

天津市突发性地质灾害气象预警系统的设计与应用

王爽¹,王晴²,李倩¹

(1.天津市地质环境监测总站,天津 300191;2.天津师范大学,天津 300384)

摘要:根据天津市地质灾害特点及与气象条件的关系,从气象因素和地质灾害隐患入手,深入研究地质环境和降水因素与地质灾害发生的关系,综合利用数学算法和GIS技术,建立了天津市地质灾害气象预警模型和预警系统。此外,重点介绍了五名山东滑坡自动化远程监测系统示范工程,运行结果显示,监测系统的实施保证了监测数据的连续性,可以较好的反应滑坡的变形特征及变形趋势。实践证明,应用基于GIS的地质灾害预警系统已在我市近几年的地质灾害气象预警预报中不断完善,预警精度得到提高,防灾减灾效果明显,对保护人民生命财产安全发挥了重要作用。

关键词:地质灾害;模型;预警系统;示范工程;防灾减灾

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2015)02-0155-06

天津市地处华北平原东北部,地质条件比较脆弱,北部山区地质灾害以崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害为主,曾造成人员伤亡和财产损失。自2004年,经天津市人民政府批准,天津市国土房管局与天津市气象局联合,开展了以大气降雨为诱发因素的天津市地质灾害气象风险预警工作,该项工作的开展起到了一定的成效,但由于该风险预警模板采用单一的临界雨量判据法,未考虑预警精度同样受到所预警地区突发性地质事件样本数量、地质环境发育现状、地质环境稳定性及区域人类工程活动等其他诸多因素制约,因而难于解释地质环境变化及地质灾害成因对预警工作的影响,预警准确性也亟待提高。为此,本课题提出了基于GIS环境下的天津市突发性地质灾害风险预警系统设计及验证实现,以及针对区域特征设计的点对点滑坡地质灾害自动化监测预警示范工程。

1 地质灾害风险预警系统设计

1.1 风险预警模型设计流程

天津市突发性地质灾害风险预警模型设计综合利用了GIS技术,过程包括地质灾害影响因子评价和预警信息发布两个阶段^[1]。地质灾害影响因子评价阶段是对地质灾害发生的空间、时间及造成危害、损

失可能性做出分析判断的过程;评价结果发布是在评价结果的基础上,借助信息技术,实现评价结果的可视化,并通过当地电视台及其他媒介渠道对外发布,流程如图1所示。

1.2 突发性地质灾害评价指标的筛选与确定

天津市北部山区地质灾害影响因素较多,包括

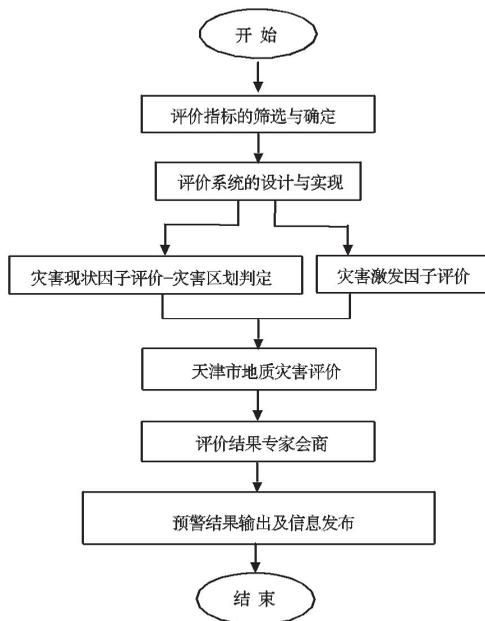


图1 灾害预报工作流程

Fig. 1 Flowchart of disaster forecast

收稿日期:2014-12-29

资助项目:天津市科委科技计划项目:天津市地质灾害预警预报技术及应用(07ZCGYSF03300);天津市国土房管局矿产资源补偿项目:天津市地质环境监测

作者简介:王爽(1979-),女,硕士,工程师,现主要从事天津市突发性地质灾害监测预警工作,Email:wangshuang7905@163.com。

地貌、地层、地质构造(断裂)、山坡坡度、高程、植被覆盖率、水系、地震烈度、岩组类型、历史地质灾害影响(灾害点和灾害规模)、降雨量、人口密度和人类工程活动分区等等^{[2][3]},如果把上述因素均列入地质灾害预警评价,则将会得到庞大的指标体系,这不仅增加评价工作量,而且还会冲淡主要指标的作用。因此,本研究采用确定性系数模型进行关键性信息选取。

