文章编号：1006－4362(2024)01－0096－06

基于 Massflow 模型的某弃渣场溃决运动特征及危险评价

孟宪森[1]，石豫川[1]，王璟玉[2]，魏松[1]，吕丰[1]
（1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，成都 610059；
2. 中国电建集团华东勘察设计研究院有限公司，杭州 311122）

摘要： 弃渣场是一个具有高势能、物源量大的危险源，一旦发生溃决运动，会对下游公共安全造成严重威胁。本次研究选取某沟谷弃渣场为研究对象，在现场调查和试验基础上，建立高精度三维模型。依据稳定性计算成果，弃渣体在极端情况下的失稳规模约 19×10^4 m^3，运用 Massflow 模拟弃渣体的溃决泛滥范围、监测点处流速和流深以及危险性分区。研究表明：溃决运动共持续 300 s，溃决运动主要沿沟道主沟滑动，主滑方向的平均厚度约 2.94 m，最大泛滥距离约 270 m，溃后龙头处距离两处村落分别为 231 m 和 379 m；监测点处速度显示，溃决运动速度具有突然增加，然后逐渐减少的趋势，整个溃决运动分为启动加速、稳定蠕滑和减速堆积 3 个阶段；溃后危险性分区表明，低、中、高风险区占比分别为 49.32%、25.64%、25.64%，对居民区无明显影响。研究成果可分析弃渣场溃决运动路径、泛滥范围及运动速度特征等，对降低弃渣场溃决风险和应急响应具有重要指导意义。

关键词： 弃渣场；溃决运动特征；Massflow；数值模拟
中图分类号： P694；X4；X83 **文献标识码：** A

CHARACTERISTICS OF OUTBURST MOVEMENT AND RISK ASSESSMENT OF A SLAG DUMP BASED ON MASSFLOW MODEL

MENG Xian-sen[1], SHI Yu-chuan[1], WANG Jing-yu[2], WEI Song[1], LYU Feng[1]
(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: The spoil field represents a man-made hazardous source with significant potential energy and a large amount of material. Once an outburst movement occurs, it poses a severe threat to downstream residents, engineering facilities, and the ecological environment. In this study, a specific slag dump was selected as the research subject, and a highly precise three-dimensional model of the study area was established based on field investigations. The stability calculations indicated that the waste slag body could reach an instability scale of approximately 190 000 m^3 in extreme scenarios. To simulate the outburst flood range, flow velocity, flow depth, and risk zoning under these conditions, Massflow was utilized. The findings revealed that the outburst movement lasted for 300 seconds. The primary direction of the outburst movement followed the main gully of the dump, with an average thickness of approximately 2.94 m. The maximum flooding distance was approximately 270 m, and the

收稿日期： 2023-10-08 **改回日期：** 2023-12-12

distances between the outburst source and two nearby villages were measured at 231 m and 379 m, respectively. The velocity at the monitoring point exhibited a sudden increase followed by a gradual decrease, and the entire outburst movement was categorized into three stages: starting acceleration, stable creep, and deceleration accumulation. Furthermore, the risk zoning analysis conducted after the collapse indicated that the proportions of low, medium, and high-risk areas were approximately 49.32%, 25.64%, and 25.64%, respectively. Importantly, no significant impact on residential areas was observed. The research outcomes provide valuable insights for analyzing the movement paths, flooding ranges, and velocity characteristics of spoil dumps, thus guiding efforts to reduce the risks associated with spoil dumps and enabling effective emergency response.

Key words: spoil field; outburst movement characteristics; Massflow; numerical simulation

弃渣场是工程建设中对不能利用的开挖土石方、拆卸混凝土或者混合物所选择的处置或堆放场地的总称。弃渣场与尾矿库类似具有高势能的人造危险源，一旦溃坝，将严重威胁下游居民、工程设施和生态环境[1, 2]。弃渣场发生溃坝的案例屡见不鲜，2015 年深圳光明新区弃渣场滑坡造成 77 人死亡，33 余处房屋被毁[3]；2005 年印度尼西亚万隆洛乌维皮加山弃渣场失稳导致 143 人与 71 处房屋被埋[4]；1985 年意大利 Stava 尾矿坝发生溃决，溃决运动造成 269 人死亡和巨大的财产损失[5]。因此确定弃渣场溃决运动路径和影响范围对于减灾防灾具有重要研究意义。

