DOI:10.12441/spyswjs.20250210001 [文章编号] 1673-1689(2025)03-0011-11

酸汤中微生物与风味物质及其相互关系的研究进展

李彬彬[1,2] 龙正玉[1,2] 包爱明[1,2*] 敖文敏[1,2] 陈兴兴[2] 秦伟军[1,2] 赵建新[3] 周 松[4]

(1. 贵州南山婆食品研究院有限公司,贵州 安顺 561000; 2. 贵州南山婆食品加工有限公司,贵州 安顺 561000; 3. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 4. 安顺学院化学化工学院,贵州 安顺 561000)

摘要:酸汤是一种以番茄、辣椒或米为主要原料经发酵而成的贵州特色食品,具有调味、增香和改善食物质地的作用,常被用作调味品或火锅底料。酸汤生产方式以自然发酵为主,其中的微生物主要来自原料表面携带的菌群。发酵过程中氧气、pH和营养物质的变化会影响其中的优势菌群,这些菌群的生长代谢活动可转化或合成酸汤的风味物质。作者综述了酸汤中的微生物及其与风味物质关系的研究进展,阐明了酸汤发酵过程中微生物的变化及其对风味的影响,旨在为酸汤微生物和风味研究及应用提供参考。

关键词:酸汤;风味物质;发酵;乳酸菌;酵母菌

Research Progress on Microorganisms and Flavor Compounds in Sour Soup and Their Interrelationships

LI Binbin[1,2] *LONG Zhengyu*[1,2] *BAO Aiming*[1,2*] *AO Wenmin*[1,2] *CHEN Xingxing*[2] *QIN Weijun*[1,2] *ZHAO Jianxin*[3] *ZHOU Song*[4]

(1. Guizhou Nanshanpo Food Research Institute Co., Ltd., Anshun 561000, China; 2. Guizhou Nanshanpo Food Processing Co., Ltd., Anshun 561000, China; 3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Anshun University, Anshun 561000, China)

Abstract: Sour soup is a distinctive food in Guizhou Province, which is fermented mainly with tomatoes, chili peppers or rice as the primary raw materials. Sour soup possesses the functions of flavor adjustment, aroma enhancement and food texture improvement, and is frequently utilized as a condiment or the base material for hot pot. The production of sour soup is dominated by natural fermentation, where the microorganisms mainly originate from those carried on the surface of the raw materials. During the fermentation process, variations in oxygen, pH and nutrients will influence the dominant microbial flora. The growth and metabolic activities of the dominant microbial flora transform or synthesize the flavor substances of sour soup. The author has reviewed the current relevant research on the microorganisms in sour soup and their connection with flavor substances, elucidating the changes of microorganisms during the sour soup fermentation process and their impact on flavor, with the aim of providing references for the research and application of microorganisms and flavors in sour soup.

Keywords: sour soup; flavor substances; fermentation; lactic acid bacteria; yeast

发酵是利用微生物及其产生的酶来转化底物的过程,该过程包括营养成分的转化、新风味的形成以及功能特性的提升等,最终使发酵食品具备独特的风味、营养和功能特性[1]。目前主要的发

基金项目:贵州省科技计划重大科技成果转化项目(黔科合成果[2023]重大011);贵州省科技计划2024年度贵州省科学家工作站项目(黔科合平台KXJZ[2024]014);贵州科技计划重点实验室项目(黔科合平台人才-ZZSG[2024]005);安顺市科技计划重点项目(安市科农重[2023]01号)。

通信作者:包爱明(1971—),女,工程师,主要从事食品加工研究。E-mail:chairman@nanshanpogroup.com

收稿日期:2025-02-10 **修回日期:**2025-03-10

酵食品原料有谷物、蔬菜、牛奶、肉、鱼等，亚洲地区以发酵豆类、蔬菜、肉类等为主[2]。很多国家具有制作和食用发酵食品的传统，例如韩国泡菜是以白菜、萝卜以及少量红辣椒、大蒜、姜、青葱和咸鱼等为原料经自然发酵而成[3]；日本味噌是一种将煮熟的大豆、麦曲和盐混合发酵而成的特色食品[2]。中国不同地域的发酵食品较多，如糟辣椒、酱油、火腿等[4]，且多采用自然发酵工艺。然而，自然发酵存在周期长、易污染、微生物难控制等问题，进而导致品质不稳定。

酸汤是贵州的一种传统特色食品，主要由番茄、辣椒或米汤经自然发酵而成。贵州曾因交通不便，导致食盐运输困难，因此贵州本地有“以酸代盐”的传统[5]。贵州本地盛产番茄和辣椒，通过发酵不仅可以延长原料的保质期，还可以增强风味和保留有益物质[6]。酸汤色泽鲜亮、酸味可口、香气浓郁，是中国国家地理标志产品。酸汤主要用作调味料及火锅底料，是与重庆麻辣火锅酱、内蒙古清汤即食羊肉火锅酱并列的三大特色火锅底料之一[7]。酸汤不仅具有良好的滋味和香气，其对食材品质也有促进作用。用酸汤腌制可以改变牛肉胶原蛋白的结构和氧化特性，促进牛肉胶原蛋白聚集，以及增大蛋白质颗粒[8]。用酸汤煮制的鱼肉和牛肉在咀嚼性、弹性、内聚性及胶黏性方面均高于纯净水煮制的肉[9]，同时改善了风味品质[10-12]。用酸汤腌制干鱼片能较好地维持质构品质[13]。酸汤不仅具有特别的风味，还含有多种活性物质。酸汤的主要原料是番茄和辣椒，番茄含有矿物质、维生素、蛋白质、必需氨基酸、单不饱和脂肪酸、类胡萝卜素和植物甾醇等[14]；辣椒富含维生素、辣椒素、类胡萝卜素和多酚等[15]。因此，酸汤中营养成分和活性物质的种类和含量都较多，具有多种营养和健康功能[16]，如减轻高脂饮食诱导的脂肪肝和体质量过度增长[17-19]、预防高脂血症、降脂减肥[20]、改善非酒精性脂肪性肝病[21]、调节肠道菌群和肠道屏障[22]。

根据制作原料的不同，酸汤可分为白酸汤和红酸汤，白酸汤主要是用米汤或面条汤混合蔬菜发酵而成[23]，红酸汤主要以番茄和新鲜红辣椒发酵而成[24]。传统酸汤的制作是以老酸汤为发酵剂，将其添加到半成品中发酵而成[25]，发酵微生物主要来自番茄、辣椒等原料表面。发酵过程涉及多种微生物，包括细菌和真菌。酸汤中的物质分解、转化以及风味物质的形成均与这些微生物的生命活动密切相关。此外，酸汤发酵过程中由于微生物生长环境和营养物质发生变化，导致其中的优势微生物也在改变。作者综述了近年来酸汤发酵中微生物和风味物质的研究进展，旨在阐明微生物对酸汤风味物质的影响，为推动酸汤产业发展提供参考。

