

民和盆地马厂塬遗址古地震与 暴雨山洪泥石流事件光释光测年研究

郭永强, 黄春长, 周亚利, 庞奖励, 查小春, 张玉柱, 胡贵明, 周强

陕西师范大学旅游与环境学院, 西安, 710062

内容提要:通过对青海民和盆地详细的野外调查,在民和马厂塬遗址周围首次发现多处黄土地裂缝(呈现 N 30°~40°W 和 N40°~50°E 走向)分布区。详细观察可见有一层红色黏土覆盖文化层或者人类活动扰动层,并且填充了这些裂隙,判定这是古地震与暴雨山洪泥石流事件的沉积记录。对马厂塬遗址边墙村南剖面两个地点相同地层单元平行采样,应用单片再生剂量法(SAR)技术对红色泥流及其上下黄土夹层进行释光(OSL)测年研究,并对这些样品等效剂量(De)值进行统计分析,获得了较为可靠的 OSL 年代。综合 OSL 年代结果、全新世黄土地层关系、考古记录及研究区马家窑文化类型的放射性 ^{14}C 测年数据,确定这次古地震及暴雨山洪泥石流事件发生在 4.9 ka BP 左右,对应于马家窑文化类型(5.3~4.8 ka BP)晚期。本文研究揭示了史前古地震事件与暴雨山洪泥石流沉积物的 OSL 特征,对于马厂塬遗址环境考古和深刻认识民和盆地自然灾害的发生规律具有重要的科学意义。

关键词:古地震;暴雨山洪泥石流事件;光释光测年;马厂塬遗址;民和盆地

光释光(optically stimulated luminescence, 简称 OSL)测年技术已经运用到古地震事件的研究,尤其在构造活动断裂带,对记录地震事件的相关沉积物进行光释光测年研究,可以获得地震事件的年代框架,有效建立特大地震的时间序列,促进和提高我们对特大地震在重复周期规律上的认识(Porat et al., 1997; Amit et al., 1999; Lu Huayu et al., 2002; Chen Yuegao et al., 2003, 2009; Cheong et al., 2003; Fattahi et al., 2007, 2009, 2010)。由于与地震事件相关的沉积物可能在沉积埋藏之前经历的曝光并不彻底,且从现代大地震相关沉积物中得到验证,故直接测定地震相关的快速沉积物的光释光年龄一直是地震研究的难题(Yang et al., 2012)。然而地震事件的相关快速沉积物可能包含晒退好的颗粒,可获得较为准确的 OSL 年龄,且与 ^{14}C 年代结果有较好的一致性(Liu Jinfeng et al., 2010)。近年来,OSL 技术、方法和应用都取得了很大发展,尤其是光释光单片再生剂量法(SAR)已经被广泛应用在地震、洪水、泥石流等曝光不充分的事件沉积物的测年(Zhang Jiafu et al., 2003; Chen et al., 2008; Fan Qishun et al., 2010; Zhao Hua et

al., 2011; Huang Changchun et al., 2011; Wang Hengsong et al., 2012a; Zhou Liang et al., 2013; Amos et al., 2013)。

民和盆地位于甘青两省的交界地带,是青藏高原和黄土高原的过渡区域,同时分布重要的新石器和青铜器时期文化遗址,也是我国史前人类活动和环境变化研究的热点区域(Xie Duanju, 2002; Dong Guanghui et al., 2013a, 2013b; Wang Lin et al., 2014)。其中,青海民和官亭盆地的大地震及伴随的暴雨山洪泥石流事件造成了著名的喇家遗址灾难事件(Huang Chunchang et al., 2013; Zhang Yuzhu et al., 2013, 2014; Yin Zhiqiang et al., 2013)。青海湟水谷地全新世和历史时期的地震频繁发生,而目前民和盆地全新世断裂活动和地震资料严重不足,现有的历史地震记录有限,并且缺乏有效考证,而长时间地震资料序列可以提高地震与活动断裂在重复周期规律的认识(Zhang Huquan & Yang Zhongxuan, 1996; Tu Delong et al., 1997, 1998; Yuan Daoyang et al., 2005)。加之沿湟水谷地人口集中且经济相对发达,所以古地震事件的研究对该区域地震风险评估及地质灾害预防等具有十

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41471071)和陕西师范大学优博项目(编号 S2014YB02)资助成果。

收稿日期:2014-11-03;改回日期:2015-05-15;责任编辑:周健。

作者简介:郭永强,1986 年生。博士研究生,主要从事环境变迁与入地关系演变研究。Email: geogyq@126.com。通讯作者:黄春长,1954 年生。教授,博士生导师,主要从事环境变迁与入地关系演变研究。Email: cchuang@snnu.edu.cn。

分重要的现实意义。

近几年,我们在民和盆地进行了大量的野外调查,在民和马厂塬遗址边墙村地点首次发现多处黄土地裂缝及其被红色泥流充填的现象。本文集中解决马厂塬遗址古地震和暴雨山洪泥石流事件的年代问题,通过系统对马厂塬遗址两个地点的红色泥流及上下黄土古土壤夹层平行采样,分离出石英颗粒(63~90 μm),采用单片再生剂量法(SAR)进行测年研究,并结合全新世黄土地层关系、考古记录以及研究区马家窑文化类型放射性¹⁴C 数据,探讨暴雨山洪泥石流沉积物 OSL 测年的释光特征,获得古地震与暴雨山洪泥石流事件的年代框架,为该区域灾害风险评价和环境考古研究等提供重要的科学依据。

1 研究区背景

民和盆地地处青藏高原东北缘,主要受到拉脊山断裂 NE 向凸出的弧形挤压逆冲断裂带的影响(Yuan Daoyang et al., 2005)。同时在区域局部构造应力场的支配下,研究区的断裂一般呈 NNW 或近 EW 向分布(图 1),第四纪时期盆地凹陷消亡,多条外流水系纵横切割,形成第四纪多级台地和山地丘陵(Zhang HUquan & Yang Zhongxuan, 1996)。其中,山丘基底多为侏罗纪—白垩纪红色砂岩及其

第三纪红色黏土,上覆第四纪黄土(Tu Delong et al., 1997, 1998; Yuan Daoyang et al., 2005)。野外观察发现,研究区第四纪风成黄土层下部是河流相砾石层,落在基座阶地上。民和马厂塬遗址位于民和县川口镇边墙村,地处湟水二级河流阶地之上,阶地面大约高出现在湟水平水位 75~95 m(图 2)。甘肃兰州海石湾镇(红古区)位于湟水南岸,与马厂塬遗址隔河相对,其位于湟水北岸的一级阶地,高出现在湟水平水位 25~30 m(图 2)。该区域多年平均降水量介于 250~350 mm 之间,周围山区 600 mm 以上,全年 65% 的降水集中在 6~9 月。马厂塬遗址首先于 1923 年被瑞典学者安特生发现,并先后又经过 1982 年、1984 年、1987 年、2000 年^①等多次复查,确认该遗址文化内涵丰富,其中包含有马家窑文化马家窑类型、马厂类型、齐家文化、辛店文化和唐汪式陶器五种不同文化类型(青海省文物考古研究所, 1993; 国家文物局, 1996)。

2 剖面特征与样品采集

2012~2014 年对民和盆地多次详细的野外考察,在民和县马厂塬遗址边墙村(BQC)周围首次发现多处黄土中有两组贯穿黄土层的地裂缝,呈现 N30°~40°W 和 N40°~50°E 走向,如马厂塬遗址边墙村西

