

# 基于 MAPGIS 的概率性地震危险性分析

张宝一<sup>1,2</sup>, 龚平<sup>3</sup>, 王丽芳<sup>3</sup>

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 武汉中地数码科技有限公司, 湖北武汉 430074

3. 中国地震局地震研究所, 湖北武汉 430071

**摘要:** 对工程场地的地震危险性分析是地震安全性评价的主要方法, 并且为工程师提供抗震参数. 在分析国内概率性地震危险性分析(PSHA)方法基础上, 提出了基于 GIS 的概率性地震危险性分析的可行性方案. 通过 MAPGIS 二次开发编写了地震危险性分析程序, 并以三峡坝区某工程场地为例对程序进行了测试. 基于 MAPGIS 的概率性地震危险性分析程序提供友好的人机交互界面, 提高了地震危险性分析的可操作性, 更重要的是帮助用户从空间数据中挖掘更多的信息.

**关键词:** 概率性地震危险性分析; 地理信息系统; 空间分析.

中图分类号: P208

文章编号: 1000-2383(2006)05-0709-06

收稿日期: 2006-05-30

## Probabilistic Seismic Hazard Analysis Based on MAPGIS

ZHANG Bao-yi<sup>1,2</sup>, GONG Ping<sup>3</sup>, WANG Li-fang<sup>3</sup>

1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Wuhan Zondy Cyber-Tech Co. Ltd., Wuhan 430074, China

3. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

**Abstract:** Engineering seismic hazard analysis for a specified site represents an essential element of seismic safety assessment, and provides engineers with the standards of protection against earthquakes. In this paper, on the basis of investigation of the several PSHA (probabilistic seismic hazard analysis) methods in China, the feasible methods and solutions of PSHA based on GIS were put forward. Through the secondary development of MAPGIS, a PSHA procedure is developed. Finally, a PSHA example in the Yangtze Gorges district has testified the feasibility of the procedure. The PSHA procedure based on MAPGIS not only provides users with interactive interface to improve maneuverability, but also mines the information of PSHA from geo-data.

**Key words:** probabilistic seismic hazard analysis; geographical information system; spatial analysis.

在各类自然灾害中,地震是最为严重的灾害之一.为了减轻地震造成的损失,有必要科学合理地确定构筑物的抗震设防标准(Akkaya and Yüçemen, 2002).地震危险性分析的实质是求一个场地(或区域)未来遭受某种地震动(如峰值加速度)的概率,地震危险性分析结果是抗震设防的重要依据(Lindholm and Bungum, 2000).

地理信息系统(GIS)是在计算机软硬件支持下,以采集、存储、管理、检索、分析和描述空间物体

的定位分布及与之相关的属性数据,并回答用户问题等为主要任务的计算机系统. GIS 的空间分析、多要素综合分析技术更可以方便、快捷地进行地震危险性分析,并且能够实现地震危险性分析的可视化(Leonard *et al.*, 2002). 张秋文和张培震(1999)在对东亚地区地震危险性分析中,利用了 GIS 平台下的图层叠加与拼接、空间数据查询和综合分析功能,编制了东亚地球地震构造图,并划分了该地区的潜在震源区. 本文的目的是应用 GIS 思想来进行概率

性地震危险性分析.

