

新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰葡萄酒自然发酵过程香气成分及微生物群落分析

杨华峰^{1,2}, 薛淑花², 权娣红², 郭豆豆¹, 孟赫诚^{3*}, 李丽丽^{1*}

(1. 暨南大学食品科学与工程系, 广东广州 510632) (2. 新疆乡都酒业有限公司, 新疆库尔勒 841100)

(3. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 该试验以新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰葡萄为原料, 旨在探究葡萄酒在自然发酵 15 d 过程中微生物群落变化以及对香气成分的影响。将发酵过程中的发酵液进行离心, 上清液进行挥发性化合物分析, 沉淀进行微生物高通量测序。发酵样品中共检测到 65 种挥发性化合物, 包括 16 种高级醇类、14 种酯类、5 种萜烯类、6 种醛类、3 种脂肪酸类及其它 21 种香气化合物。在发酵过程中, 大部分化合物呈显著上升趋势。11 种化合物具有较高的香气活力值 (OAV>1), 其中 β -大马烯酮 (OAV 为 194.60)、丁酸乙酯 (27.64) 和辛酸乙酯 (18.11) 在马瑟兰葡萄酒的香气中起着关键作用。花香、甜香和果香是新疆小产区主要的香气特征。发酵过程酿酒酵母属在真菌属中占绝对优势, 还包括少量曲霉属, 土霉属和枝孢菌属等。主要细菌属包括无色杆菌属, 乳酸片球菌属, 乳酸杆菌属, 甲基红菌属等。该研究有助于深入了解新疆小产区马瑟兰葡萄酒发酵过程中本土微生物多样性和动态变化, 对优化酿酒工艺及开发和提升当地葡萄酒的地域特色都具有重要意义。

关键词: 马瑟兰; 自然发酵; 香气成分; 微生物群落

文章编号: 1673-9078(2026)1-264-273

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.1.1489

Analysis of Aroma Components and Microbial Communities during the Spontaneous Fermentation of Marselan Wine from the Qigexing Small Production Area in the Yanqi Basin, Xinjiang

YANG Huafeng^{1,2}, XUE Shuhua², QUAN Dihong², GUO Doudou¹, MENG Hecheng^{3*}, LI Lili^{1*}

(1. Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

(2. Xinjiang Xiangdu Wine Industry Co. Ltd., Korla 841100, China)

(3. Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The experiment was conducted by using Marselan grapes from the Qigexing small production area in the Yanqi basin of Xinjiang as the raw materials to investigate the changes in microbial communities and their impacts on aromatic

引文格式:

杨华峰, 薛淑花, 权娣红, 等. 新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰葡萄酒自然发酵过程香气成分及微生物群落分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(1): 264-273.

YANG Huafeng, XUE Shuhua, QUAN Dihong, et al. Analysis of aroma components and microbial communities during the spontaneous fermentation of marselan wine from the qigexing small production area in the Yanqi Basin, Xinjiang [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(1): 264-273.

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2024-12-17; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项 (022A02002-4)

作者简介: 杨华峰 (1970-), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 葡萄酒酿造, E-mail: 188100844@qq.com

通讯作者: 孟赫诚 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物深加工, Email: femenghc@scut.edu.cn; 共同通讯作者: 李丽丽 (1985-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品微生物学, E-mail: lilili2017@jnu.edu.cn

components during the 15-day natural fermentation process of wine. The fermentation broth was centrifuged during the process, then the supernatant was analyzed for volatile compounds and the pellet was subjected to high-throughput microbial sequencing. A total of 65 volatile compounds were detected in the fermented samples, including 16 higher alcohols, 14 esters, 5 terpenes, 6 aldehydes, 3 fatty acids, and 21 other aromatic compounds. Most compounds showed a significant upward trend during the fermentation process. Eleven compounds had high odor activity values ($OAV > 1$), among which β -damascenone (194.60), ethyl butyrate (27.64) and ethyl octanoate (18.11) played key roles in the aroma of Marselan wine. Floral, sweet, and fruity aromas were the main aroma characteristics of the small production area in Xinjiang. During fermentation, *Saccharomyces cerevisiae* dominated the fungal genera during the fermentation process, along with small amounts of *Aspergillus*, *Talaromyces* and *Cladosporium*. The main bacterial genera included *Acetobacter*, *Pediococcus*, *Lactobacillus*, and *Methylobacterium*. This study helps deepen the understanding of the diversity and dynamics of indigenous microorganisms during the fermentation process of Marselan wines from small production areas in Xinjiang. It is of great significance for optimizing winemaking techniques and developing and enhancing the regional characteristics of local wines.

Key words: marselan; spontaneous fermentation; aroma component; microbial community

马瑟兰葡萄于 2001 年引入中国, 其原产于法国, 是“赤霞珠”和“歌海娜”的杂交品种^[1]。近年来, 马瑟兰葡萄酒因其具有独特品质和细腻口感倍受消费者赞誉, 并且在许多国际品酒比赛取得优异成绩, 有望成为中国葡萄酒的代表品种^[2]。随着市场对独具特色葡萄酒的追求日益增长, 地域特色依旧是决定葡萄酒品质的一个重要因素。中国马瑟兰葡萄的种植面积仅次于法国, 达到了 130~200 hm²^[2]。焉耆盆地七个星小产区属新疆独特的大陆性气候, 降雨量少, 具有显著的昼夜温差和充足的阳光。该产区的葡萄园多为沙砾土壤, 地下天山雪融水灌溉为葡萄生长提供了良好的条件。得益于焉耆盆地七个星小产区这些独特的自然物候条件, 马瑟兰葡萄成熟度高, 糖分与风味物质积累丰富。这些葡萄酿制的葡萄酒通常果香浓郁, 结构良好, 带有矿物质感, 具有独特的地域特色和较好的陈年潜力。

在年轻葡萄酒中, 挥发性化合物的种类和浓度受微生物作用的影响尤为显著。本土酵母因其对发酵环境的良好适应性, 有助于酿造出具有独特地域特征的葡萄酒^[3]。自然发酵作为一种能够充分利用这些本土微生物的发酵方法, 已引起业界的广泛关注。Lu 等^[4]通过比较河北产区马瑟兰葡萄酒自然发酵和接种发酵过程微生物及挥发性化合物含量的变化, 发现自然发酵可以增强“马瑟兰”葡萄酒的风味。Li 等^[5]对中国 6 个马瑟兰主要产区真菌群落生物地理分布格局进行了研究, 但没有研究其对自然发酵中香气成分的影响。目前对不同区域马瑟兰品种的自然发酵过程中微生物及香气成分动态变化研究尚显不足。

在本研究中, 我们旨在探讨新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰在自然发酵过程中具有地域性的微生物群落的多样性和其动态变化及其对葡萄酒挥发性化

物成分的影响。本研究的结果有助于了解新疆焉耆盆地小产区本土微生物在葡萄酒自然发酵过程中的多样性和动态变化, 对优化酿酒工艺及开发和提升当地葡萄酒的地域特色都具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

