第 32 卷 第 3 期
2012 年 5 月

第 四 纪 研 究
QUATERNARY SCIENCES

Vol. 32, No. 3
May, 2012

doi:10.3969/j.issn.1001-7410.2012.03.06

文章编号 1001-7410(2012)03-409-08

帕米尔高原东部塔合曼大型滑坡体的^{10}Be测年*

袁兆德① 陈 杰① 李文巧①
Lewis A. Owen② Lindsay M. Schoenbohm③

(①中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; ②Department of Geology, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio 45221, USA; ③Department of Chemical and Physical Sciences, University of Toronto Mississauga, Mississauga, ON L5L 1C6, Canada)

摘要 塔合曼滑坡体是发育在新疆帕米尔高原东部 1895 年塔什库尔干 7 级地震区北端的一个大型滑坡体,总体呈"舌"形,由崩塌区、滑坡区和堆积区三部分组成,在滑坡区和堆积区分别形成了平行与垂直于滑坡体滑动方向的滑坡体台阶。本文介绍了该滑坡体的基本特征并采用宇宙成因核素测年技术对其形成年代进行了测定,简要论述了该测年技术的基本原理、野外采样原则及样品前处理过程。采自滑坡体不同部位的 6 个片麻岩巨砾样品的 ^{10}Be暴露年龄结果非常一致,表明该滑坡体发生在 6.8±0.2ka,同时也表明了 ^{10}Be暴露测年是研究大型滑坡的有效测年手段。结合该滑坡体被慕士塔格断层断错并形成断层陡坎、滑坡体内发育的冲沟规模以及巨砾表面较厚的岩石漆,我们认为该滑坡体并非 1895 年地震的产物。

主题词 帕米尔 滑坡体 宇宙成因核素测年 断层

中图分类号 P597, P931.2 **文献标识码** A

1 引言

滑坡是世界上最常见的自然灾害之一,对人的生命和财产构成了巨大的危害。在活动造山带中,快速的构造隆升、强烈的河流侵蚀作用以及冰川的剥蚀作用产生了大量易于发生滑坡的高陡边坡。滑坡在地貌演化中扮演着重要的角色。如 Montgomery 等[1]提出造山带中的山坡对岩体的快速隆升和高侵蚀速率的调整是通过滑坡作用实现的; Hewitt 等[2]指出滑坡不仅仅是气候和构造事件的产物,同时会减缓或改变气候和构造动力强度; Korup 等[3]认为在印度盆地印度河上游经常发生的大型滑坡可能是阻止青藏高原被快速切穿的因素之一。

为了定量研究滑坡特别是史前古滑坡在地貌演化中的作用,测年显得尤为重要。Jibson[4]阐述了滑坡测年的几种方法,如树轮年代学方法、^{14}C、地衣、岩石漆及孢粉等。在最近十几年,随着加速器质谱(AMS)的发展,宇宙成因核素暴露测年逐渐成为滑坡体测年的有效手段之一。国外已经有学者成功应用 ^{10}Be暴露测年方法来研究滑坡[2,5~7]。但是国内在这方面的应用研究尚少见。

帕米尔高原位于青藏高原西部,是一个冰川作用强烈、大型滑坡发育、地震频发的强烈活动造山带(图 1)。区内多处发育有大型滑坡体,本文选择发育在 1895 年塔什库尔干 7 级地震区北端的塔合曼大型滑坡体,对其基本特征开展了初步的研究,并尝试利用宇宙成因核素 ^{10}Be方法测定了其形成时代。

2 区域背景及塔合曼滑坡体基本特征

2.1 区域背景

帕米尔高原冰川发育,主要受西风带和印度季风的影响,属于干旱-半干旱气候,年平均气温为 3.6℃,冬季寒冷漫长,夏季温和,多年(1971~2000 年)平均降水量 68.1mm[10]。降水主要集中在春季和夏季,分别占 22.3% 和 53.5%。塔合曼滑坡体位于帕米尔高原东部塔合曼盆地东北缘 1895 年塔什库尔干 7 级地震地表破裂带的北端,慕士塔格峰(7546m)南坡。附近出露古生代长英质片麻岩、角

第一作者简介:袁兆德 男 26 岁 硕士研究生 活动构造与年代学专业 E-mail:yzd19862922@163.com

*中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室自主研究课题(批准号:LED2010A04)和科技部国际科技合作计划项目(批准号:2008DFA20860)共同资助

