

地貌信息熵在地震后泥石流危险性评价中的应用

王 钧^{1 2 3} 欧国强^{1 2*} 杨 顺^{1 2 3} 季宪军^{1 2 3} 陆桂红^{1 2 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. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 地貌信息熵可以表示流域地貌面受侵蚀的程度,是判断地貌发育演化阶段的量化指标之一。基于流域系统地貌信息熵的原理和方法,采用 GIS 技术和 Matlab、SPSS 软件,对“5·12”汶川地震后都江堰市深溪沟流域内 41 个子流域的面积-高程积分值和地貌信息熵进行计算,研究了各个子流域的地貌发育演化基本特征和泥石流发育情况,并将分析结果和地震后野外实际调查的成果进行了对比研究。结果表明:在烈度为 XI 的都江堰深溪沟地震重灾区,地震引发的大量崩塌、滑坡导致松散固体物质广泛堆积于沟道内,不仅为泥石流提供丰富的物源,而且使沟道局部的地貌发生了突变,但通过“地貌信息熵”这种方法无法表达丰富物源的变化和沟道地貌的突变,因此,根据地貌信息熵判断地震后泥石流的危险性具有一定的局限性。为了使地震区泥石流危险性评价的结果更加真实、可靠与可信,必须结合流域的实际情况,对地貌信息熵判定的危险性结果进行综合分析 with 修正,或者通过多种评价方法进行对比论证和分析。

关键词: 泥石流; 面积-高程积分; 地貌信息熵; 危险性评价

中图分类号: P642.23 P931

文献标志码: A

2008 年“5.12”汶川 Ms8.0 级地震之后,地震灾区泥石流灾害十分活跃,处于一个强烈活动的时期^[1]。都江堰市深溪沟是“5·12”汶川地震的重灾区(烈度 XI)。地震以后,流域地表破裂严重;山体破碎、松散固体物质广布,山洪、泥石流等次生山地灾害频繁发生,威胁着深溪村 4 组、5 组、6 组、7 组、8 组约 400 多人的生命财产安全以及虹口漂流旅游景区农家乐设施、厚朴种植基地、猕猴桃种植基地、深溪沟地震遗址公园等大量的保护对象。因此,亟需对流域内的泥石流灾害进行评价,查明每条沟道发生泥石流灾害的可能性大小,以便服务于当地的旅游业、居民生产生活和震后的恢复重建及经济发展。

我国有关泥石流危险性的研究最早是 1980 年代刘希林提出的“泥石流危险度的判定”^[2],经过几十多年的发展,泥石流危险性评价方法经历了从定

性向定量、从单一向综合的发展阶段。目前,泥石流危险性评价的方法有荒溪分类法、模糊数学法、神经网络法、灰色关联法、确定性系数法、地貌信息熵法^[3-5]等,这些评价方法选取的评价指标都是反映泥石流物源、水源和地貌等的间接指标,用以间接评价泥石流的危险性大小。

泥石流形成的三大条件之一——地貌条件与地貌信息熵密切相关,根据信息熵值的大小可以判断流域地貌侵蚀发育的程度和地貌演化的阶段,进而用来判断泥石流危险性的大小。但是,鉴于地震之后震区特殊的孕灾环境(松散固体物质广布,沟道局部地貌突变,多数被地震破坏的地表发育有年轻的小流域),用“地貌信息熵”来判断震区泥石流的危险性还有待进一步的商榷和研究。本文由此出发,以汶川地震极震区深溪沟流域为靶区,对区内的

收稿日期(Received date): 2012-11-13; 改回日期(Accepted): 2012-12-11。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(40830742)。[Supported by National Natural Science Foundation of China (40830742).]

作者简介(Biography): 王 钧,男(1988-),汉族,甘肃会宁人,博士研究生,研究方向为流域灾害综合管理。[Wang Jun (1988-), male, was born in Huining, Gansu Province, Ph.D student, major in basin hazards integrated management.] E-mail: jiasanxineryi1988@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 欧国强(1958-),男,博士,研究员,主要从事泥石流与泥沙研究。[Ou Guoqiang (1958-), male, Dr. & Researcher, mainly engaged in the study of debris flow and sediment hazards.] E-mail: ougq@imde.ac.cn

41 个子流域进行了流域面积-高程积分值和地貌信息熵值的计算,探讨了各个子流域的地貌发育演化阶段和特征,对“地貌信息熵”在该地区泥石流危险性评价的应用进行了分析研究。研究结果可以服务于震区的泥石流危险性评价,提高震区泥石流危险性评价结果的准确性和可靠性,从而更好的服务于灾后的恢复重建和经济建设的布局。

1 研究区概况

1.1 流域概况

深溪沟是岷江一级支流白沙河的支流,流域面积 8.17 km^2 ,主沟长约 4400 m ,平均坡降 137% ,流域最低高程 870 m ,最大高程 2141 m ,相对高度达 1271 m ,地理位置如图 1 所示。深溪沟流域位于龙溪-虹口国家级自然保护区内,是重要的猕猴桃生产基地、厚朴种植基地、生态旅游基地;汶川地震以后,又作为地震遗迹整体保护区,将被建成国家级“地震公园”进行保护、科考和观光。流域毗邻历史文化名城都江堰、都江堰国家级风景名胜区、龙池国家森林公园和紫坪铺水库,其不仅具有优越的地理位置,而且具有重要的经济和旅游价值。



