

文章编号: 1000-0550(2012)02-0346-10

渭河咸阳段全新世古洪水事件光释光测年研究^①

王恒松^{1,2} 黄春长¹ 周亚利¹ 庞奖励¹ 查小春¹ 顾洪亮¹

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院 西安 710062; 2. 黔东南民族职业技术学院 贵州凯里 556000)

摘要 古洪水水文学研究是全球气候变化研究的前沿课题,确定古洪水事件的年代是古洪水研究的重要内容之一。对渭河流域进行深入的野外考察,在中游咸阳段阶地发现全新世黄土—古土壤层里夹有古洪水滞流沉积层,表明该地层记录了古洪水事件发生的信息。在该剖面采集光释光样品,分离提取40~63 μm石英颗粒成分,应用单片再生剂量法(SAR)进行红外后蓝光(Post-IR OSL)释光测量,获得了9个OSL年龄值。结果表明由古洪水滞流沉积层记录的特大古洪水事件发生在3 200~2 800 a B. P.之间。结合沉积样品系列的磁化率和粒度成分等气候替代性指标分析,揭示了在全新世中期向晚期转折过渡时期,渭河流域处于气候向干旱化发展的转型期,气候变化剧烈,大气系统不稳定,降水变率增大等,是导致特大洪水多发的主要原因。这也是渭河流域气候水文系统对于全球性气候恶化响应的结果。

关键词 古洪水事件 光释光测年 全新世 滞流沉积物 渭河

第一作者简介 王恒松 男 1967年出生 副教授 博士研究生 自然地理学 E-mail: wanghengsong796@163.com

通讯作者 黄春长 E-mail: cchuang@sunm.edu.cn

中图分类号 P331 **文献标识码** A

古洪水是指发生在历史时期及其以前、没有被人们观察记录到的洪水事件。特大古洪水发生的高分辨率年代数据的获得一直是古洪水水文学、古气候研究的瓶颈问题。而古洪水滞流沉积层(slackwater deposit, 即SWD)是古洪水事件的理想载体之一,这些沉积物往往被保存在河流两岸的阶地或者回水湾等滞流地段。准确解译古洪水事件信息,需要对河流古洪水沉积物进行精确的测年。古洪水沉积物的年龄问题,一般可以通过地层对比法、文化遗物断代法、放射性¹⁴C和光释光(optical stimulated luminescence, 简称OSL)测年等方法来解决^[1~4]。黄土地区全新世剖面当中能用于¹⁴C测定年代的有机质材料很少,多数沉积剖面也不含有文化遗物,而用于光释光测年(OSL)的石英和长石等矿物材料很普遍,加之光释光测年技术被广泛地运用于黄土、沙漠沙等风成沉积物的测年^[5]。葛本伟等通过单片再生剂量(SAR)释光测年技术获得古洪水所在地层层位的上覆、下伏黄土层年龄,间接推断出古洪水事件发生的年代,并建立了泾河中游CJC剖面的古洪水事件年代框架^[6]。近十几年来有学者研究,将OSL测年技术直接对水成沉积物进行测年^[7~9],结果表明OSL年代较为接近

沉积物的真实年龄^[2]。但也有学者发现水成沉积物中存在不完全晒退的现象^[10~19],如何鉴别样品晒退彻底与否是解决OSL测年技术在古洪水滞流沉积物应用的关键问题之一。当前人们关注的焦点是如何选用沉积物中晒退相对较好的颗粒进行年龄计算,以期获得较准确的年代^[15]。因此,本文试图通过应用OSL测年技术对渭河咸阳段南寺村剖面的古洪水滞流沉积物进行光释光断代研究,探讨OSL测年方法在古洪水事件测年方面的可行性,以便有效地建立渭河主流古洪水事件的年代框架。

1 研究区概况、剖面特征和样品采集

渭河是黄河最大的支流,全长818 km,流域面积13.48万km²。渭河流域属于大陆性季风气候,地处半干旱和半湿润地区,多年平均降水量为670 mm左右。降水变率大,多暴雨,且集中在7~10月,占年总量的60%以上,洪峰和沙峰皆集中该时间。渭河中游咸阳段河床比降小,河道宽浅,沙洲较多,水流分散,河道时有淤积。

通过对渭河中游咸阳段的野外深入考察,在南寺村阶地发现全新世黄土—古土壤剖面(图1)。南

^①国家自然科学基金重点项目(批准号:41030637,40930103),教育部博士点基金项目(编号:20110202130002),中央高校基本科研业务费专项基金(编号:GK200902020)资助。

收稿日期:2011-01-20;收修改稿日期:2011-04-21

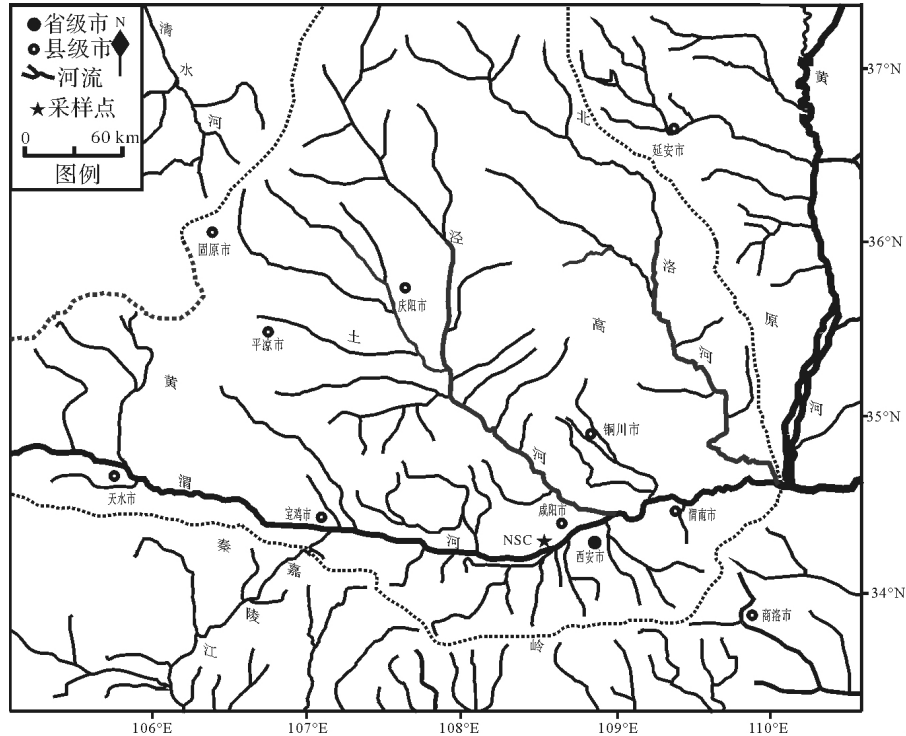


图1 渭河中下游水系和 NSC 剖面位置图

Fig. 1 The study site of the NSC profile in the middle reaches of the Weihe River

