

原地宇生核素 ^{26}Al 和 ^{10}Be 剖面定年 及其在早期人类遗址年代研究中的应用前景

高 斌, 赵志军

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046)

[摘要] 中、早更新世人类遗址年代的确定对于人类起源与演化的研究具有重要意义. 原地宇生核素 ^{26}Al 和 ^{10}Be 浓度剖面定年法可用来测定百万年尺度河流阶地沉积物的同位素年龄, 积极开展该法测年研究有望填补我国早期人类遗址如许家窑、郧县曲远河口等地点同位素地质年代研究的空白. 本文简述该法的基本原理并展望其应用前景.

[关键词] 原地宇生核素, 石英, ^{26}Al 和 ^{10}Be 剖面定年法, 早期人类遗址

[中图分类号] P597 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2008)03-0123-06

In-situ Cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be Depth Profile Method and Its Potentials for Dating Early Human Sites in China

Gao Bin Zhao Zhijun

(School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract The age determination of the early and middle Pleistocene human sites bears important implications for our understanding of the origin and evolution of early humans. In China, the key human sites such as Xujiayao site and Yunxian Man site, in most cases, lie in alluvium/fluvial deposits and so far have not been dated by radiometric geochronological method. With significant improvement of AMS technique, in situ produced cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be depth profile method can be used to date river terrace sediments over million-year time scale. Via this method, we expect to fulfill the radiometric "temporal gap" of some important human sites in China. This paper addresses the basic theory of the method and views its application potentials.

Key words in situ-produced cosmogenic nuclides; quartz; ^{26}Al and ^{10}Be depth profile method; early human sites

对研究人类起源和文化演化史而言, 可信的时间坐标是一项十分重要的参数. 从质谱 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 法测年上限 (500~600 ka) 至数百万年, 是我国年代学研究最薄弱的环节之一. 这一时段涵盖多个重要的人类演化事件, 相关人类化石和石器地点在我国多有发现, 但这些地点的年代结果主要基于地层古生物和磁性地层研究, 同位素地质年代的研究几为空白.

过去的 20 多年里, 第四纪测年技术取得重大进展. 如今性能最好的 AMS 能精确测定 10^6 个原子和丰度比为 10^{-14} 以至 10^{-16} 的同位素对^[1-4], 这使测定地表矿物中极微量宇宙射线成因的同位素 (简称为宇生核素) 成为可能.

宇生核素中的 ^{26}Al 和 ^{10}Be 半衰期分别为 0.71 和 1.34 M yr. 用这两种核素研究百万年尺度沉积物的年龄, 是近年来在理化科学和地球科学界面上产生的测年新技术之一. Lal^[5-6] 于 1991 年首先提出了用宇生核素测定堆积物埋藏年龄的可能. Anderson et al.^[7] 于 1996 年提出通过分析阶地表面层和下部两个样品中 ^{10}Be 和 ^{26}Al 的含量, 以测定河流阶地形成年龄. 2003 年, $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏测年成功应用于南非著名古人类洞穴遗址 Sterkfontein 的年代研究^[8], 结果为 $4.17 \pm 0.35 \text{ Ma}$. 大于原基于地层古生物和 ESR 测年得出的 $1.5 \text{ Ma} \sim 3.5 \text{ Ma}$. 随着 AMS 技术的不断改善以及对原地宇生核素产率的变化规律的深入了解, ^{10}Be 和

收稿日期: 2007-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (40073031)、美国 Wenner-Gren Foundation (Gr 6975) 资助项目.

通讯联系人: 高 斌, 博士, 研究方向: 第四纪年代学. E-mail: bxgaobin@sina.com

^{26}Al 的应用范围不断扩大, 已建立了多种应用模式^[9-12]. 其中原地宇生核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 浓度剖面测年法, 已广泛用于地表地质过程研究^[13-15], 如建立热带雨林红壤发育^[16], 黄土-古土壤年代序列^[17] 的尝试, 但针对位于河流阶地的古人类遗址的年代研究刚刚起步.

