

不同来源产香酵母分离鉴定及玉米发酵特征风味物质分析

何爱民*, 阎瑾, 张逸寒

(河北中烟工业有限责任公司, 河北石家庄050051)

摘要: 为筛选适合发酵玉米的产香酵母并开发发酵香精, 该研究以5种市售产品为材料, 通过菌株分离培养、分子生物学鉴定, 结合感官评价与顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用技术, 系统分析其发酵玉米的风味特征。结果表明, 分离的5株酵母均鉴定为异常威克汉姆酵母, 但其发酵玉米风味存在显著差异。感官结果显示菌株ANQ SX酯香突出, 菌株PJ和HZKY甜香显著。GC-MS共鉴定出136种挥发性风味物质, 以醇类(25种)、酯类(34种)、醛类(14种)、酸类(16种)为主要的挥发性有机物, 其中BLD发酵样品中的挥发性风味物质种类最丰富, 含67种。采用PLS-DA分析得到59种潜在的特征风味成分(VIP>1), 结合ROAV值筛选得到47种关键风味物质(ROAV>1), 通过二者筛选主要特征差异成分是(E,E)-2,4-壬二烯醛、香叶醇、苯乙醇、庚酸等物质, 赋予发酵玉米清香、醇香、果香。该研究揭示了不同异常威克汉姆酵母在玉米发酵中风味指纹图谱及关键风味化合物, 为玉米发酵制品风味定向调控及天然香精开发提供指导与理论支撑。

关键词: 酵母; 分离鉴定; 玉米发酵; 气相色谱-质谱联用仪

文章编号: 1673-9078(2025)09-121-138

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0953

Isolation and Identification of Aroma-producing Yeasts from Different Sources and Analysis of Characteristic Flavor Compounds in Corn Fermentation

HE Aiming*, YAN Jin, ZHANG Yihan

(Hebei China Tobacco Industry Co. Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: To screen aroma-producing yeasts suitable for corn fermentation and to develop fermented flavorings, five yeast products were used to corn fermentation. Yeast strains were isolated, cultured, and identified using molecular biology techniques. The flavor characteristics of the fermented corn were systematically analyzed by combining sensory evaluation and headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). The results showed that all five isolated yeast strains were identified as *Wickerhamomyces anomalus*. However, significant differences were observed in the flavor profiles of the fermented corn produced by these strains. Sensory evaluation results indicated that strain ANQ SX exhibited a distinct ester aroma, while strains PJ and HZKY displayed a significant sweet aroma. A total of 136 volatile flavor compounds were identified by GC-MS. The main volatile organic compounds belonged

引文格式:

何爱民, 阎瑾, 张逸寒. 不同来源产香酵母分离鉴定及玉米发酵特征风味物质分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(9): 121-138.

HE Aiming, YAN Jin, ZHANG Yihan. Isolation and identification of aroma-producing yeasts from different sources and analysis of characteristic flavor compounds in corn fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 121-138.

收稿日期: 2024-06-02; 修回日期: 2024-08-11; 接受日期: 2024-10-12

基金项目: 河北中烟工业有限责任公司科技项目 (HBZY2024A066)

作者简介: 何爱民 (1971-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 化学分析, E-mail: ham0311@126.com。

to alcohols (25 types), esters (34 types), aldehydes (14 types), and acids (16 types). The fermented sample with strain BLD contained the richest variety of volatile flavor compounds (67 types). Fifty-nine potential characteristic flavor components (VIP>1) were identified through Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA). Based on Relative Odor Activity Value (ROAV) analysis, 47 key flavor compounds (ROAV>1) were screened. The main characteristic differential components identified by combining these two methods included (E,E)-2,4-nonadienal, geraniol, phenethyl alcohol, and heptanoic acid. These compounds were found to impart fresh, mellow, and fruity aromas to the fermented glutinous corn. This study revealed the flavor fingerprints and key flavor compounds of different *Wickerhamomyces anomalus* strains in corn fermentation. It is considered to provide guidance and theoretical support for the directional regulation of flavor in corn fermented products and the development of natural flavorings.

Key words: yeast; isolation and identification; corn fermentation; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

近年来，随着消费者对健康和自然风味的需求不断增加，天然香精的应用在食品和其它行业中逐渐成为主流^[1]。相比传统的人工合成香精，天然香精不仅具有更好的风味表现，还符合当前绿色环保的消费趋势^[2]。除了传统的天然产物的分离提取为主，微生物发酵产香也成为天然香精的主要来源之一，这种方式不仅能够提供天然的风味物质，还具有较高的生产效率和可持续性^[2-4]。

产香酵母是一类可以产生挥发性香味化合物的酵母，它不属于传统酵母分类学意义上的名词，指可生成较高含量的特征风味物质的酵母的统称^[5]。产香酵母作为发酵过程中的关键功能微生物，通过多种复杂的代谢途径合成多种挥发性香气化合物，重新塑造发酵产品的感官品质^[6]。这些酵母菌株能够将原料中的糖类、氨基酸和脂质等前体物质转化为醇类、酯类、醛类、酮类及萜烯类等小分子风味物质，赋予产品独特的风味特征^[7,8]。在传统发酵食品工业中，产香酵母的应用历史悠久，从酒类酿造到面食发酵，从调味品生产到肉制品熟成，其风味贡献不可替代^[9,10]。从白酒酒曲、自然发酵乳制品及果蔬、烟草等多种生态体系中分离筛选出具有高效产香能力的酵母菌株，如阿萨丝孢酵母 *Trichosporon asahii*、扣囊覆膜孢酵母 *Saccharomycopsis fibuligera*、*Saccharomycopsis malanga*、伯顿丝孢毕赤酵母 *Hyphopichia burtonii*、异常威克汉姆酵母 *Wickerhamomyces anomalus* 和 *Saccharomyces cerevisiae* 酿酒酵母等，这些菌株在特定发酵体系中展现出显著的风味修饰潜力^[11-16]。

玉米作为一种全球广泛种植的谷物，因其高淀粉含量、蛋白质组成，成为发酵工业中的重要原料^[17-19]。在发酵过程中，玉米中的淀粉颗粒在糖化酶和微生物作用下降解为葡萄糖等，为酵母生长

提供碳源；而玉米胚芽油中的不饱和脂肪酸则作为脂质前体，可经微生物代谢转化为醛、酮等风味物质^[4,20]。产香酵母的风味合成机制主要依赖于其胞内酶系对底物的催化转化，在酒精发酵过程中，酵母一般通过糖酵解途径生成乙醇及其他高级醇；而酯酶结合乙酰转移酶可以催化醇与酸结合，形成具有水果香气的酯类化合物；部分酵母则通过 Ehrlich pathway 将支链氨基酸转化为 3-甲基丁醛、苯乙醛等醛类化合物^[17,21]。

该研究从市售酵母菌种混合物中分离、筛选适宜的产香酵母并用于玉米发酵。对分离酵母菌种进行分子生物学鉴定，并结合感官分析和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术，全面解析不同酵母菌株在玉米发酵中生成的特征挥发性物质，结合相对气味活度值计算确定关键香气化合物，旨在阐明玉米发酵特征风味的形成规律与菌株关联，为开发风味导向的天然香精提供理论依据与菌种资源。

1 材料与方法

1.1 原料

表 1 不同市售来源的产香酵母
Table 1 Aromatic-producing yeasts from different commercial sources

序号	名称	编号
1	沛骏果酒酵母	PJ
2	安琪果酒酵母	AnQGJ
3	和众康源生香酵母	HZKY
4	丹宝利高活性酵母	DLB
5	安琪果酒酵母 RW	AnQRW

酵母产品来源市售产品，具体如表 1 所示；YPD 培养基，上海英诺生物科技有限公司；新鲜玉

米粒, 来源市售市场。

1.2 主要仪器设备

EscoOptiMair 超净工作台, 新加坡 Esco 公司; A200PCR 仪, 杭州朗基公司; JY-SPFT 水平电泳槽, 北京君意东方公司; JY300HC 电泳仪, 北京君意东方公司; 5424 孔式离心机德国艾本德公司; SI-0146 旋涡混合器, 美国科学工业公司; FR-980 全自动凝胶成像分析仪, 上海复日科技公司; 3730XL 测序仪, 赛默飞美国; GC-2030-GCMS-QP2020NX 气相色谱联合质谱仪, 日本岛津。

1.3 实验方法

1.3.1 菌株分离与培养

参照前期文献报道的方法^[22], 为分离不同样品中酵母微生物, 将样品与生理盐水混合, 经过离心得到菌泥。将菌泥接种于含有 100 mL YPD 液体培养基的锥形瓶中, 置于 30 °C 恒温培养 18 至 24 h。随后, 取样品与生理盐水混合, 重复上述操作, 以确保微生物的全面分离与培养。增菌后, 取接种液用接种环划线接种至相应固体培养基, 置于 30 °C 培养至单菌落出现。挑取单个菌落后, 将其接种至液体培养基中, 继续培养。酵母种子液 OD₆₀₀ 值达到 0.5 时, 作为种子液用于后续发酵实验。

1.3.2 产香酵母的分子生物学鉴定方法

采用标准化流程提取真菌 DNA, 并进行 PCR 扩增以确保实验数据的准确性。真菌 DNA 提取步骤, 取适量菌体, 加入 2 mL 离心管中, 加入 800 μ L CTAB 提取液研磨成浆状, 转移至 2 mL 离心管, 65 °C 水浴 30 min, 加入等体积、体积比 24:1 的氯仿: 异戊醇溶液, 12 000 r·min⁻¹ 离心 5 min, 将上清转入一只新管中, 加入 0.8 倍体积的异丙醇, 轻轻混合直到 DNA 沉淀下来, 12 000 r·min⁻¹ 离心 10 min。加入 1 mL 体积分数 70% 的乙醇洗涤, 12 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 弃乙醇。在洁净工作台干燥, 重溶于 50 μ L TE 缓冲液或者去离子水中。PCR 扩增采用 TransStartFastpfuDNA 聚合酶, 反应体系为 50 μ L, 包括 5 $\times$ FastPfu 缓冲液、2.5 mmol·L⁻¹ dNTPs、5 μ mol·L⁻¹ 前后引物 (ITS1/ITS4 用于真菌)、FastPfu 聚合酶及模板 DNA。酵母样品的 PCR 扩增程序为: 95 °C 预变性 5 min, 接着进行 27 个循环 (95 °C 变性 30 s、55 °C 退火 30 s、72 °C 延伸 45 s), 最后 72 °C 延伸 10 min; 真菌样品设定 29 个循环,

