

引用格式: 蒋先刚, 刘维明, 文宿菘, 吴朝华. 基于 HEC-RAS 模型的雅江中游古高能洪水的模拟研究[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 276-288.
JIANG Xiangang, LIU Weiming, WEN Susong, WU Chaohua. Ancient high-energy flood simulation in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River based on HEC-RAS model [J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 276-288.

基于 HEC-RAS 模型的雅江中游古高能洪水的模拟研究

蒋先刚¹, 刘维明^{2, 3*}, 文宿菘¹, 吴朝华²

(1. 四川农业大学 土木工程学院, 四川 都江堰 611830; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所
山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 3. 中国-巴基斯坦地球科学研究中心, 伊斯兰堡 45320, 巴基斯坦)

摘要: 高能洪水是地球上目前已知最大规模的极端洪水事件, 其对全球地貌演化、气候变化等有着深刻的影响。高能洪水重建可以提高对极端洪水事件的认识, 进一步探索高山峡谷地貌对于极端洪水事件的响应。然而, 针对高海拔山区的高能洪水模型应用仍存在一定局限, 无法得到高准确度的重建结果。为了研究雅江中游高能洪水规模, 本研究在雅鲁藏布江中游宽谷加查—米林河段发现的代表古高能洪水的 17 个砾石洲/滩的基础上, 采用 HEC-RAS 模型, 结合 ArcGIS 平台下的 HEC-Georas 模块重建了古高能洪水洪峰流量; 以 $\pm 35\%$ 的变幅对曼宁糙率系数进行了敏感性测试, 以保证重建结果的准确性。计算结果表明: (1) 17 个砾石洲/滩的模拟水位与野外调查所得标志水位能较好吻合, 与实测结果相比误差均小于 0.1%; (2) 雅鲁藏布江中游古高能洪水洪峰水位为 3047.09 ~ 3373.39 m, 洪峰流量为 $0.2 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 且最大淹没水深为 366 m; (3) 当曼宁系数处于 $\pm 35\%$ 的变幅下时, 洪峰水位的误差为 $-0.36\% \sim 0.17\%$, 说明该模型对曼宁糙率系数的敏感性较差, 采用此方法能够很好地恢复雅鲁藏布江中游古高能洪水洪峰流量。该研究对于充分认识雅鲁藏布江中游的洪水运动规律有重要作用, 对于揭示高能洪水在高山峡谷区的特征及其地貌响应具有重要的现实意义。

关键词: 古高能洪水; HEC-RAS 模型; 雅鲁藏布江

中图分类号: TV122

文献标志码: A

高能洪水被定义为大量水体在短时间内快速释放所产生的大规模洪水, 具有高能性和突发性等特点^[1]。高能洪水的爆发对人类社会造成巨大危害, 并对地球表层造成剧烈扰动^[2]。高能洪水具有很强的搬运能力和侵蚀能力, 能够强烈塑造地表地形地貌, 促进流域系统的形成。研究高能洪水事件有助于理解其形成、诱发和演进机制, 对减轻极端洪水

危害性有重要意义。

目前已知的高能洪水主要分布在北美洲和欧洲的高纬度地区古大陆冰盖的边缘^[3]。对于高能洪水事件的重建大致分为两个阶段, 第一个阶段是通过经验公式来估算洪水规模, 主要通过堰塞湖和高能洪水沉积物之间的对应关系来进行反演。但研究证明这种方法并不具有普适性, 只适用于特定情况

收稿日期 (Received date): 2021-04-16; **改回日期** (Accepted date): 2022-03-29

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42071017); 国家自然科学基金重大研究计划 (91747207); 国家自然科学基金 (41807289); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金 (KLMHESP-20-05)。[National Natural Science Foundation of China (42071017); Key Projects of the National Natural Science Foundation of China (91747207); National Natural Science Foundation of China (41807289); Open Fund of Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences (KLMHESP-20-05)]

作者简介 (Biography): 蒋先刚 (1987-), 男, 山东梁山人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 山地灾害机制及防治。[JIANG Xiangang (1987-), male, born in Liangshan, Shandong province, Ph. D., associate professor, research on the mechanism and prevention of mountain disasters] E-mail: jxgjim@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 刘维明 (1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 古灾害地貌。[LIU Weiming (1982-), male, Ph. D., professor, research on paleo-hazard geomorphology] E-mail: liuwm@imde.ac.cn

下的洪水流量计算。第二阶段则是使用数值模型进行洪水的重建,不仅可以获得洪水的相关水动力参数,还能直观的呈现出洪水的演进过程,这也是数值模型被广泛认可采用的原因之一。在进行古洪水数值模拟重建时,HEC-RAS 曾被多次运用于溃决洪水的模拟,如西班牙^[5]、法国^[6]和巴基斯坦^[7]、冰岛冰湖溃决洪水重建^[9]等。HEC-RAS 在国内也被成功运用到古洪水的研究分析当中^[10],如黄河中上游及其支流的古洪水重建^[11-14]。

高能洪水具有巨大的单位动能,对地表系统会造成巨大的影响,但仅凭少量的历史记录和数据很难清楚的认识到低能洪水的形成条件及诱发机理,所以需要借助残存的高能洪水沉积对其进行反演和规模重建,并结合当时的环境背景对高能洪水进行更深层次的研究。对古高能洪水进行规模重建不仅可以提高对极端洪水事件的认识,还可以进一步探索高山峡谷地貌对于极端洪水事件的响应。雅鲁藏布江流域水利水能资源丰富,但因流域内地形、水文和气象条件复杂多变,导致地质灾害频发,水利水能资源利用率较低。所以对雅鲁藏布江古高能洪水事件进行研究既能够提高水资源保障能力也能够加强防灾减灾能力。

本文采用 HEC-RAS 模型并结合嵌套于 ArcGIS 平台的 HEC-Georas (Hydrologic Engineering Center Geographic River Analysis System) 模块,依据前期野外工作中发现的代表高能洪水的 17 个砾石洲/滩,对雅鲁藏布江中游加查—米林段进行古高能洪水模拟分析。重建雅江中段高能洪水事件规模,掌握高能洪水的规模和运动规律,对利用雅江水资源与水能资源、深入认知高原河流演变具有重要科学价值。

1 研究区概况

雅鲁藏布江境内总长度 2057 km、平均河床海拔超过 3000 m,以喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川为源头,向东穿过青藏高原南部,途中有帕隆藏布、雅砻江等支流汇入,在林芝地区开始向南流动,穿过巴昔卡地区后进入印度。雅鲁藏布江流域位于青藏高原的中南部,流域所处环境海拔高、地形复杂且气候条件多样化,总共横跨 4 个气候带^[15]。流域面积约为 24.048 万 km²,在国内位居第四,年平均流量约为 4423 m³/s,年径流量为 1395 亿 m³/s,水能资

源十分丰富,其理论蕴藏量为 1.13 亿 kW,在我国仅次于长江,是水资源与水能资源的重要战略储备。

雅鲁藏布江中游加查到米林段两岸主要以变质岩为主,是典型的基岩峡谷,河槽断面随时间变化程度小,抗侵蚀能力强,是进行古洪水水文学研究的理想环境。结合前期野外考察发现的砾石洲/滩,本研究将雅鲁藏布江中游加查到米林段设为研究区域(图 1)。

2 研究原理与方法

2.1 HEC-RAS 模型

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) 是美国陆军工程兵团水文工程中心研发的一款软件,主要用于河流水资源领域的研究^[16]。其研究领域涵盖水文、河道水力、泥沙输移、水文信息统计、灾害预防与规划等方面^[17]。HEC-RAS 水力模型主要用于对河流进行一维恒定流和非恒定流模拟,也可进行河网的水力计算。在洪水淹没模拟过程中可以确定泛洪平原的范围,为洪水防治提供必要的参考依据。HEC-Georas 是由水文工程中心(HEC)和环境系统研究所(ESRI)共同研发的处理模块^[18],HEC-Georas 可以嵌套在 ArcGIS 平台中使用,主要用于处理地理空间数据^[19]。

