

# 北京猿人第一个头盖骨及其遗址堆积层年代的电子自旋共振测年研究<sup>1)</sup>

黄培华 金嗣焯 梁任义 陆仲家 郑丽珍

(中国科学技术大学地球和空间科学系,合肥 230026)

袁振新 蔡炳溪

(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所,北京 100044)

方 朝 萌

(中国原子能研究院,北京 102413)

**关键词** 电子自旋共振测年;北京猿人第一个头盖骨埋藏年代;铀线性积累模式;第一地点堆积层年代表

## 内 容 提 要

裴文中教授在60年前发现的北京猿人第一个头盖骨埋藏的确切年代至今没有获得。本文通过对北京猿人共生的古脊椎动物牙化石进行电子自旋共振(ESR)测年,分别获得了第11层北京猿人第一个头盖骨埋藏的年代为578千年,第8—9层和第3—4层北京猿人埋藏的年代分别为418千年和282千年。依据ESR、U系,TL,FT和古地磁等测年结果,本文推荐了北京猿人洞的洞穴堆积层(周口店组Q<sub>2</sub>)年代表供读者参考。

## 一、引 言

自1929年裴文中教授发现了北京猿人第一个完整的头盖骨(Pei, 1929)揭开了人类发展史上重要的一页以来,这个头盖骨的确切年代一直是中外学者们,特别是古人类和史前考古学家十分关注的问题。在七十年代末,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所曾组织全国有关科学工作者进行“北京猿人遗址的综合研究”(吴汝康等, 1985)。在测年研究方面: 铀系法用动物化石测定出第1—3层(赵树森等, 1980)和第6—7层(夏明, 1982)的年代;热释光法取第4层灰烬层内石英为样品,测定了上文化层年代(裴静娴等, 1979);裂变径迹法选用第10层灰烬层内椭石为样品,测出了底文化层的年代(郭士伦等, 1980);古地磁法测量认为第7层相当于琵琶E事件以及从第1—2层至第13层均属布容正极性世(钱方等, 1980)。八十年代, Ikeya (1985)用电子自旋共振法(ESR)测量了第

1) 国家自然科学基金资助项目(4880075)。

4、6、10层的骨化石和马牙臼齿,由于数据不完全而未能得到符合实际的年代。故至今,北京猿人第一个头盖骨埋藏层——第11层的年代仍然没有数据。

电子自旋共振法(ESR)是八十年代迅速发展起来的一项新的测年技术,我国在1985年才开始进行这方面研究(黄培华等,1985,1986)。化石及其他地质和考古样品在自然环境中(包括埋藏在地层内),遭受到周围放射性元素铀、钍、钾产生的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线及宇宙射线等辐照,经电离作用产生的电离电子被样品晶格中的缺陷或俘获层捕获而形成各种不同的顺磁中心。这些顺磁中心可被 ESR 波谱仪所探测。化石样品只有经过石化作用在结构上形成晶体时,才可能在放射性元素的射线辐照下形成顺磁中心。因而,化石样品的 ESR 测年零点是以它形成晶体时开始计算的。

化石样品中顺磁中心的数目多少是与化石存在时间段所遭受天然辐射累积剂量(AD或称总剂量)成正比。一般都假定所遭受的年辐射剂量率(D)是常数,于是顺磁中心的数目就与化石样品的年龄成正比。用 ESR 波谱仪测量化石样品顺磁中心的总数目,即 ESR 信号强度,确定它的累积剂量(AD,单位:戈瑞,Gy),采用其他方法(本文采用在遗址地层中埋置热释光剂量片法)测量出化石样品采集地点的年剂量(D,单位:毫戈瑞/年,mGy/a),两者相除,即可获得化石样品的距今年龄(T,单位:千年,Ka):

$$T(\text{Ka}) = \text{AD}(\text{Gy}) / \text{D}(\text{mGy/a}) \quad (1)$$

ESR 测年范围一般是 $10^2$ — $10^6$ 年。可测物质广泛(彭子成等,1988),特别是测定化石、贝壳(金嗣焯等,1987)、珊瑚和次生碳酸盐类(如洞穴的石笋和石钟乳)等样品较现有的其他测年方法优点突出(梁任义等,1988)。故用 ESR 法测定北京猿人共生的动物化石及猿人洞内钙板层等的年代,不论从测定物质方面,还是从测年范围方面都是最适合的。