1.2.1 确定性系数模型(CF)

CF作为一个概率函数,最早由 Shortliffe 和 Buchanan(1975)提出,由 Heckerman (1986)进行了改进,表示为下式:

$$CF = \begin{cases} \frac{pp_a - pp_s}{pp_a \cdot (1 - pp_s)} & pp_a \geq pp_s \\ \frac{pp_s - pp_a}{pp_s \cdot (1 - pp_a)} & pp_a < pp_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: pp_a 是事件(地质灾害)在数据类 a 中发生的条件概率,在实际灾害应用时可以表示为代表数据类 a 的单元中存在的灾害面积与单元面积的比值; pp_s 是事件在整个研究区中发生的先验概率,可以表示为整个研究区的灾害的面积与研究区面积的比值。

计算出每一数据层的 CF 后,需要将不同数据层

的 CF 进行合并。假定要合并两个数据层的 CF 分别为 x 和 y , 合并后的结果为 z , 合并公式如下式:

$$z = \begin{cases} x + y - xy, & x, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)}, & x, y \text{ 符号相反} \\ x + y + xy, & x, y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

1.2.2 关键影响因子确定

根据公式(2)将各因子数据层进行合并,合并的字段为 CF 值。首先将其中两个因子数据层进行合并形成一新的数据层,然后与第3个因子数据层进行合并,直到所有数据层均合并完为止。为使合并结果易于解释,将合并图层的 CF 字段值进行分类,分为5个级别。划分标准与每一级别的意义如表1所示。

根据计算得到的每个因子图层叠加后分段的百分比的变化量,如图2所示。

由图2可见,各因子对于灾害发生的贡献率有所不同,我们根据下式(3),计算每个图层因子的相对贡献大小,计算结果见表2。

$$T = |A_1| + |A_2| + |A_3| + |A_4| + |A_5| \quad (3)$$

根据表2,由于地层、地震烈度和人口密度3个因子的相对贡献值较小、不足1,根据评价指标的代表

表1 CF 稳定性级别划分
Table1 Division of CF Value grade

| 代码 | CF值范围 | 描述 | 稳定性分区 |
|----|-------------|---------------------------|-------|
| 1 | < -0.6 | 具有非常小的灾害发生确定性,即基本不可能有灾害发生 | 稳定 |
| 2 | -0.6 ~ -0.2 | 灾害发生的可能性较小 | 基本稳定 |
| 3 | -0.2 ~ 0.2 | CF值在0附近变化,灾害发生的可能性不易确定 | 不确定 |
| 4 | 0.2 ~ 0.6 | 具有灾害发生的潜在危险性 | 潜在不稳定 |
| 5 | ≥ 0.6 | 极易发生 | 不稳定 |

