



红象草花青素对白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力和盲肠微生物的影响

陈鑫珠^{1*}, 林平冬¹, 高 龙^{1,2}, 岳 稳¹

(1. 福建省农业科学院畜牧兽医研究所/福建省畜禽遗传育种重点实验室, 福州 350013;

2. 福建农林大学动物科学学院, 福州 350002)

摘 要: 旨在研究红象草花青素对白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力和盲肠微生物结构的影响。选取 210 只健康、体重相近的圣泽“901”1 日龄白羽肉鸡公雏, 随机分为 5 组, 每组 6 个重复, 每个重复 7 只鸡。各组饲喂相同基础日粮, 对照组饮水中不添加花青素, 试验 1 组、2 组、3 组饮水中分别添加 50、100 和 200 mg·kg⁻¹ 红象草花青素, 试验 4 组饮水中添加 100 mg·kg⁻¹ 紫薯花青素, 试验期 42 d。结果显示: 1) 饮水中添加红象草花青素对白羽肉鸡的生长性能无显著影响($P>0.05$)。2) 21 日龄肉鸡中, 试验 2 组的血清和肝脏丙二醛(MDA)含量均显著低于对照组($P<0.05$), 血清谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)含量及肝脏过氧化氢酶(CAT)、还原型谷胱甘肽(GSH)、超氧化物歧化酶(SOD)含量均显著高于对照组($P<0.05$); 42 日龄肉鸡中, 试验 2 组的血清 SOD 含量及肝脏 GSH、GSH-Px 含量均显著高于对照组($P<0.05$)。3) 与对照组相比, 21 日龄试验组中 *SOD1*、*SOD2*、*GPX1*、*HO-1* 的 mRNA 相对表达量和 42 日龄试验组中 *NQO1*、*GPX1*、*SOD1*、*HO-1* 的 mRNA 相对表达量显著提高($P<0.05$)。4) 与对照组相比, 21 日龄试验 3 组的厚壁菌门显著减少($P<0.05$), 拟杆菌门、拟杆菌属显著增加($P<0.05$); 42 日龄试验 1 组的大肠杆菌属和乳杆菌属及试验 3 组的大肠杆菌属均显著增加($P<0.05$), 试验 1、2、4 组的艾森贝格氏菌属均显著减少($P<0.05$)。综上, 本试验条件下, 饲粮添加红象草花青素可提高白羽肉鸡的血清和肝抗氧化能力, 并可调节肠道微生物群落结构, 提高抵抗氧化应激的能力。

关键词: 红象草花青素; 白羽肉鸡; 生长性能; 抗氧化; 肠道微生物

中图分类号: S831.5

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)02-0889-18

Effects of Anthocyanins from Red Elephant Grass on the Growth Performance, Antioxidant Capacity and Cecal Microbes of White-feathered Broilers

CHEN Xinzhu^{1*}, LIN Pingdong¹, GAO Long^{1,2}, YUE Wen¹

(1. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine/Fujian Key Laboratory of

Animal Genetics and Breeding, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China;

2. College of Animal Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This experiment aimed to study the effects of anthocyanins from red elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumab cv. Red) on the growth performance, antioxidant capacity, and cecal microbial structure of white-feathered broilers. A total of 210 healthy and similar-

收稿日期: 2025-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(32302791); 国家自然科学基金项目延伸研究项目(GJYS202406); 福建省人民政府中国农业科学院农业高质量发展超越“5511”协同创新工程项目(XTCXGC2021019)

作者简介: 陈鑫珠, 副研究员, 博士, 主要从事动物营养与饲料资源的开发利用研究; 林平冬, 助理研究员, 博士, 主要从事植物活性成分研究和动物营养研究, E-mail: lpd7911@163.com; 陈鑫珠与林平冬为同等贡献作者

* 通信作者: 陈鑫珠, 主要从事动物营养与饲料资源的开发利用研究, E-mail: 010622051@163.com

sized Shengze “901” 1-day-old male chicks were randomly divided into 5 groups, with 6 replicates in each group and 7 chicks in each replicate. Each group was fed the same basal diet, and the control group had no anthocyanin added to the drinking water. The drinking water of the treatment groups 1, 2, and 3 contained 50, 100, and 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of anthocyanin extracted from red elephant grass, respectively, while the drinking water of the treatment group 4 contained 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of anthocyanin from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). The treatment period was 42 days. The results showed that: 1) The addition of red elephant grass anthocyanin to the drinking water had no significant effect on the growth performance of white-feathered broilers ($P>0.05$). 2) At 21 days of age, the serum and liver malondialdehyde (MDA) content of the treatment group 2 was significantly lower than those of the control group ($P<0.05$), and the serum glutathione peroxidase (GSH-Px) content and liver catalase (CAT), glutathione (GSH), and superoxide dismutase (SOD) contents were significantly higher than those of the control group ($P<0.05$); at 42 days of age, the serum SOD content and liver GSH, GSH-Px content of the treatment group 2 were significantly higher than those of the control group ($P<0.05$). 3) Compared with the control group, the relative expressions of *SOD1*, *SOD2*, *GPX1*, and *HO-1* mRNA in the treatment groups at 21 days of age and the relative expressions of *NQO1*, *GPX1*, *SOD1*, and *HO-1* mRNA in the treatment groups at 42 days of age were significantly increased ($P<0.05$). 4) Compared with the control group, the Firmicutes in the treatment group 3 at 21 days of age were significantly reduced ($P<0.05$), while the Bacteroidetes and *Bacteroidetes* were significantly increased ($P<0.05$). At 42 days of age, *Colidextribacter* and *Lactobacillus* in treatment group 1, as well as *Colidextribacter* in treatment group 3, were significantly increased ($P<0.05$). Conversely, *Eisenbergiella* in treatment groups 1, 2, and 4 were significantly decreased ($P<0.05$). In conclusion, under the condition of the current study, supplementation of red elephant grass anthocyanins can enhance the antioxidant capacity in the serum and liver of white-feathered broilers, modulate the intestinal microbial community structure, and improve their resistance to oxidative stress.

Keywords: *Pennisetum purpureum* Schumab cv. Red anthocyanins; white-feathered broiler; growth performance; antioxidant; intestinal microbiota

* **Corresponding author:** CHEN Xinzhu, E-mail: 010622051@163.com

在畜禽养殖过程中,环境变化、生长时期的改变以及外来致病菌的侵扰,均可导致氧化应激^[1]。氧化应激是一种机体内部的化学反应失衡状态,可造成动物肝脏损伤和肝功能障碍,严重危害畜禽健康及生产,给养殖业发展带来不利影响^[2-3]。为减少氧化应激对肉鸡造成的负面影响,寻找缓解氧化应激的方法显得尤为重要。花青素(Anthocyanin)是广泛存在于植物中的水溶性黄酮类色素,也是一种强效的天然抗氧化剂,凭借其卓越的抗氧化性能成为饲料添加剂领域抗生素替代研究关注的焦点^[4-5]。邢玉娟等^[6]研究表明,饲料中添加 15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的低聚原花青素,可显著提高肉鸡血浆中的谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、超氧化物歧化酶(SOD)及总

抗氧化能力(T-AOC)水平,提升肉鸡抗氧化性能。Fang等^[7]给热应激文昌鸡不同剂量的紫薯花青素(PSPA)处理,发现PSPA处理通过改善血清和肝抗氧化指标(GSH-Px、SOD)和降低丙二醛(MDA)水平显著增强了肝的氧化还原状态。岭南黄鸡日粮中添加 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 越橘花青素可缓解沙门氏菌引发的体重减轻,减少肝和脾中的沙门菌数量,降低肠道中变形菌门和拟杆菌门的丰度,增加厚壁菌门的丰度,调节绒毛高度、隐窝深度,恢复肠道形态,便于营养物质的吸收和利用,建立肠道屏障^[8]。Islam等^[9]研究发现,与正常饮食相比,饲料中加入富含花青素的野生蓝莓果渣后,肉鸡肠道中的乳酸杆菌、拟杆菌和双歧杆菌增加,而大肠杆菌、梭状芽

孢杆菌、幽门螺杆菌和肠球菌减少。红象草(*Pennisetum purpureum* Schumab cv. Red)是禾本科狼尾草属牧草品种,富含花色苷且其生长迅速,再生能力强,产量高,是非常有潜力的花青素来源^[10]。目前,关于红象草花青素的研究较少,本课题组前期对其花青素的提取方法做了相关研究,但作为饲料添加剂对肉鸡的影响尚未有相关研究报道。本研究旨在探究红象草花青素对白羽肉鸡生长性能、抗氧化能力以及盲肠微生物的影响,为红象草花青素在白羽肉鸡的营养调控、减小氧化应激这些实际应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

白羽肉鸡:1日龄圣泽“901”白羽肉鸡公雏购自圣农集团。

红象草花青素:使用本实验室优化过的超声辅助提取工艺制备红象草花青素提取液,所得提取液中花青素含量为 $2.09\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,低温保存备用^[11]。

紫薯花青素:购自青岛鹏远康华天然产物有限公司,总花色苷(以矢车菊-3-葡萄糖苷计) $\geq 0.7\%$ 。

1.2 试验设计

本试验选取210只健康、体重为 $(30.27\pm 2.26)\text{ g}$ 的1日龄白羽肉鸡公雏,随机分为5组,每组6个重复,每个重复7只鸡,各组饲喂基础日粮。空白对照组饮用正常水(无添加);试验1组、2组、3组饮水中添加红象草花青素,添加剂量分别为50、100和 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,于每日清晨固定时间均匀稀释至饮水中,全天自由饮用;试验4组饮水中添加 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 紫薯花青素(添加方法同红象草花青素),作为阳性对照。试验期42 d。在肉鸡饲养第21天和第42天时,每个重复随机挑选2只体重相近的白羽肉鸡进行屠宰取样。动物试验伦理批准编号:202207FJ005,审批机构:福建省农业科学院畜牧兽医研究所。

