

全新世古洪水事件光释光测年研究

——以渭河下游临潼段为例

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, 陕西西安 710062;

2) 黔东南民族职业技术学院, 贵州凯里 556000

摘要: 通过对渭河下游河谷进行深入的考察, 在临潼段发现全新世黄土-古土壤层里夹有古洪水滞流沉积层。在剖面系统采样并进行磁化率和粒度成分分析, 从沉积学角度证明该地层记录了全新世以来古洪水事件的信息。同时, 在剖面采集 OSL 测年样品, 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 7 个 OSL 绝对年龄值, 建立了全新世剖面年代深度关系曲线, 确定渭河在 3200~3000 a B.P. 之间发生特大洪水事件。综合地层学对比以及剖面磁化率和粒度等气候替代性指标分析, 揭示了全新世中期向晚期转折过渡时期, 气候向干旱化转折, 气候不稳定, 频繁波动, 降水变率大, 是造成渭河流域特大洪水事件发生的主要原因。

关键词: OSL 测年; 古洪水事件; 全新世; 渭河

中图分类号: P597; P331.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2012.02.11

OSL Dating of the Holocene Paleoflood Events: A Case Study of the Lintong Segment in the Lower Weihe River Valley

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, Shaanxi 710062;

2) Southeast Guizhou College of National Minority Professional Technology, Kaili, Guizhou 556000

Abstract: Field investigation was carried out in the lower Weihe River valley and, as a result, a Holocene loess-soil profile interbedded with flood slackwater deposits (SWD) was found in Lintong segment. The analytical results of grain-size distribution and magnetic susceptibility indicate that this profile has recorded the information of palaeoflood events that occurred during the Holocene. OSL dating of the samples from the profiles using the post-IR technique with the SAR protocol shows a linear relationship between the age and the depth. The extraordinary palaeofloods on the Weihe River were therefore dated at 3200-3000 a B.P. In combination with the stratigraphic correlation and climate proxy of grain-size distribution and magnetic susceptibility, the authors hold that extraordinary palaeofloods occurred just at the turning point from the middle Holocene climatic optimum to late Holocene dry conditions at about 3100 a B.P. The palaeofloods occurred because of the frequent climatic variation and the unstable atmospheric system in relation to the global climatic change. The catastrophic climate has resulted in both the extreme aridity and great palaeofloods.

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

本文由国家自然科学基金重点项目(编号: 41030637)、中央高校基本科研业务费专项基金(编号: GK200901007; GK200902020)联合资助。

收稿日期: 2011-09-16; 改回日期: 2012-02-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王恒松, 男, 1967年生。博士研究生, 副教授。主要从事资源开发与环境变化研究, 近年来重点研究渭河及汉江的古洪水断代。E-mail: wanghengsong796@163.com。

*通讯作者: 黄春长, 男, 1954年生。教授, 博士生导师。从事资源开发与环境演变研究, 近年来重点研究渭河及汉江的古洪水。E-mail: cchuang@sunn.edu.cn。

全球气候变化是当今人类社会关注的焦点问题之一,由于历史资料记录的有限,人们迫切需要从各种地质记录中寻找长时间的古气候记录。特大古洪水是指在史前发生的由暴雨等自然因素引起的江河湖海水量迅速增加或水位迅猛上涨的为沉积物记录到的洪水事件。没有受到人为扰动的古洪水滞流沉积物(slack water deposits, 简称SWD)是高分辨率记录了古气候信息的理想载体,古气候信息的解译,需要依赖沉积物年代的精确测定,获得高精度绝对年龄一直是古气候研究的瓶颈问题。黄春长等学者在渭河流域进行了大量的全新世地层与环境变迁研究,并在一些典型剖面建立了可靠的年代框架(Huang et al., 2006, 2009; 万红莲等, 2010)。以往学者们对水成沉积物的断代一般是依据 ^{14}C 方法、考古文物年代和地层对比方法得到的(魏乐军等, 2004; 王华等, 2005; 张强等, 2004; 杨晓燕等, 2005; 查小春等, 2007; 姚平等, 2008)。近20年来,光释光(optical stimulated luminescence, 简称OSL)测年技术得到快速的发展,可以对河流沉积物直接断代获得古洪水事件发生的年龄,同时在河流阶地、湖泊、滨海等水成沉积物测年中也获得了成功的应用(Lang et al., 1999; Murray et al., 2002; Wallinga, 2002a; Rittenour et al., 2003; Thomas et al., 2005; 王昌盛等, 2005; 范育新等, 2007; 张家富等, 2007a, b)。深入研究古洪水水文学,需要更多可靠的绝对年龄数据的支持,通过对SWD地层系统的光释光测年,为准确的断代提供可能,将有助于恢复古气候和古环境变化的历史,建立剖面年代深度关系曲线,分析洪水事件发生的时间性规律,为预测气候和水文变化提供佐证。基于此,本文在对渭河流域深入考察基础上,选择其下游临潼段具有代表性的陈东村(CDC)含有古洪水滞流沉积层的全新世黄土-古土壤剖面为研究对象,应用光释光测年方法,结合沉积学、第四纪地质学、地层学和土壤学研究该剖面地层年龄及结构,建立了渭河全新世特大古洪水事件年代。

1 研究流域概况及沉积剖面特征

渭河是黄河最大的支流,全长818 km,流域面积 $13.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。河源至宝鸡峡出口林家村为上游,平均比降为3.85‰。宝鸡峡至咸阳铁桥为中游,比降由2‰逐渐变缓为0.6‰。咸阳至黄河口为下游,该段比降较小,水流较缓慢,河道泥沙淤积,一遇暴雨极易造成洪灾。

