



严丹, 安柯颖, 张子越, 施博智, 夏兆飞. 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭肠道健康的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(04): 154-165.
YAN Dan, AN Keying, ZHANG Ziyue, SHI Bozhi, XIA Zhaofei. Effects of Magnolol on intestinal health of Pekin ducks infected with *Escherichia coli*[J].
Journal of China Agricultural University, 2025, 30(04): 154-165.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.13

厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭肠道健康的影响

严丹 安柯颖 张子越 施博智 夏兆飞*

(中国农业大学 动物医学院, 北京 100193)

摘要 为探究厚朴酚(MAG)对感染大肠杆菌(*E. coli*)北京鸭肠道健康的影响,本研究选取1 d雄性北京鸭240只,随机分为6组:空白组(NCG组),攻毒组(*E. coli* O78, PCG组),低(*E. coli* O78+100 mg/kg MAG, MLG组)、中(*E. coli* O78+200 mg/kg MAG, MMG组)、高(*E. coli* O78+300 mg/kg MAG, MHG组)剂量厚朴酚组,抗生素组(*E. coli* O78+30 mg/kg 维吉尼亚霉素, AG组),每组5个重复,每个重复8只,试验周期28 d。试验利用酶联免疫吸附法(ELISA)、病理组织学切片技术(HE染色)、实时荧光定量PCR技术(RT-qPCR)完成肠道健康指标检测。结果表明:1)与PCG组相比,3剂量组与AG组北京鸭9、14和28 d因*E. coli*感染引起生长性能降低无显著改善($P>0.05$)。2)与PCG组相比,3剂量组及AG组北京鸭9、14和28 d空肠绒毛结构相对完整、排列相对整齐,绒毛长度(VH)、绒毛长度/隐窝深度(V/C)显著增加($P<0.05$),隐窝深度(CD)显著减小($P<0.05$)。3)与PCG组相比,MMG组北京鸭9 d血清二胺氧化酶(DAO)、D-乳酸(D-LA)浓度显著降低($P<0.05$)。4)与PCG组相比,MLG组和MMG组北京鸭9 d空肠白介素-10(IL-10)的mRNA表达量显著增加($P<0.05$),肿瘤坏死因子- α (TNF- α)的mRNA表达量显著减少($P<0.05$)。5)与PCG组相比,MLG组北京鸭9、14和28 d空肠闭合小环蛋白-1(ZO-1)、闭锁蛋白(Occludin)、闭合蛋白-1(Claudin-1)的mRNA表达量显著增加($P<0.05$);MLG组和MMG组北京鸭14和28 d空肠黏蛋白2(MUC2)的mRNA表达量显著增加($P<0.05$)。综上,饲料添加MAG可在一定程度上改善感染大肠杆菌北京鸭肠道形态,稳固肠道屏障,保护肠道健康;MAG推荐添加剂量为100和200 mg/kg。

关键词 厚朴酚; 大肠杆菌; 北京鸭; 肠道健康

中图分类号 S853.74

文章编号 1007-4333(2025)04-0154-12

文献标志码 A

Effects of magnolol on intestinal health of Pekin ducks infected with *Escherichia coli*

YAN Dan, AN Keying, ZHANG Ziyue, SHI Bozhi, XIA Zhaofei*

(College of Veterinary Medicine, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract This study was aimed to explore the effect of magnolol (MAG) on the intestinal health of Pekin ducks infected with *Escherichia coli* (*E. coli*). A total of 240 one-year-old Pekin ducks were randomly allocated into 6 dietary treatments, 5 repetitions per treatment, 8 animals per repetition: blank group (group NCG), challenge group (*E. coli* O78, group PCG), low-dose MAG group (*E. coli* O78+100 mg/kg MAG, group MLG), medium-dose MAG group (*E. coli* O78+200 mg/kg MAG, group MMG), high-dose MAG group (*E. coli* O78+300 mg/kg MAG, group MHG), antibiotic group (*E. coli* O78+30 mg/kg virginiamycin, group AG). The test period was 28 days. Intestinal health indicators were detected by ELISA, pathological

收稿日期: 2024-03-25

第一作者: 严丹(ORCID:0009-0009-4355-9449), 硕士研究生, E-mail: yandand10@163.com

通讯作者: 夏兆飞(ORCID:0000-0002-7567-1007), 教授, 主要从事兽医内科疾病诊疗研究, E-mail: drxia@126.com

histological section technology (HE staining), and Quantitative Real-time PCR (RT-qPCR). The result showed that: 1) Compared with the group PCG, there was no significant improvement in growth performance caused by *E. coli* infection in the group MLG, the group MMG, the group MHG and the group AG at 9, 14, and 28 days of age ($P>0.05$). 2) Compared with the group PCG, the villus length and villus length/recess depth in the jejunum of Pekin ducks in the group MLG, group MMG, group MHG and group AG were significantly increased ($P<0.05$), the recess depth was decreased significantly at 9, 14 and 28 days of age ($P<0.05$). 3) Compared with the group PCG, the content of serum DAO and D-LA of Pekin ducks in the group MMG was significantly decreased at 9 days of age ($P<0.05$). 4) Compared with the group PCG, the expression levels of *IL-10* in the jejunum of Pekin ducks in the group MLG and MMG were increased significantly at 9 days of age ($P<0.05$). 5) Compared with the group PCG, the expression levels of *zonula occluden-1*, *Occludin* and *Claudin-1* in the jejunum of Pekin ducks in the group MLG were significantly increased at 9, 14 and 28 days of age ($P<0.05$). The expression levels of *mucin2* in the group MLG and MMG was increased significantly at 14 and 28 days of age ($P<0.05$). In conclusion, adding MAG can improve the intestinal morphology, stabilize the intestinal barrier and protect intestinal health of Pekin ducks infected with *E. coli*. The recommended dosage of MAG adding to the feed is 100 or 200 mg/kg.

