

冰川沉积类型识别与 ESR 测年样品采样规范

易朝路¹⁾, 毕伟力¹⁾, 杨海军²⁾

1) 中国科学院青藏高原研究所, 北京, 100085; 2) 清华大学化学系, 北京, 100084

内容提要: 电子自旋共振 (ESR) 技术是一种确定物质成分和结构的顺磁性质的分析方法, 也能够用于沉积物定年。该方法的测量技术和测年的物理机制等还处于发展阶段。冰川作用过程十分复杂, 形成各种类型的冰川沉积物, 其顺磁信号的归零机制有显著差异, ESR 测年的实验方案也有所差异。因此, 识别冰碛物类型, 采集合适的样品对于 ESR 测年的准确性十分重要。冰下融出碛和滞碛经过了冰下磨蚀过程, 结构致密, 细颗粒基质含量高, 石英砂中的一些杂质芯的 ESR 信号能够衰退。许多冰上融出碛, 结构疏松, 但细颗粒基质含量高, 不但经过了搬运过程中的冰下磨蚀过程使 ESR 信号衰退, 又经历了沉积时的冰上阳光直射过程使信号衰退, 一些样品的 ESR 信号能够完全晒退。冰水湖泊和冰水河流沉积的细砂和粉砂来源于冰下研磨的产物, 信号会衰退; 在搬运沉积过程中又可能被阳光直射, 信号进一步衰退。其它类型的冰碛物的 ESR 信号衰退机制不明, 或粒径不适合用 ESR 方法测年。采集冰碛物 ESR 年代样品时, 最好同时采集信号衰退机制相同的现代冰碛物样品, 以便对照, 并用于扣除可能的残留信号。

关键词: 冰川沉积类型; ESR 测年; 沉积物采样

确定冰期年代并进行区域或全球对比需要确定冰期的数值年代。尽管有几种测年技术能够确定准确的第四纪冰期年代, 但是电子自旋共振 (electron spin resonance, 简称 ESR) 在冰川遗迹测年方面有着不可替代的作用。这种技术用于冰碛物测年的最大特点是不需要像光释光 (optically stimulated luminescence, 简称 OSL) 测年技术那样要求采集分选好的冰水夹层。除了可以采集冰水夹层以外, 还可以采集冰碛物中含粉砂和细砂的基质, 因此样品易于获得。尽管目前主流的 ESR 测量用的是相对值, 新型的仪器测量顺磁数目的最小计数单位也是 10^9 , 光释光的光子计数是个位数。即使这样, ESR 测年也能够测定数十万年到百万年地质样品的时代 (Hennig and Grun, 1983), 这是常用的光释光测年和宇宙成因核素暴露年代方法一般情况下难以做到的, 因为 100 ka 以上的样品光释光信号饱和, 而风化侵蚀导致宇宙成因核素暴露年代被低估。

由于 ESR 技术在冰碛物测年方面存在一些其他方法不可替代的优势, 即使仪器探测灵敏度不高, 仍然具有测年应用价值。ESR 测年的一个前提是冰碛物堆积时石英砂顺磁信号归零或衰退到一个稳定值。但是, 冰川沉积十分复杂, 既有冰川可塑体形成

的多种冰下沉积, 也有冰面消融形成的沉积物, 还有冰川融水形成的冰水沉积, 具有一般河流许多相同的沉积特征。有些冰川沉积类型中的 ESR 信号衰退了, 有些没有, 因此选择 ESR 信号衰退的冰川沉积类型对 ESR 测年的可行性十分重要。下面根据目前 ESR 技术的特点和冰川沉积过程的特征和沉积类型, 论述与 ESR 测年有关的冰川沉积类型和测年样品的采集要求。

1 冰碛物 ESR 测年的基本原理

用于沉积物 ESR 测年的主要矿物是石英。石英中存在的过渡金属离子形成晶体缺陷和成岩过程中产生的氧空位缺陷, 产生不同类型的顺磁中心, 在晶体缺陷中积累不成对的电子。在沉积物搬运和沉积过程中, 受到阳光直接照射、机械摩擦和热力作用使沉积物石英砂中未成对电子消失, 顺磁信号归零 (相当于计时器设置为零), 或者顺磁信号衰退到一个常数 (相当于计时器设置为定值), 沉积物被埋藏后受到周围 U、Th、K 等放射性元素衰变所产生的电离辐射 (主要是 α 、 β 和 γ 粒子) 和宇宙射线辐照, 开始产生新的不成对电子 (相当于计时器开始计时)。随着沉积物埋藏时间的增加, 石英的顺磁中心数量

注: 本文为一带一路计划 (编号: XDA20070102) 和国家自然科学基金资助项目 (编号: 41230523) 的成果。

收稿日期: 2018-06-25; 改回日期: 2018-11-27; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.010

作者简介: 易朝路, 男, 1959 年生, 研究员, 主要从事冰川地貌和沉积及其年代学研究, Email: clyi@itpcas.ac.cn。

也会呈线性或指数规律增加。采用电子自旋共振波谱仪测量顺磁性物质中含有未成对电子的相对数量,采用附加剂量法获得样品的辐照剂量——未成对电子数量再生曲线模拟样品在自然界中接受的总辐照剂量(Ikeya, 1975; Grün, 1989; Rink, 1997)。实验模拟(刘春茹等, 2009; Yi Chaolu et al., 2016a; 毕伟力, 2017)和实际测年结果(Liu Chunru et al., 2010)显示,采用适当的石英 ESR 信号芯和测量参数,ESR 方法可以测定含石英的冰碛物最后一次埋藏事件以来的时间,即样品的埋藏年龄。

由沉积物 ESR 测年的基本原理可知,与沉积物有关的冰碛物 ESR 测年样品中要含有足够量的石英,用于提取纯石英样品。由于石英样品受到周围的沉积物电离辐射的照射,计算年代时需要知道石英受到周围放射性元素和宇宙射线所产生的年辐射剂量,因此需要确定样品周围沉积物颗粒大小分布状况和埋藏的深浅。这些都要在采样时考虑到。

目前能够用于冰碛物定年的 ESR 信号有 Al(铝)、Ti(钛)、Ge(锗)和 E_1' (氧空位)芯。其中 Ge 芯用于冰碛物测年比较多(周尚哲等, 2001; 易朝路等, 2002; 张威等, 2015)。实验显示,Ge 芯信号既对光敏感,也对研磨敏感。纯石英砂的 Ge 芯信号在几个小时内可以被阳光晒退(Grün, 1991; 业渝光等, 1993; Yi Chaolu et al., 2016a),研磨几分钟(Lee and Schwarcz, 1993; Ye Yuguang et al., 1998),或将粗砂研磨到细砂(Yi Chaolu et al., 2016a),Ge 芯信号强度减弱到原有的 $1/3 \sim 1/2$ 。冰碛物是混合矿物,很难发现分选好的纯石英砂存在于冰碛物中。实验显示,5~8 mm 厚度的混合矿物中的石英砂 Ge 信号在 3650 m 的高度处被阳光直接照射一周也不能被彻底晒退,但表面 1~2 mm 的厚度内,混合矿物中的石英颗粒的 Ge 信号在几天内信号衰减到原有的 7%~8%。实际检验显示,在海拔 5000 m 冰帽/冰原的边缘,检测不到现代冰碛物的 Ge 芯 ESR 信号,说明 Ge 芯信号彻底衰退了,但山地冰川现代冰碛物中石英砂 Ge 芯 ESR 信号能够被检测出,说明山谷冰川沉积物具有残留的 ESR 信号,继承的信号需要采用技术手段扣除(毕伟力, 2017)。

不同的冰川沉积类型经历的冰川地质地貌过程不同,所含石英砂 ESR 信号衰退机制也不同。采集能够代表冰川沉积地貌体的样品,才能正确反映第四纪冰川的年代,否则会出现不同的人在同一个剖面采集的样品,同一个实验员在同一台仪器上采用

同样的参数获得的年代不在一个时代框架内(Yi Chaolu et al., 2002; Zhao Jindong et al., 2006)。

2 影响冰碛物 ESR 测年的地质地貌过程

冰是一种固态水体。冰川冰在长时间应力作用下流变又成为可塑体,融化后成为液态水体。因此冰川同时具有固体、液体和塑性体的性质。不同于风成和水成的沉积物,冰川侵蚀、搬运和沉积动力过程十分复杂。主要有冰下动力过程、冰上动力过程和冰川融水动力过程(Flint, 1971)。不同的过程导致冰碛物石英砂 ESR 信号衰退的机制不同,影响到 ESR 测量参数的选择,从而影响到测年的准确性。

2.1 冰川侵蚀过程

冰川沉积的物质主要来源于冰川侵蚀的产物。冰川沉积中保留有冰川侵蚀留下的痕迹。冰川侵蚀主要有两种,一种是冰川磨蚀作用,产生的细颗粒物可用于 ESR 测年。另一种是冰川拔蚀作用,产生粗颗粒物,不能用于 ESR 测年。

2.1.1 冰川磨蚀(研磨+压碎)作用

冰川磨蚀作用发生在冰下,也是冰下研磨与压碎作用的统称。冰下磨蚀作用是指冻结于冰川冰底部的冰碛物与冰床或其他冰碛物相互接触,在大于大气压力的条件下,因压融形成水膜(Weertman, 1957),在冰岩界面滑动,在剪应力作用下,岩石/矿物表层或整体发生破裂,点一面接触的冰碛物碎屑棱角圆化,成次棱角状,擦痕是其中的一种表现形式。面一面接触的冰碛碎屑表面或槽谷表面被磨光。这个过程不仅在宏观上可以见到(图 1a 到 d),在微观上也可以见到(图 1e)(Yi Chaolu, 1997)。冰下磨蚀的结果是产生细砂和粉砂,在粒度分布曲线上出现显著的峰值(Dreimanis and Vagner, 1971)。温度、岩性、冰川规模和性质对粒度分布特征有很大影响。在冰川足够长的情况下,冰碛物在粒径 4~5 ϕ (0.063~0.032 mm)的粒度分布曲线上出现峰值。岩石越硬,越难以磨蚀,基质中的粉砂含量越少,磨蚀和压碎粒径偏粗,棱角状冰碛石的百分比增加。反之,岩石越软,越容易被磨蚀,基质中的粉砂含量就高,磨蚀和压碎粒径偏细。在岩性软弱的条件下,峰值粒径可以低到 6~7 ϕ (0.016~0.008 mm),岩性硬的地区,峰值粒度可以到 2~3 ϕ (0.125~0.063 mm)(Dreimanis and Vagner, 1971; 易朝路, 2006)。随着冰碛物搬运距离增大,棱角状冰碛石的百分比减少,而次棱角状的冰碛石逐渐增加(李