2011-12-17 收稿,2012-02-17 收修改稿

通讯作者:陈 杰 E-mail:chenjie@ies.ac.cn

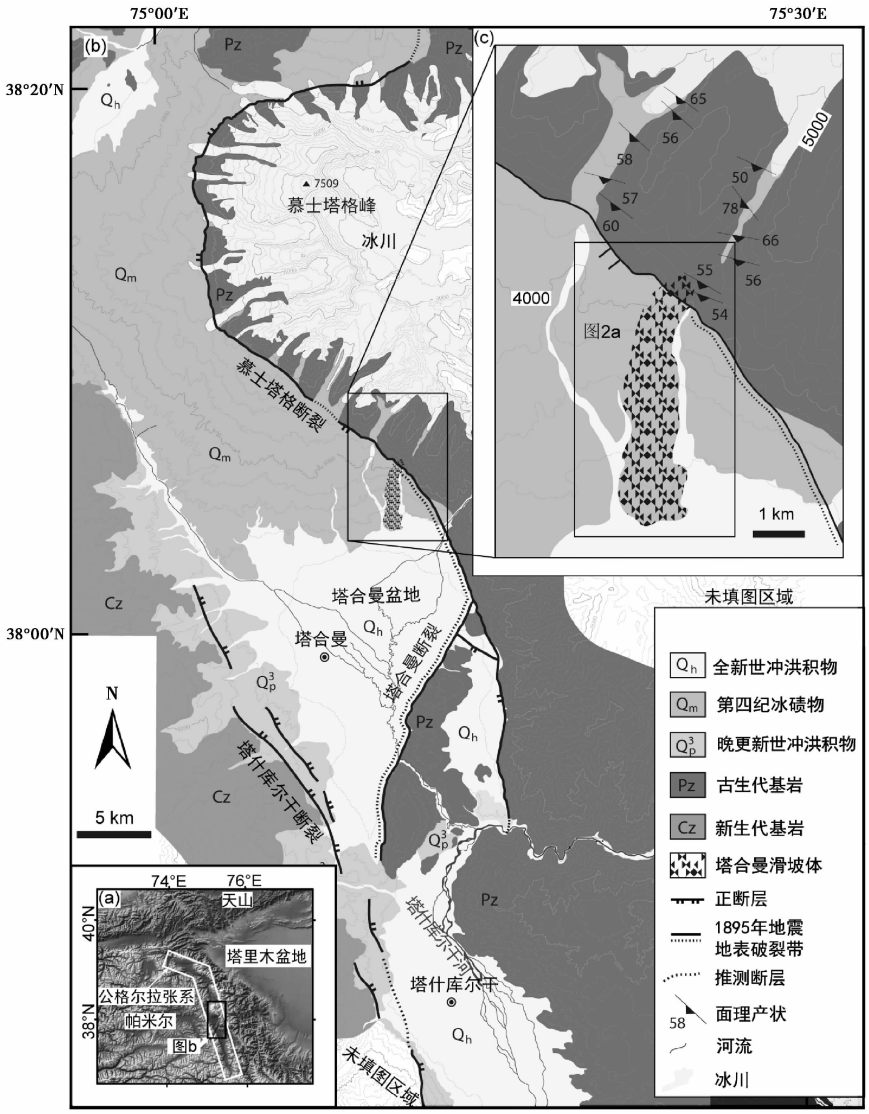

图 1 研究区位置(a)及区域构造略图(b)

据李文巧等[8]和 Robison 等[9]修改

Fig. 1 A sketch map of geological structures of the study area

闪岩-麻粒岩相沉积变质岩和三叠纪-早侏罗纪花岗岩及花岗闪长岩等(图 1)。

区内慕士塔格正断层属公格尔拉张系的南段,沿慕士塔格峰西边缘展布,断层总体倾向西。沿断层迹线多处可见晚第四纪冰碛物和地貌面被断错的证据,是一条全新世活动断层[8]。但该断层与塔合曼滑坡体的关系并不清楚。该断层在与塔合曼正断层交汇处向南延伸约 15km,终止于塔什库尔干河(图 1)。塔合曼正断层位于塔合曼盆地的东南缘(图 1),总体走向 NNE,长约 19km。断层陡倾,倾向 W-NW,以高角度切割了其下盘的震旦系高变质片岩和片麻岩面理,其拉张作用起始于约 8 ~ 10Ma[9]。该断层断错了第四纪冲洪积物,在地表形成清晰的断层陡坎,沿断层多处发育泉水。1895 年塔什库尔干 7 级地震使得慕士塔格正断层南段的部分和整个塔合曼正断层发生破裂,形成了长约 27km 的地震地表破裂带。该地表破裂带向北终止于塔合曼滑坡体南侧[8]。Seong 等[11]认为该滑坡体可能是 1895 年塔什库尔干 7 级地震的产物。

2.2 塔合曼滑坡体基本特征

塔合曼滑坡体极为壮观,高约 150m,宽约 2km,面积约 5.1km^2。因表面深棕色在卫星影像醒目(图 2a),在滑坡体以南约 9 ~ 10km 的中巴公路上观察也清晰可见。总体呈“舌”形,由崩塌区、滑坡区和堆积区三部分组成,在滑坡区和堆积区分别形成了平

