

饲料中镉对蛋鸡的毒性效应研究

张娟¹ 李浪¹ 刘光芒¹ 王建萍¹ 林燕¹ 白世平¹ 张克英¹
张军民² 赵青余² 吴彩梅^{1*}

(1.四川农业大学动物营养研究所,四川省农业部动物抗病营养与饲料重点实验室,成都 611130;

2.中国农业科学院北京畜牧兽医研究所,北京 100193)

摘要: 本试验旨在研究饲料中镉对蛋鸡生产性能、蛋品质、抗氧化指标、血浆生化指标、组织病理改变的毒性效应。选取40周龄产蛋高峰期的健康罗曼粉壳蛋鸡150只,随机分为5组,每组3个重复,每个重复10只鸡。对照组饲喂基础饲料,试验组饲喂在基础饲料中分别添加10、30、50、70 mg/kg 镉[实际添加物氧化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)]的试验饲料。试验期8周,分为试验前期(1~4周)和试验后期(5~8周)。结果表明:1)与对照组相比,试验全期,10 mg/kg 组平均日采食量升高,但差异不显著($P>0.05$),30~70 mg/kg 组随镉添加量的增加而降低,70 mg/kg 组显著低于对照组($P<0.05$);试验后期(5~8周)平均日采食量显著低于试验前期(1~4周)($P<0.05$)。与对照组相比,试验全期,产蛋率随镉添加量的增加而降低,10、30 mg/kg 组间差异不显著($P>0.05$),50、70 mg/kg 组显著降低($P<0.05$)。2)与对照组相比,试验全期,10 mg/kg 组蛋壳强度、蛋白高度升高,但差异不显著($P>0.05$),30~70 mg/kg 组随镉添加量的增加蛋壳强度显著降低($P<0.05$),蛋白高度有降低趋势($P>0.05$);试验后期(5~8周)哈夫单位显著低于试验前期(1~4周)($P<0.05$)。3)肝脏、肾脏、卵巢中还原型谷胱甘肽(GSH)含量和总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性随镉添加量的增加呈线性下降($P<0.05$);与对照组相比,10 mg/kg 组输卵管谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、T-SOD活性和还原型谷胱甘肽(GSH)含量显著升高($P<0.05$),但30~70 mg/kg 组低于10 mg/kg 组($P<0.05$);10 mg/kg 组卵巢丙二醛(MDA)含量降低($P>0.05$),但30~70 mg/kg 组显著高于10 mg/kg 组($P<0.05$)。4)与对照组相比,10 mg/kg 组血浆甘油三酯(TG)含量显著升高($P<0.05$),30~70 mg/kg 组随镉添加量的增加而降低($P<0.05$);血浆白蛋白(ALB)含量随镉添加量的增加呈线性降低($P<0.05$);50、70 mg/kg 组的血浆谷草转氨酶(AST)活性显著高于其他组($P<0.05$)。5)与对照组相比,4个镉添加组的肝脏、肾脏、输卵管发生了不同程度的病理学改变;50、70 mg/kg 组组织病理评分显著高于对照组和10~30 mg/kg 组($P<0.05$)。在本试验条件下,蛋鸡饲料中10 mg/kg 镉可提高蛋鸡采食量及蛋壳、蛋白品质,减轻输卵管氧化应激,但可引起肝脏、肾脏、输卵管发生一定程度病理改变,引起肝脏氧化应激和血液生化指标的改变。而蛋鸡饲料中30、50、70 mg/kg 镉降低了蛋鸡采食量、产蛋率和蛋品质,引起蛋鸡产生氧化应激和血液生化指标的改变,造成了肝脏、肾脏和输卵管病理改变。

关键词: 镉;蛋鸡;生产性能;蛋品质;血浆生化指标;抗氧化;组织病理

中图分类号:S831

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2020)06-2650-13

收稿日期:2019-12-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAD13B05)

作者简介:张娟(1994—),女,重庆万州人,硕士研究生,从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: 996022986@qq.com

* 通信作者:吴彩梅,副教授,硕士生导师,E-mail: zhuomuniao278@163.com

镉是环境和食品中常见的污染物^[1]。大量研究表明,饲料原料、配合饲料及鸡蛋中镉污染严重,且饲料途径是鸡蛋镉污染的主要来源^[2-3],因此,科研工作者在这方面做了大量的研究。Olgun等^[4]研究发现,5 mg/kg 饲料镉[氧化镉(CdCl_2)]暴露12周后蛋鸡产蛋率和蛋品质降低,镉对蛋鸡产生了一定毒性作用。但Leach等^[5]研究发现,3 mg/kg饲料镉[硫酸镉(CdSO_4)]暴露12周后提高了蛋鸡生产性能。Olgun等^[4]研究发现,与对照组相比,45 mg/kg 饲料镉(CdCl_2)暴露12周后,蛋鸡产蛋率降为18.81%,镉对蛋鸡毒性作用大。而陈大伟等^[6]研究发现,50 mg/L 饮水途径镉(CdCl_2)暴露8周后蛋鸡产蛋率降低为76.00%;Olgun^[7]研究发现,40 mg/kg 饲料镉(CdCl_2)暴露10周后鹌鹑产蛋率降低为66.77%,镉对蛋鸡、鹌鹑毒性作用较小。孙涛等^[8]研究发现,饲料中5、10 mg/kg 镉(CdCl_2)并未降低蛋鸡的蛋品质,未对蛋鸡产生较大毒性作用;而Yang等^[9]研究发现,饲料中210 mg/kg的镉(CdCl_2)对蛋鸡毒性大,但该剂量已接近镉的半数致死量218.44 mg/kg^[10],该研究中镉的添加量以及对蛋鸡产生的毒性作用已严重脱离生产实际。不同形式、不同暴露量的镉对家禽的生产性能、蛋品质、抗氧化指标、血液生化指标、组织病理改变的影响研究结果不尽相同。因此,本试验综合以上学者的研究结果及本课题组前期的研究结果^[11-12],结合生产实际,以产蛋高峰期蛋鸡为研究对象,通过饲料途径添加0、10、30、50、70 mg/kg 镉(CdCl_2),研究饲料中镉对蛋鸡的生产性能、蛋品质、抗氧化指标、血浆生化指标和组织病理学改变的影响,旨在系统探究饲料中镉的不同暴露量对蛋鸡的毒性效应,为蛋鸡安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 主要试验设备

实验室超纯水系统(MILLIPORE, Millipore 公司,美国);蛋品质分析仪(EMT-5200, TOU-HOKURHYTHM 公司,日本);酶标仪(SPECTRA MAX 190, Molecular Devices 公司,美国);全自动生化分析仪(Automatic Analyzer 7020, AHIMAD-ZU 公司,日本);万分之一电子天平(CP-224s, Sartorius 公司,德国);数码三目摄像显微镜

(BA400Digital, 麦克奥迪实业集团有限公司)。

1.1.2 主要试验试剂

氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, AR);生化、抗氧化指标测定试剂盒(南京建成生物工程研究所);超纯水(18.2M $\Omega \cdot \text{cm}$);苏木素染液(北京百灵威科技有限公司)。

