (LS-SVM) were applied to build the classification models based on characteristic wavelengths. This results revealed that the LS-SVM model based on SPA performed the optimal classification, with the accuracy of all 100% for modeling set and prediction set. Therefore, hyperspectral imaging technology can be used to identify *Lonicerae Japonicae Flos* and *Lonicerae Flos* effectively and non-destructively based on full wavelengths and characteristic wavelengths.
Keywords: *Lonicerae Japonicae Flos*; *Lonicerae Flos*; Hyperspectral imaging; rapid identification

金银花(*Lonicerae Japonicae Flos*)是中国传统药食同源中药材和食材^[1-2],有抗菌抗炎、清热解毒等功效,具有极高的营养价值^[3-5]。近年来,随着人们对金银花营养功效的深入了解,金银花不但在中药领域的需求越来越大,在食品行业(如凉茶、饮料、冲剂等)中的应用也日趋广泛,导致金银花市场供不应求,其价格连年持续飙升。由于山银花(*Lonicerae Flos*)与金银花的形状以及特征等方面极其相似,且产量大、价格便宜,部分不法商贩为谋取个人利益,将山银花掺杂甚至冒充金银花出售。上述掺假行为不但扰乱了正常的金银花市场,对金银花为原料的食品和药品消费市场也造成巨大危害。因此,如何建立快速、有效、实用的金银花与山银花识别方法,是保证金银花及其产品品质、健康发展金银花产业亟待解决的问题。

目前,对于金银花的鉴别主要根据外观性状进行鉴别(如花蕾尺寸、表面色泽、毛被情况等)^[6]以及利用化学方法(如高效液相色谱鉴定法^[7-8]、液-质联用^[9]、标识成分含量测定^[10]等)检测内部品质指标。然而,外观性状鉴别方法具有较强的主观性,鉴别误差较大;而理化鉴别方法具有破坏

基金项目:国家自然科学基金河南联合项目(编号:U1404334);河南省高等学校青年骨干教师资助计划(编号:2015GGJS-048);河南省自然科学基金项目(编号:162300410100);河南省科技攻关项目(编号:172102310617)

作者简介:冯洁,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:刘云宏(1975—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail:beckybin@haust.edu.cn

收稿日期:2018-02-01

性,且耗时费力、成本较高,均无法做到对金银花快速、无损、准确的检测,难以满足实际鉴别工作的需要。

高光谱成像技术是融合了成像技术和光谱技术优点的一种新兴检测技术,可以同时获得研究对象内、外部品质特征的光谱信息与空间信息^[11-13],在农作物的鉴别及品质检测方面已广泛应用^[14-16]。董高等^[17]采用 PLS-DA 和 LS-SVM 方法对强筋、中筋、弱筋小麦种子进行近红外高光谱图像判别分析,实现了基于高光谱成像技术的小麦品种快速识别。Xie 等^[18]利用高光谱成像技术分别建立了 LS-SVM、PLSR、PCR 和 MLR 4 种不同干燥时期茶叶的判别模型。蔡健荣等^[19]采用漫反射式高光谱技术结合支持向量机(SVM)建立碧螺春茶叶真伪鉴别模型,其训练集和预测集识别率分别为 100%,96.25%。可见,高光谱成像技术在农产品真伪鉴别与品质鉴定方面可以实现较高的精度。然而,利用高光谱成像技术对金银花与山银花进行快速、有效鉴别的研究未见报道。

本研究利用高光谱成像技术来探索金银花与山银花的快速鉴别方法,并结合化学计量学方法建立有效、准确的鉴别模型。使用 Savitzky-Golay 卷积平滑(SG)、标准正态变量变换(Standard Normal Variate Transformation, SNV)和多元散射校正(Multiple Scatter Correct, MSC)3 种预处理方法建立全光谱 PLS 模型,选择最佳预处理方法。并将预处理后的光谱信息应用 RC 和 SPA 提取特征波长,分别建立 ELM 和 LS-SVM 判别分析模型。最终实现对金银花和山银花的有效鉴别,以期高光谱成像技术在金银花等农产品的掺伪鉴别及品质鉴定中的应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与设备

金银花、山银花:产地河南省封丘市,其中山银花为灰毡毛忍冬,购自河南省洛阳市同仁堂大药房,随机选取 180 个样本用于高光谱扫描,其中金银花、山银花各 90 个样本;