1.3 试验日粮

本试验基础日粮参照中国鸡饲养标准(NY/T 33—2004)和《中国饲料成分及营养价值表》(2022年第33版)进行配制。试验所用基础日粮组成和营养水平如表1所示。日粮中粗蛋白质、钙的含量分别参照GB/T 6432—2018、GB/T 6436—2018中的方法测定,氨基酸含量参照GB/T 18246—2000中的方法测定;非植酸磷含量=总磷含量—植酸磷含量,其中总磷含量参照GB/T 6437—2018中的方法

测定,植酸磷含量测定方法参考《饲料分析及饲料质量检测技术》^[12]。

1.4 饲养管理

试验在福建省农科院动物饲养试验场开展。试验开始前,对鸡舍及其所有用品进行彻底清洁及熏蒸消毒。试验采用密闭鸡舍单层笼养方式,自由采食、充足饮水。参照白羽肉鸡饲养管理手册进行日常管理和免疫。每日记录各组鸡只的死亡和死淘数量、鸡舍温湿度、饲料消化情况等。所有试验程序均经福建省农业科学院畜牧兽医研究所动物伦理委员会批准。

1.5 生长性能

以重复为单位,对每笼1日龄、21日龄和42日龄的肉鸡进行称重记录,每日记录每笼投喂量和剩余料量,计算平均日增重、平均日采食量和料重比(日采食量/日体增重)。

1.6 样品采集

在试验第21天和第42天,从各组每个重复中随机选取两只健康、体重相近的白羽肉鸡(提前12 h禁食),进行翅静脉采血,离心收集血清,保存于一 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 待测。将采血后鸡只进行放血和屠宰,取盲肠内容物和肝脏组织,保存于一 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 待测。每个重复两只鸡的样品分别进行指标检测与分析。

1.7 指标检测

1.7.1 血清、肝抗氧化指标检测 测定血清和肝样品的T-AOC(A015-3-1)、过氧化氢酶(CAT, A007-1-1)、还原型谷胱甘肽(GSH, A006-2-1)、GSH-Px(A005-1-2)、MDA(A003-1-2)和SOD(A001-3-2)水平。所用检测试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。

1.7.2 肝抗氧化基因的mRNA表达量测定 采用TRIzol法提取肝组织总RNA,并测定其浓度与纯度,使用TransScript One-Step gDNA Removal and cDNA Synthesis SuperMix试剂盒(南京诺唯赞生物科技股份有限公司)反转录制备cDNA,使用PerfectStart Green qPCR SuperMix试剂盒(南京诺唯赞生物科技股份有限公司)配制qPCR反应体系,并在Roche LightCycler 96 RT-qPCR仪(Roche公司,美国)上完成扩增反应。以 $\beta\text{-actin}$ 作为内参基因,采用 $2^{-\Delta\Delta\text{CT}}$ 方法计算目的基因的mRNA相对表达量^[13]。引物通过NCBI在线设计,并交由福州尚亚生物公司合成。引物信息见表2。

表1 基础日粮组成及营养水平(风干基础)

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

%

项目 Item	含量 Content	
	1~21天 1 to 21 days	22~42天 22 to 42 days
原料 Ingredient		
玉米 Corn	58.74	62.56
大豆粕 Soybean meal	18.60	15.30
膨化大豆 Expanded soybean	18.40	18.30
石粉 Limestone	1.20	1.20
磷酸氢钙 CaHPO_4	1.80	1.66
氯化钠 NaCl	0.28	0.28
L-赖氨酸 L-Lys·HCl	0.31	0.19
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.26	0.16
L-苏氨酸 L-Thr	0.15	0.09
L-色氨酸 L-Trp	0.01	0.01
预混料 Premix ¹⁾	0.25	0.25
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ²⁾		
代谢能/(MJ·kg ⁻¹) ME	12.54	12.96
粗蛋白质 CP	21.50	20.00
钙 Ca	1.00	0.91
非植酸磷 NPP	0.51	0.40
赖氨酸 Lys	1.15	1.00
蛋氨酸 Met	0.50	0.46
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	0.91	0.79
苏氨酸 Thr	0.81	0.72
色氨酸 Trp	0.24	0.22

¹⁾ 预混料为每千克饲粮提供:1~21 d:VA,9 000 IU;VD,32 500 IU;VE,24.0 mg;VK,33.0 mg;VB₁,2.4 mg;VB₂,7.5 mg;VB₆,3.6 mg;VB₁₂,0.015 mg;烟酸,45.0 mg;D-泛酸,12.0 mg;叶酸,1.2 mg;D-生物素,0.1 mg。22~42 d:VA,8 000 IU;VD,32 000 IU;VE,20.0 mg;VK₃,2.5 mg;VB₁,2.0 mg;VB₂,6.2 mg;VB₆,3.0 mg;VB₁₂,0.012 mg;烟酸,37.5 mg;D-泛酸,10.0 mg;叶酸,1.0 mg;d-生物素,0.1 mg。1~42 d:Cu,5 mg;Fe,56 mg;Mn,48 mg;Zn,48 mg;I,0.32 mg;Se,0.32 mg。微量元素为包被型。²⁾ 代谢能、非植酸磷为计算值,其余为实测值

¹⁾ The premix provided the following per kg of diets: (1)1~21 d: VA, 9 000 IU; VD, 32 500 IU; VE, 24.0 mg; VK, 33.0 mg; VB₁, 2.4 mg; VB₂, 7.5 mg; VB₆, 3.6 mg; VB₁₂, 0.015 mg; nicotinic acid, 45.0 mg; D-pantothenic acid, 12.0 mg; folic acid, 1.2 mg; d-biotin, 0.1 mg。(2)22~42 d: VA, 8 000 IU; VD, 32 000 IU; VE, 20.0 mg; VK₃, 2.5 mg; VB₁, 2.0 mg; VB₂, 6.2 mg; VB₆, 3.0 mg; VB₁₂, 0.012 mg; nicotinic acid, 37.5 mg; D-pantothenic acid, 10.0 mg; folic acid, 1.0 mg; d-biotin, 0.1 mg。(3)1~42 d: Cu, 5 mg; Fe, 56 mg; Mn, 48 mg; Zn, 48 mg; I, 0.32 mg; Se, 0.32 mg。The trace elements were coated type。²⁾ ME and NPP were calculated values, while the others were measured values

1.7.3 盲肠内容物微生物多样性分析 盲肠内容物样品的微生物基因测序委托上海凌恩生物科技有限公司进行:提取样品总DNA并测定其浓度和纯度,对基因16S rRNA V1-V9区进行PCR扩增,采用PacBio sequel IIe平台对PCR产物进行高通量测序。

1.8 数据统计分析

采用SPSS 20.0软件对试验数据进行单因素方差分析,采用Tukey法进行多重比较,结果数据以“平均值±标准差”表示, $P \leq 0.05$ 为差异显著。RT-qPCR数据的分析结果使用GraphPad Prism 10软件作图。

表2 引物序列及其参数

Table 2 Sequence and parameters of primers

基因 Gene	引物序列(5'→3') Primer sequence (5'→3')	片段长度/bp Sequence length
<i>β-actin</i>	F:GATATTGCTGCGCTCGTTGT R:TACCAACCATCACACCCTGAT	130
<i>NQO1</i>	F:AAAACCTCTTTCAACCACGCC R:TTCTTGAGGGGTCCGGTGA	143
<i>CAT</i>	F:CGGGATGCAATGTTGTTTCCAT R:AGACTCAGGGCGAAGACTCA	111
<i>GPX1</i>	F:CAACGGCTTCAAACCCAACT R:CCTCTCTCAGGAAGGCGAAC	89
<i>SOD1</i>	F:CAAATGGGTGTACCAGCGCA R:GTCACCCACGTGCCTATCTG	89
<i>SOD2</i>	F:GCCACCTACGTGAACAACCT R:ACCTGAGCTGTAACATCACCTTT	80
<i>Nrf2</i>	F:CTGTCTTCAGCCTTTTGGACA R:AAAAACTTCACGCCTTGCCC	84
<i>HO-1</i>	F:CACACAACGCTGAAAGCATGTC R:AACTCGTGGAGGGACACCT	133

使用 UPARSE (7.1 版, <http://drive5.com/uparse/>) 将 OTU (Operational Taxonomic Units) 按照 98.65% 的相似性阈值聚类, 并使用 UCHIME 鉴定并去除嵌合序列。RDP Classifier (<http://rdp.cme.msu.edu/>) 针对 Silva (SSU132) 16S rRNA 数据库, 使用 70% 的置信度阈值分析每个 16S rRNA 基因序列的系统发育关系。利用 RDP classifier (<http://rdp.cme.msu.edu/>, version 2.2) 对每条序列进行物种分类注释, 比对 Silva 16S rRNA 数据库 (v138), 设置比对阈值为 80%。使用 Qiime 软件、R 软件 (Version 4.0.2) 和 LEfSe 软件进行 Alpha 多样性、Beta 多样性和 LEfSe 计算分析指数。

2 结 果

2.1 红象草花青素对白羽肉鸡生长性能的影响

由表 2 可知, 在 1~21 d、21~42 d 和 1~42 d 时, 各组间平均日增重、平均日采食量和料重比均无显著性差异 ($P>0.05$)。

2.2 红象草花青素对白羽肉鸡血清抗氧化能力的影响

由表 4 可知, 添加花青素对 21 日龄肉鸡血清 T-AOC、MDA 含量和 GSH-Px 活性有显著影响, 而对 CAT、GSH 和 SOD 活性没有显著影响; 对 42 日龄

