李萍, 管咏梅, 潘荣斌, 等. 山楂发酵制品研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 454−463. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120216

LI Ping, GUAN Yongmei, PAN Rongbin, et al. Progress on Fermented Products of Hawthorn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 454−463. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120216

· 专题综述 ·

山楂发酵制品研究进展

李　萍[1,2], 管咏梅[3], 潘荣斌[2], 陈淑莹[1,2], 周　洁[1,2], 潘华平[1,3,*]

（1.江西中医药大学中西医结合一级学科平台, 江西南昌 330000;
2.江西中医药大学中医学院, 江西南昌 330000;
3.江西中医药大学药学院, 江西南昌 330000）

摘　要: 山楂是我国特有的药食同源类植物，其果实、叶、种子、根等均可入药，具有较高的药用、食用价值。因山楂富含黄酮、多酚、有机酸、多糖等营养活性成分，其在降血脂、抗氧化、抗炎、抗癌和调节肠道菌群等方面均表现出一定的应用潜力，在医药、食品和化工等领域已有广泛应用。微生物发酵具有改善原料感官风味、丰富营养成分、增强功能特性的独特优势，在山楂等药食同源类物质的加工利用过程中占有重要地位。近年来，随着山楂深加工技术的持续发展，微生物发酵技术在山楂制品中的应用研究也不断深入。论文首先简要概述了山楂发酵制品的种类，其次介绍了山楂发酵制品的发酵菌种及工艺特性，最后对其活性成分和功能活性进行了归纳和总结，以期为山楂发酵制品的开发利用和精深加工提供参考，推动山楂产业发展。

关键词: 山楂, 微生物, 发酵制品, 活性成分, 健康功效

中图分类号: R282.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0454−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120216

本文网刊:

Progress on Fermented Products of Hawthorn

LI Ping[1,2], GUAN Yongmei[3], PAN Rongbin[2], CHEN Shuying[1,2], ZHOU Jie[1,2], PAN Huaping[1,3,*]

（1.Discipline of Chinese and Western Integrative Medicine, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330000, China;
2.School of Traditional Chinese Medicine, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330000, China;
3.School of Pharmacy, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330000, China）

Abstract: Hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) is a plant of the Rosaceae family and is widely distributed in China as one of the medicinal and edible plants. The fruits, leaves, seeds and roots of hawthorn could be used as medicine, extracts for medicinal and edible use due to its various medicinal and edible value. Because hawthorn is rich in flavonoids, polyphenols, organic acids, polysaccharides and other nutritional active ingredients, it has a variety of beneficial biological activities, such as lipid-lowering, antioxidant, anti-inflammatory, antitumor and intestinal flora regulation activities. Therefore, hawthorn has been widely used in the fields of medicine, functional foods and chemical industries. Microbial fermentation has the unique advantages of improving the sensory flavor of raw materials, enriching nutrients, and enhancing functional properties. It plays an important role in the processing and utilization of dual-purpose medicinal-edible materials like hawthorn. In recent years, with the continuous development of hawthorn deep processing technology, the application of microbial fermentation technology in hawthorn products has also been continuously deepened. This paper first briefly summarizes the types of hawthorn fermentation products, then introduces the fermentation strains and process characteristics of hawthorn fermented products, and finally concludes their active components and functional activities. The purpose of this review is to provide a reference for the utilization and deep processing of hawthorn fermented products and promote the development of the hawthorn industry.

收稿日期: 2024−12−17

基金项目: 江西省重点研发计划项目（20224BBG71023）; 博士科研启动基金项目（2018BSZR001）。

作者简介: 李萍（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 中药微生物发酵, E-mail: 1534294316@qq.com。

*** 通信作者:** 潘华平（1985−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 中药微生物发酵, E-mail: huaping@jxutcm.edu.cn。

Key words: hawthorn; microorganism; fermented product; active ingredients; health effects

山楂（*Crataegus pinnatifida* Bunge）又名山里红，蔷薇科山楂属，性微温，味酸、甘，入脾、胃、肝经。山楂之名始见于《本草纲目》，是中国卫生部首批认定的药食两用药材之一。山楂的可食部分主要是果肉，约占果实总重的 70%~80%，果肉富含多种营养成分，如果胶、氨基酸、维生素 C 等。活性成分主要存在于果实、叶和花中，包括黄酮类化合物（果实中含量为 0.1%~1.0%，叶和花中含量为 1%~2%）、有机酸（含量约为 2%~6%）、三萜类化合物（含量约为 0.1%~0.5%）等[1−3]。山楂具有健胃消食、化浊降脂、散结止痛、行气散瘀、止泻止痢功效，临床主要用于治疗消化系统疾病及循环系统疾病，比如消食、降血压[4]、抗氧化[5]、降脂、抗动脉粥样硬化及抗菌消炎等[6]。虽然山楂具有较高的药用、食用价值，但因其有机酸含量较多，口感酸涩，不宜鲜食[7]。因此，对山楂采取有效的加工措施十分必要。

发酵是加工、保藏食品的重要工艺之一，利用发酵技术对山楂进行加工处理，可以有效提高山楂的利用率和附加值。山楂发酵制品是指以山楂为原料，加以其他原料和辅料等，在适宜的温度、湿度、水分等条件下，利用微生物（主要是益生菌）发酵而成的产品。山楂发酵制品的本质是利用微生物的生物转化，在微生物酶的作用下，实现改变山楂及制品的物质结构和组成，增强功能活性的目的。在发酵加工处理后，山楂制品的口感风味可以得到有效改善，甚至还能产生一些新的生物活性成分，其药用、营养价值也可以得到提高。因此，发酵已成为山楂加工的主要方式之一。目前，国外对山楂发酵制品的研究甚少，国内对山楂发酵制品的研究主要涉及发酵工艺优化、感官品质成分分析及抗氧化功效研究，但由于山楂发酵制品的生产工艺、发酵原料和发酵菌种等有差异，对其营养成分、感官风味、功效活性均有影响，从而导致结论有所不同。通过概述山楂发酵制品的研究现状，可为后来者对山楂发酵制品进一步研究提供借鉴依据，也对拓展山楂发酵制品种类，研发新型功能性食疗产品具有重要意义。

本文对山楂发酵制品的种类、发酵菌种、活性成分和功能特性方面的研究进行综述，为山楂的精深加工和高值化利用等研究提供参考。

1　山楂发酵制品种类

目前已报道的山楂发酵制品可大致分为五大类：山楂酵素饮料类、山楂酸奶类、山楂酒类、山楂醋类及其他，具体可见表 1。

山楂酵素饮料是指以新鲜山楂或山楂汁为原料，通过有益微生物发酵后，调配出来的含有多种生物活性成分且具有山楂果香味的天然营养保健产品，其中包括了山楂单独发酵而成的饮料和山楂复合发酵饮料[8−9]。

表 1　山楂发酵制品类型及优缺点

Table 1　Types and advantages/disadvantages of hawthorn fermentation products

发酵制品类型	原料（质量比）	参考文献	优点	缺点及不足
山楂酵素饮料类	山楂	[8]	发酵过程产生大量乳酸和乙酸，降低体系pH，干扰有害微生物细胞膜电位，抑制其代谢功能，具有良好的抑菌作用	标准化生产流程和质量控制标准尚不完善，这可能导致不同工艺的山楂酵素质量参差不齐
	山楂、红树莓（1∶1）	[9]		
	山楂、黄精（1∶5）	[19]		
	山楂、枸杞（3∶7）	[20]		
	山楂、地瓜黄浆水（1∶1）	[18]		
山楂酸奶类	山楂、木瓜、奶粉（16∶24∶13）	[21]	酸奶的发酵可降低大多数乳蛋白的免疫活性，具有预防过敏和减轻过敏症状的作用	研究主要集中在口感与风味，对其活性成分及功能研究较少
	山楂、南果梨、牛奶（5.9∶10.6∶76.1）	[11]		
	山楂、陈皮、牛奶（1∶2∶19.5）	[10]		
	山楂、红枣、脱脂乳（9∶12∶100）	[22]		
	山楂、红枣、桂圆、牛奶（4∶4∶3∶73.3）	[23]		
山楂酒类	山楂	[24−25]	发酵保留了山楂中的营养物质及独特的果香味，具有较好的体外抗氧化活性和保健功效	山楂发酵酒中可能存在食品安全风险，例如展青霉素含量超标
	山楂、火龙果（1∶2）	[26]		
	山楂、红枣（1∶2）	[27]		
	山楂、枳椇（2∶1或3∶5）	[28−29]		
	山楂、无花果（3∶1）	[30]		
	山楂、石榴（1∶1）	[31]		
	山楂、糯米（1∶10）	[32]		
山楂醋类	山楂	[15]	醋酸发酵可将醇类物质转化成酯类物质，总酚含量和抗氧化能力均优于山楂酒	具体有效成分及其作用机制尚未完全阐明
	山楂、香蕉（1∶2）	[33]		
	山楂、苦荞（3∶4）	[34]		
其他	山楂粉、豆渣、麸皮（0.7∶5∶2）	[17]	可提高生产副产品的利用率，增添产品风味，并融入一定保健功效	未考虑如何平衡产品的健康效益和消费者的口味偏好
	山楂、黄芪、白菜（3∶0.24∶100）	[35]		

