

# 不同蒸制时间下红芽芋的风味品质评价

黎小椿<sup>1</sup>, 罗杨合<sup>1,2</sup>, 梁宁<sup>1</sup>, 伍淑婕<sup>1</sup>, 李官丽<sup>1\*</sup>

(1. 广西康养食品科学与技术重点实验室, 广西贺州 542899) (2. 大连工业大学食品学院, 辽宁大连 116034)

**摘要:** 利用感官评价和电子鼻评价不同蒸制时间(0、5、10、15、20、25 min)红芽芋风味品质, 最后结合固相微萃取与气相色谱-质谱联用(Solid Phase Microextraction and Gas Chromatography Mass Spectrometry, SPME-GC-MS)技术对最佳蒸制条件下红芽芋关键风味物质进行表征。结果表明, 蒸制15 min时红芽芋感官得分最高, 为80.8分。电子鼻对不同蒸制时间红芽芋的气味均有较好的响应, 传感器1、3、4、10号响应较强, 即苯类芳香成分、烷烃类、氢化物、丙酮、乙醇对红芽芋风味影响较大。SPME-GC-MS结果表明, 从新鲜样品和蒸制15 min样品中共检出85种挥发性物质, 前者关键风味物质为壬醛、癸醛、(Z)-2-壬烯醛、苯乙醛、1-辛烯-3-醇、芳樟醇; 后者关键风味物质为壬醛、癸醛、辛醛、(Z)-2-壬烯醛、苯甲醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、苯乙醛、D-柠檬烯, 呈现不同于鲜样的脂香、清香、肉香等气味特征。醛类占两组样品总量45%以上, 是二者挥发性风味的主要来源。基于感官评价的现代技术比单一的感官评价更为客观准确, 该结果可为红芽芋的深加工和食用烹饪提供科学参考。

**关键词:** 红芽芋; 蒸制时间; 感官评价; 电子鼻; SPME-GC-MS; 挥发性风味物质

文章编号: 1673-9078(2023)06-230-239

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.0730

## Evaluation of Flavor Quality of Red Bud Taro Steamed for Different Time Periods

LI Xiaochun<sup>1</sup>, LUO Yanghe<sup>1,2</sup>, LIANG Ning<sup>1</sup>, WU Shujie<sup>1</sup>, LI Guanli<sup>1\*</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Health Care Food Science and Technology, Hezhou 542899, China)

(2. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

**Abstract:** The flavor quality of red bud taro steamed for different steaming times (0,5,10,15,20,25 min) were evaluated by sensory evaluation and electronic nose, and finally, in combination with the characterization of the key flavor compounds of thered bud taro steamed under the optimal steaming conditions by solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS). The results showed that the sensory score of red bud taro was the highest (80.8) when the taro was steamed for 15 min. The electronic nose had good responses to the odors of the red bud taro steamed for different times, Sensor No. 1, 3, 4 and 10 had stronged responses, that is, benzene aromatic components, alkanes, hydrides, acetone and ethanol had greater impact on the flavor of red bud taro. The SPME-GC-MS results showed that a total of 85 volatile substances were detected from the fresh samples and the samples steamed for 15 min. The key flavor components of the former were nonanal, decanal, (z)-2-nonenal, phenylacetaldehyde, 1-octene-3-ol and linalool; The key flavor substances of the latter were nonanal, decanal, octanal, (z)-2-nonenal, benzaldehyde, (E,Z)-2,6-nonenal, phenylacetaldehyde and D-limonene, presents odor characteristics different from those of fresh samples, such as fatty flavor, light aroma, and meat aroma. Aldehydes accounted for more than 45% of the total samples for the two groups, and were the main source of volatile flavors of the two groups. Modern technology based on sensory evaluation is more objective and accurate than sole sensory evaluation, and the results can provide scientific reference for the deep processing and edible cooking of red bud taro.

引文格式:

黎小椿,罗杨合,梁宁,等.不同蒸制时间下红芽芋的风味品质评价[J].现代食品科技,2023,39(6):230-239.

LI Xiaochun, LUO Yanghe, LIANG Ning, et al. Evaluation of flavor quality of red bud taro steamed for different time periods [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 230-239.

收稿日期: 2022-06-09

基金项目: 广西自然科学基金青年基金项目(2020GXNSFBA159065); 国家重点研发计划项目(2018YFD0901003); 2022年度广西高校中青年骨干教师基础能力提升项目(2022KY0698); 贺州学院校级项目(2021ZZZK05)

作者简介: 黎小椿(1987-),女,硕士研究生,实验师,研究方向:食品分析与安全检测, E-mail: 277792205@qq.com

通讯作者: 李官丽(1995-),女,硕士研究生,助教,研究方向:食品风味化学, E-mail: liguanli@hzyx.edu.cn

**Key words:** red bud taro; steaming time; sensory evaluation; electronic nose; SPME-GC-MS; volatile flavor compound

芋头 (*Colocasia esculenta* (L.) Schoot) 俗称芋艿, 属天南星科块茎作物, 食用部位为富含淀粉的地下球茎, 主要分布在非洲, 亚洲的中国、印度及东南亚等地<sup>[1,2]</sup>。芋头在我国南方地区种植历史悠久, 种质资源十分丰富, 品种繁多, 并以其独特风味品质享誉全国各地<sup>[3]</sup>。红芽芋形如鹅卵, 白肉红芽, 是一种很好的食物资源, 其营养价值与马铃薯相似, 且不含龙葵素, 具有较高的食用和药用价值, 特别是其所含粘液蛋白被人体吸收后可增强机体的抵抗能力和免疫能力, 同时对肿瘤和淋巴结等也有良好疗效<sup>[4]</sup>。因此, 红芽芋是一种深受消费者喜爱的滋补佳品。