肉鸡血清 SOD 活性有显著影响, 对其余指标水平没有显著影响。21 日龄鸡只中, 试验 2、4 组的血清 MDA 含量显著低于对照组 ($P<0.05$), 且试验 2 组显著低于试验 4 组 ($P<0.05$); 试验 2、3 组的血清 GSH-Px 含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 且试验 3 组显著高于试验 4 组 ($P<0.05$)。42 日龄鸡只中, 试验 1、2 组的血清 SOD 含量显著高于对照组 ($P<0.05$), 且试验 1 组显著高于试验 4 组 ($P<0.05$)。

2.3 红象草花青素对白羽肉鸡肝脏抗氧化能力的影响

由表 5 可知, 添加花青素对 21 日龄肉鸡肝 CAT、GSH、MDA 含量及 SOD 和 GSH-Px 的活性均有显著影响, 而对 T-AOC 水平无显著影响; 对 42 日龄肉鸡肝的 T-AOC、GSH、SOD 及 GSH-Px 水平均有显著影响, 而对 CAT 和 MDA 含量无显著影响。21 日龄鸡只中, 试验 2、3、4 组的肝脏 MDA 含量显著低于对照组 ($P<0.05$), 试验 1 组的肝脏 CAT、试验 2 组的肝 CAT、GSH、SOD 及试验 4 组的 CAT、GSH 含量均显著高于对照组 ($P<0.05$); 42 日龄鸡只中, 试验 1 组的肝 SOD、试验 2 组的 GSH、GSH-Px 及试验 4 组的 T-AOC、SOD、GSH-Px 含量均显著高于对照组 ($P<0.05$)。

表3 红象草花青素对白羽肉鸡生长性能的影响

Table 3 Effect of anthocyanins from red elephant grass on the growth performance of white-feathered broilers

项目 Item	组别 Group					P 值 P-value
	对照组 Control group	试验 1 组 Treatment 1 group	试验 2 组 Treatment 2 group	试验 3 组 Treatment 3 group	试验 4 组 Treatment 4 group	
1~21 天 1 to 21 days						
平均日增重/g ADG	30.14±2.30	30.47±3.02	29.62±3.19	30.78±1.46	30.32±1.32	0.938
平均日采食量/g ADFI	41.90±2.66	44.44±3.48	41.02±4.38	42.54±1.23	42.64±2.04	0.386
料重比 F/G	1.40±0.12	1.46±0.11	1.39±0.05	1.38±0.05	1.41±0.09	0.531
21~42 天 21 to 42 days						
平均日增重/g ADG	86.43±7.45	87.03±5.26	89.21±7.52	82.76±4.29	86.32±2.79	0.440
平均日采食量/g ADFI	146.16±13.22	154.48±7.53	145.62±24.2	147.82±9.31	150.34±11.47	0.820
料重比 F/G	1.70±0.19	1.78±0.08	1.63±0.21	1.79±0.07	1.74±0.10	0.308
1~42 天 1 to 42 days						
平均日增重/g ADG	58.68±4.50	59.22±3.43	60.11±4.61	56.99±2.59	58.98±2.36	0.669
平均日采食量/g ADFI	96.77±7.97	101.59±5.35	96.07±13.65	97.95±5.06	99.32±6.60	0.795
料重比 F/G	1.66±0.15	1.72±0.46	1.59±0.17	1.72±0.56	1.68±0.92	0.325

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 means 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 红象草花青素对白羽肉鸡肝脏中抗氧化相关基因表达量的影响

添加花青素对 21 日龄肉鸡肝中 *GPX1*、*SOD1*、*SOD2*、*HO-1* 的 mRNA 相对表达量有显著影响;其中,试验 1、2、3 组肝中 *GPX1* 的 mRNA 相对表达量显著高于对照组($P>0.05$),且试验 1、2 组显著高于试验 4 组($P>0.05$);4 个试验组的 *SOD1* 和 *SOD2* 的 mRNA 相对表达量均显著高于对照组($P>0.05$),且试验 1、2 组显著高于试验 4 组($P>0.05$);试验 1、4 组 *HO-1* 的 mRNA 相对表达量显著高于对照组和试验 2、3 组($P>0.05$,图 1)。

添加花青素对 42 日龄肉鸡肝中 *NQO1*、*GPX1*、*SOD1*、*SOD2*、*Nrf2*、*HO-1* 的 mRNA 相对表达量有显著影响;其中,试验 1、2、3 组肝中 *NQO1* 和 *SOD1* 的 mRNA 相对表达量显著高于对照组和试验 4 组($P<0.05$);试验 1、2、3 组 *GPX1* 的 mRNA 相对表达量显著高于对照组($P<0.05$),且试验 1、2 组显著高于试验 4 组($P<0.05$);试验 1、2 组 *SOD2* 的 mRNA 相对表达量显著高于对照组和试验 3、4 组($P<0.05$);试验 1 组 *HO-1* 的 mRNA 相对表达量显著高于其他 4 组($P<0.05$)(图 2)。

2.5 红象草花青素对白羽肉鸡盲肠微生物的影响

2.5.1 Alpha 多样性分析

2.5.1.1 样本物种数目饱和度和 OTUs 分析
如图 3A-1、A-2 所示,随着样本量的增加,稀释曲线趋向平坦,说明测序数据量渐近合理,测序数据深度足以体现样本内微生物的多样性。

在 21 日龄肉鸡盲肠样本中,将序列相似水平为 97% 的 OTUs 进行聚类后,成功识别出 5 508 个 OTUs,其中 5 个处理组共有的 OTUs 有 1 564 个,对照组及试验 1、2、3、4 组特有的 OTUs 数量分别为 660、44、145、59 和 230 个(图 3B-1)。同法,在 42 日龄肉鸡盲肠样本中成功识别出 5 602 个 OTUs,其中 5 个处理组共有的 OTUs 有 1 495 个,对照组及试验 1、2、3、4 组特有的 OTUs 数量分别为 63、44、81、103 和 102 个(图 3B-2)。

2.5.1.2 Alpha 多样性指数分析
由表 6 可知,添加花青素对 21 日龄肉鸡盲肠微生物的观测物种(Observed_species)、香浓(Shannon)指数、辛普森(Simpson)指数、Pielou 均匀度(Pielou_J)指数、谱系多样性(Pd_faith)有显著影响,对 Chao 1 指数和 ACE 指数无显著影响。但与对照组相比,4 个试验组的 Pielou_J 指数均无显著差异($P>0.05$),

表 4 红象草花青素对白羽肉鸡血清抗氧化能力的影响

Table 4 Effect of anthocyanins from red elephant grass on the serum antioxidant capacity of white-feathered broilers

项目 Item	组别 Group				P 值 P-value	
	对照组 Control group	试验 1 组 Treatment 1 group	试验 2 组 Treatment 2 group	试验 3 组 Treatment 3 group		试验 4 组 Treatment 4 group
21 日龄 21-day-old						
总抗氧化能力/(mmol·L ⁻¹) T-AOC	0.84±0.24 ^{ab}	1.31±0.60 ^a	0.86±0.12 ^{ab}	0.75±0.12 ^b	1.02±0.19 ^{ab}	0.038
过氧化氢酶/(U·mL ⁻¹) CAT	2.37±0.34	2.54±0.52	2.69±0.42	2.04±0.27	2.48±0.38	0.089
还原型谷胱甘肽/(μmol·L ⁻¹) GSH	50.00±9.82	67.86±11.66	52.17±29.97	75.00±34.42	63.04±29.07	0.400
丙二醛/(nmol·mL ⁻¹) MDA	7.65±0.84 ^a	6.85±0.32 ^a	3.59±0.41 ^c	6.34±0.88 ^{ab}	5.00±1.24 ^b	<0.01
超氧化物歧化酶/(U·mL ⁻¹) SOD	10.86±2.82	14.61±2.72	12.48±3.42	11.15±4.10	12.44±3.84	0.370
谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL ⁻¹) GSH-Px	286.67±41.53 ^c	353.85±67.41 ^{abc}	418.46±46.3 ^{ab}	430.77±54.21 ^a	340.51±10.24 ^{bc}	<0.01
42 日龄 42-day-old						
总抗氧化能力/(mmol·L ⁻¹) T-AOC	0.98±0.30	1.04±0.28	1.07±0.28	1.03±0.21	1.04±0.28	0.987
过氧化氢酶 CAT/(U·mL ⁻¹)	8.93±3.95	11.25±0.52	10.12±3.95	8.88±4.65	12.23±1.99	0.366
还原型谷胱甘肽/(μmol·L ⁻¹) GSH	37.94±3.42	39.65±3.49	42.36±2.44	38.07±7.31	38.57±5.58	0.492
丙二醛/(nmol·mL ⁻¹) MDA	6.95±1.81	6.74±2.25	6.57±1.85	6.06±1.34	6.64±0.76	0.917
超氧化物歧化酶/(U·mL ⁻¹) SOD	15.31±0.46 ^c	18.74±0.92 ^a	17.91±2.06 ^{ab}	16.16±1.92 ^{bc}	16.02±0.60 ^{bc}	<0.01
谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL ⁻¹) GSH-Px	325.10±1.72	324.90±2.16	322.14±1.71	325.00±2.39	324.69±0.41	0.161

表 5 红象草花青素对 21 日龄白羽肉鸡肝脏抗氧化能力的影响

Table 5 Effect of anthocyanins from red elephant grass on the hepatic antioxidant capacity of white-feathered broilers

