李悦, 梁炼达, 曾正, 等. 粤北地区不同发酵工艺酸笋的特征风味物质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 302−311. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070134

LI Yue, LIANG Lianda, ZENG Zheng, et al. Analysis of Characteristic Flavor Compounds of Sour Bamboo Shoots with Different Fermentation Processes in Northern Guangdong Region[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 302−311. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070134

· 分析检测 ·

粤北地区不同发酵工艺酸笋的特征风味物质分析

李　悦[1], 梁炼达[2], 曾　正[2], 唐　辉[2,3], 蒋立文[1,3,*]

（1.湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 400128;
2.韶关学院英东食品学院, 广东韶关 502005;
3.广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室, 广东韶关 502005）

摘　要: 本研究通过超声辅助溶剂萃取-气相色谱-质谱（ultrasonic assisted solvent extraction-gas chromatography-massspectrometry，UASE-GC-MS），香气活性值（odor activity value，OAV）结合三点选配法（3-AFC）联合分析了粤北地区 5 种酸笋中特征风味物质，并对其进行主成分分析（principal component analysis，PCA）以对比不同发酵工艺的差异。结果显示，在 5 种酸笋样品中共检出 78 种挥发性风味物质，其中醇类 16 种、酚类 7 种、醛类 9 种等；3-AFC 法得出 14 种挥发性风味物质的阈值，并在此基础上计算出 OAV，发现 5 种酸笋中共有 16 种挥发性风味物质 OAV 值≥1，其中，对甲苯酚（5 种样品中 OAV 最高为 20951.30，最低为 2153.03）、癸醛（5 种样品中 OAV 最高为 241.44，最低为 45.40）、1-辛烯-3-酮（5 种样品中 OAV 最高为 1958.36，最低为 614.59）在酸笋中 OAV 较高，是酸笋中主要的关键风味物质。PCA 表明，大罐发酵工艺（SGNX-D）样品风味物质总含量最高（7264.74 μg/g），其独特风味与棕榈酸乙酯、癸醛和苯酚等特征风味物质密切相关。除此之外，本研究首次揭示了癸醛（醛类 OAV 最高）和肉桂酸乙酯（酯类唯一 OAV>10）在酸笋风味中的核心作用，二者香气显著提升了酸笋风味的层次感。

关键词: 发酵酸笋, 超声辅助溶剂萃取-气相色谱-质谱, 气味阈值, 特征风味物质

中图分类号: TS264.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0302−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070134

本文网刊:

Analysis of Characteristic Flavor Compounds of Sour Bamboo Shoots with Different Fermentation Processes in Northern Guangdong Region

LI Yue[1], LIANG Lianda[2], ZENG Zheng[2], TANG Hui[2,3], JIANG Liwen[1,3,*]

（1.College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 400128, China;
2.Henry Fok School of Food Science and Technology, Shaoguan University, Shaoguan 502005, China;
3.Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Conservation of Food and Medicinal Resources in Northern Region, Shaoguan 502005, China）

Abstract: The characteristic flavor compounds in five types of sour bamboo shoots from northern Guangdong were analyzed using ultrasonic assisted solvent extraction-gas chromatography-mass spectrometry (UASE-GC-MS), odor activity value (OAV), and the 3-AFC method. Principal component analysis (PCA) was applied to compare differences among fermentation processes. A total of 78 volatile compounds were detected, including 16 alcohols, 7 phenols, 9 aldehydes, among others. Thresholds were determined for 14 compounds using the 3-AFC method, and their OAVs were calculated. Sixteen

收稿日期: 2025−07−10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目（32102126）; 广东省基础与应用基础研究基金面上项目（2024A1515013053）。

作者简介: 李悦（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品发酵, E-mail: 1561278981@qq.com。

*** 通信作者:** 蒋立文（1968−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物科技, E-mail: hnndjlw@163.com。

compounds had OAVs ≥ 1, among which p-cresol (The highest OAV among the five samples was 20951.30, and the lowest was 2153.03), decanal (The highest OAV among the five samples was 241.44, and the lowest was 45.40), and 1-octen-3-one (The highest OAV among the five samples was 1958.36, and the lowest was 614.59) showed the highest OAVs and were identified as key flavor compounds. PCA indicated that the sample fermented in large tanks (SGNX-D) had the highest total flavor content (7264.74 μg/g), with its distinctive flavor associated with compounds such as ethyl palmitate, decanal, and phenol. Moreover, this study revealed for the first time the essential role of decanal (highest OAV among aldehydes) and ethyl cinnamate (only ester with OAV > 10) in enhancing the complexity of the flavor profile of sour bamboo shoots.

Key words: fermented sour bamboo shoots; ultrasonic assisted solvent extraction- gas chromatography- mass spectrometry (UASE-GC-MS); spectrometry odor threshold; characteristic flavor compounds

发酵酸笋作为中国南方，特别是粤北地区的传统发酵食品，因其独特的风味深受消费者的喜爱，是粤菜及客家菜系中重要的调味食材[1]。酸笋中典型的挥发性成分包括酚类、醛类、酮类、酯类及含硫化合物等[2−3]，其中乙酸是酸笋挥发性酸味的主要来源[4]，对甲苯酚因其极低的气味阈值与超高的 OAV，被认为是酸笋特殊气味（如窖泥臭）的主要贡献者[5]。目前，粤北地区酸笋生产主要采用自然接种的传统发酵方式[6]，包括小型陶缸、瓦罐等容器进行户内或户外发酵，亦有部分企业采用大型发酵罐进行规模化生产。已有研究表明，不同发酵容器与工艺参数（如温度、盐度、发酵周期等）可能导致酸笋在微生物群落结构与代谢产物组成上存在显著差异，进而影响其风味[7−8]。然而，目前针对不同发酵规模尤其是大型发酵罐与实验型小罐发酵酸笋的风味物质差异及其特征风味物质的系统性研究仍较为缺乏。

在发酵食品风味研究中，挥发性风味物质的精准分析是关键。目前常用的方法包括气相色谱-质谱联用技术（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）结合挥发性成分提取方法，如顶空固相微萃取（headspace solid-phase microextraction, HS-SPME）[9]、顶空吸附法（headspace absorption, HSA）[10]、液液萃取法（liquid-liquid extraction, LLE）[11] 等。其中，固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术（solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS）结合内标法的应用，在一定程度上实现了挥发性成分的定量分析，并且已经应用到包括酸笋在内的多种发酵食品研究[12−13]。本研究团队前期使用该法测定了酸笋的挥发性物质[14]，但该方法受吸附竞争及内标选择限制，回收率波动显著，导致半定量结果存在一定局限性，进而对关键风味物质的检测易出现偏差。为了克服该方法的局限，探索更精准的分析策略显得尤为重要。超声辅助溶剂萃取（ultrasonic assisted solvent extraction, UASE）是一种利用超声波增强溶剂渗透效率的样品前处理技术[15]，结合 GC-MS 可高效分析复杂基质中的挥发性风味物质，尤其在提升低沸点、热敏性成分（如醛类、酯类）的提取效率上优于传统蒸馏法[16]。

此外，OAV 作为评价挥发性成分风味贡献度的关键指标，其计算依赖于该物质的浓度与感官阈值的比值。现有研究中，阈值数据多引自文献，不同来源的阈值差异较大，阈值选取的主观性易导致 OAV 计算结果的不确定性，从而影响特征风味物质的科学判定。三点选配法（3-AFC）感官阈值分析，是通过感官实验直接测定目标物的实际阈值[17−18]。该方法通过统计学显著性检验，显著降低个体差异与偶然性干扰，为 OAV 分析提供了更可靠的数据基础。

