

许家窑遗址哺乳动物化石的 铀子系法年代测定

陈铁梅 原思训 高世君 王良训 赵桂英

(北京大学历史系考古专业年代测定实验室)

关键词 许家窑旧石器遗址；铀系法测年

本文报告用铀子系法测量许家窑旧石器文化遗址出土的哺乳动物化石年代的初步结果。

山西省阳高县许家窑遗址的发现不仅在研究石器的文化传统上有重要的意义，而且在地层上证实了桑干河流域早更新统标准地层“泥河湾层”的上部还包括了晚更新世的沉积物。

但对于“许家窑人”的时代问题却有不同的认识，也缺乏绝对年代的数据。贾兰坡教授等根据1974年首次发掘的动物化石群，认为许家窑人生活时期的年平均气温比现在低，时代上大致相当于欧洲莫斯特文化期至奥瑞纳文化期之初的阶段，即估计约为距今三万一六万年。1976年进一步的发掘发现了北京人遗址的代表种——裴氏扭角羊(*Spirocerus peii*)和似布氏田鼠(*Microtus brandtoides*)。并在离74093地点东南二公里的漫流堡村的剖面中，观察到在胶结砂层上方好几米的黄绿色粘土层中发育有冰缘条件下形成的融冻褶皱。而74093地点的含人化石和动物化石的文化层是处在同一胶结砂层之下四至八米。贾兰坡等认为许家窑的融冻褶皱是玉木冰期某一阶段的产物，因此许家窑遗址的时代应比过去的估计为早，属里斯冰期的后一阶段，估计绝对年代超过十万年。严富华等分析了许家窑遗址剖面的孢粉组合，根据云杉花粉占比例较大，而喜温暖湿润的落叶阔叶种属的花粉极少，判断当时的气候是干燥寒冷的，气温比现在低4℃左右，时代上属玉木冰期的中期偏晚，约距今三万年前。尤玉柱等认为许家窑动物群代表距今约六万年前的玉木冰期的第一高峰阶段。

北京大学考古专业¹⁴C年代实验室在1978年曾与古脊椎动物与古人类研究所¹⁴C实验室的同志一起测量了许家窑遗址79043地点八米以下的动物化石和沉积层中残剩有机物的¹⁴C年代，所测四个样品的年代都大于四万年，超出了北大¹⁴C实验室的最大可测年限。

以上情况促使我们尝试用铀子系法来测定许家窑遗址动物化石的绝对年代。

一、铀子系法测动物化石年代的基本原理

动物的骨骼与牙齿等硬组织含有大量无机盐，主要以羟基磷灰石 $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}]$

(OH)₂]形式存在。在动物生前硬组织中基本上不含铀及其子体,但动物死亡后,在骨骼和牙齿的石化过程中,羟基磷灰石不断从周围地下水中交换吸附铀并保留在化石中。随后由铀的放射性衰变,其子体²³⁰Th和²³¹Pa等将在化石中不断增长。其增长规律可用下面二个数学式表示:

$$\frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}} = \frac{^{238}\text{U}}{^{234}\text{U}} (1 - e^{-\lambda_{230} \cdot t}) + \left(1 - \frac{^{238}\text{U}}{^{234}\text{U}}\right) \cdot \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \cdot [1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{234}) \cdot t}] \dots \dots \quad (1)$$

$$\frac{^{231}\text{Pa}}{^{235}\text{U}} = 1 - e^{-\lambda_{231} \cdot t} \dots \dots \quad (2)$$

式中²³⁴U, ²³⁰Th等代表单位重量化石中该同位素的放射性强度, λ_{230} 、 λ_{231} 和 λ_{234} 相应是²³⁰Th、²³¹Pa和²³⁴U的衰变常数, t为样品石化至今的年代。

通过实验可以测定化石的²³⁰Th/²³⁴U和²³⁴U/²³⁸U两个比值以及²³¹Pa/²³⁵U比值,代入公式(1)与(2),分别得到同一化石的两个独立的年龄,称为²³⁰Th年龄和²³¹Pa年龄。这两个年龄都代表动物的骨骼和牙齿石化过程的中间阶段至今的年代,即铀子系法测得的化石年龄稍晚于动物死亡的年代。

²³⁰Th的半衰期为75200年,因此²³⁰Th法的最大可测年限约为30万年;²³¹Pa的半衰期为32400年,²³¹Pa法的最大可测年限仅12万年左右。

需要指出,公式(1)、(2)的成立是以样品石化后对铀及其子体²³⁰Th和²³¹Pa组成封闭体系为前提的,即石化完成后,不再发生铀及其子体的次生迁移。如果这一假设在实际情况中成立,则同一骨化石样品的²³⁰Th年龄应与²³¹Pa年龄一致,并代表样品的真实年龄。遗憾的是,封闭条件并不是在所有的情况下都能得到满足。铀是很活泼的元素,容易氧化成六价、形成铀酰离子而随地下水出入化石,从而破坏了封闭条件。如果发生了铀的次生迁移²³⁰Th年龄与²³¹Pa年龄将不一致,而且与真实年龄也有差异。

