

饲粮铜水平对育成期雄性水貂铜元素代谢和血清生化指标的影响

吴学壮^{1,2}, 杨颖³, 刘汇涛³, 高秀华^{2*}, 杨福合³, 戴四发¹, 邢秀梅³

(1. 安徽科技学院动物科学学院, 蚌埠 233100; 2. 中国农业科学院饲料研究所, 农业部饲料生物技术重点实验室, 北京 100081; 3. 中国农业科学院特产研究所, 长春 130112)

摘要: 旨在探讨饲粮不同铜水平对雄性水貂铜代谢、血清微量元素含量、血脂和血清抗氧化指标的影响。本研究选取(60±3)日龄的健康雌性水貂 80 只, 随机分为 8 个组, 每组 10 个重复, 分别饲喂在基础日粮中添加 0(Control 组)、4(Cu4 组)、8(Cu8 组)、16(Cu16 组)、32(Cu32 组)、64(Cu64 组)、128(Cu128 组)和 256 mg·kg⁻¹(Cu256 组)铜的试验饲粮。试验预试期 7 d, 正试期 45 d。正试期开始第 30 天, 每组选择 8 只水貂进行铜元素代谢指标测定; 饲养试验结束后, 采集血液样品进行血清生化指标测定。结果表明: 1) 水貂摄入铜、粪铜、尿铜和铜在体内的沉积量随日粮铜水平增加呈一次线性和二次曲线极显著增加(linear, quadratic, $P < 0.01$)。2) 水貂血清铜含量随日粮铜水平的增加而升高(linear, quadratic, $P < 0.01$)。3) 水貂血清总胆固醇(TC, linear, quadratic, $P < 0.01$)和甘油三酯(TG, linear, $P < 0.05$; quadratic, $P < 0.01$)含量随日粮铜水平的增加呈线性和二次曲线降低。4) 水貂血清铜蓝蛋白(CER)和铜锌超氧化物歧化酶(Cu-Zn SOD)活性随日粮铜水平的增加呈二次曲线先增加后降低(quadratic, $P < 0.01$)。综合以上指标可见, 水貂日粮添加铜可以增加体内铜的沉积量和血清铜含量, 同时能够降低血清胆固醇和甘油三酯水平, 提高抗氧化酶活性。

关键词: 水貂; 铜; 血清生化指标; 脂类代谢

中图分类号: S829.95

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2018)04-0746-08

Effects of Dietary Copper Levels on Copper Metabolism and Serum Biochemical Indices in Late Growing Male Mink

WU Xue-zhuang^{1,2}, YANG Ying³, LIU Hui-tao³, GAO Xiu-hua^{2*},
YANG Fu-he³, DAI Si-fa¹, XING Xiu-mei³

(1. College of Animal Science, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233100, China;
2. Key Laboratory for Feed Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Special Animal and Plant Sciences of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130112, China)

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of dietary copper levels on copper balance, serum trace element contents, serum lipid metabolism parameters and serum antioxidant indices in male mink. Eighty healthy (60±3) day-old male minks were randomly divided into 8 groups with 10 minks in each group. 0(Control), 4(Cu4), 8(Cu8), 16(Cu16), 32(Cu32), 64(Cu64), 128(Cu128) and 256 mg·kg⁻¹(Cu256) of copper levels were added in basic diet, respec-

收稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然资源平台专项“特种经济动物种质资源共享平台”(2005DKA21102); 安徽省自然科学基金(1708085QC74); 安徽科技学院高层次人才引进项目(DKYJ201701); 农业部饲料生物技术重点实验室开放课题资助; 安徽科技学院重点学科建设项目(AKZDXK2015B03)

作者简介: 吴学壮(1985-), 男, 山东聊城人, 博士, 主要从事新型饲料资源及动物营养调控研究, E-mail: wuxuezhuang@126.com

* 通信作者: 高秀华, 研究员, 博士生导师, E-mail: xiuhuagao@126.com

tively. The pre-test period lasted for 7 days, and the trial lasted for 45 days. On day 30 of the trail, eight animals from each treatment group were selected randomly to determine copper balance. Blood samples were collected from mink before sacrifice to measure the serum biochemical indices. The results showed that: 1) Intake of copper, fecal copper, urinary copper, retention copper had a linear and quadratic ($P < 0.01$) increase with the increasing dietary copper level. 2) There was a linear and quadratic ($P < 0.01$) effect of dietary copper level on plasma Cu concentrations. 3) Serum TC (linear, quadratic, $P < 0.01$), TG (linear, $P < 0.05$; quadratic, $P < 0.01$) contents were decreased with the increasing dietary copper level. 4) There was a quadratic ($P < 0.01$) effect of dietary copper level on plasma ceruloplasmin concentration and Cu-Zn superoxide dismutase activity. These results indicate that supplementing Cu in the diet can increase Cu retention and plasma Cu concentrations, but reduce serum TC and TG levels, and improve antioxidant enzyme activity.

