

基于物源数量的泥石流危险性评估

——以都江堰白沙河为例

杨成林^{1,2}, 陈宁生¹, 邓明枫^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:汶川地震通过诱发滑坡和崩塌产生大量松散固体物质促进了泥石流的暴发,且大多数地震次生泥石流为超大规模,对地震灾后重建造成严重威胁。从区域上进行泥石流灾害危险性评估是目前地震灾区恢复重建和区域经济发展所必须而又紧迫的工作。通过对地震次生泥石流形成条件的分析,提出了一种基于泥石流物源数量,并结合遥感及 GIS 技术的泥石流危险性快速评估方法。通过在都江堰白沙河 59 个小流域的应用证明,评估结果与实际灾害情况较吻合,能够为地震灾区泥石流防灾减灾提供参考。此方法适用于地震灾区在短时间内物源突然富集的流域,并且受到遥感图像精度的影响,同时也具有一定时限性,需要根据遥感图像进行周期性更新。此方法能对地震灾区大区域泥石流危险性进行快速评估分级,尤其适用于野外调查无法开展的河流上游区域的泥石流评估。

关键词:白沙河; 泥石流; 形成条件; 物源数量

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)06-0025-06

Assessment on Debris-flow Hazard Based on the Volume of Debris

— A Case Study in the Baishahe River, Dujiangyan

YANG Cheng-lin^{1,2}, CHEN Ning-sheng¹, DENG Ming-feng^{1,2}

(1. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Abundant debris deriving from the landslides and rock avalanches triggered by large earthquakes could significantly alter the characteristics and occurrence frequency of debris flows in the earthquake stricken areas. There is an urgent need for a quick and easy method to assess debris flow hazard to aid the recovery activities by the local residents. Conventional methods are mainly based on field investigations which are time consuming and resources demanding. In addition, as the loose materials are gradually taken away by debris flows, the debris flow occurrence frequency will change with time and more regular updates are needed with the debris flow hazard maps. Therefore, a GIS based system using satellite remote sensing and digital elevation model is proposed in this study. The debris-flow potential index based on the volume of unstable debris is used as the assessment criterion. The proposed method is applied to a case study in the river area affected by the Wenchuan Earthquake 2008. It has been found that the resulted hazard map corresponded well with the observed debris hazards. The validity of the proposed method is depended on the digital data and need regularly update from the latest satellite images with more up-to-date debris accumulation information.

Key words: Baishahe River; debris flows; formation condition; volume of debris

2008 年“5·12”汶川地震除直接造成众多人员伤亡和各种设施毁坏外,还引发了大量的崩塌、滑坡、泥石流等次生链状地质灾害。这些灾害对山区城镇、

村庄、道路和水利水电工程以及通讯设施等造成严重破坏,使得恢复重建遇到前所未有的困难,特别是龙门山各旅游景区的恢复重建屡遭次生地质灾害的威

胁,使得尚未完成恢复重建的景区和村镇雪上加霜,遭到巨大破坏。例如 2008 年 9 月 24 日四川省北川县暴雨引发区域性泥石流,导致了 42 人死亡,公路和其他基础设施受到严重损毁;2009 年 7 月 17 日都江堰白沙河、龙溪河流域共 11 条沟暴发大规模泥石流,造成 2 人死亡,经济损失上亿元;2010 年 8 月 12—14 日绵竹市清平乡、汶川县映秀镇和都江堰龙池镇、虹口乡均暴发大型泥石流灾害,造成严重的人员伤亡和财产损失^[1]。

严重的次生泥石流灾害不仅威胁着灾区居民和景区游客的生命财产安全,还严重阻碍了灾区的恢复重建。同时,由于地震次生泥石流大多规模超大,震后陆续建立的泥石流防治工程无法满足防灾需要。因此,从区域上进行泥石流灾害危险性评估是目前地震灾区恢复重建和区域经济发展所必须而又紧迫的工作。

