

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
缩略词.....	VII
前言.....	IX
第一部分 文献综述.....	1
1.体内的氧化及抗氧化防御系统.....	1
1.1 自由基.....	1
1.2 酶促抗氧化防御系统.....	2
1.3 非酶促抗氧化防御系统.....	4
2.氧化应激及其对家禽的影响.....	4
2.1 氧化应激的产生.....	4
2.2 氧化应激对家禽的影响.....	5
3.抗氧化剂.....	7
3.1 抗氧化剂的种类.....	7
3.2 抗氧化剂的作用机制与应用.....	7
4.本研究的目的与意义.....	11
5.试验技术路线图.....	12
第二部分 试验研究.....	13
第一章 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能及血清生化指标的影响.....	13
1.材料与方法.....	15
1.1 试验材料与基础日粮.....	15
1.2 试验动物与设计.....	16
1.3 样品采集.....	17
1.4 指标检测与方法.....	17
1.5 数据统计与分析.....	17
2.结果与分析.....	18
2.1 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能的影响.....	18
2.2 新型复合抗氧化剂对肉鸡空肠二糖酶的影响.....	18
2.3 新型复合抗氧化剂对肉鸡血清生化指标的影响.....	19

3.讨论	19
3.1 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能的影响	19
3.2 新型复合抗氧化剂对肉鸡空肠二糖酶的影响	20
3.3 新型复合抗氧化剂对肉鸡血清生化指标的影响	21
4.小结	21
第二章 新型复合抗氧化剂对肉鸡抗氧化功能及肉品质的影响	23
1.材料与方法	24
1.1 试验材料与基础日粮	24
1.2 试验动物与设计	24
1.3 样品采集	24
1.4 指标检测及其方法	24
1.5 数据统计与分析	25
2.结果与分析	25
2.1 新型复合抗氧化剂对肉鸡血清抗氧化指标的影响	25
2.2 新型复合抗氧化剂对肉鸡肝脏抗氧化指标的影响	26
2.3 新型复合抗氧化剂对肉鸡肾脏抗氧化指标的影响	26
2.4 新型复合抗氧化剂对肉鸡心脏抗氧化指标的影响	27
2.5 新型复合抗氧化剂对肉鸡胸肌抗氧化指标的影响	27
2.6 新型复合抗氧化剂对肉品质的影响	28
3.讨论	28
3.1 新型复合抗氧化剂对肉鸡血清抗氧化指标的影响	28
3.2 新型复合抗氧化剂对肉鸡肝脏抗氧化指标的影响	29
3.3 新型复合抗氧化剂对肉鸡肾脏抗氧化指标的影响	29
3.4 新型复合抗氧化剂对肉鸡心脏抗氧化指标的影响	30
3.5 新型复合抗氧化剂对肉鸡胸肌抗氧化指标的影响	31
3.6 新型复合抗氧化剂对肉品质的影响	31
4.小结	32
全文结论	33
存在问题及工作展望	35
参考文献	37
致谢	51

新型复合抗氧化剂对肉鸡生产性能及抗氧化功能的影响

摘要

肉鸡养殖中由于养殖密度、养殖季节、饲料氧化,尤其是添加陈化粮等因素,造成肉鸡体内氧化应激,生产性能显著下降。复合抗氧化剂具有防止饲料氧化、缓解应激、提升抗氧化性能的良好作用。本试验在前人的研究基础上应用了乙氧基喹啉(EQ)、维生素E(VE)、茶多酚(TP)、酵母硒(SY)进行复配作为新型复合抗氧化剂,以研究此新型复合抗氧化剂对肉鸡的生产性能和抗氧化功能的影响。试验选用2880羽健康、体重接近的1日龄青脚麻鸡,随机分为6组,分别为对照组(基础日粮)、VE组(基础日粮+100mg/kg VE)、EQ组(基础日粮+250mg/kg EQ)、X1组(基础日粮+150mg/kg 新型复合抗氧化剂)、X2组(基础日粮+300mg/kg 新型复合抗氧化剂)、X3组(基础日粮+450mg/kg 新型复合抗氧化剂),每组分8个重复,每个重复60羽,试验期54天。在试验的第21和54天每组随机选取8只鸡屠宰,分别采集肉鸡的空肠黏膜、血清、肝脏、肾脏、心脏、胸肌,并进行相关指标的测定。试验结果表明:

(1) 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能与血清生化指标的影响

与EQ组和对照组相比,X3组显著提高了肉鸡22-54、1-54日龄的ADG($P < 0.05$);与对照组相比,X1、X2、X3组显著降低了肉鸡1-54日龄的F/G($P < 0.05$);与VE组相比,X3组显著提高了肉鸡21日龄空肠蔗糖酶和54日龄肉鸡空肠麦芽糖酶的活性($P < 0.05$)。与VE组、EQ组和对照组相比,X2组、X3组显著提高了21、54日龄肉鸡血清的ALT含量($P < 0.05$),X3组显著提高了54日龄肉鸡血清的AST含量($P < 0.05$),X3组显著降低了54日龄肉鸡血清的TG、LDL-C含量($P < 0.05$),X3组显著降低了21、54日龄肉鸡血清的TC含量($P < 0.05$)。

(2) 新型复合抗氧化剂对肉鸡抗氧化功能与肉品质的影响

与对照组相比,X1组显著提高了21、54日龄肉鸡血清的CAT活性($P < 0.05$)。与对照组、VE组、EQ组相比,X2组显著提高了21、54日龄肉鸡肾脏的SOD活性($P < 0.05$);与对照组和EQ组相比,X2组显著提高了21、54日龄肉鸡肾脏、胸肌的CAT活性($P < 0.05$);与对照组相比,X2组显著提高了54日龄肉鸡血清的GSH-Px活性($P < 0.05$);X2组显著降低了21、54日龄肉鸡肾脏、心脏及21日龄肉鸡血清的MDA含量($P < 0.05$)。与对照组、VE组、EQ组相比,X3组显著提高了21、54日龄肉鸡肝脏、肾脏、心脏的SOD活性($P < 0.05$),X3组显著提高了21、54日龄

肉鸡心脏的 CAT 活性 ($P < 0.05$)，X3 组显著提高了 21、54 日龄肉鸡肾脏、胸肌的 GSH-Px 活性 ($P < 0.05$)，X3 组显著降低了 21、54 日龄肉鸡胸肌的 MDA 含量 ($P < 0.05$)。与对照组相比，X1 组、X2 组、X3 组肌肉的亮度显著性降低 ($P < 0.05$)，X1 组、X2 组、X3 组的胸肌率显著性提高 ($P < 0.05$)；与 VE 组、EQ 组和对照组相比，X3 组肌肉的红度显著性提高 ($P < 0.05$)，与 EQ 组和对照组相比，X2 组的肌肉剪切力、蒸煮损失显著性降低 ($P < 0.05$)，X3 组的腹脂率显著性降低 ($P < 0.05$)。

结论

(1) 新型复合抗氧化剂提高了肉鸡肠道二糖酶活性，促进饲料消化，提高肉鸡的平均日增重，降低料重比，促进生长，能够显著提高血清的谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性，改善血清脂质代谢水平。

(2) 新型复合抗氧化剂显著提高了肉鸡肝脏、肾脏、心脏、胸肌的 SOD、CAT、GSH-Px 的活性，降低 MDA 的含量，提升肉鸡抗氧化性能，显著降低鸡肉的亮度、剪切力、腹脂率与蒸煮损失，显著提高肉品质。

关键词：新型复合抗氧化剂；肉鸡；生长；抗氧化功能；肉品质

EFFECTS OF NEW COMPOUND ANTIOXIDANTS ON PRODUCTION PERFORMANCE AND ANTIOXIDANT FUNCTION OF BROILERS

ABSTRACT

In broiler breeding, due to factors such as breeding density, breeding season and feed oxidation, especially adding aging grain and other factors, broiler body oxidative stress and production performance decreased significantly. Compound antioxidants can prevent feed oxidation, alleviate stress and improve antioxidant performance. Based on previous studies, ethoxyquinoline (EQ), vitamin E (VE), tea polyphenols (TP) and yeast selenium (SY) were used as new compound antioxidants to study the effects of the new compound antioxidants on the production performance and antioxidant function of broilers. 2880 healthy 1-day-old green legged broilers with similar body weight were randomly divided into 6 groups: control group (basic diet), VE group (basic diet + 100mg / kg VE), EQ group (basic diet + 250mg / kg EQ), X1 group (basic diet + 150mg / kg new compound antioxidant), X2 group (basic diet + 300mg / kg new compound antioxidant) and X3 group (basic diet + 450mg / kg new compound antioxidant), with 10 repetitions in each group, each repeat was 60 feathers, and the test period was 54 days. On the 21st and 54th days of the experiment, 8 chickens in each group were randomly selected and slaughtered. The jejunal mucosa, serum, liver, kidney, heart and pectoral muscle of broilers were collected respectively, and the relevant indexes were measured. The results show that:

(1) Effects of new compound antioxidants on growth performance and serum biochemical indexes of broilers

Compared with EQ group and control group, X3 group significantly increased ADG of broilers aged 22-54 and 1-54 days ($P < 0.05$); compared with the control group, the F / G of broilers aged 1-54 days in X1, X2 and X3 groups were significantly reduced ($P < 0.05$); compared with VE group, X3 group significantly increased the activities of sucrase in jejunum of 21 day old broilers and maltase in jejunum of 54 day old broilers ($P < 0.05$). Compared with VE group, EQ group and control group, X2 group and X3 group significantly increased the serum ALT content of 21 and 54 day old broilers ($P < 0.05$), X3 group significantly increased the serum AST content of 54 day old broilers ($P < 0.05$), X3

group significantly decreased the serum TG and LDL-C content of 54 day old broilers ($P < 0.05$), and X3 group significantly decreased the serum TC content of 21 and 54 day old broilers ($P < 0.05$).

