

汉江上游全新世古洪水水文频率分析研究

李晓刚^{1,2}, 查小春², 刘科²

(1. 商洛学院 地理系, 陕西 商洛 726000; 2. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 在汉江上游郧县庾家洲段发现含有古洪水滞流沉积物的剖面, 通过对其进行理化性质分析及测年断代, 发现该剖面记录了距今 12 600 ~ 12 400 a、距今 4 200 ~ 4 000 a、距今 3 100 ~ 3 000 a 和距今 1 900 ~ 1 800 a(东汉 A. D. 200 ~ 300a) 的 4 期特大古洪水事件。通过古洪水滞流沉积物指示的水位信息, 利用 HEC-RAS 模型对其进行水文学恢复, 计算出这 4 期古洪水的流量分别为 54 920、51 300、43 500、37 050 m³/s。分别利用实测洪水数据、实测 + 历史洪水数据、实测 + 历史 + 古洪水数据, 建立汉江上游不同时间尺度的洪水序列频率。通过对比研究表明: 将全新世古洪水水文学研究成果加入到洪水数据序列中, 大大延伸了洪水序列的长度, 在洪水流量频率曲线中, 变外延为内插, 提高了洪水频率计算的精度。研究结果对汉江上游水利工程建设、跨河交通工程建设以及防洪用洪具有重要的现实意义。

关键词: 古洪水; 历史洪水; 实测洪水; 洪水频率计算; 汉江

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0024-06

Analysis of hydrology frequency of holocene paleo flood in the upperstream of Hanjiang river

LI Xiaogang^{1,2}, ZHA Xiaochun², LIU Ke²

(1. Department of Geography, Shangluo University, Shangluo 726000, China;

2. College of Tourism and Environmental Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The profile of sediment flow of paleo flood had been found in TJZ of Yun County in the upperstream of Hanjiang river. From the analysis of physical and chemical properties and its OSL dating age, the paper found that the profile recorded four paleo flood events, which occurred before 12 600 to 12 400 years, 4 200 to 4 000 years, 3 100 to 3 000 years and 1 900 to 1 800 years. Through the hydrological information of slackwater deposit, the four paleo flood discharges were calculated by HEC-RAS model, they were 54 920, 51 300, 43 500 and 37 050 m³/s. Then by use of the data of gauge flood, the data of gauge and historical flood, the data of gauge and historical together with palaeo flood, the paper set up the frequency of flood series of different time scales. The results showed that the palaeo flood data being connected with the gauge and historical flood data prolonged the flood data sequence and also advanced the credibility of flood frequency calculation. The result has important realistic significance for studying palaeo flood records in sedimentological evidence. It is not only to gain long-time scales flood data, but also provided important hydrological data for the construction of water conservancy and cross river traffic, flood control and utilization in the upperstream of Hanjiang river.

Key words: palaeo flood; historical flood; gauge flood; calculation of flood frequency; Hanjiang river

汉江作为南水北调中线工程的水源地, 是一条经济价值利用极高的河流。汉江上游的水文变化不仅与该流域的经济发展息息相关, 而且还通过南水北调中线工程与京津地区的水资源供给有着密切的

联系。因此准确掌握汉江上游长时间尺度的洪水资料, 对该流域水利工程建设、跨河交通工程建设以及防洪用洪都有十分重要的现实意义。

我国学者对汉江流域的研究主要集中于水资

收稿日期: 2015-08-17; 修回日期: 2015-10-19

基金项目: 国家社科基金项目(14BZS070); 陕西省教育厅科学研究计划项目(15JK1224); 商洛市科技计划项目(SK2014-01-05)

