

基于 IR 和 PLS 的银耳中亚硫酸盐快速定量检测

Rapid and quantitative determination of sulfite residue in *tremella* based on IR spectroscopy and PLS

袁凯 王锡昌 张龙 谷东陈 郭小溪 樊震宇

YUAN Kai WANG Xi-chang ZHANG Long GU Dong-chen GUO Xiao-xi FAN Zhen-yu

(上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:采用红外光谱技术,通过探究亚硫酸盐残留量对银耳中特定化学官能团含量变化的影响,揭示银耳漂白机理,并基于二者的联系建立一种快速定量检测银耳中亚硫酸盐残留量的方法。模拟硫磺熏蒸工艺,制备不同亚硫酸盐含量水平的银耳样品,并通过碘滴法检测所制备样品中亚硫酸盐含量的真实值,收集不同样品的红外光谱图,分析谱图差异,从而建立基于偏最小二乘法(PLS)的定量检测模型。结果表明:硫磺熏蒸通过破坏维生素 B₂ 的羟基自由基从而实现漂白目的。且红外定量检测银耳中亚硫酸盐含量模型的 R 为 0.980 4, RMSECV 为 0.97。该方法具有快速、定量和无损检测食品中亚硫酸盐的潜力。

关键词:亚硫酸盐;银耳;快速检测;红外光谱;偏最小二乘法;化学建模

Abstract: The change regulation of the content chemical functional group in *tremella* samples with different setting levels of sulfite content was explored by using the infrared spectroscopy, and the mechanism of bleaching was further revealed. A rapid quantitative method testing the sulfite residue in *tremella* would be established. Moreover, the true content of sulfite content was detected by iodine drop method. The infrared spectra of the samples with different levels of residual sulfur were collected and analyzed, and the quantitative detection model based on partial least squares (PLS) was built. The result indicated that the sulphur fumigation bleaching *tremella* through destroying the hydroxyl radicals of vitamin B₂. Moreover, IR quantitative prediction model for sulfite residue in *tremella* based on PLS has been established with R of 0.980 4 and RMSECV of 0.97. This approach showed well potential to provide a rapid, nondestructive and quantitative method for detecting the sul-

fites residue in food.

Keywords: sulfite residue; *tremella*; a rapid quantitative method; IR spectroscopy; chemometric methods

银耳又称作白木耳、银耳子、雪耳等,是中国特有的真菌类食药原材料^[1]。在银耳传统干制加工中,常常运用硫磺熏蒸这一工艺。硫磺熏蒸具有漂白和消毒作用,能减缓果蔬内部发生的一系列化学变色反应,同时能够抑制微生物的滋生^[2-4]。但硫磺熏蒸工艺无法控制亚硫酸盐(以 SO₂ 计)的残留量,易导致亚硫酸残留量超标,危害人体健康,因此硫磺熏蒸这一传统工艺在中国被严格禁止^[5]。但银耳市场中依旧存在以颜色判定质量的错误消费理念,刺激了某些不良商家仍采用这一高危害的加工技术制作超白银耳。

针对亚硫酸盐和二氧化硫在食品及药材中残留的问题,各国相继制定出系列规定和标准,同时研究并建立其检测方法,国际上常采用 MW 法(Monier-Williams),中国多采用氮滴定蒸馏法和离子色谱法,日本多采用盐酸副玫瑰胺比色法^[6]。但这些方法存在耗时长、检测成本高等缺陷。一些快检方法相继出现,包括电化学法^[7]、色度比色法^[8]、近红外荧光探针法^[9],虽在检测耗时上有极大的改善,但灵敏度低,对样品破坏程度大,实际使用效果不佳。近年来,为探究更加便捷、有效的检测方法,将近红外光谱技术运用于面粉非法添加的检测^[10]及鱼糜品质评价^[11]等领域且取得了良好的效果,其快速、无损的检测优势也受到广泛的认可。因此,本试验拟采用该技术建立食品中亚硫酸盐残留量的检测方法,旨在为市售银耳的食用安全检测和预防工作提供一定的参考和指导。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

银耳:盛耳牌,购于上海临港古棕路农工商超市;
药用硫磺:食品级,国药集团化学试剂有限公司;

基金项目:上海海洋大学与大山集团有限公司的横向研究项目(编号:D-8006-14-0075)

作者简介:袁凯,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:王锡昌(1964—),男,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: xewang@shou.edu.cn