1.2 试验设计及饲料

试验选择40周龄产蛋高峰期的健康粉壳罗曼蛋鸡150只,随机分为5组,每组3个重复,每个重复10只鸡。对照组饲喂玉米-豆粕型基础饲料,其组成及营养水平见表1。试验组饲喂在基础饲料中分别添加10、30、50、70 mg/kg 镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)的试验饲料。各组饲料中镉含量的实测值分别为(0.29±0.00)、(8.72±0.98)、(27.69±1.35)、(46.87±1.70)、(66.52±2.81) mg/kg(蛋鸡饮水镉实测值为0.06 $\mu\text{g}/\text{L}$)。试验前期对蛋鸡预饲1周,预试期各组饲喂基础饲料,并对各组的蛋鸡产蛋率进行调整,确保正式试验开始时各组间产蛋率无显著差异($P>0.05$),试验期8周。

表1 基础饲料组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

| 项目 Items | 含量 Content |
|---|------------|
| 原料 Ingredients | |
| 玉米 Corn | 63.70 |
| 豆粕 Soybean meal | 24.00 |
| 大豆油 Soybean oil | 1.30 |
| DL-蛋氨酸 DL-Met | 0.14 |
| 碳酸钙 CaCO_3 | 8.66 |
| 磷酸氢钙 $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 1.16 |
| 食盐 NaCl | 0.35 |
| 氯化胆碱 Choline chloride | 0.16 |
| 预混料 Premix ¹⁾ | 0.53 |
| 合计 Total | 100.00 |
| 营养水平 Nutrient levels ²⁾ | |
| 代谢能 ME/(MJ/kg) | 11.22 |
| 粗蛋白质 CP | 15.73 |
| 钙 Ca | 3.65 |
| 有效磷 AP | 0.32 |
| 赖氨酸 Lys | 0.79 |
| 蛋氨酸 Met | 0.36 |

续表 1

| 项目 Items | 含量 Content |
|------------------|------------|
| 半胱氨酸 Cys | 0.25 |
| 蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys | 0.62 |

1) 预混料为每千克饲料提供 Premix provided the following per kg of the diet: $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 60 mg, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 8 mg, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 60 mg, $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 80 mg, KI 0.35 mg, Na_2SeO_3 0.30 mg, VA 10 000 IU, VD 2 500 IU, VE 6.25 IU, VK_3 1.25 mg, VB_1 0.50 mg, VB_2 4.00 mg, VB_6 1.5 mg, VB_{12} 0.007 5 mg, 泛酸 pantothenic 6.25 mg, 烟酸 niacin 8.75 mg, 生物素 biotin 0.012 5 mg, 叶酸 folic acid 0.125 mg。

2) 代谢能为计算值,其余为实测值。ME was a calculated value, while the others were measured values.

1.3 饲养管理

试验在四川农业大学动物营养研究所试验场进行。采用 3 层全阶梯笼养,自然光照与人工照明相结合,保证每天 16 h 光照,舍内温度控制在 25 ℃ 左右,鸡舍内采用机械通风和自然通风进行通风和换气,试验全期自由饮水,每天喂食 2 次 (09:00、13:00)。定期打扫鸡舍卫生,按常规方法进行消毒及免疫。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生产性能

记录每天产蛋数、产蛋重、破壳蛋数、不合格蛋数,每周统计采食量,并计算 1~4 周、5~8 周和整个试验期不合格蛋率、平均日采食量、料蛋比、产蛋率、平均日产蛋重。

1.4.2 蛋品质

试验期间,每周末每组每个重复采集 3 枚外形完好的鸡蛋 (9 枚/组),用于测定蛋白高度、哈夫单位、蛋壳厚度、蛋壳强度、蛋黄色度等,蛋品质当日测定 (16:00 采集,19:00 测定)。以上指标均采用蛋品质分析仪测定。

1.4.3 抗氧化指标

试验第 8 周末,从每个重复中随机选取 3 只鸡 (每组 9 只,共 45 只),禁食 12 h 后采用肝素钠抗凝管翅静脉采血,3 000 r/min 离心 10 min 后吸出上清血浆,装入 1.5 mL EP 管中,-20 ℃ 保存。采血后断头法处死,取其肝脏、肾脏、卵巢、输卵管,-20 ℃ 保存。

血浆、肝脏、肾脏、卵巢、输卵管中谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px)、谷胱甘肽硫转移酶 (GST)、

总超氧化物歧化酶 (T-SOD) 活性及还原型谷胱甘肽 (GSH)、丙二醛 (MDA) 含量均采用试剂盒,使用酶标仪测定,具体步骤按试剂盒说明书进行。

1.4.4 血浆生化指标

试验第 8 周末,从每个重复中随机选取 3 只鸡 (每组 9 只,共 45 只),禁食 12 h 后采用肝素钠抗凝管翅静脉采血,分离血浆,-20 ℃ 保存。

血浆中甘油三酯 (TG)、总胆固醇 (TC)、高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C)、葡萄糖 (GLU)、总蛋白 (TP)、白蛋白 (ALB)、尿素氮 (UREA) 含量及谷丙转氨酶 (ALT)、谷草转氨酶 (AST) 活性均采用试剂盒,使用生化分析仪测定,具体步骤按试剂盒说明书进行。

1.4.5 组织病理学观察

试验第 8 周末,每个重复取肝脏、肾脏、输卵管组织 3 个样本,每组 9 个样本。样品用中性 2.5% 磷酸盐缓冲液 (PBS) 固定。将固定的标本经水洗、透明、浸蜡、包埋等处理后,制成 5 μm 的切片,伊红-苏木精 (HE) 染色,在光学显微镜下观察组织病理学改变并计分,计分标准采用 4 级法,分别为轻微 (0 分)、轻度 (1 分)、中度 (2 分)、重度 (3 分),并计算各组织每组中病理损伤程度平均分 (平均分计算方法为:各组织每组中不同病理损伤程度得分乘以相应蛋鸡数量,累加后除以蛋鸡总数)^[13]。

1.5 数据统计

先将数据录入 Excel 2013 进行初步整理,再采用 SAS 9.4 软件的 two-way ANOVA 程序对生产性能、蛋品质数据进行以镉添加量、处理时间为主效应以及二者互作的分析^[14],采用 one-way ANOVA 程序对其他数据进行单因素方差分析,组间采用 Duncan 氏法进行多重比较,对抗氧化指标和血浆生化指标的数据进行回归分析。结果用平均值和均值标准误 (SEM) 表示,以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 饲料中镉对蛋鸡生产性能的影响

生产性能结果见表 2。试验全期,与对照组相比,10 mg/kg 组平均日采食量增加 ($P > 0.05$),而 30~70 mg/kg 组平均日采食量随镉添加量的增加而降低,呈剂量效应关系,70 mg/kg 组显著降低了

19.23% ($P < 0.05$); 随处理时间的增加, 蛋鸡平均日采食量显著下降 ($P < 0.05$), 有时间效应关系, 试验后期 (5~8周) 较试验前期 (1~4周) 下降了 7.59% ($P < 0.05$)。试验全期, 10、30 mg/kg 组间产蛋率无显著差异 ($P > 0.05$), 与对照组相比, 50、70 mg/kg 组产蛋率显著下降 ($P < 0.05$), 70 mg/kg 组降低了 25.47%。随处理时间的增加, 产蛋率有下降趋势, 呈剂量-时间的显著交互效应关系 ($P < 0.05$), 试验后期 (5~8周) 低于试验前期 (1~4周), 但差异不显著 ($P > 0.05$)。试验全期, 与对照组相比, 10、30 mg/kg 组间平均日产蛋重无显著差异 ($P > 0.05$), 50、70 mg/kg 组显著下降 ($P < 0.05$); 随处理时间的增加, 平均日产蛋重显著下降 ($P < 0.05$), 有剂量-时间的显著效应关系 ($P < 0.05$)。各组间不合格蛋率、料蛋比差异不显著 ($P > 0.05$), 但随镉添加量的增加, 料蛋比有上升趋势 ($P > 0.05$)。