其他条件一致。所有反应在 ABI GeneAmp®9700 型 PCR 仪上进行, 以确保反应条件的准确控制。

1.3.3 玉米发酵工艺及感官评价

玉米发酵实验中, 取新鲜玉米粒, 打碎后每组称取 20 g, 装瓶并置于灭菌锅中, 于 100 °C 蒸煮 30 min。蒸煮后冷却, 分别向每组样品中加入 5 mL 无菌水和 0.4 mL 酵母种子液, 同时设置三组对照组, 分别加入 5 mL 无菌水和 0.4 mL YPD 液体培养基作为对照。所有样品均在 30 °C 恒温条件下进行发酵, 进行一次发酵 6 d 后统一进行感官评估, 将样品置于透明、无色容器中, 以消除容器对气味的潜在影响。评审员打开样品容器并轻摇, 以促使气味均匀挥发, 每次评估持续 2~3 min, 确保准确性并避免嗅觉疲劳。气味强度采用 9 点评分法评分。

1.3.4 GC-MS 香气成分分析

为分析玉米发酵过程中挥发性香气成分, 称取 6 g 发酵样品, 加入 0.5 g 氯化钠及 1 μ L 内标样品 (0.001 mg·mL⁻¹ 的 2-辛醇溶液), 并充分混合。将处理后的样品置于 80 °C 恒温孵化器中平衡 10 min, 随后插入已老化的 SPME 纤维头进行顶空萃取, 萃取时间为 50 min。萃取结束后, 将 SPME 纤维头直接插入 GC-MS 进样口, 进行 250 °C 解析 5 min。色谱分析采用 RTX-POLARWAX 毛细管柱 (60 m $\times$ 250 μ m $\times$ 0.25 μ m), 载气为高纯氦气, 流量 1 mL·min⁻¹, 压力 112 kPa, 不分流模式。色谱条件: 初始温度 40 °C, 保持 5 min, 以 3 °C·min⁻¹ 升温至 120 °C, 保持 1 min, 再以 5 °C·min⁻¹ 升温至 180 °C, 保持 1 min, 最后以 10 °C·min⁻¹ 升温至 230 °C, 保持 5 min。质谱条件: 电子轰击离子源 (EI), 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C, 接口温度 210 °C, 四极杆温度 150 °C; 扫描质量范围 33~500 m/z。

1.3.5 数据处理

所有试验均重复 3 次, 使用 SPSS24.0 软件进行数据统计和显著性分析, 数据表示为平均值 $\pm$ 标准差, $P < 0.05$ 被认为具有显著差异, $P < 0.01$ 被认为具有极显著差异。

2 结果与讨论

2.1 菌株分离与培养

该实验对酵母菌的分离培养操作如下图 1 所示: 取待处理样品置于 200 mL 烧杯, 经充分混匀后, 取一定量液体转移至离心管, 以 4 000 r·min⁻¹ 转速

离心 10 min。离心完成后，取处理后的沉淀，用接种工具接种于马铃薯葡萄糖琼脂培养基平板。随后将接种后的平板置于适宜环境培养，最终获得酵母菌菌落，为后续酵母菌相关研究提供实验材料。从上述样品中共筛选出 5 种未知的酵母菌种用于后续的分析。

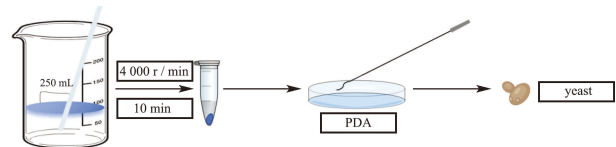


图 1 不同来源酵母菌种分离流程

Fig.1 Isolation procedures of yeast strains from different sources

2.2 分离菌种鉴定

表 2 不同来源酵母菌种鉴别结果

Table 2 Identification results of yeast strains from different sources

菌种编号	属	种
AnQGJ	<i>Wickerhamomyces</i>	<i>anomalus</i>
AnQSX	<i>Wickerhamomyces</i>	<i>anomalus</i>
DLB	<i>Wickerhamomyces</i>	<i>anomalus</i>
HZKY	<i>Wickerhamomyces</i>	<i>anomalus</i>
PJ	<i>Wickerhamomyces</i>	<i>anomalus</i>

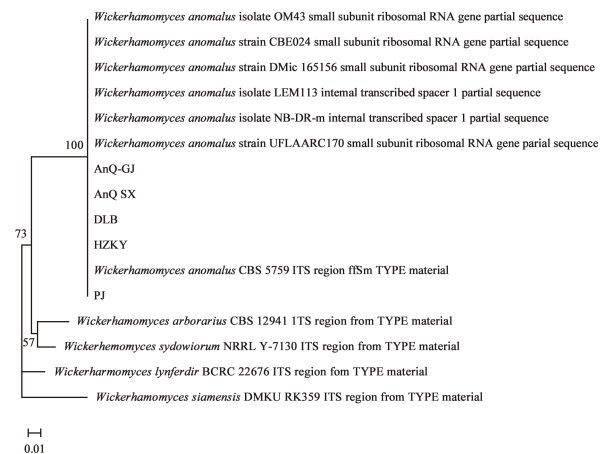


图 2 不同来源酵母菌种鉴定系统发育树

Fig.2 Phylogenetic tree of yeast species identification from different source

该研究通过对分离出 5 株产香酵母菌株（编号 AnQGJ、AnQSX、DLB、HZKY、PJ）进行分类鉴定，参照酵母分类系统，明确其分类地位^[23, 24]。结果如表 2 所示，5 株酵母菌株均归属威克汉姆酵母属 *Wickerhamomyces*，且种级分类均为异常威克汉姆酵母 *Wickerhamomyces anomalus*。进一步对 AnQGJ、AnQSX、DLB、HZKY、PJ 样本分析时，发现它们

在系统发育树中，与 *Wickerhamomyces anomalus* 多种菌株聚类，如图 2 所示。这些 *Wickerhamomyces anomalus* 菌株涵盖不同基因序列类型，像 CBE024、DMC166166 菌株的小亚基核糖体 RNA 基因部分序列，LEM113、NB-DR-m 菌株的内转录间隔区 1（ITS1）部分序列，还有 UFLAARC170 菌株的小亚基核糖体 RNA 基因部分序列等。这种聚类模式清晰展现出 AnQGJ、AnQSX、DLB、HZKY、PJ 样本属于威克汉姆酵母属中 *Wickerhamomyces anomalu*，反映它们有着相近的遗传特征。

2.3 不同酵母发酵玉米感官评价

该研究对 5 株酵母菌株（PJ、AnQGJ、HZKY、DLB、AnQSX）及对照样品的发酵产物进行感官评价。采用 9 点评分法从果香、花香、醇香、酯香、酸香、甜香、清香、酒糟香 8 类香气指标进行评价。如图 3 结果显示不同来源的异常威克汉姆酵母在香气特征上存在明显差异。AnQSX 样品的酯香评分最高（7 分），显著高于其他样品（1-3 分），其可能通过特定代谢途径积累了更多酯类物质（如乙酸乙酯、己酸乙酯等）^[17]。此外，PJ 和 HZKY 样品的甜香评分较高（分别为 6 分、5 分），而酸香在 PJ 样品中表现突出（5 分），推测其可能通过碳水化合物代谢生成更多醇类、有机酸等风味前体物质，可能酵母发酵中糖代谢与风味物质代谢关联，酵母对碳源的分解效率及代谢流向会显著影响甜香、酸香等关联香气的形成^[21, 25]。综合而言，不同样品的香气差异可能源于酵母菌株代谢的挥发性有机物造成。

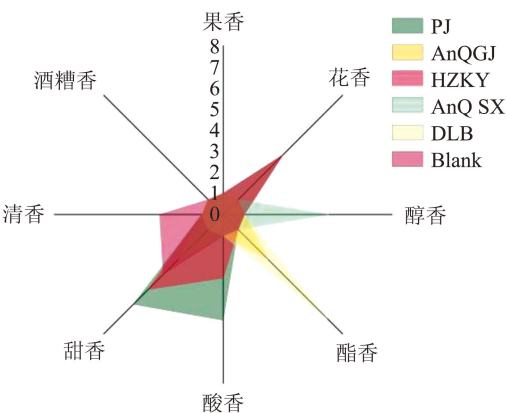


图 3 不同来源酵母发酵玉米风味雷达图

Fig.3 Radar chart of corn fermentation flavors by yeasts from different sources

2.4 分离菌种发酵样品挥发性成分分析

不同菌种发酵样品总离子流图如图 4 所示。该

研究共鉴定出136种挥发性成分,涵盖醇类(25种)、酯类(34种)、醛类(14种)、酸类(16种)、烷类(14种)、酮类(11种)、烯类(5种)及其他类别(17种)。不同酵母发酵产生挥发性有机化合物与风味贡献上呈现显著差异,形成独特的风味指纹图谱:DLB:以醇类与酯类为核心特征,异丁醇($116.77\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、异戊醇($700.21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$),苯乙醇($429.92\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)含量为所有菌株最高,同时乙酸异戊酯($16.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)是其他菌株的3-7倍,形成“醇香+果香”的风味轮廓。此外,反式-2,4-癸二烯醛($14.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)与苯乙醇($429.92\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的高含量,进一步赋予其花香层次。AnQSX:以短链酯类为标志性成分,乙酸乙酯($4.73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)为唯一检出该成分的菌株,庚酸乙酯($1.66\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)含量与PJ($1.45\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)接近,而醇类(如乙醇 $3\,594.42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)含量中等,风味以“清新果香”为主。PJ:特征成分为2,3-丁二醇($23.63\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)与甜香关联的3-羟基-2-丁酮,同时辛酸($16.58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)与壬酸乙酯($2.77\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)形成温和的酸香与酯香,整体风味偏向“甜润柔和”。其醇类总量(乙醇 $1\,743.99\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)为所有菌株最低。HJRY:以长链酯类与烯类为显著特征,油酸乙酯($345.95\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、亚油酸乙酯($1\,302.11\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)为独有成分,同时苯乙烯($72.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)含量最高,形成“蜡质脂香+淡淡花香”的风味,且正己醛($12.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、壬醛($9.87\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的高含量增强了青草香基调。AnQGJ:挥发性成分总量与丰富度最高,乙醇($5\,234.14\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、正辛醇($7.41\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)等醇类,癸酸乙酯($198.55\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、月桂酸乙酯($106.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)等长链酯类,以及癸酸($338.39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、辛酸($280.59\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)等酸类均居首位,且2,4-癸二烯醛($15.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)与法尼醇($27.61\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的积累,使其风味呈现“醇香+酯香+微酸”的复合特征。