我们吸取了国际和国内测年研究工作的经验和教训。在测定物质方面,我们挑选了与北京猿人共生的动物牙齿化石为测年样品,而不用一般的骨化石。测年样品以一颗完整的牙为一个样品,而不用多颗碎牙,或多个不同个体动物的牙混在一起为样品。本文样品,除第1—2层缺少化石外,从第3层起,以下各层都是挑选与北京猿人共生的动物牙齿化石为测年样品。例如,第3—4层斑鹿(*Pseudaxis grayi*)牙化石(标本号:3—4—L<sub>25</sub>)是与第V号北京猿人头盖骨(HIII)共生;第8—9层斑鹿牙化石(标本号:8—9,36—74)是与LI、LII、LIII头盖骨共生的;第11层肿骨鹿(*Megaceros pachyosteus*)牙化石(标本号:11—L<sub>31</sub>)是与北京猿人第一个头盖骨(E1)共生的。上述的测年样品都只选用了一颗牙齿而进行分析和测定的。

我们还对牙化石样品进行了X射线衍射分析。图1为鹿牙的釉质层,从衍射峰线条的尖锐特征表明,它结晶很好,氟磷酸钙晶体 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ 占90%以上;图2为鹿牙的齿质层,衍射峰线条宽化,表明它虽经石化作用但结晶状态仍较差。从上述原理可知,应选择结晶良好的牙齿釉质层作为测年样品。因而,本文以鹿牙釉质层为主作为测年样品。

依据电子自旋共振测年法获得的猿人洞第2、3、8—9、11和12层的年代,同时将铀系、热释光、裂变径迹和古地磁等方法测定出的第3、4、6—7和10层的年代结合起来,于是,文中列出了北京猿人遗址第一地点的中更新世周口店组(Q<sub>2</sub>)从第2层至第13层的年代表,供今后研究者的参考。

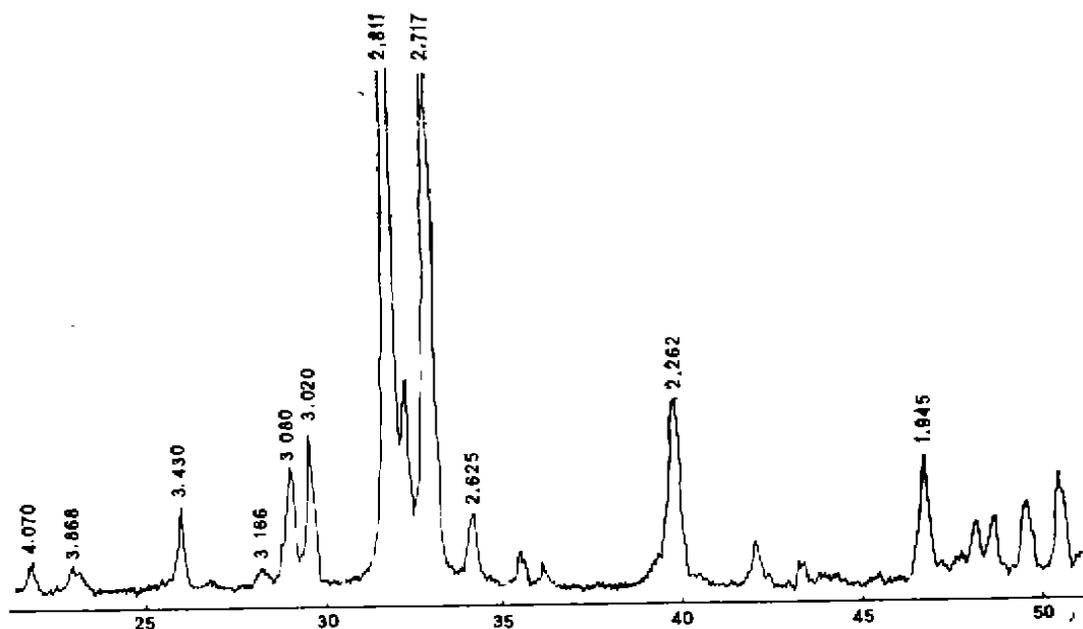


图 1 北京猿人遗址第一地点第 8—9 层鹿牙釉质层 X 射线衍射谱  
The spectrum of X-ray diffraction for deer tooth enamel from the  
8—9th layer in Peking Man Site Loc. 1