2.2 饲料中镉对蛋鸡蛋品质的影响

蛋品质结果见表 3。各组间蛋壳厚度、蛋壳重、哈夫单位、蛋黄重、蛋黄比重差异不显著 ($P > 0.05$)。试验后期 (5~8周) 蛋壳厚度和哈夫单位显著低于试验前期 (1~4周) ($P < 0.05$), 且哈夫单位有时间效应关系。试验全期, 与对照组相比, 10 mg/kg 组蛋壳强度和蛋白高度有上升趋势, 但差异不显著 ($P > 0.05$), 30~70 mg/kg 组的蛋壳强度显著低于 10 mg/kg 组 ($P < 0.05$), 而蛋白高度随镉添加量的增加有降低趋势, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。10、30 mg/kg 组蛋黄色度变化不显著 ($P > 0.05$), 50、70 mg/kg 组显著低于对照组 ($P < 0.05$), 有剂量效应关系, 试验后期 (5~8周) 蛋黄色度显著低于试验前期 (1~4周) ($P < 0.05$), 有时间效应关系。

2.3 饲料中镉对蛋鸡血浆、肝脏、肾脏、卵巢、输卵管抗氧化指标的影响

抗氧化指标结果见表 4。蛋鸡血浆 GSH-Px、GST 活性和 MDA 含量随镉添加量的增加呈二次曲线变化 ($P < 0.05$)。30、50、70 mg/kg 组血浆 GSH-Px 活性显著高于对照组 ($P < 0.05$), 血浆 MDA 含量随镉添加量的增加而显著增加 ($P < 0.05$), 70 mg/kg 组血浆 GST 活性显著高于对照组 ($P < 0.05$)。

肝脏中 GSH-Px 活性呈二次曲线变化, 10 mg/kg 组高于对照组, 30、50 mg/kg 组低于对照

组, 但差异不显著 ($P > 0.05$); 肝脏 MDA 含量呈二次曲线变化, 镉添加组肝脏 MDA 含量显著高于对照组 ($P < 0.05$); 肝脏 GSH 含量和 T-SOD 活性呈线性降低, 与对照组相比, 10~50 mg/kg 组肝脏 GSH 含量、T-SOD 活性差异不显著 ($P > 0.05$), 70 mg/kg 组显著低于对照组 ($P < 0.05$)。

肾脏中 MDA 含量呈二次曲线变化, 30 mg/kg 组显著高于对照组 ($P < 0.05$); 肾脏 GSH 含量和 T-SOD 活性呈线性降低, 与对照组相比, 50、70 mg/kg 组肝脏 GSH 含量显著降低 ($P < 0.05$), 10、30、70 mg/kg 组肝脏 T-SOD 活性显著降低 ($P < 0.05$)。

与对照组相比, 输卵管 10 mg/kg 组 GSH-Px、T-SOD 活性显著升高, 30、70 mg/kg 组显著下降 ($P < 0.05$); 输卵管 GSH 和 MDA 含量呈线性变化趋势, 70 mg/kg 组输卵管 GSH 含量显著低于对照组 ($P < 0.05$), 各组输卵管 MDA 含量较对照组分别显著升高了 44.44%、66.67%、51.85%、107.41% ($P < 0.05$)。

卵巢的 GSH 含量和 T-SOD 活性呈线性降低, MDA 含量呈线性升高, 与对照组相比, 镉添加组卵巢 GSH 含量显著降低 ($P < 0.05$), 50、70 mg/kg 组卵巢 T-SOD 活性显著降低 ($P < 0.05$), 10 mg/kg 组卵巢 MDA 含量显著降低 ($P < 0.05$), 但 30、50、70 mg/kg 组卵巢 MDA 含量显著升高 ($P < 0.05$), GSH-Px 活性未检出。

2.4 饲料中镉对蛋鸡血浆生化指标的影响

血浆生化结果见表 5。血浆 TG 含量呈二次曲线变化, 10 mg/kg 组显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其他组随镉添加量的增加而降低, 50、70 mg/kg 组显著低于 10 mg/kg 组 ($P < 0.05$)。血浆 HDL-C 含量呈线性升高, 70 mg/kg 组显著高于其他组 ($P < 0.05$)。各组间血浆 LDL-C、GLU、TC 含量差异不显著 ($P > 0.05$), 但血浆 TC 含量随着镉添加量的增加而上升, 相应增加了 46.33%、68.95%、128.81%、203.39%。各组间血浆 TP 含量和 ALT 活性差异不显著 ($P > 0.05$), 10 mg/kg 组血浆 ALT 活性高于对照组, 30~70 mg/kg 组随镉添加量的增加而降低。血浆 ALB 含量随着镉添加量的增加呈线性降低 ($P < 0.05$)。50、70 mg/kg 组血浆 AST 活性显著高于其他组 ($P < 0.05$)。各组间血浆 UREA 含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 2 饲料中镉对蛋鸡生产性能的影响

Table 2 Effects of dietary cadmium on performance in laying hens

| 项目 Items | 试验阶段 Testing stage | 镉添加量 Cadmium supplemental level/(mg/kg) | | | | | SEM | | | 处理时间 Treatment time/weeks | | | P 值 P-value | |
|--|------------------------------|--|---|--|---|---------------------------------------|-------|---------------------|---------------------|------------------------------|----------|---------|------------------|--|
| | | 0(对照 Control) | 10 | 30 | 50 | 70 | SEM | 1~4 | 5~8 | SEM | Cadmium | Time | Cadmium× time | |
| 平均日采食量 Average daily feed intake/g | 1~4 周 5~8 周 全期 Overall | 125.75 119.87 122.81 ^{ab} | 127.02 120.16 123.59 ^a | 125.84 118.33 122.09 ^{ab} | 119.59 111.23 115.41 ^b | 107.90 90.49 99.19 ^c | 2.654 | 121.22 ^a | 112.02 ^b | 1.679 | <0.000 1 | 0.000 9 | 0.554 0 | |
| 料蛋比 Feed to egg ratio | 1~4 周 5~8 周 全期 Overall | 2.06 1.92 1.99 | 2.10 2.02 2.06 | 2.13 2.07 2.10 | 2.22 2.03 2.13 | 2.02 2.37 2.20 | 0.083 | 2.11 | 2.08 | 0.053 | 0.058 0 | 0.737 8 | 0.209 5 | |
| 产蛋率 Laying rate/% | 1~4 周 5~8 周 全期 Overall | 95.74 96.53 96.14 ^a | 94.05 92.60 93.32 ^a | 92.14 88.97 90.56 ^{ab} | 88.98 84.54 83.76 ^b | 80.10 63.19 71.65 ^c | 2.563 | 90.20 | 85.17 | 1.621 | <0.000 1 | 0.0574 | 0.044 1 | |
| 平均日产蛋重 Average daily egg weight/g | 1~4 周 5~8 周 全期 Overall | 61.21 62.33 61.77 ^a | 60.55 59.77 60.16 ^a | 59.15 57.52 58.33 ^{ab} | 54.51 55.02 54.77 ^b | 53.80 40.97 47.38 ^c | 1.375 | 57.84 ^a | 55.12 ^b | 0.869 | <0.000 1 | 0.038 7 | 0.010 5 | |
| 不合格蛋率 Unqualified egg rate/% | 1~4 周 5~8 周 全期 Overall | 0.70 0.25 0.48 | 1.01 2.69 1.85 | 0.73 0.71 0.72 | 2.36 1.74 2.05 | 1.07 1.31 1.19 | 0.518 | 1.17 | 1.34 | 0.327 | 0.177 9 | 0.724 7 | 0.550 6 | |

Cadmium 为镉添加量, Time 为处理时间, Cadmium×time 为镉添加量和处理时间的交互。同行数据肩标不同字母表示差异显著 (P<0.05)。表 3 同。

Cadmium was cadmium supplemental level, Time was treatment time, and Cadmium×time was interaction effect between cadmium supplemental level and treatment time. Values with different letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as Table 3.