收稿日期:2017-03-10

盐酸、碘滴定液:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
KBr:光谱级,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

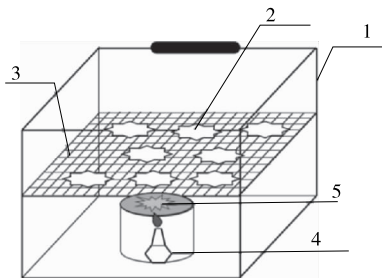
电子天平:ME104E型,瑞士梅特勒-托利多公司;

高速粉碎机:CT410型,丹麦福斯公司;

红外光谱仪及单点 ATR 附件:Nicolet iS5 型,美国赛默飞世尔公司。

1.2 方法

1.2.1 样品制备 将 100 g 银耳置入熏染室,取 3 g 硫磺放入石棉瓦上,点燃搪瓷中的酒精用以引燃硫,当硫磺形成明显的蓝色火焰后,放入空白银耳样品进行硫熏处理(图 1)。硫熏后取出并放入真空干燥箱内,45 °C 条件下干燥 24 h。干燥后的银耳用高速粉碎机粉碎并过 120 目筛,将原始硫熏银耳标记为 A-1。将原始硫熏银耳和银耳空白样本按一定比例配制成不同亚硫酸盐含量的银耳样本,将原始硫熏银耳与银耳空白按质量比 5:1 混合,记作 5/1(A-2),其他各组依次标记为 2/1(A-3)、1/1(A-4)、1/2(A-5)和 1/5(A-6)。



1. 熏蒸室 2. 银耳样品 3. 镂空隔板 4. 酒精灯 5. 硫磺

图 1 实验室硫磺熏蒸模拟装置结构图

Figure 1 Structure diagram of sulfur fumigation simulation device in laboratory

1.2.2 精确检测银耳中亚硫酸盐含量的方法 参考 GB/T 5009.34—2003《食品中亚硫酸盐的检测》中的碘滴定法。准确称取 5 g 银耳样品置于装有 250 mL 超纯水和沸石的圆底蒸馏烧瓶中,再加入 10 mL 盐酸(6 mol/L),加热至微沸并保持 3 min 后,通过碘标液(0.01 mol/L)滴定游离的二氧化硫至产生蓝色且 20 s 内不褪色。通过碘溶液的消耗量折算出二氧化硫的含量,其中 1 mL 碘标液相当于 0.640 6 mg 二氧化硫。

1.2.3 红外光谱的采集 取样品 1 mg 与 溴化钾 100 mg 混合并进行压片制样,红外单点 ATR 的参数设置为扫描范围 550~4 000 cm^{-1} ;分辨率 4 cm^{-1} ;16 次平行。经傅里叶红外光谱仪获取原始谱图,再经基线校准和谱图校准得到傅里叶红外光谱。为降低信噪比、提高谱图表现分辨率,傅里叶红外光谱经 7 点 Savitsky-Golay 平滑和二阶导数,获得二阶导数红外谱图。将银耳样品放入样品池,以外界温度的改变为微扰,温度范围 30~70 °C,升温速率 2 °C/min,不同温度的动态原始谱图每 5 °C 采集 1 次,并使用 SpectraCorr 软件处理后,获取二维红外光谱图。

1.2.4 定量模型的构建 银耳样本以校正集:验证集为 3:1 的比例被随机选取。通过比较 3 种化学计量学(CLS、

SMLR 和 PLS)的建模效果,选取最佳化学计量法。并采取 150 组银耳样本在 TQ Analyst 软件中优化亚硫酸盐的定量检测模型。随后,采取 t 检验验证 3 组未知亚硫酸盐含量银耳的模型预测值和其真实值的显著性差异。其中未知亚硫酸盐含量的真实值由碘滴定测得。

2 结果与讨论

2.1 样品的亚硫酸盐含量

采用通氮滴定蒸馏法检测所制备的不同水平亚硫酸盐含量的银耳样本(A-1~A-6)的亚硫酸盐残留量分别为 24.26,20.21,16.22,12.18,8.15,3.96 mg/g,不同样品在表观上存在显著差异,随着亚硫酸残留量的增加,银耳样品越发显白,同时黄色逐渐变浅(图 2)。

