

基于 GDEM-GAVA 的白羊城沟泥石流 成灾风险数值分析¹⁾

徐兴全^{*,2)} 王心泉^{†,**} 冯春^{†,**,3)} 丁桂伶^{*} 刘新明^{†,**} 王晓亮^{††}

^{*}(北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

[†](中国科学院力学研究所, 北京 100190)

^{**}(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

^{††}(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘要 降雨型泥石流是一个降雨-洪水-泥沙运输-推移质运动的多过程耦合过程。本文借助颗粒碎屑流仿真系统(GDEM-GAVA),对白羊城沟泥石流的成灾风险进行了分析。首先通过历史灾情数据反分析出了沟道物源的力学参数,而后基于该参数分析了不同降雨强度下该泥石流的成灾临界降雨时长。计算结果表明,白羊城沟泥石流物源的饱和黏聚力为 0.5~1 kPa,饱和内摩擦角为 5°~10°;降雨强度为 65 mm/h 时,沟道形成泥石流的时间为 3.6 h;降雨强度为 78 mm/h 时,沟道形成泥石流的时间为 2.8 h;降雨强度为 88 mm/h 时,沟道形成泥石流的时间为 2.3 h。上述泥石流成灾风险的分析结果可为白羊城沟泥石流的科学预警提供必要的依据。

关键词 降雨型泥石流,物源参数反演,数值模拟,泥沙运输,成灾风险

中图分类号: P642.23 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-22-540

NUMERICAL ANALYSIS OF MUDFLOW RISK IN BAIYANGCHENG GULLY BASED ON GDEM-GAVA¹⁾

XU Xingquan^{*,2)} WANG Xinquan^{†,**} FENG Chun^{†,**,3)} DING Guiling^{*}
LIU Xinming^{†,**} WANG Xiaoliang^{††}

^{*}(Beijing Institute of Geological & Prospecting Engineering, Beijing 100048, China)

[†](Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^{**}(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^{††}(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Rainfall debris flow is a multi-coupling process including rainfall-flood-sediment transport-bed load movement. The disaster risk of Baiyangcheng Gully debris flow is analyzed based on GDEM-GAVA software. First, through historical disaster data, the accurate mechanical parameters of the channel material source are back-analyzed. Then, based on the parameters obtained from the inversion, the critical rainfall duration of the debris flow under different rainfall intensities is analyzed. The calculation results showed that the saturated cohesive force of the debris flow in Baiyangcheng Gully is 0.5~1 kPa, and the saturated internal friction angle is 5°~10°; when the rainfall intensity is 65 mm/h, the formation time of the debris flow in the

2022-09-26 收到第 1 稿, 2022-11-12 收到修改稿。

1) 国家重点研发计划项目(2018YFC1505504)和国家自然科学基金项目(12172057, 12032005)资助。

2) 徐兴全, 工程师, 研究方向为地质灾害监测预警、工程勘察。E-mail: xuxingquan@126.com

3) 冯春, 高级工程师, 研究方向为地质灾害监测预警方法。E-mail: fengchun@imech.ac.cn

引用格式: 徐兴全, 王心泉, 冯春等. 基于 GDEM-GAVA 的白羊城沟泥石流成灾风险数值分析. 力学与实践, 2023, 45(4): 744-753

Xu Xingquan, Wang Xinquan, Feng Chun, et al. Numerical analysis of mudflow risk in Baiyangcheng Gully based on GDEM-GAVA. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(4): 744-753

channel is 3.6 h; when the rainfall intensity is 78 mm/h, the formation time of the debris flow in the channel is 2.8 h; when the rainfall intensity is 88 mm/h, the formation time of the debris flow in the channel is 2.3 h. The analysis results of the above-mentioned debris flow disaster risk can provide the necessary basis for the scientific early warning of the Baiyangcheng Gully debris flow.

Keywords rainfall mudflow, source parameter back-analysis, numerical simulation, sediment transport, disaster risk

泥石流常发生于山区沟谷中，主要诱因有强降雨、冰雪融化、地震活动等，是一类携带大量沙泥、地质块体和水体的特殊地质流动。我国是泥石流灾害频发的国家，泥石流具有流动体密度大、黏滞性高、流动速度快等特点，运动过程对沿途的建构筑物产生强烈冲击，对生命财产、公共设施及生态环境有着极大的威胁，因此，研究泥石流的成灾条件对于灾害有效预警具有极其重要的意义^[1-2]。

泥石流的发展主要包含四个阶段：第一阶段是强降雨迅速在集水区汇集并形成沟道洪水；第二阶段是道沟洪水冲刷并携带泥沙、石块等松散地质体形成洪流；第三阶段是在其流经滑坡崩塌体、道沟堵塞体时，物质及能量的瞬间蓄聚释放使泥石流规模进一步扩大；第四阶段是泥石流在高速流动过程中，对道沟的强烈冲刷侵蚀，以及松散地质块体的持续补充，使其发展形成破坏力巨大的地质灾害^[3-4]。

国内外学者近年来主要通过数值方法对泥石流灾害进行预警和风险性评价。当下在泥石流流体力学灾害模拟领域多采用二维洪水与土石流数值模拟套装软件（FLO-2D），舒和平等^[5]采用 FLO-2D 对不同降雨频率单沟泥石流进行了模拟灾害风险评估，并利用 GIS 技术进行危险区划分。黄勋等^[6]利用 FLO-2D 并引入强度指数建立了适用于我国西南山地城镇的风险评价体系 and 流程。刘鑫磊等^[7]基于 FLO-2D 对不同降雨频率下的牛圈沟泥石流进行了数值反演和泥石流危险性评价。杨涛等^[8]运用 FLO-2D 重现了泥石流暴发时的堆积扇危险特征。除上述基于 FLO-2D 进行的相关研究外，Ouyang 等^[9]利用改进的 MacCormack-TVD 有限差分方法，开发了基于深度积分连续介质方程的泥石流模拟软件 Massflow，并成功应用于国内多处泥石流的成灾风险分析^[10-11]。

