

泾河流域不同时间尺度洪水序列频率分析对比研究

查小春^{1,2}, 黄春长¹, 庞奖励¹, 李瑜琴¹, 古明兴³

(1 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2 中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3 陕西省水文水资源勘测局, 陕西 西安 710068)

摘要: 以泾河中游彬县至礼泉段的 H-CJC 沉积记录的古洪水信息, 结合实测洪水和历史洪水资料, 比较了泾河流域不同时间尺度洪水序列频率。研究表明, 将古洪水研究成果加入到历史洪水和实测洪水资料序列中, 可大大延长洪水序列的时间长度, 提高洪水频率分析的精度, 说明河流沉积记录的古洪水信息, 对于水利工程建设和防洪减灾具有重要的意义。

关 键 词: 泾河; 古洪水; 历史洪水; 实测洪水; 洪水频率计算

中图分类号: P426 616 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2009)06-0858-06

当前全球气候的变化, 已使水资源在时空上的重新分布和数量发生了很大的变化^[1~4], 导致突发洪水灾害在各地频繁出现^[5~6]。因此, 准确掌握洪水资料, 对防洪减灾、水利工程建设和水资源开发调度等都具有十分重要的意义。但是, 在水文分析计算中, 洪水频率分析常苦于资料太短, 即使用有限的资料去推求稀遇的设计洪水是频率计算中最为棘手的难题^[7]。为了解决这个问题, 中国水文工作者普遍采用增加历史调查洪水的方法^[7,8]以延长洪水系列, 提高外延成果的精度。而对于历史洪水, 特别是大的历史洪水, 以文献或碑记考证等所得到的最远年限作为重现年数, 可能并不适合, 因为考证期以前可能还有一段时期也发生过这样的洪水或者发生过比这类洪水更大的洪水, 而且人类的记忆、碑记、文字记载都不能提供如此长远的信息^[8]。这就要求寻找一种比历史洪水考证期更远年代的洪水记录, 以增加设计洪水基本资料的信息量。目前, 古洪水研究为我们提供了这种可能。美国、西班牙、法国等国家都已经在古洪水水文学研究方面取得了显著成果^[9~11]。中国学者也在长江、黄河、淮河等某些河段进行了古洪水的研究, 取得了一定的成果^[12~20]。本文以泾河中游彬县段基岩峡谷地质记录的古洪水平流沉积物获得的全新世古洪水信息, 对泾河流域不同时段的古洪水、历史洪水和实测洪水的洪水频率进行了计算和

比较分析。

1 研究区河段和环境概况

泾河是黄河的二级支流, 也是渭河最大的支流, 位于 $106^{\circ}14' \sim 108^{\circ}42'E$, $34^{\circ}46' \sim 37^{\circ}19'N$, 发源于宁夏回族自治区泾源县老龙潭, 流经甘肃省平凉、泾川, 陕西省长武、彬县、永寿、淳化, 于陕西省高陵陈家滩与渭河汇合, 干流全长 455.1 km, 总流域面积 45 421 km², 多年平均径流量为 21.4×10^8 m³。流域属大陆性季风气候, 年均气温 10℃左右, 年均降水量 550 mm, 且季节分配不均, 主要集中于夏季 7、8 两月, 极易产生历时短、强度大的暴雨, 形成暴涨暴落、灾害性大的洪水过程, 给当地人们的生产和生活带来巨大影响, 严重制约和破坏该地区的经济发展^[21]。泾河流域水土流失极为严重, 年均输沙总量 3.09×10^8 t, 最大含沙量为黄河的 3 倍多, 达 1 430 kg/m³, 年均输沙模数 7 150 t/km²^[22]。

景村水文站地处彬县新堡子乡景村, 为泾河中游干流控制站, 位于 $108^{\circ}08'E$, $35^{\circ}00'N$, 控制流域面积 40 281 km², 河道平均比降 2.65‰, 年平均径流量 16.97×10^8 m³。河段以上大部分为黄土丘陵沟壑区, 少部分为土石山区, 植被较差, 水土流失严重。景村水文站有 1963 年建站以来详细的实测洪水数据序列。且历史调查特大洪水出现在清代宣

收稿日期: 2009-03-25 修订日期: 2009-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40771018)、中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金 (10501-198)、陕西师范大学优秀科技预研项目 (200702001) 资助。

