

单雯涵, 薛昱凡, 贺文静, 等. 日粮添加桉叶素对肉鸡生长性能、血清抗氧化指标及肠道健康的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (4): 36-44.  
SHAN W H, XUE Y F, HE W J, et al. Effect of dietary cineole supplementation on growth performance, serum antioxidant index and intestinal health in broilers [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (4): 36-44.

## 日粮添加桉叶素对肉鸡生长性能、血清抗氧化指标及肠道健康的影响

单雯涵, 薛昱凡, 贺文静, 上官康, 李圆, 李春梅\*

(南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 旨在探究日粮添加不同水平桉叶素对肉鸡生长性能、血清抗氧化指标及肠道健康的影响。选取 144 只健康 1 日龄雄性 AA 肉鸡, 随机分为 3 组, 每组 6 个重复, 每个重复 8 只, 其中: 对照组 (CON 组) 饲喂基础日粮, 低浓度桉叶素组 (CIN-L 组) 和高浓度桉叶素组 (CIN-H 组) 分别在基础日粮中添加 500 和 1 000 mg/kg 的桉叶素粉剂, 试验期共 42 d。结果: 与 CON 组相比, CIN-L 组和 CIN-H 组的平均日增重显著升高 ( $P<0.05$ ), CIN-H 组料重比显著降低 ( $P<0.05$ ); CIN-L 组和 CIN-H 组血清中丙二醇 (MDA) 含量显著降低 ( $P<0.05$ ), CIN-L 组的血清中总抗氧化能力 (T-AOC) 和总超氧化物歧化酶 (T-SOD) 活性显著提高 ( $P<0.05$ )。各组十二指肠和空肠绒毛高度、隐窝深度和绒隐比均无显著差异 ( $P<0.05$ ), CIN-H 组回肠绒毛高度显著高于 CON 组 ( $P<0.05$ ), CIN-L 组隐窝深度显著低于 CON 组和 CIN-H 组 ( $P<0.05$ ), 而绒隐比显著高于 CON 组 ( $P<0.05$ )。CIN-H 组十二指肠闭合蛋白 (Occludin) 和闭锁小带蛋白-1 (ZO-1) mRNA 表达水平显著低于 CON 组 ( $P<0.05$ ); CIN-H 组空肠密封蛋白-1 (Claudin-1) 和黏蛋白 2 (MUC2) mRNA 表达水平显著低于 CIN-L 组 ( $P<0.05$ ), 黏蛋白 5AC (MUC5AC) mRNA 表达水平显著低于 CON 组 ( $P<0.05$ ); CIN-H 组回肠 MUC2 和黏蛋白 5B (MUC5B) mRNA 表达水平显著低于 CON 组 ( $P<0.05$ )。综上, 日粮添加桉叶素可提高肉鸡的生长性能和抗氧化能力, 改善肠道形态和屏障功能, 本试验条件下的最适添加量为 500 mg/kg。

**关键词:** 桉叶素; 肉鸡; 生长性能; 抗氧化能力; 肠道健康

**中图分类号:** S831.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-5130(2025)04-0036-09

## Effect of dietary cineole supplementation on growth performance, serum antioxidant index and intestinal health in broilers

SHAN Wenhan, XUE Yufan, HE Wenjing, SHANGGUAN Kang, LI Yuan, LI Chunmei\*

(College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** The aim was to investigate the effects of dietary supplementation with different levels of cineole on growth performance, serum antioxidant index and intestinal health of broilers. A total of 144 healthy 1-day-old AA broilers were selected for the experiment and were randomly divided into 3 groups with 6 replicates of 8 birds each. The CON group was fed with the basal diet, while the CIN-L group and the CIN-H group had their basal diets supplemented with cineole at 500 and 1 000 mg/kg, respectively. The total experimental period was 42 d. The results showed that the average daily gain was significantly higher in the CIN-L and CIN-H groups compared with the CON group ( $P<0.05$ ), and the feed-to-weight ratio was significantly lower in the CIN-H group ( $P<0.05$ ). The propylene glycol content was significantly lower in the CIN-L and CIN-H groups than in the CON group ( $P<0.05$ ). The total antioxidant capacity and total superoxide dismutase activity were significantly higher in the CIN-L group than in the CON group ( $P<0.05$ ). However, there were no significant differences in duodenal and jejunal villus heights, crypt depths, and villus heights/crypt depths between the CIN-H group and the CON group ( $P>0.05$ ). The height of ileal villi in the CIN-H group was significantly increased compared with that of the CON group ( $P<0.05$ ), and the depth of crypts in the CIN-L group was significantly lower than those in the CON group and the CIN-H group ( $P<0.05$ ). The crypt depth of the CIN-L group was significantly lower than those of the CON group and the CIN-H group ( $P<0.05$ ), and villus height/crypt depth was significantly higher than that of the CON group ( $P<0.05$ ). In addition, the expression levels of Occludin and ZO-1 mRNA in the duodenum of broiler chickens in CIN-H group were significantly lower than those in the CON group ( $P<0.05$ ). The expression levels of Claudin-1 and MUC2

收稿日期: 2024-08-09; 修回日期: 2025-02-10

基金项目: 江苏省大学生创新创业训练计划项目 (202310307196Y)

第一作者: 单雯涵, 女, 本科生

\* 通信作者: 李春梅, 博士, 教授, 研究方向: 畜禽环境与健康, E-mail: chunmeili@njau.edu.cn。

mRNA in the jejunum of the CIN-H group were significantly lower than those of the CIN-L group ( $P < 0.05$ ). The expression levels of MUC2 in the jejunum of the CIN-L group were significantly lower than those in the CIN-H group ( $P < 0.05$ ). The MUC5AC mRNA expression levels were significantly lower in the CIN-H group compared with those in the CON group ( $P < 0.05$ ). The ileum of the CIN-H group had significantly lower MUC2 and MUC5B mRNA expression levels than those in the CON group ( $P < 0.05$ ). In conclusion, the dietary supplementation of cineole improved the growth performance and antioxidant capacity of broiler chickens, as well as the morphology and barrier function of the intestinal tract. Under the conditions of this test, the optimal inclusion level of cineole was to be 500 mg/kg.

