

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80735

# 蔡甸特色藕带的营养品质及风味特性 综合评价

张小敏<sup>1,2,3</sup> 丁 瑞<sup>1,2,3</sup> 吴艳刚<sup>4</sup> 吴正斯<sup>4</sup> 陈梦元<sup>1,2,3</sup>  
刘 言<sup>1,2,3</sup> 郭 小<sup>1,2,3</sup> 宫智勇<sup>1,2,3</sup>

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430048; 2. 武汉轻工大学大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 湖北 武汉 430048; 3. 武汉轻工大学湖北省农产品加工与转化重点实验室, 湖北 武汉 430048; 4. 武汉市蔡甸区公共检验检测中心, 湖北 武汉 430107)

**摘要:** [目的] 探究蔡甸特色藕带的营养品质及风味特性。[方法] 利用质构仪、电子鼻、固相微萃取—气相色谱—质谱 (SPME-GC-MS) 和气相色谱—离子迁移谱 (GC-IMS) 分析蔡甸主要莲藕品种“毛三节”“白玉簪 2 号”“鄂莲 5 号”3 种藕带的质构特性和挥发性有机物 (VOCs), 并结合主成分分析对 3 种藕带的营养品质进行综合评价。[结果] 3 种藕带的营养品质除了淀粉含量外均有显著性差异; 两个主成分累计贡献率为 92.612%, 可较好地反映藕带营养品质的综合信息, 综合得分排序第 1 的品种为白玉簪 2 号; 毛三节的质构特性优于其他两个品种; 3 种藕带的整体风味成分相似, 均含有较多的小分子挥发性有机物。毛三节和鄂莲 5 号的风味物质含量高于白玉簪 2 号; 经 SPME-GC-MS 和 GC-IMS 分析, 3 种藕带中检出 2-正戊基呋喃、苯乙醛和壬醛 3 种共有特征风味物质。3 种藕带的挥发性组分中醛类、酯类、酮类相对含量分别为 22.10%~30.06%, 19.76%~20.42%, 18.67%~24.47%, 为藕带风味的形成作出主要贡献, 其中醛类是最主要的挥发性化合物, 在藕带香气形成中发挥了关键作用。通过正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 共筛选出 17 种贡献较大的挥发性化合物。此外, 藕带的品质与风味之间存在一定的相关性。[结论] 蔡甸藕带营养丰富、香气独特, 具有广阔的市场前景。

**关键词:** 蔡甸藕带; 营养品质; 挥发性有机物; 综合评价

## Comprehensive evaluation of nutritional quality and flavor properties of Caidian characteristic lotus sprout

ZHANG Xiaomin<sup>1,2,3</sup> DING Rui<sup>1,2,3</sup> WU Yangang<sup>4</sup> WU Zhengsi<sup>4</sup> CHEN Mengyuan<sup>1,2,3</sup>  
LIU Yan<sup>1,2,3</sup> GUO Xiao<sup>1,2,3</sup> GONG Zhiyong<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430048, China;  
2. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil of Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430048, China;  
3. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan, Hubei 430048, China;  
4. Public Inspection and Testing Center of Caidian District, Wuhan, Hubei 430107, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the nutritional quality and flavor characteristics of the unique lotus sprout in Caidian. [Methods] A texture analyzer, electronic nose, solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS), and gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS) were used to analyze the textural properties and volatile organic compounds (VOCs)

基金项目: 湖北省标准化与质量研究院横向课题 (编号: whpu-2024-kj-4197)

通信作者: 宫智勇 (1966—), 男, 武汉轻工大学教授, 博士。E-mail: gongzyen@whpu.edu.cn

收稿日期: 2024-07-29 改回日期: 2025-01-20

引用格式: 张小敏, 丁瑞, 吴艳刚, 等. 蔡甸特色藕带的营养品质及风味特性综合评价[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 139-147.

Citation: ZHANG Xiaomin, DING Rui, WU Yangang, et al. Comprehensive evaluation of nutritional quality and flavor properties of Caidian characteristic lotus sprout[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 139-147.

of three primary lotus sprout varieties, *i.e.*, "Maosanjie", "Baiyuzan 2", and "Elian 5" in Caidian. The nutritional quality of these three lotus sprouts was comprehensively evaluated through principal component analysis. [Results] Significant differences were found in the nutritional quality of the three lotus sprout varieties, except for starch content. The cumulative contribution rate of the two principal components was 92.612%, effectively reflecting the comprehensive nutritional quality of the lotus sprouts. Baiyuzan 2 ranked first in terms of overall score. Maosanjie exhibited superior textural characteristics compared to the other two varieties. The overall flavor components of the three lotus sprouts were similar, with a higher content of small molecular volatile organic compounds. The flavor substance content in Maosanjie and Elian 5 was higher than that in Baiyuzan 2. Three common characteristic flavor compounds, 2-pentyl furan, phenylacetaldehyde, and nonanal, were detected in all three lotus sprout varieties using SPME-GC-MS and GC-IMS. The relative content of aldehydes, esters, and ketones in the volatile components of the three lotus sprouts ranged from 22.10% to 30.06%, 19.76% to 20.42%, and 18.67% to 24.47%, respectively, making significant contributions to the formation of the lotus sprout flavor. Aldehydes were the most prominent volatile compounds and played a key role in shaping the characteristic aroma of the lotus sprouts. Through orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), 17 volatile compounds with significant contributions were selected. Furthermore, a correlation between the quality and flavor of the lotus sprouts was found. [Conclusion] Caidian lotus sprout is rich in nutrition, has a unique aroma, and shows broad market prospects.