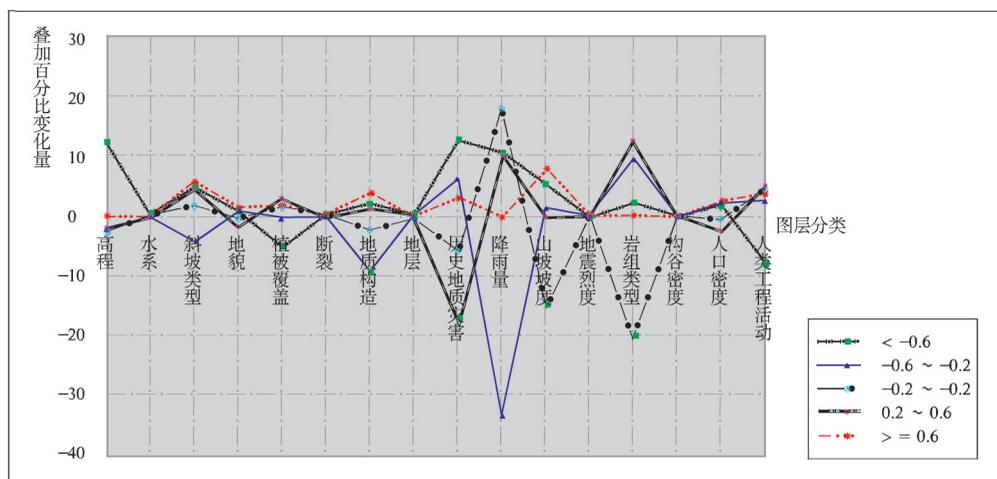


图2 各因子图层 CF 值叠加后分段百分比的变化量

Fig.2 Variation of subsection percentages after superposition of CF values of various factors

性原则,将其从评价指标中去除。选定地形地貌、地质构造、降雨量等其它10项指标作为研究区地质灾害(崩塌、滑坡和泥石流)影响因素。

1.3 突发性地质灾害影响因子权重的确定

将筛选出的影响因子划分成四部分,发育因子(历史地质灾害)、基础因子(水系、高程、地貌、植被覆盖、地质构造、山坡坡度、岩组类型)、易损因子(人类工程活动)以及激发因子(降雨量)。发育因子、基础

因子和易损因子联合作为研究区地质灾害发育的诱发因子,进行研究区预警区划判定,然后结合激发因子进行地质灾害预警判定。

1.4 地质灾害综合评价

当得到一个地区的激发因子(降雨量)预报数值时,导入本研究区预警区划,就可以根据多项因子综合分析计算出的地质灾害发生的风险预警数值,作为预警指标使用^[4](表3)。

表2 因子贡献率分析

Table 2 The factor analysis of contribution rate

| 因子 | 水系 | 高程 | 地貌 | 植被覆盖 | 地质构造 | 地层 | 历史地质灾害 | 降雨量 | 山坡坡度 | 地震烈度 | 岩组类型 | 人口密度 | 人类工程活动 |
|----|-----|------|-----|------|------|-----|--------|------|------|------|------|------|--------|
| T | 9.3 | 21.2 | 5.0 | 12.2 | 18.8 | 0.9 | 45.6 | 72.5 | 29.7 | 0.8 | 45.5 | 0.9 | 24.5 |

表3 地质灾害风险预警等级划分

Table 3 Forecast-warning grade of geo-hazard

| 预 报 等 级 降 雨 等 级 | | 危 害 区 | 地 质 灾 害 危 险 性 预 测 | | | | |
|--------------------|-----------------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 5级危害区 | 4级危害区 | 3级危害区 | 2级危害区 | 1级危害区 |
| 1日最大降雨量(mm) | 低诱发性 55~100 | | 预警区 | 非预警区 | 非预警区 | 非预警区 | 非预警区 |
| | 中诱发性 100~150 | | 预警区 | 预警区 | 非预警区 | 非预警区 | 非预警区 |
| | 高诱发性 >150 | | 预警区 | 预警区 | 预警区 | 非预警区 | 非预警区 |

1.5 风险预警案例分析

以GIS为技术平台,将上述评价因子数字化(编图采用国家标准1:10万数字化地形图作为底图)。在此基础上,按1 km×1 km,将评价区划分成850个栅格,每一个栅格中对应的各因子属性赋值及权重赋值,运用GIS的空间叠加功能,实现了天津市突发性地质灾害预警的分层次递进模型的定量研究和空间可视化。

以2012年7月21日的降雨数据为例进行预测^[5],预测结果(图3)显示,预警等级较高的地带多分布在地质灾害高易发区内,并且基本上与降雨量有着正相关。预警结果显示,未来1日地质灾害三级预警区主要分布在在下营、官庄及别山一带,发生崩塌、滑坡等地质灾害机率较大,需要引起关注,当天通过媒体向公众及有关部门