渭河临潼段属于渭河下游,当地现代年平均气温和降水量分别为13.1和555 mm(西安地图出版社, 2008),无霜期219天,汛期为6—10月,径流量年际变化较大。根据临潼站1961—2009年的水文系列资料,多年平均径流量为 $64.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均流量为 $205.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。历史上渭河曾经发生过多次大洪水,有记载的特大洪水是在1898年,当时中游咸阳、下游华县洪峰流量分别达到 $11600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $11500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。大洪水给渭河流域带来了严重的经济社会影响。通过研究渭河古洪水滞流沉积物所记录的地质信息,分析古洪水发生时间和规律,对于揭示渭河下游平原近几千年来自然环境变化,以及防洪减灾具有十分重要的意义。

本研究地点位于西安市临潼区陈东村附近(图1),该村所在处为渭河一级阶地,阶地黄土覆盖地面海拔高度为355 m,大约高出渭河河床12~15 m。CDC剖面保存比较完整,而且十分典型,没有受人为扰动,古洪水滞流层近乎水平延伸,并且向阶地后缘方向逐渐尖灭。该剖面沉积学、土壤学和地层学特征十分明显,古洪水滞流沉积层位十分清楚。根据野外观察,结合地层学和沉积学特征分析,对该剖面划分如下:(1) 30~0 cm 表土层(MS), 浊棕色,粉沙质地,团粒结构极其发育,疏松,多大孔隙和植物根系。(2) 55~30 cm 黄土层(L_0), 浊橙色黄土,粉沙质地,块状-团块结构,成壤改造微弱。(3) 90~55 cm 古洪水滞流沉积层(SWD), 浊橙色和浊棕色,粘土质地,致密坚硬,具有水平或者波状层理,碎块具有贝壳状断口,为3次古洪水的悬质泥沙沉积形成。(4) 170~90 cm 古土壤层(S_0), 浊棕色,粘土质粉沙质地,柱状-团块结构,含有大量竖直状的蚯蚓孔和蚯蚓粪团粒,含有少量的钙质假菌丝体,成壤强度大。(5) 210~170 cm 过渡层(L_1), 浊黄橙色,粉沙质地,团块-块状结构,成壤微弱,一些蚯蚓孔洞被来自上部的土壤物质充填。(6) ?~210 cm 以下马兰黄土(L_1), 浊黄橙色,粉沙质地,均质块状结构,疏松多细小孔隙,未见底(图2)。

将地层剖面清理出新鲜的垂直面,用不锈钢管水平打入新鲜的剖面内注满样品,取出后将两端用铝箔纸和黑色塑料带密封,采样深度如图2小方点所示,从该剖面共采集了7件光释光样品。同时以5 cm 间距自上而下连续采集50件沉积学样品供粒度和磁化率测试。样品经过自然风干后,采用英国Bartington公司生产的MS-2B型磁化率仪测量样品的磁化率,称取研磨后粒径 $<2 \text{ mm}$ 的风干土样

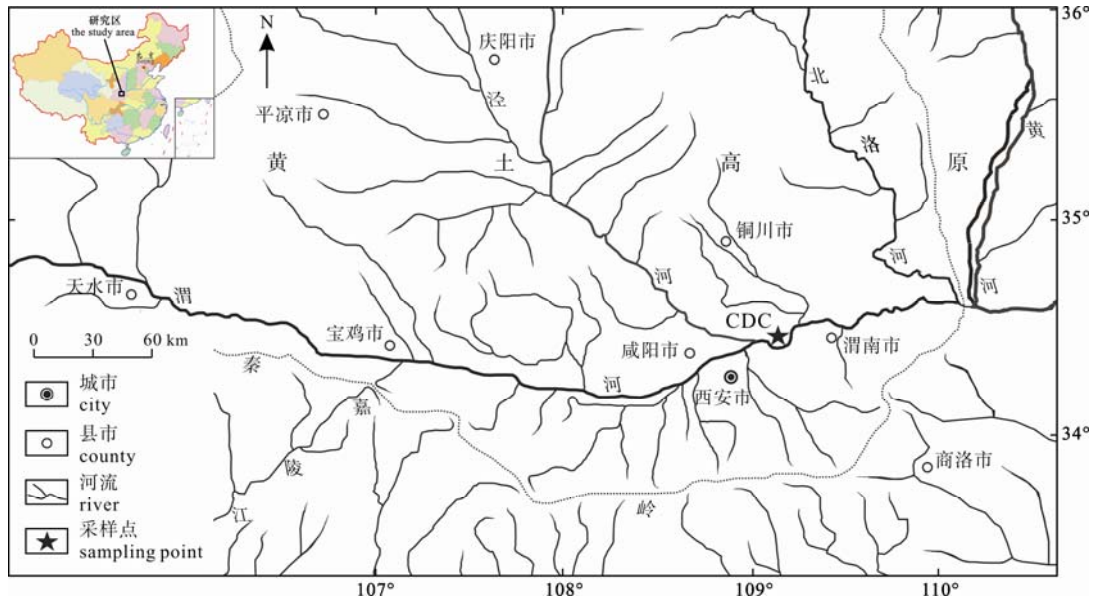


图1 渭河下游水系与临潼 CDC 地点位置图

Fig. 1 The river system in the lower reaches of the Weihe River and location of CDC site

