

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.2-3.010

宁夏清水河盆地晚更新世两期湖相沉积物的形成时代、沉积环境及构造背景

李明涛^{1,2}, 李黎明³, 田景雄³, 梁志荣³, 谈震³, 陆茂欣³

LI Mingtao^{1,2}, LI Liming³, TIAN Jingxiong³, LIANG Zhirong³, TAN Zhen³, LU Maoxin³

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 宁夏回族自治区矿产地质调查院, 宁夏 银川 750021;

3. 宁夏回族自治区基础地质调查院, 宁夏 银川 750021

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Ningxia Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

3. Ningxia Institute of Basic Geological Survey, Yinchuan 750021, Ningxia, China

摘要: 为了解宁夏清水河盆地晚更新世以来的沉积、构造演化规律, 采用钻探、粒度分析、光释光测年等技术, 对盆地中部发现的 2 期晚更新世湖相地层进行了沉积学、年代学研究。结果表明, 下部湖相地层萨拉乌苏组的形成时代为 76~63 ka, 上部湖相地层水洞沟组形成时代为 25~11 ka, 二者之间存在明显的侵蚀面。根据沉积证据和粒度分析结果, 将萨拉乌苏组自下而上划分为 4 个沉积阶段, 构成了一个完整的湖进-湖退序列, 代表了一期温暖湿润的气候环境; 而水洞沟组为干冷环境下形成的浅湖。构造、环境对比分析表明, 清水河盆地 2 期古大湖的形成、消亡指示该地区晚更新世经历了拉张-挤压-拉张的构造转换。两次拉张作用是萨拉乌苏湖和水洞沟湖形成的主要因素, 古大湖发育的间断期存在的强烈构造隆升事件是导致萨拉乌苏湖消亡的根本原因, 末次冰期 MIS4 和 MIS2 晚期的异常寒冷气候也是古湖衰退的原因之一。清水河盆地 2 期古湖的演化规律, 为研究青藏高原周缘晚更新世古大湖形成与演化、古气候变迁及青藏高原的隆升提供了重要的证据。

关键词: 晚更新世; 青藏高原东北缘; 清水河盆地; 古湖泊; 古环境演化; 地质调查工程

中图分类号: P534.63⁺1; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)02/03-0306-09

Li M T, Li L M, Tian J X, Liang Z R, Tan Z, Lu M X. Age, sedimentary environment and tectonic setting of two lacustrine sediments of the Late Pleistocene in Qingshuihe Basin, Ningxia. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(2/3): 306-314

Abstract: The sedimentology and chronology of the two Late Pleistocene lacustrine strata discovered in the middle of the basin were studied by means of drilling, grain size analysis and optically released luminescence dating in order to understand the sedimentary and tectonic evolution since the Late Pleistocene in Qingshuihe Basin, Ningxia. The results show that the lower part is the Salawusu Formation and the upper part is Shuidonggou Formation, which were formed at 76~63 ka and 25~11 ka, respectively. In addition, there is an obvious erosion surface between them. According to sedimentary evidence and grain size analysis results, the Salawusu Formation can be divided into four sedimentary stages from bottom to top, which constitute a complete set of lacustrine prograding and lacustrine recession sequence, representing a warm and humid climate environment. The Shuidonggou formation is a shallow lake formed in cold and dry environment. The comparative analysis of structure and environment shows that the formation and disappearance of the two ancient lakes in the late Pleistocene in Qingshuihe Basin indicate the transition of extensional-compression-extensional tectonic activity. The two extensional events were the main factors for the formation of Salawusu Lake and Shuidonggou Lake. The strong tectonic uplift event in the discontinuous period of the development of the ancient lake is the fundamental cause of the demise of

收稿日期: 2019-11-04; 修订日期: 2022-01-10

资助项目: 中国地质调查局项目《特殊地质地貌区填图试点》(编号: DD20160060)

作者简介: 李明涛(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: lmt1118@yeah.net

the Salawusu Lake, and the abnormal cold in the late MIS 4 and MIS 2 of the last glacial period is also one of the reasons for the decline of the ancient lake. The evolution of the two ancient lakes in Qingshuihe Basin provides important evidence for the study of the formation and evolution of the ancient lakes, paleoclimate changes and uplift of the Tibetan Plateau during the late Pleistocene.

Key words: Late Pleistocene; northeastern margin of the Tibetan Plateau; Qingshuihe Basin; Paleo-lakes; Paleo environmental evolution; geological survey engineering

清水河盆地位于宁夏中南部地区,南起六盘山,北至卫宁盆地,为带状展布的晚更新世沉积盆地。盆地中部广泛发育晚更新世湖相地层,这些沉积物记录了晚更新世以来盆地的构造和环境变化。前人针对清水河第四纪沉积盆地的研究较少,徐涛等^[1]认为,同心地区存在古大湖,并将其命名为“同心古大湖”,其湖相沉积物时代为晚更新世,并且与马兰黄土共同充填了盆地。宁夏回族自治区地质调查院^[2]根据地层对比认为,清水河盆地出露的湖相地层为全新世河湖相沉积,并将其归属为全新统灵武组。Shi 等^[3]认为,由于青藏高原北东向生长,在晚更新世(?~18 ka)的六盘山弧形构造带发生了 NE—SW 向伸展作用,形成了清水河盆地的古湖。但这些研究仅限于盆地中心区域的露头证据,或根据区域地质情况进行推断,缺少深部资料及直接的沉积学、年代学等证据。为进一步还原清水河盆地中部的地层格架和沉积环境,笔者在同心地区进行了大范围地质调查及钻孔验证,发现该地区存在 2 套晚更新世湖相地层,并对湖相沉积物进行了年代学、沉积学分析,探讨在第四纪青藏高原北东向挤压的背景下,清水河盆地的沉积环境及构造演化规律。本次研究可为青藏高原及周缘晚更新世“泛湖期”古大湖形成与演化、古气候变迁及高原隆升提供参考资料。

