

骨化学分析在古人类食物结构演化研究中的应用^{*}

胡耀武^{1 2}, Michael P. Richards¹, 刘武³, 王昌燧²

(1. Department of Human Evolution, Max-Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Deutscher Platz 6, D-04103, Leipzig, Germany; 2. 中国科学院研究生院科技史与科技考古系, 北京 100049; 3. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044)

摘要:古人类食物结构演化的研究,是探索人类起源和进化的重要组成部分。骨化学分析是探索古人类食物结构的主要方法,也是最为有效的方法。在概述骨化学分析原理的基础上,详细介绍了如何运用该方法了解古人类(南方古猿、人属、尼安德特人、欧洲现代人)的食物结构,并通过与现代黑猩猩的食物结构比较,揭示了从猿至人食物结构的演化过程,探讨了古人类食物结构的演变对人类进化的深刻影响。此外,提出了目前研究中尚存的两个重要问题及已有的解决方法。之后,评述了我国古人类食物结构的研究现状,并展望了古人类食物结构研究的前景。

关键词:古人类;古食物结构;骨化学分析;微量元素分析;稳定同位素分析

中图分类号:Q981.7593 文献标识码:A

1 前言

自猿向现代人进化的漫长岁月里,其食物结构发生了明显的变化,即以植物类食物为主转为动植物类食物并重。那么,食物结构的改变,对人类的进化究竟产生了怎样的影响呢?现代营养学的研究表明,与现生大猿相比,人类食物结构的多元化,有利于人类从外界环境吸收多种营养,在一定程度上降低了婴儿的死亡率、延长了他们的平均寿命,增强了适应外界环境的能力^[1]。而肉食的摄取,则对于人类增大脑量、开发心智和改善营养,更是至关重要^[2]。此外,食物新种类的获取,也往往与人类行为的进化密切相关^[3]。因此,人类食物结构的演化之路,自始至终都是人类起源和进化研究的重要组成部分,而万年以前古人类(hominin)食物结构的探索,更是揭示人类食物结构演化的关键所在。为此,本文中所谓的古人类,主要指全新世以前的古代

人类。

旧石器时代遗址中,古人类食物的直接证据(如有机残留、植物遗存等),在漫长的岁月中往往分解殆尽,很难得以保留。因此,古人类食物结构的证据,更多地来自于质地坚硬的人和动物骨或牙齿以及石器的分析结果^[4-5]。如通过石器表面磨损的显微观察,探索石器的用途、功能以及古人类可能的食物来源,通过对动物埋藏学和其骨上切痕的分析,了解古人类狩猎和切割动物的有关活动;通过对古人类下颌骨以及牙齿形态和微痕的分析,推断其食物的大致种类和粗糙程度;通过对古人类骨或牙齿中化学成分的分析,即骨化学分析(bone chemistry analysis)^[6],直接揭示古人类的食物结构,探索其演化过程。

自20世纪80年代初骨化学分析方法建立以来,其不仅在揭示新石器时代先民生活方式的转变、农业的起源与发展等方面成绩斐然,而且在揭示古

* 收稿日期 2007-09-30;修回日期 2008-02-19。

* 基金项目:中国科学院和德国马普学会基金项目;中国科学院知识创新工程重要方向项目“科技考古的若干前沿问题再研究”(编号:KJ951-A1-01-01);国家自然科学基金项目“山东后李文化时期人和动物骨的稳定同位素分析”(编号:40702003);中国科学院研究生院院长基金项目“北京周口店田园洞遗址古人类食谱与古环境分析”资助。

作者简介:胡耀武(1972-),男,安徽省滁州市人,副教授,主要从事生物考古和农业考古研究。E-mail: yw@gucas.ac.cn

人类食物结构的演化历程也已取得极大的成功^[5,7],引起考古学家和人类学家的的高度重视,在揭示古人类食物结构演变过程的积极作用正日益彰显。为此,本文拟在概述骨化学分析原理的基础上,详细介绍骨化学分析在古人类食物结构研究的研究进展,指出目前研究中存在的两大主要问题,并提出了可能的解决方法。最后,评述了古人类食物结构在我国的研究现状,并预测了它的发展前景。

2 骨化学分析原理简介

众所周知,人类生长与发育所需的营养和能量,皆来自其生存环境的食物。食物经人体消化吸收后,就转化为人体组织的组成成分。人骨的化学组成通常可分为两部分,即以骨胶原为主的有机质和以羟磷灰石为主的无机质。研究表明,人体骨组织的化学组成与其食物中的化学组成密切相关^[6]。人们食物的来源不同,人骨的化学成分也将存在明显差异。因此,根据人骨的化学成分,即稳定同位素比值和微量元素含量,便可揭示他们的食物结构、生活方式以及生存环境等多方面的信息^[8,9]。

