

文章编号: 1008-2786-(2020)3-394-08

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000519

# 震区泥石流物源储量评价方法综述

张友谊,袁亚东,顾成壮

(西南科技大学 土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 充足的物源是泥石流形成的三大基本条件之一,对物源动储量进行合理的评价,不仅可预测泥石流爆发的规模和频率,同时也是其治理工程设计的重要依据。本文从泥石流分类物源、全流域物源及震后物源三方面总结了目前动储量的评价方法,分析了各方法的评价原理,并指出各类方法存在的不足,得到以下结论:(1)物源总储量的评价方法较多,而动储量评价由于受影响因素较繁多,评价方法相对较少;(2)“5.12”汶川地震后震区物源数量及种类剧增,物源统计易忽略具有隐蔽性的高位震裂物源,震后不同时期各物源对泥石流的贡献不一,应考虑时间及空间的演化效应,根据各类物源的动态演化特征做科学合理的震后物源动储量评价;(3)泥石流物源的动储量评价应考虑一定工程有效期内的不同降雨条件的影响更为合理。

**关键词:** 物源类型;高位震裂物源;总储量;动储量

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

泥石流物源总储量(静储量)一般指流域内总的松散固体物质量,动储量是指在工程有效期内会起加入泥石流活动的固体物质量。物源的动储量是评估泥石流的规模<sup>[1]</sup>和防护工程设计的重要依据,正确合理的储量评价,意义重大。但是现有的泥石流勘查、设计规范对物源的储量无明确统一的定义和评价方法<sup>[2]</sup>。在工程应用中多采用调查及经验预估确定,其结果与实际往往会产生较大偏差。“5.12”汶川地震触发了大量崩塌、滑坡,为震后泥石流提供了丰富的固体物源<sup>[3]</sup>。强震使物源的种类及数量剧增,采用传统的方法评价震后泥石流物源动储量,其结果远小于实际情况。震后已治理的泥石流拦挡工程在其后几年汛期内被损毁或满库翻坝<sup>[4]</sup>屡见不鲜。因此,本文全面介绍了国内外物源储量的评价方法,分析了各方法的特点,并基于物源储量评价的复杂性,提出储量评价方法研究的发展方向。

纵观已有的泥石流物源储量研究主要集中在三个方面:(1)将物源分为崩滑物源、坡面物源、沟道物源三类,分类讨论其相应的储量评价方法;(2)对整个泥石流流域物源总量作整体的评价分析;(3)“5.12”汶川地震后,特殊的震后泥石流物源的储量评价分析。

## 1 分类物源的储量评价

根据物源所处的位置以及失稳启动特征的不同,可将物源分为崩滑物源、坡面物源、沟道物源。国内学者根据其各自的特征,已对各类物源储量评价做了大量研究工作。

### 1.1 崩滑物源

对崩滑类物源储量的计算主要有弓形均高法、三棱柱体法等。早期学者<sup>[5]</sup>根据 D. W. Taylor、W. Fellenius 等人提出的破裂圆弧分析理论,推导了崩

收稿日期(Received date):2019-05-09; 改回日期(Accepted date):2020-03-25

基金项目(Foundation item):国家重点研发计划项目(2018YFC1505400);国家自然科学基金面上项目(41877524)。[National Key Research and Development Program of China (2018YFC1505400); National Natural Science Foundation of China General Program (41877524)]

作者简介(Biography):张友谊(1980-),男,安徽宿州人,博士,副教授,主要研究方向:工程地质。[ZHANG Youyi (1980-), male, born in Suzhou, Anhui province, assistant professor, Ph. D., research on geological engineering] E-mail: 53437391@qq.com

滑体的平均厚度计算公式,该法又被称为弓形均高法(如图1)。此法中所需参数容易确定,在实际工程中被大量运用。但是该方法对实际调查有较高的要求,如对滑坡后壁(B点)、剪出口(A点)位置的确定,沟域内单一滑坡体较多时,实际调查的工作量较大。另外,该法用于滑面为非圆弧形的崩滑堆积体时,计算误差较大。

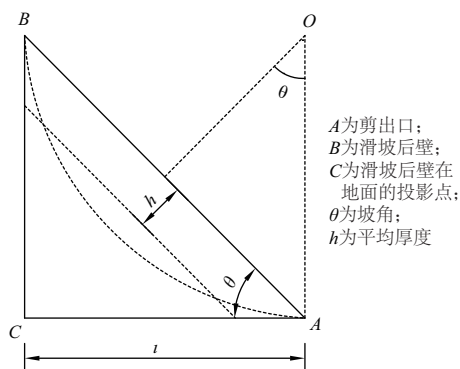


图1 滑坡类物源破裂圆弧分析示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of rupture arc analysis of landslide source

