

基于 GIS与数值模拟的三峡水库库首区诱发地震危险性评价

李雪平 李云安 汪洋 李恒

(中国地质大学 (武汉) 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心 武汉 430074)

(中国地质大学 (武汉) 工程学院 武汉 430074)

(中国地震局武汉地震研究所 武汉 430071)

摘要 采用 GIS与数值模拟相结合的方法对三峡水库库首区诱发地震危险性进行评价。通过研究水库诱发地震的影响因素,建立模型进行数值模拟。在 GIS平台上,综合数值模拟结果与诱发地震监测结果,建立危险性评价数据库。在 GIS支持下,采用最大拉应变准则判别拉伸破坏,采用摩尔-库仑准则判别剪切破坏,对单元进行评价。利用诱发地震监测资料,以发生诱发地震单元的第一主应力、第三主应力、位移作为危险单元的标准,对单元进行二次评价。研究表明,建立同一 GIS平台下的水库区地质环境、监测资料数据库是建立多因素综合评价模型的基础。采用地震评估模型对模拟结果进行评估,结合监测资料对评估成果进行修正,在三峡库首区水库诱发地震危险性评价中具有一定的可信度。

关键词 GIS 数值模拟 水库 诱发地震 危险性评价

中图分类号: P642 文献标识码: A

GIS AND NUMERICAL SIMULATION TECHNIQUES BASED RISK ASSESSMENT OF INDUCED EARTHQUAKE IN THREE-GORGE RESERVOIR HEAD AREA

LIXueping LIYun an WANG Yang LIHeng

(Engineering Research Center of Rock -Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan 430074)

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

(Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071)

Abstract GIS and numerical simulation techniques are used to quantitative risk assessment of induced earthquake in the Three-Gorge reservoir head area. The technical route is that the simulation model is set up through the analysis of affecting factors. The simulation result is obtained with FLAC 3D. The assessment database is set up by the result of simulation and monitoring data. Each unit is estimated with the maximum tensile strain criterion for judging rock tensile failure and the Mohr-Coulomb criterion for judging rock shear failure. The unit is further estimated by comparing the first principal stress, the third principal stress and the displacement where the induced earthquake had taken place after impounding of the reservoir on a GIS platform. The result shows that building database containing various data based on the same GIS platform is the basement of integrated factor model. The result of risk as-

* 收稿日期: 2009 - 04 - 21; 收到修改稿日期: 2009 - 10 - 26

基金项目: 中国科技部公益研究专项 (2004D B3J131).

第一作者简介: 李雪平, 工程地质专业. E-mail: lixp@cug.edu.cn

assessment possesses the reliability in the Three-Gorges reservoir head area. The simulation result is also calculated with the earthquake model and the calculated result is further modified with the monitored data.

Key words GIS, Numerical simulation, Reservoir, Induced earthquake, Risk assessment

1 引言

水库诱发地震危险性预测与评估是水利水电枢纽工程的重要研究内容之一。由于水库诱发地震具有多种成因,其发震机理和诱震因素十分复杂,目前国际上还处于研究阶段。对水库诱发地震的危险性评价与预测理论与方法,各学科、不同学者持不同的观点方法,目前处于资料积累和方法探索对比阶段,尚无成熟的预测潜在危险性的评价方法。

国内外早期研究侧重于已有震例特征的对比分析、诱震条件及成因机制的探讨等。随着观测资料的不断积累及研究的不断深入,对水库诱发地震的产生条件、成因机制、预测和评价方法提出了许多各具特色的理论和方法,如地质环境法、灰色聚类法、模式识别法、神经网络法和逻辑信息法、数值模拟方法等,都能从一定角度对水库诱发地震作出相应的预测与评价^[1-3]。

综合文献资料,水库诱发地震的研究大致可分为诱震条件判别和成因模式法两大类。诱震条件判别通过对水库特征参数的综合研究,如通过震例统计分析等手段,做出潜在危险性评价。成因模式法则以一定的成因模式为基础,建立破裂或屈服准则,作出危险性预测评价。

对三峡水库诱发地震的研究,研究人员作了大量的工作,取得了丰硕的研究成果。本研究侧重从库首区数值模拟成果中,应用地理信息系统的数据库管理与分析能力,找出地震发生危险性与应力场、应变场的关系,从机理研究出发对水库诱发地震的危险性进行评价。

