活性益生菌对促进排铅及润肠通便功效的影响

严致立[1]，张馨月[2]，陈文清[1]，魏义举[2*]（1.内蒙古科技大学包头医学院基础医学与法医学院，内蒙古 包头 014040；2.山东第一医科大学生命科学学院，山东 泰安 271016）

摘要：目的 探讨活性液体益生菌对斑马鱼润肠通便功效以及促进其体内排铅作用的影响。**方法** 将5 dpf（days post fertilization，受精后天数）斑马鱼经尼罗红染色后分为3组，28 ℃处理1 d，分析肠道荧光强度；将6 hpf（hours post fertilization，受精后小时数）斑马鱼建立铅中毒模型，28 ℃处理4 d后检测体内铅含量。**结果** 活性液体益生菌对润肠通便功效斑马鱼最大检测浓度（maximum tested concentration，MTC）为15.6 μL·mL^{-1}，此浓度的益生菌组肠道荧光强度显著降低（与正常对照组比较，$P<0.001$）对促进排铅功效斑马鱼MTC为7.81 μL·mL^{-1}，此浓度的益生菌组体内铅含量较模型组下降约50%（$P<0.001$）。**结论** 活性液体益生菌能够快速定植肠道，促进有益菌群增殖，从而实现润肠通便、调节肠道活力；活性液体益生菌可以利用独特离子结合能力，靶向吸附并排出重金属铅，促进排铅功效。

关键词：活性益生菌；乳酸杆菌；肠道健康；促进排铅；润肠通便

中图分类号：R965　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-229X（2026）01-0006-06

Doi：10.12048/j.issn.1674-229X.2026.01.002

The Impact of Active Probiotics on Promoting Lead Excretion and Relieving Constipation

YAN Zhili[1], ZHANG Xinyue[2], CHEN Wenqing[1], WEI Yiju[2*] (1. *College of Basic Medicine and Forensic Medicine, Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technologic, Baotou, Nei Mongol* 014040, *China*; 2. *School of Life Sciences, Shandong First Medical University, Taian, Shandong* 271016, *China*)

ABSTRACT: OBJECTIVE To investigate the effects of active liquid probiotics on the laxative efficacy and promotion of lead excretion in zebrafish. **METHODS** Zebrafish at 5 dpf (days post fertilization) were stained with Nile Red and then divided into 3 groups, treated at 28 ℃ for 1 day, and their intestinal fluorescence intensity was analyzed. Zebrafish at 6 hpf (hours post fertilization) were used to establish a lead poisoning model, treated at 28 ℃ for 4 days, and then the lead content *in vivo* was determined. **RESULTS** The maximum tested concentration (MTC) of active liquid probiotics for laxative effect in zebrafish was 15.6 μL·mL^{-1}. At this concentration, the intestinal fluorescence intensity of the probiotic group was significantly reduced (compared with the normal control group, $P < 0.001$). Similarly, for its effect on promoting lead excretion in zebrafish, the MTC was 7.81 μL·mL^{-1}, and the lead content in the probiotic group at this concentration decreased by approximately 50% compared with the model group ($P<0.001$). **CONCLUSION** Active liquid probiotics can rapidly colonize the zebrafish intestine and promote the proliferation of beneficial flora, thereby achieving laxative effects and regulating intestinal vitality. Active liquid probiotics can utilize their unique ion-binding capacity to specifically adsorb heavy metal lead for excretion, enhancing lead excretion.

KEYWORDS: active probiotics; Lactobacillus; intestinal health; promotion of lead excretion; laxative effect

人体内的肠道是众多微生物的栖息地，这些微生物包括了细菌、病毒等，共同组成了一个复杂的微生物群落——肠道菌群（Gut Microbiota）。这一群落所包含的细胞数量和基因种类远远超过人类自身的细胞和基因数目，因此被科学界誉为“人体的第二基因组”。自从19世纪末首次发现肠道微生物以来，随着高通量测序技术及宏基因组学的发展，科研人员对肠道菌群的研究实现了从表面现象的观察到对其内在分子机制深入理解的重大跨越。