(2) Effects of new compound antioxidants on antioxidant function and meat quality of broilers

Compared with the control group, the serum CAT activity of 21 day old and 54 day old broilers in X1 group was significantly increased ($P < 0.05$). Compared with the control group, VE group and EQ group, the activity of SOD in kidney of broilers aged 21 days and 54 days in X2 group was significantly increased ($P < 0.05$); compared with the control group and EQ group, CAT activity in kidney and pectoral muscle of broilers aged 21 and 54 days in X2 group increased significantly ($P < 0.05$); the serum GSH-Px activity of 54 day old broilers in X2 group increased significantly ($P < 0.05$); the content of MDA in kidney decreased significantly in X2 group, heart and serum of 21 and 54 day old broilers ($P < 0.05$). Compared with the control group, VE group and EQ group, group X3 significantly increased the SOD activity of liver, kidney and heart of 21 and 54 day old broilers ($P < 0.05$), group X3 significantly increased the CAT activity of heart of 21 and 54 day old broilers ($P < 0.05$), the activity of GSH-Px in kidney and pectoral muscle of 21 day old and 54 day old broilers in X3 group increased significantly ($P < 0.05$), and the content of MDA in pectoral muscle of 21 day old and 54 day old broilers in X3 group decreased significantly ($P < 0.05$). Compared with the control group, group X1, X2 and X3 significantly decreased muscle lightness ($P < 0.05$), and group X1, X2 and X3 significantly increased pectoral muscle rate ($P < 0.05$); compared with VE group, EQ group and control group, the muscle redness of X3 group was significantly improved ($P < 0.05$), the muscle shear force and cooking loss in X2 group decreased significantly ($P < 0.05$), and the abdominal fat rate in X3 group decreased significantly ($P < 0.05$).

Conclusion

(1) The new compound antioxidant can improve the intestinal disaccharidase activity of broilers, promote feed digestion, increase the average daily gain of broilers, reduce the feed weight ratio, promote growth, significantly improve the activities of serum alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase, and improve the level of serum lipid metabolism.

(2) The new compound antioxidant significantly increased the activities of SOD, CAT and GSH-Px in liver, kidney, heart and chest muscle of broilers, reduced the content of

MDA, improved the antioxidant performance of broilers, significantly reduced the brightness, shear force, abdominal fat rate and cooking loss of broilers, and significantly improved the meat quality.

KEY WORDS: new compound antioxidants; broiler; growth; antioxidant function; meat quality

缩略词

英文缩写	英文全称	中文全称
ADFI	Average daily feed intake	平均日采食量
ADG	Average daily weight gain	平均日增重
ALT	Alanine aminotransferase	谷丙转氨酶
AST	Aspartate aminotransferase	谷草转氨酶
a*	Redness	红度
b*	Yellowness	黄度
CAT	Catalase	过氧化氢酶
EQ	Ethoxyquin	乙氧基喹啉
F/G	Ratio of feed to gain	料重比
GSH-Px	Glutathione peroxidase	谷胱甘肽过氧化物酶
HDL-C	High density lipoprotein cholesterol	高密度脂蛋白胆固醇
L*	Lightness	亮度
LDL-C	Low density lipoprotein cholesterol	低密度脂蛋白胆固醇
MDA	Malondialdehyde	丙二醛
RNS	Reactive nitrogen species	活性氮自由基
ROS	Reactive oxygen species	活性氧自由基
SOD	Superoxide dismutase	超氧化物歧化酶
SY	Yeast selenium	酵母硒
TG	Triglycerides	甘油三酯
TP	Tea polyphenols	茶多酚
TC	Total cholesterol	总胆固醇
VE	Vitamin E	维生素 E

前言

在肉鸡养殖过程中，饲料成本直接影响最终的经济效益，但随着我国饲料原料价格的不断上涨，“人畜争粮”现象的愈发凸显^[1]，寻找合适的原料替代品是饲料生产企业节省生产成本的重要途径。我国存在大量不宜作为人类口粮的陈化粮，为了避免浪费，国家会通过拍卖的形式售与饲料企业，陈化粮可替代部分新鲜饲料原料进行饲料加工。陈化粮中含有过量的霉菌毒素和脂氧自由基，应用于饲料中会影响饲料的口感和气味，降低动物的采食量，造成氧化应激，降低生产性能^[2]。本试验中肉鸡的基础日粮添加了 30% 的陈化糙米混合物代替常规饲料原料。由于环境温度、养殖密度、季节、饲料、病原微生物等因素，也会导致肉鸡的氧化应激，造成生产性能下降^[3]。肉鸡产业在我国畜牧业中占有较大比例，但肉鸡抗病能力较差，易在冬季和夏季发生呼吸道及消化道疾病^[4]。养殖户为了提高肉鸡的抗病能力，往往会向肉鸡饲料中添加抗生素，但抗生素造成的病菌耐药性和残留问题也不容忽视^[5]，随着我国“禁抗令”的实施，寻找合适的抗生素替代品也是亟待解决的问题。研究表明，肉鸡饲料中添加 VE 和亚硒酸钠能够显著提高肉鸡免疫器官的重量，提高血清的 GSH-Px 活性^[6]；蛋鸡日粮中添加 VE 能够显著改善因陈化玉米造成的氧化应激，保护肉鸡的肝脏健康^[7]；肉鸡日粮中添加 SY 能够显著提高肉鸡的生产性能、免疫力、抗氧化酶活性，改善鸡肉品质^[8]；饲料中添加 TP 和维生素 C 能够显著提升肉鸡的生长性能、免疫功能和抗氧化功能^[9]。因此，添加抗氧化剂能在一定程度上替代抗生素，提高肉鸡的免疫能力，提高抗氧化性能，改善肉鸡因饲料或环境因素造成的氧化应激。研究表明，混合使用的抗氧化剂能够起到协同作用，其抗氧化效果可能超过单一使用的抗氧化剂^[10]。本试验在前人的研究基础上将 EQ、VE、TP、SY 进行复合使用，并以此作为新型复合抗氧化剂。

本试验以青脚麻鸡为研究对象，在日粮中添加陈化糙米混合物的基础上添加新型复合抗氧化剂研究其对青脚麻鸡的生长性能、抗氧化功能、血清生化指标及肉品质的影响，为新型复合抗氧化剂的应用提供理论依据。

第一部分 文献综述

1.体内的氧化及抗氧化防御系统

1.1 自由基

自由基是由于分子的共价键断裂而形成的原子或离子基团，具有比较强的得电子及失电子属性，因此其化学性质非常活泼，很容易在动物体内发生得失电子效应破坏生物大分子。动物体内自由基主要有两种：活性氧自由基(ROS)，包括 O_2^- 、 H_2O_2 、 $\cdot OH$ 、 $RO\cdot$ 、 $ROO\cdot$ 等；另一类是活性氮自由基(RNA)，包括 NO 和它的反应分子，对动物产生危害的主要是 ROS^[11]。

1.1.1 自由基的产生

动物体内自由基的产生主要由于两种因素，分别为体外因素和体内因素^[12]。体外因素产生的自由基往往是因为环境问题，如受到高温、辐射、化学品、重金属和污染物的侵害引起共价键的断裂而形成自由基^[13]。体内因素产生的自由基与线粒体有关，线粒体在结合呼吸有关酶参与有氧呼吸的过程中，会有少量的氧气无法被有效利用而成为氧自由基，也会因此产生其他自由基^[14]。此外，其他细胞器的某些反应也会产生自由基，与之相关的物质是细胞色素 P450；在质膜中，还原型辅酶 II (NADPH) 氧化酶促使 NADPH 氧化为 $NADP^+$ 的同时可使 O_2 还原为 O^{2-} ，后者进一步反应产生 H_2O_2 、 $\cdot OH$ 及 1O_2 ^[15]。机体内也可通过连锁反应产生自由基，自由基进入机体内，在金属离子的催化下造成自由基的连锁反应，从而产生更多的自由基，如果体内含有铜、铬等重金属离子， H_2O_2 和 O_2^- 可在机内被轻易转化为 $\cdot OH$ ^[13]。还有研究表明，体内的生物大分子或 VE、VC 也会因自氧化产生 ROS^[14]。

