

河套盆地西山咀凸起区湖相地层的发现及其测年

范天来, 范育新, 魏国孝

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 在位于河套盆地内部的西山咀凸起区发现了典型的湖滩岩、湖蚀平台和一套较完整的湖相沉积地层。基于海拔高程的推断,地貌和地层沉积记录指示西山咀地区曾经存在过一个海拔达到1080 m上下的古湖面。完整的沉积地层反映西山咀凸起区经历了深湖相—滨湖相—冲洪积相—风成堆积的演变过程。光释光测年结果表明,在距今65 ka前后,“吉兰泰—河套”古大湖在西山咀地区曾经连通;但在距今约50~30 ka湖面再没有上涨。这一研究表明:在MIS 3阶段某一时期,该地区的古湖面发生衰退。随后,再没有发育高于“吉兰泰—河套”古大湖最高湖面的湖泊。

关键词: 湖相沉积;光释光年代;西山咀凸起区;河套盆地;第四纪

1 引言

黄河沿线沉积盆地的湖泊沉积研究,对于了解黄河演化和区域环境变化等具有重要意义^[1-6]。河套盆地处于黄河中上游地区,盆地内第四系沉积物总体上为一套巨厚的河湖相地层^[7-9],盆地边缘也出露有晚更新世晚期^[10-12]或早中新世地层^[13]。前人综合研究结果表明,河套地区可能存在晚更新世的“河套古湖”^[9, 14-16]。研究组的前期研究^[9, 16]提出,至少在距今50~60 ka之前,河套地区存在一个覆盖吉兰泰和河套盆地大部分地区的“吉兰泰—河套”古大湖。但是,河套盆地构造复杂,盆地内部的断裂将盆地分割为两个凸起区(即西山咀凸起和包头凸起)和三个拗陷区(包括呼和拗陷、白彦花拗陷和临河拗陷)^[17]。前人关于“吉兰泰—河套”古大湖的连通和形成的结论,尚缺乏来自河套盆地凸起区的完整的地貌学、沉积学以及年代学证据的支持。而位于河套盆地内部的西山咀凸起区,平均海拔较高,在地理位置上连接前套平原和后套平原,是决定“吉兰泰—河套”古大湖在整个盆地贯通与否的一个最关键地区。因此,本文研究西山咀凸起区的地貌学、沉积地层和沉积年代,旨在回答两个问题:(1)西山咀凸起区是否存在湖相沉积记录?(2)如果存在,湖相沉积什么时间结束的。

2 自然地理概况

河套盆地位于我国华北地区蒙古高原南部、鄂尔多斯高原北部,是一个受到周缘断裂带控制的新生代断陷盆地。西山咀凸起以东为前套平原,以西为后套平原。西山咀凸起区将包头凸起以西,磴口凸起以东的后套地区分隔为两个断陷盆地,即临河拗陷和白彦花拗陷(图1)。西山咀凸起区的西部和南部大部分地区已经被现代库布齐沙漠所覆盖。由于受到河套盆地周缘断裂带以及盆地内部隐伏断裂等构造控制,在地形地貌上,西山咀凸起区是整个河套盆地最狭窄地区。

收稿日期: 2011-03-07; 修订日期: 2011-03-22

基金项目: 973项目(2010CB950202); 国家自然科学基金项目(40972116) [Foundation: 973 Project, No.2010CB950202; National Natural Science Foundation of China, No.40972116]

作者简介: 范天来(1984-), 男, 博士研究生. E-mail: fantl2004@hotmail.com

通讯作者: 范育新(1975-), 男, 副教授, 主要从事干旱区湖泊和沙漠的光释光年代学研究. E-mail: yxfan@lzu.edu.cn

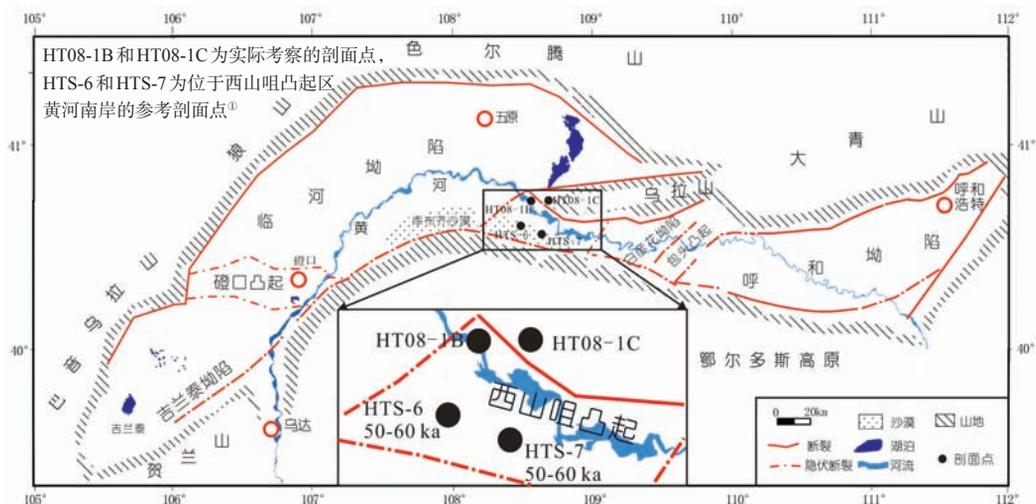


图1 河套地区地貌概况及研究剖面位置图

Fig. 1 The map of geomorphology and location of the profiles in Hetao Basin

3 地貌特征和地层性质

3.1 地貌特征

本文研究的湖相沉积剖面 HT08-1B (坐标为 $40^{\circ}43'04.9''N$, $108^{\circ}41'04.3''E$, 地表海拔 1063 m) 位于西山咀凸起区黄河北岸, 乌拉山前一条正断层的下降盘 (图 2), 剖面整体厚度约为 9.5 m, 下部的灰绿色粘土层不见底。在正断层的上升盘之上保存有典型的湖滩岩沉积, 并且在湖滩岩沉积的顶部剖面 HT08-1C 处堆积有山前洪积物。在地形地貌上, 断层上升盘、湖滩岩和山前洪积物总体上构成了一个湖蚀平台—堆积阶地。湖蚀平台—堆积阶地 (HT08-1C) 和湖相沉积剖面 (HT08-1B) 的位置关系见图 2。

