

文章编号: 1008 - 2786 - (2018)4 - 581 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000354

基于流深和弯道超高的泥石流淤积范围划分

刘清华¹, 唐川², 余斌²

(1. 成都理工大学 环境学院, 成都 610059; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059)

摘 要: 针对缺乏大比例尺地形图和历史灾害资料记录的地区, 提出一种沟谷型泥石流淤积范围划分新方法。方法假定峰值流量时泥石流形成最大淤积范围, 泥石流纵向淤积远端为堆积扇前缘。泥石流沟口过流断面最大平均流深(h_0)被假定为堆积扇上其他过流断面的特定流深, h_0 由峰值流量和沟口断面参数估算得到。利用堆积扇地形图, 在相邻两条等高线间获得由 h_0 确定的泥石流特征过流断面的位置和宽度, 并对弯道处的特征过流断面宽度进行弯道超高修正。根据堆积扇上特征过流断面的分布确定泥石流淤积范围。3 条泥石流案例用于方法验证, 结果表明方法划定的淤积范围与实际淤积范围较一致, 堆积扇上房屋的阻挡和局部相对平坦的地形是误差产生的主要原因。该方法具有操作简单、快速、客观、可重复的特点。

关键词: 堆积扇; 淤积范围; 泥石流峰值流量; 过流断面流深; 淤积宽度; 弯道超高

中图分类号: P642. 23

文献标志码: A

泥石流是一种破坏力极强的地质灾害。1999 年 12 月 15 ~ 16 日, 委内瑞拉北部加勒比海沿岸群发性泥石流造成 3 万人死亡, 损失达 100 亿美元^[1]; 2010 年甘肃省舟曲县三眼峪沟和罗家裕沟“8. 7”泥石流冲毁房屋 5500 余间, 致使 1700 余人死亡和失踪^[2-3]; 2010 年 8 月 13 ~ 14 日, 汶川震区清平乡文家沟、映秀镇红椿沟、龙池镇八一沟等暴发大规模泥石流, 损失惨重^[4]。堆积扇是泥石流成灾的主要场所, 划分泥石流在堆积扇上的淤积范围是防灾减灾的首要任务和泥石流风险评价研究的重要内容。

刘希林等^[5]通过对云南东川地区 55 处泥石流流域面积、流域高差、主沟长度及平均坡度的统计分析, 建立了最大堆积宽度、长度及幅角的半经验预测模型; 基于实验, 刘希林和唐川^[6]探讨了最大堆积宽度、长度和面积与泥石流补给总量、流通区坡度、堆积区坡度和泥石流容重的关系; 柳金峰等研究了泥石流流速^[7]、山口山脚约束^[8]对堆积范围的影响以及不同容重、堆积区坡度和水槽坡度连续堆积条

件下粘性泥石流扇状地发展过程特征^[9]; Adam 等^[10]和铁永波等^[11]通过堆积角与冲出角的关系确定泥石流冲出距离; Rickenmann^[12]构建了冲出距离与泥石流规模和流域高差间的经验方程, 其他学者针对火山泥石流^[13]、坡面泥石流^[14]、强震区沟谷泥石流^[15]等进行了类似研究。建立上述经验模型本身需要大量历史灾害调查或实验数据资料, 经回归分析得到, 其主要在构建模型的研究区(或类似实验条件下)有较好的适用性^[16], 在非建模研究区(或非类似实验条件下)使用时往往需要进行模型修正, 模型修正同样需要大量基础数据。

Iverson 等^[17]基于泥石流动力学特征分析, 利用 27 条火山泥石流的调查资料, 分别建立了泥石流在堆积扇上的过流横断面面积(A)及淤积总平面面积(B)与泥石流规模(V)的函数关系式: $A = 0.05V^{2/3}$, $B = 200V^{2/3}$, 前者决定泥石流在堆积扇上的淤积宽度, 两者共同决定淤积范围, 并借助数值高程模型(DEM)在 GIS 平台上实现了淤积范围划分过程自

收稿日期(Received date): 2018 - 01 - 03; 改回日期(Accepted date): 2018 - 08 - 28

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41402316); 四川省国土资源厅科学研究计划项目(KJ - 2016 - 09)。[National Natural Science Foundation of China (41402316); Science Research Program of Land and Resources, Sichuan Province of China (KJ - 2016 - 09)]

作者简介(Biography): 刘清华(1976 -), 女, 四川中江人, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害风险评价研究。[Liu qinghua (1976 -), female, born in Zhongjiang, Sichuan province, Ph. D., lecturer, research on risk assessment of geological disasters] E-mail: liuqinghua@cdu. cn

动化(LAHARZ)^[18]。该模型在其他火山泥石流研究中得到了推广应用^[19-20],并被改进为DFLOWZ模型用于非火山泥石流的研究^[21-22]。然而,使用该模型需要以大比例尺地形图为前提。

