

齐丹, 田华, 徐晶, 等. 基于 WRF 模式的云贵川渝地质灾害气象预报系统的应用[J]. 气象, 2010, 36(3): 101-106.

基于 WRF 模式的云贵川渝地质灾害 气象预报系统的应用^{*}

齐 丹¹ 田 华¹ 徐 晶¹ 韦方强² 江玉红²

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

提 要: 介绍了国家气象中心和中国科学院成都山地灾害与环境研究所联合研发的基于 ArcGis9.1 的云贵川渝地区地质灾害预报系统。该系统是在可拓模型理论上建立的, 其优点在于能将气象要素和地面要素紧密地结合在一起, 形成雨—地耦合的区域泥石流预报模型。系统采用区域精细化数值天气预报模式 WRF 提供的高时空分辨率的精细降雨预报作为模型的动态输入, 实现地质灾害发生概率的预报。目前, 系统已经在中央气象台进行业务运行, 每日在精细化数值天气预报系统提供的 1 小时间隔的数值降水预报支持下, 定时启动预报系统。该预报产品目前已成为区域精细化地质灾害预报的重要参考。为了进行地质灾害预报效果的检验和评估, 首先利用 2007 年 6—7 月份实况降水对 WRF 模型的预报降水进行检验。结果表明: 中尺度数值预报模式 WRF 对区域性、持续时间长的暴雨过程预报能力较高, 对于地质灾害预报服务具有较好的应用价值。此外, 对 2007 年 7 月 2—5 日发生在四川盆地东部的部分地区的群发地质灾害个例分析及对 2007 年 7 月份该地质灾害预报系统的整体预报效果进行检验, 结果表明: 系统囊括了该次灾情大部分灾情点, 总体预报准确率较高, 业务中具有一定的应用价值。

关键词: 地质灾害, WRF 模式, TS 评分

The Application of Yun-Gui-Chuan-Yu Geological Disaster Forecast System Based on the WRF

QI Dan¹ TIAN Hua¹ XU Jing¹ WEI Fangqiang² JIANG Yuhong²

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041

Abstract: By using the extensive theory, the Yunnan-Guizhou-Sichuan-Chongqing region's geological disaster forecast system was built up. The macro-scale model of WRF provides the precipitation forecasting for geological disaster forecast system. The probability forecast of geological disaster was produced. The system forecasts the probability of disaster on the lattice and then releases it in grade. Some localized tests have been done. The results show that the macro-scale numerical model WRF has some certain forecasting capability. The forecasting capability of WRF model for long duration and regional rainstorm is better, and then WRF can provide good application service for geological disaster forecast. During 2 to 5 July 2007, a series of geological disasters took place in eastern Sichuan Basin. The forecasting results showed that the geological disaster system could forecast the disasters well. Different types of rainfall, which caused the geological disasters, could be responded well and the prediction accuracy in July was better. The system has some certain effect.

Key words: geological disaster, WRF (weather research and forecasting) model, TS (threat score)

* 本文由国家自然科学基金项目(40971016)、公益性行业(气象)科研专项“东南地区强降水诱发地质灾害预警报技术研究”(GYHY(QX)2007-6-37)、“十一五气象预警工程”项目和国家气象中心科研团队课题和基金项目“中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-352)”资助

2008 年 4 月 28 日收稿; 2009 年 12 月 9 日收修定稿

第一作者: 齐丹, 从事应用气象领域研究. Email: qidan@cma.gov.cn

引 言

近年来,在全球气候变暖的影响下,我国极端天气现象出现的几率明显增高,降水引发的滑坡和泥石流等地质灾害也频频发生,并呈现增加趋势,造成了重大人员伤亡和财产损失^[1-2]。因此,针对降水诱发的地质灾害实时预报警报,最大程度地减轻地质灾害的损失,已成为需要气象、水文和地学界共同参与研究并具体落实的紧迫任务。

地质灾害的发生是一个由多种自然因素和人为因素共同作用下的复杂的从缓变到突变的过程,但在一定的地质结构特征及环境条件下,过程降水是地质灾害发生最主要的诱发因素,据统计,由暴雨引发的泥石流、滑坡等灾害占这类灾害总数的 90% 以上^[2]。因此,根据降雨进行滑坡、泥石流等地质灾害的预报,成为地质灾害预报的主要方法^[2-5]。