西山咀凸起区的湖蚀平台 (图 3a) 以及湖滩岩 (图 3b) 沿乌拉山前断续延伸直至包头以东。剖面 HT08-1B 处的整个湖蚀平台台面宽 120 m, 后缘海拔高度为 1096 m, 前缘台面海拔高度为 1085 m, 平台前缘的湖滩岩厚度达到 14 m。台地前缘被一条正断层 (图 3a) 错断, 湖滩岩保留在上升盘一侧。在该地区发现的湖滩岩呈灰白至灰色, 外观上与粗砂细砾岩或砂砾岩类似, 几乎全部由花岗岩质砾石被细粒碳酸盐胶结而成块体, 砾石为圆状—次圆状, 分选较好, 胶结程度较高 (图 3b)。湖滩岩直接覆盖在变质岩构成的基岩之上, 并与下伏基岩呈不整合接触, 而且湖滩岩的厚度随着海拔的增加而不断变薄。

3.2 地层性质

西山咀剖面 (HT08-1B, 坐标 $40^{\circ}43'04.9''N$, $108^{\circ}41'04.3''E$, 地表海拔 1063 m) 位于乌拉

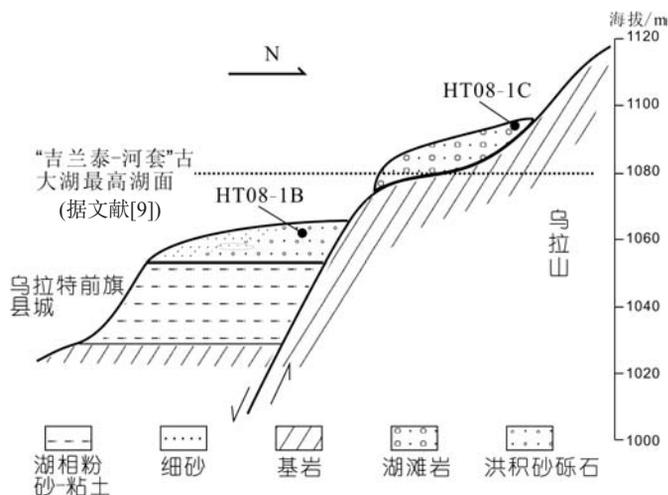


图2 西山咀凸起区湖相沉积剖面 HT08-1B 和浪蚀平台—堆积阶地 HT08-1C 的位置关系

Fig. 2 The geographic relationship between profiles HT08-1C and HT08-1B on the wave-cut platform in Xishanzui subuplift

① 范育新.“吉兰泰-河套”古湖演化(侧重光释光测年)研究. 兰州: 兰州大学博士论文, 2008.



图3 西山咀地区位于乌拉特前旗县城东部乌拉山山前的浪蚀平台—堆积阶地

Fig. 3 The wave cut-and-built platform located at the front of the Wula Mountain

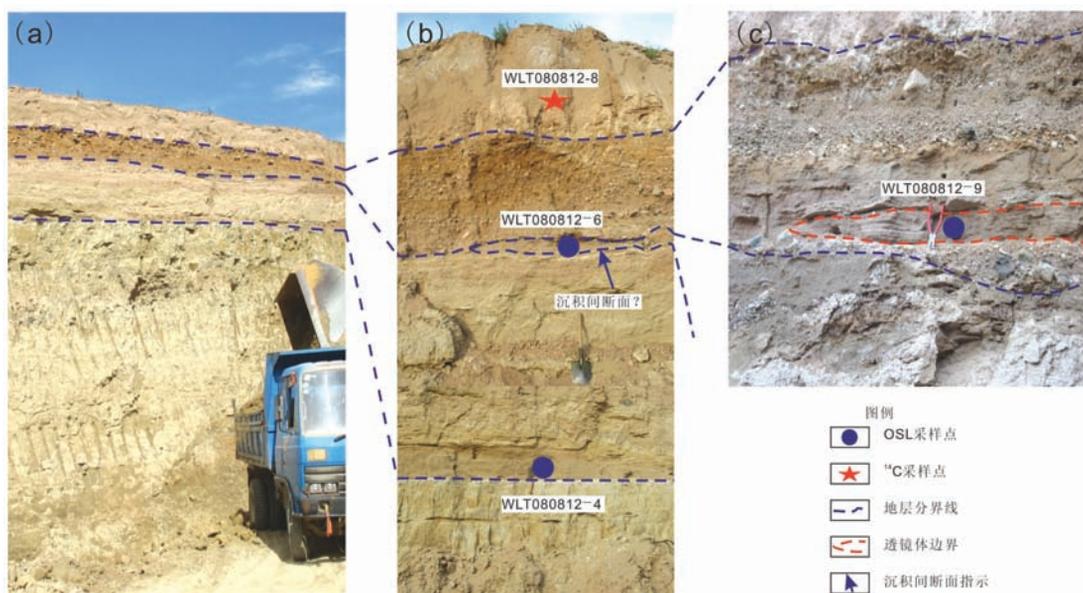


图4 西山咀凸起区湖相地层采样点断面(a)、剖面(b)和透镜体中的采样点位置(c)

Fig. 4 The pictures of the profiles in Xishanzui subplift (a) from which the samples were collected, the enlarged picture around OSL sample location (b), and the OSL sample (c) collected from the sand lens

山山前洪积扇(台地)后缘,同时也位于乌拉山前正断层的下降盘之上(图1,图3)。剖面靠近乌拉特前旗西山咀砖厂,是当地取土开挖出的土壤(图4)。

西山咀剖面整体出露厚度约9.5 m,剖面主体为典型的湖相沉积(图4a),自上而下依次为:

① 0~1.2 m: 垆土型砂土,底部见厚约10 cm的白色 CaCO_3 淀积层。在该层中部采集了全有机质样品 ^{14}C 测年样品,编号WLT080812-8;在深度1.1 m处采集散样,编号WLT080812-110;

② 1.2~1.9 m: 棕黄色洪积砾石层,向台地前缘变为洪积砂,在该层中见冲积砂的透镜体。在深度为1.5 m的该透镜体中采光释光样品WLT080812-9,在1.5 m处采集散样,编号WLT080812-150;

③ 1.9~2.0 m: 洪积砂质薄层,在台地前缘渐灭,砂层底部与下伏地层之间,推测可能存在一个沉积间断面(图4b)。在1.95 m处的砂层中采光释光(OSL)样品WLT080812-6,同时也采集了散样,编号为WLT080812-195;

④ 2.0~2.7 m: 泥岩与粘土层, 色杂, 其中2.0~2.2 m之间为半固结状棕红色泥岩碎屑, 2.2~2.7 m为灰绿色松散粉砂质粘土, 层理不明显。在2.3 m处采集散样, 编号WLT080812-230;

