

引用格式: 李彦稷,李浦,胡凯衡. 粘性泥石流龙头形态与阻力模型适用性研究[J]. 山地学报, 2023, 41(2): 216-227.

LI Yanji, LI Pu, HU Kaiheng. The morphology of viscous debris flow head and its dynamic resistance model [J]. Mountain Research, 2023, 41(2): 216-227.

## 粘性泥石流龙头形态与阻力模型适用性研究

李彦稷<sup>1,2</sup>, 李浦<sup>1</sup>, 胡凯衡<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610229; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 泥石流运动阻力是泥石流动力学核心问题。泥石流内部多种流变类型和应力过程并存, 目前各类阻力模型难以准确描述其运动阻力。本文基于原位监测与数值模拟方法, 针对宾汉模型、湍流模型、Voellmy 模型、膨胀塑流模型四种不同的阻力模型, 分析粘性泥石流龙头形态特征与阻力模型的适用性; 基于 Euler (时间过程线) 和 Lagrange (空间过程线) 两种视角, 将数值计算结果与蒋家沟实测粘性泥石流龙头形态数据进行比较; 进一步改变粘性泥石流的密度和底床坡降, 分析四种阻力模型计算结果对这两个基本参数的敏感性。结果表明: (1) 综合考虑了固液两相混合流屈服摩擦阻、粘性应力和分散应力的膨胀塑流模型适用于描述粘性泥石流的运动阻力。 (2) 宾汉模型计算结果与实测数据相差较大, 而膨胀塑流模型计算结果并未随密度变化产生差异, 但受坡度影响较大, 与实测数据较为吻合; 湍流模型、Voellmy 模型计算得到的速度几乎不受坡降变化影响, 与实际泥石流不符, 初步分析可能与湍流阻力项中残留层的计算受坡降影响有关。本文可为泥石流灾害风险评估和防治工程设计过程中的阻力模型选取提供参考。

**关键词:** 粘性泥石流; 阻力模型; 龙头形态; Euler-Lagrange 过程线; 数值分析

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

泥石流是高山峡谷区一种常见的地质灾害, 具有爆发突然、破坏力强等特点。不同于一般的低含沙量水流, 泥石流固相颗粒物浓度高、级配宽, 可将泥石流体视为介于挟沙水体和土体之间的过渡性体<sup>[1]</sup>。这种过渡性质使得泥石流在山谷或沟道中的运动过程中, 出现许多与洪水、一般水流不同的现象。泥石流动力学研究关键在于科学认识和描述其阻力特性<sup>[2]</sup>。现有的泥石流防治工程设计中, 通常用曼宁糙率系数量化泥石流运动的阻碍作用<sup>[3]</sup>, 其取值与自身物质组成和沟床特性有关。糙率系数

和运动阻力的大小影响泥石流的流速计算<sup>[4]</sup>, 从而进一步影响其整体冲击力和淤埋范围的评估。因此, 选取合适的阻力模型, 准确评估泥石流运动阻力, 对泥石流灾害风险评估与防治工程设计具有重要意义。

已有河流动力学研究中, 低含沙水流的运动阻力计算往往基于均匀恒定的明渠阻力公式 (如谢才公式、曼宁公式、Darcy-Weibach 公式), 由此结合水流断面平均流速、坡度、水力半径以及沟床粗糙度等变量得到水流运动的阻力系数。泥石流物质组成复

收稿日期 (Received date): 2023-02-17; 修回日期 (Accepted date): 2023-04-21

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41371039; 91747207); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题 (K2019G006); 陕西省自然科学基金青年基金项目 (2021JQ-452)。[National Natural Science Foundation of China (41371039; 91747207); Science and Technology Research and Development Program of China National Railway Group Co., LTD (K2019G006); Natural Science Foundation of Shanxi Province (2021JQ-452)]

作者简介 (Biography): 李彦稷 (1991-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 山地灾害防治工程。[LI Yanji (1991-), female, Ph. D. candidate, research on mountain hazard mitigation] E-mail: liyj@imde.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 胡凯衡 (1975-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 泥石流减灾理论与技术。[HU Kaiheng (1975-), male, Ph. D., professor, research on debris flow mechanism and mitigation] E-mail: khhu@imde.ac.cn

杂,固相颗粒级配宽、液相浆体粘度高,多种流变类型和应力过程并存,如固-固碰撞和摩擦应力、液相粘性和湍流应力、固-液相间作用力等<sup>[5]</sup>,导致其运动特性与低含沙水流差异巨大。由此,诸多学者相继提出了考虑泥石流上层"塞流体"的宾汉阻力模型<sup>[6]</sup>、基于固相颗粒间碰撞应力的膨胀体模型<sup>[7]</sup>、综合考虑宾汉阻力和碰撞应力的膨胀塑流模型<sup>[8]</sup>、基于土力学理论和孔隙流体压力效应的库伦混合阻力模型<sup>[9]</sup>以及考虑固、液两相相间作用力的两相流模型<sup>[10-11]</sup>。

选取符合实际的泥石流运动阻力模型,是准确模拟泥石流运动过程、科学评估灾害风险和合理设计防治工程的关键。云南蒋家沟 93 场泥石流运动观测资料的分析表明,粘性泥石流运动阻力可以用归一化的粘性碰撞模型(Visco-Collisional model)描述<sup>[12]</sup>。进一步结合粘性泥石流模型实验数据进行分析,发现库伦摩尔阻力模型更适合描述野外粘性泥石流的运动阻力<sup>[13]</sup>。国外典型流域泥石流事件(日本 Kamikamihori 流域、瑞士 Sassa 大流域)实测数据和数值计算结果的对比分析表明,相比于宾汉模型,Voellmy 模型更适用于预测堆积扇泥石流冲出距离<sup>[14]</sup>。针对泥石流在陡坡中的运动情形和堆积扇上的停淤过程,数值分析表明发现包含湍流阻力项的阻力模型(如湍屈模型<sup>[15]</sup>、Voellmy 阻力模型<sup>[16]</sup>)计算结果与泥石流实测泥深、速度和冲出距离更为吻合。已有泥石流阻力模型的适用性研究,大多基于数值结算结果和实测数据的对比分析,考虑泥石流运动速度、堆积区冲出物质总量、灾害泛滥范围和泥深空间分布的差异。这些研究往往基于泥石流宏观运动或动力学参数,尚未聚焦到泥石流运动过程的龙头形态特征。泥石流运动过程中的龙头形态是其内部固相颗粒垂向速度分布、粗细颗粒循环和分选过程、液相浆体粘性等因素综合作用的结果,反映了泥石流整体的运动阻力特性。

云南东川蒋家沟是我国泥石流天然的博物馆,蒋家沟观测站借助相关仪器设备进行了长期的野外泥石流原位观测,积累了大量的泥石流运动相关资料,为分析不同泥石流阻力模型适用性提供了有力支撑。本文以云南东川蒋家沟泥石流为例,借助数值模拟手段,针对宾汉模型、湍屈模型、Voellmy 模型、膨胀塑流模型 4 种常见阻力模型,通过分析计算得到的泥石流龙头形态与野外沟道实测数据的差

异,比较各阻力模型的适用性。并进一步改变数值计算时泥石流密度和底床坡降,探讨各阻力模型计算结果对两者的敏感程度。本文针对粘性泥石流阻力模型适用性的对比研究,有利于促进泥石流动力学和流域地貌演化研究,也可为泥石流防治工程设计提供理论依据,对泥石流防灾减灾具有重要的意义。

## 1 粘性泥石流阵流特征

粘性泥石流的运动方式通常是以阵性运动为主的<sup>[6]</sup>。云南东川蒋家沟、四川黑马河马颈沟、甘肃武都火烧沟三处泥石流均以阵性流为主要运动形态。云南省东川蒋家沟是一条典型的暴雨型粘性泥石流,是全世界最大的泥石流自然博物馆,其流域面积 48.6 km<sup>2</sup>,主沟长 13.9 km、平均纵比降 16.02%,每年 5—9 月是泥石流频发期<sup>[17]</sup>。流域上游物源区广泛分布的亚黏土、黏土残积层及砾石层是粘性泥石流土体颗粒的重要来源之一<sup>[18]</sup>。

