

# 贵州水城曾家包包大型基岩滑坡的成因机制 及稳定性

刘 涛, 李渝生, 汪 波

(成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

**摘 要:**从滑坡的地质环境入手, 通过地质调研及测绘, 分析曾家包包大型基岩滑坡的特征、控制因素及成因机制, 并运用 Sarma 法及不平衡推算法、毕肖普法对滑坡稳定性极限平衡进行计算分析。在此基础上, 对在现今应力场作用下滑坡的稳定性采用了有限元模拟, 并对模拟的结果进行分析, 得出在天然条件下曾家包包滑坡曾处于稳定状态, 岩体中的软弱夹层经长期持续的地下水浸润软化逐渐泥化形成倾角上陡下缓的贯通性滑移面, 在雨季降雨异常集中期, 岩体排水不畅形成较高的空隙水压力, 斜坡岩体就会沿滑移面发生顺层滑移, 从而形成大型基岩滑坡。

**关键词:**基岩滑坡; 成因机制; 岩体稳定性

中图分类号: P64 文献标识码: A

贵州水城曾家包包大型基岩滑坡体发育于发耳构造盆地北部, 该构造盆地由三个次级构造凹陷和一个穹状构造及穹隆组成。滑坡体分布区表现出十分典型的滑坡后缘封闭槽谷地貌, 其以南斜坡地带总体上为多级隆起—凹槽地貌, 此地貌景观是岩体滑移过程中多级解体并形成多个次级滑面的地形反映。这些不良的地质现象对该地区的工程规划选址有较大的影响。必须对其稳定性现状作出客观评价(图 1)。

## 1 滑坡体概况

该滑坡堆积体分布范围东西向宽约 340~920 m, 南北向长约 940 m, 总体积约  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据对湾河南岸龙头山大路口东侧残存的湖相地层底部粉土层进行热释光测年试验, 结果表明滑坡形成年代约在距今 2.2 万年以前。出露地层主要为上二叠统龙潭组海陆交互相沉积、下三叠统飞仙关组合

为: 上部黄褐色薄层砂岩与深灰色薄层状泥岩呈条带状互层, 下部深灰色—黑色薄层状碳质泥岩夹厚层砂岩及煤层。沿此 NE 向分区界线发育一陡坎—凹槽体系, 陡坎一直向北延伸环绕曾家包包北侧形成明显的后缘圈谷地形, 在后缘圈谷与曾家包包之间为一规模较大的封闭凹槽, 为典型的滑坡后缘封闭槽谷地貌。曾家包包及其以南斜坡地带总体上为多级隆起—平台或凹槽地貌, 其中各级凹槽多表现出后缘下陷的异常现象, 此地貌景观为岩体滑移过程中多级解体并形成多个次级滑面的地形反映。中部曾家包包主体(图 1 I—I' 剖面), 产状变化大, 基本上保持原有的相对层序, 岩体结构相对完整, 相对刚性(脆性)岩层(灰色块状砂岩)基本上解体为巨块石架空状堆积体; 相对塑性岩层(泥岩与砂岩互层)位移变形明显, 但基本保持原有地层相对层序(图 1)。

