

古湖岸堤沉积物石英光释光测年研究:以中国东北兴凯湖为例^{*}

高磊^{1,2}, 隆浩¹, 沈吉¹, 汪勇¹, 王建²

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 南京师范大学地理科学学院虚拟地理教育部重点实验室, 南京 210023)

摘要: 古湖岸堤是湖面波动的地貌证据, 可以用来重建古湖泊演化. 古湖岸堤沉积物的准确测年是应用此地貌学证据重建湖泊演化的关键. 以我国兴凯湖最低一级湖岸堤——大湖岗为研究对象, 采用石英小片技术, 应用单片再生剂量法 (SAR) 对大湖岗 2 个不同位置的剖面风成砂质沉积物 (共 13 个样品) 进行了光释光 (OSL) 测年. 样品石英组分的光释光衰减曲线特征表明, 样品的释光信号以快组分为主, 预热坪和实验室剂量恢复实验结果表明, SAR 法可以用来测量兴凯湖古湖岸堤样品的等效剂量. 通过分析样品等效剂量分布情况和比较 3 种年龄模型 (平均值模型、中值模型和最小值模型), 认为大湖岗湖滨砂质沉积物在沉积埋藏前石英光释光信号晒退完全, 获得的 OSL 年龄是可信的. 年代结果表明, 大湖岗采自不同位置的 2 个剖面的年代范围一致, 且各个剖面中所有年代均随地层顺序变化; 另外, 2 个样品的 OSL 年龄与同层位的炭屑样品的 ¹⁴C 年代结果在误差范围内一致, 进一步表明 OSL 测年技术可以获得可靠的兴凯湖岸堤沉积物的年龄. 尽管与前人使用热释光 (TL) 测年方法研究大湖岗形成年代有较大差别, 本文认为兴凯湖最低一级古湖岸堤——大湖岗形成于距今约 1.24—0.50 ka.

关键词: 兴凯湖; 大湖岗; 光释光; 单片再生剂量法; 等效剂量年代模型

Quartz OSL dating of lake shoreline ridge sediments: A case study of Lake Xingkai, Northeast China

GAO Lei^{1,2}, LONG Hao¹, SHEN Ji¹, WANG Yong¹ & WANG Jian²

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *School of Geography Science, Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P. R. China*)

Abstract: Positions of lake shoreline ridges are indicative of the fluctuations in lake level and can be used for reconstruction of palaeolake evolution history. Reliable and accurate chronology is necessary for using lake shoreline ridge sediments to infer lake geomorphologic variations. This paper selected the Dahugang (DHG) shoreline ridge of Lake Xingkai (Northeast China) to demonstrate the potential of optically stimulated luminescence (OSL) dating technique in sandy shoreline sediments. Thirteen sedimentary samples were collected from two profiles (DHG1 and DHG2) of DHG shoreline ridge. Using single-aliquot regenerative dose (SAR) procedure, equivalent dose (D_e) of all samples was measured in small aliquot. The OSL signals of our samples decay very quickly, indicating that the OSL signal is dominated by fast component; preheat plateau tests and dose recovery tests were carried out to select suitable preheat temperature (220°C) for SAR procedure measurement. We analyzed the distributions of D_e for each sample, and compared the D_e s derived from three models (Mean age model, Central age model, and Minimum age model). The results suggested that the sandy sediments from DHG shoreline ridge were well bleached prior to deposition and they are appropriate for OSL dating. The resultant OSL ages are stratigraphically ordered at each of the profiles of DHG1 and DHG2, and both have shown that the DHG shoreline was likely to be formed during ~1.24–0.50 ka. Furthermore, the robustness and reliability of our OSL ages are validated by two ¹⁴C ages of charcoals. Although our results seem different from previous researches we propose that

^{*} 国际科技合作项目 (2011DFA21240)、国家自然科学基金项目 (41271002)、湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目 (2012SKL002) 和中国博士后基金项目 (2013T60567, 2012M520061) 联合资助. 2013-10-01 收稿; 2014-01-07 收修改稿. 高磊 (1988~), 男, 硕士研究生; E-mail: gaolei07271136@163.com.

the DHG shoreline ridge in the Lake Xingkai was formed at around 1.24–0.50 ka based on the present OSL dating results.

Keywords: Lake Xingkai; Dahugang shoreline; optically stimulated luminescence; single-aliquot regenerative dose; equivalent dose

湖泊演化最显著的标志是湖泊水位的上升与下降、面积的扩大与缩小、湖水的咸化与淡化、湖泊和流域生物种属组合和比例的变化、湖泊沉积物的成分和性质的改变等^[1]. 在湖泊演变研究中, 湖岸地貌可提供湖岸线和湖面变化的直接证据, 并通过古湖岸堤或湖岸阶地时间序列的建立, 确定湖岸变化序列和湖面波动顺序, 以此恢复的湖泊水位记录, 可以客观反映区域降水或有效湿度等气候状况^[2]. 许多研究尝试将古湖岸堤沉积物作为湖泊环境演化的载体, 取得了不少晚第四纪以来湖面演化的高质量科学报道^[3-8]. 可靠的测年, 是利用湖岸堤研究湖泊演化的关键所在. 本文以兴凯湖最低一级古湖岸堤——大湖岗为研究对象, 主要探讨光释光(optically stimulated luminescence, OSL)技术测定由风力搬运加积的岸堤砂质沉积物年代的适宜性和可靠性.

