

# 基于GDEM的泥石流启动过程及成灾范围反演分析

周平根<sup>1</sup>, 冯春<sup>2,3</sup>, 武杰<sup>2,3</sup>, 王喜彦<sup>4</sup>

- (1. 中国地质环境监测院, 北京 100081;  
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;  
3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;  
4. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

**摘要:** 降雨型泥石流形成过程是一个水力耦合的复杂非线性过程, 四川省绵竹市清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害造成严重经济损失和人员伤亡。根据现场调查和资料收集, 在文家沟区域地质环境条件的基础上, 分析文家沟泥石流的形成条件; 基于GDEM力学分析软件, 采用深度积分的有限体积法对“8·13”泥石流的启动过程和成灾范围进行反演分析: 启动阶段物源变形模拟采用摩尔库伦准则, 当松散物源摩擦角为 $8^\circ$ 、黏聚力为50 Pa时, 降雨1 h后, 泥沙浓度达到15%, 泥石流初步形成; 运动堆积阶段泥石流运动及铲刮效应模拟采用Savage-Hutter模型, 综合摩擦系数为 $3^\circ$ 时的成灾范围与“8·13”泥石流的成灾范围基本一致。

**关键词:** GDEM; 泥石流; 地质灾害; 力学模拟; 启动过程; 成灾范围; 文家沟

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 1001-683X(2024)01-0038-10

DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2023.12.24.001

## 0 引言

降雨型泥石流的启动过程与成灾范围分析对泥石流预测预报具有重要意义。2010年8月12日18时一次日4时, 绵竹市清平乡出现大暴雨, 引发特大泥石流灾害, 共有11条沟发生泥石流, 其中以文家沟泥石流

(简称“8·13”泥石流)灾害规模最为巨大, 造成的灾情也最为严重<sup>[1-3]</sup>。泥石流直冲清平乡新场镇, 并堆积堵塞绵远河, 淤埋绵远河河床宽400 m、长近1 600 m, 平均淤埋厚度6 m, 冲出规模达450万 $\text{m}^3$ , 是我国建国以来有记录的最大单沟泥石流<sup>[4]</sup>, 掩埋房屋400余间, 冲毁、掩埋公路大于1 000 m, 冲毁桥梁1座、损坏桥梁1座、人员死亡5人。

文家沟位于四川省绵竹市北部山区清平乡, 是绵远河左岸的一条支沟, 沟口距离下游清平乡场镇约700 m, 距离绵竹市城区36 km。沟口的坐标为: 东经 $104^\circ 06' 55.3''$ 、北纬 $31^\circ 33' 02.7''$ , 海拔高度为900~

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3007200)

第一作者: 周平根(1966—), 正高级工程师, 博士。

E-mail: bjzhoupg@126.com

通信作者: 武杰(1988—), 副研究员, 博士。

E-mail: jie.voo@gmail.com

910 m。文家沟在汶川“5·12”地震前未发生过泥石流，汶川“5·12”地震过程中诱发文家沟内发生大型滑坡，为文家沟提供了巨量的松散堆积物，之后在每年汛期的大量降雨情况下，文家沟发生多次泥石流灾害<sup>[5]</sup>。震后2008年9月文家沟首次发生泥石流灾害，截至2010年9月共爆发了6次泥石流灾害，共计冲出方量约600万m<sup>3</sup>，其中2010年发生的“8·13”泥石流最典型，规模和造成的灾情也最大<sup>[6-17]</sup>。

在“8·13”特大泥石流现场调查、资料收集和地质条件分析的基础上，基于GDEM力学分析系列软件，采用深度积分有限体积法，研究了该泥石流形成条件、降雨启动过程和成灾范围，对文家沟泥石流今后的治

理和监测有一定意义。

## 1 区域地质环境条件

### 1.1 文家沟流域地形地貌

文家沟位于绵竹市西北部龙门山山区，属构造侵蚀中切割陡峻低山—中山地貌、山地深切割沟谷地形，山高坡陡。汶川“5·12”地震前，文家沟沟底无物源堆积。地震诱发一大型滑坡，滑体在高速下滑过程中转化为碎屑流，并在文家沟留下约 $8 \times 10^7$  m<sup>3</sup>的巨厚滑坡堆积物<sup>[9-12]</sup>。震后沟内碎屑流堆积物诱发多次泥石流，使沟内地形再次改造，“5·12”地震后文家沟航拍全貌见图1。

