

翟淑花. 基于 PFC 模拟的坡面物源体启动机理[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 7-13. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.002

Zhai S H. Research on the Initiation Mechanics of Slope Debris Flow Based on PFC Simulation [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 7-13. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.002

# 基于 PFC 模拟的坡面物源体启动机理

翟淑花\*

(北京市地质研究所, 北京 100120)

**摘要:**松散物源体含水率是反映降雨入渗程度的重要参数,对研究坡面泥石流的启动机理具有重要意义.以北京西山门头沟区清水镇扫帚港沟为例,在野外详细调查的基础上,采用室内直剪试验,研究了松散物源体在4种不同含水率水平下的强度特性,借助于PFC数值模拟手段,探讨了不同含水率下坡面泥石流启动的内在力学机制和外在表现形式.结果表明:松散物源体抗剪强度随含水率的增加而减小,随着含水率的增大,其内聚力和内摩擦角均呈减小的趋势.当含水率达到25%~30%时,松散物源体强度骤减,原有平衡状态被打破,坡趾碎屑物率先失去支撑牵引后部土体发生坍塌,产生由前至后的溯源破坏,并加速形成坡面泥石流.

**关键词:**含水率;坡面泥石流;启动机理;直剪试验;PFC

**中图分类号:**P642      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2019)01-0007-07

## Research on the Initiation Mechanics of Slope Debris Flow Based on PFC Simulation

Zhai Shuhua

(Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

**Abstract:** Water content of loose material was an important factor reflecting rainfall infiltration, which had important significance on the study of slope debris flow initiation mechanics. Sazhougang gully of QingShui town, MenTougou District, Beijing was taken as example, based on the field survey; strength characteristics of loose material under 4 levels of water content were studied by means of laboratory direct-shear test, and PFC was also used to simulation the inner mechanics and outer appearance of initiation of debris flow. The results indicate that the relationship between strength and water content shows tendency of inverse proportion, both cohesion and inner friction angle decrease with the increase of water-content. And when water content reaches 25%~30%, the strength of loose material decreases suddenly, the equilibrium state is broken; soils at the anterior border are destroyed and lost its support for back soil causing the deformation of back soil and the initiation of slope debris flow.

**Keywords:** water-content; slope debris flow; initiation mechanics; directory shear-test; PFC

坡面泥石流是一种发生在有碎屑堆积物的陡坡上,由降雨引发的高浓度碎屑与水的混合物沿坡面运动的现象.它是山区分布最广、出现频率最高的灾害现象之一,具有突发性、破坏性以及预防难度大等特

收稿日期:2018-01-21

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8182022);北京市自然科学基金资助项目(8173055)

\*通信作者, E-mail: zhaishuhua@163.com

点.国内外对坡面泥石流研究主要集中在理论研究、室内试验、数值模拟等方面<sup>[1-5]</sup>,如李艳富等<sup>[6]</sup>对汶川震区 19 个坡面泥石流进行了调查研究,获得了坡面泥石流的降雨量、形成与堆积坡度、颗粒级配等数据,并估算得到坡面泥石流的行进速度;刘成<sup>[7]</sup>等人以重庆市北碚区坡面泥石流为例,在对其地质、地貌和气象条件进行详细分析的基础上,认为前期降雨量和灾前 1 h 雨强对坡面泥石流的爆发影响最大;张永双<sup>[8]</sup>等通过湖北省巴东县桐木园山坡型泥石流的调查和分析认为,除了持续集中的特大暴雨和斜坡陡峻等因素外,斜坡表层残坡积物的物质组成尤其是残坡积土的粘粒含量和粘土矿物成分是坡面型泥石流大面积同时发生的重要控制性因素;吕立群<sup>[9]</sup>、刘菲<sup>[10]</sup>、何晓英<sup>[11]</sup>等分别基于室内人工降雨试验,对坡面泥石流启动机制进行了精细刻画;杨为民等<sup>[12]</sup>对坡面泥石流的影响因素、动力条件及演化过程进行了研究,认为当土体含水率超过 28%~30%时,粘聚力和内摩擦角都发生急剧降低,斜坡土体将由稳定状态向破坏状态演化;唐川<sup>[13]</sup>运用简化形式的二维 Navier-Stokes 方程,余斌<sup>[14]</sup>利用泥石流的宾汉体模型,胡明鉴<sup>[15]</sup>、左正金<sup>[16]</sup>、马秋娟<sup>[17]</sup>、周健<sup>[18]</sup>、杜建华<sup>[19]</sup>等借助于 PFC 软件对泥石流启动及运动过程进行仿真模拟,取得了较为理想的效果.上述研究成果极大的丰富了坡面泥石流的研究程度,但研究对象大多集中于我国的泥石流较为发育的西南地区,而对于北京这种低频泥石流地区适用性有待探讨.

