

高浩源,高杨,贺凯,等. 贵州水城“7.23”高位远程滑坡冲击铲刮效应分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 535-546.  
DOI: 10. 11932/karst20200409

# 贵州水城“7.23”高位远程滑坡冲击铲刮效应分析

高浩源<sup>1</sup>, 高杨<sup>2</sup>, 贺凯<sup>2,3</sup>, 李滨<sup>1,2</sup>, 赵志男<sup>1</sup>, 陈立川<sup>4</sup>, 王永甫<sup>4</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 中国地质科学院地质力学研究所新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质调查局, 北京 100037; 4. 重庆市地质灾害自动化监测工程技术研究中心, 重庆 401120)

**摘要:**以2019年贵州水城“7.23”滑坡为例,采用现场调查、无人机航测和数值模拟技术,分析了滑坡的运动过程和冲击铲刮特征,结果表明:(1)水城“7.23”滑坡属典型的高位远程滑坡,滑体高位启动后冲击下方凸起山脊,铲刮地表残坡积土层,并解体形成碎屑流,最大铲刮深度可达11 m;(2)模拟结果显示,滑坡运动最大速度为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大动能达8 900 kJ,铲刮体积达 $46\times 10^4\text{ m}^3$ ,最终体积为 $116\times 10^4\text{ m}^3$ ,灾害放大效应明显;(3)水城滑坡的冲击铲刮过程可分为冲击嵌入→剪切推覆→裹挟混合三个阶段。

**关键词:**高位远程滑坡;动力学机制;冲击铲刮效应;数值模拟

中图分类号:P642.22 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)04-0535-12 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

2019年7月23日,中国贵州省水城县发生一起特大滑坡灾害,导致21栋房屋被摧毁,77人被掩埋,51人遇难,滑体体积为 $70\times 10^4\text{ m}^3$ ,滑动距离为1 360 m,前后缘高差430 m,等效摩擦角为 $19^\circ$ ,是典型的高位远程滑坡<sup>[1-2]</sup>。高位滑坡通常是指滑体从陡山体剪出后凌空加速坠落,运动过程中发生破碎解体和冲击铲刮效应,继而转化为碎屑流或泥石流,呈现高速、远距离的运动堆积特征<sup>[1-2]</sup>。其中滑坡的冲击铲刮效应不仅导致滑坡碎裂解体,铲刮运动路径上的岩土体,增加体积,而且会增大滑坡成灾范围和堆积规模,加大滑坡的破坏程度和灾后救援难度<sup>[1-4]</sup>。

中国西南山区已发生的高位滑坡多伴有铲刮效应的出现,铲刮体积可达滑体体积的0.15~1.5倍,例如,2009年重庆武隆鸡尾山滑坡,铲刮体积为 $76\times$

$10^4\text{ m}^3$ ,是原有滑体体积的0.15倍;2013年四川都江堰三溪村滑坡,铲刮体积 $11.9\times 10^4\text{ m}^3$ ,是原有滑体体积的0.4倍;2013年云南镇雄滑坡,铲刮体积 $30\times 10^4\text{ m}^3$ ,是原有滑体体积的1.5倍;2017年贵州纳雍普洒滑坡,铲刮体积 $31\times 10^4\text{ m}^3$ ,是原有滑体体积的0.6倍<sup>[5-9]</sup>。关于冲击铲刮效应问题,早在20世纪初,Stinny和Heim教授就提出大型滑坡运动中对底部岩土体存在一定的动力侵蚀效应,通常发生在滑坡的前缘和侧缘,像“耕犁”铲动周围岩土体,会导致滑体体积增加,运动特性改变,其在滑坡运动堆积过程中扮演着重要角色<sup>[10-13]</sup>。此后,国内外学者在动力侵蚀理论方面开展了大量研究,尤其是对铲刮地质模型方面,Bouchut提出了铲刮过程的一维地质数学模型,将运动过程中的物质材料分成了两层,两层物质之间在铲刮效应下会发生质量交换和能量传递<sup>[14]</sup>。Iverson提出了铲刮过程的三层地质模型,并采用流体力学方法进行定量计算<sup>[15-16]</sup>。殷跃平<sup>[17]</sup>阐明了铲刮效应

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504806);国家自然科学基金青年基金(41907257)

第一作者简介:高浩源(1995-),男,硕士,主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail:952513795@qq.com。

通信作者:贺凯(1986-),男,博士,主要从事地质灾害等方面的研究工作。E-mail:hekai2005@163.com。

收稿日期:2020-05-10

对滑坡运动状态改变的重要性。随着研究的进一步深入,大量专家学者从基础理论、模型试验和数值模拟方法方面开展了相关研究<sup>[18-25]</sup>。数值模拟已成为目前研究高位远程滑坡冲击铲刮动力学的行之有效的方法之一,尤其是Hungr和McDougall基于铲刮率的等效流体分析理论研发了DAN3D软件,并成功对加拿大的Frank、Nomash River和Zymoetz River等滑坡的过程进行了反演,其成为了滑坡动力学分析的高效方法<sup>[26-28]</sup>。由此可见,高位远程滑坡的冲击铲刮效应是滑坡后破坏动力学研究的重点问题。因此,本文在贵州省六盘水市水城“7.23”滑坡现场调查、无人机遥感影像分析和数值模拟的基础上,研究了该滑坡的运动过程、冲击铲刮效应和破坏特征,提出了滑坡冲击铲刮的概化模式,以期为深入认识西南高位远程滑坡成灾模式和破坏特征提供科学参考。

## 1 水城滑坡地质环境条件

贵州水城“7.23”滑坡属构造侵蚀、剥蚀中山地貌,地形总体呈现西北高东南低;滑坡后缘山体最高海拔为2 050 m,前缘沟谷处海拔为1 100 m,相对高

差超过900 m,区域地形起伏大;形态近“长筒靴”状,受北西—南东山体走向控制,南侧受山体阻挡,北东侧单面临空,坡向为17°,坡度为30°;山体表面发育多条冲沟,滑体失稳下滑后,沿运动路径中N5°E和N34°E两条冲沟滑动,并在前缘沿东西向沟谷内汇合堆积(图1)。

滑坡区域内出露的岩性由新到老依次为:第四纪残坡积的沙砾和黏土,厚度为3~6 m;三叠系嘉陵江组( $T_{1-j}^{j-3}$ )浅灰色泥灰岩,飞仙关组( $T_f^{f-4}$ )紫红色粉砂质泥岩;二叠系宣威组( $P_{3x}^{x-3}$ )的灰黄色砂岩和粉砂岩,二叠系峨眉山玄武岩( $P_{2-3}^{em^{1-2}}$ )的深灰色玄武质熔岩集块岩和火山集块岩,表层风化强烈,岩体较为破碎。

滑坡发生前一个月,累计降雨量达371.9 mm,是往年该月平均降雨量的1.6倍,最大日降雨量发生在7月12日,为83 mm·d<sup>-1</sup>。滑坡发生前一周(7月17日-23日)降雨较为密集,累计降雨量达到153.7 mm,7月18日14点出现最大小时降雨量,为26.3 mm·h<sup>-1</sup>。统计和分析降雨数据认为前期强降雨和短时强降雨可能是滑坡失稳的主要诱发因素。

