

古乡冰期和白玉冰期的宇宙成因核素 ^{10}Be 定年

周尚哲 许刘兵 Patrick M. Colgan David M. Mickelson

王孝理 王 杰 钟 巍

(华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; Department of Geology, Grand Valley State University, Allendale Michigan, 49401 USA; Department of Geology & Geophysics, University of Wisconsin-Madison, Madison Wisconsin 53706, USA; 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000. E-mail: zhsz@lzu.edu.cn)

摘要 古乡冰期和白玉冰期是青藏高原迄今划分的第四纪冰期中, 具有代表性的 2 个冰期, 他们被广泛看作是高原及周边山地晚第四纪冰期划分的蓝本, 但这两次冰川作用年代一直处于推测状态. 运用宇宙成因核素测年方法对这两次冰川作用遗留的冰川漂砾的暴露年龄进行了定年研究, 得到古乡冰期漂砾的暴露年龄为 $(112.9 \pm 16.7) \sim (136.5 \pm 15.8)$ ka BP, 白玉冰期漂砾的暴露年龄为 $(11.1 \pm 1.9) \sim (18.5 \pm 2.2)$ ka BP. 从而确认, 2 个冰期可分别与深海氧同位素 6 阶段和 2 阶段对应.

关键词 古乡冰期 白玉冰期 宇宙成因核素 ^{10}Be 测年

古乡冰期和白玉冰期是青藏高原迄今划分的晚第四纪冰期中, 具有代表性的 2 个冰期. 在以阿尔卑斯冰期模式为蓝本的对比研究阶段, 被认为应当与 Riss 与 Würm 2 个冰期相对应^[1]. 后来进一步与氧同位素曲线 6 和 4~2 阶段进行对比^[2]. 最近, 我们运用宇宙核素测年方法对这两个冰期进行了测定.

1 特殊的地理位置与环境背景

古乡冰期和白玉冰期标志性地点位于西藏东南部雅鲁藏布江大拐弯附近的波密县境内(图 1). 这里

是青藏高原一个十分特殊的区域. 发源于莱古冰川的帕隆藏布江自东向西, 至通麦与易贡藏布江汇合, 南流约 40 km 入雅鲁藏布江. 雅鲁藏布江在这里绕南迦巴瓦峰 180°, 折回西南, 形成有名的大拐弯. 继而南流约 200 km 进入印度平原, 始称布拉马普特拉河. 帕隆藏布江流经波密县东 20 km 处, 有波堆藏布江自北注入. 波堆藏布江发源于念青唐古拉山脉东端的众多冰川, 谷地中保留着丰富的冰川堆积. 这是本文研究的区域所在.

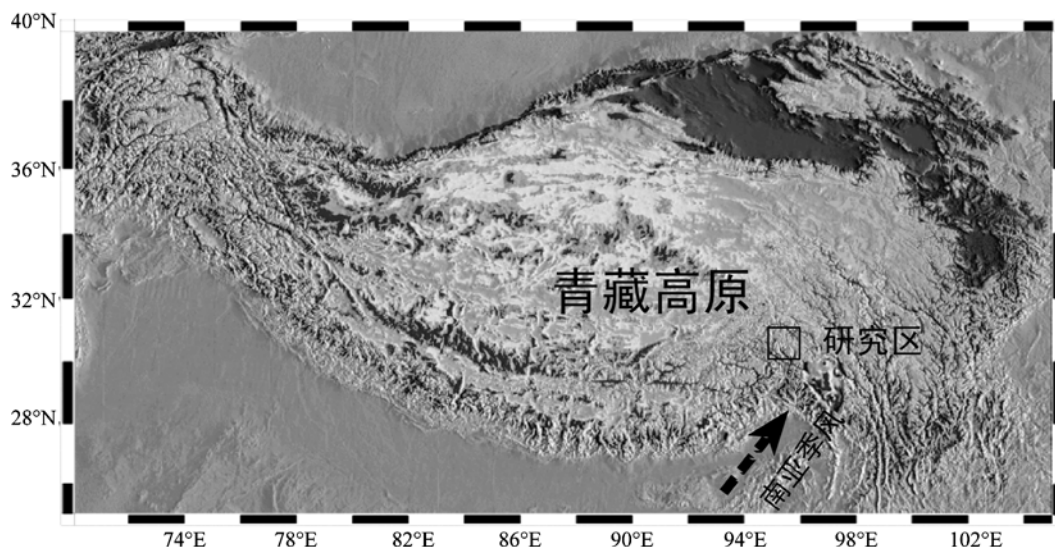


图 1 研究区位置图

2006-10-19 收稿, 2007-03-20 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 40371013, 40601012)

