

文章编号: 1008-2786-(2016)2-194-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000118

# 水石流起动的流量控制研究

陈晓辉 孙红月 梅 成 张文君 钱文见

(浙江大学 海洋工程系 浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 沟谷中水石流的发生不仅需要一定的坡度,还需要一定的水深。对于确定的沟谷,其断面形式是一定的,通过研究水石流发生时层移运动厚度与沟谷中所需最小水深的相关关系,并利用均匀流的水力学模型理论分析水深与流量的关系,可建立沟谷中层移厚度与沟谷中水流流量关系,从而确定水石流发生时层移运动厚度与所需流量的关系。通过运用数学推导的方法,得出汇水动力区接触松散堆积物前的均匀流水深  $h_w$  与水石流层移运动厚度  $z$  的关系式,表明在特定沟谷坡度和堆积物特性一定的条件下,水深是决定松散堆积物转化为层移厚度大小的动力关键因素。纵坡坡度、沟谷断面形式以及横坡系数大小都会对水深产生影响。随着沟谷坡度的增大,水石流起动所需的清水水深变小。基于这理论分析结果,工程上可通过流量控制的方法,实现最低限度的分流,避免松散堆积物整体性的层移运动,防止水石流的发生。

**关键词:** 水石流; 流量控制; 沟谷; 断面; 层移运动; 松散堆积物; 纵坡; 横坡系数

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

人类同泥石流的斗争由来已久,如意大利在 300 多年前就开始了泥石流的防治工作,俄罗斯、日本等国也有 200 多年的防治历史,但真正对泥石流运动进行研究,则是近半个世纪的事。在以往的研究中,人们也有不少关于泥石流起动方面的文献,但是不同类型的泥石流由于颗粒组成及重度不同,其形成机理差异很大,针对不同类型的泥石流,需要研究其具体的形成机理及影响因素。

根据颗粒组成及重度大小,可将泥石流分为泥流、狭义泥石流和水石流<sup>[1]</sup>。水石流作为泥石流的一种类型,每年在我国各地都有发生,如云南苍山十八溪发育十分典型的水石流<sup>[2]</sup>,1981-08 陕南特大暴雨期间宝成铁路北段普遍发生了水石流<sup>[3]</sup>;2013-07-18 四川省冕宁县牦牛坪稀土矿区水石流,威胁矿区人员安全和下游彝族群众的生产和生活<sup>[4]</sup>。

因此,应该重视水石流起动方面的研究,为水石流的防治工作提供指导。

## 1 水石流研究现状

吴永<sup>[5]</sup>等用瑞典条分法的理论把沟谷松散堆积物划分为  $n$  段条块,同时借助于水力学潜流的有关知识对松散堆积体失稳机制进行了分析。高冰<sup>[6]</sup>等着重研究不同降雨强度对砂性水石流启动下滑过程的影响,分析结果表明砂土在雨水作用下,砂颗粒的运动是导致堆积土体内部力学变化的主要因素。邵莲雪<sup>[7]</sup>等以栾川瓦石岩沟为例研究了小沟床比降沟谷水石流形成原因,指出均匀发育众多具悬沟、陡沟,水力产能条件强的支沟会将具有较大动能的水体注入动能较小的主沟内,对主沟水体进

收稿日期(Received date): 2014-11-12; 修回日期(Accepted): 2015-01-18。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目: 自淤虹吸排水技术在泥石流防治中的应用研究(41272336)。[Project supported by the National Natural Science Foundation: Application of Self-Dredging Siphon Drainage Technology in Debris Flow Prevention(41272336).]

