

文章编号: 1008—2786—(2008)6—739—06

# 采用危险指数法研究达县特大型暴雨滑坡发育特征

乔建平, 田宏岭, 石莉莉, 杨宗佑

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 在野外考察无详细勘测资料的情况下, 采用危险指数法对达县青宁乡滑坡的变形特点和形成条件, 以及触发因素进行了快速评价, 建立了滑坡危害性分区标准。研究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、挤压区和滑动区三部分组成。滑坡不同部位的危险指数具有明显的差异, 滑坡体各部位的破坏方式和危害性也各异。

**关键词:** 危险指数; 达县; 暴雨; 滑坡

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

2007—07—06 10:00 四川省达县青宁乡岩门村猫耳寨山发生体积约  $2\,400 \times 10^4 \text{ m}^3$  的特大型推移式堆积层滑坡, 岩门村13个社中有11个社不同程度受灾, 垮塌房屋1 000多间, 面积  $> 10 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 损毁堰塘6处, 受灾达到550户、2 200余人。由于滑坡滑动速度很慢, 所以未造成人员伤亡。

青宁乡岩门村距达县城40 km。滑坡位于四川盆周低山红层地貌区, 区内海拔500~900 m, 沟谷呈“V”字形, 斜坡单斜构造发育, 无大型区域性复杂构造通过。早期大型、特大型滑坡不发育。作者在滑坡发生后及时达到滑坡现场进行地面调查, 在没有任何详细滑坡勘测资料的基础上, 采用滑坡危险性指数快速评价方法进行了滑坡危险性分析。在缺少滑坡详细勘测资料的情况下, 应用该方法对特大型、大型滑坡危险性快速判别, 研究其发育特征, 制定防灾措施, 是一种非常实用的方法。

## 1 基本概况

### 1.1 规模与分区

滑坡由三部分组成: 主滑体——长1 700 m宽400 m平均厚15 m; 强变形体长1 000 m宽400 m平均厚15 m; 弱变形体I区: 长1 250 m宽200 m平均厚15 m; II区: 长400 m宽660 m平均厚15 m, 滑坡整体体积约  $2\,400 \times 10^4 \text{ m}^3$  (图1)。

### 1.2 形态与分布

主滑体: 呈长条形, 分布在强变形体和弱变形体两大变形区中部, 主滑方向由  $340^\circ$  转为  $290^\circ$ , 已分解成二级台地 (图2)。

#### 1.2.1 滑坡后壁

滑坡形成两级后壁, 海拔850 m为一级、海拔750 m为二级, 都保留了完整的滑坡后壁特征, 如滑坡湖、滑坡凹槽地形。一级后壁沿基岩面拉裂, 水平位移  $> 200 \text{ m}$ , 垂直位移20~40 m形成高陡崖壁,

收稿日期 (Received date): 2008—02—04 改回日期 (Accepted): 2008—07—05

基金项目 (Foundation item): 科技部“十一五”重点科技支撑计划项目 (NQ 2006BAC04B05), 科技部国际科技合作项目 (2007DFA21150), 中科院三期重要方向创新项目 (KJX3—SW—L4—6) 资助。 [ National key science and technology supported plan during China's Eleventh Five-years project was supported by national science and technology department (NQ 2006BAC04B05), The international cooperation project was supported by national science and technology department (NQ 2007DFA21150), Supported by the Chinese Academy of Science (NQ KJX3—SW—L4—6). ]

作者简介 (Biography): 乔建平 (1953—) 男, 研究员, 博导, 成都人, 主要研究方向: 滑坡危险度区划、区域滑坡规律、滑坡机理。 [ Qiao Jianping (1953—), male professor, research direction: landslide hazard assessment, landslide mechanism and distribution rule. ] E-mail: jqjia@imde.ac.cn

