

中国泥石流监测预报研究现状与展望

崔 鹏, 刘世建, 谭万沛

(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: 论述了中国泥石流监测预报研究已取得的成就, 分析了目前泥石流监测预报中存在的问题, 提出了泥石流灾害监测预报系统的结构模型。

关键词: 泥石流; 灾害; 预测预报; 服务系统; 监测

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

Progress of debris flow forecast in China

CUI Peng, LIU Shi-jian, TAN Wan-pei

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

Abstract: Debris flows often occur in the mountain areas over 2/3 territory of China, especially in the areas around Qinghai-Xizang(Tibet) plateau, Qinling Mountains, Taihang Mountains and Yianshan Mountains. China seriously suffers from debris flows that cause a loss of 2 billion RMB yuan and kill 300 ~ 600 people a year. China has devoted into debris flow research and disaster mitigation a lot.

Key words: debris flow; disaster; prediction and forecast; service system; monitor

在约占中国国土 2/3 的山区都有泥石流活动, 其中尤以青藏高原周边山地、秦岭山脉、太行山区、燕山山脉等地最为严重。中国是受泥石流危害最为严重的国家之一, 每年由泥石流造成的直接经济损失达 20 亿元, 死亡 300~600 人。中国政府十分重视泥石流的研究与减灾, 投入了大量资金和专门人员从事这一工作。在泥石流综合减灾技术, 特别是泥石流预测预报方面取得了许多成功的经验。

1 中国泥石流监测预报研究现状

在中国, 泥石流多由暴雨激发。其研究也以降雨泥石流预报为主。

中国从 60 年代就开始重视泥石流的流监测预报, 对泥石流形成的基本条件进行了系统研究, 提出了泥石流预报时间尺度和泥石流发生的判别依据, 开展了泥石流监测观测并建立了泥石流发生的判

收稿日期: 1999-08-30

基金项目: 中国科学院资源环境研究重大项目 B(KZ951-B1-202)

作者简介: 崔鹏(1957-), 男, 陕西长安人, 研究员, 博士, 主要从事山地灾害、自然地理和岩土工程研究。

别模式。在上述理论研究的基础上，还研制了一系列泥石流监测和预报仪器，它们在泥石流减灾中发挥了巨大作用。

1.1 泥石流监测预报的时间尺度

泥石流预报的时间尺度是泥石流预报的核心。从泥石流发生条件方面考虑，我们把泥石流的预报时间尺度同水文气象部门的天气预报尺度相联系，以基本要素的信息变化作为依据，把泥石流预报分为长期预报、中期预报、短期预报和临警报 4 大类 12 种（见表 1）^[1]。长期预报是数月到数年的趋势预测，一般不大引起人们重视。中期预报分季、月、旬、候几种尺度，主要依据气象部门对天气气候的相同尺度预报信息，属于险情预报，可以在较大范围内提醒人们提前做好防灾工作，得到地方政府的重视。短期预报指数小时到 3 天内的预报，是以气象部门的短期天气过程持续时间、雨团活动和重要天气消息为依据，属防灾预报，广大群众非常关心。短期临报指零小时到数小时内的预报，是依据每小时的雨量图、雨势情报、危险前兆、监测仪器制定依据，属临灾预警，对城镇、工矿和交通运输部门的泥石流临灾避难与救助有重要意义。

