

乳酸菌发酵改善小麦胚芽的营养品质与贮藏特性的研究

魏一星¹, 董英¹, 周兴华¹, 常宪辉², 陈国平²

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013) (2. 丹阳市江南面粉有限公司, 江苏丹阳 212300)

摘要: 利用植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum* dy-1) 发酵小麦胚芽, 研究其发酵前后营养品质与贮藏特性的变化。结果表明, *Lactobacillus plantarum* dy-1 中存在谷氨酸脱羧酶 (GAD), 能够转化 L-谷氨酸生成 γ -氨基丁酸 (GABA); 发酵后的小麦胚芽总游离氨基酸的含量提高了 13.64 倍, 其中天冬氨酸、亮氨酸、 γ -氨基丁酸以及蛋氨酸、赖氨酸等增加显著; 发酵过程中植酸酶活性增强, 抗营养因子植酸的含量下降; 发酵麦胚的脂肪酶活力比发酵前降低 55.31%, 脂肪氧化酶活力降低 76.32%; 顶空固相微萃取-气质联用 (SPME-GC-MS) 分析显示, 发酵麦胚的贮藏特性发生显著改变, 经过 60 d 的室温贮藏, 发酵麦胚的氧化酸败程度明显低于未发酵麦胚。因此, 乳酸菌发酵小麦胚芽可显著改善其营养品质与贮藏特性, 采用该方法加工的小麦胚芽可作为食品营养强化的原料或食品配料。

关键词: 酶活力; 氨基酸类; 脂肪酶类; γ -氨基丁酸; 植物乳杆菌

文章编号: 1673-9078(2014)4-147-153

Improvement of Nutritional Qualities and Storage Characteristics of Wheat Germ by *Lactic acid bacteria* Fermentation

WEI Yi-xing¹, DONG Ying¹, ZHOU Xing-hua¹, CHANG Xian-hui², CHEN Guo-ping²

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. Danyang Jiangnan Flour Co., Ltd, Jiangsu, Danyang 212300, China)

Abstract: *Lactobacillus plantarum* dy-1 was used as starters for the wheat germ fermentation, and the nutritional qualities and storage characteristics were analyzed. The results show that, *Lactobacillus plantarum* dy-1 had glutamate decarboxylase (GAD) activity, which was enabled to catalyze the irreversible decarboxylation of glutamate to γ -amino butyric acid. The concentration of free amino acids in Lactic acid bacteria fermented wheat germ increased by 13.64 times, especially aspartic acid, leucine, γ -amino butyric acid, methionine and lysine increased significantly; during the fermentation process, phytase activity increased, while phytic acid content decreased. Lipase activity after fermentation was 55.31% lower than that found in wheat germ, and lipoxigenase activity decreased by 76.32%. The SPME-GC-MS analysis indicated that, the storage characteristics of fermented wheat germ were significantly changed. After 60 days, the oxidative rancidity of fermented wheat germ was significantly lower than the unfermented. Therefore, Lactic acid bacteria could improve the nutritional qualities and storage characteristics of wheat germ, making the fermented wheat germ suitable to be food nutritional supplements or ingredients.

Key words: enzyme activity; amino acids; lipases; γ -amino butyric acid; *Lactobacillus plantarum*

小麦胚芽 (简称麦胚) 是小麦籽粒中营养最丰富的组成部分, 但其不易贮藏及抗营养等问题却影响着麦胚深加工与高效利用。主要表现为: 麦胚中抗营养因子植酸会明显降低矿物质与氨基酸的生物利用率^[1]; 而内在的脂肪酶和脂肪氧化酶活力则导致了麦胚的不耐贮藏特性, 即易产生水解和氧化产物。对于脂

肪酶类的钝化通常采用微波、挤压、蒸煮等方法进行处理^[2-3], 或添加抗氧化剂^[4]等加以控制, 虽然具有不同程度的作用, 但仍存在成本高、效率低、效果差及其合成抗氧化剂的安全性受到质疑等问题^[4]。因此, 高效、安全的麦胚加工方法仍是值得探索和深入研究的课题。

发酵是一种传统的食品加工及贮藏方法。在发酵过程中不仅可以降解食物原料中的有害物质、控制致病菌的生长, 还可以通过生物转化产生活性酶和多种营养物质, 如维生素、氨基酸、脂肪酸等。此外, 发

收稿日期: 2013-12-05

基金项目: 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2012172)