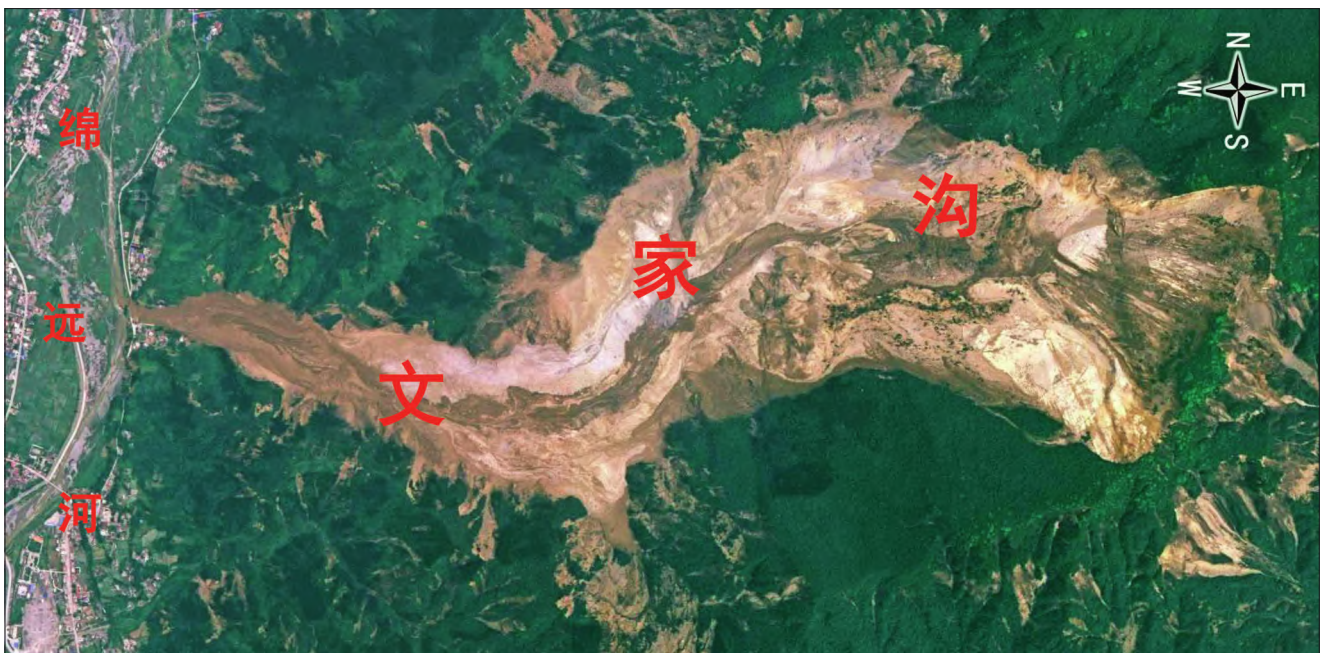


图1 “5·12”地震后文家沟航拍全貌

文家沟流域整体东高西低，最高处顶子崖海拔2 400 m至最低处汇入绵远河处沟口海拔910 m，相对高差达到1 490 m，文家沟主沟道至分水岭处沟长4.9 km，沟谷宽度在315~2 875 m，两侧斜坡坡度较陡，一般在30°~70°，沟谷总体平均坡降达306‰，陡峻的地形和较多不良地质现象为泥石流发育提供了有利条件<sup>[5]</sup>。与文家沟相连的绵远河河床呈“U”形，长约5 km，宽约500 m，河床较为平缓，纵坡降20‰左右。

根据泥石流物源分布和泥石流形成条件，将文家沟流域可划分为3个区：上游韩家大坪和每条支沟上游

部分，划为形成区（汇水区）；中游2级平台（1 300 m平台）是泥石流物源的主要堆积区，划为形成区（物源区）；下游3级平台以下至绵远河顺下游长1.5 km河道为泥石流流通堆积区（见图2）。

### 1.2 文家沟流域地层岩性

文家沟流域主要由泥盆系、寒武系基岩和第四系松散层组成，按由老到新顺序叙述如下：

(1) 寒武系清平组（ $v_1c$ ）基岩，分布于1 300 m平台—沟口一带，岩性大致分3层：上部为质地较细的灰色薄层状钙泥质砂岩，中部为暗紫、灰绿色薄层状钙质砂岩，

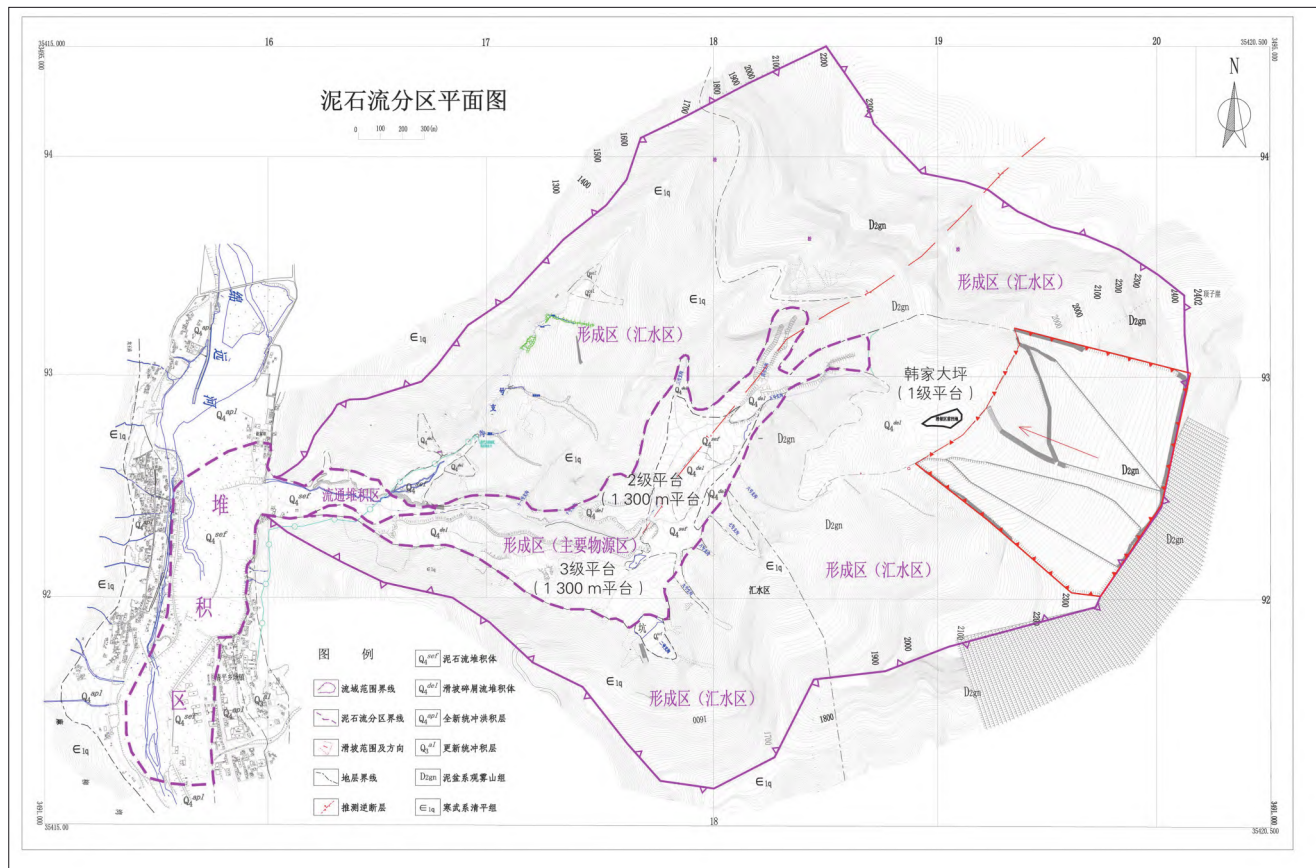


图2 文家沟泥石流分区

下部为灰绿色细粒状磷块岩、泥灰岩，属较硬~坚硬岩。

(2) 泥盆系上统观雾山组 ( $D_{2gn}$ )，分布在文家沟 1 300 m 平台以上、韩家大坪一带，岩性为上部灰白色白云岩和纯灰岩、下部为砂页岩夹泥质灰岩、石英砂岩等，岩石坚硬。

(3) 文家沟内第四系松散层分 3 部分组成：汶川“5·12”地震诱发的文家沟滑坡造成的堆积残留体和滑坡碎屑流堆积物 ( $Q_4^{del}$ )，分布于沟源—文家沟沟口一带；震后不同时间暴雨诱发多次泥石流产生的泥石流堆积物 ( $Q_4^{sef}$ )，主要分布在文家沟沟口—绵远河河床一带；基岩风化残留堆积物 ( $Q_4^{del}$ )，主要分布在沟谷两岸斜坡表面。

