

唐小闲,董明琴,罗杨合,等. 莲藕片汽蒸加工工艺及其挥发性风味物质变化研究 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 61–69. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020100147

TANG Xiaoxian, DONG Mingqin, LUO Yanghe, et al. Steam Processing Technology of Lotus Root Slices and the Changes of Its Volatile Flavoring Substances[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 61–69. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020100147

· 研究与探讨 ·

# 莲藕片汽蒸加工工艺及其挥发性 风味物质变化研究

唐小闲<sup>1,2,3</sup>, 董明琴<sup>1</sup>, 罗杨合<sup>3,\*</sup>, 李官丽<sup>1</sup>, 伍淑婕<sup>1,2,3</sup>, 黎小椿<sup>1,2</sup>, 刘 艳<sup>1,2,3</sup>, 聂 辉<sup>1,2</sup>

(1. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西贺州 542899;

2. 贺州学院食品科学与工程研究院, 广西贺州 542899;

3. 贺州学院广西果蔬保鲜和深加工研究人才小高地, 广西贺州 542899)

**摘 要:** 以莲藕为对象, 采用汽蒸加工方式处理制成食用莲藕片。在单因素实验基础上, 通过正交试验优化, 探讨莲藕片汽蒸最佳加工工艺。并采用固相微萃取-气质联用技术, 分析汽蒸加工处理过程前后挥发性风味物质变化。结果表明: 在电磁炉功率为 1400 W、莲藕切片厚度为 4 mm 的条件下汽蒸 16 min, 汽蒸莲藕片的感官评分为 89.08, 色差为 9.85, 硬度为 555.57 g, 此时莲藕片呈淡黄色, 藕片肉质脆嫩, 咀嚼性较好, 具有藕香味。SPME-GC-MS 鉴定出新鲜、汽蒸莲藕片中的挥发性风味物质分别为 45、42 种, 二者共有 28 种化合物。莲藕中主要风味物质有壬醛、癸醛等醛类物质, 此外还有柠檬烯、棕榈酸乙酯、辛醇、1-壬醇、香叶基丙酮等, 这些风味物质使莲藕片呈现不同的风味特征。经过汽蒸过程后, 醛类、杂环类及含氮化合物相对含量增加, 酯类、醇类、酚类和酸类含量减少, 酮类、醚类、烃类含量无明显变化。该研究结果可以为莲藕挥发性风味分析及莲藕加工工业提供一定的理论依据。

**关键词:** 莲藕片, 汽蒸加工, 挥发性风味物质, 固相微萃取-气质联用

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)12-0061-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020100147

## Steam Processing Technology of Lotus Root Slices and the Changes of Its Volatile Flavoring Substances

TANG Xiaoxian<sup>1,2,3</sup>, DONG Mingqin<sup>1</sup>, LUO Yanghe<sup>3,\*</sup>, LI Guanli<sup>1</sup>, WU Shujie<sup>1,2,3</sup>, LI Xiaochun<sup>1,2</sup>,  
LIU Yan<sup>1,2,3</sup>, NIE Hui<sup>1,2</sup>

(1. College of Food and Biological Engineer, Hezhou University, Hezhou 542899, China;

2. Institute of food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou 542899, China;

3. Guangxi Talent Highland of Preservation and Deep Processing Research in Fruit and Vegetables,  
Hezhou University, Hezhou 542899, China)

**Abstract:** Based on single factor experiment and orthogonal experiment, the optimum processing technology of steaming lotus root slices were discussed. The changes of volatile flavor substances before and after steam treatment was analyzed by solid phase micro extraction-GC. The results showed that sensory scores of steam lotus root slices was 89.08, color difference was 9.85 and hardness was 555.57 g under the condition of 1400 W power, 4 mm thickness of lotus root slice and steam time 16 min. 45 and 42 volatile flavor compounds were identified by SPME-GC-MS in fresh and steamed lotus root slices. There were 28 compounds in common. The main flavor substances in lotus root were nonanal, decanal and other aldehyde substances, in addition, there were limonene, ethyl palmitate, octanol, 1-nonanol, vanillin acetone and so on, these

收稿日期: 2020-10-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0901003)。

作者简介: 唐小闲 (1984-), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向: 食品加工新技术, E-mail: tangxiaoxian2016@163.com。

\* 通信作者: 罗杨合 (1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品活性成分开发利用, E-mail: 250581250@qq.com。

flavor substances made lotus root slices showed different flavor characteristics. After steaming, the relative contents of aldehydes, heterocycles and nitrogen-containing compounds increased, the contents of esters, alcohols, phenols and acids decreased, and the contents of ketones, ethers and hydrocarbons did not change significantly. The results would provide a theoretical basis for the analysis of lotus root volatile flavor substances and lotus root processing industry.

**Key words:** lotus root slices; steam processing; volatile flavor substances; SPME-GC-MS

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn)为睡莲科属多年生水生草本植物,其品种丰富,在我国已有 3000 多年的种植历史<sup>[1-2]</sup>。莲藕主要成分为淀粉、蛋白质、碳水化合物、脂肪、维生素等营养成分,此外还含有生物碱、酚类、黄酮、多糖等活性物质,是一种很好的食品资源<sup>[3]</sup>。莲藕作为一种美味、营养的水生蔬菜,其加工方法多样,口感和风味各异,深受人们的喜爱。随着我国经济、社会的快速发展和人们生活水平的提高,人们更多关注于食品安全、营养及口感风味,对莲藕制品需求也在不断增加。近几年,我国水煮藕片、盐水藕片及脱水藕片等莲藕制品出口量快速增长<sup>[4]</sup>。

目前国内外对莲藕的研究主要集中在莲藕种植选育<sup>[5]</sup>、护色保鲜<sup>[6-7]</sup>、脆片干燥<sup>[8-9]</sup>、抗氧化活性研究<sup>[10]</sup>、膳食纤维与多酚制备<sup>[11]</sup>和不同品种莲藕的风味特性<sup>[12]</sup>,除此,陈亭<sup>[13]</sup>研究了油炒、水煮、汽蒸和微波 4 种烹饪方法对莲藕营养成分等的影响。莲藕无论是鲜食,还是加工成制品,都有其独特的感官属性及风味品质,有研究表明汽蒸处理能更有效地减少蔬菜中营养成分的流失<sup>[14]</sup>。目前关于莲藕挥发性研究报道较少,罗庆<sup>[15]</sup>运用了气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术对不同莲藕的挥发性风味物质进行检测分析,并研究煮制和蒸制两种加工方式对三种品种莲藕其挥发性风味化合物变化研究;韩丽娟等<sup>[16]</sup>采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱的联用(SPME-GC-MS)技术对不同品种莲藕水煮风味物质比较,本实验主要探索莲藕片汽蒸加工工艺,并采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析莲藕片挥发性风味物变化。风味物质构成与果蔬加工质量有明显关联,这促使其成为人们研究的重点和热点<sup>[17-18]</sup>。