目前,国内外对降雨诱发的地质灾害均开展了大量研究。Premchitt 等对香港地区斜坡破坏与降雨条件进行的一系列相关分析研究,确定了引发滑坡的临界雨强^[6]。日本濑尾克美等人对从 10 分钟雨量到多日累计雨量在内的各种降雨指标进行验证,制定泥石流发生的“报警”、“避难”的降雨临界值^[7]。在我国,泥石流预报的理论研究始于 20 世纪 90 年代,但直至 2000 年以后才真正开展泥石流预报的应用研究,并向公众提供预报服务^[8-10]。

西南地区山地分布广泛,地质条件复杂,构造运动剧烈,地质灾害尤为突出,严重地威胁着人民生命财产安全,给国民经济造成重大损失^[10-12]。西南地区地质灾害发生的重要特点是区域性强,地质气象工作者做了大量的研究工作^[13-19]。但目前对于整个西南地区地质灾害进行全面研究和预报系统的建设尚不多见。本文基于地理信息处理平台,结合地质灾害相关的气象和环境数据库,采用可拓模型建立的云贵川渝地质灾害预报系统,对中尺度降水预报模式 WRF 为地质灾害预报系统提供的降水预报场进行了检验,最后以 2007 年 7 月发生在四川盆地东部的一次较大的大型群发地质灾害为例,对该地质灾害预报系统的预报效果进行个个例分析,并对 2007 年 7 月的预报效果进行检验。

1 云贵川渝地区地质灾害预报系统模型简介

云贵川渝地区地质灾害预报模型^[20-22]是基于泥石流、滑坡的现场监测及遥感观测结果,建立云贵川渝泥石流、滑坡信息及其发育的环境背景条件数据库,深入研究云贵川渝泥石流、滑坡的发育背景和现状,运动特性以及与触发降雨之间的关系特征,选择基于模糊数学的可拓性理论,并建立云贵川渝区域泥石流、滑坡预测预报模型。可拓模型^[23-24]将物元分析与可拓集合相结合,广泛应用于新产品构思与设计、优化决策、控制、识别与评价等领域,在理论和实践方面发挥了重要的作用。根据泥石流、滑坡的形成条件和区域系统的内外应力影响,滑坡、泥石流预报的可拓模型选取了与滑坡、泥石流紧密相关的 6 个因素:相对高差、地层、断层、土地利用、降水总量和降水强度。在这 6 个因素的作用下,泥石流发生概率大小为 B_j 。

根据上述 6 个因子和滑坡、泥石流之间关系的分析结果,确定了研究区滑坡、泥石流预报可拓模型标准物元表(见表 1)。

降雨是地质灾害发生的触发因素(外因),下垫面是地质灾害发生的基础条件(内因),区域性短期滑坡、泥石流预报,就是结合区域环境背景条件和降雨状况,对滑坡、泥石流发生可能性进行评估预报的过程。这种评估预报很难提供预报区域的确定性预报,所以,区域性短期地质灾害预报应为概率预报,根据不同降水与下垫面的相互作用评估预报区域滑坡、泥石流发生的概率大小。然而,这种概率的评估尚无法提供精确的概率值,将这种概率分成若干等级,构成若干概率区间(表 1),更容易被人们所接受,在宏观指导减灾中也更具有实用性。

2 中尺度数值模式 WRF 在西南地区的降水预报

通过上述分析可知,和泥石流、滑坡发生概率关系密切的因子有两类:一类是相对稳定的下垫面因子,如高差、断层、地层和土地利用等。另一类是动态因子,即降水总量和降水强度;此外,对历史上滑坡、泥石流与降雨量的分析可知,降水量与滑坡、泥

石流的产生有很好的相关性^[25-28],因而准确地预报出雨量是问题的关键。中尺度数值预报模式 WRF (Weather Research Forecast)是由美国开发的新一代中尺度预报模式和同化系统,该模式采用高度模块化、并行化和分层设计技术,集成了迄今为止在中尺度方面的研究成果。模拟和实时预报试验表明,WRF 模式系统在预报各种天气中都具有较好的性能,具有广阔的应用前景,是目前比较成熟的数值预报模式之一^[29]。

表 1 西南地区地质灾害发生概率与对应的标准物元

H:高差(单位:m);F:断层距离(单位:m);

