

郫县豆瓣“翻、晒、露”期间微生物群落及挥发性风味物质的变化

王鹏跃^{1*}, 蒋四强², 邓维琴², 徐垒³, 李雄波², 刘润叶¹, 罗岚¹, 陈海风³

(1. 成都农业科技职业学院休闲旅游学院, 四川成都 611130) (2. 四川省食品发酵工业研究设计院有限公司, 四川成都 611130) (3. 四川省鹃城郫县豆瓣股份有限公司, 四川成都 611730)

摘要: 该研究采用气相色谱质谱串联仪 (GC-MS)、高通量测序 (HTS) 技术分析郫县豆瓣工业发酵“翻、晒、露”期间挥发性风味物质 (VFS) 的变化与微生物群落的演替, 并分析关键 VFS 与优势菌群的相关性。结果表明, “翻、晒、露”期间的 VFS 呈动态变化, 尤其是体现特色风味的酯类、醇类物质在这一过程富集, VFS 总含量呈先增加后降低的趋势。*Bacillus*、*Staphylococcus*、*Levilactobacillus*、*Tetragenococcus*、*Oceanobacillus*、*Enterobacter*、*Weissella*、*Aspergillus* 及多种酵母类菌属为“翻、晒、露”期间的优势微生物。Pearson 相关性分析表明, 上述优势菌群与 35 种关键香气成分 (OAV>1) 具有相关性。其中, *Bacillus* 与 3- 甲硫基丙醛极显著正相关 ($P<0.001$); 愈创木酚与 *Zygosaccharomyces* 极显著正相关 ($P<0.001$)、与 *Wickerhamiella* 显著正相关 ($P<0.01$); *Starmerella* 与十四酸乙酯显著正相关 ($P<0.01$); *Weissella*、*Kazachstania*、*Vishniacozyma*、*Fusarium* 及 *Alternaria* 与异戊腈均显著正相关 ($P<0.01$)。“翻、晒、露”过程有益于郫县豆瓣 VFS 的积累和风味的改善, 发酵郫县豆瓣的优势菌群与部分关键 VFS 存在显著的正相关性, 可通过调控期间的微生物群落影响产品风味。研究结果有助于阐明郫县豆瓣特色风味形成的机理及对工业“翻、晒、露”工艺的理解。

关键词: 郫县豆瓣; 翻、晒、露; 挥发性成分; 微生物群落

文章编号: 1673-9078(2025)05-290-301

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0344

Changes in Microbial Community and Volatile Flavor Substances during the “Turning, Drying and Dewing” Process of Pixian Broad-bean Paste

WANG Pengyue^{1*}, JIANG Siqiang², DENG Weiqin², XU Lei³,

LI Xiongbo², LIU Runye¹, LUO Lan¹, CHEN Haifeng³

(1. School of Leisure Tourism, Chengdu Agricultural College, Chengdu 611130, China)

(2. Sichuan Food Fermentation Industry Research and Design Institute Co. Ltd., Chengdu 611130, China)

(3. Sichuan Juancheng Pixiandouban Co. Ltd., Chengdu 611730, China)

引文格式:

王鹏跃, 蒋四强, 邓维琴, 等. 郫县豆瓣“翻、晒、露”期间微生物群落及挥发性风味物质的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(5): 290-301.

WANG Pengyue, JIANG Siqiang, DENG Weiqin, et al. Changes in microbial community and volatile flavor substances during the “turning, drying and dewing” process of Pixian broad-bean paste [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 290-301.

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 成都农业科技职业学院资助项目 (23ZR203); 2022 年中央引导地方科技发展项目; 四川省科技厅川渝合作重点研发项目 (2022YFQ0029)

作者简介: 王鹏跃 (1990-), 男, 硕士, 讲师、工程师, 研究方向: 传统发酵食品, E-mail: pengyuew9696@163.com

Abstract: In this study, the changes of volatile flavor substances (VFS) and succession of microbial community in the “turning, drying and dewing” process during industrially fermentation of Pixian broad-bean paste (PXDB) were investigated by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and high-throughput sequencing (HTS), and the correlation between the key VFS and the dominant microbial community was also analyzed. The results showed that the VFS underwent dynamic changes, especially the esters and alcohols imparting characteristic flavor were enriched and the total VFS content increased gradually then decreased, during the “turning, drying and dewing” process. *Bacillus*, *Staphylococcus*, *Levilactobacillus*, *Tetragenococcus*, *Oceanobacillus*, *Enterobacter*, *Weissella*, *Aspergillus* and multiple yeast genera were the dominant microorganisms during the “turning, drying and dewing” period. Pearson correlation analysis showed that the above dominant floras previously mentioned were correlated with 35 key aroma components (OAV>1). Among them, *Bacillus* was significantly and positively correlated with 3-methylthiopropionaldehyde ($P<0.001$). 2-Methoxyphenol was extremely significantly and positively correlated with *Zygosaccharomyces* ($P<0.001$) and significantly and positively correlated with *Wickerhamiella* ($P<0.01$). *Starmerella* was significantly and positively correlated with ethyl myristate ($P<0.01$). *Weissella*, *Kazachstania*, *Vishniacozyma*, *Fusarium* and *Alternaria* were significantly and positively correlated with 3-methylbutanenitrile ($P<0.01$). The “turning, drying and dewing” process was beneficial to the accumulation of the main VFS and the improvement of PXDB’s flavor. A significant and positive correlation was detected between the dominant floras and some key VFS in the fermented PXDB, indicating that product flavor could be affected by regulating the microbial community during a specific period. The results of this study are helpful to clarify the mechanism underlying the formation of the characteristic flavor of PXDB and the understanding of the “turning, drying and dewing” process of industrially fermented PXDB.

Key words: Pixian broad-bean paste; turning, drying and dewing process; volatile flavor substances; microbial community

郫县豆瓣是以红辣椒、蚕豆为主要原料，食盐、小麦粉等为辅料所制成的一种传统发酵食品，因产于四川成都郫县而得名，有着“川菜之魂”的美誉^[1]，其产品和制作工艺先后分别被评为地理标志产品（2006）和国家非遗（2008）^[2]。郫县豆瓣的生产主要包括辣椒醃制作、甜瓣子制作及混合后酵生香三个阶段^[3]，经多种微生物和化学底物的共同作用形成了酱香浓郁、瓣粒酥脆、回味醇厚的产品特性^[4]。其中，后酵对郫县豆瓣风味物质的形成十分重要，是郫县豆瓣挥发性成分生成的主要阶段^[5-7]，“翻、晒、露”是这一阶段的核心环节。

郫县豆瓣是光阴的艺术^[8]，传统晒场的发酵方式——“晴天晒，雨天盖，白天翻，夜晚露”历经周而复始、昼夜转换，极有利于多种有益微生物的生长繁殖，有助于物料充分而完全地复式发酵，经如此“翻、晒、露”8个月酿成郫县豆瓣独特的风味^[3,9,10]。随着社会对食品安全的更高要求及生产效率提高的需求，传统发酵方式逐渐转变为大规模的工业化生产。工业发酵手段的应用大大缩短了生产时间和成本，工业发酵豆瓣酱只需6个月的生产周期即可销售^[11]，或“翻、晒、露”1~3个月即成为商用豆瓣酱。现有关于郫县豆瓣风味的研究多集中在前发酵阶段^[12,13]，样品来源多为实验室^[14,15]或传

