

沈阳, 李河, 姚瑶, 等. 日粮中添加色氨酸对新西兰兔生长性能、机体免疫和空肠形态的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (8): 25–31.

SHEN Y, LI H, YAO Y, et al. Effects of dietary tryptophan supplementation on growth performance, immune function, and jejunal morphology of New Zealand rabbits [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (8): 25–31.

日粮中添加色氨酸对新西兰兔生长性能、机体免疫和空肠形态的影响

沈阳^{1,2}, 李河^{1,2}, 姚瑶^{2,3}, 任清长^{1*}, 秦枫^{2,3*}, 杨杰^{2,3},
翟频^{2,3}, 邵乐^{2,3}, 李健^{2,3}, 张霞^{2,3}

(1. 安徽科技学院动物科学学院, 安徽 凤阳 233100;

2. 江苏省农业科学院畜牧研究所, 江苏 南京 210014;

3. 农业农村部种养结合重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 旨在探究日粮中添加色氨酸对新西兰兔生长性能、机体免疫和空肠形态的影响。选取 144 只 35 日龄、体重 (689.5 ± 5.96) g 健康的新西兰仔兔, 随机分为 4 组, 每组 6 个重复, 每个重复 6 只, 分别为对照组 (基础日粮)、试验 I 组 (基础日粮+0.2% 色氨酸)、试验 II 组 (基础日粮+0.4% 色氨酸)、试验 III 组 (基础日粮+0.6% 色氨酸), 试验饲养期 42 d。结果: 与对照组相比, 试验 III 组的平均日增重显著升高 ($P < 0.05$), 料重比和死亡率分别降低 11.9% 和 8.33%; 试验 III 组肾脏指数显著高于对照组及试验 I 组 ($P < 0.05$); 与对照组相比, 试验 I 组血清总蛋白浓度和球蛋白浓度均显著升高 ($P < 0.05$), 试验 II 组和试验 III 组葡萄糖浓度均显著升高 ($P < 0.05$); 试验 III 组血清与空肠组织中的免疫球蛋白 (Ig) A、IgM、IgG 浓度较对照组均极显著升高 ($P < 0.01$); 试验 II 组空肠组织绒毛高度显著高于试验 I 组 ($P < 0.05$), 而试验 II、III 组隐窝深度较对照组、试验 I 组极显著降低 ($P < 0.01$), 试验 II 组绒毛隐比极显著高于对照组和试验 I 组 ($P < 0.01$)。综上, 日粮中添加色氨酸可有效提升新西兰兔的生长性能和免疫功能, 促进肾脏发育并改善肠道形态, 且总色氨酸水平为 0.77% 效果较好。

关键词: 色氨酸; 新西兰兔; 生长性能; 免疫功能

中图分类号: S829.1 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2026)08-0025-07

Effects of dietary tryptophan supplementation on growth performance, immune function, and jejunal morphology of New Zealand rabbits

SHEN Yang^{1,2}, LI He^{1,2}, YAO Yao^{2,3}, REN Qingchang^{1*}, QIN Feng^{2,3*}, YANG Jie^{2,3},
ZHAI Pin^{2,3}, SHAO Le^{2,3}, LI Jian^{2,3}, ZHANG Xia^{2,3}

(1. College of Animal Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China;

2. Institute of Animal Husbandry, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

3. Key Laboratory of Crop-Livestock Integration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of dietary tryptophan supplementation on growth performance, immune function and jejunal morphology of New Zealand rabbits. A total of 144 healthy 35-day-old New Zealand young rabbits with uniform body weight (689.5 ± 5.96) g were randomly divided into four groups with six replicates per group and six rabbits per replicate. The rabbits in each group were fed with the basal diet (the control group), basal diet supplemented with 0.2% tryptophan (Group I), basal diet supplemented with 0.4% tryptophan (Group II) and basal diet supplemented with 0.6% tryptophan (Group III), respectively; and the feeding trial lasted for 42 days. The results showed that the average daily gain of Group III was significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$), with feed conversion ratio reduced by 11.9% and the mortality decreased by 8.33%. The kidney index of Group III was significantly higher than that of the control group and Group I ($P < 0.05$). The serum total protein and globulin concentrations in Group I increased significantly ($P < 0.05$), while the serum glucose concentration in Group II and Group III increased significantly ($P < 0.05$). The concentrations of

收稿日期: 2025-11-18; 修回日期: 2026-06-13

基金项目: 国家兔产业技术体系南京综合试验站项目 (CARS-43-G-2)

