

^{10}Be 和 ^{26}Al 揭示的合黎山西南部侵蚀速率初步研究

张 丽^{1,2}, 武振坤^{1,2}, 李 明^{1,2}, 董国成^{1,2}, 赵国庆^{1,2}, 付云翀^{1,2}

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西省加速器质谱技术及应用重点实验室, 西安 710061
2. 西安加速器质谱中心, 西安 710061

摘 要: 地表侵蚀速率是衡量地貌演化的一个重要因子。本研究利用原地宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 对合黎山西南部地表岩石侵蚀速率进行了首次测定。结果显示: 约 30 ka 以来, 合黎山西南部的地表岩石侵蚀速率约为 $24 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。这一结果与已见报道的其他基岩侵蚀速率值一致。这一结果与 Small et al 获得的非干旱地区的基岩侵蚀速率也基本一致, 但是显著高于干旱的南极地区和半干旱的澳大利亚。 ^{10}Be 和 ^{26}Al 获得的侵蚀速率的良好一致性表明本研究所用侵蚀模式的有效性。所得的侵蚀速率小于 Palumbo et al 测定的合黎山平均流域侵蚀速率 ($99 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$), 原因解释尚待更多地点和样品的研究。

关键词: 宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al ; 合黎山西南部; 侵蚀速率

Erosion rate in the southwest of Helishan from *in-situ* cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al

ZHANG Li^{1,2}, WU Zhenkun^{1,2}, LI Ming^{1,2}, DONG Guocheng^{1,2}, ZHAO Guoqing^{1,2}, FU Yunchong^{1,2}

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Shaanxi Key Laboratory of Accelerator Mass Spectrometry Technology and Application, Xi'an 710061, China
2. Xi'an Accelerator Mass Spectrometer Center, Xi'an 710061, China

Abstract: Background, aim, and scope Surface erosion rate is an important subject in evaluating geomorphic evolution of landforms. Our understanding of landform evolution, however, is limited by the lack of the data about landscape change rate in appropriate geological time scale. The accelerator mass spectrometry (AMS)-based cosmogenic nuclide technique is an increasingly utilized method that can measure long-term ($>10^3$ — 10^4 years) average erosion rates. Determination of *in-situ* ^{10}Be and ^{26}Al in bedrock surfaces on summit flats constrains erosion rate for mountain ranges within various climatic environments. Studies on ^{10}Be environmental tracer and exposure dating/erosion rate have lagged behind in China due to lack of AMS facilities for routine ^{10}Be measurements. Based on the ^{10}Be and ^{26}Al samples preparation method in our laboratory, the article presents the erosion rate determined from ^{10}Be and ^{26}Al in quartz samples measured by AMS from outcrop bedrock collected from southwest Helishan, at the northeast margin of Tibetan Plateau. We hope to understand the effects of climate and tectonics on erosion rate better and especially to provide hints on the cause of the abrupt increase of erosion rates in northeast Tibet. **Materials and methods** Four rock samples were collected from the outcrop. The rocks were brought into the lab,

收稿日期: 2017-09-15; 录用日期: 2017-11-28

Received Date: 2017-09-15; Accepted Date: 2017-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41602195); 中国科学院西部博士基金

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41602195); Western Light Talent Culture Project of CAS

通信作者: 张 丽, E-mail: zhl@ieecas.cn

Corresponding Author: ZHANG Li, E-mail: zhl@ieecas.cn

引用格式: 张 丽, 武振坤, 李 明, 等. 2018. ^{10}Be 和 ^{26}Al 揭示的合黎山西南部侵蚀速率初步研究 [J]. 地球环境学报, 9(1): 45–53.

Citation: Zhang L, Wu Z K, Li M, et al. 2018. Erosion rate in the southwest of Helishan from *in-situ* cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(1): 45–53.