近年以来随着计算机计算能力和数值模拟的不断发展，数值分析的方法越来越受广大学者重视，是分析滑坡及颗粒材料动力过程的有效方法。众多学者利用数值模拟对溃决运动特征展开了大量研究，欧阳朝军[6]基于 MacCormack-TVD 的有限差分方法建立了二维山区流动态求解软件（Massflow-2D），该软件将滑动体的运动类型视为连续介质，同时考虑地形地貌对运动过程的影响，在保证计算精度的前提下对物质的质量、动量守恒方程进行计算，在溃坝、滑坡、泥石流等动力分析方面得到了广泛应用[7-10]；Savage 等[11]提出了平均积分方法，主要应用于滑坡、碎屑流、雪崩、水动力过程；Wang 等[12]通过 FLO-2D 软件以泥石流不同的拦挡坝和沟道纵坡降为变量探讨其对溃坝尾砂沉积、砂流能力损失变化的影响。

Massflow 基于深度积分的基本原理，能揭示滑坡、泥石流、溃坝、山洪等山地灾害的时空演化过程，将三维问题二维化，有效地提高了计算效率。丁邦政[13]运用 Massflow 软件计算尾矿库溃决过程中溃体的最大冲击高度、冲击力、流速等对桥墩的影响；林小莉[14]基于无人机航空摄影生成 DEM，结合 Massflow 软件模拟某尾矿库溃后运动路径及淹没区域，为降低尾矿库溃决风险提供重要意义。

以往学者通常默认全部弃渣体参与溃决运动，而结合稳定性计算成果推演失稳影响范围的研究较少，故本文基于稳定性计算成果，采用 Massflow 对某弃渣场极端强降雨工况下失稳规模的溃决运动特征进行数值模拟，分析弃渣溃决运动路径、泛滥范围及运动速度等动力学特征。研究成果可为应急部门提供具有参考价值的危险范围，旨在减少弃渣场溃决造成的人员伤亡和财产损失。

1　前言

1.1　弃渣场概况

研究区弃渣场位于沟道内，属沟道型弃渣场，设计占地 8×10^4 m^3，堆积方量 87×10^4 m^3，下游分布两处村落（图 1）。弃渣场所处沟段长约 395 m，平均纵坡降 134‰，常年流水。两岸地形坡度 25°～45°，山脊、垭口及沟口局部稍缓，其余陡峻，左岸山体发育多处陡崖，植被较发育，山坡以乔木、灌木、毛竹为主。沟底局部基岩出露，未见规模较大的泥石流、滑坡等不良物理地质现象。

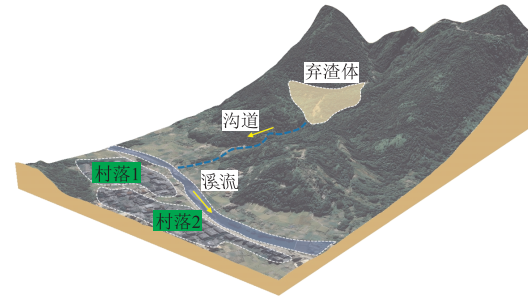
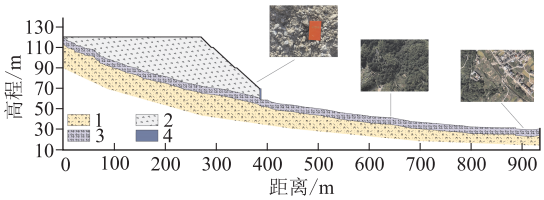


