

# 甘肃鼯鼠骨骼 13 种微量元素测定

王 栋 何建平\* 李金钢 詹文明

(陕西师范大学生命科学学院 西安 710062)

**摘要:** 对甘肃鼯鼠 (*Myospalax cansus*) 骨骼中 Fe、Cu、Zn、Mn、Cr、Ni、Co、Mo、Cd、As、Pb、F、Al 等 13 种微量元素进行了测定。结果表明,甘肃鼯鼠全骨中 13 种元素含量依次为 Al > Fe > Zn > F > Mn > Cu > Pb > As > Cr > Co > Ni > Mo > Cd; 同一元素在不同骨骼分布不均,头骨最丰富,除 Zn、Mn 外,同一元素在不同部位骨骼的含量存在显著差异;13 种微量元素之间的相关性,Zn-Pb、Mn-Cd、As-Pb 3 组呈显著负相关 ( $0.01 < P < 0.05$ ),Cu-Ni、Cu-Al、Cu-Fe、Co-Mo、Co-Cd、Co-Pb、Co-As、Cd-Pb、Cd-Mo、Cd-As、Fe-Zn 等 11 组呈显著正相关 ( $0.01 < P < 0.05$ ),其中 Cu-Ni、Cu-Al、Co-Mo、Co-Cd、Co-Pb、Cd-Pb 等 6 组呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。说明甘肃鼯鼠终生虽营地下生活,但骨骼微量元素含量依然丰富,并不表现出缺乏的现象。

**关键词:** 甘肃鼯鼠;骨骼;微量元素

**中图分类号:** Q953 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263(2007)05-115-06

## Determination of Trace Elements in Skeletons of Gansu Zokor

WANG Dong HE Jian-Ping\* LI Jin-Gang ZHAN Wen-Ming

(College of Life Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** The contents and distributions of the trace elements —Fe, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Mo, Cd, As, Pb, Al and F in skeletons of Gansu Zokor (*Myospalax cansus*) were determined. The results showed that value of these thirteen elements in Gansu Zokor's skeletons from high to low are Al > Fe > Zn > F > Mn > Cu > Pb > As > Cr > Co > Ni > Mo > Cd. The content of most elements has significant differences by *F*-test ( $P < 0.05$ ) in different parts of skeletons, except Zn and Mn ( $P \geq 0.05$ ). The trace elements are higher in the skull than any other parts. There is a significant positive correlation between Cu and Fe, Fe and Zn, Co and As, Mo and Cd, As and Cd ( $0.01 < P < 0.05$ ); a significant negative correlation between Zn and Pb, Mo and Cd, As and Pb ( $0.01 < P < 0.05$ ); and a extremely significant positive correlation between Cu and Al, Cu and Ni, Co and Mo, Co and Cd, Co and Pb, Cd and Pb ( $P < 0.01$ ). In conclusion, although Gansu Zokor lives underground all lifetime, no any evidence of absence of trace elements in their skeletons are found.

**Key words:** Gansu Zokor (*Myospalax cansus*); Skeleton; Trace element

骨骼是动物无机元素的重要储存部位,除 Ca、K、Na、Mg、P 等常量元素外,微量元素亦十分丰富,这些元素广泛参与骨钙矿化等多种生命代谢过程<sup>[1]</sup>,维持机体矿质元素平衡<sup>[2]</sup>。与地面活动动物相比,长期地下生活的啮齿动物,生活环境受到极大限制,但其机体矿质元素含量并不缺乏<sup>[2-6]</sup>。为进一步研究特殊生境条件下小型哺乳动物体内矿质元素的稳态调节,我

们对甘肃鼯鼠 (*Myospalax cansus*) 整体及不同部位骨骼微量元素 Fe、Cu、Zn、Mn、Cr、Ni、Co、Mo、

**基金项目** 陕西省科技攻关项目[No. 2002K10-G3(13)],陕西师范大学研究生培养创新基金项目;

\* 通讯作者, E-mail: hejianping@snnu.edu.cn;

