

孙逊, 李菲, 张雨, 等. 发酵果蔬汁的发酵方式、生物活性及品质改善研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 471-480. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110298

SUN Xun, LI Fei, ZHANG Yu, et al. Research Progress on Fermentation Strategies, Biological Activities and Quality Improvements of Fermented Fruit and Vegetable Juices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 471-480. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110298

· 专题综述 ·

发酵果蔬汁的发酵方式、生物活性及品质改善研究进展

孙 逊¹, 李 菲², 张 雨¹, 赵 婧¹, 戈建华³, 李全宏^{1,*}
(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;
2. 青岛大学生命科学学院, 山东青岛 266071;
3. 华戈五谷控股有限公司, 河北沧州 061600)

摘要: 随着消费者对健康饮食的日益重视, 具有保健作用的发酵果蔬汁相关产品引起了研究者的广泛关注。果蔬是微生物生长的理想基质, 果蔬汁发酵后会产生丰富的营养物质和多种功能活性, 因此实现了果蔬高值化利用, 使得未来发酵果蔬汁系列产品有着广阔的应用市场。本文综述了果蔬汁的常见发酵方式, 发酵后的生物活性成分、功能活性以及发酵对果蔬汁的品质改善作用, 对发酵果蔬汁行业的发展具有一定的指导意义。

关键词: 果蔬, 发酵, 营养物质, 生物活性, 功能食品

中图分类号: TS201.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)19-0471-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110298

本文网刊:



Research Progress on Fermentation Strategies, Biological Activities and Quality Improvements of Fermented Fruit and Vegetable Juices

SUN Xun¹, LI Fei², ZHANG Yu¹, ZHAO Jing¹, GE Jianhua³, LI Quanhong^{1,*}

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Life Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

3. Huage Wugu Holding Co., Ltd., Cangzhou 061600, China)

Abstract: As the consumers pay more and more attention to a healthy diet, fermented fruit and vegetable juice related products with health benefits are attracting extensive notice. Fruits and vegetables are ideal substrates for microbial growth. Fermented fruit and vegetable juices are rich in nutrients with many function, adding more value to the products, which could have a broader market in the future. In this paper, the common fermentation strategies, the dominating bioactive ingredients, the functional activities and the effect of fermentation on the quality improvements of fermented fruit and vegetable juices are reviewed. Overall, this review has a guiding significance for the development of fermented fruit and vegetable juices industry.

Key words: fruits and vegetables; fermentation; nutrients; biological activities; functional food

果蔬富含碳水化合物、维生素、矿物质和酚类化合物等营养物质, 是国际公认的健康食品, 许多研究表明食用果蔬可以降低慢性疾病风险^[1-2], 因此天然果蔬制品受到越来越多消费者的青睐。但是由于新

鲜果蔬含水量比较高, 适合微生物的繁殖导致其容易腐烂, 这对运输和贮藏提出了很大的挑战。近年来, 随着种植技术的发展和品种的优化, 果蔬产量不断增加, 然而也带来了大量优质果蔬的滞销, 造成了资源

收稿日期: 2022-11-28

作者简介: 孙逊 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物提取及应用、果蔬加工, E-mail: sunxun1212@163.com。

* 通信作者: 李全宏 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 天然功能因子的提取与保健食品理论与技术、农产品精深加工与产业化的理论与实践, E-mail: quanhong_li@hotmail.com。

的严重浪费^[3];另一方面,由于加工技术的落后,目前果蔬制品主要是以鲜销和初级加工制品(如罐头、果蔬汁)为主,种类单一,果蔬深加工产业发展极其缓慢,越来越难以满足消费者的需求。发酵制品在我国有着悠久的历史,早在汉朝腐乳就已经出现,北魏的《齐民要术》详细介绍了古人用菘菜腌制酸菜的方法。发酵是一种操作简单、低成本、可持续的技术,并能延长果蔬的保质期^[4]。新鲜果蔬汁经过发酵不仅可以保留基本营养成分、降解有毒化合物,而且还会产生大量新的对健康有益的活性成分并改善食品风味,从而提高果蔬的附加值和利用率。调查显示益生菌产品已占据世界功能性食品市场份额的65%,发酵果蔬汁因其显著的健康效益和良好风味而发展

成为新流行的益生菌产品^[5]。基于上述发展现状,本文对发酵果蔬汁的发酵方式、生物活性成分、功能活性和发酵对果蔬汁的品质改善作用进行归纳和总结,旨在为深入研究发酵对果蔬汁营养和功能性质的影响提供参考。

1 发酵果蔬汁的发酵方式

发酵是一种生物转化过程,其实质是利用微生物生产有益代谢产物。通过发酵可以提高果蔬的安全性、营养价值、感官特性以及延长保质期,因而是一种操作简单且经济环保的生物技术^[2]。如图1所示,常见的方式包括自然发酵、接种内源菌种发酵以及商业菌种发酵。表1是对上述三种不同发酵方式的举例,介绍了不同果蔬原料经各种方式发酵后产品特点。

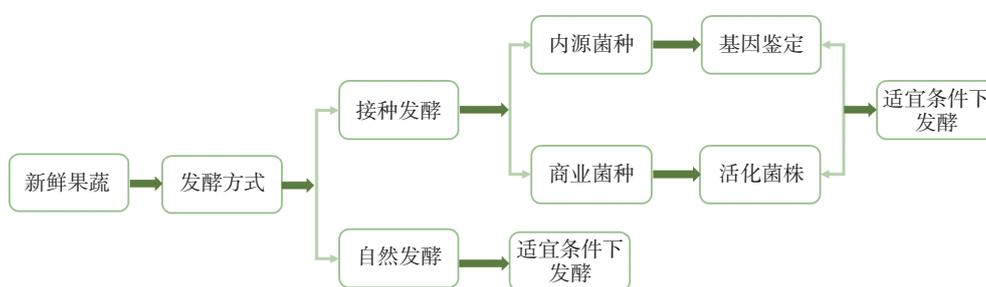


图1 发酵果蔬汁的发酵方式

Fig.1 Fermentation strategies of fermented fruit and vegetable juices

表1 发酵果蔬汁的发酵方式

Table 1 Fermentation strategies of fermented fruit and vegetable juices

发酵方式	原料	发酵菌种	主要特点	参考文献	优缺点	
自然发酵	刺梨	酿酒酵母、乳酸片球菌、棘皮鞘氨醇单胞菌	提高了果酒的总酸含量,降低了还原糖含量,抗氧化能力显著提升	[6]	操作简便、成本较低,但发酵时间过长、对腐败菌和病原菌的抑制效果不佳、发酵菌群未知导致产品易受污染、保质期短,以及发酵产品感官品质的不可预测性	
	红树莓	毕赤酵母属和哈萨克斯坦酵母属	促进了酶和多糖等活性物质的产生	[7]		
	柿子	伯克霍尔德菌、乳酸菌、醋酸菌、酵母菌等	超氧阴离子清除活性显著提高20.15%,总黄酮和多酚含量也显著提高	[8]		
内源菌种发酵	蓝莓	植物乳酸菌、发酵乳杆菌	活菌数超过10.0 log CFU/mL,乳酸显著升高;总酚含量提高6.1%~81.2%,体外抗氧化能力提高34.0%	[9]	内源菌株具有较强的发酵环境适应性,但筛选出适宜的特定果蔬发酵的内源菌种过程较为复杂,周期长	
	番茄	植物乳杆菌	活菌数显著高于外源菌株,并且在储存期间内源植物乳杆菌发酵的番茄汁也具有更高的抗坏血酸、谷胱甘肽含量和总抗氧化活性	[10]		
	胡萝卜、菜豆和西葫芦	植物乳杆菌、短乳杆菌、戊糖小球菌等	pH迅速下降,碳水化合物大量消耗	[11]		
商业菌种	单一菌种	苹果	植物乳杆菌、瑞士乳杆菌等	植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌表现出较强的苹果酸转化成乳酸能力	[13]	商业发酵剂具有严格的质量保证和质量控制,能够对整个发酵生产过程更好的控制,并将发酵失败的风险降到最低,但对果蔬基质的适应能力不如内源菌株强
		甘薯	双歧杆菌等	发酵后可溶性膳食纤维、总多酚含量、有机酸含量和甘薯渣稳定性均有所提高	[14]	
		胡柚	植物乳杆菌、发酵乳杆菌	pH显著降低,酸度和V _C 显著提高	[15]	
复合菌种	杏	乳酸菌和双歧杆菌	混合菌种发酵的样品在发酵结束后活菌数更高	[17]		
	苹果	酿酒酵母和植物乳杆菌	发酵产生新的挥发物,显著改善了苹果汁风味	[18]		
	石榴	植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌	可溶性固形物降到4.63%,可滴定酸含量增加到0.88 mg/mL	[19]		
	梨	植物乳杆菌、瑞士乳杆菌和干酪乳杆菌	植物乳杆菌和干酪乳杆菌混合发酵具有较强的DPPH自由基清除能力	[20]		
佛手柑	三种植物乳杆菌	二元组合发酵的pH、葡萄糖和果糖消耗量、乳酸生成量和DPPH自由基清除的效果显著提高	[22]			

