DOI:10.12441/spyswjs.20240222002 [文章编号] 1673-1689(2024)09-0142-11

大米精白度对酶法酿造米酒风味品质的影响

褚继阳[1,2,3] 夏天禹[1,2,3] 吴殿辉[1,2,3] 陆 健[1,2,3*]

(1. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室,江苏 无锡 214122; 2. 江南大学粮食发酵与生物制造国家工程研究中心,江苏 无锡 214122; 3. 江南大学生物工程学院,江苏 无锡 214122)

摘要:不同精白程度的大米在营养成分上有显著差异。为探究大米精白度对酶法酿造米酒风味品质的影响,使用5种不同精白度的大米(0、10%、20%、30%、40%)进行酶法酿造米酒,并从理化指标、游离氨基酸质量浓度、挥发性风味物质质量浓度和感官评价4个方面分析米酒风味品质的变化。结果表明,随着大米精白度的增加,米酒乙醇体积分数和总糖质量浓度升高,氨基酸态氮质量浓度下降;游离氨基酸质量浓度和高级醇质量浓度分别由1 346.17 mg/L和4 033 μg/L降至1 063.85 mg/L和3 119 μg/L,同时醇酯比也由1.24降至0.98,有利于提升米酒的口感;含硫氨基酸蛋氨酸和半胱氨酸质量浓度分别减少了50.8%和59.3%,有助于提高米酒储藏稳定性并改善其新鲜度;乙酸异戊酯质量浓度由254.19 μg/L提高至406.91 μg/L,改善了米酒的风味。最后,通过感官评价验证了上述结论,发现适度精白的大米所酿造的米酒具有更丰富的花香和果香,其口感也更加柔和。综上所述,适度提高大米的精白度能够有效改善米酒的气味和滋味,从而提升其整体风味品质。

关键词:酶法酿造;米酒;大米;精白度;风味

Effect of Rice Polishing Degree on Flavor Quality of Enzymatically Brewed Rice Wine

CHU Jiyang[1,2,3] *XIA Tianyu*[1,2,3] *WU Dianhui*[1,2,3] *LU Jian*[1,2,3*]

(1. Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. National Engineering Research Center of Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Rice with different polishing degrees shows significant differences in nutritional composition. To explore the effect of rice polishing degree on the flavor quality of enzymatically brewed rice wine, five kinds of rice with different polishing degrees (0, 10%, 20%, 30%, 40%) were used to brew rice wine by enzymatic fermentation. The changes in rice wine flavor quality were analyzed from four aspects: physical and chemical indexes, free amino acids mass concentrations, volatile flavor substances mass concentrations, and sensory evaluation. The results showed that with the increase in rice polishing degree, the ethanol volume fraction and total saccharide mass concentration in the rice wine increased, while the amino acid nitrogen mass concentration decreased. The mass concentrations of both free amino acids and higher alcohols decreased from 1 346.17 mg/L and 4 033 μg/L to 1 063.85 mg/L and 3 119 μg/L, respectively, while the alcohol-to-ester ratio dropped from 1.24 to 0.98, which contributed to an improved flavor profile of the rice wine. The mass concentrations of sulfur-containing amino acids methionine and cysteine decreased by 50.8% and 59.3%, respectively, which helped improve the storage stability and freshness of the rice wine. The mass concentration of isoamyl acetate increased from 254.19 μg/L to 406.91 μg/L, improving the volatile flavor of the rice wine. Finally,

基金项目:高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(111-206);江苏高校优势学科建设工程资助项目。

通信作者:陆健(1968—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事酿酒工程与食品生物技术研究。E-mail: jlu@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2024-02-22 **修回日期:**2024-03-28

sensory evaluation confirmed the above conclusions, revealing that the rice wine brewed from moderately polished rice exhibited richer floral and fruity aromas, with a smoother taste. In summary, moderately increasing the rice polishing degree can effectively improve the aroma and taste of rice wine, thereby enhancing its overall flavor quality.
Keywords: enzymatically brewed; rice wine; rice; polishing degree; flavor

米酒是一种以稻米为主要原料，通过酵母发酵制成的传统酒精饮料，因其香气浓郁、口感清爽备受消费者喜爱。因稻米种类、加工工艺、酵母种类和地域差异，使得中国各地米酒在颜色、形态和风味上有很大差异。传统的米酒大多采用自然培养的酒曲进行固态或半固态发酵，但这种方法存在几个问题：1）传统制曲工艺通常是在自然条件下进行，受季节和气温的影响，且主要基于经验操作，导致酒曲质量不稳定；2）制曲流程耗时较长，至少需要3~4 d，增加了现代化生产的时间成本；3）酒曲中的微生物种类繁多、酶系复杂，在酿造过程中难以实现精准控制，这不仅不利于品质控制，还容易造成原料浪费。近年来，随着对酶的深入研究及工业化进程的发展，使用酶制剂代替传统酒曲的酶法酿造新工艺逐渐成为酿酒行业的研究热点。酶法酿造工艺可以避免因酒曲质量不稳定及酿造过程难以控制带来的问题。此外，酶制剂“简单、高效、成本低”的特点不仅可以节省生产成本，在某些情况下还能提升酒类产品的品质并改善发酵效果，有望推动整个酿酒行业的进一步发展。王乃军等[1]使用复合酶制剂代替麸曲进行白酒发酵，发现使用酶法工艺后白酒出酒率提高了3.54%，乙酸乙酯含量提高了21.83%，不仅提高了经济收益，还提升了白酒的品质。谢娟等[2]以板栗和糯米为原料开发了一种酶法酿造板栗糯米黄酒的技术，并通过优化α-淀粉酶、糖化酶和酸性蛋白酶的添加量及作用时间改进其生产工艺，最终得到的板栗糯米黄酒色泽清透、滋味丰富、香气浓郁，具有独特的风格。综上所述，采用酶法酿造米酒不仅在工艺上具有可行性，还有利于米酒的品质控制，为米酒工业化和自动化生产奠定了技术基础。

大米作为米酒的主要原料之一，其质量不仅会影响米酒的发酵过程，还直接决定了米酒品质的优劣。因此，从原料阶段开始严格控制对于现代化高品质米酒的生产至关重要。稻谷成熟后通过砻谷机脱除颖壳得到糙米，糙米再经精米机进一步精白处理得到精白米。在精白过程中，根据精白程度的不同，大米的理化性质和营养成分会发生显著变化[3-4]。目前关于这些变化的研究主要集中在大米本身的食用品质方面，如精白去除的蛋白质和脂肪对大米糊化、硬度和黏度的影响[5]。然而，这些成分的变化同样会影响酿酒酵母在发酵过程中的代谢途径及代谢物，从而间接作用于酒的风味品质。Sasaki等[6]使用3种不同精白程度的大米分别以Yamahai和Sokujo两种方法酿造清酒，发现随着大米精白度的增加，某些对清酒品质不利的物质如甲硫醛、4-壬内酯等的含量呈下降趋势。但在米酒特别是酶法酿造新工艺领域，关于大米精白度对米酒影响的研究较少，因此有必要对大米精白这一步骤进行深入研究，分析精白度对酶法酿造米酒风味品质的影响。

作者在酶法液态发酵米酒工艺的基础上，分别从理化指标、游离氨基酸、挥发性风味物质和感官评价4个方面，系统研究了不同精白度大米（0、10%、20%、30%、40%）对酶法酿造米酒品质的影响，以期为现代化米酒生产提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