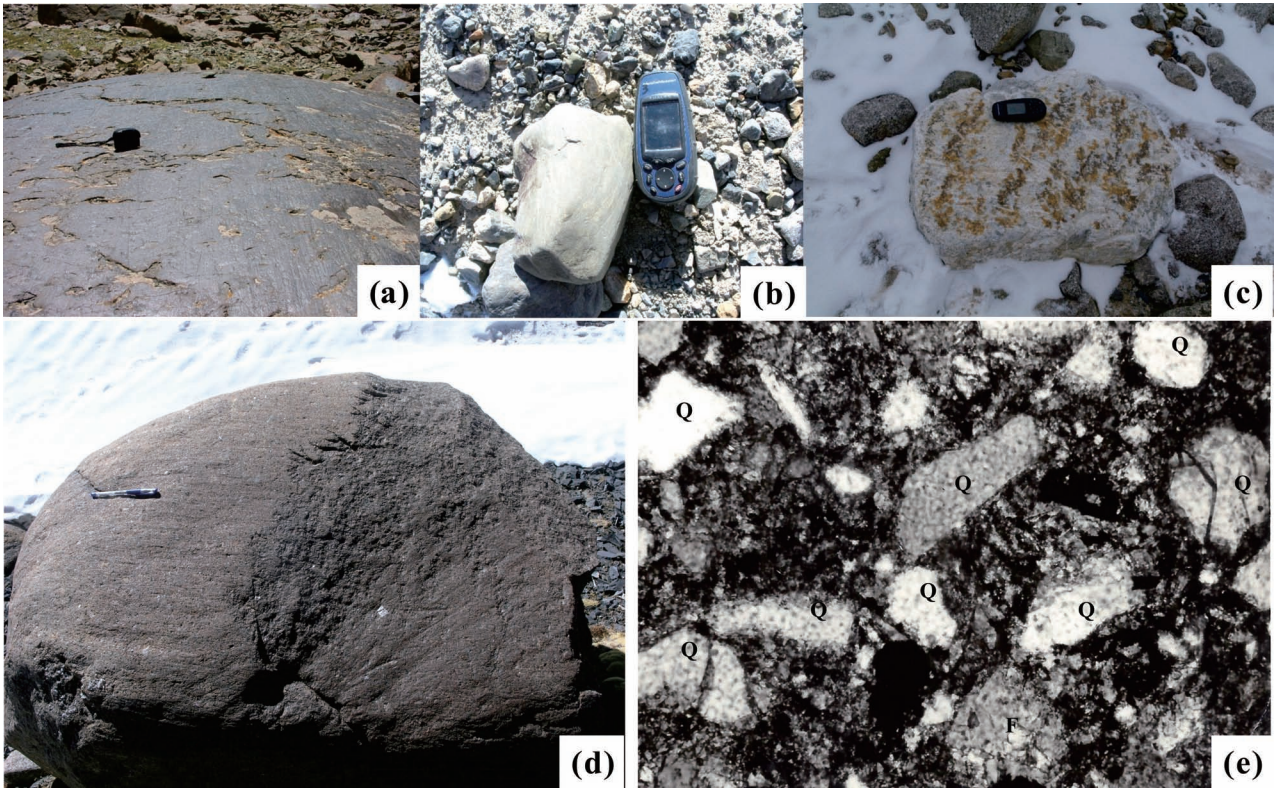


图 1 冰下磨蚀现象：(a) 天山博格达峰南坡羊背石上的磨光面(俗称冰溜面,板岩)与擦痕；(b)、(c)和(d) 分别为高原腹地普若岗日东北部 10 号冰川高侧碛垄上熨斗形冰川条痕石(碳酸盐岩)、西部 6 号冰川前碳酸岩漂砾上的冰川擦痕和北部 14 号冰川前的条痕石(花岗岩)。两组方向不同的擦痕显示冰碛石长轴方向在冰下发生了变化。说明即使在最低冰温达到 $-9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (蒲健辰等, 2002)的极大陆型冰川的底部也能产生融水,冷底冰川和暖底冰川一样也有发生冰下滑动过程,产生擦痕；(e) 阿尔泰山哈纳斯湖湖口冰碛物在显微镜下观察到的压碎与磨蚀现象。Q = 石英；F = 长石

Fig. 1 Subglacial abrasion in till: (a) polished surface with striations on a rock-moutonee in the southern slope of the Bogeda Peak in the eastern Tianshan Mountains; (b) iron-like clast with striations (carbonate) in the high lateral moraine of Glacier 10, in the northern part of the Puruogangri icefield; (c) striated clast (carbonate) in the terminal moraine of Glacier 6 in the western part of the Puruogangri icefield; (d) striated clast (granite) in the front of Glacier 14 in the northern part of the Puruogangri icefield. Two sets of striations on the clasts indicate that elongated clasts changed their directions beneath ice during transportation and suggest that meltwater was present and sliding occurred in the interface of ice—rock in the base-cold glacier with the lowest temperature of $-9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Pu Jianchen et al., 2002) to produce the striations in the continental climate region; (e) Subglacial rushing and abrasion observed under polarized microscope in the moraine at the outlet of the Halasi Lake, the Altay Mountains. Q = Quartz; F = feldspar

树德等, 1981; 崔之久和熊黑钢, 1989; 崔之久等, 1993)。尽管磨蚀还是拔蚀对冰川地貌的塑造哪个更为重要存在争议 (Yi Chaolu et al., 2016b), 但 Herman 等 (2015) 建立了冰下磨蚀量与冰川表面流速成二次方的关系,。在降水多湿润地区, 冰川流速大, 冰下磨蚀作用更强。

冰川的压碎和磨蚀作用对 ESR 信号有显著影响。实验室人工研磨研究显示, 粒径 $0.5\sim1.0\text{ mm}$ 的石英砂, 研磨到细砂时, Ge 芯信号会降低 $1/3\sim1/2$ (Yi Chaolu et al., 2016a)。

2.1.2 冰川拔蚀作用

冰雪融水渗入到冰床底部或冰斗后背的基岩的裂隙中, 反复冻融使基岩松动和破碎, 并被冰川搬走的过程。冰川拔蚀作用形成的冰碛物粗大, 不适合 ESR 测年, 这里不赘述。

2.2 冰川搬运作用

冰川搬运作用指冰川冰在重力作用下向下流动, 将冰川表面的冰碛物 (简称表碛)、冰内的冰碛物 (简称内碛) 和冰川底部的冰碛物 (简称底碛) 搬运到冰川边缘的过程。在冰碛物沉积以前, 冰川的



图 2 山谷冰川的表碛。(a) 喜马拉雅山珠穆朗玛峰北坡绒布冰川下游的表碛(近景为摄影者所站的侧碛垄);
(b) 阿尔泰山北坡哈纳斯河流域上游现代冰川表碛和冰下融水河流;(c), 喜马拉雅山东段的米堆冰川表碛
Fig. 2 Debris covered glacier. (a) Supraglacial till in the lower part of the Rongbuk Glacier in the northern slope of the Qomolangma Peak; (b) Supraglacial till and subglacial meltwater stream in the upper reach of the Halasi River catchment; (c) Supraglacial till in the Midui Glacier in the eastern Himalaya

搬运作用对 ESR 信号影响较大。

2.2.1 冰上搬运作用

表碛在山谷冰川中常见(图 2)。表碛主要来自山坡上寒冻风化后破碎的岩石滚落到冰面上,以及冰斗后壁因冰川拔蚀作用产生的部分岩块坠落到冰面,被冰川带到下游。还有一部分表碛来自底碛。在喜马拉雅山的南坡南迦—帕尔巴特峰和喀喇昆仑山(Benn and Owen, 2002)和珠峰北坡(图 2a),在阿尔泰山北坡哈纳斯河流域(图 2b)和喜马拉雅山东段的米堆冰川(图 2c)等冰川上都有大量表碛。内碛来源于表碛和底碛。底碛主要是冰岩界面冰川拔蚀和磨蚀冰床产生的碎屑,少量来自表碛和内碛。大部分底碛随冰川的运动向下游移动。少部分底碛,因冰川冰的变形,沿着冰内剪切面输送到冰内和冰面变成内碛和表碛。经过冰川研磨形成的底碛,

含有许多粉砂和细砂,被输送到冰面后,经过阳光直接照射,ESR 信号会很快衰退,后又被冰川融水带到冰岩界面和冰川下游沉积下来,能够用于 ESR 测年。

2.2.2 冰下搬运作用

冰下拔蚀和磨蚀的物质多在底部被搬运,通过冰川冰的蠕变和底部滑动,将冰岩界面的物质带向下游。

2.2.3 剪切面搬运作用

由于冰川末端冰体厚度减薄,压力减小,冰的压融温度上升,冰下水膜减少或消失,冰川运动缓慢或停滞,后面的冰体因压融温度低,冰下存在水膜,运动快,遇到前面的冰体阻挡发生剪断,沿剪切面将冰下沉积物推挤到冰舌末端,冰体消融后沉积下来(图 3)。剪切面在冰川内部经常出现。冰下的一些



图 3 冰前剪切面及其搬运的冰碛物:(a) 普若岗日冰原 6 号冰舌的剪切面中所含冰碛物(箭头所指),和正在形成的现代冰碛物(圈出的地方);(b)、(c) 天山乌鲁木齐河源 1 号冰舌的剪切面(箭头所指)及其所形成的侧碛垄(b);剪切面搬运的冰碛物沉积后形成现代终碛垄,与退缩后的现代冰川分离(c)

Fig. 3 Shearing zones and transported glacial till: (a) glacial till in shearing zone (circle) in Glacier 6 in the western part of the Puruogangri icefield; (b) shearing zone (arrow direction) and lateral moraine which is forming; (c) contemporary terminal moraine (circle) has been formed due to recent glacier retreat

冰碛物也由剪切面输送到冰面。

2.2.4 冰川融水河流搬运

冰川表面、底部和边缘有大量融水,形成冰川表面流、冰下水流和冰川两侧的融水溪流。融水多时可以形成规模较大的冰下河道(图 2b 和图 4)。

2.3 冰川沉积作用

冰川沉积过程分为冰下沉积过程和冰上沉积过程。冰川沉积过程对 ESR 信号影响很大。不同的沉积类型的冰碛物石英砂 ESR 信号衰退机制不一样,野外采集样品要特别注意。冰下沉积过程分为冰下融出过程和冰下压融过程。冰上沉积过程分为冰上融出过程,冰川边缘消融过程,冰面流动过程,冰面重力过程和冰面升华过程。此外,还有冰川消融产生的冰下和冰上融水沉积过程。

2.3.1 冰上消融过程

冰川表面吸热消融,使冰川表面的漂砾和冰内的冰碛物,或者沿剪切面输送到冰面的底碛沉积过程。主要发生于冰川边缘,少数出现于冰川表面。对应的冰川成因类型是冰上融出碛。由于冰上融出过程中,冰碛物受到阳光直接照射,而阳光照射会导致 Ge 芯的 ESR 信号衰退甚至完全衰退(Yi Chaolu et al., 2016a),因此对 ESR 测年影响很大。

2.3.2 冰下消融过程

发生于冰川底部,冰碛物沉积时,沉积面与大气相通,即沉积发生在正常大气压力条件下,形成的沉积物分布于冰川底部和冰川边缘。对应的冰碛物成因类型是冰下融出碛。

2.3.3 冰下压融过程

发生在受到冰川重力作用的冰川底部,特别是

发生在冰下有突出物体的迎冰面,由于压力增大,冰川冰的融点低于正常大气压力下的融点,冰碛物在压融条件下沉积,对应的冰碛物成因类型是滞碛。

2.3.4 冰面流动过程

冰面或沉积物中含饱和水分的冰碛物沿着冰面或沉积界面流动,在低洼处沉积下来。这种过程能够导致冰碛物有一定的分选和暴露在阳光下,能够导致 ESR 信号衰退。

2.3.5 滑塌和滚动等重力过程

冰面消融冰碛物暴露,在重力作用下,沿着冰面或沉积面滑落或滚动到地势相对较低的位置上。这一过程可能导致冰碛物暴露在阳光下,导致 ESR 信号衰退。

2.3.6 冰面升华过程

冰面升华过程是指冰川冰直接由固态变成气态的过程。这一过程将造成 ESR 信号衰退,但所形成的升华碛在沉积物中不能识别,在冰川沉积分类中意义不大。

2.3.7 冰面和冰下融水过程

由于冰面和冰下冰川消融,形成融水,沉积物发生分选,在冰碛物中形成分选好的砂透镜体。在暖底冰川作用区,融水可以在冰川底部形成冰下河流,在局部形成磨圆极佳的鹅卵石堆积。冰川融水能够将冰下研磨的细颗粒带到下游或冰碛物中沉积下来,在沉积搬运过程中被阳光照射的机会多,形成的沉积物能够用于 ESR 测年。