山楂酸奶是将乳原料与山楂相结合，通过乳酸菌发酵制成的一类兼具山楂果香与酸奶醇厚口感的营养饮品。山楂酸奶作为一种发酵乳制品，不仅营养丰富，人群可接受性高，还兼备山楂的部分药理特性[10]。将山楂作为制造酸奶的成分，可增加酸奶的抗氧化能力[11]，并抑制 α-葡萄糖苷酶的酶活性。研究表明，在多种野果发酵酸奶中，山楂酸奶的整体抗氧化能力最高，其 $ABTS^{+\cdot}$ 及 ORAC 清除能力高达 731 μmol TE/g 与 625.94 μmol TE/g[12]。目前，市面上多见的为复合山楂酸奶，单一山楂酸奶产品较为少见。

山楂酒可分为发酵型山楂酒和配制型山楂酒，发酵型山楂酒比配制型山楂酒具有更强的果香味[13]。发酵型山楂酒是指以山楂为原料，经破碎后接种酵母菌进行无氧发酵得到的酒精饮品。酿造而成的山楂酒不仅保留了山楂的功能活性成分，还产生了很多风味物质，比山楂果具有更高的营养保健价值和市场前景[14]。发酵型山楂酒有单独使用山楂作为原料进行发酵，也有山楂与其他原料按照一定比例复合发酵，是当前研究最全面、最深入的山楂发酵制品。

山楂醋是山楂酒精发酵后，再经过醋酸菌二次发酵的产品[15]，含有大量挥发性物质，如乙酸、苯乙酸、乙酰、戊酸、苯甲酸、异丁香酚、2-环己酮、丙酸、佳味酚和琥珀酸二乙酯等[16]，这些成分与感官风味和抗氧化能力密切相关。

此外，有研究利用山楂作为添加剂进行发酵，如在豆腐渣酱油发酵过程中加入山楂，不仅提高了豆腐渣的利用率，也增添了山楂风味，满足人们对健康保健食品的需求[17]。也有报道以地瓜黄浆水与滞销的山楂为原料，结合乳酸菌发酵得到一款功能饮品，不仅避免了资源浪费和环境污染，也实现了黄浆水的高值化利用[18]。

2 山楂发酵制品的发酵菌种

目前，研究报道可用于山楂发酵的微生物菌种有乳酸菌、醋酸菌等细菌，以及酵母菌、霉菌、药食用真菌等真菌，详见表 2。

表 2 山楂发酵制品的发酵菌种

Table 2 Fermentation strain of hawthorn fermentation products

发酵制品类型	发酵菌种	发酵条件(接种量、温度、时间)	成分含量及功效变化	参考文献
山楂酵素饮料类	鼠李糖乳杆菌217-1	37 ℃, 21 d	小鼠GSH 16.195 mg/g, SOD 17.5 ng/g, 抗炎↑	[39]
	蛹虫草	74.49%(V/V), 24 ℃, 150 r·min^{-1}, 6 d	虫草素↑, 虫草多糖↑, 虫草酸↑, 综合评分97.38分	[49]
	猴头菌	8%(V/V), 26 ℃, 160 r·min^{-1}, 10 d	多糖5.91 mg/mL, 猴头菇菌丝湿质量255.86 mg/mL	[50]
	植物乳杆菌、酿酒酵母	5.5‰(V/V), 32 ℃, 102 h	酸度21.82 mg/mL, SOD 26.45 U/mL, 抗氧化活性↑, 降脂↑	[51]
	植物乳杆菌、保加利亚乳杆菌、瑞士乳杆菌、肠膜明串珠菌肠膜亚种、嗜热链球菌	0.1%(V/V), 37 ℃, 24 h	感官风味物质↑	[8]
	植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、副干酪乳杆菌	1%(V/V), 37 ℃, 36 h	总酚0.061 g/100 g, 维C 89.56 mg/100 g, 有机酸4.19 g/L↑, 乳酸3.22 g/L↑, 感官评分86分	[9]
	植物乳杆菌、类干酪乳杆菌	4%(V/V), 34 ℃, 52 h	pH3.29↓、可溶性固形物10.19%↓, 还原糖14.13 g/L↓, 总酸11.59 g/L↑, 总黄酮0.86 mg/mL↑, SOD 30.2 U/mL↑	[19]
山楂酸奶类	短乳杆菌、干酪乳杆菌和柠檬明串珠菌	3%(V/V), 34.3 ℃, 1.8 d	柠檬酸降解率13.23%, 乳酸↑, 氨基态氮含量↑, 电导率↑	[7]
	干酪乳杆菌、鼠李糖乳杆菌	0.5%(V/V), 37 ℃, 30 h	乳酸菌胞外多糖178.48 mg/L, 风味物质↑, 小鼠免疫力↑	[20]
	保加利亚乳杆菌	11%(V/V), 45 ℃, 5 d, 4 ℃后熟12 h	感官评分95.6分	[23]
	保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌	3%(V/V), 40 ℃, 20 h	蛋白质2.79%, 脂肪3.20%, 可溶性固形物14.1%, 乳酸菌总数≥1.03×10^6 CFU /100 mL, 风味物质↑	[21]
山楂酒类	F33酵母	0.15‰(V/V), 22 ℃	感官风味物质↑, 稳定性↑	[26]
	果酒专用酵母RW	0.3%(V/V), 19 ℃, 7 d	酒精度11.50%vol, 可溶性固形物7.80%, 总糖3.40 g/L, 总酸7.13 g/L, 感官评分93.80分, DPPH自由基清除率85.7%, $ABTS^{+}$自由基清除率88.8%	[27]
	酿酒酵母	2%(V/V), 25 ℃, 9 d	酒精度11.34%vol, 总酸14.69 g/L, 总酚280.59 mg/100 mL。DPPH自由基清除率96.3%, $ABTS^{+}$自由基清除率96.5%	[28−29]
	库德毕赤酵母Y1	13%(V/V), 31 ℃, 10 d	酒精度11.07%vol, 总黄酮16.10 mg/mL	[52]
	酿酒酵母、毕赤酵母	5%(V/V), 28 ℃前发酵, 18 ℃后发酵11 d	发酵周期11 d↓, 风味物质↑	[45]
山楂醋类	酿酒酵母、醋酸菌	酒精发酵: 3%(V/V), 30 ℃, 6 d 醋酸发酵: 10%(V/V), 33 ℃, 9 d	酸度52.6 g/L, 总黄酮0.832 mg/mL, 酯类30%~40%	[15,53]
	酿酒酵母、巴氏醋杆菌、植物乳杆菌	酒精发酵: 8%(V/V), 30 ℃ 醋酸发酵: 醋酸菌10%(V/V), 植物乳杆菌4%(V/V), 30 ℃	细胞抗衰老↑, 有机酸↑, 氨基酸↑	[34]
山楂风味酱油	米曲霉	制曲: 3%(V/V), 30 ℃, 40 h 制醅后发酵: 35 ℃	还原糖↑、总酸↑, 感官评分93分	[17]
调脂中药红曲	红曲霉	10%(V/V), 30 ℃, 2 d, 打散加水3 d, 最后25 ℃, 13 d	洛伐他汀5.127 mg/g, 降血脂↑	[48]