酿酒用秋田小町大米：中粮集团有限公司；蛋白酶（酶活力30 000 U/mL）、α-淀粉酶（酶活力30 000 U/mL）、糖化酶（酶活力12 500 U/mL）：帝斯曼（中国）有限公司；SYJN5酿酒酵母：作者所在实验室筛选并保藏的米酒酵母；17种游离氨基酸标准品：Sigma公司。

1.2 仪器与设备

精米机：VP-32型，日本株式会社山本工作所；pH计：PHST-5T型，上海仪电科学仪器股份有限公司；鼓风干燥箱：9006型，上海一恒科学仪器有限公司；全自动凯氏定氮仪：NKY-6120型，上海望海环境科技有限公司；自动索氏抽提仪：GY-QZCDY型，上海归永电子有限公司；高效液相色谱仪：Agilent 1100型，美国安捷伦科技公司；三重四极杆气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）：Agilent 8890-7000D型，美国安捷伦科技公司。

1.3 不同精白度大米的制备

使用精米机制备不同精白度大米，精白度计算按式（1）。

$$p=(1-m_1/m_2)\times 100\% \quad (1)$$

式中：

p——精白度，%；

m_1——大米精白处理后的质量，g；

m_2——大米精白处理前的质量，g。

挑选大小均匀、米粒完整的大米进行精白处理，将未精白大米样品的精白度记为0。通过调整精白时间，依次制备精白度为10%、20%、30%和40%的精白大米样品。

1.4 酶法米酒酿造工艺

1）粉碎：称取200 g大米，将其粉碎成米粉，置于糖化杯中。

2）蛋白质休止：将500 mL蒸馏水加入糖化杯中，不断搅拌使米粉与水混合均匀，加入蛋白酶（比酶活60 U/g），50 ℃保温2 h。

3）液化：蛋白质休止结束后，于糖化杯中加入α-淀粉酶（比酶活25 U/g），升温至90 ℃液化70 min。

4）糖化：在液化后的米汁中加入糖化酶（比酶活60 U/g），60 ℃糖化4 h。

5）灭酶：将糖化结束后的米汁煮沸15 min使酶失活。

6）接种发酵：将灭酶后的米汁用滤纸过滤，冷却后加入适量的食品级乳酸，将pH调至4.0~4.5，然后接种提前活化好的酵母（1×10^7 CFU/mL），于15 ℃下发酵，至酒体在24 h质量损失低于0.2 g。

7）过滤：将发酵结束后的酒醪用滤纸过滤得到米酒。

1.5 大米及米酒理化指标测定

大米中的水、蛋白质和脂肪分别按照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》、GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》和GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行测定。淀粉使用北京索莱宝科技有限公司的淀粉检测试剂盒进行测定。米汁可溶性固形物参考GB/T 12143—2008《饮料通用分析方法》进行测定。米酒总糖、总酸、乙醇和氨基酸态氮参考GB/T 13662—2018《黄酒》进行测定。

1.6 游离氨基酸测定

采用邻苯二甲醛柱前衍生反相高效液相色谱-紫外检测法测定米酒中17种游离氨基酸质量浓度，具体方法如下：

1）样品预处理：将发酵结束的米酒离心（10 000 r/min，15 min）后，上清液过0.22 μm水系微孔滤膜。

2）色谱条件：流动相A为27.6 mmol/L的醋酸钠-三乙胺-四氢呋喃（体积比为500∶0.11∶2.5），流动相B为80.9 mmol/L醋酸钠-甲醇-乙腈（体积比为1∶2∶2），pH均为7.2。使用Agilent Hypersil ODS柱（4.0 mm×250 mm×5 μm），采用梯度洗脱，流量为1.0 mL/min。流动相B按以下梯度程序洗脱：0~17 min，8%~50%；17~20 min，50%~100%；20~24 min，100%~0%。柱温为40 ℃，紫外检测器检测波长为338 nm。游离氨基酸质量浓度以外标法定量。

1.7 挥发性风味物质测定

采用顶空固相微萃取法提取米酒样品的挥发性风味物质，并使用GC-MS检测。

1）样品预处理：将4 mL米酒样品置于20 mL顶空瓶中，再分别加入4 mL蒸馏水和2 g NaCl，混合均匀。

2）GC-MS检测：采用50 μm/30 μm CAR/DVB/PDMS固相微萃取纤维来萃取风味物质。先将样品在55 ℃下孵育15 min，再用固相微萃取纤维萃取30 min。萃取结束后，将萃取纤维快速插入GC进样口，在250 ℃下解吸0.5 min后进行GC-MS分析。所用色谱柱为TG-WAXA色谱柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）。GC升温程序为：初始温度40 ℃，以3 ℃/min升至180 ℃，再以20 ℃/min升至230 ℃，保持15 min。检测器温度保持在250 ℃，载气为氦气，流量为1.2 mL/min。质谱离子源温度为260 ℃，电子电离能量为70 eV。监测m/z为20~450的总离子流色谱图。通过与NIST质谱库中的标准谱图和文献报道的Kovats保留指数（RI）进行比对，鉴定化合物。采用内标标准曲线定量挥发性风味化合物的质量浓度，使用乙酸正戊酯定量酯类化合物，使用2-辛醇定量醇类化合物和其他化合物。

1.8 气味活性值计算

挥发性风味物质的气味活性值（odor active

value，OAV）通过式（2）计算。

$$V_{OA}=\frac{c}{T} \quad (2)$$

式中：

V_{OA}——挥发性风味物质的气味活性值；

c——挥发性风味物质的质量浓度，μg/L；

T——挥发性风味物质的气味阈值，μg/L。

1.9　感官评价

由10名经过专业感官培训的人员对米酒的滋味和气味进行感官评价。其中滋味包括甜味、酸味、回味、醇厚和柔和度。气味包括花香、果香、谷物香、甜香和酒香。分值为0~10分，分值由小到大强度逐步增大，0分代表强度最小，10分代表强度最大。

1.10　数据处理

采用SIMC-P 14.1对数据进行偏最小二乘法判别分析（PLS-DA），采用SPSS 20.0进行方差分析，使用Origin 2021软件作图。

2　结果与讨论

2.1　精白度对大米及米酒理化指标的影响

随着精白度的提高，大米中水分、蛋白质、脂肪质量分数呈下降趋势，而淀粉质量分数呈上升趋势，见图1，这与姚哲[7]的研究结果一致。在精白过程中，水分质量分数由12.89%下降至10.70%，这可能是由于大米与精白机之间的摩擦生热导致水分蒸发。蛋白质和脂肪质量分数由9.25%、1.27%分别下降至7.85%、0.84%，且随着精白度增加其降幅变缓。这是因为在大米中，蛋白质和脂肪分布不均匀，主要集中在大米谷皮和胚乳表面的糊粉层中，而精白过程正是去除了这一部分[8]。淀粉质量分数由78.85%上升至84.80%，这主要是由于随着大米皮层被逐渐去除，内部以淀粉为主要成分的胚乳的质量占比逐渐提高。

