

复合益生菌较单一菌粉对斑马鱼肠道动力的调节研究

方晓晖¹, 张浩天¹, 金东宁², 沈 刚³, 徐 玮³

¹镇江远森医药科技有限公司研发部, 江苏 镇江

²合肥综合性国家科学中心大健康研究院慢性疾病药物中心, 安徽 合肥

³江苏远森健康产业有限公司研发部, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

本研究聚焦于益生菌的润肠通便功效, 利用非靶向代谢组学分析复合益生菌粉(鼠李糖乳酪杆菌LGc、罗伊氏粘液乳杆菌DSM0798、瑞士乳杆菌Ys-299、植物乳植杆菌LD-295、短双歧杆菌YSs12、动物双歧杆菌动物亚种BB-14X)与单一益生菌粉(鼠李糖乳酪杆菌LGc/罗伊氏粘液乳杆菌DSM0798/瑞士乳杆菌Ys-299/植物乳植杆菌LD-295/短双歧杆菌YSs12/动物双歧杆菌动物亚种BB-14X)的代谢物差异, 通过斑马鱼模型进一步分析其功效及潜在机制, 实验表明, 复合益生菌粉能够有效促进肠道蠕动, 并增加5-羟色胺的生物合成, 同时能够在肠道中有效定植24 h以上。

关键词

复合益生菌粉, 斑马鱼, 润肠通便, 代谢物

Study on the Regulation of Zebrafish Intestinal Motility by Probiotic Mixtures Compared to Single Strain Powders

Xiaohui Fang¹, Haotian Zhang¹, Dongning Jin², Gang Shen³, Wei Xu³

¹Research and Development Department, Zhenjiang Yuansen Pharmaceutical Technology Co., Ltd., Zhenjiang Jiangsu

²Chronic Disease Medication Center, Hefei Comprehensive National Science Center Institute of Health Sciences, Hefei Anhui

³Research and Development Department, Jiangsu Yuansen Health Industry Co., Ltd., Zhenjiang Jiangsu

Received: June 3, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 15, 2026

文章引用: 方晓晖, 张浩天, 金东宁, 沈刚, 徐玮. 复合益生菌较单一菌粉对斑马鱼肠道动力的调节研究[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(4): 484-491. DOI: 10.12677/hjfn.2026.154052

Abstract

This study focuses on the laxative effect of probiotics. Non-targeted metabolomics was applied to analyze the metabolite differences between compound probiotic powder (*Lactocaseibacillus rhamnosus* LGc, *Limosilactobacillus reuteri* DSM0798, *Lactobacillus helveticus* Ys-299, *Lactiplantibacillus plantarum* LD-295, *Bifidobacterium breve* YSs12, and *Bifidobacterium animalis subsp. lactis* BB-14X) and single-strain probiotic powder (each of the aforementioned strains individually). A zebrafish model was used to further investigate the efficacy and potential underlying mechanism. Experimental results indicate that the compound probiotic powder can effectively promote intestinal peristalsis, enhance the biosynthesis of 5-hydroxytryptamine, and achieve stable colonization in the intestinal tract for more than 24 hours.

Keywords

Compound Probiotic Powder, Zebrafish, Promote Bowel Movement, Metabolites

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代社会节奏快、压力大，年轻人普遍存在饮食作息不规律、情绪焦虑等问题，导致消化不良、代谢紊乱、排便异常等肠道问题高发，长期影响身心健康与生活质量。因此，开发安全天然、无西药添加的肠道调理功能食品具有重要价值与广阔市场前景。

肠道是人体最大的消化和排泄器官，寄生着数以亿计的细菌，与宿主形成一种共生共赢的微生态平衡，对人体健康起多维度、动态、复杂且广泛的作用。益生菌是寄生在肠道中的活微生物，可以改善宿主代谢，调节菌群，增强免疫力。有益菌主要来自双歧杆菌属和乳酸杆菌属，前者可以改善肠道状况，后者特定菌株可以改善焦虑和情绪等精神健康问题。