1 研究区概况

1.1 研究区地质背景

六盘山弧形构造带位于青藏高原东北缘,是中国大陆重要的岩石圈构造转换带,也被认为是青藏高原北西向挤压的前锋部位^[4],在整个新生代该区构造运动十分强烈,对于研究青藏高原隆升的过程具有重要的科学意义^[5]。早更新世末,受祁连造山带与鄂尔多斯地块两大块体的共同作用,六盘山地区由南至北发育了海原断裂、天景山断裂、烟筒山断裂、牛首山断裂 4 条相间排列的弧形断裂带(图 1-b),清水河盆地呈 NNW 向夹持于天景山断

裂和烟筒山断裂之间,西侧边界为天景山、六盘山,东侧边界为烟筒山、窑山(图 1-a)。在同心地区盆地内主要断裂为天景山断裂和清水河断裂,前者是盆地的西侧边界,控制着盆地的形成和演化,后者隐伏于盆地内部。晚更新世中晚期,天景山断裂和清水河断裂开始由逆冲转为伸展,盆地性质也由压陷盆地转为断陷盆地,逐渐形成了现今的地貌格局。

1.2 研究区晚更新世湖相地层特征

本次研究发现,清水河盆地中部普遍发育 2 套晚更新世湖相沉积,主要出露在清水河河流阶地之上,两侧山体地层为新近系。出露地表的湖相层经区域对比和年代学分析,初步厘定为晚更新世水洞沟组,其下部的湖相层仅在盆地边缘的冲沟内可见,为晚更新世萨拉乌苏组。2 套湖相层上下叠置,平行不整合接触,存在明显波状起伏的侵蚀面,均未遭受区域性构造变形,产状水平(图 2)。

钻孔资料显示,研究区水洞沟组主要分布在清水河 II 级阶地,在盆地内最厚,在钻孔 TZK02 上岩心厚度为 27.5 m,向盆地边缘逐渐变薄。宏观上以土黄色与紫红色韵律层为特征,水平层理发育(图 2-a)。紫红色层为富含铁质的泥、粉砂,有时呈不规则团块状,单层厚度多为 2~5 cm,红色泥质层中夹有石膏碎屑,表明沉积物频繁暴露地表及干旱气候条件造成盐类析出。土黄色层的粒度较红色层粗,为粒度均一的粉砂、砂,孔隙发育,普遍含有粉华蜗牛(*Cathaica pulveratrix*)等化石。局部出现风积黄土特有的柱状节理,扫描电镜也显示土黄色层沉积物具有风蚀槽、撞击坑等风积物的特征(图 3),而其水平层理表示黄土沉积经历了流水搬运,是改造的结果。

在盆地边缘的多个露头上,水洞沟组与下伏萨拉乌苏组之间普遍存在沉积间断面,之上沉积了河道相砂砾石层(图 2-b~d),表明萨拉乌苏湖消亡后水洞沟湖诞生。在盆地内部的钻孔 TZK02 中地层界线处无砂砾石层,表现为岩性组合突变,粒度变粗。