与其他果蔬相比, 新鲜红芽芋的香气并不浓郁, 当经过蒸、煮、炸、煎等高温烹饪熟制后口感细腻爽滑、香糯细柔, 易于消化, 风味独特, 风味品质居芋类之首, 并以其独特的香味深受消费者欢迎<sup>[5,6]</sup>。其中, 沸水蒸制是较为健康、传统烹饪方式, 可以较好保留食材的营养成分和原有的风味特性, 更符合现代人们健康饮食的诉求<sup>[7]</sup>。然而, 红芽芋极易煮烂, 过长或过短的蒸制时间都会引起红芽芋发生复杂化学反应, 产生不良风味和口感。因此, 红芽芋蒸制过程中风味品质的研究尤为重要。

迄今为止, 学者们已从芋头中鉴定出 200 百余种挥发性物质, 包括醇类、杂环类、醛类、酮类、酯类等物质<sup>[8-10]</sup>。然而, 只有少数挥发性物质对芋头风味有影响, 这些物质决定了芋头的风味属性。因此, 研究红芽芋的关键香气化合物对提升其风味品质具有重要现实意义。传统芋头风味监测多靠感官评价, 存在较大的主观性。电子鼻是一种模拟人类感觉器官的无损检测技术, 可准确快速区分样品整体气味信息, 已广泛应用于食品分析检测<sup>[11,12]</sup>。固相微萃取与气相色谱-质谱联用 (Solid Phase Microextraction and Gas Chromatography Mass Spectrometry, SPME-GC-MS) 技术结合了气相和质谱的优点, 具有操作简便、快速、灵敏度高、分离能力强等优点, 已成为挥发性物质定性定量主流技术<sup>[13]</sup>。因此, 在感官评价的基础上, 结合现代仪器研究风味可实现优势互补, 有助于提高实验结果的真实性和准确性<sup>[14]</sup>。韩丽娟等<sup>[15]</sup>采用 SPME-GC-MS、电子鼻和感官评价从水煮莲藕中鉴定出 38 种挥发性物质, 并认为电子鼻可有效区分 4 种莲藕风味物质, GC-MS 结合电子鼻可综合评定不同莲藕品种风味品质。Chen 等<sup>[16]</sup>利用电子鼻和 SPME-GC-MS 从西兰花中共检测到 43 种挥发性化合物, 包括烃类、醇类、酯类、醚类、酮类和硫化物。因此, 本研究

在感官评价的基础上, 采用电子鼻结合 SPME-GC-MS 检测技术对不同蒸制时间红芽芋的挥发性风味物质进行分析, 以期红芽芋的深加工与研究开发提供相关基础理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

新鲜红芽芋 (每个 100~150 g), 产自广西贺州市, 形态完整个体饱满, 无虫无斑, 外表无机械损伤。

### 1.2 主要仪器

C21-RT2170 多功能电磁炉, 广东美的生活电器制造有限公司; AQT-1500 分析天平, 艾德姆横器武汉有限公司; Super Nose 电子鼻, 上海瑞玢智能科技有限公司; MR Hei-Tec 磁力搅拌器, 德国 Heidolph 公司; TRACE1300-ISQQD GC-MC 联用仪, 美国 Agilent 公司; 固相微萃取、50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS Gray 萃取头, 美国 Supelco 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

(1) 将红芽芋清洗、切去外皮, 取中间部位沿纵向切片, 切成厚度约 1 cm, 长度约 5 cm, 宽度约 3 cm 的芋片。

(2) 参考苏可珍等<sup>[17]</sup>蒸制荔浦芋实验条件对红芽芋进行蒸制 0、5、10、15、20、25 min。每个时间点的芋片样品进行单独蒸制, 并取 5 个平行。

#### 1.3.2 感官评价

参考苏可珍等<sup>[17]</sup>和程珍等<sup>[3]</sup>的方法稍作修改, 再根据红芽芋自身的特点制定感官评价的标准及方法。感官评定小组由 10 名具有一定的芋头评判经验的食品专业的教师和学生组成, 并经过一定的培训。具体如下: 感官品评前让品评员先提前了解实验目的和样品属性; 品评员须在感官评定半小时前用盐水漱口, 并完成一组评分后进行漱口, 一次测试的样品不超过 10 份, 每份测试样品 20 g 左右, 品评员在品评过程不得互相沟通与交流, 否则会影响结果判断; 品评员从硬度、口感、糯性、香味、黏液量、色泽等 6 个指标进行观察和品评, 并填写感官品评表, 总分为 100 分。统计结果, 每个样品的各项指标取算术平均值计分。具体评分标准见表 1。

表 1 不同蒸制时间红芽芋感官评价标准表

Table 1 Sensory evaluation standards of red bud taro at different steaming times

评价指标	总分/分	评分标准
口感	硬度	15 适中 (11~15); 适中偏硬或适中偏软 (6~10); 偏硬或偏软 (0~5)
	糯性	15 适中 (11~15); 微糯 (6~10); 不糯 (0~5)
黏液量	15	适中 (11~15); 适中偏多或偏少 (6~10); 偏多或偏少 (0~5)
形状	15	长方形, 表面均匀 (11~15); 长方形, 表面塌陷 (6~10); 形状不完整, 表面有裂痕 (0~5)
色泽	20	芋片表面肉呈灰紫色, 花纹淡黄色 (16~20); 芋片表面肉呈浅紫白色, 花纹浅白色 (11~15); 芋片表面肉偏灰白色, 花纹偏浅黄色 (6~10); 芋片表面肉呈黄白色, 花纹偏黄色 (0~5)
气味	20	明显芋头香味 (16~20); 香味略淡 (11~15); 芋头香味很淡 (6~10); 无芋头香味 (0~5)

### 1.3.3 电子鼻检测

Super Nose 电子鼻传感器阵列性能描述见表 2。检测时, 将待测样品置于一次性顶空瓶中, 并封上封口膜, 使样品气味信息充满顶空瓶上部, 保持环境中温度和湿度一致并静置 30 min。每次进样设定 10 mL, 进行预检, 确定适宜实验参数后可进行正式实验。测试样品 6 组, 每组 5 个平行, 传感器室流量 6 L/min, 载气速度为 1 L/min, 进样气体体积 10 mL, 等待时间 10 s, 电子鼻采样间隔 10 s, 检测温度: 25 °C (室温), 检测时间为 90 s。

