

岷江上游潜在性泥石流堰塞湖危害及判识

柳金峰^{1,2}, 游 勇^{1,2}, 陈兴长³

(1.中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2.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; 3.西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:汶川地震造成泥石流形成条件的改变, 其次生灾害堰塞湖的危害已开始显现。如何对震后潜在性泥石流堰塞湖进行判识, 成为迫切需要解决的问题。选取岷江上游映秀至汶川段为研究区, 通过分析震后泥石流形成条件的变化、典型泥石流堰塞湖的危害及松散物质储量, 选取潜在性泥石流堰塞湖的判识指标, 利用模糊物元可拓模型, 建立潜在性泥石流堰塞湖的综合判识模式。通过判识, 研究区形成泥石流堰塞湖可能性高的一级支沟有17条, 主要集中分布在映秀镇至草坡乡段, 此段将是今后受堰塞湖危害的高危地段。

关键词:岷江上游; 泥石流; 堰塞湖; 潜在危害; 判识

中图分类号: P642.23 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2012)07-0885-07

引 言

汶川地震诱发的大量崩塌、滑坡提供了丰富的松散物源, 泥石流灾害会在未来相当长一段时间内处于活跃期^[1,2]。其次生灾害堰塞湖的危害已开始显现, 如岷江上游震后2008~2009年雨季只形成了磨子沟泥石流堰塞湖, 但是到2010年就形成4个堰塞湖, 且造成了较大危害, 如2010年8月14日, 映秀镇红椿沟暴发特大泥石流, 泥石流直接冲入岷江, 形成了长450 m、宽300 m、厚度达30 m的堰塞体, 堵塞导致岷江改道, 洪水涌入重建的映秀新城。震后泥石流的活跃导致堵河形成堰塞湖的可能性大大增加, 因此, 如何对震后潜在性泥石流堰塞湖进行判识, 以保障灾区人民生命财产的安全, 成为迫切需要解决的问题。本文选取岷江上游映秀至汶川段为研究区, 通过分析震后泥石流形成条件的变化、典型泥石流堰塞湖的危害, 选取潜在性泥石流堰塞湖的判识指标, 利用模糊物元可拓模型, 建立潜在性泥石流堰塞湖的综合判识模式。

1 背景概况

1.1 研究区概况

本文选取岷江上游映秀—汶川段为研究区

域。研究区域位于四川省阿坝州汶川县境内, 集水区面积565 km², 沿岷江的一级支沟共有55条(图1)。

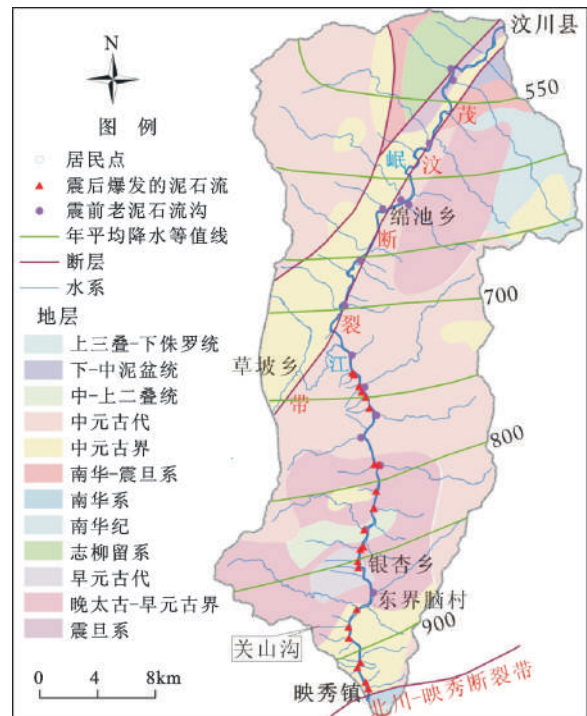


图1 研究区地质、降水及地震前后泥石流沟分布
Fig.1 The geology, rainfall of the study area and debris flow distribution before and after earthquake

收稿日期: 2011-05-03; 修订日期: 2011-09-12

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2009BAK56B05)、国家自然科学基金项目(40971014)资助。

作者简介: 柳金峰(1979-), 男, 安徽泾县人, 助理研究员, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。E-mail: liujf@imde.ac.cn