统工艺^[5,6]制作。关于传统发酵与工业发酵两种生产方式形成的豆瓣酱香气特征及品质孰优孰劣尚未形成统一认识，且鲜有针对工业化生产郫县豆瓣后发酵阶段“翻、晒、露”环节的报道^[12,16]。

挥发性物质对食品的风味产生决定性作用，显著影响消费者的消费行为^[2,17]。郫县豆瓣的挥发性成分、产品质量与稳定性和豆瓣酱中的微生物密切相关^[4,6]。高通量测序（High-throughput Sequencing, HTS）技术为解析微生物群落演替提供一种便捷高效的方法，已被广泛用于微生物及其与风味物质的关系研究^[4,18,19]。本研究通过气相色谱质谱联用仪（Gas Chromatography Mass Spectrometry, GC-MS）分析郫县豆瓣翻晒露期间的挥发性成分，借助HTS技术鉴定微生物群落的演替，并分析了两者之间的相关性，以助于阐明郫县豆瓣特色风味形成的机理及对工业“翻、晒、露”工艺的理解。

1 材料与方法

1.1 样品来源

红辣椒挑选、清洗、轧碎后，混入16%~18%的食盐（ m/m ），自然发酵6个月得辣椒醃；蚕豆瓣浸润后沸水烫漂2 min，加入面粉、曲精搅拌均匀，

置于 37 °C 下发酵 48 h 制得豆瓣曲，豆瓣曲加入 15% 的食盐 (m/m) 和 20% 的水 (m/m) 于 30~32 °C 发酵 4 个月得甜瓣子。辣椒酞与甜瓣子以 3:1 混合，在带阳光棚的车间条池常温发酵，期间每隔 8 至 12 h 翻拌 1 次，日晒夜露，由此“翻、晒、露”3 个月即得成熟豆瓣酱。

取“翻、晒、露”第 0 天、7 天、15 天、1 个月、2 个月、3 个月、8 个月的豆瓣酱样品（编号分别为 F0、F7、F15、F30、F60、F90、F240，取自四川省某郫县豆瓣公司），置于 -20 °C 保存备用。

1.2 试剂与仪器

氯化钠（分析纯），成都市科隆化学品有限公司；4-甲基-2-戊醇（色谱纯），阿法埃莎（中国）化学有限公司。

GCMS-TQ8040 三重四级杆气相色谱质谱联用仪，日本岛津仪器公司；Agilent J&W DB WAX 高分离度气相色谱柱（30 m×0.320 mm×0.25 μm），美国安捷伦公司；GERSTEL 多功能自动进样器（配有 MPS 三合一软件），德国哲思泰公司；固相微萃取手柄（带有 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微取纤维），美国 Supelco 公司；ESJ200-4A 型分析天平，沈阳龙腾电子有限公司；KQ-500DE 型超声波清洗机，昆山市超市仪器有限公司；Milli-Q 超纯水器，美国 Millipore 公司；DZKW-4 型恒温水浴锅，北京中兴伟业仪器有限公司。

1.3 挥发性成分测定方法

参照邓维琴等^[20]报道的方法，略作改动。称取样品 2.0 g，添加 2 mL 饱和氯化钠溶液，加入 10 μL 0.5 μg/mL 4-甲基-2-戊醇溶液作为内标，使用固相微萃取装置吸附样品中的挥发性物质，采用气质联用仪进行检测。

检测条件：DB-WAX 毛细管柱（60 m×0.25 mm，0.25 μm）；载气为氦气，流量 1 mL/min；进样口温度 250 °C；不分流进样；升温程序：起始温度 50 °C，以 10 °C/min 升至 85 °C（保留 1.5 min），再以 5 °C/min 升至 100 °C（保留 1 min），以 2.5 °C/min 升至 175 °C（保持 1.5 min），最后以 10 °C/min 升至 250 °C/min。质谱条件：EI 电离源，电子轰击能量 70 eV；离子源温度 230 °C；接口 250 °C；质量扫描范围 35~350 u；检测器电压 0.1 kV；调谐文件 stuneu；扫描模式 scan。

定性和定量分析：由 GC-MS 得到的色谱图，经计算机在标准谱库 NIST11 中比对检索，选取相似度 (SI)>80（最大值为 100）的物质进行定性分析，并准确地鉴定出各挥发性成分，同时采用 4-甲基-2-戊醇（0.5 μg/mL）为内标进行半定量分析，得到各组分的质量浓度，计算公式按式（1）进行。

相对含量计算公式：

$$B = \frac{A_1 \times C \times V}{A_2 \times m} \quad (1)$$

式中：

B ——相对含量 (RC)，μg/g；

A_1 ——目标物质的峰面积；

C ——内标质量浓度，μg/mL；

V ——内标添加的体积，μL；

A_2 ——内标峰面积；

m ——称取样品的质量，g。

1.4 总 DNA 提取与高通量测序

豆瓣酱样品总 DNA 提取、聚合酶链式反应扩增及基于 Illumina NovaSeq 平台的测序均由上海缩滕生物科技有限公司完成。采用 338 F/806 R 为引物扩增细菌 16S rRNA V3-V4 区序列，采用 ITS1 F/ITS2 R 为引物扩增真菌 ITS 1 区序列。原始序列数据使用 demux 插件进行解码处理，cutadapt 插件进行引物切除，然后使用 DADA2 插件对序列进行质量过滤、去噪、拼接和嵌合体去除等数据处理。对上述获得的序列按 100% 的序列相似度进行归并，生成特征性序列 (Amplicon Sequence Variants, ASVs)，最后采用 QIIME2 的 classify-sklearn 算法对 100% 相似水平的 ASVs 特征序列进行分类学分析，并在各水平统计每个样品的群落组成。16S 细菌使用 Silva 数据库，ITS 真菌使用 Unite 的真菌数据库进行比对。

1.5 挥发性成分香气活力值 (Odor Activity Value, OAV) 的计算

OVA 的计算参照彭凯雄等^[21]的方法，计算公式见式（2）。

$$D_i = \frac{M_i}{C_i} \quad (2)$$

式中：

D_i ——物质 i 的香气活性值 (OAV_i)；

M_i ——化合物 i 的含量，μg/g；

C_i ——组分 i 的水中嗅觉阈值浓度，mg/kg。

1.6 数据处理

采用 WPS、Origin 2021 进行分析与绘制图表。采用派森诺基因云平台对高通量测序数据进行处理，以 Pearson 相关分析法对微生物群落与挥发性风味成分进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 “翻、晒、露”过程中郫县豆瓣挥发性成分含量及种类数的变化