肠道菌群是指生活在肠道内的多种微生物，主

基金项目：山东省医药卫生科技项目（202402050918）

作者简介：严致立，在读硕士研究生，研究方向：益生菌调控肠道细胞死亡与营养干预　　*__通信作者：__魏义举，宾夕法尼亚州立大学博士后，教授，研究生/博士后导师，研究方向：肠道菌群与宿主代谢调控，E-mail：weiyiju@sdfmu.edu.cn

要包括细菌和真菌，在人体健康中发挥着关键作用。它们通过参与营养物质的代谢、调节免疫系统、维护肠道屏障功能[1]以及影响神经内分泌等机制，与消化、吸收、免疫和代谢等生理过程密切相关。健康的肠道菌群具有高度的多样性，但其组成和功能易受到饮食结构、环境因素、抗生素使用以及年龄变化的影响。当肠道菌群失衡时，可能与消化系统疾病、代谢性疾病及心理健康问题的发生发展有关[2]。研究表明，通过摄入益生菌和益生元、改善饮食习惯等方式，可以有效调节肠道菌群结构，从而改善肠道健康[3]，并增强消化和免疫功能。此外，近年来的研究还发现，某些益生菌可能通过影响肠道菌群的组成和活动，帮助减少铅的吸收或促进其排泄，为重金属毒性的干预提供了新的思路。随着研究的不断深入，肠道菌群已成为医学和生命科学领域的重要研究热点。目前，相关研究正逐步从基础理论探索向临床应用转化，在疾病的早期诊断、个性化饮食干预、粪便菌群移植以及精准医疗等方面展现出广阔的应用前景。然而，该领域仍面临诸多挑战，例如明确菌群与疾病之间的因果关系较为困难，个体间的菌群动态变化复杂且差异较大。未来，进一步揭示肠道菌群与人体健康之间的具体联系及其作用机制，不仅有助于推动慢性病的预防和治疗策略更新，也将为健康管理与医学模式的变革提供新的方向和动力。

乳酸杆菌（Lactobacillus）是一类革兰氏阳性、呈杆状形态的兼性厌氧或微需氧益生菌，广泛分布于人体肠道、口腔、泌尿生殖道等生理部位，以及酸奶、泡菜等发酵食品中。作为益生菌的代表，乳酸杆菌能够通过发酵碳水化合物产生大量乳酸，降低环境pH值，从而抑制有害菌的生长，维持微生态平衡。其在宿主健康方面具有多重积极作用：在免疫调节方面可增强宿主免疫功能；在肠道健康方面能改善消化吸收、强化肠道屏障；在抗病原体方面则表现出拮抗效应。此外，乳酸杆菌还能合成短链脂肪酸、维生素等有益代谢产物，有助于机体整体健康[4]。自19世纪首次被分离以来，乳酸杆菌因其高度的安全性和多样化的益生功能受到广泛关注，目前已鉴定出超过200种，如嗜酸乳杆菌（L. acidophilus）、干酪乳杆菌（L. casei）等，广泛应用于功能性食品、微生态制剂及临床辅助治疗等多个领域[5]。

益生菌与肠道健康之间的联系已经成为现代营养学和医学研究的热点领域。益生菌与肠道健康关系密切[6,7]，研究表明，益生菌，尤其是乳酸杆菌等革兰氏阳性菌，通过其独特的代谢能力，在维持人体微生态平衡方面发挥着重要作用，它们能够通过发酵碳水化合物产生大量乳酸，降低环境pH值，抑制有害细菌的生长[8]。此外，双歧杆菌来源健康婴儿的粪便，一些研究发现，乳双岐杆菌有改善便秘症状的效果和调节肠道菌群的作用[9]。

乳酸杆菌、双歧杆菌等益生菌能通过竞争性抑制大肠杆菌、艰难梭菌等有害菌来维持肠道微生态稳定，还可促进黏蛋白分泌、调节紧密连接蛋白以增强肠道屏障，激活肠道免疫细胞、缓解炎症来调节免疫，并且能缓解腹泻和便秘[10]。活性液体益生菌包括：副干酪乳酪杆菌BMC-2020、副干酪乳酪杆菌LPA-2088、植物乳植杆菌LEP-1208、干酪乳酪杆菌LPM-0188、德氏乳杆菌保加利亚亚种RHM-1068、植物乳植杆菌MCA-3066等9大菌株。益生菌对宿主健康的积极作用体现在多个方面：在免疫调节上，它们能有效增强宿主的免疫功能；在肠道保护方面，可以改善消化吸收过程，增强肠道屏障功能；在抵御病原体方面，表现出明显的拮抗效应。此外，一些研究表明，益生菌在改善便秘方面有积极作用[11,12]，益生菌还参与了短链脂肪酸、维生素等有益代谢产物的生成[13]，这些物质对于维护机体整体健康至关重要。本研究旨在分析活性液体益生菌对调节斑马鱼润肠通便功能与促排铅功效的影响。

