

不同水平铜源对奶牛生产性能、抗氧化能力和铜代谢的影响

刘祥圣¹ 冀飞² 宁丽丽¹ 赵国琦^{1*}

(1. 扬州大学 动物科学与技术学院 江苏 扬州 225009;

2. Zinpro Corporation, Eden Prairie, MN 55344, USA)

摘要 为研究不同水平铜源对奶牛生产性能、抗氧化能力和铜代谢的影响,采用双因素试验设计,包括2种铜源(硫酸铜、赖氨酸铜和谷氨酸铜的1:1络合物),铜源的不同添加水平分别为0、3.5和7.0 mg/kg,2种铜源共用对照组,添加量均以铜元素计。选择80头胎次、泌乳天数和产奶量相近的健康荷斯坦奶牛,随机分为5组,每组16头,预试期2周,正试期12周。每2周测定干物质采食量(DMI),每周测定产奶量和乳成分,每4周测定血清抗氧化指标,试验期最后3d进行铜代谢试验。结果表明:铜水平为3.5和7.0 mg/kg组DMI和产奶量显著高于对照组($P < 0.05$),铜水平为3.5和7.0 mg/kg组间DMI和产奶量无显著差异($P > 0.05$),2种铜源间DMI和产奶量无显著差异($P > 0.05$);铜水平为3.5和7.0 mg/kg组乳脂率显著低于对照组($P < 0.05$),不同水平铜源对乳蛋白率、乳糖率和总固形物无显著影响($P > 0.05$);铜水平为3.5和7.0 mg/kg组铜蓝蛋白(CER)活性显著高于对照组($P < 0.05$),铜水平为7.0 mg/kg组CER和超氧化物歧化酶(SOD)活性显著高于3.5 mg/kg组($P < 0.05$),2种铜源间CER和SOD活性无显著差异($P > 0.05$);铜水平为3.5和7.0 mg/kg组粪铜和铜沉积率显著高于对照组($P < 0.05$),铜水平为7.0 mg/kg组粪铜和铜沉积率显著高于3.5 mg/kg组($P < 0.05$),赖氨酸铜和谷氨酸铜的1:1络合物组铜沉积率显著高于硫酸铜组($P < 0.05$)。综上所述,饲料中添加铜可以提高奶牛产奶量和抗氧化能力,赖氨酸铜和谷氨酸铜的1:1络合物相较于硫酸铜具有更高的铜沉积率,从生产性能 and 环境保护角度看,添加3.5 mg/kg的赖氨酸铜和谷氨酸铜的1:1络合物效果最好。

关键词 奶牛; 铜源; 生产性能; 抗氧化能力; 铜代谢

中图分类号 S823

文章编号 1007-4333(2021)02-0070-09

文献标志码 A

Effects of different levels of copper sources on performance, antioxidant capacity and copper metabolism of dairy cows

LIU Xiangsheng¹, JI Fei², NING Lili¹, ZHAO Guoqi^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Zinpro Corporation, Eden Prairie, MN 55344, USA)

Abstract The aim of the experiment was to study the effects of different levels of copper sources on performance, antioxidant capacity and copper metabolism of dairy cows. A two factor experimental design was used, including two copper sources (copper sulfate, 1:1 complex of copper lysine and copper glutamic acid) and the different supplemental levels of copper sources were 0, 3.5 and 7.0 mg/kg, respectively. Two copper sources shared the control group, and the supplemental amount was based on copper element. 80 healthy Holstein cows with similar parity, lactation days and milk yield were randomly divided into 5 groups with 16 cows in each group. The pre-test period lasted for 2 weeks, and the trial period lasted for 12 weeks. DMI was measured every 2 weeks, milk yield and milk composition were measured weekly, serum antioxidant index were measured every 4 weeks, and copper metabolism test was conducted in the last 3 days of the trial period. The results showed that DMI and milk yield of 3.5 and 7.0 mg/kg copper groups were significantly higher than those in control group ($P < 0.05$). There was no

收稿日期: 2020-07-06

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-36)

