²⁶Al/¹⁰Be 等时线埋藏测年法基本原理与应用简介

孙 $\mathbf{D}^{1,3}$ 沈冠军² 赖忠平¹

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008;

2. 南京师范大学地理科学学院 江苏 南京 210097;

3. 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要:介绍了²⁶ Al/¹⁰ Be 等时线埋藏测年法的基本原理及其主要应用范围。将应被同时埋藏的一组石英矿 物样的²⁶ Al – ¹⁰ Be 浓度拟合成等时线,从其斜率解得样品的埋藏年代。在如下情况下该法可克服未知参数 多于制约方程的困难:1)冰碛物 – 古土壤序列中古土壤形成年代的研究,以规避继承核素(inherited nuclide)的干扰;2)因样品埋藏不够深引起的后期生成核素的干扰。此外,依据等时线拟合结果可判断样品是 否符合简单恒态侵蚀模式。等时线法的引入,拓宽了埋藏测年的应用范围,并为埋藏测年数据可信度提供 了一种有效的验证手段。

关键词:²⁶Al/¹⁰Be 埋藏测年;等时线;继承核素;浓度剖面模型

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 1008 - 858X(2012) 02 - 0066 - 07

1 前 言

²⁶ Al/¹⁰ Be 埋藏测年法是近年来在理化和 地球科学界面上发展出的测年新技术,其理论 模型最早由 Lal 等^[1]在 1985 年提出,第一个实 验程序由 Granger 等^[2]在 1997 年建立。该法 有效测年范围 0.3~5 Ma,样品为分布广泛的 石英,自建立以来的十多年中,已在地貌演 化^[3-4]、早期人类遗址年代^[5-7]确定等研究中 获得了广泛应用。

近地表矿物受次级宇宙射线轰击,内部可 生成多种放射性核素,此为原地宇生核素²⁶Al 和¹⁰Be为其中较重要的二种。在高纬度海平面 每克石英砂每年生成大约30个²⁶Al和4.4个 ¹⁰Be原子,尽管生成速率受海拔高度、地磁纬度 等多项参数影响,但二者之比(~6.75^[8],因测 定¹⁰ Be 半衰期的误差,此值曾被定为 6.0~ 6.8^[9-10])基本不变^[11-21]。当矿物较长时间暴 露于地表后,被流水冲入洞穴或被快速(相对 于²⁶ Al-¹⁰ Be 半衰期而言)埋入地层深处,宇宙射 线被十多米以至更厚的上覆堆积屏蔽,宇生核 素的生成几近停止,暴露时积累的²⁶ Al 和¹⁰ Be 随时间的流逝指数衰减。由于²⁶ Al 较¹⁰ Be 衰变 快约一倍,二者浓度比亦从初始值依时间指数 规律下降,表观半衰期为~1.48 Ma,由此可推 溯埋藏事件的年代。设 t_b 为埋藏时间, $N_{Al}(t_b)$ 和 $N_{Be}(t_b)$ 分别为现今测量的²⁶ Al 和¹⁰ Be 的浓 度(atoms/g), $N_{Al}(0)$ 和 $N_{Be}(0)$ 分别为刚埋藏 时这二个核素的浓度, $\lambda_{Al}(0.967 \times 10^{-6}
m yr^{-1})$ 和 $\lambda_{Be}(0.510 \times 10^{-6}
m yr^{-1})$ 分别为²⁶ Al 和¹⁰ Be 的 衰变常数,则有:

$$N_{\rm AI}(t_b) = N_{\rm AI}(0) e^{-\lambda_{\rm AI} t_b} , \qquad (1)$$

$$N_{\rm Be}(t_b) = N_{\rm Be}(0) e^{-\lambda_{\rm Be} t_b} \,. \tag{2}$$

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40873042)

收稿日期: 2012-01-04;修回日期: 2012-03-02

作者简介: 孙 政(1982 –), 男, 硕士研究生,主要研究方向为第四纪年代学。E – mail: zhengsun13@ yahoo. cn。 通信作者: 沈冠军。E – mail: gjshen@ njnu. edu. on。