高光谱摄像机:Inno-Spec IST50-3810 型,包括高光谱摄像机、成像光谱仪、镜头三部分,光谱采集范围为 371~1 024 nm,在光谱范围内共 1 288 个波段,光谱分辨率为 2.8 nm,德国 Inno-Spec GmbH 公司;

光纤卤素灯:90000420108 型,德国 ESYLUX 公司;

控制箱:SC100 型,北京光学仪器厂;

电控位移台:SC100 型,北京光学仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 高光谱图像采集 在图像采集前,为了保证图像的清晰度及避免失真,首先应确定物镜距离、高光谱摄像机的曝光时间和输送装置的移动速度^[20-21]。经过反复调整,最终确定物镜高度为 250 mm,CCD 相机的曝光时间为 90 ms,输送装置的移动速度为 1.20 mm/s。光源前后两边各 2 个,以保证花蕾表面形成足够的光照强度,防止由于光照不足或不均匀而产生的噪音。

1.2.2 图像黑白校正 在进行光谱处理前,需要进行黑白校正以清除由于传感器的暗电流等原因导致图像信息中含有较大噪音。因此,在同一本采集系统条件下,扫描标准白

色校正板(99%反射率)与关闭摄像头快门进行图像采集,分别得到全白和全黑的标定图像,根据式(1)进行图像标定^[22-23]。

$$R = \frac{I - B}{W - B}, \quad (1)$$

式中:

I ——原始的高光谱图像;

B ——全黑的标定图像;

W ——全白的标定图像;

R ——标定后的高光谱图像。

图像校正后,采用 ENVI 5.1 软件选取整株金银花花蕾为感兴趣区域(Region of Interest, ROI),将 ROI 内所有光谱信息的平均值作为对应样本的光谱值进行数据分析。

1.3 化学计量学方法

利用 MATLAB R2014a (The Math Works, Natick, USA)软件,将采集到的样本数据使用 SG 卷积平滑、MSC 和 SNV 3 种方法进行预处理^[24-26]。利用回归系数法(RC)和连续投影系数法(SPA)选择经预处理光谱的特征波段,并使用所提取的特征波段分别建立极限学习机(ELM)和偏最小二乘支持向量机(LS-SVM)判别分析模型。采用识别率来评价判别分析模型的精度。经反复调试,本试验所选算法 ELM 所用隐含层神经元的个数为 $2(N-1)$,其中 N 为特征波段数。LS-SVM 选用的核函数为 RBF 算法,惩罚因子设置 γ 为 20, RBF 核函数参数 σ^2 为 230。其作为非线性函数能够减少训练过程中的计算复杂度。

2 结果与分析

2.1 金银花与山银花的原始光谱曲线

由于光谱数据前端和后端数据波动较大,噪声影响明显,因此研究时去掉前端和后端中具有明显噪声的波段,本试验采用第 141~1 160 波段,共计 1 020 个,即对波长范围在 442.65~960.48 nm 的光谱进行分析^[27]。图 1 为金银花和山银花 180 个样本的原始光谱曲线图,其光谱曲线的趋势相似,并无异常样本存在,因此无需剔除异常样本,可直接进行光谱分析。

本试验使用 Kennard-Stone(KS)算法将去除前后噪声的金银花和山银花光谱信息按照 2:1 的比例随机划分为建模集和预测集。划分结果见表 1,其中建模集为 120 个样本,

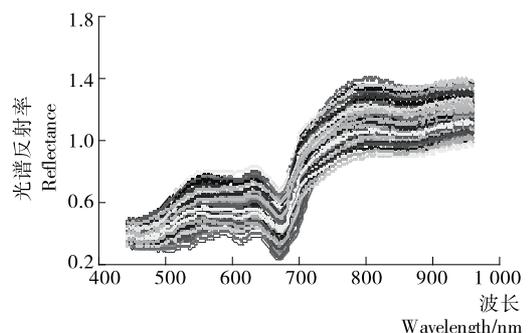


图 1 金银花与山银花原始光谱图

Figure 1 Average spectral of modeling *Lonicerae Japonicae Flos* and *Lonicerae Flos*

表 1 山银花与金银花类别赋值与建模集和预测集样本划分
Table 1 Class assignment and division of calibration set and prediction set of *Lonicerae Japonicae Flos* and *Lonicerae Flos*