### 1.3 文家沟流域地质构造及地震

文家沟位于扬子准地台四川台地向斜西北部，属四川盆地西北部的龙门山推覆构造带前缘，由多个推覆体和绵竹前陆盆地组成，其边界有 4 条断裂带，分别为四道沟断裂、清平—白云山断裂、卸军门断裂和晓坝—金花断裂。文家沟距离西北方向的龙门山中央断

裂带不到 1 km，区内地质构造复杂，断裂褶皱发育、岩体破碎严重<sup>[8]</sup>，新构造活动强烈，为地质灾害发生提供了有利的地质构造条件。

## 2 基于深度积分有限体积法的降雨型泥石流成灾过程数值计算

采用 GDEM 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动力演化过程，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方法<sup>[17]</sup>。在启动阶段物源变形模拟中，方法采用 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：

$$(\rho_b g h_s \cos \theta + \rho_w g h \cos \theta - p_{bed}) \tan \phi_b + h_s \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_s g h_s \cos \theta) + c_b = (\rho_b h_s + \rho_w h) g \sin \theta \quad (1)$$

式中： $h$ 、 $h_s$  分别为水深及堆积物的深度； $\rho_s$ 、 $\rho_w$  分别为堆积物密度及水密度； $g$  为重力加速度； $\theta$  为斜坡角

度； $p_{bed}$ 为基床孔隙水压力； $c_b$ 、 $\phi_b$ 分别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。

在泥石流的运动成灾过程模拟中采用基于Savage-Hutter模型，模型抓住了泥石流运动过程的铲刮和薄层2个重要特征。其中铲刮方面，模型采用基于作用力和抗滑力的铲刮率模型对地质灾害成灾过程中的铲刮效应进行精确描述；薄层方面，该方法考虑泥石流的垂向尺度远小于水平尺度，可以对原始方程采取垂向平均。同时，该模型还能将计算量限制在合理范围之内，因此既非常适合描述滑坡体的运动成灾过程，又能反映地形的影响。大型滑坡碎屑流运动和受力示意图见图3。

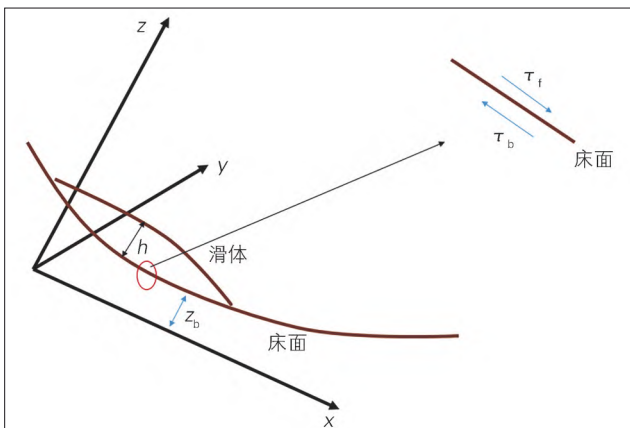


图3 大型滑坡碎屑流运动和受力示意图

建立考虑铲刮效应的地质灾害成灾过程力学模型：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S_f + S_e, \quad (2)$$

式中： $U = (h, hu, hv)^T$  为守恒量， $F = (hu, hu^2 + \frac{1}{2}g_x h^2, huw)^T$ ， $G = (hw, hw^2 + \frac{1}{2}g_y h^2, huw)^T$ ，分2个方向的通量； $S_f = (0, g_x h - g_x h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \tau_{bx}, g_y h - g_y h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \tau_{by})^T$ 、 $S_e = (E, uE, vE)^T$  分别表示地形-摩擦源项和铲刮源项。

$E$ 为铲刮率：

$$E = \frac{1}{\rho} \frac{\tau_f - \tau_b}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (3)$$

式中： $\tau_f$ 为流体作用力； $\tau_b$ 为床面抗滑力。

### 3 文家沟泥石流形成条件

#### 3.1 物源条件

文家沟内物源非常丰富，“5·12”大地震过程中，文家沟发生高位快速顺层滑坡，形成碎屑流堆积在沟道内<sup>[13-14]</sup>，是泥石流发生的主要物源。根据调查，滑坡碎屑流主要堆积于1级平台（韩家大坪）、2级平台（1300m平台）及3级平台处，此外在其支沟中有少部分堆积。

根据勘察统计，文家沟内的碎屑流堆积物总方量为8160万 $m^3$ ，其中上游韩家大坪上堆积体积大约2260万 $m^3$ ，在75.3万 $m^2$ 的面积上堆积厚度大约30~50m，由于堆积体所处的平台地形为凹形，其整体稳定性较好，只有平台两侧陡坡冲沟内的松散堆积物会在水流的冲刷下被携带搬运参与泥石流活动，但是搬运量比较少，韩家大坪的堆积物对泥石流灾害的形成贡献较少。在韩家大坪以下到文家沟沟口的范围内仍然有超过5000万 $m^3$ 的松散堆积物，其中2、3级平台堆积方量分别为2225万、2775万 $m^3$ ，震后发生的多次泥石流灾害的主要物质来源就是3级平台的堆积物，其次为2级平台前部边缘被侵蚀产生<sup>[15]</sup>。根据分析，2级平台如果不断产生溯源侵蚀，可能参与形成泥石流的堆积物动储量约为1330万 $m^3$ 。因为3级平台地势比较陡峻，松散堆积体不断产生垮塌，揭底冲刷，可能参与形成泥石流的堆积物动储量约为1024万 $m^3$ 。另外还有4条支沟的部分堆积物可能参与泥石流活动，总计堆积方量为232.8万 $m^3$ ，可能参与形成泥石流的动储量合计为153.8万 $m^3$ 。但在“8·13”泥石流中，各支沟发生的泥石流都堆积在沟口开阔平坦处，并没有参与主沟的泥石流活动。总之，文家沟沟内固体物质静储量为7492.8万 $m^3$ ，可能参与泥石流活动的动储量为2507.8万 $m^3$ ，也是“8·13”泥石流冲出450万 $m^3$ 固体物质的主要来源。

对文家沟泥石流主要物源区（3级平台）的滑坡碎屑流堆积物进行调查和颗粒分析（见表1），确定该部分堆积物主要为灰岩碎块石、黏土、粉质黏土组成的混合物。为确定其物质组成，特别是大块径碎块石的大致比例，首先采用块径量测法初略得到块径大于200mm的块石占31.4%、块径20~200mm的碎石占35.4%、粒径小于20mm的砾砂及粉黏粒占33.2%。为