寺村(NSC) 剖面位于咸阳市附近的渭河北岸第一级阶地,阶地黄土覆盖层顶面海拔 394 m,大约高出渭河河床 8 m。根据野外宏观观察,发现全新世黄土(L_0)与古土壤层(S_0)之间夹有一层水平层状结构的古洪水滞流沉积物,油红棕色,粘土质地,紧实致密,具贝壳状断口,碎裂为棱角状,具有水平或者波状层理,并且向阶地后缘方向逐渐尖灭^[20]。在渭河中下游同类地貌单元的相应高度,发现多处古洪水沉积层。通过野外观察,根据其地层层位初步确定 NSC 剖面 and CDC 剖面以及沿线所发现的古洪水滞流沉积层为同一期古洪水事件的记录。结合土壤学、地层学和沉积学特征分析,将 NSC 剖面详细划分如下:(1) 35~0 cm,表土层(TS);(2) 95~35 cm,现代黄土层(L_0);(3) 110~95 cm,古洪水滞流沉积层(SWD);(4) 175~110 cm,古土壤层(S_0);(5) 210~175 cm,过渡性黄土层(L_1);(6) ?~210 cm,马兰黄土层(L_1),未见底(图2)。

将地层剖面清理出新鲜的垂直面,在不同地层关键部位(图1)用不锈钢管水平打入,取出样品后将两端用铝箔纸和黑色塑料袋密封,以防曝光和损失水分。在该剖面共采取 9 个光释光测年样品。同时以每 5 cm 间距自上而下采集沉积物样品 55 个,以便进

行粒度成分和磁化率测定。

2 实验方法

2.1 光释光年龄的测量

2.1.1 样品前处理

在实验室安全红光下对样品进行前处理,将样品不锈钢管两端 2 cm 左右的曝光部分削去,用铝盒盛放,称湿重,然后烘干称干重,并计算出含水量,研磨后用测 U、Th、K 的含量;将余下的未曝光部分用 30% 的 H_2O_2 和 10% 的 HCL 分别除去样品中的有机质和碳酸盐类物质^[21-22],并用蒸馏水冲洗至中性,然后分离出不同的粒级,选择 40~63 μm 的粒级组分作为本次测年材料,37 $^{\circ}C$ 恒温烘干后,取适量用氟硅酸浸蚀 15 天,再用 20% 氢氟酸溶液刻蚀 40 分钟以溶蚀长石组分,并用盐酸清洗样品以去掉其中的氟化物。样品烘干后过筛,确保所选石英的粒径范围在 40~63 μm 之间,并通过 IR 检测石英颗粒的纯度^[23]。把提纯的石英颗粒用硅胶单层粘贴在直径为 9.8 mm 的铝片中间 5 mm 的区域内供仪器测量。

2.1.2 等效剂量(D_e)的测定

每个样品各制备 12 个样片,所有样品的等效剂量测量步骤按照单片再生剂量法(SAR)^[24-25],在

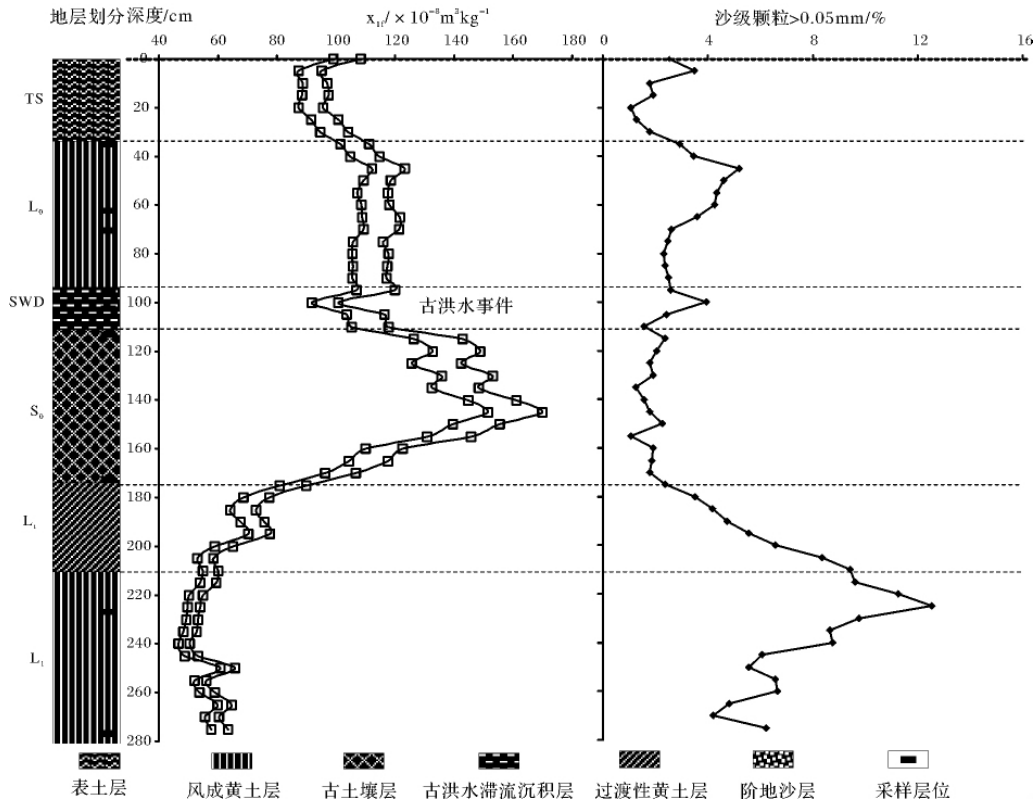


图2 渭河中游 NSC 剖面全新世地层划分、光释光测年样品分布、磁化率和沙级成分含量曲线图
 Fig.2 Stratigraphic subdivision ,OSL samples ,magnetic susceptibility and content of sand-sized particle in the NSC profile in the middle reaches of the Weihe River

Risφ TL/OSL DA—15 型自动测量仪上进行。采用红外后蓝光激发,激发光源为红外发光(830 nm)和蓝光(470 ± 17 nm)。光释光信号由 EM19235QB15 光电倍增管测量,探测滤光片为 U-340,β 辐射源为 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 辐照剂量率为 0.10475 Gy/s。

