杂谷脑河流域暴雨型泥石流沟地貌特征分析

黄 海，石胜伟，谢忠胜，佘 涛
（中国地质科学院 探矿工艺研究所，四川 成都 611734）

摘 要：沟谷的地貌特征是泥石流灾变过程中的一个重要的缓变因子。它决定泥石流形成的动力条件，制约水源条件中的地表径流汇流过程，影响固体物质补给的方式。因此，可以通过研究流域地貌特征来分析泥石流灾害发育特征。以杂谷脑河中游的暴雨型泥石流沟为研究对象，分析了定量描述沟谷发育阶段的流域地貌信息熵，流域面积以及沟床纵比降与泥石流灾害特征之间的关系。结果发现，泥石流沟流域地貌信息熵值处于为 0.12～0.20 之间时，沟谷属于中高频的泥石流沟，熵值位于区间之外的沟谷则属于低频泥石流沟；沟谷流域面积大于 15 km^2，沟床纵比降小于 300‰时，发育稀性泥石流，反之则发育黏性泥石流。

关键词：干旱河谷；杂谷脑河；泥石流；地貌信息熵
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)03-0203-05 **中图分类号**：P642.23

Geomorphic Features of Rainstorm-induced Debris Flow Gullies in Zagunao River Basin

HUANG Hai, SHI Sheng-wei, XIE Zhong-sheng, SHE Tao
(*The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan* 611734, *China*)

Abstract: Geomorphic features of a gully is an important slowly varying factor in the processes of debris flow, which determine the driving forces of debris flow, restrict the surface runoff converge among water source conditions and influence the ways of solid material supply. Therefore, debris flow occurrence can be analyzed by the geomorphic features of a drainage basin. By taking a rainstorm-induced debris flow gullies in the middle of Zagunao River basin as the research object, the relationships among geomorphic information entropy in gully development stages, basin area, longitudinal channel bed gradient and debris flow disaster characteristics are analyzed. Geomorphic information entropy of the high frequency debris flow gullies is found to be 0.12～0.20 and the low frequency debris flow gully, 0～0.12 and 0.20～0.30, respectively. When gully area is >15 km^2 and longitudinal channel bed gradient is <300‰, debris flow is watery, and on the contrary, is viscous.

Keywords: dry valley; Zagunao River; debris flow; geomorphic information entropy

泥石流是暴发在山区的一种饱含泥沙块石的特殊洪流，也是最活跃的现代动力地貌过程之一。它既是流域演化的结果，也是流域演化的方式之一，故其发育特征与流域地貌演化密切相关[1]。前人对泥石流发育特征的研究中，主要集中于泥石流灾变过程中的急变因子上，如流域内固体物质的启动、降雨和汇流过程以及泥石流的流动和堆积过程，而对泥石流发育特征与地貌条件之间关系的探讨相对较少。事实上，在泥石流的发育过程中，沟谷的地貌条件决定泥石流形成与流动的动力条件，制约地表径流的汇流过程，也影响流域固体松散物质的补给方式[2]，因此，地貌条件与泥石流的发育特征是具有相关耦合性的。本文以地处岷江上游杂谷脑河流域干旱河谷区的薛城S型构造中心区域的沟谷为研究对象，利用地貌信息熵理论对沟谷的地貌发育阶段进行定量分析，并结合实地调查资料，对地貌信息熵与沟谷是否发生泥石流灾害以及泥石流的发育规模这两个因素进行分析，探索地貌信息熵与泥石流发育特征之间的关系，并对地貌信息熵结合流域形态特征参数在泥石流评价、预测等领域的应用提出建议。