⑤ 2.7~3.0 m: 灰白色粉细砂, 保存有蓝蚬壳体碎屑, 采光释光样品WLT080812-4。在2.8 m处采集散样, 编号WLT080812-280;

⑥ 3.0~9.5 m: 粉砂质粘土, 整体上为灰绿色, 水平层理发育, 由棕黄、灰黄色粉砂与灰绿色粘土细层相间构成的典型韵律层理, 向下未见底。在4.0 m、6.0 m、8.0 m处分别采集3个散样, 编号依次为WLT080812-400、WLT080812-600和WLT080812-800。

该剖面出露的地层不仅在台地前缘的土壤中有出露, 而且在台地后缘的另一土壤中也有出露, 地层结构相同, 但高程比剖面点HT08-1B(图4b)高近10 m, 反映这套沉积非常稳定。

4 样品采集和实验方法

在剖面HT08-1B中非等间距地共采集了8个散样进行粒度分析和碳酸盐含量测定, 同时也采集了1个 ^{14}C 年代样品和3个光释光年代样品进行年代控制。采集光释光(OSL)样品时, 先用工具刨去剖面表面数厘米, 再将一头密封的不锈钢圆管垂直敲入直至末端, 拔出后迅速密封钢管另一端, 将整个不锈钢管用塑料袋严密包裹, 并用胶带固定, 以保证样品未曝光, 同时避免沉积物中水分流失。所有测试均在兰州大学西部环境教育部重点实验室进行。粒度组成是采用筛分法进行分析的。碳酸盐含量采用气量法进行测定。 ^{14}C 年代测试是采用常规 ^{14}C 测量地层全有机质进行的。OSL年代测量是采用石英的单颗粒和单片法两种方法进行的, 所用实验仪器为丹麦生产的Risø DA-20 OSL/TL reader。

4.1 碳酸盐含量测定和粒度分析

碳酸盐含量采用气量法^[18]来测定, 利用样品中碳酸盐和盐酸反应产生 CO_2 的体积来计算碳酸盐含量, 最终碳酸盐含量的变化被用来进行剖面地层垂向上的分析。

由于剖面中各地层沉积物粒度差异较大, 部分样品明显含有 $> 2000 \mu\text{m}$ 的砾石颗粒, 为了统一分析各地层的粒度样品, 本文在粒度测量时采用套筛处理所有样品(套筛网孔最大为 $2000 \mu\text{m}$, 最小为 $38 \mu\text{m}$), 然后分别对各粒级区间组分进行称重, 从而获得了各个粒级组分的百分含量, 据此获得了粒度概率累积曲线图(图5)。粒度分级是按照Udden-Wentworth标准进行划分, 并将砂分为(极)粗砂、中砂以及(极)细砂三个类别。

4.2 OSL年代测试

在实验室暗室微弱的红灯

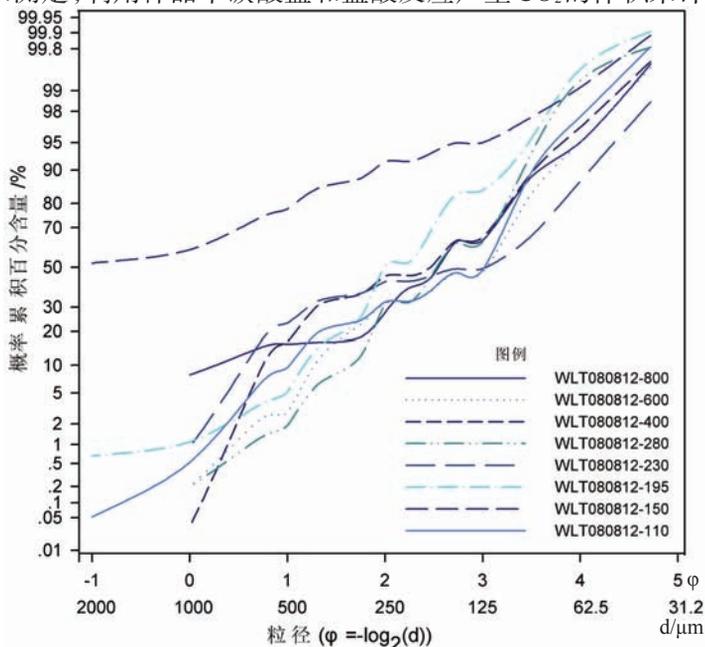


图5 西山咀凸起区剖面HT08-1B沉积物粒度概率累积曲线

Fig. 5 The probability cumulative curves of all samples obtained from the profile HT08-1B in the Xishanzui subuplift

条件下,按照常规方法^[19]获取了粒径为150~180 μm 的石英颗粒。为了提高OSL年代的可靠性,本文同时采用了单颗粒法和单片法进行了等效剂量的对比测试。在采用单颗粒测量之前,为了排除放射源辐照强度不均匀带来的误差,先用标准样品获得放射源对于每一个颗粒的辐照强度,然后采用单颗粒测量技术^[20-22]利用蓝光释光信号获得了等效剂量 (D_e) 值。测量自然(或再生)剂量释光信号之前采用了260 $^{\circ}\text{C}$ 的预热温度,测量试验剂量释光信号之前采用了220 $^{\circ}\text{C}$ 的预热(Cut heat),本研究同时采用单片再生法(预热条件与单颗粒方法相同)获得了各个光释光样品的等效剂量 (D_e) 值。在统计 D_e 值时,只有同时满足以下条件颗粒的 D_e 值才被采用^[23-24]:(1)样品的自然信号强度(Signal intensity)至少大于背景信号强度的3倍;(2)再循环比率(Recycling ratio)介于0.8~1.2;(3)热转移的光释光强度(Recuperation)小于自然信号强度的5%。

单片法(Single Aliquot)在第四纪沉积物光释光测年中得到广泛的应用^[25-26],但是由于水下沉积物晒退可能不彻底,单片法获得的 D_e 值是测片上所有不同晒退程度的颗粒混合后的平均值,因而湖滨沉积物光释光测年结果的可靠性仍存在一定的争议^[27-30]。但是单颗粒(Single Grain)测量技术是测量每一个颗粒自身的真实等效剂量,因而通过对比不同颗粒的等效剂量大小,可以帮助判断哪些颗粒的晒退比较彻底,能够给出样品是否完全晒退的信息^[31-33],从而可以获得湖滨沉积物真实的光释光年代。