固相微萃取技术(Solid phase micro-extraction, SPME)是一种集采样、萃取、浓缩、进样于一体的风味分析方法<sup>[19-20]</sup>,具有操作简便、快速安全、样品容量小,无溶剂萃取、重现性好等优点,并且容易实现自动化,可直接与气相色谱-质谱(GC-MS)联用实现挥发性成分定性定量分析,大大加快了分析检测的速度。目前广泛应用于食品、医药领域的分析检测<sup>[21]</sup>。刘登勇等<sup>[22]</sup>利用 SPME-GC-MS 分析熏鸡腿挥发性风味物质。Yang 等<sup>[23]</sup>通过 HS-SPME-GC-MS 和电子鼻研究热风干燥对金针菇挥发性化合物的影响。本研究以莲藕为研究对象,采用汽蒸加工技术,拟以蒸煮时间、电磁炉功率、切片厚度为主要因素进行正交试验,考查其对莲藕片的色差  $\Delta E$ 、硬度及感官评分指标的影响,在单因素实验基础上,通过正交试验

优化法对莲藕片汽蒸加工工艺条件进行优化,确定最佳工艺参数。在汽蒸加工最优条件下,采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析莲藕片风味物质成分,旨在为莲藕加工工业提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn) 鄂莲 6 号,贺州市泰兴连锁超市,挑选新鲜、无黑斑、无机械损伤、大小均匀莲藕。

BSA124S 分析天平 德国赛多利斯公司; C21-RT2173 电磁炉 广东美的生活电器制造有限公司; 不锈钢蒸锅 潮州市潮安区龍江不锈钢制品有限公司; CR-400 色彩色差计 KONICA MINOLTA 公司; TA.XT.plus 物性测定仪 英国 Stable Micro Systems 公司; CP-216 手动多功能搅碎机 双马塑业有限公司; MR-Hei-Tec(CN)加热型磁力搅拌器 德国 Heidolph 公司; 20 mL 顶空瓶 美国 Supelco 公司; 50/30umDVB/CAR/PDMS 固相微萃取针头 美国 Supelco 公司; Trace 1300-ISQ QD 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 莲藕片汽蒸方法 将新鲜莲藕清洗干净,去节,去皮、切片备用;蒸锅中加入 1000 mL 的水,设置电磁炉功率,待水沸腾后,将莲藕片 100 g 放于隔水单层置料框进行汽蒸,并开始计时,汽蒸结束后,关闭电磁炉,取出莲藕片。

1.2.2 单因素实验 分别研究不同汽蒸时间、功率及切片厚度对汽蒸莲藕片品质的影响。通过汽蒸莲藕片的色差  $\Delta E$ 、硬度及感官评分三个指标来判定试验结果,确定较好加工条件进行正交优化试验。

1.2.2.1 汽蒸时间对莲藕片品质的影响 在切片厚度为 4 mm、功率为 1200 W 条件下,考查汽蒸时间为 12、16、20、24、28 min 对莲藕片色差、硬度、感官评分的影响。

1.2.2.2 功率对莲藕片品质的影响 功率为电磁炉功率,在切片厚度为 4 mm、汽蒸时间为 20 min 条件下,考查电功率为 800、1000、1200、1400、1600 W 对莲藕片色差、硬度、感官评分的影响。

1.2.2.3 切片厚度对莲藕片品质的影响 在汽蒸时间为 20 min、功率 1400 W 条件下,考查莲藕片厚度为 2、3、4、5、6 mm 对莲藕片色差、硬度、感官评分的影响。

1.2.3 正交试验 在单因素实验基础上,选取适度的

汽蒸时间、功率、切片厚度,以色差  $\Delta E$  值、硬度、感官评分三个指标为判断依据,以综合加权评分法作为确定汽蒸莲藕片正交实验最佳工艺条件的依据。评分时以各指标最佳值为参考,将数据进行归一化,再给出不同的权重<sup>[24]</sup>。感官品质被认为是汽蒸工艺优化的重要前提基础,故感官得分权重系数为 0.5,色差权重系数为 0.3,硬度权重系数为 0.2。

$$\text{综合评分} M = 0.5 \times 10 \times \frac{X}{X_{\max}} + 0.3 \times 10 \times \frac{Y}{Y_{\min}} + 0.2 \times 10 \times \frac{Z}{Z_{\max}}$$

式 (1)

式中:  $M$  为综合评分, 分;  $X$  为感官得分, 分;  $X_{\max}$  为感官得分最大值, 分;  $Y$  为色差;  $Y_{\min}$  为色差最小值;  $Z$  为硬度, g;  $Z_{\max}$  为硬度最大值, g; 10 为 10 分制。

采用  $L_9(3^4)$  正交试验对汽蒸莲藕片进行最佳加工工艺的优化试验。正交实验设计的因素及水平见表 1。

表 1 汽蒸莲藕片正交试验因素水平设计  
Table 1 Level table of orthogonal test factors for steamed lotus root slices

水平	因素		
	A 汽蒸时间(min)	B 功率(W)	C 切片厚度(mm)
1	16	1200	3
2	20	1400	4
3	24	1600	5

1.3 指标测定

1.3.1 感官评定 由 20 位食品专业人员组成评定小组,采用观、闻、尝的方式对样品进行感官评定。按照感官评价标准表打分,利用加权法<sup>[25]</sup>计算总分作为最终感官评分,分析不同汽蒸条件对莲藕片的感官品质影响。感官评分表见表 2。

感官评分分为色泽、滋味、质感、气味 4 项,分别为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ ,每项权重为 0.25,总分记为  $X$ 。 $X=0.25(X_1+X_2+X_3+X_4)$ 。

1.3.2 色差的测定 采用色彩色差计对每组样品色泽进行测定,测量 5 次后取平均值。样品色泽参数为  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 。色差  $\Delta E$ ,反映汽蒸处理后样品与鲜生