## 1 概率性地震危险性分析

Cornell(1968)建立了概率性地震危险性分析方法,并由 McGuire(1976)编写成标准的计算机程序,因此该方法一般被称为 Cornell-McGuire 方法. Cornell-McGuire 经典方法通过划分潜在震源区,确定地震活动性参数和衰减关系,并应用概率分析方法来评定工程场地的地震危险性(Lindholm and Bungum, 2000). 多年来,众多工程地震学家对概率性地震危险性分析方法进行了发展和完善(Kiureghian and Ang, 1977; 张秋文和张培震, 1999; Lindholm and Bungum, 2000; Meletti *et al.*, 2000; 龚平等, 2000; 汪梦甫等, 2000; Cramer, 2001; Akkaya and Yüce men, 2002; Castaños and Lomnitz, 2002; Bommer, 2003). 20 世纪 80 年代初,以胡聿贤院士为首的一批地震工程专家、地震地质专家和地震预报专家利用我国地震工程、地震地质和地震预报的理论成果并借鉴 Cornell(1968)的概率法思想提出了地震危险性分析综合概率法模型,且在当时主导的 DOS 操作系统上用 FORTRAN 语言编写了计算程序. 该程序作为标准程序在全国地震系统推广,1991 年《中国地震烈度区划图》及 2001 年《中国地震动参数区划图》的编制就使用了这一程序.

在 Cornell-McGuire 经典方法中,地震危险性分析涉及的数据主要包括 3 方面:(1)空间数据,主要包括潜在震源区;(2)属性数据,主要为地震活动性参数,如震源深度、年平均发生率、 $b$  值、最大震级等;(3)模型数据,主要为地震动衰减关系. 然后工程场地的地震危险性应用概率分析方法通过对潜在震源区和地震震级的双积分计算得到(Lindholm and Bungum, 2000). 场地地震烈度和地震动参数年超越概率的计算公式为:

$$P(Z \geq z) = 1 - e^{-v(z)}, \quad (1)$$

式(1)中: $Z$  为地震动参数或地震烈度, $z$  为给定的地震动值, $P(Z \geq z)$  为地震烈度或地震动参数值大于或等于某一给定值的概率, $v(z)$  为地震动超越给定值  $z$  的年平均发生率. 设有  $N_S$  个震源区,第  $i$  个震源区的面积为  $A_i$ ,年平均发生率  $v(z)$  可表示为:

$$v(z) = \sum_{i=1}^{N_S} v_i(z | A_i). \quad (2)$$

设共划分  $N_M$  震级档,第  $i$  个潜在震源区的年平均

发生率  $v_i(z | A_i)$  可以表示为对潜在震源区和震级的双重积分:

$$v_i(z | A_i) = \int_{A_i} \int_{\theta} \frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^{N_M} v_{i,M_j} \cdot P(Z \geq z | A_i) f_i(\theta) d\theta dA_i, \quad (3)$$

式(3)中: $v_{i,M_j}$  为第  $i$  个潜在震源区、第  $j$  个震级档的地震年平均发生率; $P(Z \geq z | A_i)$  为第  $i$  个潜在震源区内发生所考虑的地震时,场地地震烈度或地震动参数值超越某一给定值的概率,是公式中求解的关键部分; $f_i(\theta)$  为第  $i$  个潜在震源区的方向性函数, $\theta$  为可能的主破裂方向.

## 2 基于 GIS 的概率性地震危险性分析

概率性地震危险性分析中的数据属于地理数据范畴,地震危险性分析方法适合应用 GIS 空间分析技术来实现. 式(3)也可以表示为:

$$v_i(z | A_i) = \sum_{j=1}^{N_M} \{v_{i,M_j} \int_{A_i} \int_{\theta} \frac{1}{A_i} P(Z \geq z | A_i) f_i(\theta) d\theta dA_i\}. \quad (4)$$

取以场地为圆心,以  $\theta_k$  ( $k=1, 2, \dots, N_\theta$ ) 为长轴方向的椭圆,椭圆的长短轴半径分别根据各自的地震动衰减关系,由所考虑的地震震级  $M_j$  和给定地震动值  $z$  联合确定. 显然潜在震源区内的  $M_j$  级地震发生在该椭圆内部和边界线上时,可以使场地产生大于或等于给定值  $z$  的地震动. 根据概率性地震危险性分析中潜在震源区内地震均匀发生的假设,式(4)中  $\int_{A_i} \frac{1}{A_i} P(Z \geq z | A_i) dA_i$  就等于潜在震源区与椭圆相交面积占潜在震源区面积的比例(介于 0 到 1 之间),如图 1 所示.