**Keywords:** cineole; broiler; growth performance; antioxidant capacity; intestinal health

禽肉富含高质量蛋白质、维生素和矿物质，是我国最主要的肉类消费选择之一。但是，随着我国肉鸡养殖规模的不断扩大，集约化、封闭式的养殖模式导致肉鸡养殖过程中不断出现健康问题，其中氧化应激和肠道健康备受关注<sup>[1-2]</sup>。氧化应激会损害肉鸡的免疫系统，增加患病风险，并影响生长性能和饲料利用效率。饲养管理、环境以及营养等因素均会诱导氧化应激，威胁肉鸡健康和产品质量，给肉鸡生产带来巨大损失<sup>[3]</sup>。肠道是肉鸡最大的免疫器官之一，也是营养吸收的主要场所。在养殖过程中，家禽肠道易受到大肠杆菌、产气荚膜梭菌和沙门菌等致病微生物的入侵，引起炎症反应。过度的炎症反应会打破机体免疫稳态，并且进一步造成肉鸡肠道损伤，导致消化功能紊乱。多年来抗生素都被应用在家禽养殖中以促进生长和提高抗病能力。但是抗生素的滥用导致耐药性增加、环境污染和食品安全隐患等问题，畜牧养殖中促生长类抗生素饲料添加剂已被禁用。因此，寻找绿色高效的新型饲料添加剂，通过营养调控手段来促进肉鸡生长十分重要。

1, 8-桉叶素，又名桉叶素，为环状单萜类化合物，是桉树精油的主要成分，含量高达84%，主要存在于桃金娘科植物蓝桉和樟科植物樟树中<sup>[4]</sup>。目前1, 8-桉叶素已被广泛应用于生物医药、日用品工业以及食品添加剂等领域。1, 8-桉叶素还因具有抗菌、抗炎和抗氧化等生物学特性，被广泛应用于畜牧养殖行业<sup>[5]</sup>。有研究表明，在饲料中添加适量桉树精油，可显著提高笼养白羽肉鸡的生长性能和抗氧化能力<sup>[6]</sup>。日粮补充桉树和薄荷的混合精油，可以改善艾美球虫属和新城疫病毒攻毒肉鸡的生长性能<sup>[7-8]</sup>。另外，通过在肉鸡饲料中添加1%和3%的桉叶素微胶囊能够有效预防因热应激引起的肉鸡肠道菌群紊乱、体重下降和炎症反应<sup>[9]</sup>。

富含桉叶素的精油在养殖生产上的应用研究多有报道，但纯化的桉叶素在肉鸡养殖中的相关研究不多，且日粮中桉叶素的最适添加量也不确定。桉叶素相比桉叶精油在养殖研究中具有成分单一、稳定性高、剂量控制精确、成本效益好且不良反应风险较低

等优势。因此，本试验以AA肉鸡为试验对象，探究日粮添加不同浓度桉叶素对肉鸡生长性能、抗氧化指标和肠道屏障功能的影响，为桉叶素在肉鸡生产中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用雄性AA肉鸡购自南京特给力种植专业合作社；桉叶素粉剂由云南绿宝香精香料股份有限公司提供，1, 8-桉叶素含量大于10%。总抗氧化能力(T-AOC)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)测定试剂盒购自南京建成生物工程研究所；TRIzol试剂盒购自南京诺唯赞生物科技有限公司；cDNA反转录试剂盒、2×Universal SYBR Green Fast qPCR Mix购自武汉爱博泰克生物科技有限公司。

### 1.2 试验设计

本试验经过南京农业大学动物保护与使用委员会批准。试验采取单因素完全随机试验设计，共选取144只健康1日龄雄性AA肉鸡，体重无显著差异，随机分为对照组(CON组)、低浓度桉叶素组(CIN-L组)和高浓度桉叶素组(CIN-H组)，每组6个重复，每个重复8只。3组分别在基础日粮中添加0、500、1 000 mg/kg的桉叶素粉剂。试验期为42 d。

### 1.3 肉鸡基础日粮及饲养管理

试验在南京农业大学动物实验中心进行，采用4层叠笼饲养。试验开始前将鸡舍和养殖用具全面彻底消毒，常规免疫，试验期间自由采食粉料和饮水，试验基础饲料参照美国NRC(1994)标准进行配制，具体配方及营养水平见表1。在试验期间，严格遵守肉鸡饲养最佳温度及光照时间，1~3 d时温度控制在34~35℃，4~8 d时温度控制在32~33℃，之后每周降低2℃，最终温度控制在22~23℃。采用自然光加白炽灯补光，前4 d每天光照24 h，之后每天黑暗时间增加30 min，直至光照与黑暗时间比为20:4时，保持至试验结束。

表 1 肉鸡基础饲料组成及营养水平 (风干基础)

项目	1~21 日龄	22~42 日龄
饲料组成/%		
玉米	57.01	61.52
玉米蛋白粉	3.40	4.60
豆粕	31.50	25.00
石粉	1.20	1.40
豆油	3.10	4.10
磷酸氢钙	2.00	1.70
L-赖氨酸	0.34	0.30
DL-蛋氨酸	0.15	0.08
食盐	0.30	0.30
预混料 <sup>1)</sup>	1.00	1.00
营养水平 <sup>2)</sup>		
粗蛋白质/%	21.33	19.49
赖氨酸/%	1.21	1.04
蛋氨酸/%	0.50	0.41
有效磷/%	0.46	0.40
钙/%	1.00	0.98
(蛋氨酸+半胱氨酸)/%	0.86	0.75
代谢能/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	12.55	13.05

注: <sup>1)</sup> 预混料为每千克饲料提供: VA 10 000 U, VD<sub>3</sub> 3 000 U, VE 30 U, 硫胺素 2.2 mg, VK<sub>3</sub> 1.3 mg, 核黄素 8 mg, Mn 110 mg, 烟酸 40 mg, 氯化胆碱 400 mg, 泛酸钙 10 mg, 吡哆醇 4 mg, 叶酸 1 mg, 生物素 0.04 mg, VB<sub>12</sub> 0.013 mg, Fe 80 mg, Zn 65 mg, Cu 8.0 mg, I 1.1 mg, Se 0.3 mg;

<sup>2)</sup> 代谢能为计算值, 其余为实测值。

## 1.4 测定指标与方法

### 1.4.1 生长性能

试验期间每天检查鸡的健康状况, 以重复为单位, 于试验第 1 天对雏鸡进行初始体重的称重, 记录每个重复每天的饲喂量; 在 42 d 时, 对每个重复进行 (空腹 12 h, 自由饮水) 称重, 并统计各重复结料量和死淘数。计算平均日增重 (ADG)、平均日采食量 (ADFI) 和料重比 (F/G)。

