

# 钼对镉胁迫下山羊红细胞膜抗氧化功能和肝 XOD 基因转录的影响

顾小龙, 王琦, 曹华斌\*, 张彩英, 庄煜, 胡国良, 郭小权, 黄爱民

(江西农业大学动物群发性疾病监测和防治研究所, 南昌 330045)

**摘要:** 旨在观察钼对镉胁迫下山羊红细胞膜抗氧化功能和肝 XOD 基因转录的影响。选取体重约为 20 kg 的山羊 36 只分为 4 组(每组 3 个重复, 每个重复 3 只): 试验组灌服相同量的  $\text{CdCl}_2$  和不同量的  $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ , 对照组灌服对应量去离子水, 试验期 50 d。具体分组为对照组( $\text{Cd } 0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、试验 I 组( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 按体重计算, 下同)、试验 II 组( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、试验 III 组( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。于试验的第 0、10、20、30、40、50 天每组山羊采血, 于试验的第 0、25、50 天每组山羊取肝, 测定相关指标。结果表明, 随着试验时间的延长, 各试验组红细胞膜 XOD、LDH 活性呈现上升的趋势, ATPase、ALP 活性呈现下降的趋势, 并在第 50 天时, 与对照组相比, 各试验组红细胞膜 XOD、LDH 活性显著上升( $P < 0.01$ ), ATPase、ALP 活性显著降低( $P < 0.01$ ), T-AOC 无统计学意义( $P > 0.05$ )。随着试验时间的延长, 各试验组肝 XOD 基因转录量呈下降的趋势, 并在第 50 天时, 与对照组相比, 各试验组 XOD 基因转录量显著下降( $P < 0.05$ )。镉胁迫下随着钼水平的升高红细胞膜抗氧化功能降低, 肝 XOD 基因的转录量下调, 钼与镉呈协同关系。

**关键词:** 山羊; 钼; 镉; 红细胞膜; 肝

中图分类号: X503.22

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2014)10-1726-07

## Effects of Molybdenum under Stress of Cadmium on Red Blood Cell Membrane Antioxidation and XOD Gene Transcription of Liver in Goat

GU Xiao-long, WANG Qi, CAO Hua-bin\*, ZHANG Cai-ying, ZHUANG Yu,

HU Guo-liang, GUO Xiao-quan, HUANG Ai-min

(Institute of Animal Population Health, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** This experiment was conducted to determine effects of molybdenum under stress of cadmium on red blood cell membrane antioxidation and XOD gene transcription of liver in goat. Thirty-six goats weighing approximately 20 kg each were randomly allocated into 4 groups of 9 goats each (three replicates every group). Goats of experiment group were drenched the same amount  $\text{CdCl}_2$  and the different amount  $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ , and goats of control group were drenched corresponding quantitative deionized water. Groups consisted of control group (0Cd+0Mo), experiment group I (Cd 0.5 mg+Mo15 mg, per kg of body weight), experiment group II (Cd0.5 mg+Mo30 mg, per kg of body weight), experiment group III (Cd0.5 mg+Mo45 mg, per kg of body weight). Blood was collected on the 0th, 10th, 20th, 30th, 40th and 50th day and liver were collected on the 0th, 25th and 50th day in experiment period from every group, then related

收稿日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(31101863); 江西省自然科学基金(2010GQN0052); 江西省教育厅科学基金项目(GJJ10103); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ14294)

作者简介: 顾小龙(1988-), 男, 江西景德镇人, 硕士, 主要从事畜禽营养代谢与中毒病研究, E-mail: xuewu24588@126.com。王琦与顾小龙对本文的贡献相同

\* 通信作者: 曹华斌, 江西樟树人, 博士, 副教授, 主要从事畜禽营养代谢与中毒病的教学及科研工作, E-mail: chbin20020804@163.com

indexes were determined. Results showed that XOD, LDH in red cell membrane of each experiment group were significantly raised, reduced ATPase, ALP activity were observed following the increase of experiment time, in addition, compared with control group, levels of XOD, LDH from each group were significantly higher while ATPase, ALP were lower on 50th day ( $P < 0.01$ ), T-AOC had no statistical significance ( $P > 0.05$ ); XOD transcription of liver in each experiment group showed a time-dependent effect, in addition, compared with control group, transcription of XOD significantly descend on 50th day ( $P < 0.05$ ). These results showed that red blood cell antioxidation decreased and XOD transcription of liver downregulated with the increasing of molybdenum under stress of cadmium in goats, and there was synergistic relationship between molybdenum and cadmium.

