

利用宇宙成因核素 ^{10}Be 、 ^{26}Al 估算流域 侵蚀速率的原理与应用

胡二伢, 李颖, 赵志军

(南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 地表侵蚀是地貌演化的外营力。定量估算地表侵蚀速率, 探讨其与构造活动、气候变化的响应和反馈是地学研究的重要课题之一。利用河流阶地沉积物或盆地沉积物宇宙成因核素(^{10}Be and ^{26}Al) 可获取流域万年尺度平均侵蚀速率时间序列, 弥补了热年代学获得的百万年平均剥露速率和水文观测获得的年代级侵蚀速率之间的环节。地表及其附近岩石中的矿物的原子核受到来自外层宇宙空间的高能宇宙射线粒子的轰击, 发生核反应而产生放射性核素, 然后被快速埋藏, 不再接受宇宙射线辐射。总体上, 它们在地表的暴露时间短暂, 宇生核素含量低, 埋藏后宇生放射性核素随时间流逝而衰减。利用 ^{10}Be 和 ^{26}Al 估算流域古侵蚀速率基于此原理, 通过测试河流沉积物或盆地沉积物的年代, 结合 ^{10}Be 浓度, 进而估算流域的平均侵蚀速率。应用宇生核素方法研究流域侵蚀速率, 具有采样简便, 精确度高, 应用范围广等优势, 可以反映更大时间尺度和更广空间尺度上的侵蚀速率变化情况, 利用 ^{10}Be 和 ^{26}Al 等核素方法对第四纪至全新世的地表演化进行研究正成为一种重要的研究方法。

关键词: 宇宙成因核素; ^{10}Be ; ^{26}Al ; 侵蚀速率; 流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0103-05

中图分类号: P597.3, S157

Calculating Erosion Rate of Drainage Basin by ^{10}Be and ^{26}Al Measurements: Theory and Application

HU Er-ya, LI Ying, ZHAO Zhi-jun

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

Abstract: Erosion is an exogenic agent of landscape evolution. Quantitatively calculation of erosion rates and the reveal of the climate-erosion-tectonics feedback system are important research subjects in Geosciences. The average rates of exhumation can be obtained from thermochronology on time scale of millions of years, and erosion rates from hydrological measurement on time scale of tens of years. As a supplement, erosion rates on time scale of ten thousands of years can be calculated by measuring cosmogenic nuclide(^{10}Be and ^{26}Al) from river terrace deposits or basin sediments. Cosmogenic nuclides were primarily generated by reaction of quartz grains exposed near earth surface by galactic cosmic radiation, which were then suddenly and deeply buried to shield off cosmicrays after exposure of short time on the ground surface. Generally, the quartz grains have a short time exposure and low cosmogenic nuclide concentration. In addition, the cosmogenic nuclide decreases over time after burial. Quantitatively calculation of erosion rates from ^{10}Be and ^{26}Al is a concept based on dating river terrace deposits or basin sediments by determination of ^{10}Be concentration. Combining ^{10}Be and ^{26}Al measurements, surface exposure ages or erosion rates can then be calculated. The method is precise, easily accessible and widely applicable. It can be used for longer time scales and broader spatial scales, and it is a new method important to landscape evolution research from Quaternary to Holocene.

Keywords: cosmogenic nuclides; ^{10}Be ; ^{26}Al ; erosion rate; drainage basin

流域侵蚀速率估算的定量化是研究地貌演化形
式、速率及其与气候、构造运动、海平面变迁之间耦合

关系的关键。定量化研究古侵蚀速率的方法有多种。
例如利用热年代学的方法和裂变径迹分析方法可以

收稿日期: 2010-10-26

修回日期: 2010-11-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“玉门砾岩、酒泉砾石层的宇生核素埋藏测年及其记录的流域侵蚀速率研究”(40871011)

作者简介: 胡二伢(1988—), 男(汉族), 安徽省望江县人, 硕士研究生, 研究方向为宇生核素测年及其记录的流域侵蚀研究。E-mail: anhuihey@yahoo.com.cn.

