

# 四川汉源二蛮山高速滑坡 - 碎屑流 基本特征及地质演化

顾成壮<sup>1</sup>, 胡卸文<sup>1,2</sup>, 方 力<sup>1</sup>, 杨绍平<sup>3</sup>, 罗春红<sup>4</sup>

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 抗震工程技术四川重点实验室, 四川 成都 610031;  
3. 四川水利职业技术学院, 四川 崇州 611231; 4. 四川省地矿局九〇九水文地质工程地质队, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:** 2010 - 07 - 27 凌晨, 四川省汉源县万工集镇后山因持续暴雨而突发高位高速远程滑坡 - 碎屑流, 最大滑程约 1.4 km, 启动时滑坡体约  $48 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 沿线裹挟和铲刮沟谷及其两侧边坡松散体, 到达坡脚部位滑坡碎屑流体积增大至  $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 最终导致沿沟的双合村一组 5 户 20 名村民失踪及下游万工集镇部分房屋被掩埋而倾倒破坏。滑坡启动区发育于万工集镇后侧二蛮山大沟内, 沟左侧为二叠系灰岩 ( $P_1y$ ), 顺坡倾向沟内; 右侧为强风化的二叠系峨眉山玄武岩 ( $P_2\beta$ ), 节理极发育; 沟内早期堆积物丰富, 特别是沟上游还存在一大型古滑坡体; 这些不稳定物源在有利地形条件及降雨诱发下极易形成滑坡。原始沟谷上游高位陡峭地形导致山体具备高位潜在势能, 具备形成高位高速远程滑坡 - 碎屑流的地形条件。2010 - 07 - 24—26 的降雨是触发此次特大灾害的主要原因, 累计降雨量达 163 mm, 在水的作用下启程剧动并高速下滑。采用将今论古的地质方法, 从地质构造、地层序列、岩体坡体结构及坡体变形等角度研究了二蛮山滑坡孕育的地质演化史, 再现了滑坡区域历史时期中重要的地质活动过程。

**关键词:** 碎屑流; 高速远程; 基本特征; 形成条件; 地质演化

**中图分类号:** P642, TU43

**文献标志码:** A

2010 - 07 - 27 T4:00 许, 四川汉源万工乡二蛮山一带在前期强降雨的影响下发生特大滑坡灾害 (图 1), 致使双合村一组 5 户 20 名村民失踪<sup>[1]</sup>, 万工集镇靠近山体一侧部分遭受掩埋。地质灾害呈现高位高速远程滑动特征 (图 2), 约  $48 \times 10^4 \text{ m}^3$  的崩滑体向南西下滑形成高速碎屑流, 铲刮右侧玄武岩表层堆积体及原始沟床堆积物, 运动约 548 m 后, 剧烈撞击沟谷中段深大沟槽左侧灰岩山体后, 一部分碎屑流因本身直进性翻出沟道致使位于左岸双合村的 20 名村民遇难, 另一部分碎屑流撞击后向西偏转约  $18^\circ$  后继续表现为高速碎屑流高速下滑, 填平原始沟床及排导设施, 运动约 700 m 后在集镇后侧山坡平坦处停止堆积。主滑结束半小时后, 大沟槽上

堆积体在重力作用下沿着主滑方向发生二次滑动, 因主滑体抬高作用, 后期碎屑物质运动更远, 滑程约 908 m, 最终导致万工集镇部分房屋遭受倾倒破坏 (图 3)。

降雨是触发此次特大灾害的主要原因, 2010 - 07 - 24—26 连续 3 d 强降雨, 降雨量达 163 mm, 其中 25 日降雨曾引发过一次泥石流, 因其规模不大, 原排导槽发挥了作用。但由于滑坡启动于 1 560 ~ 1 630 m 高程处, 高位势能大, 启动后沿路不断携卷和铲刮沟谷及两侧的表层松散物质, 使滑坡方量逐渐增大到  $100 \times 10^4 \text{ m}^3$  左右, 排导设施失效。类似此种高位高速远程滑坡引发的悲剧在西南山区时有发生, 因其势能大, 速度快, 致灾强特点, 具有典型代表性。因此, 系统分析其基本特征、形成条件及其地

**收稿日期** (Received date): 2013 - 12 - 08; **修回日期** (Accepted): 2014 - 03 - 06。

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41372293); NSFC - 云南联合基金重点项目 (U1033601); 2013 年西南交通大学博士研究生创新基金。[Supported by National Natural Science Foundation of China (41372293), National Natural Science Foundation Project-mutual Fund of Yunnan Province (U1033601), and the Fund of Southwest Jiao Tong University Graduate Innovation.]

**作者简介** (Biography): 顾成壮 (1986 - ), 男, 江苏盐城人, 在读博士研究生, 主要从事铁路工程地质勘查及设计方面的研究工作。[Gu Cheng-zhuang (1986 - ), male, born in Yancheng of Jiangsu province, Ph D students, mainly engaged in the researching work of engineering geology and environmental geology.] Tel: 13666287437, E-mail: guchengzhuang123@163.com

质演化过程,对今后类似地质灾害防治提供理论依据无疑具有重要的指导借鉴意义。

## 1 地理位置及地质环境概况

### 1.1 地理位置

滑坡区位于四川省汉源县县城东南约 20 km,



图1 万工集镇地质灾害后无人机遥感图

Fig.1 The UAV remote sensing image of the geological disaster of Wan Gong town



图2 二蛮山滑坡远景

Fig.2 The distant prospect of Ermanshan landslide



图3 滑坡导致房屋倾倒破坏

Fig.3 Toppling failure of houses caused by landslide

地处大渡河瀑布沟库区左岸,距坝区约 20 km。地理坐标:102°43'26"~102°44'41"E,29°18'58"~29°19'25"N,海拔 920~1 700 m;新建的万工集镇位于大沟流域下游右侧台地大坪头。

