

青藏高原北部可可西里库赛湖年纹层 微区分析及形成机理

陈钰¹⁾, 刘兴起^{1,2,3)}, 何利⁴⁾, 叶莉⁵⁾, 陈惠芬⁶⁾, 李凯^{2,3)}

1) 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京, 100048;

2) 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京, 210008;

3) 湖泊与环境国家重点实验室, 南京, 210008;

4) 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京, 100875;

5) 北京师范大学基建处, 北京, 100875; 6) 国立台湾海洋大学应用地球科学研究所, 台湾

内容提要:湖泊年纹层是进行高分辨率古气候环境研究的重要载体之一,其形成机理的研究能够为高分辨率古气候环境信息的提取提供重要的依据。本文以青藏高原北部可可西里库赛湖沉积的年纹层为研究对象,通过纹层薄片显微镜观察,以及纹层的扫描电镜、X衍射和同步辐射X射线荧光等微区分析,对库赛湖沉积年纹层的形态、沉积和成分特征进行了研究,以探讨库赛湖年纹层形成过程和机理。结果表明:年纹层层偶由深浅相间的微层组成,深色层主要由灰褐色—黑褐色的粗颗粒物组成,磨圆中等、分选性差,矿物以石英、长石、白云母、黏土矿物等为主,其中石英含量占73%左右,且具有明显的风力搬运特征;浅色层呈灰白色,矿物颗粒较细,除石英、长石、白云母、黏土外,还有自生的文石,同时浅色层中含有大量的枝角类碎片和半月形介形类生物壳体。研究认为,库赛湖冬季温度低、风力强劲,风的机械搬运作用使大量的陆源物质在冰面堆积,等到春季湖泊开封,冰面上粗颗粒物沉积到湖底形成库赛湖年纹层的深色层(粗颗粒层);夏季温度升高,冰雪融化,降水增加,河流搬运的陆源粗颗粒物由于重力作用先在湖泊边缘沉积,而黏土矿物等细颗粒物则在湖泊中心沉积,同时夏季湖水温度升高,蒸发作用加强,生物活动增强,湖泊自身的生物、化学作用加强,从而形成以细碎屑矿物、生物残体、自生碳酸盐沉积为主的浅色层(细颗粒层)。因此,库赛湖的年纹层层偶是由冬季冰面风成物质形成的粗颗粒深色层(冰融化后,风成物质沉降至湖底堆积)和夏季沉积的细颗粒浅色层两者交替而形成的。

关键词:青藏高原北部;可可西里;库赛湖;年纹层;微区分析;形成机理

湖泊沉积年纹层是以年为周期的层状沉积物,同冰芯和树轮一样,可以获得年甚至季节性的古气候环境变化信息(Saarnisto, 1986; Brauer, 2004; Ojala et al., 2012)。其形成与发育既需要特定的湖盆环境,也需要当地气候环境存在明显的季节性变化(O'Sullivan, 1983)。百余年来,有关湖泊沉积年纹层的研究工作非常活跃,但这些研究工作主要集中在欧洲地区(Ojala, 2001; Zillén et al., 2003; Veski et al., 2004)和环北大西洋的北美地区(Bradbury et al., 1993; Graig, 1972; Lamoureux et al., 1996; Francus et al., 2002),亚洲的日本

(Nakagawa et al., 2012),非洲(Shanahan et al., 2008)也有相关年纹层研究的报道。然而,国内对于湖泊沉积年纹层的研究起步较晚,主要集中在东北(Chu Guoqiang et al., 2005; You Haitao et al., 2008)、青藏高原(Chu Guoqiang et al., 2011; Liu Xingqi et al., 2014)、柴达木盆地(Zhou Aifeng et al., 2007)等地。

利用微区分析技术研究湖泊沉积年纹层的成分、形貌特征,能够帮助我们充分理解年纹层的形成过程、形成时的气候环境信息,从而为利用年纹层进行高分辨率古气候环境信息的提取提供坚实的基础

注:本文为湖泊与环境国家重点实验室开放基金(编号 2014SKL001)和中国科学院战略性先导科技专项项目(编号 XDA05080403)资助成果。

收稿日期:2015-04-29;改回日期:2015-07-05;责任编辑:周健。

作者简介:陈钰,女,1992年生。硕士研究生,自然地理学专业,研究方向:湖泊沉积与气候环境演化。通讯地址:100048,首都师范大学资源环境与旅游学院;Email:chenyu0330@sina.com。通讯作者:刘兴起,男,1966年生。教授,博士生导师,从事湖泊沉积与气候环境演化研究。通讯地址:100048,首都师范大学资源环境与旅游学院;Email: xqliu@cnu.edu.cn。

(Saarnisto, 1986; Brauer, 2004; Ojala et al., 2012)。目前对于湖泊年纹层的形成机理主要从年纹层层偶的单层纹层形成入手,按其形成的作用力(主要包括生物作用、化学作用和机械作用等),大体上可以分为三种类型:①碎屑纹层,例如瑞典 Kassj n 湖中相对较薄的深色冬季层(Saarnisto, 1986);②生物成因纹层,例如德国 Hohlnaar 玛珥湖中春、夏季节形成的硅藻层(Brauer, 2004);③化学成因纹层,例如死海地区浅色的夏季层是规律性的文石沉降形成的,偶尔会出现石膏沉积,属于典型的蒸发盐年纹层(Brauer, 2004)。年纹层则通常是由碎屑纹层、生物纹层、化学纹层任意两种类型组合在一起而形成的深浅相间的层偶。

位于青藏高原北部可可西里地区的库赛湖,其沉积物中发育有比较连续的纹层,是研究该地区高分辨率古气候环境变迁的理想材料。 $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ 、 ^{14}C 测年、纹层计年的研究结果证实:库赛湖的纹层为年纹层,虽然对库赛湖年纹层的形成机制有初步的探讨(Liu Xingqi et al., 2014),但缺乏系统的研究。因此,本文将通过对库赛湖沉积纹层的微区进行显微镜和扫描电镜观察、基于扫描电镜下石英颗粒表面特征观察、X 衍射分析(XRD)和同步辐射 X 射线荧光分析(μXRF),研究库赛湖纹层的结构特征、沉积特征和组成特征(矿物组成特征、元素组成特征),结合库赛湖地区的气候环境特征,探讨库赛湖沉积年纹层的形成过程和机制。该研究有助于从年际尺度或季节性尺度上理解库赛湖年纹层的形成过程及区域的气候环境特征,进而为青藏高原北部高分辨率的古气候环境重建提供强有力的支撑。

