

# 宁波市突发性地质灾害气象预报预警方法

朱龙彪<sup>1</sup> 何彩芬<sup>1</sup> 陈有利<sup>1</sup> 崔飞君<sup>2</sup> 朱晓曦<sup>2</sup>

(1. 浙江省宁波市气象局, 315012; 2. 浙江省宁波市国土资源局)

**提 要:** 地质灾害的诱发因素包括人为因素和自然因素,但在一定的地质结构及环境条件下,降雨是地质灾害发生的最主要诱发因素。基于人工神经网络系统(ANN)和地理信息系统(GIS),结合地面中尺度自动观测系统的雨量实况与高精度的 WRF 数值预报雨量格点产品,依托 MICAPS 系统,实现预报员的快速主观订正,建立的宁波市突发性地质灾害预报预警系统在业务运行中是高效可行的。

**关键词:** 地质灾害 气象条件 预报预警

## Early Warning and Prediction of Abrupt Geological Hazards Based on Weather Forecast in Ningbo

Zhu Longbiao<sup>1</sup> He Caifen<sup>1</sup> Chen Youli<sup>1</sup> Cui Feijun<sup>2</sup> Zhu Xiaoxi<sup>2</sup>

(1. Ningbo Meteorological office, Zhejiang Province 315012; 2. Ningbo Land and Resources Department, Zhejiang Province)

**Abstract:** The geological hazards can be induced by both man-made and natural factors. Precipitation may be the most important factor under a certain geological structure and environmental conditions. The early warning and prediction system of abrupt geological hazard in Ningbo would be very efficient and feasible in the operation, which is based on artificial neural network (ANN) and geographical information system (GIS), combined with rainfall factor from surface mesoscale observation system and high-precision grid rainfall amount forecasted by WRF model and relied on MICAPS to achieve quick subjective correction by forecasters.

**Key Words:** geological hazard meteorological condition early warning and prediction

### 引 言

滑坡泥石流地质灾害是世界上许多国家特别重视的问题,已被列为“国际减轻自然灾

害 10 年计划(IDNDR)”中的主要突发性自然灾害之一。美国、日本及前苏联等国家开展滑坡、泥石流等地质灾害的监测已有几十年时间,但其监测和预警的研究也是近 10 年才提出的。地质灾害的形成受地质条件、气

象条件、人类活动等诸多因素控制,具有较大的随机性。地质灾害监测预警的研究目前在国际上还是一个难题<sup>[1]</sup>。但据统计,由局地暴雨引发的泥石流、滑坡等灾害占这类灾害总数的 95% 和 90% 以上<sup>[2]</sup>。为了有效地减轻气象因素诱发的地质灾害,2003 年 4 月 7 日国土资源部和中国气象局签署了《国土资源部和中国气象局联合开展地质灾害气象预报预警工作协议》,2003 年 11 月 24 日国务院总理温家宝签署公布了《地质灾害防治条例》。自此,我国地质灾害防治工作走上了法治化和规范化的轨道。许多地质工作者和气象工作者在泥石流、滑坡等地质灾害的预报预警中作了很多的尝试并取得了一定的成效<sup>[3-6]</sup>。宁波市气象局与宁波市国土资源局于 2004 年开始进行合作与研究,由宁波市国土资源局提供全市山地特征及地质灾害实况资料,市气象局提供雨量预报与雨量实况资料,联合研制了宁波市突发性地质灾害气象预报预警系统,并已正式投入业务运行,在 3 年的汛期发挥了较好的地质灾害预警作用,为市领导的决策服务与减灾防灾以及平安宁波建设起到了积极的作用。

## 1 资料与分析

### 1.1 资料

为增加样本数,样本范围扩大到与宁波地质情况相近的整个浙江省。使用的降雨资料为浙江省水文勘测局(2002)提供的 1990—2001 年全省 1257 个观测站的日降雨量观测数据,地质灾害资料根据浙江省国土资源厅地质环境处提供的地质灾害调查与区划统计资料。截止 2002 年 3 月全省有记载的滑坡、泥石流、崩塌灾害点总计有 2918 处,其中 86.3% 属于滑坡(78.3%)和泥石流(8.0%),有具体发生日期和地点记载的滑坡、泥石流灾害共有 814 处,时间跨度为

