

文章编号: 1000-0550(2008) 05-0789-08

# 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究<sup>①</sup>

余 斌

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

**摘 要** 泥石流的容重是泥石流的最重要的参数之一,用简单易行的方法获得泥石流的容重因泥石流灾害的评估和泥石流的防治的需要显得日益重要。分析了泥石流的组成颗粒中 3 个分别代表粗颗粒、细颗粒和粘粒颗粒的颗粒粒径,即 2 mm、0.05 mm 和 0.005 mm,及它们的百分含量与泥石流容重的关系。在对泥石流的组成颗粒的研究中发现泥石流中的粗颗粒、细颗粒和粘粒颗粒的百分含量与泥石流容重都有一定的关系,但因地区的差异这种关系不是唯一的。粘性泥石流中的粘粒含量与物源区的粘粒含量相当,稀性泥石流的粘粒含量远大于物源区的粘粒含量。用粗颗粒和细颗粒百分含量计算的泥石流的容重与泥石流观测样和沉积样对比有较好的一致性。根据泥石流沉积物计算的泥石流容重应服从根据沉积物的特征判断的泥石流类型和框定的泥石流容重范围。

**关键词** 泥石流 沉积物 容重 颗粒粒径 百分含量

**作者简介** 余斌 男 1966 年出生 博士 研究员 泥石流、浊流 E-mail dbinyu@yahoo.com

**中图分类号** P642.23 **文献标识码** A

## 0 前言

泥石流的容重是泥石流的最重要的参数之一。泥石流发生时观测的泥石流可以通过取样测量等手段获得泥石流的容重,但要获得历史上发生的泥石流的容重就困难得多。调查历史上发生的泥石流的容重一般采用配制泥石流样的方法获取泥石流容重<sup>[1]</sup>,但这种方法受目击者的影响很大,有时因年代久远根本找不到目击者,加上配制时块石的多寡对泥石流容重的影响很大,该方法有时出入很大。根据泥石流的沉积形态判断泥石流的类型,即粘性泥石流或稀性泥石流等,可以框定泥石流的容重范围,但该范围仍然较大,不利于准确使用容重参数。

根据泥石流沉积物计算泥石流容重的研究取得了一些进展,如用泥石流体中 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量计算泥石流容重<sup>[2]</sup>和泥石流体中 < 0.005 mm 的粘粒的百分含量计算泥石流容重<sup>[3]</sup>,但因为泥石流的区域特征的不同,这些方法存在偏差,有时因地区的不同偏差很大。随着我国的经济发展,特别是西部大开发的进行,山区泥石流灾害的危害越来越大,正确地计算泥石流的各参数并评估泥石流的危害,从而正确地防治泥石流灾害已到了刻不容缓的时候,因此用简单易行的方法,正确合理地计算泥石流的容重也显得日益重要。本文在总结前人的研究工作的基

础上,由泥石流观测样提出根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法,与泥石流的沉积样对比有较好的一致性和适用性。

## 1 泥石流沉积物的特征和分类

泥石流属于一种混杂堆积只能笼统地概述泥石流的沉积,不同类型的泥石流的沉积方式是不同的。强粘性的粘性泥石流的沉积属分选极差的混杂沉积。中等和弱粘性的泥石流的沉积都有泥沙的分选。稀性泥石流属弱粘性泥石流,具有泥沙的沉积分选;中等粘性的过渡(亚粘性)泥石流介于粘性泥石流和稀性泥石流之间,其沉积特征也介于两者之间,属弱分选沉积。广义的泥石流还包括泥流和水石流。

对泥石流的分类方法很多,最常见和适用的方法多以容重来分类<sup>[2,4~6]</sup>。表 1 为总结各家泥石流按容重的分类方法后提出的泥石流的分类方法。表 1 中狭义泥石流指常见的粘性泥石流和稀性泥石流,而粘性泥石流又可细分为粘性泥石流和过渡(亚粘性)泥石流。表 1 中泥流沉积无分选,与粘性泥石流的区别在于沉积物的粒度上表现为 > 2 mm 的粗颗粒极少。水石流沉积有分选,与稀性泥石流的区别在沉积分选前泥石流体中 < 0.05 mm 的细颗粒极少。因此根据沉积方式和沉积物中粗颗粒(> 2 mm)和细颗粒(< 0.05 mm)的含量可以划分泥石流的类型,从而框定

①国家自然科学基金项目(批准号:40271003)资助。

收稿日期:2007-12-23 收修修改稿日期:2008-01-14

表 1 以容重为主要参数的泥石流分类  
Table 1 Classification of debris flow by density

泥石流类型	狭义泥石流				水石流
	泥流	粘性泥石流	过渡(亚粘性)泥石流	稀性泥石流	
泥石流容重 $\gamma$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.5~1.8	2.0~2.4	1.8~2.0	1.5~1.8	1.5~1.9
泥石流粘性	强	强	中	弱	极弱
沉积特征	无分选	无分选	弱分选	有分选	有分选

泥石流的容重范围。这个范围用于对泥石流的初步认识是足够的,但要用于对泥石流的危险性评估,从而正确地防治泥石流灾害显然还太粗糙。因此还需要对泥石流的沉积物作更深入的研究,如泥石流的颗粒粒径的百分含量的特征等,从而给出更准确的泥石流容重值。本文的研究集中在常见的泥石流(即狭义泥石流)上,下文中的泥石流均为狭义泥石流,均不考虑泥流和水石流问题。