将两式相除,可解得埋藏年龄t_b为:

$$t_b = \frac{-\ln(R_M/R_{init})}{\lambda_M - \lambda_{R_0}}$$
(3)

方程(3) 中 $R_M = N_{Al}(t_b) / N_{Be}(t_b)$,为现今测量 的²⁶ Al/¹⁰ Be; $R_{init} = N_{Al}(0) / N_{Be}(0)$,即刚埋藏时 这二个核素的浓度比,此值与石英矿物在地表 暴露时间的长短相关,而暴露时间为当时当地 地表侵蚀速率 ε (cm/yr)的函数,当暴露时间相 对于²⁶ Al 和¹⁰ Be 半衰期短得多、这二个核素衰 变可忽略时 R_{init} 等于二者生成率之比。

同其它基于放射性衰变和平衡的测年方法 一样,²⁶Al/¹⁰Be 埋藏测年法亦需引入多个假设 前提,年代结果可信与否,取决于样品在何种程 度上满足这些假设前提。上述方程组的成立基 于二个重要假设前提:1) "简单恒态侵蚀模式" (simple steady-state erosion model),即石英矿物 在过去的~10 Ma 内只经历一次暴露 – 埋藏事 件^[11];2) 埋深足以定量屏蔽宇宙射线,以使后 期生成的宇生核素可忽略。若样品满足这二个 前提,则方程组中只 R_{init} (或 ε)和 t_b 未知,测 得²⁶Al和¹⁰Be 浓度后,通过迭代计算可解得这 二个未知数。核素浓度、地表侵蚀速率和埋藏 时间三者间的函数关系也可用²⁶Al/¹⁰Be-¹⁰Be 二维图表示^[10-11]。

但不是所有的样品都能满足上述二个假设 前提。有些样品经历了复杂的暴露 - 埋藏史, 也有些样品埋藏深度不足以定量屏蔽宇宙射 线。这两种情况下由于未知参数的增多,而制 约方程不能相应增加,仅据方程(3)便难以给 出可信的年代结果,这在很大程度上限制了埋 藏测年法的应用范围。

由于假设前提是否得到满足的不确定性, 埋藏测年法的可信度常受到质疑。如该法应用 于南非著名古人类遗址 Sterkfontein 的结果^[5], 近年来受到 U-Pb 法^[13]和古地磁法^[14]的挑战。 周口店第1地点的²⁶ Al/¹⁰ Be 埋藏测年数据^[7] 是否可信,亦倍受争议^[15-16]。为此我们迫切需 要能够拓展埋藏测年应用范围和揭示其数据可 信度的方法。

等时线法(isochron method) 是同位素年代 学研究常用的一种重要方法,在 Rb-Sr、Sm-Nd、 U-Th、U-Pb、K-Ar(Ar-Ar) 等体系中得到了广泛 应用^[17-19]。Balco 等在研究美国 Missouri 中部 发育于冰碛物上部古土壤的埋藏年代时,成功 地将该法引入埋藏测年^[20]。本文将介绍等时 线埋藏测年的基本原理,并探讨其应用范围。

2 ²⁶Al/¹⁰Be 等时线埋藏测年法的 基本原理与应用

如前所述,埋藏测年最重要的假设前提之 一为"简单恒态侵蚀模式"。Granger 等在有较 多数据积累的基础上,得出了大多数石英矿物 适于作埋藏测年的结论。他们为此援引了整个 流域面积流失的泥沙远多干河床沉积物作为论 据^[2]。在采集样品时,详尽的地质地貌考察可 在一定程度上判断沉积物的埋藏-暴露史 如 河流上游没有沉积盆地 则该地石英矿物暴露 史简单的可能性大。但这些证据是间接的、大 范围的。由于地质过程错综复杂,基于大量数 据统计得出的结论不一定适用于某些特殊情 况。如美国中北部冰期和间冰期沉积物由更老 的冰碛物经侵蚀、搬运后再沉积形成 经历过多 次暴露 - 埋藏的循环,含未知浓度的继承核素 (inherited nuclide)^[21]。又如周口店第1地点 第8~9层的4件石英质石制品中3件给出了 在误差范围内一致的年代结果,可作为它们符 合埋藏测年假设前提的证据;但另一件给出了 大得多的年代结果,表明其暴露-埋藏史并不 简单^[7]。由于继承核素已经过较长时间的衰 变,剩下的²⁶Al和¹⁰Be的比值应小于R_{init},若样 品不仅含最后一次暴露期间生成的²⁶ Al 和 ¹⁰Be 还有之前暴露积累继承核素的残存,这种 情况下若仍沿用方程(3),所得结果将老于样 品的真实年龄。这构成了埋藏测年法的最大 "软肋"。