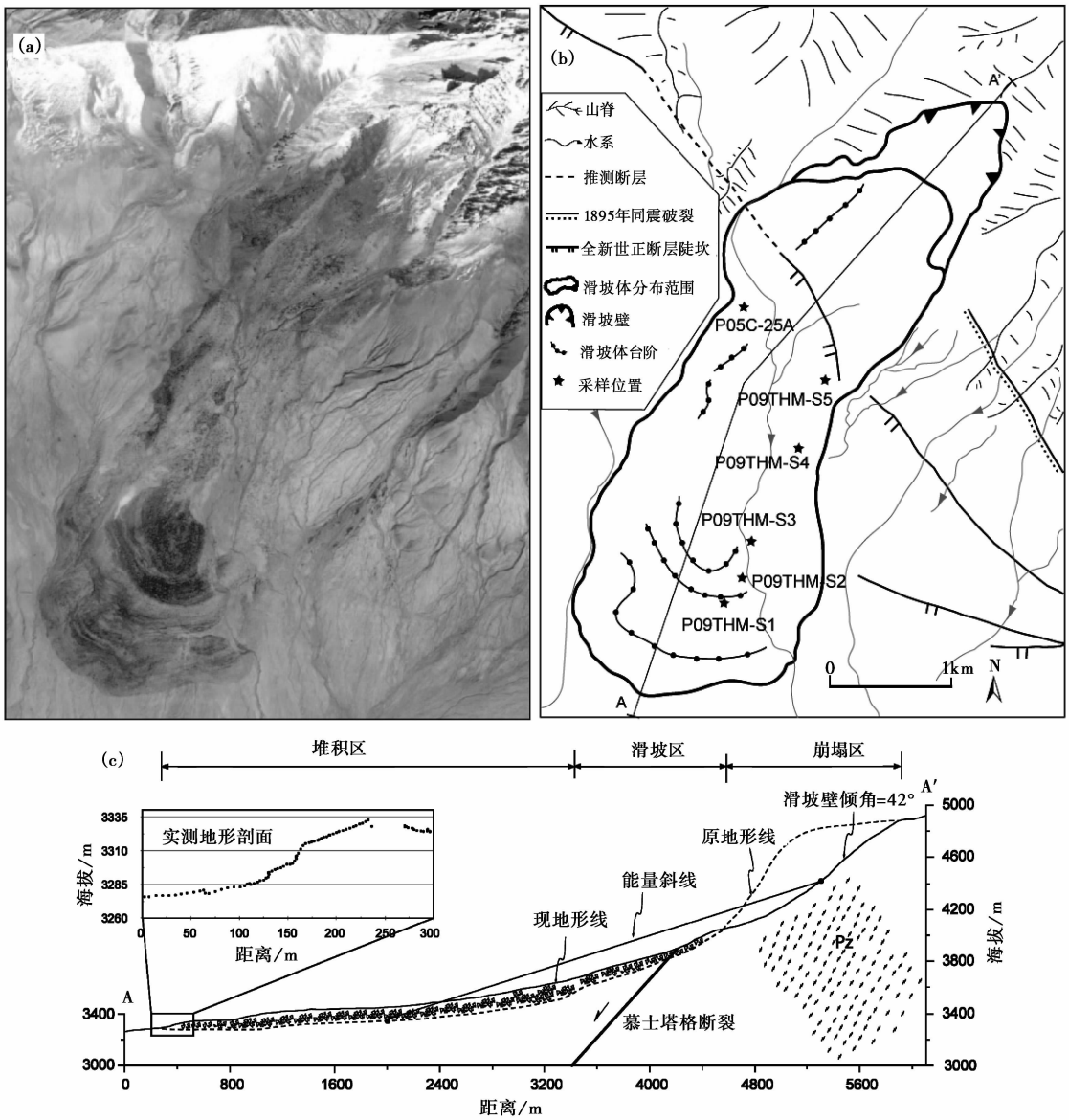

图 2　塔合曼滑坡体

(a)滑坡体高分辨率卫星影像(据 Google Earth)　(b)滑坡体卫星影像解译图及^{10}Be 宇宙成因核素样品采样位置

(c)滑坡体地质剖面图(剖面位置见图 b)

Fig. 2　Taheman landslide. (a) A google map of Taheman landslide, (b) interpretated map of the landslide showing sampling location, and (c) path profile of the Taheman landslide

行与垂直于滑坡体滑动方向的滑坡体台阶(图 2a和 2b)。该滑坡体的滑坡壁呈三角形,倾角约为 42°,倾向 SW,保存良好,分布在海拔 4200m 至 4800m 之间。滑坡体物源区为古生代长英质片麻岩,其片理的平均倾角为 60°[9],倾向 SW,远大于滑坡壁的倾角。滑坡体滑动距离最远可达 5.3km,垂直高差为 2km(图 2c);其最大滑动速度用下式计算:

$$Z_{max} = V_{max}^2/2g \qquad (1)$$

公式(1)中:Z_{max}为推测的原地形线与能量线之间的最大垂直距离,本文取 $Z_{max}=250$m;V_{max}为最大速度(m/s);g 为地球的重力加速度[7]。利用公式(1)计算出最大滑动速度为 70m/s。利用 DEM 计算出滑坡体堆积区面积约为 3.1×10^6m^2;实测滑坡堆积体最前缘厚度约为 50m(由 Trimble Juno SB GPS 实测得到),见图 2c。若以此厚度作为滑坡体的平均厚度,并且忽略滑坡区内堆积的物质,那么滑坡体的体积至少为 155×10^6m^3。

对该滑坡体约 1m 分辨率 Google Earth 卫星影像的详细解译发现,慕士塔格正断层实际上断错了塔合曼滑坡体,形成了高 15 ±3m、坡向南西的正断

层陡坎。奇怪的是 1895 年塔什库尔干 7 级地震地表破裂带向北终止于塔合曼滑坡体南侧,并未切穿该滑坡体,实际考察也证实了这一点[8]。该滑坡体已被不少冲沟切蚀改造,特别是在滑坡体东西两侧已被较大的冲沟切穿,这些冲沟的规模表明其形成时间显然远早于 1895 年。滑坡体由块状或棱角状片麻岩巨砾(砾径多为 5 ~ 30m)组成,砾石表面发育 2 ~ 5mm 厚的深棕色岩石漆(图 3),这显然在百年内难以形成。为了进一步证实这一观察,我们尝试利用 ^{10}Be宇宙成因核素方法对该滑坡体形成时代进行了测定。

