甜杆西兰冻干粉的营养价值及胃肠道代谢特性

林月[1]，杨继国[1,2]，夏小乐[2]，刘瑜彬[3]，罗珍[3*]

（1.华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510640）（2.岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心，广东河源 517000）（3.无限极（中国）有限公司，广东广州 510665）

摘要：该研究以 INQ 值评价甜杆西兰冻干粉中 12 种微量营养素的营养价值，并基于体外模拟胃肠道消化与发酵体系，研究了甜杆西兰粉对四种益生菌生长和代谢 SCFAs 的影响。结果表明，该研究制备的甜杆西兰冻干粉富含 6 种维生素与 6 种矿物质元素，且各营养素 INQ 值均大于 1。在体外模拟肠道环境下，使 *B. lactis* B420、*B. lactis* HN019、*L. acidophilus* NCFM 与 *L. paracasei* Lpc-37 的生长水平提高了约 2 倍。甜杆西兰粉与四种益生菌分别发酵时可以显著促进发酵物中乙酸与丁酸的含量，而丙酸的产量没有显著增加。其中，甜杆西兰粉与 *B. lactis* B420 共发酵时乙酸含量最高，约 600 μg/mL，与 *B. lactis* HN019 共发酵时丁酸含量最高，达到 2 199.39 μg/mL。该研究中的甜杆西兰粉富含 12 种微量元素，且能够促进四种益生菌在肠道中生长与代谢 SCFAs 水平，弥补了甜杆西兰在肠道益生功能方面的研究空白。该研究为甜杆西兰及其功能性食品的开发提供了理论基础。

关键词：甜杆西兰；短链脂肪酸；体外发酵；乳酸菌

文章编号：1673-9078(2025)12-13-19 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.0873

Nutritional Value and Gastrointestinal Metabolic Characteristics of Freeze-dried Sweet Stem Broccoli Powder

LIN Yue[1], YANG Jiguo[1,2], XIA Xiaole[2], LIU Yubin[3], LUO Zhen[3*]

(1.College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2.Heyuan Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Heyuan 517000, China)
(3.Infinitus (China) Company Ltd, Guangzhou 510665, China)

Abstract: In this study, the nutritional value of 12 micronutrients in lyophilized sweet stem broccoli powder was evaluated by the INQ value, and the effects of the sweet stem broccoli powder on the growth of four probiotics and metabolism of SCFAs were studied based on an *in vitro* simulated gastrointestinal digestion and fermentation system. The results showed that the lyophilized powder prepared in this study was rich in 6 vitamins and 6 mineral elements, and the INQ value of each nutrient was greater than 1. In the *in vitro* simulated intestinal environment, the growth levels of *B. lactis* B420, *B. lactis* HN019, *L. acidophilus* NCFM and *L. paracasei* Lpc-37 were increased by a factor of about 2. The contents of acetic acid and butyric acid in the fermented products increased significantly upon the fermentation of broccoli powder with one of the four probiotics, though the yield of propionic acid increased insignificantly. Among which, the highest acetic acid content of *B. lactis* B420 (about 600 μg/mL) occurred during co-fermentation. The butyric acid content was the highest during co-fermentation with *B. lactis* HN019, reaching 2 199.39 μg/mL.

引文格式：

林月,杨继国,夏小乐,等.甜杆西兰冻干粉的营养价值及胃肠道代谢特性[J].现代食品科技,2025,41(12):13-19.

LIN Yue, YANG Jiguo, XIA Xiaole, et al. Nutritional value and gastrointestinal metabolic characteristics of freeze-dried sweet stem broccoli powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 13-19.

收稿日期：2024-06-19；修回日期：2024-08-29；接受日期：2024-09-13

基金项目：广东省重点领域研发计划项目（2021B0707010002）；河源市科技计划项目（河科平台 2022 大专项 010）

作者简介：林月（2001-），女，硕士研究生，研究方向：食品生物技术，E-mail：1347039967@qq.com

通讯作者：罗珍（1979-），女，博士，工程师，研究方向：功能食品，E-mail：Violet.Luo@infinitus-int.com

The sweet stem broccoli powder in this study was rich in 12 kinds of trace elements, and can promote the growth and metabolic SCFAs level of four probiotics in the simulated intestine, which makes up for the research gap of sweet stem broccoli in intestinal probiotic function. This research provides a theoretical basis for the development of sweet stem broccoli and its derived functional foods.

