DOI:10.12441/spyswjs.20250913001 [文章编号] 1673-1689(2026)08-0044-11

双歧杆菌的体外生理特性及对秀丽隐杆线虫降脂作用研究

丁 易 骆 婧 樊哲新 李宝坤 陈晓倩 邱盈盈 王建程 方志锋*

(石河子大学食品学院,新疆 石河子 832003)

摘要:【目的】研究双歧杆菌(*Bifidobacterium*)的体外生理特性及其对秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*, *C. elegans*)的降脂作用。**【方法】**首先通过测定双歧杆菌的耐酸及耐胆盐能力、抗氧化能力及其对抗生素的敏感性,筛选出10株具有良好体外生理特性的双歧杆菌。其次测定双歧杆菌对秀丽隐杆线虫摆头频率、咽泵频率和抗氧化应激能力的影响。最后,利用秀丽隐杆线虫模型评估双歧杆菌的降脂能力,测定了双歧杆菌对秀丽隐杆线虫体内低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、甘油三酯(TG)和游离脂肪酸(FFA)水平的影响。**【结果】**假小链双歧杆菌BP2在模拟胃液环境中的存活率最高,齿双歧杆菌BD1在模拟肠液环境中的存活率最高。不同菌株对抗生素的敏感性和抗氧化能力也存在差异。双歧杆菌干预可提高秀丽隐杆线虫的摆头频率、咽泵频率及抗氧化应激能力,其中长双歧杆菌长亚种BLSL4干预后,秀丽隐杆线虫存活率最高,达84.53%。此外,长双歧杆菌长亚种BLSL4能够显著降低秀丽隐杆线虫中的LDL-C和TG水平,且多株双歧杆菌可显著降低秀丽隐杆线虫中的FFA水平。**【结论】**双歧杆菌具有较强耐酸及耐胆盐能力、抗氧化能力,能通过提升秀丽隐杆线虫的抗氧化应激能力以及减少脂肪沉积来发挥降脂作用。

关键词:双歧杆菌;生理特性;秀丽隐杆线虫;降脂;抗氧化能力

Study on the Physiological Characteristics of *Bifidobacterium in vitro* and Its Lipid-lowering Effect in *Caenorhabditis elegans*

*DING Yi LUO Jing FAN Zhexin LI Baokun CHEN Xiaoqian QIU Yingying WANG Jiancheng FANG Zhifeng**

(School of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: [**Objective**] This article aimed to investigate the *in vitro* physiological characteristics of *Bifidobacterium* and their lipid-lowering effects in *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*). [**Method**] First, the acid and bile salt tolerance, antioxidant capacity, and antibiotic resistance of *Bifidobacteria* were assessed, and 10 strains with excellent *in vitro* physiological characteristics were screened out. Second, the effects of *Bifidobacteria* on the head swinging frequency, pharyngeal pumping frequency, and antioxidant stress resistance of *C. elegans* were determined. Furthermore, the lipid-lowering ability of *Bifidobacteria* was evaluated using the *C. elegans* model, and the effects of *Bifidobacteria* on the levels of low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C), triglycerides (TG) and free fatty acids (FFA) were measured. [**Result**] *Bifidobacterium pseudocatenulatum* BP2 and *Bifidobacterium dentium* BD1 had the highest survival rates in simulated gastric juice environment and simulated intestinal fluid environment, respectively. There were differences in the antibiotic sensitivity and antioxidant activity among different *Bifidobacteria* strains. In addition,

基金项目:新疆维吾尔自治区"天池英才(青年博士)"人才计划项目。

通信作者:方志锋(1987—),男,博士,副教授,博士研究生导师,主要从事益生菌资源与功能挖掘研究。Email:zhifengf@foxmail.com

收稿日期:2025-09-13 **修回日期:**2025-10-19

C. elegans treated with *Bifidobacterium* exhibited increased head swing and pharyngeal pumping frequencies, as well as enhanced oxidative stress resistance. Among these strains, *Bifidobacterium longum* subsp. *longum* BLSL4 exerted the most significant effects, resulting in the highest survival rate of *C. elegans* at 84.53%. Meanwhile, *Bifidobacterium longum* subsp. *longum* BLSL4 reduced the levels of LDL-C and TG. In addition, multiple strains lowered the level of FFA in *C. elegans*. [**Conclusion**] *Bifidobacterium* possessing strong acid and bile salt tolerance as well as antioxidant capacity can enhance the oxidative stress resistance and reduce fat accumulation to exert lipid-lowering effects in *C. elegans*.

Keywords: *Bifidobacterium*; physiological characteristic; *Caenorhabditis elegans*; lipid reduction; antioxidant ability

双歧杆菌（*Bifidobacterium*）是典型的肠道益生菌，广泛分布于人体肠道内，其作为人体肠道微生态系统中的重要功能性菌群，具有多种生理调节作用，可以改善胃肠道功能、增强肠道免疫屏障、调节宿主免疫应答等[1]。研究表明，特定益生菌株具有调节血脂的潜力，其中双歧杆菌凭借其良好的降脂效应受到广泛关注[2]。

高脂血症是指以血脂代谢异常为特征的一种代谢性疾病，是脑梗死、心肌梗死等心血管疾病的危险因素之一[3]。近年来，随着高脂血症等代谢性疾病在全球范围内广泛流行，肠道菌群失调与脂代谢紊乱的密切关联成为研究热点。张蕾[4]的研究表明，复合益生菌Probio-X可通过调节肠道菌群结构和脂质代谢来缓解高脂血症的相关症状。何盈犀等[5]研究表明，动物双歧杆菌NX-6通过其代谢物吲哚-3-甲酸降低高脂血症斑马鱼模型的脂质积累。

秀丽隐杆线虫（*Caenorhabditis elegans*，*C. elegans*）作为标准化模式生物，因其非致病特性及独特的生物学优势，在基础研究中具有重要地位[6]。秀丽隐杆线虫在研究应用方面具有多重优势，如无需通过实验动物伦理审查流程、繁殖效率高、具备标准化的长期保存方案等[7]。陈家裕[8]用高脂模型筛选出一株具有降脂活性的鼠李糖乳酪杆菌，该菌株能够显著降低秀丽隐杆线虫体内甘油三酯水平，降幅达58.1%。另外，动物双歧杆菌乳亚种CECT8145在秀丽隐杆线虫模型中可以有效降低总脂肪和甘油三酯水平，同时表现出显著的抗氧化性能[9]。然而，当前针对双歧杆菌降脂功能的研究仍存在局限，不同菌株的降脂效果差异显著，具体作用靶点与分子机制尚未系统阐明，临床转化潜力亟待深入挖掘。

作者结合双歧杆菌的体外生理特性研究，并使用秀丽隐杆线虫模型评估双歧杆菌调节脂质代谢的性能，以期为开发改善高脂血症的双歧杆菌功能性产品提供依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

1.1.1　菌株与秀丽隐杆线虫

双歧杆菌：婴幼儿粪便中筛选所得（菌种信息见表1）；秀丽隐杆线虫（野生型N2）、大肠杆菌OP50（*Escherichia coli* OP50，尿嘧啶渗漏缺陷型）：石河子大学食品学院新疆特色微生物种质资源保藏中心。

