



载锌蒙脱石对肉鸡生产性能、免疫功能及肠道组织形态的影响

王海波, 周永明, 王静, 张瑞, 康鹏, 马晓东, 裴文刚, 杨敏敏, 史兆国*, 秦士贞*

(甘肃农业大学动物科学技术学院, 兰州 730070)

摘要: 本试验旨在研究载锌蒙脱石(zinc-montmorillonite, Zn-MMT)对肉鸡生长性能、屠宰性能、免疫功能及肠道形态的影响。选择1日龄健康科宝公雏288只,按体重随机分成6个处理组,每处理6个重复,每个重复8只仔鸡。对照组(CK)饲喂玉米-豆粕型基础日粮,正对照组饲喂基础日粮添加 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ ZnSO}_4$,试验组分别在基础日粮中添加20、40、60和 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Zn-MMT}$ (均以Zn含量计算),自由采食饮水,试验42 d,采集肠道和脾组织,并测定脾 $IL-2$ 、 $TNF-\alpha$ 、 IgG 、 IgA 基因表达及肠道绒毛高度与隐窝深度。结果表明:1)与CK和 ZnSO_4 组相比,Zn-MMT对肉鸡平均日采食量(average daily feed intake, ADFI)无显著影响($P>0.05$),但 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Zn-MMT}$ 显著降低了1~21、22~42及1~42日龄的仔鸡平均日增重(average daily gain, ADG)($P<0.05$),且 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT显著降低1~42日龄的料重比(feed to gain ratio, F/G)($P<0.05$)。2)相比CK组,添加 ZnSO_4 和 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT显著提高21日龄法氏囊指数($P<0.05$),且 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT提高42日龄法氏囊指数($P<0.05$)。同时, ZnSO_4 、20和 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT显著提高42日龄脾 IgG 的表达($P<0.05$)。同时, ZnSO_4 组显著提高脾 IgA 的表达($P<0.05$)。相比CK和 ZnSO_4 组, $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT显著提高脾 $TNF-\alpha$ 表达,添加40、60和 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT显著提高脾 $IL-2$ 的表达($P<0.05$)。3)与CK相比,Zn-MMT对肉鸡屠宰性能无显著影响($P>0.05$)。4)相比CK与 ZnSO_4 组,添加 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT可以显著提高十二指肠、空肠的绒毛高度(villus height, VH)和绒毛高/隐窝深(villi height to crypt depth ratio, V/C)($P<0.05$),且显著降低十二指肠的隐窝深度(crypt depth, CD)($P<0.05$),但对回肠的CD无显著影响($P>0.05$)。同时,相比CK组, $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Zn-MMT显著提高回肠的VH和V/C($P<0.05$),但与 ZnSO_4 组无显著差异($P>0.05$)。添加 ZnSO_4 对肉仔鸡十二指肠和空肠的VH、CD、V/C及回肠的VH、CD均无显著影响($P>0.05$),但能显著提高回肠的V/C($P<0.05$)。结果显示,日粮添加Zn-MMT显著提高饲料转化率、增强机体免疫力,促进肠道绒毛的发育。

关键词: 载锌蒙脱石;肉鸡;生长性能;肠道发育;免疫功能

中图分类号: S831.4

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2021)04-1020-11

Effects of Zinc-Montmorillonite on Production Performance, Immunologic Function and Intestinal Tissue Morphology of Broilers

WANG Haiibo, ZHOU Yongming, WANG Jing, ZHANG Rui, KANG Peng, MA Xiaodong, PEI Wengang, YANG Minmin, SHI Zhaoguo*, QIN Shizhen*
(College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

收稿日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(03119023); 甘肃农业大学人才专项经费(2017RCZX-18); 省青年科技基金计划(20JR5RA013); 甘肃省现代农业产业技术体系猪鸡产业岗位(GARS-ZJ-2)

作者简介: 王海波(1992-),男,甘肃会宁人,硕士生,主要从事家禽营养研究, E-mail: wanghaibo8815@163.com

* 通信作者: 史兆国,主要从事家禽生产与营养研究, E-mail: shizhaoguo@gsau.edu.cn; 秦士贞,主要从事家禽分子营养研究, E-mail: qinshizhen@163.com

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of zinc-montmorillonite (Zn-MMT) on the production performance, slaughter performance, immunologic function and intestinal morphology of broilers. A total of 288 1-day-old male Cob broiler were randomly assigned to 6 groups with 6 replicates per group and 8 birds per replicate. The birds were fed a corn-soybean meal basal diet or one of the four Zn-MMT diets or 40 mg · kg⁻¹ ZnSO₄ diets, which were the basal diet supplemented with 20, 40, 60, 80 mg · kg⁻¹ Zn-MMT (zinc content measurement). The broilers were provided the diets in ad libitum basis. Intestinal tract and spleen were collected on 42 days, and the expression of *IL-2*, *TNF-α*, *IgG*, *IgA* genes, intestinal villus height and crypts depth were measured. The results showed as follows: 1) Compared with CK group and ZnSO₄ group, Zn-MMT had no significant effect on average daily feed intake (ADFI) of broiler chickens ($P > 0.05$). However, 80 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly reduced the average daily gain (ADG) of chicks aged 1-21, 22-42 and 1-42 days ($P < 0.05$), and 40 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly reduced the feed to gain ratio (F/G) of chicks aged 1-42 days ($P < 0.05$). 2) Compared with CK group, ZnSO₄ and 60 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly increased the bursa index at 21 days of age ($P < 0.05$), and 60 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly increased the bursa index at 42 days of age ($P < 0.05$). At the same time, ZnSO₄, 20 and 40 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly increased the expression level of *IgG* in spleen at 42 days old ($P < 0.05$). Meanwhile, ZnSO₄ group significantly increased the expression level of *IgA* in the spleen ($P < 0.05$). Compared with CK group and ZnSO₄ group, 20 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly improved *TNF-α* gene expression in spleen. The expression of *IL-2* in spleen was significantly increased in 40, 60 and 80 mg · kg⁻¹ Zn-MMT groups ($P < 0.05$). 3) compared with CK, Zn-MMT had no significant effect on the slaughter performance of broilers ($P > 0.05$). 4) Compared with CK and ZnSO₄ groups, 40 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly increased villus height (VH) and villi height to crypt depth ratio (V/C) of the duodenum and jejunum ($P < 0.05$), and significantly reduced the crypt depth (CD) of the duodenum ($P < 0.05$), but had no significant effect on the ileal CD of ileal ($P > 0.05$). Meanwhile, compared with CK group, 40 mg · kg⁻¹ Zn-MMT significantly increased the ileal VH and V/C ($P < 0.05$), but had no significant difference with ZnSO₄ group ($P > 0.05$). At the same time, ZnSO₄ had no significant effect on VH, V/C and CD of duodenum, jejunum, VH and CD of ileum of broilers ($P > 0.05$), but could significantly improve the V/C of ileum ($P < 0.05$). It is concluded that dietary supplementation with Zn-MMT can significantly improve feed conversion rate, enhance body immunity, and promote the development of intestinal villi.