Key words: cabbage; SCFAs; *in vitro* fermentation; lactic acid bacteria

甜杆西兰（又称西兰苔、芦笋青花菜）是由西兰花和芥蓝杂交选育而来的新品种，拥有比芥蓝更好的口感，比西兰花具有更丰富的营养价值，维生素总含量是甘蓝的 2 倍，抗癌物质比西兰花高出 10 倍，是一种高品质、高档次的功能型绿色食品[1]。目前关于甜杆西兰的研究多关注于其抗癌功效，例如，杨艳婧等[2]研究了甜杆西兰种子中硫代葡萄糖苷的诱导卵巢癌细胞凋亡的作用；王晓琴等[3]研究了西兰苔中叶黄酮提取物的抗癌功能。但关于甜杆西兰对肠道益生菌生长及代谢 SCFAs 的研究几乎没有。

益生菌是有益的活性微生物，人体肠道中的益生菌主要有乳杆菌属（*Lactobacillus*）、双歧杆菌属（*Bifidobacterium*）、片球菌属（*Pediococcus*）等。其中乳双歧杆菌 HN019（*Bifidobacterium lactis* HN019，*B. lactis* HN019）、副干酪乳杆菌 Lpc-37（*Lactobacillus paracasei* Lpc-37，*L. paracasei* Lpc-37）、乳双歧杆菌 B420（*Bifidobacterium lactis* B420，*B. lactis* B420）与嗜酸乳杆菌 NCFM（*Lactobacillus acidophilus* NCFM, *L. acidophilus* NCFM）具有调节肠道菌群、改善肠道健康的功效[4]，且对胃肠道消化具有一定抗性，被机体摄入适当数量后能够定植于肠道，已被广泛用于食品发酵、制作益生菌补充剂[5]。

果蔬是益生菌生长发酵的良好底物，可以促进益生菌生长[6]，产生有机酸[7]。其中短链脂肪酸（Short Chain Fatty Acids，SCFAs）是一组由五个或五个以下碳原子组成的饱和有机脂肪酸[8]，具有提供能量[9]、改善肠道健康[10]、调节神经性疾病[11]、降低血压[12]、预防肥胖等多种生物学功能[13]。正常机体结肠中乙酸、丙酸和丁酸的含量占比达到 90%[14,15]，摩尔比为 60:25:15[16]，但一些病人的肠道菌群不能够产生足够多的 SCFAs，特别是丁酸的含量比较低[17]。

该研究采用冷冻干燥工艺制备甜杆西兰冻干粉，以营养质量指数评价其维生素及矿物质的营养价值，同时，基于体外模拟胃肠道消化与发酵，研究甜杆西兰冻干粉对四种益生菌增殖和代谢产生 SCFAs 的影响，将弥补关于甜杆西兰营养价值及肠道益生功能的研究空白。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

甜杆西兰，来自深圳南理工科技有限公司。*B. lactis* HN019、*B. lactis* B420、*L. acidophilus* NCFM、*L. paracasei* Lpc-37 由东莞市华南协同创新研究院保存。MRS 肉汤培养基、技术琼脂粉 广东环凯微生物科技有限公司；葡萄糖、氯化钠、氢氧化钠，天津大茂化学试剂厂；α-淀粉酶（4 000 U/g）、胃蛋白酶（＞3 000 U/mg）、胰酶（130 U/mg）和猪胆盐，上海麦克林生化科技股份有限公司；碳酸氢钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、葡萄糖和无水乙醇，分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

SQ510C 立式压力蒸汽灭菌器，重庆雅马拓科技有限公司；HYQX- Ⅱ厌氧培养箱，上海跃进医疗器械有限公司；3K15 离心机，曦玛离心机（扬州）有限公司；ZQLY-180S 震荡培养箱，上海知楚仪器有限公司；pH 计，梅特勒－托利多仪器；Alliance e2695 凝胶渗透色谱仪，沃特世科技（上海）有限公司；SW-CJ-2FD 洁净工作台，苏州安泰空气技术有限公司；SpectraMax i3x 多功能酶标仪，美谷分子仪器（上海）有限公司；Alpha1-4Ldphs 冷冻干燥机，德国 Christ 公司。

1.3 方法

1.3.1 冻干工艺

甜杆西兰→挑选、清洗→沥水→切片（厚度 1 cm）→ −25 ℃预冻 24 h →真空冷冻干燥 48 h →粉碎→过 60 目筛→甜杆西兰冻干粉→ −20 ℃保存

1.3.2 冻干粉中微量营养素检测

送往东莞市质检中心检测甜杆西兰冻干粉中叶酸、维生素 K1、维生素 E、维生素 B2、维生素 C、β- 胡萝卜素、锌、锰、钾、钙、磷、铁等微量营养素含量。

1.3.3 体外模拟胃肠道消化方法

5 g 样品加入 15 mL 预热至 37 ℃的模拟唾液，放

入 37 ℃恒温摇床 160 r/min 震荡 10 min。取出加入 15 mL 模拟胃液，调节 pH 值至 1.50，放入 40 ℃恒温摇床震荡 120 min。再次取出加入 50 mL 模拟肠液、10 mL 1 mol/L NaCl 溶液，调节 pH 值至 6.80，放入 37 ℃恒温摇床震荡 240 min。