作者简介: 查小春 (1972-), 男, 陕西南郑人, 博士, 副教授, 主要从事资源开发与环境演变方面的研究。E-mail: zhaxc@snnu.edu.cn

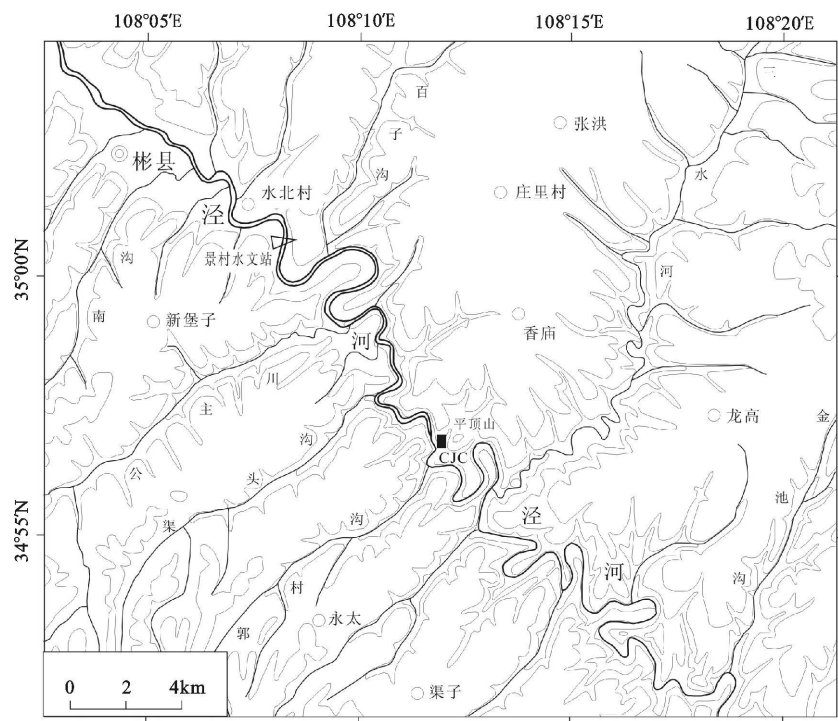


图 1 泾河彬县段河谷地形与全新世古洪水沉积剖面 JH - CJC 位置图

Fig 1 Contour map of the Jinghe River channel and the location of JH-CJC site

统三年 (1911 年), 洪峰流量为 $13\,350\text{ m}^3/\text{s}$ 次大洪水出现在 1933 年, 洪峰流量 $9\,380\text{ m}^3/\text{s}$ ①。

2 地层剖面特征和全新世古洪水信息

通过在泾河干流彬县至礼泉段的调查 (图 1), 在景村水文站下游约 18 km 处的程家川段曲流峡谷地段, 发现了保存完整、典型的古洪水平流沉积层 JH - CJC (图 2), 并且向坡上方向逐渐尖灭, 具有代表性。从沉积结构看, 整个 JH - CJC 剖面叠覆于晚更新世马兰黄土 L_4 之上, 古洪水平流沉积单元厚约 1 m, 夹在全新世中期古土壤 S_0 上部, 包括 5 个单层, 每个单层厚度约 20~25 cm, 为水平波状层粉沙, 其间有坡积角砾土层分隔, 代表 5 次洪水 (图 2)。

尤其重要的是, 程家川古洪水平流沉积层覆盖了含有龙山文化晚期文化层的黑垆土层, 其中的灰色绳纹陶片、木炭屑和烧土块等文化遗物在剖面照片中清晰可见 (图 2), 其年代为 4 500~4 200 a B. P., 这就表明泾河古洪水发生年代为 4 200 a B. P.。通过与处于相同气候系统的渭河支流漆水