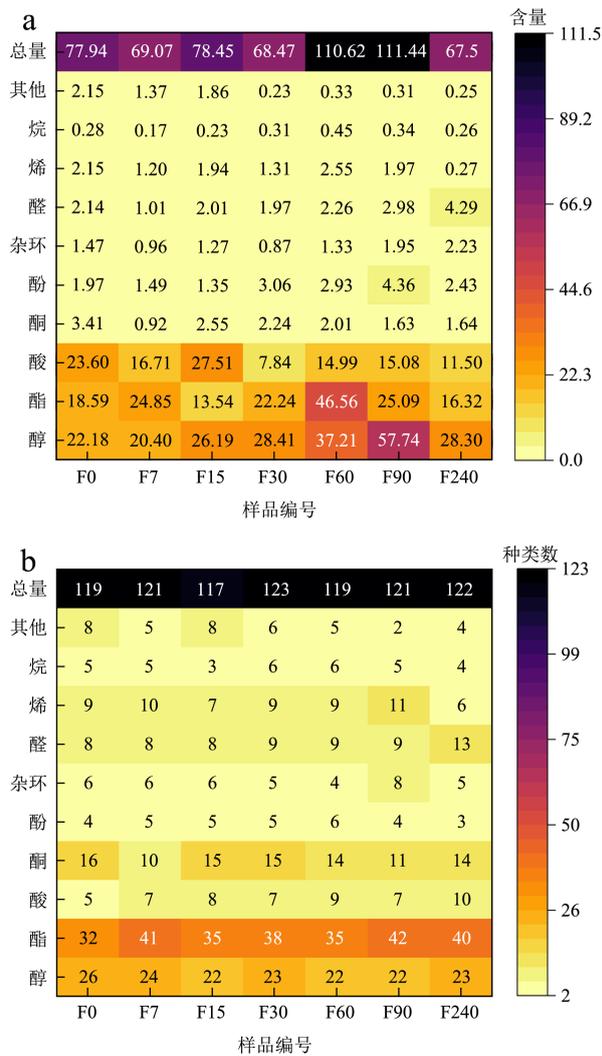


图1 各类挥发性成分相对含量(μg/g) (a) 及种类数 (b)
 Fig.1 Relative content (μg/g) (a) and number (b) of volatile compounds of varied chemical classes in PXDB detected though GC-MS

由 GC-MS 共检测到“翻、晒、露”过程中的挥发性成分 188 种，包括醇、酯、酸、酮、酚、醛、杂环、烯烃、烷烃及其他 10 类物质。挥发性成分含量及种类数的变化情况如图 1 所示。由图 1a 可知，

挥发性成分的总含量整体呈先增加后降低的趋势，与现有研究^[4,22]结果一致。郫县豆瓣的后熟周期并非越长越好，发酵时间过长，有效成分将会从高峰降至低谷，可能表现为整体品质变劣^[3]。

由图 1a 可知，各样本中，醇、酯、酸类挥发性物质为前三大成分，醇类挥发性成分主要是由酵母菌等微生物产生，是郫县豆瓣中重要的呈香物质，可赋予产品果香和油脂香气^[14]。“翻、晒、露”过程中，酸类相对含量整体呈下降趋势，其可与醇发生酯化反应产生酯类^[22,23]，发酵后期的优势酵母菌群可产生大量醇类物质^[14]，使得醇和酯类相应增加。由此，可以减少酸类物质积累过量产生的令人不愉快的酸性气味^[15]。作为种类最丰富的酯类挥发性成分(图 1b)，主要赋予郫县豆瓣特殊的酯香，还能够掩盖游离脂肪酸带来的不愉快的气味^[24]。

由图 1b 可知，翻晒露期间可检测到的挥发性成分种类数总数较为稳定，分布在 117~123 种，但有大量成分在发生演替。如图 2 所示，挥发性成分种类数总数上 F0 有 119 种、F30 有 123 种、F90 有 121 种、F240 有 122 种，其中共有成分 67 种，属于它们的特有成分分别为 15、5、12 和 7 种。1 个月后，豆瓣酱在“翻、晒、露”第 0 天的基础上产生了 32 种新的成分，在 3 个月后，又产生了 20 种新的成分，在 8 个月后又产生了 7 种特有物质，与此同时，有些成分也在消失。综上，“翻、晒、露”过程中，挥发性成分种类数总数基本稳定，但挥发性物质分类与分布统计表明，各类挥发性成分种类数和含量在发生着动态变化，尤其是体现特殊风味的酯类、醇类物质在这一过程富集。

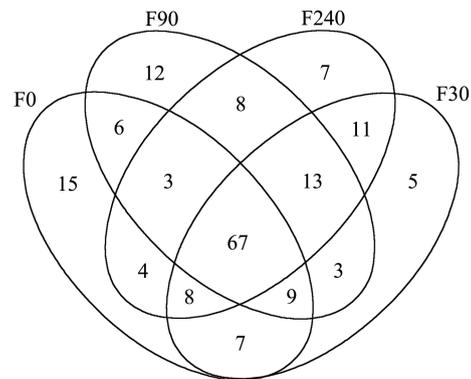


图2 翻晒露第 0 天、1、3 及 8 个月的豆瓣酱挥发性成分种类数量韦恩图

Fig.2 Venn plot of volatile compounds in PXDB samples at day 0, month 1, month 3 and month 8 of the turning, drying and dewing process

2.2 挥发性成分OAV计算及关键香气成分分析

相较于前发酵阶段,郫县豆瓣中大部分关键风味化合物的积累发生在混合发酵阶段,正是这些关键化合物对产品的风味作出重要贡献,OAV被广泛用于这一贡献度的评估^[7]。OAV代表单一的香气成分对整体香气的贡献程度,一般认为OAV>1的成分可能对总体风味有重要影响^[17,21,25]。经查阅统计,OAV>1的成分55种,包括醇类物质15种、酯15种、酸5种、酮4种、酚5种、杂环1种、醛类8种、其他2种,如表1所示。

表1结合图1a可知,随着“翻、晒、露”的进行,醇类物质显著增加,后续有所下降,其中,苯乙醇、(-)-2,3-丁二醇、异戊醇等含量增加,随后出现下降,这可能是由于曲霉代谢甜瓣子产生的这些醇类物质在后续翻晒露过程中逐渐被氧化成其他物质^[21,26]。芳樟醇在“翻、晒、露”前后变化不大,其因阈值较低而OAV极大,在F90中达到124 076.41,其赋予豆瓣酱花果香气^[23]。在发酵初期检测到的具有油气风味的合金欢醇在后期未被检测到,这可能是其与葡萄球菌有正相关关系(图4),随着葡萄球菌的衰弱而不产生。醇类的大量产生可能与发酵期间,多种酵母类菌群逐渐成为主要优势菌群(图3)有关,长时间的翻、晒可能使醇类物质挥发或和酸类物质的酯化反应导致其含量下降^[22]。