这一测年新技术有可能为诸多位于沉积阶地的中、早更新世人类遗址提供可信的年代依据, 并填补我国早期人类化石和石器地点同位素地质年代的空白. 本文将简介该法的基本原理, 并展望其应用前景.

1 ^{26}Al 和 ^{10}Be 的生成机制和 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 阶地剖面法测年原理

我们生活的地球始终受着宇宙射线的轰击. 初始宇宙射线 (primary cosmic radiation) 进入地球外圈的同温层时, 与大气物质发生核反应, 生成 ^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 等一系列宇生核素, 同时产生次级宇宙射线 (secondary cosmic radiation), 主要由中子、质子和介子组成. 其中能量较高的中子, 负 μ 介子和快速 μ 介子能到达地表, 并与地表矿物发生核反应, 也生成 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{10}Be 等一系列宇生核素, 人们将此称为原地宇生核素 (in situ cosmogenic nuclides), 以有别于大气中产生的宇生核素.

在诸多矿物中, 富含石英的硅质矿物是应用 ^{26}Al 和 ^{10}Be 测年的理想材料^[18]. 这是因为: ①石英化学组成为相当纯净的 SiO_2 , 同时具有生成 ^{26}Al 和 ^{10}Be 的靶核, 可认为二者产生和积累于相同的地质背景下; ②石英中包括 ^{27}Al 在内的杂质含量低, 较高的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 丰度比有利于 AMS 对 ^{26}Al 的精确测量; ③石英的化学性质稳定、结构致密, 大气中产生的 ^{26}Al 和 ^{10}Be 难以渗入晶体造成污染; ④石英在自然界分布广泛, 样品容易采集; ⑤石英中 ^{26}Al 和 ^{10}Be 原地产率已有较好的参考值^[19-20]. 由于上述优越性, 至今利用 ^{26}Al 和 ^{10}Be 测年几乎只以这类物质为样品. 以下我们也只讨论地表石英矿物中的这两种核素的生成及其在河流阶地剖面测年中的应用.

1.1 ^{26}Al 和 ^{10}Be 的生成机制

石英砂中的 ^{26}Al 和 ^{10}Be 主要有两种生成方式. 一种是次级宇宙射线里的高能中子与靶核 (^{16}O 、 ^{28}Si 等) 发生散裂反应, 如: $^{16}\text{O}(n, 4p3n)^{10}\text{Be}$ 即中子轰击 ^{16}O 原子核, 生成 ^{10}Be 同时放出 4 个质子和 3 个中子. 另一种是负 μ 介子和快速 μ 介子引发的核反应, 如: $^{28}\text{Si}(\mu^-, 2n)^{26}\text{Al}$ 即 ^{28}Si 原子核俘获了落入核外电子层中的负 μ 介子, 生成 ^{26}Al 同时发射出 2 个中子等.

到达地表的次级宇宙射线由于不断与物质发生核反应, 其能量快速衰减, ^{26}Al 和 ^{10}Be 的产生速率随深度指数递减^[6], 可以表示为:

$$P_n(z) = P_n(0) e^{-z/\Lambda}, \quad (1)$$

式中 $P_n(z)$ 表示深度为 z (cm) 的生成速率, ρ 为岩石的密度 (g/cm^3), Λ 为宇宙射线衰减长度 (attenuation length, g/cm^2), 其定义为每穿过一个 Λ 入射宇宙射线将衰减至原有的 $1/e$ ($\sim 37\%$). μ 介子的宇宙射线衰减长度比中子高一个量级, 约为 $1500 \text{ g}/\text{cm}^2$, 因此可以穿透更厚的岩石. 在地表之下约 3 m 处, 中子和 μ 介子的贡献大致相等, 其上中子散裂反应占主导地位, 其下则 μ 介子所占份额渐居优势.