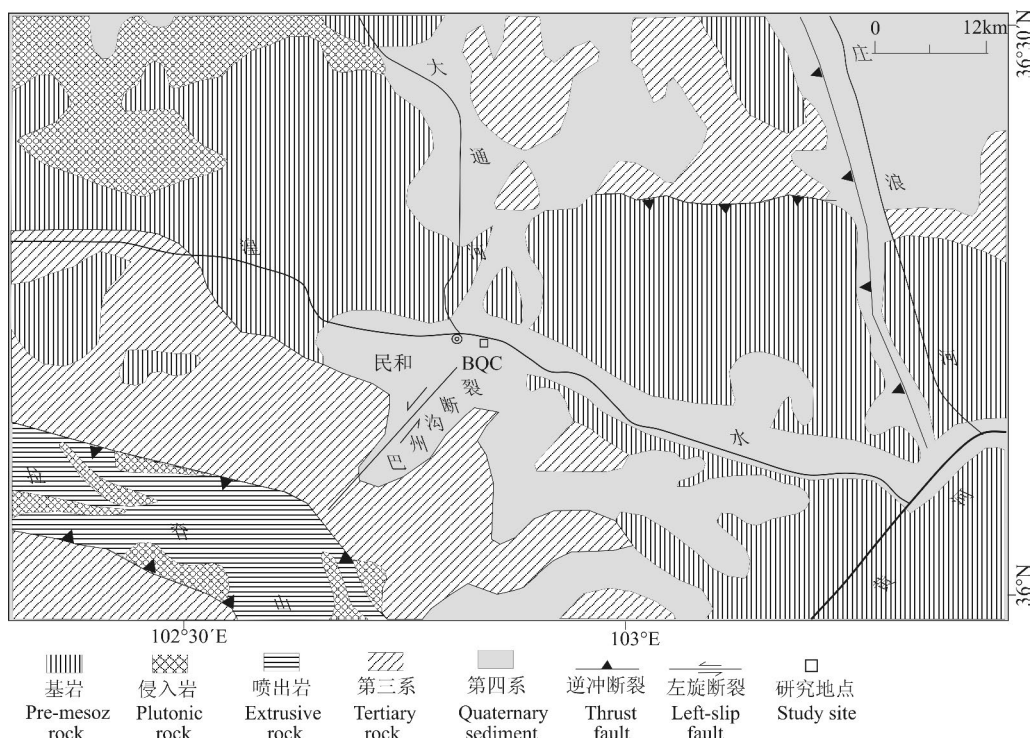


图 1 研究区地质与断裂带分布图(修改自 Lu Huayu et al., 2004)

Fig. 1 The distribution of faults and the geologic map of the study area (modified from Lu Huayu et al., 2004)

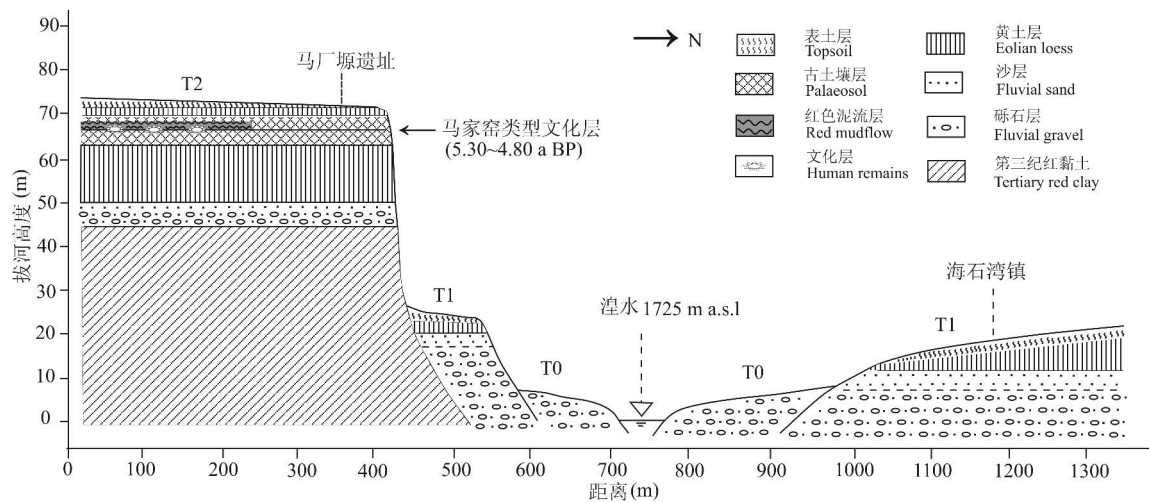


图 2 民和盆地马厂塬遗址综合剖面地层结构和地形示意图

The topography and the pedo-stratigraphy at the Machangyuan ruins on the second terrace of the Huangshui River valley

(BQW)和边墙村南(BQS)地点,这些地裂缝是古地震事件的地质证据(图 3 和图 4)。同时,一层团块状的红色黏土所充填这些黄土地裂缝,并随着遗址古地面波状起伏;其中在马厂塬遗址边墙村南(BQS)剖面发现红色黏土层直接覆盖在马厂塬遗址马家窑文化类型的古地面、人类活动扰动层和文化层之上(图 4),这些红色黏土是马厂塬遗址暴雨山洪的地质证据。对马厂塬遗址周围进行大量详细的野外调查,这些地裂缝和红色泥流集中分布在遗址偏南部,其地形位置靠近出露晚第三纪红黏土的冲沟口外的洪积扇前沿和阶地后部地区,而位于阶地前沿的遗址探坑内却未发现红色黏土充填黄土地裂缝的相关遗迹,其详细的地质描述和地质证据等将另外发表(图 2)。这些充填地裂缝的红色黏土物质被认为是地震之后暴雨山洪泥石流事件的沉积记录。根据 Kang Zhicheng 康志成等(2004)有关泥石流的分类,由于红色黏土本身细颗粒含量很高,且没有任何石砾等粗颗粒固体物

质,故称为红色泥流(图 3, 图 4)。
野外考察发现,在马厂塬遗址边墙村南 BQS 剖面出露的红色泥流、马家窑文化层和人类活动扰动层以及全新世黄土地层关系清楚(图 4),对该剖面的地层划分和详细描述如表 1。为了获得可靠的古地震与暴雨山洪泥石流事件发生年代,在剖面深度为 60~65 cm 处的表土层(TS)、90~95 cm 的红色泥流层(RC)和 125~130 cm 的古土壤层(S_0)分别进行采样,且在相同地层单元且沉积界限清晰的两个剖面平行取样,分别命名 BQC-A 和 BQC-B 剖面,共获得 6 个 OSL 样品。

3 研究方法

3.1 环境剂量率的测定

环境剂量率主要来自沉积地层周围 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 等放射性元素及其衰变产生的 α 、 β 和 γ 射线以及宇宙射线的贡献(Aitken, 1998)。本文所

表 1 民和马厂塬遗址边墙村南剖面(BQS)全新世地层划分及描述
Table 1 Pedological and stratigraphic descriptions of soil and sediments in the south of the Bianqiangcun (BQS) profile at the Machangyuan ruins in the Minhe basin