### 1.2 地质环境概况

#### 1.2.1 地貌

滑坡区位于大渡河左岸,属高中山地,构造剥蚀地貌,最高点为后缘二蛮山,高程 1 963.4 m,最低处为瀑布沟电站库区正常蓄水水面,高程 850 m。二蛮山 SW 侧发育一大型沟谷,早期为一高频泥石流沟,当地人称“大沟”。850~960 m 呈陡缓交替的山地斜坡地貌,其中高程 920~960 m 为平缓台地,是集镇所在地,地形坡度 8°~10°;高程 960 m 以上为山势陡峭的中山地貌。集镇所在台地斜坡地形总的走向为 N40°~50°W,坡向 SW。

#### 1.2.2 地层岩性

在大沟中、上游 1 170 m 高程以上,为第四系早期滑坡堆积层( $Q_4^{del}$ ),主要由碎石土、块碎石土组成。1 170 m 高程以下至沟口地带,为第四系早期泥石流堆积层( $Q_4^{sef}$ ),其由块石、碎石、泥砂混合堆积而成,厚度一般 6~14 m。第四系坡残积层( $Q_4^{el+dl}$ )分布于大沟中、下游两侧山体斜坡地带,岩块岩性为灰岩和玄武岩,厚度一般 3~5 m。此外还有第四系坡洪积层( $Q_4^{dl+pl}$ )和第四系冲洪积层( $Q_4^{al+pl}$ )分别分布于万工集镇及其后部斜坡地带和大渡河 I、II 级阶地、漫滩及河床中。

滑坡碎屑流所在区基岩为二叠系上统峨眉山玄武岩组( $P_2\beta$ )和下统阳新组( $P_{1y}$ )灰岩构成。 $P_2\beta$  玄武岩分布于大沟右岸,主要成分是暗紫色豆状玄武质凝灰岩或铁灰色致密块状玄武岩,柱状节理发育,表部岩体风化卸荷强烈呈碎块状。 $P_{1y}$  灰岩分布于大沟左岸,以生物碎屑灰岩,钙质、炭质粘土岩,白云岩为主。

#### 1.2.3 地质构造及地震

滑坡区及其周边范围内无大规模断裂、褶皱等地质构造发育。研究区历史上无 5 级以上强震活动记载,其地震效应属外围强震活动波及区。近年来,外围强震主要有 1964 年汉源地震(震级 4.5 级、烈度 6 度)及 2008 年汶川大地震(震级 8.0 级、烈度 8 度)。

#### 1.2.4 水文地质

研究区内水文地质条件较为简单,地下水类型以松散堆积层孔隙水为主,次为基岩裂隙水和碳酸盐岩溶隙水。孔隙水主要赋存于松散层孔隙中,主

要接受大气降雨和农业灌溉水补给;基岩裂隙水主要赋存于二叠系玄武岩( $P_2\beta$ )裂隙中,主要接受大气降水的垂直入渗补给和松散层孔隙水径流补给;碳酸盐岩溶隙水赋存于二叠系阳新组( $P_1\gamma$ )的生物碎屑灰岩岩溶裂隙中。区内未见大型岩溶现象,地表仅见小溶沟、溶槽及小溶孔,地下水处于深部岩溶裂隙循环中。

## 2 高速滑坡特征

### 2.1 滑坡物质分布

通过现场调查,根据滑坡物质分布、运动和堆积特征,可对整个滑坡-碎屑流分为如下几个区域(图4)。

#### 2.1.1 I区:滑坡区

I-1区(滑源区):分布于高程1 630 m~1 470 m,上部主要为玄武岩块石,颗粒较大,含少量巨石,为后缘崩塌积;下部为古滑坡堆积块碎石土及少量原有沟床块石,颗粒总体较细,粒径一般2~3 cm,含泥量较大,高达40%,厚度为8~13 m。

I-2区(崩滑加速区):分布于高程1 470~1 290 m,主滑体上覆崩滑堆积,为玄武岩碎石、坡残积土及少量原有沟床块石,纵向上呈条带状分布,横向上物质组成差别明显,下游侧左侧堆积体主要为滑坡及少量玄武岩碎石,颗粒较细,粒径一般2~3 cm,含泥量较大,厚度为8~13 m;中间主要为玄武岩碎块石及少量原有沟床块石,颗粒中等,粒径一般3~6 cm,厚度为6~10 m;右侧主要为玄武岩碎石,颗粒较细,粒径一般2~3 cm,厚度为5~6 m。

I-3区(碎屑流通区):分布于高程1 290~

1 050 m,上部主要为玄武岩碎石,颗粒较细,粒径一般2~3 cm,厚度为6~12 m,下部为滑坡堆积块碎石土。

#### 2.1.2 II区:崩塌区

II-1区(崩塌源区):分布于主滑体下游右侧,高程1 640~1 440 m,纵向上呈条带状分布,玄武岩壁上残留少量危岩体,三组优势节理将岩体切割成块状,往下游侧方向,节理极发育,现仍有零星崩落。

II-2区(崩塌堆积区):分布于高程1 610~1 380 m,为玄武岩巨石、块石,颗粒较粗,呈块状、菱形,粒径一般>6 cm,厚度为4~8 m,往下游侧颗粒逐渐变细,厚度也逐渐变薄。

