

基于空间平滑法的武汉城市圈地震危险性概率分析*

魏运浩, 姚运生, 王秋良, 檀玉娟

(中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:以武汉城市圈为研究对象, 利用空间平滑方法建立了区域的两个地震活动性模型, 计算了50年超越概率10%的基岩峰值加速度分布图, 与地震动参数区划图的对比表明, 其结果能合理反映区域的地震危险性水平。在弱震活动区, 基于空间平滑法的地震危险性概率计算能给出可靠的地震动参数。

关键词:空间平滑法; 地震危险性分析; 武汉城市圈

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)03-0286-05

0 引言

地震危险性分析概率方法通过计算场地具有概率含义的地震动参数(如峰值加速度, 简称PGA)为抗震设防提供重要依据。此方法的基本理论框架最早由Cornell(1968)提出, 此后McGuire将其编制成了计算机程序, 极大促进了其推广和应用。20世纪80年代, 该理论被引入我国。国内地震工作者在已有研究成果的基础上, 提出了“考虑地震活动时空不均匀性的概率性地震危险性分析方法(CPSHA)”(胡聿贤, 1999)。此方法大量应用于地震区划和工程场地地震安全性评价工作中, 并写入国家标准《工程场地地震安全性评价》(GB 17741-2005)。

CPSHA方法中, 地震统计区和潜在震源区的划分是重要的环节, 对场点地震动参数的估计有重要的影响(黄玮琼, 吴宣, 2003, 2005)。在弱震活动区的工作中, 地震带和潜在震源区的划分都带有主观性和不确定性, 会影响地震危险性计算结果的准确度。美国的地震工作者在美国东部弱震活动区的地震烈度区划编制工作中也曾遇到类似情况, 为解决此问题, Frankel(1995)提出了空间平滑地震活动性方法, 并将其应用于1996年美国东部地震烈度区划图编制工作中。此后, 国外研究人员在该理论的细节上做了进一步的完善研究(Stirling, 2000; Kafka, Levin, 2000; Lapajne et al, 2003), 该方法先后应用于2002年

美国东部的地震烈度区划图编制、南加州地区地震危险性分析和斯洛文尼亚地区地震危险性分析等; 国内研究人员也对此方法的应用进行了研究(杨勇等, 2008)。空间平滑方法理论简明, 不用主观地划分潜在震源区, 使其在地震活动与构造关系不明确地区具有应用优势。

武汉城市圈区域地震活动性较弱, 在目前的地震安全性评价工作中, 潜在震源区的划分存在主观性和不确定性的问题。为避免这种不确定性所带来的影响, 笔者采用空间平滑程序建立研究区地震活动性模型并计算地震危险性概率。

1 基于空间平滑法的地震危险性概率分析方法

基于空间平滑法的地震危险性概率分析假定: 地震的发生满足泊松过程; 破坏性地震活动遵从历史重演原则, 即历史上曾经发生地震的区域未来发生同级及以上地震的可能性较大。

1.1 资料选取

选取的资料应满足下述两个条件: (1) 地震目录要完整, 即区域内起算震级及其以上的地震要全部被记录到; (2) 为了保证所选取的地震事件的独立性和随机性, 要删除大震的前震和余震。

1.2 空间平滑地震活动性模型

空间平滑地震活动性模型的具体建立步骤如下:

* 收稿日期: 2010-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金——长江三峡地区壳幔三维结构与地震活动性研究(40730317)和三峡公司专项基金——三峡库区地震类型快速识别及地震趋势预测研究(SXSN/2377)共同资助。

(1) 震级分布。在 $m_0 \sim m_U$ 震级范围内，震级—频度关系 (Cornell, 1968) 表示如下

$$n(m) = n(m_0) \frac{10^{-b(m-m_0)} - 10^{-b(m_U-m_0)}}{1 - 10^{-b(m_U-m_0)}}. \quad (1)$$

式中，震级下限 m_0 使用完整地震目录中的起算震级，震级上限 m_U 在历史最大震级的基础上增加 0.5 度的震级档。相应的概率密度分布函数为

$$p(m) = \frac{b \ln 10 \cdot 10^{-b(m_U-m_0)}}{1 - 10^{-b(m_U-m_0)}}. \quad (2)$$

(2) 区域网格化。将研究区域划分为一系列的矩形网格，网格是计算的基本单元，所有的输入输出数据均赋值于单元格的中心，单元格内的地震的震中也都归于单元格的中心。网格的尺寸影响计算结果的分辨率。

