

董博, 纪春玲, 张合, 等. 唐山区域概率地震危险性研究 [J]. 华北地震科学, 2020, 38(1): 38-48. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2020.01.006.

DONG Bo, JI Chunling, ZHANG He, et al. Study on Probabilistic Seismic Risk in Tangshan Area[J]. North China Earthquake Sciences, 2020, 38(1): 38-48. doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2020.01.006.

唐山区域概率地震危险性研究

董博, 纪春玲, 张合, 李姜, 吕国军

(河北省地震局, 石家庄 050021)

摘要: 依据历史地震重演和构造类比原则对唐山地区进行潜在震源区划分, 共确定出 5 个对研究区影响较大的潜在震源区。在确定地震活动性参数和地震动衰减关系后, 将研究区网格化成 60 个均匀的独立场地单元, 计算每个场地单元未来可能遭受相应超越概率的地震动峰值加速度; 通过插值分析, 将研究区原有地震区划中的基岩峰值加速度等值线间隔由 0.05 g 进一步细化为 0.01 g; 得到研究区 50 年超越概率为 10% 的基岩水平地震动峰值加速度分布图, 表明唐山 8.0 级潜在震源区对研究区未来影响最大。

关键词: 地震; 超越概率; 网格化; 加速度

中图分类号: P315.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-1375 (2020) 01-0038-11

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2020.01.006

0 引言

20 世纪 60 年代, 麻省理工学院的美国教授 C. A. Conell^[1] 提出了概率地震危险性分析方法, 这种方法充分考虑了地震宏观影响形成的物理过程和地震发生的不确定性, 可以为工程抗震提供更为合理的依据, 所以在工程地震中得到了较为广泛的运用。章在塘等、时振梁等、高孟潭引用并多次改进该方法^[2-5], 较好地反映了中国地震活动的时空不均匀性, 从而使地震危险性分析得到了很大的发展。常用的概率地震危险性分析方法中, 雷建设等首先提出了潜在地震破裂面源模型, 探讨了该模型在地震危险性分析中的应用, 并提出了双场点地震危险性分析方法^[6]; 陈仁法等对南海北部做地震危险性分析时, 重新划分了南海北部海域的潜在震源区, 并调整了相关的地球物理参数, 得出东区的地震动峰值加速度和西区大部分海域的地震动峰值加速度^[7]。在改进分析方法方面, 王国新等人总结分析了我国历史地震活动及等震线的某些特征, 提出了地震烈度衰减模型, 改进了地震的双态泊松模型, 并探讨了潜在震源区划分的不确定性^[8]; 刘特培等计算了研究区各地的地应力分布, 并依据 GPS 有关观测结合地震活动参数和有关数理统计结果, 对

广东及邻区地震活动特征和地震危险性做出了分析^[9]。其他学者均根据自身研究需要对概率地震危险性分析方法进行了改进和完善^[10-12]。唐山地区概率地震危险性分析资料的运用基本都是针对单个场地, 缺少整个唐山地区的地震危险性研究, 全国地震动峰值加速度区划图唐山地区部分给出的结果也比较粗略。本文通过对唐山地区进行网格划分, 并对各场地单元独立进行概率地震危险性分析, 绘制得到了更为详细的唐山地区基岩峰值加速度分布图。

1 潜在震源区划分

研究区在大地构造上隶属于中朝准地台, 在新构造分区上涉及华北平原拗陷区, 太行燕山隆起区 2 个二级新构造单元。区域新构造运动具有继承性和新生性, 时间上具阶段性, 空间上具差异性、掀斜性。地震活动是新构造运动的重要表现形式。

研究区内共有 32 条断裂(图 1), 具有如下特征。

1) NE-NNE 向活动断裂是区内的主干活动断裂, 其次是与之近于正交的 NW-NWW 向活动断裂。它们对分析区域构造地貌、第四纪地质、新构造运动起重要作用, 规模较大, 一般长度在数十至



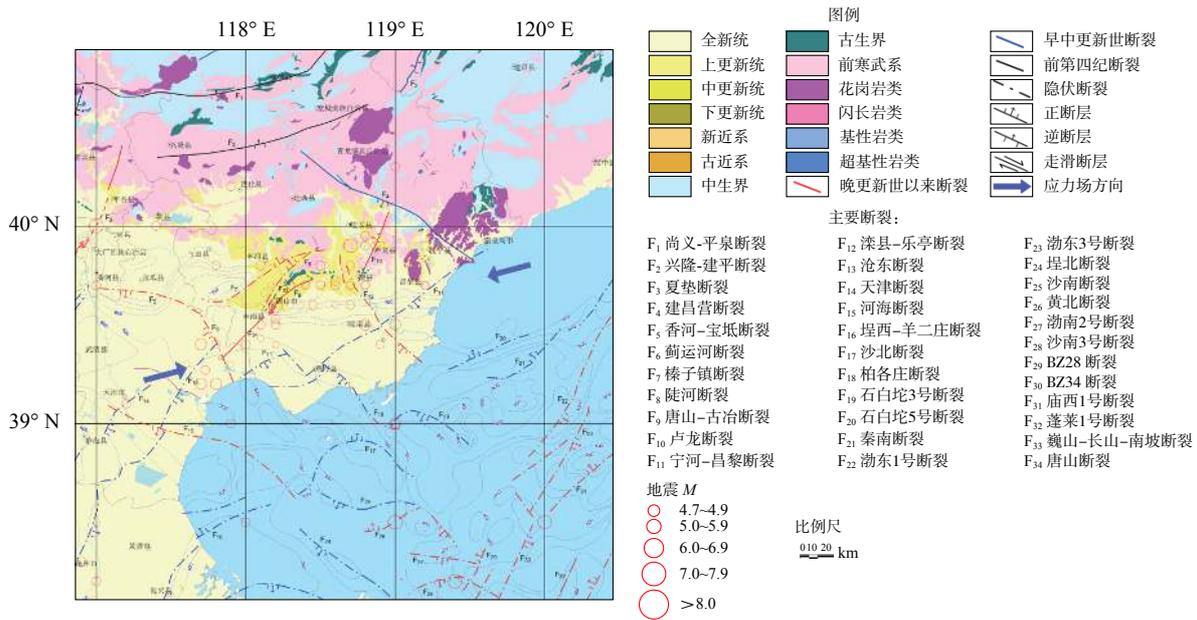


图 1 区域断裂分布图

数百公里, 往往成为划分不同级别活动构造单元的边界断裂。

2) 根据多年断裂活动性的研究资料, 第四纪活动断裂区分为全新世(Q4)、晚更新世(Q3)、中更新世(Q2)、早更新世(Q1)等不同时代的活动断裂, 对于无法准确判定最新活动时代的断裂划为第四纪活动断裂, 许多断裂具有活动分段特征, 有些断裂的每个活动段很小, 一般是盆地边缘的拉张性活动。