本区从稍大的范围来说,处于喜马拉雅山脉、念青唐古拉山脉和横断山脉的交汇部位。由于雅鲁藏布江切穿喜马拉雅山这道气候上的巨大屏障,使这里成为湿润气流输入的通道。来自孟加拉湾强大水汽穿过这个通道后,直扑念青唐古拉山南坡,形成了青藏高原一个十分特别的区域。可以用几个“最”来描述本区的特点:() 青藏高原上降水量最多的区域。雪线附近的降水可达到 3000 mm。() 高原雪线最低的区域之一,现代雪线位于 4500~5000 m,与 10 个纬度以北的祁连山雪线高度相当。() 最茂密的原始森林区,动植物物种丰富,带谱齐全。() 中国最典型的现代海洋性冰川的活动地区。长度 10 km 以上的冰川就有 28 条,著名的恰青冰川长达 35 km,面积 151.5 km²[13]。这里的冰川温度高,积累量大,消融强,运动速度快,侵蚀搬运能力强。() 是青藏高原冰期-间冰期气候交替中,冰川范围变化最大的地区之一。这里的降水能够充分满足冰川发育的需要,在此情况下,冰川对温度的反应就比较灵敏。故在以温度大幅度下降为特征的冰期中,以末次冰期为例,本区是高原上当时冰川面积最大的区域[14],而高原上规模最大的现代冰川却分布在西北部的喀喇昆仑山和西昆仑山。

但也是由于降水多,侵蚀切割作用强,本区不像高原其他较干旱的地区那样能够保留很老的冰川遗迹。现今保留的冰川堆积是相对比较年轻的。在 20 世纪 70 年代青藏高原综合科学考察中,李吉均等人[11]提出了“古乡冰期”和“白玉冰期”2 个冰期概念。成为了青藏高原晚第四纪有代表性的冰期名称。当时认为可以与阿尔卑斯山地区的 Riss 冰期和玉木 würm 冰期对比,也可和珠穆朗玛峰地区此前划分的基隆寺阶段和绒布寺阶段对比[11]。

2 古冰川沉积与冰期划分

波堆藏布全流域有现代冰川 334 条,总面积 825.26 km²[15]。最上源是 12 km 长的关星冰川。其中最大的冰川是有名的则普冰川(图 2(a))。则普冰川长 19.2 km,面积 65.8 km²,冰川上限、雪线和末端海拔高度分别为 6349, 4683 和 3420 m。冰川沉积表明,在冰期时,所有这些冰川前进汇入波堆藏布主谷,形成很壮观的复合型山谷冰川。如今保留在波堆藏布江北岸的侧碛堤在许木高出现代河床 800~700 m,宽度变化于 200~100 m 之间。从育仁附近延续到坝多对面。

由于波堆藏布江在这里与亚龙藏布江汇合,形成直角夹击侵蚀之势,这一侧碛堤至此消失。但是,却在避开江水袭击的南岸断续延伸,一直到波堆藏布与帕隆藏布江汇合的卡达桥西侧,乃至向下达到古乡附近。根据这套冰碛恢复,当时的冰川长度达到 100 km。这次规模巨大的冰川扩张时期即被命名为“古乡冰期”。在卡达桥西侧,这道侧碛的高度降至拔河 200~300 m,表面比较平坦,约有 2~3 km²,还有一个面积约 0.4 km²的湖泊(图 2(b)),在湖泊外侧高起的冰碛上,有暴露的巨大花岗岩漂砾,已有相当程度的风化。我们对于古乡冰期的系统测年样品即采自这里(图 2(b))。