### 1.4.2 血清抗氧化指标

42 d 时翅静脉采集血液样本, 自然凝固后以 3 000 g 离心 10 min 分离上层血清, -20 °C 冰箱保存备用。参考试剂盒说明书测定血清中 MDA 的含量、T-AOC 的水平、CAT 和 T-SOD 的活力。

### 1.4.3 肠道组织形态观察

在 42 d 对试验鸡禁食 12 h 后, 从每个重复中随机选取 1 只鸡进行屠宰, 分离十二指肠、空肠和回肠, 取各肠段中部约 3 cm, 置于 4% 多聚甲醛固定, 按照常规方法制备石蜡切片, 采用 HE 染色法对各肠段进行染色。每个肠段取 8 个非连续切片, 每张切片随机选取 8 个典型视野, 使用 ImageJ-win64/ImageJ 图像分析软件测量各肠段绒毛高度 (VH)、隐窝深度 (CD), 并计算绒隐比 (VH/CD)。

### 1.4.4 肠道屏障相关基因 mRNA 水平测定

收集的十二指肠、空肠和回肠样本 -80 °C 冻存。通过 TRIzol 试剂法提取十二指肠、空肠、回肠的总 RNA, 取混匀后的 RNA 滴于分光光度计上检测其浓度和纯度, 并将 RNA 样品浓度统一稀释到 500 ng/μL。使用 cDNA 反转录试剂盒对 RNA 进行反转录, 反应程序为: 37 °C 孵育 2 min, 55 °C 孵育 15 min, 85 °C 变性 5 min, 最后降温保持 4 °C, 分装保存在 -20 °C 冰柜待用。通过 GenBank 网站获取所需基因序列, 引物由上海生工生物有限公司合成, 具体基因引物序列见表 2。采用 SYBR<sup>®</sup> Green I 嵌合荧光法, 以 β-actin 为内参基因, 对所有目的基因在 QuantStudio<sup>™</sup>7 实时荧光定量 PCR 仪器 (Applied Biosystems, 新加坡) 上进行荧光定量 PCR 检测, 具体操作根据 2× Universal SYBR Green Fast qPCR Mix 试剂盒进行, 反应程序为: 95 °C 3 min; 95 °C 5 s, 60 °C 30 s, 循环 40 次。采用 2<sup>-ΔΔCt</sup> 法计算各目的基因 mRNA 表达水平。

表 2 荧光定量 PCR 引物序列

基因名称	引物序列	产物大小/bp	序列号
β-actin	F: GCCAACAGAGAGAAGATGACAC	140	NM_205518.2
	R: GTAACACCATCACCAGAGTCCA		
Occludin	F: TCGCCTCCATCGTCTACATC	323	XM_046904540.1
	R: GTTCTTACCCACTCTCTCCA		
ZO-1	F: ACAGCTCATCAGCCTCTCT	125	XM_046925214.1
	R: TGAAGGCTTACAGGAATGG		
Claudin-1	F: CATACTCTGGGTCTGTTGGT	100	NM_001013611.2
	R: GACAGCCATCCGCATCTTCT		
MUC2	F: CCCTGGAAGTAGAGGTGACTG	143	XM_040673077.2
	R: TGACAAGCCATTGAAGGACA		

续表2

基因名称	引物序列	产物大小/bp	序列号
MUC5AC	F: GTCAAGTGCCAGCCTGTTAC	131	XM_040673078.2
	R: TGTGTAGTGCCGCTTCCA		
MUC5B	F: ATGATGCTAGGAAGAGGAATGGT	113	XM_046917694.1
	R: TGGTTCTGAGATGCCTGGATTA		

注:  $\beta$ -actin 为  $\beta$ -肌动蛋白, Occludin 为闭合蛋白, ZO-1 为闭锁小带蛋白-1, Claudin-1 为密封蛋白-1, MUC2 为黏蛋白 2, MUC5AC 为黏蛋白 5AC, MUC5B 为黏蛋白 5B。

### 1.5 数据统计与分析

使用 Microsoft Excel 2020 对原始数据进行记录与整理, 用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 并用 Turkey 进行多重比较,  $P < 0.05$  表示差异显著。试验数据用“平均值 $\pm$ 标准误”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 日粮添加桉叶素对肉鸡生长性能的影响

由表 3 可知, 与 CON 组相比, 添加桉叶素组 ADG 均显著提高 ( $P < 0.05$ ), CIN-L 组与 CIN-H 组之间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 各组 ADFI 无显著差异 ( $P > 0.05$ ); CIN-H 组 F/G 显著低于 CON 组 ( $P < 0.05$ )。

表 3 日粮添加桉叶素对肉鸡生长性能的影响 ( $n=6$ )

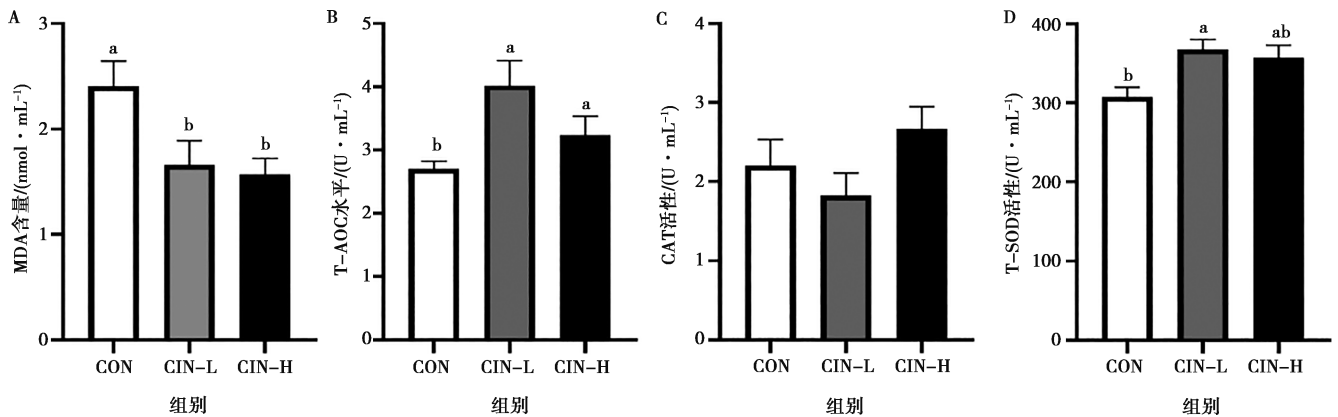
指标	CON 组	CIN-L 组	CIN-H 组
ADG/g	33.86 $\pm$ 0.50 <sup>b</sup>	38.39 $\pm$ 1.19 <sup>a</sup>	39.62 $\pm$ 0.91 <sup>a</sup>
ADFI/g	62.84 $\pm$ 2.46	61.98 $\pm$ 1.41	61.45 $\pm$ 3.53
F/G	1.86 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	1.62 $\pm$ 0.07 <sup>ab</sup>	1.55 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>