作者简介: 魏一星 (1989-), 女, 硕士研究生, 食品工程

通讯作者: 董英 (1954-), 女, 教授, 博士生导师, 食品营养与安全

酵过程中蛋白质降解可产生大量的多肽和氨基酸,并具有多种生理功能,且更易于吸收。

GABA是一种非蛋白氨基酸,是哺乳动物大脑和脊髓中重要的抑制性神经传递物质,具有降低血压、调节心跳速率,缓解疼痛和紧张等功能。同时,GABA也是胰腺产胰岛素的一种强促分泌素,能够有效预防糖尿病。GABA是由谷氨酸脱羧酶(GAD)催化L-谷氨酸不可逆的脱羧反应生成。麦胚中含有大量酶原,给予适当的处理,内源性酶原可被激活。麦胚经孵育后通过自身蛋白酶可将蛋白质水解成肽和氨基酸,通过生物调控技术可以富集GABA^[5]。另外,利用微生物GAD催化L-Glu脱羧生产GABA,也是有效的富集GABA的途径。近年来,国内外学者在利用乳酸菌发酵法合成GABA方面的研究已越来越成为热点。但目前关于乳酸菌发酵麦胚进行GABA富集的研究尚少见报道。

近年来,麦胚发酵多采用酵母菌,且主要集中在生物活性物质^[6-7]及其功能研究方面,而对其营养与贮藏特性变化的研究则较少。乳酸菌作为人体重要的益生菌,在发酵食品工业中得到了广泛的应用,但目前国内外关于乳酸菌发酵麦胚的研究尚少见报道。本研究利用实验室自行分离鉴定的植物乳杆菌发酵麦胚,研究其发酵前后营养和贮藏特性的变化,以期对麦胚的加工贮藏与高效利用提供理论依据和技术支持。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

1.1.1 试验材料

新鲜小麦胚芽(山东永乐食品公司提供);植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum* dy-1)实验室自行分离鉴定;其它试剂均为分析纯。

1.1.2 仪器与amp;设备

UV-9600 紫外可见分光光度计,北京瑞丽分析仪器有限公司;K-350/355 半自动凯氏定氮仪,瑞士步琪公司;Sykam S433D 氨基酸分析仪,德国 sykam 公司;HB43-S 卤素水分测定仪,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;LC-20AT 液相色谱仪,日本岛津公司;75um Carboxen/PDMS 熔融石英 SPME 萃取头,美国 sigma 公司;HP6890/5973 气相色谱-质谱联用仪,美国 Agilent 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 麦胚发酵工艺

新鲜的麦胚磨粉过筛,按料液比 1:0.6 混合均匀。按 1×10^8 接种活化至对数后期(活菌数达到 1×10^9

CFU/mL)的 *Lactobacillus plantarum* dy-1, 搅拌 5 min, 30 °C 发酵 24 h, 40 °C 烘干至水分含量达到 $10.5 \pm 0.05\%$ 左右,磨粉过筛备用。

1.2.2 基本组分的测定

水分含量测定:105 °C 常压干燥法,参照 GB/T 5009.3-2003;灰分含量测定:参照 GB/T 5009.4-2010;粗蛋白含量测定:凯氏定氮法,参照 GB/T 5009.5-2003;粗脂肪含量测定:索氏抽提法,参照 GB/T 5009.6-1985。

1.2.3 GAD 活力测定

1.2.3.1 乳酸菌 GAD 活力测定

参照许建军^[8]等人的方法,利用比色法测定一定条件酶反应后 GABA 的生成量来反映 GAD 活力大小。一个酶活力单位(U)定义为:在测定条件下,每分钟产生 1 μmol GABA 所需酶量为一个酶活力单位 U (μmol/min)。

1.2.3.2 麦胚中 GAD 活力测定

称取 1 g 麦胚,加入 10 mL 底物溶液(含 10 mmol/L L-谷氨酸钠和 0.1 mmol/L 5'-磷酸吡哆醛, Macllvaine 缓冲液体系 pH 4.7), 40 °C 反应 2 h, 离心取上清液测定 GABA 含量。在测定条件下,每分钟产生 1 μmol GABA 所需酶量为一个酶活力单位 U (μmol/min)。

