

泥石流容重的内涵诠释及其 对灾害防治的启示

黄海^{1,2)}, 马东涛³⁾

1) 中国地质科学院探矿工艺研究所, 成都, 611734;

2) 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 成都, 611734;

3) 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都, 610041



内容提要:容重是描述泥石流性质的重要基础参数。本文基于泥石流运动过程的时空特征,厘定了最大容重、峰值容重和平均容重3个容重特征值。以蒋家沟1987年以来的泥石流观测数据为分析对象,分析了3个容重特征值在数值上的分布规律和影响因素。结果显示:①最大容重与峰值容重的关系式具有较好的相关性,最大容重与平均容重的关系式具有实际计算适宜性;②最大容重和峰值容重均与泥石流峰值流量呈正相关,与泥石流冲出规模关系不明显。在现有泥石流容重计算方法基础上,进一步界定了泥石流容重取样、计算和校验方法,构建了泥石流灾害特征值计算中容重独立取值原则,即峰值流量、流速、冲压力等计算建议选取最大容重,而一次冲出固体物质总量、堵河危险性和危险区范围等计算建议选取平均容重。研究结果可为泥石流灾害防治提供参考。

关键词:容重特征值;物理意义;峰值流量;校验方法;灾害防治

泥石流容重是描述泥石流物理性质最基本的参数,其定义为单位体积的流体重度(李培基等,1982;章书成,1989)。容重不仅表达了流体性质差异,同时也是泥石流灾害的流速、流量、一次冲出固体物质总量和冲压力等动力特征值计算公式的重要参数,是泥石流灾害评价和治理中的关键参数之一(陈宁生等,2003)。直接而准确的获取泥石流容重的唯一手段是在泥石流灾害暴发时现场取样测试,但这种方法有极大的限制性,在缺少长期观测的泥石流沟,观测到泥石流的发生的概率极低,即使是室内试验,由于流体的通透性差,目前也缺少先进技术对于容重进行有效测量。因此,如何精细刻画容重特征是泥石流灾害研究中一直悬而未决的问题。为了解决该难题,从20世纪60年代起,国内外的学者试图通过间接手段确定某一次灾害事件的容重来回避直接观测的缺陷,建立了基于泥石流的流态现象和物质特性来计算容重的方法(Iverson, 1997;蒋树等,2012)。这些方法大体上可以归纳为3类:①从观测手段出发,通过配置最近泥石流事件的相似流体进行测试获取容重值的配方法和根据孕灾背景赋值的打分法(国土资源部,2006);②基于泥石流堆

积物组分的统计规律建立的颗粒分析法,也是目前学术界和工程界的主流方法,其中以杜榕桓等建立的方法应用较广泛(杜榕桓等,1987;陈宁生等,2003,2010;余斌,2008, Li Yong et al., 2015);③基于泥石流容重的时空动态变化规律建立的预测估算法(黄海等,2020a),如Huang Hai等建立的基于物源条件和水力条件建立的预测方法(Huang Hai et al., 2020)。以上也可明显看到容重取值方法的逐步改良,主要体现在统计的方法上,从流态表观相似,提升到建立特征颗粒与容重之间的数量统计关系,或者孕灾背景与容重之间的统计关系,再进一步到颗粒粒度分布特征与容重之间的统计关系(Wang Baoliang et al., 2018; Yang Taiqiang et al., 2019),直至近年来探讨的从时空变化角度分析容重的预测计算。但这些方法都似乎在回避两个问题,即计算所得的容重值的物理意义是什么,容重值具体刻画了一场泥石流的哪个断面、哪个时刻的性质,尤其是在泥石流调查中常用的现场浆体试验所测到的容重值(石建军等,2018),严重受制于被访问者的描述。现有计算方法中将容重作为一个笼统的概念进行研究的模糊处理方法,无法定时、定量的

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20190644、20190505)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号:2019QZKK0903)的成果。

收稿日期:2021-06-07;改回日期:2021-11-02;网络首发:2021-11-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.11.021

作者简介:黄海,男,1984年生,博士,高级工程师,主要从事泥石流灾害防治理论与技术研究;Email: huangh@mail.cgs.gov.cn。

描述流体性质在时空尺度上的变化(李泳等, 2009)。这种模糊的定义目前广泛应用于泥石流灾害的动力模拟(Kim et al., 2018)、风险评价(Ouyang Chaojun et al., 2019; Zou Qiang et al., 2020)、防治技术研究(张江华等, 2015; Lee et al., 2019; Yuan Dong et al., 2019; Vagnon, 2020)等方面,这就使得我们无法判断分析结果的真实性和近 10 年来的新理论新方法难以在工程实践中广泛推广的重要原因。随着我国重大工程建设对地质敏感区的扰动越来越强烈,在叠加全球气候变暖的大背景下,对泥石流灾害的防灾减灾需求也与日俱增,铁路、水电等重大关键工程对于防灾减灾提出了更高的需求(Lu Chunfang et al., 2019; 彭建兵等, 2020)。本文针对泥石流灾害评价和治理中的关键特征值,定义了泥石流的 3 个容重特征值:最大容重、峰值容重和平均容重。结合蒋家沟泥石流观测站自 1987 年以来的连续观测资料,分析 3 个容重值的分布规律和影响因素,进一步优化了泥石流容重的确定方法,为泥石流灾害的防灾减灾提供重要的基础理论支撑。

1 泥石流容重特征值概念

泥石流容重是随着时空动态演化的,其值一般从最小 1.30 g/cm^3 到最大 2.40 g/cm^3 。时间尺度上,同一断面上不同泥石流运动时间点的容重是不断变化的,总体上具有“小—大—小”的趋势;空间尺度上,同一时刻,沿沟道不同断面的泥石流容重是不同的,一般来说形成区>流通区>堆积区,与沿程泥沙侵蚀规律密切相关(吕立群等, 2017),同时在沟道横断面上呈现中间主流>两侧侧流(图 1)。定量描述泥石流灾害特征时,泥石流的峰值流量和固体物质冲出总量是致灾规模的关键参数(Canovas et al., 2016)。灾害评估中,峰值流量决定泥石流冲出规模和泥石流灾害危害范围(Zou Qiang et al., 2017);灾害治理中,峰值流量决定拦砂坝结构受力、溢流口结构尺寸、排导工程截面尺寸等(Hu Hongsen et al., 2020),冲出固体物质量则决定拦挡工程规模(Liu Wei et

al., 2020)。因此对于一次泥石流事件,峰值流量时的泥石流容重(峰值容重)、泥石流过程中出现的最大容重(最大容重)和整场泥石流事件的平均容重(平均容重)就成为连接流体物理性质和动力参数的关键链。

最大容重($\gamma_{\max}$)代表了该次泥石流流体物质搬运能力上限,与泥石流形成的水土耦合过程以及床沙交换过程密切相关,受泥石流过程的复杂性(Liu Jingjing et al., 2009),其上限的形成机制和规律还不甚明确。峰值容重(γ_p)代表了此次泥石流物质输移的汇集过程和动力侵蚀能力,由于峰值流量的形成受沟道条件和泥石流运动过程的堵溃影响,其峰值流量时不一定达到流体最大携沙能力的饱和状态,因此峰值容重较最大容重可能略小。平均容重(γ_m)是描述整场泥石流事件的物质输移总量的数学统计概念,是由泥石流过程不同时间尺度进行加权计算所得的数学上的值,不代表全过程泥石流流体物理性质的描述。

2 研究方法和数据

2.1 研究数据

本文研究数据来源于的云南省昆明市东川区蒋家沟泥石流的观测数据(张军和熊刚, 1997; 康志成等, 2006)。在搜集中国科学院东川泥石流观测站 1987 年以来的详细观测数据基础上,以规模较大、持续时间较长、无缺失观测为筛选原则,筛选出具有完整观测的 187 次泥石流事件。统计出每次泥石流事件的最大容重值与对应的流量极值、峰值容重与峰值流量、平均容重、一次冲出总量、一次固体物质