1.1 自然发酵

自然发酵是无人接种菌种,由原料中的原微生物群进行发酵的过程。在水分、温度适宜的条件下,新鲜果蔬可发生自然发酵^[2]。彭欢等^[6]以刺梨为原料,通过自然发酵制备刺梨果酒,结果表明发酵显著提高了果酒的总酸含量,降低了还原糖含量,抗氧化能力也显著提升。红树莓经过自然发酵产生了酶和多糖等活性物质,通过高通量测序分析出红树莓中的微生物组成,为其产业化生产奠定基础^[7]。Wang 等^[8]研究了自然发酵柿子醋过程中微生物的组成和风味物质的变化,结果表明,从属水平上主要的细菌是伯克霍尔德菌(*Burkholderia*)、乳酸菌(*Lactobacillus*)、醋酸菌(*Acetobacter*);主要的真菌是酵母菌(*Saccharomyces*)、枝孢菌属(*Cladosporium*)。发酵结束后超氧阴离子自由基清除活性显著提高了 20.15%,总黄酮和多酚含量也显著提高。虽然自然发酵作为一种传统的发酵技术带来了巨大的经济效益,但是仍然有很多因素限制它的发展,比如发酵时间过长、对腐败菌和病原菌的抑制效果不佳、发酵菌群未知导致产品易受污染、保质期短,以及发酵产品感官品质的不可预测性等。因此,采用接种发酵的方式来控制发酵过程是一种更合理的选择。

1.2 内源菌种发酵

发酵果蔬汁最终的质量和风味的好坏主要取决于发酵剂的选择。每种果蔬在发酵过程中都有其独特的优势菌群,这些优势菌群主要受自身物理和营养条件的影响,研究证明采用原料中分离的特有菌群作为发酵剂更有利于发酵的进行。Li 等^[9]从番茄、蓝莓等水果中分离出植物乳酸菌和发酵乳杆菌接种到蓝莓汁中进行发酵,发酵 48 h 后,活菌数超过 10.0 log CFU/mL,乳酸含量上升到 2184.90 mg/L,总酚含量提高 6.1%~81.2%,体外抗氧化能力提高 34.0%。Di 等^[10]将从番茄中分离的植物乳酸菌发酵剂与外源菌株进行比较,结果表明,外源菌株的生长和酸化潜伏期更长,25 °C 发酵 17 h 后,内源菌株活菌数从约 7.0 log CFU/mL 上升到约 9.6 log CFU/mL,而外源植物乳酸菌的含量约为 8.5 log CFU/mL。并且在储存期间,与外源植物乳酸菌发酵的番茄汁相比,内源植物乳酸菌发酵的番茄汁也具有更高的抗坏血酸、谷胱甘肽含量和抗氧化活性。选用内源分离菌种发酵胡萝卜、菜豆和西葫芦,结果显示与外源菌株相比,发酵后内源菌株的 pH 下降更快且碳水化合物消耗更多。在维生素 C 浓度、颜色指数、硬度和感官性状方面,内源和外源菌株也有显著差异^[11]。内源菌株具有较强的发酵环境适应性,且其发酵的果蔬汁具有较高的营养价值,但筛选出适宜的特定果蔬发酵的内源菌种过程较为复杂,周期长。

1.3 商业菌种发酵

商业发酵剂是用于生产发酵食品的标准化的接种物,具有严格的质量保证和质量控制。商业菌种的使

用能够对整个发酵生产过程更好的控制,并将发酵失败的风险降到最低^[12]。目前,果蔬发酵主要使用的商业菌种是乳酸菌,如植物乳杆菌、干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌和瑞士乳杆菌等,其次还有酵母菌和醋酸菌。这些商业发酵剂通常采用单一或者混合菌种发酵的方式生产果蔬发酵产品。

1.3.1 单一菌种发酵 与自然发酵相比,使用单一菌种发酵可以大大缩短发酵时间,更有利于工业化生产。Wu 等^[13]选择植物乳杆菌、瑞士乳杆菌等 6 种乳酸菌发酵富士苹果汁,结果表明富士苹果汁是乳酸菌良好的发酵基质,发酵结束后活菌数最高达到 12.7 log CFU/mL,植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌表现出较强的苹果酸转化成乳酸的能力,最终产生的乳酸大于 6.5 mg/mL。Zhu 等^[14]利用 4 种乳酸菌和 1 种双歧杆菌单独发酵甘薯渣,并对其营养成分、抗氧化活性、挥发性物质及稳定性进行评价。研究显示发酵后可溶性膳食纤维、总酚含量、有机酸含量和甘薯渣稳定性均有所提高。束文秀等^[15]选择植物乳杆菌和发酵乳杆菌分别发酵胡柚汁,结果表明,胡柚汁是两种乳酸菌生长的优良基质,活菌数均超过 8 log CFU/mL, pH 较发酵前显著下降,而维生素 C 含量显著升高。Gao 等^[16]的研究表明将苦瓜用植物乳杆菌发酵后显著提高了总酚和总黄酮含量,发酵显著改变了果汁的香气,使其具有更理想的风味。

1.3.2 复合菌种发酵 经过多菌种协同作用可以改善果蔬的品质,产生更加丰富的活性物质。Bujna 等^[17]将乳酸菌和双歧杆菌混合培养物接种到杏汁中,结果显示,混菌发酵杏汁在发酵结束后活菌数更高,乙酸的浓度是单菌发酵的两倍左右,而乳酸含量接近。Li 等^[18]用酿酒酵母和植物乳杆菌分阶段发酵苹果汁,研究表明,发酵后黄酮类化合物、维生素 C 和 B₆ 含量增加。发酵后酮类和酸类得到富集,显著改善了苹果汁风味。刘晓翠等^[19]采用乳酸菌复配的方式发酵石榴汁,结果表明,乳酸菌复配发酵显著改善了石榴汁的品质,特别是植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌复配能显著降低石榴汁的可溶性固形物,总酚和花色苷含量显著提高,提升了石榴汁的抗氧化效果。Wang 等^[20]研究植物乳杆菌 90、瑞士乳杆菌 76 和干酪乳杆菌 37 在单菌和混菌发酵条件下发酵梨汁,结果表明,混菌发酵梨汁活菌数明显高于单菌发酵。植物乳杆菌 90 和干酪乳杆菌 37 发酵梨汁由于香草酸和熊果苷含量增加,具有较强的 DPPH 自由基清除能力。Wu 等^[21]以植物乳杆菌和短乳杆菌按 1:2 的比例发酵葡萄汁,结果显示混菌发酵可以富集酚类化合物,增强抗氧化能力,同时赋予葡萄汁的特色香气和宜人风味。Hashemi 等^[22]探究单一和复合菌株发酵佛手柑果汁,结果表明,与单一菌株发酵相比,复合菌株发酵的佛手柑汁的 pH 值、葡萄糖和果糖消耗量、乳酸和甲酸生成量、柠檬酸消耗量和 DPPH 自由基清除的效果显著提高。可见,复合菌种发酵果蔬产品不仅