1.1.2 自由基的生理功能

在正常生命活动中，自由基可作为活性成分参与机体的新陈代谢并具有解毒、抗癌、贮能等作用^[16]。例如，在动物的疾病防御系统中，噬菌细胞产生 O_2^- 、 H_2O_2 ，可阻止细菌和病毒对动物体的侵袭^[17]；自由基还是动物体内的信息分子和调控分子，其功能比脂质介质、细胞因子的功能要更广泛也更全面^[17]。自由基在动物体内不停地产

生，同时不断被清除，使其浓度维持在正常生理水平。一旦机体自由基稳态被打破，清除系统无法有效消除体内产生的自由基，自由基在体内越来越多，机体会因此受到直接损伤^[18,19]。

1.1.3 自由基导致的氧化损伤

ROS 与细胞膜中的脂类物质发生接触之后，会破坏脂类物质的不饱和双键并夺取其中的氢原子，造成脂质的氧化或过氧化反应，产生脂质自由基（ROO·）和脂质过氧化物（ROOH）。自由基造成的脂质过氧化主要有三个过程，分别是引发、增长和终止三个过程^[20]。随着 ROS 对细胞膜的不断攻击，维持细胞膜稳定的脂质不断被消耗，细胞膜中的蛋白质与脂质无法达到最佳结合状态，膜的稳固状态被摧毁，细胞膜的通透性增强，细胞的保水性随之下降，细胞的过度失水造成肉品质的下降。ROS 产生速率过快会提高自由基的连锁反应强度，造成细胞膜的受损状况愈发严重，损坏细胞功能并发生病变，最终导致细胞凋亡^[21]。如果机体的自由基清除系统无法及时清除不断产生的自由基，线粒体受到破坏，最终会造成机体的能量代谢紊乱，影响机体的正常生命活动，对机体健康造成威胁^[22]。丙二醛（MDA）是生物膜脂质过氧化的终产物，在血液或组织中的含量可以体现氧化应激对机体的损伤程度和细胞膜的健康状态^[23]。

自由基可氧化氨基酸的侧链，造成肽链的断裂，还会导致蛋白质发生交联反应，使蛋白质的结构和功能受到抑制^[24]。自由基会造成细胞膜上的运输蛋白发生变性，使机体无法正常吸收营养物质。动物体内的 H₂O₂ 还会与血红蛋白发生氧化反应造成溶血，并损伤机体内的氨基多糖和蛋白多糖^[25]。

自由基会攻击 DNA 并造成 DNA 碱基的改变或 DNA 链断裂。DNA 碱基容易被自由基攻击的原因是因其本身的性质比较活泼，使得自由基对其进行损害性修饰，碱基也是自由基对 DNA 攻击的主要对象^[26]。其中，鸟嘌呤的还原电位最低，最易受损^[27]。ROS 能够夺取 DNA 中的 H 原子造成 DNA 链断裂，且自由基与碱基反应生成的化合物也会对 DNA 造成损害，破坏 DNA 的分子结构，最终造成 DNA 链的断裂^[28,29]。

1.2 酶促抗氧化防御系统

1.2.1 超氧化物歧化酶（SOD）

SOD 广泛存在于动植物体内，由于金属辅基的不同，SOD 可分为四类，分别是

是 Cu/Zn-SOD、Mn-SOD、Fe-SOD、Ni-SOD，动物体内所含的 SOD 为 Cu/Zn-SOD 和 Fe-SOD。研究表明，SOD 作为酸性亲水蛋白质，稳定性较强一些，相对于其他酶，SOD 对酸、热的耐受性要更强，也不会被蛋白水解酶轻易催化降解^[30]。SOD 能够使 O_2^- 发生歧化反应并进行消除，SOD 可以将 O_2^- 氧化成 O_2 ，也可以将 O_2^- 还原成 H_2O_2 ， H_2O_2 又可在 H_2O_2 酶（CAT）作用下，生成 O_2 和 H_2O ^[31]。

1.2.2 过氧化氢酶（CAT）

CAT 又称触媒，此酶在生物体中分布较广，约占过氧化物酶总量的 40%。CAT 有三种类型，分别为单功能、双功能和锰过氧化氢酶^[32]。CAT 已经可以进行人工合成，且最佳保存温度在 $0^{\circ}C-4^{\circ}C$ ^[33]。研究表明，过 CAT 具有极强的抗氧化能力，可以将 H_2O_2 分解成 H_2O 和 O_2 ，单分子 CAT 的催化效率为每秒八万分子 H_2O_2 ，是催化能力最高的酶之一。可有效分解体内的 O_2^- 经 SOD 产生的 H_2O_2 ，因此 O_2^- 在 SOD 和 CAT 的共同作用下，转变成了无害的 O_2 和 H_2O ，减轻了氧化损伤，同时抑制脂质过氧化反应，降低 MDA 的产生，在抗氧化过程中起到了关键性作用^[34]。

1.2.3 谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）

GSH-Px 是一种能够消除体内过氧化物的酶。GSH-Px 于 1957 年发现^[35]，1973 年才被证明与硒之间的联系^[36]，GSH-Px 也是在动物体内发现的第一个与硒元素有关的酶^[37]。GSH-Px 主要存在于胞浆、血浆、细胞膜及胃肠道中。它可与细胞中的有机物结合并成为催化官能团，最终有效清除 H_2O_2 ，降解因各种原因产生的脂类过氧化物（ROOH），与体内的 SOD、CAT 共同构成了机体抗氧化的重要防线，来抵御由自由基造成的氧化损伤^[38]。

1.2.4 SOD、CAT、GSH-Px 之间的联系

SOD、CAT、GSH-Px 之间不仅在消除自由基方面起着协同作用，三种酶之间还可以进行彼此之间的保护。 O_2^- 会导致 CAT 和 GSH-Px 的活性被减弱， H_2O_2 能使 CuZn-SOD 失去活性。SOD 能够催化生物体内的 O_2^- 生成 H_2O_2 ，减少机体中 O_2^- 的存在量，保证了 CAT 和 GSH-Px 的活性，CAT 和 GSH-Px 在保障自身活性的同时对 H_2O_2 进行分解，分解的最终产物为 H_2O 和 O_2 ，使得 CuZn-SOD 免受 H_2O_2 灭活。所以，对于此抗氧化系统而言，三种酶缺一不可，其中任何一种酶的缺失都可能导致整个抗氧化酶保护系统的紊乱甚至崩溃，导致严重的氧化损伤^[39,40]。

1.3 非酶促抗氧化防御系统

动物的非酶促抗氧化系统，即动物可通过摄取外源抗氧化剂来实现自由基及其代谢产物的清除。可通过三类反应来实现抗氧化作用，第一种是螯合作用，螯合剂的作用机理是通过螯合反应减少金属离子在有机物中的含量，有机物中的金属离子含量减少以后会使自由基反应缺失催化剂，起到抑制自由基产生的作用。其中比较常用的金属离子螯合剂有柠檬酸、酒石酸、磷酸等。第二种是直接清除自由基，其作用机理是通过与饲料或机体中的自由基发生氧化还原反应，常见的用于动物饲料的自由基清除剂有乙氧基喹啉（EQ）、维生素 E（VE）、茶多酚（TP）、叔丁基对苯二酚（TBHQ）等。第三种是还原保护剂：通过消耗氧气来降低因自由基的连锁反应导致的自由基含量上升，例如维生素 C（VC），是效果极好的还原保护剂^[41]。张玉等^[42]研究表明，在蛋鸡日粮中添加叔丁基对苯二酚（TBHQ）、茶多酚（TP）、维生素 E（VE）、吡咯并喹啉醌（PQQ）、葡萄原花青素（GPC）等能够显著提高蛋鸡 SOD、CAT 活性，显著降低血清和肝脏中的 MDA 含量。

