

产 γ -氨基丁酸植物乳杆菌对发酵萝卜风味和品质的影响

吕欣然¹, 王德晟¹, 刘水琳², 李叙波¹, 白凤翎¹, 檀茜倩¹, 崔方超¹,
励建荣^{1*}, 俞张富³, 沈荣虎³

(¹渤海大学食品科学与工程学院 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心

辽宁省食品安全重点实验室 辽宁锦州 121013

²大连海关技术中心 辽宁大连 116000

³杭州萧山农业发展有限公司 杭州 311215)

摘要 为改善萝卜泡菜风味和品质,以产 γ -氨基丁酸的植物乳杆菌 PJ-7 和市售发酵剂分别接种发酵萝卜,采用高效液相色谱、顶空固相微萃取气相色谱-质谱及高通量测序等技术测定发酵萝卜中微生物数量、理化特性、有机酸、挥发性风味物质及细菌多样性,探究产 γ -氨基丁酸植物乳杆菌 PJ-7 对发酵萝卜风味及品质的影响。结果表明,植物乳杆菌 PJ-7 组发酵萝卜的微生物数量和理化特性均优于市售发酵剂组和自然发酵组,其 γ -氨基丁酸含量达 1.33 mg/mL,有机酸总量为 28.52 mg/mL,其中乳酸含量最高为 22.91 mg/mL。PJ-7 组发酵萝卜挥发性风味物质种类丰富,共检测出 48 种挥发性物质,主要是酯类、醇类和硫醚类,相对含量分别为 9.65%,21.16%,22.10%。乳杆菌属、魏斯氏菌属和链球菌属是 PJ-7 组发酵萝卜的优势菌属。说明植物乳杆菌 PJ-7 接种发酵能够提高发酵萝卜的 γ -氨基丁酸含量,改善其风味及品质。研究结果为开发富含 γ -氨基丁酸的泡菜食品提供试验依据。

关键词 植物乳杆菌; γ -氨基丁酸; 发酵萝卜; 风味; 品质

文章编号 1009-7848(2024)12-0224-09 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.12.020

我国酱腌菜年产量约 450 万 t,其中泡菜约占 45%^[1]。萝卜泡菜是以萝卜为原料,添加各种辅料,在一定浓度盐水中发酵而成的一种酱腌菜食品,具有酸爽、脆嫩和咸鲜等独特风味,是人们日常生活中不可或缺的调味副食品。然而,在其生产过程中存在发酵效率低,品质不稳定,产业标准化不足等问题^[2]。

为解决萝卜泡菜发酵过程中存在的问题,人工接种发酵被认为是缩短发酵周期,简化生产工艺,稳定产品品质的有效手段^[3]。益生菌发酵剂具有菌种活力高、活菌数高以及使用方便等优点,能够缩短发酵时间,提高发酵食品的风味、安全性和营养价值。Zhang 等^[4]将具有较好降解亚硝酸盐能力的植物乳杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*) ZJ316 应用于芥菜发酵中,得到的芥菜发酵产品亚硝酸盐含量保持在较低水平,同时能够抑制金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) D48、大肠杆

菌 (*Escherichia coli*) DH5 α 和单增李斯特菌 (*Listeria monocytogenes*) LM1 的生长。Zhao 等^[5]将植物乳杆菌 DP189 和肠膜明串珠菌亚种 (*Leuconostoc mesenteroides*) UA107 作为起始发酵剂分别接种到东北酸菜中,研究发现接种植物乳杆菌 DP189 的东北酸菜产酸速度快,可溶性蛋白和还原糖的利用率高,乳酸、鲜味氨基酸和挥发性风味物质含量增加,酸菜的品质和风味得到较大改善。

γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA) 别称 4-氨基丁酸,具有抗抑郁、降血压、助睡眠等的健康益处,是研发功能性食品的新热点^[6]。Li 等^[7]从 17 株乳酸菌中筛选出 1 株高产 GABA 的植物乳杆菌 8014,将其应用在红曲米发酵中,生产出的红曲米富含活性成分单核糖素 K 和 GABA。何梦秀^[8]从发酵桑叶的菌源中筛选出 1 株高产 GABA 的植物乳杆菌 SG-5,将其应用在桑豆乳中,该产品口感良好,对 ACE 酶的抑制率达 90%,具有较好的体外降血压效果。本课题组前期从发酵萝卜中获得 1 株具有较好合成 GABA 能力的植物乳杆菌 PJ-7,产量达 0.48 mg/mL,具有较好的发酵特性。然而,其在实际应用中是否具有改善发酵食品

收稿日期: 2023-12-02

基金项目: 辽宁省教育厅面上项目 (JYTMS20231621)