因此，本研究采用 UASE-GC-MS 技术，结合 3-AFC 法实测挥发性成分的感官阈值，进而计算 OAV，以系统分析粤北地区 5 种不同发酵工艺酸笋中的特征风味物质，并通过主成分分析（PCA）对比其风味结构差异，旨在为酸笋生产工艺的优化与风味品质调控提供理论依据，对控制和改良传统发酵酸笋风味，加速其规范化、工业化生产的进程具有重要的意义。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

酸笋样品：韶关南雄小罐发酵酸笋（SGNX-X）、韶关南雄大罐发酵酸笋（SGNX-D）、家庭自制酸笋（SGL）　从韶关地区散户中收集；自然变温发酵酸笋（natural variable temperature fermentation, VTNF）　用新鲜麻竹笋，剥去笋壳，洗净晾干后切条，将笋条与 1%（W/W）食盐水按照 1∶1.5 的比例装入发酵罐中，封口，在 37、28、18 ℃ 下 24 h 交替控温发酵 90 d；变温强化发酵酸笋（enhanced by variable temperature fermentation, VTEMF）　在 VTNF 相同条件下将两株斯比氏促生乳杆菌（*Levilactobacillus spicheri*）GM2B 和 NM1A 以 1∶1 比例混合添加到发酵罐，菌液添加量为笋条和水总量的 1%，在 37、28、18 ℃ 下 24 h 交替控温发酵 90 d；C_7~C_{30} 正构烷烃混合标准品、邻二氯苯标准品　99.9%　美国 SUPELCO 公司；风味化合物标准品（1-辛烯-3-酮（95%）、E-2-庚烯醛（95%）、正壬醛（96%）、E-2-辛烯醛（95%）、1-辛烯-3-醇（98%）、乙酸（99.5%）、癸醛（97%）、二乙二醇乙醚（98%）、水杨酸甲酯（99%）、茴香脑（98%）、香叶基丙酮（98%）、苯甲醇（99%）、棕榈酸乙酯（98%）、苯酚（99%）、2-甲氧基-4-甲基苯酚（99%）、对甲苯酚（99.7%））、乙醇（色谱纯）、二氯甲烷（色谱纯）　上海麦克林生化科技股份有限公司；其他常规试剂　由韶关学院实验室提供。

Trace1600-OP275PRO Ⅱ型 GC-O 联用仪　美国赛默飞世尔科技公司; GC8890-MS7000E 型 GC-MS 联用仪　美国安捷伦公司; AUY120 型分析天平　日本岛津公司; KS-600E 型超声波清洗器　昆山洁力美超声仪器有限公司; TGL16M 型冷冻离心机　长沙英泰仪器有限公司; SPX-250B Ⅲ型恒温培养箱　天津市泰斯特仪器有限公司; 其他常规仪器由韶关学院实验室提供。

1.2　实验方法

1.2.1　标准品的配制　根据标准品的溶解特性, 分别使用无气味的蒸馏水、丙二醇或 1% 盐酸等作为无气味基质溶剂, 配制不同浓度梯度的风味化合物。分别称取一定量标准品分别置于 50 mL 容量瓶中, 初步溶解, 混匀, 得到风味物质单标。从各单标中分别取适量溶液于 50 mL 容量瓶中, 最后用无水乙醇定容得到混合储备液。混合储备液中对甲苯酚和乙酸的浓度为 550 mg/L, 其他的标准品均为 25 mg/L。

1.2.2　UASE-GC-MS 测定　酸笋挥发性风味物质的提取: 采用 UASE 的方式对酸笋样品进行预处理, 配制混合提取剂(色谱纯二氯甲烷∶色谱纯乙醇=1∶1), 称取 2.0 g 酸笋固体和 2.0 mL 发酵酸笋液置于 10 mL 容量瓶中, 先加入 4~5 mL 的提取剂; 将容量瓶置于超声波清洗机中超声 10 min, 超声温度控制在 20~30 ℃。超声后用混合提取剂定容, 然后倒入 50 mL 离心管, 11000 r/min 离心 10 min, 温度 20 ℃。取上清液, 用 0.22 μm 的尼龙 66 过滤膜过滤, 置于自动进样瓶中, 待测。

GC 分析条件: DB-WAX 石英毛细管柱(30 m×250 μm×0.25 μm)色谱柱; 采用自动进样, 进样量为 1 μL, 分流进样, 分流比 10∶1; 进样口加热器设定值 230 ℃, 压力 7.389 psi, 总流量为 34 mL/min, 隔壁吹扫流量 3 mL/min; 程序升温 50 ℃ 保持 1 min, 后以 10 ℃/min 升到 230 ℃ 保持 3 min, 总运行时间为 22 min。

MS 分析条件: 离子源温度 250 ℃; 载气流速 He 1 mL/min; 电子轰击(E1)能量为 70 eV, 发射电流 150 μA, 倍增器电压 1037 V; 数据采集为 MS1 扫描, 扫描范围为 45~500 amu(m/z), 延迟时间为 3.0 min。

1.2.3　挥发性风味物质定性分析　挥发性风味物质定性方法: 通过质谱库检索(MS)对照质谱库(NIST11.L)、保留指数(RI)与标准品(S)对酸笋中测出的挥发性风味物质进行定性。MS: 利用 NIST17-1 谱库检索对气相色谱质谱仪检测出的风味化合物进行初步定性; RI: 在同样 GC-MS 分析条件下得到 C_7~C_{30} 正构烷烃标准品的保留时间, 计算保留指数(见式 1)。S: 挥发性风味物质标准品出峰时间准确定性。

$$RI = 100Z + 100 \times \frac{TX - TZ}{T(Z+1) - TZ} \qquad 式（1）$$

式中: RI 为保留指数; Z 为碳数; TX 为待测挥发性成分的保留时间, min; TZ 为具有 n 个碳原子的正构烷烃的保留时间, min; T(Z+1)为具有(n+1)个碳原子的正构烷烃的保留时间, min。

1.2.4　挥发性风味物质定量分析　首先采用外标法构建主要挥发性风味物质的标准曲线。标准品的配制同 1.2.1, 将混标继续用无水乙醇分别稀释 5 倍、10 倍、25 倍、50 倍、100 倍, 最后得到不同梯度的标准品混合溶液。将 6 种不同浓度标准品混标经过 GC-MS 测定, 可得到混标中各标准品不同浓度下的峰面积, 根据标准品浓度和峰面积的关系确定了标准曲线的一元回归方程, 代入计算待测样品中挥发性风味物质的含量。

其余物质采用内标法, 以样品中苯酚为内标物, 计算公式为:

$$C_{目标物} = \frac{C_{苯酚} \times A_{目标物}}{A_{苯酚}} \qquad 式（2）$$

式中: C 为对应物的浓度(μg/g); A 为对应物的峰面积。

1.2.5　酸笋中特征风味物质气味阈值的测定　参考文献 [19], 采用三点选配法(3-AFC)测定酸笋中风味物质气味阈值。评价时, 选择嗅觉灵敏的 13 名人员组成感官评价小组, 告知评价员每种香气化合物的香气特征并给予标准溶液感受其香气特征。小组成员从最高浓度的标准溶液开始嗅闻, 在 3 个气味瓶中(1 个含有待测物组分, 2 个为空白溶剂对照样品)开始嗅闻, 如果小组成员可以在 3 个样品中识别出含有香气化合物的样品, 则测试下一个浓度的样品, 以此类推直到不能正确辨别为止。记录每个评价员感知气味的程度和能感知到的最低浓度[20]。