表 3 饲料中镉对蛋鸡蛋白质的影响
Table 3 Effects of dietary cadmium on egg quality in laying hens

| 项目 Items | 试验阶段 Testing stage | 镉添加量 Cadmium supplemental level/(mg/kg) | | | | SEM | | 处理时间 Treatment time/weeks | | P 值 P-value | |
|---|----------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------|--|----------------|----------------|----------------|
| | | 0(对照 Control) | 10 | 30 | 50 | 70 | SEM | 1~4 | 5~8 | Cadmium | Time |
| | | | | | | | | | | | |
| 蛋壳厚度 Shell thickness/ mm | 1~4周 5~8周 全期 Overall | 0.29 0.28 0.29 | 0.29 0.29 0.29 | 0.29 0.27 0.28 | 0.29 0.28 0.29 | 0.29 0.28 0.28 | 0.003 | 0.29 ^a 0.28 ^b | 0.200 0.200 | 0.000 0.000 | 0.287 0.287 |
| 蛋壳强度 Shell intensity/ (kg/cm ²) | 1~4周 5~8周 全期 Overall | 3.63 3.50 3.56 ^{ab} | 3.82 3.65 3.73 ^a | 3.57 3.37 3.47 ^b | 3.20 3.27 3.23 ^c | 3.25 3.44 3.15 ^c | 0.078 | 3.49 | 0.002 | 0.481 | 0.360 |
| 蛋白高度 Albumin height/mm | 1~4周 5~8周 全期 Overall | 6.45 6.97 6.71 | 6.40 7.42 6.91 | 6.56 7.15 6.85 | 6.45 6.98 6.71 | 6.11 6.81 6.46 | 0.137 | 6.39 ^b 7.06 ^a | 0.093 | <0.000 | 0.685 |
| 哈夫单位 Haugh unit | 1~4周 5~8周 全期 Overall | 77.83 79.96 78.89 | 77.94 83.91 80.93 | 79.45 82.72 81.09 | 78.66 83.64 81.15 | 75.22 83.40 79.31 | 1.012 | 82.73 ^a 77.82 ^b | 0.364 | <0.000 | 0.285 |
| 蛋黄重 Yolk weight/g | 1~4周 5~8周 全期 Overall | 18.32 18.32 18.32 | 18.04 18.56 18.30 | 19.11 18.53 18.82 | 18.50 17.71 18.11 | 18.19 18.17 18.18 | 0.191 | 18.43 | 0.110 | 0.312 | 0.154 |
| 蛋黄比重 Yolk percentage/% | 1~4周 5~8周 全期 Overall | 27.96 27.78 27.87 | 27.61 27.65 27.63 | 28.38 27.62 28.00 | 27.96 27.98 27.97 | 27.72 28.05 27.88 | 0.188 | 27.93 | 0.665 | 0.513 | 0.348 |
| 蛋黄颜色 Yolk color | 1~4周 5~8周 全期 Overall | 8.97 8.65 8.81 ^a | 8.76 8.68 8.80 ^a | 8.76 8.68 8.72 ^a | 8.57 7.98 8.27 ^b | 8.11 8.14 8.13 ^c | 0.086 | 8.63 ^a 8.42 ^b | <0.000 | 0.000 | 0.365 |

表 4 饲料中镉对蛋鸡抗氧化指标的影响

Table 4 Effects of dietary cadmium on anti-oxidation indicators in laying hens

| 项目 Items | 镉添加量 Cadmium supplemental level/(mg/kg) | | | | | SEM | P 值 P-value | | | |
|----------------|---|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|--------------|-----------------|----------|
| | 0(对照 Control) | 10 | 30 | 50 | 70 | | 处理 Treatment | 线性 Linear | 二次 Quadratic | |
| 血浆 Plasma | 谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mL) | 167.63 ^c | 172.81 ^c | 231.70 ^b | 247.20 ^a | 228.37 ^b | 3.162 | <0.000 1 | <0.000 1 | <0.000 1 |
| | 谷胱甘肽硫转移酶 GST/(U/mL) | 82.21 ^{bc} | 82.70 ^{bc} | 79.01 ^c | 88.73 ^b | 126.56 ^a | 2.454 | <0.000 1 | <0.000 1 | <0.000 1 |
| | 丙二醛 MDA/(nmol/mL) | 4.49 ^d | 6.70 ^c | 10.08 ^b | 10.36 ^b | 11.64 ^a | 0.188 | <0.000 1 | <0.000 1 | <0.000 1 |
| | 总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mL) | 31.85 ^b | 35.57 ^a | 32.27 ^b | 36.57 ^a | 32.05 ^b | 0.676 | 0.000 2 | 0.530 8 | 0.004 5 |
| | 谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot) | 80.70 ^b | 84.33 ^b | 76.38 ^b | 79.70 ^b | 95.27 ^a | 3.091 | 0.008 0 | 0.033 9 | 0.009 5 |
| 肝脏 Liver | 还原型谷胱甘肽 GSH/(nmol/mg prot) | 98.76 ^a | 95.75 ^a | 91.20 ^a | 86.57 ^a | 73.86 ^b | 3.669 | 0.005 5 | 0.000 4 | 0.179 7 |
| | 丙二醛 MDA/(nmol/mg prot) | 0.66 ^c | 1.56 ^{ab} | 1.67 ^a | 1.45 ^b | 1.49 ^b | 0.037 | <0.000 1 | <0.000 1 | <0.000 1 |
| | 总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot) | 161.30 ^a | 147.55 ^{bc} | 158.33 ^{ab} | 150.41 ^{abc} | 140.65 ^c | 3.805 | 0.015 0 | 0.007 2 | 0.476 2 |
| | 谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot) | 218.81 | 175.48 | 210.83 | 207.41 | 188.91 | 10.760 | 0.083 3 | 0.429 8 | 0.787 2 |
| | 还原型谷胱甘肽 GSH/(nmol/mg prot) | 460.99 ^a | 401.37 ^{ab} | 409.09 ^{ab} | 388.81 ^b | 369.82 ^b | 18.587 | 0.034 4 | 0.005 9 | 0.455 5 |
| 肾脏 Kidney | 丙二醛 MDA/(nmol/mg prot) | 0.98 ^a | 1.04 ^a | 0.82 ^b | 0.94 ^{ab} | 1.10 ^a | 0.050 | 0.003 9 | 0.413 1 | 0.010 0 |
| | 总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot) | 150.05 ^a | 131.36 ^b | 124.52 ^b | 144.77 ^a | 127.32 ^b | 2.087 | <0.000 1 | 0.000 7 | 0.003 6 |
| | 谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot) | 70.41 ^c | 108.06 ^a | 44.92 ^e | 86.09 ^b | 60.02 ^d | 2.313 | <0.000 1 | <0.000 1 | 0.013 1 |
| | 还原型谷胱甘肽 GSH/(nmol/mg prot) | 69.28 ^{ab} | 76.69 ^a | 67.77 ^{ab} | 63.72 ^{bc} | 54.29 ^c | 3.006 | 0.004 7 | 0.001 1 | 0.028 3 |
| | 总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot) | 0.27 ^d | 0.39 ^e | 0.45 ^b | 0.41 ^c | 0.56 ^a | 0.013 | <0.000 1 | <0.000 1 | 0.585 5 |
| 输卵管 Oviduct | 丙二醛 MDA/(nmol/mg prot) | 4.42 ^c | 6.10 ^a | 4.30 ^c | 5.23 ^b | 4.13 ^c | 0.147 | <0.000 1 | 0.007 1 | 0.000 2 |
| | 还原型谷胱甘肽 GSH/(nmol/mg prot) | 25.45 ^a | 15.63 ^b | 13.09 ^b | 14.05 ^b | 14.34 ^b | 2.326 | 0.021 3 | 0.008 9 | 0.021 4 |
| | 谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot) | 1.26 ^c | 1.08 ^c | 3.12 ^a | 2.28 ^b | 2.38 ^{ab} | 0.276 | <0.000 1 | 0.000 3 | 0.035 2 |
| | 还原型谷胱甘肽 GSH/(nmol/mg prot) | 142.50 ^a | 134.74 ^a | 125.85 ^a | 87.77 ^b | 73.86 ^b | 7.262 | <0.000 1 | <0.000 1 | 0.140 8 |
| | 总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot) | | | | | | | | | |

