

山西老陈醋大曲霉菌群落多样性、理化及风味特征

赵东敏¹, 张钰婧², 柳青山³, 白文斌³, 高振峰², 许 女^{2,*}

(1.晋中市综合检验检测中心, 山西食醋产业计量测试中心, 山西 晋中 030600;

2.山西农业大学食品科学与工程学院, 山西省食醋酿造技术创新中心, 山西 晋中 030801;

3.山西农业大学高粱研究所, 山西 晋中 030600)

摘要:以4家代表性醋厂的山西老陈醋大曲(A~D)为研究对象,采用高通量测序技术对其霉菌群落结构进行分析,结合常规理化分析、高效液相色谱(HPLC)及顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(HS-SPME-GC-MS)分别测定其理化指标、有机酸组成与挥发性风味物质,并对其进行感官评价。结果表明,从4种大曲中共注释到8个霉菌属,主要优势霉菌属为曲霉属(*Aspergillus*) (38.60%)和根霉属(*Rhizopus*) (32.33%)。不同大曲中的霉菌群落结构存在差异,且主要体现在相对丰度上。4种大曲的理化指标、风味及感官品质存在一定差异,其中大曲A的综合品质最好,水分、总酸、淀粉、氨基酸态氮含量及糖化力、液化力、纤维素酶活力、酸性蛋白酶活力、酯化力及发酵力分别为10.76%、1.77 mmol/10 g、56.44 g/100 g、0.41 g/100 g、530 U、0.89 U、93.95 U/g、104.31 U/g、886 U、1.89 U,有机酸总量为3.79 g/100 g,酯类、醇类和吡嗪类物质含量分别为2.07、3.58、0.20 mg/100 g;大曲A断面菌丝致密、曲香浓郁,综合得分最高(91)。该研究结果系统揭示了不同醋厂山西老陈醋大曲品质的差异,为传统食醋酿造工艺的优化与品质提升提供了理论依据。

关键词:山西老陈醋;大曲;霉菌群落;理化指标;风味

Mould Community Diversity, Physicochemical Indicators and Flavor Characteristics of Shanxi Aged Vinegar Daqu

ZHAO Dongmin¹, ZHANG Yujing², LIU Qingshan³, BAI Wenbin³, GAO Zhenfeng², XU Nü^{2,*}

(1. Shanxi Province Measurement and Testing Center for Vinegar Industry, Jinzhong Comprehensive Inspection and Testing Center, Jinzhong 030600, China; 2. Shanxi Province Vinegar Brewing Technology Innovation Center,

College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

3. Sorghum Research Institute, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, China)

Abstract: Using Shanxi aged vinegar Daqu samples (A–D) from four representative vinegar factories as the research objects, the mould community structure was analyzed using high-throughput sequencing technology. The physicochemical indexes, organic acid composition, and volatile flavor compounds were determined by conventional physicochemical analysis, high performance liquid chromatography (HPLC), and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), respectively, and sensory evaluation was conducted. The results showed that a total of 8 mould genera were identified from the four Daqu samples, and the dominant mould genera were *Aspergillus* (38.60%) and *Rhizopus* (32.33%). The mould community structure was different in different Daqu samples, which reflected in the relative abundance. The physicochemical indexes, flavor and sensory quality of the four Daqu were different to some extent. Among them, the comprehensive quality of Daqu A was the optimal, the moisture, total acid, starch, amino acid nitrogen, saccharification power, liquefaction power, cellulase activity, acid protease activity, esterification power and fermentation power were 10.76%, 1.77 mmol/10 g, 56.44 g/100 g, 0.41 g/100 g, 530 U, 0.89 U, 93.95 U/g, 104.31 U/g, 886 U, and 1.89 U,

收稿日期: 2025-01-22

基金项目: 山西省重点研发计划(重点)项目(202202130501011); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-06-14.5-A30); 山西省现代农业产业技术体系项目(2025CYJSTX03-33)

第一作者简介: 赵东敏(1973—), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为产品质量安全。E-mail: sxyczd@163.com

*通信作者简介: 许女(1979—), 女, 教授, 博士, 研究方向为传统酿造食品机理与应用技术。E-mail: xunv_2004@163.com

respectively. The total organic acid content was 3.79 g/100 g. The contents of esters, alcohols and pyrazines were 2.07, 3.58 and 0.20 mg/100 g, respectively. The cross-section of Daqu A had dense mycelium and strong aroma, with the highest comprehensive score (91). The research results systematically revealed the differences in the quality of the Shanxi aged vinegar Daqu in various vinegar factories, which provided a theoretical basis for the optimization and quality improvement of the traditional vinegar brewing process.

Keywords: Shanxi aged vinegar; Daqu; mould community; physicochemical indicator; flavor

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.04.016

中图分类号: TS264.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-5071 (2026) 04-0117-08

引文格式:

赵东敏, 张钰婧, 柳青山, 等. 山西老陈醋大曲霉菌群落多样性、理化及风味特征[J]. 中国酿造, 2026, 45(4): 117-124.

