

基于水系三维模型及分形理论对泥石流活动强度的研究

张 晨¹, 陈剑平¹, 王 清¹, 张 文¹, 阙金声²

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130061; 2. 北京国电华北电力工程有限公司, 北京 100120)

摘要: 泥石流的水系结构能够直观地反映出泥石流本身的发育状态和活动程度, 为定量描述泥石流水系结构从而对泥石流的活动强度进行分析, 基于 GIS 系统提取出泥石流水系的三维化数据, 根据分形理论自编 Matlab 程序测定出金沙江流域泥石流三维水系模型的盒维数值, 确定水系结构的量化指标, 并结合松散物源量、泥沙补给段长度比等指标对研究区内的泥石流进行分析, 得出泥石流的活动强度与各影响因素之间深层次规律。随着泥石流活动强度的增长, 其影响因素也会跟着增加。而且, 在活动强度为 15 和 21 处时, 活动强度和影响因素的关系曲线均出现拐点。对泥石流活动强度的界定提出新的判据。通过上述方法对金沙江流域的泥石流进行研究, 结果发现, 矮坝沟的活动强度最大, 这一结论与实际相符, 验证该方法的科学性和合理性, 为泥石流灾害的评估提供新的手段和依据。

关键词: 工程地质; 分形理论; 活动强度; 泥石流

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)06 - 1214 - 08

STUDY OF ACTIVITY INTENSITY OF DEBRIS FLOW BASED ON THREE-DIMENSIONAL DRAINAGE SYSTEM MODEL AND FRACTAL THEORY

ZHANG Chen¹, CHEN Jianping¹, WANG Qing¹, ZHANG Wen¹, QUE Jinsheng²

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China;

2. North China Power Engineering(Beijing), Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: The developmental state and activity level of debris flow can be reflected by its drainage system pattern. A quantitative description of drainage system is very important to the study of debris flow activity intensity. The three-dimensional data of debris flow are extracted by a computer program based on Matlab software which is written according to fractal theory to calculate the fractal dimensions of three-dimensional drainage system along Jinsha River. The quantitative indicators of drainage system were determined to analyze the debris flow in the study area, considering the amount of loose material and length ratio of sediment supply segment. The law between the factors and the activity intensity is summarized. With the activity intensity of debris flow increasing, the index values of factors also increase. What is more, when the activity intensities are 15 and 21, respectively, the curves of the relationships between factors and activity intensities all bend sharply which prove that there is an internal link in the amount of loose material, length ratio of sediment supply segment and fractal dimensions. New judgments to define the activity intensity of debris flow are proposed to supply new method and evidence for debris flow hazard assessment. The typical debris flows along Jinsha River are studied by above-mentioned

收稿日期: 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872170); 高校博士学科点专项基金资助(20090061110054); 吉林大学 985 工程项目资助(450070021107)

作者简介: 张 晨(1983 -), 男, 2006 年毕业于吉林大学岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地灾评估和边坡工程方面的研究工作。E-mail: 191390845@qq.com

method. From the results, it can be seen that the activity intensity of Aiba groove is the largest which proves that the activity intensities of debris flows determined by new judgments are consistent with the reality. The new judgments are scientific and rational.

Key words: engineering geology; fractal theory; activity intensity; debris flow

1 引 言

自 20 世纪以来, 我国因泥石流每年损失 33~36 亿元人民币, 死亡数百人, 对泥石流的研究具有重要意义。目前, 对泥流水系形态的研究受到学者重视, 这方面, 张杰林等^[1]通过计算水系密度等研究了东胜地区地表水系的分布规律; 李春景^[2]利用 GIS 软件对流域水系空间分布进行了定量分析; 杜国云^[3]就胶东半岛水系展布方向的分析, 揭示水系受构造运动影响显著。庄建琦和崔鹏^[4]利用神经网络对泥石流发育阶段进行了预测。

