

区域和沟谷相结合的泥石流预报及其应用

韦方强¹, 汤家法², 谢洪¹, 钟敦伦¹

(1. 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; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 在分析泥石流预报现状和泥石流减灾决策对泥石流预报的要求的基础上, 提出了建立区域和单沟相结合的泥石流预报的问题。以泥石流发育的基础数据库、降水的动态预报与监测和泥石流预报模型为基础, 以 GIS 技术为工具, 建立泥石流预报平台。泥石流预报模型采用基于模糊数学的泥石流预报模型, 预报结果应用概率分级进行表述, 以适应泥石流预报准确率低的不足, 并最大程度地克服了过分依赖临界降水量进行泥石流预报的不足。将该泥石流预报方法应用到北京山区泥石流预报中, 建立了北京山区泥石流预报系统。

关键词: 泥石流, 预报, 区域, 单沟, 应用

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

泥石流预报是泥石流减灾的重要手段之一, 分为区域泥石流预报和单沟泥石流预报。因绝大多数泥石流都是由降水激发而成, 目前的泥石流预报研究几乎都是基于降水的统计预报模式。这种预报模式下的预报准确率一般较低, 并且需要降水量的预报阈值, 即临界降水量。而临界降水量的确定极其困难, 它不仅随区域或沟谷的不同而变化, 还随区域或沟谷的下垫面条件的变化而变化。因此, 目前除了极少数具有长序列观测资料的泥石流沟谷可以建立完整的统计预报模型外^[1, 2], 一般地区和沟谷都很难建立实用的预报模型。为了提高泥石流预报准确率, 国内外都在探索泥石流形成机理, 试图通过在降水作用下土体物理特性的变化来进行泥石流预报, 但该预报模式尚处于探索阶段^[3- 5]。因此, 基于降水统计的泥石流预报模式在较长时期内仍是泥石流预报的重要方法。

泥石流预报在时间尺度上又可分为长期预报、中期预报和短期预报, 其中短期预报指数小时到 3 天内的预报^[6, 7], 一般是对即将发生的降水过程中泥石流发生可能性的预报, 对具体指导减灾具有重要意义。本文所讨论的泥石流预报就是这种短期预

报。区域泥石流预报是对在即将发生的降水过程中不同区域发生泥石流可能性的预报, 可以确定出泥石流减灾的重点区域, 对泥石流减灾决策具有较宏观的指导意义。但是, 区域预报范围较大, 对预报区域内哪些沟谷是泥石流沟、那些沟谷是非泥石流沟、哪些泥石流沟是应重点防范的沟都没有确定, 减灾目标不明确。为此, 在进行区域预报的同时, 还应查明预报区域的泥石流沟分布, 对每条泥石流沟发生泥石流的可能性进行预报, 进一步确定出防灾和减灾的重点, 并提前做好减灾预案。因此, 对于短期泥石流预报, 只有建立区域和沟谷相结合的泥石流预报系统, 才能明确防灾和减灾重点, 更准确地指导泥石流减灾决策。

1 区域与沟谷相结合的泥石流预报平台

无论是区域泥石流预报还是沟谷泥石流预报, 都需要有下垫面的基础数据和预报降水量的动态数据支持, 即需要建立一个区域与沟谷相结合的泥石流预报平台。这个平台由基础数据库、降水预报和泥石流预报模型构成(图 1), 以 GIS(地理信息系统)

收稿日期(Received date): 2003- 11- 30; 改回日期(Accepted): 2004- 02- 10。

基金项目(Foundation item): 中国科学院重点项目北京山区泥石流及防治对策研究(KZ952- J1- 027)、中国科学院成都山地灾害与环境研究所创新前沿项目(C3 200307) [Foundation Item: The key of Chinese Academy of Science: Debris flow and its control countermeasures in the Mountain of Beijing. No. KZ952- J1- 027, Frontiers Item of Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS Major Item of Chinese Academy of Sciences (C3 200307)]

