

不同地区甜酒曲发酵米酒工艺的优化及风味成分比较分析

杨洋洋, 冶海潇, 梁安健, 朱成林, 唐俊妮*

(西南民族大学药学与食品学院, 四川成都 610000)

摘要: 为比较宜昌、无锡、随州和南宁地区酒曲对发酵米酒风味成分的差异, 该研究通过正交试验方法对四个地区酒曲的发酵工艺进行了优化, 并对四种发酵后的米酒进行基本理化指标测定; 随后采用电子舌技术分析四种米酒的滋味特性, 并通过主成分分析直观对比风味特征差异; 同时利用顶空固相微萃取-气质联用(HS-SPME-GC-MS)技术对米酒的挥发性风味物质成分进行测定。结果表明, 宜昌、无锡、随州、南宁四种地区酒曲最佳酿造温度、时间、接种量分别为 32 ℃、60 h、0.2%; 28 ℃、60 h、0.4%; 28 ℃、60 h、0.6%; 32 ℃、48 h、0.6%。四种酿造米酒的 pH 值在 3.88~4.01 范围内, 差异不显著; 宜昌米酒还原糖含量最高为 431.53 mg/mL, 四种米酒还原糖差异显著 ($P<0.05$)。不同地区酒曲制作的米酒风味差异显著, 其中南宁米酒在风味上表现最佳, 具有酸甜适中、滋味浓郁的特点, 其酯类风味化合物种类最多且相对含量最高, 米酒风味浓郁醇厚; 无锡米酒和随州米酒在色泽、风味、口感、组织状态上有所差异, 整体风味也各具特色; 宜昌米酒相较于其他三种甜米酒甜度最高, 但口味相对单一。该研究区分了不同地区酒曲发酵米酒的独特风味特征, 为传统米酒品质提升和地域性特色保持提供参考。

关键词: 米酒; 甜酒曲; 酿造工艺; 风味特性

文章编号: 1673-9078(2025)08-257-265

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0736

Optimization of Fermentation Process and Comparative Analysis of Flavor Components of Fermented Rice Wine (Sweet Wine Koji) from Different Regions

YANG Yangyang, YE Haixiao, LIANG Anjian, ZHU Chenglin, TANG Junni*

(College of Pharmacy and Food, Southwest Minzu University, Chengdu 610000, China)

Abstract: The differences in the flavor components of fermented rice wine varieties (Yichang, Wuxi, Suizhou, and Nanning local koji) were compared by optimizing the process for the fermentation of koji from four regions using an orthogonal test, and the basic physical and chemical indexes of the four kinds of fermented rice wine were determined. An

引文格式:

杨洋洋, 冶海潇, 梁安健, 等. 不同地区甜酒曲发酵米酒工艺的优化及风味成分比较分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 257-265.

YANG Yangyang, YE Haixiao, LIANG Anjian, et al. Optimization of fermentation process and comparative analysis of flavor components of fermented rice wine (Sweet Wine Koji) from different regions [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 257-265.

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金优秀人才培养工程项目 (ZYN2024145)

作者简介: 杨洋洋 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工与安全, E-mail: 1557534236@qq.com

通讯作者: 唐俊妮 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全与食品微生物, E-mail: 392783291@qq.com

electronic tongue was used to analyze the flavor characteristics of the four kinds of rice wine, and the differences in the flavor characteristics were compared by principal component analysis. The volatile flavor components of the four kinds of rice wine were determined by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME-GC-MS). The optimum brewing temperature, time, and inoculum amount of koji for Yichang, Wuxi, Suizhou, and Nanning were 32 °C, 60 h, 0.2%; 28 °C, 60 h, 0.4%; 28 °C, 60 h, 0.6%; and 32 °C, 48 h, 0.6%, respectively. The pH of the four kinds of fermented rice wine was in the range of 3.88~4.01, where the difference was not significant. Yichang rice wine had the highest content of reducing sugar (431.53 mg/mL), where the content differed significantly among the four kinds of rice wine ($P<0.05$). There were significant differences in the flavor of the rice wine produced from koji in different regions, among which Nanning rice wine had the best flavor, with moderate acidity and sweetness and a rich taste. This wine had the most types of ester flavor compounds and the highest relative content, and had a rich and mellow flavor. Wuxi rice wine and Suizhou rice wine were different in color, flavor, taste, and organizational state, and the overall flavor was also different. Compared with the other three kinds of sweet rice wine, Yichang rice wine has the highest sweetness, but its taste and flavor were relatively simple. This study distinguished the unique flavor characteristics of koji fermented rice wine from different regions and provides a reference for improving the quality of traditional rice wine and maintaining the regional characteristics.