表 1 降雨泥石流预报的时间尺度分类
Table 1 Time scale of rainstorm debris flow forecast

预报分类	预报类型	预报形式	预报对象	预报的主要信息依据
背景预测 (长期预报)	超长期(10a)	远期趋势预测	省、地、市、州	气候长期变化规律,地震活动韵律,太阳活动规律。
	长期(1~10a)	长期趋势预测	省、地、市、州	气候与环境演变趋势,地震活动长期趋势。
	中长期(3~12月)	当年趋势预测	省、地、市、州	气候年报,环境演变过程趋势,地震活动中期趋势。
预案预报 (中期预报)	长中期(1~3月)	近期险情预报	地、市、州、县	气候与气象季、月预报,降雨规律,地震活动中期趋势。
	中期(10~30d)	中期险情预测	地、市、州、县	气候和天气过程月、旬预报,地震活动短期预报
	短中期(3~10d)	短期险情预报	地、市、州、县	气候和天气过程旬、周预报,天气自然周期,地震活动短期预报。
判定预测 (短期预报)	中短期(1~3d)	近期防灾预报	县、乡、镇、村	天气过程持续时间预报,地震临震前预报。
	短期(12~24h)	短期防灾预报	县、乡、镇、村	每日定时天气预报和重要天气消息,重要预报、报警,地震临震警报。
	超短期(6~12h)	临近防灾预报	县、乡、镇、村	每小时天气图和卫星云图,气象警报,水文情报,地震发震警报。
确定预报 (临警报)	短临报(3~6h)	短期灾情警报	机关、群众、村民	每小时雨量实况图,灾情、雨势监测情报。
	临报(1~3h)	临近灾情警报	机关、群众、村民	雨量监测网,雨强临界状态,危险前兆判定信息。
	警报(0~1h)	紧急灾情警报	机关、群众、村民	警戒警报仪器监测信息,灾情判定信息。

1.2 泥石流预测预报模型

中国学者非常重视资料的积累和原型观测。从 1961 年起，先后在云南东川蒋家沟、西藏波密古乡沟和加马其美沟、甘肃武都火烧沟、四川西昌黑沙河和攀枝花三滩沟等进行泥石流及其降雨条件观测，其中蒋家沟的观测延续至今。在这些长系列观测数据基础上，提出了一系列泥石流预报模型。如蒋家沟模型^[2]：

$$R_{10}=5.5-0.098(P_a+R_i)>0.5\text{mm(临界线)}$$
 (1)

$$R_{10}=6.9-0.123(P_a+R_i)>1.0\text{mm(暴发线)}$$
 (2)

式中： R_{10} 为 10min 降雨量（mm）； R_i 为泥石流发生时刻前的当日降雨量（mm）； P_a 为泥石流发生前 20d 内的有效降雨量， $P_a=\sum_{i=1}^{20}R_i(K)$ ， K 为递减系数，取为 0.8， $i=1,2,\cdots,20$ ， R_i 为泥石流发生前 i 天降雨量。该式预报提前时间为 17 ~ 20min，报准率为 86%，错报 3%，漏报为 11%。

由成（都）昆（明）铁路甘洛试验区 64 次观测资料确定的泥石流形成降雨量组合指标为^[3]

$$R=K(\frac{H_{24}}{H_{24}(D)}+\frac{H_1}{H_1(D)}+\frac{H_{1/6}}{H_{1/6}(D)})$$
 (3)

式中： R 为降雨综合指标； K 为前期降雨修正系数， $K\geq 1$ ，在甘洛试验区 $K=1$ ； H_{24} ， H_1 ， $H_{1/6}$ 分别为 24h，1h 和 10min 最大降雨量（mm）； $H_{24}(D)$ ， $H_1(D)$ 和 $H_{1/6}(D)$ 分别为 24h，1h 和 10min 单因子临界雨量阈值，随沟谷和地区而不同，在甘洛试验区，它们分别为 60mm，20mm 和 10mm。

当 $R < 2.8$ 时, 不会发生泥石流;
 $R \geq 3.6$ 时, 发生泥石流的几率约占 85%;
 $R = 2.8 \sim 3.6$ 时, 有可能发生泥石流。

1.3 泥石流激发因素判别指标

泥石流预报分单沟预报和区域预报。单沟泥石流预报的判别指标通过观测确定; 区域泥石流预报判别指标须根据泥石流形成的区域环境背景条件和降雨条件综合判定。表 2 为单沟泥石流发生的雨量指标, 表 3^[7] 和表 4^[8] 为区域泥石流发生的雨量指标。

表 2 单沟泥石流发生临界雨量阈值

Table 2 Critical rainfall of debris flow occurrence in a single ravine mm

沟 名	10min 雨量	30min 雨量	1h 雨量	24h 雨量	文献
武都火烧沟	8 ~ 10	20			[4]
天山阿拉沟	20	20			[5]
东川大桥河			20 ~ 30		[6]
黑水芦花沟	15		30	30	*

* 谭万沛. 川滇西部山区城镇泥石流的危害及其防治对策, 山地世界 1987, (7).