3 冰川沉积类型

按照冰川沉积的位置,分为冰川边缘沉积、冰下

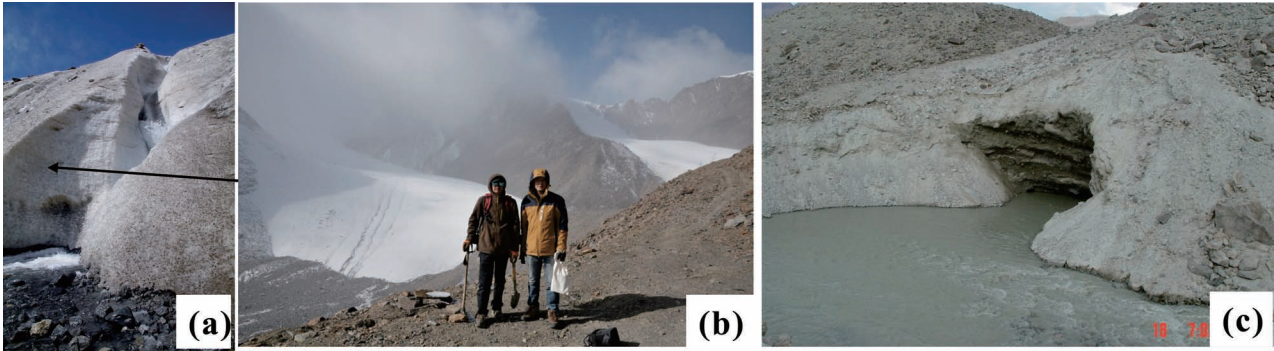


图 4 冰川融水搬运:(a 和 b) 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川冰面融水形成的沟槽和流出冰川后在冰川前面形成的融水溪流,冰水中部分物质在冰碛垄上或侧面沉积;(c) 帕米尔高原慕士塔格峰东坡冰下河流与表碛
Fig. 4 Transportation through glacial meltwater: (a and b), gutters on glacier surface and meltwater streams in front of Glacier 1 in the upper valley of the Urumqi River, the Tianshan Mountains; (c) subglacial meltwater stream in a debris-covered glacier in the western slope of the Mustag Ata, the Pamir

沉积和冰前河流—湖泊沉积。山谷冰川沉积在地貌上表现为终碛垄、侧碛垄(堤)、中碛垄(堤)、冰碛丘陵、冰砾阜、锅穴和冰水阶地等。大陆冰盖和一些高原冰帽/冰原,还形成鼓丘、蛇形丘等微地貌。这些地貌体由不同的沉积类型组成。在广泛使用数值测年技术对冰川遗迹测年以前的上世纪70年代,Goldthwait (1971)编辑的论文集中,对冰盖沉积的结构构造、沉积类型和沉积相划分等方面进行了大量研究(Boulton, 1971)。国际第四纪研究联合会根据碎屑在冰川搬运和沉积作用发生时的位置、过程等关系,于1979年11月制定了“冰碛物的成因分类方案”(Dreimanis, 1988)。以两类冰碛为主,一类是冰上的,一类是冰下的。冰上的主要以冰上融出碛为主,而流碛仅在局部可见,升华碛仅有分类上的意义。而冰下沉积则主要以冰下融出碛和滞碛为主。变形碛和流碛分布范围也很有限。由于冰川动力过程复杂,尤其是对冰下过程的认识还不甚清楚,一些学者对此分类还有保留意见,小型山谷冰川的冰下融出碛和滞碛从沉积特征上就很难区分开,常统称为底碛(basal till)。

我国的第四纪冰川沉积研究始于英国学者Edward Derbyshire教授。1980年他在兰州冰川沉积学研究生班上讲授冰川沉积学,此后,崔之久等(1981)也对我国的冰碛进行了分类探讨。许多研究者主要从几个方面研究冰碛物沉积特征:宏观上的沉积结构构造(崔之久, 1980; 冯兆东和秦大河, 1984; 易朝路, 1989; 崔之久和熊黑钢, 1989; 崔之久等, 1992), 冰碛物微结构(谢又予和崔之久, 1981; 唐永仪, 1990; 崔之久和易朝路, 1994; 易朝露和崔之久, 1994; Yi Chaolu, 1997; Yi Chaolu and Cui Zhijiu, 2001; Li Dewen et al., 2006)。崔之久和熊黑钢(1989)对山谷冰川沉积相作了划分。Benn and Owen (2002)对喜马拉雅—喀喇昆仑山的冰川沉积过程作了研究,并指出了宇宙成因核素暴露年代和光释光年代样品合适采样的沉积部位和沉积类型。冰水沉积也是冰川沉积的一种类型,它既发育于冰碛垄周围,形成冰砾阜、冰水扇或冰水阶地,也广泛出现于冰上融出碛和冰下融出碛中,形成冰水透镜体。冰水沉积中的细颗粒物质来源于冰下磨蚀作用,它们在被冰水搬运的过程中,多数能够受到阳光照射,因此ESR信号会衰退,对ESR测年有意义,这里将其归为冰川沉积。

3.1 冰上沉积

冰上沉积包括固态冰融化形成的冰上融出碛、

冰面融水形成的流碛和冰川消融冰碛物直接坠落地表的倾卸碛以及冰面湖沉积。

3.1.1 冰上融出碛

冰上融出碛是在冰上大气压力下冰体融化沉积形成的冰碛。沉积过程主要受重力控制,冰碛物从冰面坠落、滑动和滚动等,最后沉积到侧碛和终碛垄上。也有一些冰碛是从山坡岩壁上滚落至冰川上后沉积到冰碛中,分布于终碛垄和侧碛垄上部。由于没有受到冰川的压实作用,冰碛物疏松多孔,孔隙大且不规则(Yi Chaolu and Cui Zhijiu, 2001; 易朝露和崔之久, 1994)。因每一次搬运的碎屑数量不同、粗细不同而形成一些粗略的平行于坡面的层(图5a和b)(崔之久和熊黑钢, 1989)。常常呈现出各种类似地质构造的形态,如“背斜”、“单斜”、“向斜”等。由于气候变冷或降水增加,冰川前进,推挤其前部的冰上融出碛,特别是在个别地段遇到冰底巨砾阻挡时使冰上融出碛中粗略的斜层发生变形,褶皱起来,形成推挤褶皱构造。受到挤压变形后,巨砾上游一侧的砾石扁平面以大角度的叠瓦状向上游倾斜,形成局部叠瓦构造(图5c和d)(崔之久和熊黑钢, 1989; 朱大岗等, 2005)。组构优势方位受局部地形的控制,与冰川流向无关。长轴在冰碛垄坡上多平行于坡面倾向,在终碛垄上与冰川流向一致,一旦顺坡滚落坡下,长轴又与冰川流向垂直。若在侧碛垄上,则长轴走向会完全相反。扁平面组构发育较好,多平行坡面分布,倾角多在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 间,倾向不定(崔之久, 1980; 冯兆东和秦大河, 1984; Li Dewen et al., 2006)。微组构也有这种特征,碎屑的微组构有明显优势方位,但孔隙无优势方位(Yi Chaolu and Cui Zhijiu, 2001)。

如果冰碛物来自冰面消融和山坡上的坠落物,因为搬运距离短,遭受磨蚀的机会少,所以冰碛石和冰碛石英砂的磨圆度差,多为棱角状和次棱角状的,冰碛物岩性成分简单,与附近山坡上基岩的岩性一致,基质少,多以颗粒支撑结构为主(图6a和6b,图5b)。如果冰碛物来自冰川前端的剪切面,由于冰碛物来自冰下而受到冰下磨蚀作用,所以冰碛石磨圆度较高,多为次棱角状,有擦痕和擦面,冰碛石岩性成分复杂。

3.1.2 流碛

冰融水参与使冰碛接近或达到液限,沿冰面以泥石流形式流动,会在低洼处沉积形成流碛。如果冰碛物规模小,将以团块状出现在融出碛之中,多呈透镜状。如果冰碛团块不明显,要把流碛与冰上融

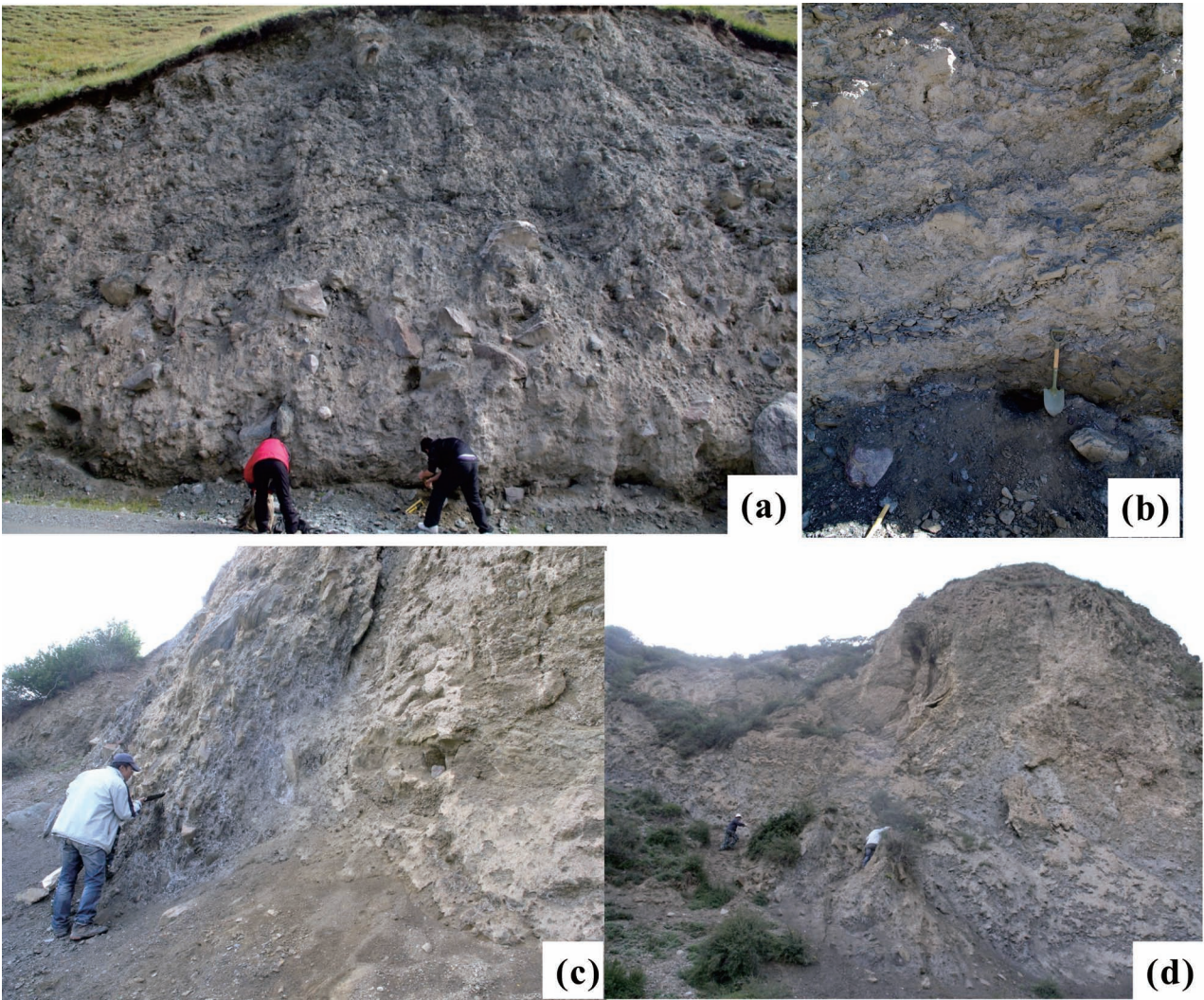


图 5 冰上融出碛的沉积构造: (a) 天山乌鲁木齐河源上望峰冰上融出碛似层理构造(斜层构造),斜层倾角向上游倾斜(左上)或近水平的(上部)和冰下融出碛块状构造(下部);(b) 天山乌鲁木齐河源上望峰冰上融出碛斜层构造和斜层中的砾石镶嵌结构;(c) 祁连山东段冷龙岭主峰什卡沟冰碛层变形构造,左侧的蓝色冰碛层被后来的冰川推挤(黄色冰碛层),砾石近乎直立;(d) 祁连山东段冷龙岭岗什卡沟冰上融出碛变形构造,左侧的冰水湖泊沉积的层理被推挤褶皱

