

基于流域系统超熵的泥石流沟活跃度定量分析

邹强^{1,2}, 王青¹, 刘延国¹

1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川绵阳 621010

2. 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

摘要 泥石流沟谷活跃程度评价是泥石流灾害预测、评价和防治的前提。结合 GIS 信息处理技术, 以沟谷纵剖面形态指数为媒介, 将泥石流流域系统的超熵与泥石流沟谷演化过程联系起来, 探讨了泥石流流域系统活跃度的定量分析方法, 并依据超熵值将流域沟谷活跃度分为 4 个等级: 活跃 ($-0.097 \leq \delta_x P < 0, 1.225 \leq N < 2.0$)、较活跃 ($-0.097 \leq \delta_x P < -0.011, 0.585 \leq N < 1.225$)、较稳定 ($\delta_x P \geq 0, N \geq 2.0$) 和稳定 ($-0.011 < \delta_x P < 0, 0 < N < 0.585$)。本文利用此方法对川藏公路鲜水河段 58 条沟谷进行判定, 其中, 处于活跃期的沟谷 26 条, 占总数的 44.83%, 处于较活跃期的沟谷 30 条, 占总数的 51.72%, 处于较稳定—稳定的沟谷仅 2 条。川藏公路鲜水河段流域沟谷演化处于发展—旺盛阶段, 活跃度较高。通过对比验证, 评价结果与实际情况具有一致性。评价结果表明, 利用流域系统超熵值判断泥石流沟谷活跃程度, 具有较好的客观性、可操作性和可靠性。

关键词 泥石流; 超熵; 活跃度; 川藏公路

中图分类号 P694

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.18.007

Quantitative Analysis of Debris Flow Gully Based on Geomorphic Excess Entropy in Catchment

ZOU Qiang^{1,2}, WANG Qing¹, LIU Yanguo¹

1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan Province, China

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes; Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract The activity evaluation of debris flow gully is the first step for forecasting, assessing, preventing, and controlling the debris flow. In order to resolve the problems, such as complexity of determination research, difficult of datum collection in the evaluation of debris flow gully, by virtue of GIS information processing technology, an effective and convenient method for quantitatively analyzing the evolution stage and activity degree of debris flow gully is discussed. In the method, a index of valley longitudinal profile shape is used to link the geomorphic system excess entropy with the evolution stage for debris flow gullies, also four ranks of activity for debris flow gully are divided into, they are: activity ($-0.097 \leq \delta_x P < 0, 1.225 \leq N < 2.0$), sub-activity ($-0.097 \leq \delta_x P < -0.011, 0.585 \leq N < 1.225$), sub-stability ($\delta_x P \geq 0, N \geq 2.0$), and stability ($-0.011 < \delta_x P < 0, 0 < N < 0.585$). Furthermore, the method is applied to the middle reaches of Xianshui River along Sichuan-Tibet Highway and detail works are carried out. First of all, 58 catchments are extracted from 1:50000 local DEM with the support of GIS hydrologic analysis technology, and then the main lengths from 353m to 1712m and the areas from 0.47km² to 58.09km² of these gullies are acquired. After determining on the activity of debris flow gullies, some significant results are obtained as follows: 26 gullies accounting for 44.83% of total gullies are in the active period; 30 gullies accounting for 51.72% of total gullies are in the sub-active period and only two gullies are in the sub-stable phase. It is shown that the catchments located in the middle reaches of Xianshui River along Sichuan-Tibet Highway are in the developing and active evolution stage, and the activity degree of debris flow gullies is at a high level that is consistent with the actual situation. Based on the result, the method of geomorphic excess entropy analysis on the

收稿日期: 2012-04-16; 修回日期: 2012-06-05

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (12ZC1381)

作者简介: 邹强, 讲师, 研究方向为山地灾害与 GIS, 电子邮箱: zouqiang@swust.edu.cn

activity of debris flow catchments is objective, credible, easy to carry out for data scarce areas, and it is also helpful for evaluating, warning, and reducing debris flows.