注: 同行比较, 不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 日粮添加桉叶素对肉鸡血清抗氧化指标的影响

由图 1 可知, CIN-H 组和 CIN-L 组血清 MDA 含量显著低于 CON 组 ( $P < 0.05$ ); CIN-L 组 T-AOC 水平显著高于 CON 组 ( $P < 0.05$ ), 与 CIN-H 组无显著

差异 ( $P > 0.05$ ); 添加桉叶素组 CAT 活性与 CON 组间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); CIN-L 组 T-SOD 活性显著高于 CON 组 ( $P < 0.05$ ), 但与 CIN-H 组无显著差异 ( $P > 0.05$ )。



注: 不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 日粮添加桉叶素对肉鸡血清抗氧化指标的影响 ( $n=6$ )

### 2.3 日粮添加桉叶素对肉鸡肠道形态的影响

图 2 所示, 日粮添加桉叶素后肉鸡肠道组织结构并无明显变化。由表 4 可知, 各组间十二指肠 VH 无

显著差异 ( $P > 0.05$ ), CIN-L 组和 CIN-H 组 CD 显著高于 CON 组 ( $P < 0.05$ ), VH/CD 值显著低于 CON 组 ( $P < 0.05$ )。各组间空肠 VH、CD 和 VH/CD 值均

无显著差异 ( $P>0.05$ )。CIN-H 组回肠 VH 显著高于 CON 组和 CIN-L 组 ( $P<0.05$ )，CIN-L 组 CD 显著

低于 CON 组和 CIN-H 组 ( $P<0.05$ )，VH/CD 值显著高于 CON 组 ( $P<0.05$ )。

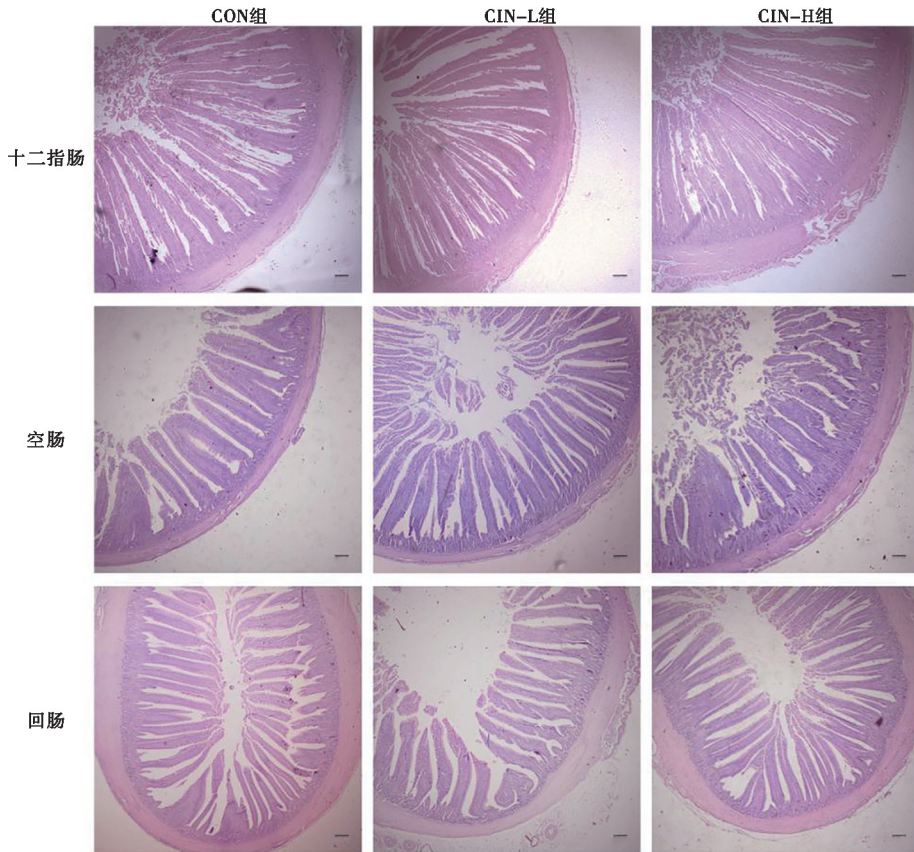


图 2 各组十二指肠、空肠、回肠 HE 染色切片肠道形态观察 (比例尺=500 μm)

表 4 日粮添加桉叶素对肉鸡肠道形态的影响 (n=6)

指标		CON 组	CIN-L 组	CIN-H 组
十二指肠	VH/μm	3 412.40±67.11	3 351.14±88.49	3 311.92±122.88
	CD/μm	279.06±11.07 <sup>b</sup>	345.64±19.02 <sup>a</sup>	391.87±19.21 <sup>a</sup>
	VH/CD	12.43±0.78 <sup>a</sup>	9.97±0.73 <sup>b</sup>	8.56±0.41 <sup>b</sup>
空肠	VH/μm	2 635.68±119.98	2 602.10±167.60	2 279.10±122.13
	CD/μm	418.78±31.82	365.98±23.67	424.05±34.51
	VH/CD	6.45±0.32	7.31±0.71	5.56±0.41
回肠	VH/μm	1 914.62±34.52 <sup>b</sup>	1 956.92±40.13 <sup>b</sup>	2 373.24±179.56 <sup>a</sup>
	CD/μm	309.41±12.78 <sup>a</sup>	240.21±19.58 <sup>b</sup>	324.36±18.65 <sup>a</sup>
	VH/CD	6.24±0.22 <sup>b</sup>	8.49±0.63 <sup>a</sup>	7.48±0.65 <sup>ab</sup>

#### 2.4 日粮添加桉叶素对肉鸡十二指肠组织屏障相关基因表达水平的影响

由图 3 可知，与 CON 组相比，CIN-H 组肉鸡十二指肠 Occludin 和 ZO-1 mRNA 表达水平显著降低

( $P<0.05$ )，CIN-L 组仅有 ZO-1 mRNA 表达水平显著降低 ( $P<0.05$ )。CIN-H 组和 CIN-L 组十二指肠 Claudin-1、MUC2、MUC5AC 和 MUC5B mRNA 表达水平与 CON 组相比均无显著差异 ( $P>0.05$ )。

