

沈学怀, 赵瑞宏, 尹磊, 等. 单月桂酸甘油酯对雏鸡沙门菌感染的保护效应及肠道屏障调控 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (10): 50–60.
Shen X H, Zhao R H, Yin L, et al. Protective effects of glycerol monolaurate against *Salmonella* infection and intestinal barrier modulation in chicks [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (10): 50–60.

单月桂酸甘油酯对雏鸡沙门菌感染的保护效应及肠道屏障调控

沈学怀^{1,2,3}, 赵瑞宏^{1,3}, 尹磊^{1,3}, 侯宏艳^{1,3}, 戴银^{1,3}, 胡晓苗^{1,3},
殷冬冬^{1,3}, 王洁茹^{1,3}, 潘孝成^{1,3}, 周学利^{1,3}, 刘永杰^{2*}
(1. 安徽省农业科学院畜牧兽医研究所/安徽省畜禽产品安全重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 南京农业大学动物医学院, 江苏 南京 210014;
3. 安徽省农业科学院畜禽疫病防控技术研发中心, 安徽 合肥 230031)

摘要: 单月桂酸甘油酯 (GML) 是具有多种生物学功能的添加剂, 本试验旨在研究 GML 对雏鸡健康以及在防控肠炎沙门菌 (*Salmonella* Enteritidis, SE) 感染中的作用。将 2 日龄 SPF 雏鸡随机分为 4 组, 其中对照组饲喂基础饲料, GML 和 SE+GML 组在饲料中添加 0.3% GML, SE+GML 和 SE 组在 7 日龄进行 SE 人工感染, 测定雏鸡体重、器官指数、血液生化与免疫指标、肠道结构及微生物菌群。结果显示: SE 组雏鸡体重显著低于其他试验组 ($P<0.05$), 而 GML 和 SE+GML 组增重均不同程度高于对照组。SE 组雏鸡肠道指数显著降低 ($P<0.05$), GML 添加可提高健康和 SE 感染雏鸡的肠道指数。与对照组相比, GML 组雏鸡血清丙二醛 (MDA)、乳酸脱氢酶 (LDH) 和天门冬氨酸氨基转移酶 (AST) 含量均显著降低 ($P<0.05$), 过氧化氢酶 (CAT) 的水平升高 ($P<0.05$), SE+GML 组血清 MDA、LDH 和 AST 水平均显著低于 SE 组 ($P<0.05$)。与对照组相比, GML 组白介素 6 (IL-6) 水平显著降低 ($P<0.05$), SE+GML 组雏鸡血清中髓过氧化物酶 (MPO)、肿瘤坏死因子 α (TNF- α) 和干扰素 γ (IFN- γ) 含量均低于 SE 组。与对照组相比, GML 组雏鸡肠道绒毛高度显著升高 ($P<0.01$); SE+GML 组绒毛高度和绒毛比均显著高于 SE 组 ($P<0.05$)。0.3% GML 添加显著提高健康雏鸡和感染雏鸡肠道有益菌毛螺菌科 NK4A136 群 (*Lachnospiraceae*_NK4A136_group) 和沙特尔沃思菌属 (*Shuttleworthia*) 的相对丰度 ($P<0.05$), 降低瘤胃球菌属 troques 群 (*Ruminococcus*_torques_group) 的相对丰度 ($P<0.05$)。综上, 饲料中添加 0.3% GML 可促进雏鸡生长和抗氧化能力, 显著缓解 SE 感染雏鸡造成的体重降低、应激损伤和炎性因子变化, 并通过调节雏鸡的肠道结构和菌群改善机体健康。

关键词: 单月桂酸甘油酯; 肠炎沙门菌; 生长性能; 血液生化; 肠道微生物; 感染防控

中图分类号: S831 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2026)10-0050-11

Protective effects of glycerol monolaurate against *Salmonella* infection and intestinal barrier modulation in chicks

SHEN Xuehuai^{1,2,3}, ZHAO Ruihong^{1,3}, YIN Lei^{1,3}, HOU Hongyan^{1,3}, DAI Yin^{1,3}, HU Xiaomiao^{1,3},
YIN Dongdong^{1,3}, WANG Jierui^{1,3}, PAN Xiaocheng^{1,3}, ZHOU Xueli^{1,3}, LIU Yongjie^{2*}

(1. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Science, Anhui Academy of Agricultural Science/Anhui Province Key Laboratory of Livestock and Poultry Product Safety, Hefei 230031, China;
2. College of Veterinary Medicine, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China;
3. Research and Development Center of Livestock and Poultry Disease Prevention and Control Technology, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Glycerol monolaurate (GML) is a feed additive with multiple biological functions. This experiment aimed to study the effects of GML on chick health and its role in preventing and controlling *Salmonella* Enteritidis (SE) infection. Two-day-old SPF chicks were obtained and randomly divided into four groups; the control group was fed with a basal diet, the GML group and the SE+GML group had 0.3% GML added to their diet, and the SE+GML group and the SE group were artificially infected with SE at 7 days of age. Then, growth performance, organ indices, blood biochemistry and immune indices, intestinal structure, and microbial flora of the chicks were measured. The results

收稿日期: 2025-10-09; 修回日期: 2026-08-03
基金项目: 国家蛋鸡产业技术体系项目 (CARS-39); 安徽省农业科学院立科研计划项目 (2026YL037); 农业农村部滁州野外综合科学观测站项目 (MARA-ORS046-AH007, 2026YL084); 安徽省家禽产业技术体系项目 (AHCYJSTX-06)
第一作者: 沈学怀, 男, 博士, 副研究员
* 通信作者: 刘永杰, 教授, 研究方向为动物病原微生物, E-mail: liuyongjie@njau.edu.cn。

showed that the body weight of the chicks in the SE group was significantly lower than that in the other groups ($P<0.05$), while the weight gain in the GML group and the SE+GML group was higher than that in the control group. The intestinal index of the chicks in the SE group was significantly reduced ($P<0.05$), and GML addition increased the intestinal index of healthy and SE-infected chicks. Compared with the control group, the serum MDA, LDH, and AST contents in the GML group were significantly decreased ($P<0.05$), the level of CAT was increased ($P<0.05$); and the serum MDA, LDH, and AST levels in the SE+GML group were significantly lower than those in the SE group ($P<0.05$). Compared with the control group, the IL-6 level in the GML group was significantly decreased ($P<0.05$); the contents of MPO, TNF- α , and IFN- γ in the serum of chicks in the SE+GML group were lower than those in the SE group. Compared with the control group, the intestinal villus height of the chicks in the GML group was significantly increased ($P<0.01$), and the villus height and villus-to-crypt ratio in the SE+GML group were significantly higher than those in the SE group ($P<0.05$). SE infection led to a significant increase in the relative abundance of the [*Ruminococcus*] _torques_group in the chick intestine ($P<0.05$), and 0.3% GML addition significantly increased the relative abundance of beneficial bacteria in the *Lachnospiraceae*_NK4A136_group and *Shuttleworthia* in the intestines of healthy and infected chicks ($P<0.05$), and decreased the relative abundance of the [*Ruminococcus*] _torques_group ($P<0.05$). In conclusion, adding 0.3% GML to the diet promoted the growth and antioxidant capacity of chicks, significantly alleviated the reduction in their body weight, stress injury, and inflammatory factor changes caused by SE infection, and improved the health of the body by regulating the intestinal structure and microbial flora of the chicks.

