

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0125

LI Yang, OU Xianjiao, WEN Jiajie, et al. Bleaching characteristics of young glacial cobbles and its implications for rock luminescence burial dating[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4):1395-1405. [李阳, 欧先交, 温佳洁, 等. 年轻冰川沉积砾石的晒退特征及其对岩石释光埋藏测年的启示[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4):1395-1405.]

## 年轻冰川沉积砾石的晒退特征及其对岩石 释光埋藏测年的启示

李 阳<sup>1,2</sup>, 欧先交<sup>2</sup>, 温佳洁<sup>2</sup>, 杨婉宜<sup>2</sup>, 曾兰华<sup>2</sup>, 姚 盼<sup>2</sup>, 赖忠平<sup>3</sup>

(1. 青海师范大学 地理科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 嘉应学院 地理科学与旅游学院, 广东 梅州 514015;

3. 汕头大学 海洋科学研究院, 广东 汕头 515063)

**摘 要:** 不完全晒退/晒退不均现象是冰川沉积物释光测年所面临的巨大挑战, 这一问题限制了传统颗粒沉积物释光方法在冰川沉积物测年方面的应用。最新发展的岩石释光埋藏测年技术, 可以根据释光-深度曲线判断砾石是否经历过充分曝光, 是解决冰川沉积晒退不均问题的有效途径之一。本工作选择青藏高原东部硬普沟现代冰川前沿为研究对象, 采集130个年轻冰川沉积砾石样品, 包括93个现代样品和37个小冰期样品, 其中20个现代样品采自地表。首先, 运用表<sub>2mm</sub>/饱和信号法区分不同冰川沉积环境中砾石样品的晒退程度; 再基于SAR和SGC法初步估算样品的等效剂量及其高估情况; 然后, 统计砾石样品的特征(磨圆度、球度、颜色、晶粒大小、晶粒相对大小、砾石大小等)与晒退程度的关系, 找寻晒退良好的砾石及其特征。结果表明大部分采样点的砾石样品呈现了被晒退的特征, 平均20.6%的埋藏砾石的岩芯晒退良好, 剂量高估程度低; 不同沉积类型样品的晒退程度不一, 侧碛垄顶部砾石样品晒退程度最好, 冰水阶地和现代冰河砾石样品次之, 现代冰川后退碛垄间洼地的冰水沉积砾石样品晒退程度最差, 剂量高估较严重; 磨圆度较差、球度较低、浅色的花岗岩砾石晒退程度较好。综上, 冰川沉积砾石的晒退程度与沉积环境、沉积过程、搬运距离、砾石特征等相关, 在进行岩石释光埋藏测年采样时, 应综合考虑上述情况。

**关键词:** 岩石释光埋藏测年; 冰川沉积; 砾石; 现代样品; 晒退程度

**中图分类号:** P343.6; P512.4<sup>2</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1395-11

### 0 引言

释光测年是确定冰川地貌年代的少数几种测年技术之一, 在第四纪冰川测年中已被广泛应用<sup>[1-7]</sup>。运用释光进行冰川沉积物测年时, 晒退不充分是面临的最突出问题<sup>[3-10]</sup>, 并且也不容易找到砂或粉砂级的细组分颗粒层位进行传统的颗粒沉积释光测年。而岩石释光埋藏测年技术较传统颗粒沉积释光测年技术具有一些优势, 可能更适用于冰川地貌年代的测定。首先, 部分砾石在被搬运沉积之前和搬运过程中有可能长时间暴露在地表, 晒退

情况较好且能根据释光-深度曲线识别出来<sup>[11-14]</sup>; 其次, 砾石在冰川沉积环境中普遍存在, 样品采集更容易。近年来, 岩石释光埋藏测年技术已成功应用于对于传统释光测年技术极具挑战性的冰川沉积地貌的定年<sup>[13-15]</sup>, 但是仍然存在冰川沉积环境下砾石到底能否晒退、晒退良好的比例是多少、不同沉积环境下砾石的晒退特征有何不同、砾石的特征与晒退程度之间有何关联等影响测年精度的问题。针对上述问题, 最好的检验办法就是对年轻样品, 特别是现代样品进行测试<sup>[16-17]</sup>。本研究对青藏高原

收稿日期: 2022-07-03; 修订日期: 2022-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071088; 42101007); 嘉应学院科研项目(2019KJY06)资助

作者简介: 李阳, 硕士研究生, 主要从事冰川沉积物释光测年研究. E-mail: lyliyang1998@163.com

通信作者: 欧先交, 教授, 主要从事自然地理学研究. E-mail: ouxianjiao@163.com; 赖忠平, 教授, 主要从事第四纪地质和光释光年代学研究. E-mail: zhongping.lai@yahoo.com

东部硬普沟年轻冰川砾石样品进行快速筛选,并统计不同冰川沉积环境下砾石的晒退比例和晒退程度,然后分析砾石特征与其晒退程度的关系,为野外采样提供参考以提高测年结果的可靠性。

## 1 研究区概况及样品信息

研究区位于青藏高原东部横断山脉雀儿山北坡,四川省德格县竹庆乡附近的硬普沟( $32^{\circ}07'N$ ,  $98^{\circ}51'E$ )。由于火山-花岗质岩浆活动贯穿整个义敦岛弧碰撞造山带演化过程中,导致研究区所在的三江地区发育了不同类型的花岗岩类<sup>[18]</sup>。雀儿山在 206~138 Ma 岩浆事件和 135~73 Ma 岩浆事件中

形成了以钾长石花岗岩为主的岩石<sup>[18]</sup>。硬普沟冰川在全新世前延伸至竹庆盆地,末次冰期及更老的冰碛垄分布在“U”形谷外<sup>[7,16,19]</sup>,全新世后范围退缩至“U”形谷内<sup>[16]</sup>,现“U”形谷中可见新冰期、小冰期冰碛垄以及现代后退冰碛垄等分布。我们在硬普沟的现代冰川前方的现代冰水沉积、小冰期侧冰碛及冰水阶地等 6 个采样点(图 1~图 2)采集了 130 个花岗岩砾石样品,其中现代冰川沉积砾石 93 个(73 个现代埋藏砾石),小冰期埋藏砾石 37 个,为了解研究区砾石释光信号晒退的下限,在 YPGC002S 及 YPGC003S 这 2 处地点采集了 20 个地表正在曝光的砾石样品,采样点及采样信息见表 1。