白玉冰期的证据是白玉村附近的冰碛。波堆藏布主谷冰川在这里形成一道较大的弧形终碛垄(图 2(c)),内侧即为白玉村,因临近白玉沟口而得名。这道冰碛高约上百米,正好和白玉沟同期伸出的巨大终碛垄相接触。白玉沟终碛拔河高达 260~300 m,大致可以分出四列,显示冰舌出沟口后由西向东分阶段摆动情况。就规模而言,外三列小,里面一道最大,内侧冰碛垄沉积时,冰川维持时间最长。四列冰碛垄形成时间由外向里,依次年轻。白玉沟稍向下游,就是珠西沟,沟口的终碛情形与白玉沟雷同(图 2(d))。我们这次对于白玉冰期的测试样品就采自白玉沟口一带。这些冰碛垄上都有巨大的花岗岩漂砾。白玉冰期时,由关星冰川和则普冰川等汇合而成的主谷冰川达到约 80 km 的长度。

3 研究方法

3.1 宇宙成因核素地表暴露测年原理

近年迅速发展起来的宇宙成因核素技术现已被广泛运用到地表暴露年代和地貌过程研究中来,其中,第四纪冰川遗迹(如冰川漂砾、冰川磨光面)是宇宙成因同位素地表暴露测年(cosmogenic nuclide surface exposure dating, 简称 SED)运用得最广泛的领域,已取得了诸多重要研究成果[16~19]。宇生核素测年的基本技术原理是:当埋藏于地下的岩石由于某种地质作用(比如第四纪冰川作用、崩塌、泥石流)暴露于地表后,岩石中的靶元素(如 ¹⁶O, ²⁸Si, ⁴⁰Ca 和 ³⁵Cl)与次生宇宙射线粒子(如快中子、热中子和负慢介子)通过一定的形式(如裂变、介子捕获)发生核反应,形成新的同位素(如放射性同位素 ¹⁰Be, ²⁶Al, ³⁶Cl 和稳定同位素 ³He, ²¹Ne)[10],这些新形成的同位素浓度与岩石