Key words: mink; copper; serum biochemical indices; lipid metabolism

铜是动物机体不可缺少的元素之一。研究表明,铜参与动物体造血功能及铁的代谢,又对生物氧化还原过程、色素沉积和脂类代谢起重要作用^[1-3]。铜是铜锌超氧化物歧化酶、酪氨酸酶、铜蓝蛋白、赖氨酰氧化酶、细胞色素氧化酶的重要组成部分。大量动物试验已经明确,随着日粮铜添加量的增加,血清铜浓度在一定范围内随着饲料中铜添加量的增加而升高,铜和锌在动物肠道吸收过程中存在拮抗作用^[4],但是日粮铜水平对动物血清铁、锌浓度是否也存在影响,有待进一步进行科学确定。研究表明,铜与血脂代谢存在密切相关,动物日粮添加铜能够影响动物体内脂类代谢,主要表现在日粮添加铜可以降低血浆胆固醇和甘油三酯水平^[5-7]。但铜对动物生长调节和脂质代谢调控的机理仍不清楚,有待进一步研究。水貂是严格的肉食性动物,其消化道仅约为其体长的4倍,食物在消化道中停留时间比较短,约2~3 h,育成期水貂生长发育迅速,所以,水貂需要采食高能量、高蛋白的饲料来满足其需要,对微量元素的需要量也较其他动物高^[8]。

目前国内外关于饲料中铜水平对水貂血清生化指标和铜锌铁元素代谢的报道相对较少。水貂铜的营养有待进一步研究。因此,本研究通过饲料中添加不同水平的铜,探讨其对育成期水貂铜代谢、血清Cu、Zn、Fe含量和血清中蛋白质代谢指标、脂类指标及相关酶活性的影响,旨在揭示铜在水貂体内的营养作用调控机制,为铜在水貂生产中的合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与日粮

试验在“农业部长白山野生生物资源重点野外科学观测试验站”的毛皮动物生产基地开展。选取健康、体重相近(60 ± 3)日龄的雄性水貂80只。采用单因素随机试验设计,将80只试验水貂随机分为8个组,每组10个重复,每个重复1只。在基础饲料中分别添加0(Control组)、4(Cu4组)、8(Cu8组)、16(Cu16组)、32(Cu32组)、64(Cu64组)、128(Cu128组)和 $256 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cu256组)的铜(以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为铜源)配成8种试验饲料。试验水貂均单笼($40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$)饲养,每日07:30与15:30各饲喂1次,自由采食,自由饮水,常规免疫。试验预试期7 d,正试期45 d。水貂目前没有统一的饲养标准,参照国内近几年水貂营养需要量的研究,配制水貂基础日粮,其组成及营养水平见表1。

1.2 样品采集

消化代谢试验样品采集:消化代谢试验于正试期开始30 d后开始,每组挑选8只体重相近的水貂进行消化代谢试验,水貂消化代谢试验时间为4 d,采用全收粪法。每天收集的尿液中每100 mL加入10 mL的10%硫酸溶液,将试验期间收集的尿液混合均匀后取样,加4滴甲苯用于防腐,保存于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 备用。每天收集的粪便称重后按鲜重的5%加入10%硫酸溶液,并加少量甲苯防腐,保存于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$,消化代谢试验结束后,将试验期间收集的粪混合均匀后取样,其中粪样先在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀菌2 h,然后降到 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,磨碎过40目筛,制成风干样本,

以备实验室分析。

表 1 基础日粮组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of basal diet (DM basis)