1.1.2　试剂

MRS肉汤培养基、BBL液体培养基：青岛高科技工业园海博生物技术有限公司；牛胆盐、胰蛋白酶、胃蛋白酶、DPPH、ABTS、*L*-半胱氨酸盐酸盐、过硫酸钾、胆固醇、5-氟尿嘧啶（5-FU）：上海麦克林生化科技股份有限公司；氯化钠、氯化钙、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、硫酸镁、无水乙醇：天津市富宇精细化工有限公司；蛋白胨、酵母浸粉：北京奥博星生物技术有限责任公司；琼脂粉：北京兰杰柯科技有限公司；抗菌药物药敏纸片：杭州微生物试剂有限公司；总蛋白质定量试剂盒、LDL-C试剂盒、HDL-C试剂盒、甘油三酯试剂盒、游离脂肪酸测定试剂盒：南京建成生物工程研究所。

1.1.3　仪器与设备

立式压力蒸汽灭菌锅：LDZX-30KBS型，上海申安医疗器械厂；pH计：PHS-3C型，上海雷磁传感器科技有限公司；生化培养箱：SPX-150B-Z型，上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；高速冷冻离心机：Neofuge 15R型，上海康雷分析仪器有限公司；光吸收全波长酶标仪：ReadMax1900型，上海闪谱生物科技有限公司；高速低温组织研磨仪：SWE-FP型，武汉塞维尔生物科技有限公司；超净工作台：SW-CJ-2型，苏州安泰空气技术有限公司；生物显微镜：CX23LEDRFSS1C型，奥林巴斯（广州）工业有限公司；厌氧培养箱：YQX-II型，上海新苗医疗器械制造有限公司。

表 1 双歧杆菌菌种信息

Table 1 *Bifidobacterium* strain information

菌株原始编号	设定编号	菌株原始编号	设定编号
长双歧杆菌长亚种 FJS3B1	BLSL1	齿双歧杆菌 FJS1B21	BD1
长双歧杆菌长亚种 FJS4B15	BLSL2	齿双歧杆菌 FJS12B13	BD2
长双歧杆菌长亚种 FJS6B8	BLSL3	动物双歧杆菌动物亚种 FJS4B2	BAL1
长双歧杆菌长亚种 FJS9B19	BLSL4	动物双歧杆菌动物亚种 FJS5B13	BAL2
长双歧杆菌长亚种 FJS11B3	BLSL5	动物双歧杆菌动物亚种 FJS15B15	BAL3
长双歧杆菌长亚种 FJS15B8	BLSL6	动物双歧杆菌动物亚种 FJS14B16	BAL4
长双歧杆菌长亚种 FSD1B8	BLSL7	动物双歧杆菌动物亚种 FJS13B17	BAL5
长双歧杆菌长亚种 FJS14B6	BLSL8	动物双歧杆菌动物亚种 FJS11B12	BAL6
短双歧杆菌 FJS2B1	BB1	动物双歧杆菌动物亚种 FJS8B3	BAL7
短双歧杆菌 FJS4B8	BB2	动物双歧杆菌动物亚种 FJS7B5	BAL8
短双歧杆菌 FJS5B17	BB3	动物双歧杆菌动物亚种 FJS20B3	BAL9
短双歧杆菌 FJS15B20	BB4	动物双歧杆菌动物亚种 FJS25B1	BAL10
短双歧杆菌 FJS10B17	BB5	假小链双歧杆菌 FJS3B6	BP1
短双歧杆菌 FJS17B2	BB6	假小链双歧杆菌 FJS14B11	BP2
短双歧杆菌 FJS19B7	BB7	假小链双歧杆菌 FJS13B3	BP3
短双歧杆菌 FJS21B5	BB8	假小链双歧杆菌 FJS9B1	BP4
短双歧杆菌 FJS18B10	BB9	假小链双歧杆菌 FJS10B3	BP5
青春双歧杆菌 FJS18B14	BA1	假小链双歧杆菌 FJS18B1	BP6
青春双歧杆菌 FJS13B22	BA2		

1.2 方法

1.2.1 菌株活化

将−80 ℃冻存的菌种置于常温环境下解冻，按体积分数 4% 接种于 MRS 液体培养基中，将液体培养管置于厌氧培养箱，37 ℃恒温培养 36~48 h，连续活化 2 代，将菌液 OD_{600} 调整至 1.00±0.05，用于后续试验。

1.2.2 耐酸及耐胆盐能力测定

模拟胃液：在 pH 3.0 的无菌生理盐水中加入胃蛋白酶，配制成 3.0 g/L 的胃蛋白酶工作液，经 0.22 μm 滤膜过滤除菌。

模拟肠液：在 pH 8.0 的无菌生理盐水中加入胰蛋白酶，配制成 1.0 g/L 的胰蛋白酶溶液，并添加胆盐至 0.3 g/L，经 0.22 μm 滤膜过滤除菌。

取 1 mL 菌液以 8 000 r/min 离心 6 min，用生理盐水洗涤 2 次后，分别重悬于 1 mL 模拟胃液、模拟肠液和生理盐水中，37 ℃厌氧培养 4 h，采用稀释涂布平板法测定活菌浓度（n=3）[10]。按照式（1）计算菌株存活率。

$$S=\frac{N_1}{N_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

S——菌株存活率，%；

N_1——经胃液/肠液处理后的活菌浓度，CFU/mL；

N_0——未处理活菌浓度，CFU/mL。

1.2.3 抗生素敏感性测定

检测菌株对 12 种常见抗生素的耐药性，抗生素包括：氨苄西林（AM）、头孢噻肟（CTX）、庆大霉素（GM）、多西环素（DX）、氧氟沙星（OFX）、阿莫西林（AMX）、甲硝唑（MTZ）、甲氧苄啶（TMP）、恩诺沙星（ENR）、四环素（TE）、红霉素（E）以及万古霉素（VA）。将活化好的菌液稀释 10 倍，取 100 μL 涂布于 MRS 固体培养基上，将药敏纸片贴在培养基表面，于 37 ℃厌氧培养 48 h，测量抑菌圈直径（n=3）。根据美国临床和实验室标准协会（CLSI）中的标准，判断菌株对常见抗生素的敏感性。抑菌圈越大，表明菌株对抗生素越敏感[11]。抑菌圈直径≥15 mm，判定为敏感；抑菌圈直径为 10~<15 mm，判定为中度敏感；抑菌圈直径<10 mm，判定为不敏感。

1.2.4 抗氧化能力的测定

1）菌株预处理：选取 MRS 液体培养基培养下的细胞悬液，测定其抗氧化能力。取活化后的菌液，8 000 g 离心 6 min，弃上清液，用无菌水洗涤菌体 2 次，彻底去除残留培养基。将菌体重悬于等体积生理盐水中，将菌液的 OD_{600} 调整为 1.00±0.05，制成均一的完整细胞悬液样品。