2. 氧化应激及其对家禽的影响

2.1 氧化应激的产生

机体内的自由基不断产生并被不断清除，两者之间存在平衡关系。如果机体受多种外界因素干扰，使体内自由基出现持续性的增加，自由基清除系统超负荷运行，久而久之便会出现机体氧化还原平衡被打破的现象，该现象被称为氧化应激^[43]。造成动物氧化应激的因素有很多，例如日粮中添加陈化粮，陈化粮中含有过多的霉菌毒素及游离脂肪酸，游离脂肪酸容易被氧化从而产生大量脂氧自由基，损伤动物肠道，降低饲料转化率和动物肉品质^[44]；矿物质元素硒、铜、锌或锰缺乏导致抗氧化酶无法正常分泌。环境因素，如冷（冷应激）、热（热应激）等因素，其中热应激造成的氧化应激最严重，会直接引起动物线粒体的功能失衡并产生大量的 ROS，对细胞内的脂质、蛋白质和 DNA 造成危害^[45-47]。研究表明，仔猪过早断奶也会产生氧化应激，造成仔猪的食欲减退，消化功能紊乱、抗病力差、腹泻和行为异常甚至死亡等一系列的应激症状^[48]。

2.2 氧化应激对家禽的影响

2.2.1 损伤家禽的细胞功能

抗氧化酶活性、MDA、硫代巴比妥酸反应产物（TBARS）在机体内的含量都能反映出机体氧化应激的严重程度。研究表明，通过内病毒或其他因素造成的氧化应激会显著提高动物血浆中的内毒素水平，显著降低血液、肝脏、肌肉等组织中抗氧化酶的活性，削弱动物器官清除氧自由基的能力，造成MDA在体内的含量升高^[49]，造成细胞的功能紊乱^[50]，包括能量代谢丧失、改变细胞信号通路并扰乱细胞周期^[51]，造成基因突变、细胞转运机制改变、生物活性下降，最终导致细胞的凋亡^[52,53]。

2.2.2 损害家禽的免疫系统

氧化应激造成的机体代谢紊乱会诱导多种免疫细胞的表达，导致家禽的免疫功能受损，造成炎症的发生和组织损伤。研究表明，免疫细胞膜中不饱和脂肪酸的含量很高，因此极易容易被自由基攻击，最终的结果就是免疫细胞无法抵抗氧化应激造成的自由基攻击，造成机体免疫功能的下降。研究表明，如果ROS在体内的储量过大，会造成由NF- κ B或Nalp-3诱导免疫系统发生病变，机体中的Nrf2和NF- κ B因子能够通过代偿性表达来调节氧化应激与免疫系统。轻度的氧化应激不仅不会对动物造成伤害，还会对动物的抗氧化指标和免疫力进行一定程度的提升^[54]。Nrf2和NF- κ B在组织中的表达具有一定的平衡性，轻度的氧化应激造成的NF- κ B的表达会在一定程度上增加Nrf2的表达，而当NF- κ B的表达过于强烈，这种平衡会被打破，最终造成Nrf2的表达受到抑制^[55]。因此，如果动物体内进行了持续性的氧化应激，机体的抗氧化系统和免疫系统不堪重负，则必然引起动物的健康损伤。

2.2.3 降低家禽的生产性能

氧化应激会直接影响家禽的采食量，提高肉鸡的料重比，造成肉鸡的抵抗力下降，提高肉鸡的发病率^[56]。研究表明，氧化应激会降低肉鸡肌肉蛋白的合成效率并提高肉鸡体内的蛋白质降解率，导致肉鸡生长性能的降低。氧化应激还会促进脂肪合成，提高肉鸡整体的脂肪含量，造成肉鸡腹脂率升高，降低瘦肉率^[57]。研究表明，由氟苯尼考诱导的肉鸡氧化应激会明显降低平均日增重，并严重损害肉鸡的肾功能^[58]。研究表明，由高温导致的氧化应激会显著降低肉鸡的采食量，造成肉鸡精神不振，显著降低

肉鸡的器官指数^[59]。

2.2.4 损害家禽的肠道健康

动物肠道内，大量的物质和能量代谢不断进行，动物体内的分泌器官和免疫器官在肠道内也有分布，免疫细胞膜内较高的脂质密度导致 ROS 非常容易对肠道免疫器官进行攻击，引发肠道损伤。氧化应激会损害肠绒毛和肠粘膜，扰乱腺体的分泌系统，造成与消化相关的酶类分泌失调，最终使肠道功能异常并造成各种肠道疾病。通常情况下，一旦动物处在慢性氧化应激状态，动物的受损情况不易被及时察觉，对集约化养殖的动物肠道危害非常之大^[60]。氧化应激导致的肠道绒毛损伤是造成饲料的营养成分无法被动物充分吸收的主要原因。肠道的屏障功能被氧化应激攻破以后，肠道内细菌的有害分泌物会进入血液，血液中的有害物质会使免疫系统被激活，使机体释放出更多的有害物质，对动物造成更大的伤害^[61]。

2.2.5 降低家禽的肉品质

自由基与细胞膜中的脂质发生的氧化反应是造成动物肉品质下降的主要因素。动物细胞膜的破坏造成细胞的功能紊乱，动物体内的蛋白质合成过程会受到抑制，细胞膜通透性的增加会使动物的肉质受到不可逆的损害，可导致肌肉的风味丧失、颜色不良、降低肉品的营养价值和安全性。自由基破坏了细胞膜的完整结构之后，钙离子会迅速进入细胞中，高浓度的钙离子会激活与能量代谢有关的酶，提高胞内的糖原酵解速度，肌肉 pH 值被降低，导致肉产品的滴水损失升高、剪切力增加、嫩度下降、MDA 含量增加。脂质发生过氧化会直接影响肉产品的肉色，脂质过氧化产物会将氧合肌红蛋白催化为正铁肌红蛋白，降低肉品的红色度，使肌肉的颜色逐渐变暗^[62]。Zhang 等^[63]研究表明，日粮中添加氧化油脂诱导的肉鸡氧化应激会导致肌浆网钙泵酶（ Ca^{2+} -ATPase）活性降低和宰后糖酵解速率加快，最终导致类 PSE 肉的发生。王娟娟等^[64]研究表明，地塞米松（DEX）诱导的肉鸡氧化应激会直接损害肉品质。

3. 抗氧化剂

3.1 抗氧化剂的种类

3.1.1 天然抗氧化剂

在饲料中应用的天然抗氧化剂主要有维生素 A (VA)、VC、VE、TP 等, 上述物质能够清除饲料中的自由基, 减缓饲料的氧化速度, 保护饲料中的脂类物质, 在提高饲料抗氧化效果的同时也能提高机体的抗氧化酶活性。研究表明, 饲料中添加 VE 和 TP 能够显著提高动物肠道消化酶活性^[65]。作为抗氧化剂的 VE 和 TP 容易在饲料中被氧气或自由基消耗, 所以在饲料加工过程中需要添加保护维生素的抗氧化剂, 目前主流的可用于防止维生素氧化的产品为 EQ, 一些中草药粉末或某些中草药的提取物也能起到一定的抗氧化作用^[66]。

3.1.2 人工合成抗氧化剂

目前饲料中常用的保护营养物质的抗氧化剂产品主要包含 EQ、TBHQ 等^[67]。而 SY 作为一种可以参与动物体内抗氧化酶合成的产品, 已经具有广泛的应用。SY 是一种不直接进行自由基清除的抗氧化剂, 它是酵母与无机硒混合之后的发酵产物, 是一种具有高效性和安全性的有机硒产品。研究表明, 酵母硒经动物小肠吸收后转化为硒蛋白, 硒蛋白直接参与 GSH-Px 的合成^[68], 作为机体 GSH-Px 的重要组成元素, 动物体内的硒含量会在一定程度上影响整体的抗氧化效果。

3.2 抗氧化剂的作用机制与应用

3.2.1 乙氧基喹啉 (EQ)

乙氧基喹啉 (Ethoxyquin, EQ) 是人工合成的抗氧化剂, 也是饲料添加剂中应用较广的一款产品。是最经济、性价比最高的抗氧化剂之一。研究表明, 当 EQ 在高浓度下使用时, 则会起到促氧化作用, EQ 在动物日粮中的添加量一般不超过 150mg/kg^[69]。EQ 的抗氧化能力较强, 通过阻断 ROS 的氧化链保护饲料中的油脂和蛋白质, 并防止饲料原料或外源添加的多种维生素的氧化损失, 在一定情况下可部分替代 VE^[70], 广泛应用于饲料预混料及高脂高蛋白的饲料原料中。饲料中自由基的减少会使饲料中的

营养成分得到最大程度的保护，从而提高饲料转化率。研究表明，动物饲料中添加 EQ 能够显著提高蛋鸡的产蛋率，同时还具有提高畜禽产品品质、提高禽类繁殖性能的作用^[71]。添加 EQ 到鱼类饲料中能够提高饲料消化率，显著促进鱼类的生长^[72]。有研究表明，EQ 具有高抗氧化活性，它能够非常有效地保护食物中的脂质免受氧化^[73]，可用于延缓胡萝卜素、叶黄素、VA、VE 的氧化。Li 等^[74]研究表明，EQ 和当归提取物（EAs）阻断了亚油酸和亚麻酸乳剂以及鱼饲料中的脂质氧化。