可以丰富营养成分,改善风味,还有利于功能活性的提升。复合菌种发酵主要涉及不同菌种之间的共生或互生作用,其代谢机制比单菌发酵更为复杂,发酵产物更加丰富。

2 发酵果蔬汁的生物活性成分

经果蔬汁发酵后酚类化合物、胞外多糖、B族维生素和矿物质等生物活性成分含量显著提高,这些生物活性成分赋予了果蔬汁抗氧化活性、降血糖活性、降血压活性等多种功能活性。发酵后果蔬汁中主要生物活性成分的具体变化如表2所示。

2.1 酚类化合物

酚类化合物是一种天然抗氧化剂,能预防与氧化应激相关的疾病,主要存在于果蔬中。Shang等^[23]研究了佛手瓜自然发酵过程中酚类物质的动态变化,发现类黄酮物质木犀草素、芹黄素、香叶木素和异鼠李素的含量在发酵过程中显著增加,相关性分析表明8种酚类化合物与抗氧化活性的增加高度相关。植物乳杆菌产生的阿魏酸酯酶能催化阿魏酸从共轭酚酸中释放出来,单宁酶可以将儿茶素和没食子酸代谢为原儿茶酸,酚类物质的释放和转化是发酵后猕猴桃汁抗氧化活性提高的原因^[24]。Kwaw等^[25]观察到桑葚汁经过乳酸菌发酵后总酚含量显著提高,这归因于乳酸菌水解酶将复杂的酚类水解为小分子酚,菌株的总酚含量不同主要与水解酶的水解能力的差异有关。Tlais等^[26]探究乳酸菌发酵对酸菜中酚类含量变化的影响,结果发现,乳酸菌通过酚酸还原酶或脱羧酶对酚酸进行代谢,将咖啡酸转化为二氢咖啡酸和4-乙基儿茶酚,阿魏酸转化为二氢阿魏酸,辛酸转化为4-乙基乙酰酚,3-羟基苯甲酸转化为儿茶酚,衍生物与前体相比具有更好抗氧化活性。简而言之,果蔬发酵后酚类物质含量增加,一方面是与发酵导致植物细胞壁破坏从而释放出酚类物质有关;另一方面是与微生物中各种酶类导致大分子酚类物质水解以及酚类物质的转化有关。

2.2 胞外多糖

胞外多糖是微生物在生长过程中分泌到细胞壁外的一种次级代谢产物,其不仅可以改善发酵果蔬汁

的流变特性,还具有抗氧化、抗肿瘤和免疫调节等多种生物活性^[12]。目前胞外多糖的合成机制主要包括单糖分子进入细胞质,合成葡糖-1-磷酸,胞外多糖重复单元的合成以及胞外多糖的聚合输出四个步骤^[27]。很多研究已证实果蔬发酵后可以产生胞外多糖。例如,Wang等^[28]以甘蔗汁为原料,在28℃条件下采用灵芝发酵甘蔗汁,研究发现发酵后胞外多糖和蛋白质含量显著提高,游离氨基酸显著富集。抗氧化活性试验表明,胞外多糖具有明显的清除羟基自由基、超氧阴离子自由基和DPPH自由基的能力。Chen等^[29]评价了在高静水压力下,鼠李糖乳杆菌和木糖葡萄糖杆菌共发酵对荔枝桂圆汁品质的影响,结果表明发酵后胞外多糖的产量高于未发酵果汁。

2.3 维生素

果蔬富含维生素C,但是B族维生素含量较低,然而B族维生素作为各种反应的辅酶在机体代谢中发挥关键作用。已有研究报道通过发酵可以促进B族维生素的生成。Kapasob等^[30]利用5种乳酸菌发酵苹果汁并探究发酵菌种对B族维生素生成的影响,结果发现嗜酸乳杆菌和干酪乳杆菌发酵可以使B族维生素含量分别提高19.25%和23.11%。Presti等^[31]筛选的新乳酸菌和双歧杆菌菌株也可以产生B族维生素。李依娜等^[32]利用干酪乳杆菌、植物乳杆菌和肠膜状明串珠菌单一或复配发酵菠萝浆,发现只有肠膜状明串珠菌单独发酵组维生素C含量较发酵前增加,其余组均有不同程度的下降。Szutowaska等^[33]对羽衣甘蓝进行自然发酵,发现发酵结束维生素C含量显著下降。发酵导致维生素C含量下降的原因可能与其自身不稳定,极易氧化分解有关,也可能与在发酵过程中被乳酸菌代谢利用有关。

2.4 其他物质

果蔬汁中矿物质具有较低的生物利用度,主要是因为矿物质易于和其他物质络合,通过发酵可以降解络合物从而释放矿物质。Sevindik等^[34]发现乳酸菌发酵显著提高了莢蒾果汁的总矿物质含量,特别是钾、镁、铜、铁和锌元素,矿物质含量增加的原因可能是发酵导致莢蒾果汁中与矿物质络合多酚的分解,

表2 发酵果蔬汁的生物活性成分和功能活性

Table 2 Bioactive ingredients and functional activities of fermented fruit and vegetable juice

原料	发酵菌种	活性成分与功能	参考文献
蓝莓	植物乳杆菌	发酵后果汁中酚类物质和花青素含量提高,DPPH和超氧阴离子自由基清除率显著提高,能缓解Caco-2细胞氧化损伤	[25]
桑椹	植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌和副干酪乳杆菌	丁香酸、矢车菊素-3-O-芸香糖苷和槲皮素与自由基清除能力具有显著相关性	[28]
胡萝卜	植物乳杆菌	发酵产生短链脂肪酸促进了GLP-1分泌,从而达到降血糖的效果	[30]
柿子	黄霉菌和植物乳杆菌	发酵导致酚类释放,对自由基清除能力和碳水化合物水解酶抑制能力显著提高	[34]
甘蔗	灵芝	胞外多糖含量显著提高,具有明显的自由基清除能力	[36]
葡萄	植物乳杆菌	发酵产生 γ -氨基丁酸具有一定的降血压效果	[40]
石榴	植物乳杆菌	发酵使石榴汁的ACE抑制活性显著提高,具有降血压效果,主要与酚类物质释放有关	[43]
苹果	嗜酸乳杆菌和干酪乳杆菌等	嗜酸乳杆菌和干酪乳杆菌发酵可以使B族维生素含量分别提高19.25%和23.11%	[46]
黑樱桃	念珠菌植物乳杆菌和屎肠球菌	发酵后产生有机酸对大肠杆菌、肺炎克雷伯菌、铜绿假单胞菌等均有抑菌作用	[53]
莢蒾果	植物乳杆菌、德式乳杆菌、干酪乳杆菌	发酵显著提高了莢蒾果汁总矿物质含量,从而提高机体代谢	[54]

从而释放出小分子的酚类物质和矿物质。此外, 还有报道指出发酵可以使果蔬中的蛋白质转化为生物活性肽。众所周知, 生物活性肽是极具商业应用前景的功能因子, 具有降血压、抗氧化和免疫调节等多种有益作用。Fernandez 等^[35] 研究发现酒球菌具有蛋白水解活性, 能使葡萄释放出多种有益的生物活性肽, 从而发挥抗氧化和降血压的效果。