第一作者: 刘祥圣, 硕士研究生, E-mail: 1157873319@qq.com

通讯作者: 赵国琦, 教授, 主要从事动物营养与饲料科学研究, E-mail: gqzhao@yzu.edu.cn

significant difference in DMI and milk yield between 3.5 and 7.0 mg/kg copper groups ($P>0.05$), and there was no significant difference in DMI and milk yield between two copper sources ($P>0.05$); Milk fat rate in 3.5 and 7.0 mg/kg copper groups was significantly lower than that in control group ($P<0.05$), and there was no significant effect of different levels of copper sources on milk protein rate, lactose rate and total solids ($P>0.05$); CER activity in 3.5 and 7.0 mg/kg copper groups was significantly higher than that in control group ($P<0.05$), CER and SOD activities in 7.0 mg/kg copper group were significantly higher than those in 3.5 mg/kg copper group, and there was no significant difference in CER and SOD activities between two copper sources ($P>0.05$); Fecal copper and copper deposition rate in 3.5 and 7.0 mg/kg copper groups were significantly higher than those in control group ($P<0.05$); Fecal copper and copper deposition rate in 7.0 mg/kg copper group were significantly higher than those in 3.5 mg/kg copper group ($P<0.05$), and copper deposition rate in 1 : 1 complex of copper lysine and copper glutamic acid group was significantly higher than that in copper sulfate group ($P<0.05$). In conclusion, diet supplemented with copper can improve milk yield and antioxidant capacity of dairy cows. 1 : 1 complex of copper lysine and copper glutamic acid has higher copper deposition rate than copper sulfate. From the perspective of performance and environmental protection, diet supplemented with 3.5 mg/kg 1 : 1 complex of copper lysine and copper glutamic acid has the best effect.

Keywords dairy cows; copper source; performance; antioxidant capacity; copper metabolism

铜作为生命体的必需元素,是动物机体内细胞色素氧化酶、酪氨酸酶、超氧化物歧化酶和铜蓝蛋白等多种酶的组成成分,对动物机体的造血、色素沉积、骨骼发育和免疫能力具有重要作用^[1]。研究表明,饲料中补充铜能够提高奶牛的产奶量、抗氧化能力和免疫能力^[2-3],对促进反刍动物瘤胃发酵也具有重要作用^[4]。然而,成年反刍动物对铜的吸收率较低,仅为5%~10%,大部分饲料中的铜未被充分利用而被排泄^[5],因而在奶牛生产中存在较为严重的铜污染问题。目前在生产中应用较为广泛的是以硫酸铜为代表的无机铜,有机铜包括蛋白盐铜和氨基酸螯合铜,可提高反刍动物的生物利用度引起广泛关注^[6]。Dezfoulian等^[7]研究表明蛋白盐铜相较于硫酸铜能够减少羔羊铜的排泄量,李寰旭和王芬^[8]的研究同样表明羟基蛋氨酸铜相较于硫酸铜具备更高的生物利用度。Bampidis等^[9]的研究表明赖氨酸铜和谷氨酸铜的1 : 1络合物相较于硫酸铜可提高鸡体内铜沉积量,并证实了赖氨酸铜和谷氨酸铜的1 : 1络合物是安全有效的铜源。赖氨酸铜和谷氨酸铜的1 : 1络合物作为新型氨基酸螯合铜,目前仅在鸡上有相关的研究报道,在其他动物中尚未有相关研究。因此,本研究旨在研究不同水平铜源对奶牛生产性能、抗氧化能力和铜代谢的影响,以期在奶牛生产中选择合理铜源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

硫酸铜 CuSO_4 (具体物质为五水硫酸铜

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 含铜量为25%),由扬州大学试验农牧场提供。赖氨酸铜和谷氨酸铜的1 : 1络合物(含铜量为17%),由美国金宝公司提供,以下简称LGC。

1.2 试验动物和设计

本研究采用双因素试验设计,包括2种铜源(硫酸铜、赖氨酸铜和谷氨酸铜的1 : 1络合物),铜源的不同添加水平分别为0、3.5和7.0 mg/kg,2种铜源共用对照组,添加量均以铜元素计。选择80头胎次(1.7 ± 1.0)、泌乳天数(92 ± 24 d)和产奶量(34.16 ± 2.48 kg)相近的健康荷斯坦奶牛,随机分为5组,每组16头。试验于2019年2—6月在扬州大学试验农牧场进行,每日饲喂3次,自由饮水,预试期2周,正试期12周。基础饲料组成及营养水平见表1。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 饲料及粪便样品

每2周称量奶牛投料量及剩料量,同时采集饲料样品用以测定常规营养成分,计算奶牛的平均干物质采食量(DMI)。试验期最后3 d每组选取8头,采用全收粪法和收尿法进行铜代谢试验。粗蛋白质(CP)按GB/T 6432-1994的方法测定;钙(Ca)按GB/T 6436-2002中乙二胺四乙酸二钠络合滴定法测定;磷(P)按GB/T 6437-2002钼黄分光光度法测定;铜含量用Optima 7300 DV电感耦合等离子体光谱仪(PerkinElmer,美国)按JY/T 015-1996的方法进行测定。中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)根据Van Soest等^[10]的方法,用ANKOM-2000I纤维分析仪(ANKOM,美国)进行测定。

表1 基础饲料组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Basic diet composition and nutrient level (dry matter basis)

原料 Ingredient	含量/% Content
玉米 Corn	22.21
大豆皮 Soybean hull	1.72
膨化大豆 Extruded soybean	3.87
豆粕 Soybean meal	9.34
菜籽粕 Rapeseed meal	2.80
甜菜粕 Beet pulp	3.50
棉籽 Cottonseed	2.80
糖蜜 Molasses	1.62
干酒糟及其可溶物 DDGS	3.97
磷酸氢钙 CaHPO_4	0.32
石粉 Stone powder	0.23
食盐 NaCl	0.64
小苏打 NaHCO_3	1.21
氧化镁 MgO	0.45
预混料 ^① Premix	1.14
苜蓿干草 Alfalfa hay	14.04
燕麦草 Oat hay	1.95
小麦青贮 Wheat silage	9.29
玉米青贮 Corn silage	18.90
合计 Total	100