表 2 SuperNose 电子鼻传感器阵列性能表

Table 2 Performance of supernose electronic nose sensor array

序号	传感器符号	性能描述
1	S1	丙烷, 烟雾
2	S2	酒精, 烟雾, 异丁烷, 甲醛
3	S3	氨类, 有机硫化物, 苯系蒸汽芳香成分
4	S4	甲烷, 天然气, 沼气
5	S5	氨类
6	S6	苯类芳香成分, 丙酮, 乙醇, 氢气
7	S7	苯类芳香成分, 酒精, 丙酮
8	S8	甲烷, 天然气, 沼气
9	S9	氨类, 有机硫化物, 苯系蒸汽芳香成分
10	S10	氢气
11	S11	液化气, 甲烷
12	S12	甲烷
13	S13	可燃气体, 烟雾
14	S14	臭氧

### 1.3.4 SPME-GC-MS 检测条件

SPME 萃取条件: 将制备好的红芽芋样品破碎, 迅速称取 5 g 置于 20 mL 顶空瓶, 置于恒温加热磁力搅拌器水浴, 转速为 100 r/min, 将老化后的 50/30 μm DVB/CAR/PDMS Gray 萃取头插入顶空瓶密封垫, 在 80 °C 下平衡 5 min 后萃取 40 min 取出, 立即插入 GC 进样口, 解析 3 min。每组样品 3 个平行。

GC 条件: 毛细管色谱柱: TG-SQC 色谱柱 (15 m×0.25 mm×0.25 μm); 载气: 高纯度氦气, 流速 1.5 mL/min; 分流方式: 不分流进样; 升温程序: 起始温度 45 °C, 保持 2 min, 以 8 °C/min 的速度升至 120 °C, 5 °C/min 升至 130 °C, 15 °C/min 升至 250 °C, 保持 5 min; 进样口温度 250 °C。

MS 条件: 电离方式: 电子轰击源 (EI); 电子能量: 70 eV; 质量扫描范围:  $m/z$  30~500 u; 离子源温度: 230 °C; 传输线温度: 250 °C; 扫描方式: 全扫描监测模式。

### 1.3.5 SPME-GC-MS 定性与定量分析

定性方法: 通过人工解析并与 NIST 2014 标准谱库相匹配, 仅报道正反配比大于 800 或者有一个匹配度大于 900 (最大值为 1 000) 的化合物进行定性鉴定。

定量方法: 参考程华峰等<sup>[18]</sup>方法采用内标法定量, 以 2,4,6-三甲基吡啶 (TMP) 作内标物, 按公式

(1) 计算各挥发性物质的含量。

$$D = \frac{V_1 \times 0.2}{V_2 \times m} \times 1000 \quad (1)$$

式中:

$D$ ——挥发性风味物质浓度含量, ng/g;

$V_1$ ——挥发物的峰面积;

$V_2$ ——内标物的峰面积;

0.2——内标物的含量, μg;

$m$ ——测定样品的质量, g。

### 1.3.6 风味评价方法

用气味活度值 (Odor Activity Value, OAV)<sup>[19]</sup> 评价各化合物对总体风味的贡献, OAV 计算公式为:

$$OAV = \frac{C}{T} \quad (2)$$

式中:

OAV——气味活度值;

$C$ ——挥发性风味物质的浓度, ng/g;

$T$ ——挥发性风味物质的气味阈值, ng/g。

表3 不同蒸制时间红芽芋感官评定结果

Table 3 Sensory evaluation results of red bud taro at different steaming times

蒸制时间/min	硬度	糯性	黏液量	形状	色泽	气味	总分
5	5.70	4.40	5.20	11.90	6.20	6.30	39.70
10	8.60	8.50	8.60	11.20	12.90	11.90	61.70
15	11.60	11.10	10.50	11.90	18.20	17.50	80.80
20	9.00	11.40	9.10	9.30	16.20	16.60	71.60
25	7.10	10.30	8.00	7.60	14.70	16.80	64.50

## 1.4 数据处理

将感官评定和 SPME-GC-MS 所得数据采用 Excel 2016、Origin 8.5 软件分析数据并作图；电子鼻测试数据利用 SuperNose 型电子鼻内部自带的软件进行，包括主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）、线性判别分析（Linear Discriminant Analysis, LDA）。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同蒸制时间下红芽芋感官评价结果分析

由表 3 可见，不同蒸制时间对红芽芋的口感、黏液量、形状、色泽和气味皆有影响。蒸制 5~15 min 内，红芽芋样品感官评分随着蒸制时间的延长而升高，以蒸制 15 min 所得评分最高为 80.8 分，其感官特点在于芋片表面呈灰紫色，花纹呈淡黄色，形状完整，香味浓郁，硬度、糯性适中，各方面综合评分最佳。蒸制时长为 5 min 时，样品硬度较大，芋片尚未熟透，口感欠佳，各项评分较低。蒸制 10 min、25 min 时样品总体感官得分相近，分别为 61.7 和 64.5 分，蒸制 10 min 时芋片刚好熟，但香味不够浓郁，蒸制 25 min 时芋片香气最浓郁，但颜色变暗且表面明显塌陷，口感偏软，导致总体评分较低。蒸制 20 min 时，样品表面开始略有塌陷，口感和色泽也略逊于蒸制 15 min 的样品。

综上，蒸制时间过长与过短都会影响红芽芋的食用口感，故蒸制时间为 15 min 时红芽芋食用品质最佳。

### 2.2 电子鼻结果分析

#### 2.2.1 不同蒸制时间下红芽芋响应雷达图分析

不同蒸制时间红芽芋样品传感器响应雷达图见图 1。经过传感器的气体浓度越大，响应值越大<sup>[12]</sup>。从图中可知，蒸制时间为 0~25 min 内，红芽芋样品风味差异主要集中在 1、3、4、5、6、10、12 号传感器上，其中 1、3、4、10 号传感器区分能力较强，说明随着蒸制时间的延长，红芽芋样品所含苯类芳香成分、烷烃类物质、氢化物、丙酮、乙醇等挥发性风味物质含量逐渐增加，同时也说明电子鼻对不同蒸制红芽芋