3 发酵果蔬汁的功能活性

发酵后新鲜果蔬汁具有多种对人体健康有益的功能活性, 例如抗氧化活性、降血糖、降血压和抗菌活性等(图 2 和表 2), 这与酚类化合物、胞外多糖和维生素等发酵产物的生成密切相关。

3.1 抗氧化活性

在代谢过程中人体会产生大量自由基和活性氧, 与多种疾病密切相关。由于合成抗氧化剂存在安全问题, 开发具有清除自由基能力的发酵食品对改善人体健康非常重要。发酵果蔬汁的抗氧化机理如图 3 所示, 果蔬汁发酵引起植物细胞壁结构破坏从而释放出各种生物活性成分, 与过量的自由基相互作用, 从而达到抗氧化的效果。酚类化合物、类胡萝卜素和花青素等是果蔬中主要的抗氧化物质, 可以作为还原剂、氢供体和单线态氧淬灭剂从而发挥抗氧化作用。李虹甫等^[36] 利用植物乳杆菌发酵蓝莓汁, 结果表明发酵使 DPPH 和超氧阴离子自由基清除率显著提高, 而且对 Caco-2 细胞氧化损伤具有缓解作用。Qi 等^[37] 研究了 6 种商业乳酸菌发酵对枸杞汁中活性植物化学物质、抗氧化活性和风味的影响, 结果表明, 基于 DPPH、ABTS 和 FRAP 方法的抗氧化活性在 LAB 发酵后显著提高。枸杞汁抗氧化活性的提

高是枸杞汁中多种抗氧化剂的协同作用, 如酚酸、类黄酮和维生素, 相关性分析显示根霉素、对香豆酸与 DPPH、ABTS 自由基清除活性呈正相关。桑椹汁分别用植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌和副干酪乳杆菌在 37 °C 下发酵 36 h, 乳酸菌发酵桑椹汁中主要的酚酸为丁香酸、矢车菊素-3-O-芸香糖苷和槲皮素, 它们与自由基清除能力具有显著相关性^[25]。

3.2 降血糖活性

目前临床使用的降血糖药物具有很大的副作用, 研究者开始从天然功能食品中寻找没有毒副作用的降血糖药物, 不少研究证明发酵后的果蔬汁具有降血糖作用, 这与发酵后的产物(如短链脂肪酸、酚类物质等)促进肠泌素激素的分泌和抑制碳水化合物水解酶的活性有关。Nayak 等^[39] 发现发酵后的诺丽汁对糖尿病大鼠有降血糖和保肝作用, 而且推测其可能是一种极好的降糖药物-格列本脲的替代物。Li 等^[40] 使用植物乳杆菌发酵胡萝卜汁, 结果证明, 该菌株促进了发酵果汁中短链脂肪酸的产生, 从而导致 II 型糖尿病大鼠结肠中短链脂肪酸水平更高。短链脂肪酸能促进胰高血糖素样肽(Glucagon-like peptide-1, GLP-1)分泌, GLP-1 是一种肠泌素激素, 主要功能是刺激葡萄糖依赖性胰岛素的释放和促进葡萄糖稳态, 从而达到抗糖尿病的效果。 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶是两种重要的碳水化合物水解酶, 抑制两种酶的活性会降低游离葡萄糖的产生, 进而调节人体血糖^[41]。Wang 等^[41] 筛选了具有降血糖功能的乳酸菌, 并添加在苹果汁中进行发酵, 结果表明, 发酵后的苹果汁对 α -葡萄糖苷酶抑制能力显著高于未发酵苹果汁, 这可能与乳酸菌产生的胞外多糖有关, 胞外多糖可以与酶

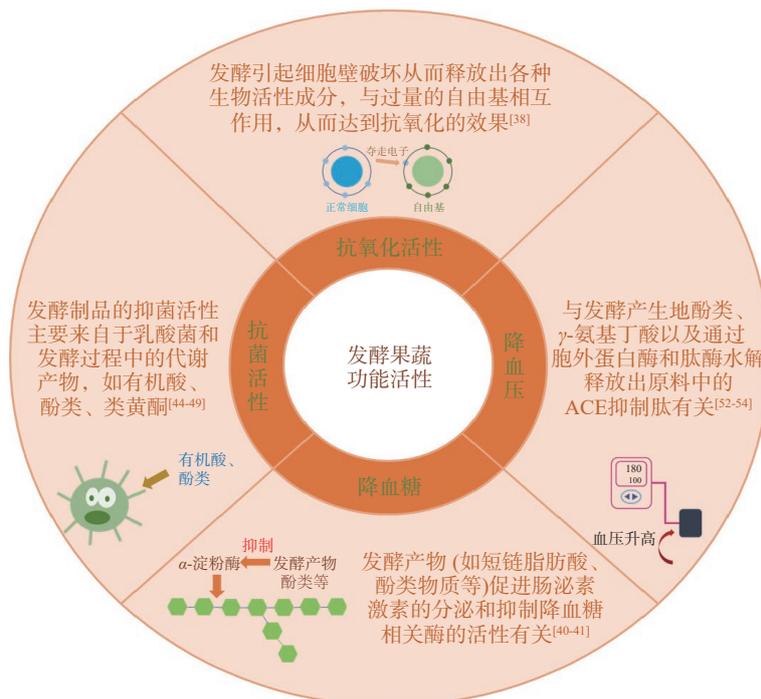


图 2 发酵果蔬汁的功能活性

Fig.2 Functional activities of fermented fruit and vegetable juices

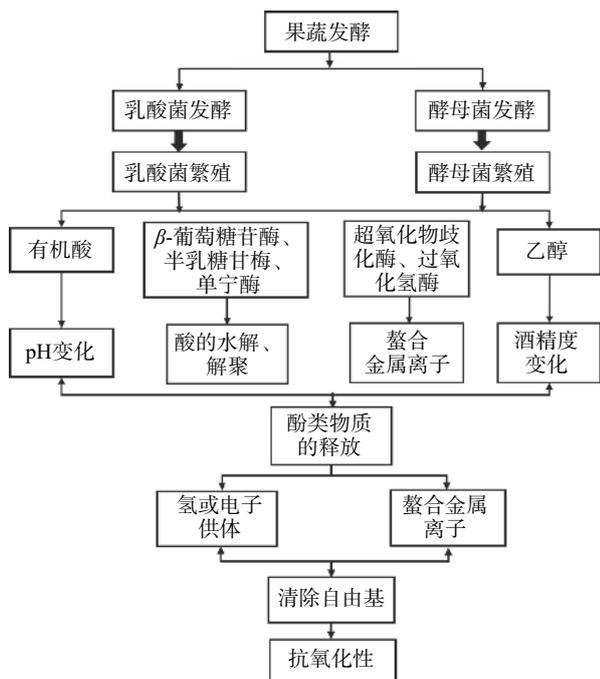


图 3 发酵果蔬汁抗氧化机制^[38]

Fig.3 Antioxidant mechanism of fermented fruit and vegetable juices^[38]

通过静电引力或氢键相互作用,从而改变酶的结构,导致其活性降低。Zhang 等^[42]用植物乳杆菌发酵蓝莓汁,发现蓝莓汁发酵后对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制能力均有所增强,这一结果与植物乳杆菌发酵增加了酚类物质的含量有关,因为多酚能有效抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的酶活性,研究表明多酚通过氢键、疏水相互作用等与酶形成稳定复合物,从而降低了其催化活性。Zhang 等^[43]发现黄微菌和植物乳杆菌发酵柿子对 α -葡萄糖苷酶抑制活性是未发酵组的 2.06~4.73 倍,其中发酵时间为 72 h α -葡萄糖苷酶活性的抑制效果最高。