Staffler 等^[12]利用数值模拟技术与 GIS 技术相结合对小流域进行了泥石流风险性制图。崔鹏等^[3]总结了风险分析与管理的方法和内容，构建了基于灾害动力过程的泥石流风险评估与风险制图方法。胡明鉴等^[13]采用 PFC2D 软件分析了降雨条件下泥石流的形成过程，展示了松散碎屑物质引发泥石流的过程和机制。周健等^[14]、马秋娟等^[15]采用 PFC3D 软件分析了泥石流的启动过程。胡卸文等^[16]基于 CFX 软件，采用 Bingham 流变模型进行三维数值建模，分析了泥石流的危险区范围及速度场分布。李兆华等^[17]采用拉格朗日积分点有限元法以及黏弹塑性模型，对泥石流的固态、固流转化态和流态进行了模拟。王志超等^[18]基于达西渗透原理，建立了光滑粒子流体动力学（smoothed particle hydrodynamics, SPH）和离散单元法（discrete element method, DEM）耦合的滑坡涌浪模型。韩征等^[19]通过在 SPH 中引入 Herschel-Bulkley-Papanastasiou（HBP）本构，实现了稀性泥石流动力过程的精确模拟。陈伟^[20]采用连续介质理论建立了泥石流动力模型并模拟了泥石流的运动和堆积过程。潘青等^[21]采用 EDEM 数值软件，考虑流槽坡度、底部拦挡结构角度以及颗粒级配对泥石流运动规律及其冲击性能进行了数值模拟。以上方法在处理泥石流问题时存在计算区域小或计算速度慢的问题，不能满足大型地质灾害高效快速预警的要求，而泥石流灾害的形成发展过程迅速，运动速度快，对沿途建构筑物的冲击破坏作用大。因此对泥石流的成灾过程进行快速模拟意义重大。

降雨诱发泥石流的运动过程是复杂的水沙耦合动力学过程，首先降雨将导致山洪，山洪引起地表侵蚀，随着泥沙含量的增加，山洪将转变为泥石流，同时泥沙还会发生沉降，形成地表堆积，地表堆积物在一定条件下又可能发生推移质运动。

颗粒碎屑流仿真系统(GDEM-GAVA)是一款基于多核CPU/GPU混合并行的显式颗粒流动力学高效数值模拟软件,该软件基于垂向积分的有限体积法,采用黎曼求解器,大大减少了计算量,可计算百万平方米区域的地质灾害成灾过程问题。本文为了准确评价不同降雨条件下白羊城沟泥石流的形成过程及成灾演化过程,借助GDEM-GAVA软件,通过历史灾情数据对该泥石流沟物源的力学参数进行反演,而后对不同降雨强度下白羊城沟泥石流的成灾临界降雨时长进行分析。

1 白羊城沟泥石流隐患点的基本特征

白羊城沟泥石流位于北京市昌平区流村镇王

家园村白羊城沟内,距北京市中心50 km。白羊城沟泥石流属于暴雨沟谷型泥石流,地形起伏较大,坡度较陡,汇水面积约4.18 km²;地势西北高东南低,沟床坡降比约为208.53%。在地形地貌上具有坡面较陡、流域形状便于水流汇集且可提供丰富的松散物质的特点,为泥石流的形成提供了充足的水源和物源条件。物源主要有人工堆积物源、沟道物源和坡面侵蚀物源,根据现场勘察测量,该泥石流沟静态物源储量约为6.398×10⁵ m³,可参与泥石流活动的动储量约为5.46×10⁴ m³。根据沟道特征,该泥石流隐患点可分为形成区(清水区、物源区)、流通区和堆积区,各区域的野外勘察图片如图1所示,整体形态图如图2所示。



图1 泥石流区域野外照片

Fig. 1 Field photos of the debris flow area

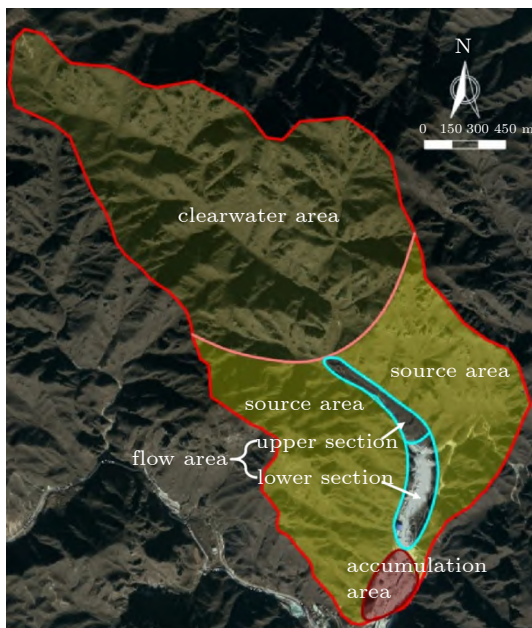


图2 泥石流隐患点整体形态图

Fig. 2 Overall morphology of hidden danger points of debris flow

泥石流沟的中下游存在大量的人工堆积碎石和第四系坡洪积物,可为暴雨期泥石流的形成提供较为丰富的物源。物源类型包含坡面侵蚀物源、沟道堆积物源及人工堆积物源三大类。

坡面侵蚀物源的静态储量为4.892×10⁵ m³,主要来源于形成区(清水区、物源区)坡段。清水区沟道两侧坡体的基岩风化程度较高,在暴雨等特殊情况下,会使岩块脱落进入沟道参与泥石流活动。物源区两侧山体为较厚的松散沉积土层,最厚可达20 m,且呈松散-稍密状态,部分山体受人类工程活动的影响,部分坡体表面的植被缺失,部分坡体陡立。在暴雨等特殊情况下,该处松散堆积的土层极易产生滑塌,进而引发泥石流。此外,物源区坡面上的残坡积物也是物源之一。

