

# 辽宁金牛山遗址牙釉质样品的 电子自旋共振(ESR)测年研究

陈铁梅 杨全 吴恩

(北京大学考古系、物理系, 北京 100871)

**关键词** 电子自旋共振测年;金牛山古人类遗址的年代

## 内 容 提 要

本文报告金牛山五个牙化石样品的 ESR 法和铀系法对比测年的结果, 两者很接近, 为 23 万年左右。文中着重讨论了 ESR 测年中的: 简单指数拟合求累积剂量的困难,  $\alpha$  射线相对效率和氧逸失系数的实验测定以及选择关于铀加入模式的指导思想等问题。最后探讨了牙釉质样品 ESR 测年的可靠性与应用前景。

1984 年秋北京大学考古系旧石器教研组等在辽宁省营口市金牛山旧石器遗址发现了一具保存较完整的古人类头骨, 包括颅骨、面骨、颅底和齿弓完整只缺一前臼齿的上颌骨, 以及同一个体的大量体骨 (吕遵谔, 1985)。在该遗址还曾先后发现丰富的动物化石、烧骨和灰烬等人类用火遗存。金牛山人化石的重要性得到学术界的充分肯定, 如国家教委于 1985 年组织召开的鉴定会的报告书指出: “对这些化石的研究, 将会提供丰富的从直立人 (猿人) 过渡到智人的具体形态结构的知识, 进一步提高对人类发展过程中这一时期的认识”。

本文的作者曾用不平衡铀系法系统, 细致地先后测量了采自该遗址各层位的 30 个骨、牙化石样品的年龄。每个样品均同时测  $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$  和  $^{231}\text{Pa} / ^{235}\text{U}$  两个放射性比值以检验样品对铀的封闭性。在前述鉴定会上曾提交报告, 把“有人类化石的第六层的年代初步定为距今 24—31 万年”, “平均为 28 万年左右”。1988 年又根据后来补测样品的结果, 在公开学术刊物发表时略作修正, 定为距今 23—30 万年, 平均 26.3 万年 (Chen and Yuan, 1988)。

关于金牛山人化石在人类进化谱系上的位置, 曾长期争论。吴汝康 (1988) 把它归属于早期智人。吕遵谔 (1989) 则“认为他属于晚期直立人向早期智人过渡为适”, 该文中也曾用智猿人或古智人 (*Archaic Homo sapiens*) 的名称。后者也就是早期智人。

金牛山人的铀系年龄并未被普遍接受, 主要的疑点在于智人在时代上能否如此的古老。“金牛山人化石是距今 28 万年前的数据与我国迄今已发现的所有人类化石的形态类型

收稿日期: 1992-05-08

国家自然科学基金课题, 资助号 48970186。

所处的时代相差甚远”“有必要做进一步的工作和论证”(吴汝康, 1988)。需“进一步做工作与论证”的意见是正确的, 因为如此重要的遗址, 仅用铀系一种方法测年本是不够的, 何况铀系年龄在分类为智人的角度看偏早。每一个考古遗址最好用二种或多种独立的方法测年(理论与实践均成熟的碳十四测年法应是例外), 因为每种方法基于的假设前提不尽相同, 对比二种或二种以上测年方法的结果, 往往是验证测年数据可靠性的有效手段。本文报告用电子自旋共振法(ESR)测定金牛山五个牙化石釉质年龄的结果, 每个样品的牙本质部份同时作了铀系测年, 以作对比。五个样品均系 1984 年发掘, 其中 91001 样采自人化石层位上面的第五层, 其他四个样品与人化石同层。

## 一、电子自旋共振法测年的 原理、潜在能力和问题

电子自旋共振法测年是池谷元伺(Ikeya)于 1975 年首先提出的, 用以测定 Akiyoshi 洞穴中堆积物的年龄。ESR 测年方法的原理基于把被测样品看作一个剂量计, 测定样品自形成以来所接受的放射性射线辐照的累积效应。这个效应反映为样品晶格内电子陷阱中不成对电子的总数, 后者可以用电子顺磁共振谱仪测量。该原理的数学表达形式为:

$$AD = \int_0^T D(t)dt \quad (1)$$

式中 AD 为样品所接受的累积剂量, 一般用附加剂量法(additive dose method)在 ESR 谱仪上测定。T 为样品形成或某地质事件以来的年龄。D(t) 为年剂量率, 即样品每年所接受的来自样品本身及周围环境中放射性物质(铀、钍、钾)的辐照剂量。由于放射性元素铀与其子体间不一定处于平衡状态, D(t) 可能随时间变化。

