

不同损失条件下的泥石流预报模型

韦方强^{1, 2}, 胡凯衡², 崔鹏², 杨坤²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 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)

摘 要: 泥石流预报是泥石流减灾的重要手段之一, 然而泥石流形成的复杂性使泥石流预报准确度低, 误报和漏报率较高。泥石流误报和漏报都会造成损失, 但二者造成的损失有很大的差别。为了减少泥石流误报或漏报造成的损失, 应当考虑两种错报造成损失的不同。根据使总平均损失达到最小的原则, 建立了不同损失条件下的泥石流预报模型, 并将该模型应用到云南东川蒋家沟。

关键词: 泥石流; 预报; 损失; 模型

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

1 问题的提出

泥石流预报是城镇泥石流或具有重要威胁对象的泥石流减灾的重要途径, 但由于泥石流形成机理还未从根本上解决, 泥石流预报一直是泥石流研究的难题之一。鉴于对泥石流形成机理研究的深度, 目前泥石流预报模式多为根据激发泥石流的降水的统计模式^[9]。泥石流预报从时间尺度上可分为长期预报、中期预报、短期预报和临警预报, 其中长期预报为背景预测, 属对长时期内发生泥石流可能性的趋势预测; 中期预报属预案预报; 短期预报属判定预报, 是根据天气变化趋势作出的泥石流发生可能性; 临警预报属于确定性预报, 是根据泥石流激发因素作出的泥石流是否发生的确定性预报^[6]。

泥石流短期预报和临警预报是泥石流减灾的重要手段, 其预报的准确性是决定泥石流减灾防灾成败的关键。然而, 目前的短期预报和临警预报都是建立在一些统计假设的基础上, 并且绝大多数沟谷泥石流缺乏系统的序列资料, 严重影响了此类泥石流预报模型的准确性, 再加上泥石流形成机理的复杂性和区域差异性, 即使有完整资料的沟谷, 其泥石流预报模型准确性也不是很高。例如云南东川蒋家沟已有 30 年数百场泥石流的观测资料, 根据这些资料建立了蒋家沟泥石流预报模型^[3]:

$$R_{10} = 5.5 - 0.098(P_a + R_t) > 0.5 \text{mm (临界线)}$$

$$R_{10} = 6.9 - 0.123(P_a + R_t) > 1.0 \text{mm (暴发线)}$$

式中 R_{10} 为 10min 降雨量(mm); R_t 为泥石流发生时刻前的当日降水量(mm); P_a 为泥石流发生前 20d 内的有效降雨量。

泥石流预报的不准确包括误报和漏报。误报是将“无泥石流”预报为“有泥石流”, 漏报是将“有泥石流”预报为“无泥石流”。误报和漏报都会造成损失, 但损失的大小可能很不相同。漏报会造成人民生命财产的重大损失, 误报又会造成不必要的生产停顿和人心恐慌等损失。为了减小泥石流预报不准确造成的灾害和损失, 有必要在利用泥石流预报模型做出泥石流预报(泥石流发生的概率和泥石流不发生的概率)的同时, 探讨泥石流漏报和误报造成的损失, 使泥石流预报中错报造成的总平均损失最小, 以弥补目前泥石流预报准确度低的缺点, 这就引出了泥石流适时预报的概念, 并根据使泥石流错报产生的总平均损失达到最小的原则建立不同损失条件下的泥石流预报模型。

2 基本原理^[10]

设有 m 个总体 G_1, G_2, \dots, G_m , 它们的分布密度函数分别为 $f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)$, 且假定已知

收稿日期: 2001-07-10; 改回日期: 2001-11-20.

基金项目: 中国科学院资源与环境研究“九五”重大项目 B(项目编号为 KZ951-B1-202)和中科院特别支持领域“山地灾害—泥石流滑坡基础研究”资助。

作者简介: 韦方强(1968-), 男, 山东临沐人, 副研究员, 主要从事泥石流减灾理论以及 3S 技术在减灾领域的应用研究。

G_1, G_2, \dots, G_m 的先验概率分别为 q_1, q_2, \dots, q_m , 显然

$$q_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, m), \sum_{i=1}^m q_i = 1$$