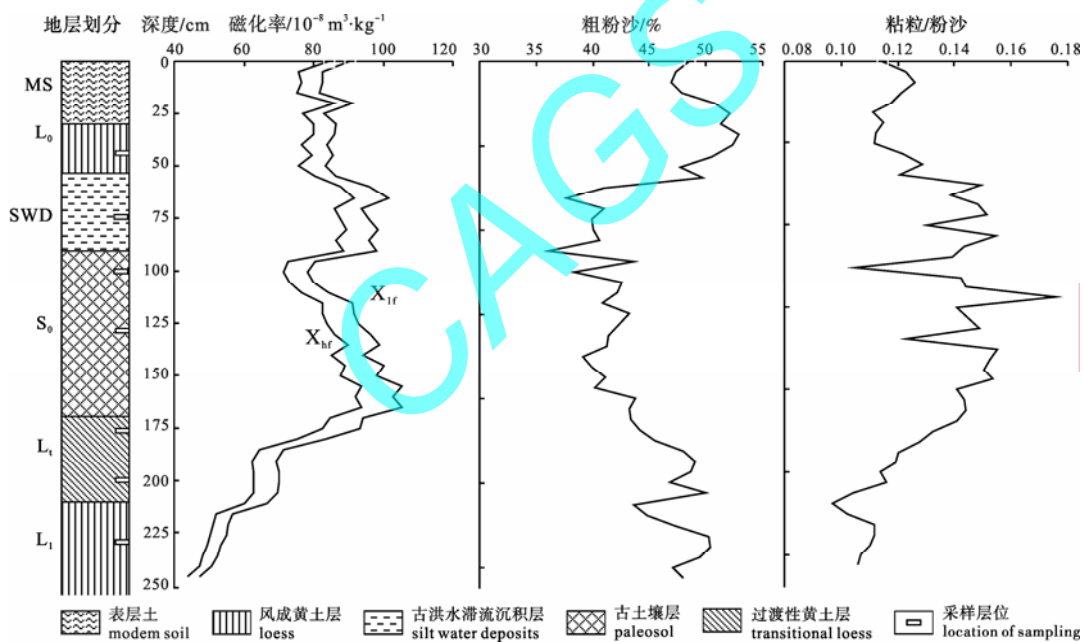


图2 渭河下游 CDC 剖面地层划分、磁化率、粒度成分曲线图

Fig. 2 Stratigraphic division, magnetic susceptibility and grain sizes in the CDC profile

10 g 装入无磁性塑料盒进行测量, 每个样品测定 3 次, 取其平均值。粒度用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer-S 型激光粒度仪进行测量。对于样品中 >0.1 mm 颗粒采用筛分法测量, 并用实体显微镜进行分析鉴定。

2 研究方法

2.1 环境剂量测定

样品中的环境剂量率贡献主要是石英、长石等

矿物在埋藏期间吸收的辐射能量, 它取决于 U、Th 和 K 的衰变及沉积矿物本身的含量。此外, 还有部分来自宇宙射线。在本文中, 样品的铀、钍和钾含量是在中国原子能研究院通过中子活化法得到。宇宙射线对环境剂量率的贡献是依据样品所在地点的经纬度、海拔高度、样品埋藏深度和沉积物的密度, 通过辐射剂量之间的转换系数计算(Prescott et al., 1994)获得。由于在地质时期, 沉积物样品的含水量

是变化的, 现在的测量值并未能代表当时的真实值, 故本研究中样品的含水量是在实验室对干燥前后的样品称重及按照黄土 $\pm 15\%$ 、古土壤(包括古洪水滞流沉积物) $\pm 20\%$ 的误差校正获得的(黄明斌等, 2001; 杜娟等, 2007; Lai, 2010)。由于 40~63 μm 石英颗粒表层受 α 粒子照射的部分, 经溶蚀处理后仍有贡献, 所以 α 射线对 40~63 μm 石英颗粒的辐射效率系数值取 $\alpha = 0.035$ (Adamiec et al., 1998; Lai et al., 2007)。最后, 根据相关转换参数(Mejdahl, 1979; Adamiec et al., 1998)求出样品的环境剂量率(表 1)。

2.2 等效剂量测量

在实验室安全红光下对样品进行前处理, 将样品不锈钢管两头曝光的部分削去 2 cm 左右, 用铝盒盛放, 称湿重和烘干重, 计算含水量和测定 U、Th 和 K 的含量; 余下未曝光部分用 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, 待充分反应停止后, 用蒸馏水冲洗至中性, 然后用湿筛法分离出 40~63 μm 的颗粒组分作为测年材料, 用 30% 的氟硅酸腐蚀长石矿物 7~15 天(陈杰等, 1997), 再用 20% 的 HF 溶液刻蚀 40 min, 溶蚀石英表面的长石等杂质。然后加入稀盐酸去除 HF 溶蚀过程中形成的氟化物, 提纯出石英颗粒。用 IRSL 检测样品中红外信号已经非常微弱接近仪器的本底值, IR 测试中再生释光信号与实验剂量所诱发的释光信号的比值小于 10%, 表明样品中的长石矿物对测量等效剂量的贡献率影响微弱, 可以忽略。然后将样品过一次筛, 确保所选石英的粒径范围在 40~63 μm 之间。最后把提纯的石英颗粒用硅胶单层粘贴在直径为 9.8 mm 的铝片供仪器测量。

将每个样品各制备 18 个样片, 所有样品等效剂量的测量步骤按照单片再生剂量法(SAR)(Murray et al., 2000; Wintle et al., 2006), 在陕西师范大学旅游与环境学院 TL/OSL 实验室的热释光/光释光自动化

测量仪(Risø TL/OSL DA-15 型)上进行。由于红外后蓝光测年技术可消除石英矿物中的长石包裹体对 De 值的影响, 提高测量精度, 并在光释光测年中获得了成功的应用(Murray et al., 2000; Roberts et al., 2001; Wintle et al., 2006; 范育新等, 2009)。故本文采用红外后蓝光技术测量 De 值, 激发光源分别为红外发光(830 nm)和蓝光(470 \pm 17 nm)。样品的光释光信号由 EMI9235QB15 光电倍增管测量, 探测滤光片为 U-340, β 辐射源为 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, 辐照剂量率为 0.10475 Gy/s。

