



麋鹿被毛微量元素、 重金属含量及对环境污染的监测作用

程志斌, 白加德*, 钟震宇, 张宇晨,
张树苗, 张庆勋, 单云芳, 郭青云, 张盼

(北京麋鹿生态实验中心, 北京, 100076)

稿件运行过程

收稿日期: 2022-10-25

修回日期: 2022-11-24



摘要

关键词: 麋鹿;
被毛;
微量元素;
重金属;
生物监测

Key words: Père David's deer (*Elaphurus davidianus*);
Hair;
Trace element;
Heavy metal;
Biological monitoring

中图分类号: Q956

文献标识码: A

文章编号:

2310-1490(2024)-01-0035-08

DOI: 10.12375/ysdwxb.20240105

哺乳动物被毛微量元素和重金属元素含量能够反映其生活状态和栖息地状况, 是环境监测中重要的生物化学指示物。对北京南海子和浙江临安两地麋鹿 (*Elaphurus davidianus*) 种群被毛中的 10 种重金属和 34 种微量元素进行测定, 以期探讨麋鹿被毛微量元素和重金属含量在栖息环境监测中的可行性。结果表明: 除 Re 元素外, 其余 43 种元素在麋鹿被毛中均被检出, 统计分析表明 Li、Be、Sc、V、Co、Ga、Rb、Ir、Mo、Cd、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Tl、Bi、Th、U、Nb、Ta、Zr 和 Hf 34 种元素为麋鹿被毛的特征元素; 与北京南海子麋鹿种群相比, 浙江临安麋鹿种群被毛中的微量元素 Sr、In、Sb、W、Bi、U 和重金属元素 Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 含量更少, 其余 32 种元素含量均高于北京南海子麋鹿种群; 独立样本 t 检验分析表明, 麋鹿被毛微量元素和重金属元素含量存在地域差异性, 仅 Cr ($p=0.064$)、Ni ($p=0.769$)、Mo ($p=0.129$)、Tl ($p=0.065$)、Zr ($p=0.138$) 和 Hf ($p=0.057$) 6 种元素差异不显著, 其余 37 种元素差异均显著; 北京南海子和浙江临安麋鹿种群的栖息环境和食物均未受到 Zn、Cu、Cr、Pb、Cd、V、Co、Ni、Sb 和 Tl 10 种重金属元素污染的威胁。研究表明, 麋鹿被毛可作为栖息环境重金属污染的非损伤监测指示材料。

基金项目: 北京市财政项目 (11000022T000000440772, 23CB064); 北京麋鹿生态实验中心春华项目 (2022003)

第一作者简介: 程志斌 (1983—), 男, 副研究员; 主要从事野生动物保护研究。E-mail: czb@milupark.org.cn

* 通信作者: 白加德, E-mail: baijiade234@aliyun.com

Quantifying Concentration of Trace Elements, Heavy Metals in Hair of Père David's Deer and Its Application in Environmental Monitoring

CHENG Zhibin, BAI Jiade*, ZHONG Zhenyu, ZHANG Yuchen,
ZHANG Shumiao, ZHANG Qingxun, SHAN Yunfang, GUO Qingyun, ZHANG Pan

(Beijing Milu Ecological Research Center, Beijing, 100076, China)

Abstract: Life conditions and habitat status of mammals could be reflected by trace elements and heavy metals in animal hair which is also a key biological-chemical indicator. To explore the feasibility of monitoring the habitat environment through the content of trace elements and heavy metals in hair of Père David's deer (*Elaphurus davidianus*), we studied 34 trace elements and 10 heavy metals in hair of Père David's deer from Beijing Milu Park (BMP) and Lin'an City of Zhejiang Province (LAZJ). The results showed that except Re, the other 43 elements were detected in the hair of Père David's deer. 34 elements were the characteristic elements such as Li, Be, Sc, V, Co, Ga, Rb, Ir, Mo, Cd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Tl, Bi, Th, U, Nb, Ta, Zr and Hf. Concentration of six trace elements including Sr, In, Sb, W, Bi, U and five heavy metals including Zn, Cu, Cr, Pb, Cd in hair of LAZJ were lower than those in BMP, concentration of the other 32 trace elements in LAZJ were higher than those in BMP. Independent sample *t*-test showed that among the 43 elements, only six elements including Cr ($p=0.064$), Ni ($p=0.769$), Mo ($p=0.129$), Tl ($p=0.065$), Zr ($p=0.138$) and Hf ($p=0.057$) did not differ significantly between BMP and LAZJ, thereby regional difference existed in hair of Père David's deer. Habitats and food resources of Père David's deer in BMP and LAZJ were not affected by Zn, Cu, Cr, Pb, Cd, V, Co, Ni, Sb and Tl heavy metals pollution. It is concluded that the content of trace elements and heavy metals in hair of Père David's deer can serve as non-invasive indicator materials for heavy metal pollution in their habitat.

