DOI:10.12441/spyswjs.20250430003 [文章编号] 1673-1689(2026)01-0064-11

体外模拟胃肠消化乳酸菌发酵红枣汁的多酚类物质组成和抗氧化活性分析

张江宁 叶 峥 申佳琦

(山西农业大学山西功能食品研究院,山西 太原 030031)

摘要:【目的】探究乳酸菌发酵红枣汁经体外模拟胃肠消化后的多酚类物质及抗氧化活性的变化规律。**【方法】**测定不同发酵阶段乳酸菌发酵红枣汁(原液)及其体外模拟胃肠消化液中的总酚、游离酚、结合酚的质量分数以及多酚类物质的组成、抗氧化活性,并对其进行比较。**【结果】**随着发酵时间的延长,原液、胃消化液的总酚质量分数均呈先上升后下降的趋势,肠消化液的总酚质量分数呈波动变化趋势,当发酵时间为 48 h 时,均达到最高值,分别为 156.83、152.50、100.71 mg/100 g。随着发酵时间的延长,原液和胃消化液的游离酚质量分数均呈上升趋势,肠消化液的游离酚质量分数呈波动变化趋势;且胃消化液的游离酚质量分数在发酵 16 h 后高于原液和肠消化液,当发酵时间为 64 h 时,其最高值为 110.78 mg/100 g,说明胃环境显著促进了游离酚的释放。此外,原液与肠消化液的结合酚在发酵前期显著积累。发酵提升了游离酚对 DPPH、$ABTS^+$ 自由基的清除率,胃、肠消化分别增强了游离酚对 DPPH、$ABTS^+$ 自由基的清除效果。随着发酵时间的延长,原液结合酚的 DPPH 和 $ABTS^+$ 自由基清除率呈波动变化趋势,胃消化液结合酚的 DDPH 自由基清除率呈上升趋势,肠消化液结合酚的 $ABTS^+$ 自由基清除率呈先上升后下降的趋势。与未发酵红枣汁游离酚组分相比,原液游离酚组分中芦丁、氢化肉桂酸、苯甲酸和水杨酸质量浓度分别增加了 21.51%、54.41%、25.68%、28.62%;与原液游离酚组分相比,胃消化液游离酚组分中香草酸、没食子酸、丁香酸、原儿茶醛、木犀草苷等的质量浓度升高,说明发酵及胃消化促进了游离酚的释放。与未发酵红枣汁结合酚组分相比,原液结合酚组分中芦丁、反式阿魏酸、4-羟基苯甲酸等的质量浓度降低;与原液结合酚组分相比,胃消化液结合酚组分中芦丁、反式阿魏酸、原儿茶酸、原儿茶醛等的质量浓度降低;与胃消化液结合酚组分相比,肠消化液结合酚组分中反式阿魏酸、没食子酸、原儿茶酸的质量浓度分别提高了 20.67%、54.03%、29.76%。**【结论】**乳酸菌发酵改善了红枣汁经胃肠消化后的多酚类物质组成及抗氧化活性,为开发功能性发酵枣制品提供了科学依据。

关键词:乳酸菌发酵红枣汁;体外胃肠消化;游离酚;结合酚

Analysis of Polyphenol Composition and Antioxidant Activity of Jujube Juice Fermented by Lactic Acid Bacteria by *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion

ZHANG Jiangning YE Zheng SHEN Jiaqi

(Shanxi Institute of Functional Food, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the variation rules of polyphenolic substances and antioxidant activity of jujube juice fermented by lactic acid bacteria after *in vitro* simulated gastrointestinal digestion. [**Method**] The mass fractions of total phenols, free phenols, and bound phenols, as well as the composition of polyphenolic substances and antioxidant activity in the jujube juice fermented by lactic acid bacteria (original jujube juice) at different fermentation stages and *in vitro* simulated gastrointestinal digestive

基金项目:山西省基础研究计划自然科学研究面上项目(202303021211106)。

通信作者:张江宁(1981—),女,硕士,副研究员,主要从事功能食品研究。E-mail:17400495@qq.com

收稿日期:2025-04-30 **修回日期:**2025-06-03

fluids were determined and compared. [**Result**] With prolonged fermentation time, the mass fractions of total phenolics in the original jujube juice and the gastric digestive fluid increased and then declined, while that in the intestinal digestive fluid exhibited fluctuating trends. At 48 h of fermentation, all samples reached their peak values: 156.83, 152.50, and 100.71 mg/100 g, respectively. With prolonged fermentation time, the mass fractions of free phenols in the original jujube juice and the gastric digestive fluid showed an increasing trend, while that in intestinal digestive fluid exhibited fluctuating changes. The mass fraction of free phenols in the gastric digestive fluid was higher than those in the original juice and intestinal digestive fluid after 16 h of fermentation, reaching a maximum value of 110.78 mg/100 g after 64 h of fermentation, indicating that the gastric environment significantly promoted the release of free phenols. In addition, bound phenols in the original juice and intestinal digestive fluid accumulated significantly in the early stage of fermentation. Fermentation improved the scavenging rates of free phenols against DPPH and $ABTS^+$ free radicals, and gastric and intestinal digestion enhanced the scavenging effects of free phenols against DPPH and $ABTS^+$ free radicals, respectively. With prolonged fermentation time, the DPPH and $ABTS^+$ free radical scavenging rates of bound phenolics in the original jujube juice exhibited fluctuating trends, while those of the gastric digestive fluid showed an increasing trend in DPPH free radical scavenging activity. In contrast, the $ABTS^+$ free radical scavenging capacity of bound phenolics in the intestinal digestive fluid followed an initial increase followed by a decline. Compared with the free phenol components in the unfermented jujube juice, the free phenol components rutin, hydrocinnamic acid, benzoic acid, and salicylic acid in the original jujube juice showed mass concentration increases of 21.51%, 54.41%, 25.68%, and 28.62%, respectively. Compared with the free phenol components in the original jujube juice, vanillic acid, gallic acid, syringic acid, protocatechuic aldehyde, and luteoloside among the free phenol components in the gastric digestive fluid showed increased mass concentrations, indicating that fermentation and gastric digestion facilitated the release of free phenols. Compared with the bound phenol components in the unfermented jujube juice, rutin, *trans*-ferulic acid, and 4-hydroxybenzoic acid showed decreased mass concentrations in the original jujube juice. Compared with the bound phenol components in the original jujube juice, rutin, *trans*-ferulic acid, protocatechuic acid, and protocatechuic aldehyde showed decreased mass concentrations in the gastric digestive fluid. Compared with the bound phenol components in the gastric digestive fluid, the intestinal digestive fluid showed increases of 20.67%, 54.03%, and 29.76% in the mass concentrations of *trans*-ferulic acid, gallic acid, and protocatechuic acid, respectively. [**Conclusion**] Lactic acid bacteria fermentation improves the polyphenol composition and antioxidant activity of jujube juice after gastrointestinal digestion, which provides a scientific basis for the development of functional fermented jujube products.

