

引用格式:

周振乾, 郭智, 胡引霞, 朱敬文, 虎新林, 秦士贞. 酵母硒对产蛋高峰后期蛋鸡抗氧化、免疫性能及肠道菌群结构的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(2): 109–118.

ZHOU Z Q, GUO Z, HU Y X, ZHU J W, HU X L, QIN S Z. Effects of selenium yeast on antioxidant, immune performance and intestinal microbiota structure of laying hens in the late peak laying period[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(2): 109–118.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



酵母硒对产蛋高峰后期蛋鸡抗氧化、免疫性能及肠道菌群结构的影响

周振乾, 郭智, 胡引霞, 朱敬文, 虎新林, 秦士贞*

(甘肃农业大学动物科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 选取50周龄的海兰褐蛋鸡448羽, 随机分为4个处理组, 每组7个重复, 每个重复16羽。对照组饲喂基础饲料, 试验组分别在基础饲料中添加0.15、0.30、0.45 mg/kg(以硒计)的酵母硒(SY)。预试期10 d, 正式期56 d。试验结束后, 检测蛋鸡的抗氧化、免疫性能及肠道菌群结构。结果表明: 1) 饲料添加SY显著提高了血清免疫球蛋白(IgA、IgM、IgG)水平, 显著降低了白细胞介素(IL-1 β 、IL-2、IL-6)和肿瘤坏死因子(TNF- α)含量; 2) 饲料添加0.15、0.30 mg/kg SY显著提高了空肠谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性; 3) 饲料添加SY显著提高了回肠Toll样受体2基因的mRNA相对表达量, 其中0.30 mg/kg SY组相对表达量最高; 饲料添加0.45 mg/kg SY显著提高了空肠中转化生长因子 β 3基因的mRNA相对表达量; 4) 饲料添加0.30 mg/kg SY显著提高了回肠和空肠中闭锁小带蛋白1、闭合蛋白基因的mRNA相对表达量, 饲料添加0.30、0.45 mg/kg SY显著提高空肠闭锁小带蛋白2、封闭蛋白1和黏蛋白2基因的mRNA相对表达量; 5) 各组蛋鸡盲肠中的优势菌门均为厚壁菌门(Firmicutes)和拟杆菌门(Bacteroidetes), 优势菌属均为理研菌科RC9肠道群(Rikenellaceae_RC9_gut_group)和拟杆菌属(*Bacteroides*), 饲料添加0.45 mg/kg SY显著提高了脱硫菌门(Desulfobacterota)和脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)的相对丰度。综上所述, 饲料中添加SY能提高蛋鸡产蛋高峰后期的抗氧化、免疫性能; 在本试验条件下, SY的适宜添加量为0.30 mg/kg。

关键词: 蛋鸡; 酵母硒; 抗氧化性能; 免疫性能; 炎症因子; 菌群结构; 肠道健康

中图分类号: S831.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)02-0109-10

Effects of selenium yeast on antioxidant, immune performance and intestinal microbiota structure of laying hens in the late peak laying period

ZHOU Zhenqian, GUO Zhi, HU Yinxia, ZHU Jingwen, HU Xinlin, QIN Shizhen*

(College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A total of 448 50-week-old Hy-Line Brown laying hens were randomly divided into 4 treatment groups with 7 replicates per group and 16 hens per replicate. Laying hens in the control group were fed a basal diet, and laying hens in the experimental groups were fed the basal diet supplemented with 0.15, 0.30 and 0.45 mg/kg selenium yeast(SY), respectively. The pre-test period was 10 days, and the formal period was 56 days. At the end of the experiment, the antioxidant, immune performance and intestinal microbiota structure of laying hens were detected. The results showed as follows: 1) dietary SY supplementation significantly increased serum immunoglobulins(IgA, IgM, IgG) levels, and significantly decreased the contents of interleukin(IL-1 β , IL-2, IL-6) and tumor necrosis factor(TNF- α); 2) dietary supplementation of 0.15 and 0.30 mg/kg SY significantly increased the activities of glutathione peroxidase and superoxide

收稿日期: 2025-05-08

修回日期: 2025-09-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(32360848); 兰州市青年科技人才创新项目(2023-QN-139); 甘肃农业大学伏羲青年英才项目(Gaufx-05Y01)

作者简介: 周振乾(2001—), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事畜牧学研究, zhouzhenqian2@163.com; *通信作者, 秦士贞, 博士, 副教授, 主要从事家禽营养研究, qinshizhen@163.com

dismutase in jejunum; 3) dietary SY supplementation significantly increased the relative mRNA expression of Toll-like receptor 2 gene in ileum, and the relative expression of 0.30 mg/kg SY group was the highest, while dietary supplementation of 0.45 mg/kg SY significantly increased the relative mRNA expression of transforming growth factor β 3 gene in jejunum; 4) dietary supplementation of 0.30 mg/kg SY significantly increased the relative mRNA expression levels of zonula occludens 1 and occludin genes in ileum and jejunum, and dietary supplementation of 0.30 and 0.45 mg/kg SY significantly increased the relative mRNA expression levels of zonula occludens 2, claudin 1 and mucin 2 genes in jejunum; 5) the dominant bacteria in the cecum of laying hens in each group were Firmicutes and Bacteroidetes, the dominant bacteria were Rikenellaceae_RC9_gut_group and *Bacteroides*, and dietary supplementation with 0.45 mg/kg SY significantly increased the relative abundance of Desulfobacterota and *Desulfovibrio*. In summary, the addition of SY in the feed can improve the antioxidant and immune performance of laying hens in the late peak laying period; and under the conditions of this experiment, the suitable addition amount of SY was 0.30 mg/kg.