由分别采用单颗粒技术和单片法后获得的3个OSL样品 D_e 值分布放射图可看出(图6),利用单片再生法获得的 D_e 值分布(图6d,6e,6f)都明显比较分散,但难以确切知道该样品在最后一次埋藏期间积累的剂量。单颗粒技术获得的 D_e 值分布(图6a,6b,6c)比较明确地说明不同颗粒接受到的剂量差异比较明显。由于湖泊沉积物的光释光年代学研究结果普遍认为最小的等效剂量能代表晒退比较充分的颗粒^[34-35],因此本文选择晒退程度较好的颗粒(对应于最小的 D_e 值)获得了这些样品的 D_e 值(图6a,6b,6c)。在计算 D_e 值时,剔除了明显偏离众数分布的 D_e 值数据(图6中空三角形),采用Thomsen等^[36]的统计方法计算其余所有 D_e 值的加权平均值(表1)。

剂量率的计算是通过中子活化法测量样品的U、Th和K含量,利用转化函数^[37]来获得的。地层中的水可能会影响矿物对辐射剂量的吸收^[19],因此在实验室中测量了样品的天然含水量以及饱和含水量,从而获得在埋藏期间样品含水量的估计值(表1)。根据埋藏期间样品含水量的估计值对剂量率进行校正,最终获得了OSL年代结果(表1和图4)。

5 讨论与分析

5.1 地貌记录和工程指示的古环境

“湖滩岩”是一种发育在湖滩带上拍案浪和周期性湖水涨落影响区间的湖相沉积物^[38],作为重建古湖岸线的重要标志,可以根据湖滩岩来推断湖泊的相对变迁,进而探讨湖面变化和地壳隆升等问题^[38-39]。湖蚀平台是湖岸在湖浪的冲击和磨蚀下不断后退后形成的典型的湖岸地貌,因而湖滩岩与湖蚀平台都可以指示高原湖泊古湖岸线的分布,并进一步用于研究古湖泊演化。

表1 西山咀凸起区湖相剖面HT08-1B中样品WLT080812-4,WLT080812-6和WLT080812-9的OSL测年结果

Tab. 1 OSL dating results of samples WLT080812-4, WLT080812-6 and WLT080812-9 from the profile HT08-1B

地表高程(m)	样品	深度(m)	含水量(%)	K(%)	Th(ppm)	U(ppm)	宇宙射线剂量率(Gy/ka)	总剂量率(Gy/ka)	粒径(μm)	D_e (Gy)	颗粒数	年代(ka)	沉积物
1063	WLT080812-9	1.5	5	3.01±0.09	6.86±0.22	1.30±0.08	0.21	3.89±0.21	150-180	197.72±6.97	26	50.79±3.31	冲洪积
1063	WLT080812-6	1.95	5	2.14±0.04	15±0.39	2.37±0.09	0.20	3.87±0.21	150-180	120.50±9.32	7	31.13±2.92	冲洪积
1063	WLT080812-4	2.8	5	1.99±0.04	7.11±0.21	2.97±0.10	0.18	3.30±0.18	150-180	213.89±14.12	10	64.77±5.48	滨湖相

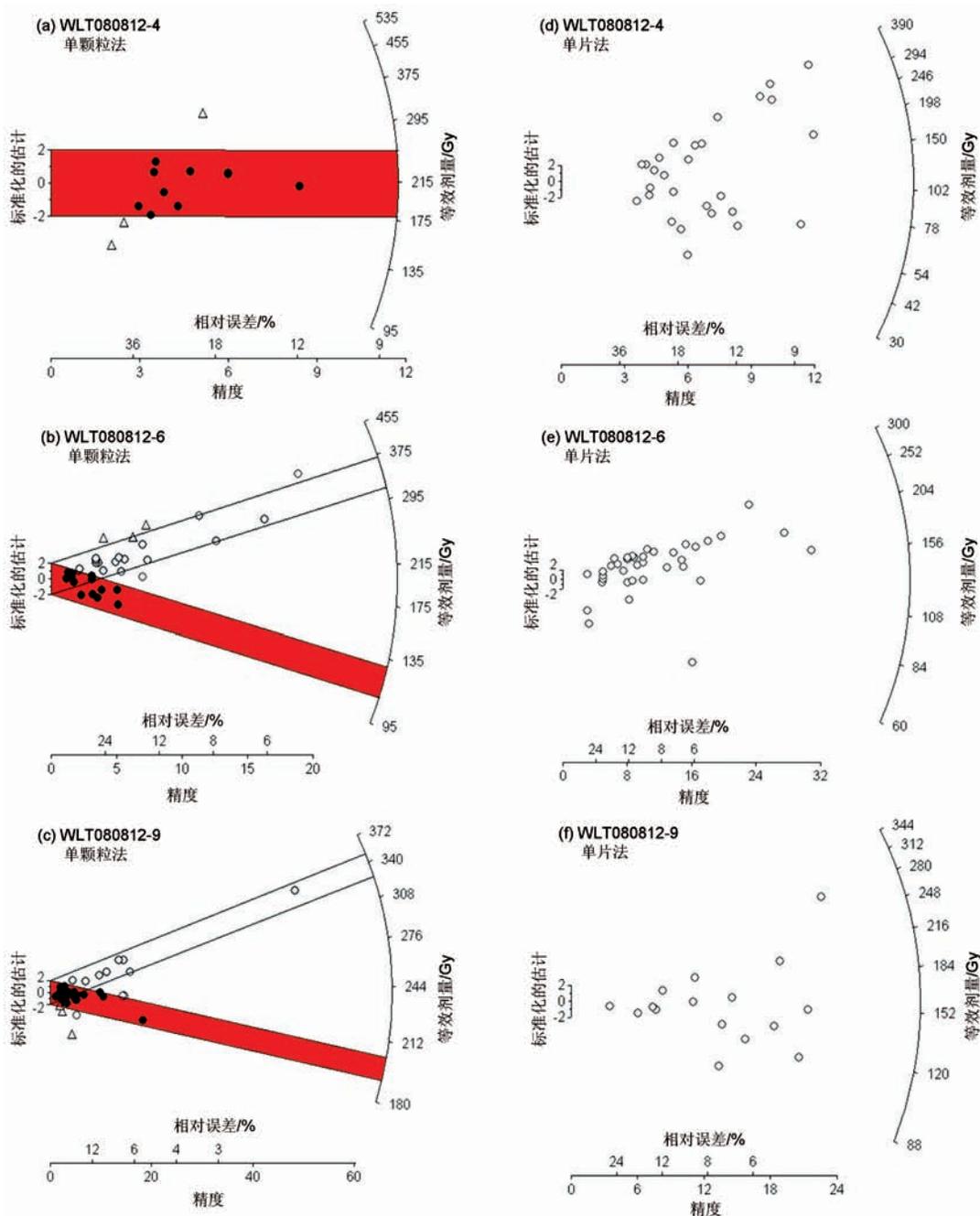


图6 西山咀凸起区HT08-1B剖面中OSL样品WLT080812-4、WLT080812-6和WLT080812-9采用单颗粒(a,b,c)和单片再生法(d,e,f)两种方法获得的 D_s 分布的放射图