埋藏测年的另一个重要假设前提是样品应 有足够的埋深。由于宇生核素的生成率随深度 指数下降^[11-12 22-23],因此在较大埋深处(如 >15 m),通常可以忽略后期生成的核素。但 是如河流阶地那样的研究对象,埋藏深度常不 足10 m,后期生成的核素不可忽略。应可根据 宇生核素生成随深度的变化规律,通过计算扣 除这部分核素。或可用浓度剖面模型(depth profile) 作校正,该模型通过不同深度多个样品 的测试 将所获²⁶ Al 和¹⁰ Be 深度分布曲线外推 至埋深足够大处^[24-25]。但实际上,沉积物累 积、地表侵蚀、化学风化和土壤生成等过程使上 覆堆积的厚度和密度发生变化,难以确定这二 项参数在埋藏时间内的变化规律,这使埋深不 足的"修正"产生很大误差,浓度剖面模型的应 用因此受到限制^[26-27]。

等时线法实质上是利用已有的地学知识, 通过一组相互关联样品的测试,得出规律,以在 一定程度上克服年代计算中未知数多而制约方 程不足的困难。该法应用条件可概括如下:1) 构成等时线的一组样品须具有相同的年龄;2) 等时线纵、横坐标显示的参数在各样品中应有 较大差别;3)体系形成后应一直处于封闭状 态。下面将分别介绍其在规避继承核素和后期 生成核素、检验埋藏年龄可信度等3个方面的 应用。

2.1 存在继承核素的情况下等时线的推导与 应用

若一组取自不同深度而又同时埋藏的样品,各样品所含继承核素浓度高度一致,埋藏后上覆堆积足够厚以致可忽略后期生成的核素。 设 $N_{A1 inh}$ 和 $N_{Be inh}分别为继承核素²⁶ A1 和¹⁰ Be 的浓度 <math>P_{A1}(0)$ 和 $P_{Be}(0)$ 分别为地表²⁶ A1 和¹⁰ Be 的生成率(atoms • g⁻¹ • yr⁻¹),暴露时间相对于²⁶ A1 和¹⁰ Be 半衰期短得多,即 $R_{init} = 6.75$, ρ(g/cm³)为堆积物密度, Λ (g/cm²)为宇宙射线 衰减长度,其定义为每穿过一个 Λ ,宇宙射线通量衰减为原有的 1/e^[9] t_e 为暴露时间,则核素 浓度与埋藏时间关系如下^[20]:

$$N_{\rm AI}(t_b) = [N_{\rm AI \ inh} + P_{\rm AI}(0) t_e e^{-\rho z/A}] e^{-\lambda_{\rm AI} t_b},$$

$$(4)$$

$$N_{\rm Be}(t_b) = [N_{\rm Be \ inh} + P_{\rm Be}(0) t_e e^{-\rho z/A}] e^{-\lambda_{\rm Be} t_b},$$

$$(5)$$

为消去 t_e 和样品深度 z(cm),将由方程(5)得 出的 $t_e e^{-\rho z/A}$ 代入方程(4)中可得:

$$N_{\rm Al}(t_b) = R_0 e^{-(\lambda_{\rm Al} - \lambda_{\rm Be}) t_b} N_{\rm Be}(t_b)$$

+ $(e^{-\lambda_{\rm Al} t_b} N_{\rm Al \ inh} - R_0 e^{-\lambda_{\rm Al} t_b} N_{\rm Be \ inh})$
(6)

