

刘博研、仲秋、史保平等, 2015, 与特征断层结合的地震活动空间光滑模型在衡水市活断层地震危险性评价中的应用, 中国地震, 31(2), 390 ~ 398.

与特征断层结合的地震活动空间光滑模型在衡水市活断层地震危险性评价中的应用

刘博研¹⁾ 仲秋²⁾ 史保平³⁾

- 1) 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京市德外西三旗安宁庄路 1 号 100085
- 2) 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301
- 3) 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

摘要 在衡水市活断层地震危险性评价中, 应用研究区域的地震活动性数据建立恰当的分布式地震活动性空间光滑模型, 并结合断层对周边地震危险性的影响, 计算前磨头断裂和衡水断裂在不同超越概率下上限震级分别为 6.5、6.0 级的区域基岩峰值加速度。研究发现, 研究区域内 50 年超越概率为 63% 的基岩峰值加速度略有增加; 50 年超越概率为 10%、5% 的基岩峰值加速度在断层附近有所增加。研究表明在较低超越概率的情况下, 断层周围如深州市、冀州市和衡水市辖区的地震危险性大于其他地区; 利用仪器记录资料得到的地震活动性模型并结合断层资料计算出的地震危险性结果能够反映衡水地区现今的地震活动水平和危险性水平。

关键词: 地震危险性评价 超越概率 空间光滑模型

[文章编号] 1001-4683(2015)02-0390-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震危险性分析包括了特定场地地面震动的定量评估, 分为确定性地震危险性分析和概率地震危险性分析。早期的岩土地震工程中, 普遍使用的是确定性地震危险性分析(DSHA)。在过去二三十年中, 概率的概念使我们在估计地震危险性时能够明确地考虑地震的大小、位置和时间的不确定性以及不同震级和发震位置引起的地面运动的差别。概率地震危险性分析(PSHA)所构建的构架使得这些不确定性可以被识别、量化并结合合理的方法以提供更加完善的地震危险性分布图。目前应用较广泛的演绎法是由 Cornell (1968) 提出的, 该方法基于同类地震的潜在震源区的划分。然而, 地震发生的时空不均匀性使得潜在震源区的划分被人为地引入了不确定性, 这种不确定性包括: ①潜在震源区划分依据不明确, 常常出现多个方案且各获得一部分专家的支持; ②潜在震源区边界不能明确判

[收稿日期] 2014-11-27; [修定日期] 2015-02-12

[项目类别] 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2013-43)、国家青年科学基金项目(41404044)共同资助

[作者简介] 刘博研, 女, 1983 年生, 助理研究员, 主要从事震源物理、地震活动性和危险性方面的研究。

E-mail: liuboyan_lby@msn.com

断;③地震带内新区($M=8$ 左右)未来百年内的大震发生概率难以确定(胡聿贤,1990)。而 Frankel(1995)和 Frankel 等(2000)提出的地震活动性空间平滑方法结合了2种危险性分析的优点,常应用于地震构造未知并且震源区描述较为主观的地区(Lapajne et al, 2003)。在美国中部的 NMSZ,分布式地震活动模型中的圆形光滑得到了普遍应用(Frankel, 1995; Kafka et al, 1998; Kafka et al, 2000)以处理由震源、震级等带来的不确定性。美国中、东部的地震动参数图就是采用了该方法编制的。在我国,胥广银等(1998)利用此方法在弱震和中等强度地震活动区进行了地震活动性模型研究;杨勇等(2008)也基于华北区域地震活动性分布,应用空间光滑模型对该地区的地震危险性进行评价。然而,虽然圆形高斯光滑减少了潜在震源区划分的主观性,但也存在未考虑地震沿活动断层分布特征的局限性,因此 Lapajne 等(2003)引入了地震通常沿活动断层分布的概念进一步发展了椭圆光滑模型。本文在椭圆空间光滑的基础上,着眼于古登堡-里克特定律(下文简称 G-R 定律),结合特征断层复发周期的影响对衡水地区的地震危险性进行重新评价。