稳定同位素分析,是骨化学研究的主要方法。植物的光合作用途径以及固氮方式的差异,将直接导致其¹³C和(¹⁵N)值明显不同。一般认为,C₃植物的¹³C平均值约为-26.5‰,而C₄植物的¹³C平均值则约为-12.5‰^[10];豆科植物的¹⁵N大约等于0‰,而非豆科植物的¹⁵N则稍高^[11]。这些差异,在整个食物链的流动和传递过程中,始终有所体现^[12]。动物组织的同位素组成,与其食物的同位素组成密切相关,但存在一定的同位素分馏。人们发现,动物组织对原食物的¹³C皆有所富集,其中,动物肌肉的富集程度甚微,仅1‰左右,通常可忽略不计,而骨骼中,骨胶原的富集程度为5‰左右,羟磷灰石中置换碳酸根的富集则高达12‰左右^[13]。因此,分析人骨中骨胶原或羟磷灰石的¹³C值,即可了解人们的食物来源。小白鼠的饲养实验^[14]进一步发现,骨胶原中的C主要来自食物中的蛋白质部分,而羟磷灰石中置换碳酸根的C,则与整个食物的C来源相关,即包括碳水化合物、蛋白质和油脂等等。骨胶原和羟磷灰石C来源的差异,为更精细地研究人类食物结构奠定了坚实的基础。相比于C同位素,N同位素的富集显得更有规律,营养级每上升一级,大约富集3‰~4‰,如较之食物,食草类动物骨胶原的¹⁵N,将富集约3‰~4‰,而较之食草类动物,以之为食的食肉类动物¹⁵N,又将进一步

富集约3‰~4‰^[15]。故此,分析人骨中骨胶原的¹⁵N,就可辨别其在食物链中的营养级别,了解其食物结构以肉食或素食为主。

骨化学研究的另一主要方法,就是分析人骨中羟磷灰石的微量元素。研究指出,动物消化吸收食物时,其吸收效果与食物的成分密切相关^[16]。一般说来,Sr的吸收远不如Ca吸收有效,致使骨中的Sr/Ca值显著降低。通常,食草动物骨中积淀的Sr/Ca约为其食物的1/5,而食肉动物骨中积淀的Sr/Ca又约为食草动物的1/5。这就是所谓的生物纯化(Biopurification)^[16]。除Sr外,元素Ba也有生物纯化现象。这样,根据人骨中Sr/Ca、Ba/Ca值的分析,原则上可望揭示该个体的食物结构信息,即其以植物类食物为主或以肉类食物为主^[17]。

3 古人类食物结构的演化

3.1 南方古猿的食物结构及其与人属间的食物差异

人类的进化,经历了南方古猿(Australopithecines)、能人(Homo habilis)、直立人(Homo erectus)以及智人(Homo sapiens)4个阶段。那么,自古猿至人属的演化过程中,人类的食物结构发生了怎样的变化呢?

生活在420~120万年前的南方古猿,主要分为纤细种(gracile Australopithecines)和粗壮种(robust Australopithecines),后者也被称为傍人(Paranthropines)^[18]。根据牙齿形态的分析结果,一般认为粗壮种的门齿、犬齿较小,而颌骨较粗壮,加上臼齿硕大,牙齿珐琅质甚厚,据此推测,其主要食物可能为小而硬的、多纤维的粗糙植物,并进一步认为,粗壮种的最终灭绝,很可能与这种低营养的食物结构有关^[4,19,20]。与粗壮种不同,纤细种的食物种类多样,为杂食结构,其营养明显广谱化,从而增强了他们的进化优势,并最终成为人类(Homo sapiens)的直系祖先。而由纤细种进化而成的人属(Homo),其脑容量较大而肠胃的吸收面积较小,唯摄取人体所需的复合营养方能有此结果,因此,人属的食物结构也必然具有杂食的特征^[21]。然而,骨化学分析的研究成果,却对此提出了新的见解。

南非Swartkrans遗址发现了大约180万年前的南方古猿粗壮种(A. robustus),Sillen等^[22]测定了其骨骼的Sr/Ca比值,并与该遗址食草类和食肉类动物的相应Sr/Ca值进行了比较,结果发现,南方古猿粗壮种的Sr/Ca值略低于该遗址的食肉类动物,而远高于食草类动物,这一事实表明,该遗址南方古猿

粗壮种的食物结构应与食肉类动物相近,即其食物组成中应该有一定量的动物。与粗壮种古猿相比,该遗址的人属(*Homo sp.*),具有更高的 Sr/Ca 值,这可能与其较为广泛地摄取富含 Sr 的地下植物资源(如块茎类植物)有关^[23]。而南非斯泰克方丹(Sterkfontein)地区的南方古猿非洲种(*A. africanus*)其牙齿珐琅质的 Sr/Ca 比值,虽也位于食草类动物和食肉类动物之间,但显著高于南方古猿粗壮种(傍人粗壮种)(*P. Robustus*),表明该南方古猿仍属杂食类,但较南方古猿粗壮种更多地摄取了富含 Sr 的食物,如地下块茎类植物、昆虫类等^[24]。

尽管微量元素分析方法,在探索古人类食物结构领域,业已取得了较为丰硕的成果,但其方法自身的缺陷,如植物含 Ca 量的不同,使不同营养级的 Sr/Ca、Ba/Ca 值,有时并不存在明显的差异;当地质环境不同时,不同地域的古人类及动物 Sr/Ca、Ba/Ca 值,常常缺乏可比性等,从而极大制约了其在古代食物结构研究中的有效应用^[17, 25]。因此,古人类食物结构的探索,更多地来自于稳定同位素分析的研究成果。