裘善文等认为兴凯湖北部平原分布着由湖岸向内陆呈同心圆状排列的5道湖成沙堤, 其中4道沙堤依次为: 大湖岗、太阳岗、二道岗、荒岗—南岗, 形态上清晰完整, 容易辨认, 并给出了湖岗形成的热释光年代, 得出最靠近内陆的一道湖岗, 在荒岗段沉积物热释光年龄为 63900 ± 3190 a, 而濒临湖岸的大湖岗沙堤在 2.01 m 深处沉积物热释光年龄为 12190 ± 610 a^[9-10]; 然而热释光技术可能会因为信号残留而导致年代高估. 胡君生依据湖岗发现的古墓人骨¹⁴C 测年, 间接判定太阳岗形成在 5600 a 之前, 而大湖岗形成在 5600 a 之后^[11]. 由于以前受沉积物测年技术手段的限制, 兴凯湖岸数道古湖岸堤准确的形成年代还缺乏足够的认识. 对光释光技术而言, 第四纪沉积物中含丰富的测年物质(石英或长石)并易于提取; OSL 技术测定的是沉积事件的年龄且其测年范围大, 因此该技术已广泛应用于各类型沉积物测年^[12-21], 获得了可靠的年代结果. 国内外已广泛使用 OSL 技术对湖相沉积物, 特别是滨岸砂质沉积物测年^[22-29]. 朱芸等^[23]应用 OSL 方法对兴凯湖北部几道湖岗作初步定年, 重建 200 ka 兴凯湖地区湖泊环境演化历史. 对于同一级湖岸堤——大湖岗而言, 裘善文等给出的热释光(TL)年代和朱芸等 OSL 年代结果差别很大, 两种年代结果究竟能否代表大湖岗的真实年代还需要进一步的验证. 本文重点从 OSL 测年技术方面探讨兴凯湖大湖岗砂质沉积物 OSL 测年的可靠性, 并以此确定大湖岗的形成年代.

1 研究区概况与样品采集

兴凯湖($44^{\circ}32' \sim 45^{\circ}21'N$, $131^{\circ}58' \sim 132^{\circ}51'E$)地处我国黑龙江省东北边缘, 横跨中俄边界(图 1a), 是亚洲东北部最大的湖泊之一. 兴凯湖的西、南及东北侧为丘陵地形, 北部发育为兴凯湖平原, 主要有湖滩、小湖、洼地、湖成沙堤或阶地等地貌单元组成. 湖区所在流域位于中高纬度温带典型东亚季风区内, 属温带湿润气候. 湖区土壤以沼泽草甸土为主, 分布沼泽植被和沼泽化草甸植被, 滨湖岗地上长有山杨、水曲柳、紫椴、柞树、春榆、落叶松、樟子松和赤松等乔木树种. 兴凯湖由东西向的湖岗沙堤隔开分成大、小两湖, 并由古水道相联通, 南面为大兴凯湖, 湖面以松阿察河口与白凌河口连线为中俄湖边界. 大兴凯湖自湖岸边向北依次分布 4 道清晰的湖岗, 即大湖岗、太阳岗、二道岗、荒岗(图 1b).

通过对兴凯湖东北岸详细的野外考察发现这几道湖岗在顶部为土壤层, 下部为分选性和磨圆度良好的中、细砂层, 本研究采集了一系列湖岸堤砂质沉积物 OSL 测年样品, 以确定各级岸堤的形成年代, 只对兴凯湖最低一级湖岸堤——大湖岗 2 个独立剖面采集的年代样品进行研究. 在大湖岗, 本文选择 2 个地层出露较好的剖面 DHG1(图 2a)和 DHG2, 共采集 13 个样品做光释光(OSL)测年和 2 个炭屑样品做¹⁴C 测年. 其中在 DHG1 剖面处($45^{\circ}13'17"N$, $132^{\circ}46'24"E$)采集 9 个 OSL 样品(编号为: DHG1-1、DHG1-2、…、DHG1-9), 在 DHG2 剖面处($45^{\circ}13'56"N$, $132^{\circ}45'39"E$)采集 4 个 OSL 样品(编号为: DHG2-1、DHG2-2、DHG2-3、DHG2-4), 2 个炭屑样品采自 DHG1 剖面的中下部, 层位深度与样品 DHG1-3 的深度相当, 所有 OSL 和¹⁴C 测年样品的采集位置如图 2b. DHG1、DHG2 剖面顶部为现代土壤层, 植被发育, 下部为古土壤层和砂层, 砂层主要是细砂物质, 分选性很好, 具有清晰的斜层理, 是典型的风成岸堤沉积结构. 采样时, 直接挖出平整的剖面用地质锤将不锈钢管水平打入剖面, 取出后将两端避光密封保存.