1969 年至 2002 年 3 月。在 814 处滑坡、泥石流地质灾害中,由降雨诱发的占 85.5%,有 9% 左右的滑坡未记录诱发原因,因此估计由降水诱发的滑坡(泥石流)灾害点应超过 90%。在 1990—2001 年地质灾害和雨量资料共有的时段内,选择总计为 609 处滑坡和泥石流地质灾害点作为样本。在 609 处滑坡、泥石流灾害点中,泥石流 49 处,仅占 8%。由于滑坡灾害的发生点并不一定发生在雨量观测点处,因此选择距离灾害发生点最近的观测站的雨量数据来代替灾害发生时该处的降雨量。

### 1.2 滑坡灾害与降雨量关系

对浙江省 609 处滑坡灾害与临近的雨量作统计<sup>[7]</sup>,当日雨量为 20~160mm 间发生的滑坡占总数的 90% 左右,而当日雨量超过 160mm 后,随着降雨量的继续增大,滑坡数增加很少,即在 160mm 附近发生的滑坡降雨量约占 10%。由于滑坡灾害是由降雨诱发基岩上覆土层滑动而产生的,因此降雨发生后存在雨水下渗的时间因素。对滑坡前 5 天、10 天、15 天的累计雨量进行统计分析,结果显示当前 5 天和前 10 天累计雨量超过 30mm 时,滑坡就开始发生,在累计雨量 30~330mm 区间发生的滑坡数占 40%,但在累计雨量超过 330mm 以后,随着降雨量的增大滑坡数增加很少,表明 60% 左右的滑坡是在 330mm 附近发生的。而前 15 天累计降雨量达到 45mm 时开始发生滑坡,其中在 45~380mm 区间发生的滑坡数占 32% 左右,在累计降雨量达到 380mm 左右时发生的滑坡约占 68%,但随着降雨量的进一步增大滑坡数增加很少。

此外,在各种人类活动中,如因造房、筑路等引起切坡、植被毁坏等情况发生时,即使降雨量较小也可能诱发滑坡。对 1990—2001 年期间有明确日期记载和切坡、植被毁

坏等诱发因素的 70 个滑坡灾害点分析发现, 触发灾害的当日降雨量明显降低, 此时有 35% 左右的滑坡发生在 10~80mm 雨量区间, 在日降雨量大于 80mm 时发生的滑坡约占 65%。

## 2 研究方案

建立正确的地质灾害预报预警模型是实现突发性地质灾害气象预警成败的关键, 资料统计显示, 浙江省有 90% 以上的滑坡灾害是由降水引起的, 但由于地质灾害与强降水呈非线性关系, 难以使用简单的参数进行解析表达。因此, 寻找一种能在已知客观条件下, 可以自动学习和调整各因子之间的作用参数, 并合理利用已有的数据资源的方法, 就成为提高地质灾害预报预警能力的一个可行途径。基于这一思想, 宁波市突发性地质灾害气象预报预警系统(LAPS)结合人工神经网络模型(ANN)与地理信息系统(GIS), 其基本思想就是把降雨以外的因子(如自然地理、地质环境、地质灾害特征、人类活动等因子)看作相对稳定的因子, 把降雨当作一种较大的诱发因子来考虑。

人工神经网络(ANN)是近年来迅速发展的人工智能技术, 它采用自适应算法, 具有自组织、自学习功能及归纳能力。在数据处理中可以避免数据分析和建模中的困难, 采用拟人化的方法进行处理, 特别适合不确定性和非结构化信息的处理, 具有较强的容错能力。能够将新近发生地质灾害点信息输入到系统中, 从而实现对影响灾害的各因子权重进行重新分配, 并不断地训练模型动态更新、提高预报预警精度。应用 ANN 技术必须要有数据源, 应用 GIS 在多种有关滑坡灾害信息的基础上进行操作获得的各种结果, 可以作为 ANN 的输入和训练条件, 同时 ANN 的输出又可以作为 GIS 的资源来管理

