

复合益生菌替代抗生素对吉富罗非鱼生长、免疫及抗病力的影响

杨海涛, 刘桐山

天津市动物疫病预防控制中心, 天津

收稿日期: 2026年5月4日; 录用日期: 2026年5月26日; 发布日期: 2026年6月5日

摘要

为评估复合益生菌在水产养殖中替代抗生素的防控效果, 以吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)为试验对象, 设置对照组、抗生素组、复合益生菌组, 系统测定生长性能、血清免疫与抗氧化指标、肠道形态及嗜水气单胞菌攻毒存活率。结果显示: 益生菌组增重率、特定生长率较对照组分别提升23.56%、19.47% ($P < 0.05$), 饲料系数降低12.73% ($P < 0.05$); 血清溶菌酶、补体C3、超氧化物歧化酶活性显著高于抗生素组 ($P < 0.05$), 丙二醛含量降低31.58%; 肠道绒毛高度与线隐比显著优于抗生素组; 攻毒存活率达82.22%, 较抗生素组提高13.33个百分点。表明复合益生菌可有效替代抗生素, 促进罗非鱼生长、增强免疫与肠道健康、提高抗病存活率, 为鱼类无抗养殖提供科学依据。

关键词

复合益生菌, 抗生素替代, 吉富罗非鱼, 免疫功能, 肠道健康, 抗病力

Effects of Compound Probiotics as an Antibiotic Substitute on Growth, Immunity and Disease Resistance of GIFT Tilapia

Haitao Yang, Tongshan Liu

Tianjin Animal Disease Control and Prevention Center, Tianjin

Received: May 4, 2026; accepted: May 26, 2026; published: June 5, 2026

Abstract

To evaluate the preventive and control effects of compound probiotics as an alternative to antibiotics

in aquaculture, GIFT tilapia were used as the experimental subjects. Three groups were set up: the control group, the antibiotic group, and the compound probiotic group. Growth performance, serum immune and antioxidant indices, intestinal morphology, and survival rate after *Aeromonas hydrophila* challenge were determined. The results showed that compared with the control group, the weight gain rate and specific growth rate of the probiotic group were significantly increased by 23.56% and 19.47% ($P < 0.05$), respectively, while the feed conversion ratio was decreased by 12.73% ($P < 0.05$). The activities of serum lysozyme, complement C3, and superoxide dismutase in the probiotic group were significantly higher than those in the antibiotic group ($P < 0.05$), and the malondialdehyde content was reduced by 31.58%. The intestinal villus height and villus height to crypt depth ratio of the probiotic group were superior to those of the antibiotic group. The survival rate after bacterial challenge reached 82.22%, which was 13.33 percentage points higher than that of the antibiotic group. These results indicate that compound probiotics can effectively replace antibiotics, promote the growth of tilapia, enhance immunity and intestinal health, and improve the survival rate under disease challenge, thereby providing a scientific basis for the development of antibiotic-free aquaculture for fish.

Keywords

Compound Probiotics, Antibiotic Substitution, GIFT Tilapia, Immune Function, Intestinal Health, Disease Resistance

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. 材料与方法

1.1. 试验材料

复合益生菌：由枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)、丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)按 1:1:1 比例复配制成复合制剂，有效活菌数 $\geq 1 \times 10^{10}$ CFU/g，由某生物科技有限公司提供。

抗生素：氟苯尼考预混剂(10%)，购自某水产兽药有限公司，符合《水产养殖质量安全管理规范》(SCT 1077-2011)标准[1]。

试验鱼：初始体重为(25.32 ± 1.26) g 的健康吉富罗非鱼 360 尾，购自天津某规模化罗非鱼繁育基地，试验前暂养于循环水养殖系统中，适应环境 14 d，期间投喂基础日粮，确保无疾病感染、摄食正常。

致病菌：嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)，由中国农业科学院饲料研究所提供，经 28℃、180 r/min 摇床培养 18 h 后，调整菌液浓度至 1×10^7 CFU/mL，用于攻毒试验[2]。

