

张向营, 张春山, 孟华君, 等. 地震扰动区泥石流起动阈值研究现状及展望[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 221-227. [ZHANG Xiangying, ZHANG Chunshan, MENG Huajun, et al. The review and development trend of critical threshold value of debris flow in earthquake-influenced area[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 221-227. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.01.039.]

地震扰动区泥石流起动阈值研究现状及展望^{*}

张向营^{1,2,3}, 张春山^{1,2}, 孟华君^{1,2}, 王 鹏^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 中国科学院大学, 北京 101407)

摘 要: 地震扰动区泥石流是大地震活动后常见的地质灾害类型, 具有高频、突发、超大规模、时间同步性、危害大和潜伏性等特点。该文从地震扰动区泥石流降雨因子和起动机理两个方面出发, 对国内外有关地震区泥石流起动阈值的研究做了全面的综述, 总结了当前地震扰动区泥石流研究工作中存在的问题, 并对未来地震扰动区泥石流研究趋势进行展望。

关键词: 地震扰动区; 泥石流; 起动阈值; 展望

中图分类号: X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)01-0221-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.01.039

我国是世界上遭受地震次生地质灾害最为严重的国家之一。近年来, 发生的汶川 8.0 级地震、芦山 7.0 级地震等破坏性地震, 导致我国西部山区持续处于地震地质灾害的高发期, 给当地人民群众生产生活带来极大的威胁。例如汶川 8.0 级地震, 在大约 110 000 km² 的区域内, 诱发了超过 197 000 多处崩滑地质灾害^[1], 而崩塌和滑坡又为后期泥石流活动提供了丰富的松散固体物质, 在强降雨作用下导致大量的松散堆积物转化为泥石流, 这也给灾区人民生命财产安全带来严重的二次灾难。截止 2010 年底, 汶川地震灾区已经先后发生不同规模泥石流灾害约 440 余起^[2], 类比国内外强震发生后地质灾害活动的时空规律^[3-6], 汶川震区地质灾害可能将强烈活动 20 年甚至更长时间^[7-11], 灾害类型由地震初期的崩塌、滑坡灾害为主逐渐转为以泥石流为主^[2,12]。因此, 后地震时期灾区泥石流灾害形势非常严峻。典型案例包括: 2008 年“9.24”泥石流群发事件、2010 年“8.13”泥石流群发事件等 6 起超大规模泥石流灾害, 其规模都远远超过了现有泥石流防治规范设计标准的范畴, 很难依靠工程手段进行防治^[13]。据此, 一些科学家和工程专家提出“在近 3~5 个雨季之内不宜进行大规模泥石流防治工程建设”^[14-15]。在这种情况下, 监测预警技术就成为震区泥石流防灾减灾最重要的手段。从地震灾区震后泥石流活动

情况来看, 泥石流激发的临界条件相比震前发生了显著的变化^[16]。泥石流起动阈值的研究不仅对泥石流预警报具有重要的现实意义, 是防灾减灾工作急需解决的关键技术问题, 同时也是泥石流学科的前沿科学问题^[13]。因此, 本文对国内外地震扰动区泥石流起动临界值问题研究进行了总结。

1 地震扰动区泥石流起动阈值的研究现状

1.1 基于降雨资料的震区泥石流起动阈值研究现状

强大的地震作用破坏流域内表层土壤和植被, 岩土体强烈扰动, 为泥石流的触发提供巨量的松散固体物质。基岩出露及地震造成的崩塌、滑坡, 改变了沟道流通条件及流水径流条件, 造成沟道堵塞。再加上强震区泥石流沟的降水和汇水条件均十分良好, 一旦这些巨量物源的泥石流沟遇上强降雨, 就极有可能再次爆发泥石流地质灾害, 所以地震是通过影响泥石流形成条件而强烈影响泥石流的形成^[17]。对于震区泥石流起动阈值研究, 目前国内外学者把研究重心放在激发泥石流起动的降雨因子上。与震前相比, 在相同降雨条件下,

^{*} 收稿日期: 2016-05-26 修回日期: 2016-07-22

基金项目: 中国地质调查项目(1212011220087); 国家自然科学基金(41502339); 中国地质科学院基本科研业务费专项经费(YYWF201523)

第一作者简介: 张向营(1993-), 男, 山东济宁人, 硕士, 主要从事地质灾害方面的研究. E-mail: dzxy2011@163.com

通讯作者: 张春山(1964-), 男, 研究员, 主要从事地质灾害、地应力、环境地质等方面的工作. E-mail: zhangcs401@sina.com

震后现有泥石流沟道需要更低的起动阈值。我国台湾地区集集地震过后陈友兰沟流域泥石流起动的最大降雨强度和临界累计降雨强度全都降到只有震前三分之一大小^[18]。而 Shieh CL 通过对 1999–2006 年间集集地震区激发泥石流临界雨强的进一步深入研究发现,震后 1 年内泥石流在全年累计雨量仅有 200 mm(地震前的四分之一)时就被触发了,泥石流的激发临界雨强显著降低,虽然逐步上升,现在仍然低于地震前的强度^[19]。