马瑟兰葡萄: 采摘自新疆焉耆盆地七个星镇仪尔高新农业开发有限公司葡萄庄园(北纬 42°2'23", 东经 86°16'17"), 长势良好、大小均匀的马瑟兰 20 kg (树龄 10 年、行间距 4 m、采收时总糖为 269 g/L、总酸 5.5 g/L、pH 值 3.84); 果胶酶, LAMOTHE-ABIET 公司; Fast DNA SPIN Kit, 美国 MP Biomedicals; AxyPrep DNA Gel Extraction Kit, 美国 AXYGEN Biosciences 公司。GC/MS-QP2020 气相色谱-质谱联用仪, 日本岛津公司; 自动固相微萃取进样器、DVB/CAR/PDMS 萃取纤维, 美国宾夕法尼亚州贝尔丰特公司; DB-WAXETR 毛细管色谱柱 (60 m×0.25 mm, 0.25 μ m), 美国安捷伦公司; 挥发性化合物分析所用试剂均为色谱纯, 阿拉丁试剂有限公司; 理化指标测试所用试剂均为分析纯, 广州化学试剂有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备

成熟的马瑟兰葡萄原料经过分选, 除梗破碎之后, 装于具塞玻璃发酵罐中, 加入果胶酶 (0.04 g/Kg), 在控温 (20~25 $^{\circ}$ C) 条件下自然发酵。每 12 h 见氧循环 1 次, 并每天检测温度与比重。当比重达到 0.996 以下, 残糖含量降至 6.0 g/L 以下时, 分离皮渣并调整二氧化硫终止发酵。在自然发酵的不同阶段, 即第 0 天

(D0)、第3天(D3)、第4天(D4)、第5天(D5)、第7天(D7)、第9天(D9)、第11天(D11)以及第15天(D15)收集发酵液进行微生物测定以及挥发性化合物分析。每个样品在4℃处离心(1 000×g, 10 min), 上清液用于挥发性化合物分析, 沉淀进行高通量测序。

1.2.2 理化指标的测定

葡萄酒理化指标测定按照 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》的方法执行。主要包括酒精度、pH 值、总糖、总酸等指标。

1.2.3 香气成分分析

挥发性化合物分析采用顶空固相微萃取方法, 参考 Lu 等^[4]的方法: 精确量取 8 mL 进行适当稀释过后的酒样原液、内标液 2-辛醇(400 μg/L)、2.0 g NaCl 放入 20 mL 顶空瓶中, 用 ptfe-硅胶隔膜密封, 于 40℃、600 r/min 水浴 15 min 后插入 DVB/CAR/PDMS 萃取纤维, 40℃萃取 30 min, 后将萃取纤维引入 GC 的进样口 250℃解析 5 min, 进行气相色谱-质谱分析。

分析条件参照苗丽平等^[6]的测定方法: GC 条件: DB-WAXETR 毛细管柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm), 载气(氦气)流量为 1 mL/min, 汽化室温度 250℃, 不分流进样, 采用梯度升温程序, 初始温度为 50℃, 保持 2 min 后以 3℃/min 升温至 80℃, 最后以 5℃/min 升温至 260℃, 保持 6 min。MS 条件: 离子源 200℃, 全扫描模式, 进样器温度 250℃, 检测器温度 250℃, 电子能量 70 eV, 无溶剂延迟。通过与 NIST 14 数据库匹配和 C8-C26 正构烷烃保留指数对比进行化合物的定性, 将检测出的化合物的峰与标准品的峰和保留时间作比较。采用内标物 2-辛醇进行定量。

1.2.4 菌群测定

使用 Fast DNA SPIN Kit 从大约 1.0 g 的沉淀物中提取总 DNA。通过在 1% 琼脂糖凝胶中以 5 V/cm 的电压下电泳 20 min 来评估 DNA 的完整性。

使用引物 338F(5'-ACTCCTACGGAG GCAGCAG-3') 和 806R(5'-GGACTACHVGGGT WTCTAAT-3') 扩增细菌的 16S rRNA 基因的 V3~V4 区域, 及引物 ITS1F(5'-CTTGGTCATTT AGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2R(5'-GCTGCGTTCTT CATCGATGC-3') 扩增真菌的 ITS 区域。PCR 产物采用 AxyPrep DNA Gel Extraction Kit 进行纯化, 并使用 QuantiFluor™ -ST 荧光仪和 2% 琼脂糖凝胶测定其浓度。利用 Illumina Miseq 平台进行 16S rDNA 和 ITS 区域的测序(上海美吉生物科技有限公司)。

测序数据通过 Flash 软件(v1.2.11)根据重叠关

系拼接成对末端序列, 并使用 QIIME 软件(v1.9.1)进行质量控制和筛选。通过 Uparse 软件(v7.0)将序列以 97% 的相似性聚类为操作分类单元(OTUs), 并选择每个 OTU 中丰度最高的序列作为代表序列。最后, 利用 Silva/Unite 数据库对 16S rRNA/ITS 的 OTU 序列信息进行注释。在进行微生物数据分析前, 根据 OUT 的丰度信息标准化, 以匹配数量最少的样本, 从而获得标准化数据。

1.3 统计分析

挥发性气体成分结果为 3 次重复的平均值。试验数据采用 Microsoft Excel 软件进行处理获得平均值和标准差。采用独立样本 *t* 检验与 Duncan 多重比较检验对香气化合物进行了显著性分析, 所有统计检验的显著性水平均设定为 $P < 0.05$ 。这些分析工作均通过 SPSS 23 软件(IBM, USA)来完成。

2 结果与讨论

2.1 马瑟兰葡萄自然发酵过程中挥发性化合物的变化

图 1 显示了马瑟兰自然发酵期间物理化学参数的变化, 包括总糖、乙醇、总酸和 pH 值。总糖在 D0 含量为 269.0 g/L, 随着发酵时间变长, 质量浓度不断降低, 在 D15 达到最小值 3.55 g/L。乙醇含量从 D0 的 5.32%(V/V)显著降至 D3 的 1.75%(V/V), 而后随着发酵时间变长, 含量显著上升, 于 D11 达到最大值(15.32%, V/V)。pH 值从 D0 的 3.83 波动到 D15 的 3.95。总酸在发酵前 5 d 含量不断上升, 并在 D5 达到峰值(7.47 g/L), 而后含量不断下降, 降至 D15 的 3.73 g/L。

根据马瑟兰发酵 15 d 的总离子色谱(图 2), 分析时间 53 min, 谱库匹配并手动去除柱流失峰和杂质后, 鉴定出峰面积相对百分比 0.01% 以上且匹配度大于 90% 的物质 27~60 种, 检测出的香气成分种类及其含量见表 1。如表 1 所示, 在马瑟兰葡萄自然发酵液中鉴定出 65 种挥发性化合物, 包括 16 种高级醇类、14 种酯类、5 种萜烯类、6 种醛类、3 种脂肪酸类、及 21 种其它香气化合物。占比由高到低依次是高级醇类(233 474.87 μg/L)、酯类(54 413.8 μg/L)、其它(9 569.25 μg/L)、萜烯类(6 296.59 μg/L)、脂肪酸(285.73 μg/L)及醛类(3.4 μg/L), 这与前人对贺兰山东麓马瑟兰葡萄酒的研究结果类似^[7,8]。

