

粘性泥石流流入汇区河床堆积动力学研究的问题与展望

刘晶晶^{1,2,3}, 马春^{1,2,3}, 李春雨^{1,2,3}
LIU Jingjing^{1,2,3}, MA Chun^{1,2,3}, LI Chunyu^{1,2,3}

1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, Sichuan, China;*
2. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;*
3. *School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

LIU J J, MA C, LI C Y, 2020. Fundamental problems and prospects in the study of deposition dynamics of viscous debris flow in the gully-river junction [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 544–555. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.04.047

Abstract: Viscous debris-flow deposits in the junction with mainstream channel may greatly change the morphology, and the dynamics relies on the interaction between the Newtonian fluid and non-Newtonian fluid. The deposition under water differs much from that on the surface, and properly describing the subaqueous process is significant for zoning the danger area and understanding the river evolution. This review provides a comprehensive survey of studies on subaqueous deposition of debris flows and puts forward some questions for the future. We found several new phenomena during the deposition under water, such as the intermittent transport, the “unitary” deposit due to separate surges, and the “water slip” of the surge front, which have been long ignored in previous studies. The existing studies are all based on oversimplification of the water-flow interaction, which considers debris flow as sediment-load flow and adopts the method of density flow, or treats debris flow as a semi-solid state and takes into account only the sediment transport by water flow. Such paradigms do not match the complexity of the real processes and usually underestimate the deposition scale. Then we suggest that further studies, based on the special phenomena, should be emphasized on 1) finding a new framework of the water-flow interaction in the junction, and 2) establishing a new model for debris-flow deposition under water.

Key words: viscous debris flow; confluence; cross-coupling; accumulation; dynamical process

摘要: 粘性泥石流流入汇主河极大地改变了入汇区的河床堆积地貌, 其动力学实质是非牛顿流体与牛顿流体的交互作用, 合理描述粘性泥石流流入汇区河床堆积动力过程对于划定粘性泥石流风险区范围和认知流域地貌演化具有重大意义。粘性泥石流流入汇区河床堆积体时空演化过程有别于粘性泥石流在地表的纯堆积过程, 通过回顾国内外学者在泥石流流入汇区堆积动力学方面的研究成果, 可以发现在粘性泥石流流入汇区内堆积现象复杂, 存在“阵性”输移、“元堆积”和龙头“水滑”等特殊现象。但目前的研究对泥石流和水流交互机制都进行了简化, 一是将粘性泥石流视为挟沙水流, 直接采用异重流方法; 二是将粘性泥石流视为“半固态”, 只考虑水流的输沙特征, 研究认为基于这样的简化不足以描述粘性泥石流流入汇的物理过程和特殊现象, 也低

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA23090202); 国家自然科学基金面上项目 (41877261); 国家自然科学基金项目 (U19A2049)

第一作者简介: 刘晶晶 (1981-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事山地灾害理论及工程防治研究。E-mail: liujingjing@imde.ac.cn

收稿日期: 2020-05-30; **修回日期:** 2020-06-28; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 刘晶晶, 马春, 李春雨, 2020. 粘性泥石流流入汇区河床堆积动力学研究的问题与展望 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 544–555. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.04.047

估了粘性泥石流交汇区冲击速度和堆积范围。同时,根据粘性泥石流入汇区河床堆积动力过程的研究现状,结合粘性泥石流入汇的特殊运动过程,提出未来可开展的工作:一是粘性泥石流入汇的物理过程和其交互机制的合理简化;二是普适性高的粘性泥石流-水流堆积动力学模型的建立。

关键词: 粘性泥石流;入汇区;交互耦合;堆积;动力过程

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A

0 引言

泥石流是一种完全不同于清水和一般挟沙水流的多相流体,是介于土体和水体之间的过渡性流体(钱宁和王兆印,1984;Takahashi,1991)。按照泥石流泥沙浓度或容重,可分为粘性泥石流、稀性泥石流、水石流、泥流和高含沙水流五个亚类(田连权等,1993),其中尤以粘性泥石流最为典型,也是泥石流动力学研究的主要对象(吴积善等,1990)。

粘性泥石流(体积比浓度 $S_v \geq 40\%$,密度 $\rho \geq 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)是一种非均质、非恒定的非牛顿流体(康志成等,2004),具有高强度输沙能力,可携带大量大小混杂的固体物质(粒径范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \text{ m}$)(陈德明,2000)。粘性泥石流进入主河,在入汇区与来流发生交互作用,迅速改变主河水沙组成及局部边界条件,引起河床地貌形态短时间内急剧变化,主河水位急速升高,大规模泥石流可能淤积形成堰塞体(何易平,2003;郭志学等,2004a)。

从河床演变的角度来说,粘性泥石流的入汇在局部改变了河流地貌的下切趋势,导致上游河床升高,下游河床的比降变大,河曲加剧,极易造成岸岸受灾和河床游荡,这导致河谷地区土地资源的开发和利用十分困难(吴积善等,2005;刘晶晶等,2015;张佳佳等,2018)。同时从灾害学的角度来说,泥石流入汇主河,抬高上游水位,使上游沿江两岸低洼处的居民点和农田被淹;致使主河道持续推向对岸,掏蚀对岸山脚;而其后续堰塞体溃决时,产生大规模的溃坝洪水,造成下游长距离超常冲刷,冲毁下游农田和沿江建筑物,形成二次灾害(朱平等,2000;郭志学,2003;苏鹏程等,2012)。所以,粘性泥石流与河流交互导致的堆积地貌改造过程,是粘性泥石流造成的最严重的次生灾害(韦方强等,2002;Stancanelli and Musumeci,2018),有必要对粘性泥石流入汇区河床堆积动力过程形成机制及模拟进行深入研究。

1 粘性泥石流入汇典型现象

1.1 “阵性”输移和“元堆积”现象

典型粘性泥石流,常以间歇性的阵流形式出现,在一次泥石流过程中可形成十几次至几十次甚至几百次阵流(刘晶晶和李泳,2016)。粘性泥石流的非均质性导致了其流动的非恒定性,使其流出呈现明显阵性输移的特征,阵流是粘性泥石流活动的基本单元,这在野外现象中可以观察到(图1)。所以Major(1997)和李泳等(2003)认为通常粘性泥石流堆积不只是一次整体性堆积,更多表现为多场次具有整体性的小单元叠加的,每个单元都是一个分离的小阵流,最终堆积是无数“元堆积”的结果。



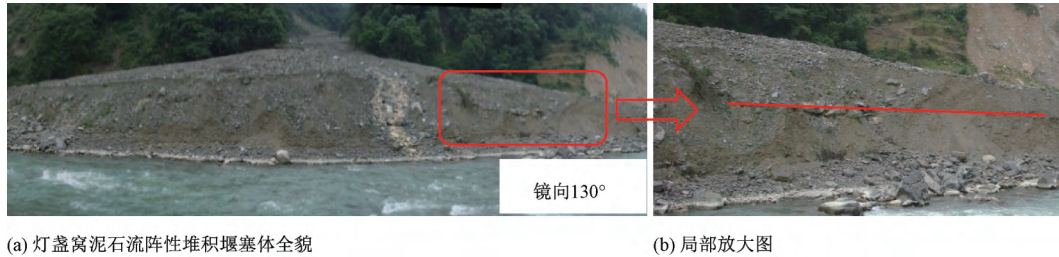
图1 野外观测云南东川蒋家沟阵流铺床过程(刘晶晶和李泳,2016)

Fig. 1 Paving process in field observation (Photo was taken in Jiangjiagou, Dongchuan, Yunnan; Liu and Li, 2016)