以 $N_{AI}(t_b)$ 为纵坐标 $N_{Be}(t_b)$ 为横坐标 ,上述一 组样品的²⁶ AI 和¹⁰ Be 浓度关系应构成一条等时 线。其斜率 K 为 $R_0 e^{-(\lambda_{AI}-\lambda_{Be})t_b}$, $R_0 = P_{AI}(0) / P_{Be}(0)$ 。由于 $R_0(6.75)$ 和衰变常数都已知 ,故 K 仅与埋藏时间 t_b 相关 ,根据测得的 K 值即可 求得 t_b :

$$t_b = \frac{-\ln(K/R_0)}{\lambda_{\rm Al} - \lambda_{\rm Be}} \,. \tag{7}$$

需要指出的是 t_b 在方程(7) 与在方程(3) 中虽然形式上一致 ,但含义有差别。方程(3) 中 R_M 为样品现今的²⁶ Al/¹⁰ Be。在存在未知量 继承核素的情况下 ,我们无法根据单个样品的 R_M 来求解 t_b ,方程(7) 中的 K 是一组样品的 R_M 用最小二乘法拟合的结果。



图 1 存在继承核素的情况下一组样品等时线随埋 藏时间的变化^[20]

Fig. 1 Isochrons with burial time for a set of samples when inherited nuclides exist

图1给出了满足上述假设前提一组样品的 等时线。在埋藏初始时它们的²⁶ Al-¹⁰ Be 浓度应 落在一条斜率为 R_0 ,纵轴截距为($N_{Al jnh}$ - $R_0N_{Be jnh}$)的等时线上,黑点代表暴露期地表及 其下不同深度的样品,空心圆圈代表继承核素。 对应于不同的埋藏时间,²⁶ Al-¹⁰ Be 构成了不同 的等时线(图1中实线),斜率随时间增大而变 小。因²⁶ Al 较¹⁰ Be 衰变得更快,故 $N_{Al jnh}$ 应小于 $R_0N_{Be jnh}$,方程(6)在纵轴上的截距(²⁶ Al 浓度) 应为负值,即各时段等时线均在过原点且斜率 为 R_0 直线(图1中虚线)的右下方区域。若有 多组符合上述假设的样品,由于继承核素浓度 不同 在经过相同的埋藏时间后 A组样品等时 线的斜率相同 但在纵轴上的截距不同。

等时线法用于规避继承核素时,要求一组 样品含相同浓度的继承核素。经冰川长距离搬 运后沉积冰碛物中的石英砂粒,应经历了混合 均匀的过程。在间冰期暴露于地表的冰碛物风 化为土壤,之后又被新一期冰碛物覆盖,取自如 是古土壤剖面的石英砂样无论上下应含相同浓 度的继承核素,深度差异可保证样品含不同浓 度的继承核素,深度差异可保证样品含不同浓 度的²⁶ Al 和¹⁰ Be,从而满足等时线应用的第二 个前提条件。在实际应用中,还要考虑侵蚀速 率或暴露时间对 *R_{init}*值的影响^[20]。目前该法 应用仅限于研究冰碛物 – 古土壤序列中古土壤 的埋藏年代。Balco等所报道的是目前唯一正 式发表的数据。

2.2 存在后期生成核素的情况下等时线的推 导与应用

在有后期生成核素的情况下,若存在一组 取自同一层位即具有相同埋藏年龄的样品,各 样品后期生成的核素相同,且物源区地表侵蚀 速率足够大,即有 $\rho \varepsilon / \Lambda \gg \lambda$ 则样品中现今测得 的²⁶ Al 和¹⁰ Be 浓度为^[11 20]:

$$N_{\rm Al}(t_b) = \frac{P_{\rm Al}(0) \Lambda}{\rho \varepsilon} e^{-\lambda_{\rm Al} t_b} + N_{\rm Al \ \rho b} , \qquad (8)$$

$$N_{\rm Be}(t_b) = \frac{P_{\rm Be}(0) \Lambda}{\rho \varepsilon} e^{-\lambda_{\rm Be} t_b} + N_{\rm Be, pb} \, \circ \qquad (9)$$