1 研究区介绍

衡水地区在大地构造上属中朝准地台的二级构造单元——华北断坳区,它是我国最古老的陆块之一,经历了太古代和早元古代基底形成、晚元古代至三叠纪盖层发育和中、新生代以来地壳活化等3个构造演化阶段。在地壳活化阶段,华北断坳发生大规模的伸展裂陷作用,早第三纪发育了众多的 NE 或 NNE 向断陷盆地,形成典型的盆岭构造;晚第三纪华北断坳大面积沉降,上第三系超覆于整个盆地;第四纪进一步发展,但构造分异比较显著,形成了一系列隆(坳)、凸(凹)相间结构。区内为华北平原区,一般海拔高 100m 以下,大部分小于 50m。平原地区整体由东向西缓慢掀斜,内部地势平坦,滏阳河、漳卫河和黄河支流马颊河共同形成的冲洪积倾斜平原,河道变化频繁,从而在平原区留下了大量的古河道和积水洼地。沿海地区由于河流和海侵的共同作用地势低平,并保留沙丘和多道贝壳堤,并形成三角洲平原。平原西部邻近太行山前,为冲洪积平原,主要为滏阳河上游一系列支流,如沙河、洺河、泲河等水系的冲积平原。中部大部分地区为冲积平原区,地势平坦,水系河道曲折宽阔,水流平缓,主要水系为滏阳河和运河。水系由西向东、由西南向东北流入大海。沧州以东为冲积海积三角洲平原区。衡水市位于华北平原拗陷区中的邢衡隆起、冀中拗陷和沧县隆起交汇地带,第四系厚度为 350~400m。

根据衡水市城市发展和防震减灾的需要以及主要断层的实际情况,确定衡水市区东西长 30km,南北宽 25km,面积约 750km²。地理坐标为: 37.66°~37.81°N, 115.52°~115.78°E。为了考虑衡水市周边断层的影响,将研究区范围扩大为 37°~38.5°N, 114.5°~116.5°E。区域内包括沧西、旧城北、护驾池、新河、前磨头、明化镇、衡水、德州等断裂(图 1)。由于衡水市区内只有前磨头断裂和衡水断裂 2 条断层,所以在计算衡水市地震危险性时,仅考虑这 2 条断层带来的影响。

前磨头断裂发育在邢衡隆起内部,为控制前磨头凹陷形成、发展的东边界断裂。全长 28km。总体走向 NE60°,西段折为近 EW 向。石油人工地震剖面揭示,断面上部倾角 60°,下部约 45°。古近系底面垂直落差为 2800m,新近系底面垂直落差约 200m,断面顶端埋深在地表以下 700m,明显断入新近系。浅层地震探测表明,前磨头断裂面早更新世早期有过幅

度不大的活动,均反映为正断层性质,断面北倾,倾角较大。前磨头断裂为早更新世早期活动断裂,第四纪中、晚期活动不明显。

衡水断裂为冀中拗陷和邢衡隆起的边界断裂,区内长 60km 以上。断裂总体走向为 NW60°左右,在衡水以东段折为 NW45°。断面北倾,上部倾角一般为 55°左右,下部倾角 37°~43°。石油人工地震资料表明,断裂两侧地层不连续,切割了元古界、古生界、中生界和新生界古、新近系。衡水断裂主要活动时期为古近纪,晚第三纪以来活动性明显减弱,断裂最新活动时代为早-中更新世,晚更新世以来未见活动。