风味区分效果较好，尤其在 10 号传感器上，对红芽芋的风味轮廓感知更敏感，区分效果最佳，表明红芽芋样品的氢化合物含量较高，气味较为突出。2、7、8、9、11 号传感器区分能力较弱且传感器响应值均接近 1，且随蒸制时间延长其响应值没有明显变化，表明红芽芋样品中存在的对应化合物（异丁烷、甲醛）含量较低。

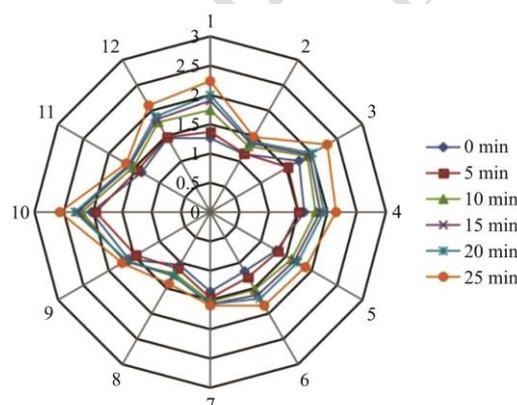


图1 不同蒸制时间红芽芋传感器响应雷达图

Fig.1 Radar response of red bud taro sensor at different steaming time

#### 2.2.2 不同蒸制时间下红芽芋挥发性风味物质主成分分析 (PCA)

PCA 是电子鼻通过传感器将所获得复杂气味信息转化成少数几个相互独立且包含原有指标大部分信息的综合指标<sup>[20]</sup>。由图 2 可以看出，红芽芋红样品的 PC1 和 PC2 贡献率分别为 84.074 3%、11.595 3%，总贡献率为 95.669 6%，表明样品干扰少，所得挥发性风味物质可代表总体的气味特征。区分指数 DI=-6.913 3%，表明不同蒸制时间的红芽芋样品既有明显的分离也有一定的重叠，且在 PC1 上呈现一定的变化趋势。其中，新鲜样品与其他 5 组样品明显区分，说明新鲜红芽芋经过蒸制加工后其挥发性风味物质种类和含量存在一定的差异。蒸制 10~20 min 时间内样品距离较近，且蒸制 10 和 15 min 红芽芋有重叠，说明它们气味差异不大，挥发性化合物种类和含量相似。25 min 红芽芋样品与其他样品距离较远，可能产生大量挥发性气味物质，综合感官评价可知 25 min 时红芽芋表面塌陷，口感偏软。因此，综合感官评估结果，

建议红芽芋蒸制时间为 15 min 为宜。

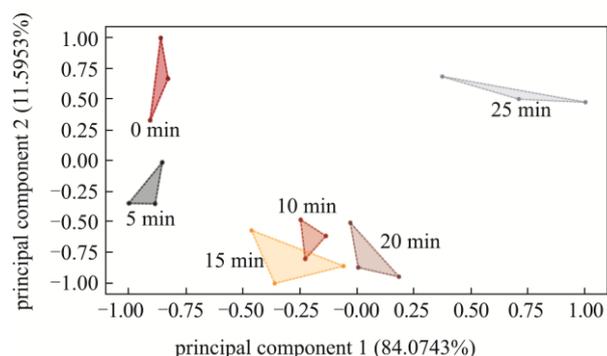


图 2 不同蒸制时间红芽芋主成分分析图

Fig.2 Principal component analysis of red bud taro at different steaming times

### 2.2.3 不同蒸制时间红芽芋挥发性风味物质线性判别分析 (LDA)

不同蒸制时间红芽芋线性判别分析如图 3。LDA 可敏锐察觉样品之间的气味差异，同时缩小同种样品之间的差异，扩大不同样品的差异，组间距离越大说明差异性越大<sup>[21]</sup>。LDA 与 PCA 同时使用以达到提高样品分类的准确性的目的。由图 3 可知，红芽芋样品的 LDA 总贡献率为 97.321 5%，略高于 PCA，LDA1 和 LDA2 贡献率分别为 92.877 4%、4.444 1%，可以代表样品大部分信息。新鲜样品与其他 5 组样品明显区分，说明新鲜红芽芋经过蒸制加工后产生了大量挥发性风味物质。蒸制 5 min 和 10 min 样品距离较近，可能由于蒸制时间较短，挥发性气味物质存在一定的相似。蒸制 10~25 min 样品在 LDA1 与 LDA2 均能明显区分，说明不同蒸制时间红芽芋样品存在差异，可以用电子鼻有效识别。

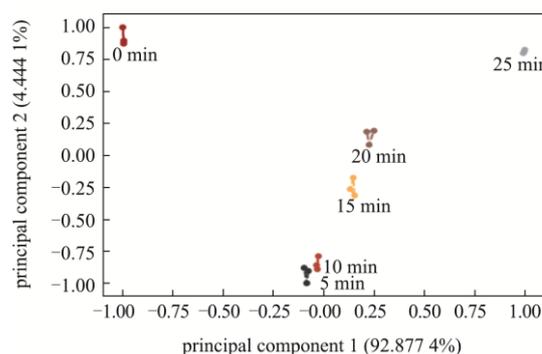


图 3 不同蒸制时间红芽芋 LDA 图

Fig.3 LDA diagram of red bud taro with different steaming time

### 2.3 红芽芋挥发性物质分析

在感官评价的基础上，采用 SPME-GC-MS 技术分析新鲜样品和蒸制 15 min 红芽芋挥发性成分，所得结果见表 4 和表 5。

2 组样品共鉴定出 85 种挥发性物质，其中，从新鲜样品和蒸制 15 min 红芽芋分别鉴定出 55 种、61 种。从化合物种类来看，与新鲜样品相比，蒸制 15 min 红芽芋总化合物种类明显增加，包括醛类、杂环类、烃类、酯类等。从化合物含量来看，2 组样品中醛类含量均最高，均占到各组样品总量的 45% 以上，说明红芽芋的挥发性风味物质主要来源于醛类。与新鲜样品相比，蒸制 15 min 红芽芋中醛类、烃类、酮类、杂环类含量均明显增加，醇类、酯类、酸类含量变化不大，表明蒸制加工可以有效提升红芽芋自身挥发性风味物质的种类和含量，从而赋予其特殊风味。

