

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201907024

泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

黄 海^{1,2}, 刘建康^{1,2}, 杨东旭^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734)

摘要: 为了探索泥石流容重在不同时空条件下的动态演化特征及其影响机制, 基于蒋家沟 1995 年以来的泥石流观测数据和汶川震区 2008 年以来的调查资料, 研究了典型泥石流灾害的水土耦合过程和容重动态变化的互馈作用, 对比分析了常用的容重计算方法在汶川震区泥石流计算中的差异性, 并从计算公式和灾害特征两方面探索误差产生的原因。结果表明: 容重随泥石流孕灾条件的时空演化而动态变化; 在时间尺度上, 物源活动性与容重呈正相关, 物源赋存状态从极度活跃演化至高度活跃时, 容重将下降 10.0% ~ 27.8%; 泥石流峰值流量与容重成幂函数关系, 容重随着流量增大而增大, 但具有明显的上限值; 在空间尺度上, 容重与沟床纵比降变化趋势一致, 随着侵蚀作用而增大, 淤积作用而减小; 常用的 6 种泥石流容重计算方法在龙门山区的应用结果偏差幅度为 10% ~ 30%, 仅使用某种计算方法确定容重参数将导致一定误差。文章最后利用物质组成计算容重的方法, 基于冲淤总量和颗粒参数建立了不同沟道段泥石流容重经验计算公式, 并在雍家沟泥石流进行应用, 结果显示该方法针对具有完整序列观测资料的泥石流沟, 具有较好的适用性。

关键词: 泥石流; 容重; 动态演化; 孕灾条件; 计算方法

中图分类号: P642.3; TV144

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)02-0161-08

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density

HUANG Hai^{1,2}, LIU Jiankang^{1,2}, YANG Dongxu^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan 611734, China;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu, Sichuan 611734, China)

Abstract: Density is the most fundamental parameters in the calculation of debris flow movement characteristics. In order to explore the dynamic evolution of the debris flow density under different spatial-temporal conditions, based on the observation data of debris flow in the Jiangjia Gully since 1995 and the investigation data of debris flow hazards occurred in the Wenchuan earthquake area since 2008, the interaction of fluid-soil coupling process and density of typical debris flow disasters is studied, and several methods of density calculation are used in the Wenchuan earthquake area and the differences in the calculation formula establishment and the disaster characteristics are analyzed. The results show that the density changes dynamically with the evolution of formation conditions of debris flow. On the temporal scale, the activity of the solid materials in the gully is positively related to the density, and the density will decrease by 10.0% ~ 27.8% when the solid materials evolve to highly active from extremely active. There is a power function relationship between the density and peak flow of debris flow, and it has an obvious limit when the density increases with the increasing flow. On the spatial scale, the change trend of density is consistent with the

收稿日期: 2019-07-24; 修订日期: 2019-11-19

基金项目: 四川省国土资源厅“8.8”九寨沟地震灾区生态化地质灾害防治重大科技支撑研究课题(KJ-2018-24); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190644; DD20160251; 12120113011000); 支撑服务川藏铁路规划建设地质调查(20190505)

第一作者: 黄海(1984-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事泥石流灾害防治理论与技术研究。E-mail: 52134170@qq.com

channel gradient, which increases with erosion and decreases with sedimentation. The deviation of these calculation results in the Longmen mountain area is in the range of 10 ~ 30% , suggesting that using only one method for density calculation is very much likely imprecise. Empirical formula are established based on the total amount of erosion and deposition, and particle parameters are practically applied to the debris flow at the Yongjia Gully. The research lays a foundation for calculation of the density based on the disaster history and evolution of geological conditions, and are of practical guidance significance in the evaluation and prevention of debris disaster and the calculation of dynamic parameters.

Keywords: debris flow; density; dynamic evolution; formation condition; calculation method

泥石流是一种含有大量泥沙块石的多相流体,也是山区常见的地质灾害^[1]。近 20 年来,我国开展了大量泥石流灾害治理,尤其是在西南地区的泥石流灾害高易发区,以龙门山区、滇西地区、川西地区及秦岭山区为代表,取得了显著的社会效益和经济效益。但是,在泥石流治理工程运行中还存在一些不足,如拦砂坝结构破坏、冲出量超出设计标准、排导槽漫流等。其重要原因之一是治理工程的勘查设计阶段对灾害体的物理特征参数计算存在较大误差,影响工程结构可靠度计算和防灾效益分析,导致泥石流灾害破坏力超出了工程的防灾能力。

