

新疆古墓沟墓地人发角蛋白的提取与 碳、氮稳定同位素分析

屈亚婷^{1,2}, 杨益民^{1,2}, 胡耀武^{1,2*}, 王昌燧^{1,2}

(1. 中国科学院 古脊椎动物与古人类研究所 脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044; 2. 中国科学院大学 人文学院 科技史与科技考古系, 北京 100049)

摘要: 通过对人发角蛋白的碳、氮稳定同位素分析, 揭示个体死亡前短期内的食物结构, 我国迄今为止尚无任何报道。在观察新疆罗布淖尔古墓沟墓地 M5 人发组织结构的基础上, 采用两种方法提取了人发角蛋白, 并对该个体发与骨的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行了比较分析。研究结果显示, 该个体的发组织结构保存较好; 尽管酸处理会导致角蛋白 C、N 含量明显降低, 但对其碳、氮稳定同位素比值影响不大; 发角蛋白的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 -18.8‰ 和 14.8‰ , 表明该个体在约 250 d 内摄入了大量的动物蛋白。与骨胶原的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-18.3‰) 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值 (15.5‰) 相比, 发与骨的碳、氮稳定同位素比值非常相近, 结合考古资料, 可以看出该个体的食物来源一直较为稳定, 源自发达的畜牧业。此外, 发与骨之间 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的细微差异, 可能与高蛋白含量的食物在转化为体内胶原蛋白和角蛋白过程中发与骨之间碳、氮同位素的分馏效应较小有关。

关键词: 古墓沟墓地; 碳、氮稳定同位素分析; 食谱变化; 发角蛋白提取; 骨胶原

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2013)05-0448-07

The extraction and the C, N isotope analysis of hair keratin from Gumugou cemetery in Xinjiang

QU Ya-ting^{1,2}, YANG Yi-min^{1,2}, HU Yao-wu^{1,2*} and WANG Chang-sui^{1,2}

1. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origin, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China;

2. Department of Scientific History and Archaeometry, School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In contrast to bone collagen, the isotopic composition of the hair keratin is representative of food eaten during the period shortly before demise. Currently, the diet revealed by hair keratin has not yet been reported in China. On the basis of the microstructure of ancient hair from M5 of Gumugou cemetery in Luobunor, Xinjiang, we used two methods to extract keratin from hair and compared the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of hair keratin with that of bone collagen from the same individual. The results showed that the organizational structure of ancient hair was well preserved. Although C, N contents decrease during the process of the acid treatment, the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of hair keratin were not obviously affected. The $\delta^{13}\text{C}$ (-18.8‰) and $\delta^{15}\text{N}$ (14.8‰) of keratin indicated that the individual consumed much animal protein in about 250 days before death. There were no significant isotopic differences between the $\delta^{13}\text{C}$ (-18.3‰) and $\delta^{15}\text{N}$ (15.5‰) of collagen and that of keratin, coupled with the archaeological data, which suggested that the diet of this individual in origin of developed animal husbandry did not vary distinctly in his whole life. In addition, the slightly different $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ between bone collagen and hair keratin were possibly connected to little C, N isotopic fractionation during the transformation from high protein food to collagen and keratin.

Key words: Gumugou cemetery; C, N stable isotopic analysis; dietary variations; extraction of hair keratin; bone collagen

收稿日期(Received): 2012-12-17; 改回日期(Revised): 2013-03-29; 接受日期(Accepted): 2013-04-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130303)、中国科学院-德国马普学会伙伴小组项目(KACX1-YW-0830)

作者简介: 屈亚婷(1986-), 女, 博士研究生, 科技考古专业。E-mail: quyating09@mailsucas.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): HU Yao-wu, E-mail: ywhu@ucas.ac.cn; Tel: +86-10-88256417

0 引言

通过古代人类食物结构的研究,可望揭示先民的生活方式、生存环境以及迁徙活动^[1-2]。其中,人骨中骨胶原的碳、氮稳定同位素分析,可以揭示该个体10年及以上的主要食物来源,成为探索先民食物结构的主要研究手段^[3-4]。与之相似,考古遗址中特殊情况下得以保留的人发,其碳、氮同位素分析同样可望探索其食物来源^[5-6]。