**第一作者介绍** 王栋,男,硕士研究生;研究方向:比较动物生理学; E-mail: mascot0000@yahoo.com.cn.

收稿日期:2007-03-29, 修回日期:2007-07-04

Cd、As、Pb、F、Al 进行测定,同一元素在不同部位骨骼的含量差异进行显著性分析,并分析 13 种元素含量之间相关性。

## 1 材料与方法

**1.1 实验动物** 实验用成年甘肃鼯鼠 24 只 (12♀, 12♂), 体重 280~300 g, 于 2006 年 4~9 月捕自陕西省延安市。该地区海拔 970~1 150 m, 年平均气温 7.7~11.6℃, 年均降水量约 500 mm, 黄土土层厚, 土质松软, 为典型的黄土高原丘陵、沟壑农区。农作物以小麦、玉米、谷子、马铃薯、豆类等为主, 田间杂草有苜蓿 (*Medicago hispida*)、凤毛菊 (*Saussurea* spp.)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、野豌豆 (*Pongamia pinnata*) 等。可塑性地貌及丰富的食物环境为甘肃鼯鼠提供了生息繁衍的栖息地。

**1.2 样品预处理** 甘肃鼯鼠心放血处死, 去除内脏, 剥皮剔肉, 取骨骼用去离子水冲洗干净, 置 60℃ 恒温箱中烘干, 按前肢骨、后肢骨、脊柱 ( $n=12$ ) 与整体骨骼 ( $n=12$ ) 分开, 经粉碎后充分混匀, 装袋备用。

### 1.3 样品溶液制备

**1.3.1 灰化法** 取各烘干样品 2.000 0 g, 置瓷坩埚, 放入马弗炉, 缓慢升温至 550℃, 灰化 3~4 h。取出冷却, 转入 100 ml 蒸馏瓶, 加 5 ml 浓 HNO<sub>3</sub>, 低温加热溶解灰化, 体积控制在 1~2 ml。稍冷, 转至 100 ml 容量瓶中, 去离子水定容。用于测定 Fe、Cu、Zn、Mn、Cr、Ni、Co、Mo、Al 等 9 种元素。

**1.3.2 消化法** 取各烘干样品 1.000 0 g 置 50 ml 烧杯中, 加 10 ml 浓 HNO<sub>3</sub>, 混匀后加盖放置过夜。次日低温加热消化至体积为 1~2 ml, 加入 2 ml HClO<sub>4</sub>, 继续消解, 待白烟冒尽, 稍冷, 转至 50 ml 容量瓶, 去离子水定容。用于测定 Cd、As、Pb、F 等 4 种元素。

**1.4 测定方法与仪器** TAS-986 型原子吸收分光光度计, GFH-986 石墨炉原子化器 (北京普析通用仪器有限公司) 火焰原子吸收法测定 Fe、

Cu、Zn、Mn、Cr、Ni、Co, 石墨炉原子吸收法测定 Mo、Cd、As、Pb。氟离子选择电极 (上海精密仪器仪表有限公司) 电位法测定 F。721 型分光光度计 (上海精密科学仪器有限公司) 铬天青 S 分光光度法测定 Al, 波长为 640 nm。各元素加标回收率为 92.5%~108.3%, 3 次重复的相对标准偏差为 1.741%~5.138%。

