

花岗岩表面侵蚀速率估算

——基于稻城古冰帽宇生核素 Be-10 暴露测年研究

梁兴江¹⁾, 陈麓名²⁾, 张志刚^{2, 3, 4}, 郑超刚²⁾, 赵丹²⁾,
李奕曼²⁾, 卢楠心²⁾, 张红梅²⁾

- 1) 江苏省地质勘查技术院, 南京, 210049; 2) 南京师范大学地理科学学院, 南京, 210023;
3) 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京, 210023;
4) 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京, 210023

内容提要: 宇生核素 Be-10 暴露测年方法是目前冰川地貌最成功的测年方法之一, 该技术在全球冰川地貌年代测定中作出了巨大贡献。在测年过程中, 通常会选择花岗岩样品进行年代测定, 然而, 万年尺度的花岗岩由于受到风化作用的影响会降低其表面宇生核素 Be-10 的浓度, 从而导致低估地貌体的暴露年代。如何定量估算万年尺度花岗岩的侵蚀速率对冰川地貌演化和宇生核素暴露测年准确度有着重要的意义。笔者等以稻城古冰帽为研究区, 利用宇生核素 Be-10 暴露测年技术测定具有差异风化的花岗岩表面暴露年代, 并结合差异风化厚度来估算花岗岩的侵蚀速率。对 6 个花岗岩样品点 12 个 Be-10 年代样品的研究表明, 30 ka 以来, 稻城古冰帽区花岗岩侵蚀速率为 1.3 ~ 3.6 mm/ka。该研究为宇生核素暴露测年技术中样品侵蚀速率估算提供了可靠的参考依据。

关键词: 宇生核素暴露测年方法; Be-10; 花岗岩; 侵蚀速率; 稻城古冰帽

精确定年是第四纪冰川演化与环境重建的关键, 陆生原地生成宇宙成因核素(简称宇生核素)(in-situ terrestrial cosmogenic nuclides——TCN)¹⁰Be 和²⁶Al 暴露测年技术是目前古冰川地貌最成功的测年方法之一(Gosse and Phillips, 2001; 施雅风等, 2011; Balco, 2020)。该技术在重建第四纪南极冰盖变化(Dong Guocheng et al., 2016; Adams et al., 2022)、青藏高原古冰川演化(Wang Jie et al., 2013; Zhang Zhigang et al., 2023; Dong Guocheng et al., 2024)、探讨末次冰盛期末期南北半球冰川大规模退却时间是否一致(Schaefer et al., 2006; Clark et al., 2009)、区域末次冰盛期和末次冰消期发生时间、冰川作用历史及其规模(Smith et al., 2005; Zhao Jingdong et al., 2023)等方面作出了巨大贡献。然而, 由于测年误差等原因, 这些冰川地貌的暴露年代数据很少被应用于古气候研究中(Balco, 2011)。因此, 提高 TCN 暴露测年技术的精度和准确度是未来研究重点之一(Phillips et al., 2016; Balco, 2020)。

在冰川地貌测年研究中, 通常会选择在富含石英的花岗岩漂砾或者是基岩表面采集样品, 由于长时间尺度的侵蚀速率难以估计, 在年代计算过程中通常会假设侵蚀速率为 0。然而, 侵蚀速率对宇生核素暴露测年, 尤其是较老地貌的暴露年代测定有较大的影响。相关研究表明: 侵蚀速率不同、暴露时间尺度不同, 影响程度不同。侵蚀速率为 0.5、1、2 mm/ka, 对于 1×10^4 a 尺度的样品暴露年代可能低估约 0.5%, 1%, 2%; 对于 10×10^4 a 尺度的样品可能低估约 5%, 7%, 20%; 对于 50×10^4 a 尺度的样品可能低估约 40%, 70% 甚至 100% 以上(Smith et al., 2005; Owen et al., 2009; 张志刚等, 2014; Stübner et al., 2024)。因此, 有必要定量分析花岗岩样品暴露后期的侵蚀速率, 及其对 TCN 暴露测年的影响程度。

准确测定万年尺度以及万年以上尺度的地表岩石的侵蚀速率难度较大, 存在着许多不确定因素(Owen et al., 2009)。目前, 对于长尺度地表岩石侵蚀速率估算有几种方法: 一是“微风化(micro-

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41971009)的成果。

收稿日期: 2025-02-08; 改回日期: 2025-07-15; 网络首发: 2025-07-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.095

作者简介: 梁兴江, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事第四纪地质沉积地层工作与研究; Email: mowang124@163.com。通讯作者: 张志刚, 男, 1984 年生, 博士, 教授; 主要从事冰川地貌宇生核素年代学研究; Email: zhangzhigang840620@126.com。



weathering) ”或者称为“差异侵蚀法”,该方法最先由 Dahl (1967) 提出,主要是基于冰川作用后的岩石表面(磨光面、漂砾、羊背石等)由于抗风化侵蚀程度不同而在岩石表面形成侵蚀高差,再通过该岩石所代表的地貌年代来估算侵蚀速率,应用较广(Wang Jian et al., 2006; Larsen et al., 2012)。二是“宇生核素最大侵蚀速率”方法,该方法是由(Lal, 1991)提出,但是该方法应用的假设条件是样品已经达到“侵蚀平衡状态”,从而计算其最大侵蚀速率,然而,许多年轻样品如末次冰期以来的冰川漂砾,暴露时间短,其浓度并未达到稳态浓度,其估算的最大侵蚀速率意义不大(黄费新等, 2019)。三是“风化晕法”,即利用花岗岩风化晕生长与侵蚀模型来估算侵蚀速率(张威等, 2019),目前相关研究较少。四是“流域水化学法”,即通过测定河流水样阴阳离子以及悬浮颗粒物的方法估算流域内岩石的化学风化和物理风化速率,获得短时间尺度现代气候背景下区域岩石的风化速率(Gaillardet et al., 1997; Fernandes et al., 2016; 肖洒等, 2021)。