沟道堆积物源的静态储量为1.479×10⁵ m³,主要位于泥石流隐患点流通区上段,泥石流隐患点的中上游至中游。物源主要由第四系坡洪积碎

石土构成，厚度约 2~5 m，碎石粒径较大，分选差，呈棱角状。

人工堆积物源的静态储量为 $2.7 \times 10^3 \text{ m}^3$ ，主要位于该泥石流隐患点流通区下游。

物源的平均颗粒级配如图 3 所示。

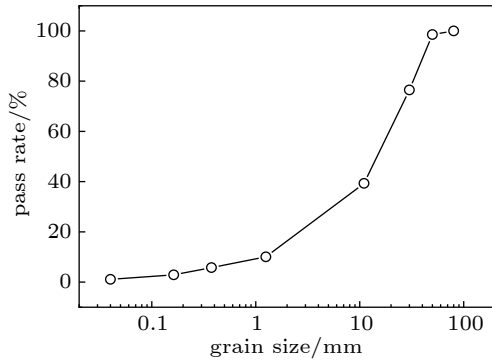


图 3 物源的平均颗粒级配

Fig. 3 Average grain gradation of the material source

2 泥石流成灾过程数值计算原理

文章采用 GDEM-GAVA 软件模拟泥石流成灾演化的全过程。该软件可模拟场次暴雨条件下，山洪转化为泥石流的形成和动力演化过程，给出沟床侵蚀冲淤和泥沙输运沉积导致的地表演化过程。该软件的核心理论为基于垂向积分模式的降雨-洪水-泥石流-侵蚀冲淤多过程耦合模型^[22-23]，现对主要计算公式简述如下。

首先计算降雨入渗的过程，考虑到植被的影响，到达土体表面的有效降雨强度可表述为

$$P_{\text{eff}} = (1 - C_v)P + C_v(T_c P + D_c) \quad (1)$$

式中， P_{eff} 为有效降雨强度， P 为降雨强度， T_c 为静降水量系数， D_c 为从植被冠层排出水分的速率， C_v 为植被覆盖的百分比。

降雨入渗采用 Green-Ampt 模型进行描述。该模型假定有两层土体，即一层为体积含水量为 θ_i 的初始土层和一层为体积含水量为 θ_s 的饱和土层，两层土体被深度为 Z_f 的湿润前峰面分割。设 k_s 为渗透系数， h_f 为湿润前峰面毛细压力水头， h 为水深， H_a 为累计渗透深度，则降雨向土层内的渗透速度 v 可表述为

$$v = k_s \frac{Z_f + h_f + h}{Z_f} \quad (2)$$

其中， Z_f 可表述为

$$Z_f = \frac{H_a}{\theta_s - \theta_i} \quad (3)$$

采用 Mohr-Coulomb 模型判定堆积物的剪切破坏。一旦发生破坏，堆积物将会进入水中，随着水流一起输运。斜坡微元上堆积物的 Mohr-Coulomb 判断准则可表述为

$$(\rho_b g h_s \cos \theta + \rho_w g h \cos \theta - p_{\text{bed}}) \tan \phi_b + h_s \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_s g h_s \cos \theta) + c_b = (\rho_b h_s + \rho_w h) g \sin \theta \quad (4)$$

式中， h 和 h_s 分别为水深及堆积物的深度， ρ_s 和 ρ_w 分别为堆积物密度及水密度， g 为重力加速度， θ 为斜坡角度， p_{bed} 为基床孔隙水压力， c_b 和 ϕ_b 为堆积物的黏聚力及内摩擦角， x_i ($i = 1, 2$) 为 x 方向及 y 方向坐标。

由雨水滴溅引起的挟带和再挟带比率可表述为

$$\left. \begin{aligned} e_k &= (1 - H)p_k a P [(1 - C_v) + T_c C_v] T_c \\ e_{rk} &= H \frac{m_k}{m_t} a_d P [(1 - C_v) + T_c C_v] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， e_k 和 e_{rk} 为由雨水滴溅引起的单位面积上第 k 个颗粒等级堆积物的挟带及再挟带比率， p_k 和 m_k 为单位面积上第 k 个颗粒等级堆积物的比例及质量， m_t 为单位面积上堆积物的总质量， H 为防侵蚀系数， a 和 a_d 为可分离系数。

由洪水径流引起的挟带和再挟带比率可表述为

$$\left. \begin{aligned} r_k &= (1 - H)p_k \frac{F(\Omega - \Omega_{\text{cr}})}{J} \\ r_{rk} &= (1 - \beta)H \frac{m_k}{m_t} \frac{F(\Omega - \Omega_{\text{cr}})}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} g h} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中， r_k 和 r_{rk} 为由洪水径流引起的单位面积上第 k 个颗粒等级堆积物的挟带及再挟带比率， F 为有效侵蚀溪流流量比例， J 为携带单位质量沉积物所需的能量， Ω 为水流功率， Ω_{cr} 为临界水流功率， H 为防侵蚀系数， β 为侵蚀后残余防侵蚀系数。