1 实验材料与方法

1.1 研究对象

活性液体益生菌（安徽中微微元生物科技有限公司提供）每瓶含100亿以上的活性益生菌，采用缓释技术及耐酸训练培育出高活性“超级益生菌”，含副干酪乳酪杆菌BMC-2020、副干酪乳酪杆菌LPA-2088、植物乳植杆菌LEP-1208、干酪乳酪杆菌LPM-0188、德氏乳杆菌保加利亚亚种RHM-1068、植物乳植杆菌MCA-3066等9大菌株。

1.2 主要试剂

吗丁啉多潘立酮片（简称多潘立酮，白色片剂，货号：HY-116282C），购自西安杨森制药有限公司，溶剂为DMSO；甲基纤维素（批号：C2004046，上海阿拉丁生化科技股份有限公司）；二甲基亚砜（DMSO，批号：BCCD8942，Sigma，Switzerland）；尼罗红（批号：SLBP9326V，Sigma，India）；二巯基丁二酸（DMSA，白色粉末，批号：C1810021，上海阿拉丁生化科技股份

有限公司，溶剂为DMSO）；乙酸铅三水化合物（批号：D1826028，上海阿拉丁生化科技股份有限公司）。

1.3 实验方法

1.3.1 润肠通便实验

1.3.1.1 实验动物模型 斑马鱼饲养于28 ℃的养鱼用水中（水质：每1 L反渗透水中加入200 mg速溶海盐，电导率为450~550 μS·cm^{-1}；pH为6.5~8.5；硬度为50~100 mg·L^{-1} $CaCO_3$），由环特生物公司养鱼中心繁殖提供。实验选取健康、遗传背景清晰且繁殖稳定的野生型AB品系斑马鱼，将成年斑马鱼按照1∶1的雌雄比例放入繁殖缸，设置适宜的光照周期（14 h光照，10 h黑暗）和水温（28.5 ℃左右），诱导其自然产卵。由于受精后5 d（5 dpf）斑马鱼肠道结构完整，蠕动规律，具备摄食和排泄功能；可通过尼罗红染色直接观察肠道蠕动和排便，结合行为学指标综合评估疗效[14]，故本实验选取5 dpf野生型AB品系斑马鱼。收集刚产出的胚胎，用无菌水清洗后，转移到新的培养皿中培养。胚胎发育到5 dpf，将其转移到养殖缸中饲养，养殖缸中的水质需严格控制保持pH在6.5~8.5，氨氮含量低于0.5 mg·L^{-1}，并定期更换部分养殖水（每周更换2~3次，每次更换1/3~1/2）。

1.3.1.2 实验分组 随机选取5 dpf野生型AB品系斑马鱼，水溶给予尼罗红作为肠内容物的荧光指示剂。16 h后洗脱尼罗红，将斑马鱼随机分配至6孔板中，MTC预实验分为5组不同浓度梯度组同时设置空白对照组[15]；益生菌功效验证实验分为3组，每组3孔，每孔30尾，分别为模型对照组、阳性对照组（多潘立酮）和活性液体益生菌组。

1.3.1.3 给药方案 首先进行MTC预实验确定合适的益生菌浓度，针对润肠通便功效随机选取受精后5 dpf野生型AB品系斑马鱼，水溶给予尼罗河作为肠内容物的荧光 指示剂，喂饲16 h后洗脱尼罗红，将斑马鱼随机分配至6孔板中，每孔（实验组）均处理30尾斑马鱼，水溶给予样品（浓度见表1），同时设置正常对照组，每孔容量为3 mL。28 ℃处理1 d后，测定样品对正常斑马鱼的MTC。

