

地震灾害预测和应急模拟系统的设计与应用

——以永安市城市应急系统为例

危福泉¹, 刘高焕², 姚 新², 蔡宗文¹, 洪 伟³

(1. 福建省地震局, 福州 350003; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 九江市环境保护局, 江西 九江 332000)

摘要: 城市防震减灾是地震潜在频发区提高自然灾害防治能力建设的重要方面。本文结合福建省永安市城市防震减灾信息管理系统的建设, 探讨设计防震减灾数值模型, 分析模型集成的关键技术, 构建了地震风险评估、建筑物易损性评价、生命与财产损失估算、救援与救灾管理调度等模型和基于 GIS 开发的震害预测和应急模拟系统。该系统在福建省永安市的实际应用表明, 通过对地震灾害预测结果的分析, 可加强城市抗震中的薄弱环节, 为灾区政府应急响应和制订对策提供决策支持辅助信息, 从而显著提高城市防震减灾的综合能力。

关 键 词: 地震; 预测; 应急; GIS

文章编号: 1000-0585 (2005) 05-0749-08

1 引言

近十年来, 发达国家先后建立了多种抵御自然和人为灾害的应急反应系统, 如美国的“紧急事物管理系统”(EMS), 欧洲五国在 EUREKA 计划下研制的“重大紧急事件智能管理系统”(MEMbrain)、日本的“灾害响应系统”(DRS) 等, 对于人类抵御各类灾害起到了积极的作用^[1~3]。随着我国防震减灾技术及地理信息系统的快速发展, 我国城市震害预测和防震减灾对策研究及相关的信息管理和辅助决策系统工程得到了较大推进。“九五”以来, 中国地震局设立的 95-06 项目开展了 10 余个城市和城市群示范城市的震害预测和防震减灾对策研究^[4~7]。

永安市位于福建中部偏西, 属典型亚热带季风山地气候, 年均气温 19.1℃, 总面积 2942 km², 是地震的频发地段。1997 年 5 月 31 日 14 时 51 分, 连城—永安地区发生 5.2 级地震, 受灾范围达 26 个乡镇, 人口超过 35 万, 是 1997 年中国大陆地区受灾人数最多的一次地震。

本文构建的基于 GIS 的震害预测和应急模拟系统在大量实践经验的基础上, 充分利用 GIS 的空间分析功能, 综合集成目前在防震抗灾领域的模型与方法, 从而实现对地震灾害预测、地震影响评估, 并提供减灾救援决策的信息系统。该系统的设计与应用能为受灾区提高防治灾害的综合应急能力并制定相关的决策提供重要的决策信息^[8,9]。

收稿日期: 2005-02-10; 修订日期: 2005-07-02

基金项目: 科技部“十五”国家攻关计划项目 (2001BA601B-04-01-06); 福建省 2003 年重点科技攻关项目 (2003 Y039); 福建省发展计划委员会“十五”重点项目“福建省地震重点监视防御区城市防震减灾体系工程 (105-05) 专题”

作者简介: 危福泉 (1964-), 男, 福建惠安人, 1984 年毕业于北京大学。主要从事地震地质和地理信息系统工作。

2 系统设计

基于 GIS 的震灾预测和应急模拟系统，由数据库系统、分析模型系统和决策支持系统三部分组成。系统框架结构如图 1。数据库系统由基础地理信息数据库、专业地理数据库以及易损性数据库等组成：地理基础数据包括地形地貌数据、土地利用数据、交通水系数据、输水输气管网数据、电力数据、建筑物分布数据、医疗救护设施数据等城市基础数据；专业数据库存储与地震环境有关的数据，包括地质地层数据、地震历史数据、地质构造数据、断层断裂数据、地质灾害数据等；易损性数据库主要包括建筑物结构材料、抗震强度、易损性等。辅助决策数据包括救灾救援、物资与人员调度、物资与人员疏散、社会经济等。

