

# $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法及其在我国早期人类遗址年代研究中的应用

沈冠军<sup>1</sup>, 邵庆丰<sup>1</sup>, Darryl E. GRANGER<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046;

2. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, IN 47907-1397, USA)

**摘要:** 本文介绍基于原地宇生核素  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  埋藏测年的基本原理: 地表石英矿物与次级宇宙射线发生核反应, 生成  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$ , 两者之比为 6.8:1。若长期暴露于地表的石英被快速深埋, 不再接受宇宙射线照射, 已积累的宇生放射性核素将随时间流逝而衰减。因  $^{26}\text{Al}$  比  $^{10}\text{Be}$  衰变快约一倍, 两者之比也将按指数规律随时间衰减, 由此可测定埋藏事件的年代。本文并讨论了这一测年新技术的假设前提和限制其应用的各种因素。试用该法于周口店第 1 地点第 7—10 层的结果为  $770 \pm 80\text{ka}$ , 支持洞穴方解石质谱铀系测年的结果。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法理化基础坚实, 独立于其他测年技术, 应用范围正值我国年代研究的“盲段”, 所需样品为广泛分布的石英矿物, 应可为我国早期人类演化可信年代系列的建立作出重要贡献。

**关键词:** 原地宇生核素; 石英;  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年; 早期人类遗址

**中图法分类号:** P533

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3193 (2009) 03-0292-08

## 1 引言

对研究人类体质和文化演化史而言, 可信的时间坐标是一项不可或缺的参数。从人类诞生之初到数十万年间的非洲遗址, 主要用火山灰为样品的  $\text{K}/\text{Ar}$  ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) 法定年, 其可信度已经多方验证, 并为学界普遍接受。但在我国, 由于同期火山活动不活跃,  $\text{K}/\text{Ar}$  法的应用受到限制, 从质谱  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  测年法上限 ( $\sim 600\text{ka BP}$ ) 至数百万年, 是年代学研究最薄弱的环节之一。这一时间段涵盖多个重要事件, 相关人类化石和石器地点在我国多有发现, 但这些地点的年代主要基于地层古生物和古地磁研究, 同位素地质年代几为空白。

在过去的 20 多年里, 很大程度上受计算机技术和材料科学快速发展的拉动, 理化测试仪器的性能得到了大幅度提高, 由此导致第四纪测年技术的重大进展。加速器质谱 (AMS)  $^{14}\text{C}$ 、热电离质谱 (TIMS) 铀系、单晶体激光熔融  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  等测年新技术的引入, 是第四纪地质年代学摆脱粗约、真正成为建立在理化测试数据基础上独立、定量学科的标志, 人类演化的时间坐标因之发生了重要变化<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2008-11-20; 定稿日期: 2009-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (课题号 40873042)

作者简介: 沈冠军 (1943-), 男, 江苏海门人, 教授, 法国国家博士, 主要从事第四纪年代学研究。E-mail: gjshen@njnu.edu.cn。

与经典的放射性强度测定法相比较,由粒子加速器与质谱技术相结合而产生的 AMS 在测定低丰度核素方面,有着无可比拟的优势。这一高灵敏度、高精度大型仪器诞生于上世纪 70 年代末,最先被应用于  $^{14}\text{C}$  测年,使这一重要的第四纪测年技术发生了革命性的进展,极大地推动了考古、古气候和其他相关学科的发展。经过 20 多年的不断改进,如今性能最好的 AMS 已可精确测定  $10^6$  个原子和丰度比为  $10^{-14}$  以至  $10^{-16}$  的同位素对<sup>[3]</sup>,使比  $^{14}\text{C}$  丰度更低的宇宙射线成因核素(简称为宇生核素)应用于地球化学和地质年代学成为可能。

用原地宇生核素(*in situ* cosmogenic nuclides)  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  之浓度比测定埋藏事件的年代,是近年来在理化和地球科学界面上产生的测年新技术之一。Lal 和 Arnold<sup>[4]</sup>首先提出埋藏测年的概念模型。Granger *et al.*<sup>[5]</sup>首次测定冲入洞穴石英质砾石中的  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ ,以此确定 1.5Ma BP 以来美国 New River 的下切速率。该法后被成功应用于南非著名古人类遗址 Sterkfontein 的年代研究,结果为  $4.17 \pm 0.35\text{Ma BP}$ ,大于原基于古生物、古地磁和 ESR 测年得出的  $1.5\text{—}3.5\text{Ma BP}$ <sup>[6]</sup>。最近该法被用于测定西班牙 Sima del Elefante 的年代,结果为  $1.1\text{—}1.2\text{Ma BP}$ <sup>[7]</sup>,该地点发现的下颌骨因此是欧洲最早的人类化石。