3.3 抗菌活性

研究表明,发酵制品对革兰氏阳性和革兰氏阴性菌都具有抗菌作用。Filannin 等^[44]研究发现与未发酵果汁相比,通过植物乳杆菌发酵石榴汁可提高其抑菌活性。发酵的蔓越莓汁与抗生素的组合具有抗菌增效作用。乳酸菌代谢物与蔓越莓汁中酚类化合物有助于更好地抑制病原菌的生长^[45]。Divyashree 等^[46]研究了从发酵黑樱桃果实中分离的念珠菌植物乳杆菌 MYSAS1 和屎肠球菌 MYSAS4 对肠道沙门氏菌的抑制活性。结果表明,这两种乳酸菌对大肠杆菌、肺炎克雷伯菌、铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌和副伤寒沙门氏菌均有抑制作用,特别是植物乳杆菌的抑制率可达 80% 以上。Ayed 等^[47]发现发酵红葡萄酒对 7 种致病菌(例如金黄色葡萄球菌、表皮葡萄球菌和大肠杆菌)具有抗菌活性,这主要是由于发酵过程中乙酸含量增加。发酵果蔬汁的抑菌潜力主要来自于乳酸菌发酵过程中产生的具有抗菌活性的代谢产物,如有机酸、脂肪酸、过氧化氢或双乙酰,以

及一些抗菌蛋白,如细菌素肽聚糖水解酶。有机酸的抑菌机理主要涉及未解离的酸进入细胞后在细胞内释放质子,从而降低细胞质的 pH;除此之外,未解离的酸还能改变细胞膜的通透性从而导致病原菌的死亡^[48]。研究表明类黄酮可以破坏酰基高丝氨酸内酯与其受体之间的相互作用,也可以抑制革兰氏阳性细菌的表面粘附^[49]。

3.4 降血压活性

调查显示我国 65 岁以上老年人高血压患病率已达到 64.23%^[50],已有大量研究表明发酵果蔬汁具有潜在的降血压效果。经植物乳杆菌发酵,柿子汁对醇脱氢酶、乙醛脱氢酶的激活作用以及对血管紧张素转化酶的抑制活性显著增强,表现出较强的解酒和降血压功效^[51]。Luisa 等^[52]发现发酵浆果具有抗氧化的潜力和血管松弛的能力。也有研究显示 γ -氨基丁酸可能与预防高血压有一定的关联,但是天然果蔬中鲜有存在,而发酵可以使 L-谷氨酸转化成 γ -氨基丁酸。Di Cagno 等^[53]发现植物乳杆菌在 30 °C 发酵葡萄酒 72 h 的过程中合成了 4.83 mmol/L 的 γ -氨基丁酸。Chen 等^[54]研究了发酵石榴汁对血管紧张素转换酶(Angiotensin converting enzyme, ACE)的抑制活性,结果表明植物乳杆菌发酵使石榴汁的 ACE 抑制活性显著提高,进一步研究发现石榴汁 ACE 抑制活性主要与酚类物质有关,石榴汁中表儿茶素和绿原酸等 ACE 抑制活性均在 30% 以上,酚类化合物通过与氨基酸或活性位点的锌离子相互作用来钝化 ACE 催化活性。乳酸菌也可以通过其胞外蛋白酶和肽酶水解释放出原料基质中的 ACE 抑制肽从而具备降血压活性,乳酸菌的菌体成分如胞外多糖等也可发挥降血压作用^[55]。

3.5 其他功能活性

Choi 等^[56]选用嗜酸乳杆菌和鼠李糖乳杆菌等四种乳酸菌发酵香菇,结果发现发酵产物能抑制 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性,对脂多糖诱导的炎症反应中亚硝酸根和前列腺素等代谢产物也有抑制效果,因而具有开发为功能性益生菌膳食补充剂或食品潜力。通过对五倍子发酵液进行体外抗血栓活性实验,结果表明发酵液抗血栓机理是加速纤维蛋白溶解和血凝块降解以及延长凝血酶原时间。体内实验也表明,血栓的形成得到了缓解,并在一定程度上避免了血栓堵塞引起的瘫痪或死亡^[57]。Harima-Mizusawa 等^[58]研究了每天摄入经过热杀菌植物乳杆菌发酵柑橘汁是否能缓解特应性皮炎症状,结果表明发酵柑橘汁对多种过敏性疾病都有缓解作用。

4 发酵对果蔬汁的品质改善作用

4.1 改善风味

微生物在发酵过程中可以利用游离氨基酸、脂肪酸和糖类等前体物质合成风味化合物,从而产生果香、酯香和花香等味道(表 3)。风味化合物是消费者评价果汁的重要指标之一,与发酵果蔬产品的感官品

表 3 发酵果蔬汁的风味物质

Table 3 Flavor substances of fermented fruit and vegetable juice

原料	发酵菌种	关键风味物质	主要香味	参考文献
苦瓜	植物乳杆菌	发酵后1-己醇、苯甲醛、十六酸、辛酸含量显著提高	花香、杏仁味、焦糖味、甜味、奶酪味、草本香等	[16]
枸杞	植物乳杆菌、副干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌等	醛类含量下降; 酸类、酯类和醇类含量升高, 如2-甲基丁酸、庚酸、1-辛醇、1-己醇、乙酸乙酯、壬酸乙酯等	果味、甜味、面包味、青草味、蜂蜜味、菠萝味、葡萄味等	[37]
沙棘	植物乳杆菌	酯类含量显著提高, 如己酸乙酯、异戊酸异戊酯、辛酸乙酯、苯甲酸乙酯、丁酸乙酯等	水果味、苹果味、菠萝味、香蕉味、甜味等	[60]
葡萄	植物乳杆菌和短乳杆菌	总挥发物含量增加了65.75%, 包括醇类、酯类、酸类和萜烯类	花香和水果香气等	[21]
腰果苹果	嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌、植物乳杆菌	发酵后醇类、酯类含量提高, 包括2,6-二甲基-4庚醇、苯乙醇、苯丙醇、3-甲基丁酸乙酯、己酸乙酯等	奶油味、威士忌味、甜味、酸味、奶酪味、果味、脂肪味等	[61]
山楂	干酪乳杆菌、副干酪乳杆菌、双歧杆菌等	挥发性成分种类及总量增加, 形成了17种新醇和17种新酯, 并降低了醛的含量	丁香、玫瑰花香、木香、果香、酯香等	[62]
苹果	瑞士乳杆菌、嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌等	生成7种新醇, 包括2-甲基-1-丙醇、异丁基甲醇、苯甲醇、香茅醇、香叶醇等; 6种新酯, 包括乙酸乙酯、丙酸乙酯、乙酸戊酯等	玫瑰香、柑橘香、果香、甜味等	[13]
梨	植物乳杆菌、瑞士乳杆菌、干酪乳杆菌	瑞士乳杆菌发酵梨汁总挥发性物浓度最高, 醇类如芳樟醇和(E)-2-己烯-1-醇以及酯类如乙酸乙酯、丁酸乙酯等含量显著升高	花香、果香、苹果味、玫瑰香等	[20]