“翻、晒、露”过程中,酯类成分变化较明显,其含量最高时较“翻、晒、露”前增加1.5倍,丰富了豆瓣酱的果香和花香以及香气复杂性^[6]。“翻、晒、露”过程对大多数酯类成分具有正向促进作用,如新生成了水杨酸甲酯、异戊酸乙酯、丁酸丙酯、4-甲基-戊酸乙酯、庚酸乙酯等物质,月桂酸乙酯、十四酸乙酯、己酸乙酯、辛酸乙酯、苯乙酸乙酯等含量也逐渐增加。期间,棕榈酸乙酯出现下降,由F0的5.72 μg/g下降至F240的1.05 μg/g,棕榈酸乙酯是由高级脂肪酸和低级醇脱水缩合而成,阈值较高,但气味活度值较低,对香气贡献较小^[27]。

“翻、晒、露”期间酸类物质整体含量降低,但酸类物质种类增加,部分酸类物质在这一过程得到积累,如己酸、异丁酸。3-甲基丁酸逐渐增加,其OAV较大,具有丰富了豆瓣酱的奶酪香气。

由表1可知,酮类关键性香气成分的含量整体

呈下降趋势,如香气贡献度较高的3-羟基-2-丁酮、β-紫罗兰酮出现降低,菠萝酮在2个月及之后未被检测到。酚类物质中,香气贡献度最高的愈创木酚在“翻、晒、露”1个月后被检测到,并出现浓度增加趋势,其赋予豆瓣酱烧焦味和木质香气。对乙基愈创木酚、对乙基苯酚含量逐渐增加后降低。Lu等^[7]的研究结果也表明,愈创木酚、对乙基愈创木酚、对乙基苯酚的含量在混合发酵期间显著($P<0.05$)增加,它们具有焦香、丁香等气味特征,在酱油和味噌中也能鉴定出分泌这些成分的耐盐菌株^[28]。2-甲基丁醛、壬醛、异戊醛、3-甲硫基丙醛、辛醛等醛类物质OAV较高,其中,3-甲硫基丙醛随着翻晒露的进行被检出且含量不断增加,丰富了豆瓣酱酱香气味。异戊腈因阈值较低而OAV相对较高,但其仅出现在发酵前期,在发酵30天后未能检测到。有研究表明异戊腈是茶叶中含量相对较高的香气成分,但在不同产品中差异较大^[29]。

2.3 “翻、晒、露”期间微生物群落的演替

“翻、晒、露”期间,豆瓣酱微生物群落属水平上的组成与演替如图3所示。

由图3a可知,“翻、晒、露”过程中,芽孢杆菌(*Bacillus*)丰度逐渐增加,由3.1%提升到93.8%,成为绝对优势菌群,其属于兼性厌氧型,作为豆瓣酱中的核心微生物,可利用糊化淀粉进行糖化发酵产生乳酸^[2]。葡萄球菌(*Staphylococcus*)中间出现波动,整体呈现消减,由“翻、晒、露”前的42.8%下降为F240的3.6%,Yang等^[2]也有类似报道。促生乳杆菌(*Levilactobacillus*)由“翻、晒、露”前的24.4%到F240时几乎消亡。四联球菌(*Tetragenococcus*)在“翻、晒、露”初期由2.5%快速增长到13.0%,后又快速消减,到F30时几乎消亡。Lu等^[7]发现海洋芽孢杆菌(*Oceanobacillus*)是翻晒露0~3个月期间的优势菌属,这在本研究中也得到验证。肠杆菌(*Enterobacter*)、魏斯氏菌(*Weissella*)在“翻、晒、露”前期出现增长,发酵后期逐渐减少,与现有研究结果一致^[4]。肠杆菌属(*Enterobacter*)可以赋予豆瓣酱成熟、柔软的口感特性^[14],其在韩国豆酱中也是属于优势菌群^[7]。魏斯氏菌(*Weissella*)在酱油、韩国豆酱等食品中都是属于优势菌群,它们能促进有机酸、挥发性成分的产生,同时抑制致病菌^[16]。

表 1 郟县豆瓣“翻、晒、露”过程中关键香气成分 (OAV>1) 含量及风味属性
 Table 1 The content and aroma description of the key volatile compounds from PXDB during turning, drying and dewing process

名称	CAS	香气属性	阈值 ^[7,30,32] (mg/kg)	相对含量/(μg/g)															
				F0	F7	F15	F30	F60	F90	F240	F0	F7	F15	F30	F60	F90	F240		
异冰片醇	124-76-5	樟脑、发酵味	0.0025	0.09	0.03	0.05	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	36.58	12.97	21.62	18.37	31.59	23.16	24.83
乙醇	64-17-5	酒香	3.5	7.50	6.01	7.64	11.41	9.48	26.09	7.56	2.14	1.72	2.18	3.26	2.71	7.46	2.16	2.16	2.16
(-)-2,3-丁二醇	24347-58-8	玫瑰、蜂蜜样香气	0.0951	3.95	2.59	3.46	4.36	9.88	8.65	6.03	41.51	27.23	36.34	45.81	103.87	91.00	63.45	63.45	63.45
异戊醇	123-51-3	焦糖、可可、麦芽及花香	0.22	3.28	5.04	3.78	4.99	5.69	8.35	5.63	14.91	22.93	17.17	22.69	25.85	37.97	25.61	25.61	25.61
2-乙基己醇	104-76-7	青草香、玫瑰香	0.198	0.62	0.17	0.83	0.53	1.40	1.69	1.27	3.12	0.86	4.22	2.66	7.06	8.55	6.44	6.44	6.44
苯乙醇	60-12-8	花果香、丁香	0.211	1.25	1.41	1.08	2.13	3.25	4.88	1.31	5.90	6.67	5.13	10.08	15.39	23.11	6.20	6.20	6.20
芳樟醇	78-70-6	花果香气	0.00001	1.11	0.78	0.72	0.51	0.95	1.24	0.82	111458.64	78007.48	71881.13	50662.74	94959.79	124076.41	81891.17	81891.17	81891.17
异丁醇	78-83-1	苹果、可可苦味及酒香	0.36	0.39	0.74	0.62	0.77	0.69	1.00	0.96	1.08	2.06	1.73	2.14	1.91	2.77	2.66	2.66	2.66
3-甲基硫丙醇	505-10-2	泥土、土豆味	0.036	0.14	0.45	0.40	0.64	0.85	0.61	0.66	3.95	12.46	11.19	17.85	23.48	16.85	18.27	18.27	18.27
苯甲醇	100-51-6	烤面包香、玫瑰香	0.1	0.30	0.18	0.21	0.24	0.39	0.41	0.32	2.97	1.79	2.09	2.44	3.86	4.07	3.16	3.16	3.16
桉叶油醇	470-82-6	樟脑、薄荷气味	0.0013	0.48	0.10	0.37	0.22	0.56	0.47	0.36	369.85	77.31	281.72	169.53	433.90	358.27	275.04	275.04	275.04
α -松油醇	98-55-5	木香、紫丁香	0.0046	0.30	0.18	0.19	0.07	0.36	0.48	0.31	66.25	38.75	42.26	15.46	79.18	104.31	67.46	67.46	67.46
正己醇	111-27-3	水果香气	0.0056	0.32	0.23	0.20	0.27	0.32	0.51	0.28	56.30	41.08	35.42	47.49	57.18	90.89	49.72	49.72	49.72
(E)-3-己烯-1-醇	928-97-2	青草香	0.11	0.11	0.09	0.07	0.08	0.11	0.11	0.13	1.01	0.80	0.61	0.73	1.00	1.00	1.19	1.19	1.19
合欢醇	4602-84-0	油脂气味	0.02	0.11	—	—	0.11	—	—	—	5.33	—	—	5.27	—	—	—	—	—
棕榈酸乙酯	628-97-7	温和蜡质香气、奶油香	2	5.72	1.00	2.81	5.61	2.84	3.71	1.05	2.86	0.50	1.40	2.80	1.42	1.86	0.53	0.53	0.53
月桂酸乙酯	106-33-2	花果香、叶香	0.4	0.70	0.44	0.59	0.73	0.86	2.49	1.01	1.76	1.09	1.48	1.83	2.16	6.23	2.52	2.52	2.52
十四酸乙酯	124-06-1	蜡质香气	0.18	0.97	1.13	0.71	1.14	2.32	2.32	0.85	5.41	6.26	3.93	6.35	12.91	12.88	4.74	4.74	4.74
水杨酸甲酯	119-36-8	杏仁、蔗糖及薄荷气味	0.034	—	0.39	0.49	0.35	0.57	0.57	0.34	—	11.42	14.56	10.15	16.70	16.81	10.07	10.07	10.07
异戊酸乙酯	108-64-5	苹果、菠萝及酸香	0.00001	—	0.09	0.03	0.41	0.02	0.55	0.19	—	8814.65	3307.76	41321.10	2185.65	54919.19	18866.11	18866.11	18866.11
己酸乙酯	123-66-0	熟水果香、白兰地香	0.014	0.09	0.15	0.07	0.12	0.11	0.50	0.14	6.08	10.80	4.86	8.56	7.86	35.86	10.34	10.34	10.34
辛酸乙酯	106-32-1	熟水果香、白兰地香	0.005	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	0.31	0.10	18.00	18.27	16.04	20.75	18.35	61.46	19.51	19.51	19.51
苯乙酸乙酯	101-97-3	花果香、蜜香	0.15555	0.06	0.08	0.07	0.10	0.16	0.51	0.12	0.36	0.49	0.48	0.63	1.06	3.25	0.76	0.76	0.76