营养水平 ^② Nutrient level	含量 Content
产奶净能/(MJ/kg) Net energy for lactation	6.53
粗蛋白质/% Crude protein	16.76
中性洗涤纤维/% Neutral detergent fiber	36.35
酸性洗涤纤维/% Acid detergent fiber	19.95
粗灰分/% Ash	7.32
钙/% Ca	0.87
磷/% P	0.44
铜/(mg/kg) Cu	15.06

注:①每千克预混料含有:维生素 A 1 100 000 IU,维生素 D₃ 270 000 IU,维生素 E 6 000 mg,Mn 2 700 mg,Zn 12 080 mg,Se 70 mg,I 160 mg,Co 36 mg。

②产奶净能为计算值,其余均为实测值。

Note: ① Each kilogram of premix contains: Vitamin A 1 100 000 IU, Vitamin D₃ 270 000 IU, Vitamin E 6 000 mg, Mn 2 700 mg, Zn 12 080 mg, Se 70 mg, I 160 mg, Co 36 mg. ② Net energy for lactation was a calculated value, while the others were measured values.

1.3.2 产奶量及乳成分测定

每周测定奶牛日产奶量,计算奶牛的平均日产奶量。按“产奶量 $\times(0.4+15\times\text{乳脂率})$ ”计算4%标准乳(4%FCM)。测定产奶量当天采集奶样,早中晚按照4:3:3的比例共50 ml加入到装有万分之六苯甲酸的奶样管中充分摇匀。使用MILKO SCAN 605红外线测奶仪(FOSS,丹麦)测定乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和总固形物。

1.3.3 血清抗氧化指标测定

正试期第0、4、8和12周于晨饲后3 h,利用真空采血管在奶牛尾根部进行尾静脉采血,静置30 min后3 000 r/min、4℃离心15 min,制备血清样品于-80℃冰箱中保存。铜蓝蛋白(CER)、总超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物还原酶(GSH-Px)参照试剂盒说明书测定,试剂盒购自南京建成生物工程公司。

1.4 数据处理与统计分析

数据使用Excel 2016整理,使用SPSS 25.0中One-Way ANOVA程序对5个组进行单因素方差分析,使用SPSS 25.0中GLM程序进行双因素方差分析,采用Duncan氏法进行多重比较,结果以平均数 \pm 标准差表示, $P<0.05$ 表示差异显著, $0.05<P<0.10$ 表示有趋势。

2 结果与分析

2.1 不同水平铜源对奶牛生产性能的影响

由表2可知,对照组干物质采食量显著低于其余各试验组($P<0.05$),对照组产奶量有低于其余各试验组的趋势($0.05<P<0.10$),4%标准乳和饲料转化率各组间无显著差异($P>0.05$)。铜水平对干物质采食量和产奶量有显著影响($P<0.05$),铜水平为3.5和7.0 mg/kg组干物质采食量和产奶量显著高于对照组($P<0.05$),铜水平对4%标准乳和饲料转化率无显著影响($P>0.05$)。铜源对干物质采食量、产奶量、4%标准乳和饲料转化率无显著影响($P>0.05$)。各组间干物质采食量、产奶量、4%标准乳和饲料转化率无铜源和铜水平的交互作用($P>0.05$)。此结果表明,相较于对照组,添加3.5和7.0 mg/kg的 CuSO_4 或LGC均可提高奶牛的干物质采食量和产奶量,但2种铜源对奶牛干物质采食量和产奶量的影响较小。

2.2 不同水平铜源对奶牛乳成分的影响

由表3可知,各组间乳脂率、乳蛋白率、乳糖率

表 2 不同水平铜源对奶牛生产性能的影响

Table 2 Effects of different levels of copper sources on performance of dairy cows

