

发酵辣椒营养与生物活性研究进展

段欣月¹, 张晓乐², 李金桩², 刘占英¹, 胡建华¹, 李永丽¹, 朱明达^{1*}

(1. 内蒙古工业大学化工学院, 内蒙古呼和浩特 010000)

(2. 内蒙古草原红太阳食品股份有限公司, 内蒙古呼和浩特 010000)

摘要: 发酵辣椒是一种以乳酸菌属和酵母菌属为主发酵而成的具有独特风味和营养特性的辣椒制品。与新鲜辣椒相比, 发酵辣椒经微生物分解作用产生更丰富的活性物质。该文主要介绍了发酵辣椒制品的种类和加工工艺, 探讨了辣椒发酵过程中营养成分的变化及主要风味化合物的代谢途径, 分析了发酵辣椒的生物活性物质与功效, 总结了目前国内外关于发酵辣椒的相关研究成果, 旨在促进对发酵辣椒的深入了解和研究。

关键词: 发酵辣椒; 营养成分; 生物活性; 营养素; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2025)06-366-375

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0491

Research Progress on Nutrition and Biological Activity of Fermented Chili Peppers

DUAN Xinyue¹, ZHANG Xiaole², LI Jinzhuang², LIU Zhanying¹, HU Jianhua¹, LI Yongli¹, ZHU Mingda^{1*}

(1. College of Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010000, China)

(2. Inner Mongolia Grassland Red Sun Food Co. Ltd., Hohhot 010000, China)

Abstract: Chili peppers fermented using Lactobacillus and Saccharomyces exhibit unique flavor profiles and enhanced nutritional characteristics. Compared to fresh peppers, fermented chili peppers possess more abundant bioactive substances produced during microbial fermentation. Different types of fermented chili pepper products and their processing technologies were introduced in this paper, and the changes in nutrient composition and the metabolic pathways of main flavor compounds due to fermentation were discussed. Next, the bioactive substances and efficacy of fermented chili peppers were analyzed. Finally, the relevant research results of fermented chili peppers at home and abroad were summarized. The ultimate aim of this study was to promote the in-depth understanding and research of fermented chili peppers.

Key words: fermented chili peppers; nutrient composition; biological activity; nutrients; antioxidation

引文格式:

段欣月, 张晓乐, 李金桩, 等. 发酵辣椒营养与生物活性研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 366-375.

DUAN Xinyue, ZHANG Xiaole, LI Jinzhuang, et al. Research progress on nutrition and biological activity of fermented chili peppers [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 366-375.

收稿日期: 2024-04-16

基金项目: 内蒙古自治区科技计划与成果转化项目 (2022YFHH0101)

作者简介: 段欣月 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: 2630537992@qq.com

通讯作者: 朱明达 (1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品精深加工与资源化利用, E-mail: zhumingda2003@163.com

辣椒是世界上广泛种植的蔬菜作物之一, 也是重要的调味料。辣椒最早产于美洲, 16 世纪后期引入中国, 我国作为世界第一大辣椒生产国与消费国, 种植面积达 3 000 万亩以上, 占世界辣椒播种面积的 40%, 辣椒产量约占世界总产量的 50%^[1]。根据种植面积分布情况显示, 全国共有 28 个省种植辣椒,

华北地区和西北地区是辣椒的主要产地，主要包括直角椒、螺丝椒和厚皮甜椒等品种，东北地区辣椒品种类型以沈椒、黄绿皮尖椒和厚皮甜椒为主，华南地区辣椒品种主要有线椒、干椒、朝天椒、羊角椒等。辣椒中维生素、矿物质、辣椒素等营养素含量较高，具有调节血糖、抗氧化、抗菌、抗炎等功效^[2]。辣椒发酵后会发生一系列的物理变化及生物化学变化，具有独特的发酵风味和营养价值。发酵辣椒富含多种营养物质，其中包括有机酸、氨基酸、维生素及辣椒素等，对人体健康具有积极影响。发酵过程中，微生物利用辣椒中的糖类、蛋白质、脂质等产生一系列独特的风味物质，发酵辣椒以其独特的风味和营养价值备受广大消费者的青睐。此外，发酵辣椒的辣度会降低，口感更加柔和，适合更多人的口味。近年来，随着微生物技术在辣椒生产中的广泛应用，接种发酵能够减少杂菌污染，提高辣椒制品质量，接种发酵技术成为发酵辣椒的研究热点。本文从发酵辣椒的种类及生产工艺入手，综述了发酵辣椒制品的营养成分、生物活性物质及功效，介绍了国内外发酵辣椒制品的研究现状，并对发酵辣椒制品未来的研究方向进行了展望，以期对发酵辣椒的开发和利用提供参考。

1 发酵辣椒制品种类

发酵辣椒是我国辣椒产业的重要加工产品，主要包括剁辣椒、泡辣椒和辣椒酱等产品，不同区域的生态环境及气候条件造就了不同饮食习惯，因而生产出不同风格和形式的发酵辣椒制品，发酵辣椒制品种类及特点见表 1。发酵辣椒是以辣椒为主要原料，经乳酸菌属和酵母菌属为主多种微生物发酵制成的产品，生产工艺如图 1 所示。泡椒是以二荆条辣椒、子弹头辣椒、墨西哥辣椒等为原料，将辅料加入泡菜坛后，在适宜的温度下采用自然发酵或接种乳酸菌发酵。剁辣椒通常以新鲜辣椒为原料，洗净后剁成薄片，加入适当调味料后，接入发酵剂，翻拌均匀，封口发酵，具有独特的发酵风味。辣椒酱是一种由辣椒经加工制成的调味品，通常将辣椒磨碎，加入盐、糖、蒜等其他调味料混合炒制，添加发酵剂，灌装密封发酵而成，其口味鲜甜微辣，广泛用于烹饪、调味和腌制食物。目前，采用接种发酵、低盐发酵、二次发酵等新兴发酵工艺制作发酵辣椒取得了一定的突破^[3-5]，但部分研究还只处于试验和中试阶段，大规模产业化生产仍相对较少。

