

# 重庆库区工程弃渣泥石流形成机理

刘 菲, 唐红梅

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

**摘要:** 基于对重庆库区工程弃渣泥石流发育的宏观地质环境较系统地分析, 认为重庆库区工程弃渣具备发生泥石流灾害的可能性; 选取沟床比降、沟床糙度、汇水面积、洪峰流量等 10 个因子分析了重庆库区工程弃渣泥石流的稳定性条件, 建立了适合重庆库区工程弃渣泥石流的起动机理; 并以重庆库区奉节县城李家大沟工程弃渣为实例进行验证, 说明工程弃渣的活动性是通过实际验算来具体确定的, 为泥石流的有效防治提供科学依据。

**关键词:** 泥石流; 工程弃渣; 起动机理; 重庆库区

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)04-0620-04

## Formation Mechanism of Construction Spoil Debris Flow in Chongqing Reservoir

LU Fei TANG Hongmei

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract** From systematic analysis of the geological environment in which Chongqing reservoir construction spoil debris flow developed, it was found that it was probable to occur large and extra large debris flow disaster in Chongqing reservoir. From the analysis of 10 factors such as groove gradient, groove roughness, water catchment area and flood peak, the stability condition of Chongqing reservoir construction spoil debris flow and formation mechanism of the debris flow was discovered. The construction spoil of Lijia Valley, Fengjie county, Chongqing reservoir was taken to demonstrate that construction spoil activity could be determined by actual checking, which could provide scientific basis for effective prevention and control of debris flow.

**Key words** debris flow; construction spoil; mechanism; Chongqing reservoir

重庆库区是一个泥石流多发地区, 陈洪凯教授等<sup>[1-5]</sup>在近来的研究中发现, 三峡库区泥石流沟条数已达到 600 多条。重庆库区人数众多, 人口密集, 而且在移民迁建后人口更加集中, 因城镇、道路、矿山开采等建设过程中产生了大量的工程弃渣, 因工程弃渣处置不当而造成损失的事件越来越多<sup>[6]</sup>, 因此, 工程弃渣产生泥石流问题必须引起人们的高度重视。

然而, 到目前为止, 国内外学者对这种泥石流的 研究还非常少。在前人对泥石流形成规律研究<sup>[7-12]</sup>的基础上, 笔者针对重庆库区地形地貌、物源条件、水源条件等方面, 全面系统地分析了重庆库区工程弃渣形成泥石流的环境条件; 选取沟床比降、沟床糙度、汇水面积、洪峰流量、流速、弃渣堆积体规模、弃渣体饱和度、沟谷断面形态、弃渣体颗粒级配等 10 个因子分析了重庆库区工程弃渣泥石流的稳

定性条件, 建立了适合重庆库区工程弃渣泥石流的起动机理, 并以李家大沟工程弃渣体为例, 运用该理论验证其稳定性。

## 1 重庆库区工程弃渣泥石流形成条件分析

一般认为, 泥石流的暴发必备 3 个条件, 即地形地貌、物源和水源条件<sup>[2-3, 13-15]</sup>。

### 1.1 地形地貌条件

重庆库区位于中国地形第 2 阶梯和第 3 阶梯的过渡带, 地跨川、渝、鄂低山峡谷和川东平行岭谷低山丘陵区, 地质构造上包括新华夏构造体系第 3 沉降带之川东褶皱带, 第 3 隆起带之川黔湘鄂隆起褶皱带及大巴山弧形褶皱带和淮阳山字型构造体系的盾地和砥柱, 这 4 大构造体系发育着众多的非稳定性背斜与向斜; 地貌形态受岩性、地质构造的控制,

收稿日期: 2010-04-06

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助项目 (200902288); 全国高校博士点基金项目 (20080430095); 重庆市自然科学基金重点项目 (2008BA0015)

作者简介: 刘 菲 (1985-), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构与岩土相互作用理论及应用技术。E-mail: laifei0813003