目前, 越来越多学者将分形理论引入地质工程领域, 陈剑平等^[5]对岩体裂隙网络分形维进行了计算机模拟; 贾林和王士天^[6]对岩体裂隙网络多标度性进行了计算机模拟; 韩杰等^[7]利用水系分形维的空间变化来表征水系空间形态的差异; 倪化勇^[8]论述了泥石流流域地貌的分维意义; 菊春燕等^[9]从分形维角度揭示了吐鲁番市内水系空间分布特征。泥石流活动是水系发育到一定程度的现象。不同水系在其中发生泥石流的活动程度也存在差异^[10], 所以通过水系分维数来表征泥石流特性是具有理论价值的。作为三维空间的泥石流沟, 对其水系三维模型分形维的测定能够更客观地反映泥流水系的结构特征, 目前水系分形维与泥石流强度之间的规律尚无定论。下面用自编程程序计算金沙江流域泥石流三维水系模型的分形维, 并结合考察资料对泥石流强度的判据进行研究, 对其与水系形态的关系进行分析。

2 泥流水系三维模型的建立和盒维数的测定

2.1 理论可行性论证

分形理论由美籍法国数学家 B. Mandelbrot 提出, 其研究的是自然界中没有特征长度且有自相似性的图形和现象, 这样的现象往往都是具有统计意义上的自相似性^[11~16]。流域水系中充满了大小小

的河道, 这些河道之间彼此联通, 共同形成了树枝状的水系网络, 在这样的网络中往往是主河道分有支河道, 支河道中也有自己的支河道。无论怎样改变观察的尺度, 都能看到相似的分支结构, 所以可以证明水系结构具有自相似性, 使用分形结构对其进行研究是可行的。

2.2 水系三维模型

从形态上看, 水系是由多组不规则的线段构成的, 而线段又是由许多的点构成。因此, 为了研究水系在三维空间内的结构特征, 就要提取出水系的三维点坐标, 这些控制点构成了水系的基本形态。图 1 为矮坝沟水系的三维示意图。将水系的三维点数据提取出来之后即可生成水系三维形态, 并将研究区域网格化处理, 最终测算出水系的分形维。

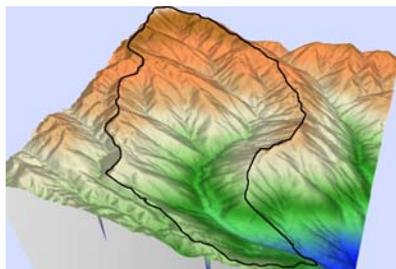


图 1 矮坝水系三维示意图

Fig.1 Three-dimensional diagram of drainage system of Aiba

数据提取方法如下: 首先, 通过 MapGIS 的矢量化功能将水系的二维图形和其所在区域的等高线文件存储成线文件。其次, 通过线拓扑检查和插值功能将线文件中的控制点加密, 这里设置为每隔 1 m 添加一个控制点, 从而尽可能的反映出水系的真实形态。接着, 将水系二维形态的线文件以 MapGIS 明码文件的形式输出, 等高线文件则通过 Sufer 软件导出, 2 种坐标文件均存储为 txt 文件。最后, 通过 Matlab 编程识别出二维水系中的控制点所对应的高程值。这样, 就完成了水系的三维控制点的提取。这样获取的三维点数据量很大, 每个水系的三维控制点数量都至少为 1×10^5 个。

2.3 盒维数的计算

盒维数因其相对容易测定, 是目前应用最为

广泛的一种维数，具体确定公式为

$$D_f = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r(F)}{-\lg r} \quad (1)$$

式中： D_f 为盒维数， r 为尺度， $N_r(F)$ 为与研究对象相交的盒子的个数。 D_f 或者也可以表述为是 $\lg N_r(F)$ 相对于 $-\lg r$ 的斜率值。因为这里研究的是三维图形，所以这里就是使用不断变换小立方体边长的方式实现盒维数的计算。

因为计算结果是三维空间的分维数，下面介绍三维盒维数的计算过程：要解决如何计算三维化盒维数的问题，本质上就要解决如何计算被水系占据的小立方体的数目的问题。首先根据研究范围构建出一个三维立方体。当一个立方体在规定的坐标系内被建立之后，该立方体的 8 个角点就被赋予了坐标值。而后，按照不同的尺度对该立方体进行三维等尺度的网格划分，若将每边分成 n 份，就是将立方体分为 n^3 个小立方体。这时，每一个小立方体的 8 个角点上也被赋予了坐标值。接着，就是计算被水系占据的小立方体数目。因为之前提取的坐标点是离散的，当研究区域被划分的十分细密的时候，离散的点就无法满足水系分维数的计算精度。于是，将水系中的相邻控制点构成的空间直线方程求取出来，再将划分出的每个小立方体的 6 个面的面方程确定出来。当一个小立方体同时有 2 个面上不同的点满足同一条直线方程时，该小立方体必然被水系占据，当小立方体只有一个面上的点满足直线方程时，要再判断该直线终点与小立方体的位置，若控制点在小立方体内，则该小立方体被占据，否则不被占据。其数学表达如下：