项目 Items	干物质采食量/ (kg/d) DMI	产奶量/ (kg/d) Milk yield	4%标准乳/ (kg/d) 4% FCM	饲料转化率 FCR
组别 Group				
对照组 Control Group	21.76±1.73 b	30.16±5.35 a	31.23±4.90 a	1.43±0.17 a
3.5 mg/kg CuSO ₄	23.35±0.66 a	32.80±1.53 a	32.77±1.88 a	1.40±0.06 a
7.0 mg/kg CuSO ₄	23.37±0.67 a	33.44±1.45 a	33.06±1.62 a	1.41±0.07 a
3.5 mg/kg LGC	23.34±1.01 a	33.67±2.80 a	33.18±3.25 a	1.42±0.13 a
7.0 mg/kg LGC	23.03±1.16 a	32.74±4.79 a	32.49±4.48 a	1.41±0.16 a
铜源主效应 Main effect of Cu source				
CuSO ₄	22.83±1.35 a	32.13±3.55 a	32.35±3.21 a	1.42±0.11 a
LGC	22.71±1.49 a	32.19±4.63 a	32.30±4.27 a	1.42±0.15 a
铜水平主效应 Main effect of Cu level				
0 mg/kg Cu	21.76±1.73 b	30.16±5.35 b	31.23±4.90 a	1.43±0.17 a
3.5 mg/kg Cu	23.35±0.83 a	33.24±2.24 a	32.77±2.60 a	1.41±0.10 a
7.0 mg/kg Cu	23.20±0.94 a	33.09±3.50 a	32.97±3.32 a	1.41±0.12 a
P 值 P-value				
组别 Group	<0.001	0.055	0.532	0.971
铜源 Cu source	0.653	0.943	0.947	0.875
铜水平 Cu level	<0.001	0.003	0.137	0.780
铜源×铜水平 Cu source×Cu level	0.829	0.732	0.872	0.938

注：同列数据后所标字母相异表示差异显著($P < 0.05$)，所标字母相同表示差异不显著($P > 0.05$)。下表同。

Note: Different letters in the same column mean significant difference among the treatments ($P < 0.05$), same letters in the same column mean no significant difference between treatments ($P > 0.05$). The same below.

和总固形物差异不显著($P > 0.05$)。铜水平对乳脂率有显著影响($P < 0.05$)，铜水平为 3.5 和 7.0 mg/kg 组乳脂率显著低于对照组($P < 0.05$)，铜水平对乳蛋白率、乳糖率和总固形物无显著影响($P > 0.05$)。铜源对乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和总固形物无显著影响($P > 0.05$)。各组间乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和总固形物无铜源和铜水平的交互作用($P > 0.05$)。此结果表明，相较于对照组，添加 3.5 和 7.0 mg/kg 的 CuSO₄ 或 LGC 会降低奶牛乳脂率，不同水平铜源对奶牛乳蛋白率、乳糖率和总固形物的影响较小。

2.3 不同水平铜源对奶牛抗氧化能力的影响

由表 4 可知，对照组 CER 活性显著低于其余各试验组($P < 0.05$)，对照组 SOD 和 GSH-Px 活性显

著低于添加 7.0 mg/kg 的 CuSO₄ 和 LGC 组($P < 0.05$)。铜水平对 CER、SOD 和 GSH-Px 活性有显著影响($P < 0.05$)，铜水平为 3.5 和 7.0 mg/kg 组 CER 活性显著高于对照组($P < 0.05$)，铜水平为 7.0 mg/kg 组 CER 和 SOD 活性显著高于 3.5 mg/kg 组($P < 0.05$)，铜水平为 7.0 mg/kg 组 GSH-Px 活性显著高于对照组($P < 0.05$)。铜源对 CER、SOD 和 GSH-Px 活性无显著影响($P > 0.05$)。各组间 CER、SOD 和 GSH-Px 活性无铜源和铜水平的交互作用($P > 0.05$)。此结果表明，随着 CuSO₄ 和 LGC 添加量的提高，奶牛 CER、SOD 和 GSH-Px 活性也随之提高，但 2 种铜源对奶牛 CER、SOD 和 GSH-Px 活性的影响较小。

表3 不同水平铜源对奶牛乳成分的影响

Table 3 Effects of different levels of copper sources on milk composition of dairy cows

项目 Items	乳脂率/% Milk fat rate	乳蛋白率/% Milk protein rate	乳糖率/% Lactose rate	总固形物/% Total soild
组别 Group				
对照组 Control Group	4.28±0.50 a	3.52±0.19 a	5.12±0.21 a	13.39±0.63 a
3.5 mg/kg CuSO ₄	3.99±0.23 a	3.46±0.17 a	5.14±0.15 a	13.21±0.43 a
7.0 mg/kg CuSO ₄	3.92±0.17 a	3.45±0.16 a	5.14±0.10 a	13.33±0.57 a
3.5 mg/kg LGC	3.92±0.63 a	3.35±0.28 a	5.21±0.12 a	12.95±0.78 a
7.0 mg/kg LGC	3.99±0.63 a	3.44±0.23 a	5.17±0.11 a	13.07±0.76 a
铜源主效应 Main effect of Cu source				
CuSO ₄	4.07±0.36 a	3.48±0.17 a	5.14±0.15 a	13.31±0.54 a
LGC	4.06±0.60 a	3.43±0.24 a	5.17±0.15 a	13.14±0.74 a
铜水平主效应 Main effect of Cu level				
0 mg/kg Cu	4.28±0.50 a	3.52±0.19 a	5.12±0.21 a	13.39±0.63 a
3.5 mg/kg Cu	3.96±0.46 b	3.40±0.23 a	5.18±0.14 a	13.08±0.63 a
7.0 mg/kg Cu	3.96±0.46 b	3.44±0.20 a	5.15±0.11 a	13.20±0.67 a
P值 P-value				
组别 Group	0.197	0.260	0.428	0.289
铜源 Cu source	0.996	0.311	0.289	0.183
铜水平 Cu level	0.011	0.095	0.349	0.154
铜源×铜水平 Cu source×Cu level	0.856	0.477	0.670	0.637