粘性泥石流“阵性”输移特征导致粘性泥石流入汇后抵达对岸堆积形成堆积扇的过程并非一次性的。若泥石流的流量或速度足够抵达对岸,通常表现为阵流“元堆积”层叠的过程。汇入主河后,泥石流向对岸前进的同时也向河流的上下游进行扩展,每一场次粘性泥石流动力堆积过程,

也是通过一个个分离的阵流局部叠加起来的,其堆积效果是累次堆积扇“元堆积”的层叠体现,此过程改变了泥石流入汇后形成堰塞体的最终范围。2009年灯盏窝泥石流堰塞体(31°51'13.2"N,

104°29'20.7"E)如图2所示,该泥石流堰塞体没有经过任何人工扰动,并且是在同一场次泥石流中形成。通过堆积角度和堆积物成层判断,可认为此堰塞体是两阵次泥石流的层叠堆积。



(a) 灯盏窝泥石流阵性堆积堰塞体全貌

(b) 局部放大图

图2 灯盏窝泥石流阵性堆积堰塞体(没有经过人工扰动的堰塞坝,拍摄于2009.6.7)

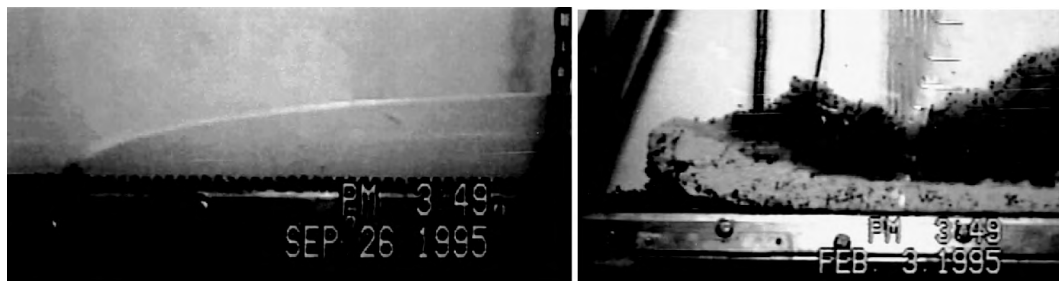
Fig. 2 Dengzhanwo debris-flow dam (It was a landslide dam without artificial disturbance, and the photo was taken on June 7, 2009)

1.2 入汇区龙头“水滑”现象

粘性泥石流在入汇主河的过程中存在泥石流边界掺混和龙头加速现象,其特征是粘性泥石流的龙头进入交汇区后速度较原始出流速度大幅增加,泥石流龙头翘起脱离底床,进而脱离泥石流的中后部向前运动,更快速且在更远的地方沉积,这种现象称为粘性泥石流龙头“水滑”现象。

Mohrig et al. (1998) 通过水下泥石流实验发现,在“硬”的河床(河床底部固定且不可侵蚀)

上,具有相同流变特性的水下泥石流比陆上泥石流向下流动更远;而在“软”的河床(河床底部为之前的泥石流沉积物)上,陆上泥石流能重新带动泥石流沉积物,而水下泥石流则在沉积物上方流动,并未带动河床沉积物。分析认为造成这些差异的原因被假设为在水下泥石流的底部有一层薄薄的环境水,该层环境水作为润滑层阻止了两层之间剪切应力的传递,致使泥石流龙头在河床出现加速(图3)。



(a) 陆面泥石流

(b) 水下泥石流(水深3 m)

图3 Mohrig 实验中的水滑现象(Mohrig et al., 1998)

Fig. 3 Phenomenon of “water slip” in the Mohrig’s experiment (Mohrig et al., 1998)

Ilstad et al. (2004a) 通过一系列室内实验研究了水下泥石流在固定含水量下改变粘土和砂质量分数的流动特性,证实润滑层增强了流动性。对于强粘性泥石流,泥石流龙头出现显著“水滑”,这一现象拉伸了流动的泥石流体,并最终使其破裂。将观测到的速度分布与宾汉流变学进行拟合,并与流动前泥浆的标准流变学测量结果进行比较,结果表明,在底层剪切层中有弱化和软化的作用,而在上覆的流层中则没有。为了更好地了解这种现象,后期 Ilstad et al. (2004b) 在河床底层中安装总应力传感器和孔隙水压力传感器,

通过实验的压力数据分析,也证明了无论是粘土质泥石流还是砂质泥石流,入汇的泥石流水下部分床层摩擦力都出现降低的现象。

汶川磨子沟原型实验中也出现了典型的“水滑”现象(刘晶晶, 2013)。通过进行数组次的对比实验,设定支沟泥石流的所有实验参数完全一致,唯一改变的参数条件就是主河是否有水,以观察主河道中薄水层对粘性泥石流入汇部分的加速作用。其中某一组次的对比实验如图4所示,可以清晰地看到“水滑”现象,例如实验开始(0 s)到实验进行到0.24 s,在单纯陆面堆积实验

中, 泥石流仅仅行进约 1/3 的主河宽度 (图 4a), 而在入汇实验中泥石流龙头已经到达了主河对岸边壁 (图 4b)。这一过程体现了水下泥石流的行进速度远大于单纯陆面泥石流的行进速度, 即“水

滑”现象的存在。并且由于这一现象, 可以看到在实验进行到 0.96 s 时, 泥石流单纯陆面堆积体的范围 (图 4a) 也是显著小于泥石流入汇堆积的范围 (图 4b)。