质密切相关。王昕悦等^[59]利用乳酸克鲁维酵母和植物乳杆菌发酵苹果浓缩汁, 研究发现乳酸克鲁维酵母发酵后氨基酸含量显著下降, 这是由于该菌株利用氨基酸合成了高级醇, 从而使发酵苹果汁具有怡人的香气。此外, 酵母菌发酵代谢了缬氨酸、甲硫氨酸、亮氨酸等具有苦味的氨基酸, 对发酵苹果汁风味的改善具有积极的作用。低浓度的醛类可以产生可接受的风味, 而高浓度则会产生异味, Gao 等^[16]发现植物乳杆菌发酵苦瓜汁会导致异味醛的含量减少, 同时增加醇和酸的含量, 使其具有更理想的风味。经过植物乳杆菌发酵后枸杞汁中醛类含量从 1841.22 mg/L 降低到 332.83 mg/L, 从而去除了不良风味。酯类对果蔬汁风味的改善发挥了重要作用, 一般由发酵后产生的酸类和醇类通过酯化反应生成。瑞士乳杆菌发酵枸杞汁使具有果味的酯类得到积累, 特别是乙酸乙酯含量最高, 这是乙酰辅酶 A 和乙酰转移酶合成的结果^[37]。Liu 等^[60]采用四种乳酸菌发酵沙棘汁, 结果表明, 经乳酸菌发酵后, 沙棘汁酸味显著提高, 而苦味和涩味显著降低; 经植物乳杆菌发酵后, 沙棘汁挥发性物质含量最高, 特别是产生了大量酯类, 如己酸乙酯、异戊酸异戊酯、辛酸乙酯、苯甲酸乙酯、丁酸乙酯等, 且植物乳杆菌组感官评价得分也最高。Wu 等^[21]利用植物乳杆菌和短乳杆菌混合接种发酵葡萄汁, 研究表明发酵后单萜醇和月桂烯的含量增加, 它们是重要的芳香化合物, 具有花香和水果香气, 使果汁的风味更易被消费者所喜爱。萜烯类含量增加可能是葡萄汁中的共轭前体被 β -糖苷酶水解的结果。

4.2 补充益生菌

作为一种非乳制品的益生菌饮料, 益生菌发酵果蔬汁对一些特殊消费者非常有益, 尤其是严格素食者、乳糖不耐者和高胆固醇血症者, 因此占据了很大的市场份额。益生菌饮料是大部分消费者补充益生菌的主要途径, 研究表明益生菌饮料的活菌数应达

到 $10^6 \sim 10^7$ CFU/mL 以上才能发挥较好的健康作用^[63], 并且还需要在货架期内保持良好的活性, 然而要保证上述要求是具有一定挑战性的。近年来, 一些研究者发现添加适量的益生元可以与益生菌产生共生作用, 从而可以维持益生菌饮料较高的活菌数, 并且改善了其感官品质和理化性质^[12]。

4.3 延长保质期

乳酸发酵能延长食品保质期主要是由于合成了各种各样的代谢物, 如有机酸、二氧化碳、乙醇、双乙酰和过氧化氢, 这些物质对多种有害菌具有抑制作用。Muhialdin 等^[64]发现经过植物乳杆菌发酵。火龙果汁极大地提高了对大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌的抑菌活性, 同时较未发酵火龙果汁的保质期延长了 3 个月。Alegre 等^[65]发现鼠李糖乳杆菌在苹果贮藏过程中对沙门氏菌和李斯特菌具有显著抑制作用, 因而能延长苹果的保质期。还有研究发现在新鲜哈密瓜汁中添加发酵哈密瓜汁在 8 °C 储藏条件下, 可以延长保质期 6 个月, 并且发酵哈密瓜汁对大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、黄曲霉和青霉菌具有较强的抑菌活性^[66]。

4.4 降低亚硝酸盐含量

传统发酵方式如高盐发酵蔬菜在发酵过程中产生大量亚硝酸盐从而影响发酵产品的安全性。研究证明乳杆菌属、明串珠菌属和片球菌属等具有降解亚硝酸盐的作用, 主要的降解途径是酶解和酸解, 也有研究表明乳酸菌还能通过其他途径降解亚硝酸盐, 例如通过抑制大肠杆菌等致病菌的生长从而降低亚硝酸盐的产生和积累^[67]。叶陵等^[68]发现乳酸菌发酵导致酸度升高, 而亚硝酸盐在 pH 低的环境中极易降解, 从而降低了其含量。隋明等^[69]通过接种植物乳杆菌和鼠李糖乳杆菌制备甘蓝泡菜, 研究表明接种量 3%, 发酵温度 30 °C, 盐加入量 4% 时, 风味最佳, 而且亚硝酸盐的含量远低于产品标准。

5 结论与展望

开发发酵果蔬汁可以较好地解决果蔬资源浪费的问题,还可以提高果蔬加工副产品的附加值和利用率。目前主要采用3种发酵方式发酵果蔬汁,分别是自然发酵、接种从果蔬分离的内源菌种以及商业菌种发酵。果蔬汁经发酵后产生了丰富的生物活性物质,具有抗氧化、降血糖、降血压和抗菌等多种功能活性,并且其品质有了很大的提升,例如改善了原有风味、延长了保质期以及降低了亚硝酸盐含量等。然而发酵果蔬汁行业也存在着突出问题,例如功能活性的作用机制探究还不完善,并且缺乏相关的临床试验,可借助于分子生物学、基因组学和代谢组学,进一步阐明发酵果蔬汁活性成分对其功能特性的具体调节机制。除此之外,发酵技术不够完善,产品的安全性也有待进一步考证,以及缺乏相关的行业标准。随着人们越来越重视自身的健康问题,发酵果蔬汁产品未来将是功能食品市场的重要组成部分,将展现出一种长期可持续发展的态势。因此在未来的研究应持续关注上述提及的技术短板问题。同时,开发出更多风味和口感优良、具有保健效果的发酵果蔬汁产品以满足市场的需求。