若将本来属于总体 G_i 的样品错判为属于总体 G_j 时, 所造成的损失为 $c(j|i)$ 。显然有 $c(i|i)=0, c(j|i) \geq 0 (i=1, \dots, m; j=1, \dots, m)$ 。由于一个判别规则实际上就是对 P 维样品空间 Q_p 作一个划分: Q_1, Q_2, \dots, Q_m , 故可将判别规则简记为

$$Q=(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)。$$

根据规则 Q 进行判别, 若原来属于总体 G_i 的样品的取值落入了 Q_j 内, 就会将它错判为属于总体 G_j 。犯这种错误的概率为 p 重积分。所以, 在规则 Q 下, 将属于 G_i 的样品错判为 G_j 的概率为

$$P(j|i, Q) = \int_{R_j} f_i(X) dX \quad (i, j=1, 2, \dots, m; i \neq j) \quad (1)$$

由于这种错判造成的损失为 $C(j|i)$, 因而在规则 Q 下, 把属于总体 G_i 的样品错判为其他总体所造成的平均损失为:

$$r(i, Q) = \sum_{j \neq i} c(j|i) P(j|i, Q) \quad (2)$$

因 G_1, G_2, \dots, G_m 的先验概率分别为 q_1, q_2, \dots, q_m , 故根据规则 Q 进行判断时, 所造成的总平均损失为

$$\begin{aligned} g(Q) &= \sum q_i r(i, Q) \\ &= \sum_{i=1}^m q_i \sum_{j=1}^m c(j|i) P(j|i, Q) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中 q_i 和 $c(j|i)$ 均给定, 而 $P(j|i, Q)$ 可通过式(1)计算, 它依赖于划分 Q , 而这里的目的是要选定一个判别规则 Q , 使总平均损失 $g(Q)$ 达到最小, 即在式(3)最小的约束条件下, 得出判别规则 Q 。

对泥石流来说, 这个判规则 Q 就是判定泥石流发生与否的一种划分, 即泥石流的预报模型。

3 模型的建立

对于一条泥石流以当日降水量 $R=x_1$ 和前期降水量条件 $R_0=x_2$ 作为随机向量 X , 设“泥石流发生”为总体 G_1 , “泥石流不发生”为总体 G_2 , 并假设 G_1, G_2 均服从正态分布。泥石流误报即把属于总体 G_2 的样品错判属于总体 G_1 , 误报造成的损失为

$c(1|2)$; 泥石流漏报即把属于总体 G_1 的样品错判属于总体 G_2 , 漏报造成的损失为 $c(2|1)$ 。根据统计资料, 可估计 $G_1 \sim N_p(\mu_1, \Sigma)$ 和 $G_2 \sim N_p(\mu_2, \Sigma)$ (μ_1, μ_2 为 G_1, G_2 的均值, Σ 为方差)中的各参数。则式(3)的解为^[10]

$$\begin{cases} Q_1 = \{X: W(X) \geq d\} \\ Q_2 = \{X: W(X) < d\} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $W(X) = (X - \bar{\mu})' \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2)$;

$$\bar{\mu} = \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2); d = \ln \left(\frac{c(1|2) q_2}{c(2|1) q_1} \right)。$$

式(4)就是所求的泥石流预报模型, 同时可求出泥石流误报和漏报的概率为

$$p(2|1) = \Phi \left(\frac{d - \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{\lambda}} \right) \quad (5)$$

$$p(1|2) = 1 - \Phi \left(\frac{d + \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{\lambda}} \right) \quad (6)$$

式中 $p(x)$ 为 $N(0, 1)$ 的分布函数;

$$\lambda = (\mu_1 - \mu_2)' \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2)。$$

4 模型应用

蒋家沟位于云南省昆明市东川区, 是我国西南山区一条典型的暴雨泥石流沟。其流域面积 48.6 km^2 , 主沟长 13.9 km 。植被稀少, 崩塌、滑坡发育, 可移动固体物质储量极丰, 地形陡峻, 降雨充沛(年降雨量为 $700 \text{ mm} \sim 1200 \text{ mm}$), 并集中于雨季(6~9月)。据观测, 该沟平均每年发生泥石流 15 场左右, 最多一年达 28 场^①。中国科学院东川泥石流观测研究站设在此沟内, 该站长期对蒋家沟的降水、泥石流形成、泥石流运动和泥石流堆积进行科学观测和研究, 积累了大量 7 的观测资料。本文利用该站 1982~1984 年和 1994~2000 年雨季蒋家沟降水和泥石流观测资料为基础进行研究(表 1, 2)。降水资料来自马驿坪雨量观测点, 该雨量观测点位于流域上游泥石流形成区(图 1)。

根据表 1 和表 2 中的数据统计, 计算出 μ_1, μ_2, Σ 的估计值如下

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \begin{pmatrix} 25.48 \\ 25.92 \end{pmatrix} \\ \mu_2 &= \begin{pmatrix} 6.04 \\ 23.59 \end{pmatrix} \\ \hat{\Sigma} &= \begin{pmatrix} 143.55 & -7.77 \\ -7.77 & 216.38 \end{pmatrix} \end{aligned}$$



图1 蒋家沟流域观测设施分布示意图

Fig. 1 The distribution of debris flow observation equipments in Jiangjiagou.