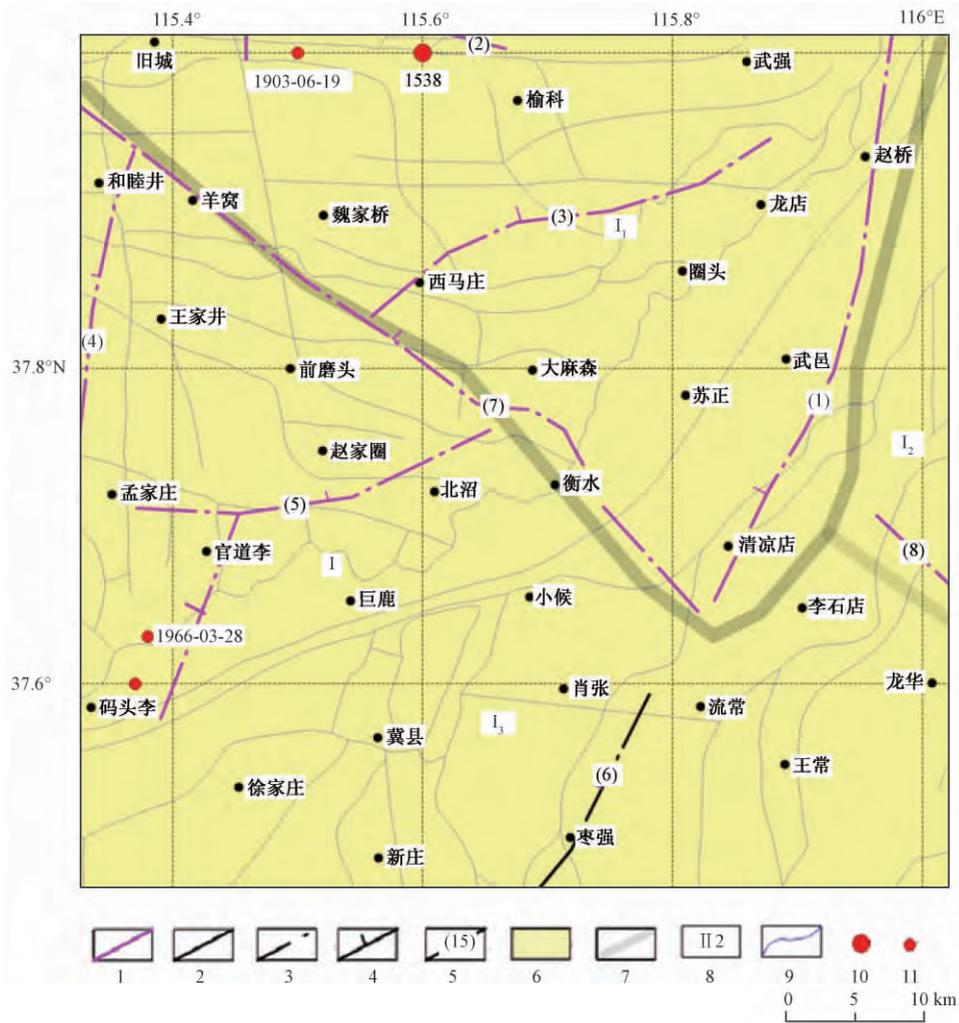


图 1 地震构造图

1. 早、中更新世活动断裂; 2. 前第四纪断裂; 3. 隐伏断裂; 4. 正断层; 5. 主要断裂及编号; 6. 第四系; 7. 二级新构造分区界线; 8. 新构造分区编号; 9. 水系; 10. 震中 $M_{5.0} \sim 5.9$; 11. 震中 $M_{4.7} \sim 4.9$

I 华北盆地断拗区: I_1 . 冀中断陷; I_2 . 沧县断隆; I_3 . 邢衡断隆

(1). 沧西断裂; (2). 旧城北断裂; (3). 护驾池断裂; (4). 新河断裂; (5). 前磨头断裂; (6). 明化镇断裂; (7). 衡水断裂; (8). 德州断裂