2）DPPH 自由基清除能力的测定：参照李俊飞等[12]的方法，取待测液 2.0 mL 于离心管中，加入新配制的 DPPH-无水乙醇工作液 1.0 mL。在避光、室温条件下反应 30 min，用酶标仪在 517 nm 特征波长下测定吸光度，每个样品设置 3 个平行。按

照式（2）计算DPPH自由基清除率。

$$S_1=(1-\frac{A_1-A_2}{A_0})\times 100\% \quad (2)$$

式中：

S_1——DPPH自由基清除率，%；

A_1——样品与DPPH溶液的吸光度；

A_2——样品与无水乙醇的吸光度；

A_0——无水乙醇与DPPH溶液的吸光度。

3）$ABTS^+$自由基清除能力的测定：参照王明芳等[13]的方法，将2.5 mL ABTS溶液（7.00 mmol/L）与44.0 μL过硫酸钾溶液（140.0 mmol/L）混合，涡旋振荡30 s，避光氧化12~16 h，制备母液。使用时，用无水乙醇稀释至734 nm的吸光度为0.70±0.02，得到工作液。取30.0 μL待测液与3.00 mL工作液反应6 min，测定734 nm的吸光度，每组重复3次。按照式（3）计算$ABTS^+$自由基清除率。

$$S_2=(1-\frac{A_4-A_5}{A_3})\times 100\% \quad (3)$$

式中：

S_2——$ABTS^+$自由基清除率，%；

A_4——样品与工作液的吸光度；

A_5——样品与无水乙醇的吸光度；

A_3——无水乙醇与工作液的吸光度。

4）羟自由基清除能力的测定：取1.00 mL待测样本至试管中，依次加入等体积的硫酸亚铁（6 mmol/L）和水杨酸-无水乙醇（6 mmol/L）工作液，涡旋混匀。反应开始前加入等体积的体积分数1% H_2O_2激发剂，将反应体系转移至37 ℃条件下孵育30 min。终止反应后，使用酶标仪于510 nm测定吸光度，每个样本重复3次。按照式（4）计算羟自由基清除率。

$$S_3=(1-\frac{A_7-A_8}{A_6})\times 100\% \quad (4)$$

式中：

S_3——羟自由基清除率，%；

A_7——样品与工作液及H_2O_2的吸光度；

A_8——样品与工作液及无水乙醇的吸光度；

A_6——无水乙醇与工作液及H_2O_2的吸光度。

1.2.5　秀丽隐杆线虫的培养

1）大肠杆菌OP50的培养：参照郜鑫洋等[14]的方法，取冻存菌株解冻后接种于LB液体培养基中，于37 ℃培养16~18 h，待OD_{600}达0.4~0.6时，将菌悬液涂布于含NGM培养基的培养皿中，确保接种边缘距皿缘≥5 mm。于37 ℃培养12 h形成单层菌苔后，4 ℃保存（保质期≤7 d）。

2）秀丽隐杆线虫的复苏与传代：从-80 ℃冰箱取出一管秀丽隐杆线虫于室温下解冻，加入含有*E. coli* OP50的NGM培养基，第2天置于显微镜下观察。如果观察到秀丽隐杆线虫的爬行痕迹，则说明复苏成功。传代时，可用无菌枪头或手术刀片切下一块琼脂转移到新的NGM平板上。

3）秀丽隐杆线虫的同期化：依照龚春淼等[15]的方法，取生殖高峰期秀丽隐杆线虫，用M9缓冲液洗涤，收集虫体，加入裂解液涡旋振荡60 s，室温孵育5 min至虫体变黄。5 000 *g*离心3 min，弃去上清液，用M9缓冲液洗涤沉淀2次，获得纯净虫卵悬液。将虫卵接种于OP50-NGM平板，20 ℃培养至目标发育阶段。

4）双歧杆菌干预秀丽隐杆线虫培养：在完成同期化处理72 h后，当线虫发育至L4期时，使用挑虫针将个体分别转移至2种培养基：对照组（OP50）为仅含*E. coli* OP50的NGM培养基，试验组为含各株双歧杆菌的NGM培养基。每组3个平板，每个平板至少30条线虫，培养基均添加25 μg/mL的5-FU以抑制子代产生，此时间点记为试验起始日（第0天）。

1.2.6　秀丽隐杆线虫的摆头频率

在双歧杆菌干预后，以第1、3、5、7、9天作为观测时间点，系统评估秀丽隐杆线虫运动功能的变化趋势。从每组3个平板中分别随机选择3条线虫（n=9），置于含有M9缓冲液的检测皿中，允许秀丽隐杆线虫自由活动30 s以适应液体环境，使用体视显微镜连续观察60 s，记录摆动次数，秀丽隐杆线虫头部每摆向一侧记为一次。

1.2.7　秀丽隐杆线虫咽泵频率

在双歧杆菌干预后，在第5、10天测定秀丽隐杆线虫的咽泵频率。从每组3个平板中分别随机选择3条秀丽隐杆线虫（n=9），在电子显微镜下观察，连续记录60 s内的咽泵次数。

1.2.8　秀丽隐杆线虫的抗氧化应激能力

参照易翠平等[16]的方法，将秀丽隐杆线虫置于涂布过氧化氢（20 mmol/L）的NGM培养基中，每组3个平板，每个平板30条秀丽隐杆线虫，4 h后统计秀丽隐杆线虫存活率。

1.2.9　脂质指标的测定

用M9缓冲液收集同期化后的秀丽隐杆线虫，平均分配至各平板，按照1.2.5中的方法进行培养（每组3个平板），保证每个平板中的秀丽隐

杆线虫数量达300条以上。培养结束后，用M9缓冲液冲洗虫体至无菌EP管中，用高速低温组织研磨仪破碎虫体，4 000 r/min离心10 min，收集上清液。根据血脂水平相关指标的试剂盒说明书测定秀丽隐杆线虫体内低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）、甘油三酯（TG）和游离脂肪酸（FFA）水平。先用试剂盒测定各组样本的蛋白质质量浓度，再利用本组样本的蛋白质质量浓度标定各指标。

1.3 数据处理

使用GraphPad Prism 9.5和Excel对数据进行统计分析，计算平均值和标准误差。采用One-Way ANOVA进行显著性分析并制图，并使用Dunnett方法进行多重比较检验。

2 结果与讨论

2.1 耐酸及耐胆盐能力测定

益生菌抵达人体肠道发挥功能之前，需先进入胃酸环境，因此需要有较强的耐酸能力，这也是衡量益生菌益生特性的重要指标之一[17]。肠道是双歧杆菌定植的部位，而肠道内存在质量分数为0.05%~2.00%的胆盐[18]，这会形成高渗透环境，不利于其生存。因此能够在小肠中定植和进行代谢活动的双歧杆菌需要有一定的酸耐受性和胆盐耐受性[19]。如表2所示，菌株BLSL2、BP2、BAL3、BAL7、BLSL8和BB9在模拟胃液环境中的