在样品进行等效剂量测定之前, 必须通过试验找到适合本样品的测量条件。本文选择 SWD 样品 CDC-02 分别从 160 到 300 $^{\circ}\text{C}$ 以 20 $^{\circ}\text{C}$ 间距对单片预热 10 s 的实验, 在 200~260 $^{\circ}\text{C}$ 之间等效剂量没有随温度升高而增大, 获得了样品的预热坪区(图 3(b))。因此样品 CDC-02 采用预热温度 260 $^{\circ}\text{C}$, cut heat 取 220 $^{\circ}\text{C}$ 做热迁移效应及剂量恢复试验。在对样品进行多次预热和激发试验过程中, 热转移生成的等效剂量值非常小, 介于 0.06~0.18 Gy 之间, 相当于原始剂量的 1.27% 左右。在 160~260 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 热转移产生的剂量在 0.06~0.11 Gy 之间, 当温度上升到 280~300 $^{\circ}\text{C}$ 时, 剂量达到 0.14~0.18 Gy, 表明 280 $^{\circ}\text{C}$ 以上热转移效应明显, 而在 260 $^{\circ}\text{C}$ 热转移生成的剂量最小仅为 0.06 Gy(图 3(a))。对 CDC-02 进行等效剂量的恢复试验过程是取一组 12 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。在剂量恢复试验中, 附加的已知剂量为 14.14 Gy, 恢复得到的平均等效剂量为 14.32 Gy, 与已知剂量比较仅相差 1.25%(图 4), 均在误差范围之内。循环比率变化范围在 0.90~1.10 之间, 表明

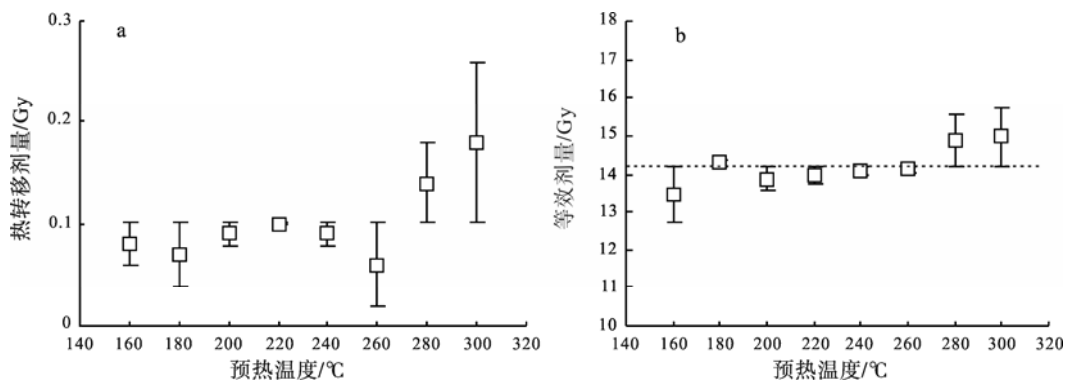


图 3 样品 CDC-02 预热温度对等效剂量的坪区及热转移实验

Fig. 3 Plot of equivalent dose versus preheat temperature and thermal transfer of sample CDC-02

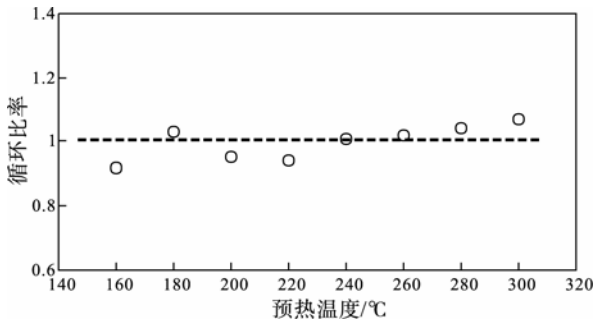


图 4 样品剂量恢复试验
Fig. 4 Results of dose recovery tests for the sample

样品在测试过程中感量变化得到了很好的校正 (Murray et al., 2000)。因此, 本实验在此条件下进行测试。

样品的释光信号采用前 0.8 s 减去后 0.8 s 内自然释光信号快速衰退到本底值 (图 5), 说明光释光信号以快速组分为主 (Steffen et al., 2009; Ou et al., 2010), 经过灵敏度校正后的自然光释光信号与再生剂量及其释光强度对比建立生长曲线, 释光生长曲线未达到饱和, 基本经过原点, 拟合较好, 将校正后的自然光释光信号投影到生长曲线上, 用内插法得到测量单片的等效剂量 (图 5 内插图)。

代表古洪水滞流沉积物 SWD 的样品 CDC-02 的 D_e 值频率分布图 (图 6), 分析可知, 样品的 D_e 值分布相对比较集中, 变化范围较小, 成较好的正态分布, 说明所测样品在埋藏前晒退较好 (Wallinga, 2002b)。偏离较大的样片很少, 把明显异常的个别单片的 D_e 值舍去, 然后计算算术平均值, 获得了所有样品的等效剂量值。最后根据 Aitken (1998) 提供的方法和软件 AGE.exe (Grün, 2003) 计算得出样品的光释光年龄值 (表 1)。

3 结果与解释

渭河下游 CDC 剖面样品的光释光年龄是用等

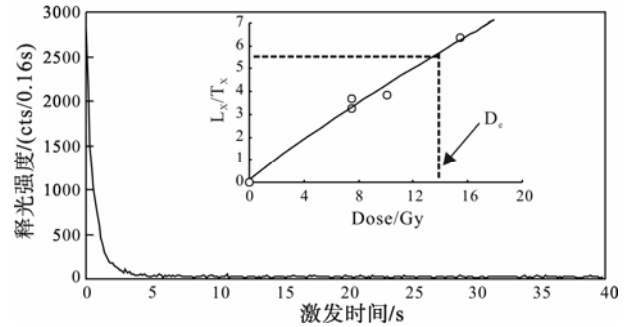


图 5 样品 CDC-02 自然光释光信号衰减曲线 (内插图是光释光生长曲线)
Fig. 5 OSL decay curve for sample CDC-02 (the insert shows the growth curves of post-IR OSL signals)