第一作者: 吕欣然,女,博士,副教授

通信作者: 励建荣 E-mail: lijr6491@163.com

GABA、风味及品质的能力还不清楚。

本文以产 GABA 的植物乳杆菌 PJ-7 和市售发酵剂分别接种发酵萝卜,采用高效液相色谱、顶空固相微萃取气相色谱-质谱及高通量测序等技术测定发酵萝卜的微生物数量、理化特性、有机酸、挥发性风味物质及细菌多样性,探究产 GABA 植物乳杆菌 PJ-7 对发酵萝卜风味及品质的影响,为发酵食品中应用产 GABA 植物乳杆菌提供一定的理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

植物乳杆菌 PJ-7,保藏在广东省微生物菌种保藏中心(GDMCC:63005);泡菜菌粉,天猫川秀旗舰店;食盐、白萝卜,锦州市百鲜荟生鲜超市;MRS 培养基、平板计数培养基,青岛海博生物;亚硝酸钠标准溶液,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;细菌基因组 DNA 提取试剂盒,北京百泰克生物技术有限公司;3,5-二硝基水杨酸(DNS)试剂,天津大茂化学试剂厂;抗坏血酸、牛血清蛋白、草酸、酒石酸、乳酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸,索莱宝生物科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

紫外-可见分光光度计,日本岛津;便携式 pH 计 SG2-ELK,美国 METTLER TOLEDO 公司;赛多利斯普及型精密天平 GL2201-1SCN,上海新诺仪器集团有限公司;高效液相色谱仪 Agilent1260,美国 Agilent 公司;生化培养箱 LRH-250F,上海善志仪器设备有限公司;SW-CJ-1D 型超净工作台,上海沪粤明科学仪器有限公司;台式高速冷冻离心机 KS50R,盐城市凯特实验仪器有限公司;高压灭菌锅,致微仪器有限公司;冷冻干燥机,浙江正大空分设备有限公司;真空干燥箱 DZF-6020A,济南欧莱博技术有限公司。

1.3 方法

1.3.1 植物乳杆菌 PJ-7 发酵剂的制备 将活化后的植物乳杆菌 PJ-7 以 2%(体积分数)接种至 MRS 液体培养基中,于 37℃培养 24 h,经 10 000 r/min 离心 10 min 后,PBS 缓冲溶液洗涤 2 次。将菌体与保护剂(脱脂奶粉 25%、海藻糖 7.5%、甘油 0.75%的水溶液)以质量比 1:1 混合后,进行真空

冷冻干燥,获得植物乳杆菌 PJ-7 发酵剂。

1.3.2 发酵萝卜的制备 将新鲜的白萝卜洗净去皮,切分成 1.3 cm×1.3 cm×4.0 cm 的条状,称取 1 500 g 放入 70℃水中烫漂 15 min。将烫漂后的萝卜条用流动水冲洗,使其快速冷却至室温并沥水,加入 3%食盐,搅拌均匀盐渍 1 h 后,将盐渍出的水分去除并洗去多余的盐分。然后将盐渍后的萝卜条放入发酵罐中,按照萝卜总质量计算,加入 4‰植物乳杆菌 PJ-7 发酵剂、4%食盐、2%谷氨酸钠、1 500 mL 水,密封发酵 5 d。以添加泡菜菌粉商业发酵剂组 SY 和未添加发酵剂的自然发酵组 CK 为对照。

1.3.3 菌落总数和乳酸菌的测定 参考《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》(GB 4789.2-2022)^[9]和《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》(GB 4789.35-2016)^[10]的测定方法,分别测定 3 组发酵萝卜中细菌菌落总数和乳酸菌总数。

1.3.4 理化指标的测定 参考《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》(GB 5009.237-2016)^[11]、《食品安全国家标准 食品中酸度的测定》(GB 5009.239-2016)^[12]、《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》(GB 5009.86-2016)^[13]、《食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定》(GB 5009.235-2016)^[14]、《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》(GB 5009.33-2016)^[15]的测定方法,测定发酵萝卜中 pH 值、总酸、维生素 C、氨基酸态氮和亚硝酸盐含量。参照曹健康等^[16]方法,测定发酵萝卜中的可溶性蛋白的含量。采用 Berthelot 比色法测定发酵萝卜中 GABA 的含量^[17]。

1.3.5 有机酸的测定 参考叶秀娟等^[18]方法,测定 CK 组、SY 组及 PJ-7 组发酵萝卜中的有机酸含量。取 3.0 g 样品匀浆,加入 3.0 mL 超纯水,超声处理 20 min 后,经 9 000 r/min 离心 15 min,取上清液经 0.22 μ m 滤膜过滤后用于高效液相色谱仪分析。色谱条件:流动相 A 为 0.01 mol/L $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$,流动相 B 为甲醇,A:B=95:5;流速 0.6 mL/min;柱温 30℃;进样量 10 μ L;紫外检测器 220 nm。