使用不同精白度大米制备的米汁和米酒的基本指标见表1。当大米精白度为0~20%时，米酒发

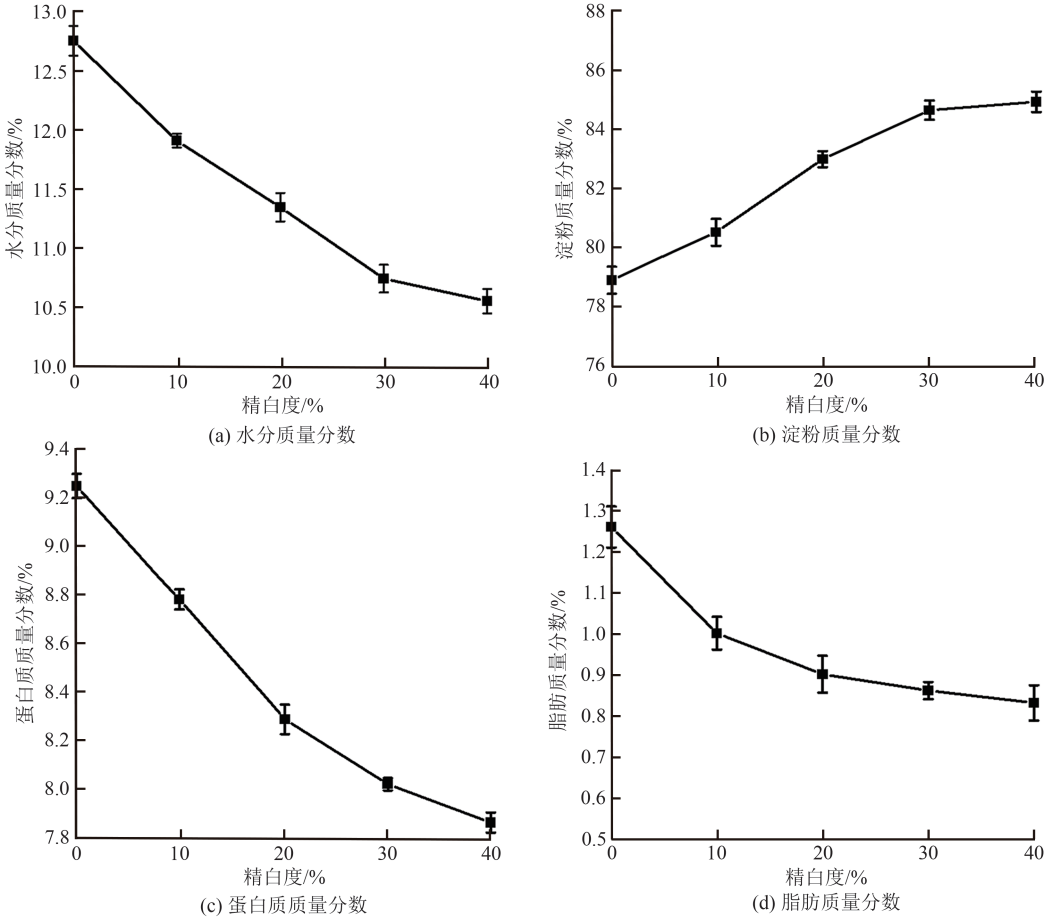


图1　不同精白度大米营养成分变化

Fig. 1　Changes in nutritional components of rice with different polishing degrees

酵时间为10 d;而当精白度提升至30%~40%时，发酵时间延长至11 d。这是由于随着精白度的提高，大米中蛋白质质量分数下降，减少了酵母可利用的氮源，从而需要更长的时间来完成发酵过程。米汁可溶性固形物、米酒总糖质量浓度和乙醇体积分数均随精白度的提高而上升。这主要是由于大米中蛋白质和脂肪质量分数的降低不仅提高了淀粉的质量分数，还在一定程度上促进了淀粉的溶出，使得更多的淀粉被酶解为糖类物质，进而提高了乙醇体积分数[8]。米酒中氨基酸态氮的质量浓度随着精白度的提高而逐渐降低，当精白度为40%时，其质量分数仅为0.16 g/L，这可能是由于大米中蛋白质质量分数的减少导致发酵过程中产生的氨基酸态氮也相应减少[9]。

表1 不同精白度大米制备米汁和米酒的基本指标

Table 1 Basic indicators of rice juice and rice wine prepared from rice with different polishing degrees

精白度/%	米汁可溶性固形物质量分数/%	发酵时间/d	乙醇体积分数/%	米酒总糖质量浓度/(g/L)	米酒总酸质量浓度/(g/L)	米酒氨基酸态氮质量浓度/(g/L)
0	26.5±0.1^{e}	10	11.4±0.0^{e}	13.2±0.2^{e}	2.28±0.03^{d}	0.27±0.02^{a}
10	27.8±0.1^{d}	10	12.1±0.1^{d}	15.3±0.4^{d}	2.45±0.06^{c}	0.24±0.01^{b}
20	28.7±0.1^{c}	10	12.5±0.1^{c}	15.9±0.0^{c}	3.03±0.11^{a}	0.19±0.02^{c}
30	29.6±0.1^{b}	11	12.8±0.1^{b}	16.4±0.2^{b}	2.39±0.04^{c}	0.18±0.01^{c}
40	30.1±0.2^{a}	11	13.1±0.1^{a}	17.8±0.5^{a}	2.67±0.05^{b}	0.16±0.01^{d}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2 精白度对米酒中游离氨基酸的影响

不同精白度大米酿造米酒中游离氨基酸质量浓度测定结果见表2。共检测出17种游离氨基酸，包括6种甜味氨基酸、8种苦味氨基酸、2种鲜味氨基酸和1种无味氨基酸。随着精白度的提高，游离氨基酸总质量浓度呈降低趋势，由1 346.17 mg/L降至1 063.85 mg/L。造成这种现象的主要原因是，随着大米精白度的提高，原料中蛋白质质量分数逐

表2 不同精白度大米酿造米酒游离氨基酸质量浓度

Table 2 Mass concentration of free amino acids in rice wine brewed from rice with different polishing degrees