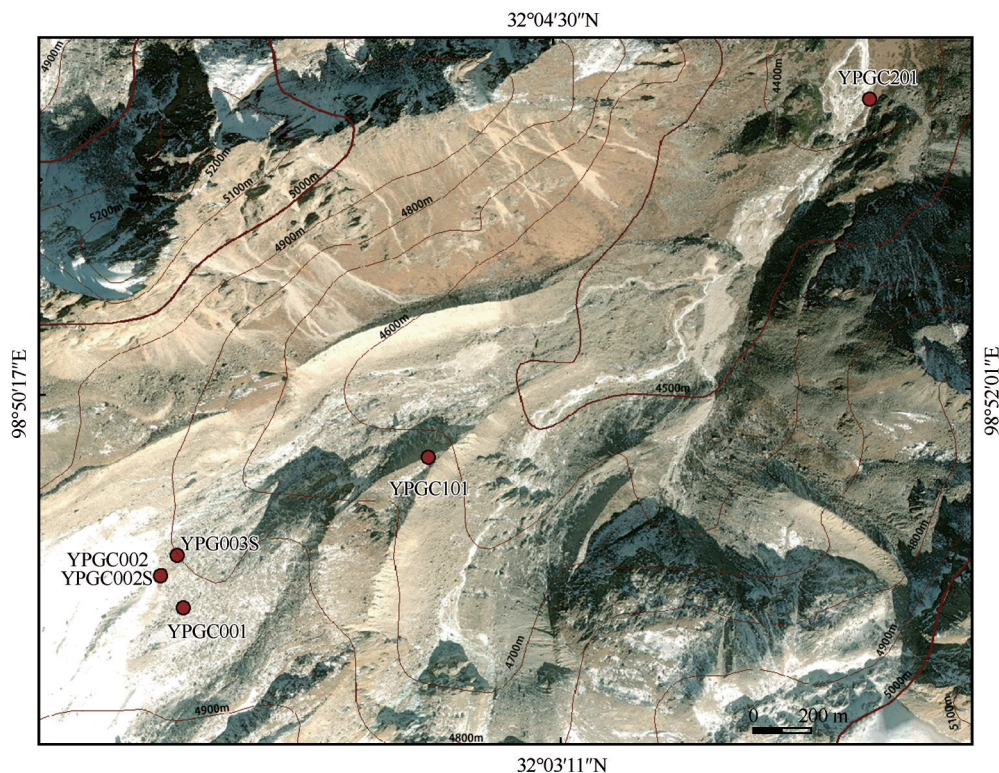


图 1 硬普沟现代冰川(左下)及其前方采样点

Fig. 1 Modern glacier in Yingpu Valley (lower left) and sampling sites in front of it

## 2 方法

### 2.1 样品前处理

在释光实验室里依次将样品洗净晾干,统计每个砾石的特征(磨圆度、球度、砾石大小、颜色、晶粒大小、晶粒相对大小等),除表面采集的样品(YPGC002S 和 YPGC003S)在采样过程中标记了顶底面(即上下两个 ab 面)外,其他埋藏样品在室内人为判断顶底面,面积大的 ab 面定为底面,面积小的 ab 面为顶面。用内径 7 mm 的水冷式金刚石

钻头在砾石的顶面和底面各钻取 1 根深达砾石中心、直径约为 7 mm 的岩芯。再用装有金刚石刀片的慢速切割机或金刚石线切割机,将岩芯切成厚度约为 0.6~0.7 mm 左右的岩片。对于多数岩芯,按照表<sub>2</sub>/饱和信号法<sup>[20]</sup>进行前处理:分别切取顶部和底部的两片岩片,顶部的前两片岩片标记为 T01、T02,底部的前两片岩片标记为 B01、B02,并确保 T02 的底面深度 $\geq 2$  mm。对少数判断为晒退良好的整根岩芯,进行了从顶部到底部的完整切





图2 采样点照片

Fig. 2 Photos of sampling sites

表1 不同采样点的位置、采样深度及采集花岗岩砾石的数量

Table 1 Location, sampling depth and quantity of granite cobble collected at different sampling sites				
采样点	采样位置	采样深度/cm	采集花岗岩砾石数量/个	预计时代
YPGC002S	YPGC002所在的冰河浅滩表面	0	11	现代
YPGC003S	现代冰川前方约80 m的现代后退碛垄表面	0	9	现代
YPGC001	现代冰川末端右前方约200 m的后退碛垄间小洼地	10~20	36	现代
YPGC002	现代冰川末端约50 m的冰河右岸浅滩	10~30	37	现代
YPGC101	现代冰川末端约850 m的侧碛垄脊上	~50	15	小冰期
YPGC201	现代冰川末端约2.5 km的冰水扇阶地近扇顶	~50	22	小冰期

片,获得不同深度的岩片。将岩片洗净烘干便可上机测试。

2.2 测试程序

本文的样品全部为花岗岩,使用简化的 post-

IR<sub>50</sub> IRSL<sub>225</sub> 单片再生剂量法 (single aliquot regenerative, SAR) 程序<sup>[21]</sup> (图3) 测试长石释光信号。实验仪器为丹麦 Risø 生产的 Risø TL/OSL-DA-20 热释光/光释光两用仪。岩片放置在内径 8.5 mm、外径 11.5 mm 的杯状载样碟 (cup) 里, 将载样碟在样品盘上间隔放置, 避免样品之间互相影响。

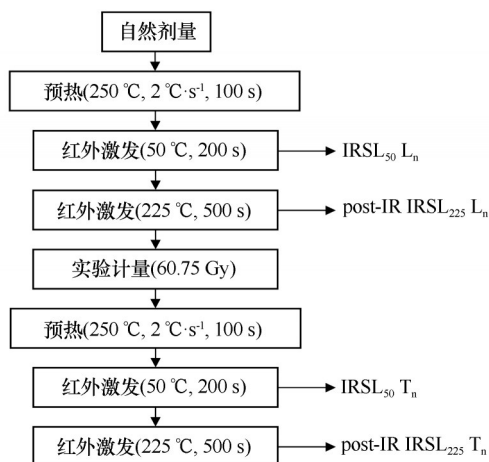


图3 简化的 post-IR<sub>50</sub> IRSL<sub>225</sub> 单片再生剂量法程序<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Simplified post-IR<sub>50</sub> IRSL<sub>225</sub> single aliquot regenerative protocol<sup>[21]</sup>

### 2.3 砾石晒退程度的筛选

根据表<sub>-2 mm</sub>/饱和信号法<sup>[20]</sup>, 对比表面~2 mm 深度岩片的释光信号与研究区砾石的饱和释光信号, 判断其晒退程度。在 Rstudio 中运用有限混合模型 (finite mixture model, FMM)<sup>[22]</sup>, 提取出所有岩芯近

砾石中心岩片 (即 B02) 的释光信号 ( $L_n/T_n$ ) 值最高的一组组分, 将其峰值 ( $4.8 \pm 0.1$ ) 定为该区域花岗岩砾石的饱和释光信号。测试每根岩芯~2 mm 深度岩片 (T02) 的释光信号  $L_n/T_n$ , 并与饱和释光信号对比, 得出表<sub>-2 mm</sub>/饱和信号比。再运用有限混合模型提取每个采样点所有岩芯中表<sub>-2 mm</sub>/饱和信号比值最低的一组组分, 此组分中的岩芯划为该采样点晒退良好的岩芯, 其余为晒退不良的岩芯。