微量元素与生物的生存、健康和疾病有重大关系^[1-2],是一种重要的生物化学指示物。兽类被毛、鸟类羽毛和人类头发均含有多种微量元素,不仅能够反映动物的健康状况,还能反映生存环境状况^[3-4]。因地域、生存环境、食物条件和季节等不同,物种之间被毛中的微量元素和重金属含量存在差异。例如:印度东北部地区豹猫(*Felis bengalensis*)、大灵猫(*Viverra zibetha*)和栗褐鼯鼠(*Petaurista magnificus*)被毛中的Pb、Cr、Hg和Se含量存在显著差异^[5];同为半散放条件下的猎豹(*Acinonyx jubatus*)、东北虎(*Panthera tigris altaica*)和非洲狮(*Panthera leo*)被毛中的Cu、Zn、Se、Mn和Pb含量存在极显著差异^[6]。此外,同一物种不同个体被毛(羽毛)的微量元素含量也不相同^[7-15]。因此,开展被毛微量元素的研究对探讨野生动物的生活状况及栖息环境具有重要意义。

生物监测基于生物对环境变化有高度的敏感性,能够综合评价重金属对环境质量的影响,具有易被监测、费用低的特点,因而越来越受到学者的关注。目前,已有学者利用大型底栖动物^[16-17]、鸟类^[18-19]和兽类^[20-21]作为监测湿地环境重金属污染情况的指示物种,而对哺乳动物而言,与肌肉和血液等组织相比,被毛更易获得,且对动物不造成伤害,可被广泛用于环境重金属污染的监测,尤其是反刍动物^[22-23]。在国外,驯鹿(*Rangifer tarandus caribou*)^[24]、马鹿(*Cervus elaphus*)^[25]和黑尾鹿(*Odocoileus hemionus*)^[14]等哺乳动物的被毛常被用作生物环境监测的指示物,而国内相关报道甚少。麋鹿(*Elaphurus davidianus*)是我国特有物种,国家一级重点保护野生动物,被毛微量元素含量目前尚不清楚,且麋鹿是典型的湿地旗舰物种,其被毛可作为无损监测环境污染的最佳材料之一。因此,本

研究以北京南海子和浙江临安两个麋鹿种群被毛为样本,检测Li、Be、Sc等34种微量元素和Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、V、Co、Ni、Sb、Tl 10种重金属含量,以探讨麋鹿被毛微量元素和重金属含量在栖息环境监测中的可行性,同时为麋鹿保护和生物学研究提供依据。

1 研究方法

1.1 样本采集与测试方法

选择春季(4月)换毛期,采用非损伤采样法分别采集北京南海子麋鹿苑(39°46′15.6″—39°46′40.5″N, 116°26′59.6″—116°27′47.5″E)和浙江临安麋鹿繁殖研究基地(30°8′2.4″—30°8′15.3″N, 119°46′10.9″—119°46′44.4″E)(以下简称“北京南海子”和“浙江临安”)内麋鹿(各10只,成年健康个体)脱换的被毛样本,每个样本取5g。清除被毛样本中的沙土、虫卵和枯草等杂质,使用无水乙醇和蒸馏水清洗干净,90℃干燥至恒质量。使用万分之一电子天平称取0.2g被毛,置于聚四氟乙烯消解罐中,加入2mL硝酸(MOS纯,亚沸)、1mL过氧化氢水(MOS纯),加盖放置过夜。将消解罐放入微波消解装置消解,设置程序:预加压冲入30Bar氮气,功率为1400W,在消解20min内将温度升至200℃,保持10min,消解后冷却至室温。打开消解罐,用少量二次去离子水冲洗内盖,然后将消解罐放入赶酸仪,150℃敞口赶酸除气至溶液体积约为1mL,冷却至室温后,加入0.5mL(1+1)硝酸溶解盐类,并将溶液转移至10mL的容量瓶中,去离子水定容至10mL,摇匀备用。参考《重金属污染综合防治“十二五”规划》(国函[2011]13号)重金属污染物分类,使用ELEMENT 2/XR ICP-MS电感耦合等离子体质谱仪(Thermo Scientific,美国),采用电感耦合等离子体质谱法对麋鹿被毛中的Li、Be、Sc、Ga、Rb、Sr、Ir、Nb、Mo、In、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Ta、W、Re、Bi、Th、U、Zr和Hf 34种微量元素及Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、V、Co、Ni、Sb和Tl 10种重金属进行测定。

1.2 统计分析

使用SPSS 20.0对数据统计分析。每只麋鹿被毛的微量元素及重金属质量分数以 $\mu\text{g/g}$ 为单位,将每只麋鹿被毛样本随机分为3份,取测试后的平均值,若某种元素质量分数 $<0.002\mu\text{g/g}$,表示未检出,

视为 $0\mu\text{g/g}$ 。麋鹿被毛元素含量的平均值为北京南海子和浙江临安共20份样本的平均值。采用聚类分析将北京南海子和浙江临安两个种群的被毛样本进行微量元素分类。使用因子分析程序对44种元素进行主成分分析;使用Pearson相关性分析(双侧检验)检验44种元素之间的相关性;针对北京南海子和浙江临安两个麋鹿种群的被毛微量元素差异性进行比较,先经正态性检验,数据均符合正态分布;再进行方差齐性检验,统计性概率均大于0.05,方差齐,然后采用独立样本 t 检验。