3.2.2 维生素 E（VE）

维生素 E（Vitamin E，VE）是一种机体必需的维生素，体内无法合成。VE 能够有效保护生物膜，提高生物膜的稳定性，使膜的通透性降低。VE 主要存在于细胞膜上，向自由基提供氢离子，有效减少侵袭到细胞中的自由基，消除具有氧化效应的自由基^[75]。研究表明，VE 还可防御因辐射导致的氧化损伤，当机体处于高氧浓度环境下时，VE 还可以对肺部细胞进行保护、并保持肺部细胞的生物膜完整性^[76]。VE 除了直接参与清除自由基外，还能通过激活核转录因子 Nrf2 来促进抗氧化酶的产生，Nrf2 是与氧化应激有关的重要反应因子，可诱导抗氧化相关酶的合成，增强细胞的抗氧化系统^[77]。

VE 能在提高畜禽的生产性能方面具有显著作用。作为机体内重要的抗氧化剂，VE 具有的抗氧化特性在帮助动物抵抗因环境温度造成的氧化应激方面具有显著作用^[78]。此外，VE 还可以降低腹脂，提高胴体品质。研究表明，VE 可以显著改善肉鸡在氧化应激状态下因激素或酶的分泌失衡所造成的代谢紊乱和生产性能下降^[79]。

动物在屠宰之后，机体的抗氧化系统完全失效，肌肉的 pH 发生变化。肌肉中的肌球蛋白发生变性，引起肌原纤维缩短，肌肉的渗出性损失增加。生物膜脂质发生过氧化之后其本身受到损伤，细胞的滴水损失更加严重^[80,81]。VE 添加到日粮中之后，VE 能够通过降低脂质的过氧化反应来达到改善肌肉品质的效果。主要表现为提高肌肉的保水性，使高铁肌红蛋白不被自由基诱导变性，使肌肉的红度保持的更持久。研究表明，在一定的添加范围内，VE 的日粮添加量和肉色稳定性呈正相关^[82]。Hu ZP 等^[83]研究发现，日粮中添加 VE 或微囊化 VE（MVE）的鸡，其胸肉的腹脂率低于基础日粮组（C 组），VE 组和 MVE 组肝脏 GSH-Px 活性较 C 组有升高趋势。

VE 能够增加畜禽免疫器官的相对重量^[84]，提高机体各种免疫方式的反应速度^[85,86]。在动物的免疫应激状态下，给予动物高剂量的 VE 能够显著提高机体的免疫水平，使应激带来的机体损伤程度降到最低，达到提高动物生长性能的目的^[87]。VE 调节免疫功能的方式并不唯一，研究表明，VE 能够通过促进免疫细胞的生长和发育来

改善免疫系统的整体功能，也可以通过间接的改变动物的代谢和内分泌参数来维持免疫能力^[88]；也可通过调控花生四烯酸（AA）代谢产物的合成来影响免疫应激；VE 可以加强巨噬细胞和免疫调节细胞的联系，提高机体内抗体的合成水平^[89]。

3.2.3 茶多酚（TP）

茶多酚（Tea Polyphenals, TP）作为一种茶叶提取物，本身具有很多优点，它可以清除外界和机体内的自由基，做到体内与体外抗氧化的双效作用，同时具有抑菌、解毒的作用。其抗氧化功能主要通过以下 4 种途径来实现：① TP 的特殊结构使其能与金属离子相结合，降低铁离子的浓度，使自由基的产生缺乏催化剂，从而降低 ROS 的产生量；② TP 的还原性使其能提供氢原子，使 $O_2^{\cdot -}$ 和 $\cdot OH$ 在遇到 TP 之后能够被迅速中和，TP 在一定的使用范围内几乎无毒，并能直接参与生物体内的自由基消除，使机体有效避免自由基的侵袭，TP 的结构式中具有多个酚羟基，因此它的抗氧化活性超过一般的单酚羟基类添加剂；③ TP 能增强 GSH-Px、CAT 的活性；④ 对某些蛋白质靶向控制并改变其构象，最终达到抑制黄嘌呤氧化酶、脂氧化酶活性的目的，直接抑制自由基的产生^[90]。郑言等^[91]研究发现，在清除自由基试验中，TP 能够有效清除 $\cdot OH$ 和 DPPH 自由基并且效果较强。李丽等^[92]研究表明，肉鸡日粮中添加 TP 可显著提高血液和肌肉的抗氧化酶的活性。刘宁等^[93]研究发现，蛋鸡饲料中添加 200 和 400 mg/kg 的 TP 不仅能够改善蛋品质，还能显著提高血浆的 SOD、GSH-Px 活性和血浆总抗氧化（T-AOC）水平。

脂类不仅是动物体中的能量物质，因此机体对脂质的正常吸收利用具有重要意义。研究发现，TP 能够通过调节多种与脂肪代谢相关的酶来影响脂肪的代谢过程，它能够使脂质不易在血管内沉积，从而延缓胆固醇的氧化过程^[94]。TP 能够提高体内胰高血糖素的水平，脂肪酶的活性与胰高血糖素的含量呈正比关系，能够促进脂肪的分解，使得脂肪不易在体内沉积，最终使体内的脂肪含量降低^[95,96]。Kobayashi M 等^[97]研究发现，红茶多酚可使机体对三酰甘油的吸收受到抑制，有效避免血液疾病的发生。

TP 的抗菌性较强，能够抑制不同种类的革兰氏菌的生长繁殖，尤其对革兰氏阳性菌的抑制力较强，可用于饲料或食品的保鲜。TP 目前在肉制品、油脂和方便食品中已经得到广泛应用。研究表明，TP 对于大肠杆菌的繁殖也有抑制效果^[98]。

3.2.4 酵母硒（SY）

酵母硒（Selenium Yeast, SY）是利用酵母开发的一类有机硒产品。相比于无机

硒，SY 是一种具有高效性和安全性的硒源，主要存在形式为硒含硫氨基酸。从化学角度来看，酵母硒本身不具有还原性，但硒元素作为 GSH-Px 的重要组成成分，其在动物体内的含量直接决定了 GSH-Px 活性的强弱。在动物生产中通过向日粮中外源添加亚硒酸钠或 SY 的方式进行硒源的补充，但在环境污染和生物安全性方面，SY 比亚硒酸钠表现更好，因此作为动物的硒源补充剂，SY 是较好的选择。

硒以硒蛋白的形式分布于各种免疫细胞中，可以对动物的免疫力起到非常显著的提升作用。原因在于硒元素能够促进动物各种免疫细胞抵抗病菌的活力，并提升抗体水平^[99]。

研究表明，日粮中添加 SY 够显著提高肉鸡的生产性能和肉品质，由于 SY 是酵母菌的发酵产物，SY 不仅可以补充硒元素，还同时具有微生物制剂的特点，可有效促进营养物质的消化，除此之外，SY 本身就是氨基酸类营养物质，所以能够起到改善肉鸡生产性能的作用^[100]。

3.2.5 复合抗氧化剂

根据不同抗氧化剂的效果及特征，可将它们进行配合，组成复合抗氧化剂，复合抗氧化剂中各种有效成分的掺杂比例直接影响其最终效果。经过科学的相互搭配，复合抗氧化剂的各组分之间会产生协同作用，使其中各单一组分的抗氧化剂产生最佳效果。朱原等^[101]研究发现，多酚类物质与 VE 同时添加进肉鸡日粮中，能够显著提高肉鸡氧化应激状态下血清 GSH-Px 活性。在肉鸡日粮中添加 200mg/kgVE 与多酚类物质能够显著改善禽类生产性能、增强血液抗氧化酶活性、提升氧化应激饲养条件下的鸡肉品质。Mazur-Kuśnerek 等^[102] 研究表明，在暴露于高温的鸡中，日粮中添加 200mg/kg 的 VE 和 VE、多酚的复合剂能够有效改善肉鸡的总抗氧化状态，提高血液抗氧化酶活性，且复合剂的效果最好。在肉品质的改善方面，复合剂的效果也更好一些，当肉鸡饲料中的油脂出现氧化酸败问题时，添加多酚与 VE 的复合剂可以显著降低其有害性^[103]。El-Senousey 等^[104]研究发现，饲料中补充 VC、VE 和 α -硫酸锌的复合剂显著提高了抗氧化酶的活性，并减轻了在 LPS 诱导的氧化应激过程中炎症细胞因子的表达程度。Ozkan 等^[105]研究发现，相较于添加单一的有机硒，无机硒和 VE 的复合剂在提高肉鸡肝脏中 GSH-Px 的活性和 GSH 浓度方面的效果更好。Leskovec 等^[106]研究发现，单独使用 VE 或硒和 VC 的复合剂可增加胸肌中的 α -生育酚浓度，并在冷冻或烹饪过程中都显示出抗脂质过氧化的作用；Leskovec 的另一研究中还发现，与对照组相比，抗氧化剂组合（VE+VC+Se）的家禽平均日采食量降低，血浆中 MDA 含量也降低，全血中 GSH-Px 的活性提高^[107]。