表 1 发酵辣椒制品种类
Table 1 Types of fermented chili products

发酵辣椒制品种类			辣椒品种	发酵方式	参考文献
泡辣椒	国外	土耳其泡椒	Üçburun 辣椒	自然 / 接种	[6]
	国内	四川泡椒	二荆条辣椒 / 小米辣	自然 / 接种 / 二次	[7,8]
		贵州、广西多彩泡椒	遵义辣椒 / 灯笼椒		[9]
剁辣椒	国内	湖南剁椒	七姊妹辣椒 / 灯笼椒	自然 / 接种	[10]
		贵州剁椒	朝天椒 / 野山椒		[11]
辣椒酱	国外	墨西哥红辣椒酱	墨西哥辣椒 Jalapeno	自然 / 接种	[12]
		哈瓦那辣椒酱	哈瓦那辣椒		[13]
	国内	韩国 Gochujang 辣椒酱	Gochu 辣椒	自然	[14]
		郫县豆瓣酱	二荆条辣椒		[15]
		海南黄灯笼辣椒酱	黄灯笼辣椒	自然 / 低盐 / 接种	[16]
糟辣椒	国内	贵州 / 云南糟辣椒	红线椒 / 小米椒	自然	[18]
糍粑辣椒	国内	贵州糍粑辣椒	遵义辣椒	自然 / 接种	[19]

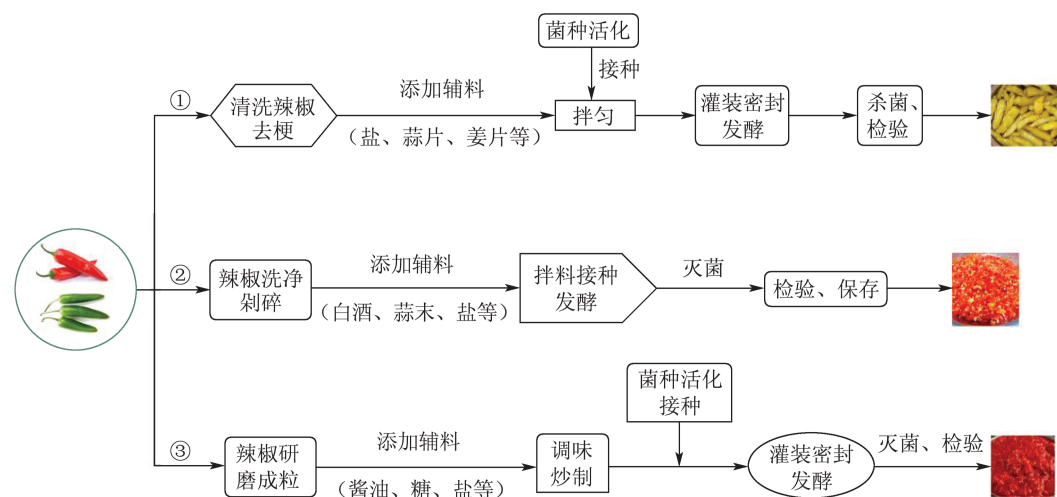


图 1 发酵辣椒制品生产工艺

Fig.1 Production technology of fermented chili products

表 2 发酵辣椒制品营养成分及变化

Table 2 Nutritional composition and changes of fermented chili products				
营养成分	种类	发酵菌种	主要变化	参考文献
有机酸	泡椒（朝天椒）	植物乳杆菌、季也蒙迈耶氏酵母	接种发酵辣椒有机酸总量显著增加，乳酸占比最高	[21]
	剁椒（红线椒）	植物乳杆菌	接种发酵辣椒有机酸总量高于自然发酵，乳酸含量最高	[22]
	泡椒（墨西哥辣椒）	琥珀葡萄球菌	促进甜味和鲜味游离氨基酸的产生	[23]
氨基酸	辣泡菜（红辣椒粉）	/	添加红辣椒粉的泡菜中鸟氨酸含量约为对照的 75 倍	[24]
	剁椒（艳红辣椒）	乳酸菌	谷氨酰胺、精氨酸、天冬酰胺含量最高，接种组氨基酸含量高于自然发酵	[25]
	韩国 Gochujang	/	小麦辣椒酱中富含高浓度的氨基酸和糖，大米辣椒酱中富含 γ -氨基丁酸	[26]
维生素	发酵辣椒酱（墨西哥辣椒）	类布氏乳杆菌	类胡萝卜素分解形成的挥发性化合物影响辣椒的特征风味	[27]
	发酵辣椒（墨西哥辣椒）	融合魏斯氏菌 食实魏斯氏菌	发酵辣椒中的维生素 A 和胡萝卜素含量有所增加	[28]
	发酵辣椒粉（Cayenne 辣椒）	植物乳杆菌	维生素 C 的总损失较低	[29]
挥发性风味物质	市售剁辣椒	/	产生酯类、醇类和酸类物质	[30]
	韩国 Gochujang	/	检测到醇类、醛类、烷烃类物质，亚油酸乙酯是主要香气成分	[31]
辣椒素	韩国发酵辣椒	枯草芽孢杆菌	辣椒素降解率达 88%	[32]
	辣椒酱（红辣椒变种）	/	辣椒素含量在 0.012 6%~0.05% 之间，苯酚和黄酮类化合物含量升高	[33]

2 发酵辣椒制品营养成分

辣椒发酵过程中，微生物可以生成多种酶，有助于降解辣椒中的各种成分，从而赋予发酵产品独特的口感和风味。乳酸菌发酵可以将碳水化合物氧化为二氧化碳和有机酸，也可以将食物中蛋白质分解，生成机体可直接吸收的有机酸、小分子肽及氨

基酸等营养成分，另外还能增强机体对纤维及矿物质等关键营养素的摄取与利用^[20]。辣椒素和维生素等成分会经过降解和转变，产生其他风味活性成分。发酵辣椒制品营养成分及变化见表 2。

