

无资料区小流域山洪灾害过程数值仿真研究

徐富刚^{1,2}, 曾佳鑫¹, 胡文龙¹, 钟千有¹, 许小华²

(1. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省水利科学研究所, 江西 南昌 330029)

摘要: 为揭示无资料区小流域山洪灾害爆发过程及致灾机理,以江西省樟树市芎溪河小流域为例,建立暴雨洪水情况下松散体运移数值模型,分析了暴雨发生过程及泥沙运移规律。结果表明,对河道而言,高地势、坡降变化处与汇流地区流速较大,对于坡面较缓、汇水面积大的区域,汇流点流速相对其他区域增长尤为显著;流域初期局部积水,短期内出现地表径流,汇集而成的水流冲刷出多条沟壑,泥沙多在下游出口处沉积;流域水深、流速与降雨量相关,降雨量越大,水深流速越大,冲刷情况越显著。研究成果对于该地区山洪预警具有积极意义。

关键词: 无资料区; 小流域; 暴雨山洪; 泥沙运移; 数值仿真

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)04-0092-04

1 概况

江西省樟树市地处赣中,鄱阳湖平原南缘,跨赣江中游两岸,境内以平原低丘为主。全市地势呈横置的马鞍形,中部为河谷冲积平原、辽阔低平、贯通南北。东西两翼隆起,分别向中倾仄。东部为低山高丘区,店下镇东南角的玉华山海拔为1 169.1 m,为樟树、新干、丰城三市(县)的分水岭,是全市地势最高点,自东南向西北次第降低;至大桥街道东北角溪源村,海拔仅19.0 m,为全市地势最低点^[1]。樟树市东部山区及其下游平原为山洪灾害频发区域,芎溪河流域发源于东部山区的店下芦岭村,流经店下镇、阁山镇和大桥街道办事处3个乡镇后流入鄱阳湖水系清丰河。水系较为复杂,呈扇形分布,其河道宽浅多弯,河床以粗砂、粘土为主。主河道发源于玉华山山脉,长度近40 km,比降为4.4‰,坡度较缓。经现场调查,上游地区地势狭窄,居民多在地势较高的地区修建房屋,山洪灾害影响较小。中游地区店下镇和阁山镇近些年修建了盐化基地等工业园区,大量土地被硬化,在洪水形成过程中易发生超渗产流。下游河道淤积较为严重,河道行洪能力下降,虽然下游平原地区地势开阔,但由于行洪不畅,下游村庄易受洪水漫滩淹没。从历史洪水场次调查

记录来看,2010年后下游地区村庄和农田受洪水淹没的场次有明显增加倾向,说明芎溪河小流域发生山洪灾害的可能性大。对此,本文以江西省樟树市芎溪河小流域(图1)为例,采用Flow 3D软件模拟暴雨条件下的产汇流过程,总结暴雨条件下小流域下游水文参数变化特征及泥沙运移规律,对暴雨山洪灾害预警及防灾减灾具有一定指导意义。



图1 项目研究区域水系图

Fig. 1 Project research area water system map

2 研究方法

2.1 仿真模型构建

(1)控制方程。选用 RNG κ - ϵ 紊流模型,包含连续性方程、动量方程、紊流动能 κ 方程和紊流动能耗散率 ϵ 方程。其中连续性方程为:

收稿日期: 2022-05-25, 修回日期: 2022-07-30

基金项目: 中国博士后基金项目(2019M652281); 江西省自然科学基金项目(20212BAB204057, 20202BAB204034)

作者简介: 徐富刚(1988-), 男, 博士、讲师, 研究方向为水利工程及管理, E-mail: 785315056@qq.com

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

紊流动能 κ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\sigma_\kappa (\mu + \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\text{其中 } \mu_t = \frac{\rho C_\mu \kappa^2}{\epsilon}; G_\kappa = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

紊流动能耗散率 ϵ 方程为:

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1}^* G_\kappa \epsilon / \kappa - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon^2 / \kappa \quad (6)$$