深度 (cm)	地层名称	地层符号	土壤与沉积学特征描述
80~0	表土层	TS	浊橙色,粉砂质黏土,团粒结构,疏松多孔,多蚯蚓孔和粪团,多植物根系
125~80	红色泥流沉积层	RC	亮红棕色,黏土质粉砂质地,团块状构造,显示出粘稠态流动的内部结构,厚度 15 cm 左右,随遗址古地面波状起伏,垂直方向颜色和结构构造差异显著,覆盖了马厂塬遗址文化层或者人类活动扰动层,并且充填黄土地裂缝
230~125	古土壤层	S_0	浊橙色,粉砂质地,团粒结构,成壤较弱,其顶部为马场垣遗址文化层或者人类活动扰动层
255~230	过渡性黄土层	L_t	浊黄橙色,粉砂质地,疏松多孔,具有微弱的成壤改造
?~255	马兰黄土层	L_1	浊黄橙色,粗粉砂质地,疏松多细小孔隙,未见底



图 3 民和盆地马厂塬遗址边墙村西(BQW)地点的古地震裂隙与暴雨山洪泥流照片

Fig. 3 The loess ground fissures were filled with the red mudflow at the west of the Bianqiangcun (BQW) site in the Minhe basin

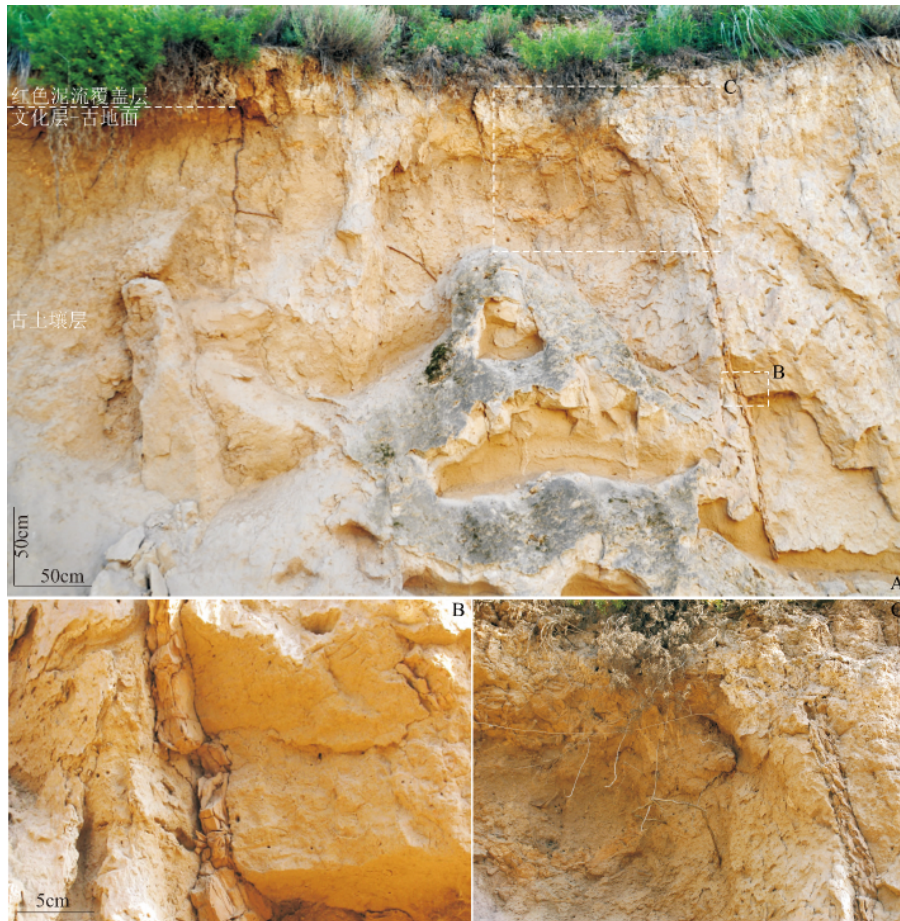


图 4 民和盆地马厂塬遗址边墙村南(BQS)剖面古地震裂隙与暴雨山洪泥流填充情况照片

Fig. 4 The red mudflow overlying the Majiayao (MJY) Phase Culture and filled with loess ground fissures along the trench wall at the Machangyuan ruins in the Minhe basin

A—BQS 剖面全景; B—黄土地裂缝内充填红色黏土的局部照片; C—红色黏土覆盖在文化层古地面并且充填黄土地裂缝局部照片

A—BQS profile at the Machangyuan Ruins; B—the ground fissures in loess infilled with the red mudflow;

C—the red clay overling the Majiayao culture layers at the Machangyuan Ruins

有样品的 U、Th、K 含量的测定是在中国原子能研究院通过中子活化法完成。宇宙射线对剂量率值的贡献是依据样品采样地的经纬度、海拔高度、埋藏深度等相关方程计算获得 (Prescott and Hutton, 1994)。样品的含水量是结合实验室测定的样品含水量并结合青海地区土壤含水量研究成果进行校正获得 (Xu Zhenghui et al., 2010)。最后, 根据相关公式和转换系数计算了样品的剂量率 (Aitken, 1998)。

3.2 等效剂量的测量

在实验室首先将 OSL 样品在暗室红光条件下, 削去不锈钢管两端各 2 cm 左右的表层部分, 用于测定样品中 U、Th、K 含量和含水量。再将中间部分的样品倒入 1000 mL 烧杯中, 用过量稀 HCl (10%) 浸泡去除样品中的碳酸钙等碳酸盐类物质, 然后加入足量 H_2O_2 (30%) 以消解其中的有机质, 待杯中样品无明显反应后用蒸馏水洗至中性。用湿筛法筛选出不同粒径的组分, 本文选择粒径为 $63 \sim 90 \mu m$ 的石英作为本次测年的材料, 用 40% HF 溶液浸蚀样品 40 min 以去除长石矿物, 且通过 IR 检验石英颗粒的纯度。在铝片 (直径 0.97 cm) 中间 5 mm 范围涂抹一层硅油, 将提纯的石英颗粒单层均匀铺在样片上供仪器测量。用丹麦 Risø 国家实验室生产的 Risø TL/OSL DA-20 型全自动释光仪测量, 辐射源为 $^{90}Sr/^{90}Y$ 型 β 源, 其中蓝光的激发光源波长为 470 ± 30 nm, 滤光片为 HoyaU-340, 红外激光波长为 880 ± 80 nm, 光电倍增管为 EMI9235QB15。样品等效剂量值 (De) 采用单片再生剂量 (SAR) 法测定, OSL 信号采用前 5 个通道减去紧接着 6~10 个通道的均值, 每个样品制备 20 个以上的样片, 生长曲线的拟合采用指数或者线性方法计算样品的