1 研究区域概况

库赛湖($35^{\circ}33'—35^{\circ}50' \text{ N}$, $92^{\circ}37'—93^{\circ}03' \text{ E}$)位于青海省玉树藏族自治州治多县五道乡境内(图1),青藏高原北部可可西里地区的东部,湖面海拔4475 m,湖水面积254.4 km²,集水面积3700 km²,水深为10~50 m,湖泊东南部水域较浅,水深平均约10 m;湖泊西北水域较深,最大深度达50 m。补给系数为13.1,接受大气降水和发源于昆仑山南坡五雪峰(5577 m)和大雪峰(5863 m)的库赛河补给。湖水pH值8.3,矿化度为28.54 g/L(李炳元, 1996)。来自库赛湖南50 km左右的五道梁气象站53年(1957~2009年)的气象资料显示,该地区年平均气温约-5.4℃,6~9月份的气温通常在0℃以上;年平均降水量为283 mm;年平均风速4.4 m/s,

冬季月平均风速明显大于其他季节,出现大风的天气情况下经常伴有沙尘暴天气,并且库赛湖地区是青海省沙尘天气频发的地区之一(Zhao Qiang et al., 2002; Liu Xingqi et al., 2014)。

2 样品采集

2010年9月,利用奥地利产 UWITEC 水上平台在可可西里库赛湖东南部($35^{\circ}43'19.3'' \text{ N}$, $92^{\circ}55'12.1'' \text{ E}$)水深14.5 m处(图1),采得岩芯1根(KS-2010),岩芯长度为350 cm,岩芯保存在PVC管中,运回实验室并储存于0~4℃的冷库中。整个岩芯岩性较为一致,以粉砂为主,除表层沉积物由于含水量较大层次不明显外,整体呈深浅带交互状分布。

为进行库赛湖纹层粗颗粒层形态形貌和成因分析,还采集了库赛湖冬季冰面的风成样品(Liu Xingqi et al., 2010),花土沟至阿尔金典型沙丘的风成样品($38^{\circ}05.549' \text{ N}$, $90^{\circ}05.477' \text{ E}$),格崖公路沙丘样品($36^{\circ}40.722' \text{ N}$, $93^{\circ}46.872' \text{ E}$),格尔木河古河道河流相样品($36^{\circ}04.644' \text{ N}$, $94^{\circ}48.910' \text{ E}$)。

3 研究方法

用钢锯将采集回来的岩芯沿中轴线剖开,对其中一半岩芯的表面形态进行详细的描述,并照相留存;另一半岩芯自上而下逐一分割出60 mm×12 mm×8 mm的岩芯样条(每个样条间要互相重合20 mm),并且放入70 mm×15 mm×10 mm铝盒中;将带铝盒的岩芯样条用液氮速冻15 min左右,真空冷冻干燥48 h后取出样条,在通风橱中注胶,并于室温下在通风橱中放置48 h。选择代表性样条经切割磨平后,用于同步辐射 X 射线荧光(μXRF)分析。X 射线荧光(μXRF)分析实验在中国科学院高能物理研究所北京同步辐射装置4W1B站 X 射线荧光分析实验站完成。X 射线荧光光谱分析结果用Pymca程序进行元素能量标定和谱线拟合从而得到目标元素的计数含量,然后用光强标准化。

注胶后的样条通过粘片、切割、粗磨、细磨、抛光后,制成厚度在50 μm左右的岩相大薄片供镜下观察和研究。对制好的纹层薄片首先进行系统的显微镜镜下观察,其次选择有代表性的薄片进行扫描电镜的观察和研究。实验在台湾大学地球科学系扫描电镜室,用带 X 射线能量色散谱仪的场发射扫描电镜完成。