## 2 泥石流的颗粒组成

泥石流的颗粒组成范围极广,从小于 0.001 mm 量级的胶粒到 1 m 量级的巨石都有涵盖,其中有 3 个重要颗粒粒径值: 2 mm, 0.05 mm 和 0.005 mm, 分别代表泥石流中的粗颗粒粒径, 细颗粒粒径和粘粒颗粒粒径<sup>[4]</sup>。这三种颗粒粒径的特点和与泥石流容重的关系详述如下:

### 2.1 2 mm 颗粒粒径与泥石流容重关系

> 2 mm 的颗粒在泥石流中代表粗颗粒, 在粘性泥石流 ( $> 1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) 中, < 2 mm 的颗粒的含沙量(泥沙在每立方米泥石流中的重量, 下同)基本保持不变<sup>[4]</sup>, 即随容重的增大, < 2 mm 的颗粒的百分含量随之减少, > 2 mm 的粗颗粒的百分含量随之增加, 因此有泥石流容重与 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量关系的经验公式<sup>[2]</sup>:

$$\gamma = (0.175 + 0.743P_X)(\gamma_s - 1) + 1 \quad (1)$$

式中  $\gamma$  为泥石流容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $P_X$  为 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量(小数表示);  $\gamma_s$  为粗颗粒比重, 约  $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

图 1 为泥石流观测样的容重与 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量关系图。公式(1)的计算值在稀性泥石流 ( $< 1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) 时偏差较大, 这是因为 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量与粘性泥石流容重更相关, 与稀性泥石流容重关系不大: > 2 mm 的粗颗粒的百分含量涵盖了从 2% ~ 36% 的范围, 但稀性泥石流的容重变化很小:  $1.5 \sim 1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 因此用简单的线性关系不能

描述 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量与泥石流容重的所有关系。公式(1)在对甘肃省武都地区的泥弯沟, 山背后沟, 火烧沟和柳弯沟的计算中偏差较大, 说明泥石流的地区特点会影响公式(1)计算的正确性, 仅用单一的参数: > 2 mm 的粗颗粒的百分含量还不能概括所有区域的泥石流容重特点。尽管 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量与泥石流容重的关系受区域特点的影响尚不十分一致, 但区域特点的影响并不大, 观测样的数据差别不是十分明显, 因为地区的差别仅在于粗颗粒的多少这一物理特性上。

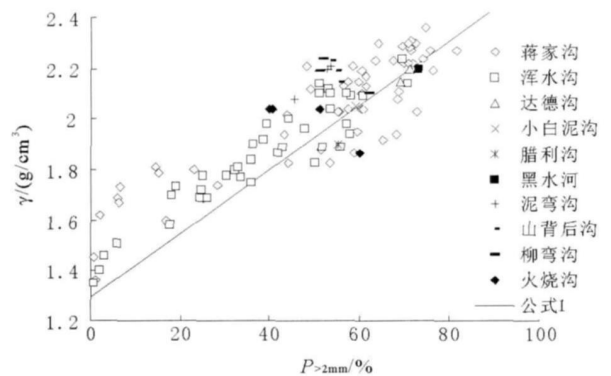


图 1 泥石流观测样的容重与 > 2 mm 的粗颗粒的百分含量关系

Fig. 1 Relationship of densities of living samples of debris flows and their percentages of coarse particle (> 2 mm)

图 1 中图例数据来源: 蒋家沟: 云南蒋家沟 1999 年观测资料; 浑水沟: 文献 [5]; 达德沟和小白泥沟: 文献 [1, 2]; 腊利沟和黑水河: 文献 [2]; 泥弯沟, 山背后沟和柳弯沟: 文献 [7]; 火烧沟: 文献 [1, 7]。图 2 和图 4 中图例数据来源同图 1。

### 2.2 0.05 mm 颗粒粒径与泥石流容重关系

< 0.05 mm 颗粒在泥石流中代表细颗粒, 是泥石流液相浆体的主要组成部分, 在不同的泥石流流体中, < 0.05 mm 的颗粒的含沙量基本保持不变<sup>[4]</sup>, 即随容重的增大, < 0.05 mm 的细颗粒的百分含量随之减少。图 2 为泥石流观测样的容重与 < 0.05 mm 的细颗粒的百分含量关系图。图 2 很好地说明了 < 0.05 mm 的细颗粒的百分含量与泥石流容重的线性

关系, 但地区的不同特点使这种线性关系有较大的差别, 因此很难用单一的  $< 0.05 \text{ mm}$  的细颗粒的百分含量表示泥石流的容重。  $< 0.05 \text{ mm}$  的细颗粒的百分含量在地区的差别不仅在于细颗粒的多少这一物理特性上, 还与细颗粒, 特别是细颗粒中  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒颗粒的化学特性 (如膨胀率, 塑性指数和矿物活性等) 有关, 因此地区的差别更大, 更明显。

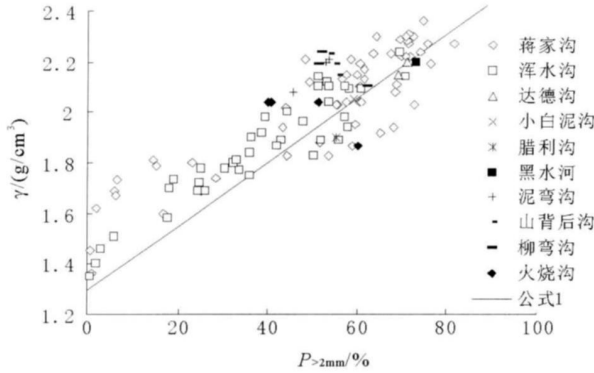


图 2 泥石流观测样的容重与  $< 0.05 \text{ mm}$  的细颗粒的百分含量关系

Fig 2 Relationship of densities of living samples of debris flows and their percentages of fine particle ( $< 0.05 \text{ mm}$ )

