

饲料中添加超氧化物歧化酶模拟物对肉鸡生长性能、血清免疫指标及肠道抗氧化指标和消化酶活性的影响

马渭青 王思博 杨季 崔红霞 赵旦华 许丽*

(东北农业大学动物科技学院,哈尔滨 150030)

摘要: 本试验旨在研究饲料中添加超氧化物歧化酶模拟物(SODm)对肉鸡生长性能、血清免疫指标及肠道抗氧化指标和消化酶活性的影响。选取1日龄健康的爱拔益加(AA)肉鸡公雏288只,随机分为4组,每组6个重复,每个重复12只。对照组(I组)饲喂基础饲料,试验组(II、III、IV组)在基础饲料上分别添加1.0、2.0、3.0 g/kg的SODm。试验期为42 d。结果表明:1)饲料中添加SODm对肉鸡生长性能无显著影响($P>0.05$)。2)21日龄时,III组的血清免疫球蛋白G(IgG)含量显著高于对照组($P<0.05$),IV组的血清免疫球蛋白M(IgM)含量显著高于其他各组($P<0.05$),各组之间血清免疫球蛋白A(IgA)含量无显著差异($P>0.05$)。42日龄时,各组之间血清IgA、IgG、IgM含量均无显著差异($P>0.05$)。3)21日龄时,III组的肠道超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性显著高于对照组($P<0.05$),丙二醛(MDA)含量显著低于对照组($P<0.05$)。42日龄时,IV组的肠道总抗氧化能力(T-AOC)显著高于其他各组($P<0.05$),III、IV组的肠道MDA含量显著低于对照组($P<0.05$)。4)21日龄时,II、III组的肠道胰蛋白酶、胃蛋白酶、脂肪酶活性显著高于对照组($P<0.05$);42日龄时,III组的肠道胃蛋白酶活性显著高于其他各组($P<0.05$)。由此可见,饲料中添加SODm可以提高肉仔鸡血清免疫指标及肠道抗氧化性能和消化酶活性。

关键词: 超氧化物歧化酶模拟物;肉鸡;免疫;抗氧化;消化酶

中图分类号:S831

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2020)01-0432-08

超氧化物歧化酶模拟物(superoxide dismutase mimics, SODm)是一种通过化学或生物合成的具有超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性的化合物,常见的配体有卟啉环、希夫氏碱(Schiff's base)、大环含氮化合物及天然活性物质等,其中以天然活性物质作为配体毒性最小^[1-2]。SOD是机体抗氧化系统中重要的抗氧化酶之一,能够清除机体内的超氧阴离子,维持机体的氧化还原平衡,减少机体的炎症反应^[3]。根据所含辅

基可分为锰超氧化物歧化酶(Mn-SOD)、铁超氧化物歧化酶(Fe-SOD)、铜锌超氧化物歧化酶(Cu/Zn-SOD)3种类型,Mn-SOD主要存在于线粒体中,当过度消耗时,会引起细胞衰老,导致机体出现炎症反应^[4-5]。在医学上SOD具有抗辐射、抗氧化、抗癌、消炎等作用,被广泛应用^[6-7]。而SODm作为模拟物也具有类似的作用。Salvemini等^[8]研究发现,SODm可以通过抑制中性粒细胞的衰老缓解脂多糖引起的大鼠肠道炎症。目前,

收稿日期:2019-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(31872377)

作者简介:马渭青(1994—),男,山东高密人,硕士研究生,从事单胃动物营养研究。E-mail: 1131878862@qq.com

*通信作者:许丽,教授,博士生导师,E-mail: xuli_19621991@163.com

SODm 作为抗氧化剂在动物生产中的研究较少。有鉴于此, 本试验研究了 SODm 对肉仔鸡生长性能、血清免疫指标及肠道抗氧化指标和消化酶活性的影响, 以期 SODm 在家禽生产中的应用提供依据。

