DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.007

鸡乳杆菌发酵辅助提取胡萝卜膳食纤维的益生功能分析

檀茜倩,周振彧,宋梦豪,尤利军,崔方超,李学鹏,励建荣*
(渤海大学 食品科学与工程学院,辽宁 锦州 121000)

摘　要:该研究以一株产 β-葡萄糖苷酶鸡乳杆菌 FB20 发酵胡萝卜渣提取水溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF),在基于细胞和斑马鱼胚胎毒性试验评价其安全性的基础上,通过高效液相色谱、扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)对两种膳食纤维结构进行分析,通过测定促益生菌生长能力、体外模拟消化情况、体外发酵后微生物群落和短链脂肪酸含量的变化,对两种膳食纤维作为益生元的功能进行评价。结果显示,所提取的两种膳食纤维均具有安全性,两者单糖组成和微观结构具有一定差别;在功能方面,两种膳食纤维均具有对植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18 和鼠李糖乳酪杆菌 GG 的生长促进作用,且 IDF 组相较于 SDF 组效果更优;在模拟消化液中二者均不会被消化,体外发酵试验显示 SDF 组相较于空白组和 IDF 组在一定程度上可以促进肠道微生物的平衡,拟杆菌门和厚壁菌门中部分有益菌的菌群丰度得到提升,丁酸、乙酸、己酸和戊酸等短链脂肪酸的含量明显更高。

关键词:膳食纤维;益生元;体外发酵;短链脂肪酸;肠道菌群

Prebiotic Properties of Carrot-Derived Dietary Fibers by *Lactobacillus gallinarum* Fermentation Assisted Extraction

TAN Xiqian, ZHOU Zhenyu, SONG Menghao, YOU Lijun, CUI Fangchao, LI Xuepeng, LI Jianrong*
(College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, Liaoning, China)

Abstract: This study employed *Lactobacillus gallinarum* FB20, a β-glucosidase-producing strain, to ferment carrot pomace for the extraction of soluble dietary fiber (SDF) and insoluble dietary fiber (IDF). The safety of both fiber types was confirmed through cell-based assays and zebrafish embryo toxicity tests. Structural and prebiotic properties were characterized by analyzing monosaccharide composition and scanning electron microscopy, alongside evaluations of probiotic growth promotion, *in vitro* simulated digestion, and changes in microbial composition and short-chain fatty acid (SCFA) profiles after *in vitro* fermentation. The results indicated that both types of dietary fibers are safe for consumption. Structural analyses revealed distinct monosaccharide compositions and microstructural features between SDF and IDF. Both fibers enhanced the growth of *Lactiplantibacillus plantarum* FB13, *Bifidobacterium breve* FB18, and *Lactobacillus rhamnosus* GG, with IDF demonstrating superior performance compared to SDF. During *in vitro* simulated digestion, neither fiber was degraded in the oral or gastric phases. *In vitro* fermentation results showed that, compared to the control and IDF groups, the SDF group promoted a more balanced gut microbiota composition, notably increasing the relative abundances of the benefit bacteria in the phylum of Bacteroides and Firmicutes, etc. Additionally, the concentrations of SCFAs—including butyric, acetic, hexanoic, and pentanoic acids—were significantly higher in the SDF group.

Key words: dietary fiber; prebiotics; *in vitro* fermentation; short-chain fatty acids; gut microbiota

基金项目:辽宁省博士启动项目(2025-BS-0814)
作者简介:檀茜倩(1985—),女(汉),副教授,博士,研究方向:食品营养与安全。
*通信作者:励建荣,男,教授,博士,研究方向:食品营养与安全。

引文格式：
檀茜倩，周振彧，宋梦豪，等. 鸡乳杆菌发酵辅助提取胡萝卜膳食纤维的益生功能分析[J]. 食品研究与开发，2026，47（17）：52-62.
TAN Xiqian, ZHOU Zhenyu, SONG Menghao, et al. Prebiotic Properties of Carrot-Derived Dietary Fibers by *Lactobacillus gallinarum* Fermentation Assisted Extraction[J]. Food Research and Development，2026，47（17）：52-62.

膳食纤维是第七大营养素，根据其水溶性分为可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维[1]。有研究表明，摄入一定量膳食纤维可以预防心血管疾病、肥胖、癌症和糖尿病的发生[2]，其可以通过调节肠道菌群组成、丰富程度及代谢活动起到维持肠道正常生理功能进而改善机体健康的作用[3-4]，因此目前普遍被认为是一种益生元[5]。膳食纤维的种类和来源非常丰富，并且也可以在一定程度上影响其功能。膳食纤维可以调节肠道微生物群落，例如增加有益菌、减少有害菌以及改变乙酸、丁酸等短链脂肪酸的组成。研究表明桑黄可溶性膳食纤维可通过增加肠道中有益菌丰度，降低肠道中致病菌志贺氏菌、大肠杆菌丰度来改善肠道微生态[6]；人参可溶性膳食纤维可以有效促进瑞士乳杆菌、双歧杆菌等纤维分解菌的增殖，抑制致病菌的生长，进而起到降低血糖和血脂水平的作用[7]；大麦叶不溶性膳食纤维也可以通过调节短链脂肪酸产生菌的丰度来改善高尿酸血症[8]。

胡萝卜营养丰富，具有较高的纤维素含量，是膳食纤维的良好来源。不同的提取方法对膳食纤维的结构和功能会产生一定的影响。例如超声和酶法协同提取荔枝果渣膳食纤维显著增强了其作为益生元的能力，能显著促进嗜酸乳杆菌和植物乳植杆菌的增殖[9]。超声和高压处理也被证明可以有效提升胡萝卜膳食纤维持水和胆固醇降解能力[10]。在众多活性产物的提取方法中，基于益生菌的发酵技术被认为是一种有效的活性产物生物转化、提取和改性方法，益生菌发酵不仅有助于降低活性物质提取成本，还可以增强提取物功能[11-13]。植物在益生菌的发酵下，利用所产 β-葡萄糖苷酶、葡聚糖酶等纤维素酶进一步破坏细胞壁，促使活性成分释放，同时可以促进活性成分的生物转化，提高其利用度[14]。

榨汁是胡萝卜加工的一种重要方式，而在加工过程中，榨汁残渣未能得到充分利用而被丢弃[15-16]。因此本研究以榨汁后胡萝卜渣为原料，利用前期分离的一株产 β-葡萄糖苷酶益生性鸡乳杆菌 FB20 发酵的方法对其中的可溶性及不溶性的膳食纤维进行提取，在评价其安全性和对其结构进行分析的基础上，基于体外消化和体外发酵试验，重点对其作为益生元的能力进行探讨，以期为基于乳酸菌发酵技术提取植物膳食纤维以及其应用提供一定理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

胡萝卜：市售；CCK-8 试剂盒：上海碧云天生物技术有限公司；菊粉：北京酷来搏科技有限公司；低聚果糖、硫酸、苯酚、1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮（1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone，PMP）、甲醇、葡萄糖、3，5-二硝基水杨酸、短链脂肪酸标准品（纯度≥98%）：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；4-甲基戊酸、偏磷酸：上海麦克林生化科技有限公司；$Na_2HPO_4 \cdot H_2O$、NaH_2PO_4、NaCl、KCl、$CaCl_2 \cdot 2H_2O$、$MgCl_2 \cdot 6H_2O$、硫酸铜：天津市大茂化学试剂厂；MRS 肉汤培养基：青岛海博生物技术有限公司；乳酸含量测试盒：南京建成生物工程研究所有限公司；AxyPrep DNA 凝胶提取试剂盒：美国 Axygen 公司；TIANamp 粪便 DNA 试剂盒：天根生化科技（北京）有限公司。所采用化学试剂均为分析纯。

鸡乳杆菌 FB20、植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18：分离自婴儿粪便，保存于渤海大学食品营养与安全实验室；鼠李糖乳酪杆菌 GG、Caco-2 细胞、HK-2 细胞：上海博尔森生物科技有限公司；成年 AB 品系斑马鱼：上海费曦生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

冷冻干燥机（YTLG-10A）：上海叶拓科技有限公司；高速冷冻离心机（Multifuge X1R）、酶标仪（PE Victor X3）：美国珀金埃尔默科技公司；紫外分光光度计（UV-2550）：日本 Shimadzu 公司；pH 计（PHS-25）：上海雷磁仪器有限公司；生化培养箱（LRH-250A）：上海一恒科学仪器有限公司；高效液相色谱仪（Agilent 1260 Infinity II）：安捷伦科技（中国）有限公司；扫描电子显微镜（SU8010）：日立高新技术公司。