据最新调查成果显示<sup>[20]</sup>,北京地区现有泥石流隐患 899 条,是北京山区威胁对象最多的灾害类型.自 1867 年以来,北京地区共发生严重泥石流灾害 27 次,1949 年以来泥石流灾害共造成 502 人死亡、60 多人受伤、7 534 间房屋和 60~70 km<sup>2</sup> 耕地被毁,直接经济损失累计达数亿元,且以坡面泥石流为主.本文以北京西山门头沟区清水镇扫帚港沟为例,在野外调查的基础上,以室内直剪和 PFC 数值模拟为手段,探讨了坡面泥石流启动的内在力学机制和外在表现形式,以为坡面泥石流预警和防治提供技术支撑.

## 1 扫帚港沟地质环境概况

扫帚港沟位于门头沟区清水镇达摩沟流域,流域面积约 1.4 km<sup>2</sup>,主沟长约 2.8 km,流域内相对高差约 670 m.上游支沟众多,呈树冠状,沟谷宽度 30~100 m 不等,下游沟道逐渐变宽,平均 50~60 m.沟床平均纵坡约 13°,沟向为 300°.该沟在 1950 年 8 月发生过泥石流,冲毁房屋、道路及农田等设施,造成一定的经济损失.

沟谷内松散堆积物以第四系冲洪积层为主,厚度一般小于 2 m,成分主要为砂岩、砾岩等,粒径一般为 5~15 cm.受地质构造影响,沟内岩体节理裂隙较发育,表层风化较强,岩体破碎、完整性差,强度较低.沟谷内两侧山坡坡度平均约 25°,松散堆积物较为丰富,稳定性差(如图 1).



图 1 扫帚港沟松散物源体形态

## 2 不同含水率下物源体强度响应室内实验

为分析扫帚港沟物源体物理力学特征,为数值模拟提供参数,开展了扫帚港沟坡面碎屑物颗粒级配试验(见图 2),结果表明碎屑物中粗粒组含量 92.32%(砂粒含量 59.02%,砾粒含量 34.30%),细粒含量 7.68%,不均匀系数  $C_u = 7.991$ ,曲率系数  $C_c = 0.463$ ,物源体为级配不连续、不均匀的含细粒土砂.

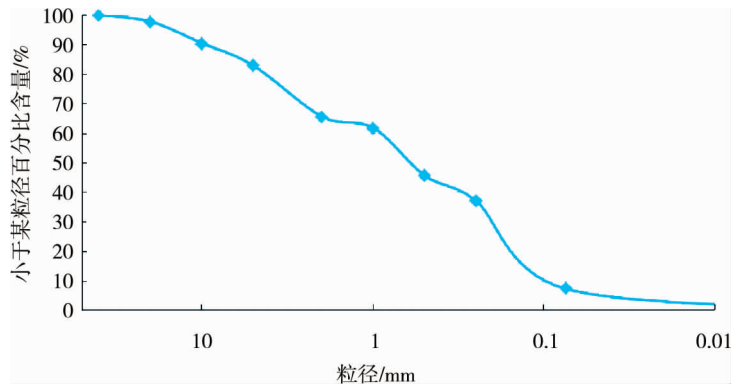


图 2 土样颗粒级配曲线

在测得天然含水率(3.11%)及天然干重度(1.09 g/cm<sup>3</sup>)的基础上,配置含水率为 10%,20%,30%,40%的重塑土样,分别在 100,200,300,400 kPa 垂向应力下开展了直剪试验,获得了试样在不同正应力作用下的剪应力-位移数据(见图 3).结果表明:在相同的垂向压力下,试样峰值强度随含水率的增加而减小,含水率越高,峰值及应变软化现象越明显,剪切过程收敛较快.在相同含水率作用下,垂向压力越大,剪应力越大;垂向压力越小,应变软化效应越明显.