其中 $N_{Al,pb}$ 和 $N_{Be,pb}$ 分别为埋藏后²⁶ Al 和¹⁰ Be 的 生成量。将由方程(9) 得出的 $\Lambda/\rho\varepsilon$ 代入方程 (8) 中可得:

$$N_{\rm Al}(t_b) = R_0 e^{-(\lambda_{\rm Al} - \lambda_{\rm Be}) t_b} N_{\rm Be}(t_b) - R_0 e^{-(\lambda_{\rm Al} - \lambda_{\rm Be}) t_b} N_{\rm Be \ ab} + N_{\rm Al \ ab} \circ (10)$$

以 $N_{Al}(t_b)$ 为纵坐标 $N_{Be}(t_b)$ 为横坐标,该组样 品的²⁶ Al 和¹⁰ Be 浓度关系满足直线方程(10), 故可构成等时线,斜率为 $R_0e^{-(\lambda_{Al}-\lambda_{Be})t_b}$,与 式(6) 中相同 t_b 仍可由方程(7) 来表示。等时 线斜率(K) 随埋藏时间的变化与图 1 相同。不 同的是,由于在埋藏初始不存在后期生成核素, 因此 $t_b = 0$ 时等时线在纵坐标上的截距(²⁶ Al 浓度) 为0 斜率为 $P_{Al}(0) / P_{Be}(0)$ 此即图 1 中 的虚线; 埋藏一定时间后,此截距即为正值,各 等时线均应位于上述图1虚线的左上方。

方程(10)要求一组样品后期生成的核素 相同。取自同一层位的石英砂样品应该能保证 后期生成核素一致,但各样品在暴露期积累 的²⁶Al和¹⁰Be浓度应较为接近,因此一般不适 于用来拟合等时线。已有证据表明,由于不同 物源区的核素生成率以及表面侵蚀速率存在差 异,同一层位砾石间核素浓度差别较大;而如果 砾石取自同一层位,或者其深度分布范围相对 于它们的整体埋深来说很小,则可以近似认为 各砾石的后期生成核素彼此相同^[20],这就为构 建等时线提供了保证。因此需在同一层位采集 5~10个砾石样品,经测量分析后拟合出等时 线,进而根据其斜率求得埋藏年龄。

尽管人们在数年前就看好等时线法克服样 品埋深不足的可能性^[20],但由于该法工作量 大、实验周期长,至今尚未有相关论文见刊。现 唯一可援引的为 Erlanger 的硕士论文^[28],其在 南非 Sundays River 的 Canal 阶地采集了7个埋 深7 m的砾石样品,剔除一个被认为是来自较 老阶地的样品后,对其余6个样品²⁶ Al 和¹⁰ Be 浓度进行线性拟合,所得等时线表明样品含显 量后期生成的核素,其斜率对应的埋藏年龄为 0.65 ±0.06 Ma。

2.3 等时线法检验埋藏年龄可信度

等时线法的一个显著特点在于它的可检验 性^[20]。若一组样品的²⁶ Al 和¹⁰ Be 浓度不能很 好地拟合成等时线,则说明至少部分样品不满 足应用该法的假设前提^[29]。

若具有相同埋藏年龄的一组样品,满足简 单恒态侵蚀模式,且后期生成的核素可以忽略, 即满足方程(1)和方程(2),二式相除,可得²⁶Al 和¹⁰Be 浓度关系如下:

$$N_{\rm Al}(t_b) = R_{init} e^{-(\lambda_{\rm Al} - \lambda_{\rm Be})t_b} N_{\rm Be}(t_b) \circ \qquad (11)$$

仍以 $N_{AI}(t_b)$ 为纵坐标,以 $N_{Be}(t_b)$ 为横坐标,上述一组样品的²⁶ AI 和¹⁰ Be 浓度关系依方程(11)构成等时线,其截距应为0,斜率为 $R_{init}e^{-(\lambda_{AI}-\lambda_{Be})t_b}$ 若 $R_{init} = R_0$ 则其斜率表达式与方程(6)和(10)中的斜率相同。图2给出了随着埋藏时间增大这样一组样品等时线的变化,与图1最明显的区别是,由于等时线过原点,因

