

豉香型白酒微生物的研究进展

苏泽佳¹, 熊若冰¹, 梁景龙^{1,2*}, 费永涛^{1,2}, 白卫东^{1,2}, 赵文红^{1,2*}

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

(2. 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东广州 510225)

摘要: 豉香型白酒是米香型白酒的衍生香型, 其口感醇厚, 豉香独特, 醇厚甘甜, 回味爽净, 是我国广东地区岭南特色食品代表之一。近年来, 白酒消费趋势倾向低度化、舒适化, 顺应豉香型白酒的发展特色, 但如何进一步打开市场, 迎合市场要求, 产品的风味组成是关键。而发酵微生物结构对风味的形成具有重大影响。因此, 该研究对豉香型白酒微生物结构、影响风味的微生物和微生物强化发酵提升酒品质相关内容进行综述, 旨在为豉香型白酒的进一步发展提供参考。

关键词: 豉香型白酒; 风味物质; 产酒微生物; 产酯微生物

文章编号: 1673-9078(2024)01-319-324

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.1441

Research Progress on Microorganisms in Chi-flavored Baijiu

SU Zejia¹, XIONG Ruobing¹, LIANG Jinglong^{1,2*}, FEI Yongtao^{1,2}, BAI Weidong^{1,2}, ZHAO Wenhong^{1,2*}

(1.College of Food Science and Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China) (2.Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510225, China)

Abstract: Chi-flavored Baijiu is a liquor with a derivative flavor of Chinese Rice baijiu. It has mellow sensation, unique fermented black bean flavor, mellow and sweet taste, with a clean aftertaste. It is one of the representative foods/beverages of the Lingnan region in Guangdong province, China. In recent years, the trend of Baijiu goes towards low level of alcohol and more comfortable feeling, which conforms to the development characteristics of Chi-flavor Baijiu. But, to open further the market and meet market requirements, product flavor composition is the key. The structure of fermentation microorganisms has a significant impact on flavor formation. Therefore, this paper reviews the microbial structure of Chi-flavor Baijiu, the microorganisms affecting the Baijiu's flavor, and microbial enhanced fermentation to improve Baijiu quality, in order to provide a reference for the further development of Chi-flavor Baijiu.

Key words: Chi-flavor Baijiu; flavor substance; wine-producing microorganisms; ester-producing microorganisms

引文格式:

苏泽佳,熊若冰,梁景龙,等.豉香型白酒微生物的研究进展[J].现代食品科技,2024,40(1):319-324.

SU Zejia, XIONG Ruobing, LIANG Jinglong, et al. Research progress on microorganisms in Chi-flavored Baijiu [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 319-324.

收稿日期: 2022-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(21808248); 广东省重点建设学科科研能力提升项目(2021ZDJS005); 广州市科技计划基础与应用基础研究项目(202102020558); 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室(2021B1212040013); 仲恺农业工程学院研究生科技创新基金项目(KJCX2022009)

作者简介: 苏泽佳(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 773914214@qq.com

通讯作者: 梁景龙(1988-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: jinglong_liang@zhku.edu.cn; 共同通讯作者: 赵文红

(1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: zhaowenhong2002@126.com

中国白酒是一种历史悠久的酒精饮料，是中国古代的伟大发明之一，也是世界上最受欢迎的六种蒸馏酒之一，根据不同的香型，可将白酒分为基础香型共四种，分别是酱香、清香、浓香和米香，其余皆为基础香型的衍生（如图1）^[1]。不同类型的白酒因其酿造工艺与环境的不同，其酿造过程中所含微生物与风味物质成分也会有不同，豉香型白酒是米香型白酒的衍生香型，其口感醇厚，豉香独特，醇厚甘甜，回味爽净，是我国广东地区岭南特色食品代表之一^[2,3]。