Keywords magnolol; *Escherichia coli*; Pekin duck; intestinal health

大肠杆菌(*Escherichia coli*)作为引起肉鸭常见细菌性疾病的病原,通过干扰机体能量代谢途径、下调与氧化磷酸化及核糖体相关的基因表达,破坏肠道屏障,引发炎症反应,降低肉鸭的生长性能、免疫功能及繁殖性能,给养殖业带来严重的经济损失^[1-4]。在防治方面,*E. coli*血清型众多且存在地域差异,广谱疫苗的研发难度高^[2-3];其易对抗生素产生强耐药性,又因我国在饲料端已全面禁抗,防治该病的药物选择与使用严重受限^[1,5]。近期研究发现,*E. coli*能够以家禽产品为媒介诱发人食源性疾病,可通过饮水、环境等媒介平行传播耐药基因至人类,危害人类公共健康^[6-8]。因此,急需开发高效、绿色、安全的替抗饲料添加剂,解决鸭大肠杆菌病的防治难题。

厚朴酚(Magnolol, MAG)是一种分离自中药厚朴茎皮的联苯酚类化合物,其生产制备工艺趋于成熟,已广泛用于日化、营养、食品、药理等多个领域^[9-12]。在健康家禽,厚朴酚具有促生长、改善肉蛋品质、抗炎、抗氧化应激、促进肠道健康的作用^[11-13]。Deng等^[14]研究发现,MAG可下调感染*E. coli*小鼠的肠道炎症因子干扰素- γ (*Interferon-gamma*, *IFN- γ*)、白细胞介素-10(*Interleukin-10*, *IL-10*)的mRNA表达,增加肠道绒毛长度(Villus height, VH),抑制肠上皮细胞凋亡,有效保护肠黏膜。Chen等^[15]研究发现,MAG通过提高回肠闭锁蛋白-1(*Claudin-1*)的mRNA表达量,优化肠道微生物菌群,减轻鸡白

痢引起的肉鸡生长性能下降。MAG能够维护肠道形态结构,提高肠道免疫功能及屏障功能,改善肠道微生物结构^[16],具有绿色、安全、无残留、经济、实惠、易获取的优点^[5,13],MAG作为家禽饲料添加剂以防治家禽疾病的应用潜力较高。

目前,北京鸭大肠杆菌病的防治难度高,且尚未有研究探索MAG在北京鸭大肠杆菌病中的作用。因此,本研究以感染大肠杆菌北京鸭为模型,探究饲粮添加不同剂量MAG对肠道健康的影响,为北京鸭养殖行业防治大肠杆菌病提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

厚朴酚(纯度 $\geq 98\%$)购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。维吉尼亚霉素(Virginiamycin, VIR)购于北京泛球科技有限公司。菌株大肠杆菌O78由中国农业大学动物科技学院王忠老师提供。试验用北京鸭购于任丘市顺和种鸭养殖孵化厂。

1.2 试验分组及设计

试验选择体重相近的240只1 d健康雄性北京鸭,随机分为6个处理组,每组5个重复,每个重复8只鸭。空白组(NCG组)、攻毒组(PCG组)饲喂基础日粮;厚朴酚处理组分别在日粮中添加100 mg/kg(MLG组)、200 mg/kg(MMG组)、300 mg/kg(MHG组)的MAG;抗生素处理组(AG组)在日粮中添加30 mg/kg的VIR。从5 d开始,除NCG组,其余5组

每日灌胃 2.00 mL *E. coli* O78 菌液 2 次(2.00×10^9 CFU/mL), 2 次攻毒间隔 8 h, 连续灌胃 3 日; NCG 组以相同方式灌胃 0.9 % 无菌生理盐水。基础日粮参照 NRC(1994) 肉鸭营养需求标准配置, 日粮配方及成分见表 1。

试验于中国农业大学涿州试验基地开展。试验期为 28 d。试验期间采用 3 层立体笼养, 24 h 持续光照, 自由饮水和采食。

表 1 基础日粮组成及营养水平(风干基础)
Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diets (Air-dry basis)

项目 Item	1~21 d	22~28 d
原料 Ingredient		
玉米 % Corn	56.00	60.24
豆粕 % Soybean meal	32.69	24.67
次粉 % Wheat middling	5.00	9.00
豆油 % Soybean oil	2.10	1.80
磷酸氢钙 % CaHPO_4	1.00	1.60
石粉 % Limestone	1.52	1.20
DL-蛋氨酸 % DL-Met	0.15	0.12
L-赖氨酸 % L-Lysine	0.20	0.10
复合维生素 % Vitamin premix ^①	0.02	0.02
复合微量元素 % Trace mineral premix ^②	0.20	0.20
氯化钠 % NaCl	0.35	0.30
50 % 氯化胆碱 % 50 % Choline chloride	0.24	0.20
抗氧化剂 % Ethoxyquin	0.03	0.03
麦饭石 % Maifanite	0.50	0.50
总计 % Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ^③		
代谢能 ME/(MJ/kg)	12.31	12.53
粗蛋白 CP	19.52	16.83
赖氨酸 Lys	1.12	0.87
蛋氨酸 Met	0.46	0.39
钙 Ca	0.88	0.89
有效磷 AP	0.29	0.39
总磷 TP	0.54	0.62
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	0.79	0.69

注: ① 维生素预混料每千克饲料提供: VA 12 500 IU, VD₃ 3 500 IU, VE 20 IU, VK₃ 2.65 mg, VB₁ 2.00 mg, VB₂ 6.00 mg, VB₁₂ 0.025 mg, 生物素 0.032 5 mg, 叶酸 12.00 mg, 泛酸 50.0 mg, 烟酸 50.0 mg。② 微量元素预混料每千克饲料提供: 铜 6 mg, 锌 40 mg, 硒 0.15 mg, 锰 100 mg, 铁 80 mg, 碘 0.35 mg。③ 为计算值。
Note: ① The Vitamin premix provided the following per kg of diet: VA 12 500 IU, VD₃ 3 500 IU, VE 20 IU, VK₃ 2.65 mg, VB₁ 2.00 mg, VB₂ 6.00 mg, VB₁₂ 0.025 mg, biotin 0.032 5 mg, folic acid 12.00 mg, pantothenic acid 50.00 mg and nicotinic acid 50.00 mg. ② The trace mineral premix provided the following per kg of diet: Cu 6 mg, Zn 40 mg, Se 0.15 mg, Mn 100 mg, Fe 80 mg, I 0.35 mg. ③ Calculated value.

1.3 样品采集

分别于 9、14 和 28 d, 自每个处理随机选取 5 只北京鸭颈静脉放血致死。采集血样, 使用离心机 3 500 g、4℃, 离心 15 min, 分离血清于 -20℃ 保存。采集空肠组织及黏膜, 分别置于无 RNA 酶管内, 液氮速冻后于 -80℃ 冷冻保存。血清及空肠样本均用于后续指标检测。

1.4 指标检测

1.4.1 生长性能指标测定

每日健康监测,观察北京鸭临床表现。在 9、14 和 28 d,在禁食 8 h 后,称量各重复北京鸭的体重和饲料重量,记录北京鸭体重、消耗饲料重量、剩余饲料重量等生长性能指标数据,计算 0~21 d、22~28 d 北京鸭平均体重(Average body weight, ABW)、平均体增重(Average body weight gain, ABWG)、平均采食量(Average feed intake, AFI)和料重比(Feed/Gain ratio, F/G)。

