应用技术

5·12 地震后灾区泥石流危险度增加系数评价

沈兴菊[1]，张金山[2,3]，王士革[2,3]，谢 洪[2,3]，魏军林[4]
（1. 西南民族大学 旅游与历史文化学院，四川 成都 610041；2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室，四川 成都 610041；3. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所，四川 成都 610041；4. 四川省金科成地理信息技术有限公司，四川 成都 610041）

摘 要：5·12 地震不仅直接引发了大量的崩塌、滑坡，而且降低流域内岩土体的强度，使其更易于受到侵蚀，从而为泥石流的形成提供丰富的固体物质。灾区震后泥石流活动频繁，并造成了较大的损失。泥石流沟的危险度评价是进行灾后重建的必要条件。选择震后固体物质增加量、地震烈度和堰塞坝规模这 3 个重要参数，提出了基于泥石流设计流量的震后泥石流危险度增加系数的评价方法。该方法通过计算地震后新增加的固体物质方量与通过配方法计算出的一次泥石流冲出物总量的比值，该比值与地震烈度影响系数的乘积及堰塞体蓄水量以流域 50 年一遇的流量排泄所需要时间 3 项之和来表达地震后泥石流危险度增加量。经灾区 9 条典型泥石流沟谷的计算验证，该方法做为一种新的方法，可快速、准确地评价 5·12 地震后灾区泥石流危险度的增加情况。

关键词：地震灾区；泥石流；危险度；增加系数
文献标识码：A 文章编号：1000-288X(2010)05-0096-05 中图分类号：P642.23

Evaluation of Debris Flow Risk in Worst-hit Area of Wenchuan Earthquake Based on Increase Coefficient

SHEN Xing-ju[1], ZHANG Jin-shan[2,3], WANG Shi-ge[2,3], XIE Hong[2,3], WEI Jun-lin[4]
(1. *College of Tourism and History & Culture, Southwest University for Nationalities, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 2. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 3. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 4. *Sichuan JKC Geographical Information Technologies Co., Ltd., Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

Abstract: Wenchuan Earthquake not only induced a large amount of collapses and landslides immediately, but also reduced the strength of rock and soil mass in drainage basin, which makes them to be eroded more easily, so that abundant solid matter is provided for the formation of debris flows. The occurrence of debris flow is frequent in the disaster area after the earthquake and great losses have been caused. Evaluation on the risk degree of debris flow ditches is a necessary condition for post-disaster reconstruction. Three important parameters, i.e., increment of solid matter, seismic intensity, and scale of barrier dam, are selected and evaluation method on increase coefficient of debris flow risk degree after earthquake is put forward based on designed debris flow. In this method, increase of debris flow risk degree is expressed by the ratio of added volume of solid matter to gross obtruding matter in a debris flow, seismic intensity multiplying the ratio, and time (hour) needed to drain water body in barrier dam with $P_{50\%}$ flux of the valley. By the validation of calculation for 9 typical debris flow ditches in the disaster area, the increase of debris flow risk degree in the May 12th disaster area after earthquake can be assessed by the new method, rapidly and precisely.

Keywords: **disaster area of Wenchuan earthquake; debris flow; risk degree; increase coefficient**

“5·12”地震引发了大量的崩塌、滑坡、不稳定边坡，造成大量的松散碎屑物质堆积在沟道和坡面上，为泥石流的形成提供了丰富的物质基础。地震后重灾区汶川、北川、青川、茂县等地，受降雨激发，多次发生泥石流，危及灾区群众的生命财产安全，并造成公路损毁、交通中断，阻碍了抗震救灾工作的开展。据

收稿日期：2010-03-03 修回日期：2010-04-09
资助项目：灾区次生地质灾害快速调查(2008BAK47B03-01)；中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金
作者简介：沈兴菊(1974—)，女(汉族)，甘肃省古浪县人，讲师，研究方向为自然地理。E-mail：sxju@163.com。

研究, 震后 10~20 a 内, 汶川地震强震区泥石流将处于高度活跃期, 是震后发育最广泛、影响最大的灾害形式[1]。如 2008 年 9 月 24 日汶川地震区中心位置的北川一带突降暴雨, 导致区域性泥石流的暴发, 位于北川老县城附近的西山坡沟暴发大规模泥石流, 导致了 42 人死亡、失踪[2]。