项目 Item	组别 Group				P 值 P-value
	对照组 Control group	试验 1 组 Treatment 1 group	试验 2 组 Treatment 2 group	试验 3 组 Treatment 3 group	试验 4 组 Treatment 4 group
21 日龄 21-day-old					
总抗氧化能力/(mmol·L ⁻¹) T-AOC	0.09±0.01	0.11±0.01	0.11±0.03	0.09±0.02	0.10±0.02
过氧化氢酶/(U·mL ⁻¹) CAT	6.76±0.72 ^b	8.87±1.62 ^a	9.84±0.67 ^a	6.85±1.27 ^b	10.05±0.99 ^a
还原型谷胱甘肽/(μmol·L ⁻¹) GSH	31.54±0.98 ^b	33.62±1.46 ^b	40.76±2.84 ^a	31.71±2.34 ^b	26.50±1.07 ^c
丙二醛/(nmol·mL ⁻¹) MDA	1.12±0.15 ^a	1.05±0.18 ^{ab}	0.80±0.13 ^{bc}	0.55±0.20 ^c	0.64±0.15 ^c
超氧化物歧化酶/(U·mL ⁻¹) SOD	3.47±0.96 ^b	4.00±0.26 ^{ab}	4.67±0.71 ^a	4.28±0.46 ^{ab}	4.07±0.31 ^{ab}
谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL ⁻¹) GSH-Px	151.57±12.23 ^b	169.65±4.16 ^b	214.56±16.07 ^a	198.62±14.26 ^a	153.28±9.65 ^b
42 日龄 42-day-old					
总抗氧化能力/(mmol·L ⁻¹) T-AOC	0.10±0.02 ^b	0.12±0.02 ^{ab}	0.10±0.01 ^{ab}	0.11±0.02 ^{ab}	0.13±0.01 ^a
过氧化氢酶/(U·mL ⁻¹) CAT	9.83±0.88	9.94±1.03	11.33±1.77	9.95±2.69	10.22±1.28
还原型谷胱甘肽/(μmol·L ⁻¹) GSH	41.26±3.65 ^b	50.68±7.82 ^{ab}	51.61±4.17 ^a	43.86±2.90 ^{bc}	40.57±1.66 ^b
丙二醛/(nmol·mL ⁻¹) MDA	1.53±0.31	1.41±0.23	1.14±0.14	1.36±0.57	1.42±0.31
超氧化物歧化酶/(U·mL ⁻¹) SOD	3.83±0.43 ^b	4.77±0.70 ^a	4.60±0.48 ^{ab}	4.54±0.30 ^{ab}	4.69±0.43 ^a
谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL ⁻¹) GSH-Px	174.58±28.85 ^{bc}	209.88±34.99 ^b	326.67±23.55 ^a	175.05±10.58 ^{bc}	149.97±9.58 ^c

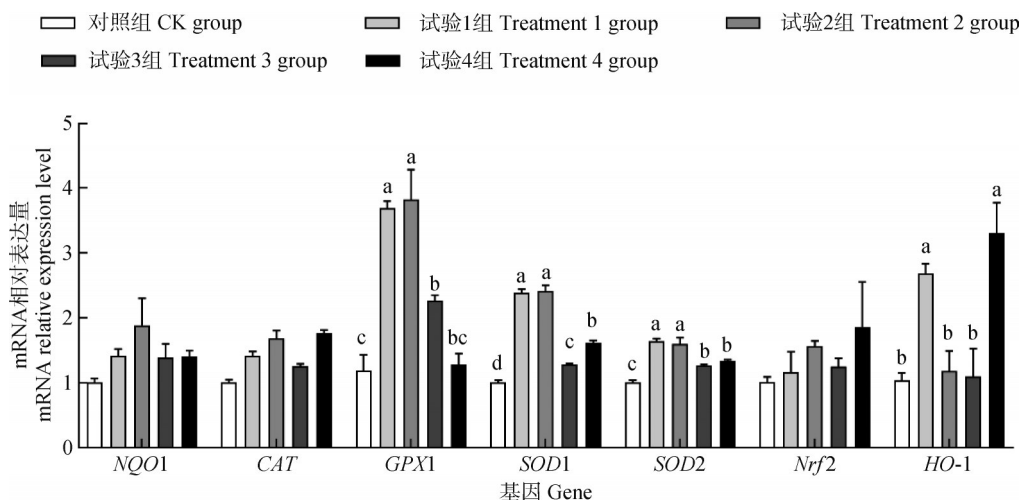


图1 红象草花青素对21日龄白羽肉鸡肝脏抗氧化相关基因表达的影响

Fig. 1 Effect of anthocyanins from red elephant grass on expression of antioxidant related gene in the liver of 21-day-old white-feathered broilers

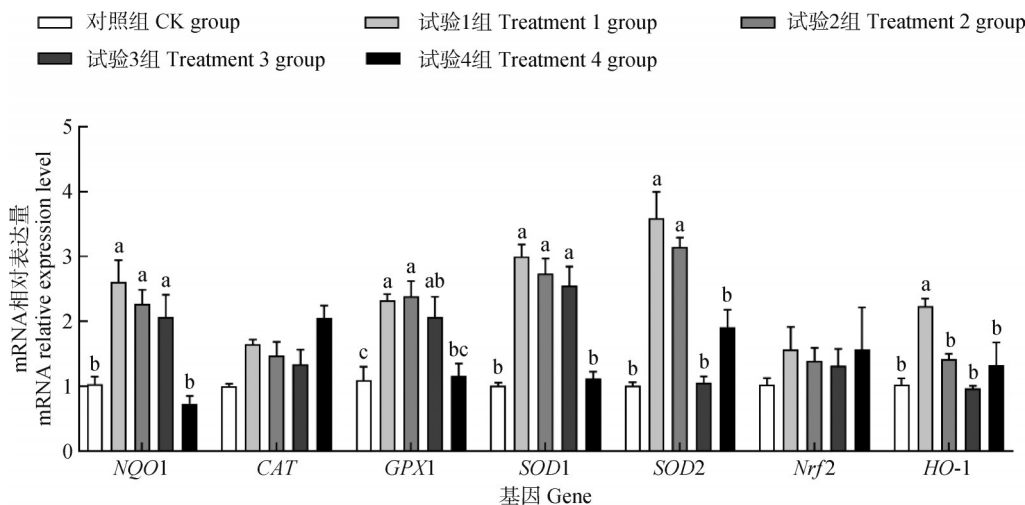


图2 红象草花青素对42日龄白羽肉鸡肝脏抗氧化相关基因表达的影响

Fig. 2 Effect of anthocyanins from red elephant grass on expression of antioxidant related gene in the liver of 42-day-old white-feathered broilers

Pd_faith 均显著降低 ($P < 0.05$); 试验 1、4 组的 Observed_species 显著降低 ($P < 0.05$); 试验 4 组的 Shannon 指数和 Simpson 指数均显著降低 ($P < 0.05$)。

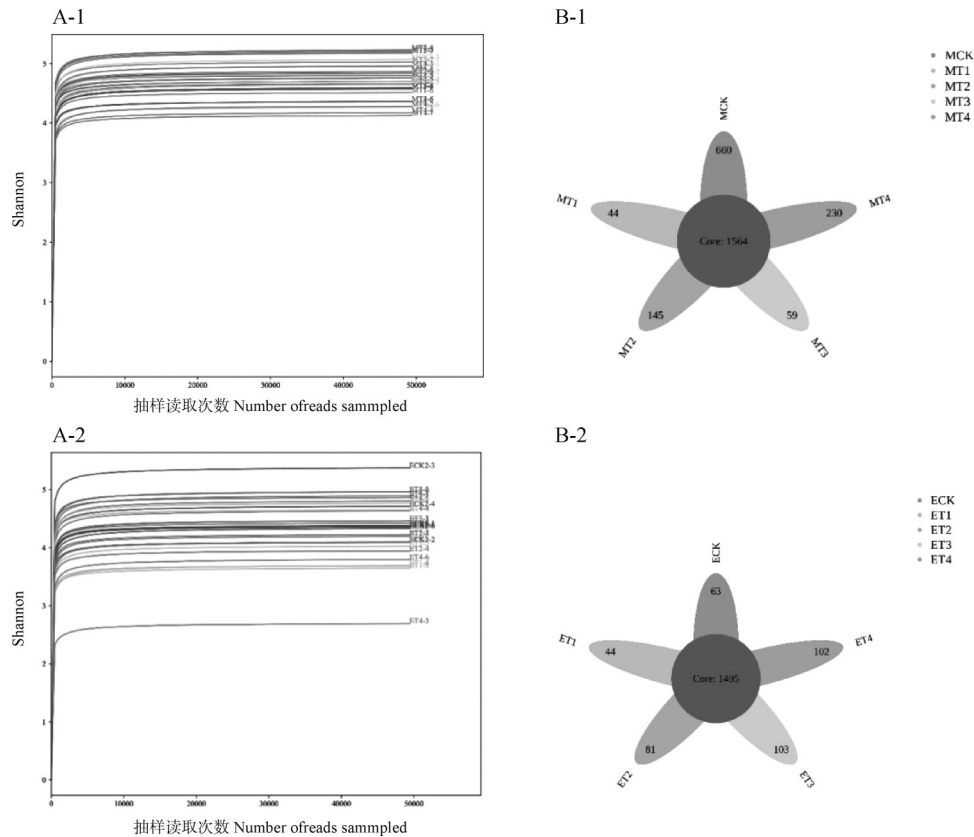
添加花青素对 42 日龄肉鸡盲肠微生物的 Observed_species、Chao 1 指数和 ACE 指数均有显著影响,而对 Shannon 指数、Simpson 指数、Pielou_J 指数及 Pd_faith 均无显著影响。但与对照组相比,4 个试验组的 Alpha 多样性指数均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5.2 物种组成分析 21 日龄和 42 日龄白羽肉鸡盲肠微生物物种组成分析结果如图 4 和表 7

所示。

在门水平上,厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度总占比超过 99%,Firmicutes 为各组中的优势菌门,其次为 Bacteroidetes。添加花青素对 21 日龄肉鸡盲肠中的 Firmicutes 和 Bacteroidetes 两个菌门有显著影响;与对照相比,试验 3 组 Firmicutes 的相对丰度显著降低 ($P < 0.05$),Bacteroidetes 的相对丰度显著提高 ($P < 0.05$);42 日龄样本中,各组在门水平上的相对丰度均无显著差异 ($P > 0.05$)。