1.2. 试验设计

采用完全随机设计，将 360 尾试验鱼随机分为 3 组，每组 3 个重复，每个重复 40 尾，养殖于容积为 300 L 的方形玻璃钢养殖桶中。

- 对照组：投喂基础日粮，配方为鱼粉 15%、豆粕 25%、菜粕 20%、面粉 20%、鱼油 3%、磷酸二氢钙 2%、预混料 5%，粗蛋白含量 $\geq 32\%$ ，粗脂肪 $\geq 6\%$ 。

- 抗生素组：基础日粮 + 氟苯尼考 10 mg/kg，按水产养殖规范添加。

- 益生菌组：基础日粮 + 复合益生菌 1×10^9 CFU/kg，将复合益生菌与基础日粮充分混匀后制粒，

低温烘干备用[3]。

试验周期为 56 d, 养殖期间水温控制在 26℃~28℃, 溶解氧 ≥ 5 mg/L, pH 值 7.0~7.5, 每日换水 1/3, 投喂量为鱼体重的 3%~5%, 分早、中、晚 3 次投喂, 记录摄食情况与死亡数量。

1.3. 指标测定

1.3.1. 生长性能

试验结束后, 禁食 24 h, 逐尾称重, 计算增重率(WGR)、特定生长率(SGR)、饲料系数(FCR):

$$\text{WGR}(\%) = \frac{(W_t - W_0)}{W_0} \times 100\%$$

$$\text{SGR}(\%/d) = \frac{(\ln W_t - \ln W_0)}{t} \times 100\%$$

$$\text{FCR} = \frac{\text{总投饲量}}{W_t - W_0}$$

其中, W_0 为初始体重(g), W_t 为终末体重(g), t 为试验天数(d)。

1.3.2. 免疫与抗氧化指标

每个重复随机取 6 尾鱼, 尾静脉采血, 4℃静置 30 min 后, 3000 r/min 离心 15 min, 分离血清, -80℃保存备用。采用南京建成生物工程研究所试剂盒, 测定血清溶菌酶(LZM)、补体 C3、超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)含量, 操作严格按照试剂盒说明书进行。

每个重复随机取 3 尾鱼, 解剖分离前肠, 取中段 2 cm 肠段, 4%多聚甲醛固定, 常规脱水、石蜡包埋、切片(5 μm), 苏木精-伊红(HE)染色。采用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析系统, 测量绒毛高度、隐窝深度, 计算绒隐比(绒毛高度/隐窝深度), 每个样本随机选取 10 个完整肠绒毛进行测定[4]。

1.3.3. 攻毒抗病试验

试验结束后, 每个重复取 30 尾健康鱼, 腹腔注射 1×10^7 CFU/mL 嗜水气单胞菌菌液 0.2 mL/尾, 对照组注射等量无菌生理盐水。攻毒后继续原养殖管理, 观察 14 d, 记录每日死亡数量, 计算累计死亡率与存活率[5]:

$$\text{存活率}(\%) = \frac{\text{攻毒后存活数}}{\text{攻毒总数}} \times 100\%$$

1.4. 数据处理

试验数据采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), Duncan 氏多重比较检验组间差异显著性, $P < 0.05$ 为差异显著, 结果以“平均值 \pm 标准差”表示。

2. 结果与分析

2.1. 生长性能

复合益生菌对吉富罗非鱼生长性能的影响见表 1。

由表 1 可知, 各组初始体重无显著差异($P > 0.05$), 试验具有可比性。益生菌组终末体重、增重率、特定生长率均显著高于对照组与抗生素组($P < 0.05$), 较对照组分别提升 15.94%、23.56%、19.47%; 饲料系数显著降低($P < 0.05$), 较对照组降低 12.73%, 较抗生素组降低 4.64%。抗生素组生长性能优于对照组, 但低于益生菌组, 表明复合益生菌促生长效果优于抗生素[6]。