第一作者: 沈阳, 男, 硕士研究生

* 通信作者: 任清长, 副教授, 研究方向为动物营养与饲料科学, E-mail: Renqc@ahstu.edu.cn; 秦枫, 副研究员, 研究方向为动物营养与饲料科学, E-mail: fqin1983@163.com。

immunoglobulin A, immunoglobulin M and immunoglobulin G in the serum and jejunal tissue of Group III were extremely significantly higher than those of the control group ($P<0.01$). The jejunal villus height of Group II was significantly higher than that of Group I ($P<0.05$), while the crypt depth of Group II and Group III was extremely significantly lower than that of the control group and Group I ($P<0.01$). The villus height to crypt depth ratio of Group II was extremely significantly higher than that of the control group and Group I ($P<0.01$). In conclusion, dietary tryptophan supplementation effectively improved the growth performance and immune function of New Zealand rabbits, promoted kidney development, and ameliorated their intestinal morphology. Under the conditions of this study, Group III (with a total dietary tryptophan level of 0.77%) demonstrated the best overall efficacy.

Keywords: tryptophan; New Zealand rabbit; growth performance; immune function

随着经济发展,居民饮食结构日益丰富,兔肉市场认可度不断提升,2023年我国兔肉产量达45.8万吨^[1]。当前兔产业已逐步形成规模化、集约化生产,但仍面临养殖成本高、饲料替抗技术不足、仔兔死亡率偏高等突出问题^[2]。色氨酸作为畜禽重要的功能性必需氨基酸,具有调节动物生长、抗氧化应激、机体免疫以及营养物质代谢等功能^[3-5]。日粮色氨酸缺乏会使畜禽的生长性能下降^[6]。色氨酸代谢产物5-羟色胺、尿氨酸、褪黑素等,广泛参与机体免疫反应调控^[7-8]。研究发现,日粮补充色氨酸可提高动物血清免疫球蛋白(Ig)浓度,改善肠道形态,维持机体健康^[9-10]。断奶时仔兔应激大,免疫力降低,死亡率高,其肠道健康问题是目前兔生产最大的挑战之一,如何提高仔兔免疫及肠道健康是目前兔生产中研究的焦点。因此,本试验以断奶35日龄新西兰兔为试验动物,探究日粮中添加色氨酸对新西兰兔生长性能、机体免疫和空肠形态的影响,旨在评价色氨酸在断奶仔兔生产中的应用效果,为肉兔日粮色氨酸应用及科学营养配比提供相关依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

35日龄断奶新西兰仔兔,公母各半,均来自江苏省农业科学院六合实验兔场。色氨酸由无锡久信生物科技有限公司提供,纯度 $\geq 99\%$ 。

1.2 试验设计

试验采用单因素完全随机设计,选取144只35日龄健康、体重 (689.5 ± 5.96) g新西兰仔兔,随机分为4组,公母各半,每组6个重复,每个重复6只,分别为对照组(基础日粮),试验I组(基础日粮+0.2%色氨酸),试验II组(基础日粮+0.4%色氨酸),试验III组(基础日粮+0.6%色氨酸)。试验饲养期42d,饲养试验时间为2024年12月—2025年2月

1.3 基础日粮及饲养管理

试验前对兔笼进行统一消毒,对仔兔进行常规驱虫。采用每笼3只的饲养方式,每日08:00与15:00分别饲喂全价基础日粮和试验日粮,颗粒粒

径1~2cm,并保证自由饮水。每日执行日常管理与数据记录。

试验饲料依据NRC(1977)家兔饲养标准、法国国家兔营养需要量、农业行业标准《肉兔营养需要量》配制^[11-13](补充0.3%蛋氨酸、0.3%赖氨酸),基础饲料组成及营养水平见表1。

表1 基础日粮组成及营养水平

原料	含量/%	营养成分	含量
玉米	15.0	干物质/%	88.75
麦麸	20.0	消化能 ^② /(MJ·kg ⁻¹)	10.57
豆粕	14.0	粗蛋白质/%	16.98
玉米胚芽粕	10.0	粗纤维 ^③ /%	19.79
苜蓿草粉	9.5	粗脂肪/%	5.98
花生秧	10.0	钙/%	1.38
麦芽根	7.5	有效磷/%	0.54
稻壳粉	8.0	赖氨酸/%	0.98
大豆油	1.0	蛋氨酸+胱氨酸/%	0.48
预混料 ^①	5.0	精氨酸/%	0.90
		色氨酸/%	0.17