2.1　细菌发酵

用于山楂发酵的细菌主要是乳酸菌和醋酸菌，其中乳酸菌主要用于酵素饮料与酸奶类制品的发酵，醋酸菌主要用于醋类制品发酵。

乳酸菌包括乳酸杆菌属、乳球菌属、片球菌属、肠球菌属和链球菌属等[36]。研究表明，乳酸菌发酵会导致发酵底物酸化，使其成为不适合其他微生物生存的环境，并产生一系列抑制其他生物生长的化合物，如有机酸、过氧化氢和细菌素[37]，来保证发酵产品的安全性。乳酸菌在厌氧发酵时通过糖酵解途径将果糖转化生成柠檬酸，柠檬酸可进一步转化为乙酸和草酰乙酸，后者再进一步转化为丙酮酸，最终产生乳酸、乙酸或丙酮酸代谢物[38]。此外，因乳酸菌具有分解乳糖的能力，其发酵的乳制品还可缓解蛋白过敏[36]。保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌发酵的山楂酸奶，可为乳制品过敏人群提供更好的营养，其感官评分达 95.6 分，总黄酮含量达 4.62±0.533 mg/mL，对 DPPH 自由基的清除率为 78.35%，较普通酸奶均有所提高[10−11,22]。鼠李糖乳杆菌发酵的山楂汁可以调节小鼠肠道菌群，提高谷胱甘肽 GSH（16.195 mg/g）和超氧化物歧化酶 SOD（17.5 ng/g）的浓度，从而增强肝组织的抗氧化能力，改善肝脏炎症[39]。植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、副干酪乳杆菌混合发酵的山楂红树莓汁乳酸含量由 0.12 g/L 增至 3.22 g/L，果香味浓郁，口感微酸爽口，较原果汁更容易被人所接受[9]。短乳杆菌、干酪乳杆菌和柠檬明串珠菌混合发酵亦能将口感酸涩刺激的苹果酸与柠檬酸转化为口感柔和的乳酸[7]。植物乳杆菌、类干酪乳杆菌混合发酵能显著降低 pH、可溶性固形物及还原糖含量，显著升高感官评分、总酸含量、总黄酮含量及 SOD 活力[19]。综上，乳酸菌发酵的山楂制品在感官风味、抗氧化能力、活性成分含量及缓解乳糖不耐受等方面均有所提升。

醋酸菌发酵主要出现在山楂酒精发酵后的二次发酵。醋酸菌可以将醇类和糖醇氧化成相应的有机酸或糖衍生物[40]，该氧化过程多与脱氢酶有关[41]，其发酵产生的成分主要与抗氧化、感官风味密切相关。有研究表明，醋酸菌发酵能产生酯类物质（30%~40%），显著提高山楂醋的香气成分含量[15]。同时，将巴氏醋杆菌与植物乳杆菌混合进行醋酸发酵，还可以提高山楂醋的抗氧化能力以及有机酸、氨基酸等物质含量，其中的有机酸、氨基酸等物质具有预防高血压、心脏病等功能[34]。由此可见，醋酸菌发酵的山楂制品在香味、抗氧化能力、活性成分含量等方面均有所提升。

2.2　真菌发酵

酵母菌是发酵生产山楂酒的主要真菌，可将葡萄糖和果糖转化为乙醇[42]，发酵山楂最常见的酵母菌为酿酒酵母[43]，用其发酵的山楂酒口味丰富，香气成分总含量高达 163.63 mg/100 mL[24]，DPPH 自由基与 $ABTS^{+}$自由基清除能力最大可分别达 96.3%、96.5%，具有较好的体外抗氧化活性[27−29,44]。也有报道将毕赤酵母与酿酒酵母混合发酵山楂，在发酵 11 d 时即可达预期酒度（11%（V/V））[45]，该发酵方式还有利于增加感官风味成分、醋酸盐、高级醇和甘油含量，降低醋酸和丁二酸的含量，从而改善酒体的圆润度[46]。以上研究说明，酵母菌发酵的山楂酒不仅可缩短制酒周期，还在感官风味与抗氧化活性方面有较大提升。

目前，利用霉菌发酵山楂的有米曲霉和红曲霉。米曲霉发酵的山楂风味酱油色度、还原糖、总酸含量均比普通酱油有较大改善[17,47]。而红曲霉发酵山楂复方可显著提高洛伐他汀（42.27%）与熊果酸（232.7%）产量，同时，在发酵过程中加入柠檬酸，能促进纤维素酶和蛋白酶的分泌，分解山楂细胞壁，释放山楂酸、科罗索酸及红曲色素等活性物质，可有效抑制食源性高脂血症的形成[48]。以上霉菌发酵的山楂发酵制品在活性成分方面均有较大提升。

此外，也有研究利用蛹虫草、猴头菌等药食用真菌与山楂进行混合发酵，通过菌丝体代谢实现双方活性成分（如虫草素、猴头菌丝与山楂多糖）的交互转化，显著提升产物的多糖含量（5.91 mg/mL）及抗氧化活性（SOD 26.45 U/mL）[49−50]。该发酵方式不仅整合了真菌与山楂的药用活性成分，还提升了药用价值与保健功能，为功能性食品创新提供了新方向。

3　山楂发酵制品的活性成分

3.1　多酚类物质

据报道，山楂发酵制品中往往具有更高的多酚含量，如在啤酒发酵时添加山楂，其多酚类化合物含量可增加 1.4 倍（279.6 mg/L），添加山楂汁则可增加 2 倍以上（410.0 mg/L）[16,54]。按照结构的不同，山楂发酵制品中的多酚类物质可分为黄酮类、酚酸类两大类。

黄酮类化合物是山楂中含量较高、分布最广的一类化合物[1]，包括氧化型（白杨素、芦丁和槲皮素）和还原型（原花青素，即儿茶素衍生物）物质[2]。研究发现，经过适当的发酵工艺处理，可以提高山楂发酵制品中黄酮类化合物的含量，如李楠[55] 发酵的山楂果酒，其总黄酮含量在发酵过程中呈上升趋势。山楂发酵制品中的酚酸类物质主要包括苯丙酸、苯乙酸、苯甲酸、咖啡酸、绿原酸和没食子酸等[16,56]。目前报道的山楂发酵制品中酚酸类物质含量变化存有差异，有些甚至相反，其原因在于影响酚酸类物质含量变化的因素较多，如山楂果品种特性差异、发酵前预处理条件、发酵菌种特性、发酵条件（如时间、温度）等，这些都有待进一步深入研究。

以上山楂发酵制品中的多酚类物质具有抗菌、抗氧化和清除自由基的作用，可有效预防炎症性疾病[57]、心血管疾病[58] 和肥胖症[59] 等慢性疾病。

3.2　酸类物质

山楂发酵制品中的酸类物质主要是各类有机

酸，包括柠檬酸、苹果酸、草酸、乳酸、乙酸等。据报道，山楂浆经过乳酸菌发酵后，柠檬酸、苹果酸含量显著减少，分别减少了 0.938 g/L 和 0.651 g/L，草酸含量变化不显著，而乳酸和乙酸的含量显著增多，分别增加了 3.699 g/L 和 0.396 g/L[60]。王媛等[7] 发现，在山楂发酵过程中，乳酸菌能将口感酸涩刺激的苹果酸与柠檬酸转化为口感柔和的乳酸，从而达到改善山楂口感的作用。乳酸的产生会显著降低发酵体系的 pH[61]，这种酸性环境能抑制腐败菌和致病菌的生长，乳酸菌本身则因其耐酸性得以进一步生长成为优势菌群，从而提高产品的安全性和保健价值。而乙酸作为短链脂肪酸，可维持人体肠道和免疫稳态，对肠胃消化吸收功能及肠道稳态具有明显提升作用[62]。此外，山楂中的有机酸还能促进胃分泌消化酶，增强胃肠蠕动功能[63−64]。由此可见，山楂发酵制品中的酸类成分不仅能改善口感风味，同时还具有促进胃肠蠕动、健胃消食和抑菌等功效。