Key words: zinc-montmorillonite; broiler; growth performance; intestinal development; immunologic function

* **Corresponding authors:** SHI Zhaoguo, E-mail: shizhaoguo@gsau.edu.cn; QIN Shizhen, E-mail: qinshizhen@163.com

锌(Zn)是动物必需微量元素之一,不仅参与动物机体酶和功能蛋白的组成,并与养分、遗传物质代谢及激素的功能和活性相关,在稳定生物膜,介导肠道离子转运,增加消化酶活性,促进细胞增殖、分化和肠绒毛发育等方面发挥重要功能^[1-2]。通常,家禽饲料常以 ZnSO₄ 作为饲料锌源,ZnSO₄ 易吸潮结块从而破坏饲料中的维生素及其他活性营养物质,且

吸收利用率低,过度排放到环境中易造成锌污染^[3]。然而,通过离子交换对沸石、蒙脱石等黏土矿物富集微量矿物元素,可使微量元素在动物肠道内合理释放,持久被动物体吸收利用,提高微量元素的利用率,减少微量元素对环境的污染^[4]。杨雪^[5]的研究发现,载锌沸石相比 ZnSO₄ 和抗生素能提高肉鸡日增重、采食量;载钙蒙脱石可缓解黄曲霉毒素 B₁

(AFB₁) 诱发的肉鸭肠黏膜损伤, 促进肠绒毛发育^[6]; 同时, 载铜蒙脱石可显著提高肉鸡小肠绒毛高度^[7]。罗有文^[8]研究发现, 载锌凹土具有抑菌和调节免疫功能。但关于载锌蒙脱石(zinc-montmorillonite, Zn-MMT)作为锌源的研究鲜见报道, 因此, 本试验旨在研究 Zn-MMT 对肉鸡生产性能、免疫功能及肠道发育的影响, 为 Zn-MMT 在肉鸡生产中的应用提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

载锌蒙脱石(赤峰和明化工有限公司)经兰州中检科测试技术有限公司检测, 锌含量为 10 408.80 mg · kg⁻¹。

1.2 试验设计

采用单因子完全随机试验设计, 对照组饲喂玉米-豆粕型基础日粮(CK)、正对照组饲喂基础日粮添加 40 mg · kg⁻¹ ZnSO₄、试验组分别在基础日粮中添加 20、40、60 和 80 mg · kg⁻¹ Zn-MMT(均以 Zn 含量计算)。

1.3 试验动物及管理

选择 1 日龄健康科宝公雏 288 只, 按体重随机分成 6 个处理组, 每处理 6 个重复, 每重复 8 只仔鸡。试验采用 3 层笼养, 为期为 42 d。饲养管理和常规免疫按照《科宝肉仔鸡饲养管理手册》进行。采用 24 h 恒定光照, 鸡只自由采食、饮水。

1.4 试验日粮

基础日粮参照《鸡饲养标准》(NY/T 33—2004)及 NRC(1994)配制玉米-豆粕型日粮。基础日粮及营养水平见表 1。

1.5 指标测定与方法

1.5.1 生长性能 分别于第 21 和 42 天, 自由饮水下禁食 12 h 后, 以重复笼为单元, 空腹称量体重, 记录体重(BW)及饲料消耗量。并计算 ADFI、ADG、F/G。

1.5.2 屠宰性能 在第 42 天, 各重复随机选取 1 只体重接近该重复平均值的肉仔鸡, 自由饮水, 禁食 12 h, 称重并屠宰, 按《家禽生产性能名词术语和度量统计方法》^[9]规定方法对屠宰性能测定。

1.5.3 免疫器官指数 分别于第 21 和 42 天, 每重复选 1 只接近平均体重的仔鸡屠宰, 去除表面结缔组织和脂肪, 称重, 计算免疫器官指数; 免疫器官

指数 = 器官重量(g)/体重(kg)。

1.5.4 小肠绒毛高度和隐窝深度的测定 在第 42 天, 各重复选 1 只接近平均体重的肉仔鸡进行屠宰, 分离十二指肠、空肠、回肠, 选取 1~2 cm, 中段肠道用生理盐水清洗后迅速放入 4% 多聚甲醛中保存, 送往武汉塞维尔生物科技有限公司制作切片, 采用 Motic-BA210Digital 数码显微镜对 VH、CD 进行测量, 计算 V/C。

1.5.5 脾基因(IL-2、TNF- α 、IgG、IgA)表达检测

在试验 42 d, 从每个处理中选择 3 只接近平均体重的肉鸡, 迅速屠宰取出脾, 液氮速冻, 在 -80 °C 冰箱中保存直至分析。使用 TRIzol(北京全式金生物技术有限公司)法提取脾组织总 RNA, 用微量紫外可见分光光度计(NanoDrop-2000)测定 RNA 浓度和纯度, 参照反转录试剂盒(PrimeScript™ RT reagent Kit with gDNA Eraser)说明, 对总 RNA 进行反转录合成 cDNA, 储存在 -20 °C 冰箱中备用。并利用 Light Cycler® 480 II Systems 荧光定量基因扩增仪, 采用 SYBR® Green I 染料法, 以 β actin 为内参, 参照荧光定量试剂盒说明书(SYBR® Green Pro Taq HS 预混型 qPCR 试剂盒)进行实时荧光定量 PCR 扩增, 用 2^{- $\Delta\Delta$ C_t} 法计算基因表达量。引物序列由苏州金唯智生物科技有限公司合成, 详见表 2。

1.6 数据统计分析

数据经 Excel 处理后, 采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 用 Duncan 氏法进行多重比较, 试验结果均以“平均值(Mean) ± 标准差(SD)”表示, P < 0.05 表示显著水平。

2 结果

2.1 Zn-MMT 对肉鸡生长性能的影响

Zn-MMT 对肉鸡生长性能的影响见表 3。由表 3 可见, Zn-MMT 对 1~21、22~42 及 1~42 日龄肉仔鸡的 ADFI 无显著影响(P > 0.05), 但显著性影响 ADG 及 1~42 日龄的 F/G(P < 0.05)。与 CK 和 ZnSO₄ 组相比, 添加 60 和 80 mg · kg⁻¹ Zn-MMT 显著降低了 1~21 日龄肉仔鸡 ADG(P < 0.05), 且 80 mg · kg⁻¹ Zn-MMT 显著降低 22~42 及 1~42 日龄的仔鸡 ADG(P < 0.05); Zn-MMT 对 1~21、22~42 日龄肉仔鸡的 ADFI 与 F/G 及 1~42 日龄肉仔鸡的 ADFI 无显著影响(P > 0.05), 但 40 mg · kg⁻¹ 的 Zn-MMT 显著降低了 1~42 日龄的 F/G(P < 0.05)。

