

毛乌素沙地东南缘全新世湖相地层石英和钾长石释光测年对比^{*}

冯玉静^{1,2}, 隆 浩², 黄银洲¹, 王洪娇¹, 王乃昂¹, 高 磊², 沈 吉²

(1: 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

(2: 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)

摘要: 采集来自毛乌素沙地东南缘巴图湾、大沟湾和三岔河等3处典型湖相地层出露点的3个样品, 分别提取石英和钾长石矿物组分, 采用小片技术(样品直径2 mm)进行释光年代测试, 并将两种矿物年代结果进行对比研究。应用单片再生剂量(SAR)流程测试了石英样品的等效剂量(预热温度选为260℃)。剂量恢复实验和光释光特性显示, SAR流程测试条件选择合适, 样品沉积前光释光信号晒退完全, 说明石英年代结果可靠。另外, 应用两步红外激发(激发温度分别为50℃和150℃)的单片再生剂量流程(post-infrared infrared-stimulated luminescence, 简写为pIRIR流程)测试钾长石样品的等效剂量, 剂量恢复实验和释光特性等各项检验均符合要求, 剩余剂量在-0.2~0.026 Gy之间, 可忽略不计。钾长石的pIRIR₁₅₀信号异常衰减速率为0.55~1.71(%/decade), 因造成的误差较小, 故无需对年代结果进行校正。3处湖相地层的石英年代分别为11.3±0.9、6.5±0.6、2.7±0.2 ka BP, 钾长石pIRIR₁₅₀年代分别为10.0±0.7、6.9±0.5、2.4±0.2 ka BP, 两者在误差范围内一致, 说明毛乌素沙地东南缘的全新世湖相沉积物适合用钾长石pIRIR₁₅₀流程进行释光测年。本研究为毛乌素沙地部分样品因石英信号较弱而无法测年问题提供了解决办法, 也为该区域全新世, 尤其是历史时期(近2000年)以来的环境变化研究提供了年代学支撑。

关键词: 毛乌素沙地; 湖相沉积; 石英; 钾长石; 释光测年; 全新世

Luminescence dating of Holocene lacustrine sediments from the southeastern Mu Us sandy land: Comparison of quartz OSL and K-feldspar pIRIR₁₅₀ ages

FENG Yujing^{1,2}, LONG Hao², HUANG Yinzhou¹, WANG Hongjiao¹, WANG Naiang¹, GAO Lei² & SHEN Ji²

(1: College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China)

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

Abstract: In the current study, we collected three samples from lacustrine sequences at southeast Mu Us sandy land. For each of these samples, both quartz and K-feldspar fractions were extracted for luminescence dating using small aliquot (2 mm) technique. The single aliquot regenerative-dose (SAR) protocol was applied to measure the equivalent dose (De) of quartz samples (at pre-heat temperature of 260℃). Dose recovery tests and luminescence characteristics of quartz suggest that the quartz SAR protocol is suitable and the samples were well bleached before deposition, and the resultant ages of quartz fraction are reliable. For K-feldspar fraction, a new post-IR IRSL protocol measured at 150℃ (pIRIR₁₅₀) was used to determine the De. Dose recovery tests and luminescence characteristics of K-feldspar meet the requirement well. A set of tests, such as residual test and fading test, was carried out. Residual doses of pIRIR₁₅₀ signal are between -0.2 and 0.026 Gy, which can be considered negligible for the Holocene sediments. The g-values of pIRIR₁₅₀ signal (0.55~1.71(%/decade)) are much lower, comparing with that of IRSL₅₀ signal, or even negligible. Thus, we propose that the use of pIRIR₁₅₀ signal is able to reduce anomalous fading to a negligible level. Subsequently, the K-feldspar pIRIR₁₅₀ ages are not corrected for anomalous fading. For the three samples, the quartz ages are 11.3±0.9, 6.5±0.6 and 2.7±0.2 ka BP, respectively, and the K-feldspar ages are 10.0±0.7, 6.9±0.5 and 2.4±0.2 ka BP, re-

* 国家自然科学基金项目(41101187, 41271002, 41430530)和教育部人文社科一般项目(10YJCZH053)联合资助。
2014-08-29 收稿; 2014-11-13 收修改稿。冯玉静(1988~), 女, 硕士研究生; E-mail: fyj.ybyq@163.com.

spectively. Both ages from the two methods agree with each other within the error ranges. Therefore, K-feldspar pIRIR₁₅₀ protocol can be applied for dating the Holocene lacustrine sediments from southeast Mu Us sandy land. Our research found a method to date the samples that their luminescence signal intensity of quartz is too low to be detected, and a geochronology to support for environmental changes in the Holocene, especially in the historical period (past 2000 years).

Keywords: Mu Us sandy land; lacustrine sediments; quartz; K-feldspar; luminescence dating; Holocene

毛乌素沙地东南缘因萨拉乌苏河深切而出露较完整的沉积地层,是环境变化研究的理想区域,一系列标准地层的建立^[1-3]更凸显了该区研究的重要性。同时,众多的人类活动遗址也为历史时期人地关系研究提供了良好的时空坐标^[4-7]。野外考察发现,毛乌素沙地东南缘近地表众多地点出露灰白色或灰绿色湖相地层,表明古湖泊在某一时期广泛分布。然而,该区域湖相地层年代学的研究不够完善,深入探讨近地表湖相地层的年代及古湖泊干涸原因的报道还很少见。Dong 等基于热释光和¹⁴C 测年数据,认为毛乌素沙地湖相沉积的年代为 9700—3000 a BP^[8];刘凯等的光释光测年数据显示,在约 40—30 ka 毛乌素沙地有古湖泊存在,并发现两层湖相沉积^[9];胡珂等根据¹⁴C 和光释光年代数据,认为 1000 a 前流经毛乌素沙地东南缘的萨拉乌苏河还没有下切,当时存在大面积的湖沼^[10];Liu 等通过光释光测年,认为毛乌素沙地高湖面形成的年代约为 12 ka^[11]。显然,众学者对湖相地层的发育时代看法不一,这与不同测年方法和测年物质的选择不无关系。要得到较为可靠的年代,需要找到适合研究区域的测年方法和测年物质。¹⁴C 测年方法在第四纪沉积物测年应用上已较为成熟,但在干旱区湖相沉积物中由于有机质的缺乏和“老碳效应”的影响,该方法受到了很大的限制^[12]。

释光测年技术直接测定沉积物的埋藏年代,已有大量研究成果证实该技术是应用于干旱区风成沉积和湖相沉积最有效的测年方法之一^[13-23]。释光测年所需物质是沉积物中含量丰富且易于提取的石英和钾长石矿物。石英光释光测年技术已相当成熟,在第四纪研究中得到广泛的应用^[19,24-28]。而相较于石英,钾长石释光信号存在异常衰减,易使测年结果偏年轻,从而阻碍了钾长石释光测年的应用^[29,30]。为解决该问题,新的技术手段应运而生。自 Thomsen 等发现高温红外激发(pIRIR)信号比传统的 50℃ 红外激发信号(IR₅₀)更稳定且衰减速率更小^[31]以来,钾长石 pIRIR 技术在国际上的应用成果日益增多。钾长石两步红外(post-IR IRSL,简写为 pIRIR)技术和多步红外(multi-elevated-temperature post-IR IRSL,简写为 MET-pIRIR)技术目前最新应用于钾长石释光测年,这两种方法均成功地获得了钾长石矿物内部稳定的释光信号,并且能够得到可靠的年代结果^[31-40]。例如,Buylaert 等检测了钾长石 pIRIR₂₉₀信号的稳定性,并得到了从中晚更新世到现代的 pIRIR₂₉₀年代^[41];Li 等运用多步高温红外技术(MET-pIRIR)测试了来自中国黄土高原的黄土样品,年龄长达 300 ka^[35]。