Keywords: glycerol monolaurate; *Salmonella* Enteritidis; growth performance; blood biochemistry; intestinal microorganisms; infection prevention and control

单月桂酸甘油酯 (GML), 也称作十二酸单甘油酯, 是一种中链脂肪酸酯类物质, 化学式为 $C_{15}H_{30}O_4$, 天然存在于母乳、椰子油和棕榈仁油等多种物质中^[1]。GML 已获得相关机构认可, 可作为安全的食品乳化剂使用, 即便在较高的剂量下使用, 也不会产生食品安全的风险^[2]。研究发现, GML 可以抵抗多种病原菌, 其通过多种机制发挥抗菌作用, 包括破坏细胞膜和细胞壁、抑制生物被膜形成、调节细胞内离子平衡等, 其抗菌效果广泛, 且不易导致耐药性^[3]。对于细胞壁含脂寡糖的革兰阴性菌, 如空肠弯曲杆菌、幽门螺杆菌、嗜血杆菌等, GML 能轻松穿过其细胞壁并与生物膜结合, 从而发挥较强的抑制效果^[4]。已有研究报道 GML 在畜禽生产上的应用, 如在麻黄鸡饲料中添加 GML, 可显著提高仔鸡的平均日增重, 提高血清免疫球蛋白 IgM 和 IgA 含量, 提高肠道紧密连接蛋白的表达^[5]; 在 1 日龄雏鸡饲料中添加 GML, 可显著提高采食量, 增加血清 IgG 和抗氧化能力, 降低白介素 1 β (IL-1 β)、肿瘤坏死因子 α (TNF- α) 和丙二醛 (MDA) 的含量, 同时对肠道微生物菌群有显著的调控作用^[6]。

沙门菌是导致人和动物感染最常见的人畜共患病原体之一, 由多种血清型组成, 目前已发现 2 600 多个血清型^[7]。禽类是沙门菌的天然宿主, 并可同时通过水平和垂直方式在禽群中传播^[8]。鸡感染沙门菌不仅可以造成鸡的感染发病, 还可以通过肉蛋产品传染给人类, 不仅给养鸡产业造成巨大的经济损失, 还会持续威胁食品和公共卫生安全^[9]。鸡源沙门菌的优势流行血清型是肠炎沙门菌 (*Salmonella* Enteritidis, SE), 其也是造成食品安全风险和人类感染频率最

高的血清型^[10]。有报道称, 浓度大于 0.156 mg/mL 的 GML 对沙门菌的生长有明显抑制作用^[11]。Chen 等^[12]发现, 0.5% GML 和 0.025% 乳酸制备的复合杀菌剂可以有效杀灭鸡肉中的沙门菌和抑制细菌生物被膜的形成。目前, 关于 GML 应用于养鸡生产中的沙门菌感染防控鲜有报道。本研究通过在雏鸡饲料中添加 GML, 综合评价其对雏鸡生长和生化、免疫指标的影响及其在肠炎沙门菌感染中的防控作用。

1 材料与方法

1.1 试验动物、单月桂酸甘油酯和菌株

80 只 2 日龄 SPF 雏鸡, 由本研究室采购自济南鑫盛达生物工程有限公司的 SPF 种蛋并进行孵化和常规饲养; GML 购自安徽万士生物制药有限公司; SE 菌株 CVCC3377 购自中国兽医微生物菌种保藏管理中心, 常规 LB 培养基传代培养, 采用含 25% 甘油冻存液进行冻存。

1.2 主要试剂

MDA、乳酸脱氢酶 (LDH)、过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、总抗氧化能力 (T-AOC)、丙氨酸氨基转移酶 (ALT)、天门冬氨酸氨基转移酶 (AST) 检测试剂盒购自中国南京建成生物工程研究所; 髓过氧化物酶 (MPO)、免疫球蛋白 A (IgA)、TNF- α 、干扰素- γ (IFN- γ)、白介素 2 (IL-2) 和白介素 6 (IL-6) 检测试剂盒购自武汉基因美生物科技有限公司; 蛋白浓度测定试剂盒为上海碧云天生物技术公司产品; 苏木精-伊红 (HE) 组织染色试剂盒购自中国珠海贝索生物技术有限公司。

1.3 动物分组与饲喂

将 80 只 2 日龄雏鸡分为 4 组, 分别为 SE 组、

SE+GML 组、GML 组和对照组（Con 组），每组 20 只。在 SE+GML 组和 GML 组雏鸡饲料中按 0.3% 的比例加入 GML，从雏鸡 2 日龄开始饲喂，SE 组和对照组饲喂基础雏鸡饲料，饲喂 5 d 后（7 日龄）对 SE 组和 SE+GML 组雏鸡通过口服途径接种 CVCC3377，剂量为 1×10^8 CFU/只，GML 组和对照组口服接种同等量的生理盐水。接毒后继续饲喂，对各组雏鸡进行称重，在接毒后 5 d（12 日龄）每组宰杀 10 只试验鸡采血、取样用于测定指标。

1.4 器官指数测定

在试验期结束时，称量鸡体重，并分别采集各组 10 只试验鸡的内脏器官进行称重，器官包括心脏、肝脏、脾脏、胃（腺胃和肌胃）、肠道、肾脏、胰腺、法氏囊和胸腺等，使用电子秤（精度为 0.001 g）进行称重，计算器官指数（器官重量/体重 $\times$ 100%）。采用卷尺（精度为 0.1 cm）测量肠道总长和盲肠长度。

1.5 生化与免疫指标测定

采集的血液样品经 5 000 g 离心 5 min 收集血清，血清样本中的 MDA、LDH、ALT、AST、SOD、CAT 和 T-AOC 活性测定以及组织样品蛋白浓度测定使用商品试剂盒进行检测。血清样本中 TNF- α 、IL-2、MPO、IL-6 和 INF- γ 含量使用 ELISA 试剂盒进行检测。所有指标测定均按照试剂盒说明书进行操作和结果判定。

1.6 组织的病理学观察

每组鸡的空肠组织在 4%多聚甲醛组织固定液中固定 24 h，然后进行石蜡包埋，使用切片机将包埋样品切片获得 4 μ m 厚的切片样本，并用 HE 组织染色试剂盒染色。具体染色操作方法参照试剂盒说明书操作。组织切片在显微镜下观察（100 $\times$ ），细胞核染成

蓝色，细胞质染成红色。使用 CaseViever 软件（3DHISTECH）测量肠绒毛高度和肠隐窝深度，并计算绒毛比。

1.7 肠道菌群分析

收集所有试验鸡的盲肠内容物并在-80 $^{\circ}$ C 冻存。检测前将每组盲肠内容物样品进行四混一制备混样，每组测定 5 个混合样品，根据制造商说明书（赛默飞世尔科技）提取总 DNA，并于-80 $^{\circ}$ C 冻存备用。对提取的总 DNA 进行 16S rRNA V3-V4 区域的 PCR 扩增、文库测序和生物信息学分析，盲肠菌群的扩增、测序和生信分析委托上海欧易生物医学科技有限公司完成。

1.8 数据统计和分析

使用 Microsoft Office Excel 2010 对数据进行初步处理，采用 SPSS v16.0 软件的单因素方差分析进行组间差异统计分析，采用 GraphPad Prism 8 软件进行数据图制作。数据以“平均值 $\pm$ 标准误”表示。

2 结果

2.1 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡体重的影响

各处理组雏鸡体重变化如表 1 所示，雏鸡初重（2 日龄）预处理期和攻毒时（7 日龄）各组雏鸡体重均无差异；在试验末重（12 日龄），SE 组雏鸡体重显著低于对照组（ $P<0.01$ ），GML 组体重显著高于对照组和 SE 组（ $P<0.05$ ），SE+GML 组雏鸡体重显著高于 SE 组（ $P<0.05$ ），但与对照组和 GML 组无显著差异；试验期总增重分析显示，SE 组显著低于对照组、GML 组和 SE+GML 组（ $P<0.05$ ），GML 组和 SE+GML 组增重均高于对照组，但差异不显著（ $P>0.05$ ）。