@163.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

地势东高西低, 以三峡起点奉节为界, 东为中低山峡谷区, 西为低山丘陵宽谷区, 山地高程 1 000~1 400 m, 谷宽 150~250 m, 高差幅度大, 坡度陡, 一般坡度为 20°~50°, 最陡达 70°以上, 沟谷纵比降为 200 ‰~400 ‰, 为该地区泥石流的形成提供了良好的地形地貌条件。

1.2 物源条件

物源条件集中反映在泥石流形成的松散碎屑物质方面, 在山区小流域内, 如果没有数量足够的松散碎屑物质, 是不可能形成泥石流的。重庆库区内的工程弃渣主要来源于库区建设过程中排放的废土石渣以及由于工程建设导致地形条件变化所提供的侵蚀堆积物, 如采石场和煤矿(图 1), 公路或城市建设向山区要地(图 2)等。这种工程弃渣一般粗细混杂, 并以粗颗粒为主, 且大多为新近堆积, 还没有经过水流等冲刷磨蚀, 结构松散, 多孔隙具有松散性、内聚力小、摩阻力小、相互联结弱等特点, 在降雨时, 雨水易于下渗, 使弃渣呈饱和状态, 力学性能降低, 在同等水源条件下它比自然泥石流暴发几率要大得多。由于各种原因, 造成工程弃渣随意堆积于坡表或沟谷中, 原本郁郁葱葱的良好植被被破坏地千疮百孔, 一旦毁坏造成基岩裸露, 便难以恢复, 不仅为泥石流提供了极易起动的物源条件, 而且由于植被的毁坏降低了启动阈值。

点是暴雨持续时间长, 雨量和雨强都较大, 常常超过了库区激发泥石流的限量雨值(表 1)<sup>[4-5]</sup>, 为库区泥石流的形成提供了水源条件。库区年均降雨量在 1 000~1 400 mm 之间, 最大超过 2 000 mm 且具有降雨量随高程增大而增加的趋势。3 日最大降雨量一般为 200~400 mm, 最大超过 1 000 mm。奉节以东的三峡段 5—9 月为雨季, 雨量占全年降水量的 68.4%~70%。奉节以西至万州段 4—9 月为雨季, 雨量占全年降雨量的 77.7%~80%; 重庆一带 5—9 月为雨季, 雨量占全年降水总量的 69.3%。

表 1 库区激发泥石流的限量雨值

Tab 1 Rain limited value in debris flow of reservoir /mm			
H 年均降雨量	$H_{24(D)}$	$H_{1(D)}$	$H_{1/6(D)}$
> 1 200	100	40	15
800~1 200	60	25	12

2 重庆库区工程弃渣泥石流起动机理

根据固体力学定义, 构成泥石流的松散固体物质属于松散介质, 其物理性质介于固体与液体的中间状态, 以部分流动性区别于固体, 仅在一定范围内能保持其形状, 基本上没有抵抗拉伸的能力或抗拉强度很小, 抗剪强度随剪切面上的正压力增加而增加; 其不同于液体, 液体流动性大, 没有固定的形状, 抵抗剪切能力更小。

通过野外调查, 重庆库区的工程弃渣泥石流起动可以分为两类: 第 1 类, 在高强度降雨作用下, 堆积体表面的厚层土体在坡面破坏、滑动, 同时在沟谷径流作用下, 坡脚浸润, 从沟床处剪出, 在沟谷径流作用下, 形成沟谷泥石流, 这一类称之为沟谷型泥石流<sup>[7]</sup>; 第 2 类, 在中小强度长时间降雨作用下, 滑坡体堆积体表层远离沟道的厚层土体在坡面破坏、滑动, 在坡面滑动中, 逐渐解体, 并在沟道中堆积, 在沟道径流作用下, 形成泥石流, 这一类称之为坡面泥石流。笔者以重庆库区工程弃渣形成的沟谷型泥石流为例, 分析其起动机理。