De 值。

4 实验结果与分析

4.1 实验条件的选择

根据 Murray 和 Wintle 研究 (Murray and Wintle, 2000, 2003; Wintle and Murray, 2006), 用 SAR 法对样品测量过程中, 反复加热样品可能造成石英颗粒灵敏度的改变以及电子的热转移现象。为了找到本实验石英颗粒样品 SAR 法合适的测量条件, 分别对古土壤 (BQC-A3) 和红色泥流沉积 (BQC-B2) 样品进行预热和剂量恢复实验。其中, 预热实验是以 $20^\circ C$ 为间隔, 温度从 $180 \sim 300^\circ C$ 逐渐升高对单片进行预热 10 s, 每个温度点至少测量 3 个样片。结果如图 5 所示, 样品 BQC-A3 和 BQC-B2 分别在 $180 \sim 240^\circ C$ 和 $180 \sim 280^\circ C$ 出现一个明显的预热坪区。热转移实验表明 BQC-A3 和 BQC-B2 在 $220^\circ C$ 因热转移效应生成的 De 值分别是 0.07 和 0.15 Gy, 相当于给定剂量的 0.4% 和 0.9%, 因此热转移对本实验样品等效剂量的影响可以忽略不计。对样品 BQC-A3 和 BQC-B2 的剂量恢复实验表明, 在温度 $220^\circ C$ 时恢复剂量与实验剂量比率分别是 0.96 和 1.04。此外, 根据这些样品满足循环比介于 $0.9 \sim 1.1$ 和回授率小于 5% 的实验要求。最终我们选择预热温度 $220^\circ C$, 实验剂量之后的预热温度为 $180^\circ C$ 的实验条件。如图 6 所示, 古土壤样品 BQC-A3 和红色泥流沉积样品 BQC-B2 的释光信号晒退曲线在 1 s 之内都快速衰减到本底值, 说明样品释光信号主要为快速组分晒退, 且两者的生长曲线经过原点并呈现近似指数式的增长, 均未达到饱和。由此证明样品的实验条件合适以及石英颗粒的感量变化得到很好的校正。

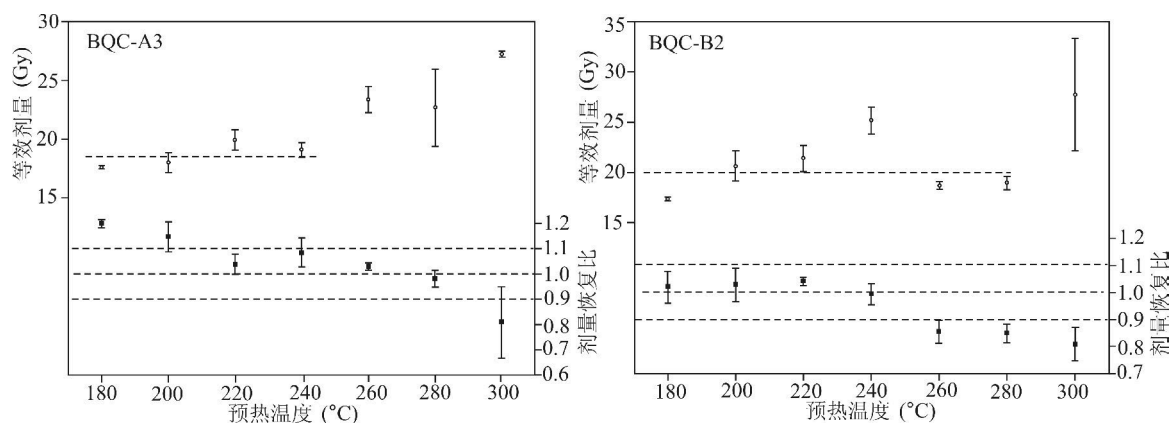


图 5 样品 BQC-A3 和 BQC-B2 预热温度和剂量恢复实验数据图

Fig. 5 Preheat temperature and dose recovery (given/measured dose) experiments for samples BQC-A3 and BQC-B2

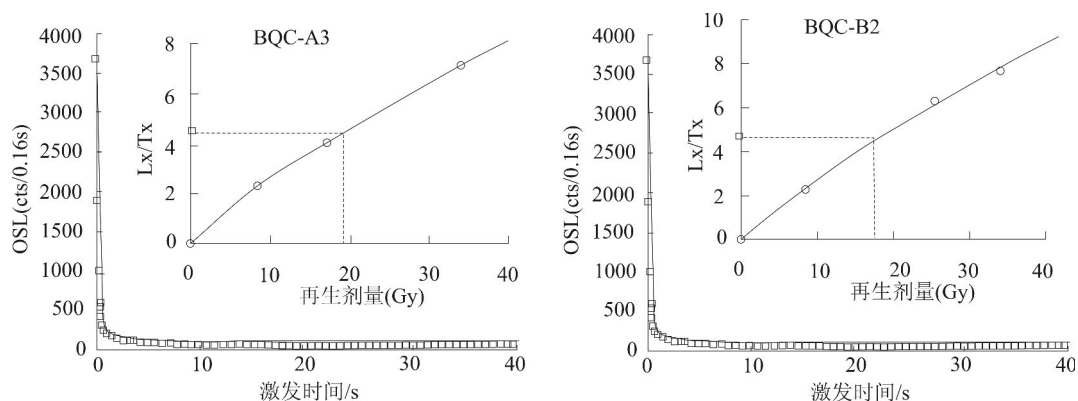


图 6 样品 BQC-A3 和 BQC-B2 OSL 信号衰减与生长曲线图(内插图)

Fig. 6 Decay and growth curve for samples BQC-A3 and BQC-B2

4.2 等效剂量值的晒退特征分析及 OSL 年龄确定

光释光测年中包含测定许多变量,而每一种都有相关的不确定性,故对等效剂量值的统计模型和方法分析这种测量的变化和不确定性,辨别沉积物的晒退程度并挑选出沉积物晒退较为彻底的样品,以获取准确的释光年代是十分必要的(Galbraith and Roberts, 2012)。一般情况下晒退不好的样品会呈现出不对称的偏态分布且 De 值分布离散性较大,而晒退良好的样品则呈现出对称的正态分布且

De 值分布较为集中(Olley et al., 1998, 1999)。民和马厂塬遗址边墙村剖面古土壤样品 BQC-A3 的 De 值分布相对集中,离散度较小,其分布频率直方图明显地呈现出一种对称的正态分布,反映出该样品在最后一次曝光埋藏之前经过充分的曝光(图 7a)。而红色泥流 BQC-B2 的 De 值分布分散,离散度大,其分布频率直方图明显的呈现出一种正偏态的不对称分布(图 7b)。这说明对民和马厂塬遗址 BQC 剖面红色泥流沉积物存在晒退不彻底问题。