### 2.4 SAR/SGC 确定岩片的等效剂量

对每根岩芯完全切割且用完整 SAR 法对每片岩片都进行等效剂量 (equivalent dose,  $D_e$ ) 测试将耗费大量实验时间, 为提高测试效率, 采用了 SAR 和标准生长曲线法 (standardized growth curve, SGC)<sup>[22-25]</sup> 结合的方法测试。在每个采样点中挑选一根晒退良好 (见 2.3 节) 的岩芯, 进行完全切割, 通过完整 SAR 法测试此岩芯不同深度岩片的等效剂量, 建立等效剂量-深度曲线。然后, 在 SigmaPlot 中根据上述测试过  $D_e$  的岩片的生长曲线, 拟合建立硬普沟花岗岩砾石的标准生长曲线, 在 MATLAB 软件中根据 SigmaPlot 拟合出的 SGC 及其函数公式, 将岩片标准化之后的释光信号 ( $L_n/T_n \times \text{Test dose}$ ) 插入到此曲线中, 得到相应的  $D_e$  值。不同岩片标准化后的 IRSL<sub>50</sub> 信号和 post-IR IRSL<sub>225</sub> 信号的生长曲线分别在  $\leq 972$  Gy 和  $\leq 243$  Gy 的剂量范围内相似, 可以在此范围内建立 SGC<sup>[26]</sup>。对比 SGC 拟合得出的  $D_e$  值与完整 SAR 法测试出的  $D_e$  值, 发现大部分结果很接近 (图4), 说明 SGC 法求  $D_e$  是可行的。

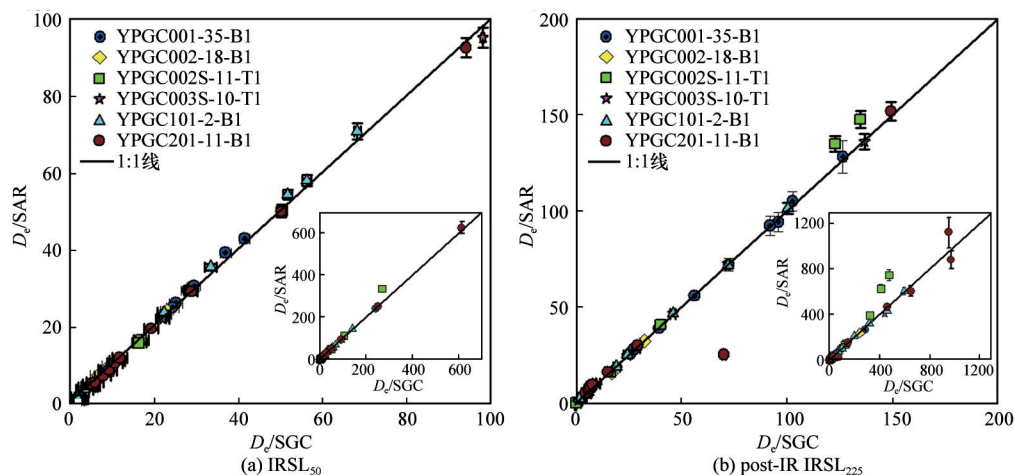


图4 硬普沟 6 个砾石不同岩片 SGC 和 SAR 的等效剂量对比<sup>[26]</sup>

Fig. 4 Comparison of  $D_e$  estimated by SGC and SAR for different rock slices of 6 cobbles from Yingpu Valley<sup>[26]</sup>: the result of IRSL<sub>50</sub> (a); the result of post-IR IRSL<sub>225</sub> (b)

剩余其他岩芯, 均采用 SGC 法获得距顶面~2 mm 深度的岩片 (T02) 的  $D_e$ 。研究表明砾石表层

$\leq 2$  mm 深度的剂量率变化较大、较复杂, 而  $\geq 2$  mm 深度的剂量率相对稳定<sup>[13,27]</sup>。因此, 对于这些岩芯,



仅选择 T02 岩片进行测试,其结果用以代表其所在岩芯。这些 T02 岩片此前已用简化的 SAR 程序测试过释光信号( $L_n/T_n$ )(见 2.3 部分),用上述的方法在 MATLAB 软件中求出相应的  $D_e$  值。然后在 Rstudio 中运用最小年代模型(minimum age model, MAM)<sup>[25]</sup>,对每个采样点中 T02 岩片的  $D_e$  值进行计算,其结果作为该采样点的  $D_e$ 。

3 结果

根据 2.3 节中砾石晒退程度的筛选方法,计算出 130 个砾石的 258 根岩芯(每个砾石钻取 2 根岩芯,由于钻取过程中砾石破碎,有 2 个砾石各只钻取了 1 根岩芯)的表<sub>2mm</sub>/饱和信号比,运用 FMM 将其按晒退程度划分为晒退良好和晒退不良两类(FMM 中分别提取的每个采样点岩芯表<sub>2mm</sub>/饱和信号比值最低的一组组分中的岩芯为该采样点晒退良好的岩芯,其余为晒退不良的岩芯)。表面砾石样品 YPGC002S 和 YPGC003S 共 40 根岩芯中晒退良好的比例分别为 45.5% 和 50.0%(表 2),平均为 47.7%,其中砾石顶面岩芯晒退良好的平均比例为 85%,远高于底面岩芯(详见 4.3 节)。埋藏样品的 218 根岩芯晒退良好的比例在 0~75.9% 之间(表 2),平均为 20.6%。作为对比,我们选择了其中一个砾石(YPGC201-11)的 3

片岩片,在阳光下曝光近 3 个月后用本文的程序测试  $D_e$ ,结果表明 IRSL<sub>50</sub> 的平均  $D_e$  值为(0.9±0.1) Gy, post-IR IRSL<sub>225</sub> 的平均  $D_e$  值为(1.2±0.4) Gy,将其作为研究区花岗岩砾石的不可晒退剂量,在计算残余剂量时减去该部分。对所有表面采集的砾石顶面的晒退良好岩芯的 T02 岩片的  $D_e$  值进行 MAM 模型计算,IRSL<sub>50</sub> 的  $D_e$  值为(3.9±2.4) Gy, post-IR IRSL<sub>225</sub> 的  $D_e$  值为(10.6±8.7) Gy,此  $D_e$  值可以视为研究区花岗岩砾石的残余剂量。MAM 模型计算的所有埋藏砾石的岩芯的 T02 岩片 IRSL<sub>50</sub> 的  $D_e$  值在(4.5±2.8)~(20.18±4.28) Gy 之间, post-IR IRSL<sub>225</sub> 的  $D_e$  值在(2.7±3.0)~(35±6.7) Gy 之间。根据地貌部位及此前的传统释光测年结果<sup>[7]</sup>可以大致推算各个样品的预期  $D_e$ ,结合实测  $D_e$  及不可晒退剂量可获知各个样品的剂量高估值。从表 2 中可见,除 YPGC001 样品的剂量高估值较大外[IRSL<sub>50</sub> 和 post-IR IRSL<sub>225</sub> 剂量高估分别为(19.2±4.2) Gy 和(33.8±6.7) Gy],其余样品的剂量高估值均较低,其中 IRSL<sub>50</sub> 剂量高估在(3.6±2.4)~(6.0±2.4) Gy 之间, post-IR IRSL<sub>225</sub> 剂量高估在(1.6±3.0)~(8.1±4.9) Gy 之间。除 YPGC001 外,埋藏砾石样品(YPGC002、YPGC101、YPGC201)与表面采集的砾石样品(YPGC002S、YPGC003S)的剂量高估差别不大。