2 结果

2.1 麋鹿被毛微量元素及重金属质量分数

除Re未被检出外,其余43种元素均被检出,含量从大到小依次为Zn、Sr、Ba、Cu、Cr、Pb、V、Rb、Ni、Ce、Zr、Li、La、Nd、Co、Ir、U、Ga、Th、Sc、Pr、Nb、Cs、Gd、Sm、Cd、Mo、Dy、W、Sb、Er、Be、Bi、Yb、Hf、Eu、Tb、Ho、Tl、Ta、Tm、Lu和In。其中,质量分数排名前3位的微量元素为Zn、Sr和Ba,分别为 (107.385 ± 19.144) 、 (7.893 ± 1.304) 、 $(7.694\pm 2.741)\mu\text{g/g}$;质量分数排名后3位的微量元素为Tm、Lu和In,分别为 (0.005 ± 0.002) 、 (0.004 ± 0.002) 、 $(0.002\pm 0.002)\mu\text{g/g}$ (表1)。聚类分析结果表明,麋鹿被毛微量元素含量可分为4类:(1)大于 $100.0\mu\text{g/g}$,Zn;(2) $6.0\sim 8.0\mu\text{g/g}$,包括Sr、Ba和Cu;(3) $1.0\sim 2.5\mu\text{g/g}$,包括Cr、Pb、V、Rb、Ni、Ce、Zr;(4)小于 $0.8\mu\text{g/g}$,包括Li、La、Nd、Co、Ir、U、Ga、Th、Sc、Pr、Nb、Cs、Gd、Sm、Cd、Mo、Dy、W、Sb、Er、Be、Bi、Yb、Hf、Eu、Tb、Ho、Tl、Ta、Tm、Lu和In。

10种重金属质量分数从大到小依次为Zn、Cu、Cr、Pb、V、Ni、Co、Cd、Sb和Tl,分别为 (107.385 ± 19.144) 、 (6.096 ± 1.307) 、 (2.323 ± 0.936) 、 (2.094 ± 0.912) 、 (1.732 ± 0.791) 、 (1.394 ± 0.498) 、 (0.476 ± 0.183) 、 (0.100 ± 0.048) 、 (0.039 ± 0.011) 、 $(0.010\pm 0.005)\mu\text{g/g}$ 。

2.2 麋鹿被毛中被检出的43种元素之间的关系

主成分分析表明,除Re元素外,麋鹿被毛有4个成分的原始特征值大于1,累积贡献率为93.144%。第1主成分与Li、Be、Sc、V、Co、Ga、Rb、Ir、Mo、Cd、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Tl、Bi、Th、U、Nb、Ta、Zr和Hf高度相关;第2主成分与Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、In、Sb、W、Pb和Bi高

度正相关;第3主成分与Sr、Mo高度相关;第4主成分与Cu、Mo和U高度相关(表2)。因总方差70.221%的贡献率来自第1主成分,所以Li、Be、Sc、

V、Co、Ga、Rb、Ir、Mo、Cd、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Tl、Bi、Th、U、Nb、Ta、Zr和Hf 34种元素为麋鹿被毛的特征元素。

表1 麋鹿被毛中重金属及微量元素质量分数

Tab. 1 Mass fraction of heavy metals and trace elements in hair of *Elaphurus davidianus*