原料 Ingredient	含量 Content	营养水平 Nutrient level	含量 Content
膨化玉米 Extruded corn	36.2	代谢能/(MJ·kg ⁻¹) ME ²⁾	15.19
豆粕 Soybean meal	7.0	干物质 Dry matter	94.41
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	8.0	粗蛋白质 Crude protein	34.62
鱼粉 Fish meal	14.0	粗脂肪 Crude fat	14.03
肉骨粉 Bone meat meal	18.0	碳水化合物 Carbohydrate	42.12
乳酪粉 Cheese meal	5.0	灰分 Ash	9.24
豆油 Soybean oil	8.0	赖氨酸 Lysine	1.64
羽毛粉 Feather meal	1.0	蛋氨酸 Methionine	0.88
血粉 Blood meal	1.0	半胱氨酸 Cysteine	0.36
预混料 Premix ¹⁾	1.0	钙 Calcium	3.10
L-赖氨酸 L-Lysine	0.3	总磷 Total phosphorus	2.07
DL-蛋氨酸 DL-Methionine	0.3	铜/(mg·kg ⁻¹) Cu	7.63
食盐 NaCl	0.2		
总计 Total	100.0		

¹⁾ 每千克预混料含有: 维生素 A 醇 1 000 000 IU; 胆钙化醇 200 000 IU; 生育酚醋酸酯 6 000 IU; 硫胺素 600 mg; 核黄素 800 mg; 钴胺素 10 mg; 维生素 K 100 mg; 抗坏血酸 40 000 mg; 烟酸 4 000 mg; 泛酸 1 200 mg; 生物素 20 mg; 叶酸 80 mg; 胆碱 30 000 mg; 铁 8 200 mg; 锰 1 200 mg; 锌 5 200 mg; 碘 50 mg; 硒 20 mg; 钴 50 mg。²⁾ 代谢能计算根据 NRC(1982)

¹⁾ Contained the following per kg of premix composition: vitamin A palmitate 1 000 000 IU; vitamin D cholecalciferol 200 000 IU; vitamin E acetate 6 000 IU; vitamin B₁ thiamine hydrochloride 600 mg; vitamin B₂ riboflavin 800 mg; vitamin B₁₂ cobalamin 10 mg; vitamin K menadione 100 mg; vitamin C sodium ascorbate 40 000 mg; nicotinic acid 4 000 mg; vitamin B₃ niacin 1 200 mg; biotin 20 mg; folic acid 80 mg; choline 30 000 mg; Fe 8 200 mg; Mn 1 200 mg; Zn 5 200 mg; I 50 mg; Se 20 mg; Co 50 mg. ²⁾ The metabolisable energy content of feed was calculated on the basis of NRC(1982)

血液样品采集: 饲养试验结束后, 每组分别选取 8 只水貂, 趾尖采血 8~10 mL, 置于促凝采血管和抗凝采血管各半。转移至实验室, 3 500 r·min⁻¹, 4 ℃ 离心 10 min, 将分离出的血清和血浆分装在 1.5 mL 的 Eppendorf 管中, 置于 -80 ℃ 中保存, 备用。

1.3 测定指标与方法

样品中铜、锌和铁含量的测定: 用移液器取 2 mL 血清样品于 100 mL 锥形瓶中, 加 10 mL 优级纯硝酸, 封口放置 2 h, 置于电炉上低温消煮至近干, 将溶液无损失地转移到 10 mL 容量瓶中, 使用 VARIAN SpectrAA-240 原子吸收分光光度计进行 Cu、Zn 和 Fe 含量的测定。

血清脂类指标及血清抗氧化指标: GPO-PAP 法检测血清甘油三酯 (Triglyceride, TG) 含量; COD-PAP 法检测血清总胆固醇 (Total cholesterol, TC) 含量; 选择性清除法测定低密度脂蛋白胆固醇

(Low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇 (High density lipoprotein cholesterol, HDL-C) 含量。以上指标均用试剂盒测定, 试剂盒购自中生北控生物科技股份有限公司。

铜锌超氧化物歧化酶 (Cu-Zn SOD) 活性采用抽提法测定, 血清铜蓝蛋白 (CER) 活性采比色法测定, 以上血清指标测试均采用南京建成试剂盒通过分光光度计测定。

1.4 数据分析

试验数据采用 SAS 9.13 软件 GLM 程序单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行差异显著性检验, 处理间差异采用邓肯氏法 (Duncan) 多重比较进行检验; 采用 SAS 9.13 软件 REG 程序, 以日粮铜含量为自变量, 各种指标为效应因子, 进行一次线性二次曲线回归分析。P < 0.05 为差异显著, P < 0.01 为差异极显著。