**1.5 数据统计** 测定数据用 SPSS 13.0 统计软件处理, 以平均值 ± 标准差 ( $\bar{X} \pm SD$ ) 表示, 对同一元素在不同部位骨骼的含量差异进行显著性检验分析, 不同元素含量之间进行相关性分析。

## 2 结果与讨论

**2.1 元素含量及分析** 甘肃鼯鼠整体及不同部位骨骼 13 种微量元素平均含量、标准差及同种元素在不同部位骨骼含量差异显著性检验结果如表 1 所示。

甘肃鼯鼠 13 种微量元素在全骨中含量顺序为 Al > Fe > Zn > F > Mn > Cu > Pb > As > Cr > Co > Ni > Mo > Cd, 除前肢骨、后肢骨与脊柱 As、Cr、脊柱 Mn、Cu、Pb 含量顺序不同外, 不同部位骨骼元素含量顺序与全骨一致。每种微量元素在不同部位骨骼含量顺序为 Cu、Mo、As: 头骨 > 脊柱 > 后肢骨 > 前肢骨; Fe: 头骨 > 脊柱 > 前肢骨 > 后肢骨; Zn: 后肢骨 > 脊柱 > 头骨 > 前肢骨; Mn: 后肢骨 > 头骨 > 前肢骨 > 脊柱; Cr、Pb: 脊柱 > 后肢骨 > 前肢骨 > 头骨; Ni、Co: 头骨 > 后肢骨 > 前肢骨 > 脊柱; Cd: 脊柱 > 头骨 > 后肢骨 > 前肢骨; F: 脊柱 > 前肢骨 > 后肢骨 > 头骨; Al: 脊柱 > 头骨 > 前肢骨 > 后肢骨。其中, 前肢骨与后肢骨 Co 含量, 前肢骨与脊柱之间 Cu、Cr、Co、As、Cd、Pb 含量, 前肢骨与头骨之间 Cu、Cr、Co、Ni、As、Mo、Cd 含量, 后肢骨与脊柱之间 Fe、Cr、Co、As、Cd、Pb、Al 含量, 后肢骨与头骨之间 Fe、Cr、Ni、Co、Mo、As、Al 含量, 头骨与脊柱之间 Cr、Ni、Co、Mo、As、Pb、F、Al 含量存在显著性差异。

表 1 甘肃黔鼠骨骼微量元素含量( $\bar{X} \pm SD$ ,  $n = 12$ , mg/kg)  
Table 1 Contents of trace elements in skeletons of Gansu Zokor

元素 Elements	全骨 Whole skeleton	前肢骨 Forelimb bone	后肢骨 Hindlimb bone	脊柱 Vertebral column	头骨 Skull
Cu	5.1 ± 1.0	4.6 ± 0.5 a	4.9 ± 0.6 ab	5.4 ± 0.5 b	5.6 ± 0.9 b
Fe	300.4 ± 15.9	294.3 ± 18.0 ab	284.1 ± 20.7 b	307.0 ± 18.0 ac	307.2 ± 13.0 ac
Zn	194.1 ± 16.5	195.4 ± 15.6 a	205.6 ± 18.0 a	198.7 ± 14.0 a	197.7 ± 5.6 a
Mn	5.1 ± 1.1	4.7 ± 1.1 a	5.3 ± 1.3 a	4.6 ± 0.9 a	4.9 ± 1.0 a
Cr	1.36 ± 0.46	1.25 ± 0.31 a	1.41 ± 0.34 a	1.60 ± 0.25 b	0.86 ± 0.29 c
Ni	0.31 ± 0.08	0.266 ± 0.06 a	0.27 ± 0.04 a	0.25 ± 0.05 a	0.32 ± 0.05 b
Co	0.51 ± 0.05	0.42 ± 0.03 a	0.42 ± 0.05 b	0.53 ± 0.05 c	0.48 ± 0.05 d
Mo	0.50 ± 0.07	0.40 ± 0.03 a	0.42 ± 0.03 a	0.43 ± 0.04 a	0.51 ± 0.8 b
As	1.51 ± 0.14	1.00 ± 0.11 a	1.03 ± 0.16 a	1.46 ± 0.10 b	1.56 ± 0.10 c
Cd	0.28 ± 0.05	0.21 ± 0.04 a	0.22 ± 0.05 ac	0.29 ± 0.05 b	0.26 ± 0.04 bc
Pb	4.55 ± 0.42	4.08 ± 0.19 a	4.09 ± 0.26 a	4.79 ± 0.33 b	4.08 ± 0.35 a
F	33.2 ± 3.8	32.0 ± 2.5 ab	31.6 ± 2.6 ab	34.1 ± 3.6 ac	30.3 ± 1.6 b
Al	528.4 ± 53.1	551.0 ± 87.9 ab	455.4 ± 31.1 c	588.8 ± 48.0 b	552.2 ± 34.4 a