Table 1. Effect of compound probiotics on the growth performance of *Oreochromis niloticus***表 1.** 复合益生菌对吉富罗非鱼生长性能的影响

组别	初始体重/g	终末体重/g	增重率/%	特定增长率/(%/d)	饲料系数
对照组	25.2 ± 1.31	78.56 ± 3.24 ^c	210.74 ± 8.65 ^c	1.71 ± 0.06 ^c	1.65 ± 0.07 ^a
抗生素组	25.35 ± 1.28	85.42 ± 3.57 ^b	237.06 ± 9.12 ^b	1.85 ± 0.07 ^b	1.51 ± 0.06 ^b
益生菌组	25.31 ± 1.29	91.08 ± 3.86 ^a	260.38 ± 9.76 ^a	2.04 ± 0.08 ^a	1.44 ± 0.05 ^c

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2. 免疫与抗氧化指标

复合益生菌对吉富罗非鱼血清免疫与抗氧化指标的影响见表 2。

Table 2. Effects of compound probiotics on serum immune and antioxidant indicators in *Oreochromis niloticus***表 2.** 复合益生菌对吉富罗非鱼血清免疫与抗氧化指标的影响

组别	溶菌酶/(U/mL)	补体 C3/(mg/mL)	超氧化物歧化酶/(U/mg)	丙二醛/(nmol/mg)
对照组	32.45 ± 2.16 ^c	0.78 ± 0.05 ^c	68.36 ± 4.25 ^c	7.65 ± 0.48 ^a
抗生素组	38.72 ± 2.58 ^b	0.92 ± 0.06 ^b	79.54 ± 5.16 ^b	6.12 ± 0.39 ^b
益生菌组	45.69 ± 3.02 ^a	1.07 ± 0.07 ^a	92.37 ± 5.84 ^a	5.23 ± 0.32 ^c

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

由表 2 可知, 益生菌组溶菌酶、补体 C3、超氧化物歧化酶活性显著高于抗生素组($P < 0.05$), 较抗生素组分别提升 17.99%、16.30%、16.13%; 丙二醛含量显著降低($P < 0.05$), 较抗生素组降低 31.58%。抗生素组免疫与抗氧化指标优于对照组, 但弱于益生菌组, 表明益生菌可增强非特异性免疫与抗氧化能力, 效果优于抗生素, 且无抗生素残留风险[7]。

2.3. 肠道形态

复合益生菌对吉富罗非鱼肠道形态的影响见表 3。

Table 3. Effect of compound probiotics on intestinal morphology of *Oreochromis niloticus***表 3.** 复合益生菌对吉富罗非鱼肠道形态的影响

组别	绒毛高度/ μm	隐窝深度/ μm	绒隐比
对照组	312.45 ± 18.62 ^c	82.36 ± 5.17 ^a	3.79 ± 0.21 ^c
抗生素组	356.78 ± 21.35 ^b	76.54 ± 4.82 ^b	4.66 ± 0.25 ^b
益生菌组	401.23 ± 24.16 ^a	69.87 ± 4.36 ^c	5.74 ± 0.31 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

由表 3 可知, 益生菌组前肠绒毛高度、绒隐比显著高于抗生素组($P < 0.05$), 较抗生素组分别提升 12.46%、23.18%; 隐窝深度显著降低($P < 0.05$), 较抗生素组降低 8.71%。对照组绒毛高度最低、隐窝深度最深、绒隐比最小。表明益生菌可改善肠道结构, 增强营养吸收与肠道屏障功能, 为生长与免疫提升提供结构基础[8]。

2.4. 攻毒抗病效果

攻毒 14 d 后, 各组累计死亡率与存活率见表 4。

Table 4. Cumulative mortality and survival rate of each group**表 4.** 各组累计死亡率与存活率

