

基于显式统计原理的地质灾害 区域预警方法初步研究

刘艳辉^{1,2} 刘传正¹ 连建发¹ 温铭生¹ 唐 灿¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

(2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 区域预警是提高防灾减灾意识、有效减轻地质灾害造成损失的重要手段。地质灾害显式统计预警理论考虑了地质环境变化与降雨参数等多因素的耦合作用, 克服了传统单一临界雨量判据方法的局限。笔者应用地质灾害显式统计预警的基本原理, 以中国的东南区为例开展应用研究。选取岩土体类型、地形起伏等 12 个基础地质环境因素, 通过确定性系数模型(CF)综合分析了地质灾害分布与地质环境基础因素的关系, 选取地质灾害“潜势度”作为地质环境优劣的指标, 并进行了定量计算。选取当日雨量和一个降雨过程的前期累计雨量作为降雨激发因素的指标。采用多元回归的统计分析方法, 分析了地质环境因素、降雨激发因素的耦合作用与地质灾害发育情况之间的关系, 建立了显式统计的地质灾害预警预报模型。以 2006 年 5 月 18 日台风“珍珠”登陆期间的实况预警情况对模型进行了应用校验, 验证了显式统计预警原理及模型方法的可行性和实用性。

关键词: 地质灾害; 潜势度; 区域预警; 显式统计; 预警模型; 结果检验

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)02-0344-07

1 引言

中国是世界上地质灾害最严重的国家之一, 区域预警是提高全社会的防灾减灾意识、有效减轻地质灾害造成损失的重要手段。美国(Keefner 等, 1987)、中国香港(Brand 等, 1984)、日本(Fukuzono, 1985)、巴西(Neiva, 1998)、委内瑞拉(Wieczorek 等, 2001)等国家和地区都曾经或正在开展地质灾害区域预警工作, 主要针对降雨为主要诱发因素的地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流), 采用临界降雨阈值参数开展地质灾害区域预警, 常采用的区域预警判据参数有临界累计雨量(24 小时、1 天、3 天、7 天、15 天累计雨量等)、临界降雨强度(一般为小时雨量)等^[1-4]。在吸收国外先进经验基础上, 并结合中国大陆的具体情况, 自 2003 年起, 中国大陆启动了国家级地质灾害气象预警预报工作(5—9 月), 采用临界降雨判据模板法,

即将全国分为若干预警区, 不同预警区建立临界降雨判据模板进行预警, 取得了较好的效果^[5-10]。总结分析国内外研究进展, 区域预警方法通常把地质环境因素的作用隐含在降雨参数中, 预警判据中仅仅考虑降雨参数建立模型, 比较适用于地质环境模式比较单一的小区域, 但预警精度必然受到所预警地区的限制, 单一临界雨量指标难以解释地质环境变化及地质灾害成因, 且更新判据与提高准确性也比较受限制。

2006 年, 结合中国大陆几年来的预警技术方法研究和服务实践, 刘传正等^[11-12]提出了区域地质灾害显式统计预警理论。地质灾害显式统计预警是一种考虑地质环境变化与降雨参数等多因素耦合建立预警判据模型的方法, 它是由地质灾害危险性区划与空间预测转化过来的。这种方法可以充分反映预警地区地质环境要素的变化, 并随着调查研究精度

收稿日期: 2007-07-10; 改回日期: 2007-09-17

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212010640333)资助。

作者简介: 刘艳辉, 女, 1978 年生, 工程师, 博士生, 主要从事地质灾害预报预警等方面的研究工作; E-mail: liuyh@mail.cigem.gov.cn。

的提高相应地提高地质灾害的空间预警精度。显式统计法克服了仅仅依据单一临界雨量指标的限制,比较适用于地质环境模式比较复杂的各类区域。

笔者应用地质灾害显式统计预警的基本原理,采用多因子叠加确定权重法,以中国的东南区为例,量化计算了地质环境基础因素、降雨激发因素,通过多元回归分析方法,分析了地质环境基础因素、降雨激发因素的耦合作用与地质灾害发育之间的关系,建立显式统计的地质灾害预警预报模型。通过实际预警应用检验,证明显式统计预警原理及模型方法的可行性和实用性。