be cleaned, dry, crush, and sieved. The 0.25—0.50 mm grain size were selected. The magnetic minerals were removed with magnetic separation. Pure quartz samples were completely dissolved with 0.3—0.5 mg ^9Be carrier in hydrofluoric acid. Fluorides were removed by perchloric acid fuming. Beryllium and aluminum were separated by cation and anion exchange chromatography, and leached with $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl and an $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -HCl acid mixture. Ammonium hydroxide was added to the ^{10}Be and ^{26}Al fractions to precipitate beryllium and aluminum hydroxide gels at $\text{pH}=8-9$ and $\text{pH}\approx 8$, respectively, and the hydroxides were oxidized by ignition at 900 °C in quartz crucibles. The beryllium oxide and aluminum oxide products were mixed with copper powder and pressed into target holders prior to measurement on the AMS. **Results** The $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios of the samples were normalized to the NIST AMS standard SRM-4325 with a nominal value of $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 2.68 \times 10^{-11}$. The $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratios of the samples were normalized to the ICN AMS standard with a nominal value of $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 1.065 \times 10^{-11}$. We calculate the ^{10}Be and ^{26}Al concentrations in quartz samples, combined the $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratio determined by AMS, with the sample weight, ^9Be carrier weight and ^{27}Al weight. The erosion rates are determined by the CRONUS-Earth online calculator version 2.2. The minimum exposure ages are also shown. The maximum steady erosion rates of HLS-1-4 are $(23.4 \pm 1.8) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Be) and $(24.4 \pm 2.0) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Al). The maximum steady erosion rates of HLS-1-3 are well agreement with that of HLS-1-4, $(33.4 \pm 12.9) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Be) and $(24.2 \pm 1.9) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Al), respectfully. While A two-isotope plot of ^{10}Be and ^{26}Al data shows that samples HLS-1-4 and HLS-1-3 are consistent with a model of constant exposure. HLS-4-2 may have complex exposure histories, suggesting burial and re-exposure. The determined erosion rate of $24 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ is comparable with the erosion rates in other mountainous regions. **Discussion** Both tectonics and climate affect erosion of landforms. The obtained average erosion rate for southwest Helishan is about $24 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$, are comparable to those with bedrock from non-arid climatic regions, but significantly higher than those of arid Antarctica and semi-arid Australia. It appears that arid regions with high erosion rates are basically all tectonically active. It may suggest tectonic activity plays a more important role in controlling erosion of landforms. The focused area is located at the northeast margin of Tibetan Plateau. Along both its northern and southern sides, reverse faults bound the core of the range. Helishan is dominated by slip with a reverse component. So the erosion rate of the southwest Helishan could be effected by the tectonic activity to some extent. Outcrop erosion rate is slower than that inferred from drainage basin study ($99 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$). It is similar to that reported by Bierman et al, Small et al and Quigley et al. The results suggest that soil cover, even if it is quite shallow, speeds the rate of rock weathering. Outcrops are situated above the landscape and exposed to a limited suite of what must be largely ineffective subaerial erosion processes that both physically and chemically wear away exposed rock. **Conclusions** Using *in-situ* cosmogenic nuclide dating technique, we have determined steady-state erosion rates in arid southwest Helishan. The consistency of erosion rates derived from ^{10}Be and ^{26}Al suggests validity of the erosion model used in this study. Comparison of erosion rates in arid regions with contrasting tectonic activities suggests that tectonic activity plays a more important role in controlling long-term erosion rates. The obtained erosion rate is, however, significantly lower than the catchment erosion rate. **Recommendations and perspectives** Our result should provide the basic data for the study of the erosion rate in arid regions and provide hints on the cause of the abrupt increase of erosion rates in northeast Tibet.

Key words: *in-situ* cosmogenic nuclides; southwest of Helishan; erosion rate

在不同地貌背景下, 不同时间尺度和空间尺度侵蚀速率的测量, 无论对于地貌演化速率和方式的定量化研究、不同地貌过程的控制作用的理解, 还是气候变化和地貌响应关系联系的建立, 都至关重要 (Small et al, 1997)。然而, 由于合

适的地质时间尺度地貌改变速率数据的缺乏, 对地貌演化的认识受到诸多限制 (Beaumont et al, 1999)。近年来迅速发展的宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 测年可以直接测定 ($>10^3-10^4 \text{ a}$) 地表平均侵蚀速率 (Lal, 1991), 更能揭示第四纪 (尤其是

第四纪晚期)地貌演化的真实情况。

自 20 世纪 80 年代以来,随着高精度加速器质谱仪的出现,宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 的快速、高精度、低探测极限常规测量成为可能 (Elmore and Phillips, 1987; Granger et al, 2013)。Nishiizumi et al (1986) 首次将原地宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 应用于基岩侵蚀速率的研究。目前这一方法已经在地表过程研究中得到广泛应用 (Bierman and Turner, 1995; Small et al, 1997; Bierman and Caffee, 2002; Lal et al, 2003; Kong et al, 2007)。由于我国之前还没有开展 ^{10}Be 常规测量的质谱仪,所以在 ^{10}Be 的环境示踪和年代测定/侵蚀速率方面起步较晚。新建的西安加速器质谱中心拥有一台多核素 (^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 和 ^{129}I) 加速器质谱仪,其 ^{10}Be 的探测灵敏度可达 10^{-15} , ^{10}Be 和 ^{26}Al 测量精度分别为优于 1.4% (10^{-12}) 和 1.14% (10^{-11}) (Zhou et al, 2007)。目前已在我国黄土 ^{10}Be 示踪高分辨率古地磁场变化研究中取得重要进展 (周卫健等, 2010; Zhou et al, 2014), 并且建立了 ^{10}Be 和 ^{26}Al 暴露测年方法 (Zhang et al, 2016)。青藏高原是一个重要的研究区域,国内已见报道的基岩侵蚀速率研究主要集中在青藏高原,如孔屏和那春光 (2007)、许刘兵和周尚哲 (2009) 等,而青藏高原东北缘的研究较少。

本文基于本实验室已经建立的 ^{10}Be 和 ^{26}Al 样品制备和测量方法,选择青藏高原东北缘的合黎山西南部露头基岩进行研究,通过测试 ^{10}Be 和 ^{26}Al 浓度,计算获得其侵蚀速率,并与已见报道结果进行对比,并尝试对其基本成因进行初步探讨。

1 宇宙成因核素 ^{10}Be - ^{26}Al 方法简介

次级宇宙射线粒子与组成地表或近地表物质的 O、N 发生核反应,在其物质结构中产生积累原地宇宙成因核素 ^{10}Be 、 ^{26}Al (Goesse and Phillips, 2001)。因而地表物质在地表环境停留的时间越长,其中累积的宇宙成因核素浓度就越高。宇宙成因核素生成率随深度呈指数衰减,其浓度是暴露时间和侵蚀速率的函数:

$$N = \frac{P}{(\lambda + \frac{\rho\varepsilon}{\Lambda})} [1 - e^{-(\lambda + \frac{\rho\varepsilon}{\Lambda})T}] + N_0 e^{-\lambda T} \quad (1)$$

