

文章编号: 1674—8247(2023)05—0040—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 05. 008

缺水文资料地区小流域暴雨洪水数值模拟研究

付刚¹ 刘威² 何思明² 罗星文¹ 王任国¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:小流域暴雨洪峰流量对铁路排洪工程设计以及铁路运营防排洪工作具有重要意义。受限于老挝当地基础设施建设,缺乏足够的水文设施支撑相关水文信息的采集,水文实测资料匮乏且水文资料序列较短,这成为中老铁路磨万段排洪工程设计以及运营期间防排洪工作的重难点。通过建立雨量-流量监测系统获取实测小流域暴雨洪水资料,再利用实测数据对小流域暴雨洪水数值模拟系统进行参数校对,构建了磨万铁路典型小流域生态-水文-岩土耦合条件下暴雨洪峰数值预报系统。研究成果为解决铁路小流域暴雨洪水计算提供了一种新思路,对今后水文资料匮乏地区的铁路水文计算具有重要的应用价值。

关键词:缺乏实测水文资料地区;小流域暴雨洪水;数值模拟

中图分类号: U412. 23

文献标志码: A

A Study on Numerical Simulation of Rainstorms and Flood in Small Watershed within the Ungauged Basin

FU Gang¹ LIU Wei² HE Siming² LUO Xingwen¹ WANG Renguo¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment of Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The peak flow of rainstorm in small watersheds is of great significance for the design of railway drainage works and flood prevention and drainage during railway operation. Due to the limitations of local infrastructure construction in Laos, there is insufficient hydrological infrastructure to acquire relevant hydrological information. The lack of hydrological data and the short length of hydrological data sequences have become major difficulties affecting the design of flood drainage works and the flood prevention and drainage during the operation of Boten-Vientiane Section of China-Laos Railway. By establishing a rainfall-runoff monitoring system to obtain measured data on rainstorms and floods in small watersheds, and using the field-measured data to calibrate the parameter of the numerical simulation system for rainstorms in small watersheds, a numerical forecasting system for rainstorms and peak flow under the coupled ecological-hydrological-geotechnical conditions of the Boten-Vientiane Section typical small watershed was constructed. The results provide a new approach to calculating rainstorms and floods in small watersheds for railways and have significant practical value for hydrological computation in the ungauged basin of railways in the future.

Key words: ungauged basin; rainstorm and flood in small watersheds; numerical simulation

老挝地处东南亚,中老铁路磨丁至万象段北端连接与我国玉溪至磨憨铁路,南端与规划中的泰国曼

收稿日期:2022-08-02

作者简介:付刚(1986-),男,高级工程师。

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划项目(K2018G060),中国科学院青年创新促进会人才项目(2021373)

引文格式:付刚,刘威,何思明,等. 缺水文资料地区小流域暴雨洪水数值模拟研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(5):40-44.

FU Gang, LIU Wei, HE Siming, et al. A Study on Numerical Simulation of Rainstorms and Flood in Small Watershed within the Ungauged Basin [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5):40-44.

谷至廊开铁路相接。该铁路起于中老边境口岸磨丁,经老挝北部的南塔省、乌多姆塞省、琅勃拉邦省、万象省,到达首都万象。铁路跨越水系主要为湄公河及其支流,铁路所经地区河流众多。在全长 424 km 的铁路中,除去 196 km 隧道外,剩余 228 km 共设桥梁 165 座,拥有排洪功能的涵洞更是多达 510 座。受老挝独特的地理和气候条件影响,海洋和大陆对老挝气候产生强烈影响,使其成为亚洲季风区之一。年内降雨变化大,有明显的旱季和雨季之分,雨季持续时间长。铁路所经的北部山区(磨丁至琅勃拉邦)年平均降雨量 1 000 ~ 2 000 mm,而万荣年平均降雨量可达 3 875 mm。加之河道位于中南半岛山地,河道纵坡陡峻,导致河流洪峰流量大,陡涨陡落历时短促,给当地居民生活和交通运输带了巨大的挑战^[1]。

然而,受限于老挝当地基础设施建设,缺乏足够的水文设施支撑相关水文信息的采集,水文实测资料匮乏和水文资料序列较短成为影响铁路排洪工程设计以及运营防排洪工作的重难点。因此,本文通过实测暴雨洪水数据,提出缺乏实测资料地区小流域暴雨洪水数值模拟系统建设和研究方法,构建山区小流域三维高精度数字场景,研究不同降雨模式下植被截流、坡面饱和-非饱和入渗到坡面产汇流等多物理过程时空演化机制,构建无资料山区小流域暴雨洪水数值预报物理模型。研究成果对缺乏实测水文资料地区的小流域暴雨洪水计算具有重要的参考价值。