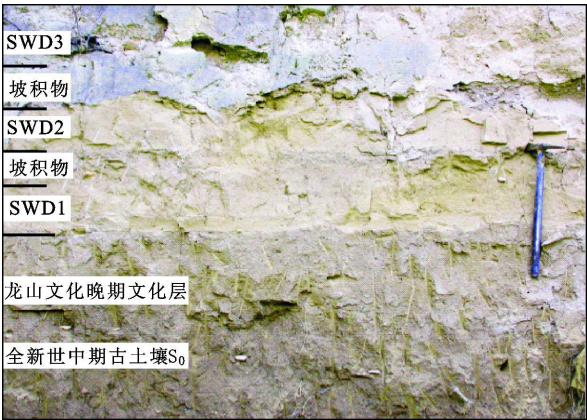


图 2 JH-CJC 全新世剖面古洪水平流沉积层照片 (SWD4 和 SWD5 照片中未显示)

Fig 2 The JH-CJC Holocene profile containing the bedding of paleoflood slackwater deposits (SWD) (SWD4 and SWD5 could' t be showed in this photo)

河古洪水研究结果^[16]对比表明, 漆水河流域在客省庄文化时期 (4 200~4 000 a B. P.) 发生过特大古洪水, 发生年代与泾河流域程家川剖面所记录的古洪水年代相同, 表明这一期古洪水事件在泾河流域也有地层记录, 也再次证明了泾河流域的古洪水

① 陕西省水利水土保持厅. 中华人民共和国陕西省洪水调查资料: 黄河流域部分的洪水调查资料 (第一册). 西安: 陕西省水利厅, 1984.

事件发生的年代为龙山文化晚期 (4 200~ 4 000 a B P.), 同时也说明这一期古洪水事件在黄河中游地区是具有普遍性的。由于泾河 JH - CJC 地层剖面 4 200 a B P. 以下均无全新世古洪水平流沉积层, 所以确定 JH - CJC 剖面的古洪水淤积物为泾河流域全新世 11 500 a B. P. 以来特大洪水的全部记录。根据比降法计算公式, 分别推算出了泾河中

游 JH - CJC 的 5 次相应的洪峰流量, 计算成果见表 1^[23], 同时, 利用比降法计算了泾河 1977 年的洪水流量, 计算的结果为 6 280 m³ /s 与实测洪峰流量 6 190 m³ /s 相比, 误差为 1. 4%, 说明采用比降法对泾河大洪水洪峰流量恢复的计算结果是可靠的, 方法是合理的。

表 1 泾河古洪水计算成果表

Table 1 Hydrological results of Holocene paleofloods in Jinghe River channel

JH - CJC 古洪水期次	洪峰水位 <i>H</i> (m)	水面宽 <i>B</i> (m)	水深 <i>h</i> (m)	水面比降 <i>S</i>	过水断面面积 <i>A</i> (m ²)	湿周 <i>L</i> (m)	水力半径 <i>R</i> (m)	糙率系数 <i>n</i>	洪峰流量 <i>Q</i> (m ³ /s)
SW D5	801. 70	178. 5	21. 70	0. 0035	2797. 98	190. 77	14. 67	0. 045	22040
SW D4	801. 35	174. 7	21. 35	0. 0035	2736. 04	186. 85	14. 64	0. 045	21530
SW D3	801. 15	172. 5	21. 15	0. 0035	2701. 33	184. 61	14. 63	0. 045	21250
SW D2	800. 05	162. 2	20. 05	0. 0035	2516. 32	173. 94	14. 47	0. 045	19640
SW D1	799. 90	160. 0	19. 90	0. 0035	2492. 15	171. 69	14. 52	0. 045	19490
1977 年	824. 38	296	14. 98	0. 0015	1787. 43	302. 91	5. 90	0. 036	6280

3 古洪水、历史洪水和实测洪水的频率计算

频率分析是估计水利水电工程设计洪水的主要方法, 也是工程水文学的重要组成部分。对于古洪水、历史洪水和实测洪水的频率计算, 分别采用以下公式计算^[24]:

1) 古洪水频率计算:

$$P_i = i / (N + 1) \quad i = 1, 2, \dots, a$$

式中: *N* 为古洪水考证期, *i* 为古洪水的排位序号, *a* 为古洪水的个数。

2) 历史洪水频率计算:

$$P_{a+i} = P_a + (1 - P_a) [j / (N' + 1)]$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