Fraccarollo & Papa^[23]基于宾汉模型、Ghilardi等^[24]基于动量和质量平衡方程、胡卸文等^[25]使用基于有限体积法的CFX软件和宾汉流变模型、Hübl & Steinwendtner^[26]应用FLO-2D进行了泥石流运动堆积过程的数值模拟。Rickenmann等^[27]认为FLO-2D等二维数值模型都能较好地模拟泥石流堆积过程。Canuti等^[28]认为FLO-2D能适应多样化的建模环境。数值模拟能获得泥石流在堆积扇上的淤积范围及流速、流深分布,能为危险区划及易损性和风险评价提供更多信息,所以备受关注。然而,数值模拟需要输入的模型参数较多,过程复杂,耗时较多,且也需要以大比例尺地形图研究前提。

在对泥石流威胁范围进行危险性评价时,许多地区通常仅有小比例尺地形图,而且缺乏泥石流灾害堆积范围的历史记录,使得上述方法在应用中受到限制。本文针对缺乏大比例地形图和历史灾害资料记录的地区,提出一种基于流深和弯道超高的沟谷型泥石流淤积范围划分新方法,并通过实例验证了其有效性。

1 研究区

以甘肃省舟曲县三眼峪沟“8.7”泥石流、四川省都江堰八一沟“8.13”泥石流及汶川县七盘沟“7.11”泥石流为例进行淤积范围划分方法验证,泥石流沟位置见图1。

1.1 三眼峪沟

三眼峪沟位于甘肃省舟曲县城北面,嘉陵江一级支流白龙江左岸,堆积扇穿过舟曲县城。流域面积21.35 km²,流域高差2268 m,主沟长6.21 km,平均纵比降331‰。三眼峪沟2010年“8.7”泥石流冲出量108.5 × 10⁴ m³,峰值流量1712 m³/s,泥石流穿过县城冲入白龙江,造成严重损失^[2-3]。

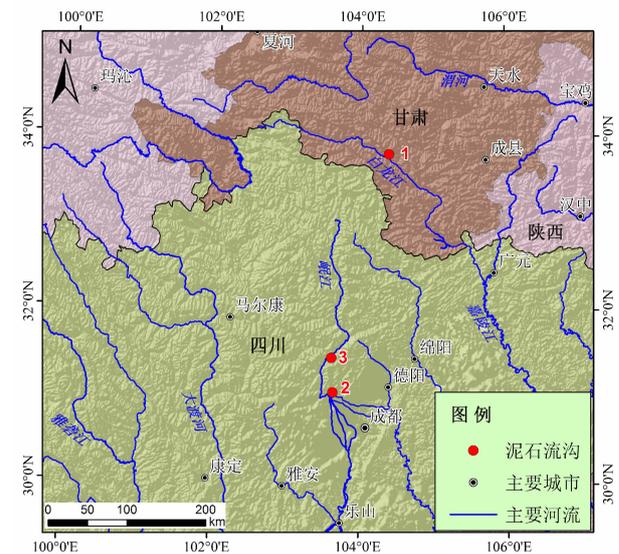
1.2 八一沟

八一沟位于四川省都江堰市龙池镇云华村,龙溪河右岸,距上游龙池新场镇1.32 km。流域面积8.31 km²,流域高差1560 m,主沟长4.32 km,纵比降180‰~230‰。八一沟2010年“8.13”泥石流冲

出量116.5 × 10⁴ m³,峰值流量1260 m³/s,冲毁多座谷坊及拦砂坝、36间民房和100余间安置板房,淤埋公路280 m,造成2人失踪,1人受伤。

1.3 七盘沟

七盘沟位于四川省汶川县城西南5 km处,岷江左岸,堆积扇上分布有大量工矿企业和居民住宅楼。流域面积54.22 km²,流域高差3040 m,主沟长15.03 km,平均纵比降190‰。七盘沟2013年“7.11”泥石流冲出量78.2 × 10⁴ m³,峰值流量1755 m³/s,泥石流造成沟口道路被掩埋,大量房屋被冲毁或淤埋,8人死亡,6人失踪。



1:三眼峪沟,2:八一沟,3:七盘沟

图1 泥石流沟位置

Fig. 1 Location of debris flow gully

2 方法

方法主要探讨泥石流在堆积扇上淤积的横向边界(淤积宽度)确定方法,未进行纵向停止(淤积长度)确定方法的研究。在方法研究中假定了泥石流淤积远端为堆积扇前缘,方法验证实例也属于淤积远端到达堆积扇前缘的泥石流。因此,本文方法目前主要适用于规模相对较大的沟谷型泥石流淤积范围划分,即泥石流规模满足在纵向上能淤积到堆积扇前缘。根据历史灾害资料,当泥石流在堆积扇上的平均堆积厚度(泥石流规模/堆积扇面积) ≥ 0.5 m时,灾害损失主要为大及特大等级,其实际淤积远端都到达甚至超过堆积扇前缘^[29]。以