2 数值模拟在水库诱发地震机理研究中的应用

对水库诱发地震机理的研究,最早由 Healy (1968)提出,指出孔隙水压力的增加降低了断层的有效正应力,从而导致地震发生。Gough 夫妇 (1970)、Snow (1972)、Beck (1976)、Withers 和 Nyland (1978)等, Bell 和 Nur (1978), Talwani 等, Simpson D. W. 等 (1989)分别研究了库水位、孔隙水压

力与诱发地震的关系。国内高士钧 (1990), Shen and Chang (1995), 颜玉定等 (2005), 陈蜀俊等 (2005), 齐文浩等 (2006), 刘素梅等 (2007)运用有限元数值模拟技术和试验手段研究了水库诱发地震的机理^[4-14]。

长期监测、研究结果表明,水库诱发地震的关键因素包括:

(1)库水压力(水头)作用下,渗流场的变化导致应力场的改变,即水头越高,渗流场变化的深度越大、应力调整的范围越大、应力积累的可能性越大。因此,取决于库盆岩体的渗透性及其渗流条件。

(2)由于深大断裂的存在,其破裂带岩体一般具有一定的渗透性,水头压力越大,影响深度越大。故深大断裂的诱发地震可能性大小与渗透性相关,与水头成正比;同时,深大断裂尤其活动断裂自身具有构造地震环境,而渗流场的较大变化必然加剧应力场的改变,即诱发地震。因此,诱震与其背景及应力现状相关。

库水变化及库区断裂带,特别是活动性断裂带的存在,在水库诱发地震机理研究中具有重要地位。因此通过数值模拟技术,模拟库水重力荷载作用和断裂带存在条件下水压应力场、位移场,分析其特点和变化,探讨水库诱发地震机理,并对水库诱发地震危险性进行评价。

3 GIS技术在地震科学研究中的应用

GIS在美国、日本等发达国家的地震科学研究中已得到了广泛的应用,形成了一定的规模。主要应用于地震区划、地震易损性分析、地震危险性分析、防震减灾对策和震后救灾等方面。我国将 GIS 技术应用于地震科学研究工作起步较晚,但发展迅速。GIS技术主要应用于城市防震减灾、地震分析预报、地震早期趋势判定、地震应急、地震灾害预测、地震信息管理和查询等方面应用。GIS在地震科学中的应用概括起来有两个方面,一方面主要利用 GIS 技术强大的数据管理功能和快捷的查询功能,对地震基础信息进行管理。另一方面结合地震专业评价模型,应用 GIS 二次开发功能,研发专业的 GIS 地震应用软件系统^[15]。

4 水库诱发地震危险性评价技术路线

4.1 GIS与专业模型的结合方式

目前大多数 GIS软件都具有基本的空间分析功能和属性数据统计功能,这些功能能满足相关领域的数据库管理和简单的数据分析。不同应用领域对数据分析与处理要求不同,将 GIS与专业模型相结合,进行信息管理、数据处理、空间分析、预测、决策等,是 GIS研究的一个重要方向。GIS与专业模型的结合大致分为以下几种方式^{[16][17]}。

- (1)基于数据传输的结合方式
- (2)基于共同用户界面的结合方式
- (3)在 GIS中嵌入专业模型
- (4)在专业模型中嵌入 GIS功能模块

4.2 GIS技术与数值模拟技术结合方式

GIS技术与数值模拟技术的结合方式,可参考 GIS与专业模型的结合方式,划分为以上 4类。尽管目前大型 GIS软件二次开发平台很完善,但由于数值模拟技术的复杂性,研发数值模拟 GIS专业软件困难相当大,而且也没有必要。所以 GIS技术与数值模拟技术的结合一般采用基于数据传输的松散结合方式。

4.3 水库诱发地震危险性评价专业模型

本研究中的评价专业模型采用双标准。标准一为采用最大拉应变准则判断拉伸破坏,采用摩尔-库仑准则判断剪切破坏,对达到破坏标准的单元定义为危险单元;标准二为采用地震监测资料,以水库蓄水后发生诱发地震单元的第一主应力、第三主应力、位移为危险单元的标准,对各单元进行二次评价。

4.4 水库诱发地震危险性评价技术路线

在水库诱发地震危险性评价研究中, GIS技术与数值模拟技术结合采用基于数据传输的松散结合方式,通过 GIS技术与数值模拟技术之间开发数据传输与转换模块实现两者之间的数据交互。GIS与水库诱发地震危险性评价的专业模型采用在 GIS中嵌入专业模型的方式,进行基于 GIS平台的二次研发。本研究选用 FLAC3D为数值模拟工具,MAPGIS地理信息系统软件为 GIS基础平台,VC++作为开