其中 $C_1^* = C_{\epsilon 1} - \eta(1 - \eta/\eta_0)/(1 + \beta\eta^3)$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{\kappa}{\epsilon}; E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中, u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的流速分量; A_x, A_y, A_z 分别为 x, y, z 方向上可流动的面积分数; t 为时间; V_F 为可流动的体积分; ρ 为流体密度; P 为作用在流体微元上的压力; G_x, G_y, G_z 分别为 x, y, z 方向上的重力加速度; f_x, f_y, f_z 分别为 x, y, z 方向上的粘滞力; u_i, u_j 均为速度分量; x_i, x_j 均为坐标分量; $\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon$ 分别为湍动能和耗散率对应的 Prandtl 数, 均取 1.39; μ 为紊流粘性系数; μ_t 为紊流黏性系数; G_κ 为紊流动能 κ 的产生项; $C_{\epsilon 1}^*$ 为经验常数; $C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \eta, \beta$ 均为参数, 分别取为 1.42, 1.68, 4.377, 0.012^[2-4]; η, E_{ij} 均为中间参数。

(2) VOF 自由液面处理方法。利用 TrueVOF 方法, 对无资料山区小流域产汇流过程的自由表面进行处理。

(3) 模型建立与网格划分。为模拟暴雨洪水情况下泥沙冲刷过程, 模型由 2 部分组成: ①以江西省樟树市芎溪河小流域 DEM 数据为基础, 建立山体 STL 模型, 该模型从上游至下游长 4 895

m、宽 3 888 m、高 1 333 m, 将其设置为固体 (solid), 以此作为不透水基岩; ②综合考虑当地地质条件, 采用表面覆盖一层 6 m 厚的多孔介质模型 (porous media) 用于模拟降雨及土壤下渗过程。孔隙率为 0.5, 阻力系数取 100, 单位面积流量 P_1 的计算式为:

$$P_1 = P_2 \times 10^{-3} / 3\ 600 \quad (7)$$

式中, P_2 为流域模拟降雨量, mm/h。

设置网格块数为 1, 网格总数为 5 000 000 个, 渲染结果见图 2。单位选择 CGS, 设置重力加速度为 9.80 m²/s, 方向竖直向下。为便于观测, 在模型中自上游至下游沿程设置 8 个监测点, 其中汇集区设置 3 个, 汇集区上游设置 3 个, 汇集点下游设置 2 个。

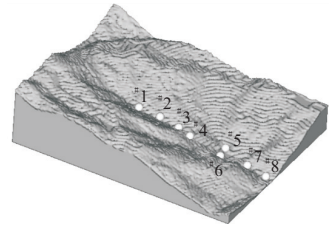


图 2 小流域山体模型及监测点

Fig. 2 Small basin mountain model and monitoring point

(4) 边界条件及初始条件设置。本模型选用自由出流边界 (O)、对称边界 (S)、固壁边界 (W) 与压力边界 (P); 上游和下游不设置初始流量和初始水位, 边界条件为自由出流 (O); 底部用固壁边界; 两侧采用对称边界; 顶部采用压力边界, 设置为一个标准大气压, 液体分数为 0; 计算总时间为 3 600 s, 初始时间步长和最小时间步长采用默认值; 采用 GMRES 隐式求解器计算, 使计算结果精度更高。

2.2 模型验证

(1) 物理模型构建。以依据重力相似准则构建的江西省樟树市芎溪河小流域地形为基础, 表层铺设 6 mm 厚松散体模拟小流域地形; 降雨模拟装置主要由钢架、雾化喷头搭建而成。除结构所需钢材外, 钢架顶部垂直河流方向均匀布置横向角钢, 每根横向角钢上均匀布置雾化喷头, 考虑到雾化喷头的有效喷雾直径为 0.3 m, 为确保无空隙, 横向角钢与喷头间距均采用 0.25 m。所有喷头连接到同一根主管, 该水管装有控制阀门与流量计以调节降雨量, 如图 3。模型几何比尺 (模型/原型) $\alpha_L = 1\ 000$, 流速比尺 $\alpha_u = 31.62$, 水深比尺 $\alpha_H = 1\ 000$ 。在地形断面出口处用流速仪监测流速变化。