研究表明,泥石流的形成是前期降雨量和短历时雨强共同作用的结果,前期有效降雨量可作为泥石流前期预报的重要参数之一^[20]。但是对前期雨量的定义不同的学者有较大差异。如谭万沛^[21]把前 14 d 降雨残留在土壤中的含水量定为前期降雨;崔鹏^[22]等人认为间接前期降雨量、直接前期降雨量、短历时激发雨量三者共同构成前期降雨;陈景武^[23]则把泥石流暴发前 1 d 的降雨量和暴发当天的降雨量之和看作前期降雨量;彭涛^[24]把间接前期降雨量和直接前期降雨量之和看作前期降雨量;庄建琦^[25]把前期雨量分为直接前期雨量和间接前期雨量。前期雨量对泥石流发生影响已是不争的事实,但究竟其与泥石流的发生相关性有多大,由于数据缺失等因素很难做精确的定量说明。

国内对于激发泥石流临界雨量的研究,主要包括单因子临界雨量组合判别模式和多因子临界雨量组合判别模式两种。单因子临界雨量主要指泥石流发生的激发雨强、主要临界日雨量、临界小时雨量、临界 10 min 雨量等^[26]。对于多因子临界雨量组合判别模型,国内外用的较多的是降雨历时–降雨强度预报模型,即所谓的 $I-D$ 模型计算泥石流的临界雨量公式。Guzzetti^[27]等人为了描述泥石流起动的临界情况,通过 $I-D$ (雨强–降雨历时)关系曲线表示,两者之间的关系可以用如下的等式表示:

$$I = \alpha D^{-\beta} \quad (1)$$

Caine^[28]在 1980 年发表了激发浅层滑坡和泥石流的 $I-D$ 关系:

$$I = 14.82D^{-0.39} \quad (2)$$

Jibson^[29]1989 年对 Puerto Rico 南部的泥石流起动临界条件进行了研究:

$$I = 30.53D^{-0.57} \quad (3)$$

Crosta^[30]于 2001 年提出了

$$I = 0.48 + 7.2D^{-1.0} \quad (4)$$

Guzzetti^[31]2008 年对全球 2 626 次导致浅层滑坡和泥石流的降雨事件导致进行了统计研究,得出:

$$I = 2.2D^{-0.44} \quad (5)$$

Chyan-Deng Jan 和 Cheng-lung Chen^[32]对集集地震前后陈友兰沟流域中泥石流起动的临界降雨

线(水文气象阈值)进行了比较。

$$\text{地震前: } I = 13.5D^{-0.2} \quad (6)$$

$$\text{地震后: } I = 6.7D^{-0.2} \quad (7)$$

同样, Jinn-Chyi Chen^[33]也对陈友兰沟流域进行了研究,地震发生前后的 I 和 D 为:

$$\text{地震前: } I = 30D^{-0.75} \quad (8)$$

$$\text{地震后: } I = 36(1 - e^{-32\pi})D^{-0.75} \quad (9)$$

其中 π 是反映时间变化作用的参数。

而 Chien-Yuan^[34]还研究整个台湾地区在集集地震后泥石流启动条件。拟合后,提出

$$I = 115.47D^{-0.8} \quad (10)$$

这在结果上与 Guadagno^[35]在研究意大利中部山脉泥石流提出的临界方程是接近的:

$$I = 176.4D^{-0.9} \quad (11)$$

通过对上述不同研究者在不同研究区得出的部分 $I-D$ 方程在对数坐标系中投点得出图像(图 1),不难发现不同地区激发泥石流的雨强和降雨历时之间大致呈线性关系,平均雨强随着降雨历时的增加而降低,即降雨持续的时间越长,诱发泥石流所需的平均雨强越小。虽然由于各研究区地质背景的不同造成了数值上的差异,但整体上还是有较强的规律性可循。