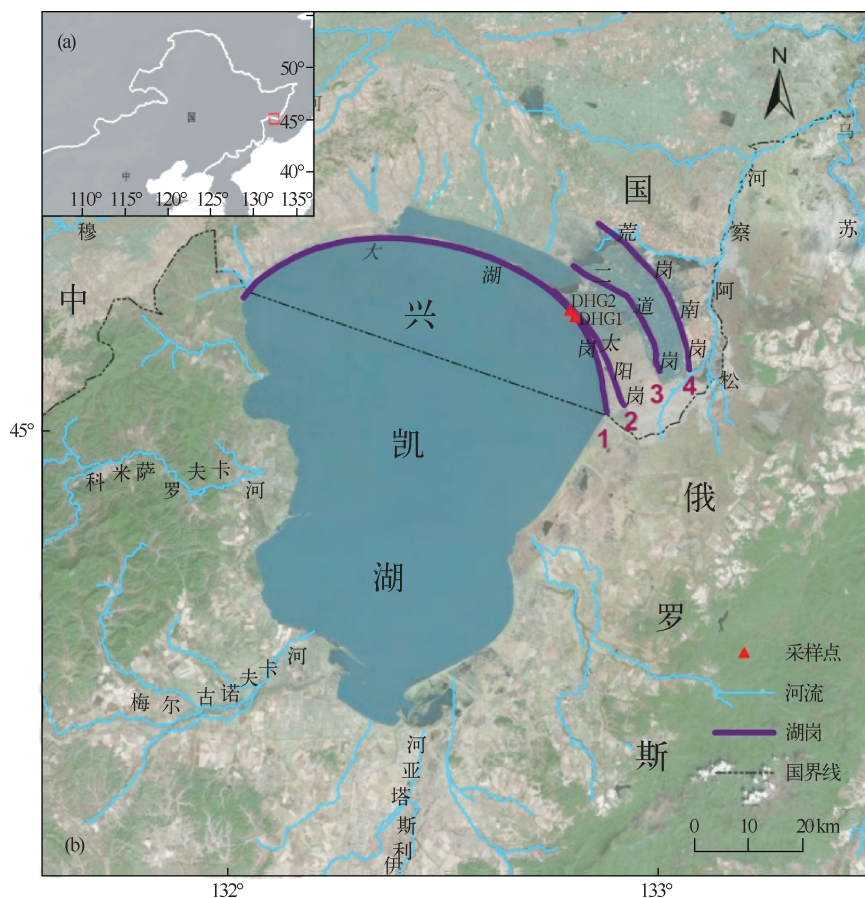


图1 兴凯湖所处位置示意(a),兴凯湖流域水系、湖岗分布及采样点位置(b)
(其中曲线1、2、3和4分别表示大湖岗、太阳岗、二道岗、荒岗的分布范围)

Fig. 1 Location of Lake Xingkai in the Northeast China(a) , river systems and four palaeoshorelines around Lake Xingkai(b)

2 样品前处理与测试流程

对于采集的 OSL 样品,首先,在暗室中取出钢管两端的有可能曝光的样品,用天平称取样品湿重,放入 50℃ 的恒温烘箱将样品烘干,再使用天平称量其干重,样品含水量 = (净湿重 - 净干重) / 净干重 × 100%, 随后将计算完含水量的样品选取 2 ~ 3 g 用玛瑙研钵磨成粉末状 (粒径 < 30 μm), 送往中国原子能研究院使用中子活化法测量样品的 U、Th、K 元素含量,以用于样品剂量率 (dose rate) 的计算.

接着,在暗室中,对钢管中部未曝光的样品进行化学处理,以提取纯石英矿物,用于样品等效剂量(equivalent dose, D_e)的测试。前处理主要步骤如下:(1)将样品用水充分浸泡后采用湿筛法选取 150 ~ 200 μm 的粗颗粒组分用 10% 稀盐酸浸泡去除碳酸盐,反应中止后用纯水清洗样品 3 ~ 4 次;(2)用 30% 的双氧水去除样品中的有机质,直至反应中止后纯水清洗 3 ~ 4 次并在 50℃ 恒温烘箱烘干;(3)用密度为 2.75 g/cm^3 的多钨酸钠重液分离去除重矿物,清洗烘干后再用密度为 2.62 g/cm^3 的多钨酸钠重液分离出石英和长石矿物,并用纯水清洗后烘干;(4)用氢氟酸刻蚀分离出的石英矿物约 1 h,可以除去石英表皮受 α 射线影响的部分或未完全分离的长石;(5)加入 10% 的稀盐酸浸泡样品 30 min 左右以去除残留氟化物^[30];(6)用纯水清洗样品几次后再烘干。最后,将提取的粗颗粒石英使用小片技术制成样片以备剂量测试,即在

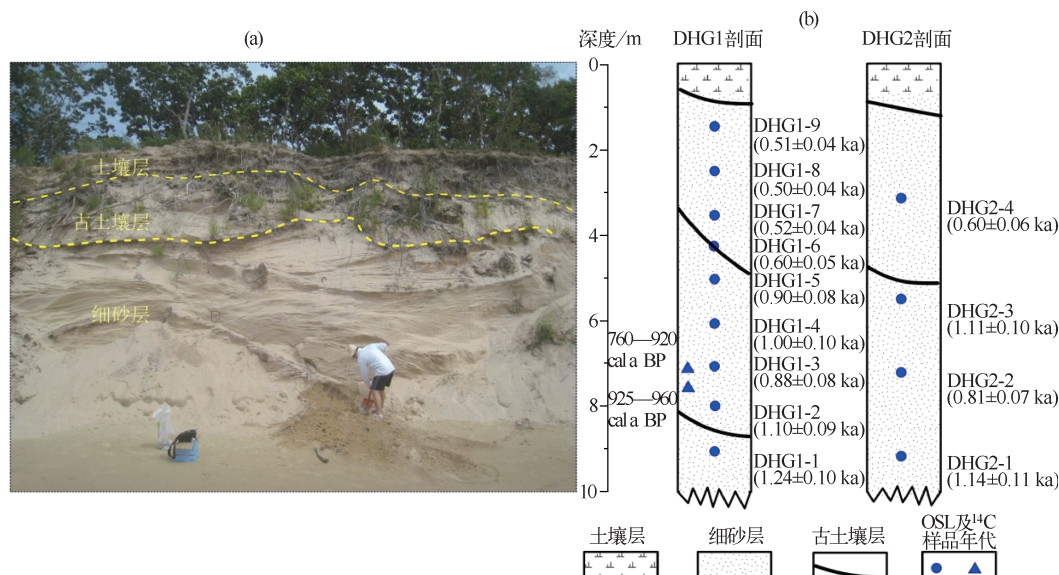


图2 大湖岗岸堤沉积剖面照片(a), DHG1、DHG2 剖面的岩性、采样位置和年代结果(b)

Fig. 2 Field picture showing beach sediments from Dahugang shoreline(a), stratigraphy and chronology of sections DHG1 and DHG2(b)

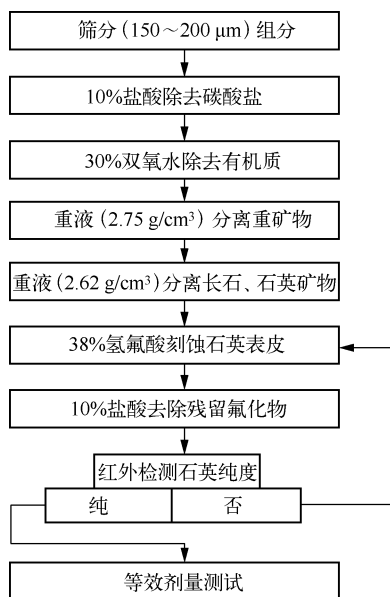


图3 粗颗粒(150~200 μm)石英提取流程

Fig. 3 Laboratory protocol for extracting coarse grain (150–200 μm) quartz mineral