假定 \dot{C} 为某小立方体 \dot{A} 中 6 个面的集合，设面法线为 $n(i, j, k)$ ，其中任一点为 (x_0, y_0, z_0) ，面方程通式为： $i(x-x_0) + j(y-y_0) + k(z-z_0) = 0$ 。 \dot{B} 为某一条由相邻控制点构成的空间直线。2 个控制点，起点 $B_1: (x_1, y_1, z_1)$ ，终点 $B_2: (x_2, y_2, z_2)$ ， $\dot{B}: \frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}$ 。 a, b 代表小立方体 6 个面中不在同一平面上的任意点，则有

$$\forall a, b \in \dot{C}$$

$$\left. \begin{matrix} a \in \dot{B} \\ b \in \dot{B} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \dot{A} \text{ 被水系占据}$$

$$a \in \dot{B} \Rightarrow \begin{cases} B_2 \text{ 不在小立方体中} \Rightarrow \dot{A} \text{ 不被水系占据} \\ B_2 \text{ 在小立方体中} \Rightarrow \dot{A} \text{ 被水系占据} \end{cases}$$

其他 $\Rightarrow \dot{A}$ 不被水系占据

图 2 所示为直线与小立方体空间位置的示意图。由上述规则即可认定，小立方体 A, B, C 被直线 F 占据，而小立方体 D, E 不被直线 F 占据。

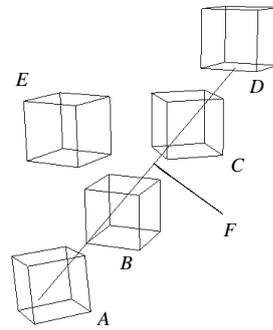


图 2 直线与小立方体空间位置示意图
Fig.2 Spatial location of line and small cubes

不断重复这一识别过程，就可以计算出不同尺度下水系占据小立方体的数量，将这些数量与对应的尺度绘制于双对数坐标下，其拟合出的斜率即为三维化盒维数值。上述过程是通过 Matlab 程序来实现的。图 3 为程序编译流程图。图 4 为程序绘制的图示效果，其中三维坐标中的数值代表了程序赋予水系的相对位置坐标。

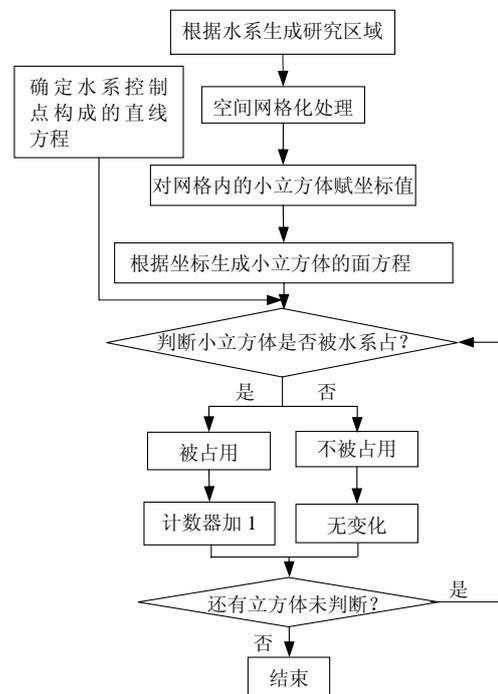
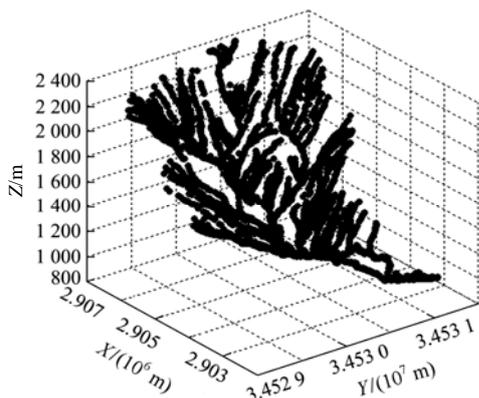
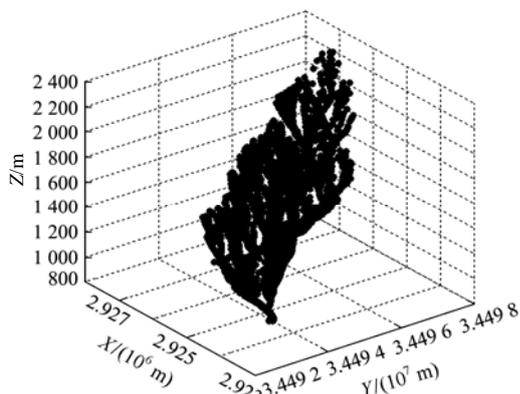