表 3 四川地区泥石流发生临界雨量阈值

Table 3 Critical rainfall of debris occurrence in Sichuan Province mm

地区	大雪山区	雀儿山区	凉山地区	龙门山区	大巴山区	华蓥山区	盆中山区	七曜山区
日雨量	25 ~ 35	30 ~ 50	50 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 140	140 ~ 180	150 ~ 200	180 ~ 200
小时雨量	15 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	30 ~ 50	30 ~ 50	50 ~ 60	≥ 60	≥ 60

表 4 中国山区灾害性降雨泥石流发生临界雨量阈值 (mm)

Table 4 Critical rainfall of rainstorm debris flow occurrence in the mountain areas in China mm

地区	天山山脉区	祁连山、西倾山区	冈底斯山区	念青唐古拉山、沙鲁里山区	陇南、岷山区	高黎贡山、哀牢山区	屈吴山区	贺兰山区	六盘山区	吕梁山、火焰山区	大巴山区、秦岭山区
日雨量	25~50	25~200	25~50	30~100	35~300	50~200	50~200	100~300	100~300	100~300	100~300
小时雨量	20	20	20	25	30	30	30	30	30	40	40

地区	大兴安岭山区	小兴安岭山区	龙岗山区、千山	北老图山、太行山区	五台山、中条山区	大娄山区	大别山、武当山区	雪峰山、幕阜山区	武夷山、阿里山、海南山区	泰山、崂山区
日雨量	100~200	200~300	200~300	100 ~ 300	100~300	100~300	100~300	150~300	200~300	200~300
小时雨量	40	40	50	50	50	50	50	50	60	60

1.4 泥石流监测报警器

为满足对泥石流临灾警报的需求, 铁道部门和中国科学院分别研制了一系列泥石流监测报警及其传感器。

接触型泥石流警报传感器^[9]: 其工作原理是, 通过量测传感器 (安装在泥石流断面侧壁的盆形凹槽里) 被泥石流流体淹没之前的高电位 V_{k0} , 和传感器被泥石流流体淹没后沟通的电流从变压器流经限流电阻、传感器、泥石流流体、接地极又回到变压器的回路电压 V_{ky} ($V_{ky} < V_{k0}$), 借助于 V_{ky} 与 V_{k0} 的显著差异, 来判别传感器是否被淹没, 从而确定和发报泥石流是否发生及发生的规模。

超声波泥位报警^[2]: 考虑到泥石流流深能直观地反映泥石流规模大小和可能危害的程度, 利用回声测距的原理, 测得传感器断面的泥石流流深 h_2 ,

$$h_2 = \left(\frac{n_{c2} I_1^{1/2} b_1}{n_{c1} I_2^{1/2} b_2} \right)^{3/5} \cdot h_1 \quad (4)$$

式中, h_1 和 h_2 分别为上下两个断面的泥石流流深, n_{c1} 和 n_{c2} 分别为上下两个断面的泥石流糙率密系数, b_1 和 b_2 分别为上下两个断面宽度, I_1 和 I_2 分别为上下游断面的沟床纵比降。

泥石流预报时间, 即由发报到泥石流到达下游断面的时间, 由下式确定:

$$T = S/V \quad (5)$$

式中, T 为预报时间, S 为两断面间的距离, V 为泥石流流速。

根据这一原理研制的 DFT-3 型遥测超声波泥位报警器于 1985~1986 年在云南东川蒋家沟内安

装,共测到14次泥石流,并成功报警。

遥测地声警报^[2]:泥石流运动过程中摩擦、撞击沟床和岸壁而产生振动,并沿沟床方向传递,称之为泥石流地声。其信号具有一狭窄的频率范围,且其卓越频率较其它频率成分(环境噪声)至少高出20分贝。另外,地声信号的强度与泥石流规模成正比。利用泥石流地声的这些特点,即可通过信号接收与转换,对泥石流实施报警。报警装置自收到泥石流地声信号开始报警,泥石流停歇,信号消失,因而从原理上消除了错报、漏报的可能。根据这一原理研制的NJ-2型遥测地声警报器于1985年间在蒋家沟试用,测报13场泥石流,成功报警12场(一场因传感器故障而未完成测报)。