醇类化合物作为酵母发酵的核心代谢产物,其总量与种类分布直接反映酵母菌株的糖代谢与氨基酸代谢活性^[26]。乙醇作为糖酵解的终端产物,在各菌株中均为含量最高的挥发性成分,其中AnQGJ代谢产物($5\,234.14\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)与HJRY代谢产物($4\,548.49\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)显著高于对照($12.16\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)。高级醇(如异丁醇、异戊醇)的差异更具代谢特异性,DLB的异丁醇含量($116.77\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)是AnQSX的异丁醇含量($27.87\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的4.2倍,这与异丁醇来源于缬氨酸的转氨与脱羧反应一致,

DLB可能具有更强的缬氨酸降解酶活性^[26];而异戊醇在DLB中达 $700.21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,是AnQSX中($231.02\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的3倍,推测其亮氨酸代谢通路更活跃^[27]。此外,苯乙醇作为苯丙氨酸脱氨产物,在DLB中含量最高($429.92\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$),赋予样品独特的玫瑰香气^[27]。酯类化合物是风味多样性的核心驱动因子,其合成依赖醇与酰基-CoA的缩合反应^[16]。短链酯如乙酸乙酯在AnQSX中含量为 $4.73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,赋予样品果香,长链酯如棕榈酸乙酯在HJRY中含量为 $829.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 与AnQGJ中含量为 $693.85\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 中集中富集,贡献蜡质香气。值得注意的是,AnQGJ的癸酸乙酯($198.55\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、月桂酸乙酯($106.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)含量分别为DLB含量的2.1倍、1.6倍,且乙酸苯乙酯($21.46\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)显著高于其他菌株,推测可能其酰基-CoA或醇酰基转移酶活性更高^[16]。

醛类与酸类化合物多源于脂肪酸代谢与氨基酸降解^[28]。醛类中,正己醛在HJRY中 $12.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 来自亚油酸氧化,反式-2,4-癸二烯醛在DLB中 $14.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、AnQGJ中 $15.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 推测有玉米中亚麻酸经脂氧合酶催化生成,赋予样品青草香与脂肪香;酸类中,辛酸(AnQGJ中 $280.59\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、癸酸($338.39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)为长链脂肪酸,其积累可能与AnQGJ的脂肪酸延长酶高表达相关,而乙酸(DLB中 $36.91\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)作为糖酵解中间产物^[6]。其他类别中,烷类(如十四烷、十五烷)与烯类(如苯乙烯)含量较低但菌株差异显著,苯乙烯在HJRY中 $72.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 可能来自肉桂酸脱羧,其在HJRY中的高含量暗示芳香族氨基酸代谢的特异性;酮类(如2-辛酮)在AnQGJ中含量最高($6.01\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$),可能与乙酰-CoA向酮体转化的代谢流增强有关^[21]。

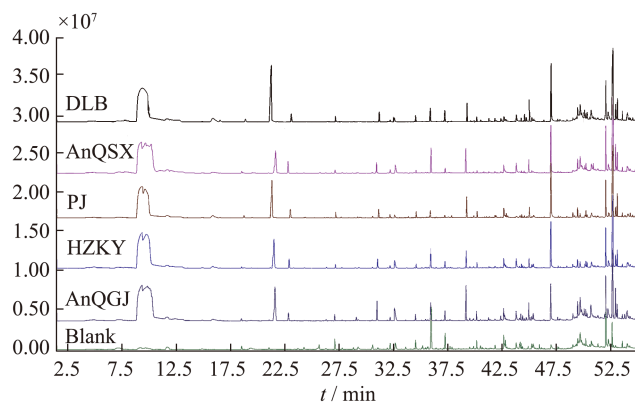


图4 不同来源酵母发酵玉米GC-MS总离子流图

Fig.4 Total ion chromatograms of GC-MS analysis for corn fermented by yeasts from different sources

表 3 不同酵母菌种发酵玉米样品挥发性成分

Table 3 Volatile components of corn samples fermented by different yeast strains												
NO.	保留时 间 /min	英文名称	中文名称	RI	分子式	含量/(μg·mL ⁻¹)					鉴定	
						DLB	AnQ SX	PJ	HJRY	AnQ GJ	Blank	
醇类												
1	9.7413	Ethanol	乙醇	941	C ₂ H ₆ O	3 987.97 ± 780.27 ^b	3 594.42 ± 338.36 ^b	1 743.99 ± 442.55 ^c	4 548.49 ± 812.67 ^{ba}	5 234.14 ± 582.07 ^a	12.16 ± 6.61 ^d	MS/RI
2	16.03	1-Propanol, 2-methyl-	异丁醇	1105	C ₄ H ₁₀ O	116.77 ± 15.94 ^a	27.87 ± 9.52 ^c	42.01 ± 5.59 ^c	67.82 ± 5.37 ^b	69.97 ± 3.81 ^b	—	MS/RI
3	21.313	Isoamyl alcohol	异戊醇	1218	C ₅ H ₁₂ O	700.21 ± 74.74 ^a	231.02 ± 49.51 ^c	248.56 ± 24.33 ^c	405.83 ± 49.9 ^b	444.13 ± 50.42 ^b	0.24 ± 0.02 ^d	MS/RI
4	23.42	1-Pentanol	正戊醇	1263	C ₅ H ₁₂ O	1.87 ± 0.14 ^c	—	0.76 ± 0.13 ^d	3.33 ± 0.08 ^b	4.17 ± 0.35 ^a	0.36 ± 0.09 ^e	MS/RI
5	26.158	2-Heptanol	2-庚醇	1322	C ₇ H ₁₆ O	—	—	1.00 ± 0.13 ^a	—	—	—	MS/RI
6	27.803	1-Hexanol	正己醇	1358	C ₆ H ₁₄ O	2.51 ± 1.1 ^b	1.42 ± 0.2 ^c	2.89 ± 0.32 ^b	—	6.42 ± 0.13 ^a	0.96 ± 0.07 ^c	MS/RI
7	31.937	1-Octen-3-ol	1-辛烯-3-醇	1450	C ₈ H ₁₆ O	2.41 ± 0.55 ^b	0.99 ± 0.19 ^c	1.51 ± 0.35 ^{cb}	—	4.04 ± 1.11 ^a	1.03 ± 0.18 ^c	MS/RI
8	32.201	1-Heptanol	正庚醇	1456	C ₇ H ₁₆ O	9.55 ± 2.11 ^c	15.1 ± 2.42 ^b	10.55 ± 0.48 ^c	18.27 ± 2.86 ^{ba}	20.26 ± 3.91 ^a	4.19 ± 0.29 ^d	MS/RI
9	34.912	2-Nonanol	2-壬醇	1520	C ₉ H ₂₀ O	—	—	0.42 ± 0.08 ^a	—	—	0.27 ± 0.13 ^b	MS/RI
10	36.339	2,3-Butanediol, [R-(R*,R*)]-	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇	1557	C ₄ H ₁₀ O ₂	—	—	23.63 ± 3.00 ^a	—	—	—	MS/RI
11	36.414	1-Octanol	正辛醇	1559	C ₈ H ₁₈ O	2.81 ± 0.6 ^b	1.46 ± 0.28 ^b	2.07 ± 0.09 ^b	6.3 ± 0.43 ^a	7.41 ± 2.24 ^a	1.17 ± 0.43 ^b	MS/RI
12	36.79	2,3-Butanediol isomer-1	2,3-丁二醇	1569	C ₄ H ₁₀ O ₂	119.21 ± 68.06 ^{ba}	174.56 ± 72.91 ^a	25.5 ± 27.62 ^c	148.25 ± 26.89 ^a	169.64 ± 48.17 ^a	47.46 ± 2.5 ^{cb}	MS/RI
13	37.801	Propylene Glycol	丙二醇	1596	C ₃ H ₈ O ₂	—	1.79 ± 0.22 ^a	—	—	—	—	MS/RI
14	38.41	trans-2-Undecen-1-ol	反-2-十一烯醇	1614	C ₁₁ H ₂₂ O	—	—	0.32 ± 0.01 ^a	—	—	—	MS/RI
15	38.515	(E)-2-Octen-1-ol	反式-2-辛烯-1-醇	1618	C ₈ H ₁₆ O	—	—	—	—	—	1.16 ± 0.98 ^a	MS/RI
16	39.87	1-Nonanol	正壬醇	1660	C ₉ H ₂₀ O	4.27 ± 0.38 ^c	—	6.57 ± 0.07 ^b	12.95 ± 1.55 ^a	—	2.18 ± 1.05 ^d	MS/RI
17	40.677	3-Nonen-1-ol, (Z)-	顺式-3-壬烯-1-醇	1686	C ₉ H ₁₈ O	1.84 ± 0.55 ^{cb}	1.40 ± 0.10 ^c	1.18 ± 0.18 ^c	2.17 ± 0.04 ^b	3.01 ± 0.23 ^a	1.44 ± 0.66 ^c	MS/RI
18	41.84	1-Propanol, 3-(methylthio)-	3-甲基硫丙醇	1726	C ₄ H ₁₀ OS	33.08 ± 14.21 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
19	42.448	1-Hexadecanol	1-十六烷醇	1748	C ₁₆ H ₃₄ O	3.88 ± 0.66 ^a	—	—	—	—	1.22 ± 0.38 ^b	MS/RI
20	42.963	9-Octadecen-1-ol, (Z)-	油醇	1767	C ₁₈ H ₃₆ O	—	—	—	29.45 ± 10.19 ^a	—	—	MS/RI
21	45.09	Geraniol	香叶醇	1848	C ₁₀ H ₁₈ O	4.1 ± 1.55 ^a	3.73 ± 1.31 ^a	—	—	—	—	MS/RI
22	47.002	Phenylethyl Alcohol	苯乙醇	1929	C ₈ H ₁₀ O	429.92 ± 96.66 ^a	278.14 ± 34.22 ^{cb}	225.63 ± 1.56 ^c	333.67 ± 18.04 ^b	247.43 ± 28.12 ^c	—	MS/RI
23	47.87	1-Dodecanol	十二醇	1970	C ₁₂ H ₂₆ O	—	—	—	—	—	0.70 ± 0.44 ^a	MS/RI
24	48.845	1,7-Heptanediol	1,7-庚二醇	2020	C ₇ H ₁₆ O ₂	—	1.70 ± 0.58 ^a	—	—	—	—	MS/RI

