

曹颖, 耿瑶, 韩乃瑄, 等. 果酒中的有机酸及降酸策略研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 457-464. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090119

CAO Ying, GENG Yao, HAN Naixuan, et al. Research on Organic Acids in Fruit Wine and Acid Reduction Strategies[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 457-464. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090119

· 专题综述 ·

果酒中的有机酸及降酸策略研究

曹 颖, 耿 瑶, 韩乃瑄, 王兆力, 王雪山, 孙中贯*
(枣庄学院食品科学与制药工程学院, 山东枣庄 277160)

摘 要: 有机酸是果酒主要风味物质之一, 其种类和含量对果酒的品质具有重要影响。适量的有机酸能够赋予果酒柔顺的口感, 同时具有一定的抑菌功效; 但较高的有机酸含量, 给人以尖锐刺口等不愉悦的体验, 严重影响果酒感官品质。因此充分掌握有机酸的呈味特征及降酸方法, 对果酒酿造具有十分重要的指导意义。本文系统介绍了果酒中的重要有机酸, 重点论述了物理、化学、生物及新兴技术等降酸工艺及应用现状, 并比较了各种降酸工艺的优缺点, 以期生产高品质果酒提供参考。

关键词: 果酒, 有机酸, 降酸策略, 物理降酸, 化学降酸, 生物降酸, 新兴降酸技术

中图分类号: TS261.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)14-0457-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090119



本文网刊:

Research on Organic Acids in Fruit Wine and Acid Reduction Strategies

CAO Ying, GENG Yao, HAN Naixuan, WANG Zhaoli, WANG Xueshan, SUN Zhongguan*

(College of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

Abstract: The type and content of organic acids have important influence on the quality of fruit wine. Proper amount of organic acids can give fruit wine soft taste, and has certain antibacterial effect. However, higher organic acid content causes the unpleasant sensation of sharp prickles, which seriously affected the sensory quality of fruit wine. Therefore, it is of great significance to master the flavor characteristics and acid reduction methods of organic acids in fruit wine brewing. The important organic acids in fruit wine are reviewed, and the physical, chemical, biological and emerging technologies for acid reduction and their application are emphatically discussed. The advantages and disadvantages of various acid reduction techniques are also compared, in order to provide reference for the production of high quality fruit wine.

Key words: fruit wine; organic acids; organic acid reduction strategies; physical acid reduction method; chemical acid reduction method; biological acid reduction method; emerging technologies for acid reduction

果酒是指以新鲜的水果及其制品为原料, 经全部或部分发酵, 获得的酒精含量在 18% 以下的轻度饮料酒^[1]。果酒生产历史悠久, 因酸、甘、清香的风味深受广大消费者们的喜爱。目前我国水果种类多样, 绝大多数适合于果酒的酿制, 其中葡萄、苹果、猕猴桃、山楂等水果在果酒酿制中占据较大比例^[2]。果酒中富含来自原料的各种营养物质, 包括多糖、氨基酸、酚类物质、有机酸等功能性物质, 具有抗氧化、降血脂、降胆固醇、预防心血管疾病等作用^[3]; 同时含

有醇类、脂类、酮类等香气成分, 为果酒提供悦人的香味。

果酒中的有机酸主要来自于原料水果、发酵过程的酵母代谢及酿制过程中的外加酸。有机酸种类和含量的差异会使果酒在风味、口感、品质等方面不尽相同。有机酸含量较少时, 酒体寡淡无味且无法平衡酒中的苦涩味; 而过量的有机酸会导致酒体生硬酸涩, 口感欠佳。只有当有机酸适量时, 才可使果酒酒体柔顺, 给人以愉悦之感, 并且还有一定的抑菌功

收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2020QC229); 枣庄市科技发展计划项目 (2020NS12, 2020NS18)。

作者简介: 曹颖 (2002-), 女, 本科, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: 1192426925@qq.com。

* 通信作者: 孙中贯 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 微生物发酵技术, E-mail: zhongguan115@163.com。

效。在具体生产过程中,由于原料本身所含有的有机酸和发酵过程中酵母代谢产生的有机酸较多,使得降酸成为果酒酿造过程中的一大重要难题。本文针对此类问题,系统介绍了果酒中的重要有机酸,并从物理、化学、生物等方面论述了降低有机酸的策略,以期改善果酒品质,促进果酒产业发展提供理论依据。

1 果酒中的有机酸

果酒中的有机酸种类和含量十分丰富,在自然界中的存在方式呈现多样化,主要为游离态或有机酸盐的形态,并以一元酸、二元酸及多元酸的形式存在于水果或蔬菜中^[4]。酒石酸、苹果酸、柠檬酸、琥珀酸和乳酸这几类有机酸存在于绝大多数的水果中,且含量较为丰富^[3],对果酒口感和风味的形成发挥着重要影响,现分别对其进行系统介绍。

1.1 酒石酸

酒石酸(Tartaric acid, TA)又名葡萄酒酸^[5],分子式为 $C_4H_6O_6$,是一种二元羧酸,酸性较强。其来源较广,存在于大多数水果中,于葡萄中含量最多,是葡萄酒中最为重要的特征酸。酒石酸对葡萄酒 pH 的高低起决定性作用,并使其颜色及微生物保持稳定,且对口感和风味有显著影响。酒石酸的合成积累一般在浆果转色期前,以葡萄为例,酒石酸大量积累的时间在葡萄开花后一个月内,之后非但没有酒石酸的形成,其浓度还会有所下降,主要是因为果实的体积增大导致酒石酸浓度被稀释^[6-7]。在发酵过程中,酒石酸的浓度因受到内外因素的影响而降低。当果酒在酿造过程中遭受某些乳酸细菌污染时,酒石酸便分解形成乳酸和乙酸,使酒体挥发酸的含量增加,引起“泛浑病”^[8]。

1.2 柠檬酸

柠檬酸(Citric acid, CA)又名枸橼酸,分子式为 $C_6H_8O_7$,是一种三羧酸类化合物,酸性强。在水果和蔬菜中均有其分布,特别是青桔、柠檬类柑橘属的水果中含量较多。柠檬酸本身具有温和而清爽的酸味,能够赋予果酒宜人的酸度和风味。因果实原料不同,果酒中的柠檬酸含量存在较大的差异,不同葡萄品种所酿造的葡萄酒中柠檬酸含量相差可达 10 倍^[9];在果酒酿造过程中,大部分柠檬酸是由需氧微生物在三