1.3 方法

1.3.1 膳食纤维的提取

将活化好的鸡乳杆菌 FB20 以 6%（1×10^6 CFU/mL）的接种量接种至由 2% 脱脂乳粉、1.5% 葡萄糖和 200 mL 胡萝卜渣构成的无菌培养基中，37 ℃、160 r/min 振荡孵育 24 h 后 90 ℃水浴灭菌 20 min，待冷却至室温后在 5 000×*g*、4 ℃条件下离心 30 min，将沉淀用蒸馏水洗涤 2 次后冷冻干燥，以制备不溶性膳食纤维（insoluble dietary fiber，IDF），样品记为 FB20-IDF；上清液与 3 倍体积预冷 24 h 后的无水乙醇混合，于 4 ℃醇沉 24 h 后在 5 000×*g* 条件下离心 30 min，收集沉淀，冷

冻干燥以制备可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF),样品记为 FB20-SDF[17]。

1.3.2 膳食纤维安全性评价

1.3.2.1 细胞活性试验

取对数生长期的 Caco-2 细胞及 HK-2 细胞,以每孔 5×10^3 的细胞密度用 100 μL 培养基接种至 96 孔板,贴壁孵育 24 h,随后分别加入 0.2、0.5、1.0、2.0、5.0 mg/mL 样品,孵育 48 h 后去除培养基,每孔加入 110 μL 含 10% CCK-8 的培养基溶液,在 5% CO_2 的条件下,37 ℃孵育 20 min,于 450 nm 处测定吸光度。根据如下公式计算细胞存活率(V,%)[18]。

$$V = \frac{A_1 - A_0}{A_S - A_0} \times 100 \quad (1)$$

式中:A_1 为试验组吸光度;A_S 为对照组吸光度;A_0 为空白组吸光度。

1.3.2.2 斑马鱼胚胎毒性试验

将斑马鱼胚胎每 20 个为一组,随后分别加入 0.2、0.5、1.0、2.0、5.0 mg/mL 样品,于室温下孵育 4 d,每 24 h 于光学显微镜 20 倍下观察胚胎存活情况。FB20-IDF 和 FB20-SDF 毒性根据半数致死浓度(median lethal concentration, LC_{50})进行评估,LC_{50} 值>1 mg/mL 为相对无害,0.1~1 mg/mL 为实际无毒,0.01~0.1 mg/mL 为轻微毒性,0.001~0.01 mg/mL 为中毒性,0.000 1~0.001 mg/mL 为剧毒,<0.000 1 mg/mL 为超毒性[19]。

1.3.3 膳食纤维结构分析

1.3.3.1 单糖组成分析

分别用 5 mL 三氟乙酸(2 mol/L)在 120 ℃下水解 20 mg FB20-SDF 和 FB20-IDF,然后用甲醇去除三氟乙酸并进行冷冻干燥,干燥后的膳食纤维溶于 5 mL 蒸馏水中,分别吸取多糖溶液、PMP 甲醛溶液(0.5 mol/L)和 NaOH 溶液(0.3 mol/L)各 400 μL 混匀反应 2 h,反应完全后用 400 μL HCl 溶液(0.3 mol/L)进行中和。使用高效液相色谱分析单糖组成,C18 色谱柱(2.1 mm×50 mm, 5 μm),温度为 35℃,紫外检测波长为 250 nm,流动相为 50 mmol/L 乙酸铵和 100% 乙腈,流速为 0.4 mL/min[20]。

1.3.3.2 微观结构观察

通过扫描电子显微镜对 FB20-SDF 和 FB20-IDF 的微观结构进行观察。将冻干样品用双面碳带固定在观察盘上,喷金处理,于 5 kV 电压、1 500 倍下观察并拍照。

1.3.4 益生能力评价

1.3.4.1 促益生菌生长能力

配制无碳源 MRS 肉汤培养基,并分别添加 2% 的 FB20-SDF 和 FB20-IDF 作为碳源,以添加等量的葡萄糖为阴性对照,添加等量的菊粉和低聚果糖为阳性对照,无碳源 MRS 肉汤培养基为空白对照。将植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18 和鼠李糖乳杆菌 GG 以 2% 接种量接种至上述培养基中,分别在 4、8、12、24、48 h 于 $OD_{600\ nm}$ 测定菌株吸光度,用 pH 计测定培养液 pH 值。

1.3.4.2 对益生菌的黏附能力

将植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18 和鼠李糖乳杆菌 GG 过夜孵育后于 4 ℃下 8 000×g 离心 10 min 收集菌体,用 0.1 mmol/L 的磷酸盐缓冲液(phosphate buffer saline, PBS)洗涤菌体 2 次后于 $OD_{600\ nm}$ 处用 PBS 调成密度至 1.0±0.2 的菌悬液备用。吸取 2 mL 菌悬液与 2 mL FB20-SDF(10 g/L)或 FB20-IDF(10 g/L)混匀,室温沉淀,分别于 20、40、60、80 min 时于样品表面吸取 3 mL 液体于 540 nm 处测定吸光度[21]。黏附率(A,%)按公式(2)计算。

$$A = \left(1 - \frac{a - b}{c}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中:a 为含细菌和 FB20-SDF 或 FB20-IDF 的吸光度;b 为仅含 FB20-SDF 或 FB20-IDF 的吸光度;c 为仅含细菌的吸光度。

细菌黏附率>70% 为高黏附率,细菌黏附率在 40%~70% 之间为中等黏附率,细菌黏附率<40% 为低黏附率[22]。

1.3.5 模拟消化试验

1.3.5.1 模拟唾液消化

唾液由 5 名年龄在 24~25 周岁(男 2 名,女 3 名)的志愿者提供,要求志愿者无任何消化系统疾病,近 3 个月内未服用抗生素,未刻意服用益生菌或益生菌补充剂。志愿者用去离子水漱口 30 s 后收集唾液。将唾液于 4 000×g、4 ℃条件下离心 15 min,吸取上清液用于后续试验。将 FB20-SDF 和 FB20-IDF 制备成 8 mg/mL 的溶液,以 1∶1 的体积比制备唾液与膳食纤维溶液、唾液与蒸馏水溶液和蒸馏水与膳食纤维溶液。所制备溶液于 37 ℃、120 r/min 孵育 10 min。于 0 min 和 10 min 采集样品,于沸水浴中灭酶。用 3,5-二硝基水杨酸法测定其中还原糖含量,用硫酸苯酚法测定其中总糖含量[23]。水解度(H,%)按公式(3)计算。

$$H = \frac{C_2}{C_0 - C_1} \times 100 \quad (3)$$

式中:C_0 为总糖含量,mg/mL;C_1 为初始还原糖含量,mg/mL;C_2 为游离出还原糖含量,mg/mL。

1.3.5.2 模拟胃液消化

利用 $Na_2HPO_4\cdot H_2O$、NaH_2PO_4、NaCl、KCl、$CaCl_2\cdot 2H_2O$ 和 $MgCl_2\cdot 6H_2O$ 配制模拟胃液,用 1 mol/L HCl 溶液调节 pH 值至 3。随后将 100 mg FB20-IDF、FB20-SDF 溶于上述配制好的 1 L 溶液中,37 ℃孵育 3 h。分别于 0 h 和 3 h 取样测定还原糖和总糖含量以计算水解度[24]。

1.3.6 体外发酵试验

粪便由先前提及的 5 名志愿者提供。分别用 0.85% 的生理盐水将各粪便样品稀释 10 倍,混匀后静

置 15 min。然后将 5 份粪便稀释液等体积混合，得到的混合物用四层无菌纱布过滤，得到 10% 的粪便样品用于后续试验。

称取 500 mg 膳食纤维样品于紫外灯下照射 2 h 以杀灭表层微生物，随后分别放入 60 mL 无菌取样杯中，然后加入 40 mL 无菌厌氧肉汤和 10 mL 10% 粪便样品制成粪浆。37 ℃厌氧培养，以不添加膳食纤维为空白组（CK），当发酵时间达到 0、6、12、24 h 后 8 000×*g*、4 ℃离心 20 min，沉淀保存于无菌离心管内用于菌群分析。上清液用 pH 计测定 pH 值，用乳酸含量测试盒测定乳酸含量。并取 800 μL 各个时间点取样的离心上清液加入 200 μL 50 mmol/L 4-甲基戊酸、5% 偏磷酸和硫酸铜的混合溶液，涡旋均匀后置于−80 ℃保存并进行后续试验。