模拟唾液：磷酸氢二钠 2.39 g/L、磷酸二氢钾 0.19 g/L、氯化钠 8 g/L、*α*-淀粉酶 0.10 g/L。调节 pH 值至 6.80。

模拟胃液：氯化钠 17.50 g/L、胃蛋白酶 3.20 g/L。调节 pH 值至 1.20。

模拟肠液：碳酸氢钠 8.40 g/L、胆盐 5 g/L、胰酶 1.43 g/L。调节 pH 值至 7.00。

1.3.4 益生菌生长曲线测定

将甜杆西兰粉与抗性糊精的胃肠道消化物过 0.22 μm 滤膜除菌后分别与葡萄糖液（质量分数 1%）以 1:3 的体积比混合，以 1% 的接种量接种活化好的菌悬液，在 37 ℃的厌氧培养箱中孵育 24 h，每 2 h 取样检测培养液在 600 nm 处吸光值。以添加不含甜杆西兰的消化液组别为空白对照组，添加等量抗性糊精消化物的组别为阳性对照组。

1.3.5 SCFAs检测方法

孵育结束后取上清液过 0.22 μm 滤膜后上机检测。液相色谱仪器参数：色谱柱：HPX-87H Column（300×7.8 mm）；流量：0.6 mL/min；流动相：硫酸－水溶液（278 μL/L）；进样量：20 μL，紫外检测器波长：210 nm。

1.4 数据分析

所有数据以三次平行实验结果的均值 ± 标准差表示。采用 Microsoft Excel 2021 进行数据统计，利用 SPSS Statistics 26.0 进行数据显著性分析，并采用 Duncan 多范围检测方法，以 $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 甜杆西兰粉中微量营养素含量

营养质量指数（Index of Nutrition Quality, INQ）法是国际上对食物中各营养素对人体需要的满足程度的评定，即营养素密度（该食物所含某营养素占供给量之比）与能量密度（该食物所含热能占供给量的比）之比[18]。当 INQ＜1，说明该食物提供营养素能力小于提供能量能力，长期食用，可能导致营养摄入不足；当 INQ＞1 时，表明该食物提供营养素能力大于提供能量能力，适合超重和肥胖者；当 INQ＞2 时，表明该食物可作为这类营养素的良好来源[19]。根据中国食品成分表，胡萝卜素、维生素 E、维生素 C、维生素 B_2、钙、钾、铁、锌、锰、磷是对人体健康起重要作用的微量元素，叶酸与维生素 B_2 同属于 B 族维生素，可以改善贫血和皮肤炎症，维生素 C 与维生素 E 是天然的抗氧化剂，锰、钙、磷是促进骨骼发育的重要物质。经检测，甜杆西兰冻干粉中维生素与矿物质等微量营养素含量见表 1 所示。甜杆西兰粉中富含叶酸、维生素 K_1、维生素 E、维生素 B_2、维生素 C 与 *β*-胡萝卜素等六种维生素，锌、锰、钾、钙、磷和铁等六种矿物质元素。且 INQ 值均大于 1，这表明甜杆西兰粉可作为提供这些微量营养素的良好补充剂。刘培秀等[20]采用冻干工艺制备的西兰花茎粉中钙、铁、锌、锰的含量分别为 4.47 mg/g、58.93 μg/g、17.47 μg/g 与 9.82 μg/g，均低于甜杆西兰粉中矿物元素含量，其中锌、锰的含量仅为甜杆西兰的 53% 与 41%。

表 1 甜杆西兰冻干粉的营养价值

Table 1 Nutritional value of broccoli freeze-dried powder

项目	含量/(mg/100 g)	推荐摄入量/(mg/d)	INQ 值
叶酸	0.52 ± 0.00	0.40	7.89
维生素 K_1	0.45 ± 0.07	0.08	37.95
维生素 E	15.90 ± 1.56	14.00	7.37
维生素 B_2	0.40 ± 0.00	1.40	1.72
维生素 C	181.98 ± 9.99	100.00	10.99
*β*胡萝卜素	10.19 ± 1.14	4.50	14.84
锌	3.08 ± 0.30	10.00	2.00
锰	2.23 ± 0.22	3.50	4.13
钾	2 430.00 ± 127.28	2 000.00	7.65
钙	555.00 ± 70.71	800.00	4.59
磷	545.50 ± 12.02	700.00	4.80
铁	6.26 ± 0.78	16.00	2.58