**Key words:** goat; molybdenum; cadmium; red cell membrane; liver

钼是一种动物必需的微量元素, 是被称为钼辅因子的复合物的一部分, 为哺乳动物酶黄嘌呤氧化酶、乙醛氧化酶和亚硫酸盐氧化酶的必需成分<sup>[1]</sup>。当动物摄取的钼超过一定量时, 会导致钼中毒。这种情况又因动物物种、年龄、摄取钼的化学形式和剂量、铜钼比例不同而不同。Kusum 等持续给山羊喂服  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的钼酸盐 30 d 后, 会引起山羊钼中毒<sup>[2]</sup>。钼能引起中毒的本质在于它能引起继发性的铜缺乏症, 动物中毒后会发生繁殖障碍、生长抑制、血红蛋白和血细胞比容下降<sup>[3]</sup>。因冶炼钼工人长期暴露在高钼环境中, 其血液中尿素盐浓度会升高, 同时发生类似骨生成障碍的临床症状和类痛风的综合征<sup>[4]</sup>。镉是一种高毒性金属, 人类和动物发生镉中毒的事件非常普遍。它能刺激机体产生自由基和诱发多个脏器的肿瘤或癌症, 美国毒物管理委员会已经把它列为第 6 位危害人类健康的有毒物质。随着工业的发展带来的环境污染, 环境中镉含量逐年增加, 并给动物和人类带来了一定的影响<sup>[5]</sup>。研究发现, 大多数的钼污染, 主要是由于钼矿精选及冶炼厂排放的“三废”, 污染湖泊、河流或飞散的粉尘落入土壤及饲草中而发生污染, 而镉在选矿中也有少量伴生, 所以钼镉联合中毒在放牧动物中偶有发生。钼、镉进入生物体后首先通过血液循环到达靶细胞, 所以红细胞是钼、镉直接接触的细胞之一。镉中毒会导致自由基代谢紊乱, 过量的自由基对红细胞产生毒副作用, 尤其对红细胞膜的损伤作用最强, 从而导致许多疾病的发生。关于钼或镉导致动物中毒的基础性研究在国内外已经做了很多<sup>[6-10]</sup>, 但是关于钼镉联合作用的研究较少, 而由于江西地区多矿, 其钼镉联合中毒的现象也常有发生。作者拟探讨钼对镉胁迫下山羊红细胞膜中红细胞膜抗氧化功能

和肝 XOD 基因表达的影响, 旨在了解反刍动物中钼镉联合作用对其血液学和肝功能的变化提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

采用纯种波尔山羊作为试验动物, 选取 36 只体重约 20 kg 的健康山羊, 随机分为 4 组, 每组 9 只羊, 具体分组为对照组 ( $\text{Cd } 0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、试验 I 组 ( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 按体重计算, 下同)、试验 II 组 ( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、试验 III 组 ( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 每组 3 个重复。 $\text{CdCl}_2$  和  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  分别作为镉源和钼源, 各试验组每日定时定量通过胃导管灌服氯化镉和钼酸铵溶液, 对照组灌服对应量去离子水。试验周期 50 d。试验山羊基础日粮参照 NRC(2007) 饲养标准山羊营养需要量配制, 日粮组成和营养水平, 饲料及水中的钼、镉与铜含量的检测见表 1。

### 1.2 检测指标

试验期内每日对山羊的状态进行观察, 并做记录。在试验的第 0、10、20、30、40、50 天, 每组山羊隔夜禁食后采取少量抗凝血提取红细胞膜, 测定抗氧化酶相关指标 XOD、LDH、ATPase、ALP 和 T-AOC。分别在试验的第 0、25、50 天, 每组山羊在麻醉后随机宰杀 3 只, 并迅速取肝组织, 做凋亡基因 XOD 表达的测定。

### 1.3 红细胞膜的提取及相关指标的检测

红细胞膜的抽提参照杨根元等<sup>[11]</sup>介绍的方法进行。红细胞膜检测所用试剂盒由南京建成生物工程研究所提供, 严格根据试剂盒说明进行检测。

表 1 山羊基础日粮组成和营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels in the basal diet (air-dry basis) for the dairy goats

