

中国水土保持学会科技协作工作委员会2014年年会，江西，德安

山区城镇泥石流风险分析

崔 鹏

pengcui@imde.ac.cn

中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所

2014年10月11日

目 录

一、山区城镇泥石流群发性

二、群发性泥石流危害特征

三、城镇泥石流风险分析

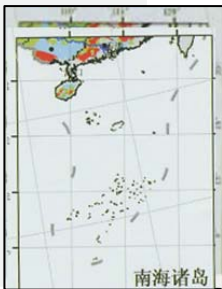
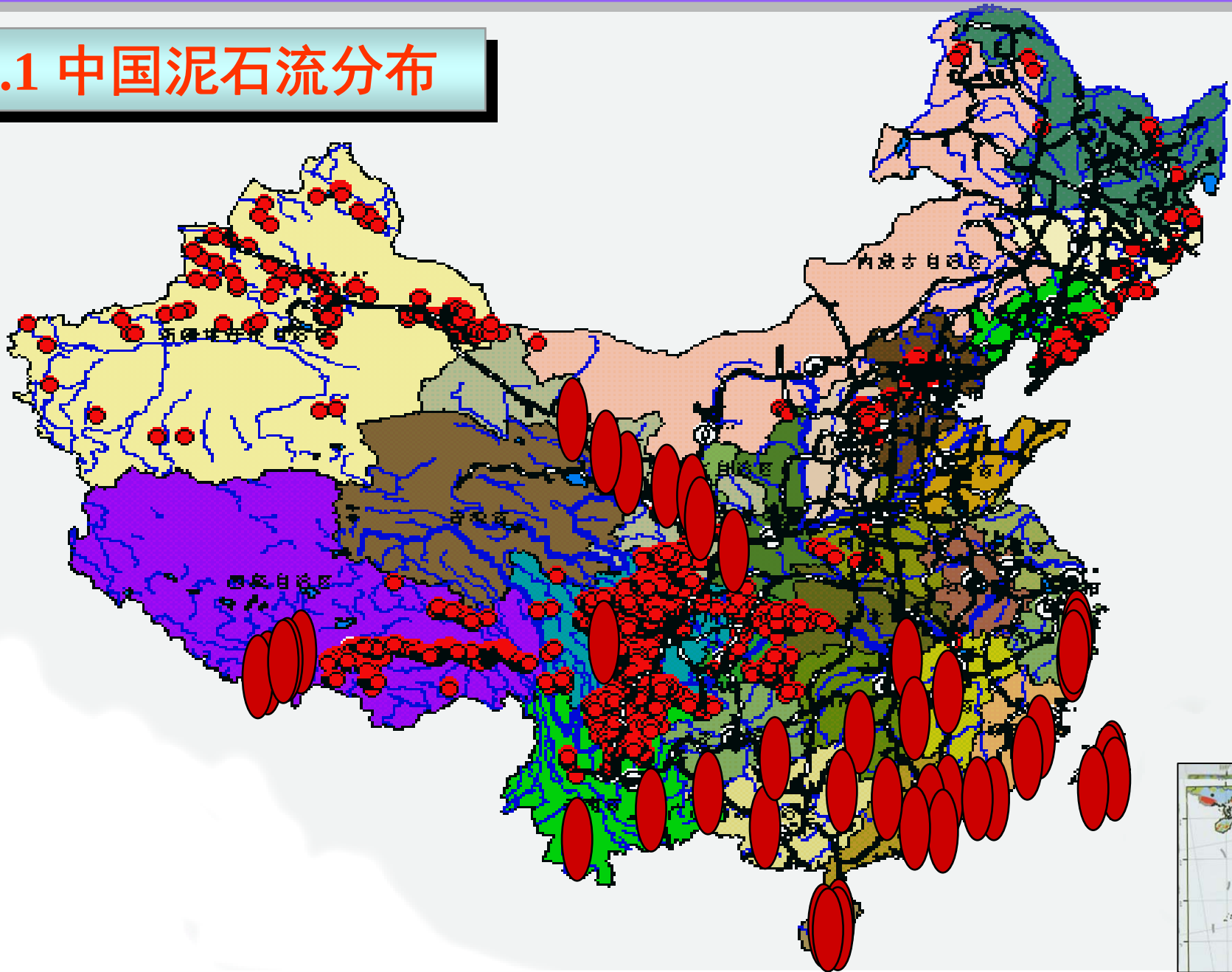
四、城镇泥石流防治技术

四、结论

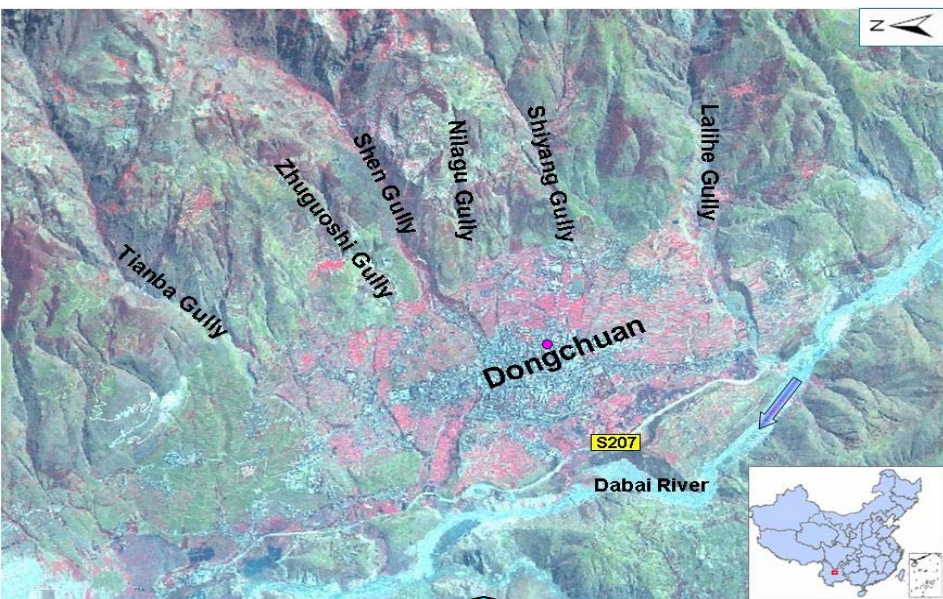
1.山区城镇泥石流群发性



1.1 中国泥石流分布



1.3 山区城镇群发性泥石流



- 初步统计，仅中国西部山区有1000座以上城镇坐落在多条泥石流的联合堆积扇上。
- 在局地性暴雨激发下，可能同时暴发泥石流；
- 特别是汶川地震后，大规模群发性泥石流暴发频繁。

云南昆明**东川**城区位于6条泥石流沟的联合堆积扇上，曾多次遭受多条泥石流的危害。其中1964年，深沟和石羊沟同时暴发泥石流，冲毁农田300亩，死亡8人。

老北川县城周边的席家沟、花石板沟、魏家沟，汶川地震后（2008年9月24日）同时发生大规模泥石流，淤埋了作为地震遗址的北川县老县城，导致21人死亡。



舟曲泥石流



2010年8月7日，受 $77.3\text{ mm}/40\text{ min}$ 的局地强降雨激发，在甘肃省舟曲县城北部的罗家峪、三眼峪两条支沟同时暴发泥石流。泥石流堵断白龙江，冲毁舟曲县城，造成严重损失。

泥石流发生前



泥石流发生后

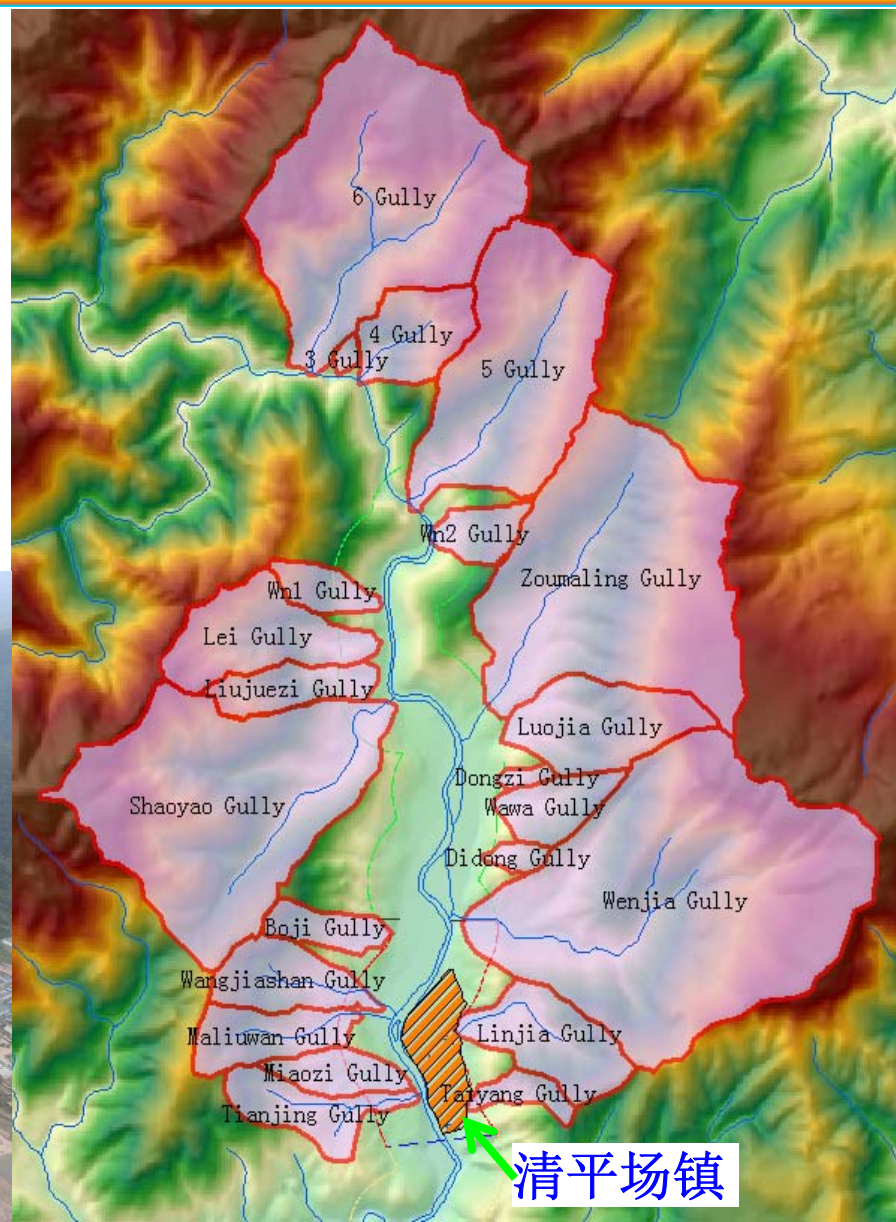


2010年8月8日舟曲特大山洪泥石流造成1765人遇难，堵断白龙江，形成堰塞湖。是我国60多年以来最严重的泥石流灾害！



清平泥石流

2010年8月13、14日，四川省地震灾区普降暴雨，绵竹县清平乡**21条沟谷同时暴发泥石流**，淤埋清平乡场镇。在清平场镇形成了长3.5 km，宽400-500m，平均厚度约5m（最大厚度超过13m）的淤积区。泥石流造成7人遇难，7人失踪，33人受伤，泥石流还造成清平乡379户房屋严重受损。