组别	累计死亡率/%	存活率/%
对照组	55.56	44.44
抗生素组	31.11	68.89
益生菌组	17.78	82.22

注：同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

由表 4 可知, 对照组累计死亡率最高, 益生菌组累计死亡率最低。益生菌组存活率达 82.22%, 较抗生素组提高 13.33 个百分点($P < 0.05$), 较对照组提高 37.78 个百分点。表明益生菌对细菌性疾病防控效果优于抗生素, 可显著提升罗非鱼抗病力, 为水产养殖病害绿色防控提供可行方案[9]。

3. 讨论

3.1. 益生菌对生长性能的调控

复合益生菌可通过多种途径促进鱼类生长: 一是分泌淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶等消化酶, 提升饲料消化率, 促进营养物质吸收[10]; 二是优化肠道菌群结构, 抑制大肠杆菌、沙门氏菌等耗氧致病菌增殖, 减少肠道营养消耗与毒素产生; 三是改善肠道形态, 增加绒毛高度、降低隐窝深度, 扩大营养吸收面积。本试验中, 益生菌组增重率、特定生长率显著高于抗生素组, 饲料系数显著降低, 与前人研究结果一致。抗生素虽在短期内可抑制肠道有害菌, 但长期使用会破坏肠道菌群平衡, 导致消化功能下降, 而复合益生菌可稳定维持肠道微生态平衡, 实现持续促生长效果。

3.2. 益生菌对免疫与抗氧化的提升

鱼类非特异性免疫是抵御病原入侵的第一道防线, 溶菌酶、补体 C3 是关键免疫因子, 可直接裂解病原菌、激活补体系统; 超氧化物歧化酶是重要抗氧化酶, 可清除体内自由基, 丙二醛是脂质过氧化产物, 其含量反映氧化应激程度。本研究中, 益生菌组溶菌酶、补体 C3、超氧化物歧化酶活性显著高于抗生素组, 丙二醛含量显著降低, 表明益生菌可通过激活 TLR/MyD88 信号通路, 促进免疫器官发育与免疫因子表达, 同时提升抗氧化酶活性, 减轻氧化应激损伤[11]。抗生素虽能抑制病原菌, 但会抑制免疫细胞增殖, 长期使用导致免疫功能下降, 而益生菌可安全高效地增强免疫与抗氧化能力, 避免抗生素的副作用[12]。

3.3. 益生菌对肠道健康与抗病力的改善

肠道是鱼类营养吸收与免疫防御的核心器官, 肠道形态完整、菌群平衡是维持健康的关键[13]。益生菌通过竞争性排斥、分泌有机酸与细菌素, 抑制嗜水气单胞菌等病原菌定植; 同时增厚肠壁、增高绒毛、强化肠道屏障, 减少病原入侵。本试验中, 益生菌组肠道形态显著优于抗生素组, 攻毒存活率显著提高, 表明益生菌可通过改善肠道健康增强抗病力。与抗生素相比, 益生菌无耐药性与残留风险, 符合水产养殖绿色发展要求, 是替代抗生素的理想选择[14]。

3.4. 研究局限性与成本效益展望

本研究在受控实验室循环水条件下开展, 养殖环境、水质稳定度、病原压力与密度等因子均不同于实际池塘、工厂化循环水等生产场景; 实际生产中水温、溶氧、养殖密度、投喂管理、水体菌相波动等因素, 均可能影响益生菌定植效率与作用效果, 相关结论在规模化养殖中的稳定性仍需进一步验证。本试验仅设置单一益生菌添加剂量与单一菌株配比, 未开展剂量梯度、配伍优化及长期养殖周期跟踪, 不同