第 k 个颗粒等级的有效沉积率 d_k 可表述为

$$d_k = v_{sk} c_k (1 - c^*)^\alpha \quad (7)$$

式中， α 为经验指数，一般取 2~5 之间（本文

取4)； c_k 为第 k 个颗粒等级的含沙量， c^* 为总的体积含沙量； v_{sk} 为级配中第 k 个颗粒等级的沉降速率，可表述为

$$v_{sk} = \sqrt{(13.95v/\delta_k)^2 + 1.09sg\delta_k} - 13.95v/\delta_k \quad (8)$$

式中， $s = \rho_s/\rho_w - 1$ ， v 为运动黏度， δ_k 为第 k 个等级的颗粒特征粒径。

描述水-堆积体混合物协同运输的控制方程可表述为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{s}_0 + \mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2 \quad (9)$$

其中， $\mathbf{U} = (h \quad hu \quad hv \quad hc)^\top$ ， $\mathbf{F} = (hu \quad hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \quad huv \quad huc)^\top$ ， $\mathbf{G} = (hv \quad huv \quad hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \quad hvc)^\top$ 。 u 和 v 为平面 x 及 y 两个方向的流速， c 为泥沙浓度。 \mathbf{s}_0 ， \mathbf{s}_1 ， \mathbf{s}_2 为源项。

描述地表堆积物运动过程的推移质输运方程可表述为

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = d - e - r \quad (10)$$

式中， M 为单位面积上的堆积物质量； q_x 和 q_y 为堆积物在 x 方向及 y 方向的质量流量； e ， r ， d 分别代表雨滴侵蚀、山洪侵蚀和泥沙沉积，具体如式(5)~式(7)所示。

根据泥沙侵蚀沉降过程、推移质理论，以及泥沙守恒，得到地表演化方程，为

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{\rho_s(1-\phi)} \left(d - e - r - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (11)$$

式中， z 为地表高程， ϕ 为孔隙率。

控制方程(9)~(11)构成了描述降雨山洪、泥沙运输、山洪转泥石流和地表侵蚀冲淤的耦合模型，这里山洪转化为泥石流的条件通过混合水流的运动特征给出。当泥沙的体积浓度较低时，采用曼宁公式计算阻力；当泥沙的体积浓度较高时，采用摩尔库仑摩擦计算阻力描述泥石流运动，中间通过过渡态描述^[22-23]。

GDEM-GAVA采用基于正交网格的有限体积法求解控制方程组，并采用近似黎曼求解器构建数值通量。如图4所示，采用结构网格离散计算区域，定义每个单元的平均物理量，通过算子分裂法，使用有限体积法计算控制方程(9)，给出在结构网格下欧拉方程的半离散格式，即

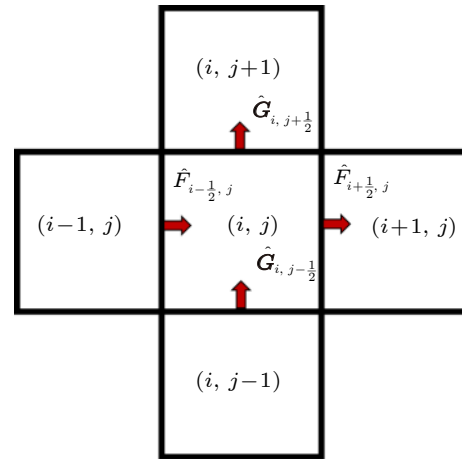


图4 网格和通量示意图

Fig. 4 Sketch map of grid and flux

$$\frac{d\bar{U}_{i,j}}{dt} = - \left[\frac{1}{\Delta x} (\hat{F}_{i+1/2,j} - \hat{F}_{i-1/2,j}) + \frac{1}{\Delta y} (\hat{G}_{i,j+1/2} - \hat{G}_{i,j-1/2}) \right] \quad (12)$$

这里 $\bar{U}_{i,j}$ ， $\hat{F}_{i+1/2,j}$ 和 $\hat{G}_{i,j+1/2}$ 分别为单元 (i,j) 平均值、单元右边界和上边界的数值通量，时间方向采用二阶龙格-库塔方法求解。单元的数值通量 $\hat{F}_{i+1/2,j}$ 和 $\hat{G}_{i,j+1/2}$ 采用黎曼解进行求解，在 x 和 y 方向上分别进行。为处理干湿边界，设置一个小深度 ε 为截断条件，如果计算深度超过 ε ，则按照正常情况计算，如果计算深度小于 ε ，则仅计算质量守恒方程，动量直接置零。为了处理摩擦力部分，采用一种起动-停止条件避免一个时间步内产生回流现象，其余各项采用直接数值积分处理。

控制方程(9)求解完成后，采用显格式直接求解控制方程(10)和(11)，从而完成山洪泥石流、泥沙运输与地表高程演化的耦合。以上耦合数值模型在较多的自然流动和灾害问题中得到应用，展现了较好的鲁棒性，如梯级水库溃坝洪水的增强机制^[24]、大型滑坡泥石流运动^[25-26]，以及滑坡涌浪^[27]等水沙耦合运动。

3 物源参数的反演分析

物源区的空间位置及颗粒级配组成相对确定，而松散物源在不同位置的力学特性相差较大。因此，反演的重点是物源区饱和状态下的强度特性，主要为饱和黏聚力及饱和内摩擦角。根据已有资

料，白羊城沟在 2012 年发生过一次泥石流事件，彼时的降雨强度随时间的变化曲线如图 5 所示。

由于缺乏 2012 年泥石流灾害物源区、成灾过程及成灾范围的详细数据支撑，现仅以临发条件进行动态反演分析。将图 5 所示降雨量数据作为条件引入数值模拟中，将降雨强度作为流量边界条件施加在地质模型表面，根据山体表面渗透系数计算出降雨入渗量及地表径流量，借助雨滴侵蚀模型及山洪侵蚀模型，实现松散堆积物的剥离及输运。设白羊城沟物源区饱和黏聚力的初始值为 2 kPa，饱和内摩擦角为 20°，开展相关的数值反演。