泥石流的危险性是指泥石流潜在暴发的可能性,泥石流危险性评估是对一定区域内泥石流将来发生可能性的评估,是以泥石流发生条件为核心的评估。不同类型、不同区域的泥石流危险性评估有不同的方法,其采用的指标体系也大相径庭。目前常用的危险性评估方法是综合考虑泥石流形成的降水条件、地形地貌条件和区域地质与松散固体物质条件,并参考已发生的泥石流灾害的特点进行。目前可操作的大都以定性和半定量的指标评估为主。传统泥石流评估主要采用实地调查结合权重的方法^[2-5],这种方法不仅要考虑一系列与泥石流发生相关的地质、地貌、水文等因素^[6-8];同时还需要对泥石流灾害历史分析,成本较高且耗时,难以大规模开展。

近年来,国内外许多学者开始尝试使用遥感(RS)以及地理信息系统(GIS)方法进行地质灾害危险性评估^[9-13]。尤其在汶川地震以后,大量学者采用遥感以及地理信息系统手段进行灾害影响范围调查^[14-15]、堰塞湖评估^[16-17]和灾害决策分析^[18]等。遥感以及地理信息系统方法不仅便于对难以到达的河流上游山区进行快速调查,还善于进行空间分析及成果演示,是灾害调查分析的有力手段,但是目前还较少采用这一手段进行泥石流危险性评估。本文尝试提出一种采用遥感及地理信息系统技术并基于较少评估因子的地震灾区区域泥石流危险性快速评估方法。

1 研究区域

本文选择汶川地震极重灾区—都江堰市的白沙河作为研究区域。白沙河位于素有“成都后花园”之称的都江堰虹口—龙池景区内,为岷江左岸的一级支

沟,是成都市著名的旅游休闲胜地。白沙河发源于虹口乡光光山南麓,流经虹口、紫坪铺汇入岷江,其流域范围 $31^{\circ}01' - 31^{\circ}22'N, 103^{\circ}34' - 103^{\circ}44'E$,流域面积 364 km^2 ,主沟沟长 48.2 km ,河床比降 120% ,年径流量 5.11 亿 m^3 。白沙河流域细长,呈南北向展布,共有 24 条支沟。白沙河流域内植被茂密,森林覆盖率较高,历史上较少有泥石流暴发,灾害以山洪为主。

2 技术路线

在本研究中采用遥感数据分析以及数学统计的方法分析地震对泥石流产生的影响,再采用地理信息系统(GIS)对泥石流发生影响的主要因素进行分析,从而得出泥石流危险性评估结果。主要包括以下几个步骤(图 1):(1)首先分析并确定地震次生泥石流产生的关键条件;(2)再通过遥感图像及数字高程模型(DEM)获取相关数据;(3)对潜在泥石流危险性指标进行分级;(4)在研究区域应用本方法并将其结果与实际情况进行对比分析。

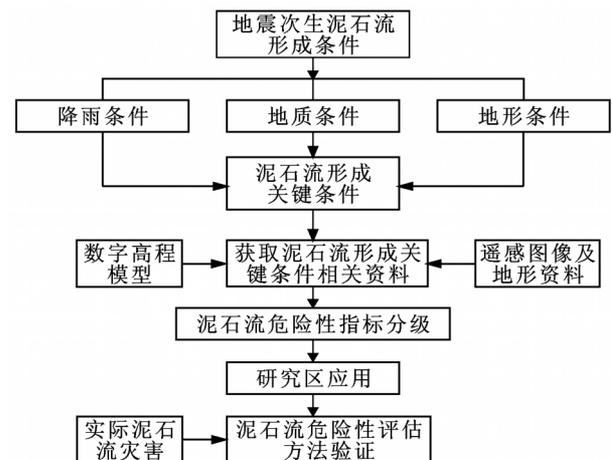


图 1 研究技术路线图

3 泥石流形成条件

3.1 地形条件

在泥石流形成的 3 个基本条件中,地貌条件是相对稳定的,其变化也较缓慢。据统计,形成区的沟床比降 $>250\%$ 或是岸坡坡度 $>25^{\circ}$ 、流域相对高差超过 1000 m 的泥石流沟在诱发因素作用下就可以暴发泥石流^[19]。白沙河流域内山势陡峻,岸坡坡度由东南至西北逐渐增加。通过对数字高程模型进行分析可知,各支沟沟床形成区平均比降为 284% ;而流域内平均岸坡坡度为 34.9° (附图 1),均满足泥石流形成的地形条件。汶川地震虽然对流域造成极大影响,甚至局部地形地貌条件有所改变,但流域总体比降和特征变化不大。