阵性泥石流的特点主要有:流量过程有间断现象、流速和泥深一般呈正变关系、每次阵性流的外形基本相似,即呈头大、身短、尾长的蝌蚪形<sup>[19]</sup>,图 1 为实拍的蒋家沟泥石流阵性流形态特征。粘性泥石流阵性流的龙头形态如峰值泥深、速度等,往往能直观地反映一次泥石流的整体规模和灾害泛滥范围。以往蒋家沟现场观察结果表明,粘性泥石流通过观测断面时近似为楔形,形状基本不变<sup>[20]</sup>。泥石流阵性流的流量过程线可以简化为三角形<sup>[21]</sup>,即泥石流泥深随时间是一种线性变化,进而计算泥石流一次径流总量。进一步的野外实测数据表明,泥石流阵性流流量的时间过程线并不是简单地三角形,陡峭的龙头过后泥位会急剧下降<sup>[22]</sup>。由此,可以引入 Euler(时间过程线)和 Lagrange(空间过程线)这两种坐标系,来分析泥石流泥位过程线的形态差异<sup>[22]</sup>。当泥石流流经一段沟道时,对于岸边的观察者而言,泥石流空间形态是同一时刻不同空间位置的泥位,即 Lagrange 空间过程线;对于固定于测量断面的超声波传感器而言,它记录的泥位时间序列反映的是同一空间位置不同时刻的泥石流形态,即 Euler 时间过程线。两种观察视角的示意图如图 2a 所示。图 2b 为 1998 年 8 月在蒋家沟实测的阵性泥石流的龙头纵剖面泥深数据<sup>[23]</sup>。图 2c 是 2001 年 7 月在蒋家沟利用超声波监测的某一时段阵性泥石流

泥位的时间过程线。本文拟借鉴该方法,从空间过程线和时间过程线两个视角入手,对比分析不同阻力模型计算结果和实测泥石流阵流龙头形态的差异。

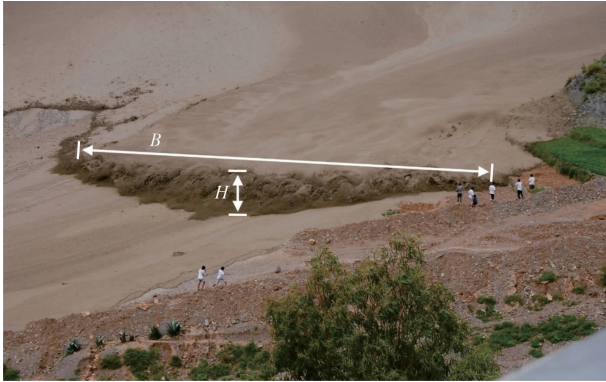


图 1 蒋家沟阵性泥石流的形态特征

Fig. 1 Characteristics of viscous debris flow in Jiangjia ravine

## 2 控制方程和数值方法

### 2.1 控制方程

泥石流运动过程具有以下特点:存在自由表面、

以重力为主要驱动力、水平流速沿垂向近似分布均匀、水平运动尺度远大于垂直运动尺度等,因此可将泥石流运动过程视为浅水运动<sup>[24]</sup>,可以根据一维的浅水波方程(圣维南方程)进行数值计算。为了降低计算过程离散化带来的误差,同时满足间断跳跃条件,本研究采用守恒形式的圣维南方程,即:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} u \\ hu \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2 \cos \theta / 2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(\sin \theta - \operatorname{sgn}(u)S_f) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $U$  为输运量;  $F$  为输运通量;  $S$  为源项; 变量  $h$  为泥石流泥深(m);  $u$  为泥石流基于深度平均的速度值(m/s);  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>);  $\theta$  代表泥石流沟道底床坡度(°);  $S_f$  为泥石流的阻力坡降(/), 运算符函数  $\operatorname{sgn}$  是为了确保泥石流在逆坡时的阻力与实际运动阻力符合。

### 2.2 泥石流阻力模型

泥石流是一种物质组成复杂、包含多种应力过

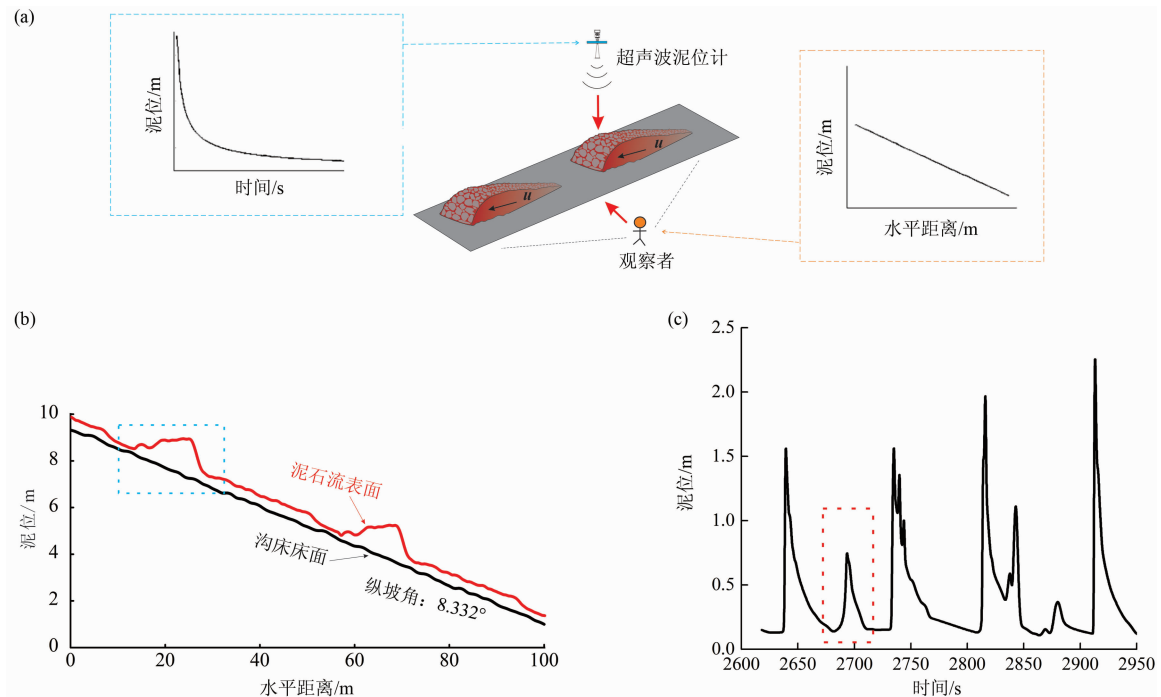


图 2 两种不同观察视角下的泥位过程线: (a) 超声波测量泥位和观测者观测泥位示意图;

(b) 野外实测泥石流阵流的龙头纵剖面泥深数据; (c) 超声波监测的断面泥位数据

Fig. 2 Process lines of debris flow mud level from two different perspectives:

(a) schematic diagram of mud level measured by ultrasonic wave and mud level observed by observer;

(b) longitudinal section mud depth of debris flow surge measured in field; (c) ultrasonic monitoring of section mud level

程的固液两相流,粘性泥石流固液两相分离不明显,相间速度差可以忽略,因此可视为一相流。本文将运用于泥石流数值模拟中的各种不同的单相阻力形式进行数值模拟的对比分析。考虑4种典型的泥石流阻力形式,具体形式如表1所示。