表 1 日粮组成及养分水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of diets (air-dry basis)

%

项目 Item	含量 Content	
	1~21 日龄 1-21 days of age	21~42 日龄 21-42 days of age
原料 Ingredient		
玉米 Corn	52.39	56.20
玉米蛋白粉 Corngluten meal	5.37	5.80
豆粕 Soybean meal	33.99	28.33
大豆油 Soybean oil	3.30	5.19
石粉 Limestone	1.50	1.20
磷酸氢钙 CaHPO ₄	1.70	1.53
食盐 NaCl	0.30	0.30
DL-蛋氨酸 ¹ DL-Methionine	0.17	0.16
L-赖氨酸盐酸盐 ² L-Lysine monohydrochloride	0.28	0.29
预混料 ³ Premix	1.00	1.00
营养水平 ⁴ Nutrient level		
代谢能/(MJ·kg ⁻¹) ME	12.38	12.96
粗蛋白质 CP	21.51	19.55
钙 Ca	1.20	1.03
有效磷 AP	0.46	0.42
赖氨酸 Lys	1.32	1.19
蛋氨酸 Met	0.54	0.51
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	0.93	0.88
锌 ⁵ /(mg·kg ⁻¹) Zn	27.35	27.02

¹. 饲料级 DL-蛋氨酸:DL-蛋氨酸 $\geq 99.0\%$ 。². L-赖氨酸盐酸盐(饲料添加剂):含量(以 C₆H₁₄N₂O₂·HCl 干基计) $\geq 98.5\%$ 。³. 预混料为每千克日粮提供:VA 15 200 IU,VD₃ 4 400 IU,VE 32 IU,VK₃ 3.2 mg,VB₁ 4 mg,VB₂ 12 mg,VB₆ 4.8 mg,VB₁₂ 0.032 mg,D-生物素 0.12 mg,叶酸 1.6 mg,烟酰胺 48 mg,D-泛酸 18 mg,铁(硫酸亚铁)100 mg,铜(硫酸铜)8 mg,锰(硫酸锰)120 mg,碘(碘酸钙)0.7 mg,硒(亚硒酸钠)0.3 mg。⁴. 营养水平为计算值。⁵. 测定值,每个测定值以 3 次平行测定为基础

¹. Feed grade DL-Methionine:DL-Methionine $\geq 99.0\%$. ². L-Lysine monohydrochloride (feed addition):content (C₆H₁₄N₂O₂·HCl) $\geq 98.5\%$. ³. The premix provided the following per kg of diets:VA 15 200 IU,VD₃ 4 400 IU,VE 32 IU,VK₃ 3.2 mg,VB₁ 4 mg,VB₂ 12 mg,VB₆ 4.8 mg,VB₁₂ 0.032 mg,D-biotin 0.12 mg,folic acid 1.6 mg,nicotinamide 48 mg,D-pantothenic acid 18 mg,Fe (ferrous sulfate) 100 mg,Cu(copper sulfate)8 mg,Mn(manganese sulfate)120 mg,I(Calcium iodate)0.7 mg,Se(sodium selenite)0.3 mg. ⁴. Nutrient levels were calculated values. ⁵. Values determined by analysis and each value based on triplicate determinations

2.2 Zn-MMT 对肉鸡屠宰性能的影响

Zn-MMT 对肉鸡屠宰性能的影响见表 4。由表 4 可见,Zn-MMT 对胸肌率有显著影响($P < 0.05$),但对屠宰率、半净膛率、全净膛率、腹脂率、腿比率、腿肌率无显著影响($P > 0.05$)。相比 CK 组,添加 Zn-MMT 对肉仔鸡 42 日龄的胸肌率无显著影响($P > 0.05$),但与 ZnSO₄ 组相比,添加 40 mg·kg⁻¹的 Zn-MMT 显著提高了 42 日龄肉仔鸡的胸肌率($P < 0.05$)。

2.3 Zn-MMT 对肉鸡免疫器官指数的影响

Zn-MMT 对肉鸡免疫器官指数的影响见表 5。由表 5 可见,Zn-MMT 对 21 日龄肉仔鸡法氏囊指数

和 42 日龄肉仔鸡法氏囊指数和胸腺指数有显著性影响($P < 0.05$),对 21 日龄肉仔鸡胸腺和脾脏指数以及对 42 日龄肉仔鸡脾脏指数没有显著影响($P > 0.05$)。与 CK 组相比,60 mg·kg⁻¹ Zn-MMT 显著升高了 21 日龄肉仔鸡法氏囊指数($P < 0.05$),但与 ZnSO₄ 组相无显著差异($P > 0.05$)。与 CK 组相比,Zn-MMT 对 42 日龄肉仔鸡胸腺指数无显著影响($P > 0.05$);但相比 ZnSO₄ 组,40 和 80 mg·kg⁻¹ Zn-MMT 显著提高了 42 日龄肉仔鸡胸腺指数($P < 0.05$)。与 CK 和 ZnSO₄ 组相比,60 mg·kg⁻¹ Zn-MMT 显著增加了 42 日龄肉仔鸡法氏囊指数($P < 0.05$)。

表 2 目的基因及内参基因引物

Table 2 The primers of target genes and reference genes

基因 Gene	引物序列(5'→3') Primer sequence	参考来源 Source of reference	登录号 Accession number	扩增长度/bp Length
<i>IL-2</i>	F:CTGTATTTTCGGTAGCAATG R:ACTCCTGGGTCTCAGTTG	[10]	NM_204153.1	161
<i>TNF-α</i>	F:TGTGTATGTGCAGCAACCCG R:AACAACCAGCTATGCACCCC	[11]	NM204267.1	164
<i>IgG</i>	F:ATCACGTCAAGGGATGCCCG R:ACCAGGCACCTCAGTTTGG	[12]	X07174.1	118
<i>IgA</i>	F:GTCACCGTCACCTGGACTACA R:ACCGATGGTCTCCTTCACATC	[12]	S40610	192
<i>βactin</i>	F:CACCACAGCCGAGAGAGAAAT R:TGACCATCAGGGAGTTCATAGC	[13]	L08165	135