ESR 方法因其物理机制的广泛适应性, 它在第四纪物质的年龄测定中有着巨大的潜在能力, 具有测年范围宽, 可测样品丰富的特点, 可用于测定多种地质与环境事件的年龄。但是也必须指出 ESR 测年中的困难与问题, 存在着一系列复杂的过程和因素影响着 ESR 测年。在对它们作充分研究之前, ESR 技术不能看作一种成熟的或常规的测年方法。任意地或轻率地处理这些因素, 会使最终的年龄测定结果在很大的范围内波动。因此在目前这个“初级阶段”, 发展最终的测年数据时, 极为重要的是同时发表影响年龄计算诸因素的数值等。它们包括样品及环境中有关放射性核素的含量,  $\alpha$  效率系数, 氦逸失系数, 样品含水量等。还应该说明上述参数是实测的还是取假设值, 样品是如何制备和测量的, 采用那一种关于铀的加入模式计算年龄的等。长期从事 ESR 测年研究, 国际上颇有影响的 R.Grün (1989, 1991) 曾一再建议, 审稿人及有关杂志编辑部应拒绝通过与发表那些未详细描述实验与计算过程, 未充分公布有关原始数据的 ESR 测年论文。我们完全同意 Grün 的意见, 认为这将有利于加强 ESR 年龄数据的质量控制, 可以让地质学家和考古学家知道他们面对或使用的 ESR 年龄数据是基于怎样的假设与实验条件下得到的, 由此能评价数据的精确程度, 也使其他人有可能来验证所发表的数据。在欧美国家, 曾因数据质量控制不严, 出现过部分地球科学家对 ESR 年龄产生怀疑的不幸情况(Grün, 1991), 希望在我国能引以为鉴。

下面报告本文的实验工作。

## 二、样品累积剂量的测定

本研究工作中 AD 值是用附加剂量法测定的。牙釉质层厚约 2–3mm, 刮去表层的 20 $\mu$ m 后, 研磨并筛选出 100–200 目粒度的样品。样品分成 8 份, 每份重 100mg, 其中 7 份在钴源装置上分别以约 0.1、0.3、0.6、1、1.5、2.5 和 5kGy 剂量辐照, 实际的辐照剂量由伴照的丙氨酸剂量片精确标定, 误差可控制在 5% 以下 (高钧成等, 1991)。样品在保干器中“冷却”至少一周后, 在 Bruker ER-200D-HRC X 波段顺磁共振谱仪上测量。测量条件如下: 室温, 专一的  $\phi = 3\text{mm}$  低本底石英管, 微波功率 2mW, 频率调制 100kHz, 场强调制 2Gpp。由于样品量大, 已超出微波吸收灵敏区, 因此 ESR 信号主要受装样的密度影响。我们采用定数墩样品管的办法, 使装样密度尽可能一致。实验表明, 重复装样测量的重复性差异可控制在 2%–3%。实测的牙珐琅样 ESR 谱形状与文献报导的一致, g 值为 2.0018。

附加剂量法是根据实验测定的不同辐照剂量 Dose 下 ESR 信号 I 的实验点外推到  $I=0$  来定 AD 值的。这就必须知道 I 对剂量 Dose 的响应规律。早期的工作用线性外推, 即认为 ESR 信号的响应曲线是直线, 或者是一条曲线的直线部份, 其数学表达式为:

$$I = K \cdot \text{Dose} \quad (2)$$

式中 K 为斜率, 反映样品的 ESR 灵敏度。

鉴于样品中电子陷阱的总数总是有限的, 当样品接受剂量时, 随着陷阱的被填充, ESR 信号的增长会出现饱和现象。因此后期的工作多数采用指数拟合与外推, 即:

$$I = I_{\max} \{1 - \exp[-\alpha(\text{Dose} - \text{AD})]\} \quad (3)$$

或改写为:

$$-\ln\left(1 - \frac{I}{I_{\max}}\right) = \alpha(\text{Dose} - \text{AD}) \quad (3a)$$