直径9.7 mm的不锈钢片中心涂上直径约2 mm的硅胶,将石英颗粒均匀撒在钢片中心处。样品测试前用红外(波长830 nm)检测石英的纯度情况^[31]。整个石英提取流程如图3所示。

所有样片的等效剂量的测试均在 Risø TL/OSL DA-20型全自动化释光仪上完成。测试石英的光释光信号采用波长为470±30 nm蓝光为激发光源,红外检测采用波长为830 nm激发光源,光电倍增管前放置1个7.5 mm的Hoya U-340滤光片,人工β辐照源为⁹⁰Sr/⁹⁰Y。等效剂量测试采用Murray等提出并改进的单片再生剂量法(single-aliquot regenerative dose, SAR)流程^[32-33],见表1。

3 光释光特征

3.1 预热温度坪和剂量恢复实验

在测试D_e值之前,需要对单片再生剂量法的测试条件进行内部检验,以保证样品在测试过程中选用的条件对样品测试是适宜的。为此,本文按照Murray等提出的SAR方法对大湖岗代表性样品DHG1-6做了预热坪实验和不同预热温度条件下剂量恢复实验,具体做法是:将每个样品都按表1中的SAR流程测试7个循环,第1循环测试样片的天然释光信号强度L_N,第2~7个循环依次对同一样品辐照6个再生剂量,记作R₁、R₂、R₃、R₄、R₅(=0 Gy)、R₆(=R₁),并测对应的释光信号强度L₁、L₂、L₃、L₄、L₅、L₆,在每循环中测完天然或再生剂量后,均会给定1个固定的实验剂量,记作T_d,并测其对应的释光信号强度T_N、T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆。每个测试循环都用循环比(recycling ratio)和热转移效应(recuperation)来验证感量变化校

正或热转移对等效剂量测试的影响情况.

在预热坪实验中,从 180 ~ 300℃之间,每隔 20℃选择 1 个预热温度测试样品的等效剂量,实验剂量预热温度(cutheat)均为 160℃,每个温度点测试 3 个样片计算均值作为该温度点的等效剂量.可见,预热温度在 180 ~ 220℃之间,等效剂量值较一致,存在明显的温度坪区,而预热温度在 240 ~ 300℃之间,等效剂量值的分散性较大(图 4a).在剂量恢复实验中,预热温度在 180 ~ 300℃之间恢复的等效剂量与给定的剂量比值都在 0.9 ~ 1.1 之间,而在 200 ~ 260℃之间存在明显的温度坪区,恢复等效剂量与实验剂量的比值接近于 1(图 4b).预热温度在 180 ~ 300℃之间,循环比均在 0.9 ~ 1.1 之间,基本接近于 1,而热转移效应总体小于 0.1,而在 180 ~ 220℃温度之间,热转移效应稳定于 0.1 水平,但随预热温度升高,热转移效应出现波动(图 4).所以综合预热坪和剂量恢复实验结果,最终选择 220℃作为 SAR 法测试样品的预热温度,以保证测试等效剂量的精确度^[34].

表 1 单片再生剂量法测定石英等效剂量实验步骤^[32-33]

Tab.1 SAR protocol for D_e determination of quartz		
步骤	实验处理方法 ^a	观测值
1	附加再生剂量 D_i	—
2	预热 ^b (220℃, 5℃/s, 10 s)	—
3	蓝光激发 40 s ^c , 激发温度设为 130℃	L_i^d
4	附加实验剂量 D_i	—
5	预热 ^b 到 160℃	—
6	蓝光激发 40 s, 激发温度设为 130℃	T_i^d
7	返回步骤 1	—

a: 对于天然样品, $i = 0, D_0 = 0$ Gy; b: 测片在预热后,冷却到 60℃以下; c: 激发时间跟激发光源强度相关,本文采用 40 s 激发时间; d: L_i 和 T_i 为测得初始信号减去背景信号值.

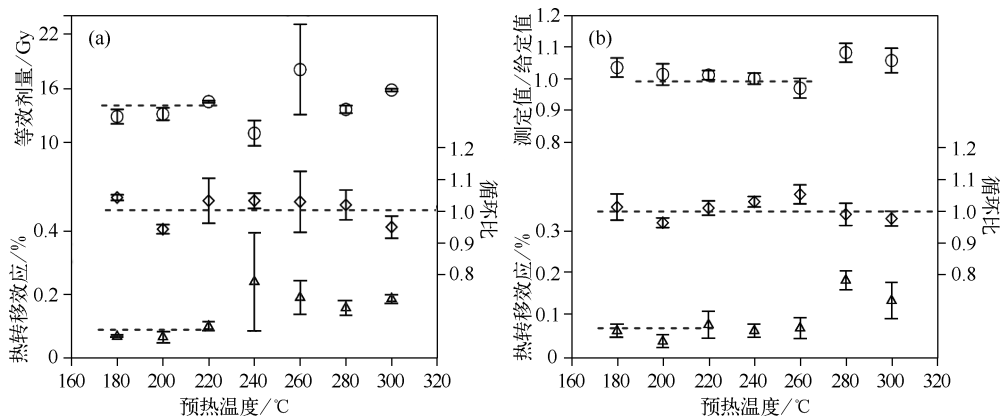


图 4 样品 DHG1-6 粗颗粒组分的预热坪实验(a)和剂量恢复实验(b)
Fig.4 Preheat plateau test(a) and dose recovery test(b) for the sample DHG1-6

另外,对 220℃预热条件下 SAR 法测试的 13 个样品的所有测试样片的循环比和热转移效应作了频率分布直方图统计,表明测试的 232 个样片的循环比平均值为 1.060 ± 0.099 ,绝大多数样片循环比在 0.9 ~ 1.1 之间,对于循环比不在 0.9 ~ 1.1 范围的样片,在下文利用等效剂量年代模型计算平均等效剂量时会将其剔除(图 5a).图 5b 反映所有样片的热转移效应,平均值为 0.090 ± 0.066 ,全部都小于 0.5.这也进一步说明在 220℃的预热条件下用 SAR 方法测试样品的等效剂量是适宜的.