表1 4种不同的泥石流阻力模型

Tab. 1 Four different resistance model of debris flows

名称	阻力项构成	阻力项形式( $S_f$ )
宾汉模型	宾汉阻力	$S_f = \frac{\tau_0}{\rho gh}$
湍屈模型	湍流阻力、屈服阻力	$S_f = \frac{n^2 q \sqrt{q^2}}{h^2 h_r^{4/3}} + \frac{\tau_y}{\rho gh}$
Voellmy模型	湍流阻力、库伦阻力	$S_f = \frac{q \sqrt{q^2}}{h^2 C^2 h_r} + \cos \theta \tan \delta$
膨胀塑流模型	屈服阻力、粘性应力、分散应力	$S_f = \frac{\tau_y}{\rho gh} \text{sgn}(u) + \frac{2\mu u}{\rho gh^2} + \frac{k_c \text{sgn}(u) u}{gh^2}$

注:表中,  $\tau_0 = 1.5\tau_y + 3 \frac{\mu q}{h^2}$ ;  $\rho$  为泥石流密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $\mu$  为刚度系数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $\tau_0$  为宾汉剪切力 ( $\text{Pa}$ );  $\tau_y$  为屈服应力 ( $\text{Pa}$ );  $q$  为单宽流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $n$  为床面糙率系数 (/);  $h_r$  为残留层厚度 ( $\text{m}$ ), 其计算公式为  $h_r = \tau_y / \rho g \sin \theta$ ,  $\theta$  为底床坡度 ( $^\circ$ ),  $\delta$  为泥石流内部摩擦角 ( $^\circ$ ),  $C$  为谢才系数 (/),  $k_c$  为阻力经验系数 (本文取值为 24)。

### 2.3 数值方法

本文数值计算时采用非振荡中心守恒型 NOC (Non-oscillatory Central Scheme) 格式, 计算区域为交错网格。NOC 计算格式主要分为两步, 即预测步和校正步, 分别为:

$$U_j \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) = U_j(t) - \frac{1}{2} \lambda F'_j \quad (5)$$

$$U_{j+\frac{1}{2}}(t + \Delta t) = \frac{1}{2} [U_j(t) + U_{j+1}(t)] + \frac{1}{8} [U'_j - U'_{j+1}] - \lambda \left[ F \left( U_{j+1} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right) - F \left( U_j \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right) \right] \quad (6)$$

式中,  $U_j(t)$ 、 $U_{j+1}(t)$  分别网格  $j$ 、 $j+1$  的输运量;  $U'_j$ 、 $U'_{j+1}$  分别为对应的输运量梯度;  $U_j \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)$  为网格  $j$  处  $t + \frac{\Delta t}{2}$  时刻的输运量预测值;  $U_{j+\frac{1}{2}} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)$  为交错网格  $j + \frac{1}{2}$  处  $t + \frac{\Delta t}{2}$  时刻的输运量校正值;  $\lambda$  为时间

步长  $\Delta t$  与空间步长  $\Delta x$  的比值;  $F_j \left( U_j \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right)$ 、 $F_{j+1} \left( U_{j+1} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right)$  分别网格  $j$ 、 $j+1$  处  $t + \frac{\Delta t}{2}$  时刻的输运通量;  $F'_j$  为对应的输运量梯度。

### 3 泥石流参数和计算参数选取

根据蒋家沟泥石流的分类<sup>[19]</sup>, 泥石流密度  $\rho < 1400 \text{ kg/m}^3$  为含沙水流,  $\rho$  处于  $1400 \sim 1700 \text{ kg/m}^3$  为稀性泥石流,  $\rho$  处于  $1700 \sim 1950 \text{ kg/m}^3$  为亚粘性泥石流,  $\rho > 1950 \text{ kg/m}^3$  为粘性泥石流。本文选取的泥石流密度  $\rho = 1950 \text{ kg/m}^3$ , 根据泥石流通过沟道后的粘附层厚度计算蒋家沟亚粘性泥石流和粘性泥石流的屈服应力与泥石流密度的定量关系<sup>[20]</sup>, 即:

$$\tau_y = 0.0181 \exp(0.004634\rho) \quad (7)$$

根据蒋家沟泥石流浆体的流变试验结果<sup>[25-26]</sup>, 当  $\rho > 1350 \text{ kg/m}^3$  时, 泥石流刚度系数与屈服应力比值保持稳定, 即:

$$\mu = 0.0048\tau_y \quad (8)$$

式中,  $\mu$  为刚度系数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。由此, 计算得到  $\tau_y = 183.1 \text{ Pa}$ ,  $\mu = 0.8789 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

为了与实测数据进行对比分析, 数值计算时泥石流沟道长设计为  $100 \text{ m}$ , 底床坡降取  $\theta = 8.332^\circ$  (与图 2b 坡降一致), 计算区域网格数为  $n = 500$ ,  $\text{CFL} = 0.475$ 。

### 4 四种阻力模型计算结果比较

#### 4.1 与蒋家沟实测泥石流龙头形态比较

基于4种不同的阻力模型, 将模型数值计算结果与蒋家沟实测阵性泥石流龙头形态进行对比分析。阵性泥石流的龙头形态不仅取决于自身物质组成特征, 也与沟道形态有关, 如沟道宽度、横向弯曲变化等。本研究中, 蒋家沟阵性泥石流龙头形态数据的观测点位于主沟顺直沟段, 且测量时间处于阵流流宽相对稳定期间, 因此可以忽略沟道形态对实测泥石流龙头形态的影响。数值计算时基于一维的圣维南方程, 因此沟道宽度默认为单位宽度 (即沟道宽度是不变的), 也没有考虑横向弯曲的影响, 因此不同的计算结果主要反映了不同阻力模型构成项的差异。

#### 4.1.1 Euler 分析(时间过程线)

在数值模拟泥石流阵性运动过程中,取  $x = 25 \text{ m}$  处为观测点,得出该断面泥石流泥深随时间的变化。根据 4 种不同的阻力模型计算得到的泥深时间过程线和实测的泥石流时间过程线(图 3),图中实测的泥深时间过程线为图 2c 所测实际值(即红色虚线框所示)。

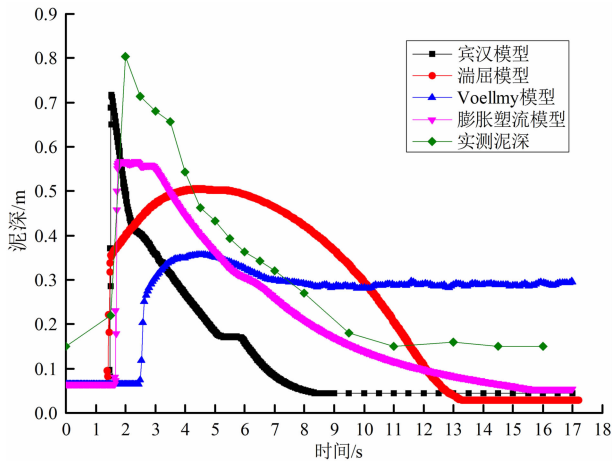


图 3 不同阻力模型计算得到的龙头泥深时间过程线与实测值对比

Fig. 3 Comparison between the temporal depth calculated by different resistance models and the measured values

由图 3 可知,实际测量得到的龙头泥深时间过程线前端平缓,然后陡增至峰值,然后缓慢趋于稳定泥深值。宾汉模型、膨胀塑流模型计算结果与实测的龙头泥深过程线相似,都具有初始陡增的峰值

(分别约为  $0.75 \text{ m}$  和  $0.58 \text{ m}$ ) 和缓降并趋于稳定的泥深值,与实测的泥深时间过程线形态接近,符合阵性泥石流流量过程线特征<sup>[22]</sup>,即高陡的头部之后急剧的下降,接近于指数或幂函数的形式。而对于湍流模型、Voellmy 模型两种阻力模型来说,得到的泥石流时间过程线峰值两侧相当平缓顺滑,没有出现陡增的峰值,这与实测的阵性泥石流时间过程线差异较大。因此由 Euler 时间过程线分析来看,宾汉模型、膨胀塑流模型更加符合真实的泥石流阻力形态。