通过计算嗅闻到的正确识别概率 p, 进一步校正, 校正公式为 P=(3×p−1)/2(其中 P 为正确识别概率的校正值, p 为实际测得的正确识别概率值), 绘制以香气化合物的质量浓度对数为横坐标, 以正确识别概率的校正值 P 为纵坐标的曲线。将上述香气物质的浓度范围以 2 为稀释倍数得到 10 个不同浓度梯度的数据点, 将 10 个数据点应用 S 型曲线 $P=1/(1+e^{-(X-C)/D})$进行拟合。当纵坐标 P=0.5 时, 对应的横坐标为 OT 值[21], lg(溶液阈值)=OT, 即可测得香气化合物的气味阈值。

1.2.6　OAV 的计算　OAV 是化合物浓度与其阈值的比值, 表征了单一化合物对整体香气的贡献, 其中 OAV≥1 的香气物质被认为对酸笋的风味有重大贡献, OAV 越大, 风味贡献度越大[22]; 当 0.1≤OAV<1 时, 认为该风味物质对酸笋风味有一定的贡献; OAV<0.1 时, 认为该风味物质对整体风味影响不大。

OAV 的计算式如下:

$$OAV = \frac{C}{OT} \qquad 式（3）$$

式中: OAV 为香气活力值; C 为通过方法 1.2.4

测定出的样品中挥发性风味物质浓度(μg/g)；OT 为通过方法 1.2.5 测定出的挥发性风味物质气味阈值(μg/g)。

1.3　数据处理

所有数据进行 3 次平行实验，采用 Excel 2010 制作图表，实验数据采用 SPSS 软件进行统计学处理，$P<0.05$ 被认为具有统计学差异；气味阈值采用 Sigma Plot 12.5(SYSTAT, London, UK)软件用于图形解析，方差分析用于非线性回归；使用 SMICA 14.1 进行 PCA。

2　结果与分析

2.1　UASE-GC-MS 测定酸笋中挥发性风味物质的结果与分析

酸笋中挥发性风味物质标准曲线如表 1 所示，根据 15 种挥发性风味物质标准曲线的决定系数 R^2 可以看出其标准曲线拟合度均较高，可以用于后续挥发性成分的定量分析。

表 1　挥发性风味物质标准曲线

Table 1　Standard curves of volatile flavor substance

名称	回归方程	R^2
对甲苯酚	y=117266x+1E+0	0.9997
乙酸	y=19179x−71341	0.9995
苯酚	y=5691.2x−2874.1	0.9999
茴香脑	y=10347x−29939	0.9998
1-辛烯-3-醇	y=3419.6x+916.92	0.9999
香叶基丙酮	y=1931.5x−8030.2	0.9998
正壬醛	y=604.01x+4951	0.9987
E-2-辛烯醛	y=1540.2x+1832.8	0.9999
二乙二醇乙醚	y=2334x−3290.9	0.9998
苯甲醇	y=105289x−15807	0.9997
水杨酸甲酯	y=174891x−26269	0.9997
棕榈酸乙酯	y=106097x−16770	0.9996
1-辛烯-3-酮	y=90903x−8270.1	0.9998
癸醛	y=16935x−2659.8	0.9993
反-2-庚醛	y=34404x−3652.7	0.9998

用 UASE-GC-MS 法对酸笋样品的特征风味物质进行分析，总离子流图如图 1，定性和定量结果见表 2。由表 2 得知在五种酸笋样品中检测出醇类物质 16 种、酚类物质 7 种、醛类物质 9 种、酸类物质 15 种、酯类物质 13 种、酮类物质 5 种等共 78 种，由此可知，UASE 法能够高效地提取样品中的风味物质，超声波能打破细胞壁，释放更多内部的风味成分[23]。在五种酸笋样品中检测出的共同成分有 E-2-辛烯醛、乙酸、癸醛、2,3-丁二醇、二乙二醇乙醚、苯乙醛、水杨酸甲酯、3,4-二甲基苯甲醛、茴香脑、苯甲醇、2-甲氧基-4-甲基苯酚、苯酚、2-吡咯烷酮、对甲苯酚、肉桂酸乙酯、棕榈酸乙酯、1,4-二噁烯、2,4-二叔丁基苯酚、棕榈酸共 19 种。在 VTNF、VTEMF、SGNX-X、SGNX-D、SGL 这五种酸笋样品中分别测出挥发性风味物质 35 种、37 种、34 种、42 种、35 种，各组间化合物含量差异显著($P<0.05$)，总含量分别为 2131.28、2030.46、1126.81、7264.74、456.25 μg/g。其中，SGNX-D 样品中测出的挥发性风味物质种类和含量都高于其他样品。

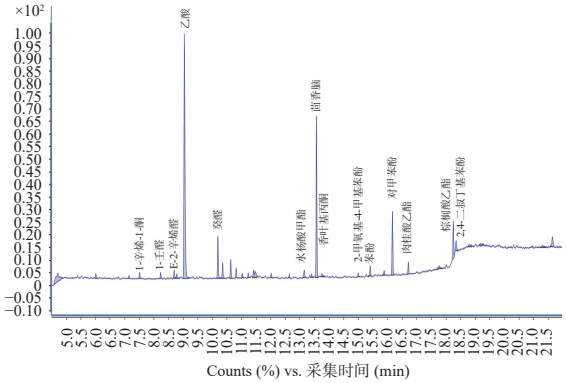


图 1　酸笋样品的总离子流图(以 SGNX-D 为例)

Fig.1　Total ion chromatogram of the sour bamboo shoot sample (taking SGNX-D as an example)

对不同种类挥发性风味物质进行分析，发现其中酸类物质和酚类物质在五种酸笋样品中的挥发性风味物质中占比最高，尤其是乙酸和对甲苯酚在酸笋中含量最高，乙酸在 VTNF、VTEMF、SGNX-X、SGNX-D、SGL 这五种酸笋样品中含量分别为 1329.78、1012.18、793.28、5297.16、255.34 μg/g。对甲苯酚在这五种酸笋样品中含量分别为 458.70、634.29、308.97、1780.86、183.00 μg/g。

检测出醇类物质共 16 种，在五种酸笋样品中总含量范围在 1.74~72.62 μg/g，其中含量最高的 2,3-丁二醇在酸笋中含量为 1.24~55.28 μg/g。其他种类的风味物质含量相对较小，其次是酯类(2.57~15.25 μg/g)、醛类(2.13~18.75 μg/g)等，因此需采用计算 OAV 的方式结合质量浓度与气味阈值来对风味物质进行进一步评价。