2.2 甜杆西兰粉对四种益生菌生长曲线的影响

抗性糊精不仅是一种低热量可溶性食品原料，还可以被肠道菌群利用，刺激益生菌生长繁殖，是一种常见益生元。该研究中，抗性糊精可以促进 *B. lactis* HN019、*L. paracasei* Lpc-37、*B. lactis* B420 与 *L. acidophilus* NCFM 四种益生菌在胃肠道环境中的增殖，增加稳定期时的菌体浓度。甜杆西兰粉亦可促进四种益生菌的生长，尤其对于 *B. lactis* HN019、*B. lactis* B420 与 *L. acidophilus* NCFM 表现出不弱于抗性糊精的益生作用，促进益生菌生长繁殖。四种益生菌的生长曲线见图 1，*B. lactis* B420、*B. lactis* HN019、*L. acidophilus* NCFM 与 *L. paracasei* Lpc-37 在 0~4 h 内为迟滞期，4~10 h 内进入对数期，而 10 h 后进入稳定期，这与丁宇威等[21]的研究结果基本一致。与空白对

照相比，添加甜杆西兰后四种益生菌的迟滞期缩短，生长速率大幅提升，进入稳定期时菌体浓度也更高，其中 *B. lactis* HN019、*B. lactis* B420 与 *L. acidophilus* NCFM 的菌体浓度接近抗性糊精组，约为空白对照的 2~3 倍，这表明甜杆西兰可以促进四种益生菌增殖。

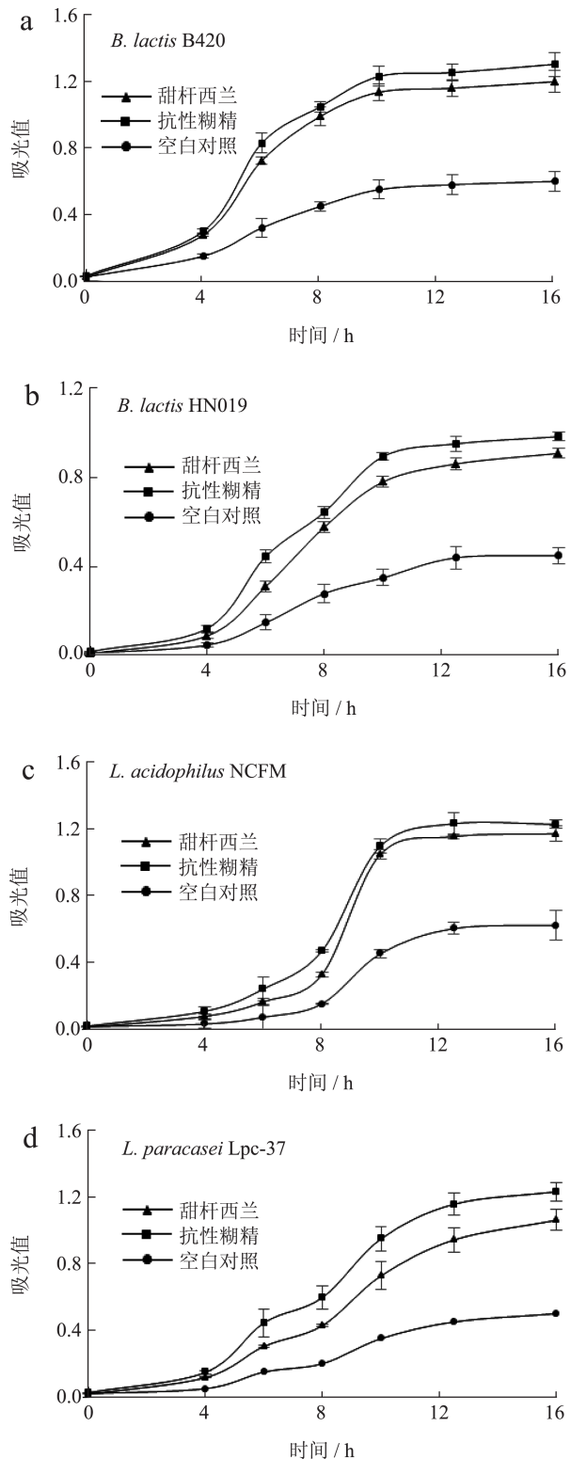
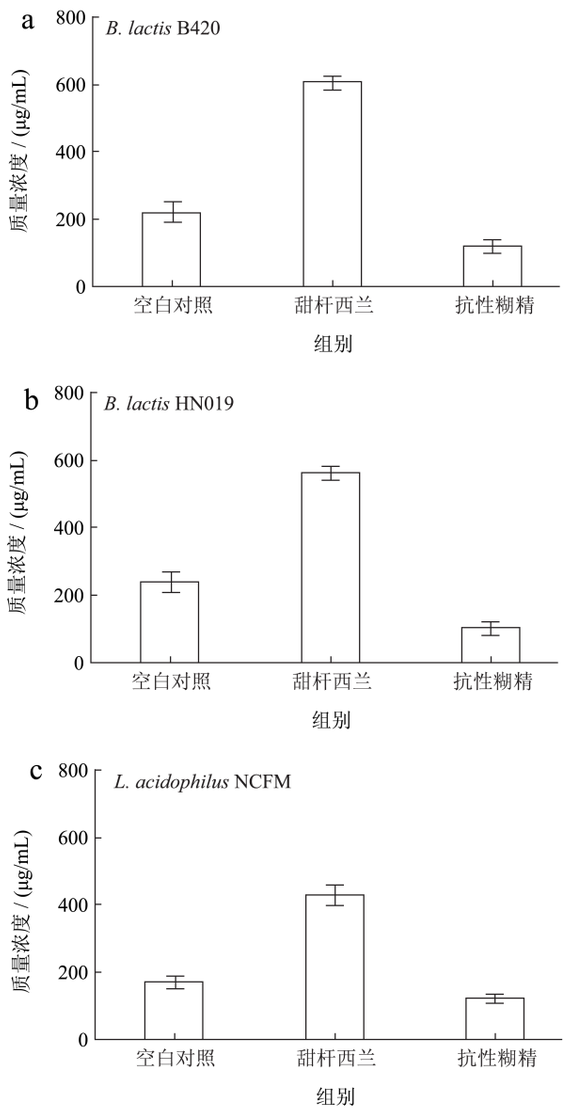