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.04.016. <https://www.chinabrewing.net.cn>

ZHAO Dongmin, ZHANG Yujing, LIU Qingshan, et al. Mould community diversity, physicochemical indicators and flavor characteristics of Shanxi aged vinegar Daqu[J]. China Brewing, 2026, 45(4): 117-124. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.04.016. <https://www.chinabrewing.net.cn>

山西老陈醋作为中国传统酿造食醋的典范, 其独特的“绵、酸、香、甜、鲜”风味与大曲工艺密不可分。山西老陈醋大曲是以大麦、豌豆等为主要原料, 经粉碎、拌料、压制成型后, 在开放环境中自然接种微生物并结合人工控温发酵而成的复合糖化发酵剂, 是集微生物菌系、酶系和复合曲香物质于一体的微生态制品^[1]。大曲菌群是其品质形成的核心, 通过调控酶系及风味物质组成, 决定大曲的感官、理化等特性, 并最终影响山西老陈醋质量。大曲菌群以细菌和真菌为主导, 两者功能各异, 其中真菌因生物量优势、代谢作用强、形态多样、感官可见, 对大曲的品质形成以及品质的鉴定有重要贡献^[2]。

霉菌作为真菌的核心功能类群, 通过分泌淀粉酶、蛋白酶等关键酶系, 驱动原料分解与风味前体生成, 直接影响大曲的发酵特性与品质形成^[3]。目前, 针对白酒大曲的研究已系统揭示了其霉菌群落结构与理化特性、风味物质之间的紧密关联。研究表明, 白酒大曲中曲霉属 (*Aspergillus*)、根霉属 (*Rhizopus*)、红曲霉属 (*Monascus*) 为核心功能菌属^[4]。不同来源的白酒大曲在糖化力、酯化力等关键酶活力及酯类、吡嗪类、有机酸等风味物质的组成上存在显著差异^[5]。进一步关联分析表明, 曲霉属、根霉属与酯化力、酸度及多种酯类、吡嗪类风味物质的合成呈显著正相关 ($P < 0.05$), 红曲霉属与柠檬酸和琥珀酸等有机酸类物质的合成呈显著正相关 ($P < 0.05$), 揭示了霉菌群落对白酒大曲品质的关键调控作用^[6]。然而, 与体系相对完善的白酒大曲研究相比, 针对山西老陈醋大曲中霉菌群落及理化、风味品质的系统性研究却鲜有报道。

本研究选取4家代表性山西老陈醋醋厂的大曲作为研究对象, 运用高通量测序解析霉菌群落多样性, 并

结合常规理化分析、高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC) 以及顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 等技术, 系统测定其理化指标、有机酸组成与挥发性风味物质。通过多维度数据的整合分析, 旨在阐明不同来源山西老陈醋大曲的品质差异, 揭示其霉菌群落与理化特性、风味品质之间的内在关联, 为优良霉菌菌种资源的定向筛选及制曲工艺的精准调控提供理论依据, 对推动传统食醋产业的现代化发展与品质升级具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

山西老陈醋大曲取自山西清徐县和榆次县4家具有代表性山西老陈醋醋厂, 所有样品均属于成品曲 (曲库贮藏3~6个月)。采样时首先根据高度将大曲堆均分成上、中、下3层, 随机取3个平行样本, 混匀, 样品编号记为A~D。

DNA提取试剂盒 北京索莱宝科技有限公司; 霉菌引物 (ITS1F和ITS1R) 北京六合华大基因科技有限公司; 3,5-二硝基水杨酸 (3,5-dinitrosalicylic acid, DNS) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 可溶性淀粉 (生化试剂) 生工生物工程 (上海) 股份有限公司; 干酪素 天津市光复精细化工研究所; L-酪氨酸 (纯度99%) 上海麦克林生化科技股份有限公司; 2-辛醇标准品 (纯度>98%) 西格玛奥德里奇 (上海) 贸易有限公司。其余试剂均为国产分析纯或生化试剂。

孟加拉红培养基、马铃薯葡萄糖琼脂 北京奥博星生物科技有限责任公司。

1.2 仪器与设备

LYNX 4000高速冷冻离心机、Trace 1300 GC仪、ISQ MS仪、NanoDrop 2000微量紫外-可见分光光度计美国Thermo Fisher Scientific公司；170-4406水平电泳系统、Universal Hood II凝胶成像系统、T100聚合酶链式反应（polymerase chain reaction, PCR）仪 美国伯乐公司；PB-21酸度计 申贝科学仪器（苏州）有限公司；1200 HPLC仪 美国Agilent公司。

1.3 方法

1.3.1 大曲霉菌群落结构的测定

参考文献[7]进行大曲微生物宏基因组DNA的提取，以其为模板，采用霉菌对应区域特异性引物ITS1F（5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3'）和ITS1R（5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'）进行PCR扩增。PCR扩增体系：上、下游引物各2 μ L，模板基因组DNA 2 μ L，2 $\times$ Mix 15 μ L，双蒸水（ddH₂O）补足至30 μ L。PCR扩增条件：94 $^{\circ}$ C预变性10 min；94 $^{\circ}$ C变性30 s，52 $^{\circ}$ C退火30 s，72 $^{\circ}$ C延伸1 min 45 s，共30个循环；72 $^{\circ}$ C再延伸10 min，4 $^{\circ}$ C保存。PCR扩增产物经1%琼脂糖凝胶电泳检测合格后送至北京百迈客生物科技有限公司进行文库构建及Illumina MiSeq高通量测序。