2.2　酸笋挥发性成分的 PCA

为进一步对比酸笋样品间的挥发性化合物含量的差异，对五种酸笋的挥发性化合物含量进行 PCA 分析。如图 2 所示，其中，主成分 2 与棕榈酸乙酯、肉桂酸乙酯和对甲苯酚等具有明显正相关关系。SGNX-D(南雄大罐发酵酸笋)得分落在了主成分 2 的较高正向区间，说明在这些物质含量上明显区分于其他样品。GC-MS 结果显示 SGNX-D 中挥发性风味物质总含量高达 7264.74 μg/g，远高于其他样品，尤其是肉桂酸乙酯和对甲苯酚等的含量显著更高，这可能与其大罐发酵的工艺特点有关：较大的发酵规模可能导致微生物群落结构、代谢产物积累方式与小罐或家庭发酵存在显著差异。SGL(家庭自制酸笋)与 SGNX-X(南雄小罐发酵酸笋)之间的离散程度较低，表明它们的香气结构比较相似。这可能与两者在发酵工艺和原料来源上的相似性有关[24]，即均采用传统自然发酵方式，且未引入外源强化菌种或严格温控，发酵微生态环境较为接近。

表 2 酸笋 UASE-GC-MS 鉴定结果

Table 2 Identification results of sour bamboo shoots by UASE-GC-MS

序号	种类	保留时间（min）	化合物名称	CAS号	定量方法	RIA（计算的RI指数）	RIB（查阅数据库的RI指数）	含量（μg/g）				
								VTNF	VTEMF	SGNX-X	SGNX-D	SGL
1	醇类	4.6256	异丙醇	616-09-1	IS	*	923	4.90±0.79^{a}	–	–	1.78±0.35^{b}	–
2		4.6415	2-庚醇	543-49-7	IS	*	1313	–	7.51±0.12	–	–	–
3		5.2596	6-二甲胺基-1-己醇	1862-07-3	IS	*	*	1.13±0.12	–	–	–	–
4		5.8417	3-甲基-1-丁醇	123-51-3	IS	1213	1204	–	–	–	0.39±0.12	–
5		8.9610	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	ES	1450	1458	–	0.15±0.04^{a}	0.05±0.02^{b}	–	0.03±0.02^{c}
6		10.1521	2-氨基-2-甲基-1,3-丙二醇	115-69-5	IS	1544	*	–	–	–	3.16±0.79	–
7		10.6210	2,3-丁二醇	513-85-9	IS	1582	1554	55.28±3.57^{a}	45.05±1.67^{b}	5.48±1.04^{d}	6.34±1.23^{c}	1.24±0.35^{e}
8		10.8045	（R）-1,2-丙二醇	4254-14-2	IS	1596	*	–	–	–	6.75±0.23	–
9		11.0166	反式-2-辛烯-1-醇	18409-17-1	IS	1614	1609	7.69±0.47^{b}	8.00±0.35^{a}	0.09±0.03^{d}	0.39±0.11^{c}	–
10		11.2504	2-氨基-1,3-丙二醇	534-03-2	IS	1634	*	–	–	–	0.55±0.12	–
11		11.5901	1-壬醇	143-08-8	IS	1664	1664.4901	–	–	–	0.09±0.02^{a}	0.09±0.02^{a}
12		11.6155	3-呋喃甲醇	4412-91-3	IS	1667	*	–	–	0.18±0.04	–	–
13		14.1031	苯甲醇	100-51-6	ES	1888	1879	1.48±0.12^{b}	1.35±0.04^{b}	0.31±0.12^{c}	1.89±0.11^{a}	0.38±0.12^{c}
14		14.4783	甲基苯甲醇	98-85-1	IS	1923	1825	–	–	–	1.36±0.22^{a}	–
15		14.4879	苯乙醇	60-12-8	IS	1924	1905	–	0.65±0.05	–	–	–
16		18.3756	2-肼基乙醇	109-84-2	IS	2327	*	–	9.91±2.25	–	–	–
17		14.9304	2-甲氧基-4-甲基苯酚	93-51-6	ES	1967	1959	0.55±0.11^{ab}	0.29±0.06^{bc}	0.04±0.01^{c}	0.90±0.57^{a}	0.09±0.01^{bc}
18	酚类	15.3985	苯酚	108-95-2	ES	2013	2007	6.59±1.25^{b}	7.41±1.85^{b}	2.44±0.36^{c}	11.93±1.56^{a}	1.67±0.35^{c}
19		16.1568	对甲苯酚	106-44-5	ES	2090	2083	458.70±12.78^{c}	634.29±25.85^{b}	308.97±10.87^{d}	1780.86±20.86^{a}	183.00±7.96^{e}
20		16.7748	对乙基苯酚	123-07-9	IS	2155	2167	–	0.40±0.13	–	–	–
21		18.2407	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	IS	2314	2327	9.87±1.24^{c}	18.03±3.25^{a}	3.10±0.24^{d}	13.59±1.85^{b}	2.64±0.35^{d}
22		18.9933	4-甲基-6-叔丁基苯酚	119-47-1	IS	2407	*	3.43±0.46^{b}	18.35±1.86^{a}	–	–	–
23		12.3265	3,5-二羟基甲苯	504-15-4	IS	1726	*	–	–	–	2.44±0.25	–
24	醚类	10.7328	正辛基苯醚	1818-07-1	IS	1589	*	–	–	–	–	0.03±0.01
25		11.2213	二乙二醇乙醚	111-90-0	ES	1632	1628	0.84±0.15^{b}	1.23±0.34^{a}	0.19±0.04^{c}	0.91±0.24^{b}	0.13±0.02^{c}
26		18.8706	4-氯丁基甲基醚	17913-18-7	IS	2383	*	–	18.85±1.68	–	–	–
27		13.5603	茴香脑	104-46-1	ES	1837	1815	2.92±1.1^{a}	2.38±0.63^{a}	0.21±0.05^{b}	0.96±0.15^{b}	0.35±0.11^{b}
28	醛类	5.6110	二甲醇缩甲醛	109-87-5	IS	*	*	–	–	0.15±0.03	–	–
29		7.4390	（E）-2-庚醛	18829-55-5	ES	1333	1320	0.76±0.05^{a}	0.78±0.02^{b}	0.57±0.12^{c}	–	0.17±0.03^{d}
30		8.3697	正壬醛	124-19-6	ES	1404	1389	–	0.31±0.03^{a}	–	–	0.02±0.01^{b}
31		8.4210	1-壬醛	124-19-6	IS	1414	*	–	–	–	0.09±0.03^{a}	0.09±0.01^{a}
32		8.7935	E-2-辛烯醛	2548-87-0	ES	1437	1427	1.38±0.24^{a}	1.55±0.08^{a}	0.16±0.05^{c}	0.91±0.18^{b}	0.15±0.02^{c}
33		9.6584	癸醛	112-31-2	ES	1504	1498	1.85±0.36^{b}	2.01±0.13^{ab}	0.67±0.15^{c}	2.41±0.35^{a}	0.45±0.14^{c}
34		11.4565	苯乙醛	122-78-1	IS	1651	1648	6.28±1.46^{a}	7.97±1.54^{a}	1.28±0.22^{c}	4.22±1.10^{b}	1.25±0.46^{c}
35		13.4341	3,4-二甲基苯甲醛	5973-71-7	IS	1826	*	2.05±0.36^{b}	6.11±0.57^{a}	0.23±0.06^{c}	1.27±0.05^{b}	0.05±0.01^{d}
36		21.5624	间羟基苯甲醛	100-83-4	IS	*	*	–	–	10.69±1.24	–	–
37	酸类	4.6485	N-乙酰胞壁酸	10597-89-4	IS	1200	*	4.90±0.36	–	–	–	–
38		9.0400	乙酸	64-19-7	ES	1454	1452	1329.78±26.85^{b}	1012.18±17.85^{bc}	793.28±19.68^{c}	5297.16±25.97^{a}	255.34±4.95^{c}
39		11.4059	氟乙酸	144-49-0	IS	1647	*	–	–	–	0.76±0.13	–
40		11.6285	3-(4-氨基苯基)丙酸	2393-17-1	IS	1669	*	–	–	–	–	0.83±0.57
41		11.9295	4-吡啶甲酸	55-22-1	IS	1691	*	–	–	–	3.84±0.47	–
42		12.3335	2-巯基丙酸	79-42-5	IS	1727	*	–	–	–	0.79±0.24	–
43		12.6287	2-氨基-5-甲基苯甲酸	2941-78-8	IS	1753	*	0.95±0.34	–	–	–	–
44		12.9947	3,4-二羟基苯乙酸	102-32-9	IS	1767	*	–	–	0.47±0.05	–	–
45		19.7189	反式-4-羟基环己烷羧酸	3685-26-5	IS	2479	*	82.71±5.85^{b}	111.55±3.96^{a}	14.72±1.25^{d}	74.36±4.85^{c}	–
46		19.7303	4-羟基环己烷甲酸	17419-81-7	IS	2480	*	98.02±8.97	–	–	–	–
47		20.4256	对羟基苯乙酸	156-38-7	IS	2483	*	–	29.22±2.05	–	–	–
48		20.8436	棕榈酸	57-10-3	IS	2586	2913	22.82±0.75^{b}	31.26±5.96^{a}	5.27±0.86^{d}	12.78±1.57^{c}	1.63±0.23^{e}
49		20.8441	亚麻油酸	1000378-74-2	IS	2586	*	–	–	–	1.09±0.05	–
50		21.0213	共轭亚油酸	2420-56-6	IS	*	*	5.50±0.37	–	–	–	–
51		21.5588	氢化肉桂酸	501-52-0	IS	*	2603	0.95±0.12	–	–	–	–