2.2 研究原理

HEC-RAS 模型已经广泛的应用于国内外古洪水水文学研究领域,其计算原理是一维恒定总流能量方程,计算公式为:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

$$h_e = L \overline{S_f} + c \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

式中, Z_1 、 Z_2 为断面 1(上游断面)和断面 2(下游断面)的河道底部高程(m); Y_1 、 Y_2 为断面 1 和断面 2 的水深(m); V_1 、 V_2 为断面 1 和断面 2 的平均流速(m/s²); α_1 、 α_2 为断面 1 和断面 2 的动能修正系数; L 为断面 1 和断面 2 之间的平均距离(m); g 为重力加速度(m/s²); h_e 为水头损失(m); c 为损失系数,包括收缩损失和扩张损失; $\overline{S_f}$ 为断面 1 和断面 2 间沿程水头损失坡度。

根据设置的曼宁糙率值来区分河流的主河槽(Channel)与河漫滩(Gravel bars),并利用曼宁公式

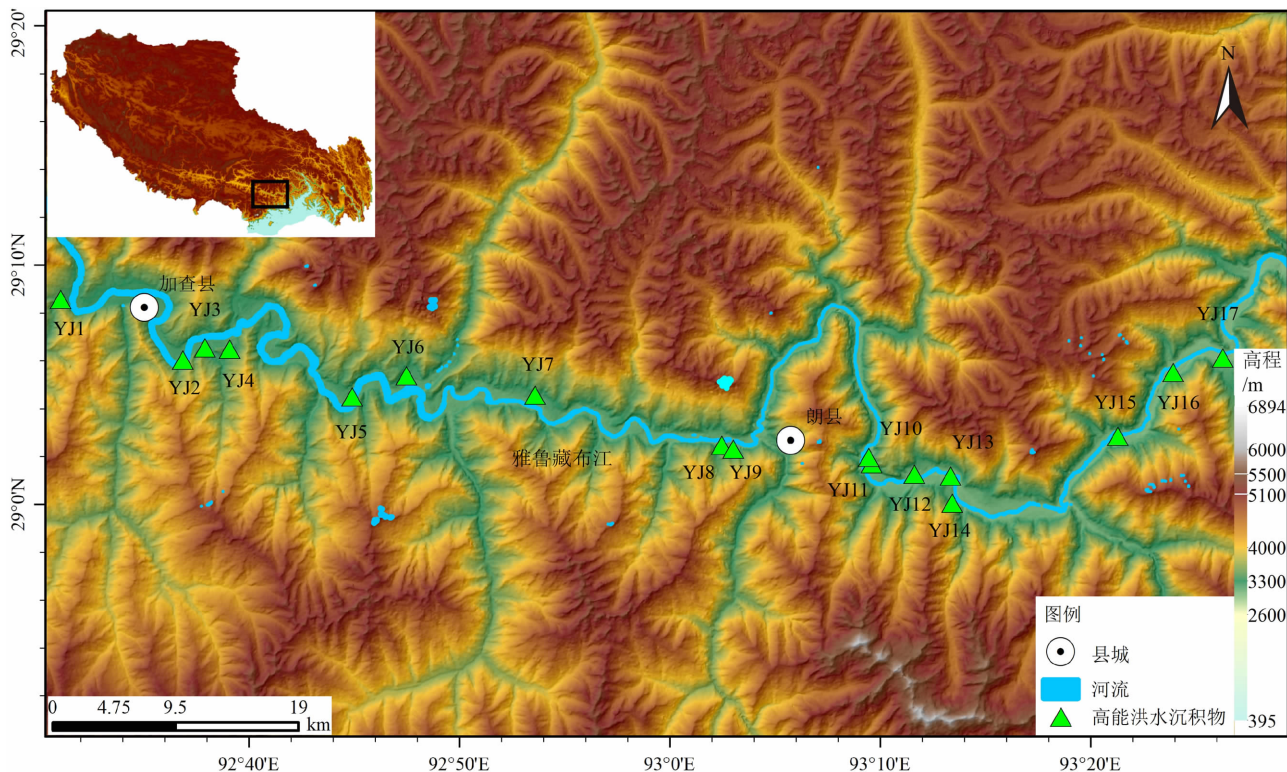


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Location of the study area

来计算各个分区的流量,计算公式为:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, Q 为洪峰流量(m^3/s); n 为河道曼宁糙率系数; A 为过流断面面积(m^2); R 为水力半径(m); S 为水面比降。

2.3 研究方法

本文采用“顶面高程法”来恢复古高能溃决洪水的洪峰水位^[5, 20-21], 并且利用 HEC-Georas 耦合 HEC-RAS 模型中的一维恒定流来重建研究河段的古高能溃决洪水事件的洪峰流量。该方法已经成功的运用到全球多个地方的古洪水重建中^[14, 22-23], 具体的操作方法如下:

(1) 使用 ArcGIS 内嵌的 HEC-Georas 模块对 DEM 数据进行计算前期的预处理, 创建河道中心线 (River)、河岸线 (Bank)、水流路径线 (Flowpaths) 以及横断面 (XSCutlines) 图层, 并为图层命名, 包括河流名称, 河流长度和高程等。

(2) 使用 HEC-RAS 对 HEC-Georas 处理后的模型数据进行下一步的编辑。主要对河网的几何数据 (Geometric Data) 的编辑, 例如河流走向、河道断面、

曼宁系数等。

(3) 利用假设起始流量给模型赋予上游边界条件, 根据野外实地考察所得的沉积物高程给模型赋予下游边界条件。

(4) 进行一维恒定流模拟, 得出研究河段各断面的洪水流量值及洪峰水位。将模拟结果与研究河段古高能洪水沉积物资料进行对比。

该模拟实现的技术路线图如图 2 所示。

3 高能洪水模拟

3.1 古洪水河槽横断面的确定

在古洪水的水文学计算中, 稳定的河槽断面是进行模拟计算的前提, 也是计算结果准确性的保障^[24-25]。因为基岩峡谷具有很强的抗侵蚀能力, 所以在计算古洪水洪峰流量时通常选择基岩峡谷作为研究河段, 这样可以得到比较稳定的河槽断面, 从而提高洪峰流量推算的准确性^[26]。根据 HEC-RAS 模型的要求, 在雅鲁藏布江中游加查到米林段 150 km 左右的河道上均匀选择了 237 个过水断面 (图 3), 且在相邻断面之间隔 200 m 内插一个过水断面, 同