3.3 多糖类物质

多糖是山楂中重要的功能活性成分，其含量可达山楂干重的 6.4%，具有免疫调节、抗炎、调节糖脂代谢、抗糖基化等功效[65]。在山楂发酵过程中，多糖的含量呈现动态变化[49−50,66]。山楂中的多糖主要是由鼠李糖、木糖、葡萄糖和半乳糖等多种单糖组成的复杂聚合物[65]。在发酵过程中，微生物（如酵母菌、乳酸菌等）分泌的酶类（如淀粉酶、纤维素酶、果胶酶等）可将这些多糖水解成小分子糖类。这些小分子糖类一方面被微生物自身吸收利用，作为碳源进行生长繁殖和代谢活动，产生酒精、乳酸、有机酸等发酵产物；另一方面，部分小分子糖在微生物代谢过程中可能进一步发生聚合反应，形成一些新的多糖类物质[20,67]。这些新生成的糖类物质可能具有不同的生理活性和功能特性，如某些低聚糖具有益生元的功能，可促进益生乳酸菌的生长、有效改善发酵乳的组织状态，增强发酵乳的风味，提高发酵乳的品质[68]。

3.4 膳食纤维类物质

膳食纤维根据溶解性分为可溶性膳食纤维与不溶性膳食纤维[69]。高品质膳食纤维其可溶性膳食纤维与不溶性膳食纤维的比例在 1~2.3 之间[70]。然而，在天然植物中，可溶性膳食纤维的含量远低于不溶性膳食纤维，达不到人体平衡膳食的要求[71]。微生物发酵可以改性膳食纤维，将一些不溶性膳食纤维分解或修饰，转化为可溶性膳食纤维[72]，从而提高山楂发酵制品中可溶性膳食纤维的比例。另一方面，膳食纤维经微生物发酵后形成新的化合物（如短链脂肪酸），改变了膳食纤维的化学结构和功能特性[73]。山楂发酵制品中的膳食纤维主要以果胶形式存在，其不仅可作为益生元促进肠道有益菌的生长，还能作为天然食源性抗糖基化剂。研究报道，酸乳发酵时添加适量的山楂果胶可促进乳酸菌的增殖，提升酸乳风味，增加还原糖含量，且可抑制晚期糖基化终产物的形成[74]。除此之外，发酵后的山楂膳食纤维可能具有更好的生理功能，如更强的吸附胆固醇能力、更好的肠道调节作用[75] 等。这是因为发酵过程中膳食纤维的结构和组成发生了变化，使其能够更好地与肠道内物质相互作用。

除了以上成分，山楂发酵制品还含有氨基酸和维生素等营养物质[9,34]。其中谷氨酸和天冬氨酸是发酵制品中含量最高的两种氨基酸，也是鲜味物质形成的前提；由于维生素 C 极容易被氧化，因此山楂发酵制品中的维生素 C 含量有所降低[9]。三萜类物质如山楂酸、熊果酸、齐墩果酸等，是山楂果实中的主要化学物质成分之一，具有抗氧化、抗癌等保健功能，但其在山楂发酵制品的相关研究中尚未被深入挖掘。

4 山楂发酵制品的功能活性

4.1 抗氧化作用

自由基是一类具有高活性的化学物质，过量存在会对人体造成氧化损伤，氧化损伤后，缺乏抗氧化剂则不能有效防止组织损伤[76]，导致衰老、癌症、糖尿病、炎症、肝病、心血管疾病、白内障和肾毒性以及神经退行性疾病等多种疾病的发生[77−78]。山楂发酵制品中含有丰富的维生素 C、维生素 E、多酚及多糖类等物质，这些物质能够有效地清除体内自由基，减缓氧化反应的速度，其中起主要抗氧化作用的是多酚类物质[79]。除此之外，山楂发酵制品中的某些成分还可以促进人体内抗氧化酶的活性，如超氧化物歧化酶（SOD）、谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）和过氧化氢酶（CAT）等[19,76]。据报道，山楂的抗氧化机制分为直接机制和间接机制[80−81]，见图 1。在直接机制中，山楂多酚保持非氧化状态，直接与活性氧结合，通过将电子或氢原子转移到活性氧分子中，中和 O^{2-}、NO_2^-、·OH、$ABTS^+$、DPPH 等自由基，有效防止细胞组分氧化损伤。间接机制中，山楂多糖可以调节参与氧化应激和炎症反应的信号通路，如激活 NF-κB、MAPK 及 Nrf2 等通路，该途径的激活可导致抗氧化基因的下调，抑制 IL-6、TNF-α 等炎症因子，从而为细胞提供防御氧化损伤的能力。此外，山楂多糖还可以提高 SOD、CAT、GSH-Px 等抗氧化酶的活性，这

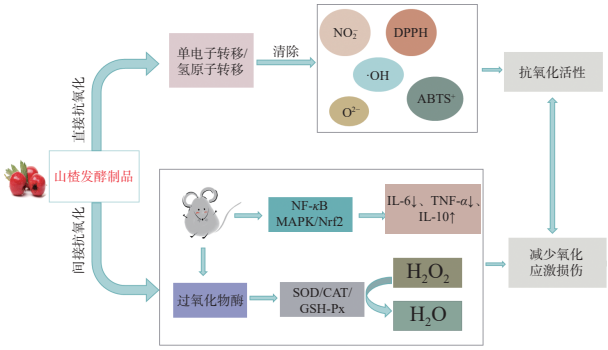


图 1 山楂发酵制品抗氧化的直接和间接机制[80−81]

Fig.1 Direct and indirect mechanisms of antioxidant activity in hawthorn fermented products[80−81]

些酶在中和活性氧和保护细胞免受氧化损伤中起着关键作用。

4.2　降血脂作用

山楂发酵制品中含有的黄酮类物质和多酚类物质，能够有效降低血清总胆固醇（TC）、甘油三酯（TG）和低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）水平，同时还能增加高密度脂蛋白胆固醇水平，从而起到调节血脂的作用[82]。此外，黄酮类化合物还有清除肝组织脂肪的作用，通过诱导蛋白激酶 p-AMPK 和抑制体内乙酰辅酶 p-ACC 表达来改善高脂血症，从而增加脂肪酸氧化，抑制胆固醇合成，减少脂肪合成[83]。据报道，山楂降血脂机制（图 2）大致可分为 7 类[84−89]：a.抑制肝脏内的乙酰辅酶 A 羧化酶（ACC）、羟甲基戊二酰辅酶 A 还原酶（HMGR）等脂质合成相关酶，从而减少胆固醇的合成，促进脂肪酸氧化；b.激活过氧化物酶体增殖物激活受体 α（PPARα），而 PPARα 的表达可以促进酰基辅酶 A 氧化酶-1（ACOX-1）、肉碱棕榈酰转移酶-1（CPT-1）等 β 氧化相关酶的表达，进而推动脂肪酸的氧化分解；c.上调 AMP 活化蛋白激酶（AMPK）磷酸化和降低磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶（PEPCK）的表达，从而抑制 TC 和 TG 的表达；d.增强抗氧化防御系统，如上调核因子-红细胞 2 相关因子（Nrf2）、血红素氧化酶-1（HO-1）和谷胱甘肽过氧化物酶（GPx）等，从而产生显著的降血脂活性；e.下调 CCAAT/增强子结合蛋白（C/EBPR）、PPARγ、固醇调节元件结合蛋白 1c（SREBP1c）、活化蛋白 2（aP2）和脂联素的基因表达，从而抑制 TG 和游离脂肪酸积累；f.增加 NO 含量和减少内皮素和维生素 E 的合成，进而降低血清 TC、TG 和 LDL-C 水平；g.抑制肠道酰基辅酶 A-胆固醇酰基转移酶（ACAT）活性，从而降低 TC、TG 和 LDL-C 水平。目前，因不同种类的山楂发酵制品所含有的活性成分也不相同，其降血脂机制是否与上述山楂的降血脂机制类似，有待进一步深入研究。

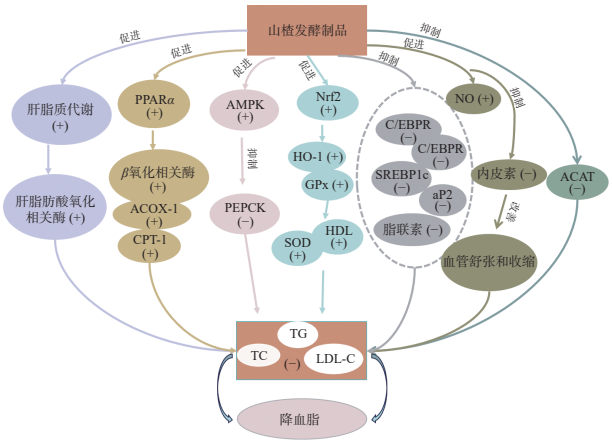


图 2　山楂发酵制品潜在降血脂作用机制[84]