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$), while with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same as below.

表 5 饲料中镉对蛋鸡血浆生化指标的影响

Table 5 Effects of dietary cadmium on plasma biochemical indicators in laying hens

| 项目 Items | 镉添加量 Cadmium supplemental level/(mg/kg) | | | | | SEM | P 值 P-value | | |
|-----------------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|-----------------|--------------|-----------------|
| | 0 (对照 Control) | 10 | 30 | 50 | 70 | | 处理 Treatment | 线性 Linear | 二次 Quadratic |
| 甘油三酯 TG/(mmol/L) | 6.98 ^{bc} | 12.22 ^a | 8.78 ^{ab} | 7.15 ^{bc} | 3.54 ^c | 1.582 | 0.005 0 | 0.015 3 | 0.016 1 |
| 总胆固醇 TC/(mmol/L) | 1.77 | 2.59 | 3.93 | 4.05 | 5.37 | 0.284 | 0.184 3 | 0.451 9 | 0.838 6 |
| 高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/(mmol/L) | 0.68 ^b | 0.67 ^b | 0.71 ^b | 0.79 ^a | 1.22 ^a | 0.062 | <0.000 1 | <0.000 1 | 0.000 8 |
| 低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/(mmol/L) | 0.56 | 0.77 | 1.05 | 0.53 | 0.57 | 0.175 | 0.290 3 | 0.661 8 | 0.097 1 |
| 葡萄糖 GLU/(mmol/L) | 5.61 | 5.87 | 6.93 | 6.85 | 5.59 | 0.622 | 0.378 1 | 0.608 7 | 0.098 4 |
| 总蛋白 TP/(g/L) | 54.18 | 67.74 | 59.78 | 65.11 | 54.27 | 6.019 | 0.303 5 | 0.892 8 | 0.147 5 |
| 谷丙转氨酶 ALT/(U/L) | 3.54 | 4.77 | 2.93 | 2.59 | 2.56 | 0.759 | 0.203 8 | 0.093 4 | 0.827 0 |
| 白蛋白 ALB/(g/L) | 23.32 | 22.19 | 21.94 | 20.16 | 19.13 | 1.443 | 0.216 8 | 0.019 9 | 0.818 4 |
| 谷草转氨酶 AST/(U/L) | 185.04 ^b | 180.61 ^b | 171.74 ^b | 250.33 ^a | 265.51 ^a | 18.060 | 0.001 3 | 0.000 2 | 0.078 1 |
| 尿素氮 UREA/(mmol/L) | 0.69 | 0.72 | 0.65 | 0.66 | 0.70 | 0.068 | 0.951 2 | 0.834 1 | 0.697 3 |

2.5 饲料中镉对蛋鸡肝脏、肾脏、输卵管组织病理变化的影响

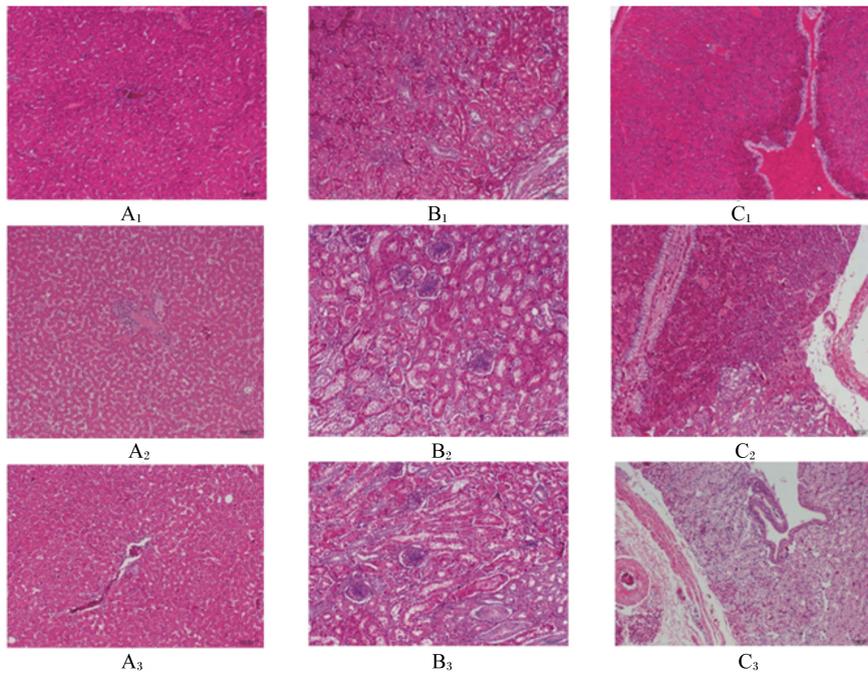
组织病理评分见表 6。50、70 mg/kg 组肝脏评分显著高于对照组 ($P < 0.05$), 50、70 mg/kg 组的肾脏和输卵管评分显著高于其他组 ($P < 0.05$)。组织病理变化程度见图 1。与对照组相比, 蛋鸡肝脏、肾脏、输卵管外观形态均有一定的病理性变化。10、30 mg/kg 组的肝脏、肾脏病变但程度较低, 50 mg/kg 组病变程度加深。70 mg/kg 组肝脏病理中肝小叶分界不明显, 肝窦淤血, 肝细胞呈片

