

岩门村滑坡高分辨率遥感调查与机制分析

王治华, 徐起德, 徐斌

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 2007年7月7日, 四川达县岩门村斜坡发生滑坡, 造成直接经济损失约人民币1.5亿元。采用滑坡前后的高分辨率卫星影像及“数字滑坡”技术, 获取滑坡地质环境及滑坡前后的道路、水塘、植被群位移及高程变化的定量信息, 根据斜坡各部分变形特征, 将其划分为主滑区、牵动滑区、强影响区及影响区4个部分, 各自活动方式分别为快速推移+前缘砂土液化和面状流动, 牵引(或后退)式滑移, 受拉力发生拉张裂缝、错位和局部位移, 以及受振动发生小规模的裂缝和错位。以DEM求得原地面以上的滑走及堆积方量分别为 132.6×10^4 和 132.2×10^4 m³; 结合钻孔资料求得滑面以上滑坡规模为 1.97×10^6 m³。岩门村斜坡具备形成滑坡的岩性及坡体结构条件, 但所临河谷狭窄, 难以发育大型厚层滑坡, 但有适宜的临空空间供局部浅层滑坡活动。长期强降雨是岩门村滑坡的主要触发因素。就斜坡整体而言, 本次滑坡活动释放能量不充分, 在连续降雨情况下局部可能再次发生浅层滑坡, 但难以发生整体大规模滑移。

关键词: 边坡工程; 岩门村斜坡; 数字滑坡技术; 主滑区; 牵动滑区; 强影响区及影响区

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)09-1810-09

HIGH RESOLUTION REMOTE SENSING SURVEY AND MECHANISM ANALYSIS FOR YANMEN VILLAGE LANDSLIDE

WANG Zhihua, XU Qide, XU Bin

(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: A landslide occurred on July 7th 2007 in Yanmen village of Daxian County, Sichuan Province, and it caused economic loss of about RMB 0.15 billion. The information of the geological environment of the Yanmen slope, the displacement of roads, pools and tree groups, and the elevation variety before and after the landslide occurrence had been captured using high resolution satellite image with digital landslide technique. Based on the deformation characteristics the slope is divided into 4 regions: main sliding region, retrogressive sliding region, intensive influence region and influence region; and their moving styles are considered as quick push+sand soil liquefaction and flow in plane manner at the front part, retrogressive sliding, tension cracks, deformation and partial displacement caused by tension force, small cracks and deformation caused by land shake. With DEM, the volume of mass of sliding out and deposit from ground before landslide were estimated as 132.6×10^4 and 132.2×10^4 m³ respectively; and combining with drilling data, the landslide volume from sliding surface is estimated as 1.97×10^6 m³. The lithology and geological structure conditions for Yanmen village slope are feasible for forming a landslide but it is difficult to form large-scale and thick ones since it faces a small and narrow valley which is suitable for developing partial and shallow landslides. Long-term and intensive rainfall was the main

收稿日期: 2009-02-09; **修回日期:** 2009-03-25

基金项目: 中国地质大调查项目“川东缓倾斜坡地区特大型滑坡遥感识别技术研究”(2008J03-15-08)

作者简介: 王治华(1942-), 女, 1965年毕业于中国地质大学地球物理勘探系, 现任教授、博士生导师, 主要从事地质灾害遥感调查方面的教学与研究工作。E-mail: wzh@agrs.cn

inducing factor for forming Yanmen village landslide. As for whole slope, the movement of landslide occurred on July 7th, 2007 had not release energy sufficiently, therefore, in conditions of continuous rainfall, landslides may occur in parts of the slope but it is hard to have the large-scale landslide of whole slope.

Key words: slope engineering; Yanmen village slope; digital landslide technique; main sliding region; retrogressive region; intensive influence region and influence region

1 引言

2007 年 6 月中旬, 四川达县青宁乡连续降雨, 总降雨量达 292.1 mm, 其中 7 月 5~6 日降雨量高达 140.2 mm。从 7 月 6 日上午 10 时开始, 青宁乡的岩门村斜坡显露出滑坡迹象, 直至次日上午 9 时许, 当岩门村 552 户 2 251 名村民全部撤到安全地带半个多小时后, 整个岩门村斜坡地动山摇, 大片房屋接连倒塌。剧滑过程一直持续到中午 12 时左右。由于受灾群众及时全部转移和安置, 无一人伤亡。滑坡致使房屋倒塌, 耕地损毁、部分水渠水塘、公路被毁, 直接经济损失约 1.5 亿元。

岩门村发生滑坡引起了中央和省部各级部门及有关专家的高度关注。前期勘查和研究认为: “滑坡体呈 3 级解体向下垮塌, 滑坡体长超过 2 km, 宽度约为 1.5 km, 平均厚度为 6 m, 滑坡体积约为 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ ” [1~3]。乔建平等[4]认为, 该滑坡为一特大型推移式中厚层堆积层滑坡, 主滑坡体自上而下, 由推动区、挤压区和滑动区 3 个部分组成。

受中国地质调查局委托, 中国国土资源航空物探遥感中心采用高分辨率卫星和数字滑坡技术对岩门村斜坡进行调查研究, 获得了一些新的调查结果及不同的认识。

2 岩门村滑坡环境

岩门村滑坡位于四川达州市达县青宁乡, 距达县县城 30 km, 如图 1 所示。岩门村斜坡位于川东褶皱陷带的华蓥山隆褶带北段, 铁山背斜和渡市向斜之间的缓倾坡, 为四川盆地弱活动构造区, 区内未见断层分布(见图 2), 挽近期地壳运动以间歇性的大面积抬升为主。根据《中国地震参数区划图》(GB18306 - 2001), 当地地震基本烈度为 VI 度。