1.2 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 剖面定年法原理

如果地表石英砂被冲入洞穴或被快速埋藏, 上覆 10 m 以上的岩层, 则宇宙射线被充分屏蔽, ^{26}Al 和 ^{10}Be 停止生成. 由于放射性衰变, 在暴露过程中所积累的浓度将按指数形式衰减. 在此情况下, 依据样品中现存 ^{10}Be 含量和 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 就可以在 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ — ^{10}Be 的二维图上直观地求得埋藏年龄^[9]. 这种情况常适合于洞穴地点的埋藏堆积.

对于冲洪积相沉积地层如河流阶地, 堆积往往直接暴露于宇宙射线, 没有足够厚的覆被层以屏蔽负 μ 介子和快速 μ 介子穿透效应, 因此不能忽略二者对石英矿物中 ^{26}Al 和 ^{10}Be 浓度累积的贡献. 在此情形下, 样品中宇生核素总浓度 N_{tot} 由两部分组成: 沉积过程发生前矿物中继承的宇生核素 N_{in} (inheritance N), 以及沉积后生成的宇生核素 (N_{dep}) (N at some depth)^[7].

河流阶地沉积物中的宇生核素浓度可表示为:

$$N_{\text{tot}} = N_{\text{in}} e^{-\lambda t} + N_{\text{dep}}, \quad (2)$$

对于具有连续稳定表面侵蚀速率的河流阶地, 堆积物中宇生核素的产生和衰变可表示为:

$$N_{\text{tot}}(z, t) = N_{\text{in}} e^{-\lambda t} + \int_0^t P_n(z + \rho \epsilon t') + P_{\mu}(z + \rho \epsilon t') + P_{\mu}^{\text{fast}}(z + \rho \epsilon t') J e^{-\lambda t'} dt', \quad (3)$$

其中 N 为¹⁰Be或²⁶Al的浓度, N_{in} 为核素继承量, t 为沉积以来的时间, ε 为侵蚀速率, λ 为核素衰变常数, z 为埋藏深度, ρ 为覆盖层密度, P_{ns} , P_{μ}^{-} 和 P_{μ}^{fast} 分别代表核散裂变反应,负 μ 介子捕获和快 μ 介子反应引起的核素产率.由于大气层和地磁场的屏蔽,核素产率应根据海拔和纬度的不同进行校正^[6, 21-23].

核素继承量 N_{in} 包含堆积组成矿物在沉积发生前,从物源区出露和传输过程中累积的量.阶地堆积物如卵砾、河砂等可能经历了不同的出露过程或传输距离.因而 N_{in} 具有很大的随机性,可由组成矿物粒径大小,物源区不同,岩性不同,以及传输途径的不同等引起,其大小难以通过对单个样品的²⁶Al和¹⁰Be分析确定^[7, 24].现在通过混合制样法和沿剖面多点采样的技术^[7, 25, 26]可以建立核素浓度剖面.比如在堆积剖面不同的深度,采集石英岩碎屑或石英砂颗粒作为样品.从组成样品的每块碎屑中提取等量的石英混合,得到样品的平均核素浓度 N_{ob} ,使样品中核素浓度更具代表性.通过不同深度的多个样品测量,确定²⁶Al和¹⁰Be浓度随深度在阶地堆积剖面上的分布曲线,再通过最小二乘法原理进行线性回归处理,得到最优拟合曲线,即平均浓度剖面曲线.最后引入数据相关性检验,判断拟合曲线是否有意义.相关性良好的剖面曲线就可以用来确定方程(3)中各项未知数,包括阶地年龄 t .

图1为阶地堆积宇宙生核素平均浓度剖面示意图^[24, 29].图中点划线代表沉积之初样品核素平均继承值.尽管每个样品中不同石英碎屑颗粒的核素继承值不同,但如图中正态分布曲线所示,采用混合制样后,整个剖面中各样品平均核素继承值应是一致的.图中实线示意沉积形成后经过时间 t 后,阶地堆积平均核素浓度的剖面曲线.由于核素产率随深度 z 呈现指数规律递减,所以核素平均浓度曲线也应呈指数曲线规律.