Keywords: laying hen; selenium yeast; antioxidant property; immune performance; inflammatory factor; microbiota structure; intestinal health

在我国当下以集约化和规模化为主的高密度笼养模式下,蛋鸡在经历产蛋高峰期的高强度代谢活动后,生产性能和蛋品质均不可避免地出现了下降趋势。这一阶段,蛋鸡对养分的消化吸收效率明显下降,同时伴随多种潜在威胁:生理机能减退、氧化还原系统失衡、免疫功能退化、病原菌易感性增加、氧化应激水平提升以及肠道菌群结构失调。这些不良生理变化不仅易导致各类疾病的暴发,同时显著加快蛋鸡个体的衰老节奏,从而造成蛋鸡提前被淘汰的局面。因此,寻求并落实切实有效的策略以提高产蛋后期蛋鸡群体的抗氧化、免疫性能,改善其肠道健康状况,对于蛋鸡养殖业的发展具有重大意义。

硒是动物必需的微量元素之一,在动物体内主要以硒蛋白的形式发挥作用^[1]。饲料中添加硒能提高畜禽生产、抗氧化能力^[2]及免疫功能等^[3-5]。ZHAI等^[6]研究发现,硒可以提高小鼠肠道有益菌的菌群丰度,降低肠道内病原菌数量。酵母硒(SY)为优质的有机硒源,相对于无机硒,其更易被动物机体吸收和利用,对机体免疫调节、抗炎以及抗氧化能力起积极作用^[7]。近年来,SY在家禽抗氧化、免疫和生产中得到了广泛的研究和应用。贺淼等^[8]和苏晓菲^[9]研究发现,在海兰褐蛋鸡饲养过程中,饲料中添加有机硒组的生产性能显著高于无机硒组的。范秋丽等^[10]研究表明,SY较亚硒酸钠能显著降低肉鸡肠道中丙二醛(MDA)含量。WANG等^[11]的研究表明,在提高肉鸡肝脏、肾脏、胰脏和肌肉的抗氧化能力方面,有机硒优于无机硒。前期研究^[12]结果显

示,在饲料中添加SY,对处于产蛋后期的海兰褐蛋鸡的生产性能与蛋品质均未产生显著影响。已有研究多聚焦于SY对蛋鸡产蛋性能及抗氧化能力的影响,针对蛋鸡肠道免疫与肠道菌群方面的研究则相对匮乏。因此,本研究中,以50周龄的海兰褐蛋鸡为试验动物,探究饲料添加SY对产蛋高峰后期蛋鸡抗氧化性能、免疫功能及肠道微生物群落结构的影响,以期SY在蛋鸡生产中的应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试海兰褐蛋鸡购自甘肃厚威农牧科技有限公司;所用SY的硒含量为3 000 mg/kg。

1.2 试验设计

选取50周龄的海兰褐蛋鸡448羽,随机分为4个处理组,每组7个重复,每个重复16羽。对照组(A组)饲喂基础饲料,试验组分别在基础饲料中添加0.15、0.30、0.45 mg/kg SY(以硒计),分别记为B、C、D组。基础饲料参考NY/T 33—2004《鸡饲养标准》配制。

1.3 饲养管理

于甘肃省武威市甘肃厚威农牧科技有限公司进行饲养试验。预试期10 d,正试期56 d。试验鸡采用笼养模式,试验期间每天于9:00、14:00和19:00进行饲喂。在饲养试验期间,每天16 h光照,鸡舍内定期消毒、清粪、通风,保持鸡舍干燥,防止因潮湿导致疾病的发生。

1.4 样品采集

第56天时，于每个重复组中挑选1只体质量接近该重复组平均水平的蛋鸡，禁食12 h后，于翅静脉采集血液并分离血清，分装后于-20 ℃条件下保存。采血后经颈动脉放血屠宰，用手术刀分离盲肠并将盲肠内容物挤进5 mL冻存管中(每组6个样品)，液氮速冻后于-80 ℃冰箱保存。截取空肠、回肠中段各约1 cm，用磷酸盐缓冲液(PBS)溶液冲洗后置于2 mL冻存管中，液氮速冻后于-80 ℃冰箱保存。

1.5 指标测定及方法

1.5.1 血清免疫指标测定

采用全自动生化分析仪(BS-240Vet)和ELISA试剂盒(南京建成生物工程研究所)测定血清中免疫球蛋白(IgA、IgG、IgM)、肿瘤坏死因子α(TNF-α)和白细胞介素(IL-1β、IL-2、IL-6)含量。

1.5.2 肠道抗氧化酶活性测定

用酶标仪(Infinite F50，上海弈朗机电设备有限公司)和ELISA试剂盒(上海酶联生物科技有限公司)测定谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)含量。

1.5.3 肠道炎症和机械屏障相关基因mRNA表达量测定

将-80 ℃保存的回肠和空肠样品在液氮环境下研磨匀浆，采用Trizol法提取肠道组织RNA，并用核酸蛋白仪(ND-2800)测定RNA完整性，采用紫外分光光度计测定RNA浓度，按照TaKaRa反转录试剂盒说明书将所提取的RNA反转录为cDNA。以甘油醛-3-磷酸脱氢酶基因(*GAPDH*)为内参基因，采用2- $\Delta\Delta C_t$ 法计算目的基因mRNA相对表达量。通过NCBI数据库找到相关基因的序列，采用Primer Premier 5.0软件设计荧光定量PCR引物，引物序列及参数见表1。待扩增的目的基因包括*TNF*、*TLR2*、*IL1B*、*IL2*、*IL6*、*TGFB3*、*IFNG*等肠道炎症相关基因及*TJP1*、*TJP2*、*CLDN1*、*CLDN2*、*OCLN*、*MUC2*等机械屏障相关基因。

表1 引物序列

Table 1 Primer sequences

基因	引物序列(5'—3')	扩增产物大小/bp
<i>GAPDH</i>	AGAACATCATCCAGCGT	128
	AGCCTTCACTACCCTCTTG	
<i>TNF</i>	ACCCCTACCCTGTCCAC	228
	GCCAAGTCAACGCTCCTG	
<i>TLR2</i>	GGGGCTCACAGGCAAAATC	102
	AGCAGGGTTCTCAGGTTTACA	
<i>IL1β</i>	ACTGGGCATCAAGGGCTACA	142
	GCTGTCCAGCGGGTAGAAGA	
<i>IL2</i>	CGAAGCAAGCAAACAATTCA	151
	ATGGTGCCAGTGGTAGGAAG	
<i>IL6</i>	CGCCCAGAAATCCCTCCTC	152
	AGGCACTGAAACTCCTGGTC	
<i>TGFB3</i>	CATCGAGCTCTTCCAGATCC	111
	ACATCGAAGGACAGCCACT	
<i>IFNG</i>	TGATGGCGTGAAGAAGGTG	150
	GACTGGCTCCTTTTCCCTTTTG	
<i>TJP1</i>	GGCAAGTTGAAGATGGTGGT	135
	ATGCCAGCGACTGAATTCT	
<i>TJP2</i>	AGCAGACCCTGCTCAACATT	124
	GGGGAGAACGATCTGTTTGA	
<i>CLDN1</i>	GTCTTTGGTGGCGTGATCTT	117
	TCTGGTGTTAACGGGGTGTA	
<i>CLDN2</i>	CTTTGCTTCATCCCACTGGT	86
	TCAAATTTGGTGCTGTCAGG	
<i>OCLN</i>	GCTGAGATGGACAGCATCAA	97
	TGCCACATCCTGGTATTGAG	
<i>MUC2</i>	ACCAAGCAGAAAAGCTGGAA	80
	AAATGGGCCCTCTGAGTTT	