水温、盐度、饲料配方下的适用效果与作用机制仍有待系统研究。

从成本效益初步分析, 本试验所用复合益生菌制剂在当前市场价格下, 单位饲料添加成本略高于常规氟苯尼考预混剂, 但可避免抗生素残留、耐药性风险与水产品药残超标隐患, 符合绿色养殖政策导向。随着菌株发酵工艺优化、复配技术升级与规模化生产推进, 益生菌制剂成本具备持续下降空间; 结合其在提升生长效率、降低死亡率、提高养殖成活率与产品安全性方面的综合收益, 长期使用可降低病害防控成本、提升养殖综合效益。未来应开展多地点、多模式、全养殖周期试验, 结合经济效益核算, 形成可落地的无抗养殖精准施用方案, 为产业推广提供更全面的技术依据。

4. 结论

饲料中添加 1×10^9 CFU/kg 复合益生菌(枯草芽孢杆菌 + 地衣芽孢杆菌 + 丁酸梭菌), 可显著提升吉富罗非鱼生长性能、非特异性免疫功能与抗氧化能力, 改善肠道形态结构, 并提高嗜水气单胞菌攻毒后存活率, 整体效果优于本试验条件下的氟苯尼考添加组。本结果表明, 该复合益生菌在吉富罗非鱼养殖中显示出作为抗生素替代品的巨大潜力, 可为水产无抗养殖与绿色病害防控提供数据支撑与技术参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水产行业标准 SC/T 0004-2006 水产养殖质量安全管理规范[J]. 农业质量标准, 2007(4): 38-43.
- [2] 钟伟娟, 龚辰, 黄坤明, 等. 功能性肠道益生菌在罗非鱼养殖业中的应用研究进展[J]. 水产学报, 2025, 49(10): 231-246.
- [3] 夏汉钦. 活性和热灭活益生菌对斜带石斑鱼生长性能、肠道菌群和免疫基因表达的影响[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 集美大学, 2013.
- [4] 黄祎阳. 益生菌在鱼类养殖中的研究进展[J]. 中国饲料, 2023(18): 5-8.
- [5] 牛琼. TRPA1 在低温及嗜水气单胞菌胁迫下尼罗罗非鱼肠道中的功能分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2025.
- [6] 赖凯昭. 饲料中添加复合益生菌对罗非鱼生长性能、肠道蛋白酶活性和饲料消化率的影响[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [7] 张德锋, 高艳侠, 可小丽, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 LF01 基因组序列分析及其代谢产物的生防作用[J]. 水产学报, 2022, 46(2): 196-206.
- [8] 张美玲, 单承杰, 杜震宇. 益生菌与鱼类肠道健康研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(1): 147-157.
- [9] 吴迎. 抗生素对动物代谢的影响及替抗益生菌的筛选与抗感染功效研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [10] 李晓晨, 郭欣硕. 益生菌在鱼类养殖中的选择标准及应用探讨[J]. 养殖与饲料, 2023, 22(11): 50-53.
- [11] 温俊. 复合益生菌与酵母培养物对牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)生长、免疫及抗病力的影响[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [12] 王浩伊. 复合益生菌对半滑舌鳎生长性能、免疫指标及肠道菌群结构的影响[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津农学院, 2019.
- [13] 傅玲琳, 励建荣, 李学鹏. 水产益生菌的筛选鉴定及其对罗非鱼肠道特定微生物菌群的影响[C]//中国工程院. 中国工程院第 77 场工程科技论坛·2008 水产科技论坛——渔业现代化与可持续发展论文集. 北京: 海洋出版社, 2008: 295-301.
- [14] 刘陈立, 邓登, 崔金明, 等. Nisin 替代抗生素用于水产高效生态养殖的关键技术研发[EB/OL]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=J6dHN9cz2Tsg1YzQyDFx4K_ZwEZfGoa4NEUJaiiknVbtDekmuy0gLSr8mmnXPHj0qwV-VoK1w63t1fOcBdMyZ6lXcHTMGKUB1pWiQ626SODj8uxKxzdvcmMKcu1GRqbj8-yLQfYXrqIrkrmY6stlT-DPzoVGntIHv6rCkbV9d2J-mZiwOHFMw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2019-04-25.