和进行新的操作。GIS 与 ANN 两者之间的关系可以用图 1 表示。基于 GIS 和 ANN 的滑坡灾害概率预报(警)系统, 简称 LAPS。

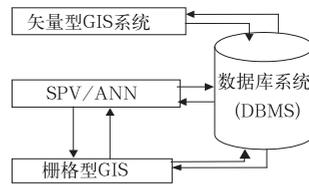


图 1 滑坡灾害预报中 ANN 与 GIS 的关系示意图

## 3 系统构建

根据突发性滑坡(泥石流)灾害分布特点及对触发因素的分析, 把地形(坡度和形态等)、断裂构造及地层岩性信息、第四纪覆盖层类型(土壤类型, 土地利用类型)、土壤湿度、土壤含水量、植被/裸露地作为 LAPS 输入变量, 把当前已知的具体日期和位置记载的滑坡灾害点作为输出变量。上述输入信息可以在 GIS 平台上从数字高程模型 DEM、遥感数据、地质图、土壤图、土地利用现状图数据库中自动获取。系统运行时, 将站点位置和对应的实况雨量和预报雨量导入系统数据库, 然后将数据库降雨数据赋值给出空间坐标点, 并采用反距离权重法进行  $1\text{km} \times 1\text{km}$  插值, 生成降雨栅格图。将各致灾因子进行计算, 实现对整个宁波地区内的灾害发生概率(0~1)进行快速评价, 并自动编制和输出地质灾害等级分布图(等级划分如表 1 所示)。在现有的 DEM 数据精度条件下, 预报空间尺度可达到  $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。图 2 给出了宁波市突发性地质灾害预报预警系统的模式。

表 1 地质灾害概率等级划分

级别	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
概率	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.5	0.5~0.8	0.8~1.0
可能性	小	较小	较大	大	很大

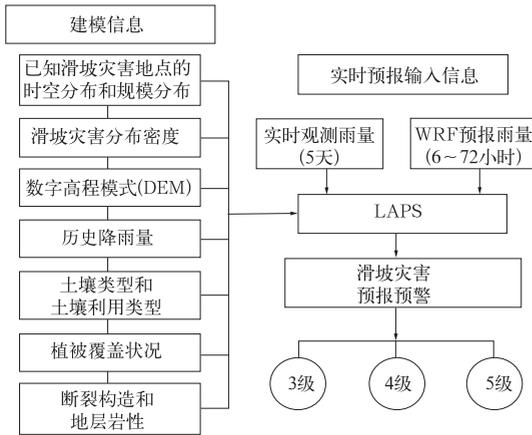


图 2 宁波突发性滑坡灾害概率预报预警模式

雨量资料在突发性地质灾害预报预警系统中是非常关键的输入因子,宁波市气象台为 LAPS 系统提供了两类雨量资料,第一类是实况雨量资料,第二类是预报雨量资料。LAPS 系统运行中需要获取 7 天(或 8 天)的雨量资料,即前 5 天雨量实况资料、当天雨量资料和未来 24 小时(或 48 小时)的预报雨量资料。

2004 年 LAPS 系统刚运行时,雨量实况资料取自宁波市 8 个地面观测站和 2004 年初新建的 2 个自动观测站。2005 年底,宁波市境内建立了 120 个地面中尺度自动气象观测站,这套观测系统使宁波市境内地面观测站间距从原来的 50km×50km 加密到了目前的 10km×10km(市区 3km×3km),使实况雨量的精度大为提高,LPAS 系统从 2006 年 6 月起应用了地面中尺度观测系统中的雨量实况资料。

预报雨量是基于宁波市气象台中尺度预报模式(WRF)雨量格点产品再经人工订正。目前 WRF 模式的技术设置:粗网格区域范围在 19~40°N、106~133°E 之间,中心位于(30°N、120°E),水平分辨率 15km×15km,格点数为 161×161,垂直层为 31,面积 576×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>;细网格区域在 28.8~30.9°N、120.5~123°E,水平分辨率 5km×5km,格点数为 49×49,垂直层为 31,面积为 5.76×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,是母网格的 1%,图 3(见彩页)是母网格区域和

子网格区域及地形图。WRF 向 LPAS 系统输出配套的 400 个雨量格点值,以 MICAPS14 类数据格式输出,预报人员在充分参考各类预报产品、雷达和卫星资料并结合天气会商结论,利用 MICAPS 的图形化修改功能,可对雨量格点值进行快速的主观订正,然后作为最后的预报雨量输入到 LAPS 模式中运行,由此计算出宁波市地质灾害的预警预报等级图。随着 WRF 预报时效的延长,目前宁波的地质灾害的预警能力已从原来设计的 24 小时提高到了 48 小时,使系统对突发性地质灾害的预警能力大为提高。