1.2.4 游离氨基酸分析

采用氨基酸分析仪测定 WG 和 LFWG 提取液中游离氨基酸含量。参考 Rizzello 等人的方法^[9], 15 g 样品中加入 60 mL 50 mM 的 Tris-HCl (pH 8.8) 溶液, 4 °C 条件下磁力搅拌 1 h, 9000 r/min 离心 20 min。取上清液,加入 9 倍体积的 1% 磺基水杨酸沉淀蛋白, 8000 r/min 离心 15 min, 上清液用于测定游离氨基酸含量。

1.2.5 植酸酶活及植酸含量的测定

植酸酶活力测定:参照 Shimizu 等人的方法^[10];植酸含量测定:参照 GB/T 5009.153-2003。

1.2.6 脂肪酶及脂肪氧化酶活力测定

参照徐斌^[11]等人的方法。

1.2.7 贮藏期间挥发性化合物的测定

利用 SPME-GC-MS 方法分别测定发酵前后麦胚在贮藏第 0 d 和第 60 d 时挥发性化合物成分。

顶空固相微萃取(SPME)方法:

将首次使用的萃取头在气相色谱进样口老化至无杂峰。取 3 g 样品放入 15 mL 样品瓶中,将 SPME 萃取头插入瓶中,使之与样品面保持 1.5 cm 的距离,40 °C 条件下萃取 30 min。

GC-MS 参数条件:

色谱条件:毛细管色谱柱 DB-WAX (60 m×0.25 mm, 0.25 μm);进样口温度 250 °C, SPME 插入进样孔解吸 6 min;程序升温:始温 40 °C, 保持 2 min, 以

5 °C/min 升温至 230 °C，保持 10 min；载气(He)流速 1.0 mL/min，不分流。

质谱条件：接口温度 250 °C，离子源温度 200 °C，电子能量 70 eV，质量扫描范围 33~450 amu。

2 结果与讨论

2.1 麦胚发酵前后主要组分的变化

麦胚经植物乳杆菌发酵，发酵前后基本组分变化列于表 1。

表 1 麦胚发酵前后主要组分分析 (以干基含量计算)

Table 1 The analysis of main components in wheat germ before and after fermentation

主要组分 /%	麦胚 (WG)	乳酸菌发酵麦胚 (LFWG)
水分	12.48±0.46 ^a	10.58±0.10 ^b
灰分	7.68±0.09 ^a	7.84±0.07 ^a
粗蛋白	41.53±0.24 ^a	41.76±0.15 ^a
粗脂肪	11.91±0.43 ^a	11.97±0.22 ^a

注: a~b 同一列中不同字母表示存在显著性差异 (P<0.05)。

由表 1 可以看出，麦胚发酵前后其粗蛋白和粗脂肪的含量变化不大。其中，乳酸菌发酵过程虽然可增加部分菌体蛋白，但是对粗蛋白含量的影响甚微。但是，麦胚蛋白在乳酸菌分泌的蛋白酶和麦胚内源性蛋白酶作用下水解，生成人体易吸收的小分子蛋白或小肽，可以提高麦胚蛋白的利用率。

2.2 GAD 活力分析及麦胚发酵前后的游离氨基酸分析

采用比色法计算得到的 *Lactobacillus plantarum* dy-1 中 GAD 粗酶液活力为 0.029±0.0015 U/mL，这一结果与许建军^[8]等研究乳酸菌 GAD 时粗酶液的活力结果相似。而麦胚内源性 GAD 活力为 1.721±0.323 U/g。结果表明 *Lactobacillus plantarum* dy-1 中以及麦胚中都含有 GAD，在发酵过程中催化 L-谷氨酸不可逆脱羧生成 GABA。

乳酸菌在发酵的过程中产生乳酸，造成低的 pH 环境，而这样的环境不利于乳酸菌维持自身的活力，必须启用某种耐酸机制，而 GAD 的活性在低 pH 下 (pH<5.5) 得到激发，催化脱羧反应。Takeshi 等认为在此过程中，L-谷氨酸被携带者由细胞外运输至细胞膜内，在胞内 GAD 的催化作用下消耗一个 H⁺ 生成 GABA，并释放 CO₂。细胞内的谷氨酸脱羧反应消耗 H⁺，这种一对一的转化使细胞膜两侧两极化，造成细胞膜两边的

pH 压差和质子势差，而这种质子运动作用力促使化合物运输，脱羧过程用于合成 ATP，CO₂ 向外自由扩散则使循环不可逆的进行下去。因此，乳酸菌富集 GABA 的能力可能与乳酸菌的耐酸能力有关^[12]。

