

DOI:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0062
CHEN Yinglu, HUANG Chunchang, ZHANG Yuzhu, et al. Study of the sedimentology and OSL dating of the Last Deglaciation paleoflood events along Maqu section in the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 549–562. [陈莹璐, 黄春长, 张玉柱, 等. 黄河源区玛曲段末次冰消期古洪水事件及其光释光测年研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 549–562.]

黄河源区玛曲段末次冰消期古洪水事件及其光释光测年研究

陈莹璐^{1,2}, 黄春长^{1,2*}, 张玉柱^{3*}, 郭永强^{1,2}, 周亚利^{1,2},
查小春^{1,2}, 庞奖励^{1,2}, 石彬楠^{1,2}, 刘雯瑾^{1,2}

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710062; 2. 陕西师范大学 地理学国家级实验教学示范中心, 陕西 西安 710062; 3. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘 要:通过对黄河源区玛曲段河谷开展野外考察,在太吾若(TWR)发现典型的古洪水滞流沉积剖面。根据野外沉积学宏观特征判别,并结合粒度分布、磁化率、地球化学元素和石英颗粒微形态特征等室内实验分析测定结果,准确鉴别出 TWR 剖面所夹一组多层洪水滞流沉积物(SWD),属典型的河流洪水在高水位滞流环境下沉积的悬移质泥沙。结果表明,TWR 剖面古洪水 SWD 和现代洪水 SWD 沉积学分类为沙质粉沙,现代土壤为黏土质粉沙,现代风成沙为中沙。古洪水 SWD 粒度自然分布频率曲线为正偏,呈单峰,主峰高且峰值集中,分选性良好。古洪水 SWD 和现代洪水 SWD 磁化率较低,介于现代土壤和现代风成沙之间,化学元素明显区别于现代土壤和现代风成沙,表明它们尚未受到风化成壤作用影响,为古洪水悬移质快速沉积形成的滞流沉积物。石英颗粒微形态特征的分析表明,古洪水 SWD 和现代洪水 SWD 石英颗粒表面分布明显的三角痕、V 形坑、撞击坑和凹面等水成沉积物的典型特征,属于河流沙类型。采用单片再生剂量法(SAR)光释光技术测年,证明在 13.6~13.0 ka BP,黄河源地区经历了一期多次的大洪水事件,发生时段对应末次冰消期向全新世转折的时期,与欧洲和格陵兰冰芯记录末次冰消期中的 Bolling/Aellrod 暖期相对应,此时青藏高原地区冰川大规模消融,这期古洪水事件正是流域内冰融水大量下泄汇入黄河而形成的大洪水。

关键词:古洪水;末次冰消期;光释光;气候变化;黄河源区

中图分类号:P331.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-0240(2017)03-0549-14

0 引言

古洪水水文学是全球变化研究当中新兴起的前沿领域^[1]。其中关于古洪水事件识别、洪峰水位和流量恢复及其发生年代问题,成为全球气候变化研究中极为重要的研究内容。史料记载研究过去气候水文变化存在资料空间覆盖度不均,记载洪水水文学数据序列时间尺度有限等问题,古洪水沉积记录可获得史前及万年尺度史料未记载的洪水资料,为重建流域洪水发生序列和研究环境变迁与气候变

化提供了很好的题材^[2-11]。

近年来,黄河中游干支流古洪水水文学研究工作得到了快速的发展,取得了一系列重要的成果^[2-11]。有学者对黄河中游、渭河、漆水河、洛河、延河、泾河,以及汉江上游等河流的基岩峡谷河段进行了考察研究^[2-7],李长安等^[11]对黄河上游末次冰盛期古洪水事件做了初步的研究。然而,对黄河源区玛曲段古洪水事件的研究几乎未见报道。

鉴于此,本文拟从沉积学、地球化学元素、石

收稿日期:2017-03-28; 修订日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41771110);中国博士后科学基金项目(2016M592829)资助

作者简介:陈莹璐(1993-),女,广西柳州人,2015年毕业于广西师范大学,现为陕西师范大学在读硕士研究生,从事资源开发与环境演变研究。E-mail: m18089209061@163.com

* 通讯作者:黄春长, E-mail: cchuang@snnu.edu.cn; 张玉柱, E-mail: xbdzy05@nwu.edu.cn.

英颗粒微形态特征及年代学角度出发,对黄河源区玛曲段典型的古洪水滞流沉积层剖面记录的古洪水事件进行研究。结果有助于揭示黄河流域气候水文环境变化对全球变化的响应,对黄河防洪减灾、水土保持和洪水资源开发与利用有十分重要的现实意义。

1 研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓。黄河源区指黄河干流唐乃亥以上的流域,地处青藏高原东部边缘,流域面积约121 900 km²,占黄河流域面积(不含闭流区)的16.2%。河长1 553 km,河道平均比降为1.1‰。据唐乃亥水文站资料记载,多年平均径流量为2.07×10¹⁰ m³,占黄河流域多年平均流量的34.5%^[12],最大年径流量为328×10⁸ m³,最小径流量为105.8×10⁸ m³,多年平均输沙量为1.27×10⁷ t^[13]。黄河源区不仅是具有水源涵养、水土保持、水源补给、调节区域气候等功能的巨大蓄水池,同时也是黄河主要的产流区。

本文研究区域(图1)玛曲段处于黄河源区若尔盖沼泽盆地西侧,正是“九曲黄河第一弯”的下游,占黄河流域面积的4%,每年向黄河补水65.9×10⁸ m³。本区属青藏高原亚寒带半湿润区,受西南季风影响比较明显,高寒多风雨(雪),无四季之分,仅有冷暖二季之别。年均温1.1~2.7℃,7月均温10.8℃,1月均温-9.4℃。年平均降水量为588.8~611.8 mm^[13],降水主要集中于5-10月,占全年降水量75%~90%,年蒸发量1 000~1 500 mm。玛曲段普遍发育现代冰川和冻土,河流湖泊众多,发育了大量的沼泽湿地,河川径流以降水和冰雪融水补给为主。玛曲县至唐乃亥区间河谷北侧有西倾山,南侧的阿尼玛卿山常年积雪,主峰地区有现代冰川分布,汛期时有部分融雪汇入。黄河上游地区1850、1904、1911、1946、1981等年份曾发生过大洪水,并具有峰高、量大、范围广、历时长、比较稀遇且灾情重等特点。其中,1981年大洪水洪峰流量为5 450 m³·s⁻¹,15天洪量为59.2×10⁸ m³,大于50 mm雨区的范围为7 000 km²,其洪峰

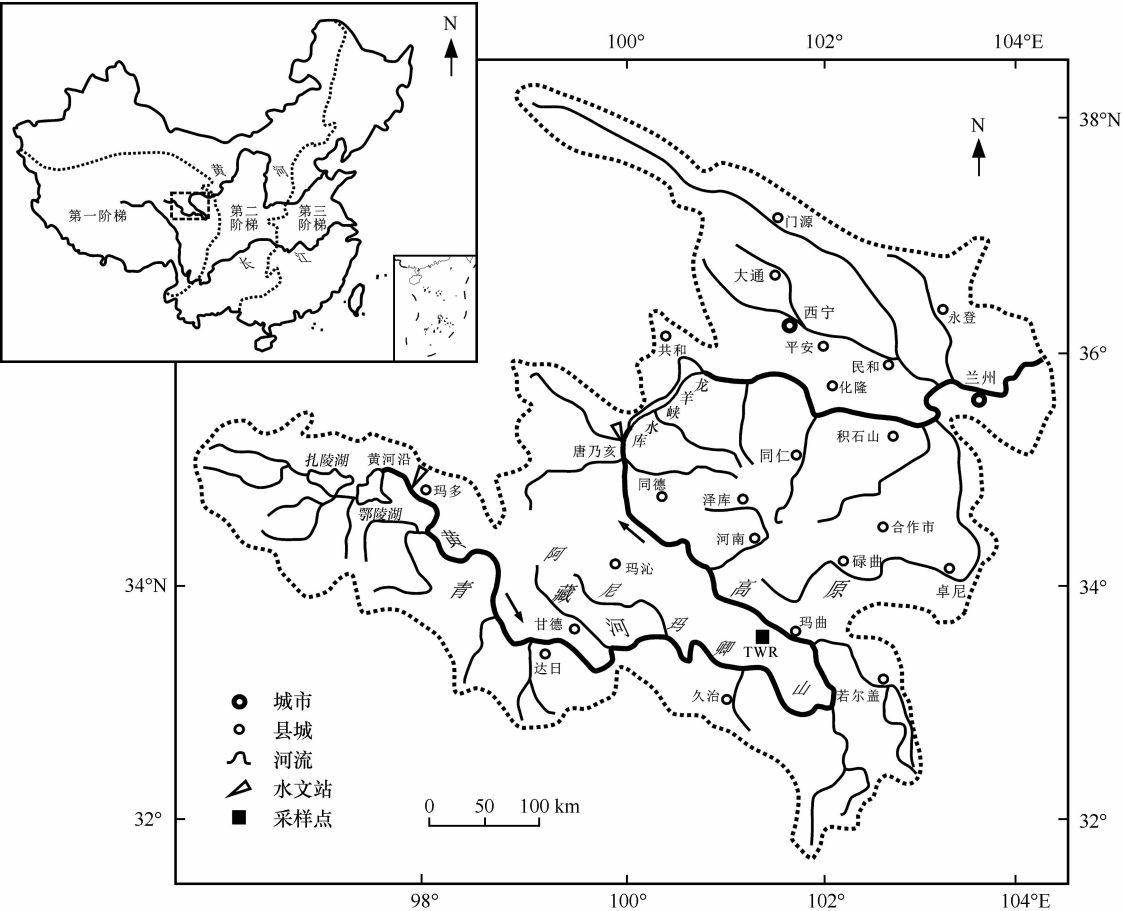


图1 研究区位置
Fig. 1 Map showing the study area

流量之高,洪量之大,历时之长均超过历年实测最大记录^[14]。前人已有研究表明,黄河源区融雪径流占总水量的11.6%,融雪流量占洪峰流量的6.7%,降雨径流占总水量的86.2%,降雨流量占洪峰流量的92.0%^[15]。