表 4 红芽芋挥发性物质类别、数量及含量比较

Table 4 Comparison of category, quantity and content of volatile substances in red bud taro

物质类别	新鲜样品			蒸制 15 min		
	数量	含量/(ng/g)	相对含量/%	数量	含量/(ng/g)	相对含量/%
醛类	7	51.97	46.94	11	191.39	54.63
醇类	17	25.46	23.00	13	25.25	7.21
酯类	6	3.23	2.92	7	7.12	2.03
酸类	2	2.29	2.07	1	0.27	0.08
烃类	21	23.26	21.01	25	108.48	30.96
酮类	1	4.18	3.78	1	15.71	4.48
杂环类	1	0.32	0.29	3	2.12	0.61
合计	55	110.71		61	350.34	

醛类具有青香、果香和甜香，阈值小，对总体特征风味起决定性作用<sup>[22]</sup>。由 5 表可知，与新鲜样品相比，蒸制加工后醛类含量明显增加，是其呈香物质主要来源。其中，具有果香、甜香和清香味味的壬醛

含量最高，占到总组分的 25.25%，可能是蒸制 15 min 红芽芋的特征风味物质。含量第二的癸醛呈脂肪香、甜瓜香，其嗅觉阈值较低，为 2 μg/kg<sup>[18]</sup>，对其风味有重要的贡献。辛醛和(Z)-2-壬烯醛的含量也较高，

分别呈清香、橙香和脂香、青香、甜瓜香,对风味也有一定的贡献。与鲜样相比,除十二醛和苯乙醛含量略有下降外,苯甲醛、(E)-2-辛烯醛、4-壬烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、十一醛的含量呈增加趋势,它们

共同赋予蒸制红芽芋浓郁的甜香和果香。醛类主要是高温蒸制过程中不饱和脂肪酸氧化裂解产生的,说明脂质氧化是生成红芽芋风味的重要途径,形成红芽芋特殊风味<sup>[23,24]</sup>。

表5 红芽芋挥发性化合物定性定量结果

Table 5 Qualitative and quantitative results of volatile compounds in red bud taro

物质类别	序号	保留时间/min	化合物名称	化合物含量/(ng/g)	
				新鲜样品	蒸制 15 min
醛类	1	10.01	苯甲醛	-	0.87
	2	11.98	辛醛	-	17.48
	3	13.76	苯乙醛	2.88	2.03
	4	14.50	(E)-2-辛烯醛	-	1.05
	5	16.22	4-壬烯醛	0.1	0.22
	6	16.70	壬醛	29.36	95.99
	7	18.95	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	-	0.17
	8	19.25	(Z)-2-壬烯醛	2.32	16.14
	9	21.42	癸醛	16.11	54.29
	10	25.97	十一醛	0.71	2.84
	11	38.38	十二醛	0.49	0.31
小计				51.97	191.39
醇类	12	6.10	(Z)-3-己烯-1-醇	0.71	-
	13	10.98	1-辛烯-3-醇	1.22	0.84
	14	15.03	2-癸-1-醇	0.52	0.75
	15	15.18	1-辛醇	-	2.53
	16	16.50	芳樟醇	7.84	4.75
	17	19.04	(Z)-3-壬烯-1-醇	1.16	-
	18	19.75	反式-2-十二烯-1-醇	1.97	-
	19	19.75	(E)-2-癸烯-1-醇	-	5.72
	20	19.88	1-壬醇	3.35	-
	21	19.88	1-十一烯醇	-	2.22
	22	20.65	松油醇	1.61	0.43
	23	24.46	1-十一烯醇	0.25	-
	24	24.67	反-2-十一烯醇	0.62	-
	25	33.94	2H-3,9a-甲醇-1-苯并氧杂环丁,八氢-2,2,5a,9-四甲基-[3R-(3,5aa,9a,9aa)]	3.49	4.16
	26	37.80	5-氮杂甲醇,1,2,3,4,5,6,7,8-八氢甲醇,至,3,8-四甲基乙基	0.7	1.15
	27	39.30	环己烷甲醇,4-乙烯基-4-三甲基-3-(1-甲基)	0.42	-
	28	39.30	立方醇	-	0.56
	29	39.69	表小叶醇	-	1
	30	40.04	(+)-异愈创木醇	0.77	0.76
	31	44.32	反式-9-十六烯-1-醇	0.27	-
	32	44.32	1-十六醇	-	0.39
	33	44.93	E,E,Z-1,3,12-十一碳三烯-5,14-二醇	0.02	-
	34	47.17	1-苯二十醇	0.53	-
	小计				25.46