%

饲粮组成 Composition of diet		营养水平 Nutrient levels	
项目 Item	含量 Content	指标 Index	水平 Level
玉米 Corn	52.50	粗蛋白质 CP	16.57
米糠 Rice bran	19.00	代谢能/(MJ·kg <sup>-1</sup> )ME	13.12
豆粕 Soybean meal	10.00	钙 Ca	0.90
菜粕 Rapeseed meal	7.00	磷 P	0.78
棉籽粕 Cottonseed meal	7.00		
磷酸氢钙 CaHPO <sub>4</sub>	1.00		
石粉 Limestone	1.50		
食盐 NaCl	1.00		
预混料 Premix*	1.00		
总和 Total	100.00		

水、草和料中的微量元素含量 Content of trace element in water, grass and fodder

项目 Item	微量元素含量/(μg·g <sup>-1</sup> ) Content of trace element		
	Mo	Cd	Cu
去离子水 Deionized water	0.000 0	0.000 0	0.000 0
自来水 Tap water	0.008 9	0.000 8	0.002 6
草 Grass	1.888 8	0.070 8	2.012 5
饲料 Fodder	6.019 5	0.049 6	4.486 5

\* 预混料为每千克饲粮提供:尼克酸 2 000 mg, V<sub>A</sub> 1 000 000 IU, V<sub>D</sub> 3 250 000 IU, V<sub>E</sub> 2 400 mg, Fe(FeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 2 000 mg, Zn(ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 140 000 mg, Mn(MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 3 000 mg, I(KI, 3%) 180 mg, Se(NaSe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 100 mg

The premix provided the following per kg of diets: Nicotinic acid 2 000 mg, V<sub>A</sub> 1 000 000 IU, V<sub>D</sub> 3 250 000 IU, V<sub>E</sub> 2 400 mg, Fe(FeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 2 000 mg, Zn(ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 140 000 mg, Mn(MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 3 000 mg, I(KI, 3%) 180 mg, Se(NaSe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) 100 mg

#### 1.4 肝组织的 RT-PCR

总 RNA 的提取和 RNA 电泳:采用 TransZol 一步法提取总 RNA,用核酸蛋白仪测定总 RNA 浓度和纯度。取 1~2 μL 总 RNA,用 1.0% 变性琼脂糖凝胶电泳分离,EB 染色后用凝胶成像系统照相,观察 RNA 条带,并保持 28S 与 18S 条带灰度之比大约为 2.0。

PCR 引物设计:依据 GenBank 上公布羊的 XOD 和肌动蛋白( $\beta$ actin)基因序列,采用 Primer Express3.0 软件设计引物,分别在相对保守的区域设计引物和探针,其中探针 5'端标记 FAM,3'端标记 TEMRA,由上海英骏技术公司合成,引物序列见

表 2。

反转录:按北京金式金生物技术有限公司的试剂盒操作进行。

Real Time(qPCR)反应:采用 TaqMan 探针法进行 Real Time(qPCR)反应,按宝生物工程(大连)有限公司的 TaKaRa Premix Ex Taq<sup>TM</sup> (Probe qPCR)试剂盒操作进行。

#### 1.5 数据统计分析

经 Excel 2007 对试验数据整理后,采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行分析,用 Duncan's 新复极差法进行平均数的显著检验。数据用平均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示。

表 2 引物和探针序列

Table 2 Primer and Probe sequence

基因名称 Gene name	基因序列号 Gene serial number	引物和探针序列(5'→3') Prime and Probe sequence(5'→3')	扩增片段长度/bp Amplified fragment length
XOD	EF151286.1	上游: CAGGAGAGAATCGCCAAAAGTC	81
		下游: GCAGCGTGACATGCTCATGA	
		探针: TGGCTTCTGCACCCCGGC	
$\beta$ actin	U39357.1.1	上游: TCACGGAGCGTGGCTACAG	63
		下游: CCTTGATGTCACGGACGATTT	
		探针: TCACCACCACGGCCGA	

## 2 结果

### 2.1 临床症状

试验在第 0 天时试验组山羊没有出现临床症状,采食正常,自灌服  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CdCl}_2$  后第 20 天开始出现症状,采食量下降,且随试验时间的延长,体重下降、消瘦,出现被毛粗乱,脱