1 研究区环境背景

1.1 地理位置

杂谷脑河流域位于川西北中、高山区，属岷江右岸一级支流，发源于邛崃山北段的鹧鸪山南麓，流经理县全县，在汶川县城威州镇桑坪汇入岷江，流域面积

收稿日期：2011-08-15 修回日期：2011-09-16
资助项目：地质矿产调查评价专项“西部复杂山体滑坡快速加固技术研究”(1212010814036)
作者简介：黄海(1984—)，男(汉族)，湖南省醴陵市人，助理工程师，从事地质灾害成灾机理和防治技研究。E-mail：hhai84@163.com。

4 632 km²，干流全长 168 km，落差 3 092 m，河道平均坡降 18.4‰。研究区选在理县杂谷脑镇至桃坪乡段的杂谷脑河中游河段，包括杂谷脑镇、甘堡乡、薛城镇、木卡乡、通化乡和桃坪乡 6 个行政区。

1.2 区域地形地貌

研究区属典型的高山峡谷区，山峦起伏，山势陡峻，支沟发育，河谷深切，相对高差大，水流湍急。两岸岩层破碎，岸坡稳定性差，易发生滑坡、泥石流等灾害，是岷江流域滑坡泥石流灾害分布最为集中的地区之一[3]。区内最低海拔为古城沟沟口，海拔高程 1 450 m，最高海拔位于甘溪沟源头，海拔高程 5 280 m，沟域岭谷相对高差 600～800 m。从地形地貌看，在坡度为 25°～50°的斜坡地带，多发育滑坡类地质灾害，在大于 50°的地区，一般发生崩塌类地质灾害，这些崩塌滑坡是沟域内主要固体松散固体物质来源，在沟谷沟床纵坡降较大的条件下，极有利于泥石流发育。

1.3 气象条件

研究区属岷江上游干旱河谷地区，气候受地形影响显著。区内海拔高差悬殊，地形复杂，气候差异显著，具有山地立体型气候特征。总体降水量少而集中，时间上，季节分配不均，干雨季分明，雨季集中于 5—9 月占全年的 70%以上。空间上，从理县县城杂谷脑镇至桃坪乡，降雨量呈减小趋势，降雨在 7—9 月的集中度呈增加趋势，越往杂谷脑河下游，降雨的集中程度越高。研究区降雨特征如表 1 所示。

表 1 研究区降雨情况

地 名	海拔/m	年总降雨量/mm	5—9 月降雨		10 min 雨强 $P=5\%$
			降雨量/mm	占全年总量比例/%	
杂谷脑镇	1 860	590.60	410.60	69.50	25.05
甘堡乡	1 805	550.10	390.70	71.00	23.73
薛城镇	1 600	483.00	348.70	72.20	24.31
木卡乡	1 565	457.60	333.60	72.90	23.51
通化乡	1 515	412.20	303.90	73.70	22.08
桃坪乡	1 490	392.70	289.20	73.60	21.72

研究区降雨集中，20 年一遇的频率下 10 min 雨强均在 20 mm 以上，据吴积善等研究成果[4]，其暴雨强度完全可以满足激发泥石流的条件。高强度集中暴雨是该区泥石流的主要诱发素。

1.4 地质条件

研究区主要受薛城 S 型构造控制，压扭性弧形断层较发育，褶皱紧密，在地貌上表现为山高坡陡、水系发育。区内地层岩性复杂，以泥盆系危关群和志留系茂县群的千枚岩、变质砂岩为主。河谷两侧斜坡主要覆盖有残坡积层，高海拔区域还有冰水堆积分布。岩性软弱、构造复杂以及邻近区域新构造运动强烈，为泥石流的发育提供了丰富的松散固体物质条件。泥石流沟的松散固体物质来源主要有：滑坡、崩塌、坡面重力侵蚀和沟床物质，其中尤其以滑坡崩塌最为丰富，是形成泥石流的主要物质来源。