1.5.4 盲肠菌群多样性测序

将-80 ℃保存的盲肠内容物样品送至北京百迈客生物科技有限公司进行16S rRNA测序分析。从盲肠内容物中提取DNA，设计并合成引物，对16S rRNA高变区的V3~V4区域进行PCR扩增，最终在Illumina MiSeq 2500平台对扩增产物进行建库分析。使用QIIME2 2020.6软件中的DADA2方法对序列进行降噪，得到扩增子序列变异体(ASVs)，并基于Silva细菌分类数据库完成ASVs物种注释。根据ASVs分析结果，统计各样本在门、属分类水平的物种信息，绘制微生物群落结构图。分别计算基于丰度的覆盖度估计指数(ACE)、Chao1、Shannon、Simpson、测序覆盖度(Coverage)指数以评估样品α多样性及测序完整性。基于Binary-Jaccard距离矩阵开展主坐标分析(PCoA)和非度量多维尺度分析(NMDS)，解析不同样本间微生物群落结构差异。设置线性判别分析(LDA)值>3、P<0.05的筛选条件，

采用LEfSe分析,探究饲料添加SY后产蛋后期海兰褐蛋鸡盲肠微生物在门至属水平的物种组成差异。

1.6 数据统计分析

试验数据经Excel 2021整理后,运用SPSS 25.0进行单因素方差分析,选用Duncan法进行多重比较。结果用平均值和均值标准误(SEM)表示。

2 结果与分析

2.1 SY对蛋鸡血清免疫指标的影响

由表2可知,与对照组相比,饲料中添加SY显著提高了血清IgA、IgM和IgG水平,各添加组之间差异无统计学意义;饲料中添加SY显著降低了IL-1 β 、IL-2、IL-6和TNF- α 水平。

表2 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡血清免疫指标

Table 2 Serum immune indexes of Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SY							
SY添加量/ (mg·kg ⁻¹)	IgA水平/ (μ g·mL ⁻¹)	IgM水平/ (μ g·mL ⁻¹)	IgG水平/ (g·L ⁻¹)	IL-1 β 水平/ (pg·mL ⁻¹)	IL-2水平/ (pg·mL ⁻¹)	IL-6水平/ (pg·mL ⁻¹)	TNF- α 水平/ (pg·mL ⁻¹)
0.00	781.55b	1 246.53b	13.28b	58.15a	217.48a	26.15a	714.23a
0.15	1 448.65a	2 852.60a	28.84a	40.98d	129.00d	18.23d	453.76c
0.30	1 402.67a	2 461.85a	27.96a	48.48c	183.70bc	21.40c	502.68c
0.45	1 460.17a	2 521.30a	28.25a	53.15b	195.89b	24.03b	609.93b
SEM	75.85	163.58	1.70	1.71	8.95	0.81	27.77
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注:同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.2 SY对蛋鸡肠道抗氧化指标的影响

由表3可知,与对照组相比,饲料中添加0.15、0.30 mg/kg SY显著提高了空肠GSH-Px和SOD活

性;添加SY对回肠GSH-Px、SOD、CAT活性和MDA含量均无显著影响。

表3 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡肠道抗氧化指标

Table 3 Intestinal antioxidant indexes of Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SY					
肠段	SY添加量/(mg·kg ⁻¹)	GSH-Px活性/(nmol·mL ⁻¹)	SOD活性/(U·mL ⁻¹)	CAT活性/(U·mL ⁻¹)	MDA含量/(nmol·L ⁻¹)
回肠	0.00	555.98	328.53	191.25	13.89
	0.15	573.82	352.56	232.97	13.46
	0.30	568.07	373.08	248.55	13.72
	0.45	548.64	344.07	255.30	13.10
	SEM	6.24	8.21	10.39	0.22
	P	0.517	0.299	0.101	0.699
空肠	0.00	493.03b	310.46c	212.83	13.87
	0.15	597.93a	359.63a	241.44	13.36
	0.30	573.06a	355.21ab	236.5	13.62
	0.45	505.82b	320.77bc	233.53	13.69
	SEM	13.4	7.54	6.2	0.17
	P	0.001	0.024	0.426	0.819

注:同列不同字母表示同一肠段处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.3 SY对蛋鸡肠道炎症和机械屏障相关基因mRNA表达量的影响

2.3.1 SY对蛋鸡肠道炎性因子mRNA表达量的影响

由表4可知,与对照组相比,饲料中添加SY对蛋鸡肠道IL1 β 、IL2、IL6、TNF和IFNG mRNA相对表达量均无显著影响;添加SY能够显著提高回肠TLR2 mRNA相对表达量,且随SY添加量的增加,

回肠TLR2 mRNA相对表达量呈现先升高后降低的趋势,其中,0.30 mg/kg SY组达到表达峰值。添加0.45 mg/kg SY显著提高了空肠中TGFB3 mRNA相对表达量。综合肠道TLR2和TGFB3表达规律来看,添加0.30 mg/kg SY既能有效激活回肠黏膜免疫功能,又可避免高剂量诱导的抗炎因子异常表达,在肠道免疫与炎症平衡调控中综合效果更优。