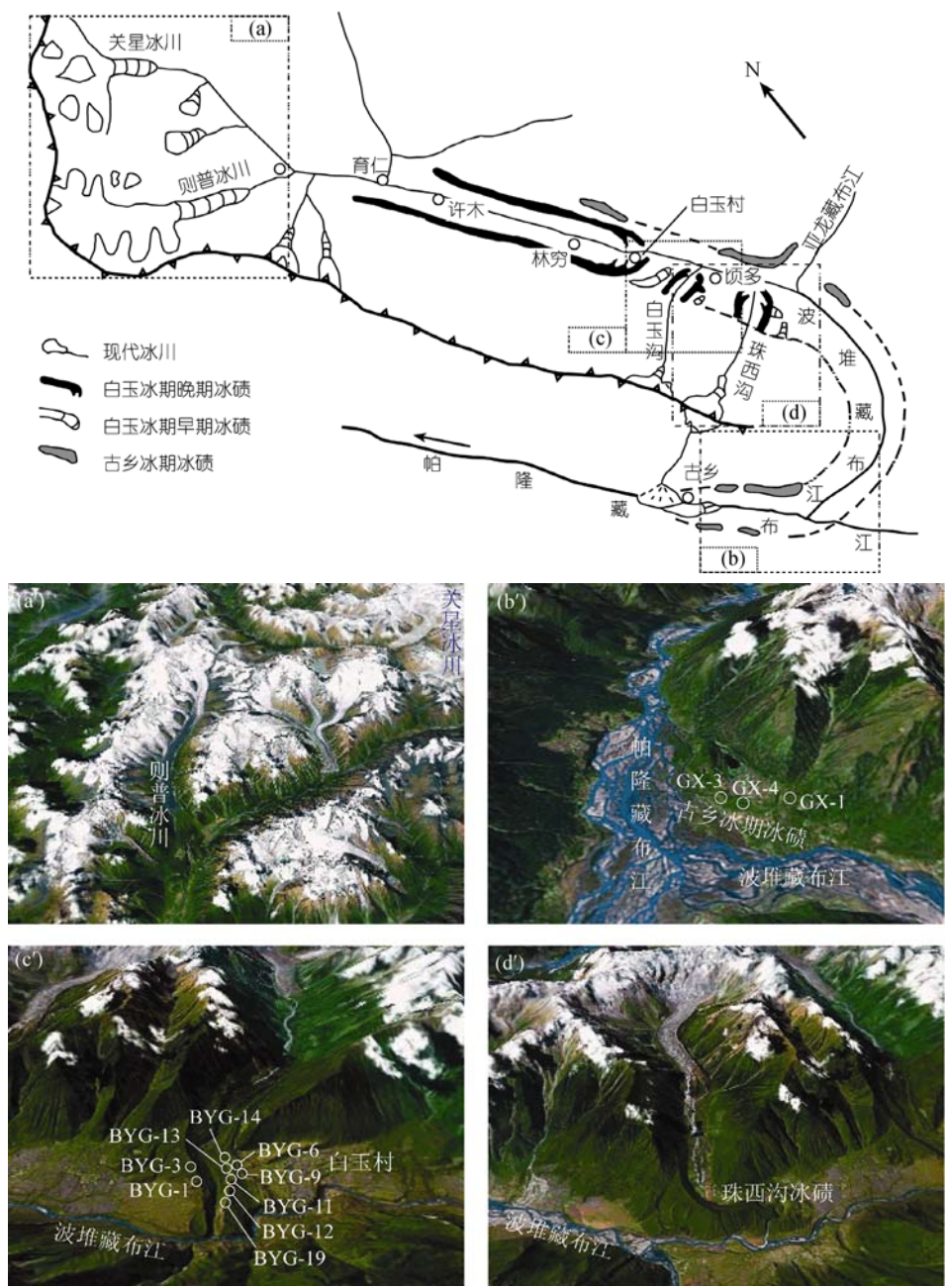


图 2 波堆藏布谷地第四纪冰川遗迹及样品位置图

(a), (a')~(d) (d')分别为: 则普冰川和关星冰川; 古乡冰期冰碛垄和采样点; 白玉冰期冰碛垄和采样点; 珠西沟口白玉冰期冰碛垄

的暴露时间和宇宙成因核素的生成速率等密切相关, 可以用关系式表示为

$$\frac{dN(x,t)}{dt} = -N(x,t)\lambda + P(x,t), \quad (1)$$

式中 $dN(x,t)$ 表示 t 时段内 x 岩石深度处生成的宇宙成因核素的原子数量, λ 为核素的衰变常数, P 为岩石 x 深度处在 t 时刻的核素生成速率. 当样品采自岩石表面时, 核素生成速率的深度效应可以忽略不计. 若假

定生成速率 P 不随时间变化, 且侵蚀速率为零, 求解 (1) 式, 即得到

$$t = \frac{-1}{\lambda} \ln \left(1 - \frac{N\lambda}{P} \right). \quad (2)$$

3.2 样品采集

野外工作中, 我们选取冰碛垄脊上最大的、出露地表较高 ($> 1 \text{ m}$)、风化程度尽可能小 (比如保留有

冰川擦痕和磨光面的原始表面)、没有翻滚迹象(漂砾位于垄脊较平坦位置,且漂砾底部有一定深度埋藏)、石英含量高的漂砾,且从漂砾顶部的中间部位采集用于 SED 测年的样品。在采样时,首先用 GPS 对样点的经纬度和高度进行测量记录,然后用卷尺对漂砾的大小(长和宽)和出露地表的高度进行测量记录。同时,对周围地形对入射宇宙射线的遮蔽情况进行测量和记录(即每隔 10° 测一个数据,一个样品 36 个数据,以确定样点所对的天穹仰角)。此外,对漂砾的岩性、风化程度等进行了描述。这些测量和描述是对 AMS 测试结果进行校正的基本参数。为了使测年结果具有统计学的意义,我们在要研究的每道冰碛垄上采集了多个(约 6~10 个)样品。由于经费问题,目前只选择测试了古乡冰期侧碛垄上采集的 3 个样品和白玉沟两侧冰碛垄上的 9 个样品。样品的采样位置、海拔高度及其他相关参数详见图 2 和表 1。