表 1 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡体重的影响 g

项目	对照组	SE 组	GML 组	SE+GML 组
初重	42.00 $\pm$ 0.60	43.00 $\pm$ 0.75	42.78 $\pm$ 0.68	42.46 $\pm$ 1.03
攻毒时体重	75.28 $\pm$ 1.40	74.86 $\pm$ 1.26	75.36 $\pm$ 1.39	75.64 $\pm$ 0.96
末重	102.00 $\pm$ 1.91 ^b	91.63 $\pm$ 2.35 ^c	110.75 $\pm$ 2.70 ^a	107.75 $\pm$ 2.20 ^{ab}
总增重	61.25 $\pm$ 2.06 ^a	48.50 $\pm$ 2.83 ^b	67.12 $\pm$ 3.03 ^a	64.87 $\pm$ 2.11 ^a

注：同行比较，肩标无字母或字母相同表示差异不显著（ $P>0.05$ ），不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

2.2 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡器官指数的影响

各组处理雏鸡组织器官指数统计结果见表 2。各试验组雏鸡在心脏、法氏囊、胃、胰腺和盲肠指数方面均无显著变化（ $P>0.05$ ）；SE 组与 SE+GML 组的肝脏指数显著高于对照组和 GML 组（ $P<0.05$ ），GML 组的肝脏指数高于对照组，但差异不显著（ $P>$

0.05）；GML 组的脾脏指数低于其他处理组，而 SE 组的则高于其他组，这两组之间差异显著（ $P<0.05$ ）；GML 添加可提高健康和 SE 感染雏鸡的肠道指数，SE 组雏鸡肠道指数显著低于 GML 组和 SE+GML 组（ $P<0.05$ ）。上述结果表明，SE 感染导致雏鸡肝脏和肠道指数的异常，而 GML 添加可部分逆转 SE 感染导致的组织器官指数的变化。

表 2 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡器官指数的影响 %

器官指数	对照组	SE 组	GML 组	SE+GML 组
心脏	0.68±0.01	0.72±0.04	0.69±0.03	0.70±0.03
肝脏	2.89±0.06 ^b	3.16±0.08 ^a	2.93±0.05 ^b	3.15±0.06 ^a
脾脏	0.12±0.02 ^{ab}	0.14±0.02 ^a	0.09±0.01 ^b	0.12±0.01 ^{ab}
法氏囊	0.41±0.05	0.37±0.04	0.42±0.03	0.40±0.03
肌胃和腺胃	5.60±0.20	5.60±0.27	5.65±0.16	5.65±0.19
总肠道	7.61±0.18 ^{ab}	6.93±0.32 ^b	7.97±0.31 ^a	7.97±0.39 ^a
胰腺	0.52±0.05	0.45±0.03	0.50±0.27	0.49±0.02
盲肠	1.02±0.09	1.02±0.10	0.94±0.13	1.16±0.16

2.3 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡血液生化指标的影响

各试验组雏鸡血清生化指标检测结果如表 3 所示。与对照组相比，SE 组的血液应激损伤指标 MDA、ALT 和 AST 的含量均显著提高 ($P<0.05$)；GML 组雏鸡血清 MDA、LDH、ALT 和 AST 的含量均低于对照组，其中 MDA、LDH 和 AST 差异显著 ($P<0.05$)；与 SE 组相比，SE+GML 组血清 MDA、LDH、ALT 和 AST 含量均降低，其中 MDA、LDH 和 AST 的水平达到显著水平 ($P<0.05$)，并且这 4 项指标与对照组均无显著差异 ($P>0.05$)。在机体抗氧化指标方

面，SE 组血清 CAT、SOD 和 T-AOC 的含量较对照组均有所降低，但差异不显著 ($P>0.05$)；GML 组血清 CAT、SOD 和 T-AOC 的含量较对照组均有所升高，其中 CAT 的含量达显著水平 ($P<0.05$)；SE+GML 组血清 CAT、SOD 和 T-AOC 的含量较 SE 组均有不同程度的升高，其中 T-AOC 含量达显著水平 ($P<0.05$)，这 3 项指标与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。结果表明，SE 感染造成雏鸡的应激损伤，降低机体的抗氧化能力；GML 饲喂可以降低机体的氧化损伤，提高抗氧化能力，并有效降低因 SE 感染造成的应激损伤。

表 3 GML 添加对雏鸡血液生化指标的影响

指标	对照组	SE 组	GML 组	SE+GML 组
MDA/ (nmol · mL ⁻¹)	14.09±0.73 ^b	22.57±1.04 ^a	5.17±0.96 ^c	17.43±1.63 ^b
LDH/ (U · L ⁻¹)	328.07±15.87 ^{ab}	370.02±14.09 ^a	210.00±21.08 ^d	305.09±16.30 ^b
ALT/ (U · L ⁻¹)	8.39±1.81 ^{bc}	13.95±1.86 ^a	5.25±0.69 ^c	10.87±1.56 ^{ab}
AST/ (U · L ⁻¹)	19.09±1.89 ^b	25.29±1.91 ^a	14.25±0.97 ^c	18.53±1.09 ^{bc}
SOD/ (U · mL ⁻¹)	19.10±0.29 ^{ab}	18.87±0.25 ^b	19.94±0.24 ^a	19.01±0.40 ^b
CAT/ (U · mL ⁻¹)	4.71±0.35 ^b	3.61±0.27 ^b	6.78±0.59 ^a	4.67±0.55 ^b
T-AOC/ (mmol · L ⁻¹)	0.54±0.02 ^{ab}	0.51±0.01 ^b	0.58±0.01 ^a	0.55±0.01 ^a

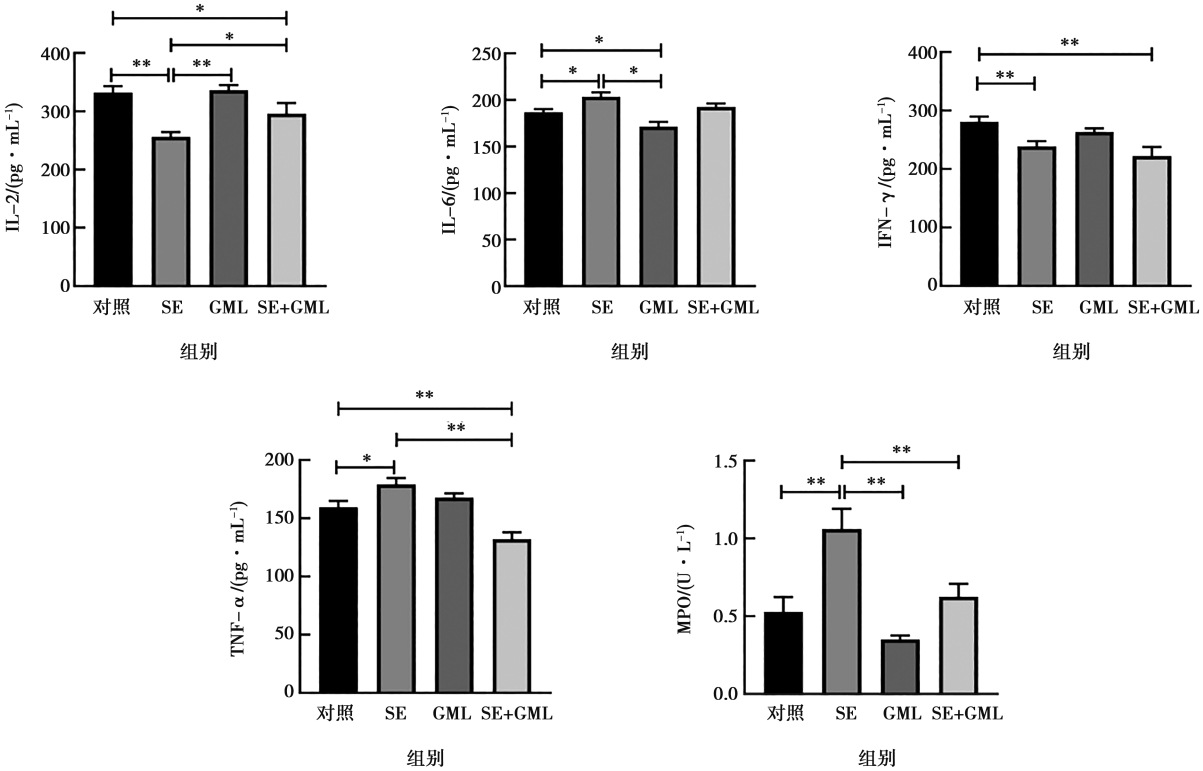
2.4 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡血液免疫指标的影响