此外, 曾家寨南侧小山包由灰色块状长石石英砂岩巨块石解体架空堆积形成, 这套灰色块状砂岩

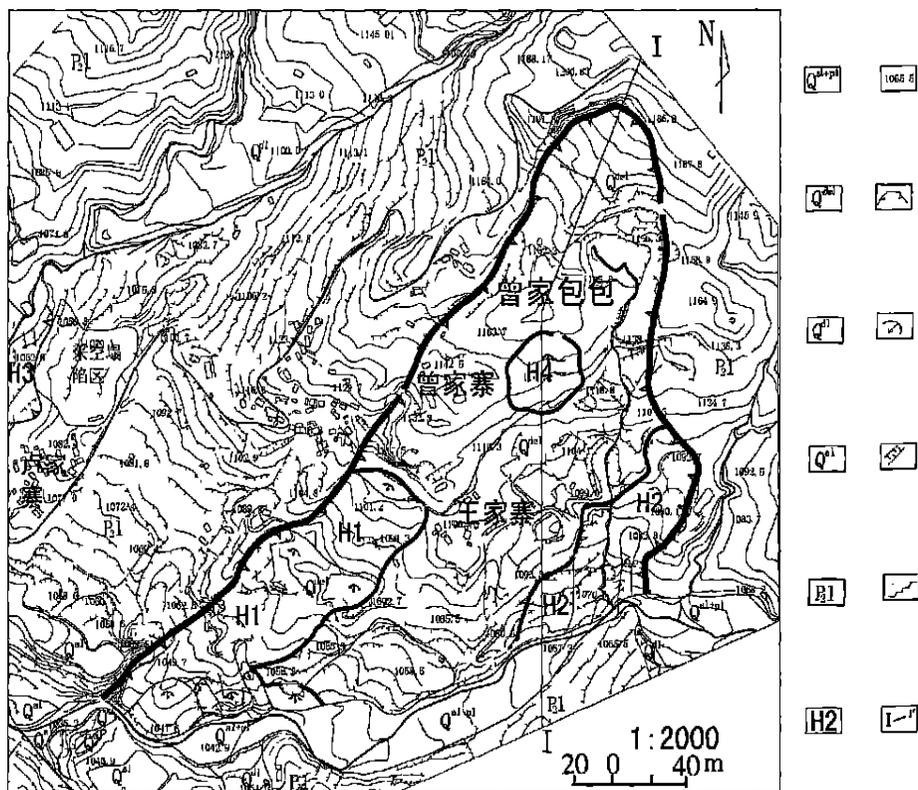
收稿日期(Received date): 2004-09-11; 改回日期(Accepted): 2005-01-31。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重大项目资助(编号: 90102002)。[The research was supported by the National Science Foundation of China(No 90102002)]

作者简介(Biography): 刘涛(1978-), 男, 汉族, 山西忻州地区, 成都理工大学环境与土木工程学院地质工程专业硕士研究生。[Liu Tao (1978-), male, the Han Nationality, Born in Xinzhou Region, Shanxi Province, the Graduate student of College of Environment and Civil Engineering of Chengdu University of Technology and Majoring in Geology Engineering.]

在该厂址区发育一层且稳定, 与曾家包包后缘凹地西侧陡坎出露的灰色块状砂岩对应, 位移距离约 280 m; 曾家包包山体地层在层位上与其北侧后缘圈谷陡坎相距 260 m 处附近出露的地层相对应, 二

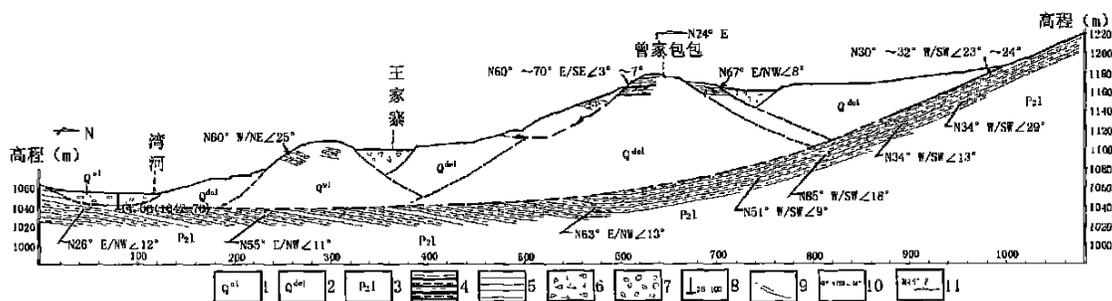
者的岩性组合基本相同。据此不难推断, 滑坡主体位移距离至少约 260 m。根据现场观测及钻孔资料, 滑体的工程地质剖面见下图(图 2)。



积层、洪积层; 2. 滑坡堆积体; 3. 第四系残积层; 4. 第四系冲积层; 5. 上二叠统龙潭组泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩  
石砂岩夹煤层; 6. 次级滑坡; 7. 高程(米); 8. 古滑坡界线; 9. 复活滑体; 10. 地表凹陷带; 11. 地表张裂缝; 12. 剖面

图 1 工程地质平面图

Fig. 1 The groundplan of engineering geology



第四系冲积; 2. 滑坡堆积体; 3. 上二叠统龙潭组泥岩、粉砂质泥岩夹砂岩及煤层; 4. 泥岩、粉砂质泥岩夹煤层; 5. 砂岩; 6. 块碎石  
泥夹粘性土堆积; 7. 砂卵石层; 8. 终孔深度(m); 9. 复活滑面; 10. 推断滑面; 11. 地层产状(走向/倾向、倾角); 12. 剖面方向