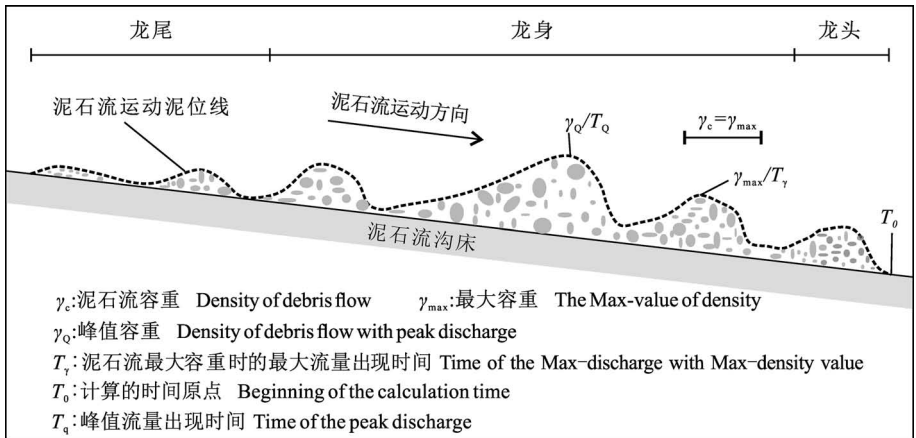


图 1 泥石流容重空间分布模型(基于蒋家沟泥石流观测)
Fig. 1 Distribution model of debris flow density(based on the observation of the debris flow in Jiangjia gully)

总量、泥石流总历时等参数,同时确定最大容重出现时的阶段最大流量以及相应时间和峰值流量对应的时间。

2.2 研究方法

本文主要通过分析蒋家沟观测数据,探索三个泥石流容重特征的时序特征、统计关系以及与灾害动力特征之间的相关性,并提出泥石流勘查设计中容重的取样、计算方法及计算结果检验方法,进而提出防灾工作中对泥石流容重特征值的取值建议。

(1) 时序分析方法。为了分析某一次泥石流事件中最大容重和峰值容重出现的时间,确定最大容重值对应的流量极值时间点距离泥石流暴发时间点的时长(T_γ)和峰值流量时间点距离泥石流暴发时间点的时长(T_Q)。计算 T_γ 和 T_Q 的时序特征 Δ ,计算公式如式(1)。

$$\Delta = \frac{T_\gamma - T_Q}{T} \tag{1}$$

式中: T_γ 为最大容重时的流量极值距离泥石流龙头时长,s; T_Q 为峰值容重时距离泥石流龙头时长,s; T 为泥石流总历时,s。

(2) 泥石流水文过程特征值计算方法。引入泥石流水文过程特征值 κ 描述一次泥石流事件的汇流过程,参数定义为峰值流量与平均流量之比,计算公式如式(2):

$$\kappa = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{Q_p}{\frac{W}{T}} = \frac{Q_p \times T}{W} \tag{2}$$

式中: Q_p 为泥石流峰值流量,单位 m^3/s ; Q_m 为泥石流平均流量, m^3/s ; W 为泥石流一次冲出总量, m^3 ; T 为泥石流总历时,s。

(3) 泥沙系数计算方法。泥沙系数(φ)主要用于根据清水流量计算泥石流峰值流量,是泥石流规模的放大系数主要部分之一,泥沙系数利用公式(3)计算(国土资源部,2006):

$$\varphi = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_c} \tag{3}$$

式中: γ_c 为泥石流容重值, g/cm^3 ; γ_w 为清水容重值, g/cm^3 ,本文取 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$; γ_s 为泥石流中岩石容重值, g/cm^3 ,本文取 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

(4) 一次固体物质冲出量计算方法。一次固体物质冲出总量按照式(4)计算(国土资源部,2006):

$$W_s = W \times \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \tag{4}$$

式中: W_s 为泥石流一次冲出固体物质总量, m^3 ;其他参数同前。

3 结果分析

3.1 容重值的时序特征

在泥石流运动过程中,最大容重和峰值容重可能是同时出现,也可能不同时出现。泥石流运动过程中液相物质和固相物质收到边界条件的约束机制是不同的(舒安平等,2010,2016),从而导致两者在泥石流过程中的动力特征有差异,主要有浆体与颗粒之间的速度差异、不同粒径岩土体搬运速度差异,从而导致泥石流运动过程的液相与固相的汇聚速度不一致,体现在容重参数上,就是观测中表现的最大容重与峰值容重的时序差。蒋家沟 1984 年以来的 187 次泥石流灾害中,最大容重与峰值容重相等的次数约占 57.75%,最大容重与峰值容重时差小于总历时 0.25 的占 33.69%,最大容重与峰值容重时差小于总历时 0.75 的占 100%(表 1)。

表 1 最大容重与峰值容重时序特征
Table 1 The time sequence characteristics of the max-density and the peak-density

时序特征值	占比	累积占比
$\Delta = 0$	57.75%	57.75%
$0 < \Delta \leq 0.25$	33.69%	91.44%
$0.25 < \Delta \leq 0.50$	7.49%	98.93%
$0.5 < \Delta \leq 0.75$	1.07%	100%

时序特征值 Δ 与水文过程特征值 κ 基本分布形态呈三角形(图 2)。当水文特征值 $\kappa \geq 225$ 时,最大容重与峰值容重具有同步特性。随着 κ 值变小,

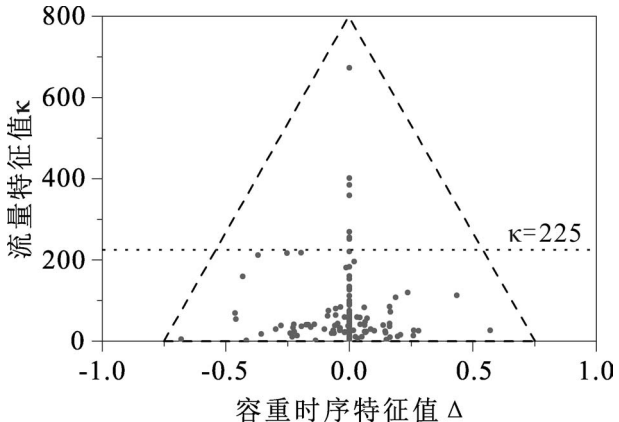


图 2 容重时序特征与流量特征关系
Fig. 2 The relationship between the discharge and the time sequence of density

时序特征值分布幅度越宽,分布范围最宽为 $[-0.75,0.75]$,即最大容重与峰值容重的时差最大不超过泥石流总历时的 75%。一般来说峰值流量与最大容重对应的最大流量之间的过程是泥石流最主要的物质搬运阶段(王洋等,2017),时序特征值越小则泥沙输移越集中,而流量特征值越大则流量过程线的尖峰形状越明显,故三角形分布特征完好的描述了泥石流泥沙输移过程的演化趋势。

3.2 容重特征值的相互关系

3 个容重特征值的数值分布规律是计算中选用的重要依据。蒋家沟泥石流观测数据显示,1987 年以来暴发的泥石流最大容重值基本在 2.0 g/cm^3 以上,且最大容重、峰值容重和平均容重之间具有一致的变化趋势(图 3)。最大容重值与峰值容重值均方误差 $\text{MSE}=0.0055$,偏差率基本小于 10%,占总样本的 97.3%,且 90% 以上样本点的偏差率小于等于 5%。平均容重与最大容重值的均方误差 $\text{MSE}=0.0285$,偏差率 10% 以上的样本占 16.52%,偏差率 5%~10% 的样本占 49.19%,偏差率小于 5% 的样本占 34.29%。