作者简介(Biography): 陈晓辉(1988-),男,河南汝州人,在读研究生,从事地质灾害防治方面的工作。[Chen Xiaohui(1988-),male,born in Ruzhou of Henan,graduate student,engaged in geological disaster prevention.] E-mail: 983674048@qq.com

\* 通信作者(Corresponding author): 孙红月(1970-),女,浙江诸暨人,博士,教授,主要从事地质灾害防治教学与科研工作。[Sun Hongyue(1970-),female,born in Zhuji of Zhejiang,prof.&Dr.,majoring in the work of teaching and scientific research of geological disasters prevention.] E-mail: shy@zju.edu.cn

行接力加速的同时,还将对沟道堆积物进行有效的应力波冲击,最终致使沟道堆积物起动和液化并与主沟水流掺混形成水石流体。屈永平<sup>[8]</sup>等进行了水力类泥石流冲出模型试验的研究,尝试探究侵蚀高度与纵比降的关系和流量与揭底距离的关系。

以上对水石流的研究,为认识水石流的形成机理提供了借鉴,但是他们并没有真正揭示水石流起动与所需水流量的关系,对于如何控制水石流形成的水力条件尚不得而知,对这方面的研究国内外尚未见有报道,是急需探讨的问题。

我国东南地区暴雨频繁,山区沟谷中堆积物多为碎石土,为水石流的形成提供了物源和水源条件(图1)。由于碎石土的相互嵌合作用,在水流作用下其发生剪切破坏的深度通常有确定值,也就是说,如果特定水流作用能够引起的层移厚度小于堆积土产生运动的最小厚度时,就不会形成水石流。松散堆积物是层移层固体物质的组成部分,水石流形成时水流填充松散堆积物的孔隙,清水流量越大,可起动的层移厚度就越大。因此,研究水流作用可起动的移层厚度与所需流量的关系,就显得尤为重要。



图1 水石流冲毁浙江省某公路路基

Fig. 1 Water-stone flow destroyed the bedrock of a highway in Zhejiang

## 2 水石流形成的临界模型

水石流的形成,必须同时具备丰富的松散固体物质、足够的水源和合适的地形三个基本条件。形成水石流的常见地貌,一般可划分为形成区、流通区和堆积区三部分(图2),其中形成区包括汇水动力区和固体物质补给区<sup>[9]</sup>。在这里首先要研究的是泥石流形成区,即汇水动力区和固体物质补给区的相互作用关系。

### 2.1 理论依据

孟河清<sup>[10]</sup>等指出:水石流属于稀性泥石流,其运动特性接近于推移质运动为主的挟沙水流。张瑞瑾<sup>[11]</sup>对推移质的解释为“沿河床床面滚动、滑动或跳跃前进的泥沙”。费祥俊<sup>[12]</sup>指出,与推移质相比,层移层厚度要大得多,只有在坡度陡峭的沟道中才会产生层移运动;层移运动为山区泥石流固体颗粒运动的主要形式,水石流尤为如此。余国安<sup>[13]</sup>等通过野外观测发现,层移层运动时,水深较通常情形要小很多,水力坡降并没有增加,但输沙率却大大增加,在仅有几厘米水深的床面上,大量泥沙(大部分为粗砂)成层向前推进,沙层表面甚至还有砾卵石(粒径5~12 cm乃至更大)滚动。

由此可见,可以用“推移质运动-层移运动”的有关理论去对水石流的起动形成机理进行分析研究。

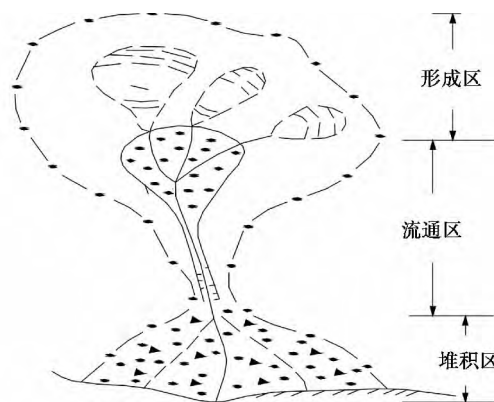


图2 水石流流域特征示意图

Fig. 2 Catchment basin's feature of Water-stone flow

### 2.2 控制方程

水石流一般形成在岩体破碎而岩性坚硬的小流域,其物质组成以粗颗粒为主,运动形式属于推移运动-层移运动。可以通过物质受到的驱动力及克服阻力而进入运动状态的力学关系,来分析水石流的形成条件。