泥石流容重是决定流速、流量、一次冲出量、冲击力等参数的基础物理量^[2]。国外泥石流灾害防治主要依据现场观测取样测定单沟泥石流容重,部分学者在早期探索了泥石流颗粒组成与容重的关系^[3-7],建立了相关经验公式^[8-9]。国内由于泥石流灾害分布广泛且监测预警系统不完善,研究者们通过对沉积物特征、灾害形成条件等进行统计分析,从已发生的单次泥石流灾害和泥石流沟流域背景两个不同尺度,构建了十余个不同区域的泥石流容重经验计算公式,为泥石流灾害风险评估和工程治理奠定了理论支撑和实践基础^[10]。泥石流灾害治理实践中,基本假定未来暴发的泥石流灾害类同于近期已发生的灾害事件,采取现场试验法、沉积物测试法及打分法等确定容重等参数。实际上泥石流灾害暴发过程极其复杂,不同的物源条件和水源条件下,其容重参数相差很大,根据蒋家沟观测资料,2001 年暴发的泥石流灾害的容重实测值为 1.30 ~ 2.26 t/m³,基本横跨泥石流流体的最小容重到最大容重之间的所有可能^[11]。

本文以龙门山区和蒋家沟泥石流为研究对象,在泥石流流域孕灾条件演化的时间尺度上,从物源特征和水力条件两个参数分析了容重的变化规律;在泥石流流体沿沟道演化的空间尺度上,分析了冲淤特征与容重增减之间的定量关系,为建立基于孕灾背景和运

动特征的容重动态计算方法奠定基础。

1 泥石流容重的时空变化特征

容重是描述泥石流流体固体物质含量多少的参数,一定程度上反映了灾害的水土耦合过程,也是泥石流动力特征参数计算中的基础参数^[12],其不仅影响泥石流运动特征参数的量值,还影响泥石流灾害致灾方式和风险评价^[13]。泥石流固体物质粒径跨度大,不均匀系数多达数百甚至上千^[14],复杂的固体物质组成导致泥石流容重的精确计算具有较大的困难。在泥石流流体中,固体物质组分是影响容重差异性的主要因素,黏粒物质(<0.005 mm)含量主要决定泥石流浆体的流体特性,粗颗粒物质(>2.0 mm)尤其是大块石(>1.0 m)含量则控制泥石流容重的上限值^[11]。在不同的时空条件下,容重参数是动态变化的,时间条件上,每一次泥石流灾害的孕灾背景和激发因素都是独特的,同一条沟在不同时间暴发的泥石流灾害的容重基本不会相同;空间条件上,泥石流运动过程受沟道微地貌影响,流体在沿沟道运移过程中,不断产生床沙交换,单次泥石流在不同沟道段的容重也是不断变化的。

泥石流启动与运动实际就是水土耦合的过程,不同的水力条件和物源赋存状态均影响泥石流物质补给量,从而影响容重参数。不同期次的泥石流灾害其孕灾背景差异性极大,在启动机制、物源补给及运动过程等方面均存在不可重复性,因此,受固体物质抗侵蚀能力和径流侵蚀能力对比的波动的影响,不同期次泥石流灾害的容重具有较大差异,如表 1。

一次典型沟谷泥石流灾害包括清水区形成地表径流、形成区启动物源形成多相流体、流通区床沙交换冲淤输移、堆积区动态平衡堆积四大过程。泥石流通过物源区后,流体由清水演变成泥石流,容重达到最大上限值,其上限值与物源活跃性及流体携沙能力成正相关。流体进入流通区后,沟道纵比降低,沟谷宽度增大,泥深和流速均较形成区小,流体携带固体物质能力

下降,在由陡变缓段沟道产生淤积,泥石流容重将降低;而进入沟道比降增大段,流体将产生冲刷,容重一定程度上将增大,因此流通区的泥石流容重处于动态波动状态。如丹巴县城后山的干桥沟,沟谷地形具有“陡-缓-陡-缓”的特征,容重自上游至下游呈现增大-减小-增大-减小的特点^[19],对应泥石流运动过程的冲刷-淤积-冲刷-淤积的冲淤特征。

表1 不同期次泥石流容重差异性统计

Table 1 Values of the density in different debris flow

序号	蒋家沟(小江流域)		文家沟(绵远河流域)	
	时间	容重 $\gamma/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	时间	容重 $\gamma/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$
1	1996-07-19	1.20 ~ 1.50	2010-08-13	2.20 ~ 2.24
2	1997-06-21	1.42 ~ 1.71	2013-07-08	1.80
3	1999-07-16	1.53 ~ 1.96	—	—
4	2007-07-25	2.00 ~ 2.25	—	—