续表 1

名称	CAS	香气属性	相对含量/($\mu\text{g/g}$)													OAV												
			限值 ^[7,10,32] (mg/kg)													F0	F7	F15	F30	F60	F90	F240	F0	F7	F15	F30	F60	F90
酯类	丁酸丙酯	105-66-8	杏、菠萝香气	0.000 87	—	0.05	—	—	—	—	—	0.52	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	594.59	55.09	
	乙酸乙酯	141-78-6	白兰地、葡萄香气	0.005	0.11	0.30	0.30	0.25	0.12	1.04	0.01	21.69	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	208.82	2.79	
	乙酸异戊酯	123-92-2	果香、胶水气味	0.03	0.04	0.04	0.08	0.12	—	0.15	—	1.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.05	—	
	丁酸乙酯	105-54-4	果香、黄油及奶酪香气	0.02	—	0.11	—	—	—	—	1.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	53.48	—	
	4-甲基-戊酸乙酯	25415-67-2	果香	0.000 01	—	—	—	—	—	—	0.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25148.55	—	
	庚酸乙酯	106-30-9	白兰地、果香	0.001 9	—	—	—	—	—	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28.33	—	
	γ -丁内酯	104-61-0	杏、李子香气	0.03	—	0.01	0.01	—	—	—	0.04	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.40	0.69	
	3-甲基丁酸	503-74-2	奶酪香气、刺激酸	0.012	2.84	3.02	3.85	3.09	4.33	5.23	5.83	236.47	5.83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	435.59	485.90
	己酸	142-62-1	奶油、酸香	0.035 6	—	0.29	—	0.06	0.15	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.63
	丁酸	107-92-6	奶油、酸香	0.05	0.16	—	0.35	0.05	0.03	0.21	0.05	3.24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.11	0.92
戊酸	109-52-4	奶酪香气、辛辣味	0.024	—	0.05	0.02	—	—	0.02	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.84	1.06	
异丁酸	79-31-2	焦香、奶酪香气	0.01	—	—	—	—	—	—	0.34	0.14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33.56	13.60	
3-羧基-2-丁酮	513-86-0	黄油、奶油、青椒香	0.014	0.52	0.38	0.83	0.25	0.53	0.43	0.23	36.83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.69	
β -紫罗兰酮	14901-07-6	清新花香	0.000 007	0.19	0.05	0.15	0.10	0.03	0.09	0.10	27 123.96	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12 942.52	147 00.17
菠萝酮	3658-77-3	焦糖香、蜜香	0.000 03	0.17	—	—	—	0.13	—	—	5711.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
甲基庚烯酮	110-93-0	水果香气、蘑菇香	0.05	0.02	—	—	—	—	—	0.10	0.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.98	—
对乙基愈创木酚	2785-89-9	丁香气	0.05	0.75	0.72	0.44	2.07	1.59	0.49	1.91	15.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
愈创木酚	90-05-1	焦香、木香	0.000 48	—	—	—	—	0.15	0.17	—	0.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	662.83	—
对乙基苯酚	123-07-9	焦香、丁香	0.042	0.39	0.32	0.32	0.58	0.59	3.64	0.20	9.24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	86.65	4.83
对乙基愈创木酚类	7786-61-0	丁香、咖喱香气	0.003	0.42	0.10	0.10	0.17	0.38	—	—	138.43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
苯酚	108-95-2	焦香	0.031	—	0.08	0.11	—	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-戊基呋喃	3777-69-3	黄油、花果香	0.005 8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	2.39	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

续表 1

名称	CAS	香气属性	限值 ^[7,10,21] (mg/kg)	相对含量/(µg/g)														
				F0	F7	F15	F30	F60	F90	F240	F0	F7	F15	F30	F60	F90	F240	
苯甲醛	100-52-7	苦杏仁、焦糖及烤胡椒味	0.3	0.45	0.32	0.47	0.33	0.58	0.64	0.83	1.52	1.07	1.56	1.09	1.92	2.13	2.77	
2-甲基丁醛	96-17-3	杏仁、可及麦芽香	0.001	—	0.35	0.59	—	—	0.69	—	—	351.47	594.50	—	—	685.01		
壬醛	124-19-6	柑橘香、青柠檬皮香气	0.001	0.30	0.08	0.34	0.20	0.49	0.73	0.36	272.99	73.95	308.53	185.09	442.99	666.17	326.99	
异戊醛	590-86-3	巧克力味, 可及香味, 果香味	0.000	0.35	0.50	0.08	—	0.56	0.22	0.55	1.419.70	233.77	—	1.594.37	631.25	1.577.49	445.03	
3-甲硫基丙醛	3268-49-3	熟土豆味, 酱香气	0.000	2	—	—	—	0.08	0.11	0.12	0.17	—	—	420.33	572.37	584.31	849.82	
辛醛	124-13-0	带果皮柑橘味	0.000	32	0.06	—	0.03	0.02	0.08	0.09	0.10	196.08	—	100.31	243.89	280.32	319.03	
己醛	66-25-1	生油脂味	0.005	0.04	—	0.00	—	0.03	0.04	—	8.07	—	0.51	6.05	7.91	—	—	
戊醛	110-62-3	杏仁、麦芽香	0.002	7	—	0.03	—	—	—	0.04	—	12.96	—	—	—	13.22	—	
三甲基吡嗪	14667-55-1	可可香, 烤土豆香气	0.023	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	—	0.04	2.26	0.68	1.23	1.07	1.02	—	1.86
异戊腈	625-28-5	油脂味, 鲜香	0.002	3	0.05	—	0.08	—	—	—	21.21	—	—	35.46	—	—	—	—