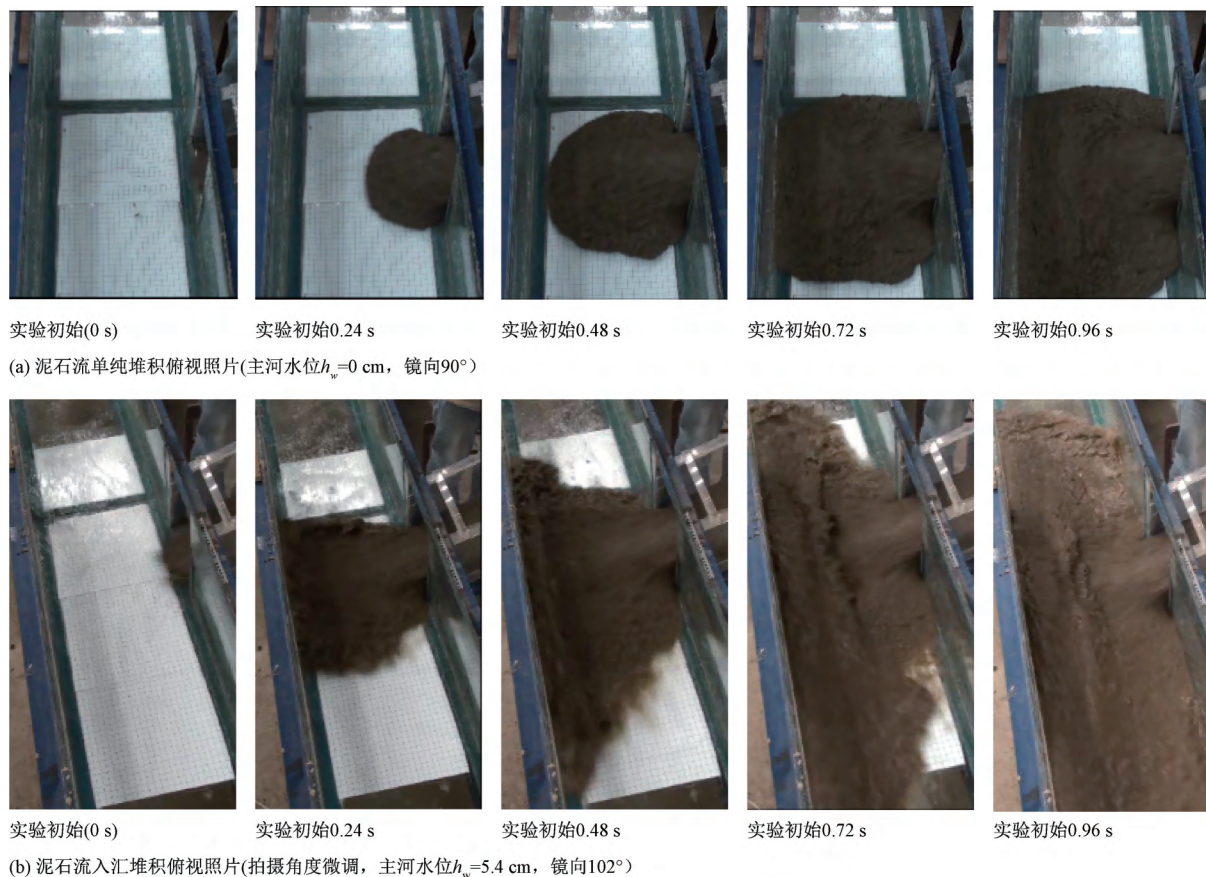


图 4 室内实验中的“水滑”现象 (刘晶晶, 2013)

Fig. 4 Phenomenon of “water slip” in the laboratory experiment (Liu, 2013)

2 泥石流入汇区堆积动力学

2.1 自由边界下的泥石流堆积形态和过程

泥石流的堆积区域常常是泥石流对人居环境的主要影响区域, 其危险范围预测一直是国内外研究的热点问题, 通常涉及堆积形态的静力学参数的计算, 包括堆积距离、堆积宽度、堆积面积、堆积高度 (刘希林和陈宜娟, 2010; 叶健等, 2016; 丰成君等, 2018)。为了认知泥石流的堆积形态和过程, 研究者们进行了大量的野外调查和室内实验工作。

基于野外调查统计, 唐川等 (1991) 通过对小江流域泥石流堆积扇的野外科考调查, 了解泥石流堆积过程, 并对泥石流群横向、平面组合类

型进行了分析, 认为泥石流堆积呈现一定的规律性。Benda (1990) 对美国山区泥石流对沟床和堆积扇的冲刷、淤积进行了野外调查和初步的定量分析, 认为支沟泥石流输入的随机性导致河道淤积和退化循环。Gómez-Villar and García-Ruiz (2000) 对泥石流塑造堆积扇地貌形态方面进行了研究, 认为堆积扇的形态受控于泥石流输入的最后坡度。王裕宜等 (1995, 2000) 认为, 泥石流的堆积形态和范围与泥石流流体浓度、下游流路坡度有关, 还与流通坡度和冲出量有关, 并根据野外测量的堆积形态进行了泥石流浓度的计算和验证。已有研究在对泥石流的堆积形态的野外调查中, 都认为最终堆积形态参数与堆积过程的动力学参数相关, 但由于野外泥石流爆发突然, 实地观测泥石流的堆积过程十分不易, 所以研究者们试图在室

内实验中模拟泥石流的堆积过程。

在实验模型模拟方面,高桥保(1986)设计泥石流堆积模型实验,建立连续体模型,通过分析泥石流头部的能量守恒方程,讨论了坡度变化和沟道宽度对泥石流堆积范围和堆积形态的影响。游勇等(1997)设计的古乡沟泥石流模型实验中,主要考虑泥石流流量的变化,以研究不同类型和不同规模的泥石流在古乡沟堆积扇上的运动和冲淤规律。王裕宜等(2000)通过小型水槽实验,分析泥石流堆积形态比模式,计算泥石流堆积范围,并根据野外测量的堆积形态进行了泥石流流体浓度的计算和验证。敖汝庄等(2004)探讨了淤积量、淤积速度和流量比之间的关系,但由于所得的各组实验数据无较明显的规律,致使拟合结果不甚理想。柳金峰等(2006)通过室内水槽实验,分析泥石流流速与堆积模式之间的关系,基于实验数据统计回归了泥石流流速对堆积形态和范围的影响,认为泥石流流速与堆积扇长度呈正相关,而与堆积扇宽度呈负相关。Haas et al. (2015)进行模型实验,发现沉积物组成(粒径大小和浓度)是影响泥石流运动距离、堆积面积、堆积长度、堆积宽度和高度的重要因素,而地形因素(沟道坡度、宽度,堆积平原坡度等)和泥石流体积的影响可以忽略不计,这也是目前研究者们认为影响泥石流堆积过程的主要参数。

虽然目前关于泥石流自然状态下堆积过程的了解有了大幅发展,可以计算堆积分布规律和堆积量,并以此划定粘性泥石流出口的危险范围(He et al., 2016)。但目前的堆积模型实验中,通常都只进行一次堆积过程。Major(1997)通过大型泥石流堆积实验得出,大量纹理状、未分选的泥石流沉积可能是逐渐叠加堆积的结果,而不是简单的一次性整体沉积。Rothman et al. (1994)和Marr et al. (2001)认为浊流沉积和水底的含沙重力流堆积是服从负幂规律。泥石流堆积因其叠加方式不同而不像浊流那样层次分明,但其厚度在空间的分布应该具有相似性。根据李泳等(2004)对东川蒋家沟多个阵流的统计数据进行分析,认为在多次累加堆积的泥石流堆积高度是原来阵流高度的随机叠加,同时也服从负幂规律。

所以泥石流尤其是粘性泥石流,其“元堆积”的阵性堆叠过程的堆积作用是不能被忽视的,考虑这一典型现象的影响,能更为准确地反映堆积

过程和预估堆积范围。并且自然状态下的堆积并不考虑在主河水环境下龙头与来流的交互作用,这样的作用通常导致入水堆积扇横断面更窄,而纵断面更长,所以有必要对泥石流入汇导致的河床堆积动力过程进行研究。

2.2 泥石流与主河的交汇

泥石流入汇主河属于复杂的非牛顿流体与牛顿流体相互作用问题,在入汇区域,泥石流的堆积动力地貌现象比单一沟床复杂得多,在室内实验和理论研究上存在诸多困难(陈德明, 2000)。粘性泥石流由于携带大量固体物质,其流量大小和过程具有与一般洪水和挟沙水流明显不同的特点。例如,流量同为 $2000\text{ m}^3/\text{s}$,黄河输沙率为 $90\times 10^3\text{ kg/s}$,蒋家沟粘性泥石流输沙率为 $3.8\times 10^6\text{ kg/s}$ (吴积善等, 1990),是黄河的40倍。并且仅汛期三个月,蒋家沟的平均输沙量达到了 $3.7\times 10^9\text{ kg}$ (Cui et al., 2005)。具有如此性态的粘性泥石流入汇主河,较于水流和挟沙水流的入汇更为复杂,涉及层流及紊流转化、掺混及输移转变,从而出现入汇典型现象。

关于泥石流入汇主河的现象基本认识通常是始于野外实地考察和室内模型实验。张金山等(2007)综合8条典型泥石流入汇分析及调查问卷结果,认为泥石流规模、堆积区主河宽度、泥石流沟床比降、泥石流流量、入汇处主河流量、泥石流颗粒级配、入汇处主河比降、泥石流粘度、重度、泥石流沟与主河夹角、泥石流爆发频率等因素与泥石流堵河密切相关(表1)。党超等(2009)将泥石流堵河的5个主要因素简化为4个无量纲量,得出无量纲化的泥石流堵塞主河的临界条件(表1)。屈永平等(2016)分析了41条单沟泥石流堵江情况,统计分析得出泥石流动力学特征值流速与泥石流断面距离、泥石流堆积扇的均厚、泥石流堆积扇的坡度的关系。