3.2 降雨条件

3.2.1 年降水变化 泥石流发生和水源的关系极为密切,白沙河流域泥石流的主要水源来自降雨。都江堰地区有完整降雨观测资料开始于 1951 年,只有极少数年份缺失。从都江堰年降雨的变化情况发现,近 50 a 来整个地区的年降雨量有下降趋势,基本上仍维持在 800~900 mm。

3.2.2 泥石流临界雨量 泥石流灾害普遍发生于山区,而目前我国气象台站大都位于平缓的县城,两者降雨过程差异极大,所以远离县城的山区泥石流的真实降雨过程资料十分短缺。通过多年的泥石流调查研究成果,根据四川省山洪规划的资料表明,当 1 h 临界雨强 ≥ 9 mm 时,发生山洪泥石流的概率为 42.9%~75%。

目前仅能收集到白沙河流域 2009 年“7·17”大型泥石流的降雨强度为 154.2 mm/h,无法判断泥石流暴发的临界雨量。根据《四川省水文手册》降雨资料^[20],白沙河流域最大 10 min 暴雨均值为 12.5~17.5 mm,最大 1 h 暴雨均值为 20~45 mm,最大 24 h 暴雨均值为 50~160 mm。完全满足泥石流形成的临界降雨条件。虽然近年来该区域年降雨量呈下降趋势,但短期内没有大规模突变的迹象,区域降雨仍然能满足泥石流形成的临界雨量条件。

3.3 物源条件

流域内的固体松散物质控制着泥石流的暴发,这些松散固体物质包括崩塌、滑坡松散堆积物、沟床堆积物、古老泥石流堆积物、低植被覆盖地区的表土层和残坡积物、局部的风成堆积物等。这些松散固体物质的积累一般受流域地层岩性、断层分布以及风化强度等的影响。而与其他流域相比,地震灾区小流域的最大特点就是在极短时间内富集大量由滑坡和崩塌产生的松散固体物质。这些崩塌和滑坡物质非常松散,孔隙率高,渗透性大,颗粒级配不连续,呈宽级配特征,是形成泥石流的主要物源,在前期降雨、短历时暴雨激发或径流冲刷下极易引发泥石流。在本研究中,白沙河流域被划分为 59 个小流域。根据 CBERS-2 卫星所提供的遥感图像的解译,得到这 59 个小流域内因汶川地震诱发的滑坡和崩塌等松散固体物质分布,见附图 2。

3.4 地震次生泥石流形成关键条件

根据统计资料,2008 年汶川地震以前的 54 a 里(1954-07-16 至 2008-05-12),白沙河流域只有 4 次泥石流记录。但在汶川地震以后,白沙河流域内泥石流灾害频发,仅 2009-07-17 该流域就发生了 11 起泥石流事件。根据前文分析,震后白沙河流域内地形及降

雨量没有发生明显变化的情况下,松散固体物质的增加是该流域泥石流激增的主要因素,流域有效物源的数量是决定泥石流暴发与否的关键。针对研究区泥石流形成的这一特征,本文以松散固体物质数量作为泥石流形成关键条件来进行泥石流危险性评估。

4 泥石流危险性指标分级

在采用以松散固体物质数量为泥石流形成主导因素的基础上进行泥石流危险性评估时,关键是确定泥石流危险性指标等级,本文采用小流域内单位面积松散固体物质总量来进行泥石流危险性等级划分。