不同参数下泥石流启动情况见图 6。由图可得，当饱和摩擦角为 20°时，仅局部区域水流中的泥沙含量高于 15%；当饱和摩擦角为 10°时，

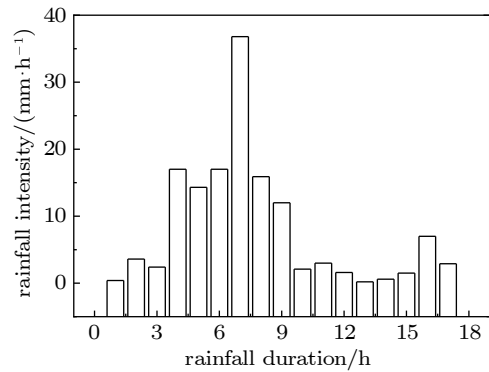


图 5 降雨强度随降雨持时的变化规律

Fig. 5 The relationship between rainfall intensity and rainfall duration

虽然泥沙含量高于 15% 的区域有所增大，但没有形成整体性的输运；当饱和摩擦角小于 5°，沟道内水流区域的大部分位置泥沙浓度超过了 15%，构成了泥石流灾情。

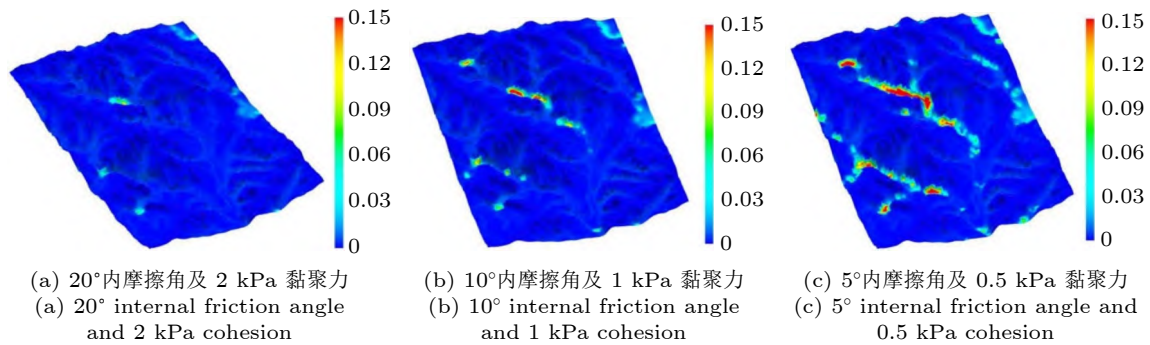


图 6 降雨 8 h 后不同物源区参数下的泥沙浓度分布

Fig. 6 Sediment concentration distribution under different source area parameters after 8 h of rainfall

不同摩擦角下泥石流的成灾范围见图 7。由图可得，当摩擦角为 20°及 10°时，物源仅在沟道内进行局部的搬运，泥沙输送距离较近；当摩擦角为 5°时，泥石流的成灾范围较大。

综上，根据 2012 年发生泥石流灾害这一事实，

初步判断白羊城沟物源参数：饱和黏聚力为 0.5~1 kPa，饱和内摩擦角为 5°~10°。

4 白羊城沟泥石流预警阈值计算分析

相关资料表明，白羊城沟所在区域二十年一

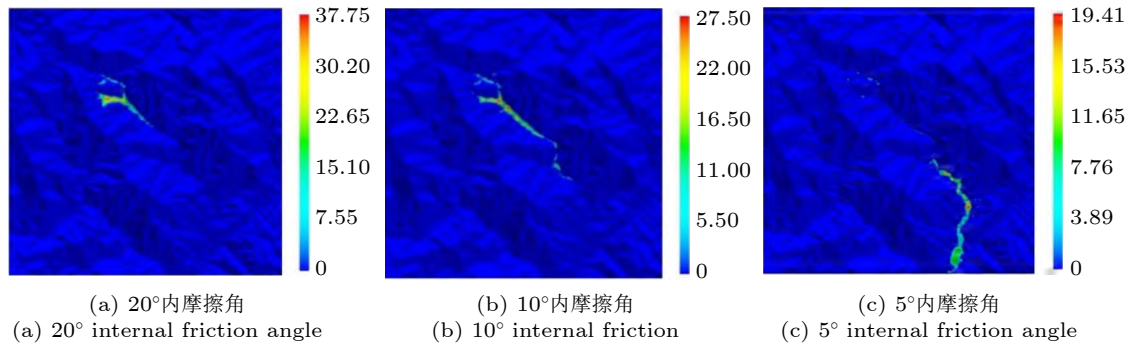


图 7 不同物源参数下泥石流的成灾范围

Fig. 7 Disaster range of debris flow under different source parameters

遇 ($P = 5\%$)、五十年一遇 ($P = 2\%$)、百年一遇 ($P = 1\%$) 的暴雨雨强分别为 65 mm/h, 78 mm/h, 88 mm/h。基于第 3 节白羊城沟反分析获得的泥石流物源基本参数, 开展不同降雨强度条件下的分析计算, 在灾害的演化过程中, 暂不考虑泥石流物源参数的变化, 即物源的黏聚力

及内摩擦角维持不变。

不同雨强下降雨 1.5 h 后的水深分布、流速分布及泥沙浓度分布分别见图 8, 图 9 及图 10。由图可得, 随着降雨强度增大, 白羊城沟道沟内的洪水深度逐渐增大, 洪水中的泥沙含量逐渐增大。当降雨强度为 78 mm/h 和 88 mm/h 时, 沟