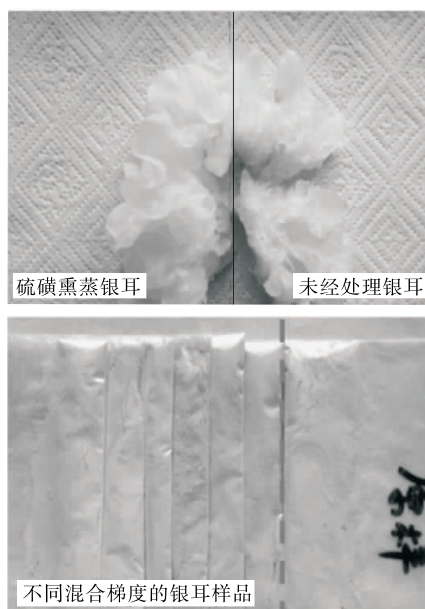


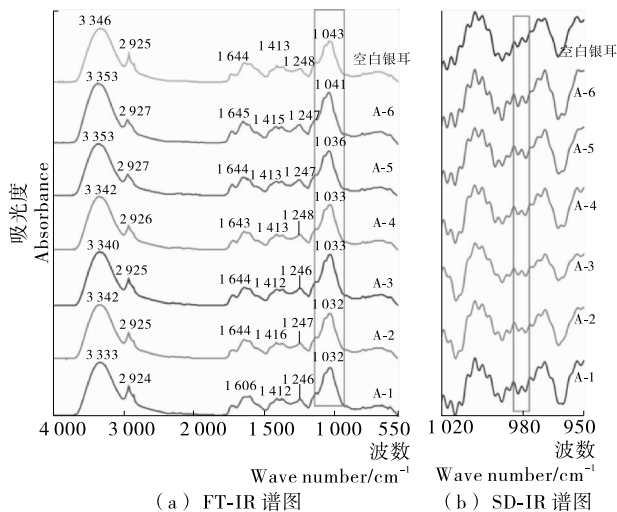
图 2 不同混合梯度下制备的亚硫酸盐不同含量的银耳样品

Figure 2 *Tremella* samples processed with various contents of sulfite

2.2 三级红外光谱分析

2.2.1 FT-IR 分析 由图 3 可知,3 346 cm^{-1} 处的吸收峰($\nu_{as}, N-H$)主要由糖类和蛋白质引起,2 925,2 854 cm^{-1} 的吸收峰(ν, CH_2)和 1 737 cm^{-1} 的吸收峰($\nu, C=O$)归属于脂质,且 1 043 cm^{-1} 处的吸收峰($\delta, C-O$)来源于纤维素。随着银耳中亚硫酸盐含量增加,属于纤维素的碳氧单键伸缩振动峰强逐渐减少,因此 1 043 cm^{-1} 吸收峰的峰强可用来鉴定银耳是否被硫磺熏染。

2.2.2 SD-IR 分析 红外二阶导数谱能有效区分傅里叶红外光谱的重叠峰,从而增强谱图的表现分辨率和扩大红外谱图的细微差异^[12]。为此,采用红外二阶导数谱进一步分析不同水平残留银耳的谱图差异。随着银耳中亚硫酸盐含量的增加,983 cm^{-1} 处吸收峰的峰强显著增强,见图 3。尤其是,根据亚硫酸盐的标准红外谱图(图 4)可知,983 cm^{-1} 处吸收峰归属于亚硫酸基团的反对称伸缩振动。二阶导数红外光谱验证了硫磺通过燃烧反应变成亚硫酸盐并附着于银耳



(a) FT-IR 谱图 (b) SD-IR 谱图

图 3 空白银耳和不同亚硫酸盐含量银耳的傅里叶红外谱图和二阶导数谱图

Figure 3 FT-IR spectra and SD-IR spectra of *tremella* blank and *tremella* with various contents of sulfite