1 材料与方方法

1.1 试验动物与试验设计

试验选取 1 日龄健康的爱拔益加 (AA) 肉鸡公雏 288 只, 随机分为 4 组, 每组 6 个重复, 每个重复 12 只。对照组 (I 组) 饲喂基础饲料, 试验组 (II、III、IV 组) 在基础饲料上分别添加 1.0、2.0、3.0 g/kg 的 SODm。SODm 模拟 Mn-SOD 人工合成, 呈白色粉末状, 购自大庆华美科技有限公司。试验期为 42 d。

1.2 基础饲料与饲养管理

基础饲料参照 NRC (1994)^[9] 和《中国饲料成分及营养价值表》(2018 年第 29 版) 配制, 基础饲料组成及营养水平见表 1。肉鸡在铁丝网笼中饲养, 在整个试验过程自由采食与饮水。第 1 周室温保持在 32 ℃, 每周逐渐降温 2 ℃, 直至达到 24 ℃, 然后保持这个温度到试验结束。在试验期间, 第 1~7 天接受 24 h 的照明, 之后 23 h 照明 1 h 黑暗直到第 42 天。所有肉鸡在第 6 天和第 12 天接种新城疫灭活疫苗, 第 19 天接种传染性法氏囊病灭活疫苗。

表 1 基础饲料组成及营养水平 (风干基础)

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

项目 Items	1~21 日龄	22~42 日龄
	1 to 21 days of age	22 to 42 days of age
原料 Ingredients		
玉米 Corn	61.00	63.00
豆粕 Soybean meal	26.00	23.00
豆油 Soybean oil	1.00	3.00
玉米蛋白粉 Corn protein meal	5.00	2.50
棉籽粕 Cottonseed meal	2.00	2.50
羽毛粉 Feather meal		2.00
磷酸氢钙 CaHPO ₄	1.30	1.10
石粉 Limestone	1.50	1.50
食盐 NaCl	0.30	0.30

续表 1

项目 Items	1~21 日龄	22~42 日龄
	1 to 21 days of age	22 to 42 days of age
L-赖氨酸 L-Lys	0.20	0.03
蛋氨酸 Met	0.20	0.07
预混料 Premix ¹⁾	1.50	1.00
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ²⁾		
代谢能 ME/(MJ/kg)	12.21	12.75
粗蛋白质 CP	21.55	20.63
赖氨酸 Lys	1.14	0.91
蛋氨酸 Met	0.55	0.39
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.91	0.76
苏氨酸 Thr	0.76	0.70
色氨酸 Try	0.22	0.21
钙 Ca	1.05	1.00
有效磷 AP	0.40	0.34
总磷 TP	0.60	0.58

1) 预混料为每千克饲料提供 The premix provided the following per kg of diets: 1~21 日龄 1 to 21 days of age, 氯化胆碱 choline chloride (50%) 1.5 g, VA 12 000 IU, VD 3 000 IU, VE 24 IU, VK₃ 2.6 mg, 硫胺素 thiamine 2.3 mg, 泛酸 pantothenic acid 12 mg, 烟酸 niacin 35 mg, 生物素 biotin 0.18 mg, 叶酸 folic acid 0.6 mg, 吡哆酚 pyrazine 3.8 mg, 植酸酶 phytase 200 IU, VB₁₂ 0.011 mg, Fe 100 mg, Mn 120 mg, Zn 100 mg, Cu 8 mg, I 0.7 mg, Se 0.3 mg; 22~42 日龄 22 to 42 days of age, 氯化胆碱 choline chloride (50%) 0.5 g, VA 12 000 IU, VD 3 000 IU, VE 24 IU, VK₃ 2.6 mg, 硫胺素 thiamine 2.3 mg, 泛酸 pantothenic acid 12 mg, 烟酸 niacin 35 mg, 生物素 biotin 0.18 mg, 叶酸 folic acid 0.6 mg, 吡哆酚 pyrazine 3.8 mg, 植酸酶 phytase 200 IU, VB₁₂ 0.011 mg, Fe 100 mg, Mn 120 mg, Zn 100 mg, Cu 8 mg, I 0.7 mg, Se 0.3 mg。

2) 粗蛋白质、钙和总磷为实测值, 其余为计算值。CP, Ca and TP were measured values, while the others were calculated values.