进行了汇报。后期经实地调查^[6],7月22日,共发现5处山体滑坡及崩塌落石灾害点,与当日利用系统生成的预警预报图对比,其中有4处(Z1-Z4)发灾点均落入图内预警区中,与预测结果基本相符,本次风险预警准确率达80%,说明评价模型具有一定的可行性。

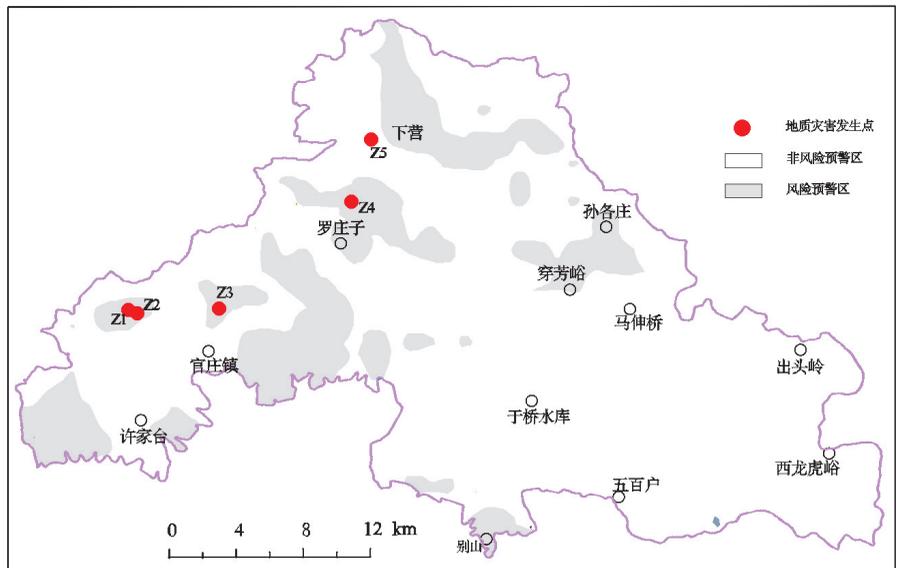


图3 天津市北部山区地质灾害预测

Fig.3 Geo-hazard early warning in northern mountain area of Tianjin city

2 滑坡地质灾害自动化监测预警示范工程

多年来,天津市的突发性地质灾害风险预警工作只局限于区域研究,然而对于具体灾害隐患点的深入研究略显不足^[7],本次课题针对现状问题,提出了在天津市蓟县五名山东隐患点设计建设一处滑坡自动化监测示范系统,形成集监测数据采集、传输、监测、数据处理和预警为一体的综合信息平台^[8]。

2.1 示范工程建设目的

(1)在滑坡体上建设点、面结合的深部位移变形和地下水活动监测网络,可以建立滑坡变形与降雨、地下水活动的定量关系,研究降雨滑坡地下水作用机理,提高滑坡预警的准确性和科学性。

(2)开展山区滑坡地质灾害预警机理研究,示范区增建的滑坡体深部位移监测和孔隙水压力监测,将全面地掌握滑坡深部位移变形的阶段特征及地下水活动规律^[9],为长期监测预警提供可靠的观测资料以及滑坡体稳定性的正确分析与评价,以便从更加深入的角度剖析灾害的发生机理。

2.2 示范区自动监测系统设计

根据五名山东滑坡现状,本设计依据其致灾机理所表现出的可测物理量,设计对滑坡实行立体监测,在原有滑坡伸缩仪、全站仪的地表变形监测基础上,加设深部测斜仪、孔隙水压计和自动雨量站监测系统。

示范区采用自动化监测手段,即将传感元件所测电信号经采集系统转化为数字信号,再通过无线通讯方式传输到云数据采集中心,监测人员通过远程登录系统查看滑坡发育变形情况,并根据天气变化情况实时调控采集频率。示范区自动化监测系统示意图如图4。

(1) 监测参数

地表大地变形监测(包括水平和垂直位移)、地表两点相对位置变化的监测(变形突出部位)、地表裂缝宽度监测、地下深部滑动面变形监测、孔隙水压力监测、地下深处稳定地层与地下一定深部位之间的相对变形监测^[10]。