表4 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡肠道炎性因子mRNA的相对表达量

Table 4 Relative mRNA expression of intestinal inflammatory factor in Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SY								
肠段	SY添加量/ (mg·kg ⁻¹)	mRNA相对表达量						
		<i>IL1B</i>	<i>IL2</i>	<i>IL6</i>	<i>TLR2</i>	<i>TNF</i>	<i>TGFB3</i>	<i>IFNG</i>
回肠	0.00	1.020	1.150	1.010	1.000d	1.470	1.050	1.120
	0.15	1.747	1.130	0.820	1.390c	1.500	1.100	2.220
	0.30	2.080	3.110	2.410	2.610a	2.520	1.530	2.870
	0.45	3.150	3.170	2.690	2.510ab	2.810	1.730	5.070
	SEM	0.370	0.490	0.340	0.240	0.240	0.210	0.660
	<i>P</i>	0.267	0.265	0.123	0.008	0.095	0.682	0.191
空肠	0.00	1.050	1.400	0.800	1.510	1.460	1.270b	1.590
	0.15	1.650	1.430	0.730	1.370	1.460	1.280b	1.710
	0.30	0.880	1.990	0.710	1.060	1.870	1.550b	2.350
	0.45	1.430	1.020	0.220	1.570	1.750	4.230a	4.580
	SEM	0.560	0.580	0.230	0.220	0.140	0.470	0.530
	<i>P</i>	0.872	0.765	0.321	0.898	0.739	0.036	0.125

注：同列不同字母表示同一肠段处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.3.2 SY对肠道机械屏障相关基因mRNA表达量的影响

由表5可知，与对照组相比，饲料中添加SY可显著提高回肠*TJP1* mRNA相对表达量；添加0.30、0.45 mg/kg SY时，回肠*OCN* mRNA相对表达量显著升高；添加SY对回肠*TJP1*、*CLDN1*、*CLDN2*及*MUC2* mRNA相对表达量无显著影响。在空肠中，

添加0.30、0.45 mg/kg SY能显著提高*TJP1*、*TJP2*、*CLDN1*、*MUC2* mRNA相对表达量；添加0.30 mg/kg SY则可显著提高*OCN* mRNA相对表达量。这表明当饲料中SY添加量为0.30 mg/kg时，肠道机械屏障相关基因的表达水平上调效果更优。

表5 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡肠道机械屏障基因mRNA的相对表达量

Table 5 Relative mRNA expression of intestinal mechanical barrier genes in Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SY							
肠段	SY添加量/ (mg·kg ⁻¹)	mRNA相对表达量					
		<i>TJP1</i>	<i>TJP2</i>	<i>CLDN1</i>	<i>CLDN2</i>	<i>OCN</i>	<i>MUC2</i>
回肠	0.00	1.38d	1.00	1.01	1.01	1.00cd	1.06
	0.15	3.78c	1.31	1.36	1.45	1.08bc	1.13
	0.30	3.97b	2.28	2.56	1.27	2.61ab	1.09
	0.45	8.00a	1.85	1.97	1.67	4.56a	1.72
	SEM	0.80	0.72	0.26	0.13	0.51	0.94
	<i>P</i>	0.040	0.114	0.164	0.425	0.016	0.393
空肠	0.00	1.00c	1.00c	1.00c	1.00	1.01b	1.01b
	0.15	1.04c	1.04c	1.04c	1.00	1.12b	1.04b
	0.30	1.32a	1.31a	1.32a	1.17	1.60a	1.32a
	0.45	1.26ab	1.26ab	1.26b	0.98	1.06b	1.26a
	SEM	0.04	0.06	0.02	0.03	0.07	0.06
	<i>P</i>	0.005	<0.001	<0.001	0.097	<0.001	0.050

注：同列不同字母表示同一肠段处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.4 SY对蛋鸡盲肠微生物区系的影响

2.4.1 蛋鸡盲肠微生物α多样性分析结果

由表6可知，各组样本Coverage均为0.990，测序深度充足；与对照组相比，SY对蛋鸡盲肠菌群丰富度(ACE、Chao1)和α多样性指数(Shannon、

Simpson)均无显著影响。

2.4.2 蛋鸡盲肠微生物β多样性分析结果

从图1可知，PCoA结果显示，PC1和PC2分别解释了5.54%和5.02%的菌群变异，各组样本点未形成明显的聚类分离；NMDS分析的胁迫值为0.204 8，

表6 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡盲肠菌群的α多样性及测序深度

Table 6 The α diversity and sequencing depth of cecal microbiota in Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SYSY					
添加量/(mg·kg ⁻¹)	ACE指数	Chao1指数	Shannon指数	Simpson指数	Coverage指数
0.00	1 009.880	1 004.010	7.760	0.990	0.990
0.15	959.950	952.730	7.620	0.990	0.990
0.30	1 075.130	1 068.940	7.730	0.990	0.990
0.45	1 019.030	1 013.310	7.630	0.990	0.990
SEM	24.010	24.120	0.060	0.000	0.000
P	0.430	0.427	0.839	0.825	0.716

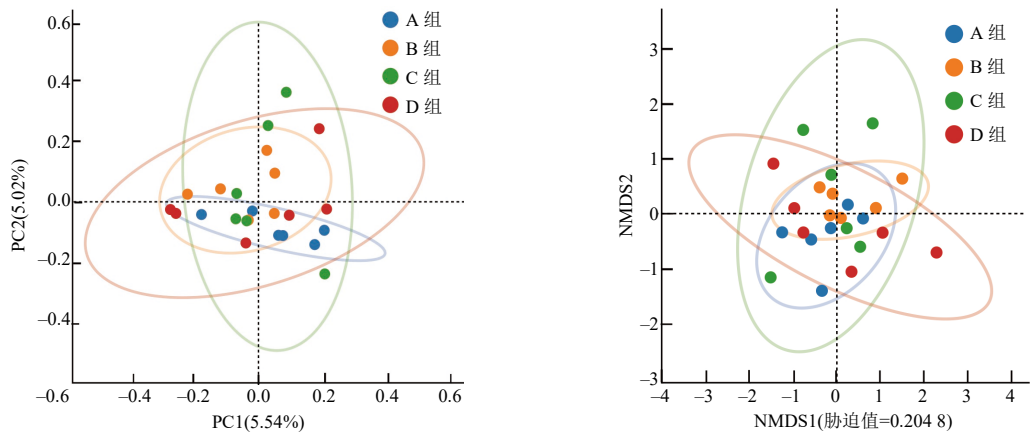


图1 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡盲肠菌群的β多样性

Fig.1 The β diversity of cecal microbiota in Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SY