S:地层等级;L:土地利用综合指数;I:小时降水强度;

P:有效降水量(单位:mm);R_n:发生概率

Table 1 The geological disaster probability and its standard elements

H:height difference (unit:m);F:faulitage distance (unit:m);

S:stratum grade;L:land use index;I:intensity of precipitation;

P:precipitation (unit:mm);R_n:probability

地质灾害 预报等级	预报 含义	地质灾害 发生概率	标准物元 R _n 阈值
1	地质灾害 发生可能 性极小	0~0.2	$R_n = \begin{bmatrix} \text{1级, } H, \langle 0, 400 \rangle \\ F, \langle 20000, 30000 \rangle \\ S, \langle 0, 1.5 \rangle \\ L, \langle 0, 4.5 \rangle \\ I, \langle 0, 3 \rangle \\ P, \langle 0, 50 \rangle \end{bmatrix}$
2级	地质灾害 发生可能 性较小	0.2~0.4	$R_n = \begin{bmatrix} \text{2级, } H, \langle 400, 900 \rangle \\ F, \langle 15500, 20000 \rangle \\ S, \langle 1.5, 2.5 \rangle \\ L, \langle 45, 85 \rangle \\ I, \langle 3, 10 \rangle \\ P, \langle 50, 90 \rangle \end{bmatrix}$
3级	地质灾害 发生可能 性较大	0.4~0.6	$R_n = \begin{bmatrix} \text{3级, } H, \langle 900, 1700 \rangle \\ F, \langle 6500, 15500 \rangle \\ S, \langle 2.5, 3.5 \rangle \\ L, \langle 85, 145 \rangle \\ I, \langle 10, 20 \rangle \\ P, \langle 90, 150 \rangle \end{bmatrix}$
4级	地质灾害 发生可能 性大	0.6~0.8	$R_n = \begin{bmatrix} \text{4级, } H, \langle 1700, 2150 \rangle \\ F, \langle 2000, 6500 \rangle \\ S, \langle 3.5, 4.5 \rangle \\ L, \langle 145, 175 \rangle \\ I, \langle 20, 35 \rangle \\ P, \langle 90, 150 \rangle \end{bmatrix}$
5级	地质灾害 发生可能 性很大	0.8~1	$R_n = \begin{bmatrix} \text{5级, } H, \langle 2150, 2400 \rangle \\ F, \langle 0, 2000 \rangle \\ S, \langle 4.5, 5 \rangle \\ L, \langle 175, 225 \rangle \\ I, \langle 35, 80 \rangle \\ P, \langle 200, 1000 \rangle \end{bmatrix}$

一个数值预报系统,要获得好的预报效果,需要进行有关模式的本地化研究。目前,本系统中使用的精细化数值天气预报模式 WRF 是国家气象中心在十五科技支撑课题“奥运气象保障技术研究”支持下本地化开发的中尺度数值预报模式。

为更好地检验模式本地化运行后的预报性能,对西南地区 4 省(市)分别进行了预报检验,本文所采用的质量检验方法是按照中国气象局 1998 年 6 月下发的《天气预报业务规定》和 2002 年 6 月的省级气象台《指导预报评分系统》严格进行的。检验站点数为 364 个。模式降水预报资料采用临近插值站点的 4 个格点平均方法插到站点上进行检验。

表 2 为 2007 年 7 月云贵川渝地区几次暴雨过程的 TS 评分结果,从表中看出,模式对几次暴雨过程的 TS 评分结果较好,特别是 7 月 2 日和 7 月 8 日开始的两次降水,暴雨的 TS 评分略高在 0.25 以上。通过对这几次暴雨过程持续时间和降水范围的分析来看,模式对区域性、持续时间长的强降水过程预报能力较高,这也说明模式预报降水在一定程度上可应用到地质灾害预报服务中。

图 1 为云贵川渝地区 2007 年 6 月 1 日至 7 月 31 日(20 时)不同降水量级的 TS 评分、漏报率和空报率。从图 1 中可以看出,对于 24 小时、36 小时和 48 小时的 WRF 模式的 TS 评分随降水量级的增加而减少,预报的空报率和漏报率随降水量级的增加而增大。对于暴雨而言,24 小时、36 小时和 48 小时 TS 评分分别为:0.02、0.015 和 0.01。偏差检验表明模式在小雨和暴雨量级降水预报上与实况观测的相对频率接近理想值 1。综合分析 TS 评分和偏差