(2) 监测仪器

地表大地变形监测(包括水平和垂直位移)采用全站仪进行监测。

地表两点相对位置变化的监测(变形突出部

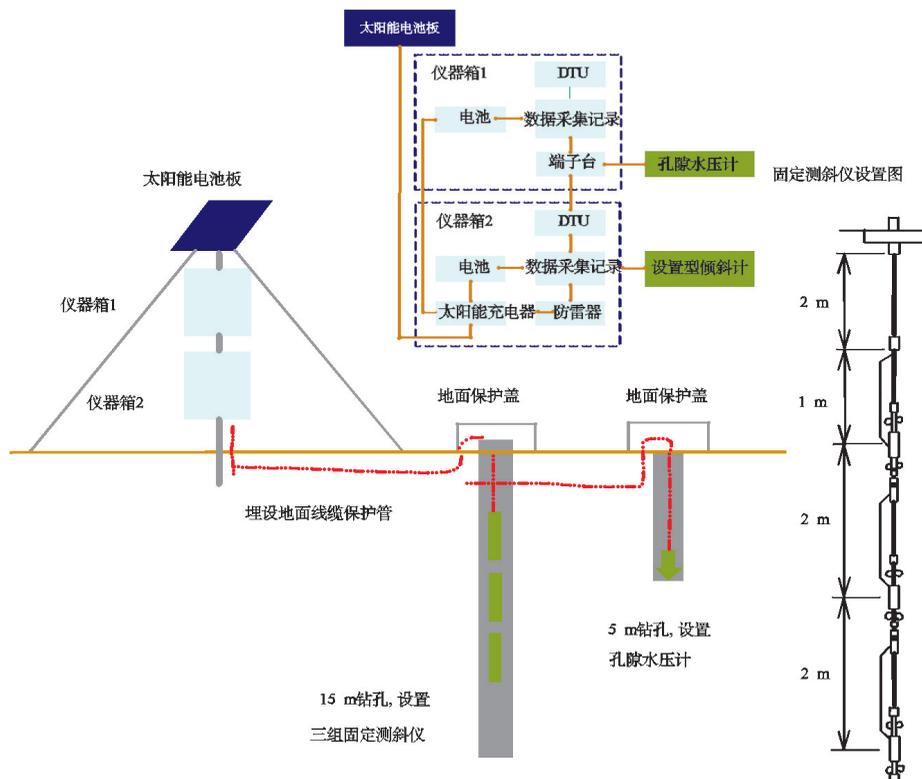


图4 示范区自动化监测系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of automatic monitoring system of demonstration area

位)、地表裂缝宽度监测选用全站仪和滑坡伸缩仪进行监测。

地下一定深部、地下深部滑动面、地下深处稳定地层附近变形监测采用固定式测斜仪进行监测;

孔隙水压力监测采用孔隙水压计进行监测。

2.3 示范区建设施工及仪器安装

(1) 监测钻孔的施工

滑坡深部位移和孔隙水压力监测孔施工包括成孔、清孔、安装设备后封孔。钻孔施工过程中严格控制钻孔垂直度要求为 $1^\circ/100\text{ m}$,本次共施工钻孔2眼,深度分别为15 m和5.5 m,钻孔过程中利用15 m孔进行地质勘探,确定滑坡体滑动面位置为地面下深5 m左右。

(2) 测斜管的安装施工

根据滑坡监测点的勘探结果,确定滑动面位置,测斜管安装在滑动面以下2 m。测斜管共安装3个固定测斜仪,分别安装在滑动面位置、滑动面以上2 m和滑动面以下2 m,安装时保证测斜管一对凹槽的方向与要测量的深部位移方向一致。深部位移钻孔中测斜管的安装、固定采取如下步骤(图5)。

(3) 孔隙水压计的安装施工

根据滑动面现场勘探结果,确定其位置,钻孔深度要超过滑动面0.5 m左右。孔底填入部分干净的砾石、砂,将包装好的空隙水压力计放入钻孔预定位置,然后在其周围填砂,并保证探头周围渗水流畅(图6)。