Keywords debris flow; excess entropy; activity; Sichuan-Tibet Highway

0 引言

泥石流是暴发在山区小流域内的特殊地质灾害,其流域沟谷活跃程度是泥石流灾害调查的重要内容,也是泥石流预测、评价和防治的前提,因而倍受关注^[1]。关于泥石流流域沟谷的评价研究,早期以定性描述为主。随着数学模型的引入和信息技术的应用,该研究向量化方向发展,吕儒仁^[2]分别用直接因素和间接因素对泥石流进行判别;谭炳炎^[3]将模糊理论用于泥石流严重程度评判;刘希林^[4]讨论了河流动力作用与沟谷地貌演变的关系。但由于评价时考虑判别因子太多(14—15项),且选取的因子在物理意义上相互不独立,多有重复,出现评判工作复杂、资料收集困难等问题。因此,寻求一种快速且能够判定泥石流沟谷活跃度的方法具有重要研究意义。

泥石流流域包含内外营力相互作用、多重正负反馈,涉及物理、化学、生物及人文等众多影响因素,是一个复杂的非线性系统^[5]。熵,指某些物质系统状态可能出现的程度,在科学技术上泛指某些物质系统状态的一种量度。超熵,是一种非线性、非平衡态熵,其符号决定区域的稳定性^[6]。因此,可以通过地貌系统的超熵值描述泥石流流域系统的活跃度,进一步探讨泥石流发育与流域地貌系统活跃性的关系。

基于此,本文试图基于泥石流流域地貌系统的超熵理念,结合GIS信息处理技术,定量分析流域沟谷特征及其发育阶段,进而形成泥石流沟谷活跃度的判定标准,建立一种快速有效的泥石流沟谷活跃度评价方法。本文选定川藏公路鲜水河段58条沟谷为研究对象,计算流域系统的超熵值,并对研究区泥石流沟谷活跃度进行评价。

1 流域地貌超熵理论

1989年,艾南山等^[6]首先将超熵的概念引入流域系统研究,并提出了对于一个特定的流域系统的超熵表达式,即

$$\delta_x P = \frac{-\beta \alpha^3 (\alpha - 1) (\alpha + 1)}{\alpha (-\beta - 1) - 3} \quad (1)$$

式中, β 为非平衡状态时斯特拉勒曲线方程 $f(x) = (1-x)^{1-\frac{2}{1+\beta}}$

中的因子; α 为该曲线的指数 $1-\frac{2}{1+\beta}$; P 为流域系统熵产生率; $\delta_x P$ 为流域系统超熵,其符号决定流域系统的稳定性,其绝对值定量表征稳定性程度。若 $\delta_x P > 0$,流域稳定,绝对值越大,流域稳定性越高;若 $\delta_x P < 0$,流域不稳定,绝对值越大,流域越不稳定。

蒋忠信^[7-8]通过对泥石流流域系统的进一步研究得出,流域系统的超熵是沟谷纵剖面形态指数的简单函数,对于泥石

流流域系统的超熵可用 N 值表达为

$$\delta_x P = \frac{N^3(N^2-4)(N+2)}{32(6-N)} \quad (2)$$

式中, N 为流域沟谷纵剖面形态指数,是沟谷纵剖面形态方程 $h/H = (l/L)^N$ 中的指数。

N 可以通过拟合沟口为原点的抛物线方程求得,具体计算方法是:(1)以一定等高距为步长,计算一系列组合点($X=l/L, Y=h/H$),其中 L 为泥石流流域主沟总长度(m), l 为该流域内某条等高线与沟口之间的主沟长度(m), h 为该等高线与流域沟口的高差(m), H 为该流域高差(m);(2)拟合沟谷纵剖面曲线,获取拟合效果最好的函数 $f(x) = x^N$ 。

在开放泥石流流域系统中,泥石流的强烈切割作用加速流域地貌形态的变化,同时,流域地貌条件也制约着泥石流的形成和运动,影响着泥石流的发生和规模,由此可见,沟谷纵剖面形态反映了流域侵蚀发育程度和地貌动态演化的丰富信息。流域的相对高差决定流水势能的大小,为松散碎屑物质的起动提供动能;沟系发育决定流域切割深度和沟壑密度,反映流域地貌演化阶段。因此,以沟谷纵剖面形态指数为媒介,将泥石流流域系统超熵与泥石流沟谷演化过程有机地联系起来,在泥石流流域系统活跃性和流域地貌演化研究上有重要的意义。