续表 5

物质类别	序号	保留时间/min	化合物名称	化合物含量/(ng/g)		
				新鲜样品	蒸制 15 min	
酯类	35	33.79	1H-环丙烯,1a,2,3,5,6,7,7a,7b-八氢-1,1,4,7-四氢咪喃甲酯,[1aR-(1a,7a,7b)]	-	0.72	
	36	44.44	胡莫柳酯	-	0.95	
	37	44.45	原膜散酯	0.7	-	
	38	28.95	二乙基碳二硫代甲酸甲酯	0.47	-	
	39	43.08	水杨酸 2-乙基己酯	1.22	0.8	
	40	44.15	邻苯二甲酸庚-3-基异丁基酯	-	0.58	
	41	45.04	十六酸甲酯	0.2	-	
	42	45.58	邻苯二甲酸二丁酯	-	3.04	
	43	46.01	十六酸乙酯	0.33	-	
	44	47.17	1-甲酸苯二十酯	-	0.77	
	45	48.22	2-丙烯酸,3-(4-甲氧基苯基),2-乙基己基酯	0.31	0.27	
			小计	3.23	7.12	
	酸类	46	45.56	正十六酸	1.97	-
		47	48.11	十八酸	0.32	0.27
				小计	2.29	0.27
酮类	48	32.13	十一碳烯-2-酮,6,10-二甲基	-	15.71	
	49	32.14	(E)-5,9-十一烯-2-酮,6,10-二甲基	4.18	-	
			小计	4.18	15.71	
烃类	50	7.29	苯乙烯	-	0.6	
	51	9.72	丙基苯	0.09	-	
	52	12.73	1,2,3-三甲基-苯	0.15	-	
	53	13.08	D-柠檬烯	0.67	16.06	
	54	15.17	环丙烷,戊基	4.29	-	
	55	18.25	环丙烷,1-庚基-2-甲基	0.15	-	
	56	20.81	(E)-3-十二烯	0.16	-	
	57	21.19	十二烷	0.85	0.93	
	58	25.69	十三烷	-	1.17	
	59	28.87	(-)-Alpha-可巴烯	-	0.9	
	60	29.56	1,4a-二甲基-7-二甲基-1,2,3,4,4a,5,6,7-八氢萘甲腈	3.14	5.77	
	61	29.99	十四烷	1.93	6.09	
	62	30.68	石竹烯	0.24	-	
	63	32.38	十一碳烯	-	1.76	
	64	32.55	2,6,10-三甲基十三烷	0.53	0.54	
	65	32.69	乙基五甲基-苯	0.24	-	
	66	33.41	B-瑟林烯	0.49	2.08	
	67	34.07	十五烷	2.61	11.66	
	68	34.56	1S,4aR,8aS-1-异丙基-7-甲基-4-亚甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘	-	1.16	
	69	34.95	萘,1,2,3,5,6,8a-六氢-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙基)-萘	2.92	-	
	70	34.95	1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8a-h 异氢萘	-	41.53	
71	35.27	立方烯	-	0.31		

续表 5

物质类别	序号	保留时间/min	化合物名称	化合物含量/(ng/g)	
				新鲜样品	蒸制 15 min
烃类	72	35.49	1H-环丙烯,1a,2,3,4,4a,5,6,7b-八氢-1,1,4,7-四甲基环丙烯,[1aR-(1a <sup>4</sup> 4a <sup>4</sup> 7b <sup>4</sup> )]	0.33	1.16
	73	35.67	A-二去氢萜烯	-	1.87
	74	36.82	十五烷,3-甲基	0.15	0.56
	75	37.95	十六烷	2.21	7.09
	76	38.70	A-二去氢萜烯	-	0.57
	77	39.56	十五烷,2,6,10-三甲基	0.2	0.64
	78	46.08	二十烷	1.19	1.08
	79	40.90	十七烷	-	2.45
	80	43.14	十六烷,2,6,10,14-四甲基	-	0.59
	81	43.66	4,8,12-十四碳三烯,5,9,13-三甲基	-	1.09
	82	45.64	1,5,9-三甲基-12-(丙基-1-烯-2-基)环四十烷-1,5,9-三烯	0.72	0.82
	小计				23.23
杂环类	83	20.11	1H-茛,1-亚甲基	0.32	0.86
	84	26.19	2-甲氧基-4-乙炔基苯酚	-	0.91
	85	27.65	过氧吩,(3a <sup>4</sup> 6a <sup>4</sup> 9a <sup>4</sup> 9b <sup>4</sup> )	-	0.35
	小计				0.32

注：“-”表示未检出。下同。

醇类来源于氨基酸、脂肪酸氧化分解以及羰基化合物还原等,饱和醇类阈值较高对样品风味影响不大,少数不饱和醇类阈值较小,主要呈现蘑菇味、芳香味和土腥味<sup>[24,25]</sup>。与新鲜样品相比,蒸制 15 min 红芽芋醇类化合物种类和含量均减小,这可能是由于醇类在加热时脂肪酸氧化降解形成酮类或醛类化合物<sup>[26]</sup>。蒸制 15 min 红芽芋新增 1-辛醇、(E)-2-癸烯-1-醇、1-十一烯醇、表小叶醇、1-十六醇等醇类物质,说明蒸制加工有利于增加红芽芋挥发性化合物种类和含量。同时也有一些醇类含量减少,如蘑菇味的 1-辛烯-3-醇、花香的芳樟醇、脂香的松油醇等,说明红芽芋在蒸制过程中,有新的挥发性成分生成,但也有一定的损失,从而在不同程度上影响红芽芋的风味品质。

酯类物质是由醇类和羧酸类酯化反应产生的,短链脂肪酸与醇类物质生成的酯类呈果香味,而长链脂肪酸与醇类物质生成的酯类具有油脂味,其气味阈值较低,对风味有一定贡献<sup>[27]</sup>。仅在蒸制 15 min 红芽芋检出的邻苯二甲酸二丁酯是塑化剂的成分之一,可能是加工过程中包装材料带入所致,但其含量非常低,对风味不造成影响<sup>[23]</sup>。其他酯类化合物含量较低,对整体风味影响不大。

酮类化合物嗅觉阈值普遍高于同分异构体的醛类,它是醛类和脂肪酸氧化的产物,性质稳定、香味持久,主要贡献奶香、清香以及果香<sup>[24,25]</sup>。酸类化合

物多存在于发酵食品中,且挥发性较低,对食品整体的挥发性风味有微弱的调节作用<sup>[7]</sup>。本研究从新鲜样品和蒸制 15 min 样品中分别检出 2 种酯类和酮类,且含量较低,因此二者对红芽芋的风味影响不大。