表 3 Zn-MMT 对肉鸡生长性能的影响

Table 3 The effect of Zn-MMT on growth performance of broilers

项目 Item	对照组 CK	Zn-MMT/(mg·kg ⁻¹)				ZnSO ₄ 组 ZnSO ₄ group	P 值 P-value
		20	40	60	80		
1~21 日龄 1-21 d							
平均日增重/(g·d) ⁻¹ ADG	30.70±0.43 ^a	29.41±0.26 ^{ab}	30.29±0.32 ^a	28.33±0.60 ^b	26.93±0.59 ^c	30.04±1.61 ^a	<0.001
平均日采食量/(g·d) ⁻¹ ADFI	45.34±7.34	40.53±4.36	41.30±2.91	41.98±4.08	40.10±4.28	42.34±2.66	0.427
料重比 F/G	1.48±0.23	1.37±0.14	1.36±0.10	1.46±0.13	1.45±0.04	1.42±0.07	0.730
22~42 日龄 22-42 d							
平均日增重/(g·d) ⁻¹ ADG	71.66±4.64 ^a	70.86±2.33 ^a	70.45±2.02 ^a	74.14±1.46 ^a	63.69±0.80 ^b	73.25±7.61 ^a	0.035
平均日采食量/(g·d) ⁻¹ ADFI	131.91±8.39	127.41±5.23	123.89±7.22	127.59±9.61	125.11±7.75	132.35±8.82	0.363
料重比 F/G	1.84±0.12	1.84±0.10	1.79±0.05	1.79±0.06	1.87±0.05	1.83±0.05	0.702
1~42 日龄 1-42 d							
平均日增重/(g·d) ⁻¹ ADG	51.20±1.99 ^a	50.10±0.91 ^a	50.77±0.86 ^a	51.41±0.82 ^a	45.34±0.86 ^b	50.80±3.68 ^a	0.001
平均日采食量/(g·d) ⁻¹ ADFI	88.63±7.10	83.97±3.20	82.60±2.65	84.78±6.49	82.62±4.61	87.35±5.26	0.247
料重比 F/G	1.73±0.04 ^{ab}	1.70±0.03 ^{abc}	1.64±0.04 ^c	1.67±0.04 ^{bc}	1.75±0.06 ^a	1.72±0.03 ^{ab}	0.011

同行数据后所标字母相异表示差异显著($P < 0.05$), 所标字母相同表示差异不显著($P > 0.05$)。下表同

Different letters in the same row mean significant difference between the treatments($P < 0.05$), same letter in the same row means not significant difference between treatments($P > 0.05$). The same as below

2.4 Zn-MMT 对肉鸡肠形态的影响

Zn-MMT 对肉鸡肠形态的影响见表 6。由表 6 可知, 添加 Zn-MMT 可以显著影响十二指肠、空肠、回肠 VH、CD 及 V/C($P < 0.05$)。相比 CK 与 ZnSO₄ 组, 添加 40 mg·kg⁻¹ 的 Zn-MMT 可以显著提高十二指肠、空肠的 VH 和 V/C($P < 0.05$), 且显著降低十二指肠的 CD($P < 0.05$), 但对回肠的 CD 无显著影响($P > 0.05$)。同时, 相比 CK, 40 mg·kg⁻¹ 的 Zn-MMT 显著提高回肠的 VH 和 V/C($P < 0.05$), 但与

ZnSO₄ 组无显著差异($P > 0.05$)。同时, 相比 CK, 添加 ZnSO₄ 对肉仔鸡十二指肠、空肠 VH、CD 及 V/C 及回肠的 VH、CD 无显著影响($P > 0.05$), 但能显著提高回肠的 V/C($P < 0.05$)。

2.5 Zn-MMT 对肉鸡脾基因 (*IL-2*、*TNF-α*、*IgG*、*IgA*) 表达的影响

Zn-MMT 对肉鸡脾 *IL-2*、*TNF-α*、*IgG*、*IgA* 基因表达的影响见表 7。由表 7 可知, Zn-MMT 显著影响肉鸡脾 *IL-2*、*TNF-α*、*IgG*、*IgA* 基因的表达

表 4 Zn-MMT 对肉鸡屠宰性能的影响

Table 4 The effects of Zn-MMT on carcass parameters of broilers

%

项目 Item	对照组 CK	Zn-MMT/(mg · kg ⁻¹)				ZnSO ₄ 组 ZnSO ₄ group	P 值 P-value
		20	40	60	80		
屠宰率 Slaughter percentage	94.63±1.24	93.68±2.15	93.46±0.71	93.88±0.47	93.20±0.64	93.97±0.70	0.371
半净膛率 Half-eviscerated percentage	86.19±2.00	85.37±1.62	85.44±0.61	84.57±1.28	84.47±0.81	85.35±1.45	0.301
全净膛率 Eviscerated percentage	75.71±5.21	75.95±1.01	73.83±4.34	74.31±1.40	75.00±0.96	75.19±1.45	0.806
腹脂率 Abdominal fat percentage	1.28±0.22	1.13±0.30	1.16±0.28	1.17±0.48	1.06±0.46	1.19±0.34	0.941
胸肌率 Pectoral muscle percentage	33.54±2.62 ^{ab}	32.71±2.29 ^{ab}	34.96±1.92 ^a	32.45±1.08 ^b	32.32±1.26 ^b	31.24±1.29 ^b	0.032
腿比率 Leg percentage	31.99±2.33	31.66±2.96	31.43±2.91	30.29±1.79	30.19±1.33	30.17±1.04	0.443
腿肌率 Leg muscle percentage	25.00±2.19	24.66±2.68	25.10±1.89	23.48±2.15	24.41±1.80	23.88±1.27	0.712

表 5 Zn-MMT 对肉鸡免疫器官指数的影响

Table 5 The effect of Zn-MMT on immune organ indexes of broilers

g · kg⁻¹

项目 Item	对照组 CK	Zn-MMT/(mg · kg ⁻¹)				ZnSO ₄ 组 ZnSO ₄ group	P 值 P-value
		20	40	60	80		
21 日龄 21 d							
胸腺指数 Thymus index	6.19±0.24	6.12±0.28	6.23±0.21	6.10±0.44	6.06±0.55	6.35±0.26	0.993
法氏囊指数 Bursa index	2.28±0.29 ^b	2.80±0.70 ^{ab}	2.97±0.20 ^{ab}	3.43±0.39 ^a	2.83±0.29 ^{ab}	3.40±0.18 ^a	0.043
脾脏指数 Spleen index	0.71±0.39	0.87±0.10	0.78±0.08	0.73±0.07	0.75±0.05	0.69±0.03	0.428
42 日龄 42 d							
胸腺指数 Thymus index	4.42±0.72 ^{ab}	4.22±0.59 ^{ab}	4.63±0.39 ^a	3.68±0.49 ^b	4.54±0.31 ^a	3.68±0.48 ^b	0.040
法氏囊指数 Bursa index	1.43±0.36 ^{bc}	1.19±0.12 ^c	1.52±0.19 ^{bc}	2.10±0.25 ^a	1.73±0.26 ^{ab}	1.48±0.48 ^{bc}	0.017
脾脏指数 Spleen index	0.93±0.11	0.81±0.24	0.72±0.87	0.89±0.19	0.61±0.22	0.80±0.11	0.083

