

# 渭河天水峡谷全新世特大洪水水文学研究

朱向锋<sup>1</sup>, 黄春长<sup>1,2</sup>, 庞奖励<sup>1</sup>, 查小春<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062; 2. 中科院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

**摘 要:**古洪水水文学是全球变化科学领域的新兴学科。通过对渭河上游天水段基岩峡谷的详细考察,对在杜家坪村附近发现的全新世古洪水滞流沉积剖面进行了深入研究。沉积学观察和分析结果表明这些沉积物为洪水悬移质泥沙沉积形成,因而其主要成分为粉沙,分选良好。其磁化率值很低,表明它们是完全全新世晚期的沉积物,还没有受到风化成壤作用的改造。通过与其下游宝鸡峡全新世古洪水沉积剖面的地层学和考古年代学对比,确定其发生的时代在 3200~3000a BP 之间,即全新世大暖期结束之时。利用古洪水水文学方法,求出该组古洪水沉积层所记录的特大洪水的洪峰流量介于 23460~25480m<sup>3</sup>/s 之间。同时,通过进一步分析验证,表明对于古洪水洪峰流量计算结果是可靠的。本研究获得了渭河万年尺度特大洪水的水文学数据,延长了洪水水文数据序列,在工程水文领域有重要应用性价值,对于揭示全球变化的水文响应具有重要的科学意义。

**关 键 词:**渭河;全新世;古洪水;沉积物;水文学

古洪水(Palaeoflood)通常指发生在历史时期以前的洪水。按照目前最新定义,是指发生在过去且没有被人类观测和记载的洪水。古洪水水文学作为是一门新兴学科,是第四纪沉积学、年代学应用于水文水资源学研究的一个新发展,它是在一定的河段,通过对于古洪水滞流沉积物 (Slackwater Deposits, 缩写为 SWD, 也翻译为平流沉积物)的沉积学研究鉴别古洪水事件,利用 OSL 和 <sup>14</sup>C 测年、考古学等方法断代,恢复古洪水的洪峰水位,采用水力学模型计算求出该洪水的洪峰流量。它能够将河流洪水的数据延长到万年尺度,以便建立更加可靠的河流洪水流量—频率关系,为水利水电枢纽、交通工程和城镇防洪工程设计等提供科学依据。

美国、西班牙、印度、法国、日本、澳大利亚等国已在古洪水水文学研究方面取得了显著成果<sup>[1-4]</sup>;中国一些学者曾经对黄河、长江、淮河、海河等河段的古洪水进行了研究,并取得一定的科研成果<sup>[5-10]</sup>。近年来,本课题组在黄河中游地区,系统地开展了全新世古洪水水文学的调查研究,先后在漆水河、北洛河、泾河成功地进行了全新世古洪水水文学研究

<sup>[11-13]</sup>。本文的内容是在对渭河干流天水峡谷河段考察的基础上,就杜家坪附近峡谷发现的全新世古洪水滞流沉积物,进行沉积学和古洪水水文学深入研究所获得有关渭河全新世特大洪水的最新成果。

## 1 渭河上游概况

渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,自西向东流经天水宝鸡峡谷进入关中平原,在潼关汇入黄河。渭河干流全长 818 km,宝鸡峡口以上为上游,长 433.4 km,控制流域面积 30660 km<sup>2</sup>,年平均流量为 70 m<sup>3</sup>/s,年平均含沙量为 65 kg/m<sup>3</sup>。宝鸡峡口林家村站观测最大洪水出现在 1954 年,洪峰流量为 5030 m<sup>3</sup>/s<sup>[14]</sup>。历史调查到的特大洪水发生在 1933 年,洪峰流量为 6890 m<sup>3</sup>/s。渭河上游流域属大陆性季风气候,年平均降水量 400~600 mm,年内分配极不均匀,降水量主要集中在 7~10 月,约占全年的 70%,且降水多以暴雨形式集中降落,年际变化较大<sup>[15]</sup>。渭河上游主要支流北有散渡河、葫芦河、牛头河、通关河等;南有榜沙河、大南河、藉河等。北岸流域为

收稿日期:2009-09;修订日期:2010-01.

基金项目:国家自然科学基金项目(40771018),陕西省自然科学基金项目(2006D01),中科院黄土与第四纪地质国家重点实验室基金(SKLLQG 0609),中央高校基本科研业务费专项资金资助(GK200901007),陕西省教育厅自然科学研究计划资助项目(09JK330).

作者简介:朱向锋(1977-),男,陕西临潼人,硕士,主要研究方向为资源开发与环境演变。E-mail:zhuxiangfeng@126.com.