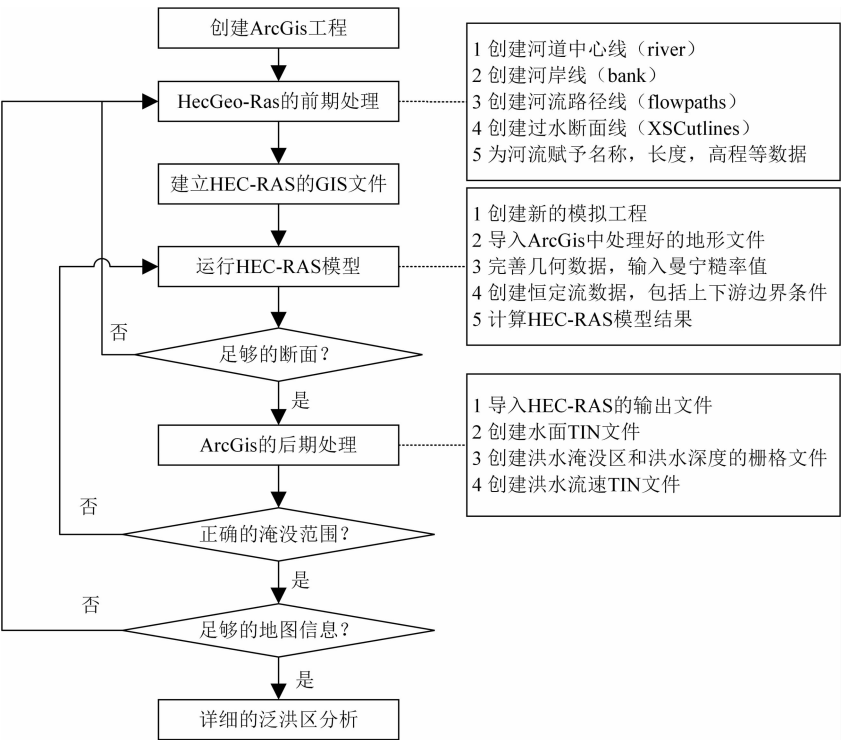


图 2 模拟技术路线图

Fig.2 Simulation technology roadmap

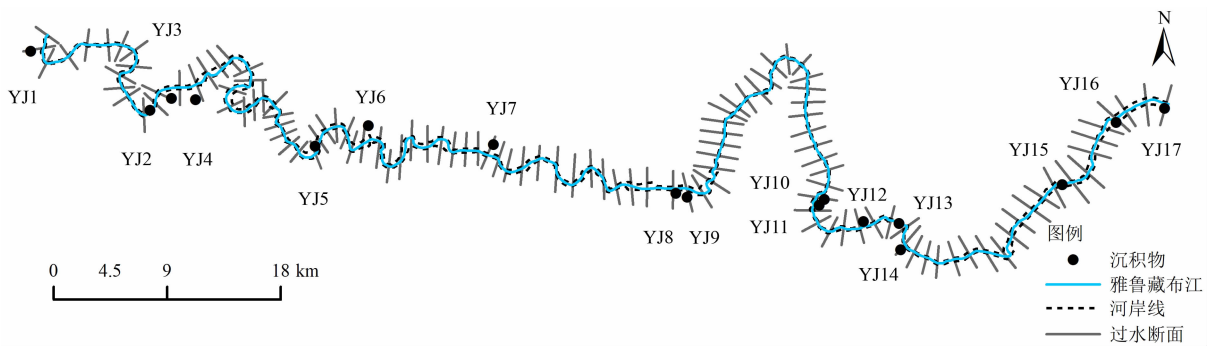


图 3 HEC-RAS 中雅鲁藏布江中游河道断面分布

Fig.3 Cross - section distribution in HEC-RAS

时保证内插断面与河流流向垂直,进而得到总过水断面 950 个,满足模型要求。

3.2 洪峰水位的确定

对砾石洲/滩样品进行光释光测年,结果显示沉积物年代分布处为 0.9 ~ 57 ka,普遍偏老,大多为晚更新世时期的沉积物。所以认定野外发现的砾石洲/滩为古洪水水位标志物。

YJ1 是位于加查县杂莫乡的涡流砂坝,地处雅鲁藏布江大峡谷出口大转弯处(图 4)。砂坝坝顶海拔高度为 3334.19 m,拔河高度为 113.47 m。在古高能洪水发生时,洪水水流与两条支流发生对冲,形

成回水环境,从而使得高含砂水流流速降低,在此处发生沉积。

YJ4 是位于江塘村的坠型砂坝,处在河道右岸弯道内部基岩丘背风侧(图 5a)。由于基岩高地的阻挡,大量洪水推移质在基岩丘的背后发生沉积,在基岩丘的尾部形成坠型砂坝(图 5b)。坠型砂坝坝顶海拔高度为 3316.94 m,拔河高度为 139.54 m。

YJ5 是位于加查县龙村的点砂坝,处在雅鲁藏布江左岸河流凸岸阶地之上(图 5c)。砂坝坝顶最高海拔为 3364.97 m,拔河高度 187.57 m,坝体顺河道延伸长 3 km,面积达 2.7 km²。通过野外的实地



图 4 杂莫沉积砂坝形态特征

Fig. 4 Morphological character of the bars in the Zamo villages

考察,精确测量古高能洪水沉积物的最高点高程,并将其作为对应古高能洪水的水位标志点,即采用“顶面高程法”确定洪峰水位。

3.3 HEC-RAS 模型水力学参数的确定

3.3.1 曼宁系数

河道糙率系数也叫做曼宁系数,是河床、河岸以及河漫滩等外部环境的不规则程度对水流阻力大小

的一个无量纲参数^[27]。水流的状态和河道的粗糙度都能对水流演进造成影响。HEC-RAS 模型要求对河道和两侧河漫滩分别设置一个糙率系数,相比其他模型采用的综合糙率值更加科学严谨。综合考虑研究河段的植被覆盖类型、砾石大小与分布和遥感影像等情况,参照我国水利水电工程设计中天然河道糙率的取值标准^[27],最终确定研究河段主水槽 (Channel) 的糙率系数 n 为 0.035,河流两岸河漫滩 (Gravel bars) 糙率系数 n 为 0.05。

3.3.2 收缩系数和扩张系数

收缩系数 (Contraction Coefficient) 和扩张系数 (Expansion Coefficient) 通常被用来衡量河道断面由于收缩或扩张所造成能量损失的程 度。HEC-RAS 的使用手册中指出理想状态时水流的沿程损失为 0,即没有能量损失,但现实中不可能出现此情况;由于研究区域的河槽变化均匀,没有出现急剧扩张或收缩的情况,根据 HEC-RAS 使用手册和野外实地考察情况,本次模拟的收缩系数取为 0.1,扩张系数