注:①每千克预混料含有CuSO₄·5H₂O 1 080 mg,FeSO₄·H₂O 5 320 mg,MnSO₄·H₂O 560 mg,ZnSO₄·H₂O 3 652 mg,CoCl₂·6H₂O 1 000 mg,VA 180 000 U,VD 18 000 U,VE 900 000 U,CaHPO₄ 250 g,赖氨酸30 g,蛋氨酸30 g。②消化能为估测值,其余为实测值。③粗纤维原料为花生秧、苜蓿草粉和稻壳粉。

1.4 样品采集

经过42d试验后,在仔兔生长至77日龄时,根据平均体重,每组选取12只试验兔,禁食24h,自由饮水。使用一次性采血针和10 mL负压采血管进行采血,将采血管置于室温静置析出血清,以3 000 r/min离心10 min,用移液枪取上层血清至无菌1.5 mL离心管,置于-80℃冰箱冷冻储存,待检。采血完成后进行屠宰,分离心脏、肝脏、脾脏、肾脏,剔除器官周围组织,准确称取各器官重量。根据屠宰前活重,计算器官指数。取空肠组织,一份采用冻存管收集,置于液氮中速冻,后转移至-80℃冰箱冻存;一份4%多聚甲醛固定,用于形态测定。

1.5 指标测定

1.5.1 生长性能指标

试验期内每天巡栏 2 次，观察采食及健康状况。每周称取体重、饲料消耗量，统计死亡仔兔只数。35 日龄时称取的体重记为初始重，饲养 42 d 后称取的体重记为试验末重。试验结束后，根据每周记录的数据，计算新西兰兔在饲养期内的平均日采食量、平均日增重、料重比及死亡率。

1.5.2 器官指数指标

根据屠宰后各器官重量与屠宰前活重，计算器官指数（器官重量与活体重的比值）。

1.5.3 血清生化指标、Ig 指标测定

血清生化指标包括血清总蛋白、白蛋白、球蛋白、总胆固醇、甘油三酯、碱性磷酸酶、葡萄糖、尿素氮，其中总蛋白、白蛋白使用蛋白定量试剂盒，其余指标使用血清生化试剂盒检测，均严格遵循检测试剂盒规定的方法进行，所用检测试剂盒购自南京建成生物工程研究所有限公司。血清 IgA、IgG、IgM 含量委托南京信帆生物技术有限公司，使用酶联免疫吸附试验试剂盒进行检测。

1.5.4 空肠组织 Ig 含量及形态观察

空肠组织 IgA、IgG、IgM 委托南京信帆生物技术

有限公司，使用酶联免疫吸附试验试剂盒进行检测。空肠组织切片（4 μm）制作采用苏木精-伊红（HE）染色法，将固定的空肠组织进行脱水、石蜡包埋、石蜡切片、HE 染色，最后使用荧光扫描仪进行扫描，得出空肠形态图像结果。空肠形态图像处理上，使用 Slide Viewer 图像分析软件准确量取空肠组织绒毛高度、隐窝深度，并计算绒毛高度和隐窝深度的比值（绒隐比），每个空肠组织切片视野中取 20 根肠绒毛进行记录。

1.6 数据统计与分析

应用 Excel 2021 统计和整理数据，采用 SPSS 26.0 中的单因素方差分析（One-way ANOVA）进行数据分析，Duncan’s 多重比较法分析数据，以 $P < 0.05$ 表示差异显著， $P < 0.01$ 表示差异极显著，所有数据均采用“平均值±标准误”的形式表示。

2 结果与分析

2.1 日粮中添加色氨酸对新西兰兔生长性能的影响

由表 2 可知，试验Ⅲ组平均日增重显著高于对照组、试验Ⅰ和Ⅱ组（ $P < 0.05$ ）；试验末重显著高于试验Ⅰ组（ $P < 0.05$ ）；料重比较对照组降低 11.9%，死亡率降低 8.33%。

表 2 日粮中添加色氨酸对新西兰兔生长性能的影响

生长性能	对照组	试验Ⅰ组	试验Ⅱ组	试验Ⅲ组
初始重/g	687.83±12.09	689.04±12.21	689.83±11.23	691.21±12.84
试验末重/g	2 297.67±29.57 ^{ab}	2 241.46±38.88 ^b	2 286.50±25.89 ^{ab}	2 365.00±21.03 ^a
平均日增重/g	38.33±0.43 ^b	36.96±0.64 ^c	38.02±0.37 ^{bc}	39.85±0.22 ^a
平均日采食量/g	162.52±9.23	154.22±10.25	149.83±9.33	151.86±10.68
料重比	4.28±0.33	4.26±0.36	3.95±0.45	3.77±0.41
死亡率/%	8.33	2.78	2.78	0.00