续表 2

序号	种类	保留时间（min）	化合物名称	CAS号	定量方法	RIA（计算的RI指数）	RIB（查阅数据库的RI指数）	含量（μg/g）				
								VTNF	VTEMF	SGNX-X	SGNX-D	SGL
52		5.5392	4-丙基苯甲酸对戊基苯酚酯	50649-60-0	IS	*	*	–	3.11±1.05	–	–	–
53		6.6838	1,3-苯二酚单苯甲酸酯	136-36-7	IS	1221	*	–	–	0.13±0.07	–	–
54		7.1169	异氰酸酯	75-13-8	IS	1233	*	–	–	0.26±0.03	–	–
55		7.6364	L(-)-乳酸乙酯	687-47-8	IS	1348	1348	–	–	2.42±0.46^{b}	9.07±1.36^{a}	1.03±0.04^{c}
56		7.6427	乳酸丁酯	138-22-7	IS	1349	1508	–	1.46±0.13^{a}	–	–	0.14±0.04^{b}
57	酯类	11.7375	磷酸三乙酯	78-40-0	IS	1675	*	–	–	0.16±0.10^{b}	0.71±0.13^{a}	0.21±0.05^{b}
58		13.1009	水杨酸甲酯	119-36-8	ES	1795	1770	1.42±0.08^{a}	0.86±0.24^{b}	0.30±0.05^{c}	0.32±0.11^{c}	0.42±0.12^{c}
59		16.7022	肉桂酸乙酯	103-36-6	IS	2147	2132	0.42±0.12^{b}	0.19±0.05^{c}	0.17±0.14^{c}	0.81±0.23^{a}	0.10±0.03^{c}
60		17.4760	2-氯基丙酸乙酯	1572-99-2	IS	2230	*	–	1.85±0.66	–	–	–
61		17.7563	棕榈酸乙酯	628-97-7	ES	2260	2256	1.32±0.46^{b}	1.17±0.09^{b}	0.20±0.13^{b}	2.84±1.25^{a}	0.42±0.15^{b}
62		19.6050	苯甲酸2-氯乙酯	939-55-9	IS	2466	*	–	–	–	0.74±0.24	–
63		20.2833	亚油酸乙酯	544-35-4	IS	2534	2532	–	–	0.15±0.06^{b}	0.73±0.15^{a}	0.22±0.04^{b}
64		20.5636	乙二醇二丁酸酯	105-72-6	IS	2547	*	4.11±1.75	–	–	–	–
65		6.9299	3-羟基-2-丁酮	513-86-0	IS	1229	1283	–	–	1.59±0.24	–	–
66		7.1509	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	ES	1311	1298	–	–	1.85±0.13^{a}	0.60±0.09^{b}	1.91±0.14^{a}
67	酮类	13.8662	香叶基丙酮	3796-70-1	ES	1866	1855	1.08±0.46^{ab}	1.32±0.36^{a}	–	0.64±0.06^{b}	0.77±0.13^{b}
68		15.8725	2-吡咯烷酮	616-45-5	IS	2061	2037	1.47±0.25^{b}	1.92±0.25^{a}	0.87±0.04^{c}	2.17±0.35^{a}	0.13±0.05^{d}
69		17.2703	4-羟基-2-甲基苯乙酮	875-59-2	IS	2207		–	–	–	0.41±0.07	–
70		4.6760	反-2,4-二甲基氧杂环丁烷	29424-94-0	IS	*	*	–	–	0.15±0.07	–	–
71		5.3814	十二烷	112-40-3	IS	*	*	1.20±0.09^{b}	9.75±1.68^{a}	–	–	–
72		8.2460	3-甲基十一烷	1002-43-3	IS	1376	*	–	–	–	–	0.04±0.01
73	其他	8.2466	正十四烷	629-59-4	IS	1394	*	1.33±0.25^{a}	0.88±0.15^{b}	0.06±0.01^{c}	–	–
74		9.7620	2-乙酰基呋喃	1192-62-7	IS	1532	1527	–	–	–	–	0.09±0.02
75		10.8143	1-碘十二烷	4292-19-7	IS	1597	*	–	–	–	0.43±0.12^{a}	0.08±0.02^{b}
76		12.0144	正十七烷	629-78-7	IS	1699	*	0.60±0.05	–	–	–	–
77		12.6769	2,5-二甲酰基呋喃	823-82-5	IS	1757	1991	–	–	–	7.94±1.25	–
78		17.8179	1,4-二噁烯	543-75-9	IS	2267	*	2.75±0.24^{c}	4.05±0.46^{a}	0.80±0.08^{d}	3.29±0.36^{b}	0.88±0.07^{d}

注：RIA和RIB中的“*”代表未计算出或未查询到；ES代表用外标法求得的浓度；IS代表以样品中苯酚具体浓度为内标物求得的浓度；物质的差异显著性以小写字母表示（$P<0.05$）；“–”表示未检出。

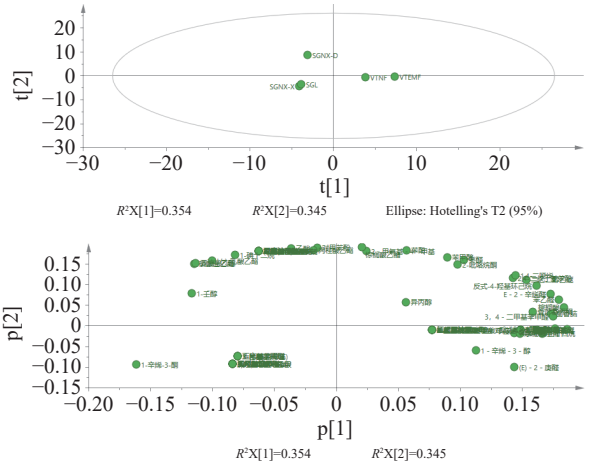


图 2　不同酸笋样品挥发性物质 PCA 得分图和载荷图

Fig.2　PCA score diagram and loading diagram of volatile compounds in different sour bamboo shoot samples