式中: N 是宇宙成因核素的浓度 ($\text{atom} \cdot \text{g}^{-1} \text{SiO}_2$), P 是生成速率 ($\text{atom} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), λ 是核素衰变常数, ρ 是岩石密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), Λ 是石英中宇宙射线衰减

系数 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), T 为岩石自暴露于宇宙射线以来的时间, N_0 为继承浓度,无核素继承时这一值为 0 (Lal, 1991; Brown et al, 1992)。

这一等式通常被用于计算暴露年龄或侵蚀速率。如果一岩石表面自暴露以来从未被侵蚀且并不含有继承性的宇宙成因核素,那么等式 (1) 简化为:

$$N = P(1 - e^{-\lambda T}) / \lambda \quad (2)$$

由这一等式可以计算暴露年龄 T 。由于原地宇宙成因核素的含量是随样品暴露时间的增加而增加的,当岩石表面暴露相当长时间 (几个核素半衰期),核素的含量会趋于稳定,即生成的核素量与由于侵蚀衰变而损失的量平衡。从而,测定表面岩石中原地宇宙成因核素含量就可以计算其暴露期间的平均剥蚀速率 (Lal, 1991)。那么等式 (1) 可转化为:

$$N = P / (\lambda + \rho\varepsilon/\Lambda) \text{ 或者 } \varepsilon = \Lambda(P/N - \lambda) / \rho \quad (3)$$

由测定的核素浓度,即可计算出侵蚀速率。运用等式 (2) 或 (3), 必须满足两个条件。一是岩石表面的宇宙成因核素生成速率 P 为常数,不随时间变化,二是岩石表面持续暴露于宇宙射线并且自暴露以来未被埋藏过。然而,在许多实际的地质问题研究中,很难通过野外调查来判断这些假设是否成立。那么计算所获得的是暴露年龄最小值和侵蚀速率最大值。

近年来,宇宙成因核素方法被广泛用于山脉平均侵蚀速率的测定。这一方法选用自然界广泛分布的石英作为目标矿物,经过化学处理提取其中的 Be 和 Al,由加速器质谱仪测得样品中原地宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 的含量,用于计算地表的暴露时间或侵蚀速率。

2 样品采集与样品制备

本研究选择河西走廊北缘的合黎山进行采样 (图 1)。该区与北山 (安西以北的马鬃山区) 和龙首山组成了北山山地。大体呈北西—南东走向,由西北向东南岛状分布,海拔在 1400—1900 m。由于气候干燥,风化剥蚀严重,山地岩石与山麓砾石裸露,常形成“岩漠”与“砾漠”景观 (国家地震局地质研究所和国家地震局兰州地震研究所, 1993)。二叠纪花岗岩,山前分布白垩纪山麓相碎屑岩并零星分布侏罗纪山麓相碎屑岩。该区属温带干旱区,年均降水量 100—200 mm。考虑到暴露测年物质为石英,本研究采集了露头上富含石英矿物的岩石样品。并且为尽可能减少