通过对黄河源区的野外深入考察,在玛曲段河谷多个地点发现含有古洪水滞流沉积层的地点。本文选择玛曲县太吾若(TWR)剖面(33°59′36.08″N,101°55′24.47″E,图2~3)进行研究,取土陡坎高4~5 m,剖面高于黄河二级阶地,夹在基岩山坡麓石渣土层之中。TWR剖面顶沿海拔3 435 m,高出黄河平水位25 m。目前河水面海拔3 410 m,水面宽度150~200 m,沿河两岸间断性地分布有两级河漫滩,低河漫滩高出水面1~2 m,高河漫滩高出水面3~4 m。根据野外调查,玛曲向西到欧拉乡段,黄河北岸T2阶地宽度4~5 km,形成宽广平坦的草原,阶地前沿海拔3 430 m,向

北延伸基岩山丘海拔高于4 350 m,沿河南岸多为坡积台地,向南延伸基岩山丘海拔高于3 650 m。在详细的野外观察基础上,根据沉积物颜色、结构、构造等宏观特征变化,结合沉积学、地层学和土壤学方法,对TWR剖面进行详细的地层划分(表1)。

在野外现场对TWR剖面进行清理,露出新鲜沉积物剖面后,利用直径5 cm不透光的不锈钢管在古洪水多层滞流沉积物(slack-water deposit, SWD)顶部及底部,分别取了光释光(optically stimulated luminescence, OSL)测年样品。在表土层深黑色草原黑土草根层约0.3 m深度处取现代土壤样品1个,在古洪水多层滞流沉积物顶部及底部各取沉积样品1个,同时在附近黄河河漫滩采取现代洪水SWD样品1个,在附近河漫滩面风沙作用区域高大沙丘,采现代风成沙样品1个,以作对比分析。共有5个沉积样品,2个OSL测年样品。

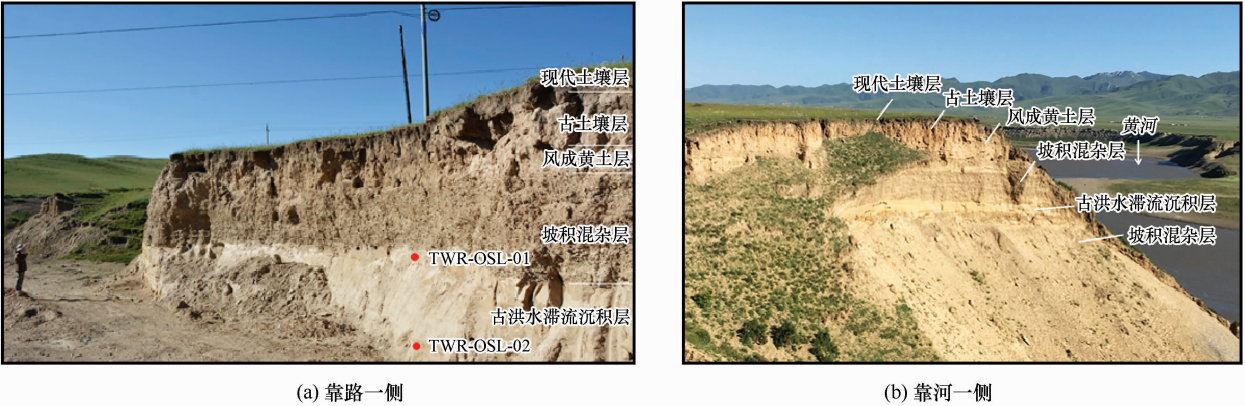


图2 TWR剖面照片
Fig. 2 Photos of the TWR profile, road-ward side (a) and river-ward side (b)



图3 黄河玛曲段河道与TWR剖面的卫星影像
Fig. 3 Satellite image showing the channel along Maqu reach of the Yellow River, and the location of TWR profile

表 1 TWR 剖面地层划分及沉积特征描述
Table 1 Stratigraphic subdivisions and descriptions of TWR profile

深度/cm	地层划分	沉积特征描述
0 ~ 50	现代表土	深黑色草原黑土草根层，沙质粉沙质地，疏松，团粒构造，多大、小空隙和密集的植物根系
50 ~ 100	古土壤	灰黑色，黏土质粉沙质地，团粒-团块构造，多大、小孔隙，比较密实坚硬，多蚯蚓孔和粪团
100 ~ 130	风成黄土	灰黄色，粉沙质地，块状结构，结构均匀，疏松
130 ~ 280	坡积物	岩屑角砾与土状物大小混杂，无分选
280 ~ 420	古洪水滞流沉积	浊黄橙色，粉沙质地，质地均一，块状结构，致密，分选良好，可见缓倾斜或水平层理。每层主体为沙质粉沙质地，上部为粉沙或黏土质粉沙，可识别出 8 ~ 10 个单层，它们代表 8 ~ 10 次大洪水
>420	厚层坡积物	岩屑角砾与土状物大小混杂，无分选

2 研究方法

将采集的样品在 37 ℃ 条件下烘干后分别进行粒度分布、磁化率、地球化学元素及石英颗粒微形态特征等指标测定。粒度前处理先用适量 HCl (10%) 和 H₂O₂ (10%) 溶液除去样品中次生碳酸盐和有机质，然后采用英国马尔文仪器公司生产的测试粒度范围在 0.02 ~ 2 000 μm 之间的 Mastersizer-2000 激光粒度分析仪进行测定。地球化学元素测定前，先将风干样品在震动磨样机中研磨至 20 目以下后，称取 5 g 土样，加入适量 H₃BO₃，在 YY-60 型压样机上进行压片后，采用德国 Bruker 公司生产的 S8Tiger 型 X 射线荧光光谱仪进行测定。磁化率采用英国 Bartington 公司生产的精度为 0.1 的 MS-2B 磁化率仪对样品进行高频和低频状态下的测定。石英颗粒微形态特征观测是将样品先后置于 HCl(30%)、SnCl₂ 和 H₂O₂ (30%) 溶液中煮沸，用蒸馏水反复清洗并干燥样品后，在显微镜下挑选出 15 ~ 20 颗石英颗粒，放置于扫描电镜下进行微观形态分析。

将两个 OSL 样品的未见光部分放在实验室安全红光下，经 HCl(10%) 和 H₂O₂ (30%) 溶液处理后，洗至中性，采用筛分法分离出不同粒级的样品，选取粒径为 90 ~ 125 μm 的样品采用 HF (20%) 溶液进行溶蚀并用 HCl 溶液清洗样品以去除样品上的残留氟化物^[16-17]。样品烘干后，用红外 (IRSL) 检测提纯的石英颗粒的纯度，以确保长石产生的信号强度降到可忽略不计^[18]。所有样品 De 值的测定按照单片再生技术法 (SAR) 在陕西师范大学光释光断代实验室 Risø TL/OSL DA-20 型自动化释光仪上完成^[19]。OSL 样品的 U、Th、K 含量的测定由中国原子能研究院通过中子活化法完成。每个样品制备 48 个测片，采用指数拟合的方

法拟合出样品的生长曲线以计算样品的 De 值。宇宙射线对环境剂量率的贡献是依据采样地的经纬度、海拔高度、埋藏深度等相关方程计算获得^[20]。样品的含水量是实验室实测含水量并结合黄河源区黄土土壤水分的研究结果进行校正获得，其不确定度约为 10%^[21]。根据样品中放射性元素含量、含水量等运用 Aitken 提供的相关公式和转换参数综合计算得到样品埋藏期间的环境剂量率^[22]。样品 OSL 年龄值采用 Age 计算软件计算获得^[23]。

