

文章编号: 1008-2786-(2017)3-357-12

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000232

雪隆囊地区堰塞湖溃坝沉积物的 石英砂表面微观特征

刘超¹ 陈剑^{1*} 崔之久² 黎艳¹ 陈松¹

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘 要: 石英砂表面微结构分析有助于理解沉积物的成因环境。四川省雪隆囊地区位于青藏高原东南缘金沙江上游, 该处分布有堰塞湖溃坝沉积物。为了判断其溃坝沉积物的沉积成因和形成环境以及过程, 采集石英砂样品并进行扫描电镜分析, 初步获得堰塞湖溃坝沉积物石英砂的表面微观结构组合特征是次棱角状及次圆状颗粒为主, 颗粒边缘形状为棱脊磨损及次棱脊, 表面多为中、低起伏; 少量出现贝壳状断口, 小撞击坑出现较多, 平行解理面少见甚至没有; 擦痕、磨光面少量出现; 化学溶蚀和沉淀形态包括蚀坑和蚀缝、硅质薄膜和硅质球。结果表明雪隆囊堰塞湖溃坝沉积物在沉积过程中不仅受到强烈的机械撞击作用, 而且在后期也有比较强烈的水流作用参与其中, 可以为分析溃坝沉积物的沉积过程和沉积环境提供参考。雪隆囊溃坝沉积物石英砂表面微观结构特征与残坡积、冰碛、冰水、冲积、洪积、泥石流、湖相沉积、海洋沉积、风成等沉积环境明显不同。

关键词: 雪隆囊; 堰塞湖; 溃坝沉积物; 石英砂; 扫描电镜; 微观结构

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

引言

坚硬的石英砂在其搬运过程和沉积过程中, 由于受到不同营力的作用而在表面产生了不同的形态标志。一定的标志组合可以反映出石英砂颗粒所经历的不同环境。1962 年 Krinsley 首先用扫描电镜 (SEM) 来观察石英砂的表面结构以进行沉积学研究^[1]。随后不同学者用 SEM 进行了大量的相关研究。Whalley 和 Krinsley 发现冰川环境下石英砂表面结构的典型特征^[2], 其后随着扫描电镜技术的普及与发展, 石英砂表面特征的研究被用于湖泊^[3]、黄土^[4]等不同环境下沉积物的研究。该技术在我

国的应用比国际上要晚, 但是其应用的领域却比国外更广阔, 有冰川研究^[5,6], 沙漠研究^[7-9], 海洋沉积物研究^[10-15], 黄土研究^[16-18]以及第四纪沉积物^[19-21]的研究等, 基本涵盖所有沉积物类型。已有研究表明, 石英砂表面微结构分析可以区分出不同的环境成因类型下的沉积物, 并且归纳出几种常见类型的典型特征组合: 残坡积、冰碛、冰水、冲积、洪积、泥石流、湖相、海洋、风成、洞穴堆积等^[22]。近年来随着数学统计方法的引入, 对石英砂表面特征的研究由定性研究慢慢向半定量、定量研究发展^[6,23,24]。

国内外关于混杂堆积物的研究很多^[25-32], 但主要集中在泥石流沉积物、滑坡沉积物、冰碛物等方

收稿日期(Received date): 2016-07-04; 改回日期(Accepted date): 2016-11-28。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(41230743); 国家自然科学基金面上项目(41571012)。[Key Program of National Natural Science Foundation of China (41230743); General Program of National Natural Science Foundation of China (41571012).]

作者简介(Biography): 刘超(1991-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 工程地质、地质灾害与环境。[Liu Chao (1991-), male, born in Puyang, Henan province, M. Sc. candidate, research on engineering geology, geological hazards and environment.] E-mail: hnpyle4876170@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): 陈剑(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 工程地质、地质灾害与环境。[Chen Jian (1975-), male, Ph. D., associate professor, research on engineering geology, geological hazards and environment.] E-mail: jianchen@cugb.edu.cn

面,目前对溃坝沉积物的研究比较缺乏^[33]。陈剑和崔之久^[33]、陈松^[34-36]等人对金沙江上游雪隆囊地区堰塞湖溃坝沉积物进行了初步研究,但是主要集中在沉积相和粒度的宏观和中观特征的分析。考虑到雪隆囊地区溃坝沉积物的微观特征研究相对匮乏,本文应用数学统计方法,采用环境颗粒百分比法^[37]对雪隆囊堰塞湖溃坝沉积物的石英砂表面结构特征进行定量分析,获得堰塞湖溃坝沉积物石英砂的表面结构特征的一定组合规律,以期对于以后的溃坝沉积相研究奠定理论基础。

1 研究区域

雪隆囊地区堰塞湖位于西藏自治区芒康县境内,距芒康县县城东南方约 50 km,地处金沙江雪隆囊至王大龙段($29^{\circ}20' \sim 29^{\circ}36' \text{ N}$, $98^{\circ}05' \sim 98^{\circ}55' \text{ E}$)。该研究区域内最高点海拔在 6000 m 左右,最低点海拔在 2200 m 左右,相对高程差在 3800 m 左右,沟谷河流海拔基本在 2300 m 左右,雪隆囊地区峡谷宽约 100 ~ 200 m,沿山谷两侧山体的坡度在 $25^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间,有的地段坡度大于 70° 。该研究区域海拔高的地方气候寒冷,海拔低的河谷气候温和,为

干热型河谷,垂直方向气候变化显著。据历史资料的记载,多年平均降水量在 400 mm 左右,且降雨多集中在 6 ~ 9 月。研究区新构造运动活跃,断裂活动发育,地热资源丰富,其东部分布金沙江断裂带的雄松—苏哇龙断裂。沿江河谷裸露岩石的岩性主要为二叠系的片岩、火山岩及大理岩等。该区岩层节理较发育,物理风化作用强烈,加之受金沙江活动断裂带的影响,河谷沿岸滑坡、崩塌现象频发^[33]。

2 采样和样品前处理

在金沙江上游雪隆囊地区海拔 2200 m 左右采集堰塞湖溃坝沉积物样品^[33]。在溃坝堆积物的上、中、下游分三段(见图 1、2)进行采样,每个剖面在竖向上进行分层采样,共采集样品 10 个。上游沉积物中有许多石块、巨砾或漂砾,呈点接触或悬浮状,粘土、粉细砂等基质填充在空隙中(见图 2a);中游沉积物中鲜见巨砾或漂砾,砾石或卵石较多,呈杂基支撑结构,粘土、粉细砂等基质填充在空隙中(见图 2b);下游沉积物细砾、卵石、粗砂含量较多,有粗略的层理,某些层面发育叠瓦状构造(见图 2c)。