2 研究区概况

研究区为川藏公路鲜水河段地区,位于甘孜州中北部道孚、炉霍境内,地理位置介于 $100^{\circ}36'E-101^{\circ}18'E$ 和 $31^{\circ}18'N-31^{\circ}56'N$,属高原寒温带、亚热带半干旱大陆性季风气候,气温年变化小、日变化大,且此变化随海拔升高而增强。该区山原面积辽阔,平均海拔高度3000m以上,相对高差2200m,地势呈西北高东南低,山坡坡度一般在 25° 以上,最大可达 71° ,为泥石流滑坡等不良地质现象的发育提供了有利地形条件。

区内三叠系地层出露完整,分布在绝大部分区域,第三系仅沿断裂带有零星分布,第四系主要分布在河谷地带。区内岩性以砂岩及变质砂岩、石英砂岩,间夹玄武岩、安山岩及砂质板岩为主,局部地段呈砂、板岩互层产出。这类高强度岩石,当地震之后,容易产生大量崩塌滑坡,从而为泥石流发育提供松散物质^[9-10]。区内断裂发育,地质构造作用强烈,属于鲜水河地震带最活跃地段,地震破坏坡体的稳定性,使山坡表层产生松动破碎,直接引发崩塌、滑坡,使大量山坡物质直接进入沟床,沟床内的松散固体物质将会骤增,形成泥石流的松散固体物质更加丰富,使得泥石流活动性增强。另外,国内外研究表明,大地震之后诱发泥石流的临界雨量也会大大降

低^[10-12],泥石流更易暴发。

3 数据处理与计算

3.1 流域提取

传统的流域划分方法是根据研究人员的主观判断,在地形图上根据分水岭的走向绘出不同级别的流域。这种方法虽然较多地体现了专家的经验知识,但是在操作过程中费时费力,尤其当研究区面积较大、分辨率较高的时候更显得无从下手^[3]。DEM(Digital Elevation Model,数字高程模型)含有地形地貌及水文信息,为准确而高效地提取研究区地形特征及水系分布提供了保证。随着地理信息数字技术与软件的发展,从DEM中提取流域的地貌特征成为可能。

本文的流域划分是基于鲜水河流域 1:50000 DEM,利用 ArcGIS 水文分析模块采用人机交互式判读方法完成。整个划分过程分为两个步骤:(1)自动划分,包括洼地填充—计算汇流方向—分析汇流累积—沟谷提取—沟谷编码—流域划分;(2)结果校验,将划分的结果与遥感图像进行对比,检验河网线、山脊线、山谷线、流域边界与遥感图像是否匹配,如果划分不当,进行人工修改。最终,研究区提取了 58 条沟谷流域,结果如图 1 所示。

3.2 流域沟谷特征

利用 ArcGIS 软件提取沟谷流域特征,统计分析每个沟谷的流域面积、主沟长度和相对高差,结果表明,流域面积差别悬殊,最小 0.47km²,最大 58.09km²。流域面积>10km²的沟谷 22 条,占总数的 37.93%;在 1—10km²之间有 35 条,占总数的 60.34%;流域面积<1km²的仅 1 条。流域沟谷的主沟长度一般在 1—10km,主沟长度>10km 的沟谷 11 条,占总数的 18.97%;在 1—10km 之间有 46 条,占总数的 79.31%;主沟长<1km 的仅 1 条。相对高差变化范围较大,353—1712m,相对高差>1500m 的沟谷有 8 条,占总数的 13.79%;在 1000—