Fig. 5 Sedimentary structure in superglacial till. (a) pseudo-oblique beddings in superglacial meltout till, slanting upper (upleft), or parallel to surface (upper) with massive structure (down); (b) pseudo-oblique beddings and mosaic texture in superglacial meltout till of the Wangfeng moraine in the upper valley of the Urumqi River; (c) and (d) Deformation structure in the glacial till in the Gangshika Valley, in the eastern Qilian Mountains. The lacustrine beddings are folded under thrusting (d)

出碛明显地区别开比较困难。因为流碛形成的动力过程,除了液态流外,还伴有半塑性流和蠕流,而后两者在冰面融出碛的形成过程中也是可以出现的。其中,由流动造成的流动相斜层较薄(10~20 cm)。由于细粒物浮托上升,砾石间有空洞,很疏松,有时呈蜂窝状, a 轴平行于流向, ab 面倾向与坡向一致(Flint, 1971; 崔之久和熊黑钢, 1989)。我国多数冰川是冷底的大陆性冰川,冰前消融量小,冰碛物含水不饱和,难以形成流碛团块,冰川消融后,冰碛物

坠落地表,形成微型倒石堆(图 7a—d)。由半塑性流和蠕流两者所造成的滑动相,由黏土、粉砂和砂砾石混合,较密实(图 7e)。冰前消融的冰碛物,大砾石或漂砾滚落的低洼处,后被冰碛物埋藏,形成砾石团块构造(图 7f)。

3.1.3 冰面沉积

由于表碛存在,冰面吸热差异消融后,在冰面形成洼地,多表现为冰塔林之间的洼地(图 8a),表碛滑落或滚落到洼地中,沉积一些粗颗粒物质,分选

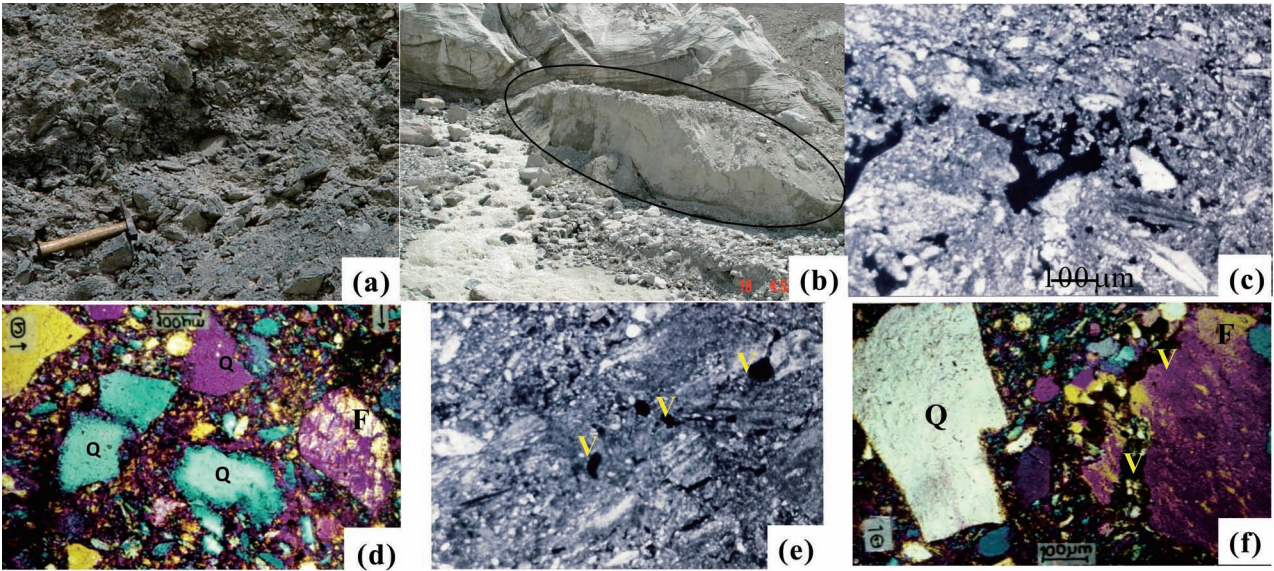


图 6 冰碛物沉积结构: (a) 天山乌鲁木齐河源望峰冰期冰上融出碛的颗粒之间面与面接触形成的镶嵌结构/叠置结构。(b) 帕米尔高原慕士塔格峰现代冰川退缩后暴露出的底碛,具有颗粒悬浮结构和块状构造。冰下融水出冰川后,切割底碛,沉积冰水扇后,又被切割。底碛和冰水扇表面分布冰水相相砂砾石。(c) 显微镜下图 6a 中的冰上融出碛的颗粒的棱角与其他颗粒的棱角或面接触形成的支撑结构,孔隙(图中暗色部分)大且形态不规则。正交偏光,2.5×10。(d) 显微镜下阿尔泰山南坡哈纳斯湖湖口冰下融出碛的悬浮结构,中细砂粒被粉砂颗粒包围,大颗粒被压碎,边缘被磨蚀,形成粉砂,孔隙消失。正交偏光加石膏试板,10×10。Q = 石英,F = 长石,V = 孔隙。(e) 天山乌鲁木齐河源望峰冰下融出碛(图中暗色部分)特征,经过冰下挤压,孔隙变小和变圆。正交偏光,2.5×10;F,显微镜下阿尔泰山南坡哈纳斯湖湖口冰下融出碛中大颗粒边缘被磨蚀,形成新的、封闭的、形态不规则的孔隙。正交偏光加石膏试板,10×10。Q = 石英,F = 长石,V = 孔隙

Fig. 6 Sedimentary textures of glacial till: (a) Mosaic texture/ Superimposed structure in supraglacial till of the Wangfeng moraine due to face-contact between particles in the upper valley of the Urumqi River, Tianshan Mountains. (b) Suspended structure and massive structure in a basal till exposed recently after the glacier retreated in the western slope of the Mustag Ata. The basal till and glacio-fluvial fan were cut by meltwater stream and their surface is covered by sandy gravels. (c) Supporting texture through the contact of angle to angle or angle to face of the supraglacial meltout till in Fig. 6a, and large irregular voids. 2.5×10, polarized. (d) Suspended texture in the subglacial meltout till in the outlet of the Halasi Lake. Medium to fine sands are surrounded by silt grains. Big particles were crushed and their edges were abraded, leading to the formation of silt and disappearance of voids. 10×10, polarized with gypsum plate. Q = quartz, F = feldspar, V = voids. (e) Regular voids (dark in the subfigure) in subglacial meltout till in the upper valley of the Urumqi River. Voids have become small and rounded. 2.5×10, polarized. (f) The edges of large particles were abraded and new irregular small voids in the subglacial meltout till in the outlet of the Halasi Lake, the southern slope of the Altay Mountains. 10×10, polarized with gypsum. Q = quartz, F = feldspar and V = void

差。有时形成临时积水洼地(图 8 b),规模小,寿命短,沉积物分带不明显。冰川退缩后形成冰塔林沉积(图 8c 和 8d),沉积物中有分选好冰水湖泊夹层(图 8e)。冰面太阳辐射强,能够导致石英砂粒中对光敏感的顺磁中心信号的衰退,中粗砂也可以用于 ESR 测年。

冰上沉积的样品经过阳光照射 ESR 信号衰退,一部分物质来源于经过冰下磨蚀的底碛信号衰退,双重作用使冰上融出碛 ESR 信号衰退明显,是非常

好的 ESR 测年样品。由于冰川融水和重力参与作用,冰上沉积物会出现粗略分选,一些细颗粒被洗刷掉,沉积物颗粒粗。冰面搬运大漂砾也多沉积在冰上融出碛中,U、Th 和 K 元素分布不均匀使沉积物受到的电离辐射不均匀。因此采样位置要避开大漂砾和粗砾石,避开粗斜层,在粒度分布均匀的地方采样。如果有便携式γ仪就地测试采样处的γ射线强度,也可以在粒度不均匀的地方采集样品。尽量采集含细沙和粉砂多的基质。

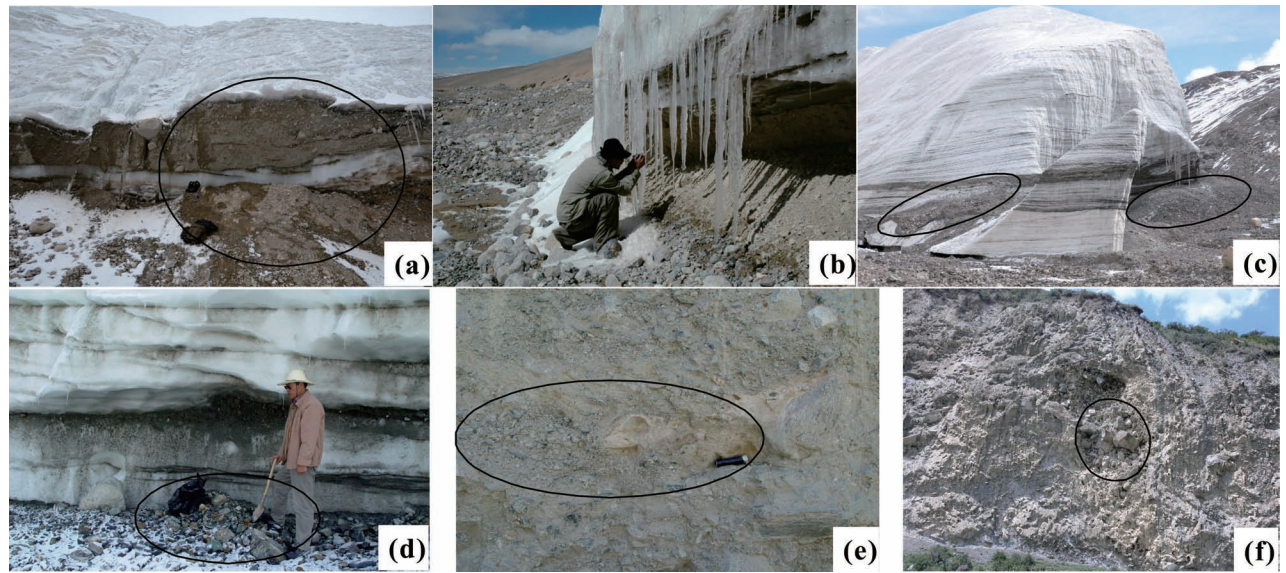


图 7 冰上融出碛形成过程与沉积构造: (a)—(d) 分别为普若岗日 3 号和 6 号、中昆仑山慕孜塔格峰蛇头冰川和帕米尔东坡 10 号冰川前正在形成的冰上融出碛,冰川受到阳光照射而消融,内碛倾卸到地面,形成倒石堆。砾石多成次棱角状和次圆状。(e) 帕米尔慕士塔格峰西坡冰碛中的流碛团块构造。(f) 祁连山冷龙岭岗什卡冰上融出碛中的砾石团块构造