黄土高原丘陵沟壑区,水土流失十分严重;南岸为构造剥蚀山地。南北地貌截然不同,影响着河川径流与洪水,北岸支流源远流长,洪枯流量相差悬殊,泥沙含量高,以悬移质为主。南岸支流较短,比降大,水流急,泥沙以推移质为主,水力资源较为丰富。

2 沉积剖面年代与研究方法

通过对渭河上游峡谷天水段的实地考察,在多处发现全新世坡积层和泥石流沉积层之中夹有典型的古洪水滞流沉积层。它们分布在峡谷河段高出常水位 15m 左右的坡脚地带。其中以元龙乡杜家坪村渭河南岸基岩坡脚发现的全新世古洪水滞流沉积层最为典型。经过对比确定这是该段渭河分布位置最高的特大洪水沉积层(图 1)。该剖面(WH-DJP)分层清晰,露头良好,水平方向稳定延伸,并且向坡上方向逐渐尖灭,是古洪水水位边缘最高点与斜坡接触带的沉积物。这是古洪水滞流沉积层的最典型代表,故选择该地段作为重点研究对象。WH-DJP 剖面位于海拔 1020~1024 m 之间,厚 2.5 m,高出渭河常水位 14.85~16 m,主体为坡积石渣土,其中夹

有 3 层古洪水滞流沉积层,每层之间由厚约 20 cm 坡积石渣土层自然分隔,记录了 3 次特大洪水事件。通过野外宏观形态特征的观察,结合地层学、沉积学和土壤学特征,对剖面进行了详细地层划分和描述(表 1)。

从剖面沉积结构看,天水峡谷 WH-DJP 剖面的含有 3 层粉沙质古洪水滞流层,质地纯净,向着坡上方向尖灭,表面覆盖有坡积表土层。从野外宏观特征分析,判断为发生在全新世晚期的古洪水的滞流沉积层。由于其中缺少可用于测年的物质,故通

表 1 渭河天水段峡谷 WH-DJP 地点古洪水滞流沉积物剖面沉积学特征

Tab.1 Sedimentary features of palaeoflood slackwater deposit in the WH-DJP profile of Tianshui Gorges, Weihe River		
深度/cm	地层和符号	沉积学特征
50~0	表土层	灰褐色坡积表土层,团粒结构显著,多根系,形成于全新世晚期
75~50	古洪水滞流层(SWD3)	浊红棕色粘土质粉沙沉积,致密,厚度 20~30cm,向坡上尖灭
95~75	坡积层	灰色角砾土沉积,大小混杂
120~95	古洪水滞流层(SWD2)	浊黄橙色粉沙土沉积,有薄层理,厚度 20~30cm,向坡上尖灭
140~120	坡积层	灰色角砾土沉积,大小混杂
165~140	古洪水滞流层(SWD1)	浊黄橙色粉沙土沉积,厚度 20~30cm,向坡上尖灭
?~165	坡积层	灰色角砾土沉积,内含大小不等角砾石块,未见底

