

角鲨烯对 1~21 日龄白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力和免疫功能的影响

高 阳, 张国慧, 周应卿, 刘世琴, 周鑫彤, 赵博絮, 张丹丹*, 李常红*

(白城师范学院生命科学学院, 白城 137000)

摘 要: 为了研究 SQ 对 1~21 日龄白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力和免疫功能的影响, 选取体重为 (38.38±0.25) g 的 1 日龄雄性 AA⁺ 白羽肉鸡 360 只, 将雏鸡随机分为 3 组, 每组 6 个重复, 每个重复 20 只, 分别饲喂基础日粮, 基础日粮+175 mg·kg⁻¹ 角鲨烯 (squalene, SQ) 和基础日粮+350 mg·kg⁻¹ SQ, 试验期为 21 d。结果表明: (1) 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ 均能显著提高肉鸡平均日增重, 并显著降低料重比 ($P<0.05$), 同时提高肉鸡血清中超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性及总抗氧化力 (total antioxidant capacity, T-AOC) ($P<0.05$), 显著降低血清丙二醛 (malonyldialdehyde, MDA) 含量 ($P<0.05$), 且 350 mg·kg⁻¹ SQ 添加量在改善肉鸡血清过氧化氢酶活性和总抗氧化力方面, 效果显著优于 175 mg·kg⁻¹ ($P<0.05$)。 (2) 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ 均能显著提高肉鸡血清中高密度脂蛋白、补体 C3 和 C4 水平 ($P<0.05$), 显著降低血清中低密度脂蛋白水平 ($P<0.05$), 且 350 mg·kg⁻¹ SQ 添加量在降低血清低密度脂蛋白和提高补体 C3 和 C4 水平方面效果显著优于 175 mg·kg⁻¹ ($P<0.05$)。 (3) 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ 均能显著提高肉鸡免疫器官指数 ($P<0.05$)。综上所述, 饲料中添加 SQ 能有效改善 1~21 日龄白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力和免疫功能, 其中 350 mg·kg⁻¹ SQ 在改善肉鸡血清过氧化氢酶、总抗氧化力、补体 C3 和 C4 方面更具优势。

关键词: 角鲨烯; 肉鸡; 生长性能; 抗氧化能力; 免疫功能

中图分类号: S831.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)06-0935-04

Effects of squalene on growth performance, antioxidant capacity and immunity function of broilers at age of 1-21 days

GAO Yang, ZHANG Guohui, ZHOU Yingqing, LIU Shiqin, ZHOU Xintong,

ZHAO Boxu, ZHANG Dandan, LI Changhong

(College of Life Science, Baicheng Normal University, Baicheng 137000)

Abstract: To investigate the effects of dietary supplementation SQ (squalene) on the growth performance, antioxidant capacity and immunity function of broilers at age of 1-21 days, 360 one-day-old male AA⁺ broilers with body weight (38.38±0.25) g were randomly divided into 3 groups by single-factor experiment, with 6 replicates per group and 20 broilers per replicate. Broilers in CK group were fed with the basal diet, and experimental treatment groups were fed with basal diet with 175 and 350 mg·kg⁻¹ SQ, respectively. The experiment lasted for 21 days. The results indicated that: (1) Dietary supplementation of 175 and 350 mg·kg⁻¹ SQ significantly increased the average ADG (average daily gain) and significantly reduced the F/G ($P < 0.05$). Dietary supplementation of 175 and 350 mg·kg⁻¹ SQ significantly increased serum SOD, GSH-Px, CAT and T-AOC activities in broilers ($P < 0.05$), significantly reduced serum MDA content ($P < 0.05$), and compared with 175 mg·kg⁻¹, dietary supplementation of 350 mg·kg⁻¹ SQ significantly increased serum CAT and T-AOC activities in broilers. (2) Dietary supplementation of 175 and 350 mg·kg⁻¹ SQ significantly increased the serum HDL level, complement C3 and C4 levels in broilers ($P < 0.05$), and significantly reduced the serum LDL level in broilers ($P < 0.05$). Compared with 175

收稿日期: 2022-08-28

基金项目: 吉林省科技厅项目 (JJKH20190017KJ), 白城师范学院博士科研启动资金 (012006), 吉林省大学生生命科学竞赛项目 (105006) 和吉林省大学生创新基金 (X20220145) 共同资助。