结果如图 1 所示。与对照组相比，SE 组雏鸡血清 IL-2 的水平显著降低 ($P<0.01$)，IL-6 和 MPO 含量显著升高 ($P<0.05$ 和 $P<0.01$)；GML 组血清 IL-6 和 MPO 水平与对照组相比降低，其中 IL-6 水平差异显著 ($P<0.05$)；与 SE 组相比，SE+GML 组雏鸡血清中 IL-6 和 MPO 水平降低，其中 MPO 水平差异显著 ($P<0.01$)，而 IL-2 的水平显著升高 ($P<0.05$)。与对照组相比，SE 组 IFN- γ 的含量显著降低 ($P<0.01$)，而 TNF- α 含量显著升高 ($P<0.05$)；GML 组的 IFN- γ 和 TNF- α 含量与对照组相比无显著差异；SE+GML 组 TNF- α 和 IFN- γ 含量显著低于对

照组和 SE 组 ($P<0.01$)。结果表明，雏鸡感染 SE 导致细胞因子水平发生改变，而 GML 的添加可以缓解因感染导致的细胞因子水平的变化。

2.5 GML 添加对雏鸡肠道结构的影响

空肠组织切片 HE 染色和统计结果显示 (图 2，图 3)，与对照组相比，GML 组雏鸡肠道绒毛高度显著升高 ($P<0.01$)，SE 组肠绒毛高度显著降低 ($P<0.01$)，并出现肠绒毛结构的破坏和肠道隐窝深度的增加 ($P<0.05$)。与 SE 组相比，SE+GML 组肠绒毛结构完整，肠绒毛高度和绒隐比均显著提高 ($P<0.01$ 和 $P<0.05$)。结果表明，GML 添加可以改善雏鸡肠道健康，并显著缓解 SE 感染导致的肠道结果损伤。



注：* 表示 $P<0.05$ ，** 表示 $P<0.01$ 。下同。

图 1 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡血液免疫指标的影响

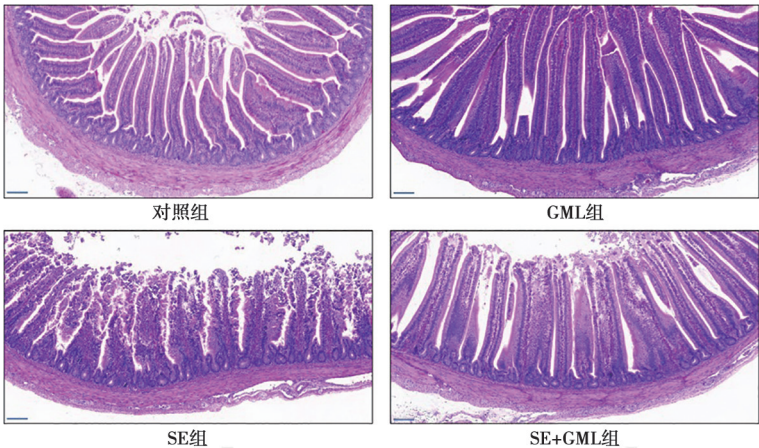


图 2 空肠的组织病理学检查 (HE 染色, 比例尺=100 μm)

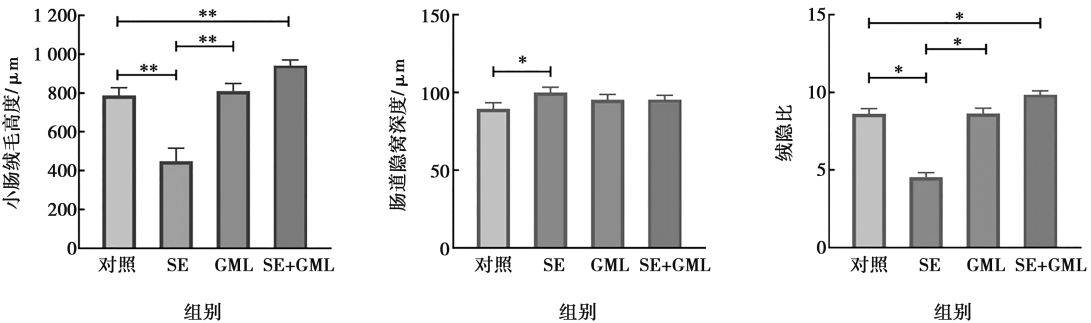


图 3 GML 添加对健康和感染 SE 雏鸡肠道结构的影响

2.6 GML 添加对雏鸡肠道菌群的影响

采集各试验组雏鸡盲肠内容物进行 16S rRNA 高通量测序。结果显示，与对照组相比，各试验组雏鸡肠道微生物菌群在 α 多样性（组内样品多样性）存在显著差异，其中 SE 组的 α -多样性 Shannon 指数最高，表明沙门菌接种对雏鸡的肠道菌群产生了明显的扰动；而 GML 组和 SE+GML 组的组内样品多样性较低。 β 多样性分析显示，不同处理组之间肠道菌群结构存在显著的聚类，表明各处理组对雏鸡肠道的菌群结构产生明显的影响（图 4）。差异菌群分析显示见表 4，厚壁菌门、变形菌门和拟杆菌门是雏鸡肠道菌群的主要门类。在门水平上，与对照组相比，SE 在厚壁菌门的相对丰度显著升高（ $P<0.05$ ），而变形菌门的相对丰度显著降低（ $P<0.05$ ）；SE+GML 组较 SE 组虽然有一定的逆转作用，但差异不显著（ $P>0.05$ ）；GML 组在门水平的菌群结构上与对照组相似。