其次进行润肠通便实验功效检测，对斑马鱼喂饲含尼罗红的饲料16 h，然后使用荧光染料标记肠道内容物，随后分为3组实验，其中模型对照组仅使用尼罗红进行标记，多潘立酮浓度30 μg·mL^{-1}的为阳性对照组[16]，同时设置正常对照组，每孔容量为3 mL，基于MTC预实验结果确定益生菌组浓度，另设空白对照组。24 h后通过荧光显微镜拍摄，使用NIS-ElementsD3.20高级图像处理软件分析肠道荧光强度，以此作为评价益生菌润肠通便功效的指标。

1.3.2 促排铅实验

1.3.2.1 实验动物模型 斑马鱼饲养于28 ℃的养鱼用水中（水质：每1 L反渗透水中加入200 mg速溶海盐，电导率为450~550 μS·cm^{-1}；pH为6.5~8.5；硬度为50~100 mg·L^{-1} $CaCO_3$），由环特生物公司养鱼中心繁殖提供。实验选取健康、遗传背景清晰且繁殖稳定的野生型AB品系斑马鱼，将成年斑马鱼按照1∶1的雌雄比例放入繁殖缸，设置适宜的光照周期（14 h光照，10 h黑暗）和水温（28.5 ℃左右），诱导其自然产卵。由于受精后6 h（6 hpf）斑马鱼胚胎处于囊胚期，细胞膜通透性高，铅易吸收，且早期发育对铅毒性敏感，基因表达变化显著。可通过高通量筛选、实时成像和基因表达分析相结合，快速评估药物对铅代谢的干预效果[17]，故本实验选取6 hpf野生型AB品系斑马鱼。收集刚产出的胚胎，用无菌水清洗后，转移到新的培养皿中培养。胚胎发育到6 hpf，将其转移到养殖缸中饲养，养殖缸中的水质需严格控制保持pH在6.5~8.5，氨氮含量低于0.5 mg·L^{-1}，并定期更换部分养殖水（每周更换2~3次，每次更换1/3~1/2）。最后建立斑马鱼铅中毒模型，将6 hpf斑马鱼暴露于乙酸铅三水合物溶液中，期间每天换液持续4 d。

1.3.2.2 实验分组 随机选取6 hpf野生型AB品系斑马鱼于6孔板中，每孔均处理30尾斑马鱼，MTC预实验分为5组不同浓度梯度组同时设置正常对照组和模型对照组[15]。益生菌功效验证实验，随机选取6 hpf野生型AB品系斑马鱼于6孔板中，每孔60尾，水溶给予样品，分为3组，分别为模型对照组、阳性对照组（DMSA，二巯基丁二酸）和活性液体益生菌组。

1.3.2.3 给药方案 首先进行MTC预实验确定合适的益生菌浓度，针对促排铅功效随机选取受精后6 hpf野生型AB品系斑马鱼于6孔板中，每孔均处理30尾斑马鱼，水溶给予样品（浓度见表3），同时设置正常对照组和模型对照组，每孔容量为3 mL。除正常对照组外，其余各实验组均水溶给予乙酸铅三水合建立斑马鱼铅中毒模型。期间每天换液，28 ℃处理4 d后，测定样品对模型斑马鱼的MTC。

其次对已建立的斑马鱼铅中毒模型进行分组处理，分别分为3组实验，其中模型对照组仅为暴露

于乙酸铅三水合物溶液中的斑马鱼模型，二巯基丁二酸浓度为15.6 μg·mL^{-1}的设置为阳性对照组[17]，基于MTC预实验结果确定益生菌组浓度。另设空白对照组。4 d后，用ICP-MS检测斑马鱼体内铅含量，分析斑马鱼体内铅含量，以此作为评价益生菌促进排铅功效的指标。

1.4 统计学处理方法

应用Graphpad Prism 9.0软件绘制数据图表，计量资料以平均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）表示。两组间数据比较采用t检验；多组间的比较采用双因素方差分析。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 活性液体益生菌对促进斑马鱼润肠通便的影响

2.1.1 MTC 随机选取5 dpf野生型AB品系斑马鱼，水溶给予尼罗红作为肠内容物的荧光指示剂。喂饲16 h后洗脱尼罗红，将斑马鱼随机分配至6孔板中，每孔（实验组）均处理30尾斑马鱼。水溶给予益生菌，由低到高分为5个浓度梯度（浓度见表1），同时设置正常对照组，每孔容量为3 mL。28 ℃处理1 d后，测定样品对正常斑马鱼的MTC。在本实验条件下，活性液体益生菌对润肠通便功效斑马鱼MTC为15.6 μL·mL^{-1}（表1）。