图 3 程序流程图
Fig.3 Program flow chart

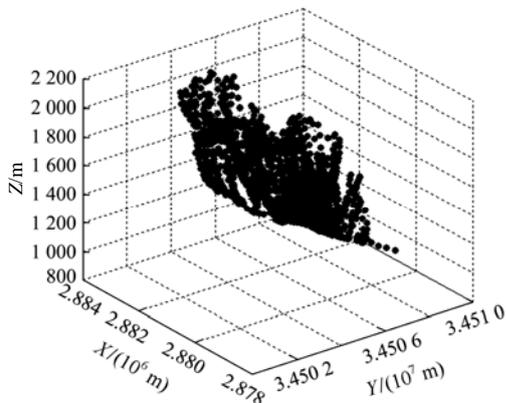
图 4 中的图像是由程序自动生成的水系结构的三维示意图。为了让研究对象更加直观，以矮坝为例，矮坝沟的二维水系结构如图 5 所示，图 6 为研



(a) 矮坝沟(活动强度: 很强)



(b) 河票(活动强度: 强)



(c) 黑者(活动强度: 较强)

图 4 水系结构三维示意图

Fig.4 Three-dimensional diagrams of drainage system

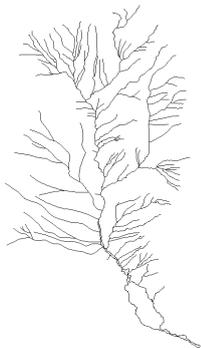


图 5 水系形态

Fig.5 Drainage system pattern

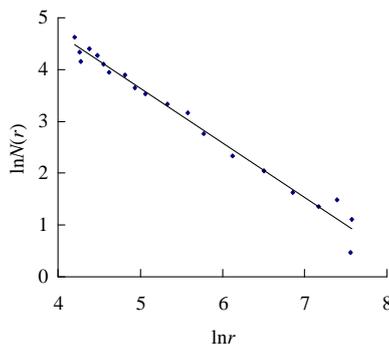


图 6 矮坝泥石流沟水系拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of water system of Aiba debris flow

究对象中的矮坝泥石流沟水系的曲线拟合情况。

无标度区间是分形几何中非常重要的指标,水系的无标度区间可以这样判断。从图 6 可以看出, $\ln r > 7.2$ 和 $\ln r < 4.2$ 时,数据点偏离了直线的范围,也就是说小立方体的边长 r 在 $65 \sim 1339$ m 的范围,是该方法计算流域水系空间分布的具有分形维的无标度区间。

三维空间中的水系实际上就是空间曲线段的一个集合。因此,本次研究的分形维数值应该在 $1 \sim 3$ 之间,以韩杰等^[7]的研究为例可以验证上述结论,将其中的二维水系按照上述方法提取出控制点,赋予控制点一定的高程值,计算结果显示,其分形维均处于 $1 \sim 3$ 之间。

2.4 泥石流活动强度的确定

为了分析泥石流的活动强度与各个影响因素之间的量化关系,下面以《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ/T 0220 - 2006)为基础,将泥石流活动强度的评价过程量化,量化方法如表 1 所示。量化的基本原理是将因素的不同描述特征赋予不同的分值,最终将分值相加就得到了最终的量化强度值。

使用上述方法计算出金沙江流域 20 条泥石流沟的水系分维数数值及泥石流活动强度。水系的分维数是对水系结构特征的定量表达。泥石流的发动除了必要的物源运移通道外还要有充足的物源作为物质保证,于是松散物源量和泥沙补给段长度比这两个指标就和水系分形维一起成为研究泥石流活动强度所必须考虑的重要因素。这里研究对象就锁定在这 3 种主要因素上,水系盒维数值、泥石流强度值及与物源相关因子的具体数据如表 2 所示,其中泥沙补给段长度比简称长度比,无量纲,松散物源量单位为 $10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。下面如再次出现相同指标,单位均与上述单位相符。