4.1 流域松散固体物质总量的确定

根据对白沙河流域遥感图像(精度 19.5 m)的分析,可以得到震后滑坡、崩塌分布图。滑坡、崩塌等地质灾害体的分布与面积可直接根据遥感图像获取,但体积量算却是个难题。这主要是因为崩塌、滑坡等地质灾害发生的地形、地质条件不同,且堆积状况差异较大。而较为准确的获取灾害体的体积,对指导灾害的治理和灾后重建有着重要的现实意义,也为次生灾害的发生发展研究提供基础可靠的资料。

国内外不少学者通过统计发现,崩塌滑坡体的体积与崩塌滑坡面积之间存在着较为密切的关系。Guzzetti 等^[21]通过对 677 个滑坡体的体积及面积的调查,采用线性拟合方式得到崩塌滑坡体的体积与崩塌滑坡面积之间的关系式:

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450} \quad (1)$$

式中: V_L ——崩塌滑坡体体积(m^3); A_L ——崩塌滑坡体投影面积(m^2)。

根据遥感分析获得的松散固体物质分布面积,运用式(1)就可以得出白沙河各小流域内松散固体物质的总体积以及单位面积松散固体物质体积,结果如表 1 所示。

4.2 物源数量与泥石流类型关系

通过对我国西部山区地震影响区 50 条泥石流沟松散物质量与泥石流性质关系的统计分析,陈宁生等^[22]提出用流域单位面积的松散固体物质方量来辨识泥石流沟,并以平均单位面积内松散固体物质数量 $0.1 m^3/m^2$ 作为泥石流沟的判别指标, $2 m^3/m^2$ 作为粘性泥石流的判别指标(表 2)。

4.3 泥石流危险性指标分级

在综合考虑白沙河流域泥石流形成特点和时空分布规律的基础上,结合泥石流灾害特征统计数据,将研究区小流域泥石流危险性指标分为极高危险、高危险、中危险、低危险 4 级。