实况雨量则从中尺度地面观测系统中自动获取。地质灾害的主要预警时段是当晚 20 时至次日 20 时,需要向 LPAS 系统输入的实况雨量是前一天 08 时到当天 20 时。目前分 3 个时段向 LAPS 系统输入完整的实况雨量,即前一天 08 时到当天 08 时和当天 08 时到 14 时实况雨量,当天 14 时到 20 时的雨量使用 WRF 预报雨量再经人工订正。

模式中考虑了前期降水与预报日降水。由于前期的降雨也会影响土壤的含水程度,且时间越接近,对滑坡等灾害的触发作用也越大,因此系统应用了前 6 天的有效雨量,即:

$$R_a = \sum_{L=0}^5 0.8^L R_L$$

其中: $R_a$  为有效雨量, $R_L$  为灾害发生当日的前 1 天到前 6 天的雨量,灾害发生前 1 天  $L=0$ ,灾害发生前 2 天  $L=1$ ,依次类推。上式中系数  $0.8^L$  是考虑降雨随时间推迟而流失影响滑坡的衰减量,该系数主要表征为蒸发、地表流失等后的降水残留系数<sup>[8]</sup>。当  $L \geq 6$  时,其权重小于等于 0.26,由历史资料统计表明,宁波的地质灾害与 7 天以前的雨量关系不明显,因此 7 天以前的雨量忽略不计。目前各地对有效雨量的时间长度取法不尽相同,这应根据各地的历史样本情况而定。

#### 4 个例检验

宁波市突发性地质灾害预报预警系统是从 2004 年 5 月 1 日起进入业务运行,在 2004—2006 年汛期共制作地质灾害预报 519 次,其中 1~2 级 450 次,3~5 级 69 次。根据宁波市国土资源局提供的地质灾害实况资料统计,2004—2006 年,宁波市境内共有 19 天发生崩塌、山体滑坡和泥石流地质灾害,其中发生泥石流和山体滑坡的 13 天(115 处),仅发生崩塌的 6 天。由于不少崩塌是由公路切坡及山田(塘)蓄水等引起的,在选择降雨引起的地质灾害样本时不考虑崩塌个例。表 2 列出了近 3 年宁波市境内发生山体滑坡、

泥石流等突发性地质灾害以及日雨量情况。在 13 天地质灾害发生日中,LAPS 系统对其其中 12 天发布了 3~4 级地质灾害等级预报预警,系统对滑坡(泥石流)地质灾害发生日的击中率为 92%(12/13)。如果以 50%以上的概率即 3 级为起报条件,则系统对地质灾害日的预报成功率为 17%(12/70),空报率 82.6%(57/69),漏报率 1.4%(1/70)。若以县为落点进行预报质量检验,则在 115 处地质灾害中有 99 处被击中,预报击中率为 86.1%(99/115),16 处漏报,漏报率为 13.9%(16/115)。从质量统计看出,系统对地质灾害的预报击中率较高,但存在空报率过高的问题,还需要在以后的工作中进行消空研究,以提高突发性地质灾害的预报准确率。

表 2 2004—2006 年宁波市地质灾害实况统计表

编号	日期	系统预报等级	WRF 雨量预报/mm	地质灾害实况	雨量及诱因
1	20040517	1	0	余姚大岚半岭村滑坡	4.8mm
2	20040703	4	55	宁海深圳下横山滑坡	强对流 28.6mm
3	20040811	4	90	8.11 夜宁海岔路等 8 处崩塌、滑坡	台风云娜 132
4	20040812	4	180	8.12 宁海双峰乡等 8 处崩塌、滑坡	台风云娜 148.9mm
5	20040911	3	16	9.12 宁海桃源等地滑坡	台风海马 126.3mm
6	20040912	3	20	9.13 余姚大岚镇夏家岭村毁房 5 间半泥石流	台风海马 45.1mm
7	20040916	4	40	宁海桑州公路滑坡 28.4mm	
8	20040917	4	19	18 日东钱湖韩岭山体滑坡	强对流 102mm/h
9	20050719	4	44	20 日凌晨 5 时,余姚陆埠镇杜徐村滑坡	台风海棠 56.3mm
10	20050805	4	132	6 日北仑等 5 处地泥石流、滑坡	台风麦莎 127.1
11	20050806	4	56	8.7 北仑等 36 处地泥石流、滑坡	台风麦莎 53.9
12	20050807	4	169	7 日凌晨 0 时许,鄞州塘溪东山新村泥石流	台风麦莎 179.9mm
13	20050911	3	208	11 日夜宁海、北仑等地 38 处崩塌、滑坡;12 日余姚、慈溪 5 处滑坡	台风卡努 487.9