此为参考,本文方法以堆积扇平均堆积厚度 $\geq 0.5\text{ m}$ 作为方法适用的参考条件。

沟谷型泥石流堆积扇上常有过水沟道,沟道处地势相对低洼,泥石流在堆积扇上主要沿过水沟道运动淤积。流深较小时,泥石流主要被限制在沟道内运动淤积;流深增大时,泥石流会溢出沟道,向两侧扩展,相应的过流断面宽度和淤积宽度增加。可见,流深决定着泥石流过流断面宽度,而过流断面宽度影响淤积宽度,即流深是界定泥石流淤积宽度的关键参数。

泥石流在堆积扇上运动淤积的实际过程较为复杂:有左右摆动、弯道超高、局部堵塞等发生,这些现象会导致淤积宽度增加。因此,泥石流实际淤积宽度大于由实际流深所界定的假定泥石流完全沿沟道运动淤积时的淤积宽度。

根据上述分析,本文方法的首要任务是寻找合理的、比实际流深大且易获取的特定流深,进而得到由该特定流深界定的假定泥石流完全沿沟道运动淤积时的特定淤积宽度,该特定淤积宽度大于由实际流深所界定的假定泥石流完全沿沟道运动淤积时的淤积宽度。通过实例验证,如果该特定淤积宽度能接近实际淤积宽度,则可以用该特定淤积宽度代表实际淤积宽度,即方法可行,特定流深可用于泥石流淤积范围的划分。

泥石流沟口(堆积扇顶)沟道相对狭窄,该处过流断面流深相对较大。泥石流冲出沟口后,失去两侧沟岸约束,且地形坡度逐渐减小,泥流向两侧迅速扩展,过流断面宽度增加,流深降低,流速减小,泥石流开始淤积。相同流量下,泥石流沟口过流断面流深大于堆积扇上其他任意过流断面流深。

峰值流量时泥石流形成最大淤积泛滥范围。峰值流量时泥石流沟口过流断面平均流深达到最大值(h_0)。 h_0 可由峰值流量和沟口过流断面参数估算得到。

为补偿因左右摆动等原因而增加的泥石流淤积宽度,也为简化泥石流淤积范围划分过程,方法假定 h_0 为峰值流量时堆积扇上其他过流断面的特定流深。借助堆积扇地形图等高线的分布,用 h_0 确定假定泥石流完全沿沟道运动淤积时的特征过流断面(包括特征过流断面的位置和宽度)。该特征过流断面的分布为在堆积扇地形图上划定泥石流淤积范围提供了横向边界信息。

上述假定中,堆积扇上所有泥石流过流断面的特定流深恒定,均为 h_0 。一般而言,从泥石流沟口到堆积扇前缘,泥石流实际流深逐渐减小。所以,假定流深 h_0 与实际过流断面流深的差从泥石流沟口到堆积扇前缘逐渐增大,这在以 h_0 界定假定泥石流完全沿沟道运动淤积时的特征过流断面时,刚好能补偿从泥石流沟口到堆积扇前缘泥石流实际淤积宽度的逐渐增加。

方法研究的前期验证表明,上述用泥石流沟口过流断面最大平均流深 h_0 概化堆积扇上其他过流断面流深所确定的淤积范围宽度不足以补偿因弯道超高导致的淤积宽度增加,故方法还需对弯道处的特征过流断面宽度进行弯道超高修正。

综上,本文方法划分泥石流在堆积扇上淤积范围的具体流程见图2。

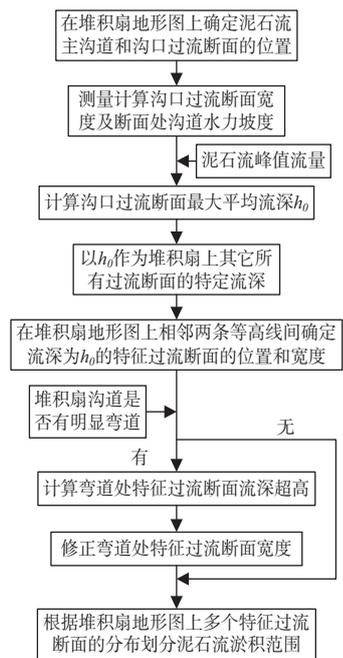


图2 泥石流淤积范围划分流程图

Fig.2 Flow chart to delineate debris flow inundation range

2.1 沟口过流断面最大平均流深估算

通过公式(1) - (6),利用泥石流峰值流量和沟口过流断面参数估算沟口过流断面最大平均流深 h_0 。

公式(1) - (6)中,以泥石流沟口过流断面为近似矩形断面的情况为例,在具体的方法验证及实际应用中,如调查条件满足,应使用野外测得的实际断面形态参数(如沟床宽度、两侧沟岸坡度等)进行相