注:蒋家沟泥石流容重数据引自东川站观测数据文集^[15];文家沟2010年泥石流灾害容重引自游勇^[16]和余斌^[17],2013年容重引自许强^[18]。

根据中国地质调查局北川泥石流灾害监测与防治技术野外试验基地的监测资料和堆积物取样分析,张家坪沟泥石流容重在四个区域表现出明显差异性(图1)。以2017年暴发的灾害为例,清水区在降雨产流作用下形成清水或含沙水流,容重 $\gamma \leq 1.3 \text{ t/m}^3$;进入物源区后,沟道内堵塞体溃决放大,且沟道纵比降达75.93%,容重 γ 最大达 2.32 t/m^3 ,表现出一定程度的坡面泥石流特征;泥石流沿基岩沟床输移至出山口后,沟床纵比降下降至35.34%,沟道宽度由形成区的1.5~2.0 m拓宽至5.0~6.7 m,流体内粒径 $D > 0.35 \text{ m}$ 的大颗粒沿沟道产生沉积,容重减少至 1.88 t/m^3 。

在工程治理实践和风险评价中较少考虑沿沟道的物质输移特征变化。当泥石流防治工程布设于流域中上游的形成流通区时^[20],不同沟道段需采用不同的容重参数,以固定的容重值进行流域性分析具有较大误差。

2 常用容重计算方法及验证

泥石流容重参数包括已发生和预测两方面内容。前者主要用于分析历史灾害事件,在工程治理中利用类比法也用于确定单沟泥石流特征参数;后者描述泥石流沟在一定时间段内的孕灾特征,对泥石流治理和风险评价至关重要。

泥石流暴发过程中对流体取样测试是容重参数最准确而直接的获取方法。但取样测试方法依然存在一定的局限性,主要受取样容器规格和取样时机的影响。



图1 泥石流容重沿沟道变化示意图(北川张家坪沟)

Fig. 1 Sketch of the change in density in debris flow gully (the Zhangjiaping gully)

蒋家沟泥石流含大块石较少,主要粗颗粒粒径小于0.20 m,观测站的取样设备可取回绝大部分流体样品,所得观测结果相对可靠,而对于大块石含量高的泥石流,取样测试误差依然较大。针对历史暴发的泥石流灾害,现阶段多采取配方法,目击者记忆、块石含量等因素均产生较大不确定性,因此国内学者基于泥石流沉积物特征、浆体特征、孕灾特征等因素与容重的关系建立了经验公式,试图通过间接手段定量精确描述泥石流容重。目前常用的容重计算方法如表2,其中配方法、浆体法、沉积物法以及查表法纳入了泥石流灾害勘查规范。

以上所述计算方法主要是根据小江流域、成昆铁路沿线的泥石流观测和调查资料分析总结而来,除蒋家沟具有完整的观测测试资料外,其他样本均来源于事后调查而非灾害过程取样测试,因此公式的建立和样本数据获取过程均有一定的误差。由于泥石流容重受灾害孕灾背景、启动机制及运动过程影响较大,各计算方法均存在一定的地域局限性。泥石流沿沟道运动过程的堆积是非完整沉积,因此物质组成实测法主要适用于沟口具有较完整堆积的泥石流,无法代表沟道内不同冲淤特征段的容重动态变化。孕灾背景预测法主要通过物源多寡建立容重参数,难以描述容重在沟域空间上和灾害演化时间上的动态变化。

选取汶川震区不同孕灾背景条件下的雍家沟、青林沟、哈尔木沟进行计算,分析各方法的适用性。雍家沟位于绵远河流域,龙门山中央断裂纵贯主沟,物源区

岩性以花岗岩和白云岩为主;青林沟位于都坝河流域,龙门山中央断裂从沟口横穿,沟道垂直主断层发育,物源区岩性主要为砂岩和灰岩;哈尔木沟位于杂谷脑河中游,距离汶川地震震断层约 50 km,处于薛城 S 型

构造核部,岩性主要为板岩和千枚岩^[24]。利用近 10 年暴发的泥石流灾害的沟口堆积物的颗粒分析结果,对比分析各容重计算方法在不同地区的使用效果,如表 3。

表 2 常用的泥石流容重计算方法
Table 2 General formula for common calculation of the density of debris flow