#### 2.1.3 III区:堆积区

III-1区(主滑坡直进翻越堆积区):分布于高程1 300~1 080 m,玄武岩大块石、碎石,中间颗粒较细,两侧颗粒粗,含少量灰岩块石,下部含泥量大,在破坏的房屋上可见泥浆痕迹,推测滑坡碎屑流发生时呈饱和状态。

III-2区(主滑坡碎屑流堆积区):分布于高程1 050~990 m,玄武岩细碎屑,含泥量往下游侧逐渐增大,原沟床部位渗水,堆积物厚度15~10 m,向下变薄,纵向坡度 $8^\circ\sim 15^\circ$ ,又多级横向陡坎,是由碎屑流运动堆积时纵向拉张作用产生的。堆积物受原始沟谷和排导设施控制而低凹呈波状起伏。

III-3区(二次滑动前缘堆积区):分布于高程990~950 m,上部为玄武岩碎屑,下部洪积成分高,含泥量较大。整体上呈扇状撒开,微地形特征丰富,龚岗、拉槽及刃脊相间分布。前缘最大宽度为136 m,面积约为 $0.0255\text{ km}^2$ ,堆积物厚度7~11 m,体积为 $17.85\times 10^4\text{ m}^3$ ,坡度 $5^\circ\sim 8^\circ$ 。通过现场巨石、

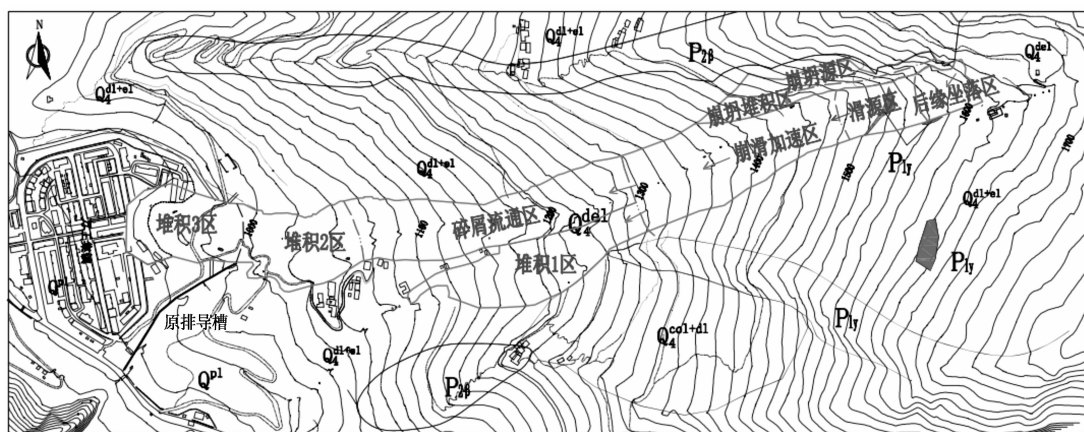


图4 滑坡物质分布平面图

Fig. 4 Plan of landslide material distribution

大块石统计及碎屑筛选结果,可以得知,粒径  $d > 200\text{ mm}$  块石约占  $0.59\%$ ,  $60 \sim 200\text{ mm}$  的碎石约占  $0.21\%$ ,  $20 \sim 60\text{ mm}$  的粗砾约占  $38.33\%$ ,  $0.075 \sim 20\text{ mm}$  的细砾及砂粒含量约占  $25.72\%$ ,  $< 0.075\text{ mm}$  的粉粒及粘粒所占比例为  $35.15\%$  (表 1)。

2.1.4 IV区:滑坡后缘座落区

地形较平缓,坡度  $< 5^\circ$ ,完整性保持较好,上部为坡残积、古滑坡堆积体,含泥量大,下部为强风化玄武岩体。座落体厚度为  $5 \sim 10\text{ m}$ ,受灰岩阻挡而覆盖其之上,但剪出口处仍有临空面。

表 1 二次滑动前缘堆积区颗粒粒径分布

Table 1 Grain composition of forward deposit area of the later landslide

粒径 /mm	百分比 /%
$> 200$	$0.59\%$
$60 \sim 200$	$0.21\%$
$20 \sim 60$	$38.33\%$
$0.075 \sim 20$	$25.72\%$
$< 0.075$	$35.15\%$

2.2 滑坡运动特征

2.2.1 运动过程分区

根据滑坡从发生直至最后堆积全过程,整个二蛮山滑坡-碎屑流大致可分成以下 6 个区域(图 5~6)。

1. 启程活动区

滑坡剪出口以上至坡顶(高程  $1\,630 \sim 1\,470\text{ m}$ ,平面上距坡顶  $0 \sim 175\text{ m}$ )的区域,先是浅表层土质堆积层沿滑面的下滑运动,滑面受左侧灰岩基岩控制沿岩面顺层滑动,滑坡物质主要为原沟床细颗粒堆积物,后玄武岩岩质边坡因坡脚失去支撑失稳破

坏,此阶段岩质滑坡获得了较高的滑动速度(图 7)。

2. 近程活动区

剪出口至大沟深沟槽(高程  $1\,470 \sim 1\,290\text{ m}$ ,平面上距坡顶  $175 \sim 615\text{ m}$ )区域。由于在启程阶段滑坡已达到较大速度,岩质滑坡临空抛射撞击地面解体形成碎屑流,由于沟床坡度较陡,滑体加速,沿线裹挟和铲刮原有沟床堆积物,体积不断增大(图 8)。

3. 短程碰撞骤停区

位于大沟沟槽灰岩突出部分(高程  $1\,310 \sim 1\,290\text{ m}$ ),由于受左侧灰岩基岩的碰撞,部分碎屑流停止堆积与此处,颗粒粒径成分相对较粗(图 9)。