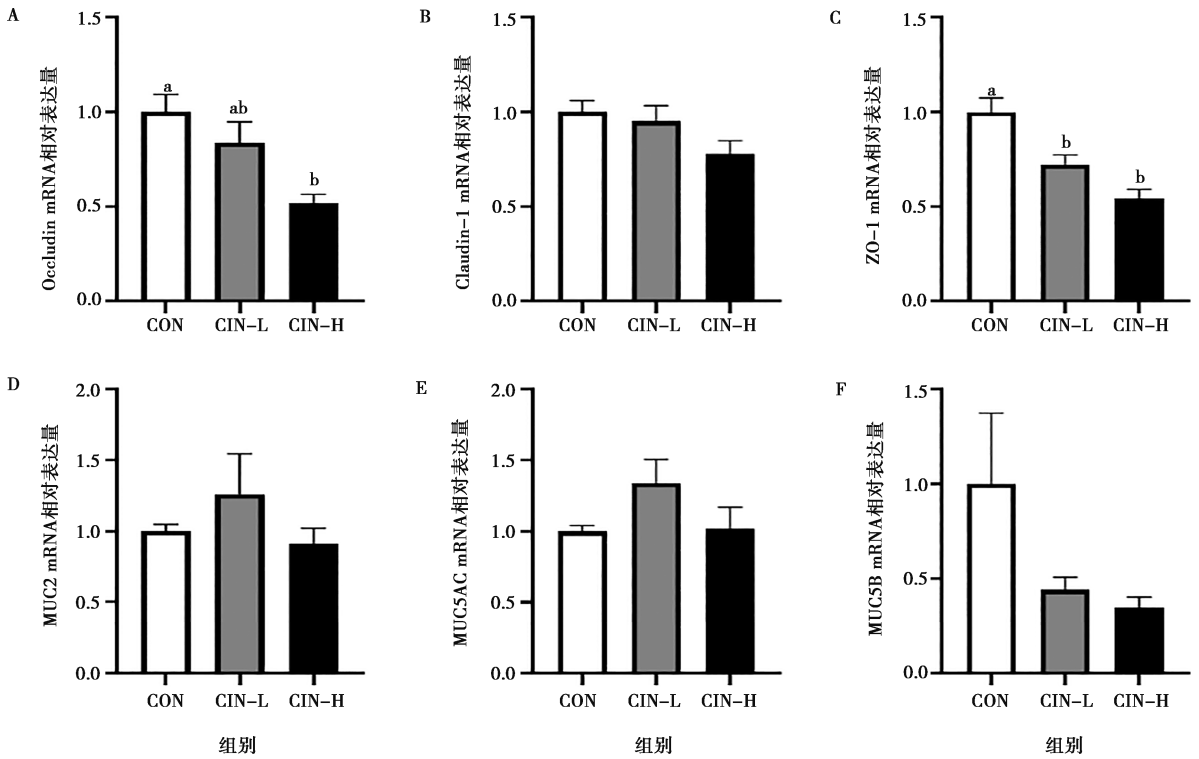


图3 日粮添加桉叶素对肉鸡十二指肠组织屏障相关基因 mRNA 相对表达水平的影响 (n=6)

### 2.5 日粮添加桉叶素对肉鸡空肠组织屏障相关基因表达水平的影响

由图4可知,与CON组相比,CIN-H组空肠组织中 Claudin-1 和 MUC5AC 的 mRNA 表达水平显著降低 ( $P < 0.05$ )。此外,CIN-L组 MUC2 mRNA 表达

水平显著高于CIN-H组 ( $P < 0.05$ ),但与CON组之间没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。CIN-L组和CIN-H组间 Occludin, ZO-1 和 MUC5B mRNA 表达水平均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

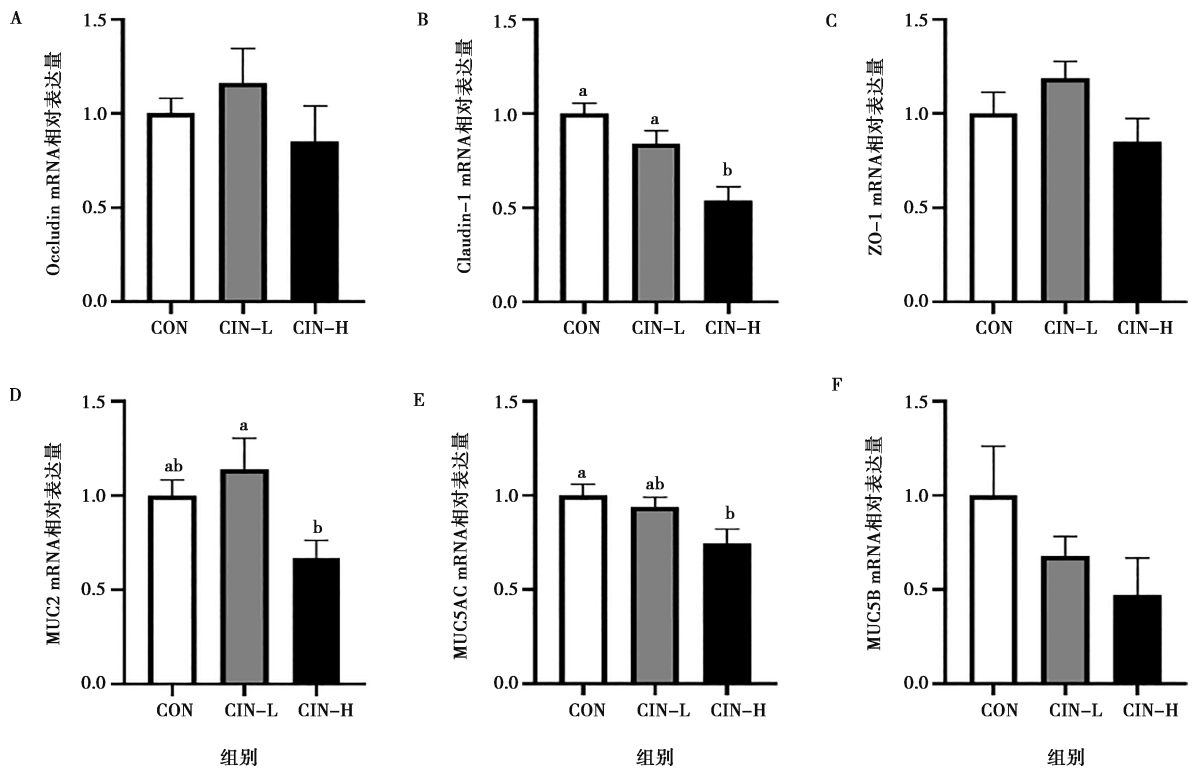


图4 日粮添加桉叶素对肉鸡空肠组织屏障相关基因 mRNA 相对表达水平的影响 (n=6)