($P < 0.05$)。相比 CK 和 ZnSO₄ 组, 20 mg · kg⁻¹ 的 Zn-MMT 显著提高脾 TNF- α 表达, 且 40、60 和

80 mg · kg⁻¹ 的显著提高脾 IL-2 的表达($P < 0.05$), 而 ZnSO₄ 组与 CK 差异不显著($P > 0.05$)。同时, 相

比 CK, 添加 ZnSO_4 和 20 与 40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Zn-MMT MMT 组, ZnSO_4 显著提高脾 IgA 的表达 ($P > 0.05$)。显著提高脾 IgG 的表达 ($P < 0.05$), 相比 CK 和 Zn-

表 6 Zn-MMT 对肉鸡肠形态的影响

Table 6 The effect of Zn-MMT on the intestinal morphology of broilers

项目 Item	对照组 CK	Zn-MMT/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				ZnSO_4 组 ZnSO_4 group	P 值 P-value
		20	40	60	80		
十二指肠 Duodenum							
绒毛高/ μm VH	909.90±99.13 ^b	875.50±50.91 ^b	1125.20±40.02 ^a	908.60±42.67 ^b	938.77±113.01 ^b	868.25±50.21 ^b	<0.001
隐窝深 CD	159.15±12.43 ^a	136.15±11.92 ^b	140.22±3.61 ^b	146.02±15.78 ^{ab}	158.10±14.68 ^a	160.40±8.00 ^a	0.001
绒毛/隐窝 V/C	5.41±0.55 ^c	6.89±0.65 ^b	7.93±0.74 ^a	6.72±0.70 ^b	5.36±0.44 ^c	5.90±0.59 ^c	<0.001
空肠 Jejunum							
绒毛高/ μm VH	886.02±162.55 ^c	995.39±62.78 ^b	1121.28±55.77 ^a	942.12±35.70 ^{bc}	882.64±66.83 ^c	869.01±56.53 ^c	<0.001
隐窝深/ μm CD	116.74±9.43 ^b	122.30±8.44 ^b	134.57±9.03 ^b	132.33±14.37 ^b	163.82±29.17 ^a	119.13±16.90 ^b	<0.001
绒毛/隐窝 V/C	7.82±0.42 ^b	8.94±0.46 ^a	8.68±0.43 ^a	7.33±0.57 ^b	5.30±0.35 ^c	7.61±0.95 ^b	<0.001
回肠 Ileum							
绒毛高/ μm VH	655.87±84.5 ^b	733.82±69.53 ^{ab}	787.49±39.23 ^a	673.33±92.39 ^b	706.55±58.13 ^{ab}	714.71±49.33 ^{ab}	<0.039
隐窝深/ μm CD	136.51±20.60 ^a	137.06±16.64 ^a	130.48±14.97 ^a	105.61±11.62 ^b	121.24±10.45 ^{ab}	122.65±15.91 ^{ab}	0.004
绒毛/隐窝 V/C	4.92±0.67 ^b	6.29±0.70 ^a	6.38±0.59 ^a	6.26±0.30 ^a	5.96±0.32 ^a	5.93±0.66 ^a	0.001

表 7 Zn-MMT 对肉鸡脾 IL-2 、 $\text{TNF-}\alpha$ 、 IgG 、 IgA mRNA 表达水平的影响

Table 7 Effect of Zn-MMT on the gene expression in broiler spleen (IL-2 , $\text{TNF-}\alpha$, IgG , IgA)

基因 Gene	对照组 CK	Zn-MMT/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				ZnSO_4 组 ZnSO_4 group	P 值 P-value
		20	40	60	80		
$\text{TNF-}\alpha$	1.00±0.05 ^b	1.58±0.41 ^a	0.77±0.24 ^{bc}	0.51±0.09 ^c	0.69±0.02 ^{bc}	0.90±0.30 ^b	<0.001
IL-2	1.00±0.11 ^b	1.76±0.48 ^b	9.06±2.03 ^a	7.17±4.87 ^a	9.27±3.47 ^a	2.06±0.67 ^b	<0.001
IgA	1.07±0.45 ^b	0.06±0.03 ^c	0.57±0.19 ^{bc}	0.91±0.18 ^b	0.76±0.18 ^{bc}	3.83±1.07 ^a	<0.001
IgG	1.05±0.34 ^b	3.64±0.55 ^a	3.12±1.60 ^a	0.96±0.42 ^b	0.72±0.15 ^b	4.29±1.00 ^a	<0.001

3 讨论

3.1 Zn-MMT 对肉鸡生产性能的影响

天然硅酸盐矿土具有无害、无污染的特性,常作饲料添加剂的载体或粘结剂应用在动物生产中,其品质易受种类、产地、等级和理化结构的影响^[6,14]。国内外关于硅酸盐黏土在反刍动物、家禽及鱼饲料的研究中发现,其具有抗腹泻、抗炎、促生长、提高饲料转化率的优点^[15-17]。研究发现,Cu-MMT^[18]可显著降低肥育猪料重及全程料重比,且双季铵盐改性蒙脱石与 Cu-MMT 均能促进肉鸡生产^[19]。Ke 等^[20]在饲料中添加改性蒙脱石替代金霉素可显著提高断奶仔猪的生长性能;Hu 等^[21]在仔猪日粮中添加蒙脱石和 ZnO,均能改善猪生长性能。本研究发现,40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zn-MMT 可显著

降低肉鸡的料重比,提高饲料转化率,这与在肉鸡日粮中添加 ZnO-MMT^[22]和 Ca-MMT^[23]降低料重比的结果一致。Zn-MMT 提高饲料转化率可能与硅酸盐黏土载体富集锌,使锌在动物肠道内能合理释放,减少日粮中植酸、纤维等成分对锌的螯合,降低抗营养因子对锌的干扰,降低肠道内食糜通过率,增加肠道消化酶活性,促进营养物质的消化吸收^[24-25]及肠道发育有关。同时,本研究还发现,80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zn-MMT 可降低肉鸡 ADG。这与罗有文^[8]在肉鸡饲料中添加 40 或 80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 载锌凹凸棒石后显著提高肉鸡的增重结果不一致。这可能与载锌蒙脱石特殊的结构和理化特性有关,且添加超过一定剂量时,可能在肠道中黏结聚合大型复合离子、在动物体内和其他动物体所需要的阳离子发生交换吸附,影响其他矿物元素及有机分子的利用^[19,26],且载锌蒙脱