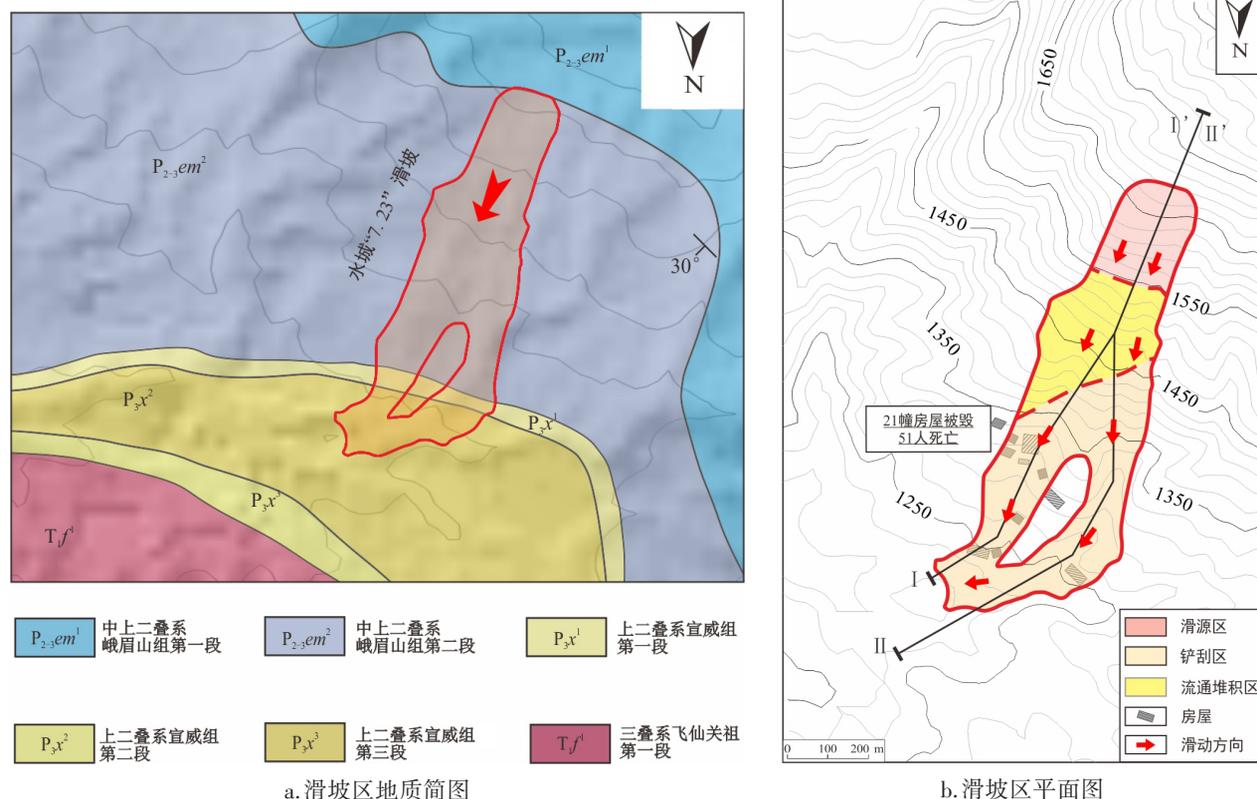


图1 贵州水城“7.23”滑坡地质及地形简图

Fig. 1 Geological and topographic map of "7.23" landslide in Shuicheng, Guizhou

## 2 滑坡失稳运动特征

### 2.1 滑坡基本特征

2019年7月20日-23日之间持续的强降雨,使得大量雨水沿岩体裂隙结构面入渗,加速滑坡失稳破坏。滑坡滑源区 $70\times 10^4\text{ m}^3$ 滑体失稳后,其中 $50\times 10^4\text{ m}^3$ 滑体沿 $N17^\circ E$ 方向高位剪出, $20\times 10^4\text{ m}^3$ 滑体残留

在滑源区,滑体岩性为二叠系峨眉山玄武岩,岩体结构破碎,主要为构造裂隙与柱状节理叠加的滑体玄武岩呈现碎裂—镶嵌结构,在降雨作用下极易失稳破坏。此外,表层覆盖有厚度 $3\sim 5\text{ m}$ 的第四系残坡积松散黏土也发生滑动。选取两条剖面,剖面线位置如图1平面图中所示,滑坡的工程地质剖面图如图2所示。

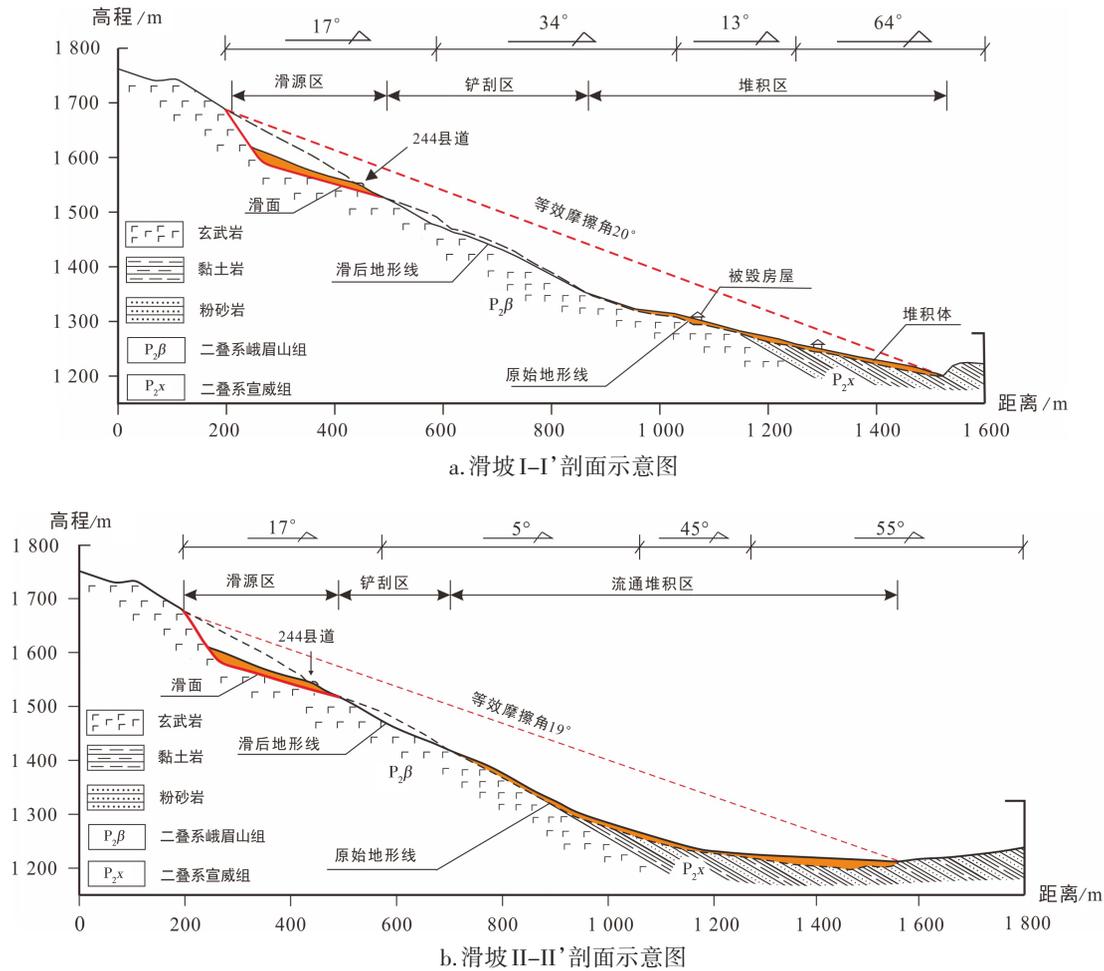


图2 贵州水城“7.23”滑坡剖面图  
Fig. 2 Profile of “7.23” landslide in Shuicheng, Guizhou

### 2.2 滑坡高位远程运动特征

根据滑坡发生前后遥感影像对比和现场调查(图3),此滑坡可分为三个区域:滑源区、冲击铲刮区和流动堆积区。

(1)滑源区(图4a),影像对比显示滑后仍残存20万方滑体,该区域地形陡峭,坡度约 $30^\circ$ ,后部高程约1630m,剪出口高程约1540m,高差90m,纵向长200~250m,平均长度为230m,横宽140~210m,平均宽度为170m,面积为 $4.8\times 10^4\text{ m}^2$ ,平面形态上为不等边梯形。