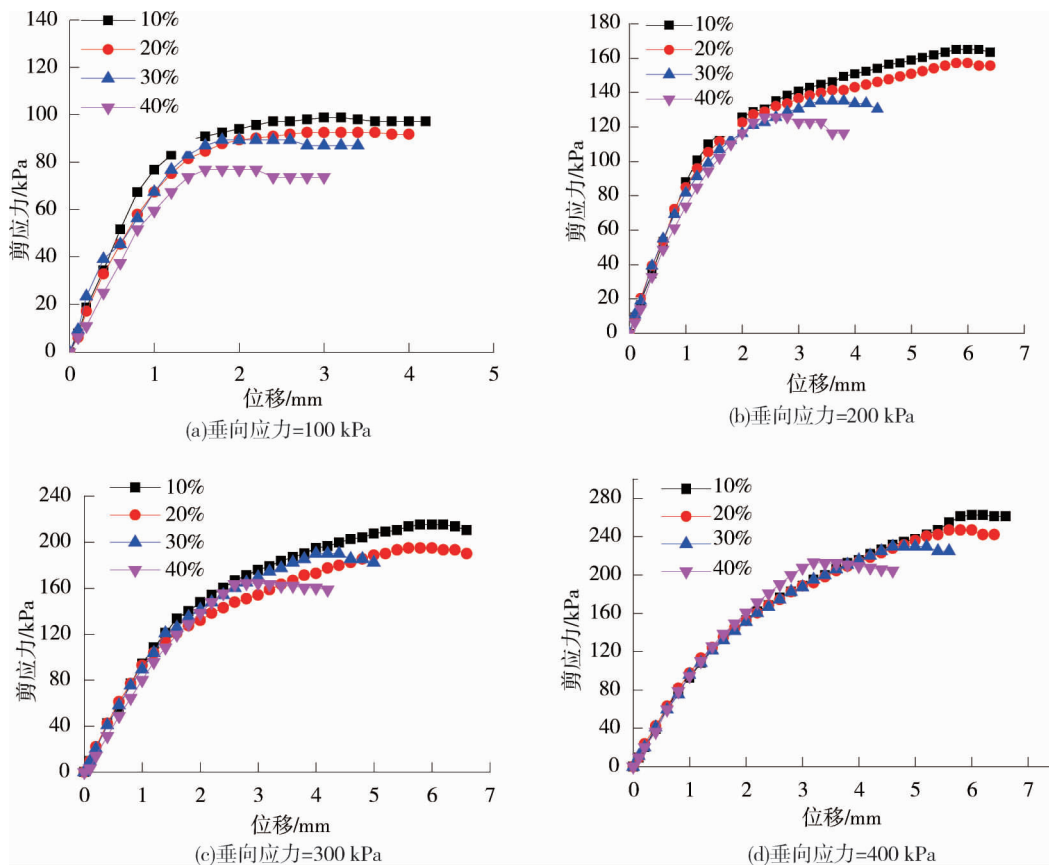


图 3 不同含水率和垂向应力下剪应力—位移关系曲线

不同含水率作用下的抗剪强度曲线(如图 4)表明,抗剪强度随含水率的增加而减小,内聚力和内摩擦角均随含水率的增大而减小(如图 5 和图 6),当土体含水率由 10%增加到 40%时,内聚力由 50.3 kPa 减小到 36.5 kPa,总降幅 13.8 kPa,且含水率达到 20%以后内聚力变化曲线斜率更大,减小幅度更明显.内摩擦角变化趋势较为均匀,由 28.4°降低为 23.8°,总降幅 4.6°.