## 2.6 日粮添加桉叶素对肉鸡回肠组织屏障相关基因表达水平的影响

由图 5 可知,相较于 CON 组, CIN-L 和 CIN-H 组肉鸡回肠组织 MUC2 mRNA 表达水平显著降低 ( $P < 0.05$ )。CIN-H 组 MUC5B mRNA 表达显著低于

CON 组 ( $P < 0.05$ ),但与 CIN-L 组之间没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。此外,与 CON 组相比, CIN-L 和 CIN-H 组回肠 Occludin、Claudin-1、ZO-1 和 MUC5AC mRNA 表达水平均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

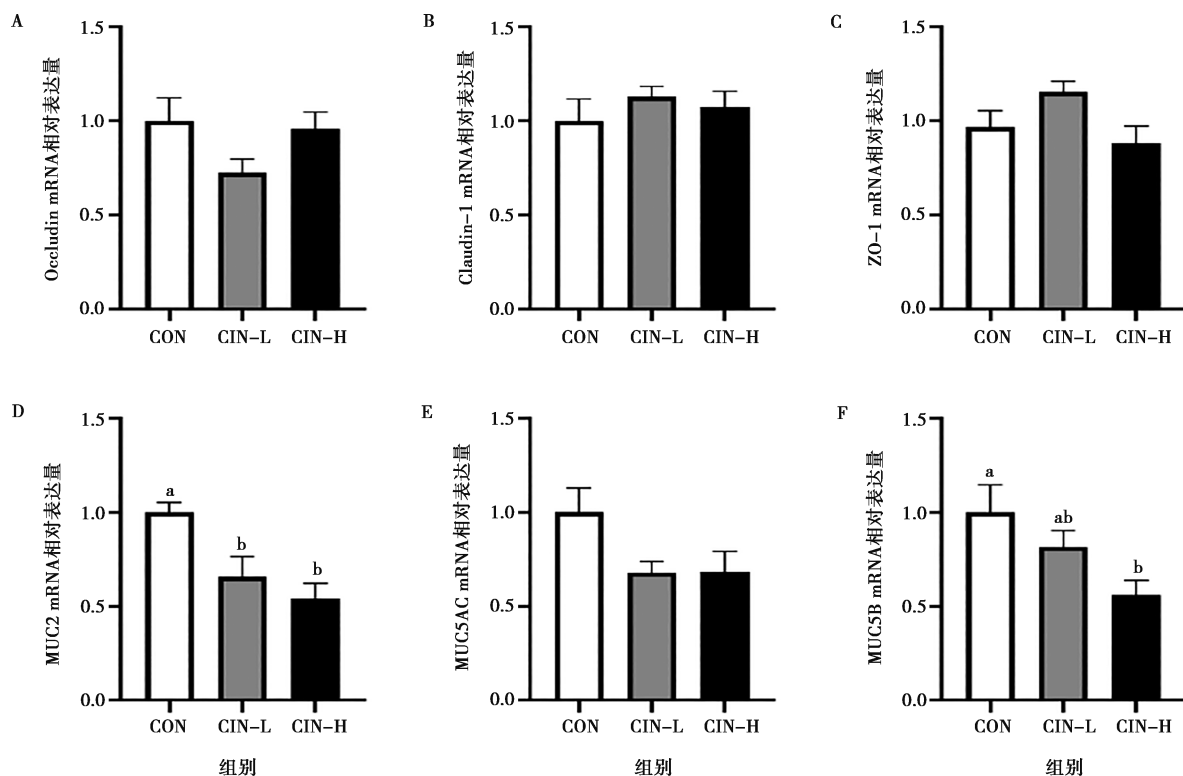


图 5 日粮添加桉叶素对肉鸡回肠组织屏障相关基因 mRNA 相对表达水平的影响 ( $n=6$ )

## 3 讨论

### 3.1 日粮添加桉叶素对肉鸡生长性能的影响

许多研究表明,富含桉叶素的精油在肉鸡生产中具有良好的应用效果。Hesabi-Nameghi 等<sup>[10]</sup>通过在肉鸡饮用水中添加从桉叶油、薄荷以及百里香酚中提取出的精油混合物 150 mg/kg,肉鸡的生长性能以及机体的免疫能力显著提升。Mohebodini 等<sup>[11]</sup>发现,在肉鸡日粮中添加浓度分别为 250、500、750 和 1 000 mg/kg 的桉树精油,不仅能够显著提升 42 d 试验期内肉鸡体重和饲料转化率,还能够改善肠道的营养消化率和微生物平衡。Trabelsi 等<sup>[12]</sup>研究发现,试验期内在日粮中添加精油 35 d,提高了肉鸡采食量,从而提高了肉鸡的生产性能。本研究发现,桉叶素可以降低肉鸡料重比、提升日增重,但是肉鸡采食量并没有显著变化,这可能意味着桉叶素对肉鸡生产性能的改善与食欲以及采食量无关。

### 3.2 日粮添加桉叶素对肉鸡血清抗氧化指标的影响

氧化应激会影响肉鸡的生长发育和机体健康状

态。T-AOC 是反映机体抗氧化能力的综合指标; T-SOD 和 CAT 是天然的自由基清除剂,能够将自由基转化为过氧化氢,从而保护组织细胞免受自由基的破坏; MDA 是细胞膜脂质过氧化的终产物,是评价脂质氧化损伤的重要指标<sup>[13]</sup>。胡湘云等<sup>[14]</sup>发现,在饲料中添加 200 mg/kg 的桉叶油、牛至精油以及肉桂醛的复合植物精油 60 d,能够改善肉鸡生长性能,增强机体抗氧化能力。Chen 等<sup>[15]</sup>研究发现,日粮中添加 0.8 g/kg 的桉树叶,可在乙醇诱导的急性氧化损伤条件下通过提高抗氧化酶活性来增强蛋鸡血清抗氧化能力,抑制氧化损伤。与上述研究结果相似,本试验发现,日粮添加桉叶素可提高肉鸡血清 CAT、T-AOC 和 T-SOD 活性,降低 MDA 含量,表明桉叶素可通过提高肉鸡血清抗氧化酶活性从而加强机体抗氧化功能。