落,白色被毛增多(图 1A、图 1B)等临床症状,并在第 32 天时观察到试验 III 组出现腹泻症状,粪便逐渐变得稀软,污染肛门周围(图 1C)。试验 I 组和试验 II 组分别是在第 40 天和第 42 天时,有山羊出现腹泻,但与试验 III 组相比病症稍轻。各试验组山羊在后期出现磨牙、尖叫、卧地不起等症状,体重急剧下降,明显消瘦。



A. 试验 I 组( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); B. 试验 II 组( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); C. 试验 III 组( $\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} + \text{Mo } 45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

A. Experiment group I; B. Experiment group II; C. Experiment group III

图 1 不同钼水平对镉胁迫下山羊临床症状的变化

Fig. 1 Effect of different levels of molybdenum on clinical sign of goats under the stress of cadmium

### 2.2 钼对镉胁迫下山羊红细胞膜 ATPase 活性的影响

不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 ATPase 活性的影响见图 2。与对照组相比,各试验组红细胞膜 ATPase 活性在第 20 天时呈下降趋势( $P < 0.05$ )。其中,第 50 天时试验 I 组、试验 II 组和试验 III 组的 ATPase 活性较对照组低 19.6%、30.8% 和 45.8% ( $P < 0.05$ )。

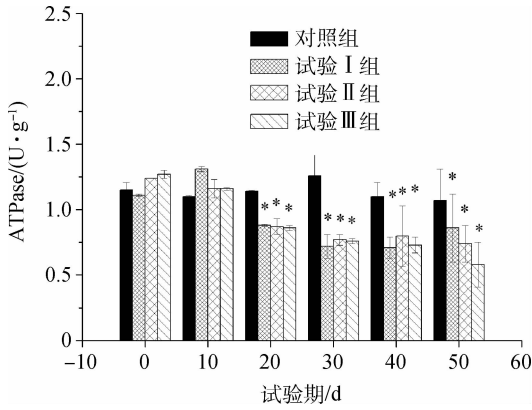
### 2.3 钼对镉胁迫下山羊红细胞膜 XOD 活性的影响

不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 XOD 活性的影响见图 3。与对照组相比,各试验组红细胞

膜 XOD 活性在第 30~40 天时呈上升趋势,试验 II 组差异显著( $P < 0.05$ ),且在第 50 天时各试验组差异极显著( $P < 0.01$ )。其中,第 50 天时试验 I 组、试验 II 组和试验 III 组的 XOD 活性比对照组高 120%、130% 和 140% ( $P < 0.01$ )。

### 2.4 钼对镉胁迫下山羊红细胞膜 ALP 活性的影响

不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 ALP 活性的影响见图 4。与对照组相比,试验组的 ALP 活性在第 50 天时降低( $P < 0.01$ )。其中,第 50 天时试验 I 组、试验 II 组和试验 III 组的 ALP 活性比对照组低 35.7%、37.4% 和 34.8% ( $P < 0.01$ )。



\* 表示与对照组相比差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ ). 下同

\*.  $P < 0.05$ ; \*\*.  $P < 0.01$ . The same as below

图 2 不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 ATPase 活性的影响

Fig. 2 Effect of different levels of molybdenum on the activities of ATPase in erythrocyte membrane from goats under the stress of cadmium

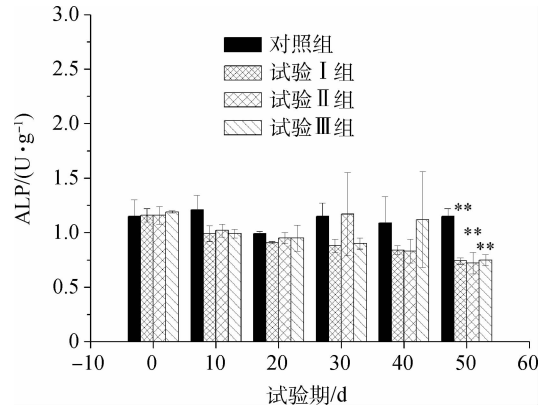


图 4 不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 ALP 活性的影响

Fig. 4 Effect of different levels of molybdenum on the activities of ALP in erythrocyte membrane from goats under the stress of cadmium