一般认为,与人类祖先最为接近的现生猿类,当属非洲的黑猩猩。因此,黑猩猩的食物结构,在一定程度上代表着最早期人类的食物结构。黑猩猩食物结构的研究表明,其食物主要为森林中的果类或嫩树叶,即 C₃ 类植物^[26],研究还发现,即便在 C₄ 类植被和食物十分丰富的草原环境中,其食物依然主要为 C₃ 类植物,表明黑猩猩的食物结构相当稳定^[27, 28]。与之相比,南非斯瓦特克朗斯(Swartkrans)地区约 180 万年前的傍人粗壮种(*P. robustus*),其牙珐琅质则相对富集了¹³C,表明其食物虽以 C₃ 类为主,但已有一定量的 C₄ 类食物,它可能来自 C₄ 类植物、以 C₄ 类植物为主要食物的动物或者两者兼而有之^[29]。最近,牙珐琅质的激光消融(Laser ablation)稳定同位素分析进一步证实,该古猿对 C₄ 类食物的摄取,还存在着季节性或年度性的明显变化,表明 C₄ 类食物的摄取,业已成为该古猿赖以生存的主要手段之一^[30]。令人诧异地是,300 万年前的南非 Makapansgat 地区^[31]以及年代稍晚些的南非斯泰克方丹地区,那里的南方古猿非洲种(*A. africanus*)^[32],其食物结构却与粗壮种基本相似,只是 C₄ 类食物的比例更高,个体间食物结构的差异也更大,反映了该古猿适应生存环境的能力更强。匠人(*Homo ergaster*)的食物结构本应不同于南方古猿,然而其¹³C 值却与南方古猿粗壮种、非洲种基本相

同,差异并不显著^[33, 34]。需要指出的是,这些古人类食物结构中的 C₄ 类,除了莎草和白蚁外,还可能包括无脊椎动物、爬行类、鸟类以及小型哺乳类动物^[34, 35]。

骨化学分析的研究成果,为深刻揭示早期古人类食物结构的演化过程提供了重要的科学依据。如果说,新近纪中新世(Miocene)的古人类,仍栖息在森林环境,主要以 C₃ 类的果类和嫩叶等为生的话^[36],那么,上新世(Pliocene)乃至更新世(Pleistocene)早期,南方古猿在学会双足行走的同时,其食物结构也由素食转为杂食,即虽以 C₃ 类为主,但已包含相当量的 C₄ 类食物,如莎草、白蚁、无脊椎动物、爬行类、鸟类以及小型哺乳类动物等。古环境研究还表明,即使南方古猿的生存环境类似于现代黑猩猩的栖息地,其食物中依然包含相当量的 C₄ 类^[37]。C₄ 类食物的摄取,可能与双足行走一样,成为古猿的基本特征之一,使得古猿能够更好地适应生存环境^[35]。而南方古猿非洲种、南方古猿粗壮种以及匠人的食物结构基本相似,则意味着早在人属出现之前,古猿就已能够获取高质量、高营养的动物类食品^[30, 31, 35, 37]。显然,南方古猿粗壮种灭绝的真正原因,仍需进一步深入探讨。

3.2 欧洲尼安德特人与现代人食物结构的差异

古代 DNA 的研究表明,至少在 50 万年前,欧洲的尼安德特人(*Homo sapiens neanderthalensis*,以下简称尼人)与早期现代人(*Homo sapiens sapiens*)的祖先就已分离,各自走向独立进化之路^[38]。大约 30 万年前至 3 万年前,尼人主要分布在欧洲和亚洲西部。来自非洲的早期现代人,在与尼人共存了很长一段时间之后,最终取代了尼人而占领了整个欧洲,成为现代欧洲人的直接祖先^[39]。尼人和现代人之间的相互关系以及尼人为何灭绝等重要科学问题,一直是学术界关注的焦点和研究前沿。

Marillac 遗址位于法国境内,距今约 4 万年。早在 20 世纪 90 年代初期,Bocherens 等^[40, 41]即比较分析了该遗址哺乳动物与尼人骨骼的¹³C 和¹⁵N,发现尼人的¹⁵N 值与食肉类动物相当,表明尼人的食物结构以肉食为主,主要来自于陆生环境下的食草类动物。之后,一系列其它遗址,如比利时的 Scladina 洞穴遗址(8~13 万年前和 4 万年前)^[42]、Awirs 洞穴遗址(4 万年前)和 Betche-al-Roche 洞穴遗址(4 万年前)^[43];法国的 Saint-Cesaire I 遗址(3.6 万年前)^[44];克罗地亚的 Vindija 洞穴遗址(3 万年前)^[45]这些遗址的尼人骨中的¹³C、(¹⁵N 值,均显