表4 不同水平铜源对奶牛抗氧化能力的影响

Table 4 Effects of different levels of copper sources on antioxidant capacity of dairy cows

项目 Items	铜蓝蛋白/ (U/L) CER	超氧化物歧化酶/ (U/mL) SOD	谷胱甘肽过氧化物酶/ (U/mL) GSH-Px
组别 Group			
对照组 Control Group	15.32±2.77 b	164.91±6.88 c	90.98±6.96 c
3.5 mg/kg CuSO ₄	17.59±1.39 a	167.98±5.57 bc	93.15±4.20 bc
7.0 mg/kg CuSO ₄	18.58±1.96 a	171.38±5.98 ab	96.76±7.06 ab
3.5 mg/kg LGC	17.85±1.26 a	167.82±7.96 bc	95.42±5.78 abc
7.0 mg/kg LGC	18.94±1.28 a	175.18±7.00 a	98.72±9.76 a
铜源主效应 Main effect of Cu source			
CuSO ₄	17.17±2.49 a	168.09±6.60 a	93.63±6.54 a
LGC	17.37±2.42 a	169.30±8.37 a	95.04±8.17 a
铜水平主效应 Main effect of Cu level			
0 mg/kg Cu	15.32±2.77 c	164.91±6.88 b	90.98±6.96 b
3.5 mg/kg Cu	17.72±1.32 b	167.90±6.76 b	94.29±5.10 ab
7.0 mg/kg Cu	18.76±1.64 a	173.28±6.69 a	97.74±8.44 a
P值 P-value			
组别 Group	<0.001	0.001	0.024
铜源 Cu source	0.618	0.381	0.325
铜水平 Cu level	<0.001	<0.001	0.001
铜源×铜水平 Cu source×Cu level	0.935	0.416	0.780

2.4 不同水平铜源对奶牛铜代谢的影响

由表 5 可知,对照组粪铜最低 ($P < 0.05$),添加 7.0 mg/kg 的 CuSO_4 组粪铜显著高于添加 7.0 mg/kg 的 LGC 组,各组间尿铜无显著差异 ($P > 0.05$),添加 7.0 mg/kg 的 LGC 组铜沉积量和铜沉积率最高 ($P < 0.05$)。铜水平对铜采食量、粪铜、铜沉积量和沉积率有显著影响 ($P < 0.05$),铜水平为 3.5 mg/kg 组铜采食量、粪铜、铜沉积量和沉积率显著高于对照组 ($P < 0.05$),铜水平为 7.0 mg/kg 组铜采食量、粪铜、铜沉

积量和铜沉积率显著高于 3.5 mg/kg 组 ($P < 0.05$),铜水平对尿铜无显著影响 ($P > 0.05$)。铜源对粪铜、铜沉积量和铜沉积率有显著影响 ($P < 0.05$),LGC 组粪铜显著低于 CuSO_4 组 ($P < 0.05$),LGC 组铜沉积量和铜沉积率显著高于 CuSO_4 组 ($P < 0.05$)。各组间铜采食量、粪铜和尿铜无铜源和铜水平的交互作用 ($P > 0.05$),铜沉积量和铜沉积率各组间存在交互作用 ($P < 0.05$)。此结果表明,在相同水平铜添加量下,LGC 组的铜沉积量和铜沉积率高于 CuSO_4 组。

表 5 不同水平铜源对奶牛铜代谢的影响
Table 5 Effects of different levels of copper sources on copper metabolism of dairy cows

项目 Items	铜采食量/ (mg/d) Cu intake	粪铜/ (mg/d) Fecal Cu	尿铜/ (mg/d) Urinary Cu	铜沉积量/ (mg/d) Cu deposition	铜沉积率/% Cu Deposition rate
组别 Group					
对照组 Control Group	295.97±25.03 c	275.66±24.97 d	2.61±0.89 a	17.69±4.40 d	6.01±1.56 c
3.5 mg/kg CuSO_4	414.29±14.55 b	382.27±19.44 c	2.76±0.75 a	29.26±6.95 c	7.10±1.77 c
7.0 mg/kg CuSO_4	503.70±20.21 a	461.81±26.85 a	2.86±0.78 a	39.03±10.10 b	7.80±2.12 c
3.5 mg/kg LGC	402.64±45.68 b	359.40±41.39 c	2.79±0.62 a	40.45±7.95 b	10.04±1.60 b
7.0 mg/kg LGC	480.50±28.92 a	413.99±22.09 b	2.93±0.38 a	63.58±13.30 a	13.17±2.30 a
铜源主效应 Main effect of Cu source					
CuSO_4	404.65±89.06 a	373.25±81.20 a	2.74±0.78 a	28.66±11.45 b	6.97±1.90 b
LGC	393.04±83.97 a	349.68±65.09 b	2.78±0.65 a	40.57±21.10 a	9.74±3.48 a
铜水平主效应 Main effect of Cu level					
0 mg/kg Cu	295.97±25.03 c	275.66±24.97 c	2.61±0.89 a	17.69±4.40 c	6.01±1.56 c
3.5 mg/kg Cu	408.47±33.30 b	370.84±33.40 b	2.78±0.67 a	34.85±9.25 b	8.57±2.23 b
7.0 mg/kg Cu	492.10±26.92 a	437.90±34.26 a	2.90±0.59 a	51.31±17.05 a	10.48±3.50 a
P 值 P-value					
组别 Group	<0.001	<0.001	0.919	<0.001	<0.001
铜源 Cu source	0.162	0.005	0.869	<0.001	<0.001
铜水平 Cu level	<0.001	<0.001	0.558	<0.001	<0.001
铜源×铜水平 Cu source×Cu level	0.515	0.060	0.990	0.001	0.001