萨拉乌苏组的分布范围较水洞沟组大,露头上未见底,钻孔 TZK02 揭露的厚度为 167.2 m,在汇入

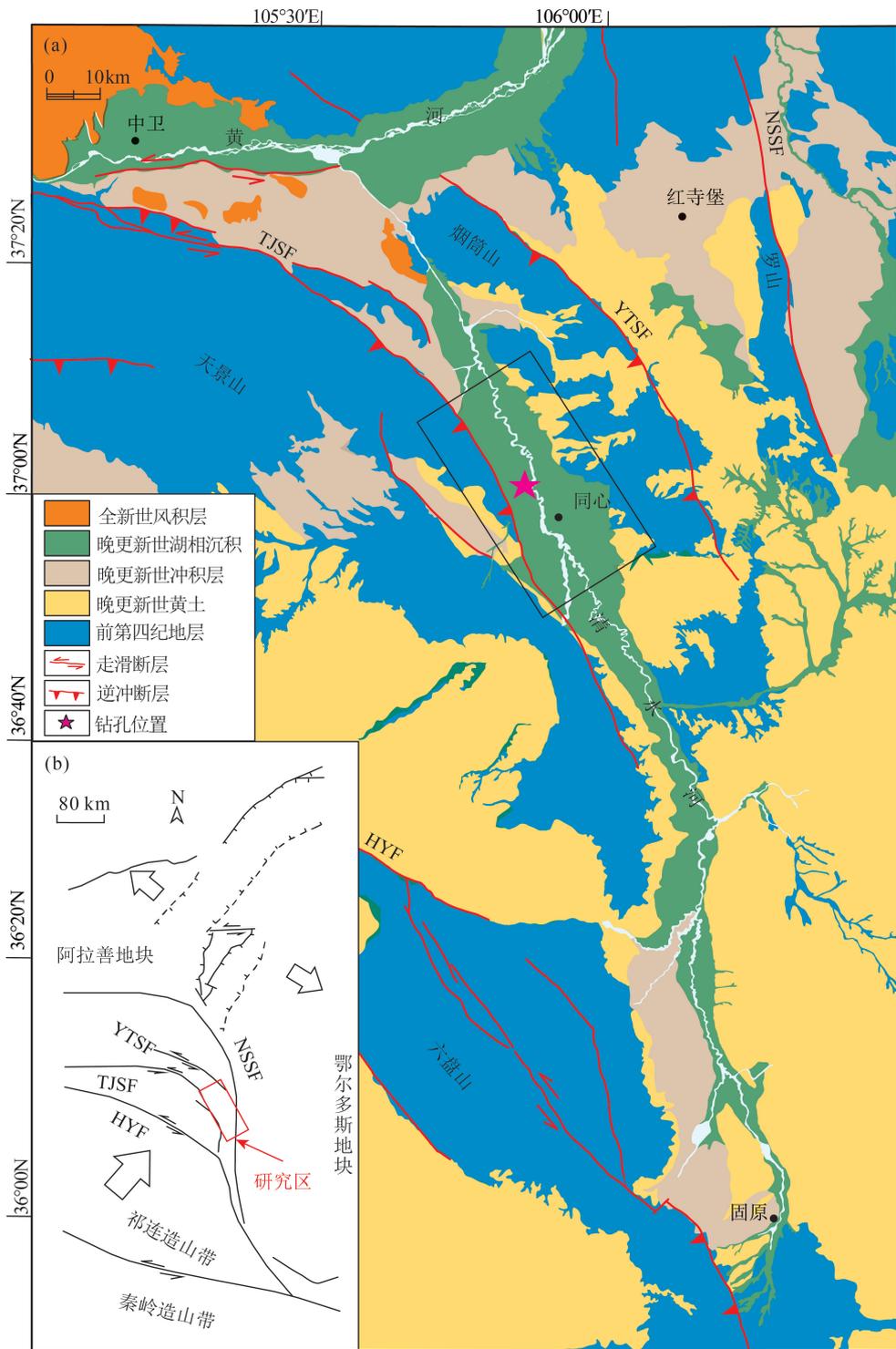


图1 清水河盆地地质构造(a)和研究区构造位置(b)

Fig. 1 Geological map of the Qingshuihe Basin (a) and tectonic location of study region (b)

HYF—海原断裂;TJSF—天景山断裂;YTSF—烟筒山断裂;NSSF—牛首山断裂

清水河的冲沟深处可见与其下伏新近系彰恩堡组不整合接触。岩性主要为浅黄色、浅灰绿色粉砂和泥质互层,块状构造,在顶部靠近剥蚀面附近,存在

层理微弯曲的冻融褶曲(图 2-d)。钻孔 TZK02 中揭露出的萨拉乌苏组岩性为松散的粉砂质-泥质沉积物,粒度十分均一,偶尔存在河道迁移形成的砂

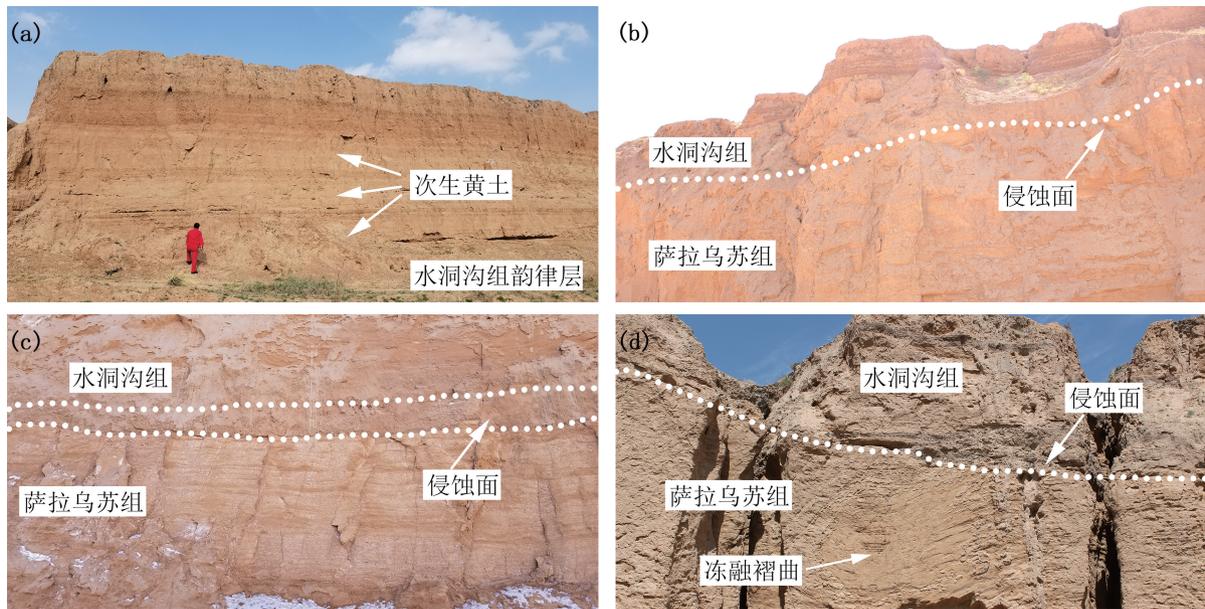


图 2 清水河盆地湖相地层特征

Fig. 2 Characteristics of the lacustrine strata in Qingshuihe Basin

a—水洞沟组露头特征;b,c—水洞沟组与萨拉乌苏组平行不整合关系及剥蚀面;d—萨拉乌苏组上部冻融褶曲

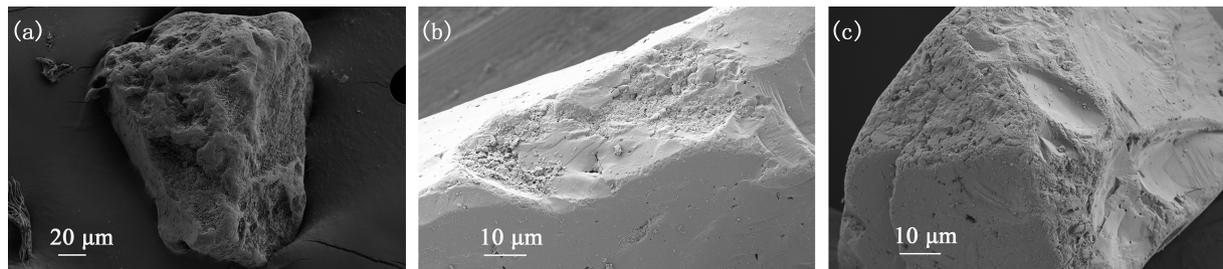


图 3 水洞沟组风成石英颗粒扫描电镜特征

Fig. 3 SEM characteristics of aeolian quartz particles of the Shuidonggou Formation

a—石英砂撞击麻点;b—石英砂碟形撞击坑;c—石英砂 V 形撞击坑

砾石层。上部浅黄色和黄绿色泥、粉砂交替出现,形成湖相韵律层,均为水平层理;中部浅黄色泥质层逐渐消失,以黄绿色和浅灰绿色的泥、粉砂为主形成韵律层,偶尔含有新近系桔红色泥砾,沉积物组成主要为灰绿色或灰黄色细砂、粉砂及灰绿色粘土,暗示沉积物沉积时处于还原的环境。下部色调较丰富,主要为黄绿色、土红色、浅黄色泥、粉砂、细砂,底部为土黄色的粗砂,肉眼观察整体粒度较中上部粗,显示更强的水动力条件。