3.3 样品预处理

^{10}Be 加速器测试前的预处理实验参照 Bierman 等人 [11] 的方法,在美国威斯康星大学宇宙成因同位素实验室完成。具体的实验步骤包括: () 将采集到的厚度较大的样品进行切割,使其厚度不超过 3 cm,然后用颚式破碎机和圆盘粉碎机粉碎样品,筛取 420~820 μm 组分的样品颗粒; () 运用磁分选去除铁磁性矿物; () 酸(HCl , HNO_3 和 HF)溶蚀: HCl 可以有效

去除有机质和多种残余的铁镁质矿物; HNO_3 和 HF 混合溶液可以分解矿物颗粒,以使重液分离更加有效;为了提高酸溶蚀效率,该步骤所有过程均在超声波浴器中进行; () 重液分离,去除密度与石英有差异的长石等矿物; () 运用 1% HNO_3 和 1% HF 混合溶液对样品进一步溶蚀,以去除残留的非石英矿物和大气成因的 ^{10}Be 成分;经过反复实验,该步骤比较有效的方法是 3 步溶蚀法,即在超声波浴器中溶蚀 8, 14 和 24 h; () ICP-AES 分析,以检测石英纯度,若测试结果显示石英纯度未达到要求(即 Be 的总量接近背景值($\sim 0 \mu\text{g}$), Al 的总量不大于 $5 \mu\text{g}$),应继续重复步骤 () ; () 量取 30~55 g 纯净石英,添加 $500 \mu\text{g}$ ^9Be 载体,根据 ICP-AES 结果估算样品的 ^{27}Al 含量,若不足 $4000 \mu\text{g}$,应添加至 $4000 \mu\text{g}$,然后将样品溶解于 HF 和 HNO_3 的混合液中,待石英完全溶解后,蒸干转制成 HCl 溶液; () 配置 2 个空白样,各加入 $500 \mu\text{g}$ 的 ^9Be 载体和 $4000 \mu\text{g}$ 的 ^{27}Al ,该步骤应与步骤 () 及随后的过程同时进行,以估算实验过程中环境污染(非宇宙成因的 ^{10}Be 和其他化学元素)所造成的误差; () 对所有样品和空白样做 ICP-AES 分析; () 添加高氯酸并加热,去除 BeF 和 AlF 之中的氟; () 阴离子交换和沉淀,去除石英中的铁、钛和钙; () 阳离子交换,分离出 ^{10}Be ; () 添加高氯酸并蒸干,去除元素 B o; () 添加 NH_4OH , 使溶液 pH

表 1 古乡和白玉冰期冰川漂砾的宇宙成因核素 ^{10}Be 测年结果及相关参数

样品序号	样品名称	纬度/ $^\circ\text{N}$	经度/ $^\circ\text{E}$	海拔高度/m	测得的 ^{10}Be 原子浓度 ($\times 10^6 \text{ atoms/g} \cdot \text{a}$)	校正后的 ^{10}Be 原子浓度 ($\times 10^6 \text{ atoms/g} \cdot \text{a}$)	^{10}Be 年龄/ka
1	GX-1a	29.912000	95.617500	2874	0.824 ± 0.028	0.138 ± 0.005	27.1 ± 3.3
2	GX-1b	29.912000	95.617500	2874	0.980 ± 0.040	0.164 ± 0.007	32.3 ± 4.2
3	GX-3a	29.912000	95.617500	2880	3.930 ± 0.121	0.649 ± 0.020	131.1 ± 15.9
4	GX-3b	29.912000	95.617500	2880	3.934 ± 0.084	0.650 ± 0.019	131.3 ± 15.7
5	GX-4a	29.906167	95.611667	2874	3.310 ± 0.171	0.561 ± 0.029	112.9 ± 16.7
6	GX-4b	29.906167	95.611667	2874	3.980 ± 0.101	0.675 ± 0.017	136.5 ± 15.8
7	BYG-1	30.084500	95.531333	3009	0.458 ± 0.014	0.071 ± 0.002	13.9 ± 1.6
8	BYG-3	30.097167	95.531167	3031	0.376 ± 0.026	0.057 ± 0.004	11.1 ± 1.9
9	BYG-6	30.098167	95.523000	3049	0.190 ± 0.009	0.028 ± 0.001	5.6 ± 0.8
10	BYG-9a	30.099333	95.523000	3023	0.317 ± 0.476	0.049 ± 0.073	9.6 ± 28.8
11	BYG-9b	30.099333	95.523000	3023	0.614 ± 0.020	0.094 ± 0.003	18.5 ± 2.2
12	BYG-11	30.101167	95.522333	3039	0.535 ± 0.026	0.080 ± 0.004	15.8 ± 2.2
13	BYG-12	30.103333	95.522333	3022	0.508 ± 0.021	0.078 ± 0.003	15.3 ± 2.0
14	BYG-13	30.09817	95.52433	3047	0.480 ± 0.025	0.071 ± 0.004	14.1 ± 2.0
15	BYG-14	30.097667	95.524167	3049	0.397 ± 0.021	0.059 ± 0.003	11.7 ± 1.7
16	BYG-19	30.105500	95.522500	3013	0.534 ± 0.015	0.082 ± 0.002	16.1 ± 1.9