表2 耐酸及耐胆盐能力

Table 2 Acid and bile salt tolerance

菌株编号	未处理的活菌浓度/（$\times10^9$ CFU/mL）	模拟胃液处理		模拟肠液处理	
		活菌浓度/（$\times10^6$ CFU/mL）	存活率/%	活菌浓度/（$\times10^6$ CFU/mL）	存活率/%
BA1	1.06±0.08	288.33±2.36	26.36±0.42	190.00±4.58	17.27±0.42
BA2	2.23±0.06	111.67±2.36	5.00±0.27	170.00±4.58	7.73±0.21
BD1	2.87±0.12	893.33±1.53	3.08±0.05	2 000.00±8.72	68.97±3.01
BD2	2.16±0.14	813.33±2.52	3.70±0.11	220.00±9.17	10.00±0.42
BLSL1	6.80±0.07	253.33±4.71	3.68±0.03	2 626.67±80.83	38.63±1.19
BLSL2	2.33±0.09	1 206.67±30.55	52.46±1.33	246.33±9.29	5.25±0.13
BLSL3	1.61±0.13	97.00±5.82	6.06±0.94	130.00±9.64	8.13±0.60
BLSL4	3.07±0.55	163.00±19.47	5.26±0.63	222.00±6.56	7.16±0.21
BLSL5	2.35±0.51	61.67±3.68	2.57±0.32	214.33±8.33	8.60±0.42
BLSL6	2.00±0.12	315.00±68.35	15.75±0.46	292.00±3.00	14.60±0.15
BP1	5.83±0.45	139.33±3.21	2.40±0.06	150.33±10.02	2.59±0.17
BP2	2.27±0.13	1 500.00±45.83	65.22±1.99	223.00±13.75	6.52±0.20
BP3	1.88±0.12	290.00±7.55	15.26±0.40	200.33±11.37	10.54±0.60
BP4	2.76±0.15	233.67±20.74	8.35±0.74	1 800.00±75.50	64.29±2.70
BP5	1.09±0.11	8.00±0.05	0.73±0.09	20.00±0.30	1.82±0.27
BP6	9.90±0.85	1 203.33±155.00	12.15±1.57	2 920.00±81.85	29.49±0.83
BB1	7.40±1.23	184.67±4.51	2.50±0.06	215.00±13.00	2.91±0.18
BB2	1.09±0.06	244.50±15.50	22.23±0.45	173.67±7.09	15.79±0.64
BB3	0.10±0.06	18.67±2.08	18.67±2.08	1.90±0.01	2.57±0.14
BB4	1.04±0.05	6.90±9.00	6.90±0.90	109.00±6.00	10.90±0.60
BB5	1.52±0.08	218.00±14.00	14.53±0.93	245.67±11.68	16.38±0.78
BB6	2.64±0.23	230.00±21.52	8.85±0.83	242.00±5.57	9.31±0.21
BB7	1.89±0.10	201.33±6.51	10.60±0.34	176.67±11.02	9.30±0.58
BB8	2.00±0.06	203.00±10.00	10.15±0.50	274.00±9.64	13.70±0.48
BAL1	3.05±0.08	131.67±5.51	4.25±0.18	294.67±5.13	9.51±0.17
BAL2	2.12±0.02	110.00±8.00	5.24±0.38	111.33±8.08	5.30±0.38
BAL3	0.27±0.03	110.33±4.51	40.86±1.67	122.00±4.58	45.19±1.70
BAL4	1.14±0.10	82.00±11.00	7.45±1.00	82.33±0.55	7.48±0.50
BAL5	0.55±0.04	2.33±0.01	0.42±0.10	30.33±0.25	5.52±0.46
BAL6	0.68±0.05	8.90±0.07	13.09±1.03	100.00±11.00	14.71±1.62
BAL7	0.31±0.07	150.67±7.02	48.60±2.27	141.33±9.61	45.59±3.10
BAL8	1.40±0.05	84.67±4.51	6.05±0.32	180.00±10.54	12.86±0.75
BAL9	0.16±0.09	4.33±0.02	2.71±0.36	<1.00	0.63±0.63
BAL10	2.42±0.10	217.00±6.00	9.04±0.25	288.67±10.02	12.03±0.42
BLSL7	4.37±0.59	1 706.67±65.06	38.79±1.48	169.67±8.02	3.86±0.18
BB9	2.04±0.08	1 213.33±40.41	60.67±2.02	150.33±10.02	7.52±0.50
BLSL8	3.63±0.25	1 476.67±55.08	41.02±1.53	280.00±10.58	7.78±0.29

存活率较高，其中菌株BP2的存活率最高，达(65.22±1.99)%；而菌株BD1、BP4、BAL7在模拟肠液环境中存活率较高，其中菌株BD1的存活率最高，达(68.97±3.01)%。结果表明，菌株BAL7在模拟胃肠液环境中的存活率均较高，这与丁瑞培等[20]的研究结果一致。

2.2　抗生素敏感性分析

如表3所示，大部分双歧杆菌对AMX、CTX、AM表现敏感；对于抗生素DX，大部分菌株表现为中度敏感或敏感。除BLSL6、BP3和BB7菌株外，其余所有双歧杆菌对TE表现出耐药，BP3表现出敏感，BLSL6、BB7表现出中度敏感；而对于E，大部分菌株表现出耐药，部分菌株表现出敏感或中度敏感；所有菌株对MTZ、VA、ENR、OFX、TMP、GM均表现出耐药。本研究结果与潘琳等[21]的研究结果基本一致，但对GM的敏感性结果稍有差异，可能是由于不同双歧杆菌之间存在差异。

表3　菌株对抗生素的敏感性

Table 3　Antibiotic sensitivity of the strains

菌株编号	AMX	MTZ	VA	CTX	ENR	AM	OFX	DX	TMP	TE	GM	E
BA1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
BA2	S	R	R	S	R	R	R	R	R	R	R	R
BD1	S	R	R	S	R	I	R	I	R	R	R	R
BD2	S	R	R	I	R	S	R	S	R	R	R	R
BLSL1	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	R
BLSL2	R	R	R	R	R	R	R	I	R	R	R	R
BLSL3	S	R	R	S	R	I	R	R	R	R	R	R
BLSL4	S	R	R	I	R	S	R	R	R	R	R	R
BLSL5	S	R	R	I	R	S	R	R	R	R	R	R
BLSL6	S	R	R	S	R	S	R	S	R	I	R	I
BP1	S	R	R	I	R	S	R	I	R	R	R	R
BP2	S	R	R	I	R	I	R	I	R	R	R	I
BP3	S	R	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
BP4	S	R	R	I	R	I	R	I	R	R	R	R
BP5	S	R	R	S	R	S	R	S	R	R	R	S
BP6	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	I
BB1	S	R	R	I	R	I	R	I	R	R	R	R
BB2	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	R
BB3	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	R
BB4	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	I
BB5	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	R
BB6	S	R	R	S	R	S	R	S	R	R	R	R
BB7	S	R	R	S	R	S	R	S	R	I	R	R
BB8	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
BAL1	S	R	R	S	R	S	R	S	R	R	R	S
BAL2	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	I
BAL3	S	R	R	S	R	S	R	S	R	R	R	I
BAL4	S	R	R	S	R	S	R	S	R	R	R	I
BAL5	S	R	R	S	R	S	R	S	R	R	R	S
BAL6	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	I
BAL7	S	R	R	S	R	S	R	R	R	R	R	I
BAL8	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	I
BAL9	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	R
BAL10	S	R	R	S	R	S	R	S	R	R	R	I
BLSL7	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	I
BB9	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	I
BLSL8	S	R	R	S	R	S	R	I	R	R	R	R