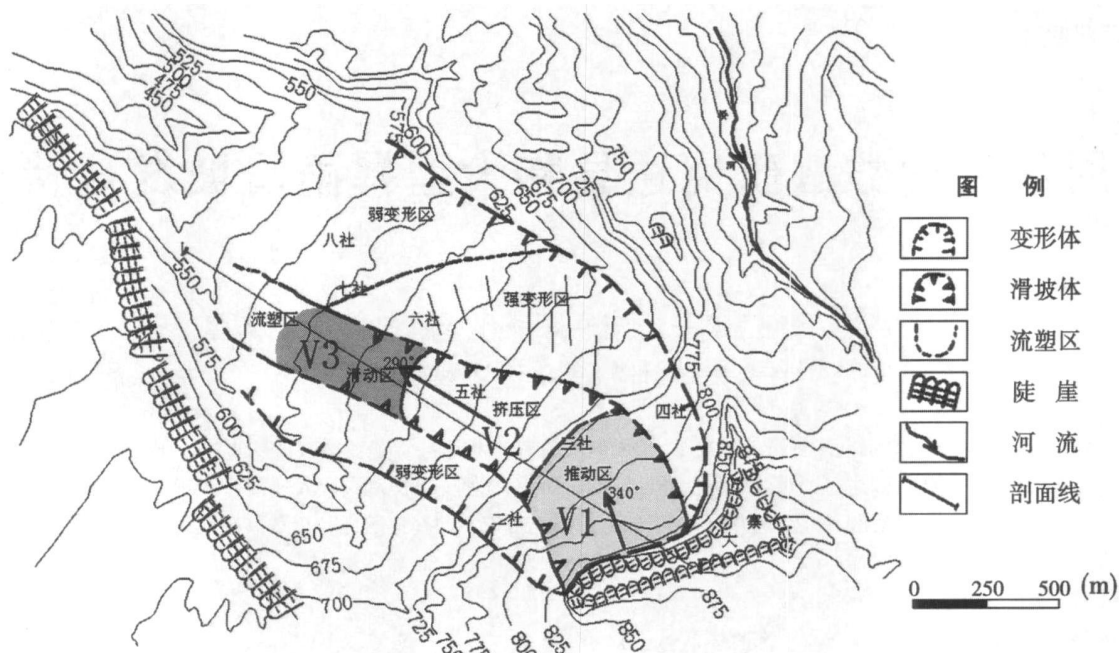


图1 青宁乡滑坡平面图

Fig.1 Plane of Qingning town landslide

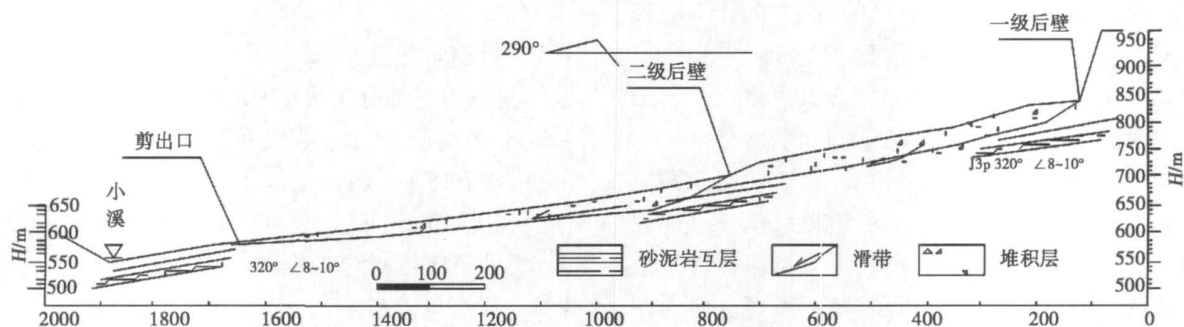


图2 青宁乡滑坡剖面图

Fig.2 Cutaway view of Qingning town landslide

位移部分的基岩解体成若干岩柱堆。二级后壁在覆盖层中产生,并切穿基岩面,形成40~60 m的高陡后壁面,水平位移150~200 m,垂直位移50~70 m。

### 1.2.2 滑坡前沿(剪出口)

滑坡剪出口位于580 m高程,地面形成5~7 m高的地垄,推挤现象明显,部分剪出。在地表水和暴雨的作用下,前沿地垄转化成流态化泥流。

### 1.2.3 滑坡中部

马刀树、醉汉林、挤压抬升现象普遍,充分反映出推动式滑坡的典型迹象和特征。

**强变形体:**呈扫帚形,分布在主滑体顺坡向的右侧,主要变形方向300°。

**弱变形体:**分别由I区长条形,分布在主滑体左

侧,主要变形方向280°,以及II区宽展形,分布在主滑体右侧,主要变形方向310°组成。

滑坡发生后,主滑体的原地貌形态改变较大,滑坡后缘和前沿的原地貌形完全破坏,位移部分分离原坡体,形成新地形。其余两大变形区虽有不同程度的蠕变,但都未改变原始地貌形态<sup>[1]</sup>。