### 2.3 $0.005 \text{ mm}$ 颗粒粒径与泥石流容重关系

$< 0.005 \text{ mm}$  颗粒在泥石流中代表粘粒颗粒 (有的定义粘粒颗粒粒径为  $< 0.002 \text{ mm}$ , 本文统一用  $< 0.005 \text{ mm}$  为粘粒颗粒粒径), 是泥石流具有粘性的主要原因, 但泥石流中的粘粒对泥石流的粘性强弱的影响并不是孤立地发挥作用的, 泥石流中的含水

量 (或容重) 对泥石流的粘性也起着至关重要的作用<sup>[8]</sup>。相对于粘粒百分含量对于粘性的影响, 水的百分含量影响更大。如在泥石流实验中, 在 30% (重量百分比, 下同) 的含水量 (容重  $1.79 \text{ g/cm}^3$ ) 时, 36% 的高岭土含量所产生的粘性 (代表粘性的主要指标屈服应力  $\tau_b = 54.9 \text{ Pa}$ ) 与 25% 的含水量 (容重  $1.86 \text{ g/cm}^3$ ) 时 20% 的高岭土含量所产生的粘性 ( $\tau_b = 49.6 \text{ Pa}$ ) 几乎一样, 这时的泥石流的粘性为强粘性, 相应的泥石流为粘性泥石流; 但当含水量增加到 40% (容重  $1.59 \text{ g/cm}^3$ ) 时, 即使有 25% 的高岭土含量的泥石流的粘性 ( $\tau_b = 11.8 \text{ Pa}$ ) 为弱粘性, 即泥石流为稀性泥石流<sup>[8]</sup>。泥石流的容重 (含水量) 对泥石流类型的巨大影响是大多数野外观测和调查使用泥石流容重来划分泥石流类型和分类的原因。

表 2 为泥石流观测样的  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量。表 2 中粘性泥石流的粘粒含量与物源区的粘粒含量相当, 随着粘性的减弱, 容重的降低, 泥石流中粘粒含量逐渐增加到远远大于物源区的粘粒含量。粘性泥石流因为运动中无沉积分选, 因此粗细颗粒和粘粒的百分含量始终保持一致, 粘粒含量也一直与物源区的粘粒含量相当。而稀性泥石流因为在运动中有沉积分选, 粗颗粒逐渐沉积下来, 细颗粒和粘粒的百分含量则逐渐增加, 因此粘粒含量远大于物源区的粘粒含量<sup>[9, 10]</sup>, 所以有稀性泥石流的粘粒百分含量大于粘性泥石流的粘粒百分含量的现象。

泥石流体中的颗粒组成主要取决于 2 个条件: 一是物源区的颗粒组成, 二是泥石流运动中的分选作

表 2 泥石流观测样的  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量

Table 2 The percentages of clay ( $< 0.005 \text{ mm}$ ) in the living samples of debris flows

物源区 (平均数)	粘性泥石流 ( $\gamma > 2.0 \text{ g/cm}^3$ )	过渡 (亚粘性) 泥石流 ( $2.0 \text{ g/cm}^3 > \gamma > 1.8 \text{ g/cm}^3$ )	稀性泥石流 ( $1.8 \text{ g/cm}^3 > \gamma > 1.5 \text{ g/cm}^3$ )	挟沙洪水 ( $\gamma < 1.5 \text{ g/cm}^3$ )	
蒋家沟 <sup>[11]</sup>	10.1	6.5~19.1	9.1~20.5	13.2~32.1	27.2~48.2
浑水沟 <sup>[5]</sup>	2.7	2.7~6.8	3.0~8.8	7.9~15	11.5~22
达德沟 <sup>[2]</sup>	10	8	-	-	-
小白泥沟 <sup>[2]</sup>	10	2.8~6	-	-	-
腊利沟 <sup>[2]</sup>	10	-	12	-	-
黑水河 <sup>[2]</sup>	10	6	-	-	-
泥弯沟 <sup>[7]</sup>	-	5~6.2	-	-	-
山背后沟 <sup>[7]</sup>	-	3.5	-	-	-
柳弯沟 <sup>[7, 12]</sup>	-	2~4.2	7.6	5.1~9.3	-
火烧沟 <sup>[7, 13]</sup>	-	2.5~7	7~9.7	-	-
小江流域 <sup>[2]</sup>	10	3.5~17	17~23	23~31	31~43
马颈沟 <sup>[9, 10]</sup>	5	6~7	10	11~12.5	15

