

国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较

蒋 树,文宝萍

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

摘要: 泥石流流体容重、流速、冲击力是表征泥石流活动特征众多指标中的三个关键指标。本文在分析国内外对这些指标评估现状的基础上,总结了应用较普遍的估算公式,对比了不同公式的特点及其适用性。比较结果认为:由于泥石流组成和运动状态的复杂性以及影响因素的多样性,对于这三个指标,目前的估算公式都不具有普适性。在当前的认知水平下,建立基于各个地区泥石流特点的指标估算经验公式是最为实用的途径。在各个指标经验公式的建立方法上,考虑各个粒组的多变量容重统计分析方法相对较为合理;泥石流流速估算公式的建立途径在我国、前苏联和欧美国家之间有显著差异,前二者基于曼宁公式,后者基于强迫涡流公式、以弯道超高为主要参数;泥石流冲击力的估算方法国内外都以动量理论为基础,区别主要体现在经验系数取值上,巨石冲击力的计算则都考虑了拦挡建筑物的特点。

关键词: 泥石流;容重;流速;冲击力;经验公式

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)03-0086-11

泥石流是一种含有大量泥砂石块、甚至很多巨砾的非均质固液两相流体,是山区最常见的地质灾害类型之一,国内外泥石流研究已有 100 多年历史^[1]。由于泥石流具有流体特征,所以流体力学、河流动力学、泥沙学、水力学以及流变理论等一直是国内外研究泥石流活动特征的理论基础。前人依据这些理论建立了众多的理论模型,如表征泥石流粘性力学特征的牛顿流体模型、宾汉流体模型、兼顾颗粒碰撞的膨胀流模型、考虑孔隙水压力的库仑颗粒流模型等^[1~3]等。然而,由于泥石流物质组成和动态特征极其复杂、影响因素众多,这些形式复杂的理论模型,尽管有其理论上的合理性,但是计算结果却与实际有很大出入,实用性差。因此,依据一定的流体运动理论、结合大量的实例观测数据,建立表征泥石流活动特性的半经验公式;或直接根据实例观测数据,通过数理统计与拟合分析,建立具有统计意义的泥石流活动指标经验公式,是国内外学者建立泥石流活动指标估算公式的两个主要途径。由于建立这些公式的基础数据来自于不同地区、不同类型的泥石流实例,所以这些公式实际上都是地区性的经验公式。目前,国内外文献报道了大量的这类公式,有些公式已被列入一些国家或地区的行业规范,从而得到广泛应用。

对于泥石流而言,有多个指标可以从不同侧面反映泥石流的活动特征,如颗粒级配、容重、冲击力、流速、流量、运动阻力、泥沙颗粒动能、泥石流压力等。在这些指标中,泥石流容重、流速、冲击力是表征泥石流活动特征最为重要的三个指标,也是泥石流防治工程设计的关键参数。本文在分析国内外相关文献的基础上,总结了对泥石流容重、冲击力和流速的各种估算方法,比较了这些方法的优缺点,以期工程应用提供参考。

1 容重

容重是泥石流最基本的物理指标,它不仅反映泥石流的成因类型,而且决定着泥石流活动特征的各个方面^[4]。

除了极个别泥石流容重可以通过现场实测获得外,多数新近发生的泥石流容重都是依照称量法、体积比法进行间接估算。国外泥石流防治与研究中,大多通过这一途径获得泥石流的容重参数。为了更简便、快速地对某一类或某一地区泥石流容重进行估算,国内部分学者根据间接估算或实测泥石流容重与实际调查的泥石流沟流域参数或颗粒级配参数进行统计分析,提出了十余个泥石流容重估算公式。根据建立统计关系所选用的参数特点,大致可以分为两类:第一类将泥石流容重与沟谷流域面积、沟床比降、松散物质储量等宏观物理量建立统计关系,这类经验公式的典型代表见表 1。

收稿日期: 2011-07-21;**修订日期:** 2011-09-01

作者简介: 蒋树(1987-),男,硕士研究生,研究方向为地质灾害分析评价与防治。

E-mail: jiangshu_1987@qq. com

表 1 基于流域特征和松散物储量及其特征的泥石流容重经验公式

Table 1 Empirical equations for debris flow density based on the watershed and loose deposition characteristics			
序号	公式形式	适用范围及应用结果	提出者
1	$\gamma_c = 0.69I + 1.51$	适用于西南地区颗粒容重为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 的稀性泥石流。	铁道部第一设计院 ^[5]
2	$\gamma_c = 1.1B^{0.11}$	适用于陇南地区。武都马槽沟、文县关家沟等泥石流防治中采用该式 ^[6-8] 。	中国科学院兰州冰川冻土研究所 ^[9]
3	$\gamma_c = \frac{1}{1 - 0.0334aI^{0.39}}$	适用于成昆铁路沿线泥石流沟 ^[10] 。 $a = 1.4$ 、 $I > 800\%$ 时,公式无意义。	铁道部第二设计院 ^[11]
4	$\gamma_c = K_1 + K_0K_RK_LK_A$	数据源于川滇地区的小江、二滩、宝兴等地。	程尊兰 ^[10]
5	$\gamma_c = \lg I + K_0 \cdot K_R \cdot \frac{F_s}{F} \cdot B^{0.11}$	在小江流域典型泥石流沟所得计算值与实测值接近。	成都山地灾害与环境研究所 ^[9]

公式中符号的意义: γ_c 为泥石流容重(t/m^3); I 为主沟沟床平均纵比降; B 为储备物质方量与汇水面积之比($\times 10^4\text{m}^3/\text{km}^2$); a 为崩滑程度系数,查表获取; K_1 为沟床比降系数(取形成区沟床平均坡度); K_0 为补给系数,取 55; K_R 为岩性系数; K_L 为稀释系数或河槽孤石覆盖系数; 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}; F_s 为泥石流形成区以上的面积(km^2); F 为流域面积(km^2)。

式(1)和式(2)都属于单因素统计公式,形式简单,应用方便。但是泥石流容重不可能由单一因素所决定,因此这种公式可能对已有资料拟合很好,但不能推广应用。式(3)是根据成昆线的调查数据归纳所得^[10],引入了作者自定义的崩滑程度系数 a ,该值考虑了物源的丰富程度以及沟床比降大小,但是该值不能精确确定,在缺乏现场资料时,需定性判断并按作者给出的取值表确定。实际上,式中考虑的因素与泥石流容重相关性较小,故也难以推广。公式(4)和公式(5)除稀释系数的定义不同外,其余基本相同。式(4)的提出者依据云南小江、四川二滩、宝兴等地泥石流的