4. 远程碎屑流区

大沟深沟槽至高程  $1\,050\text{ m}$  区域(高程  $1\,290 \sim 1\,050\text{ m}$ ,平面上距坡顶  $615 \sim 1\,440\text{ m}$ ),滑体主要以高速碎屑流运动为主,受沟槽撞击解体后颗粒更细,形成碎屑与空气及水的混合物,在高速空气涡流作用下快速下滑,同时运动过程中碎屑间相互碰撞传递能量,部分加速,部分堆积,并沿线填埋原始沟床及排导设施(图 10)。

5. 堆积区

主要分成 3 个亚区:第一亚区为滑坡撞击大沟深沟槽后直进性翻越后堆积;第二亚区为主滑坡体堆积区;第三亚区为二次滑坡堆积区(图 11)。

6. 后缘坐落区

高程  $1\,620 \sim 1\,560\text{ m}$ 。主滑坡滑动后,后缘壁较陡,因后缘后方为古滑坡堆积体,后缘壁为其提供临空面,加上前期暴雨使得古堆积体趋于饱和,抗剪强度低,在重力作用下,向临空面剪出,整体坐落,受前方灰岩体阻挡,整体堆积于基岩体之上(图 12)。

2.2.2 运动速度估算

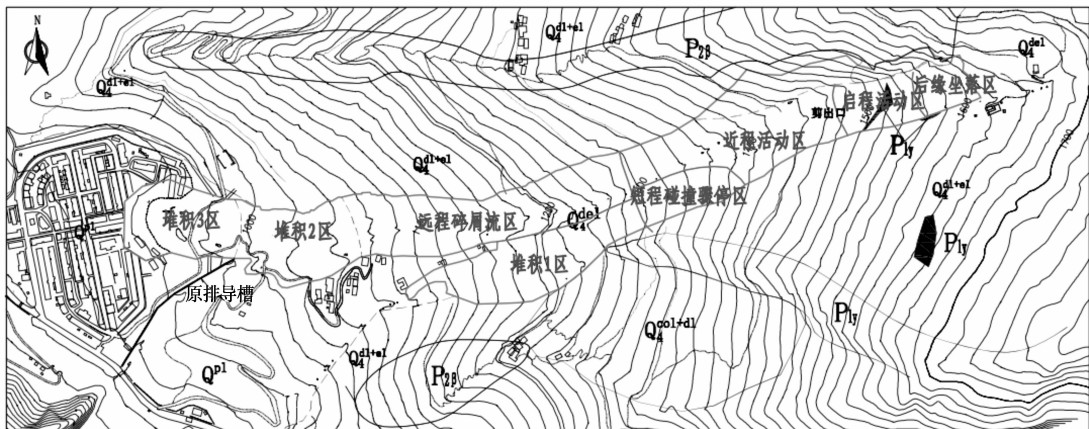


图 5 滑坡运动过程分区平面图

Fig. 5 Subarea plan of landslide movement process



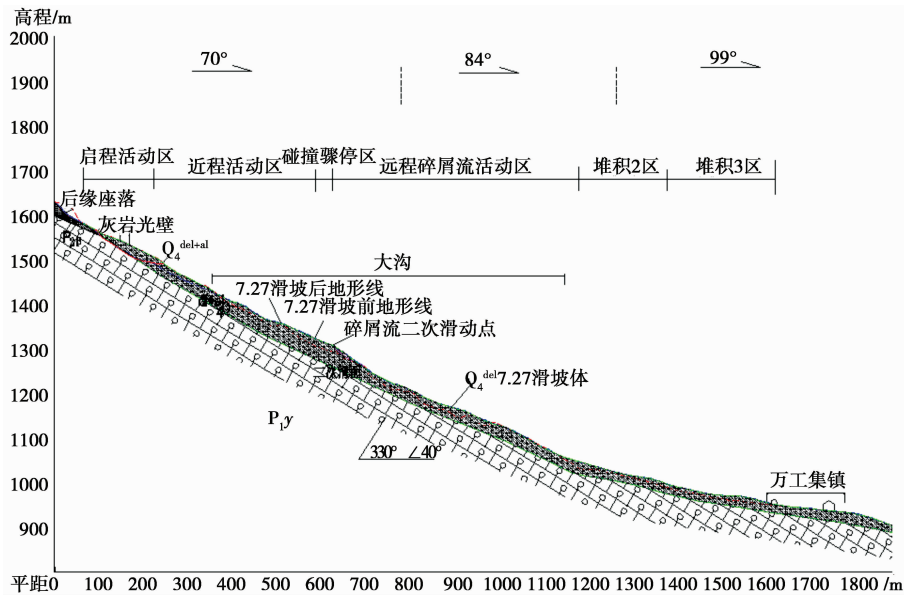


图6 主滑坡典型纵断面图

Fig. 6 Catastrophic profile of Wangong main landslide

对于体积为百万~千万立方米的滑坡运动速度和滑移距离的估计,国际上较为通行的计算公式是1973年 Scheidegger, A. E. [3] 基于能量转化原理提出的

$$\text{碎屑流运动前 } V = \sqrt{2g(H - f_1 * L)} \quad (1)$$

$$\text{碎屑流运动后 } V = \sqrt{v^2 + 2gf_2(H' - f_2 * L')} \quad (2)$$

式中  $V$  为滑动速度;  $g$  为重力加速度;  $H$  为滑坡后缘顶点至滑程估算点的高差;  $L$  为滑坡后缘顶点至滑程上估算点的水平距离;  $f_1$  为近程活动结束后碎屑流运动前滑坡后缘顶点至滑坡运动最远点的连线之斜率,即等效摩擦系数;  $v$  为近程活动结束后碎屑流运动前的滑坡速度;  $H'$  为滑坡碎屑流运动开始点至滑程估算点的高差;  $L'$  为滑坡碎屑流运动开始点至滑程估算点的水平距离;  $f_2$  为滑坡碎屑流运动后的等效摩擦系数。