效剂量除以环境剂量率得到的。该剖面地层自下而上, 等效剂量逐渐减小, OSL 年龄值不断递减。整个剖面由 5 个点来控制 (图 2), 即是 CDC-01、CDC-02、CDC-03、CDC-05 和 CDC-06。CDC-01 采于剖面深 45~50 cm 处的 L_0 层下界, 该点控制了古土壤 S_0 与现代黄土 L_0 的分界线, OSL 年龄为 (3.0 ± 0.2) ka, 同时也界定了古洪水滞流沉积层年代的下限; CDC-02 位于剖面深 75~80 cm 的古洪水滞流沉积层的中部, 年代为 (3.1 ± 0.2) ka; CDC-03 处在 100~105 cm S_0 的顶部, 年龄为 (3.3 ± 0.2) ka, 界定了古洪水事件发生年代的上限; CDC-05 采自深 170~175 cm 的 L_t 顶界, 控制了全新世 CDC 剖面古土壤形成的最初时间, 年代为 (9.0 ± 0.5) ka; CDC-06 位于深 200~205 cm 处马兰黄土过渡的 L_t 层底部, 年龄为 (11.4 ± 0.8) ka, 基本上控制了全新世年龄的底界。其他两点分别位于古土壤中部 130~135 cm 深处的样品 CDC-04 和剖面深 230~235 cm 处的马兰黄土样品 CDC-07, 年龄分别为 (5.0 ± 0.3) ka 和 (11.8 ± 0.7) ka。年龄数据误差在 5.1%~7.2% 之间。据此可以确定渭河流域全新世古洪水事件发生的年代介于 3.2~3.0 ka B.P. 之间。

根据 CDC 剖面样品的年龄值和对应深度作出

表 1 渭河下游临潼 CDC 剖面沉积物光释光测年结果
Table 1 OSL dating results from the CDC profile in the lower reaches of the Weihe River

样品编号	深度/cm	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	K/%	含水量/%	环境剂量率 (Dy)/(Gy·ka ⁻¹)	等效剂量 (De)/Gy	OSL 年龄 /ka
CDC-01	45 ~ 50	2.97±0.10	12.8±0.33	1.95±0.05	15.5	4.05±0.18	11.97±0.31	3.0±0.2
CDC-02	75 ~ 80	2.98±0.10	14.7±0.34	2.36±0.06	15.8	4.55±0.19	14.08±0.54	3.1±0.2
CDC-03	100 ~ 105	2.94±0.11	18.5±0.36	2.02±0.05	16.8	4.61±0.23	15.20±0.22	3.3±0.2
CDC-04	130 ~ 135	2.58±0.11	12.6±0.37	2.08±0.06	22.5	3.49±0.13	17.36±0.67	5.0±0.3
CDC-05	170 ~ 175	2.45±0.10	11.6±0.35	1.82±0.05	23.2	3.23±0.13	29.15±1.18	9.0±0.5
CDC-06	200 ~ 205	2.40±0.10	10.3±0.31	1.78±0.05	23.6	3.32±0.10	34.41±1.44	11.4±0.8
CDC-07	230 ~ 235	2.60±0.11	10.8±0.32	1.73±0.05	24.5	3.08±0.13	36.28±1.52	11.8±0.7

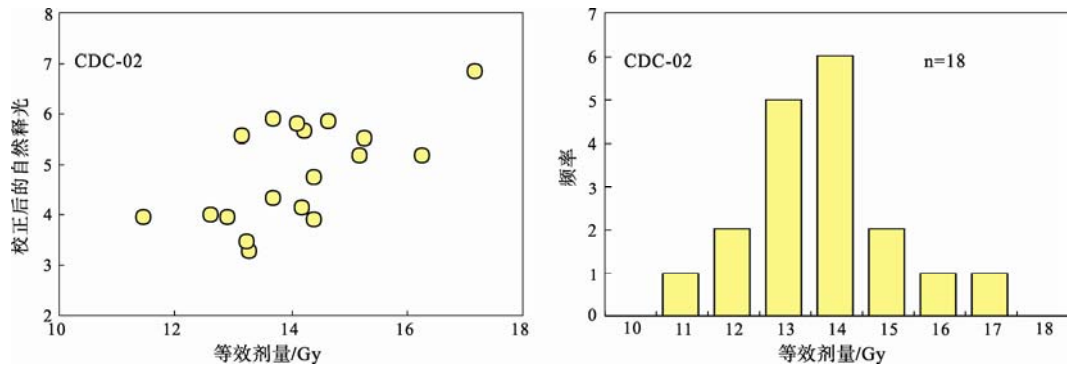


图6 等效剂量相对于感量校正后的自然信号离散图及等效剂量频率分布图

Fig. 6 Equivalent dose relative to scattergrams of natural luminescence signal after correction of the sense and frequency distribution of equivalent dose

了年龄与地层深度关系曲线图(图7)。曲线显示出它们对应较好,符合地层沉积新老关系。从土壤发生学和沉积学来看, L_t 和 L_1 的黄土堆积速度约为 0.22 mm/a , 古土壤 S_0 的堆积速度约为 0.14 mm/a , L_0 和 MS 层的堆积速度约为 0.17 mm/a , 前者明显较后两者为大, 指示风成黄土形成时期气候较干旱, 降雨少; 古土壤层厚度在 80 cm 左右, 堆积速度最小。在古土壤成壤时期, 由于气候相对湿润, 降雨量大, 成壤较强, 指示温暖湿润的气候环境。其上覆地层为古洪水滞流沉积层, 记录了突发性特大古洪水事件。根据古洪水沉积层的宏观结构构造特征, 显示出它是有多次洪水事件快速沉积形成, 其后被全新世晚期风成黄土覆盖而保存下来。

表1中 CDC-01、02、03 三个样品的环境剂量率比之下部的样品明显偏大。这可能是因为土壤里的 Ca, Sr 等可溶性化学元素随雨水向下淋溶迁移流失, 使得 U 和 Th 相对富集, 致使环境剂量率比下部偏大。张家富等(2007a)对南方第四纪沉积物的 OSL 测年研究当中也发现这种现象。