高级醇类是葡萄酒中重要的酵母发酵挥发性化合物^[9]。醇类化合物是酯的前体, 其香气特征以水果香和花香为主。在本研究中, 高级醇类香气物质的总含量随发酵进行显著增加, 从 D0 的 2 487.72 μg/L 攀

升至 D15 的 233 474.87 $\mu\text{g/L}$ 。其中，异丁醇、异戊醇、1-己醇、苯甲醇、苯乙醇、4-甲基-1-戊醇及 3-甲基-1-戊醇均呈显著上升趋势，1-丁醇、1-庚醇、1-辛醇、1-壬醇整体呈现上升趋势，3-己烯-1-醇较稳定，而 1-戊醇、1-辛烯-3-醇和 6-甲基-1-辛醇呈现下降趋势；2-己烯-1-醇仅在第 0 天检测出 2 205.96 $\mu\text{g/L}$ 。

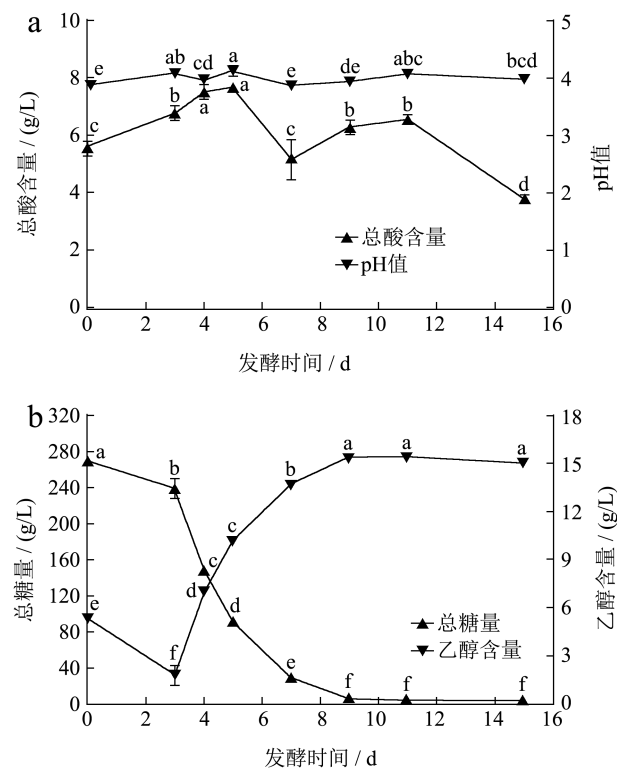


图 1 马瑟兰自然发酵过程中理化指标的变化

Fig.1 Changes in physicochemical indicators during the spontaneous fermentation process of Marselan

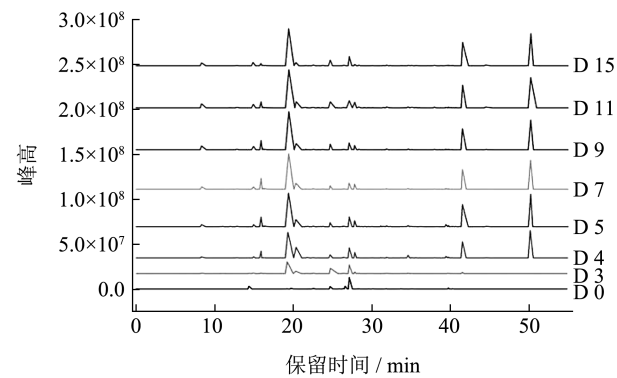


图 2 马瑟兰自然发酵 15 d 中总离子流色谱图

Fig.2 Total ion current chromatogram during the 15 days spontaneous fermentation process of Marselan

酯类化合物是马瑟兰葡萄酒自然发酵过程中最主要的挥发性组分，对果香贡献显著。酯类可以通过醇和脂肪酸的酯化反应而形成，以及在发酵过程中通过醇乙酰转移酶以乙酰辅酶 A 和高级醇为底物在微生物

细胞中合成^[10,11]。在本研究中，酯类香气物质的总含量随时间的推移呈现出显著增长的态势，由 D0 的 5 432.25 $\mu\text{g/L}$ 增加至 D15 的 54 413.8 $\mu\text{g/L}$ 。其中，主要成分乙酸乙酯浓度增长最为显著，从开始（D0 含量为 5 432.25 $\mu\text{g/L}$ ）到 D15（含量达到 53 047.21 $\mu\text{g/L}$ ），增长了近 10 倍。丁酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、琥珀酸二乙酯及 9-癸烯酸乙酯，随发酵时间的延长整体呈现上升趋势；乙酸异戊酯、己酸乙酯、乙酸己酯，呈现先增加后趋于稳定的趋势；豆蔻酸乙酯、乙酸丙酯、壬酸乙酯仅在发酵中期产生。

萜烯类化合物是葡萄和葡萄酒中重要的香气成分，对葡萄酒的果香、花香以及其他香气特征有显著贡献^[12]。本研究发现，大多数萜烯类化合物随着发酵时间的增加呈现出增加的趋势。其它如 α -萜品醇和紫罗兰酮呈显著增加的趋势，香茅醇在初始阶段时已经存在，且含量比较稳定；里那醇仅在 D11 时被检出，含量为 85.89 $\mu\text{g/L}$ 。

醛类主要由微生物发酵引起的脂肪酸氧化和氨基酸降解而产生^[13]。样品中检测出 6 种含量较低的醛类物质，且大多数醛类化合物随着发酵时间的增加呈现出减少的趋势，由 D0 总含量 9.66 $\mu\text{g/L}$ 降至 D15 的 3.4 $\mu\text{g/L}$ 。

挥发性酸类物质被认为对葡萄酒的香气和口感都很重要，通过酵母和乳酸菌代谢产生。己酸和辛酸是己酸乙酯和辛酸乙酯的前体。在发酵过程中，己酸仅在 D4 时检测到，质量浓度为 252.91 $\mu\text{g/L}$ 。辛酸在 D4 开始被检出（143.6 $\mu\text{g/L}$ ），而后整体呈现上升趋势，D15 含量达到 199.26 $\mu\text{g/L}$ 。癸酸仅在发酵末期（D15）产生，含量为 86.47 $\mu\text{g/L}$ 。

此外，还存在其它香气化合物，如 2,4-二叔丁基苯酚，可能对葡萄酒的香气有轻微的影响。

不同地区的马瑟兰葡萄酒在挥发性化合物的组成上和含量上有所不同。王悦等^[7]对中国 3 个产区（河北、宁夏和山东）马瑟兰市售酒中挥发性化合物成分进行了定量分析，河北地区检测到 91 种，其次是宁夏地区 88 种，山东地区为 83 种。胡瑞祺等^[8]对宁夏贺兰山五个地块马瑟兰葡萄酒中挥发性化合物进行分析，共检测出 114 种挥发性风味化合物。陈璐等^[14]从宁夏贺兰山东麓产区包含马瑟兰的不同品种葡萄酒中共检测出香气物质 50 种。Lu 等^[4]从怀卓盆地马瑟兰的自然发酵中检测出 59 种挥发性化合物，其中酯类总含量为 5 005.14 $\mu\text{g/L}$ ，酸类物质总含量（161.93 $\mu\text{g/L}$ ）。Lan 等^[15]从中国胶东半岛、渤海湾、怀涿盆地、黄土高原和新疆五个产区马瑟兰红葡萄酒中检测到 67 种挥发性化合物。与这些研究结果相比，本研究中检测到