近程活动后远程碎屑流前滑体质心的最大垂直落差为273 m,最大水平运动距离为615 m,动摩擦系数  $f_1 = 0.443$ ; 碎屑流的最大垂直落差为311 m,最大水平运动距离为825 m,动摩擦系数  $f_2 = 0.3774$ 。采用上述两公式,可以计算出沿线各不同滑程上的运动速度,计算结果见表2。

### 3 滑坡形成条件

#### 3.1 地形

万工滑坡滑源区坡顶高程为1560 m,堆积前缘高程950 m,垂直高差达610 m,水平距离为1600

m,纵向平均坡度20.8°,特别是在滑源区及近程活动区,坡度较陡,达23.9°。

区内发育大沟,高程1025~1270 m为早期滑坡、泥石流堆积深切段,为高处松散体运动提供了临空面。

#### 3.2 物源

大沟内原有堆积物丰富,古滑坡、早期泥石流普遍发育,同时大沟左侧灰岩上覆坡残积土,厚度5~7 m,因基岩倾向沟内,松散体极易沿着基覆界线顺层滑动。大沟右侧为玄武岩基岩出露,覆盖层3~5 m,因玄武岩强风化且节理发育,易发生崩落,堆积于大沟内,为滑坡的形成提供物源。高程1560~1700 m为古滑坡堆积体,体积达  $20.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,密实度大,稳定性较好,但在其他因素(临空面、强降雨)诱发下仍可能发生局部滑动。

#### 3.3 坡体结构

大沟左侧灰岩为顺向坡,基岩产状  $330^\circ \angle 35^\circ$ ,岩层面较光滑(图13),上覆坡残积层极易沿着基覆界线顺层滑动(图14);灰岩岩体结构较完整,裂隙不发育,有2组节理,产状分别为  $225^\circ \angle 66^\circ$ 、 $142^\circ \angle 44^\circ$ (图15),节理间距约1.5 m,张开度6~8 cm,高程1500~1190 m处,可见早期基岩顺层滑动痕迹。

大沟右侧玄武岩表层风化严重,柱状节理发育,主要有三组优势结构面(图16),第一组:  $210^\circ \sim 217^\circ \angle 65^\circ \sim 79^\circ$ 、第二组:  $317^\circ \sim 335^\circ \angle 20^\circ \sim 40^\circ$ 、第三组:  $150^\circ \sim 164^\circ \angle 68^\circ \sim 80^\circ$ ,第一组节理密集,间距



图 7 启程活动区  
Fig.7 Area of set-out activity



图 10 远程碎屑流区  
Fig. 10 The long-runout flowing area



图 8 近程活动区  
Fig.8 Area of short range activity



图 11 堆积区  
Fig. 11 Accumulation area



图 9 短程碰撞骤停区  
Fig. 9 Area of short-runout collision to arrest



图 12 后缘座落区  
Fig. 12 Area of entirety slide-down at rear

表 2 滑体各个阶段运动速度

Table 2 Moving speed in each stages of landslide body

滑程/m	高程/m	高差/m	纵坡降/ ‰	运动速度/( m/s)
175	1 560 ~ 1 470	90	514	15.64
330	1 470 ~ 1 410	60	387	16.45
615	1 410 ~ 1 290	120	421	3.30
800(185)	1 290 ~ 1 250	370(40)	216	23.32
1 000(385)	1 250 ~ 1 180	440(110)	350	22.68
1 220(605)	1 180 ~ 1 090	530(200)	409	25.13
1 350(735)	1 090 ~ 1 050	560(230)	231	17.24
1 440(825)	1 050 ~ 1 036	584(254)	267	1.98

注:括号里的数据为二次滑坡数据,即相对二次滑坡启动位置的相应数据。



0.4 m/条,第二组节理间距 1.5 m/条,第三组为坡面拉裂面。其中,前两组控制性结构面与大沟大角度相交,总体上玄武岩岩体稳定性较好,但由于第三组拉裂面的存在,侧边界临空情况下会发生崩落破坏(图 17~18)。

3.4 降雨

据汉源县富林镇(距研究区约 6 km)气象站资料统计,多年平均降水量为 730.4 mm,最大年降水量 935.1 mm,雨季(6—9 月)降水量占全年的 70.6%(图 19)。