2.4 系统监测结果和初步分析

课题以蓟县五名山东滑坡监测系统为例,对深部位移孔隙水压力监测结果进行初步分析。

(1) 固定测斜仪监测及数据分析

根据本次滑坡自动监测系统布设的固定测斜仪监测孔的观测结果,分别位于观测孔孔口3 m、5 m和7 m位置的三组固定测斜仪监测结果均保持相对稳定状态,分析原因可能是周边采矿工程大范围停产,人为破坏影响大大减少;其次仪器正式投入运行以来,该地区降水量一直较小,由降雨这一主要的诱发因素影响较小。

(2) 孔隙水压计监测及数据分析

根据本次滑坡自动监测系统布设的孔隙水压计监测孔的孔隙水压计变化与降水量存在的相关性,各期降水在孔隙水压计上均有显示,而且体现出一定程度的滞后效应,这些现象在远程监控数据中均有所体现(图7)。

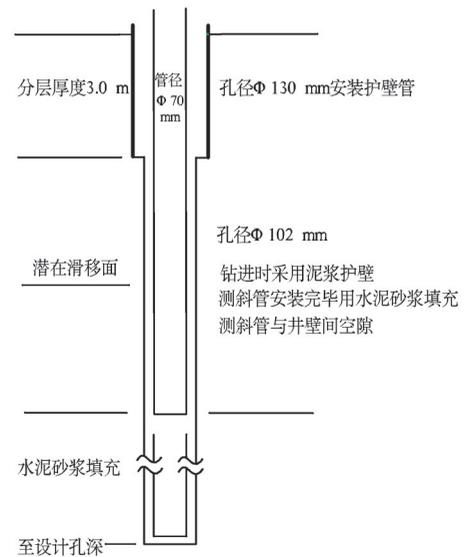


图5 深部位移钻孔施工设计

Fig.5 Drilling construction design of deep displacement

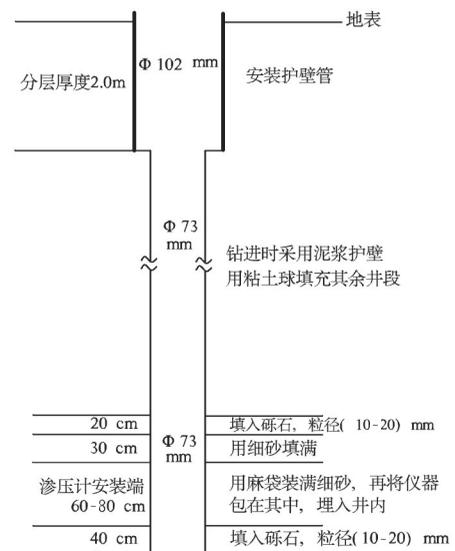


图6 孔隙水压计钻孔施工设计

Fig.6 Drilling construction design of pore water pressure gauge

2.5 五名山东滑坡变形分析

从五名山东滑坡体地表变形特征、滑坡深部发育变形和孔隙水压力监测数据分析结果可以判断:五名山东滑坡区正处于缓变蠕滑阶段,可能由于监测期未出现强降雨过程,以及周边采矿业的陆续停产,滑坡体现无明显加速趋势,整个滑坡体倾角大约 $20 \sim 30^\circ$ 。