1.4.2 血清指标测定

血清二胺氧化酶(Diamine oxidase, DAO)、D-乳酸(D-lactic acid, D-LA)使用上海酶联生物科技有限公司的试剂盒进行检测。

1.4.3 肠道病理组织观察

将剖检时采集的 1 cm 空肠组织浸泡至 4 % 的甲醛溶液内,后续经脱水—透明—浸蜡—包埋—修

块—切片—展片—常规苏木精-伊红染色处理后,制成石蜡切片。利用光学显微镜观察并测量每张切片 10 个完整、走向清晰肠绒毛的 VH、隐窝深度(Crypt depth, CD),计算二者比值(V/C)。

1.4.4 实时荧光定量 PCR

采用 Trizol 法提取空肠组织总 RNA。利用 NanoDrop 2000 分光光度计测定总 RNA 的浓度,并根据样品的 OD₂₆₀/OD₂₈₀ 比值评估 RNA 的完整性。使用 HiScript III 1st Strand cDNA Synthesis Kit(+gDNA wiper)反转录 RNA 以获取 cDNA,于-20℃保存。引物序列如表 2 所示。引物由生工生物工程(上海)股份有限公司合成。以空肠组织 cDNA 为模板,按照 Taq Pro Universal SYBR qPCR Master Mix 试剂盒说明书配制体系,进行实时荧光定量 PCR(Quantitative Real-time PCR, qPCR)。以 β -actin 为管家基因,按照 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 方法计算目的基因的相对水平。试验所用试剂盒均购于南京诺唯赞生物科技股份有限公司。

表 2 用于实时荧光定量 PCR 的基因引物序列
Table 2 Primers used for the qPCR of the target gene

基因 Gene	引物序列(5'-3') Primer sequences (5'-3')	产物长度/bp Product length
闭合小环蛋白-1 ZO-1	F: ACGCTGGTGAAATCAAGGAAGAA R: ACGCTGGTGAAATCAAGGAAGAA	255
闭锁蛋白 Occludin	F: CAGGATGTGGCAGAGGAATACAA R: CCTTGTCGTAGTCGCTCACCAT	160
闭合蛋白-1 Claudin-1	F: TCATGGTATGGCAACAGAGTGG R: TGTGTTTCGTGTTGGTTGCGG	179
白介素-4 IL-4	F: CAATGAGACAGGCACCGACAT R: GCTACTCGTTGGAGGGTTCTG	219
白介素-10 IL-10	F: CAAATAGCGAACAGCCCTCA R: CTCCATGTAGAACCGCATCA	179
干扰素- γ IFN- γ	F: ACTGAGCCAGATTGTTACCCTG R: ACTCACAGCCTTGCGTTGG	196
肿瘤坏死因子- α TNF- α	F: GAATGAACCCTCCTCCGTAC R: GGCGGTCATAAAATACCACTAC	105
黏蛋白 2 MUC2	F: GGGCGCTCAATTCAACATAAGTA R: TAAACTGATGGCTTCTTATGCGG	150
β -肌动蛋白 β -actin	F: AGAAATTGTGCGTGACATCAA R: GGACTCCATACCCAAGAAAGAT	227

1.5 数据分析

使用Excel 2010对试验数据进行初步处理,利用SPSS 29.0对数据进行单因素方差分析,对组间差异显著($P<0.05$)的指标使用Duncan氏法进行多重比较。 $P<0.01$ 为差异极显著, $0.01<P<0.05$ 为差异显著, $P>0.05$ 为差异不显著。

2 结果与分析

2.1 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭生长性能的影响

由表3可知,与NCG组相比,PCG组北京鸭0~21 d和22~28 d ABW、ABWG、AFI显著降低($P<0.05$)。PCG组、MLG组、MMG组、MLG组、AG组北京鸭6~8 d均出现不同程度的精神萎靡,排黄绿色稀便的现象,与雏鸭大肠杆菌感染后嗜睡、粪便变稀且颜色异常的临床表现相吻合^[2,17-18],提示攻毒成功。与PCG组相比,MLG组、MMG组、MHG组、AG组北京鸭0~28 d ABW、AG、AFI和F/G均无显著差异($P>0.05$)。结果表明,*E. coli*可影响北京鸭生长性能,MAG对感

染*E. coli*北京鸭生长性能无显著影响($P>0.05$)。

2.2 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠肠道形态的影响

由图1可知,在9、14和28 d,NCG组北京鸭空肠绒毛结构完整,排列整齐;PCG组北京鸭空肠绒毛结构明显不完整,绒毛顶端上皮细胞脱落严重,部分空肠绒毛中断且排列紊乱;MLG组、MMG组、MHG组及AG组北京鸭空肠绒毛结构相对完整,绒毛排列相对整齐。由表4可知,与NCG组相比,PCG组北京鸭9 d空肠VH显著减小($P<0.05$);9、14和28 d CD显著增大($P<0.05$),V/C显著减小($P<0.05$)。与PCG组相比,MLG组、MMG组、MHG组和AG组北京鸭9、14和28 d空肠VH和V/C均显著增大($P<0.05$),空肠CD显著减小($P<0.05$)。结果表明,*E. coli*破坏北京鸭空肠形态结构,抑制北京鸭空肠肠道绒毛生长,而MAG和VIR可拮抗该不良反应,进而维持良好的肠道形态结构和肠道功能,且相比于VIR,低、中剂量MAG效果更为显著。

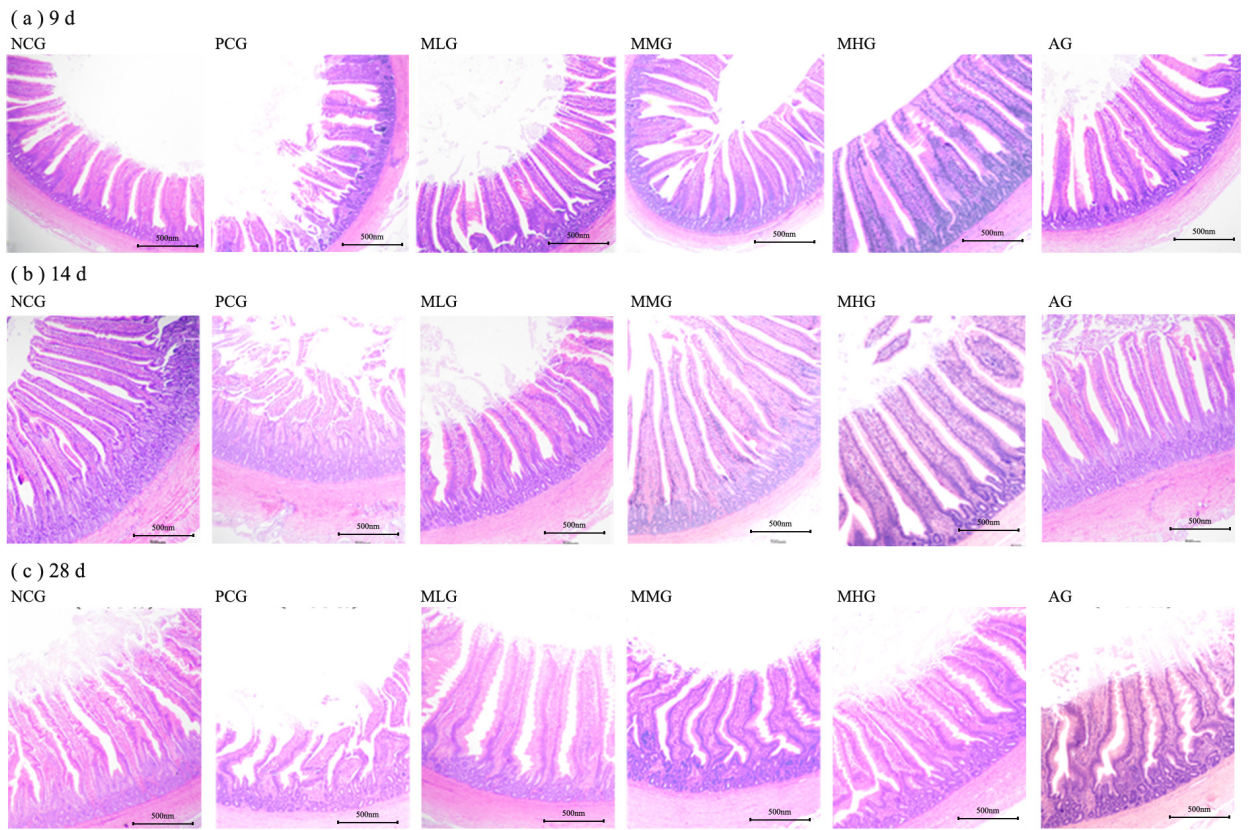
表3 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭生长性能的影响