此外,近年来我国学者已注意到新技术新方法在泥石流预测预报中的应用,使用遥感技术^[10]、灰色系统理论^[11]、专家系统判别技术^[12]、信息处理技术^[13]、计算机仿真^[14]和人工神经网络方法^[15]等进行了泥石流预测预报。

2 泥石流监测预报中存在的问题

尽管泥石流监测预报已经取得了显著的成果,但还远不能满足减灾工作的要求。这主要表现在以下四个方面:

(1)泥石流预报存在着不确定性。这是泥石流监测预报的基本理论问题,也是预报的方法论问题。由于泥石流发生背景的复杂性以及对其形成机理和汇流规律的理解还不是十分清楚,激发泥石流的雨量和雨强尚不能准确定量。另外,泥石流预报精度也只能限定在气象部门对降雨天气过程有了明确预报结论的前提之下。因而,泥石流预报的准确程度不能超过暴雨预报的准确率。暴雨出现是随机事件,暴雨预报也具有概率性。在此前提下做出的泥石流发生预报也具有随机性。泥石流监测预报精度的提高除依赖于天气预报精度的提高外,还有赖于泥石流形成条件与形成机理研究的深化。泥石流预报的非确定性,为泥石流预报提出了新的课题。

(2)预报模式推广尚有难度。相对精确的泥石流预报模式,大多是建立在长系列观测资料基础之上的。如前述蒋家沟模式和甘洛试验区模式。这些多为黑箱式经验性模式,没有包含泥石流形成背景条件与机理的信息。由于泥石流形成背景条件因沟而异,在不同地区差异更大,将这些模型用于缺乏观测资料的沟谷势必存在一定难度。基于计算机和新方法应用的泥石流预测方法,是一种有益的尝试和探索,是对传统预测预报方法的补充。但基本上也属于“黑箱式”的思维(如神经网络),加上泥石流现象本身的复杂性,所建立的方法离可靠地解决实际减灾问题还有一定距离。从根本上讲,建立基于泥石流发生机理的预测预报理论和方法仍是今后泥石流研究的主要课题。

(3)监测预报尚未涉及灾害损失。泥石流在运动过程中具有大冲大淤的特性,沿途山坡和沟道中的松散固体物质往往加入到泥石流中,使得泥石流的规模和破坏力很难预测。尽管遥测泥位计和超声波警报器可以对泥石流发生规模做出监测和预报,但由于尚没有对泥石流成灾机理进行系统研究,预测预报模式与方法中较少考虑危险区社会经济和土地利用状况,迄今还缺少泥石流成灾规模和灾害损失的预报。

(4)没有充分利用气象资源。目前,气象部门已经能够及时提供非常丰富的天气变化资料,如天气的长、中、短期预报,卫星云图,天气形势等。可惜泥石流工作者尚未充分利用这些丰富的信息,泥石流监测预报还在依赖当地网点的降雨观测资料。仅有少数学者参照天气预报做了一些泥石流活动趋势分析和评估。这远远不能满足广大山区对泥石流监测预报的要求,也是对气象资源的浪费,限制了泥石流基本理论研究和监测预报研究成果的应用。