2.3　酸笋中特征风味物质的结果与分析

2.3.1　主要挥发性风味物质阈值的测定　为了评估每种风味物质对酸笋整体风味的贡献，本文通过以香气化合物的质量浓度对数为横坐标，以正确识别概率的校正值 P 为纵坐标，将 10 个不同浓度梯度的数据点应用 S 型曲线 P=1/(1+e(−(X−C)/D))进行拟合，得到 16 种风味物质标准品在溶液中的检出概率如图 3 与表 3 所示。

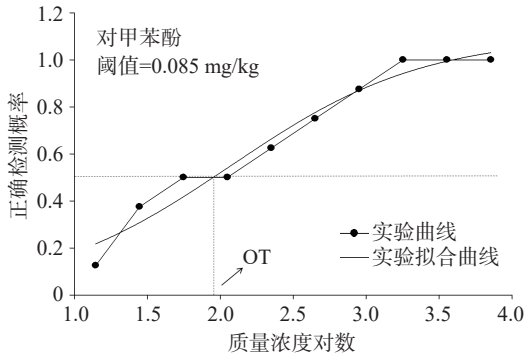


图 3　对甲苯酚在溶液中的检出概率

Fig.3　Detection probability of p-cresol in solution

注：以对甲苯酚为例，图中 OT 代表当纵坐标 P=0.5 时，对应质量浓度对数的数值即为嗅觉阈值，其余风味化合物同理。

通过构建 S 型拟合曲线得到正确识别概率校正值（P=0.5）下的质量浓度（μg/mL），即气味阈值。由此得出，对甲苯酚、苯酚、二乙二醇乙醚、E-2-辛烯

表 3 化合物香气特征及 OT 值

Table 3 Aroma characteristics and OT values

化合物名称	溶剂	OT	香气特征	气味阈值(mg/kg)
1-辛烯-3-酮	1%盐酸	−0.00830	蘑菇气味	0.00098
茴香脑	丙二醇、蒸馏水[a]	2.54	甜味	0.35
癸醛	丙二醇、蒸馏水[a]	1.00	甜香、柑橘香味	0.01
1-辛烯-3-醇	蒸馏水	3.20	强烈的蘑菇味	0.16
对甲苯酚	蒸馏水	1.93	窖泥臭、皮革臭	0.085
正壬醛	丙二醇、蒸馏水[a]	1.71	花香味	0.05
E-2-辛烯醛	乙醇、蒸馏水[b]	0.772	脂肪和肉类香气	0.0059
苯酚	蒸馏水	3.12	特殊臭味、燃烧味	1.32
苯甲醇	蒸馏水	5.27	稍有芳香味	183.30
水杨酸甲酯	蒸馏水	2.67	薄荷味	0.47
棕榈酸乙酯	乙醇、蒸馏水[b]	4.01	奶香味	10.03
香叶基丙酮	丙三醇、蒸馏水[c]	2.97	木兰香气	0.94
二乙二醇乙醚	丙三醇、蒸馏水[c]	4.05	中等程度令人愉悦的味道	11.30
反-2-庚醛	蒸馏水	2.80	脂肪味道	0.063
2-甲氧基-4-甲基苯酚	蒸馏水	1.58	烟熏味	0.039
乙酸	蒸馏水	5.84	刺激性气味	695.19

注: “[a]”表示第一梯度先用丙二醇溶解并定容, 后续均用蒸馏水稀释; “[b]”表示第一梯度先用1 mL乙醇溶解并用蒸馏水定容, 后续均用蒸馏水稀释; “[c]”表示用丙三醇:蒸馏水=1:1的混合溶剂进行稀释。

醛、水杨酸甲酯、1-辛烯-3-酮、1-辛烯-3-醇、苯甲醇、正壬醛、香叶基丙酮、茴香脑、癸醛、反-2-庚醛、2-甲氧基-4-甲基苯酚、乙酸、棕榈酸乙酯的气味阈值见表 3。

2.3.2 UASE-GC-MS 测定酸笋中特征风味物质的结果与分析 本研究采用三点选配法成功测定了酸笋中的 16 种挥发性风味物质的阈值, 并与文献记载阈值进行了对比。通过对比发现实验测得阈值与文献阈值稍有差异。这些差异可能源于实验方法的差异、感官评价的主观性、风味物质的特性及风味物质之间的相互作用等多种因素。本文在测定风味物质的气味阈值基础上, 计算出挥发性风味物质的 OAV, 用以确定酸笋中的特征风味物质。19 种风味物质的 OAV 计算结果见表 4。

由表 4 可知, 对所有样品而言, 酚类物质当中对甲苯酚(在五个样品中 OAV 最高为 20951.30, 最低

表 4 酸笋特征风味物质的结果与分析

Table 4 Results and analysis of characteristic flavor substances in sour bamboo shoots

序号	化合物名称	CAS	测量阈值(mg/kg)	文献阈值(mg/kg)	OAV				
					VTNF	VTEMF	SGNX-X	SGNX-D	SGL
1	对甲苯酚	106-44-5	0.085	0.001~0.2	5396.56	7462.26	3635.01	20951.30	2153.03
2	苯酚	108-95-2	1.32	0.031~58.58	5.00	5.61	1.85	9.04	1.27
3	二乙二醇乙醚	111-90-0	11.30	0.034~1.6	−	0.11	−	−	−
4	E-2-辛烯醛	2548-87-0	0.0059	0.00034~0.02	235.15	263.67	28.03	155.30	25.67
5	水杨酸甲酯	119-36-8	0.47	0.0349~0.04	3.02	1.83	0.64	0.68	0.89
6	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	0.00098	0.000003~0.01	−	−	1893.46	614.59	1958.36
7	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	0.16	0.000005~0.1	−	0.97	3.29	−	0.2
8	苯甲醇	100-51-6	183.30	0.1~100	−	−	−	−	−
9	正壬醛	124-19-6	0.05	0.00032~0.1	−	6.29	−	−	0.41
10	香叶基丙酮	3796-70-1	0.94	0.06~6.4	1.15	1.40	−	0.68	0.82
11	茴香脑	104-46-1	0.35	0.05~15	8.36	6.82	0.61	2.76	1.01
12	癸醛	112-31-2	0.01	0.0008~0.245	185.57	201.48	67.51	241.44	45.40
13	反-2-庚醛	18829-55-5	0.063	0.013~0.04	12.19	12.39	9.07	−	2.80
14	2-甲氧基-4-甲基苯酚	93-51-6	0.039	0.021~0.09	14.35	7.49	1.05	23.21	2.34
15	乙酸	64-19-7	695.19	10~1000	1.91	1.45	1.14	7.61	0.51
16	棕榈酸乙酯	628-97-7	10.03	2	0.13	0.17	−	0.28	−
17	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	#	0.5	19.74	36.07	6.20	27.19	5.29
18	1-壬醛	124-19-6	#	0.0031	−	−	−	29.09	32.06
19	肉桂酸乙酯	103-36-6	#	0.017	24.95	11.67	10.435	48.13	5.99