图 3 揭示了 3 个容重特征值之间的关联变化趋势,基于统计建立 3 个特征值之间的数量关系。结果显示,最大容重与峰值容重具有较好的线性关系,且可以通过式(5)进行转化计算,而平均容重与最大容重与峰值容重之间的关系可分别用式(6)和式(7)转化计算。

$$\gamma_Q = 0.9689 \times \gamma_{\max} + 0.0305 \tag{5}$$

$$\gamma_m = 0.8273 \times \gamma_{\max} + 0.2292 \tag{6}$$

$$\gamma_m = 0.7580 \times \gamma_Q + 0.4093 \tag{7}$$

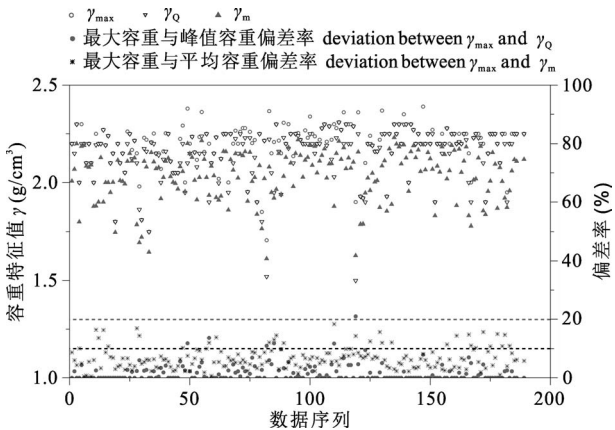


图 3 容重特征值的数值分布及变化趋势

Fig. 3 The distribution and changing trend of characteristic values of density

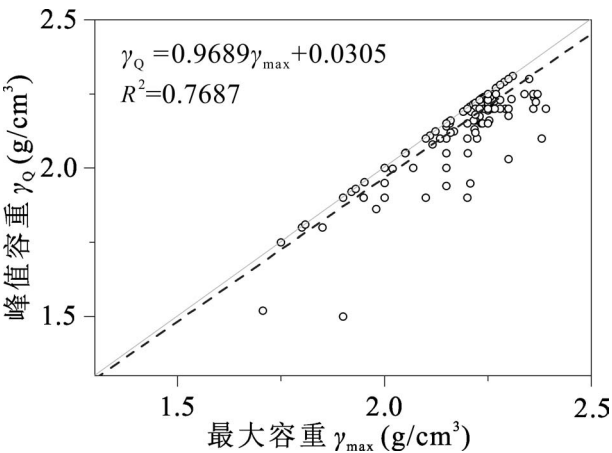


图 4 最大容重与峰值容重的统计关系

Fig. 4 The statistical relationship between max-density and peak-density

式中: γ_Q 为泥石流峰值容重, g/cm^3 ; $\gamma_{\max}$ 为最大容重, g/cm^3 ; γ_m 为平均容重, g/cm^3 。

从拟合曲线的趋势判断,平均容重分别与最大容重和峰值容重的拟合度基本接近,但根据泥石流的容重 $\gamma \geq 1.3\text{ g/cm}^3$ 的定义,从数值分布上看,最大容重与平均容重所得相关曲线可能更具有计算的适宜性。

3.3 运动特征对容重的影响

峰值容重与最大容重数值接近,前人已经建立了峰值流量与峰值容重之间的幂函数关系(Huang Hai et al., 2020),本文重点分析最大容重和平均容重两个容重特征值与灾害规模参数之间的相关性。图 7 和图 8 显示了流量特征分别与大容重和平均容

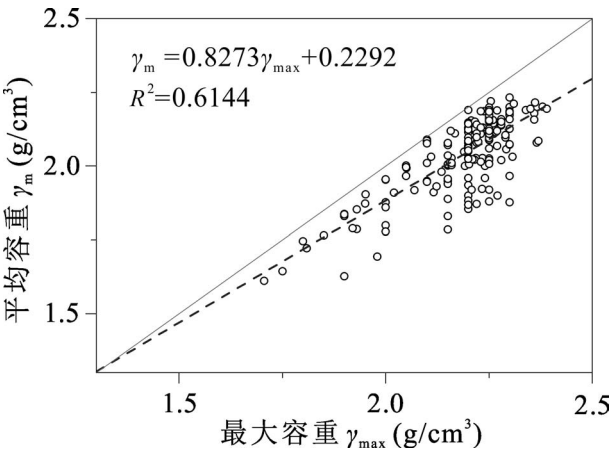


图 5 平均容重与最大容重的统计关系

Fig. 5 The statistical relationship between max-density and mean-density

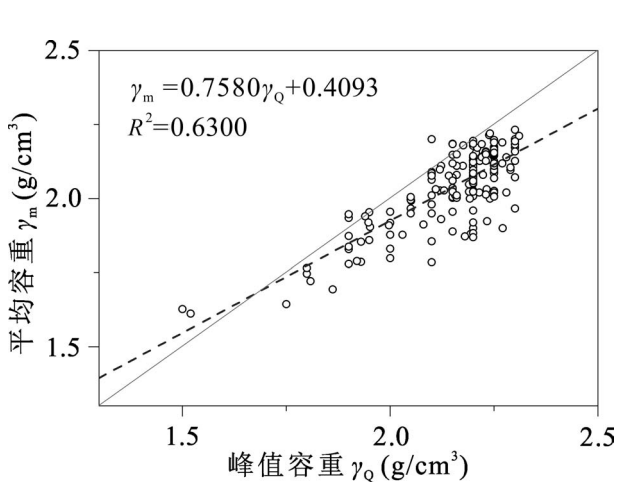


图 6 平均容重与峰值容重的统计关系

Fig. 6 The statistical relationship between mean-density and peak-density

重之间的相关性。为了描述流量特征,引入最大容重过流时的最大流量,分析结果表明最大容重值与最大容重时对应的流量极值具有较强的正相关,相关关系如式(8);而平均流量与平均容重之间相关性很弱,这与平均容重和平均流量的物理定义与计算方法不属于同一个框架导致的。

$$\gamma_{\max} = 0.069\ln(Q_{\gamma} + 5.873) + 1.780 \quad (8)$$

式中: Q_{γ} 为最大容重时对应的流量极值,单位 m^3/s ;其他参数同前。

峰值流量与最大容重和平均容重都有较好的相关性(图 9),根据拟合关系分别建立最大容重与峰值流量、平均容重与峰值流量之间的关系式,如公式(9)和(10)。容重值与泥石流冲出总量之间没有明确的相关关系(拟合相关性系数 $R^2 < 0.2$),仅有总体上呈正比的趋势(图 10)。

$$\gamma_{\max} = 0.076\ln(Q_p + 7.579) + 1.722 \quad (9)$$

$$\gamma_m = 0.089\ln(Q_p + 15.715) + 1.491 \quad (10)$$

式(9)和式(10)中各参数意义同前。

公式(9)和公式(10)所拟合的计算公式仅代表容重特征值与流量特征值之间的相关性,虽然物理意义和计算意义上似乎关联性弱,但从统计意义上看可以作为两者之间的一种校验关系进行应用。在操作层面上,最大容重和峰值流量都是泥石流灾害野外调查中较容易获得的参数,具有较强的实际应用价值。