石锌的生物学活性受其锌负载量、制备工艺影响。

3.2 Zn-MMT 对肉鸡屠宰性能的影响

相关研究显示^[27-28],在饲料中添加斜发沸石对生长猪、育肥猪、肉鸡的胴体品质和净胴体重无显著影响,但能够增加肉的产量,提高其腿肌质量。王芳等^[29]与 Qin 等^[1]研究表明,天然和改性蒙脱石及不同浓度的 $ZnSO_4$ 对肉鸡屠宰性能无显著影响。也有研究发现,载锌凹凸棒石可以提高肉鸡全净膛率、胸肌率和腿肌率,改善屠宰性能^[30],然而,本研究发现,相比 CK,添加 Zn-MMT 与 $ZnSO_4$ 对肉鸡屠宰率、半净膛率、全净膛率、腹脂率、腿比率及腿肌率无显著影响,这可能与试验中所用载锌蒙脱石的种类、载锌蒙脱石的制备工艺、肉鸡的饲养环境有关。此外,黏土矿物在动物生产中主要用来吸附霉菌毒素、重金属、细菌、病毒,预防腹泻和动物疾病产生,对胴体重的促进效果不显著^[27]。但相比 $ZnSO_4$ 与 60 和 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Zn-MMT 组,添加 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Zn-MMT 显著提高了 42 日龄的胸肌率,与不同剂量的载锌蒙脱石影响肠道发育,及 $ZnSO_4$ 与 Zn-MMT 吸收机制存在差异有关,有待进一步研究。

3.3 Zn-MMT 对肉鸡免疫器官指数的影响

锌是动物必需微量元素之一,与动物的免疫功能密切相关,并直接影响胸腺、法氏囊的发育和成熟,缺锌会引起免疫器官萎缩,补锌后免疫器官的机能有所恢复^[8,25,31]。免疫器官参与畜禽全身的细胞免疫和体液免疫^[32],脾是机体最大的免疫器官,并作为机体细胞免疫和体液免疫的中心^[33],在免疫调节中发挥重要功能。硅酸盐黏土通过吸附和清除干扰机体免疫系统功能的激素、毒素、病毒、酵母菌、真菌等,增加巨噬细胞的数量,增强机体免疫功能^[15,34]。本研究发现,添加 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Zn-MMT 可显著提高肉鸡法氏囊指数,这与罗有文^[8]研究中日粮中添加载锌凹凸土促进肉鸡免疫器官发育,提高肉鸡法氏囊指数的结果相一致。同时,本试验还发现, $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Zn-MMT 相比 $ZnSO_4$ 显著提高了 42 日龄肉鸡胸腺指数。这可能与硅酸盐黏土独特的吸附性和解吸附性相关,载锌蒙脱石中锌离子的释放受机体消化道中锌离子浓度影响,当机体消化道中锌离子浓度较高时释放减缓,若锌离子浓度降低,则锌离子的释放速度增快,从而提高胸腺激素发挥功能必需依赖锌离子的利用率^[8,35],使 Zn-MMT 组中锌利用率高于 $ZnSO_4$ 组,促进胸腺发育,改善肉鸡免疫性能。

3.4 Zn-MMT 对肉鸡小肠形态的影响

肠道是动物的主要消化器官,肠道绒毛高度、隐窝深度及其二者比值是反映肠道结构完整性的重要指标^[36-37],当内源性与外源性细菌、病毒入侵时,肠道屏障会保护机体免受外界损伤。锌参与多种酶的重要组成部分,与肠道发育密切相关。研究发现, $ZnSO_4$ 和甘氨酸锌能显著增加肠道绒毛高度^[38];Cu-MMT 能显著提高肉鸡空肠 VH 及 V/C;Ca-MMT 可缓解 AFB1 诱发的肉鸭肠黏膜损伤,提高绒毛高度及 V/C^[6]。本试验结果表明,添加 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Zn-MMT 可以显著提高十二指肠、空肠的 VH 和 V/C,且显著降低十二指肠的 CD,这与 Xia 等^[7]发现改性蒙脱石可提高空肠空肠的 VH 和 V/C 相一致。小肠绒毛高度、绒毛高度/隐窝深度增大,降低隐窝深度,可增强绒毛上皮细胞再生能力,增加小肠与营养物质的接触面积,促进营养物质的吸收,直接影响机体的生长发育与饲料转化率^[39-40]。同时,载锌蒙脱石在肉鸡肠道内持续释放锌及硅酸盐黏土吸附或抑制肠道细菌、霉菌毒素等,缓解其对肠上皮细胞造成的损伤,增强肠黏膜上皮细胞的增殖及黏膜分泌,促进肠绒毛发育,维持肠道形态^[16,25,41-42]。

3.5 Zn-MMT 对肉鸡脾基因表达的影响

动物机体的特异性免疫反应包括体液免疫和细胞免疫,体液免疫主要由 B 淋巴细胞产生特异性抗体来介导,细胞免疫主要由 T 淋巴细胞及其分泌的细胞因子来介导,包括白细胞介素、干扰素、肿瘤坏死因子等细胞因子^[43-44];其中 IL-2 被认为是 T 细胞依赖的免疫反应的关键细胞因子,并由激活的 T 细胞分泌^[45];TNF- α 是由单核细胞、巨噬细胞、中性粒细胞等产生的单核因子,在炎症反应与免疫调节中发挥作用^[46]。本研究发现,Zn-MMT 能提高脾 TNF- α 、IL-2 及 IgG 的表达, $ZnSO_4$ 显著提高脾 IgA 的表达。这可能与铝硅酸盐促进脾中负责免疫球蛋白合成的 B 淋巴细胞分化,提高免疫球蛋白的含量^[47],刺激细胞因子释放,增强机体免疫力。

4 结 论

肉鸡玉米-豆粕型基础日粮中添加 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Zn-MMT 促进脾 IL-2、IgG 基因的表达,并显著提高十二指肠、空肠、回肠的绒毛高度和绒毛高度/隐窝深度并降低十二指肠的隐窝深度,增强绒毛上皮细胞再生能力及营养接触面积,促进营养物质的吸收,提高饲料转化率。添加 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ $ZnSO_4$ 可

显著改善十二指肠、空肠的绒毛高度和绒毛高度/隐窝深度并降低十二指肠的隐窝深度,能够促进肠道发育。

参考文献(References):