毛发由毛干和毛囊组成。毛干由外到内可分为毛小皮(包括上表皮和外表皮,由鳞片重叠而成)、皮质和髓质三层。毛发中的有机质部分,主要为角蛋白(富含胱氨酸残基和二硫键)。除髓质细胞的角蛋白二级结构为 β -折叠以外,毛小皮和皮质细胞的角蛋白均为 α -螺旋。2~3股 α -螺旋的角蛋白,可组成原纤维,进而形成细纤维,并最终形成粗纤维。大量粗纤维,再组成结构致密的纤维束,成为皮质的重要组成部分^[7-8]。根据“我即我食(You are what you eat)”原理^[1],生物组织的化学成分,与其食物密切相关。已有研究表明,在食物被消化吸收并转化为生物毛发角蛋白的过程中,碳同位素将发生一定程度的分馏,但分馏系数因动物种属不同而有所差异^[9],例如,与食物相比,猪(*Sus scrofa*)毛发角蛋白 $\delta^{13}\text{C}$ 富集0.2‰^[10],沙鼠(*Meriones unguiculatus*)、牛(*Bos Taurus*)、美洲驼(*Lama glama*)则分别富集1‰、2.7‰、3.5‰^[11-13]。而氮同位素则随着营养级的上升而发生分馏,约富集2‰~3‰^[14-17]。与骨不同,毛发可持续生长,其生长速率因生物种属不同存在一定差异。因此,对生物毛发中角蛋白的碳、氮同位素分析,主要反映该个体短期内的食物来源^[5-6]。此外,通过对毛发角蛋白与骨胶原的碳、氮同位素比值的对比分析,还可深入探索该个体死亡前长期与短期内食物的变迁。

目前,通过对生物毛发中角蛋白的碳、氮稳定同位素分析,揭示该个体的食物结构,在国际生物考古界已有不少报道。例如,5200年前冰人发的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为-21.2‰和7.0‰,表明该个体死亡前的一段时间内主要摄取 C_3 类的植物^[18];努比亚木乃伊X-Group(AD 350~550)的人群,其发根(-17.10‰)与发梢(-13.25‰)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值迥异,反映了该人群的食物存在季节性的变化^[5];冰河时期(BP 42700±1300)的猛犸象,其毛发中碳、氮稳定同位素比值的变

与其觅食环境的季节性变迁密切相关^[19]。然而,与国际生物考古研究相比,尽管我国通过人骨中的碳、氮稳定同位素分析揭示先民食物结构的研究业已如火如荼、方兴未艾,但对毛发角蛋白的碳、氮稳定同位素分析迄今为止尚无任何报道。

中西方文化交流重要通道的新疆地区,气候极其干燥,出土了大量的干尸或木乃伊,这为揭示该地区人群组成、生活方式乃至中西方文化的交流提供了重要的研究材料和线索。古墓沟遗址,代表了罗布淖尔地区青铜时代土著居民的考古学文化,¹⁴C测年表明,该墓地距今3800年前后^[20-21]。之前人骨中碳、氮稳定同位素以及微量元素的分析,表明古墓沟先民以肉食为主^[22-23]。为进一步了解先民短期的食物结构,本研究拟以新疆古墓沟墓地人发为研究对象,开展人发组织结构的显微分析,采用两种方法提取人发角蛋白,并分别进行碳、氮稳定同位素分析。此外,还通过与骨胶原中碳、氮稳定同位素比值的相互比较,探索该个体在不同时间内食物来源的差异以及发与骨之间同位素分馏的可能原因。

1 材料与方法

1.1 材料的选择

本次分析样品取自于M5(为约6岁小孩)中的骨骼(图1)和头发(图2)。



图1 古墓沟人骨样品

Fig.1 The bone sample from Gumugou cemetery



图2 古墓沟人发样品

Fig.2 Hair samples from Gumugou cemetery

1.2 实验方法

1.2.1 显微观察

观察人发鳞片结构破损状况, 可为判断其保存状况提供重要依据。采用光学显微镜(型号: Nikon ECLIPSE LV100 POL)在 500 倍下观察现代和古代人发的表面结构(图 3)。