位于青藏高原东南缘的稻城古冰帽在第四纪期间,曾多次形成古冰帽并留下大量的冰川地貌遗迹,而且保存有横断山最老的冰碛垄,是基于宇生核素暴露测年进行差异侵蚀研究花岗岩侵蚀速率的理想区域(郑本兴和马秋华, 1995; 周尚哲等, 2004)。因此,笔者等以稻城古冰帽区为研究区,基于宇生核素 Be-10 暴露测年技术测定具有典型差异风化特征的漂砾或者基岩面开展花岗岩侵蚀速率定量研究。

1 研究区概况

稻城古冰帽(99°48'~100°30'E, 29°02'~30°08'N)位于青藏高原东南缘横断山脉东北部沙鲁里山中部丘状高原区(图1),其主体部分由川西甘孜藏族自治州理塘县和稻城县之间的海子山夷平面及其残丘组成。北临毛垭坝盆地和理塘盆地,东接甲洼—康嘎盆地和无量河断裂带,西界希曲和稻城河谷,长约135 km,呈西北东南走向,面积达3600 km²,一般海拔在4500~4700 m,岩性主要为印支期花岗岩以及变质岩(李炳元等, 1982; 李吉均等, 1986; 许刘兵等, 2004; 周尚哲等, 2004; 梅东, 2010)。

目前稻城海子山已无现代冰川,但在第四纪时期,该区曾多次发育冰帽并保留了大量的冰川地貌遗迹,如:冰川槽谷、冰川湖、冰蚀盆地、冰斗、冰碛垄、羊背岩、冰川漂砾等各种冰川侵蚀与堆积地貌。(郑本兴和马秋华, 1995; 崔海涛等, 2023; 李奕曼等,

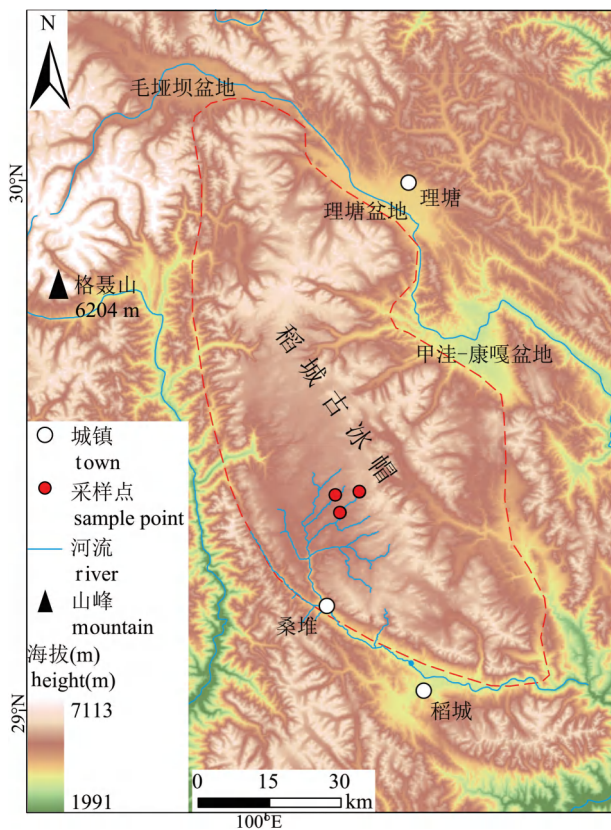


图1 稻城古冰帽位置图

Fig. 1 The map of the palaeo-Daocheng Ice Cap

2024)。

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集

2020和2022年,课题组在稻城古冰帽开展花岗岩差异风化野外考察,并选择具有典型差异风化特征的花岗岩漂砾或者基岩面采集 TCN Be-10 暴露测年样品。采样过程中,每个漂砾或者基岩表面采集1组样品,即差异侵蚀高位面和低位面岩石表面2~3 cm各采集1个样品,如图2b,漂砾凸起部分和漂砾表面(黑色网格区)各采集1个样品。本研究在6个点位共采集了12个 TCN Be-10 暴露测年样品(图2)。XYC-001和XYC-002是兴伊措附近漂砾上的一组样品(图2a),高位面和低位面呈近90°的关系(高位面与低位面间为一近直立的陡坎),相差约20 cm,很可能不是差异侵蚀造成的,为了对比验证,最终决定采集了一组样品。HYS-0611-05和HYS-0611-06是冰蚀基岩面上的一组样品,高位面和低位面相差约2 cm。HYS-0611-01,02(图2b)、HYS-0611-03,04(图2c)、HYS-0612-01,02、HYS-0612-03,04