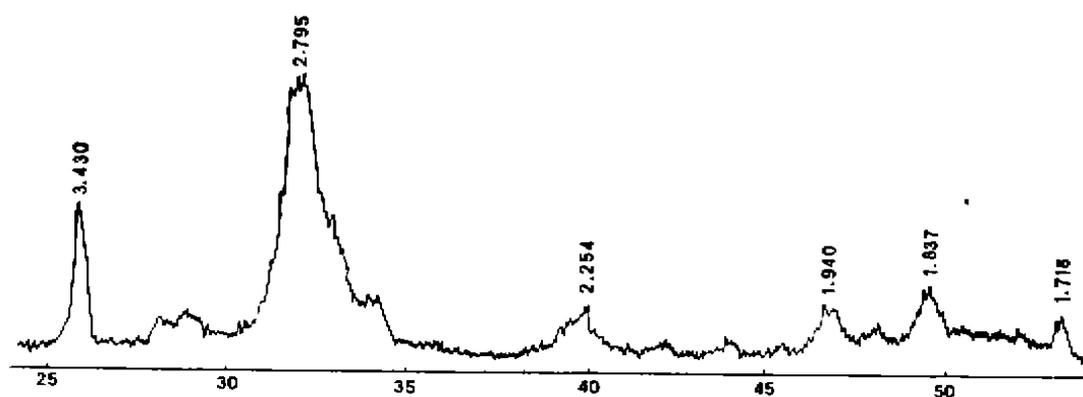


图 2 北京猿人遗址第一地点第 8—9 层鹿牙齿质层 X 射线衍射谱  
The spectrum of X-ray diffraction for deer tooth dentine from the 8—9th  
layer in Peking Man Site Loc. 1

## 二、天然辐射累积剂量 (AD) 测定

将牙齿釉质层经盐酸处理和研磨等制备后,对每一组等量相同样品经  $\text{Co}^{60}$  源人工辐照以不同的附加  $\gamma$  剂量  $Q$  后,用电子自旋共振波谱仪 (ER-200-D-SRC) 测量样品的顺磁中心数目,在 ESR 谱上显示为 ESR 信号强度 ( $R$ )。图 3 是与北京猿人第一个头盖骨

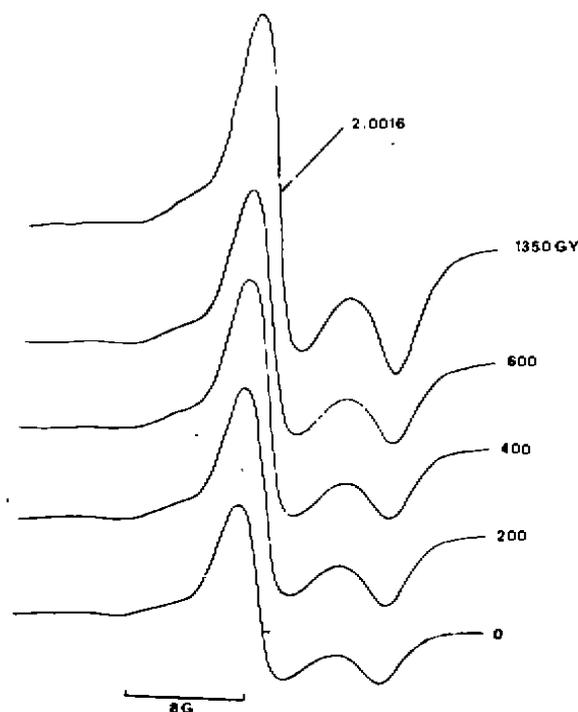


图3 北京猿人遗址第一地点第11层鹿牙(釉质)的 ESR 谱  
ESR spectra of deer tooth (enamel) from the 11th layer in Peking Man Site Loc. 1

共生的肿骨鹿牙齿釉质层的 ESR 谱。测试条件为:微波频率 9.7319GHz,微波功率 2mW,调制频率 100KHz,场调制强度 0.8Gpp。由图谱可见, $g = 2.0016$  共振峰幅度(R)随着人工辐照剂量(Q)的增加而成线性的增长。剂量(Q)为横坐标,ESR 强度(R)为纵坐标,将每一组所测得的 ESR 强度(R)用最小二乘法拟合成直线,并外推到  $R = 0$  处,即是该样品的天然辐射累积剂量(AD)。图 4 为第11层肿骨鹿牙齿釉质层的累积剂量拟合直线,AD 值为  $1564 \pm 115\text{Gy}$ 。其他各层测年样品的 AD 值见表 1。