示:尼人与陆生食肉类动物处于同一营养级,属于主动狩猎者,其食物的主要来源为开放环境下的陆生食草类动物。

Richards等^[48]分析了一批欧洲现代人的¹³C、¹⁵N值,其中,1.3万年前英国南部 Gough 和 Sun Hole 洞穴遗址的数据表明,其¹⁵N值甚高,与陆生的食肉类动物相当,反映了这些现代人的食物主要来自陆生的食草类动物,如牛或马鹿等^[46]。对于距今约2.6万年的捷克、俄罗斯和英国各遗址,其¹⁵N值高于陆生食肉类动物,而与淡水鱼、水禽相似,表明这些现代人的主要食物来源为淡水类食物,如鱼、贝类或鸟类等^[47]。至于英国北威尔士距今约1.2万年的 Kendrick 洞穴遗址,其¹³C、¹⁵N值表明,那里现代人的食物中,海生类的比例为30%左右,很可能为高营养级的海生生物,如海里的哺乳动物等。

根据以上研究,可以看出,尼人和现代人虽均属智人,但两者的食物结构却存在极大的差异。尼人为主动狩猎者,主要获取开放环境下的陆生食草动物。并且,近10万年内,其食物结构始终相对不变,反映了其获取食物资源的手段和方式较为单一^[45]。反观现代人,其食物资源,已不仅限于陆生食草动物,还包括其它食物,如淡水类和海生类,显示了现代人通过扩大狩猎范围和领域,在食物资源的选择上,比尼人具有更大的灵活性,增强了现代人对于生存环境的适应性。正是由于其食物结构的“广谱革命”(broad spectrum revolution),即食物的种类和来源较以前更为广泛,才使得现代人的人口代代顺利增长,在“物竞天择”中逐步占据了上风,并最终取代尼人而成为欧洲的主人^[48,49]。

4 研究中存在的问题及已有的解决办法

如上所述,在探索古人类的食物结构、揭示他们获取食物的方式以及反演他们所处的环境状况等方面,骨化学分析方法业已得到了成功应用,显示出强劲的发展前景,极大地增强了人们对于古人类食物结构演化过程的了解。然而,毋庸讳言,尽管古人类食物结构研究取得了很大进展,但研究中存在的种种问题,仍然不容忽视。为此,现将研究中主要两个问题的研究状况和应对方法作一简要介绍,希望引起足够重视,杜绝污染样品的直接分析,并尽可能降低取样量。与此同时,关注应对方法的研究动向,有条件时,探索新的研究方法。

(1) 古人类骨骼或牙齿的污染鉴别。人体死亡掩埋后,埋藏环境的土壤、湿度、温度以及微生物等

诸因素,都将影响骨或牙齿的保存,破坏其完整结构,改变其化学组成,这就是所谓的污染,也称为成岩作用(diagenesis)^[50,51]。一旦骨骼发生污染,其化学成分与食物化学成分间的对应关系将不复存在,食物结构的重建也就无从谈起。通常,古人类骨骼或牙齿的年代均非常久远(>1万年),其化学成分难免受掩埋环境的影响而发生改变。例如,Bocherens等^[45]认为,现有的尼人稳定同位素数据,可能受成岩作用的影响而存在微小的误差。

目前,拟分析¹³C、(¹⁵N的骨胶原样品,可根据骨胶原的含量、骨胶原中的C、N含量以及C/N摩尔比等,判断其是否受到污染^[52]。然而,拟分析¹³C的羟磷灰石样品,则缺乏公认的污染判断指标^[44]。有学者^[53~55]认为,羟磷灰石中的C含量以及羟磷灰石与骨胶原中¹³C的相关关系,可判断羟磷灰石的¹³C值是否受到污染的影响。也有学者指出^[56,57],采用傅立叶变换红外光谱(FTIR),检测羟磷灰石中的CO₃²⁻,可较好地鉴别羟磷灰石¹³C值的污染。有关羟磷灰石中微量元素有无污染的判定,其方法更是多种多样。其中,对于同一遗址,比较其人骨与食草类、食肉类动物骨中羟磷灰石的Sr/Ca、Ba/Ca值^[25],以及人骨羟磷灰石中的多元素统计分析^[58],是当前鉴别微量元素有无污染的最常用方法。

(2) 古人类化石的近似无损取样法。骨化学分析需有损取样,而古人类化石又弥足珍贵,这在很大程度上限制了古人类食物结构的深入研究。然而,最近出现的激光消融稳定同位素分析技术,可望大大缓解古人类样品的取样难题。利用此技术,在古人类牙齿珐琅质的取样面积可小于0.5 mm²,已接近于无损取样,极大地减小了对古人类化石的破坏^[19,30]。无疑,该技术的推广,必将有效地拓宽古人类食物结构研究的取样范围。

5 我国古人类食物结构的研究现状及存在问题

早在1984年,蔡莲珍等^[59]就利用稳定C同位素研究了中国一系列新石器时期遗址先民的食物结构,开创了我国古代人类食物结构分析的先河。然而,由于种种原因,直至近些年,古代人类食物结构的研究工作,才再度受到我国科技考古工作者的重视,并发表了一批相关论文^[60~64]。然而,目前我国食物结构的研究工作,还主要集中在新石器时代(<1万年),而在古人类食物结构及生存环境的研