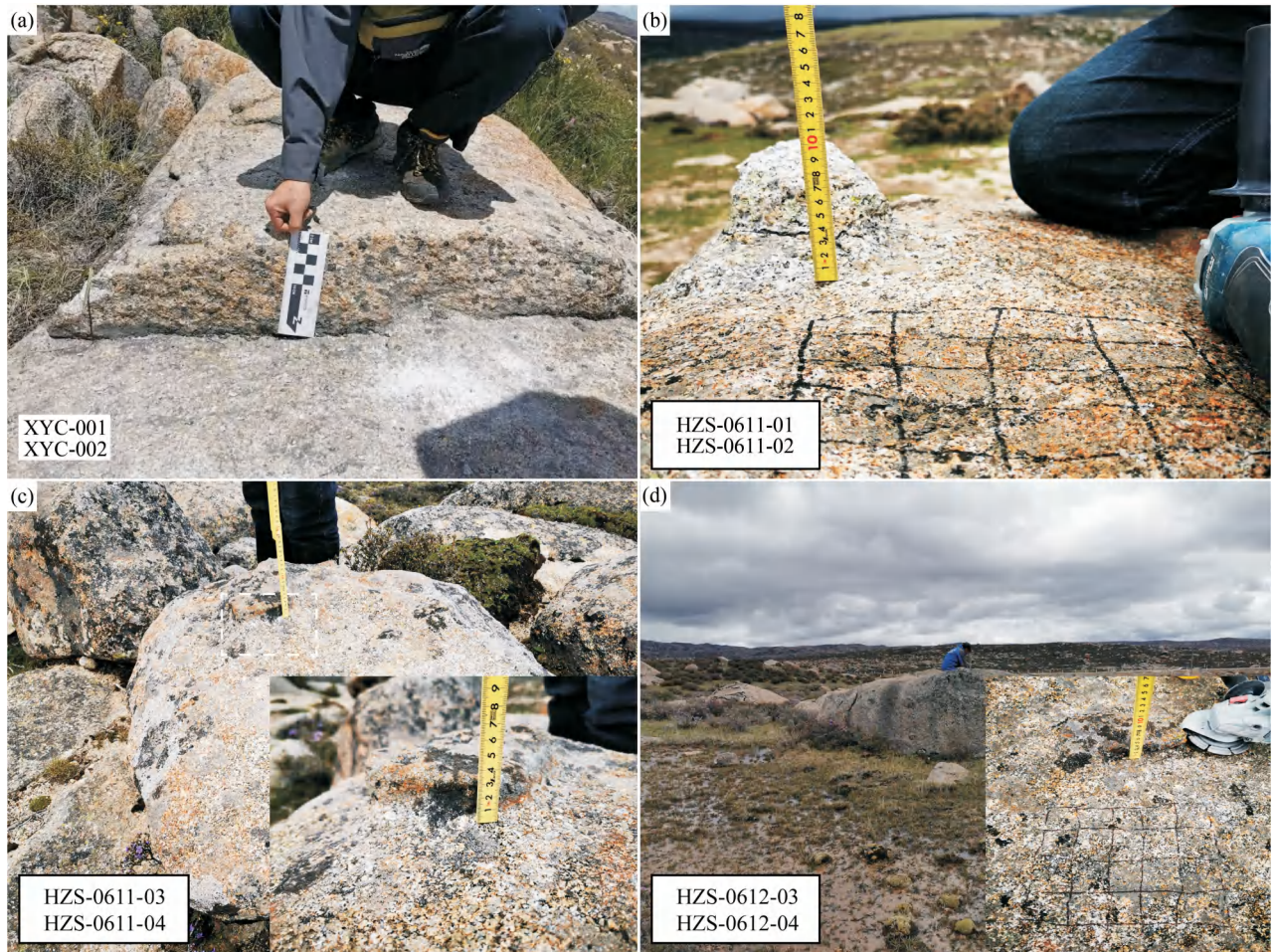


图 2 川西稻城古冰帽区差异侵蚀样品照片 (详情见表 1)

Fig. 2 Differential erosion samoles form the palaeo-Daocheng ice cap

(图 2d) 为漂砾样品。具体采样信息见表 1。

2.2 研究方法

2.2.1 宇生核素暴露测年原理与实验过程

主要来自于银河系的宇宙射线粒子经过与大气中的 N、O 等原子发生核反应后产生次级宇宙射线粒子, 这些次级宇宙射线粒子不断轰击出露于地表的岩石并与岩石中的某些目标原子发生核反应而形成新的核素, 称为原地生宇宙成因核素 (文中简称宇生核素)。岩石中生成的宇生核素浓度是岩石暴露时间与侵蚀速率的函数, 暴露时间越长, 生成的宇生核素的浓度就越大, 在假设继承性核素和侵蚀速率为 0 的情况下, 可以计算出岩石 (地貌面) 的暴露年代 (Lal, 1991; Dunai, 2001; Gosse and Phillips, 2001), 具体计算过程详见文献 (张志刚等, 2013)。

样品粉碎后筛选出 0.25~0.9 mm 粒径的颗粒, 经过人工挑选、化学分离和纯化, 提取纯石英

(Brown et al., 1991; Kohl and Nishiizumi, 1992), 随后纯石英样品放入容器中加入定量的⁹Be 载体 (约 0.25~0.5 mg), 最后加入 40% 的纯 HF 溶解。溶液加入少量 HClO₄ 后, 蒸干后再用 HCl 溶解, 至少 7 个左右样品配备一个空白样, 其化学步骤与样品完全相同, 以估算实验过程中环境背景的可能影响。然后通过离子交换将元素 Be 分离出来, 随后在含有 Be 元素的溶液中加入 NH₄OH 使溶液 pH 值达到 8 左右, 从而促使 Be(OH)₂ 的沉淀, 反复多次以消除 B 元素的影响, 接着, 在 1000℃ 高温的马弗炉中, 使 Be(OH)₂ 转换为 BeO。最后, 制靶并进行加速器质谱 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) 测试 (张志刚等, 2003)。

本文样品的前期处理在南京师范大学宇生核素超净实验室完成, 制靶和 AMS 测试是在中国科学院地球环境研究所 AMS 测试中心完成。样品暴露年龄的计算基于 CRONUS-Earth3.0 在线网络计算

表 1 川西稻城古冰帽差异侵蚀样品信息及其年代结果

Table 1 Information and ^{10}Be ages of differential erosion samples from palaeo-Daocheng ice cap

样品编号	纬度 (°)	经度 (°)	海拔 (m)	采样厚度 (cm)	$\frac{n(^{10}\text{Be})}{n(^9\text{Be})}$	^{10}Be 含量 ($\times 10^6$ atoms/g)	相对高差 (mm)	年代 (ka BP)	加权平均年代 (ka BP)	侵蚀速率 (mm/ka)
XYC-001	29.40673	100.13137	4437	2.0	5.92E-13	0.90±0.02	200	16.5±0.4	15.1	13.2
XYC-002	29.40673	100.13137	4437	2.0	5.21E-13	0.74±0.02		13.9±0.5		
HZS-0611-TCN-01	29.41258	100.17689	4657	6.0	2.61E-12	1.81±0.04	100	28.2±0.6	27.7	3.6
HZS-0611-TCN-02	29.41258	100.17689	4657	2.0	2.34E-12	1.80±0.04		27.2±0.6		
HZS-0611-TCN-03	29.41258	100.17689	4657	2.0	1.39E-12	0.93±0.03	30	15.4±0.4	15.3	2.0
HZS-0611-TCN-04	29.41258	100.17689	4657	2.0	1.27E-12	0.91±0.03		15.1±0.3		
HZS-0611-TCN-05	29.41304	100.17667	4642	2.0	1.31E-12	0.950.02	20	15.9±0.5	15.1	1.3
HZS-0611-TCN-06	29.41304	100.17667	4642	2.0	1.16E-12	0.84±0.03		14.2±0.5		
HZS-0612-TCN-01	29.37338	100.14026	4454	2.0	1.34E-12	0.94±0.02	40	17.1±0.4	16.4	2.4
HZS-0612-TCN-02	29.3733	100.14026	4454	2.0	1.19E-12	0.86±0.02		15.7±0.4		
HZS-0612-TCN-03	29.37327	100.13989	4455	2.5	4.65E-13	0.84±0.05	30	15.5±0.8	16.0	1.9
HZS-0612-TCN-04	29.37327	100.13989	4455	2.0	1.22E-12	0.92±0.03		16.8±0.5		
Blank	-	-	-	-	3.11E-15	-	-	-	-	-