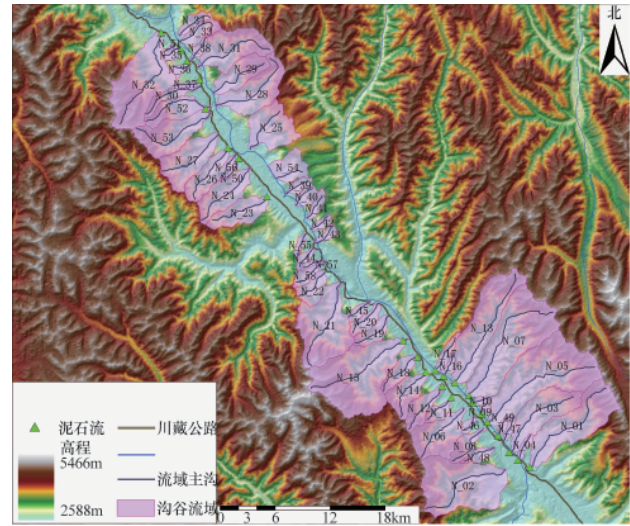


图 1 研究区流域划分结果

Fig. 1 Catchments in study area

1500m 之间有 22 条,约占总数的 37.93%;在 500—1000m 之间有 24 条,约占总数的 41.38%,相对高差<500m 的仅 4 条。

3.3 流域系统的超熵

基于流域沟谷特征数据,以 20m 等高距为步长,分别计算每条沟谷的沟长和高差,这一计算过程通过基于 ArcEngine C# 独立编程自行搭建计算平台实现。将处理结果进行统计分析,得出每个沟谷流域内一系列的 (X_i, Y_i) 值。本文借助 Origin 中曲线模型拟合工具,迭代 100 次后得到最佳拟合效果,除了第 2 条沟的拟合度 $R^2=0.92953$ (拟合度值越接近 1,拟合效果越好),其他每条流域的 $R^2>0.95$ 。根据拟合得到的函数可以获得流域沟谷纵剖面形态指数 N ,基于式(2)可以计算流域超熵值 $\delta_x P$,结果见表 1。可以看出,研究区的沟谷 N 值范围为 0.6788—2.3894,超熵值 $\delta_x P$ 主要分布范围为 -0.0174—0.8858。

表 1 川藏公路鲜水河段流域沟谷形态方程、 N 、 $\delta_x P$ 和活跃度评价

Table 1 Longitudinal profile shape equation of gullies, values of N , $\delta_x P$ and activity evaluation results

沟谷编号	流域面积 /km ²	主沟长度/km	相对高差/m	拟合公式	R^2	Chi ² /DoF	N	$\delta_x P$	沟道演化阶段	活跃度评价
1	36.8391	13.7503	1579	$h/H=(l/L)1.7354$	0.9873	0.0011	1.7354	-0.1414	旺盛期	活跃
2	46.3138	11.4350	1508	$h/H=(l/L)1.8816$	0.9295	0.0063	1.8816	-0.0902	旺盛期	活跃
3	24.5301	10.0208	1184	$h/H=(l/L)1.5646$	0.9698	0.0027	1.5646	-0.1493	旺盛期	活跃
4	2.1357	3.0659	614	$h/H=(l/L)1.0862$	0.9716	0.0027	1.0862	-0.0709	发展期	较活跃
5	58.0876	14.8150	1570	$h/H=(l/L)2.3894$	0.9659	0.0030	2.3894	0.8858	衰退期	较稳定
6	20.6259	7.7576	1418	$h/H=(l/L)1.5186$	0.9720	0.0025	1.5186	-0.1456	旺盛期	活跃
7	54.5866	15.8884	1595	$h/H=(l/L)1.8463$	0.9859	0.0012	1.8463	-0.1077	旺盛期	活跃
8	6.3789	5.6252	1527	$h/H=(l/L)1.1982$	0.9976	0.0002	1.1982	-0.0918	发展期	较活跃
9	1.1294	1.6976	699	$h/H=(l/L)0.7272$	0.9802	0.0018	0.7272	-0.0216	发展期	较活跃
10	1.2562	1.8237	733	$h/H=(l/L)1.4470$	0.9866	0.0012	1.4470	-0.1366	旺盛期	活跃
11	4.1467	3.7621	1222	$h/H=(l/L)1.5978$	0.9839	0.0014	1.5978	-0.1508	旺盛期	活跃
12	9.1512	6.5854	1532	$h/H=(l/L)1.1728$	0.9887	0.0010	1.1728	-0.0870	发展期	较活跃
13	37.4508	14.5510	1472	$h/H=(l/L)1.4450$	0.9593	0.0036	1.4450	-0.1363	旺盛期	活跃
14	11.7158	6.4500	1399	$h/H=(l/L)1.2182$	0.9951	0.0004	1.2182	-0.0957	发展期	较活跃
15	54.8818	12.8853	1712	$h/H=(l/L)1.5475$	0.9916	0.0008	1.5475	-0.1481	旺盛期	活跃

表 1 川藏公路鲜水河段流域沟谷形态方程、 N 、 $\delta_x P$ 和活跃度评价 (续表)

Table 1 Longitudinal profile shape equation of gullies, values of N , $\delta_x P$ and activity evaluation results (continued)