3 讨论

3.1 不同水平铜源对奶牛生产性能的影响

Hansen 等^[11]在饲料中添加不同水平 CuSO_4 或甘氨酸铜(5 和 10 mg/kg)相较于未添加铜组可提高公牛的干物质采食量(DMI),但铜水平为 5 和 10 mg/kg 组间 DMI 的差异较小,这与本研究结果一致,补充铜可以提高反刍动物瘤胃微生物对饲料蛋白质的利用效率和纤维降解能力,提高了干物质消化率进而提高了 DMI^[7],但不同铜水平对 DMI 的影响较小。然而付辑光等^[2]研究表明,饲料中添加铜对奶牛 DMI 影响较小,研究结果的差异性可能与奶牛品种、饲料组成和奶牛对铜的缺乏程度有关。常新耀等^[12]的研究表明,添加不同水平 CuSO_4 (6、10 和 12 mg/kg)可以提高奶牛奶量和 4% 标准乳(4% FCM),并且产奶量和 4% FCM 与铜添加量呈正相关关系,补充铜可以促进奶牛对饲料中营养物质的获取从而提高产奶量和 4% FCM,本研究中补充铜有提高产奶量的趋势,略微提高了 4% FCM,并且添加 3.5 和 7.0 mg/kg 铜水平间差异不显著,这可能与较低铜添加量已经达到生产需求有关。NRC(2001)规定体重为 650 kg、产量为 40 kg 的奶牛铜需要量为 15.6 mg/kg^[13]。本研究中基础饲料铜含量为 15.06 mg/kg,添加 3.5 mg/kg 铜后奶牛的产奶量进一步提高,但添加 7.0 mg/kg 铜对产奶量的提升效果有限,付辑光等^[2]研究同样表明奶牛铜的需要量为 18.09~23.09 mg/kg,并且更高添加量对提高产奶量的作用较小,说明在奶牛生产中铜的实际需求量更高,但过多添加铜对提升奶牛的生产能力有限。Wang 等^[14]研究表明补充羟基蛋氨酸铜相较于 CuSO_4 对奶牛 DMI 的影响较小,但有提高产奶量和 4% FCM 的趋势,并推测羟基蛋氨酸铜相较于 CuSO_4 有更高的利用率,尤其是在应对环境不利的应激状况下效果更好,因而能够提高产奶量和 4% FCM。本研究中 2 种铜源对奶牛 DMI、产奶量和 4% FCM 的影响较小,试验结果的差异性可能与试验过程中的环境因素和补充铜源均已达到奶牛生产需求有关。

3.2 不同水平铜源对奶牛乳成分的影响

乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和总固形物是评价乳品质的重要标准。常新耀等^[12]添加不同水平 CuSO_4 未发现对奶牛乳蛋白率和乳糖率造成显著影响,本研究结果同样表明补充不同水平铜对乳蛋

白率和乳糖率的影响较小,说明饲料中添加铜不会改变乳蛋白和乳糖含量。Engle 等^[15]的研究表明饲料添加 CuSO_4 未改变奶牛乳脂率,但能够降低 $\text{C}_{18:1}$ 反式脂肪酸和 C_{18} 共轭二烯酸的浓度。本研究中添加不同水平铜降低了乳脂率,试验结果的差异性可能与试验牛品种有关。有研究表明,产奶量与乳脂率具有显著负相关关系^[16],本研究中补充铜提高了产奶量从而使得乳脂含量有所下降。然而,补充铜是否会对乳中脂肪酸组成造成影响有待进一步研究。付辑光等^[2]研究表明铜水平对奶牛总固形物无影响,这与本研究结果一致。Wang 等^[14]研究表明添加羟基蛋氨酸铜相较于 CuSO_4 未对奶牛乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和总固形物造成显著影响,这与本研究结果一致,说明铜源对乳成分的影响较小。