人们很早就开始了地震影响泥石流活动的研究。钟敦伦[3]认为, 地震在泥石流活动中从多方面起着重要作用, 强地震区往往是泥石流的强烈活动区, 地震可为泥石流的形成提供丰富的松散固体物质、充足的动力条件, 在一定条件下还可以为泥石流活动提供水源。谢正伦、陈俞旭[4-5]根据 1999—2006 年的监测数据, 分析了台湾集集地震后地震区激发泥石流的临界暴雨量, 指出由于地震为泥石流提供了大量的固体松散物质, 震后地震区泥石流发生的临界雨量基准线大幅度的下降。陈宁生[6]利用土动三轴剪力仪, 取泥石流源区的砾石土作为实验对象, 证实了地震的作用会使泥石流源区的砾石土体强度降低, 导致土源大量激发, 促进泥石流的暴发的设想。

泥石流是突发性的灾害过程, 历时短暂, 一旦成灾, 往往损失严重。因此, 进行泥石流灾害发生前的危险性评价, 具有重要的实际意义, 它不仅为国家和地区经济发展、产业布局提供依据, 而且还能为布设防灾减灾工程提供决策支持, 是减轻灾害损失的重要的非工程措施。国际上对泥石流危险性评价非常重视, 有关危险性的研究也相对较早[7], 目前泥石流危险性评价的研究得到了长足的进展, 研究成果的实用性和可操作性不断加强[8], 在防灾减灾实践中被广泛应用。但这些方法涉及参数多, 所需数据不易获得, 更关键的是地震引起的岩土体变得更为松散、沟谷内堰塞坝的作用等特征难以用常规的参数来表达, 使得建立在常规条件下的泥石流危险度评价方法在灾区震后泥石流危险度评价中的使用中受到限制。5·12 汶川大地震发生以后, 关于地震泥石流的研究十分活跃[2, 9-15], 但对震区泥石流危险度评价方法的研究还未见诸文献。因泥石流危险性评价已有一些比较成熟的方法, 所以本文目标锁定在震后危险度的增加情况的评价中。针对震后灾区沟谷内固体物质增加量、地震烈度、堰塞坝规模等参数, 建立模型计算这些因素引起的泥石流危险度的增加量, 最后综合计算为震后泥石流危险度增加系数。危险度增加系数可表征地震对沟谷泥石流促进作用的程度, 与应用成熟方法评价的沟谷原有危险度进行运算还可得到沟谷地震后的危险度。

1　地震后泥石流危险度增加系数的评价模型

地震直接造成大量的崩塌、滑坡物质堆积于沟谷, 不仅给泥石流提供了丰富的固体物质来源, 而且阻塞沟谷, 产生溃决洪水的可能性大大增加, 从而更易于暴发泥石流。另外由于地震及其后余震的多次作用, 陡峻的山坡产生大量的边坡重力裂缝, 降雨时地表水渗入裂缝, 在水的静压力和动压力作用下形成一个软弱带, 软弱带之上的土石体因水分饱和重量增加, 且变得松软, 易于形成崩塌、滑坡或受到侵蚀而发生泥石流, 导致泥石流危险度增加。地震后泥石流沟危险度增加系数的评价应从流域和沟谷内增加的固体物质方量、地震影响程度及堰塞坝规模等方面开始。

1.1　新增固体碎屑物质造成的泥石流危险度增加量

地震是地壳活动的剧烈表现形式, 瞬间造成山河巨变, 在剧烈活动的过程中植被被破坏, 在遥感图像上根据地震前后的植被变化就可能大致确定崩塌滑坡发生的面积, 结合实地调查的崩滑体厚度可估算地震贡献的固体物质方量。

以 5·12 地震后的 2008 年 5 月 16 日遥感图像为基础进行固体物质方量的估算, 首先将地震前后的遥感图像进行比较, 量算出地震后裸露岩体面积的变化量, 并根据实地调查确定的崩塌滑坡厚度, 计算出增加的固体物质方量。但固体物质增加量在不同的流域无法直接进行比较, 一般在沟谷泥石流危险度评价中通行的做法是计算单位面积上的固体物质方量, 将其做为影响泥石流危险度的一个参数, 而本文拟通过固体物质的增加量来判断其对泥石流活动的贡献则必须将其与泥石流活动直接联系起来, 所以本文选择了一次泥石流冲出物总量这一参数, 计算增加的固体物质方量与一次泥石流冲出物总量的比值来表达因固体物质增加引起的泥石流危险度增加量。

本文采用泥石流防治工程设计中常用的配方法来计算一定设计频率下泥石流的洪峰流量和一次泥石流冲出物总量[16]。因形成灾害的泥石流暴发频率都较低[17], 结合地震灾区以往泥石流的暴发特征, 本文泥石流的设计洪峰流量和总量计算时采用 $P_{2\%}$ 即 50 年一遇的标准。计算步骤如下:

(1) 按水文方法计算 $P_{2\%}$ 时的设计洪水流量 Q_w, 洪水总历时 T(计算方法查阅当地水文手册)。

(2) 用配方法计算 $P_{2\%}$ 时的设计泥石流洪峰流量。

(3) 用概化过程线法计算一次泥石流总量 W_c 和

冲出固体物质方量 W_s。

用地震后新增固体物质方量与 $P_{2\%}$ 的泥石流固体物质总量的比值来表达新增固体物质对泥石流危险度的增加量，其物理意义是地震后新增加的固体物质需要多少次这种规模的泥石流来输移。

$$A_s=\frac{W_{ks}}{W_s} \tag{1}$$

式中：A_s——地震后泥石流危险度增加量；W_{ks}——沟内固体物质总方量；W_s——设计频率泥石流固体物质总量。

用配方法计算泥石流设计洪峰流量和冲出物总量时综合考虑了沟谷的流域条件和降水条件，使增加的固体物质方量与泥石流活动直接联系起来，可以用来判断因固体物质的增加对泥石流危险度的贡献大小。

1.2 岩土体松散造成的泥石流危险度增加量

地震载荷的反复作用使岩土体松软，更易于侵蚀，也会促进泥石流的形成。但这种现象在地表没有明显表现，特别是从遥感图像上难以反映出来，为了将这些地表难以反映出来的现象在评价时有所考虑，本文引入了烈度对泥石流的影响系数。据研究[3]，烈度 7°以下对泥石流活动基本没有影响，7°以上烈度对泥石流影响大小用影响系数表示，各级地震烈度对应的影响系数采用专家打分的方法赋值（表 1）。

表 1 地震烈度对泥石流的影响系数表

地震烈度	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	Ⅹ	Ⅺ	Ⅻ
影响系数	0	0.30	0.55	0.75	0.90	0.95	1.00

根据经验，若一个流域中地震作用下产生的滑坡、崩塌较多，则其未发生滑坡、崩塌的区域岩土体松散程度也更大一些。所以可将设定的地震烈度对泥石流的影响系数与上述崩塌、滑坡提供的固体物质的危险度增加量相乘来表示地震烈度造成流域泥石流危险度的增加量。

$$R_{as}=A_s\cdot S_i \tag{2}$$

式中：R_{as}——用地震烈度表示的岩土体松散影响下泥石流危险度的增加量；S_i——设定的地震烈度影响系数。

1.3 堰塞体造成的泥石流危险度增加量

当沟岸上大量的崩滑物质进入沟谷对沟谷产生阻塞时，就会形成堰塞湖。堰塞湖蓄水到一定高度后溃决，这种溃决洪水暴发突然，规模巨大，可以起动沟谷内的松散固体物质成为泥石流。暴雨激发泥石流与其流量关系密切，在用配方法计算泥石流流量时也认为在洪水达到一定流量时才可形成泥石流，所以本文用堰塞湖的库容大小与一定设计频率的洪峰流量的比较来判断其对泥石流暴发的影响。根据前面的分析，5·12 地震灾区 $P_{2\%}$ 的设计洪峰流量与泥石流危险度关系密切，计算堰塞坝内水体以此流量排泄所需要的时间（h）作为堰塞体增加泥石流危险度的增加量。

$$A_d=\frac{3\,600\cdot W_d}{Q_c} \tag{3}$$

式中：A_d——考虑堰塞坝后的泥石流危险度增加量；W_d——堰塞坝库容，可根据流域地形图和测量的堰塞体高度使用 GIS 的填挖方功能计算；Q_c——最大泥石流设计流量。

1.4 震后泥石流危险度增加系数

上述计算的 3 类泥石流危险度增加量相互间基本独立，相加后可全面表达地震后泥石流危险度的增加情况，为了与原来评价的危险度衔接，在计算结果中加 1，然后与原评价结果相乘就是该沟地震后的泥石流危险度。我们将其定义为地震后泥石流危险度增加系数。

$$R_a=1+(A_s+R_{as}+A_d)/10 \tag{4}$$

式中：R_a——地震后泥石流危险度增加系数，其余参数同前。

震后泥石流危险度增加系数与原沟谷泥石流危险度相乘便是地震后沟谷泥石流危险度的综合评价结果。

2 典型沟谷震后泥石流危险度增加系数评价

为验证震后泥石流危险度增加系数计算的合理性，本文选取 5·12 地震重灾区位于不同烈度，不同环境背景区的 9 条泥石流沟进行计算（表 2），这 9 条泥石流沟的分布及其所处地地震烈度区如图 1 所示。