作者简介: 李晓刚(1983-), 男, 山西吕梁人, 博士, 副教授, 主要研究方向为全新世古洪水。

源、水环境特征和气候变化对径流的影响等^[1-6],在频率计算方面的研究较少。早期以防洪为目的的水利工程,水文设计最大值多采用在实测或调查洪水的最大值上加上一个安全系数(即最大加成),然而水文序列的多样性和复杂性使得确定安全系数变得非常困难,水文频率计算的出现为安全系数的确定提供了客观的尺度,为水文设计提供了科学依据。然而在实际频率计算时往往由于洪水数据系列太短,外延去推求千年一遇、万年一遇的稀遇设计洪水精度受到影响^[7]。中国水文水利研究者创造性地采用历史调查洪水数据补充到洪水频率计算序列中,提高了外延的精确程度^[8]。历史调查洪水数据一般是根据古文献记载、碑记、老乡访谈等方式获取,依此方法获得的历史洪水发生年代作为特大洪水的重现年数是否合理可靠?因为文献记载或者碑记并不能记载所有水文信息,而且在有记载前也可能发生过这类洪水或者比这类洪水更大的洪水^[9]。全新世古洪水水文学的研究为解决上述难题提供了可能。古洪水从河谷两侧沉积物地层中发现历史洪水时期以前的洪水记录。国内外水文学、第四纪专家学者都从河流两侧地层中发现古洪水沉积记录,并结合测年技术确定古洪水发生年代,运用水力学模型恢复了古洪水洪峰流量,进而计算出了特大洪

水的重现期^[10-18]。本文以汉江上游郧西度家洲段地层记录中的古洪水滞流沉积物(SWD)为载体,获取全新世古洪水水位、流量等水文信息,进而计算该河段不同尺度的古洪水、历史洪水和实测洪水的洪水频率,进行对比分析论证。

1 研究河段概况

汉江发源于陕西省宁强县潘冢山,全长 1 577 km,流域面积 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北有秦岭山脉与干流平行,海拔高度在 2 500 m 以上;南以米仓山、大巴山为界,平均海拔在 2 000 m 左右^[2]。汉江上游多为 U 型峡谷,基岩裸露,河道窄深,水流湍急,河槽调蓄能力较差。白河水文站是汉江上游的代表站之一,处于丹江口上游 203 km,1934 年设立,1950 年起有连续水文观测资料。白河水站实测最大洪峰流量($31\,000 \text{ m}^3/\text{s}$)发生在 1983 年 7 月 31 日,其次 2010 年 7 月 18 日的 $27\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 2005 年 10 月 2 日的 $21\,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 。历史调查最大洪水发生在明代万历十一年(1583),推算出洪峰流量为 $34\,800 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[18]。本文的研究点位于白河水文站下游 31 km 处(图 1),沿途虽然有少量支流汇入,但由于支流较小,因此白河水文站的洪峰流量和度家洲段的洪峰流量相差不大。

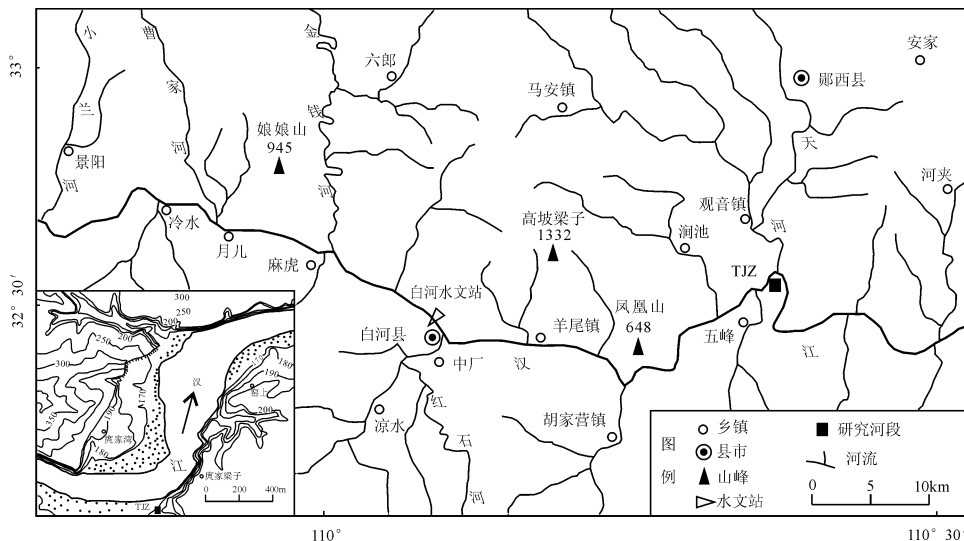


图 1 汉江上游白河至郧西段水系图

2 地层剖面和全新世古洪水信息

古洪水和历史洪水的洪水频率计算结果的精度主要取决于如何准确测定古洪水和历史洪水的重现期和量级。通过多次野外实地考察,在汉江上游多个地点发现夹有古洪水滞流沉积层(SWD)的全新