烃类分为不饱和烃(芳香烃、烯烃)和饱和烃(烷烃),主要是由脂肪酸烷氧自由基均裂产生的<sup>[24]</sup>,烃类气味阈值较高,对整体气味贡献不大;但也有一些风味独特的烯烃,如 D-柠檬烯、苯乙烯等,赋予蒸制样品愉悦的新鲜橙子甜香、柠檬香<sup>[28]</sup>,对其风味有一定的影响。与新鲜样品相比,蒸制 15 min 红芽芋种类和含量明显增加,其中含量显著升高的是 1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8a-h 异氢萘,但由于烃类化合物气味阈值较高,故对样品整体风味影响不大。

杂环类一般是美拉德反应的产物,多呈炒香、坚果香味<sup>[29]</sup>。从新鲜样品和蒸制 15 min 红芽芋中分别检出 1 种、3 种杂环类,说明经过蒸制加工后红芽芋样品的杂环类种类和含量也是升高的。其中新增成分 4-乙炔基-2-甲氧基苯酚主要来源于木质素热降解以及酚羧酸化合物的脱羧作用,主要贡献木香、焦香以及烟熏味,但杂环类含量较低,对样品风味影响不大<sup>[30]</sup>。

## 2.4 红芽芋关键香气化合物分析

为明确各挥发性物质对食品体系香气的贡献程度,结合 OAV 值进一步确定红芽芋的关键香气化合物。当 OAV > 1 时,表示该物质对样品的总体风味贡

献呈正相关, 认定其为样品的关键香气物质,  $0.1 < OAV < 1$  时, 表示该物质对样品的总体风味起修饰作用,  $OAV < 0.1$  时, 表示该物质对样品的总体风味无实际影响<sup>[19]</sup>。根据参考书籍<sup>[31]</sup>及相关文献<sup>[22-24]</sup>中已报道的挥发性物质的气味阈值(阈值介质均在水中), 确定影响新鲜红芽芋的关键香气化合物共有 6 种, 分别为壬醛、癸醛、(Z)-2-壬烯醛、苯乙醛、1-辛烯-3-醇、芳樟醇, 十一醛、十二醛对其挥发性风味也有一

定贡献, 它们共同赋予其甜香、果香、蘑菇香等气味特征。蒸制 15 min 红芽芋关键香气化合物有 8 种, 分别为壬醛、癸醛、辛醛、(Z)-2-壬烯醛、苯甲醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、苯乙醛、D-柠檬烯, 1-辛烯-3-醇、芳樟醇、苯乙烯、十一醛、(E)-2-辛烯醛、十二醛对其风味也有较大贡献, 它们使蒸制红芽芋呈现出清香、甜香、果香和不同于新鲜红芽芋的脂香、清香、肉香等气味特征。

表 6 红芽芋挥发性物质 OAV 及气味特征

Table 6 Volatile OAV and odor characteristics of red bud taro

序号	化合物名称	阈值/(ng/g)	OAV 值		气味特征
			新鲜样品	蒸制 15 min	
1	壬醛	1.00	29.36	95.99	脂肪香、青香
2	癸醛	1.00	16.11	54.29	果香、甜香、花香
3	辛醛	0.70	-	24.97	青草味、油脂味
4	(Z)-2-壬烯醛	0.08	29	201.75	青香、蜡香、甜瓜香
5	苯甲醛	0.19	-	4.58	苦杏仁、樱桃及坚果香
6	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	0.06	-	2.83	肉香、烤香
7	苯乙醛	1.10	2.62	1.85	玫瑰、蜂蜜香
8	D-柠檬烯	10.00	0.07	1.61	柠檬香
9	1-辛烯-3-醇	1.00	1.22	0.84	蘑菇香
10	芳樟醇	6.00	1.31	0.80	麝香味
11	苯乙烯	-	-	0.60	脂香
12	十一醛	5.00	0.14	0.57	脂蜡香、玫瑰香
13	(E)-2-辛烯醛	3.00	-	0.35	坚果香、油味
14	十二醛	1.07	0.46	0.29	脂香
15	1-辛醇	100.00	-	0.03	蜡、青味
16	松油醇	330.00	<0.01	<0.01	清香、紫丁香、铃兰香
17	(Z)-3-己烯-1-醇	200.00	<0.01	-	青味、青草
18	1-壬醇	50.00	0.07	-	蔷薇香
19	石竹烯	64.00	<0.01	-	木质香

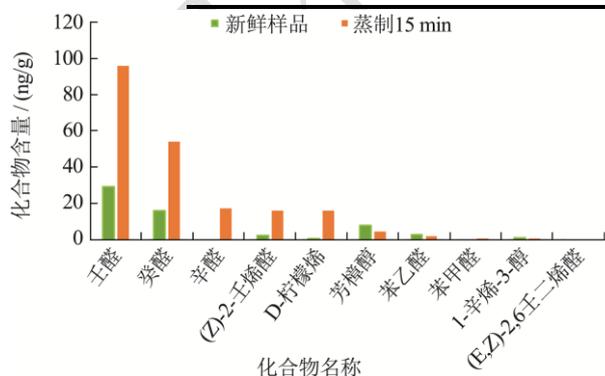


图 4 红芽芋关键挥发性风味物质含量变化图

Fig.4 Content changes of key volatile flavor substances of red bud taro

图 4 为新鲜样品和蒸制 15 min 红芽芋关键风味物质含量变化情况。由图 4 可见, 与新鲜样品相比, 蒸

制 15 min 红芽芋关键香气化合物种类和含量均有所增加, 其中, 壬醛、癸醛、辛醛、(Z)-2-壬烯醛、D-柠檬烯含量增加最为显著, 这可能是蒸制红芽芋风味品质优于新鲜红芽芋的主要原因。红芽芋挥发性风味物质和感官评价结果一致。

### 3 结论

本研究在感官评价和电子鼻基础上, 利用 SPME-GC-MS 技术对最佳蒸制时间下红芽芋挥发性风味物质进行研究, 并结合 OAV 明确其关键风味物质。结果表明, 蒸制 15 min 时红芽芋感官得分最高, 为 80.6 分。PCA 和 LDA 的总贡献率均大于 85%, 表明电子鼻可有效识别不同蒸制时间的红芽芋样品, 传感器 1、3、4、10 号区分能力较强, 即苯类芳香成分、