表1 样品润肠通便功效浓度搜索实验结果（n=30）

组别	浓度/μL·mL^{-1}	死亡数/尾	死亡率/%	表型
正常对照组	-	0	0	未见明显异常
活性液体益生菌	3.91	0	0	与正常对照组状态相似
	7.81	0	0	与正常对照组状态相似
	15.6	0	0	与正常对照组状态相似
	31.2	28	93	-
	62.5	30	100	-

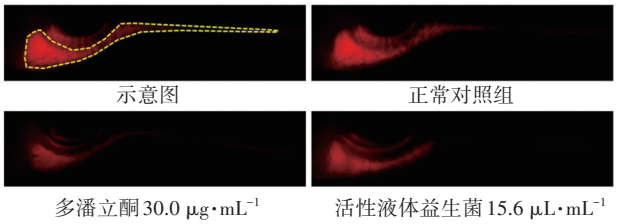
2.1.2 润肠通便功效评价

随机选取5 dpf野生型AB品系斑马鱼，水溶给予尼罗红作为肠内容物的荧光剂，喂饲16 h后洗脱尼罗红，将斑马鱼随机分配至6孔板中，每孔均处理30尾斑马鱼，水溶给予样品（浓度见表2），阳性对照组为多潘立酮30.0 μg·mL^{-1}浓度，同时设置正常对照组，每孔容量为3 mL（表2）。28 ℃处理1 d后，每组随机选取10尾斑马鱼在荧光显微镜下拍照并保存图片（图1），用NIS-ElementsD3.20高级图像处理软件分析并采集数据，分析斑马鱼肠道荧光强度，以该指标统计学分析结果评价样品润肠通便功效（图2）。

表2 样品润肠通便功效评价实验结果（$\bar{x}\pm s$，n=10）

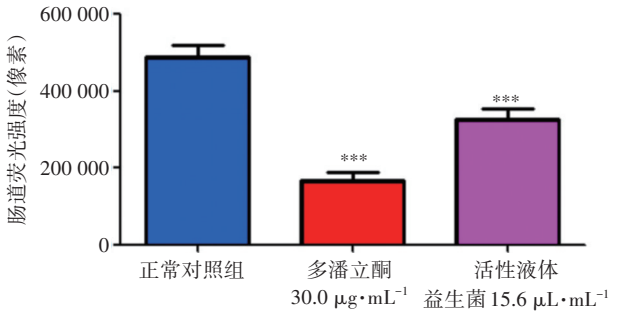
组别	浓度	肠道荧光强度（像素）
正常对照组	-	490 714±28 605
多潘立酮	30.0 μg·mL^{-1}	169 845±19 681***
活性液体益生菌	15.6 μL·mL^{-1}	327 674±27 176***

注：采用单因素方差分析比较组间差异，F(2，27)=42.89，P<0.001；与正常对照组比较，$^{***}P$<0.001。



注：黄色虚线区域为斑马鱼肠道分析部位。

图1 样品处理后斑马鱼肠道荧光强度典型图



注：与正常对照组比较，$^{***}P$<0.001。

图2 样品处理后斑马鱼肠道荧光强度

2.2 活性液体益生菌对促进斑马鱼排铅功效的影响

2.2.1 MTC 随机选取6 hpf野生型AB品系斑马鱼于6孔板中，每孔均处理30尾斑马鱼，水溶给予益生菌（浓度见表3），同时设置正常对照组和模型对照组，每孔容量为3 mL。除正常对照组外，其余各实验组均水溶给予乙酸铅三水合物建立斑马鱼铅中毒模型，期间每天换液。28 ℃处理4 d后，测定样品对模型斑马鱼的MTC。在本实验条件下，活性液体益生菌对促进排铅功效斑马鱼MTC为7.81 μL·mL^{-1}（表3）。

2.2.2 促进排铅功效评价 随机选取6 hpf野生型AB品级斑马鱼于6孔板中，每孔均处理60尾斑马鱼水溶给予样品，阳性对照组二巯基丁二酸15.6 μg·mL^{-1}浓度，同时设置正常对照组和模型对照组，每孔容量为3 mL（表4）。平行设置3次实验，除正常对照组外，其余各实验组均水溶给予乙酸铅三水合物建立斑马鱼铅中毒模型，期间每天换液。28 ℃处理