2 泥石流沟空间分布

研究区地质条件复杂，降雨集中，这两个关键因素均非常有利于泥石流的暴发。在野外实地考察和对当地居民访问的基础上，分析统计了杂谷脑河两侧沟谷的泥石流灾害发育情况。研究区流域面积小于 100 km² 的沟谷共 21 条，其中有 13 条沟在“5·12”汶川地震前即为中—高频泥石流，占泥石流总数的 57%，其他的 8 条沟受“5·12”地震影响，沟道内增加了大量松散固体物质，由低频泥石流沟转变为中—高频泥石流沟。灾害最严重的日底沟和哈尔木沟暴发的泥石流曾直接堵断过杂谷脑河，造成极大的危害。研究区泥石流发育特征统计结果如表 2 所示。

泥石流沟具有集中密集分布的特征，每条面积小于 100 km² 的沟谷均有泥石流暴发的历史。在时间上，研究区的泥石流灾害具有典型的群发性，如 1972 年和 2011 年的 2 次群发泥石流。主要原因为区内地质构造基本一致，相似的降雨条件下，诱发区域性群发泥石流灾害的可能性非常大。

3 流域地貌信息熵

3.1 流域地貌信息熵的计算方法

地貌信息熵理论是艾南山[5]和艾南山等[6]结合 Stahler 面积—高程分析法和戴维斯的地貌循环理论提出的一种定量分析流域系统侵蚀的方法[5-6]，其表达方式为：

$$H=S-\ln S-1 \tag{1}$$

式中：H——地貌系统信息熵；S——Strahler 面积—高程积分值。

面积—高程积分是 20 世纪 50 年代美国理论地貌学家 A. N. Stahler 提出的一种定量分析流域地貌发育阶段的方法[7-9]，本文中主要表现为泥石流发生的沟谷所处的不同地貌发育阶段。具体计算方法为：

设流域面积为 A，该流域内某等高线以上的面积为 a，该等高线与流域最低点的高差为 Δh，流域最高点与最低点的高差为 ΔH。根据测量数据，在直角坐标系内绘制一条拟合的曲线：

$$y=f(x) \tag{2}$$

式中：$x=a/A$；$y=\Delta h/\Delta H$。此即为该流域的面积—高程曲线，对函数(2)在 X 轴和 Y 轴内的面积进行积分：

表 2　研究区内泥石流发育情况

序号	沟 名	流域面积/km²	高差/m	平均纵比降/‰	泥石流发育情况	泥石流沟分类
1	转经楼沟*	4.34	2 150	387.63	2008 年 7 月暴发了小规模黏性泥石流,造成沟口薛孟路断路	低频黏性
2	磨子沟	17.77	2 256	277.43	2009 年 7 月 6 日暴发了小规模山洪灾害	低频稀性
3	甘堡沟*	3.09	1 665	439.50	2010 年 7 月暴发小型泥石流,冲毁少量农田	低频黏性
4	危关沟*	51.83	3 140	186.66	沟内植被较好,沟道下游较缓,无泥石流灾害	低频稀性
5	日底沟	5.12	2 810	378.40	1983 年暴发过大规模泥石流,将杂谷脑河堵断,此后 15 a 每年均有暴发记录,“5·12”地震后,2008 年 8 月由滑坡堵塞沟道,暴发了溃决型泥石流	高频黏性
6	欢喜坡沟	3.24	1 990	465.84	1972 年年均暴发过较大规模泥石流	中频黏性
7	八各寨沟	5.14	1 935	418.08	1972 年,1973 年均暴发过泥石流	中频黏性
8	祁山寨沟	9.21	2 310	411.83	1972 年暴发过泥石流	中频黏性
9	增头沟	53.10	3 330	207.44	1972 年暴发过较大规模泥石流,2011 年 7 月 6 日暴发水石流,造成沟口导流堤垮塌,桥梁淤塞	中频稀性
10	南 沟	23.50	2 570	280.53	每 3～4 a 暴发一次泥石流	高频稀性
11	哈尔木沟	6.17	1 945	412.70	每年暴发 2～3 次泥石流,最大一次为 1989 年,将杂谷脑河堵断	高频黏性
12	四南达沟	7.99	2 300	378.12	1989 年暴发过泥石流	中频黏性
13	通化沟	29.80	3 295	273.76	1972 年暴发过泥石流	中频稀性
14	谢溪沟	5.20	2 465	479.60	1972 年,1983 年均暴发过泥石流,造成大量农田被淹	中频黏性
15	古城沟	13.90	2 800	355.09	1972 年暴发泥石流,造成 2 人死亡,大量农田被淹	中频黏性
16	四马沟	13.74	2 810	369.76	1923 年暴发过泥石流,“5·12”地震后,2011 年 7 月 6 日暴发了小规模稀性泥石流,造成机耕道冲毁	中频黏性
17	铺子沟	5.25	2 250	467.15	2005 年 7 月 2 日暴发泥石流,将 G317 国道堵断;2010 年 8 月暴发小型泥石流,未造成损害	高频黏性
18	板子沟*	47.25	3 225	197.21	2011 年 7 月 6 日暴发稀性泥石流,造成农田被淹,甘堡藏寨绿化带坍塌	低频稀性
19	八十脑沟*	16.10	2 400	368.89	2011 年 7 月 6 日支沟内暴发小规模泥石流,汇入主沟后形成高含沙水流,未造成危害	低频稀性
20	日脚沟*	36.29	3 275	243.11	目前未发育泥石流,“5·12”地震后,沟内新增松散物质较多	低频稀性
21	甘溪沟*	51.54	3 730	267.40	2011 年 7 月 6 日暴发山洪,携带大量泥沙冲出沟口,幸未造成危害	低频稀性