续表3

NO.	保留时 间/min	英文名称	中文名称	RI	分子式	含量/(μg·mL ⁻¹)					鉴定	
						DLB	AnQ SX	PJ	HURY	AnQ GJ	Blank	
25	54.301	2,6,10-Dodecatrien-1-ol, 3,7,11-trimethyl-	法尼醇	2361	C ₁₅ H ₂₆ O	18.9 ± 0.56 ^c	—	14.56 ± 3.88 ^d	37.94 ± 3.97 ^a	27.61 ± 0.13 ^b	—	MS/RI
酯类												
26	7.7	Ethyl acetate	乙酸乙酯	861	C ₄ H ₈ O ₂	—	4.73 ± 0.63 ^a	—	—	—	—	MS/RI
27	16.52	1-Butanol, 3-methyl-, acetate	乙酸异戊酯	1116	C ₇ H ₁₄ O ₂	16.9 ± 3.72 ^a	—	2.22 ± 0.19 ^c	2.96 ± 0.29 ^c	7.5 ± 1 ^b	—	MS/RI
28	21.333	Hexanoic acid, ethyl ester	正己酸乙酯	1219	C ₈ H ₁₆ O ₂	—	—	2.36 ± 0.42 ^a	—	—	—	MS/RI
29	26.474	Ethyl heptanoate	庚酸乙酯	1329	C ₉ H ₁₈ O ₂	—	1.66 ± 0.87 ^a	1.45 ± 0.39 ^a	—	—	—	MS/RI
30	27.438	Propanoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester, (L)-	L(-)-乳酸乙酯	1350	C ₅ H ₁₀ O ₃	1.39 ± 0.41 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
31	28.392	Acetic acid, heptyl ester	乙酸庚酯	1371	C ₉ H ₁₈ O ₂	1.22 ± 0.53 ^a	0.72 ± 0.03 ^b	0.7 ± 0.19 ^b	—	—	—	MS/RI
32	30.942	Ethyl octanoate	辛酸乙酯	1428	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	53.71 ± 15.03 ^{cb}	43.73 ± 11.26 ^c	29.86 ± 4.5 ^c	73.39 ± 23.77 ^b	113.82 ± 18.4 ^a	—	MS/RI
33	32.045	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	硅酸二乙酯双(三 甲基硅烷基)酯	1452	C ₁₀ H ₂₈ O ₄ Si ₃	1.48 ± 0.65 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
34	35.114	Butanoic acid, 3-hydroxy-, ethyl ester	3-羟基丁酸乙酯	1525	C ₆ H ₁₂ O ₃	—	—	—	—	—	2.59 ± 0.1 ^a	MS/RI
35	35.332	Nonanoic acid, ethyl ester	壬酸乙酯	1531	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	4.4 ± 0.57 ^c	—	2.77 ± 0.14 ^c	7.22 ± 1.57 ^b	10.7 ± 1.55 ^a	—	MS/RI
36	36.245	n-Caprylic acid isobutyl ester	n-辛酸异丁酯	1555	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	1.17 ± 0.1 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
37	39.151	Ethyl decanoate	癸酸乙酯	1638	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	95.83 ± 29.79 ^{cb}	89.71 ± 26.87 ^{cb}	62.71 ± 10.62 ^c	124.91 ± 46.58 ^b	198.55 ± 19.77 ^a	—	MS/RI
38	40.821	Ethyl 9-decenoate	乙基 9-癸烯酸酯	1690	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	6.34 ± 3.2 ^a	3.73 ± 0.64 ^a	2.19 ± 0.22 ^a	9.49 ± 10.68 ^a	—	—	MS/RI
39	41.702	Ethyl Oleate	油酸乙酯	1721	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	—	—	—	345.95 ± 216.98 ^a	—	—	MS/RI
40	42.375	1,3-Propanediol, diacetate	1,3-丙二醇二 乙酸酯	1745	C ₇ H ₁₂ O ₄	—	—	—	—	50.64 ± 12.63 ^a	—	MS/RI
41	44.526	Acetic acid, 2-phenylethyl ester	乙酸苯乙酯	1826	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	36 ± 6.61 ^a	8.12 ± 1.31 ^c	7.15 ± 2.28 ^c	9.95 ± 1.4 ^{cb}	21.46 ± 14.8 ^b	—	MS/RI
42	44.957	Ethyl laurate	月桂酸乙酯	1843	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	65.88 ± 17.7 ^b	55.42 ± 15.09 ^{cb}	34.39 ± 7.25 ^c	77.65 ± 17.56 ^b	106.24 ± 5.21 ^a	—	MS/RI
43	45.76	Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,2,4- trimethylpentyl ester	2,2,4-三甲基-1,3- 戊二醇单异丁酸 酯	1875	C ₁₂ H ₂₄ O ₃	—	3.34 ± 1.05 ^a	0.81 ± 0.27 ^b	—	—	—	MS/RI
44	45.902	1,4-Butanediol, diacetate	1,4-丁二醇二 乙酸酯	1880	C ₇ H ₁₂ O ₄	—	—	—	—	4.59 ± 0.46 ^a	—	MS/RI

续表3

NO.	保留时 间 /min	英文名称	中文名称	RI	分子式	含量/(μg·mL ⁻¹)					鉴定	
						DLB	AnQ SX	PJ	HJRY	AnQ GJ	Blank	
45	45.915	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentenediol diisobutyrate	2,2,4-三甲基戊二 醇异丁酯	1881	C ₁₆ H ₃₀ O ₄	—	—	1.68 ± 0.97 ^a	—	—	—	MS/RI
46	45.92	2-Furanmethanol, tetrahydro-, acetate	四氢糠醇乙酸酯	1881	C ₇ H ₁₂ O ₃	2.85 ± 1.15 ^a	1.22 ± 0.36 ^b	—	2.77 ± 1.02 ^a	—	—	MS/RI
47	46.342	Benzenepropanoic acid, ethyl ester	3-苯丙酸乙酯	1898	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	9.64 ± 4.39 ^a	—	4.57 ± 0.31 ^b	7.91 ± 1.57 ^{ba}	8.78 ± 1.38 ^a	—	MS/RI
48	46.758	Butanoic acid, 3-hydroxy-, butyl ester	3-羟基丁酸丁酯	1917	C ₈ H ₁₆ O ₃	—	—	—	—	—	0.44 ± 0.15 ^a	MS/RI
49	47.393	5 Linoleic acid ethyl ester	亚油酸乙酯	1947	C ₂₀ H ₃₆ O ₂	—	—	—	1 302.11 ± 77.84 ^a	—	—	MS/RI
50	49.441	Ethyl myristate	十四酸乙酯	2055	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	101.63 ± 33.77 ^b	—	32.12 ± 4.43 ^c	97 ± 53.1 ^b	172.95 ± 43.07 ^a	—	MS/RI
51	49.47	2(3H)-Furanone, dihydro- 5-pentyl-	丙位壬内酯	2056	C ₉ H ₁₆ O ₂	—	—	—	—	—	9.65 ± 6.51 ^a	MS/RI
52	50.288	9,12,15-Octadecatrienoic acid, ethyl ester, (Z,Z,Z)-	亚麻酸乙酯	2105	C ₂₀ H ₃₄ O ₂	—	—	—	161.26 ± 9.78 ^a	—	—	MS/RI
53	50.564	Nonadecanoic acid, ethyl ester	十九烷酸乙酯	2123	C ₂₁ H ₄₂ O ₂	21.87 ± 8.16 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
54	51.056	Pentadecanoic acid, ethyl ester	十五酸乙酯	2156	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	35.7 ± 2.9 ^a	—	9.73 ± 2.86 ^b	—	—	—	MS/RI
55	52.716	Ethyl palmitate	棕榈酸乙酯	2265	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	772.92 ± 70.58 ^b	721.74 ± 24.07 ^{cb}	380.5 ± 10.59 ^d	829.9 ± 10.63 ^a	693.85 ± 11.2 ^c	—	MS/RI
56	53.11	Ethyl 9-hexadecenoate	9-十六碳烯酸 乙酯	2290	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	109.48 ± 19.43 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
57	53.37	Ethyl 12-hydroxy-3- phenylpropanoate	2-羟基-3-苯基 丙酸乙酯	2306	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	18.24 ± 5.43 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
58	54.503	Hexadecanoic acid, 2-methylpropyl ester	十六酸 2-甲基 丙酯	2373	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	19.27 ± 4 ^a	—	4.94 ± 0.31 ^b	—	—	—	MS/RI
59	54.724	(Z)-Ethyl heptadec-9-enoate	(Z)-十七烷-9- 烯酸乙酯	2386	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	11.64 ± 1.51 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
醛类												
60	14.861	Hexanal	正己醛	1078	C ₆ H ₁₂ O	7.96 ± 2.56 ^b	—	2.64 ± 0.49 ^c	12.79 ± 2.16 ^a	11.89 ± 2.72 ^a	1.43 ± 0.1 ^c	MS/RI
61	26.365	2-Heptenal, (E)-	(E)-2-庚烯醛	1327	C ₇ H ₁₂ O	4.31 ± 0.14 ^b	—	1.11 ± 0.06 ^c	—	6.7 ± 0.54 ^a	0.87 ± 0.29 ^c	MS/RI
62	29.231	Nonanal	壬醛	1389	C ₉ H ₁₈ O	5.22 ± 1.2 ^b	2.59 ± 0.29 ^c	4.64 ± 1.02 ^b	9.87 ± 1.78 ^a	—	3.66 ± 0.66 ^{cb}	MS/RI