Key words: rice wine; sweet wine qu; brewing process; flavor characteristics

米酒是一种将小麦曲、红曲等发酵剂添加到糯米中发酵而成的传统酒精饮料。中国米酒作为世界上传统酒精饮料之一，因其独特的清爽甜味和丰富的营养价值，深受亚非地区消费者的喜爱^[1]。米酒中富含多酚、肽、有机酸、低聚糖等，具有抗氧化、降血糖、增强免疫力、改善肠道菌群等保健功效^[2]。其独特的口感和香气作为米酒的重要品质属性之一，是评价米酒优劣的重要标准^[3]。米酒的风味特征与其原料、发酵条件和甜酒曲种类有关，其中甜酒曲发酵产生的代谢产物对酒体滋味特征和挥发性风味化合物形成有重要作用^[4]。使用不同地区甜酒曲酿造的米酒呈现出独特的滋味特征，具有较强的地域性和时代特色，其中孝感米酒^[5]、苏州米酒^[6]、广西壮乡米酒^[7]等较为著名，研究所在地域的甜酒曲更具有代表性。地域性酒曲不仅承载着当地的风俗习惯，而且融合了民族特色，对于传承和发展历史文化具有重要意义^[8]。传统米酒酿造多以小型手作坊为主，随着现代生产手段的增加，米酒的生产方式逐渐实现工业化生产。利用电子舌、HS-SPME-GC-MS 等现代分析技术对不同地区米酒滋味和风味物质进行分析对比，有利于地域特色米酒风味特征的建立^[9]，并形成更为精确的品质评价体系，对于其工业化生产有参考价值。该研究采用正交试验方法通过对感官评价指标的测定优化四个地区甜酒曲的发酵工艺，对四种发酵后的米酒进行基本理化指标的测定，采用 HS-SPME-GC-MS 和电子舌技

术分别对米酒中的挥发性风味物质成分和滋味特性进行测定，并通过主成分分析直观对比四种米酒的风味特征差异，从而能够明确不同地区米酒的风味特点，为米酒的进一步研发及工业化生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

圆糯米，沈阳粮油集团有限公司；宜昌酒曲，根霉菌；无锡酒曲，根霉菌和鼠李糖乳杆菌；随州酒曲，根霉菌；南宁酒曲，根霉菌和酵母菌；碘、碘化钾，成都市科龙化工试剂厂；酚酞，福晨（天津）试剂有限公司；盐酸、氢氧化钠，成都科隆试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

Trace DSQ 气相色谱-质谱联用仪：美国 Thermo 公司；HZQ-F160 恒温振荡培养箱：江苏省太仓市实验设备厂；TP-214 电子天平：北京赛多利斯仪器系统有限公司；SW-CJ-2FD 洁净工作台：苏净集团苏州安泰空气技术有限公司；mLS-3020 高压蒸汽灭菌锅：日本 SANYO 公司；多功能电煮锅：金斯伦有限公司；AKHL-24 艾柯超纯水机（台湾艾柯）：成都康宁实验专用纯水设备；具塞刻度试管：长沙湘波科学仪器有限公司；固相微萃取：德国默克公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程及操作要点

糯米→清洗→浸泡→蒸制→摊凉→拌曲→发酵→过滤→米酒

选米浸泡：应选择当年生产的优质糯米为原料，原料必须色泽亮白、均匀整齐、黏度适中、无杂质，水分含量≤14.5%；通过筛选除去碎米和杂质后，用自来水淘洗两到三次，直至淘米水不再浑浊。将淘洗干净的糯米在 20℃浸泡 12 h 以上，以糯米无白心、可捏碎为标准。

蒸制摊凉：将浸泡好的糯米沥干水后，在多功能电蒸锅蒸制 20~30 min 为佳，要求蒸煮后不黏连、饭粒松软、疏松不糊、均匀一致。在蒸制后可以淋上适量的凉白开水快速降低温度，使其降温到 30℃左右为宜，实际比皮感温度略低即可。

拌曲发酵：在盛有糯米原料的容器中加入一定量的酒曲，用无菌筷子将原料和菌种均匀混合。将拌好的饭粒搭成“倒喇叭”形的凹圆窝。

1.3.2 正交试验

在预实验的基础上，选定发酵温度（A）、发酵时间（B）和接种量（C）作为影响米酒品质的关键因素，并以甜米酒的感官评分作为评价标准。采用 $L_9(3^3)$ 正交试验设计，对这三个因素在不同水平上进行优化，以改进米酒的酿造工艺。具体的试验设计因素及其水平设置见表 1。

表 1 正交试验因素和水平表				
Table 1 Factors and levels of orthogonal test				
酒曲来源	水平	A 温度/℃	B 时间/h	C 接种量/%
宜昌酒曲	1	28	36	0.2
	2	32	48	0.4
	3	36	60	0.6
无锡和随州酒曲	1	28	48	0.2
	2	32	60	0.4
	3	36	72	0.6
南宁酒曲	1	28	36	0.4
	2	32	48	0.6
	3	36	60	0.8

1.3.3 理化指标测定

表观糖度测定：将发酵好的甜米酒汁经过滤后用阿贝折射仪进行测定，记录糖度数值。

还原糖和总糖含量测定：通过 3,5- 二硝基水杨酸分光光度法^[10]测定米酒中的还原糖含量和总糖含量。

pH 值测定：将发酵好的米酒汁经过滤后用酸度计测定，记录 pH 值^[11]。

1.3.4 挥发性风味成分测定

HS-SPME-GC-MS 检测条件：参考邹凌波^[12]和任然^[13]的方法，采用 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头，将已老化的固相微萃取头插入到样品，将 3 mL 的米酒样品放于顶空进样瓶中，10 min 后在 50℃萃取吸附条件下富集风味物质 30 min，在 220℃下对其进行解析，并对其进行 HS-SPME-GC-MS 分析。