世黄土-古土壤剖面,本文重点研究郧西 TJZ 剖面。TJZ 剖面位于汉江上游右岸度家洲台地前缘,含有末次冰期后期以来 4 期古洪水平流沉积层,沉积层十分清晰,具水平层理。自上而下每隔 5 cm 进行连续采样,至 645 cm 深度处,通过对野外和室内详细观察和分析的基础上,对 TJZ 剖面从上到下进行地

层划分。

全新世古洪水发生年代是计算洪水频率、重现期的重要基础数据。TJZ 剖面的古洪水年代是通过三方面相互验证来确定的。首先,通过与关中全新世 ETC 剖面^[19]、漆水河 HXZ 剖面^[20]和汉江上游黄土-古土壤年代框架^[21]对比,基本确定 TJZ 剖面的层位年代,即全新世“大暖期”形成的古土壤年代于 8500 ~ 3100 a B. P. (age before present, 距今)。其次利用已有的考古年代,在该剖面 80 ~ 60 cm 处发现汉代灰色瓦屑、烧土块和木炭屑(考古年代为距今 1900 ~ 1800),在剖面 180 ~ 200 cm 处也发现周代灰色绳纹薄陶片、骨屑、烧土块和木炭屑(考古年代为距今 3000 ~ 2800),在剖面 270 ~ 290 cm 处发现的石家河文化陶片(考古年代为距今 4600 ~ 4200)。第三利用 OSL(光释光)测年方法,先验证 3 期古文化陶片的年代;并在关键层位测得 Lt 顶界(370 ~ 365 cm)年代为 8850 ± 350 a B. P., 古洪水 SWD1 顶界(435 ~ 430 cm)年代为 11970 ± 660 a B. P., L1 上部(490 ~ 480 cm)年代为 12400 ± 350 a B. P., L1 中部(555 ~ 550 cm)年代为 15600 ± 1140 a B. P.。由此确定 TJZ 剖面记录的

四期古洪水分别发生在距今 12 600 ~ 12 400、距今 4 200 ~ 4 000、距今 3 100 ~ 3 000 和距今 1 900 ~ 1 800 a(东汉 A. D. 200 ~ 300a)(图 2)。

河槽断面的选择是古洪水洪峰流量恢复重建的一个重要环节。目前国内外古洪水水文学基本达成共识,基岩峡谷河段全新世时期构造运动相对稳定,河流冲刷淤积对河槽影响很小,是古洪水水文学研究最为理想的河段^[12,22]。本文研究的汉江上游郧西庾家洲段,均为基岩峡谷河段。该区域全新世以来地壳活动极其微弱,河槽形态特征稳定,断面变化量小,水流状态稳定,有利于借助古洪水洪峰水位推求洪峰流量。结合 1: 10 000 的汉江流域数字地形图利用 Arcgis 耦合 HEC-RAS 模型,在确定合理的参数(包括曼宁值,比降和边界条件等)后计算出 1983 年、2005 年和 2010 年的洪水流量,与实测洪峰流量相比,其误差在 0.16% ~ 4.77%,说明采用 HEC-RAS 模拟汉江流域最大洪峰流量的计算结果是可靠的。模型计算中河床曼宁值的取值范围 0.03 ± 0.002 ;河岸的曼宁值取值范围为 0.033 ± 0.002 ,分别计算出 4 期古洪水的最大洪峰流量(表 1)。