共同第一作者: 高 阳, 博士, 讲师。E-mail: 179692058@qq.com 张国慧, 本科生。E-mail: 2810589413@qq.com

* 通信作者: 李常红, 博士, 副教授。E-mail: 178163246@qq.com 张丹丹, 副教授。E-mail: 45160440@qq.com

mg·kg⁻¹, dietary supplementation of 350 mg·kg⁻¹ SQ significantly increased serum complement C3 and C4 levels, and serum LDL was significantly reduced ($P<0.05$). (3) Dietary supplementation of 175 and 350 mg·kg⁻¹ SQ significantly improved the immune organ index of broilers ($P<0.05$). In conclusion, dietary SQ effectively improved the growth performance, antioxidant capacity and immune function of 1-21 days old broilers, and 350 mg·kg⁻¹ SQ showed better function in improving serum CAT, T-AOC, complement C3 and C4 in broilers.

Key words: squalene; boiler; growth performance; antioxidant capacity; immunity function

角鲨烯(squalene, SQ)化学名称为2,6,10,15,19,23-六甲基-2,6,10,14,18,22-二十四碳六烯,化学式C₃₀H₅₀,由日本学者首次从鲨鱼肝脏中发现^[1]。自然界中, SQ及其衍生物广泛存在于植物籽实、动物肝脏、脂肪和皮肤中,鲨鱼肝脏、橄榄油和菟属植物籽实是获取天然SQ的主要来源。在动物体内, SQ在类固醇合成中扮演重要角色,在β-胡萝卜素、辅酶Q10、维生素D、维生素E和维生素K₁的合成途径中发挥重要作用,进而发挥其抗炎、抗氧化、促进肠道发育和保护心血管等功能^[2]。随着SQ研究的深入,其安全性和饲用可行性被证实^[3-4]。Zhang等^[5]研究表明,角鲨烯对种公猪精液品质具有较好的改善作用。Chen等^[6]研究表明,饲料中添加1000 mg·kg⁻¹ SQ能改善ROSS肉鸡的抗氧化力和肉质。高阳等^[7]研究发现,饲料中添加250 mg·kg⁻¹ SQ可改善仔猪生长性能,降低腹泻发生,对缓解仔猪早期断奶应激具有显著作用。目前, SQ作为畜禽饲料添加的报道较少。众所周知,1~21日龄是肉鸡生长的重要阶段,雏鸡将陆续面临环境适应和运输应激等问题。因此,平稳、健康的度过1~21日龄,能够为肉鸡的快速生长期夯实基础,提高肉鸡的生长性能。因此,本试验将SQ按照不同剂量添加到1~21日龄肉鸡饲料中,探究其对白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力和免疫功能的影响,为SQ在肉鸡生产中的应用积累经验。

1 材料与方 法

1.1 试验动物及场地

1日龄雄性白羽肉鸡由吉林省长岭县利丰养殖场提供,共计360只,体重为(38.38±0.25)g,白羽肉鸡随机分为3组。试验时间为2021年7月—8月。养殖地点位于松原市长岭县。

1.2 试验设计

将雏鸡随机分为3组,每组6个重复,每个重复20只。分别饲喂基础日粮(对照组CK),基础日粮+175 mg·kg⁻¹角鲨烯(squalene, SQ)和基础日粮+350 mg·kg⁻¹ SQ,试验期为21 d。试验肉鸡均采用笼养,自由采食与饮水,定时通风并打扫鸡舍,按照场区要求执行免疫程序。基础日粮营养参考

NRC 2012和《动物营养参数和饲养标准》^[8]设计,基础日粮和营养水平见表1。SQ购自山东腾望化工有限公司,纯度为99%,配制试验组日粮,先将SQ均匀混合入豆油,再添加到饲料中。

1.3 样品采集

试验结束前12 h禁食,次日收集肉鸡体重数据。采用翅下静脉采血,每只鸡采血8 mL,于3 500 r·min⁻¹、4℃条件下离心15 min分离血清,血清样本分装于冻存管中,干冰预冷后转至-80℃冻存。

表1 基础日粮组成和营养水平(风干基础)