(3) 空间平滑地震活动率。常用的平滑过程有一步平滑法 (图 1a 显示圆形高斯平滑，图 1b 显示椭圆形平滑) 和两步平滑法 (图 1c)，椭圆形平滑和两步平滑中的长短轴可以反映地震动沿断裂构造的分布形态。但是，由于缺乏研究区域的定量地震构造模型，本文仅采用一步圆形高斯平滑法，对其它方法不再做进一步的阐述。一步圆形高斯平滑的理论计算公式为

$$\bar{n}_i(m_0) = \frac{\sum_j n_j(m_0) e^{-(\Delta_{ij}/c)^2}}{\sum_j e^{-(\Delta_{ij}/c)^2}}. \quad (3)$$

式中， $n_i(m_0)$ 为第 i 网格 $M \geq m_0$ 地震的年发生率； Δ_{ij} 为 i, j 两个单元格中心的距离； c 为相关距离，此参数与地震定位误差有关 (Lapajne et al, 2003)。

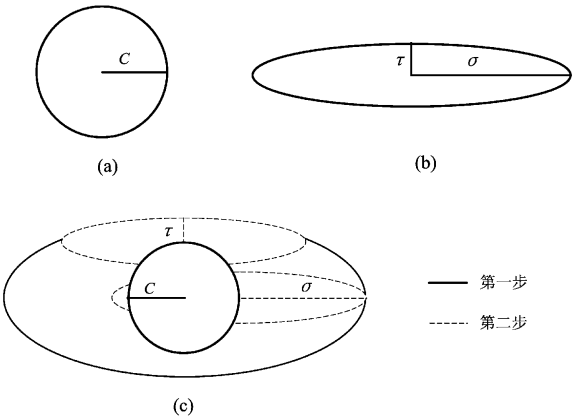


图 1 空间平滑的常用方法

Fig. 1 Methods of spatial smoothing

1.3 危险性分析计算

将所有地震的震源都看作一个点，震源坐标归到地震所在单元格的中心。单元格的地震危险性可以通过下式计算得到

$$\lambda(u > u_0) = \sum_i n_i(m_0) \int_{m_0}^{m_U} P[u > u_0 | m, r_i] p_i(m) dm. \quad (4)$$

式中， λ 为地震动参数 $u > u_0$ 的年超越概率； $n_i(m_0)$ 表示单元格 i 中大于起算震级 m_0 的地震年发生率； $p_i(m)$ 表示单元格中震源发生 m 级地震的概率，可由公式 (2) 计算得到； r_i 表示单元格 i 的中心到目标单元格中心的距离； $P[u > u_0 | m, r_i]$ 表示距离为 r 震级为 m 的地震产生地震动水平 $u > u_0$ 的条件概率，计算公式为

$$P[u > u_0 | m, r] = \frac{1}{2} \Phi^* \left(\frac{\ln u_0 - \ln u(m, r)}{\sqrt{2} \sigma} \right). \quad (5)$$

式中， Φ^* 表示补充误差函数； $\ln u$ 表示衰减关系。

2 区域概况及资料来源

武汉城市圈指以武汉市为中心，包括黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、天门及潜江周边 8 个城市所组成的城市圈。为降低计算中所产生的边缘效应的影响，本文选取范围在 $28^\circ \sim 32^\circ \text{N}$ ， $112^\circ \sim 117^\circ \text{E}$ 之间的地区作为研究区。

研究区内地质构造活动在燕山期以后趋于稳定，新构造运动的升降幅度不大。区内展布一系列形成时代和发展演化历史不尽相同的断裂，新构造运动时期显示弱活动性，不同断裂带的活动强度与地震活动的相关性也不尽相同。研究区位于华北平原地震带、长江中游地震带、郧庐地震带和长江下游地震带的交汇地区，构造地震活动的特征性不显著 (谢广林等, 1993)。

地震资料的来源有两个部分：(1) 历史破坏性地震 ($M_s \geq 4.7$) 资料，取自于国家地震局灾害防御司编制的《中国历史强震目录》(公元前 23 世纪至公元 1911 年) 和《中国历史强震目录》(公元 1912 ~ 1970 年)；(2) 现代仪器记录，取自于中国地震台网中心《中国地震详目》(公元 1970 ~ 2008 年) 和湖北省地震局台网地震目录 (公元 1970 ~ 2008 年)， M_L 与 M_s 震级的换算由公式 M_s