羧酸循环过程中产生,然而在苹果酸-乳酸发酵(malolac-tic fermentation, MLF)过程中,柠檬酸可转变成口感较为柔和的挥发性酸^[9]。

1.3 苹果酸

苹果酸(Malic acid, MC),分子式为 $C_4H_6O_5$,是一种二元羧酸,其酸性比柠檬酸高 20%^[9],多存在于不成熟的山楂、苹果和葡萄等果实的浆汁中。有刺激性爽快的酸味,稍带苦涩味,呈味时间较长。因苹果酸酸度高,故其对酒体的口感和风味等影响较大。以葡萄酒为例,高含量的苹果酸可能引起葡萄酒瓶内发酵,导致酒体品质下降甚至酸败,不利于成品酒的保藏与销售^[10]。在乳酸菌的作用下,经苹果酸-乳酸发酵(MLF)可将高酸的苹果酸转化成低酸的乳酸,增加酒体圆润度的同时,也产生了其他有益风味物质^[11]。然而只有马尔代乌拉裂殖酵母(*Schizosaccharomyces uralensis*)和粟酒裂殖酵母(*Schizosaccharomyces pombe*)才能把苹果酸最大程度的降解,并产生酒精和二氧化碳。

1.4 琥珀酸

琥珀酸(Succinic acid, SC),分子式为 $C_4H_6O_4$,是一种二元羧酸,酸性较强。琥珀酸主要是由发酵过程中酵母菌经三羧酸循环、苹果酸-乳酸发酵等代谢途径产生^[12];在酒体中比较稳定,能抵抗细菌性发酵的破坏作用。刚入口时酸味较淡,随后越来越浓,先咸后苦并能促进唾液分泌,是葡萄酒中味感最复杂的物质^[13],在果酒的成熟过程中有助于形成丰富的酯类物质,能增强葡萄酒的醇厚感。

1.5 乳酸

乳酸(Lactic Acid, LA),分子式为 $C_3H_6O_3$,是一种一元羧酸,主要来自苹果酸-乳酸发酵和酒精发酵,稳定性较高,酸性较温和但稍有涩感。因乳酸酸性柔和圆润,故常采用苹果酸-乳酸发酵以改善果酒的口感和风味,此方法还可以对酚类物质的含量起到一定的减弱作用。乳酸在果酒中的作用同柠檬酸、酒石酸,是一种对果酒有利、能改善酒体风味的不挥发酸^[14]。没有遭受细菌作用的葡萄酒,一般含有乳酸较少,不超过 500~600 mg/L^[15]。

综上所述,有机酸因其理化性质的差异,对果酒

表 1 果酒中重要有机酸比较

Table 1 Comparison of important organic acids in fruit wine

有机酸	分子结构	酸性	主要来源	对果酒的影响
酒石酸	分子式 $C_4H_6O_6$ 二元羧酸	酸性较强	来源较广,在葡萄中含量最多	对葡萄酒pH起决定性作用,并使其颜色及微生物保持稳定
柠檬酸	分子式 $C_6H_8O_7$ 三元羧酸	酸性强;具有温和而清爽的酸味	青桔、柠檬类柑橘属的水果中含量较多	赋予果酒宜人的酸度和风味
苹果酸	分子式 $C_4H_6O_5$ 二元羧酸	酸性强;刺激性爽快的酸味,稍带苦涩味	不成熟的山楂、苹果和葡萄果实的浆汁含量较多	对酒体的口感、酸度等影响较大
琥珀酸	分子式 $C_4H_6O_4$ 二元羧酸	酸性较强	酵母菌经三羧酸循环、苹果酸-乳酸发酵等代谢途径产生	有助于形成丰富的酯类物质,能增强果酒的醇厚感
乳酸	分子式 $C_3H_6O_3$ 一元羧酸	酸性柔和圆润	苹果酸-乳酸发酵和酒精发酵	对果酒有利,能改善酒体风味

的口感和风味产生了不同影响,现从分子结构、酸性、主要来源以及对果酒的影响等方面进行比较分析,如表 1 所示。

2 降酸策略

目前国内外针对果酒降酸的方法大致可以分为物理降酸法、化学降酸法、生物降酸法、混合降酸法以及新兴降酸技术等。

2.1 物理降酸法

2.1.1 低温冷冻降酸法 低温冷冻降酸法是指果酒中的酒石酸盐类物质在低温条件(0℃左右)下结晶析出,并趁冷过滤除去沉淀,达到降低酒体酸度的目的,通常可以降低酸度在 0.5~2.0 g/L 不等^[16-17]。陈继峰等^[16]采用低温冷冻法对葡萄酒进行处理时,发现葡萄酒中可滴定酸度降低了 2.2 g/L,在一定程度上减轻了酒体酸度。但该方法主要针对果酒中的酒石酸,而在降低其他有机酸含量方面无显著作用。低温冷冻法可以消除沉淀保持酒体稳定,在操作过程不加入任何外源试剂或菌株,安全性高;但应用范围较窄,且动力消耗大,在实际生产中不常用。

2.1.2 稀释降酸法 稀释降酸法是指在酸度较高的果酒中加入适量的水稀释或加入糖中和,使果酒整体酸度降低的方法。齐海萍等^[18]利用加糖法降低山楂果酒的酸度,研究发现当初始糖量超过 25% 时,发酵后的酒度便不再上升,残糖反而会增加。虽然加糖降酸效果较明显,但高浓度的糖使酒体浑浊,风味变化大。草莓酒的加水稀释降酸实验证实,尽管在降酸过程中果酒的色泽、质地和风味并未受到消极影响,并且由于酒体的总酸含量降低,改善了果酒的适口性;但却无法解决其口感寡淡,余味不足的品质缺陷^[19]。石小琼等^[20]研究发现,加水降低百香果味黄酒的酸度后,成品酒中的氨基酸态氮含量为 0.12 g/L,未达到企业产品标准(≥ 0.16 g/L),且存在色泽和产品风味明显变淡的问题。以上研究表明,利用加水或加糖法降低果酒的酸度可行性不高。