3.2 信号衰减曲线和再生剂量生长曲线

大湖岗 2 个代表样品 DHG1-1、DHG2-4 的 OSL 信号衰减曲线和再生剂量生长曲线见图 6.用于计算等效剂量的光释光信号用前 0.64 s 的初始累积信号减去最后 8 s 的背景信号获得.从 2 个样品天然释光信号衰退曲线形态来看,释光信号衰减很快,都是在 2 s 内快速晒退到本底值(图 6),说明光释光信号组成主要是快组分,而 Wintle 等研究已表明石英矿物 OSL 信号若以快组分为主时,采用 SAR 法测量 D_e 较合适.样品的 D_e 通过将经试验剂量校正的天然释光信号 L_N/T_N 投影到再生剂量生长曲线上,如图 6 中虚线所示.

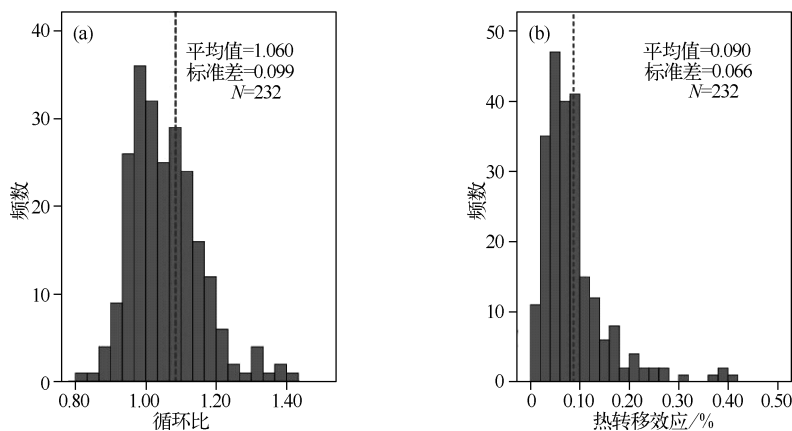


图 5 13 个样品所有测片的循环比(a)和热转移效应(b)直方图

Fig. 5 The histogram of recycling ratio(a) and recuperation(b) from 13 samples

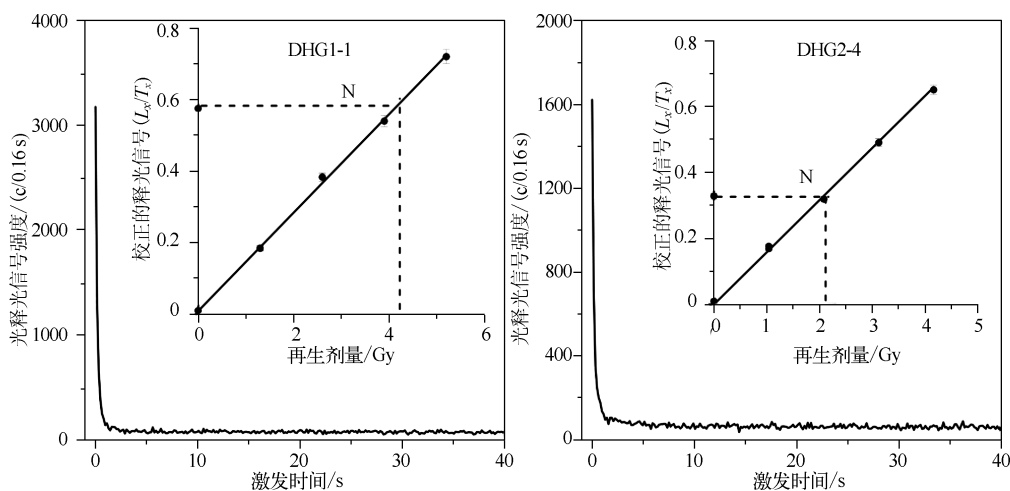


图 6 大湖岗 DHG1-1 和 DHG2-4 样品的天然信号衰减曲线和再生剂量生长曲线

Fig. 6 Natural OSL signal decay curves and regenerative dose growth curves

for samples DHG1-1 and DHG2-4 in Dahugang shoreline

3.3 等效剂量分布

沉积物光释光测年技术通常假定所测样品在沉积前释光信号晒退(或曝光)完全,否则如果采用各测片等效剂量的平均值来计算样品的等效剂量会造成年代结果的高估.因此必须检测样品是否曝光完全.通常利用同一样品小测片(如 2 mm)的等效剂量分布来判断沉积物沉积前是否晒退完全^[35].如果样品的 D_e 值的频率分布呈现对称明显并且较狭窄的高斯正态分布形态,则表明该样品的光释光信号在沉积前晒退良好;反之,则表示样品晒退不完全.大湖岗 DHG1 和 DHG2 两个剖面的 13 个样品各测片的等效剂量分布直方图可以看出(图 7),上述 13 个样品 D_e 值分布形态上大致成较窄的正态分布,同一样品各样片的 D_e 值分布集中度较高,各样品的算术平均值和中值非常接近(表 2),表明样品在沉积前光晒退较好,适合用于 OSL 测年,其结果应该是可靠的.