$^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法填补了上述测年技术的“盲段”,因此有可能改变我国质谱铀系测年范围以外人类遗址同位素年代研究甚为薄弱的现状。本文将向史前科学的同行学者介绍该法的基本原理、适用范围和初步结果,并展望其在我国早期人类遗址年代研究中的应用前景。

## 2 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法基本原理

我们生活的地球始终受着宇宙射线的轰击。初始宇宙射线进入同温层,与大气物质发生核反应,生成  $^{14}\text{C}$ 、 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$  等一系列宇生核素,同时产生次级宇宙射线,主要由中子、质子和介子组成。其中能量较高的中子和  $\mu$  介子能穿过大气层,与地表矿物发生核反应,也生成  $^{14}\text{C}$ 、 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$  等核素。为区分这二类不同来源的宇生核素,人们将后者称为原地宇生核素。

原地宇生核素主要有两种生成机制:靶核(如  $^{16}\text{O}$ 、 $^{28}\text{Si}$ )与高能中子发生的散裂反应和与负  $\mu$  介子发生的俘获反应,分别贡献近地表宇生核素的约 98% 和 2%<sup>[3,8]</sup>。在普通地表岩石( $\rho = 2.6\text{g}/\text{cm}^3$ )中,中子的平均自由程为约  $150\text{g}/\text{cm}^2$ ,大致相当于 60cm 厚的岩石。 $\mu$  介子的平均自由程比中子高一个数量级,为约  $1500\text{g}/\text{cm}^2$ ,因此可以穿透更厚的岩层。

在诸多常见矿物中,迄今只石英可用于埋藏测年的研究。这是因为这种矿物同时具有生成  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  的靶核;其组成为相当纯净的  $\text{SiO}_2$ ,基本不含稳定核素  $^9\text{Be}$ ,稳定核素  $^{27}\text{Al}$  的含量亦很低,相对较高的  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  有利于 AMS 对  $^{26}\text{Al}$  的精确测量。此外石英的化学性质稳定、结构致密,浓度高几个数量级的大气成因  $^{10}\text{Be}$  难以渗入,其内生成的宇生核素亦不易流失。

在高纬度海平面每克石英矿物每年生成约 4.5 个  $^{10}\text{Be}$  和 31 个  $^{26}\text{Al}$  原子。尽管生成速率因海拔高度、地磁纬度等多项参数而变化,但二者之比( $\sim 6.8$ ,此值曾被认为 6.1)基本不变。如果石英矿物在地表长时间暴露后被流水冲入洞穴,或被快速埋入地下深处,宇宙射线被十多米以至更厚的覆盖层屏蔽,宇生核素的生成几近停止,暴露过程中积累的  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  随时间流逝而衰减。由于  $^{26}\text{Al}$  较  $^{10}\text{Be}$  衰变快约一倍,二者浓度比将从初始值依以表观半衰期 1.52Ma 下降:

$$N_{\text{Al}}/N_{\text{Be}} = (N_{\text{Al}}/N_{\text{Be}})_0 e^{-t(\lambda_{\text{Al}} + \lambda_{\text{Be}})} \quad (1)$$

式(1)中  $t$  为埋藏时间,  $N_{\text{Al}}$  和  $N_{\text{Be}}$  分别为样品中  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  的现存浓度,  $(N_{\text{Al}}/N_{\text{Be}})_0$  为埋藏前这二种核素的浓度比, 为衰变常数 ( $\lambda_{\text{Al}} = 0.967 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Be}} = 0.510 \times 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$ )。