1 酸汤中的微生物

1.1 酸汤中微生物的筛选和鉴定

过去生产酸汤以自然发酵为主，该过程有多种微生物参与酸汤发酵。但自然发酵存在周期长、微生物种类和数量不稳定、易被病害微生物污染等问题，因而容易导致酸汤成品的品质不稳定。利用单一菌种或多种菌种进行纯种发酵或混合发酵，具有发酵周期短、易控制、品质稳定等优点。用于纯种发酵的菌种通常是从自然发酵的食品中筛选而来，目前科研人员已从自然发酵酸汤中筛选出了多株优良菌种。酸汤风味是影响酸汤综合品质的关键因素之一，伍桃英等[26]从自然发酵的酸汤中筛选出 *L. paracasei* LK10 和 *L. fermentum* T1，并用于发酵酸汤，所得成品酸汤酸辣适中、色泽红亮、乳酸风味浓郁。在酸汤自然发酵过程中，杂菌过度生长会导致亚硝酸盐的积累[25,27]。亚硝酸盐是有害物质，会导致胰岛素抵抗[28]、潜在致癌[29]等问题，国家标准里对发酵食品中亚硝酸盐的含量有严格限制。乳酸菌能够通过酸降解和代谢途径降解等方式降低亚硝酸盐含量[30-31]。Xiong 等[27]从苗族红酸汤中分离得到 1 株产乳酸的优势菌株布氏乳杆菌，在该菌发酵酸汤过程中，亚硝酸盐含量降低较快。因此，用乳酸菌发酵可以有效抑制亚硝酸盐的产生，提高产品安全性并延长保质期[32]。自然发酵的酸汤中还有多种具备优质功能和健康益处的微生物。Yang 等[33]从贵州红酸汤中分离出 1 株双歧杆菌 BLH1，其具有显著的降胆固醇作用，降胆固醇率为 51.62%。膳食胆固醇与多种癌症风险相关[34]，因此，利用具有降胆固醇能力的菌种发酵酸汤可增加其健康益处。筛选产酸能力高的菌株有利于缩短酸汤发酵时间，如伍泉烨[35]从酸汤中筛选出 3 株产酸能力强的植物乳植杆菌。潘宇等[36]从酸汤中筛选出 8 株产酸能力高且耐酸、耐牛胆盐的酵母菌。胡悦等[37]从酸汤中分离出

2株产酸能力高的乳酸菌lt1-6和lc2-1。重金属污染是食品中常见的问题之一，利用微生物吸附食品中的重金属具有无污染、成本低、易于管理和操作等优点，如王玉婷等[38]从酸汤中分离出的菌株ST2对Cd^{2+}有较好的吸附效果。李厚强[39]从酸汤中筛选出2株具有抑菌作用的乳酸菌，且具有较强的抑制热带假丝酵母CT-1和白色假丝酵母CU-3生长的能力。Zhou等[40]从酸汤中分离出1株具有高核苷降解能力的植物乳植杆菌ST-11，其对鸟苷降解率超过95%、次黄嘌呤降解率为100%，可以预防和缓解高尿酸血症。

由于白酸汤与红酸汤的发酵基质不同，因此其自然发酵过程中的微生物也有差异。吴茂钊等[41]从白酸汤中分离筛选出2株优质菌株，并将其复配使用获得品质较高的白酸汤。唐艳平等[42]从白酸汤中分离出12株乳酸菌，并用于发酵白酸汤，结果显示，其能增加白酸汤中还原糖和总糖的消耗，提高总酸含量，降低pH，并增强白酸汤的抗氧化活性。赵承鑫等[43]从贵州凯里白酸汤中分离纯化菌株，经测序鉴定分别是5株副干酪乳酪杆菌、1株干酪乳酪杆菌和1株植物乳植杆菌，均具有良好的产酸和耐酸能力。肖甜甜等[44]从白酸汤中筛选出了产酸、产香性能较好的20株菌种。总之，目前已经从白酸汤中筛选出了一些具有良好性能的菌种，然而这些菌种较少应用于实际生产，后续应深入开展菌种筛选和分离研究并将优质菌种应用于实际生产。

综上所述，纯种或强化发酵都可以有效缩短发酵周期、抑制杂菌生长，提升酸汤的理化性质和风味品质。因此，从品质较好的酸汤中筛选具有优质特性的微生物，再用于酸汤的发酵，将有利于控制酸汤品质。

1.2 酸汤发酵过程中的细菌

发酵果蔬中最多的细菌是乳酸菌和醋酸菌，它们分别产生乳酸和乙酸，对食品挥发性和非挥发性风味物质都有直接影响。在酸汤发酵过程中，空气、营养物质变化以及微生物之间的相互作用，会导致酸汤发酵过程中的细菌组成发生动态变化。自然发酵的酸汤中种类和数量最多的细菌是乳酸菌[24]，乳酸菌对酸汤风味的形成至关重要。乳酸菌是革兰氏阳性菌，能将葡萄糖转化为最终代谢产物乳酸[45-46]，乳酸是形成酸汤特色滋味的重要风味物质。乳酸菌发酵过程中碳水化合物代谢、蛋白质水解和氨基酸代谢、脂肪水解和脂肪酸代谢会产生初级代谢产物[47]，如糖、氨基酸等。乳酸菌再进一步将初级代谢产物进行生物转化，形成挥发性化合物，包括醛类、醇类、酯类等风味物质，这赋予了食品特殊的发酵风味，还有利于肠道对营养物质的吸收[48-49]。乳酸菌不仅可以降解食品中的多糖，还会在生长过程中合成胞外多糖，因而具有调节免疫、抗病毒、抗氧化和抗高血压等多种生物活性，并且还可用作改善食品质地的添加剂[50-51]。总之，乳酸菌有改善风味、提高安全性、缩短发酵周期、改善质构、增强功能活性等多种作用[47]。发酵食品中常见的乳酸菌有植物乳植杆菌、嗜酸乳杆菌、乳酸明串珠菌和短乳杆菌等，它们对改善食品风味都具有良好效果[52]。此外，乳酸菌产生的酶还可以合成或转化食品中的活性物质，从而提高发酵食品的抗氧化和降血糖等功能活性[53-55]。