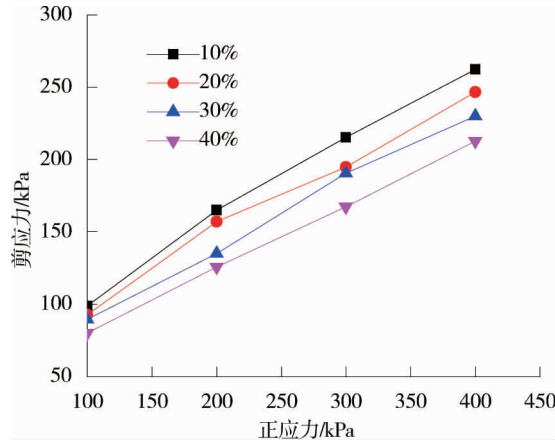


图4 不同含水率下松散物源体抗剪强度曲线

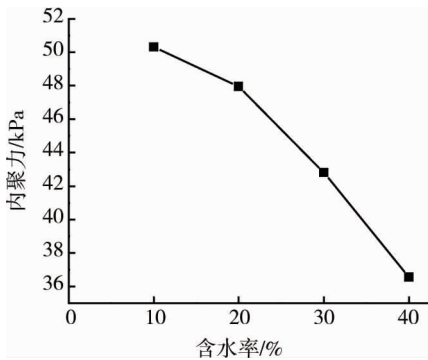


图5 内聚力与含水率的关系曲线

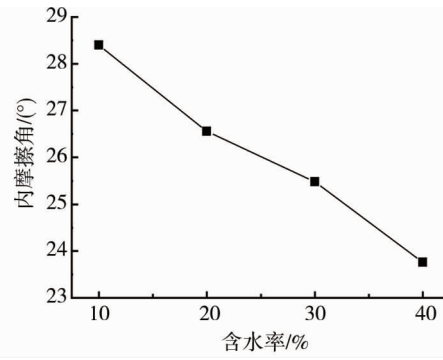


图6 内摩擦角与含水率的关系曲线

### 3 坡面泥石流启动的 PFC 模拟

#### 3.1 直剪试验宏观细观参数标定

建立如图7所示直剪实验模型,不断调整模型微细观参数,当数值模拟所确定的土体的抗剪强度与实验强度无限接近时,此时的模型参数即为对应于宏观特征的微细观参数.限于篇幅,标定过程省略,最终获取几何细观参数:颗粒最大半径  $R_{max} = 15$  cm,颗粒最小半径  $R_{min} = 5$  cm,颗粒半径比 1.5,样本孔隙率 0.3%,其不同含水率作用下的细观力学参数如表1所示.

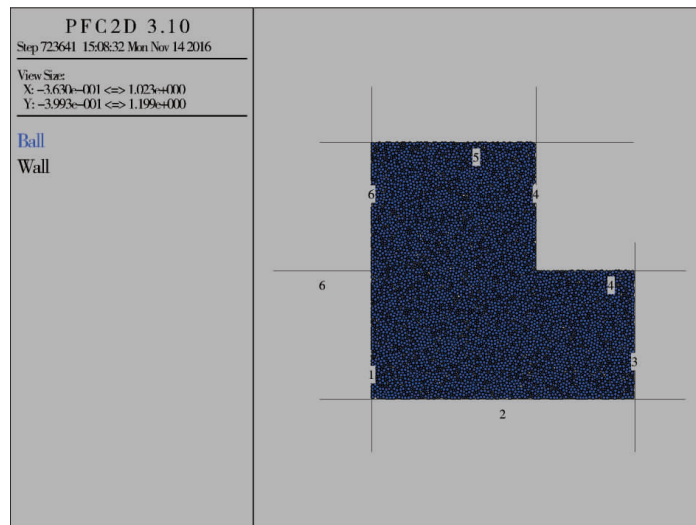


图7 直剪模型

表 1 不同含水率下模拟用的细观力学参数

含水率	颗粒密度/(kN/m <sup>3</sup> )	颗粒摩擦因数	法向刚度/(N/m <sup>2</sup> )	切向刚度/(N/m <sup>2</sup> )	法向接触力/MPa	切向接触力/MPa
10	1 380	0.45	1E9	3.14E8	0.35	0.31
20	1 490	0.26	1E9	3.14E8	0.23	0.21
30	1 520	0.18	1E9	3.14E8	0.15	0.13
40	1 650	0.11	1E9	3.14E8	0.13	0.11

### 3.2 松散堆积体 PFC 模型的建立

先以“墙”命令生成松散物源体堆积斜坡表面,在综合考虑计算效率、物理模型的颗粒级配以及粒径分布的基础上,采用逐步膨胀压紧法来产生颗粒,以解决模型出现空区域、颗粒与墙之间有重叠问题,主要建模步骤如下:

#### 1) 颗粒估算

在已知模型面积为  $A$ ,岩土体材料孔隙率为  $n$ ,最大颗粒半径为  $R_{\max}$ ,最小颗粒半径为  $R_{\min}$ ,采用式(1)和式(2)分别估算模型内生成的颗粒总面积  $A_{\text{ball}}$ 和颗粒数目  $N$ :

$$A_{\text{ball}} = A(1-n); \quad (1)$$

$$N = \frac{4A_{\text{ball}}}{\pi(R_{\max} + R_{\min})^2} = \frac{4A(1-n)}{\pi(R_{\max} + R_{\min})^2}. \quad (2)$$