色谱条件：TR-FFAP 色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；升温程序：起始温度 50℃保持 2 min，以 6℃/min 的速度升温至 220℃，保持 15 min；载气（He）流量 1.0 mL/min，采用不分流模式。

质谱条件：电子轰击离子源；电子能量 70 eV；传输线温度为 250℃；质量扫描范围为 m/z 33~450。

1.3.5 感官评价

参照 NY/T 1885-2017《绿色食品 米酒》^[14]和米酒评价标准^[15]，由 10 名（5 男 5 女）具有较好味觉、嗅觉能力和相关经验的食物专业人员组成，并且经过初步的感官培训和评价标准培训，对发酵米酒的口感、色泽、风味和组织状态进行评估，根据表 2 中提供的感官评价标准细则进行评分，其中色泽占比 20%，风味占比 20%，口感占比 30%，组织状态占比 30%，总分设定为 100 分。

表 2 感官评分标准		
Table 2 Sensory rating criteria		
项目	评分标准	感官评分
色泽 (20 分)	色泽均匀、有光泽	15~20
	色泽较均匀、光泽度欠佳	10~14
	乳白色、不均匀	0~9
风味 (20 分)	清香协调，无异味	15~20
	香气较浓或较淡，无异味	10~14
	香气过浓或过淡	0~9
口感 (30 分)	口感细腻、味道柔和、香甜可口	20~30
	口感较粗糙、酒味较淡薄	10~19
	口感粗糙、酒味淡薄	0~9
组织状态 (30 分)	质地均匀，酒醪清澈	20~30
	质地均匀，酒醪较清澈	10~19
	有明显的沉淀物或悬浮物	0~9

1.3.6 电子舌测定

参考袁灿等^[16]的方法采用 Astree 电子舌第六套传感器包括 AHS-Sourcess，PKS，CTS-Saltiness，NMS-

umami, CPS, ANS, SCS 共 7 根传感器, 以 Ag/AgCl 作为参比电极。这些传感器中, AHS-Sourcess, CTS-Saltiness, NMS-umami 传感器针对酸味、咸味和鲜味有明确的识别功能。同时, 通过 0.06 mg/mL 质量浓度梯度的蔗糖标准溶液, 对甜味进行精确测量。发酵后的甜米酒首先通过无菌双层纱布进行过滤, 然后进一步使用 18 cm 的定性滤纸进行精滤, 以获得澄清的滤液, 将所得滤液与超纯水按 1:2 的比例混合稀释。最后, 将 80 mL 稀释后的米酒样本倒入电子舌专用的烧杯中, 以便进行后续的检测分析。

1.3.7 数据处理

选用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA) 和邓肯多重比较分析检验 (Duncan), $P<0.05$ 代表差异显著, 每组实验三个数据, 所得结果以平均值 $\pm$ 标准差方式表示; Origin 2022 制作雷达图和主成分分析图; GraphPad Prism 9.5 绘制热图。

2 结果与分析

2.1 正交试验工艺优化结果

由表 3 可知, 在宜昌米酒中, 根据极差 R 值的大小排序可知, 对宜昌米酒感官评分的影响因素按程度大小为发酵温度 (A)>发酵时间 (B)>接种量 (C), 宜昌酒曲最佳酿造工艺组合为 A₂B₃C₁, 即

发酵条件为 32 ℃、60 h、0.2%。在此优化条件下, 宜昌米酒感官评分为 88 分, 米酒口感细腻, 有酒香味, 酒体清澈均匀; 在无锡米酒中, 根据极差 R 值的大小排序可知, 对 B 米酒感官评分的影响因素按程度大小为发酵温度 (A)>发酵时间 (B)>接种量 (C), 无锡酒曲最佳酿造工艺组合为 A₁B₂C₂。根据正交试验结果, 对无锡米酒优化后的发酵条件进行验证。最佳酿造工艺组合 A₁B₂C₂ 发酵条件为 28 ℃、60 h、0.4%, 与正交实验最高分发酵条件为 28 ℃、60 h、0.6% 两组米酒进行比较, A₁B₂C₂ 感官评分为 92 分, 高于正交试验 A₁B₂C₃ 最高分 90 分。综上所述, 无锡米酒最佳酿造工艺为 28 ℃、60 h、0.4%, 无锡米酒酸甜可口, 色泽透亮; 在随州米酒中, 根据极差 R 值的大小排序可知, 对随州米酒感官评分的影响因素按程度大小为发酵温度 (A)>接种量 (C)>发酵时间 (B), 随州酒曲最佳酿造工艺组合为 A₁B₂C₃, 即发酵条件为 28 ℃、60 h、0.6%。对优化发酵工艺后的米酒测定, 随州米酒感官评分为 90 分; 在南宁米酒中, 根据极差 R 值的大小排序可知, 对南宁米酒感官评分的影响因素按程度大小为发酵时间 (B)>发酵温度 (A)>接种量 (C), 南宁酒曲最佳酿造工艺组合为 A₂B₂C₂, 即发酵条件为 32 ℃、48 h、0.6%。对优化发酵工艺后的米酒测定, 南宁米酒感官评分为 93 分。