值达到 8~9, 析出 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 沉淀, 同时去除可能残留的元素钙; () 高温(~ 900) 加热, 使 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 氧化形成 BeO ; () 用 3.5 倍于样品重量的铌与 BeO 混合, 制靶并送普度大学同位素实验室进行加速器质谱测试.

3.4 样品测试与分析

样品的 ^{10}Be 加速器测试由美国普度大学同位素测量实验室(Purdue Rare Isotope Measurement)完成. 根据样品重量和 Be 含量, 将测量得到的 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比率转化为石英中宇宙成因核素 ^{10}Be 浓度. 研究区 ^{10}Be 生成速率是根据 Stone^[12] 提出的海平面(1013.25 hPa)—高纬度($> 60^\circ$)生成速率(即 5.1 atoms/g·a)及相应的校正模式(即裂变和介子成因对生成 ^{10}Be 的贡献率分别为 97.4% 和 2.6%, 以及用气压取代高度来计算大气对宇宙射线的影响)计算得到的. 关于古地磁场变化对宇宙射线浓度的影响, 我们结合 Guyodo 和 Valet^[13] 及 McElhenny 和 Senanayake^[14] 的古地磁场数据, 按照 Nishizuumi 等人^[15] 的计算方法进行了校正. 有关周围山体 and 雪盖对入射宇宙射线的影响, 以及样品的厚度影响, 均根据 Gosse 和 Phillips^[10] 的方法进行了相应校正. 样品的测试和分析结果详见表 1 和图 3.

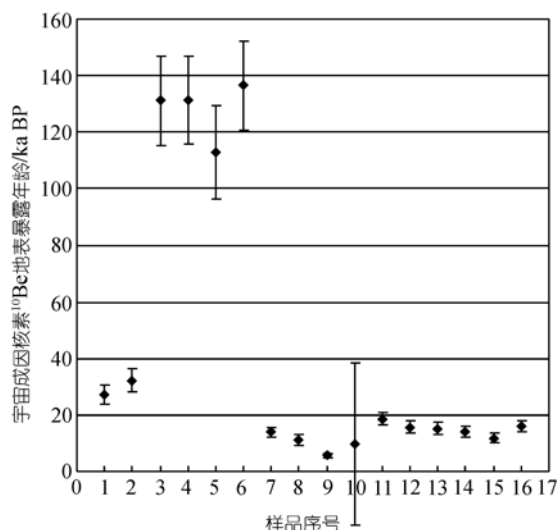


图 3 古乡和白玉冰期冰川漂砾宇宙成因核素 ^{10}Be 测年结果及其误差分布图

4 讨论和结论

采自古乡冰碛的 3 个测年样品和白玉冰碛的样品 BYG-9, 分别分为 2 份, 因此各有 2 个测年结果. 其中一号样的 2 个数据落在氧同位素 2 阶段, 考虑到其位置距离校支沟较近, 不排除后来从该支沟蠕动下来或较晚侵蚀暴露出来的可能. 另外 2 个样品采自