对纹层相对较厚的单一深色层和浅色层(分别厚1 cm左右)进行 X 衍射分析(XRD),并对样品中

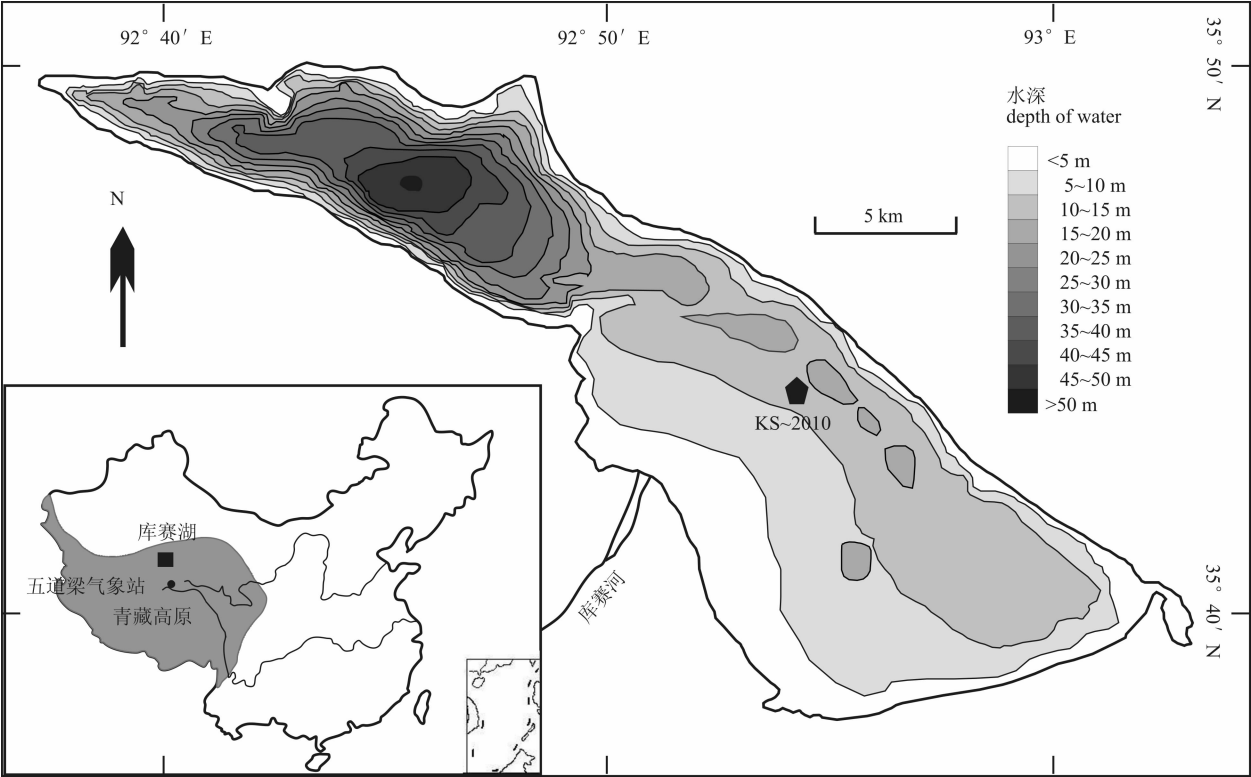


图 1 青藏高原北部库赛湖及采样点位置

Fig. 1 The sampling site and location of Lake Kusai in northern Tibetan Plateau

不同矿物的重量百分数进行半定量的估算 (Chuang,1974;Liu Xingqi et al. ,2007)。

针对扫描电镜下石英颗粒表面特征观察实验,分别采取岩芯中粗颗粒层物质、浅色与深色混合层颗粒物质、冬季库赛湖湖面冰面风成物、格崖公路沙丘风成物、花土沟至阿尔金小沙丘风成物、格尔木河下游典型古河道河流相沉积物等样品各 2~3 g。由于粒径 0.005~0.01 mm 石英砂基本可反映它的成因类型,但特征成因组合发育不全;0.01~0.125 mm 石英砂完全可以反映成因类型,表面结构成因组合发育较全;0.125~0.5 mm 石英砂基本为各成因沉积物中的最活跃组分,表面结构成因组合发育齐全;大于 0.5 mm 石英砂表面特征及成因组合不全(方小敏,1991;Fang Xuemin et al. ,1998;Li Jing et al. ,2003)。因此,样品过 30 目和 120 目试验筛,在浓度为 20% 的 HCl 溶液中浸泡、震荡 8 h 后,用蒸馏水反复冲洗直至上清液为中性;再使用浓度为 20% 的 H₂O₂ 浸泡、震荡 8 h,用蒸馏水反复冲洗至上清液为中性;清洗完毕将样品烘干后抽真空并喷镀金膜,选取粒径为 0.125~0.5 mm 的石英砂,在首都师范大学分析测试中心利用带 X 射线能量色散谱仪的场发射扫描电镜进行观察。

4 结果与讨论

4.1 纹层的结构特征

显微镜下观察岩相大薄片,是目前国际上进行年纹层微相变化研究和开展年纹层计数最常用、最精确的方法之一,特别是对于沉积速率非常低、年纹层厚度非常薄的湖泊沉积物(Brauer,2004)。对库赛湖纹层岩相大薄片的显微镜下观察,可以看出:库赛湖的纹层整体上由比较清晰的深色、浅色层交互组成(图 2a)。深色层的厚度较浅色层的厚度小,颜色呈灰褐色—黑褐色,颗粒较粗(图 2a),分选差、磨圆中等,并在薄片中发现数层厚度在 0.5~1cm 左右的粗碎屑层(Liu Xingqi et al. ,2014)。浅色层呈灰白色,颗粒很细,且在该层中发现大量的枝角类碎片和半月形介形类壳体(图 2b)。

4.2 纹层的矿物特征

对粗颗粒层进行的能谱分析表明,其物质成分主要为石英、钠长石、钾长石、云母等(图 3,表 1)。粗颗粒物粒径大小在 0.1~1mm 之间,根据风沙运动研究结果,属于风力悬移和跃移搬运的粒级范围(吴正,1987)。其中多数石英呈球状(图 3),具有风成砂的特点;云母以白云母为主,呈叠板状;颜色色

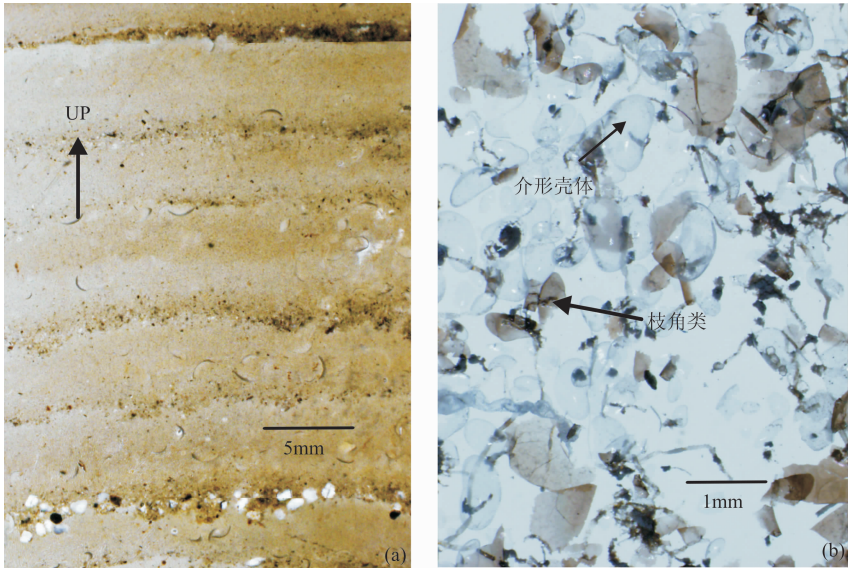


图 2 显微镜下库赛湖年纹层特征(a)及生物残体(b)(浅黄褐色薄片状为枝角类,亮色的半月形为介形类壳体)
Fig. 2 The characteristics of varved sediments from Lake Kusai under a microscope (a) and biological debris (b)
(light yellowish-brown and bright half-moon-shaped fragments are cladocera and ostracod shells, respectively)

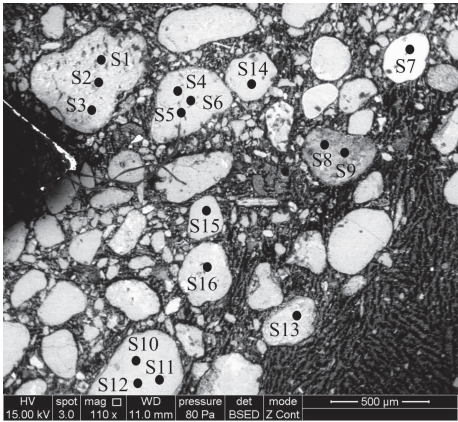


图 3 扫描电镜下库赛湖纹层粗颗粒层及能谱测试点
Fig. 3 Points of energy spectrum analysis on coarse particle layer of varved sediments from Lake Kusai under the scanning electron microscopy