表 3 正交试验结果
Table 3 Orthogonal test result

序号	A 发酵温度/℃	B 发酵时间/h	C 接种量 /%	宜昌 / 无锡 / 随州 / 南宁 感官评分
1	1	1	1	60/85/76/70
2	1	2	3	62/90/90/84
3	1	3	2	66/88/80/75
4	2	1	3	68/69/82/78
5	2	2	2	80/83/79/93
6	2	3	1	88/73/75/82
7	3	1	2	61/65/68/72
8	3	2	1	73/68/67/83
9	3	3	3	68/58/76/76
k1	62.67/87.67/82.00/76.33	63.00/73.00/75.33/73.33	73.67/75.33/72.67/78.33	
k2	78.67/75.00/78.67/84.33	71.67/80.33/78.67/86.67	69.00/78.67/75.67/80.00	
k3	67.33/63.67/70.33/77.00	74.00/73.00/77.00/77.67	66.00/72.33/82.67/79.33	
R	16.00/24.00/11.67/8.00	11.00/7.33/3.33/13.33	7.67/6.33/10.00/1.67	

2.2 理化指标结果

在表 4 中列出四种不同酒曲酿造的米酒基本理化指标。由表 4 可知，四种米酒表观糖度范围在 42.16%~45.62%，差异不显著；pH 值不仅能够反映出微生物的生长和代谢状态，而且对微生物活性及其产生的代谢产物有显著影响^[17]，米酒 pH 值范围在 3.88~4.01。还原糖含量可以作为衡量糖化与发酵过程是否达到和谐平衡的重要指标，四种米酒还原糖含量差异显著 ($P<0.05$)，其中宜昌米酒的还原糖含量 431.53 mg/mL 最高；总糖含量在 453.43~464.00 mg/mL 之间，其中无锡酒曲和随州酒曲的总糖含量较高。四种米酒相较于大麦若叶米酒^[18]总糖含量 138.00 mg/mL 高，整体偏甜，酸度适中。

表 4 理化指标测定结果				
Table 4 Physicochemical index determination results				
酒曲	表观糖度/%	pH 值	还原糖/(mg/mL)	总糖/(mg/mL)
宜昌	45.62 ± 0.88 ^a	3.88 ± 0.16 ^a	431.53 ± 2.17 ^a	455.87 ± 1.14 ^b
无锡	42.16 ± 1.19 ^a	3.84 ± 0.07 ^a	311.97 ± 7.56 ^c	462.21 ± 3.58 ^a
随州	45.25 ± 4.12 ^a	4.01 ± 0.09 ^a	308.82 ± 4.71 ^c	464.00 ± 1.46 ^a
南宁	42.88 ± 0.57 ^a	3.91 ± 0.09 ^a	349.26 ± 9.79 ^b	453.43 ± 1.95 ^b

注：表中数据表示为 $\bar{x} \pm s$ ($n=3$)，同列不同字母表示存在显著差异，(Duncan 检验， $P<0.05$)。

2.3 感官分析结果

品评人员主要通过色泽、风味、组织状态和整体接受性对甜米酒的感官特征进行描述。从图 1 雷达图能够直观地看到米酒的感官评分情况，宜昌米酒感官评分为 88 分，无锡米酒感官评分为 92 分，随州米酒感官评分为 90 分，南宁米酒感官评分为 93 分。甜米酒的感官特性各不相同，南宁米酒风味高于其他三种米酒为 19 分（满分 20），口感和色泽得分分别为 28 分和 19 分，整体评分最高，整体风味具有酸甜适中、滋味浓郁的特点；宜昌米酒色泽 17 分、风味 16 分，口感 27 分，相较于其他三种甜米酒得分较低，甜度较高，口味比较单一，整体评分最低为 88 分；无锡米酒和随州米酒在色泽、风味、口感、组织状态上有所差异，四种米酒感官评分排序为南宁米酒 > 无锡米酒 > 随州米酒 > 宜昌米酒。

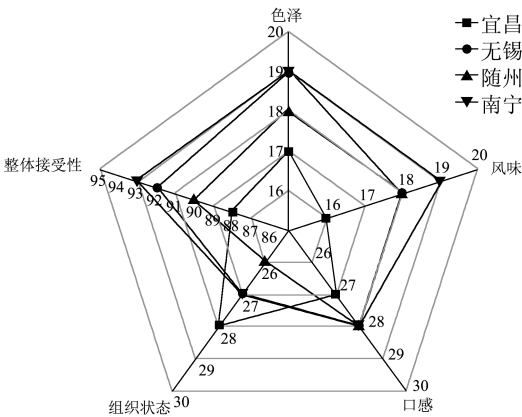


图 1 四种不同发酵米酒的感官评价结果
Fig.1 Sensory evaluation of four different fermented rice wine