用<sup>[9]</sup>。泥石流观测样不会因沉积过程中粗细颗粒的分选而出现细颗粒的缺失现象,泥石流的颗粒组成和百分比是完整的,观测资料是可靠的;而稀性泥石流沉积样在沉积分选作用下很可能因沉积过程中粗细颗粒的分选而出现细颗粒或粗颗粒的缺失现象,稀性泥石流的颗粒组成和百分比有可能发生了改变,调查资料有可能是不可靠的。因此当泥石流的观测样结果和泥石流的沉积样(特别是稀性泥石流)发生矛盾时,应以泥石流观测样为准。图 3 为泥石流沉积样和泥石流观测样的容重与  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量关系图。图 3 和表 2 很好地说明了  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量与泥石流容重的关系(泥石流观测样):随泥石流容重的增加,泥石流中的粘粒的百分含量是减少的,这点在不少文献中已明确指出<sup>[5 9-12]</sup>,但却与不少学者认为的“粘性泥石流中的粘粒的百分含量多于稀性泥石流中的粘粒的百分含量”是相反的<sup>[3 6 14 15]</sup>。造成这种误解的原因是在对野外历史上发生的泥石流的沉积物调查中,粘性泥石流因为无沉积分选,沉积物被完好地保留下来;而稀性泥石流因为有沉积分选,大部分细颗粒和粘粒运动到更远的地方沉积,使稀性泥石流的沉积物中的粗颗粒被完整保存下来,而细颗粒和粘粒保存较少,由于取样时的疏忽仅取到已缺损了细颗粒的样品,造成稀性泥石流粘粒的百分含量比粘性泥石流粘粒的百分含量少的假象。图 3 中的泥石流沉积样中粘粒的百分含量也证明这种假象的存在:粘性泥石流沉积样中粘粒的百分含量与粘性泥石流观测样中粘粒的百分含量相当且规律相同,过渡性泥石流中沉积样和观测样中粘粒的百分含量的吻合性稍差,稀性泥石流( $< 1.8 \text{ g/cm}^3$ )沉积样中粘粒的百分含量与稀性泥石流观测样中粘粒的百分含量的规律相反,即稀性泥石流沉积样中粘粒的百分含量随容重降低而降低的假象是由于稀性泥石流的沉积分选性和调查泥石流时取样的疏忽造成的。

粘粒的组成成分对泥石流的性质也有很大的影响。泥石流流体中粘土中主要是蒙脱石,伊利石(水云母)和高岭土,其次是埃洛石,海泡石,蛭石,绿泥石,斑脱土(Bentonite)等。蒙脱石和伊利石的粘土矿物活动性分别是高岭土的粘土矿物活动性的 20 倍和 8 倍;蒙脱石的塑性指数是伊利石的 5 倍,高岭土的 10 倍;蒙脱石的膨胀率是伊利石的 1~7 倍,高岭土的 5~10 倍<sup>[9]</sup>,即蒙脱石的粘性比伊利石和高岭土强,高岭土最弱。泥石流中的粘粒矿物粘性越强,形成同样

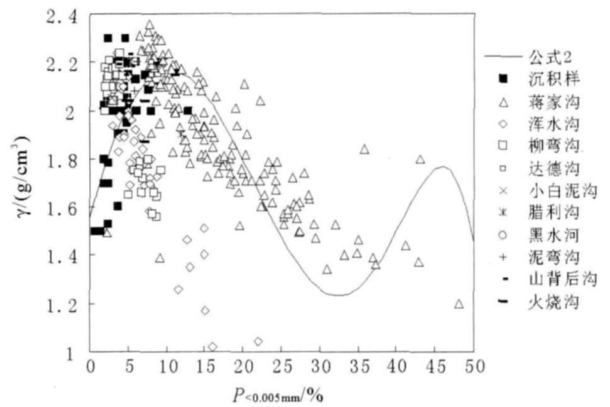


图 3 泥石流沉积样和泥石流观测样的容重与  $< 0.005 \text{ mm}$  的细颗粒的百分含量关系

Fig 3 Relationship of densities of living samples and deposit samples of debris flows with their percentages of clay ( $< 0.005 \text{ mm}$ )

图 3 中图例数据来源: 沉积样和蒋家沟: 文献 [3]; 柳弯沟: 文献 [7, 12]; 其他数据来源同图 1

容重同样类型(粘性强弱)的泥石流所需要的粘粒百分含量就越少。如斑脱土和高岭土相比,斑脱土表现为很强的粘性,而高岭土表现为弱的粘性,在实验中同样是 30% (重量百分比)的含水量(容重  $1.79 \text{ g/cm}^3$ ), 3% 的斑脱土(Bentonite)含量和 36% 的高岭土含量所产生的粘性(屈服应力  $\tau_b$  分别为  $50.7 \text{ Pa}$  和  $54.9 \text{ Pa}$ )几乎一样<sup>[8]</sup>。蒋家沟泥石流流体中粘土中主要由伊利石(水云母),绿泥石和蒙脱石组成,含少量高岭土<sup>[11]</sup>。浑水沟泥石流中粘土中主要以蒙脱石为主,含少量伊利石和高岭土<sup>[5]</sup>。因为蒙脱石比伊利石表现出更强的粘性,蒋家沟各类泥石流和洪水及物源区的  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量比浑水沟大 1 倍以上。

用  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量计算泥石流容重的经验公式<sup>[3]</sup>:

$$\gamma = -1320x^7 - 513x^6 + 891x^5 - 55x^4 + 346x^3 - 67x^2 + 125x + 155 \quad (2)$$

式中  $x$  为  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量(小数表示)。

公式(2)在图 3 中和泥石流沉积样数据较接近,与蒋家沟观测样中粘性泥石流数据偏差较大,与稀性泥石流的数据偏差很大,也完全不能反映浑水沟和柳弯沟的泥石流观测样数据,因此公式(2)仅适用于粘性泥石流,且局限在蒋家沟和少数地区的粘性泥石流容重计算。地区的不同特点和不同的粘粒矿物组成