2 结果

2.1 日粮铜水平对水貂铜代谢的影响

日粮铜水平对水貂铜代谢的影响见表 2。水貂

摄入铜、粪铜、尿铜和铜在体内的沉积量随日粮铜水平增加呈一次线性和二次曲线极显著增加(linear, quadratic, $P < 0.01$)。

表 2 日粮铜水平对育成期水貂铜代谢的影响

Table 2 Effects of dietary copper levels on Cu metabolism of late growing mink

mg · d⁻¹

项目 Item	摄入铜 Intake Cu	粪排泄铜 Fecal Cu	尿排泄铜 Urinary Cu	沉积铜 Retention Cu
Control	0.78 ^{Ee}	0.47 ^{Ef}	0.002 ^{Ef}	0.31 ^{Cd}
Cu4	1.13 ^{Ee}	0.71 ^{Eef}	3.33 ^{ABCbc}	0.41 ^{Cd}
Cu8	1.63 ^{DEe}	0.99 ^{Eef}	3.69 ^{ABbc}	0.60 ^{Ced}
Cu16	2.19 ^{DEe}	1.37 ^{Ee}	3.07 ^{BCcd}	0.73 ^{Ced}
Cu32	4.32 ^{CDd}	2.63 ^{Dd}	3.94 ^{Aa}	1.56 ^{Ced}
Cu64	6.98 ^{Cc}	4.34 ^{Cc}	3.28 ^{ABCbc}	2.42 ^{Cc}
Cu128	13.49 ^{Bb}	8.40 ^{Bb}	3.40 ^{ABCabc}	4.82 ^{Bb}
Cu256	21.35 ^{Aa}	11.97 ^{Aa}	2.67 ^{Cd}	9.29 ^{Aa}
SEM	0.96	0.54	0.08	0.44
Linear	0.000 1	0.000 1	0.001 3	0.000 1
Quadratic	0.000 1	0.000 1	0.002 4	0.000 1

同列中不同大写字母肩标表示差异极显著($P < 0.01$),不同小写字母肩标表示差异显著($P < 0.05$)。下表同

Within the same column, values with different capital letters superscripts are extremely significantly different ($P < 0.01$), values with different small letters superscripts are significantly different ($P < 0.05$). The same as below

2.2 日粮铜水平对水貂血清 Cu、Zn 和 Fe 含量的影响

日粮铜水平对水貂血清 Cu、Zn 和 Fe 含量的影响见表 3。水貂血清铜含量随日粮铜水平的增加而升高(linear, quadratic, $P < 0.01$);日粮铜水平对水貂血清锌和铁含量回归分析和方差分析结果均不显著。方差分析结果显示, Cu256 组水貂血清铜含量极显著大于 Control、Cu4、Cu8 和 Cu16 组水貂($P < 0.01$); Cu32、Cu64 和 Cu128 组水貂血清铜含量极显著大于 Control 和 Cu4 组水貂($P < 0.01$),显著大于 Cu8 组水貂($P < 0.05$), Cu16 组水貂血清铜含量显著大于 Control 组水貂($P < 0.05$)。

2.3 日粮铜水平对水貂血清脂类指标的影响

日粮铜水平对水貂血清脂类代谢指标的影响见表 4。水貂血清 TC(linear, quadratic, $P < 0.01$)和 TG(linear, $P < 0.05$; quadratic, $P < 0.01$)含量随日粮铜水平的增加呈线性和二次曲线降低;日粮铜水平与水貂血清 HDL-C 和 LDL-C 含量回归分析不显著。方差分析结果显示, Control 组水貂血清 TC 含量极显著高于 Cu16、Cu32、Cu64、Cu128 和 Cu256 组($P < 0.01$), Cu4 和 Cu8 组水貂血清 TC 含量极显著高于 Cu32、Cu64、Cu128 和 Cu256 组($P < 0.01$),显著高于 Cu16 组($P < 0.05$); Control

组水貂血清 TG 含量极显著高于 Cu8、Cu16、Cu32、Cu64、Cu128 和 Cu256 组($P < 0.01$),显著高于 Cu4 组($P < 0.05$);各组水貂血清 HDL-C 含量差异不显著; Control 组水貂血清 LDL-C 含量显著高于 Cu16、Cu32、Cu64、Cu128 和 Cu256 组($P < 0.05$)。