当松散固体物质堆积于沟道两侧的坡体时,其堆积剖面呈三角形或不规则的四边形(如图2),可根据沟道处基岩出露的情况确定松散固体物的剖面面积,再与实际调查的堆积体沿沟谷的长度相乘便可得到坡面堆积体的储量。该方法被称为三棱柱体法,其原理是以基岩面来确定堆积厚度及剖面面积,最终确定储量。该方法主要用于沟道两侧崩滑堆积体的总储量的计算,若基岩未出露(F点),需采用槽探及物探等手段确定物源堆积厚度,故该方法在实际调查过程中费时费力,各项测量的要求也较高,同时堆积体内的基岩情况变化较大时,仅凭沟道基岩的出露点做近似的三角形及四边形处理,略显粗糙。

之后有学者<sup>[7]</sup>从边坡的稳定性出发,基于卡尔

曼公式,计算边坡的临界高度,并考虑坡顶是否有裂缝。当坡高大于临界高度时,坡体沿崩塌角 $\alpha$ 产生潜在破裂面。破裂面上部为不稳定的坡体,受降雨条件的激发易下滑,供给泥石流(如图3)。因此,将潜在破裂面上部计为动储量。该方法虽计算较简便,但未考虑坡体前缘受沟道水流冲刷下切作用的情况,往往导致计算结果偏小。

## 1.2 坡面物源

坡面物源的形成主要受降雨侵蚀作用,侵蚀方式主要分面状侵蚀和沟道侵蚀两种,在实际泥石流防治工程中大多按面状侵蚀考虑,根据不同区域的侵蚀模数,计算工程有效期的总侵蚀量<sup>[8]</sup>,以此作为坡面物源的动储量。

国内的研究计算大多参考国外成熟的水土流失计算模型,例如 USLE 模型<sup>[9]</sup>、RUSLE 模型<sup>[10]</sup>、WEPP 模型<sup>[11]</sup>等。其中 USLE 模型为 Wischmeier 和 Smith 于 1965 年基于大量小区观测资料和人工模拟降雨试验资料建立的通用土壤流失方程<sup>[12]</sup>。RUSLE 模型为美国农业部自然资源保护局(NRCS)在上述方程的基础上进行改进<sup>[13]</sup>,即修正的通用土壤流失模型。

因 RUSLE 模型综合考虑了降雨侵蚀、土壤流失、坡体的长度和坡度、植被覆盖情况及支挡情况五方面的因素,目前国内学者使用较多。例如,对火后坡面爆发泥石流及震后坡面泥石流的动储量评价都有科学合理的计算,结果可信度较高<sup>[14-15]</sup>。考虑坡面物源中细小颗粒在较大降雨强度下,易被洪水冲走,因此,若采用上述计算模型应考虑洪水作用予以折减,计算结果可能更为合理<sup>[7]</sup>。

## 1.3 沟道物源

沟道内物源的总储量一般为沟道内堆积体的总量,主要采用形态调查统计得到。早期的学者<sup>[16]</sup>根

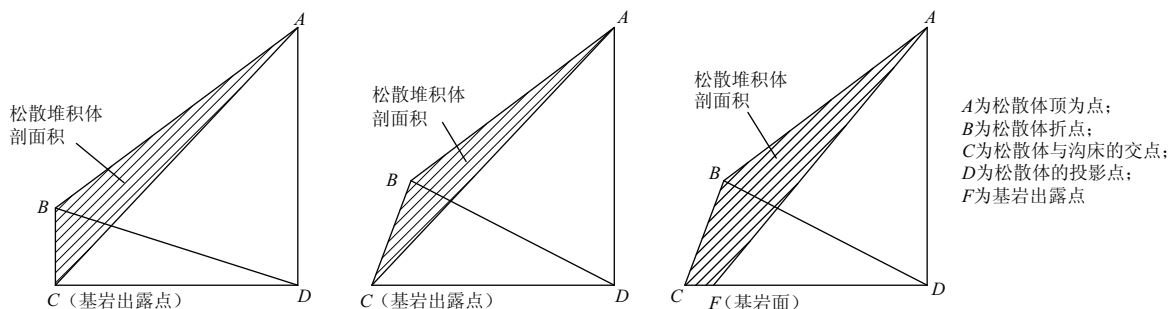


图2 崩滑堆积类物源剖面示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of source and source of collapse and slip accumulation