注：同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。

2.2 日粮中添加色氨酸对新西兰兔器官指数的影响

由表 3 可知，试验Ⅲ组的肾脏指数显著高于对照组和试验Ⅰ组（ $P < 0.05$ ）；试验Ⅰ组心脏指数显著高

于试验Ⅱ组（ $P < 0.05$ ）；而肝脏指数和脾脏指数在所有组间均无显著差异（ $P > 0.05$ ）。

表 3 日粮中添加色氨酸对新西兰兔器官指数的影响

g/kg

器官指数	对照组	试验Ⅰ组	试验Ⅱ组	试验Ⅲ组
心脏	3.02±0.18 ^{ab}	3.47±0.31 ^a	2.77±0.14 ^b	2.83±0.18 ^{ab}
肝脏	30.06±1.10	25.91±2.24	30.48±1.82	31.28±1.94
脾脏	0.68±0.13	0.56±0.04	0.54±0.05	0.58±0.07
肾脏	5.92±0.15 ^c	6.16±0.21 ^{bc}	6.74±0.27 ^{ab}	6.85±0.20 ^a

2.3 日粮中添加色氨酸对新西兰兔血清生化指标的影响

由表 4 可知，相较于对照组，试验 I 组血清总蛋白浓度和球蛋白浓度均显著升高 ($P<0.05$)。试验 I

组和试验 II 组碱性磷酸酶浓度显著高于试验 III 组和对
照组 ($P<0.05$)。试验 II 组和试验 III 组葡萄糖浓度显
著高于试验 I 组和对照组 ($P<0.05$)。试验 III 组尿素
氮浓度显著低于试验 I 组 ($P<0.05$)，为各组最低。

表 4 日粮中添加色氨酸对新西兰兔血清生化指标的影响

指标	对照组	试验 I 组	试验 II 组	试验 III 组
总蛋白/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	43.1±2.0 ^b	51.9±0.9 ^a	46.2±1.2 ^b	44.4±1.7 ^b
白蛋白/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	34.2±1.5	35.1±1.0	35.2±0.9	34.0±1.0
球蛋白/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	8.9±1.4 ^b	16.8±0.6 ^a	11.0±1.2 ^{ab}	10.4±0.8 ^b
总胆固醇/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.76±0.18	1.99±0.19	1.83±0.07	1.56±0.10
甘油三酯/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.54±0.11	0.52±0.06	0.50±0.04	0.65±0.09
碱性磷酸酶/ ($\text{U} \cdot \text{L}^{-1}$)	149.7±5.9 ^b	197.3±5.1 ^a	194.2±5.8 ^a	170.9±10.1 ^b
葡萄糖/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	6.93±0.19 ^b	7.02±0.35 ^b	8.93±0.52 ^a	9.07±0.35 ^a
尿素氮/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	4.92±0.24 ^{ab}	5.30±0.26 ^a	4.93±0.44 ^{ab}	4.32±0.14 ^b

2.4 日粮中添加色氨酸对新西兰兔血清及空肠组织 Ig 浓度的影响

由表 5 可知，试验 II、III 组血清 IgA、IgM、IgG

浓度较对照组均极显著升高 ($P<0.01$)，试验 I 组血
清 IgM 较对照组显著升高 ($P<0.05$)。

表 5 日粮中添加色氨酸对新西兰兔血清 Ig 浓度的影响

指标	对照组	试验 I 组	试验 II 组	试验 III 组
IgA/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	57.82±3.50 ^{Dd}	84.87±5.22 ^{Cc}	114.39±5.95 ^{Bb}	136.95±6.42 ^{Aa}
IgM/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	29.09±1.58 ^{Bc}	42.19±2.74 ^{Bb}	60.70±4.88 ^{Aa}	67.03±2.78 ^{Aa}
IgG/ ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)	4.31±0.19 ^{Bc}	5.02±0.20 ^{Bc}	7.28±0.49 ^{Ab}	8.45±0.38 ^{Aa}