通信作者: 赵志军(1973—), 男(汉族), 河北省井陘县人, 副教授, 主要研究领域为地貌学、第四纪地质。E-mail: zhaozhijun@njnu.edu.cn.

估算长时间尺度的岩石剥露速率,这两种方法反映的剥露历史是几百万年的长期平均数据,很难精确地与轨道尺度气候周期变化和海平面升降的影响进行对比;分析封闭盆地的沉积容积或分析有精确定年的沉积地层剖面有可能反演流域侵蚀速率的信息,但是盆地沉积还受到基准面升降和构造变动控制,在计算过程中存在较大误差,且精确定年剖面尚比较少,成为限制因素;现代水文台站输沙量和化学输移量监测可以准确反映流域的侵蚀速率,然而,有记录的台站仅百年而已,而且近年来的人为活动强烈,已经很大程度上改变了流域自然过程。近年来,利用河流沉积物中所蕴含的宇宙成因核素浓度研究流域侵蚀速率的工作越来越多,此法可以反演万年至十万年尺度的平均流域侵蚀速率,开展构造背景尺度下气候变化对侵蚀速率影响等的机制探讨。河流阶地上沉积的石英砂内所含的宇宙成因核素记录了阶地的沉积年龄、沉积物的搬运时间以及阶地形成时期整个流域的侵蚀物沉积速率。这样,如果河流的搬运速度足够快,理论上就可能通过分析阶地序列来恢复流域的古侵蚀速率的时间序列。盆地沉积物内所含的宇宙成因核素同样也记录了流域的古侵蚀速率。河流阶地和盆地数量多分布广,因此该方法具有可行性。

宇宙成因核素(如 ^{10}Be 、 ^{26}Al)是指地表及其附近岩石中的矿物的原子核受到来自外层宇宙空间的高能宇宙射线粒子的轰击,发生核反应而产生的放射性核素。它们在地表岩石中的积累量与样品在地表的暴露条件和暴露时间有关,因此理论上它们可以成为地质定年和地表物理作用示踪的有效工具。从 20 世纪 60 年代开始,宇宙成因核素就开始进入地学工作者的视野。然而,由于岩石中宇宙核素的浓度极低,测试技术限制了浓度的测量,该方法的应用直到 80 年代才趋于成熟。迄今为止,已知的宇宙成因同位素有 40 多种,加速器质谱测量的宇宙核素已达 9 种,其中 ^{10}Be 和 ^{26}Al (半衰期分别为 1.34 和 0.71 Ma)的研究程度最为深入,应用范围最广。本文就利用宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 来估算流域的侵蚀速率的原理与应用情况做些介绍。

1 ^{10}Be 和 ^{26}Al 的形成

^{10}Be 和 ^{26}Al 的生成方式主要有 3 种^[1]:一是高能中子诱发靶核 ^{16}O 和 ^{28}Si 散裂反应;二是 μ^- 介子捕获反应;三是快 μ^- 介子诱发多重核反应所释放的高能粒子引发的散裂反应^[2]。表 1 列出了 ^{10}Be 和 ^{26}Al 形成的一些重要反应^[3]。与中子散裂变反应相比,介子与岩石中的原子反应较弱,因此,介子反应成因的

宇宙核素产生量相对较低,在近地表岩石中约 97% ^{10}Be 和 ^{26}Al 是由高能中子产生, μ 介子的贡献量常被忽略^[1],但是介子的穿透能力很强,能够穿透很厚的岩层。随着岩层深度的增加, μ 介子的贡献量比例也不断增加。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。介子俘获作用产生的 ^{10}Be 和 ^{26}Al 能在地下近 10 m 处发现^[4]。

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 的产生速率随深度呈指数递减^[5],可以表示为:

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

式中: z ——深度(cm); $P_n(z)$ ——深度为 z 的生成速率[atoms/(g·a)]; $P_n(0)$ ——地表的生成速率[atoms/(g·a)]; ρ ——岩石的密度(g/cm³); Λ ——宇宙射线在岩石中的平均吸收自由程(即衰减长度)(g/cm²),其定义为每穿过一个 Λ ,入射宇宙射线将衰减至原有的 $1/e$ (低于 37%)。

^{10}Be 的主要目标矿物有石英、橄榄石、磁铁矿、斜长石等; ^{26}Al 的主要目标矿物有石英、橄榄石^[6]。其中石英是国际上用于分析、测量宇宙成因核素的理想矿物,这是因为石英具有以下几个特点^[7]。(1)石英在自然界分布广泛,易分离;(2)石英晶体结构紧密,不易受大气中生成宇宙成因核素的污染;(3)石英中可以生成多种宇宙成因核素;(4)石英的化学成分简单,只有 Si 和 O 两种元素,使得对宇宙成因核素生成速率的计算更为容易;(5)石英中 Al 含量低,能够满足加速器质谱对进行精确测量时 ^{26}Al atoms/g/ ^{27}Al atoms/g 不能小于 10^{-14} 的要求。

表 1 ^{10}Be 、 ^{26}Al 形成的重要反应(据文献[7])

核素	基本反应类型及目标	核素	基本反应类型及目标
^{10}Be	$^{16}\text{O}(n, 4p3n) \rightarrow ^{10}\text{Be};$	^{26}Al	$^{28}\text{Si}(n, p2n) \rightarrow ^{26}\text{Al}$
	$^{28}\text{Si}(n, x) \rightarrow ^{10}\text{Be}$		$^{28}\text{Si}(\mu^-, 2n) \rightarrow ^{26}\text{Al}$
	$^{16}\text{O}(\mu^-, 3p3n) \rightarrow ^{10}\text{Be};$		$^{23}\text{Na}(\alpha, n) \rightarrow ^{26}\text{Al}$
	$^{28}\text{Si}(\mu^-, x) \rightarrow ^{10}\text{Be}$	注:其中 n 个是中子;P 是质子; α 为 α 粒子; μ^- 为 μ 负介子; x 为 x 粒子; γ 为 γ 粒子	
	$^{7}\text{BeLi}(\alpha, p) \rightarrow ^{10}\text{Be};$		
	$^9\text{Be}(n, \gamma) \rightarrow ^{10}\text{Be}$		
	$^{10}\text{B}(n, p) \rightarrow ^{10}\text{Be};$		
$^{13}\text{C}(n, \alpha) \rightarrow ^{10}\text{Be}$			

2 估算流域侵蚀速率的基本原理

地表一直处于宇宙射线的轰击下, ^{10}Be 和 ^{26}Al 不断在因侵蚀而出露地表的石英矿物里富集。这些石英颗粒最终被河流搬运沉积,其中的核素浓度反映了

样品在近地表暴露的时间长短。地表石英砂被搬运到洞穴或被快速埋藏后, 由于上覆岩层的屏蔽作用, 不再接受宇宙射线的辐射, ²⁶Al 和 ¹⁰Be 停止生成。在流域内不同区域的石英被混合, 所以河流沉积物中的宇生核素含量反映了整个流域的平均侵蚀速率^[8]。在侵蚀较慢的流域, 样品在地表停留的时间较长, 核素积累量就比较高。由于放射性衰变, 在暴露过程中所积累的核素含量将按指数形式衰减。²⁶Al 和 ¹⁰Be 的半衰期分别为 0.71 和 1.34 Ma, 用这 2 种核素的原子比可研究沉积物百万年尺度的埋藏年龄与流域侵蚀速率。

²⁶Al 比 ¹⁰Be 衰变快近一倍 ($\lambda_{0Be} = 4.62 \times 10^{-7} / a$, $\lambda_{6Al} = 9.68 \times 10^{-7} / a$, $\lambda_{Al} / \lambda_{Be} \approx 2$), 埋藏后石英砂中这 2 种核素的浓度比是关于埋藏时间 t 的递减指数函数^[4, 6]:

$$\frac{N_{Al}(t)}{N_{Be}(t)} = \left(\frac{N_{Al}}{N_{Be}} \right)_0 e^{-t(\lambda_{Al} - \lambda_{Be})} \quad (2)$$