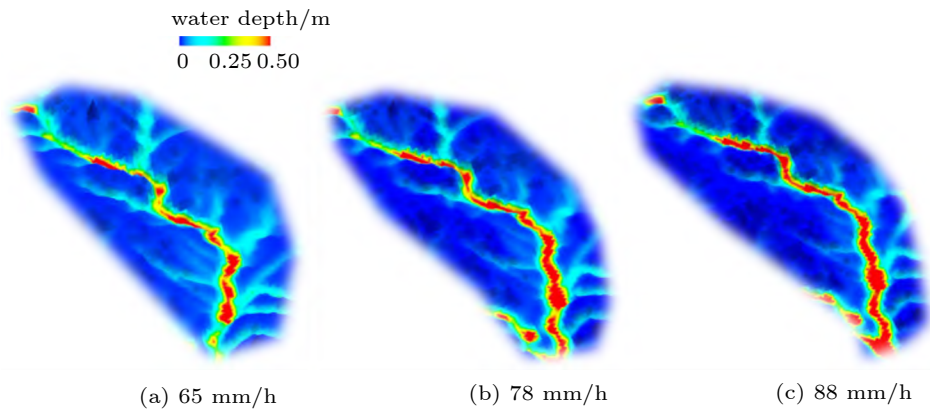


图 8 不同雨强下的水深分布

Fig. 8 Water depth distribution under different rain intensities

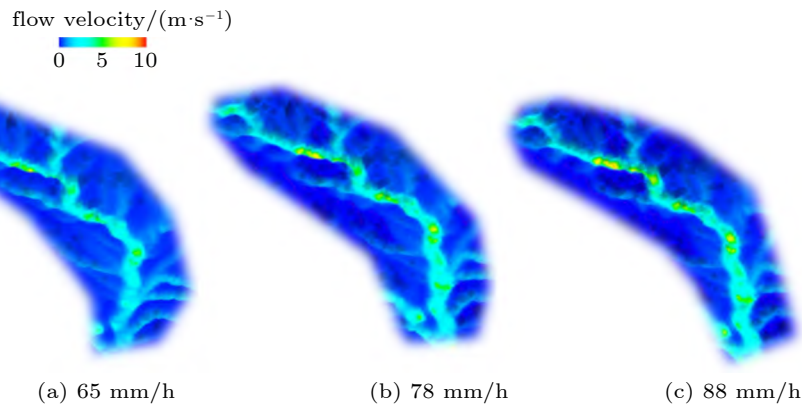


图 9 不同雨强下的流速分布

Fig. 9 Flow velocity distribution under different rain intensities

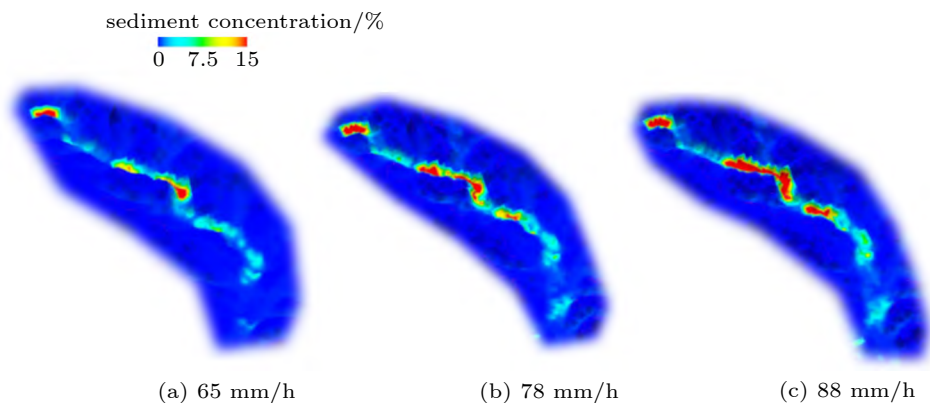


图 10 不同雨强下的泥沙浓度分布

Fig. 10 Sediment concentration distribution under different rain intensities

通内的泥沙浓度大部分区域超过了 15%，预示着泥石流灾害的发生。

选取泥石流区域的典型位置作为监测点，绘制不同降雨强度下典型测点的水深、流速及泥沙浓度随降雨时间的变化曲线，测点位置见图 11，变化曲线见图 12~图 14。由图可得，降雨 50 min 之内，沟道内没有明显的水流，降雨 1 h 后，水流及泥沙浓度均逐渐增大。相同雨强下，测点 1 的水深、流速及泥沙浓度均大于测点 2；以降雨强度 88 mm/h 为例，降雨 1.5 h 后，测点 1 的水深为 0.8 m，测点 2 的水深为 0.4 m，测点 1 的流速为 6 m/s，测点 2 的流速为 2.5 m/s，测点 1 的泥沙浓度为 35%，测点 2 的浓度为 5%。