3 建立泥石流灾害监测预报系统的构想

为了充分利用现有的研究基础、资源条件和先进技术,把泥石流监测预报提高到一个新的阶段。本文提出了建立泥石流灾害监测预报系统的设想。

3.1 系统组成与功能

泥石流灾害监测预报系统由泥石流形成背景条件、泥石流激发因素、承灾系统、预报服务和减灾对策等子系统组成。其结构关系与功能如图1所示。

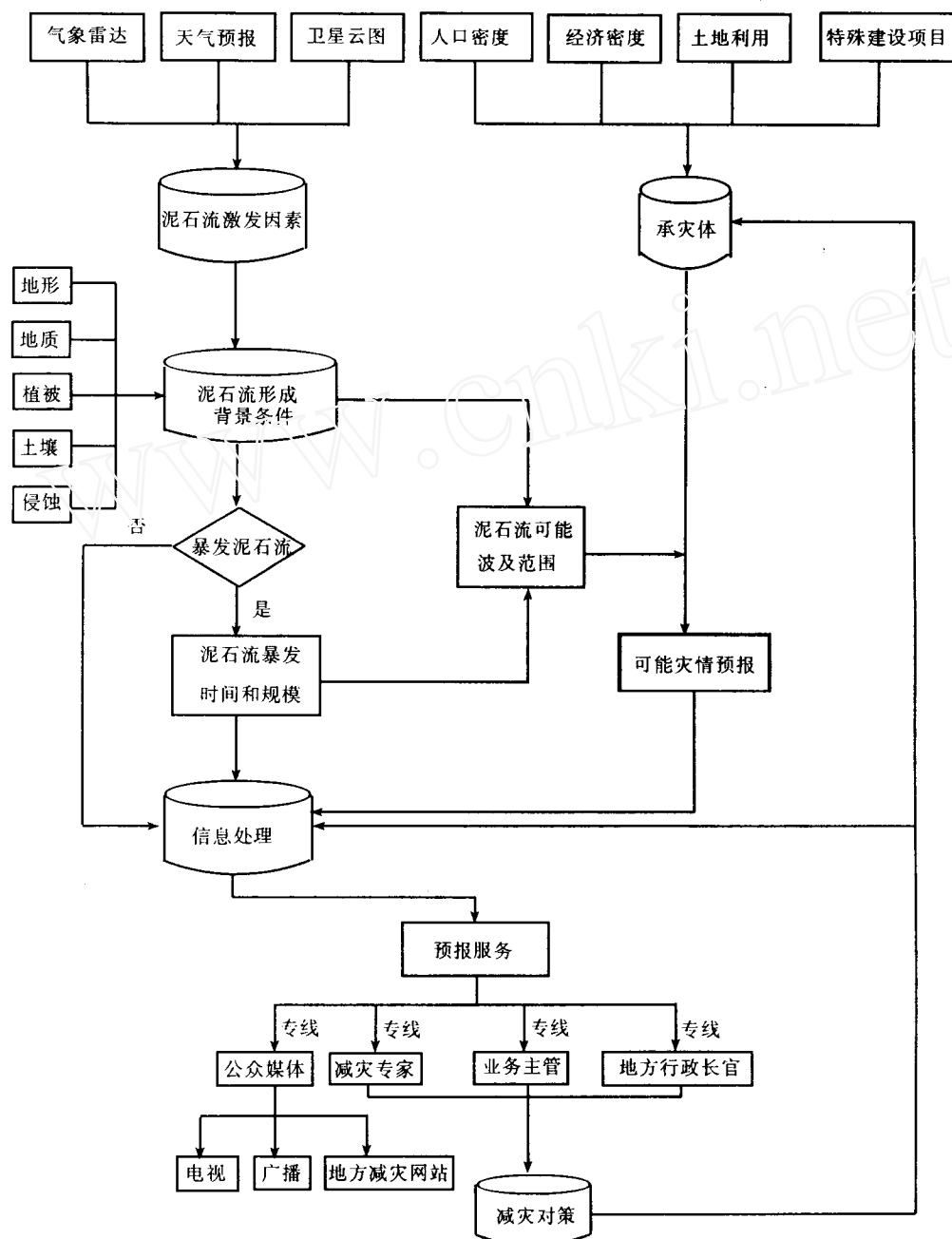


图1 泥石流灾害监测预报系统

Fig.1 Flow chart of the system of debris flow forecast

该系统的工作程序为: (1)通过接收和处理气象雷达或卫星云图与气象预报资料, 确定泥石流激发因素的量值; (2)叠加泥石流激发因素和泥石流形成背景条件, 判断是否暴发泥石流, 如果暴发泥石流, 确定其暴发的时间和规模, 再根据泥石流规模和危险区地形地物条件, 确定泥石流波及范围; (3)综合分析泥石流可能的波及范围和危险区社会经济状况, 预估可能产生的灾情; (4)信息处理系统接收到是否发生泥石流以及泥石流暴发时间、规模和可能成灾程度的预测信息后, 对信息进行分类加工, 然后由预报服务系统根据不同需要, 按不同的层次沿减灾专线分送最高行政长官、减