每行中具有相同字母的数据间无显著性差异,  $F$ -检验,  $P \geq 0.05$ 。

Value with same subscripts within rows are not significantly different,  $F$ -test,  $P \geq 0.05$ 。

骨骼微量元素可影响骨细胞新陈代谢,微量元素含量与其生理代谢作用密切相关<sup>[7]</sup>。13种微量元素不能由动物自身合成,只能从外界摄取,缺乏或过量都会对骨骼产生不良后果<sup>[8]</sup>。13种微量元素中,Cu、Fe、Zn、Mn、Cr、Ni、Co、Mo、F为机体必需微量元素,Fe主要储存于骨髓,对骨形成和硬骨化具有协同效应,若大鼠在发育过程中Fe摄取不足,则股骨矿化受限<sup>[9]</sup>。Cu是细胞色素氧化酶、过氧化氢酶等多种酶的活性组分<sup>[10]</sup>,缺Cu可阻碍胶原与弹性蛋白的结合,引起骨组织缺陷,过量可抑制胶原合成<sup>[11]</sup>。Zn是成骨细胞分化标志酶——碱性磷酸酶的辅基,既可刺激骨生长,促进Ca吸收,又可替代Ca的部分作用,促进骨折愈合<sup>[12]</sup>。Mn是糖基转移酶的辅助因子,参与骨形成所需糖蛋白的合成,Mn缺乏可引起软骨营养不良<sup>[13]</sup>。F对骨骼有双重作用,适量F有助于形成羟基磷灰石,促进骨生成,过量会导致类骨质增多,骨质机械脆性增加<sup>[14]</sup>。Co是维生素B<sub>12</sub>的金属原子中心,可间接通过维生素B<sub>12</sub>参与造血,进而影响骨髓端骨矿沉积<sup>[15]</sup>。Cr可作为激活因子作用于碱性磷酸酶,催化体内焦磷酸水解,影响骨盐沉积和骨骼生长<sup>[16]</sup>。Mo主要通过抑制Cu参与胶原代谢过程影响骨骼生物力学机能<sup>[17]</sup>。

此外,微量元素摄入量异常会产生其他不良影响,如过量Cu可降低迷走神经中枢反射能力,缺Zn好发侏儒症等<sup>[18]</sup>。Cd、Pb、As、Al为机体非必需微量元素,Cd对骨骼有致毒效应,可直接抑制Ca转运或通过损伤肾降低1,25-二羟维生素D<sub>3</sub>合成,导致机体发生骨骼Ca代谢紊乱<sup>[19]</sup>。Pb可干扰1,25-二羟维生素D<sub>3</sub>等对成骨、破骨过程的调控,影响骨基质蛋白合成,造成骨骼畸形<sup>[20]</sup>。Al可抑制类骨质矿化,减少胶原及骨样组织合成<sup>[21]</sup>。元素含量顺序反映动物体内矿物质营养水平和食物矿质丰盈度,甘肃黔鼠栖息地土壤矿质元素含量均不同程度高于全国平均水平,甘肃黔鼠喜食植物在该地区较丰富<sup>[3]</sup>,保证了甘肃黔鼠矿物质营养来源。