作者简介(Biography): 韦方强(1968-), 山东临沐人, 博士, 研究员, 主要从事山地灾害理论与减灾技术研究。[WEI Fangqiang (1968-), PH. D., Professor, majors in mountain hazards mitigation research]

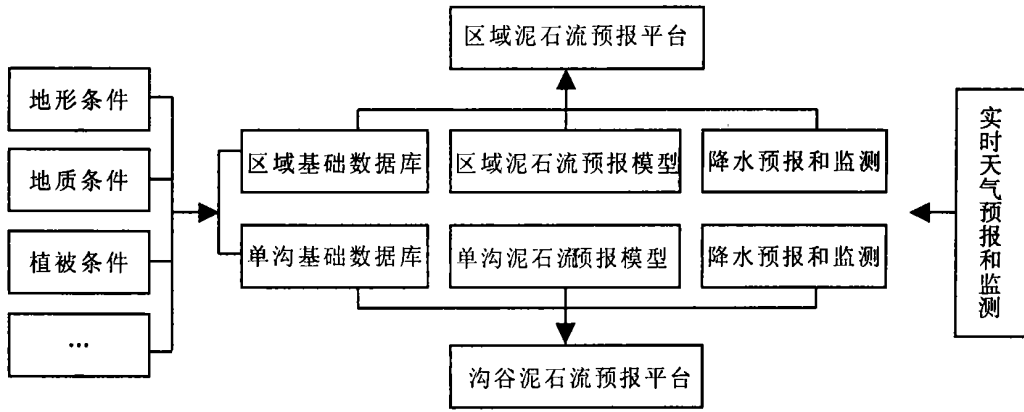


图1 区域与单沟相结合的泥石流预报平台结构示意图

Fig. 1 Platform of debris flow forecast combining regions and valleys forecast

软件为软件平台,进行空间数据的存储、空间分析和信息传输。

1.1 基础数据库

基础数据库是泥石流预报的基础,包含地形、地质、植被等各种信息,反映泥石流发育的基础条件。基础数据库包括区域基础数据库和沟谷基础数据库,区域基础数据库包括预报区域不同位置的泥石流发育条件,为栅格图形数据库,每个栅格代表一个预报单元,存储该预报单元的泥石流发育条件;沟谷基础数据库包括预报区域内所有已查明泥石流沟的泥石流发育条件信息,为矢量图形数据库,泥石流沟可以以点(位置)或面(流域)的形式表示,每条泥石流沟泥石流发育的基础信息存储在其属性数据库中。

1.2 降水动态预报和监测

降水是泥石流形成的激发因素,是泥石流形成条件中最具动态性的因素。降水动态预报和监测,包括降水预报和监测的技术平台、降水动态预报和监测结果的数据分析平台,预报和监测技术平台由气象站提供,这里不加详述;降水预报和监测结果数据分析平台是将气象站提供的降水预报和监测结果通过分析处理,转换成泥石流预报所需的以栅格图形形式存储的数据。气象站提供的降水预报结果一般为预报降水等值线形式,降水监测结果一般为点状分布数据形式。预报降水等值线数据和点状分布的监测数据,需要通过GIS软件进行坐标适配和数据内插分析等生成与基础数据库相匹配的栅格数据格式,才能进行泥石流预报所需的空间数据分析。

1.3 泥石流预报模型

泥石流预报模型直接决定了泥石流预报结果的准确性,是泥石流预报平台的核心,将在下节中详细论述。

2 泥石流预报模型和预报结果表述

2.1 泥石流预报模型现状与趋势

现有泥石流预报模型主要以统计分析临界降水量的方法进行泥石流预报,泥石流预报结果一般用“泥石流发生”和“泥石流不发生”表述。例如,钟敦伦等(1990)通过对成昆铁路泥石流的研究,确定出泥石流预报模型为:若碎屑物聚集总量/暴发泥石流的碎屑物量最低标准 ≥ 1 ,且日降雨量 ≥ 50 mm,则泥石流暴发,否则,泥石流不暴发^[8-10]。又如王伟等(1999)利用泥石流组合预报参数 $Y = M(\text{流域环境动态函数})R(\text{暴雨条件函数})$ 进行泥石流预报,若 $Y \leq 25$,则泥石流不暴发,若 $25 < Y \leq 35$,则泥石流可能暴发,若 $Y \geq 35$,则泥石流暴发^[11]。再如谭炳炎等(1995)根据成昆铁路甘洛试验区观测资料确定

