



2016年度学术年会



滑坡中的流固耦合问题

报告人：许强

成都理工大学
地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室

2017年02月25日

1. 概述



《时代》评出年度十大人为灾难：全球变暖居首

<http://www.sina.com.cn> 2007年12月12日 08:04 新浪科技

延伸阅读>> [年度十大科学发现](#) [十大动物新闻](#) [十大人为灾难](#) [十大奇闻](#)

新浪科技讯 北京时间12月12日消息，2007年即将成为过去，各种年终盘点好像商量好地一样纷纷浮出水面。灾难永远是人们关注的焦点，在即将过去的一年里，同样发生了许许多多、大大小小的灾难，其中不少是人为的灾难。

以下是《时代》杂志评选出的年度十大人为灾难。

1. 全球变暖



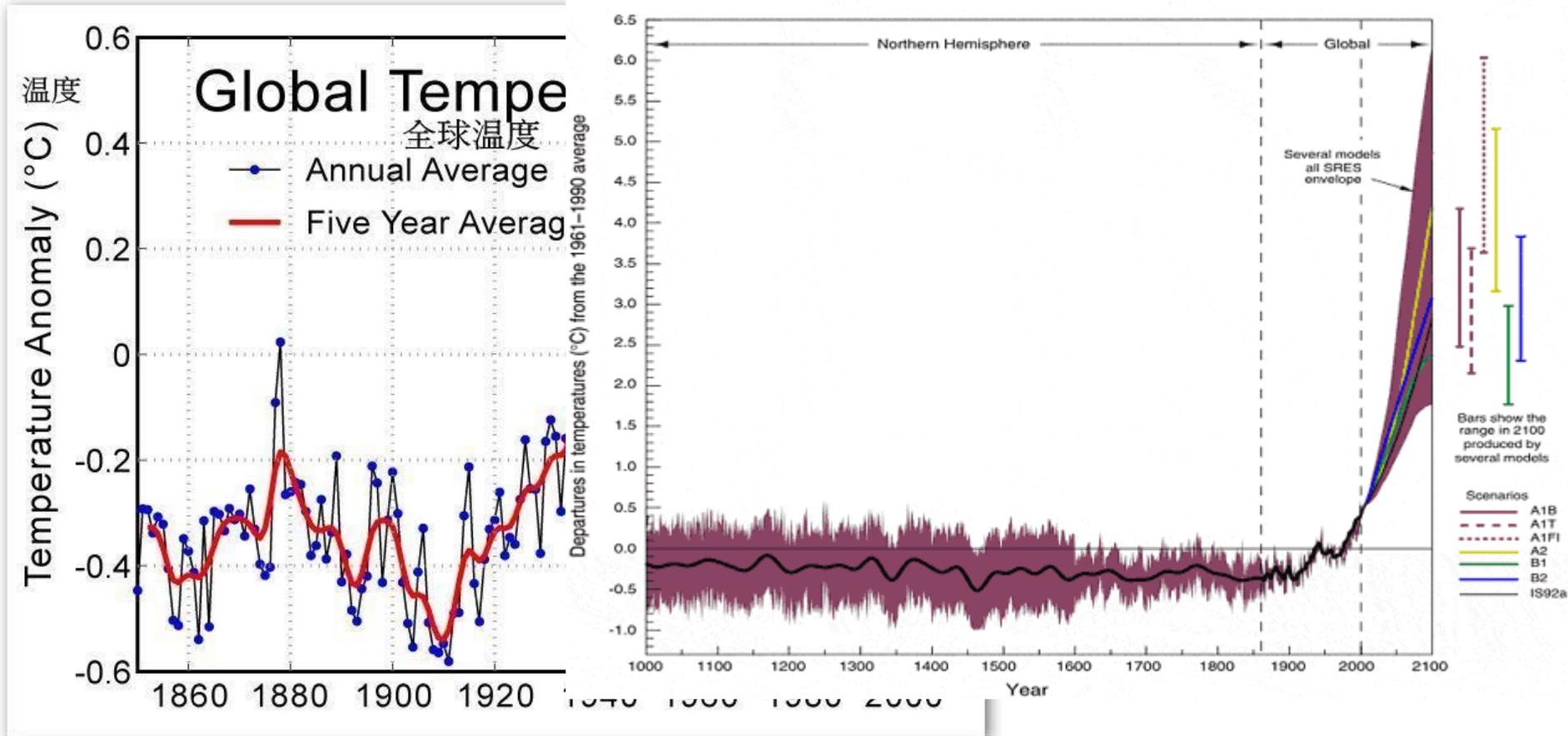
现在已经没有多少人还怀疑气候变化不是人为引起的。即使全球变暖的影响依然处于预测范围的最良性阶段，但在可以预见的将来，它肯定是一场空前的灾难。多年来，这场灾难展开的速度很慢很慢，所以人们并没有注意到它。但现在，我们可以看到了：全球高山冰川正在消融，连同格陵兰岛上的北极海冰和冰帽一起消融；干旱炙烤着美国西南部、澳大利亚和撒哈拉以南非洲；孟加拉国洪水泛滥；中美洲不断遭受强热带风暴的袭击。这些灾难中并非完全由全球变暖引起，但它们肯定会随着全球变暖而愈演愈烈，最终危及到数十亿人的生命和生计。

近年来，由于全球气候变化导致天气系统紊乱，**极端低温、干旱、强降雨**交替接连出现。世界气象组织电脑模拟预测表明，世界正进入**“极端天气频发的时代”**。

1. 概述

Variations of the Earth's surface temperature: 1000 to 2100.

1000 to 1861, N.Hemisphere, proxy data; 1861 to 2000 Global, instrumental; 2000 to 2100, SRES projections





2008



2012

新华网
WWW.NEWS.CN



江西九江鄱阳湖底现万亩大“草原” (1/8) 2011-05-29 07:52

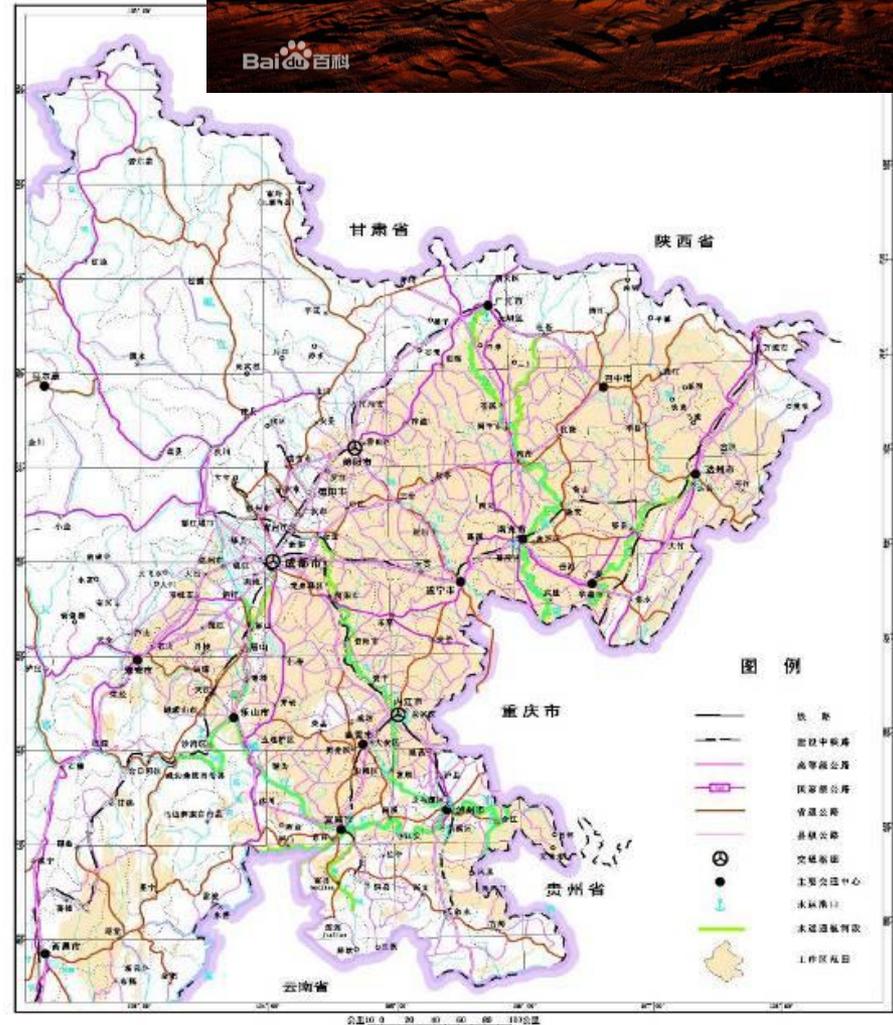
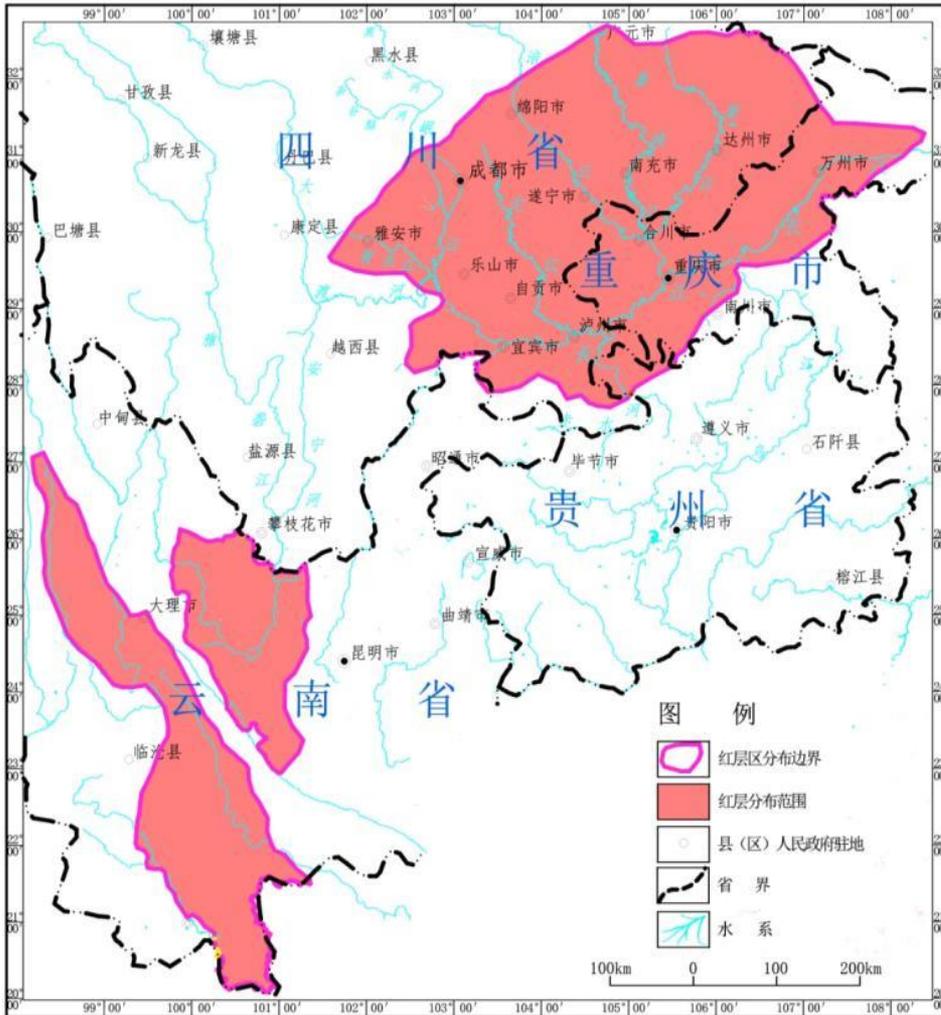
搜索图片

目前，在鄱阳湖江西九江庐山区及湖口县交界处，超过万亩的裸露湖床上长满绿草，宛如一片辽阔的大“草原”。新华社 CFP供图



2011

1. 概述



上世纪80年代以来，在西南红层地区，一场特大暴雨往往诱发成千上万处滑坡，表现出明显的**群发性**，其中不乏**大型深层岩质滑坡**。

时间	滑坡基本情况	资料来源
1981年6月特大暴雨	共发生 6万余 处滑坡灾害，基岩滑坡多发生在侏罗系和白垩系的红层中	王兰生等， 王少东
1989年7月特大暴雨	红层中发育了大量的滑坡，仅大竹、武胜、垫江等县就发生 几万余 处滑坡，体积在万立方米以上的三百多处	孔纪名，陈自生
1998年特大暴雨	在长江流域诱发数千处滑坡灾害，在四川盆地也有 数百处 地质灾害发生	相关专业队伍调查报告
2011年9.16-9.20 巴中特大暴雨	在巴中市的南江县、通江县和平昌县发生群发性滑坡，仅南江县新增滑坡 1162处	604地质队现场调查
2014.8.31-9.1渝 东北特大暴雨	日最大雨量超过400mm。云阳、奉节、巫山、巫溪、开县5县发生 2340 起地质灾害	重庆市土房局、 中科院地质力学研究所

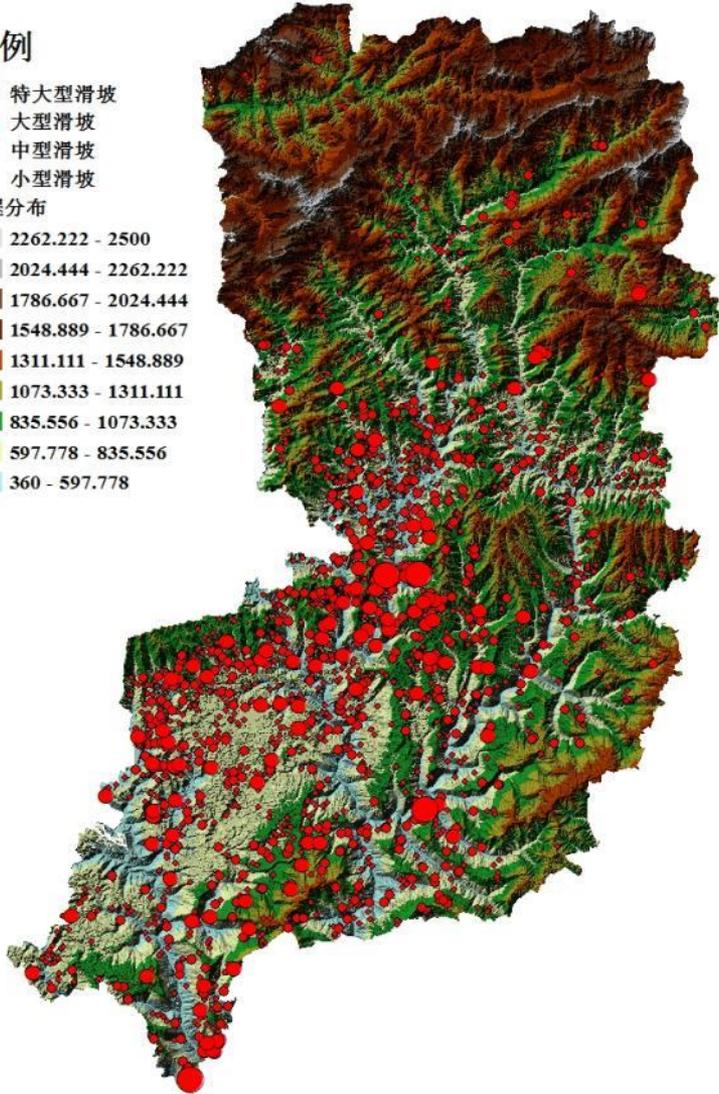
四川南江2011.9.16强降雨灾害

图例

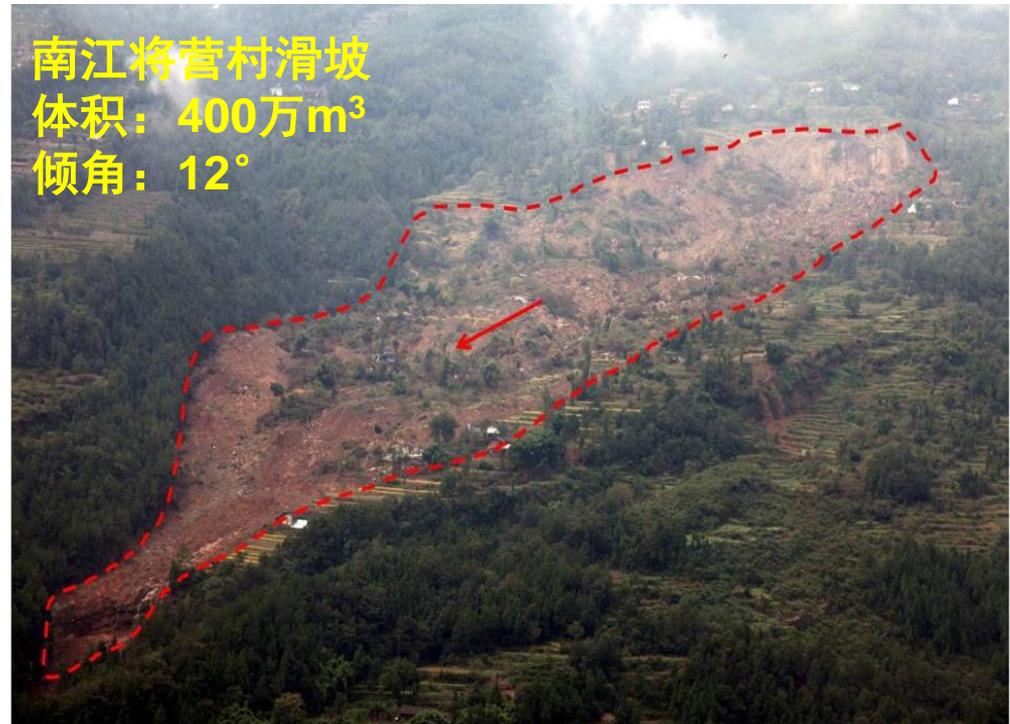
- 特大型滑坡
- 大型滑坡
- 中型滑坡
- 小型滑坡

高程分布

- 2262.222 - 2500
- 2024.444 - 2262.222
- 1786.667 - 2024.444
- 1548.889 - 1786.667
- 1311.111 - 1548.889
- 1073.333 - 1311.111
- 835.556 - 1073.333
- 597.778 - 835.556
- 360 - 597.778

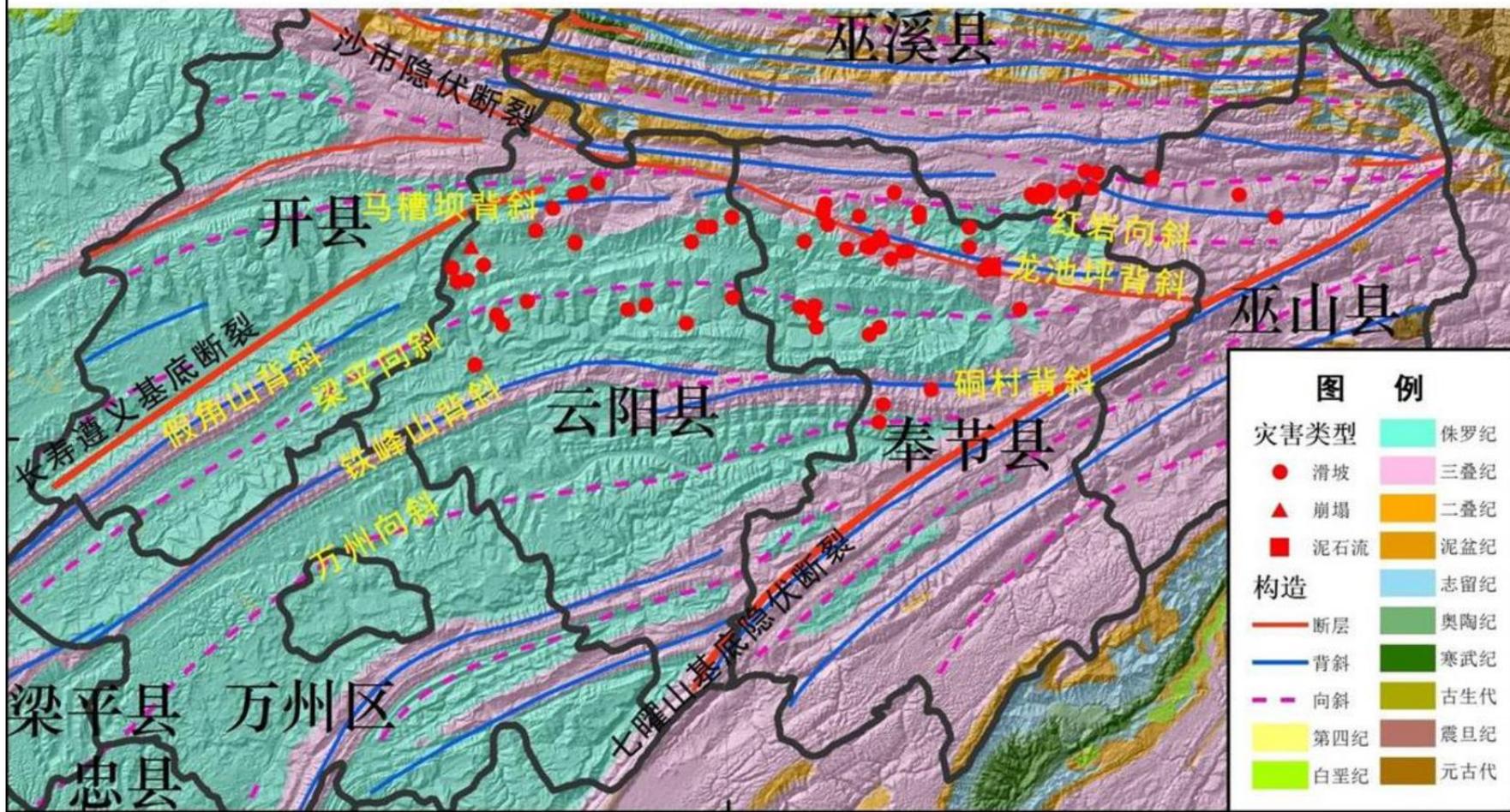


◆ 2011. 9. 16, 四川省南江县一场强降雨(日降雨量250mm, 累计430mm)诱发**上千处滑坡**, 其中不乏大型岩质滑坡。



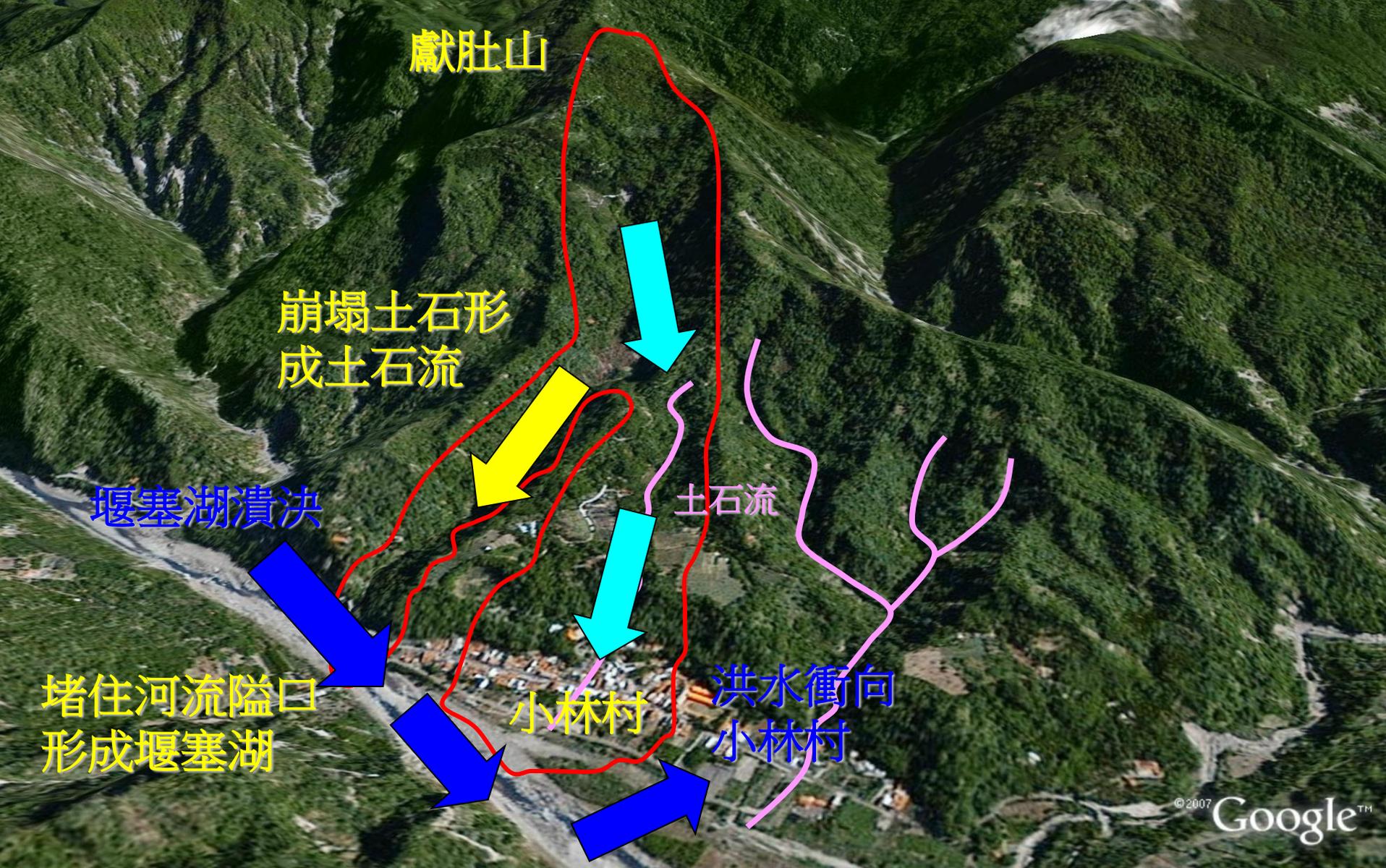
2014年“8.31”渝东北特大暴雨(400mm/日)，云阳、奉节、巫山、巫溪、开县5县发生**2340**起地质灾害。