### 3.3 日粮添加桉叶素对肉鸡肠道组织形态的影响

小肠是机体消化吸收营养物质的主要场所。肠绒毛的高度与肠上皮细胞数量呈显著相关,绒毛短时,成熟的绒毛细胞减少,对养分的吸收能力降低。隐窝

深度则体现细胞生成率, 隐窝变浅表明肠上皮细胞成熟率上升, 吸收功能增强<sup>[16-17]</sup>。Di 等<sup>[18]</sup>发现, 在日粮中添加 20~30 mg/kg 的 1, 8-桉叶素 42 d, 可增加肉鸡回肠绒毛高度, 而空肠绒毛高度、隐窝深度和绒隐比不受影响。Hosseinzadeh 等<sup>[19]</sup>研究发现, 在日粮中添加 100 mg/kg 的迷迭香精油 42 d, 可以增加肉鸡肠道的绒毛高度和隐窝深度以及降低绒隐比。Bahadoran 等<sup>[20]</sup>的研究表明, 日粮添加 0.2% 的含有 8.3% 1, 8-桉叶素的鼠尾草提取物 35 d, 可以增加高血压肉鸡回肠的绒毛长度, 但是降低了空肠的绒毛长度。本研究结果发现, 日粮中添加低浓度桉叶素可以增加肉鸡回肠的绒毛高度、降低隐窝深度、提高绒隐比, 但是对十二指肠、空肠的绒毛高度并无显著影响。提示日粮添加桉叶素主要通过影响回肠的绒毛形态结构来维持肠道健康。

### 3.4 日粮添加桉叶素对肉鸡肠道屏障功能的影响

肠道上皮机械屏障是保护肠道免受有害物质侵袭的关键屏障, 并为维持肠道上皮的选择透过性功能提供了结构基础。紧密连接蛋白是构成肠道上皮机械屏障的重要组成部分, 主要由三种跨膜蛋白组成, 分别是 Occludin、Claudins、ZO<sub>s</sub>, 这三类蛋白可以形成阻止病原体入侵的屏障<sup>[21]</sup>。肠道中的黏液层是重要的化学屏障, 其中黏蛋白是黏液层中的主要成分, 由杯状细胞合成和分泌。黏蛋白是一种覆盖在肠上皮细胞表面的大分子糖蛋白, 能防止外源致病菌入侵, 保护肠上皮细胞<sup>[22]</sup>。在鸡肠道组织中的黏蛋白 MUC2、MUC5AC 和 MUC5B 属于分泌型黏蛋白, 是肠道化学屏障的重要组成部分, 可作为判断肠道黏液屏障完整性的标志基因<sup>[23]</sup>。Ge 等<sup>[24]</sup>研究发现, 日粮中添加由 5% 香芹酚、3% 肉桂醛和 2% 辣椒油树脂组成的植物精油混合物, 能够上调番鸭空肠中 Claudin-1 和 ZO-1 的 mRNA 表达水平。孙香雪等<sup>[25]</sup>研究发现, 添加含有一定比例的肉桂醛、茴香醛和百里香酚复合植物精油在产气荚膜梭菌攻击下上调了 21 日龄肉鸡空肠 Occludin、Claudin-1、MUC5AC 的 mRNA 相对表达量以及 28 日龄肉鸡 ZO-1、Occludin、Claudin-1 的 mRNA 相对表达量。本试验结果显示, 日粮添加低浓度桉叶素对肉鸡十二指肠 MUC2 和 MUC5AC、空肠 Occludin、ZO-1、MUC2 基因表达量有上调的趋势, 但下调了肉鸡十二指肠 ZO-1、回肠 MUC2 基因表达量, 说明低浓度桉叶素对空肠的机械屏障和十二指肠的化学屏障略有增强, 但轻微损伤了回肠组织的完整性和选择通透性, 可能导致肠道的轻度炎症。Broom 等<sup>[26]</sup>研究发现, 炎症作为免疫反应的一部分, 有助于控制感染和修复组织, 但过度的炎症可能引发组织损伤并消耗营养。据 Sullivan 等<sup>[27]</sup>的研究, 富集

在屏障表面的淋巴细胞群  $\gamma\delta T$  细胞可以使上皮细胞激活消化酶和营养转运蛋白。因此, 低浓度桉叶素对回肠的损伤可能对消化酶的激活存在促进作用, 从而提高了小肠的消化率, 这与肉鸡生长性能试验中的结果一致。而高浓度桉叶素显著下调了十二指肠 Occludin 和 ZO-1、空肠 Claudin-1 和 MUC5AC 以及回肠 MUC5B 和 MUC2 的基因表达量, 表明高浓度桉叶素可能会使肉鸡十二指肠、空肠的肠道通透性增加, 黏蛋白分泌减少, 从而导致肠道的机械屏障和化学屏障受损。有研究发现, 给大鼠灌饲超过 600 mg/kg 及以上剂量桉叶油时, 可观察到亚急性毒性, 这种亚急性毒性的表现包括体重减轻以及肝脏和肾脏存在病变<sup>[28]</sup>。说明高剂量桉叶素可能会因其亚急性毒性作用对肠道屏障造成危害。但是由于桉叶素对肉鸡肠道屏障的影响研究较少, 因此桉叶素影响肉鸡肠道屏障的具体机理还有待进一步研究。