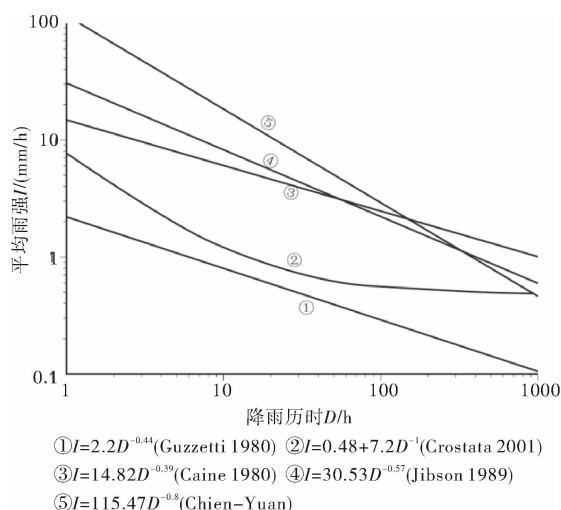


图 1 降雨强度和降雨强度关系

对于我国 2008 年汶川 8.0 级大地震极震区泥石流的起动阈值,在汶川地震发生后,国内震区泥石流起动研究不断深入,许多学者围绕汶川地震泥石流做了大量的工作,进行了较为详尽的研究。例如,马超^[36]对汶川地震灾区 2008–2010 年的暴雨泥石流以及我国台湾集集地震后 2001、2004、2009 台风引发的泥石流雨量过程进行了数据拟合,结果表明汶川地震灾区的几次暴雨激发泥石流及集集地震区台风触发泥石流的降雨过程中,平均雨强和降雨持续时间都有一个临界关系,该关系式如下所示。

$$\text{汶川地震灾区: } I = 34.4D^{-0.56} \quad (12)$$

集地震灾区: $I = 34.4D^{-0.4}$ 。(13)

李天涛^[37]采用四种判别模式对汶川震区泥石流发生的临界雨量特征进行了研究,对比得出判别模式所得到的临界雨量判别式最为符合:

$$R = -13I_c + 524。(14)$$

周伟^[38]2013年搜集了汶川震区暴雨泥石流发生的降雨数据,用单线法建立了汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值:

$$I-D \text{ 类型: } I = 51.43D^{-0.7}。(15)$$

$$C-D \text{ 类型: } C = 43.26D^{-0.42}。(16)$$

$$I_{MAP}-D \text{ 类型: } I_{MAP} = 0.029D^{-0.5}。(17)$$

$$C_{MAP}-D \text{ 类型: } C_{MAP} = 0.04D^{0.4}。(18)$$

式中: I 为平均雨强; C 为累积雨量; I_{MAP} 为标准化平均雨强; C_{MAP} 为标准化累积雨量。

周伟^[39]在研究汶川地震灾区大水等四个地区泥石流起动降雨量阈值时,又提出了平均降雨强度(I)和降雨历时(D)之间的关系:

$$I = 66.36D^{-0.79}, (2 \leq D \leq 15)。(19)$$

并且经过标准化后得到标准雨强(平均降雨强度与年平均降雨的比值)与 D 之间的关系:

$$I_{MAP} = 0.0036D^{-0.61}, (2 \leq D \leq 15)。(20)$$

叶天立^[40]等通过北川源地土和粉土的泥石流起动模式试验,得出临界雨量 T 、雨强 I 、坡脚 θ 之间的经验拟合公式:

$$T = 3.5I^{-1.39}\theta^{-2.45}。(21)$$

唐川^[11]在研究清平乡文家沟5次泥石流事件后,提出了平均降雨强度(I)与降雨历时(D)之间的关系:

$$I = 25.962D^{-0.239}, (1 < D < 24)。(22)$$

可见, $I-D$ 临界雨量计算公式得益于其使用的便捷性和统计结果的可靠性,在国内外泥石流研究工作中作为一种较常见的统计模型被使用。在国外某些地区通过进行长时间雨量监测,基于此模型还建立了较为成熟的泥石流预警系统。

1.2 基于起动机理的震区泥石流起动阈值研究现状

如前所述,国内外学者基于降雨资料的泥石流起动阈值的研究,已经获得了不少成果。并有很多共识,都是采用相同或相似的降雨参数来表达泥石流起动与降雨因子之间的关系。但是,无论是单因子还是多因子模型,或者是 $I-D$ 模型,都没有考虑泥石流形成的具体地质背景、地貌信息与形成机理的作用,在某个具体的子区通过统计学方法得到的泥石流激发阈值就不具有普适性。因此,通过分析泥石流起动机理,全面了解松散固体物质的受力特性、静水压力,综合考虑研究区的地质背景信息,从而推导出震区泥石流起动阈值。

泥石流起动的外部条件主要包括三个,陡峭的地形(地貌条件)、大量的松散固体物质(土源条

件)和降雨(水源条件),泥石流的发生是三个条件共同作用的结果^[41],因此泥石流起动机理与其形成的外部条件密不可分。国内外学者在泥石流起动机理研究中主要是通过野外实地观测研究、实验研究、理论研究三种方式围绕泥石流起动、运动过程及成灾规律等方面,建立了相应的模型。