表 2 不同采样点的沉积环境、岩芯晒退良好比例、T02 的  $D_e$  值及剂量高估值  
Table 2 Sedimentary environments of different sampling sites, the proportion of well bleached cores,  $D_e$  values of T02 and their overestimations

样品点	沉积环境	测试砾石/ 岩芯数量	岩芯晒退 良好比例	T02 岩片 $D_e$ (MAM)		预期 $D_e$ /Gy	剂量高估	
				IRSL <sub>50</sub> /Gy	post-IR IRSL <sub>225</sub> /Gy		IRSL <sub>50</sub> /Gy	post-IR IRSL <sub>225</sub> /Gy
YPGC002S	现代冰河沉积表面	11/22	45.5%	4.5±2.8	9.3±4.9	0	3.6±2.8	8.1±4.9
YPGC003S	后退碛垄表面	9/18	50.0%	6.3±4.0	2.8±3.0	0	5.4±4.0	1.6±3.0
YPGC001	现代后退碛垄间 小洼地冰水沉积	36/72	—	20.1±4.2	35±6.8	~0	~19.2±4.2	~33.8±6.7
YPGC002	现代冰河沉积	37/73	13.7%	6.8±2.5	6.9±2.8	~0	~5.9±2.5	~5.7±2.8
YPGC101	小冰期侧碛垄	15/29	75.9%	8.2±0.9	9.4±4.3	~3.0~0.6	~4.3±0.9~6.7±0.9	~5.2±4.3~7.6±4.3
YPGC201	小冰期冰水阶地	22/44	22.7%	7.5±2.4	9.3±3.1	~3.0~0.6	~3.6±2.4~6.0±2.4	~5.1±3.1~7.5±3.1

注：表中的  $D_e$  值未经过长石异常衰减的矫正。预期  $D_e$  根据地貌关系及文献 [7] 中的年代,结合研究区花岗岩铀、钍、钾含量估算。剂量高估= $D_e$  - 预期  $D_e$  - 不可晒退剂量。

从各个采样点中各挑选一根晒退良好或表<sub>2mm</sub>/饱和信号比值最低(YPGC001)的岩芯,测试不同深度岩片的等效剂量,建立等效剂量-深度曲线(图 5)。从图中可以看出,晒退良好砾石表层一定深度的释光信号较低,形成一个低剂量坪区,这种曲线形态是砾石晒退的标志,表明砾石经历过长时

间曝光,这也表明了表<sub>2mm</sub>/饱和信号法对除 YPGC001 外的采样点砾石晒退程度的判断是正确的。不同采样点晒退良好砾石的 IRSL<sub>50</sub> 信号晒退深度在 3~6 mm 左右, post-IR IRSL<sub>225</sub> 信号晒退深度在 1.2~4 mm 左右[图 5(b)~5(f)]。对于采样点[YPGC001, 图 1(a)],表<sub>2mm</sub>/饱和信号法判断的晒退最好的砾石

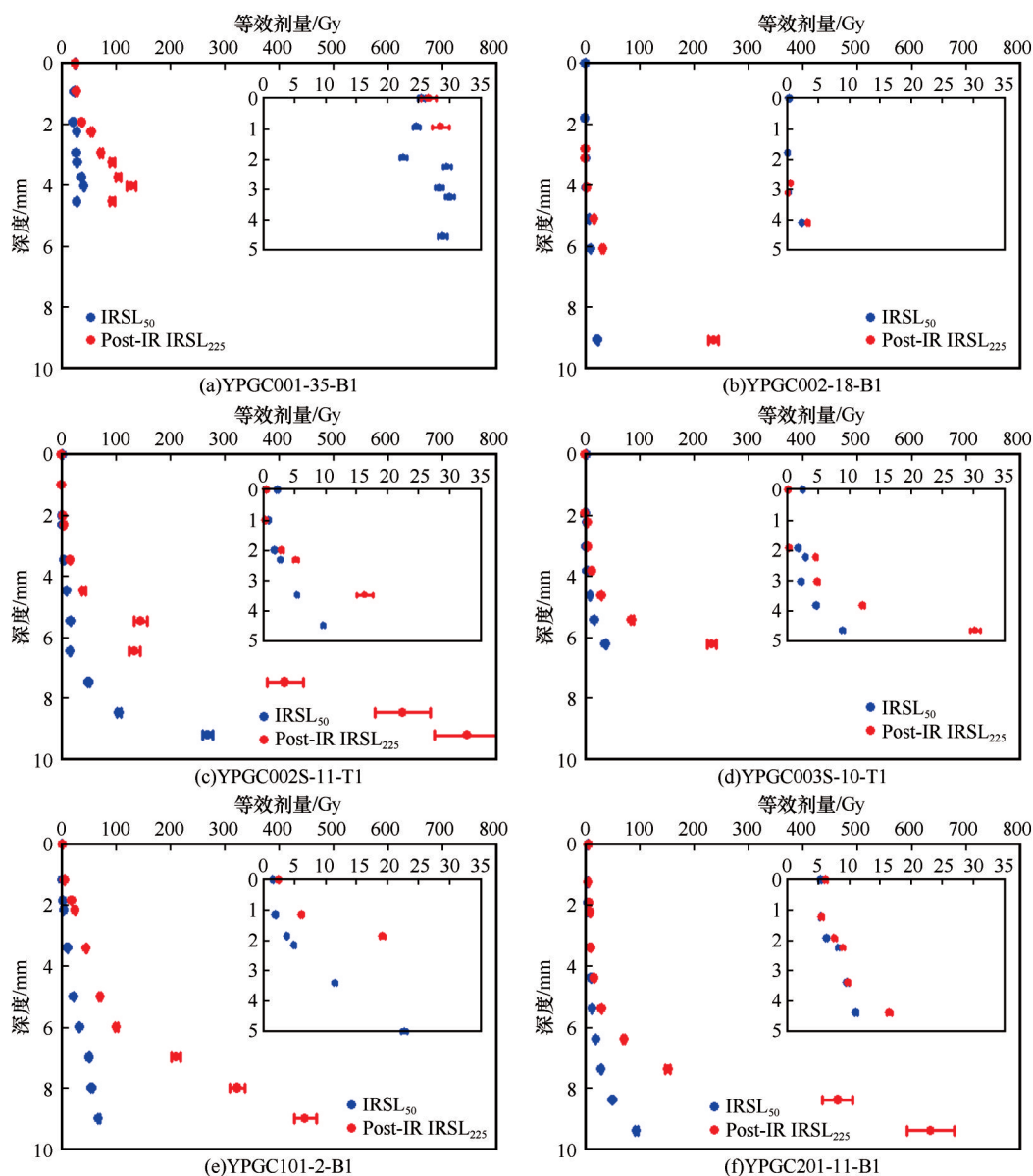


图5 不同采样点其中一根晒退较好的岩芯的等效剂量-深度曲线(小图为同一曲线的低剂量区)