在肠道微生物属水平上分析结果如图 5 所示，与对照组相比，GML 组的肠道微生物中未培养菌属 *GCA-900066575*、毛螺菌科 NK4A136 群（*Lachnospiraceae_NK4A136_group*）和沙特尔沃思氏菌属（*Shut-*

tleworthia）的相对丰度显著升高（ $P<0.01$ ），瘤胃球菌属 *torques* 群（*[Ruminococcus]_torques_group*）的相对丰度显著降低（ $P<0.01$ ），梭菌纲 UCG-014 群（*Clostridia_UCG-014*）和埃希菌-志贺菌属（*Escherichia_Shigella*）的相对丰度无显著变化。SE 组雏鸡肠道的瘤胃球菌属 *torques* 群（*[Ruminococcus]_torques_group*）和毛螺梭菌属（*Lachnoclostridium*）的丰度显著高于对照组（ $P<0.05$ 或 $P<0.01$ ），埃希菌-志贺菌属的相对丰度则显著低于对照组和 GML 组。SE+GML 组在主要属水平的变化趋势上与 GML 组具有一致性，同时缓解沙门菌感染造成的菌群扰动，如降低了瘤胃球菌属 *torques* 群的丰度，增加了毛螺菌科 NK4A136 群、毛螺梭菌属和未培养菌属 *GCA-900066575* 的丰度，但其在梭菌纲 UCG-014 群和梭菌纲 *vadinBB60* 群（*Clostridia_vadinBB60_group*）丰度变化上表现出独特性，除此之外，GML 的添加提高了盲肠沙门菌属的相对丰度。微生物物种随机森林分析显示，瘤胃球菌属 *torques* 群、梭菌纲 *vadinBB60* 群（*Clostridia_vadinBB60_group*）、未培养菌属 *GCA-900066575*、梭菌纲 UCG-014 群和埃希菌-志贺菌属在分组差异菌群中发挥重要作用。

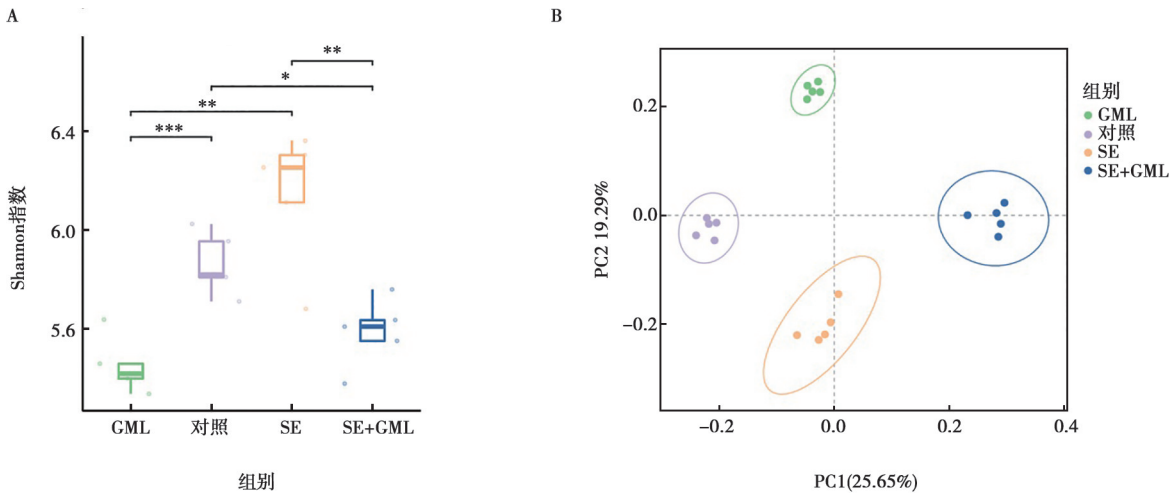


图 4 GML 对雏鸡肠道微生物菌群 α -多样性 Shannon 指数 (A) 和 β -多样性 (B) 分析

表 4 GML 对雏鸡肠道微生物菌群门水平的影响

微生物门类	对照组	SE 组	GML 组	SE+GML 组
厚壁菌门	81.72 $\pm$ 1.21 ^b	92.52 $\pm$ 4.60 ^a	81.05 $\pm$ 2.07 ^b	90.35 $\pm$ 0.31 ^a
变形菌门	18.14 $\pm$ 1.21 ^a	7.36 $\pm$ 2.62 ^b	18.78 $\pm$ 2.08 ^a	9.49 $\pm$ 0.30 ^b
拟杆菌门	0.12 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01	0.12 $\pm$ 0.03	0.11 $\pm$ 0.03

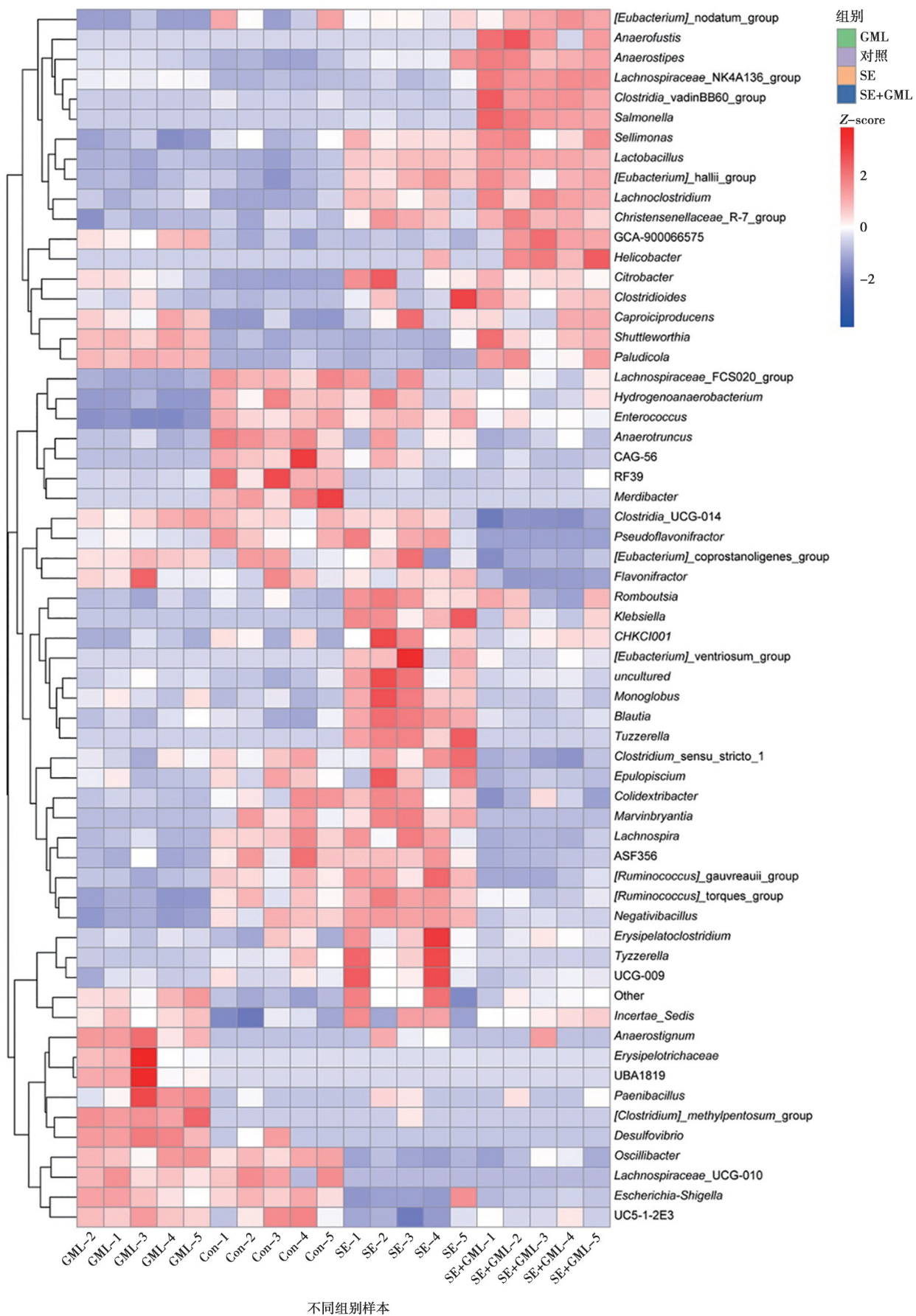


图 5 GML 对各处理组雏鸡肠道微生物差异菌属分析

PICRUSt2 功能预测显示 (图 6), SE 组在代谢途径 (metabolic pathways)、次级代谢物的生物合成 (biosynthesis of secondary metabolites)、不同环境中的微生物新陈代谢 (microbial metabolism in diverse environments)、辅助因子合成 (biosynthesis of cofactors)