1.3.6 挥发性风味物质的测定 参照吴伟杰等^[19]方法对萝卜原料组 (YL)、CK 组、SY 组及 PJ-7 组

进行挥发性风味检测。将 2.0 g 样品加入顶空样品瓶中,置于 60 °C 水浴加热 15 min,插入固相微萃取 (SPME) 针吸附 30 min 后,进行 GC-MS 分析。通过数据库检索化合物,然后选择高匹配搜索结果。结合文献报道的已知化合物,确定被测物质的组成。根据总离子流色谱峰的峰面积归一化法的标准化方法,计算各组分的相对百分含量。

1.3.7 细菌多样性 按照 DNA 试剂盒说明提取 PJ-7 组样品 DNA,随后用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 纯度和浓度。用特定引物对微生物 16S rDNA 的 V₃-V₄ 区进行扩增,扩增产物使用 2% 的琼脂糖凝胶进行纯度检测合格后。委托北京诺禾致源科技股份有限公司完成建库及高通量测序,测序平台为 Illumina NovaSeq 6000。

1.3.8 数据统计与分析 试验结果均平行测定 3 次,结果用平均值±标准差表示,并采用 SPSS 19 软件和 Origin 2018 软件对数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 微生物及理化指标分析

发酵蔬菜中微生物种类丰富,细菌菌落总数可以反映产品中微生物的数量,是评估发酵食品品质的一个重要指标。此外,乳酸菌是发酵蔬菜中常见的优势菌群,其数量和种类对产品风味物质的形成有重要影响^[20]。由表 1 可知,发酵 5 d 时,PJ-7 组发酵萝卜中的菌落总数与乳酸菌总数均显著高于 CK 组和 SY 组,分别达到了 9.89 lg CFU/mL 和 9.66 lg (CFU/mL),说明植物乳杆菌 PJ-7 能够快速在发酵萝卜中生长,使产品中的微生物数量水平更高。

pH 值与酸度是判断发酵蔬菜品质的重要指标,也是判断发酵产品成熟情况的重要指标^[21]。由表 1 可知,PJ-7 组发酵 5 d 后 pH 值为 3.00,明显低于其它两组。PJ-7 组和 SY 组的发酵萝卜酸度显著高于 CK 组,分别增加了 0.58% 和 0.31%。PJ-7 组发酵萝卜的 pH 值较低且酸度较高,说明植物乳杆菌 PJ-7 具有较好的产酸能力,能够加速发酵萝卜的成熟。

表 1 发酵 5 d 萝卜的微生物指标与理化结果

Table 1 Microbial indexes and physicochemical results of fermented radish for five days

指标名称	样品编号		
	CK	SY	PJ-7
菌落总数/lg(CFU/mL)	8.17 ± 0.04 ^c	9.65 ± 0.07 ^b	9.89 ± 0.06 ^a
乳酸菌总数/lg(CFU/mL)	7.18 ± 0.19 ^c	8.85 ± 0.13 ^b	9.66 ± 0.10 ^a
pH 值	4.13 ± 0.08 ^a	3.18 ± 0.004 ^b	3.00 ± 0.05 ^c
酸度/%	0.07 ± 0.002 ^c	0.31 ± 0.005 ^b	0.58 ± 0.01 ^a
亚硝酸盐/(mg/kg)	10.75 ± 0.48 ^c	7.73 ± 0.31 ^b	4.94 ± 0.12 ^a
维生素 C/(mg/100 g)	6.10 ± 0.25 ^b	7.85 ± 0.20 ^a	7.99 ± 0.15 ^a
氨基酸态氮/(g/100 g)	0.12 ± 0.03 ^c	0.29 ± 0.004 ^b	0.36 ± 0.008 ^a
可溶性蛋白/(mg/g)	0.71 ± 0.04 ^a	0.35 ± 0.01 ^b	0.23 ± 0.008 ^c
GABA/(mg/mL)	0.04 ± 0.01 ^c	0.58 ± 0.02 ^b	1.33 ± 0.03 ^a

注:上标小写字母不同表示具有显著差异性($P < 0.05$)。

蔬菜腌制过程中会生成亚硝酸盐,过量或长期摄入亚硝酸盐会损害健康,因此,亚硝酸盐是评价腌制蔬菜安全性的一个重要指标^[22]。由表 1 可知,发酵 5 d 时,PJ-7 组和 SY 组发酵萝卜的亚硝酸盐含量分别为 4.94 mg/kg 和 7.73 mg/kg,均显著低于 CK 组,同时也远低于国家限定标准 20 mg/kg。这可能是由于 PJ-7 组和 SY 组添加了乳酸菌

发酵剂,而乳酸菌含有亚硝酸盐还原酶,可以分解亚硝酸盐,使发酵蔬菜中亚硝酸盐含量降低^[23]。同时,乳酸菌形成的低 pH 值环境对亚硝酸盐的形成也有一定的抑制作用。

