

# 泥石流灾害水文气象联合预报

丛威青<sup>1</sup>, 潘懋<sup>1</sup>, 任群智<sup>2</sup>, 李铁锋<sup>3</sup>

(1 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2 辽宁省冶金地质勘查局地质调查研究院, 辽宁 鞍山 114002 3 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:** 由于降雨型泥石流是我国泥石流灾害的主要类型, 所以以往对泥石流灾害的预测预报主要通过雨量数据的分析来实现。但是由于雨量站记录雨量和灾害发生雨量并不一致, 这就极大的影响了单纯依赖雨量数据预测预报的准确性。在分析环境因素影响的基础上, 将水文和气象资料结合起来, 用于泥石流灾害的预测预报。通过比较灾害发生前、发生时和发生后的河流洪峰流量、日降雨量和小时降雨量, 发现洪峰流量和小时降雨量对灾害发生有很好的指示作用。经过在辽宁省岫岩满族自治县的试验, 得到洪峰流量  $1\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$  和小时降雨量  $50\sim 60\ \text{mm}$  这两个该县泥石流灾害发生临界值。结果表明水文和气象资料的联合应用, 会大大改进泥石流灾害的预测预报效果。

**关键词:** 泥石流; 水文; 气象

**中图分类号:** P45, P642.23

**文献标识码:** A

泥石流是一种饱含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体<sup>[1]</sup>, 具有暴发突然、搬运冲击淤埋能力强的特点, 具有很大的破坏力。泥石流的性质决定了它的形成需要充足的水源, 而降雨是最主要的水分来源, 所以, 人们力图通过对降雨和泥石流关系的研究, 对泥石流灾害进行预测和预报<sup>[2-5]</sup>。但是, 由于目前人们对降雨诱发泥石流的物理机制, 特别是雨水入渗后对孔隙水压力以及岩土体特性的影响还很不清楚, 加之各地地质环境条件的差异, 使得用于降雨诱发泥石流研究的方法主要还是基于对历史灾害和雨量数据的统计分析<sup>[6]</sup>。而这要求具有准确的历史灾害数据和相应的雨量记录数据, 但这些数据对于较大范围的分析研究是很困难的。雨量数据只能利用气象部门前期建立的雨量站记录, 而雨量计很少能达到每  $50\ \text{km}^2$  布设 1 个的密度, 并且, 记录到的雨量也很难保证能与灾害发生地点的雨量一致。而对灾害发生的调查工作则更为欠缺, 国内多数的调查工作集中在过去的 20 a 里, 并且多集中在

对有人居住地区的调查。这些都大大增加了基于降雨数据的泥石流灾害的预测预报难度。尽管人们提出了利用小时雨量、累积雨量、前期有效雨量等多种雨量临界值进行预测的方法, 但依然具有很大的不确定性和局部适用性<sup>[3, 4]</sup>。

一种改进的方法是利用水文记录数据进行预测预报<sup>[2, 5, 7-9]</sup>。流域水流出量是流域内降雨、融雪、入渗、蒸发等共同作用的结果。尽管它也具有不确定性, 但它反映的是一个流域内的整体环境。并且, 流量记录数据是比较准确的。这些使得利用水文数据进行泥石流预测具有一定的优势。但是, 单纯依靠水文数据也会受到很大的限制。它需要对流域划分的准确把握, 需要长时间的连续精确记录, 需要区域水文特征对降雨具有明显的响应, 当然也需要前期野外对已发生灾害进行详细调查统计<sup>[2, 10-13]</sup>。所以, 比较科学的方法是将雨量数据和天文数据结合起来进行泥石流灾害的预测预报研究。本文作者以辽宁省鞍山市岫岩满族自治县(简称岫岩县)为例,

收稿日期 (Received date): 2005-12-11; 改回日期 (Accepted): 2006-02-18.

基金项目 (Foundation item): 辽宁省鞍山市地质灾害评价预警系统 (辽国资发 [2004]6 号 [“The evaluated and forecast system of geological disaster in Anshan city of Liaoning province” which is supported by Liaoning province.]