双歧杆菌与乳酸菌作用机制不同，复配后可形成代谢互惠、功能互补效应，联合干预便秘、腹泻可缩短病程、减少复发。本试验中的6株益生菌通便靶向各有区别：鼠李糖乳酪杆菌 LGc 修复肠动力，改善慢传输顽固性便秘；罗伊氏粘液乳杆菌 DSM0798 增加排便频次、缓解腹胀型便秘；瑞士乳杆菌 Ys-299 软化粪便，改善干结型便秘；植物乳植杆菌 LD-295 调节菌群，调理久坐、高脂饮食诱发便秘；短双歧杆菌 YSs12 分泌乙酸，改善双歧杆菌缺失型便秘；动物双歧杆菌 BB-14X 双向调节肠道，改善肠道功能紊乱型便秘。

斑马鱼(*Danio rerio*)基因与人类同源性高达87%，具有体型小、繁殖快、实验周期短、模型稳定等优势，已广泛应用于肠胃健康以及消化、吸收、代谢等领域研究。本研究以斑马鱼为模型，探究复合益生菌粉的肠道定植、促肠道蠕动及提升体内5-羟色胺(5-Hydroxytryptamine, 5-HT)水平的作用，并结合代谢组学分析其活性成分与肠道调节机制，为其产品开发和功效评价提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

2.1.1. 实验动物

野生型 AB 品系斑马鱼，自然成对交配繁殖，年龄为受精后5 d (5 dpf)。养殖条件：水温(28 ± 1)℃；

水质为 1 L 反渗透水溶解 200 mg 速溶海盐, pH 6.5~8.5, 硬度 50~100 mg/L CaCO_3 , 电导率 450~550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

2.1.2. 试剂与仪器

主要试剂和耗材: 复合益生菌粉(自制/受试样品); 斑马鱼 5-羟色胺(5-HT) ELISA 试剂盒: 上海酶联生物公司; 尼罗红: Sigma 公司; 甲基纤维素: 阿拉丁公司; CM-DiI (红色荧光): 翌圣, 磷酸缓冲盐溶液(PBS), gibco 公司; 1.5 mL 离心管。

主要仪器: AZ100 电动聚焦连续变倍荧光显微镜: 日本尼康公司; SPARK 多功能酶标仪: 瑞士帝肯公司; Heraeus Fresco17 高速冷冻离心机、Q Exactive 高分辨质谱仪: 美国赛默飞公司; JXFSTPRP-24L 全自动样品快速研磨仪: 上海净信公司; 6 孔板: 浙江贝兰伯公司; UPLC I-Class Plus 系统、BEHC 18 色谱柱(2.1 mm $\times$ 100 mm, 1.7 μm): 美国沃特世公司。实验用水均为双蒸水。6 孔、12 孔细胞培养板, 康宁公司。

2.2. 实验方法

2.2.1. 最大耐受浓度(MTC)测定

随机选取 210 尾 5 dpf 野生 AB 品系斑马鱼, 随机分为 7 组, 每组 30 尾。分别给予 $3 \times 10^2 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 复合益生菌粉水溶液, 同时设置正常对照组(养鱼用水处理斑马鱼)与模型对照组, 每孔(实验组)容量为 3 mL。24 h 后, 观察斑马鱼表型、死亡情况, 计算死亡率, 确定最大耐受浓度(表 1)。

2.2.2. 复合益生菌在斑马鱼肠腔定植存活实验

随机挑选发育正常的 5 dpf 斑马鱼胚胎置于 12 孔板中, 每孔 15 尾, 每孔加入荧光标记后的复合益生菌菌液 1 mL, 28 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱共同培养 24 h, 共同培养结束后, 用无菌的胚胎培养液将斑马鱼胚胎清洗 3 次, 转入到新的孔板中, 每天更换胚胎培养液, 培养 48 dpf。于培养的 2 h、6 h、18 h、24 h 和 48 h 进行荧光强度检测, 观察移除复合益生菌培养后, 斑马鱼肠腔内荧光情况。用 ImageJ 图像处理软件进行荧光图像分析, 计算斑马鱼肠腔内荧光强度。