Fig. 5 The equivalent dose-depth curves of one of the better bleached cores for each sampling sites, in which the small figure is the same curve showing the low dose part: YPGC001-35-B1 (a); YPGC002-18-B1 (b); YPGC002S-11-T1 (c); YPGC003S-10-T1 (d); YPGC101-2-B1 (e); YPGC201-11-B1 (f)

中,砾石表层也出现一个剂量坪区,不过剂量远超出我们对于现代样品的预期。

## 4 讨论

### 4.1 不同沉积环境的晒退程度和剂量高估

研究区的6个采样点为不同类型的沉积环境, YPGC001 为后退碛垄间小洼地中局部性或者短暂性冰川融水带来的堆积; YPGC002 与 YPGC002S 为现代冰河沉积,是现代冰河搬运的碎屑不断堆积在冰河两侧形成; YPGC003S 为后退碛垄表面,是由于

冰川后退过程中,所挟带和搬运的碎屑融出堆积而成; YPGC101 所在为侧碛垄,由冰川两侧由融出碎屑堆积形成; YPGC201 为冰水阶地,即原来的冰水沉积,后被流水下切形成的阶地。由表2可以看出,研究区年轻冰川沉积砾石中可以挑选出晒退良好的样品用于释光测年,只是不同沉积环境的砾石样品的晒退比例不一。 YPGC002S 及 YPGC003S 是在表面采集的砾石样品,晒退良好的样品基本都为砾石顶面的岩芯,顶面岩芯晒退良好比例为85%,晒退不良的样品多为底面的岩芯,这也符合表面砾石

的顶面曝光而底面避光的事实。埋藏砾石样品中, YPGC101(侧碛垄)晒退良好比例最高(表2), 这可能是因为 YPGC101 的样品主要来自于侧碛垄顶部, 由在冰川表面搬运的冰面岩屑组成<sup>[4,6]</sup>, 曝光的机会更大。另一种可能是岩屑从冰川融出后, 堆积在侧碛垄顶曝光过较长一段时间, 然后再被后续沉积覆盖。晒退最差的是现代后退碛垄间小洼地冰水沉积(YPGC001)样品, 我们没有发现晒退良好的砾石。现代冰河沉积(YPGC002)晒退良好的比例也不高(表2)。这两个采样点是距离现代冰川最近的, 砾石样品也以棱角、次棱角状的较多, 反映了搬运距离较短。一般而言, 沉积物曝光的机会和时间是随着搬运距离的增加而增加的<sup>[28-29]</sup>。因此, 采样点 YPGC001 及 YPGC002 的砾石暴露在日光下的机会较小, 导致晒退不充分。YPGC001 为局部性或者短暂性冰川融水带来的堆积, 搬运及沉积过程中曝光机会更小。YPGC201 位于下游的冰水阶地上, 与 YPGC001、YPGC002 都属于冰水沉积, 但由于位于下游, 搬运距离较长, 所以晒退良好的比例明显比 YPGC001、YPGC002 高(表2)。和现代冰川沉积颗粒样品相似的砾石样品, 搬运距离与曝光的机会和时间成正比<sup>[28-29]</sup>。

除 YPGC001 外, 其他采样点晒退良好砾石的剂量高估值均较低, 和表面采集的样品几乎没有差别(表2), 即使某些采样点晒退良好砾石的比例不高, 但仍可以从中提取出代表沉积物埋藏年代的这部分砾石用于准确测年。YPGC001 剂量高估值较高, 且没有一根岩芯的 T02 岩片的  $D_e$  值代表了现代沉积的  $D_e$  值, 表<sub>2mm</sub>/饱和信号比值最低的岩芯的剂量高估都远超我们对现代样品的预期[图5(a)], 表明该采样点晒退最好的砾石在最近一次沉积时也未充分曝光。

综上所述, 在硬普沟侧碛垄顶部(YPGC101)样品的晒退程度比较好, 残余剂量也与表面样品一致, 此结论与同是侧碛垄顶颗粒沉积的晒退程度结论一致<sup>[3,7]</sup>。但冰水沉积(YPGC001、YPGC002、YPGC201)样品的晒退程度比侧碛垄顶的样品较差, 似乎反映晒退程度低于侧碛垄, 这和颗粒沉积的调查结果不一致<sup>[3,7]</sup>。原因可能是现代冰水沉积的搬运距离较短, 堆积之后快速被后续的冰水沉积物覆盖, 导致其曝光在地表的时间偏短。我们在相邻的当子沟也进行了类似的调查, 发现当子沟冰水阶地砾石晒退良好比例(41.7%)高于终碛垄(20%)、侧

碛垄(19.6%)和丘陵状垄(5%)<sup>[20]</sup>, 说明不同研究地点砾石的晒退规律并不完全一致, 局部沉积环境对砾石晒退情况也有着非常重要的影响。总体而言, 冰川沉积砾石存在晒退的可能, 其晒退程度与沉积过程、搬运距离、在搬运过程中所处位置、局部的沉积环境等有关, 从晒退良好的砾石中提取代表沉积事件的埋藏年代是可信的。但是, 由于冰川沉积的复杂性, 冰川砾石的晒退也并非简单的模式。

#### 4.2 砾石特征与晒退程度的关系

将岩芯的晒退情况与砾石的特征(磨圆度、球度、颜色、晶粒大小、晶粒相对大小、砾石大小等)进行对比分析(图6), 探索砾石特征与晒退情况间的可能关系, 可为野外砾石的筛选提供参考依据, 提高晒退良好样品的比例。基于周尚哲<sup>[30]</sup>的划分标准、砾石几何形态三角图<sup>[31]</sup>(Tri-plot)等对砾石不同特征(磨圆度、球度、晶粒大小、晶粒相对大小、砾石大小)进行划分, 再根据红光条件下肉眼所见砾石中浅色和暗色矿物所占比例大小分为浅色为主、深色为主2类。本文共统计了110个埋藏砾石的218根岩芯, 从图6可见, 磨圆度较差(次棱角状)和球度较低(扁平状、刃状、紧凑扁平状)的砾石晒退程度较好[图6(a), 6(b)]。一般说来, 磨圆度越好的砾石, 代表搬运的距离越长, 曝光几率越大, 晒退程度越好, 但磨圆度差的砾石晒退程度比磨圆度好的砾石晒退程度更好这一结果出乎我们的意料, 可能指示了砾石的晒退程度不仅与搬运距离相关, 还与沉积环境、搬运过程中所处位置、沉积过程等有关。如果砾石搬运距离短, 但长时间停留在地表某处, 也可以使其某一面充分曝光。研究表明由雪崩、泥石流及冰川侵蚀等带来的冰上碎屑会随着冰川前进或后退不断调整<sup>[32]</sup>, 冰川消融及搬运过程中碎屑也会不断向低洼处汇聚, 翻来覆去调整<sup>[33]</sup>, 在调整过程中较细的颗粒会通过砾石之间的空隙不断向下移动, 最后会出现体积较大的砾石沉积在砂-粉砂级别的颗粒上面的逆分级现象<sup>[34]</sup>, 因此, 搬运沉积过程中砾石更有可能在地表暴露, 从而比砂-粉砂级别的颗粒曝光机率大。从图6(c)~6(e)可以看出, 中粒、等粒结构比细粒、粗粒、似斑状结构的样品晒退良好比例较高; 而浅色花岗岩砾石晒退程度比深色花岗岩砾石要好, 这与以往的颜色浅的砾石晒退较容易的结论吻合<sup>[21,35]</sup>。图6(f)表明砾石的平均砾径(a、b、c轴的平均值)与晒退程度没有明显的关系。综上, 磨圆度较差(次棱角状)、球度较低(扁