(2) 数据测量与对比验证。如表 1 所示, 数值



图 3 物理模型搭建

Fig. 3 Physical model construction

表 1 流速对比

Tab. 1 Flow velocity comparison

时间 /min	数值模拟	物理试验	相对误差/%	时间 /min	数值模拟	物理试验	相对误差/%
8	0.26	0.30	-13.0	32	0.13	0.12	8.3
16	0.04	0.05	-20.0	40	0.25	0.24	4.2
24	0.14	0.12	16.0	48	1.35	1.40	-3.6

注:数值模拟、物理试验单位均为 m/s。

模拟与物理试验均模拟 100 mm/h 降雨条件,出口断面流速相对误差在允许范围内,说明三维数值模拟结果可反映小流域汇流的水力学特性,具有一定可靠性。

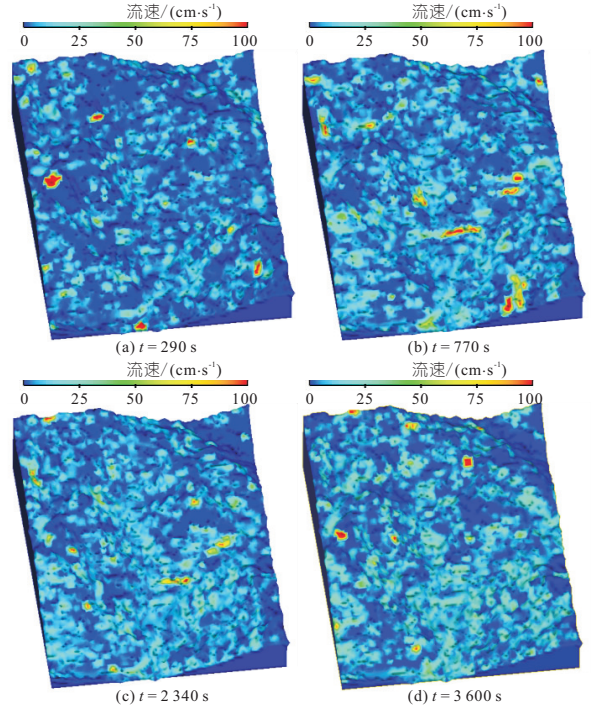


图 4 流速场变化

Fig. 4 Changes in the velocity field

3 仿真结果分析

(1)流速场分析。如图 4,大部分区域流速始终维持在 0.3 m/s 左右,一些地方流速却能达到 1 m/s 以上,这些流速大、持续时间长的区域冲刷情况严重,需着重注意。在汇集点上游干流河段中,前期上游地势高、坡降较陡处流速稳定在 0.5 m/s,坡面倾斜程度大,存在一定水土流失。下游水流流速减缓至 0.25 m/s,随着降雨时间增长,上游流速趋于稳定,基本不随时间增长而发生大的增大;左岸较缓坡面流速普遍较大,该坡面汇水区域大于右岸支流,大量水流汇入河道干流后,在相对平坦宽阔的下游流速减至 0.25 m/s 甚至更小。总体而言,全过程中流速较大处集中在汇流点处,集中在地势较高较陡处,多集中在局部凹陷区域。干流上游与左岸支流对河床冲刷能力较强,可能携带较多泥沙,右岸支流冲刷情况相对少。下游除几处汇流区域,流速均不超过 0.5 m/s。

图 5 为各监测点的流速分布情况。# 1、# 2、# 3 监测点均位于上游河段,整个汇流过程中大部

分时间段流速均低于 0.2 m/s。# 1 监测点在 8 min 左右流速达到 1.5 m/s,在 28 min 左右流速达到 0.58 m/s; # 2 监测点在 12 min 左右流速达到 0.60 m/s; # 3 监测点在 53 min 左右出现最大流速 0.40 m/s。这三个点处在流域汇流点以前的干流河段,河床下垫面坡降稳定,在不考虑基流的情况下,受水量限制导致整个过程平均流速不大,大部分时候均不超过 0.20 m/s,自上游至下游流速逐渐减小,且上游较下游更早出现流速最大值。