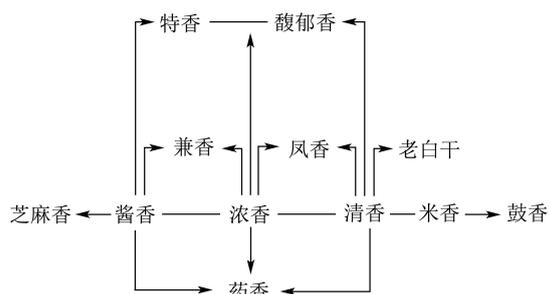


图1 中国白酒的香型及衍生

Fig.1 Flavor profile and derivation of Baijiu

酒曲是一种用于白酒发酵的发酵剂，为白酒的酿造提供了糖化和发酵的动力。根据其制作工艺和原料的不同，可将酒曲分为大曲、小曲和麸曲，它们的制备和酒精发酵在半受控条件下进行^[5,6]。豉香型白酒为小曲酒类，但因其是在全液态发酵下边糖化边发酵，风味又有别于其他小曲酒^[7]。酒曲的制作过程中加入黄豆，大豆蛋白会在酒酿造过程中被微生物利用形成与豉香相关的风味物质^[8]。豉香型白酒的酿造工艺特殊，其成品酒度数在30% vol左右，是我国传统蒸馏酒中酒精度数最低的^[9,10]。

豉香型白酒有鲜明的地域特征，其风味也较为独特，但相较于其他白酒，对其研究的深入程度较低。因此，本文将通过对豉香型白酒微生物研究现状与对风味物质形成的影响进行概述，旨在为豉香型白酒的进一步发展提供参考。

1 豉香型白酒中的微生物

豉香型白酒源于珠江三角洲地区，因其突出的豉香风味而得名。豉香型白酒酒曲属于小曲，小曲是以纯大米为原料进行制作，在酒的酿造过程中充当糖化发酵剂^[11]。豉香型白酒的味道类似于发酵的大豆，回味纯净，各种功能微生物为白酒酿造提供水解酶、挥发性物质和其他成分，从而形成豉香型白酒的独特风味^[12,13]。在酿造豉香白酒的过程中，

细菌和真菌都参与其中。主要微生物来源于环境、酒曲和原料，主要包括醋酸菌、乳酸菌、酵母和根霉^[14]。与其他基础香型白酒相比，参与豉香型白酒酿造过程的微生物类型相对较少，但少数微生物种类主导了这一酿造过程，它们利用原料进行一系列的代谢活动，为豉香型白酒提供了风味物质，这种白酒的主要芳香成分是苯乙醇和乙酯^[15]。对酒曲和白酒发酵液中的微生物进行检测，发现有29种细菌，其中乳酸杆菌和卤单胞菌是主要菌群。此外，还有21种真菌，其中酵母菌和毛霉是优势菌^[16]。

1.1 豉香型白酒酒曲中的微生物

据现有文献报道，豉香型白酒酒曲中主要的细菌属有乳酸杆菌属、魏斯氏菌属、片球菌属、链霉菌属、醋酸杆菌属等，其中乳酸杆菌属和魏斯氏菌属是酒曲中最主要的优势菌属；真菌分别为根霉属、复膜孢酵母属、嗜热毛霉属、酵母菌属、毛霉菌属、根毛霉属、毕赤酵母属和嗜热子囊菌属，酒曲中优势真菌属为根霉属、复膜孢酵母属、嗜热毛霉属和酵母菌属^[15,16]。

徐成勇等^[17]从豉香型白酒酒曲中分离出少部分微生物；吴雪梅^[18]通过传统培养法分析了豉香型白酒传统小曲的微生物，其发现酒曲中的微生物以根霉和酵母为主。江汶钰等^[19]通过使用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳（PCR-DGGE）技术研究了豉香型白酒酒丸、酒饼及酒醪中微生物，发现其细菌中优势菌群为乳酸杆菌属（*Lactobacillus*）和嗜盐单胞菌属（*Halomonas*），真菌优势菌群为酵母属（*Saccharomyces*）和毛霉属（*Mucor*）。孙哲等^[20]研究了添加酒饼叶对酒曲的影响，发现不同比例的酒饼叶酒曲中微生物的群落也存在着明显差异性。豉香型酒曲制曲原料、工艺都塑造了独特的微生物菌群，正是这些微生物为豉香型白酒发酵提供各项能力，因此对于豉香型酒曲中微生物的研究有待更深层次的探究。

1.2 豉香型白酒发酵过程中微生物的变化

发酵前期，魏斯氏菌属、肠杆菌属、乳球菌属、乳酸杆菌属和片球菌属都属于优势菌种；发酵中期，乳酸杆菌属和魏斯氏菌属是优势菌种；发酵后期，只有乳酸杆菌属保持优势地位。乳球菌属、魏斯氏菌属、乳酸杆菌属、片球菌属都属于乳杆菌目，属于兼性厌氧菌，能够产生乳酸。在发酵过程中，氧气减少、酸度上升，乳酸杆菌属依然能够存活，在