式中, *N'* 为历史洪水考证期, *j* 为历史洪水的排位序号, *b* 为古洪水的个数。

3) 实测洪水频率计算:

$$P_{a+b+m} = P_{a+b} + (1 - P_{a+b}) [m / (n + 1)]$$
$$m = 1, 2, \dots, n$$

式中, *n* 为实测最大洪水个数, *m* 为实测最大洪水的排位序号。

根据上述古洪水、历史洪水和实测洪水的频率计算公式, 分别计算出了实测洪水、历史洪水 + 实测洪水和古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水三种序列的频率洪峰流量 (表 2)。

表 2 泾河彬县段不同洪水组合系列洪水频率计算成果表

Table 2 Results of flood frequency analysis for different flood data sequence

频率 <i>P</i> (%)	0. 01	0. 1	0. 2	0. 5	1	2	5	10	20	50
重现期 <i>N</i> (a)	10000	1000	500	200	100	50	20	10	5	2
实测洪水 Q_p (m ³ /s)	21490	15660	13930	11650	9950	8270	6100	4520	3000	1230
历史洪水 + 实测洪水 Q_p (m ³ /s)	31350	22280	19600	16110	13520	10100	7790	5510	3440	1300
古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水 Q_p (m ³ /s)	23550	17200	15310	12840	10980	9150	6770	5030	3360	1380

同时, 分别作出了实测洪水、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的频率曲线图 (图 3)。从图 3 可知, 由于泾河景村水文站实测洪水资料序列短, 只有 44 a 序列, 如果仅仅依据观测的实测洪水系列来进行水文频率计算, 那么用这个有限的样本来进行总体参数估计

及频率曲线外延, 虽然可以计算出的百年一遇, 甚至千年、万年一遇的洪水, 但均为曲线外延。在水利工程设计中, 若外延的设计洪水成果偏大, 则造成国家或地方资金的大量浪费; 若外延的设计洪水成果偏小, 则使得工程达不到设计标准, 工程运行很不安全。图 3 也表明, 实测洪水频率分析曲线均

位于历史洪水 + 实测洪水和古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水频率曲线的下方, 外延推算出来的水文频率值偏低, 这对水利水电工程设计洪水带来的潜在

危害很大。因此, 有必要尽可能去寻找历史洪水或古洪水资料, 加入实测系列中进行频率计算, 以提高设计洪水成果的精度和可靠性。

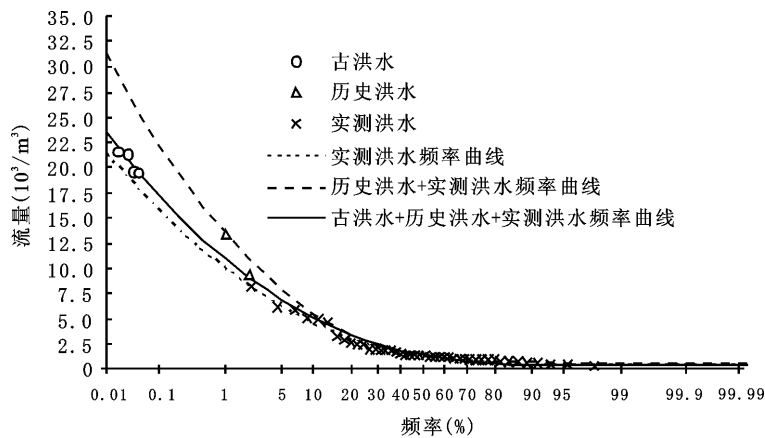


图 3 泾河彬县段不同洪水组合系列洪水频率曲线图

Fig 3 Flood frequency-peak discharge relationship curve established with a combination of gauged flood historical flood and palaeoflood data of the Jinghe River channel

通过历史洪水的调查和考证, 可以扩大洪水序列的样本容量, 起到频率曲线的“展延”作用^[25]。从图 3 可知, 将泾河景村河段调查到的 1911 年和 1933 年两次调查历史洪水加到实测洪水序列中去, 使洪水序列的年限从原来的 44 a 延长到 96 a 大大延长洪水的时间序列。而且, 百年一遇的洪水由实测洪水外延的 $9\,950\text{ m}^3/\text{s}$ 变为内插的 $13\,520\text{ m}^3/\text{s}$, 但是百年一遇以外的洪水频率均为外延, 这也为大型水利水电工程的洪水设计精确计算带来实际的问题, 可见, 采用增加历史调查洪水的方法, 延长了洪水系列, 使频率曲线相对比较稳定, 提高了外延成果的精度, 但是, 要将百年一遇的洪水由外延变为内插, 还需要再延长洪水序列资料。