4、# 5、# 6 点位于中游水流汇集区,其中 # 4 点位于干流河道坡降由缓骤变为较陡处,可以发现该点大部分时间流速均低于 1 m/s,在 36 min 流速达 6 m/s,56 min 时流速最大达 5 m/s,此外在 29、42、46 min 时流速均达 2.5 m/s,整体流速明显高于前三个监测点; # 5 点为左岸边坡水流汇入河流点,该点流速在整个汇流时段的前 10 min 与后 20 min 持续较大,前 20 min 内流速先增大后减少,流速于 4 min 时达该时段最大值 6 m/s,后 20 min 内流速于 36、45、55 min 达该时段最大

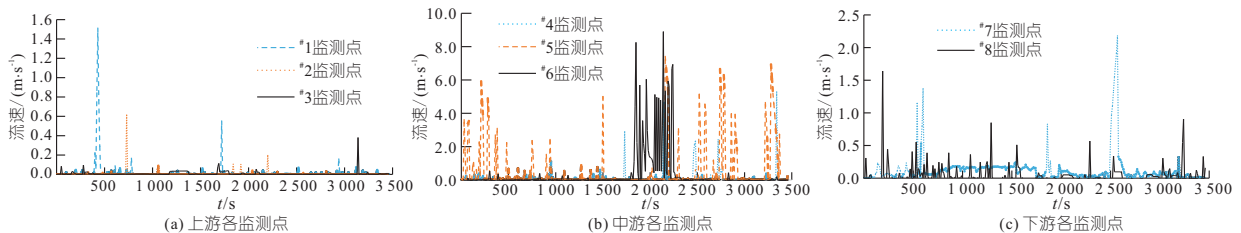


图 5 各监测点流速分布

Fig. 5 Velocity distribution of the monitoring points

流速 7 m/s; #6 监测点为右岸水流汇入河道干流点,其流速大部分时间内均稳定在 0.25 m/s 左右,在 30、40 min 时段内,流速达到 6 m/s。综上所述,水流汇集区域流速大,冲刷严重,水流携带大量泥沙,同时河道坡降陡增处流速一般在 1 m/s 左右,最大达到 5 m/s,冲刷情况较上游严重;左右岸水流汇入河道处流速持续达 5 m/s 甚至更高,冲刷情况极其严重。

#7、#8 监测点位于汇集点下游,流速相较于汇集点减小。#7 点大部分时间流速均稳定在 0.25 m/s 左右,43 min 时流速达到最大值 3.25 m/s; #8 点流速最大值为 2.5 m/s,趋于稳定。下游地形相对平坦开阔,过流能力好,水流不易汇聚,但由于流速骤减,上游冲刷带来的泥沙发生大量淤积。

(2)深度场分析。图 6 为不同时刻流域水深分布。如图 6 所示, $T=6$ min 时,水流汇入河谷,形成一条约 10 cm 深的较浅溪流,下游水流汇聚现象尚不明显; $T=15$ min 时,中下游区域水流成片汇集,汇集区域水深达到 50 cm,显著高于流域其他区域,河流覆盖范围较大,形成漫滩现象,干流水深开始稳定且此后水深增长缓慢;随着径流覆盖地表面积与水深逐渐增大,在 $t=25$ min 时水流已经成片汇集,河流在下游覆盖范围减小,流域汇流稳定,中下游河滩水流深度为 50 cm 左右; $T=60$ min 时,中下游河道水深无明显增长。整