Fig. 7 Process of the formation of supraglacial meltout till and its sedimentary structure: (a—d) Supraglacial meltout tills which are forming in the front margins of Glacier 3 and 6 in the Puruogangri icefield, the Snake-head-like Glacier in the Muzitag Peak of the Kunlun Mountains, and Glacier 10 in the Mushtag Ata of the Pamir, respectively. Inner till are dumping to the ground and forming talus as glaciers melts due to sunshine. Clast shapes display sugangular to subrounded; (e) Fluid mass structure in the till in the western slope of the Mustag Ata, the Pamir. (f) Clast mass structure in the supraglacial meltout till in the Gangshika Valley, the eastern Qilianshan Mountains

冰塔林和冰面湖沉积中的冰水夹层经过阳光暴晒,是 ESR 测年的好材料。在没有天然剖面的情况下贸然开挖工作量很大。可以先观察地貌特征,在排除其他因素的情况下,地形的突然转折处,通常是分选好的砂层所在层位(图 8d 和 e)。

3.2 冰下沉积

冰下沉积类型有冰下融出碛、滞碛和冰水夹层。冰下沉积类型少,但却最能反映冰川的侵蚀和沉积动力过程。

3.2.1 冰下融出碛

这是一种冰川底部冰体吸热融化冰内所含碎屑沉积下来形成的冰碛。

3.2.2 滞碛

在冰川底部压力融化(冰在 0℃ 以下融化)条件下,冰川底部富含碎屑的冰块消融形成的冰碛物,成长条状槽形,也叫槽碛垄(Boulton, 1971)。

在山谷冰川中,这两种冰碛类型的沉积结构构造特征十分相似,它们不易区分。共同的沉积特征有:

(1) 矿物组成和岩性复杂。由于经过长距离的

搬运,冰碛物的砂矿物组成成分复杂,硬度小的矿物先被磨细(Yi Chaolu, 1997),石英砂等硬度大的矿物不易磨细,粒径大(图 1e 和 6d)。不同于短距离搬运的崩塌和滑坡沉积,冰碛物中含有上游的岩屑,如果流域岩性成分差异大,冰碛物中的岩性差异就大。冰碛物岩性组成成分中硬度大的岩屑多,如在天山乌鲁木齐河源区,望峰冰碛剖面就有眼球状片麻岩、石英片岩、硅质岩、花岗岩、闪长岩等。而软弱的岩石,如碳质页岩、绿泥石片岩等,易被磨蚀和压碎破坏而消失(王靖泰, 1981)。

(2) 冰碛石外形呈次棱角状—次圆状。由于经历了冰下冰碛石之间或冰碛石与冰床之间的磨蚀过程,冰碛石的棱角被磨掉,加上冰下融水的磨圆作用,冰碛石多成次棱角状和次圆状(图 7a 到 7d)。优先磨平作用使得冰碛石中熨斗形冰碛石和石英砂常见(李吉均和周尚哲, 1984)(图 1b)。

(3) 擦痕和磨光面。在冰下的搬运过程中,冰碛石的面与冰床之间,或冰碛石的面之间彼此摩擦形成磨光面,冰碛石的棱角与另一冰碛石的面接触或坚硬的矿物与另一颗矿物/冰碛石直接接触,在冰

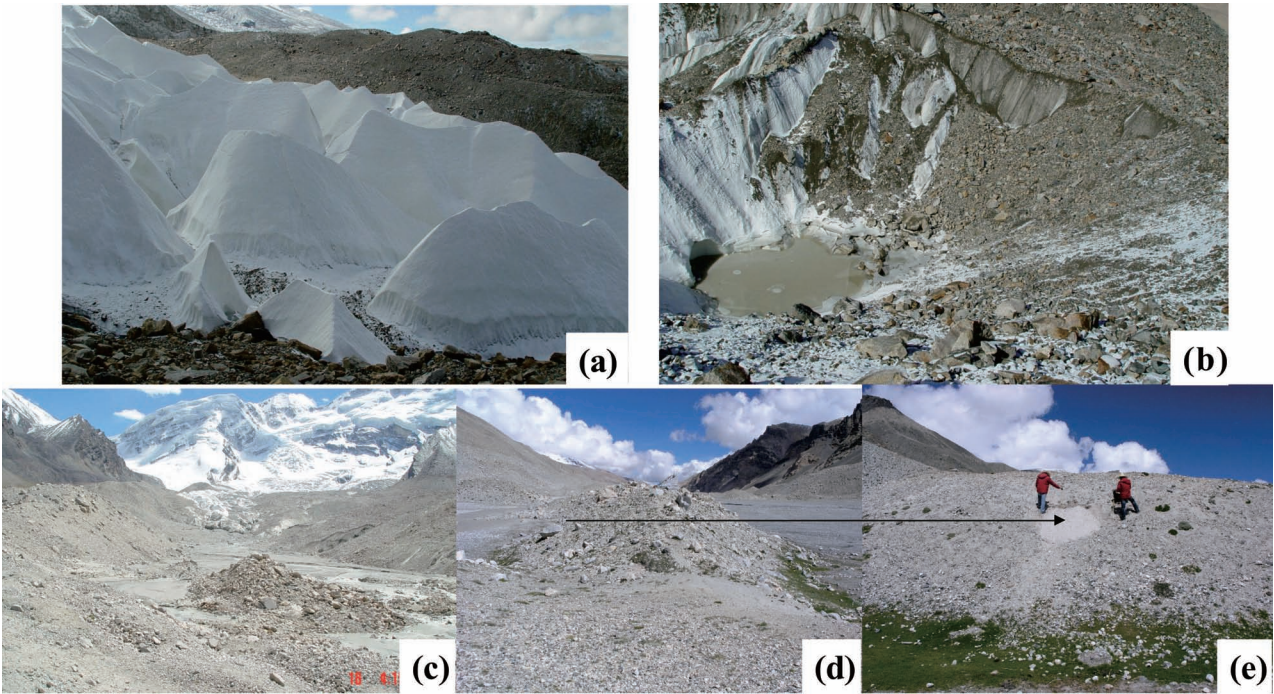


图 8 冰上融水沉积：(a、b) 帕米尔慕士塔格峰 10 号冰川的冰塔林之间洼地的沉积。有时可以形成冰面湖沉积(b) ,沉积物主要来自表碛,颗粒粗。(c、d) 图 8a 和 b 中的冰川退缩或消融后形成消融碛地貌和沉积。(e) 珠穆朗玛峰北坡绒布冰川大本营的冰塔林沉积,粗碎屑中夹有分选好的冰湖沉积物

Fig. 8 Superglacial meltwater deposit: (a, b) Deposit in the depressions between seracs. Lacustrine sediment forms in a superglacial lake (b) in front of Glacier 10 in the Mustag Ata, the Pamir. Sediments mainly come from superglacial till, particles are coarse. (c, d) Ablation moraine and deposit formed as the glaciers retreated or melt out in Figure 8a and 8b. (e) Serac deposit in the base campus for climbing in the upper Rongbuk Valley, the northern slope of the Qomolangma Peak. Sorted lacustrine sand is lenticular in the ablation moraine

下水膜的参与下滑动,在冰碛石表面(图 1b 到 1d)或矿物表面产生擦痕(谢又予和崔之久, 1981)。

(4)压裂结构。这是厚度上千米的大陆冰盖滞碛的一种特征。由于中国的古冰川厚度小,没有发现这种沉积特征。

(5)优势粒度。经过冰川底部研磨和压碎作用形成的冰碛物的粉砂含量高。在粒度分布曲线上,大冰川的冰碛物,在 4~5φ (0.032~0.063 mm)处出现峰值。这种粒度特征被认为是冰下磨蚀和压碎的结果(Boulton, 1978; Dreimanis and Vagner, 1971; 崔之久等, 1992)。这种现象被(Mahaney et al., 1988)和 Yi Chaolu (1997)用显微镜在冰碛中观察到(图 1d 和图 6c),并将这种粒径的颗粒称之为优势磨蚀和压碎粒径。

(6)悬浮结构。由于经历了冰下压碎和磨蚀过程,冰碛中细颗粒基质多,粉砂含量高,而砾石含量相对减少,呈现悬浮结构(图 6b 和 6d)。

(7)孔径小、外形规则的圆孔隙。由于经历了冰下挤压过程,冰碛物被压实,冰碛物中大而不规则的孔隙,被挤压后呈现为封闭的规则圆形、椭圆形等形态(图 6e)。大型山谷冰川作用下,冰碛中空气被挤出,孔隙消失(图 6d),因矿物颗粒边缘被磨蚀形成封闭的,但不规则的新的微孔隙(图 6f)。而冰上融出碛因没有受到冰川的挤压,孔隙大,并且不规则(图 6c)。

(8)冰碛石长轴具有明显的优势方位。冰下沉积的另一个特点是冰碛组构发育好,长轴优势方位明显,与谷地走向基本一致,倾角不大。ab 面倾角小于 20°的砾石含量最高,平行地面或倾向上游,有优势方位(Li Dewen et al., 2006)。有报道认为 ab 面倾向无明显优势方位(崔之久和熊黑钢, 1989; 崔之久等, 1992)。微组构定量研究显示,碎屑和孔隙组构发育,优势方位明显(Yi Chaolu and Cui Zhijiu, 2001)。关于冰碛定向组构的成因,有两种

说法。许多地质学家认为冰下变形导致组构不发育 (Dowdeswell and Sharp, 1986; Hart, 1994, 1997)。另一方面 Evenson (1971) 用“冰碛剪切面”解释。Hooyer and Iverson (2000) 的实验研究证明冰碛物受到剪切时组构发育好。野外观察 (Benn, 1995) 和微观研究也支持这种结论 (Yi Chaolu and Cui Zhijiu, 2001)。冰洞直接观察证实中国山地冷底冰川的冰碛中也存在剪切面 (Echelmeyer and Wang, 1987)。Love and Derbyshire (1985) 和 Yi Chaolu (1997) 在冰碛物中观察到了微剪切面。碎屑沿剪切面运动, 扁平面平行于剪切面, 长轴与剪应力方向一致。一般情况下倾向上游, 但受局部地形影响可向下倾斜。