岩门村斜坡周围及下伏基岩为侏罗系上统蓬莱镇组, 地层岩性为含钙质结核粉砂质泥岩与块状含钙质的长石砂岩、长石石英岩互层[1], 其上为第四系松散堆积层覆盖。



图 1 岩门村斜坡地理位置示意 Fig.1 Location of Yanmen village slope

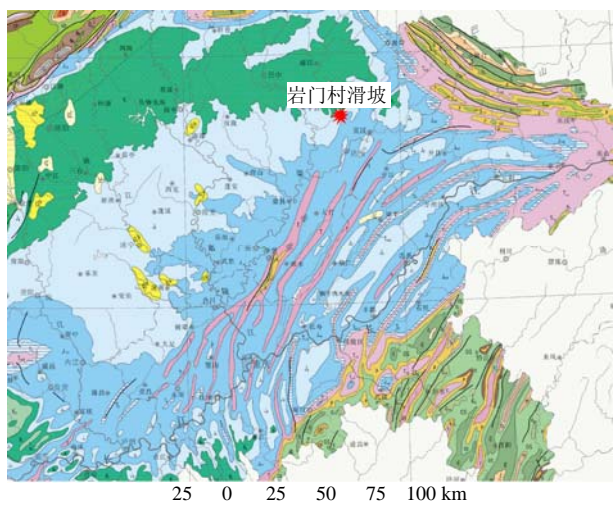


图 2 岩门村斜坡的地质环境 Fig.2 Geological conditions of Yanmen village slope

本区地貌属川东褶皱剥蚀 - 侵蚀低山丘陵岭谷区中的台坎状低山区。水平状厚层砂岩受流水的侵蚀切割作用形成深沟窄谷, 山体呈多级台地。

滑坡区位于渠江上游支流王家河的左侧支沟罗家河范围内, 罗家河下游狭窄, 中上游分为左、右两支沟从斜坡两侧通过, 以下分别称它们为左支沟和右支沟(见图 3)。

据达县气象站资料, 区内多年平均气温 17.3 ℃, 年降水量为 816.2~1 562.8 mm, 多年平均降水量为 1 174.5 mm, 年均蒸发量为 1 054.5 mm, 最大日降水量为 355 mm, 最多连续降水日为 21 d, 降雨多集中在 5~9 月, 占全年降水量的 77.6%。

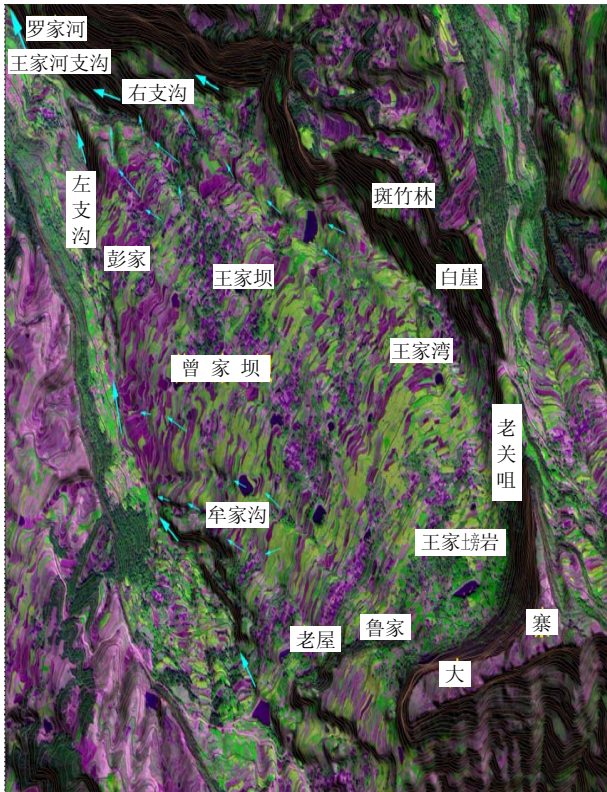


图3 滑坡前的岩门村斜坡
Fig.3 Yanmen village slope before landslide

3 方法技术

采用“数字滑坡”技术，即在滑坡基本理论指导下，遥感与空间定位结合获取滑坡基本信息，并进行GIS空间分析的技术^[5~9]。以2005年4月3日的快鸟数据图像作为滑前信息源，但由于天气原因迄今未能收到合格的滑坡后的快鸟数据，于是采用2007年9月17日接收的2.5 m分辨率的ALOS卫星数据作为滑后信息源。以滑前1:10 000数字地形及经处理的滑后由四川省地质工程勘察院实测1:2 000地形图为地理控制信息源，制作DEM和数字地形。

经多光谱合成，将滑坡前后的卫星数据均采样成0.6 m分辨率的图像，分别与滑坡前后数字地形配准^[7]。以精确配准的滑坡前后图像、数字地形和DEM共同作为解译基础，以人机交互方式解译和分析岩门村滑坡特征。

4 滑坡前后的岩门村斜坡特征解译

(1) 滑前岩门村斜坡的地形地貌及地表覆盖特征
滑前青宁乡岩门村为一台状低山(其高程为

600.0~930.6 m)环绕的凹槽，整体似鱼形，称其为岩门村斜坡。该斜坡背(南东)靠大寨山陡崖，前临罗家河河谷，两侧为左右支沟谷。从岩门村斜坡的头到尾，高程为788~450 m，相差338 m，走向304°，以约7°平均坡度平缓展布，最大长度约2 252 m，左右支沟之间最宽达1 111 m，斜坡总面积约1.84 km²。在牟家沟及其北面存在双沟同源的古滑坡地形^[10]。缓坡表面约75%为以水田为主的耕地，还分布岩门村9个队的村舍及小学，村舍周围及沟谷凹地中有成片树(竹)林植被。斜坡上共有95.00~3 286.26 m²面积的水塘32个，总面积达25 887.47 m²。