发工具,具体的数据流程如图 1所示。

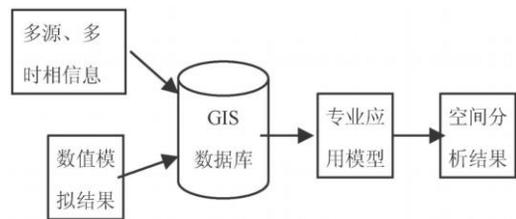


图 1 数据流示意图

Fig 1 Illustration of data stream structure

5 三峡水库库首区数值模拟简介

5.1 研究区地质概况

水库库首区属黄陵穹窿核部及其两翼,出露前震旦系结晶体及震旦-白垩系地层,沉积盖层主要有碳酸岩类的地层。

研究区断裂主要分布在八面山台褶带,东段为黄陵背斜西南侧,秭归向斜东部的北北西和北东向断裂系;西段为八面山弧形褶皱带。

穿越水库较大的重要断裂有九湾溪断裂、仙女山断裂、巴东-黔江断裂、远安断裂、新华断裂、天阳坪断裂。这些断裂中以 NW-NNW 和 NE、NNE 向活动构造明显。反映了本区域统一构造应力场-NE 向挤压,以及新构造期的继承性活动。九湾溪、新华断裂主要为张剪性质错动;仙女山、远安断裂主要为右旋剪压性质。这些断裂为本区的主要发震构造^[18](图 2)。

5.2 研究区域界定

本研究范围以大坝坝址三斗坪为中心,向四周辐射。西起高阳镇、东至土城,南起杨林桥镇、北至柏水坪(东经 110°31'~111°20'、北纬 30°32'~31°12')。东西方向长度 60km,南北方向长度 51km,深度取 10km。

计算模型的边界位移条件确定为:模型的左右边界在 y 方向施加约束,即 $x = -30\text{km}$ 的边界上在 y 方向约束,其他方向上自由, $x = 30\text{km}$ 的边界上在 y 方向约束,其他方向上自由;模型的左右边界在 x 方向上施加约束,即 $y = -25.5\text{km}$ 的边界上在 x 方向约束,其他方向上自由, $y = 25.5\text{km}$ 的边界上在 x 方向约束,其他方向上自由;模型的底部在 3 个方向上施加约束,即 $z = 0$ 的边界上在 x、y、z 方向均约束。