2 样品采集及测试方法

为判断 2 套湖相沉积物的形成年代,分析沉积环境,在 TZK02 岩心中对 2 套湖相沉积物在岩性变

化和明显界线附近采集了 5 件光释光(OSL)样品,同时以 50 cm 为间距采集粒度分析样品 176 件。

2.1 OSL 年代测试

光释光测年在中国地震局地壳动力学重点实验室进行。在实验室内弱红光下去除铁管顶和底可能曝光、污染的部分,保留中心部位的样品供等效剂量测定。样品均为粉砂及以下,故采取 4~11 μm 细颗粒组分。对经氟硅酸刻蚀的细颗粒石英组分采用简单多片再生法(SMAR)进行等效剂量(De)的测试,光释光辐照和信号测量均在丹麦 Risoe DA-20-C/D 型热/光释光自动测量系统上完成。计算等效剂量时,选取前 0.8 s(前 5 个通道积分值)减去背景值(最后 25 个通道积分值)的释光

信号值,进行线性或指数拟合,建立光释光信号的剂量响应曲线,即光释光生长曲线,确定样品的等效剂量(De)值。

由于石英信号的饱和性,用简单多片再生法能准确测定等效剂量小于300 Gy的沉积物样品。从样品的光释光信号衰减曲线看,5件样品的光释光信号较强,且呈快速衰减曲线的特征,为典型的石英信号特征,说明在前处理过程中长石已经去除干净,测试矿物为纯石英,且石英信号以快组分为主,符合光释光测年的要求;从样品的等效剂量生长曲线看,5件样品均无明显饱和趋势,其年龄可供参考(表1)。

2.2 粒度分析

粒度分析在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室进行,采用英国Malvern公司的Mastersize 2000激光粒度分析仪,粒度测量范围为0.02~2 000 μm ,测量精度为0.15 φ ,重复测量误差小于3%。

3 结果与分析

3.1 地层年代分析

露头 and 钻孔发现的2套湖相地层证明,第四纪清水河盆地中部存在2期古湖泊。其中,萨拉乌苏组不整合覆盖在中新世地层之上,在TZK02钻孔153 m处获得了76 ka的光释光年龄,但最底部年龄即湖泊开始沉积的年龄不得而知,与同心地区邻近的红寺堡盆地获得了萨拉乌苏组底部119 ka的光释光年龄^[6],或许可以代表该地区萨拉乌苏组的底界年龄。值得注意的是,在TZK02钻孔27.5 m处岩性发生了明显变化,界线上部位于25 m处的光释光年龄为25 ka,界线下部位于36 m处的光释光年龄为62 ka,结合露头上该部位存在的侵蚀面,在这一时间段应存在一次37 ka左右的沉积间断事件,导致萨拉乌苏湖的消失。TZK02中水洞沟组的

沉积时间为25~11 ka,根据岩性变化特征,这一阶段的湖泊未形成深湖,次生黄土较发育,并且频繁暴露地表形成了红黄交替的韵律层。

3.2 粒度分析与沉积阶段划分

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,一般水动力能量较强时,沉积物颗粒较粗,反之沉积物颗粒较细。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^[7-10]。

整体而言,2套湖相沉积物粒度的变化幅度较小,以粉砂和泥为主,绝大多数样品的粒度值集中在Udden-Wentworth粒度划分标准的粉砂级,粉砂含量高于50%的样品达到98.9%。萨拉乌苏组沉积物的粒度曲线表现为在粉砂级持续地窄频波动,期间虽有冲洪积的砂砾石层,但粒度曲线变化平缓,光释光年龄并未发生大幅变化,表明萨拉乌苏组为一套连续的湖相沉积。根据粒度曲线变化情况,结合露头,可将萨拉乌苏组由下至上划分为4个发展阶段,与岩性变化一致,4个阶段形成了一套完整的湖进-湖退序列(图4)。

第一阶段:195~152 m。由下至上砂的含量逐渐下降,粉砂含量逐渐上升,平均粒度表现出自下向上由粗到细的规律,表明水动力向上减小,流水携带能力减弱。从岩性看,下部沉积物色调较丰富,向上逐渐趋同,显示萨拉乌苏期早期经历了从物源丰富沉积速率较快到趋于稳定的沉积条件变化,是盆地下降湖泊快速充填的阶段。

第二阶段:152~90 m。砂的含量上升,粉砂和泥的含量下降,平均粒度缓慢变大,水动力逐渐增强。岩性上色调逐渐成为均一的黄绿色、土黄色,上部沉积物中出现泥砾及粗砂,表明汇入湖泊的水动力增大,沉积速率持续稳定上升,湖盆充填达到高峰。

表1 光释光测年结果

Table 1 OSL dating results of samples from drill cores

实验编号	U / 10^{-6}	Th / 10^{-6}	K /%	环境剂量率 / $(\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1})$	测试粒径 / μm	等效剂量 /Gy	年龄 /ka
2017-OSL-182	2.61	11.10	2.12	4.32	4~11	45.87 \pm 1.32	10.61 \pm 1.10
2017-OSL-188	2.84	11.00	1.87	4.08	4~11	102.19 \pm 2.94	25.05 \pm 2.61
2017-OSL-189	3.29	12.70	2.08	4.63	4~11	291.12 \pm 7.65	62.86 \pm 6.50
2017-OSL-192	2.99	11.80	2.25	4.60	4~11	349.35 \pm 9.70	75.87 \pm 7.87
2017-OSL-193	3.29	11.80	2.05	4.51	4~11	342.28 \pm 15.00	75.93 \pm 8.29