使用FLASH v1.2.7软件对测序数据进行拼接，使用Trimmomatic v0.33软件对拼接序列进行过滤，使用UCHIME v4.2软件去除嵌合体序列，获得有效序列。使用Usearch软件，将序列相似性达到97%以上的有效序列归为同一个操作分类单元（operational taxonomic unit, OTU）^[8]。选取每一个OTU的代表序列，在美国国立生物技术信息中心（National Center for Biotechnology Information, NCBI）的GenBank数据库中通过基本局部比对搜索工具（Basic Local Alignment Search Tool, BLAST）进行物种注释，统计各样品中霉菌在属水平的相对丰度^[8]。

1.3.2 大曲理化指标的测定

参照QB/T 4257—2011《酿酒大曲通用分析方法》^[9]测定液化力、糖化力、发酵力和酯化力及水分、总酸、淀粉、氨基酸态氮含量；参考文献[10]测定酸性蛋白酶活力；参考文献[11]中DNS比色法测定纤维素酶活力。

1.3.3 大曲风味物质的测定

有机酸含量的测定：用超纯水浸泡待测样品3 h，抽滤，12 000 r/min离心10 min，取上清液用0.22 μ m微孔滤膜过滤，采用HPLC法对有机酸含量进行测定^[12]。

挥发性风味成分的测定：采用HS-SPME-GC-MS技术测定挥发性风味成分^[13]。

1.3.4 大曲的感官评价

参照QB/T 4257—2011《酿酒大曲通用分析方法》^[9]制定大曲感官评价标准，由生产经验丰富的制曲工人和资深感官评定专家共7人组成感官质量评定组，对大曲进行感官评价，具体评价标准见表1。

表1 大曲的感官评价标准

Table 1 Sensory description and scoring criteria of Daqu		
项目	评价标准	评分
断面（30）	断面整齐，菌丝生长丰满，无水圈	25~30
	断面较整齐，菌丝生长较健壮，允许有轻微水圈	20~25
	断面基本整齐，菌丝生长一般，有少量水圈	<20
外观（30）	色泽黄褐色、棕褐色，穿衣均匀整齐，表面光滑，无裂口，无杂菌斑	25~30
	色泽多数棕褐色或黄褐色，穿衣均匀整齐，表面较光滑，有轻微裂口，无杂菌斑	20~25
	色泽灰白色较多，穿衣基本整齐，表面粗糙，有裂口，有少许杂菌斑	<20
香味（20）	曲香浓厚纯正，无异味	18~20
	曲香较浓郁，无异味	15~18
	具有曲香	<15
皮张（20）	1.5 mm	18~20
	1.5 mm~2.0 cm	15~18
	>2.0 cm	<15

1.4 数据处理与统计分析

所有样品均重复测定3次，使用SPSS 29.0.2.0软件对数据进行处理并进行单因素方差分析， $P<0.05$ 表示差异显著，结果以 $\bar{x}\pm s$ 表示。采用Excel 2023和Origin 2018绘图。

2 结果与分析

2.1 不同醋厂山西老陈醋大曲中霉菌群落结构分析

由图1可知，4种大曲中共注释到8个霉菌属，分别为曲霉属（*Aspergillus*）（38.60%）、根霉属（*Rhizopus*）（32.33%）、毛霉属（*Mucor*）（2.59%）、红曲霉属（*Monascus*）（8.41%）、链格孢霉属（*Alternaria*）（3.44%）、嗜热真菌属（*Thermomyces*）（2.44%）、耐干霉属（*Xeromyces*）（1.27%）和横梗霉属（*Lichtheimia*）（0.97%）。在4种大曲中，大曲A中曲霉属的相对丰度最高，为42.66%，曲霉属作为酿造过程中主要的供酶菌源，耐热性好，能产生糖化酶、蛋白酶、淀粉酶等活性较高的水解酶类^[14]；大曲C中根霉属的相对丰度最高，为35.44%，根霉属具有重要的工业应用，如米根霉（*Rhizopus oryzae*）代谢产生的淀粉酶可用于制曲与酿酒，华根霉（*Rhizopus chinensis*）和少根根霉（*Rhizopus arrhizus*）等可代谢产生乳酸，匏枝根霉（*Rhizopus stolonifolia*）还能转化甾族化合物，也可应用于甾体激素、延胡索酸和酶制剂的生产^[15]。此外，红曲霉属作为山西老陈醋大曲特色菌属，在A大曲中相对丰度最高，为9.49%，主要产红曲红素、酯化酶^[16]。