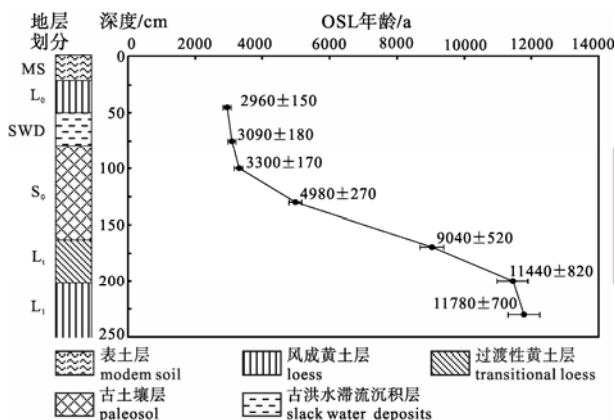


图7 渭河下游临潼 CDC 剖面 OSL 年龄与深度关系图
Fig. 7 The relationship between OSL age and the depth in the CDC profile in the lower reaches of the Weihe River

4 讨论与结论

本文结合近年来关于渭河流域全新世黄土-古土壤地层的研究成果, 及其基本年代框架(Huang et al., 2006, 2009; 万红莲等, 2010), 来探讨 OSL 测年方法对古洪水滞流沉积物测量的可靠性。渭河下游 CDC 剖面与其上游河谷 GCZ 剖面、黄土原面 XJN 剖面 ETC 剖面有很好的对比关系, 地层结构完全相同。

渭河下游阶地地面平坦宽广, 其顶部风成沉积覆盖层连续性较好。在 CDC 剖面地层几乎没有受到明显的侵蚀, 各个层次保存较为完好, 记录了丰富的环境演变信息。磁化率和粒度成分等气候替代指标曲线图显示(图2), 剖面顶部 L_1 层属于典型的马兰黄土, 对应的年代在 11500 a B.P. 之前, 磁化率为最低值, 粗粉沙含量最高。这反映气候干旱, 沙尘暴强度大。在强大的西北季风环流的控制下, 降水稀少, 沙尘暴堆积旺盛, 黄土堆积速率高, 地表黄土疏松成壤构造微弱。全新世早期 $11500 \sim 8500 \text{ a B.P.}$ 之间, 是全新世气候开始升温的过渡时期, 其磁化率逐渐增大, 表明有一定的风化成壤改造过程, 地表植被有所恢复, 但仍较寒冷干燥。这一时期形成了由马兰黄土向古土壤的过渡 L_t 层。在 $8500 \sim 3100 \text{ a B.P.}$ 之间是全新世最适宜期, 在剖面上表现为 $170 \sim 90 \text{ cm}$ 的古土壤 S_0 层。磁化率在古土壤 S_0 层达到峰值, 变化范围在 $78.3 \times 10^{-8} \sim 105.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。反映降水量变化与次生风化成壤强度指标的粘粒/粉沙比率含量为剖面最高值, 在 $0.11 \sim 0.18$ 之间变化。这个阶段粗粉沙含量最低, 揭示了该期间在东南季风主导之下, 气候温暖湿润, 降水量较多, 植物生长茂盛, 生物风化强, 土壤淋溶作用和粘化作用都较强, 形成典型的油棕色褐色土类古土壤。从 3100 a B.P. 开始, 沙尘暴堆积增强,

形成了现代黄土 L_0 层, 其磁化率和粘粒含量减小, 粗粉沙值迅速增加。在黄土 L_0 层的粗粉沙峰值在 48%~53%, 表明东南季风减弱而西北季风加强, 降水量减少, 沙尘暴强度加大, 植被退化, 成壤强度降低, 土壤颗粒变粗。表土层(MS) 则是 1500 a B.P. 以来形成的。由于关中盆地开垦历史悠久, 受人类耕作影响较大, 在 L_0 层的顶部迭加形成的一层发育较好的耕作土壤, 其表层磁化率值增高。

通过与渭河流域各个典型剖面对比可知, 全新世古土壤 S_0 与黄土 L_0 的界限为 3100 a B.P., 渭河下游河谷 CDC 剖面的古洪水滞流沉积层恰好夹在这个界面, 查小春等对漆水河古洪水研究结果显示在 3100~3000 a B.P. 之间发生了古洪水事件(查小春等, 2007)。万红莲等在渭河上游宝鸡峡的研究表明渭河在 3200~3000 a B.P. 之间发生了特大古洪水事件(万红莲等, 2010)。这在年代上与本文当中确定的古洪水发生年代 3200~3000 a B.P. 完全吻合。这也印证了我们关于渭河下游 CDC 剖面 OSL 测年结果是可信的。

结合古洪水沉积物上覆和下伏地层层位和 SWD 沉积物的 OSL 年龄测定, 确定渭河流域古洪水事件发生时间在 3200~3000 a B.P. 之间。沿渭河干流深入广泛考察, 在渭河一级阶地风成沉积覆盖层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 3200~3000 a B.P. 之间发生的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气候不稳定或剧烈波动的时期。全新世中期气候相对稳定, 特大洪水发生机率小。在 3100 a B.P. 前后, 东亚季风格局突变, 西北季风势力增强, 季风气候向干旱化发展, 气候系统不稳定, 变化异常, 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(黄春长, 2001)。渭河流域发生在 3200~3000 a B.P. 之间的特大古洪水事件, 正是发生在这样一个气候转折的时期。除了渭河流域, 在我国南部的汉江流域也发现了 3000 a B.P. 古洪水事件的沉积记录(谢远云等, 2007)。该时期在全球范围也是一个气候波动转折期, 在格陵兰 Summit 地点冰芯 GISP2 的年代系列也记录了这个时期气候的恶化转折(O'Brien et al., 1995)。通过与全球气候变化和洪水干旱事件的对比分析, 可以确定气候系统不稳定, 频繁波动, 降水变率大, 是导致特大洪水发生的主要原因。