样品之间的颜色差异, $\Delta E$  值越大说明处理后物料色泽变化越明显。色差  $\Delta E$  按式(2)计算<sup>[26]</sup>,以新鲜莲藕为对照。

$$\Delta E = \left[ (L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2 \right]^{1/2}$$

式 (2)

式中,  $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$  为新鲜样品的色度值;  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  为处理后样品的色度值。

1.3.3 硬度的测定 采用物性测定仪进行测定,测试模式: return to start; 探头: P2/E 圆柱型探头; 测前速度: 1.00 mm/sec; 测试速度: 2.00 mm/sec; 测后速度: 10.00 mm/sec; 触发力: 5.0 g, 测试距离: 7 mm。硬度值为图中的最大分值点,即样品断裂所需要的最大力,数值越大,表明产品越硬<sup>[27]</sup>。

1.3.4 汽蒸莲藕片挥发性风味物质测定 SPME 条件: 将汽蒸前后的莲藕片破碎,称取 5 g 样品置于 20 mL 顶空瓶,迅速密封,置于 80 ℃ 的恒温加热磁力搅拌器中水浴,转速为 100 r/min,将萃取头插入其中,在 80 ℃ 的条件下吸附 40 min 后在 250 ℃ GC 进样口解析 3 min。

1.3.5 GC-MS 分析条件 GC 条件: DB-WAX 色谱柱 (30.00 mm×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度: 250 ℃; 载气: 高纯度氦气 (纯度 ≥ 99.999%); 流速 1.000 mL/min,分流方式: 不分流进样。程序升温: 初始温度 40 ℃,保持 3 min,以 5 ℃/min 上升至 80 ℃,保持 3 min,再以 8 ℃/min 上升至 250 ℃,保持 7 min。

MS 条件: 电子电离源 (Electron Ionization, EI); 电子电离能量 70 eV; 离子源温度 200 ℃,传输线温度 250 ℃,四级杆温度 150 ℃; 扫描方式为全扫描监测模式,质量扫描范围 33~450 m/z; 质谱库为 NIST 11。

1.3.6 挥发性物质鉴定及相对含量的确定 GC-MS 检测出的挥发性风味物质通过计算机检索与 Library-Mainlib 标准谱库相匹配得出<sup>[25,28]</sup>,仅统计正反匹配度均超过 800 或有一个超过 900 (最大值为 1000) 的挥发性风味物质,并采用面积归一化法确定挥发性物质的相对含量<sup>[29-32]</sup>。

1.4 数据处理

采用 Origin 7.5 及 SPSS 25.0 软件进行数据处理和绘图,采用 Excel 2010 软件对莲藕中挥发性风味物质结果进行分析。

表 2 汽蒸莲藕片感官评分标准

Table 2 Standard for sensory evaluation of steamed lotus root slices

项目	90~100分	80~89分	60~79分	<60分
色泽	淡淡黄色、色泽均匀一致,无褐变	浅枣红色、色泽基本均匀	深枣红色、色泽偏差且不均匀,稍褐变	莲藕色泽差且不均匀、有其他杂色
滋味	特有的莲藕风味浓郁、香甜,回味持久	莲藕风味略淡,有香甜味	莲藕风味弱,香甜味弱	无莲藕风味,无香甜味
质感	外观好,咀嚼性好,质地软硬适中	外观较好,咀嚼性较好,肉质脆嫩	外观稍差,咀嚼性较差	外观差,过硬或过软、咀嚼性差
气味	风味好,有较浓郁的莲藕清香味、较纯正	风味较好,莲藕清香味较好	莲藕清香味略淡,无异味	风味差,无莲藕清香味、无异味
权重值	0.25	0.25	0.25	0.25



## 2 结果分析

### 2.1 单因素实验结果

**2.1.1 汽蒸时间对汽蒸莲藕片品质的影响** 在切片厚度为 4 mm、功率为 1200 W 的条件下,考查汽蒸时间对莲藕片品质的影响,结果见图 1。由图 1 可知,在汽蒸时间为 12~20 min 时,色差  $\Delta E$  值和硬度均逐渐下降,莲藕片色泽分布越来越均匀。当汽蒸时间为 12~16 min 时,硬度从 672.79 g 下降到 662.55 g,感官得分逐渐增加,但莲藕片仍较生硬。在汽蒸时间为 20 min 时,莲藕片色泽呈淡黄色,与新鲜莲藕片颜色接近,色泽均匀,色差  $\Delta E$  值最低,为 8.75,莲藕片的硬度为 631.55 g,肉质较脆嫩,感官得分为 88 分。但随着汽蒸时间增加,莲藕片颜色越来越深,且色泽分布不均匀,色差  $\Delta E$  值较大,硬度逐渐增大,感官评分明显下降。原因是汽蒸时间越长物料生成的呈色物质越多使其颜色变深。随着汽蒸时间延长,细胞中胶层逐渐被破坏,硬度持续下降,咀嚼性变差<sup>[32]</sup>。综合考虑色差、硬度、感官评分,选取最佳汽蒸时间为 20 min 进行正交优化试验。

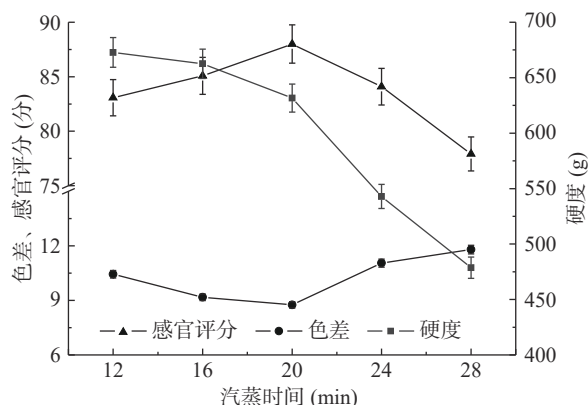


图 1 汽蒸时间对汽蒸莲藕片感官评分、色差、硬度的影响  
Fig.1 Effects of steaming time on sensory scores, color difference and hardness of steamed lotus root slices