类型	序号	计算公式	作者	备注
物质组成 实测法	1	① $\gamma = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_V + \gamma_0$; ② $\gamma = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_V + \gamma_X$;	余斌 ^[21]	①不适用于水石流、泥流; ②适用于稀性泥石流。
	2	$\gamma = (0.175 + 0.734 P_2) (\gamma_s - 1) + 1$;	杜榕桓 ^[12]	泥石流灾害勘查规范推荐
	3	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 $\gamma = \lg \left[\frac{10x + 0.23}{ x - 0.089 + 0.1} \right] + e^{-20x-1} + 1.1$	陈宁生 ^[12]	泥石流灾害勘查规范推荐
	4	$\gamma = 1 + \frac{\rho_s - 1}{1 + \frac{\omega'(\rho_s - \gamma_f)}{\gamma_f - 1}}$	陈宁生 ^[22]	泥石流灾害勘查规范推荐
	5	$\gamma = \tan I + K_0 K_R K_L K_K$	朱平等 ^[22]	适用于各种类型泥石流,但存在一定经验性和区域性
孕灾背景 预测法	6	基于泥石流沟易发程度数量化评分表,查表确定容重数值	谭炳炎等 ^[23]	泥石流灾害勘查规范推荐

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);I为沟床比降(小数); K_0 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, K_A =(松散物质储备总量/流域汇水面积)^{0.11}。

表 3 典型泥石流沟不同期次灾害的堆积区容重 γ 计算结果
Table 3 Caculation of the density in the fans of various debrisflow

沟名 (主河)	泥石流 暴发时间	物质组成法				孕灾背景法		计算 均值	工程治理 γ 取值
		1	2	3	4	5	6		
雍家沟 (绵远河)	2010-08-13	1.61	2.39	1.81	2.46	1.90	2.06 (122 分)	2.04	2.06
	2011-07-04	1.58	2.46	1.79	2.36	1.89		2.02	
	2012-08-08	1.57	2.49	1.80	2.36	1.88		2.03	
哈尔木沟 (杂谷脑河)	1989-06-30	1.75	2.20	2.00	—	1.43	2.01 (121 分)	1.88	1.96
	2008-09-17	1.80	2.28	1.95	2.36	1.68		2.02	
	2012-07-24	1.81	2.31	1.96	2.32	1.68		2.01	
青林沟 (都坝河)	2008-09-24	1.63	2.39	1.87	2.46	1.90	1.75 (108 分)	2.00	1.71
	2010-08-13	1.59	2.43	1.90	2.36	1.89		1.99	
	2013-07-09	1.68	2.36	1.94	2.32	1.87		1.99	

注:1989 年哈尔木沟暴发年代过于久远,无法获取岩壁或沟边壁的堆积样本,方法四未计算。

计算结果显示,不同容重计算方法偏差幅度为 10%~30%,方法二和方法四的计算值偏大。方法二的建模样本为块石含量较少的小江泥石流灾害,当推广至龙门山区时,大块石的存在使得计算结果误差增大,而方法四对浆体的取值不确定性较大。物质组成法建模时较少考虑固体物质中的巨块石含量,而实际应用样品的取得过程有较大的随机性,从而导致误差产生。此外,泥石流流体在堆积区沉积时,大量细颗粒物质随着流水进入主河,加大了泥石流采样测试结果的偏差。孕灾背景预测法的模型中较少考虑物源的演

化,以震区泥石流为例,地震作用在沟内诱发大量物源,短期内泥石流发生的临界阈值低,容重相对偏大,随着泥石流快速从极易暴发阶段进入较易暴发阶段后,物源总量变化较少,而物源活跃程度快速降低,现有孕灾背景预测法难以描述泥石流容重的动态变化。

3 孕灾条件对容重的影响

3.1 物源活跃程度对泥石流容重的影响

物源赋存状态包括物源颗粒组成、坡度及与沟道的空间关系等,与泥石流启动和侵蚀冲刷过程密切相

关。当物源处于不稳定状态,失稳土体直接进入沟道,与径流混合后,流体携沙能力快速饱和,流体容重较高,反之,容重较低。在龙门山区的多次灾害事件中,可明显看到地震诱发大量不稳定物源后,泥石流容重较震前急速增大,甚至由清水或山洪沟道演变成极度活跃的泥石流沟^[25]。相应的,汶川震区斜坡松散物质

经历 10 个水文年的快速演化,沟道物源坡度变缓、土体固结程度增大、表层土体粗化程度加大,活跃性逐步降低,在相似的水力条件下,容重呈现降低趋势,相应的泥石流规模和频次均呈现减弱趋势。通过分析 2000—2018 年的典型泥石流沟的物源情况和不同时期最大规模泥石流灾害容重,揭示了上述关系,如表 4。