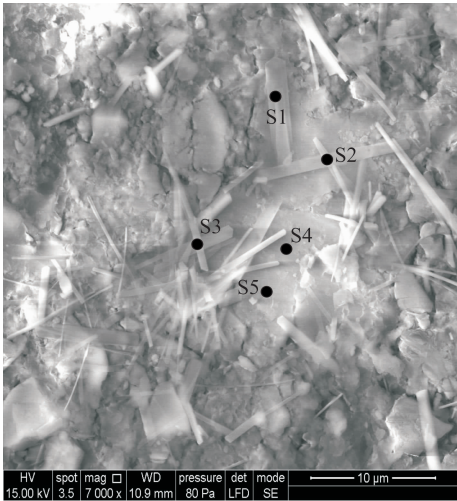


图 4 扫描电镜下库赛湖纹层细颗粒层及能谱测试点
Fig. 4 Points of energy spectrum analysis on fine particle layer of varved sediments from Lake Kusai under the scanning electron microscopy

块不均匀者多为岩屑,其成分不均质。根据分析得出,深色层具有明显的粒序分布,其主要成分可能是在冬季风的作用下,由风力携带外源物质在湖面冰面堆积,随着春季的到来,冰封的湖面融化,风成堆积物则沉入湖底。

库赛湖纹层浅色层的能谱分析结果表明,浅色层中存在有文石等盐类矿物(表 2)和黏土矿物。文石多呈针状或放射状(图 4)。由于介形类壳体主要为 CaCO_3 ,因此浅色层的主要组成物质可能是在温暖季节里由湖泊的自生化学作用和生物化学等形成的。

对于库赛湖纹层单一深色层(粗颗粒层)或浅色层(细颗粒层)厚度可达 1 cm 左右(图 5)的纹层,运用 X 衍射分析可以对单个深色层或浅色层进行测试。对单一深色层 XRD 的分析结果表明,深色层沉积物主要由石英、长石、白云母、黏土矿物等矿物组成(表 3),且深色层的矿物组成中不含文石,以石英为主,含量超过整个矿物组成的 2/3(67%~81%左右)。对单一深色层矿物的 XRD 分析结果与扫描电镜能谱分析结果有较好的一致性(表 1,表 3)。

表 1 库赛湖纹层中粗颗粒层矿物组成的能谱分析结果

能谱测点	元素组成(%)											推测矿物
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	
S1	29.23	40.12	1.57	0.80	3.49	19.72	0.73	0.36	1.08	0.33	2.58	云母
S2	19.72	45.57	3.21	0.75	5.75	20.28	0.44		1.37	0.28	2.63	云母
S3	17.27	47.83	0.76	1.20	3.46	23.84	0.53		0.83	0.36	3.91	云母
S4	17.23	49.78	0.24		0.31	32.13				0.31		石英
S5	14.68	51.70			0.34	32.64			0.22	0.44		石英
S6	20.14	47.47	0.22		0.37	31.21				0.59		石英
S7	15.73	46.83	1.72	0.24	6.38	21.97			7.13			钾长石
S8	24.92	44.72	0.54	1.93	3.83	16.67	0.49	0.41	1.35	1.49	3.66	岩屑
S9	28.02	44.25	0.66	2.12	4.60	11.82	0.78	0.46	2.00	2.05	3.24	岩屑
S10	16.54	50.17			0.34	32.68				0.27		石英
S11	16.77	50.02			0.28	32.59				0.34		石英
S12	18.06	49.23			0.38	32.10				0.24		石英
S13	18.82	46.67	4.71	0.24	6.02	21.63			0.47	0.61	0.82	钠长石
S14	19.48	48.05			0.32	31.67				0.47		石英
S15	19.33	49.14			0.33	30.85				0.34		石英
S16	19.57	47.33	0.31	0.45	1.71	28.51			0.70	0.41	1.01	石英

表 2 库赛湖纹层中细颗粒层矿物组成的能谱分析结果

能谱测点	元素组成(%)										推测矿物
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	
S1	17.82	46.10	1.73	1.02	1.28	3.76	0.98		0.41	26.90	文石
S2	22.52	44.51	1.62	1.11	1.18	3.66	1.31			24.10	文石
S3	20.62	43.42	1.57	1.21	1.10	3.45	1.32		0.35	26.95	文石
S4	20.86	43.12	0.99	1.12	1.10	3.67	0.67	0.41	0.40	27.67	文石
S5	23.98	39.93	0.75	1.12	1.10	3.74	0.60	0.35		28.42	文石

而对单一浅色层的 XRD 分析结果表明,浅色层沉积物中的矿物除存在石英、长石、白云母和黏土矿物外,还含有大量文石(图 5,表 3),其含量可达 13%~20%。

表 3 库赛湖纹层单一深色层和浅色层矿物成分对比(据 Liu et al.,2014)

Table 3 The comparison of mineral compositions between single dark and light layers (after Liu et al.,2014)

样品	矿物组成(%)						
	石英	白云母	绿泥石	长石	白云石	方解石	文石
LL-1	34	10	5	29	3	6	14
LL-2	41	8	2	17	2	9	20
LL-3	51	7	4	21	—	3	13
DL-1	81	6	1	11	—	2	—
DL-2	72	7	3	15	—	3	—
DL-3	67	8	5	19	—	2	—

注:LL-1~LL-3:单一浅色层;DL-1~DL-3:单一深色层。

4.3 纹层的元素组成特征

对库赛湖纹层进行的电子显微镜能谱扫描分析

表明深色层(粗颗粒层)中 Si 元素的含量相对较高(图 6b 中亮红色示 Si 含量高),而浅色层中 Ca 元素含量相对较高(图 6c 中亮蓝色示 Ca 含量高),同样说明深色层中石英或其他硅酸盐矿物含量较高,而在浅色层中碳酸盐矿物或生物壳体含量较高。对库赛湖纹层进行的 μ XRF 分析结果也表明:浅色层中的 Ca 含量总体上比深色层中的 Ca 含量高(图 7)。

4.4 纹层中石英颗粒表面特征

石英砂具有硬度大、化学稳定性强等特殊性质,沉积物石英砂在其沉积过程中由于搬运介质、搬运形式以及沉积环境不同,常常会在其颗粒表面留下反映不同搬运和沉积过程的形状及外貌特征,因此运用扫描电镜分析石英砂的表面结构特征可以推断其搬运和沉积过程、形成环境等(谢文予,1985;陈丽华,1986)。

通过扫描电镜观察不同样品石英颗粒表面特征(图 8),可以看出库赛湖纹层的粗颗粒层石英砂表面特征(图 8a),与库赛湖冰面采集的风成沙、沙丘等典型风成相石英砂表面特征极其相似(图 8c、8d、