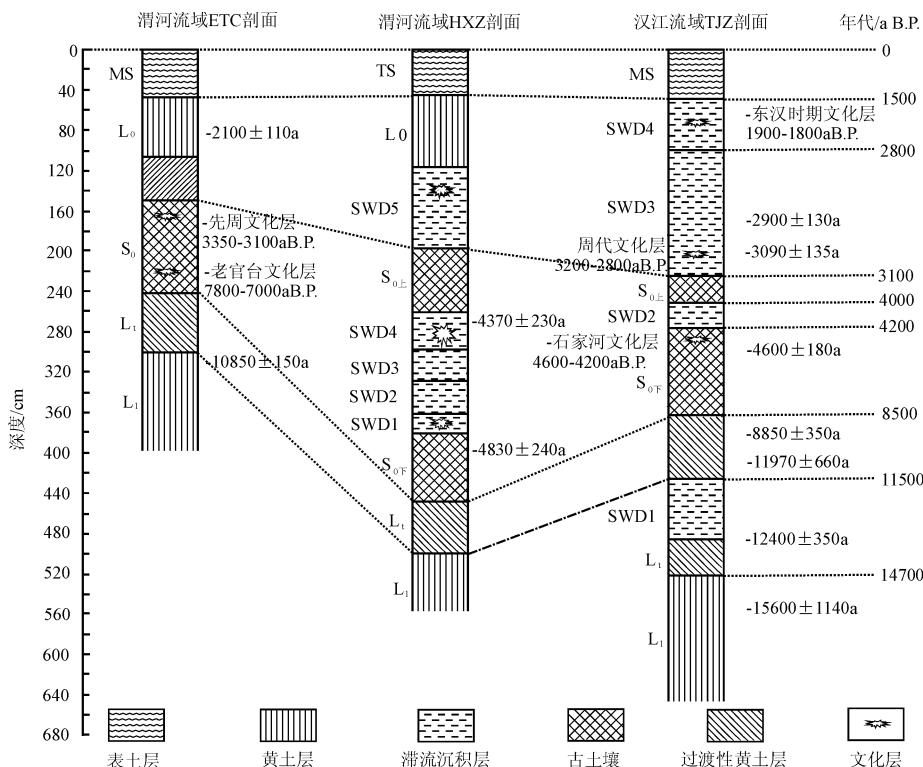


表 1 汉江上游郧西 TJZ 剖面全新世古洪水计算表

洪水期次	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	洪峰水位 H/m	比降 $S/(m \cdot m^{-1})$	水能高程 E_h/m	洪水流速 $V/(m \cdot s^{-1})$	过水断面 面积 A/m^2	最大水深 h/m	水面宽/ m
SWD4	54 920	182.50	0.0008	183.24	4.13	14 890.81	27.21	713.75
SWD3	51 300	181.50	0.0008	182.21	4.05	14 180.26	26.21	710.31
SWD2	43 500	180.00	0.0008	180.72	3.89	12 316.37	24.43	662.37
SWD1	37 050	178.30	0.0008	178.91	3.67	11 169.35	22.69	656.64
2010	22 420	174.50	0.0008	174.90	2.92	8 713.27	18.89	635.51
2005	26 800	176.01	0.0008	176.46	3.14	9 677.02	20.40	644.25
1983	31 050	177.00	0.0008	177.51	3.35	10 321.49	21.39	649.63

(1)古洪水频率计算:

$$P_i = \frac{i}{N+1} \quad i = 1,2,\cdots,a \tag{1}$$

式中: N 为古洪水考证期; i 为古洪水的排位序数; a 为古洪水的个数。

(2) 历史洪水频率计算:

$$P_{a+i} = P_a + (1 - P_a) \frac{j}{N'+1} \tag{2}$$
$$j = 1,2,\cdots,b$$

式中: N' 为历史洪水考证期; j 为历史洪水的排位序数; b 为古洪水的个数。

(3) 实测洪水频率计算:

$$P_{a+b+m} = P_{a+b} + (1 - P_{a+b}) \frac{m}{n+1} \tag{3}$$
$$m = 1,2,\cdots,n$$