1 缺实测水文资料地区暴雨洪水数值模拟数学模型

小流域暴雨洪水过程涉及降雨入渗、沟道汇流、洪水运动等多个物理阶段,各阶段内在物理过程存在较大差异。因此,需针对暴雨洪水各物理阶段分别建立数学模型以反映相应的过程演化特征。本数值模型将降雨入渗、坡面汇流、洪水运动划分为 3 个阶段,综合考虑小流域地表土壤覆盖层、小流域植被、小流域地形等因素对暴雨洪水形成过程的影响,建立小流域暴雨洪水过程的系统框架如图 1 所示。

小流域暴雨洪水成灾过程各物理阶段的数学模型为:

(1) 降雨入渗数学模型

小流域土壤蓄水是影响洪水水源条件的重要因素,降雨条件下的土壤入渗过程采用以含水率和基质吸力耦合变量表达的 Richard 方程描述^[2]:

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right\} - S(\psi, z) \quad (1)$$

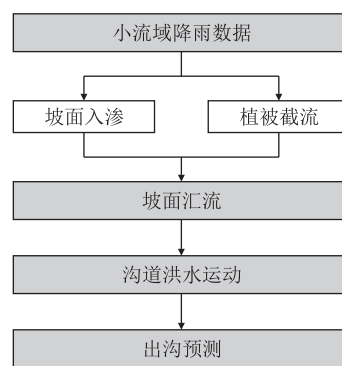


图1 小流域降雨诱发暴雨洪水过程研究系统框架图

式中: t ——时间;

θ ——土壤含水率;

ψ ——土壤内部压力水头;

z ——土壤厚度;

K ——土壤渗透系数;

S ——植被根系引起的水分吸收。

考虑到土壤在雨水下渗过程中,底部边界对入渗过程的扰动,采用两种不同的边界条件(第一类 Dirichlet 边界和第二类 Neumann 边界)进行描述:

$$\text{Dirichlet BC: } \begin{cases} \theta = \theta_s \\ \theta = \theta_m \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Neumann BC: } \begin{cases} -D(\theta) \nabla \theta + K(\theta) = I(t) \\ -D(\theta) \nabla \theta + K(\theta) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_s ——饱和土壤含水率;

θ_m ——初始土壤含水率;

I ——入渗强度。

(2) 坡面汇流数学模型

小流域土壤经历入渗饱和和后产生坡面积水,在地形条件的影响下产生汇流,进而为洪水形成提供水源条件。降雨条件下的坡面汇流过程采用 Shallow-water 方程描述^[3]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = R(t) - I(t) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + 0.5gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghS_{fx} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + 0.5gh^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghS_{fy} \quad (6)$$

式中: h ——坡面流水深;

x, y ——坡面流运动方向;

R ——降雨强度;

I ——土壤饱和入渗强度;

g ——重力加速度;
 $u、v$ ——坡面流运动速度;
 z_b ——地表高程;
 $S_{fx}、S_{fy}$ ——坡面汇流所受到的摩擦阻力。

(3)洪水运动数学模型

坡面流汇入沟道的过程中,会带动坡面松散物源启动形成含沙洪水,这一过程会对洪水运动特征产生影响,洪水自身运动特征与坡面流存在不同。现场资料分析表明,洪水成灾过程中存在明显的由侵蚀引起的体积放大效应,同时也造成地形条件的改变。因此,在传统 Shallow-water 方程的基础上考虑了物源启动对洪水运动的影响,可描述为^[4]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = R(t) - I(t) + (E - D)(1 - p)^{-1}$$
$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + 0.5gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y}$$

$$= -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghS_{fx} - 0.5(\rho_s - \rho_f)\rho^{-1}gh^2 \frac{\partial c}{\partial x} -$$
$$(\rho_0 - \rho)\rho^{-1}(E - D)u(1 - p)^{-1}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + 0.5gh^2)}{\partial y}$$
$$= -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghS_{fy} - 0.5(\rho_s - \rho_f)\rho^{-1}gh^2 \frac{\partial c}{\partial y} -$$
$$(\rho_0 - \rho)\rho^{-1}(E - D)v(1 - p)^{-1}$$

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} = E - D$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = (D - E)(1 - p)^{-1}$$