3 结果与分析

3.1 磁化率

磁化率是表征沉积物和土壤中铁磁性矿物含量的指标，可以反映在风化成壤作用下，次生铁磁性矿物含量的变化^[24]。TWR 剖面中具有水平层理的古洪水多层滞流沉积物顶部和底部的沉积样品——古洪水 SWD_上 (10.0 × 10⁻⁸ m³ · kg⁻¹) 和古洪水 SWD_下 (18.5 × 10⁻⁸ m³ · kg⁻¹) 的磁化率值较低，与现代洪水 SWD (12.0 × 10⁻⁸ m³ · kg⁻¹) 相当，介于现代风成沙 (6.0 × 10⁻⁸ m³ · kg⁻¹) 和现代土壤 (42.5 × 10⁻⁸ m³ · kg⁻¹) 之间 (表 2)。结果表明，其所记录的古洪水 SWD 是未受到成壤改造作用影响的古洪水滞流沉积物。

3.2 粒度分布

粒度成分能够揭示出沉积物的性质、搬运介质和动力、沉积环境及其变化^[25]。从粒度成分 (表 2) 可以看出，TWR 剖面古洪 SWD_上 和古洪水 SWD_下 的粒度成分以 16 ~ 63 μm 的粗粉沙为主，细沙次之，与现代洪水 SWD 性质相似。根据土壤学分级标准做出粒度三角图 (图 4)，将其命名为沙质粉沙。现代土壤以粗粉沙为主，黏粒 (< 2 μm) 含量为剖面最大，命名为黏土质粉沙。现代风成沙主要以沙级颗粒为主，其次为细沙，黏粒含量最少，命

表2 TWR 剖面古洪水 SWD 与其他沉积物的磁化率与粒度成分
Table 2 Magnetic susceptibility and particle-size distribution of the palaeoflood SWD, compared with other sediments at the TWR site

沉积样品	磁化率 / $(10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$<2 \text{ }\mu\text{m}$ /%	$2 \sim 16 \text{ }\mu\text{m}$ /%	$16 \sim 63 \text{ }\mu\text{m}$ /%	$>63 \text{ }\mu\text{m}$ /%	Md / μm	Mz / μm	黏粒/ 粗粉沙	O' / ϕ	Sk / ϕ	Kg / ϕ	S / ϕ
古洪水 SWD _上	10.0	4.70	4.27	53.46	37.56	51.87	56.06	0.09	1.34	0.35	1.89	0.62
古洪水 SWD _下	18.5	3.21	4.40	54.82	37.58	52.47	56.23	0.06	1.09	0.29	1.51	0.58
现代土壤	42.5	6.41	31.59	38.73	23.27	27.89	37.11	0.17	1.98	0.28	0.88	1.47
现代风成沙	6.0	0.00	0.00	0.94	99.06	268.75	281.60	0.00	0.57	0.04	0.96	0.40
现代洪水 SWD	12.0	4.04	10.75	49.52	35.69	49.25	53.33	0.08	1.45	0.36	1.63	0.72

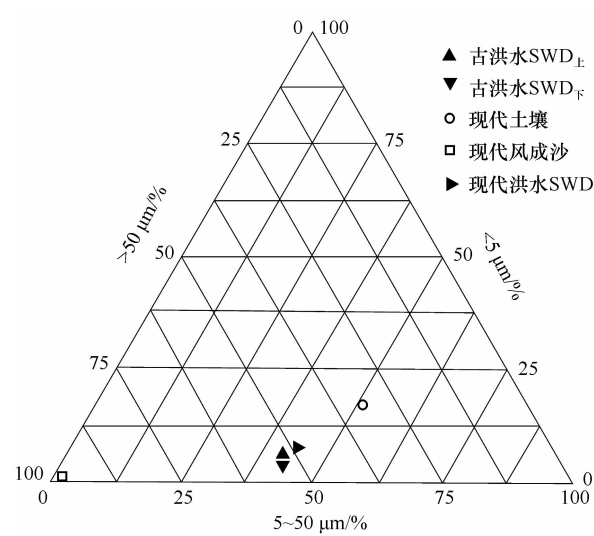


图4 TWR 剖面古洪水 SWD 与其他沉积物的
粒度成分三角图
Fig. 4 Triangle diagram showing the grain size distribution
of the palaeoflood SWD, compared with other
sediments at the TWR site

名为中沙。这些结果，与其平均粒径 (Md) 和中值粒径 (Mz) 反映的情况相对应。对比发现，现代土壤在风化成壤过程中，粗颗粒不断风化分解，黏粒和细粉沙含量不断增加；而古洪水 SWD 与现代风成沙很少受到风化成壤作用，其黏粒含量相对偏低，沙粒含量相对偏大。

黏粒/粉沙比率的变化反映沉积物受到的次生风化成壤作用强度的变化过程，也能清楚区分出古洪水 SWD、现代土壤和现代风成沙^[6]。古洪水 SWD_上(0.09)、古洪水 SWD_下(0.06) 的黏粒/粉沙比率与现代洪水 SWD(0.08) 相当，介于现代土壤(0.17)和现代风成沙(0)之间。这与磁化率和黏粒含量的变化趋势一致，与沙粒含量有着相反的变化关系，反映出它们很少受到次生风化成壤作用的影响。

结合粒度自然分布频率曲线(图5)发现，古洪水 SWD_上、古洪水 SWD_下 粒度自然分布频率曲线形态与现代洪水 SWD 相似，均与其他沉积物有明显的区别，恰恰介于现代土壤和现代风成沙曲线之间。古洪水 SWD 粒度自然分布频率曲线呈正偏，单峰，峰态尖窄，主峰介于 $40 \sim 90 \text{ }\mu\text{m}$ 之间，准偏差 (O') 和分选系数 (S) 偏小，分选良好，与现代洪水 SWD 类似。现代风成沙粒度自然分布频率曲线呈近对称，双峰，极尖窄型，主峰介于 $250 \sim 350 \text{ }\mu\text{m}$ ，在 $35 \sim 70 \text{ }\mu\text{m}$ 之间出现一个百分含量很低(小于7%)的突起，显示该现代风沙混合吸附了较多的黄土粉尘悬浮颗粒。现代土壤曲线呈正偏，单峰，峰态宽平，主峰出现在 $40 \sim 90 \text{ }\mu\text{m}$ 之间，在 $2 \sim 16 \text{ }\mu\text{m}$ 处有凸起，准偏差 (O') 和分选系数 (S) 较大，体现出现代土壤受到气候环境制约下的次生风化成壤改造作用的影响，黏粒和细粉沙含量不断增加，粒度分布相对分散，分选较差。

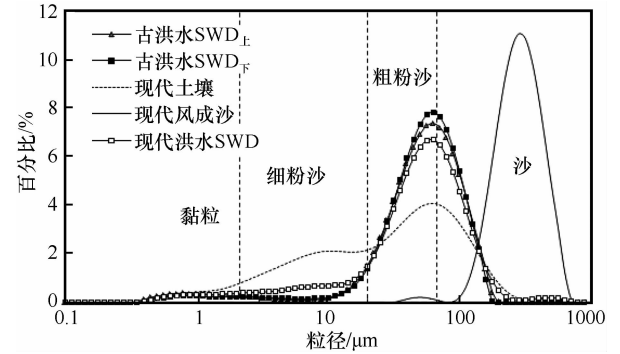


图5 TWR 剖面古洪水 SWD 与其他沉积物的
粒度自然分布频率曲线
Fig. 5 Grain-size distribution frequency curves of the
palaeoflood SWD, compared with other
sediments at the TWR site

这些粒度指标都表明 TWR 剖面记录的古洪水 SWD 的沉积来源、沉积环境及沉积动力与现代洪

水 SWD 相似, 与现代土壤和现代风成沙差异显著, 它们很少受到风化成壤作用的影响, 具有河流洪水悬移质沉积物的典型特征, 是黄河洪水后悬移质在经河流搬运、分选后在高水位滞流情况下的沉积学记录。

3.3 地球化学元素

地球化学元素是揭示沉积物性质、物源及沉积环境的有效指标, 也是区分不同沉积物的重要指标^[26]。将 TWR 剖面的元素含量(表 3)与上部陆壳平均化学成分^[24]对比, 做出 UCC 标准化曲线(图 6)。选取 Fe₂O₃、Al₂O₃、MgO、K₂O、CaO 和 Na₂O 这 6 个常量元素来分析, 发现古洪水 SWD 中 Fe₂O₃、Al₂O₃、MgO、K₂O 这 4 个常量元素含量均介于现代土壤和现代风成沙之间, 在现代土壤中呈现最高值, 现代风成沙中显示最低值, 而 CaO 和 Na₂O 元素含量则表现出相反的变化。这一规律与磁化率和黏粒(< 2 μm)含量高低密切相关。可见现代土壤在风化成壤过程中, 这些元素受全新世以来气候变化的影响, 次生黏化作用和淋溶作用相对旺盛, 导致 CaO 和 Na₂O 等易溶碳酸盐类淋失, 使