陈德明(2000)采用室内模型实验方法研究了泥石流与主河交汇作用,提出了4种交汇模式。郭志学等(2004b)根据动量原理,引入了输运流量和淤积流量以及输运率和淤积率等概念,研究了交汇区复杂条件下的动量传递关系,推导了综合反映交汇后下游水力条件关系和交汇区淤积情况的弗劳德数计算公式。陈春光等(2004a)通过室内模型实验探索泥石流与主河水流的交汇规律,将泥石流入汇分为潜入式交汇和分层交汇两种形

表1 基于统计建立的泥石流入汇堵河判断公式

Table 1 Formula of debris flow blocking in river by the statistical-based method

泥石流入汇堵河判断公式	文献出处	公式编号
$C_M = \ln M_R - 1.189(1 - \cos\theta)^2 - \frac{3.677\gamma_B}{\gamma_M} \leq -12.132$	崔鹏等 (2006)	(1)
$C_F = \ln F_R - 0.883(1 - \cos\theta)^2 - \frac{2.587\gamma_B}{\gamma_M} \leq -8.572$		(2)
$R = \frac{PQ_n J_n}{K_z Q_z J_z}$	张金山和谢洪 (2008)	(3)
$C = (r/\tan\varphi)^2 [\tau/(\rho g w)]^{1/3} \tan\left(\frac{D}{2}\right) \geq 0.87$	党超等 (2009)	(4)
$C = (\gamma_s q v) \sin\alpha / (\gamma_w Q u) \cdot V_s / V_0$	陈春光等 (2013)	(5)
$D = \frac{Q_n J_n r_n \beta}{K_z Q_z J_z} > 6$	刘文锐和周志远 (2015)	(6)

注:公式(1)、(2)中: C_M 、 C_F —泥石流堵塞主河的动量和流量; M_R 、 F_R —主、支槽的单宽动量比、单宽流量比; γ_M 、 γ_B —主槽水流、支槽泥石流的密度; θ —主支槽夹角。公式(3)中: R —泥石流堵塞度,即泥石流堵塞主河可能性; P —泥石流暴发频率; Q_n 、 J_n —泥石流流量、沟道比降; K_z 、 Q_z 、 J_z —主河宽度、流量、比降。公式(4)中: C —泥石流堵河临界值,当 $C \geq 0.87$ 时,堵河; r —泥石流与主河流量比; $\tau/(\rho g w)$ —为泥石流流体的抗冲强度和主河宽度综合参数,其中, w 为主河宽度; $\tan\varphi$ —主河比降; $\tan(D/2)$ —泥石流与主河交汇角。公式(5)中: C —泥石流堵河判定综合因子; γ_s 、 q 、 v —泥石流容重、流量、平均流速; γ_w 、 Q 、 u —水流容重、流量、平均流速; $\gamma_s q v \sin\alpha / (\gamma_w Q u)$ —一支主沟动量比; $V_0 = b \times B \times H$, b 为泥石流沟宽; B 为主河宽; H 为主河水深; V_s —泥石流入汇体积; α —入汇角。公式(6)中: D —泥石流堵塞程度; Q_n 、 J_n 、 r_n —泥石流流量、沟道比降、容重; K_z 、 Q_z 、 J_z —主河宽度、流量、比降; β —泥石流沟与主河夹角

式。崔鹏等(2006)通过水槽实验,将泥石流入汇主河的模式概括为掺混模式、潜入模式、推进模式和堵河模式,并回归分析主支沟临界流量比、动量比、泥石流密度、入汇角等因素,提出了泥石流堵塞主河的动量和流量的判据(表1)。刘翠容等(2014,2016)通过高容重泥石流直角入汇室内大型水槽实验,分析了泥石流容重、主河宽度、泥石流总量对泥石流入汇堵断主河的影响,认为容重和总量都是最重要的影响因素。基于异重流理论,将泥石流流体分为龙头和后流,简化后根据质量守恒方程推导出龙头的运动方程。目前常用的基于统计建立的泥石流入汇堵河判断公式见表1。

粘性泥石流入汇后的堆积与输移、主河水流的绕流、水跃及河床的改变均极为复杂。尽管研究者们基于野外调查统计和室内实验,对泥石流入汇现象进行了描述,并基于统计建立了入汇堵河经验公式。但由于泥石流入汇事件发生突然,野外调查存在很多动力学参数无法获取的难点,致使建立的公式只能对汇口地貌改变进行定性或半定量的研究。而目前室内实验,通常由于场地尺寸限制,难以保证粘性泥石流持续多阵次运动,故目前的实验通常也仅考虑了一次性入汇堆积作用。

2.3 泥石流入汇过程的动力学模拟

粘性泥石流入汇主河的动力学实质是非牛顿

流体与牛顿流体的交互作用,入汇问题是非定常问题且边界条件也较复杂。研究者们对其入汇过程进行动力学模拟主要涉及的方法有:①单独模拟泥石流和水流的运动,简化二者交互机制,基于力学、动量、能量的理论分析,或配合室内实验,选用适宜的数值计算方法,建立双场交互模型;②基于泥石流-水流交汇区流场的物性参数及本构关系在时空变化,用既定流体模型描述泥石流入汇过程;③采用现有流体模拟软件,对泥石流入汇过程进行模拟。

匡尚富(1995)从动量守恒定律出发,假定泥石流入汇后不发生掺混,建立了汇流部泥石流龙头的运动轨迹方程式,并研究了不同主槽水流条件下的淤积规律,这一模型为近似二维模型。陈春光等(2004b,2006)提出了泥石流与主河交汇的两种模式:上下分层交汇和潜入式交汇,并建立了潜入式交汇的泥石流龙头运动方程。其后,他又将交互简化为交汇区的流体流变关系和交汇区泥沙沉降与输移关系,依据流体力学和非牛顿流体力学原理,提出了双场交汇计算模型,该模型能刻画交汇区泥沙浓度分布规律及主河水位的变化。杜翠等(2012)考虑泥石流汇入主河后动力过程受主河水流阻力的影响因素,不考虑掺混的发生,基于一维动量守恒运动方程,建立泥石流进入主河后的运移距离的动力学方程。王纯祥等(2007)利用有限差分法对泥石流的传播和沉

积运动方程求解,并将泥石流分析模块集成于 ArcGIS 中,用于预测泥石流的流动距离和泛滥范围,最终结合 GIS 技术模拟了日本九州南部熊本县水俣市宝川区集村的泥石流的传播和泛滥过程。陈日东等(2011)将泥石流和主河水流的交互机制简化为泥石流对水流运动产生的最大影响因素是地形变化,对于泥石流堆积形态的研究主要是通过数值计算联立求解流体动力学方程组而进行的,虽然这种方式能够动态求解泥石流的运动及堆积过程,并且对复杂地形条件也具有较好的适应性,但其难点在于合适方程的选用和建立(樊赟赟等,2010)。

目前用于描述泥石流入汇过程,常用的流体模型为两相流模型(Major, 1997)、Bingham 模型(胡卸文,2016)、颗粒流模型(Berzi, 2010)。王光谦和倪晋仁(1994)对粘性泥石流采用结构两相流模型进行描述,将内部作用复杂的泥石流流体简化为液固两相流体,并建立了相应的方程以及数值解法,适合大尺度流动。胡卸文等(2016)使用基于有限体积法的 CFX 软件,选择 Bingham 流变模型对江口沟泥石流流动过程的液面分布情况和速度场进行了三维数值模拟,得出了泥石流危险区范围和速度场分布情况。Berzi et al. (2010)采用颗粒流模型,描述室内实验中水和人造粒子的均匀流动,显示流动中的流变状态分层,但目前仅适用于欠饱和流体。