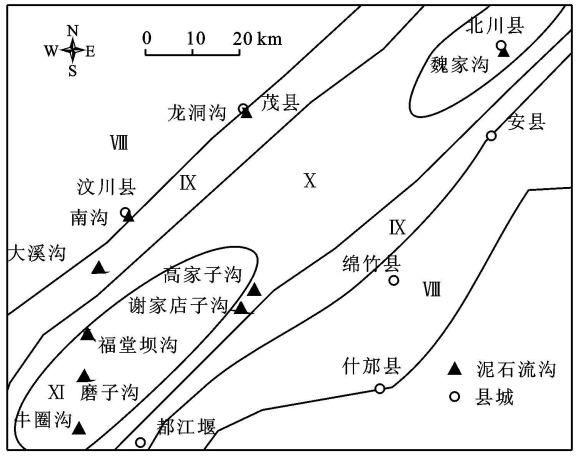


图 1 典型泥石流沟分布及其所处烈度区

表 2　典型泥石流沟基本参数

沟 名	行政区	水系及岸别	流域面积/ km^2	沟长/ km	沟床比降/ ‰	泥石流容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)
大溪沟	汶川绵虒镇	岷江右岸	15.73	7.63	314	2.0
磨子沟	汶川县银杏乡	岷江右岸	7.06	5.18	337	2.1
牛圈沟	汶川县映秀镇	岷江右岸	10.49	6.33	191	2.2
谢家店子沟	彭州市龙门山镇	沱江支流湔江右岸	0.78	2.01	385	2.2
高家子沟	彭州市龙门山镇	沱江支流湔江右岸	2.36	2.70	376	2.2
魏家沟	北川县曲山镇	涪江支流湔江右岸	0.58	1.89	163	2.2
龙洞沟	茂县凤仪镇	岷江左岸	14.52	9.15	237	2.0
福堂坝沟	汶川县银杏乡	岷江左岸	33.46	10.36	227	2.1
南 沟	汶川县威州镇	岷江左岸	6.90	13.37	210	2.0

2.1　计算过程

根据式(1)计算崩塌、滑坡等新增固体碎屑物质造成的各沟泥石流危险度增加量(表 3)。

表 3　固体碎屑物数量所致的泥石流危险度增加量

沟 名	碎屑物方量/ $10^4\ m^3$	$P_{2\%}$ 泥石流总量/ $10^4\ m^3$	危险度增量
南 沟	19.6	31.84	0.72
魏家沟	10.1	12.15	2.53
高家子沟	35.2	64.14	1.18
谢家店子沟	10.4	16.20	1.82
牛圈沟	214.2	235.36	1.34
磨子沟	135.9	119.13	1.86
大溪沟	123.8	143.81	0.82
福堂坝沟	173.9	376.79	0.42
龙洞沟	19.6	104.00	0.18

根据式 2 计算地震引造成岩土体松散所致的泥石流危险度增加量(表 4)。

表 4　岩土体松散所致的泥石流危险度增加系数

沟 名	地震烈度影响系数	危险度增加系数
南 沟	0.55	0.40
魏家沟	0.95	2.40
高家子沟	0.90	1.06
谢家店子沟	0.90	1.63
牛圈沟	0.95	1.28
磨子沟	0.95	1.77
大溪沟	0.75	0.62
福堂坝沟	0.90	0.38
龙洞沟	0.75	0.14

这些典型泥石流沟中大溪沟沟谷中有堰塞体(图 2),根据实地调查测量,该堰塞体最低处高 31 m,使用地震前地形图用 GIS 软件的填方分析法算得该堰塞湖库容为 $1.4\times10^5\ m^3$。根据式(3),大溪沟 50 年一遇的洪峰流量为 138.56 m^3/s,库内蓄水若以此流量排泄,则需要 0.28 h 即可将库内蓄水完全排干,以此数据作为有堰塞体流域的危险度增加量。



图 2　大溪沟沟口地震崩塌形成堰塞体

根据式(4)计算 9 条典型沟谷泥石流危险度增加系数,最后的评价结果如表 5 所示。为便于比较验证,将各沟地震后泥石流活动情况也列于表中。

表 5　震后泥石流危险度增加系数及实际表现

沟 名	增加系数	实际表现
南沟	1.112	未暴发
魏家沟	1.494	暴发,规模较大
高家子沟	1.223	多次暴发,造成损害
谢家店子沟	1.345	暴发过
牛圈沟	1.262	多次暴发
磨子沟	1.362	多次暴发
大溪沟	1.172	未暴发
福堂坝沟	1.081	未暴发
龙洞沟	1.032	未暴发