它们相对富集。选取微量元素 Rb、Sr、Ba、Y、Ga、Zn、Cu、Ni、Cr 分析, 整体而言, 古洪水 SWD_上、古洪水 SWD_下与现代洪水 SWD 的微量元素含量变化趋势表现出一致性, 介于现代土壤和现代风成沙之间。其原因是现代土壤受全新世以来的成壤作用的影响, 水分增加, 植物生长和黏土矿物的吸附作用导致微量元素在现代土壤层有一定程度的聚集, 而古洪水 SWD 是悬移质泥沙在高水位滞流环境下的沉积, 物源复杂, 保留了沉积物最初的元素组成。这些地球化学特征表明古洪水 SWD 是河流洪水从流域侵蚀搬运而来的滞流沉积物, 未受到风化成壤的作用影响, 与现代土壤和现代风成沙在地球化学元素指标上有很大差异。

3.4 石英颗粒微形态特征

沉积物中的石英颗粒具有很强的抗风化能力, 其表面能够记录沉积物不同的动力过程中形成的特殊形态特征, 这些标志的组合特征与关系能够反映出颗粒所经历的不同沉积环境^[27-28]。石英颗粒微形态分析结果显示, 古洪水 SWD 中石英颗粒与现代洪水 SWD 中的石英颗粒的微形态特征基本一

表 3 TWR 剖面古洪水 SWD 与其他沉积物的地球化学元素含量
Table 3 Geochemical elements of the palaeoflood SWD, compared with other sediments at the TWR site

沉积样品	Fe ₂ O ₃ /%	Al ₂ O ₃ /%	MgO /%	K ₂ O /%	CaO /%	Na ₂ O /%	Rb /10 ⁻⁶	Sr /10 ⁻⁶	Ba /10 ⁻⁶	Y /10 ⁻⁶	Ga /10 ⁻⁶	Zn /10 ⁻⁶	Cu /10 ⁻⁶	Ni /10 ⁻⁶	Cr /10 ⁻⁶
古洪水 SWD _上	3.70	10.67	1.67	2.24	3.10	2.00	88.3	140.6	398.6	22.0	13.0	57.0	14.7	19.8	47.7
古洪水 SWD _下	3.46	10.12	1.74	2.14	5.33	2.00	83.4	166.1	406.4	22.3	12.9	50.6	14.7	20.4	46.4
现代土壤	4.30	11.99	1.86	2.44	1.02	1.63	97.8	119.5	444.4	23.7	14.6	61.7	19.2	26.7	57.3
现代风成沙	2.74	9.56	1.17	2.04	2.31	2.06	68.6	121.4	331.0	12.9	10.6	35.4	6.0	13.8	31.5
现代洪水 SWD	3.15	10.16	1.38	1.96	2.75	2.13	77.0	152.6	368.5	21.3	11.8	47.3	10.8	17.4	49.4

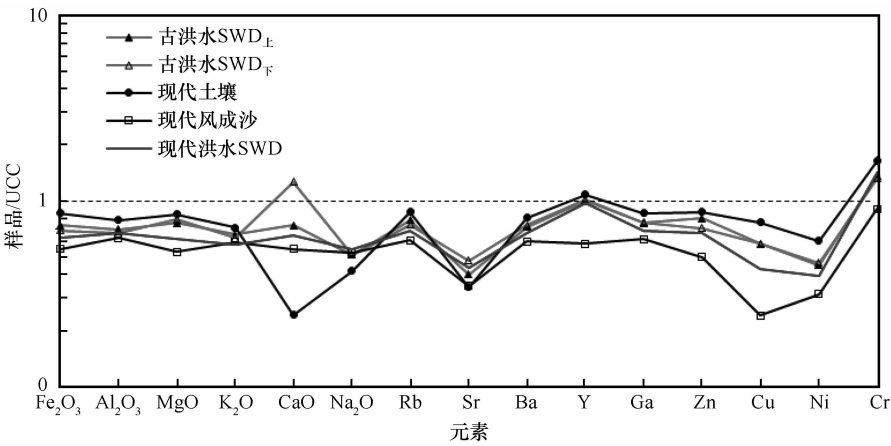
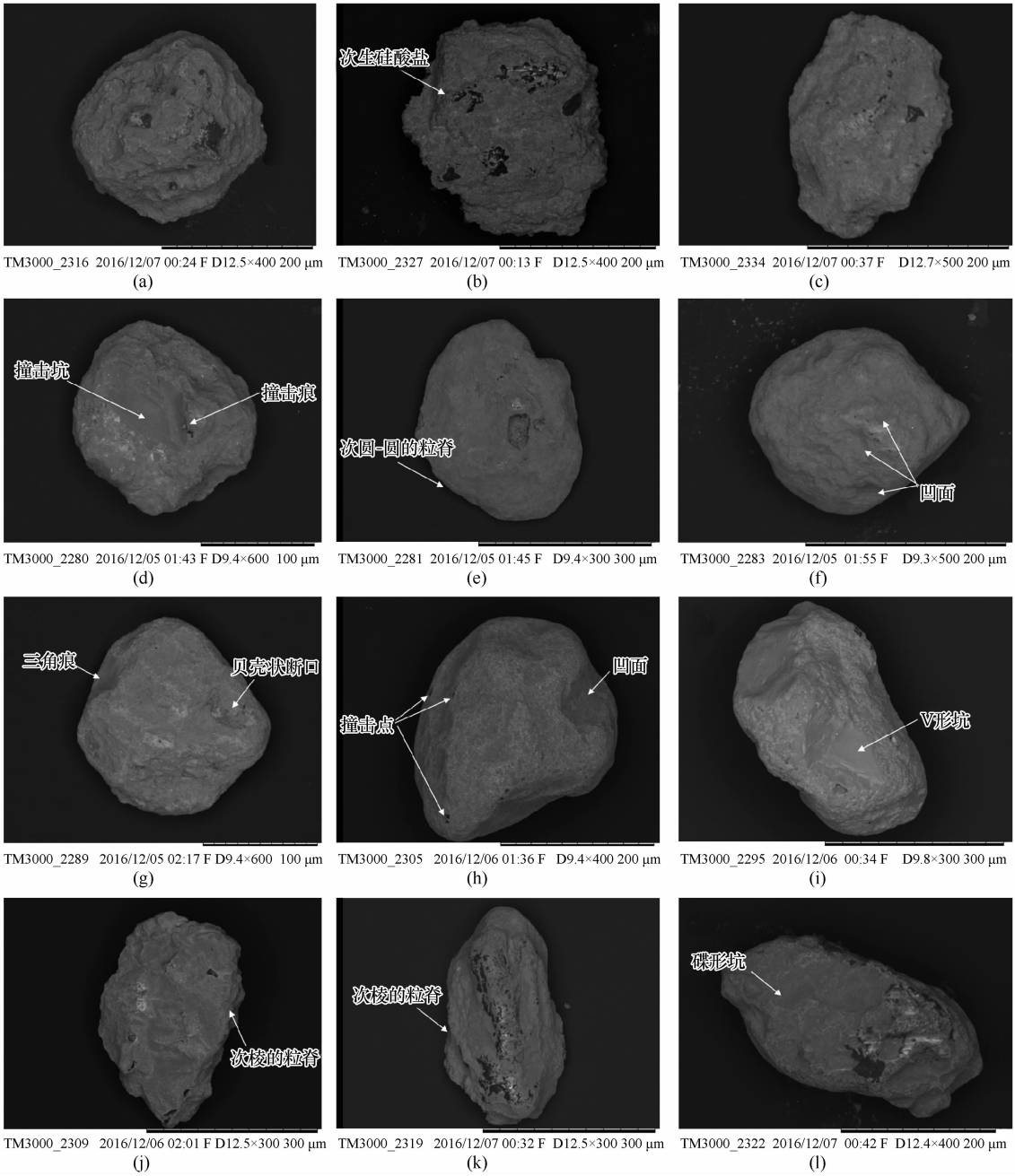


图 6 TWR 剖面古洪水 SWD 与其他沉积物元素平均含量的 UCC 标准化曲线
Fig. 6 UCC normalized curves of average contents of the geochemical elements in the palaeoflood SWD, compared with other sediments at the TWR site

致，而与现代土壤和现代风成沙中的石英颗粒的形态特征有显著不同。①古洪水 SWD 与现代洪水 SWD：石英颗粒磨圆度以次圆为主，表面有明显的三角痕、V 形坑、撞击坑、贝壳状断口和凹面等水成沉积物的典型特征[图 7(d) ~ (j)]。这反映了其经流水改造作用使颗粒圆度增加，并保留了其在水环境下高速碰撞产生的形态特征。②现代土壤：石英颗粒磨圆程度多以次棱-次圆为主，次生硅沉