来源	山银花	金银花
类别赋值	1	2
建模集	60	60
预测集	30	30

预测集为 60 个样本,并赋值山银花为 1,金银花为 2。

2.2 光谱预处理

表 2 为全光谱波段下 SG、SNV 和 MSC 3 种预处理方法的 PLS 判别分析结果,通过不同预处理方法建立 PLS 模型的决定系数基本都在 0.96 以上,其中 SNV 预处理方法与 SG、MSC 相比较,其预测集的 R^2 最大,为 0.982 0, RMSE 最小,为 0.067 1,运行时间最短,为 0.075 1 s,表明 SNV 预处理方法可通过增加样本光谱差异来提高模型稳健性和预测性能。因此,经 SNV 算法预处理后的光谱信息建模效果更好。

表 2 基于全波段的 PLS 判别分析结果

Table 2 Discriminant results of PLS-DA models

预处理	建模集		预测集		时间/s
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	
SG	0.991 7	0.045 5	0.966 9	0.091 0	0.127 6
SNV	0.999 5	0.010 8	0.982 0	0.067 1	0.075 1
MSC	0.999 2	0.014 0	0.977 9	0.074 3	0.076 7

2.3 基于主成分的聚类分析

将经过 SNV 预处理的光谱数据进行主成分分析 (PCA),得到 PCA 前 5 个主成分的贡献率分别为 83.2%, 5.1%, 3.1%, 1.4%, 1.2%, 累计贡献率为 94%,能够解释大部分的变量。并且建模集的识别率为 100%,预测集有 8 个样本错分类别,识别率为 86.67%,具有较差的识别率。由图 2 可以看出,利用 PCA 很难区分金银花与山银花。说明全光谱具有较差的可分性,需要进一步处理与分析样品的光谱信息。

2.4 特征波长的选取

为解决由于高光谱图像的原始数据量庞大及冗余信息

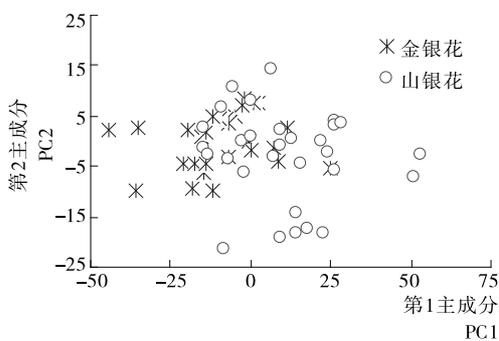


图 2 PCA 判别结果

Figure 2 PCA discrimination result

过多导致识别率不高的问题,需要剔除无信息波长及信噪比较高的波长,挑选蕴含丰富信息且信噪比较高的波长,以此对全波段进行降维处理。本试验使用 RC 和 SPA 2 种方法,筛选出几个重要特征波长。

图 3 是 RC 算法于 PLS 第 3 主成分上波峰波谷(吸光度与浓度值之间的线性关系最大点)位置所选择的结果,提取的波段数为 12,分别为 536.4, 593.3, 607.6, 643.9, 671.5, 690.4, 746.5, 765.8, 799.8, 810.4, 832.1, 852.4 nm 处,即第 141, 294, 322, 393, 447, 484, 594, 632, 699, 720, 763, 804 波段。

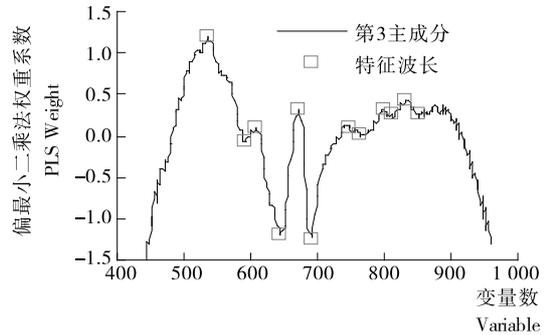


图 3 RC 算法特征波段选择结果

Figure 3 RC algorithm feature bands selection results

连续投影算法 (SPA) 可以最大限度地消除变量中存在的共线性信息。经反复调试得到,当 SPA 提取特征波长范围设定为 5~20 个时,提取的特征波长建模效果较好,当波段数为 8 时,如图 4(a) 所示, RMSE 的值较小,为 0.045 6。图 4(b) 为特征波长所对应的波段数的位置,分别为第 1, 173, 380, 663, 730, 767, 920, 1 019 波段。