进一步确定物源区堆积体物质组成，在现场取样进行风干后采用筛分称重法得到粒径大于20 mm的碎块石

占42.6%、粒径0.074~20 mm的砾砂占56.45%、粒径小于0.074 mm的粉黏粒占0.95%。

表1 文家沟泥石流主要物源区颗粒分析结果统计

| 位置         | 土粒粒径大小占比/% |          |         |        |          |             |               |                | 有效粒径 $d_{10}$ /mm | 中间粒径 $d_{30}$ /mm | 界限粒径 $d_{60}$ /mm | 不均匀系数 $C_u$ |
|------------|------------|----------|---------|--------|----------|-------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------|
|            | 200~60 mm  | 60~20 mm | 20~5 mm | 5~2 mm | 2~0.5 mm | 0.5~0.25 mm | 0.25~0.075 mm | 0.075~0.005 mm |                   |                   |                   |             |
| 冲沟出山口物源区   |            | 19.4     | 41.1    | 17.8   | 16.5     | 3.2         | 1.3           | 0.7            | 0.94              | 3.17              | 10.28             | 11.00       |
| 冲沟出山口下段物源区 |            | 40.8     | 46.9    | 7.2    | 5.1      |             |               |                | 3.86              | 11.82             | 20.30             | 5.26        |
| 物源区中段左侧    | 22.9       | 40.2     | 27.3    | 4.7    | 4.9      |             |               |                | 5.27              | 15.80             | 33.39             | 6.33        |
| 物源区中段右侧    | 11.3       | 35.1     | 25.8    | 11.8   | 10.3     | 3.4         | 1.1           | 1.2            | 0.85              | 5.91              | 26.63             | 31.51       |
| 物源区中下段     |            | 30.1     | 44.1    | 17.7   | 8.1      |             |               |                | 2.34              | 6.02              | 15.46             | 6.60        |
| 物源区下段      | 24.6       | 31.4     | 30.5    | 7.8    | 5.7      |             |               |                | 3.52              | 11.81             | 29.71             | 8.44        |

### 3.2 水源条件

绵竹市属四川盆地中亚热带季风性湿润气候区<sup>[5]</sup>，气候温和，大陆性季风气候特点显著，降水量较多，且主要集中在夏季，占全年降雨量的60%左右，降水的季节分配极不均匀。根据长期观测资料，绵竹市多年平均降水量1 053.2 mm，年最大降水量为1 421.4 mm，最少降水量为608.7 mm。

文家沟区域春季产生的冰雪融水和并不丰富的地下水均无法构成引发泥石流的主要水源，又因区内泥石流多发于雨季，暴雨形成的地表径流是引发文家沟泥石流的主要水源，暴雨是泥石流的主要激发因素。文家沟区域位于九顶山多雨区，降雨具有雨强大，暴雨频率高，波动幅度大等特点，是暴雨常出现的地区之一。

2010年8月12日18时，清平乡开始降雨，开始雨量较小，随后逐渐增大，22:30—次日01:30雨量非常大。根据所收集降雨资料，“8·13”泥石流的日降雨量为227.5 mm，最大降雨量为70 mm/h，降雨历时为3 h左右，主要集中在8月12日22:30—次日01:30，降雨频率为50年一遇。文家沟流域泥石流启动的临界降雨强度为30~40 mm/h<sup>[16]</sup>，引发“8·13”泥石流的降雨量将近其2倍。文家沟流域暴雨汇流时间在1 h左右，地形主要以盆地为主，有利于降雨的集中汇流和径流，为文家沟泥石流的形成提供有利的水源条件。

## 4 “8.13”泥石流启动与运动堆积过程反演

采用GDEM力学分析系列软件中颗粒碎屑流模拟系

统(GDEM-GAVA)，该软件可以较好地分析泥石流启动过程，而GAVA可以快速评估泥石流的成灾路径及成灾范围。

### 4.1 计算模型

根据四川省地质工程集团公司绘制的文家沟泥石流工程地质平面图，建立正交地形计算网格，该网格X方向格点数为250，长7 581 m，Y方向格点数为220，宽6 627 m（见图4）。

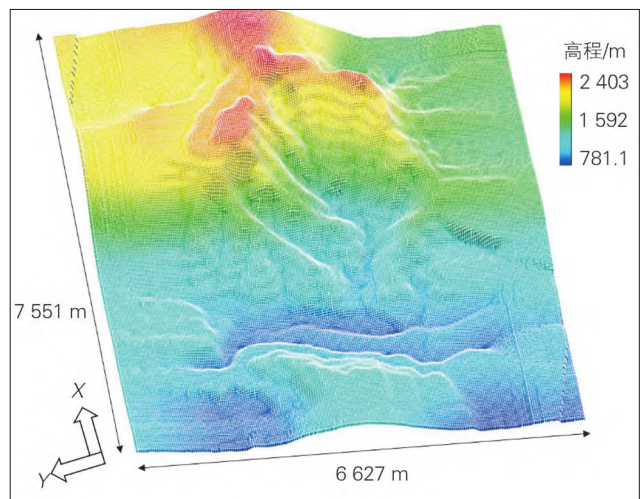


图4 泥石流成灾过程计算模型

### 4.2 “8·13”泥石流启动过程

采用深度积分的有限体积法开展泥石流分析。在计算模型中输入降雨量为70 mm/h，共降雨3 h，分析文家沟发生泥石流时的松散物源强度条件。考虑物源岩土体变形特性，启动过程采用摩尔库伦准

则，当松散物源摩擦角为 $8^\circ$ ，黏聚力为 $50\text{ Pa}$ 时，文家沟发生规模较大的泥石流。该组参数降雨1 h后的泥石流浓度、流速及水深见图5。降雨1 h

后，文家沟内大部分区域的泥沙浓度超过了 $15\%$ ，形成了较为稳定的泥石流；泥沙流输运速度整体上大于 $3\text{ m/s}$ ，局部水深可达 $5\text{ m}$ 以上。