泥石流形成降雨量组合指标为 $R = K \left(\frac{H_{24}}{H_{24(D)}} + \frac{H_1}{H_{1(D)}} + \frac{H_{1/6}}{H_{1/6(D)}} \right)$,当 $R < 2.8$ 时,泥石流不发生, $R \geq 3.6$ 时泥石流发生几率约占85%, $R = 2.8 \sim 3.6$ 时泥石流可能发生^[12],其中 K 为前期降雨量修正系数, H_{24} 为24 h最大降雨量, $H_{24(D)}$ 为可能发生泥石流的24 h限界雨量, H_1 为1 h最大降雨量, $H_{1(D)}$ 为可能发生泥石流的1 h限界雨量, $H_{1/6}$ 为10 min最大降雨量, $H_{1/6(D)}$ 为可能发生泥石流的10 min限界雨量。这些泥石流预报模型都试图通过对泥石流临界雨量的分析,给出泥石流发生与否的预报。然

而, 由于泥石流形成的复杂性、精确降水预报的困难性和不确定性、降水在流域和区域上分布的不均匀性、不同下垫面条件下临界雨量的差异性、统计分析临界雨量的不准确等原因, 仅靠临界雨量判定做出泥石流发生或不发生的预报, 在目前研究水平和条件下是极其困难的, 在预报精确度较低的情况下, 用“泥石流发生”和“泥石流不发生”表述泥石流预报结果具有极大的风险性, 因为泥石流误报和漏报都会造成严重损失。

因此, 在现阶段, 如何平滑临界雨量在泥石流预报中的单因素决定性, 如何规避确定性预报结果表述带来的风险, 成为泥石流预报模型研究的重点。

2.2 泥石流预报模型

2.2.1 基本原理

为了解决以上问题, 这里以模糊数学为基础, 利用可拓学原理, 建立泥石流预报可拓模型, 根据泥石流发生条件的不同, 将临界雨量划分成不同的等级范围, 即根据预报降水量所落的雨量等级范围, 确定泥石流发生的概率大小。其基本原理如下:

设有 i 个因素 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 且在这 i 个因素不同状态的作用下, 可能有事件 $B_j (j = 1, 2, 3, \dots, m)$ 发生。为了判别在因素组合状态 $R (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 下会有何种事件 B 发生, 首先构造事件 B_j 发生的标准物元模型。

$$R = \begin{bmatrix} B & X_1 & x_1 \\ & X_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & X_n & x_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 x_1, x_2, x_n 分别为因素 X_1, X_2, X_n 的值。

然后, 计算状态 R_0 与标准物元模型中事件 B_j 发生的相应状态的关联度, 根据关联程度判断何种事件 B 发生。

设 $X_0 = \langle a, b \rangle$, $X = \langle c, d \rangle$, $X_0 \subset X$, 且无公共端点, 令

$$K(x) = \frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{1}{2}(b-a)$$

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0), & x \notin X_0 \\ -1, & x \in X_0 \end{cases}$$

据式(2), 可分别计算出状态 R_0 中各因素 X_i 与标准物元模型中事件 B_j 发生的相应状态中因素 x_i 的关联度为

$$K_j(V_i) (j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

则, 状态 R_0 关于事件 B_j 的关联度为:

$$K_j(P) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_j(V_i) \quad (4)$$

若 $K_{j0}(P) = \max_{j_0 \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(P)$, 则判定状态 R_0 下事件 B_{j0} 发生。