Takahashi^[42]在2003年根据土坡静态极限平衡原理,结合水体的渗入使土体发生膨胀并产生泥石流,得到了泥石流的临界起动条件:

$$\tan \theta \geq \frac{c(\sigma - \rho)}{c(\sigma - \rho) + \rho(1 + \frac{1+h_0}{d})} \tan \varphi。(23)$$

式中: θ 是临界起动角, φ 是内摩擦角, σ 是颗粒的容重, ρ 是水的容重, c 是固相颗粒的体积百分比, h_0 是超出堆积体表面的水的深度, d 是颗粒平均粒径。

Armanini^[43]等假设地表径流深度与松散物质最大粒径相同条件下,推导出了此类泥石流在径流作用下起动的临界径流条件:

$$Q_c = \sqrt{\frac{8 \sin \theta}{f_0 k^3}} B^2 g d^3。(24)$$

式中: B 为径流宽, Q_c 表层径流流速, f_0 阻力系数, d 松散物质粒径, k 为流深与粒径特征的比值系数, g 为重力加速度, θ 为坡度。

D. G. Fredlund^[44]根据非饱和土理论,对降雨型泥石流起动机理进行了研究。得出

$$T = C' + (\sigma_f - \mu_a) \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w)。(25)$$

式中: C' 为 Mohr-Coulomb 破坏包线与剪应力轴的截距; σ_f 为破坏时在破坏面上的法向总应力; μ_a 为破坏时在破坏面上的孔隙气压力; μ_w 为破坏时在破坏面上的孔隙水压力; $(\mu_a - \mu_w)$ 为破坏时破坏面上的基质吸力; φ' 为与净法向应力状态变量 $(\sigma_f - \mu_a)$ 有关的内摩擦角; φ^b 为抗剪强度随基质吸力而增加的速率; $(\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b$ 为基质吸力引起的抗剪强度。

Iverson^[45]认为泥石流的起动是由以下三种因素共同作用的:①岩土体广泛上的库伦破坏②高孔隙流体压力导致的完全或部分土体液化③土体运动产生的颗粒温度升高,动能转化为颗粒内能。在某些情况下,泥石流的产生是由一种或两种因素起主导作用。他于1992年提出了一个适用于地下水流动场中的等式,可以用安全系数 FS 来表示,代表了三个无量纲比值之和,当 $FS < 1$ 时,斜坡开始发生破坏:

$$FS = T_f + T_w + T_c。(26)$$

式中: $T_f = \frac{\tan \varphi}{\tan \theta}$ 表示摩擦力与重力驱动力之比;

$T_w = \frac{(\frac{d}{Y} - 1) \frac{\partial p}{\partial y} \tan \theta}{\gamma_i \sin \theta}$ 表示地下水修正力与重力驱动

力之比; $T_c = \frac{c}{\gamma_s Y \sin \theta}$ 表示粘聚力与重力驱动力之比。

在国内, 泥石流起动机理的研究起步较晚。国内学者崔鹏^[46]用边界条件相同的 47 次模拟实验数据进行回归分析, 得到了公式:

$$\theta = 8.0062S_r - 2.4859S_r^2 - \frac{3.4896}{c - 0.096} + 7.0195 = 0. \quad (27)$$

从而得到一个以底床坡度 θ 、水分饱和度 S_r 和细粒含量 C 为主轴的空间曲面, 进行泥石流起动的判断。

陈中学^[47]探讨了黏土颗粒含量对泥石流启动的影响, 认为黏土颗粒含量具有临界性, 当黏粒含量少于 5% 或大于 18% 时, 难以形成泥石流。

费祥俊和舒安平^[48]根据极限平衡条件, 推导出了泥石流形成的临界坡度:

$$\tan \theta \geq \frac{s'_{vm}(\rho_s - \rho) \tan \varphi}{s'_{vm}(\rho_s - \rho) + \rho(h/h')} \quad (28)$$

式中: S'_{vm} 为层移层底部含沙浓度, θ 为坡度, ρ_s 为固体容重, ρ 为水的容重, h 为流深, h' 为层移层厚度, $\tan \varphi$ 为摩擦系数。

马超^[49]在对蒋家沟流域研究时提出了“临界土体含水量”的概念, 基于土体含水量和实时降雨的泥石流预警方法, 提出了临界土体含水量条件 (26%) 和雨强指标关系式:

$$i \geq f_p = \frac{(\theta_n - \theta_t | L)}{\Delta t} \quad (29)$$

式中: i 是 t 时刻雨强, f_p 是地面下渗容量, 源区土体饱和度为 θ_n , 降雨过程中土体某一时刻实时土体含水量为 θ_t , $\theta_n - \theta_t | L$ 是下渗总量与累积下渗量的差值。