淀包裹石英颗粒，偶见原始表面上具有撞击点与撞击坑[图 7(a) ~ (c)]。③现代风成沙：石英颗粒磨圆多以次棱-次圆为主，具有起伏不平的表面、碟形坑等风成沉积物特征[图 7(k) ~ (m)]。

根据以上不同沉积物中石英颗粒的形态特征对比，可以判定古洪水 SWD 与现代洪水 SWD 属河流沙类型，是古洪水悬移质泥沙在滞流环境下的产物。



(a) ~ (c) 为现代土壤, (d) ~ (f) 为古洪水 SWD, (h) ~ (j) 为现代洪水 SWD, (k) ~ (m) 为现代风成沙

图 7 TWR 剖面古洪水 SWD 与其他沉积物的石英颗粒扫描电镜照片

Fig. 7 Electron microscope scanning photos of quartz grains in the palaeoflood SWD, compared with other sediments at the TWR site: modern soil [(a) - (c)], palaeoflood SWD [(d) - (f)], modern flood SWD [(h) - (j)] and modern aeolian sand [(k) - (m)]

3.5 光释光测年

古洪水 SWD 为水成沉积物，它是流域地表土壤被降水侵蚀搬运汇入河流的沉积物。水成沉积物常因快速沉积和水体对太阳辐射的削弱作用等因素出现释光信号晒退不彻底的问题，从而导致年龄高估^[29]。为解决此问题，本文选取粗颗粒(90 ~ 125 μm)样品，采用单片再生剂量法(SAR)进行 OSL 测年^[19,30-31]。一般来说，在水成沉积物 OSL 测年中判别沉积物的晒退程度并挑选出沉积物中晒退比较彻底的样片，以获取准确的释光年龄是十分必要的^[32]，通过样品测试的单片等效剂量(De)的频率分布可以反映出该样品在沉积时的晒退程度。从 TWR 剖面古洪水 SWD 样品 TWR-OSL-02 的等效剂量频率分布柱状图[图 8(d)]发现，样品等效剂量分布表现为正偏态不对称分布且离散度大。根据 Fuchs 等^[33]通过对比完全晒退和晒退不彻底样品的等效剂量柱状分布图得出的结论，并结合样品晒退曲线的释光特征[图 8(a)]，可以判断 TWR 剖面古洪水 SWD 样品在被埋藏前未经过充分的晒退。对于晒退不彻底的样品，直接取所有 De 值的平均值会导致沉积物年龄的高估，故本文采用 Zhang 等^[34]提供的统计模型挑选出晒退比较彻底的样片。

该模型中，样片 De 值的离散度可以用相对标准偏差(RSD)表示，TWR 剖面样品 TWR-OSL-01 和 TWR-OSL-02 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} 和 RSD_{R-OSL} 表示。通过对比 RSD_{N-OSL} 与 RSD_{R-OSL} 的大小，可以挑选出晒退比较彻底的样片，获得真实的埋藏年龄。TWR-OSL-02 样品中所有样片的等效剂量与感量变化校正后的自然释光信号呈现出明显的线性关系，其相关率为 63.99%， RSD_{De} 值为 34.97%，大于 10%，表明古洪水 SWD 样品的 OSL 信号只得到了部分晒退。由此，根据 Zhang 等^[34]提供的挑选模型对样品进行挑选，挑选后的结果如图 8(c)所示(虚线的左侧为晒退比较彻底的样片，右侧为晒退较差且舍去的样片)。经过挑选后 TWR-OSL-02 样品中样片的 RSD_{N-OSL} 值与 RSD_{R-OSL} 值十分接近，分别为 8.89% 和 10.66%， RSD_{De} 值(7.94%)较小。同时，挑选出的样片也显示正偏态的频率分布，表明所挑选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，这就进一步保证了样品 OSL 年龄的可靠性。

最后根据样品的最终等效剂量(De)和环境剂

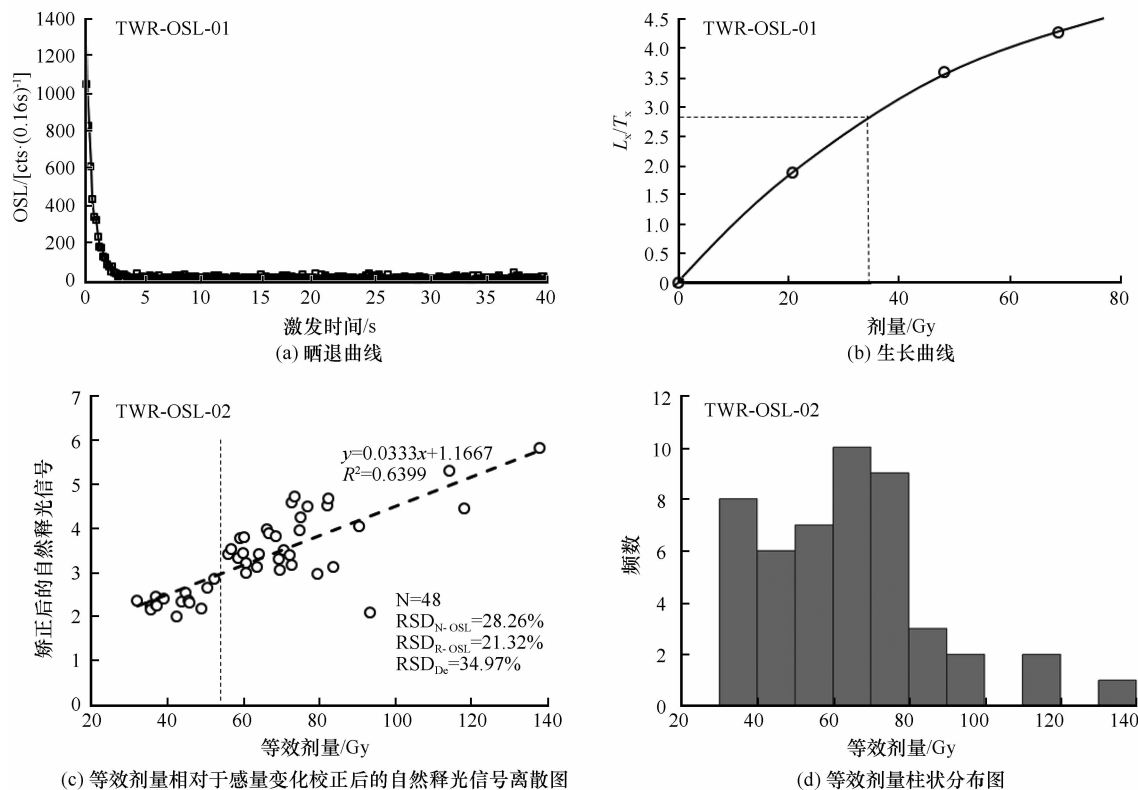


图8 TWR剖面古洪水SWD样品的释光特征

Fig. 8 OSL characteristics of the samples of the palaeoflood SWD at the TWR site

表4 TWR 剖面古洪水 SWD 样品的光释光测年结果
Table 4 OSL dating results of the samples of the palaeoflood SWD at the TWR site

OSL 测年样品	深度 /cm	U / 10^{-6}	Th / 10^{-6}	K /%	含水量 /%	环境剂量率 /($\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$)	等效剂量 /Gy	年代 /ka
TWR-OSL-01	280 ~ 290	2.24 ± 0.09	10.9 ± 0.31	1.86 ± 0.06	10	3.05 ± 0.18	39.61 ± 2.34	12.98 ± 1.09
TWR-OSL-02	410 ~ 420	2.41 ± 0.10	10.8 ± 0.30	1.75 ± 0.06	10	3.25 ± 0.19	41.49 ± 2.69	13.59 ± 1.20

注：样品的含水量是实验室实测含水量并结合黄河源区黄土土壤水分的研究结果进行校正获得，含水量误差约为 10%^[21]。

量率，运用 Age 程序^[23] 计算出样品的 OSL 年龄，结果见表 4。TWR 剖面古洪水 SWD 样品的 OSL 年龄值为 (12.98 ± 1.09) ka 和 (13.59 ± 1.20) ka，误差介于 8.43% ~ 8.88% 之间。基于 OSL 测年结果，可确定 TWR 剖面古洪水沉积物记录了一期多次的古洪水事件，发生在 13.6 ~ 13.0 ka BP，恰恰对应末次冰消期向全新世早期转折的阶段，与格陵兰冰芯记录冰消期中的 Bolling/Aellrod 暖期吻合，此时青藏高原地区冰川大面积消融，推论这期古洪水事件是该流域内冰川消融、冰融水大量下泄汇入黄河而形成的大洪水。