式(2)可以用来为沉积阶地定年。

河流沉积物中的宇生核素 (C_{total}) 包括两个部分^[9]: 初始继承的部分 (C_{in}) 和沉积后产生的部分 (C_{dep}), 即:

$$C_{total} = C_{in} \times e^{-\lambda t} + C_{dep} \quad (3)$$

式中: t ——河流阶地的沉积年龄 (a); C_{in} ——继承的阶地沉积前宇生核素浓度 (atmos/g [qtz]); C_{dep} ——阶地沉积后产生的宇生核素浓度 (atmos/g [qtz]); λ ——宇宙射线在岩石中的衰变常数 (g/cm^2)。

利用河流沉积物中石英砂所载的 ¹⁰Be, ²⁶Al 来估

$$C_{dep} = P_{nuc}(0) \times \sum_{i=1}^2 \frac{a_i \times \exp\left[\frac{(-\rho_{terra} \times z)}{b_i}\right] \times \left\{1 - e^{-t[\lambda + (\rho_{rock} \times E_{terra})/b_i]}\right\}}{[\lambda + (\rho_{rock} \times E_{terra})/b_i]} +$$

$$P_{ustopped}(0) \times \sum_{j=1}^3 \frac{a_j \times \exp\left[\frac{(-\rho_{terra} \times z)}{b_j}\right] \times \left\{1 - e^{-t[\lambda + (\rho_{terra} \times E_{terra})/b_j]}\right\}}{[\lambda + (\rho_{rock} \times E_{terra})/b_j]} +$$

$$P_{ufast}(0) \times \sum_{k=1}^3 \frac{a_k \times \exp\left[\frac{(-\rho_{terra} \times z)}{b_k}\right] \times \left\{1 - e^{-t[\lambda + (\rho_{terra} \times E_{terra})/b_k]}\right\}}{[\lambda + (\rho_{rock} \times E_{terra})/b_k]} \quad (5)$$

式中: t ——河流阶地的沉积年龄 (a); E_{terra} ——河流阶地的侵蚀速率 (cm/a); ρ_{terra} ——河流阶地沉积物的密度; z ——样品所在的深度 (cm); $P_{nuc}(0)$, $P_{ustopped}(0)$, $P_{ufast}(0)$ ——分别是散裂反应、终止介子以及快介子的地表宇生核素平均产生速率 [$atmos/(g \cdot a)$]; $a_{i,j,k}$, $b_{i,j,k}$ ——核素产生速率随深度的变化系数 (g/cm^2)。

为了找出 ¹⁰Be 的浓度及 ²⁶Al/¹⁰Be 浓度比值与式(4), (5) 中 3 个未知量 (E_{in} , E_{terra} 与 t) 之间的关系, 可以通过研究已知 E_{in} , E_{terra} 与 t 的阶地不同深度处 ¹⁰Be 的浓度及 ²⁶Al/¹⁰Be 浓度比值特征。研究表明, 已知 E_{in} , E_{terra} 的阶地, ¹⁰Be 浓度相同时, 其沉积年龄 t 在地表至大约 10 m 之间不同深度处变化很大, 而在 10 m