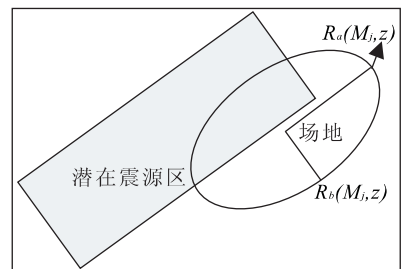


图 1 地震动超越概率的计算

Fig. 1 Calculating the probability using buffer analysis function

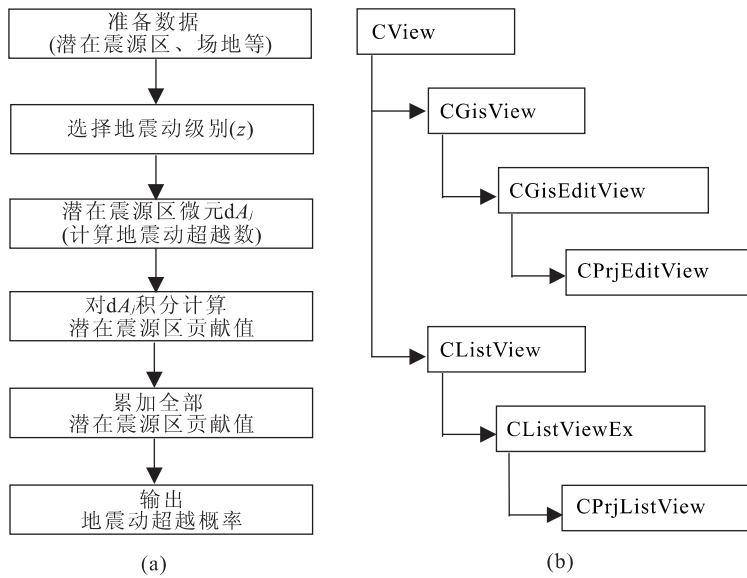


图 2 概率性地震危险性分析计算流程图(a)和 MAPGIS 二次开发类库结构(b)

Fig. 2 Flowchart of PSHA computation (a) and structure of MAPGIS secondary development MFC (b)

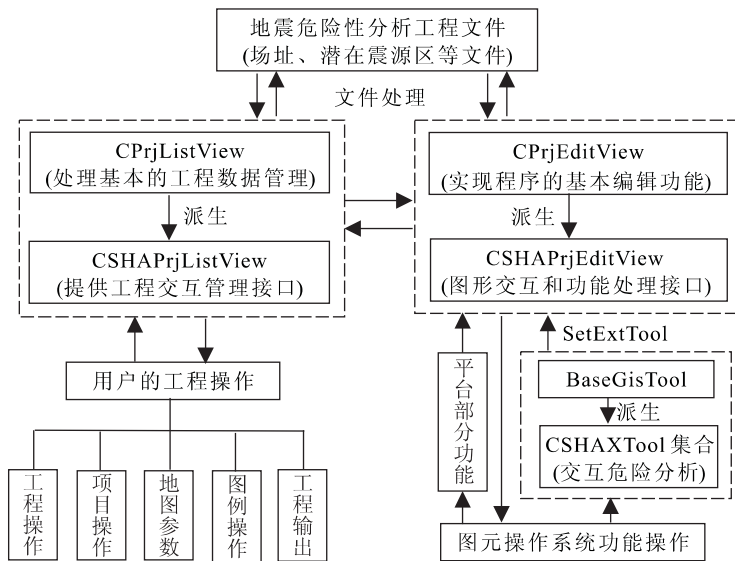


图 3 基于 MAPGIS 的地震危险性分析程序组织结构

Fig. 3 Framework of PSHA programme based on MAPGIS

用 GIS 空间分析技术实现上述过程时,首先要将潜在震源区存储为一个面对象图层,并将地震活动性参数作为其属性数据一并存储,将场地存储为一个点对象图层;然后,对第  $i$  个潜在震源区,发生  $M_j$  震级档地震,震源主破裂方向为  $\theta_k$  时通过空间运算得到使场地地震动超越给定值  $z$  的概率,以场地为圆心做一个椭圆缓冲区。在此需要扩展缓冲区的概念,缓冲区不仅可以是圆形或方形,对某个点可以通过给定长轴方向及长短轴半径参数绘制点的椭圆