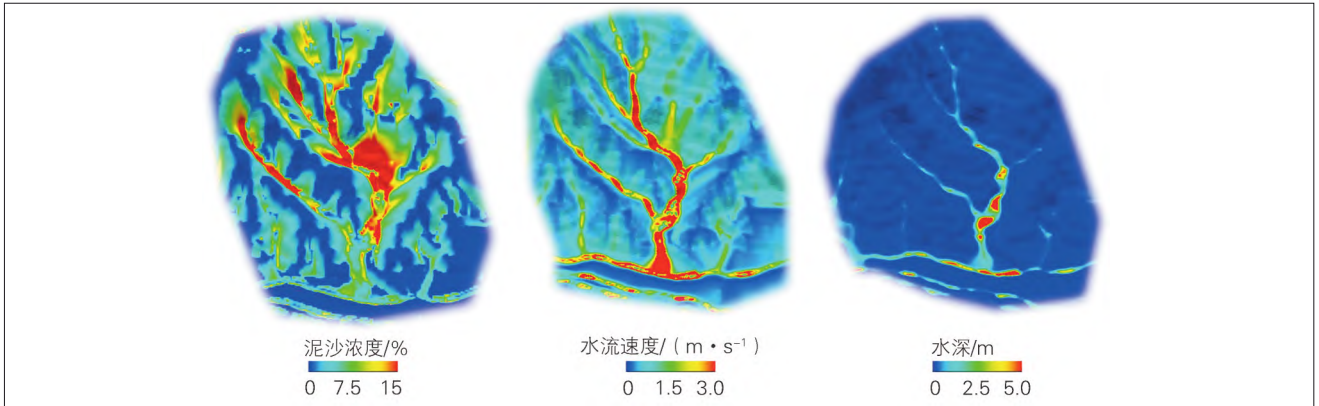


图5 降雨1 h后文家沟内的泥沙浓度、水流速度及水深情况

典型测点的泥沙浓度、水流速度及水深随降雨时间的变化规律见图6。降雨1 500 s后，土体达到饱和，坡面产流逐渐形成。随后，在强降雨作用下，水流携带大

量松散堆积物在水动力作用下逐渐向沟口运移。当降雨3 600 s后，沟道内的泥沙浓度基本达到 $15\%$ ，满足泥石流的评判标准，此时，水流速度约为 $2\sim 5\text{ m/s}$ 。

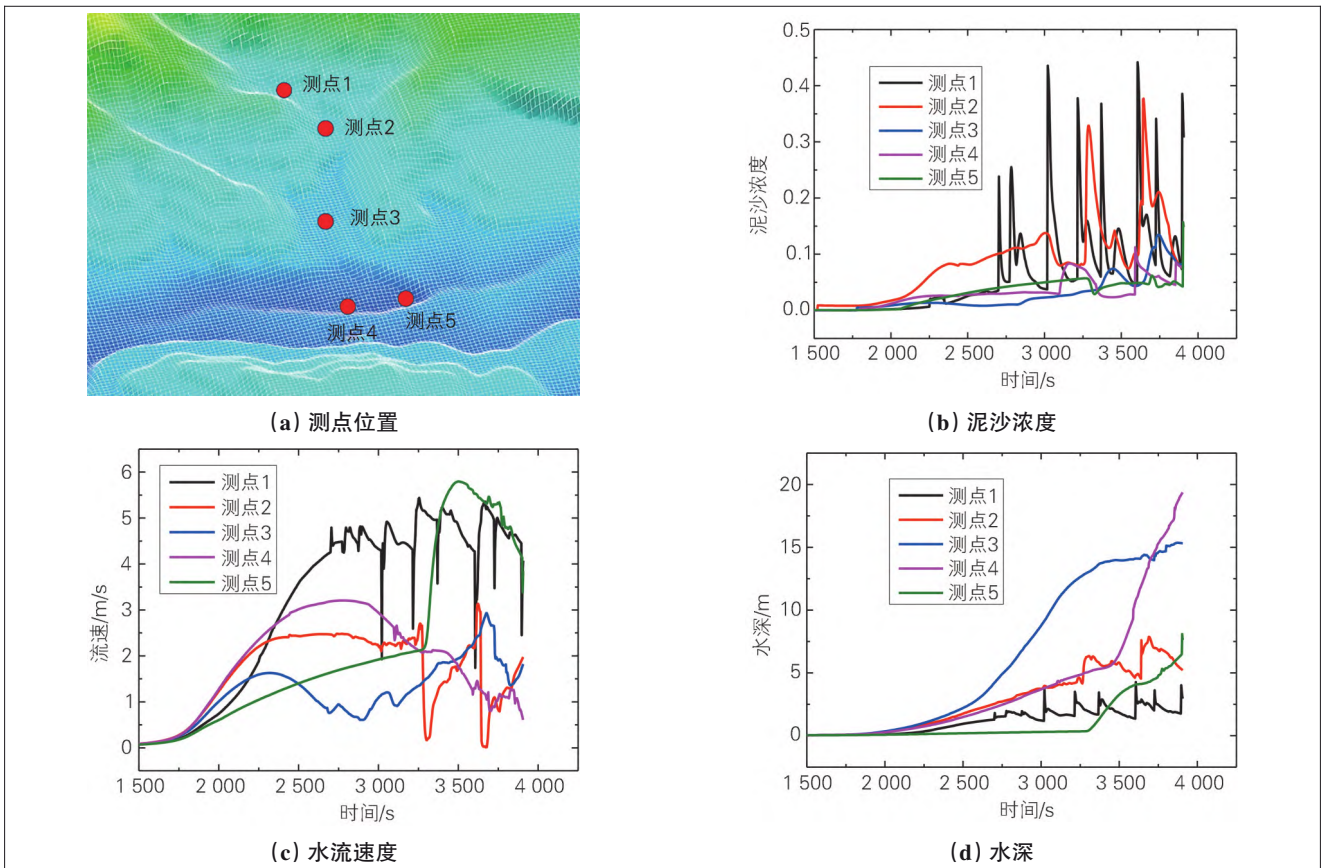


图6 泥沙浓度、水流速度及水深随降雨时间变化规律

### 4.3 “8·13”泥石流运动和堆积过程

采用深度积分有限体积法开展“8·13”泥石流成灾过程的反演分析数值模拟。根据调查，“8·13”泥石流主要物源为3级平台冲沟两侧堆积体，泥石流过后冲沟扩大至深40~60 m，共计冲出固体物质450万 $m^3$ 。所以在模型3级平台所在位置处创建1个最符合实际情况的半椭球形滑体，滑体厚度设置为14 m、半长轴设置为750 m、半短轴设置为205 m，滑体总体积大约为450万 $m^3$ 。考虑泥石流运动过程中流体与床面的摩擦效应，运动过程采用Savage-Hutter模型，根据3级平台所在位置调整泥石流运移过程中的综合摩擦系数，结合当地碎散堆积物特性和计算经验，摩擦系数分别设为 $12^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $6^\circ$ 、