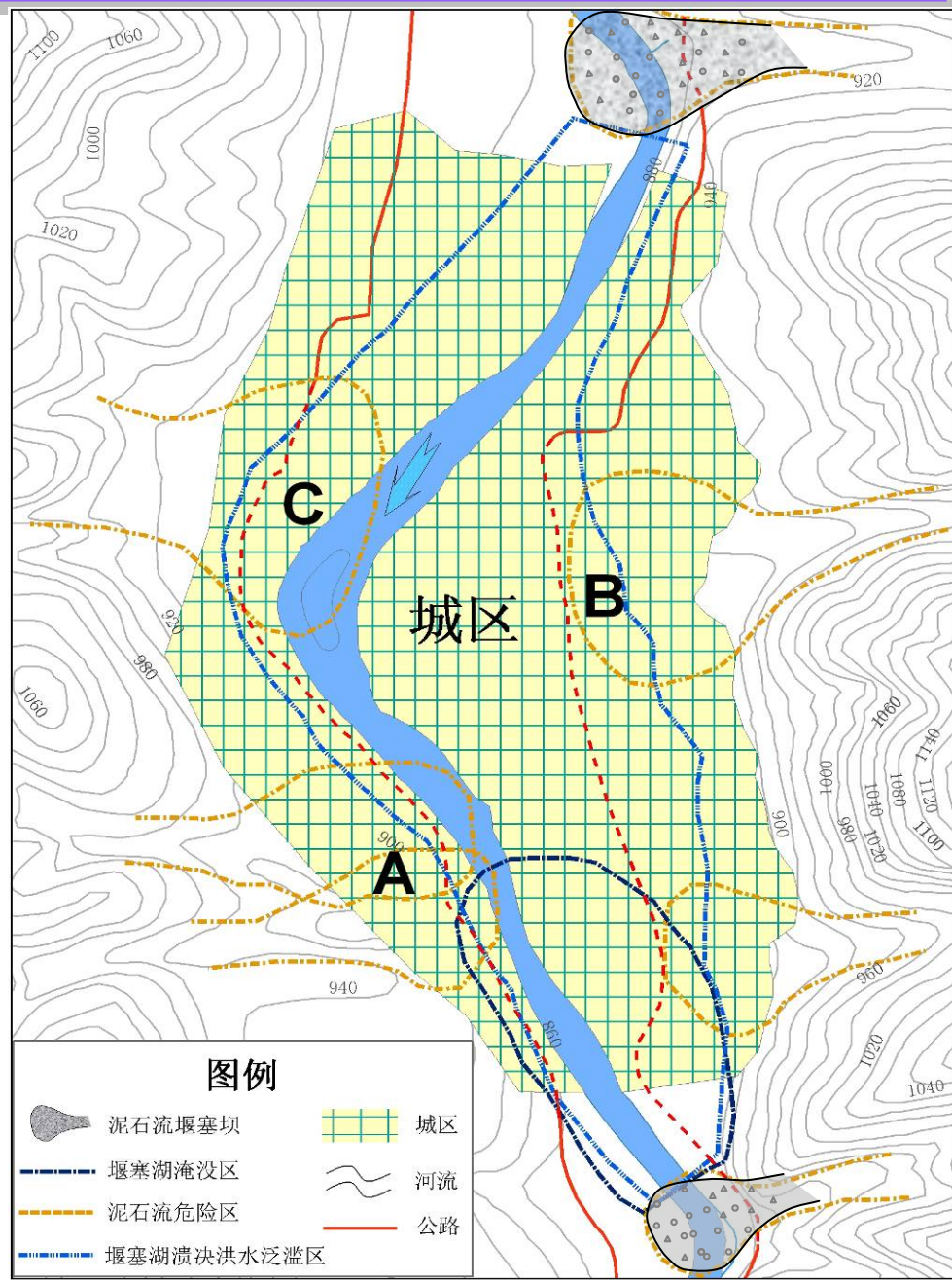


2. 群发性泥石流危害特征



2.1 灾害复合性和延拓性

- **A点：**同一地点先后受到两个泥石流的危害。
- **B点：**当城区受到泥石流的冲毁或淤埋危害以后，其上游的泥石流堰塞坝溃决，溃决洪水在泥石流堆积淤埋以后的地方又形成洪水灾害。
- **C点：**当泥石流堆积物改变河道地形以后，河道过流断面压缩，使得洪水位抬升，更容易造成洪水灾害。



2.2 灾害链生性

大规模泥石流还有可能堵江，造成上游的淹没危害，一旦堵塞坝溃决，还会在下游较长河段形成洪水灾害，形成“**泥石流-堰塞湖-洪水**”灾害链。

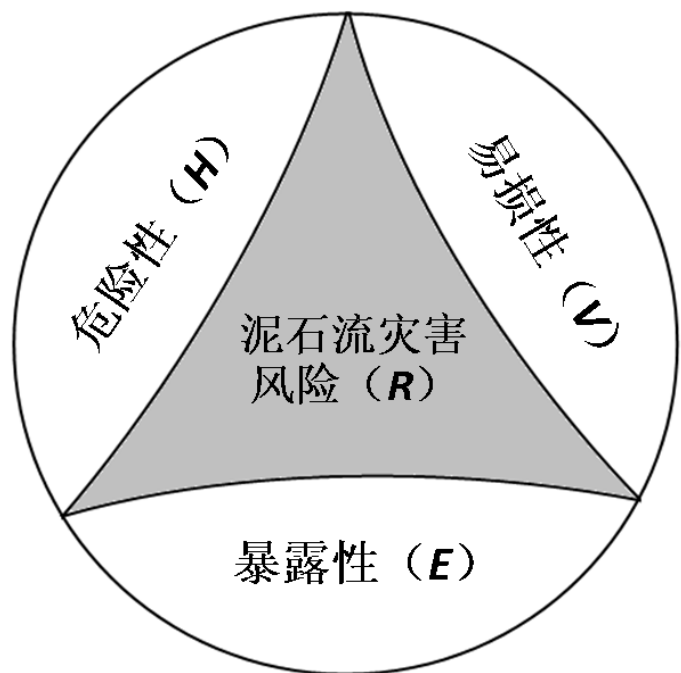


泥石流风险问题

- 泥石流危害范围如何确定 ？
- 泥石流危险性如何确定 ？
- 承灾体易损性如何分析 ？
- 群发性泥石流风险如何评估 ？



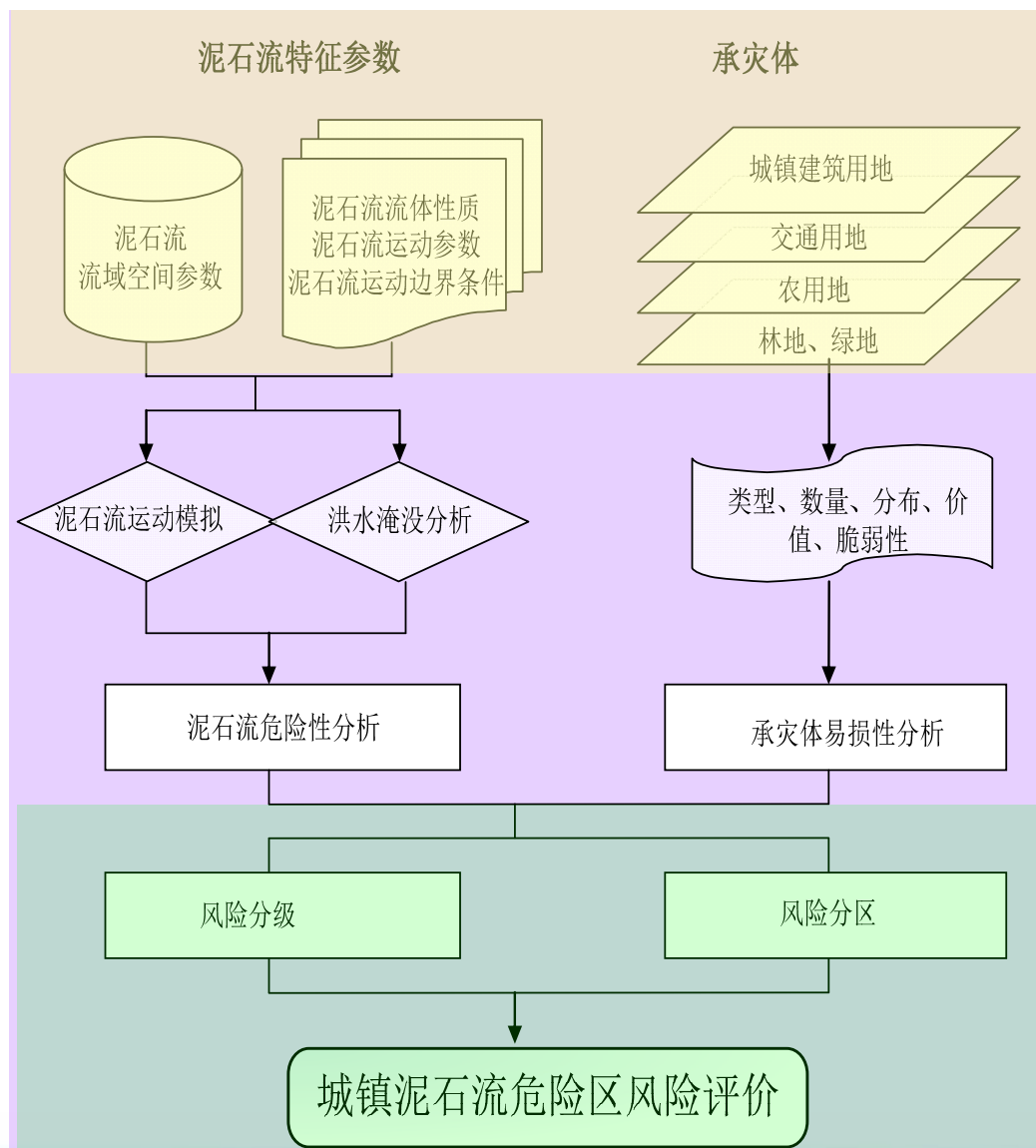
3.1 泥石流风险分析概念模型与流程



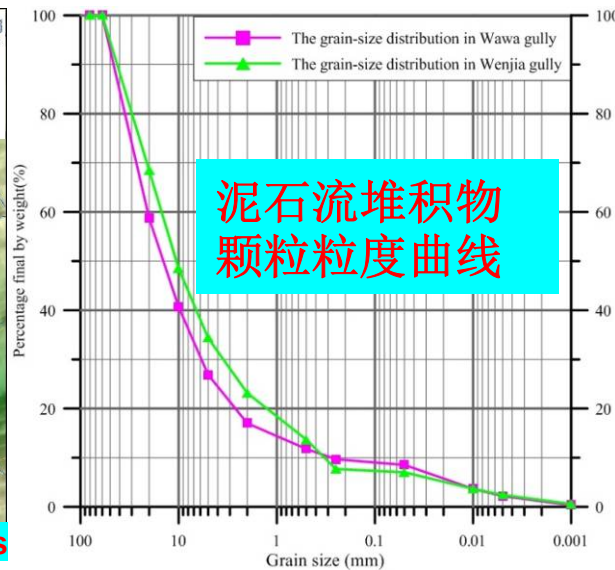
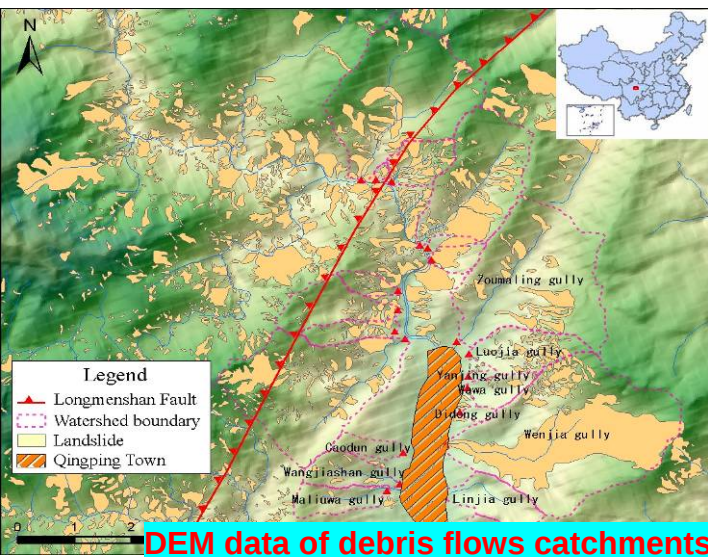
$$R = f(H, V, E) = H \times V \times E$$

$$R = H \times V$$

R 为泥石流风险度(0~1),
 H 为泥石流危险度(0~1),
 V 为承灾体易损度(0~1),
 E 为承灾体暴露度(0~1)。



3.2 泥石流动力过程数值模拟参数确定



$$Q_P = (1 + \varphi) * Q_B * D_U$$

$$\tau = 0.1 \left(\frac{\gamma}{1.635} \right)^{270}, \quad (\gamma \geq 2.0 \text{ t/m}^3)$$

$$\tau = 0.1 \left(\frac{\gamma}{0.60} \right)^{442}, \quad (\gamma < 2.0 \text{ t/m}^3)$$