式中  $I_{\max}$  为所有陷阱均被填满时的饱和 ESR 信号幅度,  $\alpha$  也是反映灵敏度的一个参数。

图 1 是实测的 91002 样品 ESR 信号 I 的辐照响应曲线, 其他样品的辐照响应曲线也相似。在  $\gamma$  辐照剂量小于 2kGy 范围内, 各样品的 I 与 Dose 之间均有良好的线性关系 (对 91002 样见图 1a), 相关系数  $r$  均大于 0.995。辐照量再增大时, I 增长率下降, 呈现出饱和现象, 但信号趋向饱和很慢。我们对其中二个样品, 专门把辐照量逐级增大到 60kGy 时, 信号仍在上升而未达到饱和值 (图 1b 的曲线 I)。这样在用指数外推定 AD 值时, AD 值随最大辐照量不同而变化 (见图 1b 的曲线 II), AD 值与 Dose 之间的关系中未见“坪”区。这一现象在 Grün(1991)的文章中也曾提及, 理论上它表明 I 与 Dose 之间的关系难以用简单的指数函数 (公式 2) 来精确表达, 实践上使人们无法用指数拟合外推来肯定地选取 AD 值。

鉴于上述的实验结果, 我们认为对本文的釉质样品用线性外推定 AD 值比用指数函数合理。如此定出的 AD 值在 0.5–1kGy 范围, 也确在线性区内。目前我们暂取 AD 值的相对误差为  $\pm 10\%$ , 由于对 ESR 信号的响应函数尚不完全了解, 例如 Grün(1991a) 曾建议试用双指数函数作非线性拟合。因此实际的误差可能比 10% 还稍大些。AD 值的测量

误差目前是对最终年龄值误差的主要贡献。

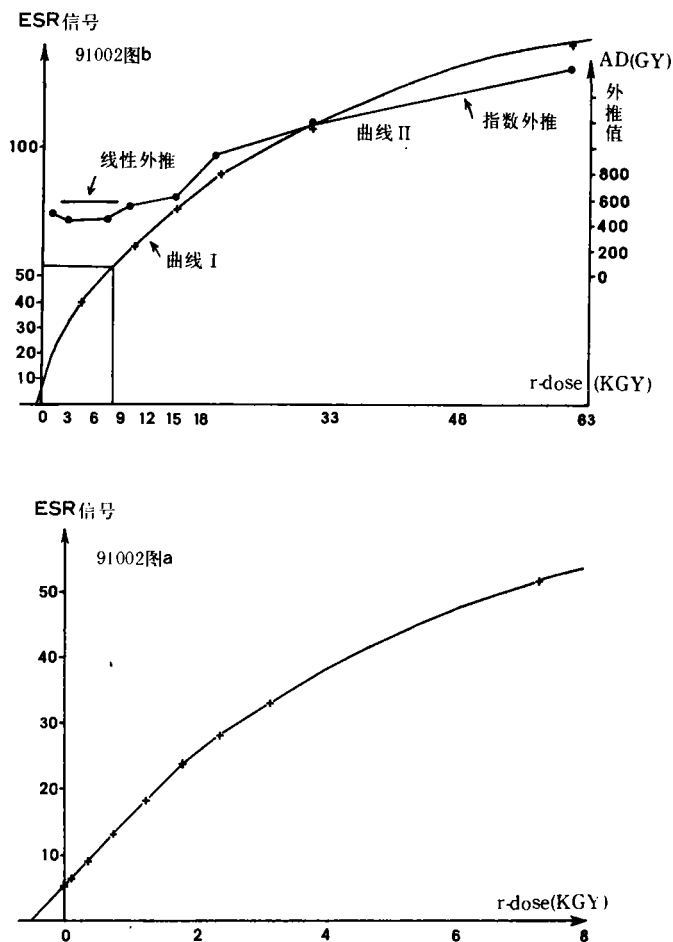


图 1 牙釉质样品 91002 ESR 信号 I 对辐照剂量 Dose 的响应曲线。图 b 中还表示

了累积剂量 AD 的指数外推计算值与 Dose 的关系 (曲线 II)