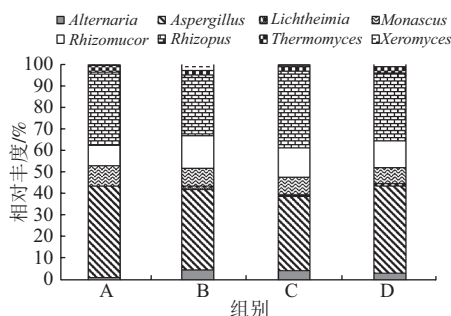


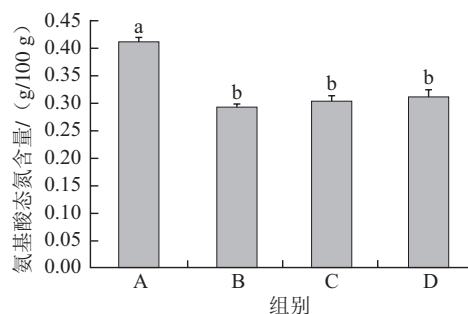
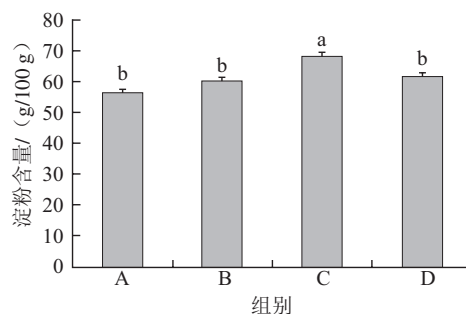
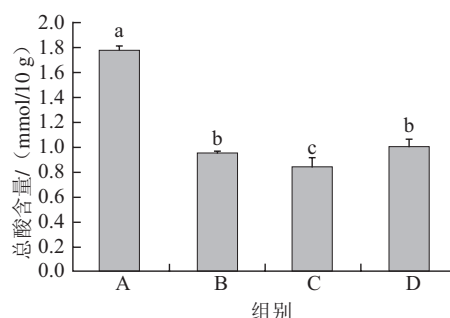
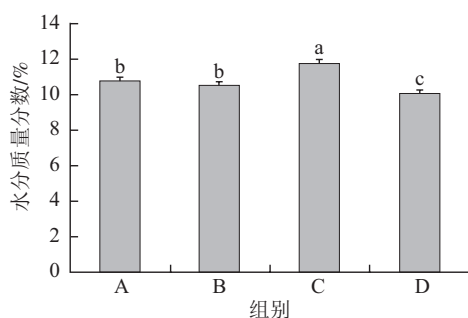
图1 不同醋厂山西老陈醋大曲中霉菌群落结构分析结果

Fig. 1 Analysis results of mould community structure of Shanxi aged vinegar Daqu from different vinegar factories

2.2 不同醋厂山西老陈醋大曲基础理化指标分析

水分、总酸、氨基酸态氮和淀粉是衡量大曲质量的关键参数^[17]。大曲的水分含量对微生物的繁殖具有明显影响，较低的水分含量会抑制微生物的生长代谢，使大曲更易贮藏；而过高的含水量则易引发二次霉变，大曲的水分质量分数不应超过13.0%^[15]。总酸含量反映了微生物代谢产酸以及脂肪、淀粉和蛋白质降解生成的酸类物质的总和^[17]。氨基酸态氮由微生物繁殖初期代谢的蛋白酶水解蛋白质生成，其含量不仅影响酯类物质的积累，还能为微生物的生长代谢提供氮源，进而产生大曲的曲香，影响大曲的整体品质^[4]。淀粉含量则体现了制曲过程中酶对淀粉的消耗程度，微生物通过代谢将原料中的淀粉分解成葡萄糖等小分子物质^[18]。

由图2可知，4种大曲的水分质量分数均小于13.0%，均符合成品曲的生产要求，其中大曲D的水分质量分数最低（10.03%）（ $P<0.05$ ）。大曲A的水分质量分数适中（10.76%），总酸（1.77 mmol/10 g）和氨基酸态氮（0.41 g/100 g）含量显著高于其他3种大曲（ $P<0.05$ ），而淀粉含量（56.44 g/100 g）显著低于其他3种大曲（ $P<0.05$ ），淀粉含量可以体现制曲过程中糖化酶对淀粉的酶解程度，侧面反映出大曲A中糖化酶活力较优^[19]。综上所述，大曲A在总酸、氨基酸态氮含量及淀粉降解效率上表现更为优异。



小写字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。图3同。

图2 不同醋厂山西老陈醋大曲基础理化指标测定结果

Fig. 2 Determination results of basic physicochemical indicators of Shanxi aged vinegar Daqu from different vinegar factories

2.3 不同醋厂山西老陈醋大曲酶活力分析

大曲的各类酶活力能在一定程度上反映大曲的品质^[4]。淀粉酶系（液化力、糖化力）决定淀粉的转化效率，能将淀粉转化为葡萄糖^[20]，纤维素酶是由内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和 β -葡萄糖苷酶三类功能互补的酶组分构成，可将纤维素分解为纤维二糖和葡萄糖等可利用糖类^[21]。蛋白酶将原料谷物中的粗蛋白水解成多肽和氨基酸等，为微生物的生长繁殖给予能量和营养；酯化力是指大曲微生物代谢的酯化酶催化醇合成酯类物质的能力；发酵力是通过发酵过程中二氧化碳产生量反映基质产酒能力^[22]。4种不同醋厂山西老陈醋大曲各类酶活力的测定结果见图3。