### 三、年剂量的测定与计算

牙齿化石样品的年剂量测量和计算是一个复杂的问题。本文采用中子活化分析方法对牙齿内铀、钍和钾( $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$ )的含量进行定量分析,依据 Bell 表给出的常数进行样品内部的年剂量( $D_i$ )计算(Henning and Grün, 1983)。用高灵敏度热释光剂量片 [ $\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})$ , GR200A] 埋置在遗址的第 1—2 层至第 13 层采样点内,经过三个月以后取出,用热释光仪进行测量。它包括了样品外部年剂量( $D_{ex}$ )和宇宙射线等年剂量( $D_c$ )。由于牙齿化石体积小,样品内部  $\gamma$  射线的贡献主要消耗在它周围的堆积物中,故它的贡献可以忽略。又由于本文测年样品取的是牙齿的釉质部分,因而必须考虑牙齿的齿质部分的放射性剂量的影响问题。对牙齿的釉质来说,齿质的放射性年剂量也是它的环境年剂量( $D_e$ )的一个组成部分。故本文的样品环境年剂量( $D_e$ ),包括了热释光片

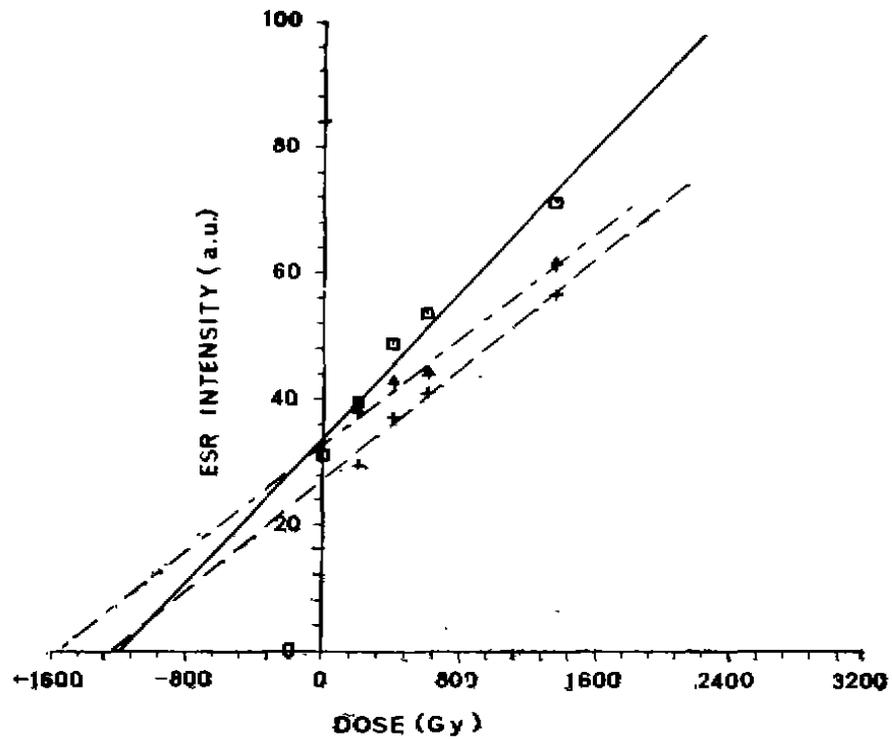


图4 北京猿人遗址第一地点第3—4、8—9和第11层鹿牙(釉质)的 ESR 信号强度与辐照剂量关系

The relationship between the ESR intensity and the irradiation doses of deer teeth (enamel) in Peking Man Site Loc. 1

- (3—4 layers: AD =  $-1183 \pm 192$  (GY) ——— □□)
- (8—9 layers: AD =  $-1234 \pm 122$  (GY) ----- ++)
- (11 layer: AD =  $-1564 \pm 155$  (GY) -.-.-. ↑↑)