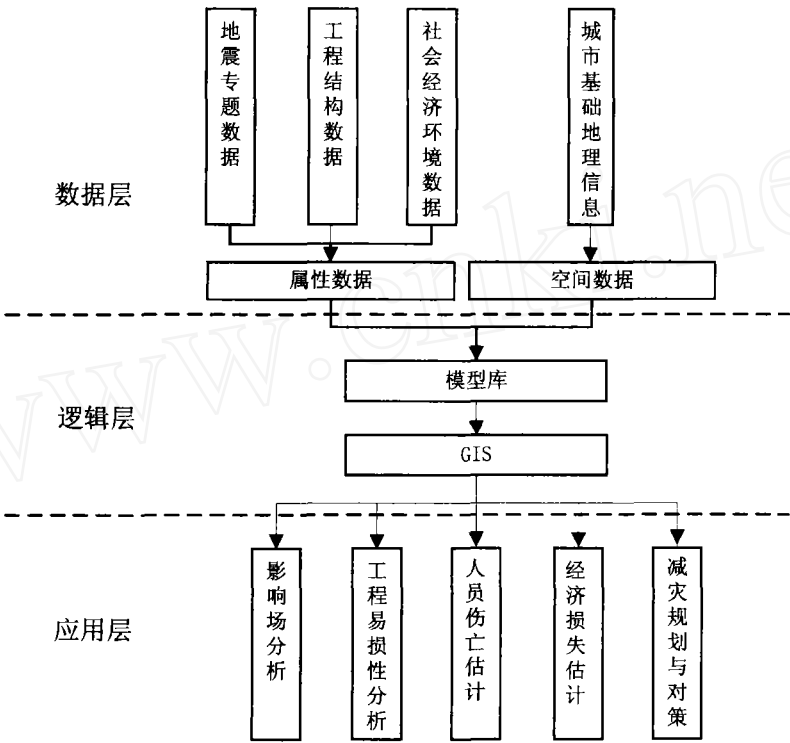


图 1 基于 GIS 的震害预测和应急模拟系统层次框架图

Fig. 1 Flow chart of the quakeproof GIS system

从系统的实现上看，该系统主要包括了两个主要环节（图 2）。一个是基于 ARCGIS 软件平台的数据集管理，主要是利用 ARCGIS 的 GEODATABASE 数据库管理系统，将多源、多层信息综合集成到一个空间数据库中，提高了数据管理与调用、访问的效率。另一个环节是系统的综合集成与管理，主要是集成目前防震抗灾领域的模型与方法，通过设计子系统的途径，实现系统功能的层次化管理。例如，将整个系统从功能上分成五个子系统：基础数据管理子系统、城市建设管理子系统、地震灾害预测与评估子系统、地震应急辅助决策子系统与易损性字典子系统。各个子系统有分司一定的功能，比如，地震灾害预测与评估子系统能实现地震影响场分析、评估建筑物震害、生命线工程灾害、次生灾害的程度，评价震害造成的人员、经济损失，划定高危害区域，并实现城市灾害的综合分析。