图 1 深溪沟地理位置

Fig. 1 The location of Shenxi gully

1.2 地貌

深溪沟流域地貌主要为中低山-中高山,山峦叠嶂起伏、沟谷纵横,构造运动强烈;河流下蚀作用较为强烈,沟谷内部分基岩裸露,河床随处可见巨型漂卵石,有的直径 $>8 \text{ m}$;主沟多呈“U”型谷,且两侧谷坡不对称,右岸坡度较陡,多陡崖,最大坡度达 70° ,左岸坡度较缓。区内植被较为发育,多为厚朴经济林和乔木。

1.3 气候

都江堰市属中亚热带湿润气候区,年均气温 15.2°C ,年均降水量近 1200 mm 。这里四季分明,夏无酷暑,最热的 7、8 月平均气温为 24°C 左右,平均最高气温仅 28°C ;冬无严寒,最冷的 1 月平均气温为 4.6°C ,平均最低气温在 2°C 左右^[6]。

1.4 地质

流域内主要地层为第四系、三叠系、泥盆系和震旦系。其中第四系为砾石层、亚砂土和亚粘土,由互相迭置的冲积、洪积及残坡积物构成;三叠系由石英砂岩、岩屑石英砂岩构成,多呈灰暗、灰褐、黄灰色;泥盆系由浅灰色薄-厚层白云质灰岩、白云岩夹泥质灰岩、炭质页岩构成,震旦系由火山岩构成^[7]。锅圈岩沟(为位于深溪沟左岸的沟谷,距离流域出口约 820 m ,位置如图 1)松散堆积物颗粒粒径级配曲线如图 2 所示。

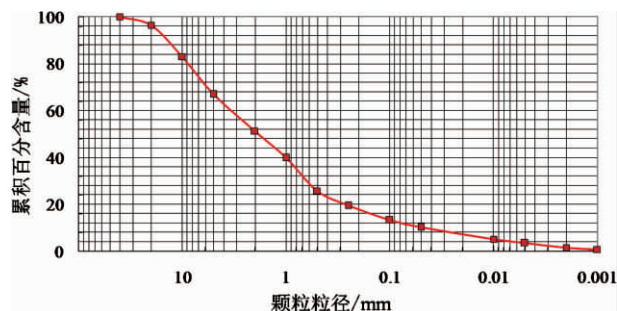


图 2 锅圈岩沟样品颗粒级配图

Fig. 2 Grain grading graph of GuoJuanyan sample

从图 2 级配曲线可以得出:不均匀系数 $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 70$,说明土级配良好,粗颗粒分布较广;曲率系数 $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} = 2.41$,累计曲线整体形状良好,不缺乏中间某种粒径的颗粒,粗细颗粒较均匀分布。

1.5 地震后次生山地灾害概况

深溪沟地处龙门山准地槽南缘山前褶皱带,位

于龙门山脉中南段,处在映秀断裂和二王庙断裂带之间,距离“5·12”汶川地震震中——牛圈沟位置较近,地震烈度达到XI度,区内地表破裂的最大垂直和水平位错分别为5.1 m和2.0 m^[8]。由于强烈的主震以及频繁的余震,使区内山体破碎,形成大量的崩塌、滑坡,大量的松散固体物质堆积于沟道内^[9](地震前后流域对比如图3所示),山洪、泥石流等次生山地灾害频繁发生,严重影响居民的生产、生活;严重破坏深溪沟地震遗址、进山道路和厚朴经济林,为震后深溪沟流域的社会、经济复苏等带来了严重威胁。

2 流域系统地貌熵理论

2.1 基本原理

地貌信息熵作为判断地貌演化阶段的量化指标之一,是在 Strahler 面积-高程曲线和 Strahler 面积-高程积分的基础上通过类比信息熵原理导出的,最早由我国的艾南山提出^[10],其数学表达式为^[11]

$$H = S - \ln S - 1 = \int_0^1 f(x) dx - \ln \left[\int_0^1 f(x) dx \right] - 1 \quad (1)$$

式中 H 为地貌系统信息熵; S 为 Strahler 面积-高程积分值; $f(x)$ 为 Strahler 面积-高程曲线。高程-面积积分值的通常计算方法如下: 设 A_i 为 i 流域的总面积, a_i^m 为 i 流域内第 m 条等高线以上的面积, h_i 为该等高线与 i 流域最低点的高差, ΔH_i 为 i 流域最高点与最低点的高差, 则 a_i^m/A_i 以为 X 轴, 以 $h_i/\Delta H_i$ 为 Y 轴, 显然 X, Y 均在 $[0, 1]$ 内取值, 根据得到的一系列 (X, Y) 值, 以 X 为横坐标, 以 Y 为纵坐标绘出的曲线即为面积-高程曲线, 曲线与坐标轴之间的面积即为面积-高程积分值^[12]。