表1展示了酸汤自然发酵过程中的优势细菌。Wang等[24]研究表明，大多数菌种如乳杆菌属、醋酸杆菌属等表现出与风味物质的显著相关性，因此，细菌可能是酸汤风味的主要产生者。乳酸菌在生长过程中水解蛋白质产生游离氨基酸，这些氨基酸具有鲜、甜等滋味，可进一步被降解或转化产生醇、醛和酯等风味物质[56]。乳酸杆菌在生长过程中会产生大量有机酸，不仅赋予了酸汤柔和的酸味和香气，还可提高其营养价值。另外，乳酸杆菌产生的乳酸和各种抗菌物质（如细菌素）在发酵过程中可抑制病原体和腐败微生物生长，提高发酵过程的稳定性，并改善酸汤的质量[25]。伍泉烨[35]采用高通量测序技术分析传统发酵红酸汤的老底酸菌群多样性，共鉴定出236个细菌属，乳杆菌属为优势细菌。乳杆菌属在生长过程中会通过产生有机酸、竞争营养物质和生产抗生素来抑制其他微生物生长，进而成为酸汤中的优势细菌[57]。Li等[58]分析了成熟凯里红酸汤的微生物，发现乳杆菌属、假单胞菌属和罗尔斯通氏菌是主要优势细菌，乳杆菌属占绝对优势。厚壁菌门和拟杆菌门也是酸汤中的优势菌门，它们可以产生碳水化合物活性酶，促进碳水化合物的水解[59]。醋酸菌能够将糖或醇不完全氧化成有机酸，是一类专性需氧的革兰氏阴性菌，在某些情况下产生重要的

化合物，如细菌素、细胞外多糖、细菌纤维素、芳香族化合物和辅酶等，对发酵食品的风味和活性都有影响[60]。

白酸汤与红酸汤的原料不同，导致其中的优势细菌存在差异。肖甜甜等[44]采用高通量测序技术对白酸汤中微生物的群落组成及多样性进行分析，发现白酸汤中主要优势细菌为乳杆菌属、醋酸杆菌属。醋酸菌在好氧条件下，将乙醇转化为乙酸，乙酸具有独特风味，与乙醇反应会生成乙酸乙酯，这是产品风味形成的重要因素之一。Liu 等[61]研究发现白酸汤中的优势细菌为乳酸杆菌、醋酸杆菌和普雷沃氏菌。

综上所述，乳酸菌是自然发酵酸汤的优势细菌，其产生的乳酸是形成酸味的主要原因。乳酸菌在酸汤发酵过程中还具有改善质地、抑制有害微生物生长、形成风味前体物质等作用。多种乳酸菌属于益生菌，可给人体带来多种健康益处。此外，乳酸菌产生的酶可以转化和合成多种活性物质，这将提高产品的功能活性。然而，目前关于酸汤益生菌、功能活性、活性物质等研究较少，应进一步探究酸汤的功能活性，提高酸汤的营养和健康价值。

表 1　酸汤发酵过程中的优势菌

Table 1　Dominant Microorganisms in the Fermentation Process of Sour Soup

发酵阶段	优势菌门	优势菌属	功能	参考文献
中期	细菌：厚壁菌门、蓝细菌门、变形杆菌门、拟杆菌门、弯曲杆菌门等 真菌：子囊菌门、担子菌门、罗兹菌门等	细菌：布氏乳杆菌属、植物乳植杆菌属、乳杆菌属、假单胞菌属、罗尔斯通氏菌属等。 真菌：赤酵母属、哈萨克斯坦酵母属、伊萨酵母属等	改善食物质地，提升香气和味道，产生有机酸、二氧化碳和其他物质，启动发酵等	［56，62］
后期	细菌：变形杆菌门、放线菌门、蓝细菌门、厚壁菌门等 真菌：壶菌门等	细菌：乳杆菌属等。 真菌：哈萨克斯坦酵母属、毕赤酵母属、伊萨酵母属、酿酒酵母属等	抑制病原体生长，防止软化、腐败，促进风味物质形成	［25，35，56，58-59］

1.3　酸汤发酵过程中的真菌

应用于食品中的真菌主要是蘑菇、酵母菌和丝状真菌，它们在生长过程中可产生大量的蛋白酶及特定的风味物质[63]，对酸汤风味的形成至关重要。如表 1 所示，在发酵中期，多种酵母菌成为优势真菌；在发酵后期，酵母菌种类和数量逐渐减少[62]。酵母菌对于酸汤风味的形成至关重要，其产物是形成醇类、酯类等风味物质的前体物质。酵母菌在食品发酵中的主要作用是产生一些参与酶促反应的酶，这些酶具有降解淀粉、生产乙醇、生产代谢物等功能[64]。酵母菌可将酸汤中的糖类转化成乙醇和二氧化碳以及一些次级代谢产物，如短链的醇、脂肪酸和酯类等；其代谢产生的醇类与乳酸菌代谢产生的有机酸可生成酯类[65]。伍泉烨[35]分析了酸汤中的真菌，发现毕赤酵母在 99 种真菌中占主导地位。毕赤酵母能够合成与酯类相关的前体物质，如壬酸是乙基壬酸、甲基壬酸和其他化合物的前体物质[66]。Liu 等[56]研究发现，自然发酵酸汤中的优势真菌包括毕赤酵母属、哈萨克斯坦酵母属、伊萨酵母属和被孢霉属，其中毕赤酵母属可以提高发酵谷物食品中叶酸和酚酸的含量。Li 等[58]研究发现凯里红酸汤中子囊菌门占绝对优势，其次为接合菌门和担子菌门；在属水平上，以毕赤酵母属、德克酵母属和酿酒酵母属 3 个产乙醇的酵母菌为主。Li 等[25]发现酸汤发酵过程中毕赤酵母和酒香酵母的相对丰度逐渐增加，而地霉的相对丰度则呈逐渐减少的趋势。

白酸汤中原料营养成分及表面微生物的不同，造成白酸汤中的优势真菌与红酸汤有差异。肖甜甜等[44]研究发现，白酸汤中的真菌主要隶属于子囊菌门、克鲁维酵母属、根霉属、木霉属、镰刀菌属、毕赤酵母属等。Liu 等[61]研究发现，白酸汤中的优势真菌属为毕赤酵母属、念珠菌属等。

总体来说，毕赤酵母属在白酸汤和红酸汤中都是优势真菌，其形成的多种风味前体物质对酸汤香气的形成至关重要。目前从酸汤中筛选的酵母菌较多，但用于酸汤生产的酵母菌较少。单一酵母菌对酸汤风味的形成作用有限，应探究其与乳酸菌共同发酵对酸汤的影响，从而提高酸汤的风味品质。

