

文章编号: 1008-2786-(2017)4-590-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000257

# 利用宇生核素 $^{10}\text{Be}$ 暴露测年技术重建 冰川漂砾运动历史

张志刚<sup>1 2 3 4 5</sup> 王 建<sup>1 2 3 4\*</sup> 徐孝彬<sup>6</sup> 常直杨<sup>7</sup> 陈 倩<sup>1</sup>

- (1. 南京师范大学 地理科学学院 江苏 南京 210023;
2. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学) 江苏 南京 210023;
3. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点 江苏 南京 210023;
4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心 江苏 南京 210023;
5. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈国家重点实验室 甘肃 兰州 730000;
6. 江苏第二师范学院 江苏 南京 210024;
7. 南京旅游职业学院 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 20 世纪 80 年代兴起的宇生核素暴露测年技术是目前冰川地貌研究中最成功的测年方法之一,多数学者通常选择冰川漂砾进行暴露测年研究。然而,冰川漂砾在出露后期可能经过再次搬运造成“翻转”现象,从而影响测年结果。重建这类翻转漂砾的运动历史,对准确测定冰川地貌年代具有重要意义。青藏高原东南部的稻城古冰帽区保存了大量的古冰川遗迹,是宇生核素暴露测年研究的天然实验室。冰帽区有一被人为劈开的巨型漂砾,其内部垂直剖面上底部样品的宇生核素 $^{10}\text{Be}$  浓度高于顶部样品,推断该漂砾自初次出露之后可能发生过翻转。本文利用该漂砾顶部、底部、左右侧面的样品通过宇生核素 $^{10}\text{Be}$  暴露测年技术来重建该漂砾的运动历史。研究结果表明:该漂砾可能是由于深海氧同位素 3 阶段 ( Marine Isotope Stage, 简称 MIS 3) 冰川作用暴露于地表,随后经过翻转直至目前状态。

**关键词:** 宇生核素; 漂砾;  $^{10}\text{Be}$ ; 翻转; 青藏高原

**中图分类号:** P931.4

**文献标志码:** A

20 世纪 80 年代以来,随着加速质谱 ( Accelerator Mass Spectrometry, AMS) 测量技术的提高,微量原地生成宇宙成因核素 ( in situ Terrestrial Cosmogenic Nuclides, TCN) 的测定成为可能<sup>[1-2]</sup>。宇生核素 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{He}$ 、 $^{21}\text{Ne}$  等被广泛应用于暴露测年和埋藏测年研究<sup>[3-6]</sup>,尤其在冰川地貌年代测定中,宇生核素 $^{10}\text{Be}$  和 $^{26}\text{Al}$  暴露测年技术由于测年物质

易于采集、测年范围相对较广、测年原理较为成熟等原因,深受国内外地质年代学家和冰川学家青睐<sup>[7-14]</sup>。在冰川地貌暴露测年研究中,多数学者选择冰碛垄上的漂砾样品进行年代测定,然而漂砾的暴露年代数据存在着数据分散、结果相对年轻的问题<sup>[9,15-17]</sup>。冰川漂砾暴露后期的再次搬运所造成的漂砾翻转现象是影响测年结果的原因之一<sup>[8]</sup>,将会对

收稿日期 ( Received date ): 2016-10-13; 改回日期 ( Accepted date ): 2017-03-20

基金项目 ( Foundation item ): 国家自然科学基金项目 ( 41503054 ); 中国博士后科学基金项目 ( 2015M582728 ); 中国科学院重点部署项目 ( KJZD-EW-G03-04 ); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 ( 164320H116 ) [ National Natural Science Foundation of China ( 41503054 ); China Postdoctoral Science Foundation ( 2015M582728 ); Chinese Academy of Sciences ( CAS ) ( KJZD-EW-G03-04; Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions ( 164320H116 ) ] 。

作者简介 ( Biography ): 张志刚 ( 1984- ), 男,山西忻州人。博士,讲师,主要研究方向:冰川地貌年代学 [ Zhang Zhigang ( 1984- ), male, born in Xinzhou, Shanxi province, Ph. D., Lecturer, specialized in Chronology of glacial landform ] E-mail: zhangzhigang840620@126.com。

\* 通讯作者 ( Corresponding author ): 王建 ( 1962- ), 男,博士,教授,主要研究方向:地貌学与年代学 [ Wang Jian ( 1962- ), male, Ph. D., Professor, specialized in Geomorphology and chronology ] E-mail: jwang169@vip.sina.com

冰川运动事件(使漂砾第一次出露于地表的冰川作用事件)发生的真实年代造成低估。研究冰川漂砾宇生核素暴露测年存在的问题和解决方法,对重建冰川作用历史、古气候演化具有重要意义。