2.1 影响沟谷型工程弃渣泥石流起动的因素

在重庆库区, 由于沟谷地形的约束, 汇水流动方式制约了工程弃渣堆积体的分布形态, 并造成沟床比降的变化, 粗糙度加大。弃渣体多以堤坝式横挡沟道或堰堤式散布在沟床两侧。一般来讲, 沟床比降小于斜坡坡度, 但汇水量大, 泥石流起动主要靠洪峰流量及流速、弃渣体饱和程度, 弃渣体自重力作用处于次要地位。初步断定在库区影响沟谷泥石流起动的主要因素有: 沟床比降、沟床糙度、汇水面积、洪峰流量、流速、弃渣堆积体规模、弃渣体饱和度、沟谷断面形态、弃渣体颗粒级配等 10 个因子。

2.2 沟谷型工程弃渣泥石流起动机理

由于人为堆积于沟谷的弃渣体堆积部位不同于



图 1 重庆五宝镇采石场的弃渣  
Fig 1 Quarry spoil in Wubao town of Chongqing



图 2 建设弃渣和毁林  
Fig 2 Construction spoil and destroyed forest

1.3 水源条件

重庆库区属亚热带季风气候区, 是西南季风和东南季风交替影响区, 又是南北冷暖气流交绥带, 为灾害性暴雨天气过程提供了有利条件。库区暴雨特

自然堆积体, 并且一般为新近堆积, 比较疏松, 孔隙度大, 渗透性强, 易达到饱和, 故沟谷工程弃渣泥石流的起动主要由洪峰流量  $Q$ 、流速  $u_{\text{水}}$ 、弃渣量  $LBH$ 、沟床比降  $J$  控制, 泥石流起动稳定系数  $K$ :

$$K = \frac{T}{F} = \frac{\text{抗动力}}{\text{起动力}} \begin{cases} < 1 & \text{不稳定} \\ = 1 & \text{极限平衡} \\ > 1 & \text{稳定} \end{cases} \quad (1)$$

工程弃渣泥石流起动是由暴雨激发所引起, 在降雨过程中, 沟谷里的弃渣体在饱水条件下, 将受到以下几种力的作用<sup>[16-17]</sup> (图 3):

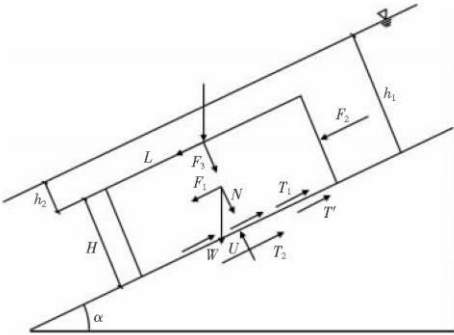


图 3 工程弃渣体受力示意图

Fig. 3 Sketch of construction spoil under force

$F_1$  为弃渣体重力在顺破方向的分力:

$$F_1 = W \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

$$\text{重力 } W = LBH \gamma \quad (3)$$

式中:  $L$ 、 $B$ 、 $H$  分别为弃渣堆长、宽、高。

由于沟谷坡降比与斜坡比降相比较很小, 故  $F_1$  是一个比较小的力。

在降雨过程中, 降雨一部分在坡面形成地表径流, 一部分下渗到堆积体中。地表径流一方面在坡面形成坡面冲刷; 另一方面汇流在沟中增强沟中水的冲刷掏蚀能力, 沟床冲刷使沟岸边、边坡出现临空面, 降低沟岸边、边坡弃渣的稳定性。弃渣体在饱水条件下的渗透力表现在其受到的水流浮力  $U$  上面。

$F_2$  为地表径流对弃渣体的冲刷力:

$$F_2 = \frac{Q \cdot \gamma_{\text{水}} \cdot u_{\text{水}}}{g \Delta t} + Q \cdot \gamma_{\text{水}} \cdot \sin \alpha - T' \quad (4)$$

$$T' = \gamma_{\text{水}} \cdot J \cdot R \quad (5)$$

$$R = \left( \frac{n \cdot u_{\text{水}}}{\sqrt{J}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

上式中:  $Q$  为洪峰流量;  $T'$  为地表径流引起的剪切力;  $R$  为水力半径;  $n$  为粗糙系数, 取值为 0.445。

$F_3$  为降雨雨滴对弃渣体的打击力:

$$F_3 = \frac{\sum_{i=1}^m m_{\text{雨}} i u_{\text{雨}}}{\Delta t} \cdot \sin \alpha \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