应计算。

不同性质的泥石流有不同的流速计算公式,公式(3)是黏性泥石流的流速计算公式,故本文研究对象为黏性泥石流。

$$q = Q_{\max}/L \quad (1)$$

$$q = h_0 \cdot v \quad (2)$$

$$v = K \cdot r^{2/3} \cdot I^{1/5} \quad (3)$$

$$r = A/P \quad (4)$$

$$A = h_0 \cdot L \quad (5)$$

$$P = 2h_0 + L \quad (6)$$

式中: q 为泥石流单宽流量(m^2/s); Q_{\max} 为泥石流峰值流量(m^3/s),通过形态调查法、雨洪法等方法获取^[30]; L 为泥石流过流断面宽度(m),根据地形图并结合野外调查获取; h_0 为泥石流沟口过流断面最大平均流深(m); v 为泥石流流速(m/s); K 为泥石流流速系数,参考表1内插取值^[31]; I 为泥石流沟道水力坡度,根据地形图并结合野外调查获取; r 为泥石流水力半径(m); A 为泥石流过流断面面积(m^2); P 为泥石流过流断面湿周(m)。

h_0 的计算在Excel表中完成。沟口过流断面实际单宽流量(q_{act})根据泥石流峰值流量(Q_{\max})和过流断面宽度(L)由公式(1)计算得到。在 h_0 的计算过程中,先假定一个沟口过流断面最大平均流深(h'),再根据公式(2) - (6),估算出流深为 h' 时沟口过流断面单宽流量(q_{est})。 h' 取值变化时, P 、 A 、 r 、 v 和 q_{est} 依次相应变化。调整 h' 取值到 $q_{est} = q_{act}$,此时假定的流深 h' 即为峰值流量 Q_{\max} 时沟口过流断面最大平均流深 h_0 。

表1 泥石流流速系数(K)^[31]

Tab. 1 Velocity coefficients(K) for debris flow^[31]

泥深/ m	<2.5	2.75	3.00	3.5	4.00	4.50	5.00	>5.5
K	10.0	9.5	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0

2.2 堆积扇上泥石流淤积范围的划分

堆积扇上泥石流淤积范围的划分过程在CAD中手动完成。

第一步:在堆积扇地形图上标出沟道深泓线和沟口过流断面(A_0B_0)。 A_0B_0 断面位于泥石流堆积区上游端狭窄沟道处(图3a),其下游沟道逐渐开阔,根据地形图并结合野外调查确定。从 A_0B_0 断面到堆积扇前缘的等高线依次为第1条、第2条...第

n 条。

第二步:以峰值流量 Q_{\max} 时沟口过流断面最大平均流深(h_0)为堆积扇上其他泥石流过流断面的特定流深,根据 h_0 确定特征过流断面的位置和宽度。

①点 O_1 、 O_2 是 A_0B_0 断面下游第1、2条等高线与沟道深泓线的交点(图3a)。

②点 O_1 和点 O_2 间沟道深泓线的长度为 $L_{O_1O_2}$, h_e 是相邻两条等高线间的高程差。点 C_1 是点 O_1 和点 O_2 间沟道深泓线上的一点,点 O_1 和点 C_1 间沟道深泓线的长度为 $L_{O_1C_1}$ 。点 C_1 的位置根据 $L_{O_1C_1}/L_{O_1O_2} = h_0/h_e$ 确定,即 $L_{O_1C_1} = h_0/h_e * L_{O_1O_2}$ (图3a)。假定相邻两条等高线间地形坡度均匀变化,则点 C_1 与第1条等高线间的高程差刚好为 h_0 。

过点 C_1 作一个与泥石流沿沟道运动方向垂直的横断面作为泥石流过流断面,断面与第1条等高线的交点分别为点 A_1 和点 B_1 (图3a)。因为点 C_1 与第1条等高线间的高程差为 h_0 ,故点 C_1 与点 A_1 和点 B_1 之间的高程差均为 h_0 ,过流断面 A_1B_1 (图3a)的流深为 h_0 。点 A_1 和点 B_1 分别为点 C_1 处泥石流流深为 h_0 时的过流断面横向边界点。过流断面 A_1B_1 为第一个由流深 h_0 确定的特征过流断面。