$=1.13M_L - 1.08$ 得到。收集的资料中, 公元 1484 年以后 $M_s \geq 4.7$ 地震记录基本完整, 有地震记录 33 次; 1970 年后 $M_L \geq 2.5$ 地震目录资料比较完整, 利用 MapSIS 提供的主震震级法删除余震后, 有地震记录 451 次。

基于上述地震资料, 本文建立了两个模型: 模型 1 (M1) 使用公元 1484 ~ 2008 年 $M_s \geq 4.7$ 的地震目录; 模型 2 (M2) 使用公元 1970 年 ~ 2008 年 $M_L \geq 2.5$ 的地震目录。

3 计算结果与分析

3.1 b 值

利用最小线性二乘法拟合两个模型的震级—频度关系图 (图 2)。计算结果表明, M1 的 b 值为 0.91, M2 的 b 值为 0.96。时间段和震级段不同的两个地震目录, 统计的 b 值基本一致, M2 模型的仪器记录可保证是完整的, 由此可证明 M1 地震目录的完整性。M1 模型使用的数据时间跨度足够长, 起始震级以上的记录完整, 最大震级也与地震构造研究的结果一致 (刘锁旺, 丁忠孝, 1990)。M1 的震级—频度关系可靠地反映了研究区域的地震活动水平。而 M2 模型统计时段有限, 无法覆盖完整的地震活动周期, b 值结果虽然可靠, 但是 a 值 (表示地震累积年发生率) 偏低, 无法反映区域真实的地震活动性水平。

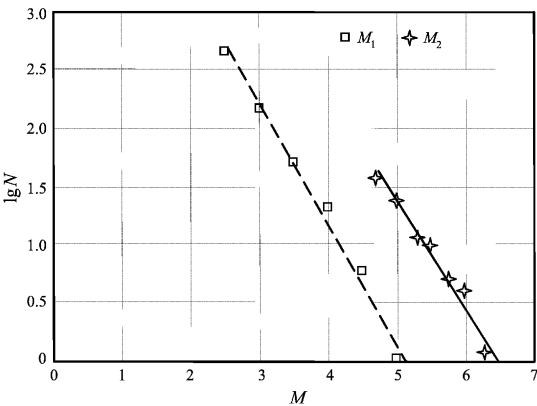


图 2 两个模型的震级-频度统计关系
Fig. 2 Magnitude-frequency relation of the two models

3.2 $v_{4.0}$ 值

将研究区域划分为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的网格, 用经纬度表示约为 $0.052^\circ \times 0.045^\circ$, 两个模型的计算都

基于此网格; 震级下限 m_0 使用地震目录中的起算震级, 震级上限 m_U 在历史最大震级的基础上增加 0.5° 的震级档; 相关距离 c 的取值与地震定位误差相关, M1 模型中设为 50 km, M2 模型中设为 20 km; 地震动计算的最大影响范围的半径为 100 km。两个模型的参数设置如表 1 所示。

表 1 两个模型的计算参数
Tab. 1 Calculation parameters of the two models

模型	m_0	m_U	c/km	b 值
M1	4.7	6.5	50	0.91
M2	2.5	6.5	20	0.96

按照前述的理论方法, 计算每个单元格的地震年发生率的值, 利用震级—频率关系将其归一化为 $v_{4.0}$ 值 ($M_s \geq 4$ 地震年发生率)。

图 3 给出了每个单元格的等值线分布。M1 计算的高值的中心位于黄冈、黄石和鄂州交界地区, 黄冈东北部、天门北部、咸宁南部和黄石东部受其邻区的辐射影响, $v_{4.0}$ 值也较高。M2 计算的结果明显比 M1 的要低, 其结果无法反映区域真实的地震活动水平, 这与前面震级—频度关系的分析结果一致。1970 年以来, 区域的小震活动集中在黄冈东北部、天门北、咸宁西北部和黄石东南地区。

M1 和 M2 的结果对比表明, 使用不同的地震目录计算得到的地震活动性分布差异很大, M1 (历史地震目录) 的计算结果与已有认识较一致 (刘锁旺, 丁忠孝, 1990), 而 M2 (现代仪器记录) 虽然有数量很多的小震, 但是时间跨度有限, 中强震记录不足, 计算地震活动性时结果会失真。因此, 建立合理的地震活动性分布模型, 要求所使用地震目录在时间域中要包含一个完整的地震活动周期, 在震级域中要包含一定数量的中强震事件。

3.3 地震动峰值加速度 PGA 值

由于 M2 的地震活动性模型无法全面反映区域地震活动性的基本特征, 本文仅使用 M1 的模型计算地震危险性。选用湖北省地震局武汉地震工程研究院给出的湖北及邻区地震动衰减关系, 最大影响半径取 100 km, 计算每个单元格 50 年超越概率 10% 的 PGA 值。