根据表 1, 2 中泥石流发生的频率, 估计泥石流发生的先验概率 $q_1=0.16$, 泥石流不发生的先验概率为 $q_2=0.84$, 又令泥石流漏报造成的损失与泥石流误报造成的损失的比值为 k , 则

$$d=\ln\left(\frac{0.84}{0.16k}\right)=1.66-\ln k$$

那么, 据式 (4), 泥石流预报条件为

$$\left\{\begin{array}{l} \text{当 } 0.136x_1+0.016x_2-4.197\geqslant-\ln k, \\ \quad \text{泥石流发生} \\ \text{当 } 0.136x_1+0.016x_2-4.197<-\ln k, \\ \quad \text{泥石流不发生} \end{array}\right.$$

式中 x_1 为当日降水量, x_2 为前期降水量。
据式 (5) 和 (6), 可以进一步计算泥石流漏报和误报的概率

泥石流漏报的概率为

$$P(2|1)=\phi(0.19-0.61\ln k)$$

泥石流误报的概率为

$$P(1|2)=1-\phi(3.00-0.61\ln k)$$

k 值的确定依赖于当地的人口密度、经济水平及泥石流威胁的对象。根据这些资料估计出 k 值后, 我们就可以对蒋家沟的泥石流作出预报。

5 结论与建议

由于泥石流形成理论研究水平的限制, 目前暴雨型泥石流的预报主要建立在对降水资料经验统计基础上, 造成泥石流预报准确率较低。泥石流预报的不准确包括漏报和误报, 但漏报和误报造成的损失截然不同, 本模型充分考虑了这一因素, 在泥石流预报不准确造成的损失最小的条件下作出最佳预报。

由于受资料缺乏的限制, 本文仅采用了当日降水量和前期降水量两个指标, 如能考虑更多指标, 如最大十分钟雨强等, 漏报率和误报率将会降低。从模型中可以看出, 漏报和误报造成损失的比值 k 在模型中起到重要作用, 是决定漏报率和误报率的关键参数, 在模型的应用中应根据实际情况确定该值。

表 1 1982~1984 年蒋家沟降水(马驿坪雨量点)与泥石流统计表^[5]
Table 1 Rainfall of Mayiping rainfall station in Jiangjiagou from 1982 to 1984

日	1982—07		1982—08		1983—06		1983—07		1983—08		1984—07		1984—08	
	<i>R</i>	<i>R</i> ₀	<i>R</i>	<i>R</i> ₀	<i>R</i>	<i>R</i> ₀	<i>R</i>	<i>R</i> ₀	<i>R</i>	<i>R</i> ₀	<i>R</i>	<i>R</i> ₀	<i>R</i>	<i>R</i> ₀
1	2.4	4.0		32.0	0.1	4.0		14.6	12.2	64.7		4.8		11.7
2	34.0	5.1		25.6	0.4	3.3		11.7	19.1	61.6	4.8	3.8	0.2	9.4
3		31.3		20.5		2.9		9.4		64.5	7.0	6.9		7.7
4	25.0		16.4	13.5	2.4		7.5		51.6		11.1	18.3	6.2	
5	1.7	20.0		13.1	6.0	12.7		6.0		41.3		8.9	5.9	19.6
6	3.4	17.4	0.9	10.5	5.4	14.9		4.8	5.5	33.0	12.2	7.1	9.3	20.4
7	36.9	16.6		9.1	1.4	16.3	0.1	3.6		30.8	37.7	15.4	1.5	23.8
8	12.2	42.8		7.3	2.0	14.1		2.9		24.7	1.2	42.6	1.4	20.2
9	4.4	44.0	2.7	5.8	7.0	12.9	0.1	2.4		19.7		35.0	0.4	17.3
10	38.7	5.3	6.8		15.6	0.1	1.9		15.8		28.0	1.0	14.2	
11		31.0	2.1	9.7	1.7	12.7	0.1	1.7	7.7	12.6		22.4		12.2
12		24.8		9.4	18.8	11.6		1.4		16.3		17.9	6.8	9.6
13		19.8	2.1	7.5	2.9	24.3	0.3	1.2	29.3	13.0	0.7	14.3	16.8	13.3
14		15.8		7.7		21.7	58.2	1.0	0.2	33.8	21.5	12.0	7.1	24.1
15	0.1	12.6	2.1	6.2	0.3	17.4	6.2	47.4	9.4	27.2	8.2	26.8	3.1	25.0
16		10.3	1.1	6.6	2.1	14.2	0.4	42.9		29.3		28.0	0.1	22.5
17	8.2	8.2	10.1	6.2	7.8	13.0	1.2	34.6		23.4		22.4	0.4	18.1
18	12.4	13.1		13.0		16.6	0.1	28.6		18.8		17.9	4.0	14.8
19	8.0	20.4		10.4		13.3	0.6	23.0	9.6	15.0	3.5	14.3		15.0
20	1.4	22.7	0.6	8.3		10.7	0.2	18.9	5.1	19.7	0.3	14.2		12.0
21		19.3	4.2	7.1	0.3	8.5		15.3		19.8	0.1	11.6	0.5	9.6
22		15.4	2.3	9.0	63.7	7.1	2.8	12.2	16.5	15.9	0.0	9.4	0.1	8.1
23	0.1	12.3	0.1	9.0	0.1	56.5	17.7	12.0	0.1	25.9	8.6	7.5	0.1	6.6
24	31.0	9.9		7.3		45.4		23.8	36.4	20.8	0.1	12.9		5.4
25	0.3	32.7	11.8	5.8		36.3		19.0	10.0	45.8		10.4	1.0	4.3
26	0.2	26.4		14.1	6.0	29.0		15.2		44.6	30.0	8.3	1.3	4.2
27	0.1	21.3		11.3	4.9	28.0	0.5	12.2		35.7		30.6	0.2	4.4
28	35.1	17.1		9.0	2.2	26.3		10.1	25.5	28.5		24.5	64.3	3.7
29	20.7	41.8		7.2		22.8		8.1	12.4	43.2	3.2	19.6		54.4
30		50.0		5.8		18.3	0.3	6.5	10.1	44.5	0.1	18.2	21.6	60.8
31		40.0		4.6			75.5	5.4	2.9	43.7		14.6	0.1	48.7