2.2.3. 复合益生菌和单一菌对斑马鱼肠道蠕动的促进作用评价

在预处理后的菌体中加入 10 mL 胚胎培养液重悬, 调整复合益生菌浓度为 $3 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。随机挑选 5 dpf 幼鱼, 水溶给予尼罗红(终质量浓度为 10 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$)于 28 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱避光暴露 4 h, 使斑马鱼肠道完全充满尼罗红染料。暴露结束, 清洗斑马鱼 3 次, 随机分配于六孔板中(30 尾/孔), 给予前处理后的益生菌 $3 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, 同时设置正常对照组和单一菌粉对照组于 2 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱避光暴露 6 h, 期间不投饵。暴露 6 h 后, 每组随机取 10 尾斑马鱼, 用荧光显微镜进行观察, ImageJ 软件处理图像并计算肠道尼罗红荧光强度(S), 以肠蠕动促进率评价样品对斑马鱼肠蠕动的促进作用。计算公式为

$$\text{肠蠕动促进率} = \frac{S(\text{正常对照组}) - S(\text{实验组})}{S(\text{正常对照组})} \times 100\%$$

2.2.4. 5-HT 含量测定

随机选取 5 dpf 野生型 AB 品系斑马鱼, 每孔(实验组)均处理 30 尾斑马鱼。水溶给予样品(表 3), 同时设置正常对照组和单一菌粉对照组, 每孔容量为 3 mL, 每组实验 3 个平行。28 $^{\circ}\text{C}$ 干预 24 h 后, 用斑马鱼 5-HT 检测试剂盒, 通过酶标仪采集数据, 分析样品对鱼体内 5-HT 含量的影响。

$$\text{5-HT 含量提升率} = \frac{S(\text{实验组}) - S(\text{正常对照组})}{S(\text{正常对照组})} \times 100\%$$

2.2.5. 复合益生菌粉与单一菌粉代谢物差异检测

采用 UPLC I-Class Plus 串联 Q Exactive 质谱仪对复合益生菌粉与单一菌粉进行代谢物的检测，每组 6 个平行，具体操作如下。

代谢物提取：取 100 μL 益生菌粉水溶液加入 96 孔板中，每孔加 300 μL 含内标的萃取剂，封膜，振荡 1 min，置于 -20°C 冰箱 2 h；4000 r/min， 4°C 离心 30 min；吸取 300 μL 上清液到新的 96 孔板中；抽干后加入 150 μL 甲醇:水(1:1, V/V)，振荡至完全溶解；4000 r/min， 4°C 离心 30 min；每孔各取 10 μL 上清液混成一个质控样本放进上样瓶内。

2.2.6. 统计学分析

所有统计学数据以均值 $\pm$ 标准差($\bar{X} \pm s$)表示，采用单因素方差分析(ANOVA)及 Dunnett's T 检验进行组间比较。P < 0.05 为差异具有统计学意义，P < 0.001 为差异具有极显著统计学意义。

3. 结果

3.1. 最大耐受浓度(MTC)测定

复合益生菌粉在 $3 \times 10^2 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $3 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 范围内，斑马鱼均未出现死亡、畸形及明显毒性反应，各组死亡率均为 0%，在 $3 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 出现死亡。确定复合益生菌粉对斑马鱼最大耐受浓度 MTC 为 $3 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，详见表 1。

Table 1. Results of determining the maximum tolerance concentration of the composite probiotic powder for zebrafish (n = 30)
表 1. 复合益生菌粉对斑马鱼最大耐受浓度测定结果(n = 30)

组别	浓度/ $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	总数/尾	死亡数/尾	死亡率/%
正常对照组	-	30	0	0
模型对照组	-	30	0	0
复合益生菌粉	$3 \times 10^2 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	30	0	0
	$3 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	30	0	0
	$3 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	30	0	0
	$3 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	30	0	0
	$3 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	30	0	0
	$3 \times 10^9 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	30	15	50