注："R"表示耐药；"I"表示中度敏感；"S"表示敏感。

2.3 抗氧化能力结果

抗氧化能力是益生菌自我防御过程中的重要能力之一，能够减少外界压力带来的氧化损伤[22]。如图1~3所示，所有双歧杆菌均表现出一定的抗氧化活性。不同菌株的ABTS$^+$自由基清除率差异较明显，菌株BB5的ABTS$^+$自由基清除率最高，达75%以上；16株双歧杆菌的DPPH自由基清除率较高，可达80%以上；所有菌株的羟自由基清除率均普遍较高，菌株BB5的羟自由基清除率（94.59%）最高。这与李思等[23]的研究结果一致。

2.4 双歧杆菌对秀丽隐杆线虫生理状态的影响

2.4.1 双歧杆菌对秀丽隐杆线虫摆头频率的影响

氧化应激与细胞脂质代谢密切相关，因此，根据双歧杆菌的抗氧化能力结果，选择了各类别中双歧杆菌抗氧化能力排名靠前的菌株，并结合可食用菌种名单去除了假小链双歧杆菌和齿双歧杆菌，共选择10株双歧杆菌进行后续试验。

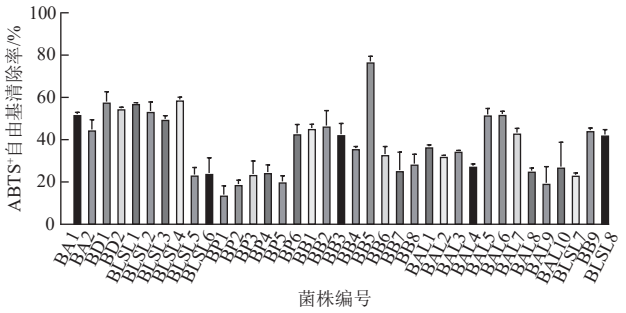


图 1 ABTS$^+$自由基清除率

Fig. 1 ABTS$^+$ free radical clearance rate

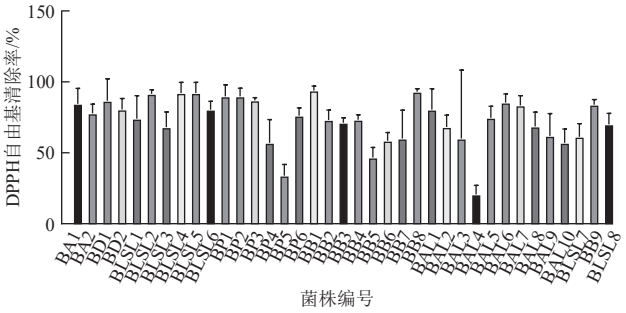


图 2 DPPH自由基清除率

Fig. 2 DPPH free radical clearance rate

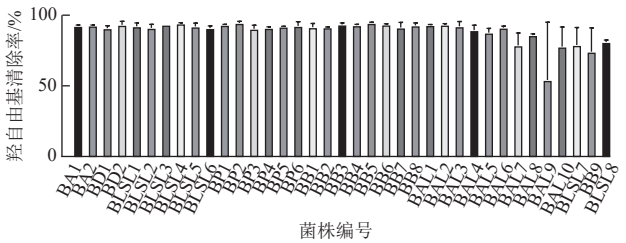


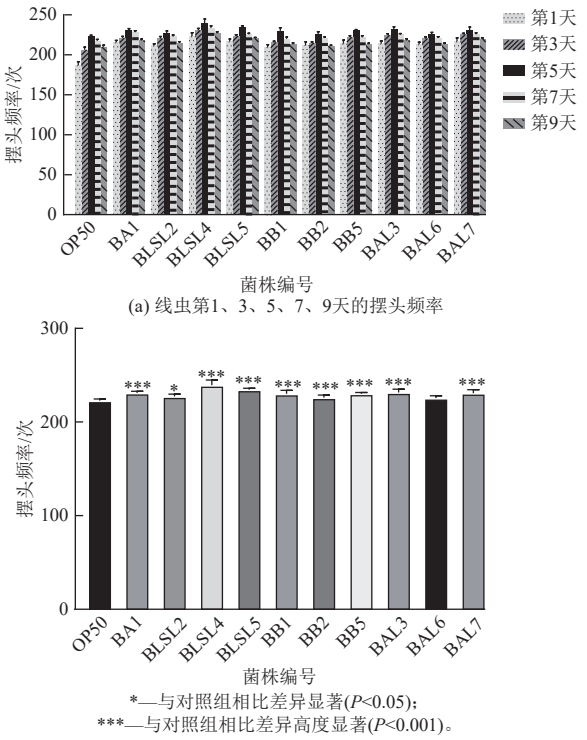
图 3 羟自由基清除率

Fig. 3 Hydroxyl free radical clearance rate

秀丽隐杆线虫的正弦曲线运动源于其背侧与腹侧肌肉的规律性收缩[24]。秀丽隐杆线虫的肌肉随着机体寿命的增长而逐步退化，从而降低其运动能力[25]，因此，摆头频率是评价秀丽隐杆线虫生理状态的关键指标之一。如图4(a)所示，秀丽隐杆线虫的摆头频率随时间的延长呈先上升后下降趋势，这与Fang等[26]的研究结果一致。为了更直观地观察双歧杆菌对秀丽隐杆线虫的影响，对比了秀丽隐杆线虫第5天的摆头频率，见图4(b)。与对照组（OP50）相比，除菌株BAL6外，其余菌株均能够显著提高秀丽隐杆线虫的摆头频率，表明本试验中大部分抗氧化能力较高的双歧杆菌菌株能够提高秀丽隐杆线虫的运动能力。

2.4.2 双歧杆菌对秀丽隐杆线虫咽泵频率的影响

秀丽隐杆线虫的咽部是神经器官，它是通过口腔后侧的吞咽泵的跳动来完成吞咽，吞咽能力决定了秀丽隐杆线虫摄食的能力，吞咽泵的吞咽次数并



(a) 线虫第1、3、5、7、9天的摆头频率

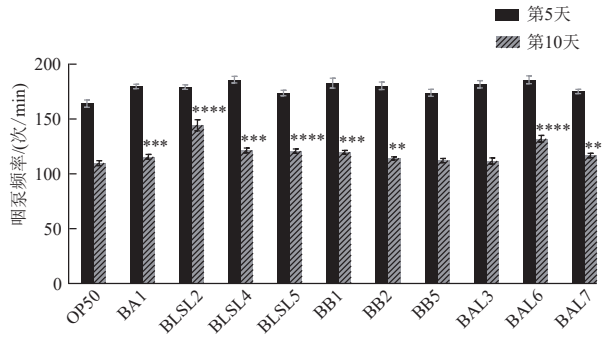
(b) 线虫第5天的摆头频率

*—与对照组相比差异显著(P<0.05)；
***—与对照组相比差异高度显著(P<0.001)。

图 4 双歧杆菌对线虫摆头频率的影响

Fig. 4 Effect of *Bifidobacterium* on the head swinging frequency of *C. elegans*