4. 本研究的目的与意义

在我国的肉鸡生产中，养殖户或企业会通过向肉鸡日粮中添加抗生素的方式来促进肉鸡生产以达到养殖利益的最大化，但随着抗生素使用的弊端日益凸显，2020年以后，我国实施全面“禁抗”措施，关于抗生素的替代也逐渐成为了研究热点。在肉鸡的生产过程中，因环境或饲料造成的氧化应激是非常典型的阻碍肉鸡正常生长的因素。本试验肉鸡饲料中添加了30%脂肪酸值超标的陈化糙米混合物，游离脂肪酸超标容易造成脂自由基的产生，被动物摄取之后可能造成肉鸡的氧化应激。氧化应激会损害肉鸡细胞生物膜，造成细胞功能紊乱，导致肉鸡出现各种疾病，造成肉鸡生产性能下降。因此，可通过向肉鸡日粮中添加抗氧化剂的方式减轻肉鸡的氧化应激，改善动物健康，起到部分替代抗生素的作用。

EQ、VE、TP、SY 等都可作为肉鸡的抗氧化剂来使用，单一抗氧化剂在单独使用时会被自由基反应消耗，造成抗氧化剂有效成分的不断降低，而且单一抗氧化剂如果用量不当或长期使用，不仅会造成促氧化作用，还具有一定的生物毒性，威胁动物健康^[108]。因此，复合型抗氧化剂可作为新型复合抗氧化剂的研究方向。研究表明，不同的抗氧化剂之间可以起到协同作用^[109]，VC 可起到保护 VE 的作用，降低 VE 在外界环境中的氧化速度^[110]。还有研究发现，VE 与胡萝卜素之间、VE 与 TP 之间、VC、VE、TP 三者之间均存在着协同增效作用，且对细胞的生物毒性较弱^[111]，因此，复合抗氧化剂具有广泛的应用前景。

本试验旨在研究复合抗氧化剂对肉鸡生长性能及机体抗氧化性能的提升作用。EQ 用作饲料中营养物质（脂质、蛋白质）和 VE、TP、SY 的保护，VE、TP 和 SY 用作动物能够摄取的体内抗氧化剂，以此作为新型复合抗氧化剂，探究新型复合抗氧化剂在缓解肉鸡氧化应激与提高肉鸡生产性能方面提供理论依据。

5. 试验技术路线图

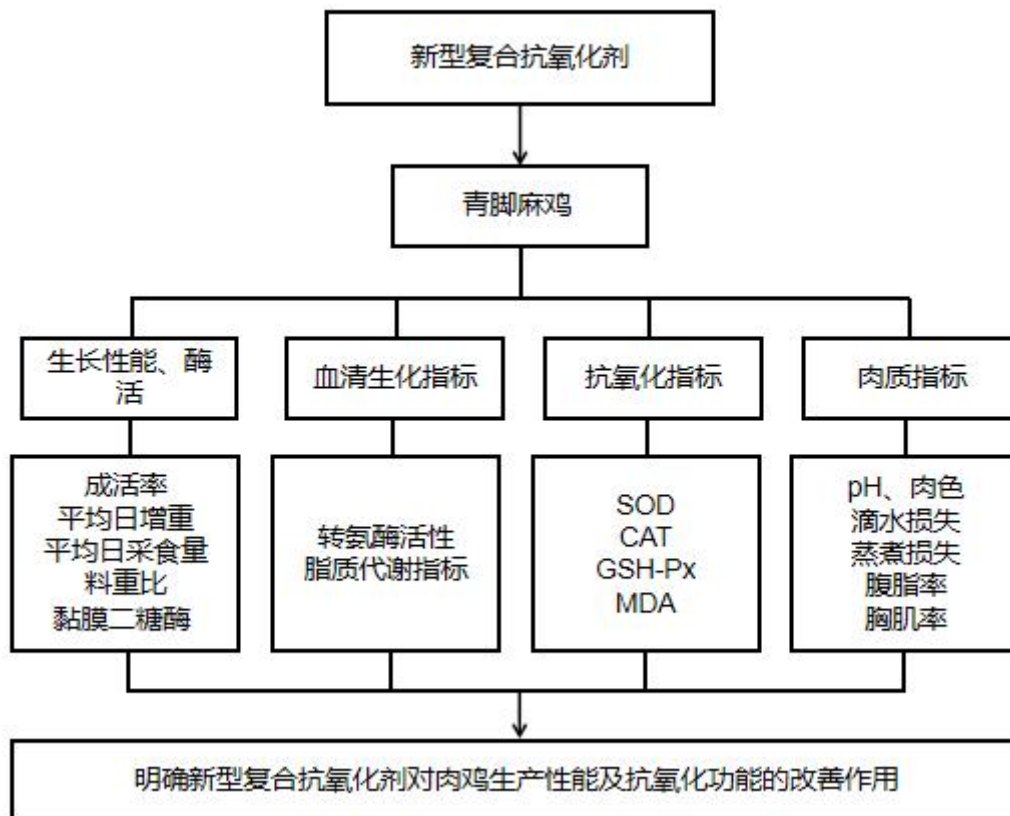


图 1 试验技术路线图

Figure 1 Test technology roadmap

第二部分 试验研究

第一章 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能及血清生化指标的影响

前言

在我国的养殖产业中，肉鸡养殖是非常重要的部分，随着我国民众对鸡肉产品需求量的加大，肉鸡养殖也逐渐趋于规模化和集约化。肉鸡羽毛较厚，代谢旺盛且缺乏汗腺，机体的散热能力较差，因此饲养过程中肉鸡容易发生热应激，热应激会直接诱导肉鸡产生氧化应激^[112]，氧化应激产生的自由基会破坏肠道功能，造成生理功能紊乱，影响营养物质的正常吸收利用。我国有大量的陈化粮，陈化粮中含有超标的霉菌毒素、酸败脂肪等有害物质，所以人类不能直接食用，为了避免浪费，陈化粮可代替部分原料用于肉鸡饲料的加工^[113]。陈化粮中大量的脂质自由基会造成动物的氧化应激，降低肉鸡的生长速度，影响肉鸡的生产性能。为了减轻因饲料和环境因素对肉鸡造成的氧化应激，可向饲料中添加适量的抗氧化剂。研究表明，饲料中添加抗氧化剂不仅可以实现饲料的抗氧化作用，而且对于调节肠道消化酶活性^[114]、提高动物生产性能也有显著作用^[115,116]。本试验利用 EQ、VE、TP、SY 组成新型复合抗氧化剂，以肉鸡作为研究对象，通过向肉鸡饲料中添加新型复合抗氧化剂研究其对肉鸡的生长性能和空肠二糖酶活性的影响。

谷丙转氨酶（ALT）在肝脏中的含量最高，心肌等组织的含量次之。谷草转氨酶（AST）在心肌、肌肉组织中含量最高。在机体的转氨酶种类中，ALT 和 AST 的活性最强，并与氨基酸的代谢具有非常紧密的关系。转氨酶的含量直接影响机体内蛋白质的合成与分解。动物体内的转氨酶含量在一定范围内的升高能够促进蛋白质合成，提高生长速度^[117]。但如果动物的肝脏、心肌与肌肉组织发生病变，两种转氨酶会发生异常升高的现象^[118]。脂质代谢是动物体内复杂且重要的代谢过程，是指在各种酶的作用下，对脂类物质进行消化、吸收、合成、分解的过程^[119]。动物血清中甘油三酯（TG）、总胆固醇（TC）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）以及低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）的含量是评价动物机体脂质代谢强弱的重要指标^[120]。适量的 TG 可起到维持内环境稳定的作用，血清中 TG 含量与脂肪的沉积、分解和转化能力相关，TG 含量越高，表明机体对脂肪的分解能力越弱^[121]。TC 是合成脂质相关激素及维生素 D