- [1] QIN S Z, ZHANG L Y, MA F, et al. Dietary zinc and growth, carcass characteristics, immune responses, and serum biochemistry of broilers[J]. *Anim Prod Sci*, 2020, 60(6): 815-822.
- [2] SHAO Y X, LEI Z, YUAN J M, et al. Effect of zinc on growth performance, gut morphometry, and cecal microbial community in broilers challenged with *Salmonella enterica* serovar typhimurium [J]. *J Microbiol*, 2014, 52(12): 1002-1011.
- [3] TANG Z G, WEN C, LI P, et al. Effect of zinc-bearing zeolite clinoptilolite on growth performance, nutrient retention, digestive enzyme activities, and intestinal function of broiler chickens[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2014, 158(1): 51-57.
- [4] SZAJEWSKA H, DZIECHCIARZ P, MRUKOWICZ J. Meta-analysis: smectite in the treatment of acute infectious diarrhoea in children [J]. *Aliment Pharmacol Ther*, 2010, 23(2): 217-227.
- [5] 杨雪. 载锌凹凸棒石黏土与载锌沸石在肉鸡饲料中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- YANG X. Application of zinc-bearing attapulgite and zinc-bearing clinoptilolite in broiler feed[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [6] WAN X L, YANG Z B, YANG W R, et al. Toxicity of increasing aflatoxin B₁ concentrations from contaminated corn with or without clay adsorbent supplementation in ducklings[J]. *Poult Sci*, 2013, 92(5): 1244-1253.
- [7] XIA M S, HU C H, XU Z R. Effects of copper-bearing montmorillonite on growth performance, digestive enzyme activities, and intestinal microflora and morphology of male broilers[J]. *Poult Sci*, 2004, 83(11): 1868-1875.
- [8] 罗有文. 载 Zn²⁺ 凹凸棒石黏土对肉鸡的抗菌性和免疫功能的调节作用及相关机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- LUO Y W. Study of the effects of zinc-bearing attapulgite on anti-bacterial capacity and immunity regulation of broilers and its relative mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [9] 陈宽维, 高玉时, 王志跃, 等. 中华人民共和国农业行业标准 家禽生产性能名词术语和度量统计方法[J]. 中国禽业导刊, 2006, 23(15): 45-46.
- CHEN K W, GAO Y S, WANG Z Y, et al. Agricultural trade standards of the People's Republic of China-Terminology and measurement and statistical methods for the production performance of poultry[J]. *Guide to Chinese Poultry*, 2006, 23(15): 45-46. (in Chinese)
- [10] 邓美玉. 肉鸡感染 FAdV-4 后胸腺组织中部分先天性免疫相关基因的表达变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- DENG M Y. Effect and mechanism of Quercetin on immune function in AA broilers [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [11] 张柏林, 杨乾, 刘宁, 等. 饲料添加 L-谷氨酰胺对脂多糖刺激肉鸡血浆生化指标、免疫性能、肠道炎症因子表达及黏膜免疫的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(06): 2611-2623.
- ZHANG B L, YANG Q, LIU N, et al. Effects of dietary L-Glutamine supplementation on plasma biochemical parameters, immune performance, intestinal inflammatory factors expression and mucosal immune of broilers challenged by lipopolysaccharide[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(6): 2611-2623. (in Chinese)
- [12] JAROSZ J, MAREK A, GRADZKI Z, et al. Effect of feed supplementation with zinc glycine chelate and zinc sulfate on cytokine and immunoglobulin gene expression profiles in chicken intestinal tissue [J]. *Poult Sci*, 2017, 96(12): 4224-4235.
- [13] 杨家新. 槲皮素对 AA 肉鸡免疫功能的作用及机制[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- YANG J X. Effect and mechanism of Quercetin on immune function in AA broilers [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [14] 马玉龙, 许梓荣, 郭彤, 等. 无机铜/蒙脱石纳米材料对肉鸡生长、肠道菌群和细菌酶活的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2006, 42(11): 28-31.
- MA Y L, XU Z R, GUO T, et al. Effect of inorganic copper/montmorillonite nanomaterial on growth performance, intestinal microflora and bacterial enzyme activities in broilers[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2006, 42(11): 28-31. (in Chinese)
- [15] 吴秋珏, 王玉琴, 刘宁, 等. 沸石的生物学功能及其在动物生产中的应用[J]. 粮食与饲料工业, 2014, 12(10): 58-62.
- WU Q J, WANG Y Q, LIU N, et al. Biological

- function of zeolite and its application in animal production [J]. *Cereal & Feed Industry*, 2014, 12 (10):58-62. (in Chinese)
- [16] KHAMBUALAI O, RUTTANAVUT J, KITABATAKE M, et al. Effects of dietary natural zeolite including plant extract on growth performance and intestinal histology in Aigamo ducks[J]. *Br Poult Sci*, 2009, 50(1):123-130.
- [17] PAPAIOANNOU D, KATSOULOS P D, PANOUSIS N, et al. The role of natural and synthetic zeolites as feed additives on the prevention and/or the treatment of certain farm animal diseases: a review[J]. *Micropor Mesopor Mat*, 2005, 84(1-3):161-170.
- [18] 杨荣芳, 郝生宏, 王敏奇, 等. 纳米载铜蒙脱石对猪生产性能的影响[J]. *畜牧与兽医*, 2010, 42(5):48-50.
- YANG R F, HAO S H, WANG M Q, et al. Effect of nano-loaded copper montmorillonite on pig production performance [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2010, 42(5):48-50. (in Chinese)
- [19] 夏明亮, 刘 婕, 齐德生, 等. 改性蒙脱石对肉鸡生产性能的影响[J]. *饲料工业*, 2012, 33(10):55-59.
- XIA M L, LIU J, QI D S, et al. Effect of modified montmorillonite on broiler performance [J]. *Feed Industry*, 2012, 33(10):55-59. (in Chinese)
- [20] KE Y L, JIAO L F, SONG Z H, et al. Effects of cetylpyridinium-montmorillonite, as alternative to antibiotic, on the growth performance, intestinal microflora and mucosal architecture of weaned pigs [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2014, 198:257-262.
- [21] HU C H, GU L Y, LUAN Z S, et al. Effects of montmorillonite-zinc oxide hybrid on performance, diarrhea, intestinal permeability and morphology of weanling pigs[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2012, 177 (1-2):108-115.
- [22] HU C H, QIAN Z C, SONG J, et al. Effects of zinc oxide-montmorillonite hybrid on growth performance, intestinal structure, and function of broiler chicken [J]. *Poult Sci*, 2013, 92(1):143-150.
- [23] ECKHARDT J C, SANTURIO J M, ZANETTE R A, et al. Efficacy of a Brazilian calcium montmorillonite against toxic effects of dietary aflatoxins on broilers reared to market weight[J]. *Br Poult Sci*, 2014, 55(2):215-220.
- [24] LEUNG S, BARRINGTON S, WAN Y, et al. Zeolite (clinoptilolite) as feed additive to reduce manure mineral content[J]. *Bioresour Technol*, 2007, 98(17):3309-3316.
- [25] 唐志刚. 载锌沸石在肉鸡中的生物学效应及对肠道保护作用研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
- TANG Z G. Bioavailability of zinc-bearing zeolite clinoptilolite and its protection of intestinal function in broilers [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [26] SHARIATMADARI F. The application of zeolite in poultry production[J]. *Worlds Poult Sci J*, 2008, 64 (1):76-84.
- [27] 吴秋珏, 吴亚男, 田金可, 等. 斜发沸石对肉鸡肠道抗氧化功能、脂肪沉积与肉品质的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2013, 44(1):57-65.
- WU Q J, WU Y N, TIAN J K, et al. Effects of clinoptilolite on antioxidation performance of gut, fat deposition and meat quality of broilers [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2013, 44 (1):57-65. (in Chinese)
- [28] PEARSON G, SMITH W C, FOX J M. Influence of dietary zeolite on pig performance over the liveweight range 25-87 kg[J]. *New Zealand J Exp Agric*, 1985, 13(2):151-154.
- [29] 王 芳, 张海军, 王 晶, 等. 蒙脱石对采食霉变花生粕型饲料肉仔鸡生长性能和免疫机能的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(5):1480-1488.
- WANG F, ZHANG H J, WANG J, et al. Montmorillonite affected growth performance and immune function of broilers fed diets containing mouldy peanut meal[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(5):1480-1488. (in Chinese)
- [30] 杨伟丽. 载锌凹凸棒石对肉鸡肌肉品质、组织金属元素沉积及抗氧化功能的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
- YANG W L. Effect of zinc bearing playgorskite supplementation on the meat quality, tissue mineral element accumulation and antioxidant function of broilers [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [31] 陈克麟, 郭荣富, 郭亚东. 实用饲料补锌对肉鸡组织锌、免疫器官及生产性能的影响[J]. *畜牧与兽医*, 1998, 30(4):155-157.
- CHEN K L, GUO R F, GUO Y D. Effect of supplemental zinc in conventional diet on concentrations of zinc, immunology function and growth for chickens [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 1998, 30 (4):155-157. (in Chinese)
- [32] 杨 硕, 金 晓, 徐元庆, 等. 黄酮类化合物对肉鸡的免疫调节作用及其机制[J]. *动物营养学报*, 2020, 32 (9):4003-4009.
- YANG S, JIN X, XU Y Q, et al. Immunomodulatory effect of flavonoids on broilers and its mechanism[J].