表1 北京猿人遗址第一地点鹿牙化石的 ESR 测年数据和结果

ESR dating date and results of fossil deer teeth in Peking Man Site Loc. 1

发掘分层		3—4	8—9	11
化石样品发掘编号		斑鹿牙 3-4-L <sub>22</sub>	斑鹿牙 36-74A4	肿骨鹿牙 11-L <sub>31</sub>
累积剂量(Gy)		1183±192	1234±122	1564±155
<sup>238</sup> U(ppm)	釉质	14.9±0.4	6.7±0.2	6.2±0.2
	齿质	38.7±1.2	20.7±0.6	23.6±0.7
<sup>232</sup> Th (ppm)		0	0	0
<sup>40</sup> K (%)		0	0	0
De (mGy/a)		11.5±0.4	7.1±0.2	6.1±0.2
D <sub>34</sub> (mGy/a)		0.56±0.02	0.35±0.01	0.23±0.01
D <sub>31</sub> (mGy/a)		8.7±0.3	5.1±0.2	4.4±0.1
ESR 年龄 (ka)		282±45	418±48	578±66

实地测量的年剂量和牙齿齿质的年剂量贡献。于是总的年剂量 ( $D_E$ ) 为:

$$D_E = K \cdot D_{i\alpha} + D_{i\beta} + D_e \quad (2)$$

式中:  $K$ —— $\alpha$  射线相对于  $\beta$  或  $\gamma$  射线的辐照效率。本文暂依据对周口店地区洞穴内次生碳酸盐类样品的实测数据  $K = 0.1$ 。  $D_{i\alpha}$  和  $D_{i\beta}$  为牙齿釉质样品内所含的铀、钍、钾所释放出的  $\alpha$  和  $\beta$  射线对于年剂量的贡献。本文用中子活化法测定含铀量的误差为 3%, 钍和钾含量都很少(见表 1)。

为了采用铀线性积累模式计算样品的年龄, 还必须计算  $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$  链贡献的年剂量 ( $D_{34}$ ) 和  $^{230}\text{Th}$ — $^{206}\text{Pb}$  链贡献的年剂量 ( $D_{30}$ ) (表 2) (Ikeya, 1986)。

表 2 铀系辐射不平衡与时间相关的剂量率参数

Parameters of a time dependent dose rate for  $^{238}\text{U}$ -series radiation disequilibrium

D	$D_\alpha$	$D_\beta$	$D_\gamma$
$D_{34}$	0.2962	0	0.0030
$D_{30}$	2.1090	0.0853	0.1097

注: 表中剂量率单位为毫戈瑞/年 (mGy/a)。

#### 四、样品 ESR 年龄的铀线性积累模式

近年来, 用 ESR 测定牙齿化石样品年龄时, 大多采用铀线性积累模式(包括 1990 年 7 月在法国召开的国际热释光和电子自旋共振测年会议上大会宣读的论文)。我们也认为用铀线性积累模式获得的牙齿样品年龄较近于实际的年代。模式的计算公式为:

$$AD = \frac{1}{2} D_E T + D_{34} \frac{r_0 - 1}{\lambda_{34}} \left[ 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_{34} T}}{\lambda_{34} T} \right] - D_{30} \left\{ \frac{1}{\lambda_{30}} \left[ 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_{30} T}}{\lambda_{30} T} \right] - \frac{r_0 - 1}{\lambda_{34}} \left[ 1 - \frac{\lambda_{30}^2 (1 - e^{-\lambda_{34} T}) - \lambda_{34}^2 (1 - e^{-\lambda_{30} T})}{\lambda_{30} \lambda_{34} (\lambda_{30} - \lambda_{34}) T} \right] \right\} \quad (3)$$

式中:  $r_0$  是  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  的初始值, 本文依据赵树森(1980)、夏明(1982)、陈铁梅和原思训(1989)\*等对 2—4 层测出的铀同位素比值, 采用衰变公式计算得到的,  $r_0 = 1.3$ ;  $\lambda_{34}$  为  $^{234}\text{U}$  衰变常数,  $2.841 \times 10^{-6}$ /年;  $\lambda_{30}$  是  $^{230}\text{Th}$  衰变常数,  $9.217 \times 10^{-6}$ /年。通过迭代法计算获得了各层牙齿化石的年龄(表 1), 其中第 11 层的北京猿人第一个头盖骨埋藏年龄为  $(578 \pm 66) \times 10^3$  年。