Keywords: jujube juice fermented by lactic acid bacterium; *in vitro* gastrointestinal digestion; free phenol; bound phenol

红枣富含多糖、多酚、黄酮等多种生物活性物质，是中国传统的优势干果，中国的红枣总产量约占世界的90%[1]。多酚类物质按照存在形式可分为游离酚和结合酚。研究表明，乳酸菌发酵可将果蔬中的结合酚转化为游离酚，显著提升多酚类物质的生物活性、生物利用度及体外抗氧化能力。多酚类物质主要在人体胃部及小肠中完成消化、吸收过程，这一特性为深入探究多酚类物质代谢机制提供了关键切入点[2]。

近年来，体外模拟消化系统凭借可控性和可重复性优势在生物活性成分代谢及生物利用度研究领域得到广泛应用。范利君等[3]通过体外消化模型系统研究了葡萄籽多酚提取物在消化过程中活性成分的稳定性及抗氧化活性变化规律。张志红等[4]采用乳酸菌发酵技术处理荞麦壳，分析了该技术对多酚类物质结构及胃肠消化、酵解特性的影响。这些研究均表明，发酵技术、体外模拟消化是解析生物活性成分代谢机制的有效手段。尽管红枣资源丰富且多酚含量较高，但现有研究多聚焦于红枣发酵产物的提取工艺优化、发酵过程

动态监测及体外抗氧化活性[5]。

乳酸菌发酵所诱导的游离酚含量的提升及其体外抗氧化活性增强效应，以及在模拟人体胃肠消化的复杂生理条件下能否保持稳定及有效提升其生物利用度，这一关键问题尚未得到解决。鉴于乳酸菌发酵对结合酚转化的促进作用与胃肠消化对多酚类物质吸收的关键影响，采用“发酵+胃肠消化”模式研究多酚类物质，可模拟其在人体消化道内的代谢过程，明确发酵对多酚类物质释放与转化的影响，以及胃肠消化各阶段的多酚类物质的变化，有助于揭示其保健功效机制。

本研究利用体外模拟胃肠消化乳酸菌发酵红枣汁，分析不同发酵时间及体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中总酚、游离酚、结合酚及抗氧化活性的变化。旨在为开发具有高生物利用度的红枣基功能性发酵产品提供更坚实的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红枣：阿拉尔市好家乡果业有限公司；植物乳植杆菌：镇江天益生物科技有限公司；福林酚试剂、2，2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（ABTS）、1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）：北京索莱宝科技有限公司；没食子酸、芦丁、苯甲酸、水杨酸、咖啡酸、香草酸等标准品：德国 Sigma 公司；甲醇、乙腈、甲酸：色谱级，上海安谱实验科技股份有限公司；胃蛋白酶（≥250 U/mg）、胰蛋白酶、猪胆盐：源叶生物科技有限公司；其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与试剂

质谱仪：Q Exactive 型，美国 Thermo Fisher Scientific 公司；酶标仪：1510-05063 型，美国 Thermo Fisher Scientific 公司；高效液相色谱仪：Vanquish 型，美国 Thermo Fisher Scientific 公司；低温高速离心机：TDL-5-a 型，上海安亭科学仪器厂。

1.3 红枣汁样品制备

1.3.1 样品制备

称取一定量红枣，按照料液比 1 g∶20 mL 加入水，加热维持微沸状态 30 min，过滤后得到红枣汁，将其浓缩至糖度为 20 Brix°，冷却至 40 ℃，静置备用。

1.3.2 乳酸菌发酵红枣汁

在一定量红枣汁中，按体积分数 1% 接种乳酸菌，于 37 ℃发酵一段时间，发酵完成后于 3 000 r/min 离心 10 min，收集上清液（原液）待分析。

1.4 体外模拟胃肠消化

参照文献[6]的方法并稍加修改，进行体外模拟胃肠消化。

1.4.1 体外模拟胃消化

分别取 10 mL 经不同发酵时间（0、16、32、48、64 h）处理的红枣汁与等体积 9 mg/mL NaCl 溶液混合，用 1 mol/L 盐酸溶液调节 pH 至 2.0±0.1，加入 4 mL 人工胃液（0.4 g 胃蛋白酶溶于 0.01 mol/L 盐酸溶液），置于恒温振荡箱中，于 37 ℃、120 r/min 条件下避光消化 60 min。12 000 r/min 离心 15 min，取上清液，−20 ℃冷冻保存待测。

1.4.2 模拟肠液消化

分别吸取 2 mL 经体外模拟胃消化 60 min 后的样品于离心管中，用 1 mol/L $NaHCO_3$ 溶液调节 pH 至 6.5~7.0，加入 4 mL 人工肠液（0.02 g 胰蛋白酶、0.12 g 猪胆盐分别溶于 10 mL 0.1 mol/L $NaHCO_3$ 溶液中，将得到的 2 mg/mL 胰蛋白酶溶液和 12 mg/mL 胆汁溶液等体积混合均匀），将 pH 调至 7.0±0.2，于 37 ℃、100 r/min 水浴振荡 60 min，12 000 r/min 离心 15 min，取上清液，于−20 ℃避光保存待测。

1.5 多酚类物质的提取

参照文献[7]的方法并稍加修改，提取多酚类物质。

1.5.1 游离酚的提取

取 5 mL 样品，加入 20 mL 体积分数 80% 的甲醇溶液。40 Hz、45 ℃条件下超声 10 min，5 000 r/min 离心 10 min，收集上清液，沉淀物经 3 次重复离心处理，合并上清液，于 45 ℃条件下旋转蒸发至无水分，用去离子水溶解后定容至 10 mL 离心管。

1.5.2 结合酚的提取

将提取游离酚后剩余的沉淀物置于锥形瓶中，加入 5 mL 2 mol/L 的氢氧化钠溶液，振荡混匀，于恒温条件下水解 1.5 h。反应终止后，采用 6 mol/L 盐酸溶液调节 pH 至 2.0±0.2，将乙酸乙酯和待测液按体积比 2∶1 进行 5 次重复萃取后合并。萃取液经 45 ℃旋转蒸发去除溶剂后，用去离子水溶解并定容至 10 mL 离心管。

1.6 抗氧化活性

参照文献[8]的方法并稍加修改，测定抗氧化活性。

1.6.1　DPPH自由基清除率的测定

移取20 μL稀释的样品溶液，加入100 μL 0.2 mmol/L的DPPH溶液与80 μL去离子水，充分混匀，将混合液转移至恒温箱中，于37 ℃避光静置反应45 min。以去离子水作为空白对照，以5 mg/mL维生素C（VC）作为阳性对照，在517 nm处测定反应液的吸光度，计算DPPH自由基清除率。