3) 区域内断裂第四纪活动性质以正断层为主。断层在剖面上多为上陡下缓的铲形断层, 断面消失在 10 km 深度以内。有些第四纪活动断裂的倾角很小(20°~30°), 成为滑脱拆离构造。

潜在震源区是指未来具有发生破坏性地震潜在可能性的地区。以历史地震重演和构造类比为原则, 结合该区域及近场区地震构造、地震活动环境的研究成果, 采用最新的区划研究成果。该研究区内共确定出 6 级以上潜在震源区 29 个, 位于华北平原地震带和郯庐地震带(图 2)。其中, 对研究区影响较大的 5 个潜在震源区进行描述。

1) 滦县 7.5 级潜在震源区(7 号)

该潜源主体位于 NE 向唐山断裂带北延部位和 NW 向滦县-乐亭断裂的北段, 1976 年 7.1 级地震沿滦县-乐亭断裂带中支断裂形成长达 7 km 呈弧形展布的地震形变带。按历史地震重复性的原则, 震级上限定为 7.5 级。

2) 唐山 8.0 级潜在震源区(8 号)

唐山断裂走向 NE, 倾向 SE, 倾角 80°左右, 长

约 50 km, 属正-平移性质。该断裂新生代以来活动明显, 为晚更新世-全新世活动断层。1976 年唐山 7.8 级地震造成长约 8 km 的地表形变带。蓟运河断裂沿蓟运河展布, 西北端与香河-宝坻断裂相连, 东南端与滦县-乐亭断裂相交, 走向 NW30°, 长约 60 km, 为正断性质, 断裂在第四系底界断距达 100 m 左右, 推测上断点断至上更新统。1976 年唐山 7.8 级地震的强余震——1976 年 11 月 15 日宁河 6.9 级地震沿此断裂有分布, 并且这些强余震震源机制解的结果和烈度分布揭示其发震断裂为 NW 向, 是蓟运河断裂在大震影响下活动的结果。

该区位于 NE 向唐山-河间-磁县断裂带与 NW 向蓟运河断裂的交汇部位, 处于上地幔隆起的边缘地带。1976 年唐山 7.8 级大地震发生后, 形成了 NE 向的余震密集分布区。1970 年以后的仪器记录地震有 1500 多次。综合上述特征, 将其震级上限定为 8.0 级。

3) 唐海 6.5 级潜在震源区(12 号)

NE 向昌黎断裂与 NW 向柏各庄断裂通过该区, 沿这 2 条断裂交汇区划分, 在第四纪初期有一定的活动性。历史上发生 4.7 级以上地震 13 次, 最大地震为 1624 年滦县 6.5 级地震。现代小震活动密集成带, 1970 年以后的仪器记录地震有 290 多次, 最大地震为 M_L5.8。故将其震级上限定为 6.5 级。

4) 昌黎 6.0 级潜在震源区(11 号)

NE 向昌黎断裂和 NW 向建昌营断裂通过该区, 沿这 2 条断裂带划分, 第四纪早期有过活动, 历

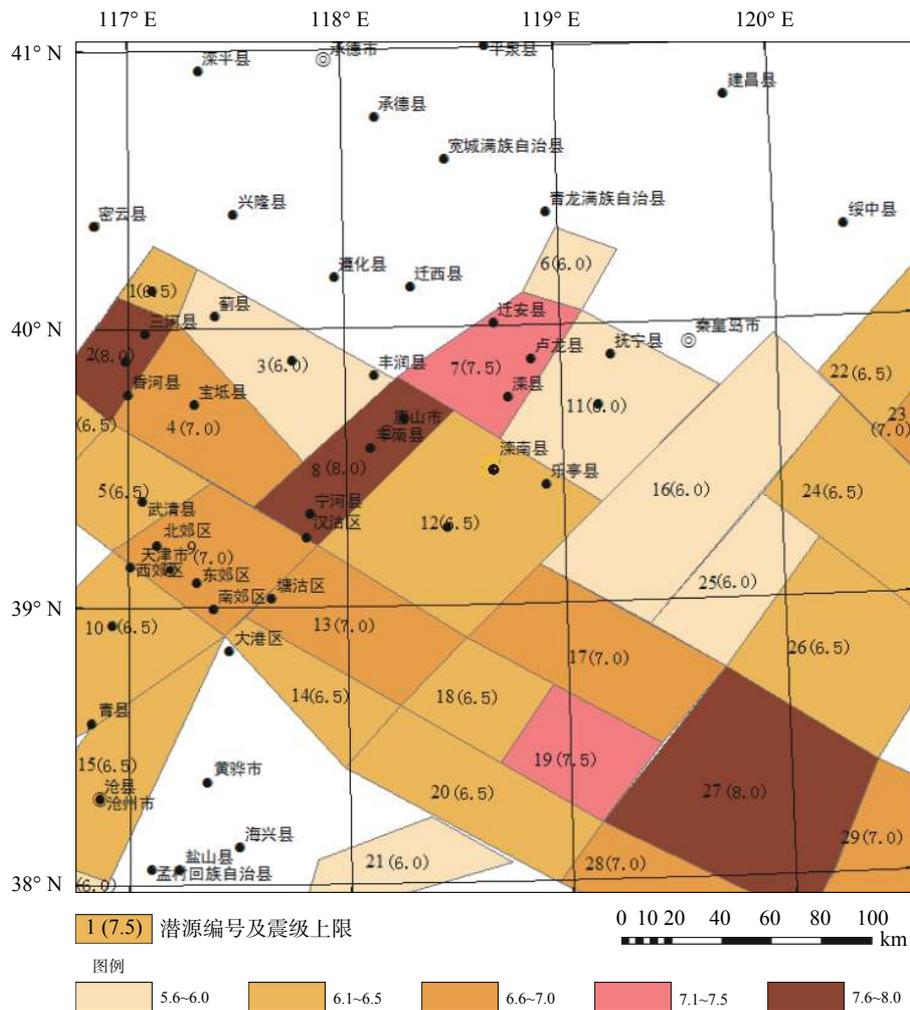


图2 区域及邻近地区潜在震源区划分图

史上发生4.7级以上地震4次,最大地震为1945年滦县 $6\frac{1}{4}$ 级地震。现代小震活动密集成带,1970年以后的仪器记录地震有170多次,最大地震为 M_L 5.3级。根据上述特征,将其震级上限定为6.0级。