2.1 有机酸

在发酵过程中，辣椒中的葡萄糖和果糖等天然

糖分被微生物代谢产生有机酸，对辣椒的口感、风味和营养功效起着重要作用。乳酸菌属是辣椒发酵过程中的主要优势菌种，糖酵解是乳酸菌合成有机酸的重要途径之一，如图 2 所示，在糖酵解过程中，葡萄糖经过一系列的酶催化反应生成丙酮酸，丙酮酸进一步代谢产生有机酸。常见的有机酸包括乳酸、苹果酸、柠檬酸等，其中乳酸是酸味的主导因子。研究发现，红辣椒和番茄发酵制作的酸汤里，乳酸占比最高，其次是乙酸^[34]。乳酸发酵又分为同型乳酸发酵和异型乳酸发酵，同型乳酸发酵通过糖酵解途径（EMP）产生乳酸，异型发酵通过磷酸酮醇酶途径（PK）发酵糖；常见的同型发酵乳酸菌包括植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌、保加利亚乳杆菌、乳球菌属等，异型发酵乳酸菌有明串珠菌属、短乳杆菌等^[35]。贺子玉等^[21]选取植物乳杆菌和季也蒙迈耶氏酵母对辣椒进行低盐接种发酵，有机酸总量显著增加，乳酸含量最高，接种植物乳杆菌能够促进乳酸的生成。叶陵等^[22]研究发现接种辣椒所产生的有机酸总量高于自然发酵，接种发酵辣椒中乳酸含量最高，自然发酵辣椒中含有较高含量的柠檬酸和苹果酸。不同的有机酸会呈现不同的特征，柠檬酸具有直爽的酸味，苹果酸则呈现出温和而爽利的酸味，乳酸的酸味则比较尖锐。发酵辣椒中的有机酸是特有成分，赋予辣椒独特的酸味和风味。

2.2 氨基酸

氨基酸既是重要的营养物质，又是呈味物质，参与发酵辣椒品质特征成分和风味物质的合成。蛋

白质代谢是生成氨基酸的主要途径，微生物在发酵过程中分泌蛋白酶，将可溶性蛋白质水解成游离氨基酸。游离氨基酸在发酵辣椒呈味方面有至关重要的作用，具有鲜、甜、酸、苦、涩的味感，丰富食品的味觉层次。发酵辣椒中主要含有酪氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸等苦味氨基酸，苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸和蛋氨酸等甜味氨基酸，以及赋予发酵辣椒鲜味的谷氨酸和天冬氨酸等^[36]。Li 等^[23]探究琥珀葡萄球菌对发酵辣椒风味的影响，发现天冬氨酸和谷氨酸是其中主要的香气氨基酸，接种琥珀葡萄球菌可调节氨基酸代谢相关基因，促进了甜味和鲜味游离氨基酸的产生，进一步改善了发酵辣椒的风味和品质。研究发现，添加红辣椒粉的泡菜中魏斯氏菌含量较高，由于其精氨酸脱氨酶活性很强，催化精氨酸代谢产生鸟氨酸，因此泡菜中鸟氨酸含量约为对照的 75 倍，由此说明，魏斯氏菌在鸟氨酸生产中具有关键作用^[24]。Wang 等^[25]从自然发酵和接种发酵辣椒中共鉴定出 20 种游离氨基酸，包括 8 种必需氨基酸、2 种半必需氨基酸和 10 种非必需氨基酸，其中谷氨酰胺、精氨酸、天冬酰胺在整个发酵周期内含量最高，同一发酵周期内，接种发酵样品中游离氨基酸含量高于自然发酵样品。对韩国发酵红辣椒的代谢产物进行研究时，发现小麦辣椒酱中氨基酸和糖浓度较高，大米辣椒酱中富含 γ -氨基丁酸^[26]，该物质是一种非蛋白氨基酸，通过调节机体内氧化还原系统，保护细胞膜结构免受外界环境刺激，提高人体抵御疾病的能力。