注：“香气属性”参考：<https://www.femaflavor.org>；<http://www.thegoodscentscompany.com>；“—”表示未检出。

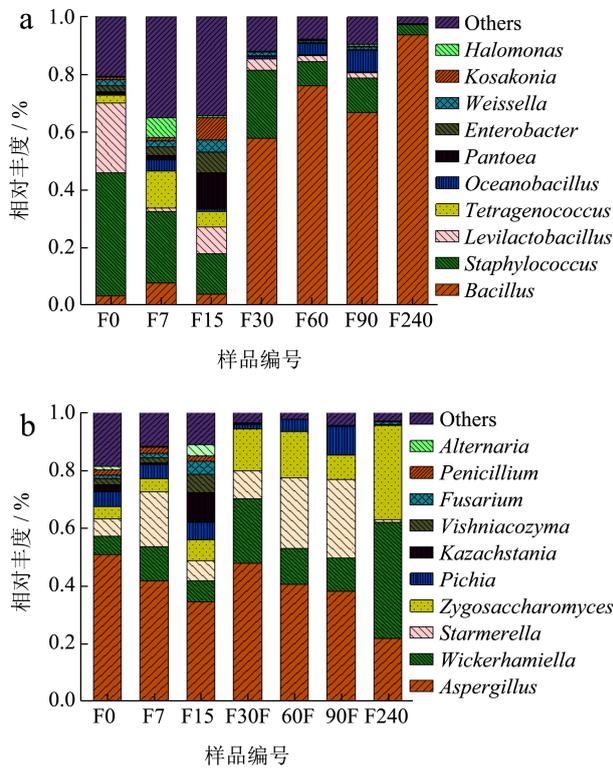


图3 郫县豆瓣“翻、晒、露”过程中细菌 (a) 和真菌 (b) 群落结构

Fig.3 Distribution of fungal community (a) and bacterial community (b) during ripening fermentation process of PXDB

由图 3b 可知，“翻、晒、露”期间，曲霉 (*Aspergillus*) 一直保持着优势地位，时间过长后出现衰弱，与此同时拟魏克酵母属 (*Wickerhamiella*)、斯塔莫酵母属 (*Starmerella*)、接合酵母 (*Zygosaccharomyces*) 呈现出增长态势，贾云等^[6]的研究也认为在豆瓣酱发酵中后期接合酵母 (*Zygosaccharomyces*) 对风味物质的形成起着主要作用，尤以鲁氏接合酵母 (*Zygosaccharomyces rouxii*) 为代表物种。总体上，曲霉、酵母类菌属为主要优势真菌。接合酵母 (*Zygosaccharomyces*) 与芽孢杆菌 (*Bacillus*) 呈显著正相关关系，在豆瓣酱的高渗透压环境下仍具有互相促进作用并产生各种挥发性成分^[33]。毕赤酵母 (*Pichia*) 前期基本稳定，后期有所增加后逐渐衰弱。哈萨克斯坦酵母 (*Kazachstania*) 与维希尼克氏酵母 (*Vishniacozyma*) 表现相似，先增长后出现衰弱，在 F240 中未检出。镰刀菌 (*Fusarium*)、青霉菌 (*Penicillium*)、链格孢霉 (*Alternaria*) 等菌属在发酵初期有所增长后逐渐衰弱。张芃芃等^[14]研究发现维希尼克氏酵母属 (*Vishniacozyma*)、链格孢霉

(*Alternaria*) 等真菌是辣椒醃的优势菌群，但在与甜瓣子混合后翻晒露第 20 天却检测到较低的丰度，本研究中，维希尼克氏酵母属 (*Vishniacozyma*)、链格孢霉属 (*Alternaria*) 在发酵初期有所增加，在发酵 30 d 及之后检测到较低丰度。

2.4 关键挥发性成分与优势微生物群落的相关性分析

为进一步探究关键香气成分与优势菌群的关系，对优势微生物与关键香气成分的相关性进行分析，结果如图 4。由图 4 可知，优势菌群与 35 种关键香气成分具有相关性，这些成分包括醇类 7 种、酯类 10 种、酸类 3 种、酮类 4 种、酚类 4 种、杂环类 1 种、醛类 3 种及其他 1 种。

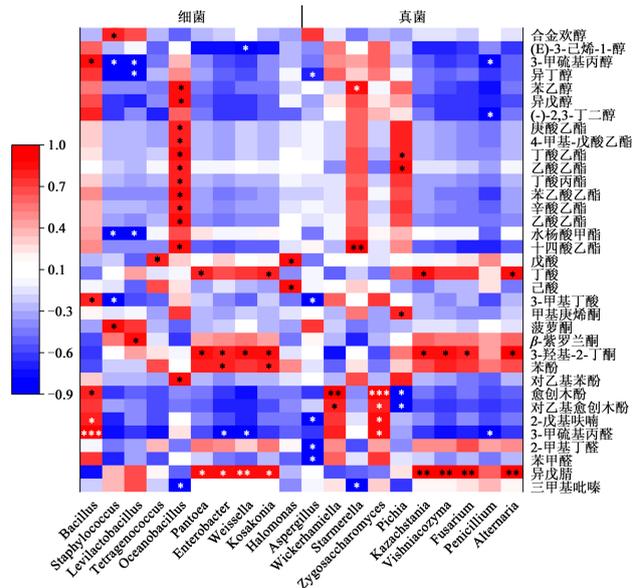


图4 郫县豆瓣“翻、晒、露”期间微生物与挥发性风味物质的相关性

Fig.4 Correlation between microbes and volatile flavor substances during ripening fermentation process of PXDB

注：左侧图例是不同相关系数 R 值的颜色区间，红色代表正相关，蓝色代表负相关，颜色越深代表线性相关程度越高；“*”表示具有相关性 ($P < 0.05$)；“**”表示显著性相关 ($P < 0.01$)；“***”表示极显著性相关 ($P < 0.001$)。