式中: h ——坡面流水深;
 $x、y$ ——坡面流运动方向;
 R ——降雨强度;
 I ——土壤饱和入渗强度;
 g ——重力加速度;
 $u、v$ ——坡面流运动速度;
 z_b ——地表高程;
 $S_{fx}、S_{fy}$ ——坡面汇流所受到的摩擦阻力;
 c ——洪水含沙量;
 E ——物源侵蚀速率;
 D ——物源沉积速率;
 p ——被侵蚀物源饱和度;
 ρ_f ——雨水密度;
 ρ_s ——被侵蚀物源密度。

(4)子物理模型耦合

小流域暴雨洪水成灾过程各物理阶段相互衔接,相互影响,存在显著的阶段互馈机制。因此,在建立的子物理模型基础上,通过暴雨洪水形成过程中各阶段之间的互馈原理,确定影响各阶段衔接及过程演化的关键因子,对子物理模型开展耦合研究,如图2所示。对于第一阶段,选取降雨强度、土壤状态、植被为关键因子,通过第一阶段数学模型计算得出的土壤饱和度及坡面产流量等变量代入第二阶段进行计算。选取地形、植被为第二阶段的关键因子,通过第二阶段数学模型计算得出的坡面汇流量等变量代入第三阶段进行计算。选取地形、土壤状态为关键因子,通过第三阶段数学模型计算得出沟道洪水流量、洪水分布及含沙量等变量。

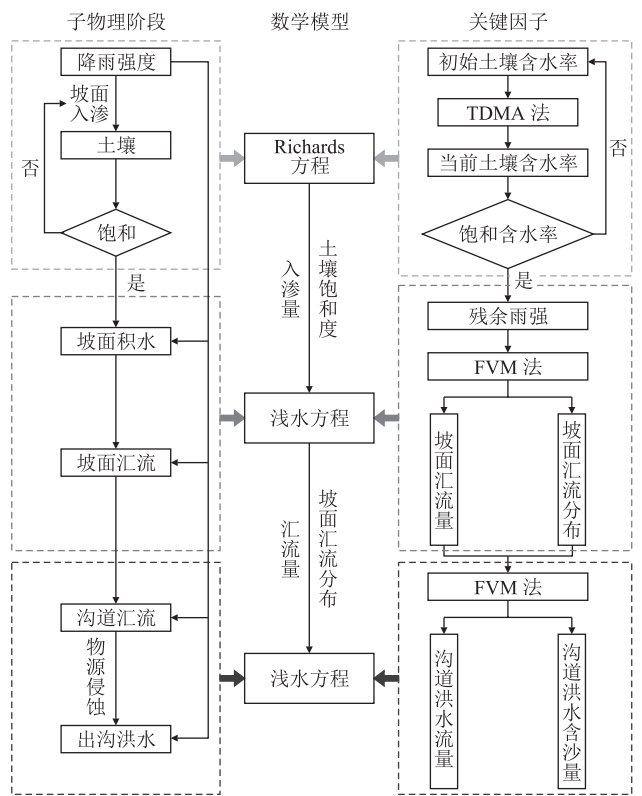


图2 暴雨洪水形成过程各阶段互馈机制及子物理模型耦合图

(5)暴雨洪水数值模拟模型平台构建

针对小流域暴雨洪水过程中各阶段物理模型方程的结构特征,采用结合 HLLC 黎曼间断近似解的有限体积算法进行求解。基于 MATLAB 语言开展代码编写,利用并行计算及网格重划分技术提高计算效率,结合 MATLAB 可视化功能,实现了计算数据的读取与展示,以此完成暴雨洪水成灾全过程的计算模拟及量化评价。小流域暴雨洪水过程流程如图3所示。

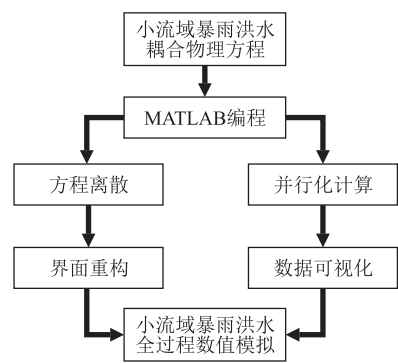


图 3 小流域暴雨洪水灾害数值模拟流程图

2 缺实测水文资料地区暴雨洪水监测系统

2.1 监测系统及监测内容

选取老挝铁路 2 个小流域作为示范区,对其降雨量及沟(河)道流量进行实时监测。通过降雨-流量实时监测,获得代表性降雨产流成果,为数值模拟提供实测验证资料。监测仪器为雨量计和超声波流量计。