超过500万方大型滑坡**55**处，威胁100人以上滑坡**397**处。岩性以J-T的碎屑岩为主。（资料来源：中科院地质力学研究所）





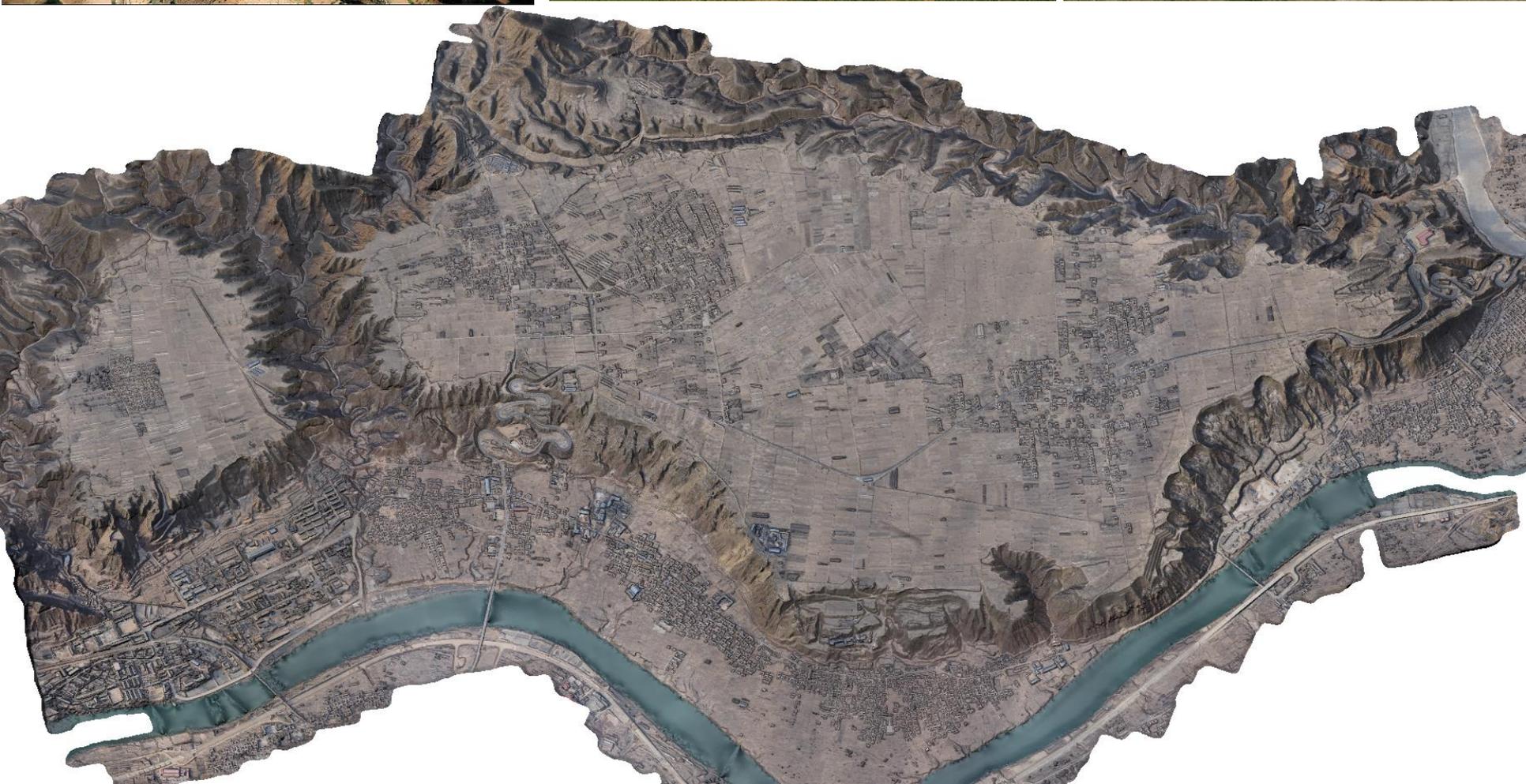
云阳大石头-双碾盘顺层滑坡



台灣小林村滑坡，2009. 08. 08



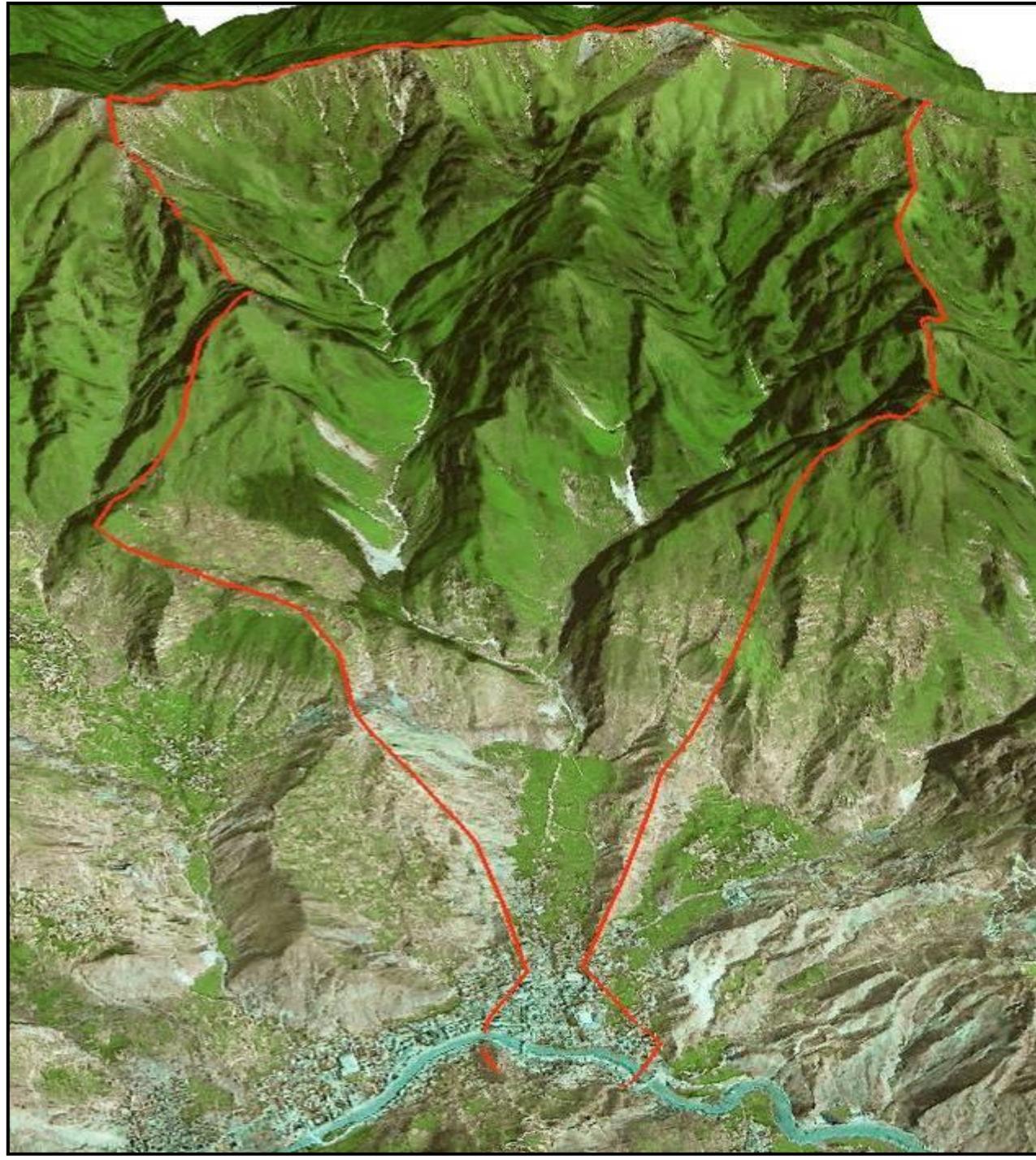
台湾小林村滑坡灭村事件，2009.08.08







2015年4月29日甘肃黑方台党川滑坡航拍图



2010.08.08，
甘肃舟曲因强降雨引发滑坡
泥石流，冲毁半个舟曲县城，
造成1765人遇难。



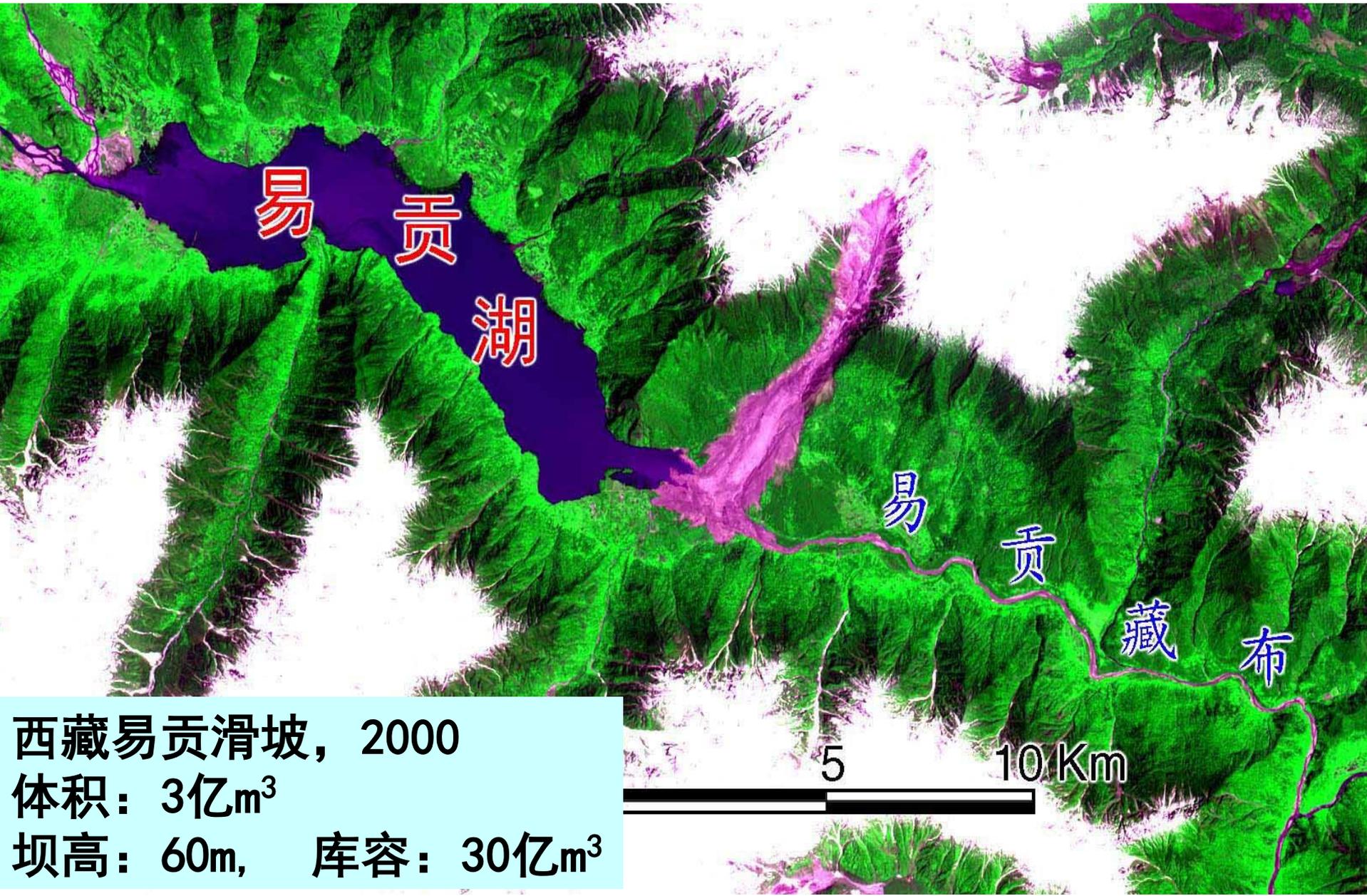


更是使清平、映秀、龙池
“三镇”遭受重创



清平乡8.13特大泥石流淤埋清平乡场镇

冰雪融化致灾：

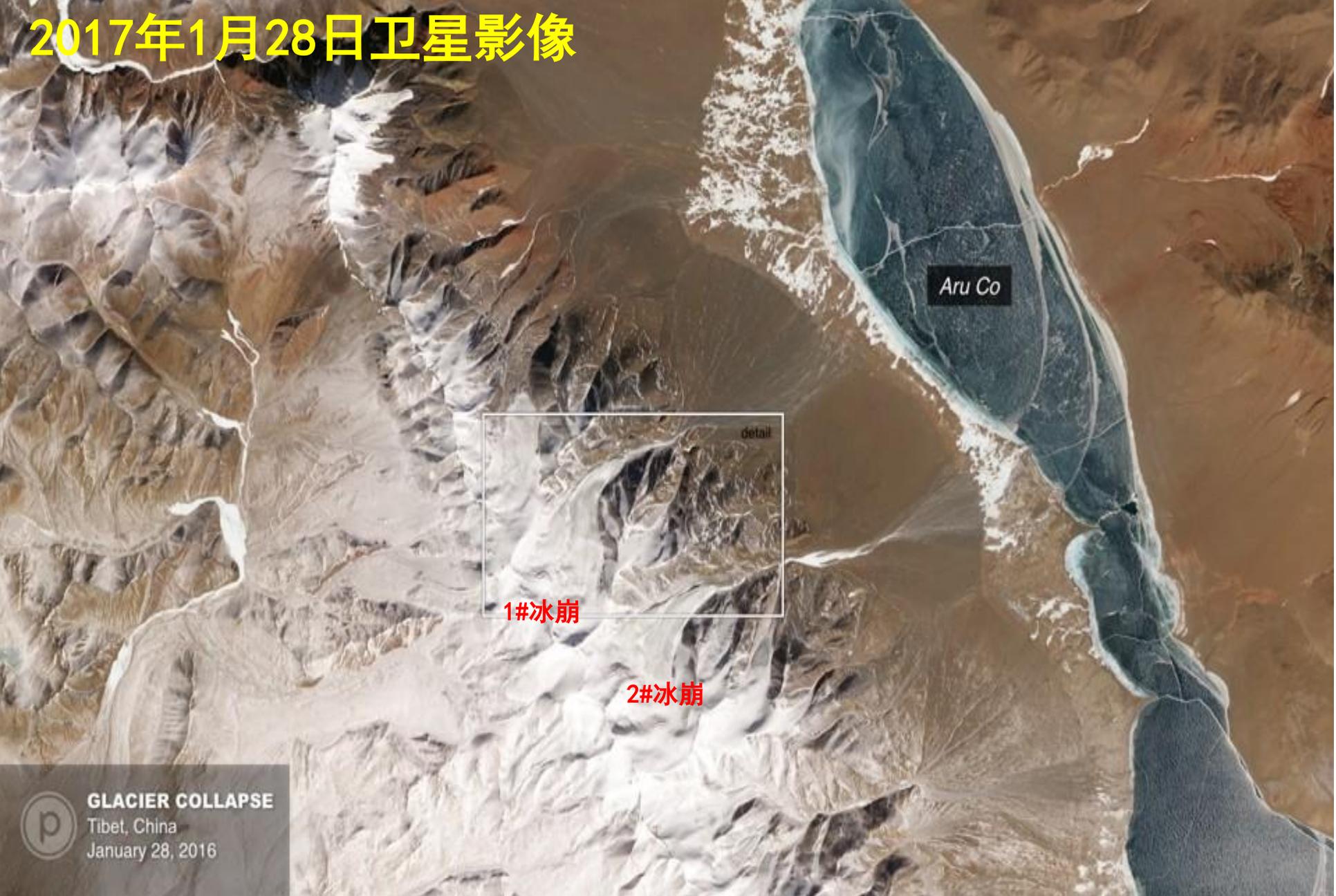


西藏易贡滑坡，2000
体积：3亿 m^3
坝高：60m， 库容：30亿 m^3



洪峰流量：1
印度：5万人

2017年1月28日卫星影像



 **GLACIER COLLAPSE**
Tibet, China
January 28, 2016

西藏阿里冰雪滑坡，2016. 7. 17



1#冰崩

冰崩带长8公里、宽5公里，体达6亿立方米，史上罕见。

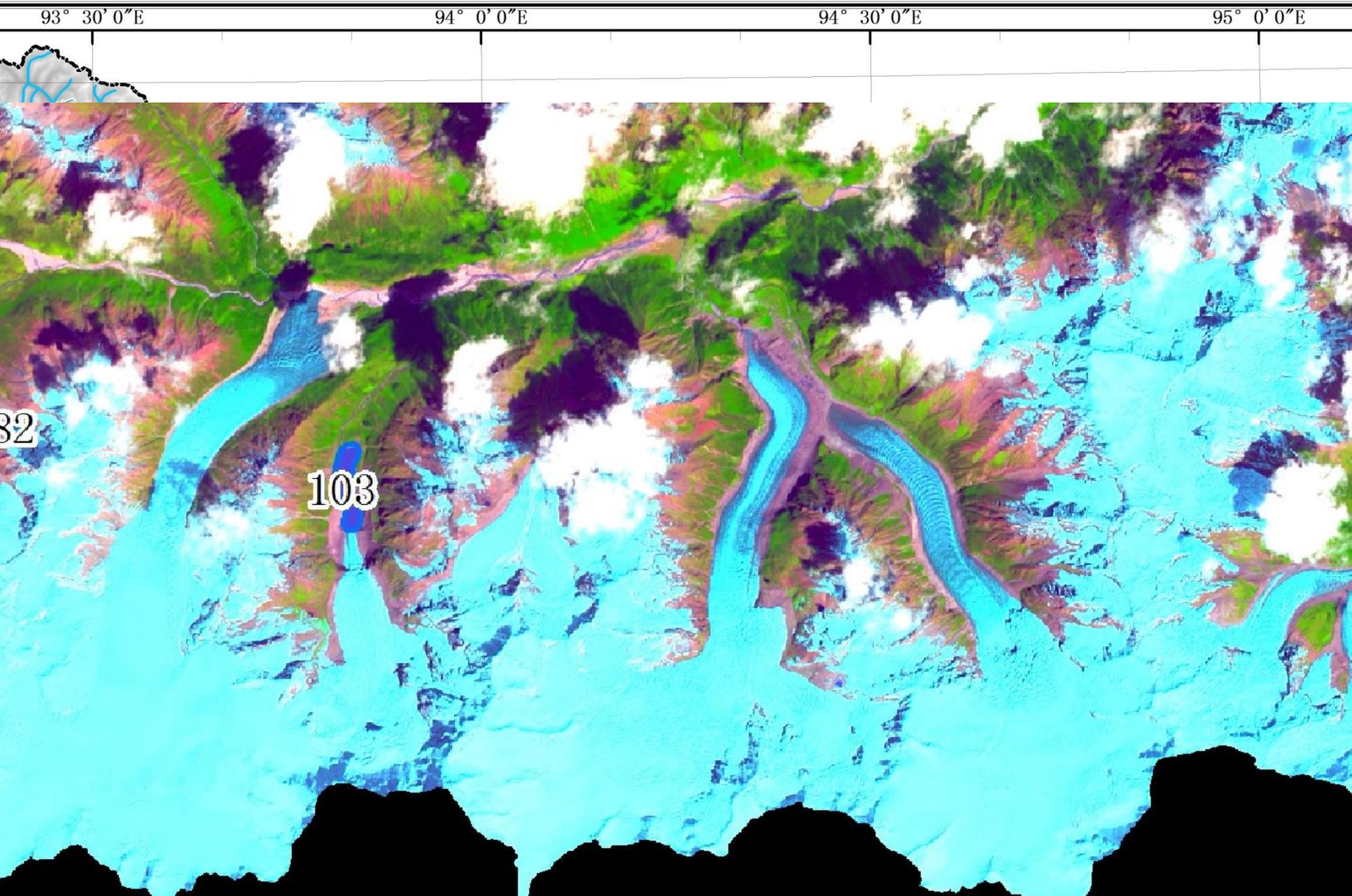


2#冰崩堆积区影像

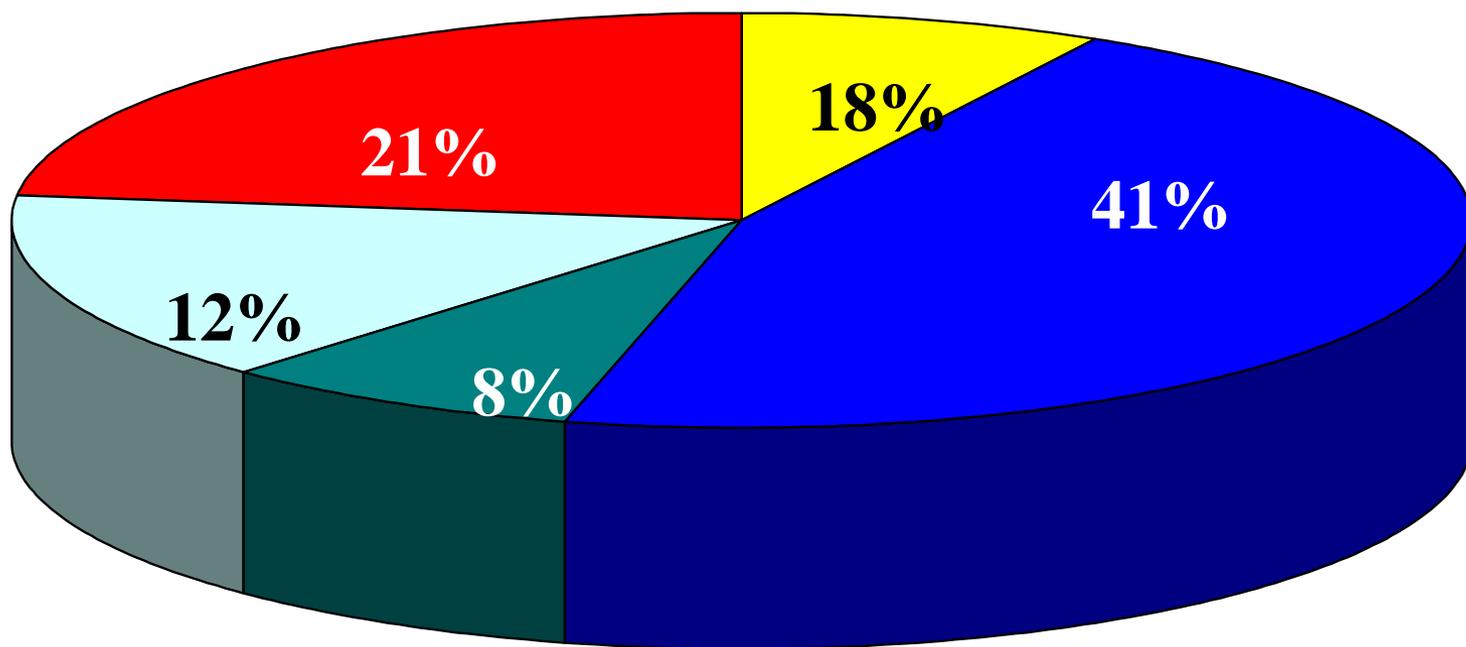


ow, Tibet, China Septemb

西藏易贡藏布流域冰湖分布图







■ 地震 ■ 降雨 ■ 冻融 ■ 重力 ■ 人类活动

各因素诱发地质灾害的比例

汇报提纲



一、概述

二、滑坡启动阶段的流固耦合问题

三、滑坡运动堆积阶段的流固耦合问题

2.1 地表冲刷侵蚀型致灾模式



文家沟滑坡—泥石流



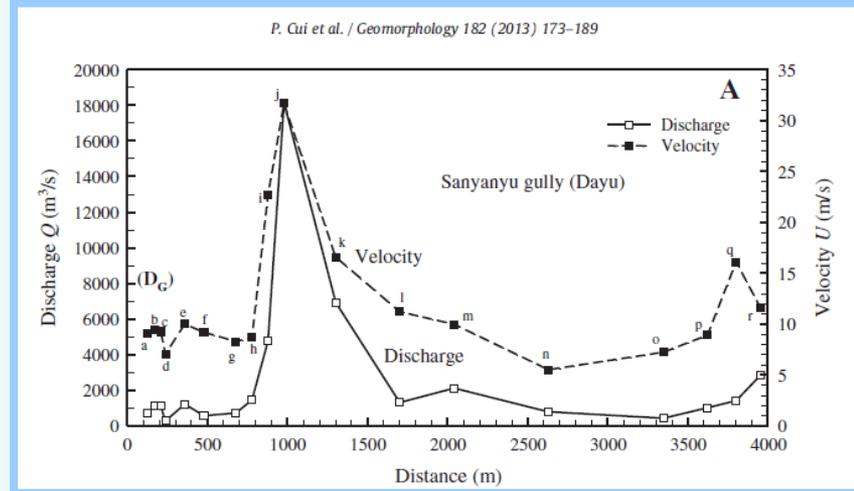
**8.13后右侧冲沟（主沟）进一步深切到40~60m，最大达75m；
宽度为50~100m**