芽孢杆菌 (*Bacillus*) 与 3-甲硫基丙醛极显著正相关，与 2-戊基呋喃、愈创木酚、3-甲基丁酸、3-甲硫基丙醇正相关。接合酵母 (*Zygosaccharomyces*) 与愈创木酚极显著正相关，与对乙基愈创木酚、2-戊基呋喃、3-甲硫基丙醛正相关。拟魏克酵母属 (*Wickerhamiella*) 与愈创木酚显著正相关，与对乙基愈创木酚正相关。魏斯氏菌 (*Weissella*)、哈

萨克斯坦酵母 (*Kazachstania*)、维希尼克氏酵母 (*Vishniacozyma*)、镰刀菌 (*Fusarium*) 及链格孢霉 (*Alternaria*) 与异戊腈均显著正相关。海洋芽孢杆菌 (*Oceanobacillus*) 与多种酯类成分正相关。斯塔莫酵母属 (*Starmerella*) 与十四酸乙酯显著正相关, 斯塔莫酵母属 (*Starmerella*) 在郫县豆瓣中的作用机制目前尚不清楚, 但其是自然发酵葡萄酒发酵醪液中最重要真菌属之一, 与葡萄酒中辛酸甲酯、乙酸异戊酯、乙酸己酯等酯类挥发性成分密切相关, 与乙酸异丁酯显著正相关^[34]。另外, 海洋芽孢杆菌 (*Oceanobacillus*) 与多种酯类物质正相关, 毕赤酵母 (*Pichia*) 与丁酸乙酯、己酸乙酯正相关。

酚类物质中, 愈创木酚香气贡献度最高, 赋予豆瓣酱焦香和木质香。愈创木酚在 F30 中检测到, 之后出现浓度增加趋势, 其与接合酵母 (*Zygosaccharomyces*) 极显著正相关, 与拟魏克酵母属 (*Wickerhamiella*) 显著正相关, 与芽孢杆菌 (*Bacillus*) 正相关, 与毕赤酵母 (*Pichia*) 负相关。本研究显示接合酵母 (*Zygosaccharomyces*)、拟魏克酵母属 (*Wickerhamiella*) 在后期都表现出了强势的状态, 而毕赤酵母 (*Pichia*) 相对弱势, 这可能有利于愈创木酚的生成。有研究表明, 接合酵母 (*Zygosaccharomyces*)、拟魏克酵母属 (*Wickerhamiella*) 是葡萄酒发酵过程中与代谢酶基因相关的重要属, 其分泌的各种酶对共轭酚的作用, 可以使酚的化合物和浓度发生变化^[34,35]。

醛类挥发性成分整体含量不高, 但其中有多种成分香气贡献度高, 如 3-甲硫基丙醛、异戊醛、壬醛等, 其中 3-甲硫基丙醛随着翻晒露的进行逐渐被检测到并呈含量增强趋势, 其赋予豆瓣酱香气及熟土豆气味。图 4 显示, 3-甲硫基丙醛与芽孢杆菌 (*Bacillus*) 极显著正相关, 芽孢杆菌 (*Bacillus*) 在翻晒露过程中丰度逐渐增加并成为强势菌群 (图 3a), 这可能促进了 3-甲硫基丙醛的产生^[4]。相反, 肠杆菌 (*Enterobacter*)、魏斯氏菌 (*Weissella*)、青霉菌 (*Penicillium*) 与 3-甲硫基丙醛负相关。LU 等^[7]在成熟辣椒醃及豆瓣曲中均未检测到 3-甲硫基丙醛, 但在成熟甜瓣子中检测到该物质, 后酵第 7 天其含量显著 ($P < 0.05$) 降低, 经后酵 1 年后又显著 ($P < 0.05$) 增加, 其由蚕豆瓣中的氨基酸代谢物质并经进一步氧化反应而来。以上可以推断, 甜瓣子与辣椒醃混合时, 原有体系中微生物的结构与平衡被迫改变后导致翻晒露初期

豆瓣酱中复杂的微生物竞争抑制了 3-甲硫基丙醛前体物质的生成, 随着微生物群落逐渐和谐稳定后, 形成了有益于 3-甲硫基丙醛生成的环境。

其他类物质的异戊腈属于含氮香气化合物, 其形成与氨基酸有关^[29], 出现在“翻、晒、露”前期, 相关性结果 (图 4) 表明, 其与魏斯氏菌 (*Weissella*)、哈萨克斯坦酵母 (*Kazachstania*)、维希尼克氏酵母 (*Vishniacozyma*)、镰刀菌 (*Fusarium*) 及链格孢霉 (*Alternaria*) 显著正相关 ($P < 0.01$), 这些菌落在翻晒露过程中的演替均呈现相似的表现, 即在发酵前期存在一定丰度, 但之后出现衰减甚至消亡 (图 3), 已有研究证明, 魏斯氏菌 (*Weissella*)、维希尼克氏酵母属 (*Vishniacozyma*)、链格孢霉属 (*Altemaria*) 等是辣椒醃的优势菌群, 但在与甜瓣子混合后“翻、晒、露”阶段与其他优势菌的竞争中转入劣势^[4,14]。

3 结论

工业发酵郫县豆瓣“翻、晒、露”过程中共检测到挥发性成分 188 种, 各阶段挥发性成分种类数总数基本稳定, 分布于 117~123 种, 但各类挥发性成分种类数和含量在发生着动态变化, 尤其是体现特殊风味的酯类、醇类物质在这一过程富集, 挥发性物质总含量呈先增加后降低的趋势, 这一现象除了微生物的消耗代谢及生化反应, 也可能与不断翻晒产生的散失有关。经统计分析, 对郫县豆瓣风味起重要贡献的关键挥发性成分 55 种, 包括醇类物质 15 种、酯 15 种、酸 5 种、酮 4 种、酚 5 种、杂环 1 种、醛类 8 种及其他 2 种, 这些成分的含量在“翻、晒、露”期间呈动态变化, 对豆瓣酱的风味的丰富与改善起重要作用。

HTS 分析表明, 芽孢杆菌 (*Bacillus*)、葡萄球菌 (*Staphylococcus*)、促生乳杆菌 (*Levilactobacillus*)、四联球菌 (*Tetragenococcus*)、海洋芽孢杆菌 (*Oceanobacillus*)、肠杆菌 (*Enterobacter*)、魏斯氏菌 (*Weissella*)、曲霉 (*Aspergillus*) 及多种酵母类菌属为“翻、晒、露”期间的主要微生物, 这些优势菌群与 35 种关键香气成分 ($OAV > 1$) 具有相关性。其中, 芽孢杆菌 (*Bacillus*) 与 3-甲硫基丙醛极显著正相关 ($P < 0.001$); 愈创木酚与接合酵母 (*Zygosaccharomyces*) 极显著正相关 ($P < 0.001$)、与拟魏克酵母属 (*Wickerhamiella*) 显著正相