熵用来表示任何一种能量在空间中分布的均匀程度, 能量分布得越均匀, 熵就越大。一个体系的能量完全均匀分布时, 这个系统的熵就达到最大值, 即熵增就是一个有效能量减小的过程。地貌的发育过程完全遵守这个熵增原理, 构造活跃地区, 有效能量很大, 侵蚀活动强烈, 流域常常处于幼年期; 构造稳定的地区, 有效能量较小, 侵蚀能力也较低, 水系发展稳定, 流域处于老年期的特征。因而, 从构造活跃到构造稳定的过程、从流域幼年到老年的发展过程, 都是有效能量减少、系统趋于均匀和稳定的过程, 满足熵增原理, 地貌信息熵值 H 呈现增函数的性质。

2.2 地貌信息熵的地理意义

流域地貌信息熵在流域地貌研究上有着重要的意义, 据此可以判断流域地貌侵蚀发育程度和地貌演化阶段划分。熵值越小, 表明流域侵蚀下切严重, 构造运动强烈, 流域处在剧烈变动的不稳定期, 即处于非常活跃的幼年期; 熵值越大, 说明流域侵蚀趋于稳定, 没有大的波动, 处于老年期, 是平稳阶段。

同时, 流域的地貌特征对泥石流的发育、发展以及消退都有重要的影响。一般处在构造运动强烈、强烈上升的山区, 泥石流极为活跃, 而在地表处于相对稳定或者下降的山区, 泥石流活动也处于相对稳定的状态^[13], 因此, 通过对泥石流沟谷的地貌侵蚀形态的定量计算, 可以在一定程度上反映泥石流的发育阶段, 并判断其危险程度。

3 数据处理和计算

3.1 流域划分

本研究以 ArcGIS9.3 为平台, 利用水文分析模块 (Hydrology) 自动进行研究区的流域提取, 所用到的数据有研究区域 10 m 分辨率数字高程模型 (DEM)

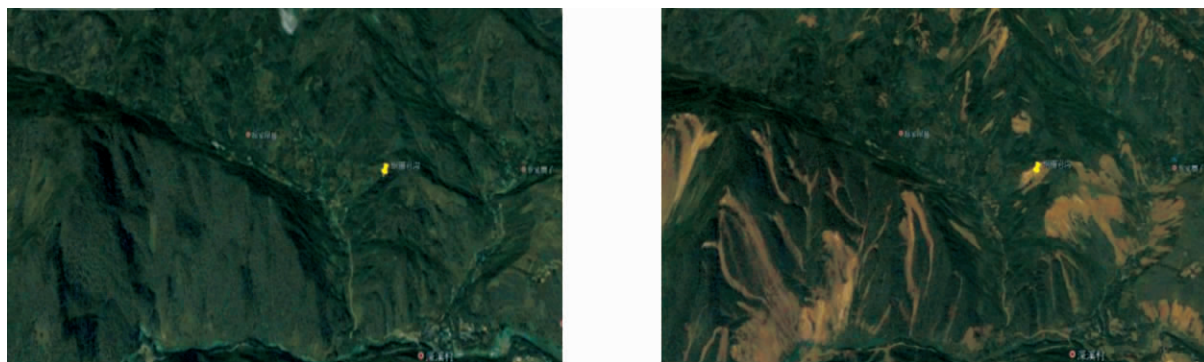


图3 地震前后深溪沟流域对比图(来自 Google Earth)

Fig. 3 The comparison of Shenxi gully before and after the Wenchuan Earthquake (From Google Earth)

和 1: 1 万的地形图。

首先是流域河网的提取。流域河网是一种重要的地理要素,在数字流域表达中有着重要的作用^[14]。在 ArcGIS9. 3 水文分析模块中借助 DEM 自动完成流域河网的提取。

在本研究中,经过对累积流量为 300、400、500、600、700、800、1 000、2 000 提取的河网进行对比发现,当集水栅格阈值即累积流量为 500 时,提取的水系与实际水系最为接近;划分出来的子流域最为理想,所以选取累积流量为 500 (Accumulation > 500) 进行流域河网的提取,并对提取的河网进行 Strahler 分级,如图 4 所示。

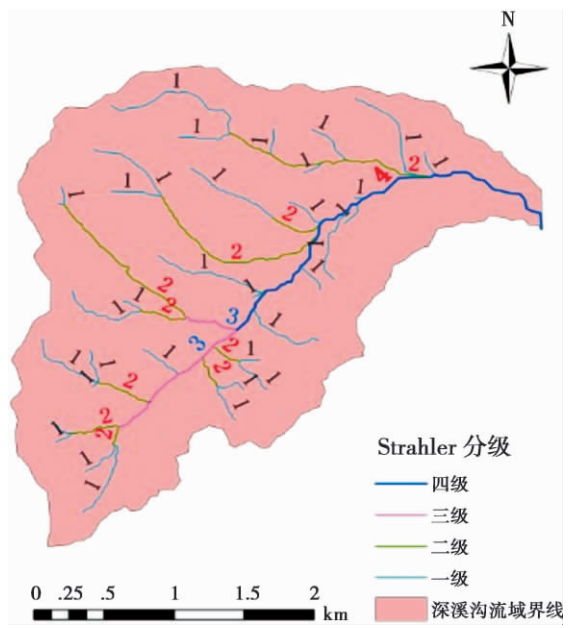


图 4 深溪沟河网 Strahler 分级

Fig. 4 The Strahler classification of Shenxi gully river network

其次进行子流域的提取。对生成的河网数据进行 Stream Link 生成,Stream Link 记录河网中结点之间的结构信息,通过提取可以得到每个河网弧段的起始点和终止点,亦即可以得到汇水区域的出水点。集水流域由 Flowdirection 和 Stream Link 提取^[15]。