杨顺^[50]从泥石流源区松散固体物质研究入手, 以力学平衡原理为基础, 提出了“可移动固体物质”概念。并基于此探讨了饱和渗流、饱和渗流 + 表面径流两种条件下固体物质的动力、阻力表达式, 并建立了相应地可移动厚度临界模型。

何文社^[51]推导了斜坡上天然非均匀沙不同启动状态时的启动流速公式, 并指出同样适用于天然均匀沙的启动。以下公式为个别启动和少量启动时的流速公式:

$$V_c = F(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} (f \cos \beta - \sin \beta)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{k} \right)^{\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{6}} \quad (30)$$

$$\text{当 } F = \begin{cases} 5.9, & \text{个别启动;} \\ 7.2, & \text{少量启动。} \end{cases}$$

式中: V_c 为启动流速; d 为粒径; f 为摩擦系数; β 为床面与水平面的夹角; h 为启动水深。之后, 张惠惠^[52]在何文社试验基础上, 引入不均匀系数和中值粒径的影响, 对地震影响区四川省都江堰虹口小沟泥石流沟流域进行研究后, 得到如下形

成泥石流的临界启动的流速公式:

$$V_c = F(1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} (f \cos \beta - \sin \beta)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{k} \right)^{\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{6}} \quad (31)$$

$$F = \begin{cases} 10.01, & \text{个别启动;} \\ 10.7, & \text{少量启动;} \\ 11.7, & \text{泥石流形成。} \end{cases}$$

白志勇^[53]分析了沟床纵坡、洪峰流量、松散物质饱和抗剪强度及剪切面积的影响, 建立了松散物质启动条件的判别公式:

$$K = \frac{F + LBC}{R + T} \begin{cases} < 1, & \text{不平衡;} \\ = 1, & \text{平衡极限;} \\ > 1, & \text{稳定。} \end{cases} \quad (32)$$

式中: K 为松散物质稳定性系数, 静摩擦阻力 F , 下滑力 T , L 为松散物质长度, B 为松散物质宽度, C 为粘聚力, R 为水流推力。

孟华君^[54]通过对汶川地震扰动区梅子林沟进行水石流启动模拟试验, 得出暴雨水石流临界雨量:

$$P_c = \frac{BV}{A} (11.721d_m - 414.32) + I_m. \quad (33)$$

式中: P_c 是临界雨量, d_m 是中值颗粒粒径, B 是平均流面宽度, V 是水石流速度, I_m 是土壤最大储水能力, A 是流域积水面积。

何思明^[55]等在运用无限边坡模型研究汶川地震震后沟谷泥石流时, 通过分析雨强、地震力、斜坡坡脚以及斜坡体物质的力学性质等因素, 给出了震后沟谷泥石流启动的临界降雨阈值:

$$I_c = T \left(\frac{b}{A} \right) \sin \theta \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left[\left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) + \frac{c}{\rho_w g D \cos \theta \tan \varphi} \right]. \quad (34)$$

式中: I_c 代表临界雨量, T 是导水系数; A 是上游汇水盆地面积; ρ_s 是水密度; ρ_w 是沉积物密度; c 是粘聚力; φ 是内摩擦角; b 是沟槽宽度; θ 表示坡脚; g 是重力加速度。

吴永^[56]借助水力学理论对震后沟道松散沉积物的启动模式进行分析, 认为坡体失稳是流域稳态降雨作用下堆积体内潜水位不断抬升、水力环境不断劣化的结果, 而松散堆积体内潜水位 h 又是流域面积 A 、区域等效稳态降雨强度 I 、沟道宽度 w 、沟床坡度、堆积深度 Z 以及导水系数 T 等变量的综合函数。

方华^[16]通过模拟研究汶川地震极震区泥石流沟启动情况进行人工降雨试验, 得出砾石土体的含水量为 15% ~ 18% 时处于失稳临界状态时, 大范围破坏形成泥石流形成时的含水量为 21% ~ 24% 左右, 震区泥石流启动的平均激发降雨强度约为 24 ~ 28 mm/h。

综上所述, 对国内外相关研究文献总结后不难发现, 通过对泥石流起动机理的研究进一步推导得出的泥石流启动阈值, 具有较强的普适性。

相比于降雨等单因子控制模型,能够较好地表达泥石流起动与沟床纵坡、粒径、细粒含量、流量等各影响因子之间的关系。但对公式(22)~(33)进行进一步拟合分析时发现,各个公式所含参数不尽相同,其空间曲线因此也相差很大。究其原因,主要是:①各研究者研究区域不同,不同的地质条件、降雨条件造成统计样本的差异;②各研究者采用不同的试验方法、不同的理论依据、不同的变量也造成的研究方法差异。