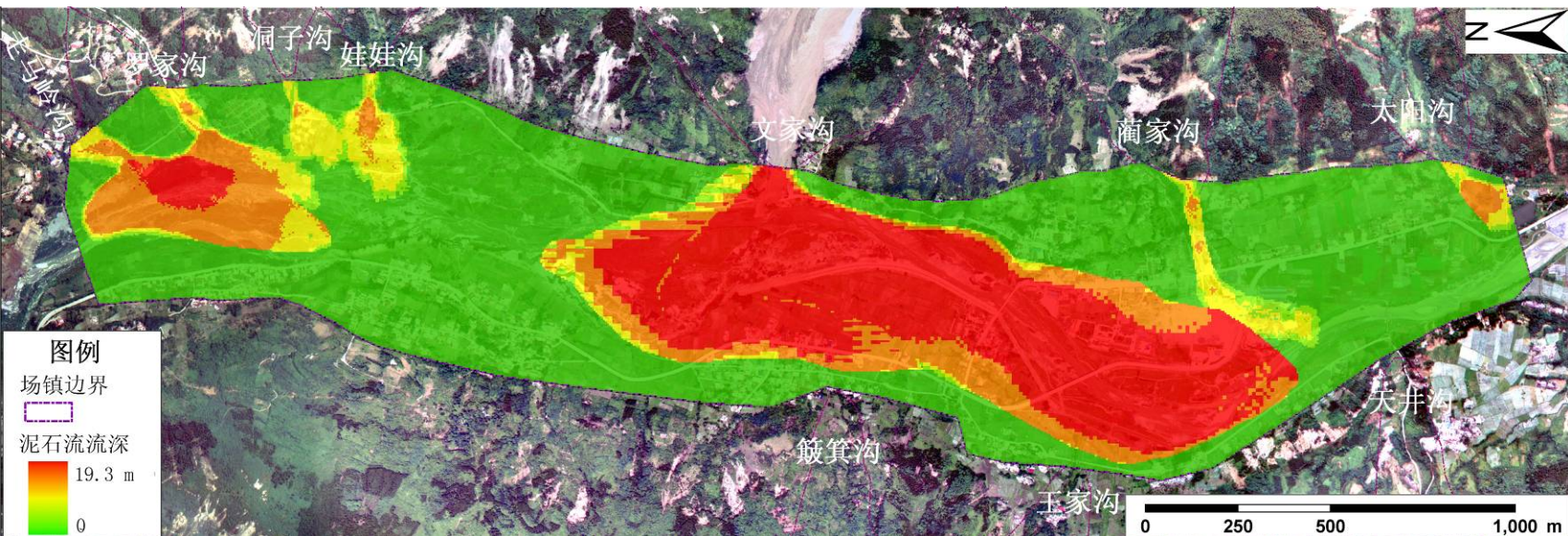
$$\eta = 0.1 \left(\frac{\gamma}{1.394} \right)^{7.41}, \quad (\gamma < 2.2 \text{ t/m}^3)$$

$$\eta = 0.1 \left(\frac{\gamma}{2.096} \right)^{450}, \quad (\gamma \geq 2.2 \text{ t/m}^3)$$

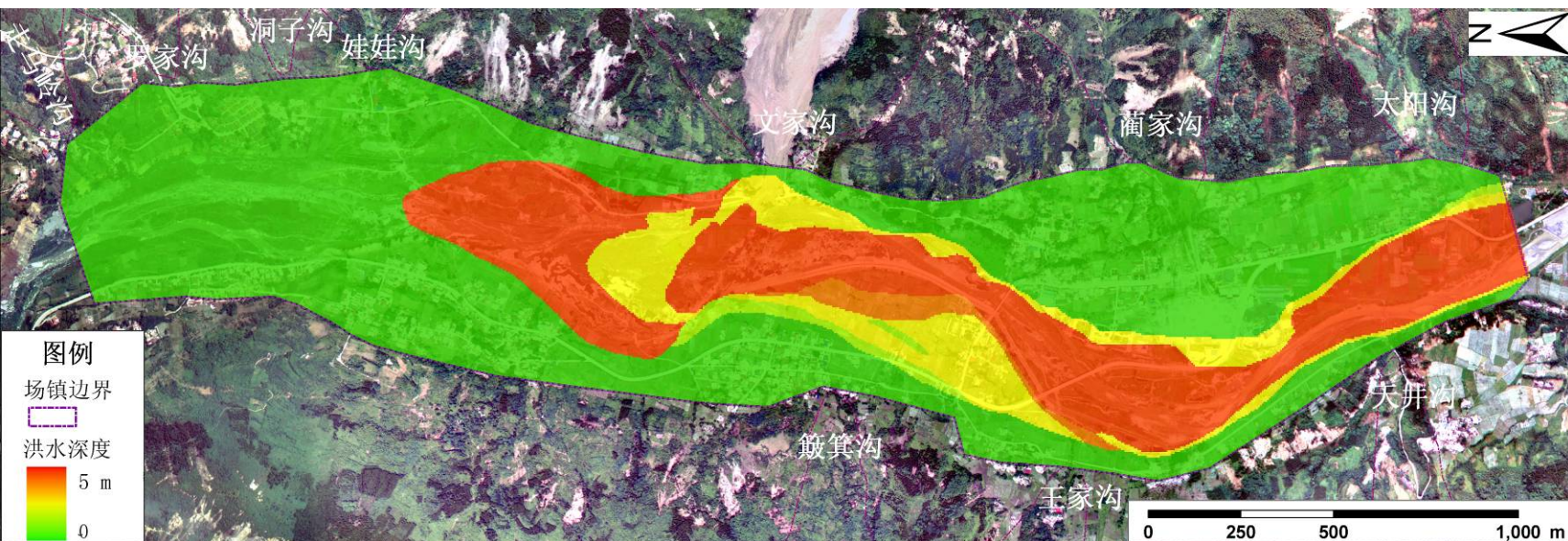
Parameter		Linjia gully	Taiyang gully	Wenjia gully	Zoumaling gully	Shaoyao gully	Luoia gully
Basic parameters of gullies	Area of catchment (km ²)	1.09	0.40	7.68	5.46	5.09	1.30
	Length of main channel(km)	1.51	0.83	4.38	3.10	3.30	1.10
	Average channel slope(‰)	250.41	484.34	322.66	183.13	170.36	465.98
Rheological parameters	Channel roughness coefficient	0.44	0.41	0.44	0.44	0.42	0.44
	Density (t/m ³)	2.10	2.10	2.10	2.15	2.10	2.15
	Viscous coefficient (N.s/m ²)	2.08	2.08	2.08	2.48	2.08	2.48
	Yield stress (N/m ²)	86.09	86.09	86.09	162.50	86.09	162.50
Kinematic parameters	Time-interval (s)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	Peak discharge (m ³ /s)	233	103	1177	774	677	323

泥石流运动数值模拟基本参数

3.3 泥石流危险区范围确定



数值模拟的泥石流直接危害区



数值分析的洪水淹没区

3.4 泥石流危险性分析

$$H = H_e + H_d + H_i + H_f$$

H -为危险区的总危险度，

H_e -为泥石流冲击破坏引起的危险，用泥石流最大动能表示；

H_d -为泥石流淤埋引起的危险，用泥石流最大淤积深度表示；

H_i -为城镇下游泥石流堵江造成的回水淹没危险，用回水淹没深度表示；

H_f -为城镇上游泥石流堰塞湖溃决造成的洪水淹没危险，用洪水淹没深度表示。

➤ 泥石流冲击破坏能力和淤埋深度的确定方法

- 用泥石流最大流深来表征泥石流的淤积危害；

$$H_d = \frac{N_{i,j} \Delta V}{A}$$

- 用泥石流的动能来表征泥石流的冲击破坏能力。

$$H_e = A \cdot \max_{t>0} [(u^2 + v^2) h \rho]$$

➤ 泥石流堰塞湖淹没危险性的确定方法

- 用回水淹没深度表示泥石流堵江造成的回水淹没危险。

$$H_i = (H_0 + H_b) - H_{i,j}$$

➤ 泥石流堰塞湖溃决洪水危险性的确定方法

- 用洪水淹没深度表示泥石流堰塞湖溃决洪水淹没危险。

$$A_f = \frac{n(Q_{LM} - Q_0)}{R^{2/3} I^{1/2}}$$

$$H_f = \frac{n(Q_{LM} - Q_0)}{R^{2/3} I^{1/2} B_i}$$

3.5 易损性确定方法

◆ 承灾体易损性分析主要包括以下五个方面内容：

- (1) 确定承灾体类型；
- (2) 统计各类承灾体数量及分布情况；
- (3) 构建易损度评价模型；
- (4) 易损度计算；
- (5) 易损性分区。

◆ 承灾体易损度取决于承灾体的价值及其脆弱性指数；

$$V = V(u) \times C$$

$V(u) = P \times N$

承灾体脆弱性指数

➤ **承灾体脆弱性**是描述承灾体受到灾害侵袭时损毁的难易程度，可用介于0和1之间的数表示，数值越大越易损毁。

$$C_D = \frac{h_D}{H_C}$$

(1) 对于**受淤埋危害的承灾体**，脆弱性指数可定为其几何高度与淤埋深度的比值，即：

(2) 对于**受到冲击的建筑物或构筑物**，通过实际结构破坏调查资料来确定。把危险区内常见的建筑物或构筑物分类，根据实际泥石流对建筑物或构筑物破坏的灾情实例考察数据，分别赋以脆弱性值。

常见的建筑物和构筑物的脆弱性指标

建筑物或构筑物类型	脆弱性级别	脆弱性指标范围	常见破坏特征
土坯	V	0.9~1.0	可被较小规模泥石流全部摧毁
木结构	IV	0.8~0.9	中小规模泥石流可以造成结构破坏
砖木结构	III	0.5~0.8	中小规模泥石流可以造成结构的局部破坏
砖混结构	II	0.2~0.5	中小规模泥石流不能造成危害，大规模泥石流可造成结构局部破坏
钢、钢筋混凝土结构	I	0.1~0.2	中小规模泥石流不能造成危害，特大规模泥石流可造成结构局部破坏