调查数据,认为泥石流容重与沟床比降、补给条件、岩性、稀释程度、松散物质储备总量等因素有关,对于补给条件和岩性这类的定性物理量,作者给出了不同条件下的取值范围。由于公式中考虑的因素较多,因此,理论上可能有较广适用性,但是由于建立公式的基础数据为地区性数据,因此其适用范围也仅限于川、滇交界地区。

第二类公式将泥石流容重与堆积物中不同粒组的百分含量建立统计关系,即认为泥石流容重主要由泥石流固体物质组成所决定。这类公式的典型代表见表 2。

表 2 基于固体物质颗粒级配的泥石流容重经验公式

Table 2 Empirical equations for debris flow density based on the particle size distribution			
序号	公式形式	适用范围及应用结果	提出者
1	$\gamma_c = P_{05}^{0.35}P_2\gamma_v + \gamma_0$	不适用于水石流、泥流。舟曲 8.8 泥石流评估采用该式 ^[12] 。	余斌 ^[13]
2	$\gamma_c = P_{05}^{0.35}P_2\gamma_v + \gamma_x$	适用于经过沉积分选作用、去掉 $>5\text{mm}$ 粗颗粒的稀性泥石流。	余斌 ^[14]
3	$\gamma_c = (0.175 + 0.743P_2)(\gamma_s - 1) + 1$	由云南小江流域泥石流数据获得。	杜榕桓 ^[15]
4	$\gamma_c = -1320x^7 - 513x^6 + 891x^5 - 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 125x + 1.55$	由蒋家沟泥石流数据统计获得,不适用于高容重粘性泥石流。	陈宁生等 ^[16]
5	$\gamma_c = \lg\left[\frac{10x + 0.23}{ x - 0.089 + 0.1}\right] + e^{-20x-1} + 1.1$	适合于西南地区粘粒含量 3% ~ 18% 的粘性泥石流。	陈宁生等 ^[16]
6	$\gamma_c = 1.887d_{50}^{0.0779}$	数据源于蒋家沟泥石流。适用于粘性泥石流,反演甘肃武都、日本、前苏联部分实例,效果较好。	李培基等 ^[4]
7	$\gamma_c = 1.30 + \lg\frac{10d_{50} + 2}{d_{50} + 2}$	数据源于蒋家沟泥石流。鲜见其他学者引用或应用。	甘肃省交通科学研究所 ^[5]
8	$\gamma_c = 500\left[\frac{d_j}{6.39}\right]^{0.18} + 1$	数据源于蒋家沟及其邻近地区的粘性泥石流。	吴积善 ^[17]

公式中符号的意义: P_{05} 为粒径 $<0.05\text{mm}$ 的细颗粒的百分含量; P_2 为粒径 $>2\text{mm}$ 的粗颗粒的百分含量; γ_0 为泥石流的最小容重,取 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$; γ_v 为粘性泥石流的最小容重,取 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$; γ_x 为容重修正系数,取 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$; γ_s 为粗颗粒($>2\text{mm}$)比重,取 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$; x 为 $<0.005\text{mm}$ 的粘粒百分含量; d_{50} 为泥石流中值粒径(mm); d_j 为泥石流颗粒平均粒径 $d_j = (d_{84} + d_{16})/2$ (mm);其余同表 1。

式(1)提出者通过对大量历史文献和实际调查数据分析,发现泥石流容重与堆积物中粗颗粒($>2\text{mm}$)和细颗粒($<0.05\text{mm}$)百分含量有对应关系,并且认

为,如果能根据沉积方式和粗、细颗粒的含量确定泥石流的类型,则该式可以估算狭义泥石流,即典型的粘性和稀性泥石流的容重^[13]。式(2)则是作者在式(1)基

础上,考虑到稀性泥石流的泥沙分选现象^[14],对稀性泥石流容重估算的修正。但是,正如作者所言,随着地区差异,泥石流容重与粗、细颗粒的这种关系并非唯一,并且颗粒粒径越小,地区差异越大。所以,式(1)和(2)中所描述的泥石流容重与颗粒级配关系可能只适合于建模数据来源的部分地区。

式(3)是以泥石流容重计算的体积比公式为基础,根据云南小江流域泥石流调查数据,得到 $> 2 \text{ mm}$ 的粗颗粒百分含量 P_x 与泥石流中固体体积浓度 S_v 的线性关系,再代入体积比公式所得。该公式的明显不足是,仅考虑了粗颗粒百分含量这个单一因素,因此采用该公式对甘肃武都泥弯沟、山背后沟、火烧沟和柳弯沟所得的计算结果与实际偏差较大。显然,该公式可能仅适合于建模数据来源的云南小江流域。

式(4)则是仅考虑了粘粒含量的统计公式。其建立是基于对蒋家沟已有数据的回归分析。余斌比较了公式计算值与不同区域泥石流容重实测值,发现计算值对稀性泥石流偏差很大,与小江浑水沟和武都柳弯沟泥石流的实测数据的差距尤其显著^[14],因此该公式的适用性较差。

式(5)与式(4)所用参数相同。考虑到粘性泥石流容重的较大值出现在粘粒含量 $8\% \sim 9\%$ 时,公式提出者以 $|x - 0.089|$ 为对数函数主体,以指数函数作为修正,并在公式中考虑了粘粒含量为零的理想流体容重。由于泥石流中颗粒粒径越小,地区差异越大,所以该公式仅适合于西南地区粘粒含量大于 3% 、小于 18% 的粘性泥石流。

式(6)、(7)和(8)也是基于特定粒径的单因素经验公式。李培基分析了蒋家沟的泥石流数据,认为泥石流容重为固体物质组成的函数而非含水量的函数,通过回归分析建立了式(6),并验算了甘肃武都柳弯沟、前苏联高加索杜鲁德日河和日本长野等地暴雨型泥石流的容重,误差均在 0.15 g/cm^3 内,说明该公式的区域适用性较好。但作者认为黄土泥流和水石流容重与固体物质的关系有其独特之处,不能用该式计算。

上述 8 个公式中,除式(1)和(2)考虑了多个粒组含量外,其余都是仅考虑单个粒组含量或某个特征粒径的拟合公式,对于泥石流这种固体物质组成非常复杂的流体而言,考虑多个粒组的多变量统计公式显然更加合理。

前述估算泥石流容重的两种途径都有其不完善之处。由于颗粒级配是控制泥石流容重的关键因素,所以基于固体堆积物颗粒级配的估算方法相对基于沟谷

流域和固体物质储量的方法更为合理。但是,由于泥石流容重与颗粒级配的关系随地区、泥石流类型变化,所以,建立适合于各个地区、不同类型泥石流颗粒级配与容重的统计关系应该是最可行、实用的途径。