相对于  $F_2$  来说, 雨滴打击力很小, 可视为 0。  
 $T_1$  为弃渣体土体间黏聚力:

$$T_1 = LBc \quad (8)$$

式中:  $c$  为土的黏聚力。

$T_2$  为弃渣体静摩擦阻力:

$$T_2 = f(N - U) \quad (9)$$

$$U = \gamma_{\text{水}} h_1 LB \quad (10)$$

式中:  $U$  为水流浮力;  $h_1$  为洪水深度。

将上述各力代入式 (1) 得:

$$K = \frac{f(W \cdot \cos \alpha - U) + LBc}{W \cdot \sin \alpha + \frac{Q \cdot \gamma_{\text{水}} \cdot u_{\text{水}}}{g \Delta t} + Q \cdot \gamma_{\text{水}} \cdot \sin \alpha - \gamma_{\text{水}} \cdot J \cdot R} \quad (11)$$

该理论适合校核和评判降雨条件下准泥石流流体的稳定性。人为堆积在沟谷里的工程弃渣已经是或接近典型的准泥石流流体, 在降雨作用下更易达到饱和, 因此适合运用该法进行稳定性评估。故式 (11) 可以作为工程弃渣诱发的沟谷型泥石流起动机理, 运用以上理论进行工程验证。

3 实例分析

3.1 实例 1

重庆库区, 工程弃渣泥石流多由暴雨引起, 物源区汇水面积大, 且物源丰富。李家大沟泥石流是重庆库区影响较为显著的大型沟谷型泥石流。因此, 以李家大沟观测资料为参照建立适用于重庆库区工程弃渣泥石流的起动机理, 可为重庆库区建设过程中工程弃渣泥石流关键防治技术的确定提供理论依据。

3.1.1 李家大沟基本资料

李家大沟属长江一级支沟, 为浅中切割脊状低山沟谷地形。流域总体近南北走向, 全长约 3.9 km, 流域面积 2.64 km<sup>2</sup>。上游切割较深, 最深达 100~125 m, 流域最高海拔 950.6 m, 入长江处沟口高程 135 m, 平均纵比降 14.95‰。下游段较平缓, 纵比降 7.78‰, 中游稍陡, 纵比降 12.7‰~23.6‰。上游最陡, 纵比降 24.91‰。沟谷呈“V”型谷。沟坡坡角 40°~48°。上游右侧发育 5 条冲沟, 源头发育两条支沟。据奉节县气象局资料, 该区多年平均蒸发量 1324.4 mm, 平均降雨量为 1132.2 mm, 雨量多集中在 5—9 月份, 年最大降雨量 1635.2 mm, 日最大降雨量 127.9 mm。区内水土流失现象严重。人类工程活动强烈, 新城建设已将李家大沟的中下游分级填方整平, 沟的两侧及中部新建有大量建筑, 据统计, 该地区由于工程建设导致的工程弃渣土体大大恶化了李家大沟的工程地质环境。出现了多个不稳定的斜坡和变形体, 如刘家湾滑坡、刘家包变形

体的斜坡和变形体等。

3 1 2 李家大沟 工程弃渣泥石流的基本特征

李家大沟为一季节性冲沟, 形成区汇水面积约  $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 主沟长 1 008 m, 纵比降 24.9 ‰。左侧斜坡区地形陡峻, 工程弃渣量最大, 诱发泥石流的可能性也是最大的。下部坡度接近  $50^\circ \sim 60^\circ$ , 上部坡度  $30^\circ \sim 50^\circ$ , 出露的基岩为巴东组 3 段中一厚层状的泥灰岩和泥质灰岩; 缓坡表面为厚约 30 ~ 50 cm 的残坡积层。坡上植被覆盖率 30%。左侧较大的冲沟为卧马槽冲沟, 冲沟的上部因弃渣填方已形成坡高约 50 m 的高边坡, 坡度  $30^\circ \sim 35^\circ$ , 由于边坡陡且临空, 在堆积体顶面经常出现不均匀沉降和拉裂缝, 并在暴雨作用下产生坍塌, 总方量约  $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。下部约 20 m 处, 有 2 个采石厂, 外侧堆积方量约  $3.00 \times 10^4 \text{ m}^3$  的采石废渣 (横截面见图 4)