(2) 滑坡后岩门村斜坡的变化

图4为滑坡后岩门村斜坡ALOS影像，虽由于天气原因不够清晰，图像分辨率也不够高，但仍可识辨滑坡后房屋、水塘、机耕道、植被群及地形的变化。

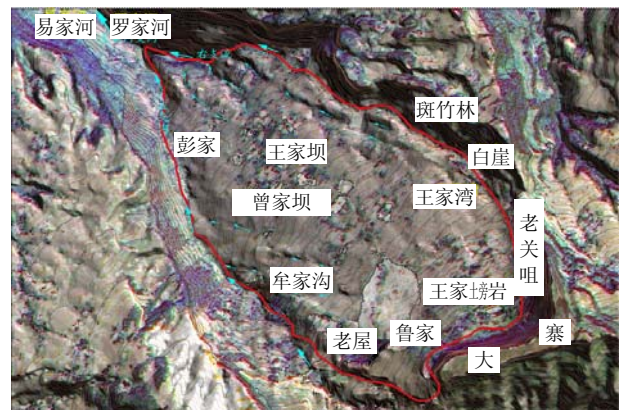


图4 滑坡后岩门村斜坡ALOS影像
Fig.4 ALOS image after the landslide for Yanmen village slope

① 房屋变化

滑坡前后房屋变化明显，滑前房屋呈深色的规则几何形态，滑后房屋已完全倒塌成为灰白斑块，结合现场调查可将滑坡后人为推倒的部分房屋区分开。斜坡南缘的老屋和鲁家之间的106 379.6 m²的倒塌房屋是斜坡上最大的一片房屋倒塌(见图4)。

② 水塘变化

如图5和表1所示，滑坡前后岩门村斜坡上分布的水塘变化可分为3种情况：滑后有11处原水塘已完全消失，说明其位于滑坡强烈活动部位；滑后有7处原水塘形态不变，但其中的水已消失，称为“形在水渗”，该特征水塘说明所处坡体受挤压

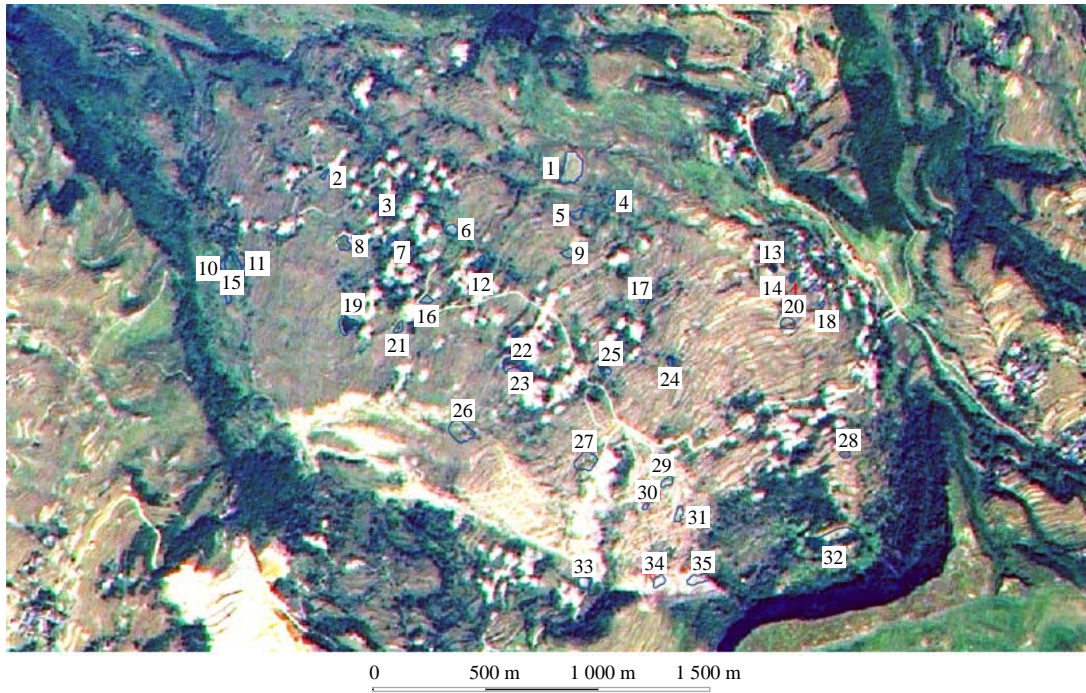


图 5 滑后图像上表现的滑前岩门村斜坡上的水塘及编号

Fig.5 Pools and their numbers before landslide on the image after landslide for Yanmen village slope