注：同行数据肩标不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。下同。

由表 6 可知，相较于对照组，试验 III 组空肠组织
IgA、IgM、IgG 浓度均极显著升高 ($P<0.01$)；试验

II 组空肠组织 IgM、IgG 浓度极显著升高 ($P<0.01$)，
IgA 浓度显著升高 ($P<0.05$)。

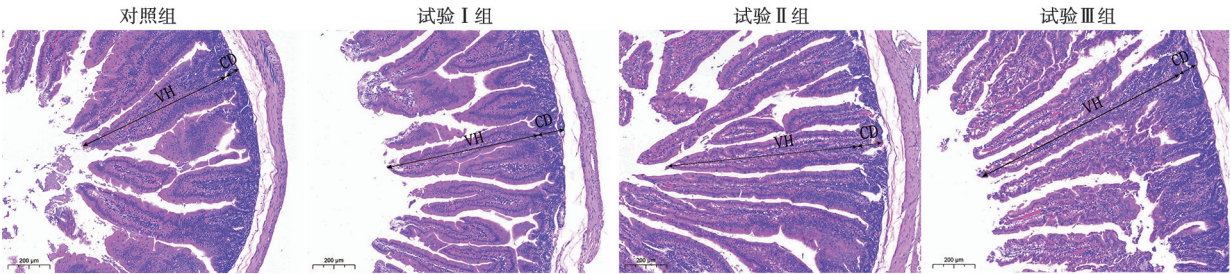
表 6 日粮中添加色氨酸对新西兰兔空肠组织 Ig 浓度的影响

指标	对照组	试验 I 组	试验 II 组	试验 III 组
IgA/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	52.43±3.57 ^{Bc}	60.46±3.31 ^{ABbc}	70.85±5.39 ^{ABab}	78.07±4.54 ^{Aa}
IgM/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	4.26±0.37 ^{Cc}	6.29±0.80 ^{Cc}	10.80±1.03 ^{Bb}	14.44±0.98 ^{Aa}
IgG/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.52±0.05 ^{Bb}	0.70±0.09 ^{Bb}	1.06±0.08 ^{Aa}	1.25±0.10 ^{Aa}

2.5 日粮中添加色氨酸对新西兰兔空肠组织形态的影响

由图 1 和表 7 可知，日粮添加色氨酸对空肠形态
有显著的影响。试验 II 组绒毛高度显著高于试验 I 组

($P<0.05$)，而试验 II、III 组隐窝深度较对照组、试
验 I 组极显著降低 ($P<0.01$)，试验 II 组绒隐比极显
著高于对照组和试验 I 组 ($P<0.01$)。



VH. 绒毛高度；CD. 隐窝深度。标尺 = 200 μm。

图 1 各组空肠组织 HE 染色形态观察

表 7 日粮中添加色氨酸对新西兰兔空肠组织形态的影响

空肠组织形态	对照组	试验 I 组	试验 II 组	试验 III 组
绒毛高度/μm	966. 68±21. 27 ^{ab}	893. 47±13. 64 ^b	1 058. 33±99. 50 ^a	920. 31±15. 96 ^{ab}
隐窝深度/μm	118. 95±3. 77 ^{Aa}	115. 92±2. 83 ^{Aa}	101. 17±1. 72 ^{Bb}	105. 83±1. 61 ^{Bb}
绒隐比	8. 39±0. 17 ^{Bb}	7. 98±0. 19 ^{Bb}	10. 53±0. 89 ^{Aa}	8. 81±0. 18 ^{ABb}

3 讨论

3.1 日粮中添加色氨酸对新西兰兔生长性能的影响

家兔养殖中饲料成本占比约 70%，集约化模式下，其生长性能、抗病力及养殖效率与饲粮营养密切相关，营养研究与配方优化至关重要，尤其在缓解断奶仔兔应激、促进生长发育与维护肠道健康等方面，仍需综合性营养策略。本试验结果表明，日粮添加 0.6% 色氨酸显著提高了 35 日龄新西兰仔兔的试验末重、平均日增重，降低了死亡率。王滔等^[14] 研究报告生长肉兔饲粮中色氨酸适宜水平为 0.205%，此添加量下可显著提高肉兔平均日增重并降低料重比。该结果也与李佳佳等^[15] 研究结果基本一致。而殷青青等^[16] 研究发现生长獭兔饲粮中色氨酸适宜水平为 0.176%~0.218%，该添加量可显著提高獭兔毛皮的重量，但对獭兔的生长性能并无显著影响。本试验中日粮色氨酸水平高于上述研究，获得了更好的效果，这可能与色氨酸的特殊生理功能紧密相关，如调节肠道微生物互作、参与细胞营养代谢等，具体作用还需进一步探究。氨基酸在体内除了参与体蛋白合成，还发挥着调节氨基酸平衡的重要功能。日粮添加适量色氨酸可以缓解其他氨基酸摄入不足造成的不良影响，完善日粮氨基酸平衡。在其他畜禽研究中，日粮中添加适量色氨酸对生长性能也有一定的提高。有研究报道，玉米-豆粕型基础饲粮中，日粮中添加 0.2% 色氨酸能有效促进断奶仔猪的采食，并显著改善其生长性能^[17]。在低蛋白日粮中添加 0.26% 色氨酸、1.15% 亮氨酸，能够有效缓解犊牛的断奶应激，提高其生长性能、增强机体抗氧化能力和改善免疫功能^[18]。而在研究绵羊色氨酸营养时发现，添加色氨酸可显著提高绵羊的平均日增重^[19]。日粮中提供充足的色氨酸还可以促进肉仔鸡的生长，且随着日粮中添加色氨酸的升高，肉仔鸡的采食量也随之提高，增重也趋于上升^[20-21]。席鹏彬等^[22] 研究表明，在黄羽肉鸡的日粮中，色氨酸缺乏会使其采食量与生长性能下降，而通过在日粮中适量添加，可提高其采食量和生长性能。由此可见，色氨酸对不同畜禽生长性能的提高具有积极作用，其积极作用体现在多个维度，而适宜添加量受物种差异、养殖环境、基础日粮组成等多重因素的影响，其适宜添加量还需要进一步研究。