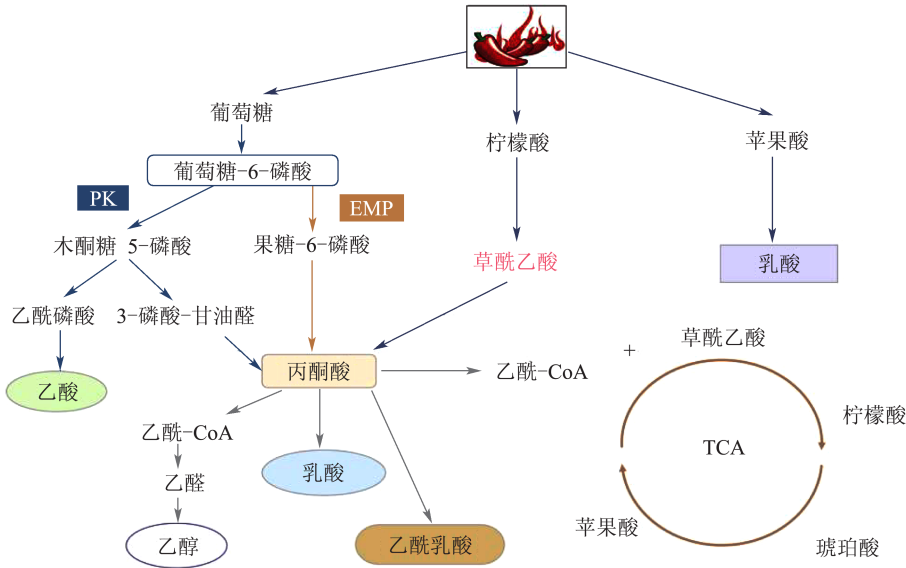


图 2 发酵辣椒制品中有机酸代谢途径

Fig.2 Metabolic pathway of organic acids in fermented pepper products

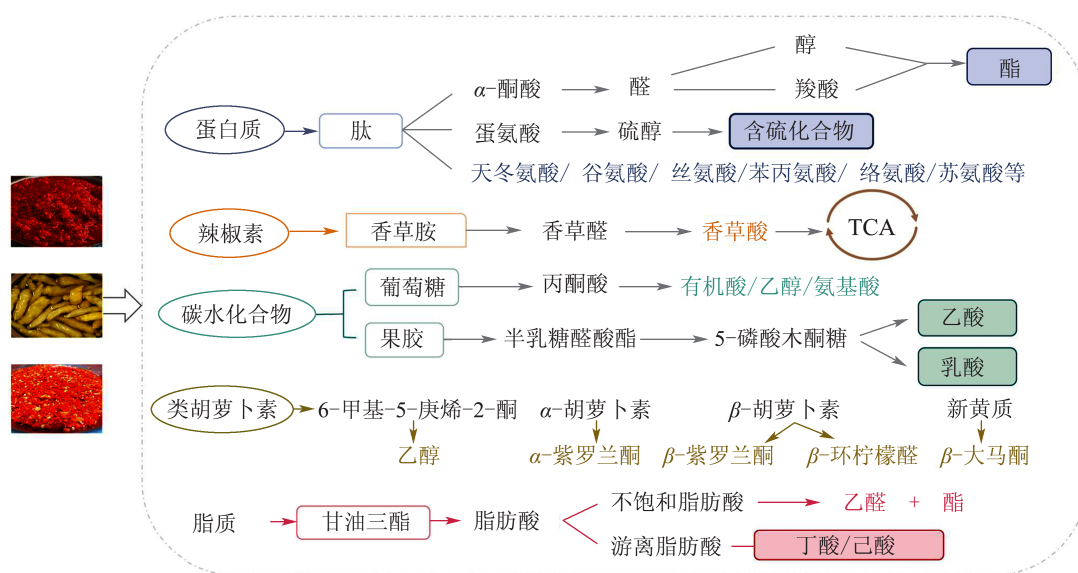


图3 发酵辣椒风味化合物合成途径

Fig.3 Synthetic pathway of flavor compounds in fermented pepper

2.3 维生素

维生素是人和动物维持机体生理功能所必需的一类有机物,参与机体生化反应并调节代谢功能^[37]。辣椒中含有丰富维生素C、类胡萝卜素、维生素A等,具有预防慢性疾病、清除自由基等有益特性^[38]。辣椒发酵过程中,微生物代谢会导致辣椒中维生素的降解和转化,生成其他潜在的风味活性物质。如图3所示,类胡萝卜素发生氧化裂解,形成6-甲基-5-庚烯-2-酮,并被进一步氧化生成酒精;类胡萝卜素的分解产物还包括 β -紫罗兰酮、 β -环柠檬醛和 β -大马酮等,它们是发酵辣椒香气特征的主体化合物。 β -紫罗兰酮具有独特的木香、紫罗兰香和果香; β -环柠檬醛具有更温和的青草香、花香和干草香气特征; β -大马酮则具有甜味、果香和花香。Lee等^[27]发现接种类布氏乳杆菌的发酵红辣椒中,类胡萝卜素分解形成的挥发性化合物影响辣椒的特征风味,尤其是叶黄素降解形成的 β -大马酮含量在发酵过程中逐渐增加,改变底物的香气和风味。发酵过程中微生物代谢和氧化反应导致维生素C的降解和损失,而某些微生物在进行代谢活动时,可能会产生或释放维生素A及其前体物质,使维生素A的含量增加。探究蔬菜发酵对营养素和生物成分的影响时发现,与其他蔬菜相比,发酵辣椒和胡萝卜中的维生素A含量有所增加^[28]。Păucean等^[29]对发酵辣椒粉进行检测,发现植物乳杆菌在发酵过程中表现出优势,维生素C的总损失较低,其含量在

3.98~11.07 mg/g之间。此外,发酵辣椒中还含有少量维生素B、维生素E及维生素K^[39],然而,营养成分的含量会受到许多因素的影响,例如,辣椒的种类、制作过程中添加的配料等。

2.4 挥发性风味物质

微生物发酵会引发多种次级代谢产物的生成,使辣椒在发酵前后风味物质的种类和含量发生显著变化,辣椒的口感和风味呈现出多样化的特征^[40]。发酵辣椒中已鉴定出上百种挥发性化合物,包括酯类、醇类、萜烯、烷烃、醛和含硫化合物等,这些化合物产生酸味、酒精味、花香和青香味^[3],这些风味物质的形成主要源于碳水化合物、蛋白质以及辣椒素等物质的降解与转化,图3概述了底物转化与发酵辣椒风味形成之间的关系。新鲜辣椒中含有丰富的碳水化合物,在各种碳水化合物中,果胶对于维持辣椒的结构有重要作用,发酵过程中微生物能够降解果胶生成丙酮酸,丙酮酸作为一种重要的中间体,能够通过乳酸菌生成乳酸等风味物质。辣椒中蛋白质代谢是产生风味物质的另一重要途径,大多数产生苦味、甜味和鲜味的味觉活性肽和游离氨基酸都来自蛋白质的水解,微生物可将蛋白质转化为 α -酮酸, α -酮酸代谢生成相应的醛作为中间体,醛再经脱氢酶转化为相应的醇和酸。研究表明,蛋氨酸参与蛋白质的分解代谢,与生物体内含硫化合物的代谢密切相关,蛋氨酸酶促转化为挥发性有机含硫化合物在形成食物特征香气方面起着重

要作用^[41]。此外，辣椒中的脂质不仅能为微生物提供营养，还是各种香气化合物的前体，乳酸菌属主要氧化不饱和脂肪酸生成醛和酯。酯类、醇类和酸类在形成发酵辣椒独特香气方面发挥着重要作用，己酸乙酯能够赋予发酵辣椒果香和酒香味^[30]；乙醇、己醇等醇类物质有助于产生甜味和新鲜味道；乙酸、己酸和癸酸等挥发性酸具有强烈的辛辣味和酸味^[42]。Ramalingam 等^[31]对韩国辣椒酱的挥发性化合物进行检测，所有样品中均发现了乙醇，还检测出了醇类、醛类、烷烃类几种挥发性化合物，其中亚油酸乙酯是产品的主要香气成分，使辣椒酱具有果香味。