式中: n 为实测最大洪水个数; m 为实测最大洪水的排位序数。

文中样本序列包括全新世古洪水 4 次(表 1), 分别发生在距今 12 600 ~ 12 400、距今 4 200 ~ 4 000、距今 3 100 ~ 3 000 和距今 1 900 ~ 1 800 a(东汉 A. D. 200 – 300a)(图 2), 从而说明古洪水考证期 N 为 12600 年; 历史洪水 3 次(分别为 1583 年 36 000 m³/s, 1867 年 33 000 m³/s, 1921 年 27 500 m³/s), 实测最大洪水 69 次。依据上述公式, 分别计算出实测洪水、历史洪水 + 实测洪水、古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水三种序列的频率洪峰流量结果(表 2)。

从表 2 可以看出, 只考虑实测洪水资料时, 百年一遇洪水洪峰流量为 31 540 m³/s, 千年一遇为 42 620 m³/s, 万年一遇为 52 630 m³/s; 加入历史洪水后, 百年一遇洪水洪峰流量为 30 200 m³/s, 千年一遇为 39 670 m³/s, 万年一遇为 48 290 m³/s, 即加入历史洪水资料后, 特大洪水洪峰流量减小; 加入古洪水和历史洪水后, 百年一遇洪水洪峰流量为 32 660 m³/s, 千年一遇为 45 430 m³/s, 万年一遇为 58 080 m³/s, 即加入全新世古洪水资料后, 特大洪水洪峰流量值增大。

表 2 汉江上游度家洲段不同洪水组合系列洪水频率计算结果表

频率 $P/\%$	0.01	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50
重现期 N/a	10 000	1000	500	200	100	50	20	10	5	2
实测洪水 $Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	52 630	42 620	39 510	35 230	31 540	27 970	22 730	19 520	16 070	10 470
实测洪水 + 历史洪水 $Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	48 290	39 670	36 500	32 870	30 200	27 170	23 160	19 770	16 250	10 790
实测洪水 + 历史洪水 + 古洪水 $Q_p/(m^3 \cdot s^{-1})$	58 080	45 430	41 490	36 480	32 660	28 850	23 720	19 790	15 860	10 250

在此基础之上, 分别绘制实测洪水、历史洪水 + 实测洪水和古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水三个洪水序列、不同时间尺度的频率曲线图(图 3)。其中, 洪水频率曲线采用中华人民共和国水利行业标准(SL44 – 2006)《水利水电工程设计洪水计算规范》中要求的皮尔逊Ⅲ型曲线拟合方法^[23]。具体步骤为: 第一、初步计算参数; 第二、采用适线法来调整上述初步计算参数, 以获得一条与经验点据拟合良好的频率曲线; 第三、最后确定参数。本文中实测洪水频率曲线参数 $C_v = 0.55$ 、 $C_s = 2 C_v$, 实测 + 历史洪水频率曲线参数 $C_v = 0.50$ 、 $C_s = 2 C_v$, 实测 + 历史 + 古洪水频率曲线参数 $C_v = 0.50$ 、 $C_s = 3.5 C_v$ 。

从图 3 可以看出汉江上游麇家洲段的实测洪水资料较短,仅有 69 a 的数据,如果仅仅依据这 69a 实测洪水系列进行洪水频率计算,虽然可以利用总体参数估计及频率外延求出百年一遇、千年一遇、万年一遇的洪水洪峰流量。但实测洪水频率曲线位于古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水频率曲线的下方,说明外延推求的稀遇洪水洪峰流量值偏小。若依此作为水利水电工程设计洪水的话,可能造成工程达不到设计标准,工程运行很不安全,带来潜在的危害。因此,有必要寻求延长洪水序列的方法,历史洪水调查考证和全新世古洪水水文学研究提供了新的思路与方法。

从图 3 还可以看出,将汉江上游麇家洲段调查到的 1583、1867 和 1921 年的 3 次历史洪水加入到先前 69 年实测洪水序列中,延长了洪水时间序列。这样由外延求百年一遇洪水转为内插,但是千年一遇、万年一遇仍需要外延求得,且绘制出的频率曲线图仍位于古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水频率曲线的下方,仍可能出现设计洪水偏小的问题。