2004 年 8 月 12 日,受 0414 号台风云娜影响,宁波市普降暴雨,宁波次日出现多处地质灾害,宁海县岔路镇、强蛟镇、跃龙街道、桑州镇、双峰乡等 8 处发生了山体滑坡或崩塌地质灾害。本系统提前 1 天预报出了相应范围内地质灾害有 4 级,起到了很好的预警作用。图 4(见彩页)是 LPAS 系统对宁波市的地质、植被、坡度等条件合成后的静态滑坡灾害等级图,图 5(见彩页)是根据公式计算出的前 5 天有效雨量累积图,图 6(见彩页)是 WRF 的 24 小时预报雨量经预报员根据天气系统主观订正后在模式中应用的预报雨量图,图 7(见彩页)是 LPAS 系统最后输出的地质灾害预报(警)图。8 月 12 日,LPAS 预报地质灾害等级 4 级,预报值班人员密切关注气象资料,监视风雨变化情况,并及时用电话与宁波市国土资源局会商,并通报了台风云娜强度强,地质灾害预报等级为 4 级,提请注意防范。宁波市国土资源局紧急部署,广发紧急通知,将宁波市境内存在安全隐患点的 5000 多人及时进行转移,有效地防止了可能造成的人员伤亡。

## 5 结 论

(1) 把降雨以外的因子(如自然地理、地质环境、地质灾害特征、人类活动等因素)看作相对的稳定,把降雨当作一种较大的诱发因子来考虑,进而通过 ANN 模型与 GIS 的紧密结合建立的宁波突发性地质灾害气象预报预警系统(LAPS)在近 3 年对滑坡灾害有

较好的预报效果,但空报率相对较高,还有待于进一步提高和改进。

(2) 人工神经网络(ANN)采用自适应算法,具有自组织、自学习功能及归纳能力。但是,对于地质灾害反馈信息不能及时获得,或者收集到的地质灾情样本不完全,使之不能及时添加到模式个例中。还需进一步完善地质灾害历史数据库和实时信息收集网络。

(3) WRF 雨量格点值以 MICAPS14 类数据格式输出,利用 MICAPS 的图形化修改功能可进行快速的主观订正。

(4) 地质灾害的预警报工作涉及面广、影响大、技术难度大,还需不断的总结经验和加强研究,增加样本个例,完善预报模型等。

## 参考文献

- [1] 宋光齐,李云贵,钟沛林. 地质灾害气象预警预报方法探讨[J]. 水文地质工程地质,2004,(2):33-36.
- [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] 刘传真,温名行,唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报,24,13(4):303-307.
- [4] 谢剑鸣,刘礼领,殷坤龙,等. 浙江省滑坡灾害预警预报的水阈值研究[J]. 地质科技情报,2003,22(4):100-101.
- [5] 魏丽,郑有飞,单九生. 暴雨型滑坡灾害预报预警方法研究评述[J]. 气象,2005,31(10):3-5.
- [6] 薛建军,徐晶,张芳华,等. 区域性地质灾害气象预报方法研究[J]. 气象,2005,31(10):24-26.
- [7] 李长江,王永江,王建国. 国土资源遥感调查与综合研究[M]. 北京:地质出版社,2004:47-48.
- [8] 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,2002:125.