此如果有多组埋藏时间相同的样品,它们应构 成同一条等时线,而不是像图1那样对应于不 同的截距,即不同的继承核素浓度,同一埋藏 时间的多组样品构成多条等时线。如同上节讨 论的那样,石英砂因样品间²⁶AI和¹⁰Be浓度差 异一般较小而一般不适于作等时线研究,故应 尽可能从同一层位采集多个石英质砾石作样 品。



图 2 简单恒态侵蚀模式且忽略后期生成核素的情况下 ,等时线随埋藏时间的变化^[20,30]

Fig. 2 isochron lines with different burial time under the condition of simple steady-state erosion model' and ignoring post-burial productions

如果我们在埋深足够大的同一层位取一组 砾石样品 对其²⁶Al 和¹⁰Be 值进行拟合 若等时 线在误差范围内通过原点 则表明样品符合假 设前提 且此时据方程(3) 求得的单个样品的 埋藏年龄应与等时线年龄在误差范围内一致。 反之 则表明假设前提未得到满足 ,据方程(3) 获得的年龄不可信。如 Kong 等对有相近 ²⁶Al/¹⁰Be比值的4个湖泊沉积物样品和2个河 流砾石的²⁶ Al-¹⁰ Be 值进行线性拟合^[30] 结果亦 在图2中给出。因这一等时线在误差范围内通 过原点 应可得出该组样品不含显量继承核素 , 后期生成核素亦可忽略的结论。所得等时线斜 率为 3.47 ± 0.37 据此求得的埋藏年龄为 1.46 ±0.24 Ma,与单个样品给出的年龄(1.34~ 1.58 Ma) 在误差范围内吻合。这是等时线法 运用于埋藏测年数据可信度检验的成功先例, 同时也表明埋藏测年的结果并非像某些人所认 为的那样悲观,其可信度是能够得到验证的。

3 总结与展望

综上所述,当冰碛物 - 古土壤序列中的古 土壤样品存在相同浓度的继承核素时,应用等 时线法可以规避其干扰。当样品埋深不足以定 量屏蔽宇宙射线时,该法可在一定程度上克服 后期生成核素的干扰。此外,依据等时线的拟 合结果以及等时线获得的年龄与单个样品年龄 间的对比,可判断所引入的假设前提是否得到 满足,从而验证埋藏年龄的可信度。

该法优点在于埋藏年龄的求解仅取决于等 时线的斜率,而无需知道继承核素和后期生成 核素的确切浓度;其可检验性保证了构建等时 线时可以将与等时线显著偏离的样品剔除掉, 然后重新采样,直至样品数量足够多和拟合出 足够精确的等时线为止,这是该法的另一个优 点。该法的缺点在于样品量较大,为了构建等 时线,需要依具体情况采集、分析多个样品,对 数据精度的要求越高,所需样品的数量就越多。 此外,该法一般只适用于同一层位、相近探方可 获得多个石英质砾石的地点。

²⁶ Al/¹⁰ Be 等时线埋藏测年法的提出,拓展 了埋藏测年的应用范围,并为埋藏测年数据可 信度提供了一种有效的验证手段。近年来 ²¹ Ne^{_26} Al^{_10} Be 三核素埋藏测年法也获得了迅速 发展,其应用范围已从高海拔、低侵蚀速率的地 区拓展至低海拔的地区^[3,8],从另一角度为揭 示样品埋藏史是否复杂提供了可能。可以预 期,宇生核素埋藏测年方法学的快速发展和广 泛应用,将引起上新世以来地质事件年代研究 革命性的重要进展。

参考文献:

- Lal D ,Arnole J R. Tracing quartz through the environment
 [J]. Journal of Earth System Science ,1985 , 94(1): 1 –
 5.
- [2] Granger D E ,Kirchner J W ,Finkel R C. Quaternary downcutting rate of the New River ,Virginia , measured from differential decay of cosmogenic ²⁶ Al and ¹⁰ Be in cave-deposited alluvium [J]. Geology , 1997 , 25(2): 107 – 110.
- [3] Davis M, Matmon A, Fink D et al. Dating Pliocene lacustrine sediments in the central Jordan Valley, Israel-Implica-

tions for cosmogenic burial dating [J]. Earth and Planetary Science Letters , 2011 , 305(3-4): 317-327.