图 1 显示了石英中  $^{10}\text{Be}$  浓度、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  比值与埋藏时间和物源区地表侵蚀速率的函数关系。图中斜虚线指示地表侵蚀速率分别为 100、10 和 1 m/Ma 的情况下  $^{10}\text{Be}$  和  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  随时间的衰减趋势。5 条横线为依不同侵蚀速率  $^{10}\text{Be}$  和  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  的等时线, 对应的埋藏时间分别为 0、1、2、3、4 Ma。若某样品  $^{10}\text{Be}$  和  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  测定值位于图 1 黑点处, 则该样约在 2.4 Ma 前被埋藏, 对应的地表侵蚀速率为约 30 m/Ma。

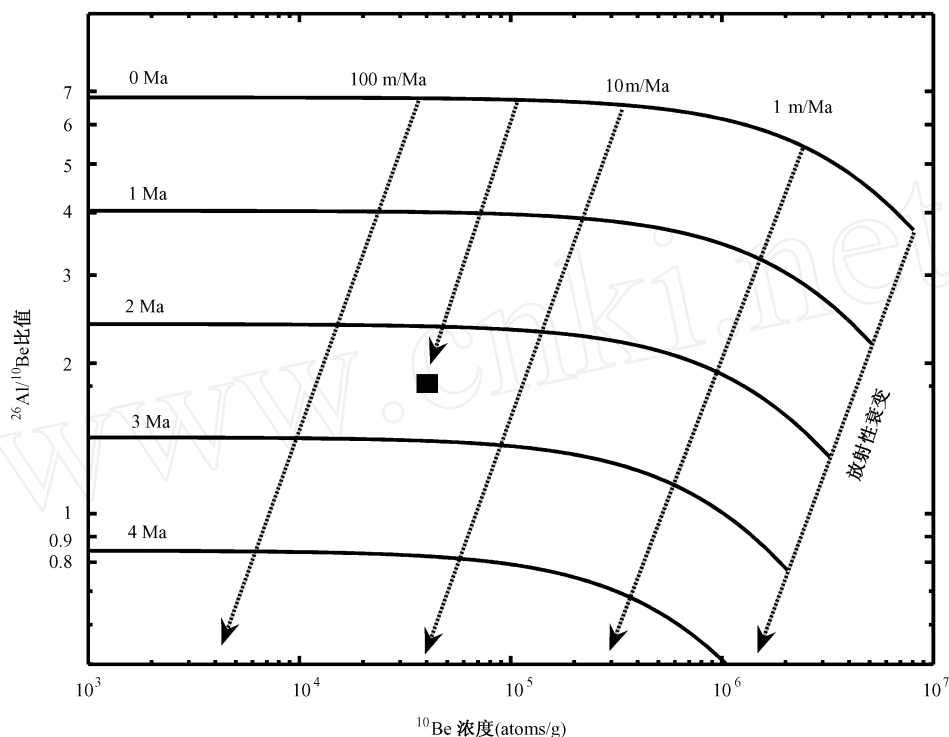


图 1 石英矿物中  $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  与地表侵蚀速率和埋藏时间的函数关系<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Relationship of  $^{10}\text{Be}$  concentration and  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  in quartz with erosion rates and burial times

以上所讨论的是埋藏测年中最简单的情形, 即石英矿物在较长时间暴露于地表后被快速深埋, 原地宇生核素停止生成。但在实际应用时, 常有些研究对象的埋藏深度不足以定量屏蔽  $\mu$  介子, 因此仍有少量  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  的后期生成, 这一因素随埋深不足的程度和年龄的增大而愈益不可忽略。以采自美国 Ohio River 埋深约 10m 的冰碛物为例, 其表观埋藏年龄为  $1.13 \pm 0.16 \text{ Ma BP}$ 。修正后期生成的  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$ , 该样更接近于真实的年代应为  $1.50 \pm 0.30 \text{ Ma BP}$ <sup>[3]</sup>。

AMS 测量  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  的计数统计误差通常为 3—5% ( $\pm 1$ ), 由此引起年代结果的误差约为 100ka。此外, 尚需考虑样品本身和制样过程的误差, 由此规定该法物理学意义的测年下限为约 300ka。石英矿物在被埋藏后, 其中  $^{26}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}$  因衰变逐渐减少。在约 3.5—5Ma

后,相当于 5—7 个  $^{26}\text{Al}$  的半衰期,剩下的  $^{26}\text{Al}$  已经接近当前 AMS 的探测极限,由此规定了该法的测年上限。