**Keywords:** Caidian lotus sprout; nutritional quality; volatile organic compounds; comprehensive evaluation

蔡甸位于长江和汉江交汇形成的三角地带,全区水域面积 100.32 km<sup>2</sup>,是武汉市主要水生蔬菜产区之一。蔡甸莲藕种植历史悠久,种植面积达 6 666.67 hm<sup>2</sup>[1],年产值达 21 亿元,是全国最大的县(市)级莲藕生产基地和销售基地。蔡甸莲藕具有独特品质,不仅外观长而丰满、质地白嫩、莲丝绵长,且味道香甜,脆嫩少渣,药补兼备,被武汉市列为优势品种。

藕带是莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)的幼嫩根状茎[2],与藕为同源器官,地下幼茎生长膨大后即为莲藕。藕带是湖北子莲和莲藕产区的主要水生蔬菜之一[3-4]。根据主要用途可将莲分为 3 类:子莲(也叫莲籽)、藕莲(也叫莲藕、荷藕等)和花莲(也叫莲花、荷花)。市场上的藕带主要来源为子莲,其次为藕莲。藕带因风味清新、口感爽脆和营养价值较高,深受国内消费者喜爱[5]。目前,关于藕带的研究主要集中在藕带保鲜[6]、护色[7-8]和生物活性物质提取[9-10]等方面,对藕带的营养品质关注度不够,且大多只针对藕带的营养成分变化进行研究,未对藕带的营养物质进行系统分析,有关藕带的风味物质尚未见报道。

固相微萃取—气相色谱—质谱联用(SPME-GC-MS)和电子鼻技术被广泛用于食品中挥发性风味物质分析。电子鼻可识别食品中整体挥发性物质差异,SPME-GC-MS 可对挥发性物质进行高灵敏度的定性和定量分析[11-12]。GC-IMS 作为一种新型气相分离检测技术,兼具 GC 的高分离能力和 IMS 的高分辨、高灵敏度,且样品几乎不需要前处理,被广泛应用至食品风味分析中[13-14]。但是目前利用 SPME-GC-MS、电子鼻和 GC-IMS 协同对藕带风味物质的研究尚未见报道。研究拟对蔡甸主要莲藕品种“毛三节”“鄂莲 5 号”“白玉簪 2 号”3 种藕带的主要营养成分进行检测,利用 SPME-GC-MS、GC-IMS 和电子鼻对藕带挥发性有机物(VOCs)进行检测分析,并综合评

价其营养品质,为蔡甸藕带的开发和综合利用提供依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与amp;仪器

#### 1.1.1 材料与amp;试剂

鲜藕带:毛三节(MSJ)、白玉簪 2 号(BYZ)、鄂莲 5 号(E5),每个品种随机采挖不少于 5 支藕带样本,挑选大小相近、成熟度一致、无病虫害的藕带,武汉民食为天食品有限公司蔡甸莲藕种植基地采集;

环己酮:GC>99.5%,阿拉丁生化科技股份有限公司;

*n*-酮(C<sub>4</sub>~C<sub>9</sub>):色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;

淀粉含量测定试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;

没食子酸、芦丁、无水葡萄糖:HPLC≥98%,上海源叶生物科技有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

手持色度仪:SR-64 型,深圳三恩时科技有限公司;

物性分析仪:TMS-Pro 型,美国 FTC 公司;

电子鼻:cNose-28 型,上海保圣实业发展有限公司;

气相色谱—质谱联用仪:7890A-5975C 型,美国 Agilent 公司;

气相色谱—离子迁移谱:FlavourSpec®型,德国 G.A.S. 公司。

### 1.2 方法

1.2.1 样品前处理 采收当天挑选完整、无机械损伤的藕带,用自来水清洗表皮淤泥后用超纯水冲洗 2~3 次,冻干,于 -80 °C 冰箱贮藏备用。

1.2.2 水分含量测定 按 GB 5009.3—2016 执行。

1.2.3 粗纤维含量测定 按 GB/T 5009.10—2003 执行。

1.2.4 总酚含量测定 按 T/NAIA 097—2021 执行。

1.2.5 蛋白质含量测定 按 GB 5009.5—2016 执行。

1.2.6 淀粉含量测定 按试剂盒说明书进行检测。

1.2.7 总糖含量测定 采用苯酚—硫酸法<sup>[15]</sup>,绘制葡萄糖标准曲线方程,并按式(1)计算总糖含量。

$$W = \frac{m_1 \times V_1}{m_2 \times V_2} \times 0.9 \times 10^{-4}, \quad (1)$$

式中:

$W$ ——总糖含量, g/100 g;

$m_1$ ——根据标准曲线计算的样本溶液的含糖量,  $\mu\text{g}$ ;

$V_1$ ——样本溶液定容体积, mL;

$m_2$ ——样本质量, g;

$V_2$ ——试管中样本溶液体积, mL;

0.9——校正系数(葡萄糖换算葡聚糖)。

1.2.8 白度测定 采用手持色差仪测定3组藕带表皮的色泽,并按式(2)计算白度。

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}, \quad (2)$$

式中:

$W$ ——白度;

$L^*$ ——明暗度;

$a^*$ ——红绿度;

$b^*$ ——黄蓝度。

1.2.9 质构特性测定 参照Ding等<sup>[16]</sup>的方法并修改。采用TPA模式, P36探头,力量感应元1 000 N,受压形变35%,检测速度60 mm/min,最大感应力1.5 N。将高度1 cm的藕带置于探头正下方,测定样品的硬度、内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性。

1.2.10 主成分分析 参照杨银爱等<sup>[17]</sup>的方法。

1.2.11 电子鼻分析 将藕带用榨汁机打碎,称取5 g至50 mL顶空瓶中,加入3 mL饱和氯化钠,60 °C孵育10 min。传感器清洗时间80 s,进样时间80 s,气体流速1 L/min。

1.2.12 SPME-GC-MS检测 参照Qian等<sup>[18]</sup>的方法并修改。称取3 g捣碎的样品于20 mL顶空进样瓶中,分别加入3 mL饱和氯化钠溶液,5  $\mu\text{L}$  0.094 7 g/mL的环己酮内标物。60 °C孵育20 min,将老化的SPME萃取头插入顶空瓶中,萃取挥发性化合物30 min后进行GC-MS分析。GC条件:HP-5MS色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ );不分流模式;升温程序:40 °C保持2 min,以5 °C/min升温至140 °C保持2 min;以10 °C/min升温至190 °C保持2 min;以5 °C/min升温至240 °C保持2 min;载气为氦气(纯度 $\geq$ 99.999%),进样口温度250 °C。MS条件:电子电离源,电子能量70 eV;离子源温度250 °C;传输线温度250 °C;全扫描模式,质量扫描范围 $m/z$  40~400。定性:采用NIST 2011 MS谱库检索,选取匹配度 $>$ 800的化合物定性鉴定。定量:采用内标法计算各挥发性物质的绝对含量,并按式(3)计算化合物含量。

$$C_i = \frac{C_{IS} \times V_{IS} \times A_i}{m_i \times A_{IS}}, \quad (3)$$

式中:

$C_i$ ——未知化合物含量,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;

$C_{IS}$ ——内标化合物浓度,  $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ ;

$V_{IS}$ ——内标化合物体积,  $\mu\text{L}$ ;

$A_i$ ——未知化合物峰面积,  $\text{AU} \cdot \text{min}$ ;

$m_i$ ——试样质量, g;

$A_{IS}$ ——内标化合物峰面积,  $\text{AU} \cdot \text{min}$ 。

1.2.13 GC-IMS检测 称取3 g捣碎的样品于20 mL顶空进样瓶中,加入3 mL饱和氯化钠,60 °C孵化20 min。仪器条件:柱温60 °C;载气为高纯氮(纯度 $\geq$ 99.999%);分析时间30 min;IMS温度45 °C。自动顶空进样,进样体积500  $\mu\text{L}$ ,孵化转速500 r/min,进样针温度70 °C。载气流速程序见表1。

表1 载气流速程序

Table 1 Carrier gas velocity program

时间/min	漂移气 $E_1/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	载气 $E_2/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$
0	150	1
2	150	1
6	150	5
12	150	10
20	150	100
300	150	150

### 1.3 数据处理

采用Excel 2019软件进行数据处理,采用Origin 2021软件绘图,采用SPSS 19软件进行单因素方差分析和主成分分析。GC-IMS数据处理采用仪器配套的Laboratory Analytical Viewer分析软件和插件Reporter、Gallery Plot以及GC $\times$ IMS Library Search对图谱进行差异分析,通过比对NIST气相保留指数数据库与IMS迁移时间数据库对物质进行定性分析。利用SIMCA 14.1软件进行正交偏最小二乘判别分析,计算预测变量重要性投影(VIP)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种藕带的主要营养成分

由表2可知,藕带中水分含量极高(94.79%~95.75%),占鲜重的90%以上,其中白玉簪2号的水分含量最高,达95.68%,显著高于其他两种藕带( $P < 0.05$ )。淀粉是由绿色植物产生的,用于长期储存能量,淀粉颗粒主要存在于种子、根和块茎中。3个品种藕带中淀粉含量无显著差异,其中鄂莲5号的淀粉含量最高。粗纤维是衡量果蔬的一个重要指标<sup>[19]</sup>,有维持消化系统健康、降低胆固醇和血压等生物活性。白玉簪2号的粗纤维含量为0.33%,显著高于鄂莲5号( $P < 0.05$ )。总糖是果蔬甜味的

表 2 蔡甸特色品种藕带的主要营养成分含量<sup>†</sup>

Table 2 Main nutrient content of Caidian characteristic lotus sprout

品种	水分/%	淀粉/(mg·g <sup>-1</sup> )	粗纤维/%	总糖/%	总多酚/(mg·g <sup>-1</sup> )	蛋白质/(10 <sup>-2</sup> g·g <sup>-1</sup> )
毛三节	94.94±0.11 <sup>a</sup>	8.51±0.25	0.31±0.01 <sup>ab</sup>	1.39±0.05 <sup>a</sup>	0.99±0.02 <sup>b</sup>	0.61±0.02 <sup>a</sup>
白玉簪 2 号	95.68±0.06 <sup>a</sup>	8.69±0.14	0.33±0.02 <sup>a</sup>	1.20±0.08 <sup>b</sup>	1.08±0.01 <sup>a</sup>	0.45±0.03 <sup>b</sup>
鄂莲 5 号	95.08±0.09 <sup>b</sup>	8.85±0.19	0.29±0.01 <sup>b</sup>	1.38±0.02 <sup>a</sup>	0.94±0.01 <sup>b</sup>	0.48±0.02 <sup>b</sup>

† 同列小写字母不同表示品种间差异显著(P<0.05)。

重要决定因素,在促进果蔬甜味的过程中起到重要作用,毛三节和鄂莲 5 号的总糖含量分别为 1.39% 和 1.38%,显著高于白玉簪 2 号(P<0.05)。多酚是果蔬中重要的抗氧化物质,可以提高果蔬的抗病性,多酚遇到氧气被氧化后会产生酶褐变形成色素,使藕带果肉亮度下降,白玉簪 2 号的多酚含量较高,达 1.08 mg/g,显著高于其他两种藕带(P<0.05)。蛋白质是人类最重要的常量营养素,能够调

节人体机能,毛三节的蛋白质含量为 0.61 g/100 g,显著高于其他两种藕带(P<0.05)。

2.2 不同品种藕带的色度及质构特性

由表 3 可知,藕带的白度值为 58.90~64.07,其中白玉簪 2 号和鄂莲 5 号的白度值分别为 63.21 和 64.07,显著高于毛三节的(P<0.05),表明白玉簪 2 号和鄂莲 5 号藕带有明亮光泽,毛三节的色泽偏暗。

表 3 蔡甸特色品种藕带色度和质构特性<sup>†</sup>

Table 3 Colorimetric and textural properties of Caidian characteristic lotus sprout

品种	白度	硬度/N	黏附性/(N·mm)	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/(N·mm <sup>-1</sup> )
毛三节	58.90±1.95 <sup>b</sup>	74.09±18.10	0.05±0.01 <sup>b</sup>	0.18±0.05 <sup>a</sup>	1.58±0.09 <sup>b</sup>	11.95±2.25	16.81±4.15
白玉簪 2 号	63.21±2.78 <sup>a</sup>	70.59±24.52	0.08±0.02 <sup>b</sup>	0.13±0.05 <sup>b</sup>	1.59±0.14 <sup>b</sup>	9.73±3.68	16.12±5.57
鄂莲 5 号	64.07±1.27 <sup>a</sup>	71.63±7.18	0.14±0.06 <sup>a</sup>	0.10±0.01 <sup>b</sup>	1.77±0.10 <sup>a</sup>	9.55±1.34	16.93±2.75