表 4 典型泥石流最大规模灾害容重与物源状态
Table 4 Relationship between the occurrence state of material source and density of the debris flow

序号	沟名	2000—2008 年		2008—2015 年		2016—2018 年	
		物源状态	容重/ ($t \cdot m^{-3}$)(年)	物源状态	容重/ ($t \cdot m^{-3}$)(年)	物源状态	容重/ ($t \cdot m^{-3}$)(年)
1	哈尔木沟 ^[24]	流域上游发育 5 处中-大型滑坡,物源较丰富	1.69 (2004 年)	地震诱发大量崩滑体,大部分新增物源直接进入沟道,物源启动模式以整体滑动为主,物源总量丰富且极易补给泥石流	1.95 (2013 年)	主要中-大型滑坡整体趋稳定,物源启动模式演化为局部溜滑	1.70 (2017 年)
2	张家坪沟	流域植被覆盖率达 90% 以上,岸坡稳定,无明显物源	1.04	地震在源头诱发滑坡,坡度 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$,沟道急速下切,岸坡崩滑发育,沟道堵塞严重	2.15 (2008 年)	地震诱发滑坡趋于基本稳定,沟道侧蚀诱发小规模坡面溜滑,堵断沟道	1.88 (2017 年)
3	青林沟	流域植被覆盖率 60% 以上,斜坡坡度较陡且覆盖层较薄,重力侵蚀发育	1.20	发育巨型滑坡并形成堰塞湖,堰塞湖逐步溃决,多次形成溃决泥石流灾害链	1.80 (2010 年)	堰塞体整体稳定,前缘局部溜滑,物源主要为宽谷段沟道物源	1.50 (2017 年)
4	塔斯沟 ^[26]	流域植被覆盖率 75% 以上,沿沟道分布老泥石流侧积垄,沟道物源粗颗粒为主,较稳定	1.15	地震诱发多处斜坡表层溜滑,堆积至坡脚堆积体上,降低沿沟道老堆积体的稳定性,在侧蚀作用下整体失稳	1.80 (2010 年)	多数堆积体启动后,坡度降低,稳定性增强,沟谷宽度增大,侧蚀作用减弱	1.30
5	党家沟	流域植被覆盖率 60% 以上,受人类耕种活动和工程建设活动影响,重力侵蚀较发育	1.10	汶川地震诱发沟道零星垮塌,规模较小,斜坡岩土体受震裂影响,重力侵蚀增强,沟道由清水沟谷演化为泥石流沟	1.57 (2010 年)	震裂山体在建国以来最强降雨作用下,发育大规模滑塌,直接补给泥石流活动	2.05 (2017 年)
6	窑子沟	流域植被覆盖率 50% 以上,沿北川-青川断层发育零星崩滑	1.20	地震诱发巨型滑坡,堵塞沟道,滑坡体受沟道流水作用,滑坡整体不断往沟道滑移	2.07 (2010 年)	滑坡总体趋于稳定,滑坡体补给泥石流模式转变为局部溜滑	1.86 (2017 年)

物源的活跃程度与泥石流容重呈明显的正相关关系,而活跃程度由物源的赋存状态决定,因此可在物源活跃程度判别的基础上,探索建立物源赋存状态与泥石流容重演化之间的关系。以汶川震区泥石流为例,地震或极端降雨诱发泥石流容重增大幅度达 15.4% ~ 106.7%,增加的幅度与发震断层的距离和沟谷地形条件密切相关,如张家坪沟,形成区平均纵比降达 750.0‰,具有明显坡面泥石流特点,其容重受地震影响增幅达 106.7%。地震诱发的泥石流松散物源经历 10 a 的演化,物源从极度活跃演化为高度活跃,容重下降幅度约 10.0% ~ 27.8%。

3.2 水力条件对泥石流容重的影响

在物源条件相对一致的情况下,不同的降雨频率,激发的泥石流灾害规模具有明显区别^[27]。水力条件越好,沟道径流的流量、深度、宽度以及速度等参数越大,相应的流体的侵蚀能力、侵蚀范围以及挟沙能力均呈正相关变化。对蒋家沟 1995 年和 2007 年的观测资