不是固定的，而是随着秀丽隐杆线虫机体的衰老逐渐下降[27]。双歧杆菌对秀丽隐杆线虫第5天和第10天的咽泵频率的影响见图5。与对照组相比，双歧杆菌干预第10天，除菌株BB5、BAL3外，其余菌株干预的秀丽隐杆线虫的咽泵频率显著提升。结果表明，本研究中大部分抗氧化能力较强的双歧杆菌能显著提高秀丽隐杆线虫的咽泵能力。双歧杆菌对秀丽隐杆线虫无不利影响，因此这10株双歧杆菌均可用于后续试验。



**—与对照组相比差异极显著(P<0.01)；
***—与对照组相比差异高度显著(P<0.001)；
****—与对照组相比差异极其显著(P<0.0001)。

图5　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫咽泵频率的影响

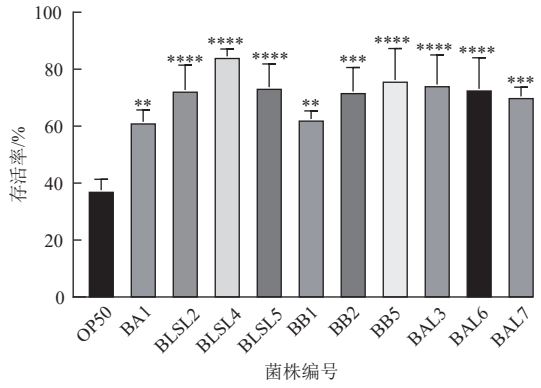
Fig. 5　Effect of *Bifidobacterium* on the pharyngeal pumping frequency of *C. elegans*

2.5　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫抗氧化应激能力的影响

基于双歧杆菌对秀丽隐杆线虫体内外抗氧化能力的影响存在差异，作者采用H_2O_2诱导的急性应激模型评估双歧杆菌对氧化应激的缓解作用。如图6所示，不同双歧杆菌对秀丽隐杆线虫氧化应激的缓解作用各有差异，其中菌株BLSL4缓解氧化应激的能力最突出。与对照组（OP50）相比，菌株BLSL4可显著提高秀丽隐杆线虫的存活率，存活率达84.53%。倪彩新等[28]研究结果显示，植物乳植杆菌Lp11不仅有较强的体外抗氧化能力，还能有效缓解秀丽隐杆线虫体内因过氧化氢刺激引起的氧化应激，这与本研究的结果相符，表明双歧杆菌可有效提高秀丽隐杆线虫对氧化应激的耐受性。

2.6　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫LDL-C、HDL-C水平的影响

双歧杆菌可能通过消除脂质β氧化途径产生的过氧化物来加速脂肪酸的代谢。HDL-C和LDL-C



**—与对照组相比差异极显著(P<0.01)；
***—与对照组相比差异高度显著(P<0.001)；
****—与对照组相比差异极其显著(P<0.000 1)。

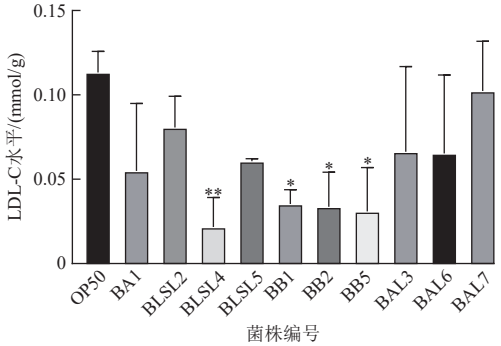
图6　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫抗氧化应激能力的影响

Fig. 6　Effect of *Bifidobacterium* on the oxidative stress resistance of *C. elegans*

是脂质在血液和细胞间转运的关键蛋白质[29]，两者的变化反映了秀丽隐杆线虫体内的脂质沉积状态。由图7可知，与对照组（OP50）相比，经菌株BLSL4、BB1、BB2和BB5干预后的秀丽隐杆线虫的LDL-C水平显著降低，其中降幅最明显的是菌株BLSL4。然而，仅菌株BLSL4能够提高HDL-C水平，但无显著差异，见图8。李健玮等[30]的试验结果表明，双歧杆菌BA6和BL6干预可降低肝脏胆固醇和TG水平。韦云路等[31]研究表明，双歧杆菌能够通过多种机制降低人体血清胆固醇水平，特别是LDL-C水平，而对HDL-C水平无显著影响，与本研究结果较为一致。

2.7　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫TG水平的影响

TG是脂肪合成的重要原料，其含量常用于评价体内脂质水平。TG含量降低会使机体的脂



*—与对照组相比差异显著(P<0.05)；
**—与对照组相比差异极显著(P<0.01)。

图7　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫LDL-C水平的影响

Fig. 7　Effect of *Bifidobacterium* on the LDL-C level in *C. elegans*

肪合成减少，从而达到降脂的效果[31]。如图 9 所示，与对照组相比，菌株 BLSL4、BB2、BB5 和 BAL6 能显著降低秀丽隐杆线虫的 TG 水平，这表明特定的双歧杆菌干预可以显著降低线虫体内 TG 水平，减少脂肪积累。有研究表明，动物双歧杆菌乳亚种 CECT 8145 可显著降低秀丽隐杆线虫中总脂质和 TG 水平，且该菌株在秀丽隐杆线虫中能发挥较强的抗氧化作用[9]，该结论与本研究结果类似，证明双歧杆菌具有调节脂质代谢的潜力。

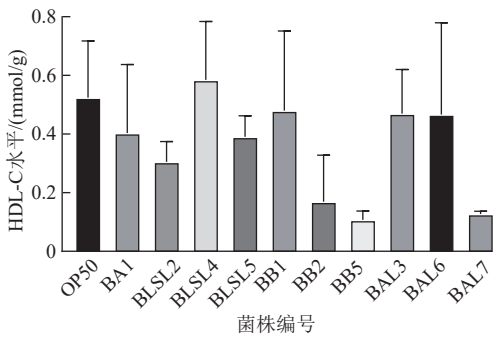
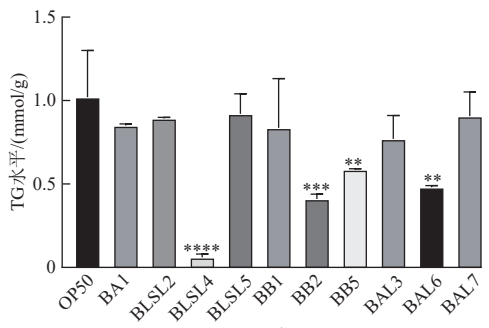