图 2 工程地质剖面图

Fig. 2 Cross section of the engineering geology

## 2 滑坡成因机制分析

现场地质调研测绘结果表明: (1)基岩层面及软弱夹层产状变化大, 北部滑体后缘圈谷附近为  $N34^{\circ} \sim 85^{\circ}W/SW \angle 13^{\circ} \sim 28^{\circ}$ , 倾角较陡, 向南至滑体前缘逐渐转变为  $N9^{\circ} \sim 27^{\circ}E/SE \angle 10^{\circ} \sim 13^{\circ}$ , 倾角较缓, 构成斜坡山体基岩层面及软弱夹层倾向坡外、倾角上陡下缓的顺层滑移控制条件; (2)沿滑体 NW 边缘陡坎发育有两组节理, 延伸长大, 平直贯通, 其产状分别为  $N46^{\circ}E/SE \angle 81^{\circ}$ ,  $N60^{\circ}E/SE \angle 66^{\circ}$ 。这两组节理的追踪贯通构成了滑坡体 NW 缘的切割—滑移边界; (3)上二叠统龙潭组 ( $P_{2L}$ ) 砂、泥岩夹煤系地层中发育有两类软弱夹层: 一类, 多层发育的铝土质泥岩, 物理力学性质较弱, 在地下水长期浸润下软化, 导致其抗剪强度大幅度降低, 其它岩体力学条件适宜的情况下极易发展成潜在的滑移控制面; 另一类, 碳质泥页岩及煤线, 地层的结构联结较弱, 力学性质低于其它地层。

在上述特定的斜坡岩体力学环境条件下, 曾家包包山体基岩中软弱夹层, 在长期持续的地下水浸润软化作用下, 逐渐泥化形成倾角上陡下缓的贯通性滑移面。雨季降雨异常集中期, 岩体排水不畅形成较高的空隙水压力, 斜坡岩体沿已泥化的软弱夹层滑移失稳, 形成总体上顺层滑移的大型基岩滑坡<sup>[1]</sup>。

## 3 滑坡体稳定性评价

### 3.1 滑坡体应力场的有限元模拟

所谓应力场的有限元模拟分析, 就是将地质原形转化为力学—数学模型, 采用有限单元算法, 通过不断地改变边界力的作用方式与量级, 使计算区内的一些特定点的应力与实际资料达到最佳拟合。据此, 分析岩体中应力集中的部位和相对稳定区段, 并对滑体稳定性现状及其未来的发展变化趋势作出

合理预测, 同时也为岩体的稳定性的改善和工程规划选址提供科学合理的依据<sup>[2]</sup>。

### 3.2 岩体力学计算

据曾家包包滑坡体岩体结构的地质特征, 选择能充分考虑空间推力及剪应力平衡、能根据岩体内部结构面实际形态进行垂直或非垂直条分的萨尔玛法 (Sarma) 和不平衡推力法, 对滑体中部曾家包包主体的稳定性极限平衡计算分析<sup>[3]</sup>。此外, 考虑到主滑体东、西两侧滑体的解体分散特征, 稳定性计算时选择适用于散体结构的简化毕肖普法。确定滑面的抗剪指标, 综合考虑软弱夹层的抗剪试验、岩体力学反算结果及已有的工程经验参数, 其中: 岩体力学反算结果:  $\Phi = 19.44^{\circ}$ ;  $C = 0.05 \text{ MPa}$ 。

#### 3.2.1 场地岩体应力—形变的数值模拟分析

##### 1. 滑坡中部计算模型

选择能够反映该场地总体地质结构特征的工程地质剖面, 作为有限元数值模拟分析的岩体力学计算剖面。滑坡中部, 即曾家包包滑坡主体 (图 1 I—I' 剖面) 符合此要求, 因此据此建立相应的计算模型 (图 3)。

该模型的计算范围水平长 1 080 m, 垂向高 240 m, 采用四节点四边形等参单元, 共剖分 1464 个单元, 1 571 个节点。模型介质的物理力学参数及指标的选取, 主要考虑了已有的研究经验及场地岩性条件的实际情况按表 1 所列数据确定。由于该表参数的选取较大程度上依赖已有的研究经验, 且缺乏岩体应力场计算的参照依据, 故计算结果并不具有岩体力学量值的涵义, 但能够较客观的反映场地岩体应力—形变作用的基本规律和特征。