1.3.7 短链脂肪酸含量分析

将上述样品解冻 30 min 后 15 000×*g* 离心 10 min，收集上清液。取 4 μL 上清液注入气相色谱系统中，该气相色谱系统以氮气为载气，由熔融石英毛细管柱和氢火焰电离检测器构成。以短链脂肪酸（short-chain fatty acids，SCFAs）标准品为外部标准，对乙酸、丙酸和丁酸等 SCFAs 进行定量分析。通过比较检测器对外部标准品的响应分别测定发酵样品在发酵 0、6、12、24 h 时 SCFAs 含量的变化。

1.3.8 细菌群落分析

使用 TIANamp 粪便 DNA 试剂盒提取发酵样品的基因组 DNA，采用聚合酶链式反应（polymerase chain reaction，PCR）扩增细菌 16S rRNA 基因 V3~V4 区域，引物为 338F 和 806R。使用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物。使用 DNA 凝胶提取试剂盒进行纯化。收集纯化后的 PCR 产物在 Ⅰ lluminaMiseq 平台上进行配对，相似性阶段率为 97%。以 SILVA 为参考数据库，对特征序列进行分类和标注后利用 QIIME2 软件和 R 软件计算并显示菌群操作分类单元（operational taxonomic units，OTUs）丰度。

1.4 数据处理和统计分析

每个试验数据均重复测定 3 次，结果以平均值±标准差表示。数据采用正态分布假设进行分析并进行方差分析，采用 SPSS（IBM SPSS Statistics 22）分析软件的 Tukey 检验进行平均值比较。当 $P<0.05$ 时，认为结果具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 膳食纤维安全性评价

膳食纤维安全性的评价结果如图 1 所示。

由图 1A 可知，当 FB20-SDF 浓度在 0.2~0.5 mg/mL 时和 FB20-IDF 浓度在 0.2 ~1.0 mg/mL 时，对 Caco-2 细胞未表现出明显的毒性。但当其浓度分别达到 1.0 mg/mL 和 2.0 mg/mL 时，Caco-2 细胞活性受到抑制并显著下降。如图 1B 所示，添加 FB20-SDF 和 FB20-IDF 对 HK-2 细胞的增殖会起到显著的促进作用，其与 FB20-SDF 和 FB20-IDF 的浓度呈正相关。斑马鱼胚胎毒性试验表明，1.0 mg/mL 的 FB20-SDF 在 96 h 时会在一定程度上影响胚胎发育（图 1C）。FB20-IDF 对斑马鱼胚胎的孵化没有明显影响（图 1D）。

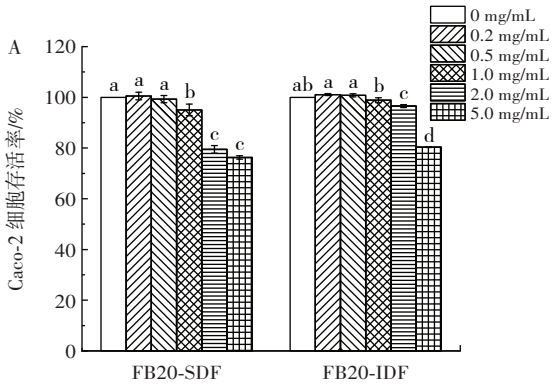
2.2 膳食纤维的结构分析

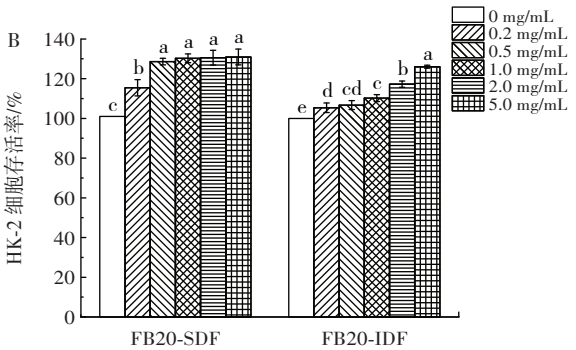
2.2.1 单糖组成分析

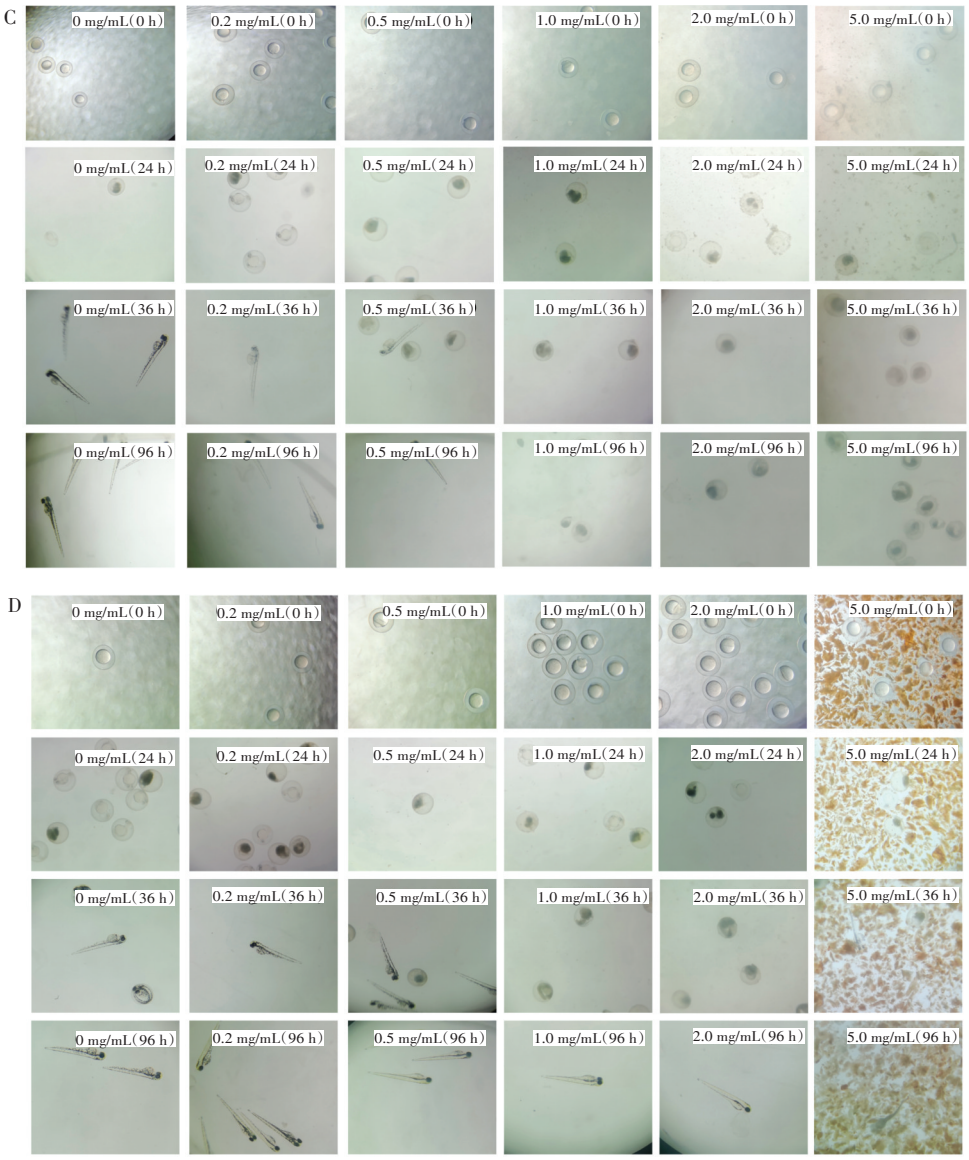
两种膳食纤维的单糖组成分析如图 2 所示。

由图 2 可知，FB20-SDF 由鼠李糖、阿拉伯糖、盐酸氨基葡萄糖、半乳糖、葡萄糖和半乳糖醛酸组成，含量分别为 7.393、24.809、1.827、118.826、28.370、88.867 μg/mg，物质的量比为 0.030∶0.111∶0.006∶0.442∶0.105∶0.306。FB20-IDF 则由鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖和半乳糖醛酸组成，含量分别为 7.877、25.071、91.257、39.811、4.033、3.083、36.140 μg/mg，物质的量比为 0.041∶0.142∶0.432∶0.188∶0.023∶0.015∶0.159。