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长性能

每天 06:00 记录投料量并每周回称 1 次剩料, 用于计算平均日采食量 (ADFI)。记录第 1 天、第 21 天和第 42 天肉鸡体重, 用于计算平均日增重 (ADG), 根据 ADFI 和 ADG 计算料重比 (F/G)。

1.3.2 血清免疫指标

试验第21天和第42天,每个重复选取2只体况相似的肉鸡,颈静脉采血,收集于采血管,然后4 000 r/min离心10 min取上清,用于测定血清免疫球蛋白A(IgA)、免疫球蛋白G(IgG)、免疫球蛋白M(IgM)含量。血清免疫指标均使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定。

1.3.3 肠道抗氧化指标

试验第21天和第42天,每个重复选取2只体况相似的肉鸡,屠宰后取十二指肠中段(从肌胃底部至胰环末端),将十二指肠纵向打开,用生理盐水溶液清洗,然后用玻璃盖玻片刮下黏膜组织。按质量体积比(肠黏膜组织:生理盐水=1:9)制备肠道黏膜组织匀浆,4 000 r/min 4℃离心10 min取上清,用于测定肠道SOD、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性,总抗氧化能力(T-AOC),丙二醛(MDA)含量。肠道抗氧化指标均使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定。

1.3.4 肠道消化酶活性

试验第21天和第42天,肉鸡屠宰后取十二指肠,收集食糜于2 mL冻存管,置于液氮中保存。按质量体积比(食糜:生理盐水=1:1)制备匀浆,4 000 r/min、4℃离心10 min取上清,测定肠道脂肪酶、胰蛋白酶、胃蛋白酶、肠道消化酶活性。肠道消化酶活性均使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定。

1.4 数据处理与统计分析

使用Excel 2016对原始数据进行处理,使用SPSS 22.0的单因素方差分析(one-way ANOVA)对数据进行方差检验和多重比较,结果表示为“平均值±标准差”, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 饲料中添加SODm对肉鸡生长性能的影响

由表2可知,饲料中添加SODm对各个时期肉鸡的ADFI、ADG、F/G均无显著影响($P>0.05$)。

表2 饲料中添加SODm对肉鸡生长性能的影响

Table 2 Effects of dietary SODm on growth performance of broilers

项目 Items	组别 Groups			
	I	II	III	IV
1~21日龄 1 to 21 days of age				
平均日采食量 ADFI/(g/d)	39.62±2.68	39.36±0.49	38.95±1.03	39.67±0.36
平均日增重 ADG/(g/d)	27.08±1.47	27.90±0.82	27.41±1.57	27.09±1.93
料重比 F/G	1.46±0.05	1.41±0.05	1.42±0.08	1.47±0.11
22~42日龄 22 to 42 days of age				
平均日采食量 ADFI/(g/d)	153.31±11.07	153.84±9.29	151.90±7.39	153.38±9.49
平均日增重 ADG/(g/d)	90.84±3.27	92.00±1.67	87.43±4.58	87.40±4.29
料重比 F/G	1.69±0.11	1.67±0.09	1.74±0.11	1.75±0.04
1~42日龄 1 to 42 days of age				
初重 Initial weight/g	44.17±3.06	46.17±0.41	45.50±1.76	46.50±0.84
末重 Final weight/g	2 520.67±94.78	2 564.17±61.40	2 457.00±117.90	2 450.67±62.30
平均日采食量 ADFI/(g/d)	96.47±6.56	96.60±4.79	95.43±4.10	96.52±4.89
平均日增重 ADG/(g/d)	58.96±2.21	59.95±0.80	57.42±2.78	57.24±1.48
料重比 F/G	1.64±0.09	1.61±0.08	1.66±0.10	1.69±0.06

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$). The same as below.