注:* 表示“5·12”汶川地震前沟道为低频泥石流沟。下同。

$$S=\int_0^1 f(x)\mathrm{d}x \tag{3}$$

将高程—面积积分结果 S 代入公式(1),即可计算出流域地貌信息熵。据艾南山等[6]的研究成果,可将地貌信息熵与流域侵蚀循环期对应起来,当 $H<0.111$,沟谷地貌发育处于幼年期;H 在 0.111～0.400之间,沟谷地貌发育处于壮年期;$H>0.400$ 时,沟谷地貌发育处于老年期。

3.2　流域面积－高程积分曲线及地貌信息熵

在 1∶5 万 DEM 中利用 Mapgis 软件划分出流域界线并矢量化,然后再统计等高距为 40 m 的各条等高线所控制的流域面积。

将所得数据导入 Excel 软件进行拟合分析,得出一系列高程曲线的拟合方程。使用 Excel 软件对研究区 21 条沟谷泥石流进行多项式拟合,且在多项式阶数为 3 的时候,全部曲线均能得到较好的拟合效果,每条沟谷均满足 $R^2>0.988$,显然采取 3 阶多项式进行拟合能满足计算精度要求。再利用 Matlab 软件即可对拟合方程进行积分和绘制图形,得到地貌系统信息熵 S(详见表 3)以及面积—高程曲线(如图 1 所示)。

4　地貌特征与泥石流发育关系

4.1　流域形态与泥石流性质的关系

流域面积是决定泥石流沟谷固体物质补给总量和地表径流汇流总量的重要参数。相同条件下,流域面积越大,松散固体物质储量越多,暴雨形成的洪峰流量越大。

沟床比降则反映了流体运动能量补给特征,沟床越陡,流体获取能量越多,携带泥沙能力越大。通过统计分析研究区 21 条沟谷中,流域面积小于 15 km²,河床纵比降大于 300‰的沟谷发育黏性泥石流,反之发育稀性泥石流(表 4)。