3.3 不同水平铜源对奶牛抗氧化能力的影响

黄元龙等^[17]研究表明饲料添加 CuSO_4 (10 和 25 mg/kg)可提高绵羊血清 CER 和 SOD 活性,并与铜添加量呈正相关关系,这与本研究结果一致,CER 作为转运铜的重要蛋白其自身也需要铜来合成,也具备减少脂质过氧化物生成的作用,SOD 作为含铜酶可以催化超氧阴离子歧化为氧气和过氧化氢,对于机体的氧化与抗氧化平衡具有重要作用,增加饲料铜水平会使机体内包括 CER 和 SOD 的含铜酶活性提高,从而提高反刍动物的抗氧化能力。本研究中,补充铜可提高 GSH-Px 活性并与铜添加量呈正相关关系,这与前人的研究结果一致^[2],增加饲料铜水平可提高 SOD 活性,减少超氧阴离子蓄积从而增强 GSH-Px 活性。程廷彬^[18]研究表明,蛋氨酸铜和 CuSO_4 对提高奶牛 CER 和 SOD 活性的作用相同,本研究中 LGC 和 CuSO_4 对提升奶牛抗氧化能力无显著差异,这表明在相同铜添加量的情况下,LGC 对于提升奶牛抗氧化能力的作用较小。

3.4 不同水平铜源对奶牛铜代谢的影响

本研究中,随着铜采食量的提高,奶牛铜的排泄量增加,这与付辑光等^[2]研究结果一致,奶牛对于铜的利用率较低,仅为 5%~10%^[5],过多的添加铜很容易造成环境污染。有机铜可提高反刍动物铜的生物利用度已经得到试验证明,蛋氨酸铜在母羊中具有更高的肠道吸收能力和更低的铜排泄率,这是由于肠道中无机来源的矿物质离子可能会与其他消化成分重组形成不溶性复合物,从而降低肠道吸收,而有机矿物质则通过粘膜吸收氨基酸并将其完全吸收到血液中^[19],有机形态的铜也能够避免与其他元素

的拮抗作用,从而提高利用效率^[20]。其他研究也报道了与CuSO₄相比,有机铜排泄量较低^[21-22]。本研究中LGC在奶牛体内的铜沉积率要高于CuSO₄,说明奶牛对于LGC的吸收效率更高。

4 结 论

在基础铜含量为15.06 mg/kg的饲料中添加3.5和7.0 mg/kg的CuSO₄或LGC均可提高奶牛的产奶量和抗氧化能力。LGC相较于CuSO₄可提高奶牛的铜沉积率,减少粪铜排放量,从生产性能和环境保护综合考虑,在奶牛饲料中添加3.5 mg/kg的LGC效果最好,在保证生产需求的基础上又能够降低环境污染。