发酵中期和后期成为绝对优势细菌,说明它可以耐受恶劣环境。

酵母菌属随着发酵先增加再减少;复膜孢酵母属随着发酵逐渐减少;丝孢酵母属和念珠菌属来自环境中,整体处于增长的变化,在发酵前期和中期增长较为缓慢,在发酵后期快速增长。随着发酵的进行,环境急剧变化,大量酸类化合物被代谢出来,形成酸性环境,不利于真菌生长代谢,但酵母菌属保持稳定的生长,而丝孢酵母属和念珠菌属在发酵后期适应环境,成为优势菌种^[15,16]。

2 豉香型白酒风味形成的相关微生物

中国白酒的风味来源于挥发性和非挥发性物质的存在,这些物质主要由发酵过程中的微生物代谢产生。挥发性物质包括化合物,如酯、醇、酸、醛、含氮化合物和含硫化合物以及萜烯。这些化合物对白酒的芳香特性和质量有重要影响。非挥发性物质一般用作挥发性物质的前体,其数量会影响白酒中挥发性物质的数量,从而影响其风味和质量^[21,22]。

在酒曲生产过程中,影响酒曲微生物群落多样性和丰富度的因素包括原料、生产温度、水等。这些来自其产地的细菌、霉菌和酵母菌都在酒曲中发挥着关键作用^[23]。三种发酵剂的微生物多样性存在显著差异,发酵剂中的微生物群落结构是决定风味多样性的关键因素。据报道,大曲和麸曲的细菌种类主要是嗜热或耐热的,麸曲和小曲都含有霉菌,麸曲和小曲也分别使用了酿酒酵母和纤维酵母菌^[24]。在酿造过程中,各种微生物的生长代谢活动相互作用会产生相应的脂质,起到催化作用,加速酿造过程。

在豉香型白酒风味的形成过程中,产生醋酸和乳酸的醋酸菌和乳酸菌是细菌的主要菌种。周北龙^[25]研究表明,乳酸菌发酵糖类不仅产生乳酸,还产生少量醇、醛、酸等,而其自溶后分解的多肽、氨基酸等大分子物质,提升黄酒的香气和口感,丰富米酒成分的多样性。醋酸菌利用乙醇生成醋酸,醋酸作为挥发酸,丰富米酒口感,醋酸还能与乙醇结合,发生酯化反应,生成醋酸乙酯。醋酸乙酯具有微带果香的香气,增添豉香型白酒的酒香^[26]。而霉菌中则有根霉菌和曲霉菌,根霉菌具有良好的淀粉糖化力和蔗糖转化力,曲霉菌分泌液化淀粉酶和蛋白酶等^[27]。霉菌的各种酶构成发酵的多酶系统,

是分解淀粉与纤维素等大分子物质的主要驱动力,可将大分子物质降解成有利于酵母菌和产酸菌的生长和发酵的营养物质,产生酒精和各种芳香成分。例如,在发酵过程中经微生物作用使酒曲中大豆的蛋氨酸形成特征香气物质 3-甲硫基-1-丙醇,在浓度较低时会有强烈的肉或肉汤的香味^[28]。

豉香型白酒发酵过程中与风味物质相关性较强的微生物(见表1),其中主要是乳酸杆菌属、醋酸杆菌属、魏斯氏菌属、片球菌属等,真菌主要是酵母类,如假丝酵母属、接合酵母属、复膜孢酵母属、克鲁维酵母属等与关键挥发性风味物质相关。

乳酸菌类属于兼性厌氧菌,适合在低氧条件下生长。方冠宇等^[29]研究浙江玫瑰醋发现发酵过程中醋酸杆菌、乳球菌和乳酸杆菌对有机酸的生成有很强的相关性,且可以利用有机酸作为碳源用于生成其他有机酸。也有研究表明某些乳酸菌可以利用丙酮酸来生产乳酸。马欢欢等^[30]研究中韩泡菜发现明串珠菌、乳杆菌、片球菌和肠球菌可以产生有机酸类、醇类和醛类,以及肽类和氨基酸等风味物质,同时还能利用氨基酸作为氮源供自身生长。Azizan等^[31]发现酿酒过程中将乳酸乳球菌(*L. lactis*)在30℃下搅拌酿造,可产生天冬氨酸、谷氨酸、精氨酸、丝氨酸、苏氨酸、苯丙氨酸和酪氨酸。红球菌能够利用有机化合物作为能源和碳源,例如降解芳香烃、多环芳烃等化合物,同时也是一种机会致病菌^[32]。