3.2 日粮中添加色氨酸对新西兰兔血清生化及 Ig 含量的影响

本试验旨在探究日粮添加色氨酸对新西兰兔血清生化及 Ig 浓度的影响。日粮添加色氨酸可不同程度地提高血清总蛋白、球蛋白、碱性磷酸酶、葡萄糖的浓度，而尿素氮水平则显著降低，添加 0.4%、0.6% 效果更为显著。血清蛋白主要由肝脏合成，具有维持血浆胶体渗透压、调节机体酸碱平衡以及运输营养等重要生理功能，其浓度常被用作评估机体蛋白质合成与营养状态的关键指标。血清尿素氮水平则主要反映体内氨基酸的分解代谢水平，较低的尿素氮浓度通常表明日粮中氨基酸配比更为合理，蛋白质利用效率更高^[23]。饶巍等^[24] 的研究发现，在蛋鸡日粮中添加适量色氨酸可显著降低血清尿素氮含量，同时显著提高总蛋白和白蛋白水平，这一结果与本试验的结果相似。李佳佳等^[15] 研究发现，日粮中色氨酸含量适量

增加, 尿素氮浓度显著降低, 有益于日粮氨基酸平衡和氨基酸代谢。肾脏是机体蛋白质代谢的重要器官, 本试验中, 色氨酸添加组肾脏指数显著升高, 说明色氨酸可能有助于改善蛋白质代谢, 降低血清尿素氮水平。由此可见, 色氨酸在改善蛋白质代谢与营养利用方面有积极作用。血清 Ig 浓度结果表明, 日粮添加色氨酸可显著提高新西兰兔血清 IgA、IgM、IgG 的浓度, 其中添加 0.4%、0.6% 效果更为显著。魏宗友等^[25]在扬州鹅日粮中添加 0.3% 色氨酸时, 血清 IgG、IgM 浓度分别显著增加了 43.68%、37.7%, 这表明色氨酸水平能够通过调控 IgG 和 IgM 的分泌来影响动物的体液免疫, 从而增强动物的抵抗力, 但 IgA 浓度无显著变化。肉鸡方面相关研究报道也较为丰富。王波等^[26]研究发现, 日粮中添加 0.248% 色氨酸可显著提高肉仔鸡血清 IgA 浓度, 说明高水平色氨酸可提高机体体液免疫, 因此提高 NRC 推荐色氨酸水平的日粮, 可同步提高肉鸡生长性能、增强抗氧化应激能力和免疫力^[27]。Emadi 等^[28]研究发现, 肉鸡日粮中适量添加色氨酸, 可提升其 Ig 浓度, 增强其抗病力。Ig 浓度的上调有助于在炎症或应激状态下及时发挥抗炎与免疫防御功能, 从而提升新西兰兔的抗病能力。本试验中 Ig 浓度增加较大, 可能是由于色氨酸通过多种途径, 协同提升机体免疫水平, 产生了效应叠加, 但机体作用机理还需要进一步研究。