2 流速

泥石流流速是泥石流动力学研究中最重要课题,也是泥石流防治工程设计中不可缺少的参数,因此国内外学者对泥石流流速计算方法研究颇多。但是,目前尚无被广泛接受的成熟方法,国内外对泥石流流速的估算均是基于各种经验公式。在流速经验公式的确定方法上,国内外学者的出发点以及相应的研究成果差别较大。表 3、4 分别汇总了国外、国内常用的泥石流流速估算经验公式。

国外学者提出的流速计算公式大致可以分为四类,前三类在西欧、北美、日本应用广泛,后一类在东亚、日本应用较多。第一类公式以弯道超高为主要参数,如式(1)~(4)。其中,式(1)是强迫涡流公式,基于弯道处离心力等于弯道两侧压力差的原理提出^[28]。国外学者对公式中校正系数 k 的取值讨论较多, Suwa 和 Yamakoshi 等认为 k 值略大于或等于 1^[29], Mizuyama 和 Uehara 建议 k 值为 2^[30], Van Dine^[31] 提出 k 在 1~5 之间, Hungr 等认为 k 介于 2.5~5^[25], Chen 认为 k 可能最大能到 10^[32]。Zanchetta 等对意大利萨诺地区火山泥石流采用 $k=1$ 时计算值与公式(5)的计算值吻合较好^[33], Webb 等也采用 $k=1$ 对美国科罗拉多河支流泥石流的计算值与当地曼宁经验公式计算值相近^[34]。Bulmer 等分别计算了 $k=1, 2, 10$ 时美国弗吉尼亚州麦迪逊市一处泥石流的流速值,认为 $k=2$ 的计算值与目击者的描述最为接近^[30]。多数认为,取 $k=1$ 时的流速计算值大于实际值。但是目前欧美国家在防治工程设计时,保守起见,常采用 $k=1$ 的流速计算值。Hungr 等认为式中的校正系数 k 最初推导是以清水为对象,所以 k 值应考虑泥石流流体粘度、纵剖面上颗粒分选等。笔者认为,除此之外, k 值还应与沟道形状有关,因为最初推导是以方形沟道为基础计算两侧压力差。该式有较强的理论依据,形式上比较简单,所需都是几何参数,如果能够简便地给出校正系数 k 值及其变化范围,则具有很强的实用性。目前,校正系数 k 主要由学者依据经验推荐取值,但是经验值的实例积累较少。式(2)是泥石流垂直冲向障碍物时,由能量转换与守恒定律推导得出。作者假定发生撞击时泥石流的动能全部转换为势能,不考虑摩擦耗

能,因此该式可能更适合于水石流。公式(3)则是在对圆筒内粘性层流流体进行室内试验和理论分析基础上得出,作者发现在雷诺数大于 20 时,该式误差小于 15%^[19]。式(4)与(1)类似,作者认为同一个横剖面从沟道外侧到内侧,速度呈线性递减趋势,从而根据几何相似原理得出泥石流流体表面的平均速率。显然,所有这些以弯道超高为主要参数的公式对直线型泥石流沟均不适用。

表 3 国外泥石流流速经验公式
Table 3 Empirical equations for debris flow velocity in other countries

序号	公式形式	适用条件及应用结果	提出者
1	$v = [(g\Delta h R_e)/kb]^{0.5}$	当沟道坡度 θ 大于 15° 时, g 为 $g\cos\theta$ 。理论上适合各类泥石流,被国外文献广泛引用。	Chow ^[18]
2	$v = [2g\Delta h]^{0.5}$	适合于泥石流流体内摩擦较小、且障碍物垂直于泥石流流向。	Chow ^[18]
3	$v = 1.2g\Delta h$	试验成果,未见实际应用。	Wigmosta ^[19]
4	$v_{\max} = (gR_a\Delta h/b)^{0.5}, v = \frac{v_{\max}}{2}\left(1 + \frac{R_a - b}{R_a}\right)$	理论上适合于各类泥石流,奥地利提洛尔地区泥石流危险性分区引用此公式。	Aulitzky ^[20]
5	$v = 2.1Q^{0.33}I^{0.33}$	适合于沟床比降在特定范围的泥石流。用该公式计算意大利莫斯卡托、中国蒋家沟、美国圣海伦斯山和瑞士阿尔卑斯山地区的泥石流流速,与实测值吻合较好。	Rickenmann ^[21]
6	$v = 1.3g^{0.2}q^{0.6}I^{0.2}/d_{90}^{0.4}$	适合于沟床比降在特定范围的泥石流,引用该式所得计算值与实测值吻合程度在 50% 左右。	Takahashi ^[22]
7	$v = 1.23(QI/d_{70})^{0.5}$	适合于数据来源区的泥石流。	Ruf ^[23]
8	$v = 5.75u^* \lg \frac{H}{d_{50}}$	适合于泥流和粘性泥石流。	Julien ^[24]
9	$v = (\gamma_e I/K\mu)H^2$	适用于牛顿粘性流体类泥石流。	Hungr ^[25]
10	$v = (1/3)\rho g H^2 I/\mu$	适用于可视层流状态牛顿流体的泥石流。	Rickenmann ^[21]
11	$v = (2/3)\xi H^{1.5} I$	适用于可视颗粒膨胀剪切流体的泥石流。	Bagnold ^[21]
12	$v = CH^{1/2}I^{1/2}$	理论上适合于各类泥石流。	Chezy ^[21]
13	$v = (1/n)H^{2/3}I^{1/2}$	理论上适合于各类泥石流。被引入日本泥石流防治技术标准 ^[26] 。	Manning ^[21]
14	$v = \frac{m_0}{a}R^{2/3}I^{1/4}$	适用于稀性泥石流。	斯利勃内依 ^[27]

公式中符号的意义: v 为平均速率(m/s); R_e 为沟道中线的曲率半径(m); Δh 为弯道超高(m); b 为沟道宽度(m); k 为校正系数; $v_{\max}$ 为弯道外侧流速(m/s); R_a 为沟道外侧曲率半径(m); Q 为流量(m^3/s); q 为单宽流量(m^2/s); d_{90} 、 d_{70} 为级配曲线上小于重量 90%、70% 对应的粒径(mm); u^* 为剪切速率(m/s); H 为泥深; K 为沟道的形态因子; μ 为动力粘滞系数($Pa \cdot s$); ρ 为水沙混合物的密度(kg/m^3); ξ 为依赖于颗粒大小和固体浓度的集中系数; C 为谢才系数; n 为曼宁糙率系数; m_0 为清水阻力系数的倒数; R 是水力半径(m); a 为泥石流阻力修正系数,其余同表 1、2。