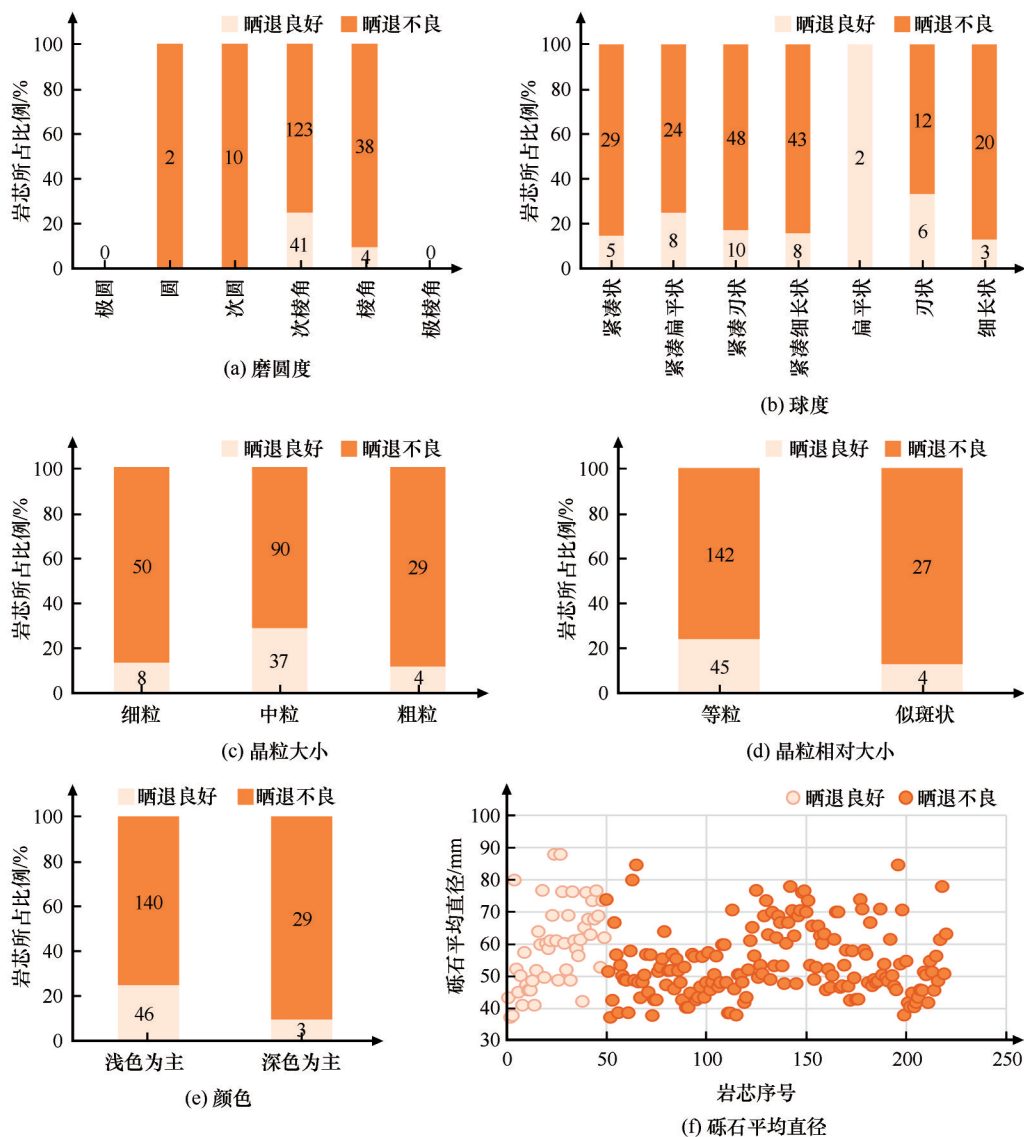


图6 不同晒退程度砾石的特征(图中柱子上数字代表岩芯的数量。注意本图仅统计了埋藏砾石,未包含表面采集的砾石)  
Fig. 6 Characteristics of cobbles with different degree of bleaching, the numbers on the columns represent the quantities of core.

Note that only buried cobbles were included in this diagram, while cobbles collected from the ground surface were excluded:  
roundness (a); sphericity (b); grain size (c); relative grain size (d); color (e); average diameter of cobbles (f)

平状、刃状、紧凑扁平状)、浅色、中粒、等粒的花岗岩砾石晒退程度较好,体积大小对花岗岩砾石晒退程度影响不大。我们在相邻的当子沟也有类似的工作,在磨圆度、球度、砾石大小等特征与晒退程度的关系上结论类似<sup>[20]</sup>。由于采样环境及采样偏好的原因,我们采样过程中主要采集次圆-次棱角、浅色、中粒、等粒结构的花岗岩,所以统计出来的结果也可能存在偏差,需要更多实例来验证。

#### 4.3 砾石表面方向与晒退程度的关系

一般情况下,现代暴露砾石样品的顶面的晒退程度高于砾石底面<sup>[35-36]</sup>,我们在现代冰水沉积表面及后退碛垄表面采集的砾石也显示了同样的结果

[图7(a)]。但有少数砾石底面的晒退程度高于顶面[图7(a)],也存在顶底面都晒退不良的样品。对于表面采集的砾石,砾石的顶面曝光时间应该更长,晒退也会比底面更好<sup>[37]</sup>,但冰碛物在沉积过程或沉积后可能会翻滚<sup>[33]</sup>,这可能是一些砾石底面的晒退程度高于顶面的原因。埋藏砾石样品的“顶”、“底”面是在实验室根据ab面的面积大小人为判断的,由图7(b)可见,砾石的“顶”、“底”面的晒退程度差别不是很大,“底面”晒退良好的比例反而比“顶面”的略高。虽然人为判断的“顶”、“底”面不一定与砾石野外实际朝向一致,我们的结果仍能表明砾石上下两个面都有可能曝光,可以推测出搬运和沉