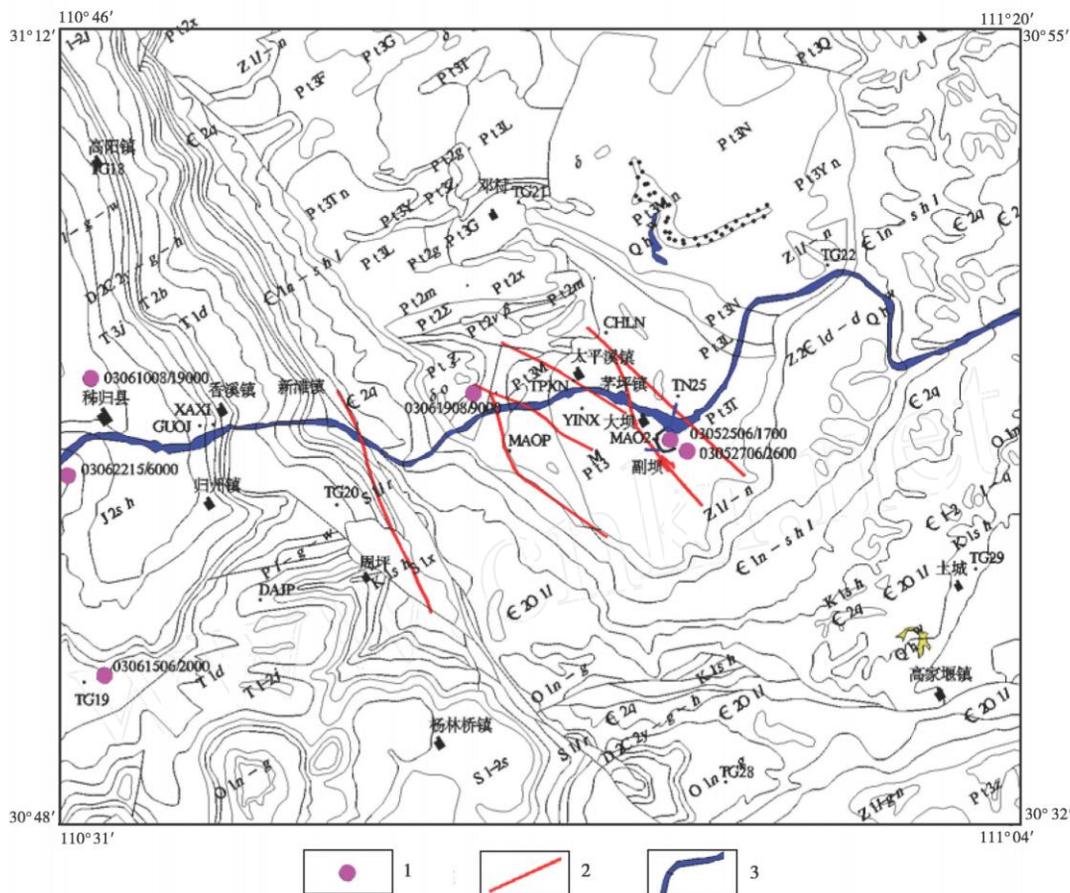


图 2 研究区地质简图

Fig 2 Summary map of the sketch geological map of studied area

1. 水库蓄水后发生的地震; 2. 断裂; 3. 长江

计算单元采用 20 节点六面体实体单元。几何区域所划分的单元数为 18,000 个, 节点 46,800 个。根据研究区地质图及岩性分布规律, 经过综合分析, 在上述选择的建模范围内对研究区进行离散化, 得到网格剖分模型 (图 3)。

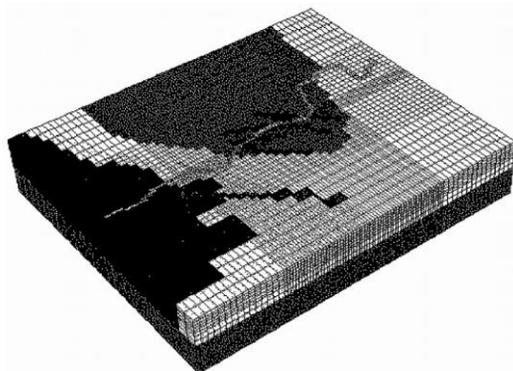


图 3 网格剖分模型

Fig 3 The model of grid section

5.3 计算参数的选取

以研究区的岩性特征为基础, 充分考虑前人研究成果及实验参数, 采用工程地质类比法确定本区的模拟参数 (表 1)。因模拟的范围很大, 深度为 10 km, 模拟参数的取值考虑了体积模量和压缩模量随深度的变化规律。

根据三峡水库的水位及大坝运营情况, 模拟选取四种工况进行数值模拟计算分析:

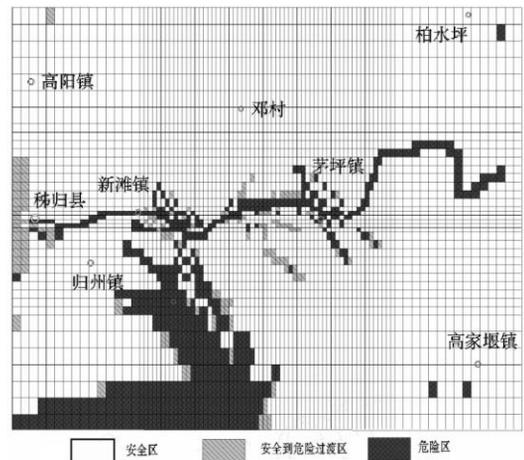
- 工况一: 水库坝前 65m 静水位;
- 工况二: 水库坝前 135m 静水位;
- 工况三: 水库坝前 156m 静水位;
- 工况四: 水库坝前 175m 静水位。

根据 135m、156m、175m 水位下库首区的水体分布, 布置蓄水工况下的水体荷载, 再进行库水下渗区物性参数调整。参考三峡库区岩石天然状态、饱水状态的实测参数, 进行蓄水工况下的模拟时, 在初始模型参数基础上, 弹性模量、泊松比分别进行调整。