位于青藏高原东南部的稻城古冰帽在第四纪期间多次经历冰川作用,区域保存了大量完整的冰川遗迹(冰川漂砾、磨光面、羊背石、冰碛垄),是研究冰川作用与高原隆升耦合作用的理想区域。许多学者在此做过大量研究,主要归纳为两类,一类是对冰川地貌的考察和冰川作用期次的初步划分,将稻城古冰帽的冰川地貌划分为冰川堆积地貌和冰川侵蚀地貌,并认为稻城古冰帽区在第四纪曾发生过三次冰川作用<sup>[18-19]</sup>。另一类是对冰川地貌的绝对年代测定:稻城古冰帽区 ESR( Electron Spin Resonance) 测年结果表明该区域第四纪曾发生过 7 次冰进事件,其中 6 次可能对应于深海氧同位素 MIS 16、MIS 14/12、MIS 6、MIS 3、MIS 2 早期以及全球冰盛期<sup>[20-22]</sup>;稻城古冰帽区宇生核素<sup>10</sup>Be 结果表明该区在 MIS 16、MIS 6、MIS 2 阶段发生过冰川作用<sup>[23-24]</sup>。目前,稻城古冰帽区最老冰碛垄的形成年代、MIS3 阶段是否存在冰进事件、冰川漂砾测年数据存在分散的问题仍需要进一步研究<sup>[22-24]</sup>。

因此,本研究通过对稻城古冰帽区公路旁的一个大漂砾(该漂砾由于修路,被劈开)内部垂直剖面的顶部、底部、左右侧面采集样品进行宇生核素<sup>10</sup>Be 浓度测定,期望探讨冰川漂砾的翻转问题,并尝试建立该漂砾的运动历史。

## 1 研究区概况

稻城古冰帽(图1)位于四川西部理塘与稻城之间的海子山山顶夷平面上<sup>[21]</sup>(99°48′—100°30′E, 29°02′—30°08′N),长约 135 km,面积达 3000 km<sup>2</sup>,属于沙鲁里山高原面的一部分。北临毛垭坝盆地和理塘盆地,东接甲洼盆地和无量河断裂带,西界希曲和稻城河谷。该高山夷平面北高南低,北段帽合山海拔在 4850 ~ 5150 m 左右,主体海拔在 4600 ~ 4800 m,残留在夷平面的个别高山海拔超过 5000 m,如九拐山和稻城河北山最高峰达到 5130 m。虽然目前稻城海子山已无现代冰川,但在第四纪期间,这里曾多次形成古冰帽并留下古冰帽特殊的侵蚀堆积地貌遗迹,稻城海子山地区主要出露的是印支期的花岗岩<sup>[19-20]</sup>。

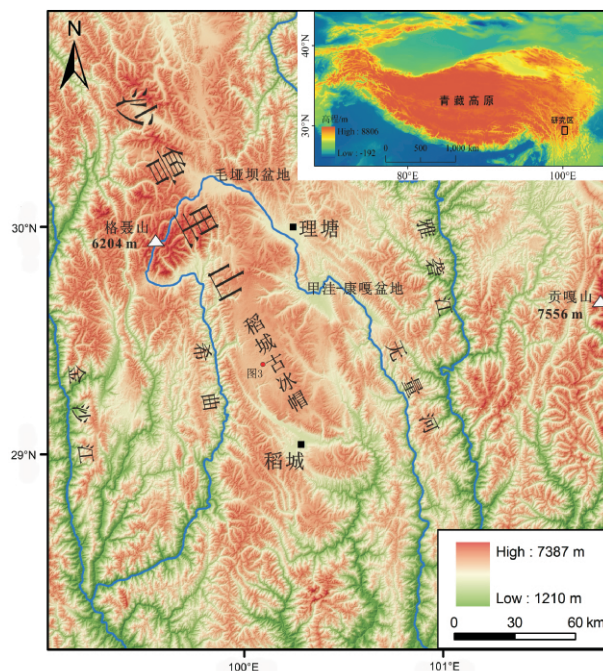


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Study area in Paleo-Daocheng Ice Cap

## 2 材料和方法

### 2.1 样品采集

稻城古冰帽区的海子山山顶夷平面分布了大量第四纪冰川作用遗留下的冰川漂砾,为冰川地貌宇生核素暴露测年研究提供了天然实验室。由于修路等其他原因,许多漂砾被劈为两半(图2),我们选择其中一个漂砾,采集顶部样品(s7)、底部样品(s13)、左侧面样品(s14)以及右侧面样品(s15)来进行漂砾翻转历史重建。由于该漂砾的采样照片意外丢失,故只能通过示意图进行展示,如图3所示。具体的采样信息见表1。



图2 海子山山顶分布的被劈开的漂砾

Fig. 2 Splitted boulders on Haizishan

表 1 漂砾不同方位、不同深度样品的宇生核素<sup>10</sup>Be 浓度

Tab. 1 Concentration of TCN <sup>10</sup>Be for the boulder sample from different azimuth and different depth