研究表明粒级为 0.01 ~ 0.125 mm 和 0.125 ~ 0.5

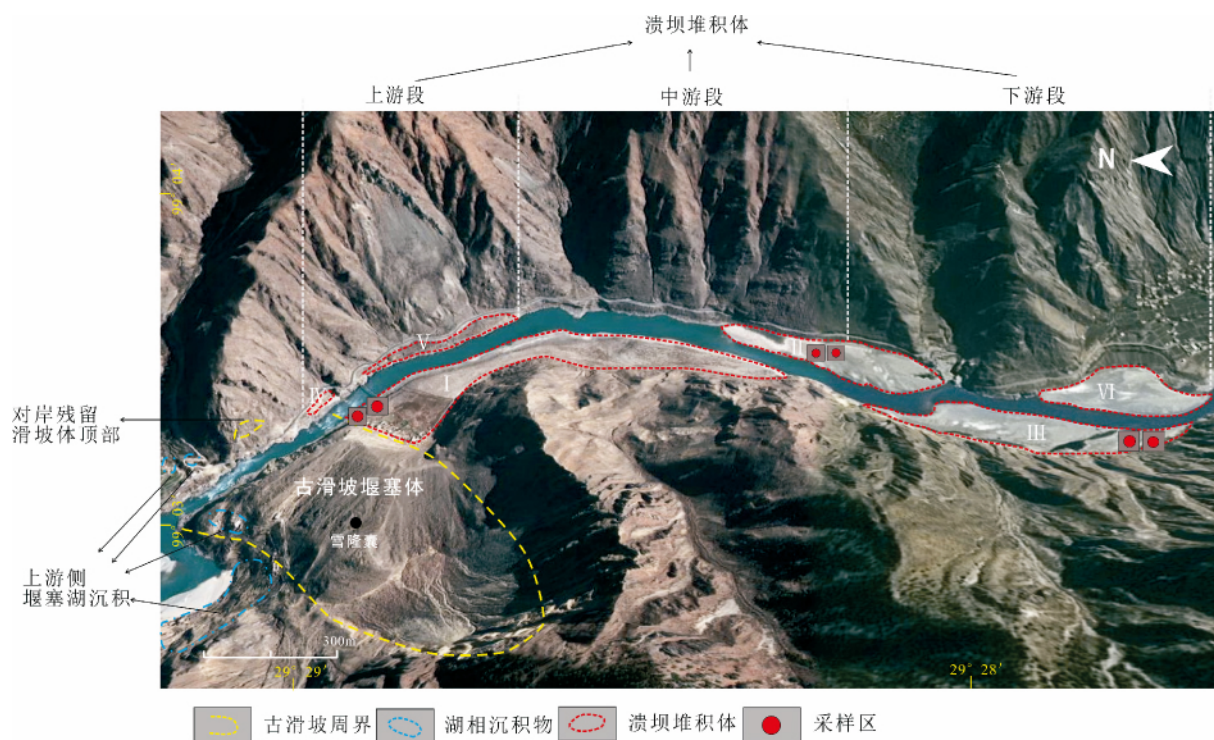


图 1 雪隆囊溃坝沉积物分布图(引自陈剑和崔之久^[33])

Fig. 1 Distribution of sediments of Xuelongnang landslide-dammed lake (Resource: Chen Jian and Cui Zhijiu^[33])



图2 雪隆囊堰塞湖溃坝沉积物(a. 上游沉积物; b. 中游沉积物; c. 下游沉积物)

Fig. 2 Photos of sediments of Xuelongnang landslide-dammed lake

(a. upstream sediments; b. midstream sediments; c. downstream sediments)

mm 的石英砂颗粒是沉积物的活跃成分,可以灵敏、全面地记录成因信息,表面微观结构发育齐全^[18]。本文用于观察的石英砂粒径范围为 0.065 ~ 0.2 mm 和 0.2 ~ 0.5 mm 两组。

每个样称取 10 g 样品,烘干后用手轻轻研磨,使样品颗粒充分分离。将分离的样品清洗烘干,并筛分出 0.065 ~ 0.2 mm 和 0.2 ~ 0.5 mm 粒级样品。筛分后样品用 30% 双氧水浸泡除去其中的有机质,然后将样品置于浓度为 1 mol/L 盐酸中以除去碳酸盐,再用 1 mol/L 氢氧化钠溶液中和,用去离子水涮洗干净后在 60℃ 温度下烘干备用。在光学显微镜下选择石英砂颗粒,每个样品中挑选 50 ~ 100 颗石英砂备用。在样品中随机选择 10 ~ 30 颗石英砂,分散粘在样品架的双面胶上,然后喷射一层薄的导电金膜。本次试验在中国地质大学(北京)科学研究院扫描电镜实验室完成,在扫描电子显微镜下总共观察堰塞湖溃坝沉积物石英砂粒 172 颗,拍摄照片

近 1000 张。

3 石英砂表面特征形态分析

在扫描电镜下观察两种粒组的石英砂,结果显示 0.2 ~ 0.5 mm 的表面微观结构比 0.065 ~ 0.2 mm 的丰富。后者只有常见的棱角状外形和化学特征,盘形凹面坑、平行解理面等罕见。因此本文重点讨论分析 0.2 ~ 0.5 mm 粒级的石英砂颗粒。

本文总结其他学者的研究成果,提出 39 个代表性表面微观结构变量,而且以表格形式列出了表面微观结构与其形成原因(见表 1)^[10,23,38]。对研究区的石英砂样品观察结果进行初步分析,可以得到该区石英砂表面结构的一般组合特征。

3.1 颗粒外形

研究区石英砂主要是不规则的颗粒,表现为次棱角状(见图 3b f)和次圆状(见图 3a c),其边缘主

表 1 石英砂表面结构特征分类

Tab. 1 Classification of Surface microstructures of quartz grains

颗粒形状	边缘形状	起伏	机械特征		化学特征
1 尖棱角	6 尖棱脊	11 高起伏	14 大贝壳状断口	22 直沟和曲沟	30 蚀坑和蚀缝
2 多棱角	7 棱脊磨损	12 中起伏	15 中贝壳状断口	23 擦痕	31 定向蚀坑
3 次棱角	8 次棱脊	13 低起伏	16 小贝壳状断口	24 磨光面	32 蜂窝状溶蚀表面
4 次圆	9 亚圆边缘		17 撞击坑	25 小撞击坑	33 硅质球
5 圆	10 磨圆边缘		18 盘形凹面坑	26 裂隙(纹)	34 硅质鳞片
			19 机械 V 形坑	27 翻卷解理薄片	35 硅质薄膜
			20 平行解理面	28 台阶	36 无定形硅沉淀
			21 突起脊	29 粘附碎片	37 二氧化硅结晶
					38 鳞片状剥落
					39 侵蚀 V 坑

注: 1. 高起伏 > 1 μm , 低起伏 < 0.5 μm , 中起伏在两者之间; 2. 大贝壳状断口长度 > 40 μm , 小贝壳状断口长度 < 20 μm , 中贝壳状断口长度在两者之间; 3. 1 ~ 39 标号作为表面微观结构代号 , 以方便作图。

要为棱脊磨损(见图 3b g) 和次棱脊(见图 3c f g) , 颗粒表面显示中起伏(见图 3b , d , e , h) 和/或低起伏。所有样品中 , 圆状和亚圆和/或磨圆边缘的石英砂颗粒罕见 , 表明溃坝沉积物近源沉积而未经长途搬运 , 同时还反映出研究区风化作用处于初级阶段。

3.2 机械特征

3.2.1 贝壳状断口

颗粒间或者颗粒和河床基岩间挤压撞击 , 使得石英颗粒破碎即可在其表面形成贝壳状断口。摩擦接触的颗粒表面受到持续作用于接触点的有效压力 , 压力达到一定程度 , 颗粒破碎 , 形成弧形断裂 , 就产生贝壳状断口^[37]。溃坝沉积物的石英砂颗粒表面贝壳状断口少见 , 其形态呈清晰的弧形 , 多为中、小贝壳状断口(见图 4a , b) 。溃坝沉积物样品中的贝壳状断口很少(见图 4a) , 说明沉积物颗粒脱离母岩不久或者石英颗粒遭受挤压的时间不长或压力不够大 , 沉积物运移的距离很近。