本试验研究中发酵麦胚游离氨基酸中的 GABA 含量，谷氨酸含量下降仅为未发酵麦胚的 10.95%，这是由于谷氨酸转换成 GABA 的缘故。闻秀梅^[13]等人采用水浴保温的方法对麦胚中 GABA 进行富集，GABA 最大富集量约为麦胚原料的 5.51 倍，而经过乳酸菌发酵，GABA 含量提高约 7.47 倍。因此，乳酸菌发酵麦胚更有利于 γ-氨基丁酸的生成与富集。

麦胚发酵前后氨基酸组成变化见表 2。

表 2 WG 和 LFWG 游离氨基酸含量

Table 2 Concentration of free amino acids in WG and LFWG

游离氨基酸种类	WG/(μg/g)	LFWG/(μg/g)
磷酸丝氨酸(PSer)	39.95±3.12 ^b	91.42±4.02 ^a
牛磺酸(Tau)	10.65±1.25 ^b	37.84±1.35 ^a
天冬氨酸(Asp)	17.99±2.01 ^b	183.13±4.03 ^a
苏氨酸(Thr)	153.76±10.56 ^b	443.58±16.21 ^a
丝氨酸(Ser)	174.14±11.23 ^a	92.74±9.68 ^b
天冬酰胺(Asn)	7182.70±58.23 ^b	7323.92±67.32 ^a
谷氨酸(Glu)	2424.75±39.21 ^a	265.49±15.11 ^b
甘氨酸(Gly)	764.14±20.31 ^b	1072.40±25.26 ^a
丙氨酸(Ala)	1175.51±29.56 ^b	1573.33±29.65 ^a
α-氨基丁酸(α-Aba)	29.87±2.13	-
缬氨酸(Val)	183.32±10.22 ^b	587.10±20.36 ^a
蛋氨酸(Met)	54.56±11.36 ^b	270.38±15.28 ^a
异亮氨酸(Ile)	191.73±10.56 ^b	282.93±20.46 ^a
亮氨酸(Leu)	103.28±10.55 ^b	1029.46±45.21 ^a
酪氨酸(Tyr)	344.12±21.89 ^a	330.00±20.65 ^b
苯丙氨酸(Phe)	138.91±9.88 ^b	409.15±6.33 ^a
β-氨基丙酸(β-Ala)	39.23±1.25 ^b	132.74±5.66 ^a
β-氨基异丁酸(β-Aiba)	197.90±10.55 ^b	868.76±9.88 ^a
γ-氨基丁酸(γ-Aba)	533.11±25.46 ^b	3981.07±45.33 ^a
组氨酸(His)	149.90±8.66 ^b	198.42±5.23 ^a
色氨酸(Trp)	219.90±10.22 ^b	693.13±16.77 ^a
鸟氨酸(Om)	1102.52±25.32 ^a	514.54±46.22 ^b
赖氨酸(Lys)	281.75±5.68 ^b	1261.55±28.95 ^a
精氨酸(Arg)	984.18±26.78 ^b	3088.87±35.33 ^a
脯氨酸(Pro)	332.59±15.21 ^b	496.64±20.33 ^a
总游离氨基酸	1784.90±30.22 ^b	26139.23±336.88 ^a

注: a~b 同一列中不同字母表示存在显著性差异 (P<0.05)。

乳酸菌是能够分泌多种蛋白酶的发酵菌种之一，在发酵过程中主要由蛋白酶系统的肽酶（内肽酶、氨基肽酶、二肽酶等）降解寡肽产生游离氨基酸，从而

满足自身合成代谢对氨基酸的需求^[14],同时使发酵产物中的游离氨基酸显著增加。

麦胚中含有丰富的蛋白酶类,内源性蛋白酶能够水解不溶性蛋白为可溶性蛋白、多肽和氨基酸。Mumford等人发现麦胚中存在一种类似胰蛋白酶活性的中性蛋白酶^[15],Runqiang Yang等人从麦胚中分离出一种半胱氨酸蛋白酶^[16]。不同蛋白酶的酶切位点不同,因而水解生成的多肽和氨基酸种类也有所差异。

在发酵过程中,大分子蛋白质在内源性蛋白酶和乳酸菌分泌蛋白酶共同作用下水解为多肽及小肽,小肽在外肽酶作用下继续水解为游离氨基酸,从而使游离氨基酸的含量增加。由表2可以看出,麦胚经发酵后其总游离氨基酸含量增加了13.64倍,其中尤以天冬氨酸、亮氨酸、 γ -氨基丁酸以及蛋氨酸、赖氨酸等增加显著,分别是麦胚的10.18、9.97、7.47、4.96、4.48倍。