表2 1994~2000年蒋家沟降水(马驿坪雨量点)与泥石流统计表¹⁾

Table 2 Rainfall of Mayiping rainfall station in Jiangjiagou from 1994 to 2000

	1994—06		1994—07		1994—08		1998—07		1998—08		1999—07		1999—08		2000—06		2000—07		2000—08	
日	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀
1	0.4	21.1	19	18.4	9.8	10.1	12.2	32.2		20	22.9	6.8	10.1	24.3		0.4		22.8	0	15.1
2	0.4	17.2		30		15.9	11.9	35.4	14.6	16	34	23.8	10.8	27.5		0.3		18.1	0.4	12.1
3		14.1	0.2	24	18.2	12.7	0.9	37.9	3.9	24.4	10.3	46.2		30.7		0.2		14.3	1.1	10
4	3.5	11.3	10.5	19.3	18.7	24.7		31	8.4	22.7		45.2	3.5	24.5		0.1	37.8	11.2	0.7	8.8
5	0.3	11.8	0.5	23.8	0.6	34.7	0.3	24.8	3.6	24.7	36.2	15.8	22.1			2.3	39.2	4.8	7.5	
6	0.2	9.7	3.6	19.1	13.9	28.2	28.1	20.1		22.5		28.9	10.7	30.1			5.1	33.2	2.1	9.8
7	6	7.9		17.6	0.1	33.7	4.7	38.6	26.9	18	0.3	23.1	3.9	32.6	13.9		9.9	30.6	21.8	9.5
8	17	11	25.1	14	0.4	27.1	0.5	34.6	3.6	35.7	43.1	18.7		29.2	5.3	11.1	10.8	32.4	17	25
9		22.4	16.1	31.2		21.7	46.7	28		31.5	5.4	49.5	4.5	23.3	11.5	13.1	6.1	34.6	23.8	33.5
10		18	0.8	37.8		17.4	2.1	59.7		25.1	0.3	43.9	25.9	22.3	24.6	19.7	1.2	32.4	0.3	45.9
11		14.3	21.2	30.8	0.6	13.8	22.1	49.4	2.3	20.1		35.4	5.5	38.5	17.4	35.4		26.4		36.9
12		11.5	0.9	41.4	9.2	11.5	0.1	57.1	12.6	17.9	1.5	28.3	2	35.2	12.4	42.3		21.1	0.6	29.5
13	8.2	9.1		33.8	3.6	16.5	6.6	45.7				23.8		29.6	26.5	43.7		16.8		24.1
14	3.8	13.9		27	17	15.9	0.1	41.7			5	18.8	0.5	23.4	4	56.2				
14	13.5	3.3	19.3																	
15	36.7	14.1	0.3	21.6	2.9	26.2	15.7	33.5			27.5	19	13.2	19.1		48.2	8.3	22	21	18
16	54.2	40.6	2.6	17.2	0.2	23.3	9.9	39.3			24.7	37.2	30.8	25.7		38.5	0.7	24.2	4.7	31.2
17	8.2	75.8		15.8		18.8	8.4	39.2			0.6	49.5	16.8	45.2		30.8	5.1	19.9	0.2	28.7
18	7.7	67.2		12.7		15	17.6	38.1			8.1	40.1	19.5	49.6		24.7	8.2	20.2	1.3	23
19	2.5	59.9	22.9	10.1	5.4	12	0.1	44.5				38.5	16.3	55.1	19.5	19.7	2.3	22.6	15.4	19.4
20	17.8	49.7	2.7	26.4	31.4	13.9	3.5	35.7			0.2	30.8	1.7	57.1	50.8	31.4	0.3	19.8		27.8
21	21.8	54	10.5	23.3	6.1	36.3		31.1			0.4	24.8	24.7	47.1	3	65.7	1.7	16		22.2
22	4.9	66.6	4.9	26.9				24.8			4	20.2	4.3	57.3	1.4	55	0.5	14.1	3.4	17.8
23	0.2	52.4	3.6	25.4				19.7			21.2	18.9		49.2		45.1	2.7	11.7	7.2	16.9
24		42.1	23.2	23.2			30.4	15.8			26	32	12.2	39.3		36.1	0.2	11.5		19.3
25	37.2	33.6	11.6	37		1.2	36.9		6.7	46.4	19.8	41.2		28.9	0.7	9	0.6	15.4		
26		56.7		38.9		2.6	30.5			13.7	42.5		48.7	2.2	23.1		7.8	8.8	12.8	
27		45.3		31.1		10.2	26.2			1.8	44.9		38.8	2.6	20.2	5.2	6.2	7	17.2	
