

## 高铜对雏鸭肾脏抗氧化功能的影响

崔伟, 彭西, 赵丽, 杨帆, 崔恒敏\*

(四川农业大学动物医学院 环境公害与动物疾病四川高校重点实验室, 雅安 625014)

**摘要:** 本研究旨在探讨日粮铜水平对雏鸭肾脏抗氧化功能的影响。360只1日龄天府肉鸭随机分为6组, 分别喂以对照日粮( $\text{Cu } 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和高铜日粮( $\text{Cu } 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高铜I组;  $\text{Cu } 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高铜II组;  $\text{Cu } 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高铜III组;  $\text{Cu } 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高铜IV组;  $\text{Cu } 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高铜V组)6周。高铜II组、III组、IV组和V组肾脏组织丙二醛含量、游离脂肪酸含量及羟自由基含量显著升高( $P < 0.01$ ), 高铜V组肾脏CuZn-SOD活性显著降低( $P < 0.01$ 或 $P < 0.05$ )。同时, 高铜III、IV和V组血清铜蓝蛋白(CP)活性和高铜V组血清CuZn-SOD活性显著降低( $P < 0.01$ 或 $P < 0.05$ ), 高铜III、IV组血清CuZn-SOD活性降低, 但不显著( $P > 0.05$ )。结果表明, 日粮铜含量达到或超过 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可引起肾脏和血清抗氧化酶活性降低, 抗氧化功能受损, 肾脏组织自由基和过氧化产物产生过量, 造成细胞损伤, 最终导致肾脏功能降低。

**关键词:** 高铜; 肾脏; 抗氧化功能; 雏鸭

中图分类号: S852.35; S856.9

文献标识码: A

文章编号: 0366-6964(2009)04-0572-05

### Effect of High Copper on the Antioxydic Function of Kidney in Ducklings

CUI Wei, PENG Xi, ZHAO Li, YANG Fan, CUI Heng-min\*

(College of Animal Medicine, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

**Abstract:** The experiment was conducted with the objective of examining the effect of dietary high copper on the antioxydic function of kidney in ducklings. 360 one-day-old Tianfu meat ducklings were randomly divided into six groups and feed on diets as follows: Controls ( $\text{Cu } 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and high copper ( $\text{Cu } 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , high copper group I;  $\text{Cu } 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , high copper group II;  $\text{Cu } 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , high copper group III;  $\text{Cu } 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , high copper group IV;  $\text{Cu } 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , high copper group V) for six weeks. Compared with those of control group, the renal free fatty acids, malondialdehyde and hydroxy radical contents in high copper groups II, III, IV and V, and the renal cuprozinc-superoxide dismutase (CuZn-SOD) in group V were increased ( $P < 0.01$  or  $P < 0.05$ ). Also, the serum copper-protein (CP) activities in high copper groups III, IV and V and the serum CuZn-SOD activities in group V were lower ( $P < 0.01$  or  $P < 0.05$ ) than that in control group. The results showed that dietary copper exceed  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  impaired renal antioxydic function, and the renal function was finally depressed.

**Key words:** high copper; kidney; antioxydic function; ducklings

铜是动物体必需的微量元素之一, 广泛分布于体内的组织和器官。现已证实, 铜以酶辅助因子的形式构成细胞色素氧化酶(cytochrome-oxydase)、铜锌超氧化物歧化酶(CuZn-SOD)、铜蓝蛋白(CP)、

单胺氧化酶(MAO)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)等多种酶<sup>[1]</sup>参与机体氧化磷酸化、自由基解毒等代谢过程<sup>[2-3]</sup>。有研究报道, 在日粮中添加 $100 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的铜, 能使猪血清CuZn-SOD活性增

收稿日期: 2008-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30471304; 30871898); “教育部长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(PCSIRT0853); 四川省教育厅(2002A002)和科技厅(035Y029-030-2)资助项目

作者简介: 崔伟(1981-), 男, 四川自贡人, 硕士, 主要从事动物病理学研究, E-mail: yonex\_1981@163.com

\* 通讯作者: 崔恒敏, 博士, 教授, 主要从事禽病发病机理研究, E-mail: cui580420@sicau.edu.cn; hmcui@scfc.edu

加<sup>[4]</sup>。崔恒敏等报道,发生铜中毒的雏鸡和雏鸭,血清 CP 活性显著降低<sup>[5-6]</sup>。然而,至今尚未见高铜对器官和组织抗氧化功能影响的报道。本试验以 1 日龄的天府肉鸭为研究对象,饲以梯度剂量的高铜日粮,检测肾脏及血清抗氧化酶和氧化产物的变化,旨在探讨高铜对雏鸭肾脏抗氧化功能的影响,为系统研究高铜对肾脏的影响提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 动物与日粮