Table 3 Effects of magnolol on grow performance of Pekin ducks infected with *E. coli*

项目 Item	空白组 NCG	攻毒组 PCG	低剂量组 MLG	中剂量组 MMG	高剂量组 MHG	抗生素组 AG	标准误 SEM
0~21 d							
平均体重/(kg)ABW	1.17Aa	1.10Bb	1.09b	1.07b	1.10b	1.12b	0.01
平均体增重/(kg)AFI	2.08Aa	1.92Bb	1.87b	1.92b	1.94b	2.01b	0.02
平均采食量/(kg)ABWG	1.1a	1.05b	1.01b	0.99b	1.04b	1.06b	0.01
料重比 F/G	1.89a	1.83b	1.85b	1.93b	1.87b	1.89b	0.02
22~28 d							
平均体重/(kg)ABW	1.65Aa	1.54Bb	1.51b	1.50b	1.52b	1.55b	0.01
平均体增重/(kg)AFI	1.40Aa	1.17Bb	1.26b	1.32b	1.27b	1.23b	0.02
平均采食量/(kg)ABWG	0.48a	0.43b	0.42b	0.44b	0.43b	0.44b	0.01
料重比 F/G	2.90	2.69	3.04	3.01	2.97	2.81	0.04

注:同行数据肩标小写字母不同表示差异显著($P<0.05$);小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$);同行数据肩标不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$);①P1为NCG组与PCG组之间的P值,P2为PCG组、MLG组、MMG组、MHG组、AG组之间的P值。下同。

Note: Different lowercase letters of shoulder tags in peer data indicate significant differences ($P<0.05$). The same lowercase letters indicate the difference is not significant ($P>0.05$). Different uppercase letters of shoulder tags in peer data indicate extremely significant differences ($P<0.01$). ①P1, the P value between group NCG and group PCG. P2, the P value among group PCG, group PCG, group MLG, group MMG, group MHG and group AG. The same below.



NCG:空白组;PCG:攻毒组;MLG、MMG、MHG 分别为低、中、高剂量厚朴酚组;AG:抗生素组。
 NCG: Blank group; PCG: Challenge group; MLG: Low-dose MAG group; MMG: Medium-dose MAG group; MHG: High-dose MAG group;
 AG: Antibiotic group.

图 1 感染大肠杆菌北京鸭空肠绒毛形态结构(40×)

Fig 1 Morphological structure of jejunum of Pekin ducks infected with *E. coli* (40×)

表 4 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠肠道形态的影响

Table 4 Effects of MAG on intestinal morphology in jejunum of Pekin ducks infected with *E. coli*

项目 Item	空白组 NCG	攻毒组 PCG	低剂量组 MLG	中剂量组 MMG	高剂量组 MHG	抗生素组 AG	标准误 SEM
9 d							
绒毛长度/(nm) VH	483.30Aa	436.15Ab	641.59Cc	665.18Cc	676.56Cc	668.74Cc	18.98
隐窝深度/(nm) CD	156.70Aa	186.52Ab	110.65Cc	109.78Cc	119.69Cc	116.88Cc	5.53
绒毛长度/隐窝深度 V/C0.	3.09Aa	2.35Ab	5.80Cc	6.06Cc	5.68Cc	5.72Cc	0.28
14 d							
绒毛长度/(nm) VH	512.11a	543.45Aa	738.53Bb	837.02Bb	759.14Bb	800.57Bb	26.23
隐窝深度/(nm) CD	158.04Aa	203.36Bb	114.75Cc	114.74Cc	114.83Cc	123.78Cc	6.50
绒毛长度/隐窝深度 V/C	3.25a	2.56Aa	6.42Bc	7.30Cd	6.61Cd	6.48Cd	0.35
28 d							
绒毛长度/(nm) VH	586.46a	524.00Aa	943.77Bbd	842.45Bcd	938.97Bbd	890.36Bd	32.02
隐窝深度/(nm) CD	167.69a	201.86Ab	114.27Bc	114.65Bc	126.01Cd	124.78Cd	6.42
绒毛长度/隐窝深度 V/C	3.53Aa	2.60Bb	8.27Cc	7.35Dd	7.45Dd	7.05Dd	0.41

2.3 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭血清 DAO、D-LA 的影响

由表5可知,与NCG组相比,PCG组北京鸭9 d血清DAO及D-LA浓度显著增加($P<0.05$)。与PCG组相比,MMG组北京鸭9 d血清DAO和D-LA浓度

均显著降低($P<0.05$),MHG组北京鸭血清D-LA浓度显著降低($P<0.05$),AG组北京鸭血清DAO、D-LA浓度无显著差异($P>0.05$)。结果表明,在感染*E. coli*早期,北京鸭肠道通透性增加,中剂量MAG可降低*E. coli*感染北京鸭肠道通透性。

表5 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭血清 DAO、D-LA 的影响
Table 5 Effects of MAG on the content of serum DAO, D-LA of Pekin ducks infected with *E. coli*