表 1 岩门村斜坡水塘在滑坡后的变化

Table 1 Changes of pools of the Yanmen village slope after landslide

编号	中心 X 坐标 /m	中心 Y 坐标 /m	滑前面积 /m ²	滑坡后水塘变化	编号	中心 X 坐标 /m	中心 Y 坐标 /m	滑前面积 /m ²	滑坡后水塘变化
1	449 071.06	3 487 997.28	3 286.26	形在水渗	19	448 506.08	3 487 604.29	1 526.81	存在
2	448 447.17	3 487 980.88	226.56	存在	21	448 635.09	3 487 597.59	447.31	存在
3	448 579.58	3 487 899.70	169.07	存在	20	449 614.20	3 487 608.17	858.00	形在水渗
4	449 171.97	3 487 918.42	289.86	消失	22	448 931.39	3 487 578.92	159.74	存在
5	449 083.89	3 487 881.83	573.03	消失	23	448 924.63	3 487 505.00	1 260.11	存在
6	448 767.10	3 487 841.82	701.54	形在水渗	24	449 320.06	3 487 510.87	222.87	存在
7	448 617.70	3 487 818.57	260.64	存在	25	449 155.08	3 487 488.79	439.61	存在
8	448 496.72	3 487 808.77	924.08	形在水渗	26	448 790.96	3 487 336.52	2 403.41	消失
9	449 061.05	3 487 783.75	522.29	消失	29	449 310.35	3 487 210.17	550.60	消失
10	448 194.11	3 487 752.82	365.60	消失(坡外)	27	449 105.36	3 487 261.36	1 912.09	消失
11	448 230.36	3 487 754.22	643.32	消失(坡外)	30	449 255.41	3 487 148.64	151.92	消失
12	448 837.89	3 487 761.83	405.86	存在	31	449 340.26	3 487 129.41	569.21	消失
13	449 576.73	3 487 748.20	339.87	存在	28	449 758.80	3 487 279.77	416.76	形在水渗
14	449 625.10	3 487 722.46	258.63	存在	32	449 733.95	3 487 071.71	2 730.23	形在水渗
15	448 206.05	3 487 670.22	273.04	消失(坡外)	33	449 102.70	3 486 956.65	778.31	形在水渗
16	448 704.83	3 487 667.07	456.32	形在水渗	34	449 289.76	3 486 960.70	611.57	消失
17	449 246.09	3 487 664.70	95.31	消失	35	449 387.79	3 486 965.50	990.28	消失
18	449 700.42	3 487 655.36	135.67	消失(人为)	36	449 980.82	3 487 441.96	106.69	存在(坡外)

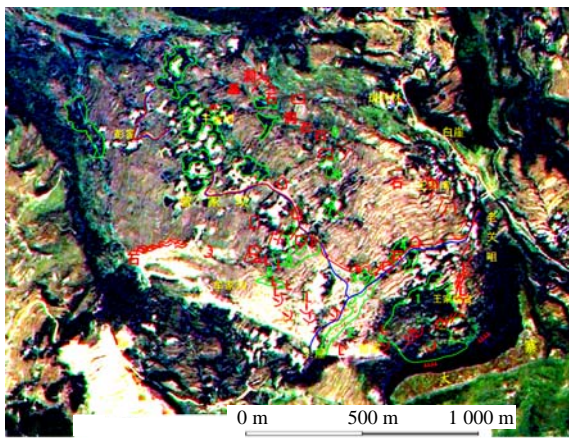
注: 坡内水塘面积为 25 887.47 m², 4 个坡外的水塘面积为 26 062.47 m²。

或拉裂影响致使塘水流失; 滑坡前后水塘未发生变化, 有 12 处水塘存在于原位并仍有水, 说明该处坡

体未位移或形变。滑坡前后水塘变化特征作为判断所在斜坡位置形变特征证据之一。

③ 机耕道(道路)变化

滑坡后斜坡上的部分机耕道被完全毁坏，甚至不见踪影，部分发生明显位移和错断。如图 6 所示，上部近横向分布的滑前和滑后机耕道线在右侧边缘基本重合，说明该部位滑坡前后未发生位移。向左(西南)两线逐渐张开，位移(张开)距离由数米到 20 m，到斜坡中部偏右位置，向 NW305°方向位移距离达 181.2 m。此点以左的机耕道完全消失。分布在斜坡中部和下(北东)部，总长约 1 285.7 m 的纵向机耕道在滑坡前后无明显变化。



- ~ 一级塑流边界 / 接张裂缝 ▲ 未损坟地 石 未动巨石
- ~ 二级塑流边界 > 鼓胀裂缝 ▽ 损坏坟地 凹 位移巨石
- ↘ 马刀树 m 局部滑坡壁 □ 未损水塘 基 裸露基岩
- ↓ 滑坡凹地 局部滑坡后缘 □ 漏水水塘 洞 落水洞
- ↑ 局部滑坡弧 L 滑动区 未损房屋 滑前滑后道路
- ↑ 局部侧壁及滑坡弧 堵滑区 损毁房屋 滑前植被

图 6 滑坡前后岩门村斜坡上的植被群、道路位置变化及验证特征点

Fig.6 Change of positions of tree group and road, and the characteristics of site verifying points

由只有滑前道路，滑后已无道路存在的路段量测得到滑坡造成彻底毁坏的道路总长为 693.1 m，其中纵向路毁长为 206.0 m；横向路毁长为 487.1 m。

滑坡前后机耕道位移及毁损特征也是指示滑坡位移及破坏特征的重要指标。

④ 植被群分布变化

由滑坡前后图像辨识植被群的范围、形态和位置变化，选取明显位移的 6 块植被进行了统计(其余植被群未见明显变化)，如图 6 及表 2 所示，变化只

表 2 滑坡前后植被群位置变化

Table 2 Change for positions of tree groups after landslide

编号	中心 X 坐标/m	中心 Y 坐标/m	面积/m ²	最大位移/m	位移方向/(°)
1	449 591	3 487 073	80 287.2	62.1	327
2	449 287	3 487 103	12 737.1	129.2	290
3	449 356	3 487 277	1 790.1	167.5	296
4	449 517	3 487 378	8 090.8	10.4	319
5	448 945	3 487 251	2 588.8	237.7	298
6	449 052	3 487 408	15 202.9	64.9	304

发生在横向机耕道以上(SW)及纵向机耕道以左部位。植被群 2, 3 联体的左端基本未动，以此点为轴其右整体向西转动，右端点最大位移 180.7 m。植被群 5 位移最大，其向 298°方向位移 238.9 m。植被群 4 仅向 NW 位移约 10 m，说明坡体位移边界应在其北附近。