对于泥石流预报, 就是根据建立的泥石流预报的标准物元模型, 判断不同区域或不同沟谷在不同泥石流发育的因素组合条件下发生泥石流的概率大小。

2.2.2 区域泥石流预报模型

区域泥石流预报是评价每个单元格在地形、地质和预报降水量 3 个因素条件作用下, 该单元发生泥石流的概率大小, 即单元格 P 在状态 $R (E = X_1, G = X_2, J = X_3)$ 下, 对于单元格 P 有事物 B (包括 n 种事件, 每种事件代表一个泥石流发生的概率等级) 发生。为了确定事物 B 中何种事件发生, 需建立关于事件 B 发生的标准物元模型, 并将状态 R 下的各因素与其比较, 计算各因素与这 n 种事件的关联度 $K_j(X_i) (j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3)$, 再根据各因素的权重系数 α , 计算单元格 P 关于 n 种事件的关联度 $K_j(P) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i K_j(x_i)$, 最后根据最大隶属度原则确定 4 种事件中的何种事件发生。即, 如果

$$K_{j0}(P) = \max_{j_0 \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(P)$$

则, 单元格 P 中事件 b_{j0} 发生, 即在该降水条件作用下, 单元格 P 发生泥石流的可能性为 b_{j0} 。

2.2.3 沟谷泥石流预报模型

沟谷泥石流预报是评价每条泥石流沟在流域面积、沟床比降、地质和预报降水量 4 个因素条件作用下, 发生泥石流的概率大小, 即泥石流沟 P 在状态 $R (A = X_1, S = X_2, G = X_3, J = X_4)$ 下, 对于泥石流沟 P 有事物 B (包括 n 种事件, 每种事件代表一个泥石流发生的概率等级) 发生。为了确定事物 B 中何种事件发生, 需要建立关于事物 B 发生的标准物元模型, 并将状态 R 下的各因素与其比较, 计算各因素与这 n 种事件的关联度 $K_j(X_i) (j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, 4)$, 再根据各因素的权重系数 α , 计算泥石流沟 P 关于这 n 种事件的关联度 $K_j(P) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i K_j(x_i)$, 最后根据最大隶属度原则确定这 n 种事件中的何种事件发生。即, 如果

$$K_{j0}(P) = \max_{j_0 \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(P)$$

则, 泥石流沟 P 中事件 b_{j0} 发生, 即在该降水条件作用下, 泥石流沟 P 发生泥石流的可能性为 b_{j0} 。

2.3 泥石流预报结果的表述

泥石流预报是对在一定条件下,未来一段时间内,泥石流发生可能性大小的预测,其结果是一种概率意义下的预测。因此,预报结果应使用泥石流发生的概率进行表述。但事实上,在目前基于降水统计的泥石流预报模式条件下,无法准确确定泥石流发生的概率大小。因此,我们采用模糊数学的方法将泥石流发生的概率结果概化成若干等级,这样可以更清楚地表述在一定条件下,未来一段时间内,泥石流活动的发展趋势。在泥石流预报可拓模型中,预报结果是用包含于事物 B 中的若干种事件表示的,每种事件即代表了泥石流发生的一个概率等级。

对事物的分级评价方法较多,如二级分法、三级分法,直至九级分法,甚至更为复杂的分法。心理学家认为,等级越多、越复杂,越不易在人脑中形成清晰的映象,认为一般不宜超过 7 ± 2 级。为了能够既较细致地表述泥石流发生的概率等级,又能使人们清楚地认识泥石流发生概率的等级印象,选择五级分法来表述区域泥石流预报的结果较为理想,但在实际应用中,可以根据预报区域的实际情况进行适当调整。