Fig.2　Potential mechanism of hypolipidemic effect of fermented hawthorn products[84]

注：(+)表示促进，(−)表示抑制。

4.3　调节肠道菌群

越来越多的研究表明，山楂发酵制品中的多糖具有较好的调节肠道菌群和肠道稳态的作用。山楂发酵制品中的多糖在肠道中可被分解成各种单糖，并与肠道微生物相互作用，产生乙酸、丙酸等短链脂肪酸（SCFAs），降低肠道 pH，导致肠道菌群结构的变化，进而影响肠道稳态（图 3）。据报道，山楂多糖可增加有益菌（如厚壁菌门、巨生菌门）的相对丰度，同时降低有害菌（如拟杆菌门、志贺杆菌门和梭杆菌门）的相对丰度[81]，并抑制 IL-1β、IL-6、TNF-α 等炎症因子的表达，有效治疗炎症性肠病[81]。此外，研究发现山楂发酵制品可以增加肠道内乳酸杆菌的丰度，减少革兰氏阴性菌的产生，恢复肠道菌群的平衡[39]，山楂发酵制品中的乳酸菌等益生菌可以直接补充肠道内的有益菌群，提高肠道菌群的多样性和稳定性。发酵产生的有机酸和多酚类化合物具有抗菌作用，可以有效抑制有害菌的生长[37]，减少肠道感染的风险，乳酸等有机酸代谢产物可以促进肠道蠕动[63]，短链脂肪酸（如乙酸）可维持人体肠道和免疫稳态[87]，对肠胃消化吸收功能及肠道稳态具有明显提升作用。说明山楂发酵制品能促进肠道有益菌的生长，降低有害菌的丰度，从而维护肠道健康，改善疾病症状。

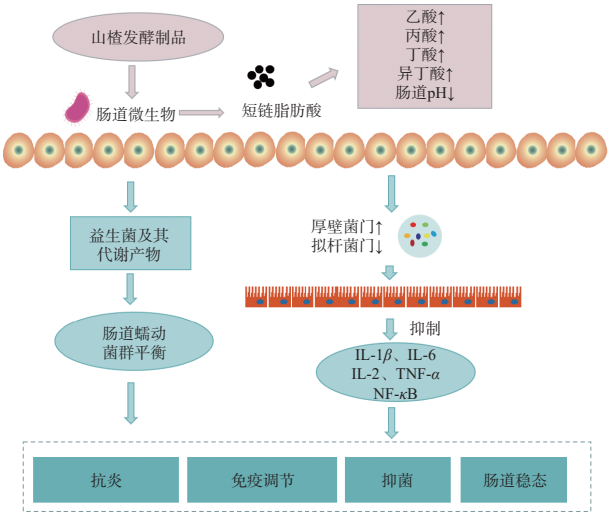


图 3　山楂发酵制品调节肠道稳态的潜在作用机制[81]

Fig.3　Potential mechanism of hawthorn fermentation products to regulate intestinal homeostasis[81]

4.4　其他

除了上述功能活性，山楂发酵制品也有抗炎、抑菌等功效，其作用机制与抗氧化的间接机制、维持肠道稳态机制相同，故没有详细阐述。此外，有报道山楂发酵制品还有一定的抗癌功效，从山楂发酵饮料中提取的乳酸菌胞外多糖对结肠癌细胞抑制率可达 66.67%[20]，其中所含的黄酮类化合物具有一定的抗癌活性，能够抑制癌细胞生长和扩散。同时，山楂发酵制品中所含的多种营养成分也有助于提高机体免疫力和抵抗力，发酵山楂中的多糖可通过激活巨噬细胞和增强 NK 细胞活性，提升机体免疫力，动物实验

还表明，其可显著提高免疫球蛋白（IgA、IgG）水平[90]。发酵制品中多糖及黄酮类成分还具有显著的抗 α-葡萄糖苷酶活性，有助于控制血糖水平[91−92]。发酵产生的蛋白酶、淀粉酶等消化酶显著提升（如蛋白酶活力达 22.79 U/mL），可加速食物中蛋白质和脂肪的分解，缓解胃胀、消化不良等症状[93]。

5 总结与展望

本文对山楂发酵制品的产品类型、发酵菌种、活性成分及其功能活性进行了系统梳理。目前，山楂发酵产品以酵素饮料和酒类为主，酸奶、醋等品类开发相对滞后，整体呈现产品同质化特征。在质量评价体系方面，缺乏专属评价标准，现行品质评定往往是以果酒、果醋、饮料类的为参照标准，未能充分体现山楂作为药食同源原料的特性，今后需建立山楂发酵制品品质特有的质量评价标准，以便更好地推动山楂产业的发展。就生产工艺而言，发酵过程中微生物、酶类物质与活性成分的复杂交互作用导致工艺可控性不足，加之菌种选择与添加量的差异性直接影响产品品质与稳定性。因此，还需要在菌种筛选、生产工艺优化、活性成分动态监测及生物转化机理等方向开展深入研究。功能活性研究虽已证实山楂发酵制品有抗氧化、降血脂等功效，但其作用机制尚未完全明确。目前，机制研究大多集中在山楂本身的成分作用机制上，而对山楂发酵制品的作用机制研究较少。此外，现有成果多基于体外实验与动物模型，人体真实作用效果及潜在保健功能仍有待通过临床验证。

总体来看，山楂发酵制品的研究和开发仍有很大的发展空间，可从多元化产品研发、专属质控体系构建、生产工艺标准化、功效机制解析等多维度协同推进，通过深化基础研究与技术创新，推动山楂产业可持续发展。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ 张祺嘉钰, 赵佩媛, 孙静, 等. 山楂的化学成分及药理作用研究进展[J]. 西北药学杂志, 2021, 36(3): 521−523. ［ZHANG Q J Y, ZHAO P Y, SUN J, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological action of hawthorn[J]. Northwest Journal of Pharmacy, 2021, 36(3): 521−523.］

［2］ ZHANG J, CHAI X, ZHAO F, et al. Food applications and potential health benefits of hawthorn[J]. Foods, 2022, 11(18): 2861.

［3］ ŻUREK N, ŚWIECA M, KAPUSTA I T. Berries, leaves, and flowers of six hawthorn species (*Crataegus* L.) as a source of compounds with nutraceutical potential[J]. Molecules, 2024, 29(23): 5786.

［4］ ZHENG X, LI X, CHEN M, et al. The protective role of hawthorn fruit extract against high salt-induced hypertension in Dahl salt-sensitive rats: Impact on oxidative stress and metabolic patterns[J]. Food & Function, 2019, 10(2): 849−858.

［5］ CHENG F, JIANG W, XIONG X, et al. Ethanol extract of Chinese hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) fruit reduces inflammation and oxidative stress in rats with doxorubicin-induced chronic heart failure[J]. Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental And Clinical Research, 2020, 26: e926654.

［6］ WU Min, LIU Longtao, XING Yanwei, et al. Roles and mechanisms of hawthorn and its extracts on atherosclerosis: A review[J]. Frontiers in Pharmacology, 2020, 11: 118.

［7］ 王媛, 韩艳秋, 吕连营, 等. 降解山楂汁中柠檬酸乳酸菌的筛选及工艺优化[J]. 辽宁农业科学, 2023(4): 17−24. ［WANG Y, HAN Y Q, LÜ L Y, et al. Screening and process optimization of citric acid bacteria degrading hawthorn juice[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2023(4): 17−24.］

［8］ 李钰婕, 王琦, 尹胜. 乳酸菌发酵山楂汁的制备工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(9): 228−235. ［LI Y J, WANG Q, YIN S. Preparation of hawthorn juice fermented by lactic acid bacteria[J]. China Food Additives, 2023, 34(9): 228−235.］

［9］ 张倩茹, 尹蓉, 王俊宇, 等. 乳酸菌发酵红树莓山楂复合果汁品质分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(1): 53−57. ［ZHANG Q R, YIN R, WANG J Y, et al. Quality analysis of red raspberry and hawthorn compound juice fermented by lactic acid bacteria[J]. China Brewing, 2023, 42(1): 53−57.］

［10］ 王子天, 吕佼, 冯腾, 等. 陈皮山楂酸奶的研制[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(1): 33−36,46. ［WANG Z T, LÜ J, FENG T, et al. Development of dried tangerine peel and hawthorn yoghurt[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(1): 33−36,46.］

［11］ 马婷婷. 南果梨山楂复合酸奶加工工艺及其品质研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2023. ［MA T T. Study on processing technology and quality of compound yoghurt including Nanguo pear and hawthorn[D]. Shenyang: Liaoning University, 2023.］

［12］ HERRERA T, IRIONDO-DEHOND M, RAMOS S A, et al. Effect of wild strawberry tree and hawthorn extracts fortification on functional, physicochemical, microbiological, and sensory properties of yogurt[J]. Foods, 2023, 12(18): 3332.