2 区域地质灾害“潜势度”计算

地质环境的优劣决定了地质灾害潜在的易发程度。基本假定是地质环境的优劣可以根据过去地质灾害(滑坡)的易发程度来确定。即过去地质灾害多发的地方,地质环境条件也较差。根据显式统计预警原理,首先完成地质灾害潜势度的计算。

2.1 基础图层设计

地质灾害潜势度主要与岩土体类型、地形地貌特征、大气降水、人类工程活动状况等因素有关。因此,地质灾害潜势度计算中,选取了岩土体类型、年均雨量、地形起伏度、人口密度、植被覆盖、第四系成因、海拔高程、水系、公路、矿山、铁路、地震烈度等 12 个因子图层,并对每个因子图层进行了分组。

2.2 因子量化

采用广泛使用的确定性系数模型(CF)进行因子图层的量化。

确定性系数模型(CF)最早由 Shortliffe 和 Buchanan(1975)提出,由 Heckerman(1986)进行了改进,表示为下式^[13]:

$$CF = \begin{cases} \frac{pp_a - pp_s}{pp_s(1 - pp_s)} & \text{if } pp_a \geq pp_s \\ \frac{pp_a - pp_s}{pp_s(1 - pp_a)} & \text{if } pp_a < pp_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: pp_a 为滑坡在数据 a 类中发生的条件概率,应用时为数据类 a 中存在的滑坡个数与数据类 a 面积的比值;

pp_s 为滑坡在整个研究区 A 中发生的先验概率,

可以表示为整个研究区的滑坡的个数与研究区面积的比值。

将 12 个因子图层分别按式(1)计算,CF 的变化区间为[-1,1]。正值代表事件发生确定性的增长,即滑坡发生的确定性高,地质环境条件差;负值代表确定性的降低,即滑坡发生的确定性低,地质环境条件好;CF 值接近于 0,说明确定性居中,不能确定地质环境的优劣。图 1 和图 2 分别为地形起伏因子、岩土体类型因子 CF 计算的计算结果,其他 10 个因子图

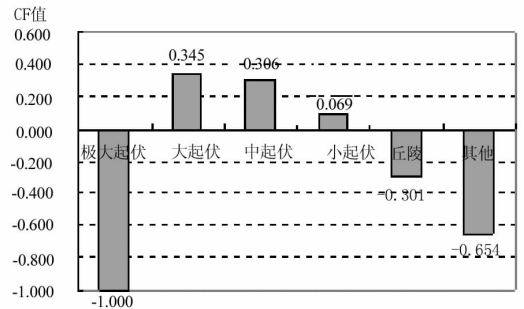


图 1 地形起伏因子 CF 计算结果

Fig.1 CF values of topographic relief

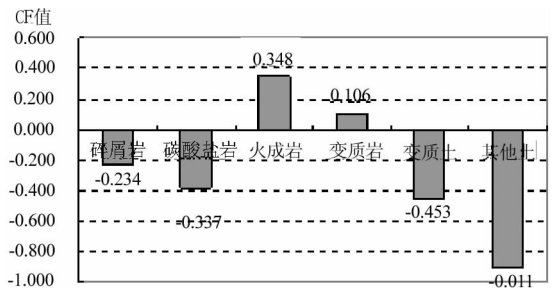


图 2 岩土体类型因子 CF 计算结果

Fig.2 CF values of rock and soil types

层计算结果类似。

2.3 因子权重确定

因子权重的确定一直是学术界的难点,通过多因子叠加权重确定法,根据上述计算所得的各因子 CF 值来计算各因子的权重。具体的计算方法如下:

(1)各因子图层 CF 值逐步叠加合并。假定要合并两个因子图层的 CF 值分别为 x 和 y , 合并后的结果为 Z , 合并公式^[14]如下式:

$$Z = \begin{cases} x+y-x^*y & x,y \geq 0 \\ \frac{x+y}{1-\min(|x|, |y|)} & x^*y < 0 \\ x+y+x^*y & x,y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