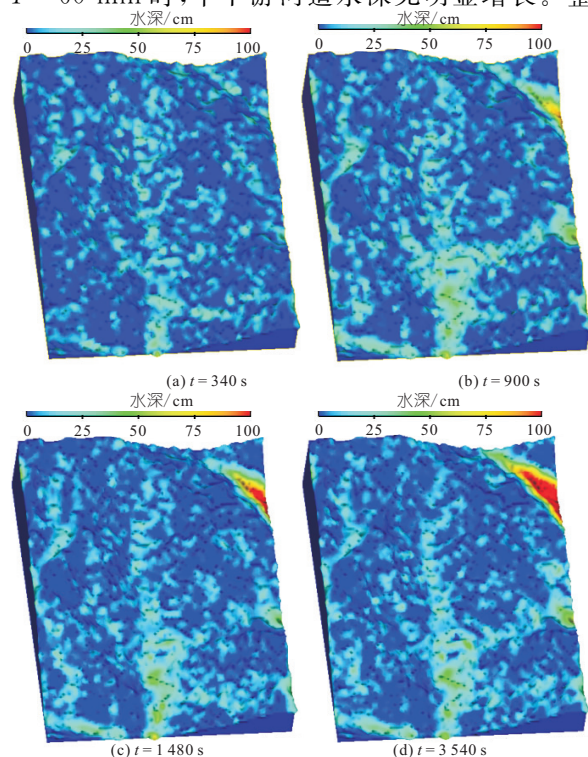


图 6 深度场变化

Fig. 6 The change for deep field

个过程中,上游局部凹陷区域水深增长极为显著,在 $t=25$ min 时水深已超过 1 m。干流河道中下游由于河床相对平坦开阔,水流分散开来,水深后期增长相对缓慢。

(3)降雨因素分析。在 800 mm/h 暴雨条件下三维数值模拟的基础上,调整参数设置,模拟 500、100 mm/h 降雨条件。图 7 为 100、500、800 mm/h 降雨量下汇流时段末 $t=60$ min 时的深度场。模拟降雨 1 h,800 mm/h 对应的工况中上游地势高处流速最大达 1.6 m/s,汇流点流速最大超过 5 m/s,水深最大达 0.75 m,其他局部凹陷处流速最大超过 6 m/s 并在该值附近稳定;500 mm/h 对应的工况上游地势高处流速最大达 1.2 m/s,汇流点流速最大超过 7 m/s,水深最大达 0.5 m,其他局部凹陷处流速最大超过 4 m/s;100 mm/h 对应的工况上游地势高处流速最大达 1 m/s,汇流点流速最大超过 5 m/s,水深最大达 0.3 m,其他局部凹陷处流速最大超过 3 m/s 并在该值附近持续一段时间。比较发现,降雨与径流存在一定相关关系,降雨越大,产流量越大,水深与流速也越大,冲刷情况也越显著^[5,6]。

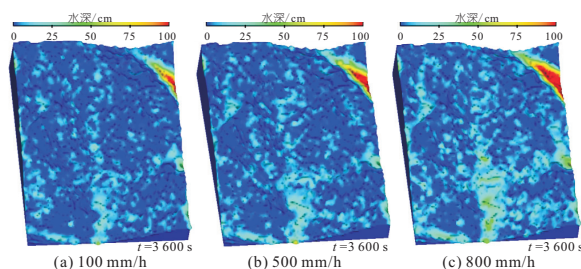


图 7 不同降雨量深度场变化

Fig. 7 Depth field changes under different rainfall

4 结论

a. 对河道而言,高地势、坡降变化处与汇流地区流速较大,对于坡面较缓、汇水面积大的区域,汇流点流速相对其他区域增长尤为显著。在坡降稳定、汇流较少的干流河道,水流流速随地势降低而递减,流速在 0~1.6 m/s 范围内变化;在河道中部坡降骤增区域出现流速增大区域,最大流速不超过 3 m/s;汇流区域流速显著增大,左岸缓坡汇水面积大,汇流点流速最大达 7 m/s 且持续较长时间。

b. 流域初期局部积水,短时间内出现肉眼可见的地表径流,汇集而成的水流冲刷出多条沟壑,将泥沙从坡面带往河道。由于汇集点下游河道平缓开阔,流速骤减,泥沙最终在下游出口处沉积,使得河床水位发生抬升,增加了漫滩风险。

c. 流域水深、流速与降雨量相关,降雨量越大,水深、流速越大,冲刷越显著。

参考文献:

[1] 李威. 江西省无资料地区暴雨山洪灾害识别与风险预警[D]. 南昌:南昌大学,2020.

[2] FUENTES-PÉREZ J F, QUARESMA A L, PINHEIRO A, et al. OpenFOAM vs FLOW-3D: A comparative study of vertical slot fishway modelling [J]. Ecological engineering: The journal of ecotechnology, 2022, 174: 106446-1-106446-7.