前人对毛乌素沙地环境演变的研究大多数是采用石英进行光释光测年,发表了大量的石英光释光年代^[11,18,42-43]。而我们在该地区采集的部分样品石英信号较弱甚至无法检测(图 3a),不适合石英测年,该情况在其它区域的样品中也有发现^[39]。因此,对于这些样品需要提取钾长石进行年代测试。钾长石信噪比要比石英高很多,这是年轻样品测试钾长石具有的优势。当前,国内释光测年技术应用研究虽多,但将钾长石 pIRIR 技术用于全新世样品测试的报道相对较少^[38-40]。Fu 等在 MET-pIRIR 技术^[33]基础上进行改进,将其由 5 步简化为 3 步,并应用于中国北方全新世风成沉积物的测年,结果不需要异常衰减的校正^[38]。Long 等将 pIRIR 技术应用于新疆巴彦布鲁克盆地全新世风成沉积物测年中,建立了可靠的年代框架^[39];最近,Long 等又将该技术应用于青藏高原南部全新世湖相沉积物测年中,进一步验证了 pIRIR 技术应用于全新世样品测年中的可靠性^[40]。此外,Madsen、Reimann 和 Mejdahl 等将 pIRIR₁₅₀技术应用到海岸沙丘全新世钾长石释光测年中,并用独立的年代对其进行检验^[32,37,53]。为此,在石英光释光信号较强的部分样品中选取了 3 个湖相层的样品,这 3 个样品分别采自 3 处不同的湖相地层出露点。本文以这 3 个湖相沉积物为例,旨在了解该区湖相沉积层的大致年代,更主要的是尝试将钾长石 pIRIR 这项新技术应用于毛乌素沙地的研究中,从而

① 国际惯例:¹⁴C 年代单位一般为 a BP 或 ka BP(已校正),光释光年代单位一般为 a 或 ka,均表示距今多少年,在千/万年尺度上,可以直接进行对比。

解决样品因石英信号较弱而无法测年的问题。在实验室中分别提取了石英和钾长石,对其进行释光年代测试,并将两种矿物年代结果进行对比,以检测在研究区域钾长石 pIRIR 测年的可靠性。

1 研究区与剖面选择

研究区位于毛乌素沙地的东南缘,萨拉乌苏河由此流过。该区域南面和东南面是黄土高原,北面和西北面是沙地,处于沙地—黄土过渡带(图 1)。该区是季风的西北边缘,年均温度 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$,年均降水量由东南向西北逐渐减少,由约 400 mm 降至约 300 mm,70% 以上的降水集中在每年的 7—9 月^[45-46]。在此不连续分布着固定、半固定沙丘,局部也有流沙分布。生态环境极其脆弱,对季风变化十分敏感,加之大量的人类活动遗址在此发现,因此该区成为研究地质时期环境变化和历史时期人类活动的理想区域。萨拉乌苏河形成了深达 70 m 的深切河谷,广泛分布的连续的湖相地层也随之大面积出露。

湖相层厚 2~3 m 不等,上覆厚度不均匀的现代沙丘,红柳(*Tamarix ramosissima*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum* BoBr)等沙生植物居多,另外还分布有蒿属(*Artemisia*)、芨芨草属(*Achnatherum*)、拂子茅属(*Calamagrostis*)等草甸植被和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等木本植物。当地农民推沙造地,导致湖相地层在多处均有出露。湖相层下部为粗砂,有红色锈斑、斜层理等河流痕迹,该层粗砂为当地居民理想的建材。本文选择的 3 个剖面分别位于巴图湾、大沟湾和三岔河附近(图 1)。

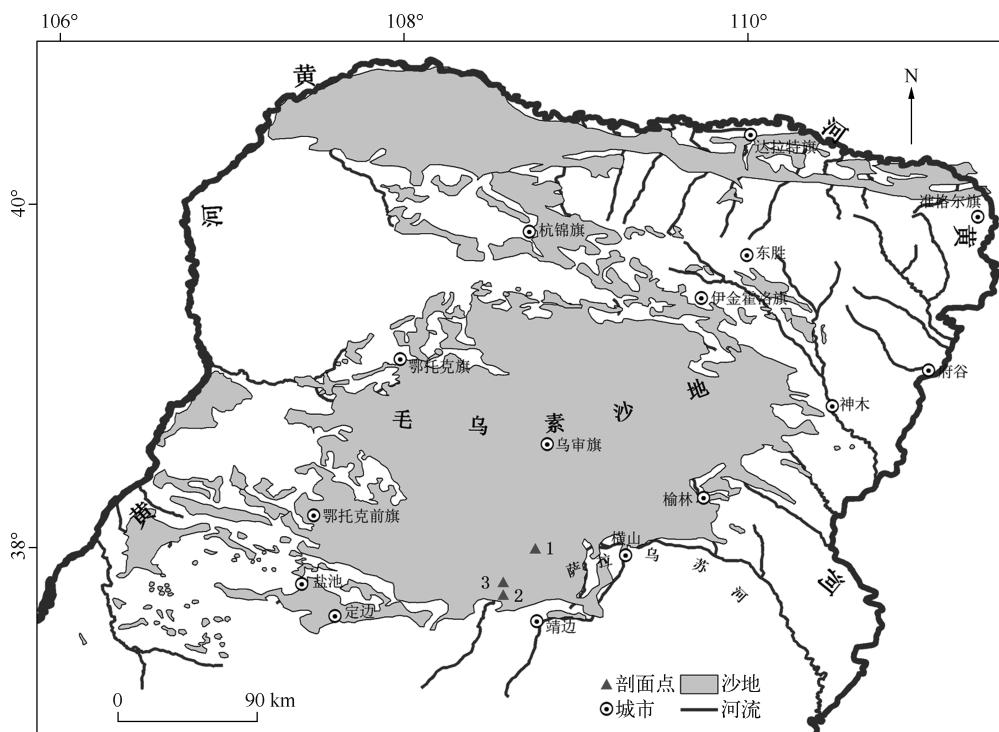


图 1 研究区及剖面位置(1 代表巴图湾剖面;2 代表大沟湾剖面;3 代表三岔河剖面)

Fig. 1 Map showing the Mu US sandy land and sampling sites: Batuwan (1); Dagouwan (2); Sanchahe (3)

巴图湾剖面:位于巴图湾附近(图 2a),萨拉乌苏河左岸($37^{\circ}59'\text{N}, 108^{\circ}45'\text{E}$),剖面厚 200 cm,自下而上岩性变化为:200~115 cm,灰绿色湖相沉积,未见底,其中 195~190 cm 有大量灰白色植物根系;115~20 cm,风成沙,其中 115~110 cm 有红色锈斑;20~0 cm,现代沙丘,有大量新鲜植物根系。在湖相层最上部(剖面 125 cm 处)采集释光样品 NL-420(NL 是中国科学院南京地理与湖泊研究所光释光测年实验室代号,下同)。

大沟湾剖面:位于大沟湾附近,萨拉乌苏河右岸($37^{\circ}43'\text{N}, 108^{\circ}34'\text{E}$),剖面厚约 100 cm,自下而上岩性

变化为:100~55 cm, 灰白色湖相沉积, 未见底;55~0 cm, 浅黄色沙。在湖相层最上部(剖面 65 cm 处)采集释光样品 NL-429。

三岔河剖面:位于三岔河岸边, 萨拉乌苏河左岸($37^{\circ}47'N, 108^{\circ}34'E$), 剖面厚约 170 cm, 自下而上岩性变化为:170~135 cm, 灰绿色湖相沉积, 未见底;135~60 cm, 风成沙;60~35 cm, 灰褐色古土壤;35~0 cm, 现代沙丘。在湖相层最上部(剖面 145 cm)采集释光样品 NL-432。剖面地层示意图及采样位置如图 2b 所示。