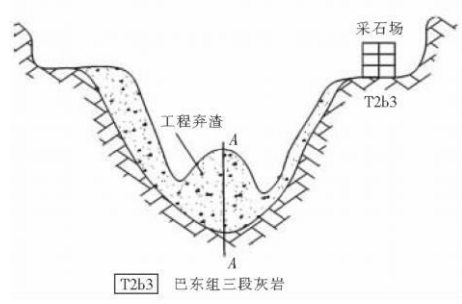


图 4 李家大沟的沟谷形态和弃渣堆积特征  
Fig 4 Gully form and characteristics of waste-dump of the Lijia Valley

3 1 3 起动机理分析

该工程弃渣堆积长度约 300 m, 宽约 25 m, 高约 4 m, 体积为  $3\,000 \text{ m}^3$ , 该沟宽约 30 m, 沟床比降取 24.9 ‰, 沟床底坡约  $14^\circ$ 。由李家大沟观测资料可知, 该工程弃渣设计 50 a 一遇的洪峰流量为  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ , 流速  $1.5 \text{ m/s}$ , 饱和内摩擦角  $14^\circ$ , 饱和黏聚力为  $0.008 \text{ MPa}$ , 容重为  $22 \text{ kN/m}^3$ , 水的容重  $10.0 \text{ kN/m}^3$ 。选取沟底弃渣体为研究对象, 取 A-A 剖面图, 其受力示意图 3 其稳定性计算如下:

$$\begin{aligned} W &= LBH \gamma = 6.6 \times 10^5 \text{ kN} \\ \sin \alpha &= 0.2419, \cos \alpha = 0.9703 \\ F_1 &= W \cdot \sin \alpha = 1.5965 \times 10^5 \text{ kN} \\ N &= W \cdot \cos \alpha = 6.404 \times 10^5 \text{ kN} \\ R &= \left( \frac{n \cdot u_{\text{水}}}{\sqrt{J}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left( \frac{0.445 \times 1.5}{\sqrt{0.2419}} \right)^{\frac{3}{2}} = 1.5811 \\ T' &= \gamma_{\text{水}} \cdot J \cdot R = 10.0 \times 0.2419 \times 1.5811 = 3.8247 \text{ kN} \\ F_2 &= \frac{Q \cdot \gamma_{\text{水}} \cdot u_{\text{水}}}{g \Delta t} + Q \cdot \gamma_{\text{水}} \cdot \sin \alpha - T' = \end{aligned}$$

708 290.4 kN

$$\begin{aligned} T_1 &= LBc = 0.6 \times 10^5 \text{ kN} \\ h_1 &= 12.3 \text{ m}, U = \gamma_{\text{水}} h_1 LB = 3 \times 10^5 \text{ kN} \\ f &= \tan \varphi = 0.2493 \\ T_2 &= f(N - U) = 0.8486 \times 10^5 \text{ kN} \\ K &= \frac{T}{F} = \frac{0.8486 \times 10^5 + 0.6 \times 10^5}{1.5965 \times 10^5 + 708.2904} = 0.90 < 1 \end{aligned}$$

由计算可知, 该工程弃渣体为不稳定的松散物质。

3 2 实例 2

重庆五宝镇采石场工程弃渣体长 100 m, 宽 20 m, 高 3.5 m (图 1)。该处沟宽 30 m, 沟床底坡  $15^\circ$ , 设计 50 a 一遇的洪峰流量为  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ , 流速  $1.9 \text{ m/s}$ , 饱和内摩擦角  $15^\circ$ , 饱和黏聚力为  $0.008 \text{ MPa}$ , 容重为  $22 \text{ kN/m}^3$ , 水的容重  $9.8 \text{ kN/m}^3$ , 则:

$$\begin{aligned} h_1 &= 3.3 \text{ m}, h_2 = 0, W = 154\,000 \text{ kN} \\ N &= 148\,753 \text{ kN}, U = 64\,680 \text{ kN} \\ F_1 &= 39\,858 \text{ kN}, F_2 = 1\,293 \text{ kN} \\ T_1 &= 16\,000 \text{ kN}, T_2 = 22\,527 \text{ kN}, K = 0.94 \end{aligned}$$