#### 4.1.2 Lagrange 分析(空间过程线)

假定初始时刻龙头泥深为图 2b 中所测实际值(即蓝色虚线框所示),根据阵性流泥深和速度的正变关系,假定初始龙头峰值处流速  $u = 3 \text{ m/s}$ ,其余各处流速根据泥深按正变规律变化。分别用 4 种不同的阻力模型进行计算,  $t = 6 \text{ s}$  时各模型计算得到的泥深和速度分布如图 4 所示,图中阵性泥石流龙头泥深和速度分布为 2001 年 7 月在蒋家沟实测的泥石流数据。

由图 4 可以看出,各类阻力模型得出的泥石流龙头的空间过程线差异较大。宾汉模型计算的峰值泥深和流速分别为  $1 \text{ m}$  和  $8.2 \text{ m/s}$ ,明显高于其他 3 种阻力模型及实际观测的泥石流龙头形态。这说明单一宾汉流体阻力模型不适合蒋家沟含大量固体的粘性泥石流。湍流模型、Voellmy 模型、膨胀塑流模型三种阻力模型得到的泥石流龙头峰值泥深均为  $0.5 \text{ m}$  左右,峰值流速均约为  $3 \text{ m/s}$ ,与实际的泥石流龙头流态相似。每一阵泥石流从形态上均可分为

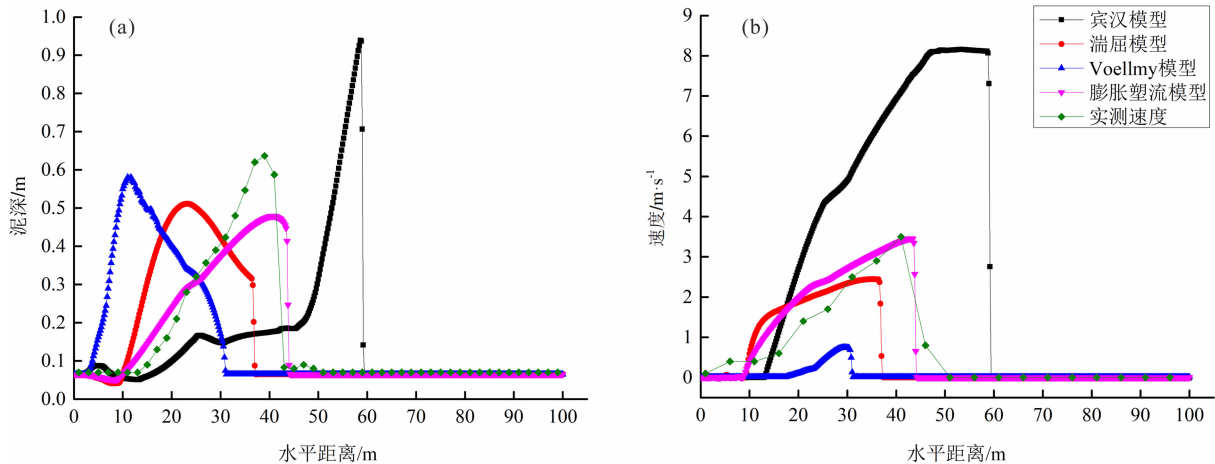


图 4 泥石流阵流实测值与不同阻力模型计算值对比:(a) 泥深空间分布;(b) 速度空间分布

Fig. 4 Comparison of measured values of debris flow surges and calculated values of different resistance models:

(a) spatial distribution of flow height; (b) spatial distribution of velocity

高陡的头部、顺滑的中部和平缓的尾部。从泥深过程线上看,湍屈模型、Voellmy 模型计算得到的泥深峰值并不在龙头的最前部,而是位于顺滑的中部,但实际观测到的在沟道中运动的泥石流龙头最前端为泥深峰值,膨胀塑流模型的泥深过程线与之符合。经过 Lagrange 空间过程线分析可知,与其他三种阻力形式相比,膨胀塑流模型模拟的结果与真实泥石流运动形态更为接近,因此适用性更好。

通过分析龙头形态的 Lagrange 过程线与 Euler 过程线的差异可知,膨胀塑流模型更适用于描述粘性泥石流的运动阻力特性。

#### 4.2 不同泥石流密度和底床坡降的影响

泥石流密度和底床坡降对泥石流的龙头形态有一定的影响。为了分析不同密度对阻力模型计算结果的影响,本项目将密度稍低的亚粘性泥石流 ( $1700 \sim 1950 \text{ kg/m}^3$ ) 也列为对比的对象。根据大

量的实际观测数据,蒋家沟亚粘性和粘性泥石流密度一般大于  $1700 \text{ kg/m}^3$ ,流通区的沟床坡降一般在  $7^\circ \sim 15^\circ$  [16]。根据公式(7)和(8),蒋家沟亚粘性和粘性泥石流的屈服应力和刚度系数与密度存在经验性的数学关系,因此泥石流屈服应力和刚度系数的差异体现在密度的差异中。针对 4 种不同的阻力模型,分别考虑泥石流密度  $\rho$  分别为  $1800$ 、 $1900$ 、 $2000$ 、 $2100$  和  $2200 \text{ kg/m}^3$  以及底床坡降  $\theta$  分别为  $5^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $11^\circ$ 、 $14^\circ$  和  $17^\circ$  时,分析不同阻力模型数值计算得到的泥石流龙头形态在时空过程线上表现出来的差异。

##### 4.2.1 不同泥石流密度下阻力模型计算结果的比较

根据 4 种不同的阻力模型,考虑不同的泥石流密度得到的泥石流龙头的泥深和速度空间分布。取  $x = 25 \text{ m}$  处为观测点,得到该点泥深和速度的时间过程线如图 5、图 6 所示。