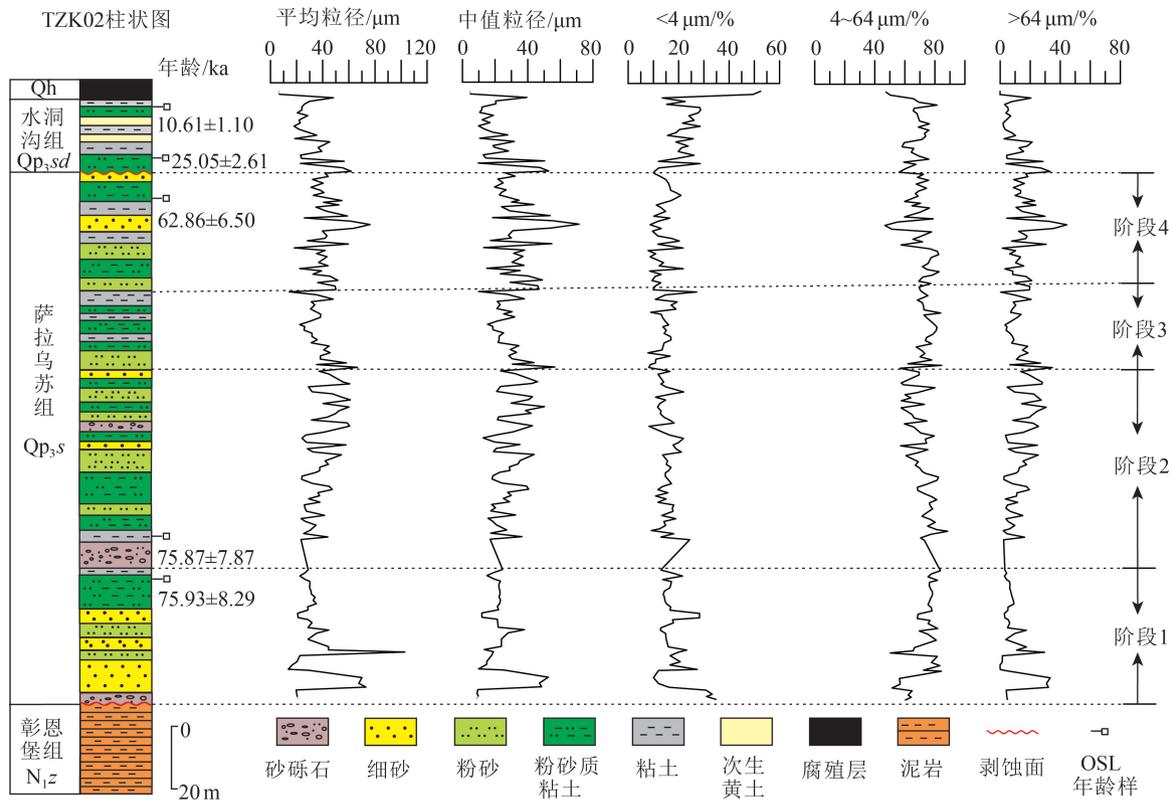


图 4 清水河盆地湖相沉积物粒度曲线

Fig. 4 Grain size distribution curve of the lacustrine sediments in Qingshuihe Basin

第三阶段:90~65 m。粉砂含量较第二阶段明显增加,砂含量明显减少,泥含量变化不大,平均粒度有向上变细的趋势。色调为黄绿色、灰绿色,没有出现泥砾及粗砂,表示湖泊水动力变弱后趋于稳定,进入并持续处于深湖环境。

第四阶段:65~27 m。砂的含量较第三阶段上升,粉砂含量下降,泥的含量变化不大,平均粒度向上增大,且沉积物中出现紫红色泥砾,水动力稳定增强,携带的粗粒物质增多。结合其上部的侵蚀面认为,这一阶段湖水开始变浅,即将退出盆地进而消失。

相比萨拉乌苏组,水洞沟组沉积物的粒度更细,其中砂的含量减少,泥的含量明显增加,粉砂含量变化不大,平均粒度显著变小。更细的粒度表明,这一阶段水洞沟湖的水动能较之前显著减弱,频繁暴露地表,说明湖泊持续处于浅水位,因补给不足而进入收缩期。

4 讨论

4.1 区域地层对比分析

已有研究表明,虽然晚更新世青藏高原内部及

周边地区古气候古环境分异明显^[11],但广大地区普遍存在古大湖,形成了一个显著的“泛湖期”^[12-13],而这一时期高原周边,如腾格里沙漠^[14]、河套地区^[15]、巴丹吉林沙漠^[16]、萨拉乌苏河^[17]等地同样广泛发育高湖岸或湖相地层。本文研究的晚更新世清水河盆地沉积的2套湖相地层,是“泛湖期”存在于青藏高原东北缘的又一证据。

将清水河盆地第四纪湖相沉积与周边地区进行对比,利用沉积学的证据可以将区域上的沉积环境联系起来(图5)。清水河盆地在76~63 ka沉积了萨拉乌苏组,在遭受了38 ka的沉积间断后于25~11 ka沉积了水洞沟组,这2个湖盆的发育时间和规律与相邻的红寺堡盆地2期古湖相似。红寺堡盆地萨拉乌苏组年代为119~54 ka,水洞沟组年代为32~11 ka,期间经历了22 ka的沉积间断^[6]。2个地区萨拉乌苏组和水洞沟组的沉积序列均相似,都具有完整的湖进-湖退沉积旋回,据此推断,在六盘山弧形山体夹持的第四纪压陷盆地中,古湖泊曾经普遍发育并具有很好的可比性。略有不同的是,清水河盆地萨拉乌苏组结束时间早于红寺堡盆地,沉积间断