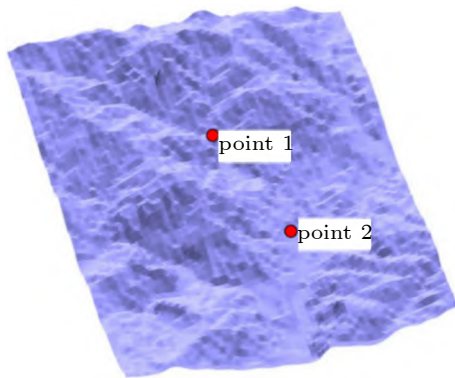


图 11 数值计算监测点布设图

Fig. 11 Layout of numerical calculation monitoring points

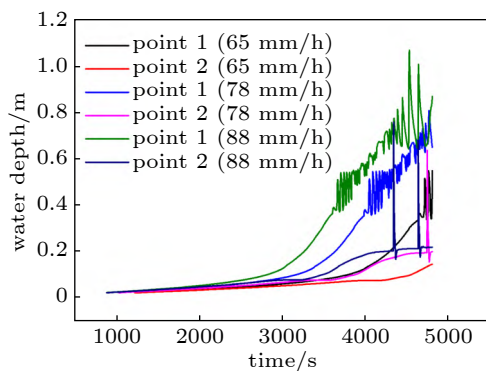


图 12 典型测点水深随时间的变化规律

Fig. 12 Variation law of water depth with time at typical monitoring points

对白羊城沟泥石流模型进行持续性降雨，可以得到不同降雨强度下该泥石流沟的成灾临界时间，具体见表 1。降雨强度越大，沟道形成泥石流所需的时间越小。

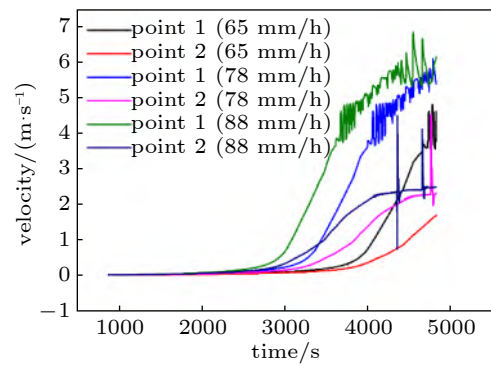


图 13 典型测点流速随时间的变化规律

Fig. 13 Variation law of flow velocity with time at typical monitoring points

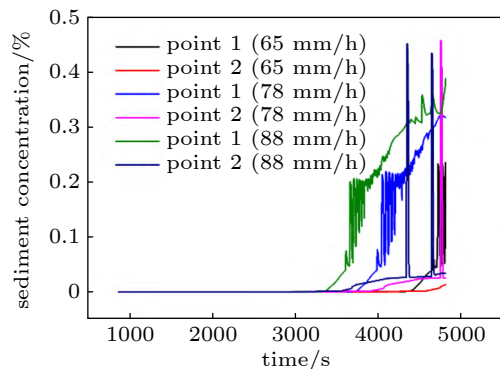


图 14 典型测点泥沙浓度随时间的变化规律

Fig. 14 Variation law of sediment concentration with time at typical monitoring points

表 1 不同降雨强度下白羊城沟形成泥石流的降雨时间

Table 1 Rainfall time of debris flow formation in Baiyangcheng Gully under different rainfall intensities

Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹)	Rainfall time of debris flow formation/h
65	3.6
78	2.8
88	2.3

5 结论

GDEM-GAVA 是一款模拟小流域场次暴雨山洪泥石流全过程的数值模拟软件，其核心理论为基于垂向积分模式的降雨-洪水-泥石流多过程耦合模型。文章借助 GDEM-GAVA，开展了白羊城沟泥石流的成灾风险分析，获得如下结论。

(1) 采用历史灾情数据对白羊城沟泥石流物源区的力学参数进行了反演分析，给出了较为合理的物源力学参数为：饱和黏聚力 0.5~1 kPa，饱和内摩擦角 5°~10°。

(2) 对修正后的白羊城沟泥石流数值模型进行了持续性降雨模拟, 结果表明: 降雨强度越大, 沟道形成泥石流所需的时间越短; 降雨强度为 65 mm/h 时, 沟道形成泥石流的时间为 3.6 h, 降雨强度为 78 mm/h 时, 沟道形成泥石流的时间为 2.8 h; 降雨强度为 88 mm/h 时, 沟道形成泥石流的时间为 2.3 h。