## 2 变形特点

### 2.1 变形分区

2007-07-02以来,达县境内普降暴雨,自07-06滑坡开始启动,经历了三个发展阶段,反映出明显的变形时间特点和滑坡内部破坏的完整过程。

自上而下, 将主滑坡体分为三个变形特征区域, 推动区、挤压区、滑动区。从图 1、图 2 中和实地调查结合估算, 三区的体积约为:  $V_1 = 550 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $V_2 = 350 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $V_3 = 100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。相对高差:  $h_1 = 100 \text{ m}$ 、 $h_2 = 70 \text{ m}$ 、 $h_3 = 50 \text{ m}$ 。根据主滑坡体的体积、滑速、滑距特点, 可以建立三者关系示意图 (图 3)。将三参数代入势能公式  $EP = Vgh$  得出各变形区势能为下列不等式关系式

$$EP_1 \geq 2.3 EP_2 \geq 12.2 EP_3 \quad (1)$$

式中  $EP_1$ —推动区势能 ( $V_1 g h_1$ )、 $EP_2$ —挤压区势能 ( $V_2 g h_2$ )、 $EP_3$ —滑动区势能 ( $V_3 g h_3$ )。式 (1) 表达式说明, 推动区势能大约为挤压区的 2.3 倍, 滑动区的 12.2 倍。所以滑坡变形时间遵从由高势能区  $EP_1$  开始, 再到中势能区  $EP_2$ , 最后结束为低势能区  $EP_3$  的规律。滑坡变形过程为: 推动式蠕变—蠕滑—慢滑<sup>[2]</sup>。

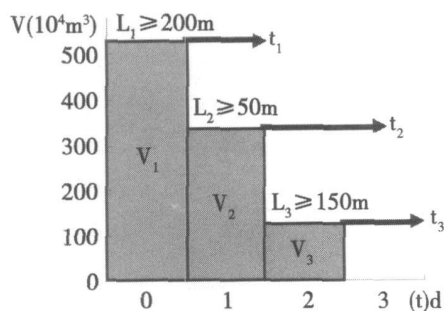


图 3 滑坡变形活动分区示意图

Fig 3 Sketch of landslide transform zonation

### 2.1.1 上部后缘首先变形

07—06 T9:00 滑坡一级后壁下方的民房发现变形, 14:00 变形加剧, 由蠕变发展到慢速状态, 房屋全部倒塌。07—07 晨活动基本结束, 历时约  $t_1 = 24 \text{ h}$ 。

### 2.1.2 中部开始启动

07—07 T8:00 降雨开始减小, 中部 (滑坡二级后壁以下) 的两处水塘开始变形漏水, 后被推挤翻水, 直至彻底破坏。房屋变形严重, 但未全部毁损。据访, 此时人在滑坡体上搬迁东西已明显感到地动, 进入蠕滑阶段。8 日中午活动基本结束, 历时约  $t_2 = 26 \text{ h}$ 。

### 2.1.3 下部前沿缓慢剪出

07—08 ~ 09 降雨基本停止, 8 日早上滑坡前沿开始从稻田中推挤剪出, 在大量地下和地表水的作用下, 滑动转为流态化。9 日滑坡活动全部结束, 历

时约  $t_3 = 24 \text{ h}$ 。

### 位移分区

由滑坡变形的性质所决定, 受力不同部位的位移量也有所不同 (图 3), 符合下列不等式关系:

$$\text{位移量 } (L): L_1 > L_2 > L_3 \quad (2)$$

式中  $L_1$ —推动区位移量,  $L_2$ —挤压区位移量,  $L_3$ —滑动区位移量。此结果符合推动式滑坡的一般规律, 后缘和前沿位移量较大, 中部受挤压区域位移量一般较小。

## 3 形成条件

### 地层岩性

发生滑坡的地层岩性为侏罗系蓬莱组砂、泥岩互层 ( $J_p$ )。地层产状  $320^\circ \angle 8 \sim 10^\circ$ , 该套地层岩性为四川盆周红层, 为典型易滑地层岩性, 三峡地区的滑坡多处发生在此套地层中<sup>[3]</sup>。近年来, 达州地区已发生多处该套地层岩性的大型滑坡<sup>[4]</sup>。