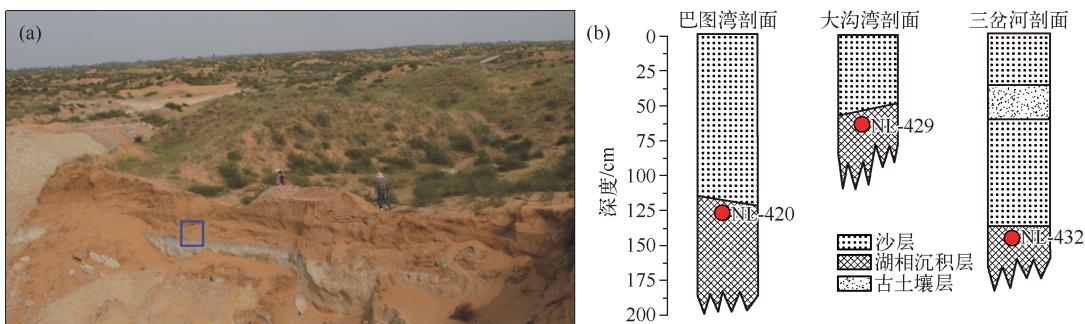


图 2 巴图湾剖面周边环境(蓝色方框指示采样点位置)(a);
巴图湾、大沟湾、三岔河剖面地层划分和采样位置(b)

Fig. 2 Field photograph showing the vegetated dune landscapes (Batuwan site denoted by the blue square) (a);
Sampling locations and stratigraphy of Sections Batuwan, Dagouwan and Sanchahe (b)

2 释光测年方法

2.1 样品前处理与测试仪器

整个前处理过程在有微弱红光的暗室里进行。首先, 取出钢管两端的样品, 烘干, 取 5 g 左右研磨至粒径小于 20 μm , 用于剂量率测试。第二, 采用湿筛法, 提取钢管中间部分样品中 90~200 μm 的粗颗粒成分, 先后加入 30% 双氧水和 10% 稀盐酸, 去除其中的有机质和碳酸盐, 烘干后得到混合矿物。第三, 分别用密度为 2.70 g/cm^3 和 2.62 g/cm^3 的重液去除样品中的重矿物和长石矿物, 得到石英矿物;然后用氢氟酸对石英刻蚀 60 min, 去除可能残留的长石, 并溶解石英表面 α -射线影响的部分;接着加入 30% 盐酸反应 30 min, 去除氟化物;石英测试前进行红外检测, 以确保无长石污染。第四, 提取钾长石矿物, 将第二步得到的混合矿物用密度为 2.58 g/cm^3 的重液浮选, 得到小于 2.58 g/cm^3 的钾长石。考虑到氢氟酸刻蚀会在钾长石颗粒表面留下较深的点蚀坑, 并且刻蚀可能不均—^[39,47], 所以重液分选的钾长石不采取氢氟酸刻蚀。最后, 石英和钾长石样品都制备小片(样品直径 2 mm), 等待上机测试。

等效剂量(equivalent dose, D_e)测试采用的仪器为 Risø TL/OSL DA-20 全自动化释光仪, 该仪器配有⁹⁰Sr/⁹⁰Y 放射源。石英样品测试采用波长为 $470 \pm 30 \text{ nm}$ 的蓝光作为激发光源, 波长为 830 nm 的激发光源进行红外检测, 光电倍增管前放置一个 7.5 mm 的 Hoya U-340 滤光片用来检测石英信号。钾长石样品测试采用波长为 870 nm 的红外作为激发光源, 在 320~450 nm 的蓝光谱区放置 Schott BG-3 和 BG-39 滤光片组合用来检测钾长石信号(IRSL)。

2.2 D_e 测试流程

石英 D_e 测试采用单片再生剂量(single aliquot regenerative dose, SAR)法^[48-49], 钾长石 D_e 测试采用两步红外激发程序, 即在 50°C 红外激发(IR_{50})之后加一步 150°C 红外激发(pIRIR_{150})^[37,39-40]。具体流程见表 1。与 Murray 等^[49]、Buylaert 等^[41]和 Li 等^[33]所用测试程序不同的是我们在实验剂量测试结束后没有做高温 IR 晒退, 因为经实验表明高温 IR 晒退容易对剂量恢复实验产生影响, 所以表 1 的石英和钾长石测试程序中没有加入该步操作。

2.3 剂量率测试

运用中子活化分析法(NAA)测定样品中U、Th、K等放射性元素含量,考虑到地质时期沉积物含水量的变化性,年代计算时样品的含水量估计为 $10\% \pm 10\%$,宇宙射线的贡献看作样品的埋藏深度、海拔和纬度的函数^[50]。根据Aitken提出的转换因子^[51],将上述测得的放射性元素含量和含水量转换成石英样品的年剂量率。钾长石样品的年剂量率由外部剂量率和内部剂量率两部分组成。根据Guérin等和Mejdahl提出的转换函数^[52-53],计算钾长石样品的外部 β -和 γ -剂量率。另外,还要考虑钾长石颗粒的外部 α -剂量率和内部剂量率。计算钾长石外部 α -剂量率时,根据Balescu等的研究将 α -value取作 0.15 ± 0.05 ^[54],同时将 α 穿透距离取作0.25 mm^[51]。计算钾长石样品内部 β -剂量率时,将内部K含量取作 $12.5\% \pm 0.5\%$ ^[55],Rb含量取作400 $\mu\text{g/g}$ ^[56]。最后,根据Guérin等提出的标准^[52],计算钾长石样品的总剂量率。

表1 石英SAR和钾长石pIRIR₁₅₀SAR测试流程

Tab. 1 SAR protocols for D_e determination of quartz and K-feldspar pIRIR₁₅₀

步骤	石英		钾长石	
	测试环节	观测值	测试环节	观测值
1	附加再生剂量 R_x	—	附加再生剂量 R_x	—
2	预热(Preheat, 260°C, 10 s)	—	预热(Preheat, 180°C, 60 s)	—
3	蓝光激发(125°C, 40 s)	Lx	红外激发(50°C, 100 s)	Lx IRSL ₅₀
4	附加实验剂量 T_D	—	红外激发(150°C, 100 s)	Lx pIRIR ₁₅₀
5	预热(Cutheat, 160°C)	—	附加实验剂量 T_D	—
6	蓝光激发(125°C, 40 s)	Tx	预热(Cutheat, 180°C, 60 s)	—
7	重复1~6,6次	—	红外激发(50°C, 100 s)	Tx IRSL ₅₀
8	附加再生剂量 $R_6 = R_1$	—	红外激发(150°C, 100 s)	Tx pIRIR ₁₅₀
9	预热(Preheat, 260°C, 10 s)	—	重复1~8,6次	—
10	红外激发(室温, 100 s)	—	—	—
11	重复3~6,1次	—	—	—

3 研究结果

3.1 石英光释光测年

为检测石英 D_e 测试条件(Preheat, 260°C, 10 s; Cutheat, 160°C, 10 s)的适宜性,进行剂量恢复实验和释光性质的检测。

3.1.1 剂量恢复实验 根据Murray等提出的方法^[48-49],对3个样品做了剂量恢复实验(每个样品4个样片)。先用蓝光辐照样品,使其自然信号衰退完全。再分别给每个样品施加一个与其自然剂量相近的人工剂量,然后用相同的SAR流程对所有样片重新测试。本文统计了每个样品的剂量恢复比(measured/given),即测试剂量与人工剂量的比值,结果如图3b所示。可以看出,3个样品的剂量恢复比(4个样片的平均值)均在0.9~1.1之间,所有样片的平均值为 0.98 ± 0.025 ($n = 16$),表明石英 D_e 测试选择的实验条件是合适的。