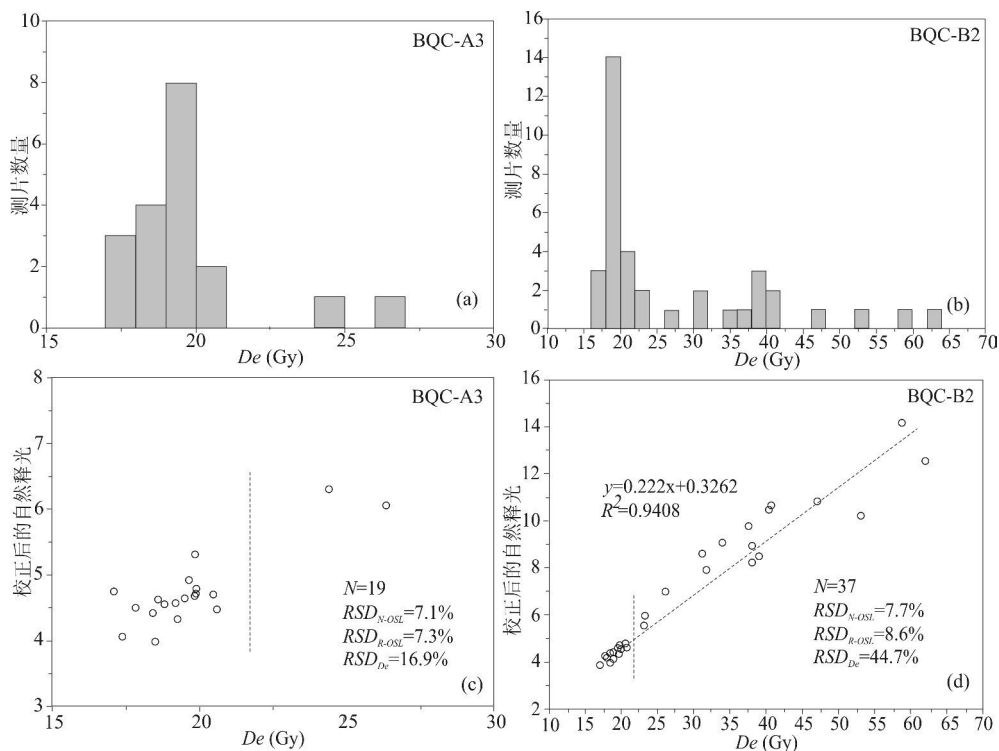


图 7 样品 BQC-A3 和 BQC-B2 等效剂量频率分布及等效剂量相对于感量变化校正后的自然释光信号离散分布图

Fig. 7 Histograms distributions of equivalent dose (De) and plots of recovery De versus sensitivity-corrected natural OSL signal for sample BQC-A3 and BQC-B2

考虑到马厂塬遗址边墙村剖面的黄土古土壤是典型的风成黄土,晒退良好,如样品 BQC-A3 的 RSD_{De} 值为 16.9%,且其频率直方图显示出正态分布,故对于此类样品(BQC-A1、BQC-A3、BQC-B1、BQC-B3)其年龄计算是去除离散异常值之后,计算剩余所有样片 De 值的平均值(图 7c)。而 BQC 剖面红色泥流样品(BQC-A2 和 BQC-B2)的晒退不彻底,直接平均所有 De 值会高估沉积物的年龄,故我们采用 Zhang 等(2003)提供的统计方法挑选出晒退较为彻底的样片。该模型中,样片的离散度用相对标准偏差(RSD)表示,单片的等效剂量、自然释光和第一次再生剂量释光信号的离散度分别用 RSD_{De} 、 RSD_{N-OSL} 、 RSD_{R-OSL} 值表示。通过对比自然 OSL 信号与第一个再生 OSL 信号的 RSD 大小,可获得样品比较真实的埋藏 De 值。红色泥流样品 BQC-B2 所有样片的 De 值分布呈现出明显的线性关系,其相关率为 94.1%, RSD_{De} 值为 44.7%,表明该样片晒退程度不彻底,而经过挑选后所有样片的 RSD_{N-OSL} 与 RSD_{R-OSL} 值非常接近,分别是 7.7% 和 8.6% (图 7d)。从 BQC-B2 挑选后的样片也显示正偏态的频率分布,故所选择的样片可能受到较好的晒退,这些样片等效剂量的平均值可接近样品的真实埋藏剂量。这也表明暴雨山洪泥石流沉积物存在较多曝光彻底颗粒的可能,尤其是这种稀性暴雨山洪泥石流沉积物(Wei Mingjian et al., 2008)。最后,根据样品最终的 De 值和环境剂量率利用 AGE. exe 程序计算出所有样品的 OSL 年龄,样品 OSL 年龄结果见表 2。

5 古地震与暴雨山洪泥石流事件的年代框架及可靠性

对马厂塬遗址边墙村 BQC-A 和 BQC-B 两个剖面的表土层(TS)、红色泥流沉积层(RC)和古土壤层(S_0)相同地层单元进行平行采样与测年分析,共获得 6 个 OSL 年龄,基本控制了这次古地震与暴

雨山洪泥石流事件的年代框架(图 8)。其中,BQC-A 与 BQC-B 两个剖面的上下土壤夹层 OSL 年龄分别是 4.86~5.47 ka BP 和 4.88~5.42 ka BP,这界定了中间红色泥流层的上限和下限。同时根据 OSL 直接测定这层红色泥流沉积物的年龄是 4.91~4.93 ka BP 之间,基本落在上下黄土层释光年代范围之间。所有这些 OSL 年龄都随着地层深度增加而增大,这些也反映了样品 OSL 年代的可靠性。

野外调查发现,这一层红色泥流覆盖在马家窑文化层古地面之上,并充填了黄土地裂缝(图 4)。根据马厂塬遗址两个剖面的 OSL 测年结果,同时结合甘青地区考古记录和马家窑文化类型的马家窑期、半山期和马厂期文化类型 ^{14}C 测年数据(Xie Duanju, 2002),对比发现,马厂塬遗址古地震与暴雨山洪泥石流事件的 OSL 年龄基本落在马家窑期文化类型的年代范围,两者具有良好的一致性(图 9)。故最终判定马厂塬遗址这次古地震与暴雨山洪泥石流事件发生在 4.9 ka BP 左右,对应于马家窑类型(5.30~4.80 ka BP)文化晚期。前人已经结合放射性 ^{14}C 技术和 OSL 测年技术成功应用到屈家岭文化、辛店文化等文化遗址,建立了相关的年代序列,并进一步验证 OSL 技术的可靠性和优点(Fu Xiao et al., 2010; Hou Guangliang et al., 2012; Sun Yongjuan et al., 2010, 2012)。这样,青海民和马厂塬遗址考古记录和文化层印证了该剖面样品的 OSL 年龄数据的可靠性。

6 结论

通过详细的野外调查和系统采样,应用 OSL 测年技术对古地震与暴雨山洪泥石流事件进行测年研究。对民和盆地马厂塬遗址 BQC 剖面不同沉积物进行预热坪区、热转移、剂量恢复等一系列实验条件的测定,选择合适的预热温度和 Cut heat 组合,有效测定每个样品的等效剂量,通过对不同样品 De 值统计分布特征分析,挑选出晒退较为彻底颗粒的

表 2 青海民和盆地马厂塬遗址边墙村剖面光释光测年数据表

Table 2 Summary of the dosimetry, equivalent dose and OSL dates for the samples from the Machangyuan ruins in the Minhe basin

样品编号	沉积物性质	深度(cm)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	K (%)	含水量 (%)	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	OSL 年龄 (ka)
BQC-A1	表土(TS)	60~65	4.52 \pm 0.14	11.6 \pm 0.32	2.16 \pm 0.06	11.5	3.97 \pm 0.77	19.26 \pm 0.28	4.86 \pm 0.12
BQC-A2	红色泥流沉积(RC)	90~95	4.13 \pm 0.13	13.0 \pm 0.35	2.37 \pm 0.07	12.0	4.13 \pm 0.08	20.25 \pm 0.44	4.91 \pm 0.14
BQC-A3	古土壤(S_0)	125~130	3.00 \pm 0.11	12.0 \pm 0.34	2.04 \pm 0.06	12.0	3.50 \pm 0.07	19.10 \pm 0.13	5.47 \pm 0.12
BQC-B1	表土(TS)	60~65	4.35 \pm 0.12	11.3 \pm 0.32	2.15 \pm 0.06	11.5	3.90 \pm 0.07	19.02 \pm 0.56	4.88 \pm 0.18
BQC-B2	红色泥流沉积(RC)	90~95	3.47 \pm 0.12	12.3 \pm 0.34	2.36 \pm 0.06	12.0	3.91 \pm 0.07	19.27 \pm 0.14	4.93 \pm 0.10
BQC-B3	古土壤(S_0)	125~130	2.75 \pm 0.11	12.1 \pm 0.34	2.03 \pm 0.06	12.0	3.43 \pm 0.07	18.60 \pm 0.38	5.42 \pm 0.16