参考文献

- [1] SEPTEMBRE-MALATERRE A, REMIZE F, POUCHERET P. Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation[J]. *Food Research International*, 2018, 104: 86–99.
- [2] DI CAGNO R, CODA R, DE ANGELIS M, et al. Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation[J]. *Food Microbiology*, 2013, 33(1): 1–10.
- [3] 周明,魏颖,晏永球,等. 发酵果蔬的功能及应用现状[J]. *中国果菜*, 2021, 41(9): 1–5, 26. [ZHOU Ming, WEI Ying, YAN Yongqiu, et al. Function and application of fermented fruits and vegetables[J]. *Chinese Fruit Vegetable*, 2021, 41(9): 1–5, 26.]
- [4] 王思轩,付雪,朱雪梅,等. 乳酸菌发酵果蔬研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2020, 43(2): 56–59. [WANG Sixuan, FU Xue, ZHU Xuemei, et al. Research progress of lactic acid bacteria fermentation of fruits and vegetables[J]. *Dairy Science and Technology*, 2020, 43(2): 56–59.]
- [5] PANGHAL A, JANGHU S, VIRKAR K, et al. Potential non-dairy probiotic products-A healthy approach[J]. *Food Bioscience*, 2018, 21: 80–89.
- [6] 彭欢,黄子健,吴涛,等. 刺梨自然发酵制酒过程中化学成分、抗氧化活性及优势菌的变化[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(2): 205–213. [PENG Huan, HUANG Zijian, WU Tao, et al. Changes of chemical constituents, antioxidant activity and dominant bacteria in natural fermentation of Roxburgh rose[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(2): 205–213.]
- [7] 武林芝,郝秀萍. 自然发酵过程中红树莓的微生物多样性及活性成分研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(5): 75–78. [WU Linzhi, HAO Xiuping. Study on microbial diversity and active constituents of red raspberry during natural fermentation[J]. *China Condiment*, 2022, 47(5): 75–78.]
- [8] WANG D H, WANG M Y, CAO L W, et al. Changes and correlation of microorganism and flavor substances during persimmon vinegar fermentation[J]. *Food Bioscience*, 2022, 46: 101565.
- [9] LI S J, TAO Y, LI D D, et al. Fermentation of blueberry juices using autochthonous lactic acid bacteria isolated from fruit environment: Fermentation characteristics and evolution of phenolic profiles[J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130090.
- [10] DI C R, SURICO R F, PARADISO A. Effect of autochthonous lactic acid bacteria starters on health-promoting and sensory properties of tomato juices[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2008, 128: 473–483.
- [11] DI CAGNO R, SURICO R F, MINERVINI G, et al. Use of autochthonous starters to ferment red and yellow peppers (*Capiscum annum L.*) to be stored at room temperature[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2009, 130: 108–116.
- [12] TANG Z Z, ZHAO Z Q, WU X L, et al. A review on fruit and vegetable fermented beverage-benefits of microbes and beneficial effects[J]. *Food Reviews International*, 2022.
- [13] WU C Y, LI T L, QI J, et al. Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2020, 122: 109064.
- [14] ZHU L L, MU T H, MA M M, et al. Nutritional composition, antioxidant activity, volatile compounds, and stability properties of sweet potato residues fermented with selected lactic acid bacteria and bifidobacteria[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131500.
- [15] 束文秀,吴祖芳,翁佩芳,等. 植物乳杆菌和发酵乳杆菌对胡柚汁发酵品质及其抗氧化性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(2): 152–158. [SHU Wenxiu, WU Zufang, WENG Peifang, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus fermentum* on fermentation quality and antioxidant activity of grapefruit juice[J]. *Food Science*, 2019, 40(2): 152–158.]
- [16] GAO H, WEN J J, NIE Q X, et al. Momordica charantia juice with *Lactobacillus plantarum* fermentation: Chemical composition, antioxidant properties and aroma profile[J]. *Food Bioscience*, 2019, 29: 62–72.
- [17] BUJNA E, FARKAS N A, TRAN A M, et al. Lactic acid fermentation of apricot juice by mono-and mixed cultures of probiotic *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(2): 547–554.
- [18] LI H C, HUANG J T, WANG Y Q, et al. Study on the nutritional characteristics and antioxidant activity of dealcoholized sequentially fermented apple juice with *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus plantarum* fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2021, 363: 130351.
- [19] 刘晓翠,殷晓翠,马嫻,等. 不同乳酸菌复配发酵石榴汁的品质指标分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(17): 48–55. [LIU Xiaocui, YIN Xiaocui, MA Yuan, et al. Analysis of quality indexes of pomegranate juice fermented by different lactic acid bacteria[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(17): 48–55.]
- [20] WANG L Y, ZHANG H X, LEI H J. Phenolics profile, antioxidant activity and flavor volatiles of pear juice: influence of lactic acid fermentation using three *Lactobacillus* strains in monoculture and binary mixture[J]. *Foods*, 2022, 11(1): 11.
- [21] WU B M, LIU J C, YANG W B, et al. Nutritional and flavor properties of grape juice as affected by fermentation with lactic acid bacteria[J]. *International Journal of Food Properties*, 2021, 24(1): 906–922.
- [22] HASHEMI S M B, JAFARPOUR D. Fermentation of bergamot juice with *Lactobacillus plantarum* strains in pure and mixed fermentations: Chemical composition, antioxidant activity and sen-

- sorial properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109803.
- [23] SHANG Z X, LI M Q, Zhang W W, et al. Analysis of phenolic compounds in pickled chayote and their effects on antioxidant activities and cell protection[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111325.
- [24] ZHOU Y, WANG R M, ZHANG Y F, et al. Biotransformation of phenolics and metabolites and the change in antioxidant activity in kiwifruit induced by *Lactobacillus plantarum* fermentation [J]. *Journal of the Science of Food Agriculture*, 2020, 100(8): 3283–3290.
- [25] KWAW E, MA Y K, TCHABO W, et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice[J]. *Food Chemistry*, 2018, 250: 148–154.
- [26] TLAIS A Z A, KANWAL S, FILANNINO P, et al. Effect of sequential or ternary starters-assisted fermentation on the phenolic and glucosinolate profiles of sauerkraut in comparison with spontaneous fermentation[J]. *Food Research International*, 2022, 156: 111116.
- [27] 秦晓萌, 张远森, 柳陈坚, 等. 乳酸菌胞外多糖生理功能及合成途径的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(14): 389-393,399. [QIN Xiaomeng, ZHANG Yuansen, LIU Xinyu, et al. Research progress on the physiological function and synthetic pathway of extracellular polysaccharide from lactic acid bacteria[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(14): 389-393,399.]
- [28] WANG Q F, HUANG Q H, LIANG L, et al. Research on sugarcane juice fermentation by *Ganoderma lucidum* and assay of antioxidant activity of exopolysaccharide[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(9): e13761.
- [29] CHEN H L, XIAO G S, XU Y J, et al. High hydrostatic pressure and co-Fermentation by *Lactobacillus rhamnosus* and *Glucanacetobacter xylinus* improve flavor of yacon-litchi-longan juice [J]. *Foods*, 2019, 8(8): 308.
- [30] KAPRASOB R, KERDCHOECHUEN O, LAOHAKUNJIT N, et al. B vitamins and prebiotic fructooligosaccharides of cashew apple fermented with probiotic strains *Lactobacillus* spp., *Leuconostoc mesenteroides* and *Bifidobacterium longum*[J]. *Process Biochemistry*, 2018, 70: 9–19.
- [31] PRESTI I, D'ORAZIO G, LABRA M, et al. Evaluation of the probiotic properties of new *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains and their *in vitro* effect[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(13): 5613–5626.
- [32] 李依娜, 邹颖, 余元善, 等. 不同乳酸菌发酵对菠萝浆品质的影响[J]. *中国酿造*, 2021, 40(2): 111–116. [LI Yina, ZHOU Ying, YU Yuanshan, et al. Effects of different Lactic acid bacteria on the quality of pineapple pulp[J]. *China Brewing*, 2021, 40(2): 111–116.]
- [33] SZUTOWSKA J, RYBICKA I, PAWLAK-LEMANSKA K, et al. Spontaneously fermented curly kale juice: Microbiological quality, nutritional composition, antioxidant, and antimicrobial properties[J]. *Journal of Science*, 2020, 85(4): 1248–1255.
- [34] SEVINDIK O, GUCLU G, AGIRMAN B, et al. Impacts of selected lactic acid bacteria strains on the aroma and bioactive compositions of fermented gilaburu (*Viburnum opulus*) juice[J]. *Food Chemistry*, 2022, 378: 132079.
- [35] FERNANDEZ P A A, STIVALA M G, VAQUERO M J R, et al. Increase in antioxidant and antihypertensive activity by *Oenococcus oeni* in a yeast autolysis wine model[J]. *Biotechnology Letters*, 2011, 33(2): 359–364.
- [36] 李虹甫, 杨鑫焱, 刘昕宇, 等. 植物乳杆菌发酵蓝莓果汁工艺优化及其抗氧化能力[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(17): 127–133. [LI Hongfu, YANG Xinyan, LIU Xinyu, et al. Optimization of fermentation process and antioxidant capacity of blueberry juice by *Lactobacillus plantarum*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(17): 127–133.]
- [37] QI J, HUANG H, WANG J, et al. Insights into the improvement of bioactive phytochemicals, antioxidant activities and flavor profiles in Chinese wolfberry juice by select lactic acid bacteria[J]. *Food Bioscience*, 2021, 43(1): 101264.
- [38] HUR S J, LEE S Y, KIM Y C. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods[J]. *Food Chemistry*, 2014, 160: 346–356.
- [39] NAYAK B S, MARSHALL J R, ISITOR G, et al. Hypoglycemic and hepatoprotective activity of fermented fruit juice of morinda citrifolia (noni) in diabetic rats[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2011, 2011: 875293.
- [40] LI C, DING Q, NIE S P, et al. Carrot juice fermented with *Lactobacillus plantarum* NCU116 ameliorates type 2 diabetes in rats[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62(49): 11884.
- [41] WANG X W, HAN M Z, ZHANG M N, et al. *In vitro* evaluation of the hypoglycemic properties of lactic acid bacteria and its fermentation adaptability in apple juice[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2021, 136(1): 110363.
- [42] ZHANG Y, LIU W P, WEI Z H, et al. Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 139: 110590.
- [43] ZHANG Z P, MA J, HE Y Y, et al. Antioxidant and hypoglycemic effects of *Diospyros lotus* fruit fermented with *Microbacterium flavum* and *Lactobacillus plantarum*[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2018, 125(6): 682–687.
- [44] FILANNINO P, AZZI L, CAVOSKI I, et al. Exploitation of the health-promoting and sensory properties of organic pomegranate (*Punica granatum L.*) juice through lactic acid fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 163(2-3): 184–192.
- [45] MANTZOURANI I, BONTSIDIS C A, PLESSAS S, et al. Comparative susceptibility study against pathogens using fermented cranberry juice and antibiotics[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1294.
- [46] DIVYASHREE S, ANJALI P G, DEEPTHI B V, et al. Black cherry fruit as a source of probiotic candidates with antimicrobial and antibiofilm activities against *Salmonella*[J]. *South African Journal of Botany*, 2022, 150: 861–872.
- [47] AYED, L, BEN ABID, S, HAMD, M. Development of a beverage from red grape juice fermented with the Kombucha consortium[J]. *Annals of Microbiology*, 2017, 67(11): 111–121.
- [48] SZUTOWSKA J. Functional properties of lactic acid bacteria in fermented fruit and vegetable juices: A systematic literature review[J]. *European Food Research and Technology*, 2020, 246(3): 357–372.
- [49] CUSHNIE T P T, LAMB A J. Recent advances in understanding the antibacterial properties of flavonoids[J]. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2011, 38: 99–107.
- [50] 姜峰, 王福娟, 乔金鸽, 等. 中国老年居民高血压患病现状与饮食影响因素分析[J]. *中国卫生检验杂志*, 2021, 31(24): 3044–3048. [JIANG Feng, WANG Fujuan, QIAO Jing, et al. Analysis of hypertension status and diet influencing factors in elderly Chi-