3.2. 复合益生菌在斑马鱼肠腔定植实验

大肠和小肠是益生菌发挥作用的消化部位，同时只有在大肠和小肠中存活足够长的时间，才能发挥其功效。为评估复合益生菌在肠道中的定植能力，采用 CM-Dil 红色荧光标记益生菌，与斑马鱼共同培养不同时间后观察肠腔荧光强度。结果如图 1 所示，培养 2 h、6 h、18 h、24 h 后，其肠腔的荧光逐渐增强，2 h 后复合益生菌已进入肠腔；6 h 后充满肠腔；24 h 时荧光强度达到峰值($13,075.91 \pm 711.43$)。共同培养 24 h 后，荧光强度逐渐下降，但 24 h 时仍可检测到荧光信号。实验表明该复合益生菌可在斑马鱼肠腔中定植并存活至少 24 h。

3.3. 复合益生菌和单一菌对斑马鱼肠道蠕动的促进作用

为评价复合益生菌及单一益生菌对肠道蠕动的促进作用，采用尼罗红染色法。斑马鱼喂食尼罗红后，

肠腔内充满未被吸收的尼罗红，其荧光信号的强弱可判定斑马鱼肠腔内蠕动状况[1]。使用 ImageJ 处理软件计算斑马鱼肠腔内荧光强度，结果见表 2。与正常对照组相比，斑马鱼给予复合益生菌 6 h 后，斑马鱼肠腔内的荧光强度显著降低，肠道蠕动促进率为 23.62% ($P < 0.01$)。表明该益生菌复合制剂对肠道蠕动有较为明显的促进作用。此外，各单一益生菌组别的荧光强度也显现出不同程度的降低，表明单一益生菌同样可以促进肠道蠕动。

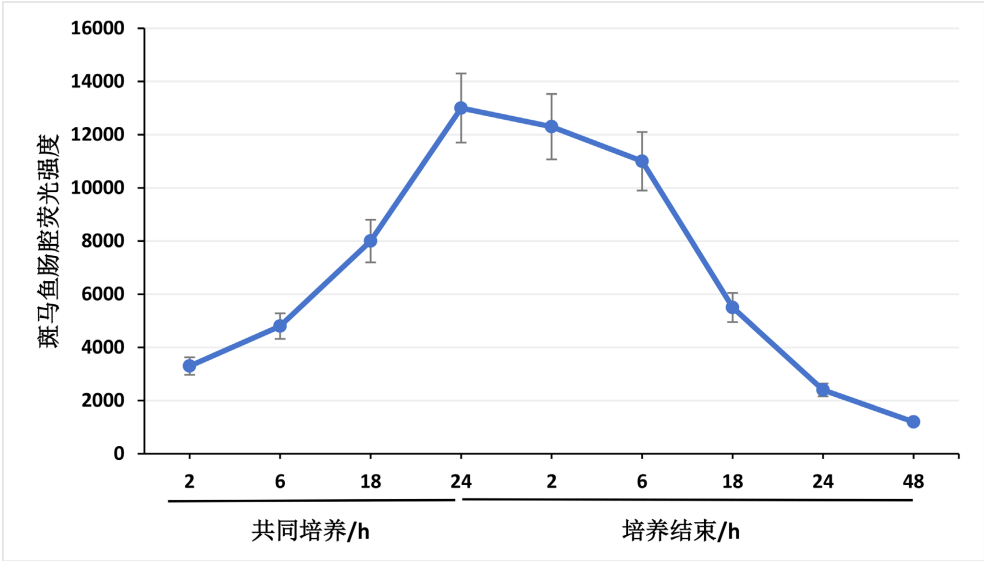


Figure 1. Fluorescence intensity map of the composite probiotics in the intestinal tract of zebrafish at different time periods
图 1. 不同时间段斑马鱼肠道中的复合益生菌荧光强度图

Table 2. The promoting effect of compound probiotic powder on intestinal peristalsis in Zebrafish ($n = 10$, $\bar{X} \pm s$)