图 1　弃渣场与村落相对位置

渣场布置现地面高程 50～120 m，坡体结构按照 1∶2 进行放坡(图 2)。弃渣体物质多为基岩开挖产生的砾石和粗砂，弃渣体颗分曲线可见图 3。



1. 熔结凝灰岩；2. 弃渣堆积体；3. 卵砾石；4. 挡土墙

图 2 弃渣场典型工程地质剖面

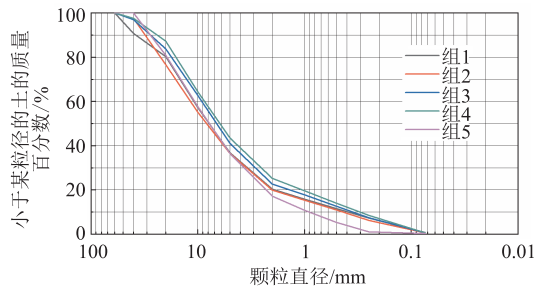


图 3 弃渣堆积体颗分曲线

1.2 弃渣场极端降雨下失稳规模

为研究弃渣场极端降雨下的失稳规模，根据确定的降雨强度，计算出渣场在各级降雨强度下的稳定性见表 1 所示，失稳阈值下的稳定性示意图见图 4。

表 1 各级降雨作用下弃渣场稳定性系数

计算对象	工况一 200 mm/d	工况二 300 mm/d	工况三 400 mm/d	工况四 500 mm/d	工况五 600 mm/d	工况六 625 mm/d
整体	1.649	1.641	1.631	1.607	1.572	1.560
局部	1.240	1.208	1.168	1.118	1.055	1.050

注：计算结果为计算时长内的最低稳定性系数。

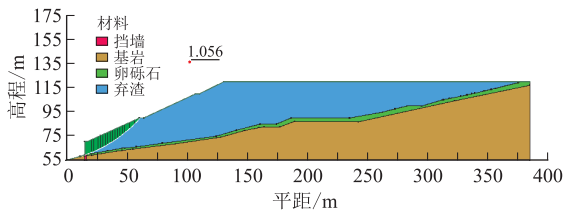


图 4 雨强为 625 mm/d 连续降雨 2 d 时弃渣失稳范围

通常将边坡稳定性系数小于 1.05 时视为失稳，此时边坡可能发生破裂变形，随时可能发生失稳破坏。从上表 1 可知，当降雨强度为 625 mm/d 并连续降雨 2 d 时，弃渣场的局部稳定性恰为 1.056，故将此时的降雨强度视为弃渣场的降雨失稳阈值。

弃渣场在降雨极端情况下发生失稳时，主要是高程 70～90 m 范围内发生局部失稳滑动，即从坡面第一级平台处发生失稳，而失稳的平均厚度约为 9.5 m，从剖面图中得出失稳面积为 453 m^2，渣场平均宽度约为 210 m，以此得出弃渣体在降雨失稳阈值下发生局部失稳滑动的方量约为 19×10^4 m^3。

2 模型建立与参数取值

针对弃渣场溃决运动特征的进一步研究，采用中国科学院山地所自主研发的数值模拟软件 Massflow，该软件建模效率高且计算速率较快，目前已经在 2015 年深圳光明新区弃土场滑坡、2018 年四川金沙江白格滑坡得到应用[15, 16]，并且取得较好的效果。因此利用 Massflow 数值模拟软件对弃渣场溃决运动特征的研究是可行的。

2.1 模型建立

本次研究，收集到研究区 1∶1 000 地形等高线和高精度遥感影像。通过 ArcGIS 对原始地形高程数据转化，获取原始地形和弃渣体地形的高精度 DEM。根据 GeoStudio 稳定性计算结果，模拟极端强降雨下，局部弃渣场发生溃决运动，启动方量约 19×10^4 m^3。考虑到 Massflow 模型采取的网格计算方式，计算网格的大小直接影响计算结果的精度，一般来说网格划分越精细，模拟结果越接近真实值，此外还要考虑到计算机的计算能力。针对以上问题，最终确定模拟区域选用 3 m×3 m 的均匀网格，共计 97 388 个计算网格，计算模型可见图 5。

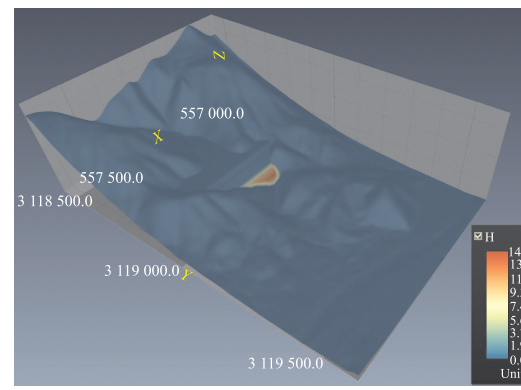


图 5 溃决运动计算模型(云图处为参与溃决运动的弃渣体)