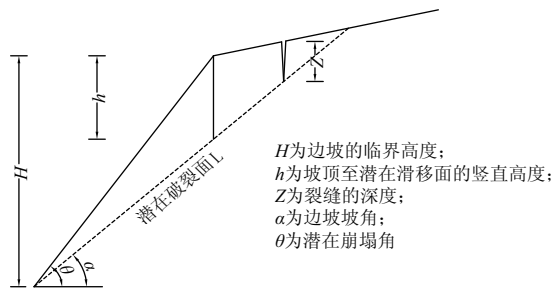


图3 基于卡尔曼法分析边坡稳定性的示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of slope stability analysis based on Kalman method

据堆积体的不同形态将其分为沟口堆积扇、沟内堆积体及局部堆积体。对扇形堆积物源提出了剖面法和纵切圆锥体法。对于沟道堆积体,根据沟道断面的不同,将其分为常见的“V”型、“U”型和台状三种形态(如图4),由各自的断面面积(沟道堆积厚度以基岩埋深深度为准)乘以沟道长度得出堆积体的总体积,即为其总储量。泥石流局部堆积体主要因泥石流难以覆盖整个沟口堆积扇,从而呈不同的局部堆积形态,根据其具体堆积形态计算。该类方法均为形态统计法,只适用于总储量计算,且调查工作量大。

后来有学者<sup>[6]</sup>认为物源储量由源地的形态演变到稳定形态之间的差异决定。泥石流沟演变到稳定形态时将不再发生泥石流,此过程的时间间隔可长可短,长的可达几万年,短的可几十年,研究一般以100年为准。以9个参数因子来确定流域的形态,以6个参数因子确定稳定形态,由此可得流域演化为稳定状态时,单位沟道供给的物源储量。在此基础上,对不同的沟道流域特征,简化得到切沟、冲沟、溪沟三类沟型物源的计算公式。该方法计算虽不复杂,但所需调查参数较多,尤其对沟道类型的判断,经验因素干扰较大。

沟床坡降的演化规律对沟道物源的储量评价有重要的指导意义,有研究表明泥石流下切侵蚀沟道

使沟床纵坡降较原沟道陡,稀性泥石流约为原沟道的1.1~1.5倍,黏性泥石流约为原沟道的1.0~1.2倍。同时沟道下切符合最小能耗原理,即调整坡降使单位水体沿程流速增大而作最速流动,从而使摩阻耗能最少<sup>[17]</sup>。

近期有文献<sup>[18]</sup>对沟道类物源动储量评价提出了一种较新的方法,主要考虑随着物源的汇入,泥石流容重增加,对沟道的“揭底”产生了沟道物源的最大启动厚度,根据沟床最大揭底厚度公式(式1),结合沟道宽度,分段求和可估算出泥石流沟道物源的总储量(式2) $V$ 。

$$d = \frac{3}{2} \cdot \frac{\delta \gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \cdot \frac{A \sqrt{gl}}{R_s^{\frac{1}{6}}} \cdot \frac{Q}{\mu} \quad (1)$$

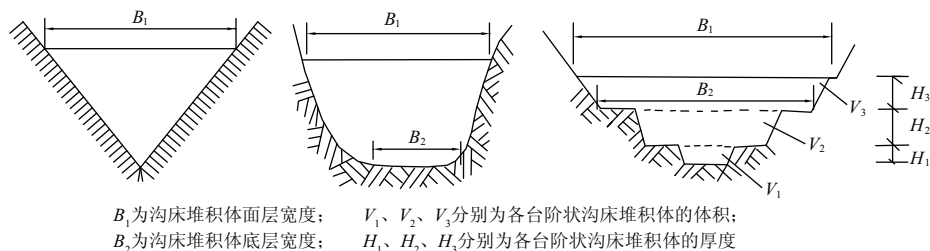
$$V = \sum_1^i d_i \cdot l_i \cdot L_i \quad (2)$$

式中, $d$ 为最大揭底厚度(m); $\delta$ 为最大脉动压强系数,无量纲; $\gamma_m$ 为泥石流重度( $\text{t/m}^3$ ); $\gamma_s$ 为沟床堆积物重度( $\text{t/m}^3$ ); $A$ 为沟床系数,无量纲; $R_s$ 为沟床床面粗糙度,无量纲; $Q$ 为泥石流流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\mu$ 为沟床形态参数,为无量纲; $g$ 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $l$ 为沟道宽度(m); $L$ 为沟道长度(m)。沟道物源的储量评价,应考虑泥石流的冲刷、揭底作用及溃决放大效应,同时沟道物源的粒径组成对泥石流的起动影响也较大,粒径较小的颗粒易形成洪流,有学者建议由起动粒径的数量和沟床下切的规模做合理的折减<sup>[7]</sup>。

综上所述,将物源分类,根据各类物源的发育特征以及启动失稳机理,分别对各物源作总储量评价,运用广泛,但是调查区域较大、物源点较多时,人工物力的投入亦较大、测量参数的精度要求较高,同时对震后泥石流物源的动储量评价会产生误差。