由此,将 GIS9. 3 流域自动提取的结果与遥感影像和实际考察想比较,并进行人工修改和完善,最终将研究区域划分为 41 条沟谷流域,并依次进行编号,如图 5 所示。

3.2 研究区流域系统地貌信息熵值计算

应用面积-高程积分值计算地貌系统信息熵值,必须计算某条等高线以上的面积值、流域的最大、最小高程、相对高度、流域总面积等,需借助

GIS9. 3 平台完成流域特征参数的提取,面积-高程积分的计算方式如图 6 所示。

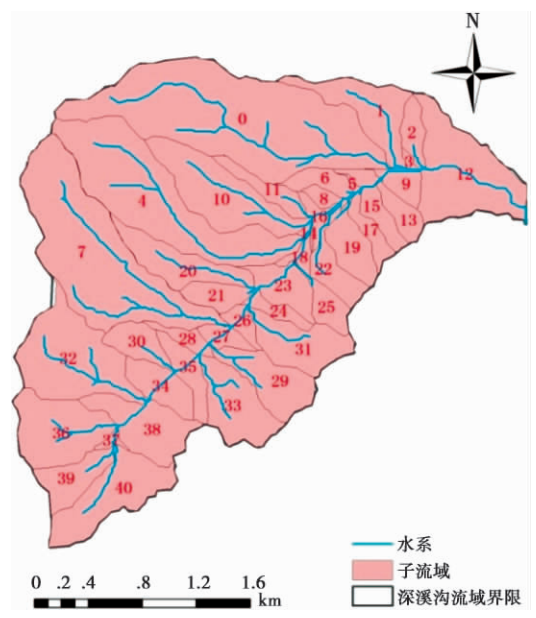


图 5 研究区域的子流域划分图

Fig. 5 The sub-watershed of the study areas

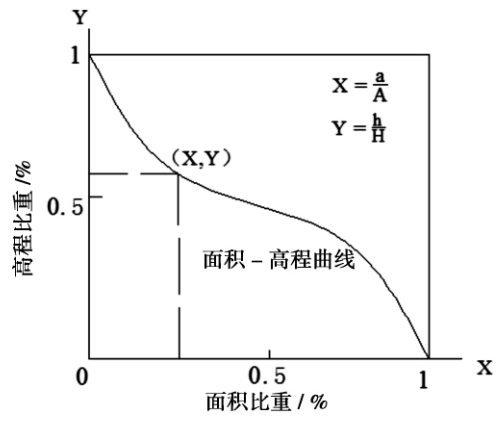


图 6 面积-高程积分值的计算方式^[16]

Fig. 6 The computation of hypsometric integral value

深溪沟流域高程变化范围为 870 ~ 2 140. 9 m, 为此利用 GIS9. 3 的 Spatial Analyst 工具生成等高距为 50 m 的等高线图层,并对等高线图层进行重分类 (Classify),利用 GIS9. 3 的线面转化功能将等高线重分类的结果转化为面文件;结合 Clip 和 Extract by Mask 功能将每个流域的等高线重分类的面文件提取出来,得到每个流域的等高线重分类图层;利用 Conversion 工具将上述所得图层转化为 Polygon,并利用 Calculate Geometry 计算每个等高线所包围的面积;将面积和高程数据导入到 SPSS 或者 Excel 中

进行统计分析,得到每个沟谷的一系列(X, Y)值;用 SPSS 或者 Excel 拟合所得到的点,即对面积 - 高程函数进行拟合。本文所用的拟合曲线类型有: n ($n = 1, 2, 3, 4, 5$) 次多项式、对数方程、指数方程、 S 曲线等多种曲线模型,用以比较拟合的结果。结果表明 n 次多项式的拟合效果最好。为了使拟合结果

具有统计学意义,计算中保证每条流域的 $R^2 > 0.98$ (拟合度,其值越接近 1 拟合效果越好)。根据拟合得到的函数在 Matlab7.0 中进行面积积分值 S 的计算,并采用公式(1)计算流域地貌系统信息熵值 H 。41 条沟道的计算结果以及部分流域的面积 - 高程积分曲线如表 1 和图 7 所示。

表 1 深溪沟流域系统地貌信息熵计算结果及泥石流发育情况

Table 1 The calculation of geomorphic information entropy and debris development in Shenxi gully watershed