第二类公式以流量、沟床比降、特征粒径为主要参数,公式的建立均以室内实验数据为基础。Rickenmann 研究了清水在沟床比降 3% ~ 20% 的卵石堆积沟道中的运动规律,验证了由 Takahashi 提出的以流量、沟床比降和特征粒径 d_{90} 为主要参数的泥石流平均流速经验式(6),式(5)是式(6)的简化形式。Ruf 根据在沟床比降 9% ~ 48% 泥石流沟内的实测数据,推导出泥石流平均流速经验公式(7)。Julien 在野外调查和室内试验基础上,建立了泥流和泥石流平均流速的经验式(8)。这类公式的共同特点是理论依据不足、普适性较差,只在一定的沟床比降范围内适用,或是只适用于某一类型的泥石流。

第三类公式是假定沟道形状、以特定运动模型为基础推导的半经验公式,如式(9) ~ (11)。其中,式(9)基于牛顿粘性流模型,提出者认为在一定条件下,该公式可以延伸用到宾汉流体和假塑性流体;式(10)针对处于层流状态的牛顿流体,式(11)则是基于 Bagnold 的膨胀理论,适用于惯性流态的颗粒膨胀剪切流体。式(10)和(11)的系数只适用于较宽的矩形沟道。这类公式虽有一定的理论基础,但是其关键参数,如动力粘滞系数 μ 、集中系数 ξ 不易获取,特别 ξ 没有确切的物理意义,也没有经验取值范围。因此这类公式的实用性不大。

表 4 国内泥石流流速经验公式
Table 4 Empirical equations for debris flow velocity in China

序号	公式形式	适用条件及应用结果	提出者
1	$v = \frac{15.5}{a} H^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	适用于西北地区细颗粒含量很少、沟道坡降较陡的稀性泥石流。被引入《泥石流灾害防治工程勘察规范》。	铁道部第三设计院 ^[27]
2	$v = \frac{15.3}{a} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{3}{8}}$	适合于西北地区的稀性泥石流,被引入《泥石流灾害防治工程勘察规范》。	铁道部第一勘测设计院 ^[35]
3	$v = \frac{M_w}{a} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{10}}$	适合于北京地区稀性泥石流,被引入《泥石流灾害防治工程勘察规范》。	北京市市政设计院 ^[9]
4	$v = \frac{M_c}{a} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	适合于水石流和稀性泥石流 ^[36] 。	铁道科学研究院西南研究所 ^[9]
5	$v = \frac{m_0}{a} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$	适合于稀性泥石流。	冰川冻土研究所 ^[37]
6	$v = \frac{m'}{a} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{10}}$	适用于大比降沟谷内($I \geq 0.015$)的稀性泥石流。	刘德昭 ^[37]
7	$v = \frac{15.5}{a} H^{\frac{2}{3}} I^{\frac{3}{8}}$	适用于青海海炸麻隆峡纵坡 0.07~0.13 的稀性泥石流。	刘丽等 ^[38]
8	$v = (1/n) H^{2/3} I^{1/2}$ $1/n = 28.5 H^{-0.34}$	适合粘性阵流型泥石流,尤其云南东川地区。	吴积善 ^[17]
9	$v = \frac{1}{n} H^{3/4} I^{1/2}$	适用于含有大漂砾的冰川泥石流。粘性泥石流 n 取 0.45,稀性取 0.25。	吴积善 ^[36]
10	$v = \frac{1}{n_d} H^{2/3} I^{1/2}$	在西藏古乡沟,东川蒋家沟,武都火烧沟、舟曲三眼峪沟 ^[39] 等地应用,被引入《泥石流灾害防治工程勘察规范》。	国土资源部 ^[40]
11	$v = \frac{1}{\sqrt{\gamma_s \varphi + 1}} \cdot \frac{1}{n_r} \cdot H^{2/3} I^{1/2}$	适用于西南地区粘性泥石流,被引入《泥石流灾害防治工程勘察规范》、《泥石流灾害防治工程设计规范》。	铁二院 ^[11]
12	$v = 1.62 \left[\frac{S_r(1 - S_c)}{d_{10}} \right]^{\frac{2}{3}} H^{\frac{1}{3}} I^{\frac{1}{6}}$	适用于粘性泥石流。 $\gamma_c < 2.12 \text{ t/m}^3$ 时, $d_{10} = 0.165 \gamma_c^{-3.6}$ 。	舒安平 ^[42]
13	$v = KH^{2/3} I^{1/5}$	被应用于云南东川大白泥沟,蒋家沟泥石流流速的计算。已被引入《泥石流灾害防治工程勘察规范》。	陈光曦 ^[11]
14	$v = M_d H^{2/3} I^{1/2}$	适合于武都地区粘性泥石流,已被引入《泥石流灾害防治工程勘察规范》。	中国科学院兰州冰川冻土研究所 ^[6]
15	$v = 65 K_c H^{1/4} I^{4/5}$	适合于武都地区的粘性泥石流。	杨针娘 ^[43]
16	$v = 27.57 \left(\frac{d_{cp}}{H} \right)^{0.245} \sqrt{gHI}$	适用于云南蒋家沟粘性泥石流,并在该沟泥石流防治中应用。	康志成 ^[44]
17	$v = \left[\frac{\gamma_w}{\gamma_c} \right]^{0.4} \left[\frac{\mu}{\mu_{ed}} \right]^{0.1} V$	适用于紊动强烈的连续性泥石流。	刘江等 ^[45]
18	$v = 2.77 \left(\frac{R}{d_{85}} \right)^{0.737} \left(\frac{\mu}{\mu_{ed}} \right)^{0.42} \sqrt{RI}$	适合于流域面积小于 1km ² 的粘性泥石流。	吴积善 ^[46]
19	$v = 1.1 (gR)^{1/2} I^{1/3} \left(\frac{d_{50}}{d_{10}} \right)^{1/4}$	适用于粘性泥石流。	余斌 ^[47]

公式中符号的意义: M_w 是河床外阻力系数; M_c 为巴科洛夫斯基粗糙系数; m_0 为清水阻力系数的倒数; m' 为与河床尺寸和河床表面粗糙程度相关的系数; n_d 为粘性泥石流沟床糙率; n_r 为泥石流清水沟床的糙率系数; K 为粘性泥石流流速系数; M_d 为泥石流沟床糙率系数; K_c 为断面平均流速换算系数,查表获取; d_{cp} 为泥石流固体的平均粒径(mm); μ 和 μ_{ed} 分别为清水粘度和泥石流浆体有效粘度(Pa·s); V 为相同边壁条件下的清水流速(m/s)。其余同表 1、2、3。