属水平上,主要分析各组相对丰度 Top10 的菌属。21 日龄样本中,链球菌属(*Streptococcus*)和拟



MCK、MT1、MT2、MT3、MT4 分别为 21 日龄的对照组、试验 1 组、试验 2 组、试验 3 组和试验 4 组；ECK、ET1、ET2、ET3、ET4 分别为 42 日龄的对照组、试验 1 组、试验 2 组、试验 3 组和试验 4 组，下同

MCK, MT1, MT2, MT3, and MT4 represent the control group, treatment group 1, treatment group 2, treatment group 3, and treatment group 4 at 21 days of age, respectively; ECK, ET1, ET2, ET3, and ET4 represent the control group, treatment group 1, treatment group 2, treatment group 3, and treatment group 4 at 42 days of age, respectively. The same as below

图 3 白羽肉鸡盲肠微生物的物种数目饱和度曲线(A)和韦恩(Venn)花瓣图(B)

Fig. 3 Species richness saturation curve (A) and Venn flower figure (B) of cecal microorganisms in white-feathered broilers

杆菌属(*Bacteroides*)为优势菌属,其次为蓝绿藻菌属(*Lachnoclostridium*)、粪球菌属(*Coprococcus*)、瘤胃球菌属(*Ruminococcus*)、布劳特氏菌属(*Blautia*)、艾森伯格菌属(*Eisenbergiella*)、龙包茨氏菌属(*Romboutsia*)、阴性杆菌属(*Negativibacillus*)和大肠杆菌属(*Colidextribacter*)。添加花青素对 *Streptococcus*、*Bacteroides*、*Romboutsia* 和 *Colidextribacter* 的相对丰度有显著影响;与对照组相比,试验 3 组的 *Bacteroides* 相对丰度显著提高($P < 0.05$),*Romboutsia* 相对丰度显著降低($P < 0.05$)。42 日龄样本中,巴恩斯氏菌属(*Barnesiella*)和 *Lachnoclostridium* 为优势菌属,其次为栖粪杆菌属(*Faecalibacterium*)、*Colidextribacter*、*Blautia*、乳杆菌属(*Lactobacillus*)、幼婴粪杆菌属(*Coprobacter*)、*Streptococcus*、宿主关联乳杆菌属(*Ligilactobacillus*)和 *Eisenbergiella*, 添

加花青素对 *Lactobacillus*、*Streptococcus* 和 *Eisenbergiella* 的相对丰度有显著影响;与对照组相比,试验 1、3 组的 *Colidextribacter* 相对丰度显著提高($P < 0.05$),且试验 1 组的 *Lactobacillus* 相对丰度也显著提高($P < 0.05$),试验 1、2、4 组的 *Eisenbergiella* 相对丰度均显著降低($P < 0.05$)。

2.5.3 Beta 多样性分析 红象草花青素对肉鸡肠道微生物 Beta 多样性的影响见图 5。

由图 5A 可知,21 日龄样本差异的贡献值第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)分别为 26% 和 9%;非参数多元方差分析(PERMANOVA)的检验结果 $R^2 = 0.2777$, P 值为 0.002;试验 3、4 组第一主成分多样性距离显著低于对照组($P < 0.05$),试验 1、2、3 组第二主成分多样性距离显著低于对照组和试验 4 组($P < 0.05$)。各组微生物组成坐标点分布,

表 6 红象草花青素对白羽肉鸡盲肠微生物 Alpha 多样性指数影响

Table 6 Effect of anthocyanins from red elephant grass on Alpha diversity index of cecal microbiota in white-feathered broilers						
项目 Item	对照组 Control group	组别 Group			P值 P-value	
		试验 1组 Treatment 1	试验 2组 Treatment 2	试验 3组 Treatment 3		试验 4组 Treatment 4
21 日龄 21-day-old						
观测物种 Observed_species	1 501.50±188.16 ^a	1 297.17±163.05 ^b	1 496.67±81.48 ^a	1 347.17±101.60 ^{ab}	1 305.83±137.87 ^b	0.031
Chao1 指数 Chao1	1 844.89±182.29	1 717.24±216.93	1 900.48±99.81	1 790.67±121.22	1 688.25±203.73	0.211
ACE 指数 ACE	1 920.97±210.16	1 730.25±228.91	1 938.26±82.46	1 811.05±119.31	1 707.65±199.31	0.105
香浓指数 Shannon	4.74±0.28 ^a	4.89±0.27 ^a	4.94±0.24 ^a	4.62±0.16 ^{ab}	4.41±0.31 ^b	0.010
辛普森指数 Simpson	0.97±0.01 ^{ab}	0.98±0.01 ^a	0.98±0.01 ^{ab}	0.96±0.01 ^{bc}	0.95±0.01 ^c	0.004
Pielou 均匀度指数 Pielou_J	0.65±0.03 ^{abc}	0.68±0.03 ^a	0.68±0.03 ^{ab}	0.64±0.02 ^{bc}	0.61±0.03 ^c	0.003
谱系多样性 Pd_faith	56.09±17.88 ^a	34.98±3.64 ^b	41.26±4.55 ^b	34.89±4.50 ^b	31.43±2.59 ^b	0.000
42 日龄 42-day-old						
观测物种 Observed_species	1 404.67±177.35 ^{ab}	1 306.67±135.74 ^b	1 267.67±149.66 ^b	1 342.00±133.31 ^{ab}	1 531.50±180.55 ^a	0.006
Chao1 指数 Chao1	1 812.78±218.48 ^{ab}	1 750.84±143.33 ^b	1 653.79±190.63 ^b	1 727.31±158.6 ^{ab}	1 994.80±172.33 ^a	0.033
ACE 指数 ACE	1 843.08±216.83 ^{ab}	1 749.81±134.89 ^b	1 678.64±165.82 ^b	1 759.54±152.93 ^b	2 013.02±169.52 ^a	0.024
香浓指数 Shannon	4.54±0.45	4.07±0.51	3.97±0.81	4.56±0.29	4.29±0.89	0.401
辛普森指数 Simpson	0.93±0.03	0.89±0.05	0.87±0.11	0.94±0.03	0.89±0.12	0.442
Pielou 均匀度指数 Pielou_J	0.63±0.06	0.57±0.07	0.56±0.11	0.63±0.04	0.58±0.11	0.388
谱系多样性 Pd_faith	37.30±2.82	36.55±2.98	42.49±7.27	39.31±4.80	40.04±3.17	0.202

表 7 红象草花青素对白羽肉鸡盲肠微生物门水平与属水平物种相对丰度的影响

Table 7 Effect of anthocyanins from red elephant grass on relative abundance of species at phylum level and genus level of cecal microbiota in white-feathered broilers

项目 Item	组别 Group					P 值 P-value
	对照组 Control group	试验 1 组 Treatment 1 group	试验 2 组 Treatment 2 group	试验 3 组 Treatment 3 group	试验 4 组 Treatment 4 group	
21 日龄 21-day-old						
门水平 Phylum level						
厚壁菌门 Firmicutes	93.30±3.35 ^a	92.42±3.72 ^a	86.26±9.94 ^a	70.19±8.01 ^b	85.99±11.19 ^a	<0.01
拟杆菌门 Bacteroidetes	2.79±4.11 ^b	5.11±4.66 ^b	10.39±9.72 ^b	28.29±8.31 ^a	12.44±11.57 ^b	<0.01
变形菌门 Proteobacteria	3.03±1.99	2.02±1.71	2.96±1.21	1.41±0.87	0.95±0.68	0.055
属水平 Genus level						
链球菌属 <i>Streptococcus</i>	11.60±14.68 ^{ab}	7.56±6.61 ^b	8.13±7.46 ^b	5.66±3.62 ^b	25.46±7.57 ^a	0.004
拟杆菌属 <i>Bacteroides</i>	2.68±4.09 ^b	4.89±4.61 ^b	8.05±10.27 ^b	26.65±8.62 ^a	11.60±11.44 ^b	<0.01
蓝绿藻菌属 <i>Lachnoclostridium</i>	5.74±1.07	8.55±2.52	8.41±3.92	6.65±2.64	4.63±2.89	0.091
粪球菌属 <i>Coprococcus</i>	7.82±3.47	5.22±2.94	4.99±5.41	2.31±1.19	9.37±13.58	0.452
瘤胃球菌属 <i>Ruminococcus</i>	5.38±2.57	4.79±3.29	3.19±3.52	5.78±4.15	1.90±1.02	0.193
布劳特氏菌属 <i>Blautia</i>	3.39±2.46	3.43±1.83	3.01±1.83	2.13±0.84	4.59±2.19	0.300
艾森贝格氏菌属 <i>Eisenbergiella</i>	2.40±1.80	4.43±2.12	4.06±2.99	2.57±0.73	1.89±1.92	0.189
龙包茨氏菌属 <i>Romboutsia</i>	1.99±1.59 ^{ab}	3.33±3.15 ^{ab}	2.32±1.98 ^{ab}	1.70±1.54 ^b	5.54±2.36 ^a	0.038
阴性杆菌属 <i>Negativibacillus</i>	3.06±2.01	4.02±4.86	3.51±1.99	2.58±1.43	0.88±0.66	0.306
大肠杆菌属 <i>Colidextribacter</i>	1.70±1.89 ^{ab}	2.24±1.41 ^a	1.34±0.81 ^{ab}	2.15±1.13 ^a	0.34±0.12 ^b	0.082
其他 others	54.22±13.00 ^a	51.65±14.34 ^a	53.00±13.42 ^a	15.22±10.69 ^{ab}	41.82±4.07 ^b	0.012
42 日龄 42-day-old						
门水平 Phylum level						
厚壁菌门 Firmicutes	62.31±10.15	50.82±12.95	51.36±4.82	62.53±8.82	55.53±19.93	0.380
拟杆菌门 Bacteroidetes	34.37±11.50	47.06±13.77	46.10±5.22	33.27±9.36	40.27±23.45	0.390
变形菌门 Proteobacteria	2.23±0.80	1.39±1.40	1.81±0.59	3.29±1.81	2.14±2.54	0.390
属水平 Genus level						
巴恩斯氏菌属 <i>Barnesiella</i>	31.19±12.19	43.84±13.53	45.3±18.46	28.18±12.21	38.75±23.30	0.312
蓝绿藻菌属 <i>Lachnoclostridium</i>	5.22±1.48	4.43±1.83	4.63±1.96	7.38±4.12	7.04±4.35	0.311
栖粪杆菌属 <i>Faecalibacterium</i>	3.45±1.78	2.39±1.20	2.36±1.43	3.93±3.31	2.67±2.04	0.616
大肠杆菌属 <i>Colidextribacter</i>	3.21±2.97 ^b	3.30±1.91 ^a	2.64±1.58 ^{ab}	3.61±2.39 ^a	0.53±0.30 ^b	0.096
布劳特氏菌属 <i>Blautia</i>	2.54±1.86	1.50±1.22	2.09±1.16	2.05±1.71	4.04±3.27	0.261
乳杆菌属 <i>Lactobacillus</i>	1.72±3.01 ^b	5.16±3.54 ^a	2.45±2.49 ^{ab}	1.35±0.96 ^b	0.82±0.71 ^b	0.038
幼婴粪杆菌属 <i>Coprobacter</i>	1.07±0.53	1.63±0.32	2.32±1.61	3.08±5.10	0.53±0.33	0.403
链球菌属 <i>Streptococcus</i>	2.11±2.27 ^{ab}	0.29±0.20 ^b	0.12±0.10 ^b	0.68±0.85 ^b	5.41±5.99 ^a	0.021
宿主关联乳杆菌 <i>Ligilactobacillus</i>	2.29±2.32	1.74±2.94	0.97±1.46	2.50±4.34	0.63±0.57	0.694
艾森贝格氏菌属 <i>Eisenbergiella</i>	2.71±1.38 ^a	1.05±0.44 ^b	1.47±1.16 ^b	1.70±1.00 ^{ab}	0.89±0.42 ^b	0.025
其他 others	44.48±11.59	34.67±10.02	35.64±12.05	45.53±4.65	38.67±16.62	0.377