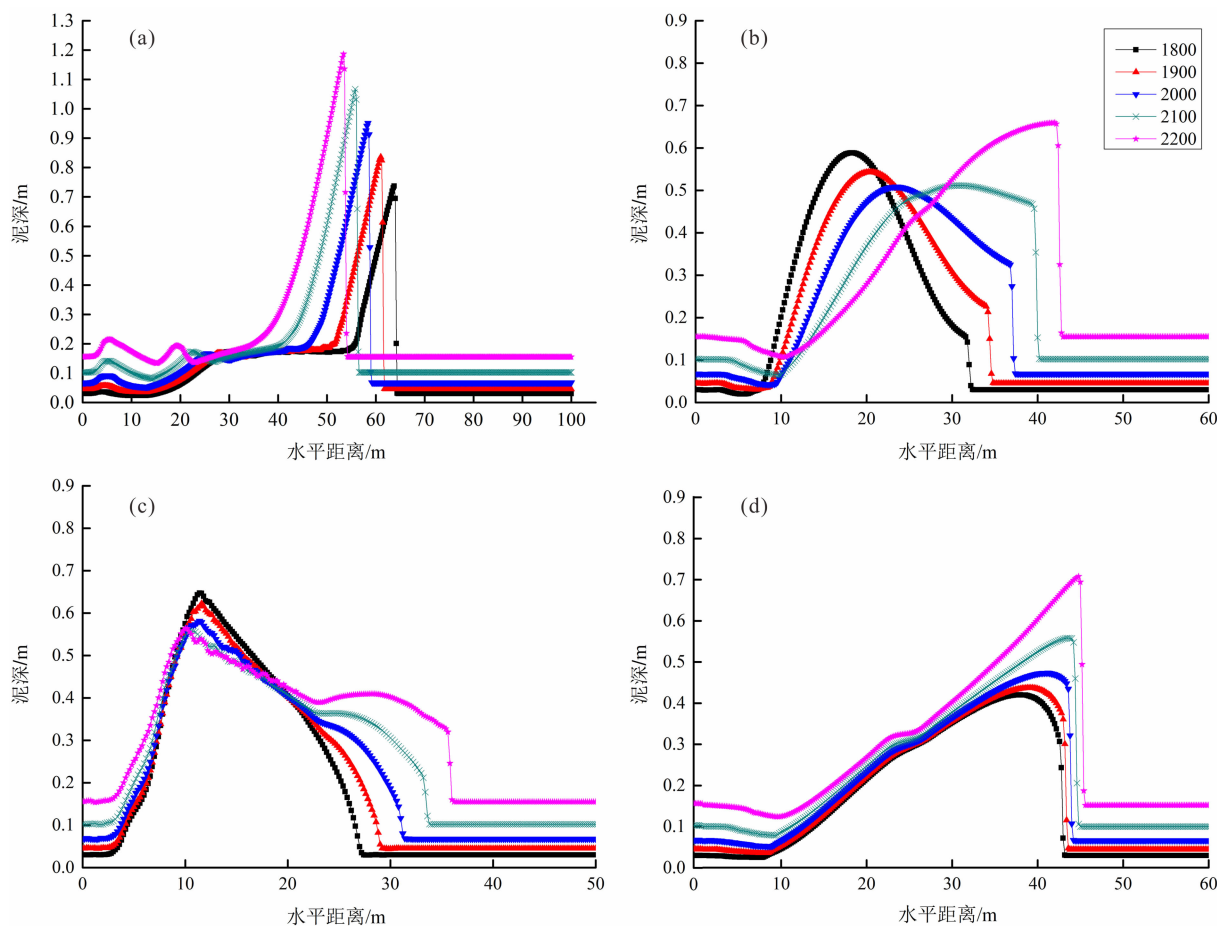


图5 不同泥石流密度时 4 种阻力模型计算得到的龙头泥深时间过程线:

(a) 宾汉模型; (b) 湍屈模型; (c) Voellmy 模型; (d) 膨胀塑流模型

Fig.5 Temporal flow depths calculated by four resistance models with different debris flow densities:

(a) Bingham model; (b) Turbulent and yield model; (c) Voellmy model; (d) Dilatant Plastic model

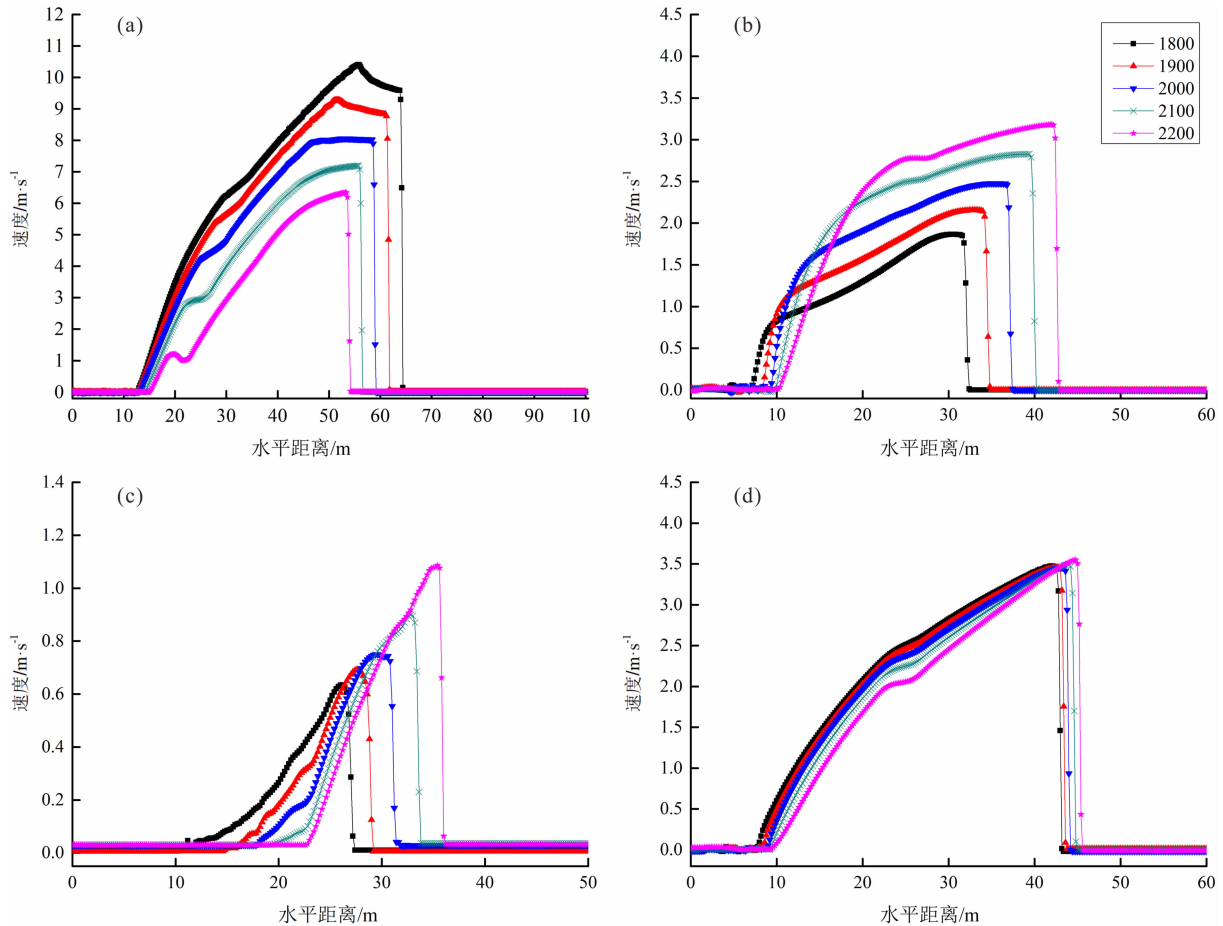


图 6 不同泥石流密度时 4 种阻力模型计算得到的龙头速度时间过程线:

(a) 宾汉模型; (b) 湍屈模型; (c) Voellmy 模型; (d) 膨胀塑流模型

Fig. 6 Temporal flow velocities calculated by four resistance models with different debris flow densities;

(a) Bingham model; (b) Turbulent and yield model; (c) Voellmy model; (d) Dilatant Plastic model

从泥深和速度的空间分布来看,随着泥石流流体密度从  $1800 \text{ kg/m}^3$  增至  $2200 \text{ kg/m}^3$ ,宾汉模型泥深峰值约从  $0.78 \text{ m}$  变为  $1.28 \text{ m}$ ,速度峰值则由  $10.65 \text{ m/s}$  变为  $6.34 \text{ m/s}$ ,两者变化均比较显著。根据蒋家沟泥石流观测数据<sup>[21]</sup>,较低密度粘性泥石流往往是一次泥石流事件中的连续流,泥深比阵性粘性泥石流龙头泥深稍小,速度较阵性流并无明显差异。对于极少的低密度泥石流阵性流,其泥深和速度峰值与高密度阵性流相比,并无明显差异。从这点看,膨胀塑流模型模拟得到的泥深与速度分布与实际的大部分阵性流性质相类似,即密度变化对阵性流龙头的速度和泥深分布并无显著的影响。

对于湍屈模型和 Voellmy 模型,两者计算得到的不同密度下泥深和速度分布大致相同。从泥深分布来看,密度的变化改变了阵性泥石流龙头的形态,当密度增大时,泥石流龙头泥深由中间尖两头缓变

为具有明显高陡的头部、顺滑的中部和平缓的尾部的形态。阵性流龙头的速度随着密度的增加也有小幅的增长,并不显著。但对于野外观测到的泥石流,密度改变并不会显著改变泥石流龙头形态,因此从这点来看,这两种阻力模型存在一定的缺陷。

#### 4.2.2 不同底床坡降下阻力模型计算结果的比较

根据 4 种不同的阻力模型,考虑不同的沟床坡降下得到的泥石流龙头的泥深和速度空间分布。仍取  $x = 25 \text{ m}$  处为观测点,得到该点泥深的时间过程线如图 7、图 8 所示。

对于宾汉模型、膨胀塑流模型而言,底床坡降增大时,阵性流龙头泥深分布并无较大的差异,速度均有一定程度的增加,尤其宾汉模型模拟结果受坡降影响显著。膨胀塑流模型泥深分布仍然保持高陡的头部、顺滑的中部和平缓的尾部,而且相比于密度变化对龙头形态的影响,底床坡降改变几乎不改变龙