光释光测年技术已经发展成为比较成熟的测年方法。对于黄土-古土壤样品来说, 精度可以达到百

年尺度。而对于古洪水滞流沉积物来说, 假如在被埋藏前, 释光信号晒退比较好, OSL 测年技术是最直接的一种方法, 能够获高分辨率的绝对年龄。从而比较准确地断定古洪水事件发生的年龄, 并建立剖面的年代框架。

致谢: 王娟同学在野外采样和实验测试中给予热情帮助, 以及两位匿名审稿专家和编辑部对本文的完善提出的有益建议, 在此深表谢忱。

参考文献:

- 陈杰, 卢滨涛, 尹功明, 刘爱国, 孙碧杰, 胡碧茹. 1997. 甘肃巴谢剖面黄土-古土壤的光释光测年研究[J]. 地球学报, 18(S1): 239-241.
- 杜娟, 赵景波. 2007. 西安高陵人工林土壤干层与含水量季节变化研究[J]. 地理科学, 27(1): 98-103.
- 范育新, 赵晖, 陈发虎, 黄小忠, 杨美临. 2007. 博斯腾湖湖泊沉积物光释光年代测量[J]. 第四纪研究, 27(4): 568-575.
- 范育新, 赵晖, 陈发虎. 2009. 干旱区湖滨沉积物中不同粒度石英矿物等效剂量对比[J]. 核技术, 32(2): 97-101.
- 黄春长. 2001. 渭河流域 3100 年前资源退化与人地关系演变[J]. 地理科学, 21(1): 30-35.
- 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 2001. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J]. 地理学报, 56(1): 7-13.
- 万红莲, 黄春长, 庞奖励, 查小春. 2010. 渭河宝鸡峡全新世特大洪水水文学研究[J]. 第四纪研究, 30(2): 430-440.
- 王昌盛, 陈杰, 张克旗. 2005. 西南天山明尧勒背斜河流阶地沉积物的光释光测年[J]. 地震地质, 27(4): 586-598.
- 王华, 张会领, 涂林玲, 覃嘉铭, 冯玉梅. 2005. 桂林甑皮岩洞穴遗址钙板 ^{14}C 年代学研究[J]. 地球学报, 26(4): 333-336.
- 魏乐军, 郑绵平, 马志邦. 2004. 西藏台错盐湖 TT-1 剖面的沉积特征和年代学研究[J]. 地球学报, 25(4): 397-404.
- 西安地图出版社. 2008. 陕西省地图册[M]. 西安: 西安地图出版社.
- 谢远云, 李长安, 王秋良, 殷鸿福. 2007. 江汉平原近 3000 年来古洪水事件的沉积记录[J]. 地理科学, 27(1): 81-84.
- 杨晓燕, 夏正楷, 崔之久. 2005. 黄河上游全新世特大洪水及其沉积特征[J]. 第四纪研究, 25(1): 80-85.
- 姚平, 黄春长, 庞奖励, 查小春, 李小刚. 2008. 北洛河中游黄陵洛川段全新世古洪水研究[J]. 地理学报, 63(11): 1198-1206.
- 张家富, 袁宝印, 周力平. 2007a. 福建晋江“老红砂”的释光年代学及对南方第四纪沉积物释光测年的指示意义[J]. 中国科学, 52(22): 2646-2654.
- 查小春, 黄春长, 庞奖励. 2007. 关中西部漆水河全新世特大洪水与环境演变[J]. 地理学报, 62(3): 291-300.

- 张家富, 周力平, 姚书春, 薛滨, 王小林. 2007b. 湖泊沉积物的¹⁴C和光释光测年——以固城湖为例[J]. 第四纪研究, 27(4): 522-528.
- 张强, 杨达源, 施雅风, 葛兆帅, 姜彤. 2004. 川江中坝遗址5000年来洪水事件研究[J]. 地理科学, 24(6): 715-721.

References:

- ADAMIEC G, AITKEN M J. 1998. Dose-rate conversion factors: update[J]. *Ancient TL*, 16(2): 37-50.
- AITKEN M J. 1998. *An Introduction to Optical Dating*[M]. Oxford: Oxford University Press: 97.
- CHEN Jie, LU Yan-chou, YIN Gong-ming, LIU Ai-guo, SUN Ying-jie, HU Bi-ru. 1997. Optically Stimulated Luminescence Dating of Loess and Paleosol from the Baxie Profile, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 18(S1): 239-241(in Chinese with English abstract).
- DU Juan, ZHAO Jing-bo. 2007. Seasonal Change of Soil Moisture Content in Dried Soil Layer in Artificial Forest in Gaoling of Xi'an[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 27(1): 98-103(in Chinese with English abstract).
- FAN Yu-xin, ZHAO Hui, CHEN Fa-hu, HUANG Xiao-zhong, YANG Mei-lin. 2007. OSL Dating of Lacustrine Sediments From Lake Bosten[J]. *Quaternary Sciences*, 27(4): 568-575(in Chinese with English abstract).
- FAN Yu-xin, ZHAO Hui, CHEN Fa-hu. 2009. The equivalent dose comparison of different grain size quartz from lakeshore sediments in the arid region[J]. *Nuclear Techniques*, 32(2): 97-101(in Chinese with English abstract).
- GRÜN R. 2003. Age.exe, Computer Program for the calculation of luminescence dates. UnPublished Computer Program[CP]. RSES, Canberra.
- HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, CHEN Shu-e, SU Hong-xia, HAN Jia, CAO Yan-feng, ZHAO Wen-yu, TAN Zhi-hai. 2006. Charcoal records of fire history in the Holocene loess-soil sequences over the Southern Loess Plateau of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 239(1-2): 28-44.
- HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, SU Hong-xia, WANG Li-jun, ZHU Yi-zhi. 2009. The Ustic Isohumisol (Chernozem) distributed over the Chinese Loess Plateau: Modern soil or palaeosol? [J]. *Geoderma*, 150(3-4): 344-358.
- HUANG Chun-chang. 2001. The Deterioration of Land Resources and the Change in Human-Earth Relationships in the Weihe River Basin at 3100 a B.P.[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 21(1): 30-35(in Chinese with English abstract).
- HUANG Ming-bin, YANG Xin-min, LI Yu-shan. 2001. Effect of Apple Base on Regional Water Cycle in Weibei Upland of the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 56(1): 7-13(in Chinese with English abstract).
- LAI Zhong-ping, WINTLE A G, THOMAS D S G. 2007. Rates of dust deposition between 50ka and 20ka revealed by OSL dating at Yuanbao on the Chinese Loess Plateau[J]. *Palaeogeography*, 248(3-4): 431-439.
- LAI Zhong-ping. 2010. 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*, 37(2): 176-185.
- LANG A, MOYA J, COROMINAS J, SCHROTT L, DIKAU R. 1999. Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements[J]. *Geomorphology*, 30(1-2): 33-52.
- MEJDAHL V. 1979. Thermoluminescence dating: beta-dose attenuation in quartz grains[J]. *Archaeometry*, 21(1): 61-72.
- MURRAY A S, OLLEY J M. 2002. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A status review[J]. *Geochronometria*, 21: 1-16.
- MURRAY A S, WINTLE A G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol[J]. *Radiation Measurements*, 32(1): 57-73.
- O'BRIEN S R, MAYEWSKI P A, MEEKER L D, MEESE D A, TWICKLER M S, WHITLOW S I. 1995. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core[J]. *Science*, 270: 1962-1964.
- OU Xian-jiao, XU Liu-bing, LAI Zhong-ping, LONG Hao, HE Zhong, FAN Qi-shun, ZHOU Shang-zhe. 2010. Potential of quartz OSL dating on moraine deposits from eastern Tibetan Plateau using SAR protocol[J]. *Quaternary Geochronology*, 5(2-3): 257-262.
- 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[J]. *Radiation Measurements*, 23(2-3): 497-500.
- RITTENOUR T M, GOBLE R J, BLUN M D. 2003. An optical age chronology of Late Pleistocene fluvial deposits in the northern lower Mississippi valley[J]. *Quaternary Science Reviews*, 22(10-13): 1105-1110.
- ROBERTS H M, WINTLE A G. 2001. Equivalent dose determinations for polymineralic fine-grains using the SAR protocol: application to a Holocene sequence of the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 20(5-9): 859-863.

- STEFFEN D, PREUSSER F, SCHLUNEGGER F. 2009. OSL quartz age underestimation due to unstable signal components[J]. *Quaternary Geochronology*, 4(5): 353-362.
- THOMAS P J, JAIN M, JUYAL N, SINGHVI A K. 2005. Comparison of single-grain and small-aliquot OSL dose estimates in <3000 years old river sediments from South India[J]. *Radiation Measurements*, 39(5): 457-469.
- WALLINGA J. 2002a. Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: A review[J]. *Boreas*, 31(4): 303-322.
- WALLINGA J. 2002b. On the detection of OSL age over estimation using single-aliquot techniques[J]. *Geochronometria*, 21: 17-26.
- WAN Hong-lian, HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, ZHA Xiao-chun. 2010. Holocene Extreme Floods of the Baoji Gorges of the WeiHe River[J]. *Quaternary Sciences*, 30(2): 430-440(in Chinese with English abstract).
- WANG Chang-sheng, CHEN Jie, ZHANG Ke-qi. 2005. Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits from the MingYaoLe anticline in the Southwestern Tian Shan[J]. *Seismology and Geology*, 27(4): 586-598(in Chinese with English abstract).
- WANG Hua, ZHANG Hui-ling, TU Lin-ling, QIN Jia-ming, FENG Yu-mei. 2005. A Study of the ^{14}C Age of Tufa Layer in the Zengpiyan Cave Site of Guilin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(4): 333-336(in Chinese with English abstract).
- WEI Le-jun, ZHENG Mian-ping, MA Zhi-bang. 2004. Characteristics and Chronology of Saline Sediments along Profile TT-1 of Dahyab Tso (Tai Cuo) in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(4): 397-404(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[J]. *Radiation Measurements*, 41(4): 369-391.
- Xi'an Map Press. 2008. Atlas of Shaanxi Province[M]. Xi'an: Xi'an Map Press(in Chinese).
- XIE Yuan-yun, LI Chang-an, WANG Qiu-liang, YIN Hong-fu. 2007. Sedimentary Records of Paleoflood Events During the Last 3000 Years in Jiangnan Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 27(1): 81-84(in Chinese).
- YANG Xiao-yan, XIA Zheng-kai, CUI Zhi-jiu. 2005. Holocene extreme floods and its sedimentary characteristic in the upper reaches of the Yellow River[J]. *Quaternary Sciences*, 25(1): 80-85(in Chinese).
- YAO Ping, HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, ZHA Xiao-chun, LI Xiao-gang. 2008. Palaeoflood Hydrological studies in the middle reaches of the Beiluohe River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 63(11): 1198-1206(in Chinese).
- ZHA Xiao-chun, HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li. 2007. Holocene extreme floods and environmental change of Qishuihe River in western Guanzhong Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 62(3): 291-300(in Chinese).
- ZHANG Jia-fu, YUAN Bao-yin, ZHOU Li-ping. 2007a. OSL Chronology of "old red sand" in the jin river of Fujian and palaeoenvironment implications of OSL dating of deposits during Quaternary from South in China[J]. *Science in China*, 52(22): 2646-2654(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jia-fu, ZHOU Li-ping, YAO Shu-chun, XUE Bin, WANG Xiao-lin. 2007b. Radiocarbon and Optical Dating of Lacustrine Sediments—A Case Study in Lake Gucheng[J]. *Quaternary Sciences*, 27(4): 522-528(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qiang, YANG Da-yuan, SHI Ya-feng, GE Zhao-Shuai, JIANG Tong. 2004. Flood events since 5000 a.B.P. recorded in natural sediments of Zhongba Site, Chuanjiang River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 24(6): 715-720(in Chinese with English abstract).