选用 360 只 1 日龄天府肉鸭,随机分为 6 组,每组 60 只(其中 15 只用于全程观察),分别采食基础日粮和 5 种不同的高铜日粮。6 组雏鸭分别饲养于木制试验禽笼内,饲养管理与常规育雏一致,自由饮水和采食。试验期 6 周。

基础日粮以玉米、豆粕为主配制而成,其中蛋白质含量、能量以及维生素和微量元素添加量均参照肉鸡 NRC(1994)的营养标准。基础日粮作为对照组日粮( $\text{Cu } 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),在对照组日粮中分别添加 92、192、392、592、792  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的铜构成高铜组日粮:高铜 I 组( $\text{Cu } 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、高铜 II 组( $\text{Cu } 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、高铜 III 组( $\text{Cu } 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、高铜 IV 组( $\text{Cu } 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、高铜 V 组( $\text{Cu } 800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。铜源为  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)。

### 1.2 肾脏抗氧化指标检测

分别于试验第 14、28 和 42 天,每组随机抽取 5 只雏鸭剖杀后取肾脏 1.0 g 于冰生理盐水中,制成 10% 组织匀浆,3 500  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 10 min,取上清液用于铜锌超氧化物歧化酶(CuZn-SOD)、游离脂肪酸

(NEFA)、丙二醛(MDA)、羟自由基( $\cdot\text{OH}$ )含量的测定。检测试剂盒购自南京建成生物工程公司。

### 1.3 血清抗氧化酶活性检测

分别于试验第 14、28 和 42 天,每组随机选 5 只雏鸭取血,分离血清,用于血清铜锌超氧化物歧化酶(CuZn-SOD)和铜蓝蛋白(CP)活性测定。检测试剂盒购自南京建成生物工程公司。

### 1.4 数据处理

用 SPSS11.0 分析软件进行数据统计、分析,单因素方差分析法进行显著性检验。

## 2 结果

### 2.1 临床观察

试验第 1 周,各组雏鸭采食量无显著差异。试验第 3 周,高铜 III、IV 和 V 组雏鸭生长发育落后于其他各组,食欲轻度下降,排泄深绿色或煤焦油样粪便。5 周龄时,高铜 IV 组和 V 组雏鸭表现为精神沉郁,食欲明显下降,其他各组变化不明显。试验期间高铜 IV 组雏鸭发病 3 只,高铜 V 组雏鸭发病 5 只,但未见死亡。

### 2.2 肾脏抗氧化指标的变化

2.2.1 肾脏 CuZn-SOD 活性变化 与对照组比较,2、4 周龄时高铜 I 和 II 组 CuZn-SOD 活性升高,但差异不显著( $P > 0.05$ ),高铜 V 组 CuZn-SOD 活性极显著降低( $P < 0.01$ ),高铜 IV 组 CuZn-SOD 活性降低( $P > 0.05$ );试验结束时,高铜 I 组 CuZn-SOD 活性升高,但差异不显著( $P > 0.05$ ),高铜 V 组 CuZn-SOD 活性极显著降低( $P < 0.01$ ),高铜 II、III 和 IV 组 CuZn-SOD 活性降低( $P < 0.05$ )。详见表 1。

表 1 肾脏 CuZn-SOD 活性变化

Table 1 Changes of the renal CuZn-SOD activity in ducklings

U ·  $\text{mg}^{-1}$

组别 Group	2 周 2 Weeks	4 周 4 Weeks	6 周 6 Weeks
对照组 Control group	9.47 ± 0.45 <sup>AB</sup>	12.00 ± 0.64 <sup>AB</sup>	12.39 ± 0.63 <sup>Ab</sup>
高铜 I 组 Group I	9.87 ± 0.58 <sup>AD</sup>	12.45 ± 0.65 <sup>Ac</sup>	12.81 ± 0.53 <sup>A</sup>
高铜 II 组 Group II	9.89 ± 0.23 <sup>Ac</sup>	12.03 ± 0.55 <sup>AB</sup>	11.28 ± 0.63 <sup>BC</sup>
高铜 III 组 Group III	9.30 ± 0.40 <sup>AB</sup>	11.39 ± 0.61 <sup>BCd</sup>	11.22 ± 0.61 <sup>BC</sup>
高铜 IV 组 Group IV	9.22 ± 0.36 <sup>BC</sup>	11.45 ± 0.38 <sup>BCd</sup>	11.00 ± 0.65 <sup>BC</sup>
高铜 V 组 Group V	7.68 ± 0.23 <sup>E</sup>	10.27 ± 0.26 <sup>D</sup>	10.33 ± 0.48 <sup>C</sup>