5) 渤中8.0级潜在震源区(27号)

主体位于张家口-渤海断裂带和营潍断裂带交汇部位,历史上1597年发生过7级地震,现今小震频繁,鉴于地震构造和强震活动特征,震级上限定为8.0级。

2 地震活动性参数确定

2.1 地震带地震活动性参数确定

依据地震构造和地震活动性研究结果,研究区位于华北平原地震带和郯庐地震带内。

1) 震级上限 M_{uz}

震级上限 M_{uz} 是指震级-频度关系式中,累积频度趋于零的震级极限值。综合地震构造和地震活动水平等因素,确定华北平原地震带的震级上限为

8.0级,郯庐地震带的震级上限为8.5级。

2) 起算震级 M_0

起算震级是指对工程场点可能有影响的最小震级。由于中国大陆地区绝大多数是浅源地震,历史上不少4.0级左右的地震也造成轻破坏效应,因此将起算震级 M_0 定为4.0级。

3) 各地震带 b 值和年平均发生率 v_4

b 值代表着地震带内不同大小地震频数的比例关系,其统计表达式为:

$$\text{Log}N = a - bM \quad (1)$$

式中: N 是地震个数; M 是地震震级; a 、 b 为常数, a 反映平均地震活动水平, b 反映大小地震的比例关系。

①华北平原地震带:华北平原地震带1484年之前地震缺失较多,1484年5级地震记录基本完整。依据表1所统计的不同时段地震发生率,采用分时段、分震级联合计算震级-年发生率关系式^[13](表1,图3),得到 $b=0.83$, $v_4=3.96$ 。考虑到华北地区 $M4.0$ 以上地震的年发生率大致相当1950年以

表 1 华北平原地震带分时段累计地震年平均发生率

时间段	$M \geq 4.0$	$M \geq 4.5$	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$	$M \geq 6.5$	$M \geq 7.0$	$M \geq 7.5$	$M \geq 8.0$
1484—2010年			0.260 0	0.127 1	0.053 1	0.026 6	0.011 4	0.005 7	0.001 9
1500—2010年			0.264 2	0.131 1	0.054 8	0.027 4	0.011 7	0.005 9	0.002 0
1791—2010年			0.422 7	0.172 7	0.081 8	0.040 9	0.022 7	0.009 1	
1950—2010年	4.966 1	1.779 7	0.694 9	0.186 4	0.118 6	0.050 8			
联合	4.966 1	1.779 7	0.422 7	0.172 7	0.081 8	0.040 9	0.011 4	0.005 7	0.001 9

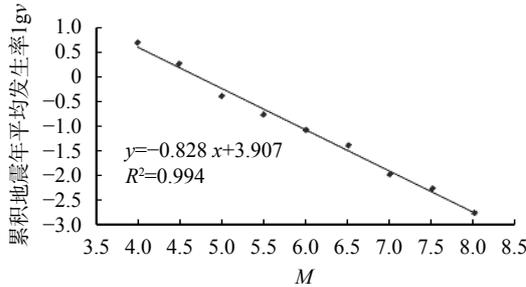


图 3 华北平原地震带 b 值拟合曲线

来地震活动水平, 将计算得到的 $v_4=3.96$ 与利用 1970 年地震资料统计得到的 $v_4=4.96$ 两者平均, 从

表 2 郟庐地震带分时段累计地震年平均发生率

时间段	$M \geq 4.0$	$M \geq 4.5$	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$	$M \geq 6.5$	$M \geq 7.0$	$M \geq 7.5$	$M \geq 8.0$
1484—2010年			0.149 8	0.080 5	0.039 3	0.016 9	0.011 2	0.003 7	0.001 9
1500—2010年			0.150 7	0.080 2	0.039 1	0.017 6	0.011 7	0.003 9	0.002 0
1892—2010年			0.225 3	0.120 9	0.065 9	0.027 5	0.016 5	0.005 5	
1970—2010年	7.268 3	1.682 9	0.317 1	0.097 6	0.024 4	0.024 4			
联合	7.268 3	1.682 9	0.317 1	0.120 9	0.065 9	0.027 5	0.016 5	0.005 5	0.002 0

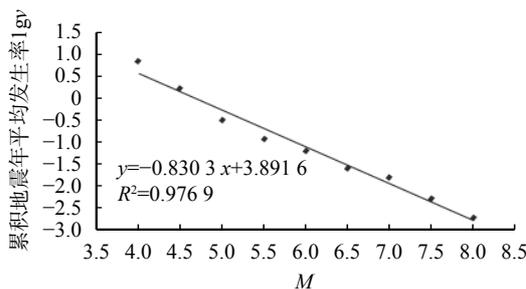


图 4 郟庐地震带 b 值拟合曲线

2.2 潜在震源区地震活动性参数确定

1) 潜在震源区的震级上限 M_u

潜在震源区的震级上限 M_u 是指该潜在震源区内可能发生的最大地震。本研究区各潜在震源区的震级上限见图 2。

2) 空间分布函数 f_{i,m_j}

在地震统计区内, 须把地震统计区各震级档地震的年平均发生率分配给各相应的潜在震源区。

而确定华北平原地震带地震活动性参数为 $b=0.83$, $v_4=4.5$ 。

② 郟庐地震带: 郟庐地震带 1500 年之前地震缺失较多, 1500 年后 5.0 级以上地震记录才基本完整。 $M \geq 5.0$ 地震发生较为平稳, 1970 年以来 4 级以上地震记录较全, 1477 年和 1829 年是 2 个地震活动相对密集期的开始, 未来地震活动水平不应低估其活跃期水平。统计了郟庐地震带不同时段的地震发生率, 采用分时段、分震级联合计算震级-年发生率关系式(表 2, 图 4), 得到 $a=3.89$, $b=0.83$, $v_4=4.0$ 。

这里采用空间分布函数, 根据各潜在震源区发生不同震级档地震可能性的大小, 对统计区各震级档的地震年平均发生率进行不等权分配。

空间分布函数 f_{i,m_j} 的物理含义是地震统计区内发生一个 m_j 档震级的地震落在第 i 个潜在震源区内概率的大小。在同一地震统计区内 f_{i,m_j} 满足归一条件(对不同震级档 m_j):

$$\sum_{i=1}^n f_{i,m_j} = 1 \quad (2)$$

式中: n 为地震统计区内第 m_j 档潜在震源区的总数。在本研究中, m_j 从 4.0 到 8.5 共分成 7 个震级档, 即 4.0~4.9, 5.0~5.4, 5.5~5.9, 6.0~6.4, 6.5~6.9, 7.0~7.4, ≥ 7.5 。