上。然而,二阶红外导数光谱无法清晰揭示硫磺熏染漂白银耳的机制。

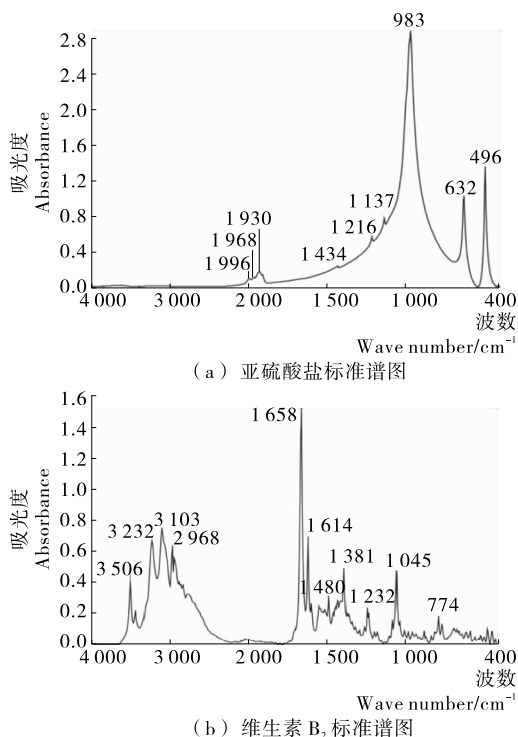
2.2.3 2DCOS-IR 分析 为了进一步分析二氧化硫在银耳中所发生的化学反应,采用二维相关红外光谱(2DCOS-IR)对硫磺熏染前后的银耳进行分析。二维相关红外光谱能扩大谱图分辨率且提供更多由于外界微扰而引起的分子变化信息,从而定性和定量区分物质^[13]。以银耳中不同亚硫酸盐含量为外界微扰构建二维相关谱图,对角线上自动峰显示对特征吸收峰的相关性和灵敏度。

在 960~1 000 cm⁻¹波段的银耳二维红外光谱中存在一个较强的自动峰,该峰为 963 cm⁻¹处多糖的碳氧双键变形振动(δ , C=O)产生。然而,亚硫酸盐的二维红外光谱在 983 cm⁻¹处有较强的自动峰,该峰归属于硫氧单键的非对称伸缩振动 ν_{as} (S-O),见图 5。随着银耳中亚硫酸盐含量的增加,963 cm⁻¹处的自动峰强度逐渐降低,但 983 cm⁻¹处的自动峰强度增强。此外,随着银耳中亚硫酸盐含量的增强,自动峰 963,983 cm⁻¹的交叉峰呈现正相关,显示 2 个自动峰的变化趋势相同。但 983 cm⁻¹处的自动峰的增强并未影响 963 cm⁻¹处的自动峰的减弱。因此硫磺熏染银耳并未破坏银耳内部的多糖成分。

维生素 B₂ 在 4 000~3 000 cm⁻¹区域的二维红外光谱中存在一个最强的自动峰为 3 506 cm⁻¹,其归属于羟基自由基的振动。而且,该自动峰也是硫磺熏染银耳的二维相关红外谱中较强吸收峰(图 6 和表 1)。表明银耳中含有维生素 B₂。随着银耳中亚硫酸盐含量的增加,3 506 cm⁻¹处的自动峰峰强逐渐减弱,而且维生素 B₂ 呈现黄色。表明维生素 B₂ 中羟基自由基在硫磺过程中被破坏。维生素 B₂ 的氧化和其他色素的破坏共同导致了银耳的漂白,其中维生素 B₂ 中羟基自由基的破坏在硫磺漂白过程中起到重要作用。

2.3 定量建模

由于红外谱图数据的复杂性,谱图的有效信息需要经过化学计量学提取出来。因此,红外定量模型常需要依靠化学计量学包括经典最小二乘的模式识别方法(CLS),逐步多元回归(SMLR)和偏最小二乘法(PLS)来构建。本研究分别采用 3 种化学计量学方法来构建银耳中亚硫酸盐含量的定量模型,并通过比较 3 种定量模型的拟合程度来优化出最优化学计量学方法。其中,模型的 R 和 RESECV 值用来评估拟合情况和准确度。基于上述 6 组硫磺熏染银耳和空白银耳样品