分类	氨基酸	游离氨基酸质量浓度/(mg/L)				
		0	10%	20%	30%	40%
甜味氨基酸	丝氨酸	26.32±4.62^{a}	24.56±8.53^{ab}	21.22±5.25^{b}	17.04±3.41^{c}	15.04±4.44^{c}
	甘氨酸	71.89±8.80^{a}	58.55±6.70^{b}	57.21±6.10^{b}	56.74±4.80^{b}	59.23±9.20^{b}
	苏氨酸	49.29±2.51^{b}	52.47±2.51^{a}	49.52±1.68^{b}	43.42±0.82^{d}	46.00±1.21^{c}
	丙氨酸	157.69±7.21^{a}	144.90±4.66^{b}	147.12±6.22^{b}	150.64±8.35^{ab}	148.31±2.51^{b}
	蛋氨酸	36.67±3.42^{a}	30.85±2.86^{b}	27.53±2.21^{c}	21.83±0.95^{d}	18.03±1.03^{e}
	脯氨酸	76.17±2.54^{ab}	70.51±1.31^{c}	72.32±1.52^{b}	74.76±3.42^{b}	79.91±1.42^{a}
苦味氨基酸	组氨酸	22.94±0.93^{a}	22.75±1.01^{a}	20.53±0.84^{b}	17.07±1.21^{c}	16.46±1.31^{c}
	精氨酸	250.28±4.21^{b}	261.99±6.64^{a}	240.52±8.52^{b}	206.60±3.41^{c}	210.08±2.22^{c}
	缬氨酸	80.99±7.21^{a}	75.31±8.51^{ab}	70.52±4.24^{b}	62.46±6.71^{c}	56.10±5.62^{c}
	苯丙氨酸	92.79±3.41^{a}	90.91±4.11^{b}	80.52±1.62^{c}	73.87±2.52^{d}	65.75±0.98^{e}
	异亮氨酸	43.65±0.72^{a}	43.50±1.07^{a}	38.52±2.11^{b}	34.74±1.75^{c}	26.62±0.77^{d}
	亮氨酸	123.08±6.71^{a}	121.85±5.71^{a}	107.52±8.61^{b}	90.95±3.42^{c}	79.83±2.44^{d}
	赖氨酸	94.93±5.25^{a}	102.58±7.52^{a}	85.25±4.22^{b}	75.91±6.21^{c}	82.32±2.49^{b}
	酪氨酸	97.17±4.25^{a}	95.50±3.31^{a}	85.43±5.21^{b}	75.34±3.01^{c}	72.58±3.52^{c}
鲜味氨基酸	天冬氨酸	38.62±2.45^{a}	11.61±1.97^{d}	19.25±3.52^{c}	16.94±1.22^{c}	25.59±0.71^{b}
	谷氨酸	74.05±2.98^{a}	78.51±3.76^{a}	69.53±2.47^{b}	58.04±1.45^{c}	58.09±2.97^{c}
无味氨基酸	半胱氨酸	9.64±1.15^{a}	7.40±0.98^{b}	5.26±1.42^{c}	4.10±1.15^{d}	3.92±1.24^{d}
总计		1 346.17±12.52^{a}	1 293.73±18.85^{b}	1 197.77±8.71^{c}	1 080.44±21.67^{d}	1 063.85±24.69^{d}

注：同行不同字母表示差异显著（P<0.05）。

渐降低，导致在酿造过程中被分解为游离氨基酸的蛋白质减少。虽然游离氨基酸是酒类产品重要的滋味成分，但对于米酒而言，较高的游离氨基酸质量浓度使口感变得浓郁且粗糙，并加深酒体颜色，这与当前市场上消费者偏好的清爽口感相悖[10]。因此，对原料大米进行适度精白处理有助于降低米酒中游离氨基酸的质量浓度，使米酒口感更加清爽，提升其在口感方面的品质。

另外，随着大米精白度的提高，米酒中蛋氨酸和半胱氨酸的质量浓度也呈下降趋势，分别降低了50.8%和59.3%。这两种氨基酸是含硫氨基酸，它们会在米酒储藏过程中产生不新鲜的气味，形成陈年米酒的硫味，加速储藏过程中米酒品质的恶化[11]。例如，二甲基三硫是导致米酒香气变差的主要物质之一，它是由酵母在米酒储藏过程中通过蛋氨酸补救途径（methionine salvage pathway）合成的[12]。因此，对原料大米进行精白处理以降低米酒中含硫氨基酸的质量浓度，有助于增强米酒的储藏性能，提高其新鲜度。

2.3 精白度对米酒中挥发性风味物质的影响

2.3.1 GC-MS分析

使用GC-MS对不同精白度大米酿造米酒的挥发性风味物质进行分析，结果见表3。在5种精白度大米酿造的米酒中共鉴定出65种挥发性物质，其中酯类30种、醇类21种、醛类6种、酸类5种、酮类3种。米酒中酯类和醇类是主要的挥发性风味物质，分别占总挥发性风味物质的39.46%~44.49%和42.30%~49.13%，见图2。

酯类化合物是米酒及其他酒类饮品中含量最丰富且较为重要的一类挥发性风味物质，它们能赋予米酒花香和果香，并且具有较低的气味阈值[13]。酯类化合物主要通过以下两种途径形成：1）在乙醇乙酰基转移酶或乙醇酰基转移酶等催化作用下，将微生物代谢葡萄糖和氨基酸所产生的醇类和酸类化合物合成酯类化合物；2）米酒中有机酸和醇类化合物间的酯化反应[14]。在不同精白度大米酿造的米酒中共发现30种酯类化合物，其中以乙酯类为主，质量浓度较高的有己酸乙酯（香蕉香、菠萝香气、花香）、乙酸异戊酯（香蕉香）、乙酸乙酯（菠萝香）、乙酸苯乙酯（蜜香、玫瑰香）、癸酸乙酯（椰子香）和辛酸乙酯（果香、花香、白兰地酒香）[15-17]，它们是构成米酒浓郁的酯味和甜味的重要成分。

醇类化合物是米酒中不可缺少的挥发性香气成分，其中绝大多数为高级醇，即含有3个碳原子以上的醇类物质。主要有两个合成途径：1）Ehrlich途径：在发酵初期，发酵液中游离氨基酸含量较高，酵母将游离氨基酸分解代谢为α-酮酸，随后α-酮酸再经脱羧、还原反应转化为高级醇，此途径也被称为氨基酸分解代谢途径；2）Harris途径：在发酵中后期，发酵液中游离氨基酸含量较低，酵母通过糖酵解途径和三羧酸循环所生成的α-酮酸无法通过氨基转化作用合成酵母所需的氨基酸。此时积累的α-酮酸会在酶催化作用下发生脱羧、还原反应，进而转化为高级醇，此途径也被称为糖合成代谢途径[18]。在所有米酒样品中，苯乙醇和异戊醇是质量浓度最高的高级醇，占总醇类化合物的80%以上。据报道，苯乙醇具有玫瑰、甜味和桃子的香气，异戊醇具有香蕉香气和酒香[19]，它们都使米酒具有独特的香气。

适量的高级醇不仅可以为米酒提供独特的香气，还可以使米酒口感更加协调、圆润，但当高级醇含量较高时则会产生异味，并使米酒的致醉性提高，即“上头”现象提高[18]。因此，对于米酒这种口感清爽的酒类饮品，控制并降低高级醇的质量浓度至关重要。不同精白度大米酿造米酒中酯类、醇类和其他化合物质量浓度见图2。随着大米精白度的提高，米酒中醇类化合物逐渐降低，由4 033 μg/L降至3 119 μg/L。这可能是由于随着原料大米精白度的提高，大米中蛋白质质量分数减少，使得在糖化过程中被蛋白酶分解得到的游离氨基酸质量浓度降低，最终导致酵母在发酵过程中通过Ehrlich途径形成的高级醇质量浓度降低。另外，当精白度较低时，米酒的发酵时间较短（见表1），说明使用低精白度大米酿造米酒的过程中酵母的代谢活动更为旺盛，因此可能会通过Harris途径生成更多的高级醇。

高级醇与总酯类化合物的比值也是一个重要指标，较低的醇酯比可以降低“上头”现象带来的影响[9]。随着大米精白度的提高，米酒中酯类物质质量浓度无显著变化，而醇类物质呈降低趋势，醇酯比逐渐降低，由1.24降至0.98。综上所述，大米精白处理有利于降低米酒中高级醇质量浓度，调整醇酯比，使米酒更好入口，缓解“上头”现象带来的头痛、头晕、恶心等不适症状。

表 3 不同精白度大米酿造米酒的挥发性风味物质质量浓度

Table 3 Mass concentration of volatile flavor compounds in rice wine brewed from rice with different polishing degrees