8. 13泥石流后文家沟沟口段地形

甘肃舟曲泥石流 2011. 8. 7



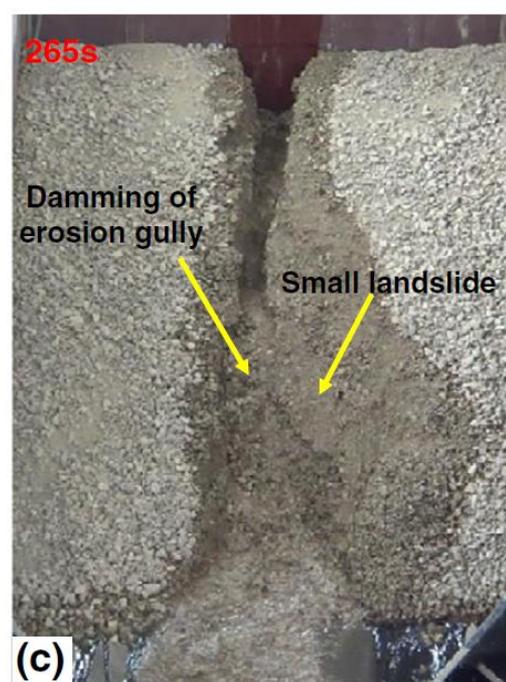
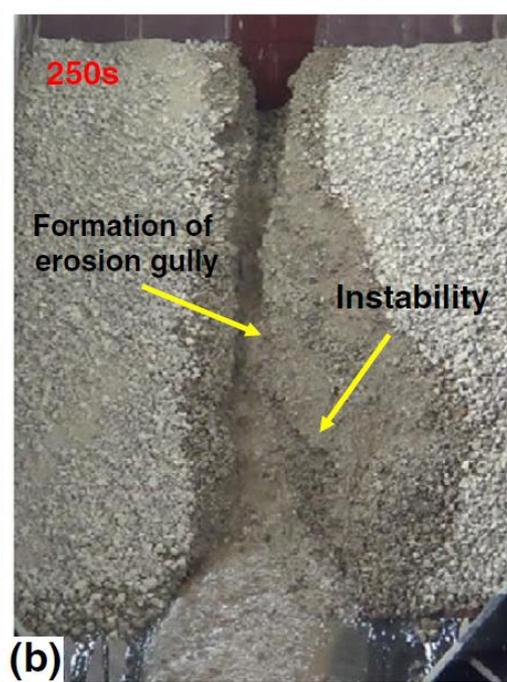
引自唐川, 2011

冲刷型泥石流的实际爆发规模远远大于用规范公式的计算规模！！！？？

红椿沟： P=2% 原计算： $Qh=1.92 \times 10^4 \text{ m}^3$
 8.13实际： $Qh=69.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ **36倍**

文家沟：

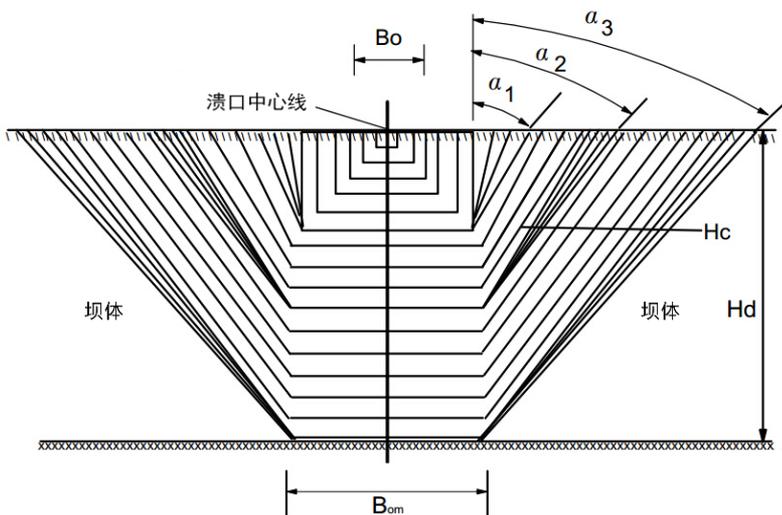
序号	时间	降雨概率	计算冲出量 Q_H ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	实际冲出量 Q_{H1} ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	Q_{H1} / Q_H
1	2008.9.24	20%	13.90	90	6.5
2	2010.7.31	20%	13.90	30	2.2
3	2010.8.13	2%	37.4	450	12.0
4	2010.8.19	10%	20.81	30	1.4
5	2010.9.18	20%	13.90	17.6	1.3



泥石流启动的水槽试验



堵溃效应 阵发性



BREACH 模型

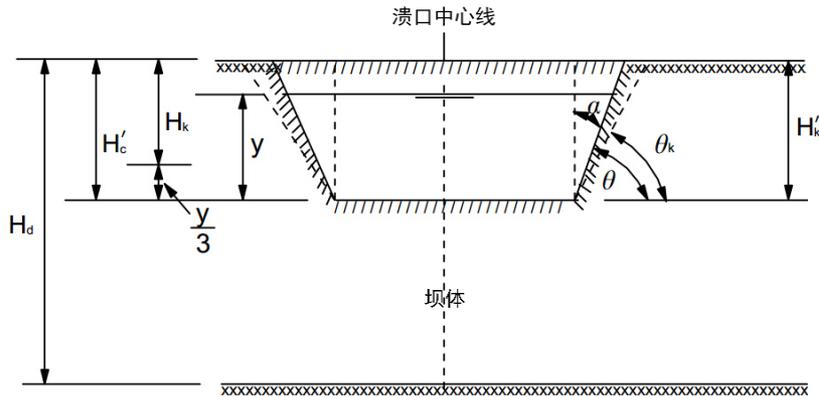
● 初始溃口设为矩形，溃口宽度 B_0 ：

$$B_0 = B_r y$$

● 坝体溃口冲蚀量：

$$Q_s = 3.64 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} P \frac{D^{2/3}}{n} S^{1.1} (DS - \Omega)$$

● 溃口两侧边坡的间歇性失稳坍塌，溃口发展为梯形。



$$H_k = \frac{4c \cos \varphi \sin \theta_{k-1}}{\gamma [1 - \cos(\theta_{k-1} - \varphi)]} \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

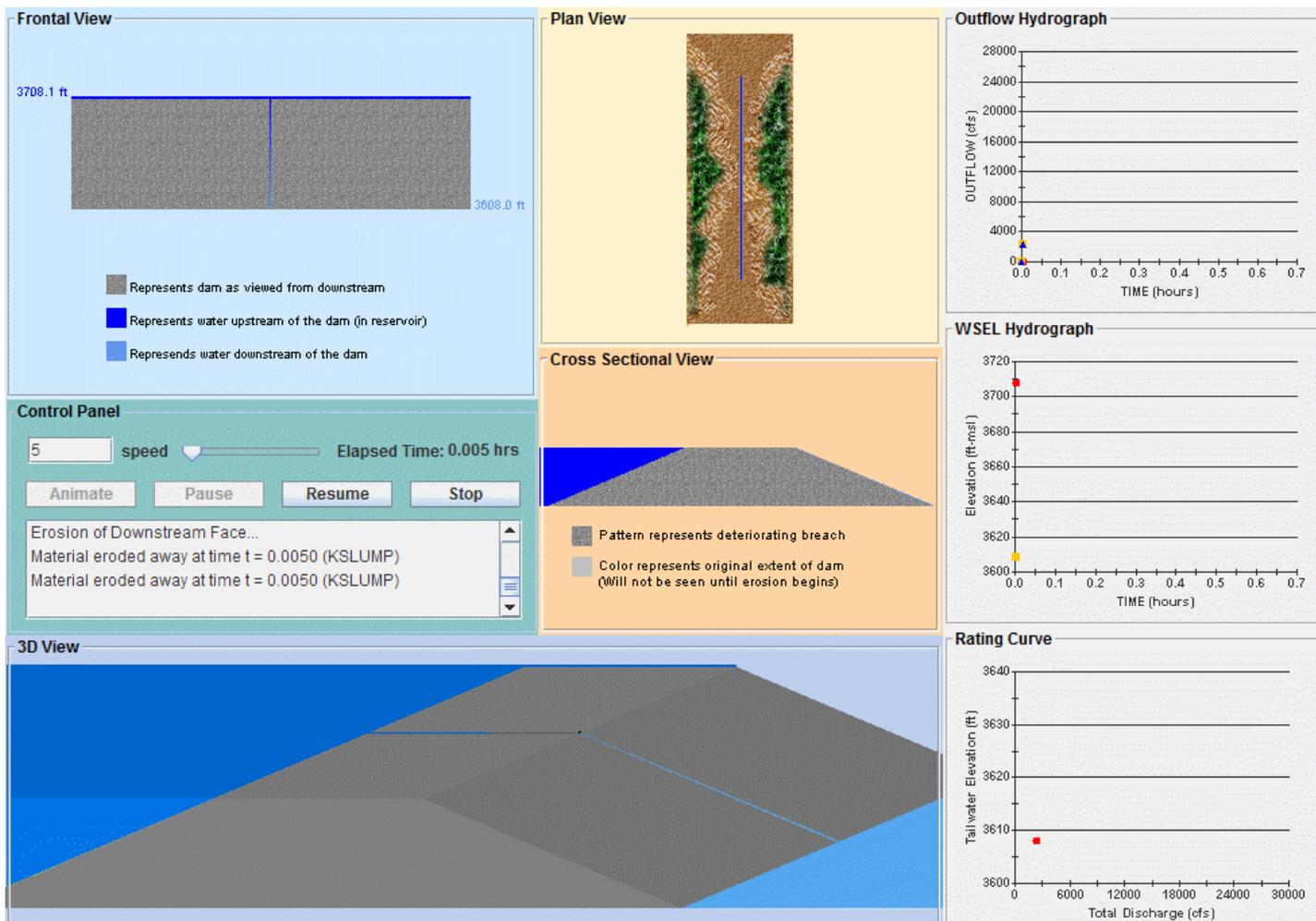
● 溃口流量：

➤ 漫顶溃决：宽顶堰流公式

$$Q_b = C_v k_s \left[3.1 b_i (h - h_b)^{1.5} + 2.45 z (h - h_b)^{2.5} \right]$$

➤ 管涌溃决：应用孔流方程

$$Q_b = 4.8 A_p (h - \bar{h})^{0.5}$$



BREACH模型数值模拟应用广泛：著名的台湾小林村滑坡坝溃决模拟（Li et al, 2011）、汶川震区唐家山堰塞坝溃决模拟（Fan et al., 2012）等，Jakob（2013）在加拿大Mosquito流域，利用BREACH模型模拟得到，不同频率规模泥石流流条件下，沟道堰塞坝溃决的流量过程线。



四川映秀红椿沟泥石流

模型验证—红椿沟泥石流（唐川）

溃决放大效应对沟床侵蚀机制的反馈作用

➤ 沟床沿程侵蚀+沟道堰塞体溃决

固体物质量
(万方)

29.9



34.7

4.9



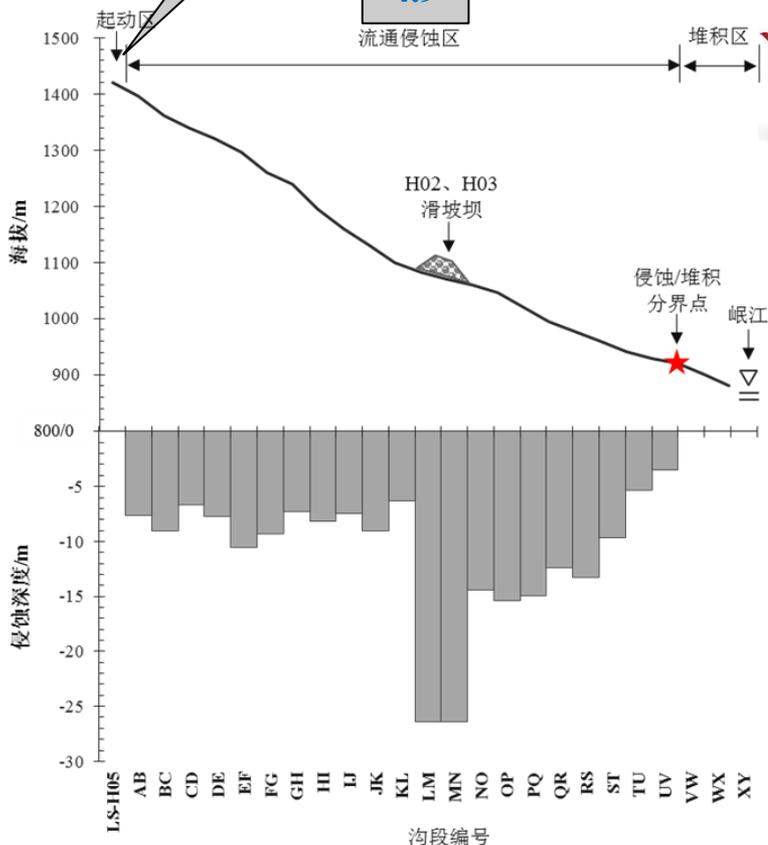
69.5



71.1

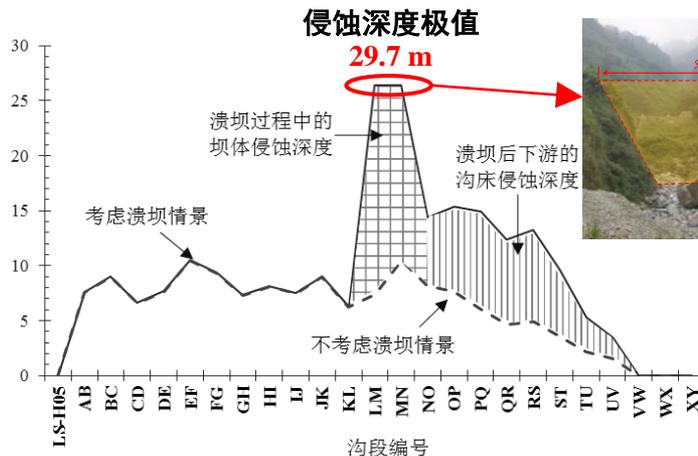
流通侵蚀区

堆积区



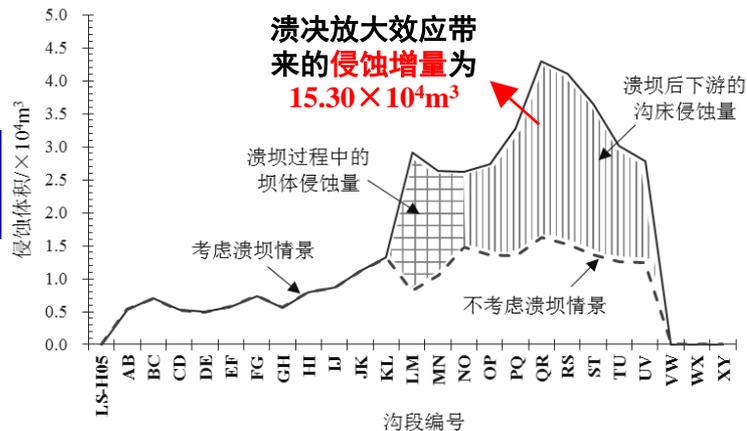
侵蚀深度

侵蚀深度/m



侵蚀方量

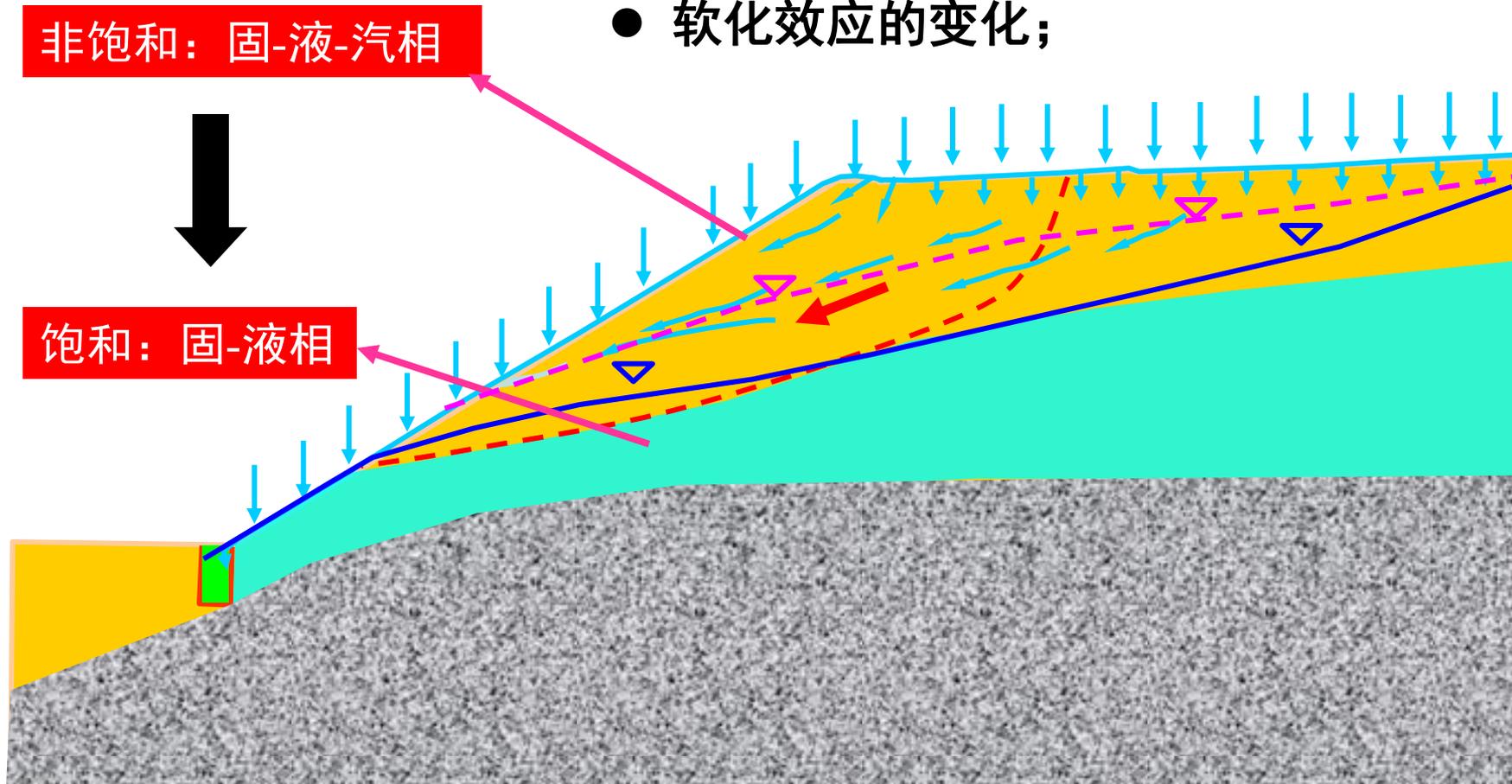
侵蚀体积/ $\times 10^4 m^3$



- 计算所得：红椿沟8·14泥石流总量为 $111.2 \times 10^4 m^3$ ，其中固体物质量为 $69.5 \times 10^4 m^3$ ，其体积浓度 C_v 为 0.63。

2.2 地表水入渗型致灾模式

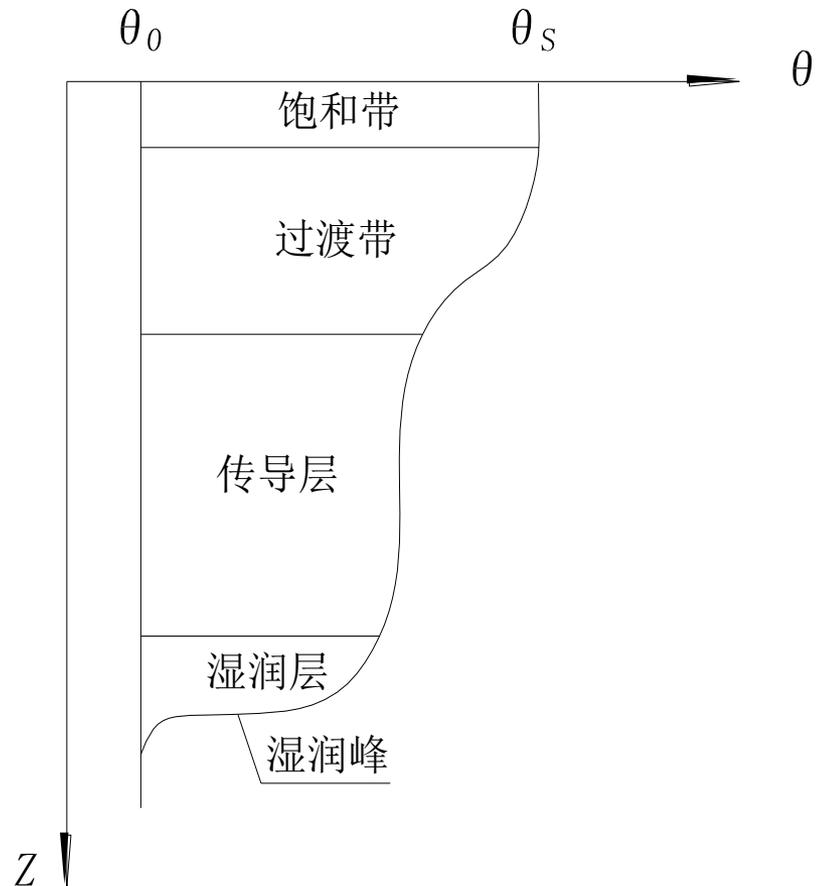
- 基质吸力变化；
- 地下水位变化(土体重度、受力等)；
- 软化效应的变化；