表 1 泥石流活动强度评价标准

Table 1 Evaluation criteria of debris flow activity intensity

堆积扇规模		主河河型变化		主流偏移程度		泥沙补给长度比/%		松散物源/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)		松散体变形量		暴雨强度指标		活动强度	
描述	分值	描述	分值	描述	分值	描述	分值	描述	分值	描述	分值	描述	分值	描述	分值
很大	4	被逼弯	4	弯曲	4	>60	4	>10	4	很大	4	>10.0	4	很强	22.75~28.00
较大	3	较弯	3	偏移	3	60~30	3	10~5	3	较大	3	4.2~10.0	3	强	17.50~22.75
较小	2	微弯	2	大水偏	2	30~10	2	5~1	2	较小	2	3.1~4.2	2	较强	12.25~17.50
小或无	1	无变化	1	不偏	1	<10	1	<1	1	小或无	1	<3.1	1	弱	7.00~12.25

表 2 水系分维数及泥石流特征描述

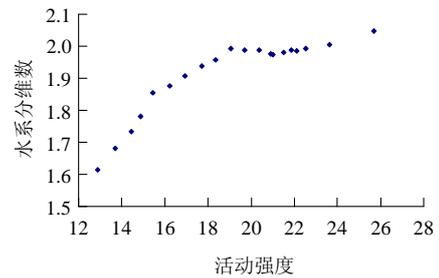
Table 2 Characteristics description of fractal dimensions of water system

地区	盒维数	强度	强度值	长度比	松散物源/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)
濛沽沟	1.929 0	强	18.25	0.590	1 371
矮坝沟	2.046 9	很强	25.68	0.870	2 200
盐水井	1.970 0	强	20.36	0.757	1 186
志力沟	1.985 0	强	22.10	0.803	1 279
平地村	1.987 0	强	21.85	0.743	1 971
方山果	1.877 0	强	17.95	0.537	1 014
法拍沟	1.958 0	强	19.68	0.663	1 479
驾车河	1.963 0	强	21.52	0.774	1 279
阴地沟	1.804 0	强	22.14	0.747	2 086
秀水河	1.982 0	强	18.69	0.694	1 579
糯扎村	1.889 0	很强	22.98	0.760	1 250
拉拉矿	1.614 7	较强	12.88	0.120	2 057
樟木河	2.004 0	很强	23.65	0.786	1 729
河漂	1.989 0	强	20.14	0.769	1 271
红门厂	1.977 0	强	21.84	0.777	479
鲮鱼河	1.682 0	较强	13.69	0.240	857
竹蚌河	1.855 0	较强	16.64	0.446	2 015
勐果河	1.733 0	较强	15.91	0.311	743
黑者	1.781 0	较强	16.54	0.374	1 025
大庆沟	1.956 0	强	21.01	0.731	1 301

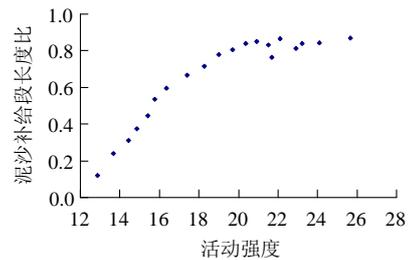
3 泥石流活动强度的新判据

为了更直观地反映出泥石流活动强度与其影响因素之间的关系，绘制出水系分形维、泥石流的泥沙补给段长度比和松散物源储量与泥石流活动强度之间的关系曲线，曲线如图 7 所示。

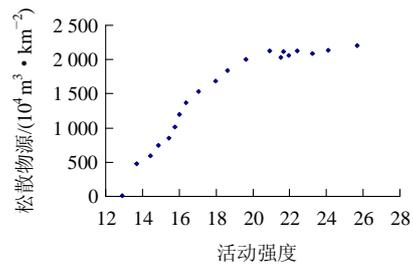
由图 7 曲线形态可以看出，曲线中在泥石流强



(a) 分维数与活动强度



(b) 长度比与活动强度



(c) 松散物源量与活动强度

图 7 泥石流强度与各因子的关系

Fig.7 Relationships between factors and activity intensity of debris flow

度为 15 和 21 处均出现了拐点，这些拐点对应的分形维是 1.81 和 1.99；对应泥沙补给段长度比是 0.52 和 0.75；对应松散物源量是 1 300 和 2 000×10⁴ m³·km⁻²。这说明在这些点上，随着泥石流水系分形维、泥沙补给段长度比和松散物源量的增加，泥石流的强度都出现了整体大幅增长。因此，可以将