天冬氨酸是生物体内赖氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、蛋氨酸等氨基酸及嘌呤、嘧啶碱基的合成前体,可以用于辅助治疗心脏病、肝病及高血压症,具有防止和缓解疲劳的作用;亮氨酸及其代谢产物在体内对营养物质代谢、神经内分泌调节、基因表达、信号转导及免疫功能等方面都具有调控作用。

蛋氨酸被认为是动物生长限制性氨基酸,具有降血压、保护肝脏与心肌等功能;赖氨酸为碱性必需氨基酸,能促进人体发育、增强免疫功能,并有提高中枢神经组织功能的作用。而谷物中赖氨酸和蛋氨酸的含量往往都很低,且在加工过程中易被破坏,因此被称为限制性氨基酸。乳酸菌发酵麦胚使这两种氨基酸的含量均得到显著提升,从而提高了麦胚的营养功能。

2.3 麦胚发酵过程中植酸酶活力的变化

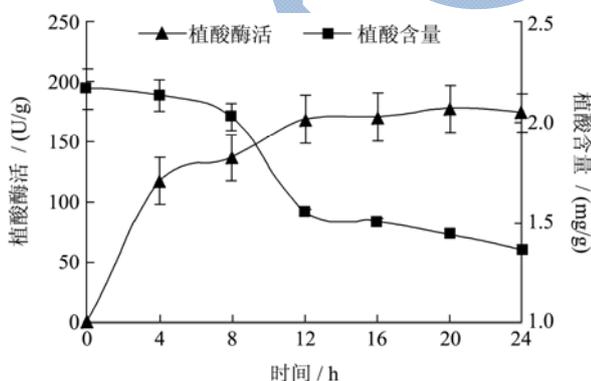


图1 麦胚发酵过程中植酸含量及植酸酶活力的变化

Fig.1 The changes of phytic acid content and phytase activity of wheat germ during fermentation

植酸是谷物中常见的一种肌醇六磷酸盐,是一种抗营养因子。它不仅可以螯合 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Zn^{2+} 等矿物质元素,影响其吸收利用,同时还可以与蛋白

质中的碱性氨基酸形成复合物,从而降低其生物利用率。有研究表明^[17],发酵过程能够通过微生物的作用调节最适pH,提高植酸酶活力,从而降低植酸含量,释放矿物质离子,提高其营养价值。

有文献表明^[18],麦胚内源植酸酶在最适温度及最适pH条件下,催化水解48h后,麦胚中的植酸水解率为31.49%。乳酸菌发酵可能产生一个合适的pH来激活或提高麦胚内源植酸酶的活力,且乳酸菌也可能成为植酸酶的来源^[9]。由图1可以看出麦胚发酵过程中植酸含量逐渐下降,同时植酸酶活力逐渐增强,发酵24h植酸水解率为37.02%,优于麦胚内源植酸酶催化水解植酸的效果。

2.4 麦胚发酵过程中脂肪酶及脂肪氧化酶活力的变化

脂肪酶能催化麦胚脂质中的三酰甘油水解为高级脂肪酸和甘油,而脂肪氧化酶则催化其不饱和脂肪酸如亚油酸氧化,生成氢过氧化油酸,并进一步分解生成挥发性的醛和酮类等。麦胚中内源脂肪酶和脂肪氧化酶活力均很高,酶解产生的游离脂肪酸可导致含有麦胚的烘焙食品酸败而影响营养与感官品质。有研究表明,麦胚中的脂肪酶具有热稳定性,60~90℃处理1h,仍可保持20%以上的残余活力。但由于麦胚脂肪酶最佳pH约为8.0,故在酸性条件下其活力明显降低^[19]。

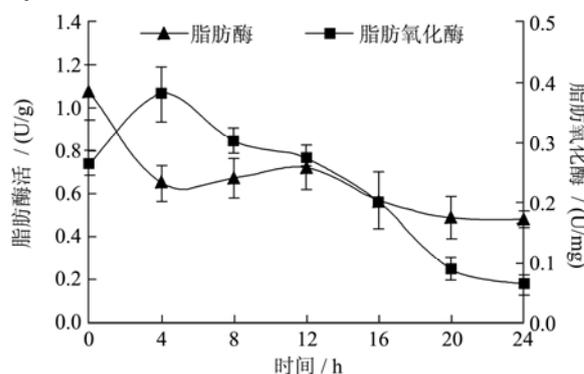


图2 麦胚发酵过程中脂肪酶及脂肪氧化酶活力变化

Fig.2 The changes of lipase activity and lipoxidase activity of wheat germ during fermentation