尽管冰下融出碛和滞碛的沉积特征相似, 但还是可以从以下几方面加以区分。滞碛主要分布在羊背石和鼓丘的迎冰面, 地貌表现形态主要为槽碛垄或鼓丘沉积等。由于冰下磨蚀和压碎作用强烈, 冰下流水作用弱, 所以冰碛石的磨光度较高, 冰川压碎作用明显, 砾石以次棱角状占优势, 粉砂含量很高, 无冰水夹层 (图 9a 和 9b)。冰下融出碛分布范围广, 主要分布在终碛垄和侧碛垄的下部 (图 9c), 鼓丘的背冰面, 以及平坦的槽谷底部。由于冰下融水的参与, 冰碛中的冰水夹层常见, 粉砂含量相对较少, 冰碛石的磨光度较高, 以次棱角状和次圆状为主。由于冰川的积极运动, 在山谷冰川的冰碛层可见剪切面 (Yi Chaolu and Cui Zhijiu, 2001) 和变形构造 (图 5c 和 5d)。

从宏观分布看, 冰下融出碛和滞碛多为大型冰川, 是大陆冰川或大型山谷冰川所具有, 因为只有达到相当的规模, 冰川才会具有持久的巨大压力, 产生强烈的冰下磨蚀作用, 形成冰下融出碛和滞碛具有的特征。悬冰川和冰斗冰川等小型冰川很难形成具有冰川作用典型特征的沉积物。

3.2.3 冰下融水沉积

见下一节“冰川融水沉积”。

这一节要点归纳如下: 滞碛和冰下融出碛中石英砂 ESR 信号衰退机制主要是冰下压碎与磨蚀作用。采集样品时注意避开大砾石, 采集以细沙和粉砂为主的基质。最好在现场用便携式 γ 仪就地测试采样点的 γ 射线强度。由于冰下磨蚀与压碎作用不一定能使 ESR 信号完全衰退, 采集老冰碛物样品的同时, 采集现代冰川的冰下融出碛或滞碛, 以便对照分析, 扣除老样品中残留的 ESR 信号。蛇形丘沉积粒度粗, 细沙和粉砂含量少, 不适合 ESR 测年。

3.3 冰川融水沉积

冰川融水沉积包括狭义的冰水沉积和广义的冰水沉积。狭义的冰水沉积通常指冰前融水沉积, 流出冰川的融水在终碛垄外围形成的冰水扇、冰水阶地和冰水湖泊沉积。广义的冰水沉还包括冰下融水沉积和冰面融水沉积。冰川融水将冰川磨蚀的细颗粒物质带到洼地沉积下来之前的搬运过程中, 冰水中物质能够被阳光直接照射, 进一步加大了对光敏感的一些 ESR 信号的衰退。



图 9 冰下融出碛和滞碛在地貌与沉积特征方面的差异: (a) 天山乌鲁木齐河源哈依萨鼓丘地貌 (李德文 2002 年朝下游拍摄); (b) 哈依萨鼓丘沉积剖面, 细颗粒物质多, 砾石粒径小, 成棱角—次棱角状; (c) 祁连山东段冷龙岭南坡岗什卡沟侧碛垄下部的冰下融出碛 (蓝色) 和上部的冰上融出碛 (黄色)

Fig. 9 Difference between subglacial meltout till and lodgment till in landscape and sedimentary properties: (a) The leeside of the Hayisa drumlin in the upper valley of the Urumqi River (photographed by LI Dewen in 2002). (b) Sedimentary profile of the Hayisa drumlin (a). Content of fine matrix is and clasts are small with angular to subangular shapes. (c) Subglacial meltout till (blue) in the lower and supraglacial meltout till (yellow) in the upper of the profile in the Gangshika Valley in the Lenglongling Ridge, the eastern Qilianshan Mountains

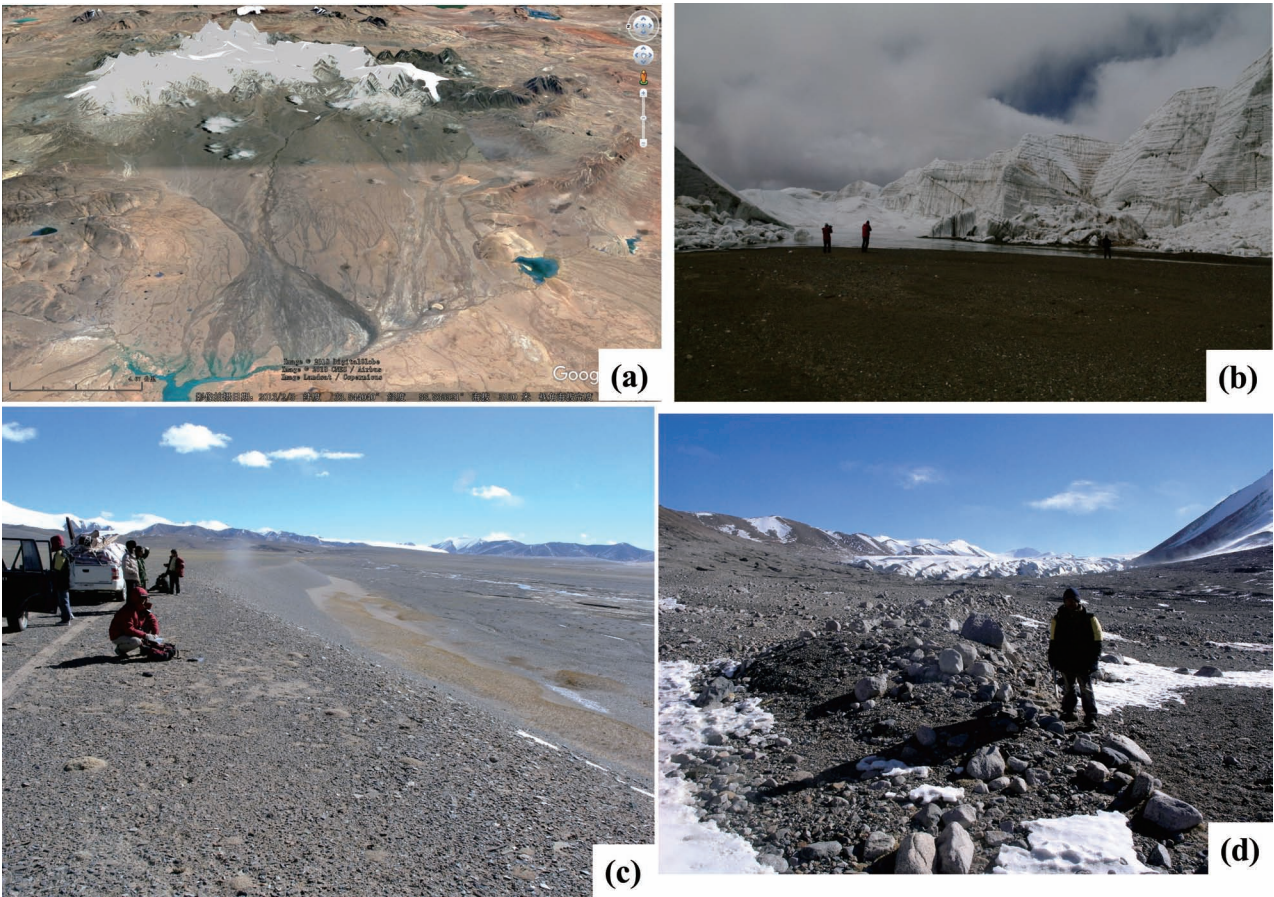


图 10 普若岗日冰原冰川融水沉积：(a) 谷歌影像上显示冰原西部多条冰川在山麓地带形成的大型冰水扇；(b) 西部 8 号冰川前的冰水扇；(c) 西部冰水扇被切割后形成的阶地；(d) 北部 14 号冰川冰下融水形成的蛇形丘沉积

Fig. 10 Glacial meltwater deposits in the Puruogangri icefield: (a) a large glacial meltwater fan in the piedmont of the western part of the icefield in the Google Earth image; (b) glacial meltwater fan in front of Glacier 8; (c) glacial fluvial terrace after glacial fluvial fan was dissected by the meltwater; (d) deposit of serpentine hillock in the front of Glacier 10 in the northern part of the icefield

3.3.1 冰水河流沉积
——冰水扇,冰水阶地和蛇形丘

冰水冲积扇是冰川融水在冰川前面形成的一种地貌。冰下融水流出冰川,压力和流速大幅度降低,冰水中携带的砂砾石立即沉积在冰舌前,散布在底磧上(图 6b),或形成扇状沉积地貌(图 10a 和 10b),融水切割后,形成冰水阶地(图 10c)。冰水沉积位于终磧垄外围不远处,通常不超过 100 km,否则,大气降水产生的径流的比例远大于冰川融水所占的比例,形成的沉积物就不能称之为冰水沉积了。冰水沉积本质上是一种河流沉积,具有几乎所有的河流沉积特征,但物源来自冰碛物,因此,沉积物中保留了一些冰碛物特征。如卵石上残留的冰川擦痕,熨斗石等。由于是一种河流沉积,沉积时进一步

受到阳光照射,ESR 锺芯信号衰退更好,并且钛芯也在衰退,可以用于 ESR 测年。

冰川底部或因吸热或压融而消融,或冰面融水沿着冰裂隙/孔洞渗透/流到冰下,汇集成冰下水流,融水携带冰碛物在冰下空洞中因压力降低或因冰下河道相对展宽后流速下降导致砾石沉积下来形成长条状的蛇形丘。分布于冰川底部,主要由分选相对较好、磨圆度高的砂砾石组成(图 10d)。蛇形丘出现于大陆冰盖和冰原/冰帽地区,山谷冰川中罕见。由于颗粒太粗,不能作为 ESR 测年的材料。

3.3.2 冰水湖泊沉积

冰水湖泊是冰川融水补给湖泊,融水中的冰碛物在静水环境下沉积的一种沉积类型(易朝露和崔之久,1994)。远离现代冰川,不与冰碛物直接接触



图 11 冰水湖泊沉积: (a) 祁连山中段摆浪河上游 14 号冰川前的冰水湖泊(李艳军拍摄);(b、c) 分别为祁连山东段冷龙岭岗什卡沟冰碛垄之间的冰湖沉积地貌(箭头所指)与冰湖沉积剖面

Fig. 11 Glacial lake deposits: (a) a glacial meltwater lake in the front of Glacier 14 (photographed by Li Yanjun); (b, c) landscape of the moraines and lacustrine depressions (arrow points) (b) and lacustrine deposits with beddings and laminations (c) in the Gangshika Valley in the Lenglongling Ridge of the Qilianshan Mountains

的冰水湖泊沉积已经属于专门的湖泊沉积研究领域,本文只讨论能直接确定冰碛物年代的冰水湖泊沉积。

冰川融水流入冰前洼地(图 2c 和图 11a)、冰碛垄之间的洼地形成的垄间湖(图 11b、c)和冰面消融形成的冰面湖(图 8b)。在冰床上的洼地和冰碛垄间的洼地,水流流速显著减小,冰川融水中携带的砂质等细颗粒在相对为静水的环境中沉积下来,形成透镜状、分选好的冰水沉积。在冰碛垄之间形成冰湖沉积(图 11c)。进入冰湖的冰川融水中的固态物质在搬运和沉积过程中,可以被阳光直接照射,使 ESR 信号衰退。