#### 五、ESR 测年结果与北京猿人遗址第一地点 洞穴堆积层年代表

北京猿人洞内十三层堆积层(贾兰坡, 1959)是属于中更新世周口店组 ( $Q_2$ ) (杨子赓

\* 原思训、陈铁梅等(1989): 周口店遗址的铀系骨化石年代研究, 油印本。为纪念北京猿人第一个头盖骨发现 60 周年国际学术讨论会论文。

表 3 北京猿人遗址第一地点周口店组 (Q<sub>2</sub>) 年代表  
Chronological scale of Zhoukoudian formation (Q<sub>2</sub>) in Peking Man Site Loc. 1

地层时代	发掘分层	地层厚度 (m)	岩性主要特征	堆积旋回	堆积层年代 (ka)	猿人头盖骨编号及发掘年代	ESR 测年 (ka)	FT 测年 (ka)	铀系测年 (ka)	TL 测年 (ka)	磁性极世		
中 更 新 世  Q <sub>2</sub> 10	1	1-2	角砾层	V	200		221 (第一钙板层)		243(1)		布 谷 正		
	2	1.7	石灰华和粉砂 细角砾互层										295 312(5)
	3	3.6	粗角砾层	IV	250	H111 1934, 1966 上文化层	282 (3-4, L28)	306(4)	256(2)				
	4	6.9	灰浆层									290(1)	
	5	0.2	钙板层										
	6	7.2	粗角砾层	III	350				355(3)		磁 正		
	7	1.5	细角砾粉砂层										
	8	2.0	角砾层	II	400	L1, L11, L111 1936 下文化层	418 (8-9, 36, 74)				极 性 世 (6)		
	9	5.0	角砾和粘土粉砂层										
	10	0.6	灰浆层									462(4)	
	11	0.8	角砾层	I	500	底文化层							
	12	1.5	粗砂层						E1 1929	578 (11-1.31)			
	13	2.9-4.8	角砾粘土层		600								
					730						730		

注: ESR——电子自旋共振测年法, 本文。  
 FT——裂变径迹测年法, (4) 郭士伦等, 1980, 1989。  
 铀系——(1) 原思训、陈铁梅等, 1989; (2) 赵树森等, 1980; (3) 夏明, 1982。  
 TL——热释光测年法, (5) 裴静娴等, 1979。  
 占地磁法, (6) 钱方, 1980; 磁极相当于距今 380 千年。

等, 1985)。本文第一作者将这些洞穴堆积层划分为 5 个堆积旋回\*。每个旋回以流水或地下水沉积开始, 至洞壁剥落、崩塌堆积结束。从下至上, 第 13 层至第 11 层为第 I 旋回, 第 10 层至第 8—9 层为第 II 旋回, 第 6—7 层是第 III 旋回, 第 3—5 层为第 IV 旋回和第 1—2 层为第 V 旋回。

本文用鹿牙齿化石样品测定出第 3—4 层, 第 8—9 层和第 11 层的年代分别为  $282 \pm 45$ 、 $418 \pm 48$  和  $(578 \pm 66) \times 10^3$  年。此外, 我们还分别用第 2 层的钙板层和第 12 层的犀牛化石测定出它们的年代分别为  $(221 \pm 84) \times 10^3$  年和  $(669 \pm 84) \times 10^3$  年。结合热释光法测定的第 4 层, 裂变径迹法测定的第 10 层和第 4 层\*\*, 铀系法测定的第 2—4 层\*、第 1—3 层和第 6—7 层, 古地磁法测量的第 7 层以及确定的布容正极性世与松山负极性世的界线, 将这些年代结果排列起来, 建立了北京猿人遗址第一地点中更新世周口店组 ( $Q_2$ ) 的年代代表供古人类、考古和第四纪研究的参考(表 3)。

致谢: 本课题研究得到中国科学技术大学开放实验室和中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的大力支持。对贾兰坡、吴新智和郑家坚研究员的鼓励、帮助, 周贵恩、全裕才和李志雄分别进行 X 射线衍射分析、钴源辐照和计算程序设计、徐云华、梁蓉和黄志蓓分别协助样品采集、ESR 测量和样品制备等工作, 在此一并致谢。

(1989 年 12 月 29 日收稿)