3 ^{10}Be暴露测年原理、采样原则、样品前处理以及年龄计算

3.1 测年原理

宇宙成因核素是指来自外层宇宙空间的宇宙射线粒子通过轰击地球外表物质使其发生核反应而产生的新核素。常见的宇宙成因核素如^{3}He(稳定),^{10}Be,^{14}C,^{21}Ne,^{26}Al和 ^{36}Cl等。本文采用了核素 ^{10}Be。已经有很多学者阐述了宇宙成因核素测年的原理[12~16]以及在冰川、黄土等测年中的应用[17~21]。研究表明,宇宙成因核素在地表岩石中的生成速率在不同地点具有不同的生成速率,随高程和地磁纬度变化,但是基本上不随时间变化,大致恒定。核素生成速率在地表以下随深度增加而呈快速衰减,如下式:

$$P_i = P_i(0)e^{\frac{-z}{\Lambda}} \quad (2)$$

公式(2)中 z 表示地表以下的质量深度(g/cm^2);P_i 为核素 i 在深度 z 的生成速率(atoms/g·a);$P_i(0)$为地表散列反应的生成速率;Λ 是散列反应生成速率的衰减长度(一般取 160 g/cm)[13]。

滑坡和冰川等地质作用可以把地表以下未暴露的岩石带到地表接受宇宙射线的照射。岩石初次暴

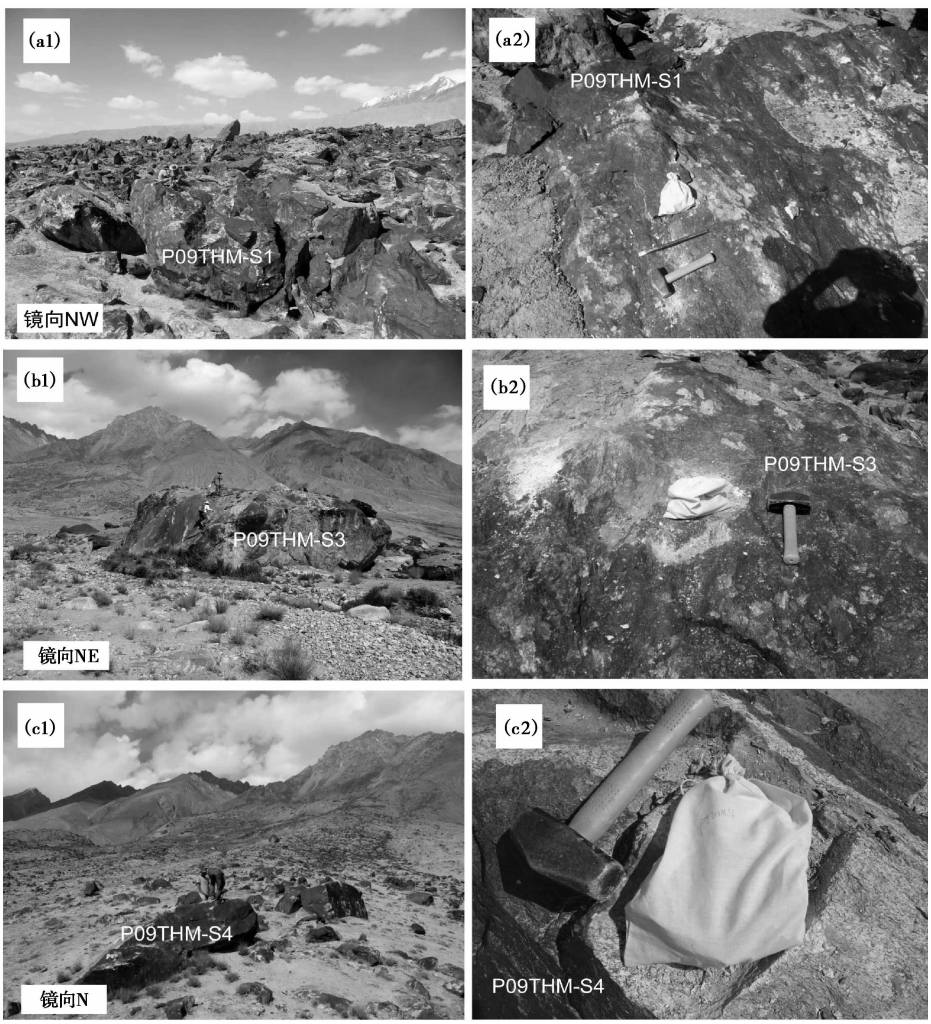

图 3 部分采样照片

Fig. 3 Sampling photos showing "jigsaw" blocks

露以后,核素开始积累,与暴露时间呈正比。因此,将新鲜岩石带到地表的地质作用的时间就可以通过测定宇宙成因核素浓度来求之。以 ^{10}Be为例,可以用下式计算暴露年龄:

$$N_{10} = \frac{P_{10}}{\lambda_{10} + \mu\varepsilon}[1 - e^{-(\lambda_{20}+\mu\varepsilon)t}] \qquad (3)$$

公式(3)中 N_{10} 为石英中 ^{10}Be 浓度; P_{10} 为采样位置 ^{10}Be 生成速率; λ_{10} 为 ^{10}Be 衰变常数; μ 为中子在岩石中的衰减系数; t 为岩石暴露时间; ε 为剥蚀速率,在侵蚀速率未知的情况下,常假定剥蚀速率值为一常数。从公式(3)可以看出,只要用 AMS 测出核素浓度,就可以计算出岩石的暴露时间。