饲料组成	占比/%	营养水平	占比/%
玉米	51.75	代谢能 ²⁾	12.56
豆粕	34.55	粗蛋白质	21.51
鱼粉	2.00	钙	1.01
膨化大豆	3.00	有效磷	0.45
豆油	4.30	赖氨酸	1.18
石粉	1.25	蛋氨酸	0.60
磷酸氢钙	1.55	蛋氨酸+胱氨酸	0.90
食盐	0.30	苏氨酸	0.83
蛋氨酸	0.30		
预混料 ¹⁾	1.00		
合计	100.00		

注:1)预混料为每千克日粮提供9500 IU VA、2750 IU、19.5 IU VE、0.45 mg VK3、2 mg VB1、8 mg VB2、3.5 mg VB6、0.01 mg VB12、35 mg 烟酸、10 mg 泛酸钙、0.55 mg 叶酸、0.32 mg 生物素、1300 mg 氯化胆碱、8 mg 铜、100 mg 铁、120 mg 锰、100 mg 锌、0.7 mg 碘、0.3 mg 硒;2)代谢能为计算值。

1.4 检测指标和方法

平均日增重(average daily gain, ADG)、平均日采食量(average daily feed intake, ADFI)和F/G的测定Chen等^[6]的方法进行。在试验第21天,在每个重复中选择2只精神状态良好且健康的肉鸡,空腹称重后剥离脾脏、法氏囊和胸腺,用电子天平称重,计算免疫器官指数。

抗氧化能力相关指标检测: SOD、T-AOC、GSH-Px、CAT和MDA使用南京建成生物工程研究所试剂盒,操作步骤按说明书进行。血液常规指标由金域医学检测完成。补体C3和C4含量采用免疫比浊法测定。

1.5 数据处理

使用 SPSS 22.0 软件中的 One-Way ANOVA 进行数据分析, 采用 Duncun's 多重比较进行差异显著性检验, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判断标准, 试验数据以平均数 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 SQ 对 1~21 日龄肉鸡生长性能的影响

由表 2 可知: 与 CK 组相比, 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ 均能显著提高 21 日龄白羽肉鸡的 ADG, 并显著降低 F/G ($P < 0.05$), 但对比 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ 添加水平, 肉鸡生长性能差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 SQ 对 1~21 日龄肉鸡抗氧化能力的影响

由表 3 可知: 与 CK 组相比, 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ, 21 日龄肉鸡血清中 T-AOC、SOD 活性、GSH-Px 活性和 CAT 活性显著升高, 同时 MDA 含量显著降低 ($P < 0.05$)。比较两试验组肉鸡血清抗

氧化指标可知: 与 175 mg·kg⁻¹ SQ 添加水平相比, 饲料中添加 350 mg·kg⁻¹ SQ, 21 日龄肉鸡血清中 GSH-Px 活性和 T-AOC 水平显著提升 ($P < 0.05$)。

表 2 SQ 对 1~21 日龄肉鸡生长性能的影响

Table 2 Effects of SQ on the growth performance of 1-21 days old boilers

组别	ADG/(g·d ⁻¹)	ADFI/(g·d ⁻¹)	F/G
CK	27.68 \pm 1.18 ^b	40.30 \pm 1.13	1.47 \pm 0.04 ^a
175 mg·kg ⁻¹ SQ	28.99 \pm 1.11 ^a	41.59 \pm 1.37	1.42 \pm 0.04 ^b
350 mg·kg ⁻¹ SQ	29.04 \pm 1.08 ^a	42.15 \pm 1.48	1.40 \pm 0.03 ^b

注: 同列数据肩标不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 同列数据肩标相同或无肩标表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

2.3 SQ 对 1~21 日龄肉鸡血清生化指标的影响

由表 4 可知: 与 CK 组相比, 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ, 21 日龄肉鸡血清高密度脂蛋白水平显著升高 ($P < 0.05$), 但两试验组间差异不显著 ($P > 0.05$)。与 CK 组相比, 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ, 21 日龄肉鸡血清低密度脂蛋白显著升高 ($P < 0.05$), 且 A 组显著高于 B 组 ($P < 0.05$)。