2 利用地震活动性模型计算断层未来地震危险性

2.1 震级分布规律

建立恰当分布式地震活动性模型必须满足 3 个基本假设:①未来破坏性地震的发生同现今地震时空活动性相关;换句话说,由历史和现代地震资料获得的区域地震时空和强度分布特征应反映未来地震发生的潜在可能性;②未来破坏性地震的发生主要同活动断层的空间展布相关;③点源代表了沿断层发生的事件(Frankel, 1995)。关于假设①,Kafka 等(1998、2000)在对美国 New Madrid Seismic Zone 和全球主要地震活动带的地震活动性时空分布进行统计时发现,中强地震的发生地点同现今地震空间活动性分布特征有着较好的相关性。一般来说,66%的中强地震发生在由中小震形成的特定地震活动区内。因此,我们有理由相信,现今取得的地震活动性分布图应该能够在一定程度上反映未来潜在地震的发生区域。对于假设中的点源模型,则充分考虑到地震沿断层发生时的空间随机性和不确定性,即未来地震沿断层发生时在空间上是均匀分布的。但事实上,现今我们仍然无法确定未来地震发生的确切时间和空间位置。

在现代地震危险性评估技术的发展过程中,针对不同国家或地区的技术细节的处理可能略有不同,但共同之处都包括了几个主要部分:①对震源区的勾画;②震级和频度关系的确定;③地面运动参数随距离衰减关系的确定和采用;④针对评估超越概率(频度)曲线的合成(Kramer, 1996)。对于分布式地震活动性模型,则将①和②合二为一,通过对研究区域震级-频度关系的处理,求取随空间变化的 G-R 关系。具体地讲,就是将研究区域进行网格划分,逐点计算各网格点内大于某下限震级的地震年发生率或个数,这一过程通常由对 G-R 关系中的地震年发生率进行必要的高斯光滑(Frankel, 1995)来完成。高斯光滑的主要目的则是充分考虑到震级和震中位置可能存在的不确定性,而这种不确定性往往来源于历史地震资料和仪器地震资料中的误差。通过对区域内地震年发生率的光滑,我们可以获得区域内不同网格点的地震年发生率的分布,由此也可求得每个网格点上大于某一下限震级的地震年发生个数。需要指出的是,由该统计模型求得的地震个数可能不是整数,因此数学模型给出的仅是可能的地震概率分布。

区域或全球震级-频度经验关系是由 Gutenberg 等(1944)首先提出,已成为推导地震时空特征的主要方法。对数线性的震级-频度经验公式为

$$N(M) = N(M_0) \cdot 10^{-b(M-M_0)} \quad (1)$$

修改过的有上、下限的指数递推关系的经验公式为(Mcguire et al, 1990)

$$N(M) = N(M_0) \frac{10^{-b(M-M_0)} - 10^{-b(M_u-M_0)}}{1 - 10^{-b(M_u-M_0)}} \quad (2)$$

式中, M 为震级; $N(M)$ 为震级大于 M 的地震个数; M_u 为上限震级; M_0 为下限震级; b 为大震与小震之间的个数比,其值一般为接近 1.0 的常数。式(2)的概率密度函数可写为

$$p(M) = b 10^{-b(M-M_0)} \cdot \ln 10 \quad (3)$$

或

$$p(M) = \frac{b 10^{-b(M-M_0)} \cdot \ln 10}{1 - 10^{-b(M_u-M_0)}} \quad (4)$$

对于衡水地区,我们将整个观测区域划分为 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 的网格,每个网格的边界长度大约为 $2.2\text{km} \times 2.2\text{km}$ 。在每个网格 i 内计算震级 $M \geq M_0$ 的地震个数 $N_i(M)$, 并称 $N_i(M)$ 为第 i 个网格中震级大于 M 的地震的年发生率。 $N_i(M_0)$ 则由原始地震数据统计得来。

2.2 地震年发生率的空間光滑模型

2.2.1 圆形空間光滑模型

地震活动率 $N_i(M_0)$ 的高斯(Gaussian Smooth)圆形光滑模型公式为

$$\tilde{N}_i(M_0) = \frac{\sum_j N_j(M_0) e^{-(\Delta_{ij}/c)^2}}{\sum_j e^{-(\Delta_{ij}/c)^2}} \quad (5)$$