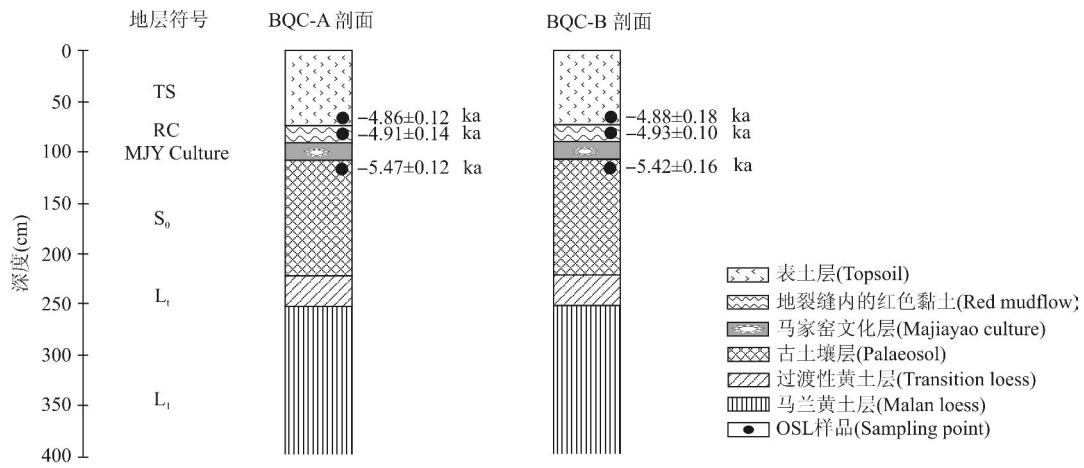


图 8 青海民和盆地马厂塬遗址边墙村(BQC)地层剖面图

Fig. 8 Detailed subdivisions of pedo-stratigraphy in the Bianqiangcun (BQC) profiles at the Machangyuan ruins in the Minhe basin

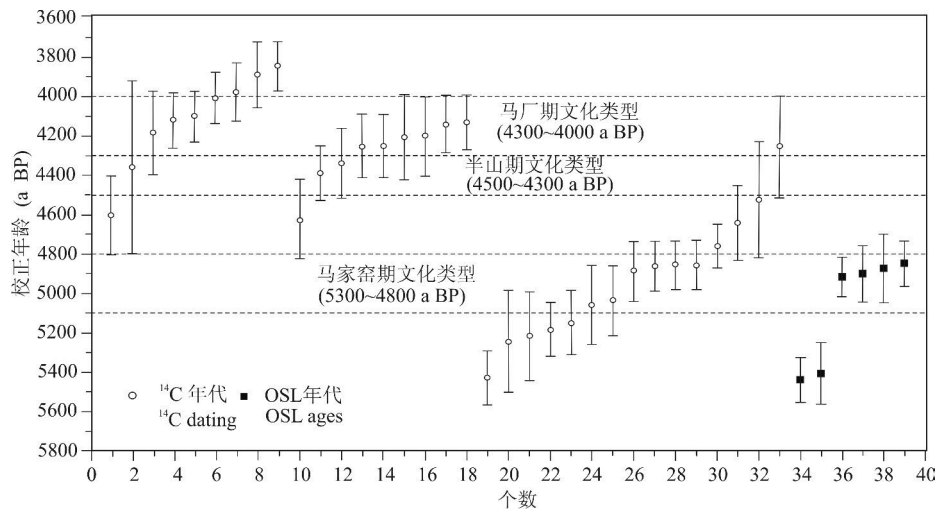


图 9 民和盆地马厂塬遗址边墙村南(BQS)剖面 OSL 年龄与甘青地区马家窑文化类型、马厂类型和半山文化类型¹⁴C 年龄分布图(¹⁴C 数据来自 Xie Duanju, 2002)

Fig. 9 Distribution of the calibrated ¹⁴C dates on the charcoal from the study area of the Majiayao phase culture, Machang phase culture, Banshan phase culture and the OSL dates of south of the Bianqiangcun (BQS) profile at the Machangyuan ruins in the Minhe basin

De 值参与年龄的计算。红色泥流样品的 De 值频率直方分布图呈正偏态,且线性相关率 94.1%,说明暴雨山洪泥流沉积物包含晒退不彻底的颗粒。通过对比自然 OSL 信号与第一个再生 OSL 信号的 RSD 大小,获得样品埋藏期间比较真实的 De 值。综合 OSL 测年结果、全新世黄土地层关系、考古记录和研究区文化遗址的¹⁴C 测年数据,判定这次古地震与暴雨山洪泥流发生在 4.9 ka BP,对应于马家窑期文化类型(5.3~4.8 ka BP)晚期。本文不仅提供马厂塬遗址暴雨山洪泥流沉积物 OSL 测年的释光特征和年代框架,延长史前古地震与暴雨山洪泥流事件的时间序列,对于马厂塬遗址环境考古和

深刻认识民和盆地自然灾害发生规律都具有重要的参考意义。

致谢:对范龙江、赵雪茹和吉琳同学在野外采样过程中的帮助表示衷心感谢。

注 释

① 民和马厂塬遗址考古勘探组, 2000, 民和马厂塬遗址考古勘探工作报告。

References

Aitken M J. 1998. An Introduction to Optical Dating. Oxford: Oxford University Press, 7~47.