③重复上述步骤①和②,在第2条和第3条等高线之间确定第2个流深为 h_0 的特征过流断面 A_2B_2 。以此类推,在堆积扇地形图上 n 条等高线之间共获得 $n-1$ 个流深为 h_0 的泥石流特征过流断面(A_1B_1 、 A_2B_2 、 A_3B_3 、...、 $A_{n-1}B_{n-1}$),如图3a。

第三步:弯道特征过流断面修正。

如果堆积区沟道无明显弯道,则直接进入第四步(泥石流淤积范围的划定);如果堆积区沟道有明显弯道,则根据弯道处流深超高修正上述泥石流特征过流断面的宽度。

①弯道过流断面流深超高计算。

根据式(7)日本(高桥保)公式计算弯道过流断面泥石流流深超高^[30]。

$$\Delta h = 2 \frac{Bc \cdot Vc^2}{Rc \cdot g} \quad (7)$$

式中: Δh 为泥石流流深弯道超高(m); Bc 为泥石流表面宽度(m); Vc 为泥石流流速, (m/s); Rc 为沟道中线曲率半径(m); g 为重力加速度($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$)。

②弯道特征过流断面宽度修正。

泥石流过流断面流深越大,则在该断面上向两

侧淤积泛滥的宽度就越大。弯道超高的实质就是表现为弯道凹岸侧泥石流流深的增大。因此,泥石流弯道超高对淤积泛滥范围的影响就表现为弯道过流断面在凹岸侧的增宽。

借助地形图等高线的分布,在弯道过流断面的凹岸端,补充因弯道超高效应(泥石流流深增加)而拓宽的部分,得到经弯道超高修正后的泥石流过流断面宽度,如图3b中的过流断面 A_1B_{1-1} 、 A_2B_{2-2} 。

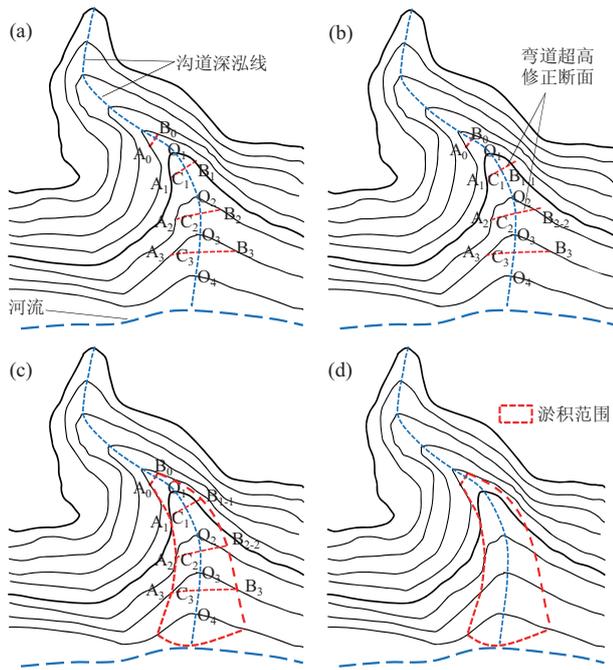


图3 泥石流堆积扇淤积范围划分过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram for delineating debris flow inundation range on alluvial fan

第四步:依次连接点 A_i 和点 B_{i-1} (图3c),得到泥石流淤积范围(图3d)。

对于泥石流沟道较深,弯道凹岸侧地形较陡的情况,直接根据经弯道超高修正后的泥石流特征过流断面的分布,得到弯道超高效应下的泥石流淤积范围。

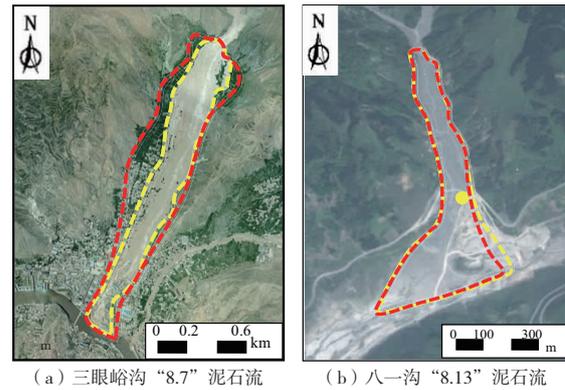
对于泥石流沟道较浅,弯道凹岸侧地形较缓的情况,如泥石流弯道流深超高较大,泥石流直接冲出弯道(沟道),则需考虑泥石流冲出后的直进性和冲出弯道后堆积扇局部地形的起伏变化,泥石流可能会沿冲出弯道的运动方向继续运动和淤积,在弯道后下游区域泥石流淤积范围会因此明显增加。