2.5 辣椒素

辣椒素是辣椒产生辛辣风味的主要生物活性物质^[43]。辣椒发酵过程中微生物代谢会引起部分辣椒素类物质的降解，进而转化为风味物质^[44]。如图 3 所示，辣椒素被辣椒素酰化酶消化成香草胺和癸烯酸，香草胺能够进一步降解为香草醛和香草酸，可被微生物用作碳源和氮源。地衣芽孢杆菌是降解辣椒素的主要微生物之一，已被用于发酵辣椒汁以减少辣椒刺激性^[45]。通过比较从韩国传统发酵食品中分离的菌株对辣椒素降解能力，发现枯草芽孢杆菌

发酵的辣椒中辣椒素含量远低于其他菌株^[32]，含量分别从最初 1.03 mg/g 急剧下降到 0.12 mg/g，降解率达 88%，说明枯草芽孢杆菌能够有效降解辣椒素。Kusnadi 等^[33]对印度尼西亚的沙拉辣椒酱进行分析，其辣椒素含量在 0.0126%~0.05% 之间，苯酚和黄酮类化合物含量显著升高。气相色谱-质谱联用（GC-MS）测定辣椒酱中辣椒素和二氢辣椒素，含量分别在 0.000 14%~9.86% 和 0.000 22%~3.45% 之间^[46]。辣椒素通过改变细胞内的呼吸速率、抑制线粒体内糖基转移酶、减少脂质过氧化反应来发挥杀菌消毒作用。此外，辣椒素还可与多种药物相互作用增强疗效。

3 发酵辣椒制品生物活性物质及功效

发酵辣椒制品富含多种生物活性物质，具有重要的功效。发酵过程中微生物代谢可以产生有益的生物活性物质，如抗菌物质、抗氧化物质，这些物质在维持人体健康、预防疾病等方面发挥着重要作用；此外，发酵辣椒中富含多种对人体有利的益生菌，这些益生菌能够帮助调节肠道菌群平衡，抑制有害菌繁殖。图 4 概述了发酵辣椒制品相关的活性物质及功效。



图 4 发酵辣椒制品的生物活性

Fig.4 Biological activity of fermented pepper products

3.1 抗菌抗炎物质

乳酸菌属通过产生胞外多糖、过氧化氢、抗菌肽、二氧化碳等物质来抑制有害菌生长。近年来多项研究表明乳酸菌代谢产生的胞外多糖具有较强的抑菌能力^[47]。乳酸菌异型发酵生成二氧化碳形成厌氧环境,从而抑制需氧型微生物生长,并且二氧化碳会导致细胞液中 pH 下降,降低酶活性。乳酸菌代谢产生的有机酸、细菌素具有很好的抗菌作用,能够有效抑制有害微生物的生长和繁殖^[48]。Yi 等^[49]在发酵的 32 种蔬菜中检测抗菌活性,发酵青辣椒的抗菌产物活性最高,发酵 7 d 时抗菌活性达到最大值。从东北发酵辣椒酱中分离出的乳酸菌对金黄色葡萄球菌、沙门氏菌以及大肠杆菌有很强的抑菌作用^[50],主要抑制物质为乳酸、乙酸等,通过破坏细胞膜结构,使其不能正常生长繁殖来达到抑菌作用。除抗菌外,发酵辣椒中的辣椒素和维生素 C 还具有抗炎和消炎的作用,Mahoro 等^[51]考察韩国辣椒酱对葡聚糖硫酸钠(DSS)所致结肠炎的抗炎作用,发现辣椒酱可通过调控炎症因子及肠道菌群组成,减轻 DSS 诱发的大鼠结肠炎。研究表明,韩式辣酱通过减少肝损伤和炎症反应以及调节肠道菌群水平而表现出抗肝脏炎症作用^[52]。以上结果表明,发酵辣椒制品对于抑制有害菌和减轻炎症具有一定效果。

3.2 抗氧化物质

人体在利用氧气进行某些代谢反应的过程中会产生自由基等不稳定物质,抗氧化物质能有效地抑制自由基氧化反应。在辣椒发酵过程中,乳酸菌属遭遇氧化胁迫时能够生成超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)等多种抗氧化酶,这些抗氧化酶能够清除人体内的自由基。其次,乳酸菌属还能够通过螯合金属离子,间接降低氧化应激^[53]。Zhou 等^[54]从 24 个发酵辣椒样品中分离出 113 株乳酸菌,并检测了对于过氧化氢的耐受性,植物乳杆菌 GXL94 表现出最好的抗氧化特性,其发酵上清液 also 具有很强的还原能力和多种自由基清除能力。研究评估了五种不同发酵辣椒的抗氧化特性,采用 DPPH 法和 FRAP 法对总多酚和总黄酮进行分析,每种发酵辣椒均具有抗氧化特性,其中红灯笼椒抗氧化活性最强^[55]。探究不同剂量辣椒素对牛犊抗氧化能力影响,发现高剂量辣椒素增加了谷胱甘肽抗氧化酶和超氧化物歧化酶的水平,显著提高了牛犊

的抗氧化能力^[56]。此外,抗氧化活性与酚类化合物含量有关,酚类化合物、抗氧化活性与葡萄糖苷酶活性呈正相关^[57],对发酵前后辣椒水的抗氧化活性进行评价时,发酵后辣椒水的葡萄糖苷酶活性更高,导致游离酚类物质释放,抗氧化效果更好^[58]。因此,由于辣椒制品中的辣椒素,以及发酵过程中所产生的酶类和酚类化合物,这些成分具有抗氧化活性,可以中和自由基,保护细胞免受氧化损伤。