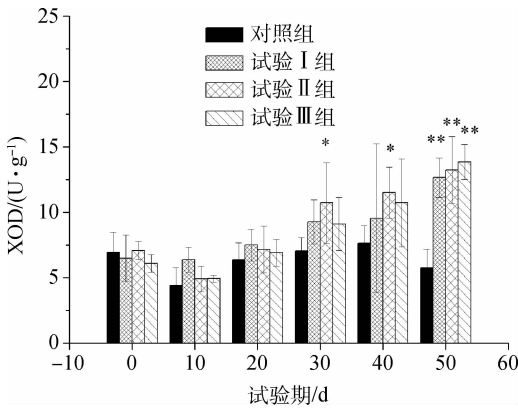


图 3 不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 XOD 活性的影响

Fig. 3 Effect of different levels of molybdenum on the activities of XOD in erythrocyte membrane from goats under the stress of cadmium

### 2.5 钼对镉胁迫下山羊红细胞膜 LDH 活性的影响

不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 LDH 活性的影响见图 5。与对照组相比,各试验组的 LDH 活性呈上升趋势,且在第 40 天时差异显著 ( $P < 0.05$ ),在第 50 天时差异极显著 ( $P < 0.01$ )。其中,第 50 天时试验 I 组、试验 II 组和试验 III 组的 LDH 活性比对照组高 17.7%、18.9% 和 16.9% ( $P < 0.01$ )。

### 2.6 钼对镉胁迫下山羊红细胞膜 T-AOC 活性的影响

不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 T-AOC

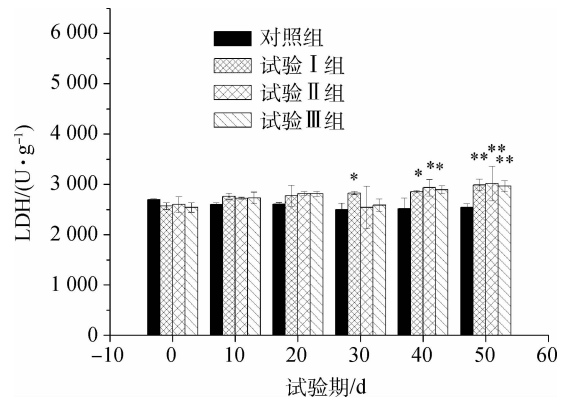


图 5 不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 LDH 活性的影响

Fig. 5 Effect of different levels of molybdenum on the activities of LDH in erythrocyte membrane from goats under the stress of cadmium

活性的影响见图 6。与对照组相比,除了试验 III 组红细胞膜 T-AOC 活性在第 30 天时升高 ( $P < 0.05$ ),其他组在整个试验周期中差异不显著 ( $P > 0.05$ )。其中,第 50 天时试验 I 组、试验 II 组和试验 III 组的 T-AOC 活性比对照组低 39.6%、17.9% 和 51.9% ( $P > 0.05$ )。

### 2.7 钼对镉胁迫下山羊肝组织 XOD 基因转录量的影响

不同钼水平对镉胁迫下山羊肝 XOD 基因转录量的影响见图 7。第 50 天时,各试验组山羊肝 XOD 基因转录量较对照组显著降低 ( $P < 0.05$ ),试验 I 组、试验 II 组和试验 III 组 XOD 基因转录量分别较对照组低 32.3%、42.6% 和 59.4%。

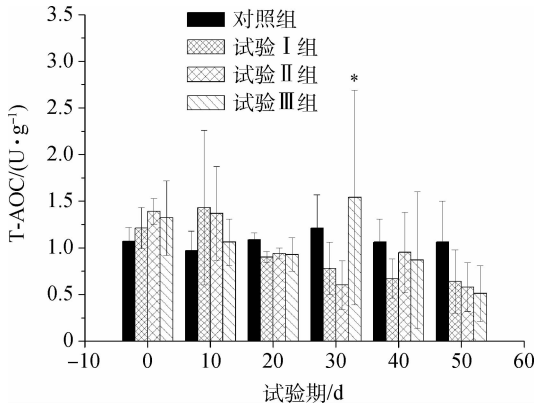


图 6 不同钼水平对镉胁迫下山羊红细胞膜 T-AOC 活性的影响

Fig. 6 Effect of different levels of molybdenum on the activities of T-AOC in erythrocyte membrane from goats under the stress of cadmium