和氨基酸的生物合成 (biosynthesis of amino acids) 等方面呈现异常活跃的状态, 而 GML 的使用可以降低这种异常的趋势。上述结果表明, 饲料中 GML 的添加可显著改善 SE 感染造成的雏鸡肠道菌群紊乱, 但其对肠道沙门菌的清除无益。

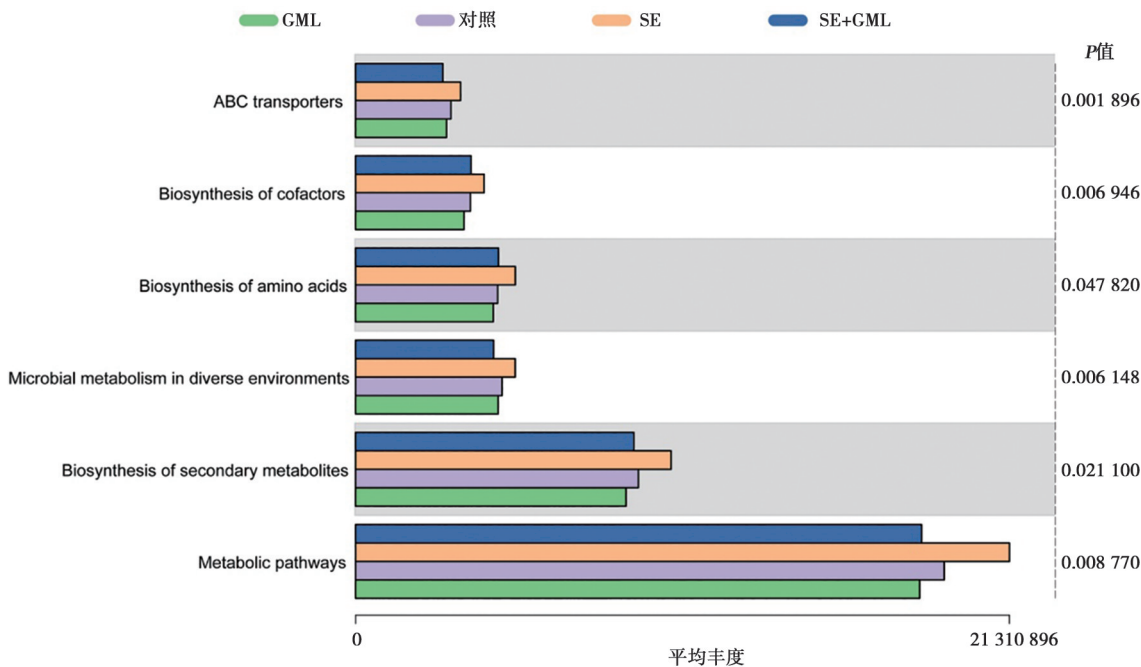


图 6 PICRUSt2 预测差异肠道微生物功能

3 讨论

SE 感染可导致雏鸡生长迟缓、病理变化, 甚至死亡^[13]。感染后存活的家禽可能成为持续性感染的宿主, 并通过消化道持续向环境中排菌, 导致交叉污染^[14]。在过去 20 年中, SE 一直是导致人类食源性沙门菌感染的主要血清型, 鸡蛋是最常见的感染传播媒介^[15]。功能性添加剂在增强动物机体健康、促进生长、调节机体免疫能力和预防疾病发生方面具有显著功效, 在畜禽生产的减抗替抗和健康生产方面具有重要作用^[16-17]。本研究综合评价 GML 在防控雏鸡 SE 感染的作用, 为功能性物质的生产应用提供研究基础。

GML 具有广谱抗菌、抗病毒、抗炎等多种生物学活性, 可作为减抗替抗的添加剂应用于畜禽生产^[18]。生长性能是评价功能性添加剂促生长作用的重要指标。研究发现, 150 mg/kg GML 饲喂可以显著提高肉鸡的饲料转化率和平均日增重, 同时提高蛋鸡的产蛋率和蛋品质^[19]。饲料中添加 GML 1 kg/t 虽然对育肥猪生长性能影响不显著, 但可以显著提高育肥猪粗蛋白、钙和总磷的表观消化率^[20]。本研究在饲

料中添加 0.3% GML 饲喂雏鸡, 显著提高雏鸡体重和总增重, 表明 GML 添加具有显著的促生长作用。在攻毒试验组中, SE 的感染可导致雏鸡的体重和增重显著降低, 这与已有的研究报道一致^[21]。本研究在雏鸡饲料中添加 0.3% GML 进行预饲喂后再进行 SE 攻毒, 结果显示, 3 种添加剂的使用均可以不同程度提高由于 SE 感染导致的体重降低, 使雏鸡体重恢复至未感染雏鸡的水平。

器官指数测定可用于评估家禽的免疫状况、生长发育、健康状况以及饲料添加剂的作用效果, 为畜禽养殖提供科学的指导^[22]。本研究中, SE 感染可导致主要雏鸡代谢器官心脏和肝脏指数不同程度的升高, 主要免疫器官脾脏指数升高以及法氏囊指数的降低; 主要消化器官胃 (腺胃和肌胃)、肠道、胰腺和盲肠指数和肠道长度在 SE 感染鸡均不同程度降低, 而 GML 的添加可显著提高肠道指数, 并且可以逆转 SE 感染造成的肠道指数降低。肠道的相对重量与肠道发育和吸收能力密切相关^[23]。Iji 等^[24]表明, 肠道重量的变化可能主要与细胞大小和蛋白质合成速率的差异有关。肠道长度的增加将消化和吸收过程从近端转移到远端肠腔段, 提高了营养吸收的效率^[25]。结果表

明, 0.3% GML 使用可以一定程度提高消化器官机能, 并缓解 SE 感染对消化器官的影响, 改善机体对营养物质的消化吸收能力。

血清中氧化损伤和抗氧化关键酶的水平对于评估家禽的健康状况和氧化应激水平具有重要意义^[26]。血清 MDA 和 LDH 水平主要指征机体的氧化损伤^[27], 本研究结果表明, 0.3% GML 的添加均对血清 MDA 和 LDH 含量有显著降低作用。SE 可以经消化道感染并进一步定殖于肝脏和脾脏, 对器官造成损伤^[28]。血清 MDA 和 LDH 水平在 SE 感染雏鸡中均出现异常升高, 同时, SE 感染导致雏鸡肝脏的损伤, 主要反映在肝脏肿大、病变以及肝损伤指标 AST 和 ALT 的异常^[29]。抗氧化能力低下会导致大量自由基的积累和细胞功能受损^[30]。在本研究中, SE 感染导致雏鸡肝脏相对重量的升高, 相应的血清 AST 和 ALT 水平也显著高于健康雏鸡, 而血清中抗氧化关键酶 (SOD、CAT、T-AOC) 含量不同程度的降低。饲料中 0.3% GML 的添加可以明显改善 SE 感染雏鸡所造成的肝脏指数升高和血清肝损伤指标 (AST、ALT) 水平。在健康试验鸡中添加 GML 增加了血清中 SOD、CAT 和 T-AOC 的水平, 并在感染鸡中维持了机体的抗氧化能力, 这些重要的抗氧化酶可以清除氧自由基并保护细胞功能的完整性, 在维持机体健康方面发挥重要作用^[31]。