种类	编号	挥发性风味物质	挥发性风味物质质量浓度/(μg/L)					香气阈值/(μg/L)
			0	10%	20%	30%	40%	
酯类	A1	邻苯二甲酸二丁酯	—	8.05±3.29^{b}	4.62±1.75^{b}	42.68±32.32^{a}	5.64±3.95^{b}	
	A2	乙酸庚酯	1.68±0.06^{b}	—	4.80±0.27^{a}	—	4.82±0.38^{a}	6.8
	A3	乙基 9-癸烯酸酯	1.60±0.05^{d}	—	3.86±0.31^{c}	8.75±1.51^{a}	5.48±0.48^{b}	
	A4	乙酸辛酯	2.12±0.09^{b}	—	2.39±0.26^{ab}	—	2.55±0.24^{a}	12.0
	A5	癸酸异戊酯	6.22±0.21^{a}	1.09±0.31^{d}	2.26±0.39^{c}	—	3.63±0.62^{b}	10.0
	A6	反油酸乙酯	27.65±21.37^{a}	5.14±1.20^{b}	—	8.31±2.14^{ab}	21.27±10.28^{ab}	
	A7	反式-4-癸烯酸乙酯	13.47±0.07^{a}	1.55±0.48^{c}	4.59±1.54^{b}	—	13.41±0.95^{a}	
	A8	苯甲酸乙酯	2.83±0.13^{c}	—	5.17±0.08^{b}	17.54±8.73^{a}	5.29±0.27^{b}	210.0
	A9	壬酸乙酯	10.28±0.81^{b}	13.72±0.58^{a}	—	8.52±0.12^{c}	8.12±0.21^{c}	377.0
	A10	丁酸乙酯	33.77±0.40^{a}	32.13±0.19^{a}	30.23±0.08^{a}	31.82±0.30^{a}	35.30±0.97^{a}	0.9
	A11	十一酸乙酯	4.37±0.20^{a}	4.36±0.76^{a}	4.56±0.85^{a}	4.99±0.71^{a}	4.67±1.91^{a}	0.3
	A12	戊酸乙酯	4.34±0.12^{b}	5.41±0.61^{a}	4.12±0.21^{bc}	4.58±0.62^{b}	3.59±0.30^{c}	1.5
	A13	辛酸异戊酯	4.16±0.09^{a}	2.33±0.04^{c}	1.73±0.32^{d}	0.61±0.29^{e}	3.12±0.14^{b}	70.0
	A14	*L*(-)-乳酸乙酯	33.45±1.49^{b}	30.03±18.85^{b}	44.13±2.91^{b}	87.68±6.78^{a}	35.68±1.20^{b}	
	A15	邻苯二甲酸二异丁酯	2.66±0.62^{b}	3.75±1.51^{b}	5.39±2.43^{b}	37.33±26.78^{a}	5.71±3.74^{b}	
	A16	乙酸己酯	2.78±0.27^{c}	1.20±0.29^{d}	8.78±0.70^{b}	0.59±0.64^{d}	11.33±1.22^{a}	85.0
	A17	己酸-2-苯乙酯	6.87±0.46^{c}	—	11.49±0.12^{a}	6.65±0.36^{c}	7.64±0.33^{b}	
	A18	乙酸异丁酯	1.86±0.02^{e}	11.03±1.04^{a}	6.53±0.02^{c}	9.53±0.51^{b}	5.02±0.27^{d}	25.0
	A19	油酸乙酯	26.69±19.41^{a}	—	15.86±1.69^{b}	—	25.86±9.70^{a}	870.0
	A20	庚酸乙酯	6.62±0.35^{b}	6.07±0.85^{b}	6.01±1.22^{b}	7.65±1.17^{a}	6.48±0.67^{b}	1.9
	A21	月桂酸乙酯	79.44±1.11^{c}	61.07±5.76^{c}	96.02±11.11^{b}	128.51±2.63^{a}	176.50±16.51^{a}	430.0
	A22	十四酸乙酯	23.73±7.03^{b}	23.80±1.07^{b}	20.19±0.65^{b}	31.02±0.13^{a}	32.64±4.39^{a}	180.0
	A23	乙酸乙酯	369.85±0.93^{a}	273.04±9.04^{c}	229.94±8.16^{d}	329.61±8.07^{b}	351.06±4.17^{ab}	5.0
	A24	辛酸乙酯	807.76±10.30^{b}	860.65±13.33^{a}	792.84±11.11^{b}	690.84±2.88^{c}	668.99±15.28^{c}	19.3
	A25	癸酸乙酯	636.45±4.52^{a}	576.76±4.32^{b}	407.60±5.98^{c}	444.91±3.10^{c}	449.94±7.46^{c}	5.0
	A26	己酸乙酯	351.18±6.43^{c}	342.15±9.84^{c}	384.11±9.79^{b}	416.32±6.97^{a}	417.87±5.11^{a}	5.0
	A27	十六酸乙酯	66.06±8.44^{b}	35.98±11.32^{c}	112.07±15.08^{a}	76.30±0.75^{b}	105.19±2.94^{a}	1 000.0
	A28	亚油酸乙酯	60.94±19.80^{a}	5.51±5.93^{c}	11.21±2.47^{c}	—	39.09±2.63^{b}	450.0
	A29	乙酸苯乙酯	390.89±10.82^{bc}	512.98±6.83^{a}	440.96±10.32^{b}	338.92±0.12^{c}	321.29±9.51^{c}	249.6
	A30	乙酸异戊酯	254.19±9.62^{d}	315.93±3.49^{c}	367.16±3.57^{b}	402.16±5.97^{a}	406.91±11.47^{a}	2.0
醇类	B1	2-壬基醇	4.58±1.62^{b}	1.42±0.15^{c}	11.39±1.92^{a}	3.91±0.84^{b}	3.85±0.92^{b}	58.0
	B2	4-戊烯-1-醇	1.18±0.42^{b}	1.46±0.17^{ab}	1.79±0.39^{a}	1.08±0.40^{b}	1.50±0.16^{ab}	
	B3	鲸蜡醇	9.75±6.68^{a}	—	1.56±1.47^{b}	2.86±7.44^{b}	—	1 100.0
	B4	正戊醇	2.33±0.19^{a}	—	2.07±0.19^{a}	—	2.17±0.15^{a}	120.0
	B5	芳樟醇	4.83±1.22^{a}	3.36±0.34^{b}	4.69±0.77^{a}	4.27±0.99^{ab}	3.54±0.49^{b}	0.2
	B6	1-壬醇	15.95±4.48^{a}	8.19±0.84^{b}	12.17±1.30^{ab}	6.55±1.47^{b}	10.91±0.65^{ab}	34.0
	B7	蘑菇醇	3.38±1.77^{ab}	1.82±0.20^{b}	4.51±0.39^{a}	1.92±1.51^{b}	4.35±0.58^{a}	7.0
	B8	顺-4-癸烯-1-醇	9.10±1.29^{a}	2.66±0.29^{c}	6.75±1.63^{b}	3.37±0.85^{c}	7.77±1.73^{b}	
	B9	1-癸醇	25.43±8.66^{a}	23.62±5.36^{a}	23.37±1.45^{a}	26.12±1.34^{a}	24.55±1.66^{a}	6.6
	B10	异戊醇	1 797.52±11.53^{a}	1 820.50±10.17^{a}	1 734.61±11.57^{a}	1 594.95±8.19^{b}	1 559.18±12.61^{b}	300.0
	B11	异丁醇	128.12±12.28^{b}	250.96±14.84^{a}	126.71±9.60^{b}	60.37±18.82^{c}	119.03±9.77^{b}	1 000.0
	B12	*D*-香茅醇	13.45±4.60^{a}	12.37±1.31^{a}	12.36±1.15^{a}	12.78±3.29^{a}	12.45±1.22^{a}	40.0
	B13	十一醇	12.18±10.15^{a}	—	5.54±0.35^{b}	5.53±7.90^{b}	16.17±7.98^{a}	86.0