成分使不同地区的泥石流在相同的泥石流类型和容重时粘粒的百分含量相差悬殊, 因此无法用单一的  $< 0.005 \text{ mm}$  的粘粒的百分含量表示泥石流的容重。虽然公式 (2) 与泥石流沉积样数据吻合较好, 但其泥石流容重与粘粒的百分含量关系是建立在稀性泥石流粘粒的百分含量比粘性泥石流粘粒的百分含量少<sup>[3]</sup>的假象基础上, 因此不能用于稀性泥石流容重的计算。

### 3 泥石流容重的计算

泥石流中的 3 个重要颗粒粒径值:  $2 \text{ mm}$ 、 $0.05 \text{ mm}$  和  $0.005 \text{ mm}$  及其百分含量都不能单一地用于计算泥石流的容重, 代表泥石流中的粗颗粒粒径的  $> 2 \text{ mm}$  的百分含量与泥石流的容重的相关性最好, 代表泥石流中的细颗粒粒径的  $< 0.05 \text{ mm}$  的百分含量与泥石流的容重的相关不好, 代表泥石流中的粘粒粒径的  $< 0.005 \text{ mm}$  的百分含量与泥石流的容重的相关最差。借助  $> 2 \text{ mm}$  和  $< 0.05 \text{ mm}$  的粗颗粒和细颗粒百分含量计算泥石流的容重可以得到更好的相关性:

$$\gamma_D = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_v + \gamma_0 \quad (3)$$

式中  $P_{05}$  为  $< 0.05 \text{ mm}$  的细颗粒的百分含量 (小数表示);  $P_2$  为  $> 2 \text{ mm}$  的粗颗粒的百分含量 (小数表示);  $\gamma_v$  为粘性泥石流的最小容重,  $= 2.0 \text{ g/cm}^3$ ;  $\gamma_0$  为泥石流的最小容重,  $= 1.5 \text{ g/cm}^3$ 。

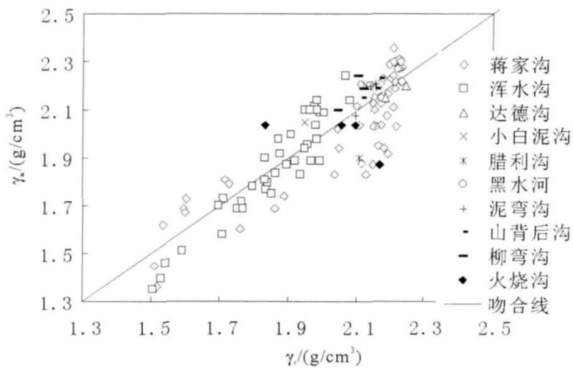


图 4 泥石流观测样计算值与实测值对比

Fig 4 Comparing the measuring densities with the calculating densities of living samples of debris flows

图 4 为泥石流观测样用公式 (3) 的计算值与实测值对比图。图中  $\gamma_c$  为计算值;  $\gamma_m$  为实测值。公式 (3) 的计算在计算洪水 ( $< 1.5 \text{ g/cm}^3$ ) 时偏差大, 这是因为公式 (3) 适用于泥石流 ( $> 1.5 \text{ g/cm}^3$ ) 而非洪水。公式 (3) 计算中区域的特点也不明显, 说明公式 (3)

适用范围较广。公式 (3) 来源于狭义泥石流, 如用于泥石流和水石流容重的计算, 因为泥石流和水石流分别仅含有极少量  $> 2 \text{ mm}$  的粗颗粒和  $< 0.05 \text{ mm}$  的细颗粒, 计算值偏小, 因此公式 (3) 不适用于泥石流和水石流容重的计算。

图 5 为泥石流沉积样用公式 (3) 的计算值与实

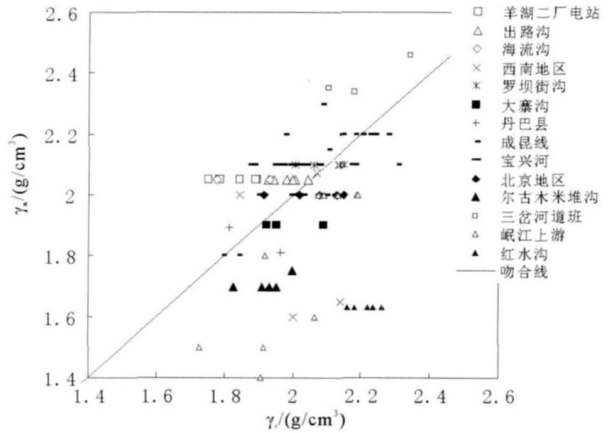


图 5 泥石流沉积样计算值与实测值对比

Fig 5 Comparing the measuring densities with the calculating densities of deposit samples of debris flows

图 5 中图例数据来源: 羊湖二厂: 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 雅鲁藏布江羊湖二厂抽水蓄能电站下线引水方案厂区内泥石流发育特征及其对工程影响专题研究, 2007. 6 1-45 出路沟: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 中国科学院一水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川省大渡河龙头山水电站出路沟地质灾害调查研究, 2005. 12 1-24 海流沟: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 中国科学院一水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川省大渡河大岗山水电站可行性研究报告, 3 工程地质, 附件 9 海流沟地质灾害研究, 2005. 12 1-32 西南地区: 文献 [16]; 罗坝街沟: 文献 [17]; 大寨沟: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 中国科学院一水利部成都山地灾害与环境研究所, 金沙江白鹤滩水电站大寨沟泥石流及其治理方案研究专题报告, 2006. 1 1-79; 丹巴县: 四川省国土资源厅环境监测总站, 成都理工大学, 丹巴县巴底乡邛山沟、岳扎乡鹤狼沟泥石流危害性评价及防治方案设计, 2006. 3 1-56 成昆线: 文献 [6 18 19]; 宝兴河: 中国科学院一水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 硃碛水电站么堂子沟、张卡沟及厂房区小沟泥石流对电站工程影响评价专题研究报告, 成果 1998. 5 1-50 北京地区: 文献 [12 20]; 尔古木米堆沟: 文献 [21~ 23]; 三岔河道班: 文献 [24]; 岷江上游: 文献 [25~ 27]。红水沟: 成都理工大学工程地质研究所, 国家电力公司成都勘测设计研究院, 2004. 12 四川省阿坝州黑水河, 色尔古水电站红水沟泥石流危险性研究, 1-88