## 2 全流域物源的储量评价

对整个泥石流流域物源不分种类而作整体的储



$B_1$ 为沟床堆积体层面宽度;  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 分别为各台阶状沟床堆积体的体积;  
 $B_2$ 为沟床堆积体底层宽度;  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 分别为各台阶状沟床堆积体的厚度

图4 “V”型、“U”型、台阶状沟道断面

Fig. 4 "V" type, "U" type, stepped channel section

量评价,也有相应的研究。例如,用表征流域各地形特征的沟谷纵坡面形态指数  $N$ 、表征流域植被覆盖状况的面积比例  $F$  及动储量  $V_0$ ,基于灰色系统理论,建立了  $G(1,3)$  动储量灰色系统预测模型<sup>[19]</sup>。该模型符合物源控制因子的灰色特征,能较为科学合理的预测区域动储量,但该预测模型的控制因子较少,同时要求必须有4个时期以上的参数资料,故对多因素控制的物源储量评价不一定合理,而且需要区域多期的观测值,前期资料收集难度较大。

随着计算机技术的快速发展,也有研究<sup>[20]</sup>采用有限元计算软件 ADINA 进行数值计算分析区域边坡的变形情况,以此量化研究区不同部位物源的稳定性,将区域分为极度不稳定物源区、较不稳定物源区和稳定物源区,估算出三区域的方量。同时运用 Scleidegger 法得出了研究区的两个主要的新构造应力方向,分析新构造应力对物源的发育情况,考虑不同降雨频率下物源的供给量。该方法首次将降雨与物源供给量相结合,得出的动储量较为合理。

### 3 震后泥石流物源的储量评价

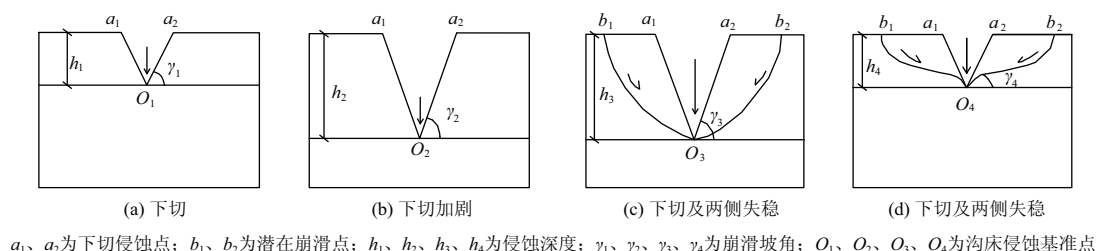
地震对震后泥石流活动有明显的加强作用,通过对日本关东地震<sup>[21]</sup>、台湾集集地震<sup>[22-23]</sup>和汶川大地震的研究表明:震后泥石流的激发雨量显著降低,活动频繁、危害巨大,其主要原因为地震对区域物源条件的改变。震区在强地震波反复作用下,表层土体松散,土体的力学参数(粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\psi$ )降低<sup>[26]</sup>,山体斜坡的岩土体受地震波的正反拉压力作用,使其开裂或者压碎,致使强震区产生了大量高位崩滑堆积体及潜在的不稳定震裂坡体<sup>[27]</sup>。

有学者将极震区震后松散固体物源归纳为地震崩滑堆积型、震裂山体失稳型、震裂坡表侵蚀型三种<sup>[28]</sup>。其中,地震崩滑堆积型以直接或间接的形式

补给泥石流,该类物源数量较大,在震后一段时期内泥石流活动强烈与此有关,随后物源量减少,以该类物源为主的区域泥石流活性降低<sup>[29]</sup>。震裂坡表侵蚀型与降雨汇流同步发产生,降雨条件对物源的补给量影响较大,之后该类坡表岩土体固结,物源补给减少。而震裂山体失稳型为最容易忽略的一类物源,由于该类物源多位于坡体中上部,分水岭、山脊及三面临空部位,故地震波在该处有放大效应,易产生应力集中<sup>[30]</sup>,使岩体破碎,结构面劣化,又由于坡体植被覆盖良好,所处位置较高,因此,在实际的调查中不易被发现。但是该类物源对震后泥石流爆发的供给量不容忽视,震后在降雨及风化作用下,该类物源会源源不断的供给震后泥石流,同时所处位置相对泥石流沟道较高,失稳下滑沿途会产生刮铲效应,进一步增大物源的补给。