- [4] Braucher R ,Bourlès D ,Brown E *et al.* Application of in situ-produced cosmogenic ¹⁰Be and ²⁶Al to the study of lateritic soil development in tropical forest: Theory and examples from Cameroon and Gabon [J]. Chemical Geology , 2000 , 170(1-4): 95 - 111.
- [5] Partridge T ,Granger D ,Caffee M ,et al. Lower Pliocene hominid remains from Sterkfontein [J]. Science , 2003 , 300 (5619): 607.
- [6] Carbonell E ,Bermudez de Castro J M ,Parés J M ,et al. The first hominin of Europe [J]. Nature ,2008 , 452 (7186) : 465 – 470.
- [7] Shen G ,Gao X ,Gao B ,et al. Age of Zhoukoudian Homo erectus determined with ²⁶ Al/¹⁰ Be burial dating [J]. Nature , 2009 , 458: 198 – 200.
- [8] Balco G ,Shuster D L. ²⁶Al-¹⁰Be-²¹ Ne burial dating [J]. Earth and Planetary Science Letters ,2009 , 286 (3 - 4): 570 - 575.
- [9] Gosse J C ,Phillips F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application [J]. Quaternary Science Reviews , 2001 , 20(14): 1475 – 1560.
- [10] Stone J O. Air pressure and cosmogenic isotope production [J]. Journal of Geophysical Research 2000, 105 (B10): 23753 - 23759.
- [11] Granger D E ,Muzikar P F. Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory , techniques ,and limitations [J]. Earth and Planetary Science Letters , 2001 , 188: 269 – 281.
- [12] Brown E T ,Brook E J ,Raisbeck G *et al.* Effective attenuation lengths of cosmic rays producing ¹⁰Be and ²⁶Al in quartz: Implications for exposure age dating [J]. Geophysical Research Letters , 1992 , 19(4): 369 – 372.
- [13] Walker J ,Cliff R A ,Latham A G. U-Pb isotopic age of the StW 573 hominid from Sterkfontein , South Africa [J]. Science ,2006 ,314(5805):1592.
- [14] Herries A I R ,Shaw J ,Palaeomagnetic analysis of the Sterkfontein palaeocave deposits: Implications for the age of the hominin fossils and stone tool industries [J]. Journal of Human Evolution , 2011 , 60: 523 – 539.
- [15] 陈铁梅 周力平.周口店北京猿人遗址的年代综述兼评 该遗址的铝铍埋藏年龄[J].人类学学报 2009 28(3): 285-291.
- [16] 陈铁梅.北京猿人为何"变老"了? [J]. 百科知识 2009 (9):4-6.
- [17] 李波,陈江峰,郑永飞,等.安徽月山石英闪长岩氧同位 素分馏, Rb-Sr等时线定年与矿物蚀变之间的关系[J].

岩石学报 2004 20(005):1185-1192.