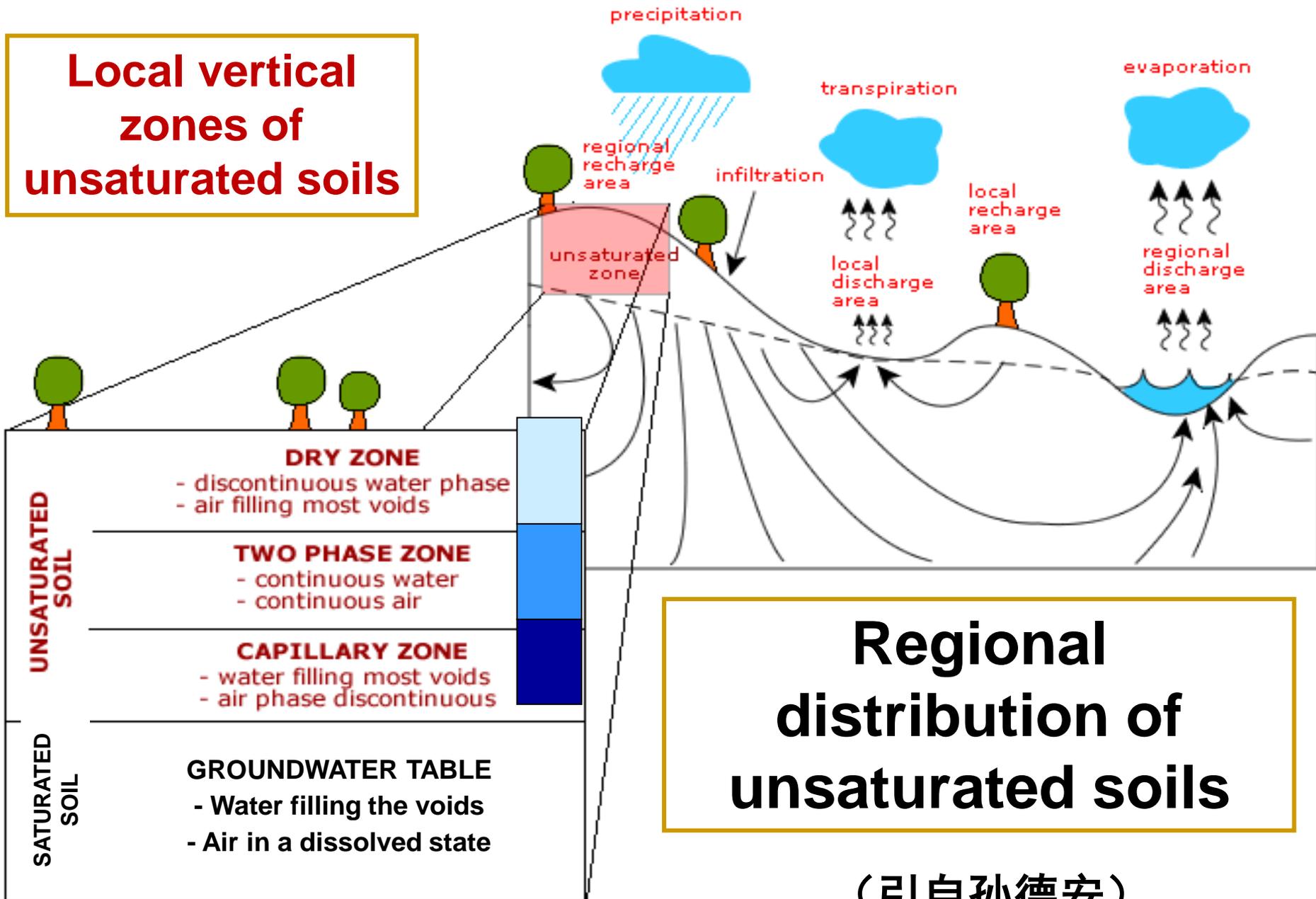
2.2 地表水入渗型致灾模式

• 边坡降雨入渗过程

- 雨水渗入边坡到达潜水面经历了一个非饱和—饱和的渗流过程。
 - 表层有一薄层为**饱和带**,
 - 以下是含水率变化较大的**过渡带**,
 - 其下是含水率分布较均匀的**传导层**,
 - 以下是湿润程度随深度减小的**湿润层**, 该层湿度梯度越向下越陡, 直到**湿润锋**。
- 随着入渗时间延续, 传导层会不断向深层发展, 湿润层和湿润锋会下移, 含水率分布曲线逐渐变平缓。



Local vertical zones of unsaturated soils



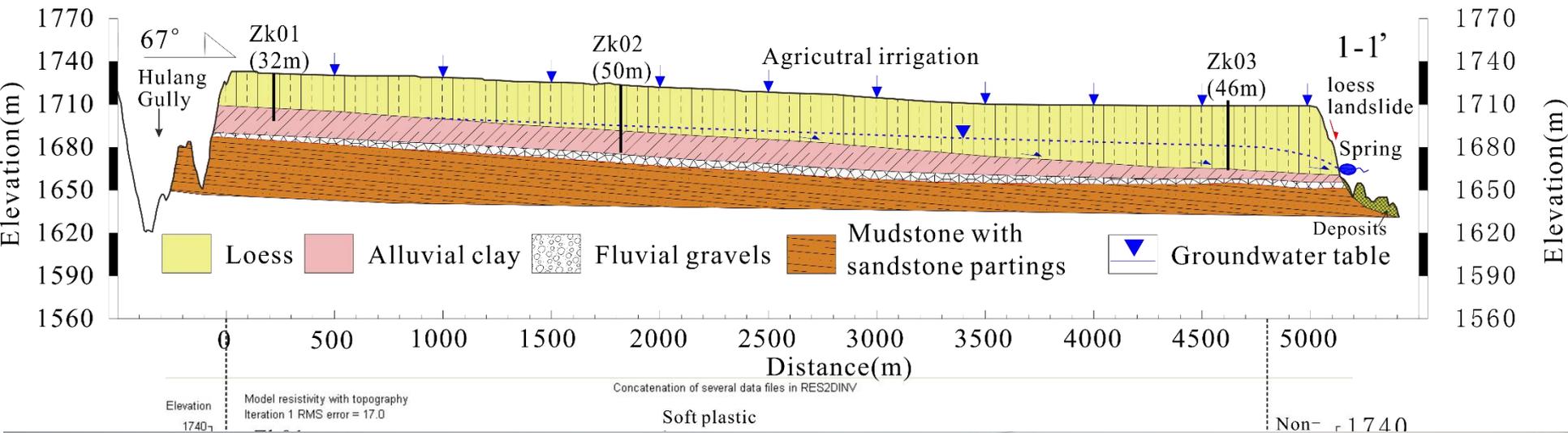
Regional distribution of unsaturated soils

(引自孙德安)



甘肃黑方台





自1968年，黑方台台塬上开始大面积灌溉，至今已有近50年的灌溉史，水位最大增高已达到20m，平均每年水位上升0.27m/a。（张茂省，孙萍萍，2012）

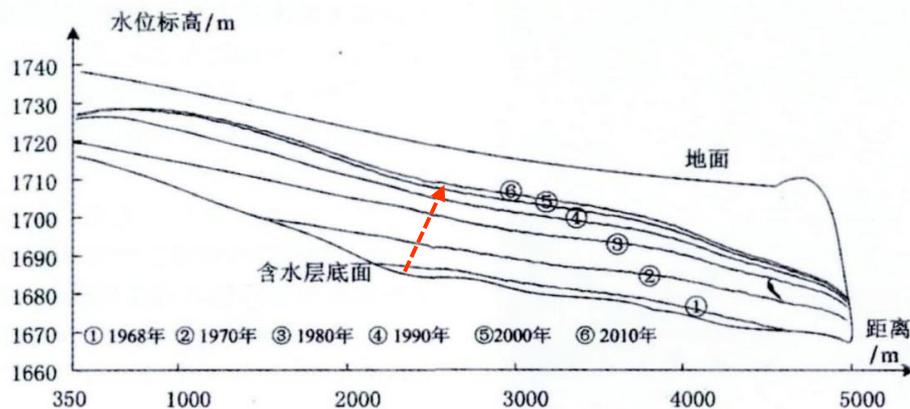


图4 典型剖面地下水位演化对比

黑方台典型剖面地下水位变化对比（张茂省）

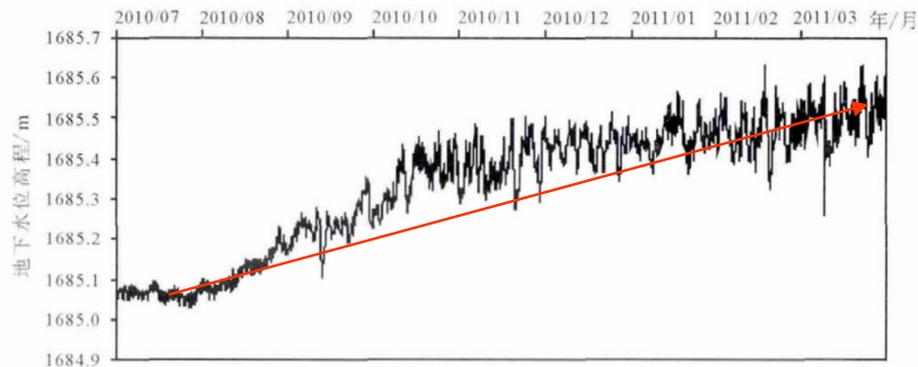
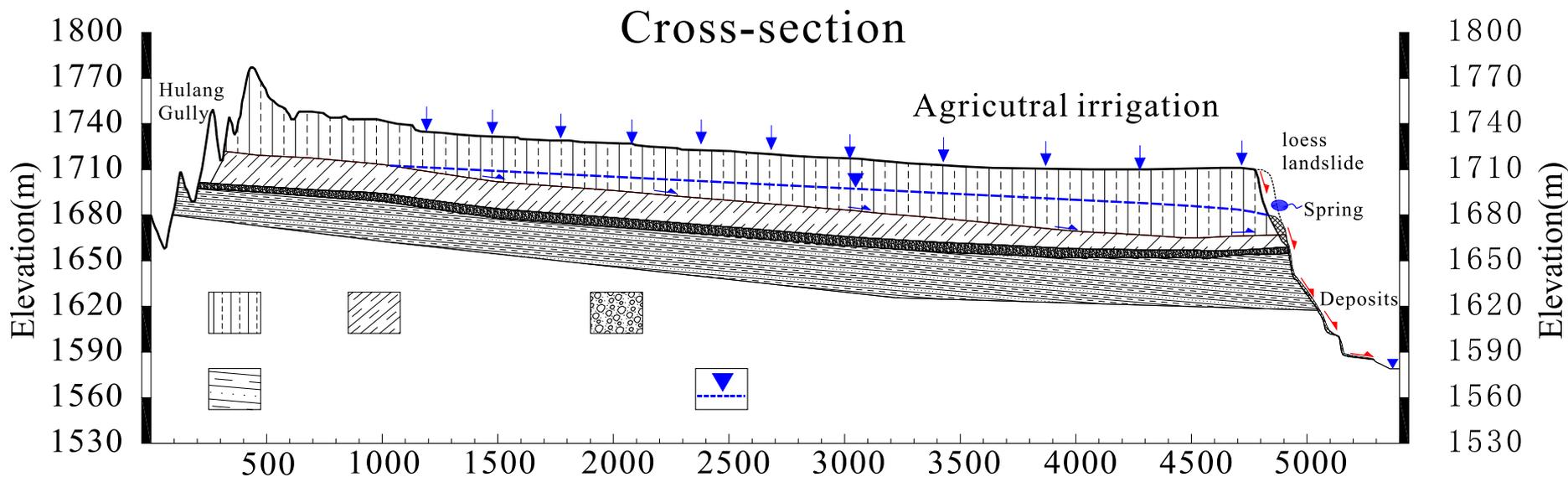


图1 黑台塬面地下水位动态监测曲线

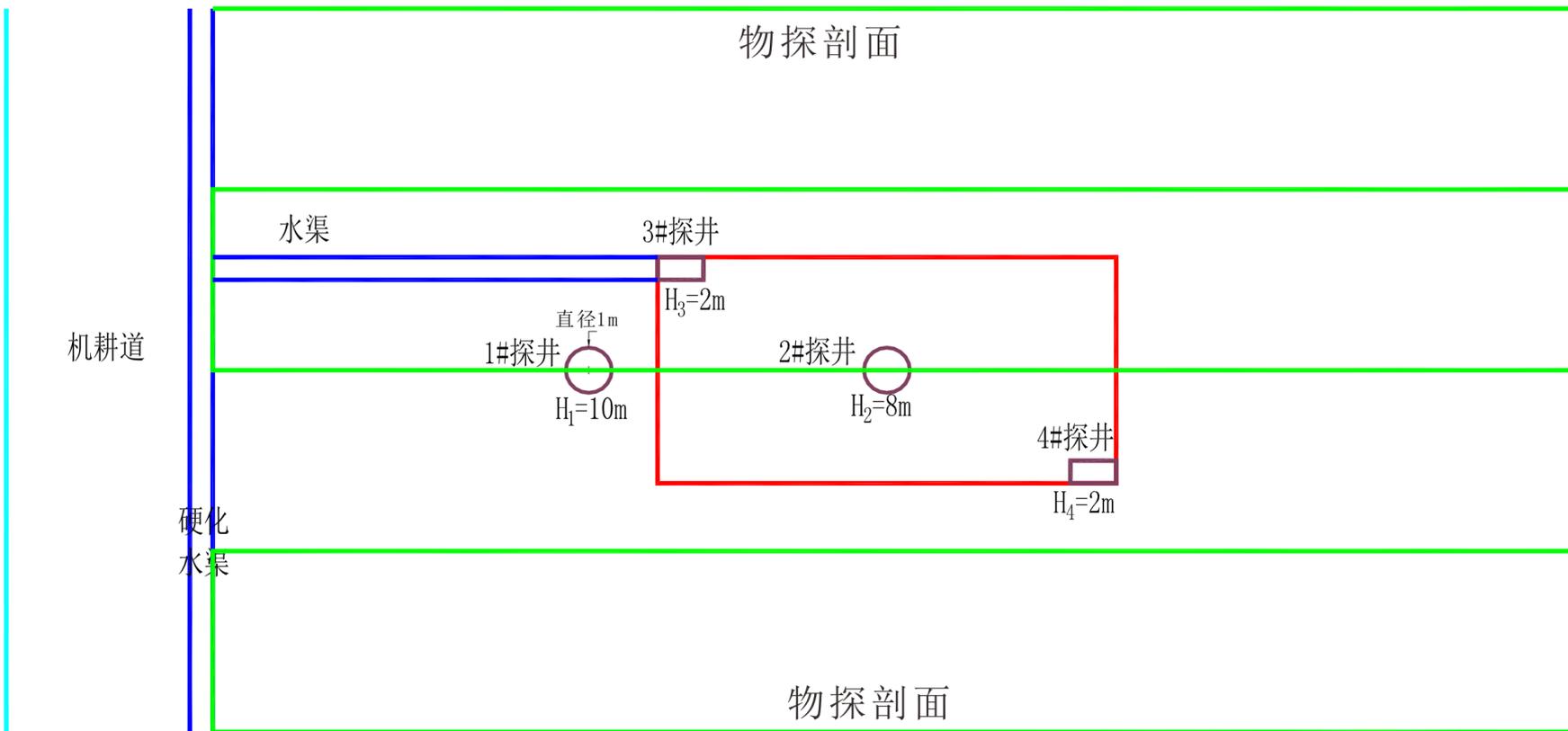
黑方台地下水位监测曲线（贾俊）



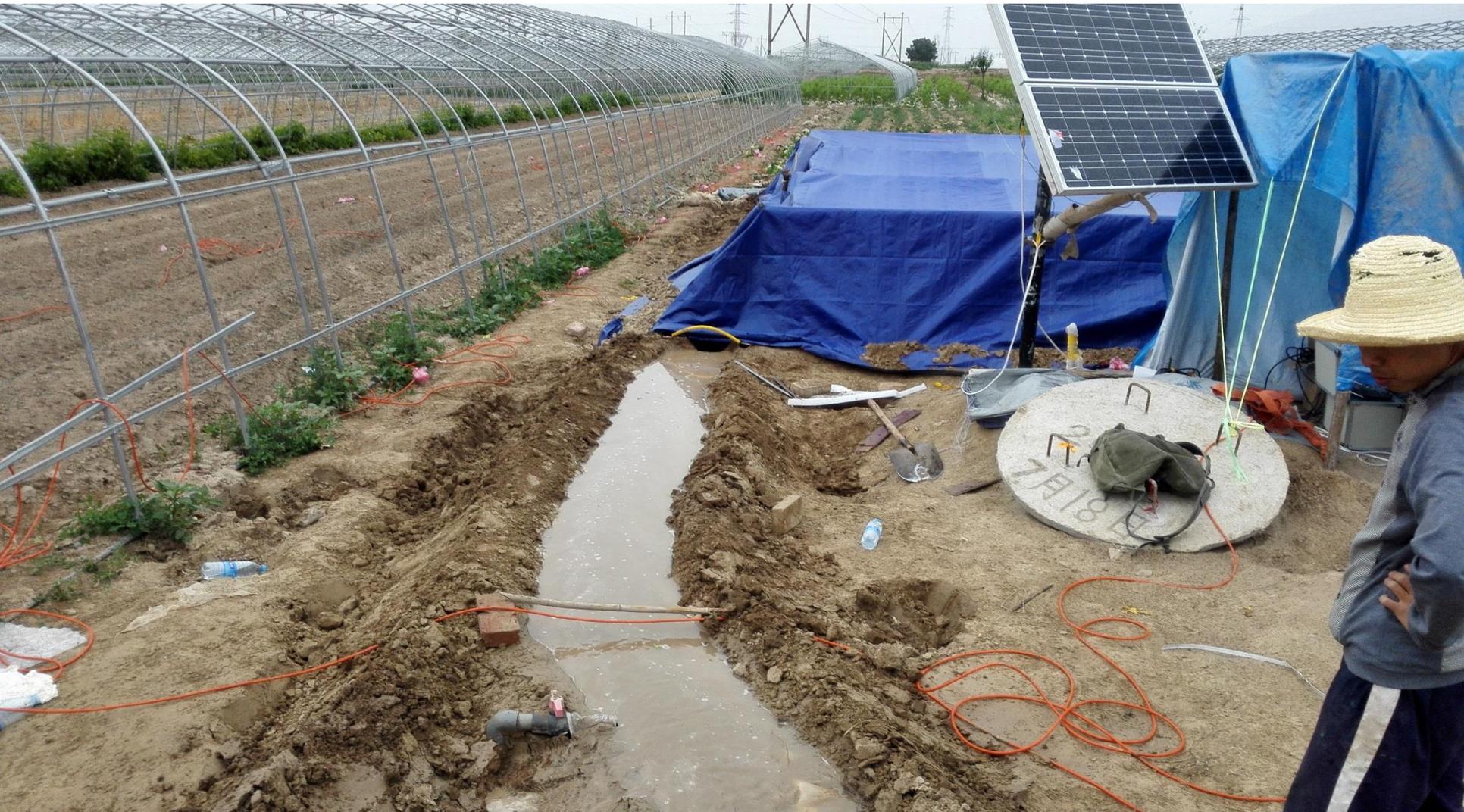
2.2 地表水入渗型致灾模式

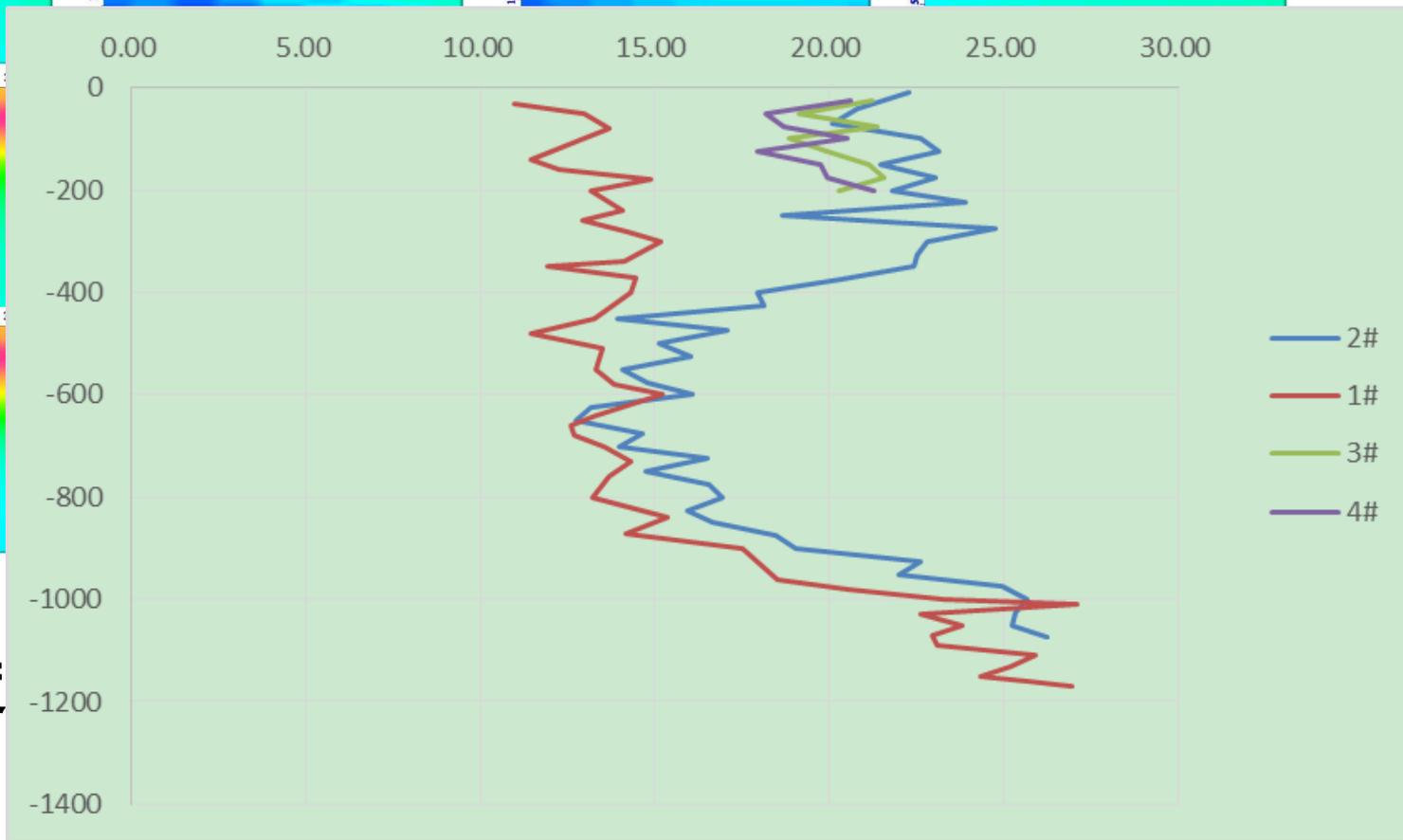
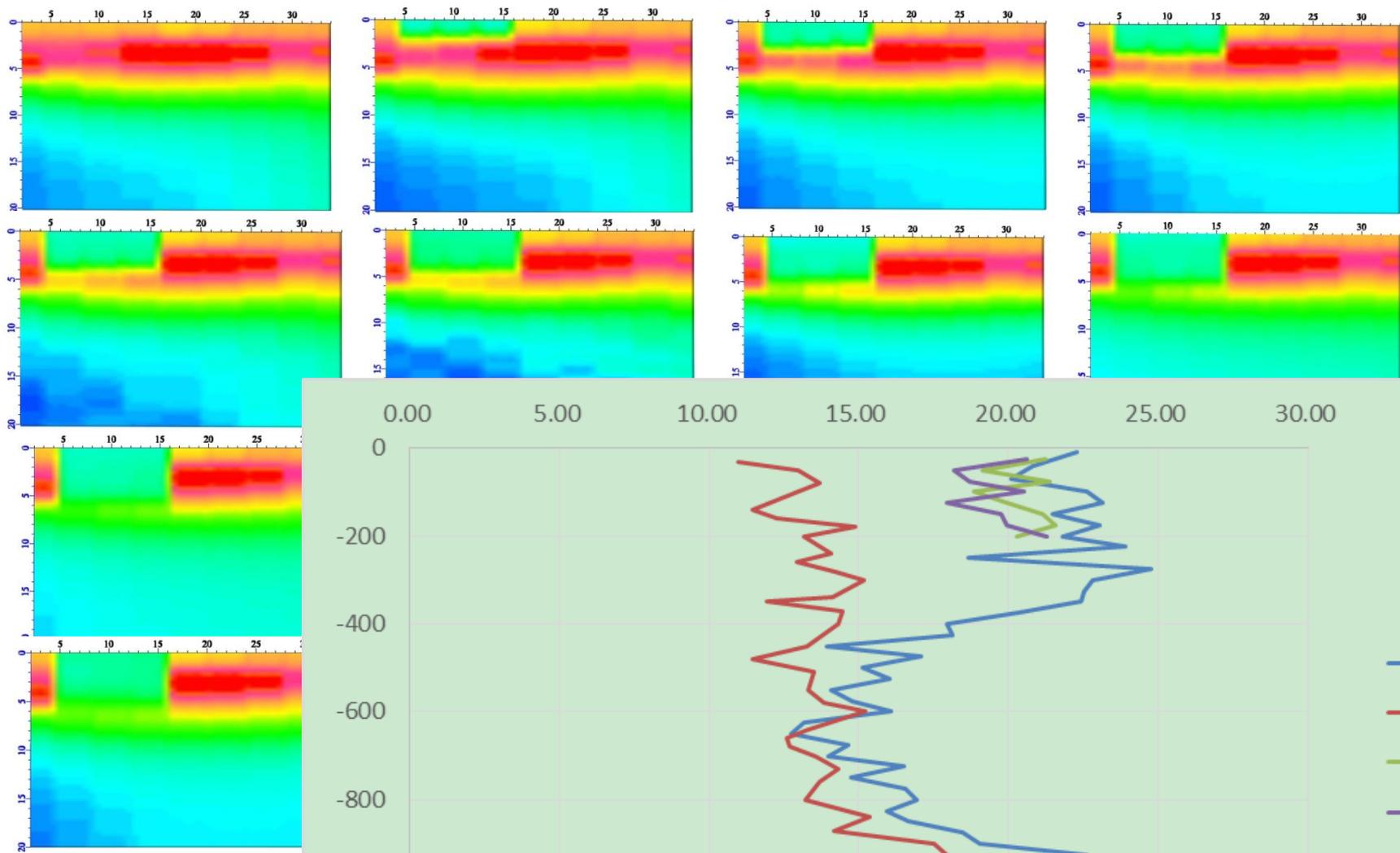