算流域的侵蚀速率, 在理想情况下, 有几个前提条件^[3, 5]: (1) 整个流域的侵蚀速率是一个常数; (2) 石英曾经在地表暴露过程中积累了一定数量的宇生核素量 (一般 > 10 ka), 能够满足 AMS 的检测; (3) 沉积物的搬运过程十分的快速, 被快速埋藏 (相对于核素的平均寿命而言); (4) 埋藏要达到一定深度, 足以遮蔽宇宙射线后期的照射 (一般 > 10 m); (5) 沉积物在埋藏前经历的暴露过程简单, 即没有反复暴露和埋藏过程。若满足以上假设条件, 那么初始继承的部分 (C_{in}) 可通过下式计算^[10]:

$$C_{in} = P_{nuc}(0) \times \sum_{i=1}^2 \frac{a_i}{[\lambda + (\rho_{rock} \times E_{in})/b_i]} +$$

$$P_{ustopped}(0) \times \sum_{j=1}^3 \frac{a_j}{[\lambda + (\rho_{rock} \times E_{in})/b_j]} +$$

$$P_{ufast}(0) \times \sum_{k=1}^3 \frac{a_k}{[\lambda + (\rho_{rock} \times E_{in})/b_k]} \quad (4)$$

式中: λ ——宇宙射线在岩石中的衰变常数 (g/cm^2); E_{in} ——沉积物源区流域的侵蚀速率; ρ_{rock} ——岩石的密度 (g/cm^3); $P_{nuc}(0)$, $P_{ustopped}(0)$, $P_{ufast}(0)$ ——流域内散裂反应、终止介子以及快介子的地表宇生核素平均产生速率 [$atmos/(g \cdot a)$]; $a_{i,j,k}$, $b_{i,j,k}$ ——核素产生速率随深度的变化系数^[9] (g/cm^2)。高纬海平面 ¹⁰Be, ²⁶Al 的平均生成速率分别为 5.33 ± 0.34 和 35.80 ± 2.70 $atmos/g[qtz]$ ^[9], ²⁶Al 和 ¹⁰Be 的平均生成速率之比约为 6.47。

沉积后产生的宇生核素浓度 (C_{dep}) 可以由下式计算^[10]:

之后随着深度的增加, 沉积年龄变化不大; 且 E_{in} 的变化对 ¹⁰Be 浓度的影响非常大; 在比较深的地方 (深于 15 m), 利用 ¹⁰Be 浓度定年时, E_{terra} 的变化对其影响不大。

当知道了样品中 ¹⁰Be, ²⁶Al 的浓度后, 通过式(2) 或者 (3) 式就可以确定阶地的年代。由于式(4), (5) 中现在有 3 个量未知 (E_{in} , E_{terra} 与 t), 因此, 必须对其中一个未知量进行假设。

一般, 当阶地深度大于 5 m 时, 可以先假设 $E_{terra} = 0$, 如果实际 $E_{terra} > 0$, 那么计算出来的阶地年龄值会偏小, 如果实际 $E_{terra} < 0$, 那么计算出来的阶地年龄值会偏大, 这必须针对不同阶地的具体情况进行校正^[10]。这样, 将式(4), (5) 代入式(3) 就可以计算出

E_{in} 。利用宇生核素计算出来的流域侵蚀速率应该包含了流域内所有侵蚀过程的影响,但由于假设了流域的侵蚀速率是一个常数且假设了沉积物的搬运过程十分的快速,因此,计算出来的 E_{in} 是理想值(最小值),这是由于计算时忽略了流域内岩石与风化层的选择性溶蚀作用^[11]。

$^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 浓度比值基本不受 E_{in} , E_{terra} 的影响,但是,其受 ^{26}Al , ^{10}Be 浓度测量误差的影响很大,最好的解决办法是,综合比对 ^{10}Be 浓度与 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比值^[10] (见图 1)^[12]。

图 1 显示了石英中 ^{10}Be 的浓度、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 与埋藏时间 t 的关系。横轴为 ^{10}Be 的浓度,纵轴为 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$, 5 条实曲线表示不同埋藏年龄。上面 0 Ma 的曲线表示尚未埋藏的石英砂在不同侵蚀环境下所积累的 ^{10}Be 浓度,构成图上所有可能数据点的上界。图中右侧以侵蚀速率 $E = 0$ 线为界,此时 ^{26}Al 和 ^{10}Be 衰变达到了长期平衡。