模型计算仅考虑重力场作用, 边界条件可简化为模型的底部及两侧均设置“连杆支座”位移约束边界。

##### 2. 数值模拟计算结果分析

根据上述计算模型、介质参数及边界条件, 通过有限元数值模拟计算, 即可获得图 4~6 所示的主应力矢量、最大主应力、最小主应力及最大剪应力分布情况的计算成果。据此分析, 曾家包包滑坡体岩体

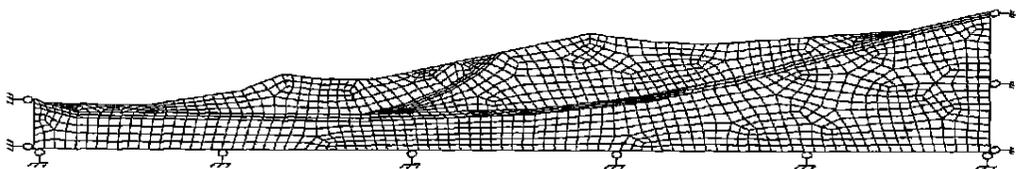


图 3 曾家包包滑坡体网格剖分图

Fig. 3. Zengjiabao slope meshing map

表 1 模型介质力学参数的取值<sup>[4]</sup>

Table 1 Physical mechanics parameter value of the model

岩性	弹性模量 (MPa)	泊松比	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	残余内聚力 (MPa)	残余内摩擦角 (°)	容重 (MN/m <sup>3</sup> )	抗拉强度 (MPa)
砂、泥岩互层	36 500	0.20	3.500	40.50	2	36.50	0.027	1
滑面	1 500	0.40	0.050	19.44	0	15.50	0.018	0
滑坡堆、坡积层	2 500	0.38	0.070	22	0	18.5	0.020	0
砂卵石层	4 000	0.33	1.188	30	0.05	28	0.023	0
块碎石夹粘土层	3 000	0.35	0.980	28	0.03	25	0.022	0

应力—形变场的现今特征, 主要有以下几点:

(1) 最大主应力  $\sigma_1$  量值分布 (图 4) 表现为由深部向地表逐渐降低的平稳递变状态, 无明显应力集中现象;

(2) 最小主应力  $\sigma_3$  量值分布 (图 5) 表现为滑面的上、下部分布特征与最大主应力总体分布特征

相似, 由深部向地表逐渐降低的平稳递变状态, 无明显应力集中现象, 滑面表现为明显的应力降低带, 由滑面顶部 1MPa 陡降为底部的 0.2MPa;

(3) 场地岩体内最大剪应力  $\tau_{\max}$  的现今分布较为平稳 (图 6), 未出现明显的剪应力高异常集中现象, 不具备基岩深层滑移所必需的剪应力条件。