$3^\circ$ 、 $1^\circ$ 。

不同摩擦系数下最终成灾范围见图7。随着综合摩擦系数减小，泥石流成灾范围逐渐增大；当综合摩擦系数大于 $9^\circ$ 时，泥石流并没有发展到沟道，碎屑流主要堆积在文家沟主沟沟道内；当综合摩擦系数为 $6^\circ$ 时，泥石流在沟口略有堆积，但堆积范围不大，没有沿绵远河形成大规模堆积；当综合摩擦系数为 $3^\circ$ 时，成灾范围与“8·13”泥石流成灾范围〔见图7(c)〕基本一致，泥石流完全堵塞了绵远河形成了堰塞坝，沿绵远河堆积近1.5 km，且冲毁掩埋对岸村庄；当综合摩擦系数小于 $3^\circ$ 时，泥石流运动范围过大，大部分泥石流越过绵远河冲到了河对岸，不符合实际情况。

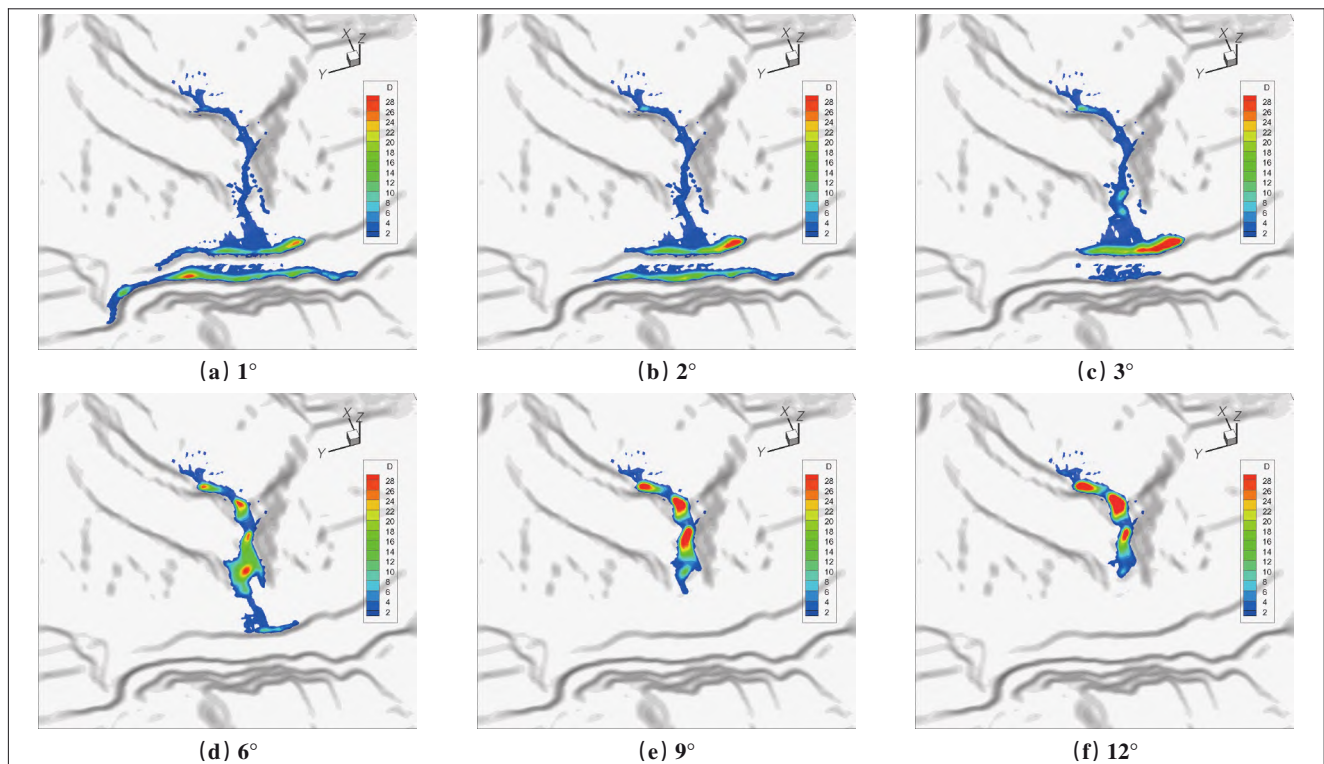


图7 不同综合摩擦系数下文家沟泥石流成灾范围(图中色带代表堆积深度,单位:m)

综合摩擦系数为 $3^\circ$ 时，泥石流运移过程中堆积深度见图8。泥石流启动后，开始向沟口运移，滑体堆积厚度变化较小；当时间为52 s时，泥石流到达沟口，堆积深度最大值处向沟口移动，并开始沿绵远河左岸堆积；当时间为77 s时，泥石流开始堵塞绵远河形成堰塞坝，且向绵远河对岸运移，碎屑流堆积物在绵远河河道内堆积厚度逐渐增大；当时间为100 s后，沟口

堆积扇基本形成，绵远河基本被堵塞，还有少部分泥石流向河对岸运动；当时间为173 s时，泥石流的运移基本停止，大量物源堆积于沟口（堆积厚度约为15~20 m），将绵远河完全堵塞。

综合摩擦系数为 $3^\circ$ 时，泥石流运移过程中运移速度见图9。泥石流启动从前缘开始，流动速度前缘快后缘慢，速度不断增大，当时间为52 s时，泥石流到达沟口，