式中, c 是相关距离; Δ_{ij} 是第 i 个网格与第 j 个网格间的距离; $N_i(M_0)$ 为第 i 网格的地震年发生率,可以由地震目录或地震释放的能量得到;光滑半径通常取为 $3c$ 。显然,这种圆形高斯光滑减少了潜在震源区划分的主观性;其局限性在于,没有考虑地震沿活动断层分布的特征。

2.2.2 椭圆空間光滑模型

椭圆光滑过程引入了地震通常沿活动断层分布的概念。地震年发生率为 $N_i(M_0)$ (Lapajne et al, 2003),

$$\tilde{N}_i(M_0) = \frac{\sum_j N_j(M_0) e^{-\frac{1}{2} \vec{\delta}_{ij}^T V^T R V \vec{\delta}_{ij}}}{\sum_j e^{-\frac{1}{2} \vec{\delta}_{ij}^T V^T R V \vec{\delta}_{ij}}} \quad (6)$$

式中, T 为矩阵转置; $\vec{\delta}_{ij}$ 为网格 i 指向网格 j 的距离矢量。其相关矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, σ, τ 分别为椭圆的半长轴和半短轴,其意义等同于相关距离。而单位方向矩阵

$$V = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, V 同区域内断层的空间走向有关; α 为椭圆长轴的方位角,亦是该处断层的走向。在具体计算中,如果我们考虑区域内地震的上限震级为 $M_w 7.5$, 那么由经验公式 $M_w = 5.08 + 1.16 \log L$ (Wells et al, 1994) (图 2) 可以得到断层长度 $L \approx 120\text{km}$ 。因此,在本文工作中取椭圆的半长轴约为 60km 。另外,假定断层宽度为 30km , 如果将不同断层综合考虑,那么震中影响区域为半径 30km 的半圆,投影到地表围绕断层出露点半径 30km 的区域为可能的震中分布区。因此,取椭圆的半短轴为 30km 。

2.3 地震危险性概率计算及 G-R 关系的影响

地面运动参数的年超越频度可由下式求得 (Reiter, 1990),

$$\lambda(Y > Y_0) = \sum_i N_i(M_{\min}) \int_{M_{\min}}^{M_u} \int_R P[Y > Y_0 | M, R] p_i(M) p_i(R) dR dM \quad (9)$$

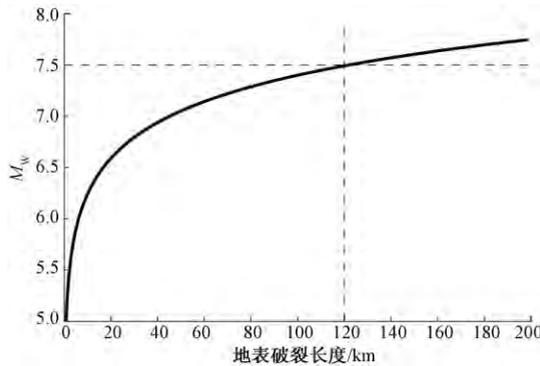


图2 地表破裂长度和震级的关系
虚线所示当震级 M_w 为 7.5 时,地表破裂长度为 120km

式中, $N_i(M_{\min})$ 为网格划分后第 i 个震源的地震年发生率,且 $M_{\min} \geq M_0$; $P[Y > Y_0 | M, R]$ 是震级为 M 、震中距为 R 、引起的地表运动 Y 大于给定值 Y_0 的条件概率。对于点源 i , $p_i(R) = 1$, $p_i(M)$ 为其概率密度函数。条件概率 $P[Y > Y_0 | M, R]$ 可由误差函数计算得到,

$$P[Y > Y_0 | M, R] = \frac{1}{2} \phi^* \left(\frac{\ln Y_0 - \ln Y(M, R)}{\sigma \sqrt{2}} \right) \quad (10)$$