缓冲区。此外, GIS 空间运算也能很方便地求取潜在震源区与椭圆缓冲区相交部分的面积,概率性地震危险性计算流程图如图 2a 所示。

本文中地震危险性分析程序是在国产 GIS 平台 MAPGIS 上进行二次开发实现的。采用二次开发这种方式,是因为其软件开发工作量小,程序开发周期短,并且可以继承 MAPGIS 平台的大部分功能。

MAPGIS 的二次开发包 (SDK, software development kit) 提供了 API (application programming

interface) 函数、MFC (microsoft foundation class) 类库、COM (component object model) 组件和 ActiveX 控件等方式进行二次开发。MAPGIS SDK 支持 MFC 程序开发和面向对象的程序设计, 提供了一套强有力的 C++ 类, 屏蔽了基于 API 开发 GIS 应用程序的复杂性, 程序开发中主要使用了 CPrjEditView 和 CPrjListView 2 个 C++ 类 (图 2b)。

GIS 开发的地震危险性分析程序符合 Windows 系统的操作习惯, 实现了地震危险性分析过程和部分空间分析功能。程序采用静态方式将视图窗口分为 2 个窗口, 2 个窗口联合起来共用一个 MAPProject 数据源。左边窗口视图类 CSHAPrjListView 的基类为 CPrjListView 类, 它负责添加、删除和修改工程中各项目的状态, 并实现与工程相关的一些操作和处理; 右边窗口视图类 CSHA-PrjEditView 的基类为 CPrjEditView 类, 具有对整个工程文件中各个工作区的编辑处理功能及地震危险性分析功能。

在开发自定义的图形交互操作功能时, 采用 SetExtTool 函数无缝集成到 CGisEditView 中, 在

CGisEditView 类可以找到该函数的原型为: void SetExtTool(BaseGisTool \* extool); 自定义的图形交互操作类 CSHAXTool 由 BaseGisTool 类派生, 并实现相应的鼠标和键盘操作后就可以在框架右边的窗口视图类 CSHAPrjEditView 中调用, 并由系统来接管交互操作 (图 3)。

### 3 为什么选择 GIS ?

近几十年, 信息技术的应用促进了地理学的众多变革。GIS 技术整合众多独立的技术于一个系统中, 系统大于部分之和, 应用 GIS 可以对大批量的空间数据进行制图、模型分析、空间查询和空间分析。基于 GIS 的概率性地震危险性分析程序符合 Windows 的操作习惯, 通过菜单、工具箱和多话框等提供给用户交互的可视化的方式进行地震危险性分析 (图 4)。地震活动性参数、潜在源区、衰减关系等数据都可以在系统中交互地输入、存储和恢复, 而不像基于 DOS 系统的地震危险性分析程序那样把这些数据存储在文本文件中, 可读性差。应用 GIS 的