图 13 沟谷左侧灰岩  
Fig. 13 Limestone on the left of the gully



图 14 灰岩顺层滑动(沿基覆界线)  
Fig. 14 Limestone bedding slip

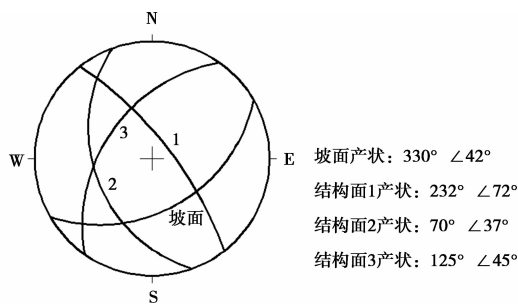


图 15 灰岩结构面赤平投影图  
Fig. 15 Stereogram of limestone structural plane

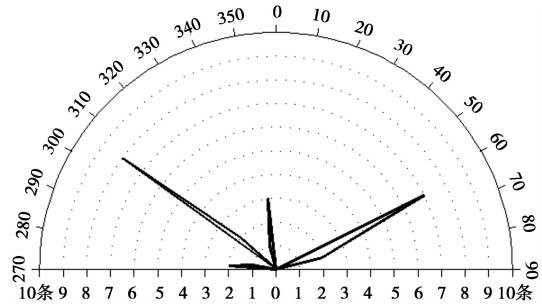


图 16 玄武岩节理裂隙走向玫瑰花图  
Fig. 16 Strike rosette of joint cracks of basalt



图 17 玄武岩柱状节理  
Fig. 17 Columnar joint of basalt

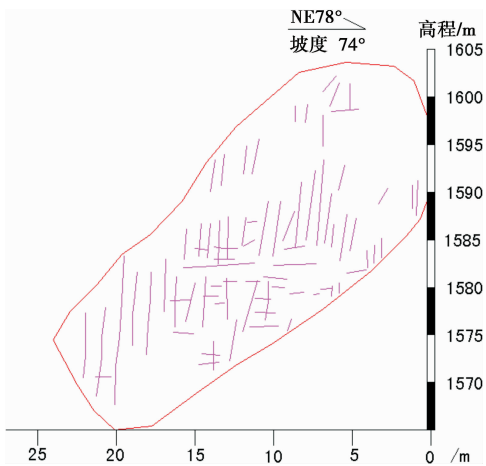


图 18 柱状节理素描图  
Fig. 18 Drawing of columnar joint

2010-07-24—26, 累计降雨量达 163 mm, 接近 7 月全月的降雨量, 雨水渗入斜坡体, 使之饱和, 岩土体的重度增大, 抗剪强度急剧下降, 同时由于水的润滑及浮托作用, 使得斜坡体极不稳定性。因地表径流强烈, 高程 1 707 m 处排水沟不能及时排出, 水流顺沟沿线携带松散体并混合向下游运动, 25 日曾暴发过一次泥石流。

## 4 滑坡区域地质演化史

通过分析总结滑坡的工程地质条件,查阅相关的区域地质资料,归纳总结出万工二蛮山滑坡区的基本地质演化过程:1. 由于岩浆作用,形成玄武岩,后由于地壳运动及风化剥蚀作用,形成现有的单斜构造;2. 由于玄武岩抗风化能力较差,灰岩抗风化能力强,差异风化作用导致边坡内出现沟谷的雏形,并在地质历史长河内不断发展;3. 由于沟谷的淘蚀作用及某外营力作用(主因),左侧灰岩岩体发生顺层滑动,并堆积于坡脚平坦处;4. 沟谷进一步下切侵蚀,逐步形成大沟,山体内岩体风化提供物源,在降雨作用下形成泥石流,且破坏范围区高程逐渐爬高;5. 大型滑坡前暴发过一次泥石流,因强降雨雨量大,历时长,岩质滑坡坡脚处的土层先发生滑动,岩质边坡失去支撑后发生变形,直至失稳破坏。

### 4.1 岩浆活动

通过观察,左侧灰岩一滚石中有玄武岩结核(图20),推测为岩浆活动时,岩浆顺着灰岩裂隙流入后经冷凝形成。从现场调查来看,接触带为灰黑色,掰开泛白,玄武岩柱状节理发育,灰岩粉末较多,为岩浆喷发时发生热接触作用所致(图21)。可以推测,在漫长的地质历史时期内,曾经发生过岩浆活动作用,岩浆冷凝后形成玄武岩,后由于地壳运动及风化剥蚀作用,形成现有的地层分布。

### 4.2 左侧灰岩山体的顺层滑动

通过现场勘查发现,左侧灰岩在过去较长的历史时期中曾发生过顺层滑动,堆积物位于现万工集镇之下,岩体结构较为完整,呈似层状,局部岩体产状发生倒转(图22~24)。集镇下方不远处有一小山包上出露钙化灰岩,山顶上可见玄武岩巨大滚石。通过观察其地质特征及山体周边地质环境,发现灰岩产状 $125^{\circ}\angle 55^{\circ}$ ,与正常灰岩山体反倾,且呈现出线性带状分布,推测为灰岩顺层滑坡的前缘。野外调查还发现,面朝山体一侧有灰岩出露,背侧基本没有,且在灰岩下方可见原沟床的冲积物,推测可能是滑动过程中裹携原沟床物质的结果。分析认为,现有的小山包可能为古滑坡体高速下滑翻越沟谷,冲到沟谷右侧(下游)坡体停留后形成(图25~27)。

### 4.3 滑坡区泥石流发生较为频繁

大沟下游侧顺着排导槽至大渡河附近堆积了大量早期的泥石流堆积物,且受沟谷切割后出露较好,

高达120 m,根据堆积物的颜色、颗粒特征、密实程度及碎块石含量等综合特征,从上往下,由新到老大概可以分出4期泥石流堆积物。从堆积物的物质组成及规模来看,过去较长的历史时期里,该沟谷曾经至少暴发过两次较大规模的泥石流(图28)。

在此次大型滑坡发生之前,由于7月24—26日连续3 d强降雨作用,于25日曾引发过一次泥石流,因其规模不大,原排导槽发挥了作用(图29)。但由于高速岩质滑坡启动于1630 m高程处,高位势能大,启动后沿路不断携卷和铲削沟谷及两侧的表层松散物质,使滑坡方量逐渐增大到 $100\times 10^4\text{ m}^3$ 左右,大量的滑坡-碎屑流物质瞬间将原排导槽掩埋,导致排导槽失效。