沟谷编号	相对高度/m	流域面积/km ²	S	H	发育阶段	泥石流危险性
0	1 175	1.240	0.429 6	0.274 5	壮年期	中度
1	610	0.244	0.365 4	0.372 2	壮年偏老期	低度
2	285	0.072	0.440 7	0.260 1	壮年期	中度
3	170	0.010	0.378 2	0.350 5	壮年偏老期	低度
4	1 080	0.773	0.479 2	0.214 8	壮年期	中度
5	185	0.007	0.231 2	0.695 7	老年期	极低
6	215	0.073	0.429 2	0.275 0	壮年期	中度
7	920	0.898	0.446 6	0.252 7	壮年期	中度
8	150	0.034	0.355 5	0.389 7	壮年偏老期	低度
9	270	0.067	0.260 1	0.606 8	老年期	极低
10	705	0.380	0.437 6	0.264 1	壮年期	中度
11	455	0.088	0.378 9	0.349 4	壮年偏老期	低度
12	450	0.464	0.331 3	0.436 0	老年期	极低
13	430	0.072	0.469 5	0.225 6	壮年期	中度
14	90	0.009	0.601 5	0.109 8	幼年期	极高
15	400	0.103	0.290 6	0.526 4	老年期	极低
16	155	0.040	0.204 1	0.793 2	老年期	极低
17	480	0.065	0.427 4	0.277 4	壮年期	中度
18	130	0.033	0.302 2	0.498 9	老年期	极低
19	495	0.133	0.450 0	0.248 5	壮年期	中度
20	620	0.214	0.349 3	0.401 1	老年期	极低
21	225	0.087	0.417 6	0.290 8	壮年期	中度
22	495	0.117	0.451 9	0.246 2	壮年期	中度
23	405	0.134	0.276 4	0.562 3	老年期	极低
24	350	0.053	0.338 0	0.422 7	老年期	极低
25	515	0.080	0.623 4	0.096 0	幼年期	极高
26	255	0.048	0.729 7	0.044 8	幼年期	极高
27	240	0.053	0.353 0	0.394 3	壮年偏老期	低度
28	185	0.050	0.320 2	0.459 0	老年期	极低
29	380	0.209	0.736 8	0.042 2	幼年期	极高
30	210	0.067	0.569 5	0.132 5	壮年偏幼期	高度
31	460	0.222	0.633 2	0.090 2	幼年期	极高
32	455	0.459	0.371 3	0.362 0	壮年偏老期	低度
33	340	0.243	0.599 3	0.111 3	壮年偏幼期	高度
34	205	0.135	0.320 9	0.457 5	老年期	极低
35	235	0.104	0.316 6	0.466 7	老年期	极低
36	260	0.311	0.437 0	0.264 8	壮年期	中度
37	171	0.016	0.262 6	0.599 7	老年期	极低
38	201	0.245	0.426 3	0.278 9	壮年期	中度
39	242	0.142	0.490 1	0.203 2	壮年期	中度
40	286	0.309	0.490 2	0.203 1	壮年期	中度