研究区位于青藏高原的东部边缘地带,属第一阶梯青藏高原向第二阶梯四川盆地及边缘山地过渡地带。地貌类型复杂,以高山峡谷为主,相对高度一般为1 000~4 000 m^[3]。研究区域土地主要集中分布在海拔1 000~4 000 m的高程范围内,占总面积的93.0%,其中海拔≥2 000 m高程的面积占总面积的77.7%。对研究区域山坡坡度进行分级统计可知,流域内≥25°的陡坡地占87.2%,可见研究区的山坡坡度主要以陡坡为主。

研究区位于四川盆地边沿的秦岭纬向构造带、龙门山北东向构造带与马尔康北西向构造带间的三角形地块内,在整体上属松潘—甘孜地槽褶皱系的北段,龙门山华夏系、岷江经向系、岷江旋扭构造系三大构造体系在区内均有展布。区内褶皱和断裂发育,尤其是深大断裂发育,如茂汶断裂、岷江断裂、米亚罗断裂等。出露的地层从元古界到新生界都有,岩性主要以陆相碎岩、火山碎岩、碳酸盐岩和区域变质岩为主(图1)。

研究区处于海陆季风气候向高原季风气候的过渡带,受水气来源和地形的影响,岷江上游各地的降水有较大差异(图1),干湿季节明显,全区多年平均降雨量在750 mm左右^[4]。汶川县的漩口是岷江上游的降水中心,年降水量达1 327.6 mm。区内降水在季节上分配不均匀,降水主要集中在下半年(5~10月),占全年降水量的80%~90%,且降水强度大,一日最大降水量为79.9 mm。

综上,研究区的地形、地质和降水条件有利于泥石流的形成,该区域历来就是泥石流灾害多发的区域^[4]。据震前统计,研究区共分布有泥石流沟15条(图1)。地震造成研究区物源的剧增,泥石流活动已经进入活跃期,并会持续很长一段时间,高度活跃的泥石流进入岷江后,不仅会抬升、挤压主河床,同时堵塞主河形成堰塞湖的可能性将会大大增加。

1.2 研究区堰塞湖危害概况

据野外考察,研究区震后在2008~2010年的雨季中,有22条沟暴发了泥石流,其中只有两条为震前老泥石流沟,其余20条是震后新增的泥石流沟(图1)。在已暴发的泥石流沟中,有4条(红椿沟、小磨子沟、关山沟和磨子沟)形成了堰塞湖,并造成了一定的危害。下面以岷江右岸的一级支沟关山沟为例,介绍泥石流堰塞湖及其危害情况。

关山沟位于汶川县银杏乡境内,该沟距离映

秀镇城区约5.4 km,距“5.12”汶川地震的宏观震中牛圈沟的直线距离为6.7 km(图1)。关山沟在汶川地震前并未暴发过泥石流,沟内植被条件较好,松散物源少。震后,松散物源剧增,地震引发的崩塌、滑坡的总方量约 $122 \times 10^4 \text{ m}^3$,如此巨大储量的松散物源,只要遇到一定的降水条件,非常容易形成泥石流^[5]。据野外考察,震后2008~2010年雨季,该沟共计暴发了十余场泥石流。2008年雨季后,泥石流在沟口形成了一个长约80 m,宽约150 m的堆积扇,泥石流并未造成岷江堵塞,而是将岷江逼向对岸,将岷江挤压成只有约5 m宽的河道(图2a,拍摄于2008年10月);2009年雨季后,沟口的泥石流堆积扇不断扩大,扇长约230 m,宽约250 m,泥石流堵断岷江,但是很快就溃决了,并未造成较大危害(图2b,拍摄于2009年12月);2010年雨季后,关山沟泥石流继续暴发,堵塞岷江,形成堰塞湖(图2c,拍摄于2010年11月),回水淹没距沟口上游1.6 km岷江右岸的银杏乡东界脑村(图1),97户新建的灾民重建房全部被淹,平均淹没深度约1.5 m(图2d,拍摄于2010年11月)。



图2 关山沟泥石流堰塞湖及其危害
Fig.2 The debris flow barrier lake of Guanshan gully and its damages