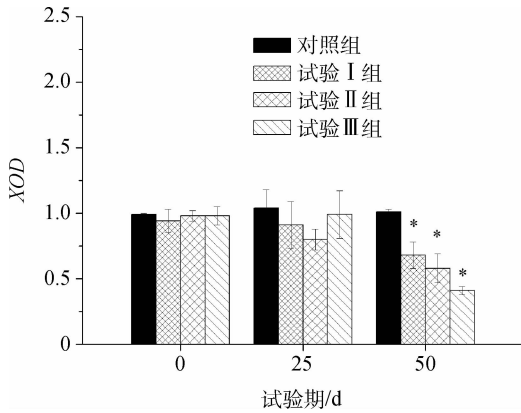


图 7 不同钼水平对镉胁迫下山羊肝 XOD 基因转录量的影响

Fig. 7 Effect of different levels of molybdenum on the transcription of XOD in liver from goats under the stress of cadmium

### 3 讨论

一般情况下机体抗氧化系统维持动态平衡状态,但在内外因(如镉<sup>[12]</sup>)的作用下这种平衡遭到破坏,使机体产生过多的氧自由基,引起机体抗氧化损伤,诱发炎症及其疾病的产生,影响生长性能。

本研究结果表明,随着钼、镉染毒时间的延长,各试验组红细胞膜 XOD、LDH 活性呈现上升的趋势,ATPase、ALP 活性呈现下降的趋势,且在第 50 天时差异均显著。ATPase 由  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -ATPase 和  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ -ATPase 组成。红细胞膜  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -ATP 酶活性与糖酵解相偶联,控制红细胞的代谢速率<sup>[13]</sup>。而 ALP 是非特异性磷酸单酯酶,可以催化

几乎所有的磷酸单酯的水解反应,生成无机磷酸和相应的醇、酚、糖等,还可以催化磷酸基团的转移反应<sup>[14]</sup>。由镉诱导的自由基会改变细胞膜的完整性和流动性,减少 ATP 的生成,继而影响  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -ATPase 的活性,另外,钼引起的山羊贫血,也加剧了这个过程。自由基对  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ -ATPase 的作用机制也与上述相似,使得红细胞  $\text{Ca}^{2+}$  内流,从而发生组织的缺氧。这种缺氧使得机体进入一种恶性循环,引发严重的危害。提示镉胁迫下钼能使得山羊的红细胞 ATPase 和 ALP 活性降低。

XOD 在核酸的分解代谢中起到重要的作用,其在催化黄嘌呤和次黄嘌呤氧化的过程中不仅会生成尿酸而且能够产生超氧阴离子和过氧化氢等过氧化物自由基<sup>[15]</sup>。在本次试验中,随着钼质量浓度的增加和试验时间的延长,山羊肝 XOD 基因转录量呈现下降的趋势。针对本试验的结果,导致山羊肝 XOD 基因转录量降低的原因可能有两方面:一方面,XOD 在钼镉联合作用下合成有所增加,但机体可能存在一种代偿保护机制,抑制 XOD 基因转录;另一方面,核酸代谢紊乱,如上所述,山羊机体的抗氧化能力已严重受损,脂质过氧化产物和自由基在山羊体内淤积。在这种情况下核酸就极易受到自由基的攻击而导致核酸断裂、突变等,进而影响山羊核酸正常的代谢与表达,导致山羊 XOD 基因表达量的降低。LDH 是以  $\text{NAD}^+$  为辅酶,催化生物体内糖代谢过程中乳酸与丙酮酸之间可逆反应的一组同工酶,检测细胞内 LDH 的泄漏是评价外源毒物细胞毒性特别是细胞膜完整性的重要指标<sup>[16]</sup>。说明一方面经镉胁迫下的山羊 RBC 膜受到由镉诱导的大量自由基和由 XOD 产生的过氧化物的攻击,膜的完整性和流动性遭到破坏,乳酸脱氢酶随之增加;另一方面,钼中毒能引起山羊的铜缺乏症,进而导致其贫血,而且已有文献报道镉能引起多种动物发生贫血,在这种情况下,血液携带的氧不能满足机体的需要,而 LDH 是参与糖酵解的关键性酶,可使细胞在氧气不足的情况下仍能进行正常的生理活动<sup>[17]</sup>,所以,LDH 的活性随着山羊试验时间的延长而逐渐升高。T-AOC 反映机体酶及非酶促体系总的抗氧化水平高低,各试验组 RBC 膜中 T-AOC 活性在第 20~50 天时与对照组比较升高,但无明显差异( $P>0.05$ )。多年来 T-AOC 被用来反映机体总抗氧化能力的综合指标。钼和镉对家畜动物的 T-AOC 的影响知之甚少。然而从图 6 来看,虽然各试