2 酸汤中的风味物质

酸汤中的风味物质主要包括非挥发性和挥发性2类，非挥发性风味物质包括有机酸、氨基酸、糖类等，挥发性风味物质包括醇类、醛类、酯类等。有机酸的种类和含量是影响酸汤风味品质的重要因素，酸汤中的有机酸主要包括乳酸、乙酸、柠檬酸、琥珀酸、丙酸和富马酸等[25]。乳酸口感柔和、清爽，是红酸汤的特色酸味物质[25]。游离氨基酸是形成食品滋味的重要组成部分，赋予发酵食品甜味、鲜味甚至苦涩味。酸汤发酵过程中，由于微生物活动和蛋白质水解导致游离氨基酸不断增加，酸汤中丙氨酸的质量分数最高，为112.99 mg/100g，其次是天冬酰胺（61.27 mg/100g）、脯氨酸（37.70 mg/100g）、亮氨酸（32.84 mg/100g）等，鲜味、甜味、苦味和涩味氨基酸质量分数分别为78.79%、11.27%、9.75%和0.18%[57-58]。丙氨酸具有甜味和咸味[67-68]，这有利于提升酸汤可口的滋味。潘季红等[69]研究发现，酸汤中呈味氨基酸以鲜味和甜味氨基酸为主，其中谷氨酸和丙氨酸是主要的呈味贡献者。Zhang等[70]研究发现，在酸汤发酵后期，酸汤中呈鲜味的谷氨酸和天冬氨酸含量增加，同时具有甜味和苦味的游离氨基酸含量也有所增加[71]。谷氨酸不仅可以增加鲜味，对食品整体风味也有增强作用[72]。在酸汤发酵过程中要减少苦味氨基酸的产生，避免影响口感。一方面要控制酸汤发酵时间，另一方面要抑制苦味氨基酸的前体物质，减少苦味游离氨基酸的生成。氯化钠、葡萄糖酸钠、腺苷酸钠和丙酸钠等钠盐均能抑制食品中苦味氨基酸对人类舌头的刺激[73]。因此可以考虑在酸汤发酵时或成品酸汤中加入苦味抑制剂，从而降低苦味感知。白酸汤主要以米汤为原料进行发酵，其中乳酸（主要是*L*-乳酸）是白酸汤中的主要有机酸（占总酸质量的29.39%~73.33%），其次是苹果酸、乙酸、柠檬酸和草酸，酒石酸质量分数最低；其中游离氨基酸包括谷氨酸、丙氨酸、天冬氨酸等[74]。总体来说，红酸汤和白酸汤中非挥发性风味物质的种类比较相似，主要是呈酸味的乳酸和呈鲜味的谷氨酸，只是质量分数有差异。

挥发性风味物质的检测方法主要有气相色谱-质谱联用（GC-MS）、气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）、气相色谱-嗅闻-质谱联用（GC-O-MS）、综合二维气相色谱-质谱联用（GC×GC-MS）等。GC-MS简单高效、应用广泛，但其检测限高导致数据不全面；GC-IMS具有快速和灵敏的特点；GC×GC-MS拥有较强的分离能力，因此在复杂食品基质中分析香气化合物组成方面显示出较高的效率；GC-O-MS可以从众多挥发性成分中识别出香气活性物质[75-77]。酸汤中风味物质组成较少，GC-MS就可以对其风味物质进行定量分析，同时仍需GC-O-MS等技术对其中的物质进行全面分析并确定香气活性物质。酸汤中主要挥发性风味物质是酸类、醇类和酯类。乙酯类是酸汤中最丰富的酯类香气化合物，可提供令人愉悦的果香[7, 58]。酸汤中挥发性酯类的种类和含量都较高，Zhou等[78]在红酸汤中检测到了24种酯类，这些酯类是形成酸汤独特香气的关键化合物。张东亚[79]用GC-MS分析了酸汤的挥发性风味物质，发现醇类在红酸汤挥发性物质中占比较高，多种醇类都具有香气，通常会产生甜味、果味、酒味、香脂味[7]。乳酸乙酯也是酸汤中占比较高的挥发性风味物质，主要赋予酸汤朗姆酒味、果味和奶油味[80]。此外，醇类还可与有机酸反应生成酯类，这些具有香气的酯类也构成了酸汤的整体风味。酸汤中挥发性风味物质还含有少量的醛类，其主要来自发酵过程中不饱和脂肪酸的氧化和氨基酸降解，具有香甜、坚果味、蘑菇味等，从而增强了发酵食品的风味[81-82]。醛类性质不稳定，会被进一步氧化成酸或还原成醇[83]，这可能是酸汤中醛类含量较低的原因。白酸汤中挥发性风味物质与红酸汤有差异。Liu等[61]研究发现，白酸汤中主要的挥发性风味化合物包括乙酸乙酯、乙醇、乙酸、丙酸、丙酸丙酯等。

综上所述，酸汤中非挥发性风味物质主要是有机酸和游离氨基酸，挥发性风味物质主要是醇类、酯类和醛类。风味物质之间存在相互作用，各种香气和滋味也有相互作用，目前关于酸汤风味物质间相互作用机制的研究较少。

3 酸汤中微生物与风味物质的关系

酸汤中风味化合物的形成和变化主要源于微生物的生长和代谢，酸汤中风味化合物与微生物之间的关系见表2。微生物的代谢途径包括糖代谢、多糖分解、蛋白质水解、脂肪酸分解等，其中糖

代谢是大多数微生物发酵过程中的主要代谢途径，微生物通过糖代谢将单糖转化为丙酮酸，这些丙酮酸可以进一步转化为有机酸、醇、羰基化合物以及其他风味物质，包括乙醛和二乙酰等[84]。

发酵初期由于发酵坛子中有少量氧气，会引起醋酸菌和酵母菌的生长繁殖，产生少量的乙酸和乙醇，乙酸和乙醇进一步反应生成芳香味的乙酸乙酯。但过量的氧气不仅会促进霉菌生长，而还会导致乙酸积累，产生不良的气味。因此在酸汤发酵过程中应减少开盖，尽量创造厌氧环境。Duan等[85]研究发现，在酸汤发酵早期，醇类和短链脂肪酸增加，带有难闻气味的丁酸是最大的风味贡献者；发酵后期随着醇和脂肪酸的减少，具有怡人风味的酯类、2-壬酮和萜类物质增加，这些物质是由一些酵母菌通过酯化反应形成的。Zhang等[70]也发现，酸汤风味物质在第1天有63种，发酵结束后风味物质有77种，表面微生物发酵对酸汤风味物质的形成有很大作用。此外，在早期发酵阶段，魏斯氏菌和乳酸球菌可能通过快速代谢糖产生乳酸和短链脂肪酸，从而占主导地位，为乳酸杆菌的后期增殖创造有利条件[86]。