参考文献 References

- [1] 薛艳锋,郝力壮,刘书杰,赵索南.铜在反刍动物上的研究和应用进展[J].黑龙江畜牧兽医,2016(13):54-58
Xue Y F, Hao L Z, Liu S J, Zhao S N. Research progress and application of copper in ruminants[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2016(13): 54-58 (in Chinese)
- [2] 付辑光,高艳霞,李妍,李秋凤,曹玉凤,张秀江,李建国.饲料铜水平对奶牛生产性能、养分表观消化率及血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2018,30(8):3005-3016
Fu J G, Gao Y X, Li Y, Li Q F, Cao Y F, Zhang X J, Li J G. Effects of dietary copper levels on performance, nutrient apparent digestibility and serum biochemical indices of lactating dairy cows[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(8): 3005-3016 (in Chinese)
- [3] 王晓雅,贾大庆,韩杨,王建发,武瑞.铜对奶牛免疫能力的影响[J].畜牧与饲料科学,2019,40(4):18-20
Wang X Y, Jia D Q, Han Y, Wang J F, Wu R. Effect of copper on immune ability of dairy cows[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2019, 40(4): 18-20 (in Chinese)
- [4] 薛艳锋,郝力壮,刘书杰,柴沙驼,张晓卫,赵索南.饲料铜含量对牦牛体外瘤胃发酵的影响[J].动物营养学报,2016,28(8):2599-2606
Xue Y F, Hao L Z, Liu S J, Chai S T, Zhang X W, Zhao S N. Effects of dietary copper content on rumen fermentation of yaks in vitro[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(8): 2599-2606 (in Chinese)
- [5] 敖·德古里那,张楠,焦蕾蕾,杨春生,王静,贺永强.铜在奶牛上的营养作用研究[J].中国牛业科学,2019,45(2):55-59
Ao D G, Zhang N, Jiao B L, Yang C S, Wang J, He Y Q. Nutritional effects of copper on dairy cows[J]. *China Cattle Science*, 2019, 45(2): 55-59 (in Chinese)
- [6] Spears J W. Organic trace minerals in ruminant nutrition[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1996, 58(1/2): 151-163
- [7] Dezfoulian A H, Aliarabi H, Tabatabaei M M, Zamani P, Alipour D, Bahari A, Fadayifar A. Influence of different levels and sources of copper supplementation on performance, some blood parameters, nutrient digestibility and mineral balance in lambs[J]. *Livestock Science*, 2012, 147(1/3): 9-19
- [8] 李寰旭,王芬.羟基蛋氨酸螯合态铜对奶牛生产性能和血液生化指标的影响[J].饲料研究,2015(12):29-35,53
Li H X, Wang F. Effects of methionine hydroxy copper on performance and blood biochemical indices of dairy cows[J]. *Feed Research*, 2015(12): 29-35, 53 (in Chinese)
- [9] Bampidis V, Azimonti G, Bastos M D, Christensen H, Dusemund B, Kouba M, Durjava M K, Lopez-Alonso M, Puente S L, Marcon F, Mayo B, Pechova A, Petkova M, Sanz Y, Villa R E, Woutersen R, Cubadda F, Flachowsky G, Mantovani A, Lopez-Galvez G, Ramos F. Safety and efficacy of copper chelates of lysine and glutamic acid as a feed additive for all animal species[J]. *European Food Safety Authority Journal*, 2019, 17(6)
- [10] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597
- [11] Hansen S L, Schlegel P, Legleiter L R, Lloyd K E, Spears J W. Bioavailability of copper from copper glycinate in steers fed high dietary sulfur and molybdenum[J]. *Journal of Animal Science*, 2008, 86(1): 173-179
- [12] 常新耀,谢红兵,魏刚才,王慧英.微量元素铜对奶牛泌乳性能的效果研究[J].湖南农业科学,2008(3):168-170
Chang X Y, Xie H B, Wei G C, Wang H Y. Effect of trace copper on performance of dairy cows[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2008(3): 168-170
- [13] NRC. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle* [M]. 7th ed. Washington, DC: National Academy Press, 2001
- [14] Wang F, Li S L, Xin J, Wang Y J, Cao Z J, Guo F C, Wang Y M. Effects of methionine hydroxy copper supplementation on lactation performance, nutrient digestibility, and blood biochemical parameters in lactating cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(10): 5813-5820
- [15] Engle T E, Fellner V, Spears J W. Copper status, serum cholesterol, and milk fatty acid profile in Holstein cows fed varying concentrations of copper [J]. *Journal of Dairy Science*, 2001, 84(10): 2308-2313
- [16] 童津津,张华,吴富鑫,牛慧,熊本海,蒋林树.不同泌乳水平奶牛产奶量、乳成分和环境温湿指数的相关性研究[J].动物营养学报,2020,32(7):3171-3180
Tong J J, Zhang H, Wu F X, Niu H, Xiong B H, Jiang L S. Correlation analysis on milk yield, milk composition and temperature humidity index of dairy cows with different milk

- yield[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(7): 3171-3180 (in Chinese)
- [17] 黄元龙, 张天芮, 高阳, 刘博, 杨文艳, 杨连玉. 日粮铜水平对绵羊血液生化指标及含铜酶活性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(6): 746-750
- Huang Y L, Zhang T R, Gao Y, Liu B, Yang W Y, Yang L Y. Effects of dietary copper levels on blood biochemical indexes and enzyme activities containing copper in Sheep[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(6): 746-750 (in Chinese)
- [18] 程延彬. 不同种类铜源及水平对奶牛瘤胃发酵及血液生化指标的影响[D]. 黑龙江: 黑龙江八一农垦大学, 2010
- Cheng Y B. Effects of different types of copper source and level on rumen fermentation and blood biochemical parameters of dairy cows [D]. Heilongjiang: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [19] Pal D T, Gowda N K, Prasad C S, Amarnath R, Bharadwaj U, Suresh Babu G, Sampath K T. Effect of copper- and zinc-methionine supplementation on bioavailability, mineral status and tissue concentrations of copper and zinc in ewes [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2010, 24(2): 89-94
- [20] 吴学壮, 高秀华, 杨福合, 张铁涛, 崔虎, 刘志, 郭俊刚, 邢秀梅. 饲料铜源及水平对育成期雄性水貂生长性能、营养物质表观消化率及氮、铜代谢的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(3): 795-803
- Wu X Z, Gao X H, Yang F H, Zhang T T, Cui H, Liu Z, Guo J G, Xing X M. Effects of dietary copper sources and levels on growth performance, nutrient apparent digestibility and copper and nitrogen metabolism of male minks in late growing period [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(3): 795-803 (in Chinese)
- [21] Datta C, Mondal M K, Biswas P. Influence of dietary inorganic and organic form of copper salt on performance, plasma lipids and nutrient utilization of Black Bengal (*Capra hircus*) goat kids[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 135(3/4): 191-209
- [22] Mondal M K, Biswas P, Roy B, Mazumdar D. Effect of copper sources and levels on serum lipid profiles in Black Bengal (*Capra hircus*) kids[J]. *Small Ruminant Research*, 2007, 67(1): 28-35

责任编辑: 秦梅