塔合曼滑坡体属于突然发生的基岩滑坡,滑动距离远,速度快。在滑动的过程中,致使大量的新鲜基岩巨砾暴露出来。在花岗岩表面以下 2 ~ 3m 的深度上,散列反应生成的核素可以忽略不计[22],对于长英质片麻岩,应该也具有相似的性质。因此,这些基岩巨砾的 ^{10}Be的暴露年龄应该是一致的,该暴露年龄即为滑坡发生的时间。

3.2　采样原则

为了检验上述推论,我们在塔合曼滑坡体不同部位选取了 6 个巨砾(长、宽、高均大于 1m),采集了 6 个片麻岩样品(图 2b和图 3)。野外采样遵循了以下原则: 1)至少选取 5 ~ 6 个暴露在地表的巨砾进行采样; 2)尽量选取较高位置较大的巨砾,以确保砾石表面采样位置在整个暴露时间内几乎没有覆盖物; 3)不能有人工改造的痕迹,以防巨砾在暴露的过程中有人为的干扰; 4)选取的巨砾必须含有石英; 5)在巨砾顶面,尽量选取位置相对较高、富含石英且岩石漆较厚的部位凿取样品; 6)当采样巨砾表面是一倾斜面时,需要测量该岩石表面的产状,以便后期进行屏蔽校正; 7)当采样巨砾周围有高山屏蔽时,需要测量巨砾至山顶的仰角(从 0 度至 360 度每隔 20 度读取一个值),以便后期进行地形屏蔽几何校正。若仰角小于 20 度,可以忽略; 8)采样深度小于 5cm; 9)样品量以岩石类型而定,纯石英 > 150g,花岗岩>500g。

3.3　样品前处理与测量

在室内把每个样品粉碎过筛,留取 250 ~ 500μm 粒径的样品。所有样品处理均在美国辛辛那提大学宇宙成因核素前处理实验室完成,流程如下: 1)用 HCl 和 HNO_3 溶液充分刻蚀样品,去除有机质、钙质以及粉碎过程中混进来的铁屑; 2)用5% HF/HNO_3 刻蚀样品约 24 小时,以去除石英表面受大气污染的部分,同时也部分去除刻蚀长石,便于下一步浮选; 3)用月桂胺进行浮选,去除长石和云母;若此步骤完成后,样品中长石含量还是很高,再重复步骤 2 和 3,直至长石含量较低为止; 4)磁选,去除磁性矿物; 5)用重液分离重矿物(比重大于石英)和轻矿物(比重小于石英); 6)用1% 的 HF/HNO_3 刻蚀样品约 24 小时,去除以上步骤中混入的 ^{10}Be; 7)先往样品中加入约 0.3500g Be 载体和 0.4500g Al 载体,然后再加入一定量的 HF 和 HNO_3 溶液溶解样品; 同时制作空白样,步骤与真实样一致; 8)添加高氯酸并蒸干,去除 BeF 和 AlF 之外的氟化物; 9)过阴离子和阳离子树脂交换柱,去除 Fe 和 Ti,分离出 Be; 10)添加 NH_4OH,沉淀 $Be(OH)_2$; 11)在750℃ 高温下,氧化 $Be(OH)_2$ 形成 BeO; 12)加入铌粉,并且混合均匀制靶。所有靶样的 ^{9}Be/^{10}Be比值是在普渡大学 PRIME 实验室用加速器质谱仪测量。

3.4　年龄计算

根据普渡大学 PRIME 实验室的测量原始数据,用 CRONUS 网页(http: // hess. ess. washington. edu/)提供的计算程序 version 2.2 计算每个样品的 ^{10}Be的暴露年龄。根据 Frankel 等[23]建议的数据标准格式将相关参数列于表 1。Owen 等[29]利用塔什库尔干谷地中两个冰川漂砾计算得出漂砾的侵蚀速率为 2.3m/Ma。假定塔合曼滑坡体巨砾的侵蚀速率也为此值,获得的年龄只比零侵蚀速率年龄大 1.3% 左右。由于野外选取的巨砾受侵蚀改造非常小,可以认为巨砾的侵蚀速率小于 2.3m/Ma。另外从表 1可以看出,核素生成速率随时间的变化对年龄结果影响很小,可以忽略不记。