- [18] 李志昌,万建华,杜国民.萤石 Sm-Nd 等时线[J].地质 地球化学,1987,15(9):67-68.
- [19] 朱照宇,顾德隆,罗尚德,等. 青藏高原甜水海湖泊沉积
 物铀系等时线测年[J]. Chinese Science Bulletin. 2001,
 46(2): 163 167.
- [20] Balco G ,Rovey C W. An isochron method for cosmogenicnuclide dating of buried soils and sediments [J]. American Journal or Science, 2008, 308(10): 1083 – 1114.
- [21] Balco G ,Stone J O H ,Jennings C. Dating Plio-Pleistocene glacial sediments using the cosmic-ray-produced radionuclides ¹⁰Be and ²⁶Al [J]. American Journal of Science, 2005, 305 (1): 1-41.
- [22] Heisinger B , Lal D ,Jull A ,et al. Production oF selected cosmogenic radionuclides by muons: 2. Capture of negative muons [J]. Earth and Planetary Science Letters ,2002 ,200 (3-4): 357-369.
- [23] Lal D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104(2-4): 424-439.
- [24] Anderson R ,S ,Repka J L ,Dick G S. Explicit treatment of inheritance in dating depositional surfaces using in situ ¹⁰Be and ²⁶ Al[J]. Geology , 1996 , 24(1): 47 – 51.
- [25] Hancock G S ,Anderson R S ,Chadwick O A *et al.* Dating fluvial terraces with ¹⁰Be and ²⁶Al profiles: application to the Wind River, Wyoming [J]. Geomorphology, 1999, 27 (1-2): 41-60.
- [26] Braucher R ,Merchel S ,Borgomano J ,et al. Production of cosmogenic radionuclides at great depth: A multi element dpproach[J]. Earth and Planetary Science Letters , 2011 , 309: 1-9.
- [27] Heisinger B ,Lal O ,Jull A *et al.* Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: 1. Fast muons [J]. Earth and Planetary science Letters , 2002 , 200(3-4): 345 – 355.
- [28] Erlanger E D. Rock uplift, erosion, and tectonic uplift of South Africa determined with cosmogenic Aluminum-26 and Beryllium-10 [D]. West Lafayette: Purdue University, 2010.
- [29] 袁兆德,陈杰,张会平.宇宙成因核素埋藏年龄测定及 其在地球科学中的应用[J].地震地质,2012,33(2): 480-489.
- [30] Kong P ,Granger D E ,Wu F Y *et al.* Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of the Xigeda paleo-lake: Implications for evolution of the Middle Yangtze River[J]. Earth and Planetary Science Letters , 2009 , 278(1-2): 131 – 141.

Introduction to Basic Principles and Applications of Isochron ²⁶Al/¹⁰Be Burial Dating Method

SUN Zheng^{1,3}, SHEN Guan-jun², LAI Zhong-ping¹

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining \$10008, China;

2. College of Geographical Sciences, Nanjing Normal University Nanjing 210097 , China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing ,100039, China)

Abstract: This paper introduces the basic principles of isochron 26 Al/ 10 Be burial dating. The 26 Al- 10 Be concentrations of a set of coeval quartz samples may be grouped into a straight line by using least squares fitting. Then the samples' burial age can be calculated from the slope of the obtained isochron. In the following two cases , the isochron burial dating can address the issues where unknown parameters outnumber constraint equations: 1. the dating of paleosol formation in a sequence of intercalated tills and paleosols to circumvent the presence of unknown 26 Al/ 10 Be inherited from past exposure. 2. the dating of samples with posteriorly produced cosmogenic nuclides due to insufficient shielding. Besides , according to the result of linear fit , whether or not the samples conform to the "simple steady-state erosion model" can be verified. The establishment of isochron method broadens the application range of burial dating. Moreover , this approach can provide an effective means to check the reliability of burial ages. **Key words**: 26 Al/ 10 Be burial dating; Isochron; Inherited nuclide; Depth profile

(上接第58页)

Efficient Separation and Accurate Isotopic Determination of Lithium in Brine

MA Ru-ying^{1 2} ,HAN Feng-qing¹ , LUO Chong-guang^{1 2} ,YAN Jian-ping^{1 2} ,ZHANG Yan-xia^{1 2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008 China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100039 China)

Abstract: The significant relative mass difference between the two stable isotopes of lithium makes a great lithium isotopic fractionation in nature materials. Lithium isotopes , as a tracer , have been used to indicate the material source and formation mechanism of lithium deposit. At present ,the lithium isotope ratio was measured by thermal ionization mass spectrometry (TIMS) or the multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS). Both methods require the lithium completely separated from other elements. The adsorption method , in all the lithium extractive technique ,could produce higher recovery rate and minimize isotopic fractionation. This paper mainly introduced the progress of the separation and accurate isotopic determination of lithium in brine at home and abroad in recent years. **Key words**: Lithium; Brine; Lithium isotope ratio