先选定岩土体类型因子,根据式(2)逐步叠加合并各因子图层。为使合并结果易于解释,将合并的图层的CF值进行分类,分为5个级别(表1)。通过叠加合并、分类,最终得到各因子图层叠加后Z分段百分比见表2。

表1 CF级别划分

Table 1 Division of CF Value grade

分级	CF 值范围	地质环境描述
1	<-0.6	对地质灾害发生的影响小
2	-0.6~-0.2	对地质灾害发生的影响较小
3	-0.2~0.2	对地质灾害发生的影响不定
4	0.2~0.6	对地质灾害发生的影响较大
5	>=0.6	对地质灾害发生的影响大

(2)计算各段Z值的变化量。

根据表2相邻相减,计算各因子图层叠加前后分段百分比的变化量(图3)。该分段百分比变化量的大小反映了该因子图层的影响大小。

由图3可见,岩土体类型因子对地质灾害的发生影响最大,其次是年均雨量、人口密度、地形起伏、

植被覆盖等因子,地震因子权重近似为0。

(3)计算因子权重。

根据公式(3),定量计算各因子图层的相对影响大小,经归一化后得到各因子的权重(表3)。

$$T = |A_1| + |A_2| + |A_3| + |A_4| + |A_5| \quad (3)$$

其中 A_i : 各因子图层分段百分比的变化量。 $i=1, 2, \dots, 5$ 。

2.4 潜势度计算

以 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 进行单元划分,将研究区划分为12593个单元,按公式(4)计算网格单元的潜势度:

$$G = \sum_{i=1}^n q_i \times Q_i \quad (4)$$

式中, q_i —各因子权重; Q_i —因子定量值(CF值)。

将地质灾害潜势度的计算结果分为5段,并与历史灾害点的分布密度比对,从而校验潜势度的计算结果(图4,表4)。由此可见,地质灾害潜势度值大

表2 叠加合并、分类后的各因子图层Z值分段百分比

Table 2 Z subsection percentages of various factors after superposition, merging and classification

Z 值分段	岩土体	+地震	+降雨	+海拔	+起伏	+成因	+水系	+植被	+公路	+铁路	+矿山	+人口
<-0.6	9.5	9.8	15.9	23.4	28.8	31.5	32.3	21.9	22.5	22.5	22.4	36.0
-0.6~-0.2	49.8	49.8	17.0	13.5	15.5	9.0	9.4	8.8	8.7	9.4	9.7	15.3
-0.2~0.2	19.2	18.9	35.3	33.0	13.9	10.9	10.4	13.3	14.4	14.2	15.6	10.8
0.2~0.6	21.5	21.5	31.7	30.1	29.8	32.2	30.2	36.0	34.2	33.6	32.8	15.9
>=0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	16.4	17.7	20.1	20.2	20.3	19.5	22.1