表 3 SQ 对 1~21 日龄肉鸡抗氧化能力的影响

Table 3 Effects of SQ on antioxidant capacity of 1-21 days old boilers

组别	SOD 活性/(U·mL ⁻¹)	T-AOC/(U·mL ⁻¹)	GSH-Px 活性/(U·mL ⁻¹)	CAT 活性/(U·mL ⁻¹)	MDA 含量/(nmol·mL ⁻¹)
CK	134.05 \pm 5.51 ^b	3.64 \pm 0.20 ^c	741.26 \pm 17.53 ^c	9.44 \pm 0.72 ^b	3.98 \pm 0.28 ^a
175 mg·kg ⁻¹ SQ	147.42 \pm 8.31 ^a	4.42 \pm 0.34 ^b	781.69 \pm 18.09 ^b	10.38 \pm 0.78 ^a	3.45 \pm 0.21 ^b
350 mg·kg ⁻¹ SQ	153.00 \pm 11.78 ^a	4.76 \pm 0.45 ^a	817.28 \pm 23.64 ^a	11.06 \pm 0.91 ^a	3.43 \pm 0.17 ^b

表 4 SQ 对 1~21 日龄肉鸡血清生化指标的影响

Table 4 Effects of SQ on serum indexes of 1-21 days old boilers

组别	总蛋白/ (g·L ⁻¹)	尿酸/ (μ mol·L ⁻¹)	高密度脂蛋白/ (mmol·L ⁻¹)	低密度脂蛋白/ (mmol·L ⁻¹)	ALT/ (U·mL ⁻¹)	AST/ (U·mL ⁻¹)
CK	24.10 \pm 2.35	136.29 \pm 10.35	1.58 \pm 0.08 ^b	0.68 \pm 0.04 ^a	3.11 \pm 0.13	213.81 \pm 11.67
175 mg·kg ⁻¹ SQ	24.91 \pm 1.97	134.61 \pm 9.31	1.68 \pm 0.09 ^a	0.46 \pm 0.02 ^b	3.05 \pm 0.10	205.41 \pm 15.08
350 mg·kg ⁻¹ SQ	25.71 \pm 1.89	137.7 \pm 13.15	1.69 \pm 0.09 ^a	0.40 \pm 0.03 ^c	3.03 \pm 0.14	203.63 \pm 10.20

表 5 SQ 对 1~21 日龄肉鸡免疫功能的影响

Table 5 Effects of SQ on immunity function of 1-21 days old boilers

组别	血清 IgA/(g·L ⁻¹)	血清 IgG/(g·L ⁻¹)	血清 IgM/(g·L ⁻¹)	血清 C3/(mg·L ⁻¹)	血清 C4/(mg·L ⁻¹)
CK	0.345 \pm 0.011	1.56 \pm 0.09	0.165 \pm 0.012	88.43 \pm 4.11 ^c	59.78 \pm 5.53 ^c
175 mg·kg ⁻¹ SQ	0.351 \pm 0.019	1.64 \pm 0.12	0.172 \pm 0.012	93.08 \pm 4.83 ^b	65.57 \pm 4.52 ^b
350 mg·kg ⁻¹ SQ	0.349 \pm 0.016	1.65 \pm 0.10	0.174 \pm 0.013	99.93 \pm 4.16 ^a	74.10 \pm 4.38 ^a

表 6 SQ 对 1~21 日龄肉鸡免疫器官指数的影响

Table 6 Effects of SQ on immune organ indexes of 1-21 days old boilers

组别	脾脏指数	法氏囊指数	胸腺指数
CK	1.45 \pm 0.09 ^b	1.76 \pm 0.12 ^b	2.15 \pm 0.21 ^b
175 mg·kg ⁻¹ SQ	1.62 \pm 0.10 ^a	2.00 \pm 0.15 ^a	2.53 \pm 0.13 ^a
350 mg·kg ⁻¹ SQ	1.69 \pm 0.09 ^a	2.15 \pm 0.19 ^a	2.58 \pm 0.22 ^a

2.4 SQ 对 1~21 日龄肉鸡免疫功能的影响

由表 5 可知: 与 CK 组相比, 饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ, 21 日龄肉鸡血清 IgG 和 IgM 水平略有升高, 但差异不显著 ($P > 0.05$), 肉鸡血清 C3 和 C4 水平均显著升高 ($P < 0.05$), 且饲料中添