2 震后泥石流形成条件的变化

震后泥石流形成条件的最大变化主要由松散物质条件的变化所决定。松散物质丰富的沟道,在较低降雨条件下很容易起动形成泥石流;而那些松散物质条件相对较少的沟道,无论是形成泥石流的规模还是暴发频率,都不及松散物质丰富的沟道。松散物质条件是震后泥石流形成的关键因素^[6]。

本文采用TM卫星影像面上解译、典型支沟航片解译、典型灾害点现场调查三者相结合的方法对研究区震后松散物质进行了解译。数据主要采用震后2008年雨季前CBERS-2和TM卫星影像、1:25 000和1:5 000航空影像(图3)。



图3 研究区崩塌和滑坡分布
Fig.3 The distribution of landslides induced by earthquake

结果表明,研究区地震直接引发的崩塌、滑坡的总地表面积为39.40 km²,占总面积的6.97%。假定崩塌、滑坡总地表面积的55%为其堆积区面积,且平均堆积厚度为10 m,可估算得到研究区松散物质的总方量为2.13×10⁸m³。由图3可知,地震直接引发的松散物质从下游映秀镇向汶川县城递减,这与距离发震断层北川映秀断裂带的远近有关,据发震断层越近,其产生的崩塌、滑坡越多。充足的松散物源使泥石流暴发的频率和规模大大增加,加之岷江两侧山坡产生的大量松散物质直接进入主河,造成主河床抬升和变窄,泥石流直接进入主河后,更容易造成堵塞,形成堰塞湖,从而造成更大危害。

3 潜在性泥石流堰塞湖多因子综合判识

3.1 判识指标

本文采用多因子综合判识的方法,对可能造成堵河形成堰塞湖的泥石流沟进行判识。从泥石流本身的活动强度和沟口处主河的条件出发,选

取单位面积松散物源方量、支主流量比、泥石流沟床比降、主河宽度、主支夹角5个判识指标。结合目前现有文献研究^[7-9],指标的分级见表1。表1中支主流量比指标是支沟泥石流峰值流量(P=5%)与主流流量的比值,泥石流流量采用配方法计算^[10],其中堵塞系数的取法采用震后修改值^[11]。主流流量采用雨季(5~10)月平均最小流量,数据来源于汶川县威州水文站观测数据(2003~2008年)。

表1 潜在性泥石流堰塞湖判识指标分级

Table 1 The classification of the indices for potential debris flow barrier lakes identification

泥石流堰塞湖发生可能性	低	中	高
单位面积松散物源方量 c_1 ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$)	<10	10~50	>50
支主流量比 c_2	<0.5	0.5~1	>1
泥石流沟床比降 c_3 (%)	<100	100~300	>300
主河宽度 c_4 (m)	>100	50~100	<50
主支夹角 c_5 (°)	<30	30~90	>90

指标选取后,需对各个指标进行因子的独立性分析^[12]。本文采用SPSS 18.0软件的非参数检验工具,将选取的因子分为5组,进行多个独立样本的检验。通过软件提供的三种检验方法:Kruskal Wallis方法、中值方法和Jonckheere-Terpstra方法检验后,其渐近显著性值均小于0.05,表明在95%置信水平下,选取的5个指标之间有显著性差异,即五个指标是相互独立的。

由于各个指标的作用不同,因此,在潜在性泥石流堰塞湖判识之前,需要确定各个指标的权重。本文采用层次分析法确定各个指标的权重,首先构造判断矩阵如下:

$$Z = C_{ij} = \begin{bmatrix} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 \\ c_1 & 1 & 2 & 3 & 5 & 5 \\ c_2 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 5 \\ c_3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ c_4 & 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ c_5 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

通过一致性检验,确定单位面积松散物源方量、支主流量比、泥石流沟床比降、主河宽度、主支夹角5个因子的权重依次为0.45、0.26、0.15、0.09、0.05。

3.2 判识方法

本文采用模糊物元可拓性理论对潜在性泥石流堰塞湖进行多因子综合判识。模糊物元模型是通过引进物元,并对其变换和运算,从而从定

性和定量两个角度去研究解决问题的规律和方法;可拓集合和关联函数是可拓学定量化工具,可拓方法的理论基础是物元理论和可拓集合理论^[13-17]。研究区潜在性泥石流堰塞湖判识的计算步骤如下:

1) 物元分析。物元分析是用来处理在某些条件下,用通常的方法无法达到预期目标不相容问题规律的一种分析方法。在物元分析中,物元的表达形式为:

$$R=(M,C,X) \tag{1}$$

式中, R 为物元,为潜在性泥石流堰塞湖判识; M 为所描述的事物,为所需评价的潜在性泥石流堰塞湖可能性的高低; C 为所描述的事物的特征,为选取的指标体系; X 为量值,为指标的量化值。

2) 物元矩阵。根据选取的5个潜在性泥石流堰塞湖判识的指标,构建物元矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} M & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & c_3 & x_3 \\ & c_4 & x_4 \\ & c_5 & x_5 \end{bmatrix} \tag{2}$$

3) 节域对象物元矩阵。根据表1中选取的5个指标的取值范围,构建节域对象物元矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} M_p & c_1 & [a_{p1}, b_{p1}] \\ & c_2 & [a_{p2}, b_{p2}] \\ & c_3 & [a_{p3}, b_{p3}] \\ & c_4 & [a_{p4}, b_{p4}] \\ & c_5 & [a_{p5}, b_{p5}] \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中, M_p 为由标准事物加上可转化为标准的事物组成的节域对象; x_{pi} 为节域对象关于特征 c_i 的量值范围, $x_{pi}=[a_{pi}, b_{pi}]$ 。

经典域对象物元矩阵可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} M_B & c_1 & [a_{B1}, b_{B1}] \\ & c_2 & [a_{B2}, b_{B2}] \\ & c_3 & [a_{B3}, b_{B3}] \\ & c_4 & [a_{B4}, b_{B4}] \\ & c_5 & [a_{B5}, b_{B5}] \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, M_B 为标准对象; $x_{Bi}=[a_{Bi}, b_{Bi}]$,表示标准对象 M_B 关于特征 c_i 的量值范围。显然有 $x_{Bi} \subset x_{pi}(i=1, 2, \dots, 5)$ 。根据表1中五个选取指标的分级范围,分别构建潜在性泥石流堰塞湖可能性高、中、低三种情况下的经典域对象物元矩阵。

4) 关联函数。在物元评价中,关联函数使解决不相容问题的结果量化。若区间 $x_0=[a,b]$, $x_1=[c,d]$,且 $x_0 \subset x_1$,则关联度为:

$$k_j(x_i) = \begin{cases} \frac{\rho(x_i, x_{ij})}{|x_{ij}|} & x_i \in x_{ij} \\ \frac{\rho(x_i, x_{ij})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ij})} & x_i \notin x_{ij} \end{cases} \tag{5}$$

式中,

$$\rho(x_i, x_{ij}) = |x_i - (a_{ij} + b_{ij})/2| - (b_{ij} - a_{ij})/2 \tag{6}$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = |x_i - (a_{pi} + b_{pi})/2| - (b_{pi} - a_{pi})/2 \tag{7}$$

5) 计算待评价单元综合关联度,并确定其所属等级。根据上式得到的关联度值,待评价单元关于潜在性泥石流堰塞湖可能性等级 j 的综合关联度按下式计算:

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^5 w_{ij} k_j(x_i) \tag{8}$$

式中, α_j 为综合关联度, w_{ij} 为评价指标的权重。

最后通过比较待评价单元各个等级的综合关联度值,其值最大的等级即为其所属的潜在性泥石流堰塞湖可能性等级。

3.3 判识结果

本文以岷江上游映秀—汶川段55条一级支沟为评价单元,根据上述判识指标和标准物源模型,利用Matlab7.0软件编程进行计算,对研究区的潜在性泥石流堰塞湖进行判识(图4、表2)。通过判识,研究区55条一级支沟中,形成泥石流堰塞湖可能性高的有17条,占总数的30.9%;可能性中等的有