试验 1、2、3 组的坐标点分布距离较接近,其中试验 1 组主要分布在第三象限,试验 2 组主要分布在第三象限和第四象限纵坐标两侧,试验 3 组主要分布在第四象限;对照组和试验 4 组坐标点分布距离较远,

对照组主要分布在第二象限,试验 4 组主要分布在第一象限。

由图 5B 可知,42 日龄样本差异的贡献值 PC1 和 PC2 分别为 20% 和 9%;PERMANOVA 的检验

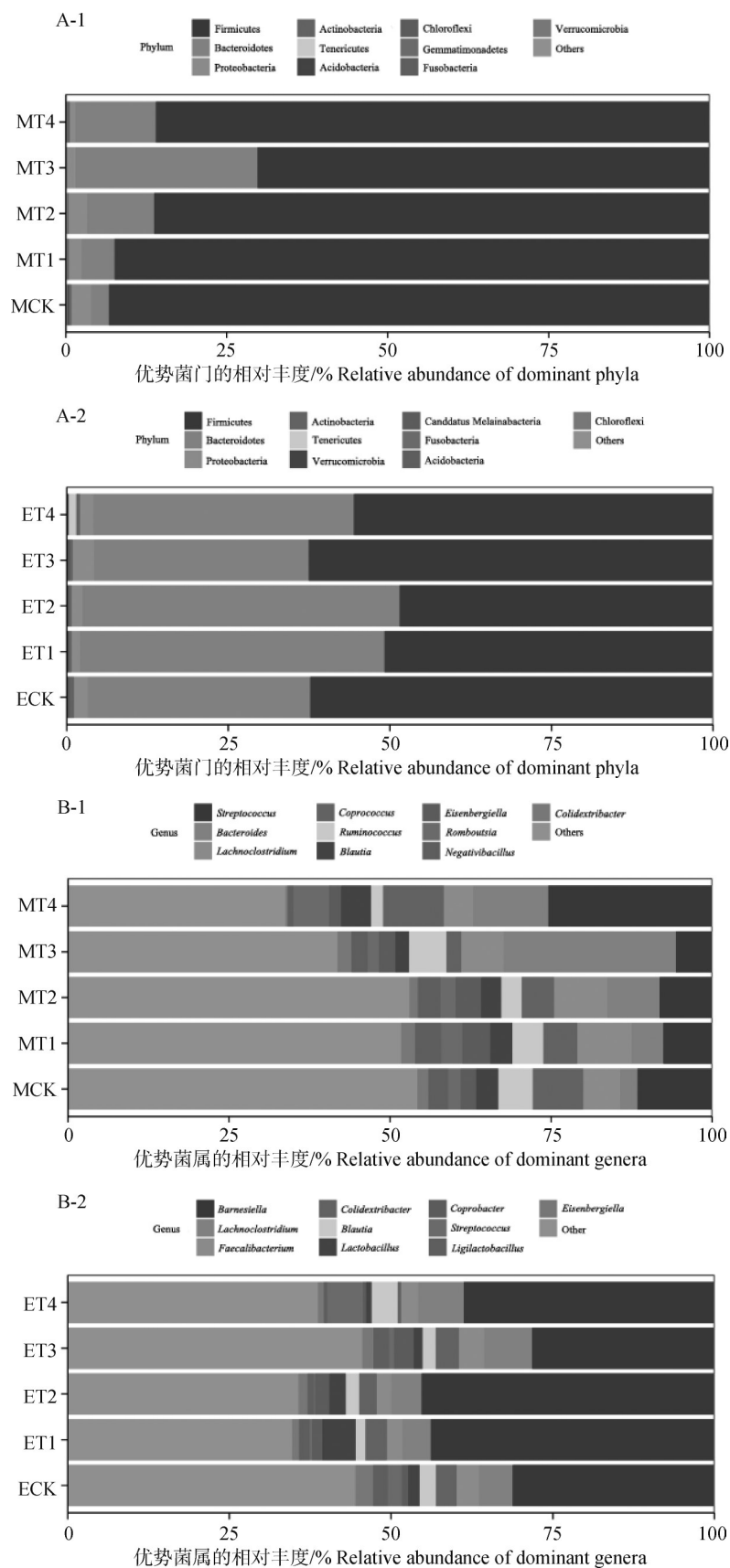


图 4 白羽肉鸡盲肠微生物门水平(A)与属水平(B)物种相对丰度水平堆叠柱状图

Fig. 4 Horizontal bar of relative abundance of species at phylum level (A) and genus level (B) cecal microbiota in white-feathered broilers

结果 $R^2=0.2413$, P 值为 0.001; 试验 1、2、3 组第一主成分多样性距离显著高于试验 4 组 ($P<0.05$), 但与对照组无显著差异 ($P>0.05$); 试验 1 组第二主成分多样性距离显著低于试验 4 组 ($P<0.05$), 但与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。各组微生物组成坐标

点分布, 对照组、试验 1、3 组坐标点分布距离较接近, 其中对照组和试验 1 组主要分布在第三和第四象限纵坐标两侧, 试验 3 组主要分布在第三象限; 试验 2、3 组坐标点分布距离较远, 试验 2 组主要分布在第二象限, 试验 4 组主要分布在第一象限。

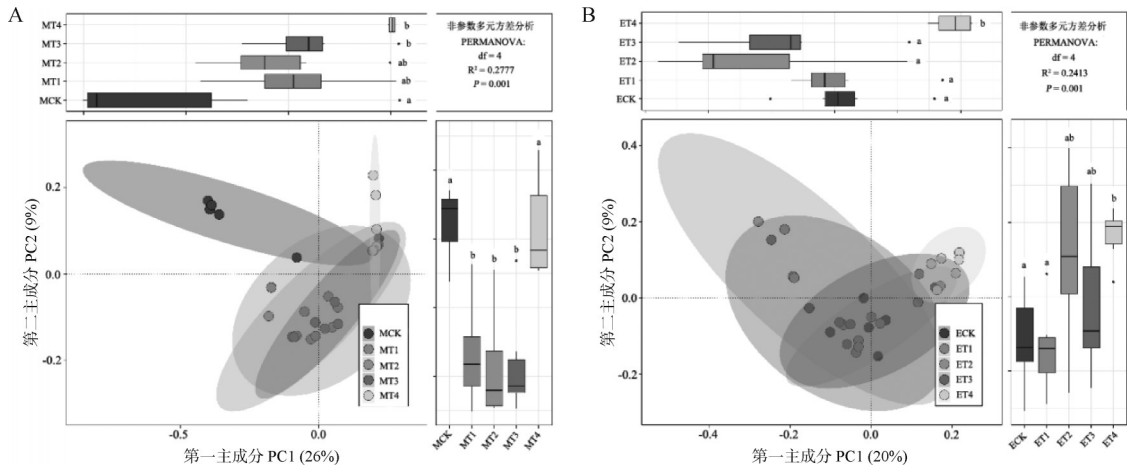


图 5 21 日龄 (A) 和 42 日龄 (B) 白羽肉鸡盲肠微生物的 PCoA 分析图

Fig. 5 PCoA analysis plots of cecal microbiota in 21-day-old (A) and 42-day-old (B) white-feathered broilers

2.5.4 组间差异物种 LEfSe 分析 如图 6A 所示, 21 日龄样本中, 各组间线性判别分析 (LDA) 分数 >4 的生物标志物总计有 18 种, 其中对照组的生物标志物是 Firmicutes 和 Proteobacteria, 试验 1 组的生物标志物是 *Lachnoclostridium* 和真细菌目, 试验 2