实际测定某一地点堆积物的埋藏年龄时,需采集数千克以至数十千克堆积物,用水和稀酸浸泡,除去砾石、碳酸盐胶结物、黏土等杂质,筛选出至少 200 克粒径为 0.2—1.0mm 的混合砂。用  $\text{HF}/\text{HNO}_3$  长时间反复处理,以除去长石、云母等杂质,再用磁选和重液法分离纯化石英砂,必要时用手工逐粒挑拣,以确保石英砂的纯度,这对精确测定  $^{26}\text{Al}$  十分重要。之后,尚需用  $\text{HF}/\text{HNO}_3$  溶蚀掉 ~30 % 的砂粒表层,以定量去除吸附于表面大气成因的  $^{10}\text{Be}$ 。将数十克经如此处理的石英砂完全溶解,加入  $^9\text{Be}$  载体,将  $\text{Al}$  和  $\text{Be}$  分离纯化。最后制靶,用 AMS 测定  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  和  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 。

### 3 初步应用结果

周口店第 1 地点因其特别重要的学术地位和深厚的研究积累,被选作  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法在我国的首试之地。该地点的年代一直备受关注,上世纪 70 年代后期曾组织多学科综合研究,主要基于古地磁、楣石样裂变径迹和骨化石样铀系测年得出的结论为:下部第 13 层为约 700ka BP,出土人类化石的第 10 层为约 500ka BP,最上部第 1—3 层为约 230ka BP<sup>[9]</sup>,这一年代框架在相关研究中广为引用。后 Grün 等<sup>[10]</sup>、郭士伦等<sup>[11]</sup>和原思训等<sup>[12]</sup>分别用电子自旋共振(ESR)、裂变径迹和二种铀系法作进一步研究,给出与此基本一致的年代结果。

纯净致密的洞穴方解石(speleothem calcite)的质谱 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 年代有较高可信度。沈冠军等<sup>[13]</sup>、Shen *et al.*<sup>[14]</sup>以此测定了该地点第 1—2 层和第 5 层钙板的年代,分别为约 400 和 600ka BP,远大于原认为的约 230 和 300ka BP。假设第 5 层以上和以下堆积的形成速度大致相同,北京猿人的早期成员应生活在 800ka BP 前。基于对洞穴方解石铀系年代可信度的认识,这些新的年代数据已为国际学界广为引用。但因与原有年代框架差距较大,也有些学者感到难以接受。为此迫切需要另一独立、可信测年法的交叉验证。由于正值上述我国测年技术的“盲段”,这一问题多年悬而未决。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法的涌现为确立该地点下部地层的年代提供了可能。

我们在现场考察的过程中发现:周口店第 1 地点中、下部堆积有多个富含粗颗粒石英砂的亚层;这些层位上覆至少 15m 堆积,在百万年以内可以认为宇宙射线已被完全屏蔽;前人对该地点及邻近地区的地质背景已作了相当深入细致的研究,因此可正确判断洞穴堆积的来源。我们采集了第 6、7、8/9、10、12 和 13 层的 6 个样品,从中提取纯净的石英砂。古脊椎动物与古人类研究所高星先生并提供了 4 件上世纪 30 年代出土于第 8/9 层的石英质石制品。这些样品在本文第三作者的实验室分析,其中 3 个石英砂样和 3 个石制品样给出了有意义的结果,加权平均值为  $770 \pm 80\text{ka BP}$ <sup>[15]</sup>。这一数据填补了质谱铀系测年范围外我国早期人类遗址同位素地质年代的空白,支持基于洞穴方解石质谱铀系测年的结果,对澄清有关东亚直立人系统地位的争议有重要意义。

### 4 假设前提与限制因素

凡基于放射性同位素衰变和平衡的地质年代测定法,都需要引入若干假设前提。所得

结果可信与否,很大程度上取决于这些假设前提能否得到满足。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法也不例外。该法最重要的假设前提之一为“简单恒态侵蚀模式”(simple steady-state erosion model)<sup>[31]</sup>,即石英矿物从地层深处逐渐暴露于地表,较长时间受宇宙射线的照射,然后被快速深埋。已有数据表明,大部分样品符合这一假设前提,但也有一些暴露-埋藏史较为复杂的样品。如上述周口店第8—9层的4件石制品中,3件给出了在误差范围内一致的年代结果,可引为它们符合上述假设前提的证据。另一件给出了大得多的年代结果,表明其暴露-埋藏过程并不单一。又如移动砂丘中的砂粒,其初始 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 偏低。具复杂暴露-埋藏史石英颗粒不同程度的混入将使年代结果偏高。详尽的地质、地貌背景资料应可为石英砂来源的判断提供依据,亦尚待数据的积累和与火山灰 K/Ar、洞穴方解石铀系等计年器的相互比对,以确立该法年代结果的可信度。