2 存在的主要问题

地震扰动区泥石流相比常态泥石流,两者触发机理相同,但其又有自身发育的特殊性:临界起动条件和降雨条件有了很大变化。文章通过系统的总结前人的工作,认为目前地震扰动区泥石流起动阈值的研究工作存在如下的问题。

(1)在降雨过程中岩土体达到一定含水量后,土体强度迅速降低发生大规模剪切破坏,土体的剪胀导致土体孔隙水压升高,从而使得土体液化产生泥石流。在目前的临界雨量判别模式中,研究者对前期雨量影响泥石流发生这一事实已不存在争议,但究竟其与泥石流的发生相关程度,以及对“前期雨量”这一重要范畴缺乏统一的认识。 $I-D$ 判别模式在国内外泥石流起动阈值研究中的应用虽然已有了较多的研究成果,但是在地震区特殊的气候和物源背景下,必须要对该模式的应用性提出思考。

(2)在泥石流起动机理的理论研究中,国内外学者主要是通过理论研究、实验研究、野外实地观测研究三种方式围绕泥石流起动、运动过程及成灾规律等方面,建立相应的模型。理论研究中,研究者通常从土力学角度出发,利用数理统计、模糊数学和灰色理论进行统计分析。但地震区物质粒径、颗粒级配、力学性质、沟床纵坡、黏土颗粒含量等多影响因素均有强烈的不确定性,推导过程中通常只控制一个或若干个变量。而泥石流的触发是一个多因子耦合的结果,这种简化的推导过程也会影响理论模型的普适性。

(3)在进行野外试验时,一般是通过构建相同的物源、相似的沟床坡降、降雨等地质和气候条件,再赋予室内试验测定的力学参数来模拟泥石流的起动。但是限于实验条件和设备等因素,当前的泥石流起动模拟试验仅仅停留在中小尺度水平。中小尺度试验的边界条件是封闭的,是由人工设定参数来控制,而现场大尺度问题的边界是开放的,其包含的物质与能量交换是难以模拟的,因此还存在中小尺度实验成果向野外大尺度推广的尺度不变性问题。

(4)不同地质条件下的泥石流起动模式相差巨

大,即使是同一流域内的泥石流沟也不尽相同。地震后,巨量的松散固体物质堆积在沟道或坡面上,而且影响泥石流起动的外在因子很多,当一个因子发生微小的变化,其他临界条件就会发生相应的变化,如地形地貌的改变,会引起气候和物源的变化。这种关联性使得单因子对泥石流的形成贡献难以量化。

(5)由于灾区泥石流的特殊性,其暴发历时较短,往往位于交通不便的山区,无法直接获取泥石流相关的指标,现今的野外试验只是针对震后特定的土体在某些现象的基础上开展的,这种资料的短缺往往使得试验不能反映泥石流起动的真实性。

3 发展趋势与展望

本文从泥石流起动机理和降雨资料分析统计两个方面出发,对地震扰动区泥石流起动阈值的研究现状进行了较为详尽的综述。地震扰动区泥石流的研究工作取得了不少突破性进展,但在如下方面还需要进行深入性研究:①在运用统计方法来进行泥石流预报时,各区域内降雨情况、阈值的时间、空间差异是由于各地区地质背景和气候条件共同决定的,消除地区性和经验性,确定各影响因素之间的定量化关系将是下一步工作重点之一。②加强地震扰动区泥石流形成和致灾机理的研究,从土力学、岩体力学、渗流力学、水力学、颗粒流力学等基础学科着手,加强泥石流基础理论研究,深入认识泥石流形成、运动和成灾机制,分别把水源、土源、激发条件等影响因子按照一定的指标,划分相应的类型,分别讨论其对泥石流起动的影响,实现从单因子到多因子,从定性、半定量到定量方向的转变。③研究手段的多样性,不应仅仅局限于野外地质调查、模型试验等传统研究方法,研究中应注重与计算机数值模拟和遥感等其他学科的结合应用。④尽可能开展物源区堆积物的原位试验和现场剪切试验,深入探讨泥石流固体物源的结构和物理力学性质。

参考文献:

- [1] 许冲,徐锡伟,吴熙彦,等. 2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 25-44.
- [2] 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.
- [3] Shou K J, Hong C Y, Wu C C, et al. Spatial and temporal analysis of landslides in Central Taiwan after 1999 Chi-Chi earthquake [J]. Engineering Geology, 2011, 123(1/2): 122-128.
- [4] Lin C W, Liu S H, Lee S Y, et al. Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan

- [J]. *Engineering Geology*, 2006, 86(2): 87–101.
- [5] Chang K J, Taboada A, Chan Y C, et al. Post-seismic surface processes in the Jiufengershan landslide area, 1999 Chi-Chi earthquake epicentral zone, Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2006, 86(2/3): 102–117.
- [6] Saba S B, Meijde M V D, Werff H V D. Spatiotemporal landslide detection for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. *Geomorphology*, 2010, 124(1/2): 17–25.
- [7] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. *山地学报*, 2008, 26(3): 280–282.
- [8] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. *山地学报*, 2009, 27(4): 501–509.
- [9] 乔建平, 黄栋, 杨宗佑, 等. 汶川大地震宏观震中问题的讨论[J]. *灾害学*, 2013, 28(1): 1–5.
- [10] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. *山地学报*, 2010, 28(3): 341–349.
- [11] C Tang, T W J V Asch, M Chang, et al. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms[J]. *Geomorphology*, 2012 (2): 559–576.
- [12] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(5): 10–19.
- [13] 方华. 汶川地震震后泥石流启动临界阈值研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012: 1–107.
- [14] 陈晓清, 崔鹏, 赵玉王. 汶川地震区泥石流灾害工程防治时机研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(3): 125–130.
- [15] 游勇, 柳金峰. 汶川 8 级地震对岷江上游泥石流灾害防治的影响[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(S1): 16–22.
- [16] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. *山地学报*, 2010, 28(3): 341–349.
- [17] 钟敦伦. 试论地震在泥石流活动中的作用[C]//泥石流论文集(1). 重庆: 科学技术出版社重庆分社, 1981: 30–35.
- [18] Lin C W, Liu S H, Lee S Y, et al. Impacts of the Chi-Chi earthquake on subsequent rainfall-induced landslides in central Taiwan[J]. *Engineering Geology*, 2006, 86(2): 87–101.
- [19] Shieh C L, Chen Y S, Tsai Y J, et al. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(2): 177–188.
- [20] 韦方强, 胡凯衡, 陈杰. 泥石流预报中前期有效降水量的确定[J]. *山地学报*, 2005, 23(4): 453–457.
- [21] 谭万沛. 降雨泥石流的临界雨量研究[C]//第二届全国泥石流学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1991: 136–142.
- [22] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1): 11–15.
- [23] 陈景武. 云南东川蒋家沟泥石流暴发与暴雨关系的初步分析[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第四号). 北京: 学出版社, 1984: 88–96.
- [24] 彭涛. 泥石流形成的降雨条件及其预测预报研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [25] 庄建琦. 降雨特征与泥石流总量的关系分析[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(4): 77–83.
- [26] 谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流滑波的区域预测与预报——以攀西地区为例[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 1–275.
- [27] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. *Meteorology & Atmospheric Physics*, 2007, 98(3–4): 239–267.
- [28] Caine N. The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows[J]. *Physical Geography*, 1980, 62(1/2): 23–27.
- [29] Jibson R W. Debris flow in southern Puerto Rico[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 1989, 236: 29–56.
- [30] Crosta G, Frattini P. Rainfall thresholds for the triggering of soil slips and debris flow[C]//Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms. edited by: Mugnai, A., Guzzetti, F., and Roth, G., Siena, Italy. 2001: 463–487.
- [31] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. The rainfall intensity – duration control of shallow landslides and debris flows: an update[J]. *Landslides*, 2008, 5(1): 3–17.
- [32] C D Jan, C L Chen. in *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1970: 539–563.
- [33] Chen J C. Variability of impact of earthquake on debris-flow triggering conditions: case study of Chen-Yu-Lan watershed, Taiwan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(7): 1787–1794.
- [34] Chen C Y, Chen T C, Yu F C, et al. Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring. *Environ Geol*[J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(5): 715–724.
- [35] Guadagno F M. Debris flows in the Campanian volcanoclastic soils[J]. Thomas Telford, 1991: 125.
- [36] 马超, 胡凯衡, 赵晋恒, 等. 震后泥石流的激发雨量特征——以汶川地震和集集地震后泥石流为例[J]. *灾害学*, 2013, 28(4): 89–94.
- [37] 李天涛. 汶川地震极震区泥石流发育特征及启动方式研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [38] 周伟, 唐川. 汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 786–793.
- [39] Zhou W, Tang C. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, southwestern China[J]. *Landslides*, 2014, 11(5): 877–887.
- [40] 叶天立, 鲁晓兵, 崔鹏, 等. 北川地震区泥石流启动条件试验研究[J]. *山地学报*, 2011, 29(S1): 22–27.
- [41] Takahashi T. Debris flow[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, 13(4): 57–77.
- [42] Armanini A, Michiue M. Recent Developments on Debris Flows[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1997: 1–208.
- [43] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521–532.
- [44] Iverson R M, Reid M E, Lahusen R G. DEBRIS-FLOW MOBILIZATION FROM LANDSLIDES 1[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2003, 25(1): 85–138.
- [45] 崔鹏. 泥石流启动条件及机理的实验研究[J]. *科学通报*, 1991, 36(21): 1650–1652.
- [46] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2197–2201.
- [47] 费祥俊, 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, 2004(4): 81–190.
- [48] 马超. 基于土体含水量和实时降雨的泥石流预警指标研究[D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2014.
- [49] 杨顺. 水动力作用下泥石流源区固体物质可移动判别模型研究[D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2014.