东南地区沟谷中松散堆积物厚度不大,在一定清水流量下使其转化为层移层,假定水石流中完全没有悬移运动的细颗粒,沟谷中的水流为均匀流,水石流形成过程示意图见图3。

在稳定流作用下,驱动松散物质运动的作用力为

$$\tau = [S'_{vm}(\gamma_s - \gamma)z + \gamma(h_0 + z)]\sin\theta \quad (1)$$

式中  $\tau$  为作用在水体及沉积物的剪切力,  $S'_{vm}$  为水



以便选取出一定流量下水深最小的沟谷概况。

明渠水流是一种具有自由液面的水流,水流的表面压强为大气压,均匀流<sup>[15]</sup>是流速沿程不变,流线为一系列相互平行的直线。水石流沟谷的局部段可以简化为明渠,又由于均匀流稳定的特点,便于观察水深与流量的关系,可把水石流沟谷的局部段视为明渠均匀流。

3.1 明渠均匀流的控制方程

明渠均匀流的水力计算公式<sup>[15]</sup>

$$q_v = \frac{\sqrt{i}}{n} \frac{[h(b + mb)]^{\frac{5}{3}}}{(b + 2h\sqrt{1 + m^2})^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

为了求解流量与水深的相互关系,把式(7)转化为迭代解的形式

$$h_{j+1} = \left( \frac{nq_v}{\sqrt{i}} \right)^{0.6} \frac{(b + 2h_j\sqrt{1 + m^2})^{0.4}}{b + mh} \quad (8)$$

式中  $q_v$  为均匀流流量,  $i$  可视为沟谷纵坡,  $h$  为均匀流水深,  $b$  为沟谷底宽,  $m$  为横坡系数,  $n$  为山区河流沟道糙率,查找资料  $n$  取 0.045<sup>[16]</sup>。

假设有一沟谷断面,如图 5 所示,其余参数见表 1,通过计算机编程求解式(8),可以得出流量与水深的相关数据。

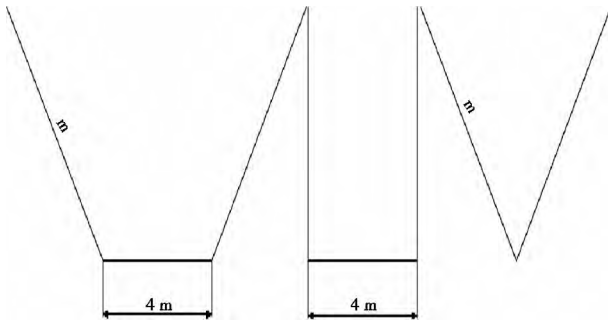


图 5 沟谷断面的 3 种形式  
Fig. 5 Three forms of valley's cross section

表 1 沟谷断面参数取值表

Tab. 1 Parameters table of valley's cross section		
$q_v / (\text{m}^3/\text{s})$	$i$	$m$
100	0.25	0.5
300	0.306	1
600	0.384	2

3.2 纵坡变化对水深的影响

为了观察沟谷纵坡对水深的影响,沟谷断面以梯形为例,纵坡坡度  $i$  取 0.25、0.306、0.384,横坡系

数取 0.5,进行计算求解,得到流量与水深的关系见图 6。可以看出,对于同一断面、同一流量,坡度越大,水深越小,在较小流量下,坡度对水深的影响并不明显,随着流量的增大,坡度对水深的影响增加;对于同一断面、同一坡度沟谷,水深随着流量的增大而增大。