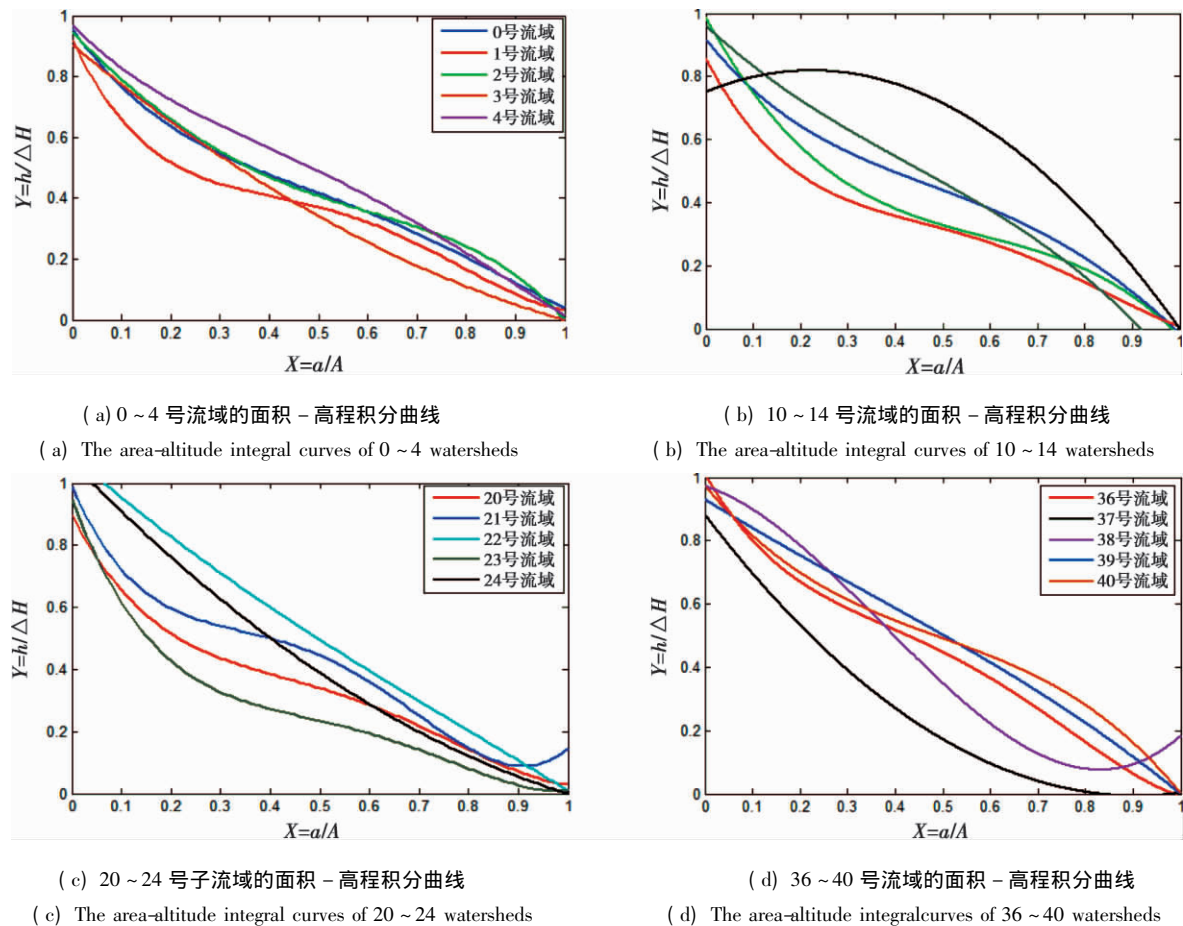


图 7 部分流域的面积 - 高程积分曲线

Fig. 7 Part of the watersheds area-altitude integral curves

4 流域地貌发育阶段和泥石流危险性评价

深溪沟流域地貌信息熵值的变化范围为： $0.0422 < H < 0.7932$ 。根据艾南山提出的判断流域地貌系统侵蚀发育程度的标准，结合深溪沟流域的地理条件和泥石流孕灾环境，将流域的划分标准作出规定（表 2）。

根据表 2 划分的标准，深溪沟流域各个沟谷发育阶段和泥石流危险性如表 1 所列。研究结果表

明：深溪沟 41 条沟谷中有 5 条处于地貌发育的幼年期，泥石流发育程度高，发生可能性极大，属于极高危险等级；2 条处于壮年偏幼期，泥石流较为发育，发生泥石流的可能性较大，属于高度危险区；15 条沟谷处于壮年期，可能发生泥石流，属于泥石流中度危险区；6 条处于壮年偏老期，泥石流发生可能性较小，属于低度危险等级；13 条沟谷处于老年期，泥石流发生可能性小，属于泥石流极低危险等级。根据上述划分方法，得到深溪沟流域泥石流危险性评价的结果，如图 8 所示。

表 2 深溪沟流域沟谷发育阶段和泥石流危险性划分标准

Table 2 The gully developmental stages of Shenxi gully and debris flow risk classified criteria

H	沟谷发育阶段	泥石流发育情况	泥石流活动特点
$H < 0.1110$	幼年期	极高危险	能发生巨大规模和高频率的泥石流，可造成重大灾难和严重危害
$0.1110 \leq H < 0.2000$	壮年偏幼期	高度危险	能发生大规模高频率泥石流，潜在破坏力大，可造成重大灾难和严重危害
$0.2000 \leq H < 0.3000$	壮年期	中度危险	能发生中等规模的泥石流，较少造成重大灾难和严重危害
$0.3000 \leq H < 0.4000$	壮年偏老期	低度危险	小规模低频率泥石流，一般不会造成重大灾难或者严重危害
$H \geq 0.4000$	老年期	极低危险	基本无泥石流活动

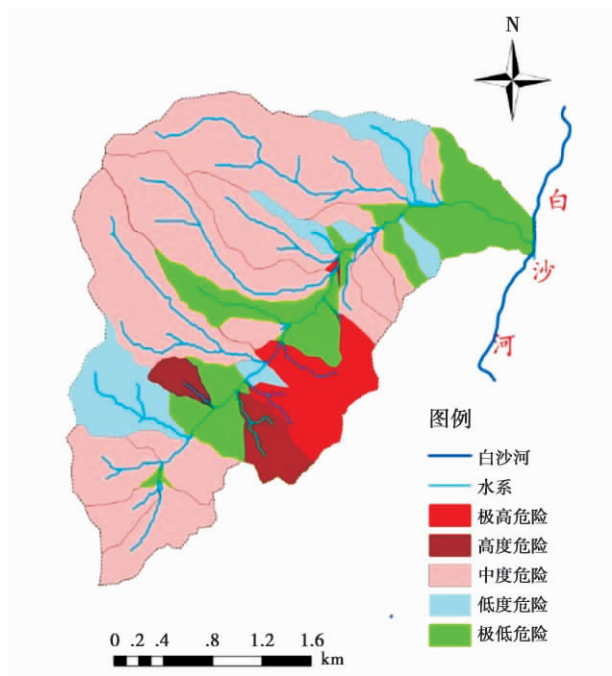


图 8 深溪沟流域泥石流危险性评价的结果

Fig. 8 The result of debris flow risk assessment in Shenxi gully watershed

5 实例分析

2 号子流域(锅圈岩沟) ,地震之前鲜有泥石流发生 ,但是汶川地震使该沟源头发生塌陷 ,形状如锅圈 ,形成大量的松散固体物质 ,震后每逢雨季 ,都会暴发泥石流 ,给沟口村民的生活带来了严重影响 ,锅圈岩泥石流沟地震前后的对比如图 9 所示。