项目 Item	空白组 NCG	攻毒组 PCG	低剂量组 MLG	中剂量组 MMG	高剂量组 MHG	抗生素组 AG	标准误 SEM
9 d							
二胺氧化酶/(pg/mL)DAO	31.96Aa	46.73Bb	45.59c	40.28c	45.71b	45.80b	1.10
D-乳酸/(nmol/L)D-LA	21.51a	24.09Ab	22.83Abc	20.94Bc	21.15Bc	23.24Ab	0.32
14 d							
二胺氧化酶/(pg/mL)DAO	37.98	42.47	42.36	39.15	43.70	40.77	0.95
D-乳酸/(nmol/L)D-LA	19.96	20.29	19.58	20.22	20.27	19.68	0.24
28 d							
二胺氧化酶/(pg/mL)DAO	43.06	43.94	43.90	35.17	39.26	42.47	1.23
D-乳酸/(nmol/L)D-LA	17.22a	18.84b	18.62b	18.38b	18.70b	18.04b	0.33

2.4 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠炎症因子的影响

由表6可知,与PCG组相比,MLG组、MMG组北京鸭9 d空肠*IL-10*的mRNA表达量显著增加($P<0.05$),MLG组、MMG组、MHG组、AG组北京鸭9 d空肠*TNF-α*的mRNA表达量显著减少($P<0.05$),MLG组、MHG组北京鸭28 d空肠*TNF-α*的mRNA表达量显著减少($P<0.05$)。结果表明,MAG可上调抗炎因子,下调促炎因子的表达,减轻*E. coli* O78引起的空肠炎性反应;且相比于VIR,低剂量MAG效果更显著。

2.5 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠紧密连接蛋白、MUC2的影响

由表7可知,与PCG组相比,MLG组北京鸭9、14和28 d空肠闭合小环蛋白-1(*Zonula occluden-1*, *ZO-1*)、闭锁蛋白(*Occludin*)的mRNA表达量显著增加($P<0.05$),MMG组北京鸭28 d时*Occludin*的mRNA表达量显著增加($P<0.05$),MHG组、AG组北京鸭14 d空肠*ZO-1*的mRNA表达量显著增加

($P<0.05$)。由表8可知,与PCG组相比,MLG组、MMG组北京鸭14和28 d空肠*MUC2*的mRNA表达量显著增加($P<0.05$)。结果表明,应用MAG可上调肠道屏障相关基因的表达,增强肠道屏障功能,保护肠道健康;且相比于VIR,低、中剂量MAG效果更显著。

3 讨论

3.1 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭生长性能的影响

本研究中,*E. coli*感染后,攻毒组北京鸭ABW、ABWG、AFI及F/G均显著降低,这与之前的研究结果一致^[19],表明*E. coli*感染可降低北京鸭的生长性能;这可能与其逃避宿主免疫抑制,诱发机体炎症反应及氧化应激,攻击宿主免疫系统,降低免疫和肠道功能有关^[19]。本研究中,低、中、高剂量MAG及AG组北京鸭未见明显的生长性能改善;这与200和300 mg/kg MAG均可显著提高临武肉鸭和黄羽肉鸡ADG的研究结果不一致^[20-21],但与MAG对已绝育公猪的生长性能无显著影响的研究

表 6 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠炎症因子的影响

Table 6 Effect of MAG on inflammatory factors in the jejunum of Pekin ducks infected with *E. coli*

项目 Item	空白组 NCG	攻毒组 PCG	低剂量组 MLG	中剂量组 MMG	高剂量组 MHG	抗生素组 AG	标准误 SEM
9 d							
<i>IL-4</i>	1.00	0.89	1.14	1.44	1.21	0.92	0.07
<i>IFN-γ</i>	1.00	0.94	1.52	1.56	1.09	1.03	0.08
<i>IL-4/IFN-γ</i>	1.00	0.95	0.75	0.92	1.11	0.89	0.13
<i>IL-10</i>	1.00Aa	0.43Bb	0.90Cc	0.78Ccd	0.59Bbd	0.67Bbcd	0.05
<i>TNF-α</i>	1.00a	0.97Aa	0.40Bb	0.47Bb	0.47Bb	0.43Bb	0.04
14 d							
<i>IL-4</i>	1.00	0.82	1.08	1.08	1.22	1.09	0.04
<i>IFN-γ</i>	1.00	0.73	0.98	0.98	0.96	1.11	0.05
<i>IL-4/IFN-γ</i>	1.00	1.12	1.10	1.10	1.27	0.98	0.06
<i>IL-10</i>	1.00	1.20	1.37	1.26	1.33	1.28	0.05
<i>TNF-α</i>	1.00	0.96	0.50	0.73	0.71	0.66	0.04
28 d							
<i>IL-4</i>	1.00	1.27	1.84	1.77	1.66	1.17	0.07
<i>IFN-γ</i>	1.00Aa	1.90Bb	1.32b	1.74b	1.74b	1.33b	0.09
<i>IL-4/IFN-γ</i>	1.00	0.67	1.39	1.02	0.95	0.88	0.07
<i>IL-10</i>	1.00	1.02	1.24	1.13	1.03	1.05	0.05
<i>TNF-α</i>	1.00a	1.01Aa	0.71Bb	0.94Aa	0.62Bb	0.80Aab	0.04

表 7 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠紧密连接蛋白的影响

Table 7 Effect of magnolol on TJ in the jejunum of Pekin ducks infected with *E. coli*

项目 Item	空白组 NCG	攻毒组 PCG	低剂量组 MLG	中剂量组 MMG	高剂量组 MHG	抗生素组 AG	标准误 SEM
9 d							
<i>ZO-1</i>	1.00Aa	0.44Bb	0.86Cc	0.43Bb	0.41Bb	0.46Bb	0.05
<i>Occludin</i>	1.00a	0.47Aa	0.79Bc	0.50Ab	0.48Ab	0.55Ab	0.04
<i>Claudin-1</i>	1.00a	0.38b	1.14b	0.80b	0.64b	0.64b	0.07
14 d							
<i>ZO-1</i>	1.00a	0.73a	1.11bc	0.94ab	1.05bc	1.20c	0.04
<i>Occludin</i>	1.00a	0.55b	1.02c	0.69bc	0.87bc	0.59b	0.05
<i>Claudin-1</i>	1.00	0.36	0.74	0.56	0.64	0.46	0.05
28 d							
<i>ZO-1</i>	1.00a	0.97Aa	1.60Bb	1.17Aa	1.05Aa	1.03Aa	0.06
<i>Occludin</i>	1.00a	0.94Aa	1.60Bb	1.27Cc	1.09Aac	1.10Aac	0.05
<i>Claudin-1</i>	1.00	1.35	2.78	2.42	1.57	1.91	0.12

表8 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠黏蛋白2的影响
Table 8 Effect of magnolol on *MUC2* in the jejunum of Pekin ducks infected with *E. coli*