4 d后，收集斑马鱼样本，用ICP-MS检测斑马鱼体内铅含量，以上述指标的统计学分析结果评价样品促排铅功效（图3）。

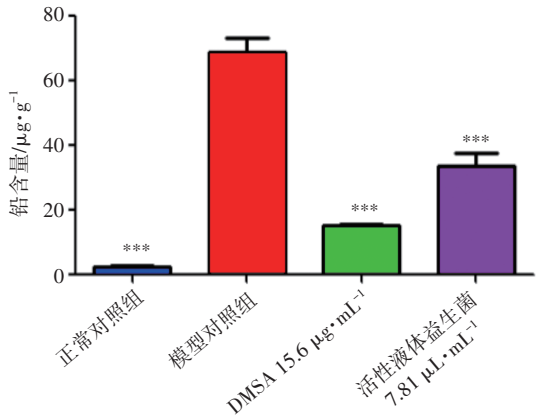
表3　样品促进排铅功效浓度摸索实验结果（$\bar{x}\pm s$，n=30）

组别	浓度/μL·mL^{-1}	死亡数/尾	死亡率/%	表型
正常对照组	–	0	0	未见明显异常
模型对照组	–	0	0	未见明显异常
活性液体益生菌	3.91	0	0	与模型对照组状态相似
	7.81	0	0	与模型对照组状态相似
	15.6	20	67	–
	31.2	27	90	–
	62.5	30	100	–

表4　样品促进排铅功效评价实验结果（$\bar{x}\pm s$，n=3）

组别	浓度	铅含量/μg·g^{-1}
正常对照组	–	2.53 ± 0.162***
模型对照组	–	68.8 ± 4.32
DMSA	15.6 μg·mL^{-1}	15.4 ± 0.405***
活性液体益生菌	7.81 μL·mL^{-1}	33.6 ± 4.03**

注：采用单因素方差分析比较组间差异，$F(3,8)=192.3$，$P<0.001$；与模型对照组比较，**$P<0.01$，***$P<0.001$。



注：与模型对照组比较，**$P<0.01$，***$P<0.001$。

图3　样品处理后斑马鱼体内铅含量

3　讨论

近年来，肠道健康与益生菌之间的关系得到了广泛的认可和深入的研究。大量研究表明，益生菌不仅在调节肠道微生态、增强肠道屏障功能、促进营养吸收和润肠通便[6]以及免疫调节方面具有显著作用，还被发现可能在重金属代谢与排泄过程中发挥积极作用，尤其是对铅等有毒金属的解毒机制引起了越来越多研究者的关注。

本研究围绕活性液体益生菌制剂展开，重点探讨其在改善肠道健康及促进排铅方面的双重功效。通过构建斑马鱼模型[18-21]，分别评估了该益生菌产品在润肠通便和铅中毒干预中的作用。实验结果显示，相较于对照组，活性液体益生菌在斑马鱼体内表现出明显的润肠通便效果，并能有效促进铅的排出，提示其在调节肠道功能的同时，具备一定的重金属解毒潜力。

从具体菌株的作用机制来看，不同益生菌成分展现出各自的功能优势。例如，副干酪乳酪杆菌BMC-2020、副干酪乳酪杆菌LPA-2088和植物乳植杆菌LEP-1208等菌株具有良好的肠道定植能力[22]，能够快速适应肠道环境并促进有益菌群的增殖，从而改善肠道蠕动功能，增强排便效率，实现润肠通便的效果[23-27]。这些菌株可能通过调节肠道微生物结构平衡、增强短链脂肪酸的生成以及改善黏膜屏障完整性等多种途径共同作用，进而提升整体肠道健康水平[28-30]。

另一方面，干酪乳酪杆菌LPM-0188、德氏乳杆菌保加利亚亚种RHM-1068以及植物乳植杆菌MCA-3066等菌株则展现出较强的重金属吸附与结合能力。这类益生菌可通过其细胞壁表面富含的多糖、肽聚糖或蛋白质结构与铅离子发生物理性吸附或化学螯合作用，形成不溶性的复合物，从而减少铅在肠道内的吸收，并随粪便排出体外。这种“直接结合-排出”的机制被认为是益生菌参与重金属解毒的重要方式之一。