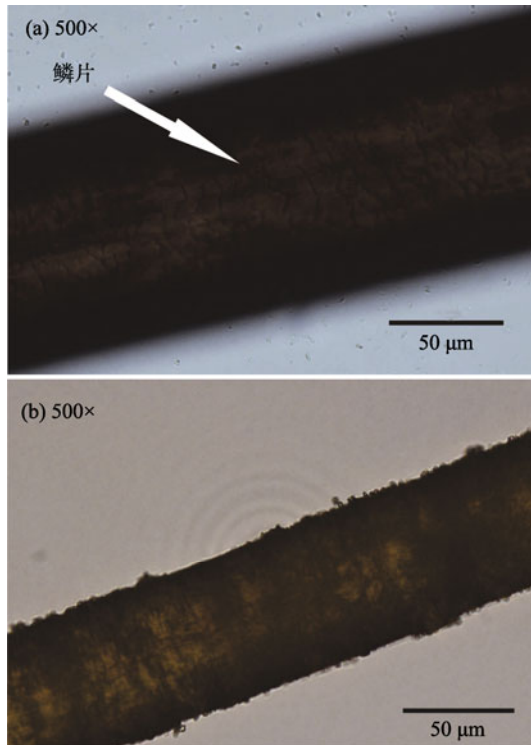


图 3 现代人发显微结构(a)和古墓沟人发显微结构(b)

Fig.3 The microstructure of modern hair (a),
The microstructure of ancient hair (b)

1.2.2 蛋白质的提取

(1) 骨胶原的制备 机械去除骨骼样品内外表面的污染物, 称量。4 °C 下 HCl (0.5 mol/L) 浸泡, 2~3 d 换酸, 直至无气泡产生且骨变得柔软透明。蒸馏水洗至中性, 4 °C 下浸于 NaOH 溶液(0.125 mol/L), 再次洗至中性。加入 HCl (0.001 mol/L), 70 °C 下 48 h, 趁热过滤后冷冻干燥得明胶化的骨胶原。称取骨胶原质量, 计算骨胶原的产率(骨胶原/骨质量)。

(2) 头发样品的预处理 方法一: 称取约 1 mg 人发(编号为 1 号), 切除人发根部的毛囊。室温下蒸馏水超声清洗 30 min, 无水乙醇超声清洗 30 min, 新鲜无水乙醇 4 °C 下浸泡 1 d, 以去除人发上的油脂^[18], 自然干燥。方法二: 称取约 1 mg 人发(编号为 2 号), 切除人发根部的毛囊。室温下蒸馏水超声清洗 30 min, HCl (0.125 mol/L) 超声清洗 30 min, 蒸馏水洗至中性。无水乙醇超声清洗 30 min, 新鲜无水乙醇 4 °C 下浸泡

1 d, 以去除人发上的油脂, 自然干燥。

1.2.3 C、N 含量及稳定同位素比值的测试

取少量骨胶原或处理后的人发 1、2 号样品, 称重, 于 Elementar Vario-Isoprime100 型稳定同位素质谱分析仪(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所环境同位素实验室)上测试其 C、N 含量及同位素比值。测试 C 和 N 含量所用的标准物质为磺胺(Sulfanilamide)。碳、氮稳定同位素比值分别以 USGS 24 标定碳钢瓶气(以 PDB 为基准)和 IEAE-N-1 标定氮钢瓶气(以 AIR 为基准)为标准, 每测试 10 个样品中插入 1 个实验室自制胶原蛋白标样($\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-14.7 \pm 0.15)\%$, $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $(6.88 \pm 0.2)\%$)。分析精度都为 $\pm 0.2\%$, 碳、氮同位素比值分别以 $\delta^{13}\text{C}$ (相对 V-PDB)和 $\delta^{15}\text{N}$ (相对 AIR)表示, 测试结果详见表 1。

表 1 骨胶原和发角蛋白的 C、N 含量及同位素比值

Table 1 The C, N contents and isotopic data
in bone collagen and hair keratin

样品性质	骨胶原/角蛋白得率(%)	C 含量 (%)	N 含量 (%)	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
人骨	5.7	47.6	17.3	3.2	-18.3	15.5
人发	1 号	89.3	13.3	3.7	-18.9	14.7
	2 号	89.1	7.5	3.7	-18.7	14.9

2 结果与讨论

2.1 骨和发的污染

生物体死亡之后, 在长期的埋葬过程中常受到各种埋藏环境因素的影响^[24-25], 可能导致骨(发)中化学成分发生明显变化, 造成样品的污染^[26-27], 使得食物结构的重建无从谈起。因此, 探索骨(发)中的蛋白质是否发生了污染是开展稳定同位素分析的前提。

2.1.1 骨胶原的保存状况

对于骨胶原而言, 其 C、N 含量和 C/N 摩尔比, 是判断其保存的重要鉴定指标^[28]。与现代骨胶原的 C(41%)、N(15%)含量相比^[29], 古墓沟人骨胶原的 C、N 含量相对较高, 分别为 47.6%和 17.3%, 表明保存较为完好。一般认为, 胶原蛋白的 C/N 摩尔比值在 2.9~3.6 之间, 可认为未受污染^[28]。古墓沟人骨的 C/N 摩尔比值为 3.2, 落于此范围内, 进一步表明该个体的骨胶原基本未受污染。