沿横轴方向随侵蚀速率减小, ^{10}Be 的浓度增高,而 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 减小。当侵蚀速率大于 10 m/Ma 的情况时, $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 两者之比接近于 6,即生成速率之比。埋藏后 ^{10}Be 浓度和 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 的值都随埋藏时间向零点退缩,箭头指示它们的衰减方向。反过来,依据样品中现存 ^{10}Be 含量和 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 就可以估算其埋藏年龄与流域侵蚀速率。

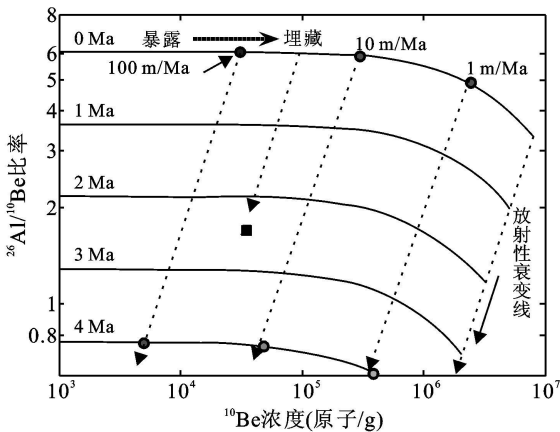


图 1 石英砂中的 ^{10}Be 和 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 随埋藏时间的衰变轨迹^[12]

采用核素对比值 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 估算埋藏年龄与流域侵蚀速率十分有利^[12],其原因可归纳为两点:第一,由于石英矿物中 ^{26}Al 和 ^{10}Be 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;第二, $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 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。

3 宇生核素 ^{10}Be , ^{26}Al 实验步骤

^{10}Be , ^{26}Al 的实验处理主要包括以下 3 步^[13]:

(1) 石英纯化处理。即从野外采集的样品中分离出纯净的石英。主要是通过酸蚀和重液矿物分离,最终要使纯化后的石英中 Al 含量一般需低于 200 mg/kg。

(2) Be, Al 化学分离。包括石英溶解,体系转换,氢氧化物沉淀和离子交换等步骤,在马沸炉中高温灼烧获得 BeO 和 Al_2O_3 , BeO 和 Al_2O_3 分别与 Nb 和 Ag 粉混合制靶。

(3) 进行加速器 AMS 测试。AMS 测定的是 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 和 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 的比值。

4 实际应用与讨论

利用宇宙核素确定点(如露头的岩石)的侵蚀速率已经有很多工作,但是点上的信息特征很难代表区域的地貌过程。近几年,利用河流阶地上沉积和盆地沉积物石英砂中的核素研究整个流域的侵蚀过程成为新的热点^[14-16]。

Schaller 等人利用此方法估算了欧洲中部 Allier 和 Dore 河流 30 000 a 来的流域侵蚀速率^[9]。发现 Allier 和 Dore 具有不同的流域侵蚀速率,可能是 2 个流域具有不同的冰川作用历史,进而揭示了末次冰期最盛期(LGM)对流域侵蚀的影响。Chappell 等人也利用此方法估算了长江流域侵蚀速率^[17]。Balco 等人还利用河流沉积物对美国犹他州 Fisher 流域中更新世以来侵蚀速率做了研究^[18]。此方法在南美和欧洲还有其它一些成功的应用。

国内目前关于利用 ^{10}Be , ^{26}Al 对流域的侵蚀速率进行估算的应用很少。郑洪波等^[9]首次利用宇宙成因核素估算了长江流域侵蚀速率,估算出岷江一大渡河流域平均侵蚀速率为 300~500 mm/ka,长江中下游地区的沅江-湘江流域侵蚀速率为 30~50 mm/ka,与水文数据推导的侵蚀速率相比而言,二者在数量级上基本一致,为研究长江流域侵蚀与沉积问题提供了一种有效的定量方法^[19]。