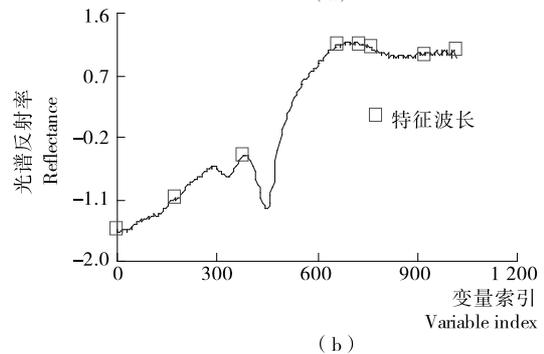
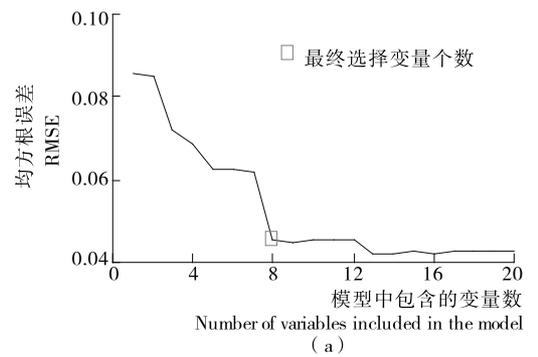


图 4 SPA 算法特征波段选择结果

Figure 4 SPA algorithm feature bands selection results

2.5 基于特征波长选择的 ELM 与 LS-SVM 判别模型

表 3 为使用 RC 和 SPA 提取的特征波长所建立的判别模型的结果。由表 3 可知,经过特征波长提取的预处理光谱,所建立的 ELM 和 LS-SVM 判别分析模型建模集识别率均达到了 100.00%,预测集识别率亦在 95.00%以上,说明 2 种提取特征波长方法与 2 种判别模型均能很好地鉴别金银花和山银花。建模结果由次到优依次为 RC-ELM、SPA-ELM、RC-LSSVM、SPA-LSSVM。同一判别模型算法,

LS-SVM 判别识别率要优于 ELM 的。而在同一特征提取方式下,经 RC 所建立的模型,其结果要低于经 SPA 所建立的。由此可知,光谱经 SNV 预处理后,使用 SPA 提取特征波长并建立 LS-SVM 判别分析模型为金银花和山银花最优判别模型。与 PCA 算法只能提取线性特征相比,ELM 和 LS-SVM 能反映和处理变量间的非线性关系,能够实现较好的分类效果。而相较于 ELM,LS-SVM 算法的执行效率更好。

表 3 基于特征波长的 ELM 和 LS-SVM 判别分析结果

Table 3 Discriminant results of ELM and LS-SVM models

特征波长 选取方法	特征波段数	判别模型	建模集		预测集	
			识别数	识别率/%	识别数	识别率/%
RC	12	ELM	120	100.00	57	95.00
		LS-SVM	120	100.00	59	97.33
SPA	8	ELM	120	100.00	58	96.67
		LS-SVM	120	100.00	60	100.00

3 结论

本试验以金银花和山银花为研究对象,采用高光谱成像技术获取金银花与山银花的光谱信息,使用 SG、SNV 和 MSC 3 种预处理方法,利用全波段光谱信息建立 PLS 判别模型,得到 SNV 预处理的效果最佳。将经 SNV 预处理后得到的光谱使用 RC 和 SPA 2 种算法进行降维处理,并分别选取了 12 个波段和 8 个波段作为特征波段。分别建立了 ELM 和 LS-SVM 判别分析模型,其判别模型结果均在 95.00%以上。综合分析判别分析模型结果,得到 SPA 优于 RC,LS-SVM 优于 ELM。因此,光谱经 SNV 预处理后,使用 SPA 提取特征波长并建立 LS-SVM 判别分析模型为金银花和山银花最优判别模型,其建模集与预测集的识别率均达到了 100.00%。说明高光谱成像技术能够实现金银花与山银花的快速、无损、有效识别,从而解决了常规性状鉴别精度不高、主观性强和理化检测鉴别费时费力、具有破坏性的问题,为金银花和山银花的快速、无损、准确鉴别提供了一种新方法。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010: 28-29, 205-206.
- [2] KONG De-xin, LI Yan-qun, BAI Mei, et al. Correlation between the dynamic accumulation of the main effective components and their associated regulatory enzyme activities at different growth stages in *Lonicera Japonica* Thunb[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 96: 16-22.
- [3] LIU Yun-hong, SUN Yue, MIAO Shuai, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of *Flos Lonicerae*[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2015, 52(8): 4 955-4 964.
- [4] SHANG Xiao-fei, PAN Hu, LI Miao-xing, et al. *Lonicera Japonica* Thunb.: ethnopharmacology, phytochemistry and phar-

macology of an important traditional Chinese medicine [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2011, 138(1): 1-21.