2.1.3 电渗析降酸法 电渗析降酸法是指利用离子交换膜的选择透过作用,在外加电场的条件下,阴阳离子分别向阳极和阴极移动进入浓缩室,从而达到降酸的目的,是一种十分有效的降酸方法^[21]。杨梅果酒因其原料中含有较高的有机酸,导致发酵后的酒体酸度过大且口感粗糙,在采用普通膜两隔室电渗析设备进行降酸处理后,杨梅果酒中的可滴定酸含量在短时间内从 12.0~14.0 g/L 降到 6.0~8.0 g/L,极大地改善了果酒的口感与品质^[22]。限制营养价值丰富的蔓越莓产品消费的因素之一便是其高酸度,Elodie 等^[23]利用双极膜电渗析(electrodialysis with bipolar membranes, EDBM)对蔓越莓果酒脱酸,实现了改善果酒口感和品质并增加其销售量的目的。Pelletier 等^[24]在施加脉冲电场的条件下采用 EDBM 对蔓越莓酒进行降酸处理,大大提高了脱酸速率,且处理过程不

产生任何污染物和废弃物,未来有望成为一种绿色环保的降酸方法。值得注意的是,电渗析的运行须在规定的电流以下,否则容易产生设备极化及膜结垢等问题,导致降酸效果减弱;同时最好在降酸之前进行预处理,减少因杂质的存在对膜产生的不利影响^[22]。因电渗析降酸具有精确控制降酸幅度、对酒体影响小、能耗较低、易实现自动化等优点,在实际生产中具有广泛的应用前景。

2.2 化学降酸法

2.2.1 碳酸钙降酸 碳酸钙降酸法是利用 CaCO_3 能与果酒中的有机酸形成有机酸钙盐沉淀,从而达到降低酒体酸度的一种方法。因降酸过程中产生的 CO_2 会造成果酒香气成分的损失,碳酸钙降酸法更适合于果酒的轻度降酸或发酵前的降酸。此种降酸方法具有反应速度快、降酸效果显著、成本低等优点,应用较为广泛。周杨等^[25]研究表明,碳酸钙对百香果酒有明显的降酸效用,且添加量为 0~5 g/L 时降酸效果最显著。杨梅果酒的降酸工艺研究发现,当加入碳酸钙的量为 0.5~1.0 g/L 时,杨梅果酒的感官评分达到最大值,且降酸作用明显^[26]。增加碳酸钙的用量,果酒 pH 亦会升高,总酸含量和果酒色度明显降低,感官评分随之下降,同时发酵过程受到抑制^[27]。这是由于 Ca^{2+} 的大量引入,使果酒呈现苦涩味同时酒体稳定性降低,进而出现酒体失光、浑浊或沉淀等问题。碳酸钠也是一种降酸效果显著的碳酸盐,在与碳酸钙对蓝锭果酒进行联合降酸时,可使酸度降至适宜浓度范围,且获得了高浓度的有机钙离子和良好的感官品质^[28]。另外,酒石酸钾也具有较好的降酸效果,但其添加量大,降酸程度小,很少被采用^[29]。

2.2.2 离子交换法降酸 离子交换法的降酸原理是利用阴离子交换树脂能交换溶液中的酸根离子,从而达到降低果酒酸度的目的^[30];离子交换树脂降酸法可避免因引入外源离子而导致果酒 pH 偏高的问题^[31]。近年来,科研人员对离子交换法降酸的研究不胜枚举。李英蕊等^[32]通过试验发现, L400 型离子交换树脂最适合青桔汁的降酸,其脱酸率达到了 66.7%。Li 等^[33]研究发现,使用阴离子交换树脂 335 以 2:11.98 的比例处理浓缩葡萄汁,在 15.5℃ 下处理 4.35 h,酒石酸的去除率达到 69.01%。柯旭清等^[34]研究不同降酸方法对浸泡型树莓果酒的影响,结果表明:采用 D301 大孔树脂处理后,树莓果酒的总酸可降低 4 g/L 以上,降酸率可达 40%,且果酒的酒体透明澄清,酒味醇香突显。刘淑珍等^[35]应用 D314 弱碱性树脂对猕猴桃果酒进行降酸处理,发现该方法可使总酸从 18.26 mg/L 降低至 7.55 mg/L,且果酒中的草酸、柠檬酸、酒石酸、苹果酸等多种有机酸含量均有所下降。目前,离子交换树脂降酸效果较理想,操作简单、树脂可重复使用、成本低,适合大规模工业生产。

2.2.3 壳聚糖吸附降酸 壳聚糖是一种天然大分子

多糖类物质,其降酸的原理是利用壳聚糖中游离的氨基与果酒中有机酸的羧基发生作用,从而降低酒体酸度。但壳聚糖主要吸附有机酸中的苹果酸和柠檬酸,降酸能力有限,应用范围较窄。诸葛庆等^[15]研究发现,5和6 g/L的壳聚糖用量在对猕猴桃果酒降酸的第九天时酒体酸度分别为11.0和10.6 g/L,均未达到猕猴桃果酒酸度6~8 g/L的标准,且壳聚糖对降低果酒酸度的速度随时间呈现下降的趋势。因其对果酒色泽、口感等方面影响较大,可以考虑与其他降酸试剂复合降酸。张方艳等^[36]研究猕猴桃果酒降酸时,发现6.0 g/L壳聚糖和2.2 g/L Na_2CO_3 相结合可使猕猴桃果酒的酸度从13.69 g/L降低至7.63 g/L,降酸率可达44.27%。此方法在降低猕猴桃果酒酸度的同时,还能改善其色泽口感,提高果酒品质。

2.3 生物降酸法

2.3.1 乳酸菌降酸法 乳酸菌降酸的原理是利用乳酸菌在苹果酸-乳酸酶(malo-lactic enzyme, MLE)的催化下,通过苹果酸-乳酸发酵将L-苹果酸转变为L-乳酸和二氧化碳的过程^[37]。Lytra等^[38]通过苹果酸-乳酸发酵,将酒体中酸涩尖锐的苹果酸转化为温和圆润的乳酸,既降低了酒体酸度,又提高了红葡萄酒的果香味,同时改善了酒体的酸糖平衡。