综上所述,目前基于力学、动量、能量的理论分析或采用各类流体模型,描述泥石流入汇过程时,通常的方法中都认为粘性泥石流具有一定的结构稳定性,不考虑入汇时的掺混和加速,将入汇时的泥石流分为水上部分和水下部分,视为二层流(胡健,2002)。

上层流体:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -g \frac{\partial h_1}{\partial x} - g \frac{\partial h_2}{\partial x} + gJ_0 - \frac{\tau_i - \tau_s}{\rho_1 h_1} \quad (7)$$

下层流体:

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = -g \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \frac{\partial h_1}{\partial x} - g \frac{\partial h_2}{\partial x} + gJ_0 - \frac{\tau_0 - \tau_i}{\rho_2 h_2} \quad (8)$$

公式中, u_1 表示 x 方向上层水流的速度; u_2 表示 x 方向下层泥石流的速度; h_1 表示上层水流流深;

h_2 表示泥石流流深; ρ_1 表示水流密度; ρ_2 表示泥石流密度; τ_0 表示河床对泥石流的剪切力; τ_i 表示水流与泥石流界面之间的剪切力; τ_s 表示水流上表面受到的剪切力; t 表示泥石流运动时间; g 表示重力加速度; $-g \frac{\partial h_1}{\partial x}$ 表示 x 方向上层水流的静水压力作用; $-g \frac{\partial h_2}{\partial x}$ 表示 x 方向泥石流的静压力作用; gJ_0 表示 x 方向上泥石流的重力坡降作用; $\frac{\tau_i - \tau_s}{\rho_1 h_1}$ 表示水流受到的剪切力作用; $\frac{\tau_0 - \tau_i}{\rho_2 h_2}$ 表示泥石流受到的剪切力作用。

从上两式中,可以发现若用二层流概化模型解释,且不考虑泥石流与水流的掺混作用,泥石流进入主河后会受到水流的剪切力 $\frac{\tau_i - \tau_s}{\rho_1 h_1}$, 导致进入主河后的泥石流速度会较之入汇速度减缓,但这并不符合入汇区泥石流龙头“水滑”现象,从而导致入汇堆积范围被低估。所以粘性泥石流入汇主河中的实际过程中掺混和输移效应不能被轻易忽略。

目前用于泥石流入汇过程较多的程序或软件,主要有 Geoflow (李同春等,2008)、SCIDDICA-SS3 (Iovine et al., 2005) 和 FLO-2D (Lin et al., 2005; 梁鸿熙等,2016)。李同春等(2008)选用了西班牙国家公共试验研究中心开发的 Geoflow 程序对四川省境内某一条泥石流沟的泛滥区域进行数值模拟,并与经验公式法得出的泥石流泛滥区域进行比对,结果良好。Geoflow 采用的是有限元方法,研究对象是具有自由表面的常态泥石流流体,虽然能得到泥石流流速和泥深的时空分布,但是更适用于泥石流的自由堆积。Iovine et al. (2005)利用 SCIDDICA-SS3 模型,模拟由强惯性效应引发的泥石流,算法采用离散的并行计算模型(元胞自动机),用于模拟基于局部交互作用而演化的动态系统。这种方法能反映出泥石流的随机过程,但是由于构成方式繁杂,分类难度极大。目前在泥石流入汇堆积方面,使用最多的是 FLO-2D 程序。FLO-2D 是美国科罗拉多州立大学开发的用有限差分法来求解运动控制的程序。

Lin et al. (2005)用 FLO-2D 软件模拟了台湾 Chui-Sue 河流域的泥石流入汇堆积情况,认为模拟

结果与该地区微地貌研究结果吻合较好。Bertolo and Wiczorek (2005) 运用 FLO-2D 模型模拟了美国 Yosemite 沟谷泥石流的运动淤积过程。Wu et al. (2013) 和梁鸿熙等 (2016) 运用 FLO-2D 流动模型数值模拟方法对泥石流的移动特性进行模拟, 以此分析粘性系数和屈服应力与泥石流流动及堆积特性的关系。Hübl et al. (2001) 采用二次流变模型与 FLO-2D 软件相结合的方法模拟了粘性泥石流的堆积过程, 模拟了奥地利 Moschergaben 和 Wartschenbach 泥石流沟的入汇堆积情况, 认为 FLO-2D 软件模拟的应用需要高质量的输入数据, 才能有较好的模拟效果。目前, 泥石流二维模型 FLO-2D 在泥石流入汇堆积危险区划分和水流深度预测方面具有较好的评价效果。但由于屈服参数和粘性参数对 FLO-2D 软件模拟结果有显著影响, 所以对于高粘性的泥石流模拟效果不及低粘性泥石流, 而且模拟过程也没有考虑到粘性泥石流入汇的一系列特殊现象。

在粘性泥石流和水流的相互作用下, 实际掺混和输移效应是非常复杂的, 如何合理简化表达两者之间的交互机制, 既能正确刻画入汇现象, 也能保证计算效率较高, 精度较好, 是未来需要解决的关键问题。

3 问题与展望

3.1 目前存在的研究问题

粘性泥石流入汇主河的动力学实质是非牛顿流体与牛顿流体的交互作用。目前, 牛顿流体 (如水流) 的理论已日益完善, 非牛顿流体 (如高含沙水流、泥石流) 也取得了一定的成果, 提出了相应的理论模式 (Iverson and George, 2014)。在粘性泥石流入汇过程中, 存在“阵性”输移和“元堆积”、龙头“水滑”加速等特殊现象, 因而呈现出以下新的研究问题。

(1) 粘性泥石流的非均质性导致了其流动的非恒定性, 故粘性泥石流的流动通常都以阵性流表现。一场次粘性泥石流入汇主河改变河床动力地貌的过程, 也是通过一个个分离的阵流局部叠加起来的, 其堆积效果是累次“元堆积”过程的体现, 甚至在粘性泥石流入汇体量足够的情况下, 最终堆积是“元堆积”和“液流反弹”堆积的总和。但目前的研究中, 大多忽视这一逐次积累过

程, 从而无法真实反映某场次粘性泥石流入汇堆积的过程和范围。

(2) 粘性泥石流入汇主河的过程是泥石流与水流的耦合过程。由于粘性泥石流具有很强的结构稳定性, 当前研究大多将其交互机制简化, 很少考虑交互过程中的掺混效应, 这导致了目前的模型无法解释粘性泥石流龙头“水滑”现象, 也低估了粘性泥石流交汇区速度和龙头冲击距离。

(3) 粘性泥石流与主河交汇的汇口处, 泥石流的堆积现象比单一沟床复杂得多。当前泥石流入汇的动力地貌计算多来源或借鉴于河流泥沙动力学, 这不能有效描述泥石流汇入主河交互过程及机制。虽然能判断泥石流流入主河后基本的流态, 但是目前对于不同条件下泥石流堵塞区堆积体的淤积特性, 包括淤积量及淤积分布规律、汇口上下游水深的调整、回流区的淤积规律的认识仍然不足, 这导致泥石流堰塞体堵河临界条件界定不清, 缺乏普适性较强的粘性泥石流入汇区河床堆积动力过程的模拟软件和计算平台。

3.2 研究展望与建议

粘性泥石流入汇区河床面堆积体时空演化过程有别于粘性泥石流在地表的堆积过程, 合理描述粘性泥石流入汇区河床堆积动力过程对于划定粘性泥石流风险区范围 (刘希林, 2000; Zhou et al., 2019) 和认知流域地貌演化具有重大意义。因此有必要在未来开展如下问题的研究。