表 2. 复合益生菌粉对斑马鱼肠道蠕动的促进作用($n = 10$, $\bar{X} \pm s$)

组别	浓度/CFU·mL ⁻¹	肠道荧光强度(S)	肠道蠕动促进率/%
正常对照组	—	52.53 ± 4.37	—
鼠李糖乳酪杆菌 LGc	3 × 10 ⁸	45.93 ± 4.12*	12.56
罗伊氏粘液乳杆菌 DSM0798	3 × 10 ⁸	46.15 ± 4.33*	12.15
瑞士乳杆菌 Ys-299	3 × 10 ⁸	48.26 ± 3.97	8.13
植物乳植杆菌 LD-295	3 × 10 ⁸	47.73 ± 3.29	9.14
短双歧杆菌 YSs12	3 × 10 ⁸	49.22 ± 3.12	6.30
动物双歧杆菌动物亚种 BB-14X	3 × 10 ⁸	48.73 ± 4.08	7.23
复合益生菌粉(鼠李糖乳酪杆菌 LGc、罗伊氏粘液乳杆菌 DSM0798、瑞士乳杆菌 Ys-299、植物乳植杆菌 LD-295、短双歧杆菌 YSs12、动物双歧杆菌动物亚种 BB-14X)	3 × 10 ⁸	40.12 ± 3.85**	23.62

注：与正常对照组比较，* $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ 。

3.4. 5-HT 水平

斑马鱼的肠道运动方式与哺乳动物相似，其内分泌系统通过分泌 5-HT 等激素调节肠蠕动，肠源 5-HT 主要由肠黏膜嗜铬细胞合成并分泌，参与调控胃肠运动、肠液分泌和情绪等功能[2] [3]。喂食斑马鱼

饲喂 $3 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 复合益生菌粉后, 其体内 5-HT 含量较对照组显著升高($P < 0.05$, $n = 3$, 表 3), 表明该复合益生菌粉可提高斑马鱼体内 5-HT 水平, 这可能与其中多种活性益生菌及其代谢物有关。此外, 在喂食各个单一益生菌后, 在斑马鱼体内也观察到 5-HT 含量的不同程度提升。

Table 3. 5-HT content in Zebrafish ($n = 3$, $\bar{X} \pm s$)

表 3. 斑马鱼 5-HT 含量($n = 3$, $\bar{X} \pm s$)

组别	浓度/ $\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	5-HT 含量(ng/mg 蛋白)	5-HT 含量提升率/%
正常对照组	—	6.28 ± 0.87	—
鼠李糖乳酪杆菌 LGc	3×10^8	6.92 ± 0.63	10.19
罗伊氏粘液乳杆菌 DSM0798	3×10^8	6.65 ± 0.42	5.89
瑞士乳杆菌 Ys-299	3×10^8	6.51 ± 0.49	3.66
植物乳植杆菌 LD-295	3×10^8	6.67 ± 0.43	6.21
短双歧杆菌 YSs12	3×10^8	6.88 ± 0.38	9.55
动物双歧杆菌动物亚种 BB-14X	3×10^8	6.56 ± 0.36	4.46
复合益生菌粉(鼠李糖乳酪杆菌 LGc、罗伊氏粘液乳杆菌 DSM0798、瑞士乳杆菌 Ys-299、植物乳植杆菌 LD-295、短双歧杆菌 YSs12、动物双歧杆菌动物亚种 BB-14X)	3×10^8	$8.05 \pm 0.93^*$	28.18

注: 与正常对照组比较, $*P < 0.05$ 。

3.5. 复合益生菌与单一益生菌代谢差异物分析

主成分分析证实, 复合益生菌与单一菌株的代谢物图谱存在明显差异。以鼠李糖乳酪杆菌 LGc 为参照, 复合益生菌共有 155 种代谢物上调、207 种代谢物下调(图 2)。其中 L-谷氨酸、L-天冬酰胺、半乳糖醇等物质含量显著升高, α -酮戊二酸、L-苏氨酸、吲哚-3-乙酸等含量降低。