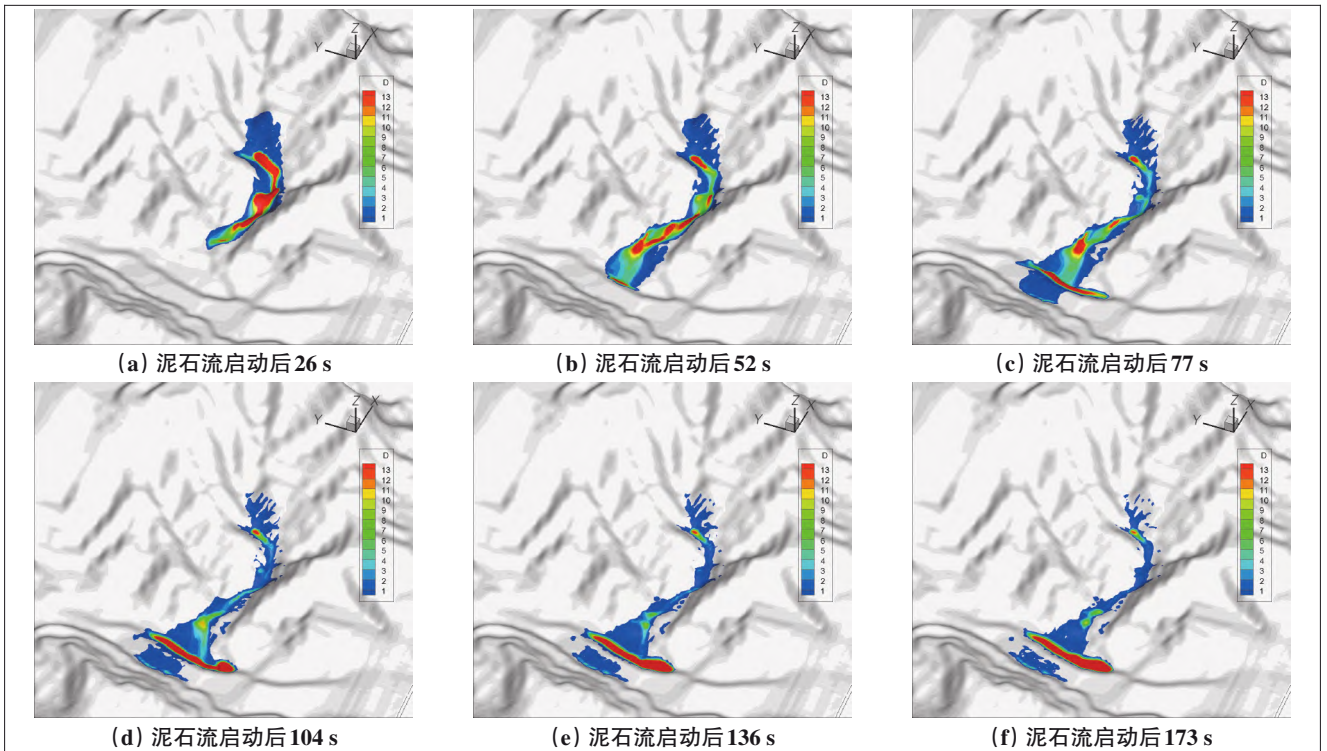


图8 3°综合摩擦系数下文家沟泥石流堆积深度(单位:m)

前缘最大流速已达45 m/s, 破坏力很强; 时间为104 s左右时, 仍然是沟口处泥石流运动速度最大, 最后逐渐变

小; 至136 s时, 仅剩小部分碎屑流在流动, 流动速度已经大大减缓, 到173 s时, 泥石流基本停止移动。

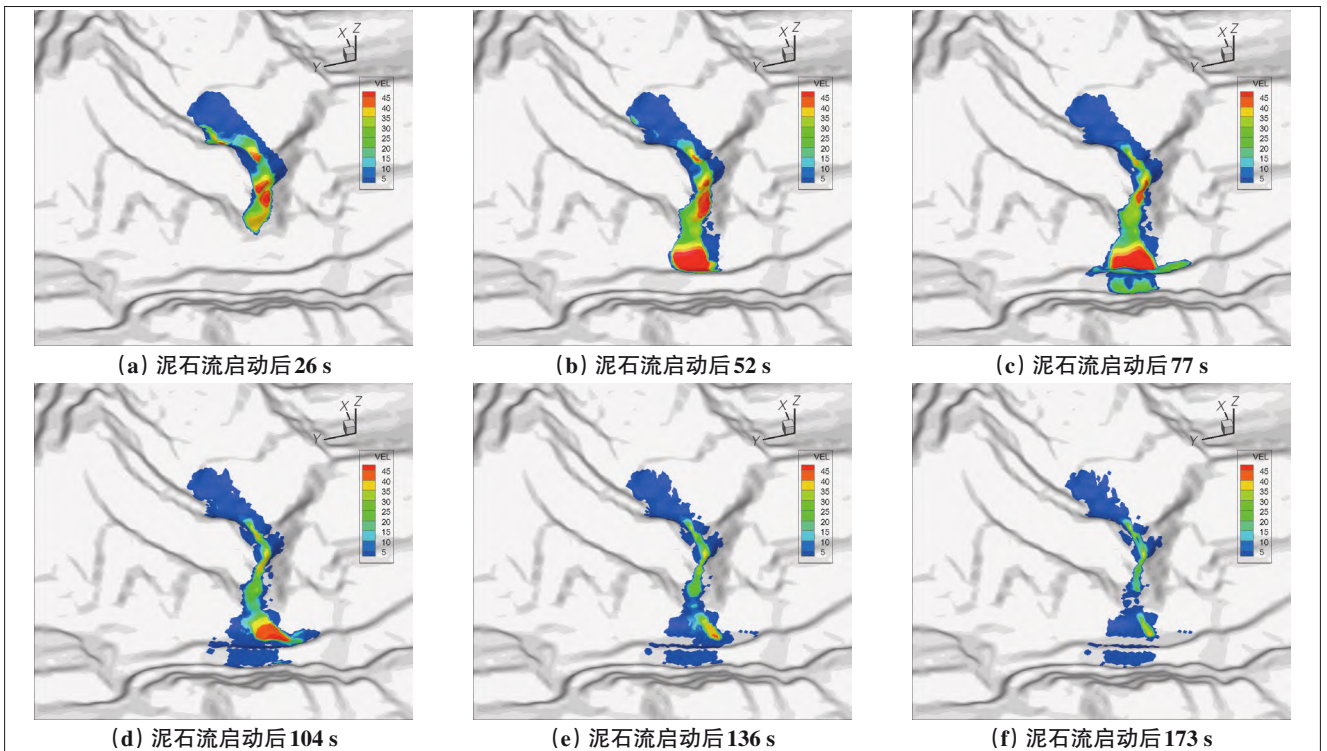


图9 3°综合摩擦系数下文家沟泥石流运移速度(单位:m/s)



## 5 结论

“8·13”泥石流属于降雨型泥石流，具有良好形成条件，即整体坡降306%的陡峻地形、地震诱发滑坡产生丰富物源和极端暴雨。基于GDEM软件，采用深度积分有限体积法，开展了文家沟“8·13”泥石流成灾过程分析，获得如下结论：

(1) 经过反演分析，当松散物源摩擦角为 $8^\circ$ ，黏聚力为50 Pa时，文家沟发生规模比较大的泥石流。在该组参数下降雨1 h后，泥沙浓度达到15%，泥沙流输运速度整体上大于3 m/s，局部水深可达5 m以上，泥石流基本形成。