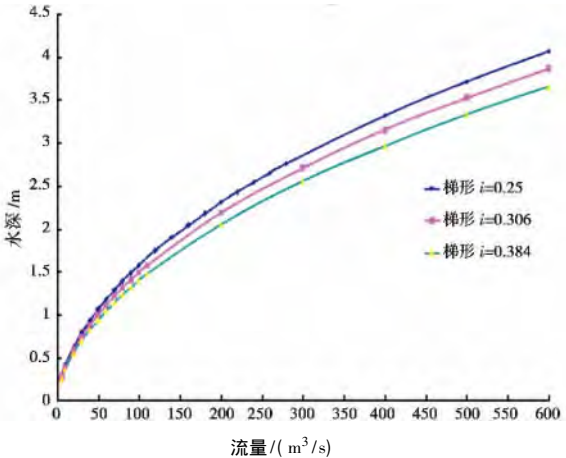


图 6 沟谷纵坡对流量和水深的影响( $m = 1$ )  
Fig. 6 Affection of longitudinal slope for flow and water depth in valley( $m = 1$ )

3.3 断面形式对水深的影响

选取了矩形、梯形、V 型三种断面进行计算比较,在给定的断面参数条件下,计算的水深与流量关系见图 7。梯形和 V 型在小流量时水深增加速率比较大,随着流量的增加,水深增加速率逐渐变小,矩形断面水深呈线性关系增加;在同一坡度,同一流量

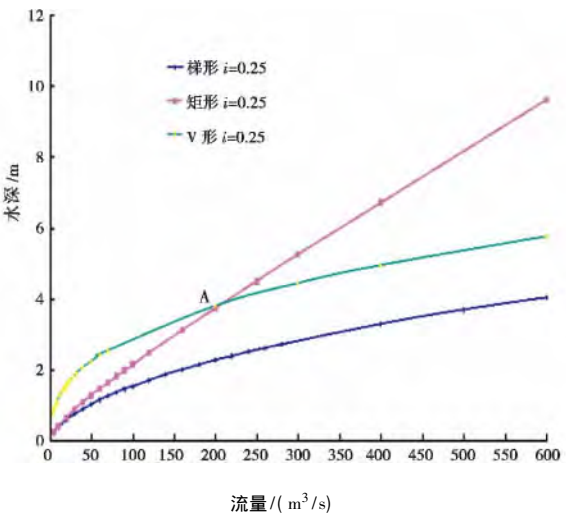


图 7 断面形式对流量和水深的影响( $m = 1$ )  
Fig. 7 Affection of different cross sections for flow and water depth in valley( $m = 1$ )



下,矩形和V形的水深大于梯形;在某一临界流量下(图中的A点),矩形的水深大于V型。

为了进一步研究上述交点的变化规律,选取矩形和V型在不同沟谷坡度下进行计算,观察水深随着流量的变化,结果见图8。可以看到,三个坡度下交点坐标分别为(3.88,208)(3.88,231)(3.88,257),可知交点横坐标-水深不随着 $i$ 发生变化,流量随着坡度的增大而增加,即两种断面形式的水深与沟谷纵坡度无关。

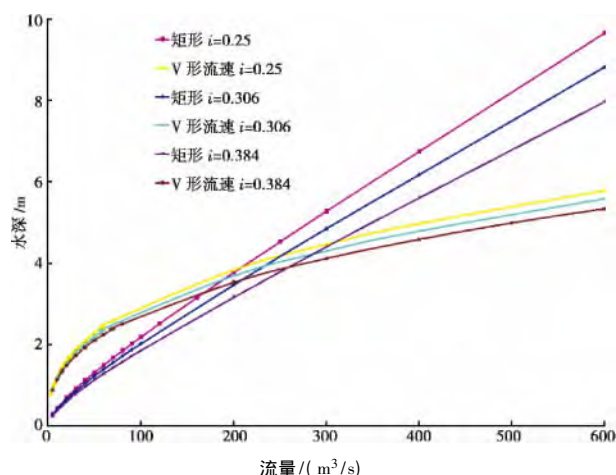


图8 矩形和V形断面交点图( $m=1$ )

Fig.8 Intersection graph of rectangle and V section( $m=1$ )

### 3.4 横坡系数对水深的影响

对于确定的沟谷断面,横坡系数的大小对水深有一定的影响。以梯形断面为例,选取纵坡 $i=0.25$ ,底宽 $b=4$  m,横边坡系数 $m$ 分别选取0.5、1、2,进行计算比较,根据计算出的结果绘制出水深与流量关系见图9。可见横坡系数不同,对水深的