(2)冲击铲刮区(图4b),滑体失稳下滑后进入铲刮区,由于地形在该处有两处略微凸起微地貌,滑坡直接撞击凸起的山脊,大部分滑体碎裂解体,转化为碎屑流,并将表层第四纪残坡积土及树木铲起,使滑体体积增加。撞击后滑体物质分为两个部分沿冲沟继续运动,其中约有 $2/3$ 体积的滑体沿 $N34^\circ E$ 方向下滑运动, $1/3$ 体积的滑体沿 $N5^\circ E$ 方向下滑运动。该区域后部高程约1540m,前部高程约1330m,高差210m,铲刮区平面面积为 $9.2\times 10^4\text{ m}^2$ 。

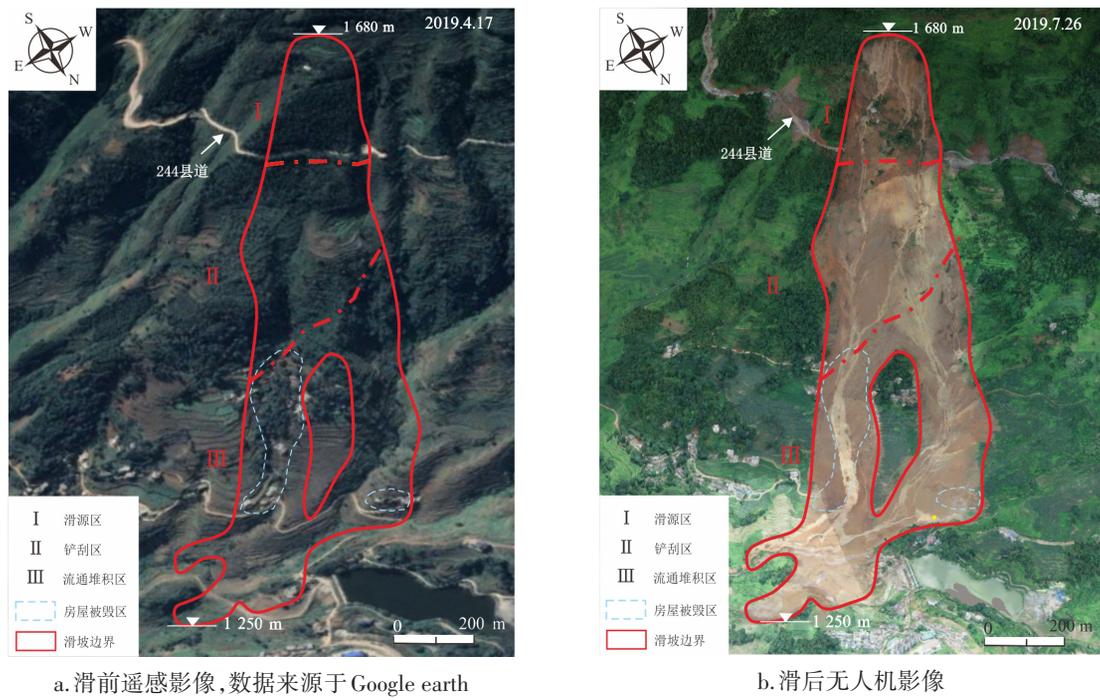


图3 贵州水城“7.23”滑坡边界及滑前、滑后地貌对比图

Fig. 3 Boundary of "7. 23" landslide in Shuicheng, Guizhou and comparison of landslide before and after the slide

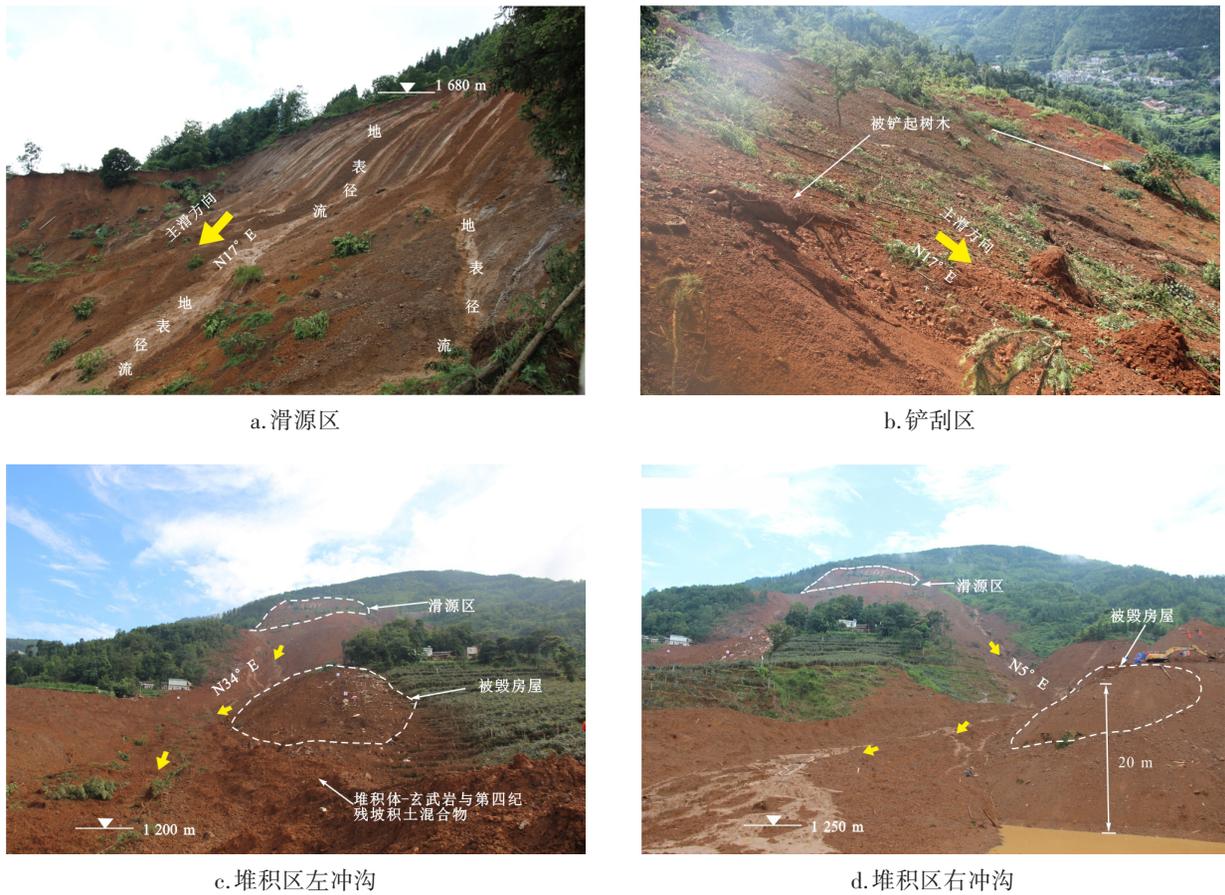


图4 贵州水城“7.23”滑坡不同运动阶段现场调查图(镜向:a.170°, b.289°, c.230°, d.208°)

Fig. 4 Field investigation of different movement stages of "7. 23" landslide in Shuicheng, Guizhou