把制备好的样片在特定的温度下预热 10 s,预热温度控制在 160 ~ 300 °C 之间,在 60 °C 下用 IRSL 激发 100 s,再用 BLSL 在 125 °C 下激发 40 s,测量样品的自然释光信号(L_0);然后给同一张样片上辐照一个

检验剂量 D_1 ,然后加热到 160 °C,快速冷却至 60 °C,用 IRSL 激发 100 s,再加热到 160 °C,冷却至 125 °C 时再用 BLSL 激发 40 s,测量由检验剂量产生的释光信号强度(T_0),所测的 L_0/T_0 的比值即是感量校正后的自然释光强度;然后辐照再生剂量 $D_i(i=1, 2, \dots, 5)$,重复上面的方法和步骤。释光信号采用前 0.8 s 减去后 4 s 内的五分之一的积分值,自然释光信号快速衰退到本底值(图 3 内插图),说明光释光信号以快速组为主^[26, 27],可以保证释光数据的可靠性。

表1 渭河中游 NSC 剖面光释光测年结果

Table 1 The OSL dating results in the NSC profile in the middle reaches of the Weihe River

样品编号	深度 /cm	U / $\times 10^{-6}$	Th / $\times 10^{-6}$	K /%	含水量 /%	环境剂量率(D_y) /Gy. ka ⁻¹	等效剂量(D_e) /Gy	OSL 年龄 /a
NSC-1	42.5	2.90 ± 0.11	12.0 ± 0.36	2.06 ± 0.06	22.80	3.26 ± 0.09	4.88 ± 0.21	1490 ± 80
NSC-2	62.5	2.73 ± 0.11	12.4 ± 0.37	2.07 ± 0.06	23.40	3.21 ± 0.09	6.40 ± 0.39	1990 ± 90
NSC-3	67.5	2.68 ± 0.11	13.0 ± 0.38	1.96 ± 0.05	19.40	3.27 ± 0.09	7.17 ± 0.41	2200 ± 140
NSC-4	97.5	2.40 ± 0.10	12.3 ± 0.37	1.95 ± 0.05	19.80	3.50 ± 0.14	10.82 ± 0.53	3080 ± 190
NSC-5	102.5	2.68 ± 0.11	12.9 ± 0.39	1.93 ± 0.05	22.40	3.54 ± 0.14	10.06 ± 0.82	2850 ± 260
NSC-6	112.5	2.46 ± 0.10	13.2 ± 0.38	2.02 ± 0.06	21.70	3.58 ± 0.14	11.32 ± 0.31	3160 ± 150
NSC-7	172.5	2.33 ± 0.10	14.8 ± 0.43	2.11 ± 0.06	22.80	3.69 ± 0.15	31.25 ± 1.35	8450 ± 500
NSC-8	227.5	2.67 ± 0.11	10.8 ± 0.33	1.76 ± 0.05	23.60	3.15 ± 0.13	37.65 ± 2.52	11 940 ± 960
NSC-9	277.5	2.54 ± 0.10	11.0 ± 0.34	1.75 ± 0.05	25.00	3.07 ± 0.13	43.21 ± 2.81	14 040 ± 1090

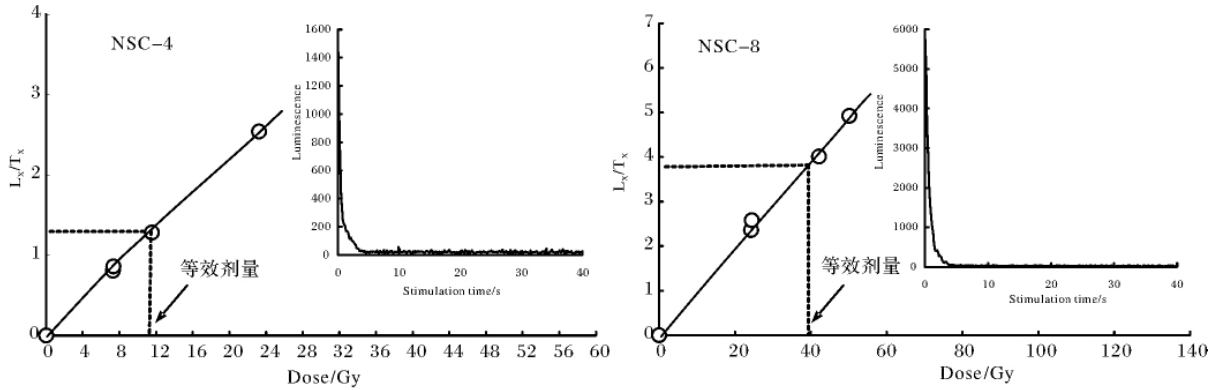


图3 样品 NSC-4 和 NSC-8 释光生长曲线(内插图为光释光衰减曲线)

Fig.3 OSL growth curves of NSC-4 and NSC-8 samples

将经过灵敏度校正后的自然光释光信号 (L_n/T_n) 与再生剂量及其释光强度 (L_x/T_x) 对比建立生长曲线, 用校正后的自然释光强度值在该曲线上内插, 得到测量单片的等效剂量 (D_e) (图3中虚线与X轴相交的数据)。样品的OSL年龄据 Aitken^[28] 提供的方法以及采用软件 AGE · exe^[29] 计算得到, 其等效剂量、年剂量及光释光年龄测试结果见表1。

2.1.3 年剂量的测定

本文的铀、钍和钾含量是在中国原子能研究院通过中子活化法得到的。原则上含水量采用样品埋藏时期的平均含水量, 但地质时期的含水量无法获得, 一般情况根据地貌部位及采集时的含水量综合分析来确定。现在的测量值并未能代表当时的真实值, 故样品的水分含量采用采集时测量所得数据, 并按照一定的误差率校正含水量^[30~32]。关于 α 射线对40~63 μm 石英颗粒的辐射效率系数值, 根据前人实验结果取 $\eta = 0.035$ ^[33, 34]。最后, 根据相关转换参数^[34, 35]求出样品的环境剂量率(表1)。

2.2 磁化率和粒度测量

磁化率采用英国 Bartington 公司生产的 MS-2 型磁化率仪测量样品的磁化率值, 每个样品测定3次, 取其平均值。样品的粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer-S 型激光粒度仪进行测定。测量前先用10%的 H_2O_2 和10%的HCl除去样品中的有机质和碳酸钙成分, 然后上机重复测量3次, 取其平均值为最后测量结果。