肩标字母相同者差异不显著( $P > 0.05$ );同一字母大、小写间差异显著( $P < 0.05$ );不同大写字母及小写字母间差异极显著( $P < 0.01$ )。下表同

Values within a column followed by different capital letters or small letters were significantly different ( $P < 0.01$ ) between two groups. Values within a column followed by small and capital letters of the same letter were different ( $P < 0.05$ ) between two groups. Values within a column followed by same letters were not different ( $P > 0.05$ ). The same as below

2.2.2 肾脏丙二醛(MDA)含量变化 MDA含量变化与日粮铜添加水平呈极强正相关,随日粮铜含量升高,MDA含量不同程度增加。2周龄和4周龄时,高铜Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组肾脏MDA含量极显著

高于对照组( $P < 0.01$ )。试验结束时,高铜Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组均极显著高于对照组( $P < 0.01$ ),高铜Ⅰ组高于对照组,但差异不显著( $P > 0.05$ )。详见表2。

表2 肾脏丙二醛含量变化

Table 2 Changes of the renal MDA content

nmol · mg<sup>-1</sup>

组别 Group	2周 2 Weeks	4周 4 Weeks	6周 6 Weeks
对照组 Control group	0.346 ± 0.014 <sup>A</sup>	0.345 ± 0.019 <sup>A</sup>	0.419 ± 0.051 <sup>A</sup>
高铜Ⅰ组 Group I	0.397 ± 0.007 <sup>A</sup>	0.405 ± 0.024 <sup>AB</sup>	0.505 ± 0.009 <sup>A</sup>
高铜Ⅱ组 Group II	0.527 ± 0.040 <sup>B</sup>	0.548 ± 0.032 <sup>BC</sup>	0.768 ± 0.086 <sup>B</sup>
高铜Ⅲ组 Group III	0.555 ± 0.021 <sup>B</sup>	0.545 ± 0.031 <sup>BC</sup>	0.875 ± 0.028 <sup>B</sup>
高铜Ⅳ组 Group IV	0.617 ± 0.055 <sup>C</sup>	0.625 ± 0.017 <sup>C</sup>	0.911 ± 0.055 <sup>B</sup>
高铜Ⅴ组 Group V	0.659 ± 0.012 <sup>C</sup>	0.940 ± 0.178 <sup>D</sup>	1.107 ± 0.033 <sup>C</sup>

2.2.3 肾脏游离脂肪酸(NEFA)含量变化 高铜组肾脏NEFA含量不同程度地增加,并与日粮铜含量呈明显的时间-剂量效应关系。高铜Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和

Ⅴ组极显著高于对照组( $P < 0.01$ ),高铜Ⅰ组高于对照组,但差异不显著( $P > 0.05$ ),见表3。

表3 肾脏游离脂肪酸含量变化

Table 3 Changes of the renal NEFA content

μmol · g<sup>-1</sup>

组别 Group	2周 2 Weeks	4周 4 Weeks	6周 6 Weeks
对照组 Control group	84.53 ± 2.19 <sup>A</sup>	240.65 ± 1.16 <sup>A</sup>	513.75 ± 2.17 <sup>A</sup>
高铜Ⅰ组 Group I	98.20 ± 3.70 <sup>A</sup>	255.01 ± 1.94 <sup>A</sup>	558.70 ± 4.11 <sup>A</sup>
高铜Ⅱ组 Group II	122.12 ± 3.84 <sup>B</sup>	317.52 ± 1.31 <sup>B</sup>	810.59 ± 3.55 <sup>B</sup>
高铜Ⅲ组 Group III	124.87 ± 2.45 <sup>Bc</sup>	358.27 ± 3.05 <sup>b</sup>	887.11 ± 2.33 <sup>BC</sup>
高铜Ⅳ组 Group IV	140.71 ± 4.67 <sup>C</sup>	430.97 ± 1.62 <sup>C</sup>	841.92 ± 3.08 <sup>CD</sup>
高铜Ⅴ组 Group V	183.33 ± 4.56 <sup>D</sup>	525.98 ± 1.60 <sup>D</sup>	923.70 ± 3.04 <sup>D</sup>