白萝卜中含有丰富的维生素 C,具有增强机体免疫的功能。由表 1 可知,发酵 5 d 时,与 CK 组相比,SY 组和 PJ-7 组发酵萝卜中维生素 C 含量

分别提高了 28.69% 和 30.98%，且 PJ-7 组含量最高为 7.99 mg/100 g。可能是由于添加发酵剂组的乳酸菌活性较好，能够快速生长繁殖，产生酸性物质，形成酸性环境，阻止了维生素 C 的氧化，保留了萝卜中的维生素 C^[24]。

微生物利用蔬菜中的蛋白质将其分解成多种氨基酸，从而增加产品的鲜味。通过测定氨基酸态氮和可溶性蛋白的数量可以间接反映产品中氨基酸和蛋白的含量。由表 1 可知，PJ-7 组发酵萝卜中氨基酸态氮的含量为 0.36 g/100 g，显著高于 CK 组和 SY 组，与之相反，PJ-7 组发酵萝卜中可溶性蛋白含量最低，为 0.23 mg/g，说明 PJ-7 组蛋白利用率更高。

GABA 具有降低血压、抗抑郁、助睡眠等生理功能，在功能性食品领域被广泛应用^[25]。由表 1 可知，PJ-7 组发酵萝卜中 GABA 的含量为 1.33 mg/mL，显著高于 CK 组与 SY 组，原因可能与前期研究证明植物乳杆菌 PJ-7 具有较好的 GABA 合成能力有关。进一步说明植物乳杆菌 PJ-7 发酵能够赋予产品较高的 GABA，改善食品的营养价值。

2.2 有机酸

蔬菜发酵过程中，乳酸菌将原料中的糖类分解代谢成多种酸类物质，包括乳酸、乙酸、苹果酸等有机酸，有助于提高产品风味的形成。研究表明，蔬菜发酵过程中以形成草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、柠檬酸、琥珀酸 6 种有机酸为主^[26]，因此，本文选择检测发酵萝卜中上述 6 种有机酸含量。

发酵 5 d 萝卜中有机酸的含量如表 2 所示。由此可知，3 组发酵萝卜中草酸、苹果酸、乳酸和琥珀酸含量差异显著，特别是乳酸，PJ-7 组乳酸含量较高达 22.91 mg/mL，说明植物乳杆菌 PJ-7 能够利用萝卜中的糖类物质形成乳酸为主的有机酸，从而赋予产品柔和的酸味。PJ-7 组的苹果酸含量为 0.17 mg/mL，显著低于其它两组。苹果酸是生物体代谢三羧酸循环的中间体，随着发酵的进行逐渐被分解为乳酸等物质^[27]。PJ-7 组草酸含量为 4.88 mg/mL，白萝卜本身含有较高含量的草酸，草酸与醇类物质反应生成酯类物质，同时草酸对其他风味物质的保留和呈味有协同作用^[28]。PJ-7 组和 SY 组琥珀酸含量没有显著性差异，但显著高于 CK 组。琥珀酸是糖代谢的中间产物，随着发酵

表 2 发酵 5 d 萝卜中有机酸含量

Table 2 Content of organic acids in fermented radish for five days

有机酸种类	有机酸含量/(mg/mL)		
	CK	SY	PJ-7
草酸	4.62 ± 0.05 ^b	3.80 ± 0.02 ^c	4.88 ± 0.11 ^a
苹果酸	0.27 ± 0.03 ^b	0.36 ± 0.03 ^a	0.17 ± 0.01 ^c
乳酸	2.37 ± 0.02 ^c	8.49 ± 0.12 ^b	22.91 ± 0.29 ^a
柠檬酸	0.31 ± 0.02 ^a	0.30 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.008 ^a
琥珀酸	0.21 ± 0.03 ^b	0.30 ± 0.02 ^a	0.27 ± 0.008 ^{ab}
酒石酸	—	—	—

注：上标小写字母不同表示具有显著差异性 ($P < 0.05$)。

的进行逐渐生成。

3 组发酵萝卜中柠檬酸含量无显著性差异，含量在 0.21~0.30 mg/mL。3 组均为检测出酒石酸。从 6 种有机酸总量分析，CK 组、SY 组及 PJ-7 组发酵萝卜中有机酸总量分别为 7.78、13.25、28.52 mg/mL。其中 PJ-7 组有机酸总量较高，说明植物乳杆菌 PJ-7 发酵剂能够促进发酵蔬菜中有机酸的形成。

2.3 挥发性风味物质

各组样品中的挥发性风味物质如图 1 所示。4 组样品中共检测到挥发性风味物质 52 种，包括酯类 3 种，醇类 15 种，醛类 7 种，酮类 4 种，酸类 7 种，烷烃类 5 种，含硫化合物 11 种，各组之间挥发性风味成分差异较大。