续表3

NO.	保留时 间 /min	英文名称	中文名称	RI	分子式	含量/(μg·mL ⁻¹)					鉴定	
						DLB	AnQ SX	PJ	HJRY	AnQ GJ	Blank	
63	31.079	2-Octenal, (E)-	反-2-辛烯醛	1431	C ₈ H ₁₄ O	—	0.93 ± 0.12 ^b	—	—	—	1.86 ± 0.53 ^a	MS/RI
64	34.028	Decanal	癸醛	1497	C ₁₀ H ₂₀ O	—	—	—	—	—	0.65 ± 0.12 ^a	MS/RI
65	35.438	Benzaldehyde	苯甲醛	1534	C ₇ H ₆ O	—	3.26 ± 0.02 ^a	1.34 ± 0.19 ^b	—	—	1.37 ± 0.37 ^b	MS/RI
66	35.65	(E)-2-Nonenal	反式-2-壬醛	1539	C ₉ H ₁₆ O	3.55 ± 1.94 ^b	3.93 ± 1.02 ^b	—	6.35 ± 0.68 ^a	—	—	MS/RI
67	39.506	(Z)-2-Decenal	(Z)-癸-2-烯醛	1649	C ₁₀ H ₁₈ O	6.33 ± 1.61 ^{cb}	3.42 ± 0.18 ^c	2.17 ± 0.26 ^c	9.77 ± 2.66 ^{ba}	11.83 ± 4.94 ^a	1.85 ± 0.46 ^c	MS/RI
68	41.386	2,4-Nonadienal, (E,E)-	(E,E)-2,4-壬二烯醛	1709	C ₇ H ₁₄ O ₂	6.63 ± 3.07 ^a	1.74 ± 0.14 ^b	—	—	—	—	MS/RI
69	41.546	Dodecanal	十二醛	1715	C ₁₂ H ₂₄ O	—	—	—	—	—	2.83 ± 0.97 ^a	MS/RI
70	43.145	2,4-Dodecadienal, (E,E)-	(E,E)-2,4-十二碳二烯醛	1773	C ₁₂ H ₂₀ O	—	—	—	—	—	1.32 ± 0.58 ^a	MS/RI
71	44.412	2,4-Decadienal, (E,E)-	反式-2,4-癸二烯醛	1821	C ₁₀ H ₁₆ O	14.57 ± 6.84 ^a	4.99 ± 1.13 ^b	—	—	15.2 ± 1.01 ^a	—	MS/RI
72	49.175	Pentadecanal-	正十五碳醛	2039	C ₁₅ H ₃₀ O	6.63 ± 4.8 ^b	30.13 ± 24.19 ^a	—	—	—	—	MS/RI
73	53.819	9,17-Octadecadienal, (Z)-	(9Z)-十八碳-9,17-二烯醛	2332	C ₁₈ H ₃₂ O	—	—	13.58 ± 3.98 ^a	—	—	—	MS/RI
酸类												
74	32.628	Acetic acid	冰醋酸	1466	C ₂ H ₄ O ₂	36.91 ± 7.82 ^a	—	16.85 ± 6.78 ^b	—	—	6.95 ± 1.74 ^c	MS/RI
75	39.257	Butanoic acid	丁酸	1641	C ₄ H ₈ O ₂	—	—	—	—	—	0.59 ± 0.39 ^a	MS/RI
76	40.512	Butanoic acid, 3-methyl-	异戊酸	1681	C ₅ H ₁₀ O ₂	—	—	—	—	—	2.34 ± 0.76 ^a	MS/RI
77	40.518	2,4-Dimethylpentanoic acid	2,4-二甲基戊酸	1681	C ₇ H ₁₄ O ₂	8.92 ± 0.4 ^a	1.51 ± 0.85 ^b	0.63 ± 0.18 ^b	—	7.88 ± 1.25 ^a	—	MS/RI
78	40.528	Butanoic acid, 2-methyl-	2-甲基丁酸	1681	C ₅ H ₁₀ O ₂	—	—	—	2.95 ± 0.54 ^a	—	—	MS/RI
79	44.125	Linoleic acid	亚麻酸	1810	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	—	—	—	10.76 ± 1.66 ^a	—	—	MS/RI
80	45.24	Hexanoic acid	己酸	1854	C ₆ H ₁₂ O ₂	—	19.25 ± 12.41 ^a	—	—	—	—	MS/RI
81	47.716	Heptanoic acid	庚酸	1963	C ₇ H ₁₄ O ₂	2.45 ± 0.79 ^a	1.76 ± 0.06 ^b	—	—	—	—	MS/RI
82	48.249	Undecanoic acid	十一烷酸	1988	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	—	—	6.36 ± 0.6 ^a	—	—	—	MS/RI
83	49.682	Caprylic acid	辛酸	2069	C ₈ H ₁₆ O ₂	133.64 ± 69.99 ^{ba}	136.34 ± 95.2 ^{ba}	16.58 ± 4.79 ^b	96.1 ± 80.42 ^b	280.59 ± 164.3 ^a	23.49 ± 18.27 ^b	MS/RI
84	49.91	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	亚油酸	2082	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	55.06 ± 19.01 ^a	19.57 ± 0.15 ^b	—	—	—	27.81 ± 17.08 ^b	MS/RI

续表3

NO.	保留时 间 /min	英文名称	中文名称	RI	分子式	含量/(μg·mL ⁻¹)					鉴定	
						DLB	AnQ SX	PJ	HURY	AnQ GJ	Blank	
85	51.301	Nonanoic acid	正壬酸	2172	C ₉ H ₁₈ O ₂	—	—	—	—	—	27.3 ± 20.18 ^a	MS/RI
86	51.309	Oleic Acid	油酸	2173	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	—	—	—	—	—	36.58 ± 44.25 ^a	MS/RI
87	52.946	Capric acid	正癸酸	2279	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	113.24 ± 15.47 ^c	215.11 ± 78.16 ^b	83.63 ± 41.82 ^c	222.91 ± 40.62 ^b	338.39 ± 21.63 ^a	—	MS/RI
88	52.95	8-Methylnonanoic acid	8-甲基壬酸	2280	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	—	—	—	—	—	6.24 ± 0.47 ^a	MS/RI
89	53.712	Tetradecanoic acid	肉豆蔻酸	2326	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	—	—	—	44.94 ± 12.23 ^a	—	—	MS/RI
烷类												
90	18.797	Dodecane	正十二烷	1165	C ₁₂ H ₂₆	—	—	—	—	—	0.21 ± 0.11 ^a	MS/RI
91	19.142	Silane, ethoxytriethyl-	乙氧基三乙基 硅烷	1172	C ₈ H ₂₀ OSi	—	—	—	6.67 ± 5.87 ^a	5.57 ± 1.11 ^a	0.8 ± 0.58 ^b	MS/RI
92	21.33	Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	2,6,11-三甲基 十二烷	1219	C ₁₅ H ₃₂	—	—	—	—	—	0.12 ± 0.05 ^a	MS/RI
93	24.8	Dodecane, 4-methyl-	4-甲基十二烷	1293	C ₁₃ H ₂₈	—	—	—	—	—	0.14 ± 0.06 ^a	MS/RI
94	29.8	Tetradecane	十四烷	1402	C ₁₄ H ₃₀	4.28 ± 3.83 ^a	4.89 ± 1.37 ^a	3.58 ± 1.26 ^a	—	9.61 ± 8.68 ^a	2.2 ± 0.24 ^a	MS/RI
95	33.557	Pentadecane	正十五烷	1487	C ₁₅ H ₃₂	—	1.99 ± 0.34 ^{cb}	3.29 ± 0.83 ^a	2.82 ± 0.74 ^{ba}	—	1.58 ± 0.42 ^c	MS/RI
96	37.7	Nonadecane	正十九烷	1593	C ₁₉ H ₄₀	3.31 ± 1.15 ^a	—	2.08 ± 0.79 ^b	1.92 ± 0.37 ^b	—	0.83 ± 0.26 ^c	MS/RI
97	37.718	Octadecane, 1-chloro-	氯代十八烷	1594	C ₁₈ H ₃₇ Cl	—	—	—	—	—	0.65 ± 0.4 ^a	MS/RI
98	38.605	Pentadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	姥鲛烷	1620	C ₁₉ H ₄₀	—	—	0.64 ± 0 ^a	—	—	—	MS/RI
99	39.432	Octadecane	正十八烷	1646	C ₁₈ H ₃₈	—	—	3.13 ± 2.09 ^a	—	—	—	MS/RI
100	39.717	1,3-Dioxane, 4-(hexadecyloxy) -2-pentadecyl-	2-十五基-4-(十 六基氧基)-1,3-二 噁烷	1655	C ₃₅ H ₇₀ O ₃	—	—	0.78 ± 0.14 ^a	—	—	—	MS/RI
101	40.972	Heptadecane	正十七烷	1695	C ₁₇ H ₃₆	—	1.09 ± 0.36 ^a	—	—	—	—	MS/RI
102	46.588	Cyclohexane, 1-butenylidene-	1-亚丁烯-环己烷	1909	C ₁₀ H ₁₆	1.28 ± 0.42 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
103	48.3	Heneicosane	正二十一烷	1990	C ₂₁ H ₄₄	48.12 ± 12.36 ^a	59.98 ± 72.89 ^a	—	—	—	11.41 ± 5.66 ^a	MS/RI
酮类												
104	19.389	2-Hexanone, 5-methyl-	5-甲基-2-己酮	1177	C ₇ H ₁₄ O	—	—	—	—	—	2.25 ± 1.34 ^a	MS/RI
105	19.476	2-Heptanone, 5-methyl-	5-甲基-2-庚酮	1179	C ₈ H ₁₆ O	—	—	1.45 ± 0.14 ^a	—	—	—	MS/RI