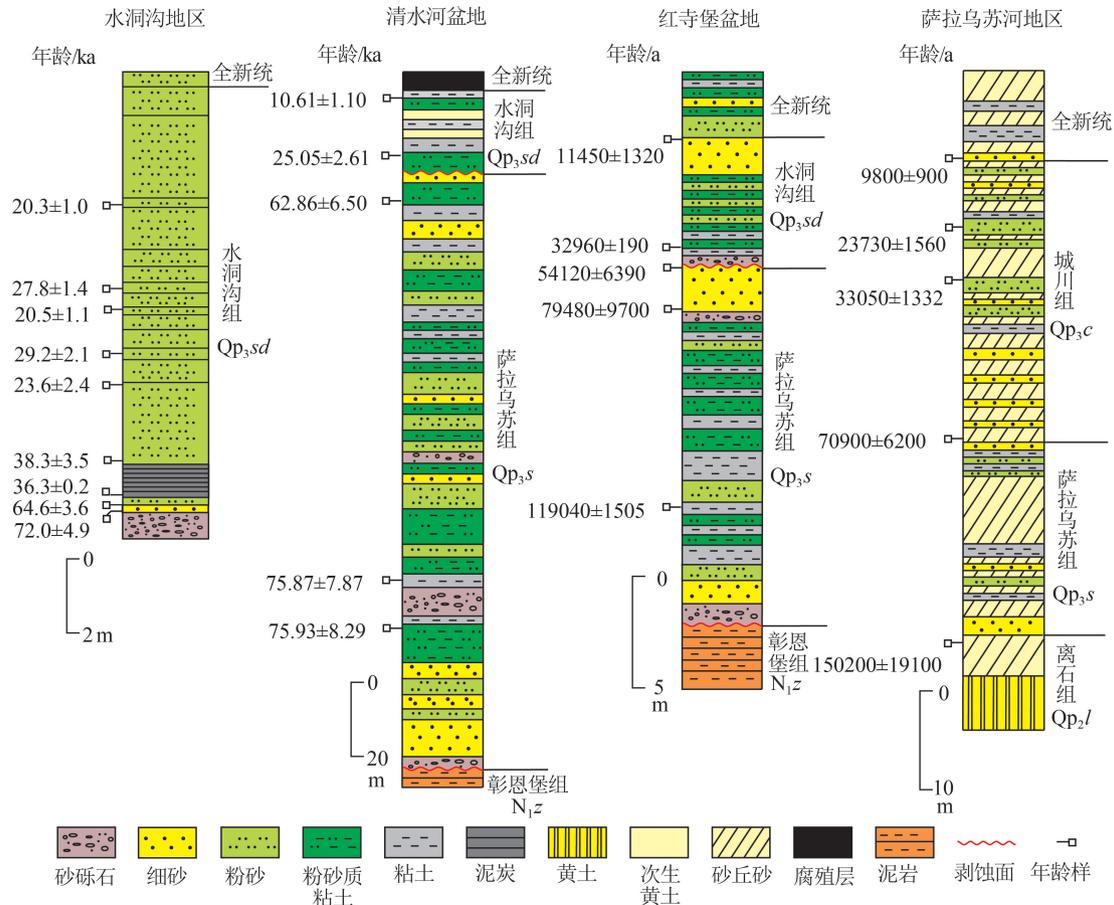


图5 清水河盆地及周边地区晚更新世沉积物对比(水洞沟年龄数据据参考文献[26];
红寺堡盆地年龄数据据参考文献[5];萨拉乌苏河年龄数据据参考文献[19])

Fig. 5 Comparison of the Late Pleistocene lacustrine sediments in Qingshuihe Basin and its surrounding areas

延续时间较长,主要与六盘山弧形构造带中4条主要断裂的活动性由南西向北东逐渐减弱有关^[18]。晚更新世受青藏高原北东向推挤,天景山断裂的活动时间早且活动强度大,造成了萨拉乌苏组和水洞沟组发育时间的不同。

内蒙古乌审旗萨拉乌苏河地区在150~70 ka沉积了萨拉乌苏组^[19-20],是华北晚更新世河湖相地层的标准地点。根据孢粉记录^[21]及处于末次间冰期东亚夏季风强盛期^[22-23]的气候背景,萨拉乌苏河地区当时的气候整体温暖湿润。70~10 ka,在末次冰期的干冷气候影响下,沉积了主要由风成砂堆积的城川组,表明这一阶段沙漠大规模扩张^[17,24]。与清水河盆地所处构造环境不同,晚更新世萨拉乌苏河地区构造活动性较弱,其沉积事件主要受气候条件影响,两地的萨拉乌苏组都是在温暖湿润的气候背景下形成的。不同点在于,清水河盆地在63~25 ka

的构造抬升和寒冷气候,造成了沉积间断,该时期由于萨拉乌苏河地区构造稳定,沉积并未间断,但气候转为干冷及地处沙漠-黄土过渡带,沉积了风积物占据主导地位的城川组。一直到23~9.8 ka才又经历了一次温湿环境,沉积了细碎屑物,这个时间可以与清水河盆地水洞沟组很好地对应,水洞沟组可能相当于城川组的上部层位。

4.2 古湖泊形成演化分析

萨拉乌苏河流域处于相对稳定的构造区,其湖相地层演化主要控制因素为气候变迁,而处在活动构造发育区的清水河盆地,2期古湖泊的形成演化控制因素更复杂。

晚更新世,青藏高原的持续隆升和北西向推挤受到鄂尔多斯和阿拉善两大刚性块体的阻挡,使天景山断裂整体上由早中更新世的逆冲转变为左旋走滑兼具逆冲的性质^[25],盆地持续下降。76~63 ka