沟谷编号	流域面积 /km ²	主沟长度/km	相对高差/m	拟合公式	R ²	Chi ² /DoF	N	$\delta_x P$	沟道演化阶段	活跃度评价
16	2.2122	2.9054	982	$h/H=(L/L)1.1413$	0.9554	0.0040	1.1413	-0.0810	发展期	较活跃
17	3.9550	4.3453	1010	$h/H=(L/L)0.8292$	0.9637	0.0034	0.8292	-0.0323	发展期	较活跃
18	7.3938	5.9294	1310	$h/H=(L/L)1.1101$	0.9950	0.0005	1.1101	-0.0753	发展期	较活跃
19	6.5610	5.2660	1242	$h/H=(L/L)1.4893$	0.9794	0.0018	1.4893	-0.1423	旺盛期	活跃
20	5.8669	4.8380	1118	$h/H=(L/L)1.7406$	0.9718	0.0026	1.7406	-0.1404	旺盛期	活跃
21	37.4491	10.8336	1630	$h/H=(L/L)1.8310$	0.9900	0.0009	1.8310	-0.1141	旺盛期	活跃
22	7.5202	4.3910	969	$h/H=(L/L)1.8242$	0.9720	0.0026	1.8242	-0.1168	旺盛期	活跃
23	13.8927	6.8706	874	$h/H=(L/L)1.1544$	0.9932	0.0006	1.1544	-0.0835	发展期	较活跃
24	16.6513	8.3830	1206	$h/H=(L/L)1.7097$	0.9765	0.0022	1.7097	-0.1454	旺盛期	活跃
25	19.9917	5.9305	1058	$h/H=(L/L)1.5824$	0.9849	0.0014	1.5824	-0.1502	旺盛期	活跃
26	12.7109	7.2715	1051	$h/H=(L/L)1.3810$	0.9768	0.0022	1.3810	-0.1261	旺盛期	活跃
27	21.1267	7.8506	1086	$h/H=(L/L)1.4817$	0.9691	0.0027	1.4817	-0.1414	旺盛期	活跃
28	23.0925	10.1387	1329	$h/H=(L/L)1.5205$	0.9960	0.0004	1.5205	-0.1457	旺盛期	活跃
29	13.9773	7.1414	1239	$h/H=(L/L)1.1127$	0.9783	0.0019	1.1127	-0.0757	发展期	较活跃
30	5.4458	7.3894	1288	$h/H=(L/L)1.1579$	0.9827	0.0015	1.1579	-0.0841	发展期	较活跃
31	23.8761	9.6443	1347	$h/H=(L/L)1.4858$	0.9773	0.0020	1.4858	-0.1419	旺盛期	活跃
32	41.3244	12.8606	1305	$h/H=(L/L)1.1425$	0.9842	0.0014	1.1425	-0.0812	发展期	较活跃
33	6.6136	5.2808	1008	$h/H=(L/L)1.0236$	0.9963	0.0003	1.0236	-0.0601	发展期	较活跃
34	4.2698	4.2735	851	$h/H=(L/L)1.1802$	0.9971	0.0003	1.1802	-0.0884	发展期	较活跃
35	2.1786	0.8916	426	$h/H=(L/L)0.9506$	0.9767	0.0021	0.9506	-0.0486	发展期	较活跃
36	2.1513	2.3755	419	$h/H=(L/L)0.6788$	0.9867	0.0013	0.6788	-0.0174	发展期	较活跃
37	1.6972	3.1159	468	$h/H=(L/L)1.0748$	0.9850	0.0015	1.0748	-0.0689	发展期	较活跃
38	2.3775	2.9700	934	$h/H=(L/L)1.7187$	0.9688	0.0028	1.7187	-0.1442	旺盛期	活跃
39	3.2722	2.8756	621	$h/H=(L/L)1.0685$	0.9557	0.0042	1.0685	-0.0678	发展期	较活跃
40	3.5619	2.7844	666	$h/H=(L/L)0.8671$	0.9757	0.0023	0.8671	-0.0370	发展期	较活跃
41	3.2772	3.1900	738	$h/H=(L/L)0.7089$	0.9825	0.0016	0.7089	-0.0199	发展期	较活跃
42	2.2636	2.5105	737	$h/H=(L/L)1.1361$	0.9886	0.0010	1.1361	-0.0800	发展期	较活跃
43	2.4779	2.6561	757	$h/H=(L/L)1.3102$	0.9881	0.0011	1.3102	-0.1133	旺盛期	活跃
44	2.2781	2.7335	735	$h/H=(L/L)1.1302$	0.9699	0.0027	1.1302	-0.0790	发展期	较活跃
45	2.7961	3.0317	825	$h/H=(L/L)1.6374$	0.9660	0.0031	1.6374	-0.1509	旺盛期	活跃
46	1.7857	2.3133	623	$h/H=(L/L)1.3241$	0.9763	0.0022	1.3241	-0.1159	旺盛期	活跃
47	1.8952	2.7111	598	$h/H=(L/L)0.8804$	0.9889	0.0010	0.8804	-0.0387	发展期	较活跃
48	3.7066	3.9693	1153	$h/H=(L/L)1.1640$	0.9980	0.0002	1.1640	-0.0853	发展期	较活跃
49	1.6756	2.4765	620	$h/H=(L/L)0.7807$	0.9871	0.0012	0.7807	-0.0269	发展期	较活跃
50	1.4040	2.6507	657	$h/H=(L/L)0.8055$	0.9980	0.0002	0.8055	-0.0296	发展期	较活跃
51	0.4740	1.2192	353	$h/H=(L/L)0.9688$	0.9936	0.0007	0.9688	-0.0513	发展期	较活跃
52	12.3152	8.5733	1438	$h/H=(L/L)1.1565$	0.9888	0.0010	1.1565	-0.0839	发展期	较活跃
53	21.8580	10.1792	1459	$h/H=(L/L)1.4290$	0.9768	0.0021	1.4290	-0.1339	旺盛期	活跃
54	10.1322	3.1132	609	$h/H=(L/L)1.4577$	0.9981	0.0002	1.4577	-0.1382	旺盛期	活跃
55	1.7552	2.4871	670	$h/H=(L/L)1.1345$	0.9625	0.0035	1.1345	-0.0798	发展期	较活跃
56	2.2023	2.9630	726	$h/H=(L/L)1.0080$	0.9924	0.0007	1.0080	-0.0575	发展期	较活跃
57	1.3288	2.2068	665	$h/H=(L/L)1.4414$	0.9849	0.0014	1.4414	-0.1358	旺盛期	活跃
58	4.0063	3.9543	964	$h/H=(L/L)2.1376$	0.9655	0.0032	2.1376	0.1862	衰退期	较稳定