1.6.2　$ABTS^+$自由基清除率的测定

将5 mL 7 mmol/L ABTS溶液与88 μL 140 mmol/L $K_2S_2O_8$水溶液混合，避光静置24 h生成自由基储备液。用无水乙醇将待测液在734 nm处的吸光度调节为1.00±0.02，现配现用。取200 μL稀释的样品溶液与4.8 mL ABTS工作液混合，避光反应15 min后，以无水乙醇作为空白对照，以5 mg/mL的VC作为阳性对照，于734 nm处测定吸光度，计算$ABTS^+$自由基清除率。

1.7　多酚类物质分析

1.7.1　多酚类物质质量分数的测定

参照文献[9]的福林酚法并稍加修改，测定多酚类物质质量分数。

1.7.2　多酚类物质组分的测定

取适量样品，12 000 r/min离心10 min，取上清液上机检测。使用Waters HSS T3色谱柱（50 mm×2.1 mm×1.8 μm）进行色谱分离，流动相为含体积分数0.1%甲酸的超纯水（A相）与乙腈（B相），流量0.3 mL/min，柱温40 ℃，进样量2 μL。质谱采用ESI离子源，参数设定：离子源温度350 ℃，传输管温度320 ℃，鞘气流量12 L/min，负离子模式扫描，一级质谱扫描范围为100~900[10]。

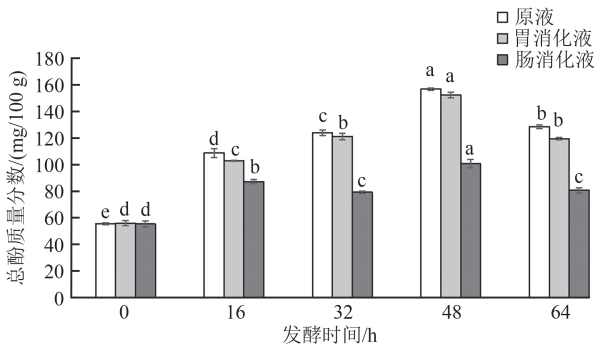
1.8　数据分析

以上试验均重复3次，试验结果采用平均值±标准差的形式表示，使用Excel 2019软件分析试验数据，利用IBM SPSS Statistics 19进行差异分析（$P<0.05$），测定质谱数据经TraceFinder 4.1软件进行峰识别与积分处理。

2　结果与讨论

2.1　体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中总酚质量分数的变化

如图1所示，当发酵时间为0~64 h时，原液和胃消化液的总酚质量分数呈先上升后下降的趋势，肠消化液的总酚质量分数呈波动变化趋势，且当发酵时间为48 h时均达到最高值，分别为156.83、152.50、100.71 mg/100 g；当发酵时间为48~64 h时，其总酚质量分数均呈下降趋势，这可能与微生物代谢产物导致多酚类物质转化或分解有关[11]。发酵前期（0~32 h），原液和胃消化液的总酚质量分数上升；发酵中期（32~48 h），两者的总酚质量分数持续上升，表明胃消化对总酚水平的提升效果较好；发酵后期（48 h后），三者质量分数均下降，说明后期发酵条件不利于维持总酚水平，存在多酚类物质降解的情况。整体来看，原液与胃消化液中总酚质量分数的变化接近，说明胃消化过程对总酚质量分数影响较大。此外，相同发酵时间下，肠消化液的总酚质量分数始终低于前两者，这可能与肠道内的酶类及微生物环境有关[12]。



同组不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

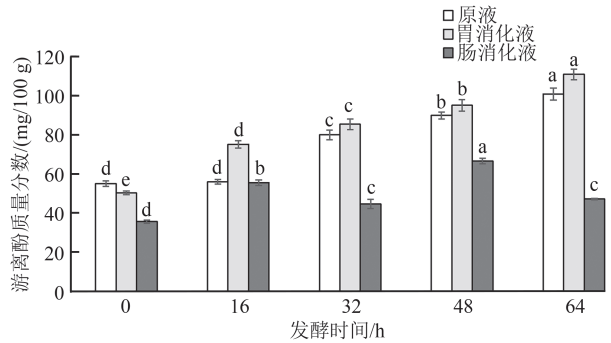
图1　体外模拟胃肠消化对发酵红枣汁中总酚质量分数的影响

Fig. 1　Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the mass fraction of total phenols in fermented jujube juice

2.2　体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中游离酚质量分数的变化

如图2所示，随着发酵时间的延长，原液和胃消化液中游离酚质量分数呈上升趋势，当发酵时间为64 h时，其游离酚质量分数均达到峰值，分别为100.70、110.78 mg/100 g，较未发酵红枣汁分别显著提高了45.71、50.64 mg/100 g。这可能是因为微生物发酵代谢产生的糖苷酶、酯酶等物质有效促进了结合酚转化为游离酚。其中，胃消化液中的游离酚质量分数在发酵16 h后高于同期的原液和肠消化液，且其在发酵前期（0~32 h）增速最快，这可能是因为胃酸促进了酚酸糖苷键的解离，有利于游离酚的释放[13]。

肠消化液的游离酚质量分数在48 h达到峰值（66.54 mg/100 g），之后持续下降，这可能是由于肠道环境促使游离酚发生氧化聚合反应，或与蛋白质、多糖、胆盐等大分子物质形成复合物，导致其生物可及性降低[14]。综上，发酵显著促进了游离酚的释放，但其效果受消化环境的影响。胃消化环境（酸性环境下蛋白酶等的作用）促进游离酚释放的作用最为突出，而肠道环境则可能导致部分活性成分损失。



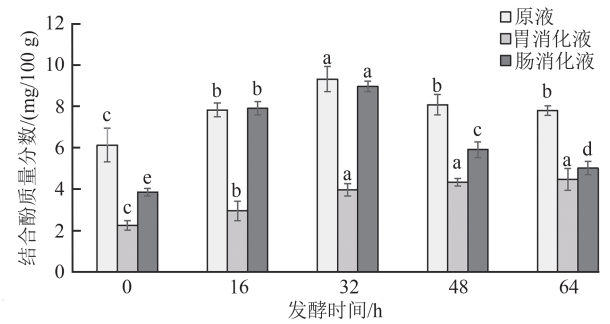
同组不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图2 体外模拟胃肠消化对发酵红枣汁中游离酚质量分数的影响

Fig. 2 Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the mass fraction of free phenols in fermented jujube juice

2.3 体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中结合酚质量分数的变化

如图3所示，原液、肠消化液的结合酚质量分数随发酵时间的延长呈先上升后下降的趋势，且当发酵时间为32 h时均达到最高值，分别为9.32、8.96 mg/100 g。这可能是因为前期发酵有利于结合酚的生成或积累，后期可能因发酵过度，微生物代谢、发酵条件变化或多酚类物质分解等因素导致结合酚质量分数降低[15]。红枣中的结合酚主要通过酯键、醚键等共价键与细胞壁中的果胶、纤维素以及蛋白质紧密相连，同时还能以糖苷键的形式与糖类物质结合，且该结合酚主要是以酯键合态、糖苷键合态和甲醇不溶性键合态形式存在[16]。胃消化液中结合酚质量分数呈持续上升趋势，且在发酵时间为64 h时达到最高值（4.47 mg/100 g），较发酵前增加了2.23 mg/100 g。但在整个发酵过程中，胃消化液结合酚质量分数始终低于原液和肠消化液，说明肠道环境有利于