续表3

NO.	保留时 间/min	英文名称	中文名称	RI	分子式	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)					鉴定	
						DLB	AnQ SX	PJ	HJRY	AnQ GJ	Blank	
106	24.25	2-Octanone	仲辛酮	1281	C ₈ H ₁₆ O	1.7 ± 0.39 ^b	1.58 ± 0.31 ^b	2.66 ± 0.3 ^b	4.58 ± 1.23 ^a	6.01 ± 1.51 ^a	1.84 ± 0.38 ^b	MS/RI
107	25.742	Acetoin	3-羟基-2-丁酮	1313	C ₄ H ₈ O ₂	—	2.59 ± 0.15 ^b	—	—	—	4.97 ± 1.01 ^a	MS/RI
108	37.893	2-Undecanone	2-十一酮	1598	C ₁₁ H ₂₂ O	0.75 ± 0.3 ^c	—	0.71 ± 0.18 ^c	—	2.13 ± 0.25 ^a	1.23 ± 0.26 ^b	MS/RI
109	42.381	CH ₃ C(O)CH ₂ CH ₂ OH	4-羟基-2-丁酮	1746	C ₄ H ₈ O ₂	—	15.15 ± 8.09 ^a	—	17.86 ± 7.56 ^a	—	—	MS/RI
110	44.235	2-Tridecanone	2-十三烷酮	1814	C ₁₃ H ₂₆ O	—	—	—	2.92 ± 0.04 ^b	—	6.08 ± 2.83 ^a	MS/RI
111	45.99	3-Buten-2-one, 4-(1-cyclopenten-1-yl)-, (E)-	(e)-(9ci)-4-(1-环 戊烯-1-基)-3-丁 烯-2-酮	1884	C ₉ H ₁₂ O	—	—	—	—	—	2.05 ± 0.74 ^a	MS/RI
112	46.75	4-Methyl-5H-furan-2-one	4-甲基-2(H)- 呋喃酮	1917	C ₃ H ₆ O ₂	0.81 ± 0.2 ^a	—	—	—	—	—	MS/RI
113	48.96	2-Pentadecanone	2-十五烷酮	2027	C ₁₅ H ₃₀ O	—	—	17.97 ± 4.73 ^a	—	—	—	MS/RI
114	48.993	2-Tetradecanone	2-十四酮	2029	C ₁₄ H ₂₈ O	29.55 ± 6.43 ^c	—	—	43.11 ± 14.05 ^b	57.12 ± 10.12 ^a	—	MS/RI
烯类												
115	22.789	Styrene	苯乙烯	1250	C ₈ H ₈	48.09 ± 11.15 ^{cb}	63.59 ± 15.54 ^{ba}	39.43 ± 4.6 ^c	72.1 ± 15.32 ^a	54.41 ± 10.74 ^{cba}	—	MS/RI
116	30.467	1,3-Hexadiene, 3-ethyl-2- methyl-	3-乙基-2-甲基 -1,3-己二烯	1417	C ₉ H ₁₆	—	—	—	7.21 ± 0.3 ^b	7.84 ± 0.68 ^a	—	MS/RI
117	35.55	1-Pentadecene	1-十五烯	1537	C ₁₅ H ₃₀	—	—	—	—	7.96 ± 1.61 ^a	—	MS/RI
118	39.068	α -Cubebene	(-)-Alpha-萜澄 茄油烯	1635	C ₁₅ H ₂₄	—	—	0.51 ± 0.04 ^a	—	—	0.77 ± 0.34 ^a	MS/RI
119	40.015	beta-Farnesene	(E)- β -金合欢烯	1665	C ₁₅ H ₂₄	—	0.77 ± 0.03 ^a	—	—	—	—	MS/RI
其他												
120	4.12	Carbamic acid, monoammonium salt	氨基甲酸铵	—	CH ₆ N ₂ O ₂	—	—	—	17.13 ± 6.17 ^a	—	—	MS
121	21.086	Furan, 2-pentyl-	2-正戊基呋喃	1214	C ₉ H ₁₄ O	2.69 ± 0.5 ^b	1.33 ± 0.19 ^b	—	5.37 ± 0.59 ^a	5.76 ± 2.22 ^a	1.13 ± 0.23 ^b	MS/RI
122	21.264	1,3-Diisopropoxy- 1,3-dimethyl-1,3- disilacyclobutane	—	1217	C ₁₂ H ₁₀ ClNO	—	6.32 ± 5.69 ^a	0.5 ± 0.11 ^b	—	—	—	MS/RI
123	29.259	1-Propanol, 3-ethoxy-	1,3-丙二醇单乙醚	1390	C ₅ H ₁₂ O ₂	—	0.87 ± 0.17 ^c	1.46 ± 0.61 ^{cb}	4.35 ± 0.28 ^b	29.55 ± 4.46 ^a	—	MS/RI
124	32.662	Ammonium acetate	乙酸铵	1466	C ₂ H ₇ NO ₂	—	74.04 ± 6.7 ^b	—	—	152.26 ± 15.31 ^a	—	MS/RI

续表3

NO.	保留时 间/min	英文名称	中文名称	RI	分子式	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)					鉴定	
						DLB	AnQ SX	PJ	HJRY	AnQ GJ	Blank	
125	35.102	2,5-Dihydroxybenzaldehyde, 2TMS derivative	—	1525	$\text{C}_{13}\text{H}_{22}\text{O}_3\text{Si}_2$	$5.17 \pm 0.25^{\text{ba}}$	$2.35 \pm 1.01^{\text{c}}$	1.24 ± 0.67	$4.32 \pm 2.21^{\text{cb}}$	$7.67 \pm 1.69^{\text{a}}$	$2.18 \pm 1.93^{\text{c}}$	MS/RI
126	37.49	1-Undecyne	1-十一炔	1588	$\text{C}_{11}\text{H}_{20}$	—	—	—	$7.02 \pm 1.21^{\text{a}}$	—	—	MS/RI
127	41.771	Naphthalene, 1,2,4a,5,6,8a- hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1- methylethyl)-	1,2,4A,5,6,8A-六 氢-1-异丙基-4, 六氢萘	1723	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	—	—	—	—	$13 \pm 8.08^{\text{a}}$	$3.38 \pm 0.46^{\text{b}}$	MS/RI
128	42.88	1-Isopropyl-4,7- dimethyl-1,2,3,5,6,8a- hexahydronaphthalene	1-异丙基-4,7-二 甲基-1,2,3,5,6,8a- 六氢萘	1764	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	$15.87 \pm 4.92^{\text{a}}$	—	—	—	—	—	MS/RI
129	43.59	Naphthalene, 1,2,3,4,4a,7- hexahydro-1,6-dimethyl-4-(1- methylethyl)-	—	1790	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	—	—	$2.3 \pm 1.26^{\text{a}}$	—	—	$0.67 \pm 0.15^{\text{b}}$	MS/RI
130	44.919	cis-Calamenene	Calamenene	1841	$\text{C}_{15}\text{H}_{22}$	—	—	—	—	—	$2.73 \pm 0.97^{\text{a}}$	MS/RI
131	45.332	3-Nonen-5-yne, 4-ethyl-	—	1858	$\text{C}_{11}\text{H}_{18}$	$34.21 \pm 5.35^{\text{b}}$	—	$16.81 \pm 2.64^{\text{cb}}$	$79.68 \pm 7.17^{\text{a}}$	$71.4 \pm 23.83^{\text{a}}$	$7.86 \pm 3.13^{\text{c}}$	MS/RI
132	50.889	Tetradecanal	十四醛三聚物	2145	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}$	$28.06 \pm 5.57^{\text{a}}$	—	—	—	—	—	MS/RI
133	51.27	(Z)-Ethyl pentadec-9-enoate	—	2170	$\text{C}_{17}\text{H}_{32}\text{O}_2$	—	—	$13.72 \pm 8.28^{\text{a}}$	—	—	—	MS/RI
134	52.04	p-Vinylguaiacol	2-甲氧基-4- 乙基苯酚	2221	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_3$	$255.96 \pm 7.04^{\text{b}}$	$261.36 \pm 30.84^{\text{b}}$	$112.85 \pm 6.01^{\text{c}}$	$323.36 \pm 63.87^{\text{b}}$	$425.18 \pm 91.57^{\text{a}}$	$65.67 \pm 8.33^{\text{c}}$	MS/RI
135	53.562	Phenol, 3,5-bis(1,1- dimethylethyl)-	3,5-二叔丁基苯酚	2317	$\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}$	$28.1 \pm 4.08^{\text{a}}$	—	—	$20.27 \pm 0.70^{\text{b}}$	—	—	MS/RI
136	54.724	(Z)-Ethyl heptadec-9-enoate	—	2386	$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$	—	—	$4.24 \pm 0.25^{\text{b}}$	$7.44 \pm 1.32^{\text{ba}}$	$8.54 \pm 4.57^{\text{a}}$	—	MS/RI

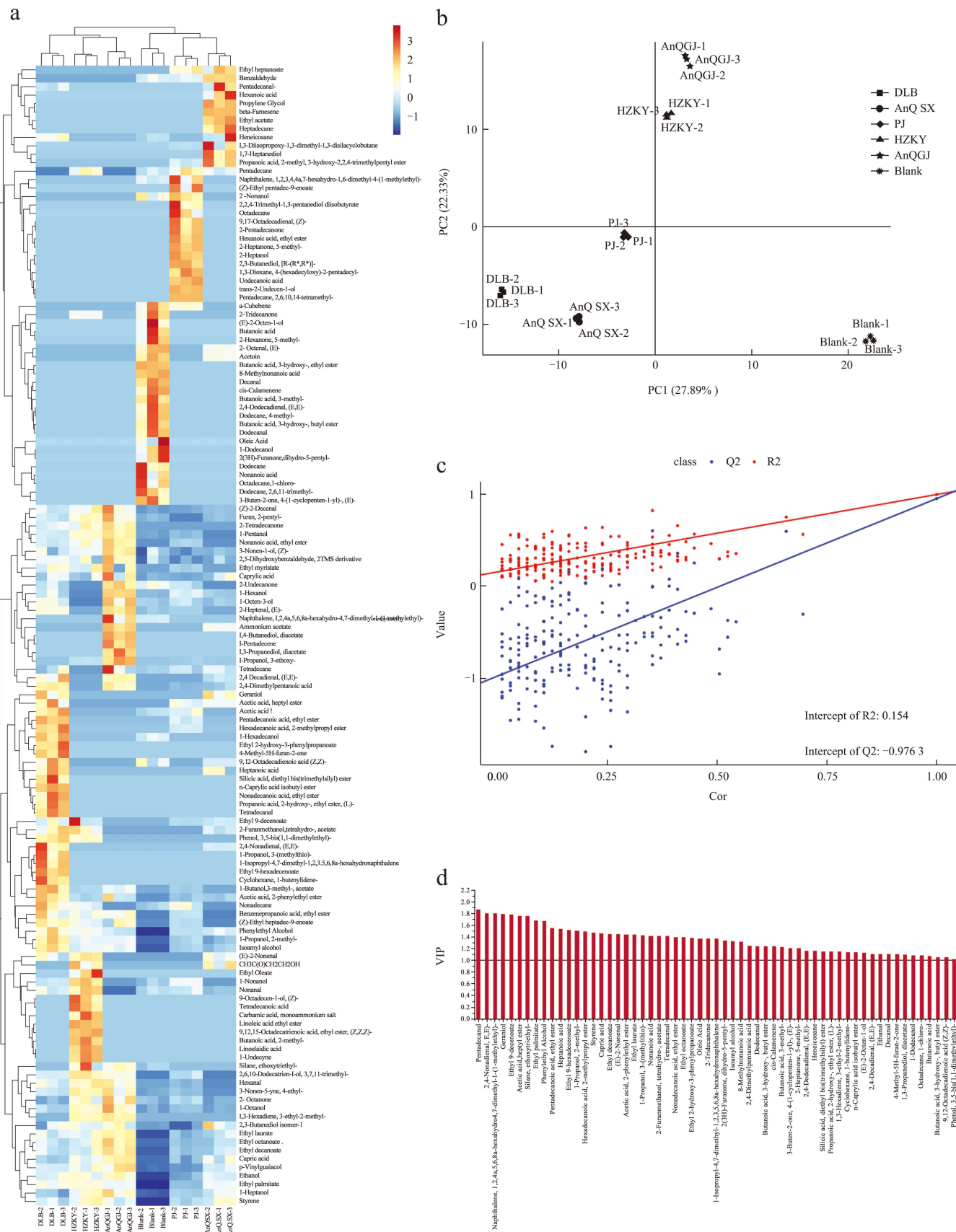


图 4 不同酵母菌种发酵玉米样品挥发性成分多元统计分析

Fig.4 Multivariate statistical analysis of volatile components in corn samples fermented by different yeast strains