4 泥石流沟活跃度评价与分析

4.1 活跃度评价

为研究不同流域沟谷演化发展阶段情况,对研究区的 N 值与超熵值 $\delta_x P$ 进行了多项式拟合,结果表明,5次多项式拟合效果最佳($R^2=0.998$),表达式如下:

$$f(x)=0.1886x^5-0.9144x^4+1.8787x^3-2.1397x^2+1.1937x-0.2632 \quad (3)$$

为了确定流域地貌演化阶段的划分边界,首先,依据超熵理论($\delta_x P>0$,流域偏向稳定; $\delta_x P<0$,流域偏向不稳定)确定泥石流发展期与衰退期的分界点,进一步分析曲线上 $\delta_x P$ 特征值

与对应的 N 值以确定其他流域地貌演化阶段。在泥石流发展期,曲线有 3 个特征点:在 $0<N<2$ 段,曲线有 2 个极小值点 ($\delta_x P=-0.1511, N=1.620$) 和 ($\delta_x P=-0.0109, N=0.585$), $\delta_x P$ 在 -0.0109 — -0.1511 曲线段的拐点是 ($\delta_x P=-0.0970, N=1.225$)。结合研究区实际,以此特征点(如图 2)作为划分泥石流发育期的分界点,进一步建立研究区泥石流沟活动性划分的标准(见表 2),从而完成研究的泥石流沟活跃度评价。评价结果见表 1,其中,处于活跃期的沟谷 26 条,占总数的 44.83%,处于较活跃期的沟谷 30 条,占总数的 51.72%,处于较稳定—稳定的沟谷仅 2 条。上述分析说明,川藏公路鲜水河段流域沟谷演