Fig. 6 Radial plots of OSL samples of WLT080812-4, WLT080812-6 and WLT080812-9 (a, b and c show the distribution of D_s s measured by using Single Grain method, and d, e and f show that by Single Aliquot Regeneration method)

西山咀地区发现的湖滩岩和湖蚀平台位于断层上升盘,与下伏地层呈不整合接触,并且沿乌拉山前断续延伸至包头以东。因此有理由推断,在某一时期,西山咀地区甚至包括包头以东的地区曾发育了湖泊,并且根据断层和湖蚀平台相对位置及海拔,基本可以推测出当时的湖面大致在剖面HT08-1B和HT08-1C之间。西山咀地区断层面及断层崖的存在表明该

断层为正断层(图2a)。考虑到断层两侧的上升盘和下降盘活动是相对运动,一侧上升,另一侧必然下降,那么不论是山体抬升还是盆地下陷,当时湖相沉积的高度大致为湖滩岩海拔高程与湖相沉积剖面高程的平均值。实地测量的断层上升盘一侧的湖蚀平台最高点的海拔达到1096 m,而下降盘湖相沉积物剖面即HT08-1B处的海拔高度为1063 m,因此据此可以推断当时湖面高度在1079.5 m左右,考虑到湖水具有一定的深度,推测当时湖面高度也应在1080 m左右。

前人的研究结果^[9,16]显示,最晚在距今50~60 ka之前的某个时间,“吉兰泰—河套”古大湖的湖面还在海拔1080 m上下,覆盖了吉兰泰和河套盆地大部分地区。根据高程推断的西山咀凸起区的古湖面海拔高度与前人的研究结果十分接近(图3)。一个可能的假设就是,西山咀地区的湖相地貌是“吉兰泰—河套”古大湖遗留下来的,但是这一假设尚需要剖面HT08-1B的地层沉积记录、年代学证据和本地区其他已有研究成果的支持。

5.2 地层沉积记录和年代分析

湖泊沉积物的粒度组成及其特征能够反映湖水的水动力条件^[40-43],一般水动力能量较强时,沉积物颗粒较粗,反之沉积物颗粒相对较细。同一地点垂直方向上,不同时期的细粒和粗粒沉积物分别对应于湖面的扩张和收缩阶段^[41-42]。湖泊沉积物中碳酸盐的来源比较复杂,主要有陆源碎屑碳酸盐、自生碳酸盐以及次生碳酸盐等^[43],故碳酸盐含量常与其他指标相互对比。

在沉积物粒度概率累积曲线图上(图5),样品WLT080812-150较为特殊,其概率累积曲线的粗截点约为 0ϕ ,粒径小于 0ϕ 的组分含量高达约50%,并且1~ 3ϕ 之间的粒度组分含量占整个粒度组分含量的90%左右,表明其粒度明显偏粗,细颗粒组分偏少,并且粒度分选性也较差。除WLT080812-150外,其他样品的粒度概率累积曲线均表现为多段式,其中主要的细截点约为 3ϕ ,粗截点基本上在 $0\sim 1\phi$ 之间,并且中值粒径范围大约在 $2\sim 3\phi$ 之间。各个粒度样品的概率累积曲线的形态又不尽相同,主要表现为各个样品的粒度组分含量均有所不同,如来自深度为1.1 m的样品WLT080812-110和深度为1.9 m的样品WLT080812-195,二者的概率累积曲线的主要截点分别为 0ϕ 、 1.3ϕ 、 3ϕ ,粒度组成基本不含小于 0ϕ 的组分,但是WLT080812-110的中值粒径约为 3ϕ ,粒度组成偏细,可能表明沉积环境能量较弱,而WLT080812-195的中值粒径约为 2ϕ ,粒度组成相对偏粗,暗示沉积时水动力相对较强。

为了进一步分析整个剖面垂向上的沉积亚相的变化情况,本文分别选取了(极)粗砂含量变化、中砂含量、(极)细砂含量变化、粉砂和粘土含、中值粒径以及碳酸钙量变化,对整个

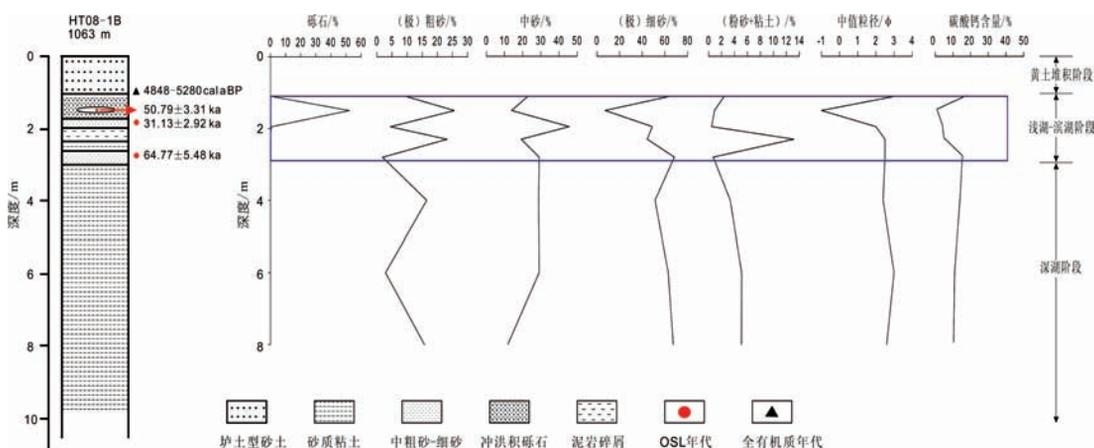


图7 西山咀凸起区剖面HT08-1B地层柱状图,年代和沉积物粒度指标、碳酸钙含量的垂向变化

Fig. 7 The comprehensive lithological profile showing dating results, strata record, grain-size and changes in the content of CaCO_3 in the profile HT08-1B