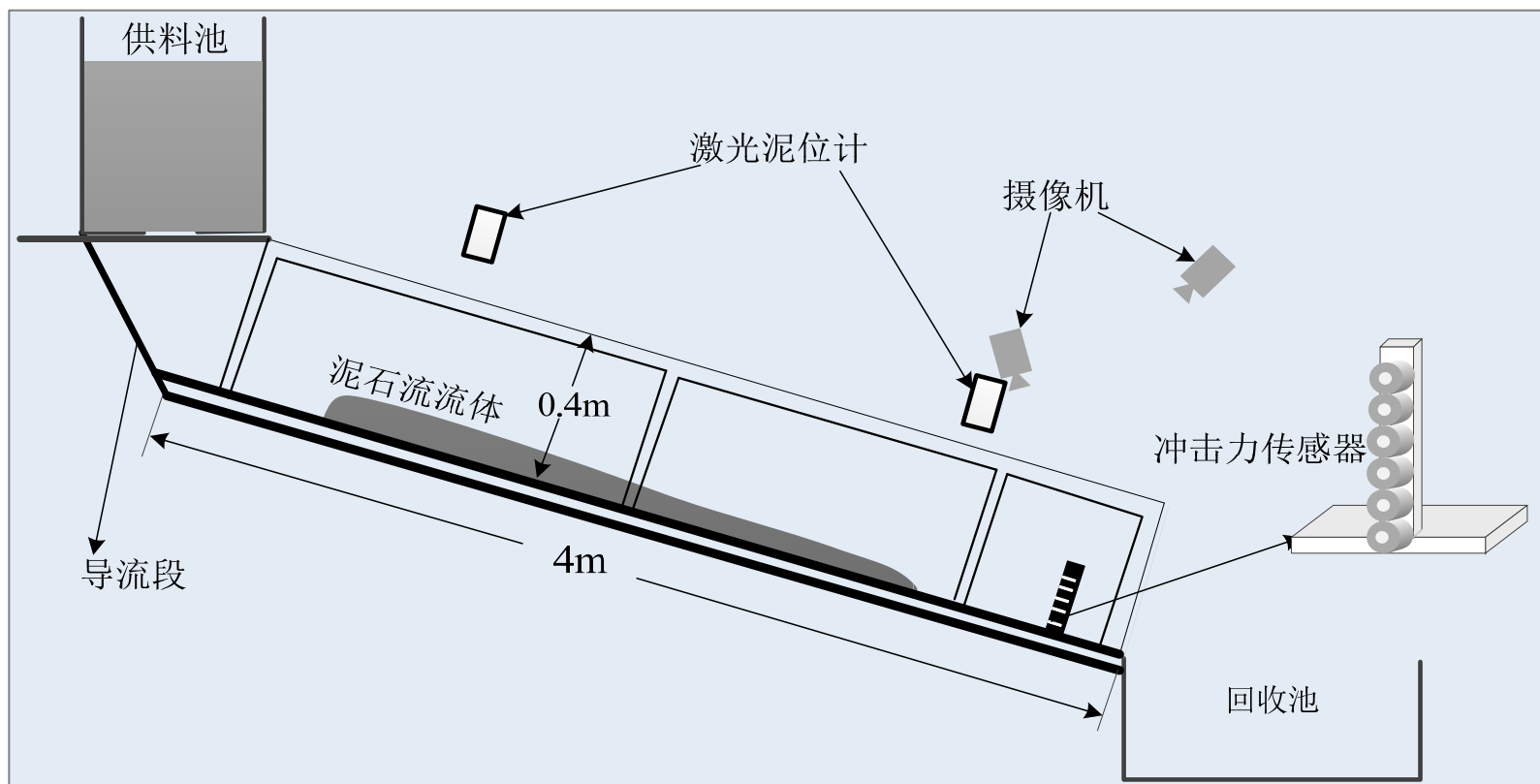
◆ 结构体破坏临界条件

(1) 泥石流冲击力实验装置

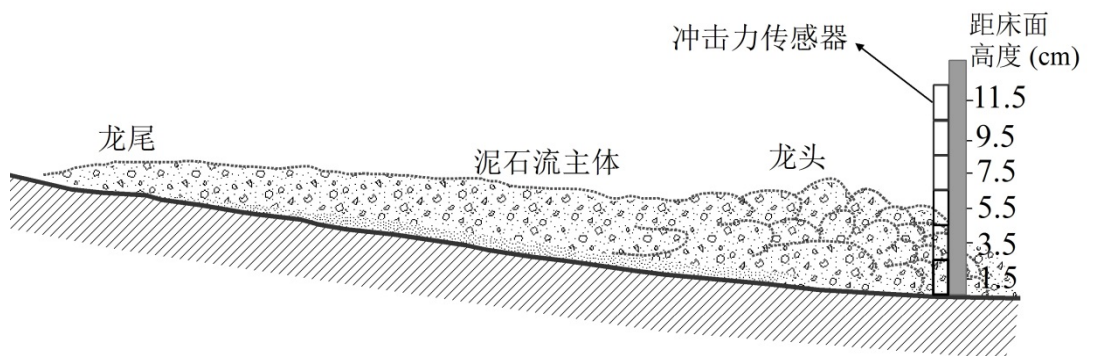
- 泥石流冲击力的垂向分布？
- 泥石流冲击典型时域过程？
- 考虑大石块冲击的泥石流整体冲击力计算？

建筑物结构
破坏力学计
算参数

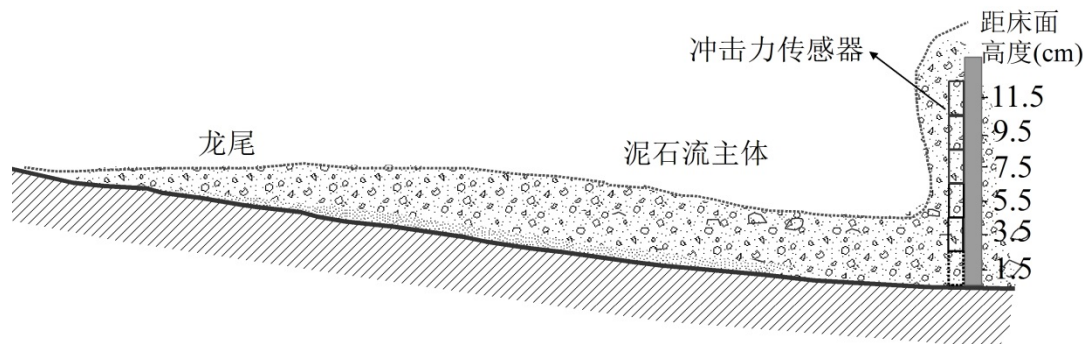
泥
石
流
冲
击
实
验



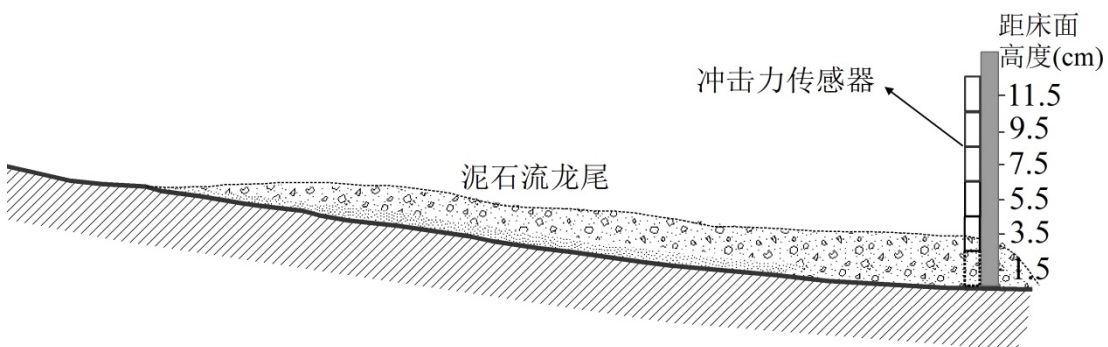
(2) 泥石流冲击时间过程



- (1) **泥石流龙头前锋快速**冲击阶段。
该阶段龙头雷诺数均小 2.06×10^5 ，龙头呈现扰动或紊动流。



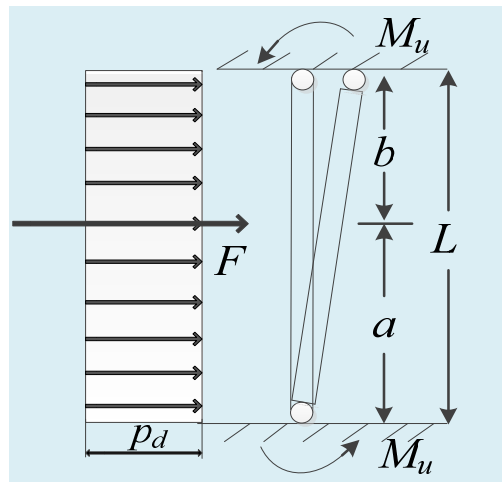
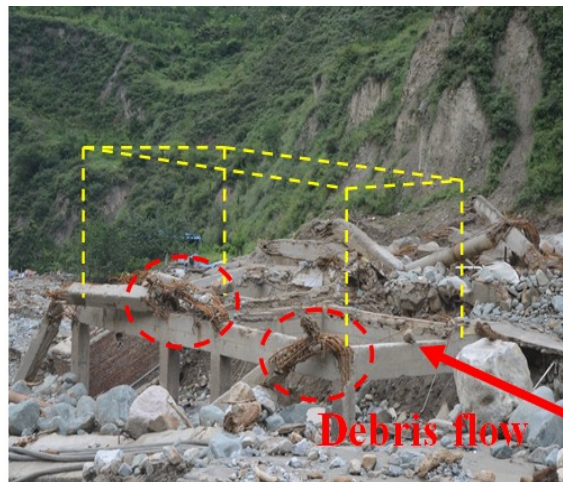
- (2) 龙头冲击后，泥石流主体到达，导致**流体迅速雍高**，最大的冲击高度超过5个传感器位置的高度。



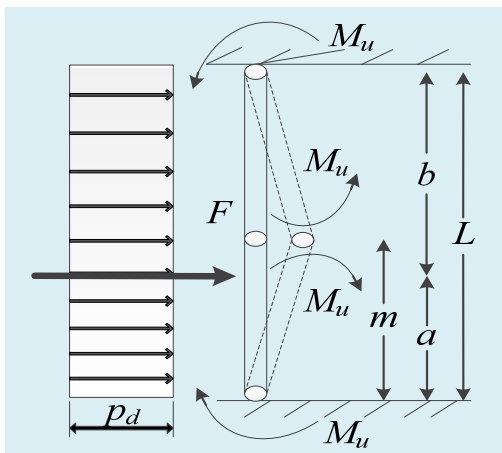
- (3) 随着后续流量减少，泥石流冲击传感器的高度平稳下降，视频显示该阶段泥石流紊动减弱，流面趋于平稳，近似层流。