2.2 模型选取及参数取值

Massflow 数值模拟计算中通常运用到的基底摩擦模型主要有：库伦模型(Coulomb model)、宾汉姆模型(Bingham model)、曼宁模型(Manning model)、Voellmy 模型(Voellmy model)。不同模型所需的参数和应用工况不同，譬如，库伦模型是基于

莫尔-库伦强度破坏准则来推导的一种基底摩擦模型，常被运用于滑坡、碎屑流等地质灾害动力过程研究，该模型所需要岩土体积密度、内聚力、内摩擦角等参数，可参考室内试验获得数据；宾汉姆模型是一种适用于非牛顿流体的摩擦模型。其物理意义是指当外力逐渐增大，超过极限屈服应力时，流体将由塑性流动转变成粘性流动；曼宁模型主要适用于洪水、溃坝等水动力学范围的研究；Voellmy 模型是基于库伦模型发展演变而来，在库伦模型基础上增加了湍流项，假定流体所受应力为摩擦力和湍流流动产生的额外阻力之和，适用于泥浆、泥石流等灾害。结合本文弃渣场溃决特点，库伦模型可模拟滑坡、碎屑流等灾害运动特征，并考虑弃渣体的抗剪强度参数，使模拟结果更加准确。因此选用库伦模型作为弃渣场溃决运动模型。

相关参数包括黏聚力、内摩擦角、基底摩擦系数和孔隙水压力。最终确定饱和内摩擦角 φ 依据室内中型直剪试验结果取值 25°，基底摩擦系数 f 为内摩擦角的正切值取 0.45，在极端条件下弃渣场属于极度饱和状态，故黏聚力 c 接近于 0，对于孔隙水压力根据已有参考文献[17，18]记录，其范围值一般在 0.6～0.8，本文综合考虑研究区实际情况，孔隙水压力 λ 取值 0.6(表 2)。

表 2　弃渣场溃决模拟参数

模型参数	取值
网格精度	3 m×3 m
基底摩擦模型	Coulomb
黏聚力 c	0
内摩擦角 φ	25°
基底摩擦系数 f	0.45
孔隙水压力 λ	0.6

3　弃渣场溃决运动特征分析

3.1　弃渣体堆积情况

模拟结果显示，溃决运动具有突发性，溃决运动初期堆积厚度变化较大，运动过程中堆积体逐渐破碎解体，以类似于泥石流运动特征向沟口滑动。弃渣体溃决运动在 t=300 s 时基本停止，堆积物主要停留在沟道中游和沟口，少量堆积于左侧支沟内，不同时刻的溃决堆积范围见图 6。