表 3 日粮铜水平对育成期水貂血清 Cu、Zn 和 Fe 含量的影响

Table 3 Effects of dietary copper levels on plasma Cu, Zn and Fe concentrations of late growing mink

mg · L⁻¹

项目 Item	血清 Cu Plasma Cu	血清 Fe Plasma Fe	血清 Zn Plasma Zn
Control	0.61 ^{Cd}	2.80	1.27
Cu4	0.68 ^{Ced}	2.86	1.21
Cu8	0.73 ^{BCcd}	2.93	1.26
Cu16	0.76 ^{BCbc}	3.01	1.17
Cu32	0.87 ^{ABbc}	2.98	1.19
Cu64	0.89 ^{ABbc}	2.99	1.20
Cu128	0.91 ^{ABa}	2.98	1.18
Cu256	0.96 ^{Aa}	3.09	1.12
SEM	0.02	0.06	0.04
Linear	0.000 1	0.260 1	0.349 5
Quadratic	0.000 1	0.508 3	0.645 2

表 4 日粮铜水平对育成期水貂血清脂类代谢指标的影响

Table 4 Effects of dietary copper levels on serum lipid metabolism parameters of late growing mink

mmol · L⁻¹

项目 Item	血清总胆固醇 Serum TC	血清甘油三酯 Serum TG	血清高密度脂蛋白胆固醇 Serum HDL-C	血清低密度脂蛋白胆固醇 Serum LDL-C
Control	8.44 ^{Aa}	2.22 ^{Aa}	3.32	1.63 ^a
Cu4	8.12 ^{ABa}	2.02 ^{ABb}	3.19	1.50 ^{ab}
Cu8	7.99 ^{ABa}	1.95 ^{Bb}	3.04	1.43 ^{ab}
Cu16	6.97 ^{BCb}	1.83 ^{Bb}	3.01	1.33 ^b
Cu32	6.45 ^{Cb}	1.84 ^{Bb}	3.08	1.34 ^b
Cu64	6.31 ^{Cb}	1.81 ^{Bb}	2.92	1.32 ^b
Cu128	6.24 ^{Cb}	1.81 ^{Bb}	2.92	1.35 ^b
Cu256	6.31 ^{Cb}	1.81 ^{Bb}	2.91	1.33 ^b
SEM	0.03	0.05	0.03	0.17
Linear	0.000 2	0.010 9	0.075 1	0.107 6
Quadratic	0.000 1	0.001 9	0.087 9	0.077 5

2.4 日粮铜水平对水貂血清抗氧化指标的影响

日粮铜水平对水貂血清抗氧化酶活性的影响见表 5。水貂血清 CER 和 Cu-Zn SOD 活性随日粮铜水平的增加呈二次曲线先增加后降低 (quadratic, $P < 0.01$)。方差分析结果显示, Cu64 和 Cu128 组水貂血清 CER 活性极显著高于 Control、Cu4、Cu8、Cu16 和 Cu256 组 ($P < 0.01$), Cu32 组水貂极显著高于 Control、Cu4 和 Cu256 组 ($P < 0.01$), 显著高于 Cu8 组 ($P < 0.05$); Cu128 组水貂血清 Cu-Zn SOD 活性极显著高于 Control、Cu4 和 Cu8 组 ($P < 0.01$), 显著高于 Cu16 和 Cu256 组 ($P < 0.05$)。

表 5 日粮铜水平对育成期水貂血清抗氧化酶活性的影响

Table 5 Effects of dietary copper levels on serum antioxidant enzyme activities of late growing mink

项目 Item	血清铜蓝蛋白/ (U · L ⁻¹) CER	血清铜锌超氧化物歧化酶/ (U · mL ⁻¹) Cu-Zn SOD
Control	18.09 ^{Cc}	36.63 ^{Bbc}
Cu4	17.98 ^{Cc}	34.52 ^{Be}
Cu8	19.08 ^{BCc}	36.16 ^{Be}
Cu16	22.87 ^{BCbc}	38.44 ^{ABbc}
Cu32	28.86 ^{ABob}	42.00 ^{ABabc}
Cu64	32.86 ^{Aa}	47.24 ^{ABab}
Cu128	34.02 ^{Aa}	51.68 ^{Aa}
Cu256	18.25 ^{Cc}	39.03 ^{ABbc}
SEM	1.27	1.47
Linear	0.574 0	0.137 8
Quadratic	0.000 1	0.000 1