第四类公式则是基于谢才公式和曼宁公式,如式(12)、(13)。这两个公式是计算明渠和管道内均匀流平均流速或沿程水头损失的主要公式,二者的经验性主要体现在谢才系数和曼宁系数上。式(14)是曼宁公式的改进形式,前苏联、部分东欧国家和日本应用较

多。

像其他学科一样,前苏联的研究思路、研究理论对我国泥石流研究也产生了重要影响。我国学者提出的泥石流平均流速经验公式,绝大多数都是基于曼宁公式,不同之处是根据不同地区泥石流特点,对曼宁公式

进行了相应的改进、或修正。

上表中,除了式(13)~(19)外,其余都可以概化成 $v=MR^aI^b$ 形式,即曼宁公式的基本形式,显示泥石流流速是沟床粗糙度、沟床比降和断面水力半径等因素的函数。从适用性来看,国内学者提出的公式可分为两类,式(1)~(7)适用于稀性泥石流,式(8)~(19)适用于粘性泥石流,并且每一个公式都具有特定的地区适用性。这些公式的应用难点在于经验系数的确定上。对于不同沟道的糙率系数,经过长期积累和不断修正,国内已有学者将不同沟道糙率值制成表格。与国外多个国家和地区广泛应用的基于强迫涡流理论、以弯道超高为主要参数的泥石流流速经验公式相比,二者所得流速的量值差异,目前尚无文献报道。

式(13)~(19)形式上与曼宁公式及其改进形式虽有差别,但实际上也是基于曼宁公式得出,只是不再包含难以确定的沟道糙率系数,通过分析将沟道糙率系数修正为用泥石流的容重、特征粒径、粘度等间接表示。除式(19)以外,其余都涉及了粒径因素,由于泥石流的颗粒组成影响泥石流内部阻力大小,因而对流速影响显著。另一方面,由于泥石流颗粒组成相对容易确定,所以这类曼宁修正公式的实用性较强。

3 冲击力

泥石流冲击力包括泥石流的整体冲击力和泥石流中巨石的集中冲击力。

3.1 泥石流整体冲击力

泥石流对其路径上各种构筑物的摧毁作用起因于泥石流与构筑物的碰撞作用。所以,目前多数文献将基于动量定理得出的泥石流流动压力称为冲击力^[40,48~49]。但是一些学者(如 Zanchetta^[33]、Yang^[50]、Armanini^[51]等)认为,泥石流整体冲击力应该包括动压力与静压力两部分。Yang 发现,当泥石流流速>5m/s 时,动压力占冲击力的绝大部分;当流速<3m/s 时,静压力是泥石流冲击力的主要部分^[50]。在此,笔者主要针对狭义的泥石流冲击力,对部分公式中的静压力略作讨论。表 5 汇总了国内外文献中应用较多的泥石流整体冲击力公式。

表 5 所列公式中,式(1)~(3)包括动压力与静压力两个部分,式(4)~(7)只针对动压力部分。尽管总压力包含的内容不同,但是对于动压力部分,中外学者的思路基本一致,都是根据动量定理可推得: $P=\rho v^2$ ^[36]。考虑到泥石流的非均质性,在应用中都在基于均值流体冲击力计算公式的基础上乘以经验系数

α 。关于 α 的取值,国外学者给出了不同的范围, α 的取值与流体的运动特征、均匀程度和物质组成有关。部分文献中反映,泥石流流速较快、碰撞时能在垂直方向激起较高涌浪、并且流体容重较小时,系数 α 取较小值;泥石流容重较大时,内部阻力也相对较大,遇到沟内拦挡构筑物时流体中易形成回波,系数 α 取较大值^[55]。铁二院认为,该系数为受力体的形状系数,与沟内阻挡构筑物的形状有关,并给出了具体的取值范围,但是铁二院给出的该系数最大取值小于 1.5,与国外文献相比明显偏小。

表 5 泥石流整体冲击力估算经验公式一览表

Table 5 Empirical equations for the entire impact force of debris flows

序号	公式形式	提出者
1	$P = \rho v^2 + \frac{1}{2} \rho gh$	Zanchetta ^[33]
2	$F = \rho qv + \frac{1}{2} \rho gh^2$	Armanini ^[51]
3	$P = \alpha \rho v^2 + \frac{1}{2} k \rho gh$	Hübl ^[52]
4	$F = \rho A v^2 \sin \beta$	Hungr ^[25]
5	$P = 4.72 \times 10^5 v^2 D$	池谷浩 ^[48]
6	$P = \lambda \rho v^2 \sin \beta$	铁二院 ^[49]
7	$P = K \rho v^2$	章书成 ^[53]

公式中符号的意义: P 为冲击力(Pa); ρ 同 γ_c ; h 为泥石流流体厚度(m); F 为总冲击力(N),公式(4)中为单宽冲击力(N/m); α 与 k 为经验系数; A 为流体横截面积(m²); β 为流动方向与障碍物朝向间的最小夹角; D 为石块半径(m); λ 为受力体形状系数; K 为不均匀系数;其余同前表。

静压力部分,一般按均质流体在竖直拦挡坝表面的压力分布呈三角形考虑,因此平均静压力为 $0.5\rho gh$ 。针对泥石流这种复杂流体,通常需乘以经验系数 k 。详细讨论该系数的文献较少,Hübl 认为, k 值应在 10 左右浮动^[51]。

3.2 泥石流中巨石冲击力

泥石流中巨石冲击力通常是造成泥石流路径上构筑物破坏的祸首。泥石流流体中的漂砾,以点接触方式碰撞建筑物,从而引起构件呈剪切或弯矩形式的断裂破坏^[11]。表 6 汇总了国内外文献中应用较多的泥石流巨石冲击力公式。

根据泥石流巨石冲击力计算所依据的理论基础,可将国内外泥石流巨石冲击力估算公式分为三类。第一类公式,依据弹性波动理论,如式(1)。将泥石流流体内石块冲击构件视为一个动态过程,认为冲击荷载作用不是立即传递到石块的所有部分,而是以一定的

波速扩散到其他部分;并且假定巨石冲击力的大小与石块材料性质和泥石流速度有关,与被撞物的性质和条件无关。由于在野外确定巨石冲撞击构筑物时的接触面积非常困难,所以,若能根据经验给出巨石与构筑物碰撞时的接触面积,则该公式具有一定的实用性。

表 6 泥石流中巨石冲击力常用计算公式
Table 6 Empirical equations for the impact force
of boulders in debris flows