3.1.2 释光信号衰减曲线和生长曲线 3个样品的释光信号均在1 s内衰减到本底值,表明样品信号以快组分为主,适合采用SAR流程进行石英 D_e 的测试^[57]。信号强度计算运用积分法,用衰减曲线前0.64 s的累积信号减去衰减曲线最后8 s的累积信号。图3c为样品NL-420的石英信号衰减曲线和生长曲线(插图)。

3.1.3 循环比 SAR程序中第5个再生剂量 R_5 等于 R_1 ,比较 R_5 与 R_1 分别对应的信号强度可以用来检验实验的感量校正情况。两者的比值即为循环比(recycling ratio, RR)。本文在标准石英SAR程序的基础上加了一项红外测试(IR checking)(表1),该步骤给定再生剂量 R_6 ($= R_5 = R_1$),以检测每个石英样片中有无长石的污染^[58]。这样可以得到两个循环比值,即为 R_5/R_1 (RR₁)和 R_6/R_1 (RR₂)。图4a为循环比RR₁的分布,RR₁大多分布在0.9~1.1之间,平均值为 1.037 ± 0.009 ($n = 78$),表明在所有测试循环结束后,重复测量同一个再生剂量可以得到相似的释光信号强度,说明实验感量校正效果较好。对于循环比值在0.9~1.1之外

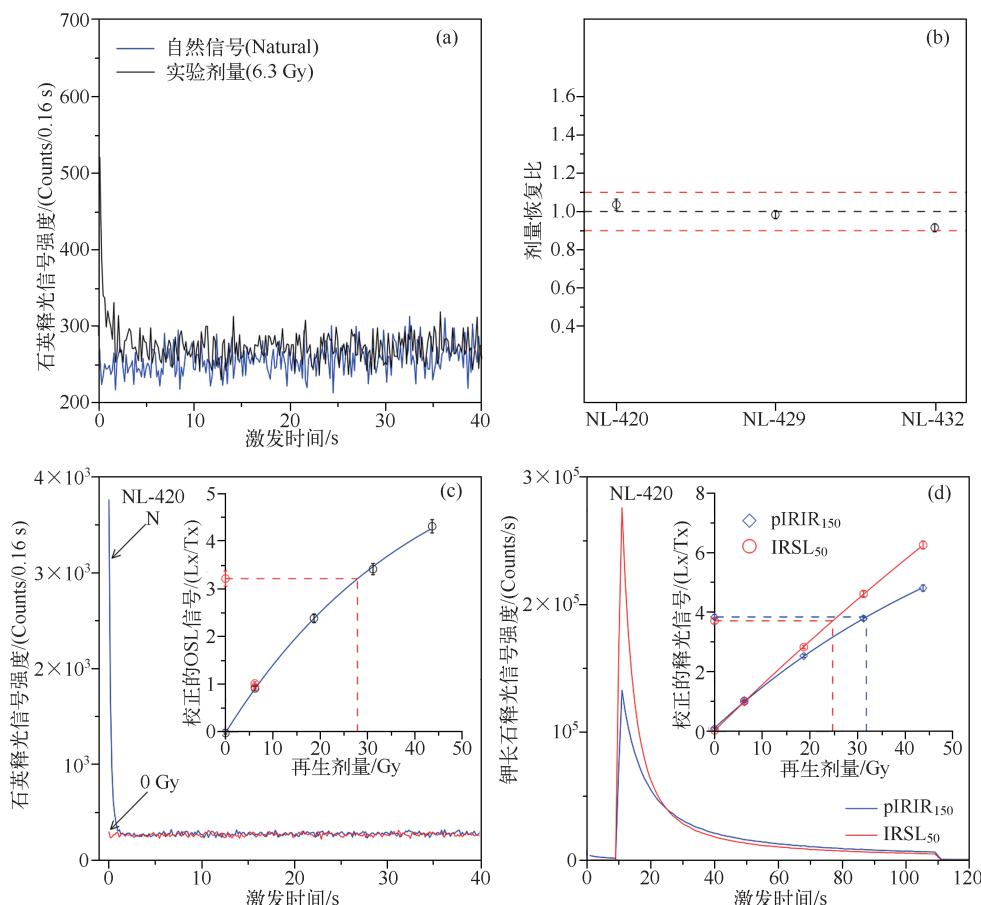


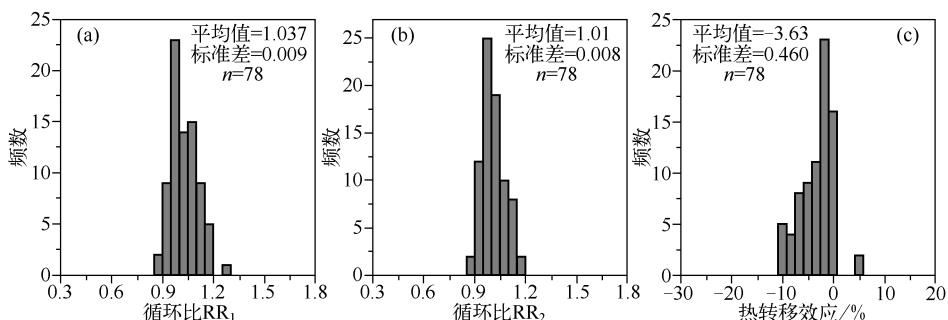
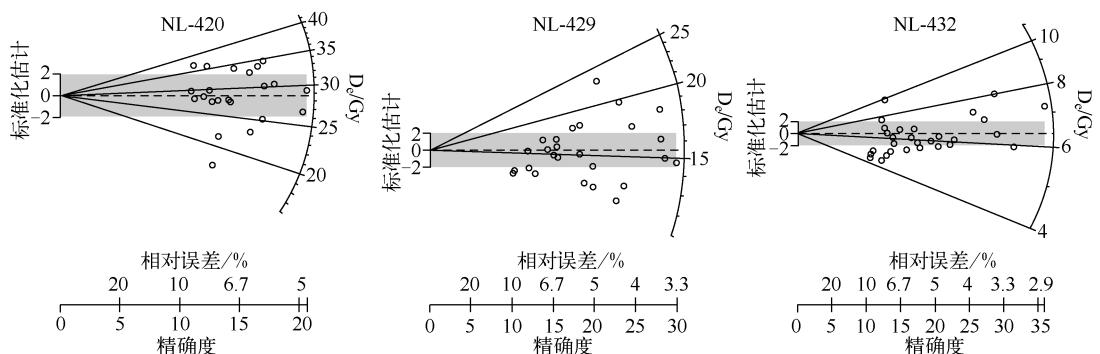
图3 石英信号较弱的一个样品的衰减曲线(a);3个石英样品的剂量恢复比(b);样品NL-420的石英衰减曲线与生长曲线(插图)(c);样品NL-420钾长石的pIRIR₁₅₀、IRSL₅₀两种信号的衰减曲线与生长曲线(插图)(d)

Fig. 3 An example showing very low quartz OSL signals (a); The measured to given ratios for quartz SAR protocol (b); Typical signal decay curves for quartz and a corresponding growth curve (inset) from a representative sample (NL-420) (c); Typical pIRIR₁₅₀ and IRSL₅₀ signal decay curves for K-feldspar and corresponding growth curves (inset) from a representative sample (NL-420) (d)

的样片,计算年代时将其剔除。图4b为循环比RR₂的分布,RR₂分布形态类似于RR₁,基本均在0.9~1.1之间,平均值为1.010±0.008($n=78$),说明石英颗粒无长石的污染。

3.1.4 热转移 实验过程中,对样品重复进行的预热和激发等操作有可能引起矿物内部晶格中电子的转移,从而影响释光信号的稳定^[57]。为了检验是否发生此类电子的转移,本文对热转移效应(recuperation)进行了统计(图4c)。热转移效应即0 Gy再生剂量对应的信号强度与样品天然信号强度的比值。一般认为热转移效应小于5%为正常范围^[57],3个样品的所有热转移效应基本为负值,表明实验过程中发生的热转移效应不明显或者可以忽略(图4c)。