Response of ESR intensity to the irradiated dose for the enamel sample of 91002. Curve II shows the variation of exponentially extrapolated AD values in dependence on the highest irradiated dose

### 三、年剂量率 $D(t)$ 的测量与计算

本文用  $\alpha$  能谱法和激光荧光法测量样品和样品周围沉积物的铀、钍含量和铀同位素比值, 钾的含量用原子吸收光谱与激光荧光法测定。根据铀、钍、钾含量, 利用 Nambi 和 Aitken(1986)的转换表计算出内剂量率和环境剂量率, 计算时考虑了样品内铀及其子体间的放射性不平衡。金牛山牙化石样品的铀量很高, 釉质为 1—3ppm, 本质为 40—

70ppm, 因此样品内部的  $\alpha$ 、 $\beta$  剂量贡献所占相对比重极高, 这样  $\alpha$  相对效率系数  $K_\alpha$ , 氦逸失系数  $L$  等参数的测定或选取对年龄值计算起明显作用, 必须谨慎对待。当然由于样品的铀含量高, 使得根据测年结果来检验铀的加入模式将是十分敏感的。

#### (1) $\alpha$ 相对效率 $K_\alpha$ 的实验测定

$K_\alpha$  值是指  $\alpha$  粒子激发样品的 ESR 信号相对于  $\beta$  粒子的效率, 由于  $\alpha$  粒子在样品中产生的比电离大, 其效率要低于  $\beta$  粒子的, 即  $K_\alpha < 1$ 。Grün (1985) 和 De Canniere *et al.* (1986) 曾实验测定牙釉质样的  $K_\alpha$  值为 0.15。以后几乎所有的釉质样 ESR 测年研究工作都未再测  $K_\alpha$  值, 而是直接引用这个数值。

本文对釉质的  $K_\alpha$  值作了实验测定。利用分离沉降法选取粒度为 5–8 $\mu\text{m}$  的牙釉质粉末, 再像热释光测年的细颗粒技术一样, 使其单层地沉积在小铝片上, 然后在 721/B 型  $\alpha$  辐照仪和 733 型  $\beta$  辐照仪上定时辐照。将辐照后的样品逐片收集起来, 使得每个样品分别经两种辐照后的总量均不少于 50mg。同时将另外一份 50mg 的釉质粉未经  $\gamma$  辐照。

$\alpha$  和  $\beta$  辐照是在上海博物馆热释光实验室进行的。 $\alpha$  辐照仪中  $\alpha$  粒子的能量为 3.7MeV, 按径迹长度刻度。 $\beta$  辐照仪也经严格标定。 $\gamma$  辐照量仍用丙氨酸剂量计刻度。这样实际测得的是 3.7MeV  $\alpha$  粒子的相对效率  $K_{3.7}$ 。二个样品三次独立测量结果如下:

样品 82012  $\alpha/\beta$   $K_{3.7} = 0.263$

样品 82012  $\alpha/\gamma$   $K_{3.7} = 0.271$

样品 83088  $\alpha/\gamma$   $K_{3.7} = 0.316$

平均值  $\bar{K}_{3.7} = 0.283 \pm 0.016$ 。

如果假设釉质和石英的阻止本领相等, 并认为与陶片一样, 天然铀系  $\alpha$  粒子谱的相对有效效率  $K_{\text{eff}} = 0.8K_{3.7}$ , 则得到  $K_{\text{eff}} = 0.227 \pm 0.013$ 。这个值比前面提到的文献值 0.15 为大, 而且差别超出了实验误差。

本文用实测值 0.227 来计算年剂量率与样品年龄, 所得年龄值要比用文献值计算的偏年青。我们计划以后再重复测量  $K_{\text{eff}}$  值。

#### (2) 氦逸失系数估测

本文用 FD-125 型射气仪实测了三个牙本质样品的氦逸失系数  $L$ 。样品为块状, 重 6–9 克, 测得  $L$  值分别为 0.32、0.42 和 0.49。另有一块共含 7.5 $\mu\text{g}$  铀的釉质片, 实测其氦逸失量在仪器的灵敏度以下。