状或局灶性坏死, 可见部分坏死细胞有细胞浸润 (图 1-A₃), 70 mg/kg 组肾脏病理中肾小囊结构基本消失, 部分肾小管上皮细胞严重水肿、脱落, 间质内可见较多的炎细胞浸润, 部分肾小管的形态结构消失, 病变程度最严重 (图 1-B₃)。50 mg/kg 组的输卵管固有层管状腺结构不清晰且局灶性坏死数量增加, 上皮细胞空泡变性、坏死 (图 1-C₂); 70 mg/kg 组腺管上皮空泡化, 纤毛上皮脱落, 固有层局灶性坏死数量增加 (图 1-C₃), 病理改变加重。

表 6 饲料中镉对蛋鸡组织病理评分的影响

Table 6 Effects of dietary cadmium on laying hens' pathological score of tissue

| 项目 Items | 评分 Score | 镉添加量 Cadmium supplemental level/(mg/kg) | | | | | P 值 P-value |
|----------------|-------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | | 0 (对照 Control) | 10 | 30 | 50 | 70 | |
| 肝脏 Liver | 0 分 | 7 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0.008 1 |
| | 1 分 | 2 | 2 | 8 | 6 | 6 | |
| | 2 分 | 0 | 4 | 1 | 2 | 1 | |
| | 3 分 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| | 平均分 | 0.22 ^c | 1.11 ^b | 1.11 ^b | 1.11 ^b | 1.22 ^a | |
| 肾脏 Kidney | 0 分 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.001 8 |
| | 1 分 | 1 | 8 | 9 | 8 | 7 | |
| | 2 分 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | |
| | 3 分 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 平均分 | 0.33 ^c | 1.11 ^b | 1.00 ^b | 1.11 ^b | 1.22 ^a | |
| 输卵管 Oviduct | 0 分 | 5 | 3 | 4 | 3 | 1 | 0.030 5 |
| | 1 分 | 4 | 6 | 4 | 4 | 6 | |
| | 2 分 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | |
| | 3 分 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 平均分 | 0.44 ^d | 0.67 ^c | 0.67 ^c | 0.89 ^b | 1.11 ^a | |



A、B、C 分别代表肝脏、肾脏、输卵管,1、2、3 分别代表对照组、50 mg/kg 组、70 mg/kg 组。

A, B and C represented the liver, kidney and oviduct, respectively, and 1, 2 and 3 represented the control, 50 mg/kg and 70 mg/kg groups, respectively.

图 1 饲料中镉对蛋鸡组织病理变化的影响

Fig.1 Effects of dietary cadmium on laying hens' pathological changes of tissue (100×)

3 讨论

3.1 饲料中镉对蛋鸡生产性能的影响

本试验中蛋鸡平均日采食量随处理时间的增加显著降低,10 mg/kg 组高于对照组,从30 mg/kg 组开始才随镉添加量的升高而降低。Olgun^[7]和孙涛等^[8]研究发现,5 mg/kg 饲料镉可降低蛋用鹌鹑和蛋鸡的采食量。本试验结果与Olgun^[7]、孙涛等^[8]的研究结果不一致的原因可能是镉添加量低于10 mg/kg 时,蛋鸡体内镉的蓄积量少,对机体反而有一定的促进作用;随着饲料中镉添加量的增加以及饲喂时间的延长,蛋鸡体内镉的蓄积量超过了机体的耐受范围,损害了蛋鸡生理机能,从而增强了其对蛋鸡采食量和产蛋量的抑制作用。本试验中蛋鸡的料蛋比随镉添加量的增加有上升趋势,与Czarnecki 等^[15]、Olgun 等^[4,7]研究结果一致。

本试验研究发现,产蛋率随镉添加量增加而降低,10 mg/kg 组开始有降低的趋势,10 ~ 50 mg/kg 组间差异不显著,50 mg/kg 组降低幅度

开始增大,70 mg/kg 组与对照组相比才显著降低,产蛋率仍有 71.65%,降低幅度与 Olgun 等^[4,7]、陈大伟等^[6]、孙涛等^[8]研究结果不一致,其原因可能与镉的添加方式、动物种类或动物年龄的不同有关,具体原因还有待进一步研究。本试验中,镉添加组的不合格蛋率高于对照组可能是由于镉与钙竞争直接抑制细胞对钙的主动转运并损害蛋鸡肾功能,导致 $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ 合成下降而间接影响钙的吸收^[16],造成蛋壳偏薄和易碎。同时镉进入蛋鸡体内后转运到生殖系统内,损害其机能,增加了不合格蛋率,但具体机制还有待研究。另外,平均日产蛋重同时受镉添加量和处理时间影响,可能与平均日采食量、产蛋率的降低及不合格蛋率的升高有关。

3.2 饲料中镉对蛋鸡蛋品质的影响

本试验中蛋壳强度、蛋白高度有先增加(10 mg/kg 组)后降低的趋势,与Olgun 等^[4,7]、Leach 等^[5]、陈大伟等^[6]、孙涛等^[8]、Korénekova 等^[17]的研究结果不一致,饲料镉对蛋鸡哈夫单位影响不显著,但哈夫单位在试验后期下降,与陈大

伟等^[6]、孙涛等^[8]的研究结果也不一致,这可能是低添加量镉提高了蛋鸡的机能反应,而随着镉添加量的增加,二价镉离子(Cd^{2+})干扰其他二价离子如 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 等的代谢,导致蛋壳形成过程中所需要的二价离子不能被有效的吸收利用,导致蛋壳强度降低^[18-19]。随镉添加量的增加和处理时间的延长,蛋鸡体内镉的蓄积量增加,镉的毒性作用增加,从而导致蛋白高度和哈夫单位下降,使鸡蛋贮藏时间变短。本研究中,10 mg/kg 镉可能对蛋品质有提升作用。而50、70 mg/kg 组蛋黄的色度随饲喂时间的增加而降低,可能是随着镉添加量的增加,蛋鸡体内脂质过氧化程度加深,使其对类胡萝卜素吸收率下降,因此蛋黄中色素沉积减少^[6]。哈夫单位和蛋黄颜色的下降都可能与镉暴露引起的氧化应激有关。

3.3 饲料中镉对蛋鸡血浆、肝脏、肾脏、卵巢、输卵管抗氧化指标的影响

动物体内镉的毒性形式分为急性镉中毒和慢性镉中毒,且其毒性机制与氧化损伤密不可分^[20-22]。在现有报道中,镉对部分酶的影响结果不尽相同。本试验中,与对照组相比,血浆、肝脏、输卵管 MDA 含量均随镉添加量的增加而增加,与 Yang 等^[9]、Berzina 等^[23]、代腊等^[24]、孙涛等^[25]、Li 等^[26]、Dawei 等^[27] 研究结果一致;肝脏、肾脏、卵巢的 GSH 含量、T-SOD 活性随镉添加量的增加而降低,与 Yang 等^[9]、Li 等^[26]、Dawei 等^[27] 研究结果一致,表明镉添加量越高对机体的氧化损伤越严重。输卵管 GSH-Px、T-SOD 活性在10 mg/kg 组升高后降低,卵巢 MDA 含量在10 mg/kg 组降低后升高,血浆中各指标均升高,与代腊等^[24]、孙涛等^[25] 研究结果不一致,可能是镉进入蛋鸡体内后引起机体产生机制性保护,促使血液中 GSH-Px、GST、T-SOD 活性不断提高,含量过高的镉通过血液运送至各组织器官时,其通过与活性中心的结合使酶活降低,诱导机体发生脂质过氧化反应。10 mg/kg 镉可能对输卵管有一定的代偿刺激作用,促进性地升高机体内 GSH-Px、T-SOD 活性,当镉含量超过其所能承受的代偿阈值时这些酶的活性受到抑制,并引起输卵管产生氧化应激反应,输卵管是影响蛋清质量的直接器官,输卵管的氧化应激会造成蛋白品质下降,本试验中蛋白高度的变化和抗氧化指标变化趋势一致,说明高添加量的镉对输卵管造成了严重的氧化损伤。由于代偿