酯类具有果香味和香甜味^[27]，在发酵萝卜中的相对含量较高，对风味有较大的影响。2-苯基乙

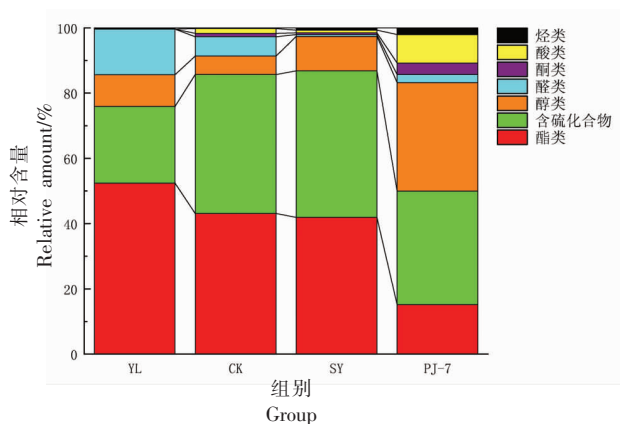


图 1 发酵 5 d 萝卜的主要挥发性风味物质及相对含量

Fig.1 Main volatile flavor compounds and their relative contents in fermented radish for five days

基异硫代氰酸酯在其它香味物质的协同作用下贡献出辛辣味和烤香味^[29];3-(甲硫基)丙基异硫氰酸酯具有辛辣味;三芥子酸甘油酯是一种特有的萝卜风味,具有辛辣味,使得发酵后的萝卜依然带有独特的萝卜香味^[30]。PJ-7组发酵萝卜中酯类相对含量比YL组、CK组和SY组分别低了10.82%,12.62%,19.65%。这说明腌制萝卜中酯类主要来源于萝卜本身,而PJ-7组酯类含量较低可能与植物乳杆菌发酵代谢产生其它物质有关^[31]。

醇类是发酵蔬菜中重要的香气物质,可以赋予发酵蔬菜愉快的气味^[32]。PJ-7组的醇类物质种类与YL组、CK组和SY组相比分别增加了17.36%,18.22%,13.74%,其中正己醇、庚醇、1-壬醇相对含量增加较为明显。这可能是由于乳酸菌异型发酵和酵母菌代谢产生醇类物质并不断积累,使PJ-7组醇类物质相对含量较高。

硫醚类物质通常被认为具有辛辣味和刺激味,特别是二甲基二硫醚和二甲基三硫醚,二甲基二硫醚具有刺激性洋葱味,二甲基三硫醚则具有肉样和洋葱蔬菜样香气^[33],是形成萝卜辛辣味的主要风味物质。PJ-7组两者相对含量为11.43%,比CK组与SY组分别低26.91%,61.11%,说明接种植物乳杆菌PJ-7可以有效改善萝卜泡菜的辛辣味。

发酵萝卜中醛类化合物以癸醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛等为主,可以赋予泡菜果香、花香等多种香气;酮类化合物以甲基壬基甲酮、2-十三烷酮、

香叶基丙酮等为主,可以赋予发酵萝卜一定的果香;酸类物质主要是乙酸,适量的乙酸可以增加发酵萝卜的酸味;烃类物质的香气阈值较高,对发酵萝卜风味的贡献较小^[34]。醛类、酮类、酸类和烃类物质的相对含量较小,但对发酵萝卜整体风味的形成具有协同作用。

2.4 细菌多样性

微生物的种类、数量及其代谢类型是影响发酵蔬菜风味及品质的重要因素。图2是PJ-7组发酵5d萝卜在科和属水平上的细菌群落相对丰度。如图2a所示,发酵初期时,发酵萝卜中微生物主要是乳杆菌科(*Lactobacillaceae*)、芽孢杆菌科(*Bacillaceae*)及其它科;发酵2~4d时,仅存在乳杆菌科与其它菌科,发酵5d时,开始出现了明串珠菌科(*Leuconostoc mesenteroides*),其与乳杆菌科同是发酵萝卜中的优势菌科。

由图2b可知,发酵0~1d时,发酵萝卜中主要是乳杆菌属(*Lactobacillus*)、芽孢杆菌属(*Bacillaceae*)和其它菌属;发酵2~4d时,仅存在乳杆菌属和其它菌属;发酵5d时,乳杆菌属(*Lactobacillus*)和明串珠菌属(*Leuconostocaceae*)是优势属。由于发酵采用接种发酵技术,因此在整个过程中乳杆菌属(*Lactobacillus*)始终占据较大比例,处于优势菌属地位,说明乳杆菌属是发酵过程中的主导菌属,能够增加发酵萝卜的风味物质,并改善品质^[35]。