根据上面三个样实测的  $L$  值, 并考虑实际牙化石样品的体积比这三个样大几倍, 外面还包裹有一层致密的釉质层, 可以认为本文所用牙化石样品在地质时期内实际的氦逸失系数要小于上面的测量值。因此我们在计算年剂量率时取  $L = 0.30 \pm 0.15$ , 估计实际的氦逸失率应包含在这一较宽的估测范围内。

#### (3) 样品含水量估测及其他

样品在地质时期的含水量难于实测, 而且是一变量。我们实测得牙化石的饱和含水量为 17%, 因此用宽范围  $0.10 \pm 0.05$  估测样品的含水量不会离实际情况太远。

釉质样品的厚度为实测厚度, 并已考虑了其不均匀性。所测釉质样品均在牙的外层, 因此牙本质的  $\beta$  贡献是单侧面的。有限厚度样品的  $\beta$  剂量衰减校正按 Grün(1986)。

宇宙射线贡献取 0.13mGy/a, 它的相对贡献很小。

#### (4) 关于铀加入样品的模式

虽然牙化石中当前的铀含量是可测的,但在计算年剂量率  $D(t)$  时,还必须知道铀是在过去什么时候,按怎样的规律进入样品的,即必须对铀的加入模式作假设。在 ESR 测年中常用的模式有两种:①早期加入模式,认为铀在样品形成初期的很短时间内就结合进样品,以后样品一直处于封闭状态。②线性加入模式,认为铀自形成后一直至今,不断匀速地加入。这两种模式都要考虑铀与其子体间的不平衡,即子体的增长和趋向平衡。选用不同的铀加入模式,ESR 年龄的计算结果是不同的,早期加入模式年龄总是年青于线性加入模式年龄。样品的铀含量愈高,内部照射剂量相对于外剂量的比重愈大,两种模式年龄的差别也愈大,最极端的情况两者可差别一倍以上。Grün 等 (1991) 认为线性模式年龄一般更符合地质和考古资料,或者认为实际情况处于两种模式年龄的中间,即它们分别为样品真实年龄的上下限。这一看法得到相当一些 ESR 测年工作者的赞同,但我们认为是值得商榷的。

不平衡铀系法测化石样品的年龄同样需要对铀的加入模式作假设,它是以早期加入模式为其基本假设的,而且通过测量和对比  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  和  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  两放射性比值来检验这个假设对某一样品是否成立 (陈铁梅等, 1984)。铀系法测量化石样品年龄的大量资料表明,在动物的骨骼、牙齿埋藏和石化的早期,铀的迅速加入是实际发生的过程,它是伴随着样品中有机质的分解并形成还原性微环境而进行的。当然在铀的早期加入过程结束后,并不能保证样品将永远处于对铀的封闭状态。由于样品埋藏环境的渗水性,地下水活动, pH 值和氧化还原电位等状态不同,还可能发生铀的后期继续加入,或者反过来铀自样品中析出。但是,从现有的研究成果来看,还找不到某种机制或物理化学基础来解释铀可能不间断和匀速地进入样品。

因此本文认为在牙釉质样品的 ESR 测年中,选取线性加入模式似乎缺乏根据,而且线性模式的 ESR 年龄与同一样品的铀系年龄是不可比的,因两者所基于的基本假设是相互矛盾的。用 ESR 方法测牙釉质样品时,应在测样品的铀含量的同时检验所测样品是否对铀封闭。当封闭性假设成立时,采用早期加入模式是得到可信 ESR 年龄的必要条件,当封闭性检验发现有铀的后期加入或析出时,无法准确确定  $D(t)$  函数和 ESR 年龄值。但是早期加入模式年龄相应可考虑为样品真实年龄上下限的最佳估计值。

本文所研究的 5 个金牛山遗址牙化石样品均测定了铀系年龄,并经验证它们对铀封闭或接近封闭 (见表 2),理所当然我们采用早期加入模式计算这些样品的 ESR 年龄。只是为了对比与讨论,表 2 中也列出了它们的线性加入模式年龄。