样本分布同样呈现组间交叉重叠的特征。2种分析结果一致,这表明饲料添加SY处理对鸡肠道菌群的整体结构未产生显著影响。

2.4.3 蛋鸡盲肠微生物群落结构和组成差异分析

由图2可知,A、B、C和D组ASVs数目分别为4 349、4 060、4 787和4 538个,其中共有的ASVs的数目为611个。

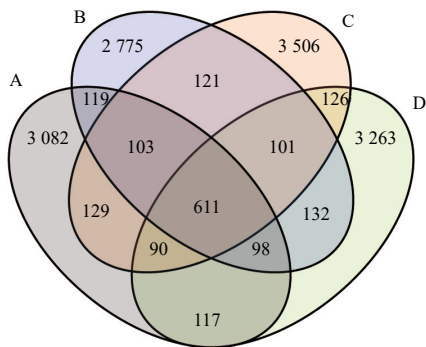


图2 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡盲肠菌群ASVs韦恩图

Fig.2 Venn diagram of cecal microbiota ASVs in Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SY

由表7可知,各组蛋鸡盲肠微生物优势菌门主要为厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes);

与A组相比,D组的脱硫菌门(Desulfobacterota)的相对丰度显著升高。由表8可知,各组蛋鸡盲肠微生物优势菌属主要为理研菌科 RC9 肠道群(Rikenellaceae_RC9_gut_group)、拟杆菌属(Bacteroides)、未分类的拟杆菌目(unclassified_Bacteroidales)和粪杆菌属(Faecalibacterium),各处理组此4种菌属的相对丰度差异均无统计学意义;与A组相比,D组的脱硫弧菌属(Desulfovibrio)的相对丰度显著升高。

LEfSe结果(图3)显示,A组主要富集嗜气斯卡多维亚菌属(Aeriscardovia);B组主要富集菌群集中于螺旋体门(Spirochaetota)演化分支,包含螺旋体纲、螺旋体目、螺旋体科及密螺旋体属(Treponema);C组主要富集菌群为红螯菌目下未分类类群(unclassified-Coribobacteriales);D组主要富集菌群隶属于脱硫菌门(Desulfobacterota)分支,涵盖脱硫弧菌纲、脱硫弧菌目、脱硫弧菌科、脱硫弧菌属(Desulfovibrio),同时富集未分类甲基戊糖梭菌组(unclassified-Clostridium_methylpentosum_group)与DTU089属。

表7 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡盲肠菌群中排名前10的优势菌门相对丰度

分组	相对丰度/%									
	厚壁菌门	拟杆菌门	放线菌门	脱硫菌门	互养菌门	变形菌门	螺旋体门	未分类细菌	弯曲杆菌门	疣微菌门
A	49.320	40.440	2.680	1.750b	1.210	1.010	0.500	0.410	0.170	0.030
B	49.850	39.350	2.310	2.220b	1.620	0.730	0.890	0.360	0.100	0.260
C	51.480	38.290	2.740	1.950b	1.660	0.660	0.030	0.760	0.180	0.470
D	47.220	37.890	2.320	3.930a	2.560	0.730	0.880	0.730	0.720	0.310
SEM	5.807	5.705	0.794	1.332	1.031	0.481	0.879	0.622	0.547	0.521
P	0.677	0.884	0.706	0.008	0.131	0.629	0.288	0.586	0.169	0.561

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

表8 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡盲肠菌群中排名前10的优势菌属相对丰度

分组	相对丰度/%									
	理研菌科 RC9肠道群	拟杆 菌属	未分类 拟杆菌目	粪杆 菌属	考拉 杆菌属	扭链瘤胃 球菌群	乳杆 菌属	脱硫 弧菌属	毛梭 菌属	利乳杆 菌属
A	14.770	8.900	5.550	5.070	3.420	3.370	2.500	1.720b	2.330	1.820
B	17.170	7.930	4.770	5.580	4.500	2.570	0.900	2.120b	2.030	1.220
C	13.170	9.530	5.720	3.570	3.230	2.950	4.800	1.900b	2.420	3.230
D	12.030	9.150	5.600	4.200	5.250	3.170	1.400	3.830a	2.480	1.300
SEM	4.000	2.390	2.350	2.370	2.240	1.210	0.040	1.300	0.670	1.950
P	0.121	0.716	0.907	0.486	0.375	0.722	0.285	0.008	0.693	0.255

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

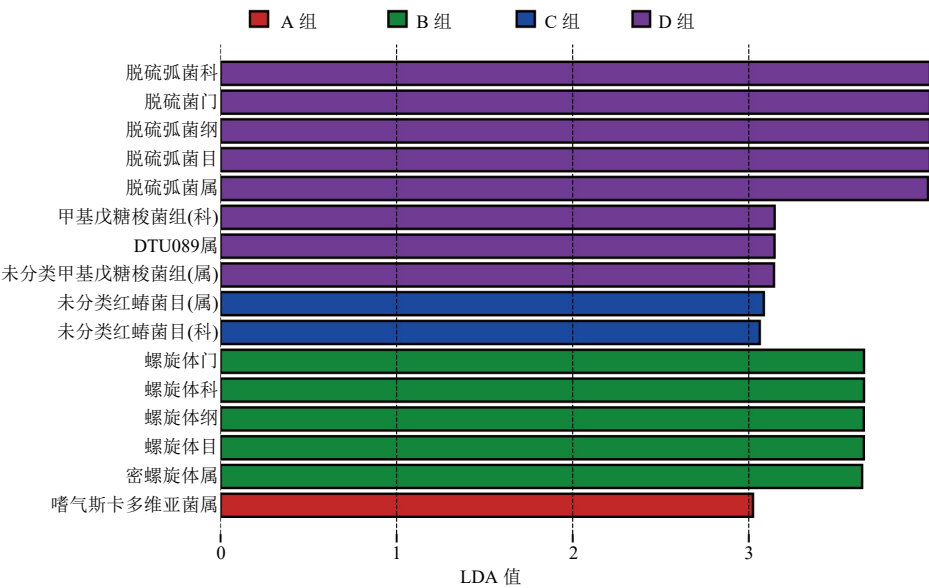


图3 饲料中添加SY的海兰褐蛋鸡盲肠菌群的差异丰度物种

Fig. 3 Differential abundant species of cecal microbiota in Hy-Line Brown laying hens fed diets supplemented with SY