应用于果酒降酸方面的乳酸菌主要为明串珠菌属、酒球菌属以及乳杆菌属某些特定的种,目前相关菌株已在果酒生物降酸工艺中得到广泛应用。明串珠菌属是进行MLF的主要乳酸菌,具有高度专一性。邓奥宇等^[39]研究了乳酸菌发酵结合7种离子交换树脂对柠檬果酒的降酸效果,发现当发酵菌株为肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*),接种量为 1.0×10^6 CFU/mL,结合弱碱性阴离子交换树脂D311,可使柠檬果酒酸度下降至2.18 g/L,降酸效果最为显著。酒类酒球菌(*Oenococcus oeni*)在MLF途径中发挥着降低果酒酸度,提高酒体品质,增加酒体香气等作用。Gao等^[40]研究酒球菌降低苹果酒酸度时,发现在室温条件下96 h内90%以上的苹果酸能够转化为乳酸,有效的降低了酒体酸度;但酒类酒球菌主要用于饮料酒中苹果酸的降解^[41],应用领域较窄。在葡萄酒酿造过程中,乳酸杆菌可进行兼性或强制性的异养发酵,能够承受高乙醇水平、低pH等苛刻的葡萄酒条件。与酒球菌相比,乳酸杆菌的酶系更为丰富,对葡萄酒香气化合物的产生贡献更大;同时也可产生如植物素等细菌素,用于对抗引起酒体腐败变质的乳酸菌^[42]。易鑫等^[43]研究植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)对梁平柚果酒发酵过程的影响,发现添加2%(v/v)的植物乳杆菌显著降低了果酒总酸酸度,获得的果酒酒体醇厚,口感强烈独特且发酵更为充分。乳酸菌通过MLF可以有效降低果酒中的过量有机酸,使酒体口感更加温和适口,但该方法因存在菌种活性不稳定、发酵条件较难控制等问题而影响降酸效果^[44]。

2.3.2 酵母菌 用于果酒降酸的酵母可分为酿酒酵母和非酿酒酵母,其降酸原理是酵母菌在苹果酸酶(malicenzyme, ME)的作用下,通过苹果酸-乙醇发酵(malo-alcohol fermentation, MAF)途径将苹果酸转化为二氧化碳和乙醇,以此来达到降酸的目的。不同于乳酸菌的降酸方式,酵母菌能通过三羧酸循环降解柠檬酸,同时产生还原型辅酶I,为其生长代谢提供还原力^[45]。

2.3.2.1 酿酒酵母降酸 酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)是果酒发酵中发挥主要作用的微生物,在发酵过程中,酿酒酵母的生长代谢会引起果酒中有机酸、酚类等各种物质组分的变化,进而影响果酒的感观和质量^[46-47]。赵文英等^[48]研究对比了五种商业酿酒酵母菌(71B、CECA、VP5、BV818、Montrachet)在发酵树莓果酒上的差异,发现酿酒酵母Montrachet发酵迅速彻底且平稳,降酸能力强,口感色泽宜人,应用前景良好。何志刚等^[49]分离鉴定降酸酿酒酵母时,发现酿酒酵母JP2、酿酒酵母J4在“解放钟”枇杷酒和葡萄酒发酵过程中均具有良好的降酸效果,但其降酸能力因水果品种存在差异。刘延岭等^[50]对降解苹果酸的酵母菌进行筛选及鉴定,发现酿酒酵母ZJ22对苹果酸的降解率为28.36%,为ZJ22、PJ34和ZG13这3株酵母菌中最大者;且对酒精、 SO_2 、酸和糖综合耐受性最好,具有在果酒酿造中应用的潜力。

2.3.2.2 非酿酒酵母降酸 自然发酵并不是单一菌种的发酵,参与发酵的菌种不仅包括酿酒酵母,也包括非酿酒酵母。在自然发酵前期,非酿酒酵母菌群占据的比例远远大于酿酒酵母^[51-52]。非酿酒酵母最初是从腐坏葡萄酒中分离得到的,所以也被认为是葡萄酒中的败坏菌种^[53]。然而近年来,随着科研人员对非酿酒酵母的持续深入研究和探索以及酿酒工作者们对葡萄酒酿酒工艺的实践研究,发现非酿酒酵母也可被用于果酒降酸,其应用价值逐渐得到越来越多的认可。能够进行MAF的酵母菌称为裂殖酵母,在裂殖酵母属中粟酒裂殖酵母(*Schizosaccharomyces pombe*)对苹果酸的分解率达到90%,是降解苹果酸的理想菌株。但在实际生产中,因粟酒裂殖酵母易被其他酵母所抑制而发挥不出分解苹果酸的特性,且产生不良风味,造成酒质欠佳,往往不单独使用。然而非酿酒酵母菌的伊萨酵母属、毕赤酵母属以及假丝酵母属对高含量的柠檬酸有较强的耐受力,十分适合于柠檬酸型果酒果汁的降酸。郝爱玲等^[41]研究猕猴桃果酒降酸工艺时发现,东方伊萨酵母(*Issatchenkia orientalis*)M130对柠檬酸的降解率达18.12%,降酸效果高于其他菌株且发酵后口感浓郁,色泽澄清。龚丽娟等^[54]将毕赤酵母(*Pichia fermentans*)JT-1-3和季也蒙毕赤酵母(*Meyerozyma guilliermondii*)JP-4-2分别接种培养,研究其对有机酸类碳源的利用程度。结果表明,*M. guilliermondii* JP-4-2对柠檬酸的代谢率最

高(28.30%),但乙醇或葡萄糖的存在会抑制其对柠檬酸的利用;这为利用此类非酿酒酵母菌株酿造酸度适中的果酒提供了理论支撑。产朊假丝酵母(*Candida utilis*)可将细胞外的 L-苹果酸、柠檬酸、琥珀酸等有机酸作为碳源利用,能够有效降低果酒中有机酸的含量,提高酒精度,是改善果酒品质的有效措施之一^[55]。可见,非酿酒酵母在果酒的发酵过程和降酸工艺中发挥重要作用。

2.3.2.3 混菌发酵降酸 过去,非酿酒酵母菌往往被忽略或被认为是不受欢迎的腐败酵母菌,近几年随着对酿酒微生物的深入研究,发现在酿酒酵母发酵的基础上添加适当的非酿酒酵母菌株,有利于果酒中有机酸的降解,酿造出风格独特、品质更高的果酒类产品^[56]。Zhong 等^[57]研究发现毕赤酵母 JT-1-3 与商业酿酒酵母菌 RV002 的联合使用对猕猴桃果酒中的柠檬酸表现出较高的降解能力和耐受力。Monika 等^[58]发现混合酵母培养物的使用有助于降低葡萄酒的挥发性酸度和乙酸含量,并获得良好的葡萄酒香气轮廓。另外,克鲁维耐热酵母(*Kluyveromyces*)具有降低果酒中挥发性酸度和提高固定酸度的能力,因此在和酿酒酵母的混合发酵过程中,能够使可滴定酸度增加 70%,同时降低 0.3pH 单位,从而达到生物降酸的目的^[59]。Rantsiou 等^[60]研究酿酒酵母和泽普林假丝酵母(*Candida zemplinina*)混合发酵时,发现发酵结束后果酒中保持较高的乙醇含量和甘油水平,乙酸含量下降明显,从而证实该混合发酵方式适用于甜型果酒的生产。目前实际生产中应用最多的是通过非酿酒酵母与酿酒酵母混合发酵增加酒体中萜烯或酯类物质的种类和含量同时增加多糖的释放,从而减少果酒的酸涩刺口之感,增加果香和花香,改善果酒的品质^[61]。