期间,末次间冰期温暖湿润的气候为清水河盆地提供了充足的物源,粒度曲线上划分的第一阶段表现为粒度逐渐变粗的趋势,显示搬运能力增强,沉积速率加快。在第二、三阶段还原环境下,普遍发育灰绿色粉砂、泥,表示湖泊迅速进入深湖阶段,最后沉积了厚约 167.2 m 的萨拉乌苏组,至 63 ka,萨拉乌苏湖逐渐从盆地消失。

根据沉积和构造的证据,推测萨拉乌苏湖消失的原因为:①在 63~25 ka 天景山断裂在同心地区的逆冲表现较强烈,表现为在同心西南的石峡口沟古近寺口子组逆冲于上更新统沉积物之上^[26],这一构造事件使清水河盆地抬升,可能导致了萨拉乌苏湖的消亡。这一阶段的沉积速率大幅降低,在岩心上表现为沉积物的突变,在露头处表现为水洞沟组平行不整合覆盖在萨拉乌苏组之上。这一沉积间断发生时间早于红寺堡盆地,可能是由于天景山断裂在晚更新世的活动性明显强于烟筒山断裂和罗山断裂。②萨拉乌苏组顶部发现了冻融褶曲,而这一时期正好处于末次冰期第一阶段的晚期,证明此时出现了异常寒冷气候,可能造成了湖泊的突然衰退。

这一系列构造—气候事件在青藏高原周缘均有直接证据。在宁夏灵武水洞沟遗址 SDG2 剖面上也出现了类似的湖泊突然衰退现象,时限为 64~36 ka^[27-28]。兰州、共和盆地、陕晋峡谷、三门峡等地普遍存在一级 50 ka 以来的河流阶地^[29-30]。这些证据表明,清水河盆地晚更新世的沉积演化是在构造与气候的共同作用下完成的,其沉积特点与周边地区的相似性由当时气候环境的“大背景”决定,而不同的构造地貌导致了整个沉积过程的差异。

25~11 ka,天景山断裂的走滑属性增强^[3],在同心以西一带形成多个小型拉分盆地,为清水河盆地的拉伸及再次接受沉积提供了条件。此阶段全球进入末次冰期 MIS2 阶段,气候转冷并且波动频繁^[31-33],清水河下游的湖相沉积物中亦出现了冻融褶皱^[34]。上游降水减少,搬运能力降低,河流带来就近的沉积物,在同心一带以紫红色的泥质层沉积为主,在马家河湾一带以灰黑色泥质层为主,物源均来自附近出露的基岩,湖泊处于低能状态,沉积物粒度较细。这一阶段青藏高原东北缘甚至华北地区均不同程度出现了风成堆积,萨拉乌苏地区在 27.94~9.51 ka 阶段出现了大量风成砂^[19],水洞沟地

区由于气候变化,在 20 ka 以后便无人活动遗迹^[28,35],黄土高原地区泾阳南塬和西安席王黄土剖面也显示,22~10 ka 随着冬季风的增强,黄土沉降增厚,没有古土壤层出现^[36]。而同心地区 25~11 ka 期间水洞沟组湖积物中出现了多层次生黄土沉积,显示了该地区为干冷环境下,黄土和湖相沉积共同充填盆地的特征。该阶段一直持续到 11 ka 左右,随着末次冰期进入鼎盛期,干冷气候下的湖盆逐渐收缩直至消失。

晚更新世以来,受青藏高原隆升及全球气候波动影响^[37-38],在不同的构造部位和沉积区都有明显的地质响应^[39-40],这种远程效应直接表现在沉积物类型、气候环境效应、古生物特征、古人类活动等方面^[41-42]。而本次研究表明,晚更新世清水河盆地 2 期古湖的形成演化,受控于青藏高原北东向扩展和全球气候变化的双重因素。

5 结 论

(1)在清水河盆地同心地区发现了 2 套晚更新世湖相沉积,下部为萨拉乌苏组,光释光年龄为 76~63 ka;上部为水洞沟组,光释光年龄为 25~11 ka,两者为平行不整合接触。2 套湖相沉积是晚更新世青藏高原及其周缘“泛湖期”的新证据。

(2)通过钻孔岩性划分与粒度分析,由下至上将清水河盆地的萨拉乌苏组划分为 4 个沉积阶段,代表了晚更新世湖进—深湖—湖退的完整充填序列。而水洞沟组大量接受黄土沉积物,并长期处于浅湖和干冷环境。

(3)通过地层对比发现,清水河盆地和红寺堡盆地处于相似的构造环境,都发育萨拉乌苏组和水洞沟组湖相沉积,推断在六盘山弧形山体所夹持的晚更新世压陷盆地中古湖泊可能普遍发育。清水河盆地和萨拉乌苏河地区的萨拉乌苏组均在温暖湿润气候下形成,水洞沟组相当于城川组的上部。

(4)本次研究表明,晚更新世清水河盆地 2 期古湖的形成演化,受控于构造和气候的双重影响。晚更新世以来青藏高原 NE 向扩展,在清水河盆地至少经历了 2 次拉张和 1 次挤压。2 次扩展形成了萨拉乌苏湖和水洞沟湖,1 次挤压使天景山断裂逆冲造成萨拉乌苏湖消失,最终形成 63~25 ka 的沉积间断,湖泊消失可能还受到了末次冰期异常寒冷气候的影响。