(3)流动堆积区(图 4c、d),滑体进入到堆积区后,滑体物质由于微地貌凸起山体阻隔被分流运动,主要沿两条冲沟流动运动:一为 N34°E 方向冲沟流动,在冲沟两侧为当地居民居住区,滑体下滑后掩埋了此处 20 户房屋,该区域纵长 520 m,后部高程约 1 330 m,前部高程约 1 200 m,高差 110 m;另一冲沟为 N5°E 方向,该侧沟谷在底部方向发生改变,堆积掩埋了后面一处养殖场,此处的堆积厚度约为 20 m,纵长为 450 m,后部高程约 1 400 m,前部高程约 1 250 m,高差 150 m。滑体沿两条冲沟运动后,在前缘位置交汇堆积,堆积体最大厚度达 20 m,平均厚度约 10 m,堆积区总面积为  $1.9 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。

### 2.3 滑坡冲击铲刮特征

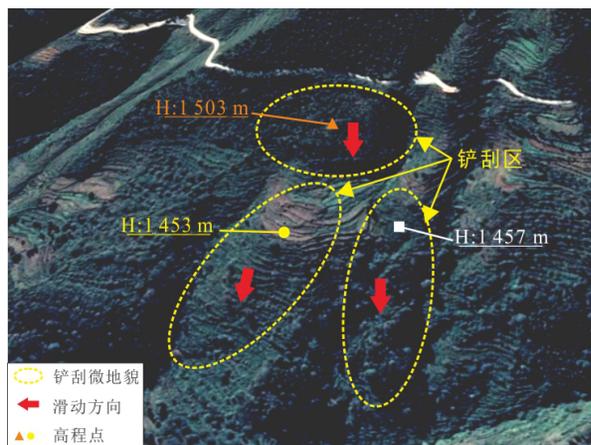
根据现场调查及无人机影像,发现该滑坡冲击

铲刮特征明显(图 5a)。冲击铲刮区位于山体海拔 1 330 m ~ 1 540 m 之间,高差 210 m,主要铲刮山体是强风化表层松散岩土体和植被,铲刮后可见局部基岩出露,岩体结构破碎,通过测量滑后影像(图 3)及分析现场调查记录数据得知,该区域平均长 350 m,宽 300 m,总面积为  $9.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

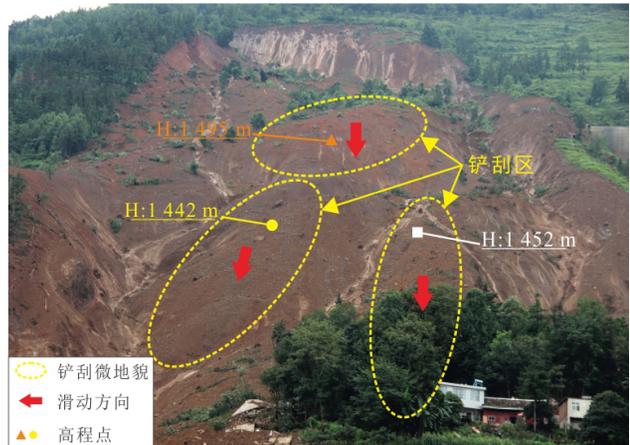
冲击铲刮分布在三个区域,分别是剪出口下方区域和左右两侧凸起山脊区域(图 5b、5c)。结果显示:剪出口下方区域铲刮深度为 8 m,面积为  $1 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,左侧山脊铲刮深度为 11 m,面积为  $3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,右侧山脊铲刮深度为 5 m,面积为  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ;平均铲刮深度为 7 m,最大铲刮深度为 11 m;铲刮区有明显铲刮痕迹,表层的残坡积土、植被,强风化的峨眉山玄武岩基岩表层均被铲刮带走(图 6)。



a. 滑坡铲刮区航拍全貌



b. 滑前影像(2018.11.13)



c. 滑后影像(2019.7.25)

图 5 贵州水城“7.23”滑坡铲刮区特征图

Fig. 5 Characteristics of the impact and scraping area of "7. 23" landslide in Shuicheng, Guizhou



图6 贵州水城“7.23”滑坡铲刮区现场调查特征图

Fig. 6 Field investigation characteristics of "7.23" landslide in Shuicheng, Guizhou

### 3 滑坡动力学特征模拟分析

#### 3.1 数值模拟基本原理

##### 3.1.1 DAN3D数值软件及基本原理

为更好分析水城滑坡运动过程的冲击铲刮效应,本文采用DAN3D数值软件对滑坡的冲击铲刮过程进行模拟。DAN3D软件是连续介质动力学软件,滑坡不同区域的流动特性决定了采取不同的流变模型。考虑前人对多个滑坡的模拟分析<sup>[7,29-30]</sup>,本文采用Voellmy模型、Frictional模型进行滑坡动力学模拟。

DAN3D软件中考虑了滑坡铲刮效应的影响,为了方便计算,引入铲刮率参数对滑坡铲刮特征进行分析。铲刮率( $E_t$ )是铲刮深度随滑坡位移呈自然指数增长的参数,增长速率 $E_s$ [公式(1)]表示单位位移及单位滑体厚度下的基底铲刮深度。计算时 $E_s$ 通过估计滑坡滑前、滑后体积,计算出铲刮体积,将铲刮体积平均分配到滑坡的铲刮区域。 $E_s$ 计算公式如下:

$$E_s = \frac{\ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right)}{\bar{S}} \quad (1)$$

式中: $V_f$ 是滑出某个区域的滑坡体积; $V_0$ 是滑入某个区域的滑坡体积; $\bar{S}$ 是这个区域的平均长度。

铲刮率与增长速率之间的关系为:

$$E_t = E_s h \bar{v}_x \quad (2)$$

式中: $h$ 是滑体厚度; $\bar{v}_x$ 是 $x$ 方向上的速度; $E_s$ 是增长速率。

铲刮与滑体运动速度相关,滑体运动速度越大,铲刮速率越大,铲刮深度也就越大。此软件根据滑体的厚度与速度计算出参数 $E_s$ ,再代入到动量平衡方程求解。

##### 3.1.2 数值模拟模型及参数选取

根据滑坡调查的实际情况,在其运动路径设置铲刮区和堆积区。针对不同区域的特征采用对应的流变模型。经过多组反演分析对比,并结合滑坡实际运动特征(滑体高位剪出,以摩擦为主,滑源区选取摩擦模型;铲刮区及堆积区滑体运动速度较大,体现出了较强的流动性),选取Voellmy模型,整个运动过程采用FVV模型对滑坡进行模拟。

不同流变模型所需参数如表1所示。滑坡岩性主要为二叠系峨眉山组玄武岩,岩石的物理力学参数为 $\gamma=21 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\varphi=35^\circ$ ;滑坡主要诱因为强降雨,后缘出露基岩裂隙水,推测滑面上有较大的孔隙水压力,结合软件建议值0.5~0.8,取值为0.6;根据滑坡实际铲刮特征,两侧冲沟最大铲刮深度为10 m;滑坡等效摩擦角为 $19^\circ$ ,摩擦系数为0.32( $f=\tan 19^\circ$ ),取近似值0.3;根据反复试错分析,湍流系数取值 $\xi=400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

#### 3.2 结果分析

##### 3.2.1 滑坡动力学过程分析

模拟结果显示,滑坡运动过程总时间80 s,滑坡最大运动距离达1430 m,滑坡堆积体体积达 $116\times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡运动过程中堆积厚度变化等值线图如图7所示,图中红色线代表真实滑坡范围,蓝黄红三种色系体现不同堆积厚度的变化情况。

0~10 s滑坡高位剪出,失稳下滑,主滑方向为 $N17^\circ E$ ,一部分滑体残留滑源区,另一部分经过势动能转换,高速下滑,开始冲击剪出口下方的铲刮区前缘位置。

表 1 水城滑坡动力学计算的参数取值表  
Table 1 Parameters of dynamic calculation of Shuicheng landslide

区域	流变模型	$\gamma / \text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$\varphi / ^\circ$	$f$	最大铲刮深度/m	$r_u$	$\xi / \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
滑源区	Frictional	21	35	—	0	0.6	—
铲刮区	Voellmy	21	35	0.3	10	—	400
堆积区	Voellmy	21	35	0.3	0	—	400

