

基于 Bayes 判别分析法的密云县山洪泥石流预报模型

郑国强¹, 张洪江¹, 刘涛¹, 吴敬东², 侯旭峰², 叶芝茵²

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要: 针对密云水库上游密云县境内山洪泥石流灾害多发的特点, 首次将 Bayes 判别分析法原理运用于自然灾害的预测预报。运用系统科学和山洪泥石流预报原理, 对密云水库上游密云县境内影响山洪泥石流发生的系统内部要素和系统外部环境条件进行分析, 确定用影响山洪泥石流发生的前 15 d 的实效雨量和当日雨量作为预报模型因子, 并建立起一组山洪泥石流预报模型, 经自身验证法和交互验证法对模型进行检验, 其判断正确率均为 82.4%, 达到了 Bayes 判别分析要求的判别模型自身验证正确率 > 80% 的要求, 两种方法检验结果一致, 模型表现稳定, 表明所建立的模型可靠, 可以投入使用。研究结果可为该地区的山洪泥石流预测预报提供一种较为简单易行的方法, 为密云县山洪泥石流灾害防治提供一定的支撑, 以减少山洪泥石流发生所导致的灾害损失。

关键词: Bayes 判别分析; 山洪; 泥石流; 预报模型; 密云县

文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2009)01-0083-05 **中图分类号:** P642.23, U456.3+3

Prediction Model of Flush Flood and Debris Flow in Miyun County Based on Bayes Discriminatory Analysis

ZHENG Guo-qiang¹, ZHANG Hong-jiang¹, LIU Tao¹, WU Jing-dong², HOU Xu-feng², YE Zhi-han²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, and Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the MOE, Beijing 100083, China; 2. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: In view of the fact that flush flood and debris flow disasters occur frequently in the upper stream of Miyun reservoir, the theory of Bayes discriminatory analysis is firstly applied in predicting the natural disasters. System science and debris flow prediction theory are adopted to analyze internal elements and external environmental conditions of the system which influences the occurrence of flush flood and debris flow in the area. Accumulated precipitation of the preceding 15 days and intraday precipitation are introduced as model indexes and a set of prediction models is then established. By checking the model with oneself validation and cross validation, the accuracy for judging is 82.4%, which meets the requirement of Bayes discriminatory analysis that the accuracy of judged model should be more than 80%. Two validation results are consistent with each other and the model is stable. Therefore, the established model is credible and can be put into practical use. The research offers a simple and quick way for predicting flush flood and debris flow in the area and provide a support for the prevention and control of flush flood and debris flow in Miyun County, so as to reduce the loss caused by the two types of disaster.

Keywords: Bayes discriminatory analysis; flush flood; debris flow; prediction model; Miyun County

山洪泥石流预报是防止其危害的重要途径之一, 由于人们对山洪泥石流形成机理及其影响因素还未从根本上认识和掌握, 所以山洪泥石流预报一直是山洪泥石流研究的难点之一。鉴于对山洪泥石流形成机理研究的深度, 目前山洪泥石流预报多依赖于激发山洪泥石流的动力统计结果^[1]。国内外对于山洪泥石流预报模型的研究已有很多^[2-13], 预报方法可以概

括为: 临界雨量阈值判别法、临界径流量水深测量法以及神经网络预测法等, 且主要集中在建立影响山洪泥石流发生的雨量与雨强的关系上。

Bayes 判别分析法作为多元统计的一种分析方法, 目前的应用主要集中在对地震预测^[14]以及安全评价^[15]方面, 而将其应用于自然灾害的预测尚未见报道。本研究针对密云水库上游密云县境内山洪泥

收稿日期: 2008-10-01

修回日期: 2008-12-05

资助项目: 北京市科技计划项目“密云水库流域水土流失综合防治体系及示范推广研究”(D0704004000091)

作者简介: 郑国强(1955—), 男(东乡族), 青海省化隆县人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。E-mail: zgqb1005@163.com。

通信作者: 张洪江(1984—), 男(汉族), 河北省易县人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土壤侵蚀和流域管理。E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn。

石流灾害多发的特点,应用 Bayes 判别分析法建立密云县境内山洪泥石流预报模型,实现研究区山洪泥石流的区域性预测预报,从而为密云县山洪泥石流灾害防治提供一定的基础,以减少山洪泥石流发生所导致的灾害和损失,也为山洪泥石流预报模型的建立提出一种简单易行的新方法。