**2.1.2 功率对汽蒸莲藕片品质的影响** 在切片厚度为 4 mm、汽蒸时间为 20 min 条件下,考查电磁炉功率对莲藕片品质影响,结果见图 2。由图 2 可知,功率在 800~1000 W 时,物料色差  $\Delta E$  值变化不大,硬度从 606.04 g 增加到 632.24 g。原因是电磁炉功率增大其热量快速增加使得蒸锅内热水转化蒸汽量迅速增加,物料中果胶甲酯酶受热被激活,在钙盐存在条件下,果胶酸钙含量增加使硬度变大。功率较低时,莲藕片出现微涩味,出现不良口感,感官评分不高。功率 1000~1600 W 莲藕片硬度趋于下降,原因是随着电磁炉功率的增大,蒸锅产生大量蒸汽加剧了物料受热程度,因而引起果胶和细胞壁多糖的分解,降低细胞间的黏着力和束缚力,致使物料硬度下降<sup>[33]</sup>。在功率为 1400 W 时,莲藕片为淡黄色,物料色泽均匀,色差  $\Delta E$  值最小,为 8.16,硬度良好,感官评分为 88.17 分。增大功率,莲藕片颜色逐渐变深

色,色差  $\Delta E$  值增大,硬度偏小,肉质较软,缺乏口感,感官评分降低。综合考虑色差、硬度、感官评分,选取最佳功率为 1400 W 进行正交优化试验。

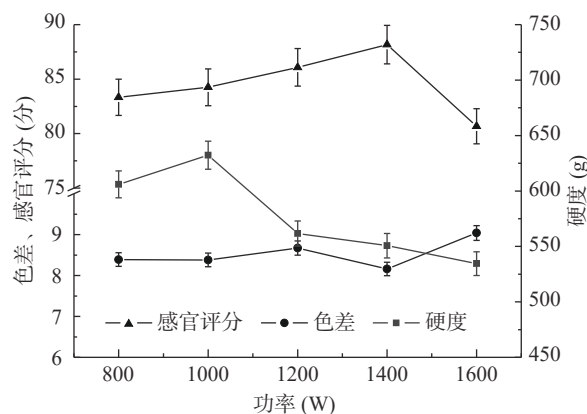


图 2 加工功率对汽蒸莲藕片感官评分、色差、硬度的影响  
Fig.2 Effects of processing power on sensory scores, color difference and hardness of steamed lotus root slices

**2.1.3 切片厚度对汽蒸莲藕片品质的影响** 在汽蒸时间为 20 min、功率 1400 W 条件下,考查切片厚度对莲藕片品质的影响,结果见图 3。由图 3 可知,莲藕片切片在 2~3 mm,色差值  $\Delta E$  变化不明显,硬度值过低,为 359.91~411.21 g,藕片没有嚼劲,感官评分不高。在切片厚度 4 mm 时,藕片基本保持着鲜藕原有色泽,藕淡黄色,且色泽均匀,色差值  $\Delta E$  最小,且硬度适中,为 560.62 g,咀嚼感较好,具有莲藕特有香味,感官评分最高,为 88.08 分。随着切片厚度的增加至 6 mm,色差值  $\Delta E$  增大,硬度达到了最高值,621.80 g,原因是切片厚度增大,蒸汽热传导阻力增大,导致藕片受热不均,局部温度过高或局部升温过慢,汽蒸总时间较长,导致藕片整体颜色变深,色泽不均匀,色差值  $\Delta E$  增大,切片厚度增大咀嚼阻力也随之增加,感官评分下降。综合考虑色差、硬度、感官评分,选取较佳切片厚度为 4 mm 进行正交优化试验。

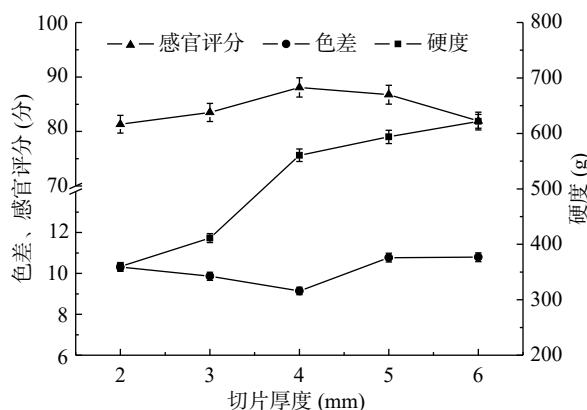


图 3 切片厚度对汽蒸莲藕片感官评分、色差、硬度的影响  
Fig.3 Effects of slice thickness on sensory scores, color difference and hardness of steamed lotus root slices

### 2.2 正交试验结果

在单因素对汽蒸莲藕片感官评分、色差、硬度影

响的实验基础上,采用  $L_9(3^4)$  正交表,对汽蒸莲藕片加工设计三因素三水平试验,结果见表 3。

表 3 汽蒸莲藕片正交试验设计表  
Table 3 Orthogonal design for steamed lotus root slices

序号	因素			感官评分 (分)	色差	硬度 (g)	综合评分 (分)
	A	B	C				
1	1	1	1	84.25	12.65	492.18	8.85
2	1	2	2	88.00	10.59	634.20	10.00
3	1	3	3	77.00	12.93	591.52	8.70
4	2	1	2	82.00	13.86	467.47	8.41
5	2	2	3	85.50	11.52	530.15	9.29
6	2	3	1	77.25	15.49	408.33	7.73
7	3	1	3	85.25	11.52	538.60	9.30
8	3	2	1	81.00	15.15	461.71	8.16
9	3	3	2	85.25	11.11	497.62	9.27
$K_1$	9.183	8.853	8.247	9.137			
$K_2$	8.477	9.150	9.227	9.010			
$K_3$	8.910	8.567	9.097	8.423			
R	0.706	0.583	0.980	0.714			
因素主次	C>A>B						
最优方案	$A_1B_2C_2$						

由表 3 极差分析和表 4~表 7 方差分析可知,若以硬度为考查指标,影响莲藕片硬度的因素排序为  $C>A>B$ ,若以感官评分为考查指标,影响莲藕片感官评分的因素排序为  $B>C>A$ ,若以色差为考查指标,影响莲藕片硬度的因素排序为  $C>A>B$ 。综合硬度、感官评分、色差三指标,以综合评分为考察指标,影响莲藕片品质的因素排序为  $C>A>B$ ,最优组合为  $A_1B_2C_2$ 。即汽蒸时间为 16 min,功率为 1400 W,切片厚度为 4 mm。

表 4 硬度方差分析  
Table 4 Analysis of hardness variance

因素	偏差平方和	自由度	均方	$F$
A	17128.880	2	8564.440	20.846
B	3652.377	2	1826.189	4.445
C	16528.283	2	8264.142	20.115
误差	821.700	2		