样品 编号	采样 深度 /cm	采样 部位	纬度 ( N ) / °	经度 ( E ) / °	海拔 高度 /m	石英 质量/g	<sup>9</sup> Be 质量 /mg	<sup>10</sup> Be/ <sup>9</sup> Be ( × 10 <sup>-15</sup> )	AMS 测量 相对误差 ( % )	宇生核素浓度 ( × 10 <sup>6</sup> atoms/g )	测试单位
S7	0~4	顶部	29.39	100.19	4420	9.38275	0.24535	693.90	4	1.21 ± 0.05	PU
S13	215	底部				10.48689	0.25219	908.20	3	1.46 ± 0.04	PU
S14	0~4	左侧面				8.58335	0.25340	655.70	3	1.31 ± 0.04	PU
S15	0~4	右侧面				11.39951	0.25433	1011.00	3	1.51 ± 0.05	PU
* B1	-	-	-	-	-	-	0.24846	2.84	40	-	PU
* B2	-	-	-	-	-	-	0.27544	2.75	40	-	PU
* B3	-	-	-	-	-	-	0.25435	1.74	67	-	PU

注：-表示该数据为空，\*表示标注的样品为空白样品，PU指“Purdue University”，“-”表示无对应数据。

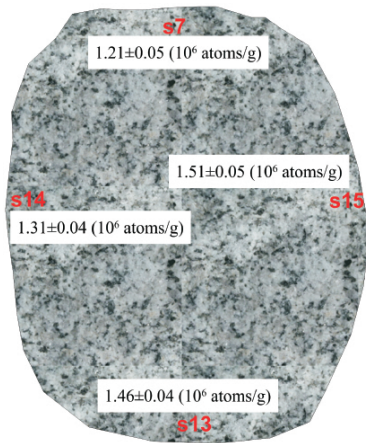


图 3 样品采集示意图

Fig. 3 Sampling positions of the big boulder

2. 2 研究方法

2. 2. 1 宇生核素暴露测年原理

本文所采用的方法为宇生核素暴露测年技术，其基本原理是：宇宙射线粒子（初始宇宙射线，主要包括质子、α 粒子、重核）与大气中的 N、O 等原子发生反应产生大量新粒子（次级宇宙射线，主要包括正负电子、μ 介子、高能光子和中子等）这些新的粒子不断轰击出露于地表的岩石，岩石中的某些目标原子与次级宇宙射线粒子以一定的方式发生核反应（散裂反应、热中子捕获、负介子捕获、快介子反应）从而生成新的核素，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，生成的宇生核素浓度就越大，通过一些假设条件便可求得岩石（地貌面）的暴露时间<sup>[3 5 25]</sup>。

$$N(x,t) = N(x,0) e^{-\lambda t} + \frac{P(0)}{\lambda + \mu \varepsilon} e^{-\mu x} [1 - e^{-(\lambda + \mu \varepsilon) t}]$$

( 1 )

式中： $N(x,t)$  指经过  $t$  时间后在  $x$  深度处样品的宇生核素浓度( atom/g )； $N(x,0)$  为暴露前深度  $x$  处样品的残留宇生核素浓度( atom/g )； $\lambda = \ln 2 / T$  ( $T$  为半衰期， $1.387 \pm 0.012 \text{Ma}$  <sup>[26 27]</sup> (<sup>10</sup>Be)) 为放射性宇宙核素的衰变系数( 1/Ma )； $t$  为暴露时间( a )； $p(0)$  为地表宇宙核素的产生率 [atoms/( g · a )]； $\mu = \rho / \Lambda$  为目标的吸收系数(  $\text{cm}^{-1}$  )； $\rho$  为目标岩石的平均密度(  $\text{g}/\text{cm}^3$  )， $\Lambda$  为目标岩石中原子核相互作用粒子的衰减路径长度(  $160 \text{ g}/\text{cm}^2$  ) <sup>[5 28-29]</sup>； $\varepsilon$  为侵蚀速率(  $\text{cm}/\text{a}$  )。

通常在计算过程中假设地表岩石初始宇生核素的浓度为 0，且宇宙射线通量为常数，地表宇生核素的产生速率为常数，因此，公式( 1) 可以简化为：

$$N = \frac{P}{\lambda + \mu \varepsilon} [1 - e^{-(\lambda + \mu \varepsilon) t}]$$

( 2 )

当假设地表没有受到风化 - 侵蚀，即侵蚀速率为 0，此时可以计算出的暴露年代为最小暴露年代：

$$t = - \frac{1}{\lambda} \ln \left[ 1 - \frac{N \lambda}{P} \right]$$

( 3 )

当假设地表岩石已达到“稳定侵蚀”状态，即  $t \gg 1 / (\lambda + \mu \varepsilon)$ ，岩石侵蚀与宇生核素的生成已经达到平衡，此时可由公式( 3) 推算出侵蚀速率，该侵蚀速率为最大侵蚀速率。计算公式为：

$$\varepsilon = \frac{1}{\mu} \left( \frac{P}{N} - \lambda \right)$$

( 4 )