2.2 饲料中添加SODm对肉鸡血清免疫指标的影响

由表3可知,21日龄时,与对照组相比,III组

的血清IgG含量显著降低($P<0.05$),其他各组无显著差异($P>0.05$);与对照组相比,IV组的血清IgM含量显著提高($P<0.05$),其他各组无显著差

异 ($P>0.05$); 各组之间血清 IgA 含量无显著差异 ($P>0.05$)。42 日龄时, 各组之间血清 IgA、IgG、IgM 含量均无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 饲料中添加 SODm 对肉鸡血清免疫指标的影响
Table 3 Effects of dietary SODm on serum immune indexes of broilers

项目 Items	组别 Groups			
	I	II	III	IV
21 日龄 21 days of age				
免疫球蛋白 A IgA	2.31±0.05	2.28±0.09	2.31±0.04	2.37±0.03
免疫球蛋白 G IgG	4.31±0.11 ^a	4.21±0.04 ^{ab}	4.13±0.07 ^b	4.24±0.02 ^a
免疫球蛋白 M IgM	1.64±0.04 ^b	1.62±0.06 ^b	1.64±0.02 ^b	1.72±0.01 ^a
42 日龄 42 days of age				
免疫球蛋白 A IgA	2.16±0.09	2.13±0.02	2.16±0.07	2.11±0.02
免疫球蛋白 G IgG	4.09±0.04	4.11±0.05	4.14±0.08	4.09±0.05
免疫球蛋白 M IgM	1.59±0.03	1.58±0.01	1.61±0.03	1.59±0.02

2.3 饲料中添加 SODm 对肉鸡肠道抗氧化指标的影响

由表 4 可知, 21 日龄时, III 组的肠道 SOD 活性显著高于对照组 ($P<0.05$), II 组的肠道 SOD 活性显著低于对照组 ($P<0.05$); III 组的肠道 GSH-Px 活性显著高于其他 3 组 ($P<0.05$); III、IV 组的肠道 MDA 含量显著低于其他 2 组 ($P<0.05$); 各组之间

肠道 T-AOC 无显著差异 ($P>0.05$)。42 日龄时, IV 组的肠道 T-AOC 显著高于其他 3 组 ($P<0.05$); III、IV 组的肠道 MDA 含量显著低于对照组 ($P<0.05$), 且 III 组的肠道 MDA 含量显著低于 IV 组 ($P<0.05$); 各组之间肠道 SOD、GSH-Px 活性无显著差异 ($P>0.05$)。

表 4 饲料中添加 SODm 对肉鸡肠道抗氧化指标的影响
Table 4 Effects of dietary SODm on intestinal antioxidant indexes of broilers

项目 Items	组别 Groups			
	I	II	III	IV
21 日龄 21 days of age				
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mg prot)	125.88±20.12 ^b	99.62±16.98 ^c	148.07±8.87 ^a	113.43±13.88 ^{bc}
谷胱甘肽过氧化物酶	1 685.39±132.00 ^b	1 638.89±150.01 ^b	1 877.51±59.21 ^a	1 640.55±89.47 ^b
GSH-Px/(U/g prot)				
总抗氧化能力 T-AOC/(U/g prot)	7.45±0.58	7.89±0.48	7.52±0.82	7.29±0.63
丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	1.15±0.13 ^a	1.01±0.20 ^a	0.79±0.13 ^b	0.73±0.11 ^b
42 日龄 42 days of age				
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mg prot)	215.28±59.51	270.10±35.69	235.76±58.32	228.77±33.80
谷胱甘肽过氧化物酶	1 491.65±159.07	1 606.56±220.11	1 624.65±313.90	1 678.89±280.99
GSH-Px/(U/g prot)				
总抗氧化能力 T-AOC/(U/g prot)	4.30±0.63 ^b	4.20±0.20 ^b	4.09±0.33 ^b	5.18±0.67 ^a
丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	3.08±0.64 ^a	2.99±0.71 ^a	1.13±0.28 ^c	2.02±0.16 ^b