宇宙射线穿过样品引起的不确定性，本研究中所采集样品厚度均小于 5 cm。使用手持 GPS 记录采样点的经纬度和海拔（表 1）。使用测斜仪测

量采样点与周围山脉间的仰角，以计算地形屏蔽系数。基于以上采样要求，共采集 3 个样品。图 1 为采样点的地理位置和照片。

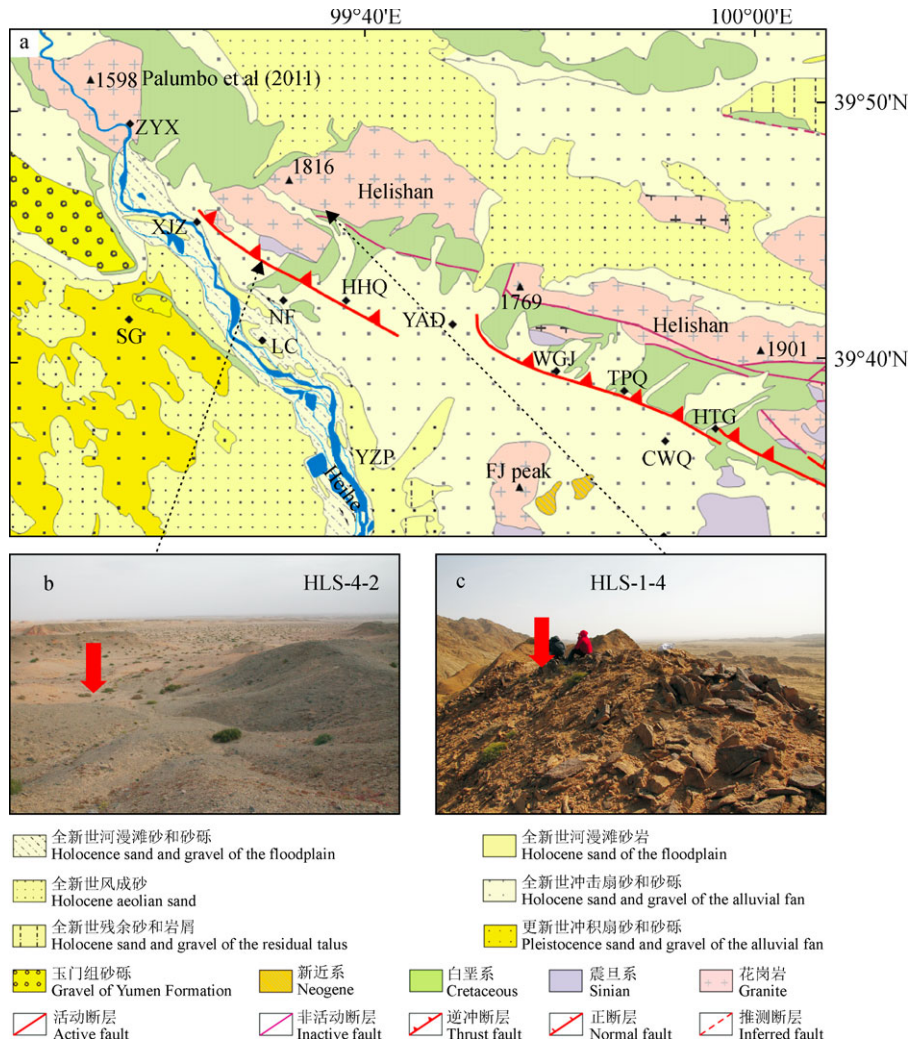


图 1 a : 标示采样点的合黎山地貌图 (基于 Zheng et al (2013) 修改) ; b : HLS-4-2 照片 ; c : HLS-1-4 照片 ; 图中还标出了 Palumbo et al (2011) 的采样点

Fig.1 a : Map of the studied area (modified from Zheng et al (2013)), the sampling site of Palumbo et al (2011) is also marked; b : sampling site HLS-4-2; c : sampling site HLS-1-4

表 1 合黎山露头基岩样品的 ¹⁰Be 和 ²⁶Al 数据及暴露年龄和侵蚀速率结果
Tabl.1 Dating and erosion rate results of bed rock from Helishan using ¹⁰Be and ²⁶Al

样品编号 Sample No.	纬度 Latitude /°N	经度 Longitude /°E	海拔高度 Altitude /m	样品厚度 Sample thickness /cm	屏蔽系数 Shielding factor	浓度 Concentration /((10 ⁵ atoms · g ⁻¹))		最小暴露年代 Minimum exposure age /ka		最大侵蚀速率 Maximum erosion rate/(mm · ka ⁻¹)	
						¹⁰ Be	²⁶ Al	¹⁰ Be	²⁶ Al	¹⁰ Be	²⁶ Al
HLS-1-4	39.7682	99.6160	1557	2	0.9997	4.1±0.1	27.9±0.7	30±3	29±3	23±2	24±2
HLS-1-3	39.7678	99.6168	1557	2	0.9997	2.9±1.0	28.1±0.6	21±7	29±3	33±13	24±2
HLS-4-2	39.7269	99.5955	1357	2	1	5.1±0.1	32.7±0.6	43±4	39±4	16±1	18±2

样品制备在中国科学院地球环境研究所西安加速器质谱中心完成。野外采集的岩石样品带回实验室进行初步清洗、烘干、粉碎, 筛选 0.25—0.50 mm 粒径组分。使用磁选仪去除磁性矿物(杂质)。再使用 4—5 次 1% HF+1% HNO₃ 处理, 去除长石等铝硅酸盐和大气成因 ^{10}Be (Kohl and Nishiizumi, 1992; <http://www.physics.purdue.edu/primelab/MSL/Flowchart%20copy.jpg>.) 并提取纯净石英。ICP-AES (电感耦合等离子体原子发射光谱仪) 分析, 测试 Al 含量, 以检测石英纯度。纯净

石英样品中加入 0.3—0.5 mg ^9Be 载体溶液和 ^{27}Al 载体 (其加入量依 ICP-AES 测试结果确定), 使用 HF 和 HNO₃ 消解, 高氯酸去除氟化物。使用阴、阳离子交换树脂分离 Be 和 Al (1 mol·L⁻¹ HCl 将 Be²⁺ 从阳离子交换树脂洗脱, H₂C₂O₄-HCl 混合溶液将 Al³⁺ 从阴离子交换树脂洗脱)。之后, 分别加入氨水获得 Be(OH)₂ 和 Al(OH)₃ 沉淀, 转至石英坩埚并置于马弗炉于 900 °C 灼烧生成 BeO 和 Al₂O₃, 再分别与铌粉、铜粉混合, 压制靶样进行 AMS 测量 (图 2)。