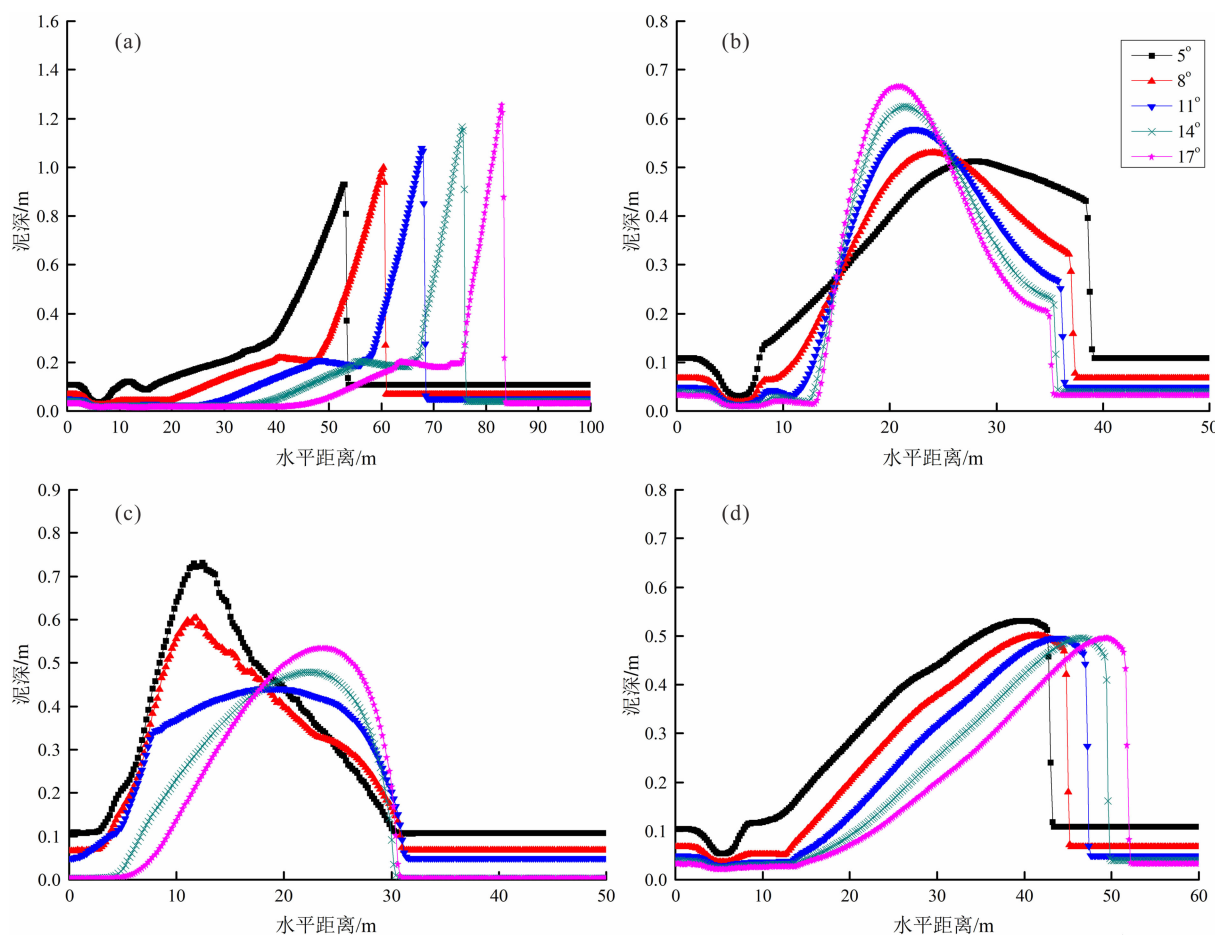


图7 不同底床坡降时4种阻力模型计算得到的龙头泥深时间过程线:

(a) 宾汉模型; (b) 湍流屈服模型; (c) Voellmy 模型; (d) 膨胀塑流模型

Fig. 7 Temporal flow depths calculated by four resistance models with different channel slopes:

(a) Bingham model; (b) Turbulent and yield model; (c) Voellmy model; (d) Dilatant Plastic model

头形态,只是坡降变大时龙头向前输移了一定的距离。膨胀塑流模型得到的速度随着坡度的增大而小幅增大,与野外观察到的泥石流阵流运动特性较为符合。

湍流模型和 Voellmy 模型,与泥石流流密度改变时的情况类似,坡降改变也影响阵性流龙头形态,小坡降时得到的泥深分布与实测的数据较为吻合。而对于两者速度分布而言,坡降改变几乎不影响二者的速度峰值和分布。这与蒋家沟实测数据<sup>[21]</sup>、国内(如云南浑水沟<sup>[27]</sup>、大白泥沟<sup>[28]</sup>、甘肃武都<sup>[29]</sup>、西藏古乡沟<sup>[30]</sup>)和国外(意大利南部 Campania 流域<sup>[31]</sup>、瑞士 Illgraben 流域<sup>[32]</sup>、美国 Cliffs 流域<sup>[33]</sup>)其他区域的泥石流实测资料相异,即泥石流运动速度随着坡降增加而增大。对湍流模型、Voellmy 模型的阻力项进行分析,发现湍流阻力项中残留层的计算包含了坡降的变化,这可能会影响整体阻力的

小。动量控制方程中,对流项中包含对坡降参数的求导,涉及到偏微分方程解对参数依赖性的分析,在此不作深究。

## 5 结论与展望

蒋家沟是一条典型的暴雨泥石流沟,泥石流阵流观测资料积累丰富<sup>[21]</sup>。本文蒋家沟泥石流龙头数据观测位置经过多次阵流铺床作用,存在一定的堆积层,可以忽略植被的影响;观测位置位于主沟顺直沟段,测量时间处于阵流流宽相对稳定期间,可以忽略沟道宽度和横向弯曲对实测泥石流龙头形态的影响;阵流观测期间没有超径大石块或树木残枝间歇性运动或停淤带来的龙头形态测量误差,因此实测的龙头形态数据主要反映了自身物质组成和沟床坡度的影响。其他地区龙头形态的测量数据尽管存