日龄/d Days of age	空白组 NCG	攻毒组 PCG	低剂量组 MLG	中剂量组 MMG	高剂量组 MHG	抗生素组 AG	标准误 SEM
9	1.00Aa	0.45Bb	0.75b	0.45b	0.42b	0.55b	0.06
14	1.00a	0.85a	1.50c	1.16b	1.05ab	0.86a	0.05
28	1.00Aa	0.56Bb	1.04Cc	0.97Cc	0.68Bbd	0.85Dd	0.04

结果一致^[22],这可能与本研究动物模型建立、饲养环境、试验条件、试验周期等多种因素有关。MAG能否改善感染 *E. coli* 北京鸭等非健康家禽的生长性能有待进一步验证。

3.2 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭空肠形态结构与通透性的影响

肠道是机体消化吸收营养物质、产生免疫保护作用的重要器官,与家禽生长发育和机体健康息息相关^[16]。本研究中,感染 *E. coli* 北京鸭空肠肠绒毛结构不完整且排列紊乱,空肠肠道 VH 和 V/C 减小,CD 增加,与之前的试验研究结果一致^[19,23-24],表明 *E. coli* 感染后北京鸭空肠上皮细胞生长发育减缓,肠绒毛形态结构受损,消化吸收功能减弱。不同剂量 MAG 处理后,北京鸭空肠 VH 及 V/C 显著增大、CD 显著减小,在感染中、末期,低、中剂量 MAG 对于北京鸭空肠 VH、CD、V/C 的影响更显著,这与 100 或 200 mg/kg MAG 可提高蛋鸡或临武肉鸭肠道 VH 及 V/C 的研究结果一致^[25-26],表明 MAG 可有效减轻 *E. coli* 引起的肠道形态结构损伤,有助于平衡北京鸭肠道健康稳态,且低、中剂量 MAG 效果显著强于高剂量 MAG 及 VIR。

DAO 和 D-LA 可反映肠道通透性的变化,是肠道屏障受损的预警指标^[16]。本研究中,*E. coli* 感染初期,北京鸭血清 DAO 和 D-LA 浓度随之增加,表明其肠道屏障受损,与肠道形态结构的受损变化相吻合;D-LA 通过受损的肠黏膜进入血液,为 *E. coli* 的入侵和有害物质侵害机体提供机会,进而引发全身炎症反应,威胁其健康^[19]。而中剂量 MAG 处理后二者浓度显著降低,这与前人的研究结果一致^[3,14,24,27];表明 MAG 能够逆转感染初期北京鸭肠道通透性的变化,稳固肠道屏障,且中剂量 MAG 效果更为显著。

3.3 厚朴酚对感染大肠杆菌北京鸭肠道屏障功能的影响

MAG 可通过不同信号通路多向调节肠道炎症因子,减轻肠道炎症反应,增强肠道免疫功能。在小鼠结肠炎中,MAG 抑制 Toll 样受体/核因子- κ B 信号通路,下调肠道促炎因子 *TNF- α* 的 mRNA 表达水平^[28]。还有研究表明,MAG 通过调节肠道细胞一氧化氮的浓度,降低大鼠回肠 *TNF- α* 水平,提高回肠 *IL-10* 的 mRNA 表达量,以此拮抗大鼠脓毒症引起的胃肠功能障碍^[29-30]。本研究中,在感染初期,低、中剂量 MAG 处理后北京鸭空肠 *IL-10* 的 mRNA 表达量显著增加,不同剂量 MAG 或 VIR 处理后北京鸭空肠 *TNF- α* 的 mRNA 表达量显著减少,与上述研究结果相符;表明不同剂量 MAG 均可减轻 *E. coli* 诱导的北京鸭空肠炎症反应,且低、中剂量 MAG 的效果显著强于高剂量 MAG 及 VIR;这可能是 MAG 介导特定信号通路产生的结果。

紧密连接(Tight junction, TJ)是肠道机械屏障的核心,由多种膜蛋白和闭合小环蛋白构成,其中 *Occludin*、*Claudin-1* 和 *ZO-1* 广泛用于肠道机械屏障的评估^[31]。研究指出,MAG 通过增加回肠和结肠 *Occludin*、*ZO-1* 的 mRNA 表达量修复小鼠肠道机械屏障的损伤^[32]。在感染柔嫩艾美耳球虫的雏鸡试验中,MAG 可增加 *ZO-1* 和 *Occludin* 的 mRNA 表达量,提高微生物优势菌群的丰度,减少球虫引起的雏鸡生长性能下降^[33]。在炎症因子与 TJ 相关性的研究中,*TNF- α* 可通过多种途径影响肠道 TJ 的分布与表达,以此破坏肠道机械屏障,危害肠道健康^[34-35]; *IL-10* 可减缓 *TNF- α* 诱导的不良反应,降低肠道屏障受损程度,减轻肠道炎症反应^[34,36]。本研究中,不同剂量 MAG 均显著增加了感染 *E. coli* O78 北京鸭空肠 *ZO-1* 和 *Occludin* 的 mRNA 表达

量,其中低剂量MAG效果更为显著,这与血清通透性指标及空肠炎症因子的mRNA表达情况相吻合。由此可知,MAG能够通过炎症因子或其他通路,调节肠道TJ相关基因的表达,进而增强感染*E. coli*北京鸭的肠道机械屏障功能,维持北京鸭肠道健康。

MUC2在肠腔内容物与肠上皮之间形成一道屏障,阻止病原微生物与机体接触,起到抵御病原微生物的作用^[6]。本研究中,在感染中、末期,低、中剂量MAG处理后,北京鸭空肠MUC2的mRNA表达量显著增加。虽然目前尚未有研究提到MAG对肠道MUC2的影响,但根据本研究结果推测,低、中剂量MAG或许能促进北京鸭肠道MUC2的分泌,减少*E. coli*在肠上皮细胞的粘附,从而增强机体的抵抗力。

本研究中,MAG展现了其在感染*E. coli*北京鸭肠道健康的促进作用,进一步印证其作为绿色安全饲料添加剂防治家禽细菌性疾病的潜力。未来的研究可深入探讨MAG在北京鸭大肠杆菌病中产生保护作用的机制及相关信号通路,精准定位,为MAG防治北京鸭大肠杆菌病提供更多的理论和实践支持。目前,MAG提取加工工艺日趋成熟,但未有厂家生产和提供添加MAG的家禽饲料,未来的研究可关注MAG家禽饲料的生产工艺研发与流水线生产。MAG作为饲料添加剂机制的深入探究,生产工艺的研发,将为MAG应用至家禽生产及疾病防治提供理论基础和技术支撑,为北京鸭乃至家禽养殖行业防治大肠杆菌病提供新的思路与方法。

4 结 论

本研究条件下,日粮添加100、200和300 mg/kg的厚朴酚均可在一定程度上提高感染大肠杆菌北京鸭免疫功能、改善肠道形态结构及屏障功能、保护肠道健康。其中,100和200 mg/kg厚朴酚处理组效果较好,能产生与维吉尼亚霉素同等甚至更优的效果,因此在北京鸭日粮中添加厚朴酚的推荐剂量为100和200 mg/kg。