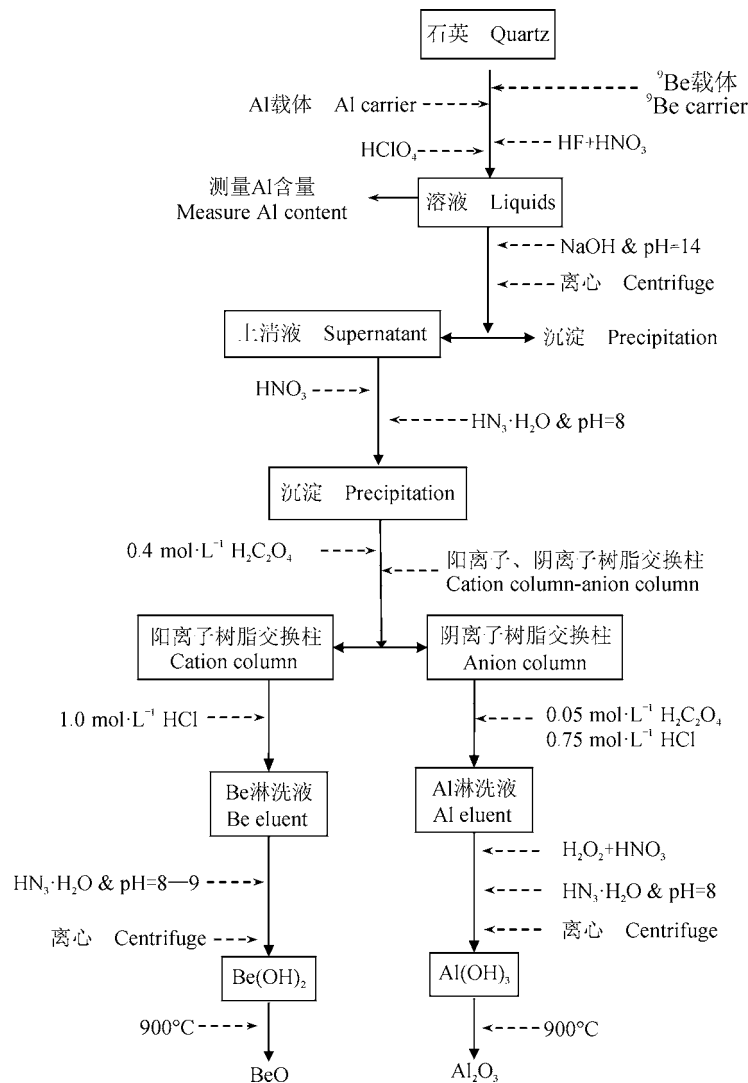


图 2 从石英提取 Be 和 Al 的实验流程图 (根据 Zhang et al (2016) 修改)

Fig.2 Experimental procedure of Be and Al extraction from pure quartz (modified from Zhang et al (2016))

所溶解石英样品的总铝含量在中国科学院地球环境研究所 ICP-AES 测试, ^{10}Be 和 ^{26}Al 测量在西安加速器质谱中心 3 MV AMS 进行 (Zhou

et al, 2007)。样品的 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 由 NIST 的 AMS 标准 SRM-4325 校正 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 2.68 \times 10^{-11}$), $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 由 ICN AMS 标准 ($^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 1.065 \times 10^{-11}$)

校正 (Nishiizumi et al, 2007)。

3 结果与讨论

3.1 侵蚀速率的结果与分析

根据 AMS 测得 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比值、样品质量及 Be、Al 载体质量, 计算得到石英样品中的 ^{10}Be 和 ^{26}Al 浓度。然后根据 CRONUS-Earth 在线侵蚀速率计算程序进行计算 (Balco et al, 2008)。需要指出的是, 如果过去侵蚀速率变化很大, 那么由核素浓度所获得是有效暴露时间内的平均侵蚀速率。使用的高纬度海平面 ^{10}Be 和 ^{26}Al 产率分别为 $4.76 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $30.6 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 产率校正选用 Lal (1991) 和 Stone (2000) 的 time-independent 校正方法 (Balco et al, 2008; <http://hess.ess.washington.edu/>)。进行侵蚀速率计算时考虑此区域植被盖度低, 季节性积雪影响小, 故忽略了季节性积雪和植被遮蔽的影响。CRONUS 方法中包括了纬度、海拔、样品厚度和样品密度 ($2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 校正。为便于比较, 本文也给出了样品的最小暴露年龄。样品的测试分析结果、最大侵蚀速率、最小暴露年龄及其它参数见表 1。

样品的暴露历史 (样品在初次暴露之后是否有过埋藏或再暴露的情况) 对于运用宇宙成因核素获得侵蚀速率或地表暴露年代有重要影响。通常可以同时测量两种半衰期不同的核素来进行评价 (Lal, 1991)。由于同时测定了 ^{10}Be 和 ^{26}Al 浓度, 为此, 将数据投射在稳态侵蚀岛曲线上 (Lal, 1991) (图 3)。样品 HLS-1-4 和 HLS-1-3 基于 ^{10}Be 、 ^{26}Al 的侵蚀速率在误差范围内基本一致, 并且图 3 显示二者均落在稳定侵蚀岛内。这表明这两个样品的暴露历史简单。HLS-1-4 的最大稳态侵蚀速率是 $(23 \pm 2) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Be) 和 $(24 \pm 2) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Al)。HLS-1-3 的最大侵蚀速率与之基本相当, 为 $(33 \pm 13) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Be) 和 $(24 \pm 2) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Al)。HLS-4-2 落在了稳态侵蚀岛下方。这说明其暴露历史复杂, 可能曾经被暴露—埋藏—暴露。

3.2 与全球已见报道侵蚀速率结果的比较

本研究所获得的侵蚀速率为 $18\text{—}24 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$, 平均值为 $22 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。目前国内外学者运用宇宙成因核素和裂变径迹等方法得到的地表侵蚀速率从每千年数厘米到数米不等 (Bierman and Turner, 1995; Small et al, 1997; Bierman and Caffee,