表 1 白沙河各小流域内松散固体物质体积与各小流域泥石流危险性等级

编号	流域名称	流域面积/ km ²	松散固体物质 面积/万 m ²	松散固体物质 体积/万 m ³	单位面积松散固体 物质/(m ³ ·m ⁻²)	泥石流危险 性等级
1	层楼沟	13.02	75.17	765.50	0.58	高
2	正沟	17.38	190.48	1690.52	0.98	高
3	源深沟	2.33	53.77	1022.22	4.40	极高
4	关门山 1 [#] 沟	16.31	121.43	1115.92	0.68	高
5	双阴沟	7.89	128.93	1871.08	2.38	极高
6	青羊沟	6.12	43.93	321.02	0.52	高
7	关门山 2 [#] 沟	0.91	11.89	96.36	1.06	极高
8	大干沟	4.05	39.54	379.44	0.94	高
9	正河 1 [#] 沟	0.88	7.30	36.44	0.42	高
10	关门山 3 [#] 沟	0.51	6.71	73.16	1.44	高
11	关门山 4 [#] 沟	1.82	26.34	291.32	1.60	高
12	大阴沟	9.53	85.99	894.60	0.94	高
13	五神沟	2.45	9.91	56.00	0.22	中
14	正河 2 [#] 沟	0.70	6.94	40.18	0.58	高
15	原木栅子沟	1.74	24.73	229.64	1.32	高
16	小干沟	2.33	24.90	242.24	1.04	高
17	关门山 5 [#] 沟	0.87	35.19	683.30	7.84	极高
18	小凉河沟	18.66	121.17	1054.04	0.56	高
19	大坪	0.71	10.13	70.62	1.00	高
20	二道河	14.85	207.80	2234.36	1.50	高
21	仓坪沟	2.42	21.33	186.18	0.76	高
22	小河沟	19.60	129.81	1351.20	0.68	高
23	长坪沟	0.38	3.85	15.24	0.40	高
24	窑子沟	1.65	35.19	317.78	1.92	高
25	水厂沟	4.70	10.56	66.96	0.14	中
26	头道河	15.73	142.00	1472.88	0.94	高
27	肖家沟	1.75	12.49	87.72	0.50	高
28	教子坪	5.48	21.95	150.72	0.28	中
29	磨子 1 [#] 沟	4.50	10.68	96.96	0.22	中
30	大水沟	7.03	53.56	945.56	1.34	高
31	白沙河 1 [#] 沟	1.96	0.81	3.46	0.02	低
32	白沙河 2 [#] 沟	1.18	6.08	43.58	0.38	高
33	长河坝	4.24	5.36	29.40	0.06	低
34	白沙河 3 [#] 沟	0.33	1.65	7.22	0.22	中
35	磨子 2 [#] 沟	0.65	5.98	32.44	0.50	高
36	二郎庙	0.51	3.14	19.44	0.38	高
37	磨子 6 [#] 沟	0.54	4.08	23.58	0.44	高
38	墙院子	2.17	3.72	21.58	0.10	中
39	磨子 7 [#] 沟	1.70	5.13	31.76	0.18	中
40	小沟	1.11	4.25	30.5	0.27	中
41	磨子 3 [#] 沟	3.04	3.95	19.68	0.06	低
42	磨子 4 [#] 沟	0.72	0.90	4.00	0.06	低
43	香樟坪 1 [#] 沟	0.94	16.89	257.74	2.72	极高
44	香樟坪 2 [#] 沟	0.84	7.17	60.12	0.72	高
45	磨子 5 [#] 沟	2.51	8.42	41.92	0.16	中
46	关凤沟	12.41	81.95	739.68	0.60	高
47	深溪沟	20.30	89.93	641.89	0.32	高
48	白沙河 5 [#] 沟	1.20	2.11	13.82	0.12	中
49	白沙河 3 [#] 沟	1.59	13.44	104.04	0.66	高
50	白沙河 4 [#] 沟	1.14	2.50	17.66	0.16	中
51	上坪	0.66	0.81	3.44	0.06	低
52	中坪	0.63	0.55	1.50	0.02	低
53	下坪	0.90	0.82	3.48	0.04	低
54	高河坎	0.55	3.22	19.14	0.34	高
55	干沟	1.19	14.33	132.92	1.12	高
56	陈家坪	8.25	21.84	137.16	0.16	中
57	三合厂	0.96	13.56	98.48	1.02	高
58	红庙子	1.62	21.46	274.52	1.70	高
59	沙湾沟	1.81	0.82	3.50	0.02	低

表 2 松散固体物质量与泥石流类型关系统计

单位面积松散物体积/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	泥石流类型
<0.1	—
0.1~0.3	稀性
0.3~2.0	大部分稀性(74%)
2.0~5.0	稀性—粘性
5.0~10.0	大部分粘性(80%)
10.0~20.0	粘性
>20.0	粘性

注:泥石流流域面积 1~30 km^2 ;74%表示在统计资料中单位松散物体积在 0.3~2.0 m^3/m^2 的泥石流沟中,稀性泥石流占 74%;80%表示单位松散物体积在 5.0~10.0 m^3/m^2 的泥石流沟中,粘性泥石流占 80%。

(1)极高风险。单位面积松散固体物质体积 > 2.0 m^3/m^2 ,一定降雨条件下极易产生泥石流,且发生粘性泥石流的可能性较高。

(2)高风险。单位面积松散固体物质体积 0.3~2.0 m^3/m^2 ,一定降雨条件下较易产生稀性泥石流。

(3)中危险。单位面积松散固体物质体积 0.1~0.3 m^3/m^2 ,一定降雨条件下能够产生稀性泥石流。

(4)低风险。单位面积松散固体物质体积 <0.1 m^3/m^2 ,较难发生泥石流。

本文的泥石流危险性指标及其分级是建立在对地震灾区次生泥石流形成特征分析以及地震影响区已暴发泥石流特征统计的基础上的,尤其是危险性指标等级划分还无法做到精确,因此仅适用于地震灾区区域泥石流危险性的快速评估。遥感图像的精度会影响单位松散固体物质数量的计算,从而影响泥石流