剖面垂向上的各个指标特征进行对比分析(图7)。总体上剖面垂向的粒度特征和碳酸盐含量变化以3.0 m为界线。在深度3.0 m以下,各粒度指标变化幅度不大,碳酸钙含量基本没有变化,而在深度3.0 m以上(图7蓝色长方形框),地层的粒度组成发生了明显的波动,碳酸盐含量明显减少并一直处于低位,但在接近深度1.1 m时碳酸盐含量又增加。结合剖面垂向上的粒度、碳酸盐含量和地层特征,西山咀剖面从下往上,总体上大致可以分为深湖沉积、浅湖—滨湖沉积和黄土堆积三个沉积阶段(图7),具体划分为:

(1) 深湖阶段,仅包括⑥层(3.0~9.5 m),整个地层厚度达6.5 m,向下不见底。该地层粒度组成以(极)细砂和中砂为主,除(极)粗砂的含量波动较明显之外,其他各个粒度指标和碳酸盐含量波动范围很小,同时碳酸钙含量也基本上在10%~15%之间,没有明显波动,暗示沉积时水动力环境较为稳定。该层中发育有水平层理和粉砂与粘土构成的韵律层理,也暗示了沉积时水动力能量较弱。沉积物组成主要是灰绿色或灰黄色细砂、粉砂以及灰绿色粘土,暗示沉积物沉积时处于一个相对还原的环境。整个地层的沉积物组成、沉积构造在横向上比较稳定,表明该地区的沉积环境在某一时期内比较稳定,并处于一个深水深湖相沉积环境。

(2) 浅湖—滨湖阶段,包括②~⑤层(1.2~3.0 m),为浅湖相粉细砂与洪积相砂交替层,向上逐渐演变为河流相沉积或洪积层。在该阶段,各个粒度指标发生了明显的波动,碳酸盐含量随着深度的减小而呈现出高一低一高的变化。其中,第⑤层(2.7~3.0 m)沉积物粒度组成以中砂和(极)细砂为主,同时地层中保存有蓝蚬壳体碎屑,部分较小的壳体保存比较完整,暗示壳体可能是在浅水动荡环境中就地沉积保存下来的。随着深度变浅,碳酸钙含量逐渐减少,这可能与沉积物的来源以及沉积环境有关。在第④层(2.0~2.7 m)中,随着深度逐渐变浅,(极)细砂含量不断降低,中砂含量越来越高,粉砂与粘土组分的含量经历了低—高一低的变化,而碳酸盐含量一直较低,暗示了沉积环境较为动荡。该层中上部半固结棕红色泥岩碎屑层,性质上属于洪积相砂,下部为灰绿色松散粉砂质粘土,层理不明显,具有浅湖相沉积特征;其中夹有洪积砂层,厚度约为10~20 cm,表明该时期开始发育冲洪积环境;③层(1.9~2.0 m)粒度组成以中砂和(极)细砂为主,实质上为洪积砂质薄层,并在台地前缘尖灭,相比于其上的洪积砾石层,该层的颗粒较细,这种沉积学特征说明该层处于该时期某一洪积相沉积物的前缘,或者此时沉积水动力环境较弱,大规模的冲洪积堆积还未形成;②层(1.2~1.9 m)沉积物的粒度中值粒径在整个剖面中达到最大值-1 ϕ ,而随着深度的减小,砾石和(极)粗砂含量经历了低—高一低的变化。碳酸盐含量略有变化,并自深度1.5 m处向上开始增加。粒度指标和碳酸盐含量变化特征总体上表明该层经历了剧烈的水动力能量的变化,具有冲洪积沉积特征。该层中碳酸盐的含量变化可能与源区物质、沉积时水动力强度以及沉积介质的孔隙度有关。实际上该层含有棕黄色洪积砾石,并且该砾石层向台地前缘变为洪积砂,在该层中见冲积砂的透镜体,这些特征均表明该层属于为典型的山前洪积相沉积。

(3) 黄土堆积阶段,包括①层(0~1.2 m),为典型的弱土壤化的黄土母质层。从沉积厚度及土壤发育程度判断,其形成时间应该较晚,推断大约形成于全新世阶段。该层底部有厚约10 cm白色的CaCO₃淀积层,说明黄土母质受到较强的淋溶作用,但总体上该层属于黄土沉积层。

从该剖面垂向上地层的变化可知,该地区依次经历了深水湖泊环境、浅湖环境、滨湖环境和冲洪积沉积环境,直到最终湖面下降,早先的湖相地层完全露出水面,并最终接受风成堆积。光释光和碳十四年代结果显示,剖面深度3.0 m处的滨湖相沉积物的OSL年龄为64.77±5.48 ka,表明在距今约65 ka前后,西山咀凸起区很可能已经处于“吉兰泰—河套”古大湖的最高湖面以下。这与前人关于“吉兰泰—河套”古大湖在距今50~60 ka前后还覆盖着整个河套盆地的年代结果^[9, 16]十分一致,进一步表明了“吉兰泰—河套”古大湖可能的确曾在西山咀凸起区连通。深度为1.95 m处砂质透镜体的OSL年龄为50.79±3.31 ka,2.0 m处砂质

薄层的沉积年龄为 31.13 ± 2.92 ka。冲洪积层中的两个OSL年龄发生了颠倒,很可能与冲洪积物快速堆积有关。尽管地层内的年代发生了颠倒,但通过单颗粒测量技术获得的最小OSL年代表明,至少在30~50 ka前后,湖相沉积开始被河流相沉积或山前洪积取代,即30~50 ka前后西山咀凸起区再没有发育过比65 ka前后的“吉兰泰—河套”古大湖最高湖面高的深水大湖。黄土层底部的 ^{14}C 年代为~5 ka,表明5 ka前后该地区开始堆积黄土。

在西山咀凸起区邻近的黄河南岸也保存有50~60 ka前后的湖滨沉积记录(见图1中剖面HTS-6和HTS-7),表明西山咀凸起区不只在个别点上保存有50~60 ka前后的湖岸遗迹。结合在西山咀凸起区黄河北岸的发现,这进一步说明在距今约60 ka前后,曾经在西山咀凸起区发育过湖泊,最大的可能性是“吉兰泰—河套”古大湖在西山咀凸起区连通。