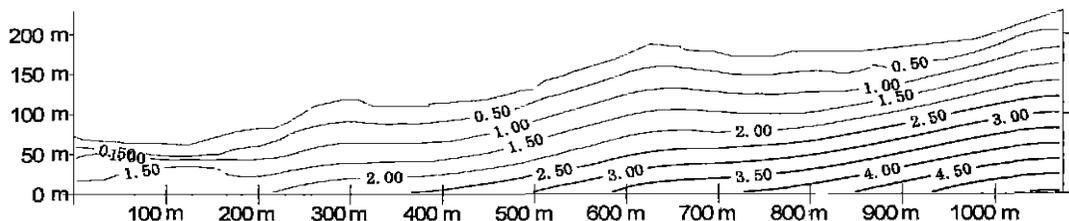
图 4 最大主应力  $\sigma_1$  等值线图

Fig. 4 Contour lines of the maximal principal stress

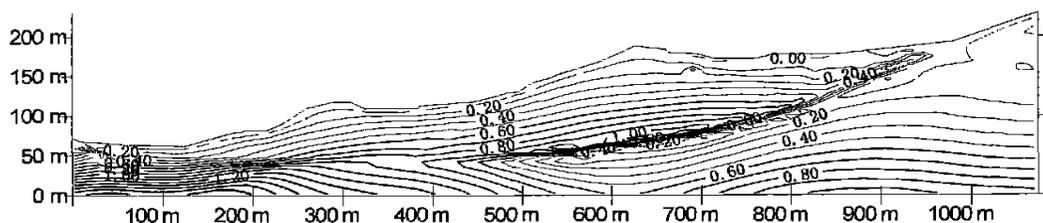
图 5 最小主应力  $\sigma_3$  等值线图

Fig. 5 Contour lines of the minimal principal stress

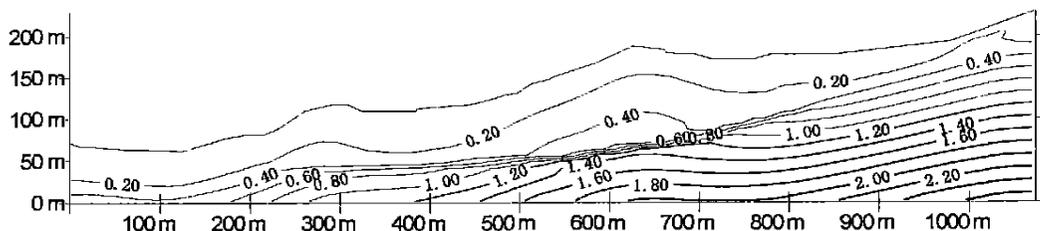
图 6 最大剪应力  $\tau_{\max}$  等值线图

Fig. 6 Contour lines of the maximal shearing stress

### 3.2.2 滑体中部主体的稳定性

根据现场地质测绘结果确定图 8 及图 9 所示的堆积体中部主体的计算模型, 运用 Sama 法反衍计算得  $C, \varphi$  值, 再通过不平衡推算法计算稳定性系数

及破坏概率(见表 2)。结果表明, 沿主滑面及前部次级滑面均表现出较高的稳定性, 各种方法及不同参数的稳定系数计算结果  $K \geq 2.0$ 。

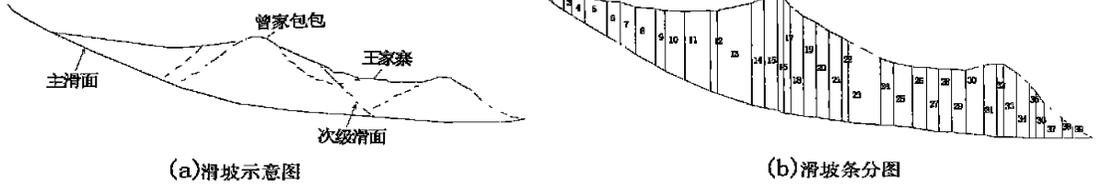


图 7 曾家包包滑体主滑面计算模型

Fig. 7 Calculation model of principal slip plane of the Zengjiabaobao slide

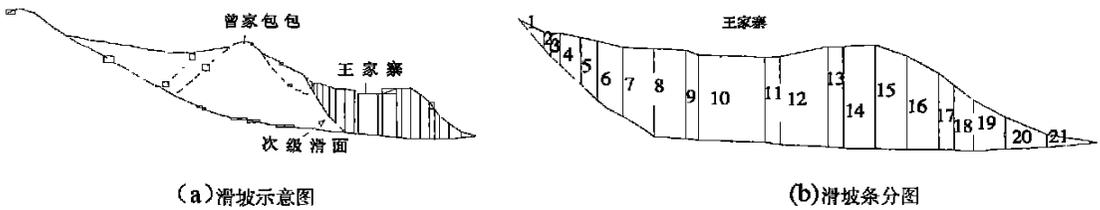


图 8 曾家包包滑体前部次级滑面计算模型

Fig. 8 Calculation model of the fore secondary slip plane of the Zengjiabaobao slide

表 2 曾家包包滑体中部主体稳定性现状计算结果

Table 2 Stability calculation result of the slide's middle side

计算滑面	抗剪指标		稳定性系数		破坏概率
	$\varphi(^{\circ})$	$C(\text{MPa})$	萨尔玛法	不平衡推算法	
主滑面	19.44	0.05	2.38		0.0
	17.00	0.02	2.07	2.08	
前部次级滑面	19.00	0.05	2.32	2.68	0.0
	17.00	0.24	2.03	2.31	