10 ~ 30 s 滑体进入到铲刮区,不断冲击铲刮区中两侧凸起的两条山脊,将表层风化岩土体带走,并不断解体,成为碎屑流,呈流态化运动,由于山脊的阻挡作用,滑体开始分流运动,进入到两条冲沟向下运动,经过房屋区域,将房屋冲毁掩埋。

30 ~ 40 s 前方滑体已经过铲刮区,沿 N34°E、N5°E 两条冲沟运动,后方滑体仍高速下滑,不断冲击铲刮区,在 40 s 时,整个滑体已全部滑出铲刮区,滑体前缘进入堆积区并开始汇合。

40 ~ 60 s 滑体在堆积区前缘汇合后继续运动扩散,不断堆积,将前方的房屋区域掩埋,后方滑体仍在继续运动不断汇入到堆积区,堆积厚度不断增大。

60~80 s 前方滑体已停止运动,后方滑体由于前方堆积体的阻挡以及阻力作用,缓慢向前的运动逐渐停止,最终的堆积形态如图 7 所示,最大运动距离达 1 430 m,最大堆积厚度约 20 m,此与实际情况较为一致。

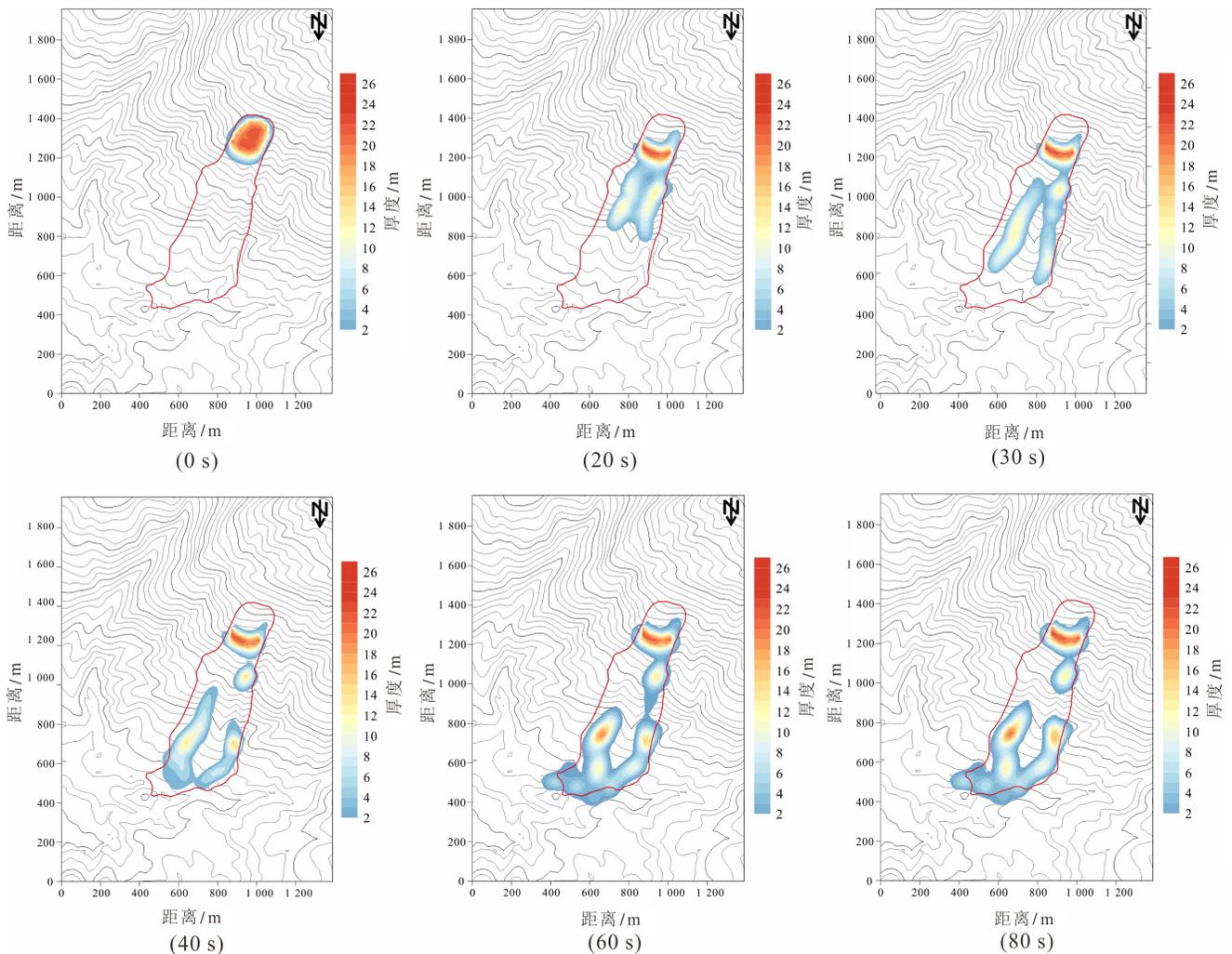


图 7 贵州水城“7.23”滑坡运动堆积厚度等值线图

Fig.7 Contours of deposit thickness of "7.23" landslide in Shuicheng, Guizhou

在整个滑坡运动过程中,最大堆积厚度约20 m,平均堆积厚度约12 m。

### 3.2.2 滑坡铲刮过程分析

通过DAN3D数值模拟,也得到了滑坡铲刮过程的模拟结果(图8)。滑坡铲刮过程从10~40 s,共计30 s,最大铲刮深度约11 m,铲刮体积为 $46\times 10^4\text{ m}^3$ 。

图8a表示,10 s时,冲击铲刮开始, $50\times 10^4\text{ m}^3$ 滑体剪出失稳下滑后,经过势动能转换高速运动,产生巨大的能量,进入到铲刮区后开始冲击碰撞剪出口下方区域(图5c),使表层岩土体屈服破坏,铲刮表层残坡积土,此阶段为初始碰撞铲刮阶段,滑体运动经过剪出口进入铲刮区后缘,主要为碰撞铲刮,作用面积较小,最大铲刮深度约1.2 m。

图8b表示在10~20 s时,滑体进入铲刮区开始大面积碰撞铲刮两条突起的山脊(图5c),带走表层的强风化松散岩土体及植被,滑坡体积不断增大,并不断碎裂解体,转化为碎屑流沿两条冲沟运动,此阶段为推覆铲刮阶段,具有巨大能量,铲刮作用最强烈,增积效应最明显,铲刮深度达4.5 m。

图8c表示在20~40 s时,滑体前缘铲刮已经结束,进入到冲沟运动,后方运动而来的滑体仍对山脊进行裹挟铲刮,使滑坡体积不断增大,致使铲刮深度不断增加,最大铲刮深度达到11 m,当滑体全部经过铲刮区域时,铲刮结束,此阶段为裹挟铲刮阶段,后方运动滑体经过铲刮区时不断进行裹挟铲刮,使滑坡体积不断增大,最终的铲刮体积达 $46\times 10^4\text{ m}^3$ ,形态为两条长条状,此同现场调查结果较为一致。