#### 四、ESR 年龄的计算及其误差估计

我们编写了计算 ESR 年龄的计算机程序。程序中计算  $D(t)$  时考虑了以下六项贡献:

- (i) 釉质中铀的内部剂量 (无限介质计算,  $D, W$ )。
- (ii) 牙本质相对于釉质过量铀对釉质层的  $\beta$  贡献 ( $D, W, L, Th$ )。
- (iii) 根据土壤中铀、钍、钾求出的无限均匀介质的  $\gamma$  剂量 ( $W$ )。
- (iv) 土壤中钍、钾和“过剩” (也可能不足) 铀对釉质层的  $\beta$  贡献。
- (v) 牙本质相对于土壤过量铀对釉质的  $\gamma$  贡献 ( $D, W, L, Th$ )。
- (vi) 宇宙射线贡献。

其中前三项起主要作用。上面括弧中的符号表示所考虑的校正因素。它们是: D 为放射性不平衡校正, 它因选取不同的铀加入模式有不同的表达式, W 为含水量校正, L 为氧逸失校正, Th 釉质层有限厚度校正。鉴于篇幅所限, 具体的计算公式省略。有兴趣者, 可与作者直接联系。

在计算年龄值的误差时, 考虑到各有关参数本身的误差值的情况不一样, 有的是实测的方差值  $\sigma$ , 但有的却是估测的 (例如氧逸失系数的误差值), 它们难以按常规方法来综合以计算年龄值的误差。此外,  $D(t)$  的数学表达式很复杂, 通过对 (1) 式微分推导误差传递公式也将十分繁琐。因此我们独立计算每一参数的误差对年龄值误差的贡献, 最后再以均方根来综合, 最终得出年龄值的误差。表 1 以 91001 样为实例列出各有关参数值及它们的误差, 以及各参数值的误差对年龄值总误差的贡献。

表 1 91001 样品的各有关参数及 ESR 年龄计算  
ESR age calculation and error assessment for the enamel sample of 91001

有关参数及其误差 (%)			年龄计算 (ka)		Age 误差 error (%)
			+	-	
AD	$708 \pm 71$ Gy	10	248	213	7.8
$U_{\text{釉}} U_{\text{enam.}}$	$1.17 \pm .29$ ppm	25	243	220	5.2
$U_{\text{牙本质}} U_{\text{dent.}}$	$60.1 \pm 2.0$ ppm	3	233	228	1.3
$U_{\text{土}} U_{\text{soil}}$	$2.7 \pm .3$ ppm	11	233	229	0.9
$Th_{\text{土}} Th_{\text{soil}}$	$8.0 \pm 1.0$ ppm	12	234	228	1.3
$K_{\text{土}} K_{\text{soil}}$	$0.35 \pm .05$ %	14	232	230	0.4
湿度 Moisture	$0.1 \pm 0.5$ %	50	240	221	4.3
Rn 逸失, Rn Loss	$0.3 \pm 1.5$ %	50	241	222	4.7
$^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$	$1.47 \pm 0.2$	2	232	229	0.9
$K_e$	$0.227 \pm 0.026$	12	235	227	1.7
厚度 thickness	$2.3 \pm 0.2$ mm	9	234	227	1.7
宇宙线 Cosm. ray	$0.13$ mGy / a	0	231	231	0.0
总和 Total					12%
中值及总误差, Best age estimate with uncertainty $231 \pm 27$ (ka)					

## 五、测年结果与讨论

表 2 列出了金牛山五个牙化石样品的牙本质铀系年龄和釉质 ESR 年龄, 计算 ESR 年龄所需要的这五个样品的铀含量和铀同位素放射性比值等参数值也同时列出。由表 2 我们可以看到:

(1) 这五个样品釉质的 ESR 年龄 (铀早期加入模式年龄) 与同一样品牙本质的铀系年龄在误差范围内一致。虽然这两种测年方法并不完全独立, 都有赖于铀加入样品模式的假设。但是根据实测的  $^{231}\text{Pa} / ^{235}\text{U}$  放射性比值来检验, 铀的早期加入并封闭的假设对 91002, 84070 和 84071 样品是成立的, 而对 91001 和 91003 样品也基本成立 (误差在