古洪水是指第四纪全新世以来至可考证历史洪水期以前这一时期内发生的大洪水, 借助大洪水信息的载体——古洪水平流沉积物, 通过一定的手段, 可以获得这些沉积物所蕴涵的诸多洪水信息^[24]。通过 H-CJC 古洪水平流沉积物的研究, 获得了全新世 4 500~4 200 a B.P. 的 5 次洪水流量, 将其加入到历史洪水和实测洪水资料序列中去, 则洪水序列的年限延长到 11 556 a (全新世起始时间为 11 500 a B.P., 实测洪水资料截至到 2006 年, 因此, 古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水组成的洪水序列为资料 11 556 a), 大大延长了洪水序

列的时间长度。从图 3 可知, 古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水的频率曲线稳定, 万年一遇以内的洪水频率均由原来的外延变为内插^[24], 频率计算出的万年一遇的洪水为 $23\,550\text{ m}^3/\text{s}$, 千年一遇的洪水为 $17\,200\text{ m}^3/\text{s}$, 百年一遇洪水为 $10\,980\text{ m}^3/\text{s}$ 。

从图 3 可知, 古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水的洪水频率曲线处于历史洪水 + 实测洪水的下方, 说明由历史洪水 + 实测洪水组成的洪水序列, 虽然可以扩大洪水序列的样本容量, 提高频率的分析与计算的成果的精度, 但是由于历史资料的有限性和资料缺乏性, 使得历史洪水 + 实测洪水的频率分析结果高于古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水的洪水频率分析结果。例如历史洪水 + 实测洪水的百年一遇洪水为 $13\,520\text{ m}^3/\text{s}$, 高于古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水百年一遇洪水 $10\,980\text{ m}^3/\text{s}$ 的 1.23 倍; 20 a 一遇洪水为 $7\,790\text{ m}^3/\text{s}$, 高于古洪水 + 历史洪水 + 实测洪水 20 a 一遇洪水 $6\,770\text{ m}^3/\text{s}$ 的 1.15 倍; 10 a 一遇洪水为 $5\,510\text{ m}^3/\text{s}$, 高于 1.1 倍, 这也表明由历史洪水 + 实测洪水组成的洪水序列, 虽然可以提高水利水电工程建设的风险性, 却会造成国家或地方资金的大量浪费。因此, 从地质记录中识别和恢复古洪水, 对于水利工程建设和防洪减灾具有十分重要的意义。