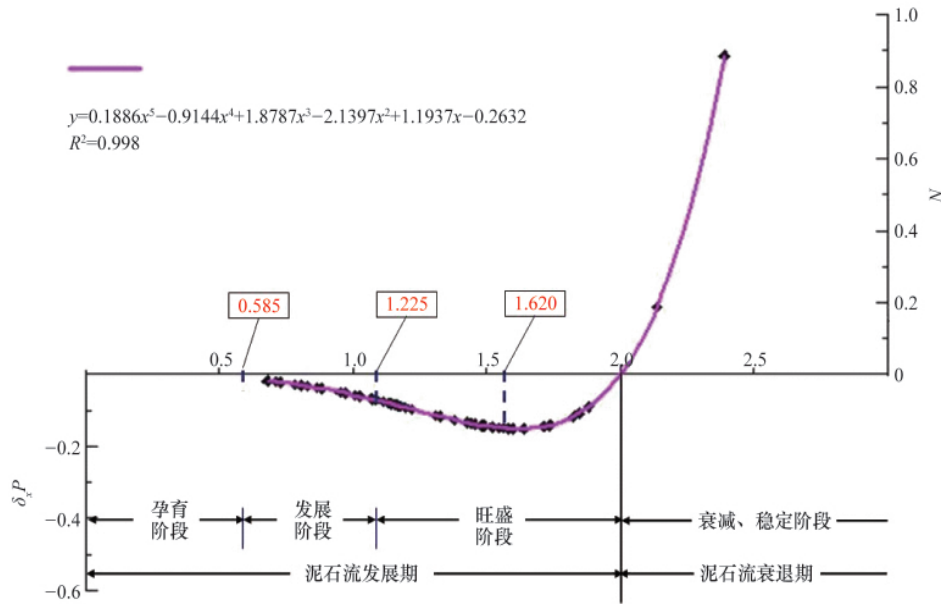


图2 N 和 $\delta_x P$ 特征值与泥石流发育阶段

Fig. 2 Eigenvalue of N , $\delta_x P$ and the evaluation stages of debris flow

表2 川藏公路鲜水河段流域沟谷活跃度划分标准

Table 2 Geomorphologic standard of the activity of debris flow gully in the middle reaches of Xianshui River along Sichuan-Tibet Highway

$\delta_x P$	N	沟谷发育演化阶段	沟谷特征	泥石流沟活跃程度
0—-0.011	0—0.585	孕育阶段	负超熵以较缓递增,水系处于扩展和分支阶段,侵蚀加强,流域系统开始趋向不稳定	各种促发泥石流的因素正在萌发,但尚不足以暴发泥石流。属于稳定期
-0.011—-0.097	0.585—1.225	发展阶段	负超熵以较快速度递增,侵蚀强烈,流域系统的不稳定性急剧增长	形成泥石流的各种条件加速具备,最终可促成泥石流发生、发展,属于较活跃期
-0.097—0	1.225—2.0	旺盛阶段	负超熵以减速度增大至极值后再加速减小至0,本阶段负超熵值最大,流域系统最不稳定	各种发育泥石流的条件十分成熟,泥石流发展旺盛,灾害频发,属于活跃期
>0	>2.0	衰退阶段	熵值向正值持续增加,侵蚀减弱,水系处于扩张末期,系统逐渐趋向相对稳定状态	泥石流退化但仍可零星发生,泥石流消亡,不复发生,属于较稳定—稳定期

化处于发展—旺盛阶段,活跃度较高。

4.2 结果验证

通过野外实地考察,研究区分布有 24 条泥石流沟(见图 1),将此历史泥石流灾害位置与泥石流沟活跃度评价结果图进行对比,结果显示,泥石流的发生主要位于活跃度较高的沟谷,占调查泥石流灾害总数的 95.8%。其中,有 9 条处于活跃期的沟谷,占灾害总数的 37.5%;有 14 条处于较活跃期的沟谷,占灾害总数的 58.3%;只有 1 条处于衰退期的沟谷,流域沟谷超熵值为正,处于相对稳定—稳定状态。上述分析与研究区泥石流活动情况比较符合,说明本文的泥石流沟活跃度评价结果是可靠的。

5 结论

本文从泥石流发育的地形条件出发,结合流域形态方程与流域超熵,对泥石流沟演化过程、流域活跃度进行了评价。主要得到的结果如下:

(1) 超熵是描述流域地貌演化的非平衡态熵,以沟谷纵剖面形态指数为媒介,可将泥石流流域系统的超熵与泥石流沟谷演化过程有机地联系起来,为描述泥石流流域系统活跃度和泥石流演化过程提供定量分析方法。