2.4 新兴降酸技术

随着科学技术的发展,基因工程日渐兴起,通过基因工程技术选育的果酒酵母菌为果酒降酸提供了新思路,同时现代发酵工程技术的进展,如固定化细胞(酶)技术的应用、膜生物反应器的开发等,已使果酒降酸技术朝着更可控、易操作的方向发展^[62]。Ding 等^[63]以粟酒裂殖酵母 CGMCC 2.1628 为出发菌株,经过三轮基因组改组,获得了性能最好的融合子

GS3-1,其脱酸活性(10 d 内消耗 4.78 g/L 苹果酸)比出发菌株提高了 225.2%,这表明 GS3-1 在提高毛葡萄酒品质方面具有很大的潜力。Vilela 等^[64]优化海藻酸珠固定化酿酒酵母 S26 用于酸性葡萄酒挥发性酸度的生物还原,发现 S26 在 72 和 168 h 内可使酸性葡萄酒(1.1 g/L 乙酸、乙醇 12.5%vol、pH3.12)的挥发酸度分别降低 28% 和 62%,表明双层珠固定化酿酒酵母 S26 菌株能够有效提升高挥发酸葡萄酒的品质。Kosseva 等^[65]在试验时研究发现,用果胶酸盐微胶囊固定乳酸菌细胞进行 MLF,可将白葡萄酒中的苹果酸降解近 30%,转化率是游离细胞的 2 倍以上。Maicas 等^[66]采用带正电荷的食品级海绵纤维素吸附固定酒类酒球菌细胞,制成了半连续的生物反应器,该反应器对葡萄酒中的苹果酸转化率高于 50%,且在 24 h 内活力不变。目前,新兴降酸技术的分类并不十分清晰,其降酸机制尚未完全掌控。利用新兴技术降酸需要专业的技术人员跟踪指导,人力物力的消耗大且成本较高,在我国实际果酒降酸领域中应用不多。

2.5 混合降酸

混合降酸是指果酒在生产加工过程中,为达到理想的降酸效果,通常采用两种或两种以上的方法去除酒体中的有机酸,以改善果酒品质。由于化学降酸法主要是利用化学试剂来降低果酒中的酒石酸,然而其使用量超出一定范围不仅会影响果酒的澄清度、色泽和香气;过量金属离子的引入还容易导致酒体的不稳定,给果酒品质带来很大的负面影响。为了避免上述问题的产生,可以采取与其他降酸方法相结合的方式,如先进行化学降酸再利用低温冷冻过滤去除沉淀物。郭子祺^[67]在研究不同降酸方法对木瓜酒降酸效果的影响时,发现化学复合降酸剂结合低温冷冻处理降酸效果更为显著,在 0~4 ℃ 的低温条件下,选用 0.5 g/L 碳酸钾、0.5 g/L 碳酸氢钾、0.5 g/L 酒石酸钾为复合降酸剂进行联合降酸,木瓜酒的总酸度将至 6~7 g/L。壳聚糖对有机酸的吸附能力较强,特别是在降解苹果酸和柠檬酸方面,但由于对苹果酒的色度影响较大,可以采用与其他降酸剂或降酸方法复合使用达到降酸目的,同时保证苹果酒的色泽和品质^[68]。混合降酸可减少异物、异味的出现,更好的改

表 2 不同降酸策略比较
Table 2 Comparison of different acid reduction strategies

策略	途径	效果	优点	缺点
物理降酸法	低温冷冻;稀释;电渗析等	对酒石酸影响较显著	对酒体影响小,安全性较高;成本较低,操作工艺简单	降酸幅度小;易造成杂菌的污染;对酒体的负面影响较大
化学降酸法	碳酸盐;离子交换树脂;壳聚糖等	降酸幅度较大	操作方便;易控制;降酸效果明显	易产生不溶性沉淀,使酒体风味和质地下降
生物降酸法	乳酸菌;酵母菌	对苹果酸、柠檬酸降解作用较强	增加酒体的稳定性和提升酒体品质	容易被杂菌污染;操作难度大;产生不利副产物
新兴降酸技术	基因工程;固定化细胞;膜生物反应器等	降酸效果显著	过程更可控,易操作;对酒体影响小	专门技术人员跟踪,人力物力的消耗大;成本较高
混合降酸法	综合选用多种方法	适合有机酸种类较多	效果更为显著;应用范围广	工序繁琐;成本较高;受诸多因素影响

善果酒品质,应用范围广,是实际生产中较为理想的降酸方法;但也存在工序繁琐,成本较高,受诸多因素影响等问题。

综上所述,不同果酒降酸技术的选择是由其本身的性质及有机酸的种类和含量等因素来决定的,每种降酸策略各有优缺点,通常采用多种方式混合降酸来达到较理想的效果,现对以上降酸策略进行比较,如表2所示。

3 总结

果酒中的有机酸类物质作为主要呈味物质之一,由于其本身具有酸味和特殊口感,使得有机酸对果酒感官品质的形成发挥着重要作用。然而,果酒中普遍存在酸度过高的现象,降酸对果酒至关重要;目前果酒降酸的方法有物理降酸法、化学降酸法、生物降酸法、新兴降酸技术以及混合降酸法等。由于果酒的多样性及所含有机酸的复杂性,采用某一种降酸方法很难达到理想的降酸效果;混合降酸法成为目前果酒生产企业广泛采用的降酸方式,但混合降酸法存在操作工序复杂、技术难度大、降酸成本高等缺陷。因此,对现有降酸技术进行创新和改进或研究发展新降酸技术是有效控制果酒中有机酸的关键途径。