μg/g

元素 Element	北京南海子 BMP(n=10)	浙江临安 LAZJ(n=10)	平均值 Average value(n=20)	元素 Element	北京南海子 BMP(n=10)	浙江临安 LAZJ(n=10)	平均值 Average value(n=20)
Li	0.479±0.209	0.958±0.330	0.719±0.364**	Nd	0.333±0.117	0.773±0.246	0.553±0.294**
Be	0.024±0.011	0.049±0.014	0.037±0.017**	Sm	0.065±0.021	0.144±0.044	0.104±0.053**
Sc	0.105±0.051	0.225±0.061	0.165±0.082**	Eu	0.014±0.005	0.029±0.009	0.022±0.010**
V	1.186±0.414	2.277±0.699	1.732±0.791**	Gd	0.068±0.023	0.147±0.043	0.108±0.053**
Cr	2.708±0.961	1.938±0.772 ↓	2.323±0.936	Tb	0.009±0.003	0.019±0.006	0.014±0.007**
Co	0.356±0.122	0.596±0.154	0.476±0.183**	Dy	0.049±0.017	0.096±0.029	0.073±0.034**
Ni	1.360±0.638	1.428±0.339	1.394±0.498	Ho	0.009±0.003	0.017±0.005	0.013±0.006**
Cu	6.809±1.517	5.383±0.422 ↓	6.096±1.307*	Er	0.026±0.008	0.049±0.016	0.037±0.017**
Zn	117.773±20.653	96.997±10.359 ↓	107.385±19.144*	Tm	0.003±0.002	0.006±0.002	0.005±0.002**
Ga	0.180±0.077	0.371±0.132	0.276±0.144**	Yb	0.022±0.007	0.039±0.012	0.030±0.013**
Rb	1.006±0.448	2.308±0.836	1.657±0.934**	Lu	0.003±0.002	0.006±0.002	0.004±0.002**
Sr	8.569±1.456	7.216±0.670 ↓	7.893±1.304*	W	0.073±0.028	0.031±0.009 ↓	0.052±0.029**
Ir	0.245±0.081	0.458±0.141	0.352±0.157**	Re	0	0	0
Mo	0.079±0.043	0.108±0.038	0.094±0.042	Tl	0.008±0.005	0.012±0.005	0.010±0.005
Cd	0.128±0.051	0.072±0.023 ↓	0.100±0.048**	Pb	2.684±0.952	1.504±0.274 ↓	2.094±0.912**
In	0.004±0.002	0.000±0.001 ↓	0.002±0.002**	Bi	0.044±0.011	0.022±0.005 ↓	0.033±0.014**
Sb	0.046±0.011	0.033±0.006 ↓	0.039±0.011**	Th	0.117±0.048	0.248±0.082	0.183±0.094**
Cs	0.085±0.037	0.139±0.050	0.112±0.051*	U	0.359±0.078	0.276±0.069 ↓	0.318±0.084*
Ba	6.139±1.769	9.248±2.713	7.694±2.741**	Nb	0.083±0.034	0.148±0.063	0.115±0.060*
La	0.379±0.135	0.948±0.308	0.663±0.372**	Ta	0.006±0.003	0.010±0.004	0.008±0.004*
Ce	0.786±0.284	1.916±0.620	1.351±0.746**	Zr	0.942±0.285	1.206±0.455	1.074±0.394
Pr	0.088±0.031	0.210±0.068	0.149±0.081**	Hf	0.025±0.009	0.035±0.013	0.030±0.012

注: **表示地域间元素质量分数差异极显著($p<0.01$); *表示差异显著($p<0.05$)。

Note: ** is extremely significant difference in mass fraction between regions ($p<0.01$); * is significant difference in mass fraction between regions ($p<0.05$).

表2 麋鹿被毛重金属及微量元素主成分矩阵

Tab. 2 Principal component matrix of heavy metals and trace elements in hair of *Elaphurus davidianus*

元素 Element	成分 Component				元素 Element	成分 Component			
	1	2	3	4		1	2	3	4
Li	0.988	0.075	0.063	0.023	Nd	0.991	-0.067	-0.007	0.065
Be	0.985	0.060	0.017	0.057	Sm	0.990	-0.063	-0.002	0.075
Sc	0.989	0.006	-0.060	-0.004	Eu	0.990	-0.054	0.027	0.061
V	0.987	0.014	0.026	-0.034	Gd	0.990	-0.057	-0.019	0.069
Cr	0.190	0.860	0.307	-0.154	Tb	0.993	-0.045	-0.011	0.057
Co	0.779	0.111	-0.364	0.021	Dy	0.996	-0.012	0.033	0.040
Ni	0.427	0.692	-0.487	0.184	Ho	0.996	0.024	0.005	0.033
Cu	-0.286	0.757	-0.235	0.400	Er	0.994	0.023	0.033	0.050
Zn	-0.274	0.722	-0.207	0.189	Tm	0.979	0.094	0.015	0.047
Ga	0.992	0.072	0.051	0.013	Yb	0.991	0.063	0.058	0.031
Rb	0.996	0.013	0.041	0.014	Lu	0.970	0.116	0.046	0.049
Sr	-0.294	0.439	0.559	0.275	W	-0.271	0.901	0.014	-0.293
Ir	0.993	0.022	0.020	0.044	Tl	0.894	0.401	0.015	-0.087
Mo	0.538	0.282	-0.563	-0.429	Pb	-0.353	0.879	-0.090	-0.087
Cd	-0.520	0.680	-0.237	0.295	Bi	-0.557	0.647	0.169	0.034
In	-0.470	0.792	0.120	-0.269	Th	0.995	0.019	0.025	0.033
Sb	-0.097	0.891	0.185	-0.154	U	-0.519	0.437	0.100	0.420
Cs	0.960	0.207	0.141	-0.023	Nb	0.945	0.191	0.086	0.001
Ba	0.971	0.153	0.113	-0.064	Ta	0.927	0.234	-0.005	0.119
La	0.988	-0.084	-0.013	0.065	Zr	0.870	0.387	0.117	-0.188
Ce	0.986	-0.080	-0.023	0.052	Hf	0.919	0.325	0.097	-0.139
Pr	0.990	-0.076	-0.002	0.063					