3 讨论

3.1 日粮铜水平对水貂铜代谢的影响

铜吸收的机制有两种,一种是主动运输过程,一种是扩散过程^[9]。随日粮铜水平增加,铜进入体内的量也增加^[4]。此外,有研究认为,血清铜蓝蛋白影响肠道对铜的吸收,血清铜蓝蛋白和铜含量与肠道内的铜存在一定的平衡关系^[10]。研究表明,尿液中的铜含量甚微,汗液排出的铜可忽略不计,体内大部分铜通过胆汁分泌^[11-12]。本研究表明,水貂食入铜、粪铜、尿铜和铜沉积都随日粮铜水平增加而增加,水貂体内的铜主要通过粪便排出体外,尿液中含量极低,但是随着日粮铜含量增加,尿液中铜的含量也增加,这与许多文献报道相一致^[13]。马德磊^[14]研究表明,随着日粮中铜水平的增加,2~3 月龄生长肉兔粪铜含量呈倍数递增。

3.2 日粮铜水平对水貂血清 Cu、Zn 和 Fe 含量的影响

研究表明,血清铜浓度在一定范围内随着饲料中铜添加量的增加而升高,铜和锌在动物肠道吸收过程中存在拮抗作用^[4]。此外,铜对于铁运输过程相当重要,缺铜会影响铁从细胞内释放和转运到血液^[15]。刘志^[16]研究表明,蓝狐血清铜浓度随着饲料铜水平的升高而显著升高,血清锌含量明显下降,血清铁含量无明显变化。邢芳芳等^[17]报道,仔猪日粮铜水平低于 100 mg · kg⁻¹时,血清铜含量随日粮铜水平的提高而上升,但是日粮铜水平为 100~250 mg · kg⁻¹时,血清铜含量随饲料铜水平

提高而降低,日粮铜水平对血清锌和铁的含量没有显著影响。G. A. Apgar 等^[18]研究表明,仔猪日粮中添加铜浓度在 100、200 和 250 mg · kg⁻¹,血清铜含量随日粮铜水平均有升高。马德磊^[14]研究表明,日粮铜水平对 2~3 月龄生长肉兔血浆中铜含量影响极显著,对血浆中其他矿物质元素含量无显著影响。本研究发现,水貂日粮添加铜可以提高血清铜的含量,但是对血清锌和铁的含量没有显著影响,说明水貂饲喂基础日粮或高铜日粮对锌的吸收和铁的转运未产生显著影响。

3.3 日粮铜水平对水貂血清脂类指标的影响

近年来有大量报道表明,铜与血脂代谢存在密切相关,动物日粮添加铜能够影响动物体内脂类代谢,主要表现在日粮添加铜可以降低血浆胆固醇和甘油三酯水平^[19-21]。但是,铜对动物体脂类代谢影响的内在机制并不清楚,有待进一步研究。动物体内胆固醇主要由肝合成,部分来自食物。HMG-CoA 还原酶是肝细胞合成胆固醇过程中的限速酶^[22],S. Kim 等^[23]研究发现,饲喂低铜日粮时,小鼠肝细胞中 3-羟-3-甲基戊二酰-CoA 还原酶(HMG-CoA 还原酶)活性增加,胆固醇 7 α -羟化酶是在肝合成并促使胆固醇转化成胆酸的限速酶^[24]。Z. R. Tang 等^[25]研究表明,成年大鼠饲喂低铜日粮时,胆固醇 7 α -羟化酶基因相对表达量降低 80%,胆固醇 7 α -羟化酶活性降低,胆固醇转化发生障碍,导致高总胆固醇血症。本试验结果表明,随日粮中铜添加水平的增加,血清中 TC、TG 和 LDL-C 含量都呈现降低的趋势,而日粮中铜的添加对血清 HDL-C 含量未产生显著影响。

3.4 日粮铜水平对水貂血清抗氧化指标的影响

血浆铜蓝蛋白是一种含铜蛋白质,由肝细胞制造,其在铁转运过程中发挥重要作用。铜锌超氧化物歧化酶是一种含铜酶,其能消除生物体在新陈代谢过程中产生的超氧化物,细胞免受氧化损伤。隋慧^[26]选用新生仔猪的肝进行细胞分离培养,建立肝细胞体外培养模型,以不同质量浓度的铜进行试验,试验结果表明,在细胞培养液中添加一定质量浓度的铜,可提高 CER 和 Cu-Zn SOD 的活性;低质量浓度的铜对 CER 活性的影响很小,当铜质量浓度逐渐升高时,CER 活性显著升高,但当铜质量浓度过高则抑制 CER 活性。动物日粮添加铜能显著提血清铜锌超氧化物歧化酶活性和 CER 含量^[4, 27-28],但是高剂量的铜可引起机体组织的病理损伤,导致血清