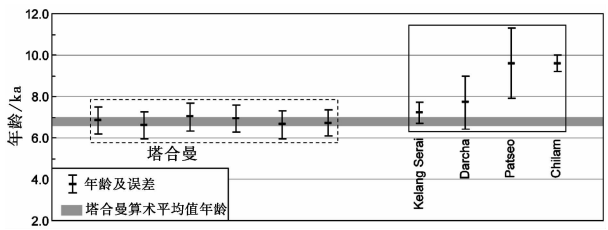

图 4　^{10}Be年龄分布图

虚线框中的年龄为塔合曼滑坡体的 6 个^{10}Be 年龄;
实线框中的年龄为 Dortch 等[7]研究的 4 个滑坡体年龄

Fig. 4　The distribution of ^{10}Be ages

表 1 片麻岩巨砾样品 ^{10}Be宇宙成因核素测年数据*

Table 1 The ^{10}Be cosmogenic nuclide data

样品编号	位置/°N/°E	海拔/m	巨砾大小 长/宽/高/m	采样厚度[a]/cm	生成速率/atoms·(g·a)$^{-1}$ 散裂反应[b]	生成速率/atoms·(g·a)$^{-1}$ μ 介子[c]	地形屏蔽影响的校正系数[d]	侵蚀速率/mm·a^{-1}	溶解的纯石英含量[e]/g	^{9}Be 载体/mg	^{10}Be/^{9}Be[f,g,h] /×10^{-13}	^{10}Be 浓度[g,i] /×10^{5}atoms·g^{-1} SiO$_2$	年龄[g,j]/ka 不随时间变化[k]	年龄[g,j]/ka 随时间变化[l]
P09THM-S1	38.06993/75.18312	3408	8.0/6.0/4.0	2	43.93	0.512	1	0	29.2716	0.3508	2.68±0.08	3.03±0.09	6.8±0.7	6.8±0.6
P09THM-S2	38.07147/75.18483	3418	4.5/3.5/2.5	3	43.81	0.511	1	0	31.6510	0.3526	2.78±0.09	2.93±0.10	6.6±0.7	6.6±0.6
P09THM-S3	38.07432/75.18553	3438	20.0/10.0/5.0	2	44.68	0.517	1	0	29.1236	0.3513	2.77±0.08	3.16±0.09	7.0±0.7	7.0±0.7
P09THM-S4	38.08148/75.18908	3521	10.0/6.0/4.0	4	46.05	0.523	1	0	28.5264	0.3502	2.78±0.08	3.22±0.10	6.9±0.7	6.9±0.7
P09THM-S5	38.08610/75.19103	3617	15.0/10.0/8.0	2	49.39	0.543	1	0	27.1316	0.3522	2.69±0.09	3.30±0.11	6.6±0.7	6.7±0.6
P05C-25A	38.09192/75.18536	3751	—	5	51.82	0.554	1	0	29.7903	0.3495	3.16±0.08	3.50±0.10	6.7±0.6	6.7±0.6

* a——巨砾顶部水平表面以下的采样厚度；b——不随时间发生变化（据 Lal[24] 和 Stone[25]），零海拔高纬度的生成速率为 4.8atoms/g·a；c——不随时间发生变化（据 Heisinger 等[26,27]）；d——本批样品至四周山顶的仰角小于 20 度，不需进行地形屏蔽几何校正；e——样品密度为 2.7g/cm^3；f——同位素浓度比均经过^{10}Be/^{9}Be比值 2.85×10^{-12}的校正（Nishiizumi 等[28]），^{10}Be半衰期为 1.36Ma；g——误差为 1σ；h——核素比值均为空白样校正后的比值（一共测试了 14 个空白样，^{10}Be/^{9}Be平均比值为 3.912×10^{-15}±8.00×10^{-16}）；i——误差包括空白样误差、1% 的载体质量误差及计数统计误差；j——年龄误差包括 6% 的 ^{10}Be生成速率误差和 4% ^{10}Be衰减常数误差；k——^{10}Be生成速率不随时间变化的暴露年龄（据 Lal[24] 和 Stone[25]）；l——^{10}Be生成速率随时间变化的暴露年龄（据 Lal[24] 和 Stone[25]）

4 讨论与结论

从图 4中可以看出，采自滑坡体不同部位巨砾的 6 个样品年龄非常一致，变化于 6.6ka 与 7.0ka 之间，其算术平均为 6.8±0.2ka，此即塔合曼滑坡体发生的时间。这说明该大型滑坡体是一次滑坡作用的产物，6 个不同部位的巨砾都是滑坡时暴露出地表的新鲜基岩，其暴露前的埋藏深度应该大于 3m，基本没有继承性核素浓度，也表明了 ^{10}Be暴露测年是研究大型滑坡的有效测年手段。

1895 年塔什库尔干 7 级地震的发震断层为塔合曼断裂，慕士塔格断裂只部分发生了同震破裂，没有切穿滑坡体。地震地表破裂带断错老的断层陡坎坡面，呈单条规模较小的张裂缝尖灭于滑坡体东缘[8]。基于以下证据，我们认为该滑坡体并非 1895 年 7 级地震的产物：1）慕士塔格正断层断错了该滑坡体，并形成了高 15 ±3m、坡向西的正断层陡坎，这并非一次强震所形成；2）该滑坡体在东西两侧已被较大规模的冲沟切穿，这些冲沟的形成时间显然远早于 1895 年；3）该滑坡体由块状或棱角状片麻岩巨砾（砾径多为 5 ~ 30m）组成，砾石表面多发育 2 ~ 5mm 厚的深棕色岩石漆；4）该滑坡体的 ^{10}Be暴露年龄为 6.8±0.2ka。

塔合曼滑坡体发生的时间与 Dortch 等[7] 研究的两个滑坡体发生的时间在误差范围内是一致的，其原因有待进一步讨论。

殷志强等[30] 应用光释光（OSL）和电子自旋共振（ESR）方法对滑坡进行了定年。但在滑坡定年中，^{10}Be测年相对其他测年方法（比如树轮年代学方法、^{14}C、地衣、孢粉及光释光等）有着诸多优势，为定量研究滑坡在造山带地貌演化中的作用提供了一种不可或缺的手段。首先，测年目标矿物石英成分简单，容易化学处理，对于化学风化具有较强的抵抗力，而且分布广泛；其次，^{10}Be较长的半衰期对于研究暴露历史较长的滑坡体是非常有用的；再之，从滑坡导致岩石开始暴露到开始接受宇宙射线照射产生核素，没有时间间隔，^{10}Be暴露年龄即为滑坡发生的年龄，其地质意义非常明确。另外，树轮年代学方法、^{14}C、地衣、孢粉及光释光等测年对象并非滑坡体本身，而是和滑坡事件相关的对象，因此这些方法获得的年龄往往早于或晚于滑坡发生的时间。