组的生物标志物是罕见小球菌属 (*Subdoligranulum*) 和巴恩斯氏菌科 (Barnesiellaceae), 试验 3 组的生物标志物是 Bacteroidetes, 试验 IV 组的生物标志物是 Bacteria 和消化链球菌科 (Peptostreptococcaceae)。

如图 6B 所示, 42 日龄时, 各组间 LDA 评分 >4 的

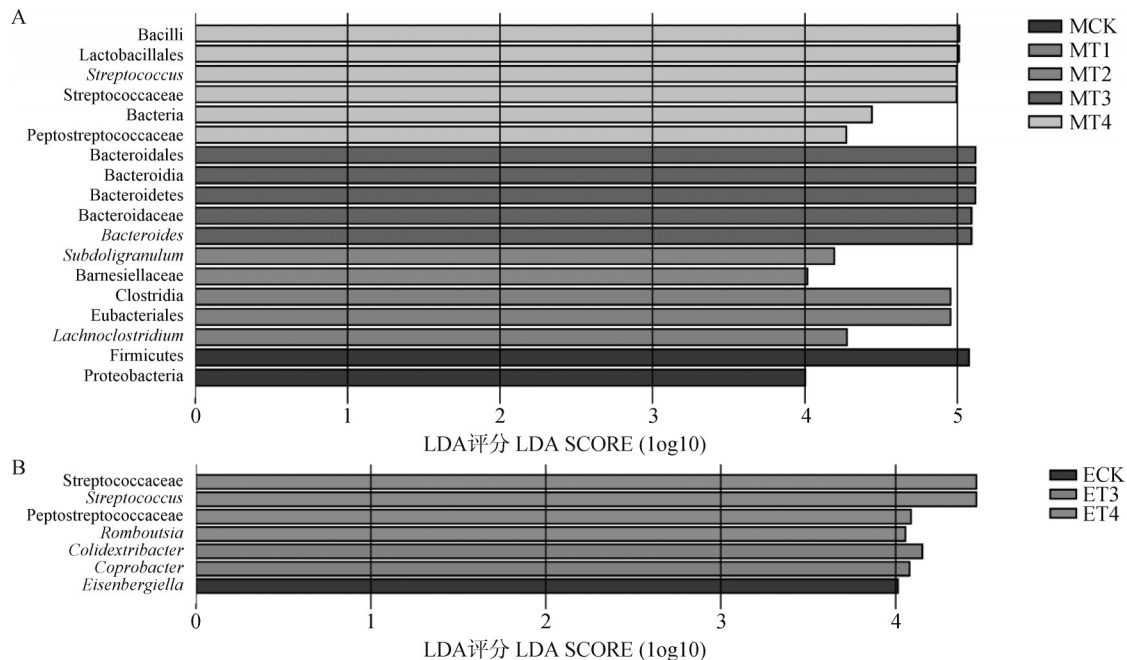


图 6 样本组间差异物种 LEfSe 分析

Fig. 6 LEfSe analysis of species differences between sample groups

生物标志物共有 7 个, *Eisenbergiella* 是对照组的生物标志物, *Colidextribacter* 和 *Coproacter* 是试验Ⅲ组的生物标志物, *Streptococcus*、*Peptostreptococcaceae* 和 *Romboutsia* 是试验Ⅳ组的生物标志物。

3 讨 论

3.1 红象草花青素对白羽肉鸡生长性能的影响

花青素作为植物源性饲料添加剂,在促进动物健康方面具有积极作用,这种作用更多地体现在对动物血清生化指标水平的调节和改善,而对动物生长性能的影响则相对有限。本研究中,红象草花青素的添加并未显著提高白羽肉鸡的平均日增重、平均日采食量和料重比等生长性能指标。Wang 等^[14]发现,添加越橘花青素对肉鸡日增重、采食量和料重比均无显著性影响。Farahat 等^[15]发现,日粮中添加不同浓度的富含花青素的葡萄籽提取物对肉鸡生长性能也无显著性影响。这些与本研究结果相似。可能是因为花青素的添加量未达到能使动物生长性能发生显著变化的水平。尽管如此,花青素在调节生理代谢和增强健康方面的潜在作用仍值得进一步研究。如花青素能够降低血清中的胆固醇和甘油三酯水平,这有助于改善肉鸡的脂质代谢;花青素还可能通过其抗氧化特性,对肉鸡的免疫功能产生正面效应^[16-18]。同时,这反映了在肉鸡生产中,营养管理、遗传选择和健康维护等多个因素共同影响着生长性能,而单一添加剂的直接作用可能有限^[19]。

3.2 红象草花青素对白羽肉鸡抗氧化能力的影响

氧化应激是家禽在养殖过程中因饲养环境温度骤变、饲料变化、病原微生物侵害等因素影响而使机体内自由基产生过多,导致体内氧化与抗氧化作用失衡的一种状态,给动物的生理机能带来不可忽略的损伤^[20-21]。这种情况下,动物机体的抗氧化能力明显降低,生理生化上表现为 ROS、MDA 等氧化应激指标水平的明显升高和 SOD、CAT 以及 GSH-Px 等抗氧化酶活性的下降。花青素是强效的天然抗氧化剂,能够中和自由基,增强抗氧化酶活性,维持细胞的正常功能,减少细胞和组织的氧化损伤,从而改善机体抗氧化功能^[19, 22]。Wang 等^[23]研究表明,日粮中添加花青素可以提高黄羽肉鸡血清 T-AOC 水平,增加肝 SOD 和 GSH-Px 活性,降低 MDA 含量,减轻脂多糖诱导的氧化损伤。AMER 等^[24]研究发现,日粮中添加 100~400 mg·kg⁻¹ 玫瑰

茄花青素可增加肉鸡血清 T-AOC 和 SOD 活性,并降低 MDA 含量。本研究中,添加 50 mg·kg⁻¹ 红象草花青素可以显著增加 42 日龄白羽肉鸡血清和肝 SOD 活性;添加 100 mg·kg⁻¹ 和 200 mg·kg⁻¹ 红象草花青素可以降低 21 日龄白羽肉鸡的血清的 MDA 水平,显著增加 GSH-Px 活性;此外 100 mg·kg⁻¹ 红象草花青素还可以显著增加 SOD 和 GSH 水平。因此,红象草花青素可通过提高相关抗氧化酶和标志物的水平,提高白羽肉鸡的抗氧化能力。

为进一步探究红象草花青素抗氧化的作用机制,本研究基于 Keap1-Nrf2/ARE 信号通路分析了红象草花青素对白羽肉鸡肝脏中氧化应激反应因子基因表达量的影响。Keap1-Nrf2/ARE 信号通路是细胞维持氧化还原平衡和防御氧化应激的重要机制^[25]。正常状态下,Keap1 与转录因子 Nrf2 结合并将其束缚于细胞质中,以便 Nrf2 被蛋白酶体降解;当氧化应激发生时,ROS 修饰导致 Keap1 构象改变,无法有效结合 Nrf2,阻断其泛素化降解,Nrf2 在胞浆中积累,并进一步转运至细胞核,与抗氧化反应元件(ARE)结合,启动下游抗氧化酶基因的转录^[26-28]。本研究中,添加红象草花青素使 21 日龄和 42 日龄白羽肉鸡肝中 GPX1、SOD1、SOD2 及 HO-1 的 mRNA 相对表达量显著升高,42 日龄肝中 NQO1 的 mRNA 相对表达量显著升高,说明红象草花青素能够通过上调抗氧化基因的转录水平来提高相应的抗氧化酶活性,提示红象草花青素的抗氧化作用途径可能与激活 Keap1-Nrf2/ARE 信号通路有关,但其具体的调控机制有待更深入的研究。

3.3 红象草花青素对白羽肉鸡盲肠微生物的影响

肉鸡胃肠道的微生物组已被广泛研究,并已充分证明它对宿主的健康起着重要作用^[29]。本试验结果表明,红象草花青素对白羽肉鸡盲肠微生物的 Alpha 多样性无显著影响。但 Beta 多样性分析发现,添加红象草花青素使 21 日龄白羽肉鸡微生物的相对丰度发生显著变化,说明红象草花青素在一定程度上改变了白羽肉鸡生长前期盲肠微生物的结构。物种组成分析结果显示,白羽肉鸡盲肠微生物的优势菌门主要是 Firmicutes、Bacteroidetes 和 Proteobacteria,其中 Firmicutes 和 Bacteroidetes 相关菌属分别在短链脂肪酸生成和多糖降解方面发挥各自优势,可为肠道细胞提供能量和营养物质。对于 21 日龄肉鸡,添加 200 mg·kg⁻¹ 红象草花青素显著降低了 Firmicutes 的相对丰度但显著提高了

Bacteroidetes 的相对丰度;从属水平来看,这主要与该红象草花青素浓度下 *Streptococcus* 的减少和 *Bacteroides* 的增加有关。相比之下,42 日龄肉鸡盲肠中优势菌门的相对丰度无明显变化。从属水平来看,42 日龄肉鸡盲肠中优势菌属为 *Barnesiella*, 添加红象草花青素使 *Barnesiella* 水平较对照组发生了波动但差异不显著。Peng 等^[30]在向小鼠饲喂枸杞花青素后,肠道中的优势菌属为 *Barnesiella*,这与本研究的发现相符。另外,42 日龄白羽肉鸡盲肠中检测出了 *Lactobacillus*、*Coprobacter* 等益生菌菌属,而 21 日龄时并未检出,这可能是由于随着肠道的发育成熟,肠道环境变得更加稳定,更有利于这些菌属的生长。其中 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 红象草花青素组 *Lactobacillus* 的相对丰度显著高于对照组,说明一定添加量的红象草花青素能促进肠道益生菌生长。Hidalgo 等^[31]的研究也表明,花青素可以显著促进乳酸杆菌属的生长,产生短链脂肪酸,维护机体健康。综上,添加红象草花青素可以不同程度地影响白羽肉鸡盲肠微生物的组成,改善菌群结构,对白羽肉鸡维持机体健康、抵抗氧化应激具有一定的促进作用。