3.3 血糖调节活性物质

血糖反映机体对于葡萄糖的吸收及代谢水平。当人体的血糖调节失衡后会引发多种疾病,其中糖尿病发病率最高,对人体危害较大。乳酸菌属能够改变肠道菌群,促进胰岛素分泌,进而降低血糖^[59]。研究调查辣椒素是否对 1 型糖尿病大鼠有降血糖作用时,肝 X 受体和胰腺十二指肠同源盒基因 -1 通过调节葡萄糖激酶、葡萄糖转运蛋白 2、磷酸烯醇丙酮酸羧激酶和葡萄糖 -6- 磷酸酶的表达水平,控制糖代谢平衡,降低大鼠血糖水平^[60]。Kenig 等^[61]对三种辣椒酱的辣椒素含量进行检测后发现,每日适量摄入辣椒素可以有效降低葡萄糖和胆固醇水平。妊娠期糖尿病会增加女性及其后代的健康风险,探究辣椒素对女性血糖和脂代谢的影响时,发现辣椒素使血糖、血清胰岛素、血清总胆固醇和甘油三酯浓度显著降低,妊娠早期摄入辣椒素,可以减少产后并发症^[62]。相较于其他降血糖药物,辣椒素的安全性和耐受性更高,定期补充含辣椒素的辣椒可改善妊娠期女性血糖升高以及脂质代谢异常现象。

3.4 抗肥胖活性物质

肥胖是由于高能量摄入与低能量消耗之间的不平衡造成的,导致多种代谢紊乱。当肠道内的有害菌数量高于有益菌数量时,会出现消化不良、食欲不振等症状。乳酸菌属能够调节菌群平衡,帮助肠道恢复正常功能。此外,研究表明辣椒素具有抑制脂肪生成的能力^[63],通过作用于胃饥饿素,调节下丘脑饱足感并抑制食欲;上调解偶联蛋白 2(UCP2)和解偶联蛋白 3(UCP3)预防体质量上升^[64]。Zheng 等^[65]探讨了乳酸乳球菌发酵红辣椒的益生作用,与未发酵的辣椒相比,发酵红辣椒对肥胖 II 型糖尿病小鼠具有明显的减肥、降脂作用,并具有较好的胰岛素敏感性,为预防肥胖和糖尿病提供了一定参考。Zsiborás 等^[66]进行了一项人体研究,考察辣椒素和辣椒素酯对能量消耗和呼吸商的影响。结

果表明,摄入辣椒素后,能量消耗增加且呼吸商降低,脂肪氧化增强,这表明膳食辣椒素对改善肥胖有一定效果。Liu 等^[67]在研究中比较多株发酵辣椒和新鲜辣椒的提取物在肥胖小鼠中的抗肥胖作用,发酵辣椒组小鼠的血清、肝和粪便中的脂质和胆固醇更低。由此说明,发酵辣椒在防止脂肪积累和降低脂质水平方面具有很好的效果。

4 展望

发酵辣椒富含多种营养成分和活性成分,具有抗菌抗炎、抗氧化、调节血糖、改善肠道健康、促进新陈代谢等多种功效。尽管接种发酵辣椒的营养成分、风味物质和生物活性已经取得了一些进展,但未来还需对不同菌种协同发酵、菌群协调与代谢产物、次级代谢产物之间的机理深入研究;利用宏转录组学技术,分析不同发酵阶段辣椒样品中物种的转录组信息,揭示不同阶段主导微生物的代谢途径、基因表达及调控机制,通过比较不同发酵阶段微生物转录组数据的差异,探究微生物之间相互作用的方式和规律;利用代谢组学对发酵辣椒中的小分子代谢物进行全面、系统的分析,进一步探究辣椒发酵过程中的风味物质的变化和代谢途径。同时为了满足不同消费者的多样化需求,还需要多种现代加工技术加强对发酵辣椒产品的个性化开发,生产出高品质的发酵辣椒制品。