致谢:参加本次野外工作的还有宁夏基础地质调查院王成、黄生金等同志,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 徐涛,杨家喜,刘源,等.宁夏南部晚更新世沉积物沉积特征及其构造意义[J].地学前缘,2013,20(4): 36-45.
- [2] 宁夏回族自治区地质调查院.中国区域地质志-宁夏志[M].北京:地质出版社,2017.
- [3] Shi W, Dong S W, Liu Y, et al. Cenozoic tectonic evolution of the South Ningxia region, northeastern Tibetan Plateau inferred from new structural investigations and fault kinematic analyses [J]. Tectonophysics, 2015, 649: 139-164.
- [4] 王斌,秦向辉,陈群策,等.鄂尔多斯地块西南缘宁夏固原地区原位地应力测量结果及其成因[J].地质通报,2020,39(7): 983-994.
- [5] Wang W T, Kirby E, Zhang P Z, et al. Tertiary basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence for basin formation during Oligocene transtension [J]. Geological society of America Bulletin, 2013, 125(3/4): 377-400.
- [6] 崔加伟,李振宏,刘锋,等.宁夏红寺堡盆地萨拉乌苏组地层时代重新厘定及意义[J].地质力学学报,2018,24(2): 283-292.
- [7] 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[J].自然科学进展,2000,10(3): 253-259.
- [8] 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[J].中国科学(D辑),2003,33(6): 563-568.
- [9] 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[J].第四纪研究,2008,28(2): 345-353.
- [10] 莱尔曼.湖泊的化学.地质学和物理学.王苏民,等译[M].北京:地质出版社,1989: 180-183.
- [11] 李吉均.中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式[J].第四纪研究,1990,3: 197-204.
- [12] 李炳元.青藏高原大湖期[J].地理学报,2000,55(2): 174-182.
- [13] 隆浩,沈吉.青藏高原及其邻区晚更新世高湖面事件的年代学问题——以柴达木盆地和腾格里沙漠为例[J].中国科学(D辑), 2015, 45: 52-65.
- [14] 张虎才,马玉贞,李吉均,等.距今 42~18 ka 腾格里沙漠古湖泊及古环境[J].科学通报,2002,47(24): 1847-1857.
- [15] 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[J].科学通报,2008,(10): 1207-1219.
- [16] 白咏,王乃昂,何瑞霞,等.巴丹吉林沙漠湖相沉积的探地雷达图像及光释光年代学证据[J].中国沙漠,2011,31(4): 842-847.
- [17] 杨劲松,王永,闵隆瑞,等.萨拉乌苏河流域第四纪地层及古环境研究综述[J].地质论评,2012,58(6): 1121-1132.
- [18] 秦翔,施炜,李恒强,等.基于 DEM 地形特征因子的青藏高原东北缘宁南弧形断裂带活动性分析[J].第四纪研究,2017,37(2): 213-223.
- [19] 靳鹤龄,李明启,苏志珠,等.萨拉乌苏河流域地层沉积时代及其反映的气候变化[J].地质学报,2007,81(3): 307-315.
- [20] 李保生,靳鹤龄,祝一志,等.萨拉乌苏河流域第四系岩石地层及其时间界限[J].沉积学报,2004,22(4): 676-682.
- [21] 邵亚军.萨拉乌苏河地区晚更新世以来的孢粉组合及其反映的古植被和古气候[J].中国沙漠,1987,7(2): 26-31.
- [22] 孙东怀,周杰,蒋复初,等.末次间冰期黄土高原夏季气候的初步研究[J].科学通报,1995,40(20): 1873-1873.
- [23] 孙东怀,安芷生,吴锡浩.黄土高原夏季气候格局的演化[J].中国科学(D辑),1996,26(5): 417-422.
- [24] 孙继敏,丁仲礼,袁宝印,等.再论萨拉乌苏组的地层划分及其沉积环境[J].海洋地质与第四纪地质,1996,16(1): 23-31.
- [25] 张维岐,焦德成,柴焯章,等.宁夏香山-天景山弧形断裂带新活动特征及 1709 年中卫南 7 1/2 级地震形变带[J].地震地质,1988, 10(3): 12-20.
- [26] 张维岐,焦德成,柴焯章,等.天景山活动断裂带[M].北京:地震出版社,2015: 93-99.
- [27] 刘德成,王旭龙,高星,等.水洞沟遗址地层划分与年代测定新进展[J].科学通报,2009,54: 2879-2885.
- [28] 高星,袁宝印,裴树文,等.水洞沟遗址沉积-地貌演化与古人类生存环境[J].科学通报,2008,53(10): 1200-1206.
- [29] 陈晓龙,范天来,张复,等.鄂尔多斯高原周缘黄河阶地的形成与青藏高原隆升[J].地理科学进展,2013,32(4): 595-605.
- [30] Jia L Y, Hu D G, Wu H H, et al. Yellow River terrace sequences of the Gonghe - Guide section in the northeastern Qinghai - Tibet: implications for plateau uplift[J].Geomorphology, 2017, 295: 323-336.
- [31] Chlachula J. The Siberian loess record and its significance for reconstruction of Pleistocene climate change in north-central Asia[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22: 1879-1906.
- [32] Antje H L V. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: A database [J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21: 1185-1212.
- [33] 崔之久,陈艺鑫,张威,等.中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨[J].第四纪研究,2011,31(5): 749-764.
- [34] 张珂,刘开瑜,杨景春.宁夏清水河下游晚更新世冰卷泥的发现及意义[J].北京大学学报(自然科学版),2000,5(36): 714-718.
- [35] 高星,李进增, Madsen D B, 等.水洞沟的新年代测定及相关问题讨论[J].人类学学报,2002,21(3): 211-218.
- [36] 雷祥义,岳乐平.陕西关中晚更新世黄土-古土壤序列特征及其记录的古环境变迁[J].地质论评,1997,43(5): 555-560.
- [37] Harris N. The elevation history of the Tibetan Plateau and its implications for the Asian monsoon [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 241: 4-15.
- [38] Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east west extension [J]. Nature, 1995, 374: 49-52.
- [39] 施雅风,李吉均,李炳元.青藏高原晚新生代隆升与环境变化[M].广州:广东科技出版社,1998: 415-442.
- [40] 张培霞,郑德文,尹功明,等.有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J].第四纪研究,2006,26(1): 5-13.
- [41] 张克信,王国灿,洪汉烈,等.青藏高原新生代隆升研究现状[J].地质通报,2013,32(1): 1-18.
- [42] 葛肖虹,刘俊来,任收麦,等.青藏高原隆升对中国构造-地貌形成、气候环境变迁与古人类迁徙的影响[J].中国地质,2014, 41(3): 698-714.