这些拐点所对应的影响因子值作为判定泥石流活动强度的新判据, 具体判据如表 3 所示。

表 3 泥石流活动强度新判据

Table 3 New criteria for debris flow activity intensities

水系分形维		长度比		松散物源量 ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)		分值区间	
取值范围	分值	取值范围	分值	取值范围	分值	取值范围	分值
<1.81	1	<0.52	1	<1 300	1	弱	3~5
1.81~1.99	2	0.52~0.75	2	1 300~2 000	2	中	5~7
>1.99	3	>0.75	3	>2 000	3	强	7~9

根据表 3 的新判据对上述 20 条泥石流沟的泥石流活动强度进行重新判定, 判定结果如表 4 所示。

表 4 新判据判定结果

Table 4 Results determined by the new criterion

地区	强度	级别	地区	强度	级别
濛沽沟	6	中	糯扎村	6	中
矮坝沟	9	强	拉拉矿	3	弱
盐水井	6	中	樟木河	8	强
志力沟	6	中	河漂	6	中
平地村	6	中	红门厂	6	中
方山果	5	中	鲮鱼河	3	弱
法柏沟	6	中	竹蚌河	6	中
驾车河	6	中	勐果河	3	弱
阴地沟	6	中	黑者	3	弱
秀水河	6	中	大庆沟	6	中

由表 4 可以看出, 只有矮坝沟和樟木河的活动级别为强, 拉拉矿, 鲮鱼河, 勐果河及黑者活动级别为弱。为了印证上述结论, 下面对研究区内矮坝沟和鲮鱼河的现场调查情况进行简述。

矮坝沟汇水面积约为 3 km^2 , 从上游段汇水区开始, 左右两侧大部分坡段分布有古滑坡堆积体, 高度从 $30 \sim 100 \text{ m}$ 不等, 物源量巨大, 植被不发育, 原岩风化严重, 裸露原岩较破碎, 崩滑现象普遍, 尤其近期崩滑活动较频繁; 汇水区出口狭窄, 坡降较大, 有助于洪积及泥石流聚集能量, 向下运行。流通区呈 V 型(见图 8(a)), 沟谷平面形态较曲折, 沟床较窄($3 \sim 12 \text{ m}$), 有多处卡口和几处小跌水, 落差均在 $3 \sim 5 \text{ m}$ 左右。两岸物源丰富, 流通区近下游段由于两岸崩滑严重, 有几处滑坡体堵塞沟谷, 成为当前泥石流的主要物质来源。多年来, 均不时有崩滑发生(见图 8(b)), 并且物源量较大, 两岸均向



(a) V 型沟谷



(b) 滑坡体

图 8 沟谷及滑坡体

Fig.8 Valleys and landslide

内后退缩。流通区的两岸坡高不等, 沟左岸崩塌裸露面高约 100 m , 近直立, 其上为原岩山体, 约为 50° , 高约 300 m , 较稳定。沟右岸高约 100 m , 为古滑体形成的平台, 完整性较好, 被主沟右岸支沟切割, 平台上有田地、树木等, 由于崩滑严重, 逐年有土石滑入沟内, 并在岸沿部分区域发现有宽 $10 \sim 30 \text{ cm}$ 的拉裂缝。堆积区内有较大堆积扇, 扇右侧被流水切割, 扇体形状基本完整, 大量沟内冲出块石已阻塞金沙江河道, 导致河流改道, 水流湍急, 并侵蚀右岸, 导致巨型岸体垮塌(见图 9), 破坏严重。

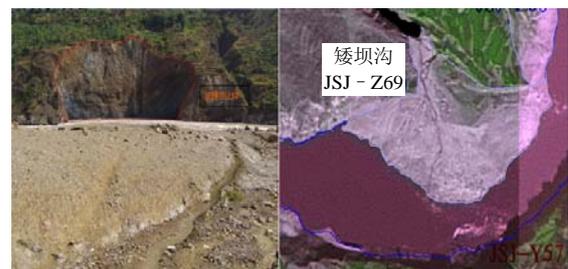


图 9 堆积区的解译图及实拍现场

Fig.9 Interpretation map of accumulations area and on-site photos

根据鲮鱼河堆积区的情况来看, 该沟很少发生泥石流, 两岸岩体稳定, 河谷较宽, 可达 200 m , 沟内顺直, 据以后形成区的物源来看, 也并不是很丰富, 故此处发生泥石流的可能性并不大。物源主要为右岸的古崩塌体(见图 10(a)), 在坡上多处可见