图 1 甜杆西兰粉对四种益生菌生长的影响

Fig.1 Effect of broccoli powder on the growth of four probiotics

2.3 甜杆西兰对益生菌产乙酸的影响

粪便中乙酸含量约占 SCFAs 含量的 45%，而在血液中约占 94%，是外周血细胞的能量来源[5]。乙酸还可以通过抑制 Toll 样受体 4（Toll-Like Receptor 4, TLR4）刺激促炎因子产生，改善肠道炎症[22]。Neda 等[23]研究还发现，补充膳食纤维可以通过增加乙酸含量，下调肾素－血管紧张素系统，降低血压，改善心血管健康和功能。Marta 等[24]研究发现谷物产品可以可以刺激乳杆菌与双歧杆菌生长，增加肠道中乙酸盐水平。夏洁[25]研究发现高压均质处理后的刺梨果渣纤维在发酵过程中乙酸的含量最高。由图 2 可知，该研究中添加甜杆西兰粉的实验组与四种益生菌分别发酵时发酵液中乙酸含量与对照组相比显著增加，其中与 *B. lactis* B420、*B. lactis* HN019 分别发酵时乙酸含量增加了约 2 倍，与 *L. acidophilus* NCFM、*L. paracasei* Lpc-37 分别发酵时乙酸含量增加了约 1 倍。



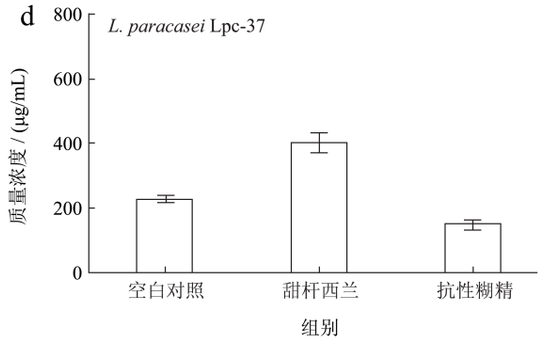


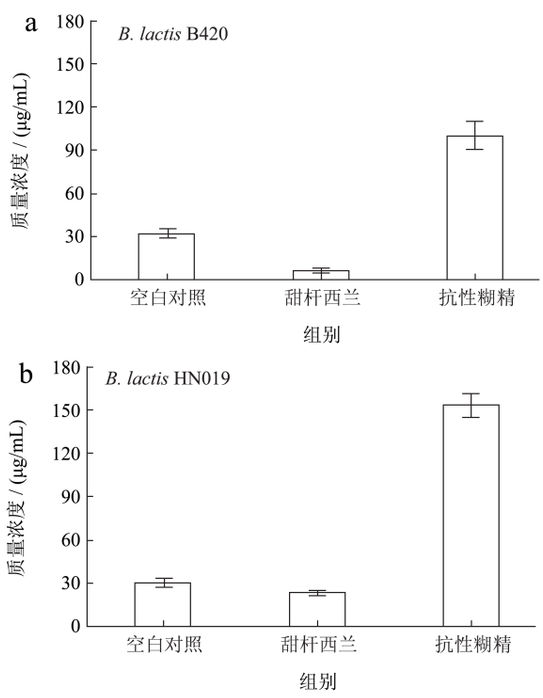
图 2 甜杆西兰粉与四种益生菌分别组合发酵时乙酸的含量

Fig.2 The content of acetic acid in the combination of broccoli powder and four probiotics during fermentation