对震后泥石流物源储量的研究不少学者亦做了大量的工作,得到了一些震后泥石流物源储量的评价模型。1999年台湾集集地震后,董家军<sup>[31]</sup>采用了多元回归统计的方法研究了震后潜在的44条泥石流沟在台风影响下的物源量。“5.12”汶川地震后,唐川<sup>[32]</sup>对震后49处典型的滑坡进行了调查分析,基于流域面积、松散固体体积及厚度的多元回归统计,拟合出崩滑面积与厚度的关系式。该公式的拟合度较高,具有代表性,不少学者均使用该式估算震后崩滑物源的体积。黄润秋<sup>[33]</sup>基于地质灾害点平均体积和平均厚度两方面分析物源量,计算出震后崩滑体的总体积分别为  $52.5 \times 10^8$  和  $45.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,考虑30%的泥石流转化率,可得震区震后总物源量为  $15 \times 10^8$  和  $13.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

其后,乔建平<sup>[4]</sup>将震后物源分为滑坡堵沟型、崩塌覆盖型、碎屑坡积型,提出了动储量的两种启动方式为沟谷下切侵蚀(如图5)和沟谷侧缘侵蚀坍塌(如图6),并以震区44处泥石流物源为样本,采用



$a_1$ 、 $a_2$ 为下切侵蚀点;  $b_1$ 、 $b_2$ 为潜在崩滑点;  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$ 为侵蚀深度;  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 、 $\gamma_4$ 为崩滑坡角;  $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ 、 $O_4$ 为沟床侵蚀基准点

图5 沟谷下切侵蚀溃决型泥石流物源启动模式示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the starting mode of the debris-cutting debris-type debris flow source<sup>[4]</sup>

表 1 统计法和图解法的动储量评价模式计算公式<sup>[4]</sup>

Tab. 1 Calculation formula for dynamic reserve evaluation mode of statistical method and graphic method

方法名称	计算公式	公式序号
统计法	$V_0 = 1827.49 \times \beta^{-0.611} (R^2 = 0.034)$	(3)
	$V_0 = 32.358 \times L^{0.519} (R^2 = 0.112)$	(4)
	$V_0 = 0.428V - 11.014 (R^2 = 0.8479)$	(5)
下切侵蚀型泥石流流动储量(如图 7a):		
	$\Delta_{1cod} = \frac{1}{2}(co) \cdot (cd) = \frac{1}{2}h \cdot h \cdot \tan\alpha = \frac{1}{2}h^2 \cdot \tan(90^\circ - \theta)$	(6)
	$V_{01} = \Delta_{1cod} \times L_1$	(7)
图解法		
	侧缘侵蚀型泥石流流动储量(如图 7b):	
	$\Delta_{2cod} = \frac{1}{2}(c_2o) \cdot (c_2d) = \frac{1}{2}l \cdot l \cdot \tan\varphi = \frac{1}{2}h^2 \cdot \tan(\alpha - \theta)$	(8)
	$V_{02} = \Delta_{2cod} \times L_2$	(9)
	总动储量 $V_0 = V_{01} + V_{02}$	(10)

注:  $V_0$  为泥石流流动储量( $m^3$ );  $\beta$  为沟床平均纵坡降( $\%$ );  $L$  为泥石流主沟长( $m$ );  $V$  为泥石流总储量( $m^3$ ); 其余参数详见图 7。

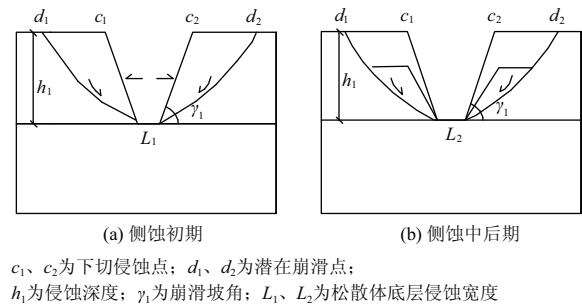


图 6 沟谷侧缘侵蚀滑坍型泥石流物源启动模式示意图<sup>[4]</sup>  
Fig. 6 Schematic diagram of the starting mode of the erosion of the slippery debris flow source<sup>[4]</sup>

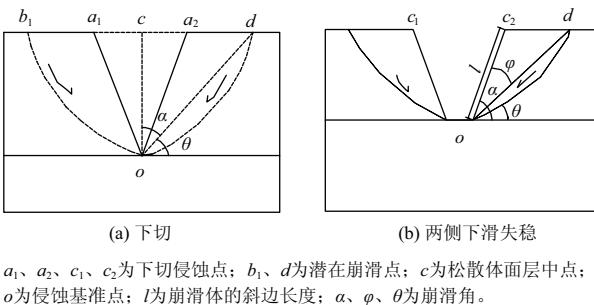


图 7 下切侵蚀型和侧缘侵蚀型泥石流统计模型<sup>[4]</sup>  
Fig. 7 Statistical model of undercut erosion and side edge erosion type debris flow