注: “#”代表未测定该物质阈值, 计算该物质OAV的阈值摘自文献[30]; “−”代表OAV<0.1或在样品中未测出该物质。

为 2153.03）是绝对主导的特征风味物质，是酸笋“标志性”臭味（窖泥臭、皮革臭）的最主要来源。苯酚具有特殊的臭味和燃烧味[25]，在 5 种酸笋中 OAV 均>1。这与 FU 等[26] 对台湾酸笋的研究结论相一致。酚类化合物作为酸笋中最重要的一类香气活性化合物，主要呈现出刺激性气味和一些特殊的异味[27]。此外，酸笋中的醛类物质（E-2-辛烯醛、癸醛、反-2-庚醛、1-壬醛）和酮类物质（1-辛烯-3-酮）因低气味阈值和高 OAV（>10），对酸笋的风味有重大贡献，分别贡献了汽油味及蘑菇香气等复杂感官属性。而酸笋中的醇类、酯类赋予了酸笋花果香味道以及清香味，但是普遍阈值较高，如苯甲醇、棕榈酸乙酯气味阈值分别为 183.30、10.03 mg/kg。其他物质如茴香脑具有令人愉快的茴香气味[28]。这些物质共同作用形成了酸笋独特的风味。

实验共鉴定出 16 种挥发性风味物质的 OAV≥1，这些物质是酸笋的特征风味物质。在 VTNF、VTEMF、SGNX-X、SGNX-D、SGL 这五种酸笋样品中分别测出特征风味物质 12 种、13 种、11 种、11 种、11 种，SGNX-X 样品中测出的特征风味物质比其他样品更多，因此 SGNX-X 风味更加丰富。对甲苯酚、E-2-辛烯醛、1-辛烯-3-酮、癸醛、反-2-庚醛、2-甲氧基-4-甲基苯酚、2,4-二叔丁基苯酚、1-壬醛、肉桂酸乙酯这 9 种风味物质的 OAV>10，OAV>10 的风味物质被认为对酸笋的风味有重要贡献[29]。对甲苯酚、1-辛烯-3-酮、癸醛的 OAV 值更是明显高于其他风味物质，所以对甲苯酚、1-辛烯-3-酮、癸醛是酸笋特殊风味的最关键的挥发性香气成分。另外，本研究首次明确了肉桂酸乙酯和癸醛的关键贡献作用。其中，肉桂酸乙酯作为酯类物质中唯一进入高贡献物质组的成分，其清甜花果香特性显著增强了酸笋风味的层次感。而癸醛作为醛类核心组分，其柑橘-蜡质复合香型不仅直接贡献清新前调，又通过平衡酚类刺激性气味、协同酯类提升香气层次，有效平衡了酸笋的风味。

2.3.3　特征风味物质的 PCA　对五种酸笋的特征风味物质进行 PCA，以使基于核心风味的样品分布关系更加清晰。通过对比发现，其与全组分模型高度一致（例如，SGL 与 SGNX-X 在 PCA 图中位置较为接近），这说明样品的风味差异主要由上述特征风味物质决定。这一结果有力地验证了通过 OAV 筛选出的关键香气活性物质，确实是区分不同工艺酸笋风味特征的最核心化学基础。

由图 4 可知，VTNF 与 VTEMF 与反-2-庚醛、二乙二醇乙醚和正壬醛等高度关联。棕榈酸乙酯、癸醛和苯酚等在主成分 1 上贡献率较高，而 SGNX-D 落在了主成分 1 的较高正向区间，表明 SGNX-D 中这些化合物的含量明显高于其他样品。因此，SGNX-D 工艺的独特性主要体现由其高含量的棕榈酸乙酯、癸醛和苯酚等关键标志物。这些物质不仅

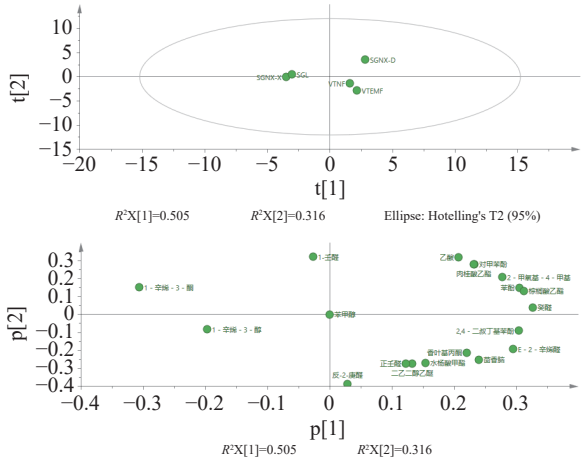


图 4　不同酸笋 OAV 的 PCA 得分图和载荷图

Fig.4　PCA score diagram and loading diagram of OAV values for different samples of sour bamboo shoots

在统计学上是区分样品的关键变量，其特有的感官属性（柑橘香味等）也从化学层面定义了 SGNX-D 酸笋的独特风味本质。今后的工艺优化或质量控制可以重点关注这些标志物的含量变化。

3　结论

本研究采用 UASE-GC-MS 法从 5 种酸笋中鉴定出 78 种挥发性物质（醇类 16 种、酚类 7 种、醛类 9 种等）。酸类（乙酸占比 49.3%~72.9%）与酚类（对甲苯酚占比 21.5%~39.3%）为绝对优势组分。实验共鉴定出 16 种 OAV≥1 的关键风味物质，其中对甲苯酚、1-辛烯-3-酮、癸醛因显著高 OAV 值被确认为核心成分。不同工艺酸笋风味差异显著，SGNX-D 样品因大罐发酵工艺其总风味物质含量最高（7264.74 μg/g），而 SGNX-X 样品特征风味物质种类最丰富。PCA 结果进一步表明，样品风味差异主要由 OAV 筛选出的特征风味物质决定，SGNX-D 的独特风味与棕榈酸乙酯、癸醛和苯酚等高含量标志物密切相关。

研究结果为发酵食品风味调控与工艺优化提供了理论支持，并强调未来需开发更灵敏的检测技术来辅助分析，以实现风味体系的精准解析与动态调控。今后，还可以结合风味重组和缺失实验，从而更深入地了解这些特征风味物质对酸笋整体风味的贡献。通过这些研究，可以更好地理解和调控酸笋的风味，满足消费者的不同需求，推动酸笋产业的可持续发展。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] GUAN Q, HUANG T, PENG F, et al. The microbial succession and their correlation with the dynamics of flavor compounds involved in the natural fermentation of suansun, a traditional Chinese