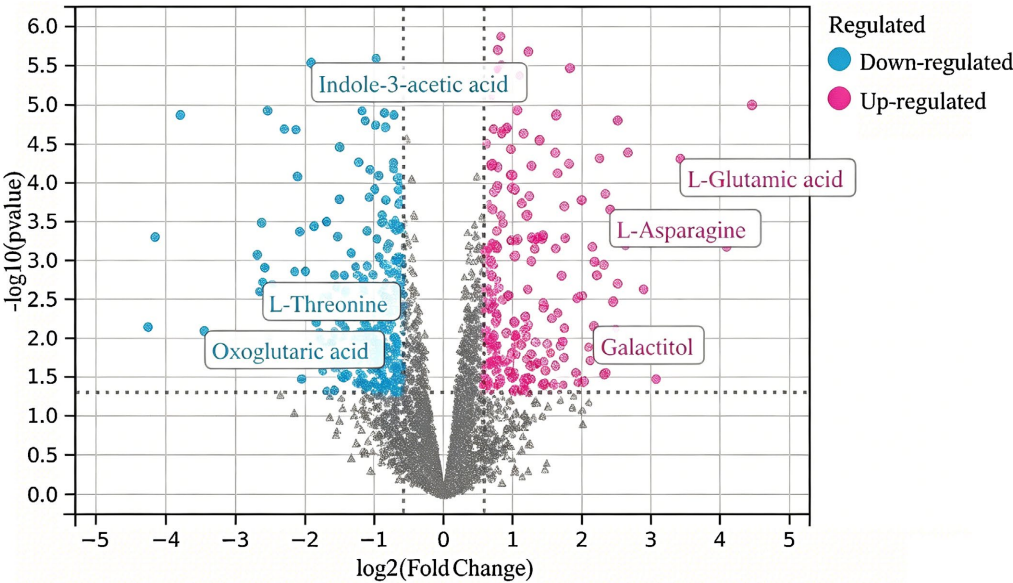


Figure 2. Comparative analysis of differences in metabolites between the composite probiotics and *Lactobacillus rhamnosus* LGc
图 2. 复合益生菌与鼠李糖乳酪杆菌 LGc 代谢物差异分析

对差异显著的代谢物进行富集分析并展示前 10 种通路(图 3)。与单一益生菌相比, 差异代谢通路主要集中在丙氨酸及天冬氨酸和谷氨酸代谢与合成、组氨酸代谢、色氨酸代谢、乙酸盐和二羧酸代谢、磷酸转移酶系统、三羧酸循环等。上述差异是由于多种益生菌分泌更多蛋白酶和肽酶, 将蛋白质水解为多肽和氨基酸; 同时将碳水化合物被分解为单糖, 通过糖酵解进入三羧酸循环, 为谷氨酸和合成提供前体[4]。