表 2 2007 年 7 月云贵川渝地区几次暴雨过程的 TS 评分
Table 2 The TS (Threat Score) of different precipitation processes in target area in July, 2007

预报时间	实况暴雨落区	TS 评分结果
2 日 20 时至 3 日 20 时	川东部	0.27
4 日 20 时至 5 日 20 时	川东部和重庆北部	0.03
8 日 20 时至 9 日 20 时	川东南部	0.26
9 日 20 时至 10 日 20 时	重庆南部、黔中部	0.07
15 日 20 时至 16 日 20 时	川东部、重庆西部	0.07
16 日 20 时至 17 日 20 时	川东部、重庆中西部	0.06
17 日 20 时至 18 日 20 时	川东南部、重庆西部	0.1
18 日 20 时至 19 日 20 时	滇南部和中部	0.03
19 日 20 时至 20 日 20 时	滇西部	0.06
24 日 20 时至 25 日 20 时	滇北部、黔中部	0.08
26 日 20 时至 27 日 20 时	川中东部	0.11
31 日 20 时至 8 月 1 日 20 时	川东南部、重庆西部	0.16

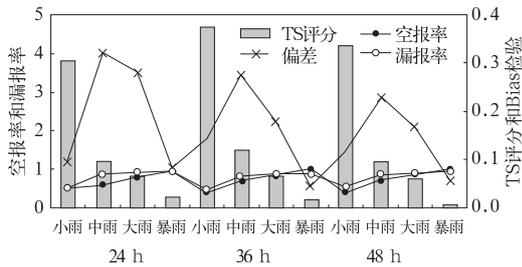


图 1 云贵川渝地区 2007 年 6 月至 7 月 20 时
降水量级 TS 评分、偏差检验、预报漏报率和空报率
Fig.1 The TS (Threat Score), Bias test, rate of
missing report and false alarm ratio of different
precipitation grades in target area at 20 BT
from June to July, 2007

检验结果,可知模式对该地区的降水预报效果较好,能够用于地质灾害的预报。

3 系统业务化使用情况与汛期典型个例分析

3.1 系统业务运行情况

云贵川渝地质灾害预报系统目前已在中央气象台进行业务试运行,在精细化数值天气预报系统每日提供 2 次、1 小时间隔的数值降水预报的基础上,每天上午和下午启动定时作业。

3.2 2007 年 7 月 5 日 20 时降水预报效果分析

图 2 给出 2007 年 7 月 5—6 日 20 时 WRF 预报的降水场,由图 2 可见,WRF 模式基本预报出了位于四川东部盆地和重庆北部开始到四川西南部一带的呈东北—西南走向的带状的雨带,位置与实况雨带位置较一致。模式对雨带位置的预报比较准确。比较可知 24 小时累计降水南江站(247.8 mm),遂宁站(72.9 mm),珙县站(131.8 mm)均落在预报的 50 mm 的暴雨区域内,不足的是除遂宁站外预报降水较实况降水量级均偏小。

这次降水过程造成 7 月 2—6 日四川中北部部分地区山地灾害频发,根据灾情实况可知,南江县内发生滑坡、泥石流累计达 500 多处,遂宁辖区累计发生山体滑坡 21 处,珙县 11 个乡镇遭遇泥石流。广元、渠江、汉源、南充、内江、射洪等地也发生不同程度的地质灾害。

图 3 为地质灾害概率预报等级,结果分为 3~5 级的区域,分别以黄色、橙色和红色代表不同的灾害

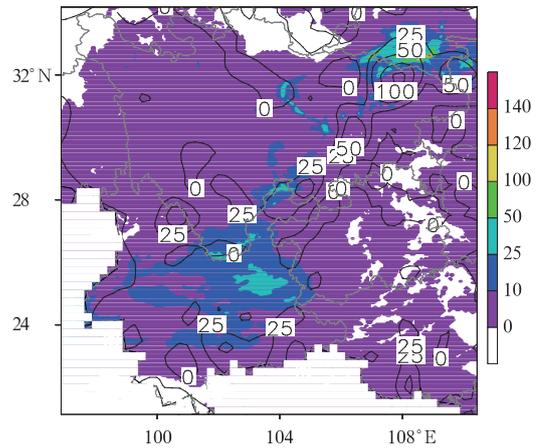


图 2 2007 年 7 月 5 日 20 时至 6 日 20 时
中尺度数值模式 WRF 预报降水场(阴影)
和实况降水场(等值线)