依据上述原则与方法, 对研究区影响较大的潜在震源区的空间分布函数列于表 3 中。

3) 椭圆长轴取向及其方向性函数

在地震危险性分析计算中, 等震线取向与相应

表3 主要潜在震源区的空间分布函数

潜在震源区	4.0~4.9级	5.0~5.4级	5.5~5.9级	6.0~6.4级	6.5~6.9级	7.0~7.4级	≥7.5级
滦县(7号)	0.009 82	0.005 39	0.012 70	0.027 64	0.056 01	0.060 85	0
唐山(8号)	0.010 86	0.005 87	0.013 69	0.023 92	0.057 01	0.071 92	0.210 24
唐海(12号)	0.012 31	0.006 60	0.012 63	0.049 42	0	0	0
昌黎(11号)	0.009 59	0.005 64	0.024 79	0	0	0	0
渤中(27号)	0.012 25	0.008 55	0.022 61	0.039 99	0.049 26	0.228 01	0.584 23

潜在震源区的构造走向有关,其方向性函数可表示为:

$$f(\theta) = P_1\delta(\theta_1) + P_2\delta(\theta_2) \quad (3)$$

式中: θ 为潜在震源区内构造走向与正东方向的夹角; P_1 和 P_2 为相应的取向概率。 θ 、 P_1 和 P_2 在同一潜在震源区内相同,不同的潜在震源区可以不同。

3 地震动衰减关系

3.1 地震动衰减关系确定

地震动衰减关系是地震危险性分析中的重要环节。基于基本结构动力学原理,参照现有的利用峰值位移估计长周期反应谱的方法^[4],对具有显著长周期误差记录的长周期反应谱值进行处理,使其位移谱在长周期范围按一定方式逼近峰值位移。在地震动参数衰减模型中,考虑到加速度峰值和反应谱的高频分量在大震级和近距离的饱和特性,采

用III型衰减模型:

$$\lg Y = c_1 + c_2M + c_3M^2 + c_4 \lg [R + c_5 \exp(c_6M)] + \varepsilon \quad (4)$$

式中: Y 代表加速度反应谱在不同控制周期点处的谱值(单位: cm/s^2); M 为震级; R 为震中距(单位: km); c_1 ~ c_6 为回归系数; ε 为随机变量,其标准差为 σ 。

3.2 衰减关系适用性论证

将收集到的华北地区现有的一些强震动记录,计算其反应谱,与本文所采用的基岩加速度反应谱衰减关系计算所得到的反应谱进行比较。这些强震基岩加速度记录包括以下台站的2个水平分向: 1976年7月28日唐山7.8级地震,红山台震中距391.3 km; 1976年8月9日唐山5.7级地震,迁安滦河桥台震中距11.4 km,昌黎凤凰山台震中距30.9 km; 2012年唐山4.8级地震,下营台震中距117.4 km。反应谱的对比曲线见图5。

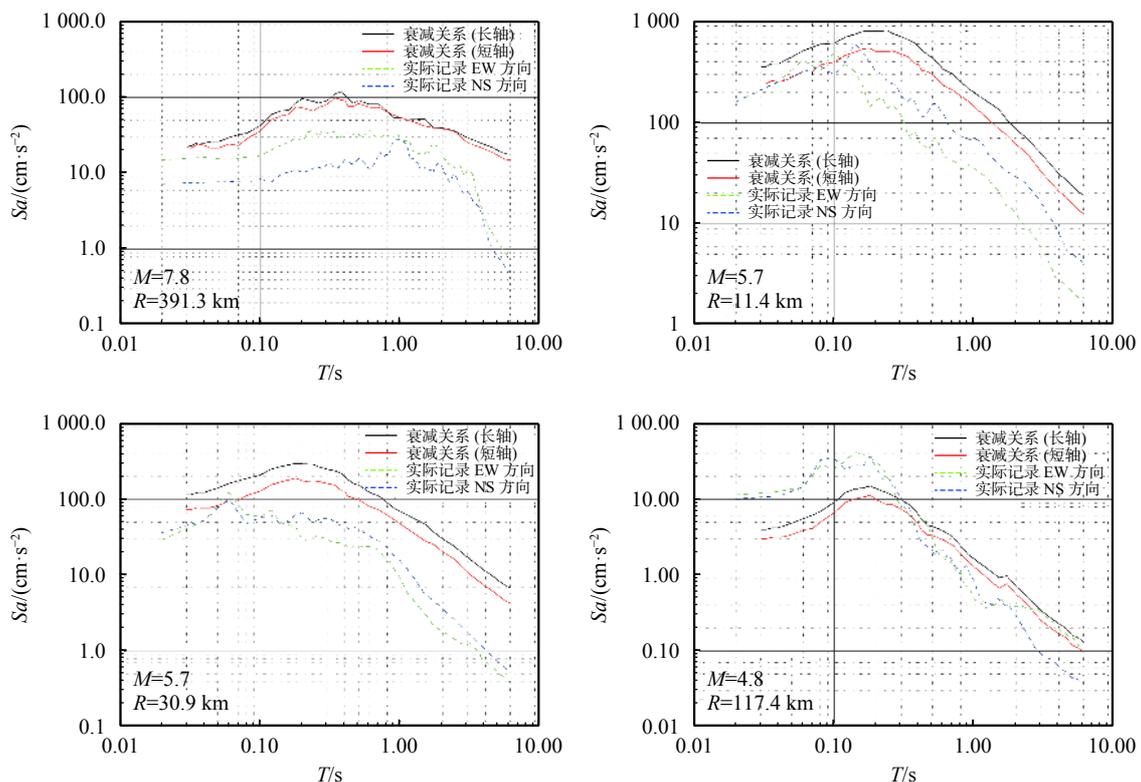


图5 衰减关系计算反应谱与强震记录计算反应谱对比

记录的计算反应谱与衰减关系计算所得的反应谱的比较结果表明, 本文所采用的基岩加速度反应谱衰减关系的计算值总体上比实际地震记录的偏高, 只有 2012 年唐山 4.8 级地震反应谱在短周期部分比基岩加速度衰减关系计算值偏高。由于确定衰减关系用到的地震目录大部分为 5.0 级以上强震, 对于 4.8 级地震存在一定的拟合误差是在可允许范围内的。

4 研究区场地单元网格划分

为了能够全面反映研究区基岩水平地震动峰值加速度情况, 将研究区按一定间隔距离划分成 60 个彼此相邻的场地单元并编号(图 6)。其中, 1[#]~44[#]为唐山地区内部的场地单元, 45[#]~60[#]为唐山邻区的场地单元(表 4)。应用成熟的地震安全性评价软件依次对每一个场地单元未来一定时期内可