2.1.2 人发的保存状况

通过显微观察, 可初步了解古发的保存状况。与现代人发的完整鳞片结构(图 3a)相比, 古发的鳞

片结构已完全破坏,但发的骨架结构较好,仍具有一定的韧性(图 3b)。究其原因,主要是由于发毛小皮和皮质所含的高硫蛋白受到埋藏环境中各种物理、化学以及生物因素的侵蚀被破坏,并且毛小皮细胞之间以及毛小皮与皮质细胞之间的细胞膜络合物(cell membrane complex,简称 CMC)明显减少,最终导致鳞片的破损、翘起和脱落^[30]。

人发角蛋白的 C/N 摩尔比是判断其保存状况的最关键指标^[18]。角蛋白的 C/N 摩尔比值通常落于 2.9~3.8 之间^[17]。而经过两种方法处理的古墓沟人发,其 C/N 摩尔比值皆为 3.7,可视为未受污染。

另一方面,比较人发处理的两种方法可以明显看出,1号样品的 C(42.6%)和 N(24.0%)含量,皆显著高于 2号样品(C、N 含量分别为 13.3%和 7.5%),表明酸处理会使人发角蛋白中的 C、N 含量降低。如前言所述,稳定角蛋白二级结构的化学键中存在大量的二硫键,在酸性环境下很容易断裂,使得角蛋白发生降解,产生水溶性的多肽或游离氨基酸^[31-32],在处理过程中很容易流失,这应当是造成角蛋白 C、N 含量下降的主要原因。

2.2 M5 个体的食物结构

M5 人发样品 1 和样品 2 以及骨胶原的碳、氮稳定同位素比值关系如图 4 所示。由图可见,样品 1 和样品 2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值非常接近,表明尽管对人发的处理方法有所差异,但并不影响人发角蛋白的碳、氮稳定同位素比值。若平均样品 1 和样品 2 的

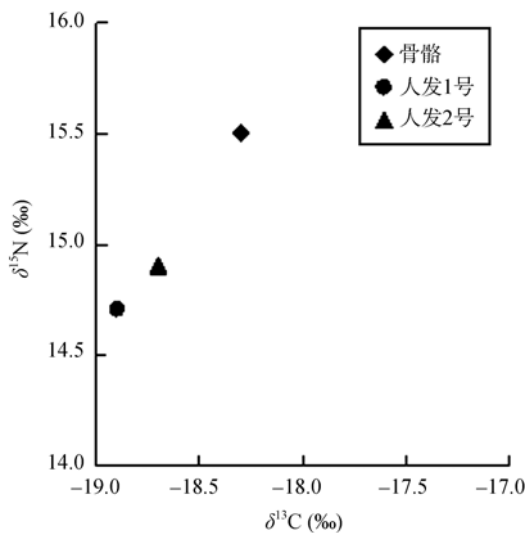


图 4 同一个体骨胶原和角蛋白的 $\delta^{15}\text{N}$ - $\delta^{13}\text{C}$ 散点图

Fig. 4 Scatter plot of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of bone collagen and hair keratin from the same individual

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值,可得人发角蛋白的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为-18.8‰和 14.8‰。若以人发的生长速度为每天生长 0.35 mm^[33]计算,则 M5 人发(长度为 8.77 cm)反映了该个体死亡前约 250 d 的平均食物组成。如前言所述,骨中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要反映了个体死亡前至少 10 年的平均食物组成^[3]。故此,通过对 M5 发与骨中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分析,即可了解其短期与长期的食物构成。

众所周知, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-30‰~-23‰(均值-26.5‰), C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-9‰~-16‰(均值-12.5‰)^[34]。与食物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比,人(动物)肌肉约富集 1‰,骨胶原约富集 5‰左右^[35]。依此,从图 4 可以明显看出,发与骨的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(分别为-18.8‰和-18.3‰)显现出典型的 C_3 类特征,表明先民的食物主要来源于 C_3 类的植物抑或以 C_3 类植物为食的动物。就氮同位素而言,自食物转化为骨胶原或发角蛋白过程中, $\delta^{15}\text{N}$ 值大约分别富集 3‰~4‰和 2‰~3‰^[36-37]。显然,发与骨的高 $\delta^{15}\text{N}$ 值(14.8‰和 15.5‰)表明先民的食物中包含了大量的动物蛋白。综上所述,可以看出,M5 个体的食物来源一直相当稳定,动物蛋白在其食物中居主导地位。