2.2.4 肾脏羟自由基(·OH)含量变化 2周龄时,高铜Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组羟自由基含量极显著高于对照组( $P < 0.01$ ),高铜Ⅱ组显著高于对照组( $P < 0.05$ )。4周龄时,高铜Ⅰ组低于对照组,但差异不显著( $P > 0.05$ ),高铜Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组极显著高于

对照组( $P < 0.01$ ),且两两之间差异极显著( $P < 0.01$ )。试验结束时,高铜Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组极显著高于对照组( $P < 0.01$ ),高铜Ⅰ组低于对照组,但差异不显著( $P > 0.05$ )。详见表4。

表4 肾脏羟自由基含量变化

Table 4 Changes of the renal ·OH content

U · mg<sup>-1</sup>

组别 Group	2周 2 Weeks	4周 4 Weeks	6周 6 Weeks
对照组 Control group	44.66 ± 3.49 <sup>A</sup>	50.51 ± 3.43 <sup>Ab</sup>	79.64 ± 3.94 <sup>A</sup>
高铜Ⅰ组 Group I	44.63 ± 3.82 <sup>A</sup>	50.25 ± 2.13 <sup>A</sup>	77.97 ± 3.80 <sup>A</sup>
高铜Ⅱ组 Group II	51.21 ± 2.16 <sup>abc</sup>	57.42 ± 3.59 <sup>B</sup>	82.51 ± 2.48 <sup>Ab</sup>
高铜Ⅲ组 Group III	52.86 ± 2.45 <sup>BC</sup>	63.75 ± 3.28 <sup>C</sup>	88.71 ± 2.22 <sup>BC</sup>
高铜Ⅳ组 Group IV	56.14 ± 3.03 <sup>BC</sup>	73.32 ± 2.29 <sup>D</sup>	90.00 ± 3.10 <sup>C</sup>
高铜Ⅴ组 Group V	57.69 ± 3.42 <sup>C</sup>	87.31 ± 1.32 <sup>E</sup>	91.90 ± 1.65 <sup>C</sup>

### 2.3 血清 CuZn-SOD、CP 活性变化

与对照组比较,2 周龄时高铜 I 组血清 CuZn-SOD 活性升高 ( $P < 0.05$ ),高铜 IV 和 V 组血清 CuZn-SOD 活性降低 ( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ )。4 周龄时,高铜 I 组和高铜 II 组血清 CuZn-SOD 活性显著升高 ( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ ),高铜 V 组血清 CuZn-SOD 活性极显著降低 ( $P < 0.01$ ),高铜 III 和 IV 组血清 CuZn-SOD 活性降低,但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。试验结束时,高铜 I 组血清 CuZn-SOD 活

性显著升高 ( $P < 0.05$ ),高铜 II 组血清 CuZn-SOD 活性升高,但差异不显著 ( $P > 0.05$ ),高铜 V 组血清 CuZn-SOD 活性极显著降低 ( $P < 0.01$ ),高铜 III 和 IV 组血清 CuZn-SOD 活性降低,但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

高铜 I 和 II 组血清 CP 活性升高,但随着试验期的延长,升高趋势减弱;高铜 III、IV 和 V 组血清 CP 活性与日粮铜水平呈现强烈负相关,随着日粮铜水平升高,CP 活性降低,见表 5。