借助古洪水滞流沉积物指示的古洪水水文信息,在汉江上游麇家洲段获得了全新世距今 12 600 ~ 12 400 a、距今 4 200 ~ 4 000 a、距今 3 100 ~ 3 000 a 和距今 1 900 ~ 1 800 a (东汉 A. D. 200 ~ 300a) 的 4 期特大古洪水年代和水文数据。将这些数据加入到洪水序列中,成为古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水序列,计算绘制出万年尺度洪水频率曲线 (图 3)。

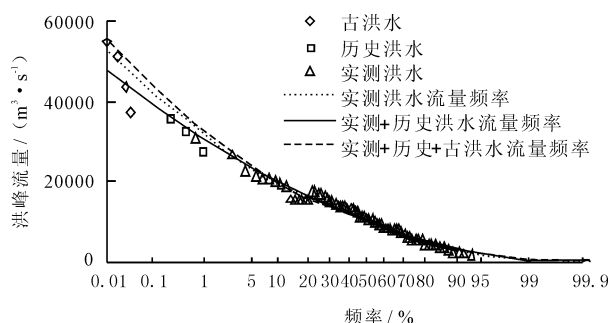


图 3 汉江上游麇家洲段不同洪水组合系列洪水频率曲线图

从 P-Ⅲ型洪水频率曲线 (图 3) 看出,加入全新世古洪水资料后,洪水频率曲线与 Y 轴交点升高,即千年一遇和万年一遇洪水的洪峰流量高于仅考虑实测洪水和历史洪水的数值。加入麇家洲河段全新世古洪水资料后,得到远超过实测和历史调查洪水重现期的稀遇洪水的水文信息,延长了汉江上游特大洪水的时间序列,使得洪峰流量 - 频率曲线的稀遇洪水部分有了点据控制,千年一遇洪水频率

由外延转变为内插,提高了洪水频率分析的精度。这就说明运用全新世古洪水资料、历史调查洪水资料和实测洪水资料共同参与计算的万年尺度洪水洪峰流量 - 频率关系可靠性更高。

4 讨 论

汉江洪水多由暴雨形成,汉江流域的各个地区均可产生暴雨,暴雨最多的地区是米仓山,大巴山一带。就季节而言,暴雨多发生在 7 - 9 月,个别年份也推迟至 10 月。受西南季风和东南季风影响,使得汉江上游的灾害频繁发生;此外,降雨程度和降水的方向也对汉江上游的洪水频率研究造成影响。如果不能准确掌握汉江上游的水文序列数据就可能造成灾难性的后果。本文在实测洪水资料的基础上,加入对历史洪水和古洪水进行了研究。在古洪水研究方面,通过地层对比和光释光测年技术确定了古洪水的发生年代,并通过模型计算了古洪水的流量。在此基础之上,将古洪水加入汉江上游洪水频率序列中。研究发现加入古洪水可以使洪水频率曲线的年限大大延长,对频率曲线起到外延作用。虽然加入历史洪水也对频率曲线起到外延作用,但是百年一遇以外的洪水都是由外延获取,这对于大型水利工程建设,特别是设计大型水利工程的最大洪水水位是极不安全的。而将古洪水加入到历史洪水和实测洪水序列中去,不仅大大延长洪水序列的时间长度,而且千年一遇、万年一遇的洪水由外延变为内插,提高了洪水频率分析的精度,这就大大提升水利工程建设的安全系数。因此在汉江上游开展古洪水研究,延长汉江上游洪水数据年限有重要的作用,同时也对汉江流域防洪减灾具有重要的现实意义。但本文的研究古洪水数据由于年代较远只能在河槽形态变化不大的上游基岩峡谷进行,对于下游河流或者河槽形态变化较大的河段尚且无法用模型来计算,需要进一步研究。

5 结 论

(1) 通过对汉江上游峡谷段的野外考察,在郧县麇家洲段发现含有古洪水滞流沉积物的剖面,进行系统采样。室内理化指标和测定断代显示剖面记录了全新世时期的 4 期特大古洪水。