(2) 超熵的符号决定区域的稳定性,利用地貌系统超熵值来判断泥石流沟活跃度,具有较好的客观性。同时,此评价方法操作简单,效率高,特别是对于面积较大的研究范围,只

需在 GIS 系统中输入 DEM 数据或数字等高线数据便可通过计算完成。

(3) 运用流域地貌系统超熵理论对川藏公路鲜水河段 58 条流域沟谷的活跃度进行评价, 结果显示, 研究区处于活跃期的沟谷 26 条, 占总数的 44.83%; 处于较活跃期的沟谷 30 条, 占总数的 51.72%, 处于较稳定—稳定的沟谷仅 2 条。分析结果表明, 川藏公路鲜水河段流域沟谷演化处于发展—旺盛阶段, 活跃度较高。通过对比验证, 评价结果与实际情况具有一致性。

参考文献 (References)

- [1] 祁龙. 泥石流沟活跃程度的评价方法[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 365-368.
Qi Long. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(4): 365-368.
- [2] 吕儒仁. 泥石流沟判别因素分析[J]. 山地学报, 1985, 3(2): 121-128.
Lu Ruren. *Journal of Mountain Science*, 1985, 3(2): 121-128.
- [3] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判 [J]. 铁道工程学报, 1986(4): 45-52.
Tan Bingyan. *Journal of Railway Engineering Society*, 1986(4): 45-52.
- [4] 刘希林. 试论泥石流动力作用于沟谷地貌演化的关系 [J]. 地理科学, 1988, 8(4): 36-42.
Liu Xilin. *Scientia Geographica Sinica*, 1988, 8(4): 36-42.
- [5] 蒋忠信, 姚令佩, 艾南山, 等. 铁路泥石流非线性研究与防治新技术 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999.
Jiang Zhongxin, Yao Lingpan, Ai Nanshan, et al. *Nonlinear research and new prevention technologies of railway debris flows* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1999.
- [6] 岳天祥, 艾南山, 张英保. 论流域系统稳定性的判别指标—超熵 [J]. 水土保持学报, 1989, 3(2): 20-27.
Yue Tianxiang, Ai Nanshan, Zhang Yingbao. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 3(2): 20-27.
- [7] 蒋忠信. 泥石流流域系统的超熵 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1992, 3(1): 33-40.
Jiang Zhongxin. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1992, 3(1): 33-40.
- [8] 蒋忠信. 滇西北三江河谷纵剖面的发育图式与演化规律[J]. 地理学报, 1987, 42(1): 16-27.
Jiang Zhongxin. *Acta Geographica Sinica*, 1987, 42(1): 16-27.
- [9] 蒋瑜阳, 唐川, 杨泰平. 鲜水河地震带炉霍段泥石流特征初步研究[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 78-82.
Jiang Yuyang, Tang Chuan, Yang Taiping. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(1): 78-82.
- [10] Liu C N, Huang H F, Dong J J. Impacts of September 21, 1999 Chi-Chi earthquake on the characteristics of gully-type debris flows in central Taiwan[J]. *Nature Hazards*, 2008, 47(3): 349-368.
- [11] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区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.
Cui Peng, Zhuang Jianqi, Chen Xingchang, et al. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2010, 42(5): 10-19.
- [12] Lin C W, Shieh C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2003, 71(1-2): 49-61.
- [13] 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.
Wang Xiaopeng, Pan Mao, Ren Qunzhi. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(2): 211-215.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·

“第八届海峡两岸航空太空 学术研讨会”征稿

“第八届海峡两岸航空太空学术研讨会”由北京航空航天大学主办, 大会定于 2012 年 9 月 3—5 日在北京市召开。

征稿范围: 航空太空相关学科, 如飞行器设计、航空发动机、流体力学与空气动力学、固体力学与结构、燃烧与传热、航天器系统、机载设备、飞行力学与控制、机械工程与自动化、信息技术、航空航天先进材料、人机工程、飞行安全与控制、飞机适航技术、航空航天应用等。

全文截稿日期: 2012 年 7 月 31 日

联系电话: 15910655137, 15901034278, 13671125407

电子信箱: aeroconference@buaa.edu.cn

大会网站: http://news.buaa.edu.cn/dispnews.php?type=10&nid=88458&st_table=news_txt