注：不同字母代表具有显著性差异（$P<0.05$）。下同。

2.4 甜杆西兰对益生菌产丙酸的影响

丙酸主要通过琥珀酸、丙烯酸和丙二醇途径产生，具有多种生物学功能。作为糖异生底物，可以通过三羧酸循环转化为葡萄糖被肝脏利用，提供能量[26]；通过抑制结肠中炎症因子的表达改善肠道健康[27]；Wang 等[28]研究发现丙酸可诱导血管舒张，起到降低血压的作用；丙酸还可以促进细胞产生胰岛素并抑制食物消耗以预防肥胖等[29]。刘心仪等[30]发现在体外发酵过程中添加藜麦纤维可以促进发酵液中丙酸、丁酸等 SCFAs 的含量。由图 3 可知，该研究中甜杆西兰粉可以促进 *L. acidophilus* NCFM 与 *L. paracasei* Lpc-37 产生丙酸，但与空白对照相比没有显著性差异。而甜杆西兰粉与 *B. lactis* B420、*B. lactis* HN019 分别发酵时丙酸产量较低。总的来说，甜杆西兰粉对促进益生菌产生丙酸的效果不如抗性糊精。



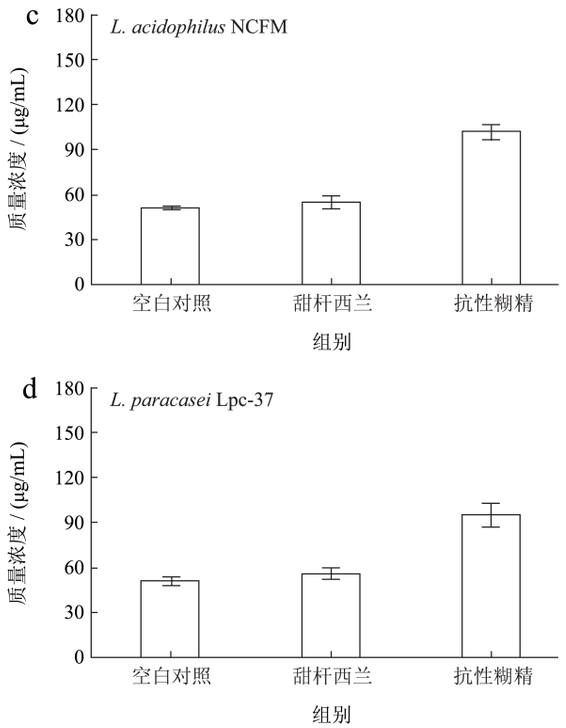


图 3 甜杆西兰粉与四种益生菌分别组合发酵时丙酸的含量

Fig.3 The content of propionic acid in the combination of broccoli powder and four probiotics during fermentation

2.5 甜杆西兰对益生菌产丁酸的影响

丁酸是由两个乙酰辅酶 A 缩合，随后还原而成[31]，人体肠道粘膜 70% 的能量来源于丁酸，其次是丙酸和乙酸[32]，正常机体结肠中乙酸、丙酸和丁酸的摩尔比为 60:25:15[16]，但一些病人的肠道菌群不能够产生足够多的 SCFAs，特别是丁酸的含量比较低[17]。Merve 等[33]研究发现腰果纤维在体外发酵过程中能产生较高的丁酸。刺梨的水不溶性纤维发酵速率最慢，但具有最高的丁酸产量[34]。体外发酵超高压处理的苹果渣纤维可以提高发酵液中丁酸含量[35]。由表 2 可知，该研究中甜杆西兰粉在与四种益生菌分别发酵过程中表现出显著的促进丁酸产量的作用。四种益生菌中，*B. lactis* B420 在生长发酵过程中产生丁酸的含量最少，但添加甜杆西兰共发酵后丁酸产量达到 2 089.19 μg/mL，与 *B. lactis* HN019 共发酵时丁酸产量最高，为 2 199.39 μg/mL，与 *L. paracasei* Lpc-37、*L. acidophilus* NCFM 分别发酵时丁酸产量为 684.21 μg/mL 与 1 416.38 μg/mL，显著高于空白对照组与抗性糊精组。SCFAs 的产生与富集可能与膳食纤维的单糖组成、糖苷键、分子量、支链与溶解度有关，Hu 等[36]研究推测丁酸的产生与半乳糖、半乳糖醛酸的发酵有关，而甜杆西兰中多糖的分子量与组成有待进一步研究。