加 350 mg·kg⁻¹ SQ 肉鸡血清补体 C3 和 C4 水平均显著高于 175 mg·kg⁻¹ 的添加水平 ($P < 0.05$)。

2.5 SQ 对 1~21 日龄肉鸡免疫器官指数的影响

由表 6 可知: 饲料中添加 SQ 能显著提高 21 日龄肉鸡免疫器官指数 ($P < 0.05$)。与 CK 组相比, 饲料中添加 175 mg·kg⁻¹ 和 350 mg·kg⁻¹ SQ, 21 日龄肉鸡脾脏指数、法氏囊指数和胸腺指数均显著提升 ($P < 0.05$), 但两试验组间差异不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

Chen 等^[6]研究表明, 在 ROSS 肉鸡饲料中添加

1 000 和 2 000 mg·kg⁻¹ SQ, 对 21 日龄肉鸡平均日增重和料肉比无显著影响, 但可显著提高 22~42 日龄肉鸡的平均日增重并降低料重比。本研究中, 饲料添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ, 显著提高肉鸡的平均日增重并降低料重比。其原因可能是: 一方面, 不同品种肉鸡的生长高峰期存在差异; 另一方面, 本研究全程在养殖场进行, 有效缓解运输应激及其他环境因素对试验结果的影响。由此可知, SQ 能在改善肉鸡生长性能方面发挥重要作用。但 SQ 在肉鸡饲料中的添加剂量及其改善肉鸡生长性能的机制仍需进一步探索。

众所周知, 机体的抗氧化能力与畜禽健康密切相关。抗氧化能力越强, 畜禽抗逆、抗炎与抗病能力就越强^[9-10]。SQ 的抗氧化能力主要表现为两方面: 一方面是清除单态氧清除能力; 另一方面能有效阻止自由基和毒物在细胞膜富集。得益于全反式 6 双键结构, SQ 具有良好的流动性, 使其能够在生物膜表面均匀分布, 进而发挥其抗氧化功能。研究表明, SQ 能有效缓解 diquat 诱导的肉鸡肝脏氧化损伤, 并提高肉鸡血清中 SOD、GSH-Px 和 CAT 活性, 同时降低血清中的 MDA 水平^[11]。研究表明, 断奶仔猪饲料中添加 250 mg·kg⁻¹ SQ 能有效改善断奶仔猪空肠形态、提高空肠组织抗氧化力^[12]。本研究中, 21 日龄肉鸡血清中抗氧化酶活性增强, MDA 含量下降, 与前人研究结果相符。由此可知, SQ 在改善肉鸡抗氧化能力方面具有积极作用。

研究表明, SQ 在改善血清脂蛋白组成方面扮演重要角色, SQ 不仅能提高血液中的 HDL 水平, 降低 LDL 水平, 还能有效抑制 LDL 与 ROS 发生脂质过氧化反应^[13]。血清 LDL 水平的降低, 有助于机体抗氧化系统的功能。SQ 能与半胱氨酸巯基发生反应, 抑制 Nrf2 泛素化, 通过调控 Keap1-Nrf2-ARE 信号通路来改善动物的血液生化指标^[14-15]。本研究中, SQ 能够显著提升肉鸡血清中的 HDL 水平并降低 LDL 水平, 提供肉鸡血清补体 C3、C4 水平。补体系统是先天免疫系统的组成部分, 在调控炎症和免疫应答中发挥重要作用, 补体系统激活后, 可通过调控活化因子 (Nf-kB)、丝裂原活化蛋白激酶 (MAPK) 和 PI3K/AKT 信号通路活性, 进而提高动物先天免疫能力和抗炎能力^[16-17]。本研究中, 饲料中添加 SQ, 21 日龄肉鸡脾脏指数、法氏囊指数和胸腺指数均显著升高。在肉鸡的免疫系统中, 脾脏、法氏囊和胸腺是重要的体液免疫器官, 免疫器官指数的升高在一定程度上代表机体免疫功能发育成熟和免疫功能增强^[18]。这表明, SQ 能够通过提高补体水平和免疫器官指数来改善肉鸡的免疫功能, 但 SQ