致谢 感谢匿名评审专家和编辑提出宝贵的修改意见；同时，也感谢余松和黄明达在野外的帮助。

参考文献(References)

1 Montgomery D R, Brandon, M T. Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **201**(3 ~ 4): 481 ~ 489

2 Hewitt K, Gosse J, Clague J J. Rock avalanches and the pace of Late Quaternary development of river valleys in the Karakoram Himalaya. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, **123**(9 ~ 10): 1836 ~ 1850

3 Korup O, Montgomery D R, Hewitt K. Glacier and landslide feedbacks to topographic relief in the Himalayan syntaxes. *Proceedings, National Academy of Sciences*, 2010, **107**(12): 5317 ~ 5322

4 Jibson R W. Use of landslides for paleoseismic analysis. *Engineering Geology*, 1996, **43**(12): 291 ~ 323

5 Yi C, Zhu L, Seong Y B *et al*. A late glacial rock avalanche event, Tianchi Lake, Tien Shan, Xinjiang. *Quaternary International*, 2006, **154 ~ 155**: 26 ~ 31

6 Mitchell W A, McSaveney M J, Zondervan A *et al*. The Keylong Serai rock avalanche, NW Indian Himalaya: Geomorphology and palaeoseismic implications. *Landslides*, 2007, **4**(3): 245 ~ 254

7 Dortch J M, Owen L A, Haneberg W C *et al*. Nature and timing of large landslides in the Himalaya and Transhimalaya of northern India. *Quaternary Science Reviews*, 2009, **28**(11 ~ 12): 1037 ~ 1054

8 李文巧,陈　杰,袁兆德等. 帕米尔高原 1895 年塔什库尔干地震地表多段同震破裂与发震构造. 地震地质, 2011, **33**(2): 260 ~ 276
Li Wenqiao, Chen Jie, Yuan Zhaode *et al*. Coseismic surface rupture of multi segments and seismogenic fault of the Tashikorgan earthquake in Pamir, 1895. *Seismology and Geology*, 2011, **33**(2): 260 ~ 276

9 Robinson A C, Yin A, Manning C E *et al*. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogeny. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, **119**(7 ~ 8): 882 ~ 896

10 孙本国,毛炜峄,冯燕茹等. 叶尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析. 干旱区研究, 2006, **23**(2): 203 ~ 209
Sun Benguo, Mao Weiyi, Feng Yanru *et al*. Study on the change of air temperature, precipitation and runoff volume in the Yarkant River Basin. *Arid zone research*, 2006, **23**(2): 203 ~ 209

11 Seong Y B, Owen L A, Yi C *et al*. Geomorphology of anomalously high glaciated mountains at the northwestern end of Tibet: Muztag Ata and Kongur Shan. *Geomorphology*, 2009, **103**(2): 227 ~ 250

12 Cerling T E, Craig H. Geomorphology and in-situ cosmogenic isotopes. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 1994, **22**: 273 ~ 317

13 Gosse J C, Phillips F M. Terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides: Theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 2001, **20**(14): 1475 ~ 1560

14 顾兆炎,刘东生. ^{10}Be和 ^{26}Al在地表形成和演化研究中的应用. 第四纪研究, 1997, (3): 211 ~ 221
Gu Zhaoyan, Liu Tungsheng. Application of the *in situ* cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al for studies of formation and evolutionary histories of the earth surface. *Quaternary Sciences*, 1997, (3): 211 ~ 221

15 黄湘通,郑红波,Chappell J. 宇宙成因核素 ^{10}Be,^{26}Al: 原理及其在地表过程中的应用. 同济大学学报(自然科学版), 2005, **33**(9): 1206 ~ 1212
Huang Xiangtong, Zheng Hongbo, Chappell J. Terrestrial cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al: Theory and applications in study of surficial processes. *Journal of Tongji University*(Natural Science), 2005, **33**(9): 1206 ~ 1212

16 刘　锐. 宇宙成因核素 ^{10}Be、^{26}Al: 原理及其地学应用. 海洋地质动态, 2008, **24**(12): 11 ~ 14
Liu Rui. Cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al: Theory and applications in earth sciences. *Marine Geology Letters*, 2008, **24**(12): 11 ~ 14

17 王　建,徐晓彬,张志刚等. 海螺沟现代冰碛物中的宇生核素 ^{10}Be浓度分析. 第四纪研究, 2010, **30**(5): 956 ~ 961
Wang Jian, Xu Xiaobin, Zhang Zhigang *et al*. Inherited cosmogenic nuclide ^{10}Be in modern moraine of Hailuogou Glacier in the Gongga Mountains, Sichuan Province, China. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(5): 956 ~ 961

18 顾兆炎,许　冰,吕延武等. 怒江峡谷构造地貌的演化: 阶地宇宙成因核素定年的初步结果. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 293 ~ 294
Gu Zhaoyan, Xu Bing, Lü Yanwu *et al*. A report on ^{10}Be dating of terrace surfaces in Nujiang River valley. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(2): 293 ~ 294