4 讨论

气候的异常波动变化是引起河流水文系统变化的主要驱动力，如干旱、洪水等灾害的发生^[35-38]，因此对待任何一期大洪水事件，都必须思考与洪水事件相关联的气候背景，将其作为气候水文事件来做更加深入的研究。本文通过对 TWR 剖面古洪水 SWD 进行 OSL 测年，确定了剖面中典型的古洪水滞流沉积层记录的古洪水事件发生年代在 13.6 ~ 13.0 ka BP，恰恰对应于末次冰消期向全新世早期转折的阶段，处于青藏高原冰川消融时期。TWR 剖面记录的一组可识别出 8 ~ 10 层的典型古洪水滞流沉积物，位置高于黄河第二级阶地，夹在黄河南岸基岩山坡坡麓石碛土层之中，剖面顶海拔 3 435 m，高出黄河平水位 25 m，它是黄河古洪水事件在高水位滞流环境当中悬移质泥沙的沉积物。通过野外宏观特征和实验室内综合分析可确定 TWR 剖面记录了黄河源区玛曲段发生的一期多次的特大洪水事件。

在黄河源区干旱、高寒地区，由正常气候驱动引起的暴雨洪水规模有限。由于暴雨较小，支流极少，水量损耗较多，加上区内沼泽、草地具有一定的调节洪流的能力，暴雨洪水涨势平缓，洪峰较低，含沙量也较小。以唐乃亥水文站为例，实测记录最大流量为 $5\,450\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[14] (1981 年 9 月)，单

纯的降水造成黄河源区形成大规模的特大洪水事件的概率极小。青藏高原东北部共和盆地风成沉积记录显示，在 15.82 ~ 9.50 ka BP，地球化学元素 SiO₂、Na₂O 含量在波动中降低，Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O 含量有明显增加，CaO、MgO 含量总体上为剖面最大值并出现多次峰值。化学元素比值中 Re 波动中达到剖面最大，Zr/CaO 也出现宽浅低谷，表明该地区气候明显转暖，但湿度呈现显著下降，降水较少，气候比较干旱，总体上这一阶段青藏高原东北部地区气候特征以温暖干旱为主^[39]。同时，共和盆地 DQ 剖面沉积记录证实在 13.6 ~ 11.9 ka BP，该地区气候总体上向温暖湿润转变，但仍偏干旱^[39]。在末次冰消期向全新世早期转折阶段，气候变暖，冰川对气温的敏感性大，青藏高原地区冰川加速退缩，冻土缩减，冰雪融水量持续增加，可以推论这一期多次的古洪水事件应当是末次冰消期气温升高，冰融水大量下泄汇入黄河而形成的大洪水。

与此同时，来自世界其他地区的沉积证据也记录了这次冰消期融水事件。这次冰消期融水事件引发了北美、南美、欧洲等地超级大洪水事件，如北美的劳伦太德 (Laurentide) 冰盖和科迪勒拉 (Cordilleran) 冰盖、南美的巴塔哥尼亚 (Patagonian) 冰盖、欧洲的芬诺斯堪迪亚 (Fennoscandian) 冰盖和中亚的许多山地和低地冰盖^[40-41]。这类与冰川消融有关的洪水事件是目前人类所能认识到的规模最大的淡水流体事件，它们的发生都与大范围的冰川消融密切相关，尤其是末次冰消期向全新世早期转折的阶段。研究表明，从末次冰期盛冰期经过冰消期，北半球大陆的冰盖除格陵兰及巴芬岛外大部分消融，南极冰盖也部分融化，全球平均海平面高度回升 120 ~ 140 m，盛冰期时出露的大陆架重新被淹没^[42]。从地质记录中至少识别出 3 次规模较大的冰融水倾泻和冰盖快速融化事件，依次被命名为 19 ka-MWP、MWP-1A 和 MWP-1B 事件，其中备受瞩目的 MWP-1A 事件发生在 14.2 ~ 13.7 ka BP，对

应于 Bolling 暖期的初始阶段,短短 500 年之内海平面上升了约 19 m;而 MWP-1B 事件发生在 11.5 ~ 11.0 ka BP,500 年之内海平面上升了约 15 m^[43]。

末次冰消期向全新世早期转折的气候转折阶段是全球范围内最为显著的气候波动变化,在世界范围内不同地方以不同的方式回应这次气候波动时期。末次冰消期气候的快速波动在湖泊沉积、孢粉、生物地层、黄土、冰芯等众多载体中都得到了高分辨率的记录,并出现 Bolling/Aellrod 暖期、Heinrich1 和新仙女木等气候事件^[44-48]。综合青藏高原地区不同载体记录的环境变化研究表明,该地区末次冰消期以来气候明显不稳定,易产生各种极端事件。13 ~ 11 ka BP,青藏高原逐渐回暖,众多封闭流域因冰川融水增加而导致冰川的湖泊扩张,如扎布耶茶卡、白硷湖、色林错、龙木错、贝里克库勒湖以及青海湖等出现 40 ka BP 以来最高湖面或次高湖面,古湖泊面积为现在的 1.8 ~ 5.4 倍^[49]。11.3 ka BP 左右,班公湖湖面迅速上升,以莎草科为主的孢粉明显增多,在日土剖面底部见有大量莎草植物残体和狐尾藻、眼子菜等水生植物^[50]。12 ka BP,玛曲县上游若尔盖盆地开始发育大面积的沼泽,出现连续的泥炭堆积^[51]。13 ka BP,青海湖乔木花粉含量开始显著增加,仁错流域植被从荒漠草原过渡到蒿草草原^[51]。14.8 ~ 12.9 ka BP,达连海周围发育森林,气候湿润,荒漠草原盖度增加或演化为草原^[52]。与此同时,我国古里雅冰芯、南岭东部湖沼沉积记录、贵州都匀七星洞石笋、西藏台错沉积物记录都清楚显示,在末次冰消期向全新世早期转变之际,尤其是在 13 ~ 11 ka BP,出现一个严重的气候冷暖剧烈波动期^[53-58]。

末次冰消期向全新世早期转折的气候转折阶段,冷暖干湿波动频繁,其中 Bolling/Aellrod 暖期在世界范围内不同地方也保存下了广泛的沉积证据,劳伦冰盖的融化历史、格陵兰 GISP2 冰芯、北大西洋的深海钻孔、非洲的湖泊沉积、白尼罗河的洪水泛滥历史,甚至在非洲南部的淡水软体动物的同位素组分中也记录到了这次严重的气候转折期^[59-61]。Fulton^[62]通过研究格陵兰区域内冰川的进退发现,在 11 ka BP 格陵兰冰盖已经退缩到加拿大地盾的边缘,在 10 ka BP 整个加拿大平原和科迪勒拉冰盖已经完全消失。北大西洋的同位素记录证实 13 ~ 9 ka BP,海水温度达到最低,这正是冰山

和融冰水流流入海洋的结果。Lister^[63]通过研究阿尔卑斯山前的苏黎世湖钻孔分离出来的有机体同位素组分并结合介形类与双壳类软体动物化石指出,12.8 ka BP 前后,双壳类介壳的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线有一个突然向正偏转的事件,原因是由氧同位素组成的较轻的冰川融水突然注入的结果。

综合各地不同信息载体记录的环境变化信息可知,在末次冰消期向全新世早期转折的阶段,黄河源区气候状态不稳定,气候变率增加,冰川退缩,冰川融水猛烈增加,导致流域内发生与冰川消融有关的洪水灾害事件。13.6 ~ 13.0 ka BP,冷暖气候波动事件在青藏高原地区甚至全中国是普遍存在的,可与格陵兰冰芯、北大西洋深海沉积和欧洲记录到的 Bolling/Allerod 暖期对比,表明 B/A 事件不只是北大西洋的区域现象,而是具有全球性质的气候波动事件。这是黄河源区河流系统对气候变化快速极端的水文响应,这对于深入理解世界其他地区河流域水文系统对于全球气候变化的响应规律,也具有非常重要的科学价值。

5 结论

通过野外实地考察,根据古洪水 SWD 的野外宏观沉积学特征,在黄河源区玛曲段太吾若(TWR)发现一组多层典型的古洪水滞流沉积物。它们质地均匀,分选良好,块状构造,具有清晰的波状水平层理。结合粒度分布、磁化率、地球化学元素及石英颗粒微形态特征综合分析,发现古洪水 SWD 与现代洪水 SWD 性质相同,与现代土壤和现代风成沙有显著差异,为典型的洪水悬移质沉积物,进一步确认 TWR 剖面古洪水 SWD 记录了一期多次与青藏高原冰川大规模消融有关的古洪水事件。

通过 OSL 测年技术确定了 TWR 剖面古洪水发生时段介于 13.6 ~ 13.0 ka BP,对应末次冰消期向全新世早期转折中的 Bolling/Aellrod 暖期,与全球气候变率大、不稳定期相吻合。这期古洪水事件是末次冰消期,气温升高,青藏高原地区冰融水大量下泄汇入黄河而形成的大洪水,与此同时北美、南美、欧洲等地也记录了与冰川消融有关的超级大洪水事件。13.6 ~ 13.0 ka BP,在世界各地都是一个冰川消融、冻土缩减、植被恢复的时期,虽然各地关于这个时期的断代有所差异,但是气候迅速冷暖波动变化的事实是客观存在的。

参考文献 (References):