序号	公式形式	提出者
1	$F = \rho_d C V_d A_d$	章书成 ^[56]
2	$F = \frac{M V_d}{T}$	吴积善 ^[48]
3	$F = \sqrt{\frac{3 E J V_d^2 W}{g l^3}}$	章书成 ^[53]
4	$F = \sqrt{\frac{48 E J V_d^2 W}{g l^3}}$	章书成 ^[53]
5	$F = \gamma V_d \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}}$	王继康 ^[54]
6	$P = \sqrt{M V_d K}$	Hungr ^[25]

公式中符号的意义: C 为纵波波速 (m/s); A_d 为石块与被撞物体的接触面积 (m²); F 为石块冲击力 (N); V_d 为石块运动速度; ρ_d 为巨石密度 (kg/m³); T 为大石块与坝体的撞击历时 (s); M 为巨石质量 (kg); E 为构件的弹性模量 (kPa); J 为截面对中心轴的惯性矩 (m⁴); W 为巨石重量 (kN); l 为构件长度 (m); γ 为动能折减系数; α 为受力面与泥石流撞击力方向所夹的角 (°); C_1, C_2 为巨石与建筑物的弹性变形系数 (m/kN); P 为冲击力 (kN); K 为被撞建筑物的刚度系数 (kg/s²)。

第二类公式,依据动量定理,如式(2)。如果泥石流流速可以确定,则巨石冲击力容易获取。但是,该式假设巨石与坝体碰撞后的速度立刻减为零,没有考虑石块反弹情况;其次将巨石与坝体撞击历时人为定为 1s 的依据不足,并且可能偏长。因此该式的适用性有限,只能用于粗略估计,目前文献中也鲜见应用。

第三类公式将被撞建筑物简化为梁、墩等结构,根据材料力学理论推导,如式(3)~(6)。式(3)将台柱、直立跌水井等概化为悬臂梁;式(4)则将软地基上两岸较坚实的坝、闸、拦栅等概化为简支梁;式(5)引入桥梁设计中船筏撞击力公式计算泥石流沟中桥梁墩台被破坏所需要的撞击力,成昆线利子依达沟和东川达德沟桥墩台设计中引用此式,其他工程也应用较多^[57]。式(6)是一个概括性的公式,当被撞建筑物可以简化为悬臂梁或简支梁时,对应式(3)、(4)。

从适用性来看,若拦挡建筑物结构复杂、不能概化为简单结构时,或构筑物结构形式未知时,则式(3)~(6)不适用。笔者认为,这种条件下可根据泥石流巨石与构筑物碰撞接触面积的经验值,采用公式(1)粗

略估算巨石冲击力。目前,在泥石流调查评价中,该公式的使用频率较高^[12,58]。

4 结论

(1)对于泥石流容重,目前的估算方法以基于单个或多个因素的简单统计方法为主,主要考虑了容重影响较大的颗粒组成因素。建立适合于各个地区、不同类型泥石流颗粒级配与容重的统计关系应是今后研究的趋势。

(2)对于泥石流流速的估算,国内学者在不同地区建立了适用于当地地质环境的曼宁改进公式,部分研究者提出了用其他指标代替糙率系数的曼宁修正公式;国外学者对基于强迫涡流理论、以弯道超高为主要参数的公式研究较多,这两类公式之间所得量值的差异目前尚不清楚。

(3)泥石流冲压力的估算都是基于动量定理,考虑泥石流特点乘以经验系数。对巨石冲击力的估算,通常将拦挡建筑物概化为某种简单结构形式,按照弹性力学的理论公式来计算,在构筑物的结构形式未知或不易简化时,则按弹性波动理论的公式估算。

参考文献:

- [1] 章书成. 泥石流研究述评[J]. 力学进展, 1983, 19(3): 365 - 375. [ZHANG S C. A review on the research of debris flow[J]. Advances In Mechanics, 1983, 19(3): 365 - 375. (in Chinese)]
- [2] 刘希林. 国外泥石流机理模型综述[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 1 - 6. [LIU X L. An Overview of Foreign Debris Flow Mechanism Models [J]. Journal of Catastrophology, 2002, 17(4): 1 - 6. (in Chinese)]
- [3] Lorenzini G. Debris Flow[M]. UK: WIT Press, 2003: 50 - 132.
- [4] 李培基, 梁大兰. 泥石流容重及计算[J]. 泥沙研究, 1982(3): 75 - 83. [LI P J, LIANG D L. Debris flow density and its caculation [J]. Journal of Sediment Research, 1982(3): 75 - 83. (in Chinese)]
- [5] 甘肃省交通科学研究所, 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 泥石流地区公路工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981: 59. [Gansu Provincial Communications Science Research Institute, Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS. Highway Engineering in the Debris Flow District[M]. Beijing: China Communications Press, 1981: 59. (in Chinese)]