2.4 电子舌雷达图和PCA分析

通过电子舌技术分析了四种米酒的风味，图 2 中雷达图反映了米酒在酸、甜、鲜、咸四种味觉强度上的相对排序为：酸味和鲜味为无锡米酒 > 随州米酒 > 宜昌米酒 > 南宁米酒；甜味和咸味为南宁米酒 > 宜昌米酒 > 随州米酒 > 无锡米酒。无锡米酒酸味为 8.5，鲜味为 8.6，在酸、鲜滋味突出；南宁米酒甜味为 9.1，咸味为 9，在甜、咸滋味突出。在甜米酒中氨基酸和鲜味化合物是米酒中鲜味和咸味的重要来源^[19]，氨基酸含量是体现鲜味的重要指标，鲜味的差异反映出了甜米酒中微生物群落蛋白质分解的能力以及对米酒整体风味的影响。无锡米酒和南宁米酒在酸、甜、咸、鲜滋味上差异最大，差值为 5.4、5.4、5.3、5.6。宜昌米酒和随州米酒在酸、甜、鲜、咸滋味比较均衡，两者之间相比，随州米酒的酸、鲜滋味高于宜昌米酒，在甜、咸滋味上低于宜昌米酒。与韩腾等^[20]研究不同品种米酒对滋味响应值有明显差异结果一致，电子舌用于区别米酒滋味，显示出样品的整体滋味特征。

通过电子舌传感器检测得到的多指标数据信息经过主成分分析处理，如图 3 所示，PC1 和 PC2 的贡献率分别达到了 95.8% 和 3.4%。两者累计贡献率达 99.2%，大于 80.0%，表明电子舌的 PCA 分析结果揭示了它能够全面地呈现样品的风味特征。样品在 PCA 图上的数据点紧密聚集，这表明通过电子舌得到的测定结果具有较好的一致性和可靠性。米酒的香气成分区域完全分离，这表明 PCA 分析法能够有效地区分米酒的香气成分。数据点分布于四个象限中，反映出不同样品之间在风味上的差异。

在 PCA 图中, PC1 的贡献率显著高于 PC2, 这意味着横轴方向上样品间距离的增大, 对应着它们风味差异性的增加^[21]。宜昌米酒和南宁米酒分布于 Y 轴的右侧, 而无锡米酒和随州米酒分布于 Y 轴左侧, 表明分布在两侧的米酒种类在第一主成分 PC1 (95.8%) 上差异明显。无锡米酒和随州米酒距离较近, 两者之间的香气差异相对较小, 宜昌米酒和南宁米酒在纵坐标距离较大, 说明在第二主成分 PC2 (3.4%) 上差异明显。综上所述, 宜昌米酒和南宁米酒位于单个象限中均与其他三种米酒风味特征有显著差异, 随州米酒和无锡米酒在主成分分析图中位置接近, 两者之间的风味差异较小。

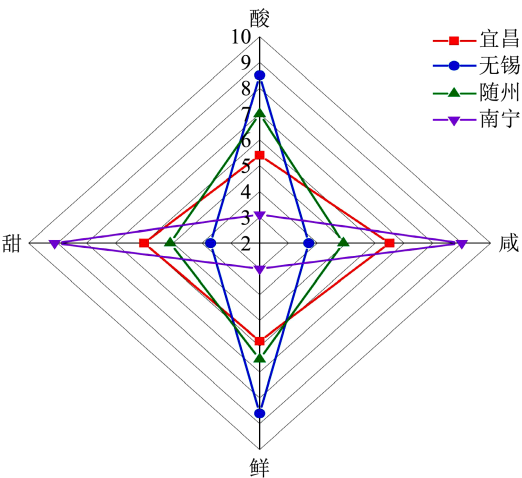


图 2 四种发酵米酒的电子舌雷达图

Fig.2 Electronic tongue radar map of four different fermented rice wine

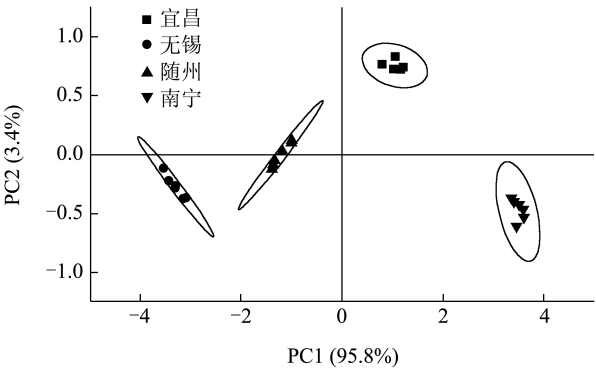


图 3 四种米酒电子舌的主成分 (PCA) 二维分析图

Fig.3 Two dimensional graph of principal component analysis (PCA) of electronic tongue results for four different fermented rice wine