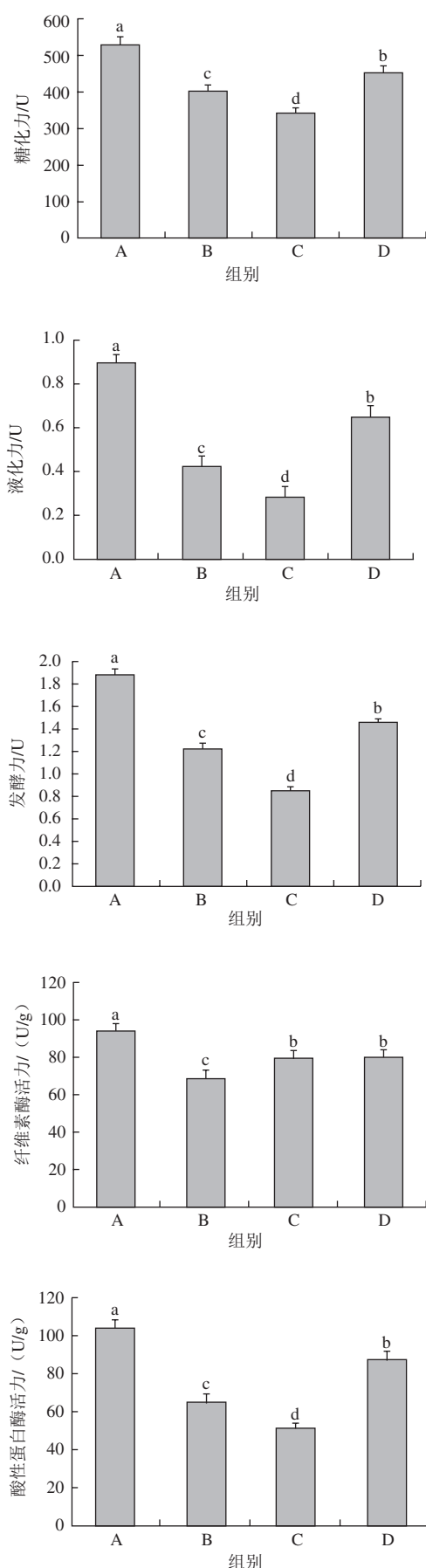


图3 不同醋厂山西老陈醋大曲各类酶活力测定结果

Fig. 3 Determination results of various enzyme activities of Shanxi aged vinegar Daqu from different vinegar factories

由图3可知, 4种大曲的各类酶活力存在一定差异, 其中大曲A的糖化力 (530 U)、液化力 (0.89 U)、纤维素酶活力 (93.95 U/g)、酸性蛋白酶活力 (104.31 U/g) 及发酵力 (1.89 U) 均显著高于其他3种大曲 ($P < 0.05$)。此外, 大曲A的酯化力 (886 U) 最高, 但与大曲B酯化力无显著差异 (868 U) ($P > 0.05$)。大曲的酶活源于曲霉属、横梗霉属、根霉属、毛霉属等优势菌群的协同作用, 这些菌属通过高效分泌糖化酶、蛋白酶及纤维素酶, 协同驱动淀粉降解、蛋白质水解与代谢物积累, 同时高糖化酶活性促进葡萄糖积累, 为发酵与酯化反应提供充足底物, 形成“酶-代谢-产物”协同强化的完整机制^[23]。具体而言, 横梗霉属、曲霉属和根霉属与液化力、糖化力、酯化力及酸性蛋白酶活力、发酵力均呈显著正相关, 其分泌的淀粉酶、酯合成酶系是核心驱动^[22,24]。与本研究曲霉属、根霉属和横梗霉属作为大曲酶活调控的核心功能菌群结果相一致。

2.4 不同醋厂山西老陈醋大曲风味物质分析

2.4.1 有机酸成分分析

大曲中的有机酸在食醋生产过程中直接或间接进入醋体, 对食醋的品质产生较大影响。作为山西老陈醋风味的核心构成及酯类物质合成的关键前体, 有机酸中非挥发性酸可中和乙酸的刺激性, 使酸味更趋柔和, 不同有机酸的生成与积累, 本质上依赖于大曲中特定微生物的代谢活动, 各类微生物通过独特的代谢通路调控对应有机酸的合成^[2]。从4种山西老陈醋大曲中均检测到8种有机酸, 由图4可知, 4种大曲中的有机酸含量存在差异, 大曲A的有机酸总量最高, 为3.79 g/100 g, 其中乙酸、草酸含量尤为突出, 分别为1.80、0.87 g/100 g。大曲B中乳酸和苹果酸的含量明显高于其他大曲, 分别达到0.53 g/100 g和0.64 g/100 g。大曲D中琥珀酸 (0.17 g/100 g) 和柠檬酸 (0.68 g/100 g) 含量明显高于其他大曲。大曲C的有机酸含量明显低于其他大曲。多项研究表明, 大曲中有机酸与霉菌代谢活动密切相关。黑曲霉可产乙酸、草酸及三羧酸循环的中间体柠檬酸^[25]; 米曲霉能合成苹果酸; 根

霉菌兼具糖化与产酸功能,可通过糖代谢产生乳酸、琥珀酸等,并与乳酸呈正相关^[26];红曲霉通过代谢直接产乳酸、琥珀酸等,其创造的酸性环境还能促进乳酸菌增殖,抑制酵母菌生长,进而强化同型乳酸发酵,提升乳酸积累量^[6]。

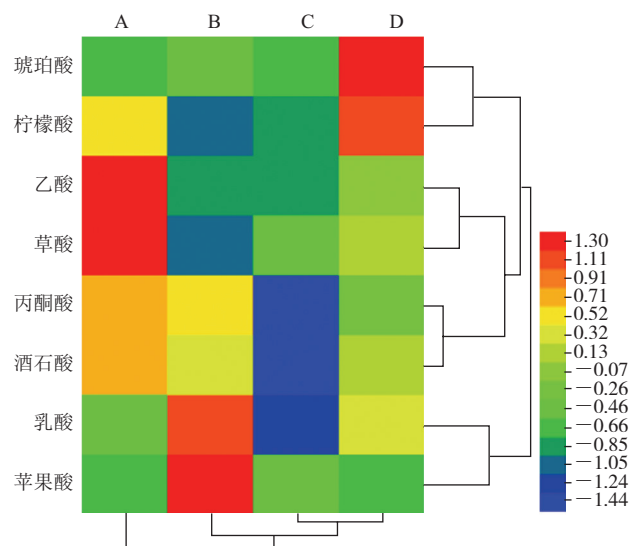


图4 不同醋厂山西老陈醋大曲有机酸含量热图

Fig. 4 Heatmap of organic acid content in Shanxi aged vinegar Daqu from different vinegar factories