2.4 饲料中添加 SODm 对肉鸡肠道消化酶活性的影响

由表 5 可知, 21 日龄时, 对照组的肠道胰蛋白酶、胃蛋白酶、脂肪酶活性显著低于 II、III 组 ($P<$

0.05); 各组之间肠道淀粉酶活性无显著差异 ($P>0.05$)。42 日龄时, III 组的肠道胃蛋白酶活性显著高于其他 3 组 ($P<0.05$); 各组之间肠道胰蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶活性无显著差异 ($P>0.05$)。

表5 饲料中添加 SODm 对肉鸡肠道消化酶活性的影响

Table 5 Effects of dietary SODm on intestinal digestive enzyme activities of broilers

U/mg prot

项目 Items	组别 Groups			
	I	II	III	IV
21 日龄 21 days of age				
胰蛋白酶 Trypsin	8.55±0.56 ^c	11.13±2.15 ^b	13.97±1.64 ^a	9.65±0.44 ^{bc}
胃蛋白酶 Pepsin	6.48±1.47 ^b	11.06±4.11 ^a	12.09±3.51 ^a	9.44±1.67 ^{ab}
脂肪酶 Lipase	0.31±0.02 ^b	0.37±0.05 ^a	0.39±0.06 ^a	0.35±0.05 ^{ab}
淀粉酶 Amylase	45.92±17.15	76.32±25.22	85.90±20.82	75.19±38.30
42 日龄 42 days of age				
胰蛋白酶 Trypsin	23.30±9.79	24.85±5.83	27.64±3.99	22.40±7.38
胃蛋白酶 Pepsin	21.14±2.57 ^b	21.32±2.56 ^b	26.34±2.07 ^a	22.67±2.37 ^b
脂肪酶 Lipase	0.43±0.11	0.41±0.08	0.41±0.04	0.39±0.07
淀粉酶 Amylase	207.75±42.75	218.95±70.52	217.69±65.69	214.27±22.50

3 讨论

3.1 饲料中添加 SODm 对肉鸡生长性能的影响

抗氧化剂可以作为饲料添加剂应用于动物生产,能够提高动物的生长性能。刘梅等^[10]研究表明,饲料中添加 40~120 mg/kg 的茶多酚可以提高肉鸡 ADFI 和 ADG,降低 F/G,从而促进肉鸡生长。王显慧等^[11]研究表明,饲料中添加 150 或 300 mg/kg 的维生素 C 可以提高肉鸡的生长性能和抗氧化性能,改善机体免疫机能。陈善真等^[12]研究新型维生素 E 类似物对黄羽肉鸡生长性能的影响时发现,饲料中添加 2.5~10.0 IU/kg 的新型维生素 E 对黄羽肉鸡的 ADFI、ADG 和 F/G 均无显著影响。本试验结果显示,在饲料中添加 1.0~3.0 g/kg 的 SODm 对肉鸡各个时期的生长性能均无显著影响,可能是植物提取物抗氧化剂除了能够抗氧化外,还具有类似植物雌激素的生理作用,促进动物生长^[10],而 SODm 这类人工合成的化合物主要以抗氧化功能为主。

3.2 饲料中添加 SODm 对肉鸡血清免疫指标的影响

IgA、IgG、IgM 是家禽体内主要的免疫球蛋白,主要存在于体液免疫中,IgA 能够有效清除黏膜上的抗原,在保护肠道、呼吸道黏膜中发挥重要作用;IgG 主要由免疫器官的浆细胞分泌,能够清除病原微生物,在血清中含量较高;IgM 是机体免疫中最早释放的免疫物质,能够溶解细菌、中和病毒等^[13-15]。抗氧化剂能够通过提高免疫器官指数促进抗体的释放,血液中中性粒细胞的吞噬作用