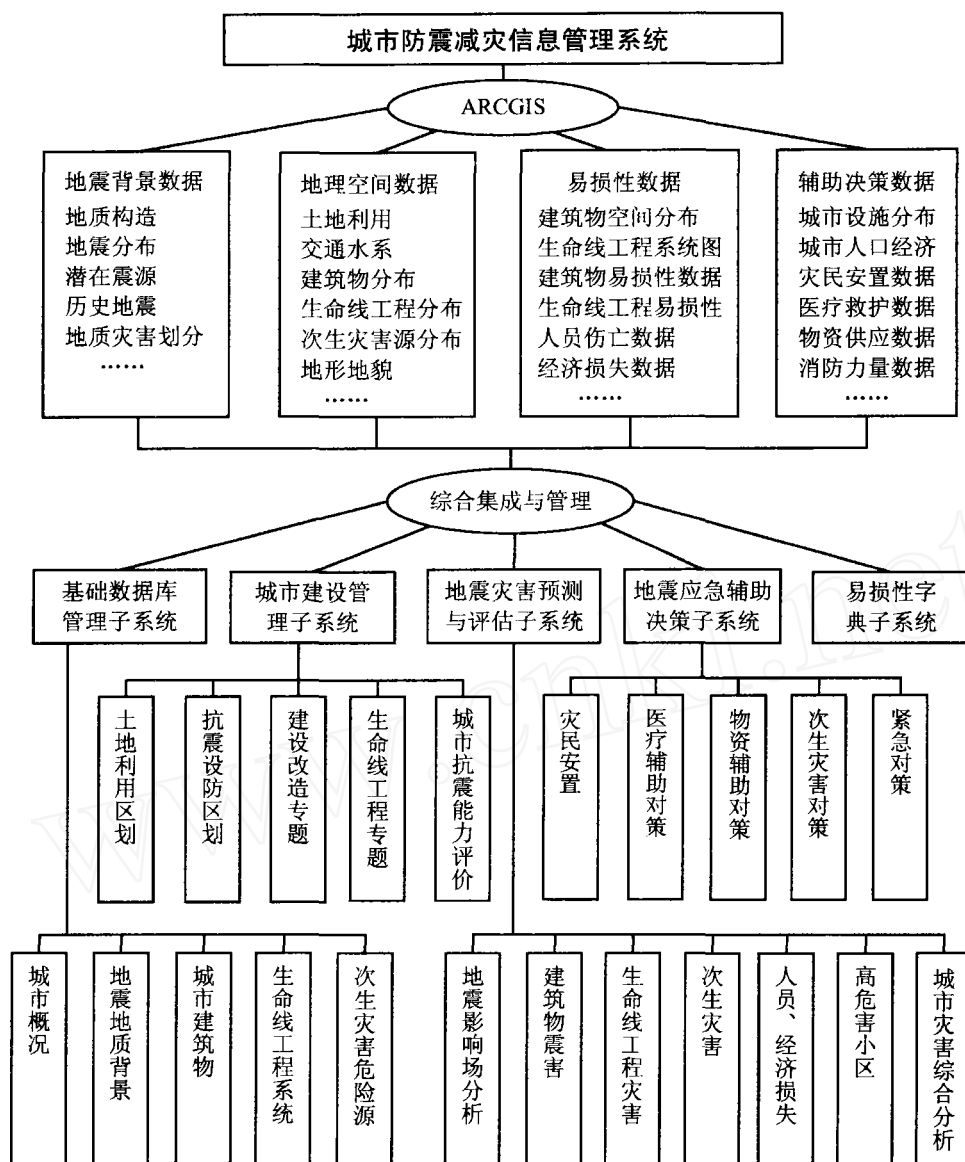


图 2 基于 GIS 的震害预测和应急模拟系统系统软件结构

Fig. 2 The structure of the quakeproof GIS system

3 基于 GIS 的地震模拟模型

防震减灾信息管理和辅助决策系统的建立需要一系列防震减灾专业模型的支持，即在研究的过程中，如何将各子专题研究获得的数据、成果、图件、文本和其他形式的专业信息、概念和数学公式转化为防震减灾的系列应用模型（概念模型和数学模型），在模型建立的基础上，进一步将专业的概念和数学模型在 GIS 平台上进行二次开发，将专业模型转化为 GIS 平台上的计算机软件。专业信息的模型化和 GIS 平台上的二次软件开发是辅助决策系统研制的核心^[10]。本系统主要设计开发了如下一系列模型。系统功能的实现主

要依赖于一系列分析与评估模型。其中尤其以地震危害性分析、建筑物破坏状态分析、城市生命线工程易损性分析模型与经济损失计算模型最为重要,下文将结合这些模型在永安市的具体应用,做重点介绍。

3.1 地震危险性分析模型

要进行地震危险性分析,首先需要根据地震的发震地点、发震时间、震中经纬度、地震震级、长轴方向等要素,利用椭圆模型得到地震影响场,并以矢量数据文件表达^[11,12]。然后,建立以震源为原点、长轴为 X 轴的新坐标系统。根据给定地震动峰值加速度 A 和震级 M,同衰减关系式和方向概率函数,分别求得椭圆的半长轴和半短轴。根据震中、震级和衰减方向画出地震影响场,再利用 ArcGIS 空间分析功能,判断场点是否落在椭圆上,落在哪个椭圆上,根据不同的落点测算震害程度。