6 结论

本文在前套和后套的衔接过渡地带,找到了湖滩岩及湖蚀平台,指示了在某一时期河套盆地的西山咀凸起区的确存在过一个古湖泊。地貌以及海拔高程方面分析结果表明,这些地貌很可能是“吉兰泰—河套”古大湖在西山咀连通后遗留下来的。地层沉积记录及其综合环境分析显示,西山咀凸起区经历了由深湖—湖滨—风力堆积环境的演变。光释光年代结果显示,西山咀凸起区的湖泊环境早在约65 ka BP之前就已经存在,并在65 ka BP前后处于高湖面状态,但在50~30 ka BP前,在西山咀凸起区不再发育湖相沉积,并开始堆积冲洪积物以及风成堆积。这一发现表明“吉兰泰—河套”古大湖在65 ka BP前后还是连通的,在50~30 ka BP,古湖发生了衰退,随后再也没有出现过高于“吉兰泰—河套”古大湖最高湖面的湖泊。

需要说明的是,本文的研究只是局限于西山咀凸起区,河套盆地其它凸起区是否类似的相关地貌学、地质记录,有待进一步研究。

致谢:陈发虎教授指导并参加了野外工作,穆德芬老师参与样品前处理过程。

参考文献 (References)

- [1] Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of Huanghe River during the Late Cenozoic. *Science in China: Series D*, 1996, 26(4): 316-322. [李吉均, 方晓敏, 马海洲等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. *中国科学: D辑*, 1996, 26(4): 316-322.]
- [2] Wu Xihao, Jiang Fuchu, Wang Sumin et al. The questions about the Yellow River passing through the Sanmen Gorge and flowing east to the sea. *Quaternary Science*, 1998, 18(2): 188. [吴锡浩, 蒋复初, 王苏民等. 关于黄河贯通三门峡东流入海问题. *第四纪研究*, 1998, 18(2): 188.]
- [3] Lin A M, Yang Z Y, Sun Z M et al. How and when did Yellow River develop its square bend? *Geology*, 2001, 29: 951-954.
- [4] Zhu Zhaoyu. The formation of river terraces and evolution of drainage system in the middle Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(4): 429-440. [朱照宇. 黄河中游河流阶地的形成与水系演化. *地理学报*, 1989, 44(4): 429-440.]
- [5] Yue Leping, Lei Xiangyi, Qu Hongjun. The age of terrace development in the middle reaches of the Yellow River. *Geological Review*, 1997, 43(2): 186-192. [岳乐平, 雷祥义, 屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代. *地质论评*, 1997, 43(2): 186-192.]
- [6] Pan Baotian, Li Jijun, Cao Jixiu et al. The study of the geomorphic evolution and development of the Yellow River in the Hualong Basin. *Mountain Research*, 1996, 14(3): 153-158. [潘保田, 李吉均, 曹继秀等. 化隆盆地地貌演化与黄河发育研究. *山地研究*, 1996, 14(3): 153-158.]
- [7] Nie Zongsheng, Li Ke. The discovery of the salawusu stratum group and its implication. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(21): 1645-1649. [聂宗笙, 李克. 内蒙古包头地区萨拉乌苏组的发现及其意义. *科学通报*, 1988, 33(21): 1645-1649.]
- [8] Madsen D B, Chen Fahu, Oviatt C G et al. Late Pleistocene/Holocene wetland events recorded in southeast Tengger Desert lake sediments, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48: 1423-1429.
- [9] Chen Fahu, Fan Yuxin, Chun Xi et al. Preliminary research on Megalake Jilantai-Fletao in the arid areas of China during

- the Late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(10): 1207-1219. [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.]
- [10] Nie Zongsheng, Li Hong, Ma Baoqi. Fossil fauna in the late stage of late Pleistocene in the Hetao Basin, Inner Mongolia. *Quaternary Science*, 2008, 28(1): 14-25. [聂宗笙, 李虹, 马保起. 内蒙古河套盆地晚更新世晚期化石动物群. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 14-25.]
- [11] Dou Suqin, Nie Zongsheng, Mai Xueshun. The spore-pollen analysis of late Pleistocene deposits in Ho-bao basin of Nei Mongol. *Seismology and Geology*, 1990, 12(3): 283-289. [窦素芹, 聂宗笙, 麦学舜. 内蒙古呼包盆地晚更新世孢粉组合及其意义. *地震地质*, 1990, 12(3): 283-289.]
- [12] Ma Baoqi, Li Dewen, Guo Wensheng. Geomorphological response to environmental changes during the late stage of late Pleistocene in Hubao Basin. *Quaternary Science*, 2004, 24(6): 630-637. [马保起, 李德文, 郭文生. 晚更新世晚期呼包盆地环境演化与地貌响应. *第四纪研究*, 2004, 24(6): 630-637.]
- [13] Jia Tiefei, Yin Shan, Zhao Ming et al. A study of the lake deposits on the Tuoketuo section of Yellow River in the early and middle stage of Pleistocene. *Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition*, 2001, 30(1): 74-78. [贾铁飞, 银山, 赵明等. 黄河托克托段早中更新世湖相地层剖面的建立及其意义. *内蒙古师大学报: 自然科学版*, 2001, 30(1): 74-78.]
- [14] Li Jianbiao, Ran Yongkang, Guo Wensheng. Research on the lacustrine strata of the Tuoketuo mesa, Hetao Basin, China. *Quaternary Science*, 2005, 25(5): 630-639. [李建彪, 冉永康, 郭文生. 河套盆地托克托台地湖相层研究. *第四纪研究*, 2005, 25(5): 630-639.]
- [15] Li Jianbiao, Ran Yongkang, Guo Wensheng. Division of Quaternary beds and environment evolution in Hubao Basin in China. *Quaternary Science*, 2007, 27(4): 632-644. [李建彪, 冉永康, 郭文生. 呼包盆地第四纪地层与环境演化. *第四纪研究*, 2007, 27(4): 632-644.]
- [16] Chen Fahu, Fan Yuxin, Madsen D B et al. Preliminary study on the formation mechanism of the “Jilantai-Hetao” megalake and the lake evolutionary history in Hetao Region. *Quaternary Science*, 2008, 28(5): 865-873. [陈发虎, 范育新, Madsen D B等. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰—河套”古大湖形成机制的初步研究. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 865-873.]
- [17] Li Jianbiao. A study on the lake forming environment and tectonic activity during the late Quaternary in the Hetao Basin Inner Mongolia Autonomous Region, China [D]. Beijing: Institute of Geology, State Seismological Bureau, 2006. [李建彪. 河套盆地晚第四纪成湖环境变化与构造活动研究[D]. 北京: 国家地震局地质研究所, 2006.]
- [18] Yu Huifu. The research progress and comparative study to measure content of carbonate. *Marine Geology Letters*, 2007, 23(1): 35-39. [郁慧福. 碳酸盐测定方法现状及方法比较. *海洋地质动态*, 2007, 23(1): 35-39.]
- [19] Atiken M J. *An Introduction to Optical Dating*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [20] Roberts R G, Walsh G, Murray A S et al. Luminescence dating of rock art and past environments using mud-wasp nests in northern Australia. *Nature*, 1997, 387: 696-699.
- [21] Murray A S, Roberts R G. Determining the burial time of single grains of quartz using optically stimulated luminescence. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 152: 163-180.
- [22] Spooner N A, Olley J M, Questiaux D G et al. Optical dating of an aeolian deposit on the Murrumbidgee floodplain. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 835-840.
- [23] Jacobs Z, Wintle A G, Roberts R G et al. Equivalent dose distributions from single grains of quartz at Sibudu, South Africa: Context, causes and consequences for optical dating of archaeological deposits. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35: 1808-1820.
- [24] Feathers J K. Single-grain OSL dating of sediments from the Southern High Plains, USA. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 1035-1042.
- [25] Murray A S, Roberts R G. Measurement of the equivalent dose in quartz using a regenerative-dose single-aliquot protocol. *Radiation Measurements*, 1998, 29: 503-515.
- [26] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 2000, 32: 57-73.
- [27] Murray A S, Olley J M, Caitcheon G G. Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14: 365-371.
- [28] Lang A, Zolitschka B. Optical dating of annually laminated lake sediments: A test case from Holzmaar/Germany. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 737-742.
- [29] Zheng Y E, Zhou L P, Zhang J F. Optical dating of the upper 22 m of cored sediments from Daihai Lake, northern China. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5: 228-232.
- [30] Owen L A, Bright J, Finkel R C et al. Numerical dating of a Late Quaternary spit-shoreline complex at the northern end of Silver Lake playa, Mojave Desert, California: A comparison of the applicability of radiocarbon, luminescence, terrestrial