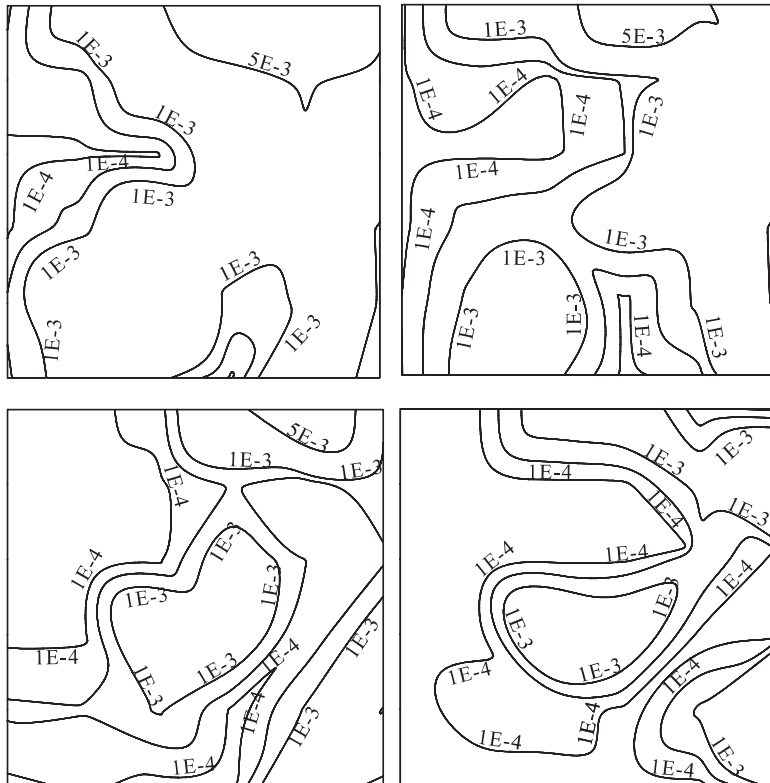


图 4 峰值加速度超越概率等值线

Fig. 4 Isoline maps of PGAs' exceedance rates

功能,可以方便地对这些数据进行查询、分析和转换,如图层叠加分析及手工无法完成的一些模型分析。

GIS 分析的结果可以用地图、报表和报告等多种形式来表达(图 4)。空间数据的可视化是一种空间认知行为,它提高了我们理解复杂空间分析过程的能力,从而帮助用户掌握地震危险性分析中的数据流程。其他的概率性地震危险性分析模型,如断层—破裂模型(Kiureghian and Ang,1977)等,也可以引入到系统中来分析各种模型的局限性和合理性。

### 4 结果

为了检测程序计算结果选取了三峡地区某工程

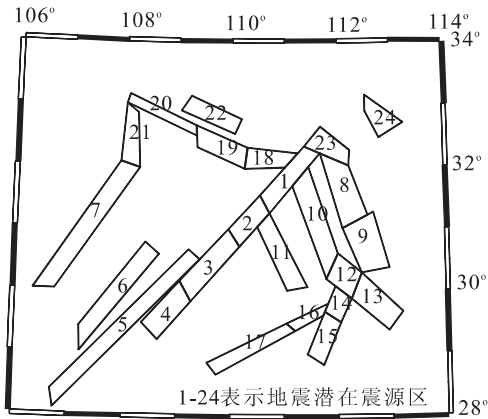


图 5 潜在震源区示意图

Fig. 5 Sketch map of seismic sources

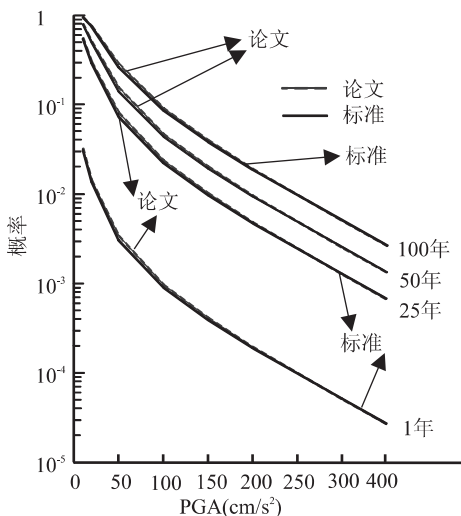


图 6 场地在 t 年内基岩峰值加速度的超越概率曲线

Fig. 6 PGA exceedance rates of site

场地进行了地震危险性分析,并与中国地震局提供的标准程序计算结果进行了对比。工作区地理坐标范围大致为 28°N—33°20'N,106°30'E—113°30'E,共划分出 24 个地震潜在震源区(图 5)。