与 IgG 的含量呈正相关^[16]。初晓等^[17]研究表明,茶多酚能够提高 D-半乳糖致衰小鼠免疫器官指数和细胞吞噬功能,是潜在的免疫调节剂。表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)是茶多酚中的主要成分,能够提高断奶仔猪淋巴细胞转换率,促进细胞因子的分泌,对于氧化应激状态下的仔猪,可提高其血清 IgA、IgG 及 IgM 含量,降低肿瘤坏死因子- α (TNF- α)含量,降低免疫器官的损伤程度^[18]。蒋守群等^[19]研究表明,添加 80 IU/kg 的维生素 E 能够提高 22~42 日龄肉鸡的法氏囊指数,降低血清 TNF- α 含量,改善免疫机能。在本试验中,饲料中添加 3.0 g/kg 的 SODm 能够显著提高 21 日龄肉鸡血清 IgM 含量,而对 42 日龄的血清免疫指标无显著影响,表明 SODm 对肉鸡前期具有一定的免疫调节作用,但是对肉鸡后期的免疫调节效果不明显。

3.3 饲料中添加 SODm 对肉鸡肠道抗氧化指标的影响

SOD、GSH-Px 是机体的主要抗氧化酶,其活性代表了机体的抗氧化性能。MDA 是脂质过氧化产物,其含量反映了脂质过氧化程度。外源性抗氧化物主要通过 2 种途径发挥作用:其一是自身作为抗氧化物被氧化,减少自由基对细胞的损伤;其二是激活体内的抗氧化系统,提高体内抗氧化酶的活性^[20-21]。研究表明,在饲料中添加 50~150 mg/kg 的维生素 E 能够提高三黄鸡血清中抗氧化酶活性,降低 MDA 含量^[22]。SODm 作为 SOD 的模拟物,具有与其相似的生理活性,能够清除超氧阴离子自由基,减少细胞的脂质氧化。本

试验研究表明,饲料中添加 SODm 能够提高肠道抗氧化性能,降低肠道 MDA 含量,减少脂质氧化水平。对于肉鸡前期,SODm 主要通过提高抗氧化酶活性来减少脂质的氧化,而在肉鸡后期,SODm 可能通过提高其他抗氧化物质来提高 T-AOC,保护肠道健康。

3.4 饲料中添加 SODm 对肉鸡肠道消化酶活性的影响

消化酶的活性决定了机体对营养物质的吸收利用程度^[23]。研究发现,天然维生素 E 能够提高肉鸡肠道消化酶活性及抗氧化能力^[24]。何敏等^[25]研究表明,饲料中添加 50~1 000 mg/kg 的维生素 E 能够提高斑点叉尾鲷消化道内蛋白酶、脂肪酶活性,改善肠道内环境,添加量为 100 mg/kg 时效果最佳。本试验研究表明,饲料中添加 2.0 g/kg 的 SODm 可以提高肉鸡十二指肠胰蛋白酶、胃蛋白酶和脂肪酶活性,SODm 前期提高肉鸡肠道消化酶活性的效果优于后期,这也许是由于前期肠道没有发育完全,SODm 能够及时清除肠道内产生的超氧阴离子,保护肠道细胞,改善肠道形态,促进消化酶的分泌。

4 结 论

① 在 1~21 日龄,饲料中添加 SODm 可以提高肉鸡的血清 IgM 含量及肠道 SOD、GSH-Px 活性,降低肠道 MDA 含量,提高肠道胰蛋白酶、胃蛋白酶、脂肪酶活性。