3.1.5 等效剂量D_e分布 释光测年的一个基本条件是样品埋藏前其释光信号衰退完全或衰减到可以忽略的水平。如果信号晒退不完全,会使测得的D_e偏大,从而造成年代的高估。从图5中看出,每个样品的D_e分布均较集中,且在D_e增大方向没有出现长“尾巴”,各样品D_e的算术平均值和中值非常接近,表明样品在沉积前晒退较好,基本不存在残留的释光信号。因此,本文采用中值年代模型(CAM)^[59]对D_e进行计算分析,

图 4 3 个石英样品循环比 RR_1 (a)、 RR_2 (b) 和热转移效应 (c) 分布Fig. 4 Histograms summarizing RR_1 (a), RR_2 (b) and recuperation values (c) for quartz SAR protocol图 5 3 个石英样品的 D_e 分布Fig. 5 The D_e radio plots for quartz of the three samples

NL-420、NL-429 和 NL-432 的离散度分别为 15.1%、15.2% 和 15.7%，根据经验，离散度小于 20% 可以认为年代模型计算效果较好，石英年代分别为 11.3 ± 0.9 、 6.5 ± 0.6 和 2.7 ± 0.2 ka BP(表 2)。

由以上剂量恢复实验及各种释光性质检验得知，本文 3 个石英样品 D_e 测试条件 (Preheat, 260°C, 10 s; Cutheat, 160°C, 10 s) 合适，年代结果可靠。这些石英样品年龄为钾长石矿物测年提供了独立年代控制。

3.2 钾长石释光测年

与石英相比，钾长石释光测年技术能测更老^[60-62] 和更年轻^[37] 的样品。尤其是有些区域晚全新世样品的石英信号较弱，而其钾长石信号要强得多，故钾长石释光测年技术有很大的应用潜力^[63-64,39-40]。钾长石 pIRIR₁₅₀ 测试流程见表 1。

3.2.1 释光信号衰减曲线和生长曲线 从图 3c、d 可以看出，相同样品的钾长石 pIRIR₁₅₀ 和 IRSL₅₀ 信号强度要比石英高出几个数量级。IRSL₅₀ 的 D_e 比 pIRIR₁₅₀ 的 D_e 小，主要是由于 IRSL₅₀ 信号的异常衰减导致了自然剂量的低估。

3.2.2 循环比、热转移检测和剂量恢复实验、剩余剂量实验 类似于石英，本文也对钾长石释光测年进行了系列检测实验。3 个样品所有样片 pIRIR₁₅₀ 流程的循环比值均在 0.9~1.1 之间，平均值为 1.059 ± 0.003 ($n = 24$) (图 6a)，表明所选流程感量校正效果非常好。pIRIR₁₅₀ 热转移效应大多数小于 5%，平均值为 $4.03\% \pm 0.29\%$ ，在允许的范围以内，表明测试过程中热转移效应较小。

另外，对 3 个样品做了剂量恢复实验。首先，将样片（每个样品 3 个样片）放在太阳模拟器灯 (Höngle SOL2) 下暴晒 4 h，然后辐照一定的人工剂量（大小接近于其等效剂量），再用相同的 pIRIR₁₅₀ 流程进行测试。从图 6b 可以看出，pIRIR₁₅₀ 信号所有的剂量恢复比均在 0.9~1.1 之间，平均值为 1.0 ± 0.003 ($n = 9$)，非常接近于 1，说明 pIRIR₁₅₀ 流程能够准确地测试钾长石样品的 D_e 。

研究表明,钾长石释光信号在日光下晒退比石英慢得多^[31,41,65],同样,IRSL信号高温时的晒退比低温时慢得多^[37].因此,钾长石样品的pIRIR信号在沉积埋藏前不完全晒退可能是利用此信号进行测年的一个潜在的问题^[44].为了检验3个样品在日光下晒退是否良好,我们将样片放在模拟太阳器灯下暴晒4 h后测其剩余剂量(residual dose)(每个样品3个样片).如图6c所示,每个样品pIRIR₁₅₀信号的剩余剂量分布在-0.2~0.026 Gy之间(3个样片的平均值),相当于对所测样品造成小于20年的年龄偏差.考虑到与全新世样品的D_e相比,剩余剂量值几乎可以忽略不计,所以计算年代时没有将其从测得的D_e里减掉.

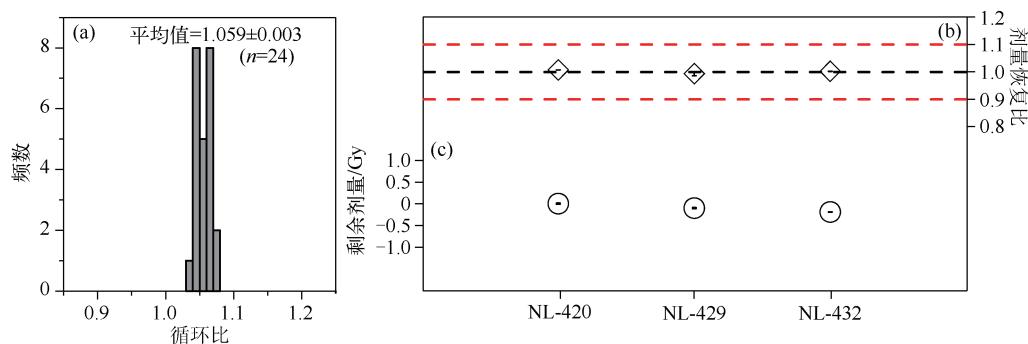


图6 3个钾长石样品的循环比(a)、剂量恢复比(b)和剩余剂量(c)分布

Fig. 6 Distributions of recycling ratios (a), measured to given ratios (b) and residual dose (c) for K-feldspar of the three samples

3.2.3 异常衰减 异常衰减速率通常用g-value表示,即每10倍标准化时间(normalization time,简写为t_c)内信号的衰减比^[66].一般来说,如用低温(如50℃)测试IRSL信号,多数钾长石样品中会存在异常衰减现象^[66].相反,高温测试pIRIR信号可将异常衰减速率降到很小,甚至达到可忽略的水平^[37,39-40].为验证此观点,采用Auclair等提出的方法^[67],对3个样品的IRSL₅₀和pIRIR₁₅₀信号的g-value进行测试(每个样品3个片子).对经过感量校正的IRSL₅₀和pIRIR₁₅₀两种信号与指数化的延长时间进行线性拟合,拟合线段的斜率即为该样品的g-value.两种信号拟合线段的斜率明显不同,即g-value差异很大(图7a).pIRIR₁₅₀的g-value在0.55~1.71(%/decade)之间,平均值为 1.05 ± 0.07 (%/decade)(n=18),IRSL₅₀的g-value在2.43~3.36(%/decade)之间,平均值为 2.85 ± 0.06 (%/decade)(n=18).显然,与IRSL₅₀相比,pIRIR₁₅₀信号的g-value要小得多(图7b).本文给出了每个样品IRSL₅₀和pIRIR₁₅₀的g-value平均值和误差(表2).