2.4.2 挥发性风味成分分析

大曲中的微生物通过生长繁殖,可产生多种代谢产物,例如乙酸乙酯、甲醇、正丁醇、乙醛、异丁醛等,这些代谢物质既是形成香味的前体,也是山西老陈醋风味的主要组成成分^[27]。通过HS-SPME-GC-MS对4种大曲的挥发性风味成分进行检测。由图5可知,在4种大曲中共检出59种挥发性风味化合物,其中酯类24种、醇类13种、醛类2种、酸类2种、酮类5种、吡嗪类1种、其他类物质12种。大曲A中检出47种挥发性风味物质,大曲B中检出40种挥发性风味物质,大曲C中检出36种挥发性风味物质,大曲D中检出29种挥发性风味物质,其中大曲A中酯类、醇类和吡嗪类物质的总量均明显高于其他大曲。

酯类物质是挥发性化合物中具有芳香性气味的一类物质,是山西老陈醋风味物质的重要组成部分。相较于其他3种大曲,大曲A的酯类物质含量最高,为2.07 mg/100 g,占比为32.73%。主要包括乙酸乙酯(0.82 mg/100 g)、乙酸甲酯(0.66 mg/100 g)、甲酸乙酯(0.19 mg/100 g)及乙酸丁酯(0.14 mg/100 g)。乙酸乙酯是山西老陈醋的主体风味物质之一,能赋予食醋威士忌、朗姆酒、香蕉香气等愉快香气,主要来源于酵母菌产醇的副产物、乙酸酯化生成及其他微生物的代谢产物^[28],乙酸甲酯、甲酸乙酯和乙酸丁酯均具有微弱的芳香气味和果香气^[27-28]。有研究证实,曲霉属和嗜热霉菌与酯类物质含量呈显著正相关($P < 0.05$),特别是在高温

发酵阶段,这类霉菌能分泌热稳定性酯合成酶,促进酯类物质积累^[29]。

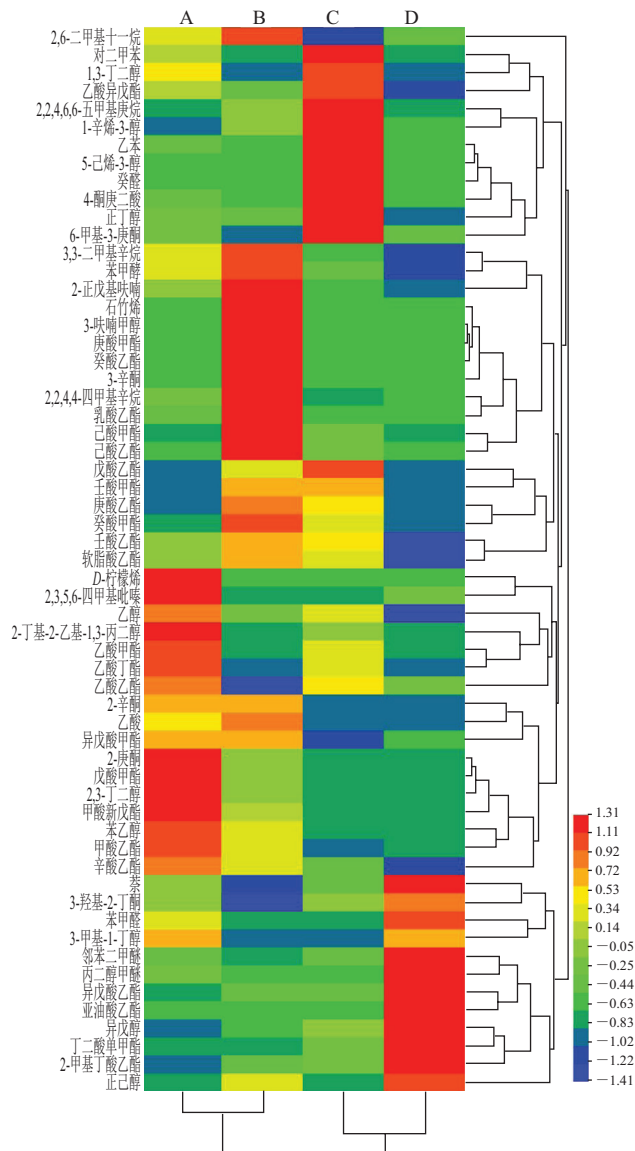


图5 不同醋厂山西老陈醋大曲挥发性风味成分含量热图

Fig. 5 Heatmap of volatile flavor compound contents in Shanxi aged vinegar Daqu from different vinegar factories