［13］ 谷佩珊, 陈亦新, 王春光, 等. 发酵型和配制型山楂酒中主要呈香物质组成分析[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 326−335. ［GU P S, CHEN Y X, WANG C G, et al. Analysis of major aroma compounds in fermented and prepared hawthorn wine[J]. Food Science, 2023, 44(14): 326−335.］

［14］ JIANG Y, DU J, ZHANG L, et al. Properties of pectin extracted from fermented and steeped hawthorn wine pomace: A comparison[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 197: 174−182.

［15］ 薛茂云, 毕静, 杨爱萍, 等. 山楂醋的工艺研究[J]. 中国调味品, 2017, 42(1): 112−114. ［XUE M Y, BI J, YANG A P, et al. Research on the technology of hawthorn vinegar[J]. China Condiment, 2017, 42(1): 112−114.］

［16］ ÖZDEMIR G B, ÖZDEMIR N, ERTEKIN-FILIZ B, et al. Volatile aroma compounds and bioactive compounds of hawthorn vinegar produced from hawthorn fruit (*Crataegus tanacetifolia* (Lam.) Pers.)[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(3): e13676.

［17］ 崔艳, 高玉婷, 牛丽丽, 等. 山楂风味豆腐渣酱油的研制[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(3): 125−130. ［CUI Y, GAO Y T, NIU L L, et al. Development of hawthorn-flavored soy sauce with soybean curd residue as raw material[J]. Food Research and Development, 2023, 44(3): 125−130.］

［18］ 伊静, 李婷, 袁冬, 等. 地瓜黄浆水与山楂复合发酵饮料的研制[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 130−135. ［YI J, LI T, YUAN D, et al. Study on compound fermented beverage of sweet potato pulp water and hawthorn[J]. Science and Technology of

Food Industry, 2019, 40(21): 130−135.]
[19] 王印壮, 费鹏, 马艳莉, 等. 黄精山楂复合酵素发酵工艺优化及品质变化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(19): 124−133. [WANG Y Z, FEI P, MA Y L, et al. Optimization of fermentation process and quality change of *Polygonatum sibiricum*-hawthorn compound enzyme[J]. Food Research and Development, 2022, 43(19): 124−133.]
[20] 郭巍. 山楂枸杞乳酸菌发酵饮料的研制及其功能特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. [GUO W. Development and functional characteristics of hawthorn and *Lycium barbarum* beverages fermented by lactic acid bacteria[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.]
[21] 董道顺. 木瓜、山楂复合型保健酸奶的研制[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(12): 187−190. [DONG D S. Development of health yoghurt mixed with pawpaw and hawthorn[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 187−190.]
[22] 范娜, 郭耀东, 陈凤娥, 等. 山楂红枣酸乳的研制及其抗氧化性[J]. 食品科技, 2018, 43(12): 82−89. [FAN N, GUO Y D, CHEN F E, et al. Optimization of processing technology for hawthorn and jujube yogurt and its antioxidant activity[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(12): 82−89.]
[23] 郝秋娟, 李树立, 郝东旭, 等. 红枣山楂桂圆酸奶的研制[J]. 中国酿造, 2015, 34(12): 171−174. [HAO Q J, LI S L, HAO D X, et al. Development of red dates, hawthorn and longan yoghurt[J]. China Brewing, 2015, 34(12): 171−174.]
[24] 钟平娟, 叶丽芳, 门戈阳, 等. 大果山楂酒发酵过程中抗氧化活性和香气成分分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 24−29. [ZHONG Pingjuan, YE Lifang, MEN Geyang, et al. Analysis of antioxidant activity and aromatic components of *Malus doumeri* (Bois) chevalier wine during fermentation[J]. Food Research and Development, 2021, 42(8): 24−29.]
[25] 潘志明, 陈志杰, 罗立川. 起泡山楂黄酒酿造工艺优化及品质评价[J]. 中国酿造, 2022, 41(9): 188−193. [PAN Z M, CHEN Z J, LUO L C. Optimization of brewing technology and quality evaluation of sparkling hawthorn Huangjiu[J]. China Brewing, 2022, 41(9): 188−193.]
[26] 李青青, 刘甲伟, 王帅帅, 等. 山楂火龙果复合果酒酿造稳定性分析研究[J]. 酿酒科技, 2023(10): 47−51. [LI Q Q, LIU J W, WANG S S, et al. Study on brewing technology and stability of hawthorn-pitaya wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(10): 47−51.]
[27] 张开平, 刘玫梅, 刘燕丽, 等. 响应面法优化大果山楂红枣复合果酒发酵工艺及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 184−193. [ZHANG K P, LIU M M, LIU Y L, et al. Optimization of fermentation technology of *Malus doumeri* (Bois) chevalier and *Zizyphus jujube* Mill. compound fruit wine by response surface methodology and its antioxidant activity analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 184−193.]
[28] 王娟, 魏贞, 石明生, 等. 拐枣山楂果酒发酵工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(11): 169−173. [WANG J, WEI Z, SHI M S, et al. Fermentation technology optimization and antioxidant activity analysis of *Hovenia acerba*-hawthorn wine[J]. China Brewing, 2022, 41(11): 169−173.]
[29] 吴双从, 曹新志, 张楷正, 等. 枳椇山楂果酒酿酒工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(4): 192−198. [WU S C, CAO X Z, ZHANG K Z, et al. Optimization of fermentation technology and antioxidant activity analysis of *Hovenia dulcis* and hawthorn fruit wine[J]. China Brewing, 2022, 41(4): 192−198.]
[30] 宋照军, 王树宁, 黄滢洁, 等. 无花果山楂复合果酒酿造工艺优化[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 214−218. [SONG Z J, WANG S N, HUANG Y J, et al. Optimization of brewing technology of fig and hawthorn compound fruit wine[J]. China Brewing, 2020, 39(6): 214−218.]
[31] 陈成, 汪洪涛. 山楂石榴复合果酒发酵工艺的研究[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 248−249. [CHEN C, WANG H T. Study on fermentation technology of hawthorn and pomegranate complex fruit wine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(7): 248−249.]
[32] 韩乃瑄, 马成莹, 李敏, 等. 电子鼻和 GC-IMS 联用分析不同条件发酵山楂糯米酒的香气成分[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 312−320. [HAN Naixuan, MA Chengying, LI Min, et al. Analysis of aroma components of hawthorn glutinous rice wine fermented under different conditions using an electronic nose and GC-IMS[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 312−320.]
[33] 李锦利. 香蕉与山楂复合果醋酿造工艺的研究[J]. 中国调味品, 2015, 40(6): 98−101. [LI J L. Study on brewing technology of banana and hawthorn composite vinegar[J]. China Condiment, 2015, 40(6): 98−101.]
[34] 陈旭峰, 王超宇, 魏莎莎, 等. 山楂苦荞醋发酵过程中活性成分及风味物质与抗氧化活性的相关性[J]. 中国酿造, 2022, 41(10): 36−41. [CHEN Xufeng, WANG Chaoyu, WEI Shasha, et al. Correlation of active constituent and flavor compounds with antioxidant activity in the fermentation process of hawthorn Tartary buckwheat vinegar[J]. China Brewing, 2022, 41(10): 36−41.]
[35] 范龙泉, 杨钦萍, 曹引. 乳酸菌发酵芡楂功能泡菜的工艺优化及品质分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(10): 157−163,171. [FAN Longquan, YANG Qinping, CAO Yin. Process optimization and quality analysis of *Astragalus*-hawthorn functional pickles by fermentation of lactic acid bacteria[J]. China Condiment, 2023, 48(10): 157−163,171.]
[36] MATHUR H, BERESFORD T P, COTTER P D. Health benefits of lactic acid bacteria (LAB) fermentates[J]. Nutrients, 2020, 12(6): 1679.
[37] HARPER A R, DOBSON R C J, MORRIS V K, et al. Fermentation of plant-based dairy alternatives by lactic acid bacteria[J]. Microbial Biotechnology, 2022, 15(5): 1404−1421.
[38] de VUYST L, LEROY F. Functional role of yeasts, lactic acid bacteria and acetic acid bacteria in cocoa fermentation processes[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2020, 44(4): 432−453.
[39] WANG Ting, WANG Zhe, YANG Zhipeng, et al. Effect of the fermentation broth of the mixture of pueraria *Lobata*, *Lonicera japonica*, and *Crataegus pinnatifida* by *Lactobacillus rhamnosus* 217-1 on liver health and intestinal flora in mice with alcoholic liver disease induced by liquor[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 722171.
[40] LYNCH K M, ZANNINI E, WILKINSON S, et al. Physiology of acetic acid bacteria and their role in vinegar and fermented beverages[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(3): 587−625.
[41] QIN Z, YU S, CHEN J, et al. Dehydrogenases of acetic acid bacteria[J]. Biotechnology Advances, 2022, 54: 107863.
[42] RUIZ-DE-VILLA C, POBLET M, CORDERO-OTERO R, et al. Screening of *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii* strains in relation to their effect on malolactic fermentation[J]. Food Microbiology, 2023, 112: 104212.
[43] VANDERWAEREN L, DOK R, VOORDECKERS K, et al.