19 张　珂,蔡剑波. 黄河黑山峡口最高阶地宇宙核素的初步年龄及所反映的新构造运动. 第四纪研究, 2006, **26**(1): 85 ~ 91
Zhang Ke, Cai Jianbo. Preliminary result of the dating by TCN technique of the highest terrace of the Heishanxia Gorge mouth, northeast margin of Tibetan Plateau and its expression of neotectonic movement in that area. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(1): 85 ~ 91

20 顾兆炎,郭正堂,Lal D 等. 黄土和红粘土中宇宙成因核素定年的潜力: ^{10}Be浓度与化学成分的关系. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 244 ~ 249
Gu Zhaoyan, Guo Zhengtang, Lal D *et al*. ^{10}Be concentration relation to chemical compositions of Chinese loess and red clay as a potential dating method. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(2): 244 ~ 249

21 顾兆炎, Lal D, 郭正堂等. 黄土高原黄土和红粘土 ^{10}Be地球化学特征. 第四纪研究, 2000, **20**(5): 409 ~ 422
Gu Zhaoyan, Lal D, Guo Zhengtang *et al*. Geochemistry of cosmogenic ^{10}Be in loess-paleosol sequences and red clay in the Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2000, **20**(5): 409 ~ 422

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

23 Frankel K L, Finkel R C, Owen L A. Terrestrial cosmogenic nuclide geochronology data reporting standards needed. *EOS*, 2010, **91**(4): 31 ~ 32

24 Lal D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, **104**(2 ~ 4): 424 ~ 439

25 Stone J O. Air pressure and cosmogenic isotope production. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(23): 753 ~ 759

26 Heisinger B, Lal D, Jull A J *et al*. Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: Fast muons. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **200**(3 ~ 4): 345 ~ 355

27 Heisinger B, Lal D, Jull A J *et al*. Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: Capture of negative muons. *Earth and*

Planetary Science Letters, 2002, **200**(3~4): 357~369

28 Nishiizumi K, Imamura M, Caffee M W *et al*. Absolute calibration of ^{10}Be AMS standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007, **258**(2): 403~413

29 Owen L A, Chen J, Hedrick K A *et al*. Quaternary glaciation of the Tashkurgan Valley, South East Pamir. *Quaternary Science Reviews*, 2012. (in review)

30 殷志强,程国明,李小林等. 中更新世早中期以来黄河上游与三峡库区滑坡形成机理与气候变化关系研究. 第四纪研究, 2010, **30**(1): 37~45

Yin Zhiqiang, Cheng Guoming, Li Xiaolin *et al*. Relationships between landslide forming mechanisms and climate changes since Early mid-Pleistocene in the upper reaches of Yellow River and the Three Gorges Reservoir area. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(1): 37~45

^{10}BE DATING OF TAHEMAN LARGE SCALE LANDSLIDE IN EASTERN PAMIR AND PALEOSEISMIC IMPLICATIONS

Yuan Zhaode[①] Chen Jie[①] Li Wenqiao[①] Lewis A. Owen[②] Lindsay M. Schoenbohm[③]

(① *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029; ②*Department of Geology, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio* 45221, *USA*; ③*Department of Chemical and Physical Sciences, University of Toronto Mississauga, Mississauga, ON L5L* 1*C6, Canada*)

Abstract

Large-scale landslides/rock avalanches are significant events that result in erosional degradation of mountains as well as the change of orogenic mass balance, and imperil human populations and their infrastructure. Determining the distribution of landslides through time is the key to assess hazards and for understanding triggering mechanisms, such as climatic change, phases of enhanced earthquake frequency, or post-glacial stress relaxation. However, few studies have been undertaken on large landslides in the high mountains of Central Asia because of the inaccessibility of the region and the associated problems of mapping and sampling for numerical dating. The Taheman landslide is located on the south side of Muztagh Ata (7546m above sea level) just to the north of the 1895 Tashkurgan earthquake (*M*7) surface rupture in the NE Chinese Pamir, a tectonically active orogen. This paper describes the characteristics of Taheman large scale landslide, with a debris area as 5.1km^2 and its volume as 155×10^6m^3 (height and width are ca. 150m and ca. 2km respectively). The landslide is composed of sediment deposit zone, transport zone and detachment zone. Its deposit has a tongue-shaped toe which is marked by numerous sub-parallel, parabolic, and longitudinal ridges. The surface of the deposit is dominated by large, very angular block > 1m in diameter. Some blocks almost exceed 20m in length and have jigsaw morphology. Blocks on the surface form an open framework with some sand and fine gravel which is the result of bedrock shattering during transport and emplacement. In order to confine the time of the landslide, six gneiss boulders (length, height and width are all more than 1m) on the surface of the landslides were collected for ^{10}Be exposure dating. All these samples were processed in University of Cincinnati and then measured by accelerator mass spectrometry at PRIME Laboratory in Purdue University. Basic concepts of cosmogenic nuclide dating, sampling and pretreatment are showed in this paper. The six ^{10}Be dating ages are very consistent and indicate their formation 6.8±0.2kaB. P. The consistence suggests TCN exposure dating is an effective method of dating landslides. In addition, gully scale, rock varnish thickness, offset scarp and dating results suggest that the Taheman landslide was not trigged by 1895 Tashkorgan earthquake. Moreover, the methods and parameters used for interpreting TCN data are not yet standardized. Therefore, we attempted to use our six ^{10}Be dating data to set up data reporting standards needed in order to help other scientists to use our data to do more research.

Key words Taheman landslide, fault, paleoearthquake, cosmogenic nuclides, Pamir