(a) 亚硫酸盐标准谱图

(b) 维生素 B₂ 标准谱图

图 4 亚硫酸盐和维生素 B₂ 的标准红外光谱图

Figure 4 FTIR spectra of sodium sulfite and vitamin B₂

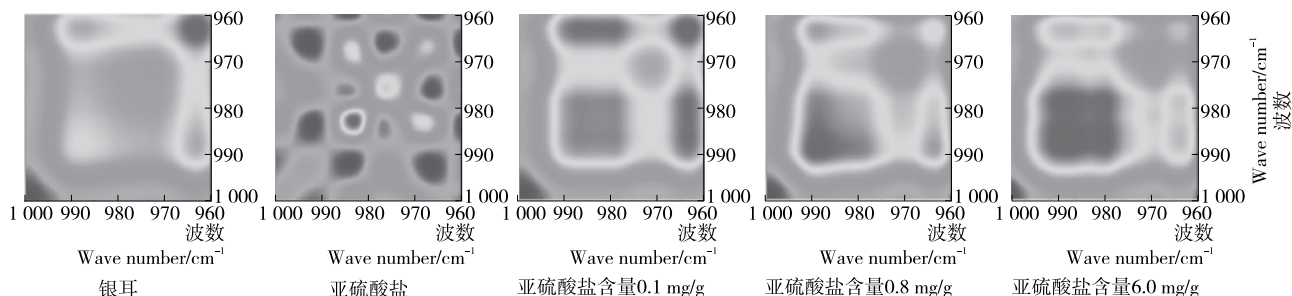


图 5 1 000~960 cm⁻¹波段范围内银耳标样、亚硫酸盐以及不同亚硫酸盐含量银耳样品的二维同步相关光谱图

Figure 5 2DCOS-IR synchronous correlation spectra of *tremella* blank, sulfite and *tremella* with various contents of sulfite in the range of 1 000~960 cm⁻¹

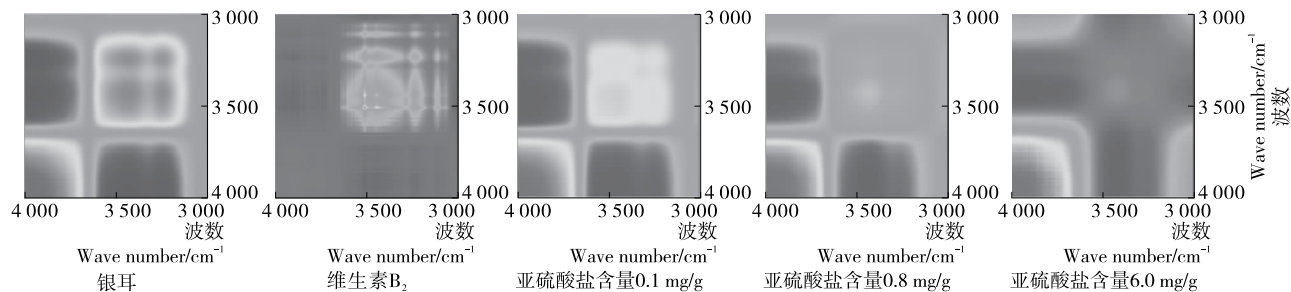


图6 4 000~3 000 cm⁻¹波段范围内银耳标样、维生素 B₂ 以及熏染不同质量硫黄的银耳样品的二维同步相关光谱图

Figure 6 2DCOS-IR synchronous correlation spectra of *tremella* blank, vitamin B₂ and *tremella* with various contents of sulfite in the range of 4 000~3 000 cm⁻¹

建立3种化学计量学模型的拟合效果见表2。结果表明,基于PLS建模的拟合效果最优。

采取150个不同硫熏银耳来优化基于PLS的定量模型,其拟合效果R为0.980 4, RMSECV为0.97(图7)。通过采取3组硫熏银耳(13.75, 21.50, 33.84 mg/kg)来交叉验证模型的准确性和应用性。通过碘滴法来获取其真实值,验证组银耳的亚硫酸盐含量,再和红外定量模型给出的预测值进行t检验(表3)。结果表明,模型结果不存在显著性差异,能用于快速定量检测银耳中亚硫酸盐的含量。

表1 维生素 B₂ 的红外光谱主要特征吸收峰

Table 1 The preliminary assignment of main characteristic absorption peaks of FT-IR spectra of vitamin B₂

峰位置 /cm ⁻¹	基团以及振动模式
3 506	$\nu(-OH)$
3 232, 1 480	$\nu(-OH)$
1 658	$\nu(C=O), \nu(C=C), \nu(N-H), \nu(C-N)$
1 737	$\nu_s(C=O)$
774	$\nu(N-H)$

表3 银耳中亚硫酸盐含量的定量模型的精度检验

Table 3 The accuracy test of sulfite content in *tremella* quantitative model

样品	亚硫酸盐含量/ (mg·g ⁻¹)	预测值/(mg·g ⁻¹)						中值/ (mg·g ⁻¹)	RSD/ %	s	t
		14.28	13.81	15.70	13.88	12.43	15.31				
A	13.75	14.28	13.81	15.70	13.88	12.43	15.31	14.24	0.082	1.714	0.49
B	21.50	22.28	23.80	20.73	20.88	22.43	20.31	21.74	0.061	1.757	0.26
C	33.84	32.20	32.80	34.70	32.82	33.43	32.37	33.05	0.028	1.693	0.81