表 5 感官评分方差分析  
Table 5 Analysis of variance of sensory score

因素	偏差平方和	自由度	均方	$F$
A	7.875	2	3.938	0.199
B	42.000	2	21.000	1.063
C	27.375	2	13.687	0.693
误差	39.500	2		

表 6 色差方差分析  
Table 6 Analysis of color variance

因素	偏差平方和	自由度	均方	$F$
A	3.803	2	1.902	0.499
B	0.888	2	0.444	0.117
C	12.611	2	6.306	1.655
误差	7.620	2		

表 7 综合评分方差分析

Table 7 Analysis of variance of comprehensive score

因素	偏差平方和	自由度	均方	$F$
A	0.762	2	0.381	0.877
B	0.510	2	0.255	0.587
C	1.700	2	0.850	1.956
误差	0.869	2		

根据理论优化所得的最佳配方  $A_1B_2C_2$ ,汽蒸时间为 16 min,功率为 1400 W,切片厚度为 4 mm 进行验证实验,结果见表 8。在  $A_1B_2C_2$  组合下实验,得出莲藕片的感官评价得分为 89.08 分,色差 9.85,硬度 555.57 g。指标均优于正交试验表中  $A_1B_2C_2$  的感官评分 88.00 分,色差 10.59。所以,可认为  $A_1B_2C_2$  是最佳配方。

表 8 最佳工艺验证试验  
Table 8 Best process validation test

指标	试验次数			平均值
	1	2	3	
感官评分(分)	90.75	89.25	87.25	89.08
色差	10.43	9.11	10.02	9.85
硬度(g)	520.29	564.95	581.46	555.57

2.3 莲藕片汽蒸前后挥发性物质种类

2.3.1 莲藕片汽蒸前后挥发性风味化合物变化鉴定结果 汽蒸莲藕片汽蒸前后挥发性风味化合物总离子流图见图 4、图 5,具体组成见表 9、表 10。由表 9 可见,新鲜莲藕片挥发性风味物质共检测出 45 种,汽蒸莲藕片挥发性风味物质共检测出 42 种,其中有 28 种挥发性物质均在新鲜莲藕片和汽蒸莲藕片中存在。在新鲜莲藕片样品中,醛类的相对含量最高,其次是醇类和酯类,经过汽蒸后莲藕片中醛类相对含量出现明显增加趋势,但酮类、烃类、酯类、醇类、醚类和酸类的相对含量出现下降趋势。新鲜莲藕片中醛类的相对含量为 35.66%,经过汽蒸后其醛类的相对

表 9 汽蒸莲藕片加工过程中挥发性成分种类及占总量的百分比

Table 9 Types and percentage of volatile components in steamed lotus root slices

挥发性成分	鲜样		汽蒸	
	种类	占比(%)	种类	占比(%)
醛类	8	35.66	11	68.70
酮类	2	3.76	2	3.65
烃类	9	10.47	8	9.88
酯类	9	20.15	6	6.18
醇类	10	23.74	10	8.97
醚类	3	2.85	2	1.13
酸类	1	2.11	1	0.23
酚类	2	0.88	—	—
杂环类及含氮化合物	1	0.38	2	1.28

注:“—”表示未检出。

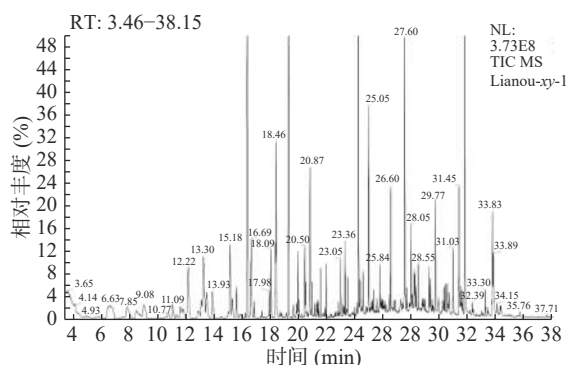


图4 新鲜莲藕片挥发性风味物质的总离子流色谱图

Fig.4 Total ion current chromatogram of volatile flavor compounds in fresh lotus root slices

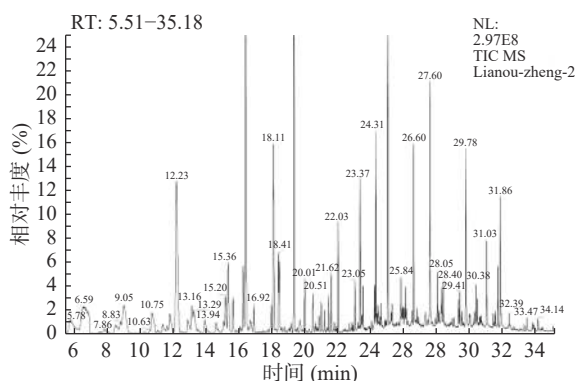


图5 汽蒸后莲藕片挥发性风味物质的总离子流色谱图

Fig.5 Total ion flow chromatogram of volatile flavor components in steamed lotus root slice

含量增加到 68.70%; 醇类的相对含量由原来的 23.74% 下降到 8.97%; 酯类的相对含量由原来的 20.15% 下降到 6.18%。这说明通过汽蒸方可改变新鲜莲藕片原有的挥发性物质种类及相对含量, 使汽蒸后的莲藕片具备特有的挥发性风味物质。

### 2.3.2 汽蒸加工前后挥发性风味化合物变化分析

由表 10 所示, 烃类物质主要来自脂肪酸烷氧自由基的均裂<sup>[25]</sup>, 烷烃类一般是无气味或者气味较弱, 因此不用作为汽蒸莲藕片呈香物质考虑。而柠檬烯阈值较低且其相对含量较高对莲藕风味物质起重要的作用。柠檬烯是主要的烃类物质, 具有愉快新鲜橙子香气, 能形成独特的芳香风味<sup>[34]</sup>。

与新鲜莲藕相比, 汽蒸后莲藕片, 其醛类化合物相对含量增加, 酯类、醇类、杂环类及其他化合物含量减少、烃类化合物含量无明显变化。新鲜莲藕醛类的相对含量为 35.66%, 经汽蒸后莲藕片的相对含量为 68.70%。说明莲藕经过汽蒸处理后, 增加了莲藕油酸氧化, 醛类物质含量增加, 香味更浓郁, 醛类物质多为不饱和脂肪酸氧化降解的主要产物, 阈值比较低。壬醛和癸醛含量最高, 是莲藕片中主要醛类风味物质。莲藕片经过汽蒸加工后, 苯甲醛等物质的相对含量增加了, 其原因可能是加热使醛类物质之间及其降解产物之间发生了反应, 使醛类物质发生了变化<sup>[35]</sup>。