- Amit R, Zilberman E, Porat N, Enzel Y. 1999. Relief inversion in the Avrona Playa as evidence of large-magnitude historical earthquakes, Southern Arava Valley, Dead Sea Rift. *Quaternary Research*, 52: 76~91.
- Amos C B, Lutz A T, Jayko A S, Mahan S A, Fisher G B, Unruh J R. 2013. Refining the southern extent of the 1872 Owens valley earthquake rupture through paleoseismic investigations in the Haiwee Area, Southeastern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A): 1022~1037.
- Bureau of National Cultural Relics. 1996. Atlas of Chinese Cultural Relics-Fascicle of Qinghai Province. China Cartographic Publishing House Press, Beijing (in Chinese without English abstract).
- Chen Yuegau, Chen Yawen, Chen Wenshan, Lee Kunjie, Lee Longsheng, Lu Shiting, Lee YuanHsi, Watanuki T, Lin Yunung N. 2009. Optical dating of a sedimentary sequence in a trenching site on the source fault of the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Quaternary International*, 199: 25~33.
- Chen Yuegau, Chen Yawen, Chen Wenshan, Zhang Jiafu, Zhao Hua, Zhou Liping, Li Shenghua. 2003. Preliminary results of long-term slip rates of 1999 earthquake fault by luminescence and radiocarbon dating. *Quaternary Science Reviews*, 22(10~13): 1213~1221.
- Cheong C S, Hong D G, Lee K S, Kim J W, Choi J H, Murray A S, Chwae C B, Chang C J, Chang H W. 2003. Determination of slip rate by optical dating of fluvial deposits from the Wangsan fault, SE Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1207~1211.
- Cui Zhijiu. 1996. Debris flows deposition and environment. Beijing: Ocean Press, 1~192 (in Chinese without English abstract).
- Dong Guanghui, Jia Xin, Elston R, Chen Fahu, Li Shuicheng, Wang Lin, Cai Linhai, An Chengbang. 2013a. Spatial and temporal variety of prehistoric human settlement and its influencing factors in the upper Yellow River valley, Qinghai Province, China. *Journal of Archaeological Science*, 40: 2538~2546.
- Dong Guanghui, Wang Lin, Cui Yifu, Elston R, Chen Fahu. 2013b. The spatiotemporal pattern of the Majiayao cultural evolution and its relation to climate change and variety of subsistence strategy during late Neolithic period in Gansu and Qinghai Provinces, northwest China. *Quaternary International*, 316: 155~161.
- Fan Qishun, Lai Zhongping, Liu Xiangjun, Sun Yongjuan, Long Hao. 2010. Luminescence Chronology of High Lake levels of Paleolakes in the Late Quaternary eastern Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1652~1660 (in Chinese with English abstract).
- Fattahi M, Nazari H, Bateman M D, Meyer B, Sébrier M, Talebian M, Le Dortz K, Foroutan M, Ahmadi Givi F, Ghorashi M. 2010. Refining the OSL age of the last earthquake on the Dhesir fault, Central Iran. *Quaternary Geochronology*, 5: 286~292.
- Fattahi M, Walker R T. 2007. Luminescence dating of the last earthquake of the Sabzevar thrus fault, NE Iran. *Quaternary Geochronology*, 2: 284~289.
- Fattahi M. 2009. Dating past earthquakes and related sediments by thermoluminescence methods: A review. *Quaternary International*, 199: 104~146.
- Fu Xiao, Zhang Jiafu, Mo Duowen, Shi Chenxi, Liu Hui, Li Yiyin, Zhou Liping. 2010. Luminescence dating of baked earth and sediments from the Qujialing archaeological site, China. *Quaternary Geochronology*, 5: 353~359.
- Galbraith R F, Roberts R G. 2012. Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: An overview and some recommendations. *Quaternary Geochronology*, 11: 1~27.
- Hou Guangliang, Lai Zhongping, Sun Yongjuan, Ye Maolin. 2012. Luminescence and radiocarbon chronologies for the Xindian Culture site of Lamafeng in the Guanting Basin on the NE edge of the Tibetan Plateau. *Quaternary Geochronology*, 10: 394~398.
- Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zhou Yali, Su Hongxia, Zhang Yuzhu, Wang Longsheng. 2013. Palaeoenvironmental Implications of the Prehistorical Catastrophes in Relation to the Lajia Ruins within the Guanting Basin along the Upper Yellow River, China. *The Holocene*, 23 (11): 1584~1595.
- Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Zhou Yali. 2011. Prehistorical floods in the Guanzhong Basin in the Yellow River drainage area: A case study along the Qishuihe River Valley over the Zhouyuan Loess Tableland. *Science in China: Series D*, 41: 1658~1669 (in Chinese without English abstract).
- Kang Zhicheng, Li Zhuofeng, Ma Ainai. 2004. Research on debris flow in China. Beijing, China: Science Press, 112 (in Chinese without English abstract).
- Liu Jinfeng, Chen Jie, Yin Jinhui, Lu Yanchou, Murray A, Chen Lichun, Thompson J, Yang Huili. 2010. OSL and AMS 14 C Dating of the Penultimate Earthquake at the Leigu Trench along the Beichuan Fault, Longmen Shan, in the Northeast Margin of the Tibetan Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2681~2688.
- Lu Huayu, An Zhisheng, Wang Xiaoyong, Tan Hongbing, Zhu, Rixiang, Ma Haizhou, Li Zhen, Miao Xiaodong, Wang Xianyan. 2004. Geomorphologic evidence of phased uplift of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 14 million years ago. *Science in China: Series D*, 34 (9): 855~864 (in Chinese without English abstract).
- Lu Yanchou, Prescott J R, Zhao Hua, Chen Jie, Wei Lanying. 2002. Optical dating of colluvial deposits from Xiyangfang, China, and the relation to palaeo-earthquake events. *Quaternary Science Reviews*, 21: 1087~1097.
- Murray A S, Wintle A G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32(1): 57~73.
- Murray A S, Wintle A G. 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements*, 37: 377~381.
- Olley J M, Caitcheon G G, Roberts R G. 1999. The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating

- single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, 30: 207~217.
- Olley J M, Caitcheon G, Murray A S. 1998. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews*, 17: 1033~1040.
- Porat N, Amit R, Zilberman E, Enzel Y. 1997. Luminescence dating of fault-related alluvial fan sediments in the southern Arava Valley, Israel. *Quaternary Science Reviews*, 16(3~5): 397~402.
- Prescott J R, Hutton J T. 1994. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements*, 23: 497~500.
- Sun Yongjuan, Lai Zhongping, Long Hao, Liu Xiangjun, Fan Qishun. 2010. Quartz OSL dating of archaeological sites in Xiao Qaidam Lake of the NE Qinghai-Tibetan Plateau and its implications for palaeoenvironmental changes. *Quaternary Geochronology*, 5: 360~364.
- Sun Yongjuan, Lai Zhongping, Madsen D, Hou Guangliang. 2012. Luminescence dating of a hearth from the archaeological site of Jiangxigou in the Qinghai Lake area of the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Geochronology*, 12: 107~110.
- Tu Delong, Wang Zanjun, Xia Yusheng Chang Zhenguang. 1997. Historical earthquakes investigation and study in the Huangshui Basin in the Qinghai Province. *Earthquake Research in Plateau*, 9(3): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Tu Delong, Wang Zanjun, Zeng Baolong Gao Qiang. 1998. Study on distraction and activity characters of the Holocene faults in the Huangshui Basin, Qinghai Province. *Northwestern Seismological Journal*, 20(4): 83~90 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hengsong, Huang Chunchang, Zhou Yali, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Gu Hongliang, Zhou Liang. 2012a. OSL dating of the Holocene paleoflood events on the Qianhe River in the Guanzhong Basin, China. *Science in China: Series D*, 42(3): 390~401 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hengsong, Huang Chunchang, Zhou Yali, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Gu Hongliang. 2012b. OSL dating of Holocene loess-paleosol profiles in the Middle Reach of Yellow River and Paleoflood Events. *Acta Geologica Sinica*, 86(6): 994~1004 (in Chinese with English abstract).
- Wei Mingjian, Ge Yonggang, Liu Zhaowen, Cai Maotang, Wang Junping, Pan Baolin. 2008. Study on the Mechanism of Thermo-luminescence attenuation of debris flow deposit. *Journal of Mountain Science*, 26(4): 433~438 (in Chinese with English abstract).
- Wintle A G, Murray A S. 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements*, 41: 369~391.
- Xie Duanju. 2002. Prehistoric Archaeology of Gansu Province and Qinghai Province. Cultural Relics Press, 1~254 (in Chinese without English abstract).
- Xu Zhenghui, Li Shilan, Yan Yanmei. 2010. Dynamic analysis of farmland soil moisture in the semi-arid region in Huzhu County, Qinghai Province. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (10): 93~99 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huili, Chen Jie, Thompson J A, Liu Jinfeng. 2012. Optical dating of the 12 May 2008, Ms 8.0 Wenchuan earthquake-related sediments: Tests of zeroing assumptions. *Quaternary Geochronology*, 10: 273~279.
- Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Zhao Wuji, Wei Gang. 2013. Reexploration on the formation mechanism of the Red clay layer in the Guanting Basin of the Upper Reaches of Yellow River. *Quaternary Sciences*, 33(5): 995~1004 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Lei Zhongsheng, Liu Baichi, Liu Xiaodong. 2005. A Preliminary study on the new activity features of the Lajishan Mountain fault zone in the Qinghai Province. *Earthquake Research in China*, 21(1): 93~102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huquan, Yang Zhongxuan. 1996. The structural Characteristics of the Minhe Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 18(3): 283~288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiafu, Huang Weiwen, Yuan Baiyin, Fu Renyi, Zhou Liping. 2010. Optically stimulated luminescence dating of cave deposits at the Xiaogushan prehistoric site, northeastern China. *Journal of Human Evolution*, 59: 514~524.
- Zhang Jiafu, Zhou Liping, Yue S Y. 2003. Dating fluvial sediments by optically stimulated luminescence: selection of equivalent doses for age calculation. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1123~1129.
- Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zhou Yali, Zha Xiaochun, Wang Longsheng, Zhou Liang, Guo Yongqiang, Wang Leibin. 2014. A luminescence dating study of the sediment stratigraphy of the Lajia Ruins in the upper Yellow River valley, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 87: 157~164.
- Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Wang Longsheng, Zhou Liang. 2013. OSL dating of the sediment stratigraphy of the Lajia Ruins in the Guanting Basin in the Upper Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 68(5): 626~639 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hua, Lu Yanchou, Wang Chengming, Mao Hongliang, Ji Hongli. 2011. A review of OSL dating for water-laid deposits: progress and prospect. *Zhao Hua, Lu Yanchou, Wang Chenmin, Nuclear Techniques*, 34(2): 82~86 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Liang, Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Xu Jie, Zhang Xiaoyan. 2013. OSL dating of the paleoflood events in the Ankang East Reach in the upper Hanjiang River valley. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1703~1714 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