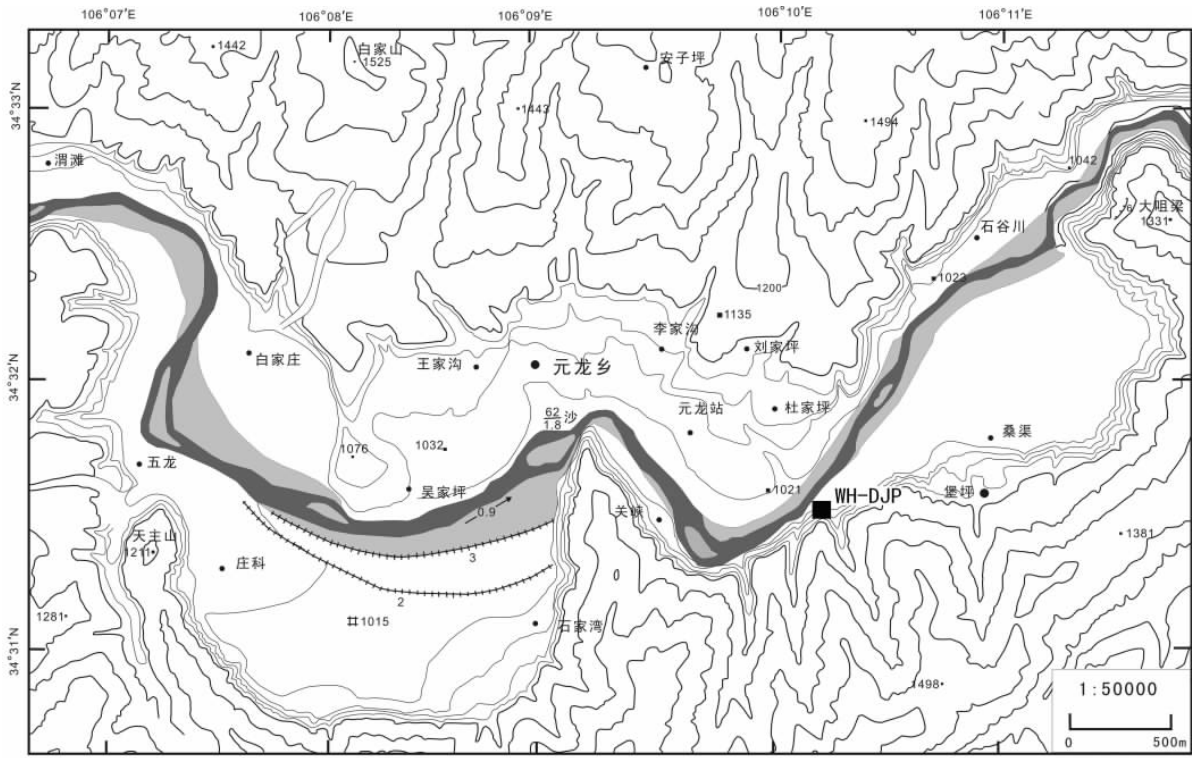


图 1 渭河天水段峡谷与 WH-DJP 古洪水滞流沉积物地点位置图  
Fig.1 The Weihe River and the WH-DJP site of palaeoflood slackwater deposit in the Tianshui Gorges

过地层对比的方法,以解决其年代问题。沿着渭河峡谷向下游宝鸡段追索,在固川镇(GCZ)台地前沿也发现有同期的3层古洪水滞流沉积物,夹在典型的全新世黄土—土壤剖面之中(图2)。通过水文计算表明两地古洪水沉积层所代表的古洪水流量基本相同。这就进一步表明两个地点是同一时期的特大洪水的沉积物。而固川镇台地剖面恰好是一个古文化遗址<sup>[16]</sup>,在古洪水滞流沉积层之下,为含有龙山文化时期(4800~4000a BP)文化层的古土壤层( $S_0$ ),其上则发现有西周时期(3000~2700a BP)的文化层的黄土( $L_0$ )。古洪水滞流沉积层恰好处于古土壤层( $S_0$ )与黄土( $L_0$ )的界线位置。由于我们在渭河流域多个剖面确定了该界限年代为3100a BP<sup>[17-21]</sup>,因此判断渭河天水宝鸡峡谷 WH-DJP 和 WH-GCZ 两个地点的古洪水滞流沉积层所记录的特大洪水,发生在3200~3000a BP。这表明它与渭河中游支流漆水河谷所记录的最大洪水时代相同<sup>[11]</sup>。这个时候正是全新世大暖期结束之际,我国北方季风气候变化剧烈,变率甚大,因而特大洪水和干旱事件频繁发生。这也已经为我们在黄河中游南部众多全新世地层剖面的研究所证实<sup>[17-21]</sup>。

将采集的沉积学样品经室内风干后,在陕西师范大学沉积分析实验室进行粒度和磁化率的分析测试。粒度分析的前处理是向样品中加入10%  $H_2O_2$  和10%  $HCl$  以去除有机质和次生  $CaCO_3$ ,再加入适量  $(NaPO_3)_6$  充分分散后,用英国 Malvern 公司的 Mastersizer-S 型激光粒度仪进行测量,测量精度为1%。对于样品中粒径 $>0.1mm$  颗粒用筛分法测定,并用实体显微镜进行分析鉴定。磁化率采用英国 Bartington 公司生产的 MS-2B 型磁化率仪测量,测量精度为1%,方法为称取研磨后粒径 $<2mm$  的风干土样10g(精确至0.0001g)装入无磁性塑料盒进行测量。

3 沉积学特征分析

粒度分析有助于揭示沉积物的性质、搬运动力及沉积环境。渭河天水峡谷 WH-DJP 古洪水滞流沉积物粒度成分总体较细,以粉沙为主,含量介于83.06%~85.90%之间,粒径小于 $2\mu m$  的粘粒含量不足10%,粒径大于 $63\mu m$  的细沙粒含量则更低(表2)。其粒度参数的分析计算结果显示,中值粒径