(a) 古崩滑体



(b) 侏罗纪—白垩纪红层

图 10 古崩滑体及次物源

Fig.10 Anelent landslide and provenance

磨菇石似的土柱，干强度很高。崩滑残体内红色层基本上已经彻底风化呈土状，但胶结较好，抗风化能力较强，有些部位可以看到砂岩呈似层状分布的特征。其次物源主要为侏罗纪—白垩纪红层(见图 10(b))，风化非常严重，手碰即解体，其面积并不大，可以作为鲮鱼河的次物源。

从图 4 和 8~10 可以看出，矮坝沟水系错综复杂，松散物源丰富，崩滑现象频发，堆积区已经使主流偏移，有堵江的危险，且从当地村民的访问中得知，该沟泥石流活动频繁，每次流量巨大。而鲮鱼河流通区开阔，形态顺直，不利于大量物源的堆积蓄势，且在对堆积区的现场调查中也很少发现泥石流的活动痕迹。这些都印证了水系形态、物源情况等因素对泥石流活动程度的作用，且说明表 4 中结论是符合客观实际的。

4 结果分析

从图 7 中的曲线结果可以得知，随着泥石流水系分形维、泥沙补给段长度比和松散物源的增长，

泥石流活动强度是呈阶梯状变化的，出现上述原因可以这样解释，水系分形维代表了水系的复杂程度，当其增长到一定程度时，水系的复杂程度增加，泥石流沟道比降增大，集水面积增大，流程变长，更加容易接纳沿途的松散固体物质，且当水系分维数超过某个阈值时，流域内的上述特征的演化速度就会提高一个层次，这时更大的主沟床比降、更丰富的支水系及松散物源为泥石流的运动提供了更大的动能，使得这些沟谷的泥石流相对更加频发，活动强度更大。而且图 7 中的拐点位置显示，泥石流活动强度在 15 和 21 处时，水系分形维、泥沙补给段长度比和松散物源均出现了阶梯状变化，这就证明三者之间也是相互影响的。水系结构越复杂，泥石流运移的通道就越发达，松散物源的采集就越便捷，而随着松散物源的增长，泥石流的水系也会逐渐扩展。上述情况也说明使用水系分形维、泥沙补给段长度比和松散物源共同判定泥石流的活动强度是符合泥石流运移、发展的物理规律的。从研究区本身的地质，气象等方面的因素来看，该研究区位于金沙江流域，地质构造比较复杂，地层稳定性差，地震活动频繁，地表岩石风化破碎，河床下切，山高坡陡。加上雨季降水过多，多数倾泻于山区和金沙江沿岸。造成了该区域的泥石流松散物源极丰富，沟道高差大，势能充足，为泥石流的发动和后期发展提供了足够的动力和物质准备。

5 结论

(1) 通过对泥石流水系三维模型盒维数的测定和分析，证明了泥石流的水系结构形态是可以通过分形维来定量描述的。

(2) 通过对泥石流水系分形维、泥沙补给段长度比和松散物源等影响因子与泥石流活动强度关系的分析，了解到它们之间是呈现阶梯状变化规律的，且随着影响因子的增长，泥石流活动强度的变化速率逐渐增大。

(3) 以泥石流运移、发展的规律为依据，结合当地地质，气象等因素深入剖析了出现图 7 曲线的原因，证明了水系分形维、泥沙补给段长度比和松散物源之间的相互影响的关系。

(4) 通过对矮坝沟及鲮鱼河现场情况的评述、分析，证实表 3 中泥石流活动强度新判据的科学性。

参考文献(References):