的具体作用机制仍需要较多研究。

饲料中添加 175 和 350 mg·kg⁻¹ SQ 可有效改善 1~21 日龄白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力和免疫功能, 在本试验条件下, 其中 350 mg·kg⁻¹ SQ 在改善肉鸡血清 CAT、T-AOC、补体 C3 和 C4 方面更具优势, 因此效果更佳。

参考文献:

- [1] TSUJIMOTO M. A highly unsaturated hydrocarbon in shark liver oil[J]. *J Ind Eng Chem*, 1916, 8(10): 889-896.
- [2] KUMAR L R G, KUMAR H S, TEJPAL C S, et al. Exploring the physical and quality attributes of muffins incorporated with microencapsulated squalene as a functional food additive[J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 58(12): 4674-4684.
- [3] DHANDAPANI N, GANESAN B, ANANDAN R, et al. Synergistic effects of squalene and polyunsaturated fatty acid concentrate on lipid peroxidation and antioxidant status in isoprenaline-induced myocardial infarction in rats[J]. *Afr J Biotechnol*, 2007, 6(8): 1021-1027.
- [4] GABAS-RIVERA C, BARRANQUERO C, MARTÍNEZ-BEAMONTE R, et al. Dietary squalene increases high density lipoprotein-cholesterol and paraoxonase 1 and decreases oxidative stress in mice[J]. *PLoS One*, 2014, 9(8): e104224.
- [5] ZHANG W M, ZHANG X X, BI D R, et al. Feeding with supplemental squalene enhances the productive performance in boars[J]. *Anim Reprod Sci*, 2008, 104(2/3/4): 445-449.
- [6] CHEN Y P, GU Y F, ZHAO H R, et al. Effects of graded levels of dietary squalene supplementation on the growth performance, plasma biochemical parameters, antioxidant capacity, and meat quality in broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2020, 99(11): 5915-5924.
- [7] 高阳, 杜鑫, 李冰娟, 等. 饲料添加角鲨烯对早期断奶仔猪生长性能、血液生化指标及抗氧化能力的影响[J]. *中国兽医学报*, 2022, 42(1): 160-164.
- [8] 张宏福. 动物营养参数与饲养标准[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [9] 洪盼. β -胡萝卜素对早期断奶仔猪肠道内质网应激及其信号通路的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- [10] 李昊阳, 钟荣珍, 房义, 等. 动物氧化应激与免疫的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(11): 3217-3221.
- [11] CHEN Y P, GU Y F, ZHAO H R, et al. Dietary squalene supplementation alleviates diquat-induced oxidative stress and liver damage of broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2021, 100(3): 100919.
- [12] 高阳, 杜鑫, 李冰娟, 等. 角鲨烯对早期断奶仔猪空肠形态、黏膜通透性和抗氧化能力的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2022, 51(1): 84-89.
- [13] BHILWADE H N, TATEWAKI N, NISHIDA H, et al. Squalene as novel food factor[J]. *Curr Pharm Biotechnol*, 2010, 11(8): 875-880.
- [14] AHMED S M U, LUO L, NAMANI A, et al. Nrf2 signaling pathway: Pivotal roles in inflammation[J]. *Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis*, 2017, 1863(2): 585-597.
- [15] RINALDI TOSI M E, BOCANEGRA V, MANUCHA W, et al. The Nrf2-Keap1 cellular defense pathway and heat shock protein 70 (Hsp70) response[J]. *Cell Stress Chaperones*, 2011, 16(1): 57-68.
- [16] HE S P, YU Q F, HE Y J, et al. Dietary resveratrol supplementation inhibits heat stress-induced high-activated innate immunity and inflammatory response in spleen of yellow-feather broilers[J]. *Poult Sci*, 2019, 98(12): 6378-6387.
- [17] 刘雁, 张清锋, 韩战强. 葛根提取物对肉鸡生产性能、免疫功能及抗氧化能力的影响[J]. *中国饲料*, 2021(19): 15-18.
- [18] 范秋丽, 陈志龙, 林泽铃, 等. 五倍子提取物对 1~42 日龄黄羽肉鸡生长性能、肠道形态、免疫功能、抗氧化能力及肠道菌群的影响[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(3): 1547-1558.