Saccharomyces cerevisiae as a model system for eukaryotic cell biology, from cell cycle control to DNA damage response[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(19): 11665.

[44] HAN Y, DU J, LI J, et al. Quantification of the organic acids in hawthorn wine: A comparison of two HPLC methods[J]. Molecules, 2019, 24(11): 2150.

[45] 周枫, 曹蒙, 范玉飞, 等. 酿酒酵母与毕赤酵母协同作用对山楂酒发酵的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 1−6. [ZHOU F, CAO M, FAN Y F, et al. Effect of synergistic of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia pastoris* on the fermentation of hawthorn wine[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(8): 1−6.]

[46] LI Na, WANG Lingyun, YIN Jian, et al. Adjustment of impact odorants in Hutai-8 rose wine by co-fermentation of *Pichia fermentans* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Research International, 2022, 153: 110959.

[47] HE Bin, TU Yayi, JIANG Chunmiao, et al. Functional genomics of *Aspergillus oryzae*: Strategies and progress[J]. Microorganisms, 2019, 7(4): 103.

[48] 杨静云, 赖永勤, 李宇兴, 等. 山楂、泽泻、决明子与红曲霉混合发酵制备调血脂中药工艺研究[J]. 中草药, 2016, 47(12): 2100−2107. [YANG Jingyun, LAI Yongqin, LI Yuxing, et al. Preparation process of lipid-lowering medicines by solid state fermentation of *Crataegi Fructus*, *Alismatis Rhizoma*, and *Cassiae Semen* mixed with *Monascus*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2016, 47(12): 2100−2107.]

[49] 林标声, 罗茂春. 蛹虫草-山楂复合保健饮料的研制[J]. 食品科学, 2013, 34(4): 293−297. [LIN Biaosheng, LUO Maochun. Production of composite healthy beverage of *Cordyceps militaris* and hawthorn[J]. Food Science, 2013, 34(4): 293−297.]

[50] 张巧, 陈春喜, 吴天保. 利用猴头菌发酵大果山楂汁的条件优化研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(12): 165−168. [ZHANG Qiao, CHEN Chunxi, WU Tianbao. Optimization of *Crataegus pinnatifida* juice fermentation conditions by *Hericium erinaceus*[J]. China Brewing, 2018, 37(12): 165−168.]

[51] 缪园欣, 田建阳, 贲锦华, 等. 山楂酵素发酵工艺优化及体外生物活性研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 181−187. [MIAO Y X, TIAN J Y, BEN J H, et al. Optimization of fermentation technology and its *in-vitro* activity of hawthorn enzyme[J]. Food & Machinery, 2024, 40(10): 181−187.]

[52] 王启慧, 张婧靖, 李晓晓, 等. 基于响应面法优化库德毕赤酵母 Y1 酿造高黄酮山楂酒工艺[J]. 中国酿造, 2024, 43(7): 184−189. [WANG Qihui, ZHANG Jingjing, LI Xiaoxiao, et al. Optimization of fermentation process of high flavonoid hawthorn wine brewed by *Pichia kudriavzevii* Y1 based on response surface method[J]. China Brewing, 2024, 43(7): 184−189.]

[53] 邢晓莹, 于迪, 乔羽, 等. 山楂果醋混合菌种发酵工艺及香气成分的 HS-SPME/GC-MS 分析[J]. 中国调味品, 2021, 46(1): 146−152. [XING X Y, YU D, QIAO Y, et al. The fermentation technology and analysis of aroma components in hawthorn fruit vinegar with mixed strains by HS-SPME/GC-MS[J]. China Condiment, 2021, 46(1): 146−152.]

[54] GASIŃSKI A, KAWA-RYGIELSKA J, SZUMNY A, et al. Assessment of volatiles and polyphenol content, physicochemical parameters and antioxidant activity in beers with dotted hawthorn (*Crataegus punctata*)[J]. Foods, 2020, 9(6): 775.

[55] 李楠. 山楂果酒发酵过程中品质特性的变化规律[J]. 食品工业, 2019, 40(3): 60−63. [LI Nan. The dynamic change of physicochemical indexes in fermentation process of hawthorn wine[J]. The Food Industry, 2019, 40(3): 60−63.]

[56] HAN Xue, ZHOU Qian, GAO Zhe, et al. Characterization of procyanidin extracts from hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) in human colorectal adenocarcinoma cell line Caco-2, simulated digestion, and fermentation identified unique and novel prebiotic properties[J]. Food Research International, 2023, 165: 112393.

[57] UNUSAN N. Proanthocyanidins in grape seeds: An updated review of their health benefits and potential uses in the food industry[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 67: 103861.

[58] ZHANG L M, LÜ S S, FU S R, et al. Procyanidins inhibit fine particulate matter-induced vascular smooth muscle cells apoptosis via the activation of the Nrf2 signaling pathway[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 223: 112586.

[59] WU Qian, FENG Yingna, OUYANG Yu, et al. Inhibition of advanced glycation endproducts formation by *Lotus* seedpod oligomeric procyanidins through RAGE-MAPK signaling and NF-κB activation in high-AGEs-diet mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 156: 112481.

[60] 黄艳. 乳酸菌发酵对山楂浆品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. [HUANG Yan. Effect of lactic acid bacteria fermentation on the quality of hawthorn pulp[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.]

[61] 黄豪, 周义, 陈佳慧, 等. 乳酸菌发酵对山楂汁理化性质、酚类化合物、抗氧化性及风味的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 97−106. [HUANG H, ZHOU Y, CHEN J H, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on physicochemical properties, phenolic compounds, antioxidant activity and volatile components of hawthorn juice[J]. Food Science, 2022, 43(10): 97−106.]

[62] MARKOWIAK-KOPEĆ P, ŚLIŻEWSKA K. The effect of probiotics on the production of short-chain fatty acids by human intestinal microbiome[J]. Nutrients, 2020, 12(4): 1107.

[63] 拓文娟, 刘永琦, 修明慧, 等. 山楂及其有效成分治疗代谢综合征的研究[J]. 中国中医基础医学杂志, 2022, 28(5): 831−838. [TUO W J, LIU Y Q, XIU M H, et al. Study on hawthorn and its effective components in treatment of metabolic syndrome[J]. Journal of Basic Chinese Medicine, 2022, 28(5): 831−838.]

[64] 董嘉琪, 陈金鹏, 龚苏晓, 等. 山楂的化学成分、药理作用及质量标志物(Q-Marker)预测[J]. 中草药, 2021, 52(9): 2801−2818. [DONG Jiaqi, CHEN Jinpeng, GONG Suxiao, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Crataegi Fructus* and predictive analysis on Q-Marker[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(9): 2801−2818.]