醇类物质不仅能在酯酶的作用下与酸类物质发生化合反应生成乙酸乙酯等酯类物质,还能氧化生成乙酸,也是形成香气的前体物质^[28]。4种大曲中共检测出13种醇类物质,其含量在0~1.66 mg/100 g之间。大曲A中醇类物质总含量高于其他3种大曲,为3.58 mg/100 g,主要包括2,3-丁二醇(1.66 mg/100 g)和乙醇(1.56 mg/100 g)。2,3-丁二醇、苯乙醇和乙醇分别赋予食醋甜香味、柔和清甜的玫瑰香以及乙醇味,这些风味物质共同构成了山西老陈醋的独特风味,有效中和了食醋的尖刺涩味,使其香甜绵软^[28]。研究表明,醇类物质的生成与霉菌菌群的糖化发酵功能直接相关,曲霉属和根霉属作为大曲中的优势霉

菌,具有较强的糖化力和发酵力,通过分泌液化型、糖化型淀粉酶降解淀粉,为醇类合成提供葡萄糖等底物^[30]。

4种大曲中检测到的酸类、醛酮类物质较少,其中大曲C的醛类物质总含量最高,为0.02 mg/100 g。大曲B的酸类、酮类物质总含量最高,分别为0.11、0.11 mg/100 g。曲霉属、根霉属等霉菌可产生多种酸类物质^[14],嗜热霉菌在发酵过程中可通过底物转化产生少量酮类化合物^[18],醛类物质主要来源于微生物对氨基酸的分解代谢^[20],曲霉属、根霉属等霉菌分泌的蛋白酶能将原料中的蛋白质降解为氨基酸,为醛类合成提供前体。

4种大曲中只检测到1种吡嗪类物质,为四甲基吡嗪,大曲A中四甲基吡嗪含量最高,为0.20 mg/100 g。四甲基吡嗪(川芎嗪)是大曲和陈醋的关键风味物质,主要通过美拉德反应和微生物合成两条途径生成^[31]。川芎嗪为大曲带来浓郁的坚果香和烘烤香气,赋予老陈醋醇厚的焦糖香和微妙的酱香^[32]。研究表明,吡嗪类物质的含量与嗜热霉菌丰度呈正相关,该菌属可通过促进美拉德反应和焦糖化反应,为吡嗪类物质的合成提供重要支撑,而曲霉属和根霉属同样具有合成这类风味物质的潜力,这一结果进一步印证了不同霉菌属在大曲吡嗪类风味形成中的协同作用^[2,33]。

2.5 不同醋厂山西老陈醋大曲的感官评价

为了全面评估山西老陈醋大曲的品质,邀请了生产经验丰富的制曲工人和资深感官评定专家对4种大曲进行感官评价。由图6可知,4种大曲中,大曲A的综合得分最高,为91,其次为大曲D,其综合得分为79。在外观方面,大曲A色泽为黄褐色、穿衣均匀整齐;在断面方面,4种大曲断面整齐,均有轻微水圈,并无明显差异;在香气方面,大曲A曲香浓厚、纯正且无杂味,大曲B曲香淡薄;在皮张方面,大曲A发酵完毕后,曲块表面基本不再发酵产生菌丝,皮张为1.5 mm,而大曲D皮张为1~2 cm。

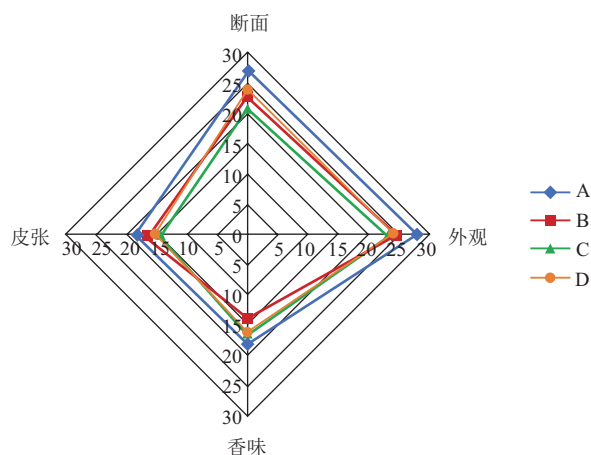


图6 不同醋厂山西老陈醋大曲的感官评分雷达图

Fig. 6 Radar chart of sensory score of Shanxi aged vinegar Daqu from different vinegar factories

3 结论

本研究以山西4个醋厂的老陈醋大曲为研究对象,系统解析了大曲霉菌群落结构、理化特性、有机酸代谢、挥发性风味物质及感官品质。结果表明,4种大曲霉菌群落、理化指标、有机酸含量、挥发性香气成分及感官品质均存在明显差异。大曲A的总酸、氨基酸态氮、酶活力均高于其他3种大曲,同时其有机酸总量最高,并且大曲A检测出的酯类、醇类和吡嗪类物质不仅种类较丰富,含量也明显高于其他大曲,此外,大曲A的感官品质亦表现最优,综合得分最高。然而,本研究仅聚焦于霉菌群落的研究,缺乏其他菌群研究、工艺关联及功能验证,后续需结合制曲工艺实地调研与微生物菌群精准解析,分离筛选高效功能菌株,通过菌株强化应用与工艺优化,系统提升大曲品质稳定性与生产效能,为山西老陈醋的品质改良与标准化生产提供科学依据。

参考文献:

- [1] 符长彪. 基于风味组学和微生物组学技术的大曲品质的关键影响因素分析[D]. 成都: 四川轻化工大学, 2022.
- [2] 曹丹, 吕嘉彬, 刘翠, 等. 白酒酿造用大曲中真菌研究现状及进展[J]. 食品科学, 2025, 46(19): 299-309.
- [3] LIU W H, CHAI L J, WANG H M, et al. Bacteria and filamentous fungi running a relay race in Daqu fermentation enable macromolecular degradation and flavor substance formation[J]. Int J Food Microbiol, 2023: 390: 110118.
- [4] 唐佳代, 石雨菲, 赵益梅, 等. 不同感官特性酱香型大曲理化指标与霉菌群落关联分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 153-161.
- [5] LI W W, HAN M Y, ZHANG H, et al. Exploring the differences in sauce-flavour Daqu from different regions and its contribution to Baijiu brewing based on microbial communities and flavours[J]. Int J Food Sci Technol, 2024, 59(10): 7357-7371.
- [6] 李申奥. 兼香型白酒高温大曲微生物群落演替规律的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [7] 朱丹, 孙晓琪, 张慧如, 等. 山西老陈醋发酵过程中真菌菌群结构及多样性[J]. 中国酿造, 2023, 42(6): 103-108.
- [8] 杨玲, 刘春, 彭佳伟, 等. 山西老陈醋和怀仁醋酒精发酵阶段细菌菌群多样性分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(2): 63-69.
- [9] 工业和信息化部. 酿酒大曲通用分析方法: QB/T 4257—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [10] 炊伟强. 大曲传统感官评价与其内在质量、理化指标的关系[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [11] 尉嘉怡, 常强, 蒋超, 等. 大曲理化性质与白酒产品风味的相关性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 244-251.
- [12] YAN Z, ZHENG X W, CHEN J Y, et al. Effect of different *Bacillus* strains on the profile of organic acids in a liquid culture of Daqu[J]. J I Brewing, 2013, 119(1/2): 78-83.
- [13] 许女, 张天震, 樊玮鑫, 等. 山西老陈醋酿造过程中香气成分的动态变化[J]. 中国食品学报, 2018, 18(11): 204-216.
- [14] 周森, 胡佳音, 崔洋, 等. 应用高通量测序技术解析清香型大曲微生物多样性[J]. 中国食品学报, 2019, 19(6): 244-250.
- [15] 郭锦宁, 刘幼强, 何松贵, 等. 米根霉麸曲提高豉香型白酒中乳酸乙酯的含量[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 84-90.

- [16] 孙羊羊, 尹亚格, 吴雨蕊, 等. 基于高通量测序技术分析天津高温大曲微生物菌群多样性[J]. 中国酿造, 2023, 42(5): 28-34.
- [17] 王鑫, 王俊麟, 彭东, 等. 不同颜色高温大曲真菌多样性及其与理化品质关联性研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-11[2025-12-23]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042668>.
- [18] 徐锦, 冯文聪, 朱澳迪, 等. 不同香型大曲微生态结构及其发酵特性相关性分析[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 104-114.
- [19] ZHU Q, CHEN L Q, PENG Z, et al. The differences in carbohydrate utilization ability between six rounds of sauce-flavor Daqu[J]. Food Res Int, 2023, 163: 112184.
- [20] 蒋力力, 田露琴, 尚煜豪, 等. 不同种类高温大曲功能特性与成分差异比较[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 362-370.
- [21] 李旭晖, 吴生文, 张志刚. 纤维素酶对大曲酒风味物质影响的探讨[J]. 中国酿造, 2011, 30(6): 80-83.
- [22] 栾春光, 郝建国, 江伟, 等. 不同工艺清香型大曲理化指标差异与微生物菌群结构的相关性研究[J]. 酿酒, 2021, 48(2): 43-48.
- [23] 罗江陶, 赵驰, 汤奥星, 等. 小麦品种对浓香型大曲品质、微生物群落及代谢产物的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 133-141.
- [24] XIAO C, LU Z M, ZHANG X J, et al. Bio-heat is a key environmental driver shaping the microbial community of medium-temperature Daqu[J]. Appl Environ Microbiol, 2017, 83(23): 1550.
- [25] 乔晓梅. 清香大曲糖化力酯化力功能及真菌群落结构分析[D]. 临汾: 山西师范大学, 2015.
- [26] 程伟, 陈雪峰, 陈兴杰, 等. 基于高通量测序解析浓香型大曲真菌群落结构及其与质量指标的关联性分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 194-200.
- [27] 康新羽, 郭莹, 秦立芹, 等. 不同地区酱香型高温大曲制曲过程理化指标及挥发性风味化合物分析[J]. 中国酿造, 2025, 44(6): 116-122.
- [28] 侯小歌, 樊俊鹏, 郭福利, 等. 小麦品种对浓香大曲细菌群落与挥发性风味化合物的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 133-146.
- [29] LI Z G, XU Y, ZOU S B, et al. Analysis of fungal diversity, physicochemical properties and volatile organic compounds of strong-flavor Daqu from seven different areas[J]. Foods, 2024, 13(8): 1263.
- [30] 崔梦君, 任宪礼, 王玉荣, 等. 不同地区高温大曲真菌群落结构与感官品质的差异性和相关性分析[J/OL]. 食品工业科技, 1-14[2025-12-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020150>.
- [31] 张翔宇. 枯草芽孢杆菌D17生成川芎嗪机制解析[D]. 太原: 山西大学, 2024.
- [32] 刘雄. 中、高温大曲固态发酵过程微生物菌群结构变化的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [33] DENG L, MAO X, LIU D, et al. Comparative analysis of physicochemical properties and microbial composition in high temperature Daqu with different colors[j]. Front Microbiol, 2020, 11: 588117.