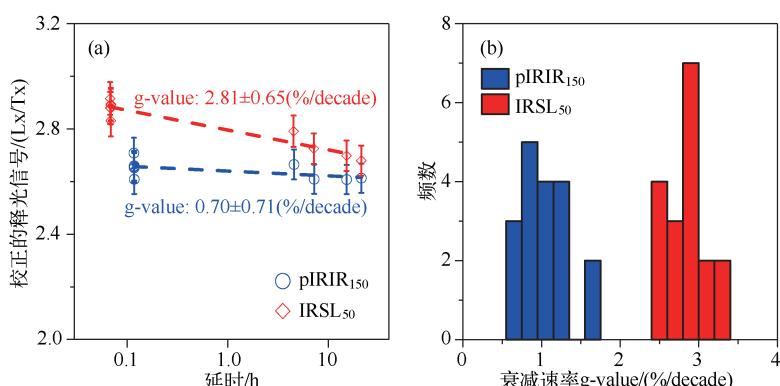


图7 样品NL-420一个代表性样片的pIRIR₁₅₀、IRSL₅₀衰减速率(a);3个样品所有样片pIRIR₁₅₀、IRSL₅₀衰减速率分布直方图(b)

Fig. 7 Fading rate (g-value) determination of pIRIR₁₅₀ and IRSL₅₀ signals from a representative aliquot from sample NL-420 (a); Histogram summarizing pIRIR₁₅₀ and IRSL₅₀ g-values for all discs (b)

$p\text{IRIR}_{150}$ 信号的 g-value 虽小,但也在一定程度上表现出了异常衰减的现象,然而本文暂不对 $p\text{IRIR}_{150}$ 年代结果进行异常衰减的校正。因为在实验室进行的衰减实验不能作为样品埋藏时期信号衰减的证据,尤其是对于很小的衰减速率,比如 $1.0 \sim 1.5$ (%/decade)。如此小的衰减速率很可能是在实验过程中产生的,例如感量校正不足^[39,41]。尽管钾长石测年结果已经能够成功地进行衰减速率的校正^[62,66],但也有研究指出,基于实验室衰减速率的校正并不能提供准确的年代结果^[44,60,68-69]。此外,即使是石英样品也可以测出约 $1.5\%/\text{decade}$ 的 g-value 值^[41],这与我们测得的 $p\text{IRIR}_{150}$ g-value 非常接近。因此认为所研究样品的 $p\text{IRIR}_{150}$ 信号是稳定的,该信号能明显降低异常衰减的速率,甚至使其降到可忽略的水平。所以,本文测试钾长石 D_e 所用的是未经衰减速率校正的 $p\text{IRIR}_{150}$ 信号。

3.2.4 等效剂量 D_e 分布 3 个样品的 D_e 分布均较集中,形态接近正态分布,且平均值接近于中值(图 8),由此可认为,样品在沉积埋藏前曝光充分,晒退完全。根据中值年代模型(CAM)^[59]计算出的 D_e 除以总的剂量率便得出各样品的年代,其中 NL-420、NL-429 和 NL-432 D_e 的离散度分别为 3.5% 、 4.9% 和 0.0% ,离散度非常小(表 2)。

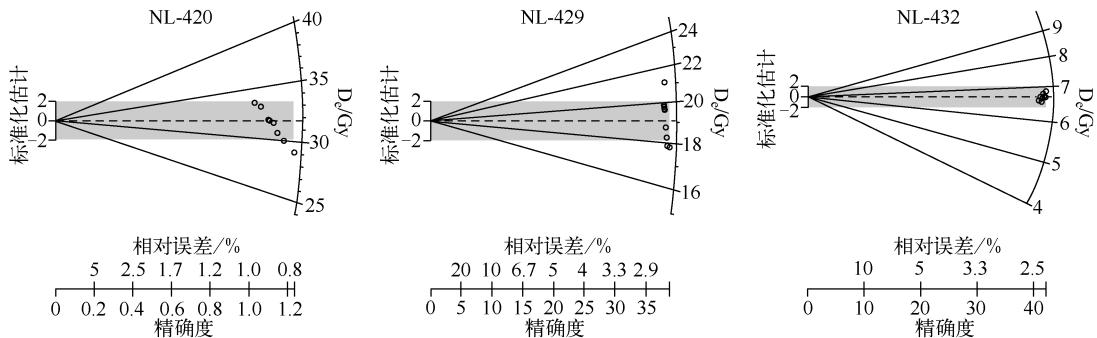


图 8 3 个样品钾长石 $p\text{IRIR}_{150}$ D_e 分布

Fig. 8 $p\text{IRIR}_{150}$ D_e radio plots of K-feldspar for the three samples

表 2 3 个样品的石英和钾长石释光年代数据

Tab. 2 Luminescence dating data of quartz and K-feldspar for the three samples

指标	样品实验室编号			
	NL-420	NL-429	NL-432	
深度/cm	135	70	130	
含水量/ $\pm 10\%$	10	10	10	
U/(mg/kg)	1.36 ± 0.07	1.47 ± 0.08	1.24 ± 0.07	
Th/(mg/kg)	6.60 ± 0.22	6.27 ± 0.21	4.50 ± 0.18	
K/%	1.84 ± 0.06	1.41 ± 0.05	1.68 ± 0.06	
石英	总剂量率/(Gy/ka)	2.6 ± 0.2	2.2 ± 0.2	2.3 ± 0.2
	D_e 均值/Gy	29.0 ± 1.0	14.3 ± 0.7	6.2 ± 0.2
	离散度(OD 值)/%	15.1	15.2	15.7
	年代/ka	11.3 ± 0.9	6.5 ± 0.6	2.7 ± 0.2
钾长石	IRSL ₅₀ 衰减速率/(%/decade)	2.84 ± 0.67	2.63 ± 0.67	3.09 ± 0.68
	IRSL ₁₅₀ 衰减速率/(%/decade)	0.99 ± 0.08	0.81 ± 0.07	1.37 ± 0.10
	内部剂量率/(Gy/ka)	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1
	总剂量率/(Gy/ka)	3.1 ± 0.2	2.8 ± 0.2	2.8 ± 0.2
	D_e 均值/(Gy/ka)	31.5 ± 0.5	19.1 ± 0.4	6.7 ± 0.0
	离散度(OD 值)/%	3.5	4.9	0.0
	$p\text{IRIR}_{150}$ 年代/ka BP	10.0 ± 0.7	6.9 ± 0.5	2.4 ± 0.2

将 IRSL₅₀ 和 pIRIR₁₅₀ 两种信号的 D_e 作图比较(图 9a), 3 个样品的 pIRIR₁₅₀ 的 D_e 均比 IRSL₅₀ 的 D_e 大, 且两者能很好地进行线性拟合, 所有点都分布在拟合线的周围, 并没有偏离较大的点, 这点可以排除钾长石 pIRIR₁₅₀ 信号晒退不充分的可能^[70]. NL-420、NL-429 和 NL-432 的钾长石 pIRIR₁₅₀ 年代分别为 10.0 ± 0.7 、 6.9 ± 0.5 和 2.4 ± 0.2 ka BP(表 2). 石英和钾长石两种矿物年代结果的对比非常接近于 1:1 线, 且两者在误差范围内一致(图 9b), 这可以证明上一节中钾长石 pIRIR₁₅₀ 信号异常衰减的影响不明显, 可以忽略. 石英与钾长石 D_e 分布集中, 钾长石 pIRIR₁₅₀ 的 D_e 均大于 IRSL₅₀ 的 D_e 且无偏离异常点, 钾长石 pIRIR₁₅₀ 年代与石英一致, 这 3 方面足以说明样品石英信号和钾长石 pIRIR₁₅₀ 信号晒退均较好, 年代结果不受残留信号的影响, 所以本文年代对比的方法合适, 继而样品钾长石 pIRIR₁₅₀ 年代可靠.