新疆地区是中西方交流的重要通道,畜牧业一直是先民最重要的生计之一。公元前 2000 年初,新疆地区出现的小河-古墓沟文化(以小河墓地和古墓沟墓地为代表),其人群组成主要为欧洲人种。墓地中的随葬品,除常见的细石器镞、铜刀、骨角器、牛羊骨骼和皮毛制品外,还存在石镰和石磨盘(石磨棒)等农业工具及小麦和粟等植物遗存,显示人群的生活方式可能主要为畜牧狩猎经济并辅以少许农业^[21,38-41]。之前,古墓沟墓地其他 10 个人骨样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值分别为(-18.2±0.2)‰和(14.4±0.52)‰,显示该墓地的先民主要以畜牧业为生^[22]。本研究中,M5 发与骨中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的对比分析进一步证实:先民经营畜牧业产生的大量动物肉类是先民最重要的食物来源。

2.3 骨胶原与角蛋白之间的同位素分馏

当食物被消化吸收后,因人(动物)的不同组织所需碳源的不同,造成了不同组织与食物之间碳同位素的分馏,使之存在明显差异。一般而言,与食物中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比,肌肉约富集 1‰,骨胶原约富集 5‰,羟磷灰石结构碳酸根中约富集 12‰^[37],毛发角蛋白约富集 0.2‰~3.5‰^[10-13]。此外,动物饲喂实

进一步显示：骨胶原中的碳主要源自食物中的蛋白质部分，而羟磷灰石的碳则来自整个食物(包括碳水化合物、蛋白质和脂类)，发角蛋白中的碳也主要源自食物中的蛋白质部分^[42-43]。

已有的研究显示，骨胶原蛋白相对于毛发角蛋白，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值富集0‰~1‰，而 $\delta^{15}\text{N}$ 值富集0‰~2‰^[44-45]。在本研究中，M5骨胶原与发角蛋白均具有高 $\delta^{15}\text{N}$ 值，表明该个体绝大部分的食物来自动物蛋白。骨胶原与发角蛋白之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值之差仅为0.5‰，说明两者的碳源非常相似。此外，骨胶原的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较发角蛋白仅富集0.7‰，也反映了两者之间具有相似的氮源。故此，可以看出，当食物以高蛋白为主时，骨与发之间碳、氮同位素的分馏效应较小。然而，当食物以碳水化合物为主时，骨与发之间的同位素分馏是否存在一定的规律，尚有待进一步研究。

另一方面，骨胶原与角蛋白在 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的差异除与先民短期与长期内食物来源的不同密切相关外，还缘于两者不同的氨基酸组成。角蛋白由22种氨基酸组成，以胱氨酸、甘氨酸和酪氨酸为主^[31,46]；骨胶原的氨基酸则主要为甘氨酸、脯氨酸、谷氨酸和天冬氨酸等^[47]。研究表明，不同氨基酸因其代谢途径的多源性，往往造成不同氨基酸的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值与食物相比存在不同程度上的分馏效应^[48-49]。由此可见，发与骨的蛋白之间 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的少许差异与其各种不同氨基酸组成造成的同位素分馏效应也密切相关。

3 结 论

比较了新疆孔雀河古墓沟遗址 M5 人发与现代人发的组织结构，采用两种方法提取古发中角蛋白，并对该个体骨与发中碳、氮稳定同位素进行了对比分析，结论如下。

(1) 与现代人发显微结构相比，古墓沟人发骨架结构保存较好。古发的 C、N 含量以及 C/N 摩尔比显示其未受污染。角蛋白提取过程中，酸处理虽不影响碳、氮稳定同位素比值，但会导致其含量明显降低。因此，毛发角蛋白提取，不适于酸处理。

(2) 角蛋白低 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-18.8‰)和高 $\delta^{15}\text{N}$ 值(14.8‰)表明该个体死亡前大半年来摄入了大量动物蛋白。与该个体骨胶原(反映先民长期内食谱信息)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-18.3‰)和 $\delta^{15}\text{N}$ 值(15.5‰)相比，可以看

出，该个体的食物来源一直较为稳定，即以大量动物蛋白为食，主要源自发达的畜牧业。

(3) 尽管角蛋白与骨胶原有着不同的氨基酸组成，但两者之间 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的细微差异可能与该个体以高蛋白为主的食物分别转化为骨和发中蛋白的过程中，骨与发之间碳、氮同位素的分馏效应较小有关。