3 应用实例

北京山区为我国泥石流发育的主要地区之一,目前已查明的泥石流沟有 705 条,分布在怀柔、密云、延庆、房山、门头沟、平谷、昌平等 7 个区(县),其中以怀柔、密云、延庆 3 个区(县)最为集中,分别有泥石流沟 217 条、137 条和 107 条^[13]。北京山区泥石流不仅直接危害公路、铁路、村镇、农田和人民生活安全,还危害北京市的水源地,为了减轻泥石流灾害,特别是减少泥石流灾害造成的人员伤亡,将区域和单沟相结合的泥石流预报方法和技术应用到北京山区泥石流减灾中,建立了北京山区泥石流预报系统,为北京山区泥石流减灾决策提供支持。

3.1 泥石流预报的数据库平台

北京山区泥石流预报的数据库包括区域数据库和沟谷数据库。区域数据库由北京山区数字高程模型、地层、断层和降水数据构成,基础地图比例尺为 1:10 万,栅格图形的像元大小为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 。沟谷数据库由北京山区发育的 705 条泥石流沟的基础数据构成,包括每条泥石流沟的准确位置、相对高度、沟床比降、流域面积、地质条件、降水条件等。

3.2 预报降水处理应用模块

预报降水数据处理应用模块的任务,是将得到的降水预报数据或降水监测数据处理成为与数据库中地图地理坐标匹配、像元大小一致、数据格式相同的图形数据,供泥石流预报应用模块使用。该模块包括两个部分,一是将降水预报的等值线图处理成泥石流预报应用模块要求的数据格式,二是将监测降水的点状数据处理成泥石流预报应用模块需要的数据格式。

3.3 泥石流预报应用模块

泥石流预报应用模块是该系统的核心部分,连接数据库和预报降水数据,通过预报模型的计算,确定泥石流发生的可能性。该模块包括泥石流区域预报和泥石流沟谷预报两个分模块,区域预报模块给出预报降水条件下北京山区不同区域泥石流发生的可能性,确定重点防灾和减灾区域;沟谷预报模块给出北京山区已查明的每条泥石流沟在该降水条件下发生泥石流的可能性,确定重点防范的泥石流沟,更明确地指导泥石流防灾减灾。

4 结论与讨论

1. 在以降水统计为基础的泥石流预报的条件下,泥石流预报的准确率较低,不宜发布确定性预报,为防止因泥石流漏报造成重大人员伤亡,应当进行泥石流发生的概率性预报,但在目前预报水平下精确的概率预报同样没有实际意义,预报结果应用概率分级进行表述更为科学。

2. 临界降水量是泥石流预报的最为重要的参数之一,然而,无论是区域预报还是沟谷预报的临界降水量都因下垫面条件的不同而不同,因此,过分依赖临界降水量的泥石流预报具有极大风险,应当采用技术手段进行平滑,降低预报风险。

3. 区域预报是泥石流减灾的重要手段之一,然而,由于其范围较大,具体的减灾指导性较差,因此,区域预报与沟谷预报相结合的泥石流预报,更能明确泥石流减灾防灾的重点,具有更强的减灾指导意义。

参考文献(References):

- [1] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, et al. Debris flow observation and research in Jiangjiagou, Yunnan. Beijing: Science Publish House, 1990, 197~212. [吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990, 197~212.]