同时,震动衰减规律受震源机制、传播途径、场地地质条件等因素影响,地区性很强,对地震动参数的预测有很大影响,因此,要实现对地震动参数的预测,必须测算出适合于本地区的烈度衰减关系^[13]。为此,我们收集了东南沿海地区 1900 年以来有仪器测定的震级,同时也有详细的宏观调查报告的 20 个 4.6 级以上地震的等震线 56 条。共整理出 56 组数据供统计用。所收集等震线资料包括了地震震级,烈度值,及长、短半径三个参数。采用如下衰减模型:

$$I = a + bM + c \ln(R + R_0)$$

采用最小二乘法,变换 R_0 进行回归统计分析。拟合出如下烈度衰减关系:

$$\text{沿长轴方向: } I_a = 6.6345 + 1.6124M - 1.7106 \ln(D + 20) \quad I_a = 0.474$$

$$\text{沿短轴方向: } I_b = 2.7030 + 1.5779M - 1.5470 \ln(D + 14) \quad I_b = 0.493$$

式中, I 为地震烈度, M 为地震震级, R 为震中距, a 、 b 、 c 为系数,常数 R_0 由地震等烈度线资料回归统计求得。

3.2 建筑物破坏状态分析模型

系统对建筑物破坏状态分析方法是以前社区和村范围内的建筑单元,给出各个小区建筑物五种破坏状态的比例,计算公式为:

$$A P_i = \frac{P_{ji} \cdot S_j}{S} \quad S = \sum_j S_j$$

式中, $A P_i$ 是小区内建筑第 i 种破坏 (1~5 分别对应完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏) 的比例, S_j 是每栋建筑的面积, S 是社区或村范围的建筑总面积。

3.3 生命线工程易损性分析模型

根据生命线工程易损性分析专题提供的生命线震害预测矩阵和结果,该系统在 GIS 空间分析技术的支持下,通过设计并运用一系列模型实现了对桥梁、变电站、供水管网等生命线工程的易损性分析域评估^[14,15]。具体而言,该系统根据永安市交通桥梁预测震害的程度,评估了市区主要桥梁、变电站与供水管网的受损程度与经济损失。

3.4 经济损失计算模型

该系统以社区和村为基本单元估算震灾造成的经济损失,按建筑类型、场地条件为每栋建筑确定易损性。所使用图件和数据包括:建筑分布图、工程场地分布图、地震烈度分布图、永安街道办事处分区图 (含人口统计表)、易损性数据、建筑造价和室内财产信息等。具体做法是利用建筑分布图、地震烈度分布图叠加的办法来确定每栋建筑遭受的地震烈度 (考虑近远震),由易损性信息表得到每栋建筑的破坏程度和毁坏概率,以下式计算每栋建筑的损失:

$$L_j = Qb_j \cdot \sum_{i=1}^5 P_i \cdot b_i + Qh_j \cdot \sum_{i=1}^5 P_i \cdot h_i$$

式中， L_j 是建筑损失额； Qb_j 是建筑物价值， $Qb_j = \text{建筑面积} \times \text{单位面积造价}$ （钢混结构 900 元/ m^2 ，砖房 500 元/ m^2 ）； Qh_j 是室内财产价值， $Qh_j = \text{建筑面积} \times \text{单位面积价值}$ （办公用房 1000 元/ m^2 ，城市居民每户 3 人，财产 5 万元，户均住房 15.8 m^2 ）； P_i 是建筑五种破坏状态的概率； b_i 和 h_i 分别是建筑和室内财产损失比，由表 1 计算。

表 1 建筑和室内财产损失比

Tab 1 The ratio between architecture and chamber property

结构类型	基本完好 (%)	轻微破坏 (%)	中等破坏 (%)	严重破坏 (%)	毁坏 (%)
钢混结构	0	5 ~ 10 (7.5)	10 ~ 40 (25)	40 ~ 80 (60)	80 ~ 100 (90)
砖结构	0	5 ~ 10 (7.5)	10 ~ 40 (25)	40 ~ 70 (55)	70 ~ 100 (85)
厂房	0	4 - 8 (6)	8 - 35 (21.5)	35 ~ 70 (52.5)	70 ~ 100 (85)
室内财产	0	0	0	20 ~ 40 (30)	40 ~ 95 (73)

在计算损失时，使用损失比的上限、下限和中值，会得到三个损失值，中值用作地图表示，上限、下限用来做损失报告。统计社区和村范围内的所有建筑损失，可得各个分区的损失额^[16,17]。