参考文献

- [1] 姜欢笑,郭建华,时小棠,等.果酒中有机酸成分分析及降酸技术研究现状[J].现代食品,2020(9):10-14. [JIANG H X, GUO J H, SHI X T, et al. Research status of organic acid composition analysis and acid reduction technology in fruit wine[J]. Modern Food, 2020(9): 10-14.]
- [2] 赵婷,李林波,潘明,等.果酒产业的发展现状与市场前景展望[J].食品工业,2019,40(5):302-308. [ZHAO T, LI L B, PAN M, et al. The development status and market prospect of fruit wine industry[J]. Food Industry, 2019, 40(5): 302-308.]
- [3] 张倩茹,殷龙龙,尹蓉,等.果酒主要成分及其功能性研究进展[J].食品与机械,2020,36(4):226-230,236. [ZHANG Q R, YIN L L, YIN R, et al. Research progress on main components and functional properties of fruit wine[J]. Food and Machinery, 2020, 36(4): 226-230,236.]
- [4] 段元良.山楂酒的酿造及降酸工艺研究[D].济南:齐鲁工业大学,2016. [DUAN Y L. Study on brewing and acid reducing technology of Hawthorn Wine[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2016.]
- [5] 曹慧玲,舒河霖,邵建辉,等.葡萄果实酒石酸生物合成研究进展[J].中国果树,2021(4):8-13. [CAO H L, SHU H L, SHAO J H, et al. Research progress of tartaric acid biosynthesis in grape[J]. China Fruits, 2021(4): 8-13.]
- [6] SETH D, JIM H, STEVE T, et al. Composition and synthesis of raphide crystals and druse crystals in berries of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon: Ascorbic acid as precursor for both oxalic and tartaric acids as revealed by radiolabelling studies[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2004, 10(2): 134-142.
- [7] DELUC L G, GRIMPLET J, WHEATLEY M D, et al. Transcriptomic and metabolite analyses of Cabernet Sauvignon grape berry development[J]. BMC Genomics, 2007, 8(1): 429.
- [8] 张军.葡萄及葡萄酒中有机酸和挥发性硫化物的研究[D].天津:天津科技大学,2004. [ZHANG J. Studies on organic acids and volatile sulfides in grape and wine[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2004.]
- [9] 曾竟蓝,马胤鹏,秦丹,等.果酒中有机酸的作用及检测方法研究[J].中国酿造,2018,37(6):183-187. [ZENG J L, MA Y P, QIN D, et al. Study on the function and detection method of organic acids in fruit wine[J]. China Brewing, 2018, 37(6): 183-187.]
- [10] 朱磊,陈芸华,胡禧熙,等.葡萄有机酸的研究进展[J/OL].中外葡萄与葡萄酒:1-8 [2022-10-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1349.TS.20220922.1236.002.html. [ZHU L, CHEN Y H, HU X X, et al. Research progress of grapevine org-ani acid[J/OL]. Sino-overseas Grapevine & Wine: 1-8 [2022-10-16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1349 TS.20220922.1236.002.html.]
- [11] 郭志君,杨磊,骆红霞,等.苹果酸-乳酸发酵对刺梨酒香气的影响[J].食品与机械,2022,38(3):197-204,233. [GUO Z J, YANG L, LUO H X, et al. Effect of malate-lactic acid fermentation on aroma of Roxburgh rose wine[J]. Food and Machinery, 2022, 38(3): 197-204,233.]
- [12] 严超,侯丽娟,齐晓茹,等.红枣白兰地发酵过程中酒酯氨基酸和有机酸的变化分析[J].食品工业科技,2017,38(14):121-125. [YAN C, HOU L J, QI X R, et al. Changes of fermented amino acids and organic acids in jujube brandy fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(14): 121-125.]
- [13] 唐柯,王蓓,马玥,等.不同酵母与温度发酵的威代尔冰葡萄酒有机酸分析[J].食品与发酵工业,2015,41(8):153-158. [TANG K, WANG B, MA Y, et al. Organic acid analysis of Wedale ice wine fermented with different yeast and temperature[J]. Food and Fermentation Industry, 2015, 41(8): 153-158.]
- [14] 朱胜男.水蜜桃果酒的工艺研究[D].淮安:淮阴工学院,2020. [ZHU S N. Study on the technology of peach fruit wine[D]. Huaian: Huaiyin Institute of Technology, 2020.]
- [15] 诸葛庆.猕猴桃酒降酸降涩新工艺的研究[D].无锡:江南大学,2005. [ZHU G Q. Study on new technology of reducing acid and astringent of kiwifruit wine[D]. Wuxi: Jiangnan university, 2005.]
- [16] 陈继峰, BILL K. 降酸方法对葡萄酒降酸效果的影响[J].中外葡萄与葡萄酒,2001(3):17-20. [CHEN J F, BILL K. Influence of acid reducing method on the effect of wine acid reducing[J]. Sino-overseas Grapevine & Wine, 2001(3): 17-20.]
- [17] 康孟利,凌建刚,林旭东.果酒降酸方法的应用研究进展[J].现代农业科技,2008(24):25-26,30. [KANG M L, LIN X D. Research progress on the application of acid reducing methods in fruit wine[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2008(24): 25-26,30.]
- [18] 齐海萍,胡文忠,姜爱丽,等.山楂汁降酸工艺与山楂果酒的酿制[J].中国酿造,2011(3):179-183. [QI H P, HU W Z, JIANG A L, et al. Technology of reducing acid in hawthorn juice and making hawthorn wine[J]. China Brewing, 2011(3): 179-183.]
- [19] 张源,兰伟,王明跃,等.草莓酒稀释降酸发酵技术研究[J].酿酒,2017,44(6):112-115. [ZHANG Y, LAN W, WANG M Y, et al. Study on diluting and reducing acid fermentation technology of strawberry wine[J]. Brewing, 2017, 44(6): 112-115.]
- [20] 石小琼,李孝,张凯,等.百香果味型黄酒勾兑降酸技术研究[J].科技资讯,2019,17(16):84-86. [SHI X Q, LI X, ZHANG K, et al. Study on acid reduction technology of passion fruit flavoring yellow rice wine[J]. Science and Technology Information, 2019, 17(16): 84-86.]
- [21] 孙洪浩,颜雪辉,张家庆,等.果酒降酸方法研究进展[J].酿酒,2013,40(6):27-30. [SUN H H, YAN X H, ZHANG J Q, et al. Research progress on acid reducing methods of fruit wine[J].