酵母在发酵过程中生长和繁殖,产生乙醇、乙醛和乙酸等初级代谢物,次级代谢物主要是高级醇、酯、硫醇和萜烯化合物等^[33,34]。有两种酵母主要用于白酒酿造^[35,36],一种是酿酒酵母,它主要具有发酵糖、发酵和生产酒精的功能,具有相对较高的酒精生产能力;另一种是产脂酵母,其酒精生产能力小于酿酒酵母。然而,在白酒发酵过程中,产脂酵母可以将一些代谢产物转化为醛、酯、高级醇和其他化合物。有研究表明^[37,38],当扣囊复膜酵母的培养基中的碳源为葡萄糖时,产生的主要挥发物是 β -苯乙醇、2-乙酸苯乙酯和苯乙酸乙酯,具有果香或花香。产生的非挥发性物质主要是脂肪酸、有机酸和氨基酸;当其中碳源为高粱时,产生的代谢物主要为酯类、酸类、醛酮类、萜酚类、内酯类和醇类。

表 1 豉香型白酒关键挥发性风味物质与相关微生物汇总

Table 1 Summary of key volatile flavor substances and related microorganisms of Chi-flavor Baijiu

关键挥发性风味物质	相关微生物	CAS	香气描述
3- 甲硫基丙醇	片球菌属、肠球菌属、链霉菌属、纳氏酵母菌属、 孢酵母菌属、复膜孢酵母菌属	505-10-2	强烈的圆葱、肉臭味
1- 辛烯 -3- 醇	片球菌属、肠球菌属、泛菌属、孢酵母菌属、 接合酵母菌属、纳氏酵母菌属	3391-86-4	具强烈浓香、药草香韵； 清香带甜的薰衣草气息
苯乙酸乙酯	红球菌属、乳酸杆菌属、丝孢酵母菌属、 念珠菌属、 <i>Apiotrichum</i>	101-97-3	有浓烈而甜的蜂蜜香气
辛醇	片球菌属、肠球菌属、泛菌属、孢酵母菌属、 接合酵母菌属、纳氏酵母菌属	111-87-5	强烈的油脂气味
β - 苯乙醇	红球菌属、不动杆菌属、根毛霉菌属、假丝酵母菌属	60-12-8	带有似玫瑰蜜香的香味
癸酸乙酯	链霉菌属、不动杆菌属、皮球菌属、毛霉菌属、根霉菌属	110-38-3	脂肪臭明显，果香微弱
月桂酸乙酯	不动杆菌属、皮球菌属、考克氏菌属、芽孢杆菌属、 假丝酵母菌属、费比恩塞伯林德纳氏酵母菌属	106-33-2	脂肪臭明显，果香次之
1- 辛烯 -3- 酮	片球菌属、肠球菌属、魏斯氏菌属、克鲁维酵母菌属、 接合酵母菌属、孢酵母菌属	4312-99-6	具有强烈的壤香、 蘑菇香气
苯甲醛	片球菌属、根霉菌属、复膜孢酵母菌属、纳氏酵母菌属	100-51-6	花香
苯乙烯	魏斯氏菌属、片球菌属、肠球菌属	100-42-5	
苯甲醇	不动杆菌属、根毛霉菌属	100-51-6	花香
辛酸乙酯	克鲁维酵母菌属	106-32-1	水果香
乙酸异戊酯	复膜孢酵母菌属、纳氏酵母菌属	123-92-2	水果香
4- 乙基愈创木酚	不动杆菌属、丝孢酵母菌属、 念珠菌属、红球菌属、乳酸杆菌属	93-51-6	烟熏、酱油味
乙酸乙酯	魏氏菌属、片球菌属、明串珠菌属、	141-78-6	菠萝香
乳酸乙酯	乳酸杆菌属	97-64-3	水果香