表 2 甜杆西兰粉与四种益生菌分别组合发酵时丁酸的含量（μg/mL）

Table 2 The content of butyric acid in the combination of broccoli powders and four probiotics during fermentation

组别	空白对照	抗性糊精组	甜杆西兰组
B. lactis B420	2.11 ± 0.89^{c}	30.68 ± 2.61^{b}	$2\,089.19 \pm 17.33^{a}$
B. lactis HN019	15.45 ± 1.31^{c}	37.24 ± 1.92^{b}	$2\,199.39 \pm 36.12^{a}$
L. acidophilus NCFM	21.45 ± 1.56^{c}	50.33 ± 3.04^{b}	$1\,416.38 \pm 28.69^{a}$
L. paracasei Lpc-37	20.6 ± 1.74^{c}	33.59 ± 2.51^{b}	684.21 ± 15.61^{a}

注：同行不同字母代表具有显著性差异（$P<0.05$）。

3 结论

该研究中的甜杆西兰冻干粉富含 12 种维生素及矿物质，且 INQ 值均大于 1，具有很高的营养价值。在体外模拟肠道发酵过程中，使 *B. lactis* B420、*B. lactis* HN019、*L. acidophilus* NCFM 与 *L. paracasei* Lpc-37 的菌体浓度提高了约 2 倍。甜杆西兰与四种益生菌共发酵时丙酸的产量没有显著增加，但可以显著促进乙酸与丁酸的含量，其中与 *B. lactis* B420 共发酵时乙酸含量最高，与 *B. lactis* HN019 共发酵时丁酸含量最高，达到 2 199.39 μg/mL。该研究弥补了甜杆西兰在肠道益生功能方面的研究空白，为甜杆西兰及其功能性食品的开发提供了理论基础。

参考文献

[1] HASTY P, VIJG J. Aging-genomic priorities in aging [J]. Science, 2002, 296(5571): 1250-1251.

[2] 杨艳婧,张学武.西兰苔籽中异硫氰酸盐鉴定及诱导OVCAR-3细胞凋亡研究[J].安徽农业科学,2010,38(2):562-563,579.

[3] 王晓琴,王冰芳,张学武.西兰苔叶黄酮体外抗癌活性的研究[J].安徽农业科学,2010,38(35):20014-20015,20024.

[4] 郎春辉,徐淼,李晓萌,等.嗜酸乳杆菌NCFM和乳双歧杆菌HN019联用对小鼠肠道菌群的调节作用[J].首都公共卫生,2017,11(4):159-161,166.

[5] DALZIEL J E, ANDERSON R C, PETERS J S, et al. Promotility action of the probiotic *Bifidobacterium lactis* HN019 extract compared with prucalopride in isolated rat large intestine [J]. Frontiers in Neuroscience, 2017, 11: 20-28.

[6] DI CAGNO R, SURICO R F, MINERVINI G, et al. Exploitation of sweet cherry (*Prunus avium* L.) puree added of stem infusion through fermentation by selected autochthonous *Lactic acid* bacteria [J]. Food Microbiology, 2010, 28(5): 900-909.

[7] RIOS-COVIAN D, RUAS-MADIEDO P, MARGOLLES A. Intestinal short chain fatty acids and their link with diet and human health [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 185-193.

[8] DALILE B, VAN OUDENHOVE L, VERVLIET B, et al. The role of short-chain fatty acids in microbiota-gut-brain communication [J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2019, 16(8): 461-478.

[9] SHATOVA O P, YAGODKINA E M, KAYDOSHKO S S, et al. Role of tryptophan metabolites and short-chain fatty acids in pathogenesis of autoimmune diseases [J]. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology, 2023, 59(4): 1360-1373.

[10] ZUO T, NG SIEW C. The gut microbiota in the pathogenesis and therapeutics of inflammatory bowel disease [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 2247-2259.

[11] DANIEL E, DE ANGELIS ANNA LENA H, DIEGO J, et al. Host microbiota constantly control maturation and function of microglia in the CNS [J]. Nature Neuroscience, 2015, 18(7): 965-977.

[12] VERHAAR B J H, COLLARD D, PRODAN A, et al. Associations between gutmicrobiota, faecal short-chain fatty acids, and blood pressure across ethnic groups: the HELIUS study [J]. European Heart Journal, 2020, 41(44): 4259-4267.

[13] SZENTIRMAI É, MILLICAN N S, MASSIE A R, et al. Butyrate, a metabolite of intestinal bacteria, enhances sleep [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 7035-7043.

[14] FERNANDES J, SU W, RAHAT-ROZENBLOOM S, et al. Adiposity, gut microbiota and faecal short chain fatty acids are linked in adult humans [J]. Nutrition & Diabetes, 2014, 4: 121-127.