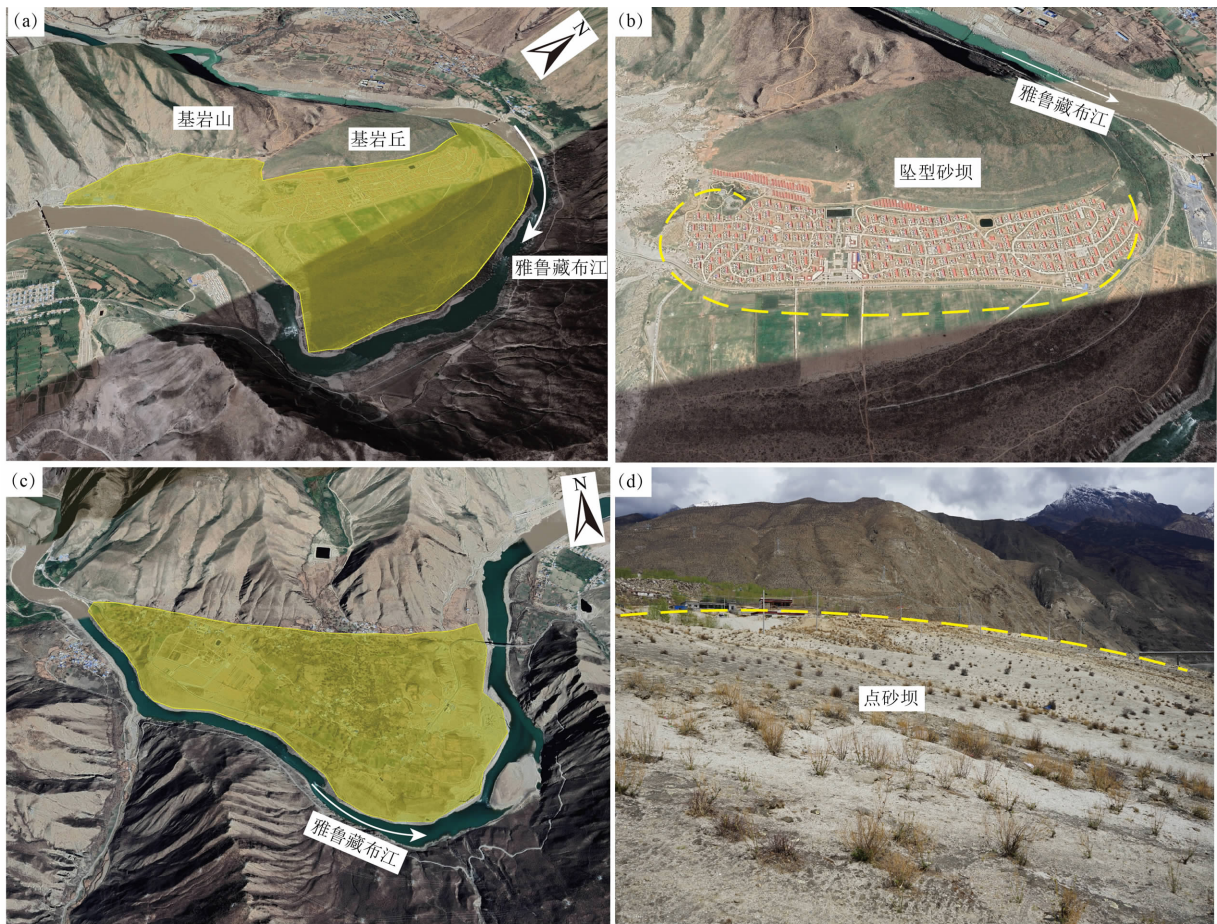


图 5 江塘村—龙村沉积砂坝形态特征

Fig. 5 Morphological character of the bars in the Jiangtang and Long villages

取为 0.3^[28]。

3.3.3 水流流态

水流按恒定流进行模拟计算。

3.3.4 边界条件

在运用恒定流模块计算古高能洪水水面线时,上游边界条件为重建古高能洪水的洪峰流量,下游边界条件为能量坡度,因为我们将洪水当做恒定流进行模拟,所以此时可以用水面比降代替能量坡度^[29]。

水面比降的定义为河道中沿水流方向上两个断面之间的高程差比上两个断面之间的距离,是与水流速度密切相关的流域特征值之一。通过野外实地调查并结合 1:10 000 地形图进行校核,得到符合研究河段实际情况的水面比降为 0.1%。

3.4 计算结果

通过 HEC-RAS 软件对调整后的模型进行模拟。在一维恒定流的情况下使用不同流量值进行试算,将计算产生的水面线与古高能洪水沉积物最高点指示的洪峰水位进行对比。最后得到雅江中游古高能洪水洪峰水位为 3407.09 ~ 3373.39 m,洪峰流量为 $0.2 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图 6 为雅鲁藏布江中游河段古高能溃决洪水的纵剖面水位线图,从图中可以看出经过 HEC-RAS 模型模拟出的纵剖面水位线没有偏高或偏低的点据。经对比发现 17 个砾石洲/滩的软件模拟水位与野外调查所发现的沉积物标志水位吻合程度较高,二者误差均小于

0.1%,符合实际情况。表明恢复的洪峰水位是合理、可靠的。图 7 为河槽过水断面示意图,其过水断面与河流中心线垂直,与实际情况较为符合。

3.5 糙率系数敏感性分析

在使用水力学模型进行古洪水水文学计算时,曼宁糙率系数 n 的取值可能对洪峰水位及流量的计算结果产生很大的影响^[28]。所以在进行曼宁糙率值选取时,要结合实际情况进行合理的取值,来减小主观因素对于计算结果的影响。为检验曼宁系数选取对于计算结果的影响,本次模拟中还对曼宁系数进行了敏感性分析。在原有模型基础上,选择洪峰流量为 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的流量状况,保持其他的水文参数不变,给曼宁糙率系数设置一定的变幅 ($\pm 35\%$),再运行 HEC-RAS 模型。在研究河段中从上游到下游均匀选择三个断面,对比这三个断面在不同曼宁糙率系数下的洪峰水位,结果如表 1 所示。

从表中可以看出,当曼宁糙率系数变幅在 $\pm 35\%$ 时,洪峰水位的变化幅度在 $-0.36\% \sim 0.17\%$ 。所以利用 HEC-RAS 模型进行古高能洪水规模的重建可以减小曼宁糙率值对于计算结果的影响,从而使计算结果的准确度和可信度更高。

3.6 古高能洪水淹没可视化

选取洪峰流量为 $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 这两种情况进行淹没区的可视化处理。通过 Arcgis 将两种洪峰流量的计算结果进行图形化输

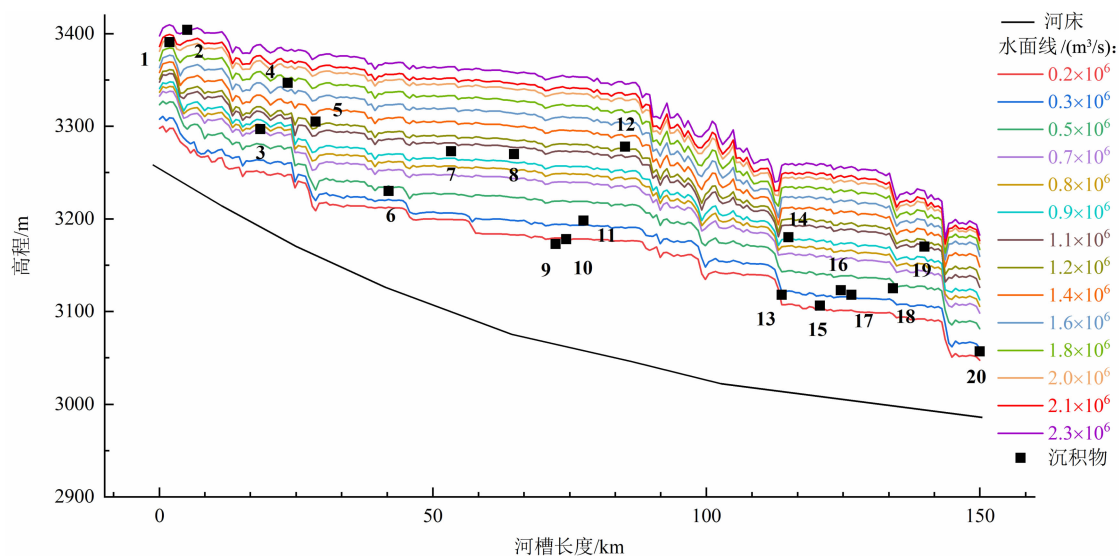


图 6 雅江中游河段纵剖面水位线

Fig. 6 Longitudinal profile water line

表 1 雅江中游古高能洪水洪峰水位对曼宁系数的
敏感性测试结果

Tab. 1 Sensitivity test results of ancient High-energy flood
peak water level to Manning's coefficient

断面	洪峰水位/m			变幅/%	
	$n \times 1.25$	$n \times 1$	$n \times 0.75$	$n \times 1.35$	$n \times 0.65$
1	3383.15	3370.84	3364.80	-0.36	0.17
2	3340.94	3333.03	3327.29	-0.24	0.17
3	3247.42	3237.85	3233.32	-0.29	0.14

出,两种洪峰流量情况分别对应图 8a 和图 8b。从淹没范围图中可以看出,在最小流量情况下,只有少数沉积物被洪水淹没,在最大流量情况下,所有沉积物都被洪水完全淹没。这也印证了雅江中游古高能溃决洪水的流量范围是从 $0.2 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟最大淹没水深为 366 m。整个研究河段中洪水