$\sigma-2\sigma$  之间)。两种测年结果的一致,增加了对所测年龄值可靠性的信心。同时也表明:只要工作细致,ESR 方法能较可靠地测定牙釉质样品的年龄。这一点对于测定年龄老于 40 万年,即老于铀系法最大可测年代范围的旧石器与古人类遗址(如郧县人、周口店、兰田等遗址)有很大意义。

表 2 金牛山牙化石样的铀系法和 ESR 法

U-series and ESR dating results for the teeth samples from the Jingniushan Palaeoanthropological Site

样品号 Sample No.	牙本质铀系测年 U-dating of dentine		釉质 ESR 测年 ESR dating of enamel						
	$^{230}\text{Th}$ Age (ka)	$^{231}\text{Pa} / ^{235}\text{U}$ ( $\pm 1\sigma$ )	AD (Gy)	$\text{U}_{\text{釉质}}$ $\text{U}_{\text{enam}}$ (ppm)	$\text{U}_{\text{本质}}$ $\text{U}_{\text{dent}}$ (ppm)	$\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}}$	厚度 Thick (mm)	早期年龄 EU Age (ka)	线性年龄 LU Age (ka)
91001	$237 \pm 16$	$1.10 \pm .06$	$708 \pm 71$	$1.17 \pm .29$	$60.1 \pm 2.0$	1.47	2.3	$231 \pm 27$	$343 \pm 36$
91002	$197 \pm 36$	$.998 \pm .040$	$572 \pm 57$	$1.47 \pm 3.7$	$71.3 \pm 2.1$	1.24	2.7	$197 \pm 23$	$296 \pm 31$
91003	$198 \pm 14$	$1.07 \pm .06$	$675 \pm 68$	$1.13 \pm .28$	$71.0 \pm 2.1$	1.22	2.7	$239 \pm 28$	$356 \pm 42$
84070	$304^{+54}_{-36}$	$1.05 \pm .06$	$998 \pm 100$	$3.0 \pm .5$	$59.8 \pm 1.7$	1.35	2.2	$241 \pm 28$	$376 \pm 39$
84071	$258^{+32}_{-26}$	$.989 \pm .056$	$799 \pm 80$	$2.23 \pm .40$	$48.7 \pm 1.5$	1.35	2.2	$236 \pm 28$	$358 \pm 39$

(2)因为金牛山牙化石样品的铀含量高,早期加入与线性加入两种模式的 ESR 年龄相差很大。四个与人化石同层位样品的早期加入模式年龄的平均值为 23 万年左右,而线性加入模式年龄的平均值达 35 万年。线性加入模式年龄显然偏老,与已知的地质与考古资料不符。因此对金牛山遗址而言线性加入模式 ESR 年龄不能被接受。

(3)表 2 的五个样品中的 84070, 84071 两样的铀系年龄 (Chen and Yuan, 1988)中已发表,其他样品的 U 系年龄与全部 ESR 年龄都是本文首次发表的。

前面已提到人化石出自第六层。

91001 样品采自第五层,新测的 U 系年龄为 23.7 万年,ESR 年龄 23.1 万年,两者一致,处在 Chen and Yuan(1988) 所定的该层的铀系年龄范围 21—26 万年之间。

第六层四个样品的铀系年龄离散较大,其平均值为  $23.9 \pm 5.2$  万年。四个 ESR 年龄值相互较接近,其平均值为  $22.8 \pm 2.1$  万年,处于原定铀系年龄范围 23—30 万年的低端 (Chen and Yuan, 1988), 基本一致。总之 ESR 测年结果同样肯定金牛山人头骨化石所在的层位早于 20 万年,属中更新世晚期,从而支持了 Chen and Zhang (1991)关于当时人属的两个种,直立人与智人在中国大陆可能共存的想法。