在酸汤发酵中后期，乳酸菌的活力比酵母菌高，因为红酸汤的封闭发酵环境含氧量低，更适合乳酸菌的生长[56]。番茄、辣椒、米中的脂质、蛋白质和碳水化合物都可以被乳酸菌的酶分解成风味前体物质，这些前体物质进一步转化为风味物质。乳酸菌产生的细胞壁蛋白酶是启动蛋白质降解的关键酶，细胞壁蛋白酶将蛋白质水解成寡肽，再进入氨基酸代谢（包括脱氨基和脱羧反应），在氨基酸转氨酶作用下形成α-酮酸，α-酮酸可以通过脱羧反应转化为醛类，醛类通过脱氢作用转化为醇或羧酸，这是酸汤中醛类、醇类和有机酸形成的一条重要途径[49]。乳酸菌发酵分为同型和异型发酵，厌氧环境下，乳酸菌多以同型发酵为主，同型乳酸发酵产生了乳酸，而异型乳酸发酵则涉及其他副产物的产生，如二氧化碳、乙醇和乙酸[87]。乳酸菌参与了柠檬酸循环，促进了柠檬酸和苹果酸的合成和分解，还参与了脂肪酸的代谢分解，产生挥发性化合物，如醇和酮等[70]。Lin等[7]研究发现，与其他发酵蔬菜一样，酸汤中乳酸菌与酯类物质呈正相关，是酸汤香气的重要来源。酸汤中草酸、柠檬酸、乙酸和酒石酸等有机酸与毕赤酵母相关，琥珀酸、苹果酸等有机酸与酒香酵母相关[25]。Zhou等[78]将5种乳酸菌接入发酵番茄和辣椒中制作酸汤，发现乳酸、胸腺嘧啶和抗坏血酸等10种代谢物的含量增加，鼠李糖乳酪杆菌与乳酸、抗坏血酸和绿原酸呈正相关，这些代谢产物对红酸汤的风味和品质都具有潜在的促进作用。Wang等[24]研究发现，酸汤中假单胞菌属、明串珠菌属和鞘氨醇单胞菌属与乳酸异戊酯、乙酸异戊酯等风味物质呈显著正相关；乙酸杆菌和葡萄糖酸乙酸杆菌与乙醛等呈正相关；假丝酵母菌与月桂酸乙酯、α-萜品醇等呈正相关。酸汤中的真菌主要是促进挥发性风味化合物的产生和氨基酸的转化[70]。毕赤酵母属、地曲霉属、酒香酵母属也是产生挥发性成分的主要真菌属，与酸汤中醛类、醇类、酯类等密切相关[25]。总挥发性酯与乳酸菌、真菌等相关，总挥发性酚与蛋白胨菌、清酒菌和热带菌高度相关；一些非挥发性有机酸（如乳酸）与一些乳酸菌和酵母菌等相关[58]。一些酵母菌和细菌还可以产生脂肪酶，脂肪酶将脂质分解为甘油和脂肪酸，脂肪分解后的不饱和游离脂肪酸容易发生自氧化，产生酮、醛、烷烃等。醛通过氧化还原反应生成醇和酸，两者发生酯化反应生成酯[84]，因此脂肪酸代谢也是酸汤风味物质形成的重要途径。酸汤中游离氨基酸含量增加是由于乳酸菌具有合成氨基酸和分解蛋白质的能力，己醛和庚醛等醛类的含量降低也是由于乳酸菌的代谢活动将醛类转化为醇或酸[70]。酸汤中的醋酸菌较少，少量的醋酸菌有利于红酸汤发酵形成特殊的风味，过量则会产生异味导致发酵失败[88]。醋酸菌产生的乙酸对酯类的形成具有重要作用，其与多种挥发性酯类有紧密相关性[89]。

酸汤中的风味物质主要是通过微生物产生的酶对物质进行转化而成。因此，控制酸汤发酵过程中微生物的代谢就可以达到控制风味物质形成的目的。控制微生物代谢有2种策略，一种是调节酶活性，另一种是调节酶合成。微生物酶活性调节可分为激活和抑制，是通过中间代谢物或最终产物改变酶分子的催化活性来控制代谢速率，这种调节可以防止细胞中某些代谢物的过度合成，同时避免其他代谢物的合成不足。微生物酶合成调节是通过调节酶合成量来调节代谢速率，酶合成的调节分为代谢终产物的反馈抑制和代谢终产物的诱导合成[84]。

此外，从微生物基因层面也可控制其代谢产物，通过控制生物合成途径和宿主的代谢通量、设计最优的遗传背景和调节基因表达来实现高效生产[90]。在酸汤发酵过程中，可通过调节物料中酶的含量，如添加产生脂肪酶或分解蛋白质的微生物，以及直接添加酶控制代谢。同时也可改变微生物的特定生长条件，如前期微氧条件可以促进酵母菌和醋酸菌的增殖，而后期厌氧条件可以抑制霉菌生长，增强乳酸菌优势地位；酸汤的pH也会影响优势菌群，较低的pH既可以抑制腐败菌（如大肠杆菌）生长，同时也可以激活耐酸菌（如鼠李糖乳酪杆菌）的代谢活性，维持有机酸与酯类平衡；调整发酵温度也可以控制酸汤中的微生物，进而影响风味物质的形成。

总之，乳酸菌和酵母菌的生长代谢是影响酸汤风味化合物形成的主要因素，此外，可以通过控制酸汤中的微生物或酶实现对酸汤风味物质的调控。后续仍需深入研究风味物质的形成机制。

表2 酸汤风味物质及相关微生物

Table 2 Flavor compounds and related microorganisms in sour soup

分类	风味物质	功能	相关微生物	参考文献
有机酸	乳酸、琥珀酸、柠檬酸、乙酸、丁酸等	形成酸汤特色风味、降解亚硝酸盐、促进肠道蠕动	乳酸杆菌、醋酸菌等	[25,58,89]
游离氨基酸	丙氨酸、谷氨酸、天冬氨酸等	具有鲜、甜等滋味	乳酸菌、酿酒酵母等	[56,58]
挥发性酯类	乙酸乙酯、乙酸丁酯、丙酸乙酯、丁酸乙酯、己酸丙酯等	增加酸汤香味强度、让酸汤香味更加丰富	与细菌的相关性最高，如乳杆菌、嗜盐单胞菌、双歧杆菌、片球菌、乳球菌、泛球菌、醋酸菌等，另外还有酿酒酵母等真菌	[58-59,85,89]
挥发性醇类	2-辛醇、2-丙醇、丙醇、α-松油醇等	增加酸汤的果香、醇香等	乳酸菌、酵母菌等	[25,70]
挥发性醛类	2-甲基丁醛、苯甲醛等	具有香甜、坚果味、蘑菇味等	乳酸杆菌、酵母菌等	[70]
其他	2-庚酮、2-丁酮、2-壬酮、苎烯等	水果香味、香草味等。	*Comamonas*、*Meyerozyma*、*Candida*、乳酸菌等	[57,70,89]

4 展望

酸汤具有调味、增香和提升食物品质的作用，然而其生产方式仍以自然发酵为主。自然发酵依靠原料携带微生物的共同作用，乳酸菌和酵母菌是酸汤自然发酵过程中的主要微生物，其生长代谢活动直接或间接形成了酸汤中的有机酸、酯类、游离氨基酸、醇类、醛类等风味物质。原料携带微生物的差异会影响发酵过程的优势微生物，最终导致酸汤产品的品质不均匀等问题。因此，一方面要推动工业化纯种发酵酸汤技术的发展，优化发酵工艺和条件，从而获得具备良好风味的酸汤；另一方面在酸汤发酵过程中应控制优势微生物的种类和数量，例如通过控制温度、发酵时间、空气量以及添加微生物等方式，最终获得具有优良风味和品质的酸汤产品。

参考文献

[1] GAO Y X, HOU L Z, GAO J, et al. Metabolomics approaches for the comprehensive evaluation of fermented foods: a review[J]. Foods, 2021, 10(10): 2294.