(2) 模拟的5个摩擦系数分别设为 $12^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $1^\circ$ ，其中综合摩擦系数为 $3^\circ$ 时的成灾范围与“8·13”泥石流的成灾范围基本一致。在摩擦系数为 $3^\circ$ 的情况下，泥石流启动后，迅速向沟口运移；当时间为52 s时，泥石流到达沟口，前缘最大流速45 m/s；当时间为100 s后，沟口堆积扇基本形成；当时间为173 s时，泥石流的运移基本停止，绵远河被完全堵塞。

### 参考文献

- [1] TANG C, VAN ASCHT W J, CHANG M, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms [J]. Elsevier BV: 559-576.
- [2] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1 239-1 249.
- [3] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- [4] 四川省地质工程集团公司. 绵竹市清平乡文家沟“8·13”特大山洪泥石流灾害应急勘查报告[R]. 成都: 四川省地质工程集团公司, 2010.
- [5] 余斌, 马煜, 吴雨夫. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 827-836.
- [6] YU B, MA Y, WU Y F. Case study of a giant debris flow in the Wenjia Gully, Sichuan Province, China [J]. Springer Science and Business Media LLC, 2013

- (1): 835-849.
- [7] YU B, LI L, WU Y F, et al. A formation model for debris flows in the Chenyulan River Watershed, Taiwan [J]. Springer Science and Business Media LLC, 2013 (2): 745-762.
- [8] 黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 168-177.
- [9] 李勇, 黄润秋, 周荣军, 等. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 3-18.
- [10] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川M<sub>S</sub>8.0地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008(3): 597-629.
- [11] 周荣军, 黄润秋, 雷建成, 等. 四川汶川8.0级地震地表破裂与震害特点[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(11): 2 173-2 183.
- [12] 铁永波, 唐川. 汶川县城泥石流灾害风险评估研究[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 43-47, 53.
- [13] 胡厚田, 赵志明, 赵晓彦. 文家沟抛射型高速滑坡全程运动机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 279-285.
- [14] 王涛, 石菊松, 吴树仁, 等. 汶川地震触发文家沟高速远程滑坡-碎屑流成因机理分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 631-644.
- [15] 赵学宏. 汶川震区清平乡文家沟泥石流形成条件与特征分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [16] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 751-758.
- [17] 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[J]. 力学与实践, 2023, 45(4): 744-753.

责任编辑 李葳

收稿日期 2023-12-24

## Inverse Analysis of Initiation Process and Disaster Range Debris Flow Based on GDEM

ZHOU Pinggen<sup>1</sup>, FENG Chun<sup>2,3</sup>, WU Jie<sup>2,3</sup>, WANG Xiyan<sup>4</sup>

(1. China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200434, China)

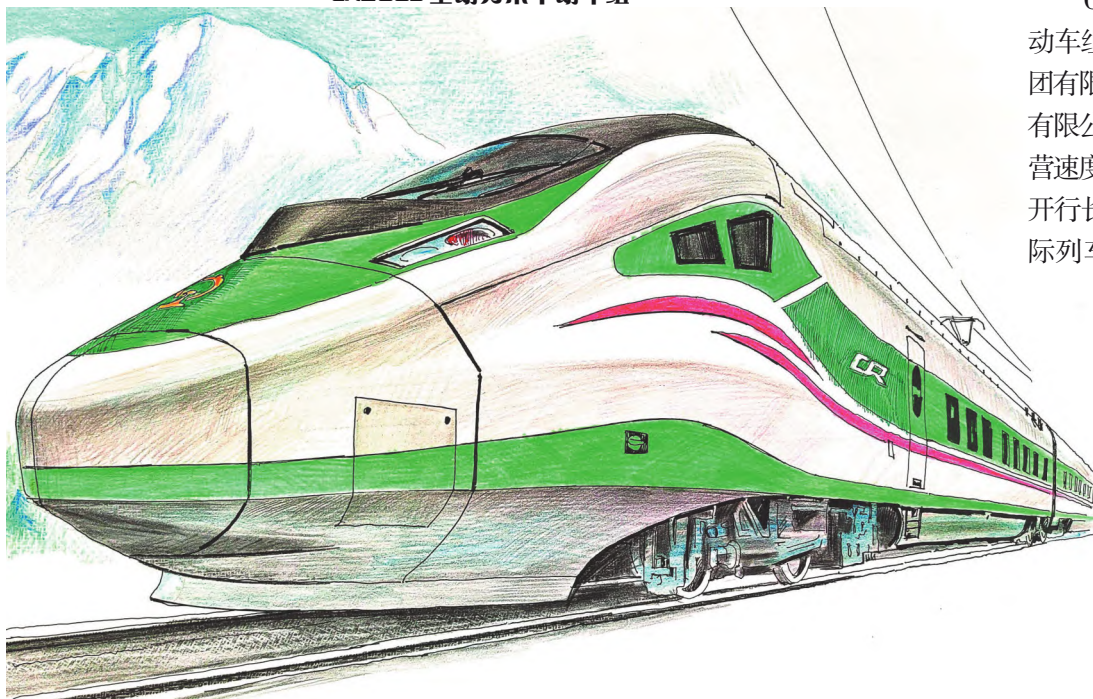
**Abstract:** The formation process of rainfall debris flow is a complex nonlinear process that involves hydraulic coupling. A catastrophic debris flow disaster struck Wenjiagou in Qingping Township, Mianzhu City, Sichuan Province on August 13, 2010. It resulted in significant economic losses and casualties. Based on field investigation and data collection, this paper analyses the formation conditions of the Wenjiagou debris flow, taking into account the geological environment conditions specific to the Wenjiagou area. Based on the GDEM mechanical analysis software, an inverse analysis was conducted on the initiation process and disaster range of the “8·13” debris flow with the finite volume method of depth integration: The Mohr-Coulomb criterion was used to simulate the source deformation in the initiation stage. For loose sources with a friction angle of  $8^\circ$  and cohesive force of 50 Pa, when the sediment concentration reached 15% after one hour of rainfall, the debris flow initially formed. The Savage-Hutter model was used to simulate the movement and scraping effect of the debris flow in the movement and accumulation stage. When the comprehensive friction coefficient reached  $3^\circ$ , the disaster range was consistent with that of the “8·13” debris flow.

**Keywords:** GDEM; debris flow; geological disasters; mechanical simulation; initiation process; disaster range; Wenjiagou



### “中国画火车第一人”王忠良老师火车钢笔画系列作品

——CR200J型动力集中动车组



CR200J型动力集中动车组由中国国家铁路集团有限公司、中国中车股份有限公司牵头研制,最高运营速度为160 km/h,可用于开行长途列车和中短途城际列车。