1 研究区概况

密云县地处北京市东北部,地理坐标为东经 116°39′—117°35′,北纬 40°13′—40°48′。全县属燕山山脉中段,三面环山,东西两侧高。主要河流水系为潮河水系和白河水系。地质基岩主要有花岗岩、片麻岩、石灰岩等,北部山区主要分布片麻岩、花岗岩,风化比较严重,东北部山区分布火山岩、片麻岩等,东南部山区分布沉积岩、石灰岩、片麻岩,西南部丘陵是火山岩丘陵区。植被主要是针阔混交林森林植被带,以天然次生林为主。属暖温带半湿润季风型大陆性气候,年平均气温 10℃,年平均降雨量为 660 mm,且降雨主要集中在 6—9 月,并以暴雨形式出现,为山洪泥石流发生提供了动力条件。

区内经济条件较差,生产水平低下,由于特殊地形、地质和气象条件,加之过度垦殖和部分森林被砍伐和过度放牧,植被破坏严重,使水土流失严重,加剧滑坡和塌方,也加大了山洪泥石流发生的频率和灾害程度^[16]。

2 Bayes 判别分析法基本原理

2.1 判别分析法概述

判别分析(discriminatory analysis)是判别、预测样品所属类型的一种多元统计方法,是在已知的分类之下,遇有新的样本时,利用此法建立判别函数,选定一个判别标准,以判定该新样品应放置于哪一类型中^[17]。判别函数的一般形式为:

$$Y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (1)$$

式中: Y ——判别指标,根据不同的方法,可能是概率,也可能是坐标值或分值; x_1, x_2, \dots, x_n ——反映研究对象特征的变量; a_1, a_2, \dots, a_n ——各变量系数,称判别系数。

在进行数据判别分析时,首先根据已知观测量分类和表明观测量特征的变量值,推导出判别函数,然后将各观测量的自变量值回代到判别函数中,根据判别函数对观测量所属类别进行判别,与原始判别进行比较,从而确定其判别函数的正确率。

在对新观测量进行判别时,把各观测量的值代入到判别函数中,得出判别函数值(或判别分数),根据一定的判别准则,从而确定新观测样本属于哪一类,

实现分类与预测。

最常用的判别方法有距离判别法, Fisher 判别法, Bayes 判别法和逐步判别法。本研究运用 Bayes 判别法建立研究区山洪泥石流预报模型。

2.2 Bayes 判别分析法

使用贝叶斯(Bayes)方法进行判别,是充分利用各类别的先验信息,认为所有 P 个类别都是空间中互斥的子域,每个观测值都是空间的一个点。在考虑先验概率的前提下,利用 Bayes 公式按照一定准则构造一个判别函数,分别计算该样品落入各个子域的概率,所有概率中最大的一类就被认为是该样品所属的类别。

Bayes 判别函数的一般形式为:

$$f(j/x) = \ln q_j + C_{0(j)} + C_{j(i)} x_i \quad (2)$$

式中: $q_j = n_j/n$; $C_{0(j)} = - (1/2) (\mu_{(j)})^T \Sigma_{(j)}^{-1} \mu_{(j)}$; $C_{j(i)} = \Sigma_{(j)}^{-1} \mu_{(j)}$; q_j ——先验概率; n ——总体样本数; n_j ——第 j 个总体的样本数; $\mu_{(j)}$ ——第 j 个总体的均值向量; $\Sigma_{(j)}$ ——第 j 个总体协方差矩阵。

采用 Bayes 判别分析法进行建模时,一般要满足以下 2 个条件:

(1) 建模时,要求样本数量为变量数的 8~10 倍,所建立的模型可靠性较高;

(2) 如果模型回判验证的正确率 > 80% 时,模型即可投入使用。

若有某观察对象,把实际测得各类样本指标 x_i 值代入公式(2),可求得各类的 f 值,哪类样本 f 值最大,就判断其归属哪一类样本^[18],从而实现新观测样本的分类与预测。