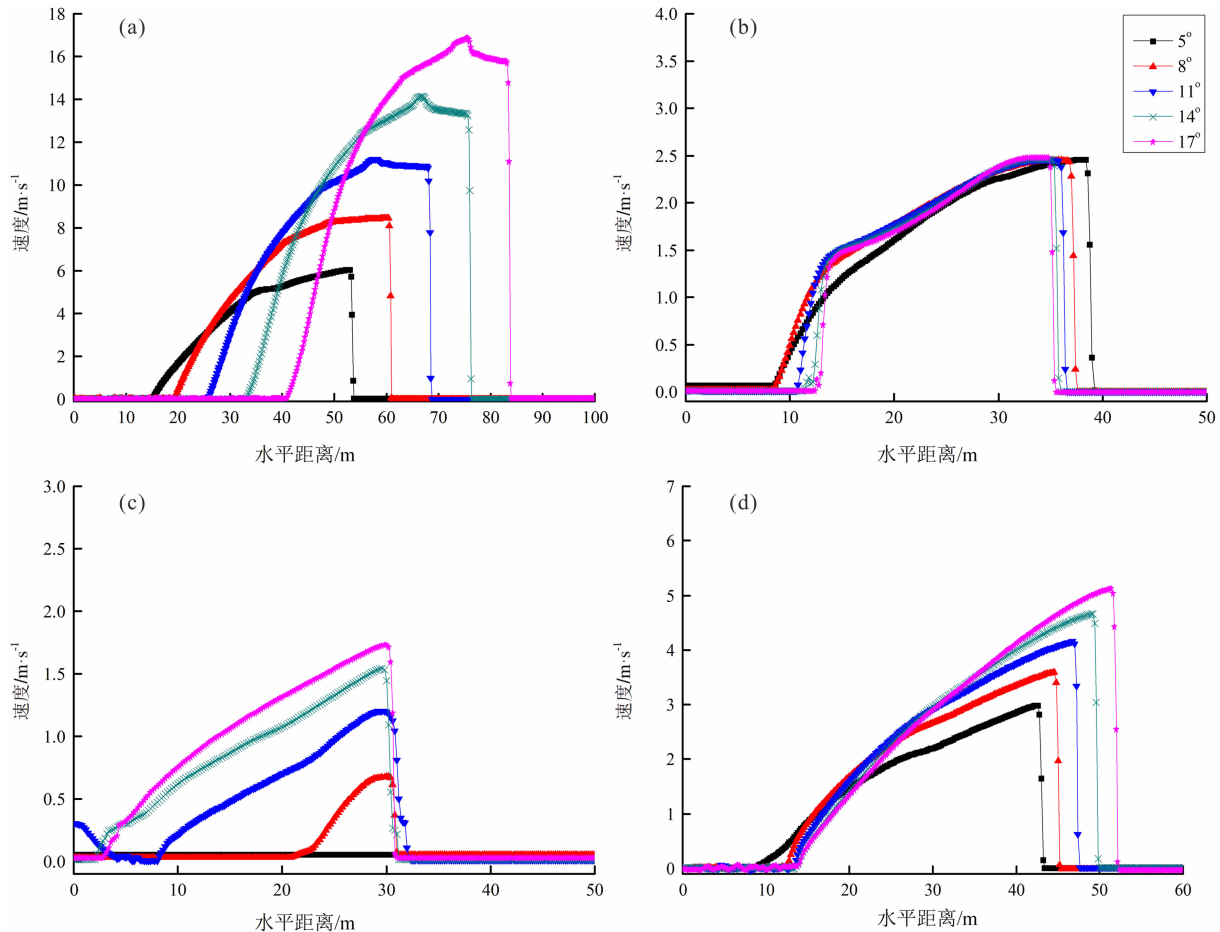


图 8 不同底床坡降时 4 种阻力模型计算得到的龙头速度时间过程线:

(a) 宾汉模型; (b) 湍流屈服模型; (c) Voellmy 模型; (d) 膨胀塑流模型

Fig. 8 Temporal flow velocities calculated by four resistance models with different channel slopes;

(a) Bingham model; (b) Turbulent and yield model; (c) Voellmy model; (d) Dilatant Plastic model

在一定的差异,但已有研究表明<sup>[34]</sup>,野外泥石流阵流龙头的空间形态几乎均为泥位陡增的龙头、持续时间长且泥位较大的龙身、以及泥位陡降的龙尾,与本文蒋家沟实测龙头形态(即头大、身短、尾长的蝌蚪形)基本一致。另外,泥石流龙头形态与流域地质构造、地形地貌、气象水文和人类工程活动程度等因素也密切相关,需要进一步结合不同地区的实测阵流数据进行深入分析。

本文利用基于交错网格的 NOC 格式计算了不同阻力模型下泥石流龙头形态,并与云南东川蒋家沟泥石流实测数据对比,分析各阻力模型的适用性。进一步改变粘性泥石流密度和底床坡降,数值分析 4 种阻力模型计算结果对密度和坡降变化的敏感程度。结论如下:

(1)以云南东川蒋家沟泥石流为例,对比分析

四种阻力模型计算结果,发现对于粘性泥石流适用性最好的是膨胀塑流模型。膨胀塑流模型考虑了固液两相混合流的屈服摩阻、粘性应力和分散应力,其中后两项均和泥石流速度有直接关联。

(2)当泥石流密度变化时,膨胀塑流模型得到的泥深和速度分布差异最小,其中速度分布几乎不随密度变化而变化,与实际蒋家沟观测到的阵性流资料较吻合。其余三种模型泥深和速度分布峰值均随密度增大而增大,湍流屈服模型、Voellmy 模型的泥深空间分布形状则受密度影响显著,与实际中不同密度粘性泥石流形态大致类似相矛盾。因此,这两种模型存在一定的缺陷。

(3)当底床坡降发生变化时,对于宾汉模型、膨胀塑流模型模拟得到的龙头形态影响较大,尤其是速度分布受坡降控制显著,膨胀塑流模型的龙头泥

深分布并未随坡降变化而改变,只是有了沿沟床的水平偏移。湍屈模型、Voellmy 模型计算得到速度分布几乎不受底床坡降的控制,这与实际泥石流速度通常随坡降增大而增大相矛盾,经分析可能与湍流阻力项中残留层的计算和动量控制方程中对流项中包含坡降的参数求导有关。

(4)由于实际的资料有限,本文只以蒋家沟为例,探讨了不同阻力模型对粘性泥石流的适用性,在其他地区的适用性有待探讨。计算过程中将泥石流视为一相流,各阻力项参数反映固液混合体表现出来的整体特性。实际泥石流流体并不能简单的当做一相流来处理,孔隙水压力对泥石流运动阻力影响很大<sup>[10]</sup>,而这并未包含在一相流的阻力项中。泥石流阻力模型中需要进一步考虑固、液两相相间作用力的影响<sup>[11-12]</sup>,因此阻力模型的适用性有待进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] 胡凯衡,崔鹏,李浦. 泥石流动力学模型与数值模拟[J]. 自然杂志, 2014, **36**(5): 313 - 318. [HU Kaiheng, CUI Peng, LI Pu. Debris flow dynamic models and numerical computation [J]. Chinese Journal of Nature, 2014, **36**(5): 313 - 318] DOI: 10.3969/j. issn. 0253 - 9608. 2014. 05. 001
- [2] 崔鹏,唐金波,林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(3): 1 - 11. [CUI Peng, TANG Jinbo, LIN Pengzhi. Research progress of resistance character of debris-flow [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(3): 1 - 11] DOI: 10.15961/j. jsuese. 2016. 03. 001
- [3] 苗绿,马超,吕立群. 蒋家沟泥石流阻力的无量纲参数分析[J]. 山地学报, 2021, **39**(4): 515 - 523. [MIAO Lyu, MA Chao, LYU Liqun. Dimensionless analysis of resistance of debris flow in the Jiangjia Gully, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(4): 515 - 523] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000616
- [4] 韦方强,胡凯衡. 泥石流流速研究现状与发展方向[J]. 山地学报, 2009, **27**(5): 545 - 550. [WEI Fangqiang, HU Kaiheng. Review and trends on debris flow velocity research [J]. Mountain Research, 2009, **27**(5): 545 - 550] DOI: 10.3969/j. issn. 1008 - 2786. 2009. 05. 005
- [5] LI Pu, WANG Jiading, HU Kaiheng, et al. Experimental study of debris-flow entrainment over stepped-gradient beds incorporating bed sediment porosity [J]. Engineering Geology, 2020, **274**: 105708. DOI: 10.1016/j. enggeo. 2020. 105708
- [6] JOHNSON P C, JACKSON R. Frictional-collisional constitutive relations for granular materials, with application to plane shearing [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, **176**: 67 - 93. DOI: 10.1017/S0022112087000570
- [7] TAKAHASHI T. Debris flow [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, **13**(1): 57 - 77. DOI: 10.1146/annurev. fl. 13. 010181. 000421
- [8] O'BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, **119**(2): 244 - 261. DOI: 10.1061/(ASCE)0733 - 9429(1993)119:2(244)
- [9] IVERSON R M. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics, 1997, **35**(3): 245 - 296. DOI: 10.1029/97RG00426
- [10] PUDASAINI S P. A general two - phase debris flow model [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, **117**: F03010. DOI: 10.1029/2011JF002186
- [11] PUDASAINI S P, FISCHER J T. A mechanical erosion model for two-phase mass flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, **132**: 103416. DOI: 10.1016/j. ijmultiphaseflow. 2020. 103416
- [12] CHEN Qian, SONG Dongri, CHEN Xiaoqing, et al. Visco - collisional scaling law of flow resistance and its application in debris - flow mobility [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2023, **128**(2): e2022JF006712. DOI: 10.1029/2022JF006712
- [13] 周必凡. 粘性泥石流阻力和运动方程验证分析[J]. 山地学报, 1999, **17**(1): 55 - 58. [ZHOU Bifan. Experiment and verification on equations of resistance and movement of viscous debris flows [J]. Mountain Research, 1999, **17**(1): 55 - 58] DOI: 10.3969/j. issn. 1008 - 2786. 1999. 01. 012
- [14] RICKENMANN D, KOCH T. Comparison of debris flow modelling approaches [G]// CHEN C L. Proceedings of the First International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. New York: American Society of Civil Engineers, 1997: 576 - 585.
- [15] NAEF D, RICKENMANN D, RUTSCHMANN P, et al. Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, **6**(1): 155 - 165. DOI: 10.5194/nhess - 6 - 155 - 2006
- [16] MEDINA V, HÜRLIMANN M, BATEMAN A. Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula [J]. Landslides, 2008, **5**(1): 127 - 142. DOI: 10.1007/s10346 - 007 - 0102 - 3
- [17] 胡卸文,钟沛林. 云南蒋家沟流域泥石流沟谷演变的非线性特征[J]. 长江流域资源与环境, 2002, **11**(1): 94 - 97. [HU Xiewen, ZHONG Peilin. Debris flow gully distribution and its nonlinear property of evolution in Jiangjiagou area, Yunnan province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, **11**(1): 94 - 97] DOI: 10.3969/j. issn. 1004 - 8227. 2002. 01. 021