该弃渣体为不稳定的弃渣体。

由以上 2 例分析计算可以看出,  $N$ 、 $U$ 、 $F_1$ 、 $T_1$  和  $T_2$  值较大, 是主要影响值;  $F_2$  值较小, 为次要影响值。而  $N$  和  $F_1$  又取决于  $\alpha$ ,  $U$  值取决于洪峰流量,  $T_1$  和  $T_2$  取决于其中包含的  $c$  和  $\varphi$  值, 且  $F_2$  中较大项取决于洪峰流量和流速。所以, 工程弃渣起动的关键因素主要是, 沟床底坡坡度、渣堆饱和内摩擦角、黏聚力以及洪峰流量和流速。降雨的影响主要表现在地表径流对弃渣体的冲刷力、水流对弃渣体产生的浮力, 以及渣堆饱和内摩擦角的影响上, 其中地表径流的冲刷力作用是较小的。

4 结 论

综合分析, 可得出以下几点结论:

- 1) 通过对重庆库区工程弃渣爆发的环境条件研究, 认为重庆库区完全具备发生工程弃渣泥石流灾害的条件;
- 2) 选取沟床比降、沟床糙度、汇水面积、洪峰流量、流速、弃渣堆积体规模、弃渣体饱和度、沟谷断面形态、弃渣体颗粒级配等 10 个因子分析了重庆库区工程弃渣泥石流的稳定性条件, 建立了适合重庆库区工程弃渣泥石流的起动机理;
- 3) 以重庆库区奉节县城李家大沟工程弃渣和重庆五宝镇采石场的工程弃渣体为实例进行验证, 说明工程弃渣在某一暴雨频率的洪峰作用下能否起动的, 是可以通过实际验算来具体确定的。

5 结 论

通过模型试验研究优化了门坎滩水电站设计方案,使其在泄流及消能等方面达到满意的效果。“设计-模型试验-优化方案-模型试验”的设计思路对于水电站工程的建设来说意义非常重大。多年的研究成果及试验成果表明,在沟深谷狭、落差大且地质条件复杂的情况下,选择宽尾墩作为消能结构能够达到较好的消能效果,在大力发展小水电建设过程中,进一步研究应用宽尾墩,对于小水电站建设具有积极意义。

参考文献:

[ 1 ] 张英克,王继保,陈和春.芙蓉江鱼塘水电站泄洪消能方案试验研究[J].三峡大学学报,2005,27(1):20-23

[ 2 ] 长科院水工研究室.趾墩消力池空蚀问题的试验研究[M]//长科院科研成果选编:第1期.武汉:长科院水工研究室,

1974:35-56.

[ 3 ] Ricardo D B. Cavitation phenomenon analysis on surface spillway of ilha solteira hydroelectric power plant [ C ] //The International Symposium on Hydraulics for High Dams Proceeding Beijing Design Institute of Chongqing Three Gorges 1988

[ 4 ] 龚振赢.堰顶收缩射流及趾部库式消力池联合消能工试验成果简介[R].重庆:水电部第四工程局石泉分局科研所报告,1978.

[ 5 ] 谢省宗,李世琴,李桂芬.宽尾墩联合消能工在我国的发展[J].红水河,1996,14(3):24-31

[ 6 ] 郭军,刘之平,刘继广.大朝山水电站宽尾墩阶梯式坝面泄洪水力学原型观测[J].云南水力发电,2002,18(4):16-20.

[ 7 ] 陆民安.百色水利枢纽 RCC 主坝表孔宽尾墩联合消能工设计与研究[J].广西水利水电,2004(2):53-60.