测值对比图。图 5 中的计算实例中有我国西南地区的四川, 云南和西藏地区的泥石流, 也有北京和新疆地区的泥石流。泥石流类型包括了粘性泥石流, 过渡 (亚粘性) 泥石流和稀性泥石流。泥石流实例均来自

泥石流的运动和堆积区的小样。有 6 个稀性泥石流容重计算偏差过大是因为稀性泥石流的分选和取样的原因;其他泥石流容重的计算基本都在吻合线附近偏差不大的地方。用泥石流的观测样测量的泥石流容重和颗粒组成较准确和可靠,因此用观测样计算的泥石流容重值与测量值的吻合性也较好。与此相对比,用泥石流沉积样计算获得的泥石流容重的吻合性要差一些,考虑到用沉积样品测量泥石流容重的局限性(如取样点和部位的差异,沉积物被改造及目击者的原因等)和资料来源于不同学者的差异性,公式(3)的计算仍然有很好的准确性。

## 4 讨论

由于对历史上发生的泥石流调查研究中获取样品具有不确定性和随机性,即使是同样的泥石流事件,同样的沉积特征,但不同地点和部位的样品颗粒组成也会不同,这个差别就会造成泥石流容重计算的差别。表 3 为图 5 中有 2 个以上取样的泥石流实测容重和计算容重范围对比。从表 3 中不难看出同样的泥石流事件但不同的泥石流样几乎都会得到不同的计算结果,大多最大容重差别都在  $0.1 \text{ g/cm}^3$  以上,最大的相差  $0.33 \text{ g/cm}^3$  (马厂沟),几乎跨越了一种泥石流类型(第二节:一种泥石流类型范围为  $0.2 \sim 0.4 \text{ g/cm}^3$ ),因此因为泥石流样品不确定性和随机性对泥石流容重的计算的影响是不容低估的。

表 3 泥石流实际容重和计算容重范围对比

Table 3 Comparing the measuring densities and the ranges of calculating densities

	实测容重	计算容重范围	样品 个数	最大容重差别	平均计算容重
	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\rho(\text{g/cm}^3)$		$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\rho(\text{g/cm}^3)$
羊湖二厂区	2.05	1.75~1.89	5	0.14	1.83
出路沟	2.05	1.93~2.05	6	0.12	1.98
海流沟	2.05	1.78~1.93	2	0.15	1.85
罗坝街沟	2.1	2.01~2.15	5	0.14	2.1
大寨沟	1.9	1.92~2.09	3	0.17	1.99
勒古洛夺沟	2.2	1.97~2.18	2	0.21	2.08
利子依达沟	2.2	2.08~2.10	2	0.02	2.09
贺波洛沟	2.2	2.14~2.24	6	0.1	2.22
马厂沟	2.1	1.97~2.30	3	0.33	2.12
对房沟	2.0	1.91~2.10	2	0.19	2.01
浑沟	2	2.0~2.10	3	0.1	2.04
么堂子沟	2.1	1.88~2.18	5	0.3	2.01
佛堂坝沟	2	2.07~2.18	7	0.11	2.12

表 3 中泥石流实例同图 5 其中勒古洛夺沟,利子依达沟,贺波洛沟和马厂沟来自成昆线数据;对房沟,浑沟和么堂子沟来自宝兴河数据,佛堂坝沟来自岷江上游数据。

尽管公式(3)计算不同地区不同类型的泥石流有较好的准确性,但在实际应用中难免会有些偏差,这也包括泥石流样品不确定性和随机性的影响。当计算容重偏差较大时,如计算的容重值所属的泥石流类型(如粘性泥石流)与泥石流的沉积物表现的泥石流类型不相符时(如过渡性泥石流),应修正计算结果以符合泥石流的沉积特征,因为泥石流的沉积特征更能反映泥石流的真实类型。因此正确地根据泥石流沉积物计算泥石流的容重方法是:首先根据沉积物的特征判断泥石流的类型,框定泥石流的容重的范围,再根据泥石流的颗粒组成用公式(3)计算泥石流的容重,计算值在框定的范围内则可以使用,否则需要根据框定的范围进行修正。

稀性泥石流的沉积有分选性,因此在计算稀性泥石流的容重时要特别注意泥石流样品的获取是否有细颗粒的流失,可以使用的泥石流样应该是分选前的泥石流沉积样,否则计算的偏差会很大,因为流失细颗粒后的稀性泥石流中粗颗粒明显增加,细颗粒的减少不能抵消粗颗粒的增加带来的容重的增加,计算结果会偏大许多。对过渡(亚粘性)泥石流的样品获取也应该注意同样的问题。