3 测试结果

3.1 热转移效应和剂量恢复试验

对样品进行等效剂量 (D_e) 测定时, 在预热过程

中常会发生热转移, 使释光信号增强, 影响 D_e 值。为此, 本研究选取一个 SWD 样品 NSC-4 (代表较年轻的样品) 和一个黄土样品 NSC-8 (代表较老的样品) 进行从160 $^{\circ}\text{C}$ 到300 $^{\circ}\text{C}$ 之间以20 $^{\circ}\text{C}$ 间隔, 预热10s的预热坪区检验与剂量恢复试验。样品 NSC-4 和 NSC-8 在200~260 $^{\circ}\text{C}$ 之间等效剂量没有随温度升高而增大, 出现明显的坪区(图4)。在此条件下做了热转移效应及剂量恢复试验, 在对样品 NSC-4 和 NSC-8 进行多次预热和激发试验, NSC-4 和 NSC-8 因热转移生成的等效剂量值分别为0.05 Gy 和 0.12 Gy, 相当于原始剂量的0.7%和0.5%, 热转移效应对等效剂量影响非常小, 均在允许的误差范围之内。对样品 NSC-4 和 NSC-8 进行等效剂量的恢复试验过程^[22]是各取一组6个样片, 在中午强烈的太阳光下暴晒30 min, 使其自然释光信号完全晒褪, 然后用 β 源辐照一个人工剂量, 该剂量相当于样品的埋藏古剂量, 相应的释光信号相当于自然释光信号, 然后按照上述的单片再生剂量法测量其等效剂量(图4)。在剂量恢复试验中, 附加给 NSC-4 和 NSC-8 的剂量分别为11.05 Gy 和 38.24 Gy, 恢复得到的等效剂量分别为11.17 Gy 和 38.36 Gy, 与所给剂量比较仅相差0.72%和0.31% (图5)。恢复系数(Recycling ratio)的变化范围在0.95~1.10之间, 表明测试过程对样品的感量变化得到了很好的校正。因此, 在本实验中, 选择预热温度为260 $^{\circ}\text{C}$, cut heat 220 $^{\circ}\text{C}$, 在此条件下进行 D_e 值的测量。

3.2 影响因子分析

影响等效剂量的原因之一是样品在埋藏之前是否晒退彻底, 只有晒退较彻底的单片测出的等效剂量, 比较接近样品的埋藏古剂量, 由此计算的年龄比

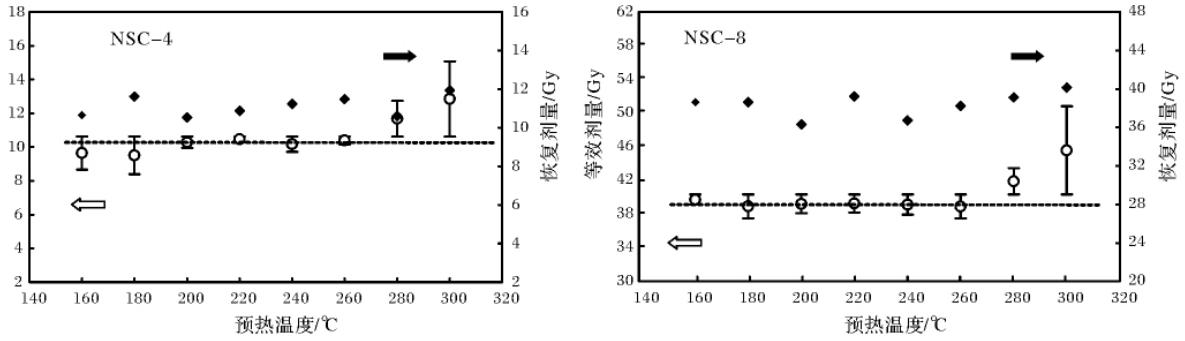


图4 样片 NSC-4 和 NSC-8 预热温度对等效剂量的坪区

Fig. 4 Preheat temperature and equivalent dose of NSC-4 and NSC-8 samples

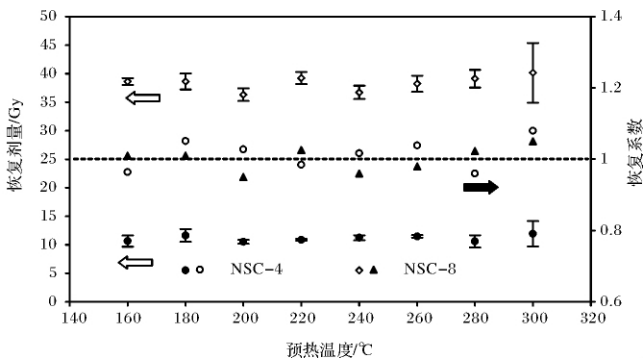


图5 样片 NSC-4 和 NSC-8 的剂量恢复实验

Fig. 5 Dose recovery experiments of NSC-4 and NSC-8 samples

较接近样品的埋藏年龄,对于水成沉积物还可能存在晒退不均一的问题。Zhang 等的研究认为可以通过不同测量单片的 D_e 值与灵敏度校正后的自然释光强度之间的相关关系来判断样品的晒退程度^[10],同时还可通过样品的 D_e 值分布来体现样品最后一次被埋藏之前的曝光程度。通过对 D_e 频率分布图(图6)

和 D_e 值与灵敏度校正后的自然释光强度之间的相关性(图7)分析,发现 D_e 值呈单峰近似正态分布,说明这些样片是晒退良好的沉积颗粒,恢复系数介于0.95~1.10之间,故本文选择相对晒退较彻底的样片的 D_e 值,计算了 D_e 的平均值,而舍去那些异常值如图6中的斜线柱图。

引起环境剂量率误差主要是样品里的放射性核素 U、Th 和它们的衰变子体以及 K 的含量,分析发现 U 系元素可能存在向上富集的现象。图6、7显示,样品 NSC-4 和 NSC-8 的 D_e 值离散性相对较大,可能是放射性元素在样品中不均匀分布或样品晒退不彻底引起的。

3.3 OSL 年代数据分析

为了验证测量结果的可靠性,进一步分析图3可知,NSC 剖面样品的 D_e 值是采用中颗粒 40~63 μm 单片再生剂量法获得的,样品的光释光生长曲线呈良好的线性增长且未达到饱和。该批样品应用 Post-IR 技术测定时,被蓝光充分晒退和 β 源辐照后未发生明显的感量变化。从图4可知样品 NSC-4 和 NSC-