- [5] 饶伟文, 黄海燕. 金银花与山银花主要有效成分含量比较[J]. 国际中医中药杂志, 2016, 38(10): 926-931.
- [6] 吴飞燕, 冯宋岗, 曾建国. 金银花和山银花的鉴别与归属研究[J]. 中草药, 2014, 45(8): 1 150-1 156.
- [7] REN Mei-ting, CHEN Jun, SONG Yue, et al. Identification and quantification of 32 bioactive compounds in *Lonicera* species by high performance liquid chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2008, 48(5): 1 351-1 360.
- [8] KUSZNIEREWICZ B, PIEKARSKA A, MRUGALAKA B, et al. Phenolic composition and antioxidant properties of polish blue-berried honeysuckle genotypes by HPLC-DAD-MS, HPLC postcolumn derivatization with ABTS or FC, and TLC with DP-PH visualization [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(7): 1 755-1 763.
- [9] WANG Xi-qing, WEI Fu-yao, WEI Zuo-fu, et al. Homogenate-assisted negative-pressure cavitation extraction for determination of organic acids and flavonoids in honeysuckle (*Lonicera Japonica* Thunb.) by LC-MS/MS [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 135: 80-87.
- [10] 高珊, 郭月秋, 刘斯亮. 现时金银花与山银花比较鉴别分析[J]. 中国医药科学, 2017, 7(1): 52-154.
- [11] CHENG Wei-wei, SUN Da-wen, PU Hong-bin. Chemical spoilage extent traceability of two kinds of processed pork meats using one multispectral system developed by hyperspectral imaging combined with effective variable selection methods[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1 989-1 996.
- [12] GOWEN A A, O'DONNELL C P, CULLEN P J, et al. Hyperspectral imaging-an emerging process analytical tool for food quality and safety control[J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(12): 590-598.

(下转第 176 页)