相关性分析表明, Cr、Ni、Cu、Zn、Sr、Sb、W 和 Pb 8 种元素与大部分元素的差异不显著, 其相关性如下: 除 Cr—Ni、Cr—Cu、Cr—Zn、Cr—In、Cr—Sb、Cr—W、Cr—Tl、Cr—Pb、Cr—Zr 和 Cr—Hf 差异显著外, Cr 与其他 32 种元素差异不显著; 除 Ni—Li、Ni—Be、Ni—Sc、Ni—Cu、Ni—Zn、Ni—Ga、Ni—Mo、Ni—Cs、Ni—Ba、Ni—Tm、Ni—Lu、Ni—W、Ni—Tl、Ni—Pb、Ni—Nb、Ni—Ta、Ni—Zr 和 Ni—Hf 差异显著外, Ni 与其他 23 种元素差异不显著; 除 Cu—Zn、Cu—Cd、Cu—In、Cu—Sb、Cu—W、Cu—Pb、Cu—Bi 和 Cu—U 差异显著外, Cu 与其他 32 种元素差异不显著; 除 Zn—Cd、Zn—In、Zn—Sb、Zn—W 和 Zn—Pb 差异显著外, Zn 与其他 34 种元素差异不显著; 除 Sr—Cd、Sr—Sb 和 Sr—Bi 差异显著外, Sr 与其他 39 种元素差异不显著; 除 Sb—W、Sb—Pb 和 Sb—Bi 差异显著外, Sb 与其他 35 种元素差异不显著; 除 W—Pb、W—Bi、W—Cd 和 W—In 差异显著外, W 与其他 33 种元素差异不显著; 除 Pb—Bi、Pb—U、Pb—Cd 和 Pb—In 差异显著外, Pb 与

其他 34 种元素差异不显著。上述结果与主成分分析结果一致, 说明 Cr、Ni、Cu、Zn、Sr、Sb、W 和 Pb 8 种元素为非特征元素。

2.3 麋鹿被毛元素质量分数之间的地域差异

独立样本 t 检验分析表明, 北京南海子和浙江临安两个种群被检出的 43 种元素中, 除 Cr ($p=0.064$)、Ni ($p=0.769$)、Mo ($p=0.129$)、Tl ($p=0.065$)、Zr ($p=0.138$) 和 Hf ($p=0.057$) 差异不显著外, 其余各元素差异均显著。与北京南海子种群相比, 浙江临安种群被毛中的微量元素 Sr、In、Sb、W、Bi、U 和重金属元素 Zn、Cu、Cr、Pb、Cd 含量均少, 其余 32 种微量元素含量均高于北京南海子种群。浙江临安种群 In 元素检测量极低, 为 $(0.000 \pm 0.001) \mu\text{g/g}$, 视为未测出 (表 1)。

3 讨论

3.1 麋鹿被毛微量元素和重金属含量及对环境的监测作用

麋鹿被毛中 Zn、Sr 和 Ba 质量分数位于前 3 位,

分别为 107.385、7.893、7.694 $\mu\text{g/g}$, Tm、Lu 和 In 位于后 3 位, 分别为 0.005、0.004、0.002 $\mu\text{g/g}$ 。麋鹿角中质量分数位于前 3 位的元素依次为 Sr、Ba 和 Zn, 分别为 159.49、89.13、74.66 $\mu\text{g/g}$, 质量分数位于后 3 位的元素依次为 In、Sm 和 Re, 分别是 0.007、0.005、0.001 $\mu\text{g/g}$ ^[26]。统计分析表明, 麋鹿被毛中有 Li、Be、Sc、V、Co、Ga、Rb、Ir、Mo、Cd、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Tl、Bi、Th、U、Nb、Ta、Zr 和 Hf 34 种特征元素, 而麋鹿角中有 Li、Be、Sc、V、Co、Ni、Cu、Ga、Sr、Ir、Mo、Cd、Cs、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Er、Tm、Lu、Pb、Th、U、Zr 和 Hf 26 种特征元素^[26]。这可能与被毛和鹿角的组成成分不同有关, 被毛主要成分为角质蛋白, 而鹿角主要成分为骨质蛋白。在元素之间的相关性方面, 麋鹿被毛中的 Cr—Ni、Zn—Cu 存在显著正相关, 但赤狐 (*Vulpes vulpes*) 被

毛中的 Cr—Ni、Zn—Cu 之间不存在显著相关性^[12]。

目前国内外还没有关于野生动物被毛和羽毛中重金属含量的标准。因此参照我国 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》和 WM/T 2—2004《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》, 发现北京南海子和浙江临安两个种群被毛中的 Cu 元素质量分数 (6.096 $\mu\text{g/g}$) 小于限值 20.0 $\mu\text{g/g}$, Cr 元素质量分数 (2.323 $\mu\text{g/g}$) 大于限值 2.0 $\mu\text{g/g}$, Cd 元素质量分数 (0.100 $\mu\text{g/g}$) 小于限值 0.3 $\mu\text{g/g}$, Pb 元素质量分数 (2.094 $\mu\text{g/g}$) 小于限值 5 $\mu\text{g/g}$, Ni 元素质量分数 (1.394 $\mu\text{g/g}$) 大于限值 1 $\mu\text{g/g}$, Zn、Sb、V、Co 和 Tl 元素暂时没有明确的限值, 结合表 3 中其他物种被毛或羽毛中重金属质量分数情况, 可推测北京南海子和浙江临安两个麋鹿种群的食物和栖息环境未受到 10 种重金属的污染。