料进行分析,流量对数值与容重具有正相关趋势,如图 2。由图 2 可知,泥石流容重随流量增大达到上限值后进入平稳变化阶段。当流量较小时,尤其在流量小于

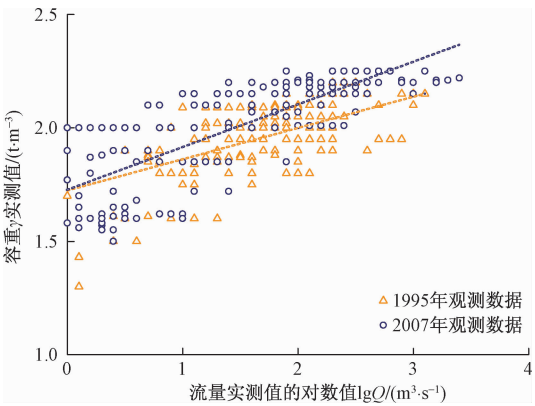


图 2 泥石流流量与容重的关系(据蒋家沟资料)
Fig. 2 Relationship between Q and γ of the Jiangjia gully debris flow

150 m³/s 时,容重随流量增加呈现快速增加的趋势,且增速不断降低。当物源活跃度减弱,水力条件对容重的影响则显著增大,甚至当水力条件不足时,不足以启动足够的松散物源,难以形成泥石流,表现在泥石流爆发的降雨临界值增大。因此,总体上水力条件对泥石流容重具有明显控制作用,当物源活动强度高时,影响相对较低,而当物源活跃降低后,容重上限值由水力条件控制。

4 容重沿沟道动态计算方法

泥石流冲出总量与沟道中活跃的固体物质量是守恒的。经过纵比降陡峻段可能产生冲刷,容重增大,而当沟道纵比降变缓,或沟道变宽,流体容重减少。泥石流固体物质的守恒关系如式(1):

$$V' = V_k + \sum_{i=1}^n V_i \quad (1)$$

式中: V' ——拟计算剖面段物质总量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$;
 V_k ——沟口堆积区物质总量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$;
 V_i ——计算沟道段至沟口各冲淤特征段的堆

积/冲刷总量,其中冲刷为负值,堆积为正值/ $\times 10^4 \text{ m}^3$ 。

利用前述的容重计算方法二所述公式,建立不同沟道段的容重 γ' 与沟口容重的比例关系,如下:

$$\frac{\gamma'}{\gamma_k} = \frac{(0.175 + 0.734P'_2)(\gamma_s - 1) + 1}{(0.175 + 0.734P_2^k)(\gamma_s - 1) + 1} = \frac{1 + 0.962P'_2}{1 + 0.962P_2^k} \quad (2)$$

$$P'_2 = \frac{V_k \times P_2^k + \sum_{i=1}^n V_i \times P_2^i}{V_k + \sum_{i=1}^n V_i} \quad (3)$$

式中: P_2^k ——沟口堆积物粒径 $> 2 \text{ mm}$ 的粗颗粒的百分含量;

P'_2 ——计算沟道段堆积物粒径 $> 2 \text{ mm}$ 的粗颗粒的百分含量;