② 在 22~42 日龄,饲料中添加 SODm 可以提高肉鸡肠道 T-AOC,降低肠道 MDA 含量,提高肠道胃蛋白酶活性。

参考文献:

- [1] 陈林林,王振兴,韩可,等.超氧化物歧化酶模拟物的合成研究进展[J].合成化学,2018,26(10):787-794.
- [2] 李晨,杨征,库梦尧,等.超氧化物歧化酶化学模拟的新进展[J].高等学校化学学报,2011,32(9):2046-2061.
- [3] NALKIRAN I, TURAN S, ARIKAN S, et al. Determination of gene expression and serum levels of *MnSOD* and *GPX1* in colorectal cancer [J]. *Anticancer Research*, 2015, 35(1): 255-259.
- [4] 董亮,何永志,王远亮,等.超氧化物歧化酶(SOD)的应用研究进展[J].中国农业科技导报,2013,15(5):53-58.
- [5] DIKALOVA A E, ITANI H A, NAZAREWICZ R R, et al. Sirt3 impairment and SOD2 hyperacetylation in vascular oxidative stress and hypertension [J]. *Circulation Research*, 2017, 121(5): 564-574.
- [6] VUJASKOVIC Z, BATINIC-HABERLE I, RABBANI Z N, et al. A small molecular weight catalytic metalloporphyrin antioxidant with superoxide dismutase (SOD) mimetic properties protects lungs from radiation-induced injury [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2002, 33(6): 857-863.
- [7] DHANASEKARAN A, KOTAMRAJU S, KARUNAKARAN C, et al. Mitochondria superoxide dismutase mimetic inhibits peroxide-induced oxidative damage and apoptosis: role of mitochondrial superoxide [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2005, 39(5): 567-583.
- [8] SALVEMINI D, RILEY D P, LENNON P J, et al. Protective effects of a superoxide dismutase mimetic and peroxynitrite decomposition catalysts in endotoxin-induced intestinal damage [J]. *British Journal of Pharmacology*, 1999, 127(3): 685-692.
- [9] NRC. Nutrient requirements of poultry [S]. 9th ed. Washington, D. C.: The National Academies Press, 1994.
- [10] 刘梅,史挺,王玉海,等.茶多酚对肉仔鸡生产性能及抗氧化能力的影响[J].中国饲料,2018(19): 65-69.
- [11] 王显慧,刘福柱,牛竹叶,等.VC对肉鸡生产性能、胴体品质、免疫机能和抗氧化特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(2): 1-7.
- [12] 陈善真,李其昌,郑森文,等.新型维生素E类似物对黄羽肉鸡生产性能、胴体指标及抗氧化指标的影响[J].饲料研究,2016(21):24-28,42.
- [13] 吴迎朝.黑沙蒿水提物对断奶仔猪生长性能、免疫和抗氧化功能的影响[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [14] 赵明明.黑灵芝多糖对小鼠肠道黏膜免疫及黏膜损伤的影响[D].硕士学位论文.南昌:南昌大学,2018.
- [15] 唐斌.不同低氧训练方式对大鼠血清免疫球蛋白A、G、M和皮质酮的影响[D].硕士学位论文.北京:北京体育大学,2007.
- [16] SUGISAWA H, ITOU T, SAKAI T. Promoting effect of colostrum on the phagocytic activity of bovine polymorphonuclear leukocytes *in vitro* [J]. *Neonatology*, 2001, 79(2): 140-144.