通过计算 ,流域地貌信息熵值 H 在地震前后变化不大 ,按此理论地震前后泥石流的危险性都应该

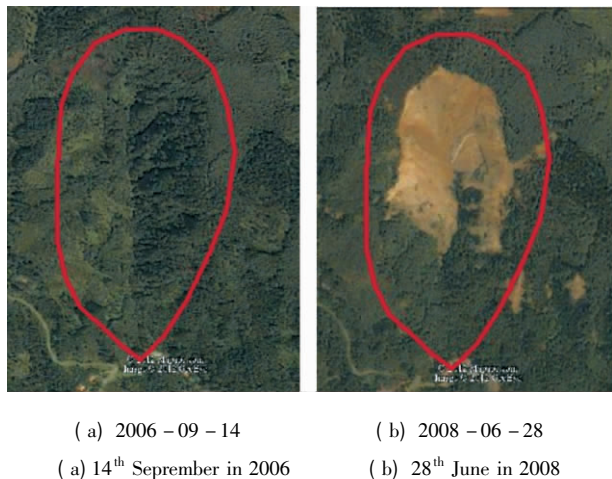


图 9 地震前后锅圈岩沟变化对比(来自 Google Earth)

Fig. 9 The changes of Guojuan gully before and after Wenchuan Earthquake

为中等 ,但是通过实地考察 ,锅圈岩沟泥石流形成区的面积 0.04 km^2 (流域总面积为 0.072 km^2) ,相对高度 285 m ,松散固体物质达 $20 \times 10^4\text{ m}^3$ (图 10) ,2008 年地震后每年都会暴发泥石流 ,属于极高危险的泥石流沟 ,说明地震使得泥石流的危险性发生了突变。



图 10 锅圈岩泥石流沟内的松散固体物质

Fig. 10 The loose materials of Guojuan debris flow gully



图 11 武显庙泥石流沟

Fig. 10 Wuxiangmiao debris flow gully

再如 0 号子流域(武显庙沟) ,地震之前未有泥石流灾害记录 ,通过计算 ,地貌信息熵在地震前后变化不大的情况下 ,震后泥石流危险性判断的结果应为低度危险 ,但实际情况是: 该沟上游大虹口、冲天坡等在地震时发生了大量的崩塌 ,摧毁了大片厚朴林 ,曾经堵断武显庙主沟; 在 2010 年 8 月和 2012 年 8 月 ,该沟都暴发了泥石流 ,摧毁农田、道路、厚朴经济林(图 11) ,严重影响“地震遗址”安全 ,定义为中度危险更是不合理。

综上 ,我们分析地震区泥石流危险性发生突变的原因: 在烈度为 XI 的都江堰深溪沟地震重灾区 ,地震引发的大量崩塌、滑坡导致松散固体物质堆积于

沟道内, 不仅为泥石流提供丰富的物源, 而且使沟道局部的地貌发生了突变, 但通过“地貌信息熵”这种方法无法表达丰富物源的变化和沟道地貌的这些突变。因此, 根据地貌信息熵判断震后泥石流的危险性就具有一定的局限性。

6 结论

地貌信息熵与泥石流形成的三大条件之一——地貌条件密切相关, 根据地貌信息熵值的大小不仅可以判断流域地貌侵蚀发育的程度和地貌演化的阶段, 而且还可以用来判断泥石流危险性的大小。但是在汶川地震的极震区, 由于地震之后特殊的孕灾环境(松散固体物质广布, 沟道局部地貌突变, 多数被地震破坏的地表发育有年轻的小流域), 通过“地貌信息熵”这种方法无法表达孕灾环境的这些突变。因此, 用“地貌信息熵”来判断震区泥石流的危险性具有一定的局限性。为了使震区泥石流危险性评价的结果更加真实、可靠与可信, 必须结合流域的实际情况, 对地貌信息熵判定的危险性结果进行综合分析、修正, 或者通过多种评价方法进行对比论证和分析。

参考文献(References)