危险性等级评估。同时,本方法的使用具也有一定的时限,仅适用于地震后 2~3 a 内,因此需要根据遥感图像进行周期性更新。一般随着时间的推移,降雨将携带走较松散土体,并且土体在自重固结等影响下,孔隙减小,密度和强度增加,震后形成的松散物源将从有效物源向无效物源转化^[23],在一般的降雨下很难启动转化为泥石流,只有在极低频率的大规模降雨的作用下,才有可能形成泥石流。

5 白沙河泥石流危险性等级

结合上述危险性等级划分,白沙河各小流域泥石流危险性分级成果见表 1 和附图 3。

在白沙河 59 个小流域中,有 5 个属于泥石流暴发极高风险流域,34 个属于泥石流暴发高风险流域,12 个属于泥石流暴发中危险流域,有 8 个属于泥石流暴发低风险流域。根据评估结果,处于高和极高风险地流域站白沙河小流域总数的 66.1%,可见整个白沙河流域在近几年内都处于泥石流严重威胁中,尤其是在各流域上游可能形成的堵溃型泥石流将严重影响当地恢复重建以及旅游产业发展。

6 评估方法验证

在 2009 年 7 月 17 日和 2010 年 8 月 13 日、2010 年 8 月 17 日,白沙河流域分别暴发了大规模群发性泥石流,造成了巨大的经济损失,严重影响了当地刚恢复的旅游产业。灾后笔者到现场进行了实地调查(由于交通原因,未能对全部 59 个小流域进行实地调查),调查结果与评估成果比较见表 3。

表 3 白沙河流域泥石流灾害与评估结果比较

编号	流域名称	泥石流灾害情况	评估结果
1	二道河	沟口形成大规模泥石流堆积扇,形成小规模堰塞湖	高
2	大水沟	沟口形成大规模泥石流堆积扇,形成小规模堰塞湖	高
3	小沟	冲毁房屋 3 座,淤埋道路及“汶川地震断裂带科学钻探”项目营地	中
4	香樟坪 1# 沟	沟口形成大规模泥石流堆积扇,压迫白沙河干流	极高
5	香樟坪 2# 沟	沟口形成大规模泥石流堆积扇,压迫白沙河干流	高
6	关凤沟	冲毁房屋 3 座,淤埋公路 50 m,堵塞桥涵,严重威胁沟口水产基地	高
7	深溪沟	造成 1 人死亡,冲毁房屋 8 座、桥梁一座,淤埋公路 200 m	高
8	高河坎	沟口形成大规模泥石流堆积扇,压迫白沙河干流,冲刷景区公路路基	高
9	干沟	造成 2 人死亡,冲毁房屋 2 座,淤积白沙河干流,冲毁漂流基地	高
10	三合厂	沟口形成大规模泥石流堆积扇,压迫白沙河干流	高
11	红庙子	沟口形成大规模泥石流堆积扇,压迫白沙河干流	高

在表 3 已发生泥石流的 11 个小流域中,被评估为极高和高风险有 10 个,占总数的 91%;1 个为中危险,占总数的 9%。因此采用高风险级别作为白沙河流域泥石流暴发的临界等级是可行的。野外实际调查情况与评估结果较为吻合,其他被评为极高和高风险

的小流域在一定降雨条件下,也极有可能暴发泥石流,因此需要尽快采取相应的措施进行灾害防治。

7 结论

地震通过诱发滑坡和崩塌产生大量松散固体物

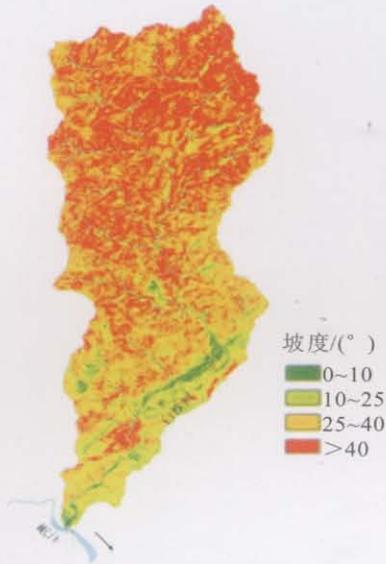
质从而促进泥石流的暴发,本文提出了一种基于泥石流物源数量,并结合遥感及地理信息系统技术的泥石流危险性评估方法,并得出了以下结论:

(1)本方法能对地震灾区大区域泥石流危险性进行快速评估分级,尤其适用于野外调查无法开展的河流上游区域泥石流评估。评估结果与实际灾害情况较吻合,能够为地震灾区泥石流防灾减灾提供参考。

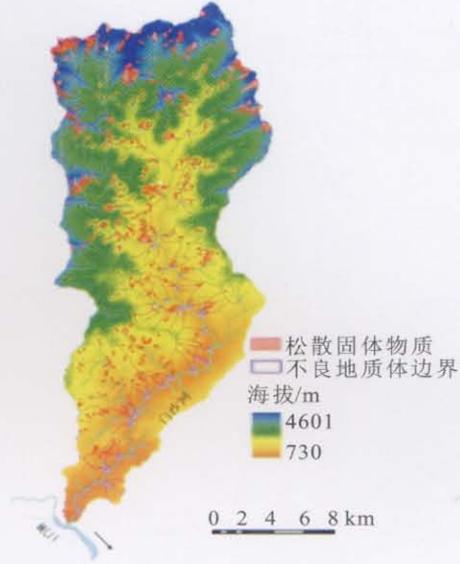
(2)本方法仅适用于地震灾区这种在短时间内物源突然富集的流域,并且受到遥感图像精度的影响,同时也具有一定时限性,需要根据遥感图像进行周期性更新。

参考文献:

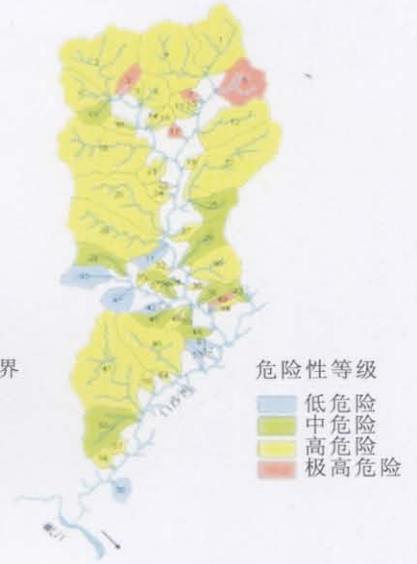
- [1] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- [2] Benda L, Cundy T. Predicting deposition of debris flows in mountain channels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27: 409-417.
- [3] Auer K, Shakoor A. A statistical approach to evaluate debris avalanche activity in central Virginia[J]. Engineering Geology, 1993, 33: 305-321.
- [4] Cheng K Y, Lin L K, Chang S Y. The filed investigation and GIS application in a potential hazardous area of debris flow[C]// Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of the First International Conference. New York: ASCE, 1997: 83-92.
- [5] Nakagawa H, Takahashi T. Estimation of a debris-flow hydrograph and hazard area[C]// Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Proceedings of First International Conference. New York: ASCE, 1997: 64-73.
- [6] Lin P S, Feng T Y, Lee C M. A study on the initiation characteristics of debris flow in gravelly deposits[J]. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 1993, 24(1): 55-64.
- [7] Lin P S, Lin J Y, Hung J C, et al. Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan[J]. Engineering Geology, 2002, 66: 295-313.
- [8] Di B F, Chen N S, Cui P, et al. GIS-based risk analysis of debris flow: an application in Sichuan, southwest China[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23: 138-148.
- [9] 唐川. 基于GIS技术对云南省泥石流的风险评估[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 300-304.
- [10] Melelli L, Taramelli A. An example of debris-flows hazard modeling using GIS[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4: 347-358.
- [11] Wang C X, Esaki T, Xie M W, et al. Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata-Hougawachi area, Japan[J]. Environ Geol. 2006, 51: 91-102.
- [12] Han Y S, Liu H J, Zhong D L, et al. GIS-based risk assessment of debris flow disasters in the upper reach of Yangtze River[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2007, 12(4): 657-662.
- [13] Di B F, Zeng H J, Zhang M H, et al. Quantifying the spatial distribution of soil mass wasting processes after the 2008 earthquake in Wenchuan, China: A case study of the Longmenshan area[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 761-771.
- [14] 范建蓉, 田兵伟, 程根伟, 等. 基于多源遥感数据的5·12汶川地震诱发堰塞体信息提取[J]. 山地学报, 2008, 26: 257-262.
- [15] 王文杰, 潘英姿, 徐卫华, 等. 四川汶川地震对生态系统破坏及其生态影响分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 110-116.
- [16] 陈晓清, 崔鹏, 程尊兰, 等. 5·12汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 244-249.
- [17] 童立强. “5·12”汶川大地震极重灾区地震堰塞湖应急遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2008(3): 71-64.
- [18] 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
- [19] 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: 4-5.
- [20] 四川省水利水电局水文总站. 四川省水文手册[S]. 1979.
- [21] Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, et al. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 279: 222-229.
- [22] 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, 27(1): 108-114.
- [23] 陈宁生, 第宝锋, 李战鲁, 等. 5·12汶川地震龙门山风景区地震次生山地灾害特征与处理建议[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 272-275.