样品是否具有代表性和均匀性可直接影响元素含量的测定<sup>[3]</sup>,不同组织微量元素含量存在差异<sup>[22]</sup>。同一微量元素在甘肃黔鼠不同部位骨骼中含量分布很不均匀,除前肢骨和后肢骨间差异较小外,多种元素在其他部位骨骼之间的含量差异显著(表1),其中,Cu、Mo、As、Fe、Co等6种元素在头骨含量最高,Cr、Pb、Cd、F、Al等5种元素在脊柱含量最高。不同部位骨骼对同一元素的吸收可因受外力程度不同而有差异<sup>[23]</sup>。甘肃黔鼠骨骼的结构和功能具有与

其长期地下洞穴生活相适应的特点<sup>[24]</sup>,如后肢主要用来行走及刨土,前肢挖掘并辅助行走等,其不同部位骨骼微量元素分布不均衡可能与其运动特点有关。

动物骨骼吸收元素的能力因种属差异各不相同,可影响微量元素的含量及分布,因此,骨骼微量元素含量可反映种属差异<sup>[4]</sup>。甘肃鼯鼠骨骼微量元素的组成与同为地下啮齿类的高原鼯鼠(*M. baileyi*)<sup>[2,4]</sup>相似,除 Cu、Cr、F、Cd、Al 外,其他微量元素含量均高于高原鼯鼠,但差别不大。甘肃鼯鼠骨骼各微量元素含量与高原鼯鼠<sup>[2,4]</sup>比较,倍数分别为 Cu 0.61、Fe 0.96、Zn 1.13、Mn 1.17、Cr 0.77、Ni 2.09、Co 2.24、Mo

1.37、As 1.32、Cd 0.83、Pb 1.45、F 0.98、Al 0.88 (表 2)。二者与其他地上活动的动物比较,骨骼微量元素含量差异较大,甘肃鼯鼠、高原鼯鼠<sup>[2,4]</sup>骨骼 Fe 含量分别为雄性根田鼠(*Microtus oeconomu*)<sup>[26]</sup>的 3.65 和 3.80 倍、雌性根田鼠的 3.43 和 3.57 倍;骨骼 Mo 含量为雄性根田鼠的 0.06 和 0.04 倍、雌性根田鼠的 0.05 和 0.03 倍;骨骼 Al 含量为高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)<sup>[2,4]</sup>的 3.11 和 3.53 倍。地下啮齿类与地上活动动物骨骼微量元素的差异可能代表了种间不同的营养物质代谢类型<sup>[25]</sup>,但还需进一步的实验证明。

表 2 甘肃鼯鼠和部分啮齿动物骨骼微量元素含量比较( $\bar{x}$ , mg/kg)\*

Table 2 Compare of the contents of trace elements in skeletons between Gansu Zokor and some other rodents

元素 Elements	甘肃鼯鼠	高原鼯鼠 <sup>[2,4]</sup>	高原鼠兔 <sup>[2,4]</sup>	根田鼠 <sup>[26]</sup>		达乌尔鼠兔 <sup>[27]</sup>	甘肃鼠兔 <sup>[28]</sup>
	<i>Myospalax</i>	<i>Myospalax</i>	<i>Ochotona</i>	<i>Microtus oeconomu</i>		<i>Ochotona</i>	<i>Ochotona</i>
	<i>cansus</i>	<i>baileyi</i>	<i>curzoniae</i>	♂	♀	<i>daurica</i>	<i>cansa</i>
Cu	5.1	8.36	8.41	6.55	7.15	2.4	6.43
Fe	300.4	312.5	189.9	82.3	87.5	270	82.5
Zn	194.1	172.3	153.5	131	163	240	275
Mn	5.1	4.36	3.64	0.70	1	-	-
Cr	1.36	1.76	3.07	22.2	23.2	14	26.8
Ni	0.31	0.148	0.170	-	-	0.2	-
Co	0.51	0.228	0.188	-	-	-	-
Mo	0.50	0.364	0.266	8.99	10.6	17	11.1
As	1.51	1.14	1.05	-	-	-	-
Cd	0.28	0.338	0.306	-	-	-	-
Pb	4.55	3.14	2.64	-	-	-	-
F	33.2	33.77	20.87	-	-	-	-
Al	528.4	600.000*	170.000*	-	-	-	-

\* 文献中的数据单位为百分比(%),本文为便于比较,将单位换算为 mg/kg, - 表示文献中未测定数据。

\* % was expressed by weight unit mg/kg, - not determined.