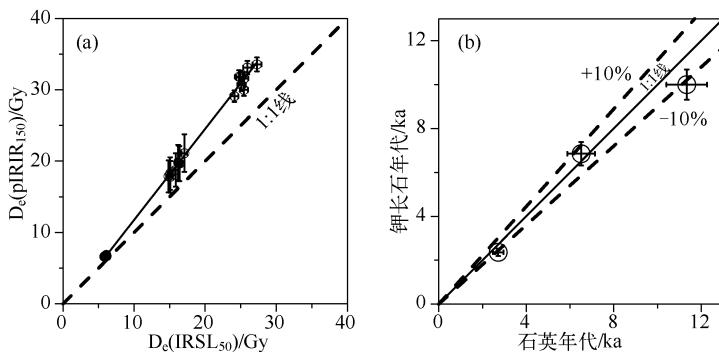


图 9 3 个样品所有样片 pIRIR₁₅₀ 和 IRSL₅₀ 两种信号 D_e 对比(a);
钾长石与石英年代对比(b)

Fig. 9 Comparisons of D_e derived from pIRIR₁₅₀ and IRSL₅₀ signals of K-feldspar (a);
Comparisons of ages derived from quartz SAR and K-feldspar pIRIR₁₅₀ (b)

4 讨论与结论

本文采用 pIRIR₁₅₀ 技术对钾长石进行了释光测年. 钾长石剂量恢复比在 0.9 ~ 1.1 之间且接近 1.0, pIRIR₁₅₀ 信号很强、循环比均在 0.9 ~ 1.1 之间、热转移效应多小于 5%、剩余剂量很小可忽略、衰减速率(g-value)均值为 1.05 ± 0.07 (%/decade) 很小无需校正等 6 个方面均表现为符合要求, 说明 pIRIR₁₅₀ 流程测试条件选择合适. 为了得到独立可靠的年代以验证钾长石 pIRIR₁₅₀ 年代的可靠性, 我们同时提取了石英矿物进行光释光测年. 剂量恢复实验和纯度检测、循环比、热转移效应、等效剂量分布等光释光特性显示, SAR 流程选择合适, 样品沉积前信号晒退完全, 说明石英年代结果可靠, 为对比研究提供了独立的年代控制. 经过两种矿物年代的对比, 发现两者基本一致, 使得钾长石 pIRIR₁₅₀ 测年在研究区域应用的可靠性得到了证明. 这为该区域部分样品因石英信号较弱而无法测年的问题提供了解决办法, 也为毛乌素沙地全新世, 尤其是历史时期(近 2000 年)以来的环境变化研究提供了年代学支撑.

样品 NL-420、NL-429 和 NL-432 的石英年代分别为 11.3 ± 0.9 、 6.5 ± 0.6 和 2.7 ± 0.2 ka BP, 钾长石 pIRIR₁₅₀ 年代分别为 10.0 ± 0.7 、 6.9 ± 0.5 和 2.4 ± 0.2 ka BP. 3 个年代分别处于早全新世、中全新世和晚全新世, 可以代表整个全新世的情况. 前人对毛乌素沙地东南缘地表湖相层年代的研究虽然不多, 但现有的年代结果大多集中于全新世期间. Dong 等认为湖相层的年代为 9700—3000 a BP^[8], 而 Liu 等的研究显示为 12—3 ka 该区域有湖相层发育^[11], 两者范围非常相近, 我们的年代结果也恰在此范围内. 本文 3 个年代虽然偏少, 但结合前人研究, 发现该区域的湖相层并没有一个确定的年代, 而是基本贯穿于整个全新世期间. 我们推测, 该区域在全新世期间断续有湖泊存在, 可能是由大小不一的湖泊组成的湖泊群, 在一些湖泊干涸的同时另一些湖泊也在发育. 但这些湖泊发育和干涸的原因尚有待研究, 也需要更多的年代数据支持上述观点.

致谢: 感谢兰州大学马斌同学在野外工作中给予的帮助, 特别感谢两位匿名审稿人提出的建设性修改意见.

5 参考文献

- [1] 董光荣, 李保生, 高尚玉等. 鄂尔多斯高原的第四纪古风成沙. 地理学报, 1983, **38**(4): 341-347.
- [2] 苏志珠, 董光荣. 萨拉乌苏组地层年代学研究. 地质力学学报, 1997, **3**(4): 90-96.
- [3] 李保生, 靳鹤龄, 吕海燕等. 150ka以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程. 中国科学:D辑:地球科学, 1998, **28**(1): 85-90.
- [4] 侯仁之. 从红柳河上的古城废墟看毛乌素沙漠的变迁. 文物, 1973, (1): 35-41.
- [5] 王乃昂, 何彤慧, 黄银洲等. 六胡州古城址的发现及其环境意义. 中国历史地理论丛, 2006, **21**(3): 36-46.
- [6] 黄银洲, 王乃昂, 何彤慧等. 毛乌素沙地历史沙漠化过程与人地关系. 地理科学, 2009, **29**(2): 206-211.
- [7] 黄银洲, 王乃昂, 何彤慧等. 明代边墙修筑时毛乌素沙地范围探讨. 干旱区研究, 2009, **26**(2): 261-266.
- [8] Dong G, Su Z, Jin H. New views on age of the Salawusu Formation of Late Pleistocene in northern China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(7): 646-650.
- [9] 刘凯, 赖忠平, 樊启顺等. 萨拉乌苏地区末次冰期酒坊台剖面光释光年代及其环境意义. 盐湖研究, 2010, **3**(18): 1-7.
- [10] 胡珂, 莫多闻, 王辉等. 萨拉乌苏河两岸宋(西夏)元前后的环境变化与人类活动. 北京大学学报:自然科学版, 2011, **47**(3): 466-474.
- [11] Liu K, Lai ZP. Chronology of Holocene sediments from the archaeological Salawusu site in the Mu Us Desert in China and its palaeoenvironmental implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, **45**: 247-255.
- [12] 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.
- [13] Stokes S, Thomas DSG, Washington R. Multiple episodes of aridity in southern Africa since the last interglacial period. *Nature*, 1997, **388**(6638): 154-158.
- [14] Goble RJ, Mason JA, Loope DB et al. Optical and radiocarbon ages of stacked paleosols and dune sands in the Nebraska Sand Hills, USA. *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23**(9): 1173-1182.
- [15] Forman SL, Marín L, Gomez J et al. Late Quaternary eolian sand depositional record for southwestern Kansas: landscape sensitivity to droughts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, **265**(1): 107-120.
- [16] Chase B. Evaluating the use of dune sediments as a proxy for palaeo-aridity: a southern African case study. *Earth-Science Reviews*, 2009, **93**(1): 31-45.
- [17] Lu H, Zhao C, Mason J et al. Holocene climatic changes revealed by aeolian deposits from the Qinghai Lake area (northeastern Qinghai-Tibetan Plateau) and possible forcing mechanisms. *The Holocene*, 2010, **21**(2): 297-304.
- [18] He Z, Zhou J, Lai ZP et al. Quartz OSL dating of sand dunes of Late Pleistocene in the Mu Us Desert in northern China. *Quaternary Geochronology*, 2010, **5**(2): 102-106.
- [19] 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.
- [20] 赵华, 卢演伟, 尹金辉. 科尔沁沙地全新世风沙沉积物的石英单测片蓝光释光测年和风沙活动年学. 核技术, 2005, **28**(5): 367-374.
- [21] 戈双文, 鹿化煜, 周亚利等. 晚第四纪科尔沁沙地干湿变化的黄土记录. 中国沙漠, 2006, **26**(6): 869-874.
- [22] 周亚利, 鹿化煜, Mason JA等. 浑善达克沙地的光释光年代序列与全新世气候变化. 中国科学:D辑:地球科学, 2008, **38**(4): 452-462.
- [23] 杨林海, 赖忠平, 周杰等. 光释光测年和孢粉分析揭示的晚冰期以来科尔沁沙地演化过程. 地理科学, 2011, **31**(6): 695-701.
- [24] Murray AS, Olley JM. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria*, 2002, **21**(1): 1-16.
- [25] Forman SL, Marin L, Pierson J et al. Aeolian sand depositional records from western Nebraska: landscape response to droughts in the past 1500 years. *The Holocene*, 2005, **15**(7): 973-981.
- [26] Mason JA, Lu H, Zhou Y et al. Dune mobility and aridity at the desert margin of northern China at a time of peak monsoon strength. *Geology*, 2009, **37**(10): 947-950.