其他参数同上。

根据雍家沟下游不同沟道段的冲淤特征(图 3),利用式(2)和(3),计算得到雍家沟 2012 年 8 月 28 日泥石流各断面的容重参数(表 5)。

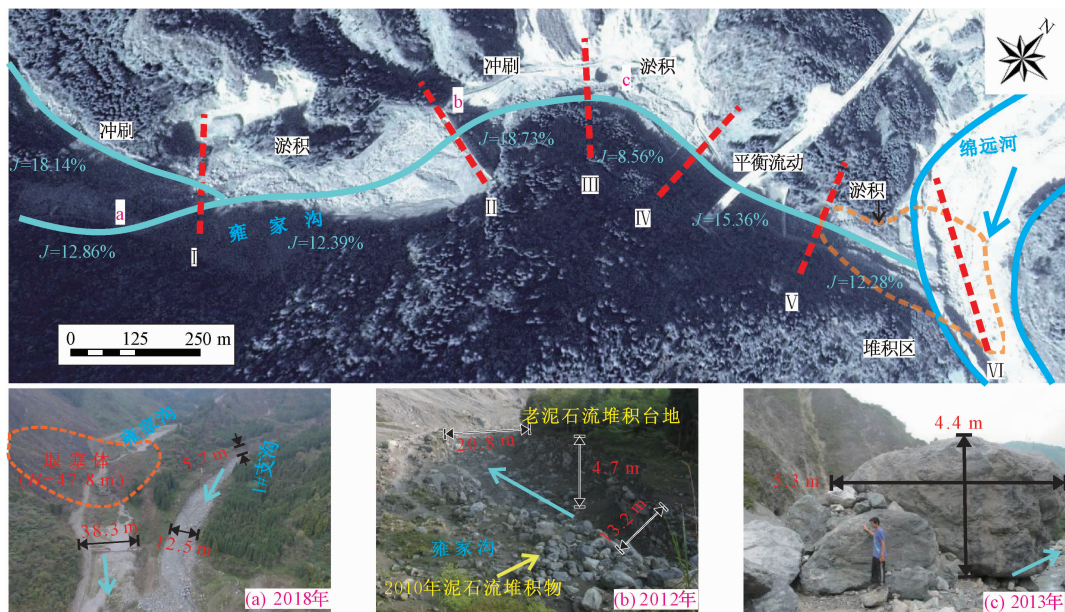


图 3 雍家沟泥石流不同沟道段冲淤特征演化(四川绵竹)

Fig. 3 Scouring and silting characteristics of the debris flow in the Yongjia gully

表 5 雍家沟泥石流容重动态计算结果

Table 5 Caculation of the density by the dynamic analysis method in the Yongjia gully $/(t \cdot m^{-3})$

沟名	沟口 (VI) γ_k	出山口 (IV) γ_e	2#拦砂坝下游 (III) γ_e	1#支沟汇入口 (I) γ_h
雍家沟	2.05	2.07	2.15	2.10

5 结论与讨论

(1) 容重是一个动态概念,在灾害演化的时间尺度上,每一次泥石流灾害的容重均不同,与沟道物源条件和水力条件呈正相关。在单次灾害运动过程的空间尺度上,容重随泥石流的运动也是不断变化的,冲刷和

淤积现象对应容重的增加与减少。

(2)常用的泥石流容重计算公式分为物质组成实测法和孕灾背景预测法,两类计算方法产生误差的原因主要为:前者通过历史泥石流特征定义未来泥石流暴发,而后者未考虑水土耦合过程的动态演化规律,均与实际灾害事件的动态演化特性不匹配。因此在防灾减灾及风险评价中,单独使用某一种方法确定沟道容重可能产生系统误差。

(3)通过分析蒋家沟及汶川震区泥石流灾害特征,揭示了物源活动程度、水力条件以及沟道冲淤特征对容重的影响规律,并基于常用容重计算公式,以历史灾害事件的沟口容重为计算基准值,建立半经验性的容重动态综合计算方法。通过雍家沟泥石流验证,该方法针对具有完整序列观测资料的泥石流沟,具有较好的适用性。

(4)泥石流容重经验计算公式受孕灾背景和启动机制所限制,现有经验计算方法均有一定的区域适宜性,本文仅初步探讨容重的动态变化特征及其影响因素,阐述的泥石流容重时空变化特征可为下一步建立基于水土耦合过程的容重计算方法奠定基础。进一步研究工作中,可基于单因素分析,探索物源赋存状态函数、降雨特征值与泥石流容重的函数关系,进而建立针对沟口的泥石流容重计算经验公式。

参考文献 (References):

- [1] 章书成. 泥石流研究述评[J]. 力学进展, 1989, 19(3): 365 - 375. [ZHANG S C. A review on the research of debris flow[J]. Advances in Mechanics, 1989, 19(3): 365 - 375. (in Chinese)]
- [2] 李培基, 梁大兰. 泥石流容重及其计算[J]. 泥沙研究, 1982(3): 75 - 83. [LI P J, LIANG D L. Debris flow density and its calculation [J]. Journal of Sediment Research, 1982(3): 75 - 83. (in Chinese)]
- [3] MAJOR J J. Depositional processes in large-scale debris flow experiments[J]. The Journal of Geology, 1997, 105(3): 345 - 366
- [4] COUSSOT P, PROUST S. Slow, unconfined spreading of a mudflow[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101 (B11): 25217 - 25229.
- [5] SCHEIDL C, RICKENMANN D. Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans[J]. Earth Surf Process Landforms, 2010, 35 (2): 157 - 173.
- [6] LI Y, ZHOU X J, SU P C, et al. A scaling distribution for grain composition of debris flow[J]. Geomorphology, 2013, 192: 30 - 42.
- [7] LI Y, WANG B L, ZHOU X J, et al. Variation in grain size distribution in debris flow[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(3): 682 - 688.
- [8] 蒋树, 文宝萍. 国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 86 - 96. [JIANG S, WEN B P. Comparison of methods used at home and abroad to estimate the key parameters of a debris flow [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39 (3): 86 - 96. (in Chinese)]
- [9] IVERSON R M. The physics of debris flows[J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245 - 296.
- [10] 刘传正. 地质灾害防治标准化建设的思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 1 - 5. [LIU C Z. Discussion on the standardization of science and technology in geological hazards prevention and control [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 1 - 5. (in Chinese)]
- [11] 中国科学院-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 - 39. [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS. Debris flow in China [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000: 38 - 39. (in Chinese)]
- [12] 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 (B12): 164 - 174. [CHEN 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, 33(B12): 164 - 174. (in Chinese)]
- [13] 郭志学, 方铎, 曹叔尤, 等. 泥石流入汇条件下交汇区的流动特性[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 468 - 471. [GUO Z X, FANG D, CAO S Y, et al. Flow characteristic in conjunction area after confluence of debris flow and main river[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 468 - 471. (in Chinese)]
- [14] 韩慕吾. 泥石流容重的确定[J]. 水土保持通报, 1985, 5(1): 48 - 50. [HAN M W. Determination of density of debris flow[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1985, 5(1): 48 - 50. (in Chinese)]
- [15] 康志成. 中国科学院东川泥石流观测研究站观测实验资料集 (1995—2000) [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 10 - 178. [KANG Z C. Data collection of Dongchuan debris flow observation and research station Chinese academy of science [M]. Beijing: Science Press, 2007: 10 - 178. (in Chinese)]