⑤ 地形变化

如图 3, 4 所示，总体上看，滑坡前后三面山脊围绕的低凹缓坡地形并无明显变化。但斜坡西南部的牟家沟及其相邻的部分均表现为有双沟同源及后壁及前部堆积组成的明显的滑坡地形。

图 7 为由滑坡前后的数字地形计算获得的滑坡前后岩门村斜坡地面高程变化。实际工作中以深浅不同的蓝色表示滑后较滑前地面降低的幅度；不同红色表示滑后地面不同增高幅度的位置，本文的黑白图中，只能以深浅不同的灰色图示意。高程降低和增高强烈部位发生在岩门村斜坡的南西和南部，上述显示滑坡地形处。由于斜坡上大量推倒房屋，残墙断垣堆积以及误差影响，±1 m 以内的地形变化不能确定其是否为滑坡影响，作为误差范围。

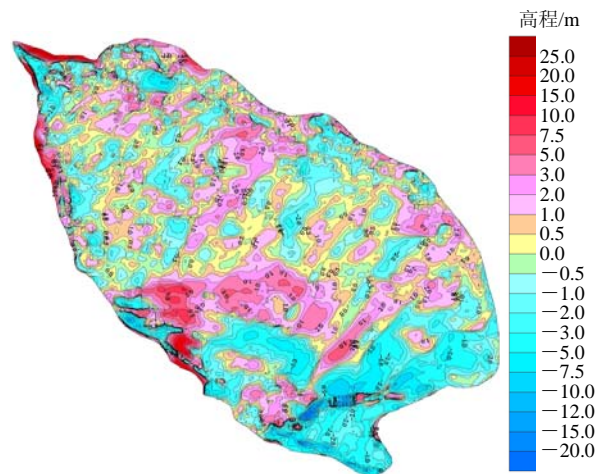


图 7 滑坡前后岩门村斜坡地面高程变化 Fig.7 DEM change before and after landslide

5 滑坡变形分区及各分区特征

根据滑坡前后房屋、机耕道、水塘、植被群及地形高程变化确定的岩门村斜坡各部分变形特征, 可将其划分为主滑区、牵动滑区、强影响区及影响区 4 个部分。该结果与许 强等^[2~4]研究不同。

(1) 主滑区

如图 8 所示, 斜坡西南部为主滑区, 主滑方向 280°, 面积约 0.146 km², 部分滑体向左支沟滑动, 称为侧向滑区, 其面积为 0.062 km², 两者共计 0.208 km²。

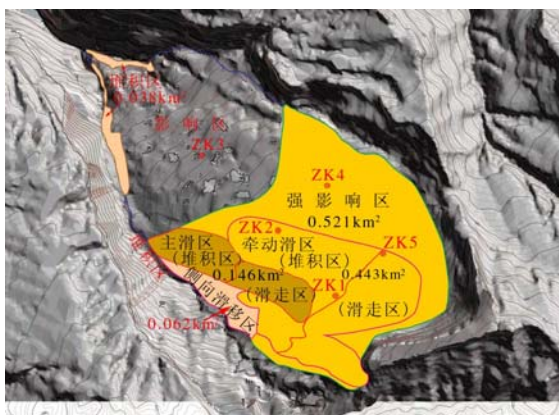


图 8 岩门村斜坡变形分区和钻孔位置

Fig.8 Zoning of deformation for Yanmen village slope and the positions of drilling

老屋以下为主滑区的滑体移走区(以下简称为移走区), 似矩形, 平均长 403 m, 宽 194 m。该区较滑前地面降低了 2~5 m, 其上房屋等地物严重损坏并长距离位移。移走区以下, 在牟家沟周围为主滑堆积区, 其地面大部较滑前升高 3.0~7.5 m, 其中部分抬升了 10 m。侧滑堆积区侧较滑前平均抬升了 3~15 m。堆积区内房屋、道路全损并位移, 前缘呈流态平铺延伸。主滑区内可解译的最大移动距离为 237.7 m。

(2) 牵动滑区

牵动滑区位于斜坡南部围绕主滑走区及堆积区后缘周围, 也可分为滑走区及堆积区两大部分(见图 8)。本区机耕道、水塘、植被群向北西位移 ≥ 10 m, 靠近主滑区时位移迅速增大, 最大位移为 167 m(植被群 3)和 181 m(机耕道)。本区滑走区大部分地面较滑前降低 3~5 m, 老屋—鲁家一带原陡崖位置地面降低达 10~20 m, 但个别滑前的低凹处滑后地面升高。堆积区大部分地面则较滑前抬高了 2~5 m(见

图 7)。同样, 该区也有一部分滑体向左支沟侧滑。

(3) 强影响区

滑坡强影响区, 指在滑坡前后的遥感图像上未见明显的滑走区或堆积区, 地物无明显位移但有拉裂错位现象如水塘“形在水渗”, 机耕道位移小于 10 m。本区地面降低与升高的区域大致相当, 其范围为 1~2 m, 并零星分布。

(4) 影响区

除以上 3 个分区外的岩门村斜坡为影响区, 该区房屋、道路、植被、水塘在滑坡后均无明显变化, 但地面验证发现有较小规模的裂缝、错位等形变现象, 分析为由滑坡震动引起。

影响区边缘另有 3 个特殊部分: ① 左支沟中下游河谷较滑前抬升了 2~10 m, ② 左右支沟下游汇合处较滑前抬升了 10~20 m, 最高达 25 m, ③ 右支沟下游有一段较滑前抬升了 2~5 m。该 3 处现象是由于主、侧滑区均有部分滑坡物质流到左支沟, 以及斜坡北东侧的 1 号水塘的围塘土坝被拉裂, 流水和泥沙向下游流到右支沟才大部堆积。该 3 个部分属于滑坡堆积区。