2002; Lal et al, 2004; Kong et al, 2007)。使用这一方法, 已见报道的山区剥蚀速率 $10 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ (Schäfer et al, 2002), 美国犹他州早更新世河流阶地剥蚀速率 $14 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ 。Portenga and Bierman (2011) 对全球 450 个露头样品数据的统计表明, 其平均侵蚀速率为 $(12 \pm 1.3) \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 。本研究结果与这些已见报道的数据基本一致。

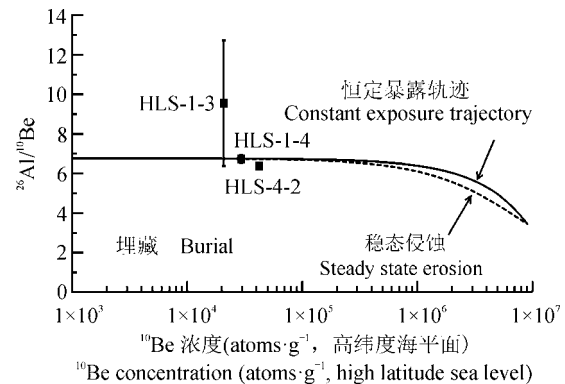


图3 合黎山基岩样品的 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ - ^{10}Be 图
Fig.3 Diagram of the $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ ratios vs ^{10}Be concentrations for Helishan bed rock samples

3.3 与干旱区长期侵蚀速率的比较

表 2 是干旱地区由宇宙成因核素获得的侵蚀速率的对比。南极、澳大利亚和纳米比亚沙漠基岩侵蚀速率很低, 为 $0.1\text{—}1 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Nishiizumi et al, 1991; Bierman and Caffee, 2002; Van der Wateren and Dunai, 2001), 而亚利桑那的 Yuma Wash 和以色列的 Nahal Yael 则相当高, 约为 $30 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Clapp et al, 2002)。青藏高原西北部的为 $12.3 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (Kong et al, 2007), 本研究结果与此基本一致。这一结果与非干旱地区的基岩所得侵蚀速率也基本一致 (Small et al, 1997), 但是显著高于干旱的南极地区和半干旱的澳大利亚。很显然南极、澳大利亚和纳米比亚沙漠较低的侵蚀速率不能仅仅归因于之前所认为的水的缺乏或低的年均降水量 (Nishiizumi et al, 1991; Bierman and Caffee, 2002)。Riebe et al (2001) 结合加利福尼亚 Sierra Nevada 侵蚀速率的研究及其温带气候环境, 认为气候变化似乎不太可能显著影响多山的花岗岩地区的冰川侵蚀。除了气候, 构造活动是地貌侵蚀中另一个重要控制因子。表 2 似乎显示高侵蚀速率的干旱地区都是构造活动区

域。这表明构造活动可能在控制地貌侵蚀速率中扮演着重要角色 (Kong et al, 2009)。Riebe et al (2001)、Bierman and Nichols (2004) 也都指出过构造活动在侵蚀速率控制中的重要性。

3.4 基岩侵蚀速率和流域平均侵蚀速率的比较

Bierman (1994) 指出宇宙成因核素测定的基岩侵蚀速率小于同一环境背景下的流域侵蚀速率。Small et al (1997) 和 Quigley et al (2007) 的研究也显示了类似的差别。Portenga and Bierman (2011) 对已见报道的 22 个同时测定了露头基岩和盆地流域侵蚀速率的地点或区域的数据进行了统计, 其中有 12 个地点的数据分析表明盆地流域比露头侵蚀更快; 而其余 10 个地点, 盆地流域和露头的侵蚀速率没有统计分析上的显著差别; 没有一个地点的数据的 T 检验表明露头基岩比附近的流域侵蚀快。Bierman and Nichols (2004) 对 9 个地点研究发现, 整体来讲, 较于汇水盆地,

裸露基岩上沉积物生成更慢。将本文研究获得的基岩侵蚀速率与 Palumbo et al (2011) 对于合黎山西侧一个流域的流域盆地平均侵蚀速率的对比 ($99 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$, 见 Palumbo et al (2011) 表 2) 显示了类似的差别。目前对于这一对比结果并没有非常明确的解释。一方面可能是露头基岩和流域盆地侵蚀速率受控于不同的过程, 并且发生于不同的物理、化学和水文环境下。露头基岩位置高于周围的地貌, 暴露的环境极大地影响近地表侵蚀过程 (物理的和化学的) 对所暴露岩石的冲刷 (Twidale, 1982)。其稳定性很可能是干旱的局部气候导致的降水快速冲刷掉暴露的岩石表面 (Portenga and Bierman, 2011)。Granger et al (2001) 通过对基岩、残留岩石和流域沉积物 ¹⁰Be 的测量研究, 表明在减缓风化层侵蚀速率上坡面覆盖的重要性。显然, 仍需更多的不同环境下的研究, 以阐明风化层和土壤覆盖在岩石风化速率方面的作用。