### 滑坡体结构

单斜构造的缓倾角顺向坡, 是川东地区主要产生滑坡的坡体结构, 该结构极易在顺向基岩面与坡积层之间形成一层富水带, 形成滑坡的滑动面, 使滑坡体能够坐“船”行动<sup>[5]</sup>。

### 滑动有效空间

主滑区斜坡相对高差约 300 m, 坡长约 1 500 m, 前沿有冲沟, 根据势能向动能转化的原理, 滑坡是可以启动的。

## 4 触发因素

### 地表水长期渗漏

由于斜坡地势较平坦, 坡体上原有约  $1.5 \text{ km}^2$  面积的土地上几乎全是水稻田, 另有 11 个堰塘长期蓄水。定性分析, 这些充足的地表水源长期补给地下水, 实际上早已在堆积层内形成了抗剪强度极差的饱和水层, 若遇更强势的地表水补给, 极容易形成滑坡。

### 强降雨触发滑动

据统计, 达州地区自 07—02 至 07—07 224 个雨量站、点记录的降雨量平均超过 175 mm, 达到暴雨标准 (图 4)。雨量集中, 其中 87 个站、点记录到 07—05 T8:00 ~ 07—06 T8:00 24 h 集中降雨量达到 150 mm, 超过 100 mm 一遇标准。由于滑坡附近

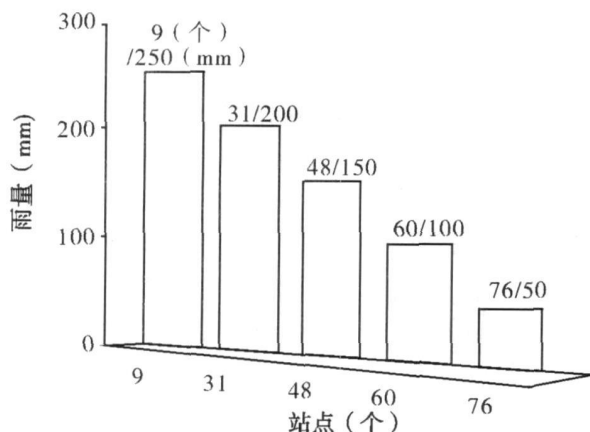


图 4 降雨资料统计图

Fig 4 Statistics on rain form

无雨量站,在资料有限的情况下,假设滑坡启动前期(07-02~07-05)降雨量达到 50 mm,则滑坡发生的有效降雨量<sup>[9]</sup>

$$R_e = R_0 + R_n = R_0 + kR_1 + k^2R_2 + \dots + k^nR_n \quad (3)$$

式中  $R_e$ —有效降雨量、 $R_0$ —当日降雨量、 $R_n$ —前期降雨量、 $k$ —递减系数(取 0.8~0.9)。采用式(3)计算出青宁乡降雨触发滑坡发生的有效降雨量为 180 mm<sup>[7]</sup>。

## 5 危害指数评价

由于推移式滑坡不同部位破坏力不同,因此地面上所受到的破坏危害性也有所不同。特大型滑坡可以采用危害指数评价法分析不同部位的发育规律和危害性,为防灾工作提供重要参考依据。

### 滑坡规模

通常滑坡的体积规模越大,产生的危害性也越大。青宁乡滑坡不同区域的体积规模不同,利用下式计算规模指数:

$$D_i = V_i / \sum_{i=1}^n V_i \quad (4)$$

式中  $D$ —体积指数,将图 3 数据代入式(4)获得  $D_1=0.53$ ,  $D_2=0.34$ ,  $D_3=0.13$ 。

### 滑动速度

滑动速度越快的滑坡,对地面产生的破坏动能越大。青宁乡滑坡在不同区域出现了不同的滑动速度,因此对地面的破坏作用也有所差别。根据一般速度计算方法近似计算各滑体的滑动速度:

$$U_{0i} = L_i / t_i \quad (5)$$

式中  $U_0$ —速度、 $L$ —滑动距离、 $t$ —历时( $t \approx 24$  h

$t_2 \approx 26$  h,  $t_3 \approx 24$  h)。将图 3 中的滑距 200 m、50 m、150 m 视为各滑体的平均滑距,代入式(5)获得:  $U_{01}=8.3$  m/h,  $U_{02}=1.9$  m/h,  $U_{03}=6.2$  m/h 并求出速度指数