此外，益生菌还可通过间接途径支持机体的排毒系统。例如，它们能够调节肠道免疫稳态，激活巨噬细胞和自然杀伤细胞等功能免疫细胞，提高抗氧化酶的表达水平，减轻由铅诱导的氧化应激和炎症反应，从而增强宿主对重金属毒性的耐受能力。这种免疫调节与肠道屏障功能增强协同作用，有助于构建更加完善的体内防御机制[22]。

尽管已有初步证据表明益生菌在促进排铅方面具有潜在应用价值，但目前相关研究仍处于探索阶段，尤其是在人体层面的应用尚缺乏大规模临床验证。多数研究仍基于动物模型或体外实验，对于菌株的长期安全性、定植稳定性、剂量效应以及个体间差异等问题仍有待进一步明确。

本研究通过斑马鱼模型验证了活性液体益生菌在润肠通便和促进排铅方面的双重功能，为益生菌在重金属毒性防护和肠道健康管理领域的应用提供了新的实验依据。随着研究的不断深入和技术手段的进步，益生菌有望成为一种兼具肠道调节与重金

属解毒功能的新型干预策略，在公共卫生、食品安全及环境污染应对等方面展现出广阔的应用前景。

4 结论

研究表明，活性液体益生菌具有良好的肠道定植能力，能够在进入肠道后迅速适应复杂微环境，并与原有菌群建立稳定共生关系，从而有效促进有益菌群的增殖与定植，改善整体肠道菌群结构。其通过调节微生物群落平衡、增强短链脂肪酸等代谢产物的生成、维护黏膜屏障完整性等多种机制，有助于提升肠道蠕动功能，缓解便秘症状，实现润肠通便和肠道活力的良性调节，进而全面改善肠道健康状况。

此外，活性液体益生菌还展现出对重金属铅的独特应对能力。部分高效菌株可通过其细胞壁表面丰富的多糖、肽聚糖及特定蛋白结构，与铅离子发生特异性结合，形成稳定的不溶性复合物，从而减少铅在肠道中的生物可利用度，降低其被机体吸收的风险。这些结合后的重金属复合物最终可通过粪便排出体外，达到辅助排铅的效果。这种“靶向吸附-主动排出”的机制为益生菌在重金属毒理防护中的应用提供了科学依据，也为开发基于益生菌的天然、安全、绿色重金属干预手段开辟了新思路。

参考文献

[1] 田瑞琦，张诗捷，丁银川，等.绿原酸对顺铂诱导小鼠肠屏障功能障碍和肠道菌群的影响[J].中国现代应用药学，2025，42(1)：27-33.

[2] 杨子欣，谢和强，朱金林，等.基于肠道菌群健康指数的膳食因子评估方法开发[J].生物工程学报，2025，41(6)：2373-2387.

[3] 石雅丽，刘洋，吴方，等.润肠通便中药纤维素复方优选及其对肠道菌群调节作用研究[J].今日药学，2024，34(2)：90-96.

[4] 谢美珠，王芳，蒋谦，等.鼠李糖乳杆菌调控宿主肠道健康的作用方式及机制研究进展[J].中国畜牧杂志，2025，61(7)：29-35.

[5] 左一帆，肖萌，苏香萍，等.副干酪乳杆菌润肠通便及调节肠道菌群作用[J].食品工业科技，2024，45(21)：329-337.

[6] 于淑俊，张连中，刘振权.复合益生菌粉对功能性便秘小鼠润肠通便的作用[J].中国微生态学杂志，2023，35(2)：142-151.

[7] 任丽萍，李颖，斯张国，等.益生菌对肉鸡生长性能、消化酶活性及肠道健康的影响[J].中国饲料，2024(12)：41-44.

[8] 张丽，崔耀明，王秋梅，等.益生菌促进肠道上皮细胞增殖分化的作用研究[J].饲料研究，2025，48(16)：169-174.

[9] 姚凯，刘志忠，穆雪峰，等.乳双歧杆菌LGG-08发酵酸奶润肠通便和调节肠道菌群的作用[J].中国奶牛，2021(7)：49-53.