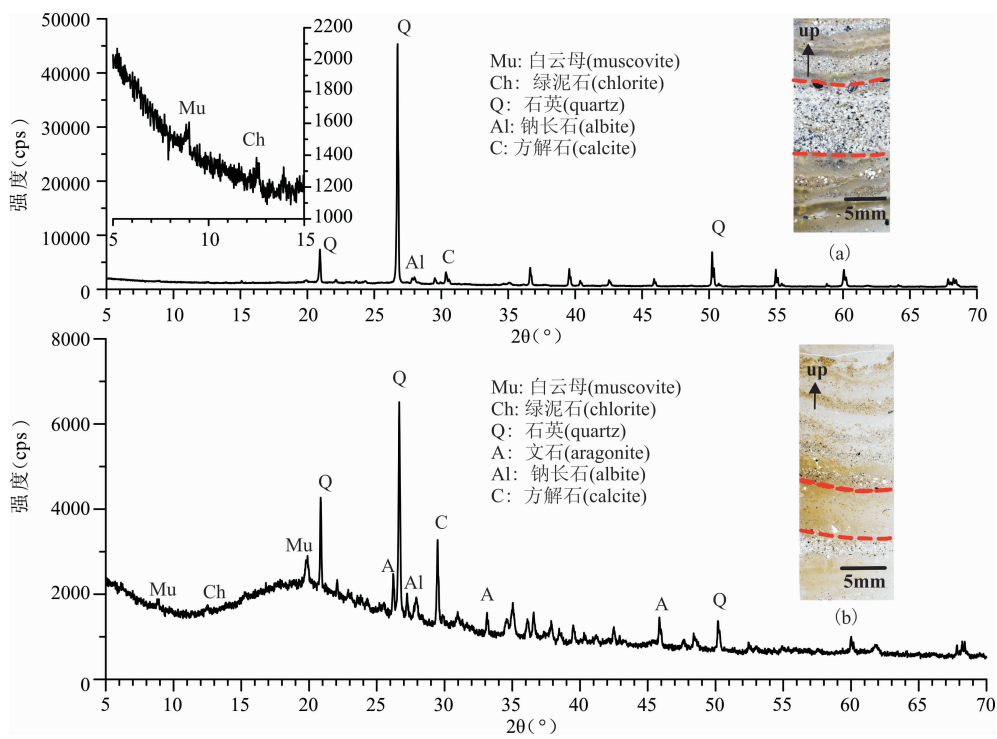


图 5 库赛湖纹层单一深色层(a,红色虚线间)与单一浅色层(b,红色虚线间)矿物组成的 XRD 图

Fig. 5 The XRD diffractograms and mineral compositions of a single dark layer (a, measured on the area between the red dotted lines) and a single light layer (b, measured on area between the red dotted lines)

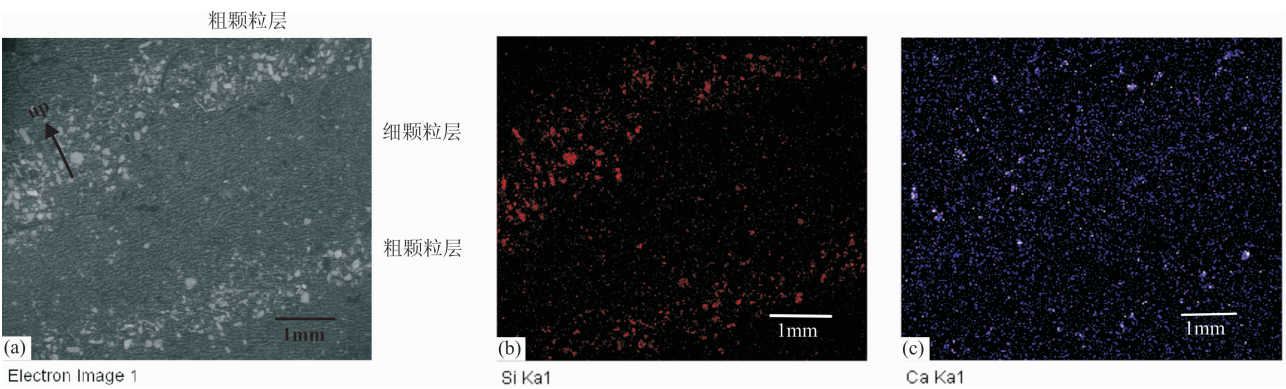


图 6 库赛湖纹层的电子能谱分析结果(a)(b,c 分别为硅和钙元素)

Fig. 6 The results of electron spectroscopy analysis in varved sediments of Lake Kusai (a) (b, c are results of silicon and calcium respectively)