2.5 挥发性风味物质分析

为研究不同地区酒曲制作米酒的风味特征, 利用顶空固相微萃取 (HS-SPME) 与气相色谱 - 质谱

(GC-MS) 联用的方法对四种甜米酒的香气化合物成分及相对含量进行分析鉴定。结果表明 (详见图 4), 共检出挥发性风味物质 100 种, 其中酯类化合物 34 种, 醇类化合物 22 种, 酸类化合物 4 种, 烃类化合物 19 种, 酮类化合物 6 种, 醛类化合物 11 种, 其他化合物 4 种, 这些香气成分构成了甜米酒的独特风味。宜昌、无锡、随州、南宁米酒中检出的风味化合物总数量分别为 51、53、64、60 种。米酒风味物质的差异主要来源于甜酒曲中所含有的菌种不同, 不同的菌种生长代谢的化学物质有所差异, 这是最终风味形成的重要因素; 酒体发酵条件对微生物群落的活力产生影响, 同样影响了酒体风味物质的形成。

酯类化合物对米酒的浓郁风味起到决定性作用, 是米酒香气中不可或缺的重要成分^[22]。四种甜米酒中酯类物质种类丰富, 相对含量最高, 这与卫春会等^[23]研究结果一致。该研究中酒体中的酯类化合物相对含量占比在 47.47%~61.85% 之间, 是米酒香气浓郁的主要原因。宜昌、无锡、随州、南宁米酒中酯类化合物数量分别为 19、16、20、27 种, 且南宁米酒中酯类相对含量达到 61.85%, 推测可能与酒曲中霉菌和酵母菌的协同作用密切相关, 霉菌主要参与米酒中的糖化过程, 酵母菌进一步转化为醇类和其他风味物质, 两者的结合促进其产生更多的酯类化合物^[24]。乙酸乙酯是米酒中一种关键的香气成分, 它主要在发酵过程的中后期形成, 这一过程涉及到乙酸和乙醇在酵母细胞内的酯酶催化下发生酯化反应, 为米酒带来更加浓郁的果香味^[24], 乙酸乙酯在四种米酒样中均有检出。在四种米酒中十六酸乙酯的相对含量均大于 15%, 提供奶油香、果香等香气, 赋予米酒浓郁醇厚的风味特点, 其相对含量在四种米酒中分别为 26.55% (南宁)、25.11% (无锡)、20.96% (宜昌)、18.30% (随州); 十四酸乙酯的相对含量均大于 5%, 具有椰子香、蜂蜡香的香气特征, 在四种米酒中其相对含量占比分别为 8.40% (南宁)、7.74% (随州)、6.79% (无锡)、5.44% (宜昌)。相比于其他三种米酒, 南宁米酒中还独含庚酸乙酯、肉豆蔻酸丙基酯和正己酸乙酯等, 这些酯类化合物能够提供果香、花香的风味, 使米酒形成独有的风味特征。

醇类化合物具有丰富酒样味感和助香的作用, 在米酒中相对含量为 8.98%~22.23%, 种类数量范围为 9~19 种, 随州米酒醇类化合物种类最多, 为 19 种,

相对含量为 22.23%。 β -苯乙醇有玫瑰香、奶油香的香气特征，且阈值较低，对米酒中的香气和口味的维持起重要作用^[25]，四种甜米酒中 β -苯乙醇相对含量在 2.41%~6.74%，与 Peng 等^[26]绍兴米酒结果相似。异戊醇呈现苹果白兰地风味，贡献了酒的独特芬芳，能够增加酒的醇厚感和饱满感，此外也是构成高级醇和杂醇油的关键成分^[27]，在随州米酒中相对含量为 2.84%，说明随州米酒中有独特的白兰地香气。

酸类化合物是酯类化合物形成的前体物质，在四种甜米酒中相对含量为 0.25%~0.47%，在米酒风味上起到平衡风味、协调口感的作用，在一定程度上减少了米酒中的苦杂味^[28]。该研究中无锡米酒中酸类化合物种类最多 3 种，相对含量为 0.47%，这可能与无锡米酒酸甜可口的口感相关联；醛酮类与醇类在酒中作用类似，是属于衬托和协调香气成分

的一类物质^[27]，该研究中醛酮类物质在四种米酒中相对含量为 1.26%~2.03% 之间，如宜昌米酒中苯乙醛相对含量为 0.07%，具有果香气味；酚类化合物在提供米酒香气的同时具有抗氧化性^[29]，2,4-二叔丁基酚在四种米酒中均有检出，相对含量在 0.16%~0.85% 之间；还含有一些烃类物质，在米酒中相对含量为 2.65%~5.37%，其香气阈值相对较高，对风味贡献值较小。

该研究中，南宁米酒中酯类化合物种类最多，共 27 种，且相对含量为 61.58%，丰富的酯类风味化合物为米酒提供了浓郁醇厚的香气特征；醇类化合物相对含量为 10.6%，醛类化合物相对含量为 2.9%，其中含有正己酸乙酯、辛酸乙酯、异戊醇、苯乙醇等呈香物质，与传统苗家米酒中所含的风味物质相似^[22]。