综上所述，通过对人骨中骨胶原与人发角蛋白的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的对比分析可揭示个体食物结构的变迁。而将人发作为研究材料，无需破坏遗骸的完整性，这在新疆地区大力开展先民的食物结构分析奠定了基础。此外，作为中西方交流重要通道的新疆地区，人口流动极为频繁，而通过对富含高硫蛋白的人发中的硫稳定同位素分析^[50-51]，还可为探讨新疆地区的人群迁徙和人群结构等热点问题提供重要线索。

感谢中国科学院大学陈相龙、侯亮亮、王宁、司艺和李文成等研究生在本文的实验和文章撰写过程中的指导。

参考文献(References):

- [1] Kohn M J. You are what you eat[J]. Science, 1999, 283(5400): 335-336.
- [2] 胡耀武, 杨学明, 王昌燧. 古代人类食谱研究现状[M]//王昌燧, 左键. 科技考古论丛(第二辑). 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 51-58.
Hu Yao-wu, Yang Xue-ming, Wang Chang-sui. The status of dietary research of ancient human[M]//Wang Chang-sui, Zuo Jian. Journal of Archaeological Science (Second Series). Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2000: 51-58 (in Chinese).
- [3] Manolagas S C. Birth and death of bone cells: Basic regulatory mechanisms and implications for the pathogenesis and treatment of osteoporosis [J]. Endocr Rev, 2000, 21(2): 115-137.
- [4] Price T D. The Chemistry of Prehistoric Human Bone[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 155-210.
- [5] White C D. Isotopic determination of seasonality in diet and death from Nubian mummy hair [J]. J Archaeol Sci, 1993, 20(6): 657-666.
- [6] Schwarcz H P, White C D. The grasshopper or the ant?: Cultigen-use strategies in ancient Nubia from C-13 analyses of human hair[J]. J Archaeol Sci, 2004, 31(6): 753-762.
- [7] Zviak C, Dawber R P R. Hair structure, function, and physicochemical properties[M]//Bouillon C, Wilkinson J. The Science of Hair Care. New York and Basel: Marcel Dekker INC, 1986: 74-82.
- [8] 何学民, 严品华. 用 N-(3-P)NEM 标记毛发角蛋白研究毛发