- [6] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 11 - 38. [Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS. Debris Flow in Gansu Province[M]. Beijing: China Communications Press, 1982: 11 - 38. (in Chinese)]
- [7] 史正涛, 祁龙. 甘肃省文县关家沟泥石流综合治理[J]. 山地研究, 1997(2): 124 - 128. [SHI Z T, QI L. Synthetical Control of Debris Flow in Guanxia Gully, Wenxian County, Gansu Province[J]. Journal of Mountain Research, 1997(2): 124 - 128. (in Chinese)]
- [8] 蔡祥兴, 李鸿琰, 崔炳田. 马槽沟泥石流防治工程初探[J]. 水土保持通报, 1982, 9(6): 50 - 60. [CAI X X, LI H L, CUI B T. Exploring and Discussing of the Debris Flow Control Engineering in Macao Gully [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1982, 9(6): 50 - 60. (in Chinese)]
- [9] 中科院 - 水利部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: 38. [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Debris Flow in China[M]. Beijing: The Commercial Press, 2000: 38. (in Chinese)]
- [10] 陈宁生, 杨成林, 李欢. 基于浆体的泥石流容重计算[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(2): 168 - 173. [CHENG N S, YANG C L, LI H. Calculation of the debris flow concentration based on debris flow slurry [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2010, 37(2): 168 - 173. (in Chinese)]
- [11] 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: 58. [CHENG G X, WANG J K, WANG L H. Prevention and Control of Debris Flow[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983: 58. (in Chinese)]
- [12] 余斌, 杨永红, 苏永超, 等. 甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 437 - 444. [YU B, YANG Y H, SU Y C, *et al.* Research on the Giant Debris Flow Hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 437 - 444. (in Chinese)]
- [13] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789 - 796. [YU B. Research on the Calculating Density by the Deposit of Debris Flows [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 789 - 796. (in Chinese)]
- [14] 余斌. 稀性泥石流容重计算的改进方法[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 70 - 75. [YU B. Research on the Improved Calculating Density of Less Viscosity Debris Flows [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(1): 70 - 75. (in Chinese)]
- [15] 杜榕桓. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社分社, 1987: 100. [DU R H. A Comprehensive Investigation and Control Planning For Debris Flow in the Xiaojiang River Basin of Yunnan Province [M]. Chongqing: Scientific and Technical Documentation Press Branch, 1987: 100. (in Chinese)]
- [16] 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(3): 164 - 174. [CHENG N S, CUI P, LIU Z G, *et al.* Calculation of the Debris Flow Density based on the Content of Clay Particles [J]. Science in China Series E, 2003(3): 164 - 174. (in Chinese)]
- [17] 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 58. [WU J S. Observation and Research of Debris Flow in Jiangjia Gully in Yunnan Province [M]. Beijing: Science Press, 1990: 58. (in Chinese)]
- [18] Chow V T. Open Channel Hydraulics [M]. New York: Mac - Graw Hill, 1959: 680.
- [19] Matthias Jakob. Debris - flow Hazards and Related Phenomena [M]. SpringerLink, 2005: 429.
- [20] Herbert AULITZKY. The debris flows of Austria [J]. Bulletin of the international association of engineering geology, 1989, 1(40): 5 - 13.
- [21] Dieter Rickenmann. Empirical relationships for debris flows [J]. Natural Hazards, 1999(19): 47 - 77.
- [22] Takahashi T. High velocity flow in steep erodible channels [C] // Lausanne. Proceedings 22nd IAHR Congress: Session A. Switzerland: Techn, 1987: 42 - 53.
- [23] Dieter Rickenmann. An alternative equation for the mean velocity in gravel - bed rivers and mountain torrents [C] // Proceedings ASCE 1994 National Conference on Hydraulic Engineering. New York: [s. n.], 1994: 672 - 676.
- [24] Pierre Y, Julien, Anna Paris. Mean velocity of mudflows and debris flows [J]. Journal of hydraulic engineering, 2010, 136(9): 676 - 679.
- [25] Hungr O. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(4): 663 - 667.

- [26] 矢野義男. 泥砂、泥石流、滑坡、崩塌防治工程手册 [M]. 谭炳炎, 孟河清, 译. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1989. [Yoshio Yano. Muddy Sand, Debris Flow, Landslide, Collapse Control Engineering Handbook [M]. TAN B Y, MENG H Q, translate. Chongqing: Scientific and Technical Documentation Press Branch, 1989. (in Chinese)]
- [27] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理及灾害防治 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 115. [FEI X J, SHU A P. Movement Mechanism and Disaster Control for Debris Flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 115. (in Chinese)]
- [28] McClung D M. Superelevation of flowing avalanches around curved channel bends [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(8): 489 – 498.
- [29] Suwa H, Yamakoshi T. Estimation of debris-flow motion by field surveys [C]//Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. Proceedings of the second international conference. Rotterdam: AA Balkema, 2000: 293 – 299.
- [30] Mark H Bulmer, Olivier S Barnouin – Jha, Mathew N Peitersen, *et al.* An empirical approach to studying debris flows: Implications for planetary modeling studies [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(E5): 1 – 14.
- [31] VanDine D F. Debris flow control structures for forest engineering [R]. UK: British Columbia Ministry of Forests Research, 1996.
- [32] Chen C – L. Comprehensive review of debris flow modeling concepts in Japan [C]// Costa J E, Wiczorek G F. Reviews in engineering geology, vol V II. Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation. USA: The Geological Society of America, Boulder, CO, 1987: 13 – 29.
- [33] Zanchetta G. Characteristics of May 5 – 6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 133: 377 – 393.
- [34] Robert H Webb, Patrick T Pringle. Debris flow from tributaries of the Colorado River, Grand Canyon National Park, Arizona [M]. Washington: United States Government Printing Office, 1989: 3 – 5.
- [35] 中国科学院甘肃省冰川冻土沙漠研究所. 泥石流 [M]. 北京: 科学出版社, 1973: 44. [Institute of glacier, taele and desert in Gansu Province, CAS. Debris Flow [M]. Beijing: Science Press, 1973: 44. (in Chinese)]
- [36] 吴积善. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 171 – 188. [WU J S. Debris Flow and Comprehensive Regulations [M]. Beijing: Science Press, 1993: 171 – 188. (in Chinese)]
- [37] 刘德昭. 稀性泥石流流速公式的选择及其陡坡流速公式糙率系数的分析 [C]//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第 4 号. 北京: 科学出版社, 1985: 190 – 198. [LIU D Z. Selection of Velocity Equation for non – viscous Debris Flow and Analysis of Roughness Coefficient [C]// Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Fourth Proceedings of the Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Beijing: Science Press, 1985: 190 – 198. (in Chinese)]
- [38] 刘丽, 陈洪凯. 泥石流运动学研究现状及趋势 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29 (2): 233 – 239. [LIU L, CHEN H K. Research Status and Trend about Dynamics of Debris Flow [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29 (2): 233 – 239. (in Chinese)]
- [39] 胡向德, 黎志恒, 魏洁, 等. 舟曲县三眼峪沟特大型泥石流的形成和运动特征 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 82 – 87. [HU X D, LI Z H, WEI J, *et al.* Formation and Kinematic Characteristics of the Debris Flow Disaster at the Sanyanyu Gulley, Zhouqu County of Gansu Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38 (4): 82 – 87. (in Chinese)]
- [40] 国土资源部. DZ/T0220 – 2006 泥石流灾害防治工程勘察规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Minister of Land and Resources. DZ/T0220 – 2006 Investigation Specification for Debris Flow Hazard Controlling Engineering. Beijing: China Standards Press, 2006. (in Chinese)]
- [41] 国土资源部. DZ/T0239 – 2004 泥石流灾害防治工程设计规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. [Minister of Land and Resources. DZ/T0239 – 2004 Design Specification for Debris Flow Hazard Controlling Engineering. Beijing: China Standards Press, 2004. (in Chinese)]
- [42] 舒安平, 费祥俊. 粘性泥石流运动流速与流量计算 [J]. 泥沙研究, 2003(3): 7 – 11. [SHU A P, FEI X J. Calculation for Velocity and Discharge of the Viscous Debris Flow [J]. Journal of Sediment Research, 2003(3): 7 – 11. (in Chinese)]