CER 和 Cu-Zn SOD 活性降低^[2]。本研究表明,当水貂日粮铜水平高于需要量但又不致中毒时,血清 CER 和 Cu-Zn SOD 活性随日粮铜水平增加而增强;当日粮添加 192 mg · kg⁻¹ 铜以上时,有可能造成水貂肝损伤,导致血清 CER 和 Cu-Zn SOD 活性降低。

4 结 论

水貂日粮添加铜可以增加体内铜的沉积量和血清铜含量,同时能够降低血清胆固醇和甘油三酯水平,提高血清铜蓝蛋白和铜锌超氧化物歧化酶活性。

参考文献 (References):

- [1] 李敏,崔伟,彭西,等. 高铜对雏鸡脑组织抗氧化酶活性的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2010, 41(2): 220-223.
LI M, CUI W, PENG X, et al. Effect of dietary high copper on the antioxidase activities of brain tissue in chickens[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2010, 41(2): 220-223. (in Chinese)
- [2] 崔伟,李敏,彭西,等. 高铜对雏鸡肾脏组织结构及生化指标影响的研究[J]. 畜牧兽医学报, 2010, 41(1): 86-91.
CUI W, LI M, PENG X, et al. Effect of dietary high copper on tissue structure and biochemical parameters of kidney in chickens [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2010, 41(1): 86-91. (in Chinese)
- [3] 刘好朋,唐兆新,苏荣胜,等. 高铜日粮对肉鸡肝脏 *TrxR2* 基因 mRNA 表达和还原活性的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2011, 42(3): 423-428.
LIU H P, TANG Z X, SU R S, et al. Effect of high level copper diet on expression of *trxR2* mRNA and reduction activity of *trxR2* of liver in broiler[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2011, 42(3): 423-428. (in Chinese)
- [4] WU X Z, LIU Z, GUO J G, et al. Influence of dietary zinc and copper on apparent mineral retention and serum biochemical indicators in young male mink (*Mustela vison*) [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2015, 165(1): 59-66.
- [5] HOSIENPOUR N, NOROUZIAN M A, AFZALZADEH A, et al. Source of copper may have regressive effects on serum cholesterol and urea nitrogen among male fattening lambs [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2014, 159(1-3): 147-151.