一般来说，膳食纤维的生物活性与其单糖组成的种类和丰富程度有关[25]。有研究表明，一些酸性多糖，例如半乳糖、鼠李糖、阿拉伯糖等通常具备较强的抗炎活性[26-27]；盐酸氨基葡萄糖可以有效缓解中度至重度的骨关节炎疼痛症[28]；木糖可以促进丁酸的生成，鼠李糖、瓜尔胶（主要由甘露糖和半乳糖组成）可以促进丙酸的生成，果胶（主要由醛酸和少量半乳糖组成）可以



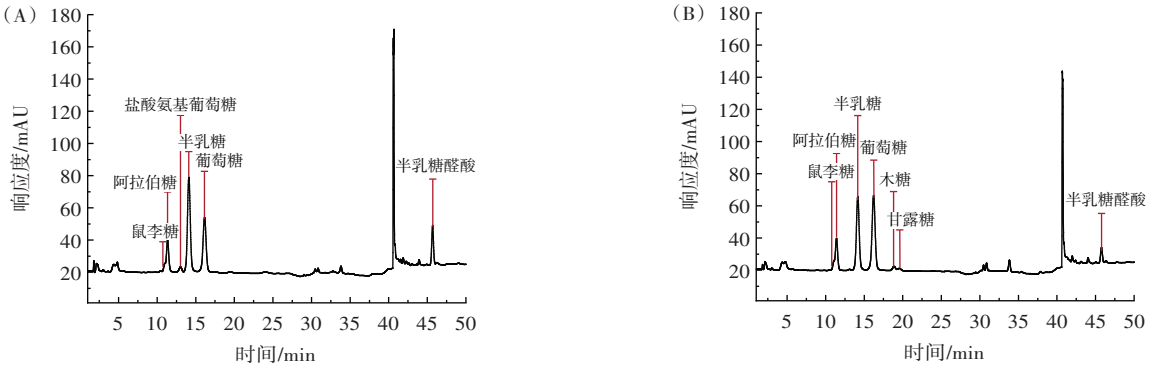




A. 膳食纤维对 Caco-2 细胞存活率的影响；B. 膳食纤维对 HK-2 细胞存活率的影响；C. 可溶性膳食纤维对斑马鱼胚胎存活率的影响；D. 不溶性膳食纤维对斑马鱼胚胎存活率的影响。不同小写字母表示同种膳食纤维不同浓度之间影响显著（$P<0.05$）。

图 1　膳食纤维的安全性评价

Fig.1　Safety evaluation of dietary fibers



（A）FB20-SDF；（B）FB20-IDF。

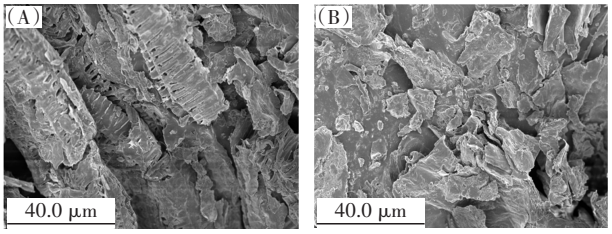
图 2　膳食纤维的单糖组分分析

Fig.2　Monosaccharide composition analysis of dietary fiber

促进乙酸的生成[29-30]。

2.2.2 微观结构分析

膳食纤维的微观结构分析如图 3 所示。



(A)FB20-SDF;(B)FB20-IDF。

图 3 扫描电子显微镜图

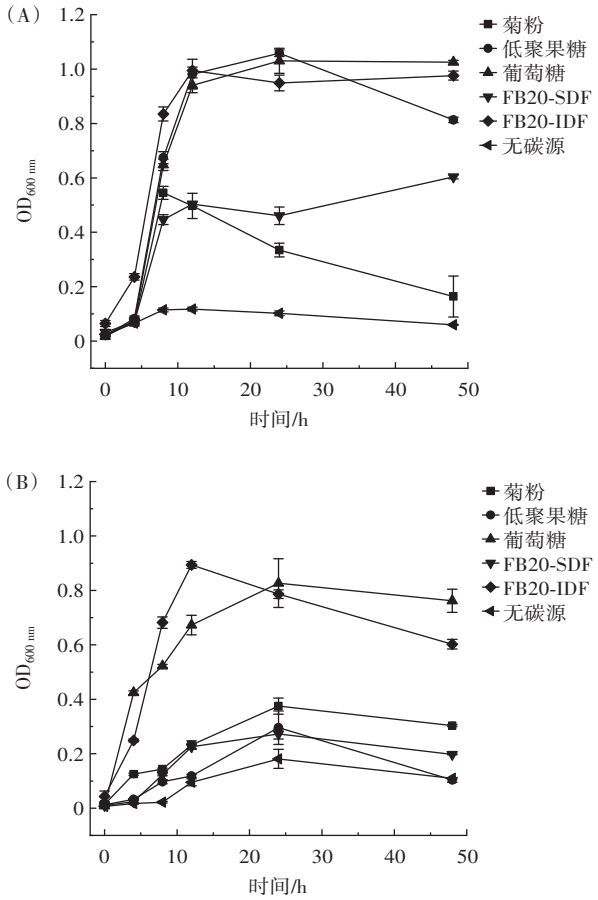
Fig.3 SEM image

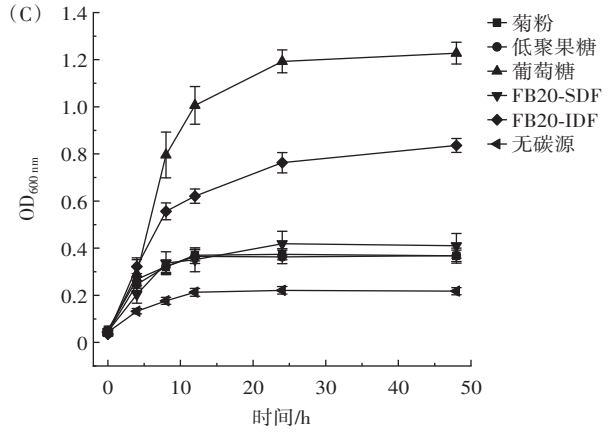
由图 3 可知,FB20-SDF 微观结构为疏松的片状结构,这可能是菌株代谢产物对纤维素长链进行了破坏,导致其微观结构变化、比表面积增加[31]。FB20-IDF 则为疏松多孔的蜂窝状结构,这种结构增加了其与肠道微生物的接触面积,同时也使其暴露更多的极性与非极性基团,使益生菌更好地黏附在其表面[32]。

2.3 膳食纤维的益生能力评价

2.3.1 膳食纤维对益生菌生长的影响

两种膳食纤维促进益生菌生长的能力如图 4 所示。





(A)植物乳植杆菌 FB13;(B)短双歧杆菌 FB18;(C)鼠李糖乳杆菌 GG。

图 4 膳食纤维对益生菌生长的影响

Fig.4 Effects of dietary fibers on probiotic growth

由图 4 可知,对于植物乳植杆菌 FB13,当 FB20-IDF 作为碳源时,相较于菊粉、低聚果糖、葡萄糖、FB20-SDF 和无碳源可以促进菌株更快地进入对数期。当葡萄糖和低聚果糖作为碳源时,在植物乳植杆菌 FB13 的稳定期的活性更强。以菊粉作为碳源时,植物乳植杆菌 FB13 的稳定期持续时间较短,相较于以葡萄糖、低聚果糖、FB20-IDF 和 FB20-SDF 作为碳源会较快地进入衰亡期。而以 FB20-SDF 作为碳源时,植物乳植杆菌 FB13 会延后进入衰亡期时间。综合来看,5 种碳源对于植物乳植杆菌 FB13 的促生长作用大小顺序依次为葡萄糖>FB20-IDF>低聚果糖>FB20-SDF>菊粉>无碳源。