作者简介 (Biography): 丛威青 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为应用地质和 GIS. [ Cong Weiqing (1980-), Male, Ph. D., Specialized in Applied Geology and GIS.]

进行了泥石流灾害水文气象联合预报的研究。

## 1 研究区概况

岫岩县位于  $122^{\circ}52' \sim 123^{\circ}41'E$ ,  $40^{\circ}00' \sim 40^{\circ}39'N$ , 总面积约  $4\,502\text{ km}^2$ , 地处辽东半岛北部, 长白山南延余脉的南端。以中、低山和丘陵侵蚀剥蚀地貌为主, 中间夹小块冲积平原和山间盆地, 山坡虽陡 (大多处于  $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ), 但流域相对高差较小 (大多处于  $200 \sim 600\text{ m}$ )。总体属暖温带湿润季风气候区, 降水比较丰沛, 境内多年平均降雨量为  $750 \sim 1\,000\text{ mm}$ , 主要集中在 7、8 月。该区山地地质灾害以泥石流为主, 于 1982 年、1987 年、1989 年集中暴发过三次大规模的泥石流灾害。经过对全县 24 个乡镇的考察统计, 发现全县共有泥石流 358 条 (处), 有确切时间记录的为 325 处 (图 1 黑点所示)。根据前人分析<sup>[14]</sup>, 其中大规模泥石流 ( $100\,000 \sim 500\,000\text{ m}^3$ ) 占 12%, 中等规模泥石流 ( $10\,000 \sim 100\,000\text{ m}^3$ ) 占 47.3%, 小规模泥石流 ( $< 10\,000\text{ m}^3$ ) 占 40.6%; 按地貌形态分类, 坡面型泥石流占 3.4%, 沟谷型泥石流占 96.6%; 依据泥石流粘度、重度、流态、流速、流动方式等流体性质分类, 粘性泥石流占 11.1%, 稀性泥石流占 18.8%, 过渡性泥石流占 70.1%。根据本次野外调查数据分析泥石流中泥沙、石块含量, 将泥石流分为以泥沙为主的泥石流和以石块为主的泥石流。从表 1 中可以

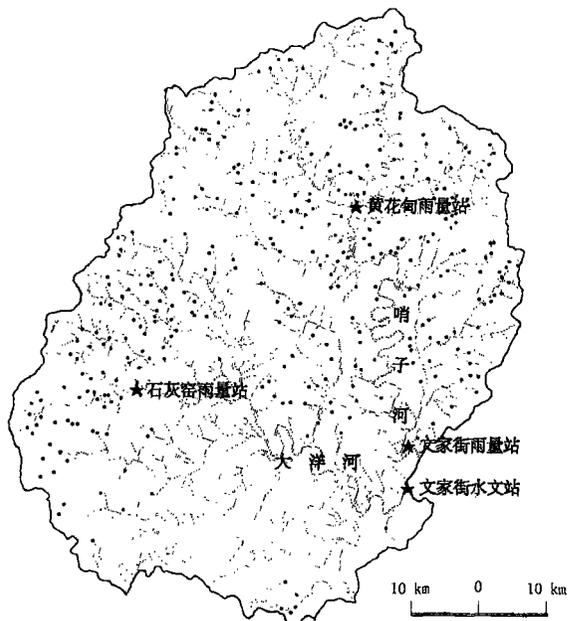


图 1 岫岩灾害点水系分布图

Fig 1 Debris flows and water system of Xiuyuan

看出 1982 年两类泥石流数量比较接近, 1987 年以泥沙为主的泥石流居多, 1989 年以石块为主的泥石流居多。

岫岩境内沟谷交错, 河溪纵横如织, 约 500 余条溪流汇集成 14 条支流——偏岭河、哈达河、干沟河、汤池河、雅河、牧牛河、沟连河、牧牛河、石庙河、三家子河、青河、古洞河、石谷汤河、渭水河。14 条支流又汇成两大干流——大洋河和哨子河。二流在文家街附近汇合, 组成境内大洋河水系。其流向受地形限制, 由西北向东南。境内河流全长  $882.21\text{ km}$ , 流域总面积达到  $4\,487\text{ km}^2$  (图 1)。