[3] 李火坤,曾智超,邓冰梅,等. 堤防决口封堵的水力学特性[J]. 水利水运工程学报,2017(3):8-15.

[4] 张为,陈和春,尤美婷,等. 基于 FLOW-3D 软件的块体水垫塘消能机理数值模拟[J]. 水电能源科学, 2015,33(4):103-106,84.

[5] 周末,覃光华,胡静,等. 西南山区不同雨强下的坡面泥沙输移变化试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(2):46-48.

[6] 葛金金,杨加智,詹美礼,等. 坡度与降雨强度对坡面侵蚀产沙过程影响的试验研究[J]. 水电能源科学,2015,33(2):101-104.

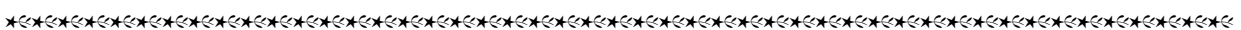
Numerical Simulation Study of Flash Flood Disaster Processes in Small Watersheds in Ungauged Areas

XU Fu-gang^{1,2}, ZENG Jia-xin¹, HU Wen-long¹, ZHONG Qian-you¹, XU Xiao-hua²

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
 2. Jiangxi Province Institute of Water Conservancy and Science, Nanchang 330029, China)

Abstract: In order to reveal the process and mechanism of outbreak of flash floods and causing disasters in ungauged areas, a numerical model of the transport of loose bodies under heavy rainfall floods was established in the Xiangxi River subbasin of Zhangshu City, Jiangxi Province. The process of heavy rainfall and the law of sediment transport were analyzed. The results show that for the river, the flow velocity is higher at the high terrain, slope drop change and the confluence area, and for the area with gentle slope and large catchment area, the increase of flow velocity at the confluence point is especially significant compared with other areas; The local water accumulation at the beginning of the basin, surface runoff occurs in a short period of time, and the gathered water scours out several gullies, and sediment is mostly deposited at the downstream outlet; The water depth and flow velocity of the basin are related to the rainfall. The greater the rainfall, the greater the water depth and flow velocity is, the more significant the scouring situation is. This study has positive significance for flash flood warning in the region.

Key words: ungauged areas; small watersheds; flash floods; sediment transport; numerical simulation



(上接第 87 页)

[2] CARLING P A, ORR H G. Morphology of riffle-pool sequences in the River Severn, England [J]. Earth surface processes & landforms, 2015, 25(4): 369-384.

[3] 徐江,王兆印. 山区河流阶梯—深潭的发育及其稳定河床的作用[J]. 泥沙研究, 2003(5):21-27.

[4] 余国安,王兆印,张康,等. 人工阶梯—深潭改善下切河流水生栖息地及生态的作用[J]. 水利学报, 2008(2): 162-167.

[5] WARD J V. Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation [J]. Biological conservation, 1998, 83(3):269-278.

[6] 陈永柏,廖文根,彭期冬,等. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(2):130-133.

[7] 张功瑾,杨明金,王任超,等. 长江口水沙条件对丁坝群坝田淤积的影响研究[J]. 水文, 2020, 40(6): 24-30,50.

Study on Restoration Technology of Continuous Pool-riffle Type in the Guangyangba River Section to Imitate Natural Habitat

LIN Huan¹, WANG Li^{1,2}, YANG Sheng-fa^{1,2}, SUN Zhang², HU Jiang^{1,2}, YAN Lu-yao¹, TONG Si-chen^{1,2}

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China)

Abstract: Taking the upper reaches of the Yangtze River at Guangyang Dam as an example, a physical model was constructed to analyze the changes of water depth and flow field in the corresponding river section before and after the implementation of the continuous pool-riffle type natural habitat restoration technology scheme. And then the effects of the habitat restoration scheme on fish spawning grounds, habitats, overwintering activities and waterways were discussed. The study show that after the implementation of the habitat restoration scheme, the area of the slow flow area in the test reach increased significantly, and a local slow flow was formed between the group of spur-dike, which was conducive to fish spawning and habitat; The implementation of the scheme did not adversely affect the vessel traffic in the channel of the river.

Key words: fish; pool-riffle; mountain river; imitation of natural habitat; spur dike