[10] 刘晓梅，彭芝榕，倪学勤，等.低聚果糖、乳酸杆菌对便秘模型大鼠的通便功能影响[J].食品科学，2013，34(11)：296-299.

[11] 赵娟，刘元法，晨光，等.β-1，3/α-1，3-葡聚糖与益生菌复配物的润肠通便功能[J].食品研究与开发，2024，45(3)：88-92.

[12] Agrawal A，Houghton L A，Morris J，*et al*. Clinical trial：The effects of a fermented milk product containing *Bifidobacterium lactis* DN-173 010 on abdominal distension and gastrointestinal transit in irritable bowel syndrome with constipation[J].Aliment Pharmacol Ther，2009，29(1)：104-114.

[13] Higashikawa F，Noda M，Awaya T，*et al*. Improvement of constipation and liver function by plant-derived lactic acid bacteria：A double-blind，randomized trial[J].Nutrition，2010，26(4)：367-374.

[14] 贾福怀，陶刚，涂宏建，等.一款固体饮料的体外活性及其对斑马鱼肠道健康改善作用的评价[J].安徽农业科学，2020，48(6)：148-151.

[15] Zhang H，Luan Y S，Gao Q，*et al*. An optimized probiotic formulation achieves sustained gut microbiota modulation and attenuates dextran sulfate sodium-induced colitis in mice[J].J Med Food，2025，28(10)：1025-1032.

[16] 曲中原，李苏楠，孙志伟，等.枳实化学成分与治疗功能性消化不良关联性分析及实验验证[J].中草药，2022，53(20)：6521-6528.

[17] Guo S Y，Zhang X X，Zhang Y，*et al*. Development of a rapid zebrafish model for lead poisoning research and drugs screening[J]. Chemosphere，2023：140561.

[18] 吴绮霞，高前程，梁枝聪，等.一款益生菌复合制剂双向调节斑马鱼肠道动力作用研究[J].现代食品，2023，29(21)：204-209.

[19] 王之怡，钱烨，陈怡然，等.腐乳来源乳酸菌的分离及其对斑马鱼生长发育的影响[J].生物学杂志，2020，37(5)：76-80.

[20] 郭亚娟，喻勤，严建刚，等.复合益生菌抗斑马鱼感染及对炎症的抑制作用[J].现代食品，2023，29(11)：176-180.

[21] 陈秋燕.益生菌发酵前后麦麸多糖的结构特征及其对斑马鱼抗氧化功能和肠道健康的影响[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2022.

[22] 江宇航，梁明，杨雨翰，等.益生植物乳杆菌SHY21-2通过维持肠道屏障的完整性、抑制炎症和氧化应激反应以及调节肠道菌群来保护斑马鱼免受嗜水气单胞菌感染[C]//中国食品科学技术学会第二十一届年会论文摘要集.重庆，2024：263-264.

[23] 丛丽敏，董为为，解傲，等.益生菌联合膳食纤维改善便秘[J].中国微生态学杂志，2016，28(6)：632-638.

[24] 印伯星，沈桂奇，储雪，等.益生菌固体饮料对功能性便秘小鼠润肠通便及肠道菌群的改善作用[J].扬州大学学报(农业与生命科学版)，2020，41(5)：47-51.

[25] 李桂花，赵云帆，路丽，等.含乳益生菌杏仁粉对便秘小鼠的通便作用[J].中国奶牛，2018(11)：5-9.

[26] 陈又铭，李宁，高学秀，等.复合益生元润肠通便及在压片糖果中的应用[J].食品工业，2024，45(6)：118-123.

[27] 耿英杰，戚浩龙，李园，等.益生菌治疗炎症性肠病的研究进展[J].中国医药工业杂志，2024，55(8)：1069-1077.

[28] 刘凤华，牛停举，赵德辉，等.益生菌对动物肠道健康的作用机制及其在毛皮动物生产中的应用[J].饲料工业，2025(3)：9-13.

[29] 韩辰淼，陆延，杨海峰，等.不同提取方式桑叶多糖对鸡免疫功能和肠道菌群的调节作用研究[J].中国家禽，2025，47(8)：76-83.

[30] 刘夏，侯彬彬.益生菌治疗过敏性疾病机制及应用的研究进展[J].实用医学杂志，2022，38(11)：1434-1438.

(收稿日期：2025-08-12；在线出版日期：2025-12-17)