2.2 监测站点的布设原则

监测站点选取和布设原则主要遵从以下 3 点:①监测点代表性;②监测点信息传输可靠性;③监测点施工及维护性。

为选择具有代表性的监测点,主要考虑以下因素:从监测点所在的降雨分区、流域面积大小、铁路跨河工程类型(桥梁、涵洞)。监测设备平面布设如图 4 所示。

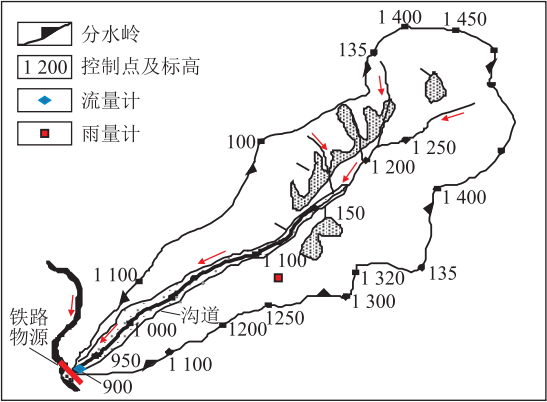


图 4 监测设备布置平面图(m)

本研究从小流域站点的分布、铁路跨河工程类型、下垫面植被类型,分别选取了 2~6 m 香嫩涵洞、3×32 m 班那迷中桥两种不同跨河类型的铁路构筑物,2 个站点流域特征如表 1 所示。

雨量计应选择在地形开阔且无高乔木遮挡的位置,兼顾现场维护。因此将雨量计设在监测流域靠近

表 1 磨万铁路典型小流域山洪监测站点特征值表

序号	站点名称	跨河建筑类型	汇水面积/km ²	流域长度/km	流域坡度	设计洪峰流量/(m ³ /s) (p=1%)
1	香嫩	2~6 m 涵洞	3.714	3.197	0.097 68	103
2	班那迷	3×32 m 梁桥	3.555 4	4.71	0.144	124

铁路的开阔地带。
流量计需对沟道内水流的水位及流速进行实时监测,雷达流量计应位于河道水流正上方,确保下方河道无遮挡,无漂浮物阻碍雷达信号发射和传输。

3 小流域暴雨洪水数值模拟成果验证

选择实测典型降雨-产流实测资料进行数值模拟模型率定,以实际降雨资料模拟暴雨洪水形成过程。流域地形数据均由现场勘测 DEM 获得,假设降雨强度在流域范围内保持一致,流域降雨强度依据现场仪器监测数据进行计算,最后将数值模拟成果与监测数据进行对比,如图 5、图 6 所示。

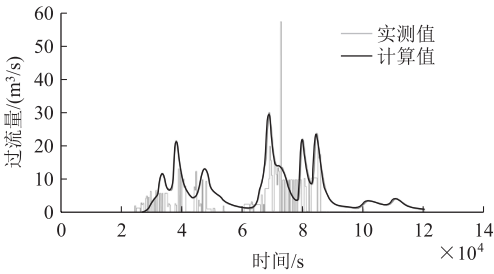


图 5 香嫩典型暴雨洪水数值模拟与实测数据对比图

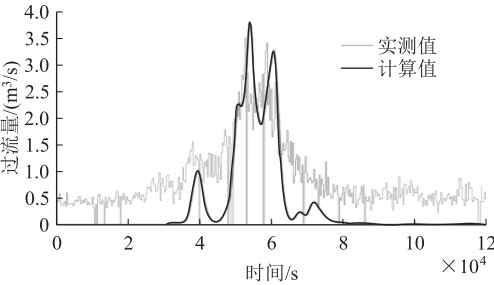


图 6 班那迷典型暴雨洪水数值模拟与实测数据对比图

随着降雨的持续,坡面开始产流。受地形影响,坡面流开始汇集,此时流量较小。值得注意的是,在流域内坡面径流形成过程中,由于地形影响,局部出现雨水积蓄现象。当蓄水高度超过洼地地形高度时,坡面流会继续向下传播。随着坡面过流量的增加,坡面流逐渐趋于稳定。计算监测点最大过流量为 28 m³/s,与实际测量值 20 m³/s 较为接近,洪峰量线型与实测序列吻合。

以上 2 个案例表明,所建立的耦合物理模型能够

较好地描述降雨诱发的坡面形成及传播过程特征。

4 最大雨强条件下监测流域暴雨洪水过程模拟

采用实测资料验证的数值模拟模型,对磨万铁路 2 个监测流域开展最大雨强条件下暴雨诱发洪水形成过程的模拟分析,如表 2 所示。假设降雨强度在流域范围内保持一致,依据最大雨强进行计算,降雨时长到坡面产流达到稳定状态为止。