- [6] LIU L, SUI X Y, LI F C. Effect of dietary copper addition on lipid metabolism in rabbits [J]. *Food Nutr Res*, 2017, 61(1): 1348866.
- [7] NETTO A S, ZANETTI M A, DEL CLARO G R, et al. Effects of copper and selenium supplementation on performance and lipid metabolism in confined brangus bulls[J]. *Asian-Aust J Anim Sci*, 2014, 27(4): 488-494.
- [8] LEOSCHKE W L. Nutrition and nutritional physiology of the mink: a historical perspective[M]. Victoria, Canada: Trafford Publishing, 2011.
- [9] 杨 凤. 动物营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
YANG F. Animal nutrition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. (in Chinese)
- [10] RAMOS D, MAR D, ISHIDA M, et al. Mechanism of copper uptake from blood plasma ceruloplasmin by mammalian cells [J]. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0149516.
- [11] SQUITTI R, GHIDONI R, SIMONELLI I, et al. Copper dyshomeostasis in Wilson disease and Alzheimer's disease as shown by serum and urine copper indicators[J]. *J Trace Elem Med Biol*, 2018, 45: 181-188.
- [12] GRAY L W, PENG F Y, MOLLOY S A, et al. Urinary copper elevation in a mouse model of Wilson's disease is a regulated process to specifically decrease the hepatic copper load [J]. *PLoS One*, 2012, 7(6): e38327.
- [13] MEJBORN H. Effect of copper addition to mink feed during the growth and moulting period on growth, skin production, and copper retention[J]. *Scientifur*, 1989, 13(3): 229-234.
- [14] 马德磊. 日粮铜水平对生长肉兔生产性能、消化代谢、血液生化指标和 MT-I mRNA 表达量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
MA D L. Effect of dietary copper supplement on growth performance, digestion, blood biochemical parameters and liver MT-I mRNA expression of growing meat rabbits[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [15] VASHCHENKO G, MACGILLIVRAY R T A. Multi-copper oxidases and human iron metabolism [J]. *Nutrients*, 2013, 5(7): 2289-2313.
- [16] 刘 志. 生长期蓝狐饲料适宜铜水平和铜源的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
LIU Z. Optimum copper levels and sources in grow-
- ing and furring blue foxes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [17] 邢芳芳, 燕富永, 孔祥峰, 等. 甘氨酸铜、蛋氨酸铜替代硫酸铜对仔猪血清生化指标的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(3): 378-380.
XING F F, YAN Y F, KONG X F, et al. Effects of Gly-Cu and Met-Cu replacing copper sulfate as dietary additive on serum biochemical parameters of piglets [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 24(3): 378-380. (in Chinese)
- [18] APGAR G A, KORNEGAY E T, LINDEMANN M D, et al. Evaluation of copper sulfate and a copper lysine complex as growth promoters for weanling swine [J]. *J Anim Sci*, 1995, 73(9): 2640-2646.
- [19] 徐晨晨, 王宝维, 葛文华, 等. 饲料中不同水平铜对 5~16 周龄五龙鹅脂类代谢、抗氧化能力与免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(4): 908-917.
XU C C, WANG B W, GE W H, et al. Effects of dietary different copper levels on lipid metabolism, antioxidant ability and immune function of Wulong geese at the age of 5 to 16 weeks[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(4): 908-917. (in Chinese)
- [20] 王宝维, 徐晨晨, 葛文华, 等. 铜对 1~4 周龄五龙鹅脂类代谢、抗氧化能力及免疫器官指数的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(8): 2093-2100.
WANG B W, MA C X, GE W H, et al. Effects of copper on lipid metabolism, antioxidant ability and immune organ indexes of Wulong geese aged from 1 to 4 weeks[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(8): 2093-2100. (in Chinese)
- [21] 王荣梅, 曹华斌, 李和平, 等. 高铜对肉鸡肝线粒体膜通透性、脂类代谢及肝和肌肉铜含量的影响[J]. 中国兽医学报, 2010, 30(2): 243-246.
WANG R M, CAO H B, LI H P, et al. Effects of high level copper on mitochondrial permeability of liver, lipid metabolism, liver and muscle copper content in broiler[J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2010, 30(2): 243-246. (in Chinese)
- [22] RANJI P, RAUTHAN M, PITOT C, et al. Loss of HMG-CoA reductase in *C. elegans* causes defects in protein prenylation and muscle mitochondria [J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e100033.
- [23] KIM S, CHAO P Y, ALLEN K G. Inhibition of elevated hepatic glutathione abolishes copper deficiency cholesterolemia[J]. *FASEB J*, 1992, 6(7): 2467-

- 2471.
- [24] XU Q, XUE C Y, ZHANG Y, et al. Medium-chain fatty acids enhanced the excretion of fecal cholesterol and cholic acid in C57BL/6J mice fed a cholesterol-rich diet[J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2013, 77(7): 1390-1396.
- [25] TANG Z R, GASPERKOVA D, XU J, et al. Copper deficiency induces hepatic fatty acid synthase gene transcription in rats by increasing the nuclear content of mature sterol regulatory element binding protein 1[J]. *J Nutr*, 2000, 130(12): 2915-2921.
- [26] 隋 慧. 铜对猪原代肝细胞含铜酶活性的影响[J]. *饲料研究*, 2013(4): 32-35.
- SUI H. The effect of copper on copper enzyme activity of the pig liver cells[J]. *Feed Research*, 2013(4): 32-35. (in Chinese)
- [27] JAROSZ Ł S, MAREK A, GRĄDZKI Z, et al. The effect of feed supplementation with a copper-glycine chelate and copper sulphate on selected humoral and cell-mediated immune parameters, plasma superoxide dismutase activity, ceruloplasmin and cytokine concentration in broiler chickens[J]. *J Anim Physiol Anim Nutr*, 2018, 102(1): e326-e336.
- [28] WU X Z, ZHANG T T, GUO J G, et al. Copper bioavailability, blood parameters, and nutrient balance in mink[J]. *J Anim Sci*, 2015, 93(1): 176-184.

(编辑 郭云雁)