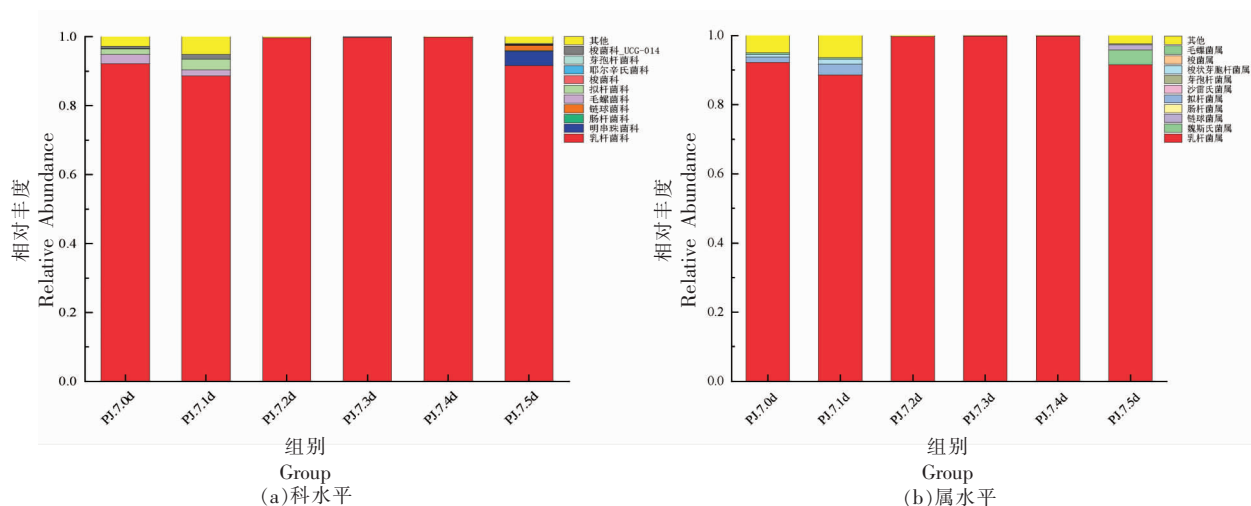


图2 科与属水平上的物种相对丰度

Fig.2 Relative abundance of species at family and genus level

结合理化指标和挥发性风味物质分析结果,与商业发酵剂组和自然发酵组相比,接种产GABA植物乳杆菌PJ-7发酵菌株,可使产品富含GABA、有机酸及丰富的挥发性风味物质,有助于产品风味的形成及品质的改良。

3 结论

本文对人工接种乳酸菌发酵萝卜中的微生物、理化特性及挥发性风味物质进行探究,结果表明产 γ -氨基丁酸植物乳杆菌PJ-7组发酵萝卜的微生物数量及理化特性均优于CK组与SY组。其 γ -氨基丁酸含量达1.33 mg/mL,有机酸总量为28.52 mg/mL,其中乳酸含量最高,达22.91 mg/mL。PJ-7组挥发性风味物质主要以酯类、醇类与硫醚类为主,相对含量分别为9.65%、21.16%、22.10%。同时,乳杆菌属(*Lactobacillus*),魏斯氏菌属(*Weissella*)和链球菌属(*Streptococcus*)是PJ-7组发酵萝卜的优势菌属。本研究为进一步开发富含 γ -氨基丁酸发酵食品提供试验参考。但 γ -氨基丁酸的产量仍有待进一步提升,未来的研究应着重于通过优化发酵条件和参数来进一步提高 γ -氨基丁酸的产量和改善产品品质。

参 考 文 献

- [1] 陈晟, 罗佳瑶, 蒋立文, 等. 我国腌渍蔬菜产业现状分析及改进对策[J]. 中国酿造, 2018, 37(7): 6-10.
CHEN S, LUO J Y, JIANG L W, et al. Status analysis and improving measures of pickled vegetables industry in China[J]. China Brewing, 2018, 37(7): 6-10.
- [2] 崔文甲, 王月明, 弓志青, 等. 酱腌菜国内外产业现状、研究进展及展望[J]. 食品工业, 2017, 38(11): 238-241.
CUI W J, WANG Y M, GONG Z Q, et al. The industry situation, research progress at home and abroad and the development of pickles[J]. The Food Industry, 2017, 38(11): 238-241.
- [3] ALAN R H. Progress in dairy starter culture technology[J]. Food Technology, 1984, 37(6): 41-49.
- [4] ZHANG X Z, HAN J R, ZHENG X G, et al. Use of *Lactiplantibacillus plantarum* ZJ316 as a starter culture for nitrite degradation, foodborne pathogens inhibition and microbial community modulation in pickled mustard fermentation[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14(30): 100344-100344.
- [5] ZHAO Y J, ZHAO Z J, GAO Y S, et al. Assessment of autochthonous lactic acid bacteria as starter culture for improving traditional Chinese Dongbei Suancai fermentation[J]. LWT, 2023, 178(15): 114615.
- [6] ZHOU H L, CHEN H Y, BAO D P, et al. Recent advances of γ -aminobutyric acid: Physiological and immunity function, enrichment, and metabolic pathway[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1076223.
- [7] LI Y J, CHEN X, SHU G W, et al. Screening of gamma-aminobutyric acid-producing lactic acid bacteria and its application in Monascus-fermented rice production[J]. Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria, 2020, 19(4): 387-394.
- [8] 何梦秀. 一株产 γ -氨基丁酸植物乳杆菌SG-5的筛选及其利用[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
HE M X. Isolation and application of *Lactobacillus plantarum* SG-5 with high γ -aminobutyric acid-producing[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [9] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of the total number of colonies in microbiological examination of food in the national standard of food safety: GB 4789.2-2022[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2022.
- [10] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验: GB 4789.35-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Microbiological examination of food according to national standards for food safety: GB 4789.35-2016[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.
- [11] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品pH值的测定: GB 5009.237-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of pH value of national food safety standards: GB 5009.237-2016[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.