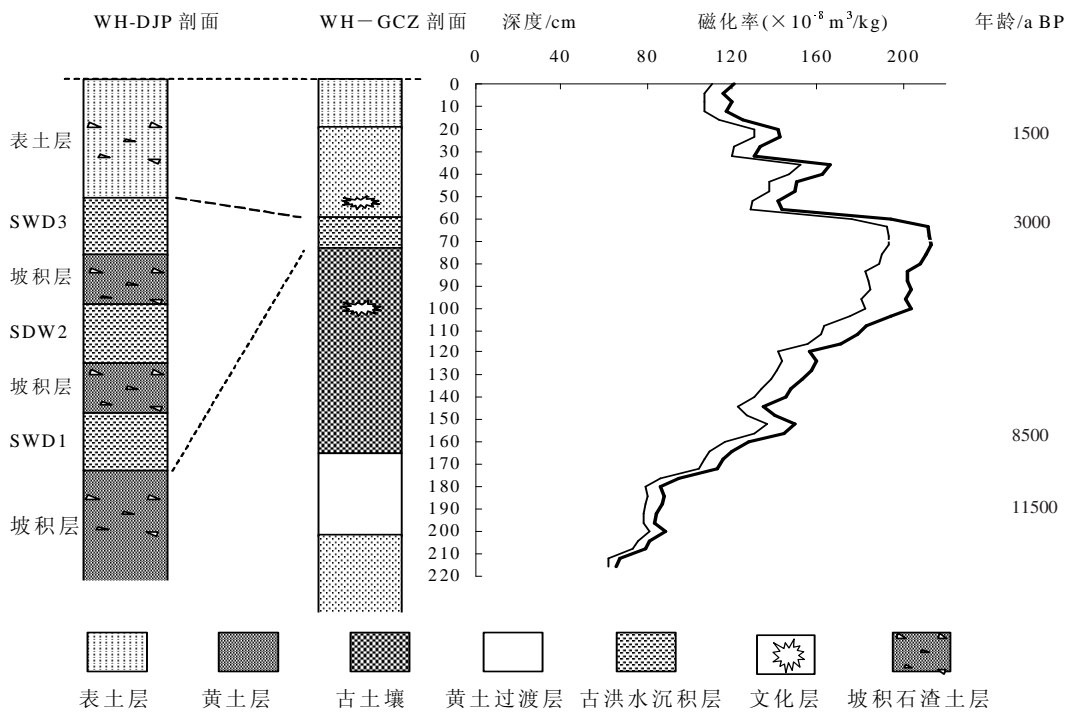


图2 渭河天水峡谷 WH-DJP 全新世古洪水沉积剖面与宝鸡峡谷固川镇 WH-GCZ 剖面地层与年代对比  
Fig.2 Pedostratigraphic correlations between the WH-DJP profile in the Tianshui Gorges and the WH-GCZ profile with Holocene palaeoflood slackwater deposits in the Baoji Gorges



Md 和平均粒径 Mz 分别在 17.66~21.49  $\mu\text{m}$  和 23.16~24.77  $\mu\text{m}$  之间, 表明粗粉沙是其主要成分。标准偏差  $\sigma$  可以反映粒径分布的中央部分和对水动力条件反映最灵敏的粗、细尾部的分选情况, 该剖面的标准偏差  $\sigma$  值介于 1.71~1.87 之间, 指示为河流相悬移质沉积。分选系数  $S_0$  介于 1.06~1.25 之间, 分选性好, 也说明这些古洪水沉积物随水流搬运, 沉积之前经过充分的分选。这些古洪水滞流沉积物粒度分布如图 3 所示。其粒度分布频率曲线形态均表现为正偏态特征, 主要锋值均偏向粗粒一侧, 出现在粗粉沙段(34.56~36.77 $\mu\text{m}$ )。作为粒度参数之一的偏度 SK, 表示沉积物粒度粗细分布的对称程度。WH-DJP 古洪水滞流沉积物粒度分布  $SK>0$ , 也指示其粒度分布均为正偏态(表 2)。粒度分布频率尖度  $K_g$  值表明主要粒度成分的粒径分布很集中, 也说明分选性较好。这些正是河流相悬移质泥沙沉积物的基本特征。与漆水河中游峡谷 HXZ 地点、北洛河中游峡谷的 LMC 地点和泾河中游峡谷的 CJC 地点的典型全新世古洪水沉积物比较, 发现它们所具有的共同特征, 就是这些古洪水滞流沉积物都主要是由粉沙组成, 分选良好, 粒度分布频率曲线表现为正偏态的特征<sup>[11-13]</sup>。