考虑到发灾范围比较集中的特点, 采用点雨量代替面雨量的方式进行发灾雨量分析。根据 1982 年、1987 年、1989 年灾害发生时的雨量等值线图, 石灰窑雨量站记录数据代表 1982 年的发灾雨量, 文家街雨量站记录数据代表 1987 年的发灾雨量, 黄花甸雨量站记录数据代表 1989 年的发灾雨量。水文站数据来自哨子河控制站文家街水文站。

## 2 水文指标

### 2.1 1982 年

小时最大雨量和日最大雨量均出现在 08-08 分别为  $63.3\text{ mm}$ 、 $317.6\text{ mm}$  (石灰窑), 而灾害也集中发生在 08-08 这说明灾害的集中发生与当日雨量关系密切。文家街记录到的小时最大雨量 ( $41\text{ mm}$ ) 和日最大雨量 ( $108\text{ mm}$ ) 均在 08-07, 水文记录洪峰值 ( $4\,220\text{ m}^3/\text{s}$ ) 出现在 08-09, 滞后了 1~2 d, 这主要是由于降雨中心区距离水文站有一定的距离所致。但是, 08-08 的水文记录已经明显高于以前 (图 2)。

1982 年的泥石流灾害多发生在岫岩西北部低山区。该区上部岩层多陆源碎屑, 下部为火山沉积, 透水性较好, 雨水有一定的下渗能力, 这使得以沙石为主的泥石流和以石块为主的泥石流数量差别不大。

表 1 岫岩泥石流灾害发生情况

Table 1 Debris flows of Xiuyuan

时间 Time	集中地 Location	灾害数 Number	泥沙为主 Sandy	石块为主 Lithoid
1982-08-08	西北部	202	123	79
1987-08-19	中东部	59	50	9
1989-07-18	东北部	64	15	49

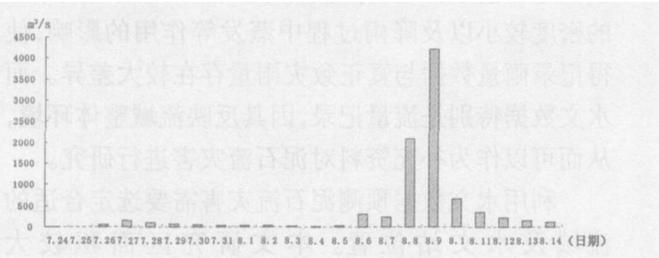


图 2 1982年雨季洪峰流量变化

Fig 2 Flood peaks in rainy season during 1982

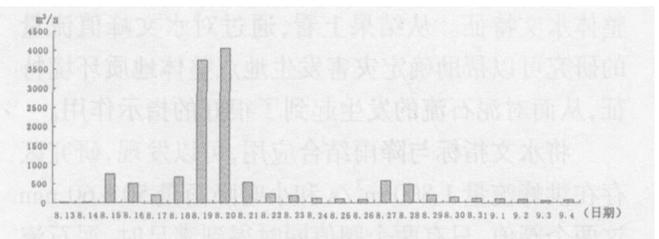


图 3 1987年雨季洪峰流量变化

Fig 3 Flood peaks in rainy season during 1987

### 2.2 1987年

小时最高降雨量(文家街)出现在 08-15(66.8 mm)和 08-18(31.6 mm), 日最大降雨量也出现在 08-15(171.3 mm)和 08-18(101.4 mm), 而灾害却集中发生在 08-19, 该日最大小时降雨仅为 14.5 mm, 日降雨只有 41.9 mm。从水文站记录上可以看到 08-19开始至 08-20的水文流量出现洪峰值。说明 1987年集中暴发的泥石流与当日雨量关系较小, 但是与整体水文变化却有很好的对应关系(图 3)。