表 3 不同物种被毛(羽毛)微量元素质量分数

Tab. 3 Trace elements of hair or feather among different species

物种 Species	元素质量分数/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Element mass fraction							采样月份 Sampling month	采样地点 Sampling sites
	Zn	Cu	Mn	Pb	Cd	Ni	Cr		
猎豹 <i>Acinonyx jubatus</i>	248.50	12.68	2.91	3.02				12	上海野生动物园 ^[6]
东北虎 <i>Panthera tigris altaica</i>	161.85	9.72	2.92	3.21				12	上海野生动物园 ^[6]
非洲狮 <i>Panthera leo</i>	180.18	10.22	2.96	3.18				12	上海野生动物园 ^[6]
黑尾鹿 <i>Odocoileus hemionus</i>	100.00	4.40	3.50					1—12	美国加利福尼亚州 ^[14]
驼鹿 <i>Alces alces gigas</i>	65.50	3.40	3.60	5.60	0.28			5	美国阿拉斯加州 ^[9]
驼鹿 <i>Alces alces gigas</i>	95.50	2.00	1.50	1.40	0.65			5	美国阿拉斯加州 ^[9]
麋鹿 <i>Elaphurus davidianus</i>	107.30	6.10		2.09	0.10	1.39	2.32	5	北京麋鹿苑、浙江临安(本研究)
白鹭 <i>Egretta garzetta</i>	107.64	26.92	3.71	2.20	0.01	4.25	33.80	10	武夷山 ^[27]
池鹭 <i>Ardeola bacchus</i>	72.77	35.68	6.99	3.13	0.02	5.46	54.57	10	武夷山 ^[27]
褐马鸡 <i>Crossoptilon mantchuricum</i>	107.92	10.57	14.01	1.11		1.93	1.60		庞泉沟国家级自然保护区 ^[11]

3.2 被毛微量元素和重金属含量的种间差异

由于生活习性、栖息环境等差异, 导致不同物种被毛或羽毛中的微量元素、重金属含量存在种间差异性。北京南海子麋鹿种群被毛中的 Zn 和 Cu 元素含量高于加利福尼亚州的黑尾鹿^[14]和阿拉斯加的驼鹿 (*Alces alces gigas*)^[9], 而 Cd 元素含量低于阿拉斯加的驼鹿^[9]。麋鹿、驼鹿和黑尾鹿被毛中的 Zn 元素含量与白鹭 (*Egretta garzetta*)、池鹭 (*Ardeola bacchus*) 和褐马鸡 (*Crossoptilon mantchuricum*) 羽毛中的含量相近^[9,11,14,27], 但 Cu 元素含量远低于处于食物链上层的猎豹、东北虎、非洲狮、白鹭和池鹭等^[6,27], 说明重金属 Cu 元素在食物链中富集作用明显。麋鹿被毛与

褐马鸡羽毛中的 Cr 元素含量低于白鹭和池鹭羽毛中的 Cr 元素含量, 说明重金属 Cr 元素在食物链中有一定的富集作用^[11,27]。

3.3 被毛微量元素和重金属的种内差异性

本研究显示, 北京南海子与浙江临安麋鹿种群被毛中除 Cr、Ni、Mo、Tl、Zr 和 Hf 6 种元素差异不显著外, 其余 37 种元素差异均显著, 反映麋鹿被毛微量元素存在地域性差异。北京南海子麋鹿种群为半散放, 浙江临安麋鹿种群为圈养, 结果表明浙江临安麋鹿种群的微量元素含量绝大多数较北京南海子高, 这可能与两地麋鹿种群的食物不同有关。北京南海子麋鹿种群采取每天投喂的饲养模式, 5 月上旬至

10月上旬投喂鲜苜蓿,10月上旬至次年4月下旬主要投喂精饲料、胡萝卜、干苜蓿和玉米青贮;此外,5月上旬至10月上旬北京南海子麋鹿苑内的湿地会生长北京本土草本植被,如紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、牛筋草(*Eleusine indica*)和狗尾草(*Setaria viridis*)等,可供麋鹿自由采食,但由于麋鹿苑麋鹿种群密度较大,12月至次年5月初生长的草本植物几乎被啃食殆尽,此期间麋鹿的食物种类比较单一,以投喂的食物为主。浙江临安麋鹿种群为圈养模式,每天除采食适量的精饲料外,从3月下旬至10月下旬主要以从养殖基地周边村庄田野和水中收割的各种野生草本植物为食,如马唐(*Digitaria sanguinalis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、稗(*Echinochloa crus-galli*)和番薯(*Ipomoea batatas*)的根茎等,从11月上旬至次年3月中旬主要以含有丰富杂草的干苜蓿为食。已有的研究表明动物的饮食、健康状态、年龄,以及季节等对被毛微量元素含量有显著影响,如野生大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)食物中的微量元素比人工饲养大熊猫的丰富,被毛中Zn、Cu、Mn、Fe、Ca和Mg 6种微量元素的含量均更高^[7];患有癫痫病的大熊猫被毛中K、Ca和Zn显著高于健康大熊猫^[8]。不同年龄组猎豹被毛中微量元素含量存在差异,青年期和老年期个体的Zn和Se含量相对较低,而成年期含量较高,这与成年期个体存在较大繁育需求的情况吻合^[10];野生赤狐种群与家养银狐种群被毛中的Pb、Cr、Ni、Zn和Cu含量均存在显著差异,野生种群Pb的含量更高,而家养条件下的银狐种群Cr、Ni、Zn和Cu的含量则较低^[12];动物园饲养的褐马鸡羽毛中除含K和Cu外,其余Mo、Zn和Ni等8种元素的含量均低于芦芽山和庞泉沟国家级自然保护区野生褐马鸡羽毛中的元素含量,认为野生环境更有利于褐马鸡的生长发育^[11]。温带地区与寒带地区季节性换毛的鹿类动物,如驼鹿和黑尾鹿的K、Na、Mg、Fe、Mn、Cd和Pb含量存在明显的季节性差异^[9,14]等。因此,同一物种被毛微量元素含量因栖息环境不同而存在地域差异。Fort Richardson和Kenai两个区域的阿拉斯加驼鹿种群被毛中的Ca、Cu、Mn、Zn和Pb含量差异显著,Fort Richardson和Elmendorf两个种群中的Ca、Mg、Cu、Mn和Zn含量差异显著^[9];重金属的地域差异现象在白鹭的羽毛中也存在^[28]。本研究麋鹿被毛微量元素和重金属地域间的差异具体因何,仍需进一步深入研究。