2.2 地表水入渗型致灾模式

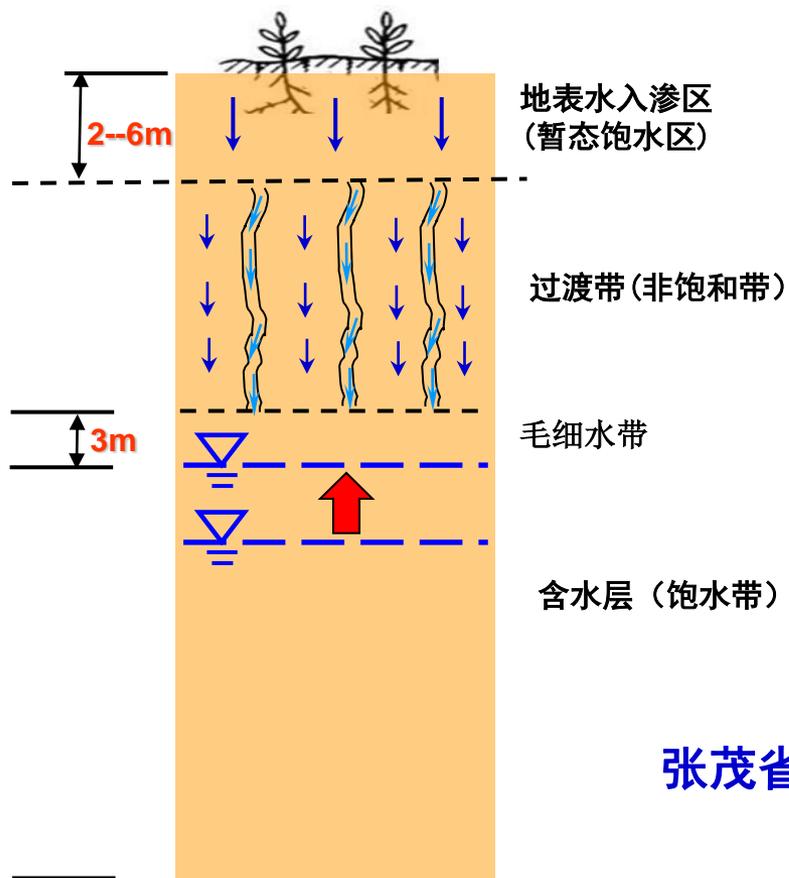
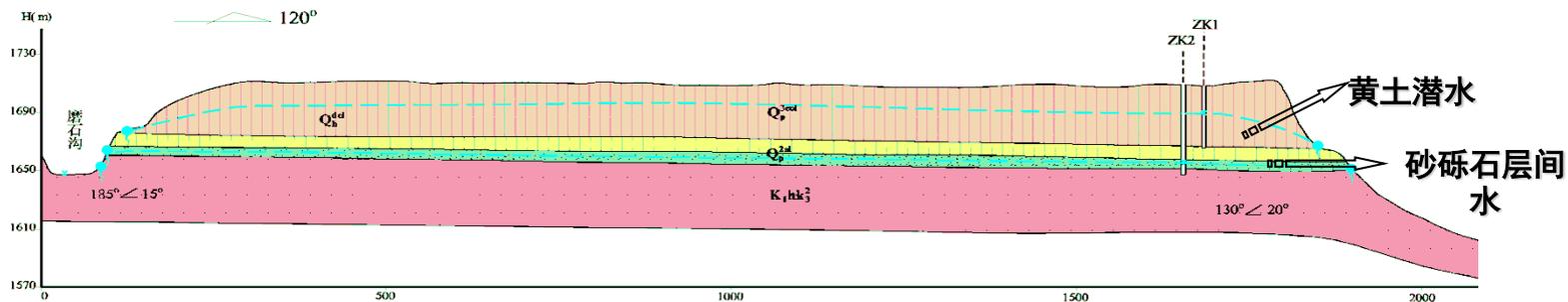


2.2 地表水入渗型致灾模式





饱和入渗深度



?

张茂省, 孙萍萍

水流动 - 广义达西定律

饱和土的达西定律： $v = -k \frac{\partial \Psi}{\partial x}$

非饱和达西定律： $q = v = -k(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial x}$

q —非饱和土中水流通量，即单位时间内通过单位截面积的水量；

θ ——土壤体积含水量。

v —平均流速；

K —导水率，与含水率密切相关；

ψ —土水势梯度，也就是水头

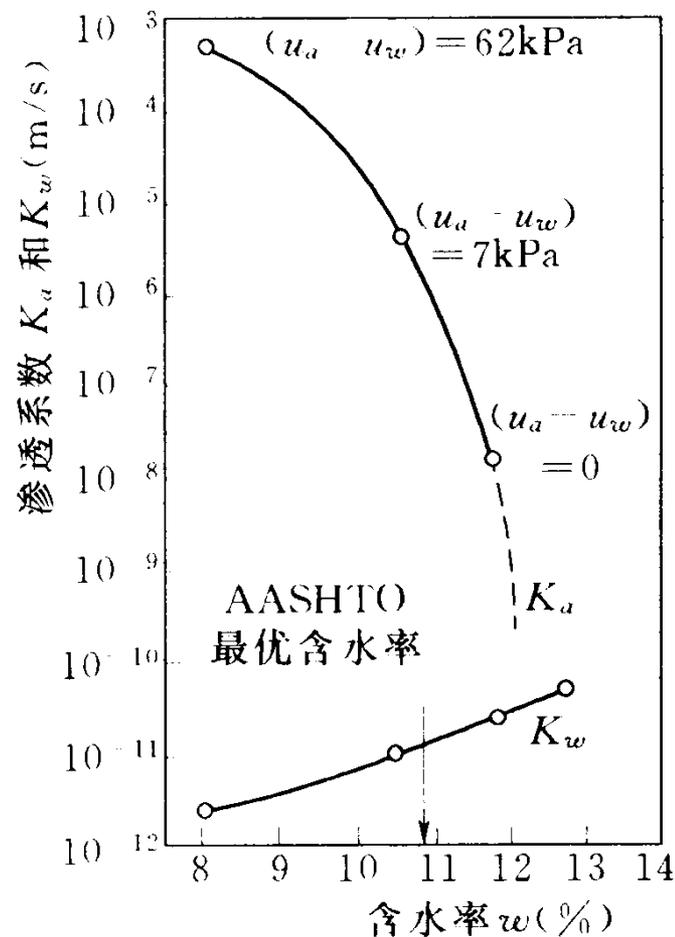
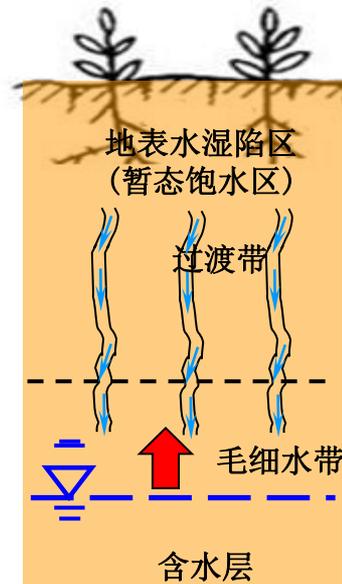
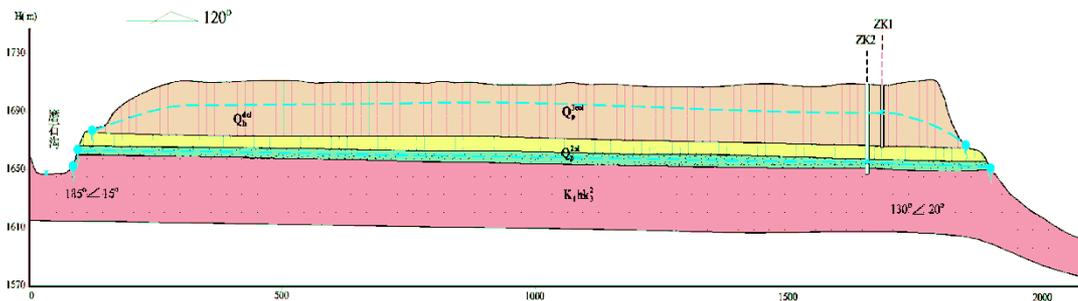
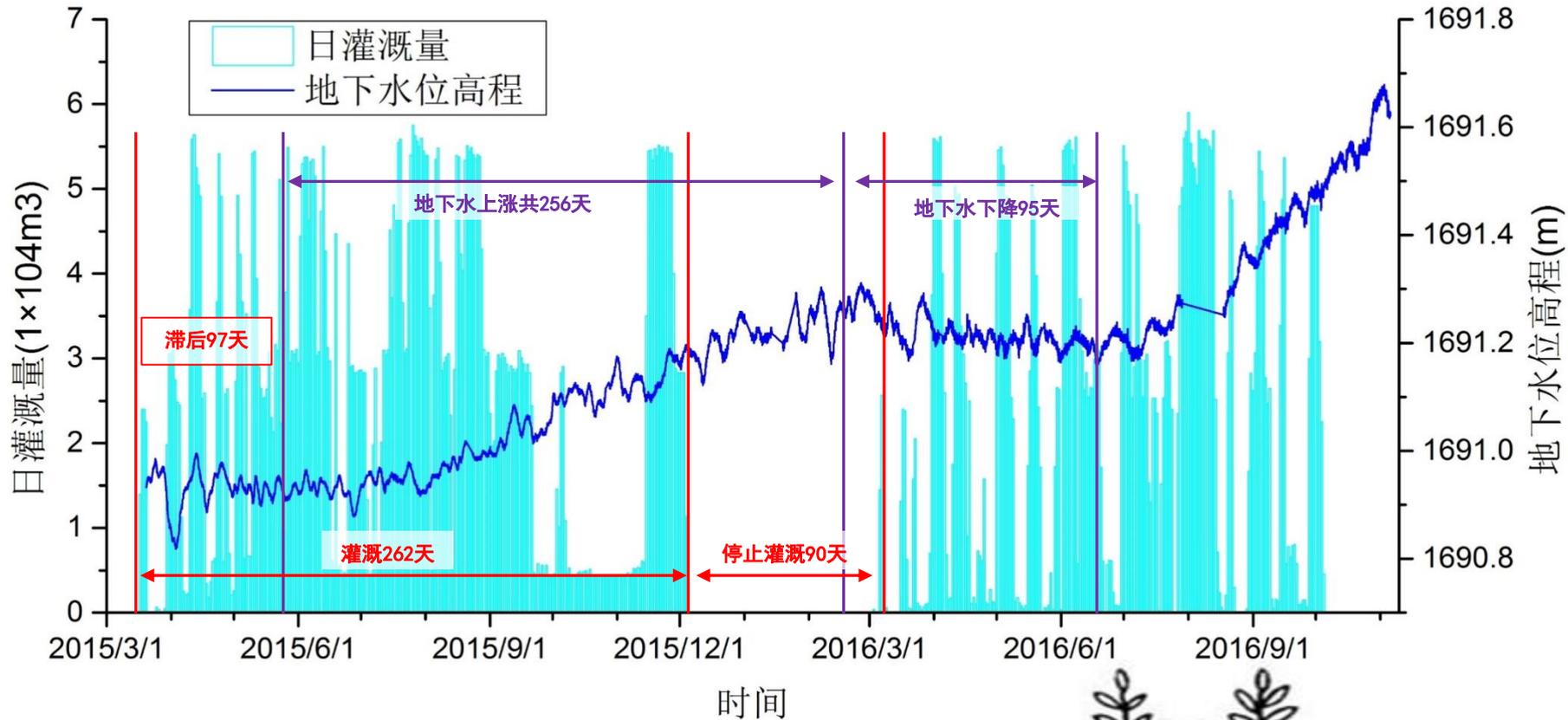
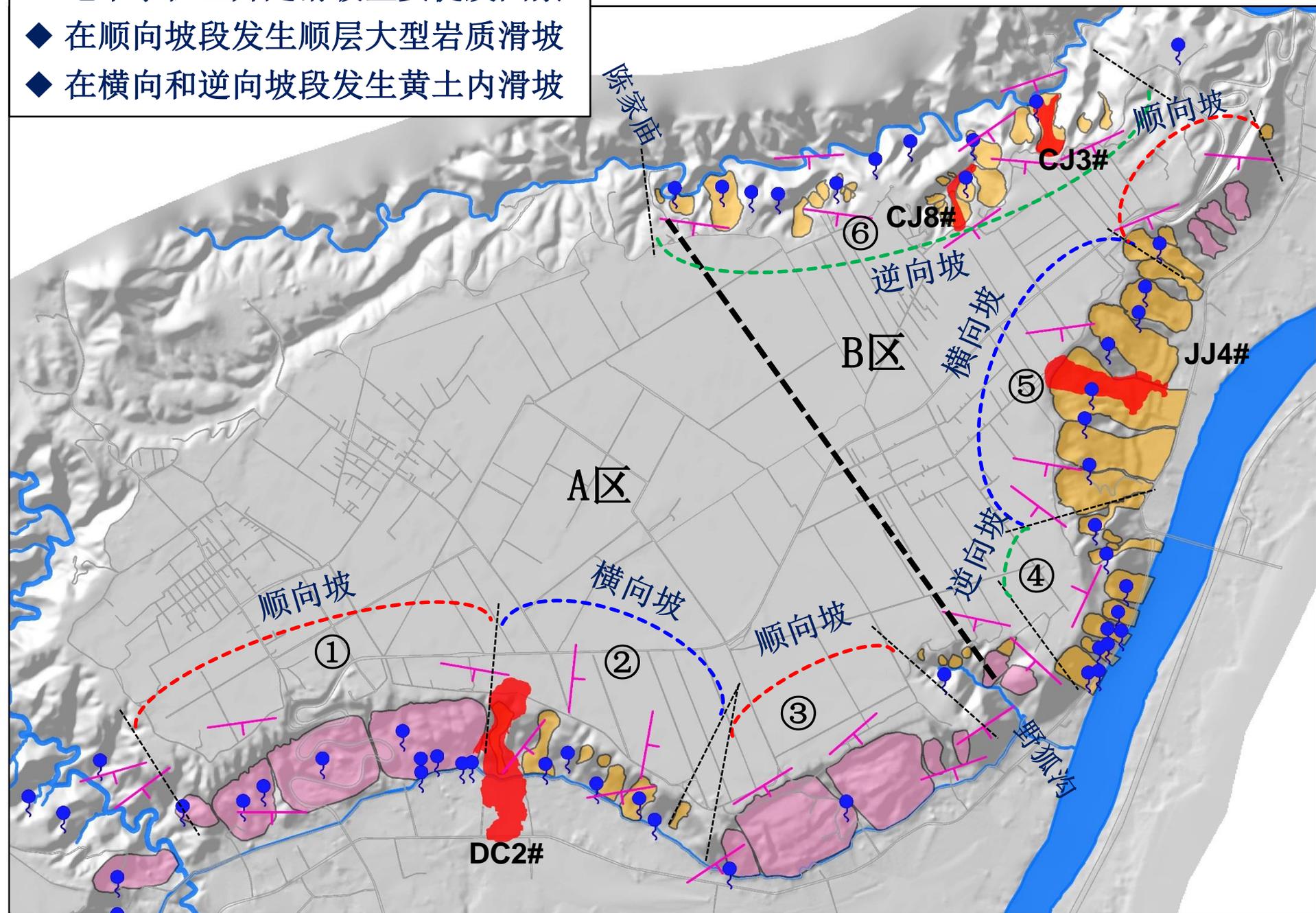


图 4-33 Westwater 土的水渗透系数和气渗透系数试验结果



- ◆ 地下水位上升是滑坡主要促发因素
- ◆ 在顺向坡段发生顺层大型岩质滑坡
- ◆ 在横向和逆向坡段发生黄土内滑坡





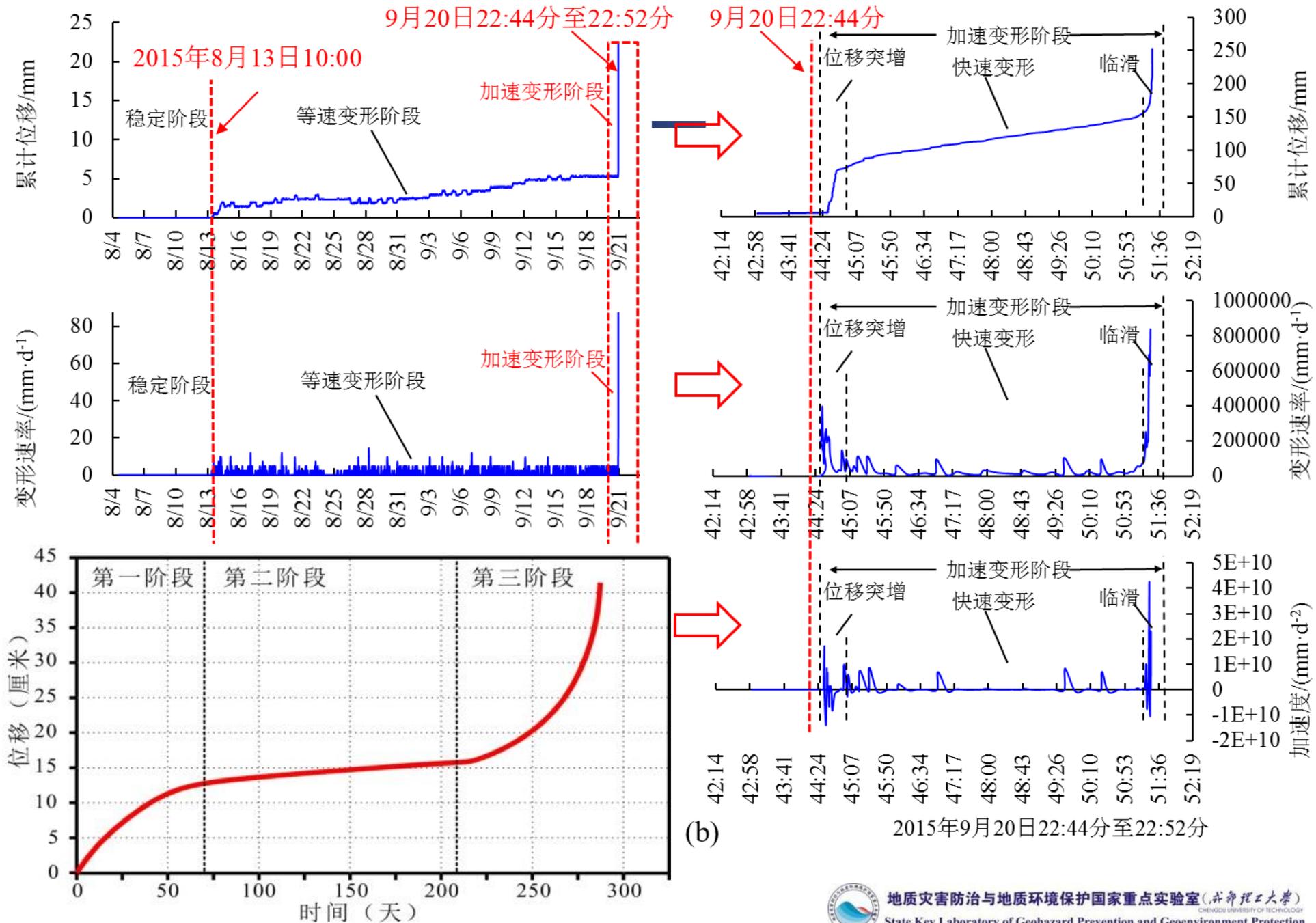
特点：

- (1) 启动具有突发性**
- (2) 运动具有流动性**
- (3) 滑源区内凹明显**

特殊的启动机制！？

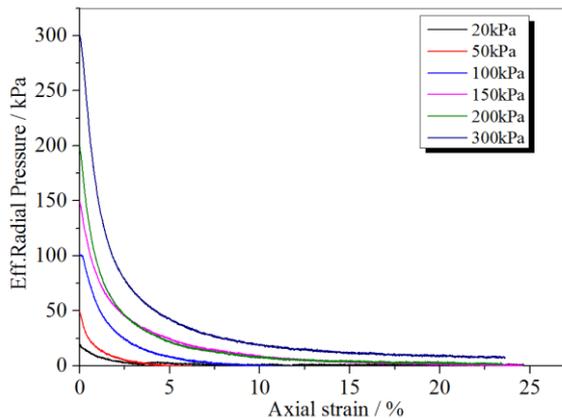
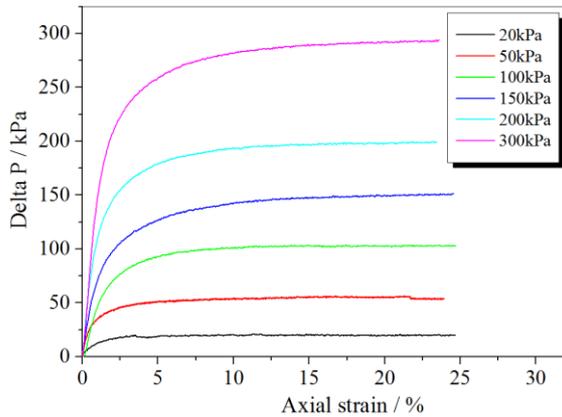
2.3 底部饱水液化诱发滑坡机理





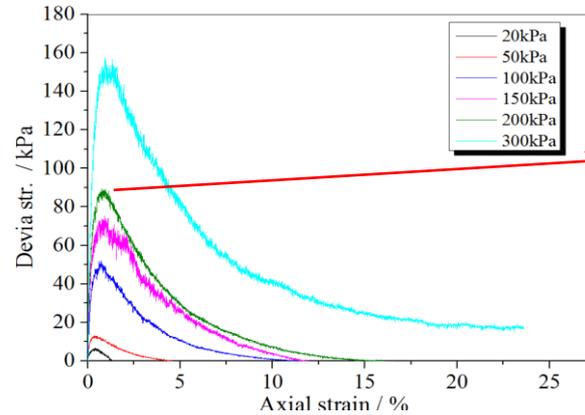
2.3 底部饱水液化诱发滑坡机理

静态液化： 斜坡变形压缩使饱水带孔隙水压力增加，最终使有效应力减小到0，导致斜坡突发性失稳破坏。

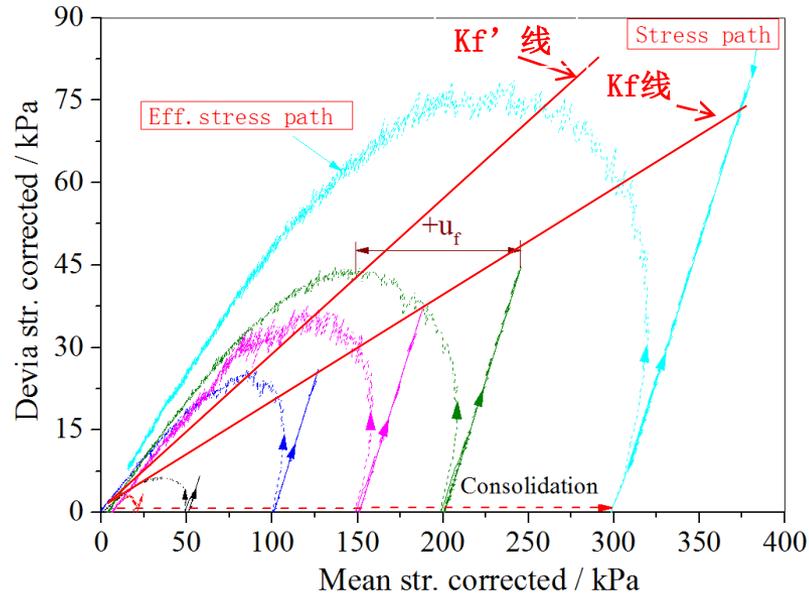


$$\begin{aligned} \mu_f &\rightarrow \sigma_3 \\ \sigma_3' &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