Fig.2 Forecast precipitation by WRF model
(shaded) and observed precipitation (contour line)
from 20 BT 5 July to 20 BT 6 July 2007 (mm)

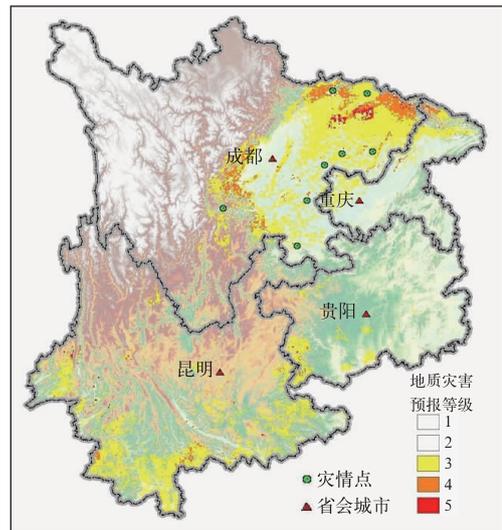


图 3 2007 年 7 月 5 日 20 时—7 月 6 日 20 时
云贵川渝地区滑坡和泥石流灾害预报图

Fig.3 The geological disaster forecast in the
target area from 20 BT 5 July to
20 BT 6 July 2007

预警级别。可见,系统对该次过程的预报效果比较好,基本覆盖了盆地东部的大部分地区的灾情点,灾情发生地区包括南充、南江、平昌、内江等地都达到了 5 级的预警标准,广元等地达到了 4 级的预警标准,射洪、汉源、渠县、珙县、遂宁等达到了 3 级的预警标准。

从南江、遂宁、珙县 2—7 日逐日降水情况

(表 3)可见,南江县从 2 日起至 7 日止的 5 天时间内,均有中到特大暴雨量级的降水出现,同时,珙县前期无降水,在 5 日出现微量降水后 6 日突降 130 mm 以上大暴雨,遂宁站在 5 天内降水比较均衡,但是所辖的蓬溪县境内在 5 日也遭受了大暴雨袭击,6 日仍有微量降水。

图 4 给出南江、遂宁、珙县 7 月 2—7 日逐小时降雨量,由图 4 可见,7 月 2 日 04 时开始,南江站逐小时降水达到 20 mm,7 月 5 日 03—07 时,南江站连续出现大于 25 mm 以上的大降水,小时最大雨量 49 mm,这与灾情发生时段对应较好,且在 5 日降水结束后的 7 个多小时之内,灾情仍在接连发生。可见该次阶段性强降水是造成南江县地质灾害高发频发的主要原因。遂宁站在该次降水过程期间雨量比较均衡,无论是前期还是灾害发生时段逐小时降水在 10 mm 以下,7 月 5 日 23 时达到最大降水记录 12 mm。可见,较长时间的持续性的降水有可能是

表 3 7 月 2—7 日南江、遂宁、珙县、射洪、蓬溪逐日降水量(单位:mm)

Table 3 Daily precipitation (mm) measured in Nanjiang, Sining, Gongxian, Shehong and Pengxi from 2 July to 7 July, 2007

	7月2日	3日	4日	5日	6日	7日
南江	20.4	45.1	8.4	211.7	32.1	1.2
遂宁	0	18	21	24	13	0
珙县	0	0	0	0.8	130.8	0
射洪	0	19	12.4	10	8.6	0.1
蓬溪	0	70	12	106.9	5.8	0.1

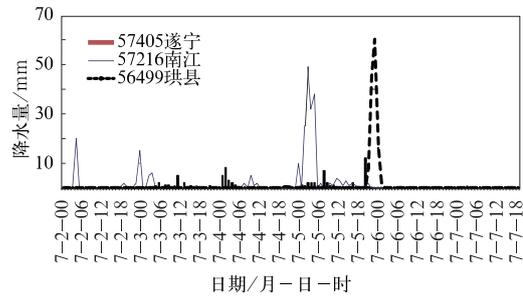


图 4 南江、遂宁、珙县 7 月 2 日 20 时—7 日 20 时逐小时降水

Fig. 4 Hourly precipitation measured in Nanjiang, Suining, and Gongxian during 2 July to 7 July 2007