雌雄两性在物种延续上所处的地位和功能不同,因此被毛微量元素含量存在显著性别差异。有学者认为雌性美洲白鹈鹕(*Pelecanus erythrorhynchos*)可以通过产卵排除体内一部分重金属以减轻身体负担,所以雌鸟体内的重金属含量小于雄鸟^[29]。麋鹿为群居动物,是典型的两性异性物种,繁殖制度为后宫制,夏季发情时,雄鹿为争夺交配权打斗激烈,且在发情高峰期鹿王更替频繁,发情期过后雄鹿之间又相处和谐;而雌性在一年一度的繁殖季节中主要以妊娠育幼为主要任务,其被毛微量元素的两性差异值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 曾敏,周宇,明珠,等. 大熊猫血液微量元素、血常规及生理生化指标测定及分析[J]. 野生动物学报, 2021, 42(1): 44-55.
ZENG M, ZHOU Y, MING Z, et al. Determination and analysis of trace elements, clinical indicators, and physiological-biochemical blood indices of captive giant panda [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2021, 42(1): 44-55.
- [2] MASRI S, LEBRÓN A M W, LOGUE M D, et al. Risk assessment of soil heavy metal contamination at the census tract level in the city of Santa Ana, CA: implications for health and environmental justice[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2021, 23(6): 812-830.
- [3] 许青,郑雯,安玉鑫,等. 东北地区红隼羽毛中重金属汞含量测定[J]. 野生动物学报, 2019, 40(3): 700-704.
XU Q, ZHENG W, AN Y X, et al. Quantification of mercury in plumage of common kestrel (*Falco tinnunculus*) in northeast China [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2019, 40(3): 700-704.
- [4] CYGAN-SZCZEGIELNIAK D, STANEK M, STASIAK K, et al. The content of mineral elements and heavy metals in the hair of red deer (*Cervus elaphus* L.) from selected regions of Poland[J]. Folia Biologica (Kraków), 2018, 66(3): 133-142.
- [5] DEY S, STAFFORD R, ROY M K D, et al. Metal toxicity and trace element deficiency in some wild animal species from north-east India, as revealed by cellular, bio-inorganic and behavioural studies[J]. Current Science, 1999, 77(2): 276-280.
- [6] 吴锋. 3种食肉目动物毛发微量元素含量比较[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(5): 288-289.
WU F. Comparison of trace elements in hair of three Carnivora species[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(5): 288-289.
- [7] 温玉田,付其如,彭厚志,等. 大熊猫毛发微量元素初析[J]. 南充师院学报, 1987(1): 55-60.
WEN Y T, FU Q R, PENG H Z, et al. Primary analysis of the trace element of giant pandas hair[J]. Journal of Nanchong Teachers College, 1987(1): 55-60.
- [8] 王能明,陈素清,陈剑瑄,等. 大熊猫体内微量元素的PIXE分析:

- I 毛发和肝脏的微量元素[J]. 兽类学报, 1986, 6(2): 81-87.
- WANG N M, CHEN S Q, CHEN J X, *et al.* Analysis of trace elements in giant panda by PIXE: I trace elements in hair and liver [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 1986, 6(2): 81-87.
- [9] FRANZMANN A W, FLYNN A, ARNESON P D. Alaskan moose hair element values and variability [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1977, 57A(3): 299-306.
- [10] 吴锋, 孙强, 周永晓, 等. 半散放猎豹毛发微量元素含量比较[J]. 兽类学报, 2009, 29(2): 223-226.
- WU F, SUN Q, ZHOU Y X, *et al.* Comparison of hair trace elements content in different age groups of semifree-ranging cheetah (*Acinonyx jubatus*) [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2009, 29(2): 223-226.
- [11] 武玉珍, 冯睿芝, 张峰. 褐马鸡卵壳、羽毛及机体器官中10种矿物元素含量的相关性研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2015, 38(3): 548-552.
- WU Y Z, FENG R Z, ZHANG F. Correlation analysis on the ten mineral elements in egg shells, feathers and internal organs of brown-eared pheasant [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2015, 38(3): 548-552.
- [12] FILISTOWICZ A, DOBRZAŃSKI Z, PRZYSIECKI P, *et al.* Concentration of heavy metals in hair and skin of silver and red foxes (*Vulpes vulpes*) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 182(1): 477-484.
- [13] SUKUMAR A. Factors influencing levels of trace elements in human hair [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, 175: 47-78.
- [14] ROUG A, SWIFT P K, GERSTENBERG G, *et al.* Comparison of trace mineral concentrations in tail hair, body hair, blood, and liver of mule deer (*Odocoileus hemionus*) in California [J]. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 2015, 27(3): 295-305.
- [15] 刘睿, 杜润家, 代湘云, 等. 278例维吾尔族大学生抑郁状况与发中微量元素的关系[J]. 实用预防医学, 2014, 21(11): 1297-1299; 1293.
- LIU R, DU R J, DAI X Y, *et al.* Relationship between depression status of 278 Uyghur college students and trace elements in hair [J]. *Practical Preventive Medicine*, 2014, 21(11): 1297-1299; 1293.
- [16] NEIRA C, MENDOZA G, PORRACHIA M, *et al.* Macrofaunal recolonization of copper-contaminated sediments in San Diego Bay [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(2): 794-804.
- [17] NAHLIK A M, BLOCKSOM K A, HERLIHY A T, *et al.* Use of national-scale data to examine human-mediated additions of heavy metals to wetland soils of the US [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(Suppl. 1): 336.
- [18] BERGLUND Å M M, RAINIO M J, EEVA T. Temporal trends in metal pollution: using bird excrement as indicator [J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0117071.
- [19] ESPÍN S, RUIZ S, SÁNCHEZ-VIROSTA P, *et al.* Effects of experimental calcium availability and anthropogenic metal pollution on eggshell characteristics and yolk carotenoid and vitamin levels in two passerine birds [J]. *Chemosphere*, 2016, 151: 189-201.
- [20] RAMOS-ROSAS N N, VALDESPINO C, GARCÍA-HERNÁNDEZ J, *et al.* Heavy metals in the habitat and throughout the food chain of the Neotropical otter, *Lontra longicaudis*, in protected Mexican wetlands [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185: 1163-1173.
- [21] REDDY U A, PRABHAKAR P V, RAO G S, *et al.* Biomarkers of oxidative stress in rat for assessing toxicological effects of heavy metal pollution in river water [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(17): 13453-13463.
- [22] PERILLO L, ARFUSO F, PICCIONE G, *et al.* Quantification of some heavy metals in hair of dairy cows housed in different areas from Sicily as a bioindicator of environmental exposure: a preliminary study [J]. *Animals*, 2021, 11(8): 2268.
- [23] HUSSAIN M I, KHAN Z I, NAEEM M, *et al.* Blood, hair and feces as an indicator of environmental exposure of sheep, cow and buffalo to cobalt: a health risk perspectives [J]. *Sustainability*, 2021, 13(14): 7873.
- [24] JUTHA N, JARDINE C, SCHWANTJE H, *et al.* Evaluating the use of hair as a non-invasive indicator of trace mineral status in woodland caribou (*Rangifer tarandus caribou*) [J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e0269441.
- [25] CYGAN-SZCZEGIELNIAK D. The levels of mineral elements and toxic metals in the *Longissimus lumborum* muscle, hair and selected organs of red deer (*Cervus elaphus* L.) in Poland [J]. *Animals*, 2021, 11(5): 1231.
- [26] 程志斌, 刘艳菊, 白加德, 等. 麋鹿角重金属、微量元素及其区域差异性[J]. 四川动物, 2016, 35(5): 734-740.
- CHENG Z B, LIU Y J, BAI J D, *et al.* Heavy metals, trace elements and their regional differences of David's deer antler [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2016, 35(5): 734-740.
- [27] 王翠榆, 陈虎, 方译, 等. 不同地点及性别的白鹭、池鹭羽毛的重金属含量分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(增刊2): 246-249; 258.
- WANG C Y, CHEN H, FANG Y, *et al.* Analysis of heavy metal concentrations in feathers of *Egretta garzetta* and *Ardeola bacchus* of different sex from six sites [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2008, 47(Suppl. 2): 246-249; 258.
- [28] 夏秋焯, 倪才英, 赵中华, 等. 鄱阳湖夏候鸟小白鹭对环境样品中重金属的富集研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1540-1544.
- XIA Q Y, NI C Y, ZHAO Z H, *et al.* Research on enrichment of heavy metals in little egret of the Poyang Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(11): 1540-1544.
- [29] DONALDSON G M, BRAUNE B M. Sex-related levels of selenium, heavy metals, and organochlorine compounds in American white pelicans (*Pelecanus erythrorhynchos*) [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1999, 37(1): 110-114.