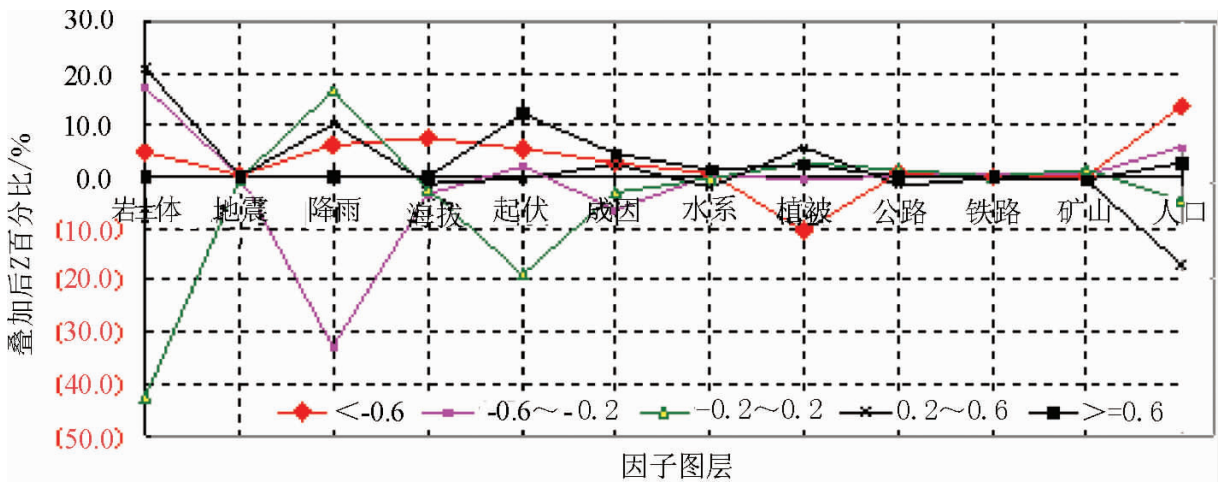


图3 各因子图层CF值叠加后分段百分比的变化量

Fig.3 Variation of Z subsection percentages after superposition of CF values of various factors

表 3 各因子权重

Table 3 Potentiality parameter grading

因子	岩土体类型	降雨	人口密度	起伏	植被	成因	海拔	水系	公路	矿山	铁路	地震
<i>T</i>	84.9	65.6	43.5	38.9	21.9	19.0	14.8	5.0	3.8	3.5	1.5	0.7
权重	0.28	0.22	0.14	0.13	0.07	0.06	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00

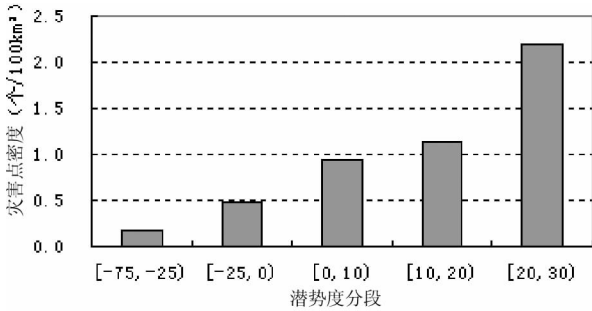


图 4 潜势度计算结果校验

Fig.4 Result checkout of the potentiality parameter

的区域,历史灾害点分布多,地质灾害潜势度值小的区域,历史灾害点分别少,即地质灾害潜势度值的大小也能够反映历史地质灾害点的多少,能够反映地质背景环境条件的优劣。

3 显式统计预警模型

采用多元回归的统计分析方法,建立地质环境基础因素、降雨激发因素与地质灾害之间的显式统计预警模型。

3.1 统计变量选择

(1)地质环境基础因素

利用 2.4 节公式(4)计算所得的网格潜势度的值(*G*)作为地质环境基础因素。本次统计分析中,将 *G* 做变换(+1)后带入统计模型。

(2)降雨激发因素

选取当日雨量(*R_d*)和前期雨量(*R_p*)作为降雨激发因素的值。当日雨量(*R_d*),定义为地质灾害发生当天的日雨量;前期雨量(*R_p*),定义为地质灾害发生前一个降雨过程中的累计雨量。降雨过程是指本次连续降雨过程中无一日间断。统计分析中,将 *R_d*、*R_p* 分别变换后($\times 10^{-2}$)带入统计模型。

(3)地质灾害发生情况

利用网格内历史地质灾害点的发生个数作为因变量参加统计。

3.2 预警模型建立

从历史灾害点中挑选统计样本参加统计。其中,地质灾害数据来源于县市调查数据和 2003—2006 年地质灾害气象预报预警日常反馈的灾害点数据,降雨资料来源于中国气象局匹配的逐日降雨数据。

将统计样本导入 SPSS 统计软件进行线性回归分析,主要结果如下:

复相关系数: $R=0.195$,

判定系数: $R^2=0.183$,

得到回归方程为:

$$T = -2.031 + 3.775G + 2.219R_d + 0.943R_p \quad (3.00) \quad (7.97) \quad (3.92)$$