- [1] Baker V R. Paleoflood hydrology: origin, progress, prospects [J]. *Geomorphology*, 2008, 101(1/2): 1–13.
- [2] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. Extraordinary floods of 4100–4000 a BP recorded at the Late Neolithic ruins in the Jinghe River Gorges, middle reach of the Yellow River, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 289(1/2/3/4): 1–9.
- [3] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. Sedimentary records of the extraordinary floods at the ending of the mid-Holocene climatic optimum along the upper Weihe River, China[J]. *Holocene*, 2012, 22(6): 675–686.
- [4] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. Holocene palaeoflood events recorded by slackwater deposits along the lower Jinghe River valley, middle Yellow River basin, China[J]. *Boreas*, 2015, 44(1): 127–138.
- [5] Huang Chunchang, Li Xiaogang, Pang Jiangli, et al. Palaeoflood sedimentological and hydrological studies in the Yongheguan reach in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 67(11): 1494–1504. [黄春长, 李晓刚, 庞奖励, 等. 黄河永和关段全新世古洪水研究[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1494–1504.]
- [6] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. 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[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2011, 41(11): 1658–1669. [黄春长, 庞奖励, 查小春, 等. 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[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(11): 1658–1669.]
- [7] Li Xiaogang, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Hydrological studies of the Holocene palaeoflood in the Hukou reach of the Yellow River [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 65(11): 1371–1380. [李晓刚, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河壶口段全新世古洪水事件及其水文学研究[J]. *地理学报*, 2010, 65(11): 1371–1380.]
- [8] Wan Honglian, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Holocene extreme floods of the Baoji gorges of the Weihe River [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(2): 430–440. [万红莲, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河宝鸡峡全新世特大洪水水文学研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(2): 430–440.]
- [9] Yang Dayuan, Ge Yu, Xie Yuebo, et al. Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China[J]. *Geomorphology*, 2000, 33(1/2): 73–88.
- [10] Xie Yuebo, Shi Mingli, Wang Jinquan. Error analysis in estimation of discharge of 2360 a BP ancient flood in the Yellow River [J]. *Yellow River*, 1998, 20(9): 1–3. [谢悦波, 时明立, 王井泉. 黄河 2360 a BP 古洪水流量推算误差分析[J]. *人民黄河*, 1998, 20(9): 1–3.]
- [11] Li Chang'an, Huang Junhua, Zhang Yufen, et al. Preliminary study of palaeoflood of Last Glacial Maximum in upper reaches of the Yellow River[J]. *Journal of China University of Geosciences: Earth Science*, 2002, 27(4): 456–458. [李长安, 黄俊华, 张玉芬, 等. 黄河上游末次冰盛期古洪水事件的初步研究[J]. *中国地质大学学报: 地球科学*, 2002, 27(4): 456–458.]
- [12] Li Wanshou, Gao Xiaoping, Sun Shengli. Changes of runoff and sediment on mainstream of Yellow River in Qinghai Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(2): 18–22. [李万寿, 高小平, 孙胜利. 青海省境内黄河干流水沙量变化历史分析[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(2): 18–22.]
- [13] Li Zhiwei, Wang Zhaoyin, Tian Shimin, et al. Variation of streamflow and sediment discharge rate and relationship with temperature change in Yellow River source area [J]. *Journal of Sediment Research*, 2014(3): 28–35. [李志威, 王兆印, 田世民, 等. 黄河源水沙变化及与气温变化的关系[J]. *泥沙研究*, 2014(3): 28–35.]
- [14] Ma Jingxian, Xu Guochang. The extraordinary flood in the upper reach of the Yellow River in 1981 [J]. *Meteorological Monthly*, 1982, 8(4): 7–9. [马镜娴, 徐国昌. 1981 年秋季黄河上游的特大洪水[J]. *气象*, 1982, 8(4): 7–9.]
- [15] Li Guofang, Wang Chi, Wang Zhengfa, et al. Study on probable maximum flood in source region of Yellow River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013, 41(2): 102–107. [李国芳, 王迟, 王正发, 等. 黄河源区可能最大洪水研究[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2013, 41(2): 102–107.]
- [16] Buylaert J P, Murray A S, Vandenbergh D, et al. Optical dating of Chinese loess using sand-sized quartz: establishing a time frame for Late Pleistocene climate changes in the western part of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3(1/2): 99–113.
- [17] Roberts H M. Assessing the effectiveness of the double-SAR protocol in isolating a luminescence signal dominated by quartz [J]. *Radiation Measurement*, 2007, 42(10): 1627–1636.
- [18] Duller G A T. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements [J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(2): 161–165.
- [19] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. *Radiation Measurement*, 2000, 32(1): 57–73.
- [20] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations [J]. *Radiation Measurements*, 1994, 23(2/3): 497–500.
- [21] Yan Yingcun, Li Fengxia, Yan Liangdong, et al. Dynamic variation of the soil moisture reserve in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 23–27. [严应存, 李凤霞, 颜亮东, 等. 长江、黄河源区土壤储水量动态变化规律[J]. *干旱区农业研究*, 2008, 26(4): 23–27.]
- [22] Aiken M J. An introduction to optical dating [M]. New York: Oxford University Press, 1998: 60–68.
- [23] Grün R. The Age. exe computer program for the calculation of luminescence dates [CP]. Canberra, Australia: Research School of Earth Sciences of the Australian National University, 2003.
- [24] Liu Xiuming, Liu Dongsheng, Shaw J. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance [J]. *Quaternary Sciences*, 1993, 13(3): 281–287. [刘秀铭, 刘东生, Shaw J. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义[J]. *第四纪研究*, 1993, 13(3): 281–287.]
- [25] Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(6): 626–631. [鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. *中国科学 (D 辑)*, 1998, 28(3): 278–283.]
- [26] Wen Qizhong. Loessial geochemistry in China [M]. Beijing: Science Press, 1989. [文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北