3 验证结果与分析

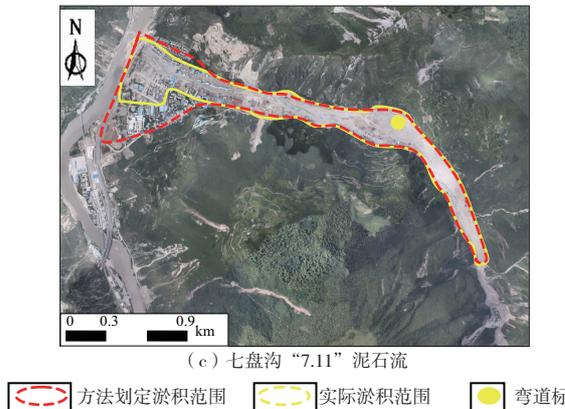
3.1 三眼峪沟“8.7”泥石流淤积范围

三眼峪沟 2010 年“8.7”泥石流峰值流量 $1712\text{ m}^3/\text{s}$ 时沟口过流断面流深为 3.2 m 。以 3.2 m 作为堆积扇上其他过流断面的特定流深,在 $1:50000$ 地形图上共计得到8个特征过流断面的分布。方法划定的淤积范围及实际淤积范围如图4a所示,实际淤积范围在方法划定的淤积范围内。

三眼峪沟堆积扇中部右侧有一处相对平坦的区域,该处地形有不能被 $1:50000$ 地形图(相邻等高线间高程差 20 m)显示的地形抬升,造成了方法划定的淤积范围在泥石流冲出沟口后迅速向右侧扩展,划定的最大淤积宽度大于实际最大淤积宽度(图4a)。如有更详细比例尺的地形图,能更好地反映堆积扇微地形变化,本文方法的研究结果会更好,能得到更接近实际的淤积范围。



(a) 三眼峪沟“8.7”泥石流 (b) 八一沟“8.13”泥石流



(c) 七盘沟“7.11”泥石流

方法划定淤积范围 实际淤积范围 弯道标记

图4 泥石流淤积范围

Fig. 4 Inundation ranges of debris flows

3.2 八一沟“8.13”泥石流淤积范围

八一沟 2010 年“8.13”泥石流峰值流量

1260 m³/s时沟口过流断面流深为7.0 m。以7.0 m作为堆积扇上其他过流断面的特定流深,在1:10000地形图上共计得到11个特征过流断面的分布。弯道处(图4b)特征过流断面流深超高2.8~3.2 m,根据地形图,特征过流断面宽度相应增加5~33 m。方法划定的考虑弯道超高效应后的淤积范围和实际淤积范围非常接近(图4b)。

3.3 七盘沟“7.11”泥石流淤积范围

七盘沟2013年“7.11”泥石流峰值流量1755 m³/s时沟口过流断面流深为8.8 m。以8.8 m作为堆积扇上其他过流断面的特定流深,在1:50000地形图上共计得到12个特征过流断面的分布。弯道处(图4c)特征过流断面流深超高1.1 m,根据地形图,特征过流断面宽度相应增加4 m。实际淤积范围总体在方法划定的淤积范围内,误差主要发生在堆积扇前端左侧区域(图4c)。

堆积扇上大量房屋的分布能改变泥石流运动方向,影响淤积范围^[32]。七盘沟堆积扇前端左侧区域地形相对平坦开阔,其上修建了大量房屋,受其阻挡影响,“7.11”泥石流并未在左侧明显扩展运动和淤积,该处方法划定的淤积宽度大于实际淤积宽度。

4 讨论

在没有条件获取大比例尺地形图开展数值模拟,以及没有大量数据资料进行经验模型构建或修正的情况下,本文提出的方法可以简单、快速地获取泥石流淤积范围,为危险性、易损性和风险评价提供基础资料。只要满足泥石流堆积区地形图具有至少3条等高线,则能得到两个及以上的泥石流特征过流断面,可完成泥石流淤积范围的初步划定,即方法可用。

本文方法基于堆积区过流断面流深和弯道超高效应来界定泥石流在运动淤积过程中的横向扩展边界。方法因未做淤积长度确定方法的探讨,假定了泥石流运动淤积远端为堆积扇前缘,且进行方法验证的3次泥石流事件均属于规模相对较大的情况,在纵向上都运动淤积到堆积扇前缘(河岸),即方法验证中主要是针对淤积宽度。但对于规模较小而堆积区相对较大的情况,还必须考虑泥石流运动淤积的纵向停止问题,如Iverson等^[17]提出的根据泥石流总体积与淤积区最大平面面积的关系来确定泥

石流淤积的最远端。在后续研究中当补充完善了泥石流淤积远端(淤积长度)的确定方法后,前述堆积扇平均堆积厚度 ≥ 0.5 m则不再作为方法适用的参考条件。此外,对沟道较深、较宽,且泥石流规模较小的情况,泥石流全部在沟道中运动淤积,本方法不适用该种泥石流危险范围的研究。