- Brewing, 2013, 40(6): 27–30.]
- [22] 周增群, 钟烈洲, 黄海智, 等. 电渗析法用于杨梅果酒降酸的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(13): 266–268. [ZHOU Z Q, ZHONG L Z, HUANG H Z, et al. Study on acid reduction of waxberry wine by electrodialysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(13): 266–268.]
- [23] ROZOY E, BOUDESOCQUE L, BAZINET L. Deacidification of cranberry juice by electrodialysis with bipolar membranes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(2): 642–651.
- [24] STEPHANIE P, ÉLODIE S, SERGEY M, et al. Optimization of cranberry juice deacidification by electrodialysis with bipolar membrane: Impact of pulsed electric field conditions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 186: 106–111.
- [25] 周杨, 李思伦, 李晓娟, 等. 百香果降酸及混合果汁酿酒研究[J]. *酿酒科技*, 2018(2): 91–96. [ZHOU Y, LI S L, LI X J, et al. Study on acid reduction of passion fruit and wine making with mixed fruit juice[J]. *Liquor-making Science & Technology*, 2018(2): 91–96.]
- [26] 高娟, 张雪林, 杨性民, 等. 杨梅果酒的澄清与降酸工艺研究[J]. *浙江万里学院学报*, 2015, 28(4): 91–97. [GAO J, ZHANG X L, YANG X M, et al. Study on clarification and acid reduction technology of waxberry wine[J]. *Journal of Zhejiang Wanli University*, 2015, 28(4): 91–97.]
- [27] KIM C W, JEON J A, KANG J E, et al. Characteristics of gaeryangmerou wine deacidified by calcium carbonate[J]. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, 2016, 26(6): 559–564.
- [28] 梁敏, 包怡红, 徐福成. 蓝靛果酒化学降酸工艺及对花色苷组成的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(10): 188–195. [LIANG M, BAO Y H, XU F C. Chemical acid reduction technology of indigo wine and its effect on anthocyanin composition[J]. *Modern Food Technology*, 2018, 34(10): 188–195.]
- [29] 马倩, 徐佳, 左勇, 等. 杏果酒加工技术及品质分析研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(13): 310–314. [MA Q, XU J, ZUO Y, et al. Research progress of apricot wine processing technology and quality analysis[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(13): 310–314.]
- [30] 张晓峰, 孙西玉, 刘延波, 等. 离子交换法对低度白酒质量影响的研究[J]. *酿酒科技*, 2018(2): 22–24. [ZHANG X F, SUN X Y, LIU Y B, et al. Study on the effect of ion exchange method on the quality of low alcohol liquor[J]. *Liquor-making Science & Technology*, 2018(2): 22–24.]
- [31] 张方艳, 蒲彪, 陈安均. 果酒降酸方法的研究现状[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(1): 390–393, 400. [ZHANG F Y, PU B, CHEN A J. Research status of acid reducing methods in fruit wine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(1): 390–393, 400.]
- [32] 李英蕊, 马玉蓉, 赵玲, 等. 青桔汁树脂降酸的工艺优化及青桔蜂蜜复合汁的初步开发[J]. *中国果菜*, 2021, 41(6): 5–10. [LI Y R, MA Y R, ZHAO L, et al. Optimization of acid reduction technology of lime juice resin and preliminary development of lime honey compound juice[J]. *China Fruit and Vegetable*, 2021, 41(6): 5–10.]
- [33] LI N, WEI Y, LI X M, et al. Optimization of deacidification for concentrated grape juice[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(6): 2050–2058.
- [34] 柯旭清, 徐兆伯, 王力, 等. 浸泡型树莓果酒降酸方法的研究[J]. *酿酒科技*, 2019(3): 99–101. [KE X Q, XU Z B, WANG L, et al. Study on the method of reducing acid in Raspberry wine by soaking[J]. *Liquor-making Science & Technology*, 2019(3): 99–101.]
- [35] 刘淑珍, 苏颖玥, 陈红梅, 等. 酿造技术对野生猕猴桃果酒有机酸组成及其品质的影响[J]. *酿酒科技*, 2021(4): 71–78. [LIU S Z, SU Y Y, CHEN H M, et al. Effect of brewing technology on organic acid composition and quality of wild kiwifruit wine[J]. *Liquor-making Science & Technology*, 2021(4): 71–78.]
- [36] 张方艳, 蒲彪, 刘兴艳. 猕猴桃果酒的降酸研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(18): 207–210. [ZHANG F Y, PU B, LIU X Y. Study on reducing acid of kiwi fruit wine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(18): 207–210.]
- [37] 李瑞国, 韩辉, 周志江. 葡萄酒苹果酸乳酸发酵研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(8): 228–233. [LI R G, HAN Y, ZHOU Z J. Research progress of malolactic fermentation in wine[J]. *Food Research and Development*, 2010, 31(8): 228–233.]
- [38] LYTRA G, MIOT-SERTIER C, MOINE V, et al. Influence of must yeast-assimilable nitrogen content on fruity aroma variation during malolactic fermentation in red wine[J]. *Food Research International*, 2020, 135: 109294.
- [39] 邓奥宇, 关统伟, 王鹏昊, 等. 柠檬果酒两步法快速降酸工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(22): 95–99. [DENG A Y, GUAN T W, WANG P H, et al. Study on two-step rapid acid reduction technology of lemon fruit wine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(22): 95–99.]
- [40] GAO J F, H P VASANTHA RUPASINGHE, NANCY L PITTS. Characterisation of malolactic conversion by *Oenococcus oeni* to reduce the acidity of apple juice[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(5): 1018–1027.
- [41] 郝爱玲, 冯莉, 秦义, 等. 降解柠檬酸酵母菌的筛选及其发酵性能研究[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(11): 72–80. [FENG A L, FENG L, QIN Y, et al. Screening of citric acid degrading yeast and its fermentation performance[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2018, 18(11): 72–80.]
- [42] TOIT M D, ENGELBRECHT L, LERM E, et al. Lactobacillus: The next generation of malolactic fermentation starter cultures—an overview[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(6): 876–906.
- [43] 易鑫, 谈安群, 欧阳祝, 等. 植物乳杆菌混菌发酵对梁平柚果酒理化性质及风味影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(11): 180–187. [YI X, TAN A Q, OU Y Z, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* mixed fermentation on physicochemical properties and flavor of Liang ping Pomelo wine[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(11): 180–187.]
- [44] 袁星星, 余元善, 徐玉娟. 柠檬酸的乳酸菌发酵降解途径及其应用[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(10): 204–208. [YUAN X X, YU Y S, XU Y J. Fermentation and degradation of citric acid by lactic acid bacteria and its application[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(10): 204–208.]
- [45] 王金玲, 晏雨辰, 李巧月, 等. 生物降解柠檬酸及其影响因素的研究进展[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(2): 347–357, 312. [WANG J L, YAN Y C, LI Q Y, et al. Research progress on biodegradation of citric acid and its influencing factors[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(2): 347–357, 312.]
- [46] 廖丽, 毛晓云, 王秋蓉, 等. 不同酿酒酵母对脆红李果酒品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(20): 131–138. [LIAO L, MAO X Y, WANG Q R, et al. Effects of different *Saccharomyces cerevisiae* on the quality of crisp red plum wine[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(20): 131–138.]
- [47] BERENGUER M, VEGARA S, BARRAJON E, et al. Physicochemical characterization of pomegranate wines fermented