灾业务主管、减灾专家和大众媒介。大众媒体通过电视、广播和其它传播手段通告灾害消息; (5) 对于可能产生严重灾情的情况, 减灾专家、减灾部门和地方行政长官 (若有民和要) 共同制定减灾对策, 减灾方案通过信息处理系统整理后由服务系统分送有关方面处理, 同时在危险区实施。

3.2 建立泥石流灾害监测预报系统所具备的基础

近年来, 泥石流形成机理与形成条件研究取得了突破性进展^[16,17], 已建立了典型地区的泥石流信息系统^[18], 从而有可能把泥石流预测建立在泥石流形成机理与发生条件的基础上; 泥石流危险度评定^[19]和泥石流灾情评估^[20]的新突破使泥石流活动预测和泥石流灾害预测相结合成为可能。相对完善的气象服务系统能保证泥石流灾害预报适时获取高质量的气象信息。先进的计算机网络及其图形与计算模拟功能, 以及GIS和RS工具是建立泥石流灾害监测预报系统的良好硬件条件和技术支撑。因而, 该系统的建立是可行的, 并具有良好基础。

3.3 尚须解决的问题

要完成泥石流灾害监测系统并使之能够正常运行, 还须解决如下问题:

- (1) 不同类型松散堆积物起动形成泥石流所需的临界水量指标的确定;
- (2) 泥石流形成背景条件和危险区社会经济条件信息系统基础数据库的建立;
- (3) 建立在能量传播基础之上的泥石流破坏力分区, 即泥石流危险度区划;
- (4) 建立直接获取气象资料, 以泥石流形成条件为基础的泥石流监测预报模型。

参考文献:

- [1] 谭万沛, 王成华等. 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.
- [2] 吴积善, 康志成等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [3] 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.
- [4] 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982.
- [5] 陈亚宁. 天山阿拉沟泥石流考察研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学卫生出版社, 1992.
- [6] 徐道明, 冯清华. 暴雨泥石流发生的水文气象条件[A]. 长江流域山地开发与灾害防治[C]. 成都: 地图出版社, 1992.
- [7] 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.
- [8] 谭万沛. 中国灾害暴雨泥石流预报分区研究[J]. 水土保持通报, 1989, 9(2): 48 ~ 53.
- [9] 叶华祥. 接触型泥石流警报传感器的试验研究[A]. 沈寿长, 谭炳炎. 泥石流防治理论与实践[C]. 成都: 西南交通大学出版社, 1991. 95 ~ 105.
- [10] 张沅. 遥感技术在泥石流预报中的应用[J]. 铁路航测, 1982, (3): 17 ~ 20.
- [11] 崔鹏. 区域泥石流活动性的灰色预测——以金川县为例[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3).
- [12] 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.
- [13] 叶华祥. 用泥石流灾害信息网络减轻泥石流对列车的威胁[J]. 灾害学, 1996, 11(2): 32 ~ 36.
- [14] 姚令侃, 沈寿长. 铁路泥石流防治安全性及综合减灾对策的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(增刊): 173 ~ 181.
- [15] 鲁小兵, 李德基. 基于神经网络的泥石流预测[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 47 ~ 50.
- [16] Cui P. Study on conditions and mechanisms of debris flow initiation by means of experiment[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(9): 759 ~ 763.
- [17] Cui P. A study on theoretical methods of forecasting debris flow[A]. internationales Symposium, Interpraevent 1992—Bern, Tagungspublikation, Band 5[C]. 307 ~ 321.
- [18] 钟敦伦等. 中国泥石流编目与信息系统[M]. 成都: 四川科技出版社, 1998.
- [19] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [20] Cui P. A study on loss assessment index system and assessment model of debris flow disasters[A]. Internationales Symposium, Interpraevent 1996 Garmisch—partenkirchen, Tagungspublikation, Band 3[C]. 113 ~ 127.