3 豉香型白酒中的功能微生物

酿造过程中功能微生物对白酒的产量与品质有很大的影响，微生物形成复杂的共生关系，从而形成独特的风味。功能微生物根据其产生的作用可分为产酒微生物、产香微生物和其他功能微生物。近年来，随着对白酒的产量和品质的要求进一步提高，功能性微生物逐渐被发现、重视，并应用到实际的酿酒生产中。

3.1 产酒微生物

为提高效率降低成本，从酿造生产中分离筛选功能菌株，然后进行强化发酵，提高白酒生产效率是近年来较热门的研究趋势。加入强化菌株会改变整个酿造微生物生态，从而影响白酒的品质，因此产酒微生物需具备产生具有优异发酵能力和高抗性

或抗恶劣环境的菌株，为提高酒的产量和质量，研究人员致力于发现并筛选优质的产酒微生物，以期在提高白酒的产量的同时能保证白酒的质量。

萧暖章^[39,40]从豉香型白酒酒曲中分离酵母菌，经筛选鉴定得到五株功能性酵母菌。之后，在发酵过程中加入安琪高活性酵母，优化发酵参数和糖化酶种类，实验时每克粮食加入 0.005 g 的酵母，用正交试验得出最优的糖化酶进行发酵，得到酒的品质和产量较原工艺都有所提高，可应用于规模化生产。

3.2 产香微生物

产香微生物是白酒发酵中产香的重要菌种，因其种类、培养条件、生产工艺的不同产生的香气不尽相同。目前产香酵母含意不仅仅是产酯酵母，某些能产生适当浓度的醇类、酚类、酸类、酮类和有机酸等都令人愉悦的香味，这些化合物可以由产香

生物合成产生,而这些成分同时也是白酒中风味物质的组成成分,发酵后产生的不同香味如豉香等通常也是各种酯类混合的结果^[41]。虽然不同用途的产香微生物产生的香气成分各异,但归纳起来主要包括:醇类,如乙醇、高级醇、其他杂醇等;酯类,如乙酸乙酯、己酸乙酯、丁酸乙酯等;酮类,如4-羟基-呋喃酮和4-羟基-2,5-二甲基-3-呋喃酮^[42]。

对豉香型白酒中提高酯含量大多采用筛选高产酯菌株之后,添加回酒曲强化发酵,使酒体中的酯含量提高的方法,曹荣冰等^[43]从酒曲中分离得到2株产酸菌(醋酸菌和乳酸菌),在实验中加入这两株菌混合发酵,优化发酵工艺,得到白酒的酯含量为1.85 g/L,产酒率为1.59%,效果较无强化发酵有所提高。随着技术的发展,通过形态学特征和测序技术分析鉴定功能菌种,以提高风味物质的产量也成为研究热点,黄光建等^[44]通过形态学特征和5.8S rDNA-ITS序列分析鉴定得出该细菌为异常毕赤酵母,通过单因素和正交实验对其发酵条件进行优化,在最佳工艺条件下,乙酸乙酯较原工艺提高158.04%。对风味物质进行定量定性,从中分析特定风味物质含量增减,以确定功能微生物又增加风味物质含量的效果,李旭娟^[45]通过单因素和正交设计实验对酵母异常威克姆酵母的产酯条件进行优化,运用气相色谱-质谱(Gas Chromatograph-mass Spectrometer, GC-MC)测定乳酸乙酯含量为0.95 g/L,较原工艺提高61%。

由于酿酒过程会受到受环境变化的影响,微生物和风味物质会随季节变化受到影响,尤其夏季的主要风味物质含量偏低,解决不同季节含量变化的问题,对豉香型白酒的品质稳定有重要作用,郭锦宁等^[46]分别将华根霉、红曲霉和米根霉制成麸曲,酿成基酒。发现试验添加2%干燥麸曲,基酒乳酸乙酯含量较平时夏季提高3倍。

4 展望

微生物对白酒风味起着决定性的作用。其中,酒曲中的混合微生物的组成和分布以及酶的产生对白酒的发酵有着决定性的影响。随现代微生物技术的进步,应探求在白酒的生产和发酵过程中,微生物的生长规律以及探求其变化的规律和机理,探讨并科学推导出微生物与香味的相互作用,进而改进酿造工艺和改善酒的品质和风味,从而提高经济效益。