究方面,至今尚未见报道。

在我国古人类学家和考古学家的不懈努力下,我国的旧石器遗址业已发现 1000 余处。古人类化石形态学研究表明,中国的古人类呈现出“连续进化、附带杂交”的进化趋势^[65,66],在整个人类起源和进化的研究中,占有非常重要的地位。然而,纵观我国古人类食物结构的研究,目前还主要依赖于动物考古^[67]和古猿的牙齿形态观察^[68],而利用骨化学分析的研究方法,探索我国从猿至人食物结构的演变及其演变对中国古人类进化产生的影响,仍然缺乏。

6 研究展望

尽管采用骨化学分析研究方法在揭示古人类食物结构已做出了显著的贡献,但其中出现的一些重要问题,仍然需要认真探索和研究。笔者认为,加强以下几个方面进行研究,可望进一步揭开人类食物结构演化之谜。

(1) 古人类化石的稀少和珍贵,使得采用无损或近似无损分析方法,如质子激发荧光(PIXE)分析、X 荧光光谱分析(XRF)等测定骨中的微量元素或激光消融同位素分析对骨或牙齿中稳定同位素的测试,将成为骨化学分析的主要方向之一。其研究成果,将会极大地拓展骨化学在古人类食物结构的研究范围。

(2) 近些年来,通过人骨或牙齿中 Sr 同位素的分析,探索人类的迁徙活动,已成为生物考古研究的重要领域和研究前沿之一^[69],并在古人类研究进行了初步尝试^[23]。可以想象,大力开展古人类的 Sr 同位素分析,将为进一步探索古人类的迁徙和交流带来深远的影响。

(3) 更新世晚期至新石器早期,人类的食物结构发生了翻天覆地的变化,即由渔猎采集转为栽培植物和饲养动物,人类也藉此开始了定居生活。显然,系统探索该段时间内人类食物结构的演变,将对探索我国农业的起源、古环境的变迁以及环境对人类生存方式的影响等等重要问题具有十分重要的意义。目前,我们正对该段时间内的若干遗址,如北京周口店田园洞遗址(4.2 ~3.9 万年前)^[70]、山顶洞遗址(3.4 ~2.9 万年前)^[71]以及山东小荆山遗址和月庄遗址^[72](8000 年前)等,采用骨化学分析方法分析其中动物和人骨的 C、N 稳定同位素,探索他们的食物结构,了解生存环境及其与人类食物结构的相互关系,揭示我国农业产生与发展的历程。

参考文献(References):

- [1] Hockett B, Jonathan H. Nutritional ecology and diachronic trends in Paleolithic diet and health[J]. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews* 2003, 12(5): 211-216.
- [2] Neil M. Dietary lean red meat and human evolution[J]. *European Journal of Clinical Nutrition* 2000, 39: 71-79.
- [3] Ambrose S H. Stable carbon and nitrogen isotope analysis of human and animal diet in Africa[J]. *Journal of Human Evolution*, 1986, 15: 707-731.
- [4] Teaford M, Ungar P S. Diet and the evolution of the earliest human ancestors[J]. *Proceedings of National Academy of Sciences, USA* 2000, 97(25): 13 506-13 511.
- [5] Richards M P. A brief review of the archaeological evidence for Palaeolithic and Neolithic subsistence[J]. *European Journal of Clinical Nutrition* 2002, 56: 1 270-1 278.
- [6] Price T D. *The Chemistry of Prehistoric Human Bone*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [7] Lee-Thorp J A, Sponheimer M. Contributions of biogeochemistry to understanding early hominin ecology[J]. *Yearbook of Physical Anthropology* 2006, 49: 131-148.
- [8] Hu Yaowu, Yang Xueming, Wang Changsui. Reviews on palaeodietary researches[C]. Wang Changsui, et al, eds. *Proceedings of Chinese Archaeometry* (2nd edition). Hefei: University of Science and Technology of China press, 2000: 51-58. [胡耀武, 杨学明, 王昌燧. 古代人类食物结构研究现状[C]. 王昌燧, 等编. 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.]
- [9] Zhang Xuelian. Application of elements and stable isotopes to study human diets[J]. *Acta Anthropologica Sinica* 2003, 22(1): 75-85. [张雪莲. 应用古人骨的元素、同位素分析研究其食物结构[J]. *人类学学报* 2003, 22(1): 75-85.]
- [10] Van der Merwe N J. Carbon isotopes, photosynthesis and archaeology[J]. *American Scientist* 1982, 70: 596-606.
- [11] Van der Merwe N J, Roosevelt A C, Vogel A C. Isotopic evidence for prehistoric subsistence change at Parmana, Venezuela [J]. *Nature* 1981, 292: 536-538.
- [12] Kohn J M. You are what you eat[J]. *Science* 1999, 15: 335-336.
- [13] DeNiro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1978, 42: 495-506.
- [14] Ambrose S H, Norr L. Isotopic composition of dietary protein and energy versus bone collagen and apatite: purified diet growth experiments[C]. Lambert J B, et al, eds. *Molecular Archaeology of Prehistoric Human Bone*. Berlin: Springer, 1993: 1-37.
- [15] 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]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 1994, 107: 215-225.
- [16] Elias R W, Hirao Y, Patterson C C. The circumvention of the natural biopurification of calcium along nutrient pathways by at-