#### 2) 逐渐膨胀

为解决颗粒填充不均匀、空区域、颗粒与墙重叠等问题,采用先缩放,再膨胀的方式来达到力的平衡.设定缩放系数为  $m$ ,对颗粒最大  $R'_{\max}$ ,最小半径  $R'_{\min}$  都缩放到原来的  $1/m$ ,则颗粒初始生成最大、最小半径为

$$\begin{cases} R'_{\max} = R_{\max}/m; \\ R'_{\min} = R_{\min}/m. \end{cases} \quad (3)$$

在  $[R'_{\min}, R'_{\max}]$  范围内随机生成颗粒,总面积  $a$ ,理论膨胀系数为  $\eta$  按照式(4)计算,采用多次膨胀,保证总的膨胀率不变的情况下,膨胀系数依次降低,分别取  $\eta^{0.6}, \eta^{0.2}, \eta^{0.1}, \eta^{0.05}$ .

$$\eta = \sqrt{\frac{A(1.0-n)}{a}}. \quad (4)$$

式中: $\eta$  为理论膨胀系数; $n$  为岩土材料孔隙率; $A$  为模型面积; $a$  为生成颗粒总面积.

#### 3) 伺服处理

向边界 wall 施加恒定的约束力(低应力)对初始模型进行伺服处理,边界墙移动速度  $\dot{u}^w$  为

$$\dot{u}^w = G(\sigma^{\text{mea}} - \sigma^{\text{req}}) = G\Delta\sigma. \quad (5)$$

式中: $\sigma^{\text{mea}}, \sigma^{\text{req}}$  分别为实测应力与目标应力; $\Delta\sigma$  为实测应力与目标应力之差; $G$  为伺服控制参数.按式(6)进行计算.

$$G \leq \frac{\alpha S}{k_n^{(w)} N_c \Delta t}. \quad (6)$$

式中: $\alpha$  为应力放松因子( $\alpha$  默认为 0.5); $S$  为边界面积,二维中为边界的长度; $k_n^{(w)}$  为颗粒与边界的接触的平均接触刚度; $N_c$  为颗粒与边界的接触总数.

根据上述步骤,建立完成的松散物源体堆积面如图 8 所示,共生成颗粒数 54 326 个.

### 3.3 启动模拟

颗粒在重力加速度作用下下落到基岩面上,在堆积体初始密度和强度下完成松散物源体的堆积过程,当不平衡力曲线趋于稳定时(如图 9),形成现有坡面形态.



图 8 松散物源体颗粒流模型



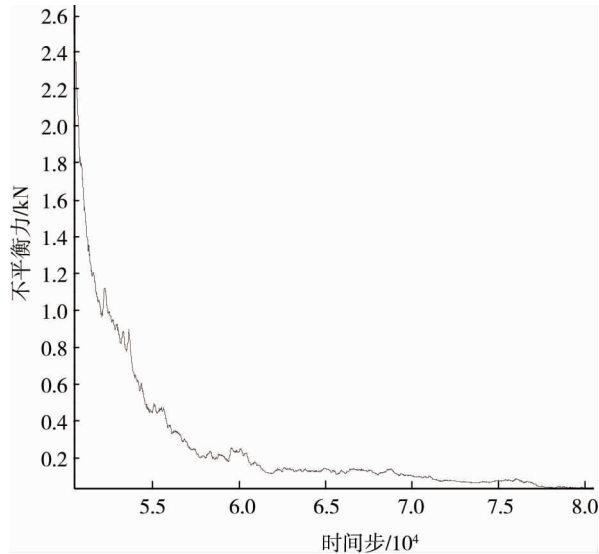


图9 堆积过程不平衡力进化

开展不同含水率下的松散物源体形态见图10,由此可知,松散对机体从堆积完成到含水率为10%时,坡面形态基本发生变化,当增加至20%时,仅有坡体前部局部颗粒有细微的调整,整个坡面形态基本未发生改变.但当含水率升至35%时,坡面形态开始出现大的变化,前缘土体出现了大面积滑动,带动后续松散物源体开始下滑,且当含水率达到30%时,整个碎屑物呈现流态化,坡面形态完全改观.



图10 不同含水率下的坡面形态

## 4 结论

1) 扫帚港沟物源区松散碎屑物较多,中粗粒组含量占92.32%,其中砂粒含量占59.02%,砾粒含量占34.30%,细粒含量占7.68%,不均匀系数  $C_u = 7.991$ , 曲率系数  $C_c = 0.463$ , 为级配不连续、不均匀的含细粒土砂.