表 5 血清 CuZn-SOD、CP 活性变化

Table 5 Changes of serum CuZn-SOD and serum CP activities in ducklings

组别 Group	2 周 2 weeks	4 周 4 weeks	6 周 6 weeks	
血清 CuZn-SOD 活性/ (U · mL <sup>-1</sup> ) Serum CuZn-SOD activity	对照组 Control group	76.98 ± 2.11 <sup>ABC</sup>	76.39 ± 3.60 <sup>AC</sup>	74.48 ± 3.23 <sup>AB</sup>
	高铜 I 组 Group I	85.17 ± 1.94 <sup>a</sup>	86.25 ± 3.28 <sup>B</sup>	79.73 ± 2.34 <sup>a</sup>
	高铜 II 组 Group II	71.92 ± 3.24 <sup>B</sup>	83.56 ± 3.03 <sup>AB</sup>	77.79 ± 3.18 <sup>B</sup>
	高铜 III 组 Group III	71.39 ± 3.90 <sup>B</sup>	73.72 ± 3.54 <sup>C</sup>	73.15 ± 3.75 <sup>B</sup>
	高铜 IV 组 Group IV	69.37 ± 3.23 <sup>C</sup>	71.92 ± 2.24 <sup>C</sup>	69.91 ± 2.39 <sup>B</sup>
	高铜 V 组 Group V	57.98 ± 2.35 <sup>D</sup>	66.31 ± 2.51 <sup>D</sup>	66.63 ± 3.28 <sup>C</sup>
血清 CP 活性/(U · L <sup>-1</sup> ) Serum CP activity	对照组 Control group	9.60 ± 0.22 <sup>A</sup>	11.57 ± 0.47 <sup>A</sup>	13.20 ± 0.32 <sup>A</sup>
	高铜 I 组 Group I	10.97 ± 0.37 <sup>B</sup>	13.31 ± 0.28 <sup>B</sup>	14.12 ± 0.23 <sup>B</sup>
	高铜 II 组 Group II	11.15 ± 0.11 <sup>B</sup>	13.08 ± 0.39 <sup>B</sup>	13.67 ± 0.17 <sup>ab</sup>
	高铜 III 组 Group III	8.83 ± 0.29 <sup>C</sup>	10.26 ± 0.18 <sup>C</sup>	12.06 ± 0.42 <sup>C</sup>
	高铜 IV 组 Group IV	7.83 ± 0.18 <sup>D</sup>	8.78 ± 0.31 <sup>D</sup>	9.81 ± 0.35 <sup>D</sup>
	高铜 V 组 Group V	6.14 ± 0.23 <sup>E</sup>	6.86 ± 0.10 <sup>E</sup>	7.69 ± 0.17 <sup>E</sup>

## 3 讨论与结论

**3.1 铜是铜锌超氧化物歧化酶的辅助因子和调节因子**<sup>[7]</sup>,CuZn-SOD 通过对氧的氢化作用发挥抗氧化能力<sup>[8]</sup>,其活性反映组织抗氧化功能。血清中 CuZn-SOD 水平受机体所吸收的铜水平影响,张苏江等报道,低剂量的铜能使猪血清 CuZn-SOD 活性提高<sup>[4]</sup>。试验结果显示,日粮铜含量在 200 mg · kg<sup>-1</sup> 以下时,肾脏 CuZn-SOD 活性有一定程度升高,日粮铜含量 400 mg · kg<sup>-1</sup> 以上时肾脏 CuZn-SOD 活性降低(见表 1);血清 CuZn-SOD 活性和铜蓝蛋白(CP)活性变化规律与此一致。这表明,肾脏组织抗氧化功能是机体抗氧化功能的一个重要组成部分,在局部发挥着重要作用,肾脏组织抗氧化功能的受损一方面可由高铜直接刺激损伤所引起,同时又受整个机体抗氧化功能的影响。CuZn-SOD 活性中心中,Cu 不可替代,Zn 则可能被多种元素替代。有研究报道,缺少 Zn 的 CuZn-SOD 的活性可下降<sup>[8]</sup>。

高剂量铜可竞争性抑制锌的吸收,导致 CuZn-SOD 活性下降。

铜蓝蛋白(CP)是血液中铜的主要载体蛋白,具有超氧化物歧化酶的抗氧化作用<sup>[9]</sup>。试验结果表明,日粮铜含量为 100 和 200 mg · kg<sup>-1</sup> 时 CP 活性增加,当日粮铜水平为 400 mg · kg<sup>-1</sup> 及其以上时,CP 活性显著降低。这与崔恒敏等报道的结果一致<sup>[10]</sup>,可能是高剂量铜可引起肝脏结构和功能受损<sup>[5]</sup>,造成合成 CP 能力降低,CP 活性下降。

**3.2 游离脂肪酸(NEFA)是细胞膜脂质结构和前列腺素合成的供体,也是重要的能源物质。同时,它也是具有高度细胞毒性的两性分子。**试验结果表明,高铜各组肾脏 NEFA 含量与对照组比较有不同程度的升高,但高铜 III 和 IV 和 V 组肾脏 NEFA 含量显著增加。崔恒敏等报道发生铜中毒的雏鸭肝脏严重受损<sup>[5]</sup>,血液中 NEFA 增加,造成其在肾脏中沉积。NEFA 不仅对肾脏细胞有直接的毒性作用,其中的不饱和脂肪酸还可通过加强脂质过氧化反应损