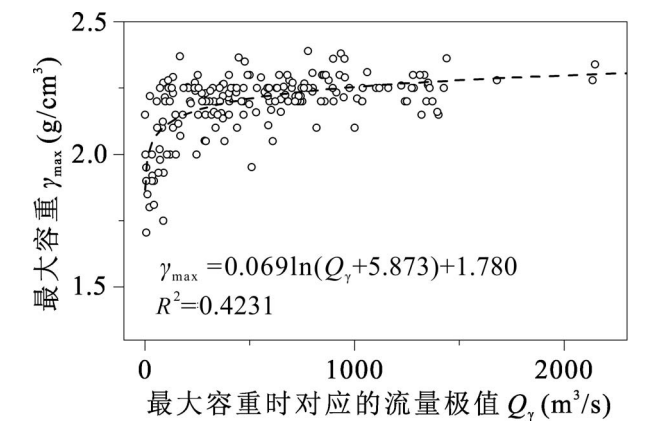


图 7 最大容重与流量的相关关系

Fig. 7 The relationship between max-density and discharge

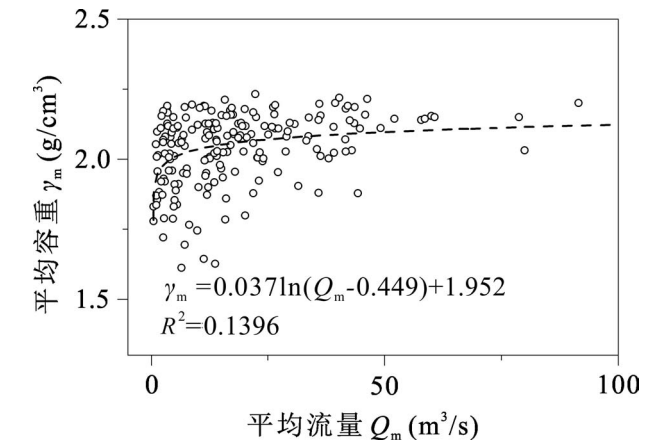


图 8 平均容重与平均流量的相关关系

Fig. 8 The relationship between mean-density and mean-discharge

4 泥石流容重取值方法优化

4.1 现有泥石流容重计算方法的评述

现有的泥石流容重计算方法对我们认识灾害特

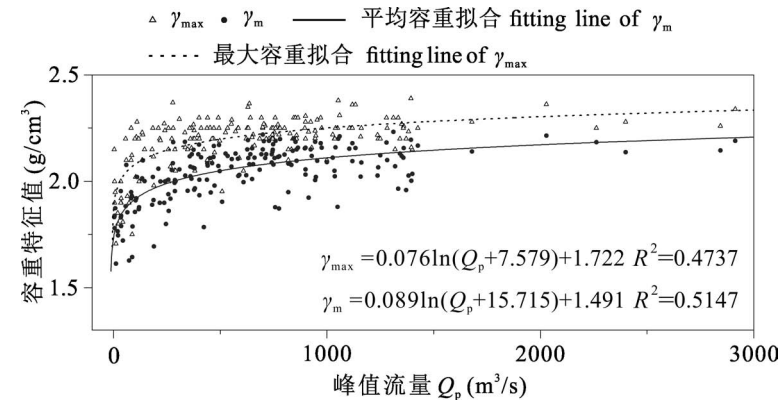


图 9 容重特征值与峰值流量相关性

Fig. 9 The relationship between the peak discharge and the characteristic values of density

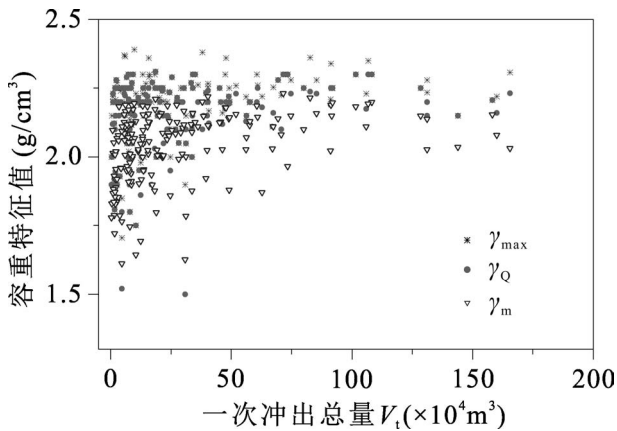


图 10 容重特征值与冲出规模的相关性
Fig. 10 The relationship between the hazards scale and the characteristic values of density

征、评价灾害风险、防灾减灾工程等提供了重要的依据。但从观测资料可知,一次泥石流事件的容重跨度很大,可从含沙水流—稀性泥石流—过渡性泥石流—粘性泥石流。在描述泥石流性质的时候,容重表达的是平均容重值,在计算泥石流峰值流量时,容重表达是峰值容重值,在计算冲压力的时候,容重表达的是最大容重值。这就导致计算所得的容重在工程设计计算中存在指向性的时空错位,且无法约束在现场采样等测试手段。基于以上的模糊概念,国内外建立了十余种容重计算方法,我们将具有典型代表性和广泛应用的 12 种进行对比分析,查明不同方法的建模依据、物理意义及计算误差来源(表 2)。

4.2 容重特征值选取方法

在泥石流灾害治理与评价工作中,涉及到以容

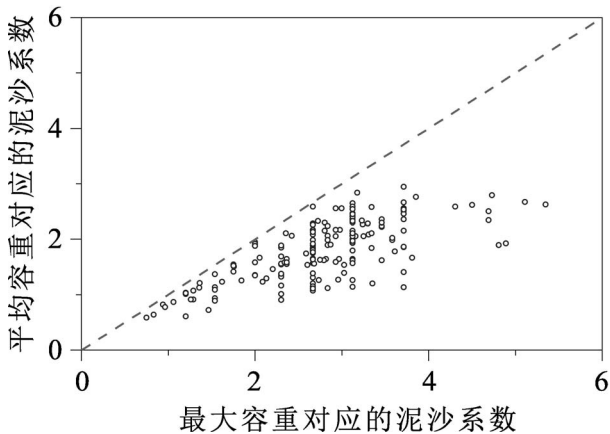


图 11 不同容重值计算的泥沙系数差异
Fig. 11 Difference of sediment coefficient calculated by different density value

重为基础参数进行计算的灾害特征值主要有规模参数、动力参数、危险分析及工程结构参数 4 种类型,共 7 个特征值(表 3)。在这些特征值中,最重要最直接的影响主要为峰值流量、流速、一次冲出固体物质量。我们从全流域空间尺度和全过程时间尺度来分析某一场泥石流灾害,可以发现泥石流的运动过程与容重的变化是具有密切关联的(王洋等, 2017),在计算过程中容重通过一些耦合因子与运动特征之间建立起联系。因此基于该耦合关系可建立特征值计算时的容重选用原则,如表 3。具体而言,峰值流量、流速、流体冲压力均应采取峰值容重,而排导槽纵比降设计则应采取最大容重,最大淤积范围、堵河分析和一次冲出固体物质量则应采取平均容重。但考虑实际情况中峰值容重的难获取和安全储备,在定量描述某次特定泥石流灾害时,建议选取最大容重和平均容重进行参数计算容重选取方法中主要涉及的参数更换的有峰值流量、流速和冲压力计算,结合前述最大容重与峰值容重的数值接近的统计规律(MSE=0.0055),将峰值容重更换为最大容重产生的误差将较小,且更有利于工程设计的可靠性。为了进一步说明新建的容重特征值选取方法的合理性和优越性,我们选择具有广泛应用和公认的较完善的泥沙修正系数和一次冲出固体物质量进行分析,结果如图 11、图 12 和图 13。

图 11 和图 12 揭示了平均容重和最大容重计算所得泥沙系数的差异,两者的偏差率具有明显的分区规律。具体为:① 当最大容重在 2.32 g/cm³ 以上

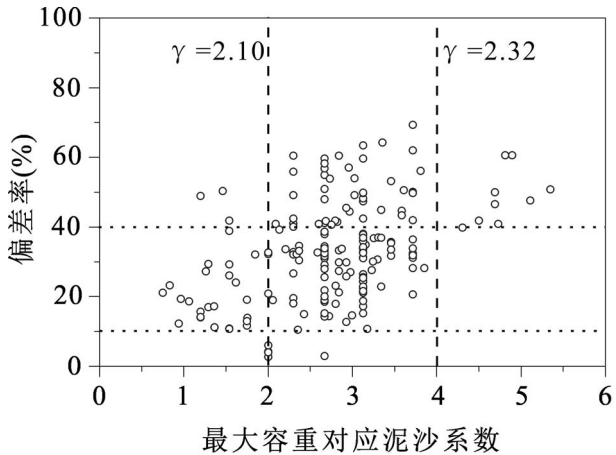


图 12 泥沙系数计算结果偏差率分布规律
Fig. 12 Distribution of deviation rate of sediment coefficient calculation