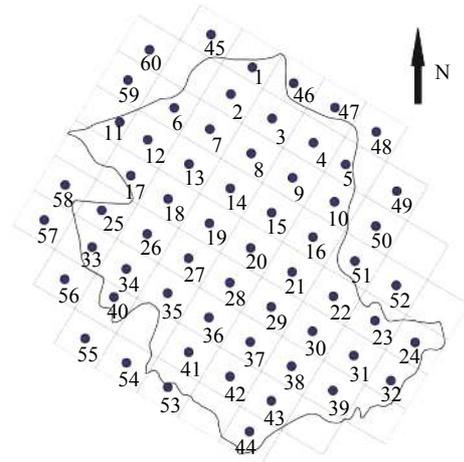


图 6 研究区概率地震危险性分析网格划分布局图

能遭受的地震动峰值加速度和相应的超越概率进行独立分析。最后, 综合各个场地单元的分析结果, 形成唐山及邻区未来 50 年超越概率 10% 的基岩水平地震动峰值加速度的分布图。

表 4 研究区场地网格中心经纬度坐标汇总表

场地	经度/(°E)	纬度/(°N)	场地	经度/(°E)	纬度/(°N)	场地	经度/(°E)	纬度/(°N)
1	118.31	40.37	21	118.65	39.66	41	118.01	39.52
2	118.25	40.33	22	118.91	39.52	42	118.11	39.41
3	118.41	40.21	23	119.12	39.45	43	118.21	39.25
4	118.62	40.12	24	119.15	39.37	44	118.47	39.02
5	118.77	40.05	25	117.67	39.95	45	118.12	40.48
6	118.00	40.27	26	117.78	39.92	46	118.61	40.32
7	118.27	40.18	27	118.02	39.77	47	118.87	40.23
8	118.38	40.11	28	118.25	39.62	48	119.00	40.13
9	118.52	40.00	29	118.66	39.50	49	119.00	40.07
10	118.83	39.92	30	118.73	39.37	50	119.02	39.82
11	117.71	40.32	31	118.87	39.33	51	118.85	39.73
12	117.73	40.18	32	119.11	39.83	52	118.98	39.58
13	118.06	40.03	33	117.61	39.92	53	117.81	39.27
14	118.15	39.95	34	117.73	39.83	54	117.78	39.42
15	118.47	39.87	35	117.95	39.65	55	117.52	39.51
16	118.72	39.85	36	118.01	39.52	56	117.42	39.73
17	117.88	40.01	37	118.13	39.48	57	117.41	39.91
18	118.02	39.98	38	118.45	39.27	58	117.42	40.00
19	118.33	39.83	39	118.48	39.28	59	117.73	40.33
20	118.58	39.75	40	117.73	39.62	60	118.02	40.45

5 地震危险性的计算及结果

5.1 计算模型

鉴于区域内地震的衰减具有方向性, 其往往取

决于发震断层的方向, 沿断层方向衰减慢, 垂直于断层方向衰减快, 通常称衰减长轴方向和短轴方向, 并且有些地震的发生, 断层破裂具有共轭的特

征,因此,本文选用共轭椭圆衰减模型。

5.2 各场地单元地震危险性计算结果

在潜在震源区划分、地震活动性参数和地震动衰减关系确定的基础上,利用概率地震危险性分析

软件计算得到了研究区各场地单元的基岩水平加速度峰值超越概率曲线、场地单元对应的基岩加速度数据(表5)和基岩加速度反应谱(表6)。限于篇幅,只选取29#场地作为示例(图7)。

表5 各场地单元50年不同超越概率对应的基岩加速度数据统计表

场地 F_s	0.994 8	0.870 1	0.630 2	0.395 0	0.330 8	0.181 6	0.099 8	0.048 8	0.019 8	0.0100	cm/s ²
1	9.39	19.65	31.48	46.94	53.06	75.59	101.98	139.19	196.80	243.19	
2	10.00	20.14	32.17	48.07	54.20	77.20	104.02	142.08	200.42	247.08	
3	10.81	22.04	34.73	51.99	58.59	84.27	115.05	160.77	228.67	290.34	
4	11.74	24.29	37.63	56.16	63.49	92.24	128.17	182.77	263.72	344.17	
5	12.75	26.52	41.14	61.25	69.39	101.49	143.26	207.22	306.78	398.79	
6	10.69	21.95	34.75	52.10	58.54	83.12	110.95	150.71	207.48	253.70	
7	10.91	22.33	35.20	52.72	59.40	85.20	115.54	159.99	225.06	283.02	
8	11.58	23.97	37.39	55.95	63.25	91.48	125.53	176.23	250.82	322.46	
9	12.65	26.32	40.95	61.16	69.34	101.18	141.10	201.37	291.06	377.33	
10	16.39	33.62	53.36	79.14	89.62	130.25	181.03	252.02	368.27	467.54	
11	15.85	32.83	52.25	76.86	86.43	122.05	164.45	222.05	310.15	389.69	
12	16.20	33.44	53.20	78.40	88.28	124.85	168.23	226.64	316.70	396.20	
13	12.25	25.65	40.09	59.99	67.93	97.71	131.87	181.05	250.33	315.60	
14	18.94	38.79	61.79	92.26	104.63	152.59	211.65	299.21	439.67	569.32	
15	17.71	36.16	57.47	85.61	97.16	141.45	196.77	274.60	401.59	517.29	
16	16.66	34.07	54.07	80.27	90.92	131.89	182.59	252.68	367.22	464.57	
17	14.92	31.11	49.75	73.41	82.68	116.92	157.52	212.14	291.58	366.54	
18	18.89	38.60	61.46	91.78	104.08	151.51	209.34	293.68	429.27	560.00	
19	18.24	37.24	59.21	88.19	100.10	145.40	201.77	282.31	413.69	530.00	
20	16.67	34.09	54.15	80.41	91.02	131.38	180.73	248.56	359.65	452.95	
21	16.09	33.04	52.55	77.88	87.97	126.13	172.20	234.70	334.28	418.04	
22	14.99	31.05	49.44	72.87	82.11	116.32	157.18	212.63	293.61	369.64	
23	13.31	27.87	43.46	63.42	71.28	99.04	129.02	171.36	230.77	283.36	
24	13.37	28.05	43.89	64.12	72.13	100.30	130.77	173.69	233.58	286.91	
25	19.38	38.77	60.76	88.98	100.33	141.48	189.89	253.08	355.70	437.90	
26	19.23	38.53	60.50	88.85	100.29	141.89	190.43	253.35	355.43	436.17	
27	19.23	39.16	62.17	92.48	104.72	151.95	209.92	295.56	433.95	560.00	
28	17.50	35.69	56.68	84.13	95.26	136.98	187.84	258.34	374.11	476.20	
29	10.19	22.64	37.85	59.49	68.35	102.02	139.34	196.48	270.19	342.88	
30	15.13	31.45	50.28	74.18	83.46	117.79	158.37	212.84	291.63	365.93	
31	14.87	30.96	49.41	72.79	81.93	115.39	154.91	208.06	283.43	356.43	
32	14.66	30.60	48.78	71.84	80.89	113.76	152.54	204.77	277.98	350.24	
33	19.60	39.13	61.24	89.54	100.88	142.04	190.31	253.16	355.24	436.84	
34	19.34	38.64	60.57	88.81	100.22	141.75	190.32	253.44	355.84	437.04	
35	19.47	38.91	61.06	89.94	101.64	145.60	198.54	269.71	384.78	485.27	
36	19.63	39.37	61.87	91.21	103.05	148.17	202.63	277.77	398.53	506.96	