3.3 日粮中添加色氨酸对新西兰兔空肠组织 Ig 浓度及形态的影响

肠道作为动物机体重要的消化吸收器官和最大的免疫器官, 其中空肠是营养物质吸收最集中的肠段, 其形态结构完整性与局部免疫功能, 直接影响营养物质吸收效率和动物机体整体的抗病能力。本试验中, 日粮添加色氨酸显著提高了新西兰兔空肠组织 IgA、IgM、IgG 的浓度, 说明色氨酸进一步提升了肠道屏障和抵御病原微生物的能力, 为空肠营养物质吸收和健康生长发育提供保障。在其他畜种上, 日粮添加色氨酸对空肠形态有积极影响。日粮中添加 0.06% *L*-色氨酸可显著提高育肥猪空肠组织绒毛高度和绒隐比^[29]。饲喂添加 0.15% 和 0.75% 的色氨酸日粮, 对断奶仔猪的生长性能无显著影响, 但提高了空肠组织隐窝深度, 绒隐比^[30]。与对照组相比, 添加 0.09%、0.12%、0.15% 色氨酸均能显著增加 21 日龄肉鸡空肠绒毛高度及绒隐比^[31]。Ruan 等^[32]研究发现, 在饲料中添加适量色氨酸能够明显增加小鼠小肠绒毛高度与隐窝深度的比值。本试验中, 0.4% 色氨酸添加组绒毛高度显著提高, 0.4%、0.6% 色氨酸添加组隐窝深度显著降低, 0.4% 色氨酸添加组绒隐比显著优于其他组, 与前人关于色氨酸对畜禽空肠形态健康具

有积极作用相似。绒毛高度增加可扩大肠道黏膜的营养吸收面积, 提升营养物质利用率; 隐窝深度降低提示肠道上皮细胞更新速率较为理想; 绒隐比的提高综合反映了肠道消化吸收功能与屏障功能有所提升。由此可见, 色氨酸的水平提高对于改善新西兰兔空肠组织形态的健康具有一定的积极作用。但色氨酸对新西兰兔空肠组织 Ig 浓度、形态影响研究较少, 且多集中于现象描述, 尚未探究色氨酸代谢产物如何调控肠上皮细胞的增殖发育、Ig 基因的转录表达等分子机制, 因此色氨酸影响空肠组织 Ig 浓度及形态的具体机理, 还需结合分子手段, 着重肠上皮细胞增殖分化、免疫反应等进一步探讨。

综上, 日粮中添加 0.6% 色氨酸 (总水平 0.77%) 可改善血清生化指标, 促进肾脏发育, 降低空肠隐窝深度, 提高血清及空肠 Ig 水平, 从而提高仔兔生长性能。此外, 添加 0.4% 色氨酸 (总水平 0.57%) 对机体免疫和肠道形态也具有积极的影响。鉴于色氨酸成本较高, 其在新西兰兔日粮中的最适添加水平仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 武拉平, 秦应和. 2024 年中国兔产业发展情况和 2025 年发展展望 [J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61 (3): 409-413.
- [2] 刘汉中, 余志菊, 秦应和, 等. 我国兔产业高质量发展之路 [J]. 畜牧产业, 2024 (6): 36-40.
- [3] 张雪蕾, 李仁德, 王静, 等. 色氨酸对动物生理功能调节的研究进展 [J]. 特产研究, 2019, 41 (1): 104-108.
- [4] 徐建, 陈芳琴, 郑德兴, 等. 色氨酸对动物采食的调控 [J]. 饲料研究, 2013, 36 (1): 21-24.
- [5] 张文杰, 马健, 王志远, 等. 色氨酸的代谢与功能及其在动物生产中的应用 [J]. 家畜生态学报, 2020, 41 (7): 73-78.
- [6] BAI M, LIU H, XU K, et al. A review of the immunomodulatory role of dietary tryptophan in livestock and poultry [J]. Amino Acids, 2017, 49 (1): 67-74.
- [7] 何宗亮. 禽类褪黑激素的研究进展 [J]. 家禽科学, 2017, 39 (3): 47-51.
- [8] 白苗苗, 刘红南, 吴信, 等. 饲料中色氨酸对畜禽的免疫调节作用 [J]. 动物营养学报, 2016, 28 (2): 361-368.
- [9] 李华伟, 祝倩, 吴灵英, 等. 色氨酸的生理功能及其在畜禽饲料中的应用 [J]. 动物营养学报, 2016, 28 (3): 659-664.
- [10] KOOPMANS S J, GUZIK A C, VAN DER MEULEN J, et al. Effects of supplemental *L*-tryptophan on serotonin, cortisol, intestinal integrity, and behavior in weanling piglets, [J]. J Anim Sci, 2006, 84 (4): 963-971.
- [11] COUNCIL N R. Nutrient requirements of rabbits [M]. 2nd ed. Washington, DC: The National Academies Press, 1977.
- [12] 谷子林, 薛家宾. 现代养兔实用百科全书 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [13] 农业农村部. 肉兔营养需要量: NY/T 4049—2021 [S]. 北京:

- 中国农业出版社, 2021.
- [14] 王滔, 贾刚, 雷怀刚, 等. 饲料色氨酸水平对生长肉兔生产性能及血清生化指标的影响 [J]. 动物营养学报, 2014, 26 (8): 2176-2183.
- [15] 李佳佳, 殷海霞. 饲料中添加色氨酸对肉兔生长性能、血液生化指标及血清抗氧化性能的影响 [J]. 中国饲料, 2021 (10): 50-53.
- [16] 殷清清, 李福昌, 王雪鹏, 等. 饲料色氨酸水平对生长獭兔生长性能、氮代谢、血清生化指标及毛皮质量的影响 [J]. 动物营养学报, 2013, 25 (5): 1010-1016.
- [17] 谷可. 色氨酸对断奶仔猪生长性能和肠上皮屏障损伤修复的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- [18] 邹松岩, 徐宏建, 王明亚, 等. 低蛋白质日粮补充亮氨酸和色氨酸对断奶期犊牛生长性能和血液参数的影响 [J]. 饲料研究, 2023, 46 (13): 1-6.
- [19] WANG J, DING L, YU X, et al. Tryptophan improves antioxidant capability and meat quality by reducing responses to stress in nervous Hu sheep [J]. Meat Sci, 2023, 204: 109267.
- [20] ROSA A P, PESTI G M, EDWARDS H M, et al. Tryptophan requirements of different broiler genotypes [J]. Poult Sci, 2001, 80 (12): 1718-1722.
- [21] FATUFE A A, HIRCHE F, RODEHUTSCORD M. Estimates of individual factors of the tryptophan requirement based on protein and tryptophan accretion responses to increasing tryptophan supply in broiler chickens 8-21 days of age [J]. Arch Anim Nutr, 2005, 59 (3): 181-190.
- [22] 席鹏彬, 林映才, 蒋宗勇, 等. 饲料色氨酸对 43~63 日龄黄羽肉鸡生长、胴体品质、体成分沉积及下丘脑 5-羟色胺的影响 [J]. 动物营养学报, 2009, 21 (2): 137-145.
- [23] MALMLOF K. Amino acid in farm animal nutrition metabolism, partition and consequences of imbalance [J]. Swed J Agric Research, 1988, 18 (4): 191-193.
- [24] 饶巍, 王玥, 周斌, 等. 日粮色氨酸水平对蛋鸡生产性能及蛋白质代谢的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2011, 47 (15): 38-41.
- [25] 魏宗友, 王洪荣, 潘晓花, 等. 饲喂方式和饲料色氨酸水平对扬州鹅免疫功能及抗氧化指标的影响 [J]. 动物营养学报, 2012, 24 (12): 2356-2365.
- [26] 王波, 闵芝智, 王永伟, 等. 1~21 日龄雌性肉仔鸡表观回肠可消化色氨酸需要量评定 [J]. 动物营养学报, 2012, 24 (9): 1664-1673.
- [27] MUND M D, RIAZ M, MIRZA M A, et al. Effect of dietary tryptophan supplementation on growth performance, immune response and anti-oxidant status of broiler chickens from 7 to 21 days [J]. Vet Med Sci, 2020, 6 (1): 48-53.
- [28] EMADI M, JAHANSHIRI F, KAVEH K, et al. Nutrition and immunity: the effects of the combination of arginine and tryptophan on growth performance, serum parameters and immune response in broiler chickens challenged with infectious bursal disease vaccine [J]. Avian Pathol, 2011, 40 (1): 63-72.
- [29] 薛垂喜, 刘尊杰. *L*-色氨酸对育肥猪生长性能、肠道形态及肠道微生物多样性的影响 [J]. 中国饲料, 2025 (18): 45-48.
- [30] TOSSOU M C B, LIU H, BAI M, et al. Effect of high dietary tryptophan on intestinal morphology and tight junction protein of weaned pig [J]. BioMed Res Int, 2016, 2016 (1): 2912418.
- [31] 伏春燕, 董以雷, 阎佩佩, 等. 饲料色氨酸水平对肉鸡生长性能、血清生化指标、器官指数及肠道组织形态的影响 [J]. 动物营养学报, 2021, 33 (10): 5545-5556.
- [32] RUAN Z, YANG Y, WEN Y, et al. Metabolomic analysis of amino acid and fat metabolism in rats with *L*-tryptophan supplementation [J]. Amino Acids, 2014, 46 (12): 2681-2691.