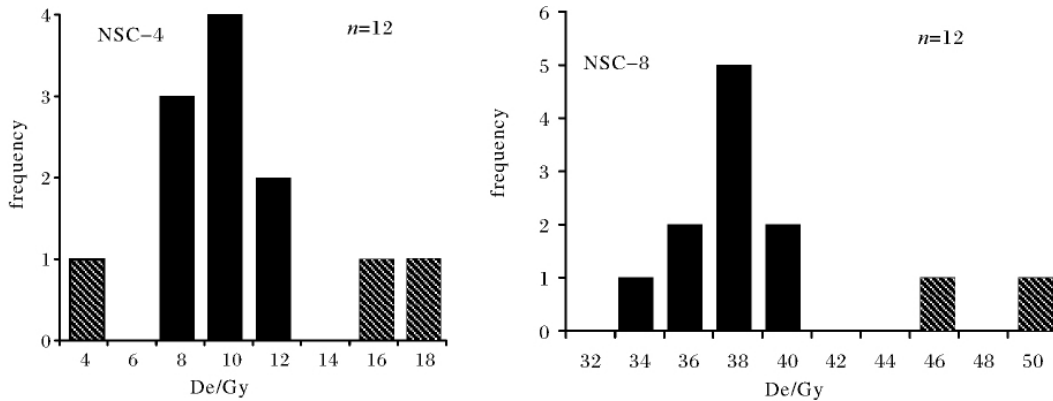


图6 样片 NSC-4 和 NSC-8 的等效剂量频率分布图

实心柱代表参与计算 D_e 值,斜线柱代表计算平均 D_e 舍去的值

Fig. 6 Distribution frequency of equivalent dose of NSC-4 and NSC-8 samples

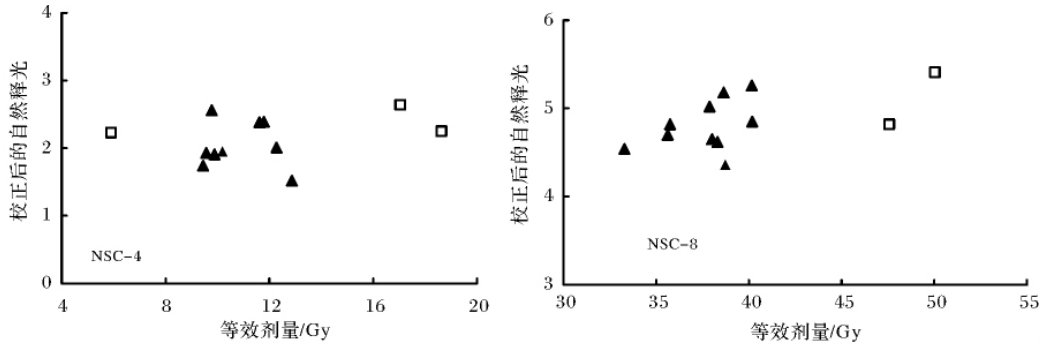


图 7 样品 NSC-4 和 NSC-8 等效剂量相对于感量校正后的自然释光信号的离散图

黑三角符号代表计算 D_0 的有效值,空心方格符号代表舍去的 D_0 值

Fig.7 Equivalent dose relative to scatter grams of natural luminescence signal after correction of the sense of NSC-4 and NSC-8 samples

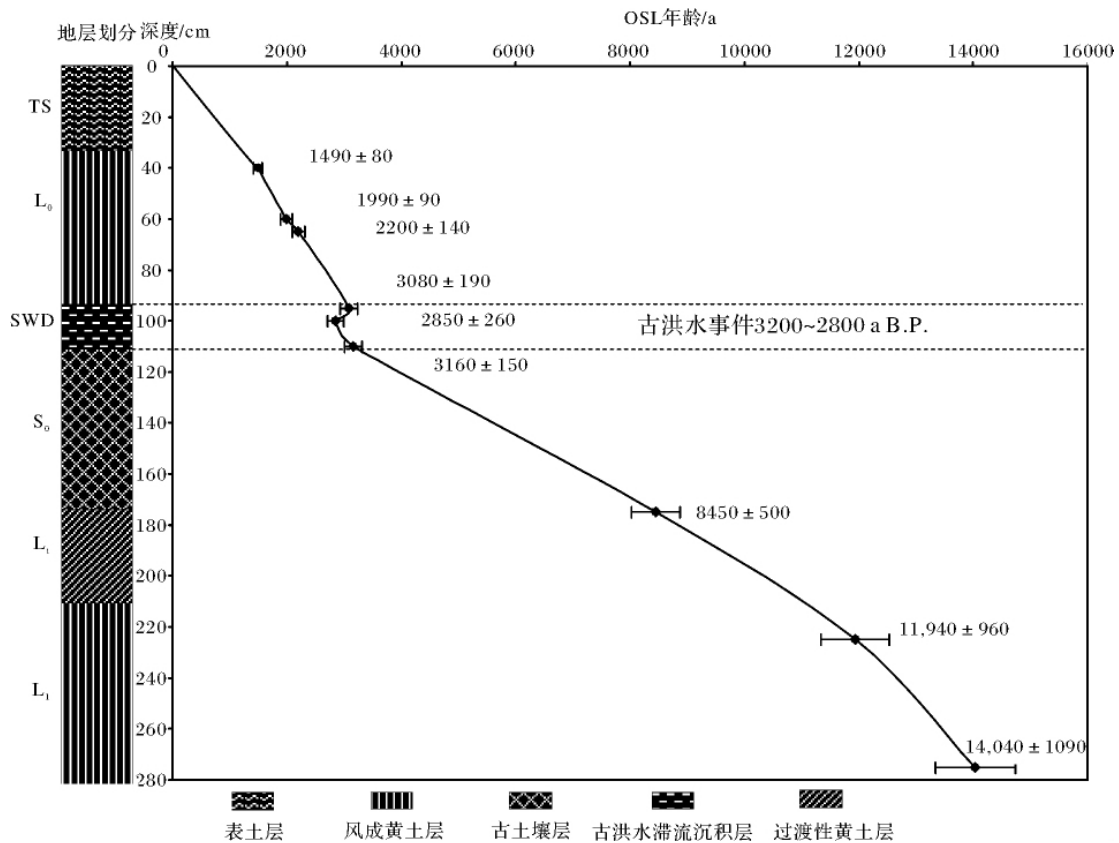


图 8 渭河中游 NSC 剖面 OSL 年龄与深度关系图

Fig.8 The relations between OSL age and the depth in the NSC profile in the middle reaches of the Weihe River