### 参 考 文 献

- 杨子廉等, 1985。周口店地区晚新生代地层研究。北京猿人遗址综合研究, 1—85。科学出版社, 北京。
- 吴汝康、任美镔等, 1985。北京猿人遗址综合研究。科学出版社, 北京。
- 金嗣焯、梁任又等, 1987。第四纪早期丽蚌的 ESR 年龄测定与泥河湾动物群的年代。中国科学技术大学学报, 17(4): 501—506。
- 赵树森等, 1980。应用铀系法研究北京猿人年龄。科学通报, 25: 192。
- 郭士伦等, 1980。用裂变径迹法测定北京猿人年代。科学通报, 25: 384。
- 钱方等, 1980。周口店猿人洞堆积物磁性地层的研究。科学通报, 25: 192。
- 贾兰坡, 1959。中国猿人化石产地 1958 年发掘报告。古脊椎动物与古人类, 1: 21—26。
- 夏明, 1982。周口店北京猿人洞骨化石铀系年龄数据——混合模式。人类学学报, 1: 191—196。
- 梁任又、金嗣焯等, 1988。第四纪地质样品的 ESR 测年法。核技术, 11(11): 49—55。
- 黄培华、彭子成等, 1986。电子自旋共振法 (ESR) 测定第四纪物质年龄的研究。科学通报, 31(6): 453—455。
- 彭子成、梁任又等, 1988。电子自旋共振法年龄测定研究。地理研究, 7(4): 78—82。
- 裴静娴等, 1979。“北京人”遗址灰焯物质热发光年龄及其地质意义。科学通报, 24(18): 849。
- Henning, G.J. and R. Grün, 1983. ESR dating in Quaternary geology. *Quater. Sci. Rev.*, 2: 157—238.
- Huang Peihua et al., 1985. An attempt to determine the archaeological doses of the travertine and the deer horn with ESR. *ESR Dating and Dosimetry*, 321—324. IONICS, Tokyo.
- Ikeya, M., 1985. ESR ages of bones in paleo-anthropology: uranium and fluorine accumulation. *ESR Dating and Dosimetry*, 373—379. IONICS, Tokyo.
- Ikeya, M., 1986. *Dating and Age Determination of Biological Material*, 111—114. Billing and Sons Limited, Worcester.

\* 黄培华, 1990。北京猿人洞堆积层的 ESR 年代、堆积旋回与深海气候旋回的对比研究。中国第四纪地质学术会议, 青岛。

\*\* 郭士伦等(1989), 北京猿人遗址第四层年代的裂变径迹法研究, 油印本。为纪念北京猿人第一个头盖骨发现 60 周年国际学术讨论会论文。

Pei, W. C., 1929. An account of the discovery of an adult *Sinanthropus* skull in the Choukoutien deposit. *Bull. Geol. Soc. China*, 8: 203—250.

## STUDY OF ESR DATING FOR BURYING AGE OF THE FIRST SKULL OF PEKING MAN AND CHRONOLOGICAL SCALE OF THE CAVE DEPOSIT IN ZHOUKOU DIAN SITE LOC. 1

Huang Peihua Jin Sizhao

Liang Renyou Lu Zhongjia Zheng Lizhen

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Yuan Zhenxin Cai Bingxi

(Institute of Vertebrate Palaeontology and Palaeoanthropology, Academia Sinica, Beijing 100044)

Fang Zhaomeng

(Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Key words** ESR dating; Burying age of the first skull of Peking Man; Uranium linear uptake model; Chronological scale of cave deposit in the site

### Abstract

Sixty years ago, Pei Wenzhong (W. C. Pei) discovered the first skull of Peking Man in the 11th layer, Loc. 1, Zhoukoudian, Beijing (1929). However, the actual age of its burying is still not sure up to now. In this paper, the deer fossil teeth are collected from the 3—4, 8—9 and 11 layers in Loc.1. The accumulative doses and internal annual doses of fossil teeth (enamel) have been gotten by electron spin resonance spectrometer (ESR) and neutron activation analysis. The environmental annual doses have been obtained by thermoluminescence dosimeters to be embedded in the 2nd layer to the 12th layer of the site. The linear uranium uptake model is adopted to calculate the ESR ages of fossil teeth. ESR dating results show that the burying age of the first skull of Peking Man is 578 ka. Other burying ages of Peking Man in the 3—4th layer and the 8—9th layer are 282 ka and 418 ka, respectively. According to the dating results of ESR, ET, TL, U-series and paleomagnetic stratigraphical measurement, a primary chronological scale of the deposits of Peking Man Cave is proposed in this paper.