表 2 干旱区长期侵蚀速率的对比
Tab.2 Comparison of long-term erosion rate in arid regions

地点 Site	海拔高度 Altitude/m	年降水量 Annual precipitation /($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	侵蚀速率 Erosion rate /($\text{mm} \cdot \text{ka}^{-1}$)	构造活动 Tectonics	参考文献 Reference
Antarctica	1180—2400	50	0.1—1.0	不活跃 Inactive	Nishiizumi et al, 1991
Eyre Peninsula, Australia	150—550	325	0.7	不活跃 Inactive	Bierman and Caffee, 2002
Namib Desert	425—920	10—100	0.5—1.0	不活跃 Inactive	Van der Wateren and Dunai, 2001
青藏高原西北部 Northwest of Tibetan Plateau	5000—5500	50	12	活跃 Active	Kong et al, 2007
Yuma Wash, Arizona	100—550	91	30	活跃 Active	Clapp et al, 2002
Nahal Yael, Israel	240	30850	29±6	活跃 Active	Clapp et al, 2000
合黎山西南部 Southwest of Helishan	1300—1500	100—200	24	活跃 Active	本研究 This study

3.5 侵蚀速率控制因子初步分析

Portenga and Bierman (2011) 对于已见报道的 22 个同时测定了露头基岩和盆地流域侵蚀速率的地点或区域的数据进行双变量全球对比发现, 露头基岩侵蚀速率与纬度、海拔或地震活动没有相关性。从全球来看, 露头基岩侵蚀速率随地形起伏和平均年降水量变化不大。Lal et al (2003) 运用宇宙成因核素 ¹⁰Be 对青藏高原内部多个地区

的剥蚀速率进行了研究, 认为主要是构造活动在制约着高原的剥蚀速率。Kong et al (2007) 认为, 气候条件和构造活动对青藏高原的剥蚀速率均有一定影响, 但构造活动的制约更甚于气候变化。本研究区地处青藏高原东北缘河西走廊北缘的合黎山南缘断裂, 与龙首山南缘断裂共同构成了河西走廊中段张掖 - 民乐盆地的北部边界, 是其南部青藏高原最新活动的动力向北部的阿拉善

块体传递和过渡的最为敏感的地区之一(郑文俊等, 2009)。Zheng et al (2013)通过地形剖面、地貌影响解译和OSL测年,认为合黎山西段被断错的洪积扇形成于9—19 ka,垂直滑动速率为0.18—0.2 mm·ka⁻¹; 1—4 Ma,很可能是自2 Ma以来,合黎山开始抬升。那么合黎山西南部的侵蚀速率在一定程度上受到构造活动的影响。侵蚀速率高的干旱地区基本都对应构造活动活跃的区域。这可能表明对于地貌侵蚀速率,构造活动似乎起着更重要的作用。

4 结论

运用宇宙成因核素¹⁰Be-²⁶Al技术,计算获得了位于青藏高原东北缘合黎山30 ka以来的稳态侵蚀速率。¹⁰Be和²⁶Al获得的侵蚀速率的良好一致性表明本研究中所用侵蚀模式的有效性。基岩侵蚀速率小于已见报道同一研究区域的平均流域侵蚀速率。这可能是由于露头 and 流域盆地侵蚀速率受控于不同的过程,并且发生于不同的物理、化学和水文环境下所造成。

致谢:感谢周卫健院士对此项工作的指导和支持。常宏研究员指导并参与了野外探勘和样品采集,熊晓虎助理研究员帮助测量了总铝含量,在此一并表示感谢。

参考文献

国家地震局地质研究所,国家地震局兰州地震研究所. 1993. 祁连山-河西走廊活动断裂系[M]. 北京:地震出版社:148-174. [Institute of Geology, State Seismological Bureau, Lanzhou Institute of Seismology, State Seismological Bureau. 1993. The Qilian Mountain-Hexi Corridor active fault system [M]. Beijing: Seismological Press: 148-174.]

孔屏,那春光. 2007. 青藏高原的剥蚀与构造抬升[J]. *第四纪研究*, 27(1): 1-5. [Kong P, Na C G. 2007. Erosion and uplift of Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 27(1): 1-5.]

许刘兵,周尚哲. 2009. 基于宇宙成因核素¹⁰Be的青藏高原东南部地区末次间冰期以来地表岩石剥蚀速率研究[J]. *地质学报*, 83(4): 487-495. [Xu L B, Zhou S Z. 2009. Quantifying erosion rates in the Southeastern Tibetan Plateau since the last interglacial using *in-situ* cosmogenic radionuclide ¹⁰Be [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(4): 487-495.]

郑文俊,张培震,袁道阳,等. 2009. 甘肃高台合黎山南缘发现地震地表破裂带[J]. *地震地质*, 31(2): 247-255. [Zheng W J, Zhang P Z, Yuan D Y, et al. 2009. Discovery of surface rupture zone on the south of Helishan in Gaotai, Gansu Province [J]. *Seismology and Geology*, 31(2): 247-255.]

周卫健,孔祥辉,鲜锋,等. 2010. 中国黄土¹⁰Be重建古地磁场变化史的初步研究[J]. *地球环境学报*, 1(1): 20-27. [Zhou W J, Kong X H, Xian F, et al. 2010. Preliminary study on the reconstruction of the paleogeomagnetic intensities by ¹⁰Be in Loess of China [J]. *Journal of Earth Environment*, 1(1): 20-27.]

Balco G, Stone J O, Lifton N A, et al. 2008. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ¹⁰Be and ²⁶Al measurements [J]. *Quaternary Geochronology*, 3: 174-195.

Beaumont C, Kooi H, Willet S. 1999. Progress in coupled tectonic-surface process models with application to rifted margins and collisional orogens [M]// Summerfield M A. *Geomorphology and global tectonics*. Chichester: John Wiley: 29-55.