建筑物墙体和柱体破坏的临界条件

(1) 框架结构柱体破坏力学模型

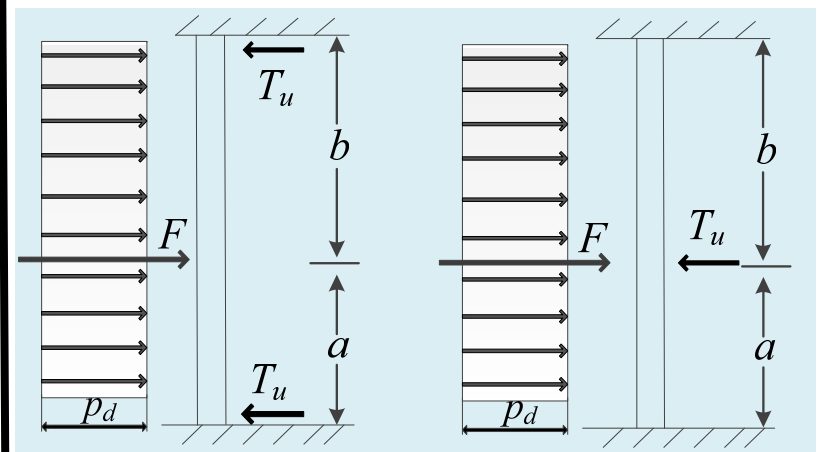


两点塑性铰破坏: $1/2 F a + 1/4 P_d L^2 = M_u$



三点塑性铰破坏:

$$1/2 F a (1 - m/L) + 1/4 P_d (Lm - m^2) = M_u$$



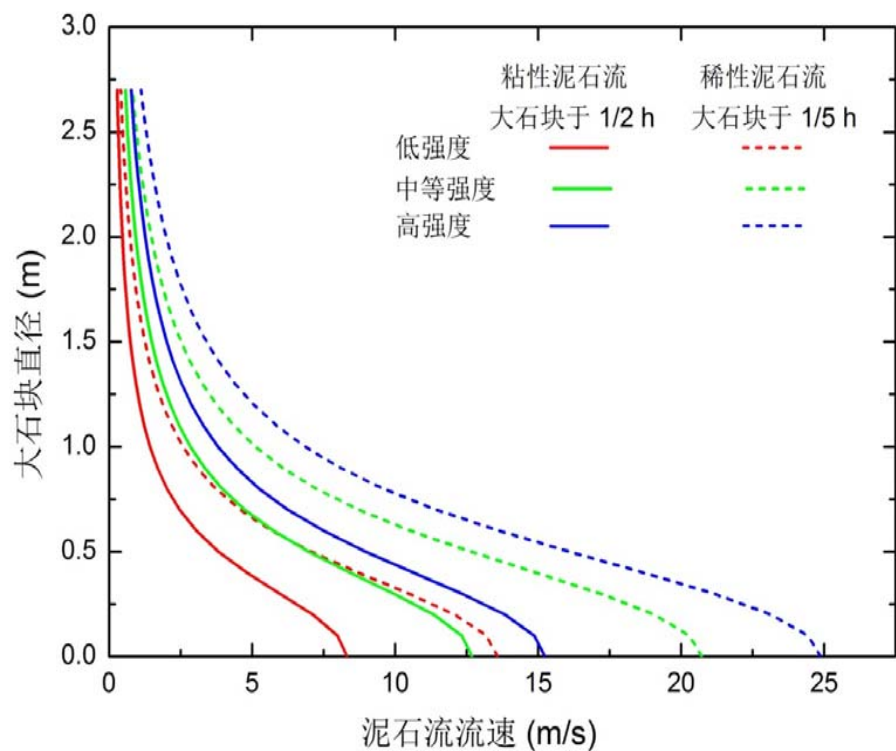
剪切破坏:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1/2 \cdot P_d \cdot L + b^2/L^2 \cdot (1 + 2a/L) \cdot F = T_u & R \leq R' \\ F = T_u & R > R' \end{array} \right.$$

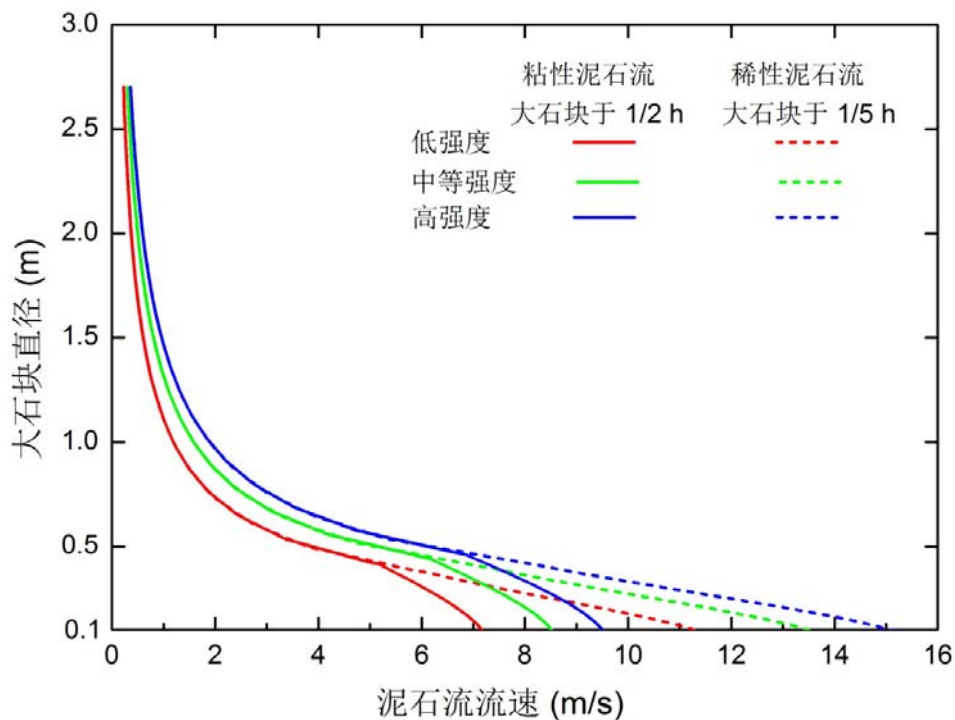
F 为大颗粒冲击力, P_d 为浆体冲击力, L 为柱体高度, a 为大颗粒冲击高度。

(2) 框架结构柱体破坏临界条件

- 粘性泥石流中大石块集中于1/2处时，柱体更容易遭受破坏；稀性泥石流中大石块集中于1/3流深处时更易破坏。
- 3点塑性铰破坏条件远高于2点塑性铰，前者破坏的临界值约为后者1.5倍。
- 粒径0.5m为柱体受大石块冲击破坏和泥石流整体冲击破坏的临界点，当粒径超过0.5m后，柱体的破坏受大石块的剪切作用。