程序 (<http://hess.ess.washington.edu/math/>) (Balco et al., 2008; Marrero et al., 2016)。本研究中暴露测年均采用 LSDn 生成速率模型 (Lifton et al., 2014), ^{10}Be 半衰期是 $1.387 \times 10^5 \text{a}$ (Chmeleff et al., 2010; Korschinek et al., 2010), 砾石密度为 2.7 g/cm^3 , 侵蚀速率为 0 mm/ka , 遮蔽度为 1, 样品暴露年代计算结果列于表 1。

2.2.2 侵蚀速率估算

每个漂砾或者基岩表面 2 个样品年代基于概率密度计算的加权平均年代代表样本的形成年代 (t , 单位:ka), 而高位面和低位面之间的高差 (H , 单位:mm) 则表示差异侵蚀量。花岗岩的侵蚀速率 (单位:mm/ka) 则为 H/t 。因为在样品暴露年代计算过程中, 假设侵蚀速率为 0, 因此计算的暴露年代为最小暴露年代, 那么, 侵蚀速率则为估算的一个最大值。

3 研究结果

稻城古冰帽区 6 个点位 12 个样品的宇生核素 ^{10}Be 暴露年代范围为 $13.9 \pm 0.5 \sim 28.2 \pm 0.6 \text{ ka}$, 对每组样品利用概率密度计算其加权平均年代, 其年代范围为: $15.1 \sim 27.7 \text{ ka}$ (图 3), 对应于 MIS 2。因此, 笔者等探讨 MIS 2 以来花岗岩的侵蚀速率。同一个点位的 2 个样品的暴露年代结果在同一个尺度范围内, 除 HZS-0612-TCN-03 (高位面样品) 暴露年代结果大于 HZS-0612-TCN-04 (低位面样品) 的暴露年代结果外, 其余 5 组样品均是高位面暴露年代

大于低位面的暴露年代。以每组样品的加权平均年代作为该点位样品的暴露时间, 结合差异侵蚀厚度 (相对高差), 可估算出万年尺度花岗岩的侵蚀速率为 $1.3 \sim 13.2 \text{ mm/ka}$, 但是由于样品组 XYC-001 和 XYC-002 之间的相对高差可能不是由差异侵蚀造成的 (详见讨论部分), 所以最终所估算的稻城古冰帽区花岗岩的侵蚀速率范围为 $1.3 \sim 3.6 \text{ mm/ka}$ 。

4 讨论

4.1 样品的代表性

如何证明采集的样品是属于本文要采集的差异侵蚀样品是一个关键问题也是一个难点问题。为了尽量保证样品具有侵蚀差异的代表性, 我们作了多种尝试和思考。首先, 在野外考察过程中, 我们根据不同时间尺度 (现代冰川区域) 和古冰川区域冰川漂砾表面形态可以凭经验判断样品是否是差异侵蚀造成的。如图 4 所示, 不同暴露时间尺度的冰川漂砾样品, 图 4a、b 是稻城古冰帽区古冰川地貌区域的花岗岩冰川漂砾, 图 4a 由于顶部有漂砾保护而呈现出明显的差异侵蚀, 图 4b 是冰川漂砾暴露后期的差异侵蚀而造成的, 这两类样品表面形态可以说明样品暴露后期经历了一定时间尺度的侵蚀。图 4c 是海螺沟现代冰川区域的花岗岩冰川漂砾, 图 4d 是祁连山岗什卡雪山现代冰川区域的冰川漂砾, 这两类样品由于冰川作用后暴露时间短, 其表面呈平坦状态。因此, 在采集过程中, 我们注意到可能由于外力作用和内部特征共同作用形成的差异侵蚀样品图