- 所, 2014.
- [50] 何文社, 曹叔尤, 袁杰, 等. 斜坡上非均匀沙起动条件初探[J]. 水力发电学报, 2004, 23(4): 78-81.
- [51] 张惠惠. 震后强震区洪水启动沟道堆积物引发泥石流灾害研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011
- [52] 白志勇. 泥石流松散物质启动条件的分析与计算[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(3): 318-321.
- [53] H J Meng, Y J Jiang. Precipitation threshold study of gully debris flow in earthquake-influenced area based on physical model experiment[J]. International Journal of Earth Science and Engineering, 2014, 07: 496-502.
- [54] He S, Li D, Wu Y, et al. Study on the rainfall and aftershock threshold for debris flow of post-earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(5): 750-756.
- [55] 吴永, 何思明, 裴向军, 等. 震后沟道泥石流启动条件——松散堆积体雨中失稳的水力学机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3043-3050.

The Review and Development Trend of Critical Threshold Value of Debris Flow in Earthquake-Influenced Area

ZHANG Xiangying^{1, 2, 3}, ZHANG Chunshan^{1, 2}, MENG Huajun^{1, 2} and WANG Peng^{1, 2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources,

Beijing 100081, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China)

Abstract: Debris flow occurred in earthquake-influenced area are common geological disasters after the earthquake and the debris flow have the characteristics of high frequency, group-occurring, suddenly outburst, very large scale and high potential hazard after the earthquake. Based on the analysis of debris flow mechanism and critical rainfall threshold and reviewed the study of critical threshold value of debris flow in earthquake-influenced area at home and abroad, We summarize the existing problems in the research work of debris flow in earthquake-influenced area, and the trend of future research of debris flow in earthquake-influenced area are prospected.

Key words: earthquake-influenced area; debris flow; critical threshold value; development trend

(上接第 215 页)

- [42] 许学工, 颜磊, 徐丽芬, 等. 中国自然灾害生态风险评价[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5): 901-908.
- [43] 赵洲, 侯恩科. 中国地质灾害生命可接受风险标准研究[J]. 科技导报, 2011, 29(36): 17-22.
- [44] 尚志海, 刘希林. 国外可接受风险标准研究综述[J]. 世界地理研究, 2010, 19(3): 72-80.
- [45] 尚志海, 刘希林. 可接受风险与灾害研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 23-30.
- [46] 尚志海, 刘希林. 自然灾害风险管理关键问题探讨[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 158-164.
- [47] 刘传正. 论地质灾害防治的科学理念[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 1-7.
- [48] 刘希林, 尚志海. 中国自然灾害风险综合分类体系构建[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(6): 1-7.
- [49] 刘希林, 尚志海. 泥石流灾害综合风险分析方法及其应用[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 86-89.
- [50] 张志强, 徐中民, 程国栋. 条件价值评估法的发展与应用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 454-463.
- [51] 梅强, 杨宗康, 刘素霞, 等. 条件价值法评估生命价值的应用探讨[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(12): 28-33.

Exploration on Risk Evaluation Value of Geological Disaster Based on Contingent Valuation Method

CAI Xiangyang^{1, 2, 3} and TIE Yongbo³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Chengdu Center of China

Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: The article is a review of the related achievements in the field of geological disaster and contingent valuation method (CVM). From the concepts of the economic properties of the geological disaster and CVM, it explores the application with CVM and acceptable risk value of statistics life evaluation, plus the existing problems in China. On the basis, we explore and design the details of questionnaires survey and technological processes about the geological disaster risk evaluation in towns, and also the research outputs can offer scientific and rational reasons for making the careful risk assessment about geological disaster in mountainous town in domestic.

Key words: Contingent Valuation Method; the value of statistical life; geological disaster; loss evaluation; hazard assessment; mountainous town