续表

种类	编号	挥发性风味物质	挥发性风味物质质量浓度/(μg/L)					香气阈值/(μg/L)
			0	10%	20%	30%	40%	
	B14	正丙醇	30.42±3.25^{a}	33.86±1.43^{a}	29.43±1.65^{a}	12.25±1.19^{c}	21.97±1.54^{b}	50 000.0
	B15	2-乙基己醇	384.72±98.11^{a}	4.24±2.16^{b}	—	—	9.74±3.17^{b}	370.0
	B16	正辛醇	31.28±18.66^{a}	4.90±2.24^{b}	19.86±2.06^{ab}	16.64±15.95^{ab}	15.96±2.10^{ab}	77.5
	B17	苯乙醇	1 523.95±8.68^{a}	1 518.99±9.21^{a}	1 469.40±7.59^{ab}	1 549.13±13.01^{a}	1 396.66±9.98^{b}	564.2
	B18	正己醇	14.98±9.63^{a}	6.18±0.66^{b}	16.02±1.32^{a}	5.38±0.81^{b}	15.93±1.44^{a}	150.0
	B19	法尼醇	5.50±0.72^{a}	3.62±0.38^{a}	3.22±0.19^{a}	5.26±1.73^{a}	2.85±1.19^{a}	20.0
	B20	月桂醇	30.45±6.22^{a}	10.73±5.12^{b}	29.35±2.02^{a}	5.85±2.74^{c}	12.53±4.05^{b}	73.0
	B21	正丁醇	6.89±1.24^{a}	2.09±0.22^{c}	1.52±0.72^{c}	2.61±0.31^{b}	2.45±0.24^{b}	270.0
醛类	C1	肉豆蔻醛	4.08±0.51^{d}	—	51.07±15.83^{b}	14.54±4.54^{c}	89.38±14.42^{a}	53.0
	C2	十二醛	115.40±15.15^{a}	—	78.80±10.31^{b}	—	110.37±19.45^{a}	300.0
	C3	壬醛	23.52±6.59^{a}	19.43±0.60^{a}	19.77±3.29^{a}	21.26±1.26^{a}	23.30±4.85^{a}	1.1
	C4	十一醛	59.90±9.86^{a}	55.33±2.86^{a}	52.02±11.19^{a}	60.13±6.51^{a}	60.24±5.48^{ab}	5.0
	C5	3,4-二甲基苯甲醛	3.70±1.26^{ab}	5.72±1.72^{a}	2.69±0.88^{b}	2.40±0.40^{b}	1.95±0.64^{b}	
	C6	正十五碳醛	7.74±4.56^{c}	—	7.37±2.57^{c}	12.42±2.42^{b}	20.61±4.89^{a}	430.0
酸类	D1	十一酸	10.49±2.53^{a}	—	7.84±2.75^{a}	—	9.71±3.41^{a}	10 000.0
	D2	月桂酸	13.76±0.63^{a}	—	18.71±0.77^{a}	—	8.18±2.18^{b}	7 200.0
	D3	冰醋酸	192.17±11.68^{d}	579.50±37.39^{a}	135.72±5.57^{e}	379.83±21.78^{b}	284.21±4.16^{c}	22 000.0
	D4	辛酸	332.16±21.54^{b}	284.42±19.26^{b}	454.21±27.06^{a}	268.78±39.76^{b}	264.26±15.34^{b}	910.0
	D5	正癸酸	156.21±16.33^{b}	61.57±29.39^{c}	309.49±22.22^{a}	92.33±29.68^{c}	133.57±8.88^{b}	1 000.0
酮类	E1	2-庚酮	0.95±0.05^{ab}	1.37±0.36^{a}	—	0.85±0.28^{b}	0.85±0.29^{b}	140.0
	E2	仲辛酮	6.58±0.02^{b}	14.90±1.25^{a}	4.94±0.25^{c}	4.12±0.94^{c}	—	50.2
	E3	2-壬酮	1.22±0.40^{c}	1.75±0.57^{bc}	3.73±0.36^{a}	2.66±0.70^{b}	2.29±0.42^{b}	41.0

注：同行不同字母表示差异显著（P<0.05）。

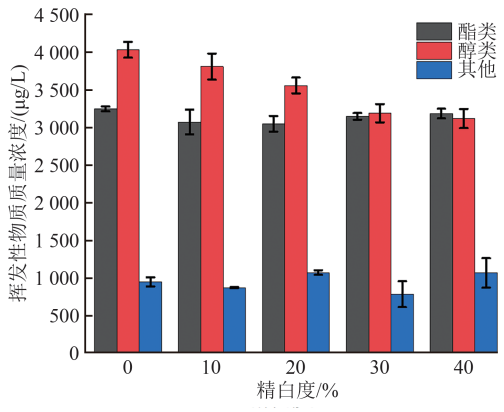


图2　不同精白度大米酿造米酒中酯类、醇类和其他化合物的质量浓度

Fig. 2　Mass concentration of esters, alcohols, and other compounds in rice wine brewed from rice with different polishing degrees

2.3.2　OAV分析

为了探究挥发性风味物质对米酒香气的贡献程度，对GC-MS检测到的所有风味物质进行OAV分析。根据表3列出的挥发性化合物质量浓度和香气阈值，计算每种物质的OAV，并将OAV≥1的挥发性化合物绘制成热图，见图3。所有样品中OAV≥1的挥发性风味物质共有16种，其中乙酸异戊酯（香蕉香，OAV为121~203）、己酸乙酯（香蕉香、菠萝香、花香，OAV为67~83）、乙酸乙酯（菠萝香，OAV为44~78）、癸酸乙酯（椰子香，OAV为80~127）、辛酸乙酯（果香、花香、白兰地酒香，OAV为34~45）、丁酸乙酯（菠萝香、苹果香，OAV为32~40）的OAV较高，对米酒的香气有突出贡献，其香气主要为花香和果香。

2.3.3　偏最小二乘判别分析

为了最大程度区分不同精白度大米酿造的米酒之间的差异，并识别导致这些差异的关键挥发性风味物质，对16种OAV≥1的挥发性风味物质进行PLS-DA。PLS-DA评分图有效地分离了5组样品，

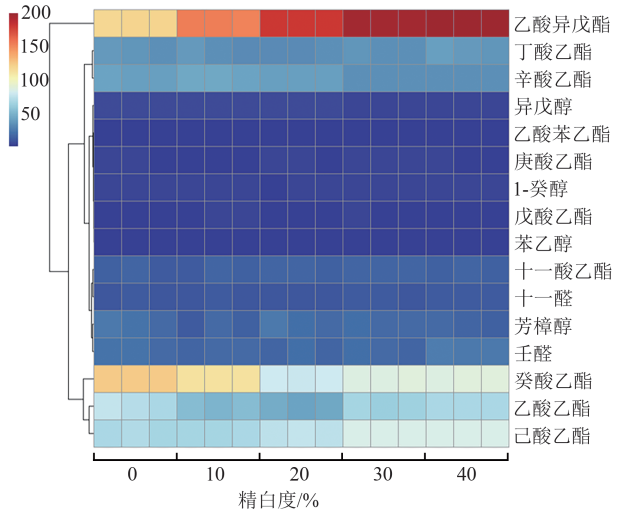


图 3　不同精白度大米酿造米酒中主要挥发性风味物质热图

Fig. 3　Heatmap of major volatile flavor compounds in rice wine brewed from rice with different polishing degrees