及湾河冲蚀坡脚两个主要因素控制下, 均发生较明显的位移变形。

3. 应特别注意的是, 曾家包包古滑坡体的岩体结构相当复杂。虽然其总体上沿底部主滑面处于稳定状态, 但局部块体的稳定性受控于堆积体内的次级滑面。因此, 在没有查明滑坡体内复杂的次级滑面体系的情况下, 应避免在该滑体堆积范围内规划大型工程建设。

4. 鉴于曾家包包古滑坡体总体上沿底部主滑面处于稳定状态, 仅其前缘局部坡体在雨季有明显的位移变形的特征, 采取支挡(挡土墙和锚索桩)为主, 辅以锚固、护坡和排水的综合治理措施, 以确保滑坡体稳定<sup>[3]</sup>。

## 4 结论

据上述现场地质调研及计算分析结果, 对该滑体的稳定性问题作如下评价:

1. 该滑坡体堆积规模约为  $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其成因机制总体上为沿已泥化的软弱夹层发生顺层滑动的大型基岩滑坡, 主体滑动方向为 SSW 向。形成年代约在距今 2.2 万年以前。

2. 现场地质调研及岩体力学计算结果均较一致地表明, 在天然条件下曾家包包滑坡总体上处于稳定状态, 并具有较高的安全储备。但其前缘局部坡体处于极限平衡状态, 每年雨季在地下水位升高

### 参考文献 (References):

[1] Zhang Zuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Analysing principle of Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 327~330 [张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 327~330]

[2] Shang Yuequan, Huang Runqu. Numerical anaysis method[M]. Chengdu: The Press of Chengdu Science and Technique University, 1991. 159. [尚岳全, 黄润秋. 数值分析方法[M]. 成都: 成都

- 科技大学出版社, 1991. 159.]
- [3] Wang Shitian, Huang Runqiu, Li Yusheng *et al.*. Study on significant Engineering Geology of hydropower station in Jinping on Ya Long River[M]. Chengdu: The Press of Chengdu Science and Technique University, 1998. 85. [王士天, 黄润秋, 李渝生, 等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998. 85.]
- [4] Wangbo, Li Yusheng. Study on the dam abutment's side slope stability of Long Pan dam region of Tiger Leaping Gorge hydropower station in Jingsha River[J], *Journal of Geomechanics*, 2002, 8(4): 379. [汪波, 李渝生. 金沙江虎跳峡水电站龙蟠坝区坝肩边坡的稳定性研究[J]. 地质力学学报, 2002, 8(4): 379.]
- [5] Zhu Pingsheng. The movable feature and control design of K399 landslide on Dali-Baoshan motorway, Yunnan[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2002, 13(4): 29~31. [朱平生. 云南大包高速公路 K399 滑坡活动特征及治理设计[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(4): 29~31.]

## Genesis Mechanism and Stability of Large Zengjiabaobao Bedrock Slide in Water City of Guizhou

LIU Tao, LI Yusheng, WANG Bo

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Starting with geological environment of a slide, by geological research and study and mapping, this paper analyze character and controlling factor and genesis mechanism of large Zengjiabaobao bedrock slide. And it calculates and analyzes limit balance of stability of the slide by Sarma and Imbalance reasoning and Besopke method. On the basis of it, this paper simulates stability of the slide in the present stress field by Finite element and analyzes the result of simulation. At last, it arrives at the conclusion that in the natural condition, the Zengjiabaobao slide was ever stable, and weak interlayer of rock mass that is chronically and continually soaked by water and gradually argillaceous forms the perforated slip plane. When it very concentrically rains in the rainy season, rock mass form upper interstice hydraulic pressure because of non free drainage, so the rock mass of slope slides along the slippage plane in the same direction as the layer and form the large bedrock slide.

**Key words:** bedrock slide; genesis mechanism; rock mass stability

### 《山地灾害及防灾减灾基础知识》科普读本出版

由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所有关专家编写的科普读物《山地灾害及防灾减灾基础知识》, 近日已由四川大学出版社出版。读书用通俗的语言介绍了山地灾害(泥石流、滑坡、崩塌)的成因、类型、分布和防灾减灾的基础知识, 对普及山地灾害知识和防灾减灾将起到积极作用。

(本刊编辑部)