- [2] Wei Fangqiang, Hu Kaiheng, Cui Peng, et al. Model of debris flow forecasting under different loss factors[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, **20**(1): 97~ 102. [韦方强, 胡凯衡, 崔鹏等. 不同损失条件下的泥石流预报模型[J]. 山地学报, 2002, **20**(1): 97~ 102.]
- [3] Cui Peng. Studies on condition and mechanism of debris flow initiation by means of experiment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, **37**(9): 759~ 763. [崔鹏. 泥石流起动条件和机理的实验研究[J]. 科学通报, 1991, **36**(21): 1650~ 1652.]
- [4] Cui Peng, Guan Junwei. The sudden change properties of debris flow initiation[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1993, **2**(1): 53~ 61. [崔鹏, 关君蔚. 泥石流起动的突变学特征[J]. 自然灾害学报, 1993, **2**(1): 53~ 61.]
- [5] Lu Xiaobing, Cui Peng. On the initiation of debris flow[J]. *Mechanics and Practice*, 2001, **23**(6): 21~ 23. [鲁晓兵, 崔鹏. 泥石流的启动分析[J]. 力学与实践, 2001, **23**(6): 21~ 23.]
- [6] Tan Wanpei, Wang Chenghua, Yao Lingkan, et al. Regional forecasting of debris flow and landslide under rainstorm[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Publish House, 1994, 205~ 208. [谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994, 205~ 208.]
- [7] Cui Peng, Liu Shijian, Tan Wanpei. Progress of debris flow forecast in China. *Journal of Natural Disasters*, 2000, **9**(2): 10~ 15. [崔鹏, 刘世建, 谭万沛. 中国泥石流监测预报研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, **9**(2): 10~ 15.]
- [8] Zhong Dunlun, Wang Aiyang, Zhao Ling, et al. Applied system of debris flow data-base along Chengdu-Kunming railway in Sichuan Province[J]. *Mountain Research*, 1990, **8**(2): 75~ 81. [钟敦伦, 王爱英, 赵玲, 等. 四川境内成昆铁路泥石流数据库应用系统[J]. 山地研究, 1990, **8**(2): 75~ 81.]
- [9] Zhong Dunlun, Xie Hong, Wang Aiyang. Forecast parameters of debris flow along Chengdu-Kunming railway in Sichuan Province [J]. *Mountain Research*, 1990, **8**(2): 82~ 88. [钟敦伦, 谢洪, 王爱英. 四川境内成昆铁路泥石流预测预报参数[J]. 山地研究, 1990, **8**(2): 82~ 88.]
- [10] Zhao Ling. Expert system of forecast of debris flows along Chengdu-Kunming railway in Sichuan Province [J]. *Mountain Research*, 1990, **8**(2): 89~ 93. [赵玲. 四川境内成昆铁路泥石流预测预报专家系统[J]. 山地研究, 1990, **8**(2): 89~ 93.]
- [11] Wang Wei, Xu Weilin, Tan Bingyan et al. Forecast and forewarn system of railway debris flow[J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, **17**(2): 183~ 187. [王伟, 许唯临, 谭炳炎, 等. 铁路泥石流预报警报体系[J]. 山地研究, 1999, **17**(2): 183~ 187.]
- [12] Tan Bingyan, Duan Aiyang. Study on prediction for rainstorm debris flow along mountain district railways[J]. *Journal Natural Disasters*, 1995, **4**(2): 43~ 52. [谭炳炎, 段爱英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, **4**(2): 43~ 52.]
- [13] Xie Hong, Zhong Dunlun, Jin Huaicheng. Debris flow and landslide disasters control in mountain area of Beijing City[J]. *Bulletion of soil and water conservation*, 2001, **21**(6): 37~ 45. [谢洪, 钟敦伦, 靳怀成. 北京山区泥石流与滑坡防治研究[J]. 水土保持通报, 2001, **21**(6): 37~ 45.]

Debris Flow Forecast Combined Regions and Valleys and Its Application

WEI Fangqiang¹, TANG Jiafa², XIE Hong¹, ZHONG Dunlun¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041.

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: The subject of debris flow forecast combined regions and valleys is taken out based on the analysis of present debris flow forecast research and the demand of debris flow disasters mitigation. The platform of debris flow forecast combined with regions and valleys is set up with the basement of the database of background of debris flow development, rainfall prediction and monitoring and debris flow forecast models, as well as with the tools of GIS. The debris flow models are set up with fuzzy mathematics and the outcome of forecasting is probability of debris flow occurrence classified into several grades for being seasoned with the lower accuracy of debris flow forecast based on rainfall statistics and overcoming the uncertain critical value of rainfall on the variable underlying surface. This kind of debris flow forecast method and technology are applied in debris flow forecast in Beijing mountains and a debris flow forecast system has been set up in Beijing.

Keywords: debris flow; forecast; regions and valleys; application