另外, 1987年的灾害集中发生在岫岩东部丘陵区, 这一地区第四纪覆盖广泛且具有一定的厚度。从野外考察中可以发现, 该年发生的泥石流中以泥沙为主的有 50处, 而以石块为主的只有 9处, 说明该年发生的灾害粘土含量较大, 这反映出雨水入渗深度较大, 滞留时间较长, 这与水文最大流量的延迟响应相一致。

### 2.3 1989年

小时最大雨量 98.8 mm 和日最大雨量 161.8 mm(黄花甸)均出现在 07-18, 灾害集中发生在 07-18。水文记录在 07-18也出现了高数值, 但是文家街雨量站记录日降雨量最高为 07-18的 39.9 mm, 之前都在 20 mm 以下, 小时降雨最高只有 15.2 mm, 说明水流量的上升不是本地降雨的原因, 而是来自与哨子河有很好水利联系的岫岩北部地区的降

雨(图 4)。

1989年灾害集中发生的岫岩北部地区以中山和丘陵为主, 上部岩层的透水性很好, 第四纪覆盖有限。灾害记录中, 大多数是以石块为主的泥石流(49处), 而以泥沙为主的只有 15处, 这与 1982、1987年的灾害形成了鲜明的对比。这主要是由于该地区环境条件不利于雨水的入渗和滞留, 并且, 由于 1989年的雨量相对于 1982年和 1987年明显较小, 也使得进入土体的雨量相应减小, 从而造成以石块为主的泥石流居多。

## 3 讨论

从图 5中可以看出, 1982年、1987年对应水流量的异常峰值 4 220 m<sup>3</sup>/s、4 040 m<sup>3</sup>/s 这两年都集中发生了泥石流灾害。1989年的流量并非处于峰值, 甚至不如 1994、1996年的流量值高(图 5), 但是为何却也集中发生了泥石流灾害呢?

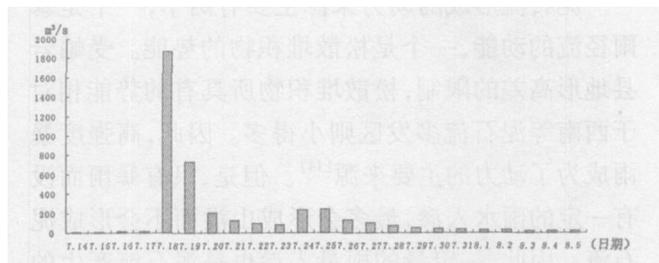


图 4 1989年雨季洪峰流量变化

Fig 4 Flood peaks in rainy season during 1989

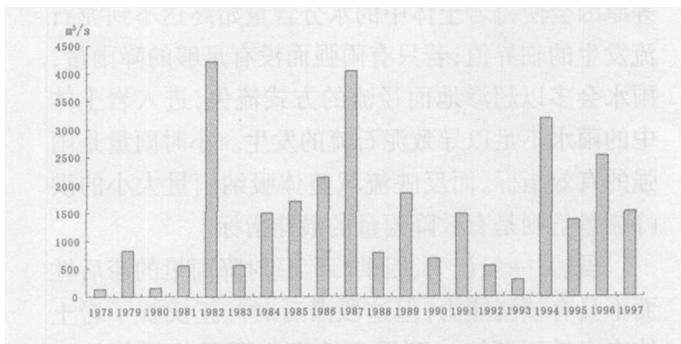


图 5 洪峰流量最大值年际变化 (1978~1997)

Fig 5 Yearly maximal flood peak (1978~1997)

考察 1989年、1994年、1996年的日降雨量, 发现降雨量均超过了利用 Logistic和前期有效降雨量计算得到的临界雨量值, 发生概率均 > 90%。但是, 再考察小时降雨量, 可以非常明显的发现, 1994年、1996年的最大小时雨量均未超过 50 mm, 而 1989年

的小时雨量记录则超过了 50 mm, 最高达到 98.8 mm(黄花甸)。从图 5、6 可以看出, 灾害的发生存在洪峰流量  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$  和小时降雨 50~60mm 这两项阈值。