伤肾脏细胞,致使肾脏功能受损。

丙二醛(MDA)是脂质过氧化反应的终产物。研究表明,MDA 对线粒体呼吸功能、丙酮酸脱氢酶、 $\alpha$ -酮戊二酸脱氢酶等具有显著的抑制作用<sup>[11]</sup>。MDA 的含量能反映机体内脂质过氧化的程度,也反映细胞损伤程度。本试验结果表明,肾脏 MDA 含量随日粮铜添加量的增加而升高,当日粮铜含量  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  及其以上时 MDA 含量显著增加,这与肾脏组织、血清 CuZn-SOD 活性和 CP 活性变化规律相吻合(见表 1 和 5),也与肾脏的损伤程度成正比。高铜使肾脏组织和血清的 CuZn-SOD 以及血清 CP 活性降低,导致机体对 MDA 等脂质过氧化产物的清除能力降低,这类产物的蓄积造成细胞损伤,导致肾脏功能受损。

**3.3 羟自由基为超氧阴离子( $\text{O}_2^-$ , superoxide)及其衍生物中的一种,它可通过夺取氢原子、氧化巯基、破坏碳链等反应而使许多重要生物分子发生结构和性质的改变<sup>[12]</sup>。试验结果表明,日粮铜含量  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  及其以上时,肾脏组织羟自由基含量显著升高,并与肾脏组织 NEFA 含量和 MDA 含量变化一致(见表 2),也与肾脏组织 CuZn-SOD 活性降低相一致(见表 1)。Harman<sup>[13]</sup>认为,当动物体内的铜代谢紊乱时,常有一价铜的大量产生,一价铜通过 Haber-Werss 反应促进体内羟自由基的形成,从而使机体发生氧自由基损伤。**

综上所述,日粮铜含量为  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时引起肾脏组织 NEFA 含量、MDA 含量及羟自由基含量升高,而肾 CuZn-SOD 活性变化不显著,肾脏损伤较轻;日粮铜含量  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  及其以上可引起肾 CuZn-SOD 活性和血清 CuZn-SOD 活性和 CP 活性显著降低。高铜引起肾脏组织和血清的 CuZn-SOD 以及血清 CP 活性降低,抗氧化功能受损或障碍,清除氧自由基和 MDA 等脂质过氧化产物的能力降低,使这类产物在肾脏蓄积并造成细胞损伤,最终导

致肾脏功能降低。

#### 参考文献:

- [1] BONHAM M, O'CONNOR J M, HANNOGAN B, et al. The immune system as a physiological indicator of marginal copper status [J]. *British Journal Nutrition*, 2002, 87: 393-403.
- [2] 吴建设,杨汉春,芮于明,等. 微量元素铜在动物体内的代谢研究进展[J]. 饲料博览, 1998, 1: 11-12.
- [3] 段智勇,吴跃明,刘建新. 铜对奶牛的营养作用[J]. 中国饲料, 2002, 10: 11-12.
- [4] 张苏江,张光圣. 猪饲料铜水平对血清酶活性的影响[J]. 动物科学与动物医学, 2002, 19(8): 16-19.
- [5] 崔恒敏,陈怀涛,邓俊良,等. 实验性雏鸭铜中毒症的病理学研究[J]. 畜牧兽医学报, 2005, 36(7): 715-721.
- [6] 崔恒敏,杨光,彭西,等. 铜中毒对雏鸡血液生化指标影响的研究[J]. 畜牧兽医学报, 2005, 36(12): 1329-1333.
- [7] HARRIS E D. 铜是铜锌超氧化物歧化酶的辅助因子和调节因子[J]. 国外医学医学地理分册, 1993, 14(2): 74-75.
- [8] 王德海,程国富. 铜抗氧自由基作用的研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2001, 18(4): 70-73.
- [9] 齐长明. 绵羊慢性铜中毒[J]. 中国兽医杂志, 2000, 26(9): 31.
- [10] 崔恒敏,陈怀涛. 铜中毒对雏鸭某些血液指标的影响[J]. 中国兽医学报, 2005, 25(3): 311-313.
- [11] 龙建纲,王学敏,高宏翔,等. 丙二醛对大鼠肝线粒体呼吸功能及相关脱氢酶活性影响[J]. 第二军医大学学报, 2005, 26(10): 1131-1135.
- [12] 莫简. 自由基在生物体系中的作用: 普通中间介质或非特异性调节剂[J]. 自由基生命科学进展, 1999, 7: 7-10.
- [13] HARMAN D. Nutritional implications of the free-radical theory of aging[J]. *J Am Coll Nutr*, 1982, 1(1): 27-34.