表 2 国内常用的泥石流容重计算方法的物理意义及误差分析

Table 2 The physical significance and error analysis of general formula of debris flow density in China						
类型	序号	计算公式	作者	模型建立依据	计算结果的物理意义	主要误差来源
配方法	1	$\gamma = \frac{W}{V}$	--	配置与现场看到的流体形态相似的实验流体,假定两者容重一致	泥石流某个断面的容重	试验所配置的流体与目击者描述之间的差异以及目击者记忆与实际的差异,且配置的流体无法考虑大块石影响
	2	$\gamma = \gamma_w + \varphi_v(\rho_s - \gamma_w)$	费祥俊等, 2004			
	3	$\gamma = \rho_s \times \varphi_s + \rho_f \times \varphi_f$	Iverson, 1997			
打分法	4	基于泥石流沟易发程度数量化评分表,查表确定容重数值	谭炳炎,1986	基于泥石流灾害易发程度建立的模型,其容重值指向性不明,数据基于成昆铁路沿线泥石流灾害,容重依据不明	物理意义不明	评分本身具有极大主观性
颗粒分析法	5	① $\gamma = P_{0.35}^{0.35} P_2 \gamma_v + \gamma_0$; ② $\gamma = P_{0.35}^{0.35} P_2 \gamma_v + \gamma_x$;	余斌等, 2008	根据堆积物颗粒组份与容重之间的关系建立的模型,容重的物理意义不明,数据来源蒋家沟及武都地区的泥石流观测,蒋家沟全过程观测,武都地区的则为单场单次观测。	泥石流运动中某个时刻点的容重值,物理意义明确,但时空指向性不确定	取样位置及取样方法的差异,样品是否是泥石流完整沉积的影响
	6	$\gamma = (0.175 + 0.734P_2)(\gamma_s - 1) + 1$;	杜榕桓等,1987	根据堆积物颗粒组份与容重之间建立的模型		
	7	① $\gamma = -1.32 \times 10^3 x^7 - 5.13 \times 10^2 x^6 + 8.91 \times 10^2 x^5 - 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 12.5x + 1.55$; ② $\gamma = \left[\frac{10x + 0.23}{ x - 0.089 + 1} \right] + e^{-20x-1} + 1.1$	陈宁生等,2003	基于堆积物特征粒径与容重之间的统计关系建立的模型	可能是泥石流一定时间内在岩壁上累计堆积的细颗粒物质代表的某个容重值,物理意义不明	无法确知所取样品是多长时长的泥石流运动所堆积样品
	8	$\gamma = 1 + \frac{\rho_s - 1}{1 + \frac{\omega'(\rho_s - \gamma_f)}{\gamma_f - 1}}$	陈宁生等,2010	基于堆积物特征粒径含量与容重关系建立计算模型		
	9	$\gamma = 1.26\mu^{-0.132} + 0.049 D_e^{0.443}$	Wang Baoliang et al., 2018	根据堆积物粒度分布特征与容重关系建立的模型,数据来源蒋家沟与武都地区泥石流观测资料	泥石流运动中某个时刻点的容重值,物理意义明确,但时空指向性不确定	取样位置及取样方法的差异,样品是否是泥石流完整沉积的影响
	10	$\gamma = 1.511\xi^{0.1}$	Yang Taiqiang et al., 2019			
孕灾背景预测法	11	$\gamma = K_1 + K_0 K_R K_L K_A$	程尊兰,1995	基于孕灾背景的单因素统计模型,与打分法类似	模型参数代表性不强,参数与灾害直接孕灾因子相关性不强,物理意义不明	计算过程误差小
	12	$\gamma = \gamma_0 \times K_w \times K_p$	Huang Hai et al., 2020	以堆积物颗粒分析得到的容重值为基准值,基于孕灾背景演化与容重的关系建立的模型	基于堆积物颗粒分析建立的某个断面某个时刻的容重值	颗粒分析法所计算的基准值获取是否准确

注: P_{05} 为粒径<0.05 mm 的细颗粒的百分含量; P_2 为粒径>2 mm 的粗颗粒的百分含量; γ_0 为泥石流的最小容重,取 1.5 t/m³; γ_v 为黏性泥石流的最小容重,取 2.0 t/m³; γ_x 为容重修正系数,取 1.4 t/m³; γ_s 为粗颗粒(>2 mm)比重,取 2.7 t/m³; x 为泥石流沉积物中的黏粒(粒径<0.005 mm)含量(用小数表示); ρ_s 为固体颗粒密度; ω' 为细颗粒(粒径小于泥石流的上限粒径,上限粒径一般取粘附于沟道岩壁浆体的最大粒径)的质量百分数,用小数表示; γ_f 为泥石流浆体容重,实际工作中取泥石流堆积物中的细颗粒配置(t/m³); μ 为细颗粒含量; D_e 为粗颗粒含量; ξ 为粒度参数; l 为沟床比降(小数); K_0 为补给系数为补给系数(河床质取 1.2,崩塌取 1.0,滑坡取 1.1); K_R 为岩性系数(千枚岩、砂岩、页岩、灰岩和玄武岩分别取 0.9、1.2、0.9、1.2 和 1.0); K_L 为稀释系数(取泥石流形成区以上面积与流域面积之比); K_A 为松散物质储备总量系数=(松散物质储备总量/流域汇水面积)^{0.11}。

表 3 泥石流特征值计算时的容重选取方法

Table 3 Method of selecting density values for the calculation of characteristic values in hazards mitigation

计算类型	特征值名称	耦合因子	容重的影响	容重特征值选取建议	备注
动力参数	峰值流量	泥沙修正系数	正相关非线性关系	最大容重	增大安全储备
	流速	阻力系数	反相关非线性关系	最大容重	计算结果有一定概率略偏小
规模参数	一次冲出固体物质量	泥沙含量	正相关线性关系	平均容重	--
危险分析	堵河危险性分析	固体物质冲出量	正相关非线性关系	平均容重	--
	最大淤积范围	堆积长度与扩散角	反相关非线性关系	平均容重	--
结构设计参数	排导槽纵比降设计	不淤纵坡	正相关线性关系	最大容重	--
	流体冲击力	流体重量与速度	正相关非线性关系	最大容重	增大安全储备

时,偏差率在 40% 以上;②当容重小于 2.1 g/cm³ 时,偏差率一般小于 30%,两者的计算具有一定的趋同性;③当容重为 2.1~2.32 g/cm³ 时,偏差率 10%~70%,这就使得我们无法确定计算结果的真实性。这种分区规律说明现有的计算方法在容重较小时,具有较好的吻合性,而当容重增大到 2.0 g/cm³ 以上时,其不确定性显著增加。因此,从物理意义匹配上来说,峰值流量应采取峰值容重计算,采取平均容重计算将导致较大的偏差率,计算结果偏小,采取最大容重计算则有更大的安全储备,可能为解决当前拦挡工程溢流结构破坏难题提供新的途径(黄海等, 2020b)。

图 13 展示了用最大容重计算所得一次冲出固体物质总量与实测值的对比,可明显看出最大容重值的偏差率分布,总体上泥石流灾害规模越大,最大容重计算所得的固体物质冲出量与实测的差异绝对值越大,但反而偏差率小;但同时灾害规模越小则差