3 山洪泥石流预报模型建立

山洪泥石流预报模型建立过程主要包括 3 部分,即模型因子选择、模型建立和模型检验。

3.1 模型因子选择

将一个地区的山洪泥石流发生作为一个系统考虑,综合考虑其系统内部要素和系统外部环境条件。系统内部要素主要有地形(沟床比降、流域面积和坡面坡度)、松散堆积物(松散堆积物数量和堆积的部位)、植被(种类、盖度和覆盖率)、土壤(种类及其厚度)、地质(岩石种类、岩石走向和岩石倾角)和水土流失情况(形式、发生可能性大小、可能发生部位和可能发生数量)等。通过对密云县境内典型山洪泥石流流域的调查分析,其流域系统特征值如表 1 所示。

根据山洪泥石流预报的判别因素综合简化原理,避开山洪泥石流形成机理大量地学因素的复杂性^[19]。因研究区在北京市密云县境内,其气象条件基本一致,而地质、地形、土壤和植被等与山洪泥石流

发生有关的因素相差较小,也可以认为是一致的,所以在建立山洪泥石流预报模型时,只考虑与降雨有关的少数因子,即将影响密云县山洪泥石流发生的外部环境条件作为模型判别因子,作为动态定量关系进行预报模型建立。

以往山洪泥石流预报模型的建立,主要是利用降雨量和降雨强度因子,通过建立二者的函数关系进行预测预报,本模型建立中直接将搜集到的降雨量作为模型判别因子,只需对降雨量进行实时观测,就能实现山洪泥石流的实时预测预报。

表 1 密云县泥石流流域系统内部要素特征值

系统内部要素	沟床比降/ ‰	相对切割 程度/ %	流域面积/ km ²	坡面平均 坡度/ (°)	植被平均 覆盖度/ %	基岩类型	土壤类型
特征值	50 ~ 250	40 ~ 250	0.3 ~ 15.24	30	44	花岗岩、片麻岩	山地褐土、淋溶褐土

山洪泥石流的发生,不仅仅是激发当次山洪泥石流降雨的作用,其前期降雨也直接影响到山洪泥石流发生前的土壤含水量,从而间接影响到当次雨量能否激发山洪泥石流发生。由于前期土壤含水量大面积测定较为困难,往往利用前期降雨量进行折算,来间接反映前期土壤含水量的多少。根据北京纬度和汛期日照、蒸发、植被状况、相对湿度以及土壤特性,采用公式(3)计算前期(在此选择 15 d)降雨对当次山洪泥石流发生的影响程度,称其为实效雨量(x_1)^[20]:

$$x_1 = \sum_{t=1}^{15} R_t (K)^t \quad (3)$$

式中: x_1 ——实效雨量; K ——衰减系数,其值随着日数的前推越来越小。即经过径流蒸发、渗漏、植物吸收等过程后,残留在土壤里的雨量,随着时间的推移就越来越少(根据北京的纬度和汛期的日照、蒸发、径流、土壤渗透能力等因素确定),在此取 $K = 0.8$; t ——降雨日数,取 $t = 1, 2, \dots, 15$ d; R_t ——山洪泥石流发生前第 t 日的降雨量。

根据所确立的模型因子和基于 Bayes 判别分析所要求的基础数据,对研究区有记载^[20]的山洪泥石流降雨资料进行整理分析(表 2)。

3.2 模型建立

利用上述 Bayes 判别分析法的基本原理,借助 SPSS 15.0 数据分析系统中的判别分析(discriminant)进行数据分析,得到一组密云县山洪泥石流预报模型:

$$f_1 = -11.969 + 0.056x_1 + 0.115x_2 \quad (4)$$

$$f_2 = -3.79 + 0.03x_1 + 0.061x_2 \quad (5)$$

式中: f_1, f_2 ——分别为判别模型的函数值; x_1 ——前 15 d 实效雨量; x_2 ——当日雨量。

其判别规则为:如果 $f_1 > f_2$ 时,判定该地区发生山洪泥石流,记为“y”;如果 $f_1 < f_2$ 时,判定该地区不发生山洪泥石流,记为“n”。

表 2 模型因子相关降雨量分析

样本 数量/个	沟道 情况	前 15 d 实效雨量 x_1 / mm	当日雨量 x_2 / mm
1	y	21.53	108.30
2	y	19.52	123.80
3	y	80.80	153.30
4	y	3.80	179.00
5	y	80.37	158.30
6	y	33.76	179.00
7	y	25.98	226.30
8	y	32.14	236.50
9	y	49.04	116.50
10	y	34.16	130.00
11	y	62.91	193.50
12	y	30.89	237.00
13	y	33.25	128.80
14	y	88.03	277.20
15	y	93.57	169.70
16	y	68.51	133.90
17	n	17.10	74.10
18	n	60.72	114.00
19	n	11.20	119.80
20	n	74.21	86.80
21	n	5.64	86.80
22	n	10.22	105.40
23	n	14.69	105.50
24	n	28.78	141.70
25	n	16.92	79.50
26	n	16.18	73.40
27	n	16.77	71.00
28	n	29.17	49.00
29	n	39.64	88.80
30	n	5.10	82.60
31	n	3.12	82.80
32	n	20.59	78.60
33	n	58.15	96.40
34	n	24.38	104.90

注:y 表示发生山洪泥石流;n 表示未发生山洪泥石流。

3.3 模型检验

对于判别分析,研究者最关心的是所建立的判别函数,在进行应用判别时的准确程度如何,常用的验证方法有自身验证法、外部数据验证法、样本二分法和交互验证法等^[17]。在本研究中,运用自身验证法和交互验证法两种方法同时对所建立的山洪泥石流预报模型进行检验。

3.3.1 自身验证法 将建立判别模型的原始数据代入已建立好的判别模型(公式 4—5),得到一组判别

模型函数值 f_1 和 f_2 ,根据判别规则进行判别,与原始的判别结果进行比较,可以得出模型判断的正确率,其验证结果如表 3 所示。

经自身验证法检验预报模型结果(表 3)可以看出,对于 16 场有山洪泥石流发生的降雨,经所建立山洪泥石流预报模型预报,出现了 5 个错误,预报模型的正确率为 68.8%。而对于 18 场未发生山洪泥石流的降雨,经所建立的山洪泥石流预报模型预报,出现了 1 个错误的预报,其正确率为 94.4%。

表 3 模型数据自身验证结果

样本序号	原类别	前 15 d 实效雨量	当日雨量	判别模型函数值	判别模型函数值	回判结果
		x_1	x_2	f_1	f_2	如果: $f_1 > f_2$,则“y” 如果: $f_1 < f_2$,则“n”
1	y	21.53	108.30	1.691 2	3.462 2	n
2	y	19.52	123.80	3.361 1	4.347 4	n
3	y	80.80	153.30	10.185 3	7.985 3	y
4	y	3.80	179.00	8.828 8	7.243 0	y
5	y	80.37	158.30	10.736 2	8.277 4	y
6	y	33.76	179.00	10.506 6	8.141 8	y
7	y	25.98	226.30	15.510 4	10.793 7	y
8	y	32.14	236.50	17.028 3	11.600 7	y
9	y	49.04	116.50	4.174 7	4.787 7	n
10	y	34.16	130.00	4.894 0	5.164 8	n
11	y	62.91	193.50	13.806 5	9.900 8	y
12	y	30.89	237.00	17.015 8	11.593 7	y
13	y	33.25	128.80	4.705 0	5.064 3	n
14	y	88.03	277.20	24.838 7	15.760 1	y
15	y	93.57	169.70	12.786 4	9.368 8	y
16	y	68.51	133.90	7.266 1	6.433 2	y
17	n	17.10	74.10	- 2.489 9	1.243 1	n
18	n	60.72	114.00	4.541 3	4.985 6	n
19	n	11.20	119.80	2.435 2	3.853 8	n
20	n	74.21	86.80	2.168 8	3.731 1	n
21	n	5.64	86.80	- 1.671 2	1.674 0	n
22	n	10.22	105.40	0.724 3	2.946 0	n
23	n	14.69	105.50	0.986 1	3.086 2	n
24	n	28.78	141.70	5.938 2	5.717 1	y
25	n	16.92	79.5	- 1.879 0	1.567 1	n
26	n	16.18	73.40	- 2.621 9	1.172 8	n
27	n	16.77	71.00	- 2.864 9	1.044 1	n
28	n	29.17	49.00	- 4.700 5	0.074 1	n
29	n	39.64	88.80	0.462 8	2.816 0	n
30	n	5.10	82.60	- 2.184 4	1.401 6	n
31	n	3.12	82.80	- 2.272 3	1.354 4	n
32	n	20.59	78.60	- 1.777 0	1.622 3	n
33	n	58.15	96.40	2.373 4	3.834 9	n
34	n	24.38	104.90	1.459 8	3.340 3	n