先天免疫状态受多种因素影响, 如营养、应激和肠道微生物等^[32]。GML 通过多种机制调节血清免疫细胞因子, 增强机体的免疫功能, 减轻炎症反应。Kong 等^[18]研究发现, 在肉鸡日粮中添加 600 mg/kg GML 可显著降低血清和空肠中的白细胞介素-1 β (IL-1 β) 和 TNF- α 水平。GML 具有显著的免疫调节作用, 能够提高禽巨噬细胞的吞噬能力, 抑制了脂多糖 (LPS) 诱导的 TLR4 和 NF- κ B p65 的基因表达, 对禽类巨噬细胞的极化状态具有显著调节作用, 并通过抑制细胞内 ROS 和 NF- κ B 信号通路表现出显著的抗凋亡和抗炎特性^[33]。SE 感染可导致宿主全身性炎症反应, 显著提高血清 IL-6、TNF- α 等炎症细胞因子的水平^[34-35]。本研究中, 0.3% GML 添加显著降低了血清 MPO 含量, 不同程度降低脾脏和法氏囊指数, 对血清 IL-2、IL-6、TNF- α 等无显著影响。在 SE 单独感染雏鸡, 其血清细胞因子水平的变化基本一致, IL-6、TNF- α 和 MPO 的含量均升高, 而 IL-2 和 INF- γ 水平不同程度降低。有研究表明, 沙门菌感染雏鸡可以导致 IL-2 的表达水平降低, 这可能与沙门菌感染后对宿主免疫系统的干扰和调控有关^[36]。GML 的添加不同程度的降低了 SE 感染雏鸡血清炎症标志因子 IL-6 和 MPO 的含量, 改善了机体的炎症

反应。

肠道微生物菌群对肠道健康有着多方面的影响, 包括调节免疫系统、参与代谢过程、维持肠道屏障功能, 并与疾病发生密切相关^[37]。SE 的感染首先是在肠道定殖, 并导致肠道菌群和肠道结构的破坏^[38]。GML 可显著调控肠道功能和微生物菌群。在老年蛋鸡日粮中添加 GML 可显著增加肠绒毛高度, 上调拟杆菌属 (*Bacteroides*) 和另枝菌属 (*Alistipes*) 的丰度, 增强了肠道屏障功能^[39]。GML 在肉鸡饲料中的添加同样可改善了肠道形态, 提高了肠道微生物多样性, 增加有益菌群丰度^[6, 40]。本研究发现, 无论是 SE 感染或 GML 的添加均可以引起雏鸡肠道微生物菌群的多样性和结构的显著改变。本研究发现, SE 感染导致雏鸡肠道瘤胃球菌属 *torques* 群的相对丰度的显著升高, 已有研究表明该菌群丰度升高与炎症性肠病的发生密切相关^[41]。GML 添加可以显著提高健康和 SE 感染雏鸡的毛螺菌科 NK4A136 群和沙特尔沃思氏菌属的相对丰度, 降低瘤胃球菌属 *torques* 群的丰度。研究表明, 毛螺菌科 NK4A136 群通过产生短链脂肪酸 (SCFAs) 维持肠道屏障和免疫系统的完整性, 促进肠道黏膜的修复, 具有潜在的抗炎和作为益生菌的特性^[42]。沙特尔沃思氏菌属中的卫星种通过产生 SCFAs, 如醋酸盐、丁酸盐和乳酸盐, 有助于维持肠道屏障的完整性, 防止病原体和有害物质的侵入, 同时能够通过其代谢产物和细胞成分调节宿主的免疫系统, 增强机体对病原体的防御能力^[43]。以上结果表明, 本研究评价的 3 种功能性添加剂虽然自身特性存在差异, 但都可以显著调节雏鸡的肠道菌群结构, 提高有益微生物的丰度, 增强肠道抵御 SE 感染的能力, 从而改善机体的健康。

4 结论

饲料中添加 0.3% GML 可显著促进雏鸡的生长, 可不同程度提高雏鸡肠道指数和抗氧化能力, 降低氧化应激指标和炎症细胞因子水平; SE 的感染可造成雏鸡生长受阻、组织器官指数异常、氧化应激和炎症因子水平升高和肠道菌群的紊乱; 0.3% GML 添加可显著缓解 SE 感染雏鸡导致的病理损伤, 提高肠道的毛螺菌科 NK4A136 群和沙特尔沃思氏菌属的相对丰度, 降低瘤胃球菌属 *torques* 群的丰度。因此, GML 添加对感染 SE 雏鸡的保护效应可能主要通过调控机体的免疫和肠道功能来实现。

参考文献:

- [1] Nithani F O, Angwarmasse L S, Bessy E Y, et al. Improved syn-

- thesis of α -glycerol monolaurate using lipozyme TL IM [J]. J Oleo Sci, 2022, 71 (7): 1013–1020.
- [2] Li L, Wang H, Dong S, et al. Supplementation with alpha-glycerol monolaurate during late gestation and lactation enhances sow performance, ameliorates milk composition, and improves growth of suckling piglets [J]. J Anim Sci Biotechnol, 2023, 14 (1): 47.
 - [3] Schlievert P M, Peterson M L. Glycerol monolaurate antibacterial activity in broth and biofilm cultures [J]. PLoS One, 2012, 7 (7): e40350.
 - [4] Lopes L Q S, de Almeida Vaucher R, Giongo J L, et al. Characterisation and anti-biofilm activity of glycerol monolaurate nanocapsules against *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Microb Pathogen, 2019, 130: 178–185.
 - [5] 孟帅, 王宏, 吴春桃, 等. α -单月桂酸甘油酯对麻黄仔鸡生长性能、免疫性能和肠道发育的影响 [J]. 动物营养学报, 2023, 35 (7): 4410–4419.
 - [6] Kong L, Wang Z, Xiao C, et al. Glycerol monolaurate ameliorated intestinal barrier and immunity in broilers by regulating intestinal inflammation, antioxidant balance, and intestinal microbiota [J]. Front Immunol, 2021, 12: 713485.
 - [7] Takaya A, Yamamoto T, Tokoyoda K. Humoral immunity vs. *Salmonella* [J]. Front Immunol, 2019, 10: 3155.
 - [8] Xu Y, Zhou X, Jiang Z, et al. Antimicrobial resistance profiles and genetic typing of *Salmonella* serovars from chicken embryos in China [J]. Antibiotics, 2021, 10 (10): 1156.
 - [9] Alikhan N F, Moreno L Z, Castellanos L R, et al. Dynamics of *Salmonella* enterica and antimicrobial resistance in the Brazilian poultry industry and global impacts on public health [J]. PLoS Genet, 2022, 18 (6): e1010174.
 - [10] Shen X, Yin L, Zhang A, et al. Prevalence and characterization of *Salmonella* isolated from chickens in Anhui, China [J]. Pathogens, 2023, 12 (3): 465.
 - [11] 高振杰, 郭锡钦. α -单月桂酸甘油酯对致病菌的抑制作用 [J]. 饲料博览, 2019 (6): 49–52.
 - [12] Chen Q, Liu Y, Zhang Z, et al. Bactericidal effect of glycerol monolaurate complex disinfectants on *Salmonella* of chicken [J]. Int J Food Microbiol, 2021, 345: 109150.
 - [13] Gast R K, Jones D R, Guraya R, et al. Research Note: internal organ colonization by *Salmonella* Enteritidis in experimentally infected layer pullets reared at different stocking densities in indoor cage-free housing [J]. Poult Sci, 2022, 101 (11): 102104.
 - [14] Sun Z, Zhang X, Wu H, et al. Antibacterial activity and action mode of chlorogenic acid against *Salmonella* Enteritidis, a foodborne pathogen in chilled fresh chicken [J]. World J Microbiol Biotechnol, 2020, 36 (2): 24.
 - [15] Khatun M F, Khan M A S, Ahmed M F, et al. Assessment of foodborne transmission of *Salmonella* Enteritidis in hens and eggs in Bangladesh [J]. Vet Med Sci, 2022, 8 (5): 2032–2039.
 - [16] Phillips C J C, Hosseintabar-Ghasemabad B, Gorlov I F, et al. Immunomodulatory effects of natural feed additives for meat chickens [J]. Life, 2023, 13 (6): 1287.
 - [17] Bilal R M, Hassan F U, Saeed M, et al. Role of yeast and yeast-derived products as feed additives in broiler nutrition [J]. Anim Biotechnol, 2023, 34 (2): 392–401.
 - [18] Kong L, Wang Z, Xiao C, et al. Glycerol monolaurate attenuated immunological stress and intestinal mucosal injury by regulating the gut microbiota and activating AMPK/Nrf2 signaling pathway in lipopolysaccharide-challenged broilers [J]. Anim Nutr, 2022, 10: 347–359.
 - [19] 刘梦芸, 陈晓倩, 赵豪斌, 等. 饲料中添加单月桂酸甘油酯对肉鸡生长性能、消化能力及鸡肉营养品质的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39 (15): 67–71.
 - [20] 陈荣荣, 郑梓, 王永颖, 等. α -单月桂酸甘油酯在育肥猪上应用的研究 [J]. 天津农业科学, 2021, 27 (12): 19–22.
 - [21] Nakphaichit M, Sobanbua S, Siemuang S, et al. Protective effect of *Lactobacillus reuteri* KUB – AC5 against *Salmonella* Enteritidis challenge in chickens [J]. Benef Microbes, 2019, 10 (1): 43–54.
 - [22] Zhang R, Ma H, Han P, et al. Effects of feed systems on growth performance, carcass characteristics, organ index, and serum biochemical parameters of pigeon [J]. Poult Sci, 2022, 101 (12): 102224.
 - [23] Liu Y S, Zhang Y Y, Li J L, et al. Growth performance, carcass traits and digestive function of broiler chickens fed diets with graded levels of corn resistant starch [J]. Br Poult Sci, 2020, 61 (2): 146–155.
 - [24] Iji P A, Khumalo K, Slippers S, et al. Intestinal function and body growth of broiler chickens on diets based on maize dried at different temperatures and supplemented with a microbial enzyme [J]. Reprod Nutr Dev, 2003, 43 (1): 77–90.
 - [25] Elsenhans B, Caspary W F. Food viscosity as determinant for adaptive growth responses in rat intestine: long-term feeding of different hydroxyethyl celluloses [J]. Br J Nutr, 2000, 84 (1): 39–48.
 - [26] Gu Y F, Chen Y P, Jin R, et al. Age-related changes in liver metabolism and antioxidant capacity of laying hens [J]. Poult Sci, 2021, 100 (12): 101478.
 - [27] Gawel S, Wardas M, Niedworok E, et al. Malondialdehyde (MDA) as a lipid peroxidation marker [J]. Wiad Lek, 2004, 57 (9/10): 453–455.
 - [28] Jesudhasan P R, McReynolds J L, Byrd A J, et al. Electron-beam-inactivated vaccine against *Salmonella* Enteritidis colonization in molting hens [J]. Avian Dis, 2015, 59 (1): 165–170.
 - [29] Tong Y, Yu C, Xie Z, et al. Trans-anethole ameliorates lipopolysaccharide-induced acute liver inflammation in broilers via inhibiting NF – κ B signaling pathway [J]. Poult Sci, 2022, 101 (8): 101962.
 - [30] Amevor F K, Cui Z, Ning Z, et al. Dietary quercetin and vitamin E supplementation modulates the reproductive performance and antioxidant capacity of aged male breeder chickens [J]. Poult Sci, 2022, 101 (6): 101851.
 - [31] Öztürk-Urek R, Bozkaya L A, Tarhan L. The effects of some antioxidant vitamin – and trace element – supplemented diets on activities of SOD, CAT, GSH – Px and LPO levels in chicken tissues [J]. Cell Biochem Funct, 2001, 19 (2): 125–132.
 - [32] Nobs S P, Zmora N, Elinav E. Nutrition regulates innate immunity in health and disease [J]. Annu Rev Nutr, 2020, 40: 189–219.
 - [33] Kong L, Sun P, Pan X, et al. Glycerol monolaurate regulates apoptosis and inflammation by suppressing lipopolysaccharide-induced ROS production and NF- κ B activation in avian macrophages [J]. Poult Sci, 2024, 103 (8): 103870.

[34]

Guan L, Hu A, Ma S, et al. Lactiplantibacillus plantarum postbiotic protects against *Salmonella* infection in broilers via modulating NLRP3 inflammasome and gut microbiota [J]. Poult Sci, 2024, 103 (4): 103483.

[35]

Liu Y, Li Z, Li H, et al. *Bacillus pumilus* TS1 alleviates *Salmonella* Enteritidis – induced intestinal injury in broilers [J]. BMC Vet Res, 2023, 19 (1): 41.

[36]

Mon K K Z, Kern C, Chanthavixay G, et al. Tolerogenic immunoregulation towards *Salmonella* Enteritidis contributes to colonization persistence in young chicks [J]. Infect Immun, 2021, 89 (8): e0073620.

[37]

Álvarez J, Fernández Real J M, Guarner F, et al. Gut microbes and health [J]. Gastroenterol Hepatol, 2021, 44 (7): 519 – 535.

[38]

Deng L, Wang S. Colonization resistance: the role of gut microbiota in preventing *Salmonella* invasion and infection [J]. Gut Microbes, 2024, 16 (1): 2424914.

[39]

Cui Z, Zhang R, Dai B, et al. Effects of glyceryl monolaurate on production performance, egg quality, oviduct cytokines and intestinal microflora of 66 weeks old laying hens [J]. Animals, 2023, 13 (2): 215.

[40]

Liu T, Tang J, Feng F. Glycerol monolaurate improves performance, intestinal development, and muscle amino acids in yellow-feathered broilers *via* manipulating gut microbiota [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2020, 104 (23): 10279–10291.

[41]

Schaus S R, Vasconcelos Periera G, Luis A S, et al. *Ruminococcus torques* is a keystone degrader of intestinal mucin glycoprotein, releasing oligosaccharides used by *Bacteroides thetaiotaomicron* [J]. bioRxiv, 2024: 2024.01.15.575725.

[42]

Song W, Wang Y, Li G, et al. Modulating the gut microbiota is involved in the effect of low-molecular-weight *Glycyrrhiza* polysaccharide on immune function [J]. Gut Microbes, 2023, 15 (2): 2276814.

[43]

Zhao L, Fang J, Tang S, et al. PM_{2.5} and serum metabolome and insulin resistance, potential mediation by the gut microbiome: a population-based panel study of older adults in China [J]. Environ Health Perspect, 2022, 130 (2): 27007.