的挥发性化合物的种类与含量上均显示不同,显示出地区差异性,这些差异可能与各地区的气候、土壤条件以及酿酒工艺有关。

2.2 马瑟兰自然发酵葡萄酒中关键香气成分分析

香气活力值 (Odor Activity Value, OAV) 是指某种挥发性香气物质在香气体系中的浓度与其在酒中嗅觉阈值的比值,是用来衡量挥发性物质在香气体系中的贡献度和判定有效香气成分的技术手段。对整体香气有影响的物质质量浓度至少要达到其阈值的 20% ($OA V > 0.2$)^[13],而当 $OA V > 1$ 时,这些化合物才能被感知^[16]。如表 1 所示, $OA V > 1$ 的物质共 11 种,其中 β -大马烯酮(桃罐头、烤苹果、干杏味) OAV 值最高为 194.60,其次为丁酸乙酯 ($OA V = 27.64$) (酸果味、草莓味)、辛酸乙酯 (18.11) (菠萝味、梨味)、乙酸异戊酯 (7.35) (香蕉味、甜果味)、乙酸乙酯 (7.07) (果香、甜香) 及己酸乙酯 (2.98) (青苹果味、草莓味); 3 种高级醇类,如异戊醇 (6.45) (生青味)、3-甲基-1-戊醇 (3.48) (土壤、蘑菇味) 及苯乙醇 (1.52) (花香、花粉味); 2 种萜烯类, α -萜品醇 (舒适的甜味) OAV 为 8.74,紫罗兰酮 (紫罗兰香、甜苹果) OAV 值为 1.2。此外,本研究还有其它 6 种 $OA V > 0.2$ 的呈香物质,可能通过累加或协同作用影响葡萄酒的香气^[15]。因此,花香、甜香和果香是新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰葡萄酒中的主要香气特征。

不同产区马瑟兰葡萄酒的感官特征存在差异。有研究报道,河北昌黎地区瑟兰葡萄酒呈红色浆果、干草、植物性香气和甜香的感官特征^[17]。癸酸乙酯 (舒服的脂肪味) 在河北地区、宁夏地区和山东地区的马瑟兰葡萄酒中的重要挥发性化合物 ($OA V \geq 10$)^[7,15]。辛酸乙酯 ($OA V = 2\ 666.87$) 是宁夏银川产地马瑟兰葡萄酒的主要挥发性化合物,赋予马瑟兰葡萄酒甜美水果香气^[18]。怀柔盆地的马瑟兰葡萄酒中 β -大马烯酮对甜、花和炖苹果的贡献显著^[8,14]。而本研究中, β -大马烯酮是气味活度值最大的挥发性物质,丁酸乙酯和辛酸乙酯是重要挥发性化合物 ($OA V \geq 10$),显示出其它地区的差异性。

2.3 发酵过程中微生物群落演替

相对丰度在 0.01% 以上的前 20 个细菌属分布如图 3 所示。在初始阶段 (D0), 沃盖拉属 (*Vogesella*) 是主要细菌属, 占比最高, 相对丰度达到 25.4%, 其次为无色杆菌属 (*Achromobacte*) 为 8.2%, 其他细

菌属如甲基红菌属 (*Methylobacterium*)、不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 以及佩迪克菌属 (*Pediococcus*) 的相对丰度分别为 5.36%、4.29% 以及 4.29%。沃盖拉属、无色杆菌属以及其它细菌属在葡萄表皮共同构成一个复杂且动态的微生物系统, 它们在保证果实健康、促进葡萄转化为葡萄酒方面发挥着重要作用^[16]。

发酵中期 (D3~D7), 在 D0 相对丰度为 1.8% 的明串珠菌属 (*Leuconostoc*) 在 D3 快速增值到 48.6%, 成为最主要的优势菌株, 并在 D4~D7 稳定增殖。无色杆菌属的丰度不断增加, 于 D7 达到 28.2%。乳酸菌属 (*Lactobacillus*) 丰度在 D7 达到峰值, 为 27.1%, 而后不断降低。而在初始阶段为优势菌属的沃盖拉属的相对丰度在发酵开始急速下降, 于 D7 降至 0.7%, D9 相对丰度小于 0.01%。

发酵后期 (D9~D15) 无色杆菌属逐渐成为绝对的优势菌属, 在 D15 时相对丰度达到峰值, 为 81.1%。明串珠菌属在 D11 含量明显下降后趋于平稳, D15 相对丰度为 11.1%。乳酸菌属含量也在不断降低, 从 D9 的 15.7%, 到 D11 的 6.1% 最后到 D15 的 3.9%。

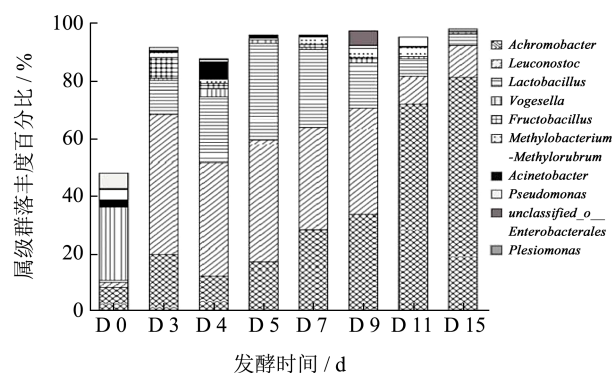


图 3 自然发酵过程中细菌属级群落相对丰度

Fig.3 Relative abundance of fungal genera in spontaneous fermentation

真菌属方面, 相对丰度在 0.01% 以上的真菌属分布如图 4 所示。样品中共检测到 7 个真菌属, 酿酒酵母属作为优势菌属在整个发酵过程中占主导地位。在初始条件下, 酿酒酵母属相对丰度仅有 0.3%。发酵开始, 酿酒酵母属快速繁殖, 于 D3 成为优势菌属, 相对丰度即达到 96.4%。而曲霉属 (*Aspergillus*) 在初始条件下的相对丰度占总体丰度超过了一半, 达到 53.3%, 随后在 D3 迅速降至 1.5%。土霉属 (*Talaromyces*) 和枝孢菌属 (*Cladosporium*) 在初始条件下相对丰度为 19.1% 以及 12.5%, 在发酵开始后相对丰度维持在 0.01%~0.06%, 并于 D15 含量小于 0.01%。