续表 5

场地 F_s	0.994 8	0.870 1	0.630 2	0.395 0	0.330 8	0.181 6	0.099 8	0.048 8	0.019 8	0.0100
37	17.36	35.42	56.21	83.24	94.13	134.77	183.94	251.53	362.54	457.93
38	15.62	32.40	51.79	76.54	86.13	121.63	163.52	219.57	302.95	378.91
39	15.58	32.33	51.66	76.34	85.91	121.31	163.10	219.01	302.00	377.82
40	19.32	38.50	60.23	88.28	99.64	141.48	191.21	256.96	363.57	451.12
41	19.63	39.37	61.87	91.21	103.05	148.17	202.63	277.77	398.53	506.96
42	17.07	34.91	55.42	82.00	92.65	132.36	180.14	245.27	352.15	441.18
43	16.27	33.65	53.66	79.31	89.40	126.75	170.97	230.00	321.54	400.48
44	15.63	32.80	52.68	77.87	87.60	123.30	165.20	221.10	304.71	380.54
45	8.30	18.75	30.28	44.99	51.07	72.00	96.20	128.92	178.89	220.35
46	10.22	20.52	32.56	48.56	54.79	78.73	107.99	152.12	218.90	278.24
47	11.32	23.26	36.17	53.85	60.75	88.02	122.66	175.91	255.53	333.50
48	13.59	29.27	46.70	68.91	77.84	111.00	152.47	214.65	317.57	414.04
49	13.98	29.86	47.56	69.90	78.87	112.46	154.68	218.39	325.28	424.35
50	13.31	27.76	43.10	62.91	70.69	98.68	129.69	173.99	236.97	294.20
51	15.67	32.27	51.32	75.93	85.70	122.90	168.05	229.54	325.94	408.35
52	14.88	30.82	48.96	72.17	81.37	115.46	156.41	212.37	294.44	371.38
53	19.03	38.59	60.85	89.52	101.07	143.91	194.95	263.04	373.18	466.02
54	19.32	38.78	60.85	89.36	100.89	143.76	195.09	263.78	374.92	469.26
55	19.24	38.47	60.14	87.76	98.84	139.08	186.16	247.95	348.37	427.51
56	19.57	38.85	60.50	87.94	98.91	138.41	184.74	245.41	343.02	421.58
57	19.90	39.49	61.52	89.49	100.65	140.88	187.95	249.38	349.31	428.49
58	20.22	40.50	63.54	93.26	104.95	148.95	200.80	271.29	386.06	488.75
59	15.27	31.69	50.47	74.11	83.31	117.54	158.35	214.00	296.85	374.36
60	9.05	19.49	31.34	46.76	52.81	74.59	99.31	132.35	182.58	223.53

表 6 代表场地基岩水平加速度反应谱

cm/s²

周期/s	50年超越概率			周期/s	50年超越概率			周期/s	50年超越概率		
	63%	10%	2%		63%	10%	2%		63%	10%	2%
0.000	37.85	139.34	270.19	0.160	104.70	328.26	620.00	0.700	47.89	233.14	544.59
0.030	37.88	139.90	271.93	0.180	111.75	362.45	680.00	0.900	33.16	181.43	438.60
0.032	37.99	141.41	278.25	0.200	105.47	355.89	680.00	1.500	19.63	126.23	328.10
0.036	40.85	151.56	289.56	0.240	99.03	347.14	680.00	1.700	17.50	108.71	281.46
0.040	40.82	150.90	289.83	0.260	99.12	356.96	710.00	2.000	14.74	98.40	262.05
0.044	41.64	151.66	290.80	0.300	93.39	358.01	740.00	2.400	12.18	83.99	230.98
0.050	44.32	158.70	304.41	0.340	92.50	383.89	830.00	3.000	8.17	66.21	186.40
0.060	51.32	181.50	353.97	0.380	83.52	365.06	800.00	4.000	2.55	45.03	125.55
0.070	53.24	182.67	350.10	0.400	79.27	357.97	800.00	4.500	1.66	40.10	113.83
0.080	61.69	209.03	399.04	0.420	68.50	308.31	680.00	5.000	1.06	35.39	102.19
0.100	72.08	228.21	424.93	0.460	62.79	295.07	680.00	5.500	0.79	32.44	94.86
0.120	90.60	280.97	530.00	0.500	62.23	297.14	680.00	6.000	0.60	30.85	91.02
0.140	99.62	304.70	560.00	0.600	52.25	243.68	560.00				

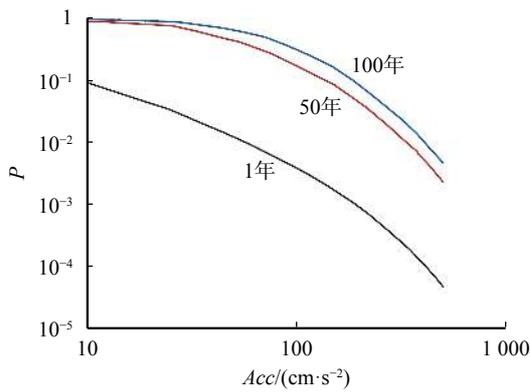


图7 研究区场地基岩水平加速度峰值超越概率曲线示例

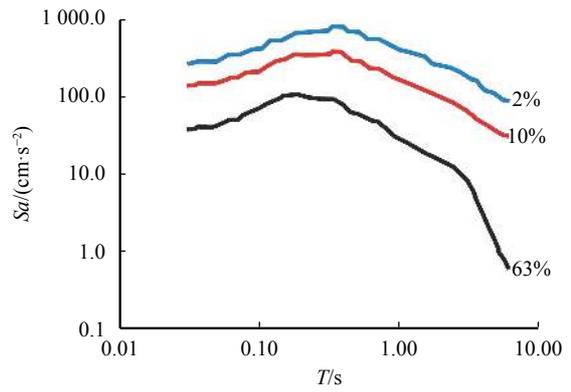


图8 代表场地基岩水平加速度反应谱曲线图(50年超越概率)