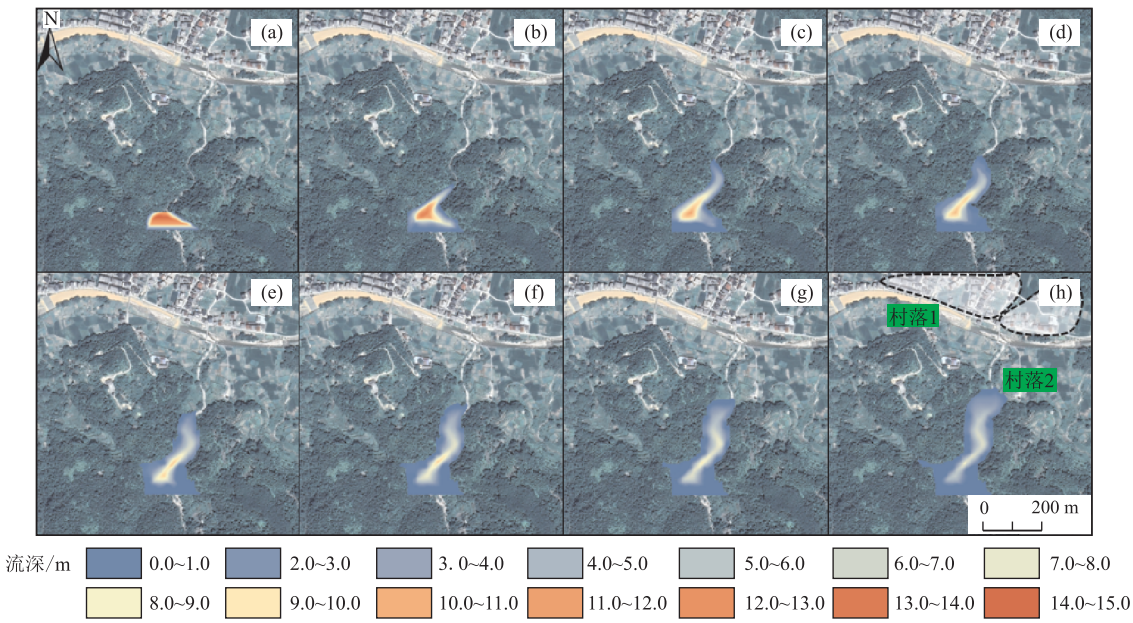


图 6　不同时间步数下溃决堆积体埋深(a=0 s；b=10 s；c=20 s；d=50 s；e=100 s；f=150 s；g=200 s；h=300 s)

堆积体前缘较陡，溃决运动在前 20 s 内堆积厚度突然降低，由初始最大堆积厚度 14.8 m 降至 10.53 m(图 6c)，之后沿主沟方向蠕滑。运动至 100 s 时，堆积体龙头处到达出山口(图 6e)，200 s 至 300 s 在出山口处泛滥堆积，最终在 300 s 时，主体物质基本停止(图 6g、h)。弃渣堆积体主要堆积于沟道主沟内，少量堆积于出山口处，最大堆积厚度约 6.15 m，平均堆积厚度约 2.94 m。溃后堆积龙头处距离原始堆积体坡脚处约 270 m，龙头处距离村落 1 约 231 m；距离村落 2 约 379 m，最终堆积形态见图 6 h。

此极端工况下，弃渣体溃后泛滥范围对两处村落影响较小。

3.2 弃渣体堆积厚度及速度分析

弃渣场溃决运动是个动态过程，为更好地了解不同点位在弃渣场溃坝后所面临的情况，本文从溃后堆积范围的角度出发，分别在最终堆积形态的前缘、中部、后缘以及左侧支沟内选取 6 处监测点（见图 7），用来分析弃渣体溃后 300 s 内运动速度和堆积深度的变化规律（见图 8、9）。

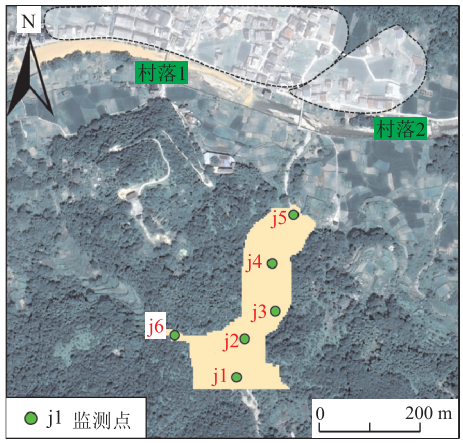


图 7 监测点分布位置

（1）各监测点不同时步下的流速变化见图 8，j1、j2 监测点分布于初始溃决体内部，溃决运动启动时，两点最大速度分别可达 8.58 m/s 和 7.30 m/s；运动至 20 s 和 50 s 时，抵达 j3、j4 监测点，速度骤降至 1.01 m/s 和 0.09 m/s，随后堆积体速度变化幅度较小，以稳定蠕滑的方式持续运动；200 s、300 s 时堆积体抵达 j5、j6 监测点，两点速度分别为 0.221 m/s 和 0.201 m/s，此时溃决运动基本停歇，各监测点速度均小于 1 m/s。对于上述运动过程，溃决运动共经历 3 个阶段即启动加速、稳定蠕滑和减速堆积，启动加速与稳定蠕滑相差时间较短，速度总体呈现突然增加然后逐渐减小的趋势，整个溃决过程以稳定蠕滑的方式运动。

（2）各监测点不同时步下的流深变化见图 9，j1 监测点位于堆积体后缘，在溃决运动开始后该点埋深持续降低，且降低幅度较大；j2、j3、j4 监测点在前 200 s 内埋深厚度变化幅度明显，是由于在溃决运动过程是动态过程，后缘堆积体不断向前蠕滑，埋深厚度在一定范围内浮动，200 s 后各监测点埋深厚度趋于稳定；在第 300 s 时堆积体抵达 j5、j6 监测点，且埋深厚度较小分别为 0.24 m 和 0.01 m。