† 同列小写字母不同表示品种间差异显著(P<0.05)。

质地是果蔬最重要的品质特征之一。根茎类食品的硬度与其淀粉含量密切相关,而胶黏性与硬度呈正相关,这两者均能有效提升食物蒸煮后的口感。食物的咀嚼性越大,所需的能量消耗也越大,因此,咀嚼性大,会影响食物的口感<sup>[20]</sup>。3 种藕带中毛三节的硬度大、黏附性小、胶黏性大、咀嚼性适中,在鲜食状态下有较好的食用品质。

2.3 不同品种藕带营养成分的主成分分析

由表 4 可知,第一、二主成分贡献率分别为 56.584% 和 36.028%,累计贡献率为 92.612%,且特征值均>1,表示能代表样品的主要信息特征。第一主成分贡献率最大的是水分含量,系数为 0.979,第二主成分贡献率最大的是淀粉含量,系数为-0.950。综上,水分和淀粉含量可以作为综合评价藕带营养品质的指标。

通过特征值、因子载荷矩阵、主成分得分对 3 种藕带的营养成分进行综合评价,结果见表 5。由表 5 可知,白玉簪 2 号的综合得分最高,其次为毛三节和鄂莲 5 号。

2.4 不同品种藕带的挥发性物质电子鼻分析

由图 1(a)可知,3 种藕带的雷达谱图具有相似的变化趋势和形状,说明其挥发性物质的组成主体风味成分相近。所有样品对短链烷烃(sensor 1 & 14)、含氮类(sensor 5)、醛酮类(sensor 6)和烷烃类醇类、酮类(sensor 9)的响应值较大,表明该类物质浓度较高。由图 1(b)可知,PC1、

表 4 因子载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 4 Factor loading, eigenvalues, and variance contribution rates of principal components

指标	因子 1	因子 2
水分	0.979	-0.053
淀粉	0.311	-0.950
粗纤维	0.718	0.696
总糖	-0.996	0.093
总多酚	0.884	0.467
蛋白质	-0.579	0.815
特征值	3.718	2.282
方差贡献率	56.584	36.028
累计方差贡献率	56.584	92.612

表 5 不同品种藕带营养成分综合得分

Table 5 Comprehensive scores of nutritional composition in different varieties of lotus sprout

品种	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F
毛三节	-0.834	0.528	-0.306
白玉簪 2 号	1.369	0.083	1.452
鄂莲 5 号	-0.534	-0.612	-1.146



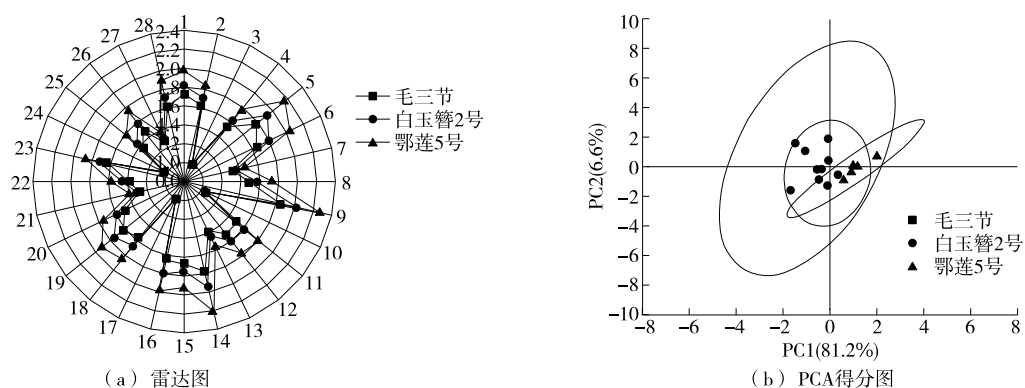


图1 不同品种藕带的电子鼻分析

Figure 1 E-nose analysis of different varieties of lotus sprout

PC2 分别占总方差的累计贡献率为 87.8%,说明 PC1 和 PC2 能反映 3 种藕带的大部分信息特征<sup>[21]</sup>。3 种藕带的轮廓相近,并有一定程度的重叠,说明三者的风味较相似,与雷达图结果一致。

### 2.5 不同品种藕带的挥发性物质 SPME-GC-MS 分析

采用 SPME-GC-MS 测定 3 种藕带的挥发性物质,共检出 18 种 VOCs,其中共有化合物 6 种,分别为 2-正戊基呋喃、苯乙醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛、癸醛和十五烷。这些风味物质基本上代表了藕带的典型风味特征,说明藕带的呈香风味并不是由单一一种物质决定的,而是由多种物质共同起作用。由表 6 可知,3 种藕带中主要挥发性风味物质种类和含量之间存在明显差异,鄂莲 5 号中检出 12 种 VOCs,为 3 种藕带中含有挥发性化合物最多的样品,其次是毛三节、白玉簪 2 号。

醛类是藕带的主要风味化合物,相对含量为 77.01%~84.85%,与韩丽娟等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。醛类物质的产生主要源于脂肪的氧化和降解,一些带支链的醛也可由氨基酸的 Strecker 降解反应生成<sup>[23]</sup>。醛类的气味阈值较低,对藕带的整体风味有重要贡献。毛三节、白玉簪 2 号和鄂莲 5 号中分别检出 6, 5, 7 种醛类化合物,相对含量分别为 77.01%, 74.56%, 84.85%。苯乙醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛和癸醛是 3 种藕带的共有醛类物质。壬醛主要为藕带贡献花香和柑橘类水果香气<sup>[24]</sup>, 3 种藕带中壬醛含量为 89.77~129.99  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,在所有醛类物质中占主导地位;苯乙醛具有类似风信子的香气,稀释后具有水果的甜香气, 3 种藕带中苯乙醛含量差异显著( $P < 0.05$ ),鄂莲 5 号的苯乙醛含量最高为 22.57  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,其次为白玉簪 2 号、毛三节;(E)-2-辛烯醛呈脂肪和肉类香气,鄂莲 5 号中(E)-2-辛烯醛含量为 15.16  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,显著高于其他两种藕带( $P < 0.05$ );癸醛赋予藕带脂肪香和甜瓜香。

酮类是脂肪氧化产物,具有奶油及果香等气味特征,对食品风味贡献较大。毛三节和白玉簪 2 号藕带中检出苯乙酮,含量分别为 8.83, 9.40  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,鄂莲 5 号藕带中未