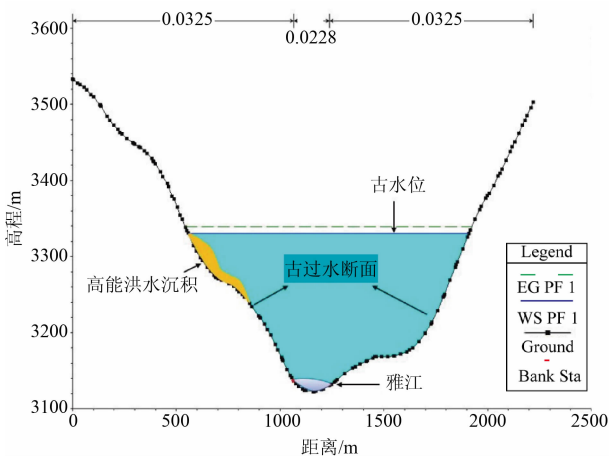


图 7 雅江中游河槽断面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the river channel section

淹没水深最大处位于朗县附近河段,河流中心处淹没水深基本大于 300 m,因为河流流向在此处发生了近乎 90° 的转变,导致水流速度变慢,淹没深度

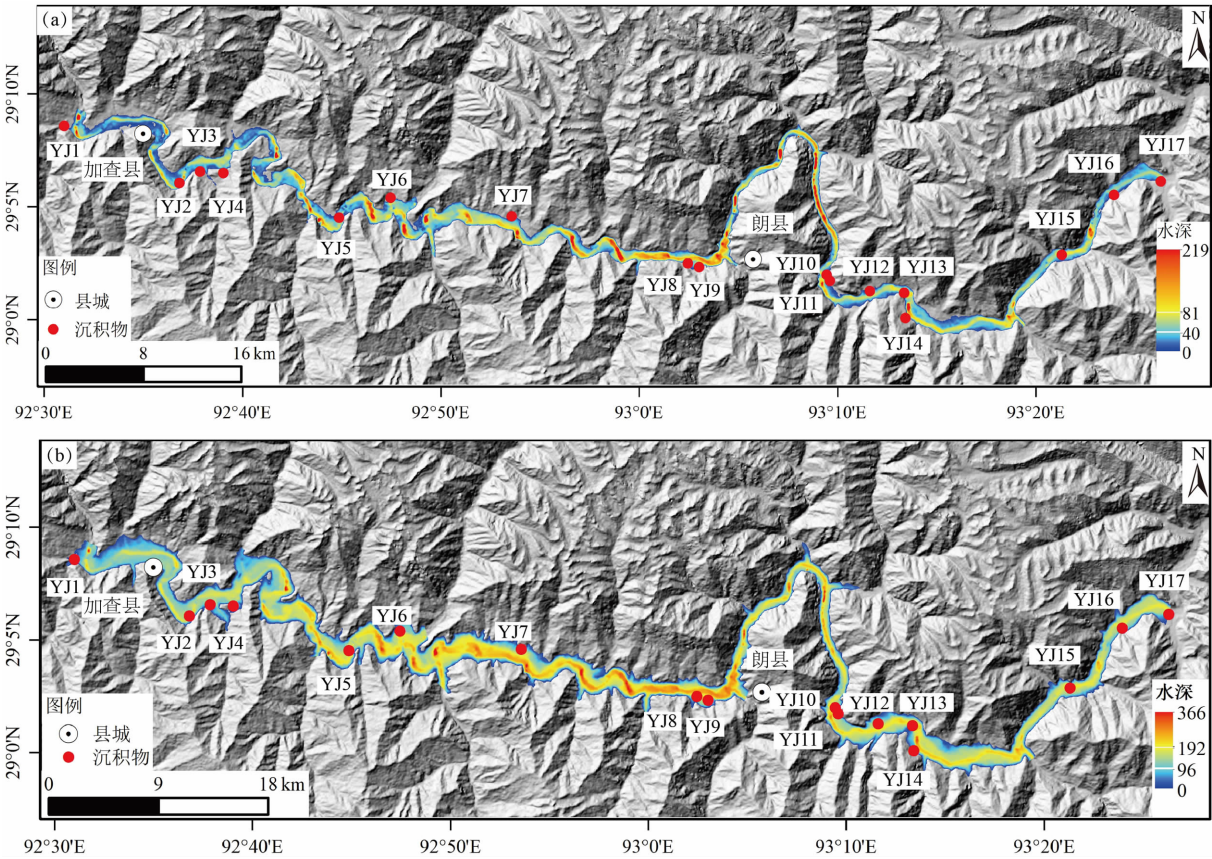


图 8 古高能洪水淹没范围图:

(a) 洪峰流量为 $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的淹没范围; (b) 洪峰流量为 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的淹没范围

Fig. 8 Distribution of the highest flow depth of ancient High-energy floods:

(a) Distribution of the highest flow depth when the peak flow rate is $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$;

(b) Distribution of the highest flow depth when the peak flow rate is $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$

增加。

在对应的洪峰流量的情况下我们做出了流速的分布图(如图9a,图9b),从图9b中可以看出模拟的最大流速达43 m/s。与淹没水深分布相反,最大流速主要分布在峡谷河段并且是位于峡谷河段的凹岸,所以在峡谷局部河段容易产生临界或超临界流,峡谷口容易产生跃水和跌水现象。流速在朗县峡谷入口处主洪道流速较高,边缘流速较低,洪水淹没范围较大,这可能跟河谷突然变窄有关。

4 讨论

古高能洪水研究的重要任务是精准重建洪峰水位和洪峰流量。影响恢复结果准确度的因素可能包括研究河段的河槽稳定性、古洪水水位指示标志的类型和形态、重建方法的选用及相关参数的确

定等^[30]。

河槽的稳定性是进行古高能洪水规模重建的前提,也是对古高能洪水规模重建结果准确度的保证。大量的古洪水水文学研究表明,河槽稳定性对重建洪峰流量产生的影响远大于其他因素对重建洪峰流量产生的影响^[31]。如何恢复古高能洪水发生时的河道断面确实是一个非常困难的问题。目前国内外学者在进行古高能洪水重建时都是用现代的基岩河道断面来替代古洪水发生时的河道断面,如使用2017年的地形数据重建了晚更新世阿尔泰溃决洪水^[32];采用现代地形重建 Moses Coulee 峡谷古洪水^[33];使用黄河中游晋陕峡谷段现代河道断面替代古断面重建全新世古洪水^[23]。这样做主要有以下几个原因:首先基岩河段有利于洪水沉积物的保存;其次基岩河床冲淤变化很小,甚至没有;最重要的一点是洪水期水位变化显著,基岩河段对于确定古高