同组不同小写字母表示差异显著（P<0.05）

图3 体外模拟胃肠消化对发酵红枣汁中结合酚质量分数的影响

Fig. 3 Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the mass fraction of bound phenols in fermented jujube juice

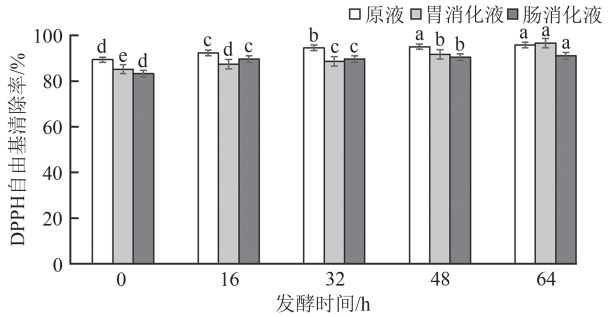
其释放，该结果与肠道菌群及胰酶对酯键的水解作用促进结合酚释放的研究结果相符[17]。

2.4 体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中游离酚抗氧化活性的变化

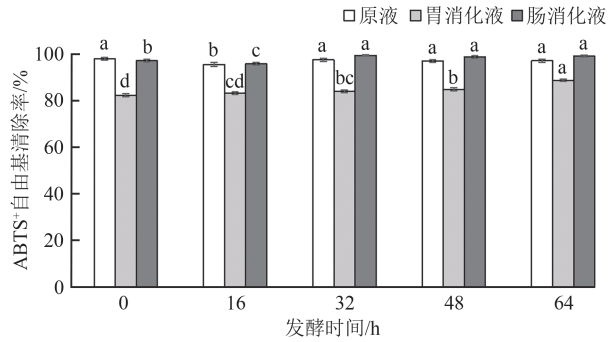
乳酸菌发酵红枣汁中游离酚的抗氧化活性变化见图4。VC（阳性对照）的DPPH自由基清除率为98.52%，$ABTS^+$自由基清除率为97.23%。随着发酵时间的延长，原液、胃消化液、肠消化液游离酚的DPPH自由基清除率均呈上升趋势，且在64 h时均达到最大值，分别为95.77%、96.60%、91.07%，说明发酵提高了红枣汁及其经胃肠消化后游离酚的DPPH自由基清除能力，其中胃消化液游离酚的DPPH自由基清除率最高（接近于VC），原液次之，肠消化液最低，说明胃消化过程对提升发酵红枣汁游离酚的DPPH自由基清除能力有促进作用。由图4（b）可知，肠消化液游离酚的$ABTS^+$自由基清除率大多高于原液和胃消化液，表明肠道环境中丰富的酶系、特定的pH以及肠道微生物的代谢产物等的协同作用有效清除了$ABTS^+$自由基[18-19]。

2.5 体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中结合酚抗氧化活性的变化

在胃肠消化过程中，乳酸菌发酵红枣汁结合酚的抗氧化活性随发酵时间的延长呈现不同的变化趋势。如图5（a）所示，原液、肠消化液的结合酚DPPH自由基清除率随发酵时间的延长呈先下降后上升的趋势。胃消化液结合酚DPPH自由基清除率在不同发酵时间呈波动变化趋势，



(a) DPPH自由基清除率

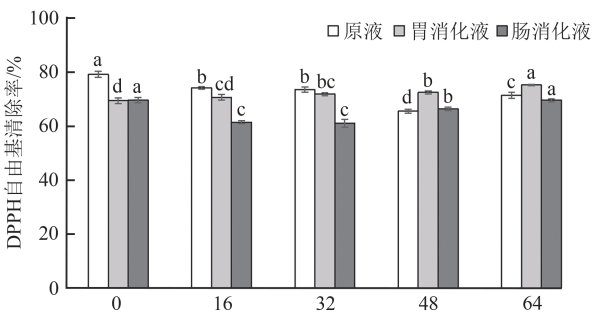


(b) ABTS⁺自由基清除率

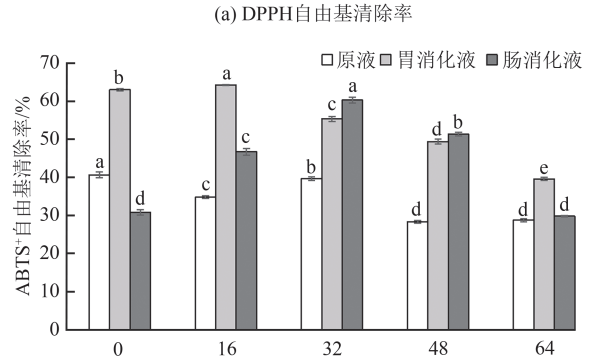
同组不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图4　体外胃肠模拟消化对发酵红枣汁游离酚抗氧化活性的影响

Fig. 4　Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the antioxidant activity of free phenols in fermented jujube juice



(a) DPPH自由基清除率



(b) ABTS⁺自由基清除率

同组不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图5　体外胃肠模拟消化对发酵红枣汁结合酚抗氧化活性的影响

Fig. 5　Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the antioxidant activity of bound phenols in fermented jujube juice

这可能与胃的酸性环境及蛋白酶水解导致结合酚结构变化有关；肠消化液的结合酚DPPH自由基清除率普遍较低，这可能是因为肠道微生物及酶的作用使结合酚发生降解[20-23]。如图5（b）所示，随着发酵时间的延长，原液结合酚ABTS⁺自由基清除率呈先下降后上升再下降的趋势，当发酵32 h后，ABTS⁺自由基清除率快速下降，发酵64 h时最低（28.76%）；胃消化液结合酚ABTS⁺自由基清除率呈下降趋势，在发酵前16 h变化较小，当发酵时间为64 h时达最低值（39.57%）；肠消化液结合酚ABTS⁺自由基清除率呈先上升后下降趋势。