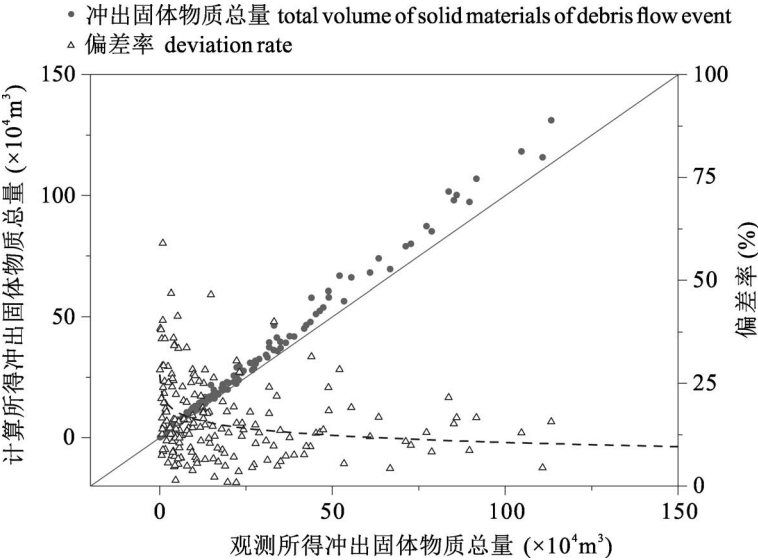


图 13 一次固体物质冲出总量计算的误差分析
Fig. 13 Error analysis of the calculation of the solid materials in debris flow

异绝对值虽然越小,但其计算偏差率反而越大,最大可达 60%。进一步说明了对泥石流不同参数计算选取不同容重特征值的合理性和必要性。

4.3 容重值的获取与结果校验

从理论分析可以看出,容重独立取值计算较笼统取值计算具有明显的优越性。基于表 2 中建立的容重取值计算方法,针对关键参数最大容重值,我们可以进一步优化其野外获取方法。对于分析已发生的泥石流灾害事件来说,颗粒分析法是最具有实物依据的一种确定方法。基于颗粒分析法,从统计角度出发,我们建立一种针对泥石流历史事件的最大容重值取样分析方法(图 14)。

新的方法共包括 7 个步骤:选取取样区—取样并测试土样粒径—计算每个土样对应的容重值—计算每个取样区容重值—确定该次泥石流最大容重值—计算平均容重值—校验计算结果。取样方法在原有的颗粒分析方法中对于样品采集无明确界定的

情况下,多数实操过程往往采取一个样品代表一次泥石流事件(Ge Yonggang et al., 2013, 2014),为了进一步减小误差并规范化操作流程,将取样方法优化为以下步骤:① 选择沟道弯道凹岸侧为取样区;② 取样范围从沟口一直往上游延伸至流通区起点;③ 每个取样区至少采取 3 个土样。计算结果的检验主要通过分析容重值与现场调查所得的峰值流量之间的关系,并按照公式(9)和(10)进行校验计算,偏差率不超过 15%则认为其结果为有效。

5 讨论

(1) 泥石流堆积物颗粒分析方法被诸多学者证明了其有效性和区域适宜性(蒋树和文宝萍,2012),但是这些方法都未明确界定计算所得的容重的物理意义,也没有确定该数值对泥石流过程的时空定位。

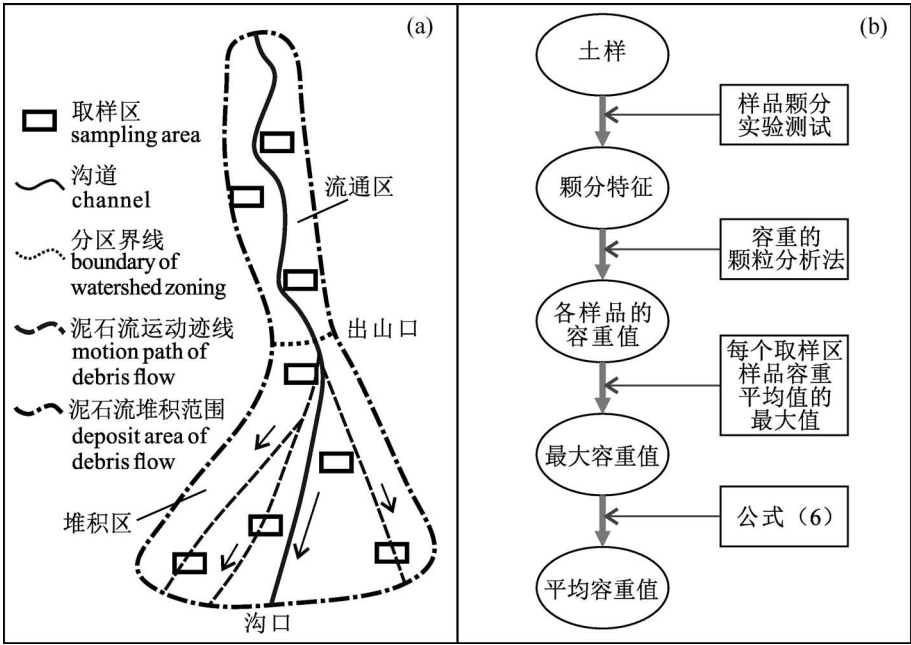


图 14 泥石流容重取样分析方法流程图:(a) 容重取样方法;(b) 容重计算方法

Fig. 14 Sampling and analysis method for calculation of debris flow density:

(a) the method of sampling; (b) the method of calculation)

甚至用于模型建立的武都等地的泥石流观测资料中针对一场泥石流也只有一个容重值,这与实际泥石流过程中容重的动态变化是不符合的。因此当我们 将泥石流过程分解开来 进行计算时,这个笼统的容重值就存在较大不足。泥石流特征值中的峰值流量、流速等是描述某一时刻的泥石流状态,物质输移总量则是描述泥石流全过程,用同一个概念下的容重值进行不同时空尺度上的非恒定流计算,是不匹配的。本文通过分析蒋家沟的观测资料,揭示不同尺度下的容重特征值的统计学规律,证明了将泥石流不同特征值计算分割开来的可行性。

(2) 当前泥石流灾害特征值的确定存在最大的问题是对计算结果没有有效的检验方法,在工程实践中多数是靠工程师们的经验进行判断,甚至很多参数我们无法判断其结果与实际相比是偏大还是偏小。在泥石流灾害评价、治理中,学者们都有意无意的回避这个问题,尤其是开展泥石流全过程数值模拟的研究中,总是试图通过各种复杂的运动学、物理学函数进行计算,但在基础参数的变化中却缺少相应的描述(Ouyang Chaojun et al., 2019),这也导致我们对灾害过程模拟的结果总是会有疑虑,从而无法在工程实践中应用相关成果。在泥石流灾害治理中,尽管一般工程设计采取的是极端工况进行可靠

度设计,但工程在抵御泥石流灾害后大部分都会出现损毁情况,如汶川震区、九寨沟景区等工程运行情况已经有证据证明了泥石流设计参数与实际运行的差异导致工程损毁(Liu Fangzhou et al., 2017; 黄海等, 2020b)。以上所述现阶段的防灾减灾实践更进一步说明了当前泥石流灾害基础物理参数上的不足已经成为制约防灾理论和技术 的卡脖子问题,因此梳理这些参数,试图更加精细的描述泥石流流体特征将极大提升应用层面的高度。

(3) 泥石流灾害治理工程 设计中的动力参数计算,如流速、峰值流量、冲击力、冲出总量等,均是 有着明确的物理意义和时空定位。

利用本文建立的新的模型来确定容重参数作为灾害动力参数计算的基础参数,原理清晰,物理过程明确,且具有一致性的时空定位,将大大提高计算的准确度和可校验性,是泥石流灾害治理工程实践的重要进步。同时,在灾害全过程模拟时,将容重进一步刻画,大大提高了泥石流运动过程和物质交换的连续性。