除此之外,尚有如下三个限制 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法应用的因素:

其一,石英是一种普遍存在的矿物。但我国早期人类遗址多位于石灰岩地区,从文化堆积中采集粗颗粒石英砂或石英质砾石并非易事。如我们曾考察过湖北建始龙骨洞、广西柳城巨猿洞等地点,均未能采得适于测年的样品。系统的沉积学研究应有助于这一困难的克服。

其二,该法技术难度较大,实验操作繁杂,最后几步分离纯化需在超净实验室中进行,国内尚未建立这样的专用实验室。我国虽已有数台 AMS 仪器,但尚未建立精确测定低丰度 $^{26}\text{Al}$ 的程序。为此目前这一方向的研究只能通过国际合作进行。如今国际上多于50%的埋藏测年样品在美国 Purdue 大学的实验室分析,大部分制备好的 $^{26}\text{Al}$ 靶用美国 Livermoor 国家实验室的 AMS 测量。由于测试成本高昂、样品处理周期长达数月、AMS 机时紧缺,国际同行接受样品的能力亦相当有限。为充分利用有限的资源,取得重要成果,现阶段我们还只能侧重于研究少数几个科学意义特别重要、堆积物来源清楚、有巨厚屏蔽的地点。

其三,很可能由于我国新构造运动活跃,山地隆升速率较高,由此导致地表侵蚀速率较高,石英矿物暴露于地表、受宇宙射线照射的时间较短,埋藏前积累的宇生核素浓度较低,这在很大程度上制约了 $^{26}\text{Al}$ 的精确测定。在多个已作试测的地点,我们都遇到了难以精确测定 $^{26}\text{Al}$ 的困难。尽可能降低稳定核素 $^{27}\text{Al}$ 的含量并相应增加样品量,可在一定程度上克服这一困难。实验表明,用手工逐粒挑选石英砂,剔除含杂质包裹体的颗粒,可有效降低多数样品的 $^{27}\text{Al}$ 含量。但这一工作十分费时。

## 5 应用前景

综上所述, $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年法的基本应用条件为:1)堆积物含粒径0.2—4.0mm的石英砂或石英质砾石;2)这些石英矿物曾较长时间暴露于地表,后被快速搬运入洞穴或埋入地下深处,其上至少有10m覆盖层;3)被测地点的年代范围在300ka BP至5Ma BP间。对照这三个条件,我国相当一部分中更新世中期以前的人类遗址都可用该法测定年代。尽管有上节所述的限制因素,我国幅员辽阔,重要人类化石和石器地点众多,经系统考察,应不难从中找到若干具重大科学意义而又可用该法测年的地点。

当前国际古人类学界较为一致的观点认为,最早的人类发祥于非洲,亚洲无早于直立人阶段的人类遗迹。但近年来我国史前学者相继在湖北建始龙骨洞<sup>[16]</sup>和安徽繁昌人字洞<sup>[17]</sup>

等地点,发现了可能是混沌初开时期的人类化石和石制品,表明人类开始在中华大地繁衍生息的时代比原认为的早。地层古生物研究将这些地点的年代定在二百万年左右,但尚无同位素年代数据。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年有可能填补我国最早期人类化石、石器和巨猿化石地点同位素年代的空白,为人类在我国最早起源的研究提供坚实的年代学证据。