2.6　体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中游离酚组分分析

由表1可知，在模拟胃肠消化中，芦丁、氢化肉桂酸、香草酸、没食子酸、苯甲酸、水杨酸和原儿茶酸等的质量浓度较高。未发酵红枣汁游离酚组分中，质量浓度最高的是苯甲酸（15 978.81 ng/mL），其次是芦丁和水杨酸，质量浓度分别为15 521.72、9 432.10 ng/mL。与未发酵红枣汁相比，原液游离酚组分中芦丁、氢化肉桂酸、苯甲酸和水杨酸的质量浓度分别增加了21.51%、54.41%、25.68%、28.62%，说明发酵促进了游离酚的形成。丁玉峰等[24]的研究表明，接种发酵可提升葡萄酵素中多酚的质量浓度，与本研究结果一致。此外，氢化肉桂酸、苯甲酸、水杨酸质量浓度的增加，可能与苯丙氨酸代谢途径有关[25-26]。与原液游离酚组分相比，发酵红枣汁经胃消化后香草酸、没食子酸、丁香酸、原儿茶醛、木犀草苷等的质量浓度升高，芦丁、反式阿魏酸、氢化肉桂酸、苯甲酸、水杨酸、原儿茶酸等的质量浓度降低，这可能与胃消化阶段的水解、去糖基化、酯化、氧化和裂解等的作用有关[27]。与胃消化液游离酚组分相比，发酵红枣汁经肠消化后芦丁、氢化肉桂酸、香草酸、苯甲酸和没食子酸等的质量浓度降低。综上可知，发酵对红枣汁在体外胃肠消化阶段的多酚类物质水平影响较为显著。

表 1 体外模拟胃肠消化后乳酸菌发酵红枣汁中游离酚组分的质量浓度变化

Table 1 Changes in mass concentrations of free phenol components in jujube juice fermented by lactic acid bacteria after *in vitro* simulated gastrointestinal digestion

编号	中文名称	CAS编号	分子式	游离酚组分质量浓度/(ng/mL)			
				未发酵红枣汁	原液	胃消化液	肠消化液
1	山柰酚	520-18-3	$C_{15}H_{10}O_6$	6.05^{c}	13.88^{a}	11.95^{b}	6.88^{c}
2	芹菜素	520-36-5	$C_{15}H_{10}O_5$	0.14^{c}	26.11^{a}	20.14^{b}	20.97^{b}
3	二氢槲皮素	480-18-2	$C_{15}H_{12}O_7$	23.58^{b}	38.21^{a}	24.40^{b}	21.42^{c}
4	二氢山柰酚	480-20-6	$C_{15}H_{12}O_6$	6.88^{c}	11.76^{a}	8.43^{b}	7.05^{c}
5	槲皮素	117-39-5	$C_{15}H_{10}O_7$	65.75^{c}	144.17^{a}	79.40^{b}	56.72^{d}
6	芦丁	153-18-4	$C_{27}H_{30}O_{16}$	15 521.72^{b}	18 861.00^{a}	13 431.25^{c}	13 185.72^{d}
7	木犀草素	491-70-3	$C_{15}H_{10}O_6$	5.87^{c}	11.90^{a}	6.53^{c}	8.12^{b}
8	柚皮素	480-41-1	$C_{15}H_{12}O_5$	1.44^{a}	2.30^{a}	1.78^{a}	1.59^{a}
9	儿茶素	7295-85-4	$C_{15}H_{14}O_6$	720.32^{a}	440.28^{b}	216.30^{d}	241.49^{c}
10	表儿茶素	490-46-0	$C_{15}H_{14}O_6$	634.01^{a}	397.69^{b}	169.79^{d}	179.35^{c}
11	二氢杨梅素	27200-12-0	$C_{15}H_{12}O_8$	35.75^{a}	35.09^{a}	16.73^{b}	12.73^{c}
12	异鼠李素	480-19-3	$C_{16}H_{12}O_7$	0.78^{a}	0.83^{a}	0.24^{a}	0.00^{a}
13	山柰酚-3-*O*-葡萄糖苷	480-10-4	$C_{21}H_{20}O_{11}$	114.97^{b}	137.53^{a}	97.62^{c}	86.97^{d}
14	槲皮素-3-*O*-葡萄糖苷	21637-25-2	$C_{21}H_{20}O_{12}$	99.42^{c}	130.88^{a}	93.32^{d}	103.17^{b}
15	反式阿魏酸	537-98-4	$C_{10}H_{10}O_4$	481.33^{a}	81.29^{b}	63.34^{d}	68.96^{c}
16	4-羟基苯甲酸	99-96-7	$C_7H_6O_3$	1 044.42^{a}	871.93^{b}	603.54^{d}	645.44^{c}
17	氢化肉桂酸	501-52-0	$C_9H_{10}O_2$	2 626.38^{b}	4 055.47^{a}	2 015.26^{c}	1 792.22^{d}
18	反式肉桂酸	140-10-3	$C_9H_8O_2$	355.21^{a}	6.62^{c}	5.52^{c}	8.47^{b}
19	香草酸	121-34-6	$C_8H_8O_4$	1 501.27^{a}	305.06^{d}	356.91^{b}	346.76^{c}
20	香草醛	121-33-5	$C_8H_8O_3$	128.41^{a}	5.42^{c}	5.43^{c}	9.14^{b}
21	没食子酸	149-91-7	$C_7H_6O_5$	369.37^{a}	264.77^{d}	293.62^{b}	289.95^{c}
22	苯甲酸	65-85-0	$C_7H_6O_2$	15 978.81^{b}	20 081.51^{a}	10 099.80^{c}	9 523.73^{d}
23	水杨酸	69-72-7	$C_7H_6O_3$	9 432.10^{b}	12 131.44^{a}	6 508.83^{d}	6 669.89^{c}
24	芥子酸	530-59-6	$C_{11}H_{12}O_5$	47.68^{a}	44.12^{b}	33.93^{c}	44.78^{b}
25	丁香酸	530-57-4	$C_9H_{10}O_5$	87.20^{a}	21.28^{c}	23.72^{b}	23.58^{b}
26	丁香醛	134-96-3	$C_9H_{10}O_4$	61.46^{a}	32.64^{b}	32.15^{b}	27.54^{c}
27	原儿茶酸	99-50-3	$C_7H_6O_4$	4 847.58^{a}	1 630.90^{b}	952.65^{d}	964.28^{c}
28	咖啡酸	331-39-5	$C_9H_8O_4$	348.46^{a}	49.64^{b}	24.51^{d}	27.01^{c}
29	对香豆酸	501-98-4	$C_9H_8O_3$	385.59^{a}	44.68^{b}	32.52^{c}	23.90^{d}
30	原儿茶醛	139-85-5	$C_7H_6O_3$	2 405.27^{a}	1 450.59^{d}	1 948.77^{b}	1 881.05^{c}
31	邻苯二甲酸	88-99-3	$C_8H_6O_4$	2 211.93^{b}	2 839.33^{a}	1 440.91^{d}	1 651.82^{c}
32	大豆苷元	486-66-8	$C_{15}H_{10}O_4$	0.00^{c}	22.08^{a}	15.76^{b}	15.97^{b}
33	木犀草苷	5373-11-5	$C_{21}H_{20}O_{11}$	11.28^{a}	7.85^{c}	11.12^{b}	7.31^{c}
34	棉酚	303-45-7	$C_{30}H_{30}O_8$	103.66^{a}	60.37^{c}	64.53^{b}	49.85^{d}