图 4a 给出了计算区域 50 年超越概率 10% 的基岩加速度峰值等值线分布。从图中可知, 黄冈、黄石和鄂州交界地区 PGA 值最高, 达 0.07 g 以上,

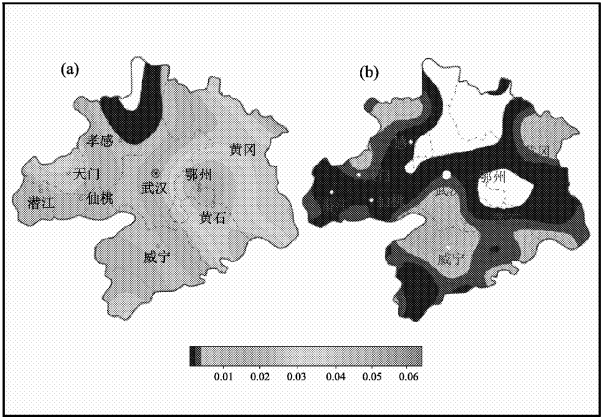


图 3 两个模型的 $M_s \geq 4.0$ 地震年发生率分布图
Fig. 3 Annual occruence rate distribution of $M_s 4.0$ earthquakes of two models

注：空白区域也有计算结果，其值在 $0 \sim 0.001$ （等值线最小刻度）区间内，以白色表示。

此区域为襄樊—广济和麻城—团风断裂的交汇处，历史地震活动频繁，曾多次发生 5 级左右地震；黄冈东北部 PGA 值也在 0.07 g 以上，主要受安徽霍山震源区的控制；另外，天门北部受钟祥地震活动区的影响，PGA 值达 0.06 g 。孝感大部、武汉西部和咸宁西北部的 PGA 值都在 0.05 g 以下，是地震危险性较低的区域。

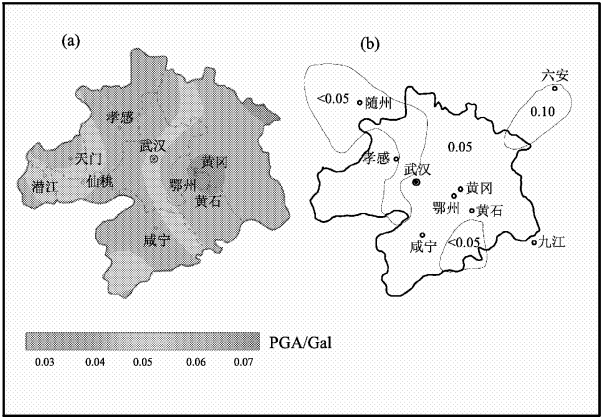


图 4 武汉城市圈峰值加速度分布图
(a) 本文计算结果；(b) 中国地震动参数区划图（GB 18306-2001）

Fig. 4 PGA distribution of Wuhan metropolitan area
(a) PGA calculated in this paper; (b) Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China (GB 18306-2001)

对比中国地震动参数区划图（图 4b），发现两者 PGA 值的分布特征基本一致，区域中部存在一条低值带（ $\text{PGA} < 0.05\text{ g}$ ），两侧值要稍高（ $0.05 < \text{PGA} < 0.1\text{ g}$ ），黄冈东北部的 PGA 值最大；而在具体的值上存在差异，主要原因是中国地震动参数区划图中给出的是一般场地条件下的 PGA 值，且其分区在科学计算结果的基础上还要考虑政治和经济因素的影响。

为进一步说明本文方法的有效性，表 2 摘录了研究区域内 10 个场地地震安全性评价报告^①给出的 50 年 10% 超越概率下的基岩 PGA 值，10 个场地在区域内均匀散布。对比表明，有 50% 的差值在 0.005 g 以内，另 50% 的差值在 $0.005 \sim 0.01\text{ g}$ ，最大差值未超过 0.01 g 。

表 2 本文与工程场地地震安全性评价报告中 PGA 值的对比
Tab. 2 Comparison the PGA value between this paper and the reports of seismic safety evaluation for engineering sites