本文所得结论可为白羊城沟泥石流的科学预警提供必要的依据。

参 考 文 献

- 曹琛. 北京市房山区西区沟小流域山洪泥石流灾害预测预警研究. 长春: 吉林大学, 2017
Cao Chen. Study of flash flood and debris flow disaster prediction and early warning system for Xiqugou Catchment, Fangshan District, Beijing. Changchun: Jilin University, 2017 (in Chinese)
- 唐得胜. 基于FLO-2D模型的不同频率泥石流数值模拟研究. 成都: 成都理工大学, 2014
Tang Desheng. The numerical simulation study on the debris-flow in different frequency base on FLO-2D. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014 (in Chinese)
- 崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 137-147
Cui Peng, Zou Qiang. Theory and method of mountain torrential debris flow risk assessment and risk management. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 137-147 (in Chinese)
- Cui P, Zhou GGD, Zhu XH, et al. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures. *Geomorphology*, 2013, 182: 173-189
- 舒和平, 孙爽, 马金珠等. 甘肃省南部单沟泥石流灾害风险评估. *山地学报*, 2016, 34(3): 337-345
Shu Heping, Sun Shuang, Ma Jinzhu, et al. Risk assessment of single gully debris flow disaster in southern Gansu Province. *Mountain Research*, 2016, 34(3): 337-345 (in Chinese)
- 黄勋, 唐川. 基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评价. *地球科学进展*, 2016, 31(10): 1047-1055
Huang Xun, Tang Chuan. Quantitative risk assessment of debris flow disaster based on numerical simulation. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 1047-1055 (in Chinese)
- 刘鑫磊, 唐川, 方群等. 基于数值模拟的溃决型泥石流危险性评价研究. *泥沙研究*, 2017, 42(6): 28-34
Liu Xinlei, Tang Chuan, Fang Qun, et al. Risk assessment of outburst debris flow based on numerical simulation. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(6): 28-34 (in Chinese)
- 杨涛, 唐川, 常鸣等. 基于数值模拟的小流域泥石流危险性评价研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(1): 197-204
Yang Tao, Tang Chuang, Chang Ming, et al. Study on risk assessment of debris flow in small watershed based on numerical simulation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(1): 197-204 (in Chinese)
- Ouyang C, Zhao W, Xu Q, et al. Failure mechanisms and characteristics of the 2016 catastrophic rockslide at Su village, Lishui, China. *Landslides*, 2018, 15(7): 1391-1400
- 熊坤勇, 范宣梅, 杨帆等. 九寨沟九寨沟天堂泥石流沟特征分析与模拟预测. *科学技术与工程*, 2020, 20(27): 10989-10995
Xiong Kunyong, Fan Xuanmei, Yang Fan, et al. Characteristics and numerical simulation of debris flow in Jiuzhai Paradise, Jiuzhaigou. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(27): 10989-10995 (in Chinese)
- 刘铁骥, 孙书勤, 赵峥等. 基于Massflow模型的冷渍沟泥石流工程治理效果评价. *水利水电技术*, 2020, 51(10): 195-201
Liu Tieji, Sun Shuqin, Zhao Zheng, et al. Massflow model-based evaluation on effect of engineering treatment of debris flow in Lengzigou Gully. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2020, 51(10): 195-201 (in Chinese)
- Staffler H, Pollinger R, Zischg A, et al. Spatial variability and potential impacts of climate change on flood and debris flow hazard zone mapping and implications for risk management. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2008, 12(6): 1873-1882
- 胡明鉴, 汪稔, 陈中学等. 泥石流启动过程PFC数值模拟. *岩土力学*, 2010, 31(S1): 394-397, 434
Hu Mingjian, Wang Ren, Chen Zhongxue, et al. Initiation process simulation of debris deposit based on particle flow code. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(S1): 394-397, 434 (in Chinese)
- 周健, 杜强, 于仕才. 泥石流启动试验的数值模拟研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(9): 96-103
Zhou Jian, Du Qiang, Yu Shicai. Numerical simulation-study on the experiments of the initiation of debris flow. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(9): 96-103 (in Chinese)
- 马秋娟, 唐阳, 宿辉. 泥石流启动过程试验与数值模拟研究. *科学技术与工程*, 2015, 15(25): 7-10, 16
Ma Qiujuan, Tang Yang, Su Hui. Experimental and numerical simulation of debris flow starting process. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(25): 7-10, 16 (in Chinese)
- 胡卸文, 刁仁辉, 梁敬轩等. 基于CFX的江口沟泥石流危险区范围预测模拟. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1689-1696
Hu Xiewen, Diao Renhui, Liang Jingxuan, et al. Prediction of the scope of Jiangkou gully debris flow hazard using CFX software. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1689-1696 (in Chinese)
- 李兆华, 胡杰, 冯吉利等. 基于黏弹塑性本构模型的泥石流数值模拟. *岩土力学*, 2018, 39(S1): 513-520
Li Zhaohua, Hu Jie, Feng Jili, et al. Numerical simulation of debris flow based on viscoelastoplastic constitutive model. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S1): 513-520 (in Chinese)
- 王志超, 李大鸣. 基于SPH-DEM流-固耦合算法的滑坡涌浪模拟. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1226-1232

- Wang Zhichao, Li Daming. Fluid-structure coupling algorithm based on SPH-DEM and application to simulate landslide surge. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1226-1232 (in Chinese)
- 19 韩征, 栗滨, 李艳鸽等. 基于HBP本构模型的泥石流动力过程SPH数值模拟. *岩土力学*, 2019, 40(S1): 477-485, 510
- Han Zheng, Su Bin, Li Yanke, et al. Smoothed particle hydrodynamic numerical simulation of debris flow process based on Herschel-Bulkley-Papanastasiou constitutive model. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 477-485, 510 (in Chinese)
- 20 陈伟. 运用Voellmy模型方法模拟泥石流运动堆积动力过程. *地质学刊*, 2015, 39(2): 334-338
- Chen Wei. Simulation of dynamic process of debris flow movement and accumulation using Voellmy model. *Journal of Geology*, 2015, 39(2): 334-338 (in Chinese)
- 21 潘青, 张清照, 李艺灵. 基于EDEM的碎屑流运动规律及冲击性能研究. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1057-1065
- Pan Qing, Zhang Qingzhao, Li Yiling. Discrete element simulation study of debris flow movement law and impact performance. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1057-1065 (in Chinese)
- 22 Mcguire LA, Kean JW, Staley DM, et al. Constraining the relative importance of raindrop- and flow-driven sediment transport mechanisms in postwildfire environments and implications for recovery time scale. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2016, 121(11): 2211-2237
- 23 Mcguire LA, Rengers FK, Kean JW, et al. Debris flow initiation by runoff in a recently burned basin: Is grain-by-grain sediment bulking or en masse failure to blame. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 7310-7319
- 24 黄灿, 刘青泉, 王晓亮. 梯级溃坝洪水洪峰增强机制. *力学学报* 2020, 52(3): 645-655
- Huang Can, Liu Qingquan, Wang Xiaoliang. Mechanism of peak discharge enhancement of cascade dam break floods. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(3): 645-655 (in Chinese)
- 25 Wang XL, Li JC. A new solver for granular avalanche simulation: indoor experiment verification and field scale case study. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2017, 60(12): 124712
- 26 Wang XL, Yang S, Yu WX, et al. Runout and deflection of granular flow on steep terrains with an array of obstacles. *European Journal of Mechanics -B Fluids*, 2022, 94: 37-49
- 27 Liu QQ, Pan MH, Wang XL, et al. A two-layer model for landslide generated impulse wave: simulation of the 1958 Lituya bay landslide impact wave from generation to long-duration transport. *Advances in Water Resources*, 2021, 154: 103989

(责任编辑: 王永会)