磁化率有助于揭示沉积物的性质、形成过程和次生变化特点。表 2 显示渭河天水峡谷 WH-DJP 剖面的古洪水滞流沉积物低频磁化率( $X_{lf}$ )介于  $31.9\times 10^{-8}\sim 67.2\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$  之间, 表明它是全新世晚期古洪水沉积物, 是最新鲜的沉积物。而 SWD1 的频率依赖性磁化率( $X_d$ )较大(表 2), 说明 SWD1 与 SWD2 之间的沉积间隔较长, 在沉积之后经过了风化改造

的影响。另一方面, 其磁化率值与渭河上游流域内的黄土相当, 也可以表明其物质来源正是流域内的黄土经过暴雨和洪水侵蚀的产物。

4 古洪水的水文学研究

4.1 古洪水洪峰流量恢复

古洪水水文学研究的最终目的是要恢复全新世古洪水的洪峰流量。在确定了古洪水滞流沉积物的性质之后, 必须对于该峡谷河段进行水文断面的测量和分析研究, 获得有关古洪水水位和行洪断面水文参数数据。古洪水行洪断面最好选择在沉积地点附近的基岩峡谷河段或抗冲蚀峡谷河段。这种河段断面在全新世时期基本稳定, 或者变化较小, 且作为行洪面积计算、比降测量、河槽糙率判断也相

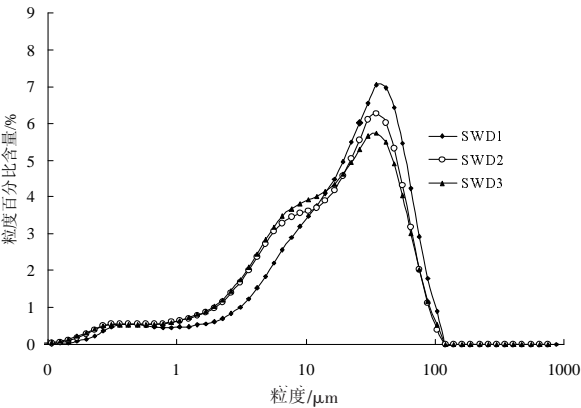


图3 渭河天水峡谷 WH-DJP 地点古洪水滞流沉积物粒度分布频率曲线

Fig.3 Grain-size distribution frequency of the palaeoflood SWD at the WH-DJP site in the Tianshui Gorges of the Weihe River

表 2 渭河天水峡谷 WH-DJP 剖面全新世古洪水沉积物粒度、磁化率分析结果统计表

Tab.2 Grain-size and magnetic susceptibility of palaeoflood slackwater deposits at the WH-DJP site in the Tianshui Gorges of the Weihe River

层位	厚度/cm	<2m/%	2~16 $\mu\text{m}$ /%	16~63 $\mu\text{m}$ /%	>63 $\mu\text{m}$ /%	Md/ $\mu\text{m}$	Mz/ $\mu\text{m}$	$\sigma$	SK $\phi$	$K_g\phi$	$S_0$	$Xlf/(10^{-8}\text{m}^3/\text{kg})$	$X_d/\%$
SWD3	25	9.27	37.46	45.61	6.63	17.66	23.16	1.87	0.29	1.1	1.25	36	0.56
SWD2	25	9.16	35.38	47.75	6.4	19.23	24.03	1.87	0.33	1.1	1.25	31.9	0.94
SWD1	25	7.54	32.07	53.83	4.69	21.49	24.77	1.71	0.37	1.2	1.06	67.2	6.55

表 3 渭河天水峡谷 WH-DJP 剖面全新世古洪水水文计算成果表

Tab.3 Hydrological characters of the Holocene palaeofloods reconstructed in the WH-DJP profile in the upper reaches of the Weihe River

层位	SWD 底界 H/m	洪峰水位 H/m	水面宽 B/m	水深 h/m	比降 S	糙率系数 n	过流面积 A/m <sup>2</sup>	湿周 L/m	水力半径 R/m	洪峰流量 Q/m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
SWD3	1023.25	1028.25	348	20.75	0.0015	0.055	5659.50	350.11	16.16	25480
SWD2	1022.80	1027.80	345	20.30	0.0015	0.055	5526.08	351.01	15.74	24440
SWD1	1022.35	1027.35	342	19.85	0.0015	0.055	5371.50	347.87	15.44	23460

会对准确一些<sup>[1-4]</sup>。本文调查发现的 WH-DJP 地点,地处渭河上游基岩峡谷,河槽形态特征稳定。故在采样点附近选取最狭窄基岩河槽,测量断面形态,并且获得有关参数(图 4,表 3)。