弃渣溃后大多物质停留在沟道内部，龙头处堆积物质少，埋深较小。

综上分析，弃渣场溃决运动具有突发性，在溃决运动初期阶段堆积厚度变化较大，溃后运动路径主要沿沟道主沟滑动，弃渣堆积体物源大多停留在沟道内部，少量分布于左侧支沟及出山口处，最终弃渣物质未跨越溪流，距离两处村落均较远。

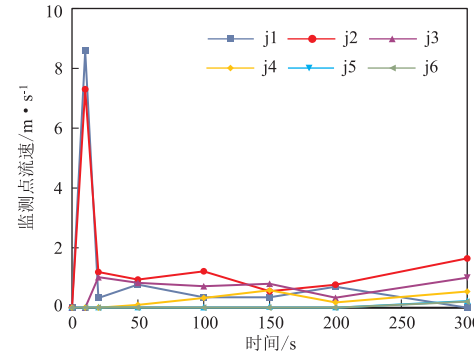


图 8 监测点流速

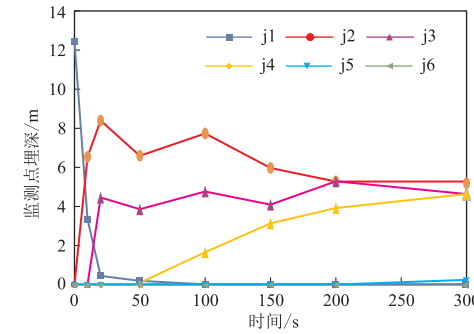


图 9 监测点流深

3.3 溃后危险强度分区

弃渣场溃决运动和泥石流运动较为相似，弃渣场溃决运动强度划分可参考泥石流强度划分标准，根据常鸣[19]建立泥石流强度影响及危险性分区标准，如表 3。首先运用 ArcGis 中栅格计算器工具，将相关栅格数据叠加运算后，再利用重分类工具，将低、中、高强度区属性分别赋值 1、2、3，得到弃渣溃后危险性强度分区如图 10。

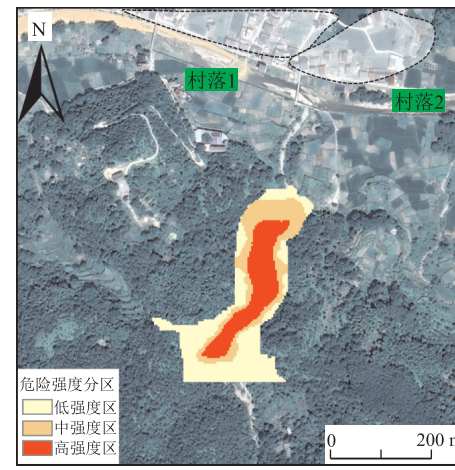


图 10 溃后危险强度分区

表 3　溃后危险强度划分

溃后危险强度	流深 H/m	关系	流深 H 与最大流速 v 乘积/$m^2 \cdot s^{-1}$
高	$H \geqslant 2.5$	*OR*	$HV \geqslant 2.5$
中	$0.5 \leqslant H < 2.5$	*AND*	$0.5 \leqslant HV < 2.5$
低	$H < 0.5$	*AND*	$HV < 0.5$

由图 10 可见，通常在埋深厚、流速大的地方危险性也往往较高，其中低风险区占比 49.32%，中风险区占比 25.64%，高风险区占比 25.04%。低风险和中风险区主要集中在溃后堆积体的后缘、龙头、左侧支沟处，高风险主要集中在主沟沟道内部。模拟结果表示，溃后风险区对两处居民点无显著影响，但沟道主滑方向的危险性远大于出山口和左侧支沟，可根据模拟结果进行重点防治。

4　结论

利用 Massflow 模拟某弃渣场在极端强降雨工况下，弃渣体失稳溃决运动特征，对溃后不同时刻的泛滥范围、监测点处的流速和流深以及危险强度分区进行分析，得出以下结论：

（1）弃渣场溃决运动具有突发性，溃决运动初期堆积厚度变化较大，堆积路径主要沿主沟道运动，弃渣堆积体物源大多停留在沟道内部，少量分布于左侧支沟及沟口处。

（2）溃决运动过程共持续 300 s，沿主滑方向的平均厚度约 2.94 m，最大堆积厚度约 6.15 m，最大泛滥距离约 270 m，距离两处村落距离分别为 231 m 和 379 m。