2. 2. 2 实验流程

将采集到的岩石样品粉碎，筛选出 0.5 ~ 0.9 mm 粒径的颗粒，再经过人工挑选与化学分离和纯化，挑选出纯净石英<sup>[28]</sup>。选取一定量的纯净石英，用 40% 的氢氟酸( HF) 溶解掉 30% 左右的石英，目的是去除石英外层，以消除大气成因<sup>10</sup>Be 的影响<sup>[30-31]</sup>。石英去表皮后添加一定量( 约 0.25 ~ 0.5

mg) 的<sup>9</sup>Be 载体,溶解入 48% 的纯 HF 酸中,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 和元素 Al 分离出来,随后在含有 Be 元素的溶液中加入 NH<sub>4</sub>OH 使溶液 pH 值达到 8 左右,从而促使 Be(OH)<sub>2</sub> 的沉淀,反复多次以消除 B 元素的影响。最后,在 1000℃ 高温的电炉中,使 Be(OH)<sub>2</sub> 氧化形成 BeO<sup>[32]</sup>,然后进行制靶和 AMS 测试。本文样品的前期处理是在南京师范大学宇生核素超净实验室完成,制靶和 AMS 测试是在普渡大学 AMS 实验室完成,测试结果如表 1 所示。

### 2.2.3 漂砾翻转事件的确立

表 1 显示漂砾内部垂直剖面样品中(顶部样品 s7 和底部样品 s13) 宇生核素<sup>10</sup>Be 的浓度分别为  $1.21 \pm 0.05 \times 10^6$  atoms/g 和  $1.46 \pm 0.04 \times 10^6$  atoms/g,其底部样品的<sup>10</sup>Be 浓度超过了顶部样品的浓度。根据宇生核素暴露测年的基本原理可知:在近地表 2~3 米的埋藏深度范围内,宇生核素的生成速率随着埋藏深度的增大而呈指数递减。如果地表生成速率为  $p(0)$ ,对于密度为  $\rho$  (g/cm<sup>-3</sup>) 的样品,其深度  $x$  (cm) 处的生成速率  $p(x)$  为<sup>[25]</sup>:

$$p(x) = p(0) e^{-\rho x/\Lambda} = p(0) e^{-\mu x} \quad (5)$$

假设样品在暴露前初始浓度为 0,且不考虑侵蚀速率的影响,深度  $x$  (cm) 处样品中宇生核素的浓度为:

$$N(x) = \frac{p(x)}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (6)$$

根据公式(5)和(6)可知:

$$N(x) = N(0) e^{-\rho x/\Lambda} \quad (7)$$

基于以上公式和原理可知,随着采样深度的增加,理论上漂砾垂直剖面样品中宇生核素<sup>10</sup>Be 的浓度呈不断递减的情况,接近 2~3 米的底部时样品的浓度可能趋于 0,而不是如文中实测的底部样品浓度超过顶部样品浓度。那么,是什么原因导致该漂砾内部垂直剖面底部样品的宇生核素<sup>10</sup>Be 的浓度超过顶部样品<sup>10</sup>Be 浓度的现象呢?根据冰川运动对漂砾搬运的特点,笔者认为漂砾在初次出露后经过后期翻转(现在的底部就是原来的顶部),造成了目前这种现象。相关学者在本研究区测定冰川漂砾年代时也发现类似的情况,其研究发现漂砾内部中间位置宇生核素浓度与表面宇生核素浓度相当,这有悖于宇生核素浓度随深度呈指数形式递减的规律,可能的解释是漂砾可能经过后期冰川作用的再次搬

运,并对该漂砾的翻转历史进行假设模拟,认为砾石形成于倒数第二次冰期(186~128 ka),在末次冰期中再次被冰川搬运,并使之翻转<sup>[33]</sup>。因此,依据王建等(2003)<sup>[33]</sup>所介绍的方法通过漂砾不同方位(顶部、底部、左侧面、右侧面)样品的宇生核素<sup>10</sup>Be 来重建漂砾翻转历史。

### 2.2.3 漂砾翻转历史模型公式的建立

根据实验结果,我们推断该漂砾在暴露后期被再次搬运发生过翻转,也就是目前样品的底部位置曾经处于顶面位置。假设该漂砾至少翻转过一次,那么漂砾的其它侧面是否有过作为顶面的过程呢?按理说该漂砾类似与长方体,其 6 个面均有可能处于顶面位置,但是我们采样时只采集了上、下、左、右四个面的表面样品。因此,我们讨论漂砾在目前状态前经过一次翻转和三次翻转历史重建的计算过程。

#### 2.2.3.1 漂砾一次翻转计算过程

假设漂砾经过一次翻转,处于目前位置的时间为  $t_1$ ,处于翻转状态的时间为  $t_2$ ,且初次暴露之前没有继承核素,且暴露期间核素被埋藏的时间忽略不计。那么对于纵剖面的每个样品其宇生核素浓度计算公式为(依据公式(2)):

$$N_x = \frac{P_{x1}}{\lambda + \mu \varepsilon} [1 - e^{-(\lambda + \mu \varepsilon) t_1}] + \frac{P_{x2}}{\lambda + \mu \varepsilon} [1 - e^{-(\lambda + \mu \varepsilon) t_2}] e^{-\lambda t_1} \quad (8)$$