表 6 SPME-GC-MS 测定不同品种藕带的挥发性物质种类及含量<sup>†</sup>

Table 6 Determination of volatile substances and content in different varieties of lotus sprout by SPME-GC-MS

化合物	保留时间/min	化合物含量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		
		毛三节	白玉簪 2 号	鄂莲 5 号
苯甲醛	10.90	—	—	32.16±3.39
2-正戊基呋喃	11.67	12.94±1.62 <sup>b</sup>	18.43±0.10 <sup>a</sup>	16.32±1.77 <sup>a</sup>
正辛醛	11.99	13.49±2.02	—	—
苯乙醛	13.29	4.60±1.31 <sup>c</sup>	11.45±1.04 <sup>b</sup>	22.57±2.50 <sup>a</sup>
(E)-2-辛烯醛	13.65	6.16±1.74 <sup>b</sup>	8.83±1.06 <sup>b</sup>	15.16±1.93 <sup>b</sup>
苯乙酮	13.29	8.83±2.34	9.40±1.12	—
壬醛	15.03	90.07±5.98 <sup>b</sup>	89.77±15.59 <sup>b</sup>	129.99±7.72 <sup>a</sup>
反-2-壬醛	17.10	—	—	17.85±2.99
萘	18.25	—	8.05±1.54	8.75±0.42
癸醛	19.08	12.80±2.18	15.67±1.45	17.95±3.41
1,3-二叔丁基苯	21.53	—	—	11.400±1.90
新癸酸	22.44	—	—	11.86±2.16
正十四烷	31.00	5.50±0.29	—	—
十五烷	39.32	10.39±1.80	12.34±2.47	13.40±0.48
正十七烷	50.51	5.93±1.84	—	—
十五醛	51.03	18.89±2.04	15.56±4.03	—
十四烷醛	51.07	—	—	34.59±4.66
邻苯二甲酸二丁酯	57.95	—	16.29±0.68	—

<sup>†</sup> 同列小写字母不同表示品种间差异显著( $P < 0.05$ );“—”表示未检出。

检出。苯乙酮可能是毛三节和白玉簪 2 号品种藕带特有的风味。

酯类化合物主要为藕带贡献花香以及水果香气<sup>[25]</sup>, 3 种藕带中仅在白玉簪 2 号中检出邻苯二甲酸二丁酯,可能为白玉簪 2 号特有的风味成分。烷烃类化合物主要来

自烷氧自由基的分解,但烷烃类具有较高的阈值,对藕带的风味影响较小<sup>[26]</sup>。呋喃化合物通常被认为是美拉德反应产物<sup>[27]</sup>。

### 2.6 不同品种藕带的挥发性物质 GC-IMS 分析

利用 GC-IMS 对不同藕带样品中挥发性物质进行分析得到 GC-IMS 二维俯视图(图 2),为了更直观地反映不同品种藕带的挥发性物质差异,生成 GC-IMS 二维平面差异谱图(图 3)。选择毛三节组作为参考,扣除其他谱图中的信号峰。毛三节组与鄂莲 5 号组的 VOCs 差异较大,毛三节组与白玉簪 2 号组的差异较小。不同品种藕带在 GC-IMS 谱图上的出峰位置、数量大致相同,与电子鼻结果一致。

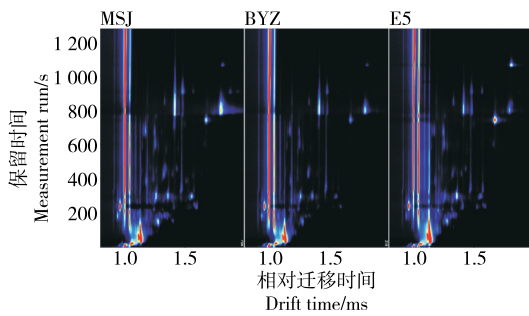


图 2 不同品种藕带的 GC-IMS 二维谱图俯视图

Figure 2 Top view of GC-IMS two-dimensional spectra of different varieties of lotus sprout

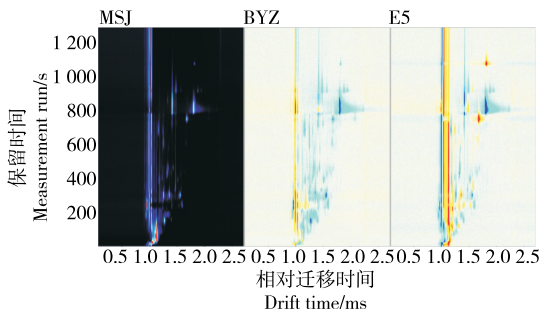


图 3 不同品种藕带的 GC-IMS 二维谱图差异对比图

Figure 3 Comparison of difference in GC-IMS two-dimensional spectra of different varieties of lotus sprout

GC-IMS 在 3 种藕带中共检出 53 种 VOCs(包括单体和二聚体),其中有 6 种物质未被定性。检出物质中含醛类 13 种、酯类 11 种、醇类 6 种、酮类 10 种、酸类 2 种、醚类 1 种、烷烃类 1 种和其他类化合物 3 种。由图 4 可知,3 种藕带中种类较多的挥发性化合物为醛类、酯类和酮类,相对含量分别为 22.1%~30.06%, 19.76%~20.42%, 18.67%~24.47%,其中醛类是最主要的挥发性化合物,在藕带香气形成中发挥关键作用,与 GC-MS 的结果一致。