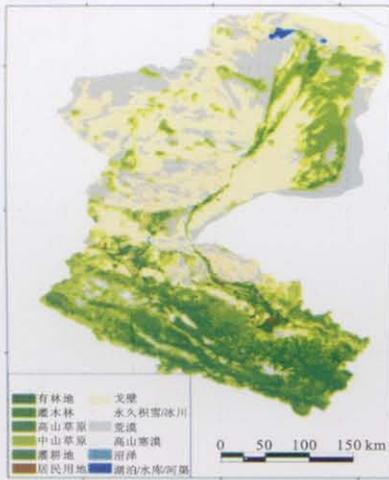
附图1 白沙河流域坡度分布图



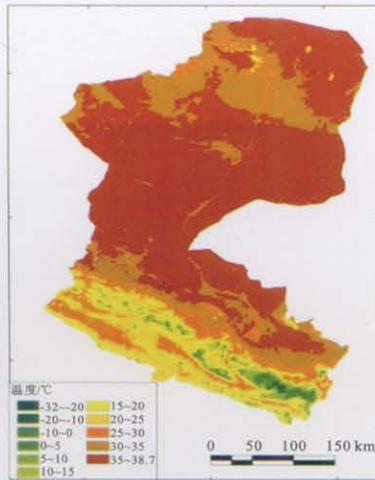
附图2 白沙河流域松散固体物质分布图



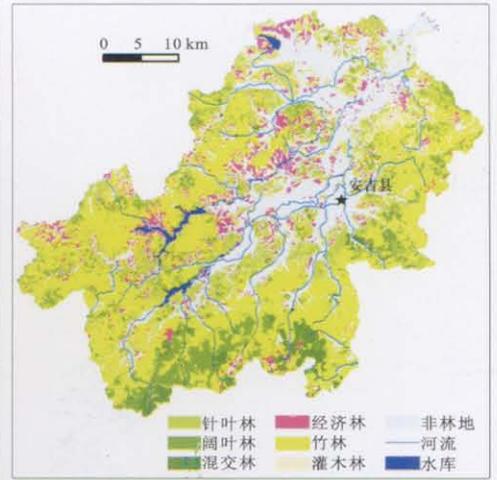
附图3 白沙河各小流域泥石流危险性



附图4 2000年黑河流域土地利用类型图



附图5 黑河流域地表温度反演图



附图6 安吉县森林资源分布图



附图7 绥阳县耕地自然质量等别、利用等别、经济等别分布图