2.5 挥发性成分分析多元统计分析

该研究采用多元统计分析解析不同酵母菌株发酵挥发性有机物的代谢差异,通过聚类热图、偏最小二乘判别分析(PLS-DA)及变量投影重要性(VIP)值分析,全面揭示不同菌株代谢特征的分化规律^[14,29]。如图4a所示,聚类热图基于代谢物丰度的欧式距离矩阵进行层次聚类,以颜色梯度(红色表示高丰度、蓝色表示低丰度)直观呈现挥发性代谢物的相对含量差异。左侧聚类树反映不同酵母菌株的代谢物的相似性,结果反应不同来源菌株在整体代谢特征上呈现显著分化,其中PJ与ANQSG菌株在特定代谢物簇中呈现相近的丰度模式,二者可能有相似的代谢通路;而DLB菌株与其他菌株的聚类距离较远,其代谢物(如异戊醇、反式-2,4-癸二烯醛)的独特性进一步印证菌株特异性代谢特征。菌株在长期演化及生境适应中,通过关键代谢酶的活性调控或基因表达差异,导致代谢通路分化,挥发性代谢产物的差异。

PLS-DA作为一种有监督的多元统计方法,通过构建代谢物与菌株分组的回归模型,最大化组间差异以提取关键判别维度^[26]。结果如图4b所示,不同菌种发酵样本在坐标空间呈现显著离散分布,第一主成分(PC1)贡献率达27.89%,为区分菌株代谢特征的核心维度,表明不同来源酵母菌株的代谢的挥发性有机物存在本质差异。如图4c所示,交叉验证结果进一步验证模型可靠性: R^2 接近1,表明模型对现有数据的解释能力强; Q^2 截距为-0.9703,说明模型未过度拟合,VIP值通过量化各代谢物对PLS-DA模型组间判别的贡献度,直接反映代谢物对分组差异的贡献度。该研究中,如图4d所示,VIP>1变量集中于醇类、酯类及醛类代谢物。醇类代谢物中以乙醇、异戊醇为代表的醇类,在DLB、AnQSG等菌株中展现出高含量。酯类代谢物中,癸酸乙酯、月桂酸乙酯等长链酯类在AnQSG菌株中展现出高含量,凸显了其在长链脂肪酸酯化代谢上的优势。在PJ菌株中,3-羟基-2-丁酮等甜香代谢物对应的高含量,与该菌株风味表型高度契合。

2.6 分离菌种发酵样品特征风味成分差异分析

该研究从酵母发酵玉米挥发性有机物中47种特征香气成分,其的ROAV值如表4所示,涵盖醇类、酯类、醛类、酸类、酮类、烃类及其他化合物。ROAV值反映成分对整体风味的贡献,通常ROAV ≥ 1 为关键风味物质^[30]。醇类中,异戊醇在DLB(11)、AnQSG(4)、PJ(4)、HZKY(6)、AnQSGJ(7)中ROAV均 ≥ 1 ,是核心风味物质,

其“威士忌味、麦芽味”赋予样品醇厚基调。顺式-3-壬烯-1-醇ROAV值极高,DLB中达(184)、AnQSG中(140)、HZKY中(217)、AnQSGJ中(301),凭借“花香、青绿味”成为关键风味驱动因子,其阈值极低($0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),少量存在即可显著影响风味。酯类是果香贡献的核心,癸酸乙酯在DLB(96)、AnQSG(90)、HZKY(125)、AnQSGJ(199)中ROAV ≥ 1 ,提供“葡萄味”;月桂酸乙酯ROAV在DLB(110)、AnQSG(92)、HZKY(129)、AnQSGJ(177)中突出,赋予“青叶味”。辛酸乙酯、壬酸乙酯等也因ROAV ≥ 1 ,共同构建果香风味层次。醛类中,反式-2,4-癸二烯醛在DLB(208)、AnQSGJ(217)中ROAV ≥ 1 ,贡献“油炸味、蜡味”;壬醛在DLB(5)、PJ(5)、HZKY(10)中ROAV ≥ 1 ,赋予“蜡味”;癸醛、十二醛等在空白组中ROAV较高(如癸醛7、十二醛28)。其他成分中,2-甲氧基-4-乙烯苯酚在各商业菌株中ROAV ≥ 1 (DLB171、AnQSG174、HZKY216、AnQSGJ283),提供“丁香味、咖喱味”,是区分发酵样品与空白组的关键标志物。

由于特征挥发性有机物含量的不同,不同酵母菌株发酵样品的关键风味类型及ROAV分布呈现显著特异性:DLB:以异戊醇(11)、顺式-3-壬烯-1-醇(184)、反式-2,4-癸二烯醛(208)、癸酸乙酯(96)、月桂酸乙酯(110)为核心,构建“醇厚麦芽香+浓郁花果香+微蜡质香”的复合风味,ROAV ≥ 1 的物质达12种,风味复杂度高。AnQSG:顺式-3-壬烯-1-醇(140)、2-甲氧基-4-乙烯苯酚(174)、癸酸乙酯(90)、月桂酸乙酯(92)为关键,风味偏向“清新花香+柔和果香+淡淡丁香味”,ROAV ≥ 1 的物质共10种,整体风格清新。PJ:异戊醇(4)、顺式-3-壬烯-1-醇(118)、壬醛(5)为主要贡献者,风味特征为“麦芽香+青绿花香+蜡质香”,ROAV ≥ 1 的物质仅7种,风味相对简约。HZKY:顺式-3-壬烯-1-醇(217)、2-甲氧基-4-乙烯苯酚(216)、癸酸乙酯(125)、月桂酸乙酯(129)主导,形成“浓郁花香+醇厚果香+丁香味”,ROAV ≥ 1 的物质达11种,风味浓郁度高。AnQSGJ:顺式-3-壬烯-1-醇(301)、2-甲氧基-4-乙烯苯酚(283)、癸酸乙酯(199)、月桂酸乙酯(177)、反式-2,4-癸二烯醛(217)为核心,风味呈现“强烈花香+复杂果香+独特油炸蜡质香”,ROAV ≥ 1 的物质共13种,是风味最丰富的菌株。空白组:仅癸醛(7)、十二醛(28)、(E,E)-2,4-十二碳二烯醛(19)等少数成分ROAV ≥ 1 ,ROAV的结果进一步验证了不同酵母发酵玉米感官和挥发性有机物上的差异。

表 4 不同酵母菌种发酵玉米样品挥发性成分ROAV分析
Table 4 Analysis of ROAV for volatile components in corn samples fermented by different yeast strains

NO.	保留时间 /min	名称	气味	RI	分子式	* 阈值 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	ROAV					
							DLB	AnQSX	PJ	HZKY	AnQJ	Blank
1	9.741 3	乙醇	酒精味	941	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	100 000	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2	16.03	异丁醇	葡萄酒味、溶剂味、苦味	1105	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	260	<1	<1	<1	<1	<1	—
3	21.313	异戊醇	威士忌味、麦芽味、焦糊味	1218	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	65	11	4	4	6	7	<1
4	23.42	正戊醇	蜡味	1263	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	440	<1	—	<1	<1	<1	<1
5	27.803	正己醇	树脂味、花香、青绿味	1358	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	500	<1	<1	<1	—	<1	<1
6	31.937	1-辛烯-3-醇	蘑菇味	1450	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}$	1	2	1	2	—	4	1
7	36.414	正辛醇	青绿草本味	1559	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	130	<1	<1	<1	<1	<1	<1
8	36.79	2,3-丁二醇	果香、洋葱味	1569	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$	100 000	<1	<1	<1	<1	<1	<1
9	39.87	正壬醇	青绿甜润油脂感	1660	$\text{C}_9\text{H}_{20}\text{O}$	50	<1	—	<1	<1	—	<1
10	40.677	顺式-3-壬烯-1-醇	花香、青绿味、辛辣刺激感	1686	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	0.01	184	140	118	217	301	144
11	41.84	3-甲基丙醇	甜味、红薯味	1726	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{OS}$	0.2	165	—	—	—	—	—
12	45.09	香叶醇	玫瑰味、天竺葵味	1848	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	15	<1	<1	—	—	—	—
13	47.002	苯乙醇	蜂蜜味、香料味	1929	$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}$	1 000	<1	<1	<1	<1	<1	—
14	54.301	法尼醇	油味	2361	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}$	6.8	3	—	2	6	4	—
15	7.7	乙酸乙酯	菠萝味	861	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	5 000	—	<1	—	—	—	—
16	16.52	乙酸异戊酯	香蕉味	1116	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	6	3	—	<1	0	1	—
17	21.333	正己酸乙酯	苹果皮味、果香	1219	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$	1	—	—	2	—	—	—
18	26.474	庚酸乙酯	果香	1329	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_2$	1.8	—	<1	<1	—	—	—
19	30.942	辛酸乙酯	果香、油脂味	1428	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	5	11	9	6	15	23	—
20	35.114	3-羟基丁酸乙酯	棉花糖味	1525	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_3$	—	—	—	—	—	—	—
21	35.332	壬酸乙酯	花香	1531	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_2$	1	4	—	3	7	11	—
22	39.151	癸酸乙酯	葡萄味	1638	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$	1	96	90	63	125	199	—
23	41.702	油酸乙酯	乳制品味(奶味)	1721	$\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2$	—	—	—	—	—	—	—
24	44.526	乙酸苯乙酯	玫瑰味、蜂蜜味、烟草味	1826	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_2$	125	<1	<1	<1	<1	<1	—
25	44.957	月桂酸乙酯	叶子味(青叶味)	1843	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2$	0.6	110	92	57	129	177	—
26	14.861	正己醛	青草味	1078	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	4.5	2	—	<1	3	3	<1