主滑区表现为明显的滑坡地形, 由后壁及滑坡堆积组成, 老屋以下为主滑后壁, 似矩形, 平均长 403 m, 宽 194 m, 覆盖面积 6.9×10^4 m², 但滑坡形态十分复杂, 平均坡度约 15°。该处地面较滑前降低了 2~5 m, 滑后成为一凹形坡。有上下二处侧滑后壁, 滑动方向 216°。上下侧滑后壁较滑前地面降低 2~10 m, 下侧滑后壁下降更多。

6 初步遥感解译结果的现场验证

在遥感解译滑坡前后地物及高程变化的基础上, 通过空间分析初步确定了该次滑坡活动变形分区及其特征后, 进行了较详细的野外现场验证。在各类变形特征部位共布置了 100 个点, 验证了 22 类情况, 如图 6 所示。验证表明, 遥感解译对各部分性质的判断是准确的, 遥感获取的滑坡基本信息符合实际。以手持 GPS 所定的验证点位置与解译点的水平位置误差为 10 m 左右。

在以上工作基础上进行滑坡规模、形成条件、运动方式及斜坡稳定性分析。

7 滑坡规模

前期滑坡调查^[2, 3]认为, 岩门村滑坡体积为 $1.1 \times$

10⁷ m³。以下分 3 个方面介绍本研究结果。

(1) 滑坡后岩门村斜坡地面上升与下降总体情况

如图 7 和表 3 所示, 本研究在斜坡上共计算了 1 858 个图斑, 其中高程下降(地面滑走)和增高(地面堆积)分别为 939 图斑、880 913.8 m² 以及 918 个图斑、962 083.2 m²。但上升和下降 ≤ ±1 m(包括 0) 的值为误差范围, 只能将其视为滑坡前后未动范围故应排除。实际滑坡活动引起的地面上升约为 0.555 km², 下降约 0.465 km², 共计活动区约 1.02 km², 包括主滑区、牵动滑区及部分强影响区。

(2) 原地面以上的滑坡方量

基于图 7, 8 计算所得各分区的面积和该区平均上升或下降高程的积求得各分区的滑走与堆积面积及方量见表 4。滑走和堆积总面积分别为 0.58 和 0.60 km², 滑走和堆积总方量分别为 1 326 410 和 1 321 731 m³。即岩门村滑坡地面上移走方量约为 132.6×10⁴ m³, 堆积方量为 132.2×10⁴ m³, 约有 0.4×10⁴ m³ 物质流入河沟。

(3) 滑面以上的滑坡方量

为了解滑面埋深, 四川省地质工程勘察院曾在

斜坡上打了 5 口钻, 位置如图 8 所示。据钻探揭露, 在钻孔中未见到明显的滑带擦痕、镜面和地下水异常, 但见到强风化基岩以上粉质黏土呈软塑状, 并连续性较好, 从而形成一含水量高、抗剪强度低的软弱面, 综合分析判定这就是滑面^[1]。

根据滑坡后钻探所得基岩面与所在地面位置的滑坡前高程求得滑坡前地面基岩平均埋深约为 5 m, 其与主滑、侧向滑及牵动滑区的总滑走面积之积 165×10⁴ m³ 即为基岩面(滑面)以上的滑坡体积。强影响区并不存在完整的滑面, 以滑走方量 32×10⁴ m³ 为其活动体积, 这样求得岩门村滑坡规模为 197×10⁴ m³。

相关研究^[1~4]以整个斜坡的面积与平均基岩面深度的积为本次滑坡体积显然不妥。

8 岩门村滑坡形成条件、活动机制及稳定性分析

(1) 滑坡前的岩门村斜坡性质

岩门村斜坡为台状低山环绕的凹槽, 平均坡度

表 3 岩门村斜坡各级地面高程变化所占面积

Table 3 Area for each grade elevation change on Yanmen village slope

高程升降/m	面积/m ²	高程升降/m	面积/m ²	高程升降/m	面积/m ²
>25.0	22.034 727	1.0~2.0	270 461.377 6	-3.0~-5.0	104 920.897 400
20.0~25.0	1 742.438 557	0.5~1.0	213 237.720 0	-5.0~-7.5	47 993.190 850
15.0~20.0	5 012.746 151	0.0~0.5	242 446.951 4	-7.5~-10.0	16 590.214 990
10.0~15.0	6 856.889 480	0.0~-0.5	210 507.317 8	-10.0~-12.0	2 813.702 925
7.5~10.0	12 967.896 430	-0.5~-1.0	156 415.056 5	-12.0~-15.0	2 383.696 628
5.0~7.5	30 303.531 430	-1.0~-2.0	185 261.625 7	-15.0~-20.0	1 021.390 802
3.0~5.0	96 095.278 970	-2.0~-3.0	103 976.796 5	<20.0	255.852 685
2.0~3.0	131 710.392 400				

注: 岩门村斜坡总面积 18.43 km²。

表 4 各滑区滑走与堆积面积及方量

Table 4 Area and volume of slide away and deposit for each sub slide region

主滑区		侧向滑区		牵动滑区		强影响区									
滑走区	堆积区	滑走区	堆积区	滑走区	堆积区	滑走区	堆积区								
面积 /km ²	方量 /m ³	面积 /km ²	方量 /m ³	面积 /km ²	方量 /m ³	面积 /km ²	方量 /m ³								
0.074	188 405 (2.54 m)	0.072+0.038	233 088+226 221 (4.17 m)	0.039	94 385 (2.42 m)	0.023	126 326 (5.49 m)	0.220	721 048 (3.27 m)	0.223	466 738 (2.09 m)	0.248	322 572 (1.30 m)	0.273	269 358 (0.98 m)