图 8　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫 HDL-C 水平的影响

Fig. 8　Effect of *Bifidobacterium* on the HDL-C level in *C. elegans*



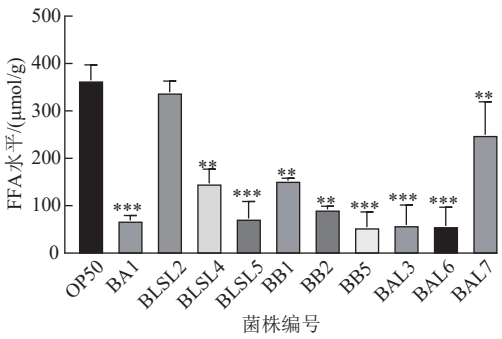
**—与对照组相比差异极显著(P<0.01)；
***—与对照组相比差异高度显著(P<0.001)；
****—与对照组相比差异极其显著(P<0.000 1)。

图 9　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫 TG 水平的影响

Fig. 9　Effect of *Bifidobacterium* on the TG level in *C. elegans*

2.8　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫 FFA 水平的影响

为了进一步研究双歧杆菌对秀丽隐杆线虫脂肪沉积的影响，对秀丽隐杆线虫体内的 FFA 进行测定。FFA 是中性脂肪分解的产物之一，其水平的升高会导致自由基过度产生，这些自由基与脂质双分子层相互作用，最终产生脂质过氧化物[32]。FFA 过多会诱导肥胖、高脂血症等代谢性疾病的发生[33]。如图 10 所示，与对照组相比，除菌株 BLSL2 外，其余菌株均可显著降低秀丽隐杆线虫的 FFA 水平，这可能与双歧杆菌能显著促进脂肪水解、抑制脂肪酸合成有关。Yan 等[34]研究发现，动物双歧杆菌动物亚种 V9 处理大鼠的 *SREBP-1c* 和 *FAS* 基因的转录减少，肝脏磷酸化 AMPK 和 PPAR-α 的表达恢复，炎症细胞因子（如 IL-6、IL-1β、TNF-α）的产生受到抑制；其抗炎作用与抑制肝脏 *TLR4*、*TLR9*、*NLRP3*、*ASC* 基因的 mRNA 表达有关，并与抑制 ERK、JNK、AKT 和 NF-κB 信号通路有关，动物双歧杆菌动物亚种 V9 可抑制炎症通路的激活，进而调节机体的脂质代谢。结果表明，双歧杆菌降低秀丽隐杆线虫脂质积累的作用，可能归因于对体内炎症通路的抑制。



**—与对照组相比差异极显著(P<0.01)；
***—与对照组相比差异高度显著(P<0.001)。

图 10　双歧杆菌对秀丽隐杆线虫 FFA 水平的影响

Fig. 10　Effect of *Bifidobacterium* on the FFA level in *C. elegans*

3　结论

以双歧杆菌为研究对象，通过体内外试验探讨双歧杆菌的生理特性及其降脂潜力。结果表明，双歧杆菌具有较强的抗氧化能力，能够减少秀丽隐杆线虫体内的脂质积累，具有降血脂的潜力，其中菌株 BLSL4 的综合效果最好。本研究结果可为双歧杆菌降低脂质水平研究提供理论依据，但还需进一步结合关键基因和通路分析，如利用相关秀丽隐杆线虫突变体，深入阐明双歧杆菌对秀丽隐杆线虫降脂作用的机制。此外，由于秀丽隐杆线虫与哺乳动物的生理结构存在明显差异，今后可以在更高等的动物模型中验证双歧杆菌的降脂能力，为治疗脂质代谢紊乱性疾病（如高脂血症、脂肪肝等）提供潜在治疗靶点。

参考文献

[1] 余贤娴. 南昌：三株长双歧杆菌的活性功能探究及其产品开发[D]. 南昌：南昌大学，2023：2-3.

[2] 阿卜力米提•阿尔祖古丽，王海蛟，王聪聪，等. 红曲霉菌降血脂功能活性及应用研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(11)：11-22.
ABLIMIT A，Wang H J，Wang C C，et al. Research progress in the blood lipid-lowering activity and application status of *Monascus*[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(11)：11-22.(in Chinese)

[3] Yao Y Y，Hong Q，Ding S Q，et al. Meta-analysis of the effects of probiotics on hyperlipidemia[J]. Current Research in Food Science，2024，9：100885.

[4] 张蕾. 复合益生菌Probio-X对高脂血症患者血脂和肠道菌群的影响[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2023：27-29.

[5] 何盈犀，许欣筑，林淑娴，等. 动物双歧杆菌NX-6对高脂血症模型斑马鱼的降血脂作用及其机制[J]. 食品科学，2025，46(14)：207-215.
He Y X，Xu X Z，Lin S X，et al. Hypolipidemic effect and mechanism of *Bifidobacterium animalis* NX-6 on a zebrafish model of hyperlipidemia[J]. Food Science，2025，46(14)：207-215.(in Chinese)

[6] 黄新亚. 秀丽隐杆线虫piRNA转录机制的研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2021：1.

[7] 王晨曦，张思雨，白雪媛，等. 铁皮石斛水提物通过激活SKN-1转录因子延长秀丽隐杆线虫寿命作用及机制研究[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14(19)：215-224.
Wang C X，Zhang S Y，Bai X Y，et al. Effect and mechanism *Dendrobium officinale* water extract on prolongation of lifespan of *Caenorhabditis elegans* by activating SKN-1 transcription factor[J]. Journal of Food Safety & Quality，2023，14(19)：215-224.(in Chinese)

[8] 陈家裕. 降脂益生菌的筛选及其与发酵中草药的联用效果评价[D]. 昆明：昆明理工大学，2024：13.

[9] Martorell P，Llopis S，González N，et al. Probiotic strain *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* CECT 8145 reduces fat content and modulates lipid metabolism and antioxidant response in *Caenorhabditis elegans*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2016，64(17)：3462-3472.

[10] 赵志霞，许翠，安美玲，等. 新疆喀什地区维吾尔族母乳源双歧杆菌分离筛选及其益生特性分析[J]. 食品科学，2019，40(22)：185-192.
Zhao Z X，Xu C，An M L，et al. Isolation，screening and probiotic characteristics analysis of *Bifidobacterium* from breast milk of uygur women in Kashi，Xinjiang[J]. Food Science，2019，40(22)：185-192.(in Chinese)

[11] 赵芳. 双歧杆菌抗生素耐药性分析及转移风险评估[D]. 无锡：江南大学，2020：10.