fermented bamboo Shoots[J]. Food Research International, 2022, 157: 111216.
[2] 李昕诺, 吴宇辉, 吴良如, 等. 基于宏基因组学揭示自然发酵与植物乳杆菌接种发酵酸笋中微生物代谢及关键风味基因[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(7): 167−176. [LI X N, WU Y H, WU L R, et al. Revealing microbial metabo lism and key flavor genes in natural fermented and Lactobacillus plantarum inoculated fermented Suansun based on macrog enomics[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(7): 167−176.]
[3] 冯浩森, 李湘鉴, 冯爱军, 等. 酸笋微生物与风味形成研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 91−99. [FENG H S, LI X L, FENG A J, et al. Research progress on microorganisms and flavor formation of sour bamboo shoots[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(22): 91−99.]
[4] 关倩倩. 我国传统酸笋中微生物菌系结构及其对特征风味物质形成的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2021. [GUAN Q Q. Microbial community flora in Chinese traditional suansun and its influence on the formation ofcharacteristie flavors[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.]
[5] 郭荣灿, 王成华, 江虹锐, 等. 广西发酵酸笋气味物质提取方法优化及比较分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 202−210, 220. [GUO R C, WANG C H, JIANG H R, et al. Optimization and comparison analysis of extraction methods of odorant from Guangxi fermentated bamboo shoots[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 202−210, 220.]
[6] ZHANG X, WANG Q, XIE Y, et al. Correlation between Microorganisms and Volatile Compounds during Spontaneous Fermentation of Sour Bamboo Shoots[J]. Fermentation, 2024, 10(7): 333.
[7] LINZHI K, DANXIA N I E, LIN C, et al. Effect of different processing techniques on the quality of sour bamboo shoots[J]. Shipin gongye ke-ji, 2024, 45(8): 182−189.
[8] WU J W, QIN R, LU Y Y, et al. Dynamic changes in microbiota during fermentation of bamboo shoots under varying conditions in Guangxi, China[J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16: 1529935.
[9] MA L, GAO W, CHEN F, et al. HS-SPME and SDE combined with GC–MS and GC-O for characterization of flavor compounds in Zhizhonghe Wujiapi medicinal Liquor[J]. Food Research International, 2020, 137: 109590.
[10] NI Q, AMALFITANO N, BIASIOLI F, et al. Bibliometric Review on the Volatile Organic Compounds in Meat[J]. Foods, 2022, 11(22): 3574.
[11] WANG L, TANG P, ZHANG P, et al. Unraveling the aroma profiling of Baijiu: Sensory characteristics of aroma compounds, analytical approaches, key odor-active compounds in different Baijiu, and their synthesis Mechanisms[J]. Trends in Food Science & amp; Technology, 2024, 146: 104376.
[12] 杨晶晶, 赵云雄, 刘宝贵, 等. 基于顶空固相微萃取-气质联用技术结合香气活度值分析 4 种干燥方式花果香型红茶的香气组分差异[J/OL]. 食品与发酵工业, 2025, 1−12 [2025-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.ts.20250422.1208.002.html. [YANG J J, ZHAO Y X, LIU B G, et al. Analysis of aroma compounds in flower and fruit scented black tea dried by 4drying dethods by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry combined with odor activity value[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2025, 1−12 [2025-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.ts.20250422.1208.002.html.]
[13] BRATTOLI M, CISTERNINO E, DAMBRUOSO P R, et al. Gas chromatography analysis with olfactometric detection (GC-O) as a useful methodology for chemical characterization of odorous compounds[J]. Sensors, 2013, 13(12): 16759−16800.
[14] TANG H, LI P, CHEN L, et al. The formation mechanisms of key flavor substances in stinky tofu brine based on metabolism of aromatic amino acids[J]. Food Chemistry, 2022, 392: 133253.
[15] KARUNANITHI A, VENKATACHALAM S. Ultrasonic-assisted solvent extraction of phenolic compounds from Opuntia ficus-indica peel: Phytochemical identification and comparison with soxhlet extraction[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(5): e13126.
[16] 郭家秀, 张宿义, 赵金松, 等. 一种萃取酒醅中低沸点挥发性成分的方法[J]. 中国酿造, 2017, 36(12): 144−148. [GUO J X, ZHANG S Y, ZHAO J S, et al. A method of extraction of the lower boiling volatile compounds from fermented grains[J]. China Brewing, 2017, 36(12): 144−148.]
[17] 何菲, 孙宝国, 李贺贺, 等. 白酒中风味物质味觉阈值的测定[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 371−383. [HE F, SUN B G, LI H H, et al. Determination of taste threshold of flavor compounds in Baijiu[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 371−383.]
[18] FAN W, XU Y. Determination of odor thresholds of volatile aroma compounds in baijiu by a forced-choice ascending concentration series method of limits[J]. Liquor Making, 2011, 38(4): 80−84.
[19] CZERNY M, CHRISTLBAUER M, CHRISTLBAUER M, et al. Re-investigation on odour thresholds of key food aroma compounds and development of an aroma language based on odour qualities of defined aqueous odorant solutions[J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(2): 265−273.
[20] 易封萍, 马宁, 朱建才. 基于 GC-O、OAV 及 Feller 加和模型对酱香型习酒特征香气成分的分析[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 242−256. [YI F P, MA N, ZHU J C. Identification of characteristic aroma compounds in soy sauce aroma Type Xi Baijiu using Gas Chromatography Olfactometry, Odor Activity Value and Feller's additive model[J]. Food Science, 2022, 43(2): 242−256.]
[21] LYTRA G, TEMPERE S, LE FLOCH A, et al. Study of sensory interactions among red wine fruity esters in a model solution [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2013, 61(36): 8504−8513.
[22] ROTHE M, THOMAS B. Aromastoffe des brotes: Versuch einer auswertung chemischer geschmacksanalysen mit hilfe des schwellenwertes[J]. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung, 1963, 119: 302−310.
[23] 练文妃, 尚红岩, 莫倩, 等. 超声辅助纤维素酶法提取柑橘皮果胶工艺优化[J]. 食品安全导刊, 2024(32): 109−111. [LIAN W J, SHANG H Y, MO Q, et al. Optimization of ultrasonic assisted cellulase extractionprocess for citrus peel pectin[J]. China Food Safety Magazine, 2024(32): 109−111.]
[24] 邓勇. 四川榨菜后熟转化作用机制的研究[J]. 食品科学, 1992, 13(10): 8−12. [DENG Y. Study on the mechanism of post-ripening transformation of Sichuan mustard tuber[J]. Food Science,

1992, 13(10): 8−12.］
［25］ 马鸿雁, 范红, 刘倩, 等. 顶空固相微萃取-GC-MS 结合气味活度值分析土鳖虫关键腥臭气成分[J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(1): 88−96.［MA H Y, FAN H, LIU Q, et al. Key components of fishy smell of eupolyphaga steleophaga by head space-solid phase microextraction-GC-MS and odor activity value[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2024, 41(1): 88−96.］
［26］ FU S G, YOON Y, BAZEMORE R. Aroma-active components in fermented bamboo shoots[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(3): 549−554.
［27］ 田玉峰, 孙明浩, 许家敏, 等. 广西酸笋特征风味化合物的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 299−306.［TIAN Y F, SUN M H, XU J M, et al. Characterization of key aroma compounds in Guangxi fermented bamboo shoots[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(23): 299−306.］
［28］ 尹含靓, 肖何, 邓高文, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析风味鱼仔加工过程中风味物质的变化[J]. 中国调味品, 2022, 47(3): 8−13.［YIN H L, XIAO H, DENG G W, et al. Analysis of the changes in volatile flavor components of flavored fish larvae during processing by HS-SPME-GC-MS[J]. China Condiment, 2022, 47(3): 8−13.］
［29］ 樊杉杉, 管桂坤, 苏雅芝, 等. 采用 GC-O-MS 结合香气活力值分析兰陵美酒香气活性组分特征[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 243−249.［FAN S S, GUAN G K, SU Y Z, et al. Characterizaion of the aroma-active components in Lanling Meijiu based on GC-O-MS and OAV[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(1): 243−249.］
［30］ VAN GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. 2nd. Netherlands: Oliemans Punter & Partners, 2011: 233−412.