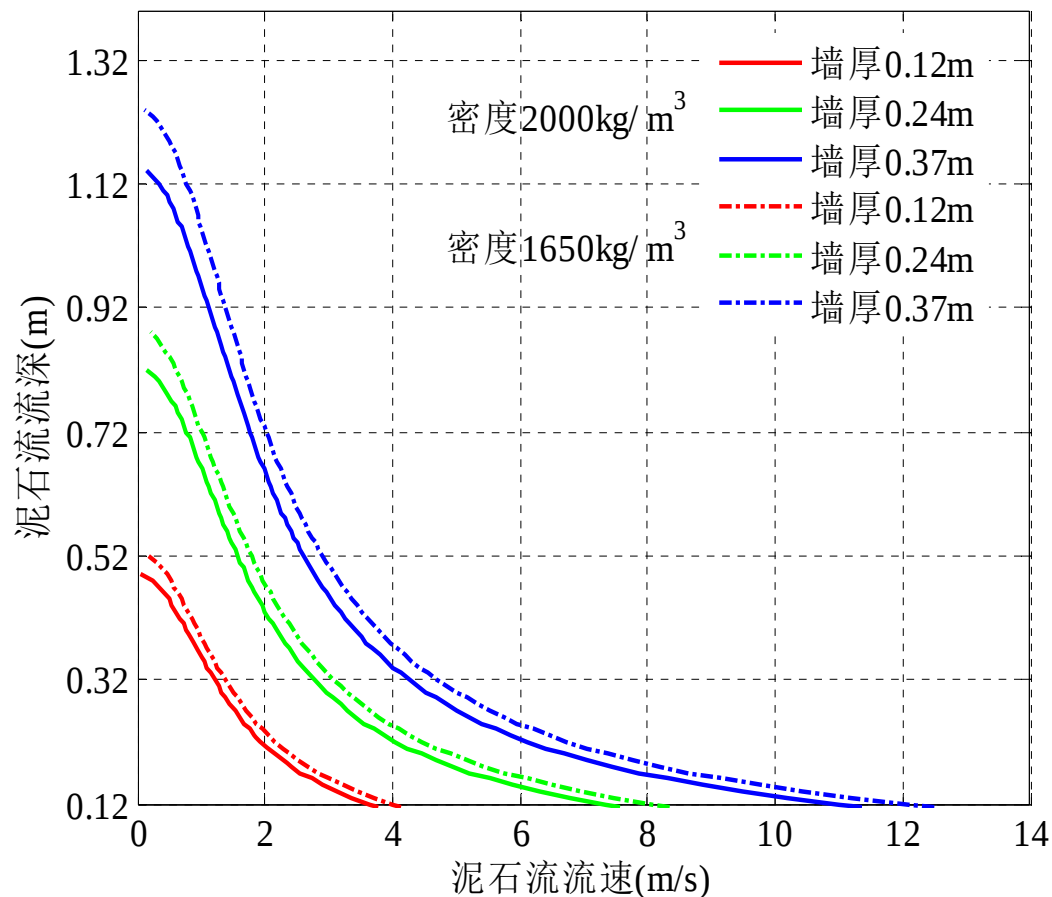


柱体固端-跨中3点塑性铰破坏临界条件



柱体剪切破坏临界条件

(3) 墙体破坏临界条件

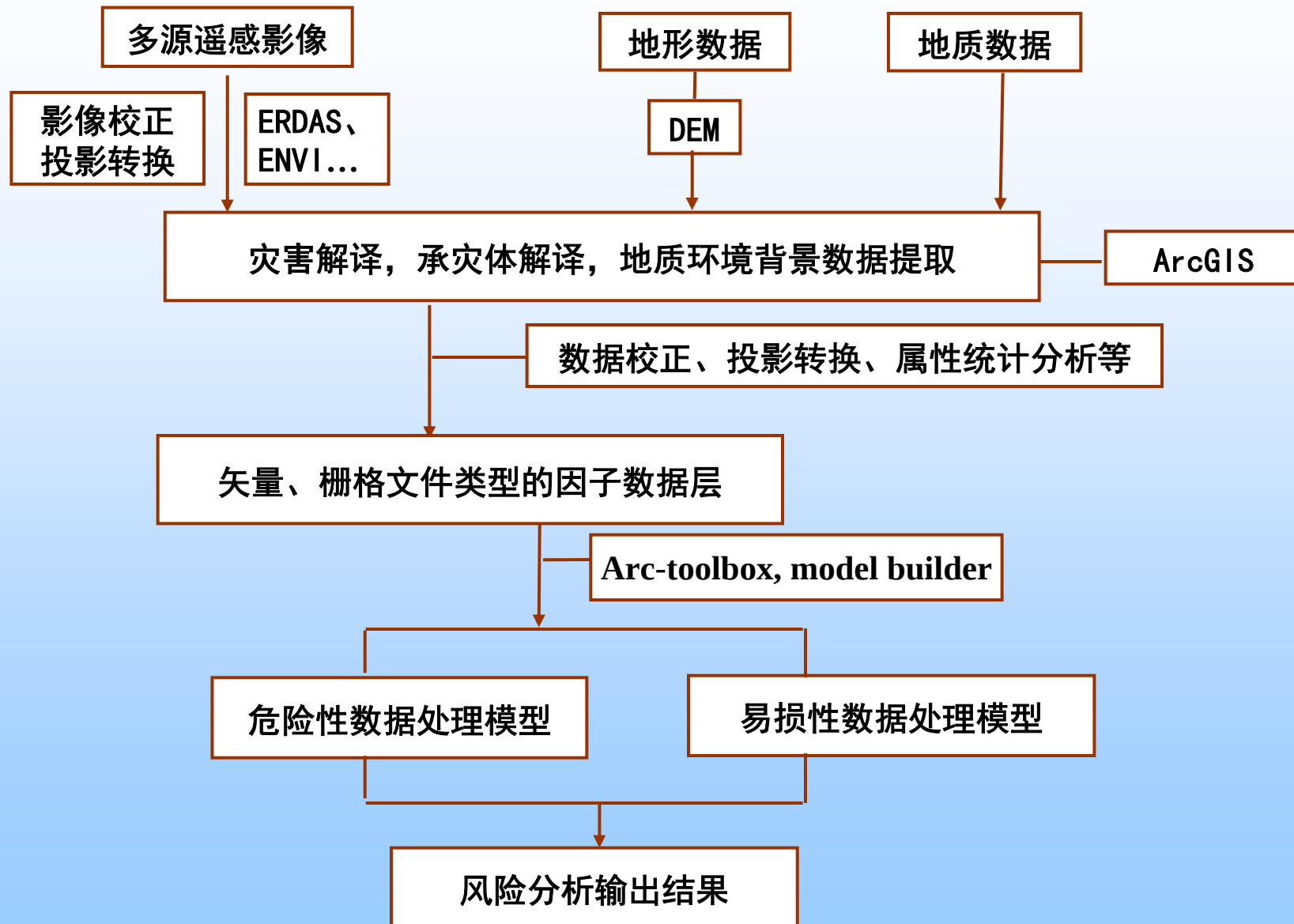


不同厚度墙体破坏的临界条件

临界流速随着流深增大而迅速较小，墙体仅受泥石流静压力作用时，泥石流对应**临界泥深**为0.82m，0.85m，0.89m，水的最大深度为1.08m。

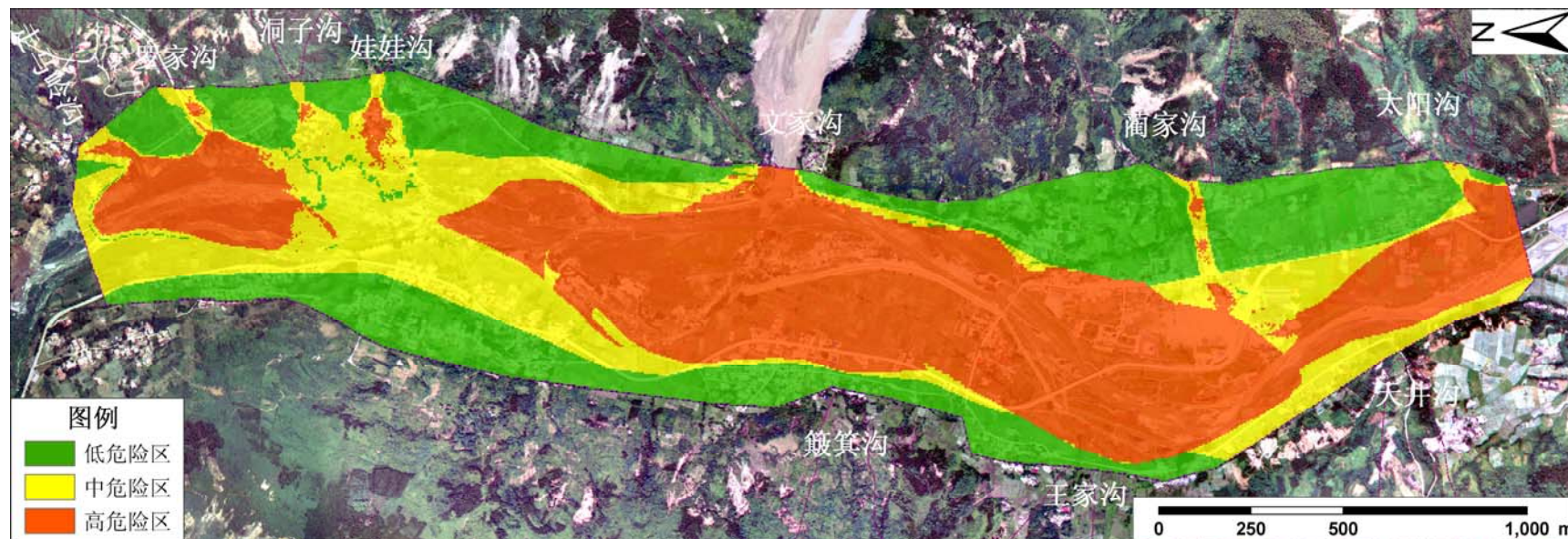
当流深为0.1m时，密度为 2000kg/m^3 的泥石流临界流速约为8.8m/s，密度 1850kg/m^3 的泥石流为9.1 m/s，密度为 1650kg/m^3 的泥石流为9.6m/s，水的临界流速为12.4 m/s。

3.6 风险制图



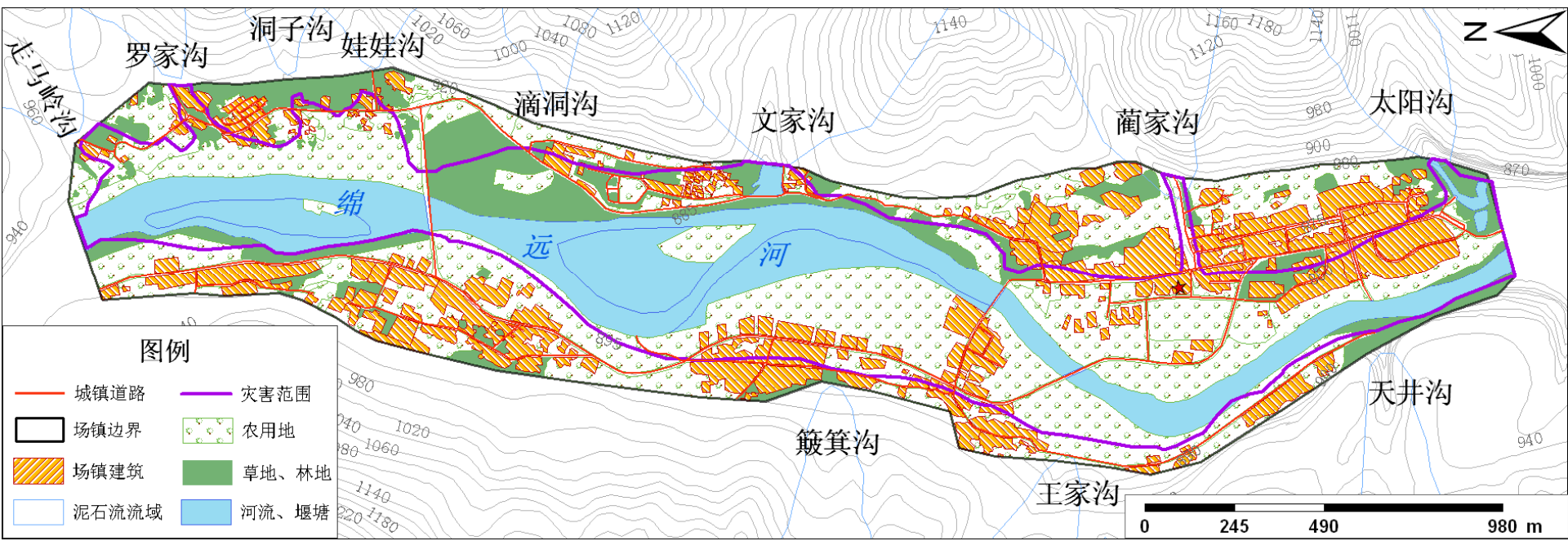
3.7 清平镇群发性泥石流风险分析

危险度计算



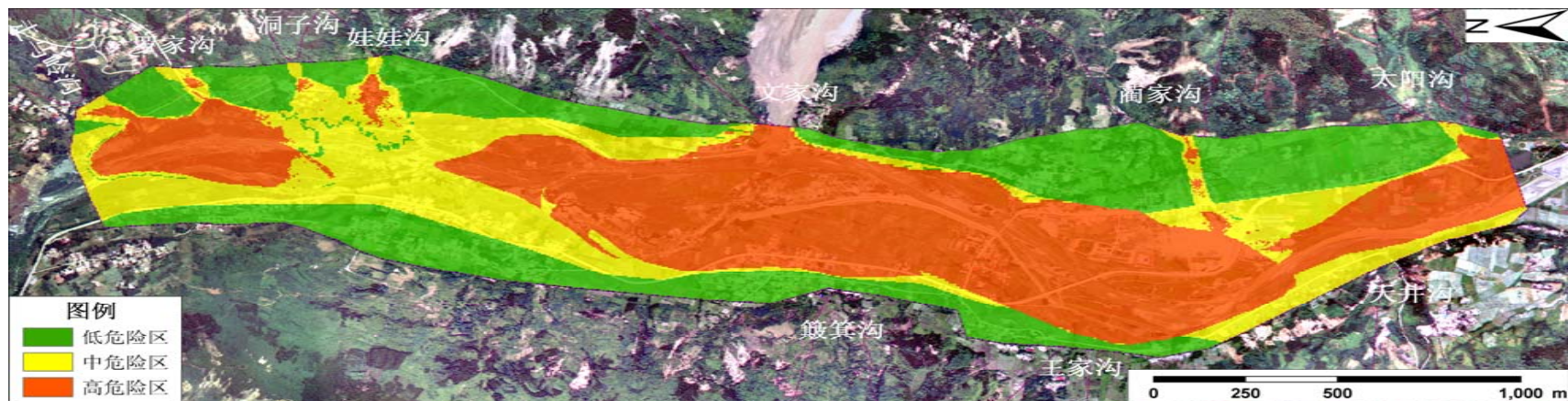
承灾体

- 航拍影像解译土地利用类型：**房屋建筑、林草地、耕地、道路**；
- 以覆盖地物的**空间信息**和**光谱特征**为基础，应用图像中的形状、大小、图形、阴影、位置和纹理等要素作为判读标志，提取地表地物**类型、数量和空间分布**等信息。