3.2.2 盘形凹面坑和机械 V 形坑

平整颗粒表面出现的 V 形撞击坑(见图 4d , f) 是在水流作用下的典型产物。出现在颗粒边缘的 V 形撞击坑是由较小颗粒之间互相研磨所致。盘形凹面坑(见图 4c , e) 、撞击坑出现相对较少 , 反映了比较强有力大颗粒之间的撞击较少。小撞击坑相对出现较多 , 说明较细颗粒之间进行多次反复撞击。V 形撞击坑反映出溃坝沉积物的沉积过程有水流作用的参与。

3.2.3 平行解理面

该区石英砂颗粒表面平行解理面、直沟和曲沟

比较少见 , 鲜有突起脊。该区石英砂表面可以见到不是很清晰的平行解理面(见图 5a) , 一般在贝壳状断口附近出现。这个部位受到多次不同方位的压缩力作用 , 所以产生破裂 , 形成贝壳状断口和平行解理面。

3.2.4 磨光面和擦痕

互相接触的石英砂颗粒 , 在一定作用下保持挤压状态并产生相对运动 , 在剪切力作用下就会在表面形成擦痕。在水流不断冲刷下 , 与原岩粗糙表面相比 , 石英颗粒表面变得光滑 , 形成磨光面。水下磨光面是反映石英砂在水流作用下的有力证据。该区石英砂颗粒擦痕(见图 5b , c) 和磨光面(见图 5d) 均有出现 , 但是比较少量 , 说明沉积物物源颗粒级差较大 , 颗粒之间挤压作用强烈 , 搬运距离不远 , 水流作用时间不长或者水位不高 , 使得水下作用产生的机械特征不是很突出。该区石英砂颗粒表面可见裂隙(纹) 发育 , 说明在沉积过程中存在拉张应力 , 可能是堆积物初步胶结后又有再次滑动 , 牵引作用下使石英砂颗粒产生裂隙(纹) 。

3.2.5 粘附碎片

该区石英砂表面可以见到二氧化硅晶体(见图 5e , f) , 这是由于石英颗粒之间的挤压造成的 , 可以说此处沉积物石英砂颗粒之间接触较多。翻卷解理薄片较少见 , 说明撞碎或压碎的石英颗粒较少。阶状面一般出现在贝壳状断口附近 , 该区石英砂颗粒贝壳状断口出现较少 , 所以相应的阶状面也较少见。

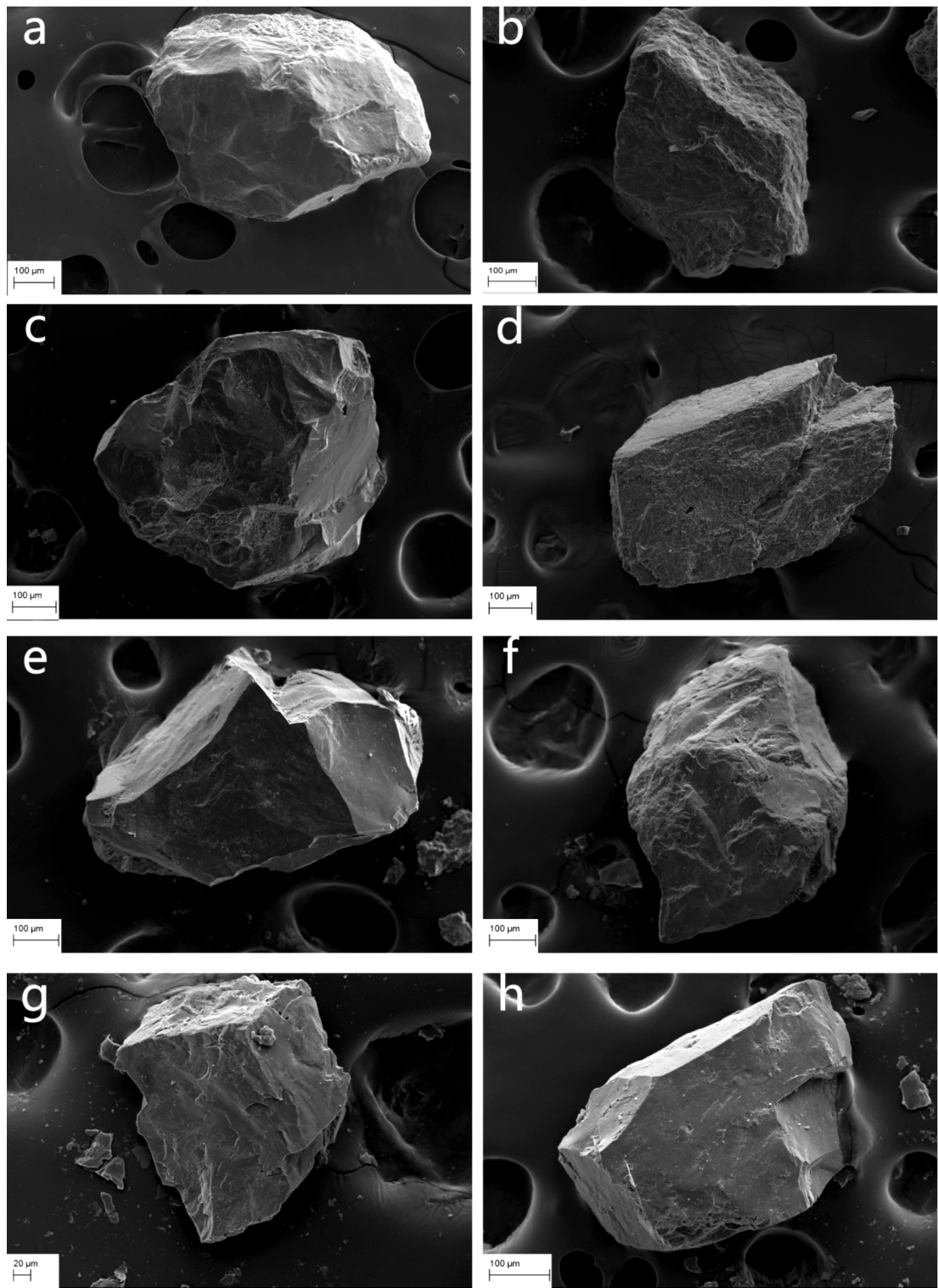


图 3 扫描电镜下石英砂颗粒外形(a , b , c: 上游颗粒; d , e: 中游颗粒; f , g , h: 下游颗粒)
Fig. 3 Particle shapes of quartz grains by SEM
(a , b , c: upstream particles; d , e: midstream particles; f , g , h: downstream particles)