$$U_i = U_{0i} / \sum_{i=1}^n U_{0i} \quad (6)$$

式中  $U$ —速度指数,将  $U_0$  数据代入式(6)获得  $U_1=1.5$ ,  $U_2=0.3$ ,  $U_3=1.1$ 。

### 滑动历时

青宁乡滑坡不同部位的地面破坏情况不仅与滑动距离有关,而且还与历时相关。滑距越长,历时越短的部位遭受破坏越严重。利用下式计算滑动历时指数

$$T_i = t_i / \sum_{i=1}^n t_i \quad (7)$$

式中  $T$ —历时指数,将图 3 数据代入式(7)获得  $T_1=0.33$ ,  $T_2=0.35$ ,  $T_3=0.33$ 。

### 危害性分区

特大型滑坡的危害性可以采用滑坡规模、速度和历时三项危险指标迭加,进行综合危害性评价,划分可能受到破坏的危害等级。根据以上统计分析的结果,建立危害指数评价数集

$$Y_i = D_i + U_i + T_i \quad (8)$$

式中  $Y_i$ —综合危害指数( $i=1 \sim 3$ )。评价数集的运算可以改写成简单数学表达式:

$$(Y_1, Y_2, Y_3) = \begin{vmatrix} D_1 & U_1 & T_1 \\ D_2 & U_2 & T_2 \\ D_3 & U_3 & T_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.53 & 1.5 & 0.33 \\ 0.34 & 0.3 & 0.35 \\ 0.13 & 1.1 & 0.33 \end{vmatrix} = (2.13, 0.99, 1.56)$$

对式(8)计算结果采用数学等距区间划分:  $q_1 = \max Y = 2.13$ ,  $q_2 = \max Y - d = 2.13 - d$ ,  $q_3 = \min Y + d = 0.99 + d$ ,  $q_4 = \min Y = 0.99$

其中  $d = (\max Y - \min Y) / 3$  获得危害性分级区间为:  $X_1 = (q_1 \sim q_2) = (2.36 \sim 1.75)$  危害性极严重区;  $X_2 = (q_2 \sim q_3) = (1.75 \sim 1.37)$  危害性严重区;  $X_3 = (q_3 \sim q_4) = (1.37 \sim 0.99)$  危害性较严重区。

区划结果:滑坡后部(推动区)—危害性极严重区,滑坡中部(挤压区)—危害性较严重区,滑坡前部(滑动区)—危害性严重区<sup>[8]</sup>。

### 稳定状态分析

采用传递系数法对滑坡进行稳定性计算<sup>[9]</sup>,天然状态下处于临界状态,综合稳定系数为 1.01。在强降雨条件下,坡体物质充分饱水,其稳定系数急剧

下降, 饱水状态综合稳定系数为  $0.60^{[10]}$ 。目前滑坡已经剪出, 滑坡重心降低, 滑动能量已得到释放<sup>[11]</sup>。滑坡整体物质基本解体, 缺少整体运动的动能条件。地表原有积水基本泄漏, 失去破坏补给源。所以, 滑坡已基本处于稳定状态, 整体复活的可能性极小。

## 6 结论

1. 根据滑坡的破坏模式和变形特点分析, 达县青宁乡滑坡为一特大型推移式中厚层堆积层滑坡。07—06滑动后, 目前已基本处于稳定状态;
2. 青宁乡滑坡具备了滑坡发育的三个基本内部条件, 当有效降雨量达到  $180\text{ mm}$  时, 滑坡将被触发滑动;
3. 采用滑坡体积规模、滑动速度、滑动历时三项危害指标综合评价, 滑坡后部为极严重破坏区, 滑坡中部为较严重破坏区, 滑坡前部为严重破坏区。此结论与实际地表破坏现象情况吻合, 应用该方法可以快速判别滑坡的发育特征;
4. 为什么川东盆周低山地区连续出现特大型暴雨滑坡? 在什么降雨条件下, 什么类型的斜坡是危险斜坡? 判别条件如何建立? 这些问题还有待进一步研究回答。