表 2 研究流域 5 年至 100 年一遇雨强值表

监测点	班娜迷流域	香嫩流域
最大雨强	$H_{10\min}(\text{mm}/10\text{ min})$	$H_{10\min}(\text{mm}/10\text{ min})$
100 年一遇	47. 87	36. 58
50 年一遇	38. 29	29. 27
5 年一遇	9. 67	7. 39

由模型计算所得的各个流域沟道最大过流量与二院法理论公式^[5-6]的结果进行对比,如表 3 所示。两者的结果较为接近,表明本文所使用的方法可较好地应用于暴雨诱发洪水形成过程描述及定量评价,可为降雨诱发流域坡面汇流及洪水危险性定量评价提供技术支撑^[7-9]。

表 3 计算最大流量与二院法公式计算结果对比表

监测点	流量/(m^3/s)	100 年一遇	50 年一遇	10 年一遇
班那迷	数值模拟	102. 5	88. 7	48. 3
	理论公式	124	100. 3	47. 9
香嫩	数值模拟	97. 1	82. 9	48. 3
	理论公式	103. 3	84. 1	40. 6

5 结论

小流域暴雨洪水形成过程十分复杂,涉及多个演化过程,如入渗、坡面汇流、洪水沟道运动等。因此,精确模拟这一过程需要考虑小流域暴雨洪水形成过程中的关键环节。本文将小流域暴雨洪水形成过程划分为入渗、汇流、运动 3 个环节。针对每个环节开展物理建模,通过寻找各个环节之间的衔接要素,对不同环节对应物理模型进行耦合得到了小流域暴雨洪水全过程物理模型,实现了小流域暴雨洪水形成过程的模拟计算。

利用所提出的小流域暴雨洪水耦合物理模型与数值计算方法,以中老铁路磨万段小流域工点为对象,以现场监测数据为依照,开展了小流域暴雨洪水形成过程的模拟与对比。模拟结果表明,2 个小流域暴雨洪水的形成过程模拟符合实际情况,且模拟所得暴雨洪水流量过程线与实际测量数据较为吻合,反映

了实际小流域暴雨洪水的过程演化特征,进一步验证了小流域暴雨洪水耦合物理模型与数值计算方法实际应用的可行性。

将所提出的小流域暴雨洪水模拟方法与理论计算算法进行了对比验证,以证明所提出小流域暴雨洪水模拟方法的可靠性。在相同边界与初始条件(地形、最大雨强等)下,针对中老铁路磨万段小流域开展了暴雨洪水形成过程模拟。模拟结果表明,在不同流域条件下,通过本项目所提出小流域暴雨洪水模拟方法得到的洪峰流量值与二院法计算得到的洪峰流量值均十分接近,验证了小流域暴雨洪水模拟方法的可靠性。

参考文献:

[1] 韩晓强,付刚,杨自力. 中老铁路水文计算研究[J]. 铁道勘察, 2017, 43(6): 65-67.
HAN Xiaoqiang, FU Gang, YANG Zili. Hydrology Research and Calculation for Laos-China Railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(6): 65-67.

[2] BRUNONE B, FERRANTE M, ROMANO N, et al. Numerical Simulations of One-Dimensional Infiltration into Layered Soils with the Richards Equation Using Different Estimates of the Interlayer Conductivity [J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(2): 193-200.

[3] LIANG Qiuhua, MARCHE F. Numerical Resolution of Well-balanced Shallow Water Equations with Complex Source Terms [J]. Advances in Water Resources, 2009, 32(6): 873-884.

[4] CAO Zhixian, PENDER G, CARLING P. Shallow Water Hydrodynamic Models for Hyperconcentrated Sediment-laden Floods over Erodible Bed [J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(4): 546-557.

[5] 铁道部第三勘测设计院. 铁道工程设计技术手册(桥渡水文) [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
The Third Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Technical Manual for Railway Engineering Design (Bridge Hydrology) [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.

[6] TB 10017-2021 铁路工程水文勘测设计规范[S].
TB 10017-2021 Code for Survey and Design on Hydrology of Railway Engineering[S].

[7] 中铁二院工程集团有限责任公司,新建铁路磨丁至万象线初步设计[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2016.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Preliminary Design of New Boten-Vientiane Railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2016.

[8] 陈家琦,张恭肃. 小流域暴雨洪水计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
CHEN Jiaqi, ZHANG Gongsu. Calculation of Storm Flood in Small Watershed [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1985.

[9] LIU Wei, HE Siming. Comprehensive Modelling of Runoff-generated Debris Flow from Formation to Propagation in a Catchment [J]. Landslides, 2020, 17(7): 1529-1544.