- [43] 杨针娘. 暴雨型粘性泥石流流速公式的初步探讨 [C]//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第4号. 北京: 科学出版社, 1985: 199 - 206. [YANG Z N. Preliminary Discuss of Velocity Equations for Viscous Debris Flow of Rainstorm Type [C]// Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Fouth Proceedings of the Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Beijing: Science Press, 1985: 199 - 206. (in Chinese)]
- [44] 康志成. 云南东川蒋家沟粘性泥石流流速分析 [C]//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第4号. 北京: 科学出版社, 1985: 104 - 108. [KANG Z C. Velocity Analysis of Viscous Debris Flow in Jinagjia Gully, Dongchuan County, Yunnan Province [C]//Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Fouth Proceedings of the Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Beijing: Science Press, 1985: 104 - 108. (in Chinese)]
- [45] 刘江, 程尊兰. 云南盈江浑水沟泥石流流速计算 [C]//中国科学院成都地理研究所. 泥石流论文集(1). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981: 87 - 89. [LIU J, CHENG Z L. Velocity Caculation of Debris Flow in Hunshui Gully, Yingjiang County, Yunnan Province [C]//Institute of mountain hazards and environment. First Proceedings of Debris Flow. Chongqing: Scientific and Technical Documentation Press Branch, 1981: 87 - 89.]
- [46] 吴积善. 泥石流流态及流速计算 [C]//中国科学院成都地理研究所. 泥石流论文集(1). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981: 79 - 86. [WU J S. Debris Flow Regime and Velocity Caculation [C]// Institute of mountain hazards and environment. First Proceedings of Debris Flow. Chongqing: Scientific and Technical Documentation Press Branch, 1981: 79 - 86. (in Chinese)]
- [47] 余斌. 粘性泥石流的平均运动速度研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 524 - 532. [YU B. Study on the Mean Velocity of Viscous Debris Flows [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 524 - 532. (in Chinese)]
- [48] 康志成. 中国泥石流研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 181 - 183. [KANG Z C. Research of Debris Flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 181 - 183. (in Chinese)]
- [49] 马欢, 张绍和, 刘卡伟. 泥石流运动参数的计算方法 [J]. 西部探矿工程, 2010(6): 122 - 125. [MA H, ZHANG S H, LIU K W. Caculation Methods of Debris Flow Movement Parameters [J]. West - China Exploration Engineering, 2010(6): 122 - 125. (in Chinese)]
- [50] YANG Hongjuan, WEI Fangqiang. Measuring the internal velocity of debris flow using impact pressure detecting in the flume experiment [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 8(2): 109 - 116.
- [51] Armanini A, Scotton P. On the dynamic impact of a debrisflow on structures [C]// IAHR. Proceeding of the XXV IAHR Congress. Tokyo: [s. n.], 1993: 203 - 210.
- [52] Hübl J. Debris flow impact estimation [J]. International symposium on water management and Hydraulic engineering, 2009(9): 137 - 148.
- [53] 章书成. 泥石流冲击力及其测试 [C]//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第4号. 北京: 科学出版社, 1985: 269 - 274. [ZHANG S C. Debris Flow Impact Force and Measurement [C]//Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Fouth Proceedings of the Institute of Glacier and Tael in Lanzhou, CAS. Beijing: Science Press, 1985: 269 - 274. (in Chinese)]
- [54] 王继康. 泥石流防治工程技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996: 81. [WANG J K. Techniques of controlling engineering for debris flow [M]. Beijing: China Railway Press, 1996: 81. (in Chinese)]
- [55] Watanabe M, Ikeya H. Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima, Japan [C]// International Association on Hydrology. Erosion sediment transport measurement. Florence: Science Publication, 1981: 245 - 256.
- [56] 章书成, Hungr O. 泥石流中巨石冲击力计算 [C]//杜榕桓. 泥石流观测与研究. 北京: 科学出版社, 1996: 67 - 72. [ZHANG S C, Hungr O. The Caculation of Impact Force of Boulders in Debris Flow [C]//DU R H. Debris Flow Observation and Research. Beijing: Science Press, 1996: 67 - 72. (in Chinese)]
- [57] 王磊, 沈娜. 5.12地震引发潜在泥石流灾害的调查评价——以四川省德阳绵竹市龙形沟泥石流为例 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1300 - 1311. [WANG L, SHEN N. Investigation of Potential Debris Flow Caused by the May 12 Earthquake——Taking Longxing Gully debris flow in Mianzhu city, Sichuan, China as example [J]. Chinese Journal of

- Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1300–1311. (in Chinese)]
- [58] 唐川,李为乐. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2011, 36(1): 172–180. [TANG C, LI W L. Field Investigation and Research on Giant Debris Flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, Epicenter of Wenchuan Earthquake [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 172–180. (in Chinese)]

Comparison of methods used at home and abroad to estimate the key parameters of a debris flow

JIANG Shu, WEN Bao-ping

(Water Resources and Environment School, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The density, velocity and impact force are three key parameters among those representing the characteristics of debris flow dynamics. Following review of literatures about estimation of those parameters at home and abroad, the methods for estimating these parameters are summarized and compared. The results show that there is no method applied to all kinds of debris flows in the world, and that present empirical equations for the three parameters can only be applied locally due to the complexity of the constitutes and the movement of debris flows. At present, it may be the most practical to establish different empirical equations according to the specialty of debris flows at different areas. The statistical methods to establish the multivariable equations considering particle size groups may be more reasonable among the estimations of density. The empirical equations for a debris flow's velocity are different among China, former Soviet Union and the Western countries. The former two is based on the Manning's equation, and the Western countries use the forced vortex equation with superelevation in channel bends as the major parameter. Momentum theorem is the basic theory to estimate the impact force in the world, whereas differences lie in the empirical coefficients. The characteristics of the blocking structures are generally taken into account in terms of the impact of boulders of debris flows.

Key words: debris flow; density; velocity; impact force; empirical equations

责任编辑:汪美华

· 封面说明 ·

汪民巡查三峡库区地质灾害防治工作

4月24日~25日,国土资源部党组成员、副部长,中国地质调查局局长汪民率领有关单位、部门负责人和专家,乘船先后到万州、云阳光、奉节、巫山、巴东、秭归、宜昌等沿江流域,巡查了三峡库区近20个重大地质灾害点和库岸边坡。汪民说,汛期即将到来,我们要一如既往地加强三峡库区地质灾害防治和监测预警工作,特别是县城和集镇所在地,要加强监测看护和应急值守,确保城镇建设中的地质安全。在政府换届工作中,各级分管领导要做好交接和衔接,要尽快熟悉情况,加强组织培训,切实抓好落实。要加强地质灾害防治新技术的研发工作,推广成功经验和做法,为全国地质灾害防治工作发挥典型示范和技术引领作用,为把地质灾害造成的人员伤亡和财产损失降到最低限度做出新贡献。

范宏喜/摄