参考文献

- [1] 江雪梅,王锋,周书栋,等.不同辣椒品种对发酵剁辣椒品质及风味的影响[J].中国调味品,2023,48(4):1-6,19.
- [2] 张瑞祥,米富丽,马慧霞,等.市场上常见辣椒品种的维生素C和辣椒碱含量分析[J].现代食品,2021,19:215-217.
- [3] 郑训培,覃业优,巢瑾,等.常温低温发酵对二次发酵辣椒酱品质的影响比较[J].食品安全质量检测学报,2023,14(22):210-219.
- [4] 许九红,王修俊,聂黔丽,等.遵义泡辣椒二次发酵过程中挥发性风味物质的变化[J].中国食品学报,2024,24(5):415-427.
- [5] 王新惠,夏艳丽,赵芮,等.特色风味辣椒酱的开发[J].中国调味品,2019,44(4):136-138.
- [6] NALBANT A, OMEROGU E E. Lactic acid bacteria isolation from Üçburun peppers and comparison of the different production process for pickled pepper [J]. Fermentation, 2024, 10(4): 196.
- [7] 张诗瑶,肖玥,王新瑜,等.不同接种发酵和自然发酵对小米辣品质特性的影响[J].食品工业科技,2024,45(12):129-139.
- [8] 杨峰,巫朝华,范大明,等.四川泡椒对鲢鱼鱼糜凝胶风味特性的影响[J].食品科学,2017,38(16):152-157.
- [9] 罗继伟.贵州泡椒产膜菌鉴定及其防控技术初探[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [10] 许弯,刘伟,胡小琴,等.湖南剁辣椒中优良乳酸菌的筛选鉴定及其发酵辣椒汁风味研究[J].食品工业科技,2020,41(8):96-103.
- [11] 陈添艳,苏伟,母应春,等.剁椒山笋后熟过程中微生物与挥发性风味物质的相关性分析[J].食品科学,2023,44(6):180-189.
- [12] ARTILHA-MESQUITA C A F, STAFUSSA A P, RODRIGUES L M, et al. Ultrasonication and thermosonication applied in the processing of jalapeno pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum*) sauce [J]. Food Science and Technology International, 2023, 29(A): 1-11.
- [13] LÓPEZ-SALAS D, ONEY-MONTALVO J E, RAMÍREZ-RIVERA E, et al. Fermentation of habanero pepper by two lactic acid bacteria and its effect on the production of volatile compounds [J]. Fermentation, 2022, 5(8): 219.
- [14] RAMALINGAM S, BAHUGUNA A, LIM S, et al. Physicochemical, microbial, and volatile compound characteristics of Gochujang, fermented red pepper paste, produced by traditional cottage industries [J]. Foods, 2022, 11(3): 375.
- [15] 张蕾蕾,吴剑荣,张洪涛,等.基于GC-MS结合化学计量学方法鉴定四川郫县豆瓣酱[J].食品与发酵工业,2022,48(13):268-276.
- [16] 李玲玲,仇厚援,陈文学,等.常用防腐剂对黄灯笼辣椒酱腐败菌抑菌作用的优化[J].食品工业科技,2013,34(22):262-265.
- [17] 张睿艺,谢辽辽,田星.辣椒品种对发酵辣椒酱真菌多样性及其理化指标的影响[J].食品科技,2024,49(1):282-289.
- [18] 蔡亚妃.植物乳杆菌的筛选及其发酵糟辣椒特性研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
- [19] 王泽亮,范智义,王美丽,等.糍粑辣椒中辣椒素降解菌株的筛选应用[J].中国酿造,2023,42(7):147-153.
- [20] 唐先谱,褚新月,王实玉,等.乳酸菌在泡菜发酵中的研究进展[J].中国食品添加剂,2023,34(12):285-290.
- [21] 贺子玉,黄娇丽,易有金,等.低盐接种发酵辣椒对其风味品质的提升作用[J].现代食品科技,2024,40(2):273-283.
- [22] 叶陵,王晶晶,王蓉蓉,等.剁辣椒发酵过程中菌群与有机酸变化规律分析[J].食品科学,2018,39(6):116-121.
- [23] LI Y M, LUO X Q, GUO H, et al. Metabolomics and metatranscriptomics reveal the influence mechanism of endogenous microbe (*Staphylococcus succinus*) inoculation on the flavor of fermented chili pepper [J]. International Journal Food Microbiol, 2023, 406: 110371.
- [24] JUNG S, AN H, LEE J H. Red pepper powder is an essential

- factor for ornithine production in kimchi fermentation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137:110434.
- [25] WANG Y R, ZHOU H, DING S H, et al. Changes in free amino acids of fermented minced peppers during natural and inoculated fermentation process based on HPLC-MS/MS [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(9): 2803-2811.
- [26] LEE D E, SHIN G R, LEE S, et al. Metabolomics reveal that amino acids are the main contributors to antioxidant activity in wheat and rice Gochujangs (Korean fermented red pepper paste) [J]. Food Research International, 2016, 87: 10-17.
- [27] LEE S M, LEE J Y, CHO Y J, et al. Determination of volatiles and carotenoid degradation compounds in red pepper fermented by *Lactobacillus parabuchneri* [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(8): 2083-2091.
- [28] KICZOROWSKI P, KICZOROWSKA B, SAMOLINSKA W, et al. Effect of fermentation of chosen vegetables on the nutrient, mineral, and biocomponent profile in human and animal nutrition [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1-13.
- [29] PĂUCEAN A, KÁDÁR C B, SIMON E, et al. Freeze-dried powder of fermented chili paste-new approach to cured salami production [J]. Foods, 2022, 11(22): 3716.
- [30] 贺子玉,何心,胡楠,等.发酵辣椒中的微生物及其风味物质研究进展[J].现代食品科技,2023,39(8):334-342.
- [31] RAMALINGAM S, BAHUGUNA A, LIM S M, et al. Physicochemical, microbial, and volatile compound characteristics of Gochujang, fermented red pepper paste, produced by traditional cottage industries [J]. Foods, 2022, 11(3): 375.
- [32] LEE S M, LEE H S, LEE J, et al. Non-pungent capsicum fermentation by *Bacillus subtilis* P3-3 and its swimming endurance capacity in mice [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2010, 47(5): 200-205.
- [33] KUSNADI J, SAPUTRA A J B, WULAN S N, et al. Quality improvement formulation of salak chili paste based on curly red chili (*Capsicum annum* var. *hailux*) and pondoh salak (*Salacca edulis* reinw var. *semeru*) using sensory evaluation, activity evaluation of bioactive compounds and microbiological evaluation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1036(1): 012018.
- [34] LI D F, DUAN F X, TIAN Q M, et al. Physicochemical, microbiological and flavor characteristics of traditional Chinese fermented food kaili red sour soup [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 110933.
- [35] MARTINEZ F A C, BALCIUNAS E M, SALGADO J M, et al. Lactic acid properties, applications and production: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 30(1): 70-83.
- [36] 许九红,王修俊,聂黔丽,等.基于两次发酵法遵义特色泡辣椒游离氨基酸组成的主成分分析及综合评价[J].食品工业科技,2024, 45(3):262-269.
- [37] 黄小兰,龙超,胡路,等.不同灭菌抑菌方式对万州传统剁椒品质的影响[J].食品工业,2023,44(8):147-150.
- [38] RIVERA M G V, ALEJO N O. Chili pepper carotenoids: Nutraceutical properties and mechanisms of action [J]. Molecules, 2020, 25(23): 5573.
- [39] SILVA M P S D, FREITAS M S M, PEREIRA J A P, et al. Capsaicinoids and mineral composition of peppers produced under nutrient deficiencies [J]. Journal of Plant Nutrition, 2021, 44(6): 845-853.
- [40] 朱建仓,尤香玲,袁小钧,等.糍粑辣椒发酵过程中挥发性风味变化研究[J].中国调味品,2023,48(4):170-175.
- [41] ZHAO Q L, WANG Z L, YANG L, et al. YALI0C22088g from *Yarrowia lipolytica* catalyses the conversion of l-methionine into volatile organic sulfur-containing compounds [J]. Microbial Biotechnology, 2021, 14(4): 1462-1471.
- [42] XU X X, WU B B, ZHAO W T, et al. Correlation between autochthonous microbial communities and key odorants during the fermentation of red pepper (*Capsicum annum* L.) [J]. Food Microbiology, 2020, 91: 103510.
- [43] 李宏洋,张通化,罗丽蓉,等.泡椒汁中耐受辣椒素乳酸菌的筛选及其耐受性研究[J].食品与发酵工业,2024,50(4): 110-117.
- [44] 冯建英,何依璇,覃琚,等.基于电子鼻和气相-离子迁移谱探究辣椒素对植物乳杆菌LP-CL-01产香特性的影响[J].食品与发酵科技,2023,59(6):40-49.
- [45] CHO S, KIM J M, YU M S, et al. Fermentation of hot pepper juice by *Bacillus licheniformis* to reduce pungency [J]. Applied Biological Chemistry, 2015, 58(4): 611-616.
- [46] BLAŠKO J, NIŽNANSKÁ Ž, KUBINEC R, et al. Simple, fast method for the sample preparation of major capsaicinoids in ground peppers, in potato chips and chilli sauces and their analysis by GC-MS [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 114: 104733.
- [47] 蒋佳芸,赵崇杰,李雪宁,等.乳酸片球菌HAO2018胞外多糖的生物活性研究[J].食品与发酵工业,2023,49(22):27-32.
- [48] 唐先谱,褚新月,王实玉,等.乳酸菌在泡菜发酵中的研究进展[J].中国食品添加剂,2023,34(12):285-290.
- [49] LI L H, LIU X Q, QI T, et al. A new way to reduce postharvest loss of vegetables: Antibacterial products of vegetable fermentation and its controlling soft rot caused by *Pectobacterium carotovorum* [J]. Biological Control, 2021, 161: 104708.
- [50] REN D Y, ZHU J W, GONG S J, et al. Antimicrobial characteristics of lactic acid bacteria isolated from homemade fermented foods [J]. Biomed Research International, 2018, 2018: 5416725.
- [51] MAHORO P, MOON H J, YANG H J, et al. Protective effect