导致遂宁发生灾害的主要原因。珙县前期基本无降水,强降水时段集中出现在 7 月 6 日 00—03 时的 3 个小时之内,最大雨强达到 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,达到该次过程三个站点中逐小时雨量的最大值。而灾情发生在 7 月 5 日 22 时至次日凌晨 05 时,与降水时段对应较好。可见,突发性的强降水可能是导致珙县地质灾害发生的主要原因,三个站点降水均在 7 月 6 日 12 时以后基本结束。可见,持续性降水、突发性的强降水、间断出现的阶段性强降水均可能诱发地质灾害。

3.3 2007 年 7 月系统预报效果分析

在 2007 年 7 月,西南地区接连遭受了多次大到暴雨袭击并引发多处滑坡和泥石流等地质灾害,通过对 7 月灾情统计可见(表 4),如果视大于等于 3

表 4 2007 年 7 月西南地区灾情预报情况统计(√:击中;×:漏报)

Table 4 The geological disaster forecast statistics in Southwest China in July 2007

时间/月-日	省份	地区	预报效果	时间/月-日	省份	地区	预报效果
7-2	四川	巴中	√	7-10	贵州	雷山县	√
7-2	四川	巴中南江县	√	7-12	贵州	黔东南	√
7-2	四川	南充南部县	√	7-12	云南	腾冲	√
7-2	四川	广元旺苍县	√	7-12	云南	文山州	×
7-2	四川	仁寿县	√	7-13	云南	武定	×
7-2	四川	巴州	√	7-12	云南	昭通	×
7-3	四川	广安市	√	7-13	云南	祥云	√
7-3	四川	内江市资中县	√	7-15	云南	腾冲	√
7-3	四川	九龙县	√	7-18	云南	盐津、大关	√
7-3	四川	广元市旺苍县	√	7-19	四川	攀枝花市	√
7-4	四川	南江县	√	7-19	云南	盈江	√
7-4	四川	遂宁市大英县	√	7-20	云南	龙陵	√
7-4	四川	珙县	√	7-20	云南	西盟	√
7-5	四川	蓬溪	√	7-23	贵州	毕节	×
7-6	四川	南江县	√	7-24	贵州	六盘水	√
7-7	四川	木里	√	7-25	四川	凉山州布拖	√
7-8	重庆	黔江区	×	7-27	贵州	毕节	×
7-10	贵州	黔南州惠水县	×	7-29	四川	凉山州布拖	√

级即为系统报对的情况下,系统在 7 月 36 次灾情中只发生了 7 次漏报,预报准确率较高。

4 结 论

本文通过对 2007 年 6—7 月 WRF 模式的预报效果进行 TS 评分检验并对云贵川渝地质灾害预报系统在 2007 年 7 月云贵川渝地区地质灾害的预报效果进行检验,结果表明:

(1) WRF 模式 2007 年 6—7 月模式的评分表明:中尺度数值预报模式 WRF 对降水具有一定的预报能力,随着预报时效的增加,WRF 模式的 TS 评分随降水量级的增加而减少,预报的空报率和漏报率却随降水量级的增加而增大。模式对区域性、持续时间长的暴雨过程预报能力较高,在一定程度上对于地质灾害预报服务具有较好的应用价值。但是对于暴雨位置预报还有一定的偏差,在以后的工作中,还需进一步优化模式参数方案,提高预报准确率。

(2) 云贵川渝地质灾害预报系统能够较好地预报出 7 月 2—6 日发生在四川盆地内南江县、遂宁、珙县等地区的地质灾害,灾情点基本囊括在预报区内,预报效果较好。

(3) 地质灾害的发生与降水时间之间存在一定的滞后相关性,通常在降水结束后地质灾害仍在持续发生。这对于地质灾害的预警和救援方面有一定的指示意义。

(4) 西南地质灾害预报系统对引发地质灾害的持续性降水、突发性的强降水、间断出现的阶段性强降水等不同雨型所引发的地质灾害的预报有较好的效果,因而降水预报准确率对地质灾害预报是至关重要的。