- mospheric inputs of industrial lead [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1982, 46: 2561-2580.
- [17] Burton J H, Wright L E. Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet: palaeodietary implications [J]. *American Journal of Physical Anthropology* 1995, 96: 273-282.
- [18] Aiello L C, Andrews P. The Australopithecines in review [C]. Ciochon R L, et al, eds. *The Human Evolution Source Book* (second edition). New Jersey: Person Education Inc 2006: 76-89.
- [19] Ambrose S H. A tool for all reasons [J]. *Science*, 2006, 314: 930-931.
- [20] Schoeninger M J. Stable isotope studies in human evolution [J]. *Evolutionary Anthropology: Issues, News and Reviews*, 1995, 4(3): 83-98.
- [21] Aiello L C, Wheeler P. The expensive tissue hypothesis: the brain and the digestive system in human and primate evolution [J]. *Current Anthropology* 1995, 36: 199-221.
- [22] Sillen A. Strontium-calcium ratios (Sr/Ca) of *Australopithecus robustus* and associated fauna from Swartkrans [J]. *Journal of Human Evolution* 1992, 23: 495-516.
- [23] Sillen A, Hall G, Armstrong R. Strontium calcium ratios (Sr/Ca) and strontium isotopic ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of *Australopithecus robustus* and *Homo sp.* from Swartkrans [J]. *Journal of Human Evolution* 1995, 28: 277-285.
- [24] Sponheimer M, Ruiters D, Lee-Thorp J, et al. Sr/Ca and early hominin diets revisited: new data from modern and fossil tooth enamel [J]. *Journal of Human Evolution* 2005, 48: 147-156.
- [25] Sponheimer M, Lee-Thorp J A. Enamel diagenesis at South African Australopithecus sites: implications for paleoecological reconstruction with trace elements [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70: 1644-1654.
- [26] Carter M L. Sensitivity of stable isotopes (^{13}C , ^{15}N , and ^{18}O) in bone to dietary specialization and niche separation among sympatric primates in Kibale National Park, Uganda [D]. Chicago: University of Chicago, 2001.
- [27] Schoeninger M J, Moore J Sept J M. Subsistence strategies of two savanna chimpanzee populations: the stable isotope evidence [J]. *American Journal of Primatology* 1999, 49: 297-314.
- [28] Sponheimer M, Loudon J E, Codron D, et al. Do savanna chimpanzees consume C_4 resources? [J]. *Journal of Human Evolution* 2006, 51: 128-133.
- [29] Lee-Thorp J A, van der Merwe N J, Brain C K. Diet of *Australopithecus robustus* at Swartkrans from stable carbon isotopic analysis [J]. *Journal of Human Evolution* 1994, 27: 361-372.
- [30] Sponheimer M, Passey B H, de Ruiter D J, et al. Isotopic evidence for dietary variability in the early Hominin *Paranthropus robustus* [J]. *Science*, 2006, 314(10): 980-982.
- [31] Sponheimer M, Lee-Thorp J A. Isotopic Evidence for the Diet of an Early Hominid, *Australopithecus africanus* [J]. *Science*, 1999, 283(15): 368-370.
- [32] van der Merwe N J, Thackeray J F, Lee-Thorp J A, et al. The carbon isotope ecology and diet of *Australopithecus africanus* at Sterkfontein, South Africa [J]. *Journal of Human Evolution*, 2003, 44: 581-597.
- [33] Lee-Thorp J, Thackeray J F, van der Merwe N J. The hunters and the hunted revisited [J]. *Journal of Human Evolution* 2000, 39: 565-576.
- [34] Sponheimer M, Lee-Thorp J, de Ruiter D, et al. Hominins, sedges, and termites: new carbon isotope data from the Sterkfontein valley and Kruger National Park [J]. *Journal of Human Evolution* 2005, 48: 301-312.
- [35] Peters C R, Vogel J C. Africa's wild C_4 plant foods and possible early hominid diets [J]. *Journal of Human Evolution* 2005, 48: 219-236.
- [36] Milton K. Primate diets and gut morphology: Implications for hominid evolution [C]. Harris M, et al, eds. *Food and Evolution*. Philadelphia: Temple University 1987: 93-115.
- [37] Sponheimer M, Lee-Thorp J A. Differential resource utilization by extant great apes and Australopithecines: Towards solving the C_4 conundrum [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2003, 136: 27-34.
- [38] Green R E, Krause J, Ptak S E, et al. Analysis of one million base pairs of Neanderthal DNA [J]. *Nature* 2006, 444: 330-336.
- [39] Krings M, Stone A, Schmitz R W, et al. Neanderthal DNA sequences and the origin of modern humans [J]. *Cell* 1997, 90(1): 19-30.
- [40] Bocherens H, Fizet M, Mariotti A, et al. Isotopic biogeochemistry (^{13}C , ^{15}N) of fossil vertebrate collagen: implications for the study of fossil food web including Neanderthal Man [J]. *Journal of Human Evolution* 1991, 20: 481-492.
- [41] Fizet M, Mariotti A, Bocherens H, et al. Effect of diet, physiology and climate on carbon and nitrogen isotopes of collagen in a late Pleistocene anthropic paleoecosystem (France, Charente, Marillac) [J]. *Journal of Archaeological Science* 1995, 22: 67-79.
- [42] Bocherens H, Billiou D, Patou-Mathis M, et al. Palaeoenvironmental and palaeodietary implications of isotopic biogeochemistry of late interglacial Neanderthal and mammal bones in Scladina Cave (Belgium) [J]. *Journal of Archaeological Science* 1999, 26: 599-607.
- [43] Bocherens H, Toussaint M, Billiou D, et al. New isotopic evidence for dietary habits of Neanderthals from Belgium [J]. *Journal of Human Evolution* 2001, 40: 497-505.
- [44] Bocherens H, Drucker D G, Billiou D, et al. Isotopic evidence for diet and subsistence pattern of the Saint-Cesaire I Neanderthal: review and use of a multi-source mixing model [J]. *Journal of Human Evolution* 2005, 49: 71-87.
- [45] Richards M P, Pettitt P B, Trinkaus E, et al. Neanderthal diet at Vindija and Neanderthal predation: The evidence from stable isotopes [J]. *Proceedings of National Academy of Sciences, USA*, 2000, 97(13): 7663-7666.
- [46] Richards M P, Jacobi R, Curren A, et al. Gough's Cave and Sun Hole Cave human stable isotope values indicate a high animal