根据括号内的 *t* 统计量的值可知:*G*、*R_d*、*R_p* 均对地质灾害的发生情况有显著影响。

根据 *F* 统计量的值 $F=36.80$,可知:回归方程是显著的。

根据统计结果可见,地质灾害的发生与地质环境基础因素(*G*)、降雨激发因素(*R_d*、*R_p*)存在一定程度的线性关系。

最终,得到地质灾害预警统计分析模型:

$$T = -2.031 + 3.775G + 2.219R_d + 0.943R_p \quad (5)$$

由式(5)可知,地质灾害预警指数与潜势度 *G*、当日雨量 *R_d*、前期雨量 *R_p* 成线性关系,三者的影响比例约为 4:2:1 的关系。可见,在研究区范围内,地质环境基础因素是地质灾害发生的主要控制因素,降雨激发因素中,当日雨量的作用约为前期雨量的 2 倍,地质灾害的发生主要受当日雨量的控制。

该模型可以用于当日 20:00 点到次日 20:00 点的地质灾害气象预报预警。实际应用中,*G* 为地质灾害潜势度;*R_d* 为预报日雨量;*R_p* 为一个降雨过程的前期累计雨量。根据预警指数 *T* 分段确定地质灾害气象预警等级。

4 预警结果与检验

2006 年 5 月 18 日,台风“珍珠”在广东省饶平

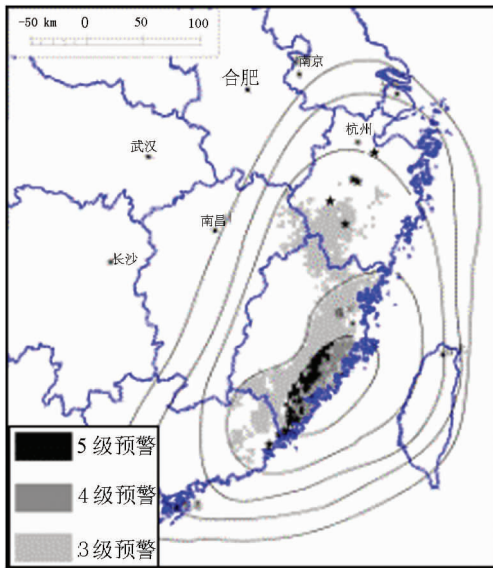


图5 2006年5月18日发布的预警区
Fig.5 Early-warning zone released on May 18, 2006

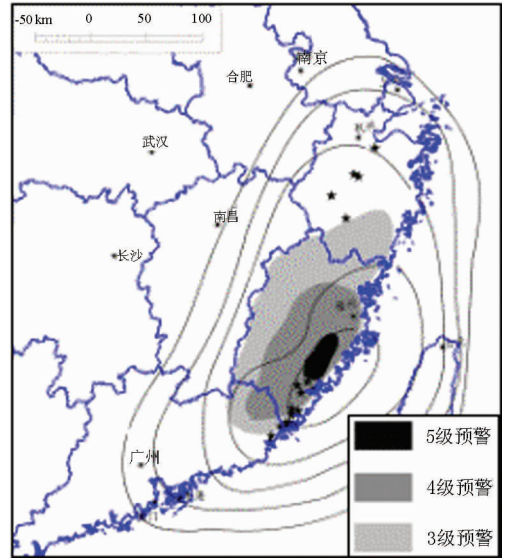


图6 新的统计模型模拟2006年5月18日的预警区
Fig.6 Early-warning zone simulated with a new explicit statistic model on May 18, 2006

到澄海之间沿海登陆,是1949年以来5月份登陆中国最强的台风之一。5月18日,中国气象局对中国的东南沿海地区发布了暴雨预报,国土资源部和中国气象局联合发布了地质灾害气象预报预警,其中局部地区达到5级警报标准(图5)。

根据5月17日气象部门的降雨预报数据和前期实况雨量数据,笔者采用公式(5)统计的预警模型,计算研究区内各网格单元的预警指数 T ,将 T

分别按 $(-5, 1)$ 、 $[0.5, 2]$ 、 $[2, 3]$ 、 $[3, 4]$ 分为4个级别,得到最终的地质灾害预报预警图(图6)。同时,根据5月18日反馈的具有一定损失地质灾害(图6中“★”所示)的实际发生情况对比,绝大多数地质灾害点落在了预警区范围内,新的统计预警模型较好地预测了地质灾害的发生情况。在保证一定准确率的情况下,显式统计预警区面积比隐式统计预警区面积减少了36.1%(表5),显式统计预警方法具有较高的空