烷烃类、氯化物、丙酮、乙醇对红芽芋风味贡献较大。GC-MS 分析结果表明,从鲜样和蒸制 15 min 样品中分别鉴定出 55、61 种挥发性物质,其中醛类占各组样品总量 45% 以上,是其挥发性风味的主要来源。OAV 分析结果表明,影响红芽芋风味的挥发性物质有 19 种,其中醛类 10 种,醇类 6 种,烃类 3 种。新鲜样品关键风味物质为壬醛、癸醛、(Z)-2-壬烯醛、苯乙醛、1-辛烯-3-醇、芳樟醇;蒸制 15 min 样品关键风味物质为壬醛、癸醛、辛醛、(Z)-2-壬烯醛、苯甲醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、苯乙醛、D-柠檬烯,它们呈现出不同于新鲜红芽芋的脂香、清香、肉香等气味特征。研究结果为红芽芋的深加工和烹饪食用提供科学参考。

### 参考文献

- [1] 苏可珍,罗杨合,黎小椿,等.油炸时间对荔浦芋感官评价和电子鼻分析的影响[J].食品与机械,2020,36(6):56-59,74.
- [2] Thompson A K. Chemistry of tropical root crops: significance for nutrition and agriculture in the pacific [J]. Experimental Agriculture, 1990, 26(1): 1-201.
- [3] 程元珍.红芽芋品质分析及其芋泥的加工研究[D].合肥:合肥工业大学,2012.
- [4] 余志平,林海红,余俊红,等.铅山红芽芋产业发展概况[J].长江蔬菜,2016,20:34-36.
- [5] 苏可珍,罗杨合,李官丽,等.芋头挥发性风味物质的研究现状[J].食品工业,2020,41(4):230-233.
- [6] Zhu G Y, Xiao Z B, Zhou R J, et al. Preparation and simulation of taro flavor [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 187(10): 1733-1745.
- [7] 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.
- [8] Maga J A, Liu M B. Extruded taro (*Colocasia esculenta*) volatiles [J]. Thermally Generated Flavors, 1993: 365-369.
- [9] Wong K C, Chong F N, Chee S G. Volatile constituents of taro (*Colocasia esculents* (L) Schott) [J]. Journal of Essential Oil Research, 1998, 10(1): 93-95.
- [10] Ajarayasiri J, Chaiseri S. Aroma active compounds of Thai taro (*Colocasia esculenta* L) [C]// Food Innovation Asia Conference, 2008.
- [11] 李官丽,聂辉,苏可珍,等.基于感官评价和电子鼻分析不同蒸煮时间芋头挥发性风味物质[J].食品工业科技,2020,41(15):1-7,14.
- [12] 陈慧敏,李晓晗,王漪,等.基于电子鼻分析提香工艺对红茶香气特征的影响[J].食品工业科技,2019,40(18):234-237,242.
- [13] Macleod G. Combined gas chromatography-mass spectrometric analysis of the aroma components of cooked taro (*Colocasia esculenta* L.) [J]. Food Chemistry, 1990, 38(2): 89-96.
- [14] Yang W J, 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: 860-866.
- [15] 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.
- [16] Chen H Z, Zhang M, Guo Z M. Discrimination of fresh-cut broccoli freshness by volatiles using electronic nose and gas chromatography mass spectrometry [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 148: 168-175.
- [17] 苏可珍,黎小椿,聂辉,等.不同蒸制条件下荔浦芋的风味评价[J].食品工业,2020,41(10):185-189.
- [18] 程华峰,林琳,葛孟甜,等.3种生态环境中华绒螯蟹肉挥发性风味特征的比较[J].食品与发酵工业,2019,45(23):247-256.
- [19] 吴林,张强,臧慧明,等.气味活度值法评价蓝莓果皮、果肉、果汁挥发性香气成分[J].食品工业科技,2020,41(1):195-200.
- [20] 王沛,刘璇,毕金峰,等.基于主成分分析的中早熟苹果脆片品质评价[J].中国食品学报,2012,12(6):204-211.
- [21] 朱继梅,杨培强,邓云.宣威火腿在贮藏过程中风味和质构变化[J].上海交通大学学报(农业科学版),2019,37(3):55-60.
- [22] Zhu Y, Lv H P, Shao C Y, et al. Identification of key odorants responsible for chestnut-like aroma quality of green teas [J]. Food Research International, 2018, 108: 74-82.
- [23] 贡慧,杨震,史智佳,等.不同熬煮时间对北京酱牛肉挥发性风味成分的影响[J].食品科学,2017,38(10):183-190.
- [24] 吴丹璇,高子武,吴鹏,等.偏小二乘回归分析市售牛肉丸感官特性与挥发性风味化合物的关系[J].现代食品科技,2022,38(3):276-285.
- [25] 何嘉敏,于兰,于新,等.顶空固相微萃取-气质联用分析益生菌发酵复合果蔬汁挥发性成分[J].食品与发酵工业,2019,45(16):275-280.
- [26] 朱俊超,张成志,张增江,等.发酵时间对青稞全粉浆香气成分的影响[J].现代食品科技,2022,38(4):208-215.
- [27] 朱文政,严顺阳,徐艳,等.顶空固相微萃取-气质联用分析不同烹制时间红烧肉挥发性风味成分[J].食品与发酵工业,2021,47(2):247-253.
- [28] Fan H Y, Fan W L, Xu Y. Characterization of key odorants in chinechixiang aroma-type liquor by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, aromare- combination, and omission studies [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 3(14): 3660-3668.
- [29] 于文龙,郝楠,吴凯晋,等.HS-SPME-GC-MS-O 联用分析不同加工工艺亚麻籽油特征香气成分[J].食品科学,2019,40(18):266-272.
- [30] 王雪梅,孙文佳,李亚隆,等.不同产地鲜辣椒发酵郫县豆瓣的品质分析[J].食品科学,2020,41(10):213-221.
- [31] 里奥 范海默特.化合物香味阈值汇编[M].化合物香味阈值汇编,2015.