式中, ϕ^* 为余误差函数。

$M_s 7.0$ 以上的大地震往往不能很好地满足对数线性的 G-R 定律,而是有自己的复发周期,这样的地震被称为特征地震。衡水地区周边新河断层的滑动速率低,在用地震活动性分布的椭圆光滑模型进行地震危险性评价时,若不对震级上限进行约束,在震级较大时,对数线性的 G-R 定律 $\log N = a - bM$ 所给出的复发周期明显偏小(图3)。而取上限震级为 7.0 时,又会使得震级较大的地震无法估计。若对 G-R 定律加以约束,则有

$$\log N = a - bM - k 10^{1.5M} \quad (11)$$

式中, $k = 10^{-1.5M_{\max}}$, $M_{\max} = 8.0$ 则既考虑到了大震的影响,又不会对复发周期估计过短(图3)。

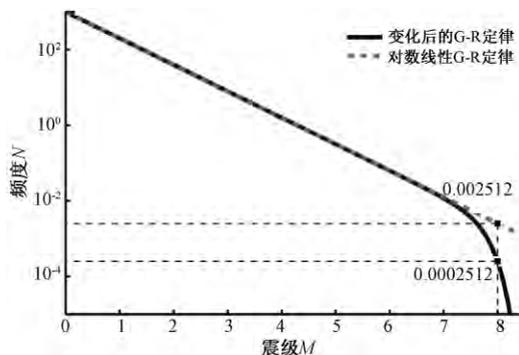


图3 加以约束的 G-R 定律

3 衡水地区基岩峰值加速度分布

本文搜集了研究区域(37°~38.5°N, 114.5°~116.5°E)内的历史地震和现代仪器记录地震资料^①,共包括了公元1484~2006年514个M4.0~7.0地震。其中,历史地震数据(不包括仪器记录地震)的震级由震级-烈度的关系换算出近似震级。取4.0级以上地震的原因:一方面是4.0级以下的地震通常对构筑物不会产生大的危害;另一方面是4.0级以下的地震目录在早期不够完整。对于所选取的地震目录,我们通过主震震级删除法删去余震。椭圆空间光滑方法一般仅限于M<7.0地震的危险性概率分析计算,对于更大的地震,应该考虑到特征断层的影响(Frankel et al, 1996),对于特征断层可用其他方法进行估计或对G-R定律进行一些变化后再提高上限震级。

椭圆的长、短轴的取值根据断层面长度和宽度得到,长轴方向和断层方向一致。考虑到我国发震区内地震分布的条带状(沿断裂带)及震害分布特征,采用椭圆光滑技术应是一个更好的方案。根据断层位置坐标,由于断层在地表的投影通常为直线且鲜有转弯,因此对每条断层分别进行线性拟合以求得其走向,再经过插值得到每一点的等效断层走向,进而通过椭圆空间光滑模型并采用G-R定律约束,求取研究区域内的基岩峰值加速度值。随后,将椭圆空间光滑方法与特征断层模型相结合,得到考虑活动断层复发周期影响的基岩峰值加速度。本文中分别求取了衡水断裂和前磨头断裂这2条衡水市内的主要活动断层的基岩峰值加速度,并与地震活动性分布模型结合得到最终的研究区域内基岩峰值加速度。表1给出了影响研究区域内基岩峰值加速度的断层潜在最大震级。

图4(a)、4(b)和4(c)分别为研究区域50年超越概率63%、10%、5%的基岩峰值加速度(PGA),图4(d)、4(e)和4(f)分别为考虑特征断层复发周期的影响得到的50年超越概率为63%、10%、5%的基岩峰值加速度。从图4中可以看出,超越概率较大(50年超越概率63%)时,特征断层对计算结果的影响并不明显;当超越概率逐渐减小时,特征断层的影响趋于明显,在地震的触发周期较短的衡水断裂和前磨头断裂附近,超越概率为50年5%时,地表峰值加速度明显增大。