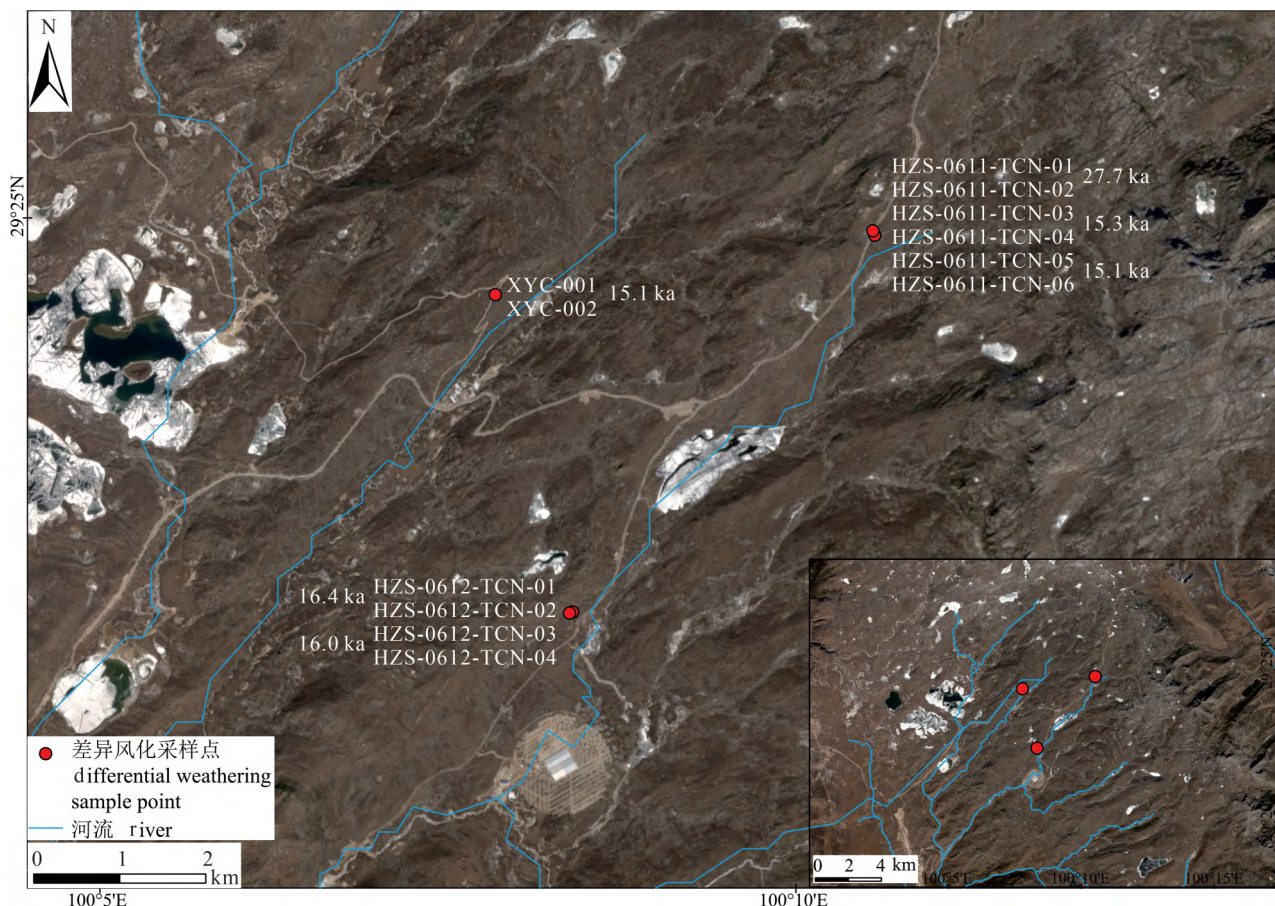


图 3 川西稻城古冰帽差异侵蚀样品地貌分布图

Fig. 3 Landform map of differential erosion samples in palaeo-Daocheng ice cap

2a 并进行了测试验证。因此,我们初步断定笔者等采集的样品除 XYC-001 和 XYC-002 样品(图 2a)外,其余样品属于差异侵蚀样品,符合笔者等的研究要求。后续如图 4a 中的样品类型也是我们要进一步研究和采集的样品。

4.2 数据的可靠性

稻城古冰帽 6 个点位的冰川地貌样品为末次冰盛期冰川事件的冰川遗迹,其年代结果为 $13.9 \pm 0.5 \sim 28.2 \pm 0.6$ ka, 对应于 MIS 2。相关学者研究表明稻城古冰帽冰在 MIS 2 曾发生过大规模的冰川作用事件(Fu Ping et al., 2013; Zhang Zhigang et al., 2014; 2025; Wang Jiangtao et al., 2023), 说明本研究的测年结果是相对可靠的。基于采样点相对地貌分布可知(图 3), 靠近冰帽中心区的 4 组样品(除 HZS-0611-TCN-01 和 HZS-0611-TCN-02, 该样品由于采自观景平台相对位置较高的地方, 可能是较老冰期的漂砾, 其暴露年代为 27.7 ka) 对应于 15 ka 的冰川事件, 而位于南边的 2 组样品对应于 16 ka 的冰川事件, 这也符合稻城古冰帽从边缘向中心逐渐

消退的过程(许刘兵等 2004; 周尚哲等, 2004)。此外, 在不考虑差异侵蚀所造成的年代差异的情况下, 同一个漂砾(基岩)样品的两个暴露年代结果相对一致的, 这也充分说明测年结果的可靠性。

4.3 稻城古冰帽区花岗岩侵蚀速率

基于差异侵蚀法所估算的稻城古冰帽区 6 个点位的花岗岩的侵蚀速率分别为 13.2 mm/ka、3.6 mm/ka、2.0 mm/ka、1.3 mm/ka、2.4 mm/ka、1.9 mm/ka。其中, 样品组 XYC-001 和 XYC-002 估算的侵蚀速率最大, 这个结果也验证了采样的设想。该样品组高位面和低位面垂直差异约 200 mm, 且呈直角关系, 可能是花岗岩沿着裂缝整体脱落或者是冰川作用过程中受到撞击后裂解的, 不是差异风化造成的, 因此排除该样品所估算的侵蚀速率。样品组 HZS-0612-TCN-03 和 HZS-0612-TCN-04 所估算的侵蚀速率为 1.9 mm/ka, 然而, 高位面样品 HZS-0612-TCN-03 的暴露年代小于低位面样品 HZS-0612-TCN-04 的暴露年代, 这与其它样品组以及客观事实不符, 这可能是由于测年误差或者其它原因



图4 不同暴露时间尺度的冰川漂砾样品

Fig. 4 Boulders at different exposure time scales

造成的,但是不可否认的是样品组的暴露年代比较一致,结合相对高差和加权平均年代估算的侵蚀速率可以作为参考。因此,综合5个点位的估算结果,稻城古冰帽区花岗岩的侵蚀速率约为 $1.3 \sim 3.6 \text{ mm/ka}$ (平均值为: 2.2 mm/ka)。Dahl (1967)利用“微风化”估算了Narvik Mountains基岩的侵蚀速率为 1 mm/ka 。Andre (2002)通过测定斯堪的纳维亚北部地区约3200个岩石样品,研究得出花岗岩和变质岩的侵蚀速率大约为 $0.2 \sim 1.2 \text{ mm/ka}$ 。Wang Jian等(2006)通过研究稻城古冰帽冰蚀基岩面未受侵蚀部位(其上有漂砾遮盖)和受到侵蚀部位的相对差异估算出冰蚀花岗岩基岩面的侵蚀速率为 0.69 mm/ka ;该结果与本研究所估算的最小侵蚀速率值(1.3 mm/ka)相近。Ballantyne (2010)、Larsen