# 朱龙彪等：宁波市突发性地质灾害气象预报预警方法

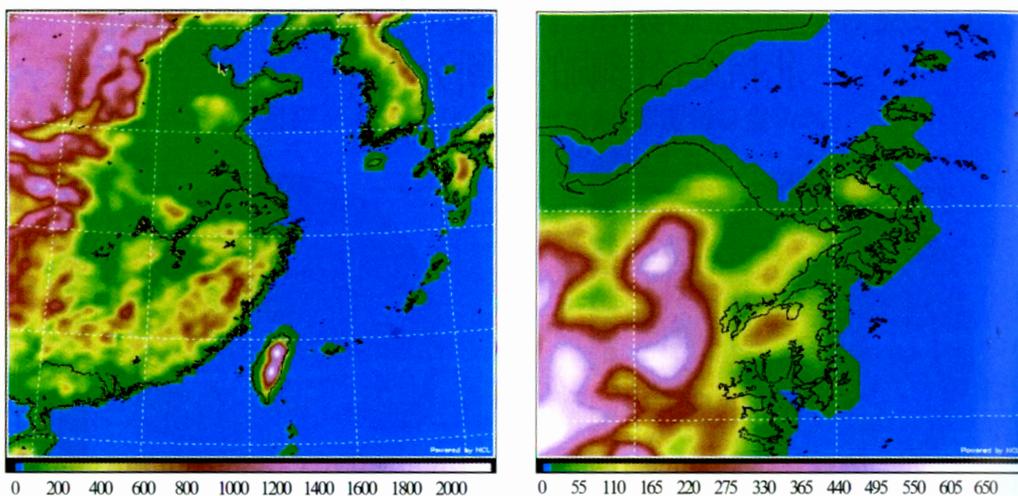


图3 WRF母网格区域和子网格区域及地形

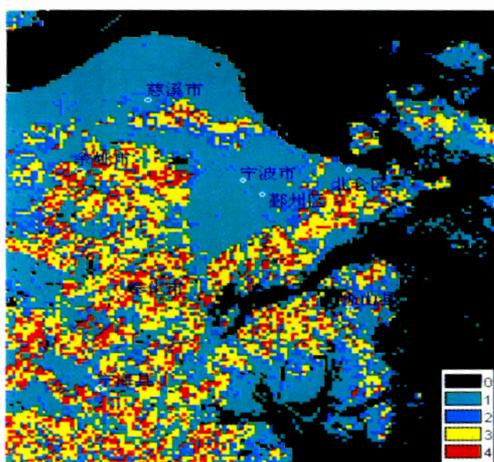


图4 宁波市静态滑坡灾害等级图

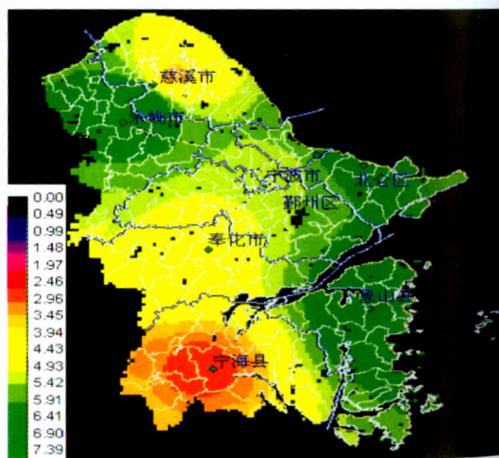


图5 2004年8月11日当天加前5天有效雨量图

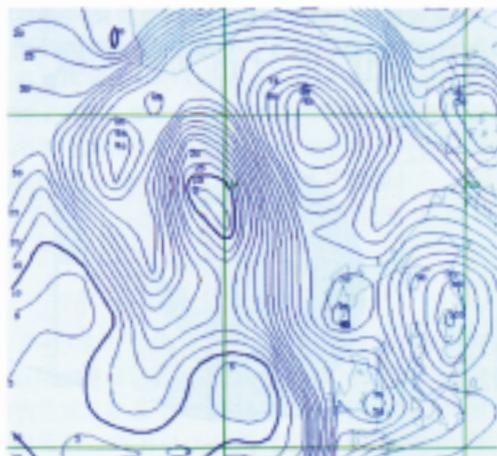


图6 2004年8月11日20时WRF24小时雨量预报图

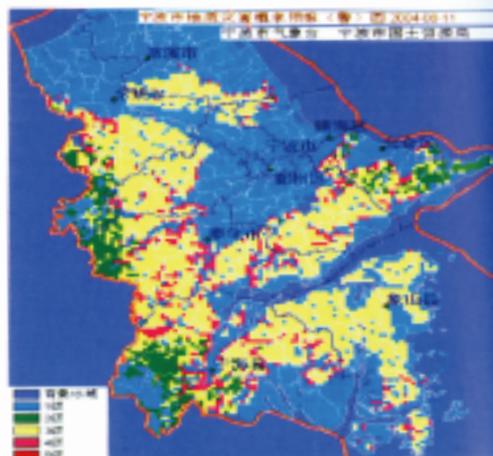


图7 2004年8月11日20时地质灾害预报图