- Chinese Journal of Animal Nutrition*, 32(9):4003-4009. (in Chinese)
- [33] 李姣清, 赖美辰, 詹家莽, 等. 中草药制剂对鸡免疫器官发育及脾脏中免疫因子表达的动态影响[J]. 中国家禽, 2020, 42(3):49-53.
LI J Q, LAI M C, ZHAN J Q, et al. Effects of Chinese herbal medicine on indexes of immune organs and expression of immune factors in spleen of chicken[J]. *China Poultry*, 2020, 42(3):49-53. (in Chinese)
- [34] WU Q J, ZHOU Y M, WU Y N, et al. The effects of natural and modified clinoptilolite on intestinal barrier function and immune response to LPS in broiler chickens[J]. *Vet Immunol Immunopathol*, 2013, 153(1-2):70-76.
- [35] MAARES M, HAASE H. Zinc and immunity: an essential interrelation [J]. *Arch Biochem Biophys*, 2016, 611:58-65.
- [36] 周洪彬, 魏景坤, 刘 洋, 等. 植物精油对肉仔鸡生长性能、免疫功能及肠道发育的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(8):3887-3895.
ZHONG H B, WEI J K, LIU Y, et al. Effects of plant essential oil on growth performance, immune function and intestinal development of broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(8):3887-3895. (in Chinese)
- [37] CHAMORRO S, ROMERO C, BRENES A, et al. Impact of a sustained consumption of grape extract on digestion, gut microbial metabolism and intestinal barrier in broiler chickens[J]. *Food Funct*, 2019, 10(3):1444-1454.
- [38] BOBÍKOVÁ K, LEVKUT Jr M, HUSÁKOVÁ E, et al. Effect of glycine-zinc complex on mucin and IgA expression, secretory IgA concentration and lengths of intestinal villi in chickens [J]. *J Comp Pathol*, 2016, 154(1):81.
- [39] 宦海琳, 白建勇, 周维仁, 等. 抗菌肽对仔猪血清生化指标、肠黏膜形态结构及空肠上皮紧密连接蛋白基因相对表达量的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(12):3797-3804.
HUAN H L, BAI J Y, ZHOU W R, et al. Effects of antimicrobial peptides on serum biochemical indices, intestinal mucosa morphology and the relative expression level of tight junction protein gene of jejunum of piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(12):3797-3804. (in Chinese)
- [40] 李姣清, 赖美辰, 翁苗先, 等. 中药复方制剂对雏鸡生产性能、肠道结构及微生物菌群的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(5):147-151, 156.
LI J Q, LAI M C, WENG Z X, et al. Effects of Chinese herbal compound preparation on growth performance, intestinal structure and microbial flora of chicks [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2020, 56(5):147-151, 156. (in Chinese)
- [41] 吴秋珏. 沸石对肉鸡肠道健康的保护及机制研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.
WU Q J. Effect of clinoptilolite on gut protection of broilers and study of relevant mechanism [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [42] 陈继发, 康克浪, 曲湘勇. 蒙脱石的作用机制及其在家禽生产中的应用[J]. 动物营养学报, 2018, 30(4):1217-1223.
CHEN J F, KANG K L, QU X Y. Functional mechanisms of montmorillonite and its application in poultry production [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(4):1217-1223. (in Chinese)
- [43] 全宗喜, 康世良, 武 瑞. 硒缺乏雏鸡细胞因子水平变化的研究[J]. 畜牧兽医学报, 2004, 35(6):731-735.
TONG Z X, KANG S L, WU R. Study on the change of cytokines level in chicken with selenium deficiency [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2004, 35(6):731-735. (in Chinese)
- [44] 靳二辉, 陈耀星, 周金星, 等. 黄芪、枸杞、金银花等中草药复方制剂对肉鸡免疫器官发育及免疫功能的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2017, 48(6):1128-1139.
JIN E H, CHEN Y X, ZHOU J X, et al. The effect of compound Chinese herbal medicine preparation of Astragalus, Wolfberry and Honeysuckle Flower on immune organ development and immune functions of broiler [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2017, 48(6):1128-1139. (in Chinese)
- [45] MALEK T R, BAYER A L. Tolerance, not immunity, crucially depends on IL-2 [J]. *Nat Rev Immunol*, 2004, 4(9):665-674.
- [46] 胡艳欣, 余锐萍, 张洪玉, 等. 热应激后猪血清中 IL-2、IFN- γ 及 TNF- α 水平的动态变[J]. 畜牧兽医学报, 2006, 37(5):496-499.
HU Y X, SHE R P, ZHANG H Y, et al. Studies on the dynamic changes of the level of IL-2, IFN- γ and TNF- α in porcine serum after heat stress [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2006, 37(5):496-499. (in Chinese)
- [47] JUNG B G, TOAN N T, CHO S J, et al. Dietary aluminosilicate supplement enhances immune activity in mice and reinforces clearance of porcine circovirus type 2 in experimentally infected pigs [J]. *Vet Microbiol*, 2010, 143(2-4):117-125.