8 有较宽泛而平直的等效剂量坪区说明所选择的 preheat 温度比较合适测试,表明 D_0 值测定的可靠性。在图 6 的 D_0 频率分布图,样品 NSC-4 和 NSC-8 都比较集中,说明样品晒退比较均以彻底。 D_0 值的选择是合理的,由此选取的 D_0 值计算得到的 OSL 年龄结果完全可信。渭河咸阳南寺村剖面的 9 个样品基

本上控制了该剖面的关键层位,获得的 OSL 年龄数值随深度增加而增大(图 8)。所测剖面的 OSL 年龄范围在 $(1\ 490 \pm 80) \sim (14\ 040 \pm 1\ 090)$ a 之间,数据误差在 5% ~ 10% 之间。可知南寺村剖面包含了整个全新世地层和部分晚更新世地层。

从图 8 可以发现,渭河咸阳 NSC 剖面的 9 个样

品分为三个区段, NSC-1、NSC-2 和 NSC-3 组成第一区段, 为全新世晚期风成黄土堆积物, 年龄在 3 100 ~ 1 500 a B. P. 左右; 第二区段由 NSC-4、NSC-5、NSC-6 和 NSC-7 组成, 为全新世地层, 该段又可细分为 2 个次级段, 其中次级一段 NSC-4、NSC-5 是古洪水滞流沉积层的年龄, 代表古洪水事件发生的年代, 年龄介于 3 200 ~ 2 800 a B. P. 之间, 虽然有一个数值出现倒置现象, 但考虑数据有 10% 左右的误差, 该值还是可信的。NSC-6、NSC-7 组成的次级二段为古土壤层的生成年龄, 在 8 500 ~ 3 200 a B. P. 之间。NSC-8、NSC-9 组成第三区段, 处于马兰黄土层顶部的年龄, 属于晚更新世沉积层。咸阳 NSC 剖面的这组年龄值与黄春长教授对渭河流域黄土—古土壤剖面所划分的地层年代框架基本一致^[1], 也进一步证明了我们测量的 OSL 年龄是可靠的。

4 古洪水事件与气候变化

粒度成分和磁化率是中国黄土与气候变化研究中应用比较成熟的替代指标^[36~38], 同时将该指标用于鉴别古洪水滞流沉积层特征已然成熟^[20, 39]。对比渭河咸阳 NSC 剖面的磁化率和粒度指标(图 2)表明全新世古土壤层(S_0)磁化率为剖面最高值, 均值达 $133.62 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 但在现代黄土层(L_0)之下, 古土壤(S_0)顶部出现一个相对的低谷值, 同时与之对应的 $>0.05 \text{ mm}$ 沙级颗粒曲线在此处突变为一个小峰值, 在此形成一个特殊层位。结合野外宏观沉积学特征综合分析, 可以确定该层即是古洪水滞流沉积层, 清楚的记录了发生在全新世时期的古洪水事件, 也反映出渭河流域一万多年来全新世气候波动变化特征。

记录该期古洪水事件的渭河咸阳段全新世 NSC 剖面, 其地层结构可与渭河流域内的漆水河谷 HXZ 剖面进行对比^[40]。古洪水滞流沉积层被夹在全新世现代黄土层(L_0)与古土壤层(S_0)之间, 表明该期古洪水事件发生在全新世中期(8 500 ~ 3 100 a B. P.)与晚期(3 100 ~ 0 a B. P.)转折过渡时期的某一时间段。采取于 S_0 的顶界样品 NSC-6 的年龄为 $3 160 \pm 150 \text{ a}$, 基本界定了古洪水事件发生的上限年龄; 样品 NSC-5 处于古洪水层中间, 年龄为 $2 850 \pm 260 \text{ a}$; NSC-4 取自古洪水滞流沉积层顶界, 年龄为 $3 080 \pm 190 \text{ a}$, 应该是界定洪水发生的下限年龄, 但与其下伏地层 NSC-5 的年龄出现倒置, 可能为误差所致, 其真实的年龄应该小于 NSC-5, 考虑到测量误差, 我们基本可以确定 NSC 剖面记录的全新世渭河古洪水事件

发生的年代范围在 3 200 ~ 2 800 a B. P. 之间。这与渭河上游的 GCZ 剖面、漆水河 HXZ 剖面和北洛河 LMC 剖面等^[40~43]所记录的古洪水事件年代完全对应, 表明渭河流域在此时间段内普遍地发生了古洪水事件。通过在渭河上游古水文学恢复计算, 该期古洪水事件洪峰流量介于 $22 560 \sim 25 960 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间^[41]。沿渭河主流进一步深入考察, 在渭河咸阳 NSC 剖面和宝鸡 GCZ 剖面更高处再未发现古洪水滞流沉积层记录, 故可以断定渭河 3 200 ~ 2 800 a B. P. 之间古洪水是全新世以来最大的洪水事件。

在半干旱半湿润地区的河流, 特大洪水事件一般发生在区域和全球气候不稳定或剧烈波动的时期。全新世中期 8 500 ~ 3 100 a B. P., 为全球性的温暖湿润期, 气候系统相对比较稳定, 特大洪水发生机率小。当时的中国黄土高原南部及渭河流域, 水土资源条件优越, 先后发展了大地湾文化、仰韶文化、龙山文化和夏商文化。到了 3 100 a B. P. 前后, 东亚季风格局突变, 使西北季风势力增强, 季风气候向着干旱化发展, 气候系统不稳定, 处于频发波动变化的异常时期, 造成渭河流域的洪水和干旱事件, 导致环境恶化, 使水土生物资源退化^[44]。渭河流域发生在 3 200 ~ 2 800 a B. P. 之间的特大古洪水事件, 出现在全球范围气候波动转折期, 格陵兰 Summit 地点冰芯 GISP2 的年代系列也记录了 this 时期气候的恶化转折^[45]。除了黄河流域以外, 在我国南部的长江流域也发现了环境恶化的记录^[46]。我国古代商周文化的转折也恰恰发生在这个全球气候恶化转折、洪水和干旱灾害频繁发生的时期。

5 结论

在全新世环境变迁以及气候水文事件高分辨率研究当中, 测年断代是一个关键性研究内容。通过野外考察, 我们在渭河咸阳段 NSC 剖面的全新世黄土—古土壤层发现古洪水滞流沉积层。为了揭示该剖面记录的环境变化和事件, 系统地进行了采样和实验研究。应用单片再生剂量法对 NSC 剖面沉积物进行 OSL 测年研究, 获得了 9 个样品的 OSL 年龄值。在此基础上, 结合流域地层与气候变化对比, 建立了渭河古洪水事件的年代框架, 确定渭河在 3 200 ~ 2 800 a B. P. 之间出现一个特大古洪水事件的多发期。