致谢 作者感谢他们所在北京大学考古系实验室其他同志的帮助,感谢北京大学技术系钴源实验室赵永和同志的帮助。特别要感谢上海博物馆王维达、夏君定两位先生在测定  $K_a$  值方面的指教与帮助。



## 参 考 文 献

- 吴汝康, 1988. 辽宁营口金牛山人化石头骨的复原及其主要性状. *人类学学报*, 7(2):97—101.
- 陈铁梅、原思训、高世君, 1984. 铀子系法测定骨化石年龄的可靠性研究及华北地区主要旧石器地点的铀子系年代系列. *人类学学报*, 3(3):259—269.
- 吕遵谔, 1985. 金牛山猿人的发现和意义. *北京大学学报(哲学社会科学版)*, (2):109—111.
- 吕遵谔, 1989. 金牛山人的时代及其演化地位. *辽海文物学刊*, (1):44—55.
- 高钧成、杜亚经, 1991. 丙氨酸/ESR剂量计在断代中的应用. *核技术*, 14:90—93.
- Chen, Tiemei and Yuan Sixun, 1988. Uranium-series dating of bones and teeth from Chinese palaeolithic sites. *Archaeometry*, 30:59—76.
- Chen, Tiemei and Zhang Yinyun, 1991. Palaeolithic chronology and possible coexistence of *Homo erectus* and *Homo sapiens* in China. *World Archaeology*, 23(2):147—154.
- De Canniere, P., R. Debuyst, F. Dejchet, D. Apers and R. Grun, 1986. ESR Dating: A study of Po-coated geological and synthetic samples. *Nucl. Tracks*, 11:211—220.
- Grün, R., 1985. Beiträge zur ESR-Datierung, Sonderveröffentlichungen des Geologischen Instituts der Universität Köln, 59:1—157.
- Grün, R., 1986. Beta dose attenuation in thin layers. *Ancient TL*, 4:1—8.
- Grün, R., 1989. Present status of ESR dating. *Appl. Radiat. Isot.*, 40:1045—1055.
- Grün, R., Stringer C.B. and Schwarcz H.P., 1989. ESR dating of teeth from Garrod's Tabun Cave collection. *J. Hum. Evol.*, 20:231—248.
- Grün, R., 1991. Potential and problems of ESR dating. *Nucl. Track Radiat. Meas.*, 18:143—153.
- Grün, R. and E.J. Rhodes, 1991a. On the selection of dose points. *Ancient TL*, 9(3):40—46.
- Ikeya, M., 1975. Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance. *Nature (London)*, 255:48—50.
- Nambi, K.S.V. and M.J. Aitken, 1986. Annual dose conversion factors for TL and ESR dating. *Archaeometry*, 28:202—205.

## ELECTRON SPIN RESONANCE DATING OF TEETH ENAMEL SAMPLES FROM JINGNIUSHAN PALAEOANTHROPOLOGICAL SITE

Chen Tiemei   Yang Quan   Wu En

(Peking University, Beijing 100871)

**Key words**   Electron spin resonance dating; Jingniushan; palaeoanthropology

### Abstract

Our early work on Uranium-series dating had assigned an age range of 230—300 ka for the Palaeoanthropological site of Jingniushan. In this work five more tooth samples from this site were dated with both electron-spin-resonance (ESR) and Uranium-series techniques.

Enamel layers were separated for ESR dating. The accumulated dose(AD) was normalized with alanine dosimeter. As the AD value based on the exponential extrapolation much depends on the highest irradiated dose, linear extrapolation going with high correlation coefficients was implemented. A value of 0.23 for alpha-effectiveness has been empirically determined, which differs somehow from the commonly accepted value of 0.15. Tentative efforts were made to determine the radon emanation and moisture coefficients. To keep the necessary consistency with the U-dating method on the U-uptake assumption, the ESR ages were calculated on the basis of "early U-uptake model".

The closed-system assumption of the U-series dating was checked and confirmed by comparing the Th-230 / U-234 and Pa-231 / U-235 activity ratios for every dentine sample.

The ESR ages, ranging from 197—241 ka, are in fairly good agreement with the U-dates for each of these samples. The average ESR age of these 5 samples is  $229 \pm 28$  (ka), which matches the lower end of the published U-series age range.