## 参考文献 (References)

- [1] Fawu Wang, Ye-Ming Zhang, Zhi-Tao Huo, et al. The July 14 2003 Qianjiangping landslide Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslide, 2004, 1: 157~162
- [2] Qiao Jianping. A 3-D visible evaluation of landslide risk degree under integration of GIS and artificial intelligence [J]. Science in China (E Technological Sciences), 2003, 33: 79~84
- [3] Du Ronghuan, Liu Xinmin, Yuan Jianping, et al. Research on Landslide and Debris Flow in the Three Gorges Reservoir [M]. Chengdu: Sichuan Science Press, 1990, 25~28 [杜榕桓, 刘新民, 袁

- 建模, 等. 长江三峡工程库区滑坡与泥石流研究 [M]. 成都: 四川科学出版社, 1990, 25~28]
- [4] Qiao Jianping, Wu Caiyan, Li Xuzhen. Analysis of Tianshan landslide Xuanhan County, Sichuan Province [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23: 458~461 [乔建平, 吴彩燕, 李秀珍. 四川省宣汉县天台山特大滑坡分析 [J]. 山地学报, 2005, 23: 458~461]
- [5] Qiao Jianping. Structure and shape of landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1335~1358 [乔建平. 滑坡体结构与坡形 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1335~1358]
- [6] Wu Caiyan. Study on the Spatial Prewarning Method of Regional Landslide Induced by Rainfall [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, 1997, 88~100 [吴彩燕. 万州区降雨滑坡空间预警 [D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 1997, 88~100]
- [7] Xu Zemin, Huang Runqiu, Fan Zhuoguo. Water-rock interaction in process of landslide preparing and triggering [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(1): 1~7 [徐则民, 黄润秋, 范柱国. 滑坡灾害孕育—激发过程中的水岩相互作用 [J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 1~7]
- [8] Shang Yuequan, Sun Hongyue, Ba Jin-fu. Synthetic study of dynamic deformation process of landslide [J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 10(4): 84~87 [尚岳全, 孙红月, 巴金福. 滑坡动态变形过程的综合研究方法 [J]. 自然灾害学报, 2001, 10(4): 84~87]
- [9] Study on the characteristic of landslide thrust and evaluation on the effectiveness of landslide control [J]. Journal of Chinese Mining & Technology, 2003, 12(8): 58~61 [郑明新. 滑坡推力特征及其对抗滑效果的评价 [J]. 中国矿业, 2003, 12(8): 58~61.]
- [10] Chen Zuyi. Stability Analysis Theories, Methods, Programs of Earth Slope [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003, 372~373 [陈祖煜. 土质边坡稳定分析原理、方法、程序 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2003, 372~373]
- [11] Janbu N. Slope stability computations [A]. In: Embankment Dam Engineering [C]. New York: John Wiley and Sons, 1973, 47~86

# Applied Risk Index Method to Research the Characters of Qingning Town Rainstorm Landslide, Daxian, Sichuan, China

QIAO Jianping, TIAN Hongling, SHI Lili, YANG Zongji

( Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & Water Resources Ministry, Chengdu 610041, China )

**Abstract:** The Qingning town landslide occurred after a heavy rainstorm. More than 1 000 houses were destroyed, 550 families, 2 200 person suffer injuries. Field investigations revealed that this landslide developed in easy-slide stratum with bedding structure and have sufficient sliding space. After the researched on its transform characters and processes, forming conditions and causal factors, the landslide can be divided into three sections from the upper side to the foot: driving section, extrusion section and sliding section. The main triggering factors are mainly the heavy rain as well as the leakage of the surface water. It is an oversize middle thick driving accumulate landslide. The slip velocity is 3 m/h, 6.2 m/h and 1.9 m/h in different areas. Overlay its size, velocity and moving time, then got the risk indexes of this landslide. The foot area is badly destroyed area, and the middle area is much worse, the crown area is worst. After calculate its stability by Transfer Coefficient Method, it is in the critical status before the rain. When the rain began, the slope fully extracts water and its safety factor descent rapidly. The safety factor is 0.60 under the saturation moisture state. After landslide, its center of gravity dropped and released its sliding energy. As well as the slide body divided into pieces. The accumulated water leaked and loses its supplement. Therefore, the slope is stable at present.

**Key words:** risk index; Daxian county; rainstorm; landslide