综上提示: 复合益生菌代谢产生的差异氨基酸与肠道细胞或肠神经系统的相互作用, 可能是其润肠通便功效的作用机制之一。

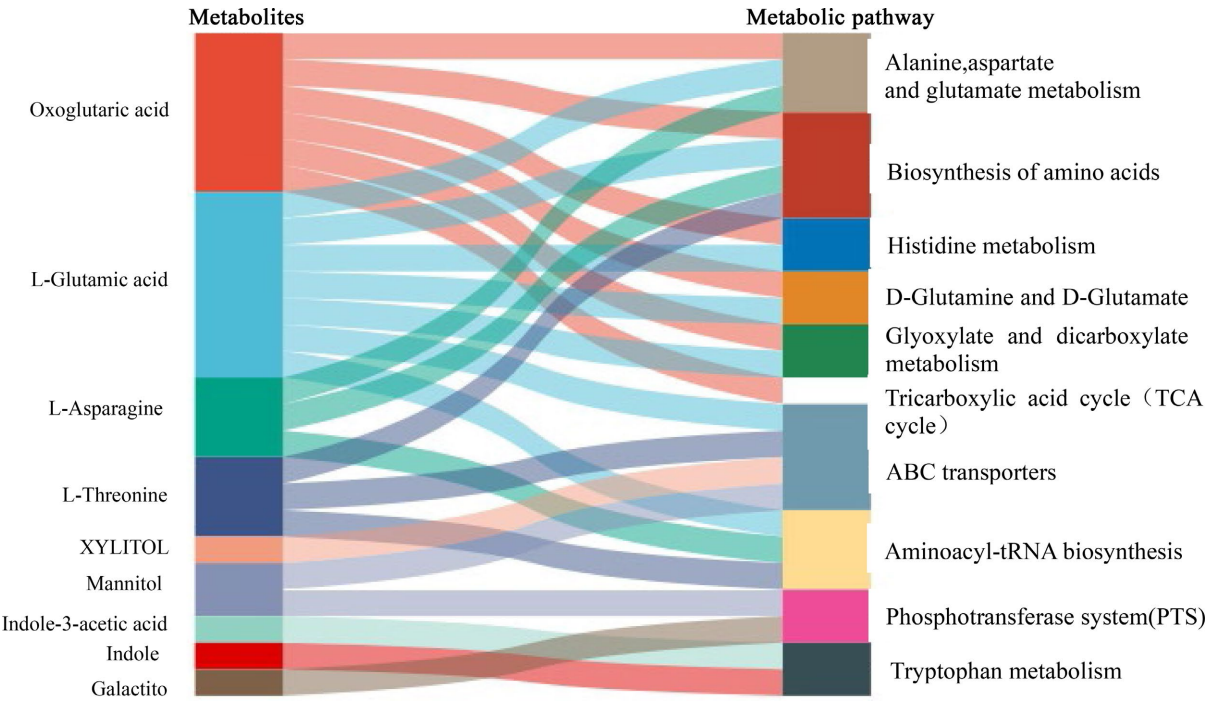


Figure 3. Enrichment analysis of differential metabolites between the composite probiotics and *Lactobacillus rhamnosus* LGc
图 3. 复合益生菌与鼠李糖乳酪杆菌 LGc 差异代谢物富集分析

4. 讨论与结论

4.1. 肠道定植能力

益生菌能否在肠道中稳定定植, 直接影响益生菌功效的发挥。本研究将斑马鱼与复合益生菌共培养发现, 培养至 6 h 后, 益生菌已遍布斑马鱼肠道组织; 24 h 时, 肠道内荧光强度达到峰值($13,075.91 \pm 711.43$)。脱离益生菌后至 48 h 仍可检出明显荧光信号, 充分证实该复合益生菌制剂具备优异的肠道定植能力。

4.2. 促进肠道蠕动作用

本研究中, 斑马鱼经复合益生菌干预 6 h 后, 肠腔内尼罗红荧光强度显著下降($P < 0.01$), 同时肠道内容物体积明显减少, 肠道蠕动促进率达 23.62%。表明该制剂可有效促进肠道蠕动。单一益生菌中, 鼠李糖乳酪杆菌 LGc 和罗伊氏粘液乳杆菌 DSM0798 的促进肠道蠕动效果较为明显($P < 0.05$)。

4.3. 提高 5-HT 水平

本研究中, 给予斑马鱼 3×10^8 CFU·mL⁻¹ 复合益生菌粉饲喂处理后, 其体内 5-羟色胺(5-HT)含量较对照组呈现显著升高趋势, ($P < 0.05$, $n = 3$, 详见表 3)。表明该制剂可提高 5-HT 水平, 可能与多种活性