图8给出了代表场地的3个概率水准的地震危险性计算结果。可以看出,随着概率水准降低,计算结果越来越大,例如 $T=0.3$ s时,超越概率为63%、10%、2%,对应的加速度反应谱值分别为

93.39 cm/s^2 、358.01 cm/s^2 、740.00 cm/s^2 。谱形越来越宽,例如超越概率为63%、10%、2%,加速度反应谱值为111.75 cm/s^2 、383.89 cm/s^2 、830.00 cm/s^2 时对应的 T 分别为0.180 s、0.340 s、0.340 s。

表7 潜在震源区对代表场地峰值加速度的贡献

潜在震源区名称	基岩峰值加速度/(cm/s^2)						
	10	25	50	75	100	150	200
滦县	1.20×10^{-2}	5.22×10^{-3}	2.91×10^{-3}	1.70×10^{-3}	1.01×10^{-3}	3.25×10^{-4}	9.93×10^{-5}
唐山	8.06×10^{-3}	4.38×10^{-3}	2.53×10^{-3}	1.63×10^{-3}	1.11×10^{-3}	4.84×10^{-4}	1.52×10^{-4}
唐海	1.99×10^{-2}	6.02×10^{-3}	2.35×10^{-3}	1.23×10^{-3}	6.43×10^{-4}	9.84×10^{-5}	0.00
昌黎	6.85×10^{-3}	1.49×10^{-3}	2.08×10^{-4}	2.15×10^{-5}	0.00	0.00	0.00
渤中	4.43×10^{-3}	2.51×10^{-3}	4.56×10^{-4}	3.39×10^{-5}	0.00	0.00	0.00

表8 主要潜源对场地50年超越概率63%、10%、2%对应的地震动峰值加速度的贡献

50年超越概率	%					
	滦县	唐山	唐海	昌黎	渤中	其他
63	34.40	29.98	27.76	2.46	5.40	4.00
10	36.57	40.18	23.25	0.00	0.00	3.00
2	39.55	60.45	0.00	0.00	0.00	2.50

由表7~8可以看出,29#场地的地震危险性来自周边地区多个潜在震源区的综合贡献,对场地峰值加速度贡献最大的潜在震源区为唐山潜在震源区(8号源);其次为滦县潜在震源区(7号源)、唐海潜在震源区(12号源)、昌黎潜在震源区(11号源)和渤中潜在震源区(25号源)。

中国抗震设防分为3个水准,即50年超越概率为63%的众值烈度,50年超越概率为10%的基本烈度和50年超越概率为2%的罕遇烈度。选取基本烈度,即50年超越概率10%的研究区各个场地单元基岩水平地震动峰值加速度进行分析(表9)。

本文选取部分场地,依据中国地震动参数区划

图中地震动峰值加速度分区的取值范围和地震动峰值加速度调整系数,计算出各场地相对应的II类场地的地震动加速度峰值,并与区划结果进行了对比(表10)。由表10可以看出,本文所计算的场地地震动峰值加速度与区划结果基本一致,虽有部分出入,但差距不大,主要原因是区划结果是选取某一区域的平均值,而计算结果是网格化的中心点。

根据表9所示数据,将研究区各个场地单元基岩水平地震动峰值加速度赋予各场地中心点,利用surfer软件,做出研究区未来50年超越概率为10%的基岩水平地震动峰值加速度分布图(图9)。通过与中国地震动峰值加速度区划图唐山地区部分(图10)进行对比看出,基岩水平地震动峰值加速度变化趋势与区划图基本一致。此外,本文在研究区的地震危险性划分方面做了更进一步的分析与探讨。原有的地震区划只是对唐山及邻区的总体基岩峰值加速度做了统计,较为笼统地将该区域的加速度确定为0.10 cm/s^2 、0.15 cm/s^2 和0.20 cm/s^2 ,等值线间隔为0.05 cm/s^2 。本次通过对唐山及邻区进行网格划分,并对研究区网格的中心点进行分析,最

表 9 研究区各个场地单元 50 年超越概率 10% 的基岩水平地震动峰值加速度 a_g 统计表

场地	$a_g/(cm/s^2)$	场地	$a_g/(cm/s^2)$	场地	$a_g/(cm/s^2)$	场地	$a_g/(cm/s^2)$
1	101.98	16	182.59	31	154.91	46	107.99
2	104.02	17	157.52	32	152.54	47	122.66
3	115.05	18	209.34	33	190.31	48	152.47
4	128.17	19	201.77	34	190.32	49	154.68
5	143.26	20	180.73	35	198.54	50	129.69
6	110.95	21	172.20	36	202.63	51	168.05
7	115.54	22	157.18	37	183.94	52	156.41
8	125.53	23	129.02	38	163.52	53	194.95
9	141.10	24	130.77	39	163.10	54	195.09
10	181.03	25	189.89	40	191.21	55	186.16
11	164.45	26	190.43	41	202.63	56	184.74
12	168.23	27	209.92	42	180.14	57	187.95
13	131.87	28	187.84	43	170.97	58	200.80
14	211.65	29	141.34	44	165.20	59	158.35
15	196.77	30	158.37	45	96.20	60	99.31

表 10 部分场地峰值加速度计算结果与地震动参数区划研究成果对比

场地	计算结果/(cm/s ²)	区划结果/(cm/s ²)	场地	计算结果/(cm/s ²)	区划结果/(cm/s ²)	场地	计算结果/(cm/s ²)	区划结果/(cm/s ²)
1	0.10 g	0.10 g	22	0.15 g	0.15 g	43	0.20 g	0.15 g
10	0.20 g	0.20 g	29	0.15 g	0.15 g	49	0.20 g	0.15 g
17	0.20 g	0.15 g	37	0.20 g	0.20 g	56	0.20 g	0.20 g
20	0.20 g	0.20 g	40	0.20 g	0.20 g	60	0.10 g	0.10 g