Granger^[11, 27]等认为采用核素对比值如²⁶Al/¹⁰Be对沉积物测年更为有利.一方面,由于石英矿物中²⁶Al和¹⁰Be的产生速率之比基本不受地磁纬度、海拔高度、太阳活动周期、埋藏深度和时间等因素的影响,因而可以最大限度地简化产生速率随时间和空间不断变化的难题;另一方面,²⁶Al/¹⁰Be的初始继承值大小可以通过对物源区表面矿物中核素浓度的测定加以估计.

应指出的是,与其它基于放射性同位素衰变和平衡的测年法一样,²⁶Al和¹⁰Be剖面测年法也引入了多个假设前提.结果可信与否,取决于被测样品在何种程度上满足这些前提.研究中需注意的有:①详尽的地质地貌调研,用以判断取样地点沉积物的埋藏-暴露史.如果河流阶地现存黄土堆积覆盖或者存有曾被其覆盖的迹象,或曾被年轻的冰碛物或其沉积物所覆盖,则不能排除阶地堆积具有复杂的埋藏-暴露史的可能性.根据覆盖层的不同,可采用相应的计算模式和技术加以解决^[11, 28-30].②观察阶地剖面,是否存在明显的沉积间断.沉积间断往往意味着剖面是由2个或者2个以上的沉积序列组成,需要采用不同的研究方案^[29].③剖面是否存在显著的风化层.它有可能打乱原有沉积序列,干扰宇宙生核素浓度随地层深度变化的有序性^[27, 30].④取样剖面垂直高度应大于5m,否则剖面曲线不足以体现指数递减规律^[27, 31].

2 ²⁶Al和¹⁰Be浓度剖面测年法在中国早期人类遗址中的应用前景

综上所述,²⁶Al和¹⁰Be浓度剖面测年法的基本应用条件为:①阶地堆积物具有足够垂直厚度.②沿剖面纵向,含多层富含石英的矿物如花岗岩卵砾或碎屑等;③石英矿物源于地表,曾较长时间接受宇宙射线照射,后以很快的速度形成阶地沉积,其堆积层位保持相对稳定;④被测地点的年代范围在300 ka至5 000 ka间^[11].对照这3个条件,可发现我国相当一部分位于河流阶地沉积地层的中、早更新世人类遗址都可以用该法测定年代.

目前,我国早期人类遗址的年代,主要基于岩石地层和生物地层的相对年代估计和磁性地层年代序列

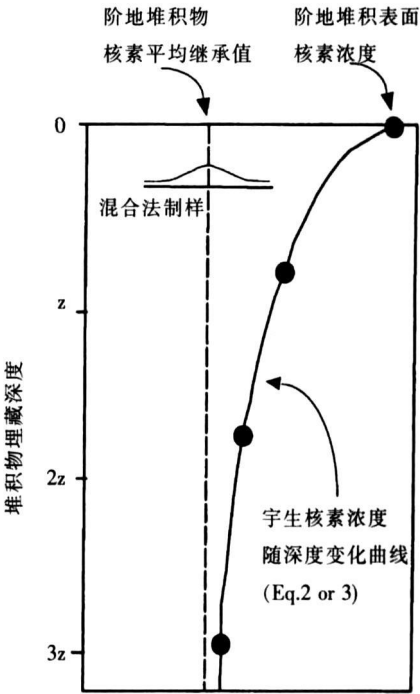


图1 阶地堆积宇宙生核素(CRN)浓度剖面示意图
Fig.1 Schematic mean CRN profile of samples with various depth

对比^[32, 33]. 但后者常因地磁剖面不完整或缺乏可靠的数值年龄控制点而存在争议. 因此有必要引入可信的同位素测年手段, 为早期人类在我国的起源和演化的研究提供更为可靠的年代依据. 当前, 这一测年法刚刚开始应用于人类遗址. 在起步阶段, 我们认为应优先研究那些有重要科学意义、堆积物来源清楚、位于有足够厚度剖面出露的冲洪积地层的古人类遗址. 我们以下述两个地点为例, 展望该方法在我国古人类遗址定年中的应用前景.