验组在整个试验期间 T-AOC、铜浓度与试验时间没有明显的关联性,但各试验组在第 50 天时的 T-AOC 都有所降低,综合上述指标,表明钼可导致镉胁迫下机体的抗氧化能力受到损害。

#### 4 结 论

镉胁迫下随着钼水平的升高红细胞膜抗氧化功能下降,肝 XOD 的转录量下调,钼与镉呈协同关系。

#### 参考文献:

- [1] SELDÉN A I, BERG N P, SÖDERBERGH A, et al. Occupational molybdenum exposure and a gouty electrician [J]. *Occup Med (Lond)*, 2005, 55(2): 145-148.
- [2] KUSUM, RAINA R, VERMA P K, et al. Haematological profile of subacute oral toxicity of molybdenum and ameliorative efficacy of copper salt in goats [J]. *Toxicol Int*, 2010, 17(2): 82-85.
- [3] NOVOTNY J A, TURNLUND J R. Molybdenum intake influences molybdenum kinetics in men [J]. *J Nutr*, 2007, 137(1): 37-42.
- [4] YANG F, CUI H, XIAO J, et al. Increased apoptotic lymphocyte population in the spleen of young chickens fed diets high in molybdenum [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2011, 140(3): 308-316.
- [5] 任继平, 李德发, 张丽英. 镉毒性研究进展[J]. *动物营养学报*, 2003, 15(1): 1-6.
- [6] 肖杰, 杨帆, 崔恒敏, 等. 高钼对雏鸡肝脏和脾脏抗氧化功能的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2010, 41(7): 883-890.
- [7] 肖杰, 崔恒敏, 杨帆, 等. 高钼对雏鸡肾脏的病理损伤和抗氧化功能的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2010, 41(12): 1598-1604.
- [8] 杨自军, 张才, 王宏伟, 等. 锌、铜对实验性钼中毒绵羊肝脏、肾脏中钼含量的影响[J]. *中国兽医学报*, 2011, 31(6): 895-898.
- [9] 袁红霞, 褚峰, 秦粉菊, 等. 镉胁迫对家蚕脂肪体脂质过氧化物含量及抗氧化酶活性和 mRNA 表达的影响[J]. *昆虫学报*, 2014, 57(2): 168-175.
- [10] 张陆, 夏士亮, 李金龙, 等. 促红细胞生成素在铅镉联合胁迫致雏鸡贫血中的作用[J]. *畜牧兽医学报*, 2011, 42(8): 1175-1180.
- [11] 杨根元, 徐德选, 何亚楠, 等. 红细胞膜的分离与溶解[J]. *右江民族医学院学报*, 1989, 11(4): 66-67.
- [12] 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.
- [13] JORGENSEN P L, HAKANSSON K O, KARLISH S J. Structure and mechanism of Na, K-ATPase: functional sites and their interactions [J]. *Annu Rev Physiol*, 2003, 65: 817-849.
- [14] DU J, ZHU H, LIU P, et al. Immune responses and gene expression in hepatopancreas from *Macrobrachium rosenbergii* challenged by a novel pathogen *Spiroplasma MR-1008* [J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2013, 34(1): 315-323.
- [15] 周佳, 张国文, 胡明明. 红旱莲总黄酮对黄嘌呤氧化酶抑制作用及抗氧化研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2013, 32(4): 353-357.
- [16] 袁燕, 张英, 卞建春, 等. 镉致大鼠大脑皮质神经细胞凋亡的机理及 N-乙酰半胱氨酸的保护作用[J]. *中国兽医学报*, 2010, 30(8): 1107-1110.
- [17] 徐钢春, 董晶晶, 聂志娟, 等. 刀鲚不同组织的乳酸脱氢酶同工酶及 DNA 含量研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(4): 481-488.

(编辑 白永平)