刺激作用,10 mg/kg 镉使卵巢 MDA 含量下降,随镉添加量的增加,脂质过氧化程度不断增加,卵巢是影响蛋黄的直接器官,卵巢的氧化应激会导致蛋黄品质下降,本试验中蛋黄色度的变化和抗氧化指标的变化趋势一致,说明高添加量镉对卵巢造成了严重的氧化损伤。

3.4 饲料中镉对蛋鸡血浆生化指标的影响

本试验中,血浆 TC 含量随镉添加量的增加而升高,TC 是反映机体脂质代谢水平的重要指标,血液中镉含量过高可引起 TC 含量升高^[28]。肝脏是合成 TC 的主要器官,表明随着镉添加量的增加,肝脏脂质代谢水平逐渐降低。本试验中,血浆 TG 在10 mg/kg 组时显著升高,而后随镉添加量的增加而降低,表明10 mg/kg 的镉可补偿性促进肝脏的 TG 合成能力,随着镉添加量的增加,其合成能力降低。本试验中,血浆 ALB 含量随镉添加量的增加而降低,血浆 AST 活性先降低后增高,而 ALB 几乎全由肝脏合成,肝脏机能受损后会导致蛋白合成能力下降,可能造成 ALB 合成不足,健康机体的血清中 AST 活性较低,当肝脏受到损伤时,干细胞中的 AST 便释放到血液中^[29],由此表明本试验中蛋鸡肝功能受到了损伤。总体结果表明,饲料中的镉对肝脏产生了毒性效应,50、70 mg/kg 毒性效应显著,与本试验研究中肝脏抗氧化指标的变化一致。

3.5 饲料中镉对蛋鸡肝脏、肾脏和输卵管病理变化的影响

本试验中各组织病理评分变化显著,10、30 mg/kg 组与对照组相比对蛋鸡组织病理影响不显著,与 Vodela 等^[16]、Skoczyńska 等^[30] 研究结果一致。50 mg/kg 组的肾脏组织病理损伤程度与黄纯波^[31] 的25 mg/kg 组的病变程度一致,可能是试验动物不同导致的。本试验中,饲料中添加镉均使肝脏、肾脏、输卵管组织发生病理性改变,50 mg/kg 组病变开始加重。总体病理结果与本试验中血浆生化指标、抗氧化指标结果一致,表明50 mg/kg 以上添加量的镉损害机体功能,70 mg/kg 以上添加量的镉严重损害机体功能。

4 结论

在本试验条件下,饲料中10 mg/kg 镉对提高蛋鸡采食量、蛋壳和蛋白品质,减轻输卵管氧化应激方面有促进作用,但可引起肝脏、肾脏、输卵管

发生一定程度病理改变,引起肝脏氧化应激和血液生化指标的改变。而饲料中 30、50、70 mg/kg 镉降低了蛋鸡采食量、产蛋率和蛋品质,引起了蛋鸡血浆生化指标的变化,使蛋鸡产生了氧化应激反应,导致肝脏、肾脏和输卵管病理性改变。

参考文献:

- [1] GODT J, SCHEIDIG F, GROSSE-SIESTRUP C, et al. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health [J]. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2006, 1: 22.
- [2] 孟君, 赵耀光. 火焰原子光谱法测定饲料和不同种类鸡蛋中的微量元素 [J]. *粮食与饲料工业*, 2014, 4 (4): 54-56, 61.
- [3] 朱建春, 李荣华, 张增强, 等. 陕西规模化猪场猪粪与饲料重金属含量研究 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44 (11): 98-104.
- [4] OLGUN O, BAHTIYARCA Y. Effects of dietary cadmium and boron supplementation on performance, eggshell quality and mineral concentrations of bone in laying hens [J]. *Biological Trace Element Research*, 2015, 167 (1): 56-62.
- [5] LEACH R M, Jr, WANG K W L, BAKER D E. Cadmium and the food chain: the effect of dietary cadmium on tissue composition in chicks and laying hens [J]. *The Journal of Nutrition*, 1979, 109 (3): 437-443.
- [6] 陈大伟, 高玉时, 唐修君, 等. 铅、镉联合暴露对蛋鸡生产性能、蛋品质及鸡蛋中微量元素含量的影响 [J]. *动物营养学报*, 2014, 26 (6): 1616-1623.
- [7] OLGUN O. The effect of dietary cadmium supplementation on performance, egg quality, tibia biomechanical properties and eggshell and bone mineralisation in laying quails [J]. *Animal*, 2015, 9 (8): 1298-1303.
- [8] 孙涛, 代腊, 唐飞江, 等. 饲料中镉对产蛋鸡生产性能、抗氧化功能及其体内残留的影响 [J]. *畜牧兽医学报*, 2012, 43 (2): 232-241.
- [9] YANG S H, ZHANG Z W, HE J B, et al. Ovarian toxicity induced by dietary cadmium in hen [J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, 148 (1): 53-60.
- [10] WANG S, XU Z, YIN H, et al. Alleviation mechanisms of selenium on cadmium-spiked in chicken ovarian tissue: perspectives from autophagy and energy metabolism [J]. *Biological Trace Element Research*, 2018, 186 (2): 521-528.
- [11] 吴彩梅, 罗成, 张娟, 等. 四川、山东、河北省鸡蛋中重金属 Cd、Cr、Pb 的溯源分析 [J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36 (4): 535-541.
- [12] 罗成. 我国四川、山东、河北省蛋鸡配合饲料中镉、铬、铅污染程度评估 [D]. 硕士学位论文. 成都: 四川农业大学.
- [13] ZENG Q F, BAI P, WANG J P, et al. The response of meat ducks from 15 to 35 d of age to gossypol from cottonseed meal [J]. *Poultry Science*, 2015, 94 (6): 1277-1286.
- [14] XIE T, BAI S P, ZHANG K Y, et al. Effects of *Lonicera confusa* and *Astragali Radix* extracts supplementation on egg production performance, egg quality, sensory evaluation, and antioxidative parameters of laying hens during the late laying period [J]. *Poultry Science*, 2019, 98 (10): 4838-4847.
- [15] CZARNECKI G L, BAKER D H. Tolerance of the chick to excess dietary cadmium as influenced by dietary cysteine and by experimental infection with *Eimeria acervulina* [J]. *Journal of Animal Science*, 1982, 54 (5): 983-988.
- [16] VODELA J K, LENZ S D, RENDEN J A, et al. Drinking water contaminants (arsenic, cadmium, lead, benzene, and trichloroethylene). 2. Effects on reproductive performance, egg quality, and embryo toxicity in broiler breeders [J]. *Poultry Science*, 1997, 76 (11): 1493-1500.
- [17] KORÉNEKOVA B, SKALICKÁ M, NAD P, et al. Effects of cadmium and zinc on the quality of quail's eggs. [J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 116 (1): 103-109.
- [18] BAIN M M. Recent advances in the assessment of eggshell quality and their future application [J]. *World's Poultry Science Journal*, 2005, 61 (2): 268-277.
- [19] RAHMAN M S, SASANAMI T, MORI M. Effects of cadmium administration on reproductive performance of Japanese quail (*Coturnix japonica*) [J]. *The Journal of Poultry Science*, 2007, 44 (1): 92-97.
- [20] KAZANTZIS G. Cadmium, osteoporosis and calcium metabolism [J]. *Biometals*, 2004, 17 (5): 493-498.
- [21] YANG J M, ARNUSH M, CHEN Q Y, et al. Cadmium-induced damage to primary cultures of rat Leydig cells [J]. *Reproductive Toxicology*, 2003, 17 (5): 553-560.
- [22] LÓPEZ E, ARCE C, OSET-GASQUE M J, et al. Cadmium induces reactive oxygen species generation and lipid peroxidation in cortical neurons in culture [J].