参考文献 References

- [1] 蔡辉益,刘娇,常文环,PIRZADO Shoaib Ahmed,李勇,郑爱娟,陈志敏,刘国华.植物精油对大肠杆菌攻毒肉鸭生长性能、血清生化指标和免疫功能的影响[J].动物营养学报,2020,32(8):3670-3680
Cai H Y, Liu J, Chang W H, Pirzado SA, Li Y, Zheng A J, Chen Z M, Liu G H. Effects of plant essential oil on growth performance, serum

- biochemical indexes and immune function of ducks challenged by *Escherichia coli*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(8): 3670-3680 (in Chinese)
- [2] 蒙晓雷.鸭大肠杆菌病的防治[J].中国畜禽种业,2020,16(1):190-191
Meng X L. Control of *Escherichia coli* disease in ducks[J]. *The Chinese Livestock and Poultry Breeding*, 2020, 16(1): 190-191 (in Chinese)
- [3] Li C, Li S Z, Liu J M, Cai H Y, Liu G H, Deng X J, Chang W H. *Escherichia coli* O88 induces intestinal damage and inflammatory response through the oxidative phosphorylation and ribosome pathway in Pekin ducks[J]. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2022, 12: 940847
- [4] Hu J G, Afayibo D J A, Zhang B B, Zhu H, Yao L, Guo W Q, Wang X Y, Wang Z Y, Wang D, Peng H H, Tian M X, Qi J J, Wang S H. Characteristics, pathogenic mechanism, zoonotic potential, drug resistance, and prevention of avian pathogenic *Escherichia coli* (APEC) [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1049391
- [5] 中华人民共和国农业农村部公告第194号[J].浙江畜牧兽医,2020,(1):28
Announcement of ministry of agriculture and rural affairs of the People's Republic of China No. 194 [J]. *Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022, (1): 28 (in Chinese)
- [6] 刘砚涵,黄丽卿,张建伟,宫晓玮,夏兆飞.丁酸梭菌对填饲北京鸭生长性能、免疫功能及血液抗氧化能力的影响[J].中国家禽,2019,(10):31-35
Liu Y H, Huang L Q, Zhang J W, Gong X W, Xia Z F. Effects of clostridium butyricum on growth performance, immune function and serum antioxidative capacity of force-feeding Pekin ducks [J]. *China Poultry*, 2019, (10): 31-35 (in Chinese)
- [7] 高文文,安柯颖,李鹏,袁建敏,李蕾,夏兆飞.酿酒酵母菌对北京鸭生产性能、免疫和抗氧化功能的影响[J].中国畜牧杂志,2022,58(12):247-253
Gao W W, An K Y, Li P, Yuan J M, Li L, Xia Z F. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* on production performance, immunity and antioxidant function of Pekin ducks[J]. *Science and Technology*, 2022, 58 (12): 247-253 (in Chinese)
- [8] Ibrahim R A, Cryer T L, Lafi S Q, Basha E A, Good L, Tarazi Y H. Identification of *Escherichia coli* from broiler chickens in Jordan, their antimicrobial resistance, gene characterization and the associated risk factors[J]. *BMC Veterinary Research*, 2019, 15(1):159
- [9] Sarrica A, Kirika N, Romeo M, Salmons M, Diomedea L. Safety and toxicology of magnolol and honokiol[J]. *Planta Medica*, 2018, 84(16): 1151-1164
- [10] 潘亭立,李浩,宋泽和,范志勇.厚朴多酚的生物学功能及其饲用化前景[J].动物营养学报,2019,31(8):3529-3534
Pan T L, Li H, Song Z H, Fan Z Y. Biological function and feeding prospects of magnolia polyphenols [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(8): 3529-3534 (in Chinese)
- [11] Zhang J H, Chen Z X, Huang X H, Shi W M, Zhang R, Chen M L, Huang H, Wu L H. Insights on the multifunctional activities of magnolol [J]. *BioMed Research International*, 2019, 2019: 1847130
- [12] 田琦,高凤仙,马现永,余苗.厚朴酚的生理功能及其在家禽生产中的应用[J].动物营养学报,2022,34(4):2114-2122
Tian Q, Gao F X, Ma X Y, Yu M. Biological function of magnolol and