表 3 研究区各沟谷地貌系统信息熵及沟谷发育阶段

沟 名	R^2	面积—高程拟合曲线方程	H	S	发育阶段
转经楼沟*	0.998 1	$y=-1.854\ 2x^3+1.879\ 5x^2-0.980\ 6x+0.994\ 0$	0.666 9	0.072 0	幼年期
磨子沟*	0.993 3	$y=-2.213\ 0x^3+2.840\ 0x^2-1.550\ 7x+0.997\ 7$	0.615 8	0.100 6	幼年期
甘堡沟*	0.995 3	$y=-2.264\ 3x^3+2.966\ 9x^2-1.646\ 4x+0.991\ 9$	0.591 6	0.116 5	壮年(偏幼)期
危关沟*	0.994 1	$y=-1.342\ 4x^3+1.679\ 8x^2-1.267\ 0x+0.999\ 6$	0.590 4	0.117 4	壮年(偏幼)期
日底沟	0.997 5	$y=-2.136\ 4x^3+2.751\ 6x^2-1.577\ 3x+0.980\ 1$	0.574 5	0.128 8	壮年(偏幼)期
欢喜坡沟	0.999 2	$y=-1.890\ 9x^3+2.317\ 7x^2-1.389\ 1x+0.967\ 3$	0.572 6	0.130 2	壮年(偏幼)期
八各寨沟	0.999 2	$y=-1.329\ 7x^3+1.545\ 5x^2-1.176\ 0x+0.976\ 5$	0.571 2	0.131 2	壮年(偏幼)期
祁山寨沟	0.987 8	$y=-1.850\ 9x^3+2.567\ 2x^2-1.562\ 4x+0.948\ 5$	0.559 8	0.140 0	壮年(偏幼)期
增头沟	0.997 9	$y=-1.690\ 9x^3+2.3\ 9x^2-1.611\ 3x+0.98\ 7$	0.555 3	0.143 5	壮年(偏幼)期
南 沟	0.995 5	$y=-2.131\ 6x^3+2.973\ 4x^2-1.729\ 2x+0.951\ 7$	0.545 3	0.151 7	壮年(偏幼)期
哈尔木沟	0.996 4	$y=-1.351\ 4x^3+1.878\ 4x^2-1.436\ 2x+0.965\ 9$	0.536 1	0.159 5	壮年(偏幼)期
四南达沟	0.993 7	$y=-2.439\ 5x^3+3.444\ 4x^2-1.896\ 3x+0.930\ 2$	0.520 3	0.173 6	壮年(偏幼)期
通化沟	0.995 7	$y=-1.102\ 9x^3+1.431\ 4x^2-1.225\ 4x+0.924\ 0$	0.512 7	0.180 8	壮年(偏幼)期
谢溪沟	0.993 0	$y=-1.998\ 9x^3+2.931\ 2x^2-1.828\ 5x+0.945\ 5$	0.508 6	0.184 7	壮年(偏幼)期
古城沟	0.994 4	$y=-1.739\ 9x^3+2.651\ 1x^2-1.713\ 1x+0.925\ 6$	0.505 3	0.187 9	壮年(偏幼)期
四马沟	0.995 1	$y=-2.112\ 3x^3+3.351\ 2x^2-2.006\ 6x+0.913\ 1$	0.498 8	0.194 4	壮年(偏幼)期
铺子沟	0.998 1	$y=-1.219\ 6x^3+1.865\ 1x^2-1.578\ 9x+0.958\ 0$	0.485 3	0.208 3	壮年期
板子沟*	0.997 0	$y=-1.170\ 6x^3+1.492\ 1x^2-1.317\ 6x+0.942\ 8$	0.488 7	0.204 7	壮年期
八十脑沟*	0.998 1	$y=-1.518\ 3x^3+2.42\ 8x^2-1.811\ 0x+0.949\ 8$	0.474 1	0.220 4	壮年期
日脚沟*	0.988 8	$y=-1.600\ 1x^3+2.410\ 9x^2-1.677\ 1x+0.891\ 2$	0.456 3	0.240 9	壮年期
甘溪沟*	0.993 0	$y=-1.773\ 5x^3+2.807\ 4x^2-1.886\ 1x+0.884\ 4$	0.433 8	0.269 0	壮年期