工程场地	PGA/Gal		
	本文结果	安评报告	差值
汉口天悦国际广场	53.2	50.6	2.6
咸宁东北陈天济中桥	54.4	52.9	1.3
武汉南军山长江大桥	50.8	49.7	1.1
武汉天河机场	50.4	53.1	-0.7
城际铁路孝感站特大桥	48.2	55.9	-7.7
咸宁职教园	48.7	56.6	-7.9
鄂州中心医院	70.6	62.3	8.3
咸宁嘉鱼长江大桥	48.6	57	-8.4
黄冈麻城人民医院	65.0	63.36	1.64
麻竹高速大悟南枢纽互通	38.7	48.37	-9.33

以上分析表明，在弱震活动区，基于空间平滑法的地震危险性计算方法能给出可靠的地震动参数值，且能避免划分潜在震源区的复杂过程。

4 结论和讨论

本文使用研究区域的历史破坏性地震目录（公元 1484 ~ 2008 年 $M_s \geq 4.7$ ）和现代仪器记录（1970 ~ 2008 年 $M_L \geq 2.5$ ），基于空间一步高斯圆

① 资料来源：武汉地震工程研究院和湖北省地震局地震文献信息中心。

形平滑程序,建立了两个地震活动性模型,分别得到了 V4.0 的等值线分布。利用 M1 的地震活动性模型,选用适当的衰减关系,直接进行地震危险性概率计算,得到了武汉城市圈 50 年超越概率 10% 的基岩加速度分布图。通过分析,得到下述结论:

(1) 选用的地震目录要求在时间域和震级域内都是完整的,选用台网记录的小震资料建立弱震区地震活动性模型时要慎重。

(2) 1970 年以来,武汉城市圈区域地震活动性明显偏低。

(3) 对比表明,基于空间平滑法的地震危险性计算结果与传统方法所得结果基本一致。

(4) 在弱震活动区,基于空间平滑法的地震危险性计算结果可以为工程场地提供合理的地震动参数值,且比传统方法更加简洁。

本文在计算地震活动性模型时只使用了一步圆形平滑方法,如果有研究区的定量地震构造模型,可使用椭圆平滑方法或两步平滑方法进行计算,效果会更好。

本文在撰写过程中得到史保平教授、李井冈和李恒的帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 胡聿贤. 1999. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社.
- 黄玮琼,吴宣. 2003. 地震活动性参数不确定性对城镇危险性估计的影响[J]. 地震学报,25(6):615-620.
- 黄玮琼,吴宣. 2005. 地震统计区活动性参数与潜在震源区划分的相关性及对危险性估计的影响[J]. 地震学报,27(4):409-413.
- 刘锁旺,丁忠孝. 1990. 湖北地震志[M]. 北京:地震出版社.
- 谢广林,饶扬誉,蒋澜珍,等. 1993. 武汉地区新构造运动与区域稳定性评价. 地壳形变与地震,13(3):59-65.
- 杨勇,史保平,孙亮. 2008. 基于华北区域地震活动性分布的地震危险性评价模型[J]. 地震学报,30(2):198-208.
- 张宝一,龚平,王丽芳. 2006. 基于 GIS 的概率性地震危险性分析[J]. 地震研究,29(2):209-213.
- Cornell C A. 1968. Engineering seismic risk analysis[J]. BSSA,58(5):1583-1606.
- Frankel A. 1995. Mapping seismic hazard in the central and eastern United States[J]. Seism Res Lett,66(4p):8-21.
- Kafka A L, Levin S Z. 2000. Does the spatial distribution of smaller earthquakes delineate areas where larger earthquakes are likely to occur? [J]. BSSA,90(3):724-738.
- Lapajne J K, Motniker B S, Zupani P. 2003. Probabilistic seismic hazard assessment methodology for distributed seismicity [J]. BSSA, 93(6):2502-2515.
- Stirling M W. 2000. A new probabilistic seismic hazard assessment model for New Zealand[C]//. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- GB17741-2005,工程场地地震安全性评价[S].

Probabilistic Seismic Hazard Analysis in Wuhan Metropolitan Region Based on Spatial Smoothing Method

WEI Yun-hao, YAO Yun-sheng, Wang Qiu-liang, Tan Yu-juan

(Institute of Seismology of China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China)

Abstract

To conduct a probabilistic seismic hazard analysis of Wuhan Metropolitan region, we build two seismicity models by Spatial Smoothing method, and calculate the contour distribution of the peak ground acceleration of bedrock within 10 percent probability of exceedance in 50 years in Wuhan. Compared with the *Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China*, the results we obtain can more reasonably reflect the seismic hazard of the area. In the low seismicity area, the ground motion parameters calculated through probabilistic seismic hazard based on Spatial Smoothing method is reliable.

Key words: Spatial Smoothing method; probabilistic seismic hazard analysis; Wuhan Metropolitan region