冰面湖沉积物质粗且少,一般不用于 ESR 测年。但是冰面湖沉积物长时间直接暴露在阳光下,

光敏感 ESR 信号可能晒退彻底,若能找到细颗粒物(图 8a),是 ESR 测年的好材料。

3.3.3 冰水夹层

冰下融出碛和冰上融出碛中都含有分选较好的冰水夹层,见前面冰下融出碛和冰上融出碛内容中所述。冰川融水在冰碛物上沉积后被后期冰碛物覆盖,或侧向切割冰碛物,部分冰水沉积物充填形成的冰水夹层。有些冰水物质沉积在融出碛表面,被后来冰上融出碛覆盖,形成透镜体状的冰水夹层(图 12)。冰水夹层分选较好,由砾石和砂组成。分选好的砂透镜体夹层是 OSL 测年的好材料。由于细颗粒物主要是冰下磨蚀作用的结果,石英砂中的一些顺磁中心信号衰退,砂透镜体可以用于 ESR 测年。



图 12 祁连山东段冷龙岭岗什卡沟冰碛物中的冰水夹层: (a) 冰下融出碛中的冰水夹层。(b) 冰上融出碛中的砾石冰水夹层(箭头所指)和细砂冰水夹层(采样处)。后期形成的冰上融出碛(棕黄色)推挤前期形成的冰碛物(蓝色),形成变形构造。(c) 帕米尔高原慕士塔格峰 14 号冰川前冰上融出碛中砂砾石冰水夹层

Fig. 12 Glacial meltwater interlayers in the Gangshika Valley of the Lenglongling Ridge in the eastern Qilianshan Mountains: (a) An sand interlayer in subglacial meltout till. (b) Gravel interlayers (arrow point) and fine sand interlayers (sampling point). The previous moraine (blue) was deformed by the thrusting of late moraine (yellow brown). (c) sandy gravel interlayer in the supraglacial meltout till in the front of Glacier 14 in the western slope of the Mustag Ata, the Pamir

冰水沉积经过了分选。分选后的细沙和粉砂都来源于冰下研磨和压碎的产物,石英砂的 ESR 信号发生了衰退。在冰水的搬运过程中 ESR 信号又经过了阳光晒退,因此 ESR 衰退更彻底。可以像光释光采样那样,用塑料或金属采样管在分选好的粉砂和细沙部位采集样品。密封后带回实验室。冰水扇和冰湖沉积在冰川沉积体系中是独立的单元。冰水夹层常分布于冰上沉积(图 8)和冰下沉积(图 12)中。

4 冰碛物 ESR 测年样品采集流程与注意事项

由上可知,ESR 测年的前提之一是冰川沉积物在埋藏之前石英砂的 ESR 信号衰退到零或趋于一个常数。冰川沉积物 ESR 衰退的机理有光晒退和冰下研磨晒退(Yi Chaolu et al., 2016a),冰川侵蚀、搬运和沉积过程既可以产生光晒退,也可以产生研磨衰退。预先知道所采集的样品所受到的冰川地质过程有助于选择实验流程,准确测定样品的 ESR 年代。冰川沉积类型反映了 ESR 信号衰退过程。因此,首先要选择合适的冰川,识别出冰川沉积类型,初步判断样品的 ESR 信号衰退机制,然后才是采集合适的样品。

(1) 选择海洋性冰川作用区或海拔高的冰川作用区。降水多的海洋性冰川作用区的冰川物质循环快,冰下磨蚀作用强。分布于高海拔的冰川,特别是海拔大于 5000 m 的冰川,阳光中紫外线作用强。这两种条件容易使冰碛物石英砂 ESR 信号衰退。

(2) 选择大型山谷冰川或冰帽。大型山谷冰川搬运距离远,冰川厚度大,冰下磨蚀作用强,因此冰碛物被磨蚀和阳光照射的概率大。大型冰川的融水多,容易在冰碛物中形成冰水夹层。冰帽将整个山体覆盖,表碛少,冰碛物主要来自冰下侵蚀的物质。总体上看,冰帽中的冰碛物少,冰碛物在冰川边缘沉积时,容易被阳光照射,石英砂 ESR 信号衰退显著。

(3) 选择含细颗粒基质的冰碛物。细颗粒物

质,如粉砂和细砂是冰下磨蚀的产物,ESR 信号受到冰下研磨而衰退,并且是顺磁波谱仪测试的材料。

(4) 记录冰碛物特征,采样的沉积部位,如能确定冰川沉积类型最佳。

(5) 选择人工或天然剖面。避开剖面中采样处的大冰川漂砾,防止它们对估算样品受到的电离辐射可能产生的影响。用阳伞遮挡直接照射采样点的阳光,用钢铲或其他工具去掉表面约 20 cm 厚的沉积物,采集 100 g 左右的样品用于测定样品含水量和铀、钍和钾的含量,装入密封塑料袋,写上样品编号,然后采集 1 kg 以上的细颗粒物,有条件是可以避开直射光筛分出 1 kg 粒径 ≤ 2 mm 的样品,装入暗色塑料袋,写上标签,并套上布袋。

(6) 拍摄照片。1 张是地貌景观照片,1 张剖面照片,1 张采样点照片。表 1 是样品记录表格。送样到 ESR 测年实验室时,同时提交冰碛物采样记录表。

(7) 建议同时采集与地质样品同成因的现代冰川沉积样品。

在野外也可以对所采集的样品进行简单筛分处理等,便于携带。由于装样袋不能完全密封,样品中的水分会很快蒸发掉,因此还要单独采集测试含水量的样品。可以参考毕伟力等(2018)对野外对样品处理的介绍论文。

5 结论

经过冰下作用的冰碛物,无论是冰上的,还是冰下沉积的,共同的特征是冰碛石呈光滑的次棱角状或次圆状,典型的冰碛石上有磨光面和一组/多组擦痕;大小混杂,常常有外来的漂砾。由于冰川的运动和底部变形,冰碛物中经常出现各种变形构造,粒度分布曲线上在粉砂或细砂出现明显峰值,具有悬浮支撑结构。不同成因的冰碛物在其他沉积特征方面有较大的差异。

采集 ESR 测年样品时,尽量选择冰川规模大,选择基质中含粉砂和细砂多的冰川沉积物。这样的

表 1 冰碛物 ESR 测年样品采集记录样表
Table 1 冰碛物 ESR 测年样品采集记录样表

样品野外编号	纬度/经度/ 海拔(m)	埋深(m)	粒度特征	孔隙特征	砾石定向排列	冰川沉积类型
常用描述用语			粉砂/细砂/中砂/粗砂为主 (最好有粒度分析)	疏松多孔/密实	长轴/扁平面平行谷地 延伸方向/何种地貌面	底碛(冰下融出 碛/滞碛)

样品,经过了冰下的研磨作用,ESR 信号更容易衰退归零,从而能够较准确的确定冰碛物 ESR 年代。选择含细颗粒物质的冰上融出碛最好,它们既经过了冰下充分研磨,又经历了阳光照射,ESR 信号衰退更彻底。

致谢: 刘耕年教授、吕洪波教授为提高文章质量提出了建设性建议,特致谢意。

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)

毕伟力. 2017. 冰碛物石英矿物中锗芯 ESR 测年研究. 导师:易朝路. 北京:中国科学院大学博士论文.

毕伟力,杨海军,易朝路. 2018. 冰碛物 ESR 信号测量的基本流程. 地球环境学报, 已经接受发表.

崔之久, 任炳辉, 李吉均. 1981. 关于冰碛术语概念和译名的讨论意见. 冰川冻土, 3(1): 78~82.

崔之久, 熊黑钢. 1989. 山地冰川沉积相模式与特征. 第四纪研究, 9(3): 254~268.

崔之久, 易朝路, 严竞浮. 1992. 新疆阿尔泰山哈纳斯河流域及其邻域第四纪冰川作用. 冰川冻土, 14(4): 342~351.

崔之久, 易朝路. 1994. 天山和阿尔泰山冰碛物显微结构特征. 应用基础与工程科学学报, (2): 313~319.

崔之久. 1980. 天山乌鲁木齐河原冰碛垄与冰碛沉积的类型和特征. 冰川冻土, 2(增刊): 36~48.

冯兆东, 秦大河. 1984. 天山乌鲁木齐河源末次冰期以来终碛的沉积类型和沉积过程. 冰川冻土, 6(3), 39~51.

李吉均, 周尚哲. 1984. 冰碛石的形态和表面特征. 冰川冻土, 6(3): 27~30.

刘春茹, 尹功明, 高璐, 李建平, 林敏. 2009. 水相沉积物石英 Ti 芯 ESR 测年可靠性初探. 核技术, 32: 110~112.

蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 段克勤, 朱国才, 杨梅学. 2002. 青藏高原普若岗日冰原 80 m 深冰层温度变化分析. 冰川冻土, 24(3): 282~286.

唐永仪. 1990. 太白山末次冰期冰碛物微结构和微构造研究. 冰川冻土, 12: 235~241.

王靖泰. 1981. 天山乌鲁木齐河源的古冰川. 冰川冻土, 3(增刊): 57~63.

谢又予, 崔之久. 1981. 电子扫描镜下我国若干冰碛石英砂的表面特征. 冰川冻土, 3(2): 52~55.

业谕光, 和杰, 刁少波, 高钧成. 1993. 晚更新世海岸风成砂 ESR 年龄的研究. 海洋地质与第四纪地质, 13(3): 85~90.

易朝路, 李孝泽, 屈建军. 2002. 青藏高原现代最大冰原区第四纪冰川作用. 冰川冻土, 25(5): 491~497.

易朝路. 2006. 冰川沉积与第四纪测年评估. 见:施雅风, 崔之久, 苏珍. 主编, 中国第四纪冰川与环境. 石家庄: 河北科技出版社: 26~35.

易朝路. 1989. 四川西南部小相岭东坡更新世冰川地貌与冰川沉积特征的初步研究. 冰川冻土, 11: 77~81.

易朝露, 崔之久. 1994. 天山和阿尔泰山冰碛物孔隙分析. 冰川冻土, 16(3): 265~273.

张威, 毕伟力, 刘蓓蓓, 刘啸, 张兵, 李超. 2015. 基于年代学约束的白马雪山晚第四纪冰川作用. 第四纪研究, 35(1): 29~37.

周尚哲, 易朝路, 施雅风, 业谕光. 2001. 中国西部 MIS 12 冰期研究.

地质力学学报, 7(4): 321~327.

朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 杨朝斌, 韩建恩, 杜建军, 余佳, 孟庆伟. 2005. 西藏阿伊拉日居山南麓第四纪冰川沉积物及其 ESR 年龄测定. 冰川冻土, 27(2): 194~198.

Benn D I, Owen L A. 2002. Himalayan glacial sedimentary environments: a framework for reconstructing and dating the former extent of glaciers in high mountains. Quaternary International, 97~98: 3~25.

Benn D I. 1995. Fabric signature of subglacial till deformation, Breidamerkurjokull, Iceland. Sedimentology, 42: 735~747.

Bi Weili, Yang Haijun, Yi Chaolu. 2018&. Basic procedures of Electron Spin Resonance (ESR) signal measurement for glacial tills. Journal of Earth Environment, accepted.

Bi Weili. 2017&. The Research of Electron Paramagnetic Resonance Dating of Germanium Center of Quartz in Glacial Tills. PhD dissertation, University of Chinese Academy of Sciences.

Boulton G S. 1971. Till genesis and fabric in Svalbard, Spitsbergen. In: Goldthwaite R P. ed. Till: a Symposium. Columbus: Ohio State University Press: 41~72.

Boulton G S. 1978. Boulder shapes and grain-size distributions of debris: a indicators of transport paths through a glacier and till genesis. Sedimentology, 25: 773~799.

Cui Zhijiu, Ren Binhui, Li Jijun. 1981#. On the conception and translation of terms of glacial tills. Journal of Glaciology and Geochryology, 3(1): 78~82.