Bierman P R, Caffee M. 2002. Cosmogenic exposure and erosion history of Australian bedrock landforms [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(7): 787-803.

Bierman P R. 1994. Using *in situ* cosmogenic isotopes to estimate rates of landscape evolution: A review from the geomorphic perspective [J]. *Journal of Geophysical Research*, 99: 13885-13896.

Bierman P, Nichols K K. 2004. Rock to sediment-slope to sea with ¹⁰Be-rates of landscape change [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 32: 215-255.

Bierman P, Turner J. 1995. ¹⁰Be and ²⁶Al evidence for exceptionally low rates of Australian bedrock erosion and the likely existence of pre-Pleistocene landscapes [J]. *Quaternary Research*, 44: 378-382.

Brown E T, Brook E J, Raisbeck G M, et al. 1992. Effective attenuation lengths of cosmic rays producing ¹⁰Be and ²⁶Al in quartz: Implication for exposure age dating [J]. *Geophysical Research Letters*, 19(4): 369-372.

Clapp E M, Bierman P R, Caffee M. 2002. Using ¹⁰Be and ²⁶Al to determine sediment generation rates and identify sediment source areas in an arid region drainage basin [J]. *Geomorphology*, 45(1): 89-104.

Elmore D, Phillips F M. 1987. Accelerator mass spectrometry

- for measurement of long-lived radioisotopes [J]. *Science*, 236(4801): 543–550.
- Gosse J C, Phillips F M. 2001. Terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides: theory and application [J]. *Quaternary Science Reviews*, 20: 1475–1560.
- Granger D E, Lifton N A, Willenbring J K. 2013. A cosmic trip: 25 years of cosmogenic nuclides in geology [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 125(9/10): 1379–1402.
- Granger D E, Riebe C S, Kirchner J W, et al. 2001. Modulation of erosion on steep granitic slopes by boulder armoring, as revealed by cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 186: 269–281.
- Kohl C P, Nishiizumi K. 1992. Chemical isolation of quartz for measurement of *in-situ*-produced cosmogenic nuclides [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(9): 3583–3587.
- Kong P, Na C G, Fink D, et al. 2007. Erosion in northwest Tibet from *in-situ*-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al in bedrock [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1): 116–125.
- Lal D, Harris N B W, Sharma K K, et al. 2003. Erosion history of the Tibetan Plateau since the last interglacial: constraints from the first studies of cosmogenic ^{10}Be from Tibetan bedrock [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1): 33–42.
- Lal D. 1991. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: *in situ* nuclide production rates and erosion models [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2): 424–439.
- Nishiizumi K, Imamura M, Caffee M W, et al. 2007. Absolute calibration of ^{10}Be AMS standards [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research Section*, 258(2): 403–413.
- Nishiizumi K, Kohl C P, Arnold J R, et al. 1991. Cosmic ray produced ^{10}Be and ^{26}Al in Antarctic rocks: exposure and erosion history [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 440–454.
- Nishiizumi K, Lal D, Klein J, et al. 1986. Production of ^{10}Be and ^{26}Al by cosmic rays in terrestrial quartz *in situ* and implications for erosion rates [J]. *Nature*, 319: 134–136.
- Palumbo L, Hetzel R, Tao M, et al. 2011. Catchment wide denudation rates at the margin of NE Tibet from *in situ* produced cosmogenic ^{10}Be [J]. *Terra Nova*, 23(1): 42–48.
- Portenga E W, Bierman P R. 2011. Understanding Earth's eroding surface with ^{10}Be [J]. *GSA Today*, 21(8): 4–10.
- Quigley M, Sandiford M, Fifield K, et al. 2007. Bedrock erosion and relief production in the northern Flinders Ranges, Australia [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(6): 929–944.
- Riebe C S, Kirchner J W, Granger D E, et al. 2001. Minimal climatic control on erosion rates in the Sierra Nevada, California [J]. *Geology*, 29(5): 447–450.
- Schäfer J M, Tschudi S, Zhao Z, et al. 2002. The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170000 yr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 194: 287–297.
- Small E E, Anderson R S, Repka J L, et al. 1997. Erosion rates of alpine bedrock summit surfaces deduced from *in situ* ^{10}Be and ^{26}Al [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(3): 413–425.
- Stone J O. 2000. Air pressure and cosmogenic isotope production [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 105(B10): 23753–23759.
- Twidale R. 1982. Granite Landforms [M]. Amsterdam: Elsevier: 1–372.
- Van der Wateren F M, Dunai T J. 2001. Late Neogene passive margin denudation history-cosmogenic isotope measurements from the central Namib Desert [J]. *Global and Planetary Change*, 30(3): 271–307.
- Zhang L, Wu Z K, Chang H, et al. 2016. A case study using ^{10}Be - ^{26}Al exposure dating at the Xi'an AMS Center [J]. *Radiocarbon*, 58(1): 193–203.
- Zheng W J, Zhang P Z, Ge W P, et al. 2013. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 32(2): 271–293.
- Zhou W J, Lu X F, Wu Z K, et al. 2007. New results on Xi'an-AMS and sample preparation systems at Xi'an-AMS center [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 262(1): 135–142.
- Zhou W J, Warren B J, Kong X H, et al. 2014. Timing of the Brunhes-Matuyama magnetic polarity reversal in Chinese loess using ^{10}Be [J]. *Geology*, 42(6): 467–470.