根据磁化率和粒度成分等气候代用指标分析, 揭示出 NSC 剖面在 3 100 a B. P. 前后磁化率值突然降

低,风成沉积物颗粒成分逐渐变粗,其中 $>0.05\text{ mm}$ 沙级颗粒曲线开始升高。这些表明受全球气候变化影响,东亚季风格局发生突变,西北季风增强,沙尘暴堆积加速。也就是说,渭河在 $3\ 200\sim 2\ 800\text{ a B. P.}$ 之间出现的特大古洪水事件多发期,与气候转折密切相关。

在半干旱半湿润地区,特大古洪水事件一般发生在区域和全球气候不稳定或剧烈波动的时期。全新世中期气候温暖湿润相对稳定,特大洪水发生频率小,但在 $3\ 100\text{ a B. P.}$ 前后的气候转折期,东亚季风格局可能发生突变,气候波动剧烈,大气系统不稳定,降水变率大,降水量年内分配不均,洪水和干旱事件均有发生。这表明渭河咸阳 NSC 剖面记录的发生在 $3\ 200\sim 2\ 800\text{ a B. P.}$ 之间的古洪水事件是流域水文过程对于全球性气候变化的响应。

致谢 野外采样和实验测试得到赵梅、杨凌同学的热情帮助,两位匿名审稿专家和编辑部提出了有益建议,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- 1 黄春长,庞奖励,黄萍,等. 关中盆地西部黄土台塬全新世气候事件研究[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 10-15 [Huang Chunchang, Pang Jiangli, Huang Ping, *et al.* Holocene climatic events on the Loess Tableland in the western Guanzhong Basin, China[J]. *Arid Land Geography*, 2002, 25(1): 10-15]
- 2 张家富,周力平,姚书春,等. 湖泊沉积物的 ^{14}C 和光释光测年[J]. 第四纪研究, 2007(27), 4: 522-528 [Zhang Jiafu, Zhou Liping, Yao Shuchun, *et al.* Radiocarbon and optical dating of lacustrine sediments[J]. *Quaternary Science*, 2007, 27(4): 522-528]
- 3 Berger G W, Doran P T. Luminescence-dating zeroing tests in Lake Hoare, Taylor Valley, Antarctica [J]. *Journal of Palaeolimnology*, 2003, 25(4): 519-529
- 4 Lang A, Zolitschka B. Optical dating of annually laminated lake sediments: A test case from Holzmaar, Germany [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5-9): 737-742
- 5 Lang A, Günther A, Wagner G A. Infrared stimulated luminescence dating of Holocene colluvial sediments using the 410nm emission [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1997, 16(3/5): 393-396
- 6 葛本伟,黄春长,周亚利,等. 龙山文化末期泾河特大洪水事件光释光测年研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(2): 422-429 [Ge Benwei, Huang Chunchang, Zha Xiaochun, *et al.* OSL dating of the Jinghe River palaeoflood events in the late period of the Longshan Culture [J]. *Quaternary Science*, 2010, 30(2): 422-429]
- 7 Murray A S, Olley J M. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A status review [J]. *Geochronometria*, 2002, 21: 1-16
- 8 Lang A, Moya J, Corominas J, *et al.* Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements [J]. *Geomorphology*, 1999, 30(1-2): 33-52
- 9 范育新,赵晖,陈发虎,等. 博斯腾湖湖泊沉积物光释光年代测量[J]. 第四纪研究, 2007, 27(4): 568-575 [Fan Yuxin, Zhao Hui, Chen Fahu, *et al.* OSL dating of lacustrine sediments from lake Bosten [J]. *Quaternary Science*, 2007, 27(4): 568-575]
- 10 Zhang J F, Zhou L P, Yue S Y. Dating fluvial sediments by optical stimulated luminescence: Selection of equivalent doses forage calculation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10-13): 1123-1129
- 11 Murray A S, Olley J M, Caitcheon G G. Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence [J]. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)*, 1995, 14(4): 365-371
- 12 Roberts R G, Galbraith R F, Yoshida H, *et al.* Distinguishing dose populations in sediment mixtures: A test of single-grain optical dating procedures using mixtures of laboratory-dosed quartz [J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32(5-6): 459-465
- 13 Olley J, Caitcheon G, Murray A. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: Implications for dating young sediments [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1998, 17(11): 1033-1040
- 14 Olley J M, Caitcheon G G, Roberts R G. The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence [J]. *Radiation Measurements*, 1999, 30(2): 207-217
- 15 Porat N, Zilberman E, Amit R, *et al.* Residual ages of modern sediments in an hyper arid region, Israel [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5-9): 795-798
- 16 Fuchs M, Lang A. OSL dating of coarse-grain fluvial quartz using single-aliquot protocols on sediments from NE Peloponnese, Greece [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(5-9): 783-787
- 17 Clarke M L, Rendell H M, Wintle A G. Quality assurance in luminescence dating [J]. *Geomorphology*, 1999, 29(1-2): 173-185
- 18 Li Shenghua. Identification of well-bleached grains in the optical dating of quartz [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(12): 1365-1370
- 19 Zhang J F, Li S H, Tso M-Y W. Assessment of bleaching of K-feldspar grains [J]. *Radiation Measurements*, 2001, 33(1): 103-108
- 20 Huang Chun Chang, 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: 1-9
- 21 赵华. 黄土细颗粒多矿物多片、单片光释光测年对比 [J]. 核技术, 2003, 26(1): 36-39 [Zhu Hua. Comparison of dating results between polymineralic fine-grains SAR and MAR [J]. *Nuclear Techniques*, 2003, 26(1): 36-39]
- 22 周亚利,鹿化煜,张家富,等. 高精度光释光测年揭示的晚第四纪毛乌素和浑善达克沙地沙丘的固定与活化过程 [J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 342-350 [Zhou Yali, Lu Huayu, Zang Jiafu, *et*