等(2012)利用差异侵蚀的方法估算富含石英岩石的侵蚀速率分别为 2 mm/ka 、 1.8 mm/ka 、 1 mm/ka 。该研究结果与本研究侵蚀速率的平均值(2.2 mm/ka)相一致。

此外,也有学者利用原地生宇生核素(主要是 ^{10}Be 和 ^{26}Al)浓度估算地表基岩侵蚀速率,但是由于该方法应用的假设条件是样品已经达到“侵蚀平衡状态”,相关学者认为年轻样品如末次冰期以来的冰川漂砾,暴露时间短,其浓度并未达到稳态浓度,此时假设其达到稳态侵蚀解出的最大侵蚀速率意义不大(黄费新等,2019)。因此,通常采用最老年代样品来估算侵蚀速率,Smith等(2005)利用其测定样品中最老样品(873 ka和1.15 Ma的两个样品)估算漂砾的侵蚀速率为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/ka}$; Seong

等(2009)利用其测定漂砾中年代最老样品估算漂砾的侵蚀速率约为 1 mm/ka; Owen 等(2010)利用相同的思路估算其岩石的侵蚀速率约为 1.2 mm/ka。也有学者在宇生核素暴露测年过程中假设花岗岩的侵蚀速率来校正测年结果。Chai 等(2024)便采用 1 mm/ka、2 mm/ka 和 3 mm/ka 的侵蚀速率来校正测年结果。

综上所述,由于测年技术、测年误差、差异侵蚀相对高差测量误差、气候条件、海拔高度、岩性、主要侵蚀动力、岩石暴露的时间尺度等的差异,基于“差异侵蚀法”所估算的岩石的侵蚀速率有一定的误差是难以避免的。即使同在稻城古冰帽区、同样的测年技术、岩性、气候条件、海拔高度、侵蚀动力等背景下所估算的花岗岩侵蚀速率也有一定的差异。因此,未来的研究中有待于通过大量的样本数据和新的研究手段不断完善研究结果。

5 结论

笔者等基于宇生核素¹⁰Be 暴露测年方法测定稻城古冰帽区 5 个点位 10 个具有“差异侵蚀”特征的花岗岩样品的暴露年代,并结合差异侵蚀相对高差进一步估算花岗岩的侵蚀速率。研究表明,在 30 ka 以来,稻城古冰帽区花岗岩的侵蚀速率为 1.3~3.6 mm/ka。该研究为宇生核素暴露测年技术中样品侵蚀速率校正年代结果提供了可靠的参考依据,也是定量估算万年尺度花岗岩侵蚀速率的一种新的尝试。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

崔海涛, 郑超刚, 张志刚, 张宏, 郭飞, 李奕曼, 王建. 2023. 稻城古冰帽第四纪冰川地貌数字化研究. 冰川冻土, 45(5): 1667~1676.

黄费新, 李岩, 程杨. 2019. 原地生成宇宙成因核素测年技术思考(一): 稳态侵蚀等式解出的 ε 是当前地表侵蚀速率. 地质与勘探, 55(1): 145~151.

李炳元, 王富葆, 杨逸畴, 张青松. 1982. 试论西藏全新世古地理的演变. 地理研究, (4): 26~36.

李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 谢应钦, 张林源, 马正海, 徐叔鹰. 1986. 西藏冰川. 北京: 科学出版社.

李奕曼, 张志刚, 张宏, 郭飞, 赵丹, 卢楠心, 张红梅. 2024. 基于无人机 LiDAR 技术的古冰川地貌定量分析——以稻城古冰帽南缘库照日冰碛垄为例. 地质论评, 1~13.

梅东. 2010. 海子山自然保护区旅游地质资源及保护性开发研究. 导师: 孙传敏. 成都: 成都理工大学博士学位论文: 1~115.

施雅风, 赵井东, 王杰. 2011. 第四纪冰川新论. 上海: 上海科学普

及出版社.

肖酉, 赵雨晴, 张幼宽. 2021. 亚热带小流域花岗岩化学风化及 CO₂ 消耗速率研究. 高校地质学报, 27(4): 375~384.

许刘兵, 周尚哲, 崔建新, 王杰, David Mickelson. 2004. 稻城冰帽区更新世冰川测年研究. 冰川冻土, (5): 528~534.

张威, 李亚鹏, 柴乐乔, 静茹, 唐倩玉. 2019. 他念他翁山中段仁措湖地区花岗岩风化晕生长侵蚀模型研究及原地生成宇宙成因核素测年思考. 地球环境学报, 10(4): 335~346.

张志刚, 王建, 白世彪, 徐孝彬, 常直杨. 2014. 地表岩石侵蚀速率对宇生核素暴露测年影响的研究. 地理科学, 34(1): 116~121.

郑本兴, 马秋华. 1995. 川西稻城古冰帽的地貌特征与冰期探讨. 冰川冻土, 17: 23~32.

周尚哲, 许刘兵, Colgan P M, Mickelson D M, 王孝理, 王杰, 钟巍. 2007. 古乡冰期和白玉冰期的宇宙成因核素¹⁰Be 定年. 科学通报, 52(8): 945~950.

周尚哲, 许刘兵, 崔建新, 张小伟, 赵井东. 2004. 沙鲁里山第四纪地貌发育与环境演变. 科学通报, 49: 2480~2484.

Adams J R, Johnson J S, Roberts S J, Mason P J, Nichols K A, Venturelli R A, Wilcken K, Balco G, Goehring B, Hall B, Woodward J, Rood D H. 2022. New ¹⁰Be exposure ages improve Holocene ice sheet thinning history near the grounding line of Pope Glacier, Antarctica. The Cryosphere, 16: 4887~4905.