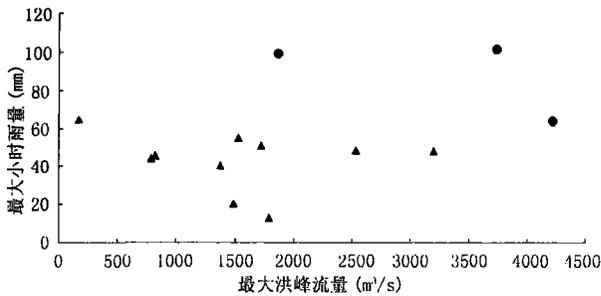


图 6 年最大洪峰流量及对应最大小时雨量图  
(点: 灾害集中发生; 三角: 灾害未集中发生)

Fig 6 Yearly maximal flood peak and corresponding hourly maximal rainfall  
(Dot debris flows; Triangle no debris flows)

泥石流形成的动力来源主要有两个, 一个是暴雨径流的动能, 一个是松散堆积物的势能。受岫岩县地形高差的限制, 松散堆积物所具有的势能相对于西南等泥石流多发区则小得多。因此, 高强度暴雨成为了动力的主要来源<sup>[14]</sup>。但是, 只有暴雨而没有一定的雨水入渗, 最多会形成山洪而不会形成泥石流。因此, 一定量的雨量入渗也是泥石流产生的必要条件。所以, 泥石流是在雨量和雨强同时满足一定条件下才会发生的, 若降雨强度过小, 由于蒸发等原因会使得岩土体中的水分含量始终达不到泥石流发生的临界值; 若只有雨强而没有足够的降雨量, 雨水会多以超渗地面径流的方式流失, 进入岩土体中的雨水不足以导致泥石流的发生。小时雨量是雨强的有效指标, 而反映流域整体吸纳雨量大小的洪峰流量值则是有效降雨量的最佳指标。

虽然, 一般认为, 因洪峰流量对降雨量的滞后性而不具有预测能力, 但这段滞后时间正反映了岩土体内水量逐渐增加到泥石流发生所需临界值的过程, 这从 1982 年、1987 年的数据中都能看出这一点。因此, 洪峰流量的滞后性恰恰使其具有了更好预测能力。

## 4 结论

虽然通过雨量站点记录的雨量进行泥石流预警

预报是目前最普遍的方法, 但是, 由于雨量站点布置的密度较小以及降雨过程中蒸发等作用的影响, 使得记录雨量数据与真正致灾雨量存在较大差异。而水文数据特别是流量记录, 因其反映流域整体环境, 从而可以作为补充资料对泥石流灾害进行研究。

利用水文数据预测泥石流灾害需要选定合适的流域及水文站位置。本文研究区面积较大 ( $4502 \text{ km}^2$ ), 但由于有较好的水利沟通, 适于作为一个流域单元进行研究。文家街水文站处于哨子河和大洋河两条主要河流的交汇处, 能反映出研究区整体水文特征。从结果上看, 通过对水文峰值流量的研究可以帮助确定灾害发生地点整体地质环境特征, 从而对泥石流的发生起到了很好的指示作用。

将水文指标与降雨结合应用, 可以发现, 研究区存在洪峰流量  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$  和小时降雨量 50~60 mm 这两个阈值, 只有两个阈值同时得到满足时, 泥石流才会发生。这说明一定的雨量和雨强同为泥石流灾害产生的必备条件。水文指标能很好指示出当天发生泥石流的可能性, 而小时雨量则能对灾害发生与否起到预警作用。两者结合能很好的区分出研究区历史年份灾害发生情况。这说明, 在较大范围内水文气象数据的结合使用能对泥石流灾害起到很好的预测预报效果。