3.3 化学特征

3.3.1 溶蚀

该区石英砂颗粒表面溶蚀现象比较常见 ,说明

水流作用参与该区堆积物的形成。表面鳞片状是溶蚀作用比较弱时造成的 随着溶蚀增强 出现蜂窝状 (见图 6c) 再增强产生蚀坑(见图 6a , e) 和蚀缝(见

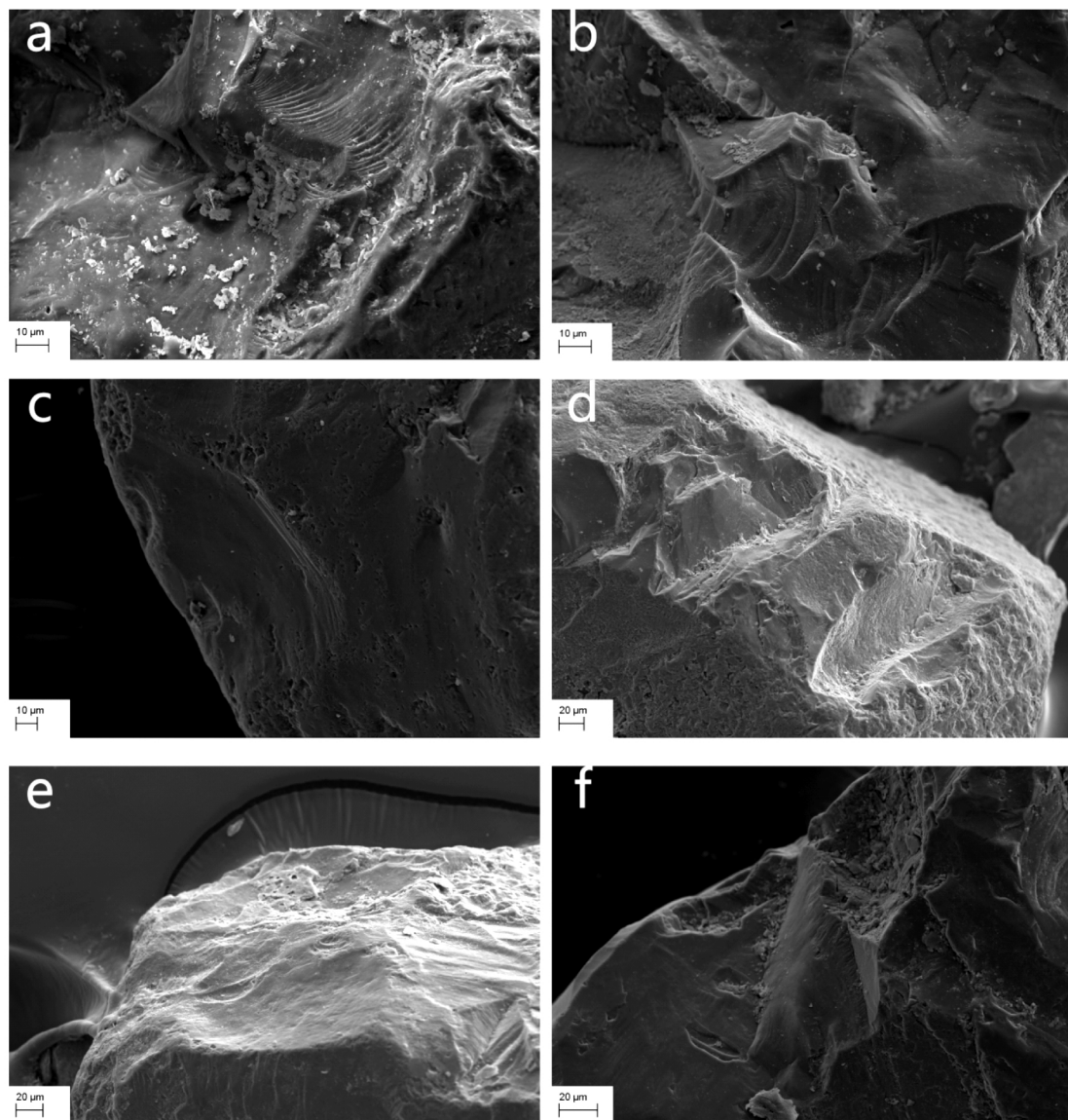


图4 机械特征(a. 下游小贝壳状断口; b. 中游小贝壳状断口; c. 下游盘面凹坑; d, f: 下游机械V坑; e. 下游盘面凹坑)
Fig. 4 Mechanical characteristics (a. small-scale conchoidal fracture in downstream; b. small-scale conchoidal fracture in midstream;
c. a dish-shaped pit in downstream; d, f: V-shaped impact pits in downstream; e. a dish-shaped pit in downstream)

图6e)。该区石英砂表面蚀坑和蚀缝相对较多,说明水流的溶蚀作用很强,可以反映出该区水流流速和流量均比较大,水位也应该漫过采样区高度。

3.3.2 沉淀

该区石英砂颗粒表面沉淀现象较少见,说明在水下的时间并不长久。硅质薄膜、硅质球(见图6d)均有出现,但是后者相对多些,说明沉积作用在较深水位进行,流速较慢。

4 讨论

石英砂颗粒表面的某些特征并不局限于某一种

沉积环境,一般不适宜用单一的表面结构特征来判别沉积成因和沉积环境,因此,有关学者大多采用数学统计的方法来进行沉积成因和形成环境以及过程分析^[6,37]。统计石英砂表面微观结构在沉积物中出现的频率,定量地判断出形成表面微观结构的物理、化学作用,并最终分析沉积物的沉积成因和形成环境以及过程。本文石英砂表面微观结构与成因分类参考 Bull^[23]和尹雪斌等^[24,39]的方法。溃坝沉积物的石英砂颗粒(0.2~0.5 mm)表面微观结构反映溃坝沉积物的物理和化学成因。表面微观结构统计提出39个典型结构,计算所有表面结构的出现频率,探讨表面微观结构与沉积成因和形成环境及过程的