近年来,技术进步和酿造工艺的不断优化,不

断提高豉香型白酒的产量和品质。豉香型白酒特殊的发酵工艺,使其主要风味物质等含量低于固态发酵白酒,这降低了豉香酒的质量,降低了其市场竞争力。为了提高豉香酒的品质,研究其微生物特别是功能性微生物以及微生物代谢机制和产香核心生物群,对于稳定发酵、保证品质非常重要。微生物群之间相互作用的影响,以及外源微生物的添加对整个发酵系统的影响仍然是未知的,值得进一步研究。

参考文献

- [1] XU M L, YU Y, RAMASWAMY H S, et al. Characterization of Chinese liquor aroma components during aging process and liquor age discrimination using gas chromatography combined with multivariable statistics [J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 39671.
- [2] 沈怡方.白酒生产技术全书[M].北京:中国轻工业出版社,1998.
- [3] 李志溥,卢斌,赵文红,等.豉香型白酒的风味物质研究现状及展望[J].*食品工业*, 2021, 42(8): 238-242.
- [4] 潘丽娟,赖嘉雯,赵文红,等.豉香型白酒研究现状[J].*中国酿造*,2020,39(10):21-25.
- [5] 孙宝国,吴继红,黄明泉,等.白酒风味化学研究进展[J].*中国食品学报*,2015,15(9):1-8.
- [6] FANG C, DU H, ZHENG X, et al. Solid-state fermented Chinese alcoholic beverage (baijiu) and ethanol resulted in distinct metabolic and microbiome responses [J]. *FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 2019, 33(6): 7274-7288.
- [7] 杨帅,皇甫洁,董建辉,等.清雅型“玉冰烧”白酒酒体风格特征研究[J].*中国酿造*,2020,39(4):49-52.
- [8] 谭莹,郭波,梁思宇.大酒饼在豉香白酒酿造中的作用和特色[J].*酿酒科技*,2020,2:116-120.
- [9] 肖冬光.白酒生产技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 魏岱岳,梁诗雅,何松贵,等.豉香型白酒肥肉浸制产脂肪油及脂质氧化研究[J].*中国酿造*,2020,39(11):183-186.
- [11] 张五九,何松贵,韩兴林,等.豉香型白酒风味成分分析研究[J].*酿酒科技*,2010,12:58-64.
- [12] WANG S L, WU Q, NIE Y, et al. Construction of synthetic microbiota for reproducible flavor compound metabolism in Chinese light-aroma-type liquor produced by solid-state fermentation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019, 85(10): e03090-18.
- [13] ARBAB H S, RAZA H, QAISER K F, et al. Functional microbiota in Chinese traditional Baijiu and Mijiu Qu (starters): A review [J]. *Food Research International*, 2020, 138: 109836.
- [14] HU Y, LEI X, ZHANG X, et al. Characteristics of the microbial community in the production of Chinese rice-flavor