注：同行不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

2.7 体外模拟胃肠消化发酵红枣汁中结合酚组分分析

由表2可知，未发酵红枣汁、胃消化液、肠消化液结合酚中芦丁、苯甲酸、原儿茶醛、邻苯二甲酸的质量浓度较高。未发酵红枣汁结合酚组分中质量浓度最高的是苯甲酸，为16 529.49 ng/mL，其次是邻苯二甲酸和芦丁，质量浓度分别为8 303.33、8 159.71 ng/mL；与未发酵红枣汁结合酚组分相比，原液结合酚组分中芦丁、反式阿魏酸、4-羟基苯甲酸、氢化肉桂酸、香草酸、没食子酸、苯甲酸、

表2　体外模拟胃肠消化后乳酸菌发酵红枣汁中结合酚各组分质量浓度变化

Table 2　Changes in mass concentrations of bound phenol components in jujube juice fermented by lactic acid bacteria after *in vitro* simulated gastrointestinal digestion

编号	中文名称	CAS编号	分子式	结合酚组分质量浓度/(ng/mL)			
				未发酵红枣汁	原液	胃消化液	肠消化液
1	山柰酚	520-18-3	$C_{15}H_{10}O_6$	12.38^{b}	17.53^{a}	1.83^{c}	2.42^{c}
2	芹菜素	520-36-5	$C_{15}H_{10}O_5$	3.38^{b}	5.19^{a}	1.22^{c}	0.59^{c}
3	二氢槲皮素	480-18-2	$C_{15}H_{12}O_7$	75.86^{a}	46.79^{b}	7.43^{d}	21.68^{c}
4	二氢山柰酚	480-20-6	$C_{15}H_{12}O_6$	30.39^{a}	18.52^{b}	1.73^{c}	1.14^{c}
5	槲皮素	117-39-5	$C_{15}H_{10}O_7$	115.80^{a}	96.82^{b}	12.70^{c}	9.88^{d}
6	芦丁	153-18-4	$C_{27}H_{30}O_{16}$	8 159.71^{c}	8 043.25^{d}	1 296.28^{a}	1 256.44^{b}
7	木犀草素	491-70-3	$C_{15}H_{10}O_6$	6.20^{a}	3.69^{b}	0.54^{d}	1.96^{c}
8	柚皮素	480-41-1	$C_{15}H_{12}O_5$	0.23^{a}	0.56^{a}	0.09^{a}	0.00^{a}
9	儿茶素	7295-85-4	$C_{15}H_{14}O_6$	85.33^{a}	43.77^{b}	8.20^{d}	23.77^{c}
10	表儿茶素	490-46-0	$C_{15}H_{14}O_6$	79.93^{a}	58.10^{b}	0.00^{c}	0.00^{c}
11	二氢杨梅素	27200-12-0	$C_{15}H_{12}O_8$	154.78^{a}	84.76^{c}	16.73^{d}	127.25^{b}
12	异鼠李素	480-19-3	$C_{16}H_{12}O_7$	0.87^{a}	1.80^{a}	0.15^{b}	0.80^{a}
13	山柰酚-3-*O*-葡萄糖苷	480-10-4	$C_{21}H_{20}O_{11}$	67.21^{a}	64.27^{b}	15.47^{d}	17.70^{c}
14	反式阿魏酸	537-98-4	$C_{10}H_{10}O_4$	830.12^{a}	721.19^{b}	97.25^{d}	117.35^{c}
15	槲皮素-3-*O*-葡萄糖苷	21637-25-2	$C_{21}H_{20}O_{12}$	73.00^{a}	51.88^{b}	16.38^{c}	15.81^{c}
16	4-羟基苯甲酸	99-96-7	$C_7H_6O_3$	1 025.04^{a}	904.45^{b}	202.74^{d}	208.72^{c}
17	氢化肉桂酸	501-52-0	$C_9H_{10}O_2$	1 387.66^{a}	1 296.21^{b}	264.53^{c}	171.60^{d}
18	反式肉桂酸	140-10-3	$C_9H_8O_2$	192.11^{a}	147.02^{b}	11.66^{d}	17.94^{c}
19	香草酸	121-34-6	$C_8H_8O_4$	1 176.51^{a}	1 012.73^{b}	158.75^{c}	137.33^{d}
20	香草醛	121-33-5	$C_8H_8O_3$	124.70^{a}	115.00^{b}	17.68^{d}	19.06^{c}
21	没食子酸	149-91-7	$C_7H_6O_5$	502.99^{a}	385.60^{b}	60.76^{d}	93.59^{c}
22	苯甲酸	65-85-0	$C_7H_6O_2$	16 529.49^{a}	13 931.92^{b}	2 759.74^{c}	2 242.16^{d}
23	水杨酸	69-72-7	$C_7H_6O_3$	6 026.24^{a}	5 684.09^{b}	1 031.17^{c}	689.18^{d}
24	芥子酸	530-59-6	$C_{11}H_{12}O_5$	269.68^{a}	259.31^{b}	52.91^{d}	59.73^{c}
25	丁香酸	530-57-4	$C_9H_{10}O_5$	110.49^{a}	103.43^{b}	21.01^{d}	31.94^{c}
26	丁香醛	134-96-3	$C_9H_{10}O_4$	45.39^{a}	45.86^{a}	11.21^{c}	18.48^{b}
27	原儿茶酸	99-50-3	$C_7H_6O_4$	5 379.75^{a}	4 056.54^{b}	524.63^{d}	680.75^{c}
28	咖啡酸	331-39-5	$C_9H_8O_4$	832.15^{a}	747.52^{b}	53.87^{c}	53.85^{c}
29	对香豆酸	501-98-4	$C_9H_8O_3$	765.68^{a}	645.88^{b}	120.74^{d}	168.99^{c}
30	原儿茶醛	139-85-5	$C_7H_6O_3$	3 788.51^{a}	3 544.68^{b}	565.91^{d}	859.61^{c}
31	邻苯二甲酸	88-99-3	$C_8H_6O_4$	8 303.33^{a}	7 177.09^{b}	1 137.14^{d}	4 149.00^{c}
32	大豆苷元	486-66-8	$C_{15}H_{10}O_4$	2.15^{b}	4.12^{a}	0.85^{c}	0.33^{c}
33	木犀草苷	5373-11-5	$C_{21}H_{20}O_{11}$	34.42^{a}	21.97^{b}	3.89^{c}	4.26^{c}
34	棉酚	303-45-7	$C_{30}H_{30}O_8$	89.09^{a}	84.16^{b}	28.35^{d}	57.87^{c}

注：同行不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

水杨酸、原儿茶酸、原儿茶醛、邻苯二甲酸等的质量浓度降低。与原液结合酚组分相比，发酵红枣汁经胃消化后，芦丁、反式阿魏酸、4-羟基苯甲酸、氢化肉桂酸、香草酸、没食子酸、苯甲酸、水杨酸、原儿茶酸、原儿茶醛、邻苯二甲酸等的质量浓度降低，这可能是因为在胃的酸性环境与胃蛋白酶的介入下，结合酚结构稳定性不足。胃蛋白酶通过催化水解作用，断裂了结合酚与大分子食物基质之间的共价交联网络，致使结合酚发生定向的结构解聚与转化，这种解构效应远大于其从基质中释放的速率，最终造成了体系内结合酚的损耗[28]。发酵红枣汁经肠消化后，结合酚组分中芦丁、氢化