## 参考文献 (References)

- [1] Pan Maq, Li Tefeng. Hazardous Geology[M]. Beijing: Peking University Press, 2002. 112~121; 潘懋, 李铁锋. 灾害地质学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002. 112~121
- [2] Kenneth Addison. Debris flow during intense rainfall in Snowdonia North Wales—a preliminary survey[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12: 561~566
- [3] S. W. C. Au. Rainfall and slope failure in Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 1993, 36: 141~147
- [4] S. W. C. Au. Rain-induced slope instability in Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 1998, 51: 1~36
- [5] A. Pasuto, S. Sikanon. Rainfall as a trigger of shallow mass movements: A case study in the Dolomites (Italy)[J]. *Environmental Geology*, 1998, 35(2-3): 184~189
- [6] P. Reichenbach, M. Cardinali, P. De Vita, et al. Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy)[J]. *Environmental Geology*, 1998, 35: 146~159
- [7] Michael J. Crozier. Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 825~833
- [8] Thomas G. Hude, Michael Crozier, Peter Smith. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model"[J]. *Pure and Applied*

- Geophysics*, 2000, 157: 1 059~ 1 079
- [ 9 ] Emmanuel J Gabet, Douglas W. Burbank, Jaakko K. Putkonen. Rainfall threshold for landsliding in the Himalayas of Nepal [ J ]. *Geomorphology*, 2004, 63: 131~ 143
- [ 10 ] Th. W. J. van Asch, M. R. Hendriks, R. Hessel. Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps [ J ]. *Engineering Geology*, 1996, 42: 239~ 251
- [ 11 ] Angeb Basile, Giacomo ele, Fabio Terribile. Soil hydraulic behaviour of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarro 1998 [ J ]. *Geotema*, 2003, 117: 331~ 346
- [ 12 ] P. L. Wilkinson, M. G. Anderson, D. M. Lloyd. An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction [ J ]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27: 1 285~ 1 297
- [ 13 ] Mark T. J. Terlien. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds [ J ]. *Environmental Geology*, 1998, 35(2-3): 124~ 130
- [ 14 ] Zhong Dunlin, Xie Hong, Cheng Zunlan, et al. A Comprehensive Prevention Study on Mountain Disasters in Low Mountains and Hills Area in Xiuyan Man Autonomous County [ M ]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1993: 48~ 50, 67 [ 钟敦伦, 谢洪, 程尊兰, 等. 低山丘陵区(岫岩满族自治县)山地灾害综合防治研究 [ M ]. 成都: 四川科学技术出版社, 1993: 48~ 50, 67 ]

## The Prediction of Debris Flows Depending on Hydrology and Meteorology

CONG Weiqing<sup>1</sup>, PAN Mao<sup>1</sup>, LI Tiejing<sup>2</sup>

( 1 The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences

Peking University, Beijing 100871, China; 2 Geological Exploration Institute, Liaoning Bureau of Geology and

Metal Exploration for Metallurgy, Anshan 114002, China; 3 China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China )

**Abstract** A multidisciplinary approach is adopted in this paper in order to study the very complex phenomenon of rainfall triggered debris flows. Rainfalls are the main inducements of debris flows in China. So it's the most common method to predict debris flows through analyzing the relationship between rainfalls and debris flows. But because disaccords between the record of gauges and the actual rainfalls causing debris flows always exist, the veracity is greatly affected. In this paper, data of geomorphology, geology, hydrology and meteorology of Xiuyan of Liaoning province are collected. On the basis of investigation of the environmental background of disasters, the hydrological and meteorological behaviors which triggered debris flows are analyzed. The peak flows of rivers, day rainfalls and hour rainfalls before and after debris flows are different. Through comparing them, it was found that hydrological behavior of a drainage area is a good indication of the day when debris flows will occur and meteorological behavior is a good indication of the hour. Critical peak flow ( $1\ 800\text{ m}^3/\text{s}$ ) and critical rainfall ( $50\sim 60\text{ mm/h}$ ) of debris flows in Xiuyan are pointed out. Notwithstanding the simplifications introduced to carry out in this study, the proposed approach demonstrates the possibility of predicting debris flows through multidisciplinary methods and hence the potential of improving debris flow risk assessment.

**Key word** debris flows; hydrology; meteorology