等生命调节物质的主要成分，也是组成细胞膜的重要原料，机体的脂质代谢状况可通过血清测得^[122]。如果血清中 TC 的含量过高，会导致其动物动脉血管造成损伤，影响血液循环，从而对动物健康造成不良影响^[123]。HDL-C 和 LDL-C 可调节机体的脂质在体内各处的运转及代谢，LDL-C 可将 TC 运输到全身，起到促进脂肪沉积的作用，而 HDL-C 是将全身的胆固醇运输到肝脏进行代谢，以减少脂肪沉积，因此 HDL-C 和 LDL-C 的生理作用完全相反^[124]。因此，肉鸡体内转氨酶含量的平衡与脂质代谢的稳定性对于保证肉鸡健康与生产性能具有重要意义。研究表明，硒和 VE 不仅能够提高动物的抗氧化水平，还能有效保护动物的肝脏和心脏健康，提高机体 ALT 和 AST 含量，促进氨基酸代谢，提高糖、脂肪和蛋白质之间的转化效率^[125]。本试验以肉鸡为研究对象，探究新型复合抗氧化剂对肉鸡血清生化指标的影响并提供理论依据。

1.材料与方法

1.1 试验材料与基础日粮

各组抗氧化剂添加见表 1，EQ 由江苏中丹化工集团泰兴经贸有限公司提供，VE、TP、SY 原料由江苏立华牧业股份有限公司提供，复合抗氧化剂配方见表 2，X1、X2、X3 配方相同，差异为饲料中添加量的不同。基础日粮饲料组成及营养水平见表 3。

表 1 抗氧化试验添加剂种类及配方
Table 1 Types and antioxidant additives

试验分组	添加抗氧化剂种类	抗氧化剂的添加量 (mg/kg)
对照组	—	—
VE 组	维生素 E (有效成分 20%)	100
EQ 组	乙氧基喹啉 (有效成分 60%)	250
X1 组	新型复合抗氧化剂 1 组	150
X2 组	新型复合抗氧化剂 2 组	300
X3 组	新型复合抗氧化剂 3 组	450

表 2 新型复合抗氧化剂组成
Table 2 Composition of new composite antioxidants

组成成分	有效成分含量(%)	单价 (元/kg)	新型复合抗氧化剂成本 (元/kg)
乙氧基喹啉 (EQ)	19	50	10
茶多酚 (TP)	4	20	4.54
维生素 E (VE)	7.5	80	8
酵母硒 (SY)	0.01	40	2
白炭黑	23	6	1.38
沸石粉	19.3	0.6	0.12
合计	—	—	26.04

表 3 基础日粮饲料组成及营养水平
Table 3 Feed composition and nutritional level of basic diet

项目	1-21 日龄	22-54 日龄
成分 (g/kg)		
玉米 Corn	151.90	161.50
小麦 Wheat	150.00	200.00
陈化糙米混合物 Aged brown rice mixture	300.00	300.00
豆粕 Soybean meal	266.00	186.00
膨化大豆 Extruded soybean	50.00	—
花生粕 Peanut meal	—	20.00

葵花粕 Sunflower meal	20.00	20.00
玉米 DDGS	—	20.00
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	10.00	30.00
米糠油 Rice bran oil	8.60	22.70
石粉 Stone powder	15.30	14.00
食盐 NaCl	0.10	0.10
磷酸氢钙 (CaHPO ₄)	8.10	5.70
预混料 Premix ⁽¹⁾	20.00	20.00
合计 Total	1000	1000
营养水平		
粗蛋白 CP (%)	21.49	19.50
粗脂肪 EE (%)	3.32	4.16
代谢能 ME (MJ/kg)	12.88	12.47
钙 Ca (%)	0.83	0.72
总磷 TP (%)	0.59	0.52
有效磷 AP (%)	0.33	0.28

注：(1) 预混料为每千克饲料提供：维生素 D 5000 mg；维生素 A 10000 mg；维生素 E 30 mg；维生素 K₃ 150 mg；维生素 B₁ 90 mg；维生素 B₂ 80 mg；维生素 B₁₂ 5 mg；维生素 B₆ 32 mg；泛酸钙 18mg；烟酸 30 g；叶酸 0.5 mg；生物素 3 mg；铜 (CuSO₄) 6 mg；铁 (FeSO₄) 60 mg；锌 (ZnSO₄) 70mg；锰 (MnSO₄) 90mg；碘 (KI) 1.0 mg；硒 (Na₂SeO₃) 0.15 mg

(1) premix provides 5000 mg vitamin D per kilogram of diet; Vitamin A 10000 mg; Vitamin E 30 mg; Vitamin K₃ 150 mg; Vitamin B₁ 90 mg; Vitamin B₂ 80 mg; Vitamin B₁₂ 5 mg; Vitamin B₆ 32 mg; Calcium pantothenate 18mg; Niacin 30 g; Folic acid 0.5 mg; Biotin 3 mg; Copper (CuSO₄) 6 mg; Iron (FeSO₄) 60 mg; Zinc (ZnSO₄) 70mg; Manganese (MnSO₄) 90mg; Iodine (KI) 1.0 mg; Selenium (Na₂SeO₃) 0.15 mg

(2) 试验饲料代谢能是计算值，其他营养水平是实测值。

(2) The metabolizable energy of the experimental diet is the calculated value, and other nutritional levels are the measured values.

(3) 陈化糙米混合物为陈化粮，脂肪酸值为 98.82mg/kg，属重度不宜存状态

(3) Aged brown rice mixture is aged grain with fatty acid value of 98.82 mg/kg, which is very unsuitable for preservation

1.2 试验动物与设计

本试验选用 1 日龄体重接近、身体健康的青脚麻鸡 2880 只，随机分成 6 个处理，分别为对照组、VE 组、EQ 组、X1 组、X2 组、X3 组，每组分 8 个重复，每个重复 60 羽，试验期 54 天。整个试验从肉鸡 1 日龄开始到 54 日龄结束。

1.3 样品采集

于试验第 21、54d，每组随机选取肉鸡 8 只进行屠宰，采集空肠粘膜用于二糖酶的测定。在试验第 21、54d 时，每组随机采取 8 只体重接近的肉鸡进行屠宰，采集肉鸡血液并离心血清，血清放至-80℃冰箱冻存。

1.4 指标检测与方法

1.4.1 生长性能测定

肉鸡在试验开始时（1 日龄起）、21d 和第 54d 时，记录 1 日龄和 54 日龄的活禽数量，计算肉鸡的成活率。记录各处理组的耗料量，计算平均日采食量（ADFI）。试验开始第 21d 和第 54d 时，以重复（g）为单位称重，每组称重 160 只，分别计算 1-21 日龄、22-54 日龄、1-54 日龄的平均日增重（ADG），并计算肉鸡的料重比。

成活率=成活数量/总数量*100%

平均日采食量（ADFI）=耗料重量/饲养天数

平均日增重（ADG）=（末重-始重）/饲养天数

料重比（F/G）=平均日采食量/平均日增重

1.4.2 二糖酶活性测定

采用试剂盒，严格按照试剂盒说明书推荐的方法测定，试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.4.3 血清生化指标测定

采用试剂盒，严格按照试剂盒说明书推荐的方法测定，试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.5 数据统计与分析

试验数据用 WPS Office 处理后，用 SPSS 统计软件（IBM SPSS Statistics 25）进行统计，数据采用单因素方差分析（one-way ANOVA），分析各组之间是否有显著差

异, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P > 0.05$ 表示差异不显著, 结果以平均值 (Mean) 和标准误差 (SEM) 表示。

2.结果与分析

2.1 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能的影响

由表 4 可知, 与 EQ 组和对照组相比, X3 组显著提高了肉鸡 22-54、1-54 日龄的 ADG ($P < 0.05$); 与对照组相比, X1、X2、X3 组显著降低了肉鸡 1-54 日龄的 F/G ($P < 0.05$)。

表 4 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能的影响

Table 4 Effects of new compound antioxidants on growth performance of broilers

项目	日龄/d	对照组	VE 组	EQ 组	X1 组	X2 组	X3 组	SEM	<i>P</i>
成活率 (%)	1-54	90.55	91.33	92.50	89.83	91.33	88.17	0.64	0.467
	1	39.73	40.33	40.07	39.93	40.00	40.13	0.12	0.836
体重 (g)	21	460.09	479.86	487.87	495.00	482.70	494.23	4.25	0.157
	54	2243.51	2303.72	2261.55	2295.41	2375.41	2360.22	15.2	0.073
平均日采食量 ADFI (g/d)	1-21	32.92	32.94	32.93	32.75	32.87	32.94	0.30	0.985
	22-54	124.29	126.99	123.61	124.83	127.96	127.29	0.71	0.424
平均日增重 ADG (g/d)	1-54	90.12	87.88	88.01	88.39	88.75	90.38	1.11	0.118
	1-21	19.12	19.42	19.21	19.54	19.51	20.41	0.7	0.520
料重比 F/G	22-54	53.39 ^c	55.62 ^{abc}	54.89 ^{bc}	56.09 ^{ab}	56.82 ^{ab}	57.58 ^a	0.36	0.011
	1-54	39.60 ^b	40.84 ^{ab}	40.03 ^b	40.78 ^{ab}	41.78 ^a	41.75 ^a	0.74	0.025
	1-21	1.73	1.70	1.73	1.69	1.70	1.64	0.05	0.575
	22-54	2.31	2.19	2.19	2.20	2.22	2.31	0.02	0.188
	1-54	2.23 ^a	2.16 ^b	2.16 ^b	2.16 ^b	2.15 ^b	2.16 ^b	0.02	0.019

注: 同行数据不标字母或标有相同字母意味着差异不显著 ($P > 0.05$), 不同的字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Note: Peer data without letters or marked with the same letters means that the difference is not significant ($P > 0.05$), and different letters mean that the difference is significant ($P < 0.05$), the following table is the same.