表 1 马瑟兰葡萄酒自然发酵中挥发性化合物的变化

Table 1 Changes in volatile compounds in spontaneous fermentation of Marselan											
挥发性化合物	质量浓度/(μg/L)							保留时间/min	阈值/(μg/L)	感官特性	
	D0	D3	D4	D5	D7	D9	D11				D15
异丁醇	—	1 812.39 ± 96.87 ^a	5 469.35 ± 2 008.09 ^a	8 131.63 ± 284.74 ^{ab}	14 010.67 ± 2 022.42 ^{bc}	21 154.32 ± 1 295.13 ^d	21 418.28 ± 2 563.45 ^d	15 806.82 ± 3 490.31 ^{cd}	40 000 ^[9]	杂醇香	
异戊醇	—	19 146.19 ± 148.8 ^a	70 318.45 ± 16 660.02 ^{ab}	103 519.59 ± 4 258.11 ^{bc}	154 621.61 ± 21 071.96 ^{cd}	203 564.89 ± 11 188.53 ^d	198 371.4 ± 17 818.65 ^d	193 636.39 ± 57 492.35 ^d	30 000 ^[9]	生青味	
1-己醇	172.27 ± 10.41 ^a	739.38 ± 18.5 ^c	409.52 ± 118.21 ^{ab}	429.6 ± 6.27 ^{ab}	575.98 ± 76.2 ^{bc}	1 050.28 ± 62.33 ^d	1 179.53 ± 122.48 ^d	1 877.37 ± 164.69 ^e	5 200 ^[20]	青草味、吐司味	
苯甲醇	—	234.66 ± 4.93 ^a	548.06 ± 100.46 ^{ab}	1 372.71 ± 67.2 ^{bcd}	892.66 ± 52.31 ^{abc}	1 345.49 ± 286.65 ^{bcd}	1 729.92 ± 421.2 ^{cd}	2 157.76 ± 514.09 ^d	100 000 ^[9]	杏仁味	
苯乙醇	—	—	6 240.46 ± 336.7 ^a	9 004.4 ± 1277.23 ^{ab}	12 557.56 ± 841.29 ^{bc}	1 4237.87 ± 526.1 ^e	16 496.79 ± 1 327.98 ^c	15 152.2 ± 2 753.62 ^e	10 000 ^[9]	花香、花粉味	
4-甲基-1-戊醇	—	—	156.86 ± 50.17 ^{ab}	409.47 ± 43.84 ^{abc}	254.11 ± 3.09 ^{ab}	558.51 ± 13.25 ^{bc}	468.67 ± 79.63 ^{bc}	681.45 ± 326.3 ^{7c}	5 000 ^[19]	杏仁、烘烤味	
3-甲基-1-戊醇	—	—	258.54 ± 51.01 ^{ab}	1 008.27 ± 118.81 ^{bc}	555.17 ± 22.11 ^{ab}	1 448.11 ± 111.27 ^d	1 343.87 ± 113.21 ^{cd}	1 742.43 ± 702.56 ^d	500 ^[19]	土壤、蘑菇	
1-丁醇	—	—	—	1 115.2 ± 0.88 ^a	2 996.94 ± 218.27 ^b	2 119.8 ± 354.54 ^{ab}	2 339.48 ± 819.64 ^{ab}	2 106.88 ± 926.8 ^{ab}	150 000 ^[9]	药味、醇香	
1-庚醇	3.82 ± 0.17 ^a	12.59 ± 0.9 ^a	21.91 ± 3.5 ^{8a}	30.14 ± 4.07 ^{ab}	64.31 ± 4.11 ^{bc}	99.2 ± 19.31 ^{cd}	161.99 ± 19.88 ^d	131.85 ± 20.5 ^{de}	1000 ^[19]	柠檬、柑橘	
1-辛醇	4.2 ± 0.01 ^a	5.52 ± 0.16 ^a	10.64 ± 0.24 ^b	10.92 ± 0.55 ^b	10.16 ± 2.11 ^b	10.98 ± 2.23 ^b	10.29 ± 0.22 ^b	12.01 ± 0.06 ^b	40 ^[9]	新鲜柑橘、玫瑰、甜药草	
1-壬醇	2.63 ± 0.05 ^a	2.91 ± 0.03 ^a	3.21 ± 0.08 ^{ab}	3.15 ± 0.2 ^{ab}	3.38 ± 0.03 ^{ab}	2.95 ± 0.63 ^a	3.21 ± 0.18 ^{ab}	3.92 ± 0.32 ^b	400 ^[20]	橙花香、淡油脂	
3-己烯-1-醇	95.55 ± 5.41 ^b	—	49.53 ± 10.54 ^{ab}	—	—	62.99 ± 21.02 ^b	—	107.08 ± 42.03 ^b	400 ^[20]	水果、青草	
1-戊醇	—	264.62 ± 1.5 ^{bc}	—	—	43.67 ± 4.48 ^a	328.1 ± 174.02 ^c	162.76 ± 7.15 ^{abc}	58.71 ± 0.67 ^{ab}	80 000 ^[20]	醇香、涩味	
1-辛烯-3-醇	—	96.32 ± 16.48	105.14 ± 16.69	—	73.09 ± 28.93	—	—	—	28.168	—	蘑菇
6-甲基-1-辛醇	3.29 ± 0.02 ^a	3.33 ± 0.05 ^{ab}	3.4 ± 0.03 ^{bc}	3.37 ± 0.04 ^{abc}	3.43 ± 0.03 ^c	—	—	—	32.168	—	醇香、酒香
2-己烯-1-醇	2 205.96 ± 88.17	—	—	—	—	—	—	—	26.601	400 ^[20]	水果、青草
总量	2 487.72	22 317.91	83 595.07	125 038.45	186 662.74	245 983.49	243 686.19	23 3474.87			