古洪水滞流沉积物(SWD)是古洪水水位的基本记录。通常,有些学者直接采用 SWD 的顶面高程作为洪峰水位,用作流量计算<sup>[1-4]</sup>。后来国内学者杨达源教授提出采用 SWD 向着坡上方的尖灭点高程作为洪峰水位,其精度相对更高<sup>[5-10]</sup>。在野外考察发现 WH-DJP 剖面包含 3 层古洪水滞流沉积层,均向坡上方向迅速尖灭,通过对古洪水滞流沉积尖灭点高程的确定,结合对于古洪水含沙量的科学判断,结合沉积层厚度即可更为准确地界定古洪水的洪峰水位<sup>[11-13]</sup>。据渭河林家村水文站 1934-2000 年水文统计,渭河多年平均含沙量为 67.56 kg/m<sup>3</sup>,最大含沙量为 886 kg/m<sup>3</sup>,根据泥沙干容重 2650 kg/m<sup>3</sup>,计算可得渭河体积含沙率介于 2.55%~33.43%之间。考虑到渭河上游流域植被在全新世中晚期为森林草原景观,且人类活动影响较小,推断当时的河流洪水泥沙含量比现在小,取 5%的体积含沙量。况

且,古洪水滞流沉积物,是在远离主流的泛滥洪水发生滞流的小环境当中,流速接近于零的情况之下,悬移质泥沙沉积物,故可以忽略流速与沉积时间。通过含沙量与 SWD 厚度推算各次古洪水滞流沉积层代表的水深,从而获得古洪水洪峰水位高程(表 4)。关于古洪水洪峰流量的计算,国内外有多种方法和模型,如控制断面法、回水曲线法、水位—流量关系法、比降法等<sup>[9]</sup>。由于本河段为基岩峡谷断面,河道稳定,糙率系数较易获得,故结合渭河峡谷河槽特点,确定采用比降法计算古洪水洪峰流量,

计算公式为:
$$Q=\frac{1}{n}AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}$$
式中: $Q$ 为洪峰流量 (m<sup>3</sup>/s); $n$ 为河道糙率系数; $A$ 为过流面积(m<sup>2</sup>); $R$ 为水力半径(m); $S$ 为水面比降。

比降法计算洪峰流量,糙率系数的确定是关键。渭河 WH-DJP 断面为基岩河床,右岸为基岩陡壁,左岸为黄土覆盖基岩陡壁,两岸岩壁长有杂草和灌木,河槽形状较规整;上游和下游河段均不顺直,有急弯,距离不远,断面处于 S 形顺直段,流速较快,水声较大;该河段为峡谷地带,无宽阔河漫

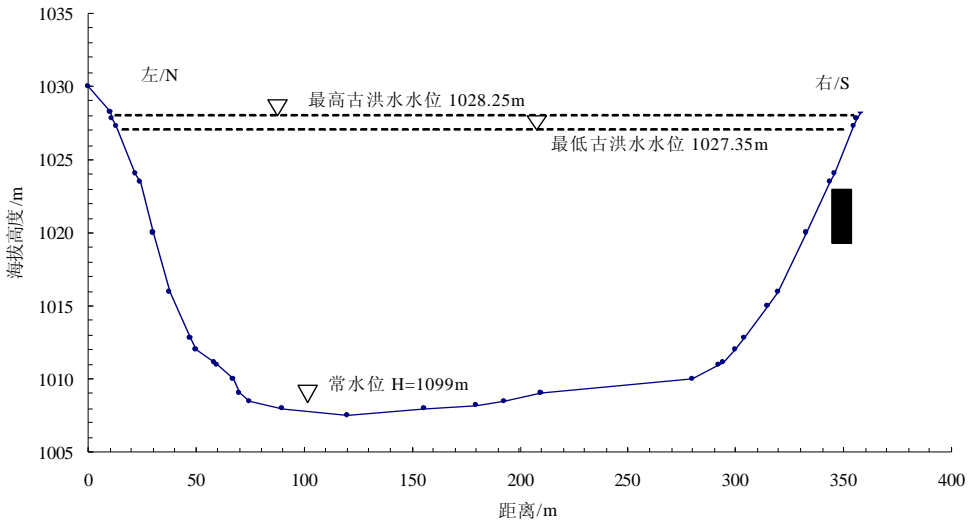


图 4 渭河天水峡谷 WH-DJP 地点全新世古洪水过流断面

Fig.4 Cross-section of the Holocene palaeofloods at the WH-DJP site in the Tianshui Gorges of the Weihe River

表 4 渭河 WH-DJP 断面现代洪痕水位恢复计算成果与水文站实测结果对比

Tab.4 A comparison of the reconstructed modern flood discharges in the WH-DJP profile to the gauged discharges at the Linjiacun station in the upper reaches of the Weihe River