从图2可以看出,乳酸菌发酵降低了麦胚脂肪酶和脂肪氧化酶的活力。发酵24h后,脂肪酶活力降低了约55.31%,脂肪氧化酶活力降低了约76.32%。因此,乳酸菌发酵麦胚可以钝化其脂肪酶和脂肪氧化酶活力,提高其贮藏稳定性。Jha等人利用 γ 射线辐照麦胚来降低脂肪酶活力,结果显示30kGy高剂量辐照仅能使脂肪酶活力降低31.20%^[20],而麦胚发酵24h

时其脂肪酶活力降低了 55.31%，效果优于 γ 射线辐照。

2.5 发酵麦胚及其贮藏期内挥发性化合物分析

析

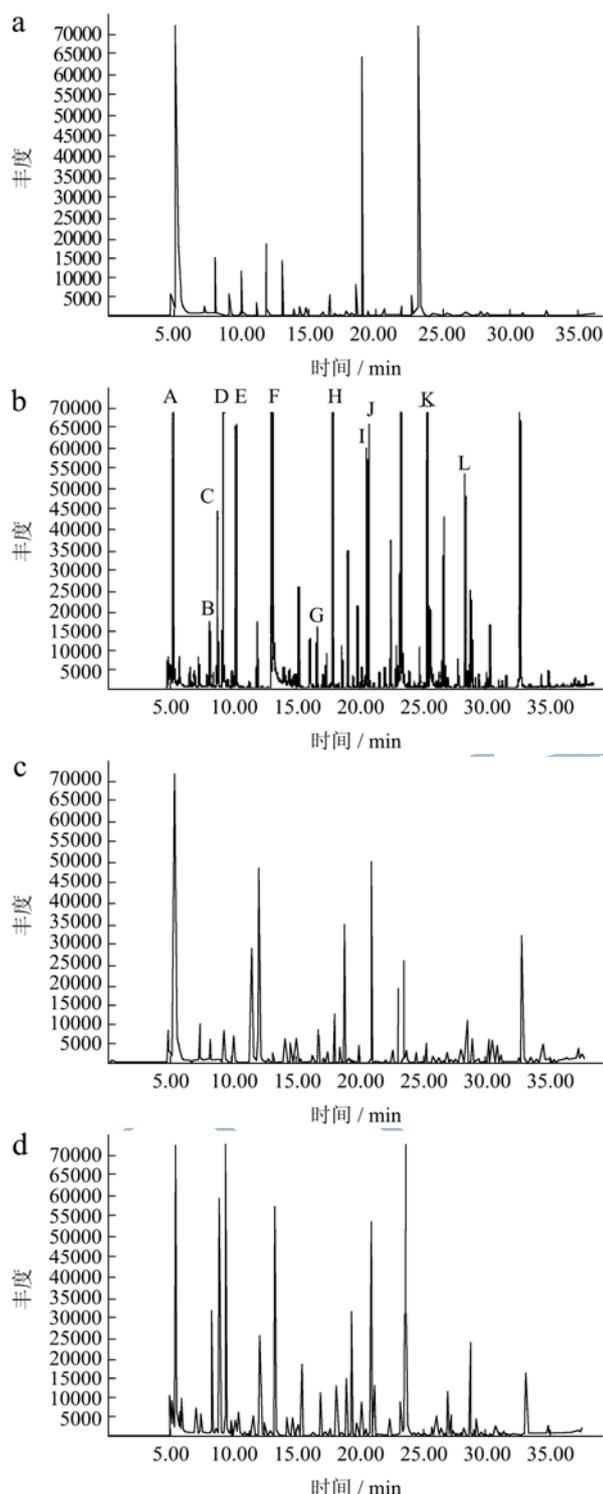


图 3 WG 和 LFWG 贮藏 0 d 和 60 d 挥发性化合物分析

Fig.3 The analysis of volatile compounds of WG and LFWG after 0d and 60d storage

注: a: WG, b: WG (60 d), c: LFWG, d: LFWG (60 d)。

麦胚和发酵麦胚贮藏前后挥发性化合物分析如图 3 所示。

表 3 部分挥发性化合物的相对含量

Table 3 The relative content of part volatile compounds

峰号	保留时间/min	化合物名称	相对含量/%			
			WG /0 d	WG /60 d	LFWG /0 d	LFWG /60 d
A	5.25	己烷	39.25	4.03	29.96	20.51
B	8.12	乙酸乙酯	1.75	0.63	0.63	0.63
C	8.76	3-甲基-正丁醛	-	1.83	1.23	4.71
D	9.18	乙醇	0.83	4.44	1.30	7.87
E	10.21	戊醛	-	2.48	-	0.48
F	13.06	己醛	1.70	30.23	-	4.92
G	16.04	庚醛	-	0.39	-	-
H	17.83	戊醇	-	2.72	1.63	0.98
I	20.48	2-羟基丙酸乙酯	-	1.94	-	3.96
J	20.71	己醇	-	2.36	-	1.04
K	25.31	3,5-辛二烯-2-酮	-	4.27	-	-
L	28.27	丁内酯	-	2.10	1.31	1.98

注: -表示未检出。