益生菌及其代谢产物密切相关。此外,单一益生菌也在一定程度上具有提高 5-HT 水平的效果。

杨树荣等验证了 4 株副干酪乳酪杆菌对于小鼠便秘的改善作用,其中小肠推进率和结肠 5-HT 浓度的实验结果表明,即使同样是作为副干酪乳酪杆菌,不同菌株的缓解便秘的效果以及途径也可能存在显著的差异,造成这种差异的原因还有待于结合各菌株的具体情况进行深入研究[5]。因此,我们可以大胆推测,影响益生菌改善便秘的效果的因素可能是多方面的,而使用单一的益生菌菌株往往具有一定的局限性,并不能对所有的影响因素都达到理想的改善效果。那么对于我们的复合益生菌粉来说,其不同菌种、不同菌株间的代谢互惠、功能互补正是其润肠通便的效果优于单一菌粉的原因。比如鼠李糖乳酪杆菌 LGc 在恢复肠动力的同时,瑞士乳杆菌 Ys-299 可以软化粪便,使其更容易被排出,动物双歧杆菌 BB-14X 在改善肠道功能紊乱的同时,植物乳植杆菌 LD-295 也在抑制有害菌生长,同时修复肠道屏障,从而降低由有害菌过度繁殖导致肠道菌群失调,引起肠道功能紊乱的可能。而作为不同属的益生菌,乳酸菌代谢产生的短链脂肪酸可为双歧杆菌提供生长所需营养,形成互利关系,从而提升整体定植效率,使复合益生菌粉润肠通便的效果更加理想。

4.4. 代谢差异物分析

代谢组学分析显示,复合益生菌中 L-谷氨酸、L-天冬酰胺等水平显著升高,相关差异代谢通路主要涉及谷氨酸代谢、三羧酸循环等。已有研究证实,谷氨酸、天冬酰胺可促进肠道蠕动、增强肠上皮细胞功能[3][6]。显示复合益生菌中差异氨基酸与肠道细胞或神经系统可能存在相互作用,可能是其润肠通便的机制之一。

4.5. 综合结论

斑马鱼模型周期短,结果直观,适用于肠道功能食品的快速评价。本实验中表明:复合益生菌粉在实验浓度内安全无毒(3×10^8 CFU·mL⁻¹),可在肠腔定植 24 h 以上,通过提升 5-HT 水平,在一定程度上直接或间接地促进肠道蠕动(促进率 23.62%, 5-HT 提升率 28.18%),且差异代谢物可能参与其功效机制。至于究竟是哪些差异代谢物参与了影响肠道蠕动效果,5-HT 又是怎样影响肠道蠕动的,以及差异代谢物、5-HT 和益生菌三者之间又存在着怎样的互作关系,则需要进一步的实验进行探究证实。

当前阶段的实验表明,该复合益生菌制剂兼具长效定植与润肠通便功效,适合开发为日常食用的肠道调理功能食品。

参考文献

- [1] 周娟,郭胜亚,李春启. 建立斑马鱼肠蠕动模型及筛选促胃肠动力药物的方法[P]. 中国专利, CN103301480B, 2019-11-08.
- [2] Ling, Y., Liu, Z., Han, S., Wu, H., Mu, C. and Zhu, W. (2024) Integrated Omics Revealed the Altered Colonic Microenvironment after Inhibition of Peripheral Serotonin Synthesis by Lp533401. *iMetaOmics*, **1**, e34. <https://doi.org/10.1002/imo2.34>
- [3] Carabotti, M., Scirocco, A., Maselli, M.A., et al. (2015) The Gut-Brain Axis: Interactions between Enteric Microbiota, Central and Enteric Nervous Systems. *Annals of Gastroenterology Quarterly Publication of the Hellenic Society of Gastroenterology*, **28**, 203-209.
- [4] Jayasree Joshi, T., S.V, S., Mohan, L., Nandagopal, P. and Arakal, J.J. (2024) Functional Metabolites of Probiotic Lactic Acid Bacteria in Fermented Dairy Products. *Food and Humanity*, **3**, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100341>
- [5] 杨树荣,朱慧越,乌翯冰,等. 副干酪乳杆菌缓解由洛哌丁胺诱导的小鼠便秘的差异[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(2): 25-31.
- [6] Jin, S., Wu, J., Wang, C., He, Y., Tang, Y., Huang, L., et al. (2025) Aspartate Metabolism-Driven Gut Microbiota Dynamics and Rip-Dependent Mitochondrial Function Counteract Oxidative Stress. *Advanced Science*, **12**, Article 2404697. <https://doi.org/10.1002/advs.202404697>