- [12] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定: GB 5009.239-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of total acid in national food safety standards; GB 5009.239-2016[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of ascorbic acid in national food safety standards; GB 5009.86-2016[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定: GB 5009.235-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of amino acid nitrogen in national food safety standards; GB 5009.235-2016[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.
- [15] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定: GB 5009.33-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Determination of nitrite and nitrate in national food safety standards; GB 5009.33-2016[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.
- [16] 曹健康, 姜微波, 赵玉梅, 等. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2022, 4(1): 68-70.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M, et al. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press Ltd, 2022, 4(1): 68-70.
- [17] 肖君荣. 发芽处理对糙米中GABA含量影响及其蒸煮食品品质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
XIAO J R. Study on effects of germination on the content of GABA and edible quality of brown rice [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [18] 叶秀娟, 郑炯, 索化夷, 等. 高效液相色谱法测定永川豆豉中的6种有机酸[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 114-118.
YE X J, ZHENG J, SUO H Y, et al. Determination of six organic acids in Yongchuan Douchi a Chinese traditional fermented soybean product, by HPLC[J]. Food Science, 2014, 35(20): 114-118.
- [19] 吴伟杰, 郜海燕, 陈杭君, 等. 白萝卜泡菜发酵菌株乳酸肠球菌WJ03的分离筛选与应用[J]. 中国食品学报, 2017, 17(12): 86-94.
WU W J, GAO H Y, CHEN H J, et al. Isolation and identification of *Enterococcus lactis* WJ03 for radish pickle fermentation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(12): 86-94.
- [20] 吴进菊, 李宇昂, 王梓杭, 等. 襄阳大头菜发酵过程中细菌的多样性[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 112-117.
WU J J, LI Y A, WANG Z H, et al. Bacterial diversity of Xiangyang pickled kohlrabi during fermentation[J]. Food Science, 2020, 41(4): 112-117.
- [21] ZHANG C C, ZHANG J M, LIU D Q. Biochemical changes and microbial community dynamics during spontaneous fermentation of Zhacai, a traditional pickled mustard tuber from China[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 347(1): 109199-109199.
- [22] YU Y Y, YU Y S, XU Z L. Evaluation of nitrite, ethyl carbamate, and biogenic amines in four types of fermented vegetables[J]. Foods, 2021, 10(12): 3150-3150.
- [23] OHC K, OH M C, KIM S H. The depletion of sodium nitrite by lactic acid bacteria isolated from kimchi[J]. Journal of Medicinal Food, 2004, 7(1): 38-44.
- [24] 金海炎, 王丰园, 鲁云凤, 等. 混菌发酵猕猴桃酒工艺条件优化及抗氧化性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 177-185.
JIN H Y, WANG F Y, LU Y F, et al. Optimization of fermentation conditions for mixed bacteria of kiwifruit wine and its antioxidant activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 177-185.
- [25] 施生玲, 郭星晨, 马金璞, 等. 产GABA乳酸菌工艺优化及其产物抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2023, 44(5): 86-91.
SHI S L, GUO X C, MA J P, et al. Optimization of GABA-producing lactic acid bacteria process and study on its antioxidant activity[J]. The Food Industry, 2023, 44(5): 86-91.
- [26] 贾洪锋, 贺稚非, 李洪军, 等. 高效液相色谱法测定发酵辣椒中的有机酸[J]. 食品科学, 2008, 29