表1 模拟所采用的参数

Table 1 parameter in the simulation analysis

建 模代 号	容重 /kN·m ⁻³	摩擦角 /(°)	粘聚力 c/MPa	渗透系数 /m·s ⁻¹	孔隙率
1	25.3	33.7	7.8	7.58×10^{-7}	15.3
2	26.3	41.6	31.4	4.05×10^{-7}	13.1
3	24.5	28.1	9.1	2.89×10^{-7}	15.5
4	24.7	33.7	22.5	2.43×10^{-7}	12.6
5	26.6	52.9	30.2	1.78×10^{-7}	0.82
6	19	71.6	0.042	3.34×10^{-6}	42.5
7	18.8	58.7	0.055	6.97×10^{-6}	45
8	18.5	61.5	0.042	4.14×10^{-6}	38.8
9	18	7	0.01	7.00×10^{-7}	50
10	25.0	52	18.9	1.0×10^{-10}	0.1

图4 蓄水位 156m,深度 500~1,000m处
诱发地震危险性区划图Fig 4 Risk assessment map of induced earthquake on
156m water level, depth from 500m to 1000m

6 三峡水库库首区水库诱发地震危险性评价

6.1 评价系统简介

根据上述技术路线,研发了水库诱发地震地质灾害预报预警与辅助决策系统。系统提供在一定蓄水位条件下(分4种水位状况:65m,135m,156m,175m)、一定评价范围中、一定深度范围内(分5种深度:<500m,500~1,000m,1,000~2,000m,2,000~5,000m,5,000~10,000m)的水库诱发地震灾害预测。预测成果形式为水库诱发地震灾害发生危险性等级划分图。系统将水库诱发地震灾害发生划分为三个等级:1级为安全区;2级为安全到危险过渡区;3级为危险区。

6.2 评价结果分析

蓄水位为135m、156m、175m时,系统预测的诱发地震的危险区主要位于长江边上和断裂带附近。现有的135m、156m蓄水时部分诱发地震监测数据,基本落在系统评价的危险区和危险过渡区中,说明系统预测有一定可信度。图4为水库蓄水位为156m,深度500~1,000m处,系统预测的诱发地震危险性评价图。图中依颜色从浅到深,依次为:安全区、安全到危险过渡区、危险区。但在预测区域的南部有大片危险区存在,这与实际情况不符,可能与模拟系统的边界系统取定有关。

7 结 语

对三峡水库的诱发地震研究,科研工作者作了很多工作。本研究主要针对数值模拟成果,设计了水库诱发地震评价模型,进行诱发地震评价。若将多种评价结果进行对比分析,再加上各种监测数据的修正,对提高评价准确性将是一个很好的解决方案。作者得出以下结论:

(1)建立同一平台下的库区地质环境、监测资料数据库是建立多因素综合评价模型的基础。

(2)多种预测评价模型进行对比分析,对水库诱发地震的专业模型进行修正,是提高评价准确性的途径。

(3)多因素综合评价模型实质上是多源信息融合问题。随着多源信息融合技术的发展,获得合理的水库诱发地震多因素综合评价模型是完全可行的。

(4)采用地震评估模型对数值模拟结果进行评估,结合监测资料对评估成果进行修正,在三峡库首区水库诱发地震危险性评价中具有一定的可信度。

参 考 文 献

- [1] 张秋文,王乘,李峰. 长江三峡工程库首及周缘地区水库诱发地震危险性定量预测与评估研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(4): 21~26.