醇类物质来源于不饱和脂肪酸氧化降解, 其气

味阈值一般比高, 但对整体气味影响不大<sup>[36]</sup>。但也有一些风味独特的醇类, 如新鲜莲藕检测到的 1-壬醇、苯乙醇、辛醇和香叶醇等, 是新鲜莲藕香气形成的主要呈香物质。经过汽蒸后, 醇类化合物种类不变, 但香气成分相对含量由 23.74% 下降到 8.97%。这可能是因为加热条件下醇类物质和脂肪酸氧化降解形成酮类或醛类化合物<sup>[36]</sup>。芳樟醇具有花香或具玫瑰样香气, 是天然植物中普遍存在的醇系挥发性成分<sup>[37]</sup>。莲藕经过汽蒸后, 减少了苯甲醇、2-癸烯-1-醇、橙花醇、香叶醇、1-癸醇这 5 种醇类物质, 增加了 2-壬烯-1-醇、十一醇、反-2-十一烯醇、反式-橙花叔醇、(1R,2R,5S,7R,8R)-2,6,6,8-甲基三环[5.3.1.01.5]十一烷-8-醇这 5 种醇类物质。

酯类物质是一种良好的风味物质, 对莲藕风味贡献较大, 其来源于莲藕中醇类和羧酸类物质发生酯化反应, 是莲藕甘甜和芳香的主要来源<sup>[12]</sup>。新鲜莲藕中酯类物质种类和相对含量较多, 经过汽蒸处理后, 其种类减少, 相对含量由 20.15% 下降到 6.18%。棕榈酸乙酯相对含量为 11.20%, 具有果香和奶油香气, 是莲藕中主要酯类物质<sup>[34]</sup>。经过汽蒸加工后, 减少了甲酸庚酯、十五酸乙酯、反油酸乙酯这 3 种酯类物质, 酯类的减少可能会导致汽蒸莲藕甜味和芳香气味减弱。

烃类物质主要来自脂肪酸烷氧自由基的均裂<sup>[34]</sup>。其种类和含量变化不明显, 柠檬烯是主要的烃类物质, 具有愉快新鲜橙子香气, 能形成独特的芳香风味<sup>[34]</sup>。经过汽蒸加工后, 减少了乙基苯、十二烷、奥甘菊环、1,2-环氧十二烷、异丁基环戊烷这 5 种烃类物质, 增加了十三烷、1,2-环氧十八烷这 2 种烃类物质。烃类物质阈值较高, 对莲藕风味直接贡献不明显, 但起着一定作用, 使得莲藕口感风味更饱满, 与韩丽娟等<sup>[34]</sup>检测洪湖藕、鄂莲水煮挥发性风味物质烃类物质结果相似。

酸类化合物多存在于发酵食品中, 且挥发性一般比较低, 对食品挥发性风味贡献较小。在新鲜莲藕和汽蒸后莲藕中仅检测到棕榈酸, 它是自然界分布最广的脂肪酸之一, 具有特殊的香气和滋味。但经过汽蒸后其相对含量略有降低, 可能是因为莲藕加热过程中发生酯化反应形成酯类化合物。

新鲜莲藕醚类物质含量较少, 对莲藕风味影响不大, 主要有对甲苯甲醚、4-烯丙基苯甲醚和茴香脑 3 种, 具有花香、茴香味。莲藕经过汽蒸后, 其种类和相对含量均减少, 4-烯丙基苯甲醚物质消失, 但对莲藕风味基本无影响。

酮类物质对风味的贡献相对较小<sup>[38]</sup>, 加工前后基本无变化, 一般具有水果香和新鲜清香气, 其主要对其他风味物质起辅助作用, 使莲藕香味更加浓郁。

在蒸煮时会导致酚类物质的损失, 汽蒸莲藕片中未检测到酚类物质。新鲜莲藕中酚类物质含量极

表 10 汽蒸前后莲藕片风味物质成分及相对含量  
Table 10 Flavor components and relative contents of lotus root slices before and after steaming