[15] FLUITMAN K S, DE CLERCQ NICOLIEN C, KEIJSER B J F, et al. The intestinal microbiota, energy balance, and malnutrition: emphasis on the role of short-chain fatty acids [J]. Expert Review of Endocrinology & Metabolism, 2017, 12(3): 215-226.

[16] TAZOE H, OTOMO Y, KAJI I, et al. Roles of short-chain fatty acids receptors, GPR41 and GPR43 on colonic functions [J]. Journal of Physiology and Pharmacology, 2008, 59: 251-262.

[17] WANG L L, HU L J, XU Q, et al. *Bifidobacterium* adolescentis exerts strain-specific effects on constipation induced by loperamide in BALB/c mice [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(2): 318-339.

[18] MONIKA J, AGNIESZKA C, MAGDALENA K, et al. Mathematical estimation of the energy, nutritional and health-promoting values of multi-layer freeze-dried vegetable snacks [J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6379-6401.

[19] MARYAM G, SAMIRA R, SAEID D, et al. Index of nutritional quality (INQ) and the risk of obesity in male adolescents: a case-control study [J]. Biological Trace Element Research, 2020, 199: 1701-1706.

[20] 刘培秀,赵美萱,杨梅,等.西兰花粉营养成分及理化性质研究[J].食品工业科技,2022,43(11):326-333.

[21] 丁宇威,郑加栋,赵春然,等.黑果腺肋花楸多糖对3种益生菌生长的影响[J].食品研究与开发,2023,44(6):30-36.

[22] ZAISS M M, SCHETT G, PACIFICI R. The gut-bone axis: how bacterial metabolites bridge the distance [J]. Journal of Clinical Investigation, 2019, 129(8): 3017-3028.

[23] NEDA R, REZA M, EFFAT A, et al. Effect of butyrate and inulin supplementation on glycemic status, lipid profile and glucagon-like peptide 1 level in patients with type 2 diabetes: a randomized double-blind, placebo-controlled trial [J]. Hormone and Metabolic Research, 2017, 49(11): 886-891.

[24] MARTA C, PIETER A D V, JONAS G, et al. Comparative effect of 22 dietary sources of fiber on gut microbiota of healthy humans *in*

vitro [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 700571-700583.

[25] 夏洁.刺梨果渣水不溶性膳食纤维的制备、结构表征及其体外发酵特性研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[26] HU J M, LIN S L, ZHENG B D, et al. Short-chain fatty acids in control of energy metabolism [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(8): 1243-1249.

[27] TONG L C, WANG Y, WANG Z B, et al. Propionate ameliorates dextran sodium sulfate-induced colitis by improving intestinal barrier function and reducing inflammation and oxidative stress [J]. Frontiers in Pharmacology, 2016, 7: 253-261.

[28] WANG L, ZHU Q, LU A H, et al. Sodium butyrate suppresses angiotensin II-induced hypertension by inhibition of renal (pro) renin receptor and intrarenal renin-angiotensin system [J]. Journal of Hypertension, 2017, 35(9): 1899-1908.

[29] PARLADORE S Y, ANDRESS B, LUIZ F R. The role of short-chain fatty acids from gut microbiota in gut-brain communication [J]. Frontiers in Endocrinology, 2020, 11: 25-38.

[30] 刘心仪,陈孟涵,李培实,等.植物乳杆菌体外发酵藜麦水不溶性膳食纤维对肠道菌群及产短链脂肪酸的影响[J].食品科学,2024, 45(13):138-145.

[31] DAVID L A, MAURICE C F, CARMODY R N, et al. Diet rapidly and reproducibly alters the human gut microbiome [J]. Nature, 2014, 505(7484): 559-563.

[32] LIU H, WANG J, HE T. Butyrate: a double-edged sword for health? [J]. Advances in Nutrition, 2018, 9(1): 21-29.

[33] MERVE S, SEDA A T, AHMET Ü, et al. Dietary fibers of tree nuts differ in composition and distinctly impact the fecal microbiota and metabolic outcomes *in vitro* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(25): 9762-9771.

[34] WANG L, LI C, HUANG Q, et al. *In vitro* digestibility and prebiotic potential of a novel polysaccharide from Rosa roxburghii tratt fruit [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 52: 408-417.

[35] WANG S K, XIA J, DE PAEPE K, et al. Ultra-high pressure treatment controls *in vitro* fecal fermentation rate of insoluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt pomace and induces butyrogenic shifts in microbiota composition [J]. Journal of Agricultural and Food Fhemistry, 2021, 69(36): 10638-10647.

[36] HU J L, NIE S P, LI C, et al. *In vitro* fermentation of polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. by human fecal microbiota [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 384-392.