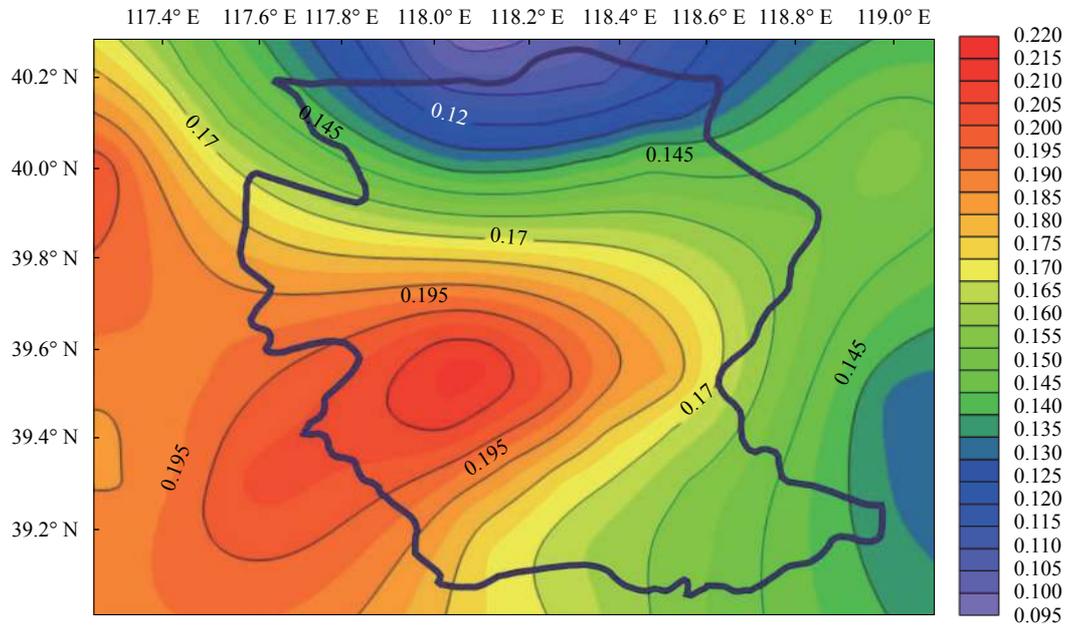


图 9 研究区基岩水平地震动峰值加速度分布图(单位: g)

后得到了较为详细的研究区基岩峰值加速度分布图,范围拓展到了 0.11 cm/s² 到 0.21 cm/s² 之间,加速度等值线的间隔为 0.01 cm/s²。

由图 9 可以看出,研究区北部地区的基岩峰值加速度值普遍呈现较小的趋势,范围在 0.11~0.14 g 之间,东南部地区较北部地区峰值加速度偏大,范

围在 0.14~0.17 g 之间,中西部区域的基岩峰值加速度值呈现普遍偏大的趋势,尤其在 118.1°E, 39.5°N 附近为区域峰值加速度的最大值,为地震的危险区域,且此区域为唐山 8.0 级潜在震源区(8 号)的所在位置。因此,对研究区影响最大的潜在震源区为唐山 8.0 级潜在震源区。



图 10 区域地震动峰值加速度图

6 结论

在潜在震源区划分、地震活动性参数和地震动衰减关系确定的基础上,将研究区按照一定的间隔

距离划分成 60 个彼此相邻的场地单元并编号,对每一个场地单元未来一定时期内可能遭受的地震动峰值加速度和相应的超越概率进行了独立分析。将研究区各个场地单元基岩水平地震动峰值加速度值赋予各场地中心点,利用 surfer 软件,通过插值分析,做出唐山地区未来 50 年超越概率为 10% 的基岩水平地震动峰值加速度分布图。分析认为,唐山北部地区的基岩峰值加速度值普遍呈现较小的趋势,范围在 0.11~0.14 g 之间;东南部地区较北部地区峰值加速度偏大,范围在 0.14~0.17 g 之间;中西部区域的基岩峰值加速度值呈现普遍偏大的趋势,尤其在 118.1°E、39.5°N 附近为区域峰值加速度的最大值,为地震的危险区域,且此区域为唐山 8.0 级潜在震源区(8 号)的所在位置。因此,对研究区影响最大的潜在震源区为唐山 8.0 级潜在震源区。

参考文献:

- [1] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [2] 章在塘, 陈达生. 二滩水电站坝区场地地震危险性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1982, 2(3): 1-15.
- [3] 时振梁, 焉家全, 高孟潭. 地震区划原则和方法的研究——以华北地区为例[J]. 地震学报, 1991, 13(2): 179-189.
- [4] 高孟潭. 地震危险性分析方法概述[J]. 国际地震动态, 1986(11): 10-13.
- [5] 高孟潭. 关于地震年平均发生率问题的探讨[J]. 国际地震动态, 1988(1): 1-5.
- [6] 雷建成, 高孟潭, 吴健, 等. 双场点地震危险性分析方法及其应用[J]. 地震学报, 2010, 32(3): 310-319.
- [7] 陈仁法, 康英, 黄新辉, 等. 南海北部地震危险性分析[J]. 华南地震, 2009, 29(4): 36-45.
- [8] 王国新. 强地震动衰减研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2001.
- [9] 刘特培, 杨向东, 王永芳. 广东及邻区地震活动特征及近期地震危险性分析[J]. 华南地震, 2003, 23(3): 35-40.
- [10] 窦海岳, 陈时军. 山东地区地震危险性空间分布特征研究[J]. 华北地震科学, 2009, 27(3): 1-6.
- [11] 郑广芬, 陶复新. 地震危险性分析中对烈度衰减的不确定性校正[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(2): 48-52.
- [12] 纪春玲, 董博. 山东某场地概率地震危险性分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(4): 53-64.
- [13] GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [14] 俞言祥. 长周期地震动衰减关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002.

Study on Probabilistic Seismic Risk in Tangshan Area

DONG Bo, JI Chunling, ZHANG He, LI Jiang, LYU Guojun

(Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: According to the principle of historical earthquake recurrence and tectonic analogy, the potential source areas in Tangshan area are divided, and five potential source areas which have great influence on the study area are identified. After determining the seismicity parameters and ground motion attenuation relationship, the Tangshan area is meshed into 60 uniform independent site units, and the peak acceleration of ground motion that each site unit may suffer from and the corresponding exceeding probability in the future are calculated. Through interpolation analysis, the interval of peak acceleration isoline of bedrock in the original seismic zoning in the study area is further refined from 0.05 g to 0.01 g. The distribution map of peak acceleration of bedrock horizontal ground motion with a 50-year exceedance probability of 10% shows that the potential source area of Tangshan M8.0 has the greatest impact on the study area in the future.

Key words: earthquake; exceeding probability; mesh; acceleration