(1) 粘性泥石流入汇的物理过程和其交互机制的合理简化

设计尺度更为大型、参数变量更为复杂的物理模型对比实验, 探索粘性泥石流交互地形条件与流体条件对入汇地貌过程的影响, 量化各参数在不同阶段对粘性泥石流-水流交互过程的影响, 探讨粘性泥石流入汇的物理过程。

粘性泥石流入汇主河后, 由于其本身的特殊动力学性质和与水流之间高密度差, 导致交汇区堆积是非定场且边界条件复杂, 致使交互过程的动力学分析十分复杂, 方程的建立和算法的选择都非常困难。其物理过程大致涉及到①掺混、②输移、③聚集、④沉降、⑤堆积、⑥再堆积 (阵次)、⑦固结, 完全真实无误地反映这一过程是非常困难的, 即使能构建方程, 对于算法的稳定性也提出非常高的要求。所以过去的研究对交互机制都进行了简化, 一是将粘性泥石流视为挟

沙水流, 直接采用异重流方法; 二是将粘性泥石流视为“半固态”, 只考虑水流的输沙特征, 但这样的简化不足以描述粘性泥石流入汇的物理过程和现象。如何合理表达粘性泥石流-水流“半耦合”交互机制, 既能正确刻画入汇过程和现象, 也能保证计算精度, 是未来可开展的工作。

(2) 普适性高的粘性泥石流-水流堆积动力学模型的建立

基于入汇区粘性泥石流-水流交互机制的研究, 建立粘性泥石流-水流堆积动力学模型。依据大量水槽实测数据, 讨论不同输入条件下参数敏感性和取值范围, 率定不同工况下的参数取值, 以适应更多边界和输入条件的协调, 保证方程的有效性和通用性。开展不同流域情景下粘性泥石流入汇区河床堆积动力模拟, 计算粘性泥石流入汇后堆积范围的时空变化参数, 预测堵断主流时间或可能性, 并与灾害现场调查对比分析, 采用非均质粘性泥石流入汇动力地貌演化物理模型的高效数值算法, 借助并行算法和区域划分手段, 实现对真实过程的模拟。

References

- AO R Z, GUO Z X, CAO S Y, 2004. Flume experiment study on deposit principle of debris flow when debris flow confluence with main river [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18 (4): 196-199. (in Chinese with English abstract)
- BENDA L, 1990. The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon Coast Range, U. S. A. [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15 (5): 457-466.
- BERTOLO P, WIECZOREK G F, 2005. Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 (6): 993-1001.
- BERZI D, JENKINS J T, LARCHER M, 2010. Debris flows: recent advances in experiments and modeling [J]. *Advances in Geophysics*, 52: 103-138.
- CHEN C G, YAO L K, 2006. Three dimensional numerical simulation of confluence of debris flow and main river [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 25 (2): 61-65. (in Chinese with English abstract)
- CHEN C G, YAO L K, LIU C R, et al., 2013. Study on conditions of river-blocking due to debris flow [J]. *Journal of Water Conservancy*, 44 (6): 648-656. (in Chinese with English abstract)
- CHEN C G, YAO L K, YANG Q H, 2004a. Experimental research on confluence between debris flow and main river [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 39 (1): 10-14. (in Chinese with English abstract)
- CHEN C G, YAO L K, YANG Q H, 2004b. Movement of debris flow head in main channel at the confluence [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 35 (1): 11-16. (in Chinese with English abstract)
- CHEN D M, 2000. Mechanism of confluence between debris flow and the main river [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 2-10, 60-90. (in Chinese with English abstract)
- CHEN R D, LIU X N, CAO S Y, et al., 2011. Numerical simulation of deposit in confluence zone of debris flow and mainstream [J]. *Science in China (Series E)*, 41 (10): 1305-1314. (in Chinese with English abstract)
- CUI P, CHEN X Q, WAQNG Y, et al., 2005. Jiangjia Ravine debris flows in south-western China [M] // *Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin Heidelberg: Springer; 565-594.
- CUI P, HE Y P, CHEN J, 2006. Debris flow sediment transportation and its effects on rivers in mountain area [J]. *Journal of Mountain Science*, 24 (5): 539-549. (in Chinese with English abstract)
- DANG C, CHENG Z L, LIU J J, 2009. Critical conditions for dam-forming due to injunction of debris flow into mainstream [J]. *Journal of Mountain Science*, 27 (5): 557-563. (in Chinese with English abstract)
- DE HAAS T, BRAAT L, LEUVEN J R F W, et al., 2015. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120 (9): 1949-1972.
- DU C, YAO L K, YANG Y L, et al., 2012. Criteria of debris flow damming of large river in terms of dynamical process and material composition [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43 (S2): 128-132. (in Chinese with English abstract)
- FAN Y Y, WANG S J, WANG E Z, 2010. Analysis of conceptual two-phase resistance for accumulation state of debris flows [J]. *Journal of Engineering Geology*, 18 (1): 100-104. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, QI B S, ZHANG P, et al., 2018. Crustal stress field and its tectonic significance near the Longmenshan fault belt, after the Wenchuan Ms8. 0 Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (4): 439-451. (in Chinese with English abstract)
- GAO Q B, 1986. Study on mechanism of stopping and deposition of debris flows (II): Forming process of debris flows [J]. *Progress in Geography*, 5 (2): 39-44. (in Chinese)
- GÓMEZ-VILLAR A, GARCÍA-RUIZ J M, 2000. Surface sediment characteristics and present dynamics in alluvial fans of the central Spanish Pyrenees [J]. *Geomorphology*, 34 (3-4): 127-144.
- GUO Z X, 2003. The movement characteristic of flow and sediment in confluence area when debris flows joine in the main river [D]. Chengdu: Sichuan University. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z X, CAO S Y, LIU X N, et al., 2004a. Experimental study on parameters affecting the river-blocking due to debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, (11): 39-45. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z X, FANG D, CAO S Y, et al., 2004b. Flow characteristic in conjunction area after confluence of debris flow and main river [J].