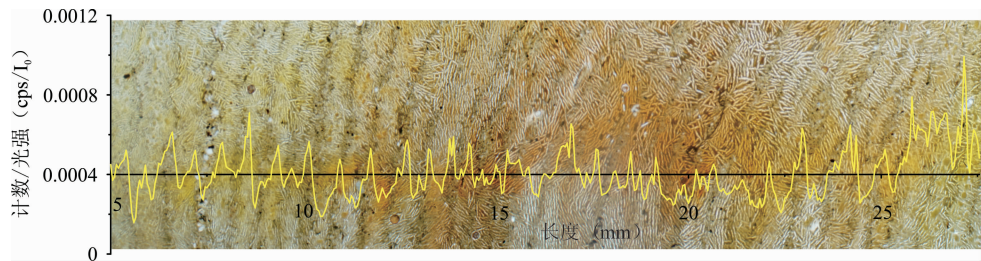


图 7 库赛湖沉积纹层中 Ca 元素的 μXRF 扫描结果

Fig. 7 The μXRF scan results of element Ca in varved sediments from Lake Kusai

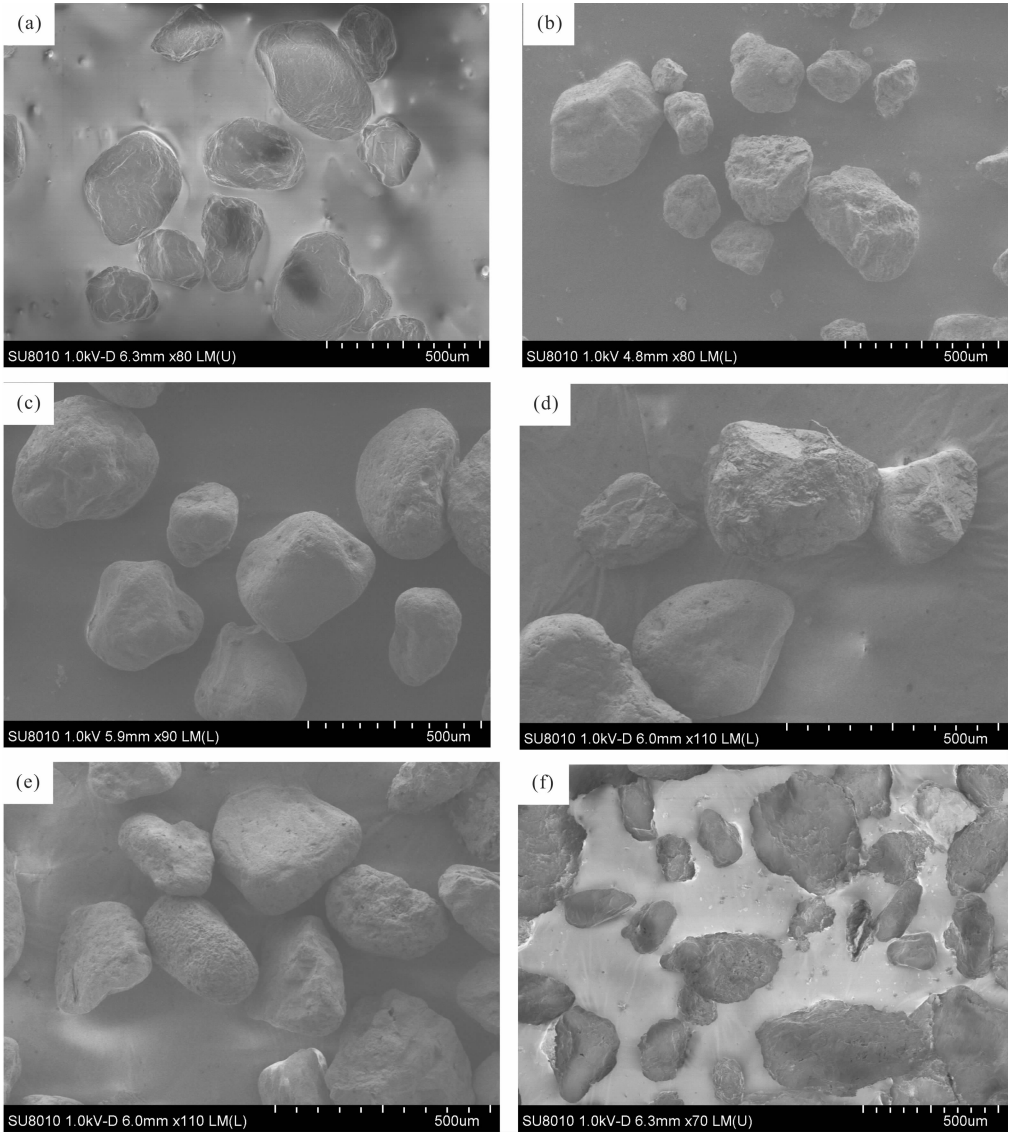


图 8 不同沉积环境条件下形成的沉积物石英颗粒表面特征

Fig. 8 Surface textures of quartz grains formed in different sedimentary depositional environments

(a)—库赛湖纹层的粗颗粒层;(b)—库赛湖纹层混合层;(c)—库赛湖冰面风成物;(d)—花土沟至阿尔金小沙丘;
(e)—格崖公路旁沙丘;(f)—格尔木河下游典型河流相沉积

(a)—The coarse particle layer in varved sediments of Lake Kusai; (b)—the mixed coarse and fine layer in varved sediments of Lake Kusai;
(c)—aeolian dust samples deposited in the ice of Lake Kusai; (d)—dune samples near the road from Hutugou town to Altun Mountains;
(e)—dune samples near the highway from Golmud to Manya; (f)—fluvial sediments in paleochannel in lower reaches of Golmud River

8e),具体地表现在它们的磨圆度都比较好,风成特征明显,而与格尔木典型河流相(图 8f)沉积的石英砂表面特征(磨圆度较差)具有明显的不同。库赛湖纹层的粗细混合层中石英砂颗粒磨圆度有好有差(图 8b),具有风成与河流搬运沉积的两种特征。

5 库赛湖年纹层的形成机理

5.1 库赛湖纹层的物质来源

湖泊沉积物的物质来源通常可以分为三类(王

苏民等,1989):①外源碎屑物质,由地表径流、风力和冰川搬运、岸蚀作用等带入湖中的碎屑物质,主要由石英、长石、云母等碎屑岩矿物组成;②湖泊化学沉积,由湖泊水体内部发生的化学过程导致的化学沉淀,如碳酸盐和各种盐类矿物;③湖泊生物沉积,主要由湖泊内部的生物残体和壳体组成。判断沉积物的来源是阐明湖泊年纹层形成机制的首要要素。

通过对库赛湖纹层粗颗粒层的研究表明,粗颗粒层具有以下几个明显的特征:①粒径大小不一,分

选择性差,磨圆度较好;②石英颗粒表面特征呈明显的风成砂特征;③石英是组成库赛湖湖泊沉积物的主要矿物,所占比例在 70%左右;④Si 含量较高,Ca 含量较低。以上特征说明,库赛湖纹层粗颗粒层是由风力作用搬运而来的外源碎屑物质组成的,其形成与冬季的风成活动有关。

而库赛湖细颗粒层则具有如下几个特征:①同样含有石英、长石、白云母、黏土等碎屑岩矿物,但颗粒较细,石英颗粒表面特征与风成石英砂的表面特征相差较大,与典型河流相的石英砂表面形态相似;②自生文石的结晶很好,含量较高,Ca 元素的含量明显高于粗颗粒层的 Ca 元素含量;③含有大量的生物残体,主要为枝角类碎片和介形类壳体。上述特征表明:库赛湖纹层的细颗粒层与夏季的径流搬运作用、湖泊内生的化学沉积作用,以及生物沉积作用有关。