由图 3 可以看出, 麦胚中烷烃类化合物最丰富, 经过 60 d 的贮藏, 挥发性物质显著增加, 尤其是醇类、醛类、酮类和酯类比例增加, 其中醛类物质含量最高。发酵麦胚挥发性物质种类略多于麦胚, 其中主要是烷烃、酸类、酯类和醇类, 但经过 60 d 的贮藏, 发酵麦胚 (60 d) 挥发性物质含量明显低于麦胚 (60 d), 说明其氧化分解产物含量较少。因此, 发酵麦胚贮藏稳定性显著提高。

表 3 为麦胚和发酵麦胚贮藏前后 12 种主要挥发性化合物及其相对含量, 可以看出, 贮藏后麦胚中己醛含量明显增加, 发酵麦胚中己醛含量虽从无到有, 但显著低于麦胚。有研究表明^[9], 麦胚在贮藏期间感官上的酸败是由于脂肪氧化酶的作用产生的醛类物质的积累。己醛作为脂质氧化的标志性成分, 其感官阈值较低, 是主要的挥发性化合物。本研究中 60 d 贮藏试验结果表明, 己醛是麦胚在贮藏期间增加最为显著的醛类化合物, 其相对含量达到 30.23%, 而在发酵麦胚中其相对含量只有 4.92%。因此, 乳酸菌发酵麦胚可以使其生化特性发生显著的改变, 从而提高其贮藏特性,

有利于麦胚的加工利用。

3 结论

3.1 *Lactobacillus plantarum* dy-1 具有较高的 GAD 活性, 可与麦胚内源性 GAD 共同作用将谷氨酸转化为 GABA, 使其含量增加约 7.49 倍。乳酸菌发酵的麦胚其总游离氨基酸的含量也明显增加, 其中除 GABA 以外, 还使具有生理活性的天冬氨酸和亮氨酸分别提高了约 10.18 和 9.97 倍, 并使蛋氨酸和赖氨酸两种谷物限制性氨基酸的含量分别提高了约 4.96 和 4.48 倍。因此, 乳酸菌发酵显著改善了麦胚的游离氨基酸组成, 从而提升了麦胚的营养品质。

3.2 乳酸菌发酵麦胚增强了植酸酶活力, 降低了抗营养因子植酸的含量; 同时有效降低脂肪酶和脂肪氧化酶活力, 其中脂肪氧化酶活力降低约 76.32%, 脂肪酶活力降低约 55.31%, 优于高剂量 γ 射线辐照对麦胚的处理效果, 其氧化酸败得到抑制, 从而使发酵麦胚的贮藏特性显著改善。

3.3 研究表明, 利用乳酸菌发酵麦胚可显著改善麦胚的营养品质与贮藏特性, 使其更易于吸收利用与贮藏, 更适于作为食品营养强化的原料或食品配料, 有利于麦胚的高效利用。