[2] KOTHE C I, CARØE C, MAZEL F, et al. Novel misos shape distinct microbial ecologies: opportunities for flavourful sustainable food innovation[J]. Food Research International, 2024, 189: 114490.

[3] BAE S, CHOI Y J, PARK S E, et al. Effects of seasonal harvest of kimchi cabbage on microbial and metabolic profiles of kimchi[J]. Food Research International, 2024, 188: 114476.

[4] LIU S N, HAN Y, ZHOU Z J. Lactic acid bacteria in traditional fermented Chinese foods[J]. Food Research International, 2011, 44(3): 643-651.

[5] 刘金，王亮. 小红尖椒对红酸汤的微生物群落结构及其品质的影响[J]. 中国酿造，2023，42(12)：104-109.
LIU J, WANG L. Effects of small red pepper on microbial community structure and the quality of red sour soup[J].

China Brewing，2023，42(12)：104-109.(in Chinese)
[6] YUAN X Y，WANG T，SUN L P，et al. Recent advances of fermented fruits：a review on strains，fermentation strategies，and functional activities[J]. Food Chemistry：X，2024，22：101482.
[7] LIN L J，WU J Y，CHEN X，et al. The role of the bacterial community in producing a peculiar smell in Chinese fermented sour soup[J]. Microorganisms，2020，8(9)：1270.
[8] ZHENG H S，HUANG C B，LIU S H，et al. Effect of ultrasound treatment on the oxidation and conformational structure of myofibrillar protein of beef marinated in red sour soup[J]. Meat Science，2025，224：109779.
[9] 潘季红. 红酸汤干制工艺及烹饪肉类食品品质研究[D]. 贵阳：贵州大学，2020.
[10] WU W Y，WANG X Y，HU P，et al. Research on flavor characteristics of beef cooked in tomato sour soup by gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose[J]. LWT-Food Science and Technology，2023，179：114646.
[11] ZHENG H S，LI L L，HUANG C B，et al. Evaluation of ultrasound-assisted tomato sour soup marination on beef：insights into physicochemical，sensory，microstructural，and flavour characteristics[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2024，110：107028.
[12] 黄朝斌，雷兴，王晓宇，等. 酸汤牛肉工艺优化[J]. 肉类研究，2023，37(8)：14-19.
HUANG C B，LEI X，WANG X Y，et al. Optimization of recipe for sour soup with beef[J]. Meat Research，2023，37(8)：14-19.(in Chinese)
[13] 唐小航，姜启兴，夏文水，等. 酸汤鲫鱼酸化及杀菌工艺研究[J]. 食品与生物技术学报，2021，40(9)：85-93.
TANG X H，JIANG Q X，XIA W S，et al. Study on acidification and sterilization of sour soup channel catfish[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2021，40(9)：85-93.(in Chinese)
[14] ALI M Y，ALI IBN SINA A，KHANDKER S S，et al. Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease：a review[J]. Foods，2021，10(1)：45.
[15] XU Z N，ZHONG D J，WANG J Y，et al. Colour，physicochemical，microbiological and bioactive component quality analysis of peppers in Guizhou[J]. International Journal of Food Science & Technology，2023，58(2)：665-675.
[16] LIU N，HU Y，QIN L K，et al. Flavor and quality characteristics of Guizhou red sour soup prepared by different artificially fortified fermentation methods[J]. LWT-Food Science and Technology，2023，186：115247.
[17] CONG S，LI Z C，YU L，et al. Integrative proteomic and lipidomic analysis of Kaili Sour Soup-mediated attenuation of high-fat diet-induced nonalcoholic fatty liver disease in a rat model[J]. Nutrition & Metabolism，2021，18(1)：26.
[18] 曲子晗. 凯里红酸汤对高脂血症大鼠肠道影响[D]. 贵阳：贵州医科大学，2020.
[19] 杨红梅. 凯里红酸汤对肥胖大鼠脂质代谢的影响及其机制研究[D]. 贵阳：贵州医科大学，2021.
[20] 鲁杨. 凯里红酸汤成分及其对大鼠血脂调节作用研究[D]. 贵阳：贵州医科大学，2019.
[21] 李正超. 贵州凯里酸汤食用频次对大鼠非酒精性脂肪肝的影响及机制探究[D]. 贵阳：贵州医科大学，2022.
[22] LI L C，SUN H Y，TAN L B，et al. Miao sour soup alleviates DSS-induced colitis in mice：modulation of gut microbiota and intestinal barrier function[J]. Food & Function，2024，15(16)：8370-8385.
[23] 石庆楠，刘桂琼，张建炀. 凯里白酸汤的研究进展[J]. 黑龙江粮食，2021(10)：98-99.
SHI Q N，LIU G Q，ZHANG J Y. Research progress of Kaili baisuan decoction[J]. Heilongjiang Grain，2021(10)：98-99.(in Chinese)
[24] WANG C，ZHANG Q，HE L P，et al. Determination of the microbial communities of Guizhou Suantang，a traditional Chinese fermented sour soup，and correlation between the identified microorganisms and volatile compounds[J]. Food Research International，2020，138：109820.
[25] LI J，WANG X Y，WU W Y，et al. Comparison of fermentation behaviors and characteristics of tomato sour soup between natural fermentation and dominant bacteria-enhanced fermentation[J]. Microorganisms，2022，10(3)：640.
[26] 伍桃英，易仕杨，李剑锋，等. 乳酸菌的筛选及在优化酸汤发酵工艺中的应用[J]. 食品与机械，2025，41(1)：42-52.
WU T Y，YI S Y，LI J F，et al. Screening of lactic acid bacteria and their application in optimizing the fermentation process of sour soup[J]. Food & Machinery，2025，41(1)：42-52.(in Chinese)
[27] XIONG K X，HAN F，WANG Z H，et al. Screening of dominant strains in red sour soup from Miao nationality and the optimization of inoculating fermentation conditions[J]. Food Science & Nutrition，2021，9(1)：261-271.
[28] NGUYEN N N，TRAN L T D，HO N D K，et al. Dietary nitrate，nitrite，and nitrosamine in association with diabetes：a systematic review and meta-analysis[J].

Nutrition Reviews，2024，82(11)：1473-1481.

[29] SHAKIL M H，TRISHA A T，RAHMAN M，et al. Nitrites in cured meats，health risk issues，alternatives to nitrites：a review[J]. Foods，2022，11(21)：3355.

[30] TAN X Q，CUI F C，WANG D F，et al. Fermented vegetables：health benefits，defects，and current technological solutions[J]. Foods，2024，13(1)：38.