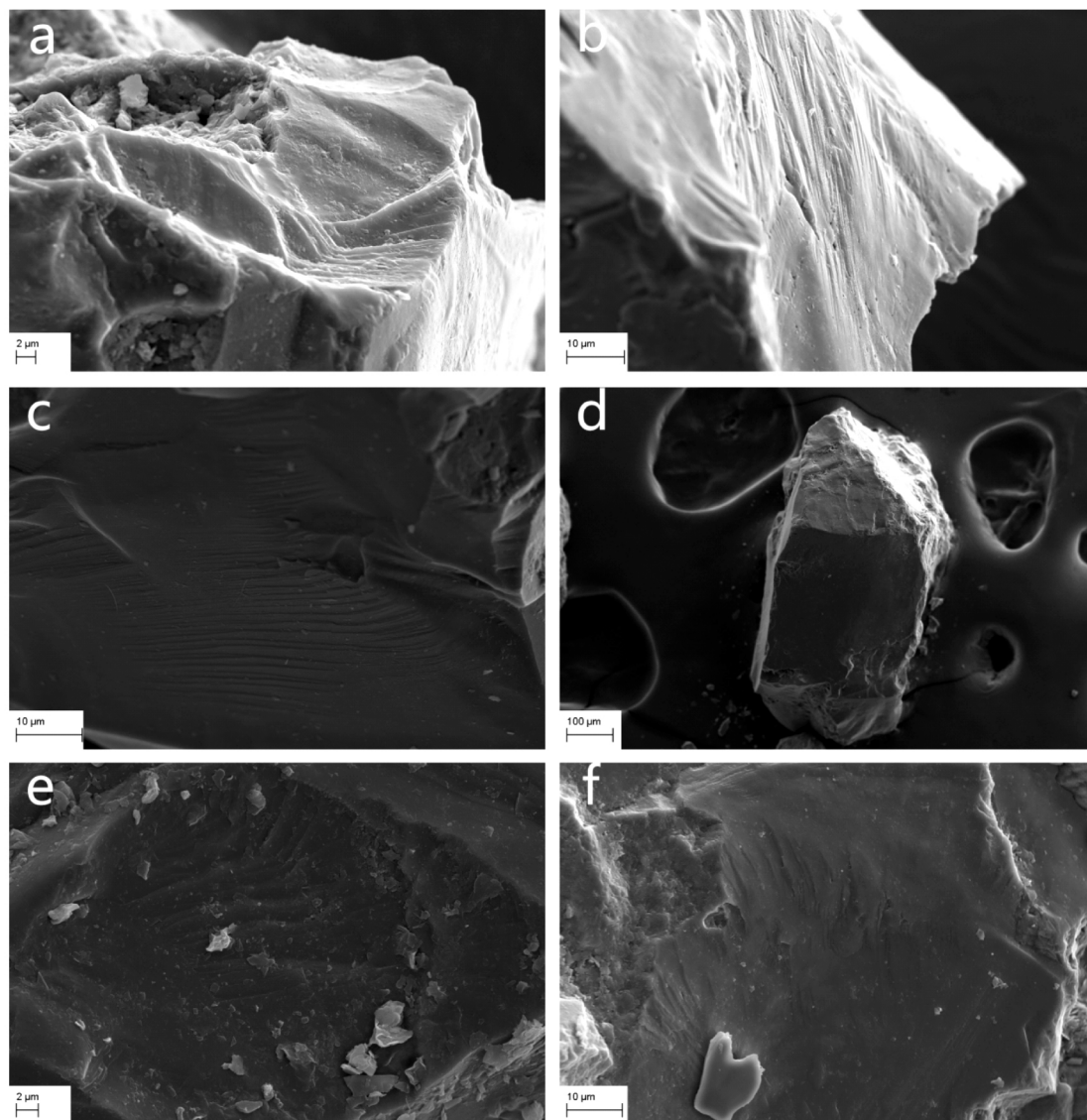


图5 机械特征(a. 下游平行解理面,b. 下游擦痕,c. 中游擦痕,d. 下游水下磨光面,e. 中游粘附碎片,f. 下游粘附碎片)

Fig. 5 Mechanical characteristics (a. parallel cleavage plane in downstream, b. scratch in downstream, c. scratch in midstream, d. grinding round face in downstream, e. adhesive fragments in midstream, f. adhesive fragments in downstream)

对应关系(图7)。

Newsome等^[40]认为,表面微观结构出现频率大于75%的是丰富的,在25%~75%之间的是正常的,在2%~25%之间的是少量的,小于2%的是罕见的。据此,雪隆囊地区堰塞湖溃坝沉积物石英砂颗粒表面发育的各种特征中,没有大量出现的特征,而次棱角、次圆、中低起伏、棱脊磨损、次棱脊、撞击坑、盘形凹面坑、机械V坑、小撞击坑、粘附碎片等正常出现。蚀坑、蚀缝、硅质薄膜、硅质球等化学溶解和沉淀特征则反映水流作用的参与。

雪隆囊地区堰塞湖溃坝沉积物表面微观结构特征组合(见图7)代表了堰塞湖溃坝沉积的典型特

征。溃坝沉积物的物质主要来源于坝体,还有部分是堰塞湖和河流带来的物质。在溃坝后形成的沉积物中,由于颗粒经受互相碰撞、摩擦,而且坝体物质是滑坡堆积物,所以其石英颗粒表面特征表现出较强的物理性质。随后沉积物受到河流冲刷,而河水位在不断变化,可能会淹没沉积物,所以颗粒会经历一定的化学改造过程。通过分析数据(见图7),溃坝沉积物主要表现出机械特征较突出,化学特征不常见的性质,即次棱角、次圆、中低起伏、棱脊磨损、次棱脊、撞击坑、盘形凹面坑、机械V坑、小撞击坑、粘附碎片等正常出现,而蚀坑、蚀缝、硅质薄膜、硅质球等少量出现或者极少出现。溃坝沉积物与残坡

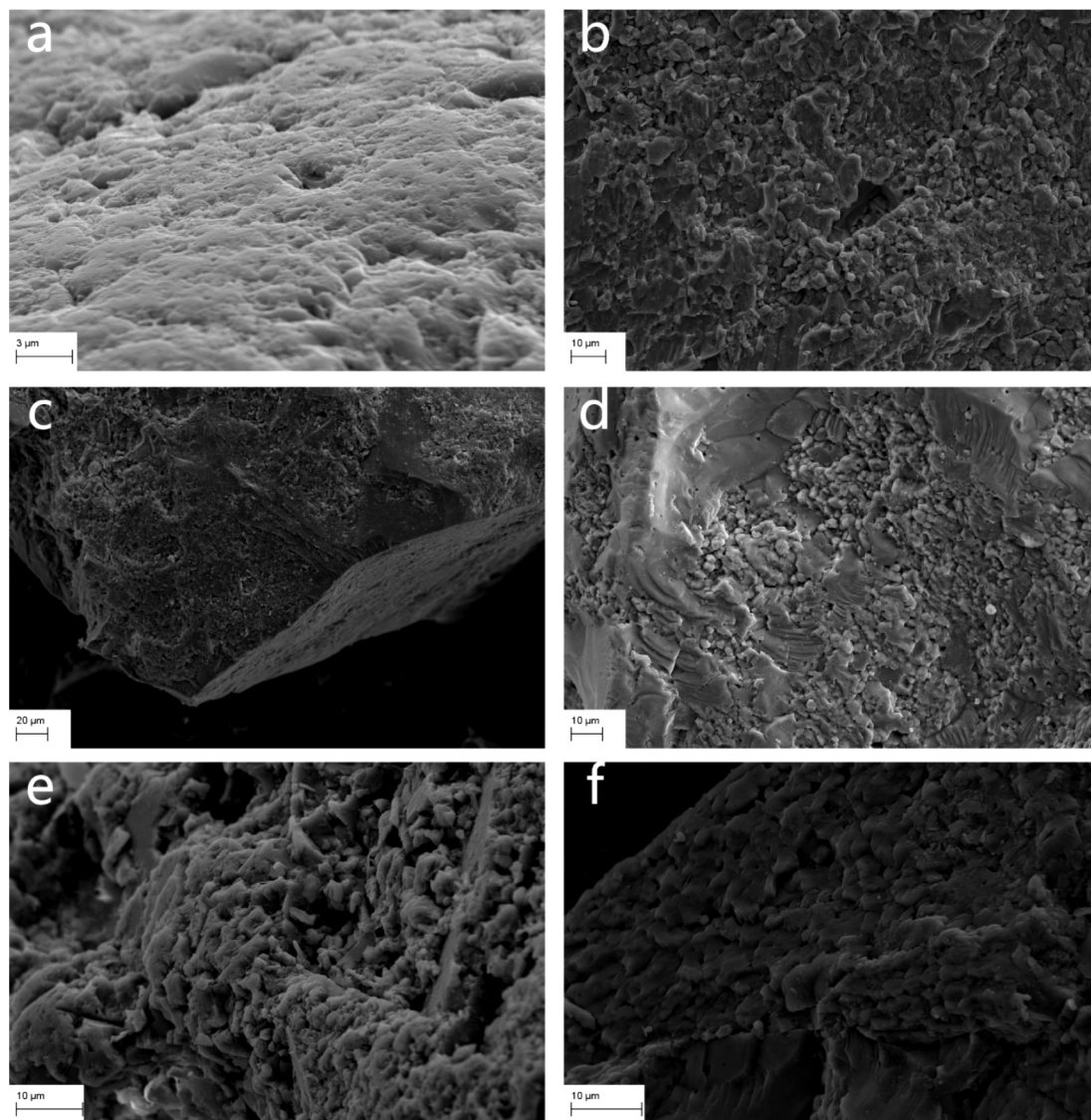


图6 化学特征(a. 下游蚀坑, b. 中游硅质球沉淀, c. 上游蜂窝状表面, d. 下游硅质球沉淀, e. 下游蚀坑和蚀缝, f. 下游无定形硅沉淀)