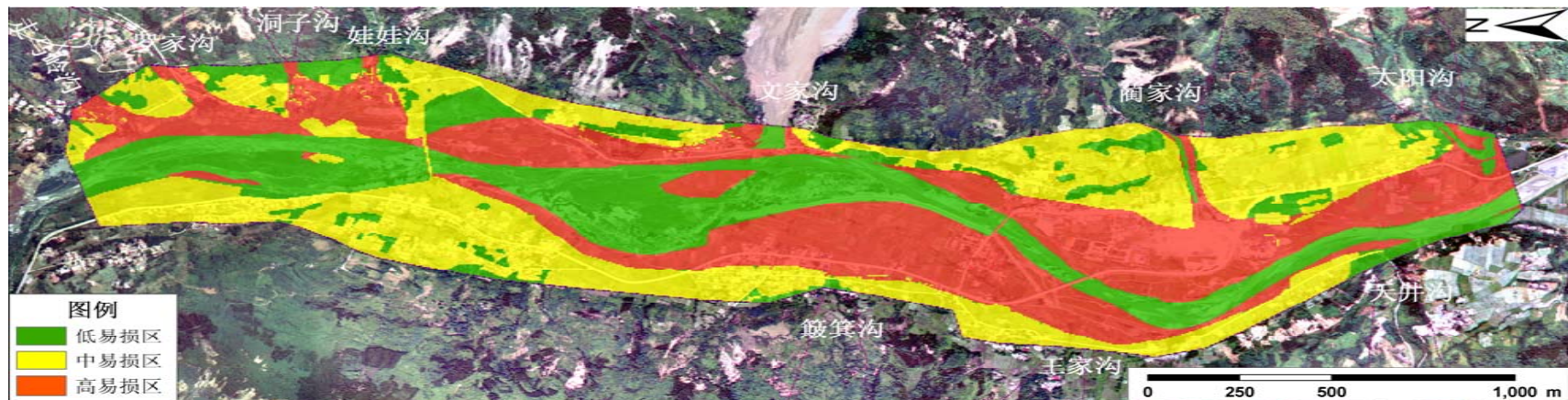


风险度计算

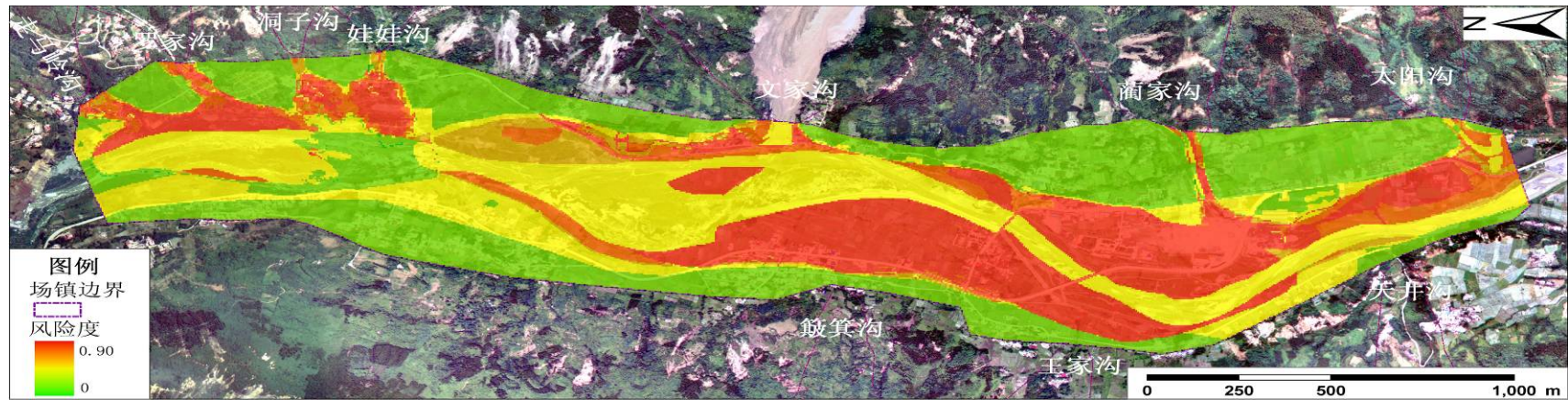
危险度



易损度



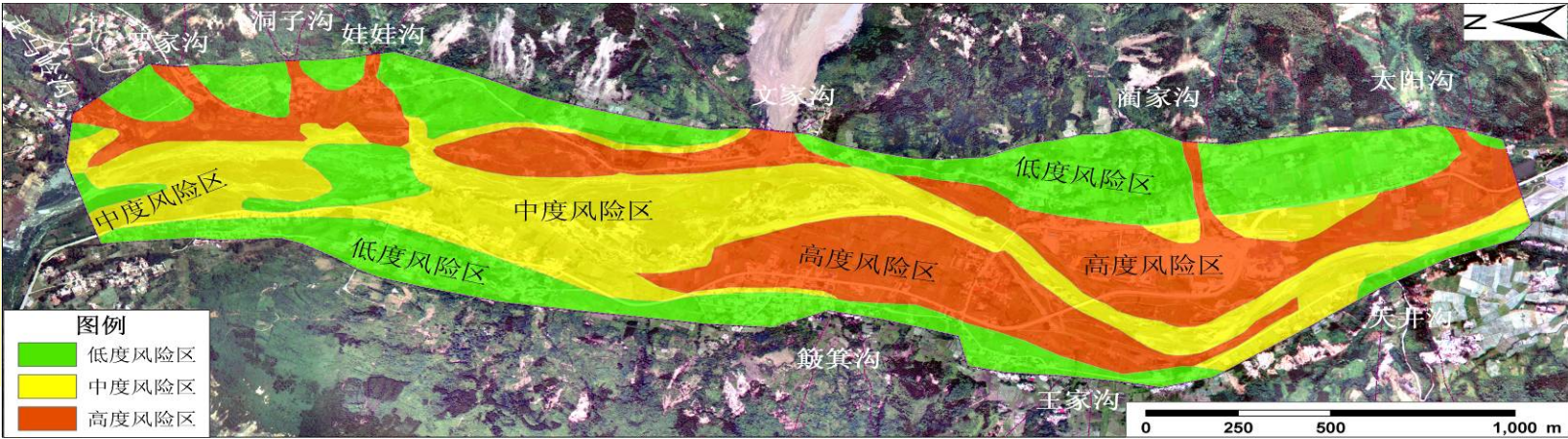
风险度



风险分区与评价

- ◆ 比较数值模拟的堆积范围与场镇受灾分布，泥石流、洪水对场镇危害的面积为1,482,345.1 m²，而模拟的受泥石流洪水影响范围的面积为1,439,488.2 m²，模拟值较实际值小2.9 %。
- ◆ 对不同级别风险区内受泥石流损毁的承灾体数量进行统计分析，对比分析清平场镇泥石流灾害风险评价结果与灾情数据，**评估结果与实际情况基本一致。**

不同风险
区内损毁
承灾体数
量统计表



承灾体 分类	高风险区			中风险区			低风险区			分类合计		
	模拟范围 内灾损值	实际灾 损值	偏差（%）	模拟范围 内灾损值	实际灾 损值	偏差（%）	模拟范围 内灾损值	实际灾 损值	偏差（%）	模拟范围 内灾损值	实际灾 损值	偏差（%）
房屋建筑(m ²)	135,000	134,000	0.7	25,000	26,000	-3.8	5,700	6,000	-5.0	165,700	166,000	-0.2
道路设施(m)	6,900	6,800	1.5	1,000	900	11.1	400	400	0.0	8,300	8,100	2.5
耕地(m ²)	498,000	495,000	0.6	66,000	63,000	4.8	12,300	12,700	-3.1	576,300	570,700	1.0
林草地(m ²)	112,000	107,000	4.7	35,000	36,000	-2.8	14,000	15,600	-10.3	161,000	158,600	1.5

4.1 城镇泥石流防治目标和原理

城镇泥石流防治目标

- (1) 建立泥石流减灾体系，包括工程调控体系、监测预警体系和灾害管理体系，全面提升城镇的防灾抗灾能力。
- (2) 在防治体系的防护下，安全排泄设计标准下的泥石流，不对城区造成危害；对于超过标准泥石流，最大限度控制泥石流规模和危害，及时预警并撤离危险区的人员，尽量避免人员伤亡的发生。
- (3) 为当地人民生产生活和社会经济发展提供安全的空间，保障区域经济可持续发展。
- (4) 发展灾害防治技术，为减灾技术推广提供示范。

城镇泥石流防治原则

(1) 因地制宜，以防为主，以流域为单元，全面规划，综合防治；

(2) 以疏为主，稳-拦-排-护合理配置，调控泥石流的形成与运动过程；

(3) 综合考虑近期和长期的减灾功效，岩土工程措施与植物工程措施有机结合；

(4) 监测、治理和减灾管理相结合，融合主管部门与社区民众的减灾作用，发挥社区减灾能动性。

城镇泥石流防治原理

全流域泥石流过程调控

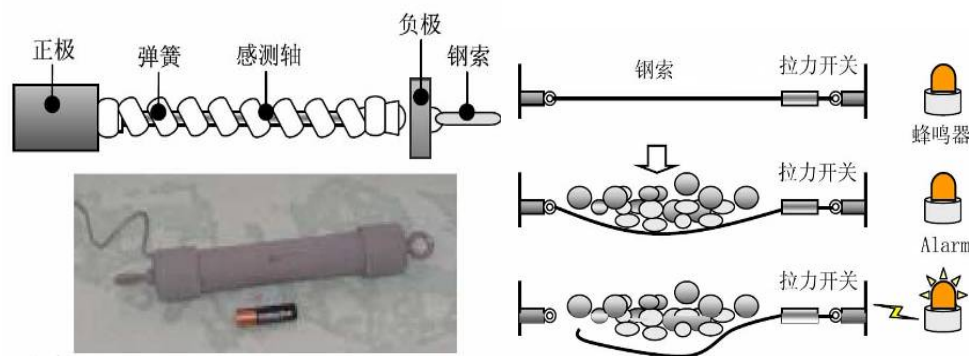
根据主河最大输移能力确定允许排泄量，在全流域配置防治措施，沿程调控物质与能量，有效限制泥石流形成与发展，减轻破坏能力，形成小流域山地灾害综合治理技术。



4.2 城镇泥石流监测预警措施

● 接触式报警器

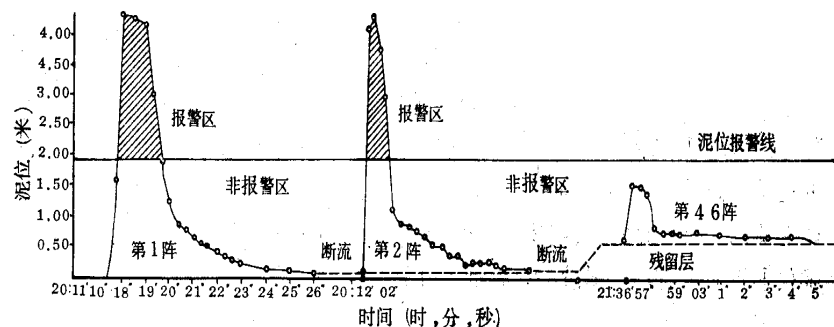
钢索监测器：原理是利用泥石流碰触钢线使钢线断裂，造成探测器内部感测轴(sensing shaft)位移形成通路而传出信号。适于安置在泥石流流通段。



钢索监测器工作原理

● 非接触式报警器

超声波泥位报警仪：利用回波测距的原理，测得传感器断面的泥石流流深，推断泥石流的规模。可根据事先计算的不同频率泥位设定警报阈值，从而实现自动分级预警。



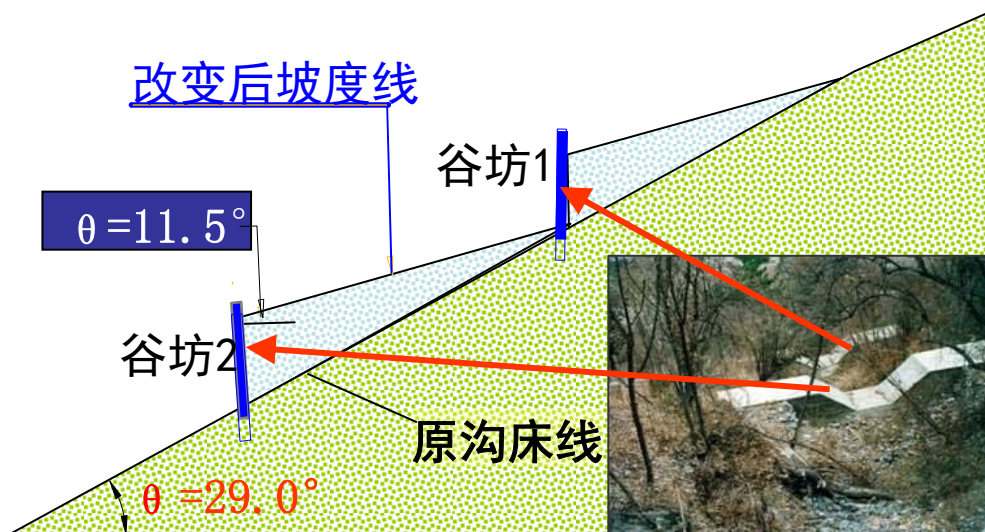
泥石流报警区和非报警区泥位监测

4.3 城镇泥石流岩土工程防治措施

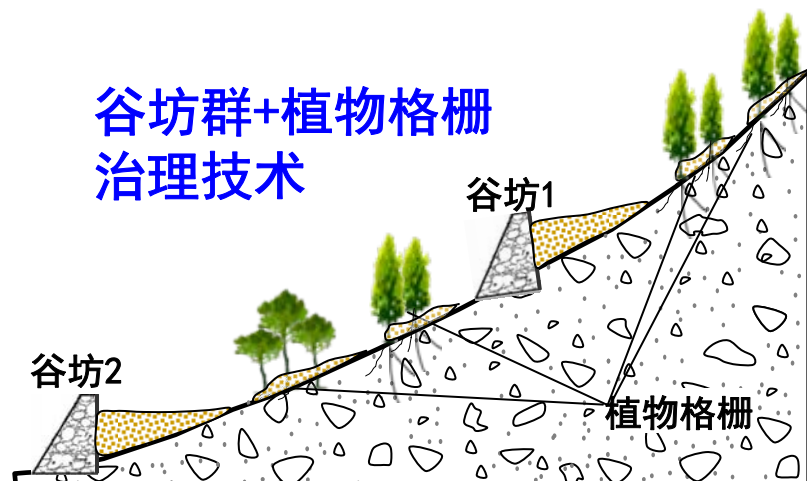
(1) 固沟稳坡工程

用于消能、固床、稳坡，防止或减轻沟床遭受侵蚀，保护坡脚防止坡体失稳，减少松散物质参与泥石流活动，削减沟床流体的能量，抑制泥石流发育。主要措施有谷坊群、植物谷坊和人工阶梯-深潭系统。