3.5 人员伤亡计算模型

震灾造成的伤亡人数是灾害估测的一项主要指标。该系统人员伤亡计算也是以社区或村的范围为基本单位进行统计的^[10]：

$$N_{dead} = N_p \left(D_3 \cdot \frac{P_{j3} \cdot S_j}{S} + D_4 \cdot \frac{P_{j4} \cdot S_j}{S} + D_5 \cdot \frac{P_{j5} \cdot S_j}{S} \right)$$

其中， N_p 是社区或村范围的总人口， S_j 是每栋建筑的面积， S 是社区或村范围的建筑总面积， P_{j3} 、 P_{j4} 、 P_{j5} 是建筑中等破坏、严重破坏、和毁坏的比率，通过建筑破坏状态得出人员死亡率 D_3 、 D_4 、 D_5 。人员死亡数量与灾害的破坏程度是密切关联的。为便于估测，系统依据震灾的破坏程度，将死亡率定义为 1/100000 (D_3)、1/1000 (D_4) 与 1/60 (夜间加倍； D_5)。

同时根据经验，确定重伤人数是死亡人数的 4 倍，轻伤是死亡人数的 30 倍。

(1) 死亡人数计算： $d_n(I) = A_1 d_{11} + A_2 d_{12} + A_3 d_{13} + A_4 d_{14} + A_5 d_{15}$

式中： $d_n(I)$ 为预测区内地震烈度为 I 时的死亡人数； $A_{1...5}$ 为建筑物破坏状态为 $D_{1...5}$ 的总面积； $d_{1...5}$ 为建筑物破坏状态为 $D_{1...5}$ 时，建筑物内部人口的死亡率；为 单位面积人数（预测区内总人口/房屋总面积）。

(2) 重伤人数计算： $h_n(I) = A_1 d_{11} + A_2 d_{12} + A_3 d_{13} + A_4 d_{14} + A_5 d_{15}$

式中： $h_n(I)$ 为区内地震烈度为 I 时的重伤人数； $A_{1...5}$ 为建筑物破坏状态为 $D_{1...5}$ 的总面积； $d_{1...5}$ 为建筑物破坏状态为 $D_{1...5}$ 时，建筑物内部人口重伤率；为 单位面积人数。

(3) 无家可归人数计算： $l_n(I) = \frac{1}{a} \left(A_5 + A_4 + \frac{7}{10} A_3 \right) - d_n(I)$

式中： $l_n(I)$ 为烈度为 I 时预测区内无家可归人数； $\frac{1}{a}$ 为预测区内人均居住面积 (m^2)； $A_{5...3}$ 为分别为发生 D_5 、 D_4 、 D_3 级破坏的居住房屋面积 (m^2)； $d_n(I)$ 为预测区内地震烈度为 I 时的死亡人数，由式 (1) 求得。

4 系统应用

通过模拟实验发现，该系统在预测震灾与灾害的应急模拟方面精度较高。通过将模拟结果与福建省永安市6.8级地震的实际灾害情况进行对比，也发现该系统具有较高的应用价值。图3是输入地震的参数得到的震害预测和应急图，从图上可以看出，该次震灾共有5个震裂度：6~10。

在该系统的支持下，我们采用模型直接计算城

市及郊区的建筑物、供电系统、交通系统、供水系统、人员伤亡等损失情况。模拟的损失结果统计如表2。

采用建筑物破坏状态分析模型，计算建筑物的破坏程度，分为基本完好，轻微破坏，中等破坏，严重破坏，毁坏等5个等级。损坏程度通过柱状图表示(图4)；还可以通过不同区的建筑情况，得到相应的建筑物破坏带来的经济损失。采用破坏指数模型，计算出所有地区的破坏指