Andre M F. 2002. Rates of postglacial rock weathering on glacially scoured outcrops (Abisko—Risksransen area, 68°N). Geografiska Annaler, 84A(3~4): 139~150.

Balco G. 2011. Contributions and unrealized potential contributions of cosmogenic-nuclide exposure dating to glacier chronology, 1990~2010. Quaternary Science Reviews, 30(1~2): 3~27.

Balco G. 2020. Glacier change and paleoclimate applications of Cosmogenic-Nuclide exposure dating. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 48(1): 21~48.

Balco G, Stone J O, Lifton N A, Dunai T. 2008. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ¹⁰Be and ²⁶Al measurements. Quaternary Geochronology, 3(3): 174~195.

Ballantyne C K. 2010. Extent and deglacial chronology of the last British—Irish Ice Sheet: implications of exposure dating using cosmogenic isotopes. Journal of Quaternary Science, 25(4): 515~534.

Chai L, Zhang Wei, Liu Liangjun, Li Yapeng, Tang Qianyu, Ma Ruifeng, Sun Bo, Qiao Jingru. 2024. Late Quaternary glaciation in the Tiantaweng Mountains. Quaternary Research, 117: 3~8.

Chmeleff J, von Blanckenburg F, Kossert K, Jakob D. 2010. Determination of the ¹⁰Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 268(2): 192~199.

Clark P U, Dyke A S, Shakun J D, Carlson A E, Clark J, Wohlfarth B, Mitrovica J X, Hostetler S W, McCabe A M. 2009. The last glacial maximum. Science, 325: 710~714.

Dahl R. 1967. Postglacial micro-weathering of bedrock surfaces in the Narvik district of Norway. Geografiska Annaler, 49 A: 155~166.

Dong Guocheng, Huang Feixin, Yi Chaolu, Liu Xiaohan. 2016. Mid-late Pleistocene glacial evolution in the Grove Mountains, East Antarctica, constraints from cosmogenic ¹⁰Be surface exposure dating of glacial erratic cobbles. Quaternary Science Reviews, 145: 71~81.

Dong Guocheng, Zhou Weijian, Xian Feng, Fu Yunchong. 2024. Atmospheric CO₂ controls on the MIS 6 glaciation: ¹⁰Be chronology

- of moraines in the Haizishan area, southeastern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 633: 111898.
- Dunai T J. 1991. Influence of secular variation of the magnetic field on production rates of in situ produced cosmogenic nuclides. *Earth and Planetary Science Letters*, 193: 197~212.
- Fernandes A, Conceição F T, Spatti Junior E P, Sardinha D S, Mortatti J. 2016. Chemical weathering rates and atmospheric/soil CO₂ consumption of igneous and metamorphic rocks under tropical climate in southeastern Brazil. *Chemical Geology*, 443: 54~66.
- Fu P, Stroeven A P, Harbor J M, Hättestrand C, Heyman J, Caffee M W, Zhou L. 2013. Paleoglaciation of Shaluli Shan, southeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 64: 121~135.
- Gaillardet J, Dupré B, Allègre C, Négrel P. 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chemical Geology*, 142: 141~173.
- Gosse J C, Phillips F M. 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20: 1475~1560.
- Korschinek G, Bergmaier A, Faestermann T, Gerstmann U, Knie K, Rugel G, Wallner A, Dillmann I, Dollinger G, Gostomski C, Kossert K, Maiti M, Poutivtsev M, Rimmert A. 2010. A new value for the half-life of ¹⁰Be by heavy-ion elastic recoil detection and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268 (2): 187~191.
- Lal D. 1991. Cosmic-ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 424~439.
- Larsen N K, Linge H, Håkansson L M, Fabel D. 2012. Investigating the last deglaciation of the Scandinavian Ice Sheet in southwest Sweden with ¹⁰Be exposure dating. *Journal of Quaternary Science*, 27(2): 211~220.
- Lifton N, Sato T, Dunai T J. 2014. Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes. *Earth and Planetary Science Letters*, 386: 149~160.
- Marrero S, Phillips F, Borchers B, Lifton N, Aumer R, Balco G. 2016. Cosmogenic nuclide systematics and the cronuscal program. *Quaternary Geochronology*, 31: 160~187.
- Nishiizumi K, Kohl C P, Arnold J, Klein J, Fink D, Middleton R. 1991. Cosmic ray produced ¹⁰Be and ²⁶Al in Antarctica rocks: exposure and erosion history, *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 440~454.
- Owen L, Yi C, Finkel R, Davis N K. 2010. Quaternary glaciation of Gurla Mandhata (Naimon'anyi). *Quaternary Science Reviews*, 29: 1817~1830.
- Owen L, Robinson R, Benn D, Finkel R, Davis N K, Yi C, Putkonen J, Li D, Murray A. 2009. Quaternary glaciation of mount everest. *Quaternary Science Reviews*, 28: 1412~1433.
- Phillips F M, Argento D, Balco G, Caffee M, Clem J, Dunai T, Finkel R, Goehring B, Gosse J, Hudson A M, Jull A J T, Kelly M A, Kurz M, Lal D, Lifton N, Marrero S, Nishiizumi K, Reedy R, Schaefer J, Stone J O H, Swanson T W, Zreda M. 2016. The CRONUS-Earth project: a synthesis. *Quaternary Geochronology*, 31: 119~154.
- Schaefer J M, Denton G H, Barrell D J A, Ivy-Ochs S, Kubik P W, Andersen B G, Phillips F M, Lowell T V, Schlüchter C. 2006. Near-synchronous interhemispheric termination of the last glacial maximum in mid-latitudes. *Science*, 312: 1510~1513.
- Seong Y B, Owen L A, Yi C, Finkel R C. 2009. Quaternary glaciation of Muztag Ata and Kongur Shan: Evidence for glacier response to rapid climate changes throughout the Late Glacial and Holocene in westernmost Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 121(3/4): 348~365.
- Smith J A, Finkel R C, Farber D L, Rodbell D T, Seltzer G O. 2005. Moraine preservation and boulder erosion in the tropical Andes: Interpreting old surface exposure ages in glaciated valleys. *Journal of Quaternary Science*, 20: 735~758.
- Smith J A, Seltzer G O, Farber D L, Rodbell D T, Finkel R C. 2005. Early local last glacial maximum in the Tropical Andes. *Science*, 308: 678~681.
- Stübner K, Gadoev M, Rugel G, Lachner J, Bookhagen B. 2024. Three Pleistocene glacial advances and a warm episode during MIS-3: Towards a more complete glacial history of the Pamir mountains. *Quaternary Science Advances*, 13: 100~135.
- Wang Jian, Grand R, Xu Xiaobin, Francios Y, Bai Shibiao. 2006. In situ cosmogenic ¹⁰Be dating of the Quaternary glaciations in the southern Mountain Shaluli on the Southeastern Tibetan Plateau. *Science in China Series D: Earth Science*, 38(8): 706~712.
- Wang Jie, Kassab C, Harbor J, Caffee M, Cui Hang, Zhang Guoliang. 2013. Cosmogenic nuclide constraints on late Quaternary glacial chronology on the Dalijia Shan, northeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Research*, 79(3): 439~451.
- Wang Jie, Wang Weicheng, Cao Bo, Cui Hang, Chen Xiaojing, Qiu Jinkun, Lei Manhong, Liao Jingsheng. 2023. Millennial-scale glacier fluctuations on the southeastern Tibetan Plateau during MIS 2. *Earth and Planetary Science Letters*, 601: 117903.
- Wang Jiangtao, Zhou Weijian, Dong Guocheng, Xian Feng, Fu Yunchong, Zhang Li, Ding Pangkai. 2023. Repeated glacial fluctuations during the Last Glacial Maximum in the southeastern Tibetan Plateau: ¹⁰Be surface exposure dating of moraines in the Lahaku Valley, Haizishan Plateau, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 636(5988): 111959.
- Zhang Zhigang, Xu Xiaobin, Wang Jian, Zhao Zhijun, Bai Shibiao, Chang Zhiyang. 2014. Last Deglaciation climatic fluctuation record by the palaeo-Daocheng ice cap, Southeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(6): 1863~1874.
- Zhang Zhigang, Zhao Dan, Zheng Chaogang, Wang Jian, Zheng Jiahong, Cui Haitao, Zhao Zhijun, Kong Xinggong, Xu Xiaobin, Chang Zhiyang, Li Yiman. 2025. Quaternary glacial history of the Paleo-Daocheng ice cap (southeast Tibetan) reconstructed from in situ cosmogenic ¹⁰Be age. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 663: 112782.
- Zhang Zhigang, Zheng Jiahong, Cui Haitao, Zhao Zhijun, Kong Xinggong, Zheng Chaogang, Zhang Hong, Guo Fei, Chang Zhiyang, Yuan Xue, Yan Mingyang, Zhang Jie, Wang Jian. 2023. Cosmogenic ¹⁰Be dating of the oldest moraine in the Hengduan Mountains. *Science China Earth Sciences*, 66(10): 2211~2223.
- Zhao Jingdong, Qiu Jinkun, Harbor J, Ji Huihan, Caffee M, Guo Wanqin, Zheng Huijun. 2023. Timing and extent of late Quaternary glaciations on Karlik Mountain, eastern Tianshan range, China. *Quaternary Science Reviews*, 306: 108038.