见图 4(a)，说明所选的 16 种挥发性风味物质能充分反映各样品间的整体香气差异。另外，随着大米精白度的提高，不同组之间表现出向第一主成分轴正方向变化的趋势，进一步证实了不同精白度大米酿造米酒中挥发性风味物质存在显著差异。为了避免模型过度拟合，采用置换检验计算 200 次交叉验证结果，见图 4(b)。结果表明 R^2 和 Q^2 截距值分别为 0.268 5 和−1.170 4，说明该模型没有过度拟合，具有良好的可靠性。

在 PLS-DA 分析中，变量权重值（variable important in projection，VIP）通常用来衡量每个变量对分类的贡献程度。当 VIP>1 时，表明该变量在判别过程中起重要作用，且 VIP 越大，其贡献越大[20]。通过计算 VIP 筛选出了 5 种关键的挥发性风味物质，分别为乙酸异戊酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、己酸乙酯和辛酸乙酯，见图 4(c)。因此，这 5 种酯类化合物不仅为米酒提供了丰富的果香和花香，还是导致不同精白度米酒风味差异的主要原因。其中乙酸异戊酯作为一种具有香蕉香气的挥发性风味物质，在不同精白度大米酿造的米酒中具有最高的 VIP 和 OAV，说明它不仅是米酒香气的主要贡献物质，也是最能区分不同精白度米酒的挥发性风味物质，是米酒的特征风味物质之一。乙酸异戊酯的质量浓度随大米精白度的升高显著增加，从 254.19 μg/L 增加至 406.91 μg/L（见表 3）。这是因为乙酸异戊酯的一条重要合成途

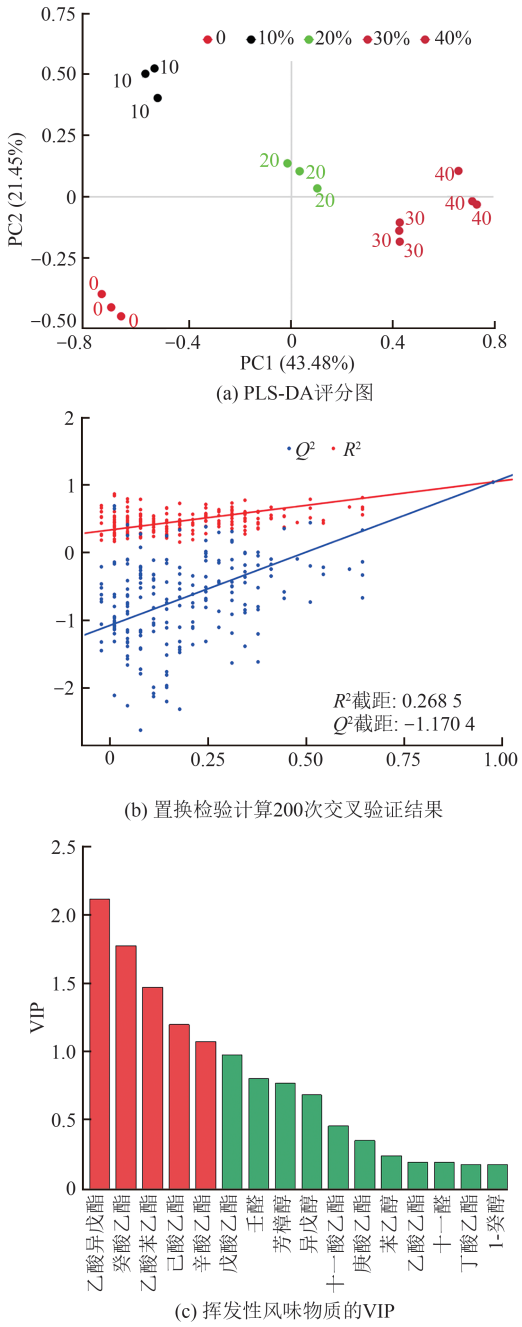


图 4　不同精白度大米酿造米酒的 PLS-DA 分析

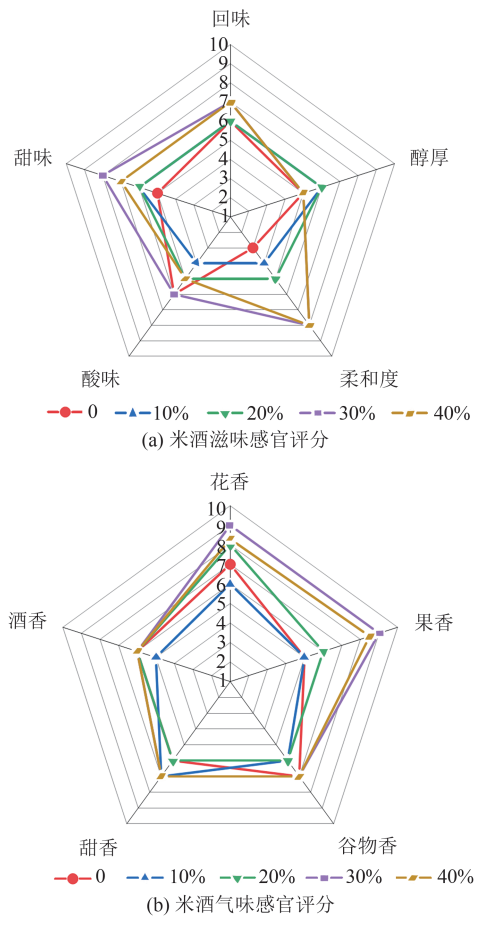
Fig. 4　PLS-DA analysis of rice wine brewed from rice with different polishing degrees

径是在乙醇乙酰基转移酶的催化作用下，将乙酰辅酶 A 和异戊醇合成为乙酸异戊酯[10]。然而，在这一过程中，大米外层脂质中的不饱和脂肪酸会抑制酿酒酵母中编码乙醇乙酰基转移酶的 *ATF1* 基因的表达，从而导致乙醇乙酰基转移酶活性降低[21]。因此，通过提高大米的精白度，可以去除这些不饱和脂肪酸，进而解除这种抑制效果，提高乙酸异戊酯的质量浓度。综上所述，对原料大米

进行精白处理可以提高米酒中重要特征风味物质乙酸异戊酯的质量浓度，从而改善米酒的整体风味。

2.4　感官评价

为进一步研究大米精白度对米酒品质的影响，分别从滋味和气味两个方面对不同精白度大米酿造的米酒进行感官评价，结果见图5。随着大米精白度的提高，米酒滋味中的酸味、回味和醇厚得分没有明显变化，而甜味和柔和度得分有所提升，见图5(a)。甜味评分的提升是由于米酒中总糖质量浓度的增加。而柔和度得分的提升可能是由于米酒中游离氨基酸质量浓度减少，降低了米酒口感的粗糙程度，使滋味变得更加柔和。随着大米精白度的提高，米酒气味中的酒香、甜香和谷物香评分没有明显变化，而花香和果香评分得到了提高，见图5(b)。这可能是由于