2) 松散物源体抗剪强度随含水率的增加而减小,内聚力和内摩擦角均随含水率的增大而减小.当土体含水率由10%增加到40%时,内聚力由50.3 kPa减小到36.5 kPa,且含水率达到20%以后内聚力变化曲线斜率更大,减小幅度更明显.内摩擦角变化趋势较为均匀,由 $28.4^\circ$ 降低为 $23.8^\circ$ ,总降幅 $4.6^\circ$ .

3) 借助于PFC软件在松散碎屑物大变形模拟方面的优势,对降雨入渗作用下松散堆积物泥石流启动机理的模拟,揭示出门头沟扫帚港沟物源区松散碎屑物在临界含水率20%之前,斜坡土体在自重和水动力作用下能够保持整体的相对稳定.当含水率达到25%~30%后,土体强度骤减,原有平衡状态被打破,松散堆积体启动并加速形成坡面泥石流.

4) 坡面泥石流的启动从前缘开始,先是坡趾土体失去支撑发生破坏,牵引后部土体发生坍塌产生由前至后的溯源破坏.在泥石流防治中,应加强该地区土体含水率的实时监测和综合分析,当含水率达到

25%~30%后,应密切关注水情,及时发出预警信息.

### 参考文献:

- [1] Laigle D, Coussot P. Numerical Modeling of Mudflows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(7):617-623.
- [2] Miyazawa N, Sunada K, Oishi S. Development of 2D numerical model of mudflows for estimation of sediment deposition in volcanic basins [J]. Sabo Gakkaishi, 2014, 59(1):23-34.
- [3] Hsu S C, Jaing C H, Chen N C. Modeling of Debris Flow Using Distinct Element Method[C]// International Conference on Geotechnical and Earthquake Engineering, 2013:713-720.
- [4] Destro E, Amponsah W, Nikolopoulos E I, et al. Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: application on an alpine extreme flood event [J]. Journal of Hydrology, 2018;S0022169418300210.
- [5] Ruette J V, Lehmann P, Or D. Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances [J]. Landslides, 2016,13(5): 1097-1107.
- [6] 李艳富,王兆印,施文婧,等.汶川震区的坡面泥石流调查研究[J].泥沙研究,2011(1):1-7.
- [7] 刘成,徐刚.坡面泥石流形成之降水条件探讨——以重庆北碚地区为例[J].土壤通报,2006,37(5):203-207.
- [8] 张永双,曲永新,何锋,等.秦巴山区宁陕县城坡面泥石流的形成机理[J].水文地质工程地质,2005(5):84-88.
- [9] 吕立群,陈宁生,卢阳,等.基于人工降雨实验的坡面泥石流启动动力学计算[J].自然灾害学报,2013,22(1):52-59.
- [10] 刘菲,唐红梅.工程弃渣型坡面泥石流形成过程试验[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(s1):519-522.
- [11] He X Y, Chen H K, Tang H M, et al. Formation mechanism study on Houchuangzi slopedebris flow[J]. Advanced Materials Research, 2011,(243/249):3082-3086.
- [12] 杨为民,吴树仁,张永双,等.降雨诱发坡面型泥石流形成机理[J].地学前缘,2007,14(6):197-204.
- [13] 唐川.平面二维泥石流数值模拟方法的探讨[J].水文地质工程地质,1994(5):9-12.
- [14] 余斌.二维定常泥流的数值模拟[J].自然灾害学报,1995,4(4):96-99.
- [15] 胡明鉴,汪稔,陈中学,等.泥石流启动过程 PFC 数值模拟[J].岩土力学,2010,31(s1):394-397.
- [16] 左正金,李才,王硕楠,等.基于 PFC~(2D)软件的柿树沟泥石流运动过程数值模拟[J].水电能源科学,2014(9):135-138.
- [17] 马秋娟,唐阳,宿辉.泥石流启动过程试验与数值模拟研究[J].科学技术与工程,2015,15(25):7-10.
- [18] 周健,杜强,于仕才.泥石流启动试验的数值模拟研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015(9):96-103.
- [19] 杜建华,匡忠祥,宋卫东,等.井下泥石流发生机理数值模拟研究[J].金属矿山,2008,38(4):18-22.
- [20] 北京市地质环境公报[R].北京:北京市规划和国土资源管理委员会,2017.