- Baijiu and comparisons with the microflora of other flavors of Baijiu [J]. *Front Microbiol*, 2021, 12: 670-673.
- [15] 曾新安,张本山,于淑娟. 豉香型米酒特征香气成分研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2001, 12: 93-95.
- [16] 梁振. 豉香型白酒发酵过程中微生物和风味物质的研究[D]. 广州:仲恺农业工程学院, 2020.
- [17] 徐成勇,刘泉勇,郭波,等. 豉香型白酒酒饼微生物的分离[J]. *食品与发酵工业*, 2002, 10: 10-12.
- [18] 吴雪梅. 豉香型白酒酒曲微生物的研究[J]. *酿酒科技*, 2013, 6: 61-64.
- [19] 江汶钰,徐学锋,杨幼慧. 豉香型白酒酒饼中细菌PCR-DGGE分析方法的建立[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(10): 307-312, 268.
- [20] 孙哲,黄芷珊,刘幼强,等. 酒饼叶对豉香型白酒酒饼细菌多样性影响研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(13): 63-69.
- [21] XU Y Q, ZHU Y, LI X T, et al. Dynamic balancing of intestinal short-chain fatty acids: The crucial role of bacterial metabolism [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 100: 118-130.
- [22] JIANG Y S, WANG R, YIN Z T, et al. Optimization of Jiuzao protein hydrolysis conditions and antioxidant activity *in vivo* of Jiuzao tetrapeptide Asp-Arg-Glu-Leu by elevating the Nrf2/Keap1-p38/PI3K-MafK signaling pathway [J]. *Food Funct*, 2021, 12(11): 4808-4824.
- [23] LIU X, GUO K L, ZHANG H X, et al. Determination of microbial diversity in Daqu, a fermentation starter culture of Maotai liquor, using nested PCR-denaturing gradient gel electrophoresis [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2012, 28(6): 2375-2381.
- [24] JIN G Y, YANG Z, YAN X. Mystery behind Chinese liquor fermentation[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2017, 63, 18-28.
- [25] 周北龙. 豉香型米酒生产中微生物作用机理[J]. *现代食品*, 2016, 10: 53-55.
- [26] WEI Y, ZOU WEI, SHEN C H, et al. Basic flavor types and component characteristics of Chinese traditional liquors: A review [J]. *Food Sci*, 2020, 85(12): 4096-4107.
- [27] XU Y Q, ZHAO J R, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese traditional fermented baijiu: The great contribution of ester compounds [J]. *Food Chemistry*, 2022, 369: 130920.
- [28] 金佩璋. 豉香型白酒中的3-甲硫基丙醇[J]. *酿酒*, 2004, 5: 110-111.
- [29] 方冠宇,穆晓静,蒋予箭. 浙江玫瑰醋发酵过程中细菌菌群结构变化与有机酸形成相关性分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(22): 177-184.
- [30] 马欢欢,吕欣然,白凤翎,等. 传统中韩泡菜乳酸菌菌相分析与风味物质组成的比较[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(12): 184-190.
- [31] AZ IZAN K A, BAHARUM S N, MOHD NOOR N. Metabolic profiling of *Lactococcus lactis* under different culture conditions [J]. *Molecules*, 2012, 17(7): 8022-8036.
- [32] 邱孜博,汪荣,张杨,等. 红球菌及其生物降解作用研究进展[J]. *食品科学*, 2016, 37(7): 254-258.
- [33] HIRST M B, RICHTER C L. Review of aroma formation through metabolic pathways of *Saccharomyces cerevisiae* in beverage fermentations [J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2016, 67(4): 361-370.
- [34] STYGER G, JACOBSON D, BAUER F F. Identifying genes that impact on aroma profiles produced by *Saccharomyces cerevisiae* and the production of higher alcohols [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 91(3): 713-730.
- [35] WANG X H, DU H, ZHANG Y, et al. Environmental microbiota drives microbial succession and metabolic profiles during chinese liquor fermentation [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2018, 84(4): e02369-17.
- [36] LI H S, HAN X L, LIU H R, et al. Silage fermentation on sweet sorghum whole plant for Fen-flavor Baijiu [J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1477.
- [37] 郝文军,刘红霞,于晓涛,等. 牛栏山白酒酿造过程中扣囊复膜酵母的分离与产物分析[J]. *酿酒科技*, 2019, 2: 49-52.
- [38] LEE S, JUNG J, SEO J, et al. Bioformation of volatile and nonvolatile metabolites by *saccharomycopsis fibuligera* KJJ81 cultivated under different conditions-carbon sources and cultivation times [J]. *Molecules*, 2018, 23(11): 2762.
- [39] 萧暖章. 豉香型白酒酒曲中酵母分离、选育和鉴定[J]. *四川食品与发酵*, 2008, 1: 14-15.
- [40] 萧暖章. 安琪高活性酿酒酵母在豉香型白酒中的应用[J]. *酿酒科技*, 2019, 12: 105-107.
- [41] SONG Z W, DU H, ZHANG Y, et al. Unraveling core functional microbiota in traditional solid-state fermentation by high-throughput amplicons and metatranscriptomics sequencing [J]. *Front Microbiol*, 2017, 8: 1294.
- [42] ZHENG J, LIANG R, ZHANG L Q, et al. Characterization of microbial communities in strong aromatic liquor fermentation pit muds of different ages assessed by combined DGGE and PLFA analyses [J]. *Food Research International*, 2013, 54, 660-666.
- [43] 曹荣冰,何松贵,刘幼强,等. 产酸菌提高豉香型白酒总酯量的研究[J]. *酿酒*, 2018, 45(4): 89-92.
- [44] 黄光建,徐学锋,郭梅君,等. 豉香型白酒酒饼中高产乙酸乙酯酵母菌的分离鉴定及发酵性能研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(11): 153-158.
- [45] 李旭娟. 乳酸乙酯合成菌株筛选及其发酵工艺研究[D]. 广州:华南农业大学, 2017.
- [46] 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.