综上, 日粮添加桉叶素可改善肉鸡的生长性能, 提升血清抗氧化能力, 增强肠道屏障, 在本试验条件下, 最适添加量为 500 mg/kg。

### 参考文献:

- [1] HU W D, HE Z K, DU L, et al. Biomarkers of oxidative stress in broiler chickens attacked by lipopolysaccharide: a systematic review and meta-analysis [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2023, 266: 115606.
- [2] PARASKEUAS V, MOUNTZOURIS K C. Broiler gut microbiota and expressions of gut barrier genes affected by cereal type and phylogenetic inclusion [J]. *Anim Nutr*, 2019, 5 (1): 22-31.
- [3] OKE O E, AKOSILE O A, ONI A I, et al. Oxidative stress in poultry production [J]. *Poult Sci*, 2024, 103 (9): 104003.
- [4] 尹晓燕, 王燕燕. 1, 8-桉叶素药理作用及其机制研究进展 [J]. *生命的化学*, 2020, 40 (11): 2026-2034.
- [5] 柴雪萍, 梁光哲, 张晓燕, 等. 1, 8-桉叶素的功能及其在家禽生产中的应用 [J]. *饲料研究*, 2022, 45 (15): 124-127.
- [6] 秦国栋, 谭子超, 周东, 等. 不同桉树精油添加水平对笼养白羽肉鸡生长性能、免疫机能和抗氧化机能的影响 [J]. *动物营养学报*, 2021, 33 (3): 1408-1417.
- [7] BARBOUR E K, BRAGG R R, KARROUF G, et al. Control of eight predominant *Eimeria* spp. involved in economic coccidiosis of broiler chicken by a chemically characterized essential oil [J]. *J Appl Microbiol*, 2015, 118 (3): 583-591.
- [8] BARBOUR E K, SHAIB H, AZHAR E, et al. Modulation by essential oil of vaccine response and production improvement in chicken challenged with velogenic newcastle disease virus [J]. *J Appl Microbiol*, 2013, 1156, 1278-1286.
- [9] JIANG Z H, LUO M J, MA W T, et al. Protective effects of 1, 8-cineole microcapsules against inflammation and gut microbiota imbalance associated weight loss induced by heat stress in broiler chicken [J]. *Front Pharmacol*, 2020, 11: 585945.

- [10] HESABI NAMEGHI A, EDALATIAN O, BAKHSHALINEJAD R. Effects of a blend of thyme, peppermint and eucalyptus essential oils on growth performance, serum lipid and hepatic enzyme indices, immune response and ileal morphology and microflora in broilers [J]. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 2019, 103 (5): 1388–1398.
- [11] MOHEBODINI H, JAZI V, ASHAYERIZADEH A, et al. Productive parameters, cecal microflora, nutrient digestibility, antioxidant status, and thigh muscle fatty acid profile in broiler chickens fed with *Eucalyptus globulus* essential oil [J]. *Poult Sci*, 2021, 100 (3): 100922.
- [12] TRABELSI I, KTARI N, BEN SLIMA S, et al. Effects of supplementation with *L. plantarum* TN8 encapsulated in alginate–chitosan in broiler chickens [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 89: 677–681.
- [13] TONG Z K, LEI F H, LIU L X, et al. Effects of *Plotytarya strohila-cea* Sieb. et Zucc tannin on the growth performance, oxidation resistance, intestinal morphology and cecal microbial composition of broilers [J]. *Front Vet Sci*, 2021, 8: 806105.
- [14] 胡湘云, 吕玲燕, 袁朝原, 等. 复合植物精油对肉鸡生长性能、免疫功能及抗氧化能力的影响 [J]. *饲料研究*, 2023, 46 (10): 48–52.
- [15] CHEN Y, CHEN H, LI W, et al. Polyphenols in *Eucalyptus* leaves improved the egg and meat qualities and protected against ethanol-induced oxidative damage in laying hens [J]. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 2018, 102 (1): 214–223.
- [16] 赵文文, 袁文华, 沈军达, 等. 黄芪多糖和丁酸梭菌对蛋雏鸭免疫性能、抗氧化性能以及肠道形态的影响 [J]. *动物营养学报*, 2018, 30 (10): 4143–4150.
- [17] MIMAKI Y, YOKOSUKA A, KURODA M, et al. New bisdesmosidic triterpene saponins from the roots of *Pulsatilla chinensis* [J]. *J Nat-Prod*, 2001, 64 (9): 1226–1229.
- [18] DI Y T, CAO A Z, ZHANG Y X, et al. Effects of dietary 1, 8-cineole supplementation on growth performance, antioxidant capacity, immunity, and intestine health of broilers [J]. *Animals (Basel)*, 2022, 12 (18): 2415.
- [19] HOSSEINZADEH S, SHARIATMADARI F, KARIMI TORSHIZI M A, et al. *Plectranthus amboinicus* and rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) essential oils effects on performance, antioxidant activity, intestinal health, immune response, and plasma biochemistry in broiler chickens [J]. *Food Sci Nutr*, 2023, 11 (7): 3939–3948.
- [20] BAHADORAN S, TEYMOURI Y, HASSANPOUR H, et al. Effect of sage (*Salvia officinalis* L.) extract in antioxidant status and intestinal morphology of pulmonary hypertensive chickens [J]. *Vet Med Sci*, 2023, 9 (5): 2176–2184.
- [21] 杨雪, 高亚男, 王加启, 等. 霉菌毒素对肠道紧密连接蛋白的影响及其调控机制 [J]. *动物营养学报*, 2020, 32 (12): 5566–5577.
- [22] 柴毛毛, 郭玉光, 李阳源, 等. 博落回提取物替代抗生素对肉鸡生长性能、盲肠微生物及盲肠紧密连接的影响 [J]. *微生物学报*, 2020, 60 (8): 1718–1728.
- [23] HANSSON G C, JOHANSSON M E. The inner of the two Muc2 mucin-dependent mucus layers in colon is devoid of bacteria [J]. *Gut Microbes*, 2010, 1 (1): 51–54.
- [24] GE C Y, LUO X Y, WU L C, et al. Plant essential oils improve growth performance by increasing antioxidative capacity, enhancing intestinal barrier function, and modulating gut microbiota in Muscovy ducks [J]. *Poult Sci*, 2023, 102 (8): 102813.
- [25] 孙香雪, 宁楠, 徐欢欢, 等. 复合植物精油对产气荚膜梭菌感染肉鸡肠道屏障和抗氧化功能的影响 [J]. *中国畜牧兽医*, 2023, 50 (9): 3573–3583.
- [26] BROOM L J, KOGUT M H. Inflammation: friend or foe for animal production? [J]. *Poult Sci*, 2018, 97 (2): 510–514.
- [27] SULLIVAN Z A, KHOURY-HANOLD W, LIM J, et al.  $\gamma\delta$  T cells regulate the intestinal response to nutrient sensing [J]. *Science*, 2021, 371 (6535): eaba8310.
- [28] HOCH C C, PETRY J, GRIESBAUM L, et al. 1, 8-cineole (eucalyptol): a versatile phytochemical with therapeutic applications across multiple diseases [J]. *Biomed Pharmacother*, 2023, 167: 115467.