古乡冰碛垄突起的最外侧, 年龄在 112.9~136.5 ka BP 之间. 白玉冰期的宇宙成因核素测年数据中, 8 个介于 11.1~18.5 ka BP 之间. 由于样品 BYG-9a 的量很少, 导致加速器测试结果偏差较大, 该年龄数据应当剔除. 此外, BYG-6 的年龄为 5.6 ka BP, 偏离平均年龄较大. 采集该样品的漂砾出露地表的高度为 0.6 m, 为所有测样中最小值, 冰川后退时, 它可能未能出露地表, 而是遭受一定时间的侵蚀作用后才暴露于地表, 这样, 该样品接受宇宙射线辐射的时间则短一些, 年代也相应偏小. 另外, 出露地表高度小, 积雪对宇宙射线的遮蔽效应也可能是该样品年龄偏小的原因之一.

分布于冰碛垄表面的冰川漂砾至少需等待冰川消退之后才能暴露于地表, 继而接受宇宙射线粒子的轰击, 形成新的宇宙成因核素, 这也是宇宙成因核素地表暴露测年中计时的开始. 冰川漂砾的宇宙成因核素暴露年代在多大程度上代表了冰碛垄的形成时间, 也即冰川作用的时间呢? 这取决于冰碛垄本身形成所需的时间. 有学者认为冰碛垄的建造过程比较短暂, 仅几十年至千年左右, 因而冰川漂砾地表暴露年代可代表冰川作用的时间^[16~18]. 然而, 喜马拉雅山和青藏高原上许多规模较大的冰碛垄, 比如本研究中的古乡冰碛垄和白玉冰碛垄, 这种大规模冰碛垄的建造应是一个较长的时间过程, 在此情况下, 冰碛垄表面冰川漂砾的暴露时间很可能代表着古冰川开始消退的时间^[19]. 此外, 侵蚀对宇宙成因核素的积累也有一定的影响, 像藏东南这样的地区, 样点高度上的年降水量接近 1000 mm, 这无疑会在一定程度上使得漂砾地表暴露年代偏小. 因而, 在充分考虑到这些因素的情况下, 应当确认古乡冰川漂砾暴露年龄(112.9~136.5 ka BP)代表了古乡冰期晚阶段冰川消退的时间, 白玉冰川漂砾暴露年龄(11.1~18.5 ka BP)代表了末次盛冰期之后冰川消退的时间. 因此, 可以确认, 古乡冰期和白玉冰期的发生年代分别与氧同位素 6 和 2 阶段对应.

关于白玉冰期的冰碛, 我们于 1998 年在上覆的坡积底层中采到许多木炭, 2 次 ^{14}C 测年结果为 (6290 ± 74) , (6820 ± 280) a BP, 同层的古土壤为 (6190 ± 75) a BP, 其上的另一层古土壤的 ^{14}C 重复测年结果为 (3110 ± 85) 和 (3420 ± 47) a BP^[20]. 这都是发生在全新世中期的事件. 考虑到冰碛在冰退后发育土壤、形成森林, 再遭森林大火, 又被坡积物覆盖的过程颇需时日,

也在一定程度上旁证白玉沟口巨大冰碛垄当形成于2阶段。

白玉冰期冰川消亡过程颇具戏剧性, 沉积记录的信息十分丰富。冰川退缩至林穷时, 有过较长时间的停顿, 形成了规模可观的终碛垄。然后雪线突然上升, 使林穷至育仁长达 20 km 的冰舌部分变为死冰。死冰在消融过程中形成了迄今发现的最为壮观的冰碛丘陵群(hummocky moraines)。这是古冰川变化所记录的一次典型的气候突变事件。根据目前所得到的 ^{14}C ((11252±209) a BP)^[21]测年数据, 可能相当于 Bolling 升温事件^[22]。则普冰川末端以下至育仁村段, 尚有两道高大的冰碛垄, 分别位于距现代冰川末端 4km 的白同和 7km 的大拿, 已由 ^{14}C 测年确定为小冰期和新冰期冰进的产物^[21]。