对于短双歧杆菌 FB18,葡萄糖和 FB20-IDF 作为碳源在其生长的各个阶段均表现出了较好的促进作用。其中,FB20-IDF 作为碳源可以延长菌株的对数生长期。除葡萄糖和 FB20-IDF 之外,菊粉相较于低聚果糖和 FB20-SDF 可以使短双歧杆菌 FB18 较快地进入对数生长期,随后对菌株的促进作用也高于其他碳源对菌株的促进作用,FB20-SDF 作为碳源也可以在一定程度上延缓短双歧杆菌 FB18 进入衰亡期。综合来看,5 种碳源对于短双歧杆菌 FB18 的促生长作用依次为葡萄糖>FB20-IDF>菊粉>FB20-SDF>低聚果糖>无碳源。

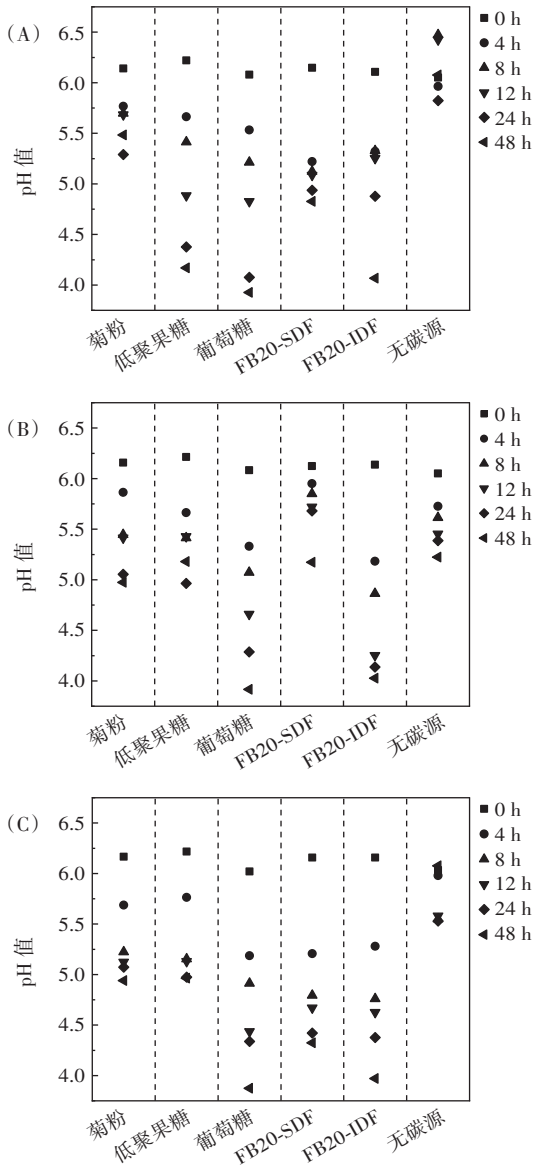
对于鼠李糖乳杆菌 GG,葡萄糖作为碳源可以促进鼠李糖乳杆菌 GG 在各个阶段都表现出较好的促进作用。其次是 FB20-IDF 作为碳源。当 FB20-SDF 作为碳源时,相较于菊粉、低聚果糖和无碳源作为碳源可以对鼠李糖乳杆菌在稳定期表现出较强的促进作用。综合来看,5 种碳源对于鼠李糖乳杆菌 GG 的促生长作用依次为葡萄糖>FB20-IDF>FB20-SDF>菊粉>低聚果糖>无碳源。

益生菌在生长时会优先利用多糖中的葡萄糖,其

次是半乳糖、甘露糖和木糖等其他单糖[6]。有报道称由葡萄糖、果糖、半乳糖、木糖和阿拉伯糖组成且葡萄糖相对含量较高的多糖往往具备更强的益生元能力[32]。

2.3.2 不同碳源对益生菌产酸的影响

益生菌利用不同碳源发酵过程中发酵液 pH 值的变化如图 5 所示。



(A)植物乳植杆菌 FB13;(B)短双歧杆菌 FB18;(C)鼠李糖乳杆菌 GG。

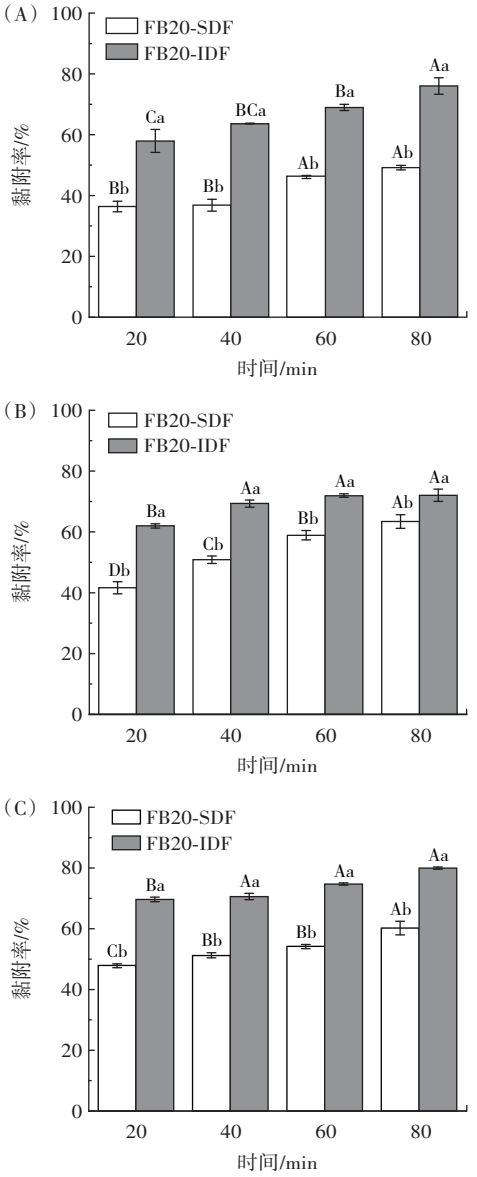
图 5 益生菌利用不同碳源发酵过程中发酵液 pH 值的变化

Fig.5 pH changing during fermentation of the probiotics using different carbon sources

由图 5 可知,5 种碳源对植物乳植杆菌 FB13 的 pH 值均有不同程度的影响,整体趋势为随培养时间的延长而下降。其中,葡萄糖作为碳源时 pH 值下降更为明显。对于植物乳植杆菌 FB13,以 FB20-IDF 和低聚果糖作为碳源相较于 FB20-SDF 和菊粉作为碳源,其 pH 值下降更为显著;对短双歧杆菌 FB18,以葡萄糖和 FB20-IDF 作为碳源时,其 pH 值下降更为明显;对于鼠李糖乳杆菌 GG,葡萄糖、FB20-IDF 和 FB20-SDF 的添加均能较好地促进发酵液 pH 值降低。研究结果基本上与促益生菌生长情况相符,同时两种膳食纤维在一定程度上均可以较好地促进益生菌产酸。

2.3.3 膳食纤维对益生菌的黏附能力

FB20-IDF 和 FB20-SDF 对植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18 和鼠李糖乳杆菌 GG 的黏附能力如图 6 所示。



(A)植物乳植杆菌 FB13;(B)短双歧杆菌 FB18;(C)鼠李糖乳杆菌 GG。不同大写字母代表同一膳食纤维不同时间点之间差异显著(P<0.05);不同小写字母代表相同时间点不同膳食纤维之间差异显著(P<0.05)。

图 6 膳食纤维对不同益生菌的黏附能力

Fig.6 Adhesion capacity of probiotics to dietary fiber

由图 6 可知,FB20-IDF 和 FB20-SDF 对植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18 和鼠李糖乳杆菌 GG 的

黏附能力均随孵育时间的延长而增强。其中 FB20-IDF 相较于 FB20-SDF 对植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18 和鼠李糖乳杆菌 GG 表现出了显著的黏附能力。菌株对膳食纤维的黏附分为特异性和非特异性两种方式。特异性黏附涉及细菌表面特定分子成分的选择性结合，其受电解质、pH 值和温度的影响较小，而非特异性结合则受环境因素影响较大，非特异性黏附是由于细菌和固体基质之间范德华力作用而产生的，并不会涉及特定的黏附素或配体。而细菌与膳食纤维的黏附大部分属于非特异性黏附[33]。