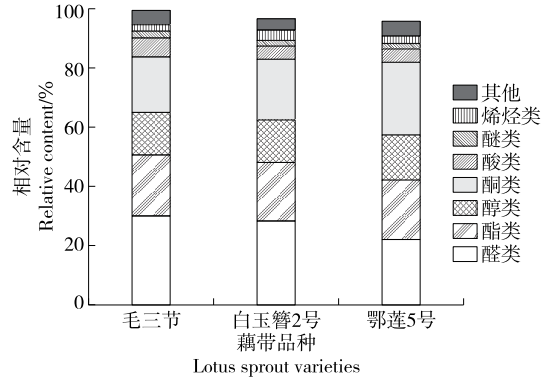


图 4 GC-IMS 挥发性组分分类占比

Figure 4 Classification proportion of volatile components by GC-IMS

图 5 以指纹图谱的形式显示了 3 种藕带中所含具体 VOCs 的含量信息,可以更加直观地体现不同藕带样品间的挥发性化合物差异。由图 4 可知,A 区域中 VOCs 在毛三节、白玉簪 2 号和鄂莲 5 号中含量相近,主要分为醛类、酯类和酮类。醛类和酯类香气阈值较低,在含量较少的情况下也能对藕带的整体风味做出重要贡献。丁酸丁酯、正壬醛、正辛醛、正己醛、2,3-丁二醇在 3 组样品中的离子峰均处于较高水平,为藕带贡献了香蕉、甜橙和玫瑰芳香<sup>[28-29]</sup>。B 区域中毛三节和鄂莲 5 号的 VOCs 含量较高,含量最高的 3 种化合物为 3-戊酮、2-正戊基呋喃和乙偶姻,赋予藕带奶油香和坚果香<sup>[30]</sup>。C 区域中毛三节的 VOCs 含量较高,主要为酸类和酮类,含量最高的为丙酸和甲基庚烯酮,为藕带贡献了柠檬草芳香<sup>[31]</sup>。D 区域中鄂莲 5 号的 VOCs 含量较高,主要分为酯类和酮类。E 区域中的挥发性物质在白玉簪 2 号中的离子峰强度较为突出,仅有一种检出物质 2-己酮。

### 2.7 基于 GC-IMS 的 OPLS-DA

结合 SPME-GC-MS 和 GC-IMS 结果分析得出藕带中挥发性化合物多以小分子化合物为主。为揭示不同品种藕带中挥发性化合物的差异,对 GC-IMS 中筛选出的挥发性化合物进行 OPLS-DA 分析。自变量拟合指数  $R_x^2$  为 0.934,因变量拟合指数  $R_y^2$  为 0.964,  $Q^2$  为 0.994,  $R^2$ 、 $Q^2$  均  $> 0.5$  表示模型拟合可接受,越接近 1 表示预测能力越强。经 200 次置换检验,分析结果中  $Q^2$  与纵轴的相交点  $< 0$  [图 6(a)],说明模型有效,不存在过拟合,认为该结果可用于 3 种藕带的风味鉴别分析。

VIP 值反映了变量贡献度,  $VIP > 1$  表明该变量对整体判别模型的贡献度高<sup>[32]</sup>,VIP 值越大表示关键标志物在 3 种藕带中的差异越显著。筛选  $VIP > 1$  的化合物作为差异挥发性化合物。在 GC-IMS 结果中,筛选出 17 种对藕带贡献较大的风味物质[图 6(b)],其中 VIP 值最大的化合物为辛醛,是最重要的区别因素。