- 中低硫和高硫蛋白的状态[J]. 华东师范大学学报, 1992 (2): 74-82.
- He Xue-min, Yan Pin-hua. Research on the low and the high-sulphur protein from hair keratins labelled with N-(3-Pyrene) maleimide[J]. J East China Normal Univ (Nat Sci), 1992 (2): 74-82 (in Chinese with English abstract).
- [9] Spohnheimer M, Robinson T, Ayliffe L, Passey B, Roeder B, Shipley L, Lopez E, Cerling T, Dearing D, Ehleringer J. An experimental study of carbon-isotope fractionation between diet, hair, and feces of mammalian herbivores[J]. Can J Zool, 2003, 81(5): 871-876.
- [10] Nardoto G B, de Godoy P B, de Barros Ferraz E S, Ometto J P H B, Martinelli L A. Stable carbon and nitrogen isotopic fractionation between diet and swine tissues [J]. Sci Agric (Piracicaba Braz), 2006, 63(6): 579-582.
- [11] Katzenberg M A, Krouse H R. Application of stable isotope variation in human tissue to problems in identification[J]. J Can Soc Forensic Sci, 1989, 22(1): 7-20.
- [12] Jones R J, Ludlow M M, Troughton J H, Blunt C G. Changes in natural carbon isotope ratio of the hair from steers fed diets of C₄, C₃, C₄ species in sequence[J]. Search, 1981, 12(3/4): 85-87.
- [13] Tieszen L L, Boutton T W, Tesdahl K G, Slade N A. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet[J]. Oecologia, 1983, 57(1/2): 32-37.
- [14] DeNiro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1981, 45(3): 341-351.
- [15] O'Connell T C. The isotopic relationship between diet and body proteins: Implications for the study of diet in archaeology[D]. Oxford: University of Oxford, 1996.
- [16] Bol R, Pflieger C. Stable isotope (^{13}C , ^{15}N and ^{34}S) analysis of the hair of modern humans and their domestic animals[J]. Rapid Commun Mass Spectrom, 2002, 16(23): 2195-2200.
- [17] O'Connell T C, Hedges R E. Investigations into the effect of diet on modern human hair isotopic values[J]. Am J Phys Anthropol, 1999, 108(4): 409-425.
- [18] Macko S A, Lubec G, Teschler-Nicola M, Andrushevich V, Engel M H. The Ice Man's diet as reflected by the stable nitrogen and carbon isotopic composition of his hair[J]. FASEB J, 1999, 13(3): 559-562.
- [19] Iacumin P, Davanzo S, Nikolaev V. Short-term climatic changes recorded by mammoth hair in the Arctic environment[J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2005, 218 (3/4): 317-324.
- [20] 韩建业. 新疆的青铜时代和早期铁器时代文化[M]. 北京: 文物出版社, 2007: 1-126.
- Han Jian-ye. Cultures in Xinjiang from the Bronze Age to the Early Iron Age [M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2007: 1-126 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王炳华. 孔雀河古墓沟发掘及其初步研究[J]. 新疆社会科学, 1983 (1): 117-127.
- Wang Bing-hua. The excavation and primary study of Gumugou cemetery, Xinjiang[J]. Soc Sci Xinjiang, 1983 (1): 117-127 (in Chinese).
- [22] 张全超, 朱泓. 新疆古墓沟墓地人骨的稳定同位素分析——早期罗布泊先民饮食结构初探[J]. 西域研究, 2011 (3): 91-96, 142.
- Zhang Quan-chao, Zhu Hong. Carbon and nitrogen stable isotope analysis of the human bones from the Gumugou cemetery in Xinjiang: A preliminary exploration of the early population dietary in Lop Nur [J]. West Regions Stud, 2011 (3): 91-96, 142 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张全超, 朱泓, 金海燕. 新疆罗布淖尔古墓沟青铜时代人骨微量元素的初步研究[J]. 考古与文物, 2006 (6): 99-103.
- Zhang Quan-chao, Zhu Hong, Jin Hai-yan. Analysis of trace elements in Bronze Age human bone from Gumugou cemetery in Luobunaoer, Xinjiang [J]. Archaeol Cult Relic, 2006 (6): 99-103 (in Chinese with English abstract).
- [24] Price T D, Blitz J, Burton J, Ezzo J A. Diagenesis in prehistoric bone: Problems and solutions[J]. J Archaeol Sci, 1992, 19(5): 513-529.
- [25] 胡耀武, 王昌燧, 左键, 张玉忠. 古人类骨中羟磷灰石的XRD 和喇曼光谱分析[J]. 生物物理学报, 2001, 17(4): 621-627.
- Hu Yao-wu, Wang Chang-sui, Zuo Jian, Zhang Yu-zhong. Analysis of hydroxyapatite in ancient human bone using Raman spectra and XRD[J]. Acta Biophys Sinica, 2001, 17(4): 621-627 (in Chinese with English abstract).
- [26] Nelson B K, DeNiro M J, Schoeninger M J, De Paolo D J. Effects of diagenesis on strontium, carbon, nitrogen and oxygen concentration and isotopic composition of bone[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1986, 50(9): 1941-1949.
- [27] Nielsen-Marsh C M. Patterns of diagenesis in bone I: The effects of site environments[J]. J Archaeol Sci, 2000, 27(12): 1139-1150.
- [28] DeNiro M J. Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction[J]. Nature, 1985, 317(6040): 806-809.
- [29] Ambrose S H, Butler B M, Hanson D B, Anderson R L H, Krueger H W. Stable isotopic analysis of human diet in the Marianas Archipelago, Western Pacific [J]. Am J Phys Anthropol, 1997, 104(3): 343-361.
- [30] Braida D, Dubief C, Lang G, Hallegot P. Ceramide: A new approach to hair protection and conditioning [J]. Cosmet Toiletr, 1994, 109(12): 49-57.
- [31] Robbins C R. Chemical and Physical Behavior of Human Hair[M]. New York: Springer-Verlag, 2012: 116-119.
- [32] 韩国防, 安原初, 韩虹, 皮运清, 尚雪岭. 毛发水解氨基酸的分离与综合应用[J]. 化学世界, 2000 (9): 496-498.
- Han Guo-fang, An Yuan-chu, Han Hong, Pi Yun-qing, Shang Xue-ling. Separation and comprehensive utilization of amino acid in the hair protein hydrolysate [J]. Chem World, 2000 (9): 496-498 (in Chinese with English abstract).
- [33] Saitoh M, Uzuka M, Sakamoto M, Kobori T. Rate of hair growth. Montagna W, Dobson R L. Advances in Biology of Skin, Volume IX, Hair Growth. Oxford: Pergamon Press,