微量元素可通过改变维生素 D<sub>3</sub> 等激素的水平影响骨代谢。如 Cd、Pb 可减少 1,25-二羟基维生素 D<sub>3</sub> 生成,继发性增加甲状旁腺激素分泌,引起骨盐丢失<sup>[19,20]</sup>。终生营地下生活的啮齿动物如裸滨鼠(*Heterocephalus galber*)、裸鼯鼠(*Cryptomys damarensis*)等,缺乏紫外线照射,体内缺乏维生素 D<sub>3</sub>,但可高效吸收矿质元素,且矿质代谢调节不依赖于维生素 D<sub>3</sub><sup>[6]</sup>。甘肃鼯鼠亦为地下小型啮齿动物,骨骼中 13 种微量元

素含量丰富,其体内维生素 D<sub>3</sub> 水平及微量元素是否通过改变激素水平影响骨代谢有待于进一步研究。

2.2 微量元素间的相关性分析 甘肃鼯鼠骨骼 13 种微量元素的相关性分析结果如表 3 所示。

元素间的相互作用可影响其在骨中的沉积和释放,在含量上表现出良好的相关性<sup>[29]</sup>。本实验结果显示,甘肃鼯鼠骨骼 13 种微量元素之

表 3 甘肃麝鼠骨骼微量元素相关性 ( $n = 12$ )

Table 3 Correlations between trace elements in skeletons of Gansu Zokor

	Cu	Fe	Zn	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	As	Cd	Pb	F
Fe	0.638*											
Zn	0.290	0.604*										
Mn	-0.186	0.132	0.132									
Cr	0.211	0.013	-0.192	-0.330								
Ni	0.765**	0.371	-0.062	0.161	0.325							
Co	0.173	-0.045	-0.209	-0.412	0.080	-0.073						
Mo	-0.054	-0.185	-0.245	-0.207	0.226	-0.051	0.852**					
As	-0.369	-0.370	-0.266	-0.020	-0.214	-0.485	0.657*	0.522				
Cd	-0.042	-0.186	-0.434	-0.588*	0.122	-0.281	0.845**	0.636*	0.619*			
Pb	-0.001	-0.245	-0.626*	-0.524	0.075	-0.156	0.763**	0.528	-0.598*	0.944**		
F	-0.062	-0.352	-0.015	-0.216	-0.189	-0.255	-0.080	-0.377	0.229	0.006	0.009	
Al	0.721**	0.326	0.128	-0.519	0.066	0.436	0.332	0.020	-0.195	0.159	0.161	0.296

\* 显著相关,  $0.05 > P > 0.01$ . \*\* 极显著相关,  $P < 0.01$ .

\* significant correlation,  $0.05 > P > 0.01$ . \*\* extremely significant correlation,  $P < 0.01$ .