4 结 论

按照洪水事件发生的时间,将有实际观测记录的洪水称为实测洪水,历史时期发生的有文献记载的洪水称为历史洪水,史前发生依靠地质沉积记录辨析的洪水称为古洪水。古洪水水文学是一门新兴学科,能够提供万年尺度的大洪水水文学数据,可为各类水利工程的洪水设计提供可靠依据^[26, 27]。以泾河中游彬县至礼泉段的 H-CJC 的古洪水沉积记录,通过对实测洪水、历史洪水+实测洪水和古洪水+历史洪水+实测洪水序列的频率计算进行比较分析表明,依据实测洪水进行频率分析计算的十年以上一遇的洪水均为曲线外延获得,外延推算出来的水文频率值偏低,这对水利水电工程设计洪水带来的潜在危害很大;加入调查和考证的历史洪水,虽然可以扩大洪水序列的样本容量,起到频率曲线的“展延”系列作用,但是百年一遇以外的洪水频率均为外延。将古洪水加入到历史洪水和实测洪水资料序列中去,则大大地延长了洪水序列的时间长度,频率曲线稳定,万年一遇以内的洪水频率均由原来的外延变为内插,提高了洪水频率分析的精度,说明从沉积记录中识别和恢复古洪水,对于水利工程建设和防洪减灾具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 查小春, 延军平. 全球变化下秦岭南北河流径流泥沙比较分析 [J]. 地理科学, 2002, 22(4): 403~407
- [2] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 建国以来中国洪涝灾害成灾面积变化的小波分析 [J]. 地理科学, 2005, 25(1): 43~48
- [3] 靳立亚, 符娇兰, 陈发虎. 近 44 年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应 [J]. 地理科学, 2005, 25(5): 567~572
- [4] 刘晓东, 安芷生, 方建刚, 等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化 [J]. 地理科学, 2002, 22(5): 513~519
- [5] 朱晓华, 蔡运龙. 中国自然灾害灾情统计与自组织临界性特征 [J]. 地理科学, 2004, 24(3): 264~269
- [6] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 建国以来中国洪涝灾害成灾面积变化的的小波分析 [J]. 地理科学, 2005, 25(1): 43~48
- [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] Baker V R. Palaeoflood hydrology in a global context [J]. Catena 2006, 66: 161~168.
- [10] Thomdycraft V R, Benito G, Rico M A, Sopena et al. A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River NE Spain [J]. Journal of Hydrology 2005, 313: 16~31.
- [11] Knox J C. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change [J]. Quaternary Science Reviews 2000, 19: 439~457.
- [12] 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: 73~88.
- [13] 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
- [14] 张 强, 杨达源, 施雅风. 川江中坝遗址 5 000 年来洪水事件研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(6): 715~720.
- [15] 杨晓燕, 夏正楷, 崔之久. 黄河上游全新世特大洪水及其沉积特征 [J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 80~85
- [16] 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研究 [J]. 地理学报, 2007, 62(3): 291~300
- [17] 杨素英, 孙凤华, 马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征 [J]. 地理科学, 2008, 28(2): 224~229
- [18] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 近 50 年来河西走廊平原区气候变化的区域特征及突变分析 [J]. 地理科学, 2008, 28(2): 525~531
- [19] 信忠保, 许炯心, 马元旭. 近 50 年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征 [J]. 地理科学, 2009, 29(1): 98~104.
- [20] 赵景波, 王长燕. 兰州黄河高漫滩沉积与洪水变化研究 [J]. 地理科学, 2009, 29(3): 409~414
- [21] 陕西师大地理系《咸阳市地理志》编写组. 陕西省咸阳市地理志 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 1991 73~86.
- [22] 冉大川. 泾河流域水沙特性及减水减沙效益分析 [J]. 水土保持通报, 1992, 12(5): 20~28
- [23] 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
- [24] 詹道江, 谢悦波. 古洪水研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 1~89
- [25] 熊炳恒. 从刘家峡洪水复核看历史洪水在频率计算中的作用 [J]. 西北水力发电, 1988(2): 29~34
- [26] Srihar A. A mid-late Holocene flood record from the alluvial reach of the Mahi River Western India [J]. Catena 2007, 70: 330~339.
- [27] Benito G, Sopena A, Sanchez-Moya Y, et al. Palaeoflood record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene [J]. Quaternary Science Reviews 2003, 22: 1737~1756.

Comparison about Flood Frequency Analysis on Different Time Scales in Jinghe River Channel

ZHA Xiao-chun^{1,2}, HUANG Chun-chang¹, PANG Jiang-li¹, LI Yu-qin¹, GU Ming-xing³

(1. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100 3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710068)

Abstract Flood frequency analysis was the main methods to calculate the design flood in water conservancy construction. Based on palaeoflood recorded in H-CJC sedimentological profile between Bin County and Liquan County in Jinghe River channel, the flood frequencies of the gauge flood, gauge flood+ historical flood and gauge flood+ historical flood+ palaeoflood were analyzed in this paper. The results showed that the palaeofloods data were connected with the historical flood and gauge flood data, the flood data sequence were prolonged and the credibility of flood frequency result was greatly advanced. So studying the palaeoflood recorded in sedimentological evidence was very important to the conservancy construction, mitigate flood hazard and develop water resources.

Key words Jinghe River, palaeoflood, historical flood, gauged flood, flood frequency analysis

《中国地理科学》(英文版)刊期变更启事

《中国地理科学》(Chinese Geographical Science) (ISSN: 1002-0063, CN: 22-1174/P) 由中国科学院主管, 中国科学院东北地理与农业生态研究所主办, 科学出版社和 Springer 合作出版, SCI-E 收录期刊。

为进一步提高信息量和时效性, 本刊从 2010 年起由季刊变更为双月刊, 欢迎国内外专家、学者踊跃投稿! 欢迎访问 www.springer.com 检索本刊创刊以来的全部论文!