- Zhang qiwen, Wang cheng, Li feng Quantitative Prediction and Assessment of Induced Seismicity Risk in Yangtze Three-Gorge Reservoir Head Area and its Neighboring Area Water Resources and Power, 2005, **23**(4): 21 ~ 26
- [2] 夏金梧, 李长安, 王旭. 神经网络在三峡水库诱发地震预测中的应用 [J]. 人民长江, 2007, **38**(2): 8 ~ 11.
- Xia jinwu, Li changan, Wang xu Application of neural network theory in prediction of earthquake induced by TGP reservoir Yangtze River, 2007, **38**(2): 8 ~ 11.
- [3] 杨清源, 陈献程, 胡毓良等. 应用灰色聚类法预测长江三峡工程水库诱发地震的最大震级 [J]. 华南地震, 1996, **16**(2): 75 ~ 79.
- Yang qingyuan, Chen xiancheng, Hu yuliang et al Forecast the maximum magnitude of induced reservoir earthquake on the sanxia project of Yangtze river using grey cluster method South China Journal of Seismology, 1996, **16**(2): 75 ~ 79.
- [4] Bell M. Lee & Nur Amose Strength Change Due to Reservoir-induced Pore Pressure and Stresses and Application to Lake Oroville [J]. Geophysical Research, 1978, **83**: 4469 ~ 4482
- [5] Talwani, Pradeep, Acree S Pore Pressure Diffusion and the Mechanism of Reservoir-induced Seismicity [J]. Pure & Application Geophysics, 1985, **122**: 947 ~ 965.
- [6] Simpson, David W, Narasimhan T N. Inhomogeneities in Rock Properties and Their Influence on Reservoir-induced Seismicity [A]. Knoll Induced Seismicity [C]. Rotterdam: Balkema, **1992**: 345 ~ 359.
- [7] Gupta Hark K Short-tem Earthquake Forecasting May be Feasible at Koyna, India [J]. Tectonophysics, 2001, **338**: 353 ~ 357.
- [8] Gupta Hark K A Review of Recent Studies of Triggered Earthquakes by Artificial Water Reservoirs with Special Emphasis on Earthquakes in Koyna, India [J]. Earth-science Reviews, 2002, **58**: 279 ~ 310.
- [9] 高士钧, 曾心传, 陈永成等. 水库诱发的孔压变化及应力特征 [J]. 西北地震学报, 1990, **12**(1): 87 ~ 95.
- Gao shijun, Zeng xinchuan, Chen yongcheng et al The Pore Pressure Variation and Stress Characteristics Induced by Reservoir Northwestem Seismological Journal, 1990, **12**(1): 87 ~ 95.
- [10] Shen liying, Chang baoqi Application of Stress-pore Pressure Coupling Theory of Porous Media in the Xingfengjiang Reservoir Earthquakes [J]. Pure & Applied Geophysics, 1995, **145**: 123 ~ 137.
- [11] 颜玉定, 李亚林, 张专等. 岩石水压力致裂和诱发地震的定量研究 [J]. 2005, **21**(21): 193 ~ 206.
- Yan yuding, Li yalin, Zhang zhuan et al A Research of Rock Experiment on Hydraulic Fracturing and Induced Earthquake Earthquake Research in China, 2005, **21**(21): 193 ~ 206
- [12] 陈蜀俊, 姚运生, 曾佐勋等. 三峡库首区蓄水前后构造应力场三维数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(S2): 5611 ~ 5618.
- Chen shujun, Yao yunsheng, Zeng zuoxun et al Study on Numerical Simulation of Tectonic Stress Field before and after Reservoir Impounding in the Head Area of the Three Gorge Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5611 ~ 5618.
- [13] 齐文浩, 薄景山, 李贞德. 江口水库诱发地震的有限元分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(6): 7 ~ 10.
- Qi wenhao, Bo jingshan, Li zhende Finite Element Analysis of Jiangkou Reservoir-induced Earthquake Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **26**(6): 7 ~ 10.
- [14] 刘素梅, 徐礼华, 彭少民等. 水库诱发地震机理研究. 武汉理工大学学报, 2007, **29**(2): 83 ~ 91.
- Liu sumei, Xu lihua, Peng shaomin et al Research on the Mechanism of Reservoir induced Seismicity. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, **29**(2): 83 ~ 91.
- [15] 周斌, 刘涛, 文俊武. GIS技术在地震学研究中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2005, **20**(1): 160 ~ 164.
- Zhou bin, Liu tao, Wen junwu The current application of GIS in earthquake studies Progress in Geophysics, 2005, **20**(1): 160 ~ 164.
- [16] Dobson J. E. Commentary A conceptual Framework for Integrating RS, GIS and Geography [J]. PE&RS 1993, **59**(10): 1491 ~ 1496.
- [17] 杜培军, 郭志达, 方涛等. GIS在开采沉陷领域应用及与专业模型的结合 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, **28**(4): 463 ~ 467.
- Du peijun, Guo zhida, Fang tao et al Application of GIS to Mining Subsidence and Combination of GIS with Professional Model Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, **28**(4): 463 ~ 467.
- [18] 袁曲, 董建辉. 三峡水库地震孕震机理与未来地震趋势初探 [J]. 地震地磁观测与研究, 2005, **26**(S): 37 ~ 47.
- Yuan qu, Dong jianhui Preliminary study on the mechanism of the TGP reservoir-induced earthquakes and future seismic tendencies Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2005, **26**(S): 37 ~ 47.