关 ($P < 0.01$); 斯塔莫酵母属 (*Starmerella*) 与十四酸乙酯显著正相关 ($P < 0.01$); 魏斯氏菌 (*Weissella*)、哈萨克斯坦酵母 (*Kazachstania*)、维希尼克氏酵母 (*Vishniacozyma*)、镰刀菌 (*Fusarium*) 及链格孢霉 (*Alternaria*) 与异戊腈均显著正相关 ($P < 0.01$)。综上,“翻、晒、露”工艺对郫县豆瓣风味的形成具有重要影响,通过调控期间的微生物群落可以改善产品风味,今后,仍需结合“翻、晒、露”工艺参数的控制对这些功能微生物群落在发酵环境中的代谢特性作进一步的研究。

参考文献

- [1] 罗静,董玲,赵驰,等.郫县豆瓣酱中芽孢杆菌进化关系及酶活性和抗生素特性分析[J].食品科学,2022,43(6):229-235.
- [2] YANG M L, HUANG J, ZHOU R Q, et al. Characterizing the microbial community of Pixian Doubanjiang and analysing the metabolic pathway of major flavour metabolites [J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 143: 111170.
- [3] 李幼筠.“郫县豆瓣”剖析[J].中国酿造,2008,27(11):83-86.
- [4] LIN H B, BI X P, ZHOU B B, et al. Microbial communities succession and flavor substances changes during Pixian broad-bean paste fermentation [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101053.
- [5] 徐琳娜,王璋,许时婴.豆瓣酱后熟过程中氨基酸和风味物质的变化[J].中国调味品,2006,9:21-25.
- [6] 贾云,钮成拓,郑飞云,等.传统豆瓣酱微生物群落发酵演替规律及其功能分析[J].微生物学报,2021,61(9):2749-2764.
- [7] LU Y H, CHI Y L, LV Y P, et al. Evolution of the volatile flavor compounds of Chinese horse bean-chili-paste [J]. LWT- Food Science and Technology, 2019, 102: 131-135.
- [8] 张东.消费者进车间看生产 探寻“川菜之魂”的品质密码[N].中国质量报,2022-03-29(7367).
- [9] 包琴,鲁时旭.郫县豆瓣生产过程风险识别与质量控制探讨[J].中国调味品,2020,45(12):197-200.
- [10] 尚丽娟.发酵食品生产技术[M].北京:中国轻工业出版社,2021:230.
- [11] GAO X Z, LIU H, YI X X, et al. Microbial floral dynamics of Chinese traditional soybean paste (doujiang) and commercial soybean paster [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2013, 23 (12): 1717-1725.
- [12] TAN X Y, LU Y H, LIN X, et al. An insight into volatile and non-volatile compounds of Chinese horsebean-chili-paste meju produced by natural brewing and temperature-controlled brewing methods [J]. Journal of The Science of Food and Agriculture, 2021, 101(6): 2371-2379.
- [13] 蒋四强,李雄波,邓维琴,等.不同品种蚕豆发酵甜瓣子非挥发性风味物质对比分析[J].现代食品科技,2023,39(8):264-272.
- [14] 张芃芃,王世乐,陈福生,等.蚕豆豆瓣酱发酵过程中微生物群落与挥发性风味物质的相关性[J].中国酿造,2023,42(5):41-49.
- [15] 刘平,王雪梅,向琴,等.郫县豆瓣智能后发酵工艺优化及品质分析[J].食品科学,2020,41(22):166-176.
- [16] LI X Y, ZHAO C S, ZHENG C, et al. Characteristics of microbial community and aroma compounds in traditional fermentation of Pixian broad bean paste as compared to industrial fermentation [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20: 2520-2531.
- [17] SUN X X, YU Y M, AHMED S M S, et al. Characterization of aroma profiles of chinese four most famous traditional red-cooked chickens using GC-MS, GC-IMS, and E-nose [J], Food Research International, 2023, 173: 113335.
- [18] 于美娟,杨慧,黄绿红,等.传统鲈鱼固态发酵过程中细菌群落与挥发性风味物质的相关性[J].食品与机械,2023,39(3):1-10.
- [19] 赵红宇,徐炜桢,杨国华,等.基于高通量测序的郫县豆瓣后发酵期细菌多样性研究[J].食品科学,2017,38(10):117-122.
- [20] 邓维琴,陈功,张其圣,等.不同发酵时长郫县豆瓣酱品质对比研究[J].中国调味品,2018,43(11):84-90,94.
- [21] 彭凯雄,唐群勇,陈晓明.酿酒用生、熟大米挥发性风味物质差异分析[J].中国食品学报,2023,23(11):303-319.
- [22] 曾艳,白艳,余进,等.传统郫县豆瓣和红油郫县豆瓣后发酵过程中风味成分的差异分析[J].食品与发酵工业,2023,49(19):289-295.
- [23] 傅小玲,张聪,丛梦,等.流过式介质电离质谱对郫县豆瓣酱香气物质的快速鉴别[J].食品与生物技术学报,2024,43(1):98-105.
- [24] 刘平,翟刚,陈功,等.郫县豆瓣特征香气物质的研究鉴定[J].中国酿造,2015,34(1):27-32.
- [25] 陈臣,田同辉,刘政,等.基于感官评价、GC-IMS和GC-MS的中式酸凝奶酪挥发性风味比较[J].食品科学,2023,44(16):228-236.
- [26] 叶玉娇.基于多元分析的郫县豆瓣后发酵阶段风味物质变化研究[D].成都:西华大学,2021.
- [27] 张杏民,陈宏宇,王超,等.茯砖茶独特香气形成的物质基础及评价方法研究进展[J].食品科学,2023,44(3):296-305.
- [28] SUEZAVA Y, SUZUKI M. Bioconversion of ferulic acid to 4-vinylguaiacol and 4-ethylguaiacol and of 4-vinylguaiacol to 4-ethylguaiacol by Halotolerant yeasts belonging to the genus Candida [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2007, 71(4): 1058-1062.
- [29] 张悦,朱荫,吕海鹏,等.不同海拔烘青绿茶的品质成分分

- 析[J].食品科学,2022,43(2):2257-2268.
- [30] 范海默特.化合物嗅觉阈值汇编(原书第二版)[M].北京:科学出版社,2018.
- [31] RAHAYU Y Y S, YOSHIZAKI Y, YAMAGUCHI K, et al. Key volatile compounds in red koji-shochu, a Monascus-fermented product, and their formation steps during fermentation [J]. Food Chemistry, 2017, 224: 398-406.
- [32] CRANDLES M, REYNOLDSE A G, KHAIRALLAH R, et al. The effect of yeast strain on odor active compounds in Riesling and Vidal blanc icewines [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64 (1): 243-258.
- [33] MARVIG C L, KRISTIANSEN R M, MADSEN M G, et al. Identification and characterisation of organisms associated with chocolate pralines and sugar syrups used for their production [J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 185: 167-176.
- [34] 魏如腾.葡萄-葡萄酒自然体系中微生物多样性及其对葡萄酒风味物质的作用[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
- [35] TRISTEZZA M, TUFARIELLO M, CAPOZZI V, et al. The oenological potential of hanseniaspora uvarum in simultaneous and sequential co-fermentation with Saccharomyces cerevisiae for industrial wine production [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7(237): 670.