3 讨论

血清免疫指标可以反映动物的生理状况和免疫状态，从而判断动物是否处于免疫应激状态^[13]。硒可以刺激淋巴细胞的增殖和分化，提高动物机体细胞因子及免疫球蛋白的含量，进而提高机体免疫力^[14]。杨清丽等^[15]研究发现，饲料中添加0.4 mg/kg

纳米硒，第42天时血清中IgM、IgA含量显著高于对照组的，分别提高了17.00%、20.30%。夏雨婷等^[16]研究发现，饲料中添加0.4 g/kg SY可显著提高山羊血清中IgG、IgA和IgM含量。管晓萌^[17]研究发现，饲料中添加0.384 mg/kg SY显著提高蛋鸡血清中IgG和IgA的含量。本研究结果表明，添加0.15、0.30、0.45 mg/kg SY试验组血清IgM、IgA、IgG水平均显

著高于对照组的。这表明饲料中添加SY可以促进血清中免疫球蛋白的生成,提高蛋鸡的免疫力。血清中促炎免疫因子含量的高低,反映了蛋鸡产蛋高峰后期的免疫应答状态^[18-19]。本研究中,饲料中添加SY均显著降低了血清中IL-1 β 、IL-2、IL-6、TNF- α 水平,这表明SY具有抑制促炎因子产生的作用。由此可见,饲料中添加SY可以提高蛋鸡的免疫力。

抗氧化能力是衡量机体清除自由基、抵御氧化应激的重要指标,对于维护细胞功能和机体健康至关重要。蛋鸡在生产过程中会产生具有高度氧化性的中间产物,如活性氧(ROS)自由基^[20]。SY在动物肠道中以GSH-Px、硫氧还蛋白还原酶(Trx R)等硒蛋白的形式发挥其抗氧化功能^[21],硒含量的高低将影响机体GSH-Px等酶的活性^[22]。GE等^[23]研究表明,SY可以提高抗氧化信号通路因子的表达水平,进而提高动物机体的抗氧化能力。李欣等^[24]研究发现,饲料中添加SY组的白羽肉鸡血清中SOD水平均显著高于对照组的,添加0.3 mg/kg SY组的GSH-Px活性显著高于对照组的。TONG等^[25]研究发现,在肉鸡饲料中添加0.4 mg/kg SY显著提高了SOD、GSH-Px活性。HAN等^[26]研究发现,饲料中添加0.30 mg/kg SY能够显著提高蛋鸡血清和肝脏中GSH-Px、SOD活性。本研究结果表明,饲料添加0.15、0.30 mg/kg SY显著提高了空肠GSH-Px和SOD活性,与上述研究结果一致。由此可见,饲料中添加SY能够增强蛋鸡肠道的抗氧化能力。

肠道是消化吸收的关键部位,也是机体的最大免疫器官,肠道黏膜屏障对健康至关重要^[27-28]。该屏障包含免疫细胞、抗体及细胞因子等,细胞因子可反映机体免疫状态,分为促炎与抗炎两类^[29]。两类因子水平失衡,会引发肠道炎症、损伤肠道健康等^[30]。ZHANG等^[31]研究发现,饲料中添加硒可以提高肠道对炎症反应的拮抗能力,从而提高动物的免疫力。LUO等^[32]研究表明,纳米硒可以通过阻滞MAPK/NF- κ B信号通路,缓解BDE-209诱发的肠道炎症,进而降低蛋鸡肠道IL-1 β 、IL-2、IL-6和IL-17含量。CHEN等^[33]研究表明,日粮添加纳米硒可调控NLRP3信号通路,下调IL-1 β 等促炎因子表达,进而缓解鸡肠道炎症反应,改善肠道健康状态。本研究结果表明,饲料中添加适量SY显著提高了产蛋高峰后期蛋鸡回肠TLR2 mRNA表达量和空肠TGF- β 3

mRNA的表达量,这表明饲料中添加SY对肠道抗炎因子的表达具有促进作用。

机械屏障是肠黏膜屏障的核心组成部分,依靠完整的肠黏膜上皮细胞及细胞间的紧密连接,发挥肠道防御和免疫保护作用^[34]。在一定范围内,紧密连接蛋白表达上调可促进肠道紧密连接结构稳定。邱小宇等^[35]研究表明,饲料中添加0.2 mg/kg SY显著提高了猪肠道组织中TJP1 mRNA表达量,且CLDN1和OCLN mRNA表达量也有所增加。XUE等^[36]研究表明,硒缺乏会降低紧密连接因子TJP1、TJP2和OCLN mRNA表达量。本研究结果表明,饲料中添加适量SY显著提高了回肠、空肠中TJP1、OCLN mRNA表达量及空肠中TJP2、CLDN1、MUC2 mRNA表达量。综上所述,SY可以提高蛋鸡肠道紧密连接蛋白和抗炎因子的mRNA表达量,进而增强肠道的免疫功能,缓解肠道炎症。

肠道微生物屏障是肠道免疫的重要组成部分,是由大量细菌和真菌等构成的一道屏障^[30]。动物肠道细菌可分为有害菌、有益菌以及中性菌^[30]。研究发现,日粮中添加膳食补充剂可调控菌群结构^[37]。而微量元素作为饲料添加剂可能会影响肠道微生物群的多样性^[38]。范彧等^[39]和辛可启等^[40]研究发现,SY可调节动物肠道菌群结构,改善肠道健康。陈冬梅等^[41]研究表明,当饲料中的硒不足以满足动物生产所需时,肠道菌群结构将受到严重的影响,肠道菌群多样性减少。KASAIKINA等^[42]研究发现,通过对小鼠饲喂不同剂量的含硒饲料,与少硒和足硒饮食相比,富硒饮食增加了小鼠体内的微生物种类。AL-QUWAIE^[43]研究发现,纳米硒可以有效降低肠道中的有害菌数量、增加有益菌数量,从而改善肉鸡的生长性能。ALAGAWANY等^[37]和REDA等^[44]研究发现,饲料添加0.4 g/kg纳米硒,鹌鹑盲肠中的乳酸菌数量显著高于对照组的。张佳鑫等^[45]研究发现,饲料中添加SY能够缓解氧化应激对肉鸡肠道造成的负面影响。刘红露等^[46]研究发现,面包酵母硒不但能够增强肉鸡的抗氧化能力,还能够改善肉鸡肠道的菌群结构。本研究结果显示,试验组与对照组鸡肠道中的微生物 α 多样性的差异无统计学意义,这表明SY对肠道菌群结构干扰较小。大量研究表明,家禽肠道的优势菌门为厚壁菌门和拟杆菌门^[47]。拟杆菌门中的细菌可以在肠道中进行厌氧