2.1 许家窑遗址

许家窑遗址位于山西省阳高县古城乡许家窑村东南约 1 km 的梨益沟西岸, 地理坐标 N 40°6′ E 113°59′. 1976 年贾兰坡与卫奇等^[32]发掘获得人类化石 9 件, 石制品 13 000 余件, 一批骨器、角器和 20 多种脊椎动物化石. 此后吴茂霖^[34]等再次发掘又获得 1 块完整的人类颞骨及其它标本.

基于出土的伴生动物化石能鉴定到种的几种动物中, 多是华北晚更新世常见的以及个别可生活到现在的类型, 吴汝康等^[35]认为许家窑人的时代为晚更新世. 陈铁梅等^[36, 37]采用铀子系法对取自含化石层上、下边界的伴生哺乳动物化石的测年结果分别为 90 ka 和 100 ka. 近年来对泥河湾各考古地点高精度磁性地层学研究有了突破进展^[38, 39]. 樊行昭^[38]等重新研究了该地点的地磁极性序列, 认为许家窑遗址文化层的年代位于中更新世早期至中期, 不支持年代位于晚更新世的观点. 事实上, 生物地层年代估计跨度较大, 磁性地层年代控制则需要明确的地磁极性反转事件, 因而都需要独立的年代结果尤其是同位素年代结果的检验. 由于动物化石铀系年代结果的可信度偏低^[40], 该地点同位素年代研究还可进一步深入.²⁶Al 和 ¹⁰Be 剖面定年法或可为解决该地点年代争议提供可信的同位素年代证据.

该遗址地层可分为两大部分: 上部为厚度 3~6 m 不等的砂质黄土覆盖层, 下部出露厚度 10~15 m, 上面为黄色或淡红色、具有垂直节理、含有砂砾的粉砂层, 中间有一层胶结的砂质薄层盖板, 下面为黏土和亚黏土, 颜色包括褐色、黄绿、灰蓝等. 含化石层位于距地表 8~12 m 的富含石英的砂土层中, 且上下还分布有砂砾和细砂层. 整个堆积保存完整, 是比较理想的 ²⁶Al 和 ¹⁰Be 剖面法应用地点. 所获结果可与已有的动物化石铀系年代结果和生物地层相对年代及地磁极性年代结果进行对比, 为验证结果的可信度提供了可能. 需要注意的是, 由于上部黄土-古土壤覆盖层的屏蔽效应, 应考虑样品中 ²⁶Al 和 ¹⁰Be 分析结果的影响以及对年龄结果的修正.

2.2 郧县人化石地点曲远河口学堂梁子

郧县人化石地点位于湖北省郧县城西约 40 km 弥陀寺村附近的曲远河口的学堂梁子, 地理坐标: N 32°51′ E 110°38′, 位于汉江北岸第四级阶地^[41], 阶地基座上沉积了河流相堆积层厚度约 16~18 m. 李天元等^[42]将其划分为 13 层. 第 3 层为浅棕色粉沙黏土层, 厚约 2 m, 出土 2 个头骨化石, 同层含石制品并伴生大量哺乳动物化石. 其下第 4、5 层为灰白色细砂层, 厚约 5 m, 松散, 含石制品和丰富的哺乳动物化石.

陈铁梅等^[43]认为遗址第 3、4、5 层的动物群之间未显示明显的时代差异, 可归纳为与郧县人化石伴生的哺乳动物群, 采用 ESR 法测定的年代结果为 58.1 ± 9.3 ka. 吴汝康等^[33]根据其中少量第三纪残余种如剑齿虎和第四级早期典型种如云南水鹿、秀丽黑鹿、桑氏缟鬃狗等, 判断该地点的年代比较早, 介于公王岭与陈家窝子动物群之间, 而稍晚于公王岭动物群. 阎桂林^[33]根据地磁年代对比, 认为该动物群的时代距今约 870 ka~830 ka.