公式(3)的获得和验证都是用泥石流小样数据,因此在公式(3)的实际应用中也应以泥石流小样为基本数据,否则会带来较大的偏差,也增加不必要的工作量。

## 5 结论

通过分析泥石流的组成颗粒中 3 个重要颗粒粒径值,即  $2 \text{ mm}$ 、 $0.05 \text{ mm}$  和  $0.005 \text{ mm}$ ,以及它们的百分含量与泥石流容重的关系,可以得出以下结论:

(1) 泥石流中的粗颗粒,细颗粒和粘粒颗粒的百分含量与泥石流容重都有一定的关系,但因地区的差异这种关系不是唯一的,颗粒粒径越小,地区的差异越大。泥石流中的粘粒矿物粘性越强,形成同样类型和容重的泥石流所需要的粘粒百分含量就越少;用单一的颗粒百分含量计算泥石流的容重的准确性较差。

(2) 粘性泥石流运动中无沉积分选,粘粒含量与物源区的粘粒含量相当;稀性泥石流有沉积分选,粗颗粒逐渐沉积下来,细颗粒和粘粒的百分含量逐渐增加,粘粒含量远大于物源区的粘粒含量。

(3) 泥石流容重越大,泥石流中的粘粒的百分含量越少。粘性泥石流中的粘粒的百分含量多于稀性

泥石流中的粘粒的百分含量这种错误的认识是因为稀性泥石流的沉积分选性和调查泥石流时取样的疏忽造成的。

(4) 用  $> 2\text{ mm}$  和  $< 0.05\text{ mm}$  的粗颗粒和细颗粒百分含量可以较好地计算泥石流的容重, 其计算结果与观测样和沉积样对比都有较好的一致性。

(5) 确定泥石流沉积物的容重首先根据沉积物的特征判断泥石流的类型, 框定泥石流容重的范围, 再根据泥石流的粗颗粒和细颗粒的百分含量计算泥石流的容重, 计算值在框定的范围内则可以使用, 否则需要根据框定的范围修正。

### 参考文献 (References)

- 1 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 51-53 [Zhou Bifan, Li Deji, Luo Defu et al. The Guide of Debris Flow Prevention [M]. Beijing: Science Press, 1991: 51-53]
- 2 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [R]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 94-113 [Du Rongheng, Kang Zicheng, Chen Xunqian, et al. Debris flow research in the Xiaojiang River basin: a review and perspective [R]. Chongqing Science and Technique Press at Chongqing division, 1987: 94-113]
- 3 陈宁生, 崔鹏, 刘中港, 等. 基于粘土颗粒含量的泥石流容重计算 [J]. 中国科学 (E 辑), 2003, 33(增刊): 164-174 [Chen Ningsheng, Cui Peng, Liu Zhonggang et al. Calculation of the debris flow concentration based on clay content. Science in China (Series E), 2003, 46 (Supp.): 163-174]
- 4 费翔俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 12-15 [Fei Xiangjun, Shu Anping. Movement Mechanism and Disaster Control for Debris Flow [J]. Beijing: Press of University of Tsinghua, 2003: 12-15]
- 5 张信保, 刘江. 云南大盈江流域泥石流 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1989: 35-64 [Zhang Xinbao, Liu Jiang. Debris Flows in the Basin of Dayinjiang, Yunnan, China [M]. Chengdu: Map Press of Chengdu, 1989: 35-64]
- 6 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989: 1-2, 95-96, 165-167 [MDE (Institution of Mountain Disaster and Environment, CAS). Research and Prevention of Debris Flow. Chengdu: Science and Technique Press of Sichuan, 1989: 1-2, 95-96, 165-167]
- 7 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 11-43 [IGC (Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS), ISDCG (Institution of Sciences of Department of Communications, Gansu, China), Debris Flow in Gansu, China [M]. Beijing: Communications Press, 1982: 11-43]
- 8 Marr JG, Harff PA, Shannugan G, et al. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: the role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 2001, 113(11): 1377-1386
- 9 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: 20-25 [Wu Jishan, Tian Lianquan, Kang Zicheng et al. Debris Flow and General Prevention [M]. Beijing: Science Press, 1993: 20-25]
- 10 田连权, 吴积善, 康志成, 等. 泥石流侵蚀搬运与堆积 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1993: 168-174 [Tian Lianquan, Wu Jishan, Kang Zicheng et al. Erosion and Deposition of Debris Flow [M]. Chengdu: Map Press of Chengdu, 1993: 168-174]
- 11 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院东川泥石流观测研究站. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 53-196 [MDE (Institution of Mountain Disaster and Environment, CAS), Research and observation of debris flow in Jiangjia Gully, Yunnan, China [M]. Beijing: Science Press, 1990: 53-196]
- 12 杨针娘. 甘肃武都粘性泥石流及其基本参数的估算 [C] // 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 北京: 科学出版社, 1984: 4: 207-217 [Yang Zheniang. The sticky debris flow in Wudu of Gansu and the estimation of its fundamental parameters [C] // Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, Beijing: Science Press, 1984, 4: 207-217]
- 13 曾思伟, 张又安. 甘肃火烧沟泥石流排导沟的工程实践 [C] // 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 北京: 科学出版社, 1984: 4: 218-226 [Zeng Siwei, Zhang Youan. The Diversion Work for Debris Flow at Huoshao Gully of Gansu [C] // Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, Beijing: Science Press, 1984, 4: 218-226]
- 14 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流 [M]. 北京: 商务印书馆, 2000: 72-94 [MDE (Institution of Mountain Disaster and Environment, CAS), Debris Flow in China [M]. Beijing: Business Press, 2000: 72-94]
- 15 钟敦伦, 谢洪, 王士革, 等. 北京山区泥石流 [M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 16-97 [Zhong Dunlun, Xie Hong, Wang Shige et al. Debris Flow in Mountain Area of Peking, China [M]. Beijing: Business Press, 2004: 16-97]
- 16 陈宁生, 张飞. 2003年中国西南山区典型灾害性暴雨泥石流运动堆积特征 [J]. 地理科学, 2006, 26(6): 701-705 [Chen Ningsheng, Zhang Fei. Movement and deposit characteristics of typical catastrophic debris flows by rainstorm in the mountainous area of Southwestern China in 2003 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(6): 701-705]
- 17 第宝锋, 陈宁生, 谢万银, 等. 罗坝街沟泥石流特征分析 [J]. 山地学报, 2003, 21(2): 216-222 [Di Baofeng, Chen Ningsheng, Xie Wanyin, et al. Character analysis of debris flow in Luobajie Gully [J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(2): 216-222]
- 18 刘希林, 王全才, 何思明, 等. 四川布托县扎台沟泥石流微地貌及成灾特性 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 1-5 [Liu Xilin, Wang Quancai, He Siming et al. Micro-geomorphology and characteristics of Zhatai Gully debris flow hazards, Butuo County, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2006, 17(2): 1-5]
- 19 刘希林, 倪化真, 赵源, 等. 四川凉山美姑县“6.1”泥石流灾害研究 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 152-158 [Liu Xilin, Ni Huayuan, Zhao Yuan, et al. Research on the “6.1” debris flow hazards in Meigu County of Liangshan State, Sichuan [J]. Journal of Engineering