统计法和图解法分别建立泥石流物源的动储量评价模型。统计法的研究表明流域面积与动储量几乎没有相关性,平均沟床坡降、主沟长度与动储量的相关性较差,总储量与动储量有一定的相关性,并建立了相应的计算公式(如表 1)。图解法几何图解了物源失稳成为动储量的部分(如图 7),最终建立了动储量的计算表达式(如表 1)。该方法在震后泥石流防治工程中被广泛应用。

顾文韬<sup>[28]</sup>以安县高川乡的 12 条泥石流沟为样本,考虑震后物源的高程放大效应建立了基于高程指数的物源储量估算模型,以流域面积对高程指数进行修正,建立以高程  $H$  和流域面积  $A$  为参数的物源总储量的计算模型,将动储量与总储量拟合,得到

震区泥石流物源动储量  $V_0$  的估算公式为:

$$V_0 = 0.184e^{0.006h}(1.439A + 0.461) + 3.403 \tag{11}$$

该学者以 8 条泥石流沟作误差分析,引入发震断裂带的距离  $n$  为参数进行最终修正,得到基于流域面积、发震断裂距离及高程三因素控制的物源动储量估算公式为:

$$V_0 = n^{0.184}e^{0.006H}(1.439A + 0.461) + 3.403 \tag{12}$$

方群生<sup>[34]</sup>以汶川县威州镇和映秀镇的 48 条泥石流沟为样本,将泥石流物源分为崩滑物源、沟道物源、坡面物源,利用激光测距仪测量物源的长度、宽

度、厚度,然后估算出物源的面积及总储量。采用乔建平的几何图解法解析了研究区物源的起动失稳模式,估算出其动储量。利用统计软件 Matlab 对三类物源的体积和面积分别进行回归分析,拟合出体积与面积之间的关系曲线,最终拟合出动储量与总储量之间的关系曲线及数学表达式。

考虑地震造成的坡体松散,崩滑体方量巨大,对震后泥石流物源的储量分析,多数学者采用卫星遥感技术对研究区物源作宏观分析,粗略估算物源的总储量,或者以区域多条泥石流沟为样本,采用前人的方法实际调查,得出物源面积及储量,进行拟合。也有基于启动方式或者物源的影响因子对储量作回归分析,拟合出多因子的物源动储量评价模型。这些方法为评价震后次生灾害的活跃性以及震后短时期的工程防护具有一定参考价值。同时,震后物源随着时间有明显的演化特征<sup>[35]</sup>,收集震区不同时期的影像进行详细解译,对震后泥石流物源的动储量评价具有指导意义。

## 4 讨论

综上所述,泥石流物源储量的评价方法主要以总储量的计算为主,动储量计算分析少有涉及,这主要受泥石流源区地质条件复杂、物源种类较多、各类物源起动机理差异较大、影响因素繁多等诸多条件限制,准确评价动储量十分困难。已有的形态调查法、统计分析法、图解法对于单体物源储量评价应用较为简便,但对强震后震区泥石流物源的总储量及动储量评价仍存在问题值得进一步讨论。

(1)强震区高位震裂物源由于其高位隐蔽性且常为基岩山体,致使调查时容易被忽略。而该类物源通常规模巨大,一旦失稳对泥石流的爆发供给方量巨大。因此,应加强对该类物源早期的判别及长期的监测研究,达到有效的防灾减灾。

(2)震后泥石流各类物源在不同时期对泥石流爆发的贡献度不一。震后初期,震区泥石流物源多以崩滑类物源、坡面类物源为主。随着时间的推移,经过几年汛期暴雨的冲刷及泥石流的挟带作用,该类物源逐渐减少或入沟,此时泥石流物源以沟道物源为主。随着沟道物源的固结,坡体植被恢复,强震区泥石流物源又逐步恢复到震前水平,而此时应加强关注流域内高位震裂物源的发育情况,判定其失

稳堵沟参与泥石流活动的可能性。因此,对震后泥石流物源储量评价及工程治理时,应区分时期,把握主次、有针对性的进行,充分考虑物源动储量的空间及时间效应。

(3)泥石流物源动储量并非为一确定值,应结合具体物源成因、泥石流防治工程期限及沟道特征等,利用高精度卫星遥感解译、星载 InSAR 技术、无人机调查等技术结合数值模拟等手段,进一步研究不同降雨频率下各类物源储量的演变规律,为泥石流的防治提供有效参考。