注: 表示错判。

因此,所建立的山洪泥石流预报模型总的预报正确率为 82.4%,满足了 Bayes 判别分析所要求的自身验证正确率 > 80% 的要求,因此可以说,所建立的山洪泥石流预报模型是可以应用的。

3.3.2 交互验证法 交互验证(cross-validation)是近年来逐渐发展起来的一种重要的判别效果验证方法。若采用交互验证法和自身验证法检验的结果相同,模型较稳定,用这种方法可以非常有效地避免强影响点的干扰。经交互验证(表 4)可以看出,已建立的山洪泥石流预报模型在 16 场有山洪泥石流发生的

降雨中,将 11 场发生山洪泥石流的降雨过程预报为“发生”,将 5 场发生山洪泥石流的降雨过程预报为“不发生”,其错报率为 31.3%;而在 18 场未发生山洪泥石流的降雨中,将 17 场未发生山洪泥石流的降雨过程预报为“不发生”,将 1 场未发生山洪泥石流的降雨过程预报为“发生”,其错报率为 5.6%。

总的来说,模型总体的预报正确率为 82.4%,其预报结果与自身验证法得到的检验正确率一致。因此可以说明该模型较为稳定,其可行性较强,可以投入使用。

表 4 自身验证与交互验证结果对比

验证类别		预测结果		总计	
		发生山洪泥石流	未发生山洪泥石流		
自身验证	样本数目	发生山洪泥石流	11	5	16
		未发生山洪泥石流	1	17	18
	预测结果所占比例/%	发生山洪泥石流	68.8	31.3	100.0
		未发生山洪泥石流	5.6	94.4	100.0
交互验证	样本数目	发生山洪泥石流	11	5	16
		未发生山洪泥石流	1	17	18
	判别结果所占比例/%	发生山洪泥石流	68.8	31.3	100.0
		未发生山洪泥石流	5.6	94.4	100.0

4 结论

(1) 运用系统科学对密云水库上游密云县境内山洪泥石流发生系统内部要素和系统外部环境条件分析,以及避开山洪泥石流形成机理大量地学因素复杂性的判别因素综合简化原理,对已有密云水库上游密云县境内山洪泥石流记载的降雨资料的系统分析,确立将影响山洪泥石流发生的前 15 d 实效雨量(x_1)和当日雨量(x_2)作为预报模型因子。本研究首次将多元统计中的 Bayes 判别分析原理运用于自然灾害的预测方面,经模型因子 Bayes 判别统计分析,得到山洪泥石流预报模型,并根据 Bayes 判别分析的判别规则,可以直接实现密云水库上游密云县境内山洪泥石流的预报。

(2) 经自身验证,山洪泥石流预报模型的正确率为 82.4%,达到了 Bayes 判别分析要求的判别函数自身验证正确率 > 80% 的要求,且经交互验证预报模型的正确率也达到了 82.4%,二者结果一致,模型稳定,因此预报模型可以投入使用。

(3) 所建立的预报模型操作简单,只需将某一天的降雨量作为当日雨量(x_2)进行实时的观测,而其前 15 d 实效雨量(x_1)可以通过持续的观测提前得到,可以认为是个确定值,因此减少了山洪泥石流预报模型

所需的观测量,使其可用性得到了大大的提高。

(4) 模型建立所收集到的降雨资料,只是密云县境内仅有的几个雨量观测站的资料,缺乏针对每个山洪泥石流流域的降雨资料,模型只能实现区域性的预测预报,难以对具体沟道的山洪泥石流发生与否准确预报,使预测预报的精度有所降低。因此,在今后降雨量观测的过程中,应该在不同类型的沟道进行雨量观测站的建设,以获得单沟山洪泥石流预测预报所需要的数据,从而提高密云县山洪泥石流单沟预测预报的准确度,最大限度地地为山洪泥石流灾害防治提供支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 铁道科学研究院铁道建筑研究所. 国内外泥石流预报警报系统研制概述[J]. 水土保持通报, 1989, 6(3): 34-38.
- [4] 棚桥由彦. 土石流の事例解析と发生预测法の试案[J]. 新砂防, 1989, 41(5): 3-13.
- [5] 石川芳治. 降雨量を用いた土石流の警戒避难基准[J]. 新砂防, 1990, 43(2): 40-47.