- (3): 374-379.
- JIA H F, HE Z F, LI H J, et al. Analysis of organic acids in fermented capsicum by reverse phase high performance liquid chromatography[J]. Food Science, 2008, 29(3): 374-379.
- [27] 史梅莓, 伍亚龙, 吕鹏军, 等. 不同乳酸菌接种发酵对泡白菜理化特征及风味的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, (2023-07-03)[2023-08-01]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035828>.
- SHI M M, WU Y L, LYU P J, et al. Effect of different lactic acid bacteria inoculation fermentation on the physicochemical characteristics and flavor of Chinese cabbage pickles[J/OL]. Food and Fermentation Industries, (2023-07-03)[2023-08-01]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035828>.
- [28] CAO J L, YANG J X, HOU Q C, et al. Assessment of bacterial profiles in aged, home-made Sichuan paocai brine with varying titratable acidity by PacBio SMRT sequencing technology [J]. Food Control, 2017, 78(8): 14-23.
- [29] 付群梅, 蒋涵, 唐华, 等. 微波处理对菜籽油风味的影响[J]. 中国油脂, 1-14 (2023-06-16)[2023-08-31]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230118>.
- FU Q M, JIANG H, TANG H, et al. Effect of microwave treatment on rapeseed oil flavor[J/OL]. China Oils and Fats, 1-14 (2023-06-16)[2023-08-31]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230118>.
- [30] 李庆羊, 吴祖芳, 翁佩芳, 等. 植物乳杆菌和棒状乳杆菌对发酵萝卜干风味品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 150-159.
- LI Q Y, WU Z F, WENG P F, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus rodarum* on flavor quality of fermented dried radish[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 150-159.
- [31] 刘春燕, 戴明福, 夏姣, 等. 不同乳酸菌接种发酵泡菜风味的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 154-158.
- LIU C Y, DAI M F, XIA J, et al. Study on the flavor of different lactic acid bacteria inoculated fermentation pickle[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(7): 154-158.
- [32] 薛冰洁, 胡荣, 吴良如, 等. 酸笋中微生物区系演替和风味物质形成机制的研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-7. (2023-05-19)[2023-08-01]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035940>.
- XUE B J, HU R, WU L R, et al. Advances in research on microbial flora succession and flavor substance formation mechanism in Suansun [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1-7. (2023-05-19)[2023-08-01]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035940>.
- [33] 随新平, 朱庆珍, 张宁, 等. 阿胶的香气活性物质分析[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(3): 89-100.
- SUI X P, ZHU Q Z, ZHANG N, et al. Analysis of aroma active compounds of Ejiao[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(3): 89-100.
- [34] 唐丽, 赵雅娇, 魏雯丽, 等. 不同原料四川工业泡菜的风味成分分析[J]. 食品科技, 2022, 47(3): 303-310.
- TANG L, ZHAO Y J, WEI W L, et al. Analysis of flavor components in sichuan industrial pickles with different raw materials [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(3): 303-310.
- [35] 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(30): 130351-130351.

Effect of *Lactiplantibacillus plantarum* Producing γ -Aminobutyric Acid on the Flavor and Quality of Fermented Radish

Lü Xinran¹, Wang Desheng¹, Liu Shuilin², Li Xubo¹, Bai Fengling¹, Tan Xiqian¹, Cui Fangchao¹, Li Jianrong^{1*}, Yu Zhangfu³, Sheng Ronghu³

(¹College of Food Science and Engineering, Bohai University, National and Local Joint Engineering Research Center for Storage and Processing of Fresh Agricultural Products and Safety Control Technology,

Liaoning Provincial Key Laboratory of Food Safety, Jinzhou 121013, Liaoning

²Dalian Customs Technology Center, Dalian 116000, Liaoning

³Hangzhou Xiaoshan Agricultural Development Co., Ltd., Hangzhou 311215)

Abstract In order to improve the flavor and quality of fermented radish pickles, radish was inoculated with *Lactiplantibacillus plantarum* PJ-7 producing γ -aminobutyric acid and commercial starter, respectively. The microbial count, physical and chemical characteristics, organic acids, volatile flavor compounds and bacterial diversity of fermented radish were determined using HPLC, headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry and high-throughput sequencing. Effect of *L. plantarum* PJ-7 producing γ -aminobutyric acid on the flavor and nutritional quality of fermented radish was analyzed in the study. The results showed that the count of microorganisms and physical and chemical characteristics in radish fermented by *L. plantarum* PJ-7 were better than that commercial starter group and natural fermentation group. The content of γ -aminobutyric acid reached 1.33 mg/mL, and the total amount of organic acids was 28.52 mg/mL, among which the content of lactic acid was the highest, reaching 22.91 mg/mL. The volatile flavor compounds of fermented radish in PJ-7 group were abundant. A total of 48 volatile flavor compounds in PJ-7 group, mainly including esters, alcohols and thioethers, the relative contents of which were 9.65%, 21.16% and 22.10%, respectively. *Lactobacillus*, *Weissella* and *Streptococcus* are the dominant bacteria genus in PJ-7 group. The results demonstrated that *L. plantarum* PJ-7 could increase the γ -aminobutyric acid content and improve the flavor and quality of fermented radish. This study aims to provide a basis for development of pickles rich in γ -aminobutyric acid.

Keywords *Lactiplantibacillus plantarum*; γ -aminobutyric acid; fermented radish; flavor; quality