- [16] 游勇,陈兴长,柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J]. 灾害学,2011,26(4): 68-72. [YOU Y, CHEN X C, LIU J F. “8.13” extra large debris flow disaster in Wenjia gully of Qingping township, Mianzhu, Sichuan province [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 68-72. (in Chinese)]
- [17] 余斌,马煜,吴雨夫. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 工程地质学报,2010,18(6): 827-836. [YU B, MA Y, WU Y F. Investigation of severe debris flow hazards in Wenjia gully of Sichuan Province after the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 827-836. (in Chinese)]
- [18] 许强,李骅锦,何雨森,等. 文家沟泥石流治理工程效果的定量分析评价[J]. 工程地质学报,2017,25(4): 1046-1056. [XU Q, LI H J, HE Y S, et al. Quantitative evaluation of engineering treatments for prevention of debris flow at Wenjia gully [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1046-1056. (in Chinese)]
- [19] 黄海,石胜伟,刘建康. 大渡河上游干桥沟泥石流发育特征与防治方法[J]. 水土保持研究,2015, 22(5): 354-357. [HUANG H, SHI S W, LIU J K. Characteristics and countermeasures of debris flow of Ganqiao gully in the upper Dadu river [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 354-357. (in Chinese)]
- [20] 李德华,许向宁,吉峰,等. 汶川县映秀镇红椿沟特大泥石流工程防治及初步效果分析[J]. 工程地质学报,2013,21(2): 260-268. [LI D H, XU X N, JI F, et al. Engineering management and its effect of large debris flow at Hongchunvalley in Yingxiutown, Wenchuan county [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 22(2): 260-268. (in Chinese)]
- [21] 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)]
- [22] 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. [CHEN 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)]
- [23] 国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘察规范: DZ/T0220—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Minister of Land and Resources. Investigation specification for debris flow hazard controlling engineering: DZ/T0220—2006 [S]. Beijing: China Standards Press, 2006. (in Chinese)]
- [24] 黄海,谢忠胜,石胜伟,等. 汶川震区哈尔木沟堵河型泥石流灾害特征与防治方法[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 327-332. [HUANG H, XIE Z S, SHI S W, et al. Characteristics and countermeasures of river-blocking debris flow of Haermu gully in Wenchuan area after earthquake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 327-332. (in Chinese)]
- [25] 温铭生,刘传正,刘艳辉,等. 汶川地震高烈度区崩滑流灾害区域预警[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 14-23. [WEN M S, LIU C Z, LIU Y H, et al. Regional warning of geological hazards in high seismic intensity area of Wenchuan Earthquake [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 14-23. (in Chinese)]
- [26] 甘建军,吴晗,唐春,等. 四川理县塔斯沟多发性特大泥石流成灾机理与特征[J]. 灾害学,2015, 30(4): 59-63. [GAN J J, WU H, TANG C, et al. Mechanism and characteristics of multiple catastrophic mudslides of Tasi ditch in Li county of Sichuan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 59-63. (in Chinese)]
- [27] 熊江,唐川,龚凌枫. 基于 HEC-HMS 模型的不同雨型泥石流流量变化特征[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 153-161. [XIONG J, TANG C, GONG L F. Flow characteristics of different rainfall type debris flow based on the HEC-HMS model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 153-161. (in Chinese)]

编辑:汪美华