（3）监测点结果表明，溃决运动共经历 3 个运动阶段：启动加速、稳定蠕滑和减速堆积，速度呈现出突然增加然后逐渐减小的趋势。

（4）对溃后堆积形态危险性分区表明，低风险区占比 49.32%，中风险区占比 25.64%，高风险区占比 25.04%。低风险和中风险区主要集中在溃后堆积体的后缘、龙头、左侧支沟处，高风险主要集中在主沟沟道内部，对居民区无明显影响。

参考文献

[1] 宋词，郑光玉，黄炬斌，等. 高寒灌丛草甸区的弃渣体场地生态修复技术研究[J]. 地质灾害与环境保护，2021，32(1)：109-112.

[2] 肖维阳，时幸幸，裴向军. 高寒山区流域汇水径流作用下弃渣型泥石流启动影响因素研究[J]. 地质灾害与环境保护，2022，33(4)：59-70.

[3] Yin Y，Li B，Wang W，et ak.. Mechanism of the December 2015 Catastrophic Landslide at the Shenzhen Landfill and Controlling Geotechnical Risks of Urbanization [J]. Engineering，2016，2(2)：230-249.

[4] Lavigne F，Wassmer P，Gomez C，et al.. The 21 February 2005，catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite，Bandung，Indonesia[J]. Geoenvironmental Disasters，2014，1(1)：1-12.

[5] Luino F，De Graff J V. The Stava mudflow of 19 July 1985 (Northern Italy)：a disaster that effective regulation might have prevented[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences，2012，12(4)：1029-1044.

[6] Ouyang C，He S，Xu Q，et al.. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain[J]. Computers & Geosciences，2013，52(10)：1-10.

[7] Wang D，Zhou Y，Pei X，et al.. Dam-break dynamics at Huohua Lake following the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in Sichuan，China[J]. Engineering Geology，2021，289：106-145.

[8] 熊朝正，吉锋，石豫川. 基于 Massflow 模型的青龙沟台风暴雨型泥石流运动特征研究[J]. 人民珠江，2023，44(3)：17-22.

[9] 周琪，许强，周书，等. 基于数值模拟的突发型黄土滑坡运动过程研究——以黑方台陈家 8# 滑坡为例[J]. 山地学报，2019，37(04)：528-537.

[10] 王学良，孙娟娟，周书，等. 尾矿库溃坝运动特征模拟研究[J]. 工程地质学报，2019，27(1)：144-151.

[11] B. S S，K. H. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline[J]. Journal of Fluid Mechanics，1989，199(1)：177-215.

[12] Guangjin W，Sen T，Bin H，et al.. Evolution Pattern of Tailings Flow from Dam Failure and the Buffering Effect of Debris Blocking Dams[J]. Water，2019，11(11)：23-88.

[13] 丁邦政. 基于 GIS 和 Massflow 仿真的尾矿库溃坝危害下的桥梁风险评估[D]. 华中科技大学，2019.

[14] 林小莉，刘英，张清凌，等. 基于无人机航空摄影的尾矿库溃坝数值模拟[J]. 水利水电技术(中英文)，2021，52(5)：71-81.

[15] 曹水合，吴新明，钟东. 基于 Massflow 的金沙江白格滑坡数值模拟及堵江风险预测[J]. 地质灾害与环境保护，2021，32(4)：3-7.

[16] 周凯琦. 基于单层单相流和多层多相流的灾害动力学数值模拟[D]. 华中科技大学，2017.

[17] 刘建麟，吕义清，徐博. 基于 MacCormack-TVD 有限差分算法的二维泥石流数值计算模型[J]. 科技通报，2019，35(4)：222-228.

[18] 任赞松. 尾矿库坝体稳定性与溃坝危险性评价[D]. 成都理工大学，2018.

[19] 常鸣. 基于遥感及数值模拟的强震区泥石流定量风险评价研究[D]. 成都理工大学，2014.

作者简介： 孟宪森(1998—　)，男，硕士研究生，研究方向为地质灾害稳定性预测评价。E-mail：953605521@qq.com