- protein diet in the British Upper Palaeolithic[J]. *Journal of Archaeological Science* 2000, 27:1-3.
- [47] Richards M P, Pettitt P B, Stiner M C, et al. Stable isotope evidence for increasing dietary breadth in the European mid-Upper Paleolithic[J]. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 2001, 98(11): 528-532.
- [48] Richards M P, Jacoby R, Cook J, et al. Isotopic evidence for the intensive use of marine foods by late Upper Palaeolithic humans[J]. *Journal of Human Evolution* 2005, 49:390-394.
- [49] Hockett B, Haws J A. Nutritional ecology and the human demography of Neanderthal extinction[J]. *Quaternary International*, 2005, 137: 21-34.
- [50] Price T D, Blitz J, Burton J H. Diagenesis in prehistoric bone: problems and solutions[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1992, 19:513-530.
- [51] Hu Yaowu, Wang Changsui, Zuo Jian, et al. XRD and Raman spectra analyses of hydroxylapatite in ancient human bones[J]. *Acta Biophysica Sinica* 2001, 17(4):621-627. [胡耀武, 王昌燧, 左健, 等. 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.]
- [52] Ambrose S H. Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis[J]. *Journal of Archaeological Science* 1990, 17:431-451.
- [53] Ambrose S H, Butler B M, Hanson D B, et al. Stable isotopic analysis of human diet in the Marianas Archipelago, Western Pacific[J]. *American Journal of Physical Anthropology* 1997, 104:343-361.
- [54] Pechenkina E A, Ambrose S H, Ma X, et al. Reconstructing northern Chinese Neolithic subsistence practices by isotopic analysis[J]. *Journal of Archaeological Science* 2005, 32:1176-1189.
- [55] Hu Y, Ambrose S H, Wang C. Stable isotopic analysis of humans from Jiahu site, Henan, China: Implications for transition to agriculture[J]. *Journal of Archaeological Science* 2006, 33:1319-1330.
- [56] Sponheimer M, Lee-Thorp J A. Alteration of enamel carbonate environments during fossilization[J]. *Journal of Archaeological Science* 1999, 26:143-150.
- [57] Lee-Thorp J A, Sponheimer M. Three case studies used to reassess the reliability of fossil bone and enamel isotope signals for paleodietary studies[J]. *Journal of Anthropological Archaeology*, 2003, 22:208-216.
- [58] Hu Yaowu, He Deliang, Liu Xinyi, et al. Elemental analysis of human bones from Xigongqiao site, Tengzhou, Shandong province[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities* 2006, 27(6):1075-1079. [胡耀武, 何德亮, 刘歆益, 等. 山东滕州西公桥遗址人骨的元素分析[J]. *高等学校化学学报* 2006, 27(6):1075-1079.]
- [59] Cai Lianzhen, Qiu Shihua. Measurement of carbon 13 and palaeodietary research[J]. *Archaeology* 1984, 10:945-955. [蔡莲珍, 仇士华. 碳十三测定和古代食谱研究[J]. *考古*, 1984, 10:945-955.]
- [60] Zhang Xuelian, Wang Jinxia, Xi Ziqiang, et al. Ancient human dietary researches[J]. *Archaeology* 2003, 2:62-75. [张雪莲, 王金霞, 冼自强, 等. 古人类食物结构研究[J]. *考古* 2003, 2:62-75.]
- [61] Hu Yaowu, He Deliang, Dong Yu, et al. Stable isotope analysis of human bones in Xigongqiao site, Tengzhou, Shandong province[J]. *Quaternary Science* 2005, 25(5):561-567. [胡耀武, 何德亮, 董豫, 等. 山东滕州西公桥遗址人骨的稳定同位素分析[J]. *第四纪研究* 2005, 25(5):561-567.]
- [62] Hu Yaowu, Burton J H, Wang Changsui. Elemental analysis of human bones from Jiahu site[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2005, 24(2):158-165. [胡耀武, James H. Burton, 王昌燧. 贾湖遗址人骨的元素分析[J]. *人类学学报* 2005, 24(2):158-165.]
- [63] Hu Yaowu, Ambrose S H, Wang Changsui. Stable isotope analysis of human bones from Jiahu site[J]. *Science in China: Series D* 2007, 37(1):94-101. [胡耀武, Stanley H. Ambrose, 王昌燧. 贾湖遗址人骨的稳定同位素分析[J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(1):94-101.]
- [64] Hu Yaowu, Wang Gengfu, Cui Yaping, et al. Palaeodietary research on ancient humans from Sanxingcun site, Jintan, Jiangsu Province[J]. *Chinese Science Bulletin* 2007, 52(1):85-88. [胡耀武, 王根富, 崔亚平, 等. 江苏金坛三星村遗址先民的食谱研究[J]. *科学通报* 2007, 52(1):85-88.]
- [65] Wu Xinzhi. Some suggestions for developing studies on human origin in China during 21st century[J]. *Quaternary Science* 2001, 21(3):233-239. [吴新智. 对 21 世纪发展中国人类起源研究的若干建议[J]. *第四纪研究* 2001, 21(3):233-239.]
- [66] Liu Wu. The origin and development of Mongolian race and modern Chinese[J]. *Acta Anthropologica Sinica* 1997, 16(1):55-74. [刘武. 蒙古人种及现代中国人的起源与演化[J]. *人类学学报* 1997, 16(1):55-74.]
- [67] Keates S G. Biostratigraphy, taphonomy, palaeoenvironment and hominid diet in the Middle and Late Pleistocene of China[C]. Shen C, et al, eds. *Current research in Chinese Pleistocene archaeology*. BAR International Series 1179, Oxford: Archaeopress, 2003:37-56.
- [68] Liu Wu, Gao Feng, Zheng Liang. The diet analysis from tooth size and morphology of Yuanmou hominoids, Yunnan Province, China[J]. *Anthropological Science* 2002, 110:149-163.
- [69] Bentley, R A. Strontium isotopes from the Earth to the archaeological skeleton: A review[J]. *Journal of Archaeological Method and Theory* 2006, 13:135-187.
- [70] Tong Haowen, Shang Hong, Zhang Shuangquan, et al. The finding of hominid site in Tianyuan Cave, Zhoukoudian, Beijing[J]. *Chinese Science Bulletin* 2004, 49(9):893-898. [同号文, 尚虹, 张双权, 等. 周口店田园洞古人类遗址的发现[J]. *科学通报*, 2004, 49(9):893-898.]
- [71] Wu Xinzhi. On the origin of modern humans in China[J]. *Quaternary International* 2004, 117:131-140.
- [72] Tong Peihua. Preliminary study on primitive agriculture in Haidai area[C]. *Oriental Archaeology Research Centre of Shandong U-*