- 2014(4): 110-113.
- [21] 方敏, 沈月新. 臭氧及其在水产品保鲜中的应用[J]. 水产科学, 2003, 22(4): 35-37.
- [22] 王朕, 谢晶. 臭氧水处理对鲜切茄子保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 324-328.
- [23] 罗丹, 梁芸志, 陈存坤, 等. 臭氧处理对番茄果实贮藏品质和芳香物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(7): 2 749-2 755.
- [24] 白友强, 廖亮, 许建, 等. 不同臭氧处理对甜瓜采后生理影响[J]. 食品工业科技, 2017(23): 257-260.
- [25] 闫师杰, 梁丽雅, 宋振梅, 等. 臭氧水对鲢鱼肉保鲜效果的研究[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 465-468.
- [26] CROWE K M, SKONBERG D, BUSHWAY A, et al. Application of ozone sprays as a strategy to improve the microbial safety and quality of salmon fillets[J]. Food Control, 2012, 25(2): 464-468.
- [27] ZHAO Yong-qiang, YANG Xian-qing, LI Lai-hao, et al. Chemical, microbiological, color and textural changes in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets sterilized by ozonated water pretreatment during frozen storage[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2016, 41(1): 45-48.
- [28] 陈丽娇, 刘杨, 程艳, 等. 气调包装结合臭氧预处理保鲜鲟鱼片[J]. 渔业研究, 2012, 34(1): 26-30.
- [29] 袁勇军, 方圆, 陈伟, 等. 臭氧处理和低温保藏对黄鱼保鲜效果[J]. 核农学报, 2010, 24(5): 987-990.
- [30] 刁石强, 李来好, 岑剑伟, 等. 冰温臭氧水对鲷保鲜效果的研究[J]. 南方水产科学, 2011, 7(3): 8-13.
- [31] 梁传辉, 薛淑霞, 王德兴. 臭氧在渔业中的应用研究进展[J]. 天津水产, 2008(2): 8-9.
- [32] 赵永强, 李来好, 杨贤庆, 等. 臭氧在水产品加工中应用综述[J]. 南方水产科学, 2013, 9(5): 149-154.
- [33] 黎柳, 谢晶. 水产品冰鲜技术的研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 259-262.
- [34] CAMPOS C A, ÓSCAR RODRÍGUEZ, LOSADA V, et al. Effects of storage in ozonised slurry ice on the sensory and microbial quality of sardine (*Sardina pilchardus*) [J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 103(2): 121-30.
- [35] 陈伟, 任彦娇, 曹少谦, 等. 臭氧流冰对南美白对虾保鲜效果的研究[J]. 浙江万里学院学报, 2012, 25(3): 84-88.
- [36] 黄玉婷. 臭氧-流化冰对梅鱼保鲜效果的研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014: 24-37.
- [37] KEYS D R, LOWDER A C, DEWITT C A M. Conditions for the effective chilling of fish using nano-sized ice slurry[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017(2): e13 564.
- [38] ASAKA T, TAJIMA A, KUMANO H. Experimental investigation on inhomogeneity of ice packing factor in ice slurry flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 70: 33-41.
- [39] KARIM NU, NASIR N, ARIFIN B, et al. Effect of salt and ozonized-slurry ice on the quality indices of tiger grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*) [J]. Journal of Sustainability Science and Management, 2015, 10(2): 97-102.
- [40] AGUSTINELLI S P, YEANNES M I. Effect of frozen storage on biochemical changes and fatty acid composition of mackerel (*Scomber japonicus*) muscle [J]. Journal of Food Research, 2014, 4(1): 135.
- [41] CALANCHE J, SAMAYOA S, ALONSO V, et al. Assessing the effectiveness of a cold chain for fresh fish salmon (*Salmo salar*) and sardine (*Sardina pilchardus*) in a food processing plant [J]. Food Control, 2013, 33(1): 126-135.

(上接第90页)

- [13] 曲佳欢, 马骥, 孙大文, 等. 高光谱成像在食品质量评估方面的研究进展与应用: 一[J]. 肉类研究, 2012, 26(4): 40-45.
- [14] WU Di, SUN Da-wen. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review-part II: applications [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 19: 15-28.
- [15] WU Di, SUN Da-wen. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review-part I: fundamentals [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 19: 1-14.
- [16] 张初, 刘飞, 孔汶汶, 等. 利用近红外高光谱图像技术快速鉴别西瓜种子品种[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 270-277.
- [17] 董高, 郭建, 王成, 等. 基于近红外高光谱成像及信息融合的小麦品种分类研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(12): 3 369-3 374.
- [18] XIE Chuan-qi, LI Xiao-li, SHAO Yong-ni, et al. Color measurement of tea leaves at different drying periods using hyperspectral imaging technique [J]. Plos One, 2014, 9(12): 1-15.
- [19] 蔡建荣, 韩智义. 碧螺春茶叶的真伪鉴别-基于漫反射式高光谱成像技术[J]. 农机化研究, 2014, 35(22): 159-163.
- [20] XIONG Zhen-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, 2016, 179: 175-181.
- [21] DONG Jin-lei, GUO Wen-chuan. Nondestructive determination of apple internal qualities using near-infrared hyperspectral reflectance imaging [J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(10): 2 635-2 646.
- [22] GUO Wen-chuan, ZHAO Fan, DONG Jin-lei. Nondestructive measurement of soluble solids content of kiwifruits using near-infrared hyperspectral imaging [J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(1): 38-47.
- [23] 蔡健荣, 王建黑, 陈全胜, 等. 波段比算法结合高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 农业工程学报, 2009, 29(1): 127-131.
- [24] 张浩, 胡昊, 陈义, 等. 水稻叶片氮素及籽粒蛋白质含量的高光谱估测模型[J]. 核农学报, 2012, 26(1): 135-140.
- [25] 许思, 赵光武, 邓飞, 等. 基于高光谱的水稻种子活力无损分级检测[J]. 种子, 2016, 35(4): 34-40.
- [26] 许思. 种子高光谱图像分割与特征光谱提取研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015: 8-20.
- [27] 邓建猛, 王红军, 黎邹邹, 等. 基于高光谱技术的马铃薯外部品质检测[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 122-125.