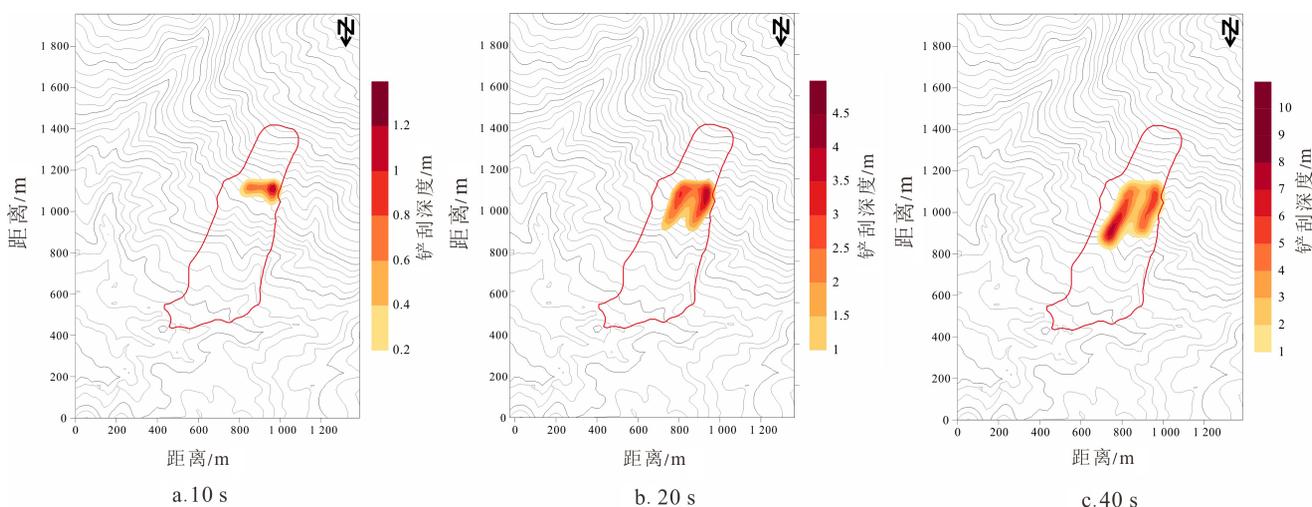


图8 贵州水城“7.23”滑坡铲刮深度等值线图

Fig. 8 Contours of scraping depth of "7.23" landslide in Shuicheng, Guizhou

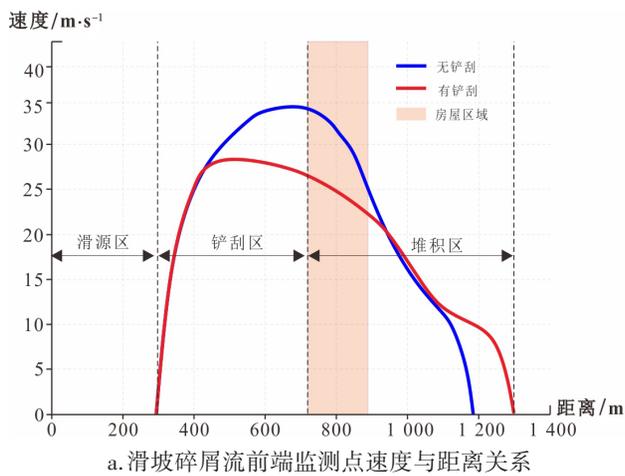
## 4 讨论

### 4.1 考虑冲击铲刮效应的滑坡动力学破坏特征

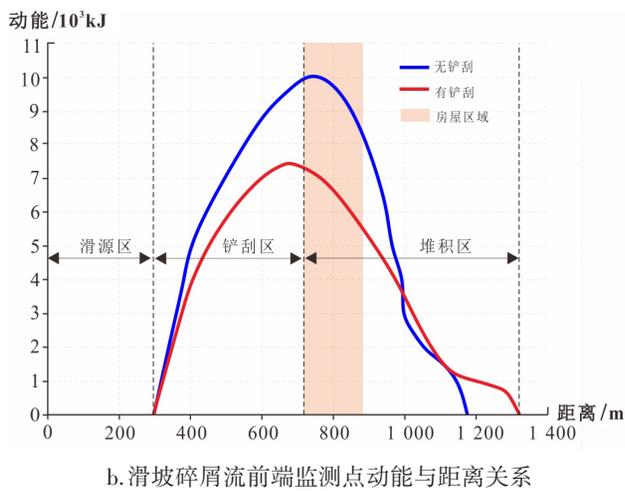
为分析铲刮效应对滑坡运动过程及产生破坏的影响,对滑坡运动过程进行考虑有无铲刮效应的数值模拟,采用对比分析方法,分析滑坡前缘速度与动能、滑坡最大速度与动能、滑坡最终堆积范围、运动距离。

图9为考虑有铲刮和无铲刮效应下滑体前缘的运动速度和动能的变化曲线。横坐标为滑坡后缘到前缘水平距离,零点为滑坡后缘位置。蓝色曲线代表无铲刮效应下滑体前缘的速度和能量的变化情

况;红色曲线代表铲刮效应下滑体前缘的速度和能量的变化情况。结果显示:经过势动能转换,速度与动能不断增加,随着运动距离增加,由于存在摩擦阻力,损耗能量增大,速度与动能在逐渐下降,受到前方山体阻挡下降明显。在铲刮效应下,滑体前缘进入铲刮区后速度达到的最大值为 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而无铲刮效应的速度最大值为 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;在铲刮效应下,前缘最大动能达到7 200 kJ,而无铲刮效应下,最大动能达到了10 000 kJ;在铲刮效应下,运动距离达到了1 380 m,而无铲刮效应下,运动距离仅为1 170 m。铲刮效应虽然降低了滑坡前缘的冲击速度和动能,但裹挟大量松散物质,增加了滑坡运动体积,使滑坡的运动距离增加。



a. 滑坡碎屑流前端监测点速度与距离关系



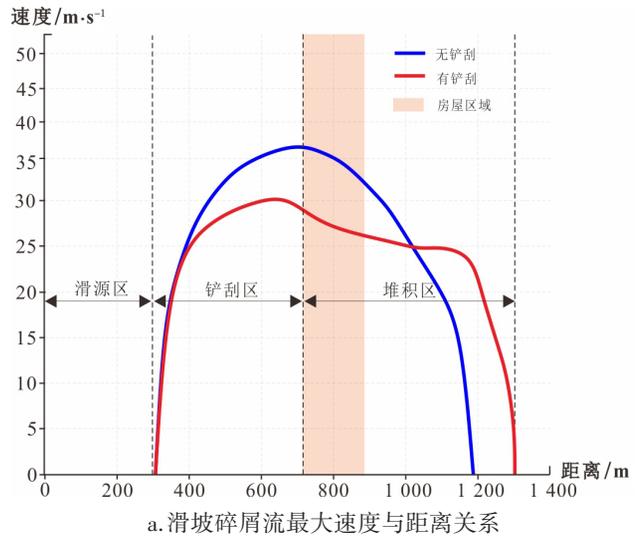
b. 滑坡碎屑流前端监测点动能与距离关系

图9 贵州水城“7.23”滑坡碎屑流前端监测点速度与动能变化曲线

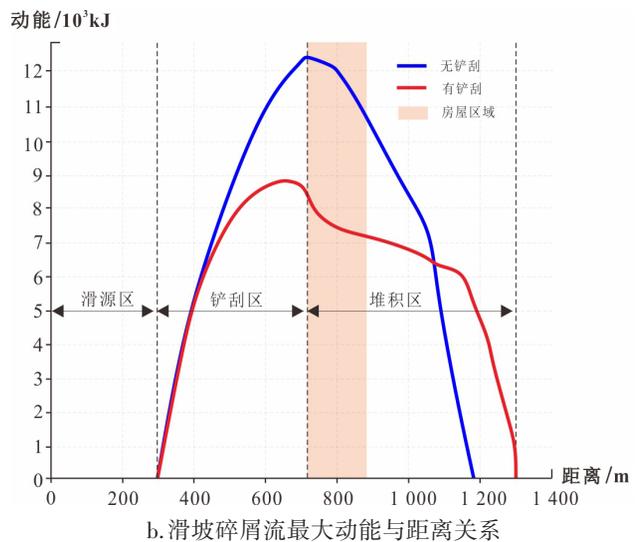
Fig. 9 Curves of velocity and kinetic energy change of the monitoring point at the frontedge of "7. 23" landslide in Shuicheng, Guizhou