参 考 文 献

- [1] 谭万沛,王成华,姚令侃,等. 暴雨泥石流的区域预测与预报[M]. 成都:四川科学技术出版社,1994,1,211.
- [2] 罗元华. 我国滑坡泥石流崩塌灾害分布与经济损失评估[J]. 国土开发与整治,1994,4(1):49-55.
- [3] 殷坤龙,汪洋,唐仲华. 降水对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报,2002,21(1).
- [4] 崔鹏,刘世建,谭万沛,等. 中国泥石流监测预报现状与展望[J]. 自然灾害学报,2000,9(2):10-15.
- [5] 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.
- [6] BRAND E W,PREMCHITT J,PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong [C]//Proc 4th Int Symp Landslides. Toronto,1984.
- [7] 濑尼克美,孟河清. 泥石流报警避难降雨指标的制定[J]. 水文科技情报,1991,8(1),32-36.
- [8] 刘传正. 中国地质灾害气象预警方法与应用[J]. 岩土工程界,2004,7(7):17-18.
- [9] Wei Fangqiang, Gao Kechang, Hu Kaiheng. Method of debris flow prediction based on numerical weather forecast and its application[C]. In "Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows", ed. G. Lorenzini, C. A. Brebbia & D. E. Emmanouloudis. Southampton: WITpress, 2006:37-46.
- [10] 郁淑华,徐会明,何光碧,等. 基于 η 数值预报模式的四川盆地泥石流滑坡预报系统[J]. 气象,2005,31(6):47-50.
- [11] 谢修齐,魏鸿,石胜国. 成昆、宝成铁路山坡泥石流危险度判定方法与防御技术研究报告[R]. 铁道部科学研究院研究报告 TY 字第 1111 号[R],成都:1998:112-116.
- [12] 谭炳炎,等. 山区铁路暴雨泥石流中短期预报的研究 专题研究报告[R]. 铁道部科学研究院研究报告 TY 字第 0483 号[R],成都:1990.
- [13] 单九生,刘修奋,魏丽,等. 诱发江西滑坡的降水特征分析[J]. 气象,2004,30(1):13-161.
- [14] 杜惠良. 浙江省滑坡、泥石流气象条件分析及其预报研究[J]. 热带气象学报,2005,21(6):642-650.
- [15] 苏鹏程,刘希林,郭洁,等. 四川泥石流灾害与降雨关系的初步探讨[J]. 自然灾害学报,2006,15(4):19-23.
- [16] 杨胜元,陈百炼,杨森林,等. 贵州省地质灾害-气象预报预警的基本思路与方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,2006,17(2):111-114.
- [17] 晋玉田. 攀西地区泥石流滑坡灾害与降水关系的分析和预报[J]. 四川气象,1999,3,34-38.
- [18] 周国兵,马力,廖代强. 重庆市山体滑坡气象条件等级预报业务系统[J]. 应用气象学报,2003,14(1):122-1241.
- [19] 彭贵芬. 云南气象地质灾害危险等级 PP-ES 预报方法[J]. 气象科技 2006,34(6):746-752.
- [20] 韦方强,汤家法,钟敦伦,等. 区域和沟谷相结合的泥石流预报及其应用[J]. 山地学报,2004,22(3):321-325.
- [21] Wei Fangqiang, Gao Kechang, Hu Kaiheng. Method of debris flow prediction based on numerical weather forecast and its application[C]. In "Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows" ed. , G. Lorenzini, C. A. Brebbia & D. E. Emmanouloudis. Southampton: WITpress, 2006:37-46.
- [22] Wei Fangqiang, Gao Kechang, Jiang Yuhong, et al. GIS-based prediction of debris flows and landslides in Southwestern China [C]. Debris flow hazards mitigation: mechanic, prediction and assessment, 2007, WillPress.
- [23] 蔡文,杨春燕,等. 可拓学基础理论研究的新进展[J]. 中国工程科学,2003,5(2),80-88.
- [24] 蔡文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报,1999,44(7):673-682.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 韦京莲,赵波,董桂芝,等. 北京山区泥石流降雨特征分析及降雨预报初探[J]. 中国地质灾害与防治学报,1994,5(增刊):45-52.
- [28] 谭万沛,罗晓梅. 暴雨泥石流预报程式[J]. 自然灾害学报,2000,9(3):106-111.
- [29] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象,2004,10(12):26-31.