郧县人化石虽已严重变形, 但基本保存完整, 在同类型其它材料中是极少见的. 遗憾的是, 限于当时没有合适的测年手段和材料, 该地点至今仍缺少可信的同位素年代结果. 该地点具备应用剖面法的良好前景, 其同位素年代研究的空白有望得以弥补. 同时原有地磁极性和 ESR 年代可用于方法间结果比对, 并讨论数据可信度.

可以相信, 伴随着剖面法应用的推广, 将来适合的研究地点可以扩展至元谋人地点、蓝田公王岭、蓝田陈家窝子等等.

测年技术前沿领域的每项突破, 都有可能带来新的冲击波, 一些人类遗址的年代位置因此需作重要调整. ²⁶Al 和 ¹⁰Be 浓度剖面测年法的物理基础坚实、测量技术可靠, 相信能为建立我国可信的早期人类演化系列、澄清与年代测定相关的诸多争议作出贡献.

[参考文献]

- [1] Wittle A G. Archaeologically-relevant dating techniques for the next century [J]. *Journal of Archaeological Science*, 1996 23: 123-138
- [2] Muzikar P, Elmore D, Granger D E. Accelerator mass spectrometry in geologic research [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115: 643-654
- [3] 刘克新. 加速器质谱及应用 [J]. *现代仪器*, 2000(5): 1-4
- [4] 郭之虞, 王宇钢, 包尚联. 核技术及其应用的发展 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2003, 39(增刊): 82-91
- [5] Lal D. Cosmogenic nuclides production rate systematics in terrestrial materials: Present knowledge, needs and future actions for improvement [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2000, 172: 772-781
- [6] Lal D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclides production rates and erosion models [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 424-439
- [7] Anderson R S, Repka J L, Dick G S. Explicit treatment of inheritance in dating depositional surfaces using in situ ^{10}Be and ^{26}Al [J]. *Geology*, 1996, 24(1): 47-51
- [8] Partridge T C, Granger D E, Caffee M W, et al. Lower pliocene hominid remains from Sterkfontein [J]. *Science*, 2003, 300: 607-612
- [9] Nishizumi K, Kohl C P, Amold J R, et al. Cosmic ray produced ^{10}Be and ^{26}Al in Antarctic rock: exposure and erosion history [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 440-454
- [10] 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: 107-110
- [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] Gosse J C, Phillips F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application [J]. *Quaternary Science Review*, 2001, 20: 1475-1560
- [13] 顾兆炎, 刘东生, Lal D. ^{10}Be 和 ^{26}Al 在地表形成和演化研究中的应用 [J]. *第四纪研究*, 1997(3): 211-221
- [14] 孔屏. 宇宙成因核素在地球科学中的应用 [J]. *地学前缘*, 2003, 9(3): 41-48
- [15] 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: 107-110
- [16] Braucher R, Bourles D L, Brown E T, et al. Application of in situ-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al to the study of late-terrestrial development in tropical forest: theory and examples from Cameroon and Gabon [J]. *Chemical Geology*, 2000, 170: 95-111
- [17] Balco G, Stone J O H, Joseph A M. Numerical ages for Plio-Pleistocene glacial sediment sequences by $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ dating of quartz in buried paleosols [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 232: 179-191
- [18] Nishizumi K, Lal D, Klein J, et al. Production of ^{10}Be and ^{26}Al by cosmic rays in terrestrial quartz in situ and implications for erosion rates [J]. *Nature*, 1986, 319: 134-136
- [19] Masarik J, Reedy R C. Terrestrial cosmogenic-nuclide production systematics calculated from numerical simulations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 136: 381-395
- [20] Stone J O H. Air pressure and cosmogenic isotope production [J]. *Journal of Geographical Research*, 2000, 105(B10): 23753-23759
- [21] Heisinger B P. Myonen-induzierte Produktion von Radionukliden [D]. *Munich: Technische Universität München*, 1998
- [22] Bieman P, Larsen P, Clapp E, et al. Refining estimates of ^{10}Be and ^{26}Al production rates [J]. *Radiocarbon*, 1996, 38: 149
- [23] Kubik P W, Ivy-Ochs S, Masarik J, et al. ^{10}Be and ^{26}Al production rates deduced from an instantaneous event within the dendro-calibration curve: the landslide of Kleins Ötztal Valley, Austria [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 231-241
- [24] Hancock G S, Anderson R S, Chadwick O A, et al. Dating fluvial terraces with ^{10}Be and ^{26}Al profiles: application to the Wind River, Wyoming [J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 41-60
- [25] Child D, Elliott G, Mifsud C, et al. Sample processing for earth science studies at ANTARES [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2000, 172(14): 856-860
- [26] 那春光, 孔屏, 黄费新, 等. 原地生成宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 样品采集及处理 [J]. *岩矿测试*, 2006, 25(2): 101-106
- [27] Granger D E, Smith A L. Dating buried sediments using radioactive decay and muogenic production of ^{26}Al and ^{10}Be [J].