(4) 基于容重特征值的统计学关系建立的取值方法和检验方法是基于蒋家沟的完整观测数据,可能在区域适宜性上还存在不确定性。但受限 于我国目前泥石流的观测资料缺失,除了蒋家沟之外,还未有泥石流灾害全过程监测数据,同时室内试验由于规模尺度效应,流体时空差异性和取样难题都制约了理论模型的完善,因此还需要通过不同区域的观测数据和更大尺度的室内外实验进行模型修正。

6 结论

(1) 为了能在工程设计中精确化分析容重参数,根据容重的物理意义和时空变化规律,本文引入最大容重、峰值容重和平均容重来刻画一次泥石流事件的容重特征。利用蒋家沟 1987 年以来的观测数据,统计分析 了 3 个特征值的相关性并建立了相互转换计算公式。

(2)最大容重与峰值容重的时序关系与泥石流灾害物质输移集中度密切相关,时序特征值越小,泥沙输移越集中,流量过程线尖峰状越明显,则将最大容重和峰值容重统一取值可信度越高。平均容重和最大容重均与泥石流峰值流量呈现对数函数关系,而与泥石流冲出规模总量无关,基于此建立了流量参数与容重特征值的统计关系式,其可用于容重取值结果的校验。

(3)防灾减灾工作中,建议采取最大容重来计算泥石流的峰值流量、流速、排导槽纵比降确定以及流体冲压力,采用平均容重计算泥石流的一次固体物质总量、堵河可能性以及危险范围。

(4)基于颗粒分析法,进一步优化了现场样品采集方法,规范了取值过程中选取取样区—取样并测试土样粒径—计算每个土样容重值—计算每个取样区容重值—确定该次泥石流最大容重值—计算平均容重值—校验计算结果的七个操作步骤。优化计算方法可有效减少取样误差,并解决了目前泥石流容重确定的概念模糊和校验缺失问题。研究结果对泥石流灾害防治具有重要支撑作用

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈宁生, 崔鹏, 刘中港, 韦方强. 2003. 基于粘土颗粒含量的泥石流容重计算. 中国科学(E辑), 33(增刊): 164~174.

陈宁生, 杨成林, 李欢. 2010. 基于浆体的泥石流容重计算. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(2): 168~173.

程尊兰. 1995. 泥石流设计流量中容重的计算方法. 泥石流(4). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社: 95~97.

杜榕恒, 陈循谦, 康志成. 1987. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社.

费祥俊, 舒安平. 2004. 泥石流运动机理与灾害防治. 北京: 清华大学出版社.

国土资源部. 2006. DZ/T0220-2006 泥石流灾害防治工程勘察规范. 北京: 中国标准出版社.

黄海, 刘建康, 杨东旭. 2020a. 泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究. 水文地质工程地质, 47(2): 161~168.

黄海, 石胜伟, 杨顺, 田尤, 杨东旭, 刘建康. 2020b. 2017年“8·8”九寨沟地震对景区泥石流治理工程影响机制研究. 岩石力学与工程学报, 39(9): 50~63.

蒋树, 文宝萍. 2012. 国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较. 水文地质工程地质, 39(3): 86~96.

康志成, 崔鹏, 韦方强, 何淑芬. 2006. 中国科学院东川泥石流观测研究站观测试验资料集(1995-2000). 北京: 科学出版社.

李培基, 梁大兰. 1982. 泥石流容重及计算. 泥沙研究, (3): 75~83.

李泳, 刘晶晶, 苏凤环, 苏鹏程. 2009. 泥石流阵流序列的整体性. 地学前缘, 16(4): 381~388.

吕立群, 王兆印, 崔鹏, 徐梦珍. 2017. 沟岸侧蚀对泥石流形成和运

动过程的影响. 水科学进展, 28(4): 553~563.

彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战. 岩石力学与工程学报, 39(12): 6~18.

石建军, 李保珠, 李鹏, 黄杰, 孙付来, 刘冰. 2018. 元谋县9·17特大泥石流特征及形成机理分析. 地质论评, 64(3): 665~673.

舒安平, 王乐, 杨凯, 费祥俊. 2010. 非均质泥石流固液两相运动特征探讨. 科学通报, 55(31): 3006~3012.

舒安平, 孙江涛, 张欣, 王澍, 师哲, 潘华利. 2016. 非均质泥石流形成过程动力学特征. 水利学报, 47(7): 850~857.

谭炳炎. 1986. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判. 铁道学报, 8(2): 51~57.

王洋, 崔鹏, 王兆印, 梁双庆. 2017. 泥石流龙头的形成及特征研究. 水利学报, 48(04): 473~479.

余斌. 2008. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究. 沉积学报, 26(5): 789~796.

张江华, 徐友宁, 陈华清, 柯海玲, 齐哲峰, 赵学理. 2015. 小秦岭东桐峪碾头岔矿渣型泥石流运动参数预测分析. 地质论评, 61(z1): 129~130.

张军, 熊刚. 1997. 云南蒋家沟泥石流运动观测资料集(1987-1994). 北京: 科学出版社.

章书成. 1989. 泥石流研究述评. 力学进展, 19(3): 365~375.

Ballesteros C J A, Stoffel M, Corona C, Schraml K, Gobiet A, Tani S, Sinabell F, Fuchs S, Kaitna R. 2016. Debris-flow risk analysis in a managed torrent based on a stochastic life-cycle performance. Science of The Total Environment, 557~558: 142~153.

Canovas J A B, Stoffel M, Corona C, Schraml K, Gobiet A, Kaitna R. 2016. Debris-flow risk analysis in a managed torrent based on a stochastic life-cycle performance. Science of The Total Environment, (557~558): 142~153.

Chen Ningsheng, Cui Peng, Liu Zhonggang, Wei Fangqiang. 2003&. Calculation of the debris flow density based on the content of clay grains. Science in China(Series E), 33(Supp): 164~174.

Chen Ningsheng, Yang Chenglin, Li Huan. 2010&. Calculation of the debris flow concentration based on debris flow slurry. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 37(2): 168~173.

Chen Zunlan. 1995&. Calculation method of debris flow density in design of discharge. Debris flow (4), Chongqing: Chongqing Branch of science and Technology Literature Press: 95~97.

Du Ronghuan, Chen Xunqian, Kang Zhicheng. 1987#. Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris Flow in the Xiaojiang River Basin of Yunnan Province. Chongqing: Sichuan Science and Technology Press, Chongqing Branch: 33.

Fei Xiangjun, Shu Anping. 2004&. Debris Flow Movement Mechanism and Disaster Prevention. Beijing: Tsinghua University Press: 37~44.

Ge Yonggang, Cui Peng, Guo Xiaojun, Song Guohu, Liu Weiming. 2013. Characteristics, causes and mitigation of catastrophic debris flow hazard on 21 July 2011 at the Longda Watershed of Songpan County, China. Journal of Mountain Science, 10: 261~272.

Ge Yonggang, Cui Peng, Su Fenghuan, Zhang Jianqiang, Chen Xingzhang. 2014. Case history of the disastrous debris flows of Tianmo watershed in Bomi County, Tibet, China: some mitigation Suggestions. Journal of Mountain Science, 11: 1253~1265.