Fig. 6 Chemical characteristics (a. corrosion pits in downstream, b. silicon spheres in midstream, c. honeycombed surface in upstream, d. silicon spheres in downstream, e. corrosion pits and corrosion fractures in downstream, f. amorphous silica precipitation in downstream)

积、冰碛、冰水、冲积、洪积、泥石流、湖相沉积、海洋沉积、风成等沉积环境有明显不同(见表2)。残坡积环境下石英砂显示出新鲜的特征,与母岩中的砂粒相差无几,外形尖角状,很少受磨损,具有贝壳状断口和翻翘薄片^[22]。冰川环境下的石英砂具有典型贝壳状断口、不规则断块,平整的解理面和翻翘薄片,压碎和变形的解理薄片以及其上粘附的平整扁平石英粒^[22]。这两种沉积物均表现出强烈物理性质,而几乎没有化学性质。冰水环境(冰川-河流沉积)下石英砂颗粒仍保持不规则外形,但棱角多已经圆化。此外,在圆化或光滑化的颗粒表面上又叠加了水下机械成因的V形或其他不规则形坑^[22],

此种环境和溃坝沉积物环境很接近,但是其水流作用较溃坝沉积更强,化学作用可以完全改造物理作用的特征。冲积环境(河流或浊流)下的沉积物,主要为磨圆边缘和圆状的颗粒,其最常见的结构是机械V形坑以及水下磨光面^[22]。洪积石英砂的磨圆性较差,最重要的特征是在强烈机械撞击下具有不规则外形和锯齿形脊线^[22]。这两种沉积物经受的水流作用较强烈,化学作用更明显。湖相沉积石英砂同时具有河流沉积物和风成沉积物的典型特征。在其沉积物中常见的现象是同时存在水下磨光面和磨圆的棱角与贝壳状断口,而水下溶蚀和沉淀作用明显(如结晶增生)也是其主要特点之一^[19, 22, 42]。

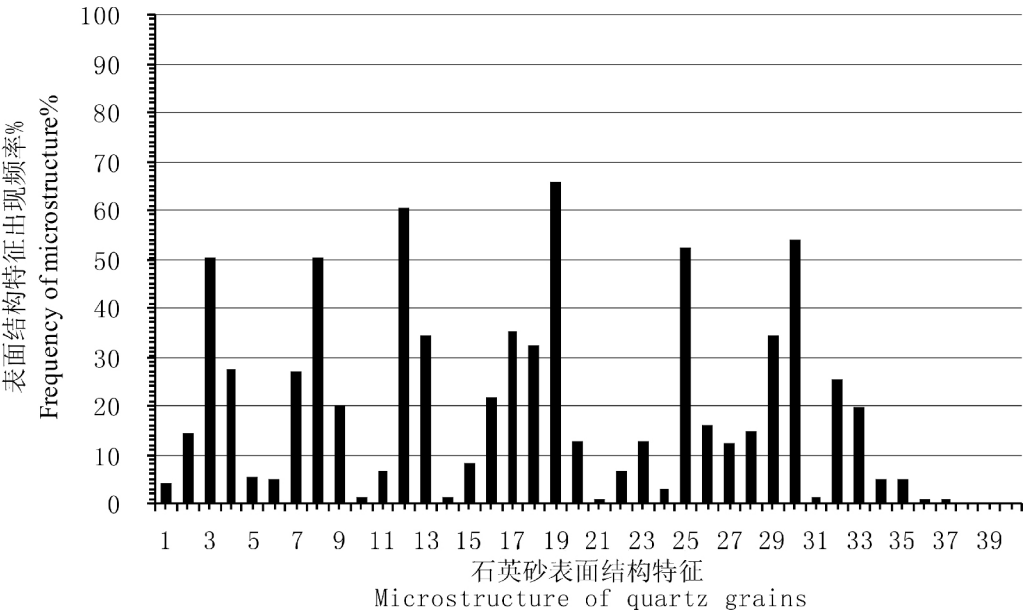


图 7 雪隆囊地区堰塞湖溃坝沉积物石英砂表面结构特征的颗粒频率

Fig. 7 Frequency histogram for quartz grains surface microstructures in the ancient lake dam break sediments of Xuelongnang landslide-dammed lake

表 2 堰塞湖溃坝沉积物石英砂表面微观结构特征与其他沉积环境对比

Tab.2 Comparison of quartz grains surface microstructures between dam-break sediments and ones from other depositional environments

沉积类型	石英砂表面微观特征
堰塞湖溃坝沉积	外形次棱角到次圆,颗粒棱脊磨损到次棱脊,撞击坑和 V 形坑常见,在下游段常见溶蚀坑
残坡积沉积**	外形尖角状,很少受磨损,具有贝壳状断口和翻翘薄片
冰碛沉积*	多贝壳状断口,平整的解理面呈翻卷的薄片状,具粘附石英粒,并有冰蚀坑和擦痕
坡积-冰缘沉积*	棱角尖锐,表面干净少粘附物,贝壳状断口丰富但多沿棱分布。冲刷层中石英可见磨光迹象
冲积(河流或浊流)沉积**	磨圆度较高,边棱角几乎完全圆化,机械成因的 V 形坑或凹坑,水下磨光面
洪积沉积**	磨圆性较差,不规则外形和锯齿形脊线
湖相沉积**	磨光面或经磨光的棱角与贝壳状断口同时存在,常见晶体生长
海洋沉积**	颗粒圆化、大量蝶形坑、麻坑,水下撞击的深坑、化学溶蚀沟和溶蚀坑,表面有时附着海相生物碎屑

注: * 数据引自崔之久^[41],** 数据引自谢又予^[22]。

海洋沉积物的石英砂一般具有风成石英颗粒的结构,如圆状颗粒、盘形凹面坑、密集的小撞击坑等,同时又有水下沉积物的微观结构,如撞击坑、溶裂隙和溶蚀坑等,颗粒表面有时粘附海相生物碎

屑^[10~15,22,40]。风成沉积物的石英砂颗粒一般磨圆很好,表面分布密集的麻面小坑,并常见硅质沉淀物和碟形撞击坑。石英砂经受风化作用的磨蚀和撞击后表现出较多的翻卷解理薄片和大贝壳状断口,有时可见较长的裂隙^[7~9,22],这可以将风成沉积物与溃坝沉积物区分开。

5 结论

通过分析雪隆囊地区堰塞湖溃坝沉积物石英砂扫描电镜形态特征,发现堰塞湖溃坝沉积物的标志性石英砂表面结构特征组合如下:

- 1) 主要以次棱角及次圆状颗粒为主,颗粒边缘形状为棱脊磨损及次棱脊,表面多为中、低起伏;少量出现贝壳状断口,小撞击坑相对出现较多,平行解理面少见甚至没有;擦痕、磨光面均少量出现;化学溶蚀和沉淀形态有蚀坑和蚀缝、硅质薄膜和硅质球。
- 2) 研究结果表明,雪隆囊堰塞湖溃坝沉积物受到多种物理、化学作用共同作用,而且由于搬运距离较近以及水流作用时间较短,使得该区石英砂表面存在保有母岩大部分特征情况下的多种环境特征叠加现象。
- 3) 溃坝沉积物石英砂表面结构特征反映的沉积环境与残坡积、冰碛、冰水、冲积、洪积、湖相沉积、海洋沉积、风成等沉积环境明显不同,其微观特征具有沉积物成因和形成环境及过程的判断意义。

参考文献 (References)

- [1] KRINSLEY D H, PERDOK W C. Applications of electron microscopy to geology [J]. New York Academy of Science Trans, 1962, 25 (1): 3-22
- [2] WHALLEY W B, KRINSLEY D H. A scanning electron microscope study of surface textures of quartz grains from glacial environments [J]. Sedimentology, 1974, 21(1): 87-105
- [3] MAHANEY W C. Macrofabrics and quartz microstructures confirm glacial origin of Sunnybrook drift in the Lake Ontario basin [J]. Geology, 1990, 18(2): 145-148
- [4] KENIG K. Surface microtextures of quartz grains from Vistulian loesses from selected profiles of Poland and some other countries [J]. Quaternary International, 2006, 152-153: 118-135
- [5] 谢又予, 崔之久. 电子扫描镜下我国若干冰碛石英砂的表面特征[J]. 冰川冻土, 1980, 3(2): 52-55 [XIE Youyu, CUI Zhijiu. Some surficial characteristics of till quartz sand in China under electronic scanning microscope [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1980, 3(2): 52-55]
- [6] 石磊, 张跃, 陈艺鑫, 等. 贡嘎山海螺沟冰川沉积的石英砂扫描电镜形态特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(1): 96-102 [SHI Lei, ZHANG Yue, CHEN Yixin, et al. Quartz grain SEM microtextures analyses of sub-glacial deposits at Hailuoguo glacier [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2010, 46(1): 96-102]
- [7] 高存海, 穆桂金, 闫顺, 等. 塔克拉玛干沙漠深部石英砂微结构特征及其环境意义[J]. 地质评论, 1995, 41(2): 152-160 [GAO Cunhai, MU Guijin, YAN Shun, et al. Features of surface microtextures of quartz sand grains in the hinterland of the Taklimakan desert and their environmental significance [J]. Geological Review, 1995, 41(2): 152-160]
- [8] 江新胜, 徐金江, 潘忠习. 四川盆地白垩纪沙漠石英砂颗粒表面特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(1): 60-68 [JIANG Xinseng, XU Jinjiang, PAN Zhongxi. The surface features of the quartz sand from the Cretaceous desert in the Sichuan Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2003, 23(1): 60-68]
- [9] 陈清华, 庞飞. 苏北盆地白垩纪沙漠石英颗粒表面特征及环境意义[J]. 特种油气藏, 2008, 15(5): 13-16 [CHEN Qinghua, PANG Fei. The surface features of the quartz from the Cretaceous desert in the Subei Basin and their environmental significance [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(5): 13-16]
- [10] 张光威, 杨子赓, 王圣洁. 南黄海第四纪时期石英砂表面结构特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(3): 37-47 [ZHANG Guangwei, YANG Zigeng, WANG Shengjie. Characteristics of surface textures of Quaternary quartz sand in the South Yellow Sea and environmental significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(3): 37-47]
- [11] 徐海鹏, 任明达, 孔繁德. 秦皇岛海岸潮间带的石英砂表面结构研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 8-12 [XU Haipeng, REN Mingda, KONG Fande. Research of the quartz sand surface texture on the Qinhuangdao International Zone [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(3): 8-12]
- [12] 周伟, 王琦, 曹立华. 渤海南部碎屑石英表面微结构特征等沉积环境[J]. 海洋湖沼通报, 1991, 3: 27-30 [ZHOU Wei, WANG Qi, CAO Lihua. The relationship between the surficial textures of clastic quartz and the sedimentary environment in the Southern Bohai Sea [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1991, 3: 27-30]
- [13] 吴正, 廖炳良, 金志敏, 等. 南海北部外陆架残留砂表面结构及其环境意义[J]. 科学通报, 1992, 37(20): 1887-1889 [WU Zheng, LIAO Bingliang, JIN Zhimin, et al. Surface structure of residual sand in the outer continental shelf of the northern South China Sea and its environmental significance [J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(20): 1887-1889]
- [14] 杨慧宁, 陈邵谋. 南海石英颗粒表面结构特征的初步研究[J]. 海洋学报, 1996, 18(3): 133-138 [YANG Huining, CHEN Shaomou. A preliminary study on the surface structure of quartz particles in the South China Sea [J]. Acta Oceanology Sinica, 1996, 18(3): 133-138]
- [15] 吴正, 廖炳良, 金志敏, 等. 我国海岸沙丘石英砂表面结构特征再探[J]. 科学通报, 1995, 40(17): 1602-1604 [WU Zheng, LIAO Bingliang, JIN Zhimin, et al. A further study on the surface structure of quartz sand in coastal dunes in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(17): 1602-1604]
- [16] 王永焱, 滕志宏, 岳平乐. 黄土中石英颗粒表面结构与中国黄土的成因[J]. 地理学报, 1982, 37(1): 35-40 [WANG Yongyan, TENG Zhihong, YUE Pingle. Surface texture of quartz grains under the scanning electron microscope and the genesis of loess in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1982, 37(1): 35-40]
- [17] 李珍, 张家武, 马海洲. 西宁黄土石英颗粒表面结构与黄土物质来源探讨[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 221-225 [LI Zhen, ZHANG Jiawu, MA Haizhou. Discussion on the texture features of quartz grains and their origin in the Xining loess [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 221-225]
- [18] 方小敏, 史正涛, 沈明智. 试从兰州地区黄土石英砂表面特征探讨黄土物质来源、成因与环境变迁[C]//中国第四纪冰川与环境研究中心, 中国第四纪研究委员会. 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991: 138-148 [FANG Xiaomin, SHI Zhengtao, SHEN Mingzhi. Preliminary discussion of material source, origin and environmental change of loess from the surface texture features of quartz of losses in Lanzhou region, China [C]// Quaternary Glacier and Environment Research Center of China, Chinese Quaternary Research Committee. Quaternary Glacier and Environment in Western China. Beijing: Science Press, 1991: 138-148]
- [19] 伍永秋, 崔之久, 葛道凯, 等. 昆仑山垭口地区第四纪地层石英砂表面特征与沉积环境[J]. 应用基础与工程科学学报, 1998, 6(2): 117-124 [WU Yongqiu, CUI Zhijiu, GE Daokai, et al. Surface character and sedimentary environment of the quartz grains in the Quaternary strata in Kunlun Mountains pass area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1998, 6(2): 117-124]
- [20] 胡东升, 李小豫, 熊卫强, 等. 中国庐山晚第四纪沉积岩系的石英形貌显微结构及环境过程[J]. 地质学报, 2012, 86(6): 1020