塑性流动，
形成黄土-
泥流



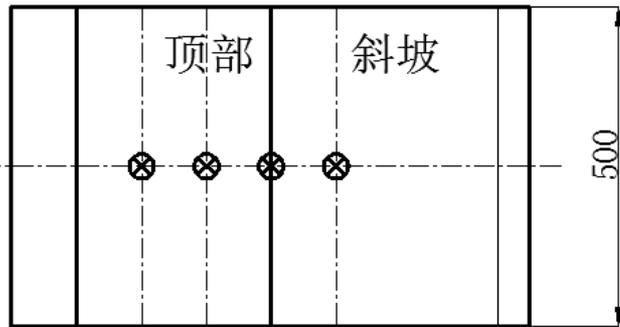
$\epsilon < 2.5\%$ ，达
到峰值，应变
软化。



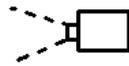
应力路径
近乎于零
有效应力
状态，说
明黄土具
有静态液
化特性。

三轴实验

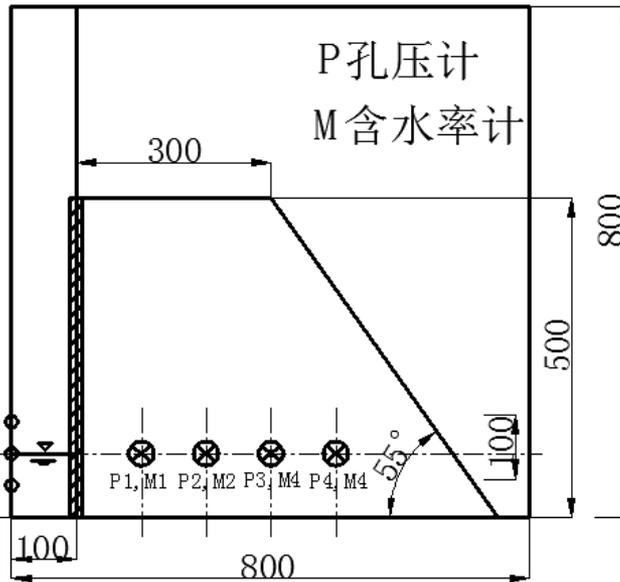
2.3 底部饱水液化诱发滑坡机理



多点位移计

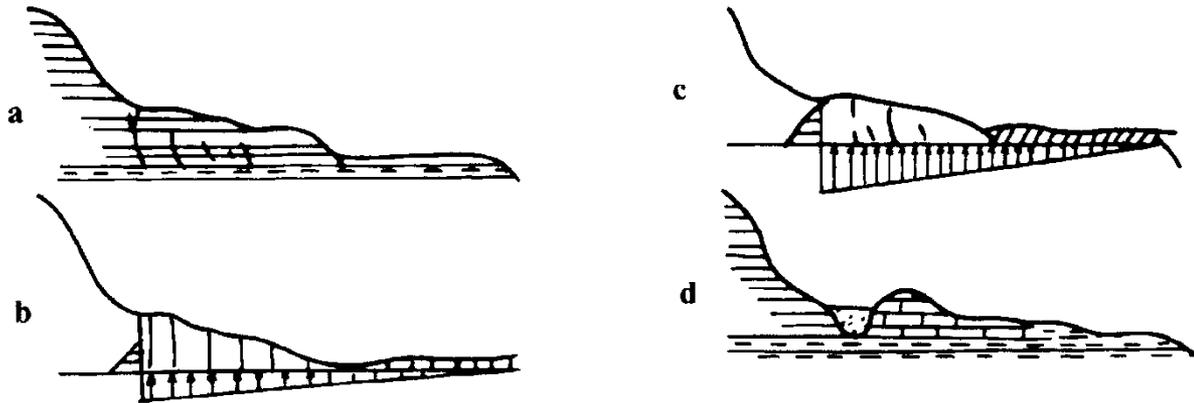
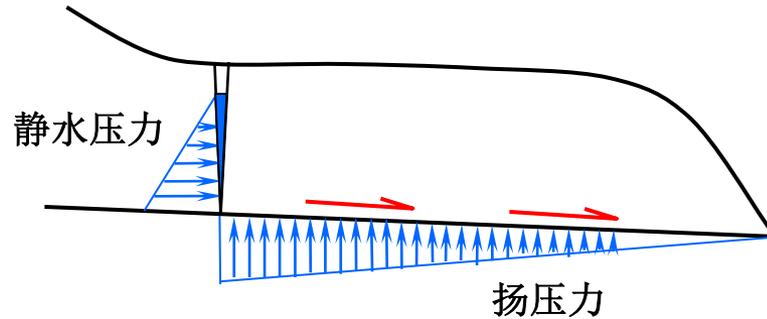


底部饱水软化的
 黄土滑坡模型



传感器布置

2.4 平推和泥化软化诱发滑坡机理



$$h_{cr} = \frac{1}{2 \cos \alpha} \left[L^2 \operatorname{tg}^2 \phi + 8 \frac{W}{\gamma_w} \cos \alpha \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha \right]^{1/2}$$

平推式滑坡概念模型(张倬元、王兰生等)

四川省南江县兴马中学 (2007)



南江县兴马中学



南江县兴马中学



南江县兴马中学

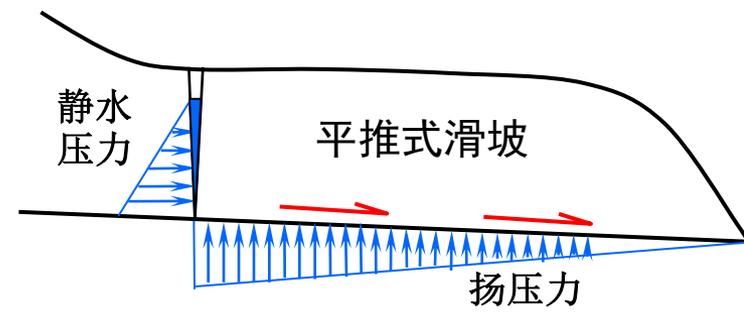
危险地段
注意安全



南江县大河兴马中学



水能否推出滑坡?

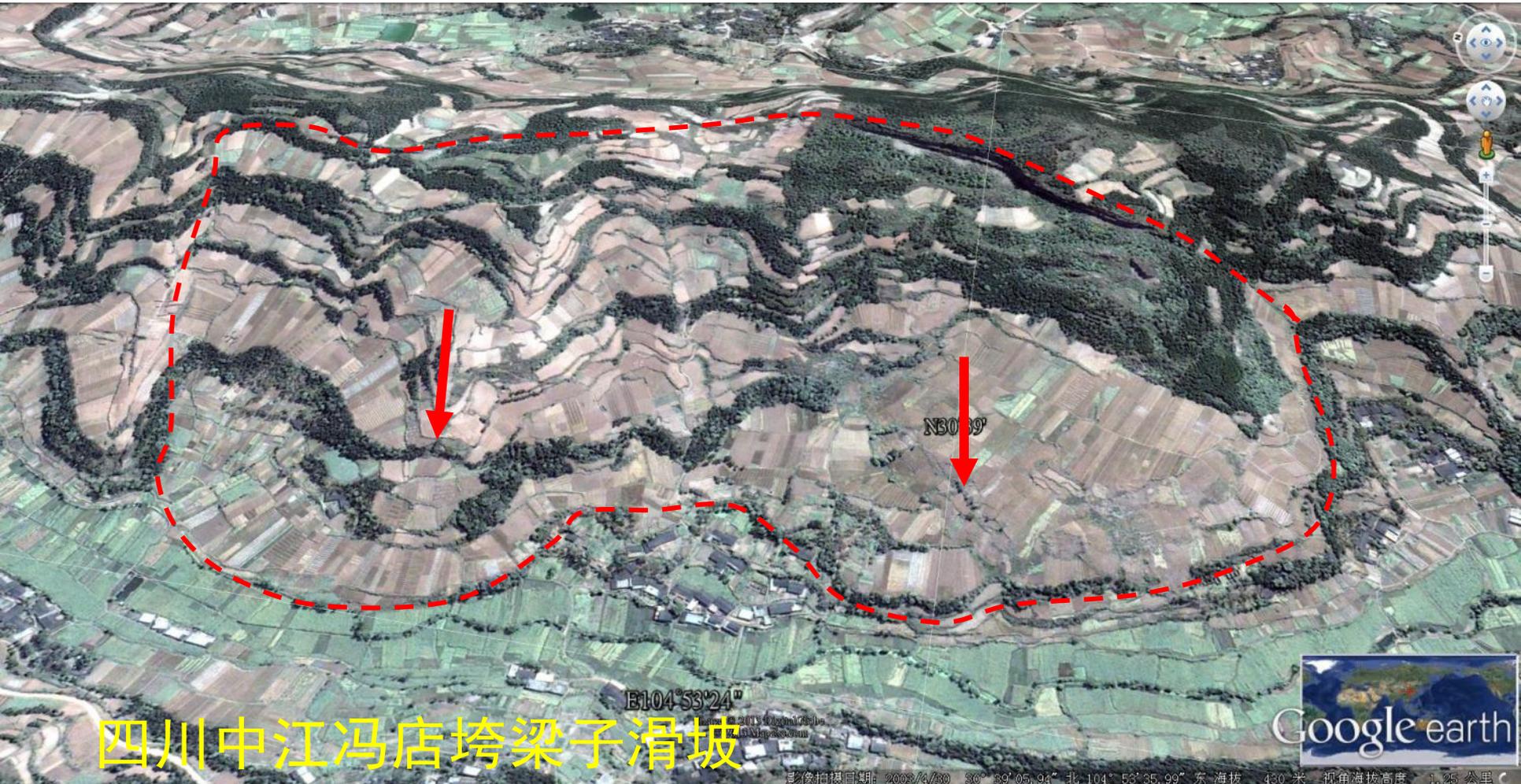


?



2.4 平推和泥化软化诱发滑坡机理

仅平推作用就能启动大型、特大型近水平岩质滑坡吗？





湖北省恩施市新塘滑坡(灰岩)

恩施市新塘滑坡工程地质图



2.4 平推和泥化软化诱发滑坡机理—泥化作用







2.4 平推和泥化软化诱发滑坡机理—软化作用

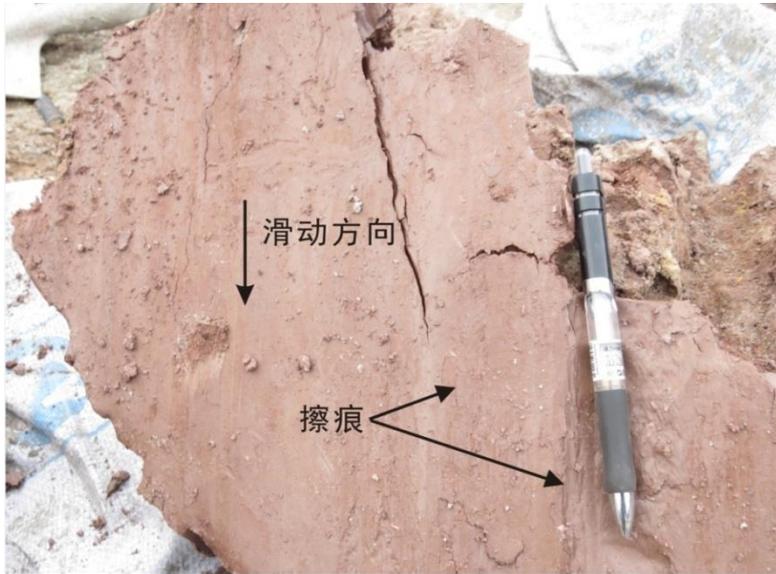


表 1 · 天然滑带土矿物成分含量表

Table 1 · Mineral components and contents of natural slip soil

矿物成分	蒙脱石	伊利石	绿泥石	石英	斜长石
含量(%)	17	22	14	36	11

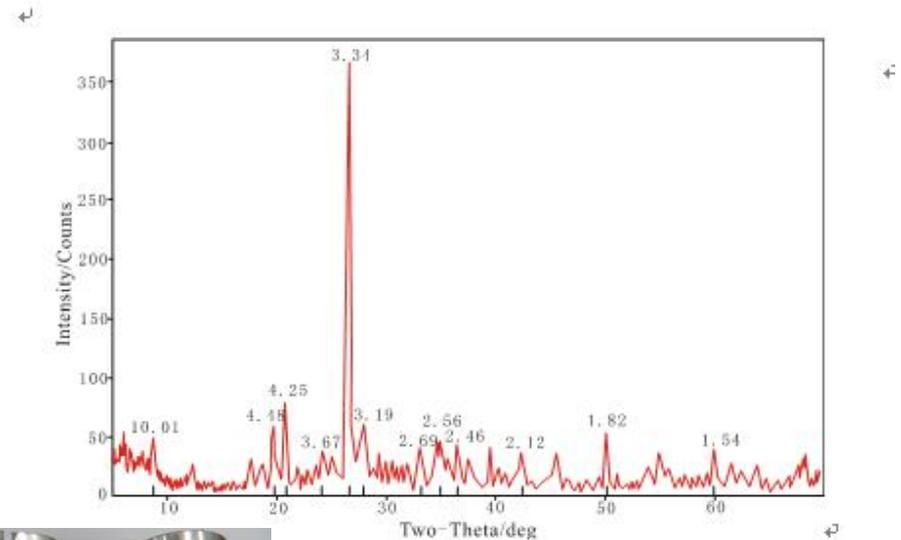
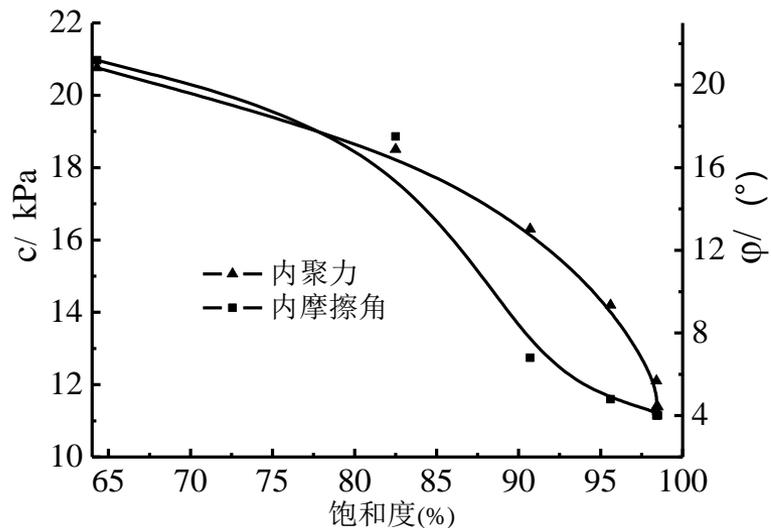
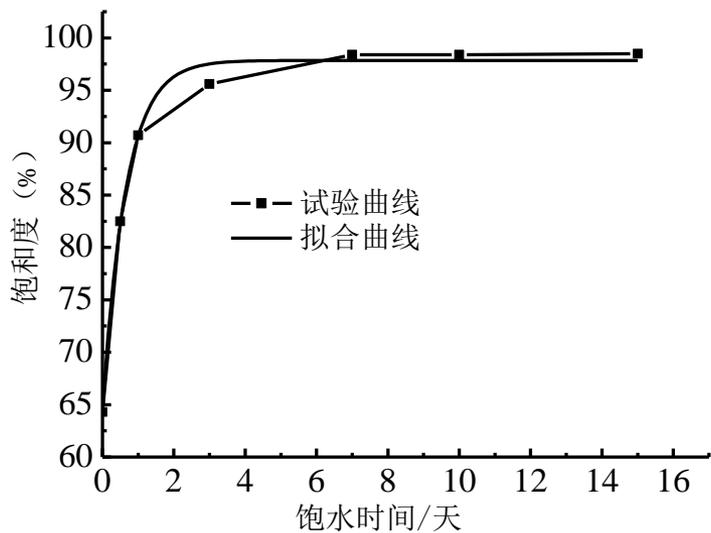
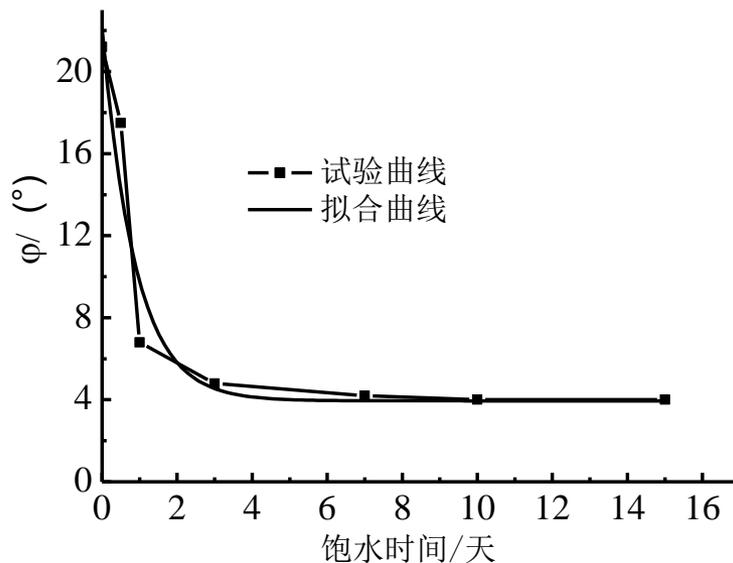
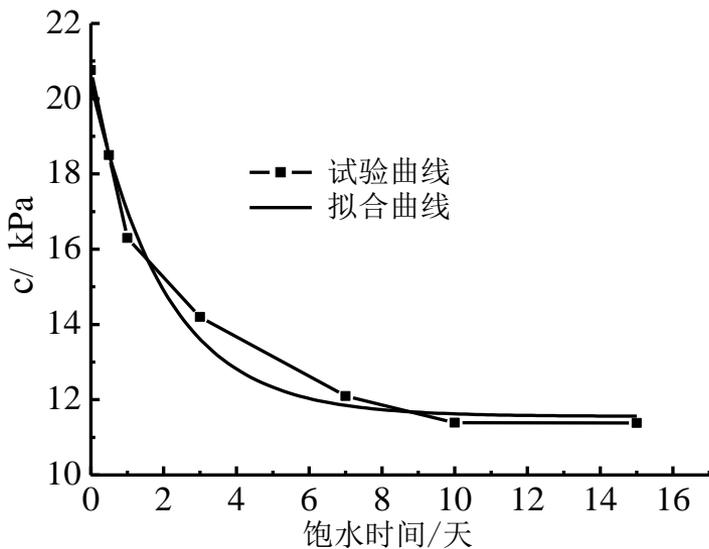


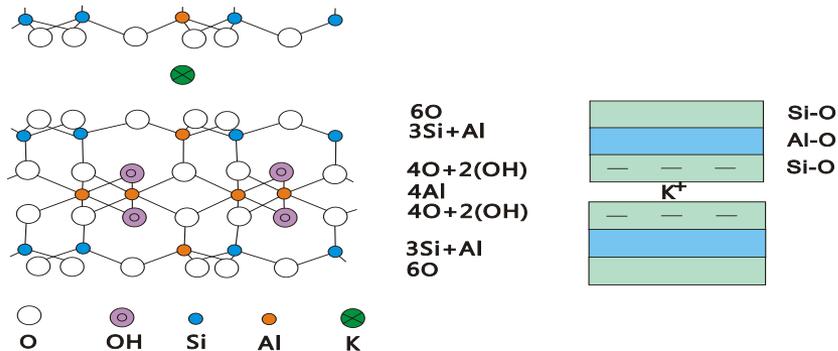
图 2 · X 射线衍射图谱

红层地区泥岩夹层(滑带土)
浸水软化试验

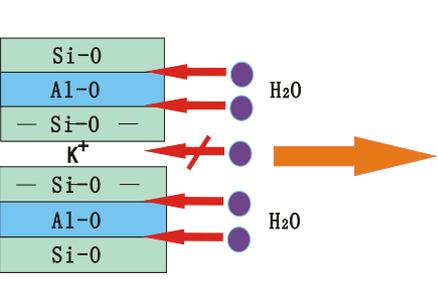


红层地区泥化夹层(滑带土)浸水软化试验
(强度降低50-80%)