2.3.4 模拟消化能力分析

FB20-SDF 和 FB20-IDF 在模拟唾液和胃液消化前后的水解程度如图 7 所示。

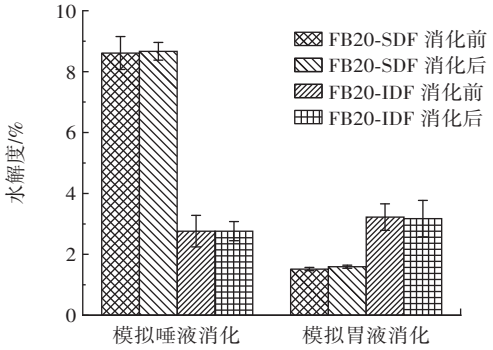


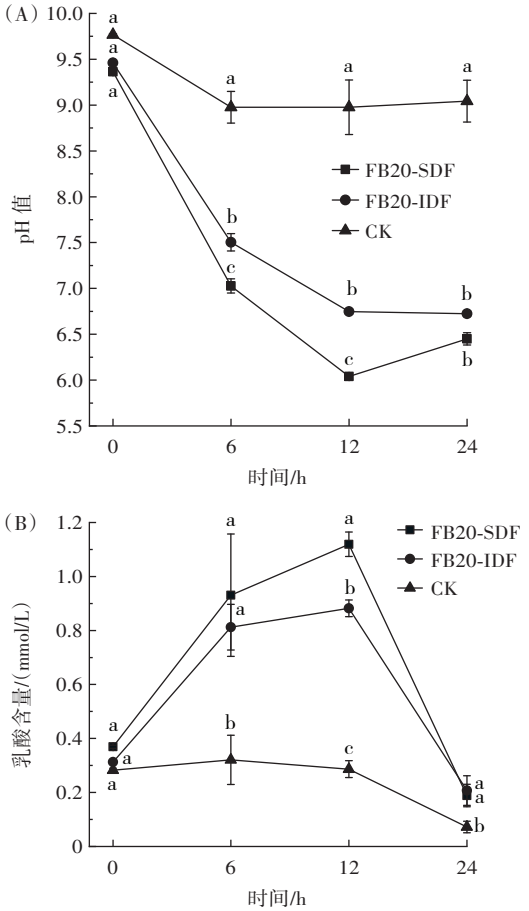
图 7 膳食纤维模拟消化

Fig.7 *In vitro* simulated digestion of dietary fibers

由图 7 可知，FB20-SDF 和 FB20-IDF 在模拟唾液和胃液消化前后的水解度无明显差异，说明 FB20-SDF 和 FB20-IDF 可以较为完整地抵达肠道，为肠道中的微生物菌提供发酵底物，产生有益于人体健康的代谢物。

2.4 膳食纤维体外发酵后产 SCFAs 的情况

FB20-SDF 与 FB20-IDF 在体外发酵后 pH 值和乳酸含量变化情况如图 8 所示。



(A)pH 值；(B)乳酸含量。不同小写字母代表组间差异显著(P<0.05)。

图 8 膳食纤维在体外发酵过程中 pH 值变化和产乳酸情况

Fig.8 Analysis of pH values and lactic acid after *in vitro* fermentation of dietary fibers

由图 8 可知，FB20-SDF 与 FB20-IDF 在体外发酵后与 CK 相比，pH 值显著下降，乳酸含量显著升高(P<0.05)。

FB20-SDF 与 FB20-IDF 在体外发酵后 SCFAs 变化情况如表 1 所示。

表 1 FB20-SDF 和 FB20-IDF 体外发酵后短链脂肪酸变化

Table 1 FB20-SDF and FB20-IDF short-chain fatty acids change after the *in vitro* fermentation

mg/L

组别	丁酸	丙酸	乙酸	壬酸	己酸	庚酸	戊酸	癸酸	辛酸
CK	11.61±0.89^{c}	13.22±0.18^{b}	41.14±4.65^{c}	0.09±0.03^{a}	0.29±0.01^{b}	0.07±0.00^{a}	2.04±0.02^{b}	0.00±0.00^{a}	0.02±0.01^{b}
FB20-SDF	222.21±2.71^{a}	292.29±12.18^{a}	385.81±2.40^{a}	0.05±0.01^{a}	4.82±0.37^{a}	0.06±0.00^{b}	73.61±5.39^{a}	0.00±0.00^{a}	0.02±0.00^{ab}
FB20-IDF	175.46±3.93^{b}	295.99±7.57^{a}	348.81±7.17^{b}	0.06±0.01^{a}	0.46±0.01^{b}	0.05±0.00^{c}	9.33±0.11^{b}	0.05±0.03^{a}	0.03±0.00^{a}

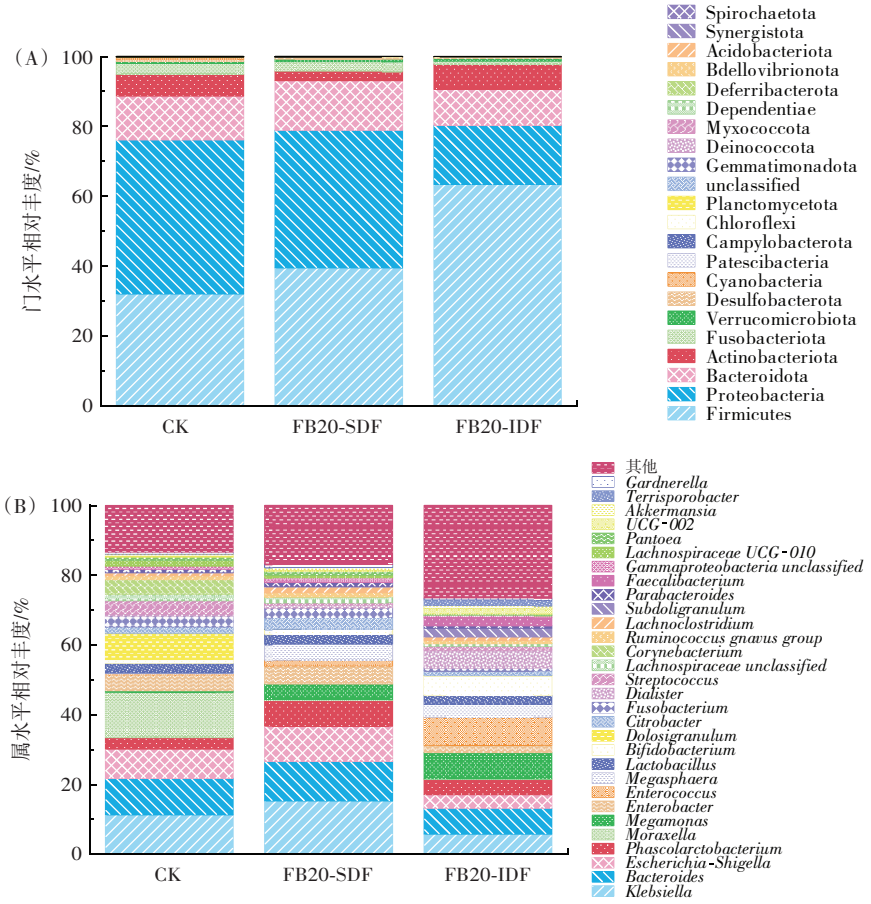
注：不同小写字母代表具有显著性差异(P<0.05)。

由表 1 可知，体外发酵后，丁酸、丙酸和乙酸含量均显著提高(P<0.05)。丁酸具备较好的抗癌活性、调节肠道功能等益生功能，对结肠稳态起着至关重要的作用[34]。有研究表明丁酸盐浓度与溃疡性结肠炎的严重程度呈负相关[35]，其可通过中性粒细胞中的 G 蛋白偶联受体(G protein-coupled receptor，GRP)43 信号传导抑制炎症[36]，也可以通过抑制炎症递质和高迁移率族蛋白 B1(high mobility group protein，HMGB1)的表达量实现抗炎目的[37]。此外，丁酸还通过抑制强直性交感神经活动或直接的血管扩张作用来达到降压效果[38]。丁酸在葡萄糖代谢中也发挥重要作用，其可刺激远端回肠和结肠 L 细胞释放胰高血糖素样肽-1(glu-

cagon-like peptide-1，GLP-1），其负责诱导胰腺 β 细胞的再生和增殖，并激活 β 细胞中的 GPR 以诱导环磷酸腺苷（cyclic adenosine monophosphate，cAMP）产生，最终刺激胰岛素分泌代谢葡萄糖[39]。丙酸是含有 3 个碳原子的短链脂肪酸，在人类肠道中，主要由拟杆菌门、厚壁菌门的微生物通过琥珀酸和丙二醇途径生成[40]。其在肝脏中代谢，负责抑制胆固醇的合成，与丁酸盐协同抑制癌细胞的增殖[41]。本研究结果也进一步说明了胡萝卜膳食纤维的益生能力。