4 结果与讨论

本文测试了大湖岗 DHG1 和 DHG2 两个剖面共 13 个样品,其中 DHG1-5、DHG1-6 样品的有效测片为 20

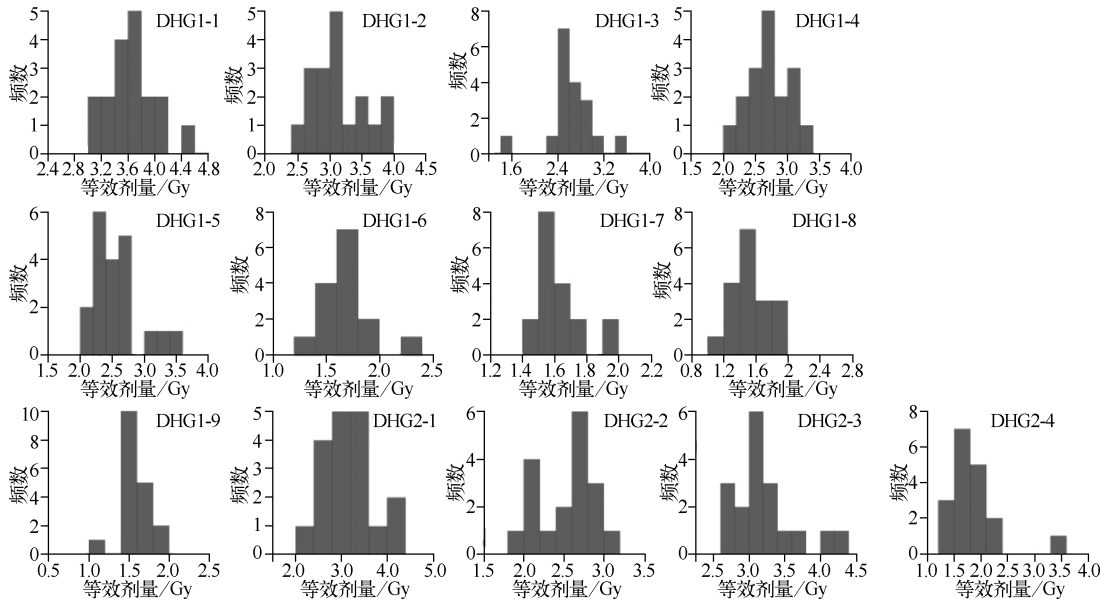


图 7 13 个样品等效剂量分布直方图

Fig. 7 The histogram of D_e distribution for all samples

个样片和 15 样片用来计算 D_e , 其余 11 个样品的有效测片均为 18 个样片. 为了更好地说明每个样品各样片之间非均质性以及完全晒退或部分晒退对计算 D_e 值的影响问题, 提高计算 OSL 年龄的准确度和精度, 本文采用了 3 种年代模型^[36-38], 即中值模型 (central age model, CAM)、最小值模型 (minimum age model, MAM) 和平均值模型 (Mean), 分别对每个样品的 D_e 值进行计算, 并对 CAM 模型的离散值作了统计, 见表 2. 需要特别说明, 本文在采用这 3 种年代模型计算 13 个样品等效剂量时, 已将在前文 3.1 节检验的循环比不符合要求的样片剔除. 结果显示 3 种计算结果非常接近, 进一步表明本文的样品在沉积前信号晒退完全. 最终, 本文采用平均值年代模型计算的等效剂量值 (D_e -Mean) 来计算 OSL 年龄.

按照 Prescott 等的方法根据采样点海拔、地理位置及深度情况计算宇宙射线对剂量率的贡献^[39], 结合中子活化分析法测试样品的 U、Th、K 元素含量及含水量, 按照 Aitken 的方法计算出样品的剂量率^[40], 通过等效剂量和剂量率计算出样品的 OSL 年龄 (图 2, 表 2).

DHG1 剖面 9 个样品的 OSL 年代在误差范围内基本随地层顺序变化, 即从最顶部 DHG1-9 的 0.51 ± 0.04 ka 到最底部 DHG1-1 的 1.24 ± 0.10 ka, 年代沿剖面自上而下的顺序依次递增, 这符合地层沉积的下老上新的规律 (图 2, 表 2). 大湖岗 DHG2 剖面自上而下的 4 个层位的样品 (DHG2-4、DHG2-3、DHG2-2、DHG2-1) OSL 年代的样品依次为: 0.60 ± 0.06 、 1.11 ± 0.10 、 0.81 ± 0.07 、 1.14 ± 0.11 ka, 样品年龄也总体呈沿剖面自上而下逐渐变老的趋势. 2 个剖面的所有 OSL 年代和地层顺序变化的这种关系, 也说明了 OSL 年代的可靠性; 另外选自同一道岸堤不同点位的 2 个剖面的 OSL 年代结果在误差范围内基本一致, 都表明了大湖岗可能在 $1.24-0.50$ ka 之间形成, 2 个剖面年代结果的相互验证让我们对 OSL 测年结果更有信心.

在 DHG1-3、DHG1-2 两个 OSL 样品同层位处各采集到 1 个炭屑样品, 测试这 2 个炭屑样品的 ^{14}C 年代 (图 2, 表 3), 上部的炭屑样品 ^{14}C 校正年代为 760—920 cal a BP, 下部的炭屑样品 ^{14}C 校正年代为 925—960 cal a BP, 这分别与 DHG1-3、DHG1-2 测得的 OSL 年代结果在误差范围内一致, 也证明 OSL 测年结果可靠, 综合对比 2 个剖面的 OSL 年代数据以及部分同层位的 ^{14}C 年代结果, 本文认为兴凯湖大湖岗很可能形成于距今 $1.24-0.50$ ka 之间, 而朱芸等研究认为大湖岗形成于约 3 ka 至今, 这尽管与前人研究认为的大湖岗形成年代有较大差别^[9-11, 23], 但本文采用石英小片技术, 基于一系列实验检测, 严格甄选实验预热条件, 检验判别样品的沉积前晒退情况, 剔除“坏片”后比较 3 种年代模型计算年代并对比部分层位采集到的炭屑样品

¹⁴C年代,认为前人研究基础上作进一步研究得出的 OSL 年代结果可能更接近兴凯湖大湖岗的真实形成年代,这对于研究兴凯湖的岸线变迁、重建湖泊演化有重要意义.