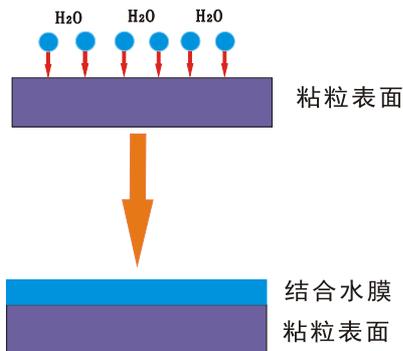
2.4 平推和泥化软化诱发滑坡机理—泥化作用



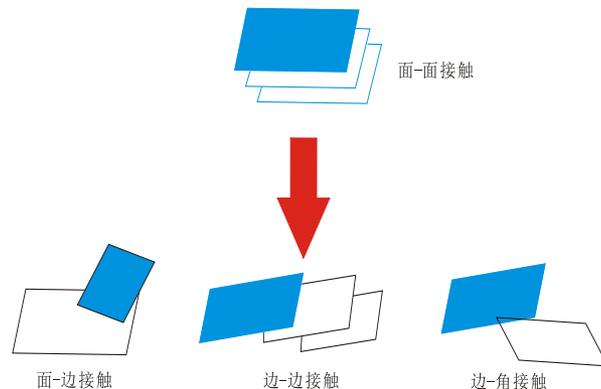
伊利石晶体结构



伊利石水岩作用下的
分子内部膨胀机理



伊利石水岩作用下的
胶结膨胀（水膜化）机理



粘粒水岩作用下
软化解体过程接触方式

红层泥岩遇水软化的内在机理

汇报提纲

- 一、概述
- 二、滑坡启动阶段的流固耦合问题
- 三、滑坡运动堆积阶段的流固耦合问题



3A. 2006 PHILIPPINE LANDSLIDE (GUINSAUGON, LEYTE ISLAND) – 1,125 DEATHS



碎屑化



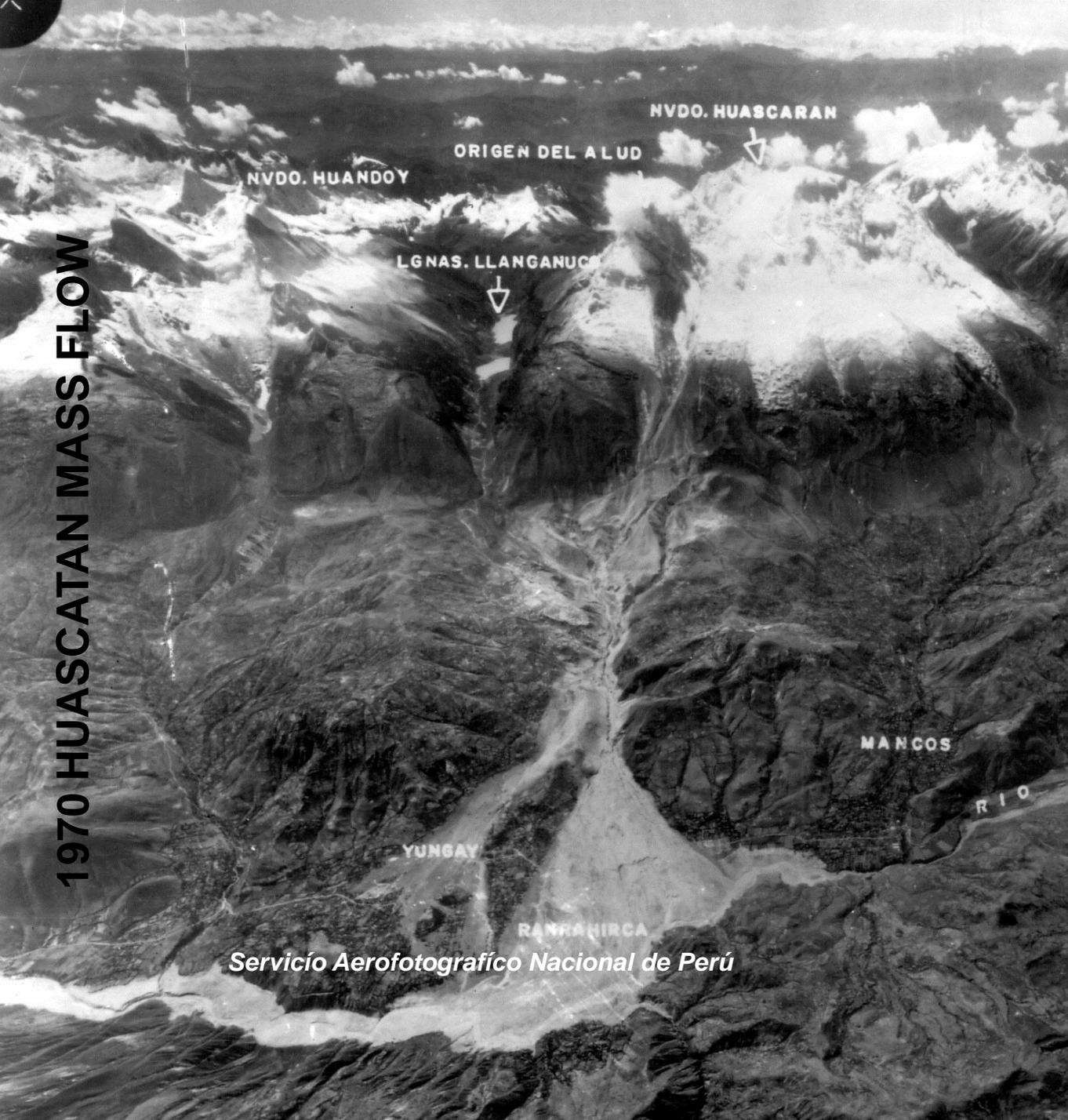
03.14.2006 12:39



流态化

03.14.2006 16:54

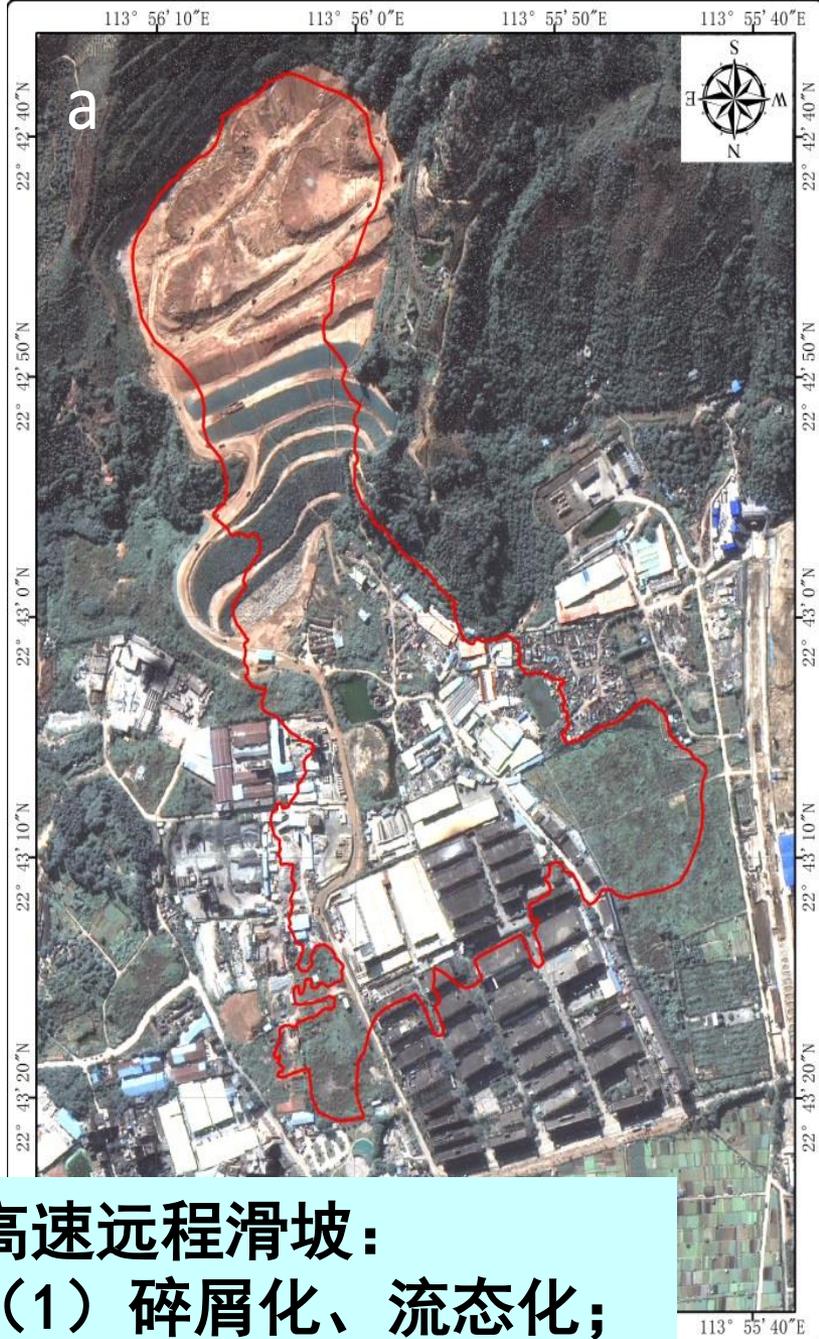
1970 HUASCATAN MASS FLOW



Servicio Aerofotográfico Nacional de Perú

1. Occurred May 31, 1970 at 3:23 pm local time
2. Initiated as a rockfall triggered by M7.7 offshore earthquake at an epicentral distance of 130 km
3. Travelled **16 km** at extremely high velocity to the Rio Santa and then downstream as a distal debris flow that swept down to the sea.
4. Debris split into two lobes one of which buried the town of Yungay
5. Total number of deaths could be as much as 20,000 people (some estimates are much lower)
6. Site of a similar smaller event in 1962 which had buried Ranrahirca (from S.G. Evans)





高速远程滑坡:

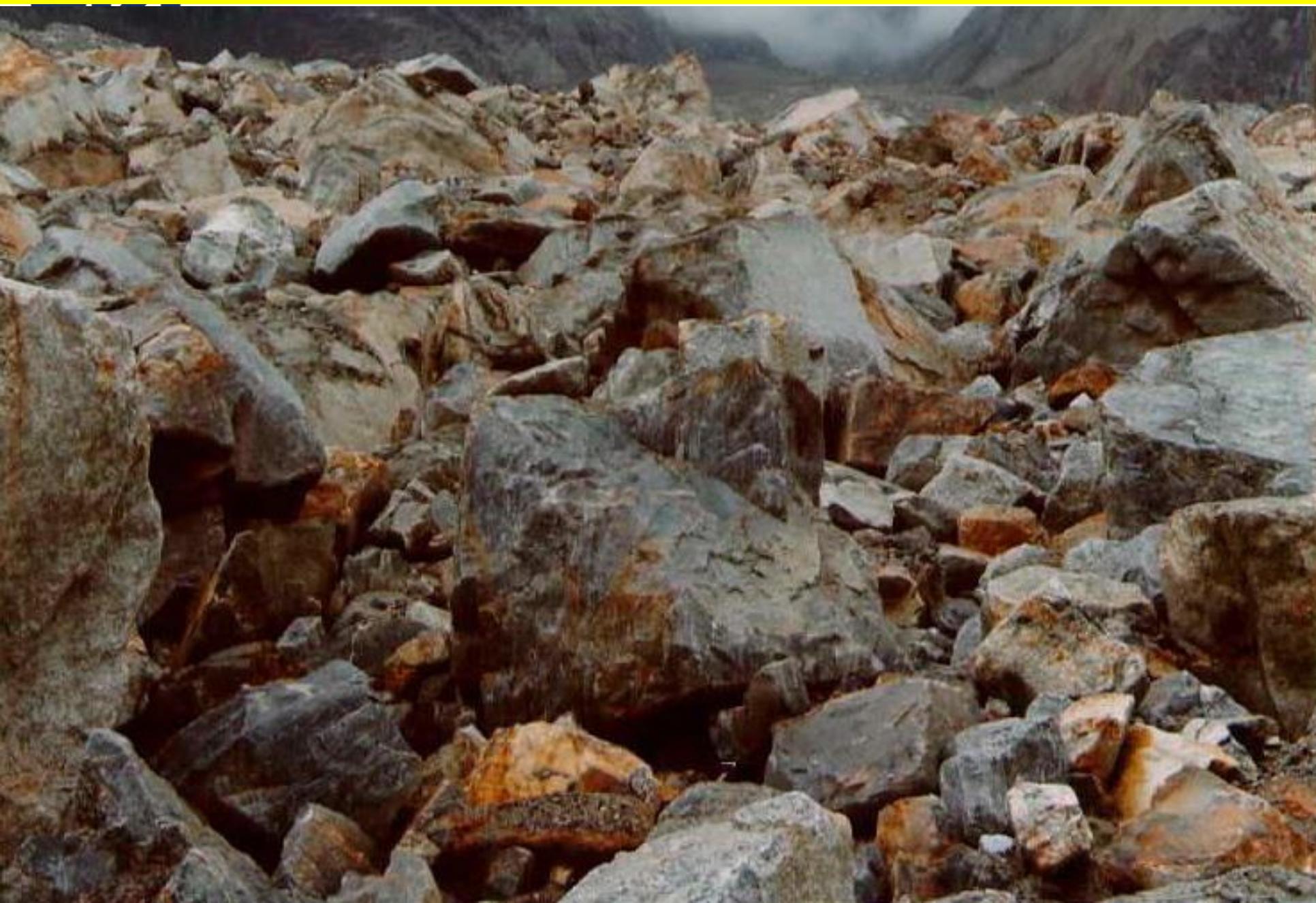
- (1) 碎屑化、流态化;
- (2) 超强的流动性。

2015.12.20 深圳光明新区渣土受纳场滑坡

(I) 块石堆积带



堆积体中的块石堆积



堆积体中的巨大块石，长轴达42米





被滑坡冲击波摧断的树木呈定向堆积



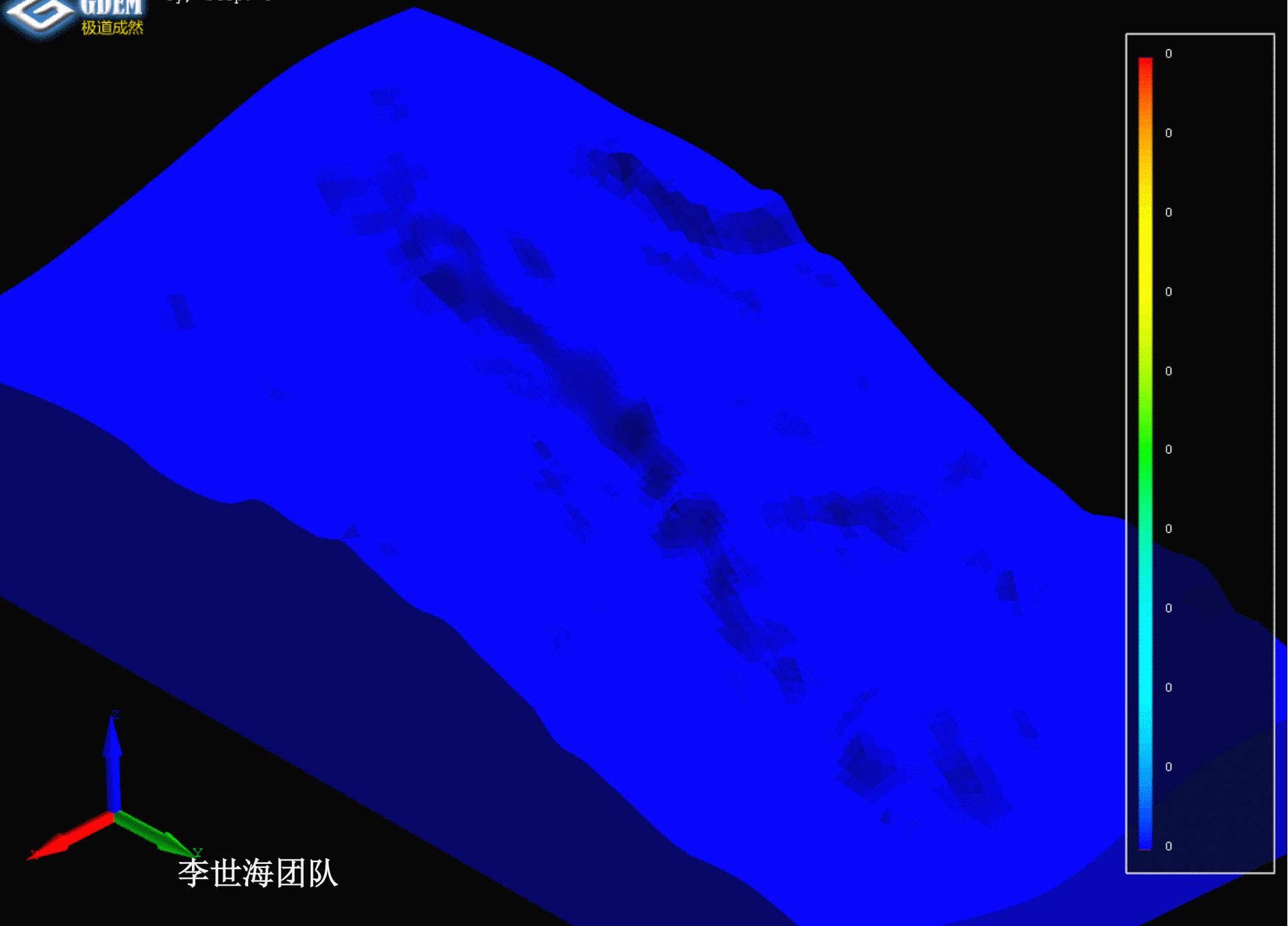


高速远程滑坡：

- (1) 碎屑化、流态化；
- (2) 超强的流动性；
- (3) 固-液-汽多相流体。

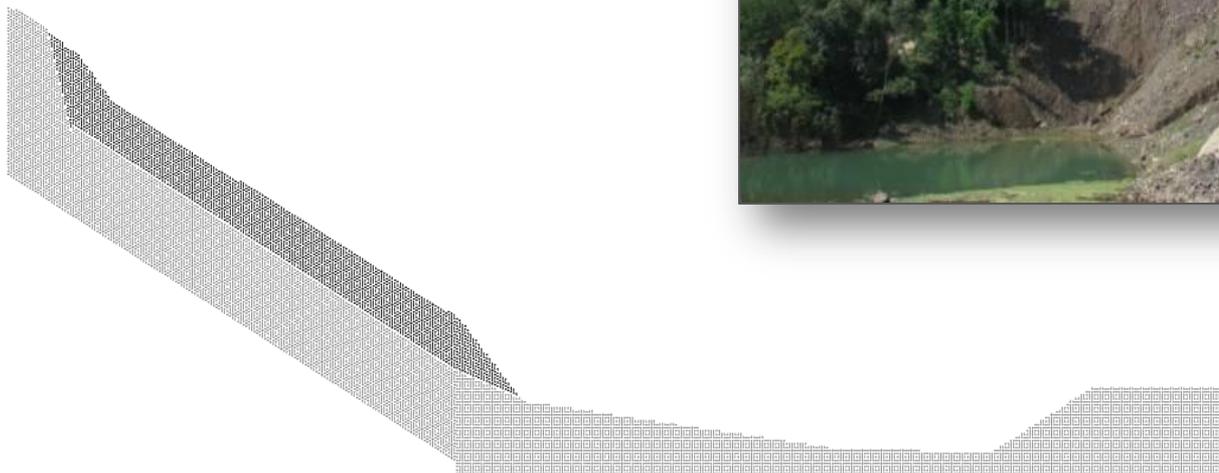
滑坡远程运动中流固耦合问题解决方案

- (1) 以**流体力学**的基本方程出发点 (FLOW-3D, 3DAN)
- (2) 以**固体力学**为出发点, 将其作为块体或颗粒介质, 分析模拟流态化运动过程 (UDEC、PFC、DDA、GDEM、SPH等)
- (3) **库伦混合流**方程 (Iverson): 通过改变混合物组成、初始条件和边界条件, 可模拟分析不同条件下多相混合流体的运动和堆积行为。
- (4) 全过程、灾害链模拟: **分阶段**模拟分析 (FEM+DEM, DEM+CFD等)



李世海团队

SPH simulation-2D



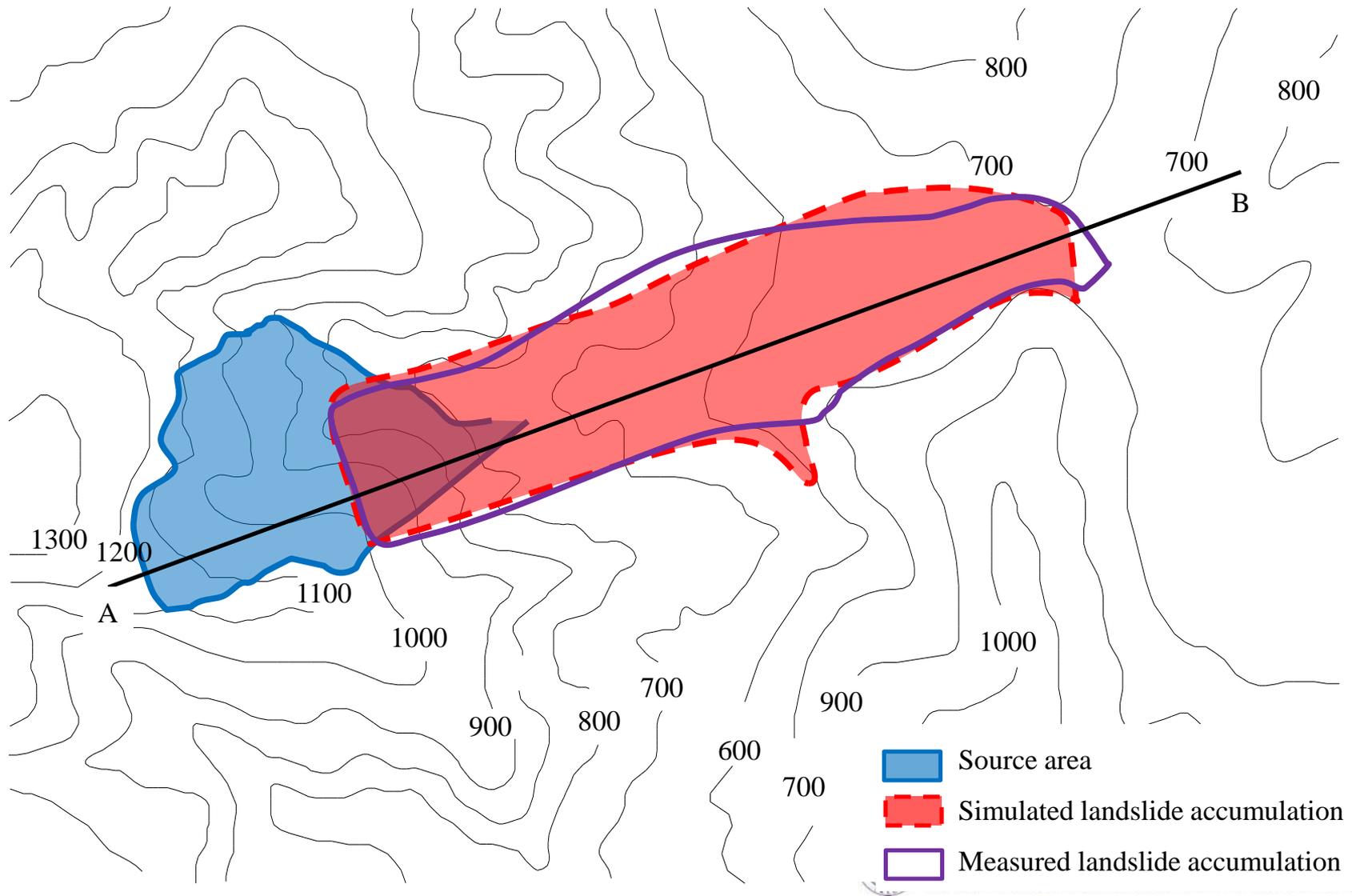
四川东河口滑坡（黄雨、许强等）

光滑粒子流 (SPH)

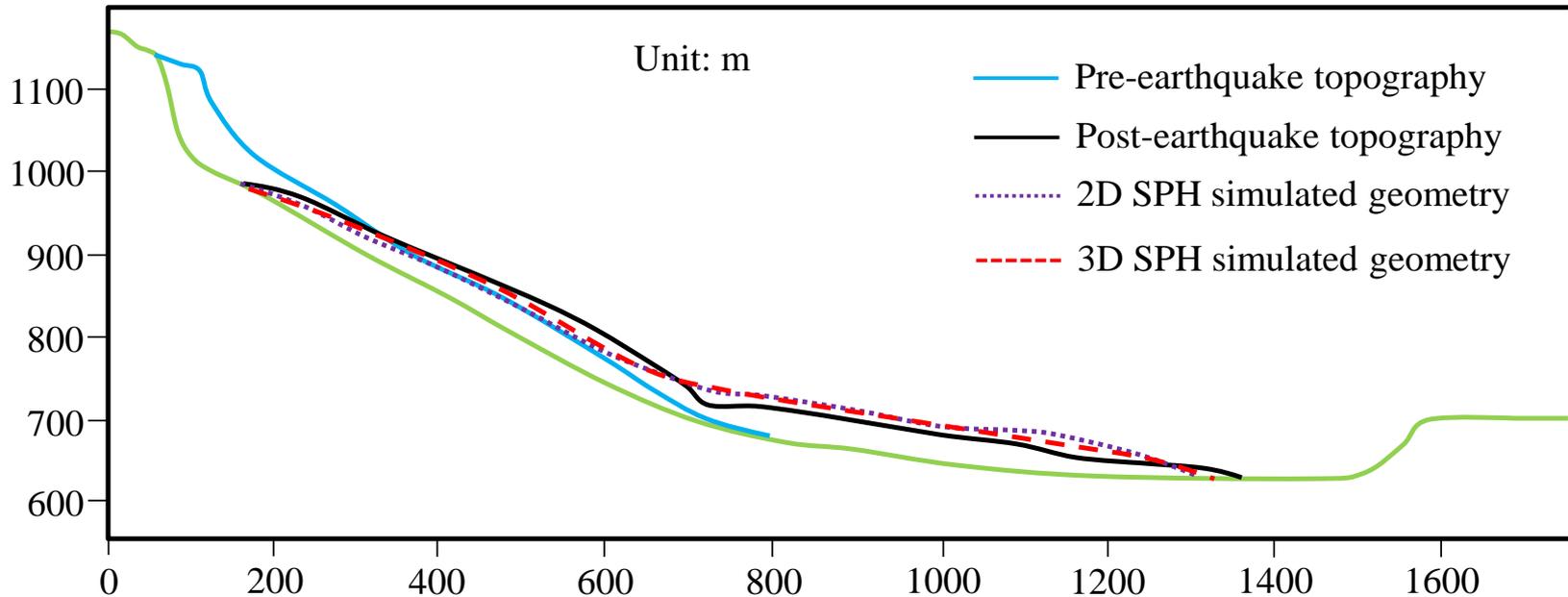
SPH simulation-3D



光滑粒子流 (SPH)



Results comparison



The final slide shapes simulated with both 2D and 3D SPH model have a high degree of similarity with surveyed configurations

$$\frac{\partial(\rho^s \varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^s \varphi \mathbf{v}^s) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho^f (1-\varphi))}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^f (1-\varphi) \mathbf{v}^f) = 0$$

$$\rho^s \varphi \left[\frac{\partial \mathbf{v}^s}{\partial t} + \mathbf{v}^s \cdot \nabla \mathbf{v}^s \right] = \nabla \cdot \mathbf{T}^s + \mathbf{f} + \rho^s \varphi \mathbf{g}$$

$$\rho^f (1-\varphi) \left[\frac{\partial \mathbf{v}^f}{\partial t} + \mathbf{v}^f \cdot \nabla \mathbf{v}^f \right] = \nabla \cdot \mathbf{T}^f - \mathbf{f} + \rho^f (1-\varphi) \mathbf{g}$$

1) 相间相互作用

□ drag force $\mathbf{F}_D = \frac{3\rho_f \varphi}{4D_s} C_D |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s)$ $C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1.0 + 0.1Re^{0.75}), & Re \leq 1000 \\ 0.44, & Re \geq 1000 \end{cases}$