东亚直立人的系统地位也是古人类学的争议热点之一。长期以来,我国人类学家认为东亚早期智人主要由当地直立人演化而来<sup>[18]</sup>。但依近年来国际学界较为盛行的学说,东亚直立人是人类演化树上的旁支<sup>[19, 20]</sup>。应指出的是,这些观点均援用原有我国主要基于骨化石铀系测年的年代框架。骨化石不是铀系测年的理想材料,洞穴地点这一时标以偏低为主要倾向<sup>[21]</sup>。在过去的十多年里,基于洞穴方解石铀系测年的结果表明,我国中、晚更新世人类遗址的年代位置应总体前移,东亚和非洲的直立人-早期智人交替事件似无重要的时间差距<sup>[14, 22, 23]</sup>。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法的引入,可为铀系测年提供校核,并可将研究范围拓展到难以获得洞穴方解石和 600ka BP 以外的地点。上述我国中更新世人类演化模式的争议可望在相当程度上得以澄清。

测年技术前沿领域每项实质性的突破,都有可能带来新的冲击波。一些人类遗址的年代位置和基于此建立的人类演化模式可能需作相应调整。 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年法的理化基础坚实,测量技术可靠,独立于其他同位素测年法,不包含人为因素确定的参数和难以验证的假设前提,应用范围正值我国年代研究的薄弱环节,目标矿物为分布甚广的石英,因此有被广泛应用和取得重要科学成果的良好前景。当前,这一测年法的应用尚处起步阶段。相信在今后数年内,一如 U-Th 和  $^{14}\text{C}$  法对中、晚更新世相关学科的研究, $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  埋藏测年将为我国早期人类演化可信年代系列的建立做出重要贡献。

## 参考文献:

- [1] Wintle AG. Archaeologically-relevant dating techniques for the next century[J]. Journal of Archaeological Science, 1996, 23: 123-138.
- [2] Stringer CB. Dating the origin of modern humans[A]. In: Lewis CLE, Kneel SJ. The Age of the Earth: From 4004 BC to AD 2002[C]. Geological Society of London, Special Publication 190, 2001, 265-274.
- [3] Granger DE, Muzikar PF. Dating sediment burial with *in situ*-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations[J]. Earth and Planetary Science letters, 2001, 188: 269-281.
- [4] Lal D, Arnold JR. Tracing quartz through the environment. Proceedings of the Indian Academy of Science (Earth and Planetary Science), 1985, 94: 1-5.
- [5] Granger DE, Kirchner JW, Finkel RC. Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$  in cave-deposited alluvium[J]. Geology, 1997, 25: 107-110.
- [6] Partridge TC, Granger DE, Caffee MW *et al.* Lower Pliocene hominid remains from Sterkfontein[J]. Science, 2003, 300: 607-612.
- [7] Carbonell E, Bermudez de Castro JM, Parés JM *et al.* The first hominin of Europe. Nature, 2008, 452: 465-469.
- [8] Granger DE. A review of burial dating methods using  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$ [A]. in Sime L, Bourlès DL, Brown ET, eds. *In situ* produced cosmogenic nuclides and quantification of geological processes[C]. Geological Society of America Special Paper 415, 2006, 1-16.
- [9] 赵树森,裴静娴,郭士伦,等. 北京猿人遗址年代研究[A]. 见: 吴汝康,任美铎,朱显谟等编. 北京猿人遗址综合研究[C]. 北京: 科学出版社, 1985, 239-240.
- [10] Grün R, Huang PH, Wu XZ *et al.* ESR analysis of teeth from the palaeoanthropological site of Zhoukoudian, China[J]. Journal of Human Evolution, 1997, 32: 83-91.