2.2 新型复合抗氧化剂对肉鸡空肠二糖酶的影响

由表 5 可知, 与 VE 组相比, X3 组显著提高了肉鸡 21 日龄空肠蔗糖酶的活性 ($P < 0.05$); 与 EQ 组相比, X1 组、X2 组 21 日龄肉鸡空肠蔗糖酶的活性显著降低 ($P < 0.05$); 与对照组和 VE 组相比, X3 组显著提高了 54 日龄肉鸡空肠麦芽糖酶的活性 ($P < 0.05$)。

表 5 新型复合抗氧化剂对肉鸡空肠二糖酶的影响

Table 5 Effects of new compound antioxidants on jejunal disaccharidase in broilers

项目	日龄/d	对照组	VE 组	EQ 组	X1 组	X2 组	X3 组	SEM	<i>P</i>
蔗糖酶 (U/mg protein)	21	55.67 ^{ab}	32.40 ^b	71.24 ^a	31.76 ^b	24.99 ^b	75.04 ^a	6.03	0.014
	54	39.49	27.34	28.15	21.13	39.46	19.24	3.30	0.389
乳糖酶 (U/mg protein)	21	3.32	5.42	6.25	2.90	4.07	5.48	0.56	0.450
	54	5.25	5.09	8.10	3.69	2.07	4.79	0.98	0.740
麦芽糖酶 (U/mg protein)	21	140.62	120.55	149.07	103.52	94.65	82.55	7.99	0.095
	54	212.91 ^b	187.63 ^b	228.89 ^{ab}	184.34 ^b	239.51 ^{ab}	307.99 ^a	13.24	0.046

2.3 新型复合抗氧化剂对肉鸡血清生化指标的影响

由表 6 可知, 与 VE 组、EQ 组和对照组相比, X2 组、X3 组显著提高了 21、54 日龄肉鸡血清的 ALT 含量 ($P < 0.05$), X3 组显著提高了 54 日龄肉鸡血清的 AST 含量 ($P < 0.05$), X3 组显著降低了 54 日龄肉鸡血清的 TG、LDL-C、HDL-C 含量 ($P < 0.05$), X3 组显著降低了 21、54 日龄肉鸡血清的 TC 含量 ($P < 0.05$)。

表 6 新型复合抗氧化剂对肉鸡血清生化指标的影响

Table 6 Effects of new compound antioxidants on serum biochemical indexes of broilers

项目	日龄/d	对照组	VE 组	EQ 组	X1 组	X2 组	X3 组	SEM	<i>P</i>
ALT (U/L)	21	0.90 ^b	0.93 ^b	0.93 ^b	1.62 ^a	1.69 ^a	1.74 ^a	0.11	0.011
	54	1.75 ^b	1.43 ^b	1.18 ^b	1.43 ^b	2.99 ^a	2.90 ^a	0.20	0.002
AST (U/L)	21	26.84	18.71	23.00	21.34	27.48	18.59	1.31	0.187
	54	22.46 ^{bc}	25.03 ^{bc}	19.48 ^c	22.03 ^{bc}	27.69 ^b	35.43 ^a	1.50	0.007
TG (mmol/L)	21	0.25	0.21	0.20	0.24	0.23	0.25	0.01	0.691
	54	0.36 ^{ab}	0.48 ^a	0.40 ^{ab}	0.34 ^{ab}	0.28 ^{bc}	0.20 ^c	0.03	0.010
TC (mmol/L)	21	4.47 ^a	3.85 ^{abc}	4.01 ^{ab}	3.38 ^{bc}	3.50 ^{abc}	2.90 ^c	0.16	0.038
	54	4.52 ^a	4.14 ^a	4.61 ^a	4.05 ^a	3.69 ^{ab}	2.85 ^b	0.18	0.018
HDL-C (mmol/L)	21	1.62	1.36	1.10	1.37	1.22	1.13	0.07	0.285
	54	1.68 ^{ab}	1.45 ^b	1.93 ^a	1.66 ^{ab}	1.62 ^{ab}	0.98 ^c	0.08	0.002
LDL-C (mmol/L)	21	1.44	0.83	1.22	1.13	1.10	1.03	0.06	0.104
	54	1.16 ^a	1.01 ^a	1.06 ^a	0.94 ^a	0.90 ^{ab}	0.50 ^b	0.07	0.048

3. 讨论

3.1 新型复合抗氧化剂对肉鸡生长性能的影响

在肉鸡的生长后期, 对照组的肉鸡平均日增重最低, 原因可能是陈化糙米混合物

中的油脂及蛋白质的氧化程度过高，营养价值降低，造成其可消化性降低。本试验结果表明，X3 组显著提高了肉鸡 22-54、1-54 日龄的平均日增重，可能是 X3 配方中体外抗氧化和体内抗氧化剂的含量都最高，消除了陈化糙米混合物中的自由基，阻止了日粮在后续的保存过程中油脂的链式氧化过程，X3 组中的体内抗氧化剂还能够起到消除体内自由基的作用，对肉鸡日粮营养物质的保护和对肉鸡的促生长效果都最好。研究表明，饲料中单独添加 EQ、VE、TP、SY 能够保护家禽的生物膜，降低各类应激对细胞的损害，调节机体能量代谢，降低动物的料肉比^[126-128]。Amevor FK 等^[129]研究表明，单独或联合补充槲皮素和 VE 可显著改善蛋鸡的生产性能和鸡蛋质量，且联合剂的效果更好。黄正洋等^[130]研究表明，饲料中联合添加 SY 和 VE 可以显著提高肉鸡的生长性能。龙萌^[131]研究表明，饲料中添加 TP 和 SY 可显著提高团头鲂的增重率和特定增长率。在本试验结果的对比之下，相对于只添加了 VE 和 EQ 的抗氧化剂，新型复合抗氧化剂的 X3 组在促进肉鸡生长性能方面效果更好。平均日增重提高的原因可能是新型复合抗氧化剂组合中的乙氧基喹啉保护了饲料中脂质、TP、VE 和 SY 不被饲料中的自由基氧化破坏，使得另外三种抗氧化剂被动物吸收并起到了体内抗氧化作用，保护了动物肠道功能的完整性，提高了肠道的抗氧化水平和消化酶活性^[132, 133]，改善了动物的能量代谢，从而提高了肉鸡生长后期及整个生长周期的平均日增重。

3.2 新型复合抗氧化剂对肉鸡空肠二糖酶的影响

动物肠道无法直接吸收二糖，需要通过小肠内壁产生的二糖酶将双糖水解成单糖才能被机体吸收。因此机体内的糖代谢过程与二糖酶直接相关^[134]。研究表明，TP 能够通过改善胰岛素抵抗、调节二糖酶的活性及机体的糖代谢^[135]。韦芳媚^[136]研究表明，TP 能够通过调节蔗糖酶和麦芽糖酶的活性，降低血糖含量。陈灿灿^[137]研究表明，饲料中添加 32IU 的 VE 能够显著提高断奶仔猪肠道内二糖酶的活性。有研究表明，动物饲料中添加 VE 会引起肠道二糖酶活性的降低^[138]。本试验研究表明，饲料中添加新型复合抗氧化剂能够显著提高 21 日龄肉鸡空肠蔗糖酶和 54 日龄肉鸡空肠麦芽糖酶的活性，推测是因为 X3 组的新型复合抗氧化剂提高了肉鸡肠道的抗氧化效果，减轻了肉鸡肠道内的氧化损伤，空肠二糖酶活性得到了显著提高。与 EQ 组相比，X1 组、X2 组 21 日龄肉鸡空肠蔗糖酶的活性显著降低，推测可能是因为 EQ 组成分单一，肠道内的淀粉酶能够与饲料中的淀粉类物质更好地接触并将其分解为二糖或单糖有关。VE 组蔗糖酶活性的降低可能与其使用的剂量较高有关，黄靓^[139]研究表明，饲料中添加 80IU 的 VE 会显著降低育肥猪的蔗糖酶活性。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/928113141127007023>