肉桂酸、香草酸、苯甲酸、水杨酸质量浓度显著低于胃消化液（P<0.05），而反式阿魏酸、没食子酸、原儿茶酸较胃消化液分别提高了 20.67%、54.03%、29.76%，说明结合酚在经肠消化时呈现出显著的双向分化特征。一方面，部分酚类（如芦丁等）在小肠环境中降解或转化，导致其质量浓度下降；另一方面，原有的交联网络被打破，释放出反式阿魏酸、没食子酸等活性单体，导致其质量浓度显著上升。这一现象表明，肠道环境及胰酶体系通过改变构象和断裂交联作用实现了结合酚的解聚，引发其组分发生双向转化。这种损耗与释放并存的规律，揭示了结合酚在胃肠消化全过程中的组成不稳定性与代谢复杂性。

3 结论

本研究探究了乳酸菌发酵红枣汁（原液）在不同发酵时间及胃肠消化过程中多酚水平及其抗氧化活性的变化。原液及胃消化液总酚质量分数随发酵时间的延长呈先上升后下降的趋势，原液与胃消化液游离酚质量分数呈上升趋势，胃消化液游离酚的 DPPH 自由基清除能力增强。胃消化环境更利于游离酚（香草酸、没食子酸等）的释放与积累，胃消化液游离酚质量分数在发酵 16 h 后均高于原液及肠消化液。与未发酵红枣汁相比，发酵提升了红枣汁游离酚组分中芦丁、氢化肉桂酸、苯甲酸和水杨酸的质量浓度。此外，原液与肠消化液结合酚质量分数随发酵时间的延长呈先上升后下降的趋势，而肠道环境则更有利于结合酚（反式阿魏酸、没食子酸等）的释放并增强了对 $ABTS^{+}$ 自由基的清除活性。因此乳酸菌发酵促进了红枣汁中多酚类物质的生物转化，胃肠消化则显著调控了多酚类物质的组成与抗氧化活性。

以上结论印证了乳酸菌发酵、胃肠消化对提升植物基食品活性成分生物可利用性及功效的增效作用。在红枣中，多酚类物质的释放依赖酶解与酸性解离机制。乳酸菌代谢会产生酯酶、糖苷酶、纤维素酶和果胶酶等多种酶类。其中，酯酶水解酯键，释放与果胶等结合的酚酸；糖苷酶断裂糖苷键，释放多酚类糖苷；纤维素酶、果胶酶破坏细胞壁结构，间接释放结合酚。此外，乳酸菌发酵产酸营造的酸性环境，可通过促进离子键断裂和酯键水解辅助多酚类物质的释放，该过程中产生的有机酸和酶协同作用，也显著提升了红枣中结合酚的释放效率[29]。胃肠消化对多酚类物质的释放影响显著，胃酸可破坏离子键与部分酯键，胃蛋白酶可辅助多酚类物质溶出；肠道中，胰脂肪酶可水解酚酯键，肠道菌群分泌的酯酶等可断裂糖苷键、酯键，从而释放结合酚[30]。

本研究为植物基食品活性成分的开发利用提供了重要理论依据与实践指导，但在发酵对多酚类物质释放的影响研究中未设置“未发酵+消化”对照组，缺乏单纯消化过程对多酚类物质释放的影响分析，未来应补充该对照组试验进一步验证。同时，VC 作为抗氧化活性的阳性对照，仅提供了抗氧化性的趋势性参考，后续应增加不同质量浓度梯度的 VC 抗氧化活性测试及计算其 IC_{50} 值，以建立更可靠的评价标准。

参考文献

[1] 戴俊生，包艳丽，张永恩，等. 我国红枣市场与产业调查分析报告[J]. 农产品市场，2021（4）：49-51.
DAI J S，BAO Y L，ZHANG Y E，et al. Investigation and analysis report on Chinese jujube market and industry[J]. Agricultural Products Market，2021（4）：49-51.（in Chinese）

[2] MASHITOA F M，MANHIVI V E，AKINOLA S A，et al. Changes in phenolics and antioxidant capacity during fermentation and simulated *in vitro* digestion of mango puree fermented with different lactic acid bacteria[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2021，45（11）：1-13.

[3] 范利君，宋安康，王志鹏，等. 葡萄籽多酚提取物在体外模拟消化过程中抗氧化成分及抗氧化活性的变化[J]. 食品科技，2022，47（6）：235-242.
FAN L J，SONG A K，WANG Z P，et al. Changes of antioxidant components and antioxidant activity of grape seed polyphenol extracts during *in vitro* simulated digestion[J]. Food Science and Technology，2022，47（6）：235-242.（in Chinese）

[4] 张志红，陈志健，王舒瑜，等. 乳酸菌发酵对荞麦壳多酚组成及胃肠消化、酵解特性的影响[J]. 中国食品学报，2024，24（4）：54-68.
ZHANG Z H，CHEN Z J，WANG S Y，et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the phenolic composition and *in vitro* digestion and fermentation properties of buckwheat hulls[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2024，24（4）：54-68.（in Chinese）

[5] 马妮，刘慧燕，方海田，等. 红枣多酚提取工艺优化、成分

及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2022，43(16)：246-254.
MA N，LIU H Y，FANG H T，et al. Optimization of polyphenol extraction process，analysis of components and antioxidant activity of jujube[J]. Science and Technology of Food Industry，2022，43(16)：246-254.(in Chinese)

[6] 朱秀灵，叶精勤，盛伊健，等. 体外模拟消化对苹果多酚及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业，2020，46(8)：63-71.
ZHU X L，YE J Q，SHENG Y J，et al. Effects of *in vitro* simulated digestion on apple polyphenols and their antioxidant activities [J]. Food and Fermentation Industries，2020，46(8)：63-71.(in Chinese)

[7] 田竹希，戴梦玲，李咏富，等. 蓝莓果浆不同形态多酚的酶法转化工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2023，44(9)：207-215.
TIAN Z X，DAI M L，LI Y F，et al. Optimization of enzymatic transformation process for different forms of polyphenols from blueberry pulp and its antioxidant activity analysis[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(9)：207-215.(in Chinese)

[8] 蔡文超. 植物源乳酸菌的筛选及其在红枣汁发酵中代谢产物的研究[D]. 石河子：石河子大学，2022.

[9] 贾荣. 山葡萄籽多酚提取物及抗氧化活性的研究[D]. 长春：吉林大学，2010.