- Advances in Water Science, 15 (4): 467-471. (in Chinese with English abstract)
- HE S T, WANG D J, CHEN S, et al., 2016. Natural consolidation characteristics of viscous debris flow deposition [J]. Journal of Mountain Science, 13 (10): 1723-1734.
- HE Y P, 2003. Influence of debris flow on riverbed evolution of mountain rivers [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- HU J, 2002. Confluence mechanism of debris flow and main river and numerical simulation of debris flow movement [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research. (in Chinese)
- HU X W, DIAO R H, LIANG J X, et al., 2016. Prediction of the scope of Jiangkou gully debris flow hazard using CFX software [J]. Rock and Soil Mechanics, 37 (6): 1689-1696. (in Chinese with English abstract)
- HÜBL J, STEINWENDTNER H, 2001. Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, 26 (9): 639-644.
- ILSTAD T, ELVERHØI A, ISSLER D, et al., 2004a. Subaqueous debris flow behaviour and its dependence on the sand/clay ratio; a laboratory study using particle tracking [J]. Marine Geology, 213 (1-4): 415-438.
- ILSTAD T, MARR J G, ELVERHØI A, et al., 2004b. Laboratory studies of subaqueous debris flows by measurements of pore-fluid pressure and total stress [J]. Marine Geology, 213 (1-4): 403-414.
- IOVINE G, D'AMBROSIO D, DI GREGORIO S, 2005. Applying genetic algorithms for calibrating a hexagonal cellular automata model for the simulation of debris flows characterised by strong inertial effects [J]. Geomorphology, 66 (1-4): 287-303.
- IVERSON R M, GEORGE D L, 2014. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 470 (2170): 20130819.
- KANG Z C, LI Z F, MA G N, 2004. Research on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press; 24-39. (in Chinese)
- KUANG S F, 1995. Study on behaviors and deposit processes of debris flow at the confluence [J]. Journal of Sediment Research, (1): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- LI T C, LI Y Y, ZHANG S C, et al., 2008. Numerical simulation on inundation area of debris flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 28 (6): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, HU K H, CHEN X Q, 2004. Thickness distribution of debris-flow deposition [J]. Journal of Mountain Science, 22 (3): 332-336. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, YAO S F, HU K H, et al., 2003. Surges and deposits of debris flow in Jiangjia gully [J]. Journal of Mountain Science, 21 (6): 712-715. (in Chinese with English abstract)
- LIANG H X, SHANG M, XU X, 2016. Research on the influence factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 24 (2): 228-234. (in Chinese with English abstract)
- LIN M L, WANG K L, HUANG J J, 2005. Debris flow run off simulation and verification-case study of Chen-You-Lan Watershed, Taiwan [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5 (3): 439-445.
- LIU C R, YAO L K, CHEN C G, et al., 2014. A distinguishing method for the river blocking from submerged dam based on the theory of gravity current [J]. Journal of Natural Disasters, 23 (5): 113-120. (in Chinese with English abstract)
- LIU C R, ZHAO S G, 2016. Experimental study on mechanism of large river blocking by debris flow [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 35 (1): 90-95. (in Chinese with English abstract)
- LIU J F, OU G Q, YOU Y, 2006. Experimental research on velocity and deposition mode of debris flow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 13 (1): 120-121, 226. (in Chinese with English abstract)
- LIU J J, 2013. The mechanism of debris-flow dam formation in Wenchuan-earthquake zone [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)
- LIU J J, SUN Z C, CHENG Z L, 2015. Assessment of influence area and emergency plan for debris-flow dammed lake-A case study in Mozi Gully of Wenchuan, Sichuan [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 13 (5): 935-940, 952. (in Chinese with English abstract)
- LIU J J, LI Y, 2016. A review of study on drag reduction of viscous debris-flow residual layer [J]. Journal of Sediment Research, (3): 72-80. (in Chinese with English abstract)
- LIU W R, ZHOU Z Y, 2015. Discussion on the type of debris flow blocking the river in Wenchuan [J]. Pearl River, 36 (1): 113-116. (in Chinese)
- LIU X L, 2000. Debris flow risk zonation in Zhaotong county of Yunnan province, China [J]. Journal of Geomechanics, 6 (4): 37-42. (in Chinese with English abstract)
- LIU X L, CHEN Y J, 2010. Application of debris flow risk zonation: An example of west Sichuan [J]. Scientia Geographica Sinica, 30 (4): 558-565. (in Chinese with English abstract)
- MAJOR J J, 1997. Depositional processes in large-scale debris-flow experiments [J]. The Journal of Geology, 105 (3): 345-366.
- MARR J G, HARFF P A, SHANMUGAM G, et al., 2001. Experiments on subaqueous sandy gravity flows; The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures [J]. GSA Bulletin, 113 (11): 1377-1386.
- MOHRIG D, ELLIS C, PARKER G, et al., 1998. Hydroplaning of subaqueous debris flows [J]. GSA Bulletin, 110 (3): 387-394.
- QIAN N, WANG Z Y, 1984. A preliminary study on the mechanism of debris flows [J]. Acta Geographica Sinica, 51 (1): 33-43. (in Chinese with English abstract)
- QU Y P, TANG C, BU X H, et al., 2016. Survey and analysis of the "7·04" river-blocking debris flow of Xiongjia Gully in Shimian

- county, Sichuan province [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47 (1): 44-53. (in Chinese with English abstract)
- ROTHMAN D H, GROTZINGER J P, FLEMINGS P, 1994. Scaling in turbidite deposition [J]. *Journal of Sedimentary Research A*, 64 (1): 59-67.
- STANCANELLI L M, MUSUMECI R E, 2018. Geometrical characterization of sediment deposits at the confluence of mountain streams [J]. *Water*, 10 (4): 401.
- SU P C, WEI F Q, CHENG Z L, 2012. Debris flow activity of Mozi Gully after Wenchuan Earthquake on May 12 [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 29 (2): 16-23. (in Chinese with English abstract)
- TAKAHASHI T, 1991. Debris flow [J]. *Annual review of fluid mechanics*, 13 (1): 57-77.
- TANG C, ZHU J, DUAN J F, et al., 1991. Research on the deposition fans in Xiaojing Watershed, Yunnan Province [J]. *Mountain Research*, 9 (3): 179-184. (in Chinese with English abstract)
- TIAN L Q, WU J S, KANG Z C, et al., 1993. Debris flow erosion handling and accumulation [M]. Chengdu: Chengdu Map Press: 2-26. (in Chinese)
- WANG C X, BAI S W, ESAKI T, et al., 2007. GIS-based two-dimensional numerical simulation of debris flow [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 28 (7): 1359-1362. (in Chinese with English abstract)
- WANG G Q, NI J R, 1994. Debris flow dynamics basic equation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 39 (18): 1700-1704. (in Chinese)
- WANG Y Y, 1995. Experimental research on predicting deposit model of debris flow prevention in mountain [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 6 (4): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y Y, ZOU R Y, YAN B Y, et al., 2000. Experimental research on prediction model of debris flow deposition [J]. *Journal of Natural Disasters*, 9 (2): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- WEI F Q, XIE H, ZHONG D L, et al., 2002. Debris flow and its disaster mitigation in the construction of mountain towns in western China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13 (4): 23-28. (in Chinese with English abstract)
- WU J S, CHENG Z L, GENG X Y, 2005. Formation of dam from debris flow in the southeast Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 23 (4): 399-405. (in Chinese with English abstract)
- WU J S, KANG Z C, TIAN L Q, et al., 1990. Observation on debris flow in Jiangjia Gully, Yunnan [M] Beijing: Science Press: 35-50. (in Chinese)
- WU Y H, LIU K F, CHEN Y C, 2013. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study [J]. *Journal of Mountain Science*, 10 (2): 293-304.
- YE J, CHEN J X, CHEN X Q, et al., 2016. Numerical simulation study on hazardous area for the confluence deposit of gully debris flow [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 36 (10): 1588-1594. (in Chinese with English abstract)
- YOU Y, CHENG Z L, HU P H, et al., 1997. A study on model testing of debris flow in Guxiang Gully, Tibet [J]. *Journal of Natural Disasters*, 6 (1): 52-58. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J J, LIU J K, GAO B, et al., 2018. Characteristics of material sources of Galongqu glacial debris flow and the influence to Zhamo Road [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (1): 106-115. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J S, SHEN X J, XIE H, 2007. Study on factors affecting the river-blocking due to debris-flow in the upper reaches of Minjiang river [J]. *Journal of Catastrophology*, 22 (2): 82-86. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J S, XIE H, 2008. Calculation of the possibility of river-blocking due to debris flow in the upper reaches of minjiang river [J]. *Resources and environment of the Yangtze River Basin*, (4): 651-655. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU G D, LI S, SONG D R, et al., 2019. Depositional mechanisms and morphology of debris flow: physical modelling [J]. *Landslides*, 16 (2): 315-332.
- ZHU P Y, CHENG Z L, YOU Y, 2000. Research on causes of river blocking by sediment delivery of Peilonggou Gully debris flow in the Sichuan-Xizang Highway [J]. *Journal of Natural Disasters*, 9 (1): 80-83. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 敖汝庄, 郭志学, 曹叔尤, 2004. 泥石流入汇主河淤积规律的水槽试验研究 [J]. *水土保持学报*, 18 (4): 196-199.
- 陈春光, 姚令侃, 杨庆华, 2004a. 泥石流与主河水流交汇的试验研究 [J]. *西南交通大学学报*, 39 (1): 10-14.
- 陈春光, 姚令侃, 杨庆华, 2004b. 入汇主河的泥石流龙头运动机理研究 [J]. *水利学报*, 35 (1): 11-16.
- 陈春光, 姚令侃, 2006. 泥石流与主河交汇区三维数值模拟 [J]. *重庆交通学院学报*, 25 (2): 61-65.
- 陈春光, 姚令侃, 刘翠容, 等, 2013. 泥石流堵河条件的研究 [J]. *水利学报*, 44 (6): 648-656.
- 陈德明, 2000. 泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院.
- 陈日东, 刘兴年, 曹叔尤, 等, 2011. 泥石流与主河汇流堆积的数值模拟 [J]. *中国科学: 技术科学*, 41 (10): 1305-1314.
- 崔鹏, 何易平, 陈杰, 2006. 泥石流输沙及其对山区河道的影响 [J]. *山地学报*, 24 (5): 539-549.
- 党超, 程尊兰, 刘晶晶, 2009. 泥石流堵塞主河条件 [J]. *山地学报*, 27 (5): 557-563.
- 杜翠, 姚令侃, 杨运林, 等, 2012. 基于动力学与物质条件的泥石流阻塞大河综合判据 [J]. *水利学报*, 43 (S2): 128-132.
- 樊赞赞, 王思敬, 王思志, 2010. 基于结构两相阻力分析的泥石流堆积形态研究 [J]. *工程地质学报*, 18 (1): 100-104.
- 丰成君, 戚帮申, 张鹏, 等, 2018. 汶川 Ms8.0 地震后龙门山断裂带地壳应力场及其构造意义 [J]. *地质力学学报*, 24 (4): 439-451.
- 高桥保, 1986. 泥石流停止和堆积机理的研究 (二): 泥石流堆积扇的形成过程 [J]. *地理译报*, 5 (2): 39-44.
- 郭志学, 2003. 泥石流入汇交汇区水沙运动特性 [D]. 成都: 四川大学.
- 郭志学, 曹叔尤, 刘兴年, 等, 2004a. 泥石流堵江影响因素试验研