间, 6 组 (Cu-Ni, Cu-Al, Co-Mo, Co-Cd, Co-Pb, Cd-Pb) 呈极显著正相关, 5 组 (Cu-Fe, Fe-Zn, Co-As, Cd-Mo, Cd-As) 呈显著正相关, 3 组 (Zn-Pb, Mn-Cd, As-Pb) 呈显著负相关, 其他各组相关性较弱。显著正相关的元素可能在骨代谢中相互促进, 显著负相关的元素可能在骨代谢中相互拮抗。有研究表明, Cu 与 Fe 在体内呈生理协同作用, Cu 含量减少会导致 Fe 缺乏<sup>[12]</sup>。Zn 可明显降低 Pb 染毒大鼠股骨 Pb 含量<sup>[30]</sup>。Al 能拮抗 F 的吸收, 二者在骨骼中含量仅较弱相关<sup>[31]</sup>。本实验结果与以上报道一致。也有研究结果显示, Cu 与 Ni 在骨骼中的吸收相互促进<sup>[32]</sup>。骨骼对 Cu 的吸收随 Mo 增多而降低, 减少骨胶原蛋白合成<sup>[18]</sup>。Al 与 Cu、Fe 与 Mn 在机体的吸收过程相互拮抗, 骨骼 Fe 与 Zn 代谢、Zn 与 Mn 代谢相互促进<sup>[12, 33]</sup>, 本实验结果与这些报道不一致, 与高原麝鼠骨骼中 Cu-Mo、Fe-Mn 呈极显著正相关的报道<sup>[2]</sup> 也不一致。

微量元素间的相互作用是影响骨代谢的重要因素之一, 各元素间的协同或拮抗作用可影响骨盐沉积、骨质形态及机械强度<sup>[34]</sup>。微量元素在甘肃麝鼠骨骼吸收过程中的相互作用有待于进一步探讨。

## 参 考 文 献

[1] Mertz W 主编(朱逢珍主译校). 人和动物的微量元素营

养. 青岛: 青岛出版社, 1994, 83 ~ 85.

- [2] 伊甫申, 索有瑞, 张宝琛. 高原麝鼠和高原鼠兔骨无机化学成分的研究 II: 微量元素. 兽类学报, 1997, 17(3): 221 ~ 226.
- [3] 王栋, 何建平, 李金钢等. 甘肃麝鼠骨骼 5 种常量无机元素的测定. 动物学杂志, 2006, 41(3): 110 ~ 113.
- [4] 索有瑞, 李天才. 高原麝鼠和高原鼠兔骨骼中非必须微量元素的测定. 兽类学报, 2003, 23(1): 89 ~ 91.
- [5] Buffenstein R, Pitcher T. Calcium homeostasis in mole-rats by manipulation of teeth and bone calcium reservoirs. In: Dacke C, Danks J, Caple I, et al. eds. The Comparative Endocrinology of Calcium Regulation. Bristol: The Society for Endocrinology, 1996, 177 ~ 182.
- [6] Pitcher T, Buffenstein R. Intestinal calcium transport in mole-rats (*Cryptomys damarensis* and *Heterocephalus glaber*) is independent of both genomic and non-genomic vitamin D mediation. *Experimental Physiology*, 1995, 80(4): 597 ~ 608.
- [7] 颜世铭, 洪昭毅, 李增禧. 实用元素医学. 郑州: 河南医科大学出版社, 1999, 1 ~ 11.
- [8] 姚军虎, 周庆安, 李秉荣等. 动物营养与饲料. 北京: 中国农业出版社, 2002, 42 ~ 55.
- [9] Maillet J M, Cordain L, Mallinckrodt C, et al. The relationship of cranial bone mineral density to serum iron status in premenopausal young women. *The Federation of American Societies for Experimental Biology Journal*, 1998, 12(4): A226.
- [10] 赖力英, 杨旭, 李代强等. 铜负荷饲养兔肝、肾组织含铜量和组织病理学观察. 动物学杂志, 2004, 39(6): 96 ~ 98.
- [11] Miguel A, Marco T. Iron and copper metabolism. *Molecular Aspects of Medicine*, 2005, 26(5): 313 ~ 327.