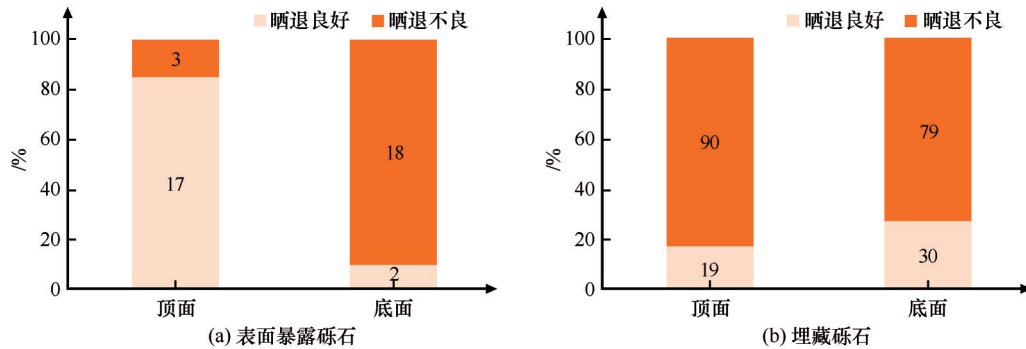


图7 砾石顶底面的晒退程度(图中柱子上数字代表岩芯的数量)

Fig. 7 Different degree of bleaching on top and bottom surfaces of cobbles, the numbers on the columns represent the quantities of core: surface exposed cobbles (a); buried cobbles (b)

积过程中,乃至沉积后砾石的翻滚是很常见的,埋藏样品的顶底面都可以被用来测年。

## 5 结论

(1)对年轻冰川沉积砾石的测试分析表明,冰川砾石释光信号充分晒退是很有可能,部分砾石的残余剂量较低,体现了岩石释光埋藏测年技术应用于冰川沉积测年的潜力。

(2)不同的沉积环境下,砾石的晒退比例不一样,硬普冰川侧碛垄脊上的砾石样品晒退程度最好,而离现代冰川较近的现代冰水沉积样品晒退良好的比例较低。

(3)大多数晒退良好砾石的剂量高估值较低且接近现代沉积表面采集样品的残余剂量,说明我们可以在晒退良好的砾石中提取出代表沉积物埋藏年代的砾石。但是也有一个现代后退碛垄间洼地冰水沉积样品的剂量高估较大,指示了局部流水环境的不完全晒退风险。

(4)对于花岗岩砾石来说,在平均直径 100 mm 范围之内,体积大小对其晒退程度影响不大,磨圆度较差(次棱角状)和球度较低(扁平状、刃状、紧凑扁平状)的浅色砾石晒退程度较好。通过表面采集的样品来看,砾石顶面晒退良好的比例明显高于底面,但对于埋藏砾石来说,由于搬运过程中的翻动,砾石的顶底面都有被晒退的可能。

(5)砾石的释光信号晒退程度与搬运距离有关,搬运距离越长,曝光的机会越多。这点与传统释光测年所用的砂-粉砂级别的颗粒相似。不同的是,砾石体积较大,即使搬运距离短,也不排除部分砾石因长时间停留在地表某处而导致某一面充分曝光。

以上结论可供冰川沉积岩石释光测年参考。需要指出的是,本文仅有几个采样点,对于复杂的冰川沉积来说,覆盖面仍差很远,将来可以调查更多的沉积类型。另外,本文仅是初步尝试的结果,由于测试工作量较大,没有考虑不同砾石或者同一砾石不同深度的剂量率、异常衰减率等的变化带来的影响,也没有直接的砾石年代。未来的工作方向是测试更多完整的释光-深度曲线,乃至年代-深度曲线,进一步排除砾石剂量率和异常衰减率变化等的影响。

## 参考文献(References):

- [1] Hu Gang, Yi Chaolu, Zhang Jiafu, et al. Luminescence dating of glacial deposits near the eastern Himalayan syntaxis using different grain-size fractions [J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 124: 124-144.
- [2] Wang Jie, Pan Baotian, Zhang Guoliang, et al. Late Quaternary glacial chronology on the eastern slope of Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau, China [J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(3): 354-365.
- [3] Ou Xianjiao, Lai Zhongping, Zhou Shangzhe, et al. Optical dating of young glacial sediments from the source area of the Urumqi River in Tianshan Mountains, northwestern China [J]. Quaternary International, 2015, 358: 12-20.
- [4] Richards B W M, Benn D I, Owen L A, et al. Timing of late Quaternary glaciations south of Mount Everest in the Khumbu Himal, Nepal [J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112(10): 1621-1632.
- [5] Spencer J Q, Owen L A. Optically stimulated luminescence dating of Late Quaternary glaciogenic sediments in the upper Hunza valley: validating the timing of glaciation and assessing dating methods [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23 (1/2): 175-191.
- [6] Tsukamoto S, Asahi K, Watanabe T, et al. Timing of past glaciations in Kanchenjunga Himal, Nepal by optically stimulated luminescence dating of tills [J]. Quaternary International, 2002, 97/98: 57-67.
- [7] Zeng Lanhua, Ou Xianjiao, Lai Zhongping, et al. Optically stimulated luminescence dating of young glacial sediments from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Mountain