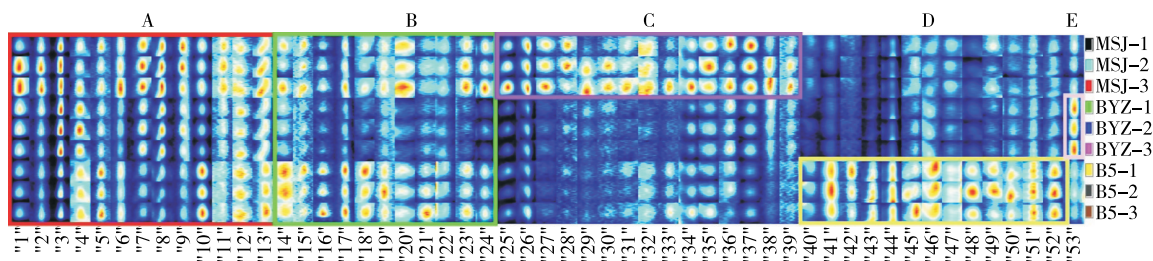


图5 不同品种藕带的GC-IMS指纹图谱

Figure 5 GC-IMS fingerprints in different varieties of lotus sprout

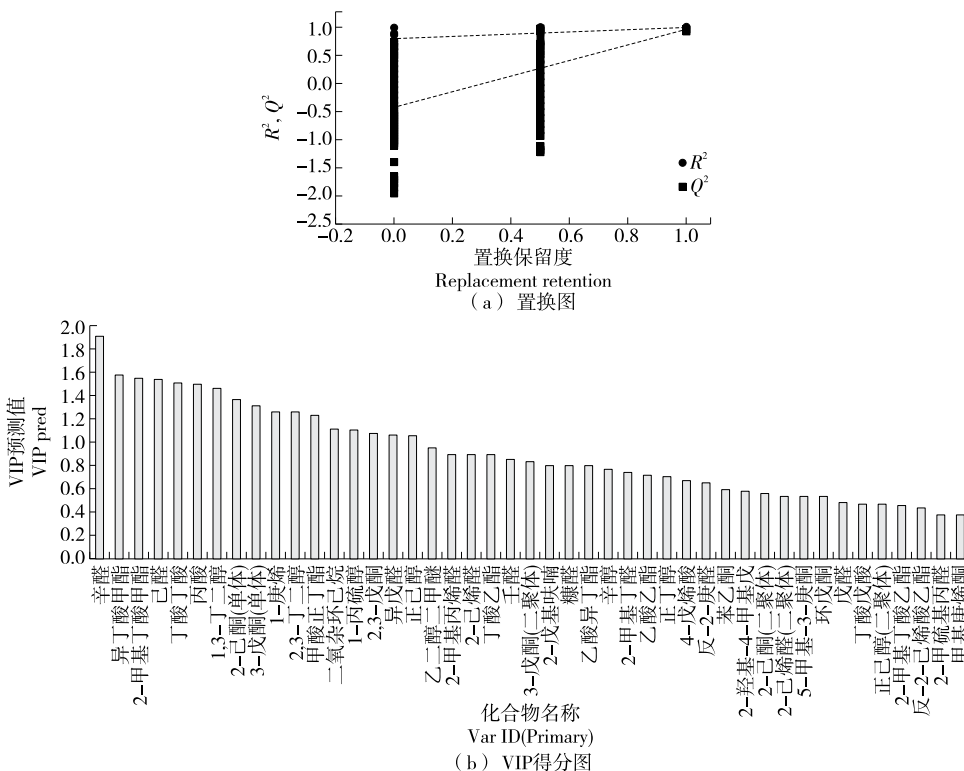


图6 基于GC-IMS不同品种藕带的OPLS-DA

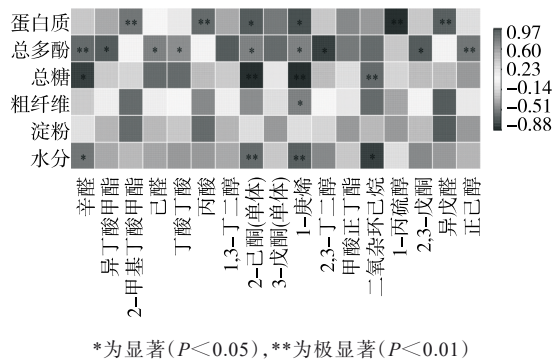
Figure 6 OPLS-DA in different varieties of lotus sprout based on GC-IMS

### 2.8 3种藕带中挥发性化合物与主要营养成分的相关性

由图7可知,蛋白质与2-己酮、1-庚烯,总多酚与异丁酸甲酯、2,3-丁二醇、2,3-戊二酮,总糖与辛醛,水分与二氧杂环己烷呈显著负相关;蛋白质与1-丙硫醇,总糖与2-己酮、1-庚烯呈极强负相关( $r < -0.8$ )。总多酚与己醛、丁酸丁酯、2-己酮、1-庚烯,粗纤维与1-庚烯,水分与辛醛呈显著正相关;蛋白质与2-甲基丁酸甲酯、丙酸、异戊醛,总多酚与辛醛、正己醇,水分与2-己酮、1-庚烯呈极强正相关( $r > 0.8$ )。表明藕带的挥发性化合物与营养品质密切相关。

### 3 结论

结合营养成分、色度、质构特性和风味物质对蔡甸特



\*为显著( $P < 0.05$ ),\*\*为极显著( $P < 0.01$ )

图7 藕带中挥发性化合物与营养品质的相关性热图

Figure 7 Correlation heatmap of volatile compounds in lotus sprout with nutritional quality

色藕带进行了营养品质及风味特性综合评价分析。结果表明,毛三节藕带的总糖、蛋白质含量最高,白玉簪 2 号的水分、总多酚含量最高,3 种藕带的淀粉含量无显著差异。白玉簪 2 号和鄂莲 5 号的色泽更好,毛三节有更好的食用品质。通过对藕带的营养品质进行主成分分析并进行综合排序可知,白玉簪 2 号的营养品质最优。藕带中挥发性物质以小分子有机化合物为主,3 种藕带的化合物类别总体相似,但含量有较大差异,其中毛三节和鄂莲 5 号的风味物质含量高于白玉簪 2 号。醛类、酯类、酮类形成了藕带的主要风味。结合 OPLS-DA 筛选出 17 种特征风味化合物,其中辛醛对藕带的风味贡献度最高。经过相关性分析发现,藕带的挥发性化合物与营养品质关系密切,可通过部分挥发性化合物含量反映藕带的品质。由于目前 NIST 数据库在藕带风味领域的数据还不完善,GC-IMS 只定性出 53 种挥发性化合物,还有 6 种未被定性检出,需要进一步检测其他不同品种藕带的风味物质,扩充藕带风味物质数据库,为构建藕带风味物质提供数据基础。同时在后续的研究中,可进一步结合 GC-嗅闻、矿物质元素等技术,为蔡甸藕带的品质评定提供客观依据。

### 参考文献

- [1] 裴娟娟, 杨惠, 陈玲. 超高效液相色谱—串联四极杆质谱法测定蔡甸莲藕中吡虫啉含量的不确定度评定[J]. 实验室检测, 2024(1): 10-16.  
PEI J J, YANG H, CHEN L. Uncertainty evaluation for the determination of imidacloprid in Caidian lotus root by ultra performance liquid chromatography-tandem quadrupole mass spectrometry[J]. Laboratory Testing, 2024(1): 10-16.
- [2] 刘义满, 柯卫东, 钟兰, 等. 湖北地区的藕带产业及其栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2011(7): 47-49.  
LIU Y M, KE W D, ZHONG L, et al. Lotus root industry and its cultivation techniques in Hubei province[J]. China Vegetables, 2011(7): 47-49.
- [3] 李峰, 周雄祥, 柯卫东, 等. 湖北省莲产业发展调研报告[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(23): 101-106, 109.  
LI F, ZHOU X X, KE W D, et al. Research report on lotus industry development in Hubei province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(23): 101-106, 109.
- [4] 郭凤领, 吴金平, 周洁, 等. 湖北省水生蔬菜产业调研报告及对策建议[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(8): 80-84.  
GUO F L, WU J P, ZHOU J, et al. Investigation report and countermeasures of aquatic vegetable industry in Hubei Province[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2020, 33(8): 80-84.
- [5] 莫才巧, 朱云龙. 藕带对油脂和胆固醇吸附作用的研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(4): 284-285, 288.  
MO C Q, ZHU Y L. Absorptive properties of lotus sprout for fat and cholesterol[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(4): 284-285, 288.
- [6] 谢巧玲, 邱紫婷, 陈燕鸿, 等. 抗菌肽复合膜对藕带品质影响及保鲜作用[J]. 食品工业, 2022, 43(9): 153-157.  
XIE Q L, QIU Z T, CHEN Y H, et al. Effect of antimicrobial peptide composite membrane on the quality and preservation effect of lotus root belt[J]. The Food Industry, 2022, 43(9): 153-157.
- [7] 杨松, 杜京京, 朱倩, 等. 水煮藕带护色配方优化研究[J]. 现代农业科技, 2023(20): 178-181.  
YANG S, DU J J, ZHU Q, et al. Optimization of color protection formula for boiled lotus root strips[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(20): 178-181.
- [8] 蒋利亚. 不同浓度的曲酸溶液对藕带褐变的抑制及抗菌作用[J]. 广东化工, 2021, 48(19): 38-40.  
JIANG L Y. Inhibition and antibacterial effect of kojic acid solution with different concentrations on browning of lotus root belt[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(19): 38-40.
- [9] 荣保华, 王清章, 李洁, 等. 藕带中多酚氧化酶的酶学性质研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(19): 10 267-10 269.  
RONG B H, WANG Q Z, LI J, et al. Studies on the enzymatic characteristics of polyphenol oxidase (PPO) in lotus sprout[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(19): 10 267-10 269.
- [10] HU S, YANG X T, WU H, et al. Lotus sprout-templated porous cobalt-doped borate bioglass with antibacterial properties and multiple-layered osteogenic promotion[J]. Applied Materials Today, 2022, 29: 101678.
- [11] CHEN Y, LI P, LIAO L Y, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130055.
- [12] 庞纪伟, 殷菲彤, 刘云芬, 等. HS-SPME-GC-MS 在水果产品挥发性物质检测中的研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 217-224.  
PANG J W, YIN F L, LIU Y F, et al. Research progress of HS-SPME-GC-MS in the detection of volatile substances in fruit products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 217-224.
- [13] GUO X Y, SCHWAB W, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131933.
- [14] 陈俊宇, 凌建刚, 杜丽慧, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同干燥方式花菇的挥发性风味成分差异[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 43-52.  
CHEN J Y, LING J G, DU L H, et al. Differences in volatile components between different drying methods of *Lentinus edodes* analyzed by GC-IMS[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 43-54.
- [15] 纪宇菲, 周若男, 艾连中, 等. 少动鞘氨醇单胞菌产高水溶性结冷胶的分子特征与制备平台[J]. 食品与发酵工业, 2023,