5 结论

(1)针对仅有小比例尺地形图、历史灾害资料缺乏、传统方法使用受限的情况,提出一种适用于沟谷型泥石流淤积范围划分的新方法。方法假定泥石流峰值流量时沟口过流断面平均流深(h_0)为堆积扇上其他过流断面的特定流深。结合堆积扇地形图上等高线的分布,在相邻两条等高线间获得流深为 h_0 的特征过流断面位置和宽度。当堆积区沟道有明显弯道时(如八一沟),需对弯道处的特征过流断面宽度进行弯道超高修正。根据多个特征过流断面的分布确定泥石流淤积范围。

(2)3条泥石流案例用于方法验证,结果表明,本文方法划定的淤积范围与实际淤积范围较一致,堆积扇上大量高层房屋的阻挡和不被地形图识别的大范围相对平坦地形是造成淤积范围误差的主要原因。

(3)针对规模相对较小而堆积扇相对较大的泥石流淤积范围划分,还需要探讨淤积纵向停止位置(淤积长度)。泥石流淤积远端确定、堆积扇上建筑物的阻挡效应、更多案例验证等问题需要在将来的工作中考虑并进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 韦方强,谢洪,JOSE Luis Lopez,等. 委内瑞拉1999年特大泥石流灾害[J]. 山地学报,2000,18(6):580-582 [WEI Fangqiang, XIE Hong, JOSE Luis Lopez, et al. Extraordinarily serious debris flow disasters in Venezuela in 1999[J]. Mountain Research, 2000, 18(6): 580-582]
- [2] 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 Bin, YANG Yonghong, SU Yongchao, 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]
- [3] 周明慧,熊海贝,赵书平,等. 泥石流冲击力简化计算方法——以舟曲县三眼峪泥石流为例[J]. 山地学报,2017,35(2):187-194 [ZHOU Minghui, XIONG Haibei, ZHAO Shuping, et al.

- Simplified calculation of impact force of debris flow based on the case study of Sanyan valley debris flow[J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(2): 187 - 194]
- [4] 许强. 四川省8.13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(5): 596 - 608 [XU Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: Characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(5): 596 - 608]
- [5] 刘希林, 唐川, 朱静, 等. 泥石流危险范围的流域背景预测法[J]. *自然灾害学报*, 1992, **1**(3): 56 - 67 [LIU Xilin, TANG Chuan, ZHU Jing, et al. The drainage background forecast on the risk range of debris flow[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1992, **1**(3): 56 - 67]
- [6] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 27 - 34 [LIU Xilin, TANG Chuan. Debris flow hazard assessment [M]. Beijing: Science Press, 1995: 27 - 34]
- [7] 柳金峰, 欧国强, 游勇. 泥石流流速与堆积模式之实验研究[J]. *水土保持研*, 2006, **13**(1): 120 - 121, 226 [LIU Jinfeng, OU Guoqiang, YOU Yong. Experimental research on velocity and deposition mode of debris flow[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, **13**(1): 120 - 121, 226]
- [8] 柳金峰, 欧国强, 游勇, 等. 不同出口山脚约束的泥石流淤埋实验研究[J]. *灾害学*, 2009, **24**(3): 7 - 10 [LIU Jinfeng, OU Guoqiang, YOU Yong, et al. An experimental study on debris flow silting and burying damage under condition of mountain foot constraint[J]. *Journal of Catastrophology*, 2009, **24**(3): 7 - 10]
- [9] 柳金峰, 欧国强, 游勇. 粘性泥石流扇状地发展过程实验研究[J]. *灾害学*, 2012, **27**(2): 13 - 18 [LIU Jinfeng, OU Guoqiang, YOU Yong. Experimental study of fan development process of viscous debris flow[J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, **27**(2): 13 - 18]
- [10] ADAM B P, PAUL M S, JERRY D H, et al. Debris-flow runout predictions based on the average channel slope (ACS) [J]. *Engineering Geology*, 2008, **98**: 29 - 40
- [11] 铁永波, 唐川, 倪化勇. 暴雨泥石流冲出距离预测[J]. *山地学报*, 2011, **29**(2): 250 - 253 [TIE Yongbo, TANG Chuan, NI Huayong. Prediction of rainstorm-induced debris flow runout distance[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, **29**(2): 250 - 253]
- [12] RICKENMNN D. Empirical relationships for debris flows [J]. *Natural Hazards*, 1999, **19**: 47 - 77
- [13] SCHILLING S P, IVERSON R M. Automated, reproducible delineation of zones at risk from inundation by large volcanic debris flows: [C]//Proceedings of the First International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation. San Francisco: ASCE, 1997, 176 - 186
- [14] LORENTE A, BEGUERÍA S, BATHURST J C, et al. Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, **3**: 683 - 692
- [15] TANG C, ZHU J, CHANG M, et al. An empirical-statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area[J]. *Quaternary International*, 2012, **250**: 63 - 73
- [16] HÜRLIMNN M, RICKENMNN D, MEDINA V, et al. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment[J]. *Engineering Geology*, 2008, **102**: 152 - 163
- [17] IVERSON R M, SCHILLING S P, VALLANCE J W. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, **110**(8): 972 - 984
- [18] SCHILLING S P. LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones [R]. U. S. Geological Survey Open-File Report, 1998, 98 - 638
- [19] DORTA D O, TOYOS G, OPPENHEIMER C, et al. Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ[J]. *Natural Hazards*, 2007, **40**: 381 - 396
- [20] PISTOLESI M, CIONI R, ROSI M, et al. Lahar hazard assessment in the southern drainage system of Cotopaxi volcano, Ecuador: Results from multiscale lahar simulations [J]. *Geomorphology*, 2014, **207**: 51 - 63
- [21] BERTI M, SIMONI A. Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships[J]. *Geomorphology*, 2007, **90**: 144 - 161
- [22] BERTIN M, SIMONI A. DFLOWZ: A free program to evaluate the area potentially inundated by a debris flow [J]. *Computers & Geosciences*, 2014, **67**: 14 - 23
- [23] FRACCAROLLO L, PAPA M. Numerical simulation of real debrisflow events[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2000, **25**(9): 757 - 763.
- [24] GHILARDI P, NATALE L, SAVI F. Modeling debris flow propagation and deposition[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (C)*, 2001, **26**(9): 651 - 656
- [25] 胡卸文, 刁仁辉, 梁敬轩, 等. 基于 CFX 的江口沟泥石流危险区范围预测模拟[J]. *岩石力学*, 2016, **37**(6): 1689 - 1696 [HU Xiewen, DIAO Renhui, LIANG Jingxuan, et al. Prediction of the scope of Jiangkou gully debris flow hazard using CFX software[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(6): 1689 - 1696]
- [26] HÜBL J, STEINWENDTNER H. Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (C)*, 2001, **26**(9): 639 - 644
- [27] RICKENMNN D, LAIGLE D, MCARDELL B W, et al. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events [J]. *Computational Geosciences*, 2006, **10**: 241 - 264
- [28] CANUTI P, CASAGLI N, CATANI F, et al. Modeling of the Guagua Pichincha volcano (Ecuador) lahars [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, **27**: 1587 - 1599
- [29] 刘清华, 余斌, 唐川, 等. 四川省都江堰市龙池地区泥石流危险性评价研究[J]. *地球科学进展*, 2012, **27**(6): 670 - 677 [LIU Qinghua, YU Bin, TANG Chuan, et al. A study of hazard