续表1

挥发性化合物	质量浓度(μg/L)								保留时间/min	阈值 (μg/L)	OAV 值	感官特性	
	D0	D3	D4	D5	D7	D9	D11	D15					
酯类	乙酸乙酯	5 432.25 ± 133.24 ^a	11 117.63 ± 134.96 ^{ab}	16 097.55 ± 2 554.08 ^{bc}	21 174.74 ± 922.24 ^b	32 018.27 ± 2 634.58 ^d	46 505.79 ± 1 211.11 ^e	49 027.2 ± 4 022.13 ^e	53 047.21 ± 1 921.95 ^e	8.133	7 500 ^[9]	7.07	果香、甜香
	丁酸乙酯	—	—	246.63 ± 59.02 ^a	267.98 ± 41.53 ^a	470.41 ± 51.46 ^b	661.24 ± 22.84 ^{cd}	719.57 ± 39.94 ^d	552.71 ± 41.86 ^{bc}	12.63	20 ^[9]	27.64	酸果味、草莓味
	辛酸乙酯	—	67.57 ± 2.32 ^{ab}	123.28 ± 28.49 ^{bc}	129.9 ± 36.06 ^{bc}	154.63 ± 33.42 ^c	118.76 ± 2.65 ^{bc}	146.79 ± 7.37 ^c	90.53 ± 22.57 ^{bc}	27.523	5 ^[9]	18.11	菠萝味、梨味
	癸酸乙酯	—	17.78 ± 1.46 ^a	47.47 ± 2.98 ^c	26.88 ± 4.77 ^{ab}	38.54 ± 7.9 ^{bc}	34.00 ± 5.01 ^{abc}	42.28 ± 4.66 ^{bc}	3.00 ± 8.9 ^{abc}	34.403	200 ^[9]	0.15	舒缓的脂肪味
	琥珀酸二乙酯	—	—	114 ± 0.71 ^{abc}	74.69 ± 4.93 ^{ab}	87.63 ± 0.5 ^{ab}	149.94 ± 71.2 ^{bcd}	275.41 ± 17.87 ^d	238.22 ± 31.13 ^{cd}	35.47	200 000 ^[9]	—	生青味、水果味
	9-癸烯酸乙酯	—	—	—	11.74 ± 0.13 ^a	—	—	13.87 ± 0.03 ^c	12.45 ± 1.07 ^{ab}	35.95	—	—	果香、花香
	乙酸异戊酯	—	74.49 ± 3.12 ^a	693.05 ± 116.53 ^b	900.9 ± 114.59 ^{bc}	1 252.43 ± 141.66 ^d	1 036.9 ± 82.95 ^{cd}	731.56 ± 40.01 ^b	220.46 ± 22.77 ^a	15.723	30 ^[9]	7.35	香蕉味、甜果味
	己酸乙酯	—	13.29 ± 0.12 ^{ab}	265.84 ± 81.1 ^d	90.78 ± 4.34 ^{abc}	122.86 ± 7.8 ^c	88.81 ± 18.54 ^{abc}	114.87 ± 6.02 ^{bc}	29.76 ± 3.85 ^{abc}	20.217	10 ^[9]	2.98	青苹果味、草莓味
	乙酸己酯	—	1.8 ± 0.74 ^{ab}	9.03 ± 1.61 ^d	5 ± 0.55 ^c	4.54 ± 0.67 ^c	3.37 ± 0.26 ^{bc}	1.52 ± 0.1 ^a	—	21.71	670 ^[9]	—	梨味、酸甜味
	豆蔻酸乙酯	—	—	126.4 ± 6.05	—	—	—	—	—	39.928	—	—	香料味
烯类	乙酸丙酯	—	—	6 805.57 ± 18.65	—	—	—	—	—	10.63	25 000 ^[20]	—	梨味、果味
	壬酸乙酯	—	—	53.77 ± 0.2	—	—	—	—	—	31.32	13 000 ^[9]	—	水果、香蕉
	乙酸异丁酯	—	—	221.23 ± 57.86 ^{ab}	265.78 ± 32.29 ^{abc}	363.1 ± 37.82 ^{cd}	394.78 ± 25.65 ^d	311.44 ± 22.93 ^{bcd}	181.98 ± 15.71 ^a	11.83	1 600 ^[9]	0.11	草莓味、果香
	乙酸苯乙酯	—	—	28.56 ± 7.67 ^{abc}	54.54 ± 14.27 ^d	44.95 ± 4.62 ^{cd}	14.8 ± 3.33 ^{ab}	18.29 ± 2.98 ^{ab}	10.48 ± 1.6 ^{ab}	39.363	250 ^[20]	0.04	蜂蜜味、苹果味
	总量	5 432.25	11 292.56	24 832.38	23 002.93	34 557.36	49 008.39	51 402.8	54 413.8				
	α-萜品醇	—	—	3 552.84 ± 147.68 ^a	4 061.48 ± 28.03 ^b	—	—	4 383.55 ± 38.96 ^c	4 021.13 ± 9.97 ^b	36.387	460 ^[20]	8.74	舒适的甜味、蘑菇
	紫罗兰酮	—	—	64.89 ± 5.32 ^a	91.15 ± 24.33 ^{ab}	—	—	—	107.97 ± 8.95 ^b	31.58	90 ^[20]	1.20	紫罗兰香、甜苹果
	香茅醇	45.5 ± 1.24	—	—	—	—	—	—	—	39.767	100 000 ^[20]	—	青草、丁香花、蔷薇香
	里那醇	—	—	—	—	—	—	85.89 ± 2.43	—	31.283	15 ^[9]	—	玫瑰、花香果香
	β-大马酮	7.18 ± 1.27 ^{ab}	4.54 ± 0.72 ^a	9 ± 2.04 ^{ab}	15.51 ± 0.13 ^c	10.11 ± 2.46 ^b	9.76 ± 1.08 ^{ab}	10.38 ± 2.1 ^b	9.73 ± 0.52 ^{ab}	39.683	0.05 ^[9]	194.60	桃罐头、烤苹果、干杏
醛类	总量	52.68	239.2	4 174.79	5 540.85	902.77	1 355.25	6 209.74	6 296.59				
	己醛	3.01 ± 0.12 ^c	1.75 ± 0.02 ^b	1.6 ± 0.02 ^a	—	—	—	—	—	12.35	400 ^[20]	—	苦味
	(E)-2-己烯醛	1.87 ± 0.04	—	—	—	—	—	—	—	19.695	500 000 ^[20]	—	特有的青叶味
	辛醛	1.55 ± 0	—	—	—	—	—	—	—	22.453	15 ^[9]	—	不良化学气味、苦味、柠檬味
	壬醛	1.72 ± 0	1.73 ± 0.03	1.84 ± 0.05	1.88 ± 0.15	1.79 ± 0.01	1.87 ± 0.04	1.82 ± 0.03	1.77 ± 0.1	26.11	15 ^[9]	0.12	玫瑰花香、李子香
	苯甲醛	—	—	1.57 ± 0.01	—	—	—	—	—	31.001	—	—	杏仁味
	癸醛	1.51 ± 0.06 ^a	1.58 ± 0 ^{ab}	1.61 ± 0.02 ^{ab}	1.61 ± 0.02 ^{ab}	1.66 ± 0.06 ^{bc}	1.74 ± 0.05 ^{cd}	1.8 ± 0.01 ^d	1.63 ± 0 ^{bc}	29.87	10 ^[20]	0.16	甜香、柑橘香、蜡香
	总量	9.66	5.06	6.62	3.49	3.45	3.61	3.62	3.4				
	己酸	—	—	252.91 ± 9.76	—	—	—	—	—	40.035	8 800 ^[20]	—	猫尿味、汗臭
	辛酸	—	—	143.6 ± 0.55 ^a	147.31 ± 3.05 ^{ab}	154.84 ± 5.01 ^{ab}	167.57 ± 2.19 ^c	209.13 ± 4.44 ^d	199.26 ± 15.79 ^d	44.217	500 ^[9]	0.40	奶酪、涩味、腐败味
癸酸	—	—	—	—	—	—	—	86.47 ± 6.87	38 803	1 000 ^[9]	0.09	甜香、柑橘香、蜡香	
总量	0	0	396.51	147.31	154.84	167.57	209.13	285.73					