注：R^2 为曲线拟合度；H 为高程面积积分；S 为地貌信息熵。

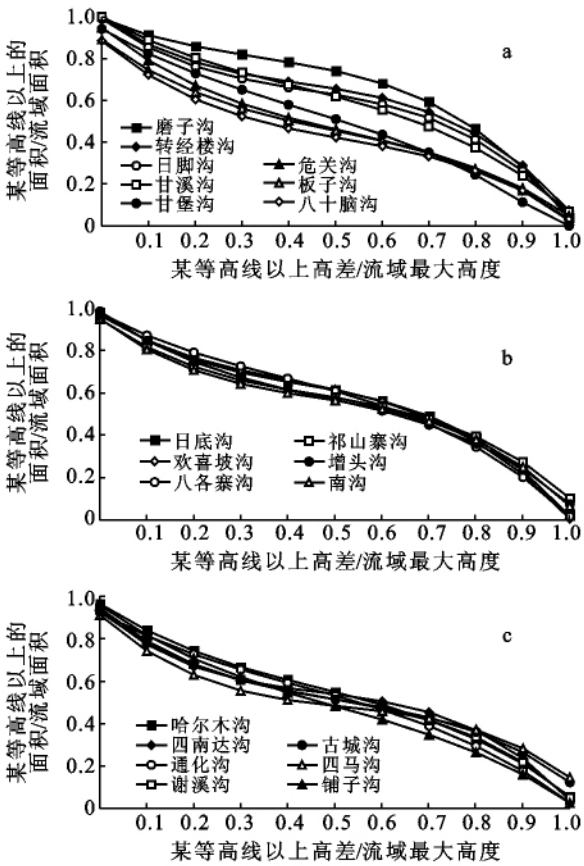


图 1 研究区各沟面积－高程曲线

注：a 信息熵 $S<0.12$，“5·12”地震前为低频泥石流泥石流沟；b 信息熵 $0.12<S<0.20$，“5·12”地震前为中—高频泥石流沟；c 信息熵 $S>0.20$，“5·12”地震前为中—高频泥石流沟。

表 4 流域形态与泥石流性质的关系

形态参数	黏性泥石流	稀性泥石流
流域面积/km^2	<15	>15
沟床平均纵比降/‰	>300	<300

从泥石流形成条件上考虑，流域面积大，暴雨下形成洪峰较大，泥沙携带能力强，因此在小于诱发泥石流启动的临界暴雨的情况下，由于汇水面积较大，洪峰流量仍然较大，沟道中大量细颗粒物质由山洪携带运输至主河中，因此，沟道内储存的松散固体物质黏性物质较少，而粗颗粒固体物质较多。同时，沟床纵比降越大，泥石流体运动能量越大，克服黏性泥石流运动产生的高阻力能力越强，因此，陡峻的沟床条件是黏性泥石流形成的必要条件之一。

4.2 地貌信息熵与泥石流发育的关系

通过地貌信息熵可定量分析沟谷流域现阶段所处的地貌发育阶段，可从宏观上定量描述沟谷地貌特征。分析研究区内的 21 条沟谷的地貌信息熵发现，地貌发育阶段与泥石流活跃程度具有明显的相关关系，研究区沟谷 H 值介于 0.07～0.27，流域地貌发育阶段全部属于幼年—壮年期。结合区域内泥石流发育情况，发现 21 条沟谷均为泥石流沟，其中地貌信息熵的范围为 $0.12<H<0.20$ 时，沟谷为中高频泥石流沟，在近 30 a 内暴发过多次泥石流灾害；而 $H<0.12$ 和 $H>0.20$ 时，沟谷为低频泥石流，即近百年来