通常需分别测量同一样品的²³⁰Th年龄与²³¹Pa年龄以检验样品是否封闭。如果两个年龄一致,就代表样品的真实年龄。如果两个年龄不一致,也可以用测得的²³¹Pa/²³⁵U比值来判断²³⁰Th年龄应是真实年龄的上限,还是下限,有时还可以用一定的关于铀的次生迁移的模型来估算样品的真实年龄。

总之,铀子系法对测定30万年以内的动物化石的绝对年龄是一种有意义的方法。

二、实验技术

本文仅限于简述本实验室测²³⁰Th年龄的实验技术。(²³¹Pa年龄的测定法不论在实验技术和数据的分析处理方面都较为复杂,限于篇幅将另文报道。)

1. 铀钍的分离和纯化

首先选取保存良好,致密的牙化石,将表面刷刮干净,并分选珞琅或牙本质部份,碾成粉末。称取一定量样品粉末放入烧杯,用HNO₃或HCl加H₂O₂溶解,同时加入已知量的²³²U—²²⁸Th平衡示踪剂标准溶液。样品溶液在有少量HClO₄存在的情况下蒸干以破坏可能

存在的有机物。蒸干物用 HCl 溶解后,配制成 4N HCl 溶液并加入少量抗坏血酸后,用 742 型强碱性阴离子树脂交换吸附铀。阴柱流脱液加入少量酒石酸后用 743 型强酸性阳离子树脂交换吸附钍。阴离子柱用 4N HCl 清洗后,用 0.4N HCl 解析铀。阳离子柱经 4N HCl 清洗,用 NH_4Cl 转型,再用 5% $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 解析钍。当样品含铁量大时,解析下来的铀中往往有少量的铁,为得到纯净的铀,我们在用 4N HCl 洗阴柱时加入适量抗坏血酸。解析下来的铀、钍溶液蒸干后,在 $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 介质中电沉积制源。以上流程对铀和钍的分离是满意的,一般情况下对铀、钍的回收效率都能稳定在 70—80%。

2. α 能谱测量及数据处理

样品中铀、钍的含量是通过测它们的 α 谱来定的。 α 谱仪由金硅面垒探测器,放大器

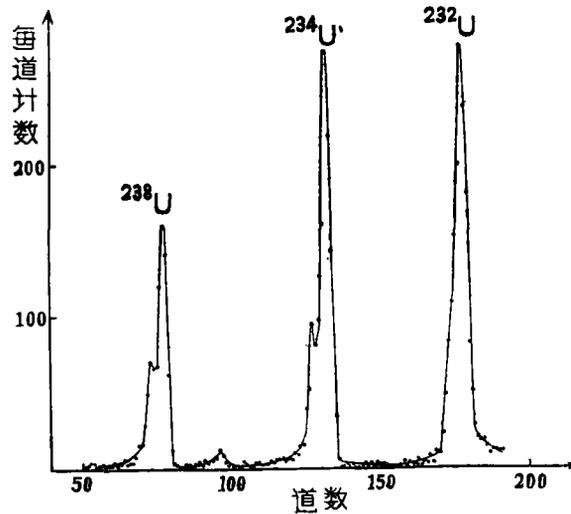


图 1 铀样 α 谱(测量时间 48 小时)

Fig. 1 Spectrum of Uranium Sample

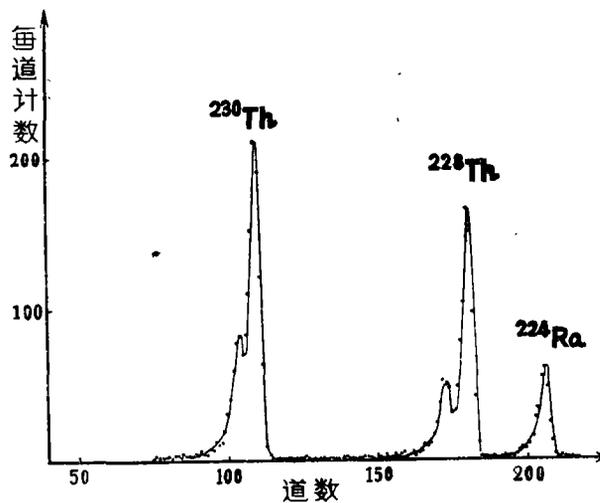


图 2 钍样 α 谱(测量时间 48 小时)

Fig. 2 Spectrum of Thorium Sample

和 256 道脉冲幅度分析器组成。全部为国产仪器。工作性能稳定,一般在室温下连续 48 小时测量对 ^{228}Th 5423Kev α 峰的半宽度(FWHM)为 45Kev 左右,因此 ^{228}Th 的 5341Kev 的峰能明显分出。图 1, 2 为典型的铀与钍的 α 谱。根据 α 谱相应峰下面的总计数,并对本底、 ^{228}Th 与母体 ^{232}U 分离后的衰减、 ^{224}Ra 在 ^{228}Th 峰位中的贡献诸因素校正后,再利用 ^{232}U — ^{228}Th 示踪剂已知的平衡系数,就能定出 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 和 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 两比值。从而按照公式(1)得到样品的 ^{230}Th 年龄及其相应的统计误差值。