- 1030 [HU Weidong, LI Xiaoyu, XIONG Weiqiang, et al. Microstructure and morphology of quartz from Late Quaternary sedimentary rocks in Lushan Mts. China, and its environment process [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(6): 1020-1030]
- [21] 夏应菲, 杨浩. 安徽宣城第四纪红土剖面石英颗粒扫描电镜研究[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 1998, 21(1): 120-124 [XIA Yingfei, YANG Hao. SEM scanning of quartz of the Quaternary red earth in Xuancheng, Anhui [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 1998, 21(1): 120-124]
- [22] 谢又予. 中国石英砂表面结构特征图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 5-10 [XIE Youyu. *Atlas of quartz sand surface textures in China* [M]. Beijing: Ocean Press, 1984: 5-10]
- [23] BULL P A, CULVER S J. An application of scanning electron microscopy to the study of ancient sedimentary rocks from the Saionia Scarp, Sierra Leone [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1979, 26: 159-172
- [24] 尹雪斌, 孙立广, 刘晓东. 南极无冰区典型沉积环境石英砂表面结构特征及其在沉积环境识别中的应用[J]. *极地研究*, 2003, 15(1): 1-10 [YIN Xuebin, SUN Liguang, LIU Xiaodong. Characteristics of quartz grain surface textures in the Antarctic ice-free area [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(1): 1-10]
- [25] CARSON B. Erosion and sedimentation processes in the Nepalese Himalaya [M]. *International Centre for Integrated Mountain Development. Occasional Paper No. 1*, 1985: 1-45
- [26] EVANS S G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1986, 23(3): 385-387
- [27] DAI F C, LEE C F, DENG J H, et al. The 1786 earthquake triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, Southwestern China [J]. *Geomorphology*, 2005, 65(3-4): 621-627
- [28] 崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成演化与减灾对策[J]. *第四纪研究* 2003, 23(6): 621-627 [CUI Peng, MA Dongtao, CHEN Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst [J]. *Quaternary Research*, 2003, 23(6): 621-627]
- [29] COSTA J E. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows [G]// *Flood Geomorphology*. Baker V R, Kochel R C, Patton P C, et al. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1988: 113-122
- [30] CUTLER P M, COLGAN P M, MICKELSON D M. Sedimentologic evidence for outburst floods from the Laurentide Ice Sheet margin in Wisconsin, USA: implications for tunnel-channel formation [J]. *Quaternary International*, 2002, 90(1): 23-40
- [31] 徐道明. 西藏波曲河冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征[J]. *冰川冻土*, 1987, 9(1): 23-24 [XU Daoming. Characteristics of debris flow caused by outburst of glacial lakes on the Boqu River in Xizang, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, 9(1): 23-24]
- [32] 崔之久, 张梅, 崔鹏, 等. 初论堰塞湖溃坝沉积相特征[J]. *山地学报* 2015, 33(2): 129-140 [CUI Zhiyu, ZHANG Mei, CUI Peng, et al. Discussion on characteristics of sedimentary facies of dammed-lakes outburst deposits [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 33(2): 129-140]
- [33] 陈剑, 崔之久. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积体的发现及其环境与灾害意义[J]. *沉积学报* 2015, 33(2): 275-284 [CHEN Jian, CUI Zhiyu. Discovery of outburst deposits induced by the Xuelongnang paleo-landslide-dammed lake in the upper Jinsha River, China and its environmental and hazard significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 275-284]
- [34] 陈松, 陈剑, 刘超. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积物分维特征分析[J]. *中国地质灾害与防治学报* 2016, 27(2): 78-85 [CHEN Song, CHEN Jian, LIU Chao. Analysis of grain size fractal feature of outburst induced by the Xuelongnang paleo-landslide-dammed lake in the upper Jinsha River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(2): 78-85]
- [35] 陈松, 陈剑, 刘超, 等. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积物粒度特征[J]. *中国水土保持科学* 2016, 14(1): 28-35 [CHEN Song, CHEN Jian, LIU Chao, et al. Granularity characteristics of deposits from the break of the dammed lake caused by Xuelongnang ancient landslide in the upper Jinsha River [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(1): 28-35]
- [36] 陈松, 陈剑, 刘宏, 等. 堰塞湖溃坝堆积物的粒度特征及其沉积环境——以雪隆囊古堰塞湖为例[J]. *冰川冻土* 2016, 38(2): 509-516 [CHEN Song, CHEN Jian, LIU Hong, et al. Grain size features and sedimentary environment of the sediments caused by outburst of barrier lake: a case study of ancient barrier lake (Xuelongnang lake) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 509-516]
- [37] 陈丽华, 廖昕, 于众. 扫描电镜在地质学上的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 21-42 [CHEN Lihua, MIAO Xin, YU Zhong. *Application of scanning electron microscope in geology* [M]. Beijing, 1986: 21-44]
- [38] 王祥珍, 吴时国, 李传荣, 等. 南极普里兹湾柱样中石英颗粒的表面结构[J]. *极地研究*, 1997, 9(2): 91-104 [WANG Xiangzhen, WU Shiguo, LI Chuanrong, et al. Surface textures of quartz grains from a core of the Antarctic Prydz Bay [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 1997, 9(2): 91-104]
- [39] 刘晓东, 孙立广, 尹雪斌, 等. 南极无冰区古海蚀龛石英颗粒表面结构特征及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质* 2002, 22(1): 37-42 [LIU Xiaodong, SUN Liguang, YIN Xuebin, et al. Characteristics of surface textures of quartz in the wave-cut notch in the Fildes Peninsula of Antarctica and their environmental significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 37-42]
- [40] NEWSOME D, LADD P. The use of quartz grain microtextures in the study of the origin of sand terrains in Western Australia [J]. *Catena*, 1999, 35(1): 1-17
- [41] 崔之久. 论混杂堆积和混杂岩的成因判别原则与标志[J]. *地质评论*, 1988, 34(4): 369-376 [CUI Zhiyu. Discussing the dis-

tinguishing principle and mark of the origin of the mixed accumulation and the mixed rock [J]. *Geological Review*, 1988, 34(4): 369–376]

[42] 史兴民 徐素宁. 新疆玛纳斯河湖积平原中砂物质的特征与环

境意义[J]. *水土保持研究* 2007, 14(6): 153–159 [SHI Xing-min, XU Suning. Environmental significance and characteristics of sands of Manas River Lacustrine Plain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6): 153–159]

SEM Surface Microstructure of Quartz Grains Collected from Dam Break Sediments at Xuelongnang of Jinsha River

LIU Chao¹, CHEN Jian¹, CUI Zhijiu², LI Yan¹, CHEN Song¹

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. School of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In the study area, the dam break sediments of a landslide-dam were distributed in the Upper Jinsha River in southwest China. Systematical research was carried out regarding quartz grain microstructure characteristics by Scanning Electron Microscopy (SEM), using the Xuelongnang dam break sediment in Upper Jinsha River as the research object. The large amount of statistical data showed that the main microstructure assemblages of the quartz grains in the dam break sediment were common in the medium relief, small pits, sub angular, secondary ridges (50% to 75%); sparse in the sub rounded, ridge wear, low relief, conchoidal fractures, parallel cleavage planes, striation (5%–50%); and rare in the polished surface (< 5%). Meanwhile, chemical dissolution/precipitation patterns were solution pits and crevasses, silica pellicle and globules. The results showed that the dam break sediment was modified not only by mechanical impact, but also by strong water flow afterwards. These findings could potentially be used as a microscopic discriminant mark to distinguish dam break sediment from those which are actually residual deposits, moraine, aqueoglacial deposits, alluvial deposits, diluvial deposits, debris flow deposits, lacustrine sediments, marine sediments, aeolian sediments, and so on.

Key words: Xuelongnang; dam break sediment; landslide-dammed lake; quartz grains; SEM; microstructure