[10] 张江宁，叶峥，杨春. 在红枣汁中乳酸菌、酵母菌单一及偶联发酵特征物质差异分析[J]. 现代食品科技，2024，40(5)：64-72.
ZHANG J N，YE Z，YANG C. Analysis of differential substances in pure and mixed culture fermentation of jujube juice by lactic acid bacteria and yeast in jujube juice [J]. Modern Food Science & Technology，2024，40(5)：64-72.(in Chinese)

[11] 王静，韩莹，罗茜，等. 体外模拟胃肠消化过程中猕猴桃抗氧化成分及活性的变化[J]. 食品与生物技术学报，2020，39(11)：49-55.
WANG J，HAN Y，LUO Q，et al. Changes of antioxidant components and activities in kiwifruit after simulated gastrointestinal digestion *in vitro* [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2020，39(11)：49-55.(in Chinese)

[12] 陈希苗，李美英，许秋莉，等. 体外模拟胃肠消化中山楂多酚及抗氧化活性的变化[J]. 食品科学，2019，40(5)：31-37.
CHEN X M，LI M Y，XU Q L，et al. Changes in polyphenol contents and antioxidant activity in hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bunge) during simulated gastrointestinal digestion[J]. Food Science，2019，40(5)：31-37.(in Chinese)

[13] 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)

[14] VILLANUEVA-CARVAJAL A，BERNAL-MARTÍNEZ L R，GARCÍA-GASCA M T，et al. *In vitro* gastrointestinal digestion of *Hibiscus sabdariffa* L.：the use of its natural matrix to improve the concentration of phenolic compounds in gut [J]. LWT-Food Science and Technology，2013，51(1)：260-265.

[15] 李娇，刘秋鸣，拔丽媛，等. 红毛丹果皮多酚水提物的体外模拟消化特性及其对肠道菌群的影响[J]. 食品工业科技，2025，46(22)：172-184.
LI J，LIU Q M，BA L Y，et al. Properties of water extracts of rambutan peel polyphenols during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation and their effects on gut microbiota[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(22)：172-184.(in Chinese)

[16] 王毕妮. 红枣多酚的种类及抗氧化活性研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2011.

[17] 张杰，党斌，张文刚，等. 不同加工方式对体外模拟胃肠消化黑青稞酚类物质含量及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学，2022，43(21)：78-86.
ZHANG J，DANG B，ZHANG W G，et al. Effects of different processing methods on phenolic content and antioxidant activity of black hulless barley *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Food Science，2022，43(21)：78-86.(in Chinese)

[18] HAO G X，MA Y W，AKEMUJIANG A Y，et al. Enhanced antioxidant potential of *in vitro* gastrointestinal digestion products derived from abalone myofibrillar protein-glucose conjugates based on structural changes [J]. Food Bioscience，2025，64：105888.

[19] 胡博，唐晓姝，陈雪梅，等. 红枣枸杞浸泡酒营养成分及体外抗氧化活性分析[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(1)：44-50.
HU B，TANG X S，CHEN X M，et al. Analysis of nutrients and antioxidant activity of red jujube wolfberry-soaked wine [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(1)：44-50.(in Chinese)

[20] 陈树俊，郑婕. 复合果蔬发酵汁有机酸动态分析及体外模拟消化抗氧化活性和功能成分分析[J]. 食品科学，

2021,42(7):90-97.
CHEN S J, ZHENG J. Dynamic analysis of organic acids in a mixture of vegetable and fruit juices during fermentation and changes in antioxidant activity and functional constituents during simulated gastrointestinal digestion[J]. Food Science, 2021, 42(7): 90-97. (in Chinese)

[21] 白晓晔,孙志宏,张和平. 益生乳酸菌与肠道菌群稳态[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(9):6-15.
BAI X Y, SUN Z H, ZHANG H P. Probiotic lactic acid bacteria and gut microbiota homeostasis[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(9): 6-15. (in Chinese)

[22] 冯颖,谭畅,苏佳怡. 紫薯多酚生物活性及体外模拟胃肠消化稳定性研究[J]. 农业科技与装备,2018(4):48-51.
FENG Y, TAN C, SU J Y. Research on bioactivities of polyphenols from sweet potato and the stabilities during *vitro* stimulated gastrointestinal digestion[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2018(4): 48-51. (in Chinese)

[23] 杨瑞丽,郭卓钊,施奕乔,等. 青梅酚类物质在体外模拟消化过程中生物接受率和抗氧化活性的变化[J]. 食品与发酵工业,2023,49(3):157-163.
YANG R L, GUO Z Z, SHI Y Q, et al. Changes in bioaccessibility and antioxidant activity of phenolics in *Prunus mume* during simulated digestion *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3): 157-163. (in Chinese)

[24] 丁玉峰,马艳莉,李素萍,等. 接种发酵对葡萄酵素多酚生物利用度及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学,2022,43(2):108-116.
DING Y F, MA Y L, LI S P, et al. Effect of inoculated fermentation on the bioaccessibility and antioxidant activity of polyphenols from grape Jiaosu[J]. Food Science, 2022, 43(2): 108-116. (in Chinese)

[25] 关倩倩,熊涛,谢明勇. 植物基食品乳酸菌发酵技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报,2022,41(7):1-11.
GUAN Q Q, XIONG T, XIE M Y. Research progress in lactic acid bacteria fermentation technology of plant-based foods[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(7): 1-11. (in Chinese)

[26] 李斌,张继月,耿丽娟,等. 软枣猕猴桃在体外模拟消化过程中酚类物质及抗氧化活性的变化规律[J]. 食品科学,2021,42(23):196-205.
LI B, ZHANG J Y, GENG L J, et al. Changes of phenolics and antioxidant activities of kiwiberry (*Actinidia arguta*) fruit during *in vitro* simulated digestion[J]. Food Science, 2021, 42(23): 196-205. (in Chinese)

[27] BOURROUBEY B, BETTOUATI A, BENDJEBBAR K, et al. *In vitro* validation of the organic and mineral antioxidant activity of lactic acid bacterial strains from intestinal microbiota [J]. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology, 2025, 61(1): 343-357.

[28] LIMA K, SILVA O, FIGUEIRA M E, et al. Influence of the *in vitro* gastrointestinal digestion on the antioxidant activity of *Artemisia gorgonum* Webb and *Hyptis pectinata* (L.) Poit. infusions from Cape Verde[J]. Food Research International, 2019, 115: 150-159.

[29] 阮静雅,于芮,林凡友,等. 和田大枣果实中酚类成分的分离与鉴定[J]. 沈阳药科大学学报,2022,39(1):10-16.
RUAN J Y, YU R, LIN F Y, et al. Isolation and identification of phenols from the fruits of *Ziziphus jujuba* Mill.[J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2022, 39(1): 10-16. (in Chinese)

[30] 丁诗瑶,雷文平,刘成国,等. 乳酸菌细胞表面结构与胃肠道的相互作用[J]. 食品与机械,2020,36(4):40-44.
DING S Y, LEI W P, LIU C G, et al. Cell surface structure of lactic acid bacteria and its interaction with gastrointestinal tract[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 40-44. (in Chinese)