[12] 李俊飞，宋智泉，何晓锐，等. 长双歧杆菌婴儿亚种CICC 6069^{T}的益生特性研究及分子鉴定方法开发[J]. 食品与发酵工业，2025，51(14)：273-282.
Li J F，Song Z Q，He X R，et al. Study on probiotic properties of *Bifidobacterium longum* subsp. *infantis* CICC 6069^{T} and development of molecular identification methods[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(14)：273-282.(in Chinese)

[13] 王明芳，陈丽澜，张雪玲，等. 人源分离长双歧杆菌长亚种的体外益生特性分析[J]. 食品科学，2024，45(2)：155-162.
Wang M F，Chen L L，Zhang X L，et al. Probiotic characteristics of human-residential *Bifidobacterium longum* subsp. *longum* strains[J]. Food Science，2024，45(2)：155-162.(in Chinese)

[14] 郜鑫洋，陈树兴. 双歧杆菌多糖对秀丽隐杆线虫冷冻保存的影响[J]. 黑龙江粮食，2022(4)：41-44.
Gao X Y，Chen S X. Effects of *Bifidobacterium* polysaccharide on cryopreservation of *Caenorhabditis elegans*[J]. Journal of Heilongjiang Grain，2022(4)：41-44.(in Chinese)

[15] 龚春淼，王晓楠，费鹏，等. 4株双歧杆菌对秀丽隐杆线虫的体内抗衰老作用[J]. 食品科学，2024，45(13)：146-152.
Gong C M，Wang X N，Fei P，et al. Anti-aging effects of four *Bifidobacterium* species on *Caenorhabditis elegans*[J]. Food Science，2024，45(13)：146-152.(in Chinese)

[16] 易翠平，张思颉，肖锦湘，等. 米糠发酵液的抗氧化活性及其对秀丽隐杆线虫寿命的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(21)：70-75.
Yi C P，Zhang S J，Xiao J X，et al. Antioxidant activity of rice bran fermentation broth and its effect on the longevity of *Caenorhabditis elegans*[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(21)：70-75.(in Chinese)

[17] Liao N，Luo B L，Gao J，et al. Oligosaccharides as co-encapsulating agents：effect on oral *Lactobacillus fermentum* survival in a simulated gastrointestinal tract[J]. Biotechnology Letters，2019，41(2)：263-272.

[18] 毕洁. 胆盐水解酶提高乳酸菌胆盐耐受能力的酶学与生理学机制研究[D]. 无锡：江南大学，2016：1.

[19] Yadav R，Puniya A K，Shukla P. Probiotic properties of *Lactobacillus plantarum* RYPR1 from an indigenous fermented beverage Raabadi[J]. Frontiers in Microbiology，2016，7：1683.

[20] 丁瑞培，刘承忠，史灿灿，等. 动物双歧杆菌B4株的全基因组测序及其益生特性分析[J]. 安徽医科大学学报，2025，60(2)：255-265.
Ding R P，Liu C Z，Shi C C，et al. Whole genome sequencing of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactic* B4 and analysis of its probiotic properties[J]. Acta Universitatis Medicinalis Anhui，2025，60(2)：255-265.(in Chinese)

[21] 潘琳，郭慧玲，李丽娜，等. 双歧杆菌分离株的耐药性评价[J]. 中国食品学报，2020，20(11)：218-227.
Pan L，Guo H L，Li L N，et al. Antibiotic resistance in

Bifidobacterium isolates[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 218-227. (in Chinese)

[22] 邵译霄,黄闯,柳陈坚,等. 乳酸菌的抗氧化活性机制及其在氧化应激相关疾病中的应用[J]. 食品与生物技术学报,2025,44(7):11-20.
Shao Y X, Huang C, Liu C J, et al. Mechanisms of antioxidant activity of lactic acid bacteria and its application in oxidative stress-related diseases [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2025, 44(7): 11-20. (in Chinese)

[23] 李思,安美玲,李珑珑,等. 我国塔吉克族儿童肠道拮抗糖尿病长双歧杆菌长亚种优势菌株筛选及其体外益生特性[J]. 食品科学,2025,46(10):128-138.
Li S, An M L, Li L L, et al. Selection and *in vitro* probiotic properties of *Bifidobacterium longum* subsp. *longum* with anti-diabetic activity from the intestinal tract of Chinese Tajik children[J]. Food Science, 2025, 46(10): 128-138. (in Chinese)

[24] Alvarez J, Alvarez-Illera P, García-Casas P, et al. The role of Ca^{2+} signaling in aging and neurodegeneration: insights from *Caenorhabditis elegans* models[J]. Cells, 2020, 9(1): 204.

[25] Lan J F, Zhang X, Chen D. Molecular mechanisms of dietary restriction in aging: insights from *Caenorhabditis elegans* research[J]. Science China Life Sciences, 2015, 58(4): 352-358.

[26] Fang Z F, Liu N, Fan Z X, et al. *Cistanche deserticola* polysaccharides: *Companilactobacillus crustorum* LBK 1001 complex relieves aging in *Caenorhabditis elegans* [J]. Food Bioscience, 2025, 68: 106486.

[27] 薛敏. 氢气对秀丽隐杆线虫抗衰老的作用及其作用机制[D]. 上海:上海师范大学,2021:8.

[28] 倪彩新,金星,周炜,等. 利用线虫模型评价乳酸菌体内抗氧化能力及其与体外抗氧化参数的对比[J]. 食品与发酵工业,2019,45(3):21-27.
Ni C X, Jin X, Zhou W, et al. Evaluation of antioxidant activity of *Lactobacillus in vivo* using *Caenorhabditis elegans* and comparison with its antioxidant parameters *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(3): 21-27. (in Chinese)

[29] 许俊雅,许泽恭,陈凯然,等. 基于代谢组学和16S rRNA测序探究罗布麻叶总黄酮抗高脂血症的作用[J]. 南京中医药大学学报,2026,42(6):882-895.
Xu J Y, Xu Z G, Chen K R, et al. Investigating the anti-hyperlipidemia effects of total flavonoids from folium apocyni veneti using metabolomics and 16S rRNA sequencing [J]. Journal of Nanjing University of Tradiiional Chinese Medicine, 2026, 42(6): 882-895. (in Chinese)

[30] 李健玮,谭雅芳,杨瑞馥,等. 健康人来源双歧杆菌体外降解胆固醇和体内缓解脂肪肝的评价[J]. 营养学报,2024,46(6):583-591,598.
Li J W, Tan Y F, Yang R F, et al. *In vitro* reduction of cholesterol and *in vivo* alleviation of fatty liver in high-fat diet fed mice by the *Bifidobacterium* strains isolated from healthy humans[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2024, 46(6): 583-591, 598. (in Chinese)

[31] 韦云路,刘义,王瑶,等. 3株益生菌体外降胆固醇能力及体内降血脂效果评价[J]. 食品科学,2017,38(23):129-134.
Wei Y L, Liu Y, Wang Y, et al. Cholesterol-lowering ability *in vitro* and hypolipidemic effect *in vivo* of three probiotic strains[J]. Food Science, 2017, 38(23): 129-134. (in Chinese)

[32] Lin C X, Chen Y, Lin Y Z, et al. Antistress and anti-aging activities of *Caenorhabditis elegans* were enhanced by *Momordica* saponin extract[J]. European Journal of Nutrition, 2021, 60(4): 1819-1832.

[33] 于海涛,马洪波,富校轶,等. 高脂饮食诱导肥胖大鼠血清游离脂肪酸水平分析[J]. 吉林医药学院学报,2015,36(6):415-417.
Yu H T, Ma H B, Fu X Y, et al. Free fatty acid analysis of diet-induce obesity rats by using GC-MS[J]. Journal of Jilin Medical College, 2015, 36(6): 415-417. (in Chinese)

[34] Yan Y, Liu C Y, Zhao S M, et al. Probiotic *Bifidobacterium lactis* V9 attenuates hepatic steatosis and inflammation in rats with non-alcoholic fatty liver disease [J]. AMB Express, 2020, 10(1): 101.