参 考 文 献

- 崔之久. 1996. 泥石流沉积与环境, 北京:海洋出版社, 1~192.
- 樊启顺, 赖忠平, 刘向军, 孙永娟, 隆浩. 2010. 晚第四纪柴达木盆地东部古湖泊高湖面光释光年代学. 地质学报, 84(11): 1652~1660.
- 国家文物局. 1996. 中国文物地图集. 青海分册. 北京:中国地图出版社, 50~53.
- 黄春长, 庞奖励, 查小春, 周亚利. 2011. 黄河流域关中盆地史前大洪水研究——以周原漆水河谷地为例. 中国科学: 地球科学, 41(11): 1658~1669.
- 康志成, 李焯芬, 马蔼乃. 2004. 中国泥石流研究. 北京: 科学出版社, 112.
- 鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 谭红兵, 朱日祥, 马海州, 李珍, 苗晓东, 王先彦. 2004. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. 中国科学: 地球科学, 34(9): 855~864.
- 青海省文物考古研究所. 1993. 青海省民和县古文化遗存调查. 考古, 3: 193~223.
- 涂德龙, 王赞军, 夏玉胜, 常振广. 1997. 青海省湟水盆地历史地震调查及研究. 高原地震, 9(3): 1~6.
- 涂德龙, 王赞军, 曾包红, 高强. 1998. 青海省湟水盆地全新世活动断裂分布及其活动特征研究. 西北地震学报, 20(4): 83~90.
- 王恒松, 黄春长, 周亚利, 庞奖励, 查小春, 顾洪亮. 2012a. 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: D 辑, 42(3): 390~401.

- 王恒松, 黄春长, 周亚利, 庞奖励, 查小春, 顾洪亮. 2012b. 渭河中游全新世黄土剖面光释光测年及记录的古洪水事件. 地质学报, 86(6): 994~1004.
- 王琳, 崔一付, 刘晓芳. 2014. 甘青地区马家窑文化遗址的地貌环境分析及其土地利用研究. 第四纪研究, 34(1): 224~233.
- 魏明建, 葛永刚, 刘兆文, 蔡茂堂, 王均平, 潘宝林. 2008. 泥石流堆积物释光退火机制研究进展. 山地学报, 26(4): 433~438.
- 谢端琚. 2002. 甘青地区史前考古. 北京: 文物出版社, 1~254.
- 许正辉, 李世兰, 阎彦梅. 2010. 青海互助县半干旱区农田土壤水分动态分析. 农业科技通讯, (10): 93~99.
- 袁道阳, 张培震, 雷中生, 刘百箴, 刘小龙. 2005. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究. 中国地震, 21(1): 93~102.
- 殷志强, 秦小光, 赵无忌, 魏刚. 2013. 黄河上游官亭盆地红黏土层成因机制再探讨. 第四纪研究, 33(5): 995~1004.
- 赵华, 卢演侑, 王成敏, 毛洪亮, 纪洪磊. 2011. 水成沉积物释光测年研究进展与展望. 核技术, 34(2): 82~86.
- 张虎权, 杨中轩. 1996. 民和盆地的构造特征. 石油实验地质, 18(3): 283~288.
- 张玉柱, 黄春长, 庞奖励, 查小春, 王龙升, 周亮. 2013. 黄河上游官亭盆地喇家遗址地层光释光测年研究. 地理学报, 68(5): 626~639.
- 周亮, 黄春长, 庞奖励, 查小春, 许洁, 张小燕. 2013. 汉江上游安康东段古洪水事件光释光测年研究. 地质学报, 87(11): 1703~1714.

OSL Dating of the Paleo-Earthquake and Paleo-Mudflow Event at the Machangyuan Ruins in the Minhe Basin

GUO Yongqiang, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, PANG Jiangli,
ZHA Xiaochun, ZHANG Yuzhu, HU Guiming, ZHOU Qiang

College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710062

Abstract

The loess ground fissures (Striking N30°~40°W and N40°~50°E) were found along the trench wall at the Machangyuan Ruins in the Minhe Basin. The red clay overlying the Majiayao (MJY) Phase Culture (5.30~4.80 ka BP) was clearly found. Sedimentary record of palaeo-earthquake and palaeo-mudflow event were indentified by ground fissures in loess infilled with red clay. Samples collected from the same sequences at two sites in the profile of southern Bianqiangcun of MCY Ruins were analysed using SAR (single-aliquot regenerative) technology to determine the OSL data of red mudflow and soils. Statistic analysis of equivalent dose (De) for the samples yielded much reliable OSL data. In combination with OSL ages, Holocene soil sequence relation and the archaeological record of MJY Phase Culture in the study area, ¹⁴C dating rereveals the paleo-earthquake and paleo-mudflow event at the Bianqiangcun sites occurred at 4.9 ka BP, which corresponds to the late MJY-type stage (5.3~4.8 ka BP). The results suggest OSL chronogical characteristic of paleo-mudflow deposits and paleo-earthquake events, which is of great scientific significance for understanding of occurrence regularity of natural disasters at the Machangyuan Ruins in the Minhe Basin.

Key words: luminescence dating; paleo-mudflow; paleo-earthquake; Machangyuan ruins; Minhe basin