- its application in poultry production [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(4): 2114-2122 (in Chinese)
- [13] Miles T D, McLaughlin W, Brown P D. Antimicrobial resistance of *Escherichia coli* isolates from broiler chickens and humans [J]. *BMC Veterinary Research*, 2006, 2:7
- [14] Deng Y L, Han X F, Tang S X, Li C J, Xiao W J, Tan Z L. Magnolol and honokiol attenuate apoptosis of enterotoxigenic *Escherichia coli*-induced intestinal epithelium by maintaining secretion and absorption homeostasis and protecting mucosal integrity [J]. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 2018, 24: 3348-3356
- [15] Chen F, Zhang H, Du E C, Fan Q W, Zhao N, Jin F, Zhang W Z, Guo W Z, Huang S W, Wei J T. Supplemental magnolol or honokiol attenuates adverse effects in broilers infected with *Salmonella pullorum* by modulating mucosal gene expression and the gut microbiota [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2021, 12(1):87
- [16] 梅华迪, 李袁飞, 马现永, 余苗. 厚朴酚对动物肠道健康的影响及其调控机制[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(4): 2111-2118
- Mei H D, Li Y F, Ma X Y, Yu M. Effect and regulatory mechanisms of Magnolol on animal intestinal health [J]. *Chinese Journal Of Animal Nutrition*, 2023, 35(4): 2111-2118 (in Chinese)
- [17] 韩姗姗, 魏笑笑, 李志中, 高绪慧, 武梅, 秦立廷. 一株大肠杆菌分离株和质粒菌株 25922 对商品肉鸭的致病性试验 [J]. *中国家禽*, 2018, 40(19): 67-69
- Han S S, Wei X X, Li Z Z, Gao X H, Wu M, Qin L T. Pathogenicity Test of An Isolate and Quality-control Strain 25922 of *E. coli* in Meat Duck [J]. *China Poultry*, 2018, 40(19):67-69 (in Chinese)
- [18] 傅仕嵘, 张勇, 张本宏, 钱保国. 雏鸭大肠杆菌病的诊断与防治 [J]. *山东畜牧兽医*, 2018, 39(5):19-20
- Fu S R, Zhang Y, Zhang B H, Qian B G. Diagnosis and prevention of *Escherichia coli* disease in ducklings [J]. *Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018, 39(5):19-20 (in Chinese)
- [19] Li C, Li S Z, Liu J M, Cai H Y, Liu G H, Deng X J, Chang W H. *Escherichia coli* O88 induces intestinal damage and inflammatory response through the oxidative phosphorylation and ribosome pathway in Pekin ducks [J]. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 2022, 12:940847
- [20] Xie Q, Xie K H, Yi J H, Song Z H, Zhang H H, He X. The effects of magnolol supplementation on growth performance, meat quality, oxidative capacity, and intestinal microbiota in broilers [J]. *Poultry Science*, 2022, 101(4):101722
- [21] Lin Q, Zhao J F, Xie K, Wang Y S, Hu G L, Jiang G T, Dai Q Z, Fan Z Y, He J H, He X, Hou D X. Magnolol additive as a replacer of antibiotic enhances the growth performance of Linwu ducks [J]. *Animal Nutrition*, 2017, 3(2):132-138
- [22] Liu Y C, Li Y F, Yu M, Tian Z M, Deng J P, Ma X Y, Yin Y L. Magnolol supplementation alters serum parameters, immune homeostasis, amino acid profiles, and gene expression of amino acid transporters in growing pigs [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(18):13952
- [23] Liu J, Liu G H, Chen Z M, Zheng A J, Cai H Y, Chang W H, Li C, Chen J, Wu Z K. Effects of glucose oxidase on growth performance, immune function, and intestinal barrier of ducks infected with *Escherichia coli* O88 [J]. *Poultry Science*, 2020, 99(12):6549-6558
- [24] Li C, Li Y, Li S Z, Chen S, Liu G H, Deng X J, Chang W H, Cai H Y. *Bacillus subtilis* protects the ducks from oxidative stress induced by *Escherichia coli*: Efficacy and molecular mechanism [J]. *Antioxidants*, 2022, 11(10): 1951
- [25] Lin Q, Zhao J F, Xie K, Wang Y S, Hu G L, Jiang G T, Dai Q Z, Fan Z Y, He J H, He X, Hou D X. Magnolol additive as a replacer of antibiotic enhances the growth performance of Linwu ducks [J]. *Animal Nutrition*, 2017, 3(2): 132-138
- [26] Chen F, Zhang H, Du E C, Jin F, Zheng C, Fan Q W, Zhao N, Guo W Z, Zhang W, Huang S W, Wei J T. Effects of magnolol on egg production, egg quality, antioxidant capacity, and intestinal health of laying hens in the late phase of the laying cycle [J]. *Poultry Science*, 2021, 100(2): 835-843
- [27] Zhao L, Xiao H T, Mu H X, Huang T, Lin Z S, Zhong L L D, Zeng G Z, Fan B M, Lin C Y, Bian Z X. Magnolol, a natural polyphenol, attenuates dextran sulfate sodium-induced colitis in mice [J]. *Molecules*, 2017, 22(7): 1218
- [28] Yang T C, Zhang S W, Sun L N, Wang H, Ren A M. Magnolol attenuates sepsis-induced gastrointestinal dysmotility in rats by modulating inflammatory mediators [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2008, 14(48): 7353-7360
- [29] Miao B, Zhang S W, Wang H, Yang T C, Zhou D S, Wang B E. Magnolol pretreatment prevents sepsis-induced intestinal dysmotility by maintaining functional interstitial cells of Cajal [J]. *Inflammation*, 2013, 36(4): 897-906
- [30] Liu J, Liu G H, Chen Z M, Zheng A J, Cai H Y, Chang W H, Li C, Chen J, Wu Z K. Effects of glucose oxidase on growth performance, immune function, and intestinal barrier of ducks infected with *Escherichia coli* O88 [J]. *Poultry Science*, 2020, 99(12): 6549-6558
- [31] 闵于明, 刘丹. 家禽肠道健康关键营养技术 [J]. *饲料工业*, 2022, 43(1): 2-7
- Guo Y M, Liu D. Nutritional strategies to regulate the intestinal health of poultry [J]. *Feed Industry*, 2022, 43(1): 2-7 (in Chinese)
- [32] Xia T, Zhang J Z, Han L Y, Jin Z X, Wang J, Li X, Man S L, Liu C X, Gao W Y. Protective effect of magnolol on oxaliplatin-induced intestinal injury in mice [J]. *Phytotherapy Research: PTR*, 2019, 33(4): 1161-1172
- [33] Mo J H, Xiang J, Li J, Yang M, Zhang Z D, Zhang L F, Zhang G Y, Yang Y Q, Liu G Y, Lu Y J, Hu D D, Si H B. Natural Magnolol ameliorates coccidiosis infected with *Eimeria tenella* by affecting antioxidant, anti-inflammatory, and gut microbiota of chicks [J]. *Poultry Science*, 2023, 102(11): 102975
- [34] Lee S H. Intestinal permeability regulation by tight junction: Implication on inflammatory bowel diseases [J]. *Intestinal Research*, 2015, 13(1): 11-18
- [35] Chelakkot C, Ghim J, Ryu S H. Mechanisms regulating intestinal barrier integrity and its pathological implications [J]. *Experimental & Molecular Medicine*, 2018, 50(8): 1-9
- [36] Luissint A C, Parkos C A, Nusrat A. Inflammation and the intestinal barrier: Leukocyte - epithelial cell interactions, cell junction remodeling, and mucosal repair [J]. *Gastroenterology*, 2016, 151(4): 616-632

责任编辑: 秦梅



第一作者简介：严丹,硕士研究生。2022年获得中国农业大学农学学士学位,同年至中国农业大学动物医学院攻读硕士学位。本科阶段荣获校级优秀学生奖学金、学习优秀一等奖学金、三好学生、优秀毕业生等多项荣誉,代表中国农业大学参加第六届全国大学生动物医学专业(本科)技能大赛并荣获特等奖,参与撰写《芳香烃受体 AhR 在免疫调节及感染性疾病中的作用》一文,并发表于《中国兽医杂志》。研究生阶段多次荣获硕士学业二等奖学金,参与家禽疫病相关课题研究项目。



通讯作者简介：夏兆飞,中国农业大学动物医学院临床系教授、博士生导师。长期在中国农业大学动物医学院从事教学、科研和兽医临床工作。现任中国农业大学动物医学院临床兽医系系主任、教学动物医院院长,《中国兽医杂志》副主编,中国兽医协会宠物诊疗分会会长,中国营养学会伴侣动物营养与食品分会副会长,北京小动物诊疗行业协会会长。主持国家自然科学基金、北京市自然科学基金、北京市农业产业体系家禽创新体系等科研项目10余项,发表论文150多篇。主编或主译《兽医临床病理学》《兽医(犬猫)临床病例分析》《犬猫营养需要》《犬猫营养学》10余部。主讲《兽医临床诊断学》《兽医临床病例分析》和《小动物临床营养学》等课程。主要研究领域有兽医内科疾病诊疗、宠物临床营养与食品生产、动物医院经营管理等。