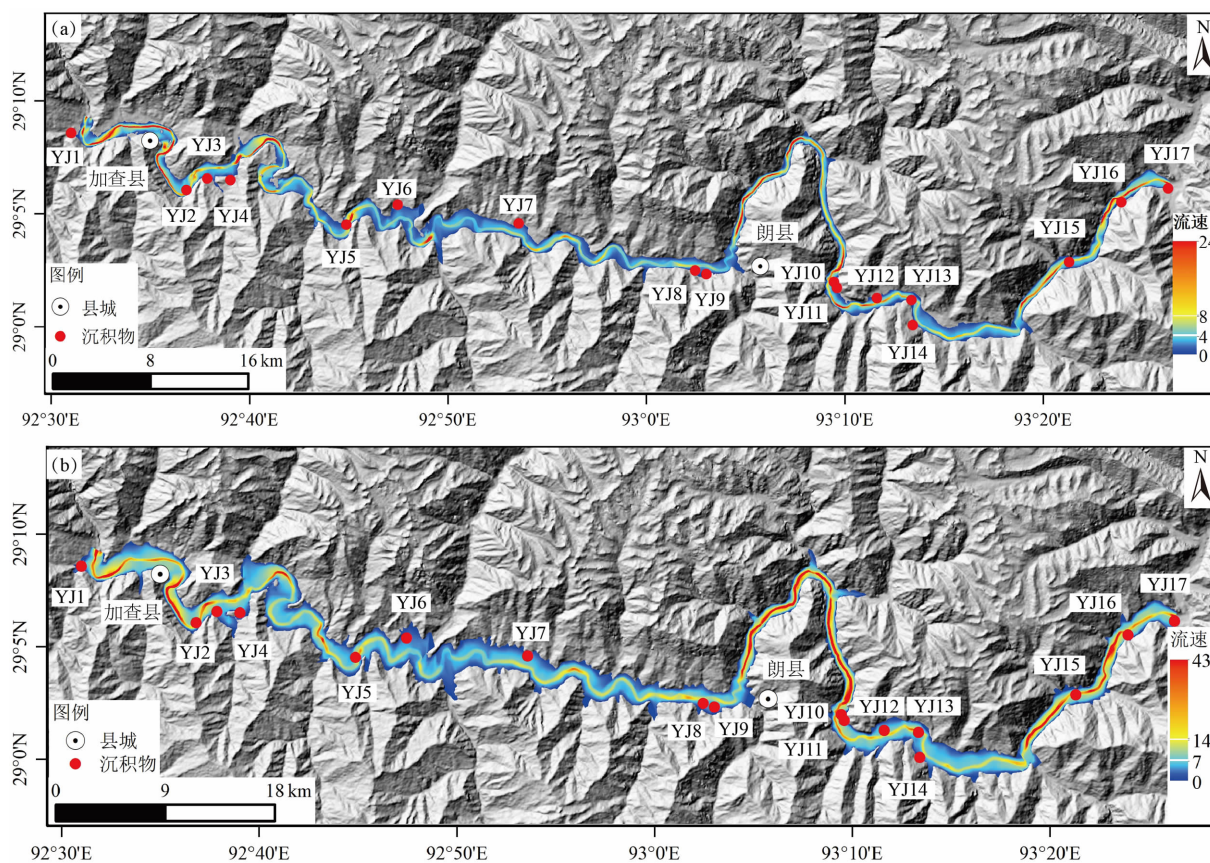


图9 古高能洪水流速分布图:

(a) 洪峰流量为 $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的流速分布; (b) 洪峰流量为 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的流速分布

Fig. 9 Distribution of the Flow velocity distribution of ancient High-energy floods:

(a) Flow velocity distribution when the peak flow rate is $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$;

(b) Flow velocity distribution when the peak flow rate is $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$

能洪水水文参数具有积极的作用。所以选择基岩峡谷作为研究河段能够提高重建结果的精确性。以 YJ5 号点砂坝为例,砂坝所在位置河流的左岸存在着河流阶地,河流右岸为基岩山,基岩河道的冲淤变化很小,河道断面受时间影响发生改变的幅度也较小。在洪水爆发时,洪水直接淹没左侧河流阶地,并在阶地上形成砂坝,如此巨大的流量和流速会对河道造成侵蚀和下切,这会使得我们对河道横断面的面积计算偏大,从而导致洪峰流量的计算值偏大,水面线也会偏大。但是这些砾石洲/滩相对现代河道水面的拔河高度很大,在如此大的流量情况下,因为河道下切而导致对洪峰流量的高估可以忽略。而且在洪水发生期间,砾石洲/滩可能会被侵蚀或因洪水演进导致其内部结构发生变化,洪水事件后人类活动也会导致沉积物的保存遭到破坏,最终导致其高度下降,从而造成洪峰流量计算值偏小。所以基岩河道断面发生的变化对重建结果的影响是很小的。

在洪水行进的过程中会对河道产生塑造作用,这些塑造作用在河道不同位置的造床结果是不相同的。但是野外实地考察发现的砾石洲/滩的最高点海拔高度比现代河面高出约 100 m(图 4、图 5),洪峰重建流量最高也达到了 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在如此大数量级的洪峰流量情况下,河床因水流塑造作用产生的变化对于重建结果的影响是很小的。所以本次模拟没有考虑这一点对重建的影响;本次模拟选择“顶面高程法”来重建洪峰水位,这是古洪水重建中最早采用的一种方法。有学者认为重建出来的洪峰流量可能会偏小,因为直接将顶面高程作为洪峰水位并没有考虑沉积物上的沉积水深,恢复出来的洪峰水位也会低于真实水位,重建结果必然偏低。这种方法对于洪峰水位恢复的误差主要是来源于沉积水深的忽略,对于这种半定量的估算还需要进行进一步的完善,来提高重建精度;目前只是对雅鲁藏布江中游古高能洪水的规模进行一个初步重建,后续会对雅鲁藏布江中游进行更详细的野外考察,采集样品进行沉积学指标分析,结合沉积物和光释光(OSL)测年对雅鲁藏布江中游古高能洪水进行一个更精确的重建。

但研究河段还是存在一些不规则变化,如河道的突然收缩或扩张、河道坡度的快速变化等,这些仍会给该河段内的水力学研究带来一些不确定

性^[32, 34-35]。从模拟结果可以看出水深较大的区域多都集中在河道的凹岸下段,流速较高的区域多分布在峡口附近,对应水深较浅,这是导致跌水现象出现的原因之一。从不同流量状况下的河道水面线可以看出研究河段中多处出现跌水现象,且都发生在河道宽度突然变宽的河段,表明跌水现象与高山峡谷地区的河谷宽度的变化相关,这也是高山峡谷地区大规模溃决洪水的特有水文特征。YJ3 号和 YJ4 号沉积物地理位置相邻,但是二者对应的峰值流量分别为 $0.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,重建流量上存在的巨大差异可能是由于水力模拟的局限性、水流水力学的复杂性或河道几何形态的多变性引起的^[36-37]。经对比发现两处沉积物的拔河高度拔河高度相差 48 m,结合实地情况可以推断 YJ3 号沉积物是在保存上受到了一定程度的破坏。因为 YJ3 号沉积物附近有农田和支流,这些情况都会导致 YJ3 号沉积物在保存过程中遭到破坏,从而出现顶面高程降低的情况。水面线在 YJ9 号沉积物与 YJ10 号沉积物之间出现了剧烈的波动,这与河道的弯曲程度有一定的关系。研究河段流向在 YJ9 号沉积物与 YJ10 号沉积物之间发生了巨大的变化,出现了一个急剧弯曲的河段。这会导致水面线在这一河段出现频繁的波动,并且随着支流的汇入,洪水水位会出现急剧的下降,这就使得该河段的水面线出现了明显的锯齿状^[38]。YJ10 号和 YJ11 号沉积物为一巨型沙坝,从图 6 可以看出各个峰值流量情况下的水面线在 YJ10 号和 YJ11 号沉积物之前都出现了一个明显的跌水阶段,可能是由于此处河道的突然扩张导致水位急剧下降造成的^[35]。一些流速明显降低的位置,如支流的汇入口、河道扩张河段或河道两侧障碍物的背面,是细粒沉积物迅速沉积的理想地点,所以可以保存大量的洪水沉积证据^[38]。

此外,HEC-RAS 模型是基于曼宁公式来重建古高能洪水的流量和水位,曼宁系数在其中有着很重要的作用。由于很难确定古洪水爆发时环境的曼宁系数,并且曼宁系数在取值的过程中受主观因素的影响很大,并有可能因此降低计算结果的精度,所以完善曼宁系数的选取方法对于提高流量计算精度十分重要。Chow^[39]提出了曼宁系数的确定标准并提供了相应河道的照片,我国也有大量研究对曼宁系数的计算^[6]和取值进行了深入分析^[40]。但是,必须

承认在对曼宁系数进行取值时误差仍然无法完全避免。通过对 HEC-RAS 模型中的曼宁系数进行了敏感性测试,发现使用 HEC-RAS 模型可以有效的减少曼宁系数选取误差对于流量计算影响,提高计算结果的精确度。但是曼宁系数对于模型精确度来说并不是一个最大的影响因素,例如河道过水断面的稳定性就比曼宁系数的准确性更加重要^[31]。对于河道形态变化复杂、河槽稳定性较低的区域此方法的适用性会有所降低,还有待进一步的研究。