其中, $N_x$ 指在目前位置  $x$  处样品的浓度(atoms/g), $P_{x1}$ 是指在  $t_1$  时间段该位置样品的生成速率(atoms/(g·a)), $P_{x2}$ 是指在  $t_2$  时间段该位置样品的生成速率(atoms/(g·a))(对应深度的生成速率如表 2 所示),样品(s7 和 s13)目前位置和翻转位置时所对应的生成速率如表 2 所示。为了简化计算,假设侵蚀速率为 0,那么公式(8)变为:

$$N_x = \frac{P_{x1}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) + \frac{P_{x2}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_2}) e^{-\lambda t_1} \quad (9)$$

因此,样品(s7 和 s13)的浓度都可以用公式(9)进行表达,理论上公式(9)中只有  $t_1$  和  $t_2$  是未知数,只需要两个带入两个样品的浓度即可解得结果。然而,在计算过程中由于该方程是指数函数方程,未知数难以分离,利用常规的方法难以获得  $t_1$  和  $t_2$  的解。因此,本文先通过假设  $t_1$  和  $t_2$  的值,然后再依据公式(9)反推对应样品的浓度,再通过平衡这 2 个样品的推测浓度和实测浓度差值(即推测浓度与实测浓度差值最小时)来确定  $t_1$  和  $t_2$ 。 $t_1$  和  $t_2$  也要满足一定的条件:根据表 1 可知翻转状态所



停留的时间要大于目前位置所停留的时间,即  $t_1 < t_2$ ; 此外  $t_1$  和  $t_2$  的最大值不超过顶部样品(s7)的宇生核素 $^{10}\text{Be}$ 浓度完全由  $t_{1\max}$  时间段贡献或底部样品(s13)的宇生核素 $^{10}\text{Be}$ 浓度完全由  $t_{2\max}$  时间段贡献,即  $t_1 < t_{1\max}, t_2 < t_{2\max}$ 。

表 2 漂砾纵剖面样品宇生核素 $^{10}\text{Be}$ 生成速率

Tab. 2 Production rate of TCN  $^{10}\text{Be}$  for s7 and s13

样品编号	采样深度 (cm)	生成速率( atoms/g · a)	
		$p_{t1}$	$p_{t2}$
s7	0 ~ 4	57.4	1.6
s13	215	1.6	59.3

注:生成速率是根据网络计算程序(<http://hess.ess.washington.edu/>),再结合深度校正后所得。

### 2.2.3.2 漂砾三次翻转计算过程

假设该大漂砾经过三次翻转,即目前位置的顶面(s7)、底面(s13)、左侧面(s15)以及右侧面(s14)都曾作为顶面暴露于宇宙射线中,假设将漂砾看作是一个长方体的实物,如图3所示,由于三次翻转情况比较复杂,为了简化计算,该式有4个假设:(1)样品不受侵蚀速率的影响;(2)样品处于同一地理位置的表面样品,所以顶面位置的生成速率是一致的都为  $p$ (表2,选择生成速率为表面生成速率 59.3 atoms/g · a),当  $a$  处于顶面位置时,那么假设该漂砾类似一个  $90^\circ$  的悬崖,根据 Dunne (1999) [34] 可知垂直面的宇生核素生成速率为水平面宇生核素生成速率的  $1/2$ ,因此,当  $a$  为顶面是其宇生核素生成速率由  $p_a = 2p_c = 2p_d$ ,以此类推;(3)假设先前翻转状态积累的核素不考虑核素衰减;(4)由于该漂砾长约 3 m,高约 2 m,当某一表面为顶面时,可以假设底面宇生核素生成量忽略。那么漂砾每个表面样品的宇生核素浓度可由以下公式表示:

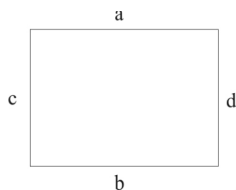


图 4 漂砾不同方位采样示意图

Fig. 4 The sampling sites from different azimuth of boulder

$$N_a = \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_a}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_c}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_d}) \quad (9)$$

$$N_b = \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_b}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_c}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_d}) \quad (10)$$

$$N_c = \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_c}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_a}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_b}) \quad (11)$$

$$N_d = \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_d}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_a}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_b}) \quad (12)$$

同理,该系列公式难以通过常规解方程组的方法进行求解,需要一定的假设条件。

(1) 当假设  $t_a = t_b = t_c = t_d = t$ , 那么  $\bar{N} = 1/4(N_a + N_b + N_c + N_d)$ , 公式(9) ~ (12) 可变为:

$$\bar{N} = \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (13)$$

$$\text{则 } t = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(1 - \frac{\bar{N}\lambda}{2p}\right) \quad (14)$$

(2) 从表1可知 s7 和 s14 样品宇生核素浓度相当( $\bar{N}_1 = 1/2(N_a + N_d)$ ), 样品 s13 和 s15 的宇生核素浓度相当( $\bar{N}_2 = 1/2(N_b + N_c)$ ), 因此假设  $t_a = t_d = t_1$ ;  $t_b = t_c = t_2$  则:

$$\bar{N}_1 = \frac{3}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_1}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_2}) \quad (15)$$

$$\bar{N}_2 = \frac{3}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_2}) + \frac{1}{2} \frac{p}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_1}) \quad (16)$$