5.2 库赛湖年纹层的形成过程及机理

据统计,库赛湖区冬季风力远大于夏季风力(Liu Xingqi et al,2014),冬季气温低,湖水结冰,强劲的风成沙刮至冰面上,翌年春季时,湖泊冰面解冻,冰面上风成沙便沉入湖底,形成库赛湖年纹层的粗碎屑层。在温度较高的夏季,冰川融化,降水增加,库赛湖携带大量的陆源物质进入湖区,较粗的颗粒物由于水动力减弱,在重力作用下先在湖泊边缘沉积下来,细颗粒物则一直可以被携带至湖泊中心沉积;夏季湖水蒸发作用强烈,化学沉淀作用加强,碳酸盐等自生矿物易于析出,导致碳酸盐(文石)含量增加;同时温暖的夏季,湖泊生物生长繁茂,从而产生大量的生物残体,如枝角类碎片和半月形的介形类壳体;在上述条件的共同影响和作用下,夏季形成的库赛湖纹层具有颗粒细、自生碳酸盐(文石)发育、生物残体丰富等特点。因此,库赛湖年纹层层偶是由冬季冰面风成物质形成的粗颗粒深色层(冰面融化后,风成物沉降于湖底堆积形成)和由夏季沉积的细碎屑矿物、生物残体、自生碳酸盐形成的细颗粒浅色层两者交替而形成的。

6 结论

(1)青藏高原北部可可西里地区库赛湖年纹层呈深浅色层交互状分布。深色层的颗粒物较粗,其组成物质主要是由风力搬运而来的碎屑物质,矿物组成有石英、长石、白云母、黏土矿物等;而浅色层主要由细颗粒物组成,并含有大量的生物残体(如枝角类、介形类壳体),矿物组成除石英、长石、白云

母、黏土矿物外,还含有文石等自生矿物。

(2)冬季温度很低,湖面结冰,风力搬运携带大量的陆源物质在冰面堆积,等到春天湖泊开封,其中较粗的颗粒物便沉积到湖底形成库赛湖沉积物中的深色层(粗颗粒层)。在夏季湖水温度升高,蒸发作用加强,有利于湖泊自身的生物、化学沉积作用,从而形成大量的文石和生物残体(如枝角类和介形类壳体);同时,夏季风力小,冰雪融化,降水增加,有利于河流的搬运作用,进入湖区的粗颗粒物先在湖泊边缘沉积,细颗粒等黏土矿物转移到湖泊中心沉积。

(3)库赛湖的年纹层是一种由冬季冰面风成物质形成的粗颗粒深色层(冰融化后,风成物质沉降于湖底堆积)和由夏季沉积的细碎屑矿物、生物残体、自生碳酸盐形成的细颗粒浅色层两者交替而形成的年纹层。

(4)通过库赛湖年纹层的微区分析,揭示了库赛湖年纹层层偶的形成同该区冬、夏季气候有关,这种关系的揭示能够为利用库赛湖的纹层厚度和其他指标(粒度、矿物、元素等),进行库赛湖地区年分辨率、乃至季节分辨率的气候反演提供重要的科学依据。

致谢:感谢首都师范大学李雅萍老师在扫描电镜实验中的帮助与指导,感谢审稿人提出的富有建设性的意见。

References

Bradbury J P, Dean W E. 1993. Elk Lake, Minnesota: Evidence for Rapid Climate Change in the North-Central United States. The Geological Society of America, Special Paper 276, 1~ 336.

Brauer A. 2004. Annually laminated lake sediments and their paleoclimatic relevance. In: The Climate in Historical Times. Towards a synthesis of Holocene proxy data and climate models. Berlin: Springer, 109~120.

Chu Guoqiang, Liu Jiaqi, Schettler G, Li Jiaying, Sun Qing, Gu Zhaoyan, Lu Houyuan, Liu Qiang, Liu Tungsheng. 2005. Sediment fluxes and varve formation in Sihailongwan, a maar lake from northeastern China. Journal of Paleolimnology, 34: 311~324.

Chu Guoqiang, Sun Qing, Yang Ke, Li Aiguo, Yu Xiaohan, Xu Tao, Yan Fen, Wang Hua, Liu Meimei, Wang Xiaohua, Xie Manman, Lin Yuan, Liu Qiang. 2011. Evidence for decreasing South Asian summer monsoon in the past 160 years from varved sediment in Lake Xinluhai, Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research, 116: 2116 | DOI: 10. 1029/2010JD014454. 1~11.

Chuang F H. 1974. Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. II. Adiabatic principle of X-ray diffraction

- analysis of mixtures. *Journal of Applied Crystallography*, 7 (6): 526~531.
- Fang Xuemin, Wan Zhaohui, Kuang Shangfu. 2000. Mechanism and effect of silt-arrest dams for sediment reduction in the middle Yellow River basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 29(10): 49~52 (in Chinese with English abstract).
- Francus P, Bradley R S, Abbott M B, Patridge W, Keimig F. 2002. Paleoclimate studies of minerogenic sediments using annually resolved textural parameters. *Geophysical Research Letters*, 29: 20| DOI:10.1029/2002GL015082. 1~4.
- Graig A J. 1972. Pollen influx to laminated sediments: a pollen diagram from northeastern Minnesota. *Ecology*, 53: 46~57.
- Lamoureux S F, Bradley R S. 1996. A late Holocene varved sediment record of environmental changes from northern Ellesmere Island, Canada. *Journal of Paleolimnology*, 16: 239~255.
- Li Jing, Zhang Jinzhu, Wang Xiao. 2003. Viewing silt retention dam constructions by looking at rainstorm in the middle reaches of the Yellow River in the 1970s. *China Water Resources*, (9): 55~57. (in Chinese without English abstract)
- Liu Xingqi, Wang Yongbo, Shen Ji. 2007. Evolution of Chaka Salt Lake during the last 16000 years and its response to climate change. *Acta Geologica Sinica*, 6(81): 843~849 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xingqi, Yao Bo, Yang Bo. 2010. Grain size distribution of Aeolian and lacustrine sediments of Kusai Lake in the Hoh Xil region of the northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 30 (6): 1193~1198 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xingqi, Yu Zhitong, Dong Hailiang, Chen Huifen. 2014. A less or more dusty future in the Northern Qinghai-Tibetan Plateau? *Scientific Reports*, 4:6672|DOI:10.1038/srep06672. 1~6.
- Nakagawa T, Gotanda K, Haraguchi T, Danhara T, Yonenobu H, Brauer A, Yokoyama Y, Tada R, Takemura K, Staff R A, Payne R, Ramsey C B, Bryant C, Brock F, Schlolaut G, Marshall M, Tarasov P, Lamb H. 2012. SG06, a fully continuous and varved sediment core from Lake Suigetsu, Japan: stratigraphy and potential for improving the radiocarbon calibration model and understanding of late Quaternary climate changes. *Quaternary Science Reviews*, 36: 164~176.
- O'Sullivan P E. 1983. Annually-laminated lake sediments and the study of Quaternary environmental changes: A review. *Quaternary Sciences Reviews*, 1: 245~313.
- Ojala A E K, Francus P, Zolitschka B, Besonen M, Lamoureux S F. 2012. Characteristics of sedimentary varve chronologies—A review. *Quaternary Science Reviews*, 43: 45~60.
- Ojala A E K. 2001. Varved lake sediments in southern and central Finland: long varve chronologies as a basis for Holocene paleoenvironmental reconstructions. PhD thesis, Geological Survey of Finland, Miscellaneous Publications, 1~41.
- Saarnisto M. 1986. Annually laminated lake sediments. In: *Handbook of Holocene Paleoecology and Palaeohydrology*. New York: John Wiley & Sons Ltd, 343~370.
- Shanahan T M, Overpeck J T, Beck J W, Wheeler C W, Peck J A, King J W, Scholzet C A. 2008. The formation of biogeochemical laminations in Lake Bosumtwi, Ghana, and their usefulness as indicators of past environmental changes. *Journal of Paleolimnology*, 40: 339~355.
- Veski S, Seppä H, Ojala A E K. 2004. The cold event 8200 years ago recorded in annually laminated lake sediments in Eastern Europe. *Geology*, 32: 681~684.
- You Haitao, Liu Jiaqi, Liu Qiang, Chu Guoqiang, Patrick R, Han Jingtai. 2008. Study of the varve record from Erlongwan maar lake, NE China, over the last 13 ka BP. *Chinese Science Bulletin*, 53(2): 262~266.
- Zhao Qiang, Zhou Yuping. 2002. Distribution of dust-storm and its relation to wind in Qinghai Province. *Journal of Qinghai Meteorology*, (3): 12~16. (in Chinese without English abstract)
- Zhou Aifeng, Chen Fahu, Qiang Mingrui, Yang Meilin, Zhang Jiawu. 2007. The discovery of annually laminated sediments (varves) from shallow Sugan Lake in inland arid China and their paleoclimatic significance. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(8): 1218~1224.
- Zillén L, Snowball I, Sandgren P, Stanton T. 2003. Occurrence of varved lake sediment sequences in Värmland, west central Sweden: lake characteristics, varve chronology and AMS radiocarbon dating. *Boreas*, 32: 612~616.