Hu Hongsen, Zhou G G D, Song Dongri, Cui K K E, Huang Yu, Choi C E, Chen Huayong. 2020. Effect of slit size on the impact load against debris-flow mitigation dams. Engineering Geology, 274:

- 105764.
- Huang Hai, Liu Jiankang, Yang Dongxu. 2020a&. A study on the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes of debris flow density. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(2): 161~168.
- Huang Hai, Shi Shengwei, Yang Shun, Tian You, Yang Dongxu, Liu Jiankang. 2020b&. Study on the damage of the August 8, 2017 Jiuzhaigou earthquake to debris flow mitigation engineering in the national park. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(9): 50~63.
- Iverson R M. 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35: 25~296.
- Huang Hai, Yang Shun, Liu Jiankang, Yang Dongxu, Tian You. 2020. A study on the forecast calculating method of the density of rainfall debris flow in Southwestern of China. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 735.
- Jiang Shu, Wen Baoping. 2012&. Comparison of methods used at home and abroad to estimate the key parameters of a debris flow. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 39(4): 86~96.
- Kang Zhicheng, Cui Peng, Wei Fangqiang, He Shufen. 2006&. Data Collection of Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station Chinese Academy of Science. Beijing: Science Press: 15~200.
- Kim M I, Kwak J H, Kim B S. 2018. Assessment of dynamic impact force of debris flow in mountain torrent based on characteristics of debris flow. *Environmental Earth Sciences*, 77: 538.
- Lee K, Kim Y, Ko J, Jeong S. 2019. A study on the debris flow-induced impact force on check dam with- and without-entrainment. *Computers and Geotechnics*, 113: 103104.
- Li Peiji, Liang Dalan. 1982&. Debris flow density and its calculation. *Journal of Sediment Research*, (3): 75~83.
- Li Yong, Liu Jingjing, Su Fenghuan, Su Pengcheng. 2009&. Integrity of debris-flow surge sequence. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 381~388.
- Li Yong, Liu Jingjing, Su Fenghuan, Wang Baoliang. 2015. Relationship between grain composition and debris flow characteristics: a case study of the Jiangjia Gully in China. *Landslides*, 12: 19~28.
- Liu Fangzhou, Xu Qiang, Dong X J, Yu Bin. 2017. Design and performance of a novel multi-function debris flow mitigation system in Wenjia Gully, Sichuan. *Landslides*, 14: 2089~2104.
- Liu Jingjing, Li Yong, Su Pengcheng, Chen Zunlan, Cui Peng. 2009. Temporal variation of intermittent surges of debris flow. *Journal of Hydrology*, 365: 322~328.
- Liu Wei, Yan Shuaixing, He Siming. 2020. A simple method to evaluate the performance of an intercept dam for debris-flow mitigation. *Engineering Geology*, 276: 105771.
- Lu Chunfang, Cai Chaoxun. 2019. Challenges and Countermeasures for Construction Safety during the Sichuan-Tibet Railway Project. *Engineering*, 5: 833~838.
- Lyu Liqun, Wang Zhaoyin, Cui Peng, Xu Mengzhen. 2017&. The role of bank erosion on the gully debris flow initiation and motion. *Advances in Water Science*, 28: 553~563.
- MLR (Minister of Land and Resources). 2006#. DZ/T0220-2006 Investigation Specification for Debris Flow Hazard Controlling Engineering. Beijing: China Standards Press.
- Ouyang Chaojun, Wang Zhongwen, An Huicong, Liu Xingrong, Wang Dongpo. 2019. An example of a hazard and risk assessment for debris flows—A case study of Niwan Gully, Wudu, China. *Engineering Geology*, 263: 105351.
- Peng Jianbin, Cui Peng, Zhuang Jianqi. 2020&. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39: 6~18.
- Shi Jianjun, Li Baozhu, Li Peng, Huang Jie, Sun Fulai, Liu Bing. 2018&. Analysis of Characteristics and Formation Mechanism for the 9·17 Giant Debris Flow in Yuanmou Country, Yunnan Province. *Geological Review*, 64(3): 665~673.
- Shu Anping, Wang Le, Yang Kai, Fei Xiangjun. 2010&. Investigation on movement characteristics for non-homogeneous and solid-liquid two-phase debris flow. *Chinese Science Bulletin*, 55(31): 3006~3012.
- Shu Anping, Sun Jiangtao, Zhang Xin, Wang Shu, Shi Zhe, Pan Huali. 2016&. Dynamical characteristics of formation processes for non-homogeneous debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47(7): 850~857.
- Tan Bingyan. 1986&. Quantified comprehensive evaluation for the scope and intensity of mud-rock flow gully activity. *Journal of the China Railway Society*, 8(2): 74~82.
- Vagnon F. 2020. Design of active debris flow mitigation measures: a comprehensive analysis of existing impact models. *Landslides*, 17: 313~333.
- Wang Baoliang, Li Yong, Liu Daochuan, Liu Jingjing. 2018. Debris flow density determined by grain composition. *Landslides*, 15: 1205~1213;
- Wang Yang, Cui Peng, Wang Zhaoyin, Liang Shuangqing. 2017&. Study on the formation and characteristics of height of debris flow head. *Journal of Hydraulic Engineering*, 48(4): 473~479.
- Yang Taiqiang, Li Yong, Zhang Qishu, Jiang Yu. 2019. Calculating debris flow density based on grain-size distribution. *Landslides*, 16: 515~522;
- Yu Bin. 2008&. Research on the calculating density by the deposit of debris flows. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(5): 789~796.
- Yuan Dong, Liu Jinfeng, You Yong, Zhang Guangze, Wang Dong, Lin Zhiheng. 2019. Experimental study on the performance characteristics of viscous debris flows with a grid-type dam for debris flow hazards mitigation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: 5763~5774.
- Zhang Jianghua, Xu Youning, Chen Huaqing, Ke Hailing, Lin Zhefeng, Zhao Xueli. 2015#. Prediction analysis of dynamic parameters of mine waste debris flow in Niantoucha, Dongtongyu, Xiaoqinling mountain. *Geological Review*, 61(z1): 129~130.
- Zhang Jun, Xiong Gang. 1997#. Data Collection of Debris Flow Observation and Research Station in Jiangjia Gully, Yunnan Province. Beijing: Science Press: 5~88.
- Zhang Shucheng. 1989&. A review on the research of debris flow. *Advances in Mechanics*, 19(3): 365~375.
- Zou Qiang, Zhou GDD, Li Shusong, Ouyang Chaojun, Tang Jinbo. 2017. Dynamic process analysis and hazard prediction of debris flow in eastern Qinghai-Tibet plateau area—A case study at Ridi gully. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 49: 373~390
- Zou Qiang, Cui Peng, Jiang Hu, Wang Jiao, Li Cong, Zhou Bin. 2020. Analysis of regional river blocking by debris flows in response to climate change. *Science of the Total Environment*, 741: 1~16.

The physical connotation of debris flow density and the enlightenment to geohazards mitigation

HUANG Hai^{1,2)}, MA Dongtao³⁾

1) Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, 611734;

2) Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu, 611734;

3) Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu, 610041

Objectives: Density is the most fundamental parameter to describe the physical property of debris flow. It is of great significance for evaluation and mitigation of debris flow.

Methods: Based on the temporal and spatial characteristics of hydrology process, considered the physical connotation of density, this paper described three characteristic values of debris flow density: max-density, peak-density, and mean-density. By used the debris flow observation data in Jiangjia gully since 1987, the distribution law and influencing factors of density are also analyzed

Results: The result shows that those three characteristic density values can be used to express the temporal and spatial evolution of debris flow process. The peak-density and mean-density both can be calculated by max-density. The density value is impacted by the peak discharge of debris flow, but not the Volume. A new method of density calculation, which contains the sampling of debris flow deposit, formula calculation, verification, and the principle of using, are established

for debris flow mitigation. The max-density can be recommended for the calculation of peak discharge, velocity, and impact pressure, while the mean-density can be recommended for the calculation of the total volume of soil materials, the danger of river blocking, and the scope of dangerous areas.

Keywords: characteristic value; max-density; peak discharge; calibration method; debris flow mitigation

First author: HUANG Hai, male, born in 1984, senior engineer, engaged in initial and mitigation of debris flow hazard; Email: huangh@mail.cgs.gov.cn

Acknowledgements: This study was Supported by the project of China Geological Survey (Nos. DD20190644, 20190505); the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) program (No. 2019QZKK0902)

Manuscript received on: 2021-06-07; Accepted on: 2021-11-02; Network published on: 2021-11-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 11. 021 **Edited by:** LIU Zhiqiang