[31] LI M N，YAO Q B，ZHANG H R，et al. Impact of different lactic acid bacteria on nitrite degradation and quality of fermented carrot[J]. International Journal of Food Science & Technology，2024，59(9)：6501-6512.

[32] LU Y H，WU J M，HUANG J R，et al. Fermented vegetables in China：overview，novel processes，influencing factors，lactic acid bacteria and industrialisation status [J]. International Journal of Food Science & Technology，2024，59(7)：4420-4436.

[33] YANG H，XIONG J，HE L P，et al. Stress tolerance，safety，and probiotic traits of cholesterol-decreasing *Bifidobacterium* BLH1 isolated from Guizhou red sour soup，a traditional Chinese fermented food[J]. LWT-Food Science and Technology，2024，192：115696.

[34] POLESEL J，DIMASO M，ESPOSITO G，et al. A plant-based cholesterol-lowering diet score correlates with serum LDL-cholesterol levels[J]. Nutrients，2024，16(4)：495.

[35] 伍泉烨. 辣椒酸汤优质菌株筛选及液态菌剂制备研究[D]. 贵阳：贵州大学，2024.

[36] 潘宇，杨第芹，朱霞，等. 酸汤中产酸酵母的筛选及性能测定[J]. 食品安全导刊，2024(21)：64-70.
PAN Y，YANG D Q，ZHU X，et al. Screening and performance determination of acid-producing yeast in sour soup[J]. China Food Safety Magazine，2024(21)：64-70.(in Chinese)

[37] 胡悦，刘娜，秦礼康，等. 分料发酵红酸汤乳酸菌和酵母菌的分离鉴定及应用[J]. 食品与发酵工业，2024，50(5)：116-123.
HU Y，LIU N，QIN L K，et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria and yeast from split-fermented red sour soup and their application[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(5)：116-123.(in Chinese)

[38] 王玉婷，徐瑞屿，牛鸿艳，等. 红酸汤中耐Cd^{2+}酵母菌的筛选及其吸附特性[J]. 食品研究与开发，2023，44(13)：183-189.
WANG Y T，XU R Y，NIU H Y，et al. Screening and adsorption characteristics of cadmium-resistant yeast in red acid soup[J]. Food Research and Development，2023，44(13)：183-189.(in Chinese)

[39] 李厚强. 具有抑菌作用乳酸菌筛选及其在红酸汤生产中的应用[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14(11)：164-170.
LI H Q. Screening of antimicrobial activities of lactic acid bacteria and its application to red sour soup[J]. Journal of Food Safety & Quality，2023，14(11)：164-170.(in Chinese)

[40] ZHOU Q L，ZHAO C Y，LI X F，et al. Discovery of lactic acid bacteria with high nucleoside degradation and low purine production in tomato sour soup [J]. International Journal of Food Microbiology，2025，434：111139.

[41] 吴茂钊，王斌，杜江，等. 苗族白酸汤中优势乳酸菌及酵母菌的筛选与应用[J]. 食品工业科技，2023，44(3)：163-171.
WU M Z，WANG B，DU J，et al. Screening and application of dominant lactic acid bacteria and yeasts in rice sour soup from Miao[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(3)：163-171.(in Chinese)

[42] 唐艳平，张凤琴，郝红梅. 贵州白酸汤优势产酸乳酸菌的筛选及发酵性能比较[J]. 中国食品添加剂，2023，34(10)：101-110.
TANG Y P，ZHANG F Q，HAO H M. Screening of dominant acid-producing lactic acid bacteria from Guizhou white sour soup and its fermentation performance comparison[J]. China Food Additives，2023，34(10)：101-110.(in Chinese)

[43] 赵承鑫，李艾蒙，杨小云，等. 凯里白酸汤乳酸菌的分离鉴定及菌种性能测定[J]. 中国调味品，2022，47(12)：32-36.
ZHAO C X，LI A M，YANG X Y，et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria from Kaili rice sour soup and determination of bacterial properties[J]. China Condiment，2022，47(12)：32-36.(in Chinese)

[44] 肖甜甜，冯子娟，邱树毅，等. 苗家白酸汤中微生物群落多样性研究及其优势微生物的筛选[J]. 食品与发酵科技，2021，57(1)：1-11，45.
XIAO T T，FENG Z J，QIU S Y，et al. Microbial community diversity and acquisition of dominant microorganisms in Hmong rice acid soup[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology，2021，57(1)：1-11，45.(in Chinese)

[45] AGUIRRE-GARCIA Y L，NERY-FLORES S D，CAMPOS-MUZQUIZ L G，et al. Lactic acid fermentation in the food industry and bio-preservation of food [J]. Fermentation，2024，10(3)：168.

[46] AYED L，M'HIR S，NUZZOLESE D，et al. Harnessing the health and techno-functional potential of lactic acid

bacteria: a comprehensive review[J]. Foods, 2024, 13(10): 1538.

[47] YANG H, HAO L Y, JIN Y, et al. Functional roles and engineering strategies to improve the industrial functionalities of lactic acid bacteria during food fermentation [J]. Biotechnology Advances, 2024, 74: 108397.

[48] LEE S M, HWANG Y R, KIM M S, et al. Comparison of volatile and nonvolatile compounds in rice fermented by different lactic acid bacteria[J]. Molecules, 2019, 24(6): 1183.

[49] WANG Y Q, WU J T, LV M X, et al. Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 612285.

[50] SHARMA P, SHARMA A, LEE H J. Antioxidant potential of exopolysaccharides from lactic acid bacteria: a comprehensive review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281(2): 135536.

[51] YANG Y, JIANG G Y, TIAN Y Q. Biological activities and applications of exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria: a mini-review [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2023, 39(6): 155.

[52] YANG X H, HONG J Q, WANG L H, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on plant-based products [J]. Fermentation, 2024, 10(1): 48.

[53] LI B B, JIANG G L, LI S L, et al. Integrating Label-free proteomics and molecular dynamics to investigate the interactions between proteins and bioactive compounds in *Rosa roxburghii* Tratt fermented by *Lactobacillus acidophilus* GIM1.208[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103748.

[54] LI B B, YUAN D D, SONG S G, et al. Effects of *Lactobacillus acidophilus* GIM1.208 on antioxidant and hypoglycemic activities, flavor and glycosides of *Rosa roxburghii* Tratt[J]. Food Bioscience, 2023, 55: 102948.

[55] LI B B, ZHANG T, DAI Y, et al. Effects of probiotics on antioxidant activity, flavor compounds and sensory evaluation of *Rosa roxburghii* Tratt [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 179: 114664.

[56] LIU N, HU Y, WU M X, et al. The quality characteristics and microbial communities of three components in traditional split-fermented red sour soup[J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(10): 7287-7305.

[57] 王婵. 凯里红酸汤菌群、风味分析及其品质提升和应用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.

[58] LI D F, DUAN F X, TIAN Q M, et al. Physiochemical, microbiological and flavor characteristics of traditional Chinese fermented food Kaili Red Sour Soup[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 110933.