为了检验实验技术的可靠性,我们曾对若干样品重复制样测量,所得年代值在误差范围内一致,并测量了国际标准样 RKM-5,也得到了满意的结果。

三、测量结果及讨论

我们测量了许家窑遗址六个牙化石样品的年代。其中除 BKY80001 样为本文作者之一原思训 1978 年采集外,均由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所卫奇同志采集及提供。六个样品都采自 74093 地点,地表下八米及十二米上下二层化石较集中的层位。测量结果列表如下。所引误差为放射性测量的统计误差,取一个 σ 标准偏差。对 BKY80001 和 BKY80003 二个样品同时测定了 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 比值,以检验样品的封闭性。

表 1

样品编号	层 位	样品材料	铀含量 (ppm)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	^{230}Th 年龄 (万年)	$^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$
BKY80002	上 层	马牙本质	175±3	1.30±0.03	0.568±0.020	8.8±0.5	
BKY81014	上 层	犀牛牙珐琅	1.9±0.1	1.46±0.09	0.587±0.036	9.1±0.9	
BKY80001	下层上部	马牙本质	141±2	1.36±0.02	0.620±0.025	9.9±0.6	0.68±0.03
BKY80003	下层上部	马牙本质	127±3	1.34±0.02	0.631±0.025	10.2±0.6	0.65±0.03
BKY80012	下层(黑色)	马牙本质	1.9±0.1	1.20±0.06	0.667±0.058	11.4±1.7	
BKY81012	下层(黑色)	马牙珐琅	12.9±0.4	1.25±0.04	0.594±0.030	9.4±0.7	

(1) 六个样品的 ^{230}Th 年龄都在十万年上下,而且与地层序列一致。这样许家窑动物化石群的 ^{230}Th 年龄应为十万年左右。

(2) 根据 BKY80001 和 BKY80003 二个样品的 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 值分析,所测的牙化石样品并非处于封闭状态。因为,如样品自石化以来是封闭的,对于十万年的样品,其 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 值根据公式(2)可以算得应等于 0.88;但实际测得的 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 值在 0.67 左右,两者差别较大。这表明有铀的后期次生加入, ^{230}Th 年龄十万年这一数值只是这二个样品真实年龄的上限。许家窑下层动物化石群的真实年代应大于十万年。结合生物标志考虑应与距今十万年前的一个寒冷时期相应。

(3) 许家窑遗址 74093 地点地表下八米及十二米两层主要化石层之间的 ^{230}Th 年代差别不大,上层化石的年代稍晚。实际的发掘也表明这二层的动物化石在种属形态上没有明显的差别。

(4) 74093 地点沉积物的颜色在十二米处有一变化,下为黑色、灰蓝色砂质粘土,而

上为黄褐色砂质粘土。沉积物颜色变化的同时, 铀量及 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值也观察到某些变化, 黑色层中的 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值比上部为小。这都说明当时在沉积环境上曾发生某种变化。

总之, 铀子系法测量动物化石年代虽然目前尚处于探索阶段, 在许家窑样品上又不巧碰到一个“开放体系”, 但比较可靠地确定了许家窑文化年代的上限。

本工作得到贾兰坡先生的支持鼓励, 得到卫奇同志, 中国科学院地质研究所铀子系年代实验室和北京第三研究所七室的帮助, 我系吕遵谔同志对本工作曾提出有益的意见, 谨致谢意。

(1981年6月3日收稿)

参 考 文 献

- 尤玉柱、徐钦琦, 1981年: 中国北方晚更新世哺乳动物群与深海沉积物的对比。古脊椎动物与古人类, 19 (1)。
 严富华等, 1979年: 从花粉分析论“许家窑人”的生活环境和时代问题。第三届全国第四纪学术会议论文。
 贾兰坡、卫奇, 1976年: 阳高许家窑旧石器时代文化遗址。考古学报, (2)。
 贾兰坡等, 1979年: 许家窑旧石器文化遗址 1976年发掘报告。古脊椎动物与古人类, 17 (4)。
 夏明等, 1979年: 铀系方法鉴定国际标准样结果。中国科学, (8)。
 Szabo, B.J., Rosholt, J.N., 1969: Uranium Series Dating of Pleistocene Molluscan Shells from Southern California—An Open System Model. *J. Geophys. Res.* 74: 3253-60.

URANIUM SERIES DATING OF XUJIAYAO (HSÜ-CHIA-YAO) SITE

Chen Tiemei Yuan Sixun

Gao Shijun Wang Liangxun Zhao Guiying

(Dating Laboratory Archaeological Section Department of History Beijing University)

Key words uranium series dating; Xujiayao Palaeolithic Site

Abstract

Six fossil teeth of *Equus* and *Coelodonta antiquitatis* from the Palaeolithic Site of Xujiayao were dated by uranium series method. The samples gave an internal concordant $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ age of about 100,000 years.

The measured $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ ratios showed that these tooth samples were not of a closed system. Uranium had continuously been migrating in after fossilization. Nevertheless the $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ age can definitely serve as the upper limit of Xujiayao Site age.

The basic principle and technique of dating are described in the paper.