- of Gochujang on inflammation in a DSS-induced colitis rat model [J]. *Foods*, 2021, 10(5): 1072.
- [52] LEE E J, EDWARD O C, SEO E B, et al. Gochujang ameliorates hepatic inflammation by improving dysbiosis of gut microbiota in high-fat diet-induced obese mice [J]. *Microorganisms*, 2023, 11(4): 911.
- [53] 尹树磊,杜香,张小希,等.乳酸菌抗氧化机制研究进展及在食品领域的应用[J].*食品科学*,2024,45(13):345-355.
- [54] ZHOU Y J, GONG W B, XU C, et al. Probiotic assessment and antioxidant characterization of *Lactobacillus plantarum* GXL94 isolated from fermented chili [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 997940.
- [55] YANG H J, LEE Y S, CHOI I S. Comparison of physicochemical properties and antioxidant activities of fermented soybean-based red pepper paste, Gochujang, prepared with five different red pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 55(2): 792-801.
- [56] SU M Q, SHE Y H, DENG M, et al. The effect of capsaicin on growth performance, Antioxidant capacity, immunity and gut micro-organisms of calves [J]. *Animals*, 2023, 13(14): 2309.
- [57] VATTEM D A, SHETTY K. Solid-state production of phenolic antioxidants from cranberry pomace by *Rhizopus oligosporus* [J]. *Food Biotechnology*, 2002, 16(3): 189-210.
- [58] YEON S J, KIM J H, CHO W Y, et al. *In vitro* studies of fermented korean Chung-Yang hot pepper phenolics as inhibitors of key enzymes relevant to hypertension and diabetes [J]. *Foods*, 2019, 8(10): 498.
- [59] 罗龙龙,任卫合,蔡林海,等.乳酸菌改善糖尿病代谢作用机制研究进展[J].*食品工业科技*,2021,42(8):404-409.
- [60] ZHANG S Q, MA X H, ZHANG L, et al. Capsaicin reduces blood glucose by increasing insulin levels and glycogen content better than aapsiate in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(11): 2323-2330.
- [61] KENIG S, ARBEITER A B, MOHORKO N, et al. Moderate but not high daily intake of chili pepper sauce improves serum glucose and cholesterol levels [J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 44: 209-217.
- [62] YUAN L J, QIN Y, WANG L, et al. Capsaicin-containing chili improved postprandial hyperglycemia, hyperinsulinemia, and fasting lipid disorders in women with gestational diabetes mellitus and lowered the incidence of large-for-gestational-age newborns [J]. *Clinical Nutrition*, 2016, 35(2): 388-393.
- [63] 张瑜,王宏洁,赵海誉,等.辣椒素减肥调血脂活性及其机制的研究进展[J].*中国现代中药*,2022,24(7):1387-1394.
- [64] KARRI S, SHARMA S, HATWARE K, et al. Natural anti-obesity agents and their therapeutic role in management of obesity: A future trend perspective [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2019, 110: 224-238.
- [65] ZHENG Z, PARK J K, JIANG L J, et al. Beneficial effects of fermentation of red chili pepper using *Lactococcus lactis* subs. *Cremoris* RPG-HL-0136 in high-fat diet-induced obese mice [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2023, 26(2): 81-92.
- [66] ZSIBORÁS C, MÁTICS R, HEGYI P, et al. Capsaicin and capsiate could be appropriate agents for treatment of obesity: A meta-analysis of human studies [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(9): 1419-1427.
- [67] LIU L, DING C, TIAN M, et al. Fermentation improves the potentiality of capsicum in decreasing high-fat diet-induced obesity in C57BL/6 mice by modulating lipid metabolism and hormone response [J]. *Food Research International*, 2019, 124: 49-60.