表1 影响衡水市区基岩峰值加速度的断层潜在最大震级

	长度/km	震级
前磨头断裂	28	6.0
衡水断裂	90	6.5

4 讨论与小结

本文对衡水地区应用地震活动性分布数据,利用分段式地震活动性空间光滑模型计算了上限震级为7.0级的区域基岩峰值加速度;根据地震活动性方法得到的基岩峰值加速度计算结果表明,研究区域内深州市基岩峰值加速度较大,景县和故城县峰值加速度相对较低;研究区内自东向西50年超越概率为63%的地震动基岩峰值加速度由12.4gal逐渐增加至17.2gal;超越概率为10%的由61.4gal增加至80.6gal;超越概率为5%的由95.6gal增加至124.4gal。

^① 中国地震局地球物理研究所工程地震学与城市减灾研究室,2006,中国破坏性地震目录(公元前780年~公元2006年)

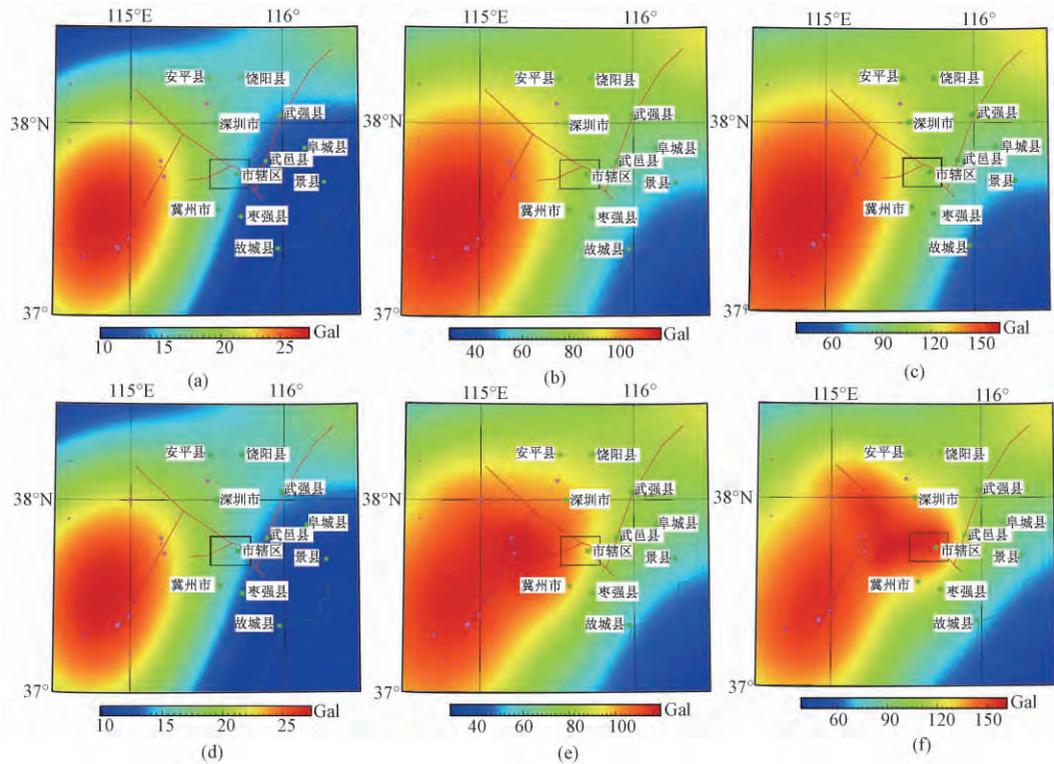


图4 研究区域50年超越概率63% (a)、10% (b)、5% (c)的基岩峰值加速度(PGA)以及考虑特征断层复发周期的影响后50年超越概率63% (d)、10% (e)、5% (f)的基岩峰值加速度
黑色方框内为本文研究区域;红色实线为区域内活动断层;圆点为历史地震震中