- 1969: 183–201.
- [34] van der Merwe N J. Carbon isotopes, photosynthesis and archaeology[J]. *Am Scient*, 1982, 70(6): 596–606.
- [35] DeNiro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1978, 42(5): 495–506.
- [36] van der Merwe N J, Roosevelt A C, Vogel A C. Isotopic evidence for prehistoric subsistence change at Parmana, Venezuela[J]. *Nature*, 1981, 292(5823): 536–538.
- [37] Bocherens H, Fizet M, Mariotti A. Diet, physiology and ecology of fossil mammals as inferred from stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry: Implications for Pleistocene bears[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1994, 107(3/4): 213–225.
- [38] 新疆文物考古研究所. 2002 年小河墓地考古调查与发掘报告[J]. *边疆考古研究*, 2004 (3): 338–398.
Institute of Cultural Relics and Archaeology of Xinjiang. The Excavation Report of Xiaohe Cemetery[J]. *Research of China's Frontier Archaeology*, 2004 (3): 338–398 (in Chinese with English abstract).
- [39] 新疆文物考古研究所. 新疆罗布泊小河墓地 2003 年发掘简报[J]. *文物*, 2007 (10): 4–24.
The Cultural Relics and Archaeology Institute of Xinjiang Autonomous Region. A Brief Excavation Report on Xiaohe Graveyard Located in Luobupo, Xinjiang Autonomous Region [J]. *Cultural Relics*, 2007 (10): 4–42 (in Chinese with English abstract).
- [40] 王炳华. 古墓沟人社会文化生活中几个问题[J]. *新疆大学学报*, 1983 (2): 86–90.
Wang Bing-hua. The several questions about the society and culture of ancient human in Gumugou [J]. *J Xinjiang Univ*, 1983 (2): 86–90 (in Chinese).
- [41] 韩康信. 新疆孔雀河古墓沟墓地人骨研究[J]. *考古学报*, 1986 (3): 361–384.
Han Kang-xin. Anthropological characters of the human skulls from ancient cemetery at Gumugou, Xinjiang[J]. *Acta Archaeol Sinica*, 1986 (3): 361–384 (in Chinese with English abstract).
- [42] Ambrose S H, Non L. Isotopic composition of dietary protein and energy versus bone collagen and apatite: Purified diet growth experiments[M]//Lambert J B, Grupe G. *Prehistoric Human Bone: Archaeology at the Molecular Level*. Berlin: Springer-Verlag, 1993: 1–37.
- [43] Tieszen L L, Fagre T. Effect of diet quality and composition on the isotopic composition of respiratory CO₂, bone collagen, bioapatite, and soft tissues[M] //Lambert J B, Grupe G. *Prehistoric Human Bone: Archaeology at the Molecular Level*. Berlin: Springer-Verlag, 1993: 121–155.
- [44] O'Connell T C, Hedges R E M. Isotopic comparison of hair and bone: Archaeological analyses[J]. *J Archaeol Sci*, 1999, 26(6): 661–665.
- [45] Webb Y, Minson D J, Dye E A. A dietary factor influencing ¹³C content of human hair[J]. *Search*, 1980, 11: 200–201.
- [46] Marshall R C, Orwin D F G, Gillespie J M. Structure and biochemistry of mammalian hard keratin[J]. *Electron Microsc Rev*, 1991, 4(1): 47–83.
- [47] Hare P E, Fogel M L, Stafford T W Jr, Mitchell A D, Hoering T C. The isotopic composition of carbon and nitrogen in individual amino acids isolated from modern and fossil proteins[J]. *J Archaeol Sci*, 1991, 18(3): 277–292.
- [48] O'Connell T C, Hedges R E M. Isolation and isotopic analysis of individual amino acids from archaeological bone collagen: A new method using RP-HPLC[J]. *Archaeometry*, 2001, 43(3): 421–438.
- [49] Ambrose S H, Buikstra J, Krueger H W. Status and gender differences in diet at Mound 72, Cahokia, revealed by isotopic analysis of bone[J]. *J Anthropol Archaeol*, 2003, 22(3): 217–226.
- [50] Richards M P, Fuller B T, Sponheimer M, Robinson T, Ayliffe L. Sulphur isotopes in palaeodietary studies: A review and results from a controlled feeding experiment[J]. *Int J Osteoarchaeol*, 2003, 13(1/2): 37–45.
- [51] Privat K L, O'Connell T C, Hedges R E M. The distinction between freshwater- and terrestrial-based diets: Methodological concerns and archaeological applications of sulphur stable isotope analysis[J]. *J Archaeol Sci*, 2007, 34(8): 1197–1204.