[59] LIN L J, ZENG J, TIAN Q M, et al. Effect of the bacterial community on the volatile flavour profile of a Chinese fermented condiment-red sour soup-during fermentation [J]. Food Research International, 2022, 155: 111059.

[60] HAN D, YANG Y S, GUO Z T, et al. A review on the interaction of acetic acid bacteria and microbes in food fermentation: a microbial ecology perspective[J]. Foods, 2024, 13(16): 2534.

[61] LIU N, PAN J H, MIAO S, et al. Microbial community in Chinese traditional fermented acid rice soup (rice-acid) and its correlations with key organic acids and volatile compounds[J]. Food Research International, 2020, 137: 109672.

[62] 何扬波, 李国林, 李咏富, 等. 红酸汤发酵过程中微生物区系及挥发性物质组成变化分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 177-190.
HE Y B, LI G L, LI Y F, et al. Analysis of microflora and volatile substances change in red sour soup during fermentation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 177-190.(in Chinese)

[63] POURIS J, KOLYVA F, BRATAKOU S, et al. The role of fungi in food production and processing[J]. Applied Sciences, 2024, 14(12): 5046.

[64] TAMANG J P, LAMA S. Probiotic properties of yeasts in traditional fermented foods and beverages[J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 132(5): 3533-3542.

[65] CHEN L, LI K, CHEN H T, et al. Reviewing the source, physiological characteristics, and aroma production mechanisms of aroma-producing yeasts[J]. Foods, 2023, 12(18): 3501.

[66] LIU D T, CHEN J, LI X, et al. Revealing the microbial contributions in chili paste fermentation by inoculating *in situ* microbiome[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115632.

[67] GMELCH T J, SPERL J M, SIEBER V. Optimization of a reduced enzymatic reaction cascade for the production of *L*-alanine[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 11754.

[68] MA L Y, LI J M. Food flavor substances.[M]Singapore: Springer Singapore, 2021: 433-509.

[69] 潘季红, 秦礼康, 文安燕, 等. 贵州红酸汤营养品质及呈味特征分析[J]. 中国调味品, 2020, 45(6): 43-48, 53.
PAN J H, QIN L K, WEN A Y, et al. Analysis of nutritional quality and flavor characteristics of red acid soup in Guizhou Province[J]. China Condiment, 2020, 45(6): 43-48, 53.(in Chinese)

[70] ZHANG X, WANG Z Y, XU X B, et al. The

relationships between flavor substances and microbial communities during the fermentation of Chinese traditional red sour soup[J]. Food Bioscience，2024，62：105451.

[71] 胡悦. 分料与混料发酵红酸汤品质研究[D]. 贵阳：贵州大学，2023.

[72] YAMAMOTO T，INUI-YAMAMOTO C. The flavor-enhancing action of glutamate and its mechanism involving the notion of kokumi[J]. npj Science of Food，2023，7：3.

[73] HARMON C P，AHMED O M，BRESLIN P A S. Amino acid bitterness：characterization and suppression[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2024，72（41）：22753-22765.

[74] LIU N，QIN L K，PAN J H，et al. Characteristics of traditional Chinese acidic rice soup（rice-acid）prepared with different fermentation methods[J]. Food Science and Human Wellness，2022，11（2）：277-288.

[75] LOUW S. Recent trends in the chromatographic analysis of volatile flavor and fragrance compounds：annual review 2020[J]. Analytical Science Advances，2021，2（3/4）：157-170.

[76] ZHANG Q，WANG Y D，MENG F Y，et al. Comparative analysis of the volatile flavor compounds of *Monascus*-fermented cheese with different ripening periods by SPME-GC-MS，SPME-GC×GC-MS，and HS-GC-IMS[J]. Food Bioscience，2024，62：105045.

[77] SONG H L，LIU J B. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis[J]. Food Research International，2018，114：187-198.

[78] ZHOU X J，LIU Z Q，XIE L，et al. The correlation mechanism between dominant bacteria and primary metabolites during fermentation of red sour soup[J]. Foods，2022，11（3）：341.

[79] 张东亚. 红酸汤发酵工艺优化及品质控制研究[D]. 贵阳：贵州大学，2018.

[80] 陆敏，陈菊，王雪雅，等. 电子鼻结合HS-SPME-GC-MS技术解析贵州主产区红酸汤香气成分[J]. 中国酿造，2024，43（11）：231-236.
LU M，CHEN J，WANG X Y，et al. Analysis of aroma components of red sour soup from main producing areas of Guizhou using electronic nose combined with HS-SPME-GC-MS[J]. China Brewing，2024，43（11）：231-236.（in Chinese）

[81] LI J L，MAO Y，SHEN W Y，et al. Effect of epigallocatechin gallate/transglutaminase synergistic cross-linking on the flavor of surimi gels[J]. Food Chemistry，2025，464：141914.

[82] ZHANG X J，GAO P，XIA W S，et al. Characterization of key aroma compounds in low-salt fermented sour fish by gas chromatography-mass spectrometry，odor activity values，aroma recombination and omission experiments[J]. Food Chemistry，2022，397：133773.

[83] 魏涛涛，左云洋，王令，等. 不同乳酸菌发酵对刺梨汁品质及风味影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43（4）：90-97.
WEI T T，ZUO Y Y，WANG L，et al. Effects of fermentation with different lactic acid bacteria on quality and fragrance of *Rosa roxburghii* Tratt juice[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43（4）：90-97.（in Chinese）

[84] ZHANG K，ZHANG T T，GUO R R，et al. The regulation of key flavor of traditional fermented food by microbial metabolism：a review[J]. Food Chemistry：X，2023，19：100871.

[85] DUAN F X，LUO Y，LI D F，et al. Kaili red sour soup：correlations in composition/microbial metabolism and flavor profile during post-fermentation[J]. Food Chemistry，2024，435：137602.

[86] ZHANG X，XIONG K X，YE S H，et al. Effects of different raw materials on bacterial community and flavor compounds in fermented red sour soup[J]. Food Bioscience，2025，65：106034.

[87] ABDUL HAKIM B N，XUAN N J，OSLAN S N H. A comprehensive review of bioactive compounds from lactic acid bacteria：potential functions as functional food in dietetics and the food industry[J]. Foods，2023，12（15）：2850.

[88] 袁野，李云成，孟凡冰，等. 贵州红酸汤研究进展[J]. 粮食与油脂，2022，35（6）：19-23.
YUAN Y，LI Y C，MENG F B，et al. Research progress on Guizhou red sour soup[J]. Cereals & Oils，2022，35（6）：19-23.（in Chinese）

[89] 周晓洁. 乳酸菌对红酸汤风味贡献机制研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2023.

[90] CARROLL A L，DESAI S H，ATSUMI S. Microbial production of scent and flavor compounds[J]. Current Opinion in Biotechnology，2016，37：8-15.

（责任编辑：史润东东）