波堆藏布谷地末次冰期的冰进记录测年尚未全部完成, 白玉冰期更老的冰期样品尚未测试。那部分样品采自 2 阶段冰碛垄外侧的另一套冰碛垄。我们现在还不能肯定其属于 4 阶段抑或 3 阶段。工作有待完成。

致谢 感谢 Brad Singer, Kurt Refsnider 和 Richard A Becker 对实验的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986. 251—256
- 2 周尚哲, 李吉均, 李世杰. 青藏高原更新世冰川再认识. 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991. 67—74
- 3 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986. 130—140
- 4 李炳元, 李吉均. 青藏高原第四纪冰川遗迹分布图. 北京: 科学出版社, 1991
- 5 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录, 念青唐古拉山区. 北京: 科学出版社, 1994
- 6 Gosse J C, Klein J, Evenson E B, et al. Beryllium-10 dating of the duration and retreat of the last Pinedale glacial sequence. *Science*, 1995, 268(5215): 1329—1333[DOI]
- 7 Phillips F M, Zreda M G, Benson L V, et al. Chronology for fluctuations in late Pleistocene Sierra Nevada glaciers and lakes. *Science*, 1996, 274(5288): 749—751[DOI]
- 8 Gosse J C, Klein J, Evenson E B, et al. Precise cosmogenic ^{10}Be measurements in western North America: support for a global Younger Dryas cooling event. *Geology*, 1995, 23(10): 877—880[DOI]
- 9 Brook E J, Brown E T, Kurz M D, et al. Constraints on age, erosion, and uplift of Neogene glacial deposits in the Transantarctic Mountains determined from in situ cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al . *Geology*, 1995, 23: 1063—1066[DOI]
- 10 Gosse J C, Phillips F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: Theory and application. *Quat Sci Rev*, 2001, 20: 1475—1560[DOI]
- 11 Bierman P R, Caffee M W, Davis P T, et al. Rates and timing of earth surface processes from in-situ-produced cosmogenic Be-10. *Rev Mineral*, 2002, 50: 147—196
- 12 Stone J. Air pressure and cosmogenic isotopic production. *J Geophys Res*, 2000, 105(B10): 23753—23759[DOI]
- 13 Guyodo Y, Valet J P. Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: The past 200 thousand years. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 143: 23—36[DOI]
- 14 McElhinny M W, Senanayake W E. Variations in the Geomagnetic Dipole I: The past 50000 years. *J Geomag Geoelectr*, 1982, 34: 39—51
- 15 Nishiizumi K, Winterer E L, Kohl C P, et al. Cosmic ray production rates of ^{10}Be and ^{26}Al in quartz from glacially polished rocks. *J Geophys Res*, 1989, 94: 17907—17915
- 16 Gosse J C, Klein J, Evenson E B, et al. Beryllium-10 dating of the duration and retreat of the last Pinedale glacial sequence. *Science*, 1995, 268(5215): 1329—1333[DOI]
- 17 Gosse J C, Klein J, Evenson E B, et al. Precise cosmogenic ^{10}Be measurements in western North America: support for a global Younger Dryas cooling event. *Geology*, 1995, 23(10): 877—880[DOI]
- 18 Phillips F M, Zreda M G, Benson L V, et al. Chronology for fluctuations in late Pleistocene Sierra Nevada glaciers and lakes. *Science*, 1996, 274(5288): 749—751[DOI]
- 19 Bern D I, Owen L A. Himalayan glacial sedimentary environments. a framework for reconstructing and dating the former extent of glaciers in high mountains. *Quat Int*, 2002, (97-98): 3—25
- 20 周尚哲, 李吉均. 冰期之青藏高原新研究. *地学前缘*, 2001, 8(1): 67—76
- 21 焦克勤, Shuji Iwata, 姚檀栋, 等. 3.2 ka BP 以来念青唐古拉山东部则普冰川波动与环境变化. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 74—79
- 22 扬威, 周尚哲, 王杰, 等. 波堆藏布谷地冰碛丘陵形成机制及其环境意义. *冰川冻土*, 2005, 27(2): 220—225