(2) 利用 4 期古洪水滞流沉积物指示的水位信息,借助 HEC - RAS 模型进行水文学恢复,计算出这四期古洪水的流量分别为 54 920、51 300、43 500、37 050 m^3/s 。

(3) 分别利用 69 年实测洪水数据、考证期为 430 年的历史洪水数据 + 实测洪水数据、考证期为 12600 年的古洪水数据 + 历史洪水数据 + 实测洪水数据,建立汉江上游不同时间尺度的洪水序列频率。

(4) 通过三条洪水频率曲线对比研究表明,将全新世古洪水水文学研究成果加入到洪水数据序列中,大大延伸了洪水序列的长度,在洪水流量频率曲线中,变外延为内插,提高洪水频率计算的精度。对汉江上游水利工程建设、跨河交通工程建设以及防洪用洪具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 朱利,张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. 资源科学, 2005,27(2):16-22.
- [2] 李文浩. 汉江上游流域水文特性分析[J]. 水资源与水利工程学报, 2004,15(2):54-58.
- [3] 蔡新玲,孙娟,乔秋文,等. 气候变化对汉江上游径流的影响[J]. 气候变化研究进展,2008,4(4):220-224.
- [4] 李明新,吕孙云,徐德龙. 汉江上游水资源量变化趋势分析[J]. 人民长江,2008,39(17):49-52.
- [5] 殷淑燕,王海燕,王德丽,等. 陕南汉江上游历史洪水灾害与气候变化[J]. 干旱区研究,2010,27(4):522-528.
- [6] 查小春,延军平. 全球气候暖干化对秦岭南北河流径流泥沙的影响研究[J]. 干旱区研究,2002,19(3):62-66.
- [7] 陈沂. 古洪水研究简介[J]. 水利水电工程设计,1995(2):50-52.
- [8] 史辅成,易元俊,慕平. 黄河历史洪水调查、考证和研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002:81-123.
- [9] 查小春,黄春长,庞奖励,等. 泾河流域不同时间尺度洪水序列频率分析对比研究[J]. 地理科学,2009,29(6):858-863.
- [10] Ely L L, Enzel Y, Baker V R, et al. A 5000 year record of extreme floods and climate change in the southwestern United States[J]. Science,1993,262(5132):410-412.
- [11] Kale V S, Singhvi A K, Mishra P K, et al. Sedimentary records and luminescence chronology of Late Holocene palaeofloods in the Luni River, Thar Desert, northwest India [J]. Catena,2000,40(4):337-358.
- [12] Benito G, Soperia A, Sánchez - Moya Y, et al. Palaeoflood

record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene [J]. Quaternary Science Reviews,2003,22(15-17):1737-1756.

- [13] Benito G, Lang M, Barriendos M, et al. Use of systematic palaeo flood and historical data for the improvement of flood risk estimation: review of scientific methods [J]. Natural Hazards,2004,31(3):623-643.
- [14] Zha Xiaochun, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Sedimentary and hydrological studies of the Holocene palaeofloods in the middle reaches of the Jinghe River [J]. Journal of Geographical Sciences,2012,22(3):470-478.
- [15] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. Development of gully systems under the combined impact of monsoonal climatic shift and neo-tectonic uplift over the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary International, 2012,263(12):46-54.
- [16] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. Extraordinary hydro-climatic events during the period AD 200-300 recorded by slackwater deposits in the upper Hanjiang River valley, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,2013,374:274-283.
- [17] 虎亚伟,庞奖励,黄春长,等. 汉江上游郧西段全新世古洪水水文学研究[J]. 自然灾害学报,2012,21(5):55-59.
- [18] 杨永德,邹宁,郭希望,等. 汉江上游水文特性的初步分析[J]. 水文,1997,17(2):54-56.
- [19] 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[J]. 地理学报,2009,64(5):541-552.
- [20] 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.
- [21] 庞奖励,黄春长,周亚利,等. 汉江上游谷地全新世风成黄土及其成壤改造特征[J]. 地理学报,2011,66(11):1562-1573.
- [22] 詹道江,谢悦波. 古洪水研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001:45-89.
- [23] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范 SL44-2006[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006:57-60.