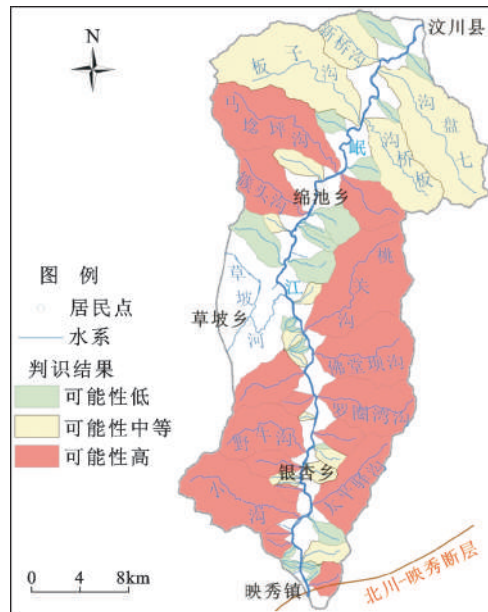


图4 潜在泥石流堰塞湖判识结果
Fig.4 The identification results of the potential debris flow barrier lakes

表2 研究区典型一级支沟特征值及潜在泥石流堰塞湖判识结果

Table 2 The characteristic value of first-grade gullies and identification results of the potential debris flow barrier lakes

编号	沟名	流域面积	主沟长度	相对高差	主沟比降	松散物方量	支主流量	主河宽度	主支夹角	判识结果
		(km ²)	(km)	(m)	(%)	(×10 ⁴ m ³)	比	(m)	(°)	
M1	郭主铺沟	5.70	5.27	2093	345	98	0.43	60	97	低
M2	万村沟	2.85	3.49	1645	425	0	0.23	66	83	低
M3	新桥沟	15.33	6.20	2292	272	245	1.35	67	76	中
M4	七盘沟	52.65	15.51	3070	153	938	4.38	74	101	中
M5	磨刀溪沟	1.75	2.69	1741	582	34	0.25	100	88	低
M6	板桥沟	27.18	11.19	3008	210	363	2.38	79	92	中
M7	板子沟	54.73	17.15	4035	176	581	1.75	52	96	中
M8	小茅坪沟	3.57	3.29	1768	483	16	0.32	56	77	低
M9	木瓜圆沟	3.74	3.17	2032	509	16	0.43	82	101	低
M10	大溪沟	15.76	7.63	2863	273	779	1.66	82	107	高
M11	马埝坪沟	43.38	15.22	3762	185	1421	2.18	82	87	高
M12	苏村沟	6.03	5.00	2333	373	163	0.58	121	43	中
M13	簇头沟	21.89	8.94	2933	262	1108	1.62	89	126	高
M14	高店子沟	7.35	5.01	2434	389	86	0.72	108	101	低
M15	瓦窑坪沟	1.20	3.09	1825	532	13	0.11	88	100	低
M16	新店沟	2.77	4.00	2069	439	50	0.26	60	86	低
M17	小坪下沟	2.04	2.80	1615	502	75	0.22	127	102	中
M18	窑子沟	7.14	4.67	2060	362	104	0.81	80	101	低
M19	华溪沟	10.41	6.46	1968	239	55	0.84	113	52	低
M20	大水沟	2.14	2.96	1664	478	80	0.15	89	58	中
M21	石马山7#沟	0.67	1.88	1339	606	8	0.05	80	56	低
M22	石马山6#沟	0.49	1.36	1170	747	13	0.04	75	97	低
M23	石马山5#沟	0.36	1.26	1144	791	11	0.03	69	112	低
M24	桃关沟	50.69	14.28	3000	161	1644	2.91	75	73	高
M25	石马山4#沟	1.76	2.20	1638	649	35	0.15	75	63	中
M26	石马山3#沟	0.67	1.91	1497	706	15	0.05	80	99	低
M27	石马山2#沟	0.61	2.20	1643	673	18	0.05	59	92	低
M28	佛堂坝沟	33.86	9.87	2479	196	2470	2.63	65	86	高
M29	石马山1#沟	1.30	2.44	1659	612	42	0.11	80	80	中
M30	彻底关沟	16.51	7.91	2362	239	1049	1.14	100	76	高
M31	高家沟	3.59	3.21	1832	485	767	0.34	52	110	高
M32	罗圈湾沟	28.05	9.62	2448	198	2054	2.31	70	114	高
M33	张坪岩沟	0.67	1.50	1437	863	21	0.09	35	93	中
M34	银杏坪沟	7.00	4.72	2037	345	505	0.66	48	78	高
M35	苏坡店上沟	0.42	1.47	1207	738	7	0.04	120	118	低
M36	苏坡店沟	2.84	3.29	1633	397	42	0.22	120	84	中
M37	野牛沟	24.38	10.57	3016	201	1655	1.65	105	91	高
M38	一碗水沟	3.46	3.36	1437	233	90	0.32	72	45	中
M39	磨子沟	7.15	5.53	2652	384	769	0.59	58	77	高
M40	下坪沟	1.48	2.66	2076	702	47	0.14	108	90	中
M41	上坪沟	0.68	2.02	1634	686	17	0.07	90	98	中
M42	马家坪沟	2.29	2.56	1782	627	267	0.24	70	80	高
M43	太平驿沟	26.19	9.18	2290	200	912	2.28	85	77	高
M44	清水沟	3.85	4.11	1596	311	3	0.42	108	95	低
M45	清水店沟	39.04	13.56	3201	182	1660	2.80	97	70	高
M46	关山沟	2.04	2.71	1871	621	122	0.56	65	85	高
M47	小磨子沟	2.74	2.81	1762	502	319	0.53	60	92	高
M48	窝岔沟	0.64	1.54	1000	563	15	0.11	60	79	低
M49	无音寺沟	5.34	4.47	1656	289	206	0.75	38	75	中
M50	白家林沟	0.63	1.78	1083	548	16	0.09	40	82	低
M51	老街沟	0.48	1.59	1087	614	6	0.06	40	95	低
M52	老街南沟	0.51	1.75	1091	559	12	0.06	40	84	低
M53	白家林南沟	0.66	1.57	1011	559	10	0.15	40	93	低
M54	烧房沟	0.65	1.90	1117	529	26	0.09	70	92	低
M55	红椿沟	5.20	3.77	1289	274	213	0.79	70	88	高