续表1

挥发性化合物	质量浓度 (µg/L)							保留时间/min	阈值/(µg/L)	OAV 值	感官特性
	D0	D3	D4	D5	D7	D9	D11	D15			
六甲基环三硅氧烷	115.73 ± 18.66	—	—	—	—	—	—	—	7.579	—	不愉快的气味
八甲基环四硅氧烷	627.05 ± 325.78	169.35 ± 59.79 ^d	265.7 ± 77.29 ^d	198.82 ± 11.54 ^c	161.57 ± 16.19 ^b	—	—	113.42 ± 33.61 ^a	10.937	—	无味
十甲基环戊硅氧烷	—	1 821.35 ± 129.88 ^b	3 511.3 ± 706.5 ^{6c}	3 962.88 ± 101.14 ^c	3 488.15 ± 143.89 ^c	1 766.78 ± 365.4 ^b	1 473.17 ± 12.68 ^a	1 279.91 ± 73.17 ^a	16.277	—	无味
二甲氧基二甲硅烷	—	176.33 ± 8.45 ^a	312.07 ± 45.23 ^b	307.14 ± 93.03 ^b	499.46 ± 21.3 ^c	—	616.08 ± 16.51 ^d	588.06 ± 67.94 ^d	21.123	—	无味
十二甲基环六硅氧烷	1 510.98 ± 829.8	683.47 ± 7.75 ^c	1 209.54 ± 242.73 ^c	929.75 ± 75.24 ^b	1 353.93 ± 259.62 ^c	1 341.64 ± 304.61 ^c	1 144.17 ± 166.07 ^c	1 554.99 ± 77.8 ^d	21.195	—	无味
1-(2-羧基-4,4-二甲基环丁烯基)-1-丁烯-3-酮	—	91.63 ± 2.43	—	—	—	—	—	—	25.521	200 ^[19]	蘑菇
(+)-5-甲基-2-己醇	—	—	72.73 ± 6.61 ^a	89.65 ± 0.67 ^b	—	—	96.01 ± 9.01 ^b	—	23.473	25 000 ^[20]	青草味、吐司味
3-羧基苯甲醛, 叔丁基二甲苯硅醚	—	—	148.09 ± 23.72 ^a	—	—	257.33 ± 21.34 ^b	—	303.54 ± 36.27 ^c	25.39	50 000 ^[20]	植物、苦杏仁
1,3-二叔丁基苯	401.17 ± 102.09 ^d	538.12 ± 7.49 ^a	641.65 ± 97.15 ^b	712.66 ± 260.93 ^b	—	—	—	—	27.657	—	无味
十四甲基环庚硅氧烷	232.46 ± 6.19 ^b	152.35 ± 7.09 ^a	220.59 ± 27.68 ^b	250.23 ± 72.9 ^b	—	—	—	—	28.219	—	无味
甲氧基(n-戊氧基)甲基硅烷	—	—	163.9 ± 20.69 ^a	142.13 ± 57.08 ^a	—	370.33 ± 85.37 ^{6c}	280.23 ± 35.33 ^b	473.49 ± 10.13 ^c	28.643	50 000 ^[20]	植物、苦杏仁
2,5-二羧基苯甲醚, 2TMS 衍生物	—	98.03 ± 0.62 ^a	132.6 ± 23.43 ^b	117.15 ± 21.21 ^{ab}	—	—	—	—	29.968	50 000 ^[20]	植物、苦杏仁
二甲基硅烷二醇	—	149.15 ± 22.19	153.47 ± 12.29	123.79 ± 12.49 ^a	—	—	—	344.84 ± 19.75 ^b	34.003	—	无味
甲氧基苯基酚	—	—	—	—	252.49 ± 2.29	—	—	—	37.206	—	无味
(S)-3,7-二甲基-7-辛烯-1醇	—	—	—	—	1 182.62 ± 64.1 ^a	1 281.71 ± 123.91 ^a	1 530.5 ± 135.28 ^a	1 180.58 ± 65.79 ^a	37.79	—	花香
6,10-二甲基-5,9-十二烯-2-酮	56.53 ± 3.33 ^a	220.69 ± 14.05 ^b	—	—	488.7 ± 57.3 ^c	531.85 ± 7.44 ^{cd}	661.73 ± 9.49 ^d	578.94 ± 37.59 ^{cd}	40.217	—	花香、木质香
2-甲基丙酸-3-羧基-2,2,4-三甲基戊酯	27.52 ± 3.44	—	—	—	—	—	—	—	40.553	—	水果、芳香
3-甲基-2-丁烯酸乙酯	—	—	92.63 ± 0.34	—	—	—	—	—	41.196	—	清新、微甜
对叔丁基苯酚	—	—	105.66 ± 1.4	—	—	—	—	—	49.787	10 000 ^[20]	酚类化合物气味
2-叔丁基苯酚	33.38 ± 7.41	—	—	—	—	—	—	—	46.803	10 000 ^[20]	酚类化合物气味
总量	3 004.82	4 100.47	8 336.37	8 391.69	1 0467.63	7 996.98	8 773.89	9 569.25			

注: 同一行不同字母的值 (a-e) 之间差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。“—”为未检测到或阈值未被确定。

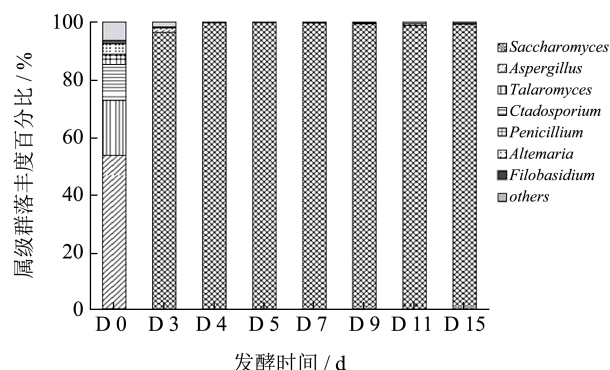


图4 自然发酵中真菌属级群落相对丰度

Fig.4 Relative abundance of fungal genera in spontaneous fermentation

随着发酵的进行,由于环境中的氧气以及pH的降低,及菌属直接存在的共生竞争关系,微生物群落结构发生动态变化^[21,22]。具有地域性的微生物群落结构与葡萄酒的风味和品质直接相关。酿酒酵母菌属是影响葡萄酒品质的重要因素,也是酯类和醇类的主要生产者,非酿酒酵母产生的酶在丰富葡萄酒香气的形成和改善葡萄酒的感官特性中起着重要作用^[23-25],细菌属可以通过柠檬酸和氨基酸代谢以及葡萄糖苷的水解生物代谢过程影响其风味^[22]。Lu等^[4]对怀卓盆地参与马瑟兰自然发酵的主要细菌属的研究发现蓝细菌属、明串珠菌和乳球菌是主要组成成分。Lu等^[4]研究了马瑟兰葡萄酒自然发酵和接种发酵过程中微生物群落结构,发现自然发酵过程中主要细菌属为未分类蓝藻(*norank_c_cyanobacteria*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)和乳酸球属(*Lactococcus*),而接种发酵过程中主要细菌属为未分类蓝藻(*norank_c_cyanobacteria*)、红球菌属(*Rhodococcus*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)、酒球菌属(*Oenococcus*)和乳酸菌属(*Lactobacillus*),而主要真菌属均为交链孢霉属(*Alternaria*)、未分类的戴维氏菌(*unclassified_f_Davidiellaceae*)、隐球菌属(*Cryptococcus*)以及红冬孢酵母属(*Rhodospiridium*)。Li等^[5]报道了中国6个地区15个“马瑟兰”葡萄园区中与发酵相关的真菌群落,其主要以壳孢属(*Aureobasidium*)、交替孢属(*Alternaria*)和枝孢属(*Cladosporium*)为主。丁建才等^[26]对河北省昌黎地区蛇龙珠、赤霞珠和马瑟兰三个品种葡萄分析其真菌群落结构多样性,发现孢汉逊酵母属(*Hanseniaspora*)在马瑟兰发酵前期相对丰度较大。与此不同,本研究中除酿酒酵母属、明串珠菌属、乳酸菌属、枝孢菌属等优势菌属外,还鉴定出曲霉属、土霉属、无色杆菌属等优势菌属。这些微生物产生的酶类及代谢产物,如淀粉酶、蛋白酶、酯酶和氧化酶等,