图10为考虑有铲刮和无铲刮效应影响下滑体中最大运动速度和动能的变化曲线。横坐标为滑坡后缘到前缘的水平距离,零点为滑坡后缘位置。蓝色曲线代表没有铲刮效应下滑坡运动过程中最大的速度和能量的变化情况;红色曲线代表铲刮效应下滑坡运动过程中最大速度和能量的变化情况。结果显示:经过势动能转换,最大速度与动能不断增加,在760 m处由于摩擦阻力存在,曲线开始转折下降,与图9情况相似,受前方山体的阻挡下降明显。在考虑铲刮效应下,滑体运动过程中速度最大为  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而无铲刮效应情况下滑坡最大速度为  $38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;在铲刮效应下,滑体运动过程中最大影响动能达到  $8900 \text{ kJ}$ ,而无铲刮效应下,最大动能达到了  $12200 \text{ kJ}$ ;在铲刮效应下,运动距离达到了

$1380 \text{ m}$ ,无铲刮效应下,运动距离仅为  $1170 \text{ m}$ 。



a. 滑坡碎屑流最大速度与距离关系



b. 滑坡碎屑流最大动能与距离关系

图10 贵州水城“7.23”滑坡碎屑流运动过程中最大速度与动能变化曲线

Fig. 10 Curves of maximum velocity and kinetic energy change in the movement of "7. 23" landslide in Shuicheng, Guizhou

图11为考虑有铲刮和无铲刮效应影响下滑坡的堆积结果。图11a为无铲刮效应下的堆积厚度等值线图,图11b为有铲刮效应下的堆积厚度等值线图。结果显示:无铲刮效应时,滑坡的最大运动距离约  $1170 \text{ m}$ ,最大堆积厚度约  $12 \text{ m}$ ,平均堆积厚度约  $5 \text{ m}$ ,滑坡最终堆积体积为  $70\times 10^4 \text{ m}^3$ ;考虑铲刮效应时,滑坡的运动距离约  $1430 \text{ m}$ ,最大堆积厚度约  $20 \text{ m}$ ,平均堆积厚度约  $12 \text{ m}$ ,滑坡最终堆积体积为  $116\times 10^4 \text{ m}^3$ ,最大堆积厚度为  $20 \text{ m}$ ,堆积范围同实际堆积情况基本一致。

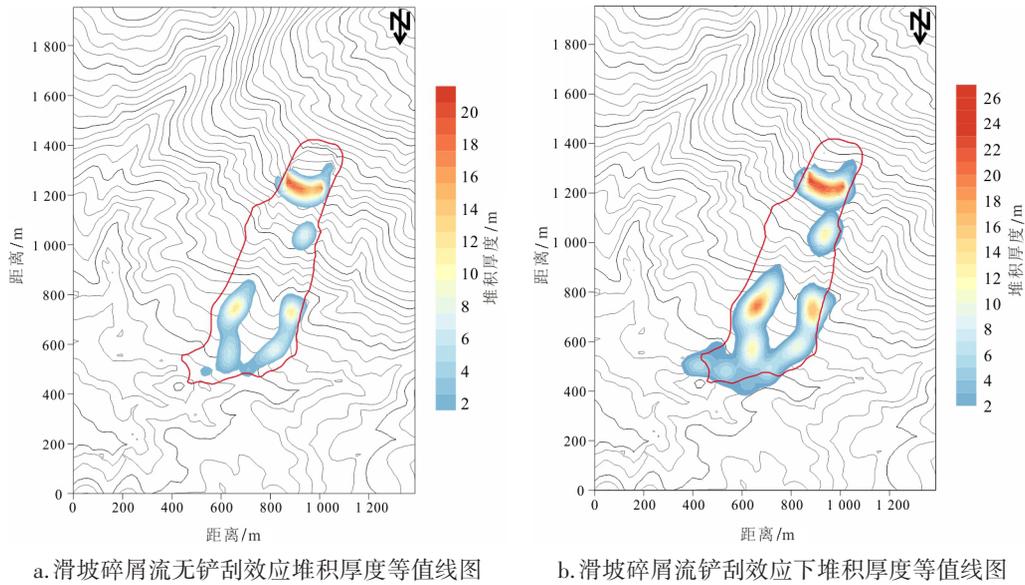


图 11 贵州水城“7. 23”滑坡在考虑和不考虑铲刮效应下的堆积厚度等值线对比图

Fig. 11 Contour comparison of deposit thickness with and without the scraping effect of "7. 23" landslide in Shuicheng, Guizhou

### 4.2 高位山体滑坡冲击铲刮模式

滑坡为高位玄武岩滑坡,由于玄武岩特殊的岩性,在滑前并无明显变形迹象,此类滑坡的成灾模式一直是研究的难点<sup>[31]</sup>。本文根据滑坡的运动、堆积及铲刮特征,提出了其冲击铲刮的概化模式,可分为3个阶段(图 12):

(1)冲击嵌入阶段:滑坡下滑呈流线型,势动能转换后滑体拥有较大动能,滑坡前缘接触碰撞可铲刮层后部,由于滑体前缘厚度较小,动能较大,在冲击过程中可将铲刮层后部的岩土体“铲起”,部分可铲刮层变形屈服,滑体前端嵌入到可铲刮层中。

(2)剪切推覆阶段:在铲起部分可铲刮层的同时更多滑体嵌入到可铲刮层中,随着滑体继续下滑,前部嵌入到可铲刮层中的滑体由于阻力速度下降,对后方的滑体起到阻挡作用,后方滑体推动前方滑体向前运动,当上部滑体速度超过下方滑体时,上方的滑体覆盖到可铲刮层上方,同时滑体底部与可铲刮层发生剪切效应,引起部分可铲刮层屈服,推覆可铲刮层继续向前运动。

(3)裹挟混合阶段:此时滑体在可铲刮层的上方运动,铲刮效应发生在滑体底部,底部滑体由于与可铲刮层之间的层间剪切效应,挟带屈服可铲刮层向前运动,同时将部分屈服的可铲刮层裹挟到滑体中,与滑体混合,形成滑体与可铲刮层的混合碎屑流。

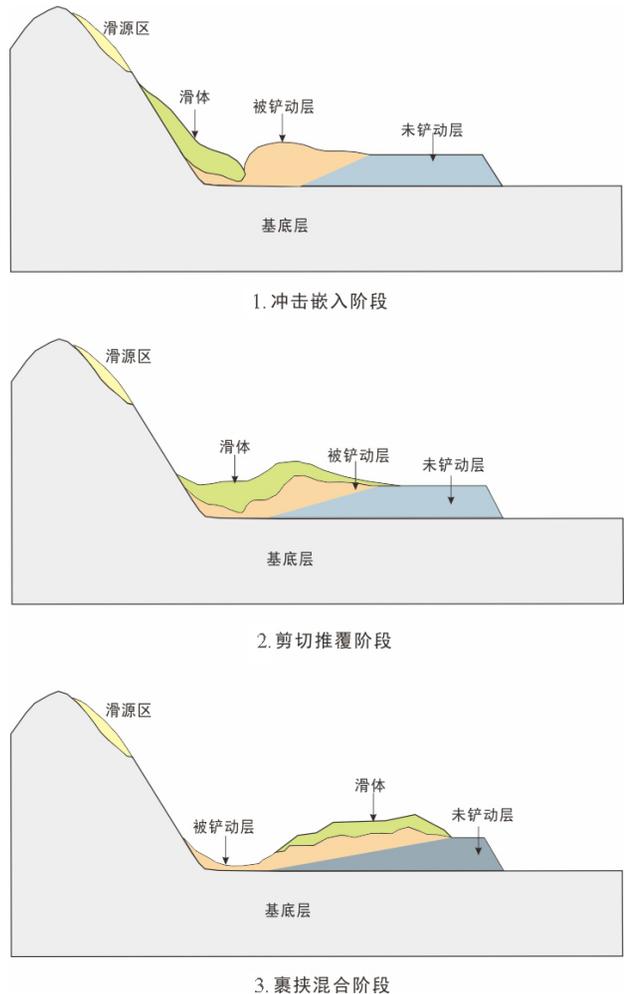


图 12 贵州水城“7. 23”滑坡铲刮过程示意图

Fig. 12 Sketch showing scraping process of "7. 23" landslide in Shuicheng, Guizhou