- 49(7): 140-154.
- JI Y F, ZHOU R N, AI L Z, et al. Molecular characteristics and preparation platform for highly water-soluble gellan produced by *Sphingomonas paucimobilis*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 140-154.
- [16] DING J J, ZHAO X Y, LI X X, et al. Effects of different recovered sarcoplasmic proteins on the gel performance, water distribution and network structure of silver carp surimi[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107835.
- [17] 杨银爱, 韩延超, 牛犇, 等. 不同成熟度莲子鲜食品质评价[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 44-51.
- YANG Y A, HAN Y C, NIU B, et al. Evaluation of the eating quality of fresh lotus seeds at different maturation stages[J]. Food Science, 2022, 43(15): 44-51.
- [18] QIAN C L, JIANG Y Y, SUN Y, et al. Changes in the texture and flavor of lotus root after different cooking methods[J]. Foods, 2023, 12(10): 2 012.
- [19] HE K H, LI Q, LI Y, et al. Water-insoluble dietary fibers from bamboo shoot used as plant food particles for the stabilization of O/W Pickering emulsion[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125925.
- [20] 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.
- HAN X M, LUO Q, WU S X. Evaluation of textural properties and flavor substances of three varieties of fresh lotus root[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 64-68.
- [21] 张静, 刘平. 基于电子鼻和GC-MS评价腌制时间对猪肉脯品质的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 97-101.
- ZHANG J, LIU P. Evaluation of effect of pickling time on quality of pork jerky based on electronic nose and GC-MS [J]. China Condiment, 2024, 49(6): 97-101.
- [22] 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.
- HAN L J, HUANG C X, LI J, et al. Comparison of flavor substances of water-boiled lotus roots from different varieties [J]. Food Science, 2020, 41(22): 245-251.
- [23] 单启梅, 罗瑞明, 杨波, 等. 不同贮藏期冷却滩羊肉煮制后挥发性气味物质的变化[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 265-271.
- SHAN Q M, LUO R M, YANG B, et al. Changes of volatile odor substances in chilled tan sheep meat stored for different periods and cooked[J]. Food Science, 2022, 43(6): 265-271.
- [24] 程晶晶, 陈会民, 罗洁, 等. 不同成熟期切达干酪的组分及特征风味物质的解析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 231-237.
- CHENG J J, CHEN H M, LUO J, et al. Analysis of components and characteristic flavor substances of cheddar cheese at different maturation stages[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 231-237.
- [25] TIAN H X, SUN X F, YU H Y, et al. Characterization of the key aroma compounds in Yunnan goat milk cake using a sensory-directed flavor analysis[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(11): 3 981-3 997.
- [26] 汪冬冬, 唐垚, 陈功, 等. 不同发酵方式盐渍萝卜挥发性成分动态分析[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 146-154.
- WANG D D, TANG Y, CHEN G, et al. Dynamic analysis of volatile components of salted radish during different fermentation processes[J]. Food Science, 2020, 41(6): 146-154.
- [27] DONG L, HOU Y M, LI F, et al. Characterization of volatile aroma compounds in different brewing barley cultivars[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(5): 915-921.
- [28] 梁水连, 吕岱竹, 马晨, 等. '桂蕉1号'香蕉成熟过程中挥发性成分和香气特征分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 99-106.
- LIANG S L, LV D Z, M C, et al. Analysis of volatile components and aroma features of banana 'Guijiao No. 1' fruit at different ripening stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 99-106.
- [29] 马宁原, 姚凌云, 孙敏, 等. 基于GC-IMS和GC-MS分析不同发酵方式对黄桃酒香气成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 306-314.
- MA N Y, YAO L Y, SUN M, et al. Effect of different fermentation methods on aroma composition of yellow peach wine analyzed by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(12): 306-314.
- [30] 吴思雨, 谢萱, 刘雨雯, 等. 基于电子鼻、HS-SPME-GC-MS和HS-GC-IMS评价不同制油工艺对大豆油品质及风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 183-196.
- WU S Y, XIE X, LIU Y W, et al. Effects of different production processes on the quality and flavor of soybean oil as evaluated by electronic nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Science, 2024, 45(4): 183-196.
- [31] 耿秋月, 田洪磊, 詹萍, 等. 椒麻鸡赋味汤料制备中主要基料对香气品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 230-237.
- GENG Q Y, TIAN H L, ZHAN P, et al. Effect of main ingredients on flavor quality of Xinjiang spicy chicken seasoning[J]. Food Science, 2020, 41(2): 230-237.
- [32] NIKOU T, WITT M, STATHOPOULOS P, et al. Olive oil quality and authenticity assessment aspects employing FIA-MRMS and LC-orbitrap MS metabolomic approaches[J]. Frontiers Public Health, 2020, 8: 558226.