图 6 给出了标准程序、论文章程序计算得到的场地在 t 年内烈度和峰值加速度的超越概率曲线。用论文章程序计算的场地在 t 年内烈度和峰值加速度的年超越概率结果与标准程序计算结果有一定差异(其中 1 年的峰值加速度的超越概率平均误差率为 4.525%),但计算结果总体趋势比较一致。

### 5 讨论

较之目前广泛使用的基于 DOS 的地震危险性分析程序,使用 GIS 技术实现的地震危险性分析程序符合 Windows 操作习惯。地震活动性参数、潜在震源区划分和地震动衰减关系等数据输入都可以通过友好的人机交互界面实现,从而提高地震危险性程序的可操作性。对于地震危险性分析,基于 GIS 的空间信息可视化是一种空间认知行为,它提高了对空间数据复杂分析过程的洞察能力,将有效改善和增强空间地理信息的传输能力,有助于理解、发现地震危险性分析中实体相关关系,并启发形象思维能力。

致谢:中国地震局地震研究所曾心传研究员在研究过程中给予了大力帮助,在此谨表示诚挚的敬意和感谢。

### References

Akkaya, A. D., Yücemem, M. S., 2002. Stochastic modeling or earthquake occurrences and estimation of seismic hazard: A random field approach. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 17: 1-13.

Bommer, J. J., 2003. Uncertainty about the uncertainty in seismic hazard analysis. *Engineering Geology*, 70: 165-168.

Castañós, H., Lomnitz, C., 2002. PSHA: Is it science? *Engineering Geology*, 66: 315-317.

Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58: 1583-1606.

Cramer, C. H., 2001. A seismic hazard uncertainty analysis for the New Madrid seismic zone. *Engineering Geology*, 62: 251-266.

Gong, P., Zeng, X. C., Luo, Y. Z., 2000. Study on rationality

- and limitation of common probabilistic models for earthquake occurrences in seismic risk analysis. *Journal of Seismological Research*, 23(1):57—62(in Chinese with English abstract).
- Kiureghian, A. D., Ang, A. H. S., 1977. A fault-rupture model for seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(4):1173—1194.
- Leonard, G., Somer, Z., Horin, Y. B., et al., 2002. GIS as a tool for seismological data processing. *Pure Appl. Geophys.*, 159:945—967.
- Lindholm, C. D., Bungum, H., 2000. Probabilistic seismic hazard: A review of the seismological frame of reference with examples from Norway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(1):27—38.
- McGurie, R. K., 1976. FORTRAN computer programs for seismic risk analysis. US Geol. Survey Open File Report, Washington, USA, 76—67.
- Meletti, C., Patacca, E., Scandone, P., 2000. Construction of a seismotectonic model: The case of Italy. *Pure Appl. Geophys.*, 157:11—35.
- Wang, M. F., Yin, H. W., Shen, P. S., et al., 2000. Improved method of seismic hazard assessment and its application. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 27(5):79—84(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. W., Zhang, P. Z., 1999. Application of geographic information system (GIS) to seismic risk analysis. *Crustal Deformation and Earthquake*, 19(1):82—86 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 龚平, 曾心传, 罗延钟, 2000. 地震危险性分析中常见地震发生概率模型的合理性及局限性研究. *地震研究*, 23(1):57—62.
- 汪梦甫, 尹华伟, 沈蒲生, 等, 2000. 地震危险性分析方法的改进及其应用. *湖南大学学报(自然科学版)*, 27(5):78—84.
- 张秋文, 张培震, 1999. 地理信息系统(GIS)在地震危险性分析中的应用. *地壳形变与地震*, 19(1):82—86.