- [1] 张杰林, 刘德长, 曹代勇. 基于遥感数据融合的水系特征定量化分析方法及其应用[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(1): 1 - 4.(ZHANG Jielin, LIU Dechang, CAO Daiyong. Quantitative analysis method and its application of characteristics of the water system based on remote sensing data fusion[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [2] 李春景. 用 GIS 分析流域水系特征——以珲春河为例[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2005, 31(4): 308 - 311.(LI Chunjing. Characteristics of water system by the GIS analysis in Hunchun river basin[J]. Journal of Yanbian University(Natural Science), 2005, 31(4): 308 - 311.(in Chinese))
- [3] 杜国云. 胶东半岛新构造东西分异的水系特征统计分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 407 - 412.(DU Guoyun. Statistical analysis of the river networks on neotectonic divergency of east and west parts in Jiaodong peninsula[J]. Journal of Peking University (Natural Science), 2001, 37(3): 407 - 412.(in Chinese))
- [4] 庄建琦, 崔 鹏. 基于 BP 神经网络泥石流沟发育阶段的判定——以成昆铁路四川段和昆东铁路为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9): 849 - 855.(ZHUANG Jianqi, CUI Peng. Determination of debris flow developmental stages based on BP neural network—taking Chengdu—Kunming railway as an example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(9): 849 - 855.(in Chinese))
- [5] 陈剑平, 王 清, 肖树芳, 等. 岩体裂隙网络分形维计算机模拟[J]. 工程地质学报, 1995, 3(3): 79 - 85.(CHEN Jianping, WANG Qing, XIAO Shufang, et al. Fractures network fractal dimension of rock mass by numerical modeling[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(3): 79 - 85.(in Chinese))
- [6] 贾 林, 王士天. 裂隙网络多标度分形计算机模拟[J]. 地质灾害与环境, 1997, 8(3): 48 - 53.(JIA Lin, WANG Shitian. Computer simulation of fracture network multifractal[J]. Geological Disasters and Environmental Protection, 1997, 8(3): 48 - 53.(in Chinese))
- [7] 韩 杰, 陆桂华, 李海涛. 水系分维在滑坡泥石流灾害区划中的应用[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 63 - 71.(HAN Jie, LU Guihua, LI Haitao. Application of fractal dimension in landslide and debris flow hazard zoning[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(4): 63 - 71.(in Chinese))
- [8] 倪化勇. 泥石流流域地貌形态的统计分形[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 92 - 93.(NI Huayong. Statistical fractal of debris flow basin topography[J]. Soil and Water Conservation Research, 2006, 13(6): 92 - 93.(in Chinese))
- [9] 菊春燕, 刘志辉, 周 绪, 等. 干旱、半干旱地区水系空间分布的分形特征及其流域环境的初步探讨[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 174 - 176.(JU Chunyan, LIU Zhihui, ZHOU Xu, et al. Elementary discussion of spatial structure of water system and its ecological environment in arid and semiarid area[J]. Soil and Water Conservation Research, 2006, 13(3): 174 - 176.(in Chinese))
- [10] 伍永秋. 段家河流域水系的分维研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993, 4(2): 31 - 35.(WU Yongqiu. Study of fractal dimension of river system in DuanJia River Basin[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4(2): 31 - 35.(in Chinese))
- [11] KULATILAKE P H S W. Bivariate normal distribution fitting on discontinuity orientation clusters[J]. Mathematical Geology, 1986, 18(2): 181 - 195.
- [12] 陈剑平, 王 清, 谷宪民, 等. 岩体节理产状极点分布的分形维[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 501 - 508.(CHEN Jianping, WANG Qing, GU Xianmin, et al. Fractal dimension of orientation pole distribution for rock mass joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 501 - 508.(in Chinese))
- [13] MILLER S M. A Statistical method to evaluate homogeneity of structure populations[J]. Mathematical Geology, 1983, 15(2): 317 - 328.
- [14] 冯增朝, 赵阳升, 段康廉. 岩石的细胞元特性及其非均质分布对岩石全曲线性态的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 819 - 1 823.(FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, DUAN Kanglian. Influence of rock cell characteristics and rock inhomogeneity parameter on complete curve of stress-strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 819 - 1 823.(in Chinese))
- [15] 冯增朝, 赵阳升. 岩体裂隙分维与岩体强度的相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2 180 - 2 182.(FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Correlation study of fractal dimensions of discontinuities and rock mass strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2 180 - 2 182.(in Chinese))
- [16] 谢其泰, 王建力. 石材裂纹扩展分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 355 - 3 360.(XIE Qitai, WANG Jianli. Fractal characteristics of crack propagation in rock slabs[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 355 - 3 360.(in Chinese))