- 究[J]. 水利学报, (11): 39-45.
- 郭志学, 方铎, 曹叔尤, 等, 2004b. 泥石流入汇条件下交汇区的流动特性[J]. 水科学进展, 15 (4): 467-471.
- 何易平, 2003. 泥石流对山区河流河床演变的影响[D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所.
- 胡健, 2002. 泥石流与主河的汇流机理及泥石流运动的数值模拟[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院.
- 胡卸文, 刁仁辉, 梁敬轩, 等, 2016. 基于CFX的江口沟泥石流危险区范围预测模拟[J]. 岩土力学, 37 (6): 1689-1696.
- 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 2004. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社: 24-39.
- 匡尚富, 1995. 汇流部泥石流的特性和淤积过程的研究[J]. 泥沙研究, (1): 1-15.
- 李同春, 李杨杨, 章书成, 等, 2008. 泥石流泛滥区域数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 28 (6): 1-4.
- 李泳, 胡凯衡, 陈晓清, 2004. 泥石流堆积的分布[J]. 山地学报, 22 (3): 332-336.
- 李泳, 姚寿福, 胡凯衡, 等, 2003. 从蒋家沟泥石流阵流看泥石流堆积[J]. 山地学报, 21 (6): 712-715.
- 梁鸿熙, 尚敏, 徐鑫, 2016. 基于FLO-2D数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J]. 工程地质学报, 24 (2): 228-234.
- 刘翠容, 姚令侃, 陈春光, 等, 2014. 基于异重流理论的潜坝堵河判别方法[J]. 自然灾害学报, 23 (5): 113-120.
- 刘翠容, 赵世刚, 2016. 泥石流阻塞大河机理试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 35 (1): 90-95.
- 柳金峰, 欧国强, 游勇, 2006. 泥石流流速与堆积模式之实验研究[J]. 水土保持研究, 13 (1): 120-121, 226.
- 刘晶晶, 2013. 汶川震区泥石流坝形成机理[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 刘晶晶, 孙正超, 程尊兰, 2015. 泥石流堰塞湖影响区域评估及其应急预案: 以汶川县磨子沟为例[J]. 南水北调与水利科技, 13 (5): 935-940, 952.
- 刘晶晶, 李泳, 2016. 黏性泥石流残留层的床面减阻研究综述[J]. 泥沙研究, (3): 72-80.
- 刘文锐, 周志远, 2015. 汶川震区泥石流堵河类型探讨[J]. 人民珠江, 36 (1): 113-116.
- 刘希林, 2000. 泥石流风险区划研究[J]. 地质力学学报, 6 (4): 37-42.
- 刘希林, 陈宜娟, 2010. 泥石流风险区划方法及其应用: 以四川西部地区为例[J]. 地理科学, 30 (4): 558-565.
- 钱宁, 王兆印, 1984. 泥石流运动机理的初步探讨[J]. 地理学报, 51 (1): 33-43.
- 屈永平, 唐川, 卜祥航, 等, 2016. 石棉县熊家沟“7·04”泥石流堵江调查与分析[J]. 水利学报, 47 (1): 44-53.
- 苏鹏程, 韦方强, 程尊兰, 2012. 5·12汶川地震对磨子沟的影响及震后泥石流活动状况[J]. 长江科学院院报, 29 (2): 16-23.
- 唐川, 朱静, 段金凡, 等, 1991. 云南小江流域泥石流堆积扇研究[J]. 山地研究, 9 (3): 179-184.
- 田连权, 吴积善, 康志成, 等, 1993. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都: 成都地图出版社: 2-26.
- 王纯祥, 白世伟, 江崎哲郎, 等, 2007. 基于GIS泥石流二维数值模拟[J]. 岩土力学, 28 (7): 1359-1362.
- 王光谦, 倪晋仁, 1994. 泥石流动力学基本方程[J]. 科学通报, 39 (18): 1700-1704.
- 王裕宜, 1995. 山区泥石流防治中堆积坡度预测模式的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 6 (4): 58-67.
- 王裕宜, 邹仁元, 严璧玉, 等, 2000. 泥石流堆积模式的试验研究[J]. 自然灾害学报, 9 (2): 81-86.
- 韦方强, 谢洪, 钟敦伦, 等, 2002. 西部山区城镇建设中的泥石流问题与减灾对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 13 (4): 23-28.
- 吴积善, 程尊兰, 耿学勇, 2005. 西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J]. 山地学报, 23 (4): 399-405.
- 吴积善, 康志成, 田连权, 等, 1990. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社: 35-50.
- 叶健, 陈锦雄, 陈晓清, 等, 2016. 泥石流沟道汇流对堆积危险范围影响的数值模拟研究[J]. 地理科学, 36 (10): 1588-1594.
- 游勇, 程尊兰, 胡平华, 等, 1997. 西藏古乡沟泥石流模型试验研究[J]. 自然灾害学报, 6 (1): 52-58.
- 张佳佳, 刘建康, 高波, 等, 2018. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响[J]. 地质力学学报, 24 (1): 106-115.
- 张金山, 沈兴菊, 谢洪, 2007. 泥石流堵河影响因素研究: 以岷江上游为例[J]. 灾害学, 22 (2): 82-86.
- 张金山, 谢洪, 2008. 岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别[J]. 长江流域资源与环境, (4): 651-655.
- 朱平一, 程尊兰, 游勇, 2000. 川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J]. 自然灾害学报, 9 (1): 80-83.

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