[65] 廖强, 邓志扬, 刘佳, 等. 山楂多糖的分离纯化及其对粪便菌群的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(12): 54−61. [LIAO Qiang, DENG Zhiyang, LIU Jia, et al. Isolation and purification of polysaccharides from hawthorn fruit and the effects on fecal microbiota[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(12): 54−61.]

[66] 宋慧, 马利华, 陈学红, 等. 山楂复合果醋发酵工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(23): 95−99,106. [SONG Hui, MA Lihua, CHEN Xuehong, et al. Research of fermentation conditions of compound hawthorn fruit vinegar[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(23): 95−99,106.]

[67] 罗游, 韦朝阳. 发酵对食物源多糖结构和生物活性的影响研究进展[J/OL]. 中国食品学报, 1−8 [2025-04-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20241025.1909.008. [LUO Y, WEI Z Y. Effects of fermentation on the structure and bioactivities of food-polysaccharides[J/OL]. Chinese Journal of Food Science, 1−8 [2025-04-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20241025.1909.008.]

[68] 赵岩岩, 赵圣明, 李帅, 等. 山楂叶多糖对发酵乳品质及抗氧

化活性的影响[J]. 食品科学，2020，41(2)：73−79. [ZHAO Y Y, ZHAO S M, LI S, et al. Effect of polysaccharides from hawthorn leaves on the quality and antioxidant activity of fermented milk[J]. Food Science, 2020, 41(2): 73−79.]

[69] ZHU Fan. Dietary fiber polysaccharides of amaranth, buckwheat and quinoa grains: A review of chemical structure, biological functions and food uses[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 248: 116819.

[70] MRABET A, RODRÍGUEZ-GUTIÉRREZ G, RUBIO-SENENT F, et al. Enzymatic conversion of date fruit fiber concentrates into a new product enriched in antioxidant soluble fiber[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 75: 727−734.

[71] CASSIDY Y, EMEIR M, ALLSOPP P. Effect of soluble dietary fibre on postprandial blood glucose response and its potential as a functional food ingredient[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 46: 423−439.

[72] 杨晨夕，张珮珮，徐阳，等. 发酵改性膳食纤维的生理功能及其在食品中的应用[J]. 食品工业科技，2024，45(4)：342−353. [YANG C X, ZHANG P P, XU Y, et al. Physiological function of fermented modified dietary fiber and its application in food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 342−353.]

[73] 董洪旺，慕文涛，彭文婷，等. 谷物膳食纤维通过肠道菌群-胆汁酸途径调控糖脂代谢的研究进展[J]. 粮油食品科技，2025，33(1)：129−137. [DONG H W, QI W T, PENG W T, et al. Research advances in the role of cereal dietary fiber in modulating glucose and lipid metabolism via the gut microbiota-bile acid[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(1): 129−137.]

[74] ZHU Rugang, HONG Mengling, ZHUANG Chunyun, et al. Pectin oligosaccharides from hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bunge. var. major) inhibit the formation of advanced glycation end products in infant formula milk powder[J]. Food & Function, 2019, 10(12): 8081−8093.

[75] 李帮秀，谭斌，李森，等. 体外发酵表征膳食纤维性质研究进展[J]. 食品与发酵工业，2025，51(1)：337−344. [LI B X, TAN B, LI S, et al. Research progress on the properties of dietary fiber characterized by *in vitro* fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 337−344.]

[76] KARAKÇI D, BAKIR B, SEYIDOGLU N, et al. Ultrasound-treated and thermal-pasteurized hawthorn vinegar: Antioxidant and lipid profiles in rats[J]. Nutrients, 2023, 15(18): 3933.

[77] NEHA K, HAIDER M R, PATHAK A, et al. Medicinal prospects of antioxidants: A review[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2019, 178: 687−704.

[78] GHEITASI I, SAVARI F, AKBARI G, et al. Molecular mechanisms of hawthorn extracts in multiple organs disorders in underlying of diabetes: A review[J]. International Journal of Endocrinology, 2022, 2022(1): 2002768.

[79] LIU Suwen, CHANG Xuedong, LIU Xiufeng, et al. Effects of pretreatments on anthocyanin composition, phenolics contents and antioxidant capacities during fermentation of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) drink[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 87−95.

[80] MU K W, KITTS D D. Intestinal polyphenol antioxidant activity involves redox signaling mechanisms facilitated by aquaporin activity[J]. Redox Biology, 2023, 68: 102948.

[81] SUN Yuan, MENG Xianwei, CHEN Mengjie, et al. Isolation, structural properties and bioactivities of polysaccharides from *Crataegus pinnatifida*[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 323: 117688.

[82] 杨静云，李宇兴，赖永勤，等. 山楂、泽泻、决明子与红曲霉混合发酵产物对高血脂大鼠调脂作用研究[J]. 中草药，2017，48(7)：1369−1373. [YANG J Y, LI Y X, LAI Y Q, et al. Lipid regulating effect of mixture fermentation products of *Cartage fructus*, *Alismatis Rhizoma*, and *Cassiae Semen* with *Monascus purpureus* on hyperlipidemic rats[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2017, 48(7): 1369−1373.]

[83] GUO Wenjing, SHAO Tingting, PENG Yu, et al. Chemical composition, biological activities, and quality standards of hawthorn leaves used in traditional Chinese medicine: A comprehensive review[J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14: 1275244.

[84] ZHANG Shiyao, SUN Xiaolei, YANG Xingliang, et al. Botany, traditional uses, phytochemistry and pharmacological activity of *Crataegus pinnatifida* (Chinese hawthorn): A review[J]. The Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2022, 74(11): 1507−1545.

[85] LI Tuoping, LI Suhong, DONG Yinping, et al. Antioxidant activity of penta-oligogalacturonide, isolated from haw pectin, suppresses triglyceride synthesis in mice fed with a high-fat diet[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 335−341.

[86] NIU C S, CHEN C T, CHEN L J, et al. Decrease of blood lipids induced by Shan-Zha (fruit of *Crataegus pinnatifida*) is mainly related to an increase of PPARα in liver of mice fed high-fat diet[J]. Hormone and Metabolic Research, 2011, 43(9): 625−630.

[87] SHIH C C, LIN C H, LIN Y J, et al. Validation of the antidiabetic and hypolipidemic effects of hawthorn by assessment of gluconeogenesis and lipogenesis related genes and AMP-activated protein kinase phosphorylation[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2013, 2013(1): 597067.

[88] WANG Tao, AN Yating, ZHAO Chunfeng, et al. Regulation effects of *Crataegus pinnatifida* leaf on glucose and lipids metabolism[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(9): 4987−4994.

[89] YOO J H, LIU Yanan, KIM H S. Hawthorn fruit extract elevates expression of Nrf2/HO-1 and improves lipid profiles in ovariectomized rats[J]. Nutrients, 2016, 8(5): 283.

[90] 刘飞，郝婧宇，赵子夫，等. 山楂、麦芽及膳食纤维对维生素缺乏幼鼠肠道功能的影响[J]. 食品科学，2022，43(19)：118−128. [LIU F, HAO J Y, ZHAO Z F, et al. Effects of hawthorn, malt and dietary fibers on intestinal function in vitamin-deficient weaned rodents[J]. Food Science, 2022, 43(19): 118−128.]

[91] 钟丽霞，江震宇，汪嘉妮，等. 山楂多糖提取工艺优化及其降血糖、降血脂活性[J]. 食品工业科技，2019，40(13)：119−124+147. [ZHONG L X, JIANG Z Y, WANG J N, et al. Optimization of extraction technology of hawthorn polysaccharides and its hypoglycemic and hypolipidemic activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 119−124+147.]

[92] MA J X, YANG W, NG C Y J, et al. The hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bge.) fruit as a new dietary source of bioactive ingredients with multiple beneficial functions[J]. Food Frontiers, 2024, 5(4): 1534−1558.

[93] 杨洋. 双菌种发酵山楂酵素及其功能性研究[D]. 天津：天津农学院，2020. [YANG Yang. Study on the fermentation of hawthorn fermented product by two strains and its antioxidant activity [D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2020.]