类别	序号	保留时间(min)	化合物名称	化学式	相对含量(%)	
					新鲜	汽蒸
醛类	1	10.76	苯甲醛(Benzaldehyde)	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	—	1.64
	2	13.95	苯乙醛(Benzeneacetaldehyde)	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	1.08	0.70
	3	14.63	反-2-辛烯醛[(E)-2-Octenal]	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	0.26	0.38
	4	16.06	(反式)-4-壬烯醛[(E)-4-Nonenal]	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O	—	0.12
	5	16.42	壬醛(Nonanal)	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	17.54	43.79
	6	18.41	反-2-十二烯-1-醛(trans-2-Dodecen-1-ol)	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	—	1.80
	7	19.35	癸醛(Decanal)	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	14.28	18.18
	8	20.65	反式-2-癸烯醛[(E)-2-Decenal]	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	—	0.16
	9	21.35	反式-2,4-癸二烯醛[(E,E)-2,4-Decadienal]	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	0.41	—
	10	21.61	十一醛(Undecanal)	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	0.89	1.05
烃类	11	22.72	2-十一烯醛(2-Undecenal)	C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O	—	0.16
	12	23.53	十二醛(Dodecanal)	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	0.53	0.72
	13	28.27	十五醛(Pentadecanal- )	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	0.67	—
	14	7.58	乙基苯(Ethylbenzene)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	0.09	—
	15	8.53	苯乙烯(Styrene)	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	1.05	0.41
	16	13.28	柠檬烯(D-Limonene)	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	4.13	1.17
	17	17.46	异丁基环戊烷[Cyclopentane,(2-methylpropyl)-]	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	0.21	—
	18	19.21	十二烷(Dodecane)	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	—	0.32
	19	21.01	1,2-环氧十二烷(Oxirane, decyl-)	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O	0.61	—
	20	21.46	十二烷(Dodecane)	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	0.32	—
醇类	21	21.46	十三烷(Tridecane)	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	—	0.65
	22	23.36	十四烷(Tetradecane)	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	1.29	2.63
	23	25.24	1,2-环氧十八烷(Oxirane, hexadecyl-)	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O	—	0.30
	24	26.6	正十六烷(Hexadecane)	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	1.91	3.39
	25	28.04	正十七烷(Heptadecane)	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	0.86	1.01
	26	13.53	苯甲醇(Benzyl alcohol)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	1.51	—
	27	15.08	2-癸烯-1-醇(2-Decen-1-ol)	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	0.05	—
	28	15.09	2-壬烯-1-醇(2-Nonen-1-ol)	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	—	0.28
	29	15.2	辛醇(1-Octanol)	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	3.59	1.52
	30	16.28	芳樟醇(Linalool)	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	0.24	2.05
醇类	31	16.71	苯乙醇(Phenylethyl Alcohol)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	3.38	0.62
	32	17.98	顺-3-壬烯-1-醇[(Z)-3-Nonen-1-ol]	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	1.62	0.72
	33	18.46	1-壬醇(1-Nonanol)	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	7.59	1.72
	34	19.91	橙花醇[(Z)- 3,7-dimethyl-2,6-Octadien-1-ol]	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	0.39	—
	35	20.5	香叶醇(Geraniol)	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	3.49	—
	36	20.87	1-癸醇(1-Decanol)	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> O	1.88	—
	37	20.88	十一醇(1-Undecanol)	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O	—	0.35
	38	21.01	反-2-十一烯醇(trans-2-Undecen-1-ol)	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	—	0.59
	39	26.11	反式-橙花叔醇[(E)- 3,7,11-trimethyldodeca-1,6,10-trien-3-ol]	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	—	0.99
	40	26.91	(1R,2R,5S,7R,8R)-2,6,6,8-甲基三环[5.3.1.01.5]十一烷-8-醇(Epicedrol)	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	—	0.13
酯类	41	11.11	甲酸庚酯(Formic acid, heptyl ester )	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	0.37	—
	42	26.52	月桂酸乙酯(Dodecanoic acid, ethyl ester)	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	0.21	0.32
	43	28.4	五甲基呋喃溴酸酯(Methyl tetradecanoate)	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	0.57	0.82
	44	29.33	十四酸乙酯(Tetradecanoic acid, ethyl ester)	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	0.68	0.47
	45	30.62	十五酸乙酯(Pentadecanoic acid, ethyl ester)	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0.46	—
	46	31.03	棕榈酸甲酯(Hexadecanoic acid, methyl ester)	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	1.25	1.76
	47	31.86	棕榈酸乙酯(Hexadecanoic acid, ethyl ester)	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	11.20	2.66
	48	33.83	亚油酸乙酯(9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester)	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	3.08	0.15
	49	33.89	反油酸乙酯[(E)-9-Octadecenoic acid ethyl ester]	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	2.33	—
	50	12.92	对甲苯甲醚(Benzene,1-methoxy-4-methyl-)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	1.99	0.67
醚类	51	19.19	4-烯丙基苯甲醚(Estragole)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	0.25	—
	52	21.21	茴香脑(Anethole)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	0.61	0.46



续表 10

类别	序号	保留时间(min)	化合物名称	化学式	相对含量(%)	
					新鲜	汽蒸
酚类	53	18.86	2-甲氧基-5-甲基苯酚(2-Methoxy-5-methylphenol)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.21	—
	54	25.29	2,4-二叔丁基苯酚(2,4-Di-tert-butylphenol)	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O	0.67	—
酮类	55	11.66	甲基庚烯酮(5-Hepten-2-one, 6-methyl-)	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	0.27	0.16
	56	24.31	香叶基丙酮[(E)-5,9-Undecadien-2-one,6,10-dimethyl-]	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	3.49	3.49
酸类	57	31.44	棕榈酸(n-Hexadecanoic acid)	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	2.11	0.23
含氮化合物	58	24.06	2,6-二异丙基苯胺[Benzenamine, 2,6-bis(1-methylethyl)-]	C <sub>12</sub> H <sub>19</sub> N	0.38	0.16
杂环类	59	11.83	2-正戊基呋喃(Furan, 2-pentyl-)	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	—	1.12

注:“—”表示未检出。

少,但是作用却十分明显。其中,2-甲氧基-5-甲基苯酚呈香辛料、丁香、香兰素和烟熏香气。新鲜莲藕中未检测出杂环类物质,2-正戊基呋喃多来源于美拉德反应<sup>[39-40]</sup>,具有清香、肉香、果香等气味,其阈值相对较低,对汽蒸莲藕片的风味有一定的影响。

### 3 结论

本实验采用单因素和正交试验确定汽蒸莲藕片最佳工艺条件,在汽蒸时间 16 min、功率为 1400 W、切片厚度为 4 mm 的条件下汽蒸莲藕片的感官评分为 89.08 分、色差为 9.85 及硬度 555.57 g,此时莲藕片呈淡黄色,藕片肉质脆嫩,咀嚼性较好,具有藕香味。

采用固相微萃取与气相色谱-质谱联用技术,分析汽蒸处理前后莲藕片挥发性风味物质的变化。结果表明,在新鲜莲藕片中共鉴定出 45 种风味物质,醛类、醇类、酯类、烃类相对含量较高,占总组分的 90.02%,是新鲜莲藕的主要风味组分。经过汽蒸处理后莲藕片共鉴定出 42 种风味物质,醛类含量最高,占总组分的 68.70%。其中二者共有的风味化合物有 28 种,与新鲜莲藕相比,莲藕片经过汽蒸处理后,醛类、杂环类及含氮化合物相对含量增加,酯类、醇类、酚类和酸类相对含量减少,其他化合物相对含量则无明显变化。莲藕中主要有壬醛、癸醛、柠檬烯、棕榈酸乙酯、辛醇、1-壬醇、香叶基丙酮等风味物质,这些风味物质具有花香、果香、脂香和香辛料等香味,使莲藕片呈现不同的风味特征。