- nese residents[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(24): 3044-3048.]
- [51] ZHOU C, LI J, MAO K M, et al. Anti-hangover and anti-hypertensive effects *in vitro* of fermented persimmon juice[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2019, 17(1): 960-966.
- [52] LUISA Z C, CASTRO P F S, LINO F M A, et al. Antioxidant potential and vasodilatory activity of fermented beverages of jaboticaba berry (*Myrciaria jaboticaba*)[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 8: 169-179.
- [53] DI CAGNO R, MAZZACANE F, RIZZELLO C G, et al. Synthesis of gamma-aminobutyric acid (GABA) by *Lactobacillus plantarum* DSM19463: Functional grape must beverage and dermatological applications[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 86(2): 731-741.
- [54] CHEN L, WANG L L, SHU G W, et al. Enhanced antihypertensive potential of fermented pomegranate juice: The contribution of phenolic compounds biotransformation and the resultant angiotensin-I-converting enzyme inhibition mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404(B): 134745.
- [55] 马超, 郝凤奇, 杨桂连, 等. 降血压功能乳酸菌研究进展[C]. 沧州: 第四届第十次全国学术研讨会暨动物微生态企业发展战略论坛, 2011: 37-41. [MA C, HAO F Q, YANG G L, et al. Research progress on lactic acid bacteria for blood pressure lowering function[C]. Cangzhou: The Fourth Tenth National Academic conference and Development Strategy Forum of Animal Microecological Enterprises, 2011: 37-41.]
- [56] CHOI J H, LEE H J, PARK S E, et al. Cytotoxicity, metabolic enzyme inhibitory, and anti-inflammatory effect of *Lentinula edodes* fermented using probiotic lactobacteria[J]. *Journal of Biochemistry*, 2021, 45(8): e13838.
- [57] CHOI J H, KIM S. Antioxidant and antithrombotic properties of *Dendropanax morbifera* Léveillé (Araliaceae) and its ferments produced by fermentation processing[J]. *Journal of Biochemistry*, 2019, 43(12): e13056.
- [58] HARIMA-MIZUSAWA N, KAMACHI K, KANO M, et al. Beneficial effects of citrus juice fermented with *Lactobacillus plantarum* YIT 0132 on atopic dermatitis: Results of daily intake by adult patients in two open trials[J]. *Bioscience of Microbiota Food and Health*, 2016, 35(1): 29-39.
- [59] 王昕悦, 曹少军, 赵华杰, 等. 不同菌种发酵苹果浓缩汁的风味成分变化分析[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(4): 238-243. [WANG Xinyue, CAO Shaojun, ZHAO Huajie, et al. Analysis of flavor components of apple concentrate fermented by different strains[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(4): 238-243.]
- [60] LIU Y Y, SHENG J, LI J J, et al. Influence of lactic acid bacteria on physicochemical indexes, sensory and flavor characteristics of fermented sea buckthorn juice[J]. *Food Bioscience*, 2022, 46: 101519.
- [61] KAPRASOB R, KERDCHOECHUEN O, LAOHAKUNJIT N, et al. Fermentation-based biotransformation of bioactive phenolics and volatile compounds from cashew apple juice by select lactic acid bacteria[J]. *Process Biochemistry*, 2017, 59(B): 141-149.
- [62] 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 Hao, ZHOU Yi, CHEN Jiahui, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on physicochemical properties, phenolic compounds, antioxidant activity and flavor of Hawthorn Juice[J]. *Food Science*, 2022, 43(10): 97-106.]
- [63] 张丽华, 查蒙蒙, 李顺峰, 等. 益生菌发酵果蔬汁研究进展[J]. *轻工学报*, 2021, 36(4): 29-36. [ZHANG Lihua, ZHA Mengmeng, LI Shunfeng, et al. Research progress of probiotics fermented fruit and vegetable juice[J]. *Journal of Light Industry*, 2021, 36(4): 29-36.]
- [64] MUHIALDIN B J, KADUM H, ZAREI M, et al. Effects of metabolite changes during lacto-fermentation on the biological activity and consumer acceptability for dragon fruit juice[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2020, 121: 108992.
- [65] ALEGRE I, VINAS I, USALL J, et al. Microbiological and physicochemical quality of fresh-cut apple enriched with the probiotic strain *Lactobacillus rhamnosus* GG[J]. *Food Microbiology*, 2011, 28(1): 59-66.
- [66] MUHIALDIN B J, KADUM H, HUSSIN A S M. Metabolomics profiling of fermented cantaloupe juice and the potential application to extend the shelf life of fresh cantaloupe juice for six months at 8 degrees C[J]. *Food Control*, 2020, 120: 107555.
- [67] 龚福明, 何彩梅, 吴桂容, 等. 乳酸菌降解发酵蔬菜中亚硝酸盐的研究现状[J]. *中国调味品*, 2022, 47(10): 201-205. [GONG Fuming, HE Caimei, WU Guirong, et al. Study on the degradation of nitrite by lactic acid bacteria[J]. *China Condiment*, 2022, 47(10): 201-205.]
- [68] 叶陵, 李勇, 王蓉蓉, 等. 荆辣椒中优良乳酸菌的分离鉴定及其生物学特性分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(10): 112-117. [YE Ling, LI Yong, WANG Rongrong, et al. Isolation, identification and biological characteristics analysis of fine lactic acid bacteria from chopped pepper[J]. *Food Science*, 2018, 39(10): 112-117.]
- [69] 隋明, 李俊儒, 张凤英, 等. 接种乳酸菌制作发酵型甘蓝泡菜过程的研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(5): 152-156. [SUI Ming, LI Junru, ZHANG Fengying, et al. Study on the preparation of fermented cabbage pickle by inoculating *Lactobacillus* [J]. *China Condiment*, 2020, 45(5): 152-156.]