5 结论

通过对雅鲁藏布江中游加查到米林段的野外实地考察,在河道两岸地层剖面中发现了 17 个代表古高能洪水的砾石洲/滩。根据野外实地考察测量所得的地形数据,结合数字地形高程数据建立雅江中游加查到米林河段的河道模型,使用“顶面高程法”恢复古高能洪水的洪峰水位,并合理的选择各个水文参数。利用 HEC-RAS 模型进行古高能洪水的重建,结论如下:

(1) 17 个砾石洲/滩的模拟水位与野外调查所得标志水位能较好吻合,与实测结果相比误差均小于 0.1%。

(2) 得到雅江中游古高能洪水洪峰水位为 3407.09 ~ 3373.39 m,洪峰流量为 $0.2 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 当曼宁糙率系数变化幅度在 $\pm 25\%$ 以内,最后的误差值 $-0.36\% \sim 0.17\%$,说明在一定的范围内曼宁糙率变化对于 HEC-RAS 模型模拟结果无明显的影响。

本研究结果可以为揭示高能洪水在高山峡谷区的特征及其地貌响应提供参考依据。

参考文献 (References)

- [1] O'CONNOR J E, CLAGUE J J, WALDER J S, et al. 9. 25 Outburst floods [J]. *Treatise on Geomorphology*, 2013, **9**: 475 - 510. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00251-7
- [2] CARLING P A, BURR D M, JOHNSEN T F. A review of open-channel megaflood depositional landforms on Earth and Mars [J]. *Megaflooding on Earth and Mars*, 2009 (3): 33 - 49. DOI: 10.1017/CBO9780511635632.003
- [3] BAKER V R, CARLING P A. Global Late Quaternary megafloods [J]. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2020, **9**: 511 - 527. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12459-5
- [4] CENDERELLI D A. Floods from natural and artificial dam failures [J]. *Inland Flood Hazards Human Riparian and Aquatic Communities*, 2000: 73 - 103. DOI: 10.1017/CBO9780511529412.004
- [5] 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**(15 - 17): 1737 - 1756. DOI: 10.1016/S0277-3791(03)00133-1
- [6] SHEFFER N A, RICO M, ENZEL Y, et al. The palaeoflood record of the Gardon River, France: A comparison with the extreme 2002 flood event [J]. *Geomorphology*, 2008, **98**(1 - 2): 71 - 83. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.02.034
- [7] BUTT M J, UMAR M, QAMAR R. Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in northern Pakistan [J]. *Natural Hazards*, 2013, **65**(1): 241 - 254. DOI: 10.1007/s11069-012-0361-8
- [8] BAKER V R, BENITO G, RUDOLPH A N. Paleohydrology of Late Pleistocene superflooding, Altay Mountains, Siberia [J]. *Science*, 1993, **259**(5093): 348 - 350. DOI: 10.1126/science.259.5093.348
- [9] ALHO P, RUSSELL A J, CARRIVICK J L, et al. Reconstruction of the largest Holocene Jökulhlaup within Jokulsá á Fjöllum, NE Iceland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, **24**: 2319 - 2334. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.11.021
- [10] 郭永强, 葛永刚, 陈晓清, 等. 高山峡谷区古洪水事件重建研究进展 [J]. *地学前缘*, 2021, **28**(2): 168 - 180. [GUO Yongqiang, GE Yonggang, CHEN Xiaoping, et al. Progress in the reconstruction of palaeoflood events in the mountain canyon valleys around the Tibetan Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(2): 168 - 180] DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.9.13
- [11] 魏海燕, 黄春长, 查小春, 等. 黄河中游晋陕峡谷段全新世晚期洪水滞流沉积研究 [J]. *地质论评*, 2010, **56**(5): 745 - 752. [WEI Haiyan, HUANG Chunzhang, ZHA Xiaochun, et al. Sedimentary studies of the Late Holocene food slackwater deposits in the Shanxi - Shaanxi Gorges, middle reach of the Yellow River [J]. *Geological Review*, 2010, **56**(5): 745 - 752]
- [12] 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 [J]. *地理科学进展*, 2010, **29**(7): 840 - 846. [ZHU Xiangfeng, HUANG Chunzhang, PANG Jiangli, et al. Palaeo - Hydrological studies of the Holocene extreme floods in the Tianshui Gorges of the Weihe River [J]. *Progress in Geography*, 2010, **29**(7): 840 - 846] DOI: 10.11820/dlkxjz.2010.07.010
- [13] 李晓刚, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河壶口段全新世古洪水事件及其水文学研究 [J]. *地理学报*, 2010, **65**(11): 1371 - 1380.

- [LI Xiaogang, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Hydrological studies of the Holocene palaeoflood in the Hukou Reach of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(11): 1371 – 1380]
- [14] 刘涛, 黄春长, 庞奖励, 等. 汉江上游郧县五峰段史前大洪水水文学恢复研究[J]. *地理学报*, 2013, **68**(11): 1568 – 1577. [LIU Tao, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Hydrological reconstructions of the pre-historical great floods in the Wufeng Reach of Yunxian county in the upper Hanjiang River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(11): 1568 – 1577] DOI: 10.11821/dlxb201311012
- [15] CUO Lan, LI Ning, LIU Zhe, et al. Warming and human activities induced changes in the Yarlung Tsangpo basin of the Tibetan plateau and their influences on streamflow [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, **25**: 100625. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100625
- [16] MANDAL A K, LI X, SHRESTHA R. Influence of water level rise on the bank of reservoir on slope stability: A case study of Dagangshan hydropower project [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, **37**(2): 1 – 12. DOI: 10.1007/s10706 – 019 – 00972 – 4
- [17] 方园皓, 张行南, 夏达忠. HEC-RAS 系列模型在洪水演进模拟中的应用研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2011, **33**(2): 12 – 15. [FANG Yuanhao, ZHANG Xingnan, XIA Dazhong. Research on application of series of HEC-RAS model to flood routing simulation [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2011, **33**(2): 12 – 15] DOI: 10.3969/j.issn.1672 – 948X.2011.02.004
- [18] KARMOUZ M, ZAHMATKESH Z, GOHARIAN E, et al. Coastal floodplain mapping and evaluation using GIS and HEC-Georas models [G]// HUBER W C. *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*. Colorado: American Society of Civil Engineers, 2014: 876 – 886. DOI: 10.1061/9780784413548.091
- [19] SHARMA P, MUJUMDAR S. Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-Georas: A case study of Ajwa Reservoir [J]. *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 2017, **5**(6): 108 – 113. DOI: 10.11648/j.wros.20160506.15
- [20] BAKER V R. Palaeoflood hydrology in a global context [J]. *Catena*, 2006, **66**(1 – 2): 161 – 168. DOI: 10.1016/j.catena.2005.11.016
- [21] KOCHER R C, BAKER V R. Paleoflood hydrology [J]. *Science*, 1982, **215**(4531): 353 – 361. DOI: 10.1126/science.215.4531.353
- [22] 吉琳, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游晏家棚段全新世古洪水研究[J]. *地球科学进展*, 2015, **30**(4): 487 – 494. [JI Lin, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Holocene palaeoflood studies of the Yanjiapeng Reach in the upper Hanjiang River, China [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, **30**(4): 487 – 494] DOI: 10.1167/j.issn.1001 – 8166.2015.04.0487
- [23] 黄春长, 李晓刚, 庞奖励, 等. 黄河永和关段全新世古洪水研究[J]. *地理学报*, 2012, **67**(11): 1493 – 1504. [HUANG Chunchang, LI Xiaogang, PANG Jiangli, et al. Palaeoflood sedimentological and hydrological studies on the Yongheguan Reach in the middle Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(11): 1493 – 1504]
- [24] YANG Dayuan, YU Ge, XIE Yuebo, et al. Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China [J]. *Geomorphology*, 2000, **33**(1): 73 – 88. DOI: 10.1016/S0169 – 555X(99)00111 – 7
- [25] HUANG Chunchang, JIA Yaofeng, PANG Jiangli, 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 [J]. *Geoderma*, 2006, **136**(3): 838 – 851. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.06.006
- [26] 詹道江, 谢悦波. 洪水计算的新进展——古洪水研究[J]. *水文*, 1997, **1**(1): 1 – 6. [ZHAN Daojiang, XIE Yuebo. New advance in flood calculation—paleoflood study [J]. *Journal of China Hydrology*, 1997, **1**(1): 1 – 6] DOI: 10.19797/j.cnki.1000 – 0852.1997.01.001
- [27] 武汉大学水利电力学院水力教研室. 水力计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1980: 44 – 45. [Department of Hydraulics, School of Water Resources and Electric Power, Wuhan University. *Hydraulic calculation manual* [M]. Beijing: China Water and Power Press, 1980: 44 – 45]
- [28] BRUNNER G W. HEC-RAS river analysis system (Hydraulic reference manual) [M]. Davis: Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers. 1995: 4 – 12.
- [29] 佟延辉, 赵同银, 李秋月. 比降—面积法应用问题探讨[J]. *黑龙江水利科技*, 2006, **34**(5): 28 – 28. [TONG Yanhui, ZHAO Tongyin, LI Qiuyue. Discussion on application of gradation-area method [J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2006, **34**(5): 28 – 28] DOI: 10.3969/j.issn.1007 – 7596.2006.05.014
- [30] 刘涛. 河流古洪水水文学重建的多种方法比较研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015: 59 – 62 [LIU Tao. Comparative study of hydrological reconstructions of paleoflood: Case studies of bedrock gorge reach in the middle Yellow River Basin and upper Hanjiang River Basin [D]. Xi'an: Shanxi Normal University, 2015: 59 – 62]
- [31] WEBB R H, JARRETT R D. One – dimensional estimation techniques for discharges of paleofloods and historical floods [G]//American Geophysical Union. *Ancient floods, modern hazards: Principles and applications of paleoflood hydrology water science and application volume 5*. Washington: American Geophysical Union. 2013: 111 – 125. DOI: 10.1029/