利用公式(15)和公式(16)便可解出  $t_1$  和  $t_2$ 。

## 3 结果

### 3.1 漂砾一次翻转历史重建

假设该漂砾经历了一次翻转,根据上述介绍,首先根据宇生核素暴露测年基本原理中公式(3)可以解出  $t_{1\max} = 21\,190\text{ a}$ ,  $t_{2\max} = 24\,702\text{ a}$ 。该漂砾纵剖面深度约 2 m 左右,在该深度的样品由宇宙射线散裂反应所生成的宇生核素量非常小,因此在估算过程中  $t_1$  和  $t_2$  应该比较接近于  $t_{1\max}$  和  $t_{2\max}$ ,且应满足尽可能使得剖面各个样品的推测浓度与实测浓度误差最小(表3)。

表 3 漂砾翻转历史估算  
Tab. 3 Re-transportation history of boulder

样品编号	AMS 测试浓度 ( $N_{\text{实测}}$ atoms/g)	反推浓度 ( $N_{\text{反推}}$ atoms/g)	$  (N_{\text{反推}} - N_{\text{实测}})  $ / $N_{\text{实测}} \times 100\%$	$t_1$ 估算 (a)	$t_2$ 估算 (a)
S7	1 209 066	1 207 884	0	20 500	24 500
S13	1 456 532	1 462 132	0		

因此,如果该大漂砾只经过一次翻转,目前状态暴露时间长度( $t_1$ )约为 20 500 a,先前暴露的时间长度( $t_2$ )约为 24 500 a,漂砾的形成时间为  $t_1 + t_2$ ,即形成于 45 ka 前(MIS3),然后在 20 ka 左右受到新的冰川运动影响而发生翻转。

3. 2 漂砾三次翻转历史重建

假设该漂砾经历过三次翻转,根据上文介绍,三次翻转情况计算更加复杂,因此根据样品 TCN <sup>10</sup>Be 浓度进行简化假设。

当每次翻转后漂砾停留的时间相等时,则可以计算出漂砾受到冰川作用每次翻转停留的时间为 11.6 ka,则可以估算出该漂砾最初形成的时间为 46.4 ka,对应于 MIS 3 阶段。

当样品 s7 和样品 s14 所代表的砾石表面处于顶面的时间相当,而样品 s13 和样品 s15 所代表的砾石表面处于顶面的时间相当时,其漂砾停留的两个时间段分别为 9.7 ka 和 13.5 ka,以此估算出漂砾的形成时间也为 46.4 ka,对应于 MIS 3 阶段。

以上分析可知,当假设漂砾先前有过一次翻转历史或者有过三次翻转历史,其所估算的漂砾形成时间是一致的,究其原因有待于进一步研究。

4 讨论与结论

本文通过测定大漂砾(被劈开)内部垂直剖面顶部、底部以及两个侧面样品的宇生核素<sup>10</sup>Be 浓度,发现该漂砾垂直剖面底部样品的 TCN <sup>10</sup>Be 浓度大于顶部样品的宇生核素浓度,推断其可能是经过翻转导致。然后通过对这些样品进行宇生核素暴露测年研究,在假设漂砾翻转次数的条件下重建该冰川漂砾的运动历史:若漂砾经过一次翻转,其经过冰川作用暴露于地表的时间对应于 45 ka,然后在末次盛冰期时(20 ka)再次被搬运,使之翻转,末次盛冰期后冰川退却,该砾石再次暴露一直到现在。若该漂砾在目前状态前有过三次翻转历史,不论每次翻转后砾石停留的时间长度是否一致,该漂砾的形成时

间约为 46.4 ka。因此,通过本文研究,该大漂砾可能是由于 MIS 3 阶段冰川作用出露于地表,而后经过若干次翻转直至目前状态。

如果按照传统流程计算出的漂砾表面样品的暴露年代则为 21.2 ka,对应的冰川作用将被解释为末次冰盛期的冰川作用所致,从而误判冰川作用过程。因此,在冰川地貌宇生核素暴露测年研究中,对于冰川漂砾的测年一定要注意。

参考文献(References)

[1] RAISBECK G M, YIOU F, KLEVIN J, et al. Accelerator mass spectrometer measurement of cosmogenic <sup>26</sup>Al in terrestrial and extraterrestrial matter [J]. Nature, 1983, **301**( 5902): 690 – 692.

[2] ELMORE D, PHILLIPS F. Accelerator mass spectrometry for measurement of long-lived radioisotopes [J]. Science, 1987, **236**( 4801): 543 – 550.

[3] GOSSE J C, PHILLIPS F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application [J]. Quaternary Science Reviews, 2001, **20**( 14): 1475 – 1560.

[4] 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**( 1 – 2): 269 – 281.

[5] DUNAI T J. Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences [M]. Cambridge University Press, 2010: 1 – 133.

[6] MARRERO S M, PHILLIPS F M, BORCHERS B, et al. Cosmogenic nuclide systematics and the CRONUScal program [J]. Quaternary Geochronology, 2016, **31**: 160 – 187.