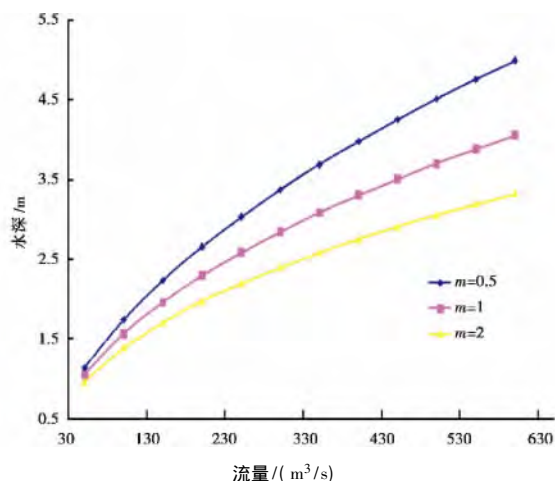


图9 横向坡度系数对水深的影响

Fig.9 The affect of cross slope coefficient for water depth

影响很大,在一定流量和底宽时,横向坡系数越大,水深越小。

## 4 结 语

本文研究运用数学推导的方法,得出了汇水动力区接触松散堆积物前的均匀流水深 $h_w$ 与粗颗粒层移运动厚度 $z$ 的关系式,表明水深是决定松散堆积物转化为层移层厚度大小的动力关键因素。计算分析表明,在堆积物厚度一定的情况下,随着沟谷坡度的增大,使其转化为层移运动所需的清水水深变小。

在给定的沟谷中,利用图4可知松散堆积物转化为层移层厚度 $Z$ 时所需清水水流深 $h_w$ ,并确定对应的临界流量 $Q_{\text{临界}}$ 。结合沟谷断面的形式,采用分流方法控制 $Q_{\text{临界}}$ ,使流量所对应的水深 $< h_w$ ,就可防止水石流发生。

## 参考文献(References)

- [1] 陈光曦,王继康,王林海. 泥石流防治[M]. 北京: 中国铁道出版社,1983:45-50 [Chen Guangxi, Wang Jikang, Wang Linhai. The prevention of debris flow [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993:45-50]
- [2] 李德基. 苍山十八溪的水石流及其防治[J]. 山地研究(现《山地学报》),1992,10(3):172-178 [Li Deji. Water-stone flow from shibaxi at the cangshan mountain and its control [J]. Mountain Research, 1992, 10(3):172-178]
- [3] 祁龙. 水石流的性质及形成机理[J]. 水土保持通报,1985,2(1):21-24 [Qi Long. The property and formation mechanism of Water-stone flow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1985, 2(1):21-24]
- [4] 冕宁县牦牛坪稀土矿区“7·18”水石流灾害[J]. 山地学报, 2014, 32(6):732-738 [Yang Min, Ma Dongtao, Chen Ying. An approach about water-debris flow hazards occurred in July 18th 2013 in Maoniuping rare earth mining area in Mianning, Sichuan [J]. Mountain Research, 2014, 32(6):732-738]
- [5] 吴勇,何思明,裴向军,等. 震后沟道泥石流起动条件-松散堆积体雨中失稳机制的水力学分析[J]. 岩土力学,2012,33(10):3033-3049 [Wu Yong, He Siming, Pei Xiangjun et al. Analysis of condition of startup of gully debris flow after earthquake-The hydraulic mechanism of instability of loose deposits in rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10):3033-3049]
- [6] 高冰,周健,张皎. 泥石流启动过程中水土作用机制的宏观分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(12):2567-2573 [Gao Bin, Zhou Jian, Zhang Jian. Macro-meso analysis of water-soil interaction mechanism of debris flow starting process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12):2567-2573]