表 2 兴凯湖大湖岗所有样品 OSL 测年结果
Tab. 2 OSL dating results of the Dahugang shoreline in Lake Xingkai

样品号	深度/ m	K/ %	Th/ ($\times 10^{-6}$)	U/ ($\times 10^{-6}$)	含水量/ %	剂量率/ (Gy/ka)	等效剂量/Gy				OSL 年龄/ ka
							D _c -CAM ¹⁾		D _c -Mean ²⁾	D _c -MAM ³⁾	
							剂量值	离散值/%			
DHG1-9	1.5	2.95±0.090	2.06±0.12	0.389±0.101	5.26±10	3.072±0.238	1.57±0.04	8.69±0.52	1.56±0.06	1.42±0.06	0.51±0.04
DHG1-8	2.5	2.97±0.089	1.66±0.111	0.595±0.118	5.27±10	3.122±0.241	1.54±0.05	13.7±0.98	1.53±0.07	1.28±0.08	0.50±0.04
DHG1-7	3.5	3.05±0.088	1.88±0.129	0.333±0.090	5.24±10	3.168±0.242	1.64±0.03	7.41±0.40	1.64±0.05	1.50±0.03	0.52±0.04
DHG1-6	4.5	2.79±0.086	2.05±0.135	0.54±0.123	8.28±10	2.841±0.224	1.67±0.05	11.64±0.80	1.40±0.05	1.37±0.07	0.60±0.05
DHG1-5	5.0	2.80±0.089	1.60±0.118	0.498±0.115	6.07±10	2.886±0.234	2.53±0.07	13.16±0.79	2.55±0.07	2.13±0.10	0.90±0.08
DHG1-4	6.0	2.72±0.081	1.61±0.106	0.472±0.119	4.47±10	2.875±0.232	2.80±0.12	18.72±1.39	2.85±0.08	2.24±0.08	1.00±0.10
DHG1-3	7.0	2.86±0.088	1.92±0.140	0.718±0.142	5.44±10	3.046±0.239	2.63±0.11	16.92±1.19	2.66±0.07	2.27±0.16	0.88±0.08
DHG1-2	8.0	2.77±0.085	1.89±0.122	0.434±0.115	6.37±10	2.901±0.229	3.13±0.09	12.12±0.73	3.15±0.06	2.53±0.09	1.10±0.09
DHG1-1	9.0	2.92±0.084	1.79±0.071	0.544±0.132	8.99±10	2.974±0.225	3.68±0.07	8.67±0.47	3.65±0.09	3.26±0.13	1.24±0.10
DHG2-4	3.0	2.96±0.088	1.69±0.114	0.543±0.129	4.39±10	3.096±0.244	1.81±0.10	22.53±1.88	1.85±0.08	1.29±0.08	0.60±0.06
DHG2-3	5.0	2.70±0.086	1.78±0.133	0.598±0.156	2.49±10	2.931±0.244	2.63±0.11	16.92±1.19	3.21±0.10	3.08±0.11	1.11±0.10
DHG2-2	7.0	2.95±0.085	1.72±0.120	0.577±0.115	4.10±10	3.121±0.245	2.51±0.08	13.15±0.84	2.52±0.07	1.98±0.09	0.81±0.07
DHG2-1	9.0	2.65±0.079	1.89±0.113	0.43±0.116	4.71±10	2.801±0.228	3.12±0.13	17.02±1.21	3.15±0.09	2.42±0.12	1.14±0.11

1) 中值模型计算的等效剂量;2) 平均值模型计算的等效剂量;3) 最小值模型计算的等效剂量.

表 3 大湖岗 DHG-1 剖面 2 个炭屑样品 ¹⁴C 测年结果
Tab. 3 ¹⁴C dating results of two charcoals in DHG-1 profile of Dahugang shoreline

样品号	深度/m	样品类型	¹⁴ C 校正年代/cal a BP	OSL 年代/ka
DHG1- ¹⁴ C-2	7.5	炭屑	760—920	0.88±0.08
DHG1- ¹⁴ C-1	8.0	炭屑	925—960	1.10±0.09

5 结论

本文通过对兴凯湖湖岸堤大湖岗两个剖面 DHG1、DHG2 共采集的 13 个样品的 OSL 年代测试,认为测试前进行预热坪实验和剂量恢复实验检验得到的样品 OSL 测试预热条件是合适的. 所有测试样品的等效剂量分布形态分析,认为测试样品在沉积前日晒退较好,适宜 OSL 测年. 采自部分同层位的炭屑的 ¹⁴C 年代结果证实了兴凯湖大湖岗岸堤沉积物 OSL 年代的可靠性. 综合大湖岗两个剖面样品的粗颗粒石英矿物 OSL 年代测定,认为兴凯湖大湖岗可能形成于距今约 1.24—0.50 ka 前.

致谢:感谢常直杨博士在作图中给予的帮助.

6 参考文献

[1] 王苏民, 冯 敏. 内蒙古岱海湖泊环境演化与东南季风强弱的关系. 中国科学: B 辑: 化学, 1991, 7: 759-768.
[2] 李容全, 郑良美, 朱国荣. 内蒙古高原湖泊与环境变迁. 北京: 北京师范大学出版社, 1990: 219.
[3] 王乃昂, 李卓仑, 程弘毅等. 阿拉善高原晚第四纪高湖面与大湖期的再探讨. 科学通报, 2011, 56(17): 1367-1377.
[4] Zhang HC, Peng JL, Ma YZ *et al.* Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1): 45-48.
[5] 张虎才, 马玉贞, 彭金兰等. 距今 42—18 ka 腾格里沙漠古湖泊及古环境. 科学通报, 2002, 47(24): 1847-1857.