发酵并合成短链脂肪酸,因此,盲肠中富含拟杆菌门的个体能够更好地利用食物中的营养物质^[48]。本研究的结果与其基本一致,优势菌门主要为厚壁菌门、拟杆菌门。理研菌科RC9肠道群作为一种有益菌,在消化饲料方面有重要作用^[49]。Desulfobacterota为硫酸盐还原菌门,其成员可利用H₂还原肠道中的硫酸盐产生H₂S,而过量H₂S会对肠道内的微生物产生抑制作用,破坏肠道微生物平衡^[50]。另外,DTU089隶属于梭菌科的梭菌属,它能协调多种生理功能,优化肠道环境及维护肠道健康。综上,饲料中添加SY对蛋鸡盲肠菌群α多样性及整体群落结构无明显扰动,仅可选择性调控少数菌群相对丰度;0.30 mg/kg SY可在不改变菌群整体稳态的前提下,兼顾提升机体免疫能力与抗氧化功能,综合适配性更佳。

4 结论

本研究结果表明,在饲料中添加SY可提高产蛋高峰后期海兰褐蛋鸡肠道抗氧化、免疫性能,对肠道微生物菌群结构无显著影响;本试验条件下,SY的适宜添加量为0.30 mg/kg。

参考文献:

- [1] 潘翠玲,黄克和,赵玉鑫,等.不同硒源和水平对蛋鸡脾脏硒含量及免疫功能的影响[J].畜牧兽医学报,2008,39(11):1523-1529.
- [2] 胡俊茹,袁夕宸,黄文,等.基于转录组分析不同硒源调节黄颡鱼适应低温应激的信号通路及关键基因[J].动物营养学报,2021,33(8):4662-4674.
- [3] 袁丽君,袁林喜,尹雪斌,等.硒的生理功能、摄入现状与对策研究进展[J].生物技术进展,2016,6(6):396-405.
- [4] SURAI P F, KOCHISH I I. Nutritional modulation of the antioxidant capacities in poultry: the case of selenium[J]. Poultry Science, 2019, 98(10): 4231-4239.
- [5] 陈彦霖,范艳丽.硒的生物学功能及富硒食品的研究进展[J].河北农业科学,2008,12(9):99-100,139.
- [6] ZHAI Q X, CEN S, LI P, et al. Effects of dietary selenium supplementation on intestinal barrier and immune responses associated with its modulation of gut microbiota[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2018, 5(12): 724-730.
- [7] 李燕,牟天铭,苗洒洒,等.微量矿物元素硒对畜禽生产性能和产品质量影响的研究进展[J].动物营养学报,2023,35(7):4191-4199.
- [8] 贺淼,张新,廖灿青,等.酵母硒对海兰褐商品代蛋鸡产蛋性能、蛋硒沉积和硒利用率的影响[J].中国饲料,2020(5):113-117.
- [9] 苏晓菲.3种硒源在蛋鸡饲料中的有效性评价[J].山西农业科学,2018,46(9):1528-1531.
- [10] 范秋丽,蒋守群,林厦菁,等.维生素E和不同来源硒对1~21日龄黄羽肉鸡生长性能和肠道功能的影响[J].饲料研究,2018,41(5):39-44.
- [11] WANG Y X, ZHAN X A, ZHANG X W, et al. Comparison of different forms of dietary selenium supplementation on growth performance, meat quality, selenium deposition, and antioxidant property in broilers[J]. Biological Trace Element Research, 2011, 143(1): 261-273.
- [12] 朱敬文,虎新林,金鑫,等.酵母硒对产蛋高峰后期蛋鸡生产性能、蛋品质、血清生殖激素、肠道形态及卵巢相关基因表达的影响[J].动物营养学报,2025,37(5):3068-3081.
- [13] 唐佳希,邱月琴,叶国豪,等.饲料添加甜叶菊绿原酸对育肥猪生长性能、肉品质、免疫功能和抗氧化能力的影响[J].动物营养学报,2025,37(1):250-260.
- [14] 靳二辉,周金星,任曼,等.酵母硒和硼联合添加对肉鸡免疫器官组织结构及免疫功能的影响[J].浙江农业学报,2017,29(11):1783-1795.
- [15] 杨清丽,彭豫东,曲湘勇,等.纳米硒对产蛋鸡生产性能、血清免疫和生化指标及蛋黄中硒含量的影响[J].动物营养学报,2017,29(1):280-289.
- [16] 夏雨婷,万永杰,姜志洋,等.日粮添加酵母硒对夏季湖羊血液指标和睾丸发育及基因表达的影响[J].南京农业大学学报,2022,45(4):752-760.
- [17] 管晓萌.姜黄素与酵母硒对蛋鸡生产性能、蛋品质和血清指标的影响[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2023.
- [18] WANG W H, KANG R F, LIU M L, et al. Effects of different selenium sources on the laying performance, egg quality, antioxidant, and immune responses of laying hens under normal and cyclic high temperatures[J]. Animals, 2022, 12(8): 1006.
- [19] 张龙飞,李建伟,李俊,等.饲料中添加薏苡米糠对蛋鸡生产性能、肠道健康和免疫功能的影响[J].动物营养学报,2025,37(3):1673-1686.
- [20] JOMOVA K, RAPTOVA R, ALOMAR S Y, et al. Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: chronic diseases and aging[J]. Archives of Toxicology, 2023, 97(10): 2499-2574.
- [21] 方热军,杨凯丽.硒的抗氧化和免疫作用及其代谢调控途径[J].饲料工业,2018,39(23):1-7.
- [22] 李丽伟,马梦梦,刘会超,等.不同硒源对肉鸡生长性能、组织硒含量、肠道抗氧化及菌群结构的影响[J].中国畜牧杂志,2024,60(2):282-292.
- [23] GE J, GUO K, ZHANG C, et al. Comparison of nanoparticle-selenium, selenium-enriched yeast and sodium selenite on the alleviation of cadmium-induced inflammation via NF-κB/IκB pathway in heart[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145442.
- [24] 李欣,李文超,付玉洁,等.酵母硒对肉鸡生长性能、屠宰性能、肉品质和抗氧化性能的影响[J].畜牧与兽