(a) 米酒滋味感官评分

(b) 米酒气味感官评分

图5　不同精白度大米酿造米酒的感官评分

Fig. 5　Sensory score of rice wine brewed from rice with different polishing degrees

随着大米精白度的提高，米酒中以乙酸异戊酯为代表的部分具有花果香气的酯类物质质量浓度有所提升，从而提高了米酒中花香和果香的评分。综上所述，大米的精白处理对米酒的滋味和气味具有改善作用，提高了米酒的整体风味品质。

另外，将感官评价结果与游离氨基酸、挥发性风味物质质量浓度结合分析，当精白度从0提升至30%时，米酒的风味品质提升较为明显，而精白度为30%和40%时米酒的风味品质没有显著差异。这可能是由于大米中的蛋白质和脂肪主要集中在米粒外层皮层和糊粉层中，在精白初期，这些成分的削减幅度较大，因此对风味品质产生了显著影响。综合考虑成本和米酒风味，选择30%的精白度最为合适。

3　结论

作者从理化指标、游离氨基酸、挥发性风味物质和感官评价4个方面研究了大米精白度对酶法酿造米酒品质的影响。结果表明，随着大米精白度的提高，米酒乙醇体积分数和总糖质量浓度有所提升，而氨基酸态氮质量浓度则呈下降趋势；米酒中游离氨基酸和高级醇质量浓度降低，有助于降低米酒的醇酯比，从而改善了米酒的口感并降低致醉性；同时，含硫氨基酸(蛋氨酸和半胱氨酸)质量浓度的下降有助于提高米酒的储藏稳定性并改善其新鲜度。另外，大米精白处理还可以提高米酒特征风味物质乙酸异戊酯质量浓度，从而改善米酒的整体风味。最后，通过感官评价验证了上述结论，发现经过精白处理后的米酒确实拥有更丰富的花香和果香以及更加柔和的口感。综上所述，大米精白处理能够提高米酒的风味品质，对其气味和滋味均有显著的改善作用，并确定最适精白度为30%。作者虽然阐明了大米精白度对酶法酿造米酒品质的影响，但研究并未深入至代谢层面。未来可进一步分析大米精白度对酿酒酵母代谢活动的影响，深入挖掘与风味和滋味有关的调控因子，以进一步完善理论体系并提供技术指导。

参考文献

[1] 王乃军，马美荣，李晶晶，等. 酶制剂在清香型麸曲白酒

生产中的应用研究[J]. 酿酒科技,2022(11):24-28.
WANG N J,MA M R,LI J J,et al. Application of enzyme preparation in the production of Fuqu Qingxiang Baijiu[J]. Liquor-Making Science & Technology,2022(11):24-28.
[2] 谢娟,邵改革,李坚盛,等. 板栗糯米黄酒制备工艺优化[J]. 中国酿造,2023,42(8):172-178.
XIE J,SHAO G G,LI J S,et al. Optimization of preparation technology of chestnut glutinous rice Huangjiu[J]. China Brewing,2023,42(8):172-178.
[3] TIE X Y,AN N N,LI D,et al. Recent advances in rice milling technology: effect on nutrient, physical properties and digestibility[J]. Food Reviews International,2024,40(8):2256-2282.
[4] XU Z K,XU Y J,CHEN X J,et al. Polishing conditions in rice milling differentially affect the physicochemical properties of waxy, low- and high-amylose rice starch[J]. Journal of Cereal Science,2021,99:103183.
[5] 刘彦宵雪. 碾减率对大米营养品质和食用品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
[6] SASAKI T,OCHIAI N,YAMAZAKI Y,et al. Solvent-assisted stir bar sorptive extraction and gas chromatography-mass spectrometry with simultaneous olfactometry for the characterization of aroma compounds in Japanese *Yamahai*-brewed sake[J]. Food Chemistry,2023,405(Pt A):134640.
[7] 姚哲. 大米的碾磨程度与品种对黄酒酿造品质的影响[D]. 无锡:江南大学,2022.
[8] LAMBERTS L,BIE E,VANDEPUTTE G E,et al. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice[J]. Food Chemistry,2007,100(4):1496-1503.
[9] 荣智兴,周建弟,钱斌,等. 大米精白度对黄酒主发酵阶段高级醇含量的影响[J]. 中国酿造,2013,32(1):28-32.
RONG Z X,ZHOU J D,QIAN B,et al. Effect of the polishing degree of rice on higher alcohols content during the main fermentation of Chinese rice wine[J]. China Brewing,2013,32(1):28-32.
[10] YOSHIZAWA K. Sake: production and flavor[J]. Food Reviews International, 1999, 15(1): 83-107.
[11] OKUDA M. Rice used for Japanese sake making[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2019, 83(8):1428-1441.
[12] MAKIMOTO J, WAKABAYASHI K, INOUE T, et al. Mutagenesis, breeding, and characterization of sake yeast strains with low production of dimethyl trisulfide precursor[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2020,130(6):610-615.
[13] 陈双. 中国黄酒挥发性组分及香气特征研究[D]. 无锡:江南大学,2013.
[14] WANG J,YUAN C J,GAO X L,et al. Characterization of key aroma compounds in Huangjiu from Northern China by sensory-directed flavor analysis[J]. Food Research International,2020,134:109238.
[15] 张瑜,张波,杨博,等. 咖啡酸和迷迭香酸对黑比诺干红葡萄酒香气成分的影响[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(7):72-83.
ZHANG Y, ZHANG B, YANG B, et al. Effects of caffeic acid and rosmarinic acid on aroma components of Pinot Noir dry red wine[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023,42(7):72-83.
[16] 尹蓉,张倩茹,王俊宇,等. 物理终止发酵工艺对低醇枣酒风味物质的影响[J]. 食品与机械,2022,38(12):15-20,27.
YIN R,ZHANG Q R,WANG J Y,et al. The influence of physical termination fermentation process on flavor substances of low-alcohol jujube wine[J]. Food & Machinery,2022,38(12):15-20,27.
[17] 何非,卢浩成,程彬皓,等. 延庆产区“美乐”干红葡萄酒在不同橡木桶陈酿过程中的香气变化[J]. 现代食品科技,2022,38(12):340-350.
HE F,LU H C,CHENG B H,et al. Aroma changes of Merlot dry red wine from Yanqing production area in different types of oak barrels[J]. Modern Food Science and Technology,2022,38(12):340-350.
[18] 李园子,郭慧敏,田伏锦,等. 酒中高级醇调控的研究进展[J]. 食品研究与开发,2024,45(1):160-169.
LI Y Z,GUO H M,TIAN F J,et al. Research progress in the regulation of higher alcohols in liquor[J]. Food Research and Development,2024,45(1):160-169.
[19] ZHOU Z L,JI Z W,LIU S P,et al. Characterization of the volatile compounds of Huangjiu using comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled to time of flight mass spectrometry (GC×GC-TOFMS)[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10): e14159.
[20] CAO J, WANG Y N, ZHANG Y, et al. Emerging applications of mass spectrometry-based metabolic fingerprinting in clinics[J]. Advanced Intelligent Systems,2022,4(5):2100191.
[21] TAKAHASHI T, OHARA Y, SAWATARI M, et al. Isolation and characterization of sake yeast mutants with enhanced isoamyl acetate productivity[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering,2017,123(1),71-77.

（责任编辑:刘冬梅）