- with three different *Saccharomyces cerevisiae* yeast strains[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 848–855.
- [48] 赵文英, 薛颖, 花锦, 等. 不同酿酒酵母菌发酵树莓果酒的理化特性[J]. *中国酿造*, 2022, 41(4): 120–125. [ZHAO W Y, XUE Y, HUA J, et al. Physicochemical characteristics of raspberry wine fermented by different *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *China Brewing*, 2022, 41(4): 120–125.]
- [49] 何志刚, 李维新, 梁璋成, 等. 优良降酸酿酒酵母的分离和鉴定[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(5): 191–197. [HE Z G, LI W X, LIANG Z C, et al. Isolation and identification of excellent acid-reducing *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2013, 13(5): 191–197.]
- [50] 刘延岭, 邓林, 陶瑞霄. 降解苹果酸酵母菌的筛选及鉴定[J]. *食品科技*, 2020, 45(3): 8–12. [LIU Y L, DENG L, TAO R X. Screening and identification of malate degrading yeast[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(3): 8–12.]
- [51] LI E H, LIU A, XUE B, et al. Yeast species associated with spontaneous wine fermentation of Cabernet Sauvignon from Ningxia, China[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2011, 27(10): 2475–2482.
- [52] WANG C X, LIU Y L. Dynamic study of yeast species and *Saccharomyces cerevisiae* strains during the spontaneous fermentations of Muscat blanc in Jingyang, China[J]. *Food Microbiology*, 2013, 33(2): 172–177.
- [53] DASHKO S, ZHOU N, TINTA T, et al. Use of non-conventional yeast improves the wine aroma profile of *Ribolla gialla*[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2015, 42(7): 997–1010.
- [54] 龚丽娟, 孙婉莹, 钟武, 等. 非酿酒酵母对有机酸类碳源代谢特征的研究[J]. *中国酿造*, 2020, 39(2): 84–88. [GONG L J, SUN W Y, ZHONG W, et al. Metabolic characteristics of organic acid carbon sources in *non-Saccharomyces cerevisiae*[J]. *China Brewing*, 2020, 39(2): 84–88.]
- [55] 黄鹭强. 降酸酵母菌株的构建及其在枇杷酒酿造中的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013. [HUANG L Q. Construction of acid-lowering yeast strain and its application in Loquat wine production[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.]
- [56] 卜光明, 周化斌, 周茂洪, 等. 酿造酒中非酿酒酵母的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14): 346–352. [BU G M, ZHOU H B, ZHOU M H, et al. Research progress of *non-Saccharomyces cerevisiae* in wine production[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(14): 346–352.]
- [57] ZHONG W, CHEN T, YANG H, et al. Isolation and selection of *non-Saccharomyces* yeasts being capable of degrading citric acid and evaluation its effect on kiwifruit wine fermentation[J]. *Fermentation*, 2020, 6(1): 25.
- [58] CIOCH-SKONECZNY M, GRABOWSKI M, SATORA P, et al. The use of yeast mixed cultures for deacidification and improvement of the composition of cold climate grape wines[J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2628–2628.
- [59] 谭玉岩, 郝宁. 酿酒酵母与非酿酒酵母混合发酵对果酒品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 353–359. [TAN Y Y, HAO N. Effects of mixed fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* and *non-Saccharomyces cerevisiae* on fruit wine quality[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 353–359.]
- [60] RANTSIOU K, DOLCI P, GIACOSA S, et al. *Candida zemplinina* can reduce acetic acid produced by *Saccharomyces cerevisiae* in sweet wine fermentations[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(6): 1987–1994.
- [61] 战吉宸, 曹梦竹, 游义琳, 等. 非酿酒酵母在葡萄酒酿造中的应用[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(19): 4057–4069. [ZHAN J C, CAO M Z, YOU Y L, et al. Application of *non-Saccharomyces cerevisiae* in winemaking[J]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2020, 53(19): 4057–4069.]
- [62] 王励治. 野生猕猴桃干酒酿造工艺及其香气成分研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011. [WANG L Z. Study on brewing technology and aroma components of wild kiwi fruit dry wine[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.]
- [63] DING S, ZHANG Y, ZHANG J, et al. Enhanced deacidification activity in *Schizosaccharomyces pombe* by genome shuffling[J]. *Yeast*, 2015, 32(2): 317–25.
- [64] VILELA A, SCHULLER D, MENDES-FAIA A, et al. Reduction of volatile acidity of acidic wines by immobilized *Saccharomyces cerevisiae* cells[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97(11): 4991–5000.
- [65] KOSSEVA M R, KENNEDY J F. Encapsulated lactic acid bacteria for control of malolactic fermentation in wine[J]. *Artificial Cells, Blood Substitutes and Biotechnology*, 2004, 32(1): 55–65.
- [66] MAICAS S, PARDO I, FERRER S. The potential of positively-charged cellulose sponge for malolactic fermentation of wine, using *Oenococcus oeni*[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2001, 28(4): 415–419.
- [67] 郭子祺. 木瓜酒降酸脱涩技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [GUO Z Q. Study on reducing acid and removing astringent technology of papaya wine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.]
- [68] 孙慧烨. 不同方法降解苹果酒中有机酸的比较和优化[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015. [SUN H Y. Comparison and optimization of different methods for degradation of organic acids in cider[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2015.]