### 参考文献

- [1] Gao H, Chai H K, Cheng N, et al. Effects of 24-epibrassinolide on enzymatic browning and antioxidant activity of fresh-cut lotus root slices[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 45-51.
- [2] Li Shuyi, Li Xiaojin, Lamikanra O, et al. Effect of cooking on physicochemical properties and volatile compounds in lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)[J]. *Food Chemistry*, 2017, 216: 316-323.
- [3] 王诗琪, 钟照恬, 易阳, 等. 莲藕多酚-多糖复合脂质体的制备及稳定性评价[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(17): 154-160.
- [4] 何登基. 乳酸菌发酵莲藕汁饮料工艺的研发[D]. 扬州: 扬州大学, 2018: 1-2.
- [5] 刘勇, 高媛, 李航兵, 等. 莲藕新品种汉莲 2 号的选育[J]. *长江蔬菜*, 2018(14): 33-35.
- [6] Ali S, Khan A S, Anjum M A, et al. Effect of postharvest oxalic acid application on enzymatic browning and quality of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root slices[J]. *Food Chemistry*, 2020: 312.
- [7] 权美平. 鲜切莲藕保鲜技术应用研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(1): 134-137.
- [8] 杨松, 伍玉茜, 陈敏, 等. 不同品种莲藕加工脆片适宜性评价[J]. *食品与机械*, 2019, 35(7): 199-203.
- [9] 邢芳, 王建辉, 何新益, 等. 莲藕脆片组合干燥工艺研究[J]. *食品与机械*, 2015, 31(6): 190-192.
- [10] 徐燕燕, 孙杰, 陈雅卉, 等. 莲藕多酚浸提工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(2): 128-132.
- [11] Li S, Li J, Zhu Z, et al. Soluble dietary fiber and polyphenol complex in lotus root: Preparation, interaction and identification[J]. *Food Chemistry*, 2020: 314.
- [12] 韩小苗, 罗庆, 吴苏喜. 3 种鲜藕的质构特性及风味物质测定与评价[J]. *食品与机械*, 2017, 33(9): 64-68.
- [13] 陈亭. 烹饪与超高压处理对莲藕食用品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2014: 13-14.
- [14] 芦健萍. 三种蔬菜熟处理工艺优化及短期放置品质变化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2017: 2-3.
- [15] 罗庆. 不同品种莲藕的风味特性及加工稳定性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015.
- [16] 韩丽娟, 黄楚雄, 李洁, 等. 不同品种莲藕水煮风味物质比较[J]. *食品科学*, 2020, 41(22): 245-251.
- [17] 刘春泉, 卓成龙, 李大婧, 等. 速冻加工过程中慈姑挥发性风味成分分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(2): 137-141.
- [18] Ren J, Tai Y, Dong M, et al. Characterisation of free and bound volatile compounds from six different varieties of citrus fruits[J]. *Food Chemistry*, 2015: 185.
- [19] 郭志勇, 姚秋虹, 林奇, 等. 薄膜固相微萃取技术的应用进展[J]. *色谱*, 2020, 38(1): 41-49.
- [20] 路悦, 吕蕾, 徐志祥, 等. 新型固相微萃取涂层及其在食品安全检测中的应用[J]. *食品科技*, 2019, 44(8): 355-359.
- [21] Yan F, Li'ang Y, Yong X, et al. Analyzing the flavor compounds in Chinese traditional fermented shrimp pastes by HS-SPME-GC/MS and electronic nose[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(2): 311-318.
- [22] 刘登勇, 赵志南, 吴金城, 等. 基于 SPME-GC-MS 分析熏制材料对熏鸡腿挥发性风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 220-227.
- [23] Yang W, Yu J, Pei F, et al. Effect of hot air drying on volatile



- compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. Food Chemistry, 2016, 196(APR. 1): 860-866.
- [24] 田冰,王玲,彭林,等.多指标综合评分法优化青花椒热泵-微波联合干燥工艺[J].食品研究与开发,2019,40(19): 149-155.
- [25] 孟凡冰,刘达玉,向茂德,等.不同卤制方法对白鹅腿肉品质及挥发性风味成分的影响[J].食品工业科技,2018,39(5): 272-279.
- [26] 杨军林,任亚梅,张武岗,等.基于主成分分析法的熟化马铃薯品质评价[J].食品科学,2018,39(19): 70-77.
- [27] 贾洋洋,周诗晶,李春美.不同包装方式对恒温贮藏柿子脆片品质影响的比较[J].现代食品科技,2018,34(10): 196-204.
- [28] 臧明伍,张凯华,王守伟,等.基于 SPME-GC-O-MS 的清真酱牛肉加工过程中挥发性风味成分变化分析[J].食品科学,2016,37(12): 117-121.
- [29] 黄晶玲,江汉美,曹晨阳. HS-SPME-GC-MS 法分析鉴定九里香不同部位的挥发性成分[J]. 国际药学研究杂志, 2019, 46(7): 532-537.
- [30] 许艳俊,张海明,郝林,等.苹果、山楂果粮醋的风味及功能成分分析[J].中国调味品,2019,44(3): 72-76, 83.
- [31] 李晓颖,马茜,王叶,等. SPME-GC-MS 联用法区分不同类别白菜[J].食品科学,2014,35(24): 224-227.
- [32] 朱瑞欣,王璐,范志红.蔬菜烹调的差异化综合营养评价[J].中国食品学报,2018,18(10): 252-257.
- [33] 朱瑞欣,范志红,郑飞飞.油煮菠菜的质构、感官和  $V_C$  保存率分析[J].食品科技,2017,42(9): 49-54.
- [34] 余琳琳,熊佳文,张志斌,等.蜜桔果酒用非酿酒酵母的分离鉴定、发酵特性及挥发性香气成分分析[J].食品工业科技,2019,40(7): 124-130.
- [35] 吴靖娜,路海霞,刘智禹,等.用电子鼻和 SPME-GC-MS 分析鲍鱼熟制前后挥发性风味物质的变化[J].大连海洋大学学报,2016,31(4): 431-437.
- [36] 刘春菊,李大婧,刘春泉.不同干燥方式对慈姑挥发性风味成分影响[J].食品工业科技,2015,36(21): 102-106.
- [37] Ho C T, Zheng X, Li S. Tea aroma formation[J]. Food Science & Human Wellness, 2015, 4(1): 9-27.
- [38] 王榛,陈雷,潘超,等.不同熟化方法对紫色马铃薯挥发性风味物质形成的影响[J].中国粮油学报,2017,32(6): 128-133.
- [39] Ying W, Jiang Y T, Cao J X, et al. Study on lipolysis-oxidation and volatile flavour compounds of dry-cured goose with different curing salt content during production[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 33-40.
- [40] Lin P C. Comparison of simultaneous distillation and extraction (SDE) and headspace solid phase microextraction (SPME) for determination of volatiles of muscadine grapes (*Vitis rotundifolia*) [J]. Dissertations & Theses Gradworks, 2014.