续表4

NO.	保留时间 /min	名称	气味	RI	分子式	* 阈值 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	ROAV					
							DLB	AnQSX	PJ	HZKY	AnQGJ	Blank
27	26.365	(E)-2-庚烯醛	油脂味	1327	C ₇ H ₁₂ O	13	<1	—	<1	—	<1	<1
28	29.231	壬醛	蜡味	1389	C ₉ H ₁₈ O	1	5	3	5	10	—	4
29	31.079	反-2-辛烯醛	油脂味	1431	C ₈ H ₁₄ O	3	—	<1	—	—	—	<1
30	34.028	癸醛	橙皮味	1497	C ₁₀ H ₂₀ O	0.1	—	—	—	—	—	7
31	35.438	苯甲醛	杏仁味	1534	C ₇ H ₆ O	350	—	<1	<1	—	—	<1
32	41.386	(E,E)-2,4-壬二烯醛	油脂味、蜡味、青绿味	1709	C ₇ H ₁₄ O ₂	0.09	74	19	—	—	—	—
33	41.546	十二醛	辛酸味(羊脂味)	1715	C ₁₂ H ₂₄ O	0.1	—	—	—	—	—	28
34	43.145	(E,E)-2,4-十二碳二烯醛	果香	1773	C ₁₂ H ₂₀ O	0.07	—	—	—	—	—	19
35	44.412	反式-2,4-癸二烯醛	油炸味、蜡味、油脂味	1821	C ₁₀ H ₁₆ O	0.07	208	71	—	—	217	—
36	32.628	冰醋酸	酸味	1466	C ₂ H ₄ O ₂	500	<1	—	<1	—	—	<1
37	39.257	丁酸	哈喇味、腐败味、奶酪味、汗味	1641	C ₄ H ₈ O ₂	240	—	—	—	—	—	<1
38	40.512	异戊酸	汗味、酸味、哈喇味、腐败味	1681	C ₅ H ₁₀ O ₂	30	—	—	—	—	—	<1
39	40.528	2-甲基丁酸	奶酪味、汗味	1681	C ₅ H ₁₀ O ₂	7	—	—	—	<1	—	—
40	45.24	己酸	汗味	1854	C ₆ H ₁₂ O ₂	300	—	<1	—	—	—	—
41	47.716	庚酸	杏子味、花香、酸味	1963	C ₇ H ₁₄ O ₂	3 000	<1	<1	—	—	—	—
42	49.682	辛酸	汗味、奶酪味	2069	C ₈ H ₁₆ O ₂	3 000	<1	<1	<1	<1	<1	<1
43	24.25	仲辛酮	肥皂味、汽油味	1281	C ₈ H ₁₆ O	50	<1	<1	<1	<1	<1	<1
44	25.742	3-羧基-2-丁酮	黄油味、奶油味	1313	C ₄ H ₈ O ₂	10 000	—	<1	—	—	—	<1
45	22.789	苯乙烯	香脂味、汽油味	1250	C ₈ H ₈	47	1	1	<1	2	1	—
46	21.086	2-正戊基呋喃	青豆味、黄油味	1214	C ₉ H ₁₄ O	6	<1	<1	—	<1	1	<1
47	52.04	2-甲氧基-4-乙基苯酚	丁香味、咖喱味	2221	C ₁₂ H ₂₄ O ₃	1.5	171	174	75	216	283	44

#: 阈值来源化合物嗅觉阈值汇编

3 结论

该研究成功筛选了五株同属异常威克汉姆酵母的产香酵母用于玉米发酵香精开发。尽管遗传背景一致,这些菌株在玉米发酵中展现出显著的风味差异: AnQSX 酯香浓郁(感官评分 7 分),呈现独特清新果香; PJ 甜香突出(6 分)并伴有明显酸香; HZKY 以蜡质脂香为主; DLB 融合了醇香、果香与花香; AnQGJ 则富集长链酯类,表现为醇香与微酸调性。通过 HS-SPME-GC-MS 分析共鉴定 136 种挥发性成分,并结合气味活度值 (ROAV) 确定异戊醇(麦芽味)、顺式-3-壬烯-1-醇(花香)、癸酸乙酯(葡萄味)等为核心风味物质驱动差异。多元统计分析进一步验证了菌株代谢谱的显著分化。该研究为玉米发酵制品的风味定向调控及天然香精开发提供了特异性菌种资源和坚实的理论依据。

参考文献

- [1] PRAVEEN M, BROGI S. Microbial fermentation in food and beverage industries: Innovations, challenges, and opportunities [J]. Foods, 2025, 14(1): 114.
- [2] VANWYK N. Current research on flavor compounds in fermented food products [J]. Foods, 2024, 13(5): 730.
- [3] LIU S, LOU Y, LI Y, et al. Aroma characteristics of volatile compounds brought by variations in microbes in winemaking [J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136075.
- [4] CHEN T, WANG H, SU W, et al. Analysis of the formation mechanism of volatile and non-volatile flavor substances in corn wine fermentation based on high-throughput sequencing and metabolomics [J]. Food Research International, 2023, 165: 112350.
- [5] 卢玥,杨易坤,郑若欣,等.产香酵母的筛选鉴定、生长特性及其混菌发酵果酒应用[J].应用与环境生物学报, 2025,31(2):282-294.
- [6] CARRAU F, GAGGERO C, AGUILAR P S. Yeast diversity and native vigor for flavor phenotypes [J]. Trends in Biotechnology, 2015, 33(3): 148-154.
- [7] CHEN L, LI K, CHEN H, et al. Reviewing the source, physiological characteristics, and aroma production mechanisms of aroma-producing yeasts [J]. Foods, 2023, 12(18): 3501.
- [8] VANWYK N, KROUKAMP H, PRETORIUS I S. The smell of synthetic biology: Engineering strategies for aroma compound Production in yeast [J]. Fermentation, 2018, 4(3): 54.
- [9] VERNI M, HOLT S, RIZZELLO C G. Editorial: Microbial fermentation for improved sensory properties and functionality of sustainable foods[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1-11
- [10] SQUARA S, FERRERO F, TABACCO E, et al. Effect of inoculation with *Lentilactobacillus buchneri* and *Lactocaseibacillus paracasei* on the maize silage volatilome: The advantages of advanced 2D-Chromatographic fingerprinting approaches [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(38): 12232-12248.
- [11] 杜亚军,郭尚,李群,等.木枣产香酵母的分离筛选和应用[J].中国酿造,2021,40(10):123-128.
- [12] 李宇辉,郭安民,刘成江,等.伊犁牧区传统发酵乳制品中产香酵母菌的分离及香气成分分析[J].食品与发酵工业, 2016,42(11):179-184.
- [13] 王春晓,何宇淋,唐佳代,等.贵州传统小曲酵母菌分子指纹图谱分析[J].食品科学,2023,44(2):165-172.
- [14] 袁文艳,胡佳星,张璐瑶,等.3种不同酵母产蓝莓酒风味物质的研究[J].中国酿造,2020,39(7):173-177.
- [15] ZHANG J, HE Y, YIN L, et al. Isolation of aroma-producing *Wickerhamomyces anomalus* yeast and analysis of its typical flavoring metabolites [J]. Foods, 2023, 12(15): 2934.
- [16] BUDNER D, CARR J, SERAFINI B, et al. Targeted study of the effect of yeast strain on volatile compounds produced in sorghum beer [J]. Foods, 2024, 13(22): 3626.
- [17] ZHAO X, PROCOPIO S, BECKER T. Flavor impacts of glycerol in the processing of yeast fermented beverages: a review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(12): 7588-7598.
- [18] LUO J, HE C, YAN S, et al. A metabolic roadmap of waxy corn flavor [J]. Molecular Plant, 2024, 17(12): 1883-1898.
- [19] ZHANG L, YU Y, YU R. Analysis of metabolites and metabolic pathways in three maize (*Zea mays* L.) varieties from the same origin using GC-MS [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17990.
- [20] ZHANG Y, NIELSEN J, LIU Z. Engineering yeast metabolism for production of terpenoids for use as perfume ingredients, pharmaceuticals and biofuels [J]. FEMS Yeast Research, 2017, 17(8):1-11.
- [21] HAZELWOOD LA, DARAN J, VANMARIS A JA, et al. The ehrlich pathway for fusel alcohol production: A century of research on *Saccharomyces cerevisiae* metabolism [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(8): 2259-2266.
- [22] 如意,任冬艳,刘文俊,等.塔什干地区发酵乳制品中酵母菌的分离鉴定[J].中国乳品工业,2021,49(7):13-17.
- [23] 李辉,余萌,刘立科,等.现代微生物鉴定技术在药品质量控制中的应用研究进展[J].中国医药工业杂志,2021, 52(3):312-319.
- [24] 陈翠珠.不同测序方法在病原微生物鉴定中应用的研究

- 进展[J].北京医学,2023,45(5):448-450.
- [25] ZHAI L, TANG Y, DONG M, et al. Characterization of volatile metabolites in temperate and tropical sweet corn cultivars under various post-harvest storage conditions [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 102020.
- [26] CAO K, WU J, WAN X, et al. Impact of non-*Saccharomyces* yeasts derived from traditional fermented foods on beer aroma: Analysis based on HS-SPME-GC/MS combined with chemometrics [J]. Food Research International, 2024, 187: 114366.
- [27] LU X, YANG C, YANG Y, et al. Analysis of the formation of characteristic aroma compounds by amino acid metabolic pathways during fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Molecules, 2023, 28(7): 3100.
- [28] LI X, XU X, WU C, et al. Effect of sequential inoculation of *Tetragenococcus halophilus* and *Wickerhamomyces anomalus* on the flavour formation of early-stage moromi fermented at a lower temperature [J]. Foods, 2023, 12: 3509.
- [29] FENG J, HAO L, ZHU H, et al. Combining with volatilomic profiling and chemometrics to explore the volatile characteristics in five different dried *Zanthoxylum bungeanum* maxim [J]. Food Research International, 2024, 175: 113719.
- [30] YU M, LI T, SONG H. Characterization of key aroma-active compounds in four commercial oyster sauce by SGC/GC×GC-O-MS, AEDA, and OAV [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104368.