15条,占总数的27.3%;可能性低的有23条,占总数的41.8%(表2)。

从判识结果可知,研究区形成泥石流堰塞湖可能性高的沟道主要集中在北川映秀断层20 km以内的范围,已经形成堰塞湖的4条泥石流沟(红椿沟、小磨子沟、关山沟和磨子沟)都在此范围内,其主要原因是震后泥石流的所需的松散物源丰富,同时地震造成地表植被破坏,植被拦截降雨的作用减弱,有利于坡面的产、汇流,加之震后沟道的堵塞不仅仅只是沟道弯曲及局部堵塞情况,而是多级的堵塞,多级溃决后的级联效应,增大了泥石流的规模。形成条件的变化导致震后泥石流活动强度、规模的急剧增大,使得泥石流的形成由降雨控制型逐步转为松散土体控制型^[18],从而加大了泥石流堰塞湖形成的可能性。

4 结 论

1) 汶川地震诱发的大量崩塌、滑坡为泥石流的形成提供了丰富的松散物质来源,泥石流会在相当长一段时间内处于活跃期,形成泥石流堰塞湖的可能性加大,目前泥石流堰塞湖的危害性已经显现,因此,在今后对泥石流及其次生灾害堰塞湖的危害需加大重视。

2) 震后泥石流的形成条件发生变化,主要表现在松散固体物质的剧增上。通过遥感解译和估算,研究区55条一级支沟内松散堆积物方量约为 $2.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。松散固体物质在研究区内的分布是不均匀的,其主要原因是由于距发震断层北川映秀断裂带远近不同而造成的,距离发震断层越近,其对发震断层的敏感性越大。

3) 通过对潜在泥石流堰塞湖的判识,研究区形成潜在性泥石流堰塞湖可能性高的有17条,主要集中分布在映秀镇至草坡乡段,已经形成堰塞湖的4条泥石流沟都分布在此段,此段将是今后受堰塞湖危害的高危地段,今后应加强此段泥石流沟的防治及监测预警工作。