□ virtual mass $\mathbf{F}_M = C_{MV} \rho_f \varphi \frac{d(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s)}{dt} = C_{MV} \rho_f \varphi \left[\left(\frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + \mathbf{u}_f \cdot \nabla \mathbf{u}_f \right) - \left(\frac{\partial \mathbf{u}_s}{\partial t} + \mathbf{u}_s \cdot \nabla \mathbf{u}_s \right) \right]$

优点：概念清晰、计算简单！

缺点：不能反映固相颗粒粒径、分布等影响。

2) 液相本构模型

■ Newtonian fluid rheology

$$\mathbf{T}_f = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}_f = -p\mathbf{I} + \mu_f (\nabla \mathbf{u}_f + \nabla \mathbf{u}_f^T)$$

■ non-Newtonian fluid rheology

$$\boldsymbol{\tau}_f = \eta_f \left[\nabla \mathbf{u}_f + (\nabla \mathbf{u}_f)^t \right] - \eta_f \frac{A(\alpha_f)}{\alpha_f} \cdot \left[(\nabla \alpha_s)(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s) + (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s)(\nabla \alpha_s) \right]$$

固液相物质同时占据空间，通过体积分数变化反映泥石流性质！

(引自何思明)

1、固液两相泥石流控制方程

$$\partial_t(\rho_s \alpha_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \mathbf{u}_s) = 0$$

$$\rho_s \alpha_s (\partial_t \mathbf{u}_s + (\mathbf{u}_s \cdot \nabla) \mathbf{u}_s) = \rho_s \alpha_s \mathbf{g} - \nabla \cdot \alpha_s \mathbf{T}_s - p \nabla \alpha_s + \mathbf{I}$$

$$\partial_t(\rho_f \alpha_f) + \nabla \cdot (\rho_f \alpha_f \mathbf{u}_f) = 0$$

$$\rho_f \alpha_f (\partial_t \mathbf{u}_f + (\mathbf{u}_f \cdot \nabla) \mathbf{u}_f) = \rho_f \alpha_f \mathbf{g} - \alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \alpha_f \boldsymbol{\tau}_f - \mathbf{I}$$

2、固液相间相互作用

$$\mathbf{I} = \nu C_D \frac{3\rho_f h_s}{4d_s} |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s)$$

$$\nu = \frac{4 + 3\alpha_s + 3(8\alpha_s - 3\alpha_s^2)^{0.5}}{(2 - 3\alpha_s)^2}$$

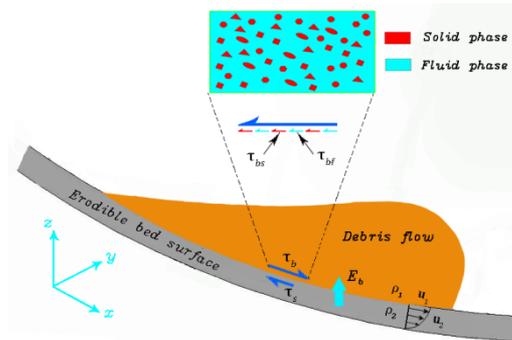
$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{R_e}, & R_e \leq 0.2 \\ \frac{24}{R_e} (1 + 0.1 R_e^{0.75}), & 0.2 < R_e \leq 1000 \\ 0.45 \left\{ \frac{1 + 17.67 \sigma(\alpha_s)^{6/7}}{18.67 \sigma(\alpha_s)} \right\}, & 1000 < R_e \end{cases}$$

$$\sigma(\alpha_s) = \frac{\mu_c}{\mu_f} (1 - \alpha_s)^{0.5} \quad \ln \left(\frac{\mu_f}{\mu_c} \right) = \frac{2.5\alpha_s}{1 - 1.4\alpha_s}$$



3、泥石流沿程侵蚀模型

$$E = \frac{\tau_b - \tau_s}{\rho_* \sqrt{u_*^2 + v_*^2}} \left(1 - e^{-\varepsilon(u_*^2 + v_*^2)} \right)$$



$$\tau_b = \alpha_s \tau_{bs} + \alpha_f \tau_{bf}$$

$$\tau_{bs} = \text{sgn}(\mathbf{u}_s) (\rho_s - \rho_f) g_z h_s \tan \delta$$

$$\tau_{bf} = \rho_f g_z n^2 \mathbf{u}_f |\mathbf{u}_f| / h_f^{1/3}$$

基于DEM-CFD耦合算法的固液两相流模型

1) 液相控制方程 (CFD)

$$\begin{cases} \frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{U}^f) = 0 \\ \frac{\partial(\varepsilon\rho\mathbf{U}^f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\mathbf{U}^f\mathbf{U}^f) - \varepsilon\nabla \cdot (\mu\nabla\mathbf{U}^f) = -\nabla p - \mathbf{f}^p + \varepsilon\rho\mathbf{g} + \mathbf{f}^s \end{cases}$$

2) 颗粒相运动方程(DEM)

$$\begin{cases} m_i \frac{d\mathbf{U}_i^p}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{F}_{ij}^c + \mathbf{F}_i^f + \mathbf{F}_i^g \\ I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{M}_{ij} \end{cases}$$

3) 相间作用力

Drag force

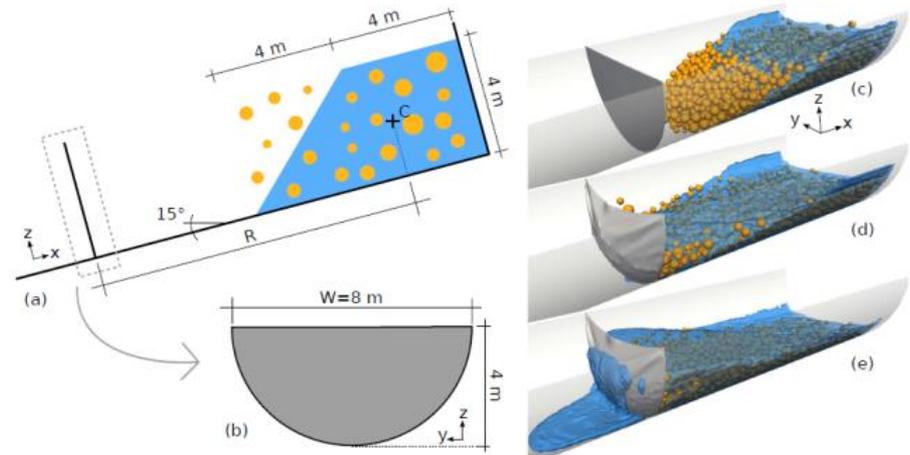
$$\begin{cases} \mathbf{F}^d = \frac{1}{8} C_d \rho \pi d_p^2 (\mathbf{U}^f - \mathbf{U}^p) |\mathbf{U}^f - \mathbf{U}^p| \varepsilon^{1-\chi}, \\ C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}} \right)^2, \\ Re_p = \frac{\varepsilon \rho d_p |\mathbf{U}^f - \mathbf{U}^p|}{\mu}, \\ \chi = 3.7 - 0.65 \exp \left[-\frac{(1.5 - \log_{10} Re_p)^2}{2} \right] \end{cases}$$

Buoyancy force

$$\mathbf{F}^b = \frac{1}{6} \pi \rho d_p^3 \mathbf{g}$$

4) DEM-CFD耦合算法

- 颗粒位置与速度由DEM计算确定；
- 确定颗粒在计算单元中的位置、体积分数；
 - 计算作用在每个颗粒上的作用力；
 - 颗粒-流体动量交换；
 - 根据CFD计算流场。



固液相各自占据空间，可以考虑固相粒径、数量、分布以及形状影响！

优点：能真实反映固相颗粒粒径、分布等影响。

(引自何思明)

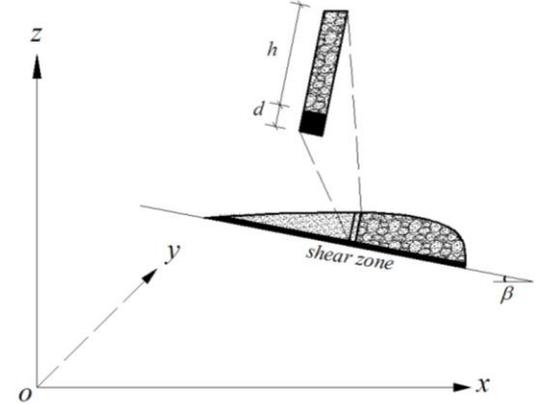
缺点：计算量大，难以实现大规模计算。

1. 深度积分 Savage-Hutter 滑坡模型

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = g_x h - \frac{1}{2} k_{a/p} g_z h \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} h \left[g_z \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) - \frac{p}{\rho h} \right] \text{tg} \varphi_{bed}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial x} = g_y h - \frac{1}{2} k_{a/p} g_z h \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} h \left[g_z \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) - \frac{p}{\rho h} \right] \text{tg} \varphi_{bed}$$



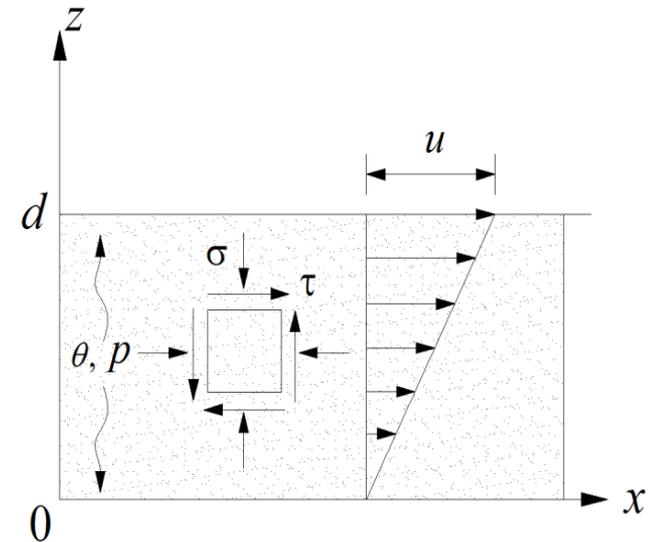
2. 滑面温度场与孔隙水压力演化方程

Temperature evolution equation

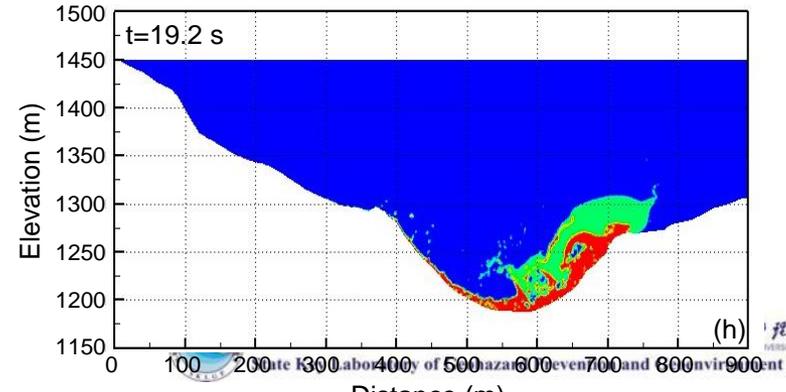
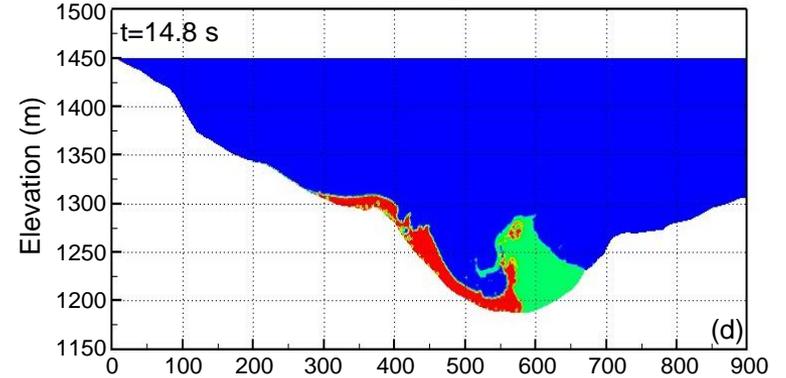
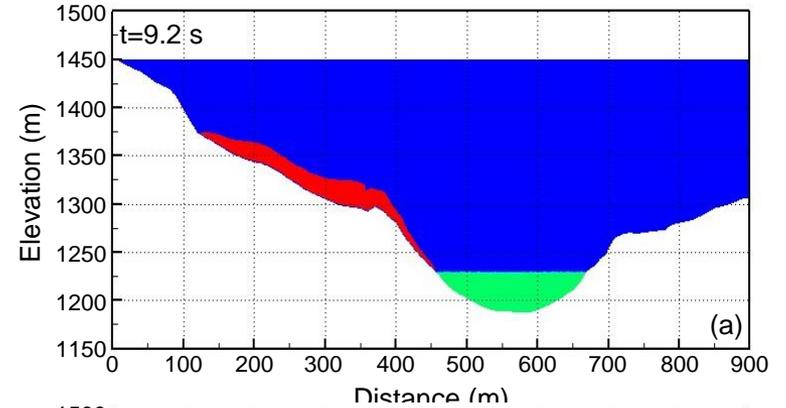
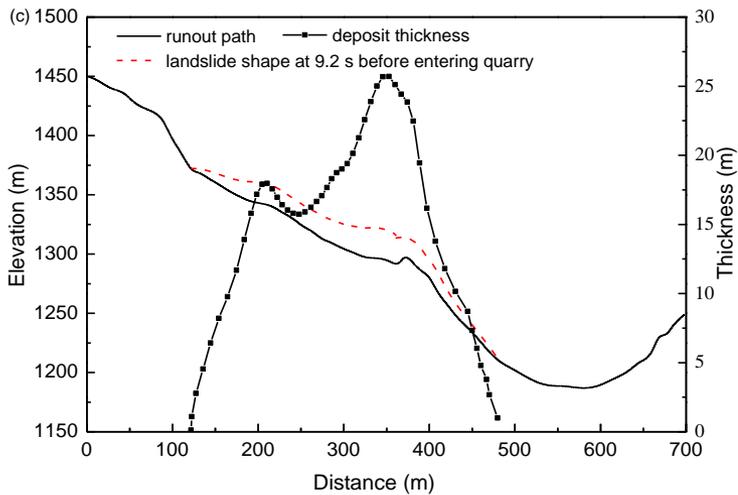
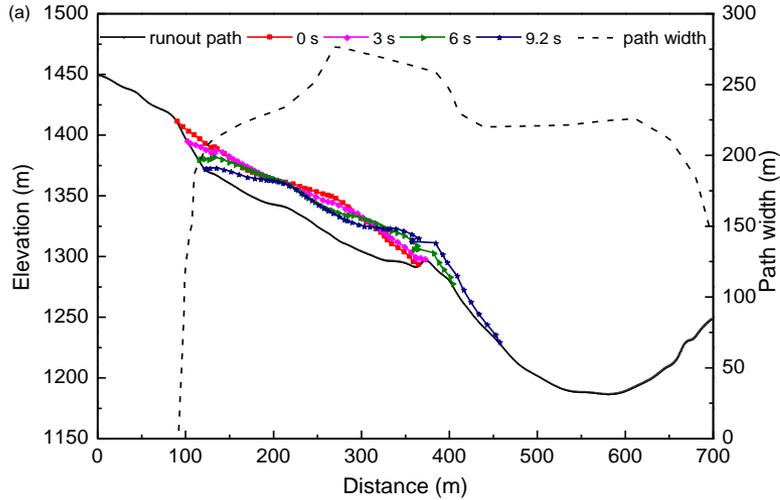
$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\rho_w c_w q \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} k_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} + \tau \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{for } 0 \leq z \leq d$$

Excess pore-water pressure evolution equation

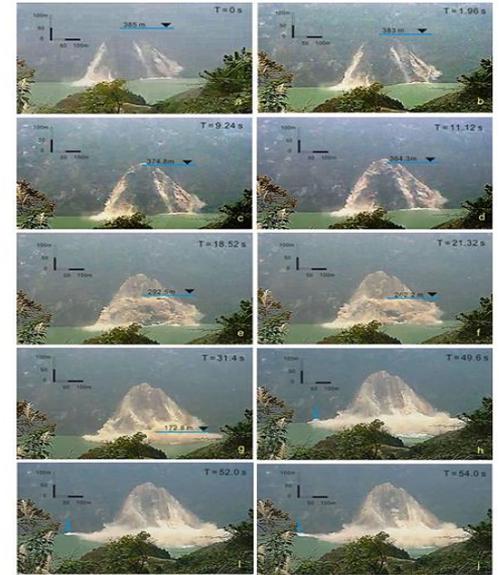
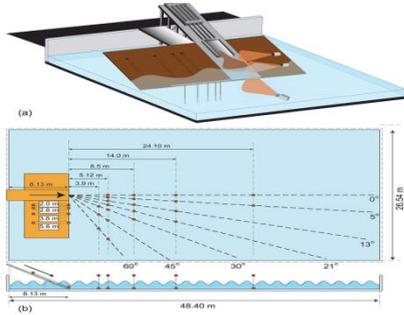
$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\kappa}{\eta S_\sigma} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \Lambda \dot{\theta} \quad \text{for } 0 \leq z \leq d$$



滑坡—涌浪灾害链模拟 (DAN-W+Fluent)



滑坡—涌浪灾害链过程模拟



滑坡体动力学方程：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x'} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y'} = \mathbf{S}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} h_a u_a \\ h_a u_a^2 + \frac{1}{2}[(1-\lambda)k_{act/pass} + \lambda]g_z' h_a^2 \\ h_a u_a v_a \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} h_a v_a \\ h_a u_a v_a \\ h_a v_a^2 + \frac{1}{2}[(1-\lambda)k_{act/pass} + \lambda]g_z' h_a^2 \end{pmatrix}$$

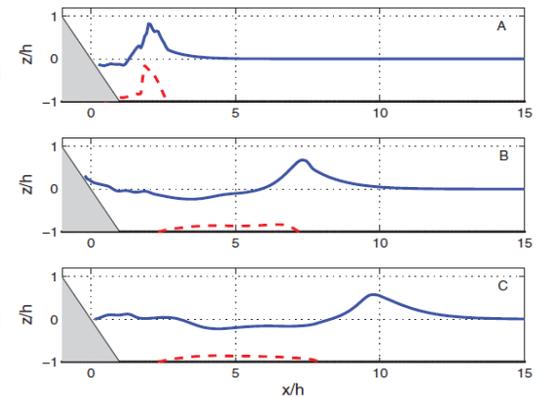
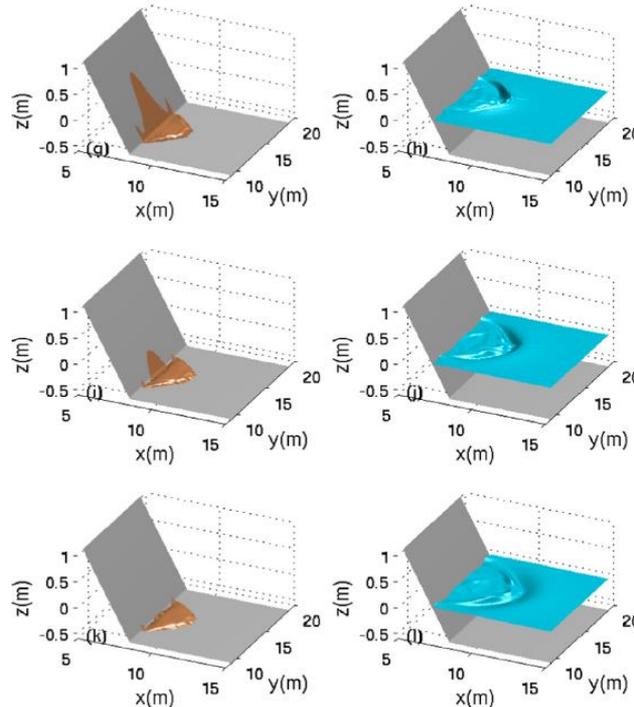
涌浪传播方程：

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0$$

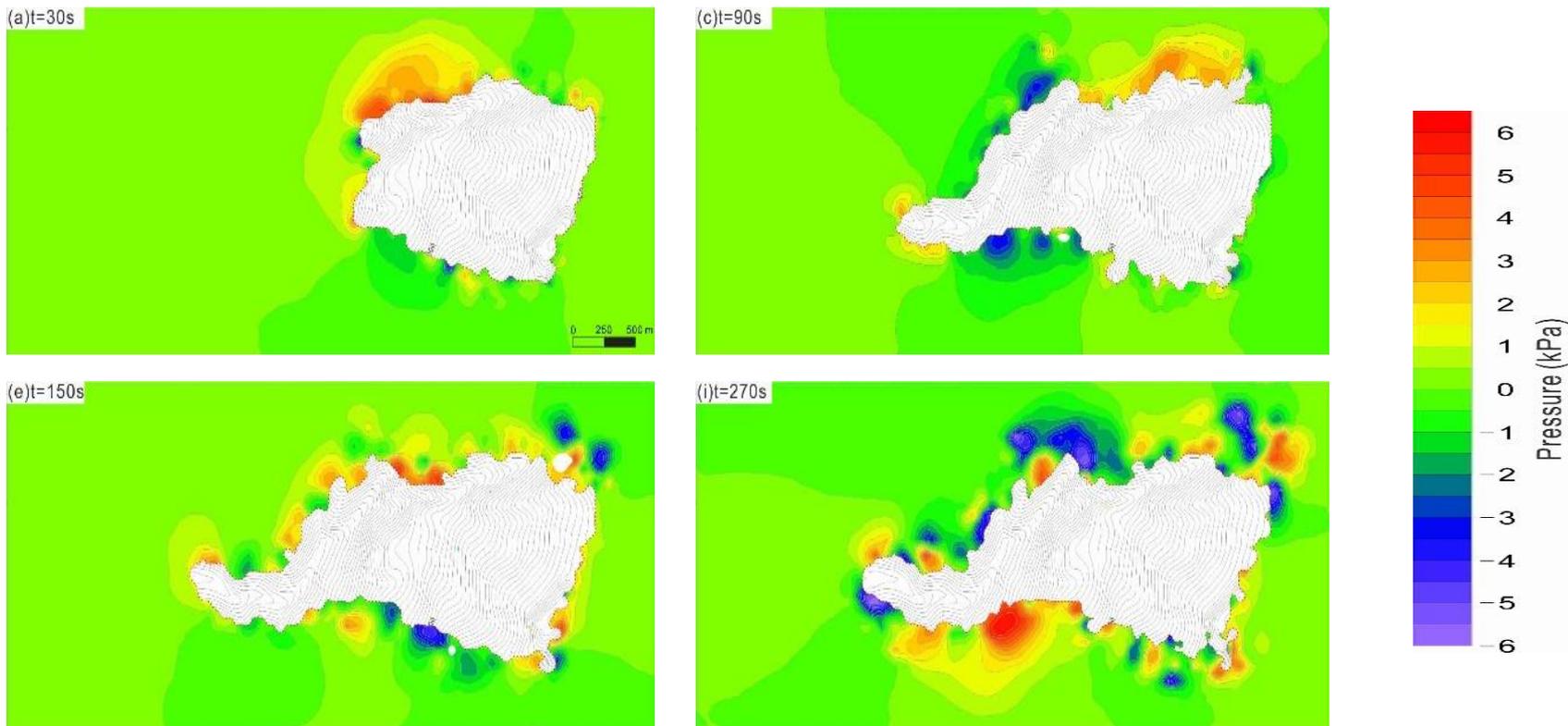
$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \sigma} = \mathbf{S}_h + \mathbf{S}_p$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} Du u + \frac{1}{2}g\eta^2 + gh\eta \\ Du v \\ Du w \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} Dv u \\ Dv v + \frac{1}{2}g\eta^2 + gh\eta \\ Dv w \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} u\omega \\ v\omega \\ w\omega \end{pmatrix}$$



滑坡—碎屑流超前气浪模拟



文家沟滑坡—碎屑流超前气浪模拟

基于Fluent软件，引入滑坡-碎屑流与空气相互作用的Multi-VOF模型

主要结论

- (1) 在地质灾害孕育、形成阶段，以及发生后的运动堆积阶段，都包含着复杂的流固耦合问题，对其研究尤其是量化研究还很薄弱。
- (2) 启动阶段：水对岩土体的力学作用、物理作用、化学作用。
- (3) 运动堆积阶段：以固体颗粒介质流动为主（颗粒介质流体力学？），同时有水和空气的参与，存在多相耦合问题。
- (4) **急需解决的问题**：黄土中地表水→地下水的过程模拟（活塞流+捷径流，饱和与非饱和渗流问题）；高速远程滑坡—碎屑流全过程模拟。

Thank you!