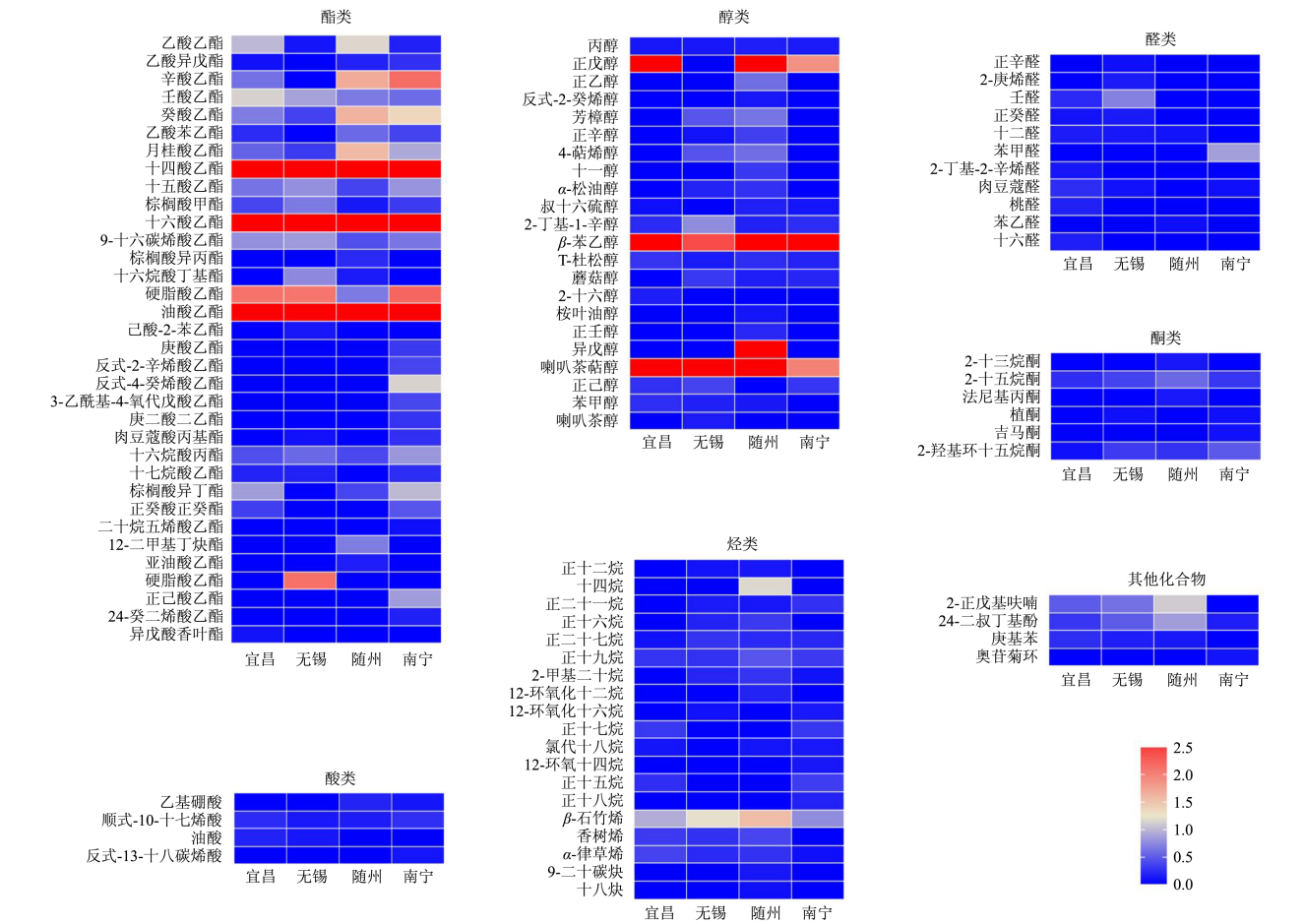


图 4 四种米酒中挥发性化合物含量热图

Fig.4 Heat map of volatile compounds for four different fermented rice wine

3 结论

该研究对四种不同地区甜酒曲酿制米酒进行对比,使用感官评价作为判定标准,通过正交试验得到每种酒曲的最佳酿造工艺。宜昌、无锡、随州、南宁四种米酒的最佳酿造温度、时间、接种量分别为 32 ℃、60 h、0.2%; 28 ℃、60 h、0.4%; 28 ℃、60 h、0.6%; 32 ℃、48 h、0.6%。四种米酒之间酸度差异不显著 ($P>0.05$),还原糖含量差异显著 ($P<0.05$)。通过电子舌分析证实了四种米酒在风味特征上的区别,其中南宁米酒在甜、鲜滋味上响应值高,并且通过主成分分析发现南宁米酒与其他三种米酒风味特征差异显著。采用 HS-SPME-GC-MS 对四种米酒的挥发性风味成分进行分析比较,宜昌、无锡、随州、南宁米酒中挥发性风味物质分别含有 51、53、64、60 种。酯类化合物南宁米酒种类最多,为 27 种,庚酸乙酯、肉豆蔻酸丙基酯和正己酸乙酯呈现出花果香气只在南宁米酒中检出。醇类化合物随州米酒种类最多,为 19 种,其整体米酒特征醇香感浓厚。酸类化合物在无锡米酒中种类最多,为其形成独特的米酒风味做出贡献。相比而言宜昌米酒风味化合物种类最少,甜度最高。综合理化指标测定、感官评价、电子舌滋味特征和挥发性风味物质分析结果,南宁米酒整体风味表现最佳,具有酸甜适中、滋味浓郁的特点。该研究不仅为不同地区米酒的风味特征提供了科学依据,也为米酒的地域性特色评价和工业化生产优化提供了重要参考,对促进米酒产业的现代化发展具有积极意义。