niversity, eds. *Oriental Archaeology* (2nd edition). Jinan: Shandong University Press 2006: 45-52. [佟佩华. 海岱地区原始农

业初探[C]. 山东大学东方考古中心编, 东方考古(第二辑), 济南: 山东大学出版社, 2006: 45-52.]

Application of Bone Chemistry Analysis to the Studies of Hominin Dietary Evolution

Hu Yaowu^{1,2}, Michael P. Richards¹, Liu Wu³, Wang Changsui²

(1. Department of Human Evolution, Max-Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Deutscher Platz 6, D-04103, Leipzig, Germany; 2. Department of Scientific History and Archaeometry, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Vertebrate Paleontology and Palaeoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China)

Abstract The study of evolution of hominin (>10,000 years ago) diets is one of important components to explore the origin and evolution of human beings. Bone chemistry analysis has been proved to be not only one of main methods but also one of the most effective methods to study hominin diets. After brief introduction of principles of bone chemistry analysis, this paper presents how to apply it to reconstruct the diets of the hominin (Australopithecines, Homo, Neanderthals, European anatomically modern human), and reveals the dietary evolution from the Australopithecines to Homo on the basis of comparison with the chimpanzee diets as the proxy for the earliest human ancestor as well as how palaeodietary evolution has deep impact on human evolution. In addition, two important problems and the solutions to deal with them in the studies are also presented. At last, the reviews on hominid diet studies in China and perspectives for further study in the future are discussed.

Key words Hominin; Palaeodiet; Bone chemistry analysis; Trace element analysis; Stable isotope analysis.

檠

2008 年第 4 期要目

- 大洋碳循环与气候演变的热带驱动 赵哈林, 大黑俊哉, 周瑞莲, 李玉霖, 左小安, 黄刚
 梯的环境生物地球化学循环与效应研究展望
 吴丰昌, 郑建, 潘响亮, 黎文, 邓秋静, 莫昌?, 朱静, 刘碧君, 劲树勋, 郭建阳
 硫化氢形成与 C₂+ 气态烷烃形成的同步性——几个模拟实验的启示
 张建勇, 刘文汇, 腾格尔, 王晓锋, 卿颖, 马凤良