无泥石流暴发记录，但从沟谷堆积扇形态等分析可知沟谷具有泥石流沟的特征。

根据地貌侵蚀循环理论，泥石流沟处于幼年期时，地势崎岖，坡地陡峻，流域侵蚀严重，固体物质形成区在流域内分散分布，在极好的汇流条件和水动力条件下，易形成高含沙水流直接通过主河输送走。因此，在研究区沟谷幼年期侵蚀地貌条件下反而不易暴发泥石流灾害。沟谷进入壮年期后，固体物质形成源区集中，且物质汇集速度极快，造成沟道阻塞，在良好的水动力条件下，极易形成泥石流[10-11]。

5　结 论

(1) 泥石流与流域地貌形态具有相互制约、相互影响的关系，在地质条件和降雨条件均较相似的区域，地貌形态与泥石流的发育特征的关系更为明显，因此，从一定范围内可以从流域地貌特征来判断单沟泥石流灾害的发育情况。流域地貌系统信息熵理论是一种较好的计算流域地貌发育阶段的定量方法。因此，建立地貌信息熵与泥石流发育程度之间的关系具有可操作性。

(2) 利用地貌信息熵理论对杂谷脑河干旱区以千枚岩地层为主的区域进行分析，初步调查表明，研究区内 21 条小于 100 km^2 的沟谷中，有 12 条沟谷为中高频泥石流沟，而其他 9 条为低频泥石流沟。地貌信息熵与泥石流发育的敏感性没有线性关系，且没有一般意义上的地貌信息熵越低，泥石流发育程度越高的关系。

(3) 研究区的 21 条沟谷的地貌信息熵 H 介于 0.07～0.27，沟谷流域地貌发育阶段属于幼年—壮年期，其中 12 条中高频率泥石流沟的 H 值处于 0.12～0.20，这表明在杂谷脑河中下游区域的沟谷地貌发育阶段处于幼年—壮年过渡期，最易暴发泥石流灾害，而非传统认识上的熵值越小泥石流灾害的危险性越大。

(4) 研究区沟谷流域形态参数与泥石流性质具有明显相关关系，流域面积小于 15 km^2，沟床平均纵比降大于 300‰的沟谷发育的泥石流为黏性，反之则为稀性。

(5) 本研究发现的干旱河谷区的泥石流与地貌信息熵之间的关系对研究利用地貌信息熵评估预测泥石流灾害具有重要意义，进一步验证了相关理论。今后在评价该区域的泥石流风险时，可结合流域形态参数和地貌信息熵分析泥石流的暴发程度及流体特征，可为当地防灾减灾工作提供工作基础。

[参 考 文 献]

[1] 李泳，胡凯衡，苏凤环，等. 流域演化与泥石流的系统性：以云南东川蒋家沟为例[J]. 山地学报，2009，27(4)：449-456.

[2] 康志成，李绰芬，马蔼乃. 中国泥石流研究[M]. 北京：科学出版社，2004：32-38.

[3] 谢洪，钟敦伦，李泳，等. 长江上游泥石流灾害的特征[J]. 2004，13(1)：94-99.

[4] 吴积善，田连权，康志成，等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京：科学出版社，1993：192-214.

[5] 艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报，1987，1(2)：1-7.

[6] 艾南山，岳天祥. 再论流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报，1988，2(4)：1-7.

[7] Strahler A N. Quantitative slope analysis[J]. Bull. Geol. Soc. Am.，1952，67(1/6)：571-59.

[8] 吕学军，刘希林，苏鹏程. 四川达曲河流域泥石流沟发育阶段的面积：高程分析[J]. 山地学报，2005，22(3)：336-341.

[9] 王晓朋，潘懋，任群智. 基于流域系统地貌信息熵的泥石流危险性定量评价[J]. 北京大学学报：自然科学版，2007，43(2)：211-215.

[10] 谢洪，钟敦伦，韦方强，等. 北京山区泥石流的分类与类型[J]. 山地学报，2004，22(2)：212-219.

[11] 游勇，柳金峰，陈长兴. “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.