(下转第 107 页)

- [3] 王葆芳,杨晓晖,江泽平.引黄灌区水资源利用与土壤盐渍化防治[J].干旱区研究,2004,21(2):139-143.
- [4] 王嵩,冯平,李建柱.地下水生态环境控制指标问题的研究现状[J].干旱区资源与环境,2005,19(4):98-103.
- [5] 张长春,邵景力,李慈君,等.内陆干旱半干旱盆地地下水生态环境指标研究[J].湘潭矿业学院学报,2003,18(1):24-27.
- [6] 《洛惠渠志》编纂委员会.洛惠渠志[M].陕西:陕西人民出版社,1995.
- [7] 张霞,李占斌,李鹏.洛惠渠灌区地下水动态变化规律研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(8):223-226.
- [8] 汪林,甘泓,汪珊,等.宁夏引黄灌区水盐循环演化与调控[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [9] 陈梦熊,马凤山.中国地下水资源与环境[M].北京:地震出版社,2002.
- [10] 戴长雷,迟宝明.地下水监测研究进展[J].水土保持研究,2005,12(2):86-88.
- [11] 朱学愚,钱孝星.地下水水文学[M].北京:中国环境科学出版社,2005.
- [12] Yamamoto S, Haruta T, Endo T. Topographic Sequence of Soil in Luohui Irrigation Scheme, China[C]// Core University Program Japan-China Joint Open Seminar on Combating Desertification and Development in Inland China. Shaanxi, Yangling: Combating Desertification and Development in Inland China of Year 2005, 2005:32-34.
- [13] 张展羽,郭相平,詹红丽,等.微咸水灌溉条件下土壤和地下水含盐量空间变异分析[J].灌溉排水,2001,20(3):6-9.
- [14] 王全九,王文焰,汪志荣,等.排水地段土壤盐分变化特征分析[J].土壤学报,2001,38(2):271-276.
- [15] 吐马尔白,马英杰.克孜勒苏地区水盐监测与分析[J].灌溉排水学报,2005,24(3):47-49.
- [16] 韩双平,荆继红,孙继朝.银川北部平原土壤水分运动状态类型及水盐运移机理研究[J].农业环境科学学报,2005,24(4):148-152.

(上接第87页)

- [6] 崔鹏,高克昌,韦方强.泥石流预测预报研究进展[J].中国科学院院刊,2005,20(5):363-369.
- [7] 陈景武.蒋家沟暴雨泥石流预报研究[M]//吴积善,康志成,田连权.云南蒋家沟泥石流观测研究.北京:科学出版社,1990:197-213.
- [8] 陈景武.降雨预报泥石流原理及方法[C]//第二届全国泥石流学术会议论文集.北京:科学出版社,1991:84-89.
- [9] 谭万沛.八步里沟降雨的垂直分布特征与泥石流预报的雨量指标[J].四川气象,1988,8(2):25-28.
- [10] 谭万沛.泥石流沟的临界雨量线分布特征[J].水土保持通报,1989,9(6):21-26.
- [12] 周金星.山洪及泥石流灾害预警技术研究[D].北京:北京林业大学,2001.
- [13] 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.
- [14] 王晓青,石绍先,丁香. Bayes 判别分析法与地震短临预测[J].地震,1999,19(1):33-40.
- [15] 雷兢,沈斐敏.贝叶斯(Bayes)判别分析理论在安全评价中的应用[J].工业安全与环保,2004,30(5):39-40.
- [16] 吴正华.北京泥石流灾害及其降水触发条件[J].水土保持研究,2001,8(1):67-72.
- [17] 张文彤.SPSS 11.0 统计分析教程(高级篇)[M].北京:北京希望电子出版社,2002:178-180.
- [18] 袁志发,周静芋.多元统计分析[M].北京:科学出版社,2002:230-235.
- [19] 谭万沛.中国暴雨泥石流预报研究基本理论与现状[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):88-95.
- [20] 王礼先,于志民.山洪及泥石流灾害预报[M].北京:中国林业出版社,2001:121-175.