有助于葡萄汁中的糖分和蛋白质的分解^[27,28],对 β -大马烯酮、丁酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸乙酯、乙酸异戊酯等香气化合物的形成及增强马瑟兰葡萄酒的香气和口感发挥着重要作用。

3 结论

新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰葡萄酒自然发酵过程中共检出67种挥发性香气成分,包括高级醇类、酯类、萜烯类,醛类、脂肪酸类及其它香气化合物,大部化合物随发酵进行呈显著上升趋势。11种化合物OAV值大于1,其中 β -大马烯酮、丁酸乙酯及辛酸乙酯是关键香气物质,赋予马瑟兰葡萄酒花香、甜香和果香。发酵过程中真菌属主要以酿酒酵母属为主,还包括少量曲霉属,土霉属和枝孢菌属等。细菌属以无色杆菌属,乳酸片球菌属,乳酸杆菌属,甲基红菌属为主。这些本土微生物对新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰葡萄酒的挥发性化合物形成起着重要作用。后续拟进一步探究马瑟兰葡萄本土微生物种类及对不同发酵过程挥发性化合物的影响,以筛选重要产香微生物及为提高马瑟兰葡萄酒的地域特色和品质奠定基础。

参考文献

- [1] LI M, GUO Z, JIA N, et al. Evaluation of eight rootstocks on the growth and berry quality of 'Marselan' grapevines [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 248: 58-61.
- [2] WANG S, MA X L, MA Y, et al. Cultivation performance and research progress on 'Marselan' grapevine in China [J]. Sino-Overseas Grapevine Wine, 2019, 3: 66-70.
- [3] OSBORNE J P, EDWARDS C G. Bacteria important during winemaking [J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2005, 50: 139-177.
- [4] LU Y, SUN F, WANG W, et al. Effects of spontaneous fermentation on the microorganisms diversity and volatile compounds during 'Marselan' from grape to wine [J]. LWT, 2020, 134: 110193.
- [5] LI R, YANG S, LIN M, et al. The biogeography of fungal communities across different Chinese wine-producing regions associated with environmental factors and spontaneous fermentation performance [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 12: 636639.
- [6] 苗丽平,赵新节,董书甲,等.商业酵母对马瑟兰干红葡萄酒香气成分的影响[J].中国酿造,2016,35(10):56-61.
- [7] 王悦,葛谦,张静,等.基于智能感官和气相色谱质谱联用的中国三产区市售马瑟兰葡萄酒感官特征总结与差异分析[J].食品与发酵工业,2024,50(8):253-264.
- [8] 胡瑞祺,杨薇熹,凌梦琪,等.贺兰山东麓产区地块间“赤霞珠”和“马瑟兰”葡萄酒香气差异分析[J].中国酿酒,2024,43(6):49-58.
- [9] HAZELWOOD L A, DARAN J M, VAN MARIS A J, et al. The Ehrlich pathway for fusel alcohol production: A century of research on

- Saccharomyces cerevisiae* metabolism [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74: 2259-2266.
- [10] WANG L, DOU G, GUO H, et al. Volatile organic compounds of *Hanseniaspora uvarum* increase strawberry fruit flavor and defense during cold storage [J]. Food Science and Nutrition, 2019, 7(8): 2625-2635.
- [11] PROCOPIO S, QIAN F, BECKER T. Function and regulation of yeast genes involved in higher alcohol and ester metabolism during beverage fermentation [J]. European Food Research and Technology, 2011, 233(5): 721-729.
- [12] MARAIS J. Terpenes in the aroma of grapes and wines: a review [J]. South African Journal of Enology and Viticulture, 1983, 4(2): 49-58.
- [13] 刘政海,董志刚,李晓梅,等.黄土高原地区干红葡萄酒香气组分分析[J].食品与发酵工业,2020,46(24):204-209.
- [14] 陈璐,石俊,张晓蒙,等.酿酒葡萄品种及产区对贺兰山东麓葡萄酒香气质量的影响研究[J].中国酿造,2022,41(4):39-45.
- [15] LAN Y B, LIU M, ZHANG X K, et al. Regional variation of chemical characteristics in young Marselan (*Vitis vinifera* L.) red wines from five regions of China [J]. Foods, 2022, 11(6): 787.
- [16] MEILGAARD M. Effects on flavor of innovations in brewery equipment and processing: A review [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2001, 107: 271-286.
- [17] 柴菊华,姚丽萍,王莉,等.‘马瑟兰’与‘赤霞珠’酿造新鲜型干红葡萄酒的对比试验[J].中国酿造,2021,40(12):144-148.
- [18] 孙健,姜文广,李记明.贺兰山东麓产区赤霞珠和马瑟兰葡萄酒发酵中风味物质分析[J].酿酒科技,2025,5:46-53.
- [19] 李爱华,王凌云,栗俊,等.混合酵母发酵对刺葡萄酒香气成分气味的调整作用[J].食品科学,2020,41(6):72-78.
- [20] 李华.葡萄酒品尝学[M].北京:科学出版社,2006.
- [21] MCDONALD L C, FLEMING H P, HASSAN H M. Acid Tolerance of *Leuconostoc mesenteroides* and *Lactobacillus plantarum* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56(7): 2120-2124.
- [22] 徐晓裕.蟠桃酒自然发酵过程中微生物多样性及其对品质的影响研究[D].石河子:石河子大学,2023.
- [23] MATURENO Y P, ASSAF L A, TORO M E, et al. Multi-enzyme production by pure and mixed cultures of *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* yeasts during wine fermentation [J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 155(1-2): 43-50.
- [24] FERNÁNDEZ M, ÚBEDA J F, BRIONES A I. Typing of non-*Saccharomyces* yeasts with enzymatic activities of interest in wine-making [J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 59: 29-36.
- [25] MATEOS J R, PÉREZ-NEVADO F, FERNÁNDEZ M R. Influence of *Saccharomyces cerevisiae* yeast strain on the major volatile compounds of wine [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 40(1): 151-157.
- [26] 丁建才,胡博然,林岚,等.河北昌黎产区干红葡萄酒发酵过程中真菌群落的研究[J].食品与发酵工业,2021,47(19):120-125.
- [27] 耿青如,杨飞洋,王雨荷,等.丝状真菌次级代谢产物的功能与合成调控研究进展[J].菌物学报,2020,39(3):539-547.
- [28] 江北,吕梦霞,蒋冬花.曲霉属真菌活性代谢产物及在农业生产中的应用研究进展[J].微生物学杂志,2019,39(2):103-110.