4 结 论

红象草花青素 ($50 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 未显著改变白羽肉鸡生长性能,但能通过上调肝抗氧化因子 mRNA 表达,提高血清抗氧化酶水平并降低氧化损伤标志物含量,显著增强其抗氧化能力,其中 50 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 剂量的抗氧化提升效果优于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该物质还能调节肉鸡肠道微生物多样性,改善菌群结构;在肉鸡生长前期主要对肠道微生物的多样性影响更显著,后期主要促进有益菌生长。

参考文献 (References):

- [1] 胡 威,郑路程,方满新,等. 氧化应激对鸡繁殖性能影响的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(3): 28-33.
- HU W, ZHENG L C, FANG M X, et al. Advances in effects of oxidative stress on reproductive performance of chicken [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(3): 28-33. (in Chinese)
- [2] 储 蓄,张军霞,王 晶. 动物氧化应激及其营养调控措施研究进展[J]. 畜牧兽医学报, 2021, 52(12): 3346-3356.
- CHU X, ZHANG J X, WANG J. Research progress of animal oxidative stress and its nutritional regulation [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2021, 52(12): 3346-3356. (in Chinese)
- [3] 苗启翔,谢彦娇,唐湘方,等. 氧化应激的产生及其对畜禽肝脏功能的影响与机制[J]. 动物营养学报, 2019, 31(8): 3496-3504.
- MIAO Q X, XIE Y J, TANG X F, et al. Generation of oxidative stress as well as its effect and mechanism on liver function of livestock and poultry [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(8): 3496-3504. (in Chinese)
- [4] ZHAO Y W, WANG C K, HUANG X Y, et al. Anthocyanin stability and degradation in plants [J]. *Plant Signal Behav*, 2021, 16(12): 1987767.
- [5] 韩姗姗,岳淑宁,张红艳,等. 天然抗氧化剂花青素在饲料添加剂中的应用[J]. 农学学报, 2024, 14(5): 60-66.
- HAN S S, YUE S N, ZHANG H Y, et al. Application of natural antioxidant anthocyanins in feed additives [J]. *Journal of Agriculture*, 2024, 14(5): 60-66. (in Chinese)
- [6] 邢玉娟,吕慧源,王志明,等. 低聚原花青素对肉鸡生长性能、免疫机能及抗氧化性能的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(3): 21-27, 36.
- XING Y J, LÜ H Y, WANG Z M, et al. Effects of supplementation OPC on growth performance, immune function and antioxidative indices in serum of broiler chicks [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(3): 21-27, 36. (in Chinese)
- [7] FANG X, NONG K Y, QIN X Y, et al. Effect of purple sweet potato-derived anthocyanins on heat stress response in Wenchang chickens and preliminary mechanism study [J]. *Poult Sci*, 2023, 102(9): 102861.
- [8] ZHANG S, WANG Y B, YE J L, et al. Dietary supplementation of bilberry anthocyanin on growth performance, intestinal mucosal barrier and cecal microbes of chickens challenged with *Salmonella Typhimurium* [J]. *J Anim Sci Biotechnol*, 2023, 14(1): 15-31.
- [9] ISLAM M R, LEPP D, GODFREY D V, et al. Effects of wild blueberry (*Vaccinium angustifolium*) pomace feeding on gut microbiota and blood

- metabolites in free-range pastured broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2019, 98(9):3739-3755.
- [10] 陆云华, 汤洪波, 邹怀波, 等. 台湾甜象草、红象草和皇竹草营养成分和无机元素的分析[J]. 浙江农业科学, 2011(2):418-419.
- LU Y H, TANG H B, ZOU H B, et al. Analysis of nutritional components and inorganic elements in *Pennisetum purpureum* Schum. ev. Taiwa, *Pennisetum purpureum schumab* cv., and *Pennisetum sinense* Roxb [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2011 (2):418-419. (in Chinese)
- [11] 林平冬, 高 龙, 陈鑫珠. 红象草花青素提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3988-3996.
- LIN P D, GAO L, CHEN X Z. Study on the optimization of extraction process and antioxidant activity of anthocyanins from red elephant grass [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32 (12) : 3988-3996. (in Chinese)
- [12] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 5版. 北京: 中国农业出版社, 2021:148-150.
- ZHANG L Y. Feed analysis and feed quality detection technology [M]. 5rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2021:148-150. (in Chinese)
- [13] LIVAK K J, SCHMITTGEN T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C(T)}$ methods[J]. *Methods*, 2001, 25(4):402-408.
- [14] WANG Y B, MA X Y, YE J L, et al. Effects of dietary supplementation with bilberry extract on growth performance, immune function, antioxidant capacity, and meat quality of yellow-feathered chickens [J]. *Animals (Basel)*, 2021, 11(7):1989-2000.
- [15] FARAHAT M H, ABDALLAH F M, ALI H A, et al. Effect of dietary supplementation of grape seed extract on the growth performance, lipid profile, antioxidant status and immune response of broiler chickens[J]. *Animal*, 2017, 11(5):771-777.
- [16] 侯福银, 杨智青, 陈长宽, 等. 原花青素对肉鸡肠道及屠宰性能、脂质代谢和肉品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(1):119-125.
- HOU F Y, YANG Z Q, CHEN C K, et al. Effect of grape seed proanthocyanidin extract on intestine, slaughter performance, lipid metabolism and meat quality of broilers [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2019, 45 (1) : 119-125. (in Chinese)
- [17] 单嘉华, 姜毅峰, 王 密. 葡萄籽原花青素(GSP)对肉鸡生长性能、屠宰性能及血脂的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(10):55-58.
- SHAN J H, JIANG Y F, WANG M. Effects of grape seed proanthocyanidins (GSP) on growth performance, slaughter performance, and blood lipid of broilers [J]. *Feed Research*, 2024, 47(10):55-58. (in Chinese)
- [18] 田 跃, 董红刚, 沈泽锋. 葡萄籽原花青素对肉鸡生长性能、免疫功能和经济效益的影响[J]. 饲料研究, 2022, 45(12):28-31.
- TIAN Y, DONG H G, SHEN Z F. Effect of grape seed proanthocyanidins on growth performance, immune function and economic benefit of broilers [J]. *Feed Research*, 2022, 45(12):28-31. (in Chinese)
- [19] FANG X, NONG K Y, QIN X Y, et al. Effect of purple sweet potato-derived anthocyanins on heat stress response in Wenchang chickens and preliminary mechanism study [J]. *Poult Sci*, 2023, 102 (9) : 102861.
- [20] 蒋守群, 蒋宗勇. 氧化应激对畜禽肉品质的影响研究综述[J]. 广东饲料, 2011(10):42-45.
- JIANG S Q, JIANG Z Y. A review of the effects of oxidative stress on the quality of livestock and poultry meat [J]. *Guangdong Feed*, 2011 (10) : 42-45. (in Chinese)
- [21] LAURIDSEN C. From oxidative stress to inflammation: redox balance and immune system [J]. *Poultry Science*, 2019, 98(10):4240-4246.
- [22] 李 煦, 白雪晴, 刘长霞, 等. 天然花青素的抗氧化机制及功能活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20):8163-8171.
- LI X, BAI X Q, LIU C X, et al. Research progress on antioxidant mechanism and functional activity of natural anthocyanin [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(20):8163-8171. (in Chinese)
- [23] WANG Y B, YE J L, ZHANG S, et al. Dietary supplementation with anthocyanin attenuates lipopolysaccharide-induced intestinal damage through antioxidant effects in yellow-feathered broiler chicks [J]. *Poult Sci*, 2023, 102(2):102325.
- [24] AMER S A, AL-KHALAIFAH H S, GOUDA A,

- et al. Potential effects of anthocyanin-rich Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract on the growth, intestinal histomorphology, blood biochemical parameters, and the immune status of broiler chickens [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2022, 11(3):544.
- [25] LIU S N, PI J B, ZHANG Q. Signal amplification in the KEAP1-NRF2-ARE antioxidant response pathway [J]. *Redox Biology*, 2022(54):102389.
- [26] CHEN D, SUN W Y, LIU H Y, et al. SeMet alleviates LPS-induced eggshell gland necroptosis mediated inflammation by regulating the Keap1/Nrf2/HO-1 pathway [J]. *Arch Biochem Biophys*, 2024 (751):109847.
- [27] DING K N, LU M H, GUO Y N, et al. Resveratrol relieves chronic heat stress-induced liver oxidative damage in broilers by activating the Nrf2-Keap1 signaling pathway [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2023 (249):114411.
- [28] GAO Z S, GAO X N, FAN W T, et al. Bisphenol a and genistein have opposite effects on adult chicken ovary by acting on ERalpha/Nrf2-Keap1-signaling pathway[J]. *Chem Bio Interact*, 2021(347):109616.
- [29] CLAVIJO V, FLOREZ M J V. The gastrointestinal microbiome and its association with the control of pathogens in broiler chicken production: a review [J]. *Poultry Scie*, 2018, 97(3):1006-1021.
- [30] PENG Y J, YAN Y M, WAN P, et al. Effects of long-term intake of anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murray on the organism health and gut microbiota *in vivo*[J]. *Food Res Int* 2020(130):108952.
- [31] HIDALGO M, ORUNA-CONCHA M J, KOLIDA S, et al. Metabolism of anthocyanins by human gut microflora and their influence on gut bacterial growth [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(15):3882-3890.

(编辑 范子娟)