- assessment of debris flows in Longchi area of Dujiangyan city, Sichuan province[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(6) : 670 – 677]
- [30] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范 [S]. 2006:26 – 27,31 [Land and Resources Ministry of People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flow stabilization[S]. 2006: 26 – 27, 31]
- [31] 王继康. 泥石流防治工程技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 1996:61 [WANG Jikang. Technology of debris flow prevention and control engineering [M]. Beijing: China Railway Press, 1996: 61]
- [32] GAO L, ZHANG L M, CHEN H X, et al. Simulating debris flow mobility in urban settings[J]. *Engineering Geology*, 2016, **214**: 67 – 78

Delineation of Debris Flow Inundation Range Based on Flow Depth and Curve Superelevation

LIU Qinghua¹, TANG Chuan², YU Bin²

(1. College of Environment and Ecology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China)

Abstract: A new method for delineating the inundation range of a confined debris flow was proposed in this research, which could deal with debris flow occurrences lacking large-scale topographic maps and historical disaster data. The method assumed that debris flows bring about the maximum inundation ranges at the peak discharge, and the end of longitudinal deposition of a debris flow is the front edge of a debris flow fan. The maximum average flow depth (h_0) of a cross-section at gully mouth was assumed to be applicable to all of cross sections on debris flow fan, and h_0 could be estimated in terms of peak flow value and geometric parameters of a cross-section at gully mouth. The position and width of a characteristic debris flow cross-section defined by h_0 were obtained between adjacent two contour lines in topographic map, and the width had to make further curve superelevation correction. The inundation range of a debris flow can be determined according to the distribution of the characteristic cross sections on alluvial fan. Three cases of debris flows were used for method verification. The results showed that the inundation ranges delineated by our proposed method were generally consistent with field observations, although blockage of houses built on the fans as well as the relatively flat topography mainly resulted in minor errors. The method is simple, fast, objective and repeatable to use.

Key words: alluvial fan; inundation range; debris flow peak discharge; cross-sectional flow depth; inundation width; curve superelevation