[7] 周尚哲, 许刘兵, Colgan P M, 等. 古乡冰期和白玉冰期的宇宙成因核素<sup>10</sup>Be 定年 [J]. 科学通报, 2007, **52**( 8): 945 – 950. [ ZHOU Shangzhe, XU Liubing, COLGAN P M, et al. Cosmogenic <sup>10</sup>Be dating of Guxiang and Baiyu glaciations [J]. Chinese Science Bulletin 2007, **52**( 8): 945 – 950. ]

[8] BALCO G. Contributions and unrealized potential contributions of cosmogenic – nuclide exposure dating to glacier chronology, 1990 – 2010 [J]. Quaternary Science Reviews, 2011, **30**( 1 – 2): 3 – 27.

[9] HEYMAN J, STROEVEN A P, HARBOR J M, et al. Too young or too old: Evaluating cosmogenic exposure dating based on an analysis of compiled boulder exposure ages [J]. Earth Planetary Science Letters, 2011, **302**( 1 – 2): 71 – 80.

- [10] WANG J, KASSAB C, HARBOR J M, et al. Cosmogenic nuclide constraints on late Quaternary glacial chronology on the Dalijia Shan, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Research*, 2013, **79**(3): 439–451.
- [11] 陈艺鑫, 李英奎, 张梅, 等. 昆仑山垭口地区“望昆冰期”冰碛宇宙成因核素 $^{10}\text{Be}$ 测年[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(1): 101–109. [CHEN Yixin, LI Yingkui, ZHANG Mei, et al. Terrestrial Cosmogenic Nuclide $^{10}\text{Be}$  Exposure Ages of the Samples from Wangkun Till in the Kunlun Pass [J]. *Journal of glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(1): 101–109.]
- [12] OWEN L A, DORTCH J M. Nature and timing of Quaternary glaciation in the Himalayan – Tibetan orogeny [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, **88**(88): 14–54.
- [13] 张威, 刘亮, 刘啸, 等. 秦岭“太白冰期”冰坎宇宙成因核素 $^{10}\text{Be}$ 定年[J]. *科学通报*, 2014, **59**(31): 3086–3094. [ZHANG Wei, LIU Liang, LIU Xiao, et al. Cosmogenic nuclide $^{10}\text{Be}$  dating of the glacial threshold of the “Taibai glaciation” in the Qinling Mountain range [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(31): 3086–3094.]
- [14] STOKES C R, TARASOV L, BLOMDIN R, et al. On the reconstruction of palaeo-ice sheets: Recent advances and future challenges [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, **125**(1): 15–49.
- [15] PUTKONEN J, SWANSON T. Accuracy of cosmogenic ages for moraines[J]. *Quaternary Research*, 2003, **59**(2): 255–261.
- [16] KAPLAN M R, CORONATO A, HULTON N R J, et al. Cosmogenic nuclide measurements in southernmost South America and implications for landscape change [J]. *Geomorphology*, 2007, **87**(4): 284–301.
- [17] 张志刚, 徐孝彬, 王建, 等. 青藏高原地区宇生核素暴露年代数据存在问题探讨[J]. *地质论评*, 2014, **60**(6): 1359–1369. [ZHANG Zhigang, XU Xiaobin, WANG Jian, et al. Discussion of existing problems on the terrestrial cosmogenic nuclides exposure ages of Xi Zang( Tibetan) Plateau [J]. *Geological Review*, 2014, **60**(6): 1359–1369.]
- [18] 李吉均, 姚檀栋, 冯兆东. 稻城古冰帽发育模式[C] // 青藏高原研究横断山考察专集(二). 北京: 北京科学技术出版社, 1986: 271. [LI Jijun, YAO Tandong, FENG Zhaocong. The development model of the Daocheng former ice cap[C] // Studies in Qinghai-Xizang (Tibet) plateau special issue of Hengduan Mountains Scientific expedition (2). Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1986: 271.]
- [19] 郑本兴, 马秋华. 川西稻城古冰帽的地貌特征与冰期探讨[J]. *冰川冻土*, 1995, **17**(1): 23–32. [ZHENG Benxing, MA Qiuhua. A study on the geomorphological characteristics and glaciations in Paleo-Daocheng Ice Cap, western Sichuan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, **17**(1): 23–32.]
- [20] 许刘兵, 周尚哲, 崔建新, 等. 稻城冰帽区更新世冰川测年研究[J]. *冰川冻土*, 2004, **26**(5): 528–534. [XU Liubing, ZHOU Shangzhe, CUI Jianxin, et al. Dating of the Pleistocene Glaciations around the Daocheng Ice Cap [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(5): 528–534.]
- [21] 周尚哲, 许刘兵, 崔建新, 等. 沙鲁里山第四纪地貌发育与环境演变[J]. *科学通报*, 2004, **49**(23): 2480–2484. [ZHOU Shangzhe, XU Liubing, CUI Jianxin, et al. Geomorphologic evolution and environmental changes in the Shaluli Mountain region during the Quaternary [J]. *Chinese Science Bulletin*. 2004, **49**(23): 2480–2484.]
- [22] XU Liubing, ZHOU Shangzhe. Quaternary glaciations recorded by glacial and fluvial landforms in the Shaluli Mountains, Southeastern Tibetan Plateau [J]. *Geomorphology*, 2009, **103**(2): 268–275.
- [23] 王建, RAISBECK G, 徐孝彬, 等. 青藏高原东南部沙鲁里山南端第四纪冰川作用的 $^{10}\text{Be}$ 年代学研究[J]. *中国科学( D 辑)*, 2006, **38**(8): 706–712. [WANG Jian, RAISBECK G, XU Xiaobin, et al. In situ cosmogenic $^{10}\text{Be}$  dating of the Quaternary glaciations in the Southern Shaluli Mountain on the south Eastern Tibetan Plateau [J]. *Science in China( Series D)*, 2006, **38**(8): 706–712.]
- [24] FU Ping, STROEVEN A P, HARBOR J M, et al. Paleoglaciation of Shaluli Shan, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, **64**(433): 121–135.
- [25] LAL D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1991, **104**(91): 424–439.
- [26] CHMELEFF J, von BLANCKENBURG F, KOSSERT K, et al. Determination of the $^{10}\text{Be}$  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*, 2010, **268**(2): 192–199.
- [27] KORSCHINEK G, BERGMAIER A, FAESTERMANN T, et al. A new value for the half-life of $^{10}\text{Be}$  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*, 2010, **268**(2): 187–191.
- [28] BROWN E T, EDMOND J M, RAISBECK G M, et al. Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using in situ produced $^{10}\text{Be}$  and $^{26}\text{Al}$  [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1991, **55**(8): 2269–2283.
- [29] BALCO G, STONE J O, LIFTON N A, et al. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from $^{10}\text{Be}$  and $^{26}\text{Al}$  measurements [J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, **3**(3): 174–195.
- [30] NISHIZUMI K, KOHL C P, ARNOLD J R, et al. Cosmic ray produced $^{10}\text{Be}$  and $^{26}\text{Al}$  in Antarctic rocks: exposure and erosion history [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1991, **104**(2–4): 440–454.
- [31] KOHL C P, NISHIZUMI K. Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ, -produced cosmogenic nuclides [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1992, **56**(9): 3583–3587.
- [32] 徐孝彬, 王建, 陈仕涛. 陆面岩石中形成的同位素 $^{10}\text{Be}$ 与 $^{26}\text{Al}$ 的实验室提取方法[J]. *南京师大学报*, **26**(1): 111–115. [XU Xiaobin, WANG Jian, CHEN Shitao. Samples selection in terrestrial cosmogenic isotopes dating and extraction of $^{10}\text{Be}$  and $^{26}\text{Al}$  [J]. *Journal of Nanjing Normal University ( Natural*