## 5 结论

(1)贵州水城“7.23”滑坡的冲击铲刮特征:边缘铲刮深度为3~5 m,内部平均铲刮深度为7 m,最大铲刮深度为11 m,总面积为 $9.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,冲击铲刮效应使滑坡的成灾规模、影响范围增大;

(2)通过DAN3D数值模拟反演技术模拟滑坡的冲击铲刮,结果显示:铲刮效应降低了滑坡的冲击速度和动能,但其导致了滑体体积的增加,使得滑坡成灾范围和堆积厚度增大;其滑坡的运动距离为1430 m,最大堆积厚度为20 m,平均堆积厚度为12 m,总铲刮体积达 $46 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,滑坡最终体积为 $116 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,这比没有考虑铲刮效应下,滑距增加了260 m,堆积厚度增加了10 m;

(3)贵州水城“7.23”滑坡的冲击铲刮过程模式可概化为冲击嵌入、剪切推覆、裹挟混合三个阶段,这是西南玄武岩山区高位远程滑坡冲击铲刮过程的典型模式。

## 参考文献

- [1] Gao Y, Li B, Gao H Y, et al. Dynamic characteristics of high-elevation and long-runout landslides in the Emeishan basalt area: a case study of the Shuicheng “7.23” landslide in Guizhou, China[J]. *Landslides*, 2020, 17(1-2): 1679-1680.
- [2] 高杨,贺凯,李壮,等.西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 14-23.
- [3] 李滨,殷跃平,高杨,等.西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 5-13.
- [4] 殷跃平,王文沛,张楠,等.强震区高位滑坡远程灾害特征研究:以四川茂县新磨滑坡为例[J]. *中国地质*, 2017, 44(5): 827-841.
- [5] 殷跃平.斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究:以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 217-226.
- [6] 高杨,李滨,王国章.鸡尾山高速远程滑坡运动特征及数值模拟分析[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(3): 425-434.
- [7] Gao Y, Yin Y P, Li B, et al. Characteristics and numerical runout modeling of the heavy rainfall-induced catastrophic landslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, China, following the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Landslides*, 2017, 14(4): 1361-1374.
- [8] 殷跃平,刘传正,陈红旗,等.2013年1月11日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(1): 6-15.
- [9] Fan X, Xu Q, Scaringi G, et al. The “long” runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: A preliminary report[J]. *Landslides*, 2019, 16(1): 139-154.
- [10] Stiny J. Die Muren (Debris Flows) [in German], Wagnerschen Univ (1910) Buchhandlung, Innsbruck, Austria. English translation, EBAConsult., Vancouver, Canada, 1997.
- [11] Heim A (1932), *Bergsturz und Menschenleben* [in German], Naurforschenden Gesellschaft, Zurich, Switzerland. [English translation, BiTechPubl., Vancouver, Canada, 1989.]
- [12] Hungr O, Evans S G. Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(9-10): 1240-1252.
- [13] McDougall S, Hungr O. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(5): 1437-1448.
- [14] Bouchut F, Fernandez-Nieto E D, Mangeney A, et al. On new erosion models of Savage-Hutter type for avalanches [J]. *Acta mechanica*, 2008, 199(1-4): 181-208.
- [15] Iverson R M, Reid M E, Logan M, et al. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(2): 116-121.
- [16] Iverson R M. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F3): F03006.
- [17] 殷跃平.汶川八级地震滑坡高速远程特征分析[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(2): 153-166.
- [18] 何思明,李新坡,吴永.滚石冲击荷载效应下土体屈服特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(S1): 2973-2977.
- [19] 许强,郑光,李为乐,等.2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究[J]. *工程地质学报*, 2018(6): 16.
- [20] 许强,李为乐,董秀军,等.四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2612-2628.
- [21] 刘春,张晓宇,许强,等.三维离散元模型的滑坡能量守恒模拟研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(S2): 698-704.
- [22] 陆鹏源,侯天兴,杨兴国,等.滑坡冲击铲刮效应物理模型试验及机制探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1225-1232.
- [23] 李祥龙,唐辉明,熊承仁,等.基底铲刮效应对岩石碎屑流堆积过程的影响[J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1527-1534.
- [24] 张龙,唐辉明,熊承仁,等.鸡尾山高速远程滑坡运动过程PFC3D模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S1): 2601-2611.
- [25] 何潇,陈洪凯,赵鹏,等.长江巫峡岸坡座滑式危岩稳定性研究:以望霞座滑式危岩为例[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(4): 411-418.
- [26] Hungr O, Evans S G. Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(9-10): 1240-1252.
- [27] McDougall S, Hungr O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(6): 1084-1097.

- [28] McDougall S. A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain[D].USA: University of British Columbia, 2006.
- [29] Hungr O, Dawson R F, Kent A, et al. Rapid flow slides of coal-mine waste in British Columbia, Canada[J]. Reviews in Engineering Geology, 2002, 15(1):191-208.
- [30] Xing A, Yuan X, Xu Q, et al. Characteristics and numerical runout modelling of a catastrophic rock avalanche triggered by the Wenchuan earthquake in the Wenjia valley, Mianzhu, Sichuan, China[J]. Landslides, 2017, 14(1):83-98.
- [31] 高杨,李滨,高浩源,等.高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题[J/OL].地质力学学报:1-10 [2020-08-27].  
http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3672.P.20200821.2057.006.html.

## Impact and scraping effects of the high-elevation, long-runout "7.23" landslide in Shuicheng, Guizhou

GAO Haoyuan<sup>1</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>, HE Kai<sup>2,3</sup>, LI Bin<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhinan<sup>1</sup>, CHEN Lichuan<sup>4</sup>, WANG Yongfu<sup>4</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Institute of Geo-mechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4. Chongqing Engineering Research Center of Automatic Monitoring for Geological Hazards, Chongqing 401120, China)

**Abstract** This paper analyzes the Shuicheng "7.23" landslide in Guizhou, 2019. Based on the field survey, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images and numerical simulation, the movement process, and impact and scraping effects of this landslide are characterized. Results suggest that, (1) the Shuicheng "7.23" landslide sliding volume is about  $70 \times 10^4 \text{ m}^3$ , with the horizontal slide distance 1,360 m, elevation difference 430 m between the front and the toe, and the equivalent friction angle  $19^\circ$ , implying a typical high-level, long-distance slope slide; (2) After the initiation of the slide, it hit the convex ridge, scraped the residual slope soil of the surface, disintegrated and formed a debris flow, resulting in a maximum scraping depth of 11 m; (3) The numerical simulation shows that the maximum velocity of the landslide is  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the maximum kinetic energy is 8,900 kJ, the scrap volume is  $46 \times 10^4 \text{ m}^3$ , and the deposit volume is  $116 \times 10^4 \text{ m}^3$ , with an obvious amplifying effect of hazard; (4) The impact and scraping process of the Shuicheng landslide can be divided into 3 stages, impact insertion, shear nappe and mixed accumulation of sliding debris.

**Key words** high-elevation and long-runout landslide, dynamic mechanism, impact and scraping effect, numerical simulation

(编辑 黄晨晖)