- [7] 邵莲雪,余宏明,彭祖武,等.小沟床比降沟谷水石流形成原因分析研究[J].灾害学,2013,28(4):120-124 [Shao Lianxue, Yu Hongming, Peng Zuwu, et al. Analysis on the cause of formation of the debris flow in gully bed of small gradient [J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(4): 120-124]
- [8] 屈永平,唐川,崔晓飞,等.水力类泥石流冲出规模模拟实验[J].地质灾害与环境,2012,23(2):107-112 [Qu Yongping, Tang Chuang, Cui Xiaofei, et al. Simulation experiment on hydraulic debris flows [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, 23(2): 107-112]
- [9] 康志成,李焯芬,马蔼乃.中国泥石流[M].北京:科学出版社,2004:56-62 [Kang Zhicheng, Li Zhuofen, Ma Ainai. Chinese debris flow [M]. Beijing: Science Press, 2004: 56-62]
- [10] 孟河清.水石型泥石流河工模型试验方法[J].泥沙研究,1982,4(4):67-75 [Meng Qinghe. The test method for river model of the Water-stone flow [J]. Journal of Sediment Research, 1982, (4): 67-75]
- [11] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998:118-120 [Zhang Ruijin. River sediment dynamics [M]. Beijing: China Water Power Press, 1998: 118-120]
- [12] 费祥俊,舒安平.泥石流运动机理与灾害防治[M].北京:清华大学出版社,2004:44-88 [Fei Xiangjun, Shu Anping. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 44-88]
- [13] 余国安,王兆印,张康,等.山区河流推移质运动的野外试验研究[J].水利学报,2012,43(6):631-638 [Yu Guoan, Wang Zhaoyin, Zhang Kang, et al. The field experimental study on bed-load movement in mountain rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6): 631-638]
- [14] C. M. 弗莱施曼 著,姚德基,译.泥石流[M].北京:科学出版社,1986:169-171 [C. M. Fleischmann, Translated by Yao Deji. Debris flow [M]. Beijing: Science Press, 1986: 169-171]
- [15] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2001:280-288 [Li Jiaxing, Zhao Zhenxing. Hydraulics [M]. Nanjing: River Sea University Press, 2001: 280-288]
- [16] 杨金全,赵队家,梁书杰,等.河流洪水糙率[M].北京:科学出版社,2003:35-45 [Yang Jinquan, Zhao Duijia, Liang Shujie, et al. Theriver flood roughness factor. Beijing: Science Press, 2003: 35-45]

## Flow Control of Water-stone Flow Start

CHEN Xiaohui, SUN Hongyue, MEI Cheng, ZHANG Wenjun, QIAN Wenjian

(Department of Ocean Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The occurring of water-stone flow (belonging to dilute debris flow) in the valley not only needs a certain slope, but also a certain amount of water depth. The section form is certain for a certain valley. Through studying the relationship between the thickness of sheet-flow layer and required minimum water depth in the valley when the water-stone flow occurs and analyzing the relationship between water depth and flow using the uniform flow theory of hydraulic model, it will find the relationship between the water flow and the thickness of sheet-flow layer in the valley. Then, it will determine the relationship between the required water flow and the thickness of sheet-flow layer for the occurrence of water-stone flow in the valley. By using the method of mathematical deduction, it obtains the relationship between the water depth  $h_w$  of the uniform flow in dynamic area catchment before loose deposits and the thickness of sheet-flow layer  $z$ . It shows that the water depth is the key dynamic factor which dominates how much loose deposits becomes sheet-flow under the condition of specific gully slope and certain characteristics of deposits. The longitudinal slope, the form of cross section and the cross slope coefficient will have an impact on water depth. With the increasing of the gully longitudinal slope, the water depth needed for water-stone flow start becomes shallower. Based on results of the theoretical analysis, it can achieve minimum bypass flow with the method of flow control in engineering. Then it will avoid the whole sheet-flow of loose deposits and prevent the occurrence of water-stone flow.

**Key words:** water-stone flow; flow control; the valley; section; sheet-flow; loose deposit thickness; longitudinal slope; cross slope coefficient