## 参考文献 (References)

- [1] BERTRAND M, LIÉBAULT F, PIÉGAY H. Debris-flow susceptibility of upland catchments [J]. *Natural Hazards*, 2013, **67** (2): 497–511.
- [2] DZ/T 0220–2006. 泥石流灾害防治工程勘察规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006. [DZ/T 0220–2006. Specification of geological investigation for debris flow stabilization [S]. Beijing: China Standards Press,2006]
- [3] 殷跃平. 汶川地震地质灾害与滑坡概论[M]. 北京:地质出版社,2009:60–80. [YIN Yueping. Generality of geohazards and landslide induced by Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Geology Press,2009:60–80]
- [4] 乔建平,黄栋,杨宗佑,等. 汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012, **23**(2): 1–6. [QIAO Jianping, HUANG Dong, YANG Zongji, et al. Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismal area of Wenchuan earthquake region [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, **23**(2): 1–6]
- [5] 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重庆分社,1987:46–53. [DU Ronghuan. Comprehensive investigation and prevention planning of debris flow in Xiaojiang, Yunnan [M]. Chongqing: Science and Technology Literature Publishing House, Chongqing Branch, 1987: 46–53]
- [6] 吴积善,中国科学院、水利部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. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993:69–71. [WU Jishan, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences. Debris flow and its comprehensive control [M]. Beijing: Science Press, 1993: 69–71]
- [7] 蒋忠信. 震后泥石流治理工程设计简明指南[M]. 成都:西南交通大学出版社,2014:8–10. [JIANG Zhongxin. A concise guide to design of debris flow control engineering after earthquake [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2014: 8–10]
- [8] 王继康,成都铁路局昆明科研所. 泥石流防治工程技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1996:84. [WANG Jikang, Kunming Scientific Research Institute of Chengdu Railway Administration.

- Debris flow prevention engineering technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1996: 84]
- [9] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning [M]. USDA: Science and Education Administration, 1978: 35–60.
- [10] RENARD K G, FOSTER G R. RUSLE: revised Universal soil loss equation [J]. Journal of Soil Water Conservation, 1991, **46**(1): 30–33.
- [11] SAVABI M R, FIANAGAN D C, HEBEL B. Application of weep and GIS-GRASS to a small watershed in Indian [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, **50**(5): 477–483.
- [12] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [S]. USDA. Agriculture Handbook. No. 703. Washington, D C. U. S. Government Print. Office, 1977.
- [13] RENARD, K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [S]. USDA. Agriculture Handbook. No. 703. Washington, D C. U. S. Government Print. Office, 1997.
- [14] 潘聪. 汶川县七盘沟泥石流斜坡物源启动模式及动储量预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015: 36–40. [PAN Cong. Study on Startup mode of slope material sources and dynamic reserves prediction of Qipan gully debris flow in Wenchuan county [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015: 36–40]
- [15] 王严, 胡卸文, 金涛, 等. 火后泥石流形成过程的物源启动模式研究[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(6): 1415–1423. [WANG Yan, HU Xiewen, JIN Tao, et al. Material initiation of debris flow generation processes after hillside fires [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(6): 1415–1423]
- [16] 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: 114–118. [TIAN Lianquan, WU Jishan, KANG Zhicheng, et al. Erosion transportation and accumulation of debris flows [M] Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 1993: 114–118]
- [17] 蒋忠信. 藏东南泥石流沟纵剖面演化的最小功模式[J]. 地理科学, 2003, **23**(1): 25–31. [JIANG Zhongxin. Model of minimum energy dissipation in evolution of valley longitudinal profile of debris flow in southeast Tibet Area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, **23**(1): 25–31]
- [18] 樊姝芳. 舟曲泥石流固体物源特征及预警预报研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 36–37. [FAN Shufang. Study on characteristics of solid sources and early warning and prediction of Zhouqu debris flow [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 36–37]
- [19] 蒋忠信. 泥石流固体物质储量变化的定量预测[J]. 山地学报, 1994, **12**(3): 155–162. [JIANG Zhongxin. A quantitative forecast to reserves change of solid loose materials in debris flow ravine [J]. Mountain Research, 1994, **12**(3): 155–162]
- [20] 唐红梅, 陈洪凯, 翁其能, 等. 从泥石流沟的岩土稳定性论冲变动型泥石流的物源问题——以西(昌)木(里)路平川泥石流为例[J]. 重庆交通学院学报, 2001, **20**(1): 74–78. [TANG Hongmei, CHEN Hongkai, WENG Qi'ngeng, et al. Research on source of loose earth for Impact-deposit debris flow to develop in view of geotechnical stability of debris flow catchment —Taking Pingchuan debris flow as an example situating in Xichang-Muli road [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, **20**(1): 74–78]
- [21] NAKAMURA H, TSUCHIYA S, INOUE K, et al. Sabo against Earthquakes [C]. Kokon Shoin, Tokyo, Japan, 2000: 190–220.
- [22] CHING-WEEI L, CHJENG-LUN S, BEE-DEH Y, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2004, **71**(1/2): 49–61.
- [23] CHING-WEEI L, LIU Shouheng, LEE Senyuan, et al. Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan [J]. Engineering Geology, 2006, **86**(2/3): 87–101.
- [24] 崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊, 2008, **23**(4): 317–323. [CUI Peng, WEI Fangqiang, CHEN Xiaoqing, et al. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2008, **23**(4): 317–323]
- [25] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(12): 2585–2592. [HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(12): 2585–2592]
- [26] 陈宁生, 崔鹏, 王晓颖, 等. 地震作用下泥石流源区砾石土体强度的衰减实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(16): 2743–2747. [CHEN Ningsheng, CUI Peng, WANG Xiaoying, et al. Testing study on strength reduction of gravelly soil in triggering area of debris flow under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(16): 2743–2747]
- [27] 冯文凯, 黄润秋, 许强. 地震波效应与山体斜坡震裂机理深入分析[J]. 西北地震学报, 2011, **33**(1): 20–25. [FENG Wenkai, HUANG Runqiu, XU Qiang. In-depth Analysis of the Seismic Wave Effect and Slope Shattered Mechanism [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, **33**(1): 20–25]
- [28] 顾文韬, 裴向军, 裴钻, 等. 极震区震后泥石流物源特征研究[J]. 自然灾害学报, 2015, **24**(2): 107–114. [GU Wentao, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. Research on post-seismic provenance features of debris flows in meizoseismal area [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, **24**(2): 107–114]
- [29] 胡凯衡, 崔鹏, 游勇, 等. 物源条件对震后泥石流发展影响的初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, **22**(1): 1–6.