- [27] Long H, Lai ZP, Frenzel P 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.
- [28] 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.
- [29] Wintle AG. Anomalous fading of thermo-luminescence in mineral samples. *Nature*, 1973, **245**(5421) : 143-144.
- [30] Huntley DJ, Lian OB. Some observations on tunnelling of trapped electrons in feldspars and their implications for optical dating. *Quaternary Science Reviews*, 2006, **25**(19) : 2503-2512.
- [31] Thomsen KJ, Murray AS, Jain M et al. Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts. *Radiation Measurements*, 2008, **43**(9) : 1474-1486.
- [32] Madsen AT, Buylaert JP, Murray AS. Luminescence dating of young coastal deposits from New Zealand using feldspar. *Geochronometria*, 2011, **38**(4) : 379-390.
- [33] Li B, Li SH. Luminescence dating of K-feldspar from sediments: a protocol without anomalous fading correction. *Quaternary Geochronology*, 2011, **6**(5) : 468-479.
- [34] Fu X, Li B, Li SH. Testing a multi-step post-IR IRSL dating method using polymineral fine grains from Chinese loess. *Quaternary Geochronology*, 2012, **10** : 8-15.
- [35] Li B, Li SH. Luminescence dating of Chinese loess beyond 130 ka using the non-fading signal from K-feldspar. *Quaternary Geochronology*, 2012, **10** : 24-31.
- [36] Murray AS, Thomsen KJ, Masuda N et al. Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals. *Radiation Measurements*, 2012, **47**(9) : 688-695.
- [37] Reimann T, Tsukamoto S. Dating the recent past (< 500 years) by post-IR IRSL feldspar—Examples from the North Sea and Baltic Sea coast. *Quaternary Geochronology*, 2012, **10** : 180-187.
- [38] Fu X, Li SH. A modified multi-elevated-temperature post-IR IRSL protocol for dating Holocene sediments using K-feldspar. *Quaternary Geochronology*, 2013, **17** : 44-54.
- [39] Long H, Shen J, Tsukamoto S et al. Dry early Holocene revealed by sand dune accumulation chronology in Bayanbulak Basin (Xinjiang, NW China). *The Holocene*, 2014, **24** : 614-626.
- [40] Long H, Haberzettl T, Tsukamoto S et al. Luminescence dating of lacustrine sediments from Tangra Yumco (southern Tibetan Plateau) using post-IR IRSL signals from polymineral grains. *Boreas*, 2015, **44** : 139-152.
- [41] Buylaert JP, Jain M, Murray AS et al. A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas*, 2012, **41**(3) : 435-451.
- [42] 周亚利, 鹿化煜, 张家富等. 高精度光释光测年揭示的晚第四纪毛乌素和浑善达克沙地沙丘的固定于活化过程. 中国沙漠, 2005, **25**(3) : 342-350.
- [43] Lu H, Mason JA, Stevens T et al. Response of surface processes to climatic change in the dune fields and Loess Plateau of North China during the late Quaternary. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, **36**(12) : 1590-1603.
- [44] Reimann T, Tsukamoto S, Naumann M et al. The potential of using K-rich feldspars for optical dating of young coastal sediments—A test case from Darsse Zingst peninsula (southern Baltic Sea coast). *Quaternary Geochronology*, 2011, **6**(2) : 207-222.
- [45] Wu YN, Pei H, Bai ML. Relationship between sandy desertification and climatic change, human activity in Inner Mongolia. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(3) : 292-297.
- [46] Shang KZ, Dong GR, Wang SG et al. Response of climatic change in north China deserted region to the warming of the Earth. *Journal of Desert Research*, 2001, **21**(4) : 387-392.
- [47] Duller GAT. Luminescence dating using feldspar: a test case from southern North Island, New Zealand. *Quaternary Science Reviews*, 1994, **13**(5) : 423-427.
- [48] Murray AS, Wintle AG. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 2000, **32**(1) : 57-73.
- [49] Murray AS, Wintle AG. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 2003, **37**(4) : 377-381.
- [50] Prescott JR, Hutton JT. 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.

- [51] Aitken MJ. An introduction to optical dating: the dating of Quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence. Oxford: Oxford University Press, 1998: 279.
- [52] Guérin G, Mercier N, Adamiec G. Dose-rate conversion factors: update. *Ancient TL*, 2011, **29**(1): 5-8.
- [53] Mejdholt V. Thermoluminescence dating: Beta-dose attenuation in quartz grains. *Archaeometry*, 1979, **21**(1): 61-72.
- [54] Balescu S, Lamothe M. Comparison of TL and IRSL age estimates of feldspar coarse grains from waterlain sediments. *Quaternary Science Reviews*, 1994, **13**(5): 437-444.
- [55] Huntley DJ, Baril MR. The K content of the K-feldspars being measured in optical dating or in thermoluminescence dating. *Ancient TL*, 1997, **15**(1): 11-13.
- [56] Huntley DJ, Hancock RGV. The Rb contents of the K-feldspar grains being measured in optical dating. *Ancient TL*, 2001, **19**(2): 43-46.
- [57] 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.
- [58] Duller GAT. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements. *Radiation Measurements*, 2003, **37**(2): 161-165.
- [59] Galbraith RF, Roberts RG, Laslett GM et al. Optical dating of single and multiple grains of quartz from jinmum rock shelter, northern Australia: part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry*, 1999, **41**(2): 339-364.
- [60] Wallinga J, Bos AJJ, Dorenbos P et al. A test case for anomalous fading correction in IRSL dating. *Quaternary Geochronology*, 2007, **2**(1): 216-221.
- [61] Buylaert JP, Murray AS, Huot S. Optical dating of an Eemian site in Northern Russia using K-feldspar. *Radiation Measurements*, 2008, **43**(2): 715-720.
- [62] Buylaert JP, Huot S, Murray AS et al. Infrared stimulated luminescence dating of an Eemian (MIS 5e) site in Denmark using K-feldspar. *Boreas*, 2011, **40**(1): 46-56.
- [63] Hülle D, Hilgers A, Radtke U et al. OSL dating of sediments from the Gobi desert, Southern Mongolia. *Quaternary Geochronology*, 2010, **5**(2): 107-113.
- [64] Sohbati R, Murray AS, Buylaert JP et al. Luminescence dating of Pleistocene alluvial sediments affected by the Alhama de Murcia fault (eastern Betics, Spain)—a comparison between OSL, IRSL and post-IR IRSL ages. *Boreas*, 2012, **41**(2): 250-262.
- [65] Godfrey-Smith DI, Huntley DJ, Chen WH. Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quaternary Science Reviews*, 1988, **7**(3): 373-380.
- [66] Huntley DJ, Lamothe M. Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2001, **38**(7): 1093-1106.
- [67] Auclair M, Lamothe M, Huot S. Measurement of anomalous fading for feldspar IRSL using SAR. *Radiation Measurements*, 2003, **37**(4): 487-492.
- [68] Li B, Li SH, Wintle AG et al. Isochron dating of sediments using luminescence of K-feldspar grains. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*(2003-2012), 2008, **113**(F2), DOI: 10.1029/2007JF000900.
- [69] Li GQ, Zhao H, Chen FH. Comparison of three K-feldspar luminescence dating methods for Holocene samples. *Geochronometria*, 2011, **38**(1): 14-22.
- [70] Buylaert JP, Murray AS, Gebhardt AC et al. Luminescence dating of the PASADO core 5022-1D from Laguna Potrok Aike (Argentina) using IRSL signals from feldspar. *Quaternary Science Reviews*, 2013, **71**: 70-80.