- 医, 2024, 56(8): 26–31.
- [25] TONG C, LI P, YU L H, et al. Selenium-rich yeast attenuates ochratoxin a-induced small intestinal injury in broiler chickens by activating the Nrf2 pathway and inhibiting NF-KB activation[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 66: 103784.
- [26] HAN X J, QIN P, LI W X, et al. Effect of sodium selenite and selenium yeast on performance, egg quality, antioxidant capacity, and selenium deposition of laying hens[J]. *Poultry Science*, 2017, 96(11): 3973–3980.
- [27] 杨健涛, 王强刚, 杨小军. 肠道微生物调控肉鸡肠道黏膜屏障的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2025, 37(1): 15–21.
- [28] PETERSON L W, ARTIS D. Intestinal epithelial cells: regulators of barrier function and immune homeostasis[J]. *Nature Reviews Immunology*, 2014, 14(3): 141–153.
- [29] 钱旺, 王宝维, 张名爱, 等. 饲料添加糖萼素和植物乳杆菌对肉鹅免疫功能、肠道形态和肠道菌群结构的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(5): 3024–3034.
- [30] 方满新, 胡威, 刘犇. 微量元素硒对动物肠道健康的影响及其调控机制[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(6): 3425–3437.
- [31] ZHANG L, FENG L, JIANG W D, et al. Vitamin a deficiency suppresses fish immune function with differences in different intestinal segments: the role of transcriptional factor NF- κ B and P38 mitogen-activated protein kinase signalling pathways[J]. *The British Journal of Nutrition*, 2017, 117(1): 67–82.
- [32] LUO D L, TANG X Y, WANG Y X, et al. Selenium deficiency exacerbated Bisphenol A-induced intestinal toxicity in chickens: apoptosis and cell cycle arrest mediated by ROS/P53[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 913: 169730.
- [33] CHEN Y H, WU W, ZHOU H J, et al. Selenium nanoparticles improved intestinal health through modulation of the NLRP3 signaling pathway[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 907386.
- [34] 李悦. 解淀粉芽孢杆菌对宫内发育迟缓断奶仔猪肠道损伤的修复及其机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [35] 邱小宇, 周晓容, 王琪, 等. 日粮中补充酵母硒对荣昌商品猪肠道屏障和肠道菌群的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2024, 60(3): 247–255.
- [36] XUE Y, WANG H H, TIAN B W, et al. Selenium deficiency promotes the expression of LncRNA-MORC3, activating NLRP3-Caspase-1/IL-1 β signaling to induce inflammatory damage and disrupt tight junctions in piglets[J]. *Biological Trace Element Research*, 2023, 201(5): 2365–2376.
- [37] ALAGAWANY M, QATTAN S Y A, ATTIA Y A, et al. Use of chemical nano-selenium as an antibacterial and antifungal agent in quail diets and its effect on growth, carcasses, antioxidant, immunity and caecal microbes[J]. *Animals*, 2021, 11(11): 3027.
- [38] REDA F M, EL-SAADONY M T, ELNESR S S, et al. Effect of dietary supplementation of biological curcumin nanoparticles on growth and carcass traits, antioxidant status, immunity and caecal microbiota of Japanese quails[J]. *Animals*, 2020, 10(5): 754.
- [39] 范戔, 解林奇, 郝薇, 等. 微生态制剂、多酚和酵母硒对仔猪生产性能和肠道菌群的影响[J]. *饲料与畜牧*, 2017(15): 27–32.
- [40] 辛可启, 聂泽健, 万敏艳, 等. 有机硒对肉仔鸡生长性能和肠道微生物区系的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(5): 31–38, 46.
- [41] 陈冬梅, 吴博, 杨文庆. 硒营养状态对大鼠肠道菌群结构及炎症的影响[J]. *中国微生态学杂志*, 2019, 31(3): 291–296.
- [42] KASAIKINA M V, KRAVTSOVA M A, LEE B C, et al. Dietary selenium affects host selenoproteome expression by influencing the gut microbiota[J]. *FASEB Journal*, 2011, 25(7): 2492–2499.
- [43] AL-QUWAIE D A. The influence of bacterial selenium nanoparticles biosynthesized by *Bacillus subtilis* DA20 on blood constituents, growth performance, carcass traits, and gut microbiota of broiler chickens[J]. *Poultry Science*, 2023, 102(9): 102848.
- [44] REDA F M, ALAGAWANY M, SALAH A S, et al. Biological selenium nanoparticles in quail nutrition: biosynthesis and its impact on performance, carcass, blood chemistry, and cecal microbiota[J]. *Biological Trace Element Research*, 2024, 202(9): 4191–4202.
- [45] 张佳鑫, 陈继发. 酵母硒对氧化应激肉鸡盲肠菌群的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(1): 107–113.
- [46] 刘红露, 范磊, 戴茜茜, 等. 面包酵母硒与酪酸梭菌制剂对肉鸡生长、抗氧化和肠道菌群的影响[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(9): 1529–1534.
- [47] HUANG P, ZHANG Y, XIAO K P, et al. The chicken gut metagenome and the modulatory effects of plant-derived benzylisoquinoline alkaloids[J]. *Microbiome*, 2018, 6(1): 211.
- [48] KOH A, DE VADDER F, KOVATCHEVA-DATCHARY P, et al. From dietary fiber to host physiology: short-chain fatty acids as key bacterial metabolites[J]. *Cell*, 2016, 165(6): 1332–1345.
- [49] ZHANG J, SHI H T, WANG Y J, et al. Effect of dietary forage to concentrate ratios on dynamic profile changes and interactions of ruminal microbiota and metabolites in Holstein heifers[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 2206.
- [50] 张亚楠, 魏单平, 韩瑞丽, 等. 高产期不同产蛋水平蛋鸡肠道微生物群落特征[J]. *中国兽医学报*, 2017, 37(6): 1179–1185.

责任编辑: 邹慧玲