年份	洪痕水位 H /m	水面宽 B /m	水深 h /m	比降 S	糙率系数 n	过流面积 A /m <sup>2</sup>	水力半径 R /m	计算流量 Q /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	实测流量 Q /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	误差 /%
2005	1012.8	257	5.30	0.0015	0.055	961.30	3.73	1629	1680	3.04
2006	1011.2	236	3.70	0.0015	0.055	575.10	2.43	733	695	5.46

滩,特大洪水发生时,洪水直接淹没全部河槽与两岸基岩。结合河段的地表特征,根据国家水利水电工程河道糙率有关标准<sup>[22-23]</sup>,对于该河段糙率  $n$  取值 0.055。

比降法中的水面比降  $S$  以河床比降代替,通过野外测量并且结合 1:1 万地形图中的水面高程点进行校正,确定该断面所在河段水面比降为 1.5‰。根据以上参数,计算出渭河 WH-DJP 断面的全新世古洪水洪峰流量介于 23460~25480 m<sup>3</sup>/s 之间(表 3)。渭河宝鸡峡口林家村水文站实测最大洪水发生在 1954 年,为 5030 m<sup>3</sup>/s。全新世特大洪水的流量是实测最大洪水的 4~5 倍。

#### 4.2 古洪水洪峰流量的验证

渭河天水峡谷 WH-DJP 断面全新世古洪水流量计算恢复是否可靠,可以通过多种方法进行验证。我们在断面下游约 300m 处的公路桥墩,找到了 2005 年和 2006 年渭河发生的最大洪水的洪痕印迹。因而,可以根据洪痕水位,同样在该断面利用比降法,进行这 2 个年份洪水流量的计算恢复。如果计算结果与实测结果误差不大,表明对全新世古洪水流量的计算结果是正确的。结合在 WH-DJP 断面获得的有关水文参数,本文根据洪痕水位,利用比降法计算获得 2005 年最大洪峰流量为 1629 m<sup>3</sup>/s,而当年林家村水文站实测最大洪峰流量为 1680 m<sup>3</sup>/s。计算出 2006 年最大洪峰流量为 733 m<sup>3</sup>/s,而当年实测最大洪峰流量为 695 m<sup>3</sup>/s。这样,利用洪痕恢复计算出来的结果与实测结果误差分别为 3.04%和 5.46%。这就表明,本文采用比降法对渭河全新世特大洪水洪峰流量计算恢复的方法是合理的,计算出来结果是可靠的。

## 5 结论

(1)通过对渭河上游天水峡谷河段的详细考察,在杜家坪村附近的基岩峡谷发现全新世古洪水滞流沉积层。沉积学分析表明,WH-DJP 剖面沉积层是典型的古洪水滞流沉积物。它们属于粉沙或者粘土质粉沙,粒度比较细,分选较好、磁化率值较低,是在洪水高水位滞流状态下,河流悬移质泥沙沉积的产物。

(2)根据 WH-DJP 剖面的古洪水滞流沉积层的层位特征,及其新鲜而没有被风化成壤改造的特点,结合与渭河宝鸡峡固川镇全新世古洪水滞流沉

积层剖面的年代框架的对比,确定 WH-DJP 地点 3 层滞流沉积物所代表的 3 次古洪水发生的时代为 3200~3000 a BP。这个时候正是全新世大暖期结束之际,季风气候变化剧烈,洪水和干旱皆有发生。

(3)结合天水渭河峡谷河槽特点,本文选用比降法对 WH-DJP 剖面所代表的 3 期古洪水进行了洪水水文恢复计算,得到该河段全新世特大古洪水的洪峰流量介于 23460~25480 m<sup>3</sup>/s 之间。并利用该方法对当地 2005、2006 年的最大洪水洪痕水位,进行了流量恢复计算,其结果与水文站实测结果相符合。这有效地证明我们对渭河上游峡谷全新世特大洪水洪峰流量计算的方法是合理的,计算结果是可靠的。

本文对渭河上游天水峡谷河段全新世中晚期特大洪水水文学研究,揭示出渭河上游河段万年尺度特大洪水的水文学特征,为水利水电工程洪水设计提供了基础性数据,因而该成果具有重要的应用性价值。同时,对于揭示全新世气候变化和水文变化及其对于全球变化的响应规律具有重要的科学意义。