参考文献

- [1] Gupta, Gangoliya, Singh. Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2013, 4: 1-9
- [2] Srivastava, Sudha, Baskaran, et al. Studies on heat stabilized wheat germ and its influence on rheological characteristics of dough [J]. *European Food Research and Technology*, 2007, 224(3): 365-372
- [3] 徐斌,董英,吴艳博,等.麦胚多层多室流化床在线稳定化试验[J].农业机械学报,2010,41(1):127-131
XU Bin, DONG Ying, WU Yanbo, et al. Technology and equipment of stabilized storage of wheat germ by on line multistage fluidization drying [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 127-131
- [4] Paradiso, Summo, Trani, et al. An effort to improve the shelf life of breakfast cereals using natural mixed tocopherols [J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47(2): 322-330
- [5] 白青云,翟学折.喷雾干燥法生产富含 γ -氨基丁酸的麦胚营养粉[J].现代食品科技,2013,29(4):775-779
Bai Qingyun, Zhai Xueze. Preparation of γ -Aminobutyric Acid-Enriched Wheat Germ Powder by Spray Drying Method [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(4): 775-779
- [6] 经秀,董英.麦胚发酵产 2, 6-二甲氧基对苯醌的研究[J].食品科技,2009,6:57-61
JING Xiu, DONG Ying. Study on 2, 6-DMBQ from fermented wheat germ [J]. *Food Science and Technology*, 2009, 6: 57-61
- [7] Judson, Al Sawah, Marchion, et al. Characterizing the efficacy of fermented wheat germ extract against ovarian cancer and defining the genomic basis of its activity [J]. *International Journal of Gynecological Cancer*, 2012, 22(6): 960-967
- [8] 许建军,江波,许时婴.比色法快速测定乳酸菌谷氨酸脱羧酶活力及其应用[J].微生物学通报,2004,31(2):66-71
XU Jianjun, JINAG Bo, XU Shiyong. Rapid determination of glutamate decarboxylase activity [J]. *Microbiology China*, 2004, 31(2): 66-71
- [9] Rizzello, Nionelli, Coda, et al. Effect of sourdough fermentation on stabilisation, and chemical and nutritional characteristics of wheat germ [J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 1079-1089
- [10] Shimizu. Purification and characterization of phytase from *Bacillus subtilis* (Natto) N-77 [J]. *Biosci. Biotech. Biochem.*, 1992, 56(8): 1266-1269
- [11] 徐斌,周世龙,苗文娟,等.微波辐射对小麦胚芽糊化特性与微观结构的影响[J].农业机械学报,2012(12):151-157
Xu Bin, Zhou Shilong. Microstructure and pasting characteristics of wheat germ treated by microwave radiation [J]. *Miao Wenjuan, et al. Journal of agricultural machinery*, 2012, 12: 151-157
- [12] 宋伟.戊糖乳杆菌产 γ -氨基丁酸及其乳制品的研究[D].保定:河北农业大学,2008
Song Wei. GABA formation by *Lactobacillus pentosus* strains used in dairy industry [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2008
- [13] 闻秀梅,纪雅慧,杨庭,等.麦胚富集 γ -氨基丁酸的培养条件优化[J].食品工业科技,2012,11:201-204
WEN Xiumei, JI Yahui, YANG Ting, et al. Optimization of culture conditions for γ -aminobutyric acid accumulation in wheat germ [J]. *Science and technology of food industry*, 2012, 11: 201-204
- [14] 谈佳玉.扇贝加工下脚料发酵生产优质蛋白饲料菌种的筛选[J].现代食品科技,2012,28(11):1530-1534
TAN Jia-yu. Screening of producing high quality protein feedstuff strains from processed scallop disposal by fermentation [J]. *Modern Food Science and Technology*,

- 2012, 28(11): 1530-1534
- [15] Mumford, Pickett, Zimmerman, et al. Protease activities present in wheat germ and rabbit reticulocyte lysates [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1981, 103(2): 565-572
- [16] Yang, Song, Gu, et al. Partial purification and characterisation of cysteine protease in wheat germ [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(13): 2437-2442
- [17] Leenhardt, Levrat-Verny, Chanliaud, et al. Moderate decrease of pH by sourdough fermentation is sufficient to reduce phytate content of whole wheat flour through endogenous phytase activity [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2005, 53(1): 98-102
- [18] 傅涛,朱斌昕,姚惠源.谷物中植酸的研究(下)-植酸降解途径的探讨[J].中国粮油学报,1989,3:004
Fu Tao, Zhu Binxin, Yao Huiyuan. The study of grain phytic acid (sequel)-phytic acid degradation pathway [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1989, 3: 4
- [19] Kapranchikov, Zherebtsov, Popova. Purification and characterization of lipase from wheat (*Triticum aestivum* L.) germ [J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2004, 40(1): 84-88
- [20] Jha, Kudachikar, Kumar. Lipase inactivation in wheat germ by gamma irradiation [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 86: 136-139