注: 括号中数据为滑后该区平均上升或下降高程。

约 7° 的缓坡。该缓坡是罗家河及其支沟侵蚀, 大寨山及东西侧蓬莱镇组粉砂质泥岩与砂岩互层沿 3 组陡倾裂隙不断后退的结果。后退的主要形式为崩塌和局部滑坡, 该过程还将继续下去, 所以岩门村斜坡会逐渐扩大。

(2) 滑坡形成条件

岩门村斜坡具备形成滑坡的岩性和坡体结构条件。

斜坡地表为第四系全新统崩坡积层(Q_4^{col+dl})、残坡积层(Q_4^{sl+dl})和滑坡堆积(Q_4^{del}), 该堆积由粉质黏土和碎块石组成。斜坡各处均分布有块径为 10~20 m 的大块石或块石堆。块碎石间有粉质黏土及少量砂粒充填, 透水性较好。大量黏土矿物, 在下渗水的作用下易在下伏基岩面富集, 并形成滑动面。但是本斜坡的堆积层平均厚仅约 5 m, 且地表有大量块石或块石堆隔离, 难以连成整体, 而只能在局部发育滑面, 从而形成局部浅层滑坡。

构成岩门村斜坡的下伏基岩的蓬莱镇组(J_3p)砂、泥岩中共存在 4 组软弱结构面: ① 层面, 岩层产状 $320^\circ\sim 340^\circ\angle 3^\circ\sim 15^\circ$, 构成顺向缓坡; 在砂岩中发育的 3 组陡倾裂隙: ② $20^\circ\angle 62^\circ\sim 90^\circ$, ③ $145^\circ\angle 60^\circ$, ④ $305^\circ\angle 52^\circ$; 再加上硬、软、厚、薄相间的岩层结构: 砂岩呈厚层块状, 粉砂岩呈薄~中层状, 泥岩为薄层状, 泥岩层面在上覆顺层中厚层砂岩、陡倾裂隙及水的作用下有可能发育成滑面。

岩门村斜坡背靠大寨山陡崖, 虽三面临空, 但前临罗家河河谷狭窄, 右侧支沟谷浅且不明显, 左支沟谷虽稍深, 但仍无足够的滑动临空面, 难以发育大型厚层滑坡, 但适于局部及浅层滑坡发育。

(3) 滑坡触发条件

降雨是岩门村斜坡发生滑坡的主要触发条件, 据达县气象资料(见表 5), 滑坡前 21 d, 6 月 16 日开始降雨, 至 22 日连续降雨 7 d, 总降雨量达 292.1 mm。连续降雨使斜坡土体饱水, 并渗透到坡体内, 有利于堆积层中的黏粒在坡体内富集, 形成滑动面。连续降雨更降低了滑面的抗剪强度; 滑坡发生前 2 d 再次强烈降水, 降雨量达 140.2 mm, 使已经饱水的堆积层土体抗剪强度更加降低, 导致滑坡发生^[1]。

坡体上存在大量水塘及水田, 其长年, 特别是雨季大量向坡体内渗水, 也是诱发滑坡发生的重要因素。

(4) 滑坡运动方式和机制

表 5 滑坡前降水量

Table 5 Precipitation before landslide

时间/年月日	降雨量/mm	时间/年月日	降雨量/mm
20070616	2.5	20070629	7.3
20070617	125.5	20070702	0.2
20070618	75.1	20070703	9.0
20070619	13.1	20070704	13.1
20070620	18.8	20070705	75.8
20070621	33.2	20070706	64.4
20070622	23.9	20070707	1.3
20070626	58.4		

综上所述, 岩门村斜坡既不是一个整体滑坡, 也不是简单的推移或后退滑动方式。在所处地质环境及长期降水综合作用下, 斜坡不同部位发生了不同形式的位移和形变。首先, 在原老滑坡部位形成滑面(或贯通), 主滑体快速向左支沟和斜坡倾向的合成方向约 280° 滑动, 该过程中, 部分滑体向左侧的左支沟沟谷侧滑, 主滑区的滑体为饱水的堆积土加块石, 其前部块石较少, 饱和砂土的结构疏松和渗透性相对较低, 在快速滑动的震动作用下造成砂土液化。砂土发生液化后, 在超孔隙水压力作用下, 孔隙水自下向上运动, 和土混合成泥浆大面积地漫溢于地表^[10~15], 这是主滑堆积前部呈流态覆盖的主要原因, 主滑区的活动方式为快速推移+前缘砂土液化和面状流动。主滑体一开始滑动, 其滑走区(后壁)突然形成的质量空穴, 必将牵动周围已处于饱和状态的土石堆积滑动, 这便形成牵动滑区, 其以牵引(或后退)为主要活动方式。

由于整个岩门村斜坡为群山环绕的封闭环境, 以及长期降雨形成的地表堆积土层饱水使得斜坡各部分联系更加紧密, 局部滑动必然影响周围, 在斜坡中上部的滑坡区周围形成以拉张裂缝为主, 包括鼓胀、剪切裂缝和局部少量位移等变形方式的区域, 这便是强影响区。

滑坡引起的强烈震动必然影响到整个斜坡, 上述 3 个分区以外的斜坡下(北西部)也发生较小规模的裂缝和由此导致的水塘泄水等现象, 这便是影响区(见图 8)。在左右支沟及斜坡北端有部分堆积归为主滑区。