- Free Radical Biology and Medicine, 2006, 40 (6) : 940-951.
- [23] BERZINA N, MARKOV S, ISAJEVS S, et al. Cadmium-induced enteropathy in domestic cocks: a biochemical and histological study after subchronic exposure [J]. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2007, 101 (1) : 29-34.
- [24] 代腊, 朱莎, 孙涛, 等. 饲料中镉含量对蛋鸡生产性能及抗氧化功能的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2012, 38 (3) : 35-40.
- [25] 孙涛, 代腊, 唐飞江, 等. 饲料中镉对产蛋鸡生产性能、抗氧化功能及其体内残留的影响 [J]. 畜牧兽医学报, 2012, 43 (2) : 232-241.
- [26] LI J H, XING L, ZHANG R X. Effects of Se and Cd co-treatment on the morphology, oxidative stress, and ion concentrations in the ovaries of laying hens [J]. Biological Trace Element Research, 2018, 183 (1) : 156-163.
- [27] DAWEI C, PU J H, TANG X J, et al. Effects of exposure to lead and cadmium on the oxidative damage of livers in laying hens [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2014 (5) : 249-253.
- [28] LARREGLE E V, VARAS S M, OLIVEROS L B, et al. Lipid metabolism in liver of rat exposed to cadmium [J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46 (5) : 1786-1792.
- [29] ABDELMOTTALEB S A, MOUSSA S, ALAAMER A, et al. Effect of zinc on the rheological properties of blood serum of cadmium treated rats [J]. General Physiology and Biophysics, 2016, 35 (3) : 71-75.
- [30] SKOCZYŃSKA A, WRÓBEL J, ANDRZEJAK R. Lead-cadmium interaction effect on the responsiveness of rat mesenteric vessels to norepinephrine and angiotensin II [J]. Toxicology, 2001, 162 (3) : 157-170.
- [31] 黄纯波. 饲料镉对生长育肥猪的毒性效应及其组织蓄积规律研究 [D]. 硕士学位论文. 成都: 四川农业大学, 2017.

Toxic Effects of Dietary Cadmium on Laying Hens

ZHANG Juan¹ LI Lang¹ LIU Guangmang¹ WANG Jianping¹ LIN Yan¹ BAI Shiping¹
ZHANG Keying¹ ZHANG Junmin² ZHAO Qingyu² WU Caimei^{1*}

(1. Key Laboratory for Animal Disease-Resistance Nutrition and Feedstuffs of China Ministry of Agriculture and Sichuan Province, Institute of Animal Nutrition, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Institute of Animal Sciences of CAAS, Beijing 100193, China)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the toxic effects of dietary cadmium on performance, egg quality, antioxidant, plasma biochemical indicators and histopathology of laying hens. A total of 150 (40-week-old) healthy Lohmann pink-shell laying hens at the peak of egg production were randomly divided into 5 groups, 3 replicates in each group, 10 chickens per replicate: control group fed a basal diet, experimental groups fed the basal diet supplemented with 10, 30, 50 and 70 mg/kg cadmium ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$). The period of the experiment was 8 weeks, which included a pre-test period (1 to 4 weeks) and a post-test period (5 to 8 weeks). The results showed as follows: 1) compared with the control group, in the whole period of the test, the average daily feed intake (ADFI) in 10 mg/kg group enhanced, but the difference was not significant ($P>0.05$), and reduced with the increase of cadmium supplemental level in the 30 to 70 mg/kg groups, the ADFI in 70 mg/kg group was significantly lower than that in the control group ($P<0.05$); the ADFI in post-test period (5 to 8 weeks) was significantly lower than that in pre-test period (1 to 4 weeks) ($P<0.05$). Compared with the control group, the laying rate decreased with the increase of cadmium supplemental level, and there was no significant difference between the 10 and 30 mg/kg groups ($P>0.05$), and that in the 50 and 70 mg/kg groups had a significant decrease in the whole period of the test ($P<0.05$). 2) In the whole period of the test, compared with the control group, the shell intensity and albumin height in the 10 mg/kg group in-

creased ($P>0.05$), the shell intensity significantly decreased with the increase of cadmium supplemental level ($P<0.05$) and the albumin height had a decreasing tendency in the 30 to 70 mg/kg groups ($P>0.05$). The huff unit in the post-test period (5 to 8 weeks) was significantly lower than that in pre-test period (1 to 4 weeks) ($P<0.05$). 3) The glutathione (GSH) content and total superoxide dismutase (T-SOD) activity in the liver, kidney and ovary decreased linearly with the increase of cadmium supplemental level ($P<0.05$). Compared with the control group, the activities of glutathion peroxidase (GSH-Px), T-SOD and GSH content in oviduct in the 10 mg/kg group significantly increased ($P<0.05$), furthermore, the 30 to 70 mg/kg groups was significantly lower than the 10 mg/kg group ($P<0.05$). The content of malonaldehyde (MDA) in ovaries in the 10 mg/kg group significantly decreased ($P>0.05$), and the 30 to 70 mg/kg groups were significantly higher than 10 mg/kg group ($P<0.05$). 4) Compared with the control group, the content of triglyceride (TG) in plasma in the 10 mg/kg group significantly increased ($P<0.05$), and the 30 to 70 mg/kg groups decreased with the increase of cadmium supplemental level ($P<0.05$). The plasma albumin (ALB) content decreased linearly with the increase of cadmium supplemental level ($P>0.05$). The plasma glutamic oxalacetic transaminase (AST) activity in the 50 mg/kg and 70 mg/kg groups were significantly higher than that in other groups ($P<0.05$). 5) Compared with the control group, the liver, kidney and oviduct in the four treatment groups adding cadmium had different pathological changes. The pathological score in 50 mg/kg 70 mg/kg groups were significantly higher than those in control group and 10 to 30 mg/kg groups ($P<0.05$). Therefore, under the conditions of the present experiment, 10 mg/kg dietary cadmium can enhance feed intake, eggshell and albumin quality, and alleviate oxidative stress of oviduct, however, it can cause pathological changes in the liver, kidney and oviduct to a certain extent, causing oxidative stress in the liver and changes in blood biochemical indexes. The 30 to 70 mg/kg cadmium reduce feed intake, egg production rate and egg quality, and resulting in oxidative stress and changes in blood biochemical indexes and pathological changes in liver, kidney and oviduct. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(6):2650-2662]

Key words: cadmium; laying hens; performance; egg quality; plasma biochemical indicators; antioxidant; histopathology