- [HU Kaiheng, CUI Peng, YOU Yong, et al. Influence of debris supply on the activity of post-quake debris flows [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, **22**(1): 1–6]
- [30] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1239–1249. [HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1239–1249]
- [31] JIA-JYUN D, CHYI-TYI L, YU-HSIANG T, et al. The role of the sediment budget in understanding debris flow susceptibility [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, **34**(12): 1612–1624.
- [32] TANG Chuan, JING Zhu, MING Chang, et al. An empirical-statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area [J]. Quaternary International, 2012, **250**(250): 63–73.
- [33] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析 [J]. 工程地质学报, 2011, **19**(2): 145–151. [HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(2): 145–151]
- [34] 方群生, 唐川, 王毅, 等. 汶川极震区泥石流流动储量与总物源量计算方法研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2016, **36**(6): 1008–1014. [FANG Qunsheng, TANG Chuan, WANG Yi, et al. A calculation method for predicting dynamic reserve and the total amount of material source of the debris flows in the Wenchuan meizoseismal area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, **36**(6): 1008–1014]
- [35] 熊江, 唐川, 史青云, 等. 强震区泥石流物源演化特征分析 [J]. 山地学报, 2019, **37**(5): 728–736. [XIONG Jiang, TANG Chuan, SHI Qingyun, et al. Evolution characteristics of debris flow sources in strong earthquake area [J]. Mountain Research, 2019, **37**(5): 728–736]

## Review of Evaluation Methods for Debris Flow Resource Reserves in Areas Affected by Earthquakes

ZHANG Youyi, YUAN Yadong, GU Chengzhuang

(Southwest University of Science and Technology department of civil engineering and architecture, Mianyang 621010, Sichuan, China)

**Abstract:** A sufficient source is one of the three basic conditions for the formation of a debris flow after an earthquake. A reasonable evaluation of the source reserves can not only predict the scale and frequency of debris flow outbursts, but also provides important parameters for protective engineering design. This paper summarized the current evaluation methods for the dynamic reserves, focusing on three aspects of debris flow, whole basin source, and post-earth source. The evaluation principles of various methods and the characteristics of the evolution of special debris flow sources after an earthquake, as well as the shortcomings of various methods were analyzed. The results showed that: (1) Many evaluation methods have been used for total reserves of provenance; however, the evaluation of dynamic reserves is complicated and relatively few evaluation methods are reliable. (2) After the “5.12” Wenchuan earthquake, the number and types of provenances increased in the earthquake area, and consequently, concealed high-level provenances were easily overlooked. The contribution of various provenances to debris flows during different periods after the earthquake should be considered, and the evolution of time and space should be considered. This would also provide scientific and reasonable post-earthquake source reserve calculations according to the dynamic evolution characteristics of various provenances. (3) The dynamic reserves of debris flow sources can be calculated more reasonably when considering the different rainfall conditions during the working period.

**Key words:** material source; high seismic crack material source; total amount of material source; dynamic reserve