- [17] 初晓,姚如泳,韩志武.茶多酚对 *D*-半乳糖致衰老小鼠免疫功能的调节作用[J].中国医院药学杂志, 2006,26(5):637-638.
- [18] 李永义.茶多酚对氧化应激仔猪的保护作用及机制研究[D].博士学位论文.成都:四川农业大学,2011.
- [19] 蒋守群,周桂莲,林映才,等.饲料维生素 E 水平对 22~42 日龄黄羽肉鸡生长性能、免疫功能和抗氧化能力的影响[J].动物营养学报,2013,25(2):289-298.
- [20] SAFFARI Y, SADRZADEH S M H. Green tea metabolite EGCG protects membranes against oxidative damage *in vitro* [J]. Life Sciences, 2004, 74(12): 1513-1518.
- [21] WANG J L, GUO H Y, ZHANG J, et al. Sulfated modification, characterization and structure-antioxidant relationships of *Artemisia sphaerocephala* polysaccharides[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(4): 897-905.
- [22] 刘敏燕,甘书灏,宋明杰,等.日粮维生素 E 水平对三黄鸡生长性能、抗氧化功能及 PPARs 基因表达的影响[J].中国家禽,2017,39(17):31-34.
- [23] HASHEMIPOUR H, KERMANSHAHI H, GOLIAN A, et al. Effect of thymol and carvacrol feed supplementation on performance, antioxidant enzyme activities, fatty acid composition, digestive enzyme activities, and immune response in broiler chickens [J]. Poultry Science, 2013, 92(8): 2059-2069.
- [24] 程康.天然维生素 E 和合成维生素 E 对肉鸡肠道发育、肠道消化酶和抗氧化功能的影响[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第十二次动物营养学术研讨会论文集.武汉:中国农业大学出版社, 2016:1.
- [25] 何敏,汪开毓,张宇,等.维生素 E 对斑点叉尾鲷生长性能和消化酶活性的影响[J].水产学报,2009, 33(2):288-294.

Effects of Dietary Superoxide Dismutase Mimics on Growth Performance, Serum Immune Indexes and Intestinal Antioxidant Indexes and Digestive Enzyme Activities of Broilers

MA Weiqing WANG Sibao YANG Ji CUI Hongxia ZHAO Danhua XU Li*
(College of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: This study was to investigate the effects of dietary superoxide dismutase mimics (SODm) on growth performance, serum immune indexes and intestinal antioxidant indexes and digestive enzyme activities of broilers. A total of 288 one-day-old male Arbor Acres (AA) broilers were randomly divided into 4 groups with 6 replicates in each group and 12 replicates in each group. Broilers in the control group (group I) were fed a basal diet, and the others in experimental groups (groups II, III and IV) were fed the basal diet supplemented with 1.0, 2.0 and 3.0 g/kg SODm, respectively. The experiment lasted for 42 days. The results showed as follows: 1) dietary SODm had no significant effect on the growth performance of broilers ($P>0.05$). 2) On 21 days of age, the serum immunoglobulin G (IgG) content of group III was significantly higher than that of the control group ($P<0.05$), the serum immunoglobulin M (IgM) content of group IV was significantly higher than that of other groups ($P<0.05$), and there was no significant difference in serum immunoglobulin A (IgA) content among all groups ($P>0.05$). On 42 days of age, there were no significant differences in contents of IgA, IgG and IgM in serum among all groups ($P>0.05$). 3) On 21 days of age, the activities of superoxide dismutase (SOD) and glutathione peroxidase (GSH-Px) in intestine of group III were significantly higher than those of the control group ($P<0.05$), and the malondialdehyde (MDA) content was significantly lower than that of the control group ($P<0.05$). On 42 days of age, the intestinal total antioxidant capacity (T-AOC) of group IV was significantly higher than that of other groups ($P<0.05$); and the intestinal MDA content of groups III and IV was significantly lower than that of the control group ($P<0.05$). 4) On 21 days of age, the activities of trypsin, pepsin and lipase in intestine of groups II and III were significantly higher than those of the control group ($P<0.05$); on 42 days of age, the intestinal pepsin activity of group III was significantly higher than that of other groups ($P<0.05$). It can be seen that dietary SODm can improve the serum immune indexes and intestinal antioxidant capacity and digestive enzyme activities of broilers. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(1):432-439]

Key words: superoxide dismutase mimics; broilers; immune; antioxidant; digestive enzyme