Cui Zhijiu, Xiong Heigang. 1989&. The sedimentary facies characteristics of mountain glaciers. Quaternary Sciences, 9(3): 1254~1268.

Cui Zhijiu, Yi Chaolu, Yan Jinfu. 1992&. Quaternary Glaciations in the Halasi River Catchment and its Surroundings in the Altai Mountains in Xingjiang, China. Journal of Glaciology and Geochryology, 14(4): 342~351.

Cui Zhijiu, Yi Chaolu. 1994&. Microfabric properties of glacial till in the Tianshan Mountains and the Altay Mountains. Journal of Basic Science and Engineering, (2): 313~319.

Cui Zhijiu. 1980#. Depositional types and characteristics of glacial tills in the source area of the Urumqi River, Tianshan Mountains. Journal of Glaciology and Geochryology, 2(supp.): 36~48.

Direct observation of basal sliding and deformation of basal drift at sub-freezing temperatures. Journal of Glaciology, 33: 83~98.

Dowdeswell J A, Sharp M J. 1986. Characterization of pebble fabrics in modern terrestrial glacial sediments. Sedimentology, 33: 699~710.

Dreimanis A. 1988. Till: genetic terminology and classification. In: Goldthwait P R and Madsen C L. eds. Genetic Classification of Glacial Deposits. Rotterdam: A. A. Balkema: 17~84.

Dreimanis A, Vagner U J. 1971. Bimodal distribution of rock and mineral fragments in basal tills. In: Goldthwait R P. ed. Till: a Symposium. Columbus: Ohio Sate University Press: 267~250.

Echelmeyer K, Wang Z X. 1987. Evenson E B. 1971. The relationship of macro- and microfabric of till and the genesis of glacial landforms in Jefferson County, Wisconsin. In: Goldthwait R P. ed. Till: a Symposium. Columbus: Ohio State University Press: 345~364.

Feng Zhaodong, Qin Dahe. 1984&. Glacial environment and sedimentary processes of end moraine since Last Ice-Age at the headwater of the Urumqi River, Tianshan. Journal of Glaciology and Geochryology, 6(3): 39~51.

Flint R F. 1971. Glacial and Quaternary Geology. New York: John Wiley.

Goldthwait R P. 1971. Introduction to Till, Today. In: Goldthwait R P.

- ed. Till; a Symposium. Columbus: Ohio State University Press; 3~26.
- Grün R. 1989. Electron spin resonance (ESR) dating. *Quaternary International*, 1: 65~109.
- Grün R. 1991. Potential and problems of ESR dating. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 18: 143~153.
- Hart J K. 1997. The relationship between drumlins and other forms of subglacial glaciotectionic deformation. *Quaternary Science Reviews*, 16: 93~107.
- Hart J K. 1994. Till fabric associated with deformable beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19: 15~32.
- Hennig G J, Grün R. 1983. ESR dating in Quaternary geology. *Quaternary Science Reviews*, 2: 157~238.
- Herman F, Beyssac O, Brughelli M, Lane S N, Leprince S, Adatte T, Lin J Y, Avouac J P, Cox S C. 2015. Erosion by an Alpine glacier. *Science*, 350: 193~195.
- Hooyer T S, Iverson N R. 2000. Clast—fabric development in a shearing granular material: Implications for subglacial till and fault gouge. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 683~692.
- Ikeya M. 1975. Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance. *Nature*, 255: 48.
- Lee H K, Schwarcz E P. 1993. An experimental study of shear-induced zeroing of ESR signals in quartz. *Applied Radiation and Isotopes*, 44: 191~195.
- Li Dewen, Yi Chaolu, Ma Baoqi, Wang Wang, Peng Ling, Ma Chunmei, Cheng Gongbi. 2006. Fabric analysis of till clasts in the upper Urumqi River, Tian Shan, China. *Quaternary International*, 154: 19~25.
- Li Jijun, Zhou Shangzhe. 1984&. Shapes and festures of glaciogenic gravels. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 6: 27~30.
- Liu Chunru G, Yin Gaoming, Gao Lu, Li Jiangping, Lin Min. 2009&. Reliability of quartz Ti-center in ESR dating of fluvial sediment. *Nuclear Techniques*, 32(2): 110~112.
- Liu Chunru, Yin Gongming, Gao Lu, Jean-Jacques Bahain, Li Jianping, Lin Min, Chen Shiming. 2010. ESR dating of Pleistocene archaeological localities of the Nihewan Basin, North China — Preliminary results. *Quaternary Geochronology*, 5: 385~390.
- Love M A, Derbyshire D. 1985. Microfabric of glacial soils and its quantitative measurement. *Proceeding international conference on construction in glacial tills and boulder clays*. Edinburgh: Engineering Technics Press: 129~133.
- Mahaney W C, Vortisch W, Julig P. 1988. Relative differences between glacially crushed quartz transported by mountain and continental ice — some examples from North America and East Africa. *Am. J. Sci.*, 288: 810~826.
- Pu Jiancheng, Yao Tandong, Wang Ninglian, Duan Keqin, Zhu Guocai, Yang Meixue. 2002&. The distribution of 280 m ice temperature in Puruogangri Ice Field on the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 24(3): 282~286.
- Rink W J. 1997. Electron spin resonance (ESR) dating and ESR applications in quaternary science and archaeometry. *Radiation Measurements*, 27: 975~1025.
- Tang Yongyi. 1990&. The study of microtextures and microstrures in the Last Ice Stage in Taibai Mountain. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 12: 235~241.
- Wang Jintai. 1981&. Paleoglaciers in the source area of the Urumqi River. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 3(supp.): 57~63.
- Weertman J. 1957. on the sliding of glaciers. *Journal of Glaciology*, 3: 33~38.
- Xie Youyu, Cui Zhijiu. 1981&. 电子扫描镜下我国若干冰碛石英砂的表面特征. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 3(2): 52~55.
- Ye Y G, Diao S B, He J, Gao J C, Lei X Y. 1998. ESR dating studies of palaeo-debris-flow deposits in Dongchuan, Yunnan Province, China. *Quaternary Science Reviews*, 17: 1073~1076.
- Ye Yuguang, He Jie, Diao Shaobo. 1993&. Study on ESR ages of Late Pleistocene coastal aeolian sands. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 13(3): 85~90.
- Yi Chaolu, Bi Weili, Li Jianping. 2016a. ESR dating of glacial moraine deposits: Some insights about the resetting of the germanium (Ge) signal measured in quartz. *Quaternary Geochronology*, 35: 69~76.
- Yi Chaolu, Cui Zhijiu. 2001. Subglacial deformation: evidence from microfabric studies of particles and voids in till from the upper Urumqi river valley, Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*, 47: 607~612.
- Yi Chaolu, Cui Zhijiu. 1994&. Void properties of till from the Altay Mountains and the Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 16(3): 265~273.
- Yi Chaolu, Fu Ping, Li Yingkui, Jon Harbor, Xu Xiangke, Hu Gang. 2016b. Glacial erosion report overlooks the role of quarrying in shaping mountain landscape. *Science*, electronic comment online <http://science.sciencemag.org/content/350/6257/193/tab-e-letters>.
- Yi Chaolu, Jiao Keqin, Liu Kexin, He Yuanqin, Ye Yuguang. 2002. ESR dating of the sediments of the Last Glaciation at the source area of the Urumqi River, Tian Shan Mountains, China. *Quaternary International*, 97~98: 141~146.
- Yi Chaolu, Li Xiaozhe, Qu Jianjun. 2002&. Quaternary glaciations in Puruogangri — the largest modern ice field in Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 25(5): 491~497.
- Yi Chaolu. 1997. Subglacial comminution in till — evidence from microfabric studies and grain-size distributions. *Journal of Glaciology*, 43: 473~479.
- Yi Chaolu. 1989&. A preliminary research of geomorphological and depositional features of Pleistocene glaciations in the east slope of Xiaoxiangling Mountain in the Southwest of Sichuan Province. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 11(1): 77~81.
- Yi Chaolu. 2006&. Glacial deposits and estimation of datings of Quaternary glaciations. In: Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen. eds. *Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press*: 26~35.
- Zhang Wei, Bi Weili, Liu Beibei, Liu Xiao, Zhang Bing, Li Chao. 2015&. Geochronology constrained on late Quaternary glaciation of Baimaxueshan. *Quaternary Sciences*, 35(1): 29~37.
- Zhao Jindong, Zhou Shangzhe, He Yuanqin Ye Yuguang, Liu Shiyin. 2006. ESR dating of glacial tills and glaciations in the Urumqi River headwaters, Tianshan Mountains, China. *Quaternary International*, 144: 61~67.
- Zhou Shangzhe, Yi Chaolu, Shi Yafeng, Ye Yuguang. 2001#. Study on the ice age MIS 12 in western China. *Journal of Geomechanics*, 7(4): 321~327.
- Zhu Dagang, Meng Xiangang, Shao Zhaogang, Yang Chaobin, Han Jianen, Yu Jia, Du Jianjun, Meng Qingwei. 2005&. Quaternary glacial deposits and their ESR dating results on the south slopes of the Ayilariju Mountains, Tibet Autonomous Region. *Journal of Glaciology and Geochryology*, 27(2): 194~198.

Genesis Types of Glacial Sediments and Sampling Procedures for ESR Dating

YI Chaolu¹⁾, BI Weili¹⁾, YANG Haijun²⁾

1) *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101;*

2) *Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing, 100084*

Abstract: Electron spin resonance (ESR) technique is a method of paramagnetic analysis for the determination of elements and structure of matters. It can also be used for dating of sediments to solve some problems in sediment age which cannot be solved by other dating techniques. The techniques in measurement of paramagnetic signal and principle for sediment dating are in state of development. Glacial geological processes are complicated and produce a complex glacial sediment with various subtypes. The mechanisms for resetting ESR signal are different from subtypes of the sediments, and the experimental procedures should be chosen properly. Therefore, it is important to identify glacial sedimentary types and collect proper samples for the accuracy of ESR dating. Subglacial meltout till and lodgment till are abraded and crushed in subglacial environment, and they are compacted and contain fine particles in matrix so that ESR signals in some impurity centers in quartz grains are decayed. Superglacial meltout till forms in ice surface environment. It is loose and contains large particles. But some material in superglacial meltout till comes beneath ice and contains concentrated fine particles which sustain subglacial abrasion to decay ESR signal, and exposes to sunlight during deposition to further decay the signal. ESR signal in some quartz grains can completely be bleached. Fine sand and silt in glacial lake deposit and glacial meltwater sediment are the products of subglacial comminution/abrasion. ESR signal in quartz grains would be decayed during transportation, and would be further decayed during sedimentation. The mechanism for ESR signal resetting is not clear for other types of glacial sediments and some grains in sediments are too large for measurement of ESR signal. They are not suitable for ESR dating. It is strongly suggested to collect contemporary glacial sediments with the same sedimentary processes with the samples for geological dating so as to reduce possible residual signal for more accurate results.

Keywords: classification of glacial sediments; ESR dating; sediment sampling

Acknowledgements: This work was supported by the Project of one belt and one road (A) and the National Science Foundation of China (No. 41230523). We thank Prof. LIU Gengnian, Prof. LÜ Hongbo and Prof. ZHANG Yuxu for constructive comments and editing to improve the manuscript.

First author: YI Chaolu, male, born in 1959, senior researcher, engaged in glacial geomorphology and sedimentation as well as their geochronology, Email: clyi@itpcas.ac.cn

Manuscript received on: 2018-06-25; Accepted on: 2018-11-27; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.010