[ 8 ] 杨首龙.宽尾墩-阶梯式坝面-库池联合消能工的水力特性[J].水力发电,1994(9):29-31

[ 9 ] 杨胜发.重庆市云阳县门坎滩水电站水工模型研究报告[R].重庆:重庆交通大学河海学院,2006.

(上接第 623 页)

参考文献:

[ 1 ] 陈洪凯,唐红梅.从菲律宾 2 17 泥石流灾害探讨三峡库区的泥石流问题[J].重庆交通学院学报,2007,26(1):112-115.

[ 2 ] Chen Hongkai Tang Hongmei. Essential principle of debris flow [ J ]. W seas Transactions on Fluid Mechanics 2006, 10(1): 932-936

[ 3 ] Chen Hongkai Tang Hongmei. Research and control of giant debris flow along highway [ C ] //The Proceedings of The China Association for Science and Technology. Beijing: Science Press 2004: 320-328.

[ 4 ] 谭炳炎.三峡库区泥石流活动及其发展趋势[J].中国铁道科学,2003,24(5):9-14.

[ 5 ] 谭炳炎.三峡库区泥石流活动发展趋势的分析预测[J].自然灾害学报,2003,12(1):91-95.

[ 6 ] 孟晖,胡东涛.我国主要人类工程活动引起的滑坡、崩塌和泥石流灾害[J].工程地质学报,1996,4(4):71-77

[ 7 ] 康志成,李焯芬,马藹乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2005

[ 8 ] King J P. The Tsingshan debris flow [ C ] //Special Project Report SPR 6/96 Hong Kong Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department 1996 427, 129& 166

[ 9 ] 崔鹏.泥石流起动机理的研究[D].北京:北京林业大学,1990

[ 10 ] 唐红梅,翁其能,王凯,等.冲於变动型泥石流沟中物质启动类型及机理研究II[J].重庆交通学院学报,2005,20(2):69-72

[ 11 ] 莫志柏.矿山泥石流形成机理及治理方法研究[D].长沙:中南大学,2003.

[ 12 ] Chen Hongkai Tang Hongmei Chen Yeying. Research on methods to calculate velocities of solid phase and liquid phase in debris

flow [ J ]. Applied Mathematics and Mechanics 2006, 27(3): 399-408.

[ 13 ] 崔鹏,韦方强,谢洪,等.中国西部泥石流及其减灾对策[J].第四纪研究,2003,23(2):142-151

[ 14 ] 蒋志信.西南山区暴雨泥石流沟简易判别方案[J].自然灾害学报,1994,3(1):75-83

[ 15 ] 左科,张奇,曹文,等.三峡工程建设后重庆境内泥石流形成机理及发育趋势[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(2):268-271.

[ 16 ] 白志勇.泥石流松散物质启动条件的分析与计算[J].西南交通大学学报,2001,36(3):318-321.

[ 17 ] 张永双,金逸民,吴树仁,等.人工弃渣诱发泥石流的动力学研究:以三峡库区巴东县黄家大沟为例[J].地球学报,2005,26(6):571-576

[ 18 ] 陈洪凯,唐红梅,陈野鹰.公路泥石流流力学[M].北京:科学出版社,2007

[ 19 ] Wang Yuyi Tan Rongzhi Jan Chyandeng et al. Gavel accumulation in deposits of viscous debris flows with hyper-concentration [ J ]. Journal of Mountain Science 2009, 6(1): 85-89.

[ 20 ] Cui Peng Ge Yonggang Zhuang Jianqi et al. Soil evolution features of debris flow waste shoal land [ J ]. Journal of Mountain Science 2009, 6(2): 181-188

[ 21 ] Mahapatra S Dana R K. Lateral variation in gravelly sediments and processes in an alluvial far-far delta setting north of Durgapur [ J ]. Journal of the Geological Society of India 2009, 74(4): 480-486

[ 22 ] Jiang Yuhong Wei Fangqiang Zhang Jinghong et al. Regional prediction of impending debris flow based on Doppler weather radar [ J ]. Wuhan University Journal of Natural Sciences 2007, 12(4): 627-632