应用断层数据分别计算了前磨头断裂和衡水断裂不同超越概率下的基岩峰值加速度,并结合由地震活动性计算的基岩峰值加速度综合考虑断层的影响。发现受断层的影响,研究区域内50年超越概率为63%的基岩峰值加速度略有增加;50年超越概率为10%、5%的基岩峰值加速度在断层附近有所增加。结果表明,在较低超越概率的情况下,断层周围如深州市、冀州市和衡水市市辖区的地震危险性大于其他地区。

致谢:感谢中国地震局地壳应力研究所吴荣辉研究员、马保起研究员对本研究的大力支持,感谢何仲太副研究员对本工作的帮助。

参考文献

- 胡聿贤,1990,地震危险性分析中的综合概率法,北京:地震出版社。
- 胥广银、金严,1998,弱震和中等强度地震活动区地震活动性模型研究,见:中国地震局科技发展司和中国抗震设防区划图编委会,中国地震区划学术讨论会论文集,43~49,北京:地震出版社。
- 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,地震学报,30(2),198~208。
- Cornell C A, 1968, Engineering seismic risk analysis, Bull Seism Soc Am, 58(5), 1583~1606。
- Frankel A D, Mueller C, Barnhard T, et al, 1996, National seismic-hazard maps: Documentation June 1996: US Geological Survey.

- Frankel A, 1995, Mapping seismic hazard in the central and eastern United States, *Seism Res Lett*, **66** (4), 8 ~ 21.
- Frankel A, Mueller C, Barnhard T, et al, 2000, USGS national seismic hazard maps, *Earthquake Spectra*, **16** (1), 1 ~ 19.
- Gutenberg B, Richter C F, 1944, Frequency of earthquakes in California, *Bull Seism Soc Am*, **34** (4), 185 ~ 188.
- Kafka A L, Levin S Z, 2000, Does the spatial distribution of smaller earthquakes delineate areas where larger earthquakes are likely to occur? *Bull Seism Soc Am*, **90** (3), 724 ~ 738.
- Kafka A L, Walcott J R, 1998, How well does the spatial distribution of smaller earthquakes forecast the locations of larger earthquakes in the Northeastern United States? *Seism Res Lett*, **69** (5), 428 ~ 440.
- Kramer S L, 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall.
- Lapajne J, Motnikar B Š, Zupanc Ć P, 2003, Probabilistic seismic hazard assessment methodology for distributed seismicity, *Bull Seism Soc Am*, **93** (6), 2502 ~ 2515.
- McGuire R, Arabasz W, 1990, An introduction to probabilistic seismic hazard analysis, *Geotechnical and Environmental Geophysics*, (1), 333 ~ 353.
- Reiter L, 1990, *Earthquake hazard analysis: Issues and insights*, New York: Columbia University Press.
- Wells D L, Coppersmith K J, 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull Seism Soc Am*, **84** (4), 974 ~ 1002.

The application of spatially smoothed seismicity model combined with the characteristics of the faults in Hengshui seismic risk evaluation

Liu Boyan¹⁾ Zhong Qiu²⁾ Shi Baoping³⁾

- 1) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China
2) South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
3) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Using the historic seismic data and the fault properties, we calculate the regional peak ground acceleration (PGA) in the study area with the spatial distributed seismicity model and segmented seismicity model in the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) of Hengshui City. Considering the impact of the characteristics of the faults, we obtain the PGA distribution for 63%, 10% and 5% P. E. in 50a of two scenario earthquake and find that the PGA for 10% and 5% in 50a increased visibly. It indicates that if the probability of exceedance is low, the seismic risk is greater in near-field region such as Shenzhou, Jizhou and the downtown of Hengshui City. The result shows that, the seismic activity model based on the instrumental earthquake catalogs with the characteristics of the faults reflects the contemporary seismic hazard level of Hengshui area.

Key words: Seismic risk evaluation Probability of exceedance Spatially smoothed seismicity model