- 京: 科学出版社, 1989.]
- [27] Ren Mingda, Miao Xin. Surface micro-textures of quartz sand grains: a guide to sedimentary environments[J]. *Geological Review*, 1984, 30(1): 36–41. [任明达, 缪昕. 石英砂表面的微结构: 一种沉积环境标志[J]. *地质论评*, 1984, 30(1): 36–41.]
- [28] Wang Ying, Deonarine B. Atlas of quartz sand surface textural features of China micrographs [M]. Beijing: Science Press, 1985: 1–10. [王颖, 迪纳瑞尔 B. 石英砂表面结构模式图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1–10.]
- [29] Zhao Hua, Lu Yanchou, Wang Chengmin, et al. A review of OSL dating for water-laid deposits: progress and prospect[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34(2): 82–86. [赵华, 卢演涛, 王成敏, 等. 水成沉积物释光测年研究进展与展望[J]. *核技术*, 2011, 34(2): 82–86.]
- [30] Wen Huachun, Lai Zhongping, Brookfield M E, et al. Late Pleistocene chronology of the Laurentide Ice Sheet in the Great Lakes regions of North America: a review and new quartz OSL dating[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 711–722. [温华春, 赖忠平, Brookfield M E, 等. 北美五大湖区晚更新世劳伦泰德冰盖演化年代学综述及石英光释光测年的初步尝试[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 711–722.]
- [31] He Ze, He Yuanqing, Zhang Zhigang, et al. OSL dating of the Quaternary glacial sedimentary sequences at Mt. Yulong, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(6): 1544–1552. [何则, 何元庆, 张志刚, 等. 玉龙雪山冰川沉积序列 OSL 定年[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(6): 1544–1552.]
- [32] Galbraith R F, Roberts R G. Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: an overview and some recommendations[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 11(8): 1–27.
- [33] Fuchs M, Woda C, Bürkert A. Chronostratigraphy of a sediment record from the Hajar Mountain range in north Oman: implications for optical dating of insufficiently bleached sediments[J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1): 202–207.
- [34] Zhang J F, Zhou L P, Yue S Y. Dating fluvial sediments by optically stimulated luminescence: selection of equivalent doses for age calculation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10/11/12/13): 1123–1129.
- [35] Huang Chunhang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. Impact of monsoonal climatic change on Holocene over bank flooding along Sushui River, middle reach of the Yellow River, China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(17/18): 2247–2264.
- [36] Knox J C. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1/2/3/4/5): 439–457.
- [37] England J F, Jr., Godaie J E, Klinger R E, et al. Paleohydrologic bounds and extreme flood frequency of the Upper Arkansas River, Colorado, USA [J]. *Geomorphology*, 2010, 124(1/2): 1–16.
- [38] Bradley R S. Past global changes and their significance for the future[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(2): 391–402.
- [39] Liu Bing, Jin Heling, Sun Zhong, et al. Geochemical characteristics of aeolian deposits in Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and the indicating climatic changes [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(7): 788–799. [刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 等. 青藏高原东北部共和盆地风成沉积地球化学特征及其揭示的气候变化[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(7): 788–799.]
- [40] Tomasson H. The jökulhlaup from Katla in 1918 [J]. *Annals of Glaciology*, 1996, 22: 249–254.
- [41] Baker V R. 9.26 global Late Quaternary fluvial paleohydrology: with special emphasis on paleofloods and megafloods [J]. *Treatise on Geomorphology*, 2013, 9: 511–527.
- [42] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle [J]. *Science*, 2001, 292(27): 679–686.
- [43] Huang Enqing, Tian Jun. Melt-water-pulse (MWP) events and abrupt climate change of the Last Deglaciation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(18): 2867–2878. [黄恩清, 田军. 末次冰消期冰融水事件与气候突变[J]. *科学通报*, 2008, 53(12): 1437–1447.]
- [44] Shen Ji, Liu Xinqi, Wang Sumin, et al. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18000 years [J]. *Quaternary International*, 2005, 136(1): 131–140.
- [45] Li Baohua, Jian Zhimin, Wang Pinxian. *Pulleniatina obliquiculata* as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa trough during the last 20000 years [J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32(1/2): 59–69.
- [46] Shakun J, Burns S J, Fleitmann D, et al. A high-resolution, absolute-dated deglacial speleothem record of Indian Ocean climate from Socotra Island, Yemen [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(3/4): 422–456.
- [47] Barker S, Diz P, Vautravers M J, et al. Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation [J]. *Nature*, 2009, 457(7233): 1097–1102.
- [48] Zhou Weijian, An Zhisheng, Porter S C, et al. Correlation of climatic events between East Asia and Norwegian Sea during Last Deglaciation [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 40(5): 490–501. [周卫建, 安芷生, Porter S C, 等. 末次冰消期东亚和挪威海气候事件的对比[J]. *中国科学(D 辑)*, 1997, 27(3): 260–264.]
- [49] Jia Yulian, Shi Yafeng, Wang Sumin, et al. Lake-expanding events in the Tibetan Plateau since 40 ka BP [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(Suppl.): 301–315. [贾玉莲, 施雅风, 王苏民, 等. 40 ka 以来青藏高原的 4 次湖涨期及其形成机制初探[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 12(增刊): 241–251.]
- [50] Zhu Song. River landform and geology environment evolution in the Yarlung Zangbo River valley [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012. [祝嵩. 雅鲁藏布江河谷地貌与地质环境演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.]
- [51] Wang Fubao, Yan Ge, Lin Benhai. Organic carbon stable isotopic composition from peat in Ruergai Plateau, eastern part of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(13): 1114–1118. [王富葆, 阎革, 林本海. 若尔盖高原泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ 的初步研究[J]. *科学通报*, 1993, 38(1): 65–67.]
- [52] Cheng Bo, Chen Fahu, Zhang Jiawu. Palaeovegetational and palaeoenvironmental changes in Gonghe Basin since Last Deglaciation [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 65(11): 1336–1344. [程波, 陈发虎, 张家武. 共和盆地末次冰消期以来的植被和环境演变[J]. *地理学报*, 2010, 65(11): 1336–1344.]
- [53] Hong Bing, Liu Congqiang, Lin Qinghua, et al. Temperature evolution from the $\delta^{18}\text{O}$ record of Hani peat, Northeast China, in the last 14000 years [J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 52(7): 952–964. [洪冰, 刘丛强, 林庆华, 等. 哈尼泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的过去 14000 年温度演变[J]. *中国科学(D 辑)*, 2009, 39(5): 626–637.]

- [54] Ouyang Jun, Zhong Wei, Xue Jibin, et al. Hydrological variation of monsoon-dominated low latitude region since Late Glacial: high-resolution lake sedimentary record from east Nanling Mountains, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(12): 1839 – 1853. [欧阳军, 钟巍, 薛积彬, 等. 我国低纬季风区晚冰期以来水文变化: 南岭东部高分辨率湖沼沉积记录[J]. *地质学报*, 2010, 84(12): 1839 – 1853.]
- [55] Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. A high resolution Late Pleistocene climate-stratigraphy of 4 stalagmites from Qixing cave, Duyun, Guizhou [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(3): 318 – 325. [覃嘉铭, 袁道先, 程海, 等. 贵州都匀七星洞石笋剖面晚更新世高分辨率的气候地层学[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(3): 318 – 325.]
- [56] Yao Tandong, Thompson L G. Dunde icecore recording the temperature changes in the last 5 ka[J]. *Science in China (Series B)*, 1992, 22(10): 1089 – 1093. [姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化[J]. *中国科学(B 辑)*, 1992, 22(10): 1089 – 1093.]
- [57] Zheng Mianping, Liu Junying, Pang Qiqing, et al. Sedimentary records and the Late Pleistocene-Holocene climatic changes in Tai Co, Tibet(Xizang)[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(1): 104 – 129. [郑绵平, 刘俊英, 庞其清, 等. 西藏台错沉积记录与更新世晚期-全新世气候变化[J]. *地质学报*, 2012, 86(1): 104 – 129.]
- [58] Zhou Liang, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. OSL dating of the paleoflood events in the Ankang east reach in the upper Hanjiang River valley[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(11): 1703 – 1714. [周亮, 黄春长, 周亚利, 等. 汉江上游安康东段古洪水事件光释光测年研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(11): 1703 – 1714.]
- [59] Broecker W S, Kennett J P, Flower B P, et al. Routing of meltwater from the Laurentide Ice Sheet during the Younger Dryas cold episode[J]. *Nature*, 1989, 341(6240): 318 – 321.
- [60] Dansgaard W, White J W C, Johnsen S J. The abrupt termination of the Younger Drays climate event [J]. *Nature*, 1989, 339(6225): 532 – 534.
- [61] Leventer A, Williane D F, Kennett J P. Dynamics of the Laurentide ice abet during the Last Glaciation; evidence from the Gulf of Mexico[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1982, 59(1): 11 – 17.
- [62] Fulton R J. Quaternary geology of Canada and Greenland[M]. Ottawa, Canada: Canadian Government Publishing Centre, 1989.
- [63] Lister G S. Stable isotopes from lacustrine Ostracoda as tracers for continental palaeoenvironments[M]// *Ostracoda in the earth science*. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema, 1988: 201 – 218.

Study of the sedimentology and OSL dating of the Last Deglaciation paleoflood events along Maqu section in the source regions of the Yellow River

CHEN Yinglu^{1,2}, HUANG Chunchang^{1,2}, ZHANG Yuzhu³, GUO Yongqiang^{1,2}, ZHOU Yali^{1,2},
ZHA Xiaochun^{1,2}, PANG Jiangli^{1,2}, SHI Binnan^{1,2}, LIU Wenjin^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. National Demonstration Center for
Experimental Geography Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 3. College of Urban and
Environmental Science, Northwestern University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Pedo-sedimentological investigations were carried out in the source regions of the Yellow River. A set of paleoflood slack water deposits (SWDs) was identified along Maqu section of the Yellow River based on sedimentary criteria and analytical results, which contain climate and hydrological information. Sediment samples were systematically taken from loess-soil profiles at Taiwuruo study site and magnetic susceptibility, grain-size distribution, geochemical elements and micromorphology were analyzed in laboratory for identifying the paleoflood SWDs. The results show that these SWDs are defined as sandy silt, which are similar to the modern flood SWD; the modern soil is defined as clayey silt; the modern aeolian sand is defined as medium sand. The shape of particle size distribution curve of the paleoflood SWDs is very similar to that of the modern flood SWD, very different from modern aeolian sand and modern soil. The magnetic susceptibility of the paleoflood SWDs and the modern flood SWD are slightly higher than that of the modern aeolian sand, but significantly lower than that of the modern soil. Chemical elements of the paleoflood SWDs are distinctly different from modern soil and modern aeolian sand. The analysis of the morphological characteristics of the quartz particles shows that the surface of the paleoflood SWD and the modern flood SWD are distributed with V-shaped pits, triangular marks, concave surfaces typically caused by physical collision and friction in running water. The morphological characteristics of the quartz particles reflect different microscopic differences in sedimentary environment. Analytical results, including magnetic susceptibility, particle-size distribution, concentrations of chemical elements and micromorphology, indicate that these well-sorted paleoflood SWDs were deposited from the suspended sediment load in floodwaters. This hydro-climatic event was dated to 13.6 – 13.0 ka BP by using the optically stimulated luminescence (OSL) dating method. The period corresponds to the transition period of the Last Deglaciation to the Holocene, corresponds to the Bolling/Aellrod warming event in the Last Deglaciation in Europe and the Greenland ice core. At this time, the phenomenon of glacier ablation was prevalent in the Tibetan Plateau, which may be concluded that the paleoflood events were closely related to glacier ablation in the same basin. These results are of great significance to mitigate flood disasters and to exploit water resources, as well as to understand hydrological response to global climate change.

Key words: paleoflood; Last Deglaciation; optically stimulated luminescence (OSL); climate change; source regions of the Yellow River

(本文编辑: 武俊杰)