Estimation of erosion rate of granite surfaces

—Based on cosmogenic nuclide Be-10 dating study in Daocheng Palaeo-Ice Cap, western Sichuan

LIANG Xingjiang¹⁾, CHEN Luming²⁾, ZHANG Zhigang^{2, 3, 4)}, ZHENG Chaogang²⁾,
ZHAO Dan²⁾, LI Yiman²⁾, LU Nanxin²⁾, ZHANG Hongmei²⁾

1) *Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing, 210049;*

2) *School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing, 210023;*

3) *Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing, 210023;*

4) *State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing, 210023*

Abstract: Terrestrial in situ cosmogenic nuclide (^{10}Be) exposure dating method is currently one of the most successful dating methods for glacier geomorphology, and this technology has made significant contributions to global glacier geomorphological dating. During the dating process, granite samples are usually selected for dating. However, granite exposed over millennia is subject to weathering, which reduces the concentration of cosmogenic nuclide Be-10 on the surface, leading to an underestimation of the exposure age of the landform. Thus, we aim to quantify the erosion rate of granite over millennial timescales to improve the accuracy of cosmogenic nuclide exposure dating. This application is crucial for understanding evolution of glacial landforms. This study focuses on the palaeo-Daocheng ice cap, where the Be-10 exposure dating technique was applied to determine the surface exposure ages of granites with varying degrees of weathering. Six granite samples sites and twelve Be-10 age samples were processed. By combining the weathering thickness difference, the erosion rates of granite samples were estimated. The results from six granite sample sites and twelve Be-10 age samples indicate that the erosion rate of granite in the palaeo-Daocheng ice cap area ranges from 1.3 mm/ka to 3.6 mm/ka over the past 30 ka. This study provides a reliable reference for estimating sample erosion rates in cosmogenic nuclide exposure dating.

Keywords: terrestrial in situ cosmogenic nuclides exposure dating; Beryllium-10; granite; erosion rate; palaeo-Daocheng ice cap

Acknowledgements: This paper is supported by the Project of National Natural Science Foundation of China (No. 41971009)

First author: LIANG Xingjiang, male, born in 1983, master, senior engineer, is mainly engaged in Quaternary geological sedimentary stratum work and research; Email: mowang124@163.com

Corresponding author: ZHANG Zhigang, male, born in 1984, Ph. D., professor, is mainly engaged in glacial geomorphology chronology; Email: zhangzhigang840620@126.com

Manuscript received on: 2025-02-08; Accepted on: 2025-07-15; Published online on: 2025-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.095

Edited by: ZHANG Yuxu