青藏高原隆升过程和环境变化是地球科学研究的焦点。地表过程如何响应构造抬升和气候变化是理解地球内外营力相互作用的关键。源于青藏高原周缘山地的河流在山前堆积了巨厚的冲洪积扇,从这些沉积物中取样,进行宇生核素年代与侵蚀速率研究,可望揭示地表侵蚀速率对构造运动以及第四纪冰期-间冰期旋回的响应。最近,法国学者在天山北麓奎屯河剖面取得了 9~1 Ma 间的长期侵蚀速率,发现在 2.5~1.7 Ma 期间有短暂高峰,认为是气候变化、北半球冰盖导致的流域侵蚀速率增加。

5 结论

应用宇生核素方法研究流域侵蚀速率, 具有采样简便、精确度高、应用范围广等优势, 可以反映更大时间尺度和更广空间尺度上的河流侵蚀速率变化情况, 所以利用 ^{10}Be 和 ^{26}Al 等核素方法对第四纪至全新世的地表演化进行研究正成为一种重要的研究方法^[14-15]。这将十分有助于我们研究大地构造、气候变化和地表过程间的耦合关系。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] Heisinger B, Lal D, Jull A J T, et al. Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: 1. Fast muons [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 200: 345-355.
- [3] Gosse J C. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 1475-1560.
- [4] 黄湘通, 郑洪波, John Chappell. 宇宙成因核素 ^{10}Be , ^{26}Al : 原理及其在地表过程中的应用 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(9): 1206-1212.
- [5] Henderson J H, Clayton R N, Jackson M L, et al. Cristobalite and quartz isolation from soils and sediments by hydrofluosilicic acid treatment and heavy liquid separation [J]. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1972, 36: 830-835.
- [6] Nishiizumi K, Kohl C P, Arnold J R, et al. Role of in situ cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al in the study of diverse geomorphic processes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1993, 18: 407-425.
- [7] Nishiizumi 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: 1342.
- [8] Granger D E, Kirchner J W, Finkel R. Spatially averaged long-term erosion rates measured from in situ produced cosmogenic nuclides in alluvial sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1996, 104: 249-257.
- [9] Schaller M, Von Blanckenburg F, Veldkamp P A, et al. A 30 000 yr record of erosion rates from cosmogenic ^{10}Be in Middle European river terraces [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 204: 307-320.
- [10] Schaller M. Paleoerosion rates from cosmogenic ^{10}Be in a 1.3 Ma terrace sequence: Response of the river meuse to changes in climate and rock uplift [J]. *The Journal of Geology*, 2004, 112: 127-144.
- [11] Riebe C S, Kirchner J W, Granger D E. Quantifying quartz enrichment and its consequences for cosmogenic measurements of erosion rates from alluvial sediment and regolith [J]. *Geomorphology*, 2001, 40: 15-19.
- [12] 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.
- [13] Cerling T E, Craig H. Geomorphology and in situ cosmogenic isotopes: Annrev [J]. *Earth Planet Sci*, 1994, 22: 273-317.
- [14] Burbank D W, Leland J, Fielding E, et al. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the Northwestern Himalayas [J]. *Nature*, 1996, 379: 505-510.
- [15] Bierman P, Steig E J. Estimating rates of denudation using cosmogenic isotope abundances in sediment [J]. *Earth Surface Process Landforms*, 1996, 21: 125-139.
- [16] Schaller M, Von Blanckenburg F, Hovius N, et al. Large scale erosion rates from in situ produced cosmogenic nuclides in European river sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188: 441-458.
- [17] Chappell J, Zheng H B. Yangtse River sediments and erosion rates from source to sink traced with cosmogenic ^{10}Be : Sediments from major rivers [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 241: 79-94.
- [18] Balco G, Stone J O H. Measuring middle Pleistocene erosion rates with cosmic-ray produced nuclides in buried alluvial sediment, Fisher Valley, southeastern Utah [M]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005: 1051-1067.
- [19] 郑洪波, 黄湘通, 向芳, 等. 宇宙成因核素 ^{10}Be : 估算长江流域侵蚀速率的新方法 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(9): 1160-1165.