参考文献

- [1] TANG A, PENG B. Uncovering the flavor differences between black rice wine and glutinous rice wine by GC-MS, GC-IMS, HPLC, and electronic sensory analysis [J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104235.
- [2] YU H, XIE T, XIE J, et al. Characterization of key aroma compounds in Chinese rice wine using gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry [J]. Food Chemistry, 2019, 293: 8-14.
- [3] LEI Y, CAI W, GUO Z, et al. Bacterial community structure of rice wine from China's Xiaogan and Dazhou regions: Correlation with taste characteristics [J]. LWT, 2024, 192: 115733.
- [4] MAO X, YUE S J, XU D Q, et al. Research progress on flavor and quality of Chinese rice wine in the brewing process [J]. ACS Omega, 2023, 8(36): 32311-32330.
- [5] 王玉荣,张俊英,胡欣洁,等.湖北孝感和四川成都地区来源的酒曲对米酒滋味品质影响的评价[J].食品科学, 2015,36(16):207-210.
- [6] 孟祥勇,沈赤,毛健,等.黄酒多糖的分离纯化及理化性质研究[J].食品与生物技术学报,2017,36(10):1029-1035.
- [7] 黄月梅,顾元锋,李丽凤.广西壮乡米酒包装设计研究[J].中国酒,2024,1:69-71.
- [8] ZHAO X, XIANG F, TANG F, et al. Bacterial communities and prediction of microbial metabolic pathway in rice wine Koji from different regions in China [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 12: 748779.
- [9] HAO Y, LI J, ZHAO Z, et al. Flavor characteristics of Shanlan rice wines fermented for different time based on HS-SPME-GC-MS-O, HS-GC-IMS, and electronic sensory analyses [J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137150.
- [10] 高继国,郭春绒.普通生物化学教程实验指导[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [11] 熊思瑞,王龙宇,王云峰,等.超高温瞬时灭菌对米酒品质的影响[J].食品与机械,2024,40(1):183-188,218.
- [12] 邹凌波.酶法酿造米酒新技术的研究[D].无锡:江南大学,2019.
- [13] 任然.四株益生菌对发酵酸奶保质期品质和风味影响的研究[D].成都:西南民族大学,2021.
- [14] NY/T 1885-2017,绿色食品 米酒[S].
- [15] 张慧娟,王悦,隋妙,等.红米水酒发酵工艺的研究[J].食品研究与开发,2020,41(22):24-29.
- [16] 袁灿,何莲,胡金祥,等.基于电子舌和电子鼻结合氨基酸分析鱼香肉丝调料风味的差异[J].食品工业科技,2022, 43(9):48-55.
- [17] 曹云刚,马丽,杜小威,等.汾酒酒醅发酵过程中有机酸的变化规律[J].食品科学,2011,32(7):229-232.
- [18] 王静,刘孟格,孙琳佳,等.两种酒曲制备大麦若叶米酒品质对比[J].中国酿造,2023,42(8):166-171.
- [19] 李建军,董倩倩,赵一,等.基于电子鼻和电子舌技术对不同金银花酒的鉴别分析[J].现代食品科技,2022,38(11): 308-312.
- [20] 韩腾,陆波,韩永斌,等.怀远县糯米加工甜酒酿适用性研究[J].食品工业科技,2024,45(14):271-281.
- [21] 宋艺君,庞来祥,袁筱,等.GC-IMS法比较不同酒龄猕猴桃酒特征香气物质差异[J].食品与生物技术学报,2023, 42(2):58-65.
- [22] 蒲领平,黄治国,饶家权,等.川中地区浓香型白酒酒醅风味物质时空差异性比较[J].现代食品科技,2023, 39(12):262-269.
- [23] 卫春会,朱金凤,程国富,等.红曲霉的分离鉴定及其在米酒中的应用[J].现代食品科技,2024,40(9):135-143.

[24] 袁国亿,何宇淋,王春晓,等.米酒风味品质形成相关因素的研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(9):286-294.

[25] 乔世玉,王洪琳,杨宏,等.贵州不同地区发酵糯米酒风味对比分析[J].酿酒科技,2021,10:17-23,35.

[26] PENG Q, MENG K, YANG X Y, et al. Analysis of flavor substances in Shaoxing traditional hand-made Jiafan wine with different amounts of ZaoShao liquor [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 2: 1-10.

[27] 李冬琴,杨萌,文笑雨,等.黄酒的挥发性风味成分研究进展[J].食品研究与开发,2022,43(2):202-207.

[28] 贾智勇.中国白酒勾兑宝典[M].北京:化学工业出版社, 2017.

[29] LIN H, MENG L, SUN Z, et al. Yellow wine polyphenolic compound protects against doxorubicin-induced cardiotoxicity by modulating the composition and metabolic function of the gut microbiota [J]. Circulation: Heart Failure, 2021, 14(10): e008220.