- [11] 郭士伦, 刘顺生, 孙盛芬, 等. 北京猿人遗址第四层裂变径迹法年代测定[J]. 人类学学报, 1991, 10(1): 73-77.
- [12] 原思训, 陈铁梅, 高世君, 等. 周口店遗址骨化石铀系年代研究[J]. 人类学学报, 1991, 10(3): 189-193.
- [13] 沈冠军, 顾德隆, Gähle B. 等. 高精度热电离质谱铀系法测定北京猿人遗址年代初步结果[J]. 人类学学报, 1996, 15(3): 210-217.
- [14] Shen G, Ku TL, Cheng H *et al.* High-precision U-series dating of Locality 1 at Zhoukoudian, China[J]. Journal of Human Evolution, 2001, 47: 679-688.
- [15] Shen G, Gao X, Gao B *et al.* Age of Zhoukoudian *Homo erectus* determined with  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  burial dating[J]. Nature, 2009, 458: 198-200.
- [16] 郑绍华主编. 建始人遗址[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] 金昌柱, 郑龙亭, 董为, 等. 安徽繁昌早更新世人字洞古人类活动遗址及其哺乳动物群[J]. 人类学学报, 2000, 19(3): 184-198.
- [18] 吴新智. 20 世纪的中国人类古生物研究与展望[J]. 人类学学报, 1999, 18: 165-175.
- [19] Rightmire GP. Human evolution in the Middle Pleistocene: the role of *Homo heidelbergensis* [J]. Evolutionary Anthropology, 1998, 6: 218-227.
- [20] Clark JD, Heinzelin J de, Schick KD *et al.* African *Homo erectus*: old radiometric ages and young Oldowan assemblages in the Middle Awash Valley, Ethiopia[J]. Science, 1994, 264: 1907-1910.
- [21] 沈冠军. 洞穴地点骨化石铀系年龄可信度的讨论[J]. 第四纪研究, 2007, 27(4): 539-545.
- [22] Shen G, Cheng H, Edwards RL. Mass spectrometric U-series dating of New Cave at Zhoukoudian, China[J]. Journal of Archaeological Science, 2004, 31: 337-342.
- [23] Shen G, Gao X, Zhao JX *et al.* U-series dating of Locality 15 at Zhoukoudian, China: implications for hominid evolution[J]. Quaternary Research, 2004, 62(2): 208-213.

## $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ Burial Dating and Its Potential in Dating Early Hominid Sites in China

SHEN Guan-jun<sup>1</sup>, SHAO Qing-feng<sup>1</sup>, Darryl E. GRANGER<sup>2</sup>

(1. College of Geographic Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046;

2. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, IN 47907-1397, USA)

**Abstract:** This paper introduces the principles of a recently established dating method based on the radioactive decay of  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$ . These two nuclides are produced *in situ* in quartz at a known atomic ratio of about 6.8 : 1 by secondary cosmic ray particles that penetrate rocks near the ground surface. Their concentrations depend on the mineral's exposure time to cosmic radiation, which in turn depends on the erosion rate of the host rock. If quartz grains, after a long period of exposure near the surface, are suddenly shielded from cosmic rays by being washed into a cave or buried beneath sediment that is at least 10 meters thick, then the production of cosmogenic nuclides drastically slows and the inherited radionuclides decay exponentially over time. Because  $^{26}\text{Al}$  decays approximately twice as fast as  $^{10}\text{Be}$ , the  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  ratio also decreases exponentially over time with an effective half-life of 1.52Ma. This technique offers a means to date burial events in the range of 0.3—5Ma.

One of the first applications of the burial dating in China is to Zhoukoudian Locality 1, chosen for its great importance in paleoanthropology. The timescale of this site has long been studied, but has

remained debated due to the lack of suitable dating methods. Although a range of 230—500 ka has been commonly accepted, previous studies based on mass spectrometric U-series dating of speleothem calcite indicated much older dates of 400ka for the upper sediments and 600ka for the middle and lower parts of Layer 5, and suggested that early members of the Peking Man family could range up to 800ka. The availability of a new dating method offers an opportunity to resolve this controversy by directly dating quartz grains and quartzite artefacts from the lower fossiliferous sediments. Six meaningful results for samples from Layers 7—10 give a weighted mean of  $770 \pm 80\text{ka}$ , rederring strong support to an earlier and longer human presence at the site than once estimated.

As for all the dating methods based on the decay of radioactive isotopes, some implicit prerequisites have to be introduced for the application of  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  burial dating, the most important one being the “simple steady-state erosion model” of quartz minerals. Besides, we meet with difficulties in finding coarse quartz grains at quite a number of cave sites in southern China and in low initial cosmogenic nuclides due to high erosion rates. In spite of these,  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  burial dating is a radioisotopic method well-founded in physics and chemistry. It is independent of other dating methods and its timescale fills a “blank period” in radiometric dating in China. Moreover, this method should be widely applicable because it requires only quartz, a mineral that is often available at hominid sites. It is foreseeable that in the coming years this dating method will contribute substantially to the establishment of a reliable timescale for early hominid evolution in China.

**Key words:** Cosmogenic nuclides; Quartz; Burial dating; Early hominid sites