(5) 岩门村滑坡稳定性分析

由以上分析可知, 岩门村斜坡主滑区及牵动滑

区的活动为推移+塑流状流动及牵引后退方式,滑面较浅,就斜坡整体而言,该活动方式释放能量是不充分的。而整个斜坡堆积土较长时间处于饱水低强度状态,在连续降雨或暴雨情况下,牵动滑区滑坡有可能进一步下滑,其他部位也可能发生局部滑坡,但难以发生整体大规模滑移。

9 结 论

(1) 岩门村斜坡既不是一个整体滑坡,也不是简单的推移或后退滑动方式。根据斜坡地质环境及滑坡前后地物位移及高程变化,确定斜坡不同部位发生了不同形式的运动和形变,将其划分为主滑区、牵动滑区、强影响区及影响区4个部分。

(2) 主滑区以快速推移+前缘液化和面状流动为主,其余部分则是被牵引、拉裂及影响。

(3) 原地面以上的滑坡方量估算为 $132 \times 10^4 \text{ m}^3$; 滑面以上滑坡规模估算为 $197 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(4) 在连续降雨或暴雨情况下,牵动滑区有可能进一步下滑,其他部位也可能发生局部滑坡,但难以发生整体大规模滑移。

参考文献(References):

- [1] 四川省地质工程勘察院. 达州市达县青宁乡岩门村滑坡勘查报告[R]. 成都: 四川省地质工程勘察院, 2007. (Sichuan Provincial Institute of Geological Engineering Investigation. Survey report for Yanmen village landslide of Qingning, Da County, Dazhou City[R]. Chengdu: Sichuan Provincial Institute of Geological Engineering Investigation, 2009. (in Chinese))
- [2] 许 强. 四川省达县青宁乡岩门村滑坡[C]// 中国灾难性滑坡. 北京: 科学出版社, 2008: 509. (XU Qiang. Yanmen village landslide of Qingning, Daxian County, Dazhou City, Sichuan Province[C]// Catastrophic Landslide in China. Beijing: Science Press, 2008: 509. (in Chinese))
- [3] 胡瑞林, 张 明, 崔芳鹏, 等. 四川省达县青宁乡滑坡的基本特征和形成机制分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 250. (HU Ruilin, ZHANG Ming, CUI Fangpeng, et al. The basic features and forming mechanism analysis for Yanmen village landslide of Qingning, Daxian County, Dazhou City, Sichuan Province[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 250. (in Chinese))
- [4] 乔建平, 田宏岭, 石莉莉, 等. 采用危险指数法研究达县特大型暴雨滑坡发育特征[J]. 山地学报, 2008, 26(6): 739 - 744. (QIAO Jianping, TIAN Hongling, SHI Lili, et al. Applied risk index method to research the Qingning Town Rainstorm Landslide, Daxian County, Sichuan, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(6): 739 - 744. (in Chinese))
- [5] 王治华. 数字滑坡技术及其应用[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 157 - 164. (WANG Zhihua. Digital landslide technique and application[J]. GeoScience, 2005, 19(2): 157 - 164. (in Chinese))
- [6] 王治华. 滑坡遥感调查、监测与评估[J]. 国土资源遥感, 2007, (1): 12. (WANG Zhihua. Remote sensing for landslide survey, monitoring and evaluation[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, (1): 12. (in Chinese))
- [7] 王治华. 大型个体滑坡遥感调查[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 517. (WANG Zhihua. Large-scale individual landslide remote sensing[J]. Earth Science Frontier, 2006, 13(5): 517. (in Chinese))
- [8] 王治华. 中国滑坡遥感及新进展[J]. 国土资源遥感, 2007, (4): 8 - 9. (WANG Zhihua. Remote sensing for landslide in China and its recent progress[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, (4): 8 - 9. (in Chinese))
- [9] 王治华. RS+GCPs 获取滑坡基本信息[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 94 - 96. (WANG Zhihua. RS+GCPs select basic information of landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 94 - 96. (in Chinese))
- [10] 鲁晓兵, 谈庆明, 王淑云, 等. 饱和砂土液化研究新进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1): 87 - 92. (LU Xiaobing, TAN Qingming, WANG Shuyun, et al. The advances of liquefaction research on saturated soils[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(1): 87 - 92. (in Chinese))
- [11] 汪闻韶. 关于饱和砂土液化机制和判别方法的某些探讨[C]// 水利水电科学研究院科学研究论文集. 北京: 水利电力出版社, 1984: 1 - 8. (WANG Wenshao. Discussion on mechanism of saturation sand soil liquefaction and discriminant method[C]// Proceedings of Water Resources and Hydropower Research. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1984: 1 - 8. (in Chinese))
- [12] 张师岸. 砂土液化分析及其防治措施[J]. 山西建筑, 2008, (13): 89 - 90. (ZHANG Shian. Analysis of sand soil liquefaction and reinforced measures[J]. Shanxi Architecture, 2008, (13): 89 - 90. (in Chinese))
- [13] 高振寰, 宋慧珍, 张镛亚, 等. 砂土液化形成的地质标志[J]. 水文地质工程地质, 1982, (3): 19 - 20. (GAO Zhenhuan, SONG Huizhen, ZHANG Diya, et al. The geological indication of forming sand liquefaction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982, (3): 19 - 20. (in Chinese))
- [14] 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土液化与稳态强度[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 90 - 95. (ZHAO Chenggang, YOU Changlong. Liquefaction and steady state strength[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 90 - 95. (in Chinese))
- [15] 冯自立, 崔 鹏, 何思明. 滑坡转化为泥石流机制研究综述[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 8 - 14. (FENG Zili, CUI Peng, HE Siming. Mechanism of conversion of landslides to debris flows[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(3): 8 - 14. (in Chinese))