- [12] Kevin D C. Milk minerals (including trace elements) and bone health. *International Dairy Journal*, 2006, **16**(11): 1 389 ~ 1 398.
- [13] Strause L G, Hegenauer J, Saltman P, et al. Effects of long-term dietary manganese and copper deficiency on rat skeleton. *Journal of Nutrition*, 1986, **116**(1): 135 ~ 141.
- [14] 张小磊, 何宽, 马建华. 氟元素对人体健康的影响. 微量元素与健康研究, 2006, (6): 66 ~ 67.
- [15] 王夔, 徐辉碧, 唐任襄等. 生命科学中的微量元素. 北京: 中国计量出版社, 1991, 上卷 56 ~ 111, 下卷 61 ~ 80.
- [16] 姚华, 王安如, 乔富强. 微量元素铬在动物上的研究与应用. *动物医学进展*, 2003, **24**(1): 43 ~ 46.
- [17] 姚浪群, 于炎湖, 齐德生. 铅对大白鼠氟中毒影响的研究. *华中农业大学学报*, 1994, **13**(6): 588 ~ 593.
- [18] 张衡主编. 生物化学. 北京: 北京医科大学, 中国协和医科大学联合出版社, 1995, 471 ~ 476.
- [19] 张亚利, 王继先. 镉对钙代谢的影响及相关机制研究进展. *环境与健康杂志*, 2004, **21**(4): 269 ~ 271.
- [20] 吕京. 铅的生物意义. 国外医学卫生学分册, 2000, **27**(3): 148 ~ 149.
- [21] Tasleem A Z, Dorothy T, Curtis A. Aluminum negatively impacts calcium utilization and bone in calcium-deficient rats. *Nutrition Research*, 2004, **24**: 243 ~ 259.
- [22] 王友慧, 叶元土, 林仕梅等. 嘉陵江 8 种鱼类不同组织微量元素含量分析. *动物学杂志*, 2005, **40**(5): 99 ~ 103.
- [23] Turner C H. Functional determinants of bone structure: beyond Wolff's law of bone transformation. *Bone*, 1992, **13**(6): 403 ~ 409.
- [24] 储昭灿, 李金钢, 李月明. 三种啮齿类动物前肢挖掘效率分析. *动物学杂志*, 2007, **42**(2): 17 ~ 20.
- [25] 邵赞. 小哺乳动物身体元素组成的研究. *生物学通报*, 1996, **31**(5): 18 ~ 19.
- [26] 李明德, 冯锦秋, 吴跃英等. 根田鼠的无机元素. *南开大学学报*, 1996, **29**(2): 110 ~ 112.
- [27] 李明德, 李攀. 达乌尔鼠兔不同组织无机元素的含量. *天津农学院学报*, 2000, **7**(3): 6 ~ 11.
- [28] 李明德, 王学高, 戴克华. 甘肃鼠兔不同组织无机元素含量. *动物科学与动物医学*, 1999, **16**(2): 27 ~ 28.
- [29] 郑高利, 郑筱祥, 张信岳等. 骨质疏松大鼠胫骨元素含量变化及相关性研究. *浙江大学学报(医学版)*, 2002, **31**(3): 185 ~ 188.
- [30] 冯福建, 王兰, 虞江萍等. 富锌排铅咀嚼片对铅染毒大鼠的排铅作用. *广东微量元素科学*, 2004, **11**(12): 29 ~ 34.
- [31] Ng A H, Hercz G, Kandel R, et al. Association between fluoride, magnesium, aluminum and bone quality in renal osteodystrophy. *Bone*, 2004, **34**(1): 216 ~ 224.
- [32] Sameer A A, Fawzi B, Fadel M. Sorption of copper and nickel by spent animal bones. *Chemosphere*, 1999, **39**(12): 2 067 ~ 2 096.
- [33] Uchida K, Mandevu P, Ballard C S, et al. Effects of feeding a combination of zinc, manganese and copper amino acid complexes, and cobalt glucoheptonate on performance of early lactation high producing dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 2001, **93**(3 ~ 4): 193 ~ 203.
- [34] 秦俊法. 骨质疏松与微量元素. *广东微量元素科学*, 1998, **5**(8): 1 ~ 12.