- [1] Xie Hong, Zhun Dunlong, Jiao Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan Quake-hit area in 2008 [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 501–509 [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]
- [2] Liu Xilin. Study on debris flow dangerous degree judgment [J]. Journal of catastrophology, 1988, 3: (10–15) [刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学, 1988, 3: 10–15]
- [3] Wei Yongming, Xie Youyu, Wu Yongqiu. Applications of relativity analysis method and fuzzy synthetically assessment method in classification of dangerous degree of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 1988, 7(2): 108–117 [魏永明, 谢又予, 吴永秋. 关联度分析法和模糊综合评判法在泥石流沟谷危险度划分中的应用[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 108–117]
- [4] Tie Yongbo, Tang Chuan. Application of AHP in single debris flow risk assessment [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 79–84 [铁永波, 唐川. 层次分析法在单沟泥石流危险度评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 79–84]
- [5] Wei Fangqiang, Hu Kaiheng, J L Lopez, et al. Debris flow hazard momentum partitioning methods and applications [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(3): 298–301 [韦方强, 胡凯衡, J L Lopez, 等. 泥石流危险性动量分区方法与应用[J]. 科学通报, 2003, 48(3): 298–301]
- [6] China Weather Network. Dujiangyan city introduced. <http://www.weather.com.cn/cityintro/101270111.shtml> [中国天气网. 都江堰城市介绍 [OL]. <http://www.weather.com.cn/cityintro/101270111.shtml>]
- [7] Shen Wenwu, Zhang Jingke, Xiang Zhongyang, et al. Status and preliminary conservation program of earthquake ruins in Shengxigou region Dujiangyan City [J]. Dunhuang Research, 2010, 6: 46–53 [谌文武, 张景科, 向忠阳, 等. 都江堰深溪沟地震遗迹现状及初步保护方案[J]. 敦煌研究, 2010, 6: 46–53]
- [8] Tai Jiaji, Deng Jianhui, Xie Heping. Surface ruptures induced by associated Wenchuan Earthquake in Yingxiu and Hongkou area [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3): 109–118 [台佳佳, 邓建辉, 谢和平. 汶川大地震中映秀—虹口地区的地表破裂[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 109–118]
- [9] Yang Zongji, Qiao Jianping, Tian Hongling. Study on rainfall induced regional geohazards prediction following Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(S1): 38–42 [杨宗继, 乔建平, 田宏岭, 等. 地震后降雨诱发区域地质灾害危险性预测[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(Suppl. 1): 38–42]
- [10] Wang Bing, Zhao Jian. Study on topography information entropy in the South of Jinan Yufu River watershed [J]. Resources and Environment, 2008, 6: 69–70 [王斌, 赵建. 济南南部山地玉符河流域地貌信息熵研究[J]. 资源与环境, 2008, 6: 69–70]
- [11] Ai Nanshan. Second discussion of the comentropy of drainage-system [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 2(4): 1–7 [艾南山. 再论流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报, 1988, 2(4): 1–7]
- [12] Zhang Jingchun, Li Chuanchuan, Zhang Mei, et al. Geomorphologic analysis of the Golmud River drainage basin based on hypsometric integral value [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(3): 257–263 [张敬春, 李川川, 张梅, 等. 格尔木河流域面积—高程积分值的地貌学分析[J]. 山地学报, 2011, 29(3): 257–263]
- [13] Tang Bangxing, Li Xianwen, Wu Jishan, et al. Flood, debris flow and landslide hazards and prevention [M]. Beijing: Science Press, 1994 [唐邦兴, 李宪文, 吴积善, 等. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[M]. 北京: 科学出版社, 1994]
- [14] Li Yahui, Yang Wunian, Yang Xin, et al. Debris flow sensitivity evaluation based on the topography of the basin system information entropy [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011, 1: 55–57 [李雅辉, 杨武年, 杨鑫, 等. 基于流域系统的地貌信息熵泥石流敏感性评价[J]. 中国水土保持, 2011, 1: 55–57]
- [15] Tang Guoan, Yang Xin. ArcGIS geographic information systems spatial analysis experiments tutorial [M]. Beijing: Science Press, 2006: 442–444 [汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 442–444]
- [16] Strahler A N. Hypsometric (Area–Altitude) analysis of erosional topography [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1952, 63: 1117–114

Applicability of Geomorphic Information Entropy in the Post-earthquake Debris Flow Risk Assessment

WANG Jun^{1 2 3}, OU Guoqiang^{1 2}, YANG Shun^{1 2 3}, JI Xianjun^{1 2 3}, LU Guihong^{1 2 3}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Geomorphic information entropy can be used to express the erosive degree of the watershed geomorphic surfaces, which is one of the quantitative indicators to judge the evolution stage of landform development. Based on principles and calculation methods of geomorphic information entropy, this article used GIS technology, Matlab and SPSS softwares to calculate hypsometric integral value and geomorphic information entropy of the 41 sub-basins in the DuJiangyan Shenxi gully watershed, studied landform development characteristics of overall basin and each sub-basin, explored debris flow development situation of each sub-basin channel, and compared with the field survey after the earthquake. The results showed that in the DuJiangyan of Sichuan earthquake-hit areas, large numbers of loose solid materials induced by Earthquake accumulated in the channel, not only supplied materials for debris flows, but also made the channel local topography change sudden. Using the method of geomorphic information entropy could not express these sudden changes, so debris flow risk assessment in the earthquake-hit areas based on geomorphic information entropy had certain limitations. In order to make the debris flow risk assessment result in earthquake-hit areas results more real, reliable and credible, it must be combined with the actual situation of the basin to analyze and correct comprehensive, or demonstrate and analyze through the several methods of risk assessment.

Key words: debris flow; hypsometric integral value; geomorphic information entropy; hazard assessment