表4 显式统计预警与隐式统计预警的空间精度比较
Table 4 Space accuracy comparison between the explicit statistics and implicit statistics early-warning methods

分 级	潜势度分段	灾害点密度 (个/100km ²)	描 述
1	$[-0.75, -0.25]$	0.2	地质环境条件好
2	$[-0.25, 0)$	0.5	地质环境条件较好
3	$[0, 0.1)$	1.0	地质环境条件不定
4	$[0.1, 0.2)$	1.1	地质环境条件较差
5	$[0.2, 0.3)$	2.2	地质环境条件差

表5 显式统计预警与隐式统计预警的空间精度对比
Table 5 Space accuracy comparison between the explicit statistics and implicit statistics early-warning methods

预警等级	隐式统计	显式统计	说 明
	预警区面积 (km ²)	预警区面积 (km ²)	
3	80834.8	77031.6	4.7
4	57665.6	10480.0	81.8
5	6885.5	5426.4	21.2
3~5	145385.9	92938.0	36.1

间预警精度。

从图 5~6, 显式统计预警模型的预警结果具有如下特点:

(1) 预警结果更加精细化。显式统计预警方法是通过网格剖分(网格尺寸 10 km×10 km)的方式进行计算的, 预警结果是以网格尺寸为最小单元, 从而使得预警结果更加的精细。

(2) 预警结果更加准确。预警结果中, 较高预警等级的区域可能是由于以下几种情况导致的: 较高的地质灾害潜势度或较大的预报雨量或较大的前期累计雨量, 或者三者同时较高。如浙江的西南与福建北部交界地区, 预报雨量仅为 25~50 mm, 但由于其前期累计雨量较大, 因此也具有较高的预警等级, 这一点在图 5 中表现的不明显, 也就造成了该地区的漏报。

5 结 论

应用地质灾害显式统计预警的基本原理, 以中国的东南区为例, 采用多元回归的统计方法, 分析了地质灾害潜势度、地质灾害发生的当日雨量、前期雨量与地质灾害实际发生情况之间的关系, 得到如下结论:

(1) 提出多因子叠加权重确定法, 计算得到地质基础因素的权重, 运用到地质灾害基础因素的定量化, 具有可行性。

(2) 地质灾害“潜势度”, 可以作为显式统计的地质灾害区域预警方法中地质环境基础因素的定量化指标。根据地质环境基础因素的量化和权重的确定, 计算得出中国东南区地质灾害潜势度。

(3) 当日雨量和一个降雨过程的前期累计雨量可以作为降雨激发因素指标。

(4) 通过多元回归统计方法, 建立了研究区范围内地质灾害显式统计预警模型, 模型显示地质环境基础因素是地质灾害发生的主要控制因素, 降雨激发因素中, 当日雨量的作用约为前期雨量的 2 倍, 地质灾害的发生主要受当日雨量的控制。

(5) 经过实况预警检验, 初步证明显式统计预警原理及模型方法的可行性和实用性。

参考文献 (References):

[1] Brand E W, Premchitt, J, Phillipson H B. Relationship between rainfall and landslides [J]. Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslides, 1984, (1):377-384.

[2] Cannon S H, Ellen S D. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region [J]. California Geology, 1985,

38 (12):267-272.