- [18] 唐邦兴, 杜榕桓, 康志成, 等. 我国泥石流研究[J]. 地理学报, 1980, **35**(3): 259–264. [TANG Bangxing, DU Ronghuan, KANG Zhicheng, et al. Research on debris flow in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1980, **35**(3): 259–264] DOI: 10.11821/xb198003008
- [19] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1–10. [KANG Zhicheng, LEE Chackfan, MA Ainai, et al. Research on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1–10]
- [20] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 17–191. [WU Jishan, TIAN Lianquan, KANG Zhicheng, et al. Debris flow and its comprehensive control [M]. Beijing: Science Press, 1993: 17–191]
- [21] 康志成, 崔鹏, 韦方强, 等. 东川泥石流观测研究站观测实验资料集(1961~1984)[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 11–32. [KANG Zhicheng, CUI Peng, WEI Fangqiang, et al. Experimental data set of Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station (1961–1984) [M]. Beijing: Science Press, 2006: 11–32]
- [22] 胡凯衡, 康志成, 李泳. 阵性泥石流泥位过程线的 Euler-Lagrange 分析[J]. 泥沙研究, 2010(4): 6–10. [HU Kaiheng, KANG Zhicheng, LI Yong. Analyses on flow depth hydrograph of debris flow surges in Euler and Lagrange coordinate systems [J]. Journal of Sediment Research, 2010(4): 6–10]
- [23] ZHANG S, CHEN J. Measurement of debris-flow surface characteristics through close-range photogrammetry [G]// RICKENMANN D, CHEN C L. Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Rotterdam: Millpress, 2003: 775–784.
- [24] 谭维炎. 计算浅水动力学——有限体积法的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 1–13. [TAN Weiyan. Calculation of shallow water dynamics: Application of finite volume method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 1–13]
- [25] 杨红娟, 胡凯衡, 韦方强. 泥石流浆体流变参数的计算方法及其扩展性研究[J]. 水利学报, 2013, **44**(11): 1338–1346. [YANG Hongjuan, HU Kaiheng, WEI Fangqiang. Methods for computing rheological parameters of debris-flow slurry and their extensibilities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(11): 1338–1346] DOI: 10.3969/j.issn.0559–9350.2013.11.011
- [26] YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, HU Kaiheng, et al. Effects of mud slurry on flow resistance of cohesionless coarse particles [J]. Powder Technology, 2017, **310**: 1–7. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.036
- [27] 王士革. 云南浑水沟泥石流与大盈江河床演变[J]. 泥沙研究, 2005(5): 28–34. [WANG Shige. Debris flow in Hunshui Gully and fluvial processes of Dayingjiang River in Yunnan province [J]. Journal of Sediment Research, 2005(5): 28–34] DOI: 10.16239/j.cnki.0468–155x.2005.05.005
- [28] 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: 65–77. [CHEN Guangxi, WANG Jikang, WANG Linhai. Prevention and control of debris flow [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983: 65–77]
- [29] 康志成. 云南东川蒋家沟粘性泥石流流速分析[G]// 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(4). 北京: 科学出版社, 1985: 108–118. [KANG Zhicheng. Velocity analysis of viscous debris flow in Jiangjia Gully, Dongchuan, Yunnan [G]// Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Collection of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences (4). Beijing: Science Press. 1985: 108–118]
- [30] 王文睿, 章书成, 王家义, 等. 西藏古乡沟冰川泥石流特征[G]// 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(4). 北京: 科学出版社. 1985: 19–35. [WANG Wenrui, ZHANG Shucheng, WANG Jiayi, et al. Properties of glacial debris flow in Guxianggou, Xizang [G]// Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Collection of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences (4). Beijing: Science Press. 1985: 19–35]
- [31] REVELLINO P, HUNGR O, GUADAGNO F M, et al. Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy [J]. Environmental Geology, 2004, **45**: 295–311. DOI: 10.1007/s00254–003–0885–z
- [32] BERGER C, MCARDELL B W, Schlunegger F. Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011, **116**: F01002. DOI: 10.1029/2010JF001722
- [33] MCCOY S W, KEAN J W, COE J A, et al. Sediment entrainment by debris flows: In situ measurements from the headwaters of a steep catchment [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, **117**: F03016. DOI: 10.1029/2011JF002278
- [34] ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Instability and surge development in debris flows [J]. Reviews of Geophysics, 2007, **45**(3): RG3006. DOI: 10.1029/2005RG000175

## The Morphology of Viscous Debris Flow Head and Its Dynamic Resistance Model

LI Yanji<sup>1,2</sup>, LI Pu<sup>1</sup>, HU Kaiheng<sup>1\*</sup>

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610299, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To measure the resistance of a flowing debris flow to movement is the key issue of debris flow dynamics. A variety of rheological formations and stresses coexist in a flowing debris flow; there was no dynamic resistance model available to properly describe debris flow movement.

In this study, it conducted in-situ monitoring and numerical simulation to investigate the morphological features of viscous debris flow head and the applicability of four dynamic resistance models by introducing Bingham model, Turbulence-yield model, Voellmy model and Dilatant Plastic model into experiments, separately. From the perspective of both Euler (time process line) and Lagrange (spatial process line) coordinate systems, morphological values of viscous debris flows obtained by simulations were verified by observations at a well-known high prevalence area of debris flow, Jiangjia Gully, Yunan, China. Then it analyzed the sensitivity of two parameters, the density of viscous debris flow and gully bed slope, in the four dynamic resistance models by adjusting their preset values in the models.

Following result are obtained: (1) The dilatant plastic model, which integrated yield friction, viscous stress and dispersion stress of solid-liquid mixed flow, was suitable for describing the movement resistance of viscous debris flow. (2) There was a large discrepancy between the mathematical results from Bingham model and observations at Jiangjia Gully. The modelling by dilatant plastic model was justified by observations, in which simulation was not changed in values with the changes of the density of viscous debris flow, but it was altered by varied slopes. The velocities of debris flow calculated by Turbulence-yield model and Voellmy model kept steady as bed slope was reset in the model, which were inconsistent with general knowledge; this might be referred to the interference of bed slope in the calculation of residual layer in the turbulent resistance term of the model. This paper can provide a reference for risk assessment of debris flow disaster and the selection of resistance model in the design of control engineering.

**Key words:** viscous debris flow; resistance model; morphology of debris flow head; euler-Lagrange coordinate systems; numerical analysis

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)