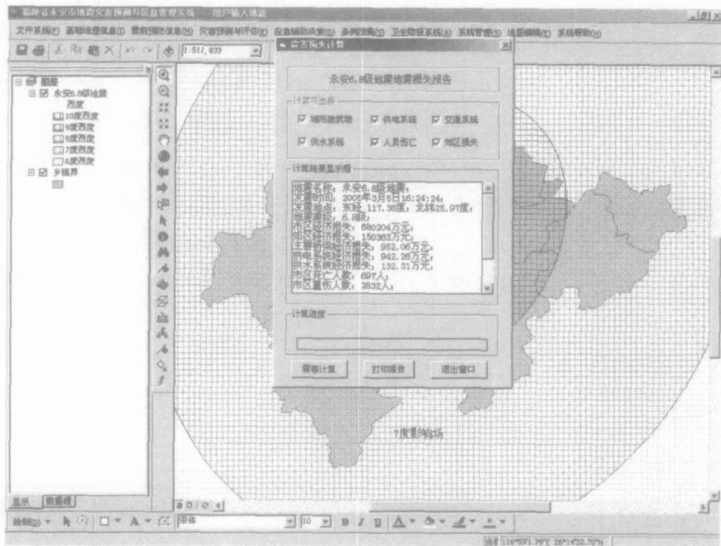


图3 地震影响场分析图

Fig. 3 The analysis of the earthquake influence scene

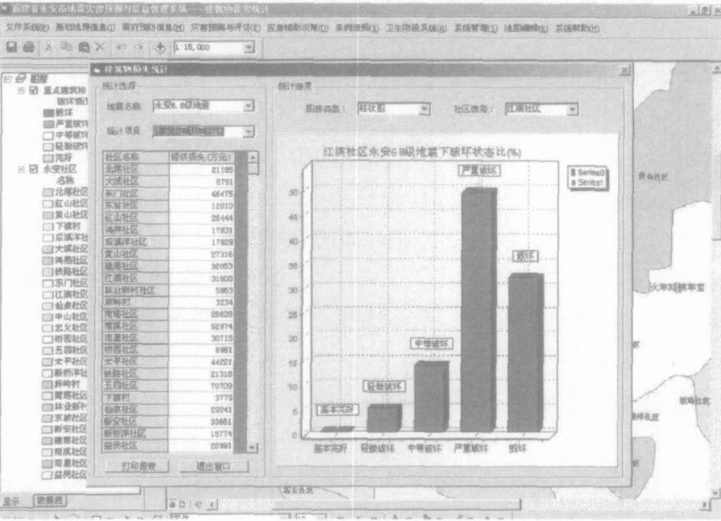


图4 建筑物毁坏情况

Fig. 4 The damage of buildings

表2 震害经济预测和伤亡模拟结果

Tab 2 The situation of economic forecasting and casualty simulation

损失	损失量	损失	损失量
市区经济损失	680204 万元	市区死亡人数	697 人
郊区经济损失	150363 万元	市区重伤人数	2832 人
主要桥梁经济损失	952.06 万元	郊区死亡人数	251 人
供电系统经济损失	942.26 万元	郊区重伤人数	504 人
供水系统经济损失	132.31 万元		

数, 破坏指数分为 8 个等级, 分别为 $0 \sim 0.1$, $0.1 \sim 0.15$, $0.15 \sim 0.2$, $0.2 \sim 0.35$, $0.35 \sim 0.5$, $0.5 \sim 0.65$, $0.65 \sim 0.8$, $0.8 \sim 1$; 分别采用不同的颜色在地图上显示出来。最后根据物资供应模型, 灾民安置模型, 药品需求模型, 分析得到抗震设防计划, 直接指导当地的防震减灾工作。

5 结论

由于破坏性地震是小概率事件, 因此本系统设计不仅考虑了震前预测, 震后评估, 而且还考虑了城市的防震减灾规划管理, 同时又充分考虑了系统的可拓展性, 使本系统具有城市应急系统及数字城市的基本雏形, 通过改造可以方便过渡到城市整体应急指挥系统, 为城市管理、事故应急等国民生产生活提供服务。

基于 GIS 的震害预测和应急模拟系统的设计与开发的成功实施, 并应用于福建省其他城市的防震减灾工作, 不仅提高了城市防震减灾的科学性、准确性、大大提高了工作效率, 使应急反应和救灾决策实现了数字化、信息化。

本模拟系统重视快速智能化发展方向, 随着计算机系统及相应软件技术的提高, 整个应急系统的不断完善, 各个部门及业务部门的功能更趋于明细, 使系统能够提供更快速的计算能力和智能化的管理能力。

参考文献:

- [1] Gao Yunxue. Suggestions on how to reduce earthquake disasters on living buildings in villages and towns of China. Chinese Science Abstracts Series B, 1995, 14(3): 60.
- [2] Yin Zhiqian. Content of analysing earthquake losses in city and the process of countermeasures decision-making for disaster Mitigation. Chinese Science Abstracts Series B, 1995, 14(3): 60.
- [3] Shabestari, Khosrow T, Yamazaki Fumio, Saita Jun, *et al.* Estimation of the spatial distribution of ground motion parameters for two recent earthquakes in Japan. Tectonophysics, 2004, 390(1-4): 193~204.
- [4] 张晓东, 张国民. 关于地震预警的思考. 国际地震动态, 2004, (6): 43~47.
- [5] 朱煌武. 突发性地震灾害危机的预警和应急管理机制. 灾害学, 2004(1): 78~82.
- [6] 陈秀芳, 杨凯欣, 方裕, 等. 基于空间信息技术的城市应急救援联动系统研究. 地理与地理信息科学, 2003, 19(4): 49~53.
- [7] 邬伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 张永波, 张礼中, 周小元, 等. 地质灾害信息系统的设计与开发. 北京: 地质出版社, 2001.
- [9] Keilis-Borok, Vladimir, Ismail-Zadeh, *et al.* Non-linear dynamics of the lithosphere and intermediate-term earthquake prediction. Tectonophysics, 2001, 338(3-4): 247~260.
- [10] Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(1): 59~79.
- [11] Three destructive inland earthquakes in the central-western Yamaguchi Prefecture, southwest Japan and accompanied stress changes to their adjacent faults. Engineering Geology, 2002, 66(1-2): 143~156.
- [12] 郭增建, 陈鑫连 主编. 城市地震对策. 北京: 地震出版社, 1991.
- [13] 尹之潜, 等. 震害与地震损失的估计方法. 地震工程与工程震动, 1990, 10(1).
- [14] 赵成刚, 冯启民, 等. 生命线地震工程. 北京: 地震出版社, 1994.
- [15] 傅征祥, 等. 地震生命损失研究. 北京: 地震出版社, 1993.
- [16] 王晓青, 丁香. 地震现场灾害损失评估地理信息系统. 北京: 地震出版社, 2002.
- [17] 山东省地震工程研究院, 胜利石油管理局地震台编. 胜利石油管理局暨东营市防震减灾示范研究与应用. 报告, 2000.

Design of the seismic disaster prediction and emergency simulating system and its application : taking emergency system in Yongan city as a case

WEI Fu-quan¹, LIU Gao-huan², YAO Xin², CAI Zong-wen¹, HONG Wei³

(1. Seismological Bureau of Fujian Province ,Fuzhou 350003 ,China ;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research ,CAS ,Beijing 100101 , China ;

3. Jiujiang Environmental Protection Bureau ,Jiujiang 332000 , China)

Abstract :Urban earthquake prevention and disaster alleviation is one of the important factors which improve the ability of natural disaster prevention in the areas where earthquakes may occur frequently. Combining with the practice of constructing urban information management systems for anti-earthquake and seismic hazard reduction in Yongan City of Fujian Province ,this paper not only discusses the mathematic models of earthquake prevention and disaster alleviation , but also analyses the critical techniques of model integration. In addition ,a seismic hazard prediction and emergency simulation system was established based on GIS for seismic risk evaluation ,vulnerability analysis of buildings ,estimation of casualty and economic loss , search and rescue management. GIS has notable advantages for spatial analysis and graphic display. We can predict the influence of earthquake in virtue of many seismic mathematic models ,such as the model of vulnerability analysis of buildings , estimation of casualty and economic loss , the influence of epicentrum. By GIS and relevant models ,we can identify the coverage of earthquake which can directly affect the precision of final result. It is believed that the loss of earthquake depends on the intensity of the earthquake. Certainly ,it is true. In the mathematic models ,the scale and the direction of seismic grade affect the distribution range of ellipse. Another factor is also very important , that is the quality of buildings ,which are affected by the materials , years and stories of a building. According to the result that leads to the formation of the models , we can take proper measures to reduce hazard before earthquake. The practical application of the system shows that it can not only intensify the weakness in urban earthquake prevention according to the analysis of seismic hazard prediction result ,but also provide auxiliary information for disaster affected area's decision-making and quick response. Therefore , the comprehensive abilities for urban earthquake prevention and disaster alleviation are improved evidently.

Key words :earthquake ; seismic hazard ; emergency ; prediction ; GIS