2.2　评价结果分析

魏家沟、磨子沟、谢家店子沟、牛圈沟和高家子沟地震后危险度增加系数较大,都在 1.2 以上,这几条沟谷处于 5·12 地震的 X度以上烈度区,地震造成大量的崩塌滑坡,固体物质充足,泥石流十分活跃,泥石流规模也较大。魏家沟由于滑坡直接补给泥石流,2008 年 9 月暴雨引发了大规模的泥石流。磨子沟

5·12地震后该沟泥石流活动强烈,截止 2008 年 9 月已发生多次泥石流活动,泥石流淤埋和冲毁了沟口村内房屋,沟口形成巨大的堆积扇,堆积扇挤压岷江,并一度堵断岷江。谢家店子沟中 5·12 地震引发高速滑坡转化为碎屑流,堆积物在下游陡峻的山坡上停积,形成厚达 40 m 以上的堆积物质,大量固体物质在沟内、下游山坡及沟口堆积,加之上中游区域又多滑坡崩塌,固体物质十分充足,一旦有暴雨激发就会暴发泥石流。牛圈沟支沟莲花芯沟是 5·12 汶川大地震的地面暴发点,地震发生时莲花芯沟上游高速滑坡将大量的固体物质迅速输送到主沟内,大量的固体物质堆积于沟内及岸坡上,地震后已暴发过多次泥石流。高家子沟在震后也多次发生泥石流,造成了较大的损害。

大溪沟、磨子沟、福堂坝沟和龙洞沟地震后泥石流危险度增加系数较小,都在 1.2 以下。从实际表现来看,这几条沟谷除福堂坝沟外都处于 5·12 地震的Ⅸ度及以下烈度区,受地震的破坏作用较小,沟内堆积的松散固体物质相对较少,在 5·12 地震后这 4 条沟谷还没有暴发过泥石流,与评价结果相符。

3 结 论

(1) 从评价结果来看,地震后泥石流活动明显增强的魏家沟、磨子沟、谢家店子沟、牛圈沟、高家子沟的增加系数较大;计算出增加系数较小的大溪沟、龙洞沟、福堂坝沟和南沟实际中也没有表现出泥石流活动性增大的现象。可见该评价方法是合理的,也是实用的。

(2) 配方法计算泥石流的设计洪峰流量和固体物质总量时要根据流域面积、沟长、比降等参数结合流域降水特征使用水文模型计算设计洪峰流量和洪水过程,此方法以往多用于泥石流防治工程设计参数的计算中,本文尝试将其用于泥石流的危险度增加系数评价中,使增加的固体物质方量、堰塞坝规模与泥石流活动直接联系起来,用来判断这些因素对泥石流危险度的贡献大小,取得了较为理想的结果。

(3) 沟谷地震之前的泥石流危险度可用现有的较为成熟的方法进行评价,震后沟谷泥石流的危险度为原危险度乘以危险度增加系数。这一方法的优势在于可以充分使用以往的研究成果,不需要从头进行研究;而且有些沟谷以前已经进行过危险度的评价,可直接使用这些数据,节省了大量的成本。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川 9.24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 751-758.

[3] 钟敦伦. 试论地震在泥石流活动中的作用[C] //第一届全国泥石流学术会议论文集. 1980.

[4] 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.

[5] 陈俞旭. 地震对崩塌与土石流发生的影响之研究[D]. 台湾: 成功大学, 2008.

[6] 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.

[7] 刘希林. 我国泥石流危险度评价研究: 回顾与展望[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 1-8.

[8] 马鹏里, 蒲金涌, 辛吉武. 甘肃省长江流域大(暴)雨引发泥石流危险程度评价[J]. 水土保持通报, 2007, 27(5): 67-70.

[9] 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: 501-509.

[10] 陈宁生, 黄蓉, 李欢, 等. 汶川 5·12 地震次生泥石流沟应急判识方法与指标[J]. 山地学报, 2009: 108-114.

[11] 唐川, 铁永波. 汶川震区北川县城魏家沟暴雨泥石流灾害调查分析[J]. 山地学报, 2009: 625-630.

[12] 谢洪, 王士革, 孔纪名. "5.12" 汶川地震次生山地灾害的分布与特点[J]. 山地学报, 2008, 26(4): 396-401.

[13] 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.

[14] Chen N S, Yang C L, Zhou W, et al. The critical rainfall characteristics for torrents and debris flows in the Wenchuan earthquake stricken area[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(4): 362-372.

[15] Tang C, Zhu J, Li W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(2): 187-194.

[16] 国家防汛抗旱指挥部办公室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

[17] 张金山, 沈兴菊, 谢洪. 低频泥石流特征及防治: 以四川汶川县茶园沟为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 37-41.