### 4.4 坡脚土层滑动后触发岩质滑坡

强降雨作用下,滑源区大沟内浅层堆积层饱水后强度降低,在水的静水压力和动水压力共同作用下沿着基覆界线发生滑动,为上侧强风化玄武岩岩质边坡提供了良好的临空条件。而表层强风化玄武岩因长期风化作用形成了腐岩,强度较低,因坡脚的土体滑动失去支撑,岩质边坡的前缘发生变形,后缘产生拉裂缝,降雨后雨水沿着拉裂缝渗入,且由于玄武岩的柱状节理及卸荷节理发育,雨水极易沿着节理裂隙渗透,水对坡体产生静水压力并降低滑面的抗剪强度。在前缘变形、后缘拉裂双重作用下,滑面追踪节理面扩展贯通,而水的参与作用则加快了滑面的形成,一旦滑面贯通,岩质边坡便以较大的速度启动产生失稳破坏(图30)。

## 5 结论

### 1. 二蛮山高速滑坡按其堆积物物质分区可分为

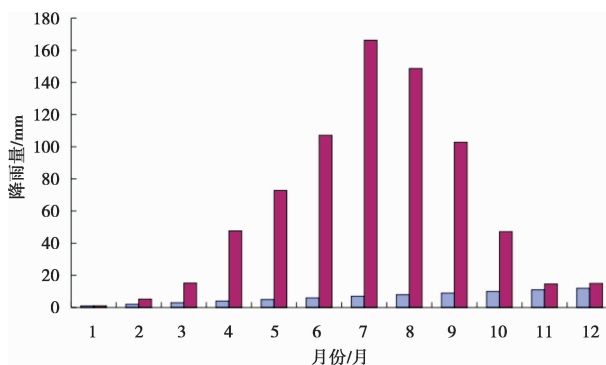


图19 汉源县多年平均降水量、蒸发量统计图

Fig. 19 Statistics of multiyear mean precipitation and evaporation in Hanyuan county





图 20 灰岩滚石含玄武岩结核

Fig. 20 Basalt tuberculosis in the rolling limestone



图 21 玄武岩与灰岩热接触带

Fig. 21 The thermal contact zone between basalt and limestone



图 22 灰岩顺层古滑坡堆积体

Fig. 22 Accumulation body of ancient bedding landslide

四个区：滑坡区（滑源区、崩滑加速区、碎屑流通区）、崩塌区（崩塌源区及崩塌堆积区）、堆积区（主滑坡直进翻越堆积区、主滑坡碎屑流堆积区及二次滑动前缘堆积区）、滑坡后缘座落区。按其运动特性可分为六个区：启程活动区、近程活动区、短程碰撞骤停区、远程碎屑流区、堆积区及后缘座落区。对



图 23 集镇公路两侧灰岩似层状结构

Fig. 23 Quasi-lamellar structure of limestone along the road



图 24 公路边灰岩似层状结构

Fig. 24 Quasi-lamellar structure of limestone



图 25 集镇下方小山包灰岩产状“反倾”

Fig. 25 Anti-dip limestone downside the town

滑坡进行物质分区及运动分区,对后期研究滑坡运动学机理提供重要的理论依据。

2. 高陡边坡及深切大沟为滑坡提供了有利的地形条件;丰富的第四系松散堆积体及强风化玄武岩为滑坡运动提供物源条件;灰岩顺向坡及玄武岩柱状节理为滑坡的进一步发展提供了优势坡体结构;





图 26 变电站山包山顶有玄武岩滚石

Fig. 26 Basalt rolling stone on the crest of the hill downside of the town



图 29 滑坡发生前暴发过小型泥石流

Fig. 29 Miniature debris-flow occurred before the landslide



图 27 变电站山包上灰岩呈带状分布

Fig. 27 Zonal distribution of limestone on the hill downside of the town

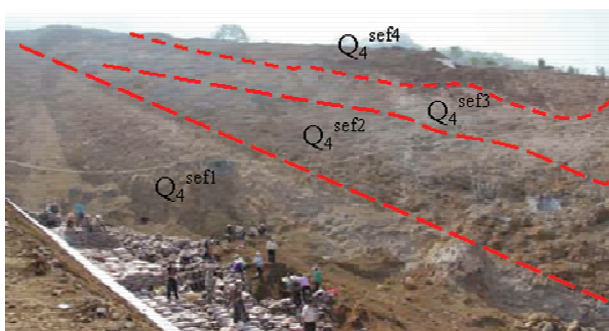


图 28 泥石流堆积区分层

Fig. 28 Layered structure of previous debris-flow accumulation zone

在强降雨诱发下滑坡启动并高速下滑。

3. 采用将今论古的地质方法分析得出了二蛮山滑坡的地质演化过程: 岩浆活动形成现有的单斜构造→玄武岩、灰岩差异风化作用出现沟谷雏形并逐渐发展→由于沟谷的淘蚀作用及某外营力作用(主因), 左侧灰岩岩体发生顺层滑动, 并堆积于坡脚平坦处→沟谷进一步下切侵蚀, 逐步形成大沟, 山体内部岩体风化提供物源, 在降雨作用下形成泥石流, 且破坏

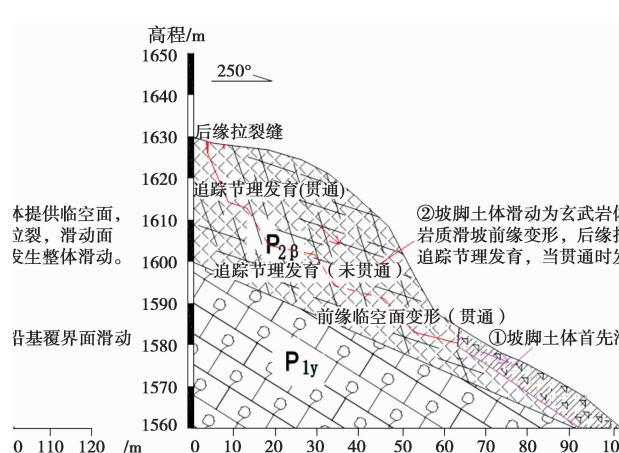


图 30 坡脚土层滑动触发玄武岩滑坡失稳破坏

Fig. 30 Soil sliding at toe of slope caused the whole unstable failure of the upper basalt rock