- Science, 2016, 13(7): 1174-1185.
- [8] Duller G A T. Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating [J]. *Boreas*, 2008, 37(4): 589-612.
- [9] Fuchs M, Owen L A. Luminescence dating of glacial and associated sediments: review, recommendations and future directions[J]. *Boreas*, 2008, 37(4): 636-659.
- [10] Houmark-Nielsen M. Testing OSL failures against a regional Weichselian glaciation chronology from southern Scandinavia [J]. *Boreas*, 2008, 37(4): 660-677.
- [11] Freiesleben T, Sohbat R, Murray A, et al. Mathematical model quantifies multiple daylight exposure and burial events for rock surfaces using luminescence dating [J]. *Radiation Measurements*, 2015, 81: 16-22.
- [12] Sohbat R, Murray A S, Porat N, et al. Age of a prehistoric "Rodedian" cult site constrained by sediment and rock surface luminescence dating techniques [J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 90-99.
- [13] Jenkins G T H, Duller G A T, Roberts H M, et al. A new approach for luminescence dating glaciofluvial deposits-high precision optical dating of cobbles [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 192: 263-273.
- [14] Rades E F, Sohbat R, Lüthgens C, et al. First luminescence-depth profiles from boulders from moraine deposits: insights into glaciation chronology and transport dynamics in Malta valley, Austria[J]. *Radiation Measurements*, 2018, 120: 281-289.
- [15] Luo Ming, Chen Jie, Liu Jinfeng, et al. A test of rock surface luminescence dating using glaciofluvial boulders from the Chinese Pamir[J]. *Radiation Measurements*, 2018, 120: 290-297.
- [16] Ou Xianjiao, Lai Zhongping, Zhou Shangzhe, et al. Timing of glacier fluctuations and trigger mechanisms in eastern Qinghai-Tibetan Plateau during the late Quaternary [J]. *Quaternary Research*, 2014, 81(3): 464-475.
- [17] Alexanderson H, Murray A S. Luminescence signals from modern sediments in a glaciated bay, NW Svalbard[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 250-256.
- [18] Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Zhou Jirong, et al. Collision-orogenic processes of the Yidun Arc in the Sanjiang region: record of granites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(4): 484-497. [侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 杨岳清, 黄典豪, 吕庆田, 唐绍华, 余今杰, 王海平, 赵金花. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. *地质学报*, 2001, 75(4): 484-497.]
- [19] Xu Liubing, Ou Xianjiao, Lai Zhongping, et al. Timing and style of Late Pleistocene glaciation in the Queer Shan, northern Hengduan Mountains in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2010, 25(6): 957-966.
- [20] Wen Jiajie, Ou Xianjiao, Li Yang, et al. Rapid assessment of bleaching of cobbles in rock luminescence burial dating [J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(5): 1450-1462. [温佳洁, 欧先交, 李阳, 等. 岩石释光埋藏测年中砾石晒退程度的快速评估[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(5): 1450-1462.]
- [21] Ou X J, Roberts H M, Duller G A T, et al. Attenuation of light in different rock types and implications for rock surface luminescence dating [J]. *Radiation Measurements*, 2018, 120: 305-311.
- [22] Lai Zhongping. Testing the use of an OSL standardised growth curve (SGC) for de determination on quartz from the Chinese Loess Plateau [J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(1): 9-16.
- [23] Roberts H M, Duller G A T. Standardised growth curves for optical dating of sediment using multiple-grain aliquots[J]. *Radiation Measurements*, 2004, 38(2): 241-252.
- [24] Lai Zhongping. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 176-185.
- [25] Lai Zhongping, Ou Xianjiao. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 683-693. [赖忠平, 欧先交. 光释光测年基本流程[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 683-693.]
- [26] Yang Wanyi. Preliminary study of post-IR IRSL standardised growth curve (SGC) of glacial cobbles at Yingpu Valley, eastern Tibetan Plateau [D]. Meizhou: Jiaying University, 2022. [杨婉宜. 青藏高原东部硬普沟冰川沉积砾石后红外释光标准生长曲线初步研究[D]. 梅州: 嘉应学院, 2022.]
- [27] Riedesel S, Autzen M. Beta and gamma dose rate attenuation in rocks and sediment [J]. *Radiation Measurements*, 2020, 133: 106295.
- [28] King G E, Robinson R A J, Finch A A. Apparent OSL ages of modern deposits from Fåbergstølsdalen, Norway: implications for sampling glacial sediments [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2013, 28(7): 673-682.
- [29] King G E, Robinson R A J, Finch A A. Towards successful OSL sampling strategies in glacial environments: deciphering the influence of depositional processes on bleaching of modern glacial sediments from Jostedal, Southern Norway [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 89: 94-107.
- [30] Zhou Shangzhe. A study on the morphological features of glaciated stone and its differences from debris flow stone [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(3): 683-689. [周尚哲. 论冰碛石的形态特征及其与泥石流石的区别[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(3): 683-689.]
- [31] Bateman M D, Swift D A, Piotrowski J A, et al. Investigating the effects of glacial shearing of sediment on luminescence [J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 230-236.
- [32] Haeberli W, Hallet B, Arenson L, et al. Permafrost creep and rock glacier dynamics [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, 17(3): 189-214.
- [33] Zhou Shangzhe, Ou Xianjiao, Wang Jie, et al. Discussions on exposure problems of glacial deposits before buried: based on the Ayizhisu Glacier in Pamir [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 39-45. [周尚哲, 欧先交, 王杰, 等. 冰碛曝光问题的沉积学探讨——以帕米尔东坡阿依直苏冰川为例[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 39-45.]
- [34] Möbius M E, Lauderdale B E, Nagel S R, et al. Size separation of granular particles [J]. *Nature*, 2001, 414(6861): 270.
- [35] Liu Jinfeng, Cui Furong, Murray A S, et al. Resetting of the luminescence signal in modern riverbed cobbles along the course of the Shiyang River, China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 49: 184-190.
- [36] Cui Furong, Liu Jinfeng, Bao Chuang, et al. Factors that influence luminescence dating of rock surfaces [J]. *Quaternary Sciences*, 2018(3): 587-593. [崔富荣, 刘进峰, 包创, 等. 岩石暴露年龄释光测定的若干影响因素研究[J]. *第四纪研究*, 2018(3): 587-593.]
- [37] Cui Furong, Liu Jinfeng. Bleaching rate of optically stimulated luminescence signal of granite, sandstone and the significance for rock surface dating [J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(3): 223-229. [崔富荣, 刘进峰. 砂岩和花岗岩岩石表层光释光信号晒退速率对比及测年意义[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(3): 223-229.]

## Bleaching characteristics of young glacial cobbles and its implications for rock luminescence burial dating

LI Yang<sup>1,2</sup>, OU Xianjiao<sup>2</sup>, WEN Jiajie<sup>2</sup>, YANG Wanyi<sup>2</sup>, ZENG Lanhua<sup>2</sup>,  
YAO Pan<sup>2</sup>, LAI Zhongping<sup>3</sup>

(1. School of Geography, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. School of Geography and Tourism,  
Jiaying University, Meizhou 514015, Guangdong, China; 3. Institute of Marine Science,  
Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, China)

**Abstract:** Incomplete/heterogeneous bleaching is a great challenge for glacial sediment luminescence dating, which hinders the application of traditional luminescence method using sand and silt-size grains in glacial environment. The latest developed rock luminescence burial dating technique is able to judge whether the cobble has been fully exposed to daylight according to the luminescence-depth profile, which is one of the solutions to the problem of heterogeneous bleaching of glacial sediment luminescence dating. In front of the modern glacier in Yingpu Valley, eastern Qinghai-Tibetan Plateau, 130 young glacial cobbles were collected, including 93 modern samples and 37 Little Ice Age (LIA) samples, 20 of the modern samples were collected from the ground surface. Firstly, surface- $_{-2\text{ mm}}$ /saturated signal method was used to distinguish the degree of bleaching of cobble samples, and SAR and SGC methods were used to preliminarily estimate the equivalent dose ( $D_e$ ) and their overestimations. Then, the relationship between the characteristics of cobble samples (roundness, sphericity, color, grain size, relative grain size, average diameter of cobbles, etc.) and the degree of bleaching was explored, to find well bleached cobbles and their characteristics. The results indicated that there are cobbles showed characteristics of being bleached at most sampling sites. On average, 20.6% of cores of the buried cobbles were well bleached, and show very low  $D_e$  overestimations. Samples from different types of sedimentary environment show different degrees of bleaching. The cobble samples from the top of lateral moraine have the best degree of bleaching, followed by glaciofluvial terrace and modern glaciofluvial cobbles. The glaciofluvial cobbles collected from small depression between modern recessional moraines in front of modern glacier show the worst degree of bleaching, and  $D_e$  is relatively seriously overestimated. Granite cobbles with poorer roundness, lower sphericity and lighter color were better bleached. To sum up, the degree of bleaching of glacial cobbles is related to sedimentary environment, deposit process, transport distance and characteristics of cobbles. The above conditions should be comprehensively considered when sampling cobbles for rock luminescence burial dating.

**Key words:** rock luminescence burial dating; glacial sediment; cobble; modern sample; degree of bleaching

(责任编辑: 赵井东)