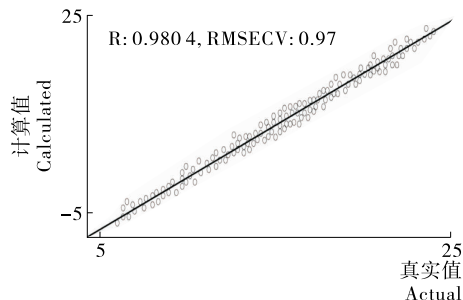


图7 基于FT-IR光谱定量测定亚硫酸盐含量的PLS定量模型

Figure 7 PLS quantitative model to detect sulfite content based on FT-IR spectra

表2 不同定量模型的R和RESECV值

Table 2 R values and the RMSECVs of three different models

不同模型	R值	RMSECV值
CLS	0.926 6	1.53
SMLR	0.943 9	2.11
PLS	0.968 8	1.03

3 结论

本研究基于红外光谱揭示了硫熏银耳漂白的机理,并构建了快速定量检测银耳中亚硫酸盐残留量的模型。结果表明,随着硫熏银耳的亚硫酸盐含量增加,傅里叶红外光谱中1 043 cm⁻¹处峰强逐渐减少,表明可通过该吸收峰强度判断银耳是否被硫熏。二阶导数红外光谱验证了硫磺通过燃烧反应后最终形成亚硫酸盐并附着于银耳上。二维相关红外光谱进一步揭示,硫熏破坏了银耳中维生素 B₂ 中羟基自由基,从而实现硫熏漂白银耳的目的。采用3种化学计量法(CLS、SMLR和PLS)比较建模发现,基于PLS的红外定量模型具有良好的拟合效果(R为0.980 4;RMSECV为0.97)。

t检验表明,定量模型具有良好的准确性和适用性。该方法能用于快速、定量检测食品中亚硫酸盐的残留量,为近年来多发的食品安全问题的检测和预防工作提供一定的参考和指导。

参考文献

[1] 彭卫红,王勇,黄忠乾,等.我国银耳研究现状与存在问题[J].食用菌学报,2005,12(1):51-56.
 [2] JIANG Xue, HUANG Lin-fang, ZHENG Si-hao, et al. Sulfur fumigation, a better or worse choice in preservation of Traditional Chinese Medicine[J]. Phytomedicine, 2013, 20(2): 97-105.

(下转第134页)