- cosmogenic nuclide, electron spin resonance, U-series and amino acid racemization methods. *Quaternary International*, 2007, 166: 87-110.
- [31] Thomsen K J, Murray A S, Botter-Jensen L et al. Determination of burial dose in incompletely bleached fluvial samples using single grains of quartz. *Radiation Measurements*, 2007, 42: 370-379
- [32] Duller G A T. Single grain optical dating of glacial deposits. *Quaternary Geochronology*, 2006, 1: 296-304.
- [33] Berger G W, Doran P T, Thomsen K J. Single-grain and multigrain luminescence dating of on-ice and lake-bottom deposits at Lake Hoare, Taylor Valley, Antarctica. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5: 679-690.
- [34] Olley J M, Caitcheon G G. The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains of quartz from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, 1999, 30: 207-217.
- [35] Olley J M, Pietsch T, Roberts R G. Optical dating of Holocene sediments from a variety of geomorphic settings using single grains of quartz. *Geomorphology*, 2004, 60: 337-358.
- [36] Thomsen, K J, Murray A S, Bøtter-Jensen L B et al. Determination of burial dose in incompletely bleached fluvial samples using single grains of quartz. *Radiation Measurements*, 2007, 42: 370-379.
- [37] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements*, 1994, 23: 497-500.
- [38] Zhu Dagang, Zhao Xitao, Meng Xiangang et al. First discovery of late Pleistocene lacustrine-beach rock around the Nam Co in the northern Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(3): 175. [朱大岗, 赵希涛, 孟宪刚等. 藏北高原纳木错首次发现晚更新世湖滩岩. *地质通报*, 2002, 21(3): 175.]
- [39] Zhu Dagang, Zhao Xitao. Late Pleistocene lacustrine-beach rock around the Nam Co in Xizang. *Geological Review*, 2003, 49(4):432-439. [朱大岗, 赵希涛. 西藏纳木错晚更新世湖滩岩. *地质论评*, 2003, 49(4):432-439.]
- [40] Chen Jing'an, Wan Guojiang, Tang Degui et al. The record of lake sediments in grain size and isotope during the recent climate change in Erhai. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(3): 253-259. [陈敬安, 万国江, 唐德贵等. 洱海近代气候变化的沉积物粒度与同位素记录. *自然科学进展*, 2000, 10(3): 253-259.]
- [41] Chen Jing'an, Wan Guojiang, Zhang Feng et al. The record of lake sediments in different scales: Taking grain size for example. *Science in China: Series D*, 2003, 33(6): 563-568. [陈敬安, 万国江, 张峰等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录: 以沉积物粒度为例. *中国科学: D辑*, 2003, 33(6): 563-568.]
- [42] Yin Zhiqiang, Qin Xiaogang, Wu Jinshui et al. Multimodal grain-size distribution characteristic and formation mechanism of lake sediments. *Quaternary Science*, 2008, 28(2): 345-353. [殷志强, 秦小光, 吴金水等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究. *第四纪研究*, 2008, 28(2): 345-353.]
- [43] Lerman A. *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. Wang Sumin et al. trans. Beijing: Geological Publishing Housing, 1989. [莱尔曼 A. 湖泊的化学、地质学和物理学. 王苏民等译. 北京: 地质出版社, 1989.]

New Findings and Dating of Lacustrine Sediments in the Xishanzui Subuplift, Hetao Basin

FAN Tianlai, FAN Yuxin, WEI Guoxiao

(MOE Key Laboratory of West China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A complete sedimentary profile composed mainly of typical lacustrine sediments including beachrock and cut-and-built platform located in the Xishanzui subuplift, Hetao Basin, has been found. The geomorphological and stratigraphic evidence indicates that there was a paleolake with its highest lake up to 1080 m a.s.l. Stratigraphic analysis of the profile indicates that this subuplift experienced an environmental change from a deep lake to a shallow lake and then to non-lake environment (suggested by alluvial/diluvial sediments). Optical dating results support that Xishanzui subuplift was actually covered by a deep water lake, potentially the Megalake "Jilantai-Hetao" at around 65 ka BP when the lake reached its highest level. And no lake level has exceeded the highest level inferred from sedimentary sequence in the profile.

Key words: lacustrine sediments; optical dating; Xishanzui subuplift; Hetao Basin; Quaternary