- Science), 2003, 26(1): 111–115.]
- [33] 王建, YIOU F, RAISBECK G 等. 用陆面岩石中生成的宇生同位素重建冰川漂砾运动历史的尝试[J]. 地质学报, 2003, 77(3): 407–413. [WANG Jian, YIOU F, RAISBECK G, et al. Reconstructing the history of drift boulder's movement by using in situ cosmogenic isotopes [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(3): 407–413.]
- [34] DUNNE J, ELMORE D, MUZIKAR P. Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces [J]. Geomorphology, 1999, 27(1–2): 3–11.

## Reconstructing Movement History of Glacial Boulders by Using <sup>10</sup>Be Exposure Dating Method

ZHANG Zhigang<sup>1 2 3 4 5</sup>, WANG Jian<sup>1 2 3 4\*</sup>, XU Xiaobin<sup>6</sup>, CHANG Zhiyang<sup>7</sup>, CHEN Qian<sup>1</sup>

(1. School of Geographical sciences, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210023, China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

3. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

5. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

6. Jiangsu Second Normal University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;

7. Nanjing Institute of Tourism and Hospitality, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

**Abstract:** Cosmogenic nuclide <sup>10</sup>Be exposure dating is one of the most successful dating methods used to study glacial geomorphology since 1980s. In most studies, glacial erratics have been preferred for exposure dating material. However, glacial erratics may have undergone re-transportation and roll-over during the post-exposure stage, which can affect the dating results. Reconstructing the movement history of these boulders is therefore of crucial importance for obtaining reliable chronology of glacial landform by exposure dating of glacial erratics. The paleo-Daocheng ice cap in the southeastern Tibetan Plateau exhibits abundant glacial remnant and provides an ideal natural laboratory for cosmogenic nuclides exposure dating. A big boulder, found in the Daocheng ice cap, was split because of road construction. Concentrations of <sup>10</sup>Be in the bottom sample were more than the top sample, which indicated that the boulder might have rolled over during the post-exposure period. In this study, samples from the top, bottom, left and right side of the boulder were selected and used to reconstruct the movement history by using <sup>10</sup>Be exposure dating method. The result demonstrated that the boulder might have been exposed to the surface due to the glacial advance during Marine Isotope Stage (MIS 3), and thereafter undergone several times re-transportation and roll-over events.

**Key words:** cosmogenic nuclides; boulders; <sup>10</sup>Be; roll over; Tibet Plateau