28		36.2		24.9		1.2	29.1				37.4		31		18.1	15.7	9	12	19.2	
29		28.8	0.3	19.7		7	24.2			12.1	29.5	27.1	24.8	4	14.5	1	19.7	13.9	24.8	
30		23.1	0.2	15.8		5.4	24.6			1.4	33.2			14.1	14.7	6.7	16.5			
31				12.8		1.3	23.9			2.7	27.7					0.4	18.5			

1): 表中黑体表示该日发生泥石流。

参考文献:

[1] 谭万沛, 韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J]. 灾害学, 1992, 7(2): 37~42.

[2] 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.

[3] 谭万沛, 王成华, 姚令侃, 等. 暴雨泥石流和区域预测与预报[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.

[4] Cui P. Study on theoretical methods of forecasting debris flow. Internationals Symposium, Interprevent 1992 — Bem, Tagungspublication, Band 5[C]. 307~321.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 赵玲. 四川境内成昆铁路泥石流预测预报研究专家系统[J]. 山地研究, 1990, 8(2): 89~93.

[8] 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃交通科学研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982.

[9] 姚令侃. 用泥石流发生频率及暴雨频率推求临界雨量的探讨[J]. 水土保持学报, 1988, 2(4): 72~77.

[10] 涂汉生, 何平, 赵联文. 应用统计. 成都: 西南交通大学出版社, 1994.

Model of Debris Flow Forecasting Under Different Loss Factors

WEI Fang-qiang^{1,2}, HU Kai-heng², CUI Peng² and YANG Kun²

(1. College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041 China)

Abstract: Debris flow forecasting is one of the important methods of debris flow mitigation. However, the accuracy of debris flow forecasting is low because of the complexity of debris flow formation. Both the missing forecasting and misdeclaration will cause economic loss. But the loss from them is different. In order to decrease the loss from the missing forecasting and misdeclaration, the loss from them must be considered in the debris flow missing forecasting and misdeclaration, the model of debris flow forecasting under different loss factors is set up as follow based on the minimal principle of the loss.

$$\begin{cases} R_1 = \{X: W(X) \geq d\} \\ R_2 = \{X: W(X) < d\} \end{cases}$$

The probabilities of missing forecasting and misdeclaration are

$$p(2|1) = \Phi\left(\frac{d - \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{\lambda}}\right) \text{ and } p(1|2) = 1 - \Phi\left(\frac{d + \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{\lambda}}\right)$$

The model is applied in Jiangjiagou, a debris flow valley located in Donchuan, Yunnan Province.

Key words: debris flow, forecasting, loss factors