3 结语

本文所采用基于GIS的突发性地质灾害风险预

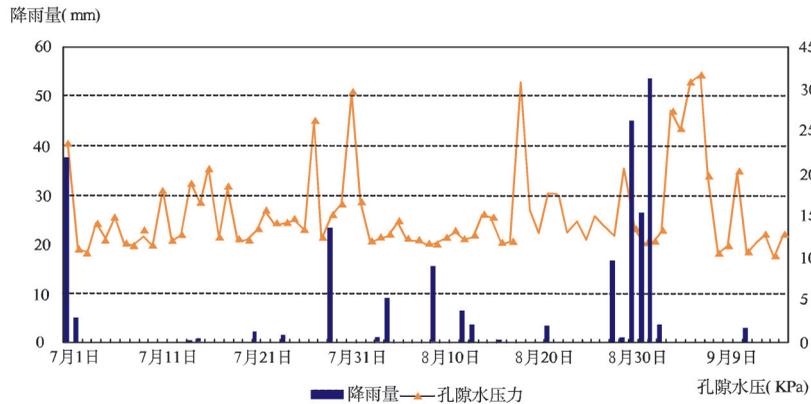


图7 孔隙水压力监测结果

Fig.7 Pore water pressure monitoring results

警模型,从研究结论来看,该结果与实际情况基本相符,说明此研究结果具有一定的可行性,且在近几年的天津市突发性地质灾害气象风险预警工作过程中得到了检验^[11]。

课题设计并投入监测使用的五名山东滑坡自动监测示范工程首次开启了天津市点对点地质灾害监测预警的新篇章。针对天津市蓟县山区小区域地质灾害预警工作特点,单点监测预警工作将进一步深化本市地质灾害监测预警水平,其监测预警结果将反馈给地质灾害风险预警模型,完成数据库更新,使地质灾害气象风险预警工作日趋专业化、常态化,不断提高地质灾害气象风险预警工作的准确性和针对性,提高本市地质灾害预警水平,切实保障人民群众的生命财产安全。

参考文献:

- [1]尹春荣.基于GIS的滑坡地质灾害危险性分区与预测[D].北京工业大学,2008.
- [2]王爽,王晴,斯嵩,等.基于GIS的天津市突发性地质灾害预警预报系统设计与实现[J].地质调查与研究,2012,35(3):206-209.
- [3]刘传正,李铁锋,程凌鹏,等.区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法[J].水文地质工程地质,2004,31(4):1-8.
- [4]苏小琴,朱静,凌昊平.四川省泸定县主要地质灾害区域危险性评价[J].山西建筑,2008,34(4):123-124.
- [5]陆显超.广东省地质灾害预测分区研究[J].岩土力学与工程学报,2006(10):82-83.
- [6]王爽.天津市地质灾害预警预报系统研究[R].天津:天津市地质环境监测总站,2009.
- [7]张红兵.云南省地质灾害预报预警模型方法[J].中国地质灾害与防治学报,2006(1):45-46.
- [8]范国胜,陈明金,万州滑坡深部位移和孔隙水压力监测系统建设和初步分析[A].国家地震局地壳应力研究所.地壳构造与地壳应力文集[C].2006,37-46.
- [9]刘传正,刘艳辉.地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J].水文地质工程地质,2007,34(6):107-115.
- [10]黄雯,方琼,王国卫,等.湖南茶陵滑坡空间预警的降雨临界值初步分析[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(3):38-42.
- [11]徐永强,马娟.基于物联网技术的地质灾害动态监测预警体系及其架构[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(3):90-93.

Design and Application of Meteorological Early Warning System for Sudden Geological Hazards in Tianjin

WANG Shuang¹, WANG Qing², LI Qian¹

(1. General geological environmental monitoring station of Tianjin, Tianjin 300191, China;

2. Tianjin Normal University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Based on the characteristics of geological hazards and its relation with meteorological condition in Tianjin city, the relation of precipitation and geological environment with geological hazards is studied in the light of meteorological factors and potential geological hazards. Using the map algebra and GIS technologies, the geological hazard meteorological alarming model and system of Tianjin is established. Besides, this paper focuses on a demonstrative automatic landslide monitoring system in east of Wumingshan area. Operation result shows that the real-time observation system guarantees the monitoring data continuity. There is a good reflection of landslide distortion characteristic and the distortion tendency. Practice proves that, basing on GIS, the warning and predicting system of geological hazard has become more perfect in recent application. It's precision was improved yet and gets an obvious effect in disaster prevention and reduction. The system is playing a considerable important action to protect life and property of human.

Key words: geo-hazard; model; early-warning system; demonstration project; control and reduction of disaster