- WS005p0111
- [32] BOHORQUEZ P, JIMENEZ-RUIZ P J, CARLING P A. Revisiting the dynamics of catastrophic late Pleistocene glacial-lake drainage, Altai Mountains, central Asia [J]. *Earth – Science Reviews*, 2019, **197**: 102892. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102892
- [33] LARSEN I J, LAMB M P. Progressive incision of the channelled scablands by outburst floods [J]. *Nature*, 2016, **538** (7624): 229 – 232. DOI: 10.1038/nature19817
- [34] AGATOVA A R, NEPOP R K, CARLING P A, et al. Last ice-dammed lake in the Kuray basin, Russian Altai: New results from multidisciplinary research [J]. *Earth – Science Reviews*, 2020, **205**: 103183. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103183
- [35] GREENBAUM N, SCHICK A P, BAKER V R. The palaeoflood record of a hyperarid catchment, Nahal Zin, Negev Desert, Israel [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, **25** (9): 951 – 971.
- [36] DODET G, LECKLER F, SOUS D, et al. Wave runup over steep rocky cliffs [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, **123**(10): 3 – 15. DOI: 10.1029/2018JC013967
- [37] CARLING P A, BORHORQUEZ P, FAN X M. Hydraulic control on the development of megaflood runup deposits [J]. *Geomorphology*, 2020, **361**: 107203. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107203
- [38] BAKER V R. Paleoflood hydrology of extraordinary flood events [J]. *Journal of Hydrology*, 1987, **96**(1–4): 79 – 99. DOI: 10.1016/0022-1694(87)90145-4
- [39] TAKEUCHI R, CHIANG A H, KUOKAWA H, et al. Roughness characteristics of natural channels [J]. *Journal of Hydrology*, 1969, **7**(2): 354.
- [40] 杨克君, 曹叔尤, 刘兴年. 复式河槽综合糙率计算方法比较与分析[J]. *水利学报*, 2005, **36**(7): 780 – 786. [YANG Kejun, CAO Shuyou, LIU Xingnian. Analysis on methods for predicting composite roughness of river channel with compound cross section [J]. *Shuili Xuebao*, 2005, **36**(7): 780 – 786] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2005.07.003

Simulation of Ancient High-Energy Flood in the Middle Reaches of the Yarlung Zangbo River Based on HEC-RAS Model

JIANG Xiangang¹, LIU Weiming^{2,3*}, WEN Susong¹, WU Chaohua²

(School of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, CAS-HEC, Islamabad 45320, Pakistan)

Abstract: High-energy floods are the largest extreme floods on earth and highly relevant to global landform evolution and climate change. The efforts to reconstruct high-energy flood occurrences can improve our understanding of historic extreme flood events and help us further investigate the responses of alpine and valley landforms to the strikes of extreme floods. Unfortunately, the research on the reconstruction of high-energy flood occurrences remains limited. There were less applicability of high-energy flood models to high-altitude mountainous areas, and high-accuracy reconstruction results were not available. In this study, high-energy floods occurred in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, China were reconstructed for estimation of their scales. HEC-RAS model was introduced and HEC-Geos module in ArcGIS platform was used to rebuild the peak flow of ancient high-energy floods based on current 17 gravel islands and shoals located in some wide valleys between the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, which were believed to be relics or records of ancient High-energy floods events. Sensitivity tests were used to ensure the accuracy of reconstruction based on the Manning roughness coefficient with a variation of $\pm 35\%$. Results conclude: (1) The simulated water levels of the 17 gravel islands and shoals were consistent with the marked water levels obtained from field surveys. The discrepancies with measured results were all less than 0.1% . (2) The peak flow was between $0.2 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, and the

maximum submerged water depth was 366 m. (3) When Manning coefficient was in the range of $\pm 35\%$, the error range of the flood peak water level was between -0.36% and 0.17% , indicating that the model was less sensitive to the Manning roughness coefficient, indicated that the proposed method was appropriate to recover the peak flow of ancient high-energy floods in the middle reaches of the Brahmaputra. This research contributes to fully understanding the flood movement in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River and has important practical significance for revealing the characteristics of high-energy floods in the alpine and canyon areas and their geomorphological responses.

Key words: ancient high-energy flood; HEC-RAS model; the Yarlung Zangbo River

翠微峰丹霞地貌崖壁上的大型蜂窝状洞穴

(陈留勤 东华理工大学)

翠微峰国家森林公园位于江西省东南部,赣州市东北部,宁都县城西北郊 2.5 km 处,中心坐标为 $115^{\circ}58'47''\text{E}$ 、 $26^{\circ}30'47''\text{N}$,园区内丹霞地貌发育,具有“峰险、岩奇、水秀、洞幽”的特点,是南方湿润区的典型丹霞地貌。翠微峰古称金精山,因传道姑张丽英为金星之精,于此修炼而得名。翠微峰历来为文人学士筑庐隐居之地,自古以来多有文人隐士到此筑室结庐、讲学授课,尤以清代“易堂九子”名居江西“三山学派”之首而蜚声海内。园区除了常见的山峰、陡崖、穿洞、一线天等丹霞地貌景观外,在砾岩崖壁上还密集分布着形态各异的洞穴群,单个洞穴开口近圆形,小如锅盆,大似岩洞,奇秀天成,形似迷宫,呈蜂巢状,故名蜂窝状洞穴。园区北侧 430 县道两侧的蜂窝状洞穴最为典型。

详见本期《江西宁都翠微峰蜂窝状洞穴特征及成因》。