- [6] Thomas DSG, Bailey R, Shaw PA *et al.* Late Quaternary highstands at Lake Chilwa, Malawi: Frequency, timing and possible forcing mechanisms in the last 44 ka. *Quaternary Science Reviews*, 2009, **28**(5): 526-539.
- [7] 陈发虎, 范育新, 春 喜等. 晚第四纪“吉兰泰—河套”古大湖的初步研究. 科学通报, 2008, **53**(10): 1207-1219.
- [8] Williams DF, Kuzmin MI, Prokopenko AA *et al.* The Lake Baikal drilling project in the context of a global lake drilling initiative. *Quaternary International*, 2001, **80**: 3-18.
- [9] 裘善文, 万恩璞, 李风华等. 兴凯湖北部平原的发展与湿地的形成. 湿地科学, 2007, **5**(2): 153-158.
- [10] 裘善文, 万恩璞, 汪佩芳. 兴凯湖湖岸线的变迁及松阿察河古河源的发现. 科学通报, 1988, **12**: 937-940.
- [11] 胡君生. 兴凯湖湖岗及其成因. 黑龙江地质, 2001, **12**(4): 89-95.
- [12] 张家富, 莫多闻, 夏正楷等. 沉积物的光释光测年和对沉积过程的指示意义. 第四纪研究, 2009, **29**(1): 23-33.
- [13] Zhao H, Lu YC, Wang CM *et al.* ReOSL dating of aeolian and fluvial sediments from Nihewan Basin, northern China and its environmental application. *Quaternary Geochronology*, 2010, **5**: 159-163.
- [14] Ou XJ, Xu LB, Lai ZP *et al.* Potential of quartz OSL dating on moraine deposits from eastern Tibetan Plateau using SAR protocol. *Quaternary Geochronology*, 2010, **5**: 257-262.
- [15] Yang LH, Wang T, Zhou J *et al.* OSL chronology and possible forcing mechanisms of dune evolution in the Horqin dune-field in northern China since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Research*, 2012, **78**(2): 185-196.
- [16] Long H, Lai ZP, Fuchs M *et al.* Palaeodunes intercalated in loess strata from the western Chinese Loess Plateau: Timing and palaeoclimatic implications. *Quaternary International*, 2012, **263**: 37-45.
- [17] Demuro M, Froese DG, Arnold LJ *et al.* Single-grain OSL dating of glaciofluvial quartz constrains Reid glaciation in NW Canada to MIS 6. *Quaternary Research*, 2012, **77**(2): 305-316.
- [18] Lü TY, Sun JM. Luminescence sensitivities of quartz grains from eolian deposits in northern China and their implications for provenance. *Quaternary Research*, 2011, **76**(2): 181-189.
- [19] Chapot MS, Sohbati R, Murray AS *et al.* Constraining the age of rock art by dating a rockfall event using single-grain and surface dating luminescence techniques. *Quaternary Geochronology*, 2012, **12**: 18-25.
- [20] 王恒松, 黄春长, 周亚利等. 关中西部千河流域全新世古洪水事件光释光测年研究. 中国科学: 地球科学, 2012, **42**(3): 390-401.
- [21] Qiang MR, Chen FH, Song L *et al.* Late Quaternary aeolian activity in Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Quaternary Research*, 2013, **79**(3): 403-412.
- [22] Long H, Lai ZP, Wang NA *et al.* Holocene climate variations from Zhuyeze terminal lake records in East Asian monsoon margin in arid northern China. *Quaternary Research*, 2010, **74**(1): 46-56.
- [23] 朱 芸, 沈 吉, 雷国良等. 湖岗光释光测年揭示的近 200 ka 兴凯湖湖泊环境演化. 中国科学: 地球科学, 2011, **56**(24): 2017-2025.
- [24] Long H, Lai ZP, Wang NA *et al.* A combined luminescence and radiocarbon dating study of Holocene lacustrine sediments from arid northern China. *Quaternary Geochronology*, 2011, **6**(1): 1-9.
- [25] Long H, Lai ZP, Peter F *et al.* Holocene moist period recorded by the chronostratigraphy of a lake sedimentary sequence from Lake Tangra Yumco on the south Tibetan Plateau. *Quaternary Geochronology*, 2012, **10**: 136-142.
- [26] 范育新, 赵 晖, 陈发虎等. 博斯腾湖湖泊沉积物光释光年代测量. 第四纪研究, 2007, **27**(4): 568-576.
- [27] Long H, Lai ZP, Fuchs M *et al.* Timing of Late Quaternary palaeolake evolution in Tengger Desert of northern China and its possible forcing mechanisms. *Global and Planetary Change*, 2012, **92**: 119-129.
- [28] Munroe JS, Klem CM, Bigl MF. A lacustrine sedimentary record of Holocene periglacial activity from the Uinta Mountains, Utah, USA. *Quaternary Research*, 2013, **79**: 101-109.
- [29] Shanahan TM, Peck JA, McKay N *et al.* Age models for long lacustrine sediment records using multiple dating approaches—an example from Lake Bosumtwi, Ghana. *Quaternary Geochronology*, 2013, **15**: 47-60.
- [30] Robert HM. Assessing the effectiveness of the double-SAR protocol in isolating a luminescence signal dominated by quartz. *Radiation Measurements*, 2007, **42**(10): 1627-1636.
- [31] Duller GAT. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements. *Radiation Measurements*, 2003, **37**(2): 161-165.
- [32] Murray AS, Wintle AG. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 2000, **32**(1): 57-73.

- [33] Murray AS, Wintle AG. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 2003, **37**(4): 377-381.
- [34] Wintle AG, Murray AS. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, 2006, **41**(4): 369-391.
- [35] Fuchs M, Wagner GA. Recognition of insufficient bleaching by small aliquots of quartz for reconstructing soil erosion in Greece. *Quaternary Science Reviews*, 2003, **22**(10): 1161-1167.
- [36] Arnold LJ, Roberts RG, Galbraith RF *et al.* A revised burial dose estimation procedure for optical dating of young and modern-age sediments. *Quaternary Geochronology*, 2009, **4**(4): 306-325.
- [37] Galbraith RF, Roberts RG. Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: An overview and some recommendations. *Quaternary Geochronology*, 2012, **11**: 1-27.
- [38] Jun P, Jun MP. Package "RadialPlotter". 2013.
- [39] Prescott J, Hutton J. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements*, 1994, **23**(2): 497-500.
- [40] Aitken MJ. An introduction to optical dating. Oxford: Oxford University Press, 1998: 279.