参考文献

- [1] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2015: 12-14.
- [2] 李钟美, 黄和. 高良姜提取物抑菌活性及稳定性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 55-59.
- [3] 杨瑛洁, 李淑燕, 胡国伟, 等. 硫代葡萄糖苷的降解途径及其产物的研究进展[J]. 西北植物学报, 2011(7): 1 490-1 496.
- [4] YARDFON T, SHYAM S S, NAPHAPORN C, et al. Microwave-assisted extraction of Sulforaphane from white cabbages: Effects of extraction condition, solvent and sample pretreatment [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1): 151-157.
- [5] WINDE I, WITTSTOCK U. Insect herbivore counteradaptations to the plant glucosinolate-myrosinase system [J]. Phytochemistry, 2011, 72: 1 566-1 575.
- [6] NIELS Agerbirk, CARL Erik Olsen. Glucosinolate structures in evolution[J]. Phytochemistry, 2012, 10(77): 16-45.
- [7] 赵永国, 江满霞, 张文, 等. 双低油菜硫苷含量与鸟害关系研究 [J]. 中国油料作物学报, 2016(1): 111-115.
- [8] 毕明芳. 山葵风味成分的提取及活性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [9] TRONCOSO R, ESPINOZA C, SA'NCHEZ-ESTRADA A, et al. Analysis of the isothiocyanates present in cabbage leaves extract and their potential application to control Alternariot in bell peppers[J]. Food Research International, 2005, 38(6): 701-708.
- [10] 刘晓君, 张余权, 潘浴清, 等. 油菜籽中硫甙化合物的分离鉴定和定量测定[J]. 中国油脂, 2014, 39(2): 89-93.
- [11] 张丽萍, 魏明峰, 张贵云, 等. 高硫苷油菜对棉花黄萎病菌和红腐病菌的抑制活性[J]. 中国棉花, 2017(2): 10-14, 26.
- [12] 李锋, 张春雷, 李光明. 油菜硫苷组分含量及抑菌活性研究[J]. 武汉植物学研究, 2006, 24(4): 351-356.
- [13] 中华人民共和国农业部. NY/T 1596—2008 油菜饼粕中异硫氰酸酯的测定 硫脲比法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 丁艳, 李丽倩, 顾振新, 等. 7 种十字花科种子中黑芥子酶降解油菜籽饼粕中硫苷的产物比较分析[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 1-7.
- [15] 杨柳, 陈宇飞. 番茄茎叶提取物抑菌试验[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 126-128.
- [16] DHARINI S, LISE K. Fruit quality and physiological responses of litchicultivar McLean, s Red to 1-methylcyclopropene pretreatment and controlled atmosphere storage conditions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(6): 942-948.
- [17] 曹健康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [18] ZHOU Ran, ZHANG Gui-xiang, HU Yun-sheng, et al. Reductions in flesh discolouration and internal morphological changes in Nanhui peaches (*Prunus persica* (L.) Batsch, cv. Nanhui) by electrolysed water and 1-methylcyclopropene treatment during refrigerated storage [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 985-992.
- [19] 魏佳, 马晓芬, 阿塔吾拉·铁木尔, 等. 核桃青皮提取液与壳聚糖复合物对甜瓜采后品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 242-248.
- [20] 曾媛媛, 王锡昌, 周然. 运输振动对哈密瓜贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 141-144, 148.
- [21] 张姣姣, 杨军, 李学文, 等. 不同成熟期甜瓜果实采后生理及品质变化的比较研究[J]. 新疆农业大学学报, 2015(6): 470-476.
- [22] 陈玉环, 彭旋, 陈楚英. 桂枝提取液对新余蜜橘冷藏保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 111-114.
- [23] 王刚霞. 核桃青皮提取物果蔬保鲜剂的研究与应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014: 41-42.
- (上接第 67 页)
- [3] LU Tu-lin, NING Zi-wan, SHAN Xin, et al. Research situation of effects of sulfur fumigation on quality of traditional Chinese medicine [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 15: 2 796-2 800.
- [4] DUAN Su-min, XU Jun, BAI Ying-jia, et al. Sulfur dioxide residue in sulfur-fumigated edible herbs: The fewer, the safer [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 119-124.
- [5] 李林, 季琳, 程雪, 等. 多指标综合优选黄芪药材硫磺熏蒸替代技术研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(14): 2 581-2 586.
- [6] 岑剑伟, 李来好, 杨贤庆, 等. 充氮蒸馏一盐酸副玫瑰苯胺比色法测定水产品中亚硫酸盐 [J]. 食品科学, 2010, 31(24): 395-401.
- [7] 许磊. 亚硫酸盐电化学传感器的制备及其在食品检测中的应用 [D]. 浙江: 浙江工商大学, 2015: 17-30.
- [8] 王震. 食品中亚硫酸盐的使用及检测[J]. 现代食品, 2016(24): 75-78.
- [9] 崔海军. 近红外比率 SO_3^{2-} 探针和双光子 Pd 探针的合成、光谱及其生物应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 9-13.
- [10] GUO Xiao-xi, HU Wei, LIU Yuan, et al. Rapid analysis and quantification of fluorescent brighteners in wheat flour by Tri-step infrared spectroscopy and computer vision technology [J]. J Mol Struct, 2015, 1 099: 393-398.
- [11] HU Wei, GUO Xiao-xi, WANG Xi-chang, et al. Rapid Discrimination of Different Grades of White Croaker Surimi by Tri-Step Infrared Spectroscopy Combined with Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) [J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(4): 831-839.
- [12] XU Li-rong, ZHU Xu-fei, CHEN Xiu-mei, et al. Direct FTIR analysis of isolated trans fatty acids in edible oils using disposable polyethylene film [J]. Food Chemistry, 2015, 185: 503-508.
- [13] GUO Xiao-xi, HU Wei, LIU Yuan, et al. Rapid determination and chemical change tracking of benzoyl peroxide in wheat flour by multi-step IR macro-fingerprinting [J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2015, 154: 123-129.
- [14] LIU Yuan, HU Wei, GUO Xiao-xi, et al. Rapid discrimination of three marine fish surimi by Tri-step infrared spectroscopy combined with Principle Component Regression [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015, 149: 516-522.