2.5　膳食纤维体外发酵后微生物群落的变化

膳食纤维体外发酵后微生物的群落变化如图 9 所示。



（A）门水平；（B）属水平。

图 9　膳食纤维体外发酵后微生物群落的变化

Fig.9　Microbial community analysis after *in vitro* fermentation of dietary fibers

由图 9 可知，在门水平上，相较于 CK，FB20-SDF 和 FB20-IDF 发酵后，发酵物菌群的厚壁菌门（Firmicutes）丰度提升，变形菌门（Proteobacteria）丰度降低，FB20-SDF 发酵后还可以提升拟杆菌门（Bacteroidota）的丰度。肠道菌群组成复杂，厚壁菌门和拟杆菌门属其中最常见的门类，占肠道微生物群的 90%[42]。厚壁菌门微生物善于分解膳食纤维，归因于其细胞壁中碳水化合物结合模块或溶质结合蛋白会捕获靠近它们的膳食纤维，随后释放糖苷水解酶将其分解[43]。

在属水平上，相较于 CK，两种膳食纤维对 *Bacteroides*、*Phascolarctobacterium*、*Megamonas*、*Enterobacter*、*Enterococcus*、*Megasphaera*、*Bifidobacterium*、*Faecalibacterium*、*Dialister* 和 *Akkermansia* 等有益菌属表现出了不同程度的促进作用。拟杆菌属（*Bacteroides*）是哺乳动物肠道中丰富的一类菌属，其在治疗腹泻、炎症性肠病和直肠癌等肠道屏障功能障碍类疾病发挥着重要作用[44]。*Phascolarctobacterium* 是一类短链脂肪酸产生菌，可产生大量乙酸和丙酸且其数量与宿主积极的情绪呈正相关[45]。*Phascolarctobacterium* 的生长几乎不利用碳水化合物，而是利用琥珀酸作为生长的底物，拟杆菌则可以通过琥珀酸途径产生琥珀酸，为其生长提供必要的底物，促进 *Phascolarctobacterium* 生长并促进丙酸的产生[46]。*Megamonas* 可以增加肠道中丙酸的浓度，以介导 APN-AMPK-PPARa 信号通路的激活，从源头抑制脂肪酸合成并促进 β 氧化，改变肝脏基因表达谱从而改善脂肪肝[47]。而 *Enterococcus*（肠球菌）和 *En-*

terobacter(肠杆菌)属于人体肠道菌群自然组成部分,广泛寄生于消化道,其参与碳水化合物、脂类和蛋白质的代谢,合成维生素、胞外多糖等有益产物,预防病原菌的结合和传播,对人体免疫系统具有积极影响[48]。*Megasphaera* 则可以合成短链脂肪酸,在调节肠道功能影响宿主免疫反应,改善渗透性腹泻等方面起着重要作用[49]。*Bifidobacterium* 是哺乳动物肠道中普遍存在的微生物类别,在帮助人体代谢、调节免疫和治疗肠道疾病等方面发挥着重要作用,其在宿主婴儿时期丰度较高,随着宿主年龄增长而呈现下降趋势[50]。*Faecalibacterium* 是胃肠道中最著名的丁酸产生细菌之一[51]。*Akkermansia* 是一类新兴的益生菌,其可以定植于肠道黏膜层,调节基础代谢并增加和维护黏膜层厚度,从而降低肠道通透性、减少脂多糖和肿瘤坏死因子等促炎因子的水平[52],目前其也被证明在治疗肥胖相关的代谢紊乱疾病中具有广阔的应用前景[53]。由此可见,经过鸡乳杆菌发酵所提取的胡萝卜膳食纤维具有通过调节肠道菌群结构来改善健康的潜在功效。

3 结论

本研究以胡萝卜渣为原料,利用鸡乳杆菌进行发酵成功制备了两种膳食纤维:FB20-SDF 与 FB20-IDF。两种膳食纤维均展现出良好的安全性特征与独特的功能优势。相比较而言,FB20-SDF 含有盐酸氨基葡萄糖,在体外发酵中显著促进了拟杆菌门的生长,并有效提升了短链脂肪酸(尤其是丁酸、己酸、乙酸和戊酸)的产量;FB20-IDF 的特征性组分为木糖和甘露糖,其对益生菌株(包括植物乳植杆菌 FB13、短双歧杆菌 FB18 和鼠李糖乳杆菌 GG)的生长与产酸能力具有更强的促进作用。未来研究应着重通过体内试验验证这两种由鸡乳杆菌发酵获得的膳食纤维的生理功能。此外,其良好的理化特性与益生元特性为开发胡萝卜渣高附加值产品提供了支持,从而为胡萝卜加工副产物的可持续利用开辟了新途径。

参考文献:

[1] BADER UL AIN H, SAEED F, KHAN M A, et al. Comparative study of chemical treatments in combination with extrusion for the partial conversion of wheat and sorghum insoluble fiber into soluble[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 2059-2067.

[2] PARTULA V, DESCHASAUX M, DRUESNE-PECOLLO N, et al. Associations between consumption of dietary fibers and the risk of cardiovascular diseases, cancers, type 2 diabetes, and mortality in the prospective NutriNet-Santé cohort[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2020, 112(1): 195-207.

[3] SEGATA N. Gut microbiome: Westernization and the disappearance of intestinal diversity[J]. Current Biology, 2015, 25(14): R611-R613.

[4] YEN C H, TSENG Y H, KUO Y W, et al. Long-term supplementation of isomalto-oligosaccharides improved colonic microflora profile, bowel function, and blood cholesterol levels in constipated elderly people—A placebo-controlled, diet-controlled trial[J]. Nutrition, 2011, 27(4): 445-450.

[5] REZENDE E S V, LIMA G C, NAVES M M V. Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposed classification by prebiotic categories[J]. Nutrition, 2021, 89: 111217.

[6] LIU T T, ZHAO M, ZHANG Y M, et al. Integrated microbiota and metabolite profiling analysis of prebiotic characteristics of *Phellinus linteus* polysaccharide *in vitro* fermentation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242(Pt 2): 124854.

[7] HUA M, FAN M L, LI Z M, et al. Ginseng soluble dietary fiber can regulate the intestinal flora structure, promote colon health, affect appetite and glucolipid metabolism in rats[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 83: 104534.

[8] LI Y M, LI L, TIAN J H, et al. Insoluble fiber in barley leaf attenuates hyperuricemic nephropathy by modulating gut microbiota and short-chain fatty acids[J]. Foods, 2022, 11(21): 3482.

[9] LI Y N, YU Y S, WU J J, et al. Comparison the structural, physicochemical, and prebiotic properties of Litchi Pomace dietary fibers before and after modification[J]. Foods, 2022, 11(3): 248.

[10] DONG R H, LIAO W, XIE J H, et al. Enrichment of yogurt with carrot soluble dietary fiber prepared by three physical modified treatments: Microstructure, rheology and storage stability[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102901.

[11] ABOULOIFA H, GAAMOUCHE S, GHABBOUR N, et al. The impact of probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* S61 and prebiotic xylooligosaccharide on the functional properties of fermented orange juice[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(8): 7044-7051.

[12] SANGTHONG S, PHOSRI S, THITILERTDECHA N, et al. Phytochemicals and antimicrobial properties of Thai edible plant extracts and their prebiotic-like effects[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 16: 101152.

[13] ZHAI Z, BAI X, JING Y, et al. Research progress on development and application of prebiotic in foods[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2): 10-18.

[14] NGUYEN N K, DONG N T N, NGUYEN H T, et al. Lactic acid bacteria: Promising supplements for enhancing the biological activities of kombucha[J]. SpringerPlus, 2015, 4(1): 91.

[15] SHARMA K D, KARKI S, THAKUR N S, et al. Chemical composition, functional properties and processing of carrot—A review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(1): 22-32.

[16] LIU S, JIA M Y, CHEN J J, et al. Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 284-292.