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, 172: 822-826
- [28] Hetzel R, Niedemann S, Tao M X, et al. Low slip rates and long-term preservation of geomorphic features in central Asia [J]. Nature, 2002, 417: 428-432
- [29] Husemann P, Fiebig M, Kubik P W, et al. A first attempt to date the original "Deckenschotter" of Penck & Bräker with cosmogenic nuclides [J]. Quaternary International, 2007, 164: 33-42
- [30] Nishiizumi K, Caffee M W, Finkel R C, et al. Remnants of a fossil alluvial fan landscape of Miocene age in the Atacama Desert of northern Chile using cosmogenic nuclide exposure age dating [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237 (3/4): 499-507
- [31] Granger D E, Kirchner J W, Finkel R. Spatially averaged long-term erosion rates measured from in-situ produced cosmogenic nuclides in alluvial sediment [J]. Journal of Geology, 1996, 104: 249-257.
- [32] 贾兰坡, 卫奇. 阳高许家窑旧石器时代文化遗址 [J]. 考古学报, 1976, 2: 97-114.
- [33] 阎桂林. 湖北“郧县人”化石地层的磁性地层学初步研究 [J]. 地球科学, 1993, 18(2): 221-226
- [34] 吴茂霖. 许家窑遗址 1977 年出土的人类化石 [C] // 卫奇. 泥河湾研究论文选编. 北京: 文物出版社, 1989: 19-29
- [35] 吴汝康, 吴新智. 中国古人类遗址 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1999.
- [36] 陈铁梅, 原思训, 高世君. 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序列 [J]. 人类学学报, 1984, 3(3): 259-269.
- [37] 陈铁梅, 原思训, 高世君, 等. 许家窑遗址哺乳动物化石的铀子系法年代测定 [J]. 人类学学报, 1982, 1(1): 91-95.
- [38] 樊行昭, 苏朴, Lovlie R. 许家窑组及许家窑文化层年代问题的磁性地层学证据 [J]. 地层学杂志, 2002, 26(4): 248-252
- [39] Zhu R X, Hoffman K A, Potts R, et al. Earliest presence of humans in Northeast Asia [J]. Nature, 2001, 413(6854): 413-417.
- [40] 石丽, 张新锋, 沈冠军. 中国现代人起源的年代学新证据 [J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2003, 26(3): 89-94
- [41] 黄培华, 李文森. 湖北郧县曲远河口的地貌、第四纪地质和埋藏环境 [J]. 江汉考古, 1995(4): 83-86
- [42] 李天元. 郧县人化石发现和研究散记 [J]. 湖北文史资料, 1999(4): 120-137.
- [43] 陈铁梅, 杨全, 胡艳秋, 等. 湖北“郧县人”化石地层的 ESR 测年研究 [J]. 人类学学报, 1996, 15(2): 114-118

[责任编辑: 孙德泉]