- al. Active and inactive phases of sand dune in Mu Us and Otindag Sand lands during Late Quaternary suggested by OSL dating[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 342-350]
- 23 Duller G A T. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements[J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(2): 161-165
- 24 Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol[J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32(1): 57-73
- 25 Wintle A G, Murray A S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols[J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(4): 369-391
- 26 Steffen D, Preusser F, Schlunegger F. OSL quartz age underestimation due to unstable signal components[J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4: 353-362
- 27 Ou X J, Xu L B, Lai Z P, *et al.* Potential of quartz OSL dating on moraine deposits from eastern Tibetan Plateau using SAR protocol[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5: 257-262
- 28 Aitken M J. *An Introduction to Optical Dating*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998
- 29 Gr n R. Age. exe, Computer Program for the Calculation of Luminescence Dates Unpublished Computer Program[M]. RSES, Canberra, 2003
- 30 Lai Z P. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37: 176-185
- 31 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水环境的影响[J]. *地理学报*, 2001, 56(1): 7-13 [Huang Mingbin, Yang Xinmin, Li Yushan. Effect of apple base on regional water cycle in Weiwei upland of the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 7-13]
- 32 杜娟, 赵景波. 西安高陵人工林地土壤干层与含水量季节变化研究[J]. *地理科学*, 2007, 27(1): 98-103 [Du Juan, Zhao Jingbo. Seasonal change of soil moisture content in dried soil layer in artificial forest in Gaoling of Xi'an[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(1): 98-103]
- 33 Lai Z P, Wintle A G, Thomas D S G. Rates of dust deposition between 50ka and 20ka revealed by OSL dating at Yuanbao on the Chinese Loess Plateau[J]. *Palaeogeography*, 2007, 248(3-4): 431-439
- 34 Adamiec G., Aitken M J. Dose-rate conversion factors: update[J]. *Ancient TL*, 1998, 16: 37-50
- 35 Mejdahl V. Thermoluminescence dating: beta-dose attenuation in quartz grains[J]. *Archaeometry*, 1979, 21: 61-72
- 36 Ding Z, Yu Z, Rutter N W, *et al.* Towards an orbital timescale for Chinese loess deposits[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13: 39-70.
- 37 Heller F, Liu T S. Palaeoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13: 1169-1172.
- 38 Maher B A, Thompson R. Palaeorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and palaeosols[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44: 383-391.
- 39 谢悦波, 杨达源. 古洪水水平流沉积基本特征[J]. *河海大学学报*, 1998, 26(6): 5-10 [Xie Yuebo, Yang Dayuan. Basic characteristics of paleoflood slack-water deposits[J]. *Journal of Hehai University*, 1998, 26(6): 5-10]
- 40 Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, *et al.* Extraordinary floods related to the climatic event at 4200 a BP on the Qishuihe River, middle reaches of the Yellow River, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30: 460-468
- 41 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 [Wang Honglian, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Holocene extreme floods of the Baoji Gorges of the Weihe River[J]. *Quaternary Science*, 2010, 30(2): 430-440]
- 42 查小春, 黄春长, 庞奖励. 关中西部漆水河全新世特大洪水与环境演变[J]. *地理学报*, 2007, 62(3): 292-300 [Zha Xiaochun, Huang Chunchang, Pang Jiangli. Holocene extreme floods and environmental change of Qishuihe River in western Guanzhong Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(3): 291-300]
- 43 姚平, 黄春长, 庞奖励, 等. 北洛河中游黄陵洛川段全新世古洪水研究[J]. *地理学报*, 2008, 63(11): 1198-1206 [Yao Ping, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Palaeoflood hydrological studies in the middle reaches of the Beiluohe River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(11): 1198-1206]
- 44 黄春长. 渭河流域3100年前资源退化与地人关系演变[J]. *地理科学*, 2001, 21(1): 30-35 [Huang Chunchang. The deterioration of land resources and the change in human-earth relationships in the Weihe River basin at 3100a B. P. [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(1): 30-35]
- 45 O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, *et al.* Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core[J]. *Science*, 1995, 270: 1962-1964
- 46 谢远云, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原近3000年来古洪水事件的沉积记录[J]. *地理科学*, 2007, 27(1): 81-84 [Xie Yuanyun, Li Chang'an, Wang Qiuliang, *et al.* Sedimentary records of palaeoflood events during the last 3000 years in Jiangnan Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(1): 81-84]

OSL Dating of the Palaeoflood Events in the Middle Reaches of the Weihe River

WANG Heng-song^{1,2} HUANG Chun-chang¹ ZHOU Ya-li¹

PANG Jiang-li¹ ZHA Xiao-chun¹ GU Hong-liang¹

(1. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062;

2. College of Ethnic Minority Profession Technology, Southeast Guizhou, Kaili, Guizhou 556000)

Abstract: Through deeply field survey, a Holocene loess-soil profile with interbedded flood slackwater deposits (SWD) was found in Xianyang of the middle reaches of the Weihe River, which recorded the information of palaeoflood events. In order to achieve OSL ages, 9 luminescence samples were collected and post-IR OSL measurements were used with single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol. Grain-size distribution and magnetic susceptibility were also analysed so as to research the occurrence and cause of palaeoflood. The result shows that the fast component is dominant in OSL signals of quartz grains (40 ~ 63 μm), which is suitable for post-IR OSL measurements. For all dating measurements, preheat temperature of each natural or regenerated dose of young samples and older samples were 260°C and 240°C, respectively; and the cutheat was set to 220°C. OSL ages increase with depth and conform to layer where were collected except individual ages underestimated.

At the NSC site, the layer of flood slackwater deposits (SWD) with horizontal bedding, silty clay-like and shallow colour, was in the depth of 95 ~ 110 cm, which has typical characteristic of SWD. This flood deposit involves 3 flood depositional layers, indicating at least 3 palaeoflood events occurred. The average of low-frequency magnetic susceptibility of paleosoil was $133.62 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, was the highest in this profile, while the value of SWD layer was $113.68 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ which was much higher than Malan loess, but lower in paleosoil layer. Grain-size distribution of SWD layer was dominated by silt, the content of silt was 59.43% and clay was 38.107%, the content of sand (>0.05 mm) was the least that was 3.32%. The curve of sand (>0.05 mm) in the SWD layer presents a small peak. The dating results show that the extreme palaeofloods occurred 3.0 ~ 3.2 ka. According to the analysis of all the results, extraordinary floods occurred 3 200 ~ 3 000 a. B. P. in the Weihe river, the period of flood occurred frequently. Three flood depositional layers indicate that each of the slackwater deposit beds has recorded one individual flood event. So the Weihe river chronological framework of palaeoflood was established. This study shows that the Weihe river in transition period from rainy to dry; the highly variable, unstable and catastrophic climate was the cause of extreme palaeofloods occurrence.

Key words: palaeoflood slackwater; OSL dating; Holocene; palaeoflood slackwater deposits; Weihe River