- [3] Au S W C. Rain-induced slope instability in Hong Kong [J]. Engineering Geology, 1998, 51(1):1-36.
- [4] Pietro Aleotti. A warning system for rainfall-induced shallow failures [J]. Engineering Geology, 2004, 73:247-265.
- [5] Liu Chuazhen, Liu Yanhui, Wen Mingsheng, et al. Early warning for geo-hazards based on the weather condition in China [J]. Global Geology, 2006, 9(2):131-137.
- [6] 刘传正, 温铭生, 唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4):303-309.
- Liu Chuazheng, Wen Mingsheng, Tang Can. Meteorological early warning of geo-hazards in China based on raining forecast [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(4):303-309(in Chinese with English abstract).
- [7] 刘传正. 区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3):1-6.
- Liu Chuazheng. Study on the early warning methods of landslide-debris flows [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(3):1-6(in Chinese with English abstract).
- [8] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4):101-105.
- Xie Jianming, Liu Liling, Yin Kunlong, et al. Study on the threshold values of rainfall of landslide hazards for early-warning and prediction in Zhejiang province [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22 (4):101-105 (in Chinese with English abstract).
- [9] 李芳, 娄月红, 程晓露. 陕西省地质灾害气象预报预警系统研制及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2):116-118.
- Li Fang, Lou Yuehong, Cheng Xiaolu. Development of geohazard weather forecasting system in Shanxi province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2006, 17(2):116-118(in Chinese with English abstract).
- [10] 张红兵. 云南省地质灾害预报预警模型方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1):40-42.
- Zhang Hongbing. Prediction system of geological hazard in Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1):40-42(in Chinese with English abstract).
- [11] 刘传正, 温铭生, 刘艳辉. 基于气象因素的区域地质灾害预警原理与应用 [C]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006:686-693.
- Liu Chuazheng, Wen Mingsheng, Liu Yanhui. Principles and application of pre-warning of regional geological hazards based on meteorological factors [C]//Symposium of No.2 Conference Rock Mass and Engineering. Beijing:Science Press, 2006:686-693 (in Chinese).
- [12] 刘传正, 刘艳辉. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6):11-18.
- Liu Chuazheng, Liuyanhui. Early warning theory for regional geo-hazards and design of explicit statistical system [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34 (6):11-18(in

Chinese with English abstract).

- [13] Heckerman. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors [C]//L N Kanal and J F Lemmer (eds). Uncertainty in Artificial Intelligence. New York:Elsevier, 1986, 1298-3111.
- [14] 兰恒星,王苓涓,周成虎. 云南小江流域滑坡关键影响因子研究[J].

中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1):100-106.

Lan Hengxing, Wang Lingjuan, Zhou Chenghu. Study on the key landslide factor by means of GIS in Xiaojiang Valley, Yunnan [J]. The Chinese Journal Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 100-106(in Chinese with English abstract).

Method of regional early warning of geohazards based on the explicit statistical theory

LIU Yan-hui^{1,2}, LIU Chuan-zheng¹, LIAN Jian-fa¹, WEN Ming-sheng¹, TANG Can¹

(1. China Institute for Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Regional early warning is an important means for improving the consciousness of geohazard prevention and reduction and effectively mitigating the loss caused by geohazards. In the early-warning method of explicit statistics, the effect of coupling of multiple factors such as geo-environmental change and precipitation is considered, thus overcoming the limitation of the single critical rainfall criterion. Based on the explicit statistic theory on geohazard early warning, applied studies have been carried out in the southeast of China. Twelve geo-environmental factors such as rock and soil types and topographic relief are selected to analyze the relationship between the distribution of geohazards and geo-environmental factors by using the determinacy coefficient function (CF), and the geohazard potentiality parameter is selected as an index of the geo-environment and quantitative calculation is performed. The very day rainfall and previous cumulative rainfall in one rain process are selected as an index of rainfall excitation conditions. Finally, the multi-regression analysis is used to analyze the relationships of the geo-environmental factor, rain excitation conditions and geohazards. Then an explicit statistic early-warning model for geohazards is constructed. Take for example the early warning during the land striking of the typhoon "Pearl" on May 18, 2006, the authors check the forecasting model and prove that the principle and model of explicit statistics early warning are feasible and practicable.

Key words: geohazard; potentiality parameter; regional early warning; explicit statistics; early-warning model; multi-regression analysis; result checkout

About the first author: LIU Yan-hui, female, born in 1978, engineer and Ph.D candidate, mainly engages in the study of geohazard forecasting and early warning; E-mail: liuyh@mail.cigem.gov.cn.