范围区沿高程逐渐爬高→二蛮山滑坡前暴发过一次泥石流, 岩质滑坡坡脚处的土层先发生滑动, 岩质边坡失去支撑后发生变形, 后变形加剧直至失稳破坏。

4. 此类滑坡隐蔽性强, 其发生突然, 危害性大, 在西南地区较为普遍。无论是沟谷的发育过程还是边坡本身的变形破坏演化过程, 都可为分析类似潜在危险滑坡提供借鉴, 这对其预测预防及有效治理具有重要的指导作用。

## 参考文献 (References)

- [1] Xu Qiang, Dong Xiujun, Deng Maolin, et al. The Ermanshan rock slide-debris flow of Junly 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan; characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 609-622 [许强, 董秀军, 邓茂林, 等. 2010年7·27四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 609-622]
- [2] Xu Qiang, Huang Runqiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 721-729 [许强, 黄润秋. 5.12汶川

- 川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721-729]
- [3] Yin Yueping, Zhu Jiliang, Yang Shengyuan. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou province[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 445-454 [殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡—碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445-454]
- [4] Xiao Shirong, Liu Defu, Hu Zhiyu. Study of high speed slide mechanism of Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3531-3536 [肖诗荣, 刘德富, 胡志宇. 三峡库区千将坪滑坡高速滑动机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3531-3536]
- [5] Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Li Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Dagunbao occurred during the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 730-741 [黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730-741]
- [6] Huang Heqing, Zhao Qihua. Basic characteristics and preliminary mechanism analysis of large scale rockslide-sturzstrom at Wenjiagou triggered by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(2): 168-177 [黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡—碎屑流基本特征及因机制初步分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 168-177]
- [7] Huang Runqiu. Catastrophic rockslides in China [M]. Beijing: Science Press, 2008: 3-8 [黄润秋. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 3-8]
- [8] Yin Yueping. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 153-166. [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]
- [9] Cui Fangpeng, Hu Ruilin, Zhang Ming, et al. Basic characteristics and formation mechanism of collapse and slid debris mass induced by Xiaonanhai earthquake in Chongqing city [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 167-174 [崔芳鹏, 胡瑞林, 张明, 等. 重庆小南海地震崩滑体的基本特征及形成机制研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 167-174]
- [10] Tang Chuan. A study on large-scale catastrophic landslide at Touthai gully of Zhaotong [J]. Yunnan Geographic Environment Research. 1991, 3(2): 64-71 [唐川. 昭通头寨沟特大型灾害性滑坡研究[J]. 云南地理环境研究. 1991, 3(2): 64-71]
- [11] G B Crosta, H Chen, C F Lee. Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps [J]. Geomorphology, 2004, 60: 127-146
- [12] Liu Yu, Xu Zemin, Liu Hongling. Study on Generation and Evolution of Touthai Landslide [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(6): 3813-3815 [刘宇, 徐则民, 刘泓伶. 头寨滑坡的形成与演化研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(6): 3813-3815]

## Basic Characteristics and Evolution History of Ermanshan High-speed Slide-debris Flow in Hanyuan, Sichuan

GU Chengzhuang<sup>1</sup>, HU Xiewen<sup>1,2</sup>, FANG Li<sup>1</sup>, YANG Shaoping<sup>3</sup>, LUO Chunhong<sup>4</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Aseismic Engineering Technology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. Sichuan Water Conservancy vocational College Chongzhou, 611231, China;

4. 909 Hydrogeology and Engineering Geology Team of Geology and Mineral Development Bureau in Sichuan, Mianyang 611830, China)

**Abstract:** At wee hours of July 27, 2010, a landslide-debris flow occurred on the back hill of Wangong town of Hanyuan city in Sichuan province of China because of heavy rainstorm. It started in high position and moved at a high speed to long distance (about 1.4 km). The whole volume was about 48 million m<sup>3</sup> when it started, entraining and scraping loose material accumulated in the gully bed and on both sides of slopes, then it increased to 100 million m<sup>3</sup>, which eventually led to five households 20 villagers of first group of Shuanghe village disappeared and some houses in Wangong town titling down. The landslide developed in the gully of Ermanshan behind the town. The bedrock on the left of the gully was limestone (P<sub>1</sub>γ), dipping to the gully and easily sliding along the overburden interface; while on the right side is Emeishan basalt (P<sub>2</sub>β) with highly developed joints; there were rich deposits in the gully and a large ancient landslide existing upstream; All of these unstable loose materials easily slid with favorable terrain conditions and under rainfall. The steep terrain of original valley provided the rock mass with high potential energy, easy to form a high-position high-speed long-run out landslide-debris flow. The heavy rainfall of July 24 ~ 26 up to 163 mm was the main factor triggering the major disaster starting and sliding down at a high speed under the action of the water. This paper studied the basic characteristics and forming conditions of the landslide-debris flow based on the detailed investigation in field. Then the geological evolution history of the landslide was also studied by analyzing the geological structure, strata sequence, the slope structure and deformation process of slope, using the method of The Present The Key To The Past, to replay the important geological events of the landslide area during the history process. Such the research results have important significance in predicting and preventing the occurrence of similar large high-speed landslide.

**Key words:** debris flow; high-speed and long-run out; basic characteristics; forming condition; geological evolution