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] 吴树仁,石菊松,姚 鑫,等.四川汶川地震地质灾害活动强度分析评价[J].地质通报,2008,27(11): 1900~1906.
- [3] 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(增刊): 16~22.
- [4] 常晓军,丁 俊,魏伦武,等.岷江上游地质灾害发育分布规律初探[J].沉积与特提斯地质,2007,27(1): 103~108.
- [5] 柳金峰,游 勇.汶川地震触发潜在性泥石流研究:以岷江上游关山沟为例[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(增刊): 70~75.
- [6] 胡凯衡,游 勇,庄建琦,等.北川地震重灾区泥石流特征与减灾对策[J].地理科学,2010,30(4):566~570.
- [7] 徐永年,匡尚富.泥石流入汇的危险性判别指标[J].自然灾害学报,2002,11(3):33~38.
- [8] 郭志学,曹叔尤,刘兴年,等.泥石流堵江影响因素试验研究[J].水利学报,2004,11:39~45.
- [9] 张金山,沈兴菊,谢 洪.泥石流堵河影响因素研究:以岷江上游为例[J].灾害学,2007,22(2): 82~86.
- [10] 周必凡,李德基,罗德富,等.泥石流防治指南[M].北京:科学出版社,1991.
- [11] 游 勇,柳金峰,陈兴长.“5·12”汶川地震后北川苏保河流域泥石流危害及特征[J].山地学报, 2010, 28(3): 358~366.
- [12] 刘希林,陈宜娟.泥石流风险区划方法及其应用——以四川西部地区为例[J].地理科学,2010,30(4):558~565.
- [13] 郝航程,朱方海.基于可拓学理论的边坡潜在破坏模式识别方法[J].地下空间与工程学报,2007,3(4):698~702.
- [14] 付 静,刘国东,张 贞,等.模糊物元模型在土壤侵蚀等级划分中的应用[J].水土保持通报, 2008, 28(3): 138~140.
- [15] 黄辉玲,吴次芳.基于可拓学的生态市建设评价——以哈尔滨市为例[J].地理科学,2009,29(5):651~657.
- [16] 李如忠,汪明武,金菊良.地下水环境风险的模糊多指标分析方法[J].地理科学,2010,30(2):229~235.
- [17] 徐 辉,陈又星.模糊聚类模型及其在国际市场划分中的应用研究[J].地理科学,2010,30(3):350~354.
- [18] 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.

Potential Damages and Identification of Debris Flow Barrier Lakes in the Upper Min River Drainage

LIU Jin-feng^{1,2}, YOU Yong^{1,2}, CHEN Xing-chang³

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: The Wenchuan earthquake caused numerous landslides and collapses that provided abundant loose solid materials for future mobilization as debris flows. The formation conditions for debris flows were changed consequently. Debris flows will be very active for a long time in the affected area. Their secondary disaster, barrier lake, is beginning to appear. Therefore, it is urgent to identify those debris flow gullies which are potential to form barrier lakes following the environmental changes caused by the earthquake. This paper selected the upper Min River from Yinxiu to Wenchuan as study area, analyzed the changed formation conditions of debris flows and the damages of a typical debris flow barrier lake, and interpreted the loose solid materials from TM satellite images and aerial photographs. Then, the identification factors were selected and classified based on the factor independence analysis. At last, the fuzzy matter-element extension theory was used to construct a model to identify potential barrier lakes. The potential future increase in debris flow activity relates directly to the great increase in loose materials. The interpretation results indicated that the area of the landslides and collapses caused by the earthquake is 39.40 km², accounting for 6.97% of the total study area. Assuming 55% of the landslide and collapse area were their deposition area and the average deposition depth was 10 m, the volume of the loose solid materials can be estimated as $2.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ which was sufficient for debris flow formation. Based on the factor independence analysis, the volume of the loose solid materials per unit area, the discharge ratio between the debris flow gully and the main river, the slope gradient of debris flow channel, the main river width, and the included angle between the debris flow gully and the main river were determined as identification factors. According to the multi-factor comprehensive identification, among the 55 first-grade gullies, 17 gullies have high probabilities for potential debris flow barrier lakes, 15 have moderate probabilities, and 23 gullies have low probabilities. The most likely debris flow gullies for forming barrier lakes mainly distribute in the middle-to-lower reaches of the study area (Yingxiu Town to Caopo Town), and those with moderate and low probabilities are mainly distributed in the upper reaches of the study area (Caopo Town to Wenchuan County). In addition, among the 17 potential debris flow gullies with high probabilities, 4 gullies already yielded barrier lakes during the 2008-2010 rainy seasons. The remaining debris flow gullies will produce barrier lakes in the future with high probability.

Key words: Upper Min River; debris flow; barrier lakes; potential damages; identification