参 考 文 献

- 陈丽华, 缪昕, 于众. 1986. 扫描电镜在地质学上的应用. 北京: 科学出版社, 21~44.
- 方小敏. 1991. 试从兰州地区黄土石英砂表面特征探讨黄土物质来源、成因及环境变迁//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, 138~148.
- 方学敏, 万兆惠, 匡尚富. 2000. 黄河中游淤地坝拦沙机理及作用. *水利学报*, 29 (10): 49~52.
- 李炳元. 1996. 青海可可西里地区自然环境. 北京: 科学出版社, 1~15.
- 李靖, 张金柱, 王晓. 2003. 20 世纪 70 年代淤地坝水毁灾害原因分析. *中国水利*, (9): 55~57.
- 刘兴起, 王永波, 沈吉. 2007. 16000a 以来青海茶卡盐湖的演化过程及其对气候的响应. *地质学报*, 6(81): 843~849.
- 刘兴起, 姚波, 杨波. 2010. 青藏高原北部可可西里库赛湖沉积物及风成物的粒度特征. *第四纪研究*, 30(6): 1193~1198.
- Lerman A 著. 1989. 湖泊的化学、地质学和物理学. 王苏民等译. 北京: 地质出版社, 184~186.
- 吴正. 1987. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1~316.
- 谢文予. 1984. 中国石英砂表面结构特征图谱. 北京: 海洋出版社, 1~148.
- 赵强, 周余萍. 2002. 青海沙尘暴分布特征及其与大风天气的关系. *青海气象*, (3): 12~16.

Micro-Area Analysis and Mechanism of Varves from Lake Kusai in the Hoh Xil Area, Northern Tibetan Plateau

CHEN Yu¹⁾, LIU Xingqi^{1,2,3)}, HE Li⁴⁾, YE Li⁵⁾, CHEN Huifen⁶⁾, LI Kai^{2,3)}

1) *School of Resource Environment and Tourism College, Capital Normal University, Beijing, 100048;*

2) *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008;*

3) *State Key Laboratory of lake and Environment, Nanjing, 210008;*

4) *School of Geography, Beijing Normal University, Beijing, 100875;*

5) *Infrastructure Construction Department, Beijing Normal University, Beijing, 100875;*

6) *Institute of Applied Earth Sciences, National Taiwan Ocean University, Taiwan*

Abstract

The varved lake sediments are one of important archives for high-resolution paleoclimate and paleoenvironment studies, and studying their sedimentary mechanism could provide an important basis for high-resolution paleoclimatic and paleoenvironment reconstructions. In this paper, observation of petrographic thin sections under microscope, and micro-area analyses, such as scanning electron microscope, as well as X-ray diffraction analysis, and synchrotron radiation X-ray fluorescence analysis, are used to study morphology, deposition and mineral characteristics of varved Lake Kusai sediments in the Hoh Xil region of Northern Qinghai-Tibetan Plateau, and thus to investigate their sedimentary process and mechanism. The results show that Varved Kusai Lake sediments are very steadily and well rhythmically laminated with interaction of light and dark layer. The dark layers are made of grey brown or black brown coarse material with middle rounded and poor sorted grains, composed of quartz, feldspar, mica, and clay minerals, among which quartz accounts for about 73%. The features of the dark layers are quite similar to those of aeolian deposits. The light layers are made of gray and white thin material, composed of quartz, feldspar, muscovite, and clay minerals. The light layers contain authigene minerals such as aragonite. Meanwhile the light layers include many half-moon-shaped ostracod shells and cladocera remains. Thus, we suggest that dark layers are formed by coarse sand and silt that were deposited on lake ice by aeolian processes during winter when the temperature is low and the wind is strong. Upon ice thawing during summer, these sands and silts may be released and deposited into lake sediments to form dark layers (coarse particle layer). We interpret the light layers (fine particle layer) to represent summer season accumulations, when thin materials are transported to the lake center by high discharge caused by snow melting and high precipitation. Authigene minerals such as aragonite deposited under the condition of high evaporation, and ostracodes and cladogram grew in warm temperature conditions. In Lake Kusai, authigene biological action and chemical action enhance, biological activity strengthen. Thus the light layers include thin materials, biological debris and authigenic carbonate precipitation.

Key words: northern Tibetan Plateau; Hoh Xil area; Lake Kusai; varve; micro-area analysis; sedimentary mechanism