#### 参考文献

- [1] Baker V R. Palaeoflood hydrology in a global context. Catena, 2006, 66(1-2): 161-168.
- [2] Kale V S, Singhvi A K, Mishra Praveen K, et al. Sedimentary records and luminescence chronology of Late Holocene palaeofloods in the Luni River, Thar Desert, northwest India. Catena, 2000, 40: 337-358.
- [3] James C K. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(1-5): 439-457.
- [4] Thorndycraft V R, Benito G, Rico M, et al. A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. Journal of Hydrology, 2005, 313(1-2): 16-31.
- [5] 杨达源, 谢悦波. 古洪水平流沉积. 沉积学报, 1997, 15(3): 29-32.
- [6] 谢悦波, 杨达源. 古洪水平流沉积基本特征. 河海大学学报, 1998, 26(6): 6-11.
- [7] 谢悦波, 张素亭, 毕东生. 古洪水行洪断面面积的估算. 河海大学学报, 1999, 27(5): 8-11.
- [8] 谢悦波, 王文辉, 王平. 古洪水平流沉积粒度特征. 水文, 2000, 20(4): 18-20.
- [9] 詹道江, 谢悦波. 古洪水研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 1-83.

- [10] 谢悦波, 费宇红, 沈起鹏. 古洪水平流沉积与水位. 地球学报, 2001, 22(4): 320–323.
- [11] 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. 地理学报, 2007, 62(3): 291–300.
- [12] 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. 地理学报, 2008, 63(11): 1198–1206.
- [13] 李瑜琴, 黄春长, 查小春, 等. 泾河中游龙山文化晚期特大洪水水文学研究. 地理学报, 2009, 64(5): 541–552.
- [14] 黄河水利委员会水文局. 黄河水文志. 郑州: 河南人民出版社, 1996: 255–260.
- [15] 焦菊英, 马祥华, 王飞, 等. 渭河流域侵蚀产沙强度的区域分异特征. 水土保持研究, 2004, 11(4): 60–63.
- [16] 国家文物局主编. 中国文物地图集: 陕西分册. 西安: 地图出版社, 1998, 上卷: 166–221; 下卷: 201–488.
- [17] Huang C C, Pang J L, Zhou Q Y, et al. Holocene pedogenic change and the emergence and decline of rain-fed cereal agriculture on the Chinese Loess Plateau. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(23–24): 2529–2539.
- [18] Huang C C, Jia Y F, Pang J L, et al. Holocene colluviation and its implications for tracing human-induced soil

- erosion and redeposition on the piedmont loess lands of the Qinling Mountains, Northern China. Geoderma, 2006, 136(3–4): 838–851.
- [19] Huang C C, Zhao S C, Pang J L, et al. Climatic aridity and the relocations of the Zhou Culture in the Southern Loess Plateau of China. Climatic Change, 2003, 61(3): 361–378.
- [20] Huang C C, Pang J L, Chen S E, et al. Holocene dust accumulation and the formation of polycyclic cinnamon soils in the Chinese Loess Plateau. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(12): 1259–1270.
- [21] Huang C C, Pang J L, Chen S E. Charcoal records of the fire history in the Holocene loess–soil sequences over the southern Loess Plateau of China. Palaeogeography Palaeoclimatology, 2006, 239: 28–44.
- [22] 武汉水利电力学院水力学教研室. 水力学. 北京: 高等教育出版社, 1986: 335–336.
- [23] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 274–290.

## Palaeo–Hydrological Studies of the Holocene Extreme Floods in the Tianshui Gorges of the Weihe River

ZHU Xiangfeng<sup>1</sup>, HUANG Chunchang<sup>1,2</sup>, PANG Jiangli<sup>1</sup>, ZHA Xiaochun<sup>1</sup>

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

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth and Environment Research, CAS, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Palaeoflood hydrological studies were carried out at the upper reach gorges of the Weihe River. Palaeoflood slackwater deposits were found at the DJP site in the Tianshui gorges of the mainstream of the river. Analysis of the grain-size distribution indicates that these SWD consist of silts and clayey silts, sourced from the suspended sediment load of the floodwater. The low magnetic susceptibility indicates they are fresh deposits without weathering and pedogenic alteration. Stratigraphic correlation with the SWD discovered downstream at the Guchuanzhen site of the Weihe River shows that these extreme floods occurred between 3200–3000 a BP at the end of the mid-Holocene climatic optimum. The reconstructed peak discharges of the palaeofloods range from 23,460 m<sup>3</sup>/s to 25,480 m<sup>3</sup>/s which are much larger than gauged floods. These results were further tested and proved to be reliable with reconstruction of the modern floods at the same reach. This research is of great importance for hydrological engineering and flood mitigation. And it is also very important for the establishment of the relationships between extreme flood events and global climate change.

**Key words:** Weihe River; Holocene; palaeoflood; slackwater deposits; hydrology

本文引用格式:

朱向锋, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河天水峡谷全新世特大洪水水文学研究. 地理科学进展, 2010, 29(7): 840–846.