[17] JI R, ZHANG X L, LIU C H, et al. Effects of extraction methods on the structure and functional properties of soluble dietary fiber from blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) berry[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137135.

[18] FENG L, XIAO X, LIU J, et al. Immunomodulatory effects of *Lycium barbarum* polysaccharide extract and its uptake behaviors at the cellular level[J]. Molecules, 2020, 25(6): 1351.

[19] AL QADR IMAD WAN-MOHTAR W A, ILHAM Z, JAMALUDIN A A, et al. Use of zebrafish embryo assay to evaluate toxicity and safety of bioreactor-grown exopolysaccharides and endopolysaccharides from European *Ganoderma applanatum* Mycelium for future aquaculture applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(4): 1675.

[20] ZHOU S Y, HUANG G L. Extraction, structural analysis and antioxidant activity of *Aloe* polysaccharide[J]. Journal of Molecular

Structure, 2023, 1273: 134379.

[21] LI L, ZHAO Y F, LI J Q, et al. The adhesion of the gut microbiota to insoluble dietary fiber from soy hulls promoted the proliferation of probiotics *in vitro*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 153: 112560.

[22] FERNANDO W M A D B, FLINT S, BRENNAN C S, et al. The influence of environmental factors on the adhesion of combinations of probiotics to rice fibre fractions[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28(6): 2293-2302.

[23] YUAN Q, HE Y, XIANG P Y, et al. Effects of simulated saliva-gastrointestinal digestion on the physicochemical properties and bioactivities of okra polysaccharides[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 238: 116183.

[24] WANG X, HUANG M Y, YANG F, et al. Rapeseed polysaccharides as prebiotics on growth and acidifying activity of probiotics *in vitro*[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 125: 232-240.

[25] QU J L, HUANG P, ZHANG L, et al. Hepatoprotective effect of plant polysaccharides from natural resources: A review of the mechanisms and structure - activity relationship[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 24-34.

[26] FU Y P, LI C Y, PENG X, et al. Polysaccharides from *Aconitum carmichaelii* leaves: Structure, immunomodulatory and anti-inflammatory activities[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291: 119655.

[27] FU Y P, LI C Y, ZOU Y F, et al. Bioactive polysaccharides in different plant parts of *Aconitum carmichaelii*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(2): 746-758.

[28] UITTERLINDEN E J, KOEVOET J L M, VERKOELEN C F, et al. Glucosamine increases hyaluronic acid production in human osteoarthritic synovium explants[J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2008, 9: 120.

[29] BAENAS N, NUÑEZ-GÓMEZ V, NAVARRO-GONZÁLEZ I, et al. Raspberry dietary fibre: Chemical properties, functional evaluation and prebiotic *in vitro* effect[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134: 110140.

[30] TIAN S H, CHU Q, MA S T, et al. Dietary fiber and its potential role in obesity: A focus on modulating the gut microbiota[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(41): 14853-14869.

[31] SI J Y, YANG C R, MA W J, et al. Screen of high efficiency cellulose degrading strains and effects on tea residues dietary fiber modification: Structural properties and adsorption capacities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 337-347.

[32] DU X Y, CHEN J J, HU T G, et al. Identification and structural characterization of key prebiotic fraction of soluble dietary fiber from grapefruit peel sponge layer and its regulation effect on gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129274.

[33] WARNAKULASURIYA Mary Ann Dipika Binosha Fernando, FLINT S, BRENNAN C S, et al. Environmental factors affecting the adhesion of probiotics to rice fiber fractions[J]. Food Digestion, 2011, 2(1): 26-36.

[34] KOH A, DE VADDER F, KOVATCHEVA-DATCHARY P, et al. From dietary fiber to host physiology: Short-chain fatty acids as key bacterial metabolites[J]. Cell, 2016, 165(6): 1332-1345.

[35] MACHIELS K, JOOSSENS M, SABINO J, et al. A decrease of the butyrate-producing species *Roseburia hominis* and *Faecalibacterium prausnitzii* defines dysbiosis in patients with ulcerative colitis[J]. Gut, 2014, 63(8): 1275-1283.

[36] KAMP M E, SHIM R, NICHOLLS A J, et al. G protein-coupled receptor 43 modulates neutrophil recruitment during acute inflammation[J]. PLoS One, 2016, 11(9): e0163750.

[37] SUN Q, JI Y C, WANG Z L, et al. Sodium butyrate alleviates intestinal inflammation in mice with necrotizing enterocolitis[J]. Mediators of Inflammation, 2021, 2021: 6259381.

[38] ONYSZKIEWICZ M, GAWRYS-KOPCZYNSKA M, KONOPELSKI P, et al. Butyric acid, a gut bacteria metabolite, lowers arterial blood pressure *via* colon-vagus nerve signaling and GPR41/43 receptors[J]. Pflügers Archiv - European Journal of Physiology, 2019, 471(11): 1441-1453.

[39] MCBRAYER D N, TAL-GAN Y. Recent advances in GLP-1 receptor agonists for use in diabetes mellitus[J]. Drug Development Research, 2017, 78(6): 292-299.

[40] LANGFELD L Q, DU K, BERESWILL S, et al. A review of the antimicrobial and immune-modulatory properties of the gut microbiota-derived short chain fatty acid propionate - What is new?[J]. European Journal of Microbiology & Immunology, 2021, 11(2): 50-56.

[41] DO PRADO S B R, MINGUZZI B T, HOFFMANN C, et al. Modulation of human gut microbiota by dietary fibers from unripe and ripe papayas: Distinct polysaccharide degradation using a colonic *in vitro* fermentation model[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129071.

[42] RINNINELLA E, RAOUL P, CINTONI M, et al. What is the healthy gut microbiota composition? A changing ecosystem across age, environment, diet, and diseases[J]. Microorganisms, 2019, 7(1): 14.

[43] SUN Y G, ZHANG S S, NIE Q X, et al. Gut firmicutes: Relationship with dietary fiber and role in host homeostasis[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(33): 12073-12088.

[44] WANG C, ZHAO J X, ZHANG H, et al. Roles of intestinal *Bacteroides* in human health and diseases[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(21): 3518-3536.

[45] WU F F, GUO X F, ZHANG J C, et al. *Phascolarctobacterium faecium* abundant colonization in human gastrointestinal tract[J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2017, 14(4): 3122-3126.

[46] IKEYAMA N, MURAKAMI T, TOYODA A, et al. Microbial interaction between the succinate-utilizing bacterium *Phascolarctobacterium faecium* and the gut commensal *Bacteroides thetaiotaomicron*[J]. MicrobiologyOpen, 2020, 9(10): e1111.

[47] YANG X Y, ZHANG M H, LIU Y, et al. Inulin-enriched *Megamonas funiformis* ameliorates metabolic dysfunction-associated fatty liver disease by producing propionic acid[J]. npj Biofilms and Microbiomes, 2023, 9: 84.

[48] KRAWCZYK B, WITYK P, GAŁĘCKA M, et al. The many faces of *Enterococcus* spp.-commensal, probiotic and opportunistic pathogen[J]. Microorganisms, 2021, 9(9): 1900.

[49] CAREY M A, MEDLOCK G L, ALAM M, et al. *Megasphaera* in the stool microbiota is negatively associated with diarrheal cryptosporidiosis[J]. Clinical Infectious Diseases, 2021, 73(6): e1242-e1251.

[50] DERRIEN M, TURRONI F, VENTURA M, et al. Insights into endogenous *Bifidobacterium* species in the human gut microbiota during adulthood[J]. Trends in Microbiology, 2022, 30(10): 940-947.

[51] REICHARDT N, DUNCAN S H, YOUNG P, et al. Phylogenetic distribution of three pathways for propionate production within the human gut microbiota[J]. The ISME Journal, 2014, 8(6): 1323-1335.

[52] ANHÊ F F, ROY D, PILON G, et al. A polyphenol-rich cranberry extract protects from diet-induced obesity, insulin resistance and intestinal inflammation in association with increased *Akkermansia* spp. population in the gut microbiota of mice[J]. Gut, 2015, 64(6): 872-883.

[53] XU Y, WANG N, TAN H Y, et al. Function of *Akkermansia muciniphila* in obesity: Interactions with lipid metabolism, immune response and gut systems[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 219.

责任编辑：王艳
收稿日期：2025-12-25