- Geology 2006, 14(2): 152-158]
- 20 谢洪, 钟敦伦. 北京山区番字牌西沟泥石流减灾规划探讨 [J]. 山地学报, 2001, 19(6): 560-564 [Xie Hong, Zhong Dunlun. An approach on debris flow disaster relief plan of Fanzipai Gully in the mountain area of Beijing [J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(6): 560-564]
- 21 罗德富, 钟敦伦, 赵惠林. 1983年5月20日甘洛县尔古木沟泥石流调查分析, 泥石流(3) [R]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986: 27-32 [Luo Defu, Zhong Dunlun, Zhao Huilin. Investigation of debris flow in Ergumu Ravine on May 20, 1983, Ganluo County, Debris Flow, No. 3 [R]. Chongqing Science and Technique Library Press, Chongqing Division, 1986: 27-32]
- 22 游勇, 程尊兰. 西藏波密堆沟泥石流堵河模型试验 [J]. 山地学报, 2005, 23(3): 288-293 [You Yong, Cheng Zunlan. Modeling experiment of debris flow in Midui Gully, Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(3): 288-293]
- 23 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所. 西藏公路水毁研究 [M]. 成都: 四川科学出版社, 2001, 123-162 [MDE (Institution of Mountain Disaster and Environment CAS), SDCT (Institution of Sciences of Department of Communications Tibet), Water Damage to Highways in Tibet [M]. Chengdu Sichuan Sciences Press, 2001: 123-162]
- 24 邓养鑫, 朱明弟, 赵德刚, 等. 天山独库公路泥石流沉积特征, 第四届全国泥石流学术讨论会论文集 [C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1994: 384-390 [Deng Yangxin, Zhu Mingdi, Zhao Degang et al. Depositional Features of Debris Flow along Duku Highway in Tianshan Mountains. Proceedings of the 4<sup>th</sup> National Symposium on Debris Flow, Lanzhou [C]. Lanzhou Culture Press of Gansu, 1994: 384-390]
- 25 刘希林, 王全才, 何思明, 等. 都(江堰)汶(川)公路泥石流危险性评价及活动趋势 [J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(1): 41-46 [Liu Xilin, Wang Quancai, He Siming et al. Hazard assessment of debris flows and their developing trend along Dujiangyan-Wenchuan Highway [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1): 41-46]
- 26 刘希林, 吕学军, 苏鹏程. 四川汶川茶园沟泥石流灾害特征及危险性评价 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 66-71 [Liu Xilin, Lv Xuejun, Su Pengcheng. Characteristics and hazard assessment of debris flow in Chayuan Gully of Wenchuan County in Sichuan [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(1): 66-71]
- 27 谢洪, 钟敦伦. 岷江上游汶川县佛堂坝沟泥石流特征及危险性分区 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 30-32 [Xie Hong, Zhong Dunlun. Features and risk zonation of debris flow in Futangba Ravine of Wenchuan County of the Minjiang River [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2003, 14(4): 30-32, 53]

## Research on the Calculating Density by the Deposit of Debris Flows

YU Bin

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Abstract** The density of debris flows is the most important parameter of debris flows. It is more important to get the density of debris flows with the need of the evaluation and prevention the hazards of debris flows. In this paper, the size of coarse particle, fine particle and clay of debris flows, i.e. 2mm, 0.05mm and 0.005mm, and their percentage were analyzed for the relationship with the density of debris flows. The percentages of coarse particle, fine particle and clay of debris flows have certain relationships with density of debris flows, but they are not the unique because the difference of region. The percentage of clay in viscous debris flows is the same with the percentage of clay in the solid source of debris flows, but the percentage of clay in less viscous debris flows is much more than the percentage of clay in the solid source of debris flows. Comparing the living samples and deposit samples of debris flows with the calculating density of debris flows by the percentages of coarse particle and fine particle, it is good consistency. But the calculating density of debris flows must obey the density range obtained by the characteristics of deposit of debris flows.

**Key words** debris flows; deposit density; particle size; percentage