◆ 控制泥石流起动条件减灾技术



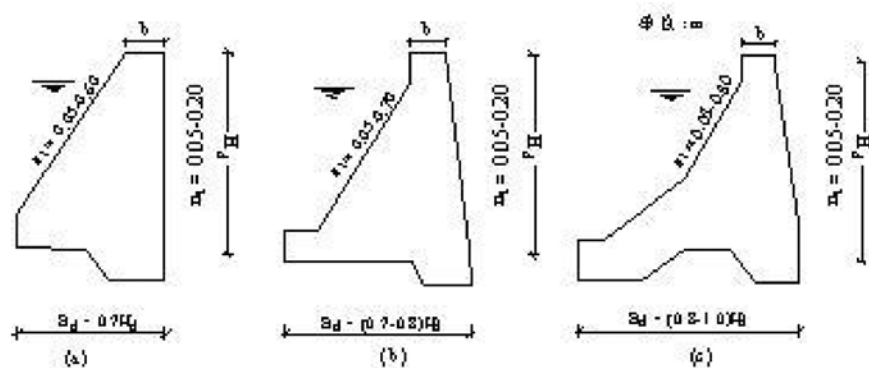
◆ 谷坊群+植物固沟的能量消散与物源调控方法



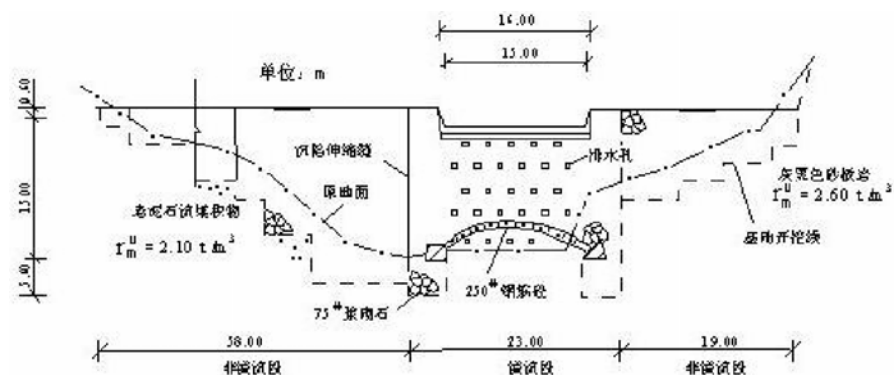
(2) 拦沙调沙工程

用于泥石流的消能、拦沙和停淤，控制其规模。主要功能有：拦截泥沙，消减泥石流的峰值流量；减缓纵坡，降低流速，消减能量；不同孔径的孔口坝可以分级拦挡砾石和漂木，改变泥石流的流体组成，减小其破坏力。

主要措施有：圬工重力式拦砂坝、拱基坝、墩(台)座支承轻型拦砂坝、土石混合坝、缝隙坝、切口坝、刚构格栅坝、柔性网格坝、停淤场等。



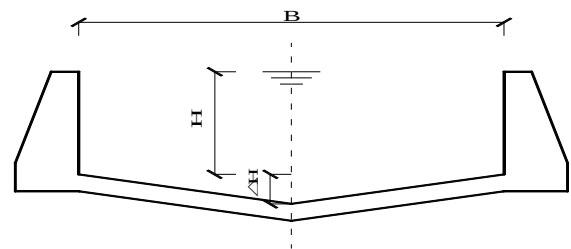
重力式拦砂坝横断面型式图



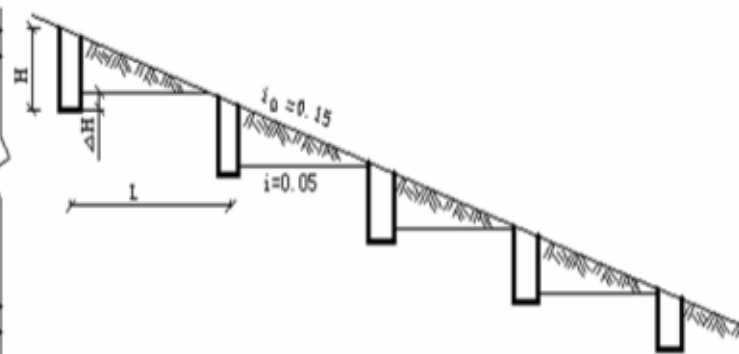
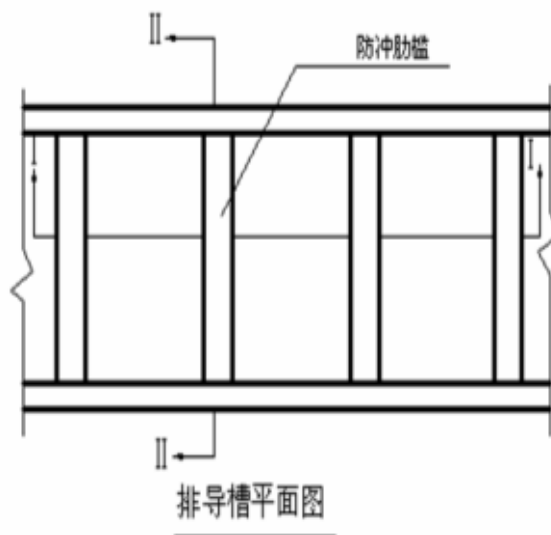
拱基筛子坝

(3) 排导工程

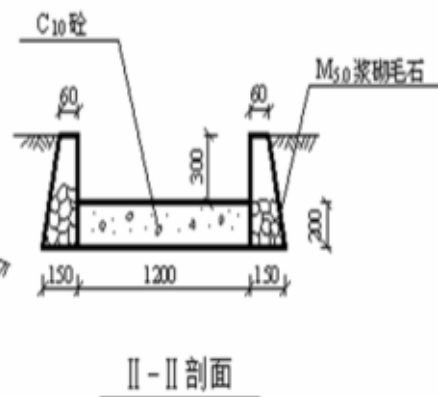
用于水土分离和安全排导泥石流。主要工程措施有排水渠、导流堤、渡槽、排泄槽等。在泥石流形成区采用排水导流措施实现水土分离。泥石流排泄槽在纵坡较大的地区多采用软基肋槛槽以消能防冲，在纵坡较小的地区多采用全衬贴V型槽以减少阻力增加排泄效能。



V型槽横断面



分离式排导槽
结构图



4.4 城镇泥石流生态工程措施

泥石流防治生态工程措施主要有坡面植被修复、水源涵养林、水土保持林、护堤护滩林、退耕还林（草）、坡改梯、坡面截水沟和蓄水池等措施，改善流域产汇流条件，减轻侵蚀，保土滞洪，稳定坡体，起到拟制泥石流形成的作用。



合欢林护坡

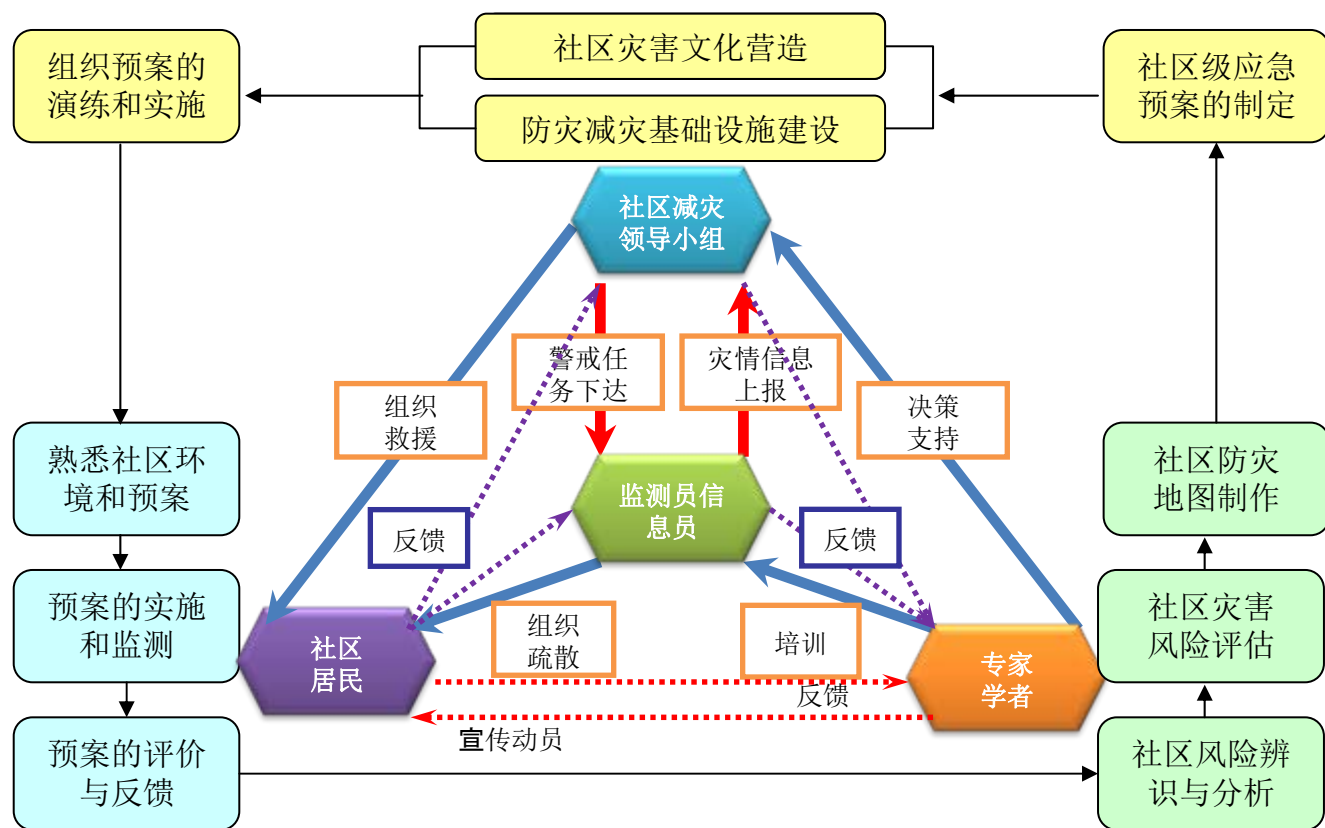


种植马桑护坡

4.5 防灾管理措施

针对不同规模的灾害划分危险区等级，查明各个危险区的人口和财产，规划安全避险处，确定逃离路线，制定应急预案明确责任分工。通过宣传教育，疏散演练，提高群众防灾减灾意识。一旦发出险情警报，保证在最短的时间安全撤离人员，保障人民生命安全。

山区城镇社区 泥石流风险管理运行 机制



- ◆ 群发性泥石流多点暴发，危害互相影响，具有灾害**复合性和叠加性**；大规模泥石流导致冲毁、淤埋等直接危害，堵江后回水淹没、溃决洪水冲毁等间接危害，具有灾害**链生性**特征；
- ◆ 针对山区城镇面临的大规模泥石流群发带来的灾害复合性、链生性和延拓性问题，提出了**基于成灾过程的山区城镇泥石流危险性分析方法**。结合研究区承灾体的类型、数量、分布、承灾体的价值以及承灾体脆弱性指标，提出了**不同类型承灾体的易损性分析方法**。
- ◆ 建立了一套基于泥石流运动数值模拟、RS和GIS技术的**山区城镇泥石流群风险分析与风险区划方法**。该方法包括空间属性数据采集、评价指标体系厘定、风险度计算、风险度分级、风险评价、风险图编制等内容。
- ◆ 提出**山区城镇泥石流灾害的综合防治方案**，主要措施有：监测预警措施、岩土工程措施、生态工程措施和减灾管理措施。



谢谢！