

王玉婷,谭庆全,薄涛,等. 2024. 京津冀地区有感地震评估模型研究及应用. 中国地震, 40(2):368~377.

京津冀地区有感地震评估模型研究及应用

王玉婷^{1,2,3)} 谭庆全^{1,2,3)} 薄涛³⁾ 郁璟贻³⁾

- 1) 中国地震局工程力学研究所,地震工程与工程振动重点实验室,哈尔滨 150080
2) 地震灾害防治应急管理部重点实验室,哈尔滨 150080
3) 北京市地震局,北京 100080

摘要 基于应急基础数据、损失评估模型和烈度衰减模型等,震后第一时间评估计算出影响范围和损失结果,将有助于政府和相关部门根据灾害规模部署救灾行动。目前,关于震后有感范围的快速确定尚无有效方法。本文基于京津冀地区2018—2022年30次震例的实际调查结果及仪器烈度分布,构建由有感半径(R)、震级(M)和震源深度(H)3个参数组成的有感地震评估模型,并从统计学角度分析该模型拟合的有效性。然后,将2023年北京地区发生的显著有感地震代入计算,与实际调查结果进行比对。最后,将模型在北京市本地化地震灾害快速评估与辅助决策系统中进行集成应用。实践应用表明,本文研究结果可以进一步提高京津冀地区地震应急服务响应能力。

关键词: 京津冀地区 有感地震 评估模型 快速评估

[文章编号] 1001-4683(2024)02-0368-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

震后快速确定有感范围、产出评估结果对于政府开展应急处置工作、平息地震谣言、安抚社会公众具有重要作用(聂高众等,2012、2013;帅向华等,2009、2021)。近年来,京津冀地区有感地震频发,据中国地震台网统计,2018年以来京津冀地区发生2.0级以上地震共计120余次,其中震级最大的为2020年7月12日河北省唐山市古冶区5.1级地震,该地震造成北京地区普遍有感,其中东部的平谷、顺义、通州等地区震感较为强烈,民众反应明显。2018—2022年北京地区发生1.5~1.9级地震17次,2.0~2.9级地震7次,3.0级以上地震3次,虽然震级较小,但大部分地震有明显震感,导致群众情绪不稳定、聚集恐慌等现象,造成一定社会影响。北京地区地震调查表明,仪器烈度达到II度时,靠近震中部分的区域则反映有感(郁璟贻等,2022b)。

[收稿日期] 2023-12-12 [修定日期] 2024-02-20

[项目类别] 北京市地震局面上项目(BJMS-2024002)、地震应急与信息青年重点任务(CEAEDM202301)、地震科技星火计划攻关项目(XH23001B)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021D07)、国家重点研发计划(2019YFC1509402)、北京市科技计划项目(Z231100003823035)共同资助

[作者简介] 王玉婷,女,1987年生,工程师,主要从事地震应急指挥系统应用和场地抗震韧性评估方面的研究。

E-mail: chinawyt@bjseis.gov.cn

谭庆全,通讯作者,男,1980年生,正高级工程师,主要从事地震应急相关研究。E-mail: tanqq@bjseis.gov.cn

目前,对于震后有感范围的评估,使用最广泛的方法是通过历史地震数据拟合得出的烈度衰减经验公式来快速估算地震影响范围。在众多快速评估系统中,“圆模型”被用来估算最大烈度小于Ⅵ度的地震有感范围,但实践证明该模型在不同地区和场地条件下存在较大误差,例如,2019年12月5日河北省唐山市4.5级地震实际有感范围达到150km以上,而通过该模型计算得到的有感范围仅为50km,这与实际结果严重不符。研究表明,地震动衰减规律受震源机制、传播距离和地质环境等因素的影响,不同地区地震的构造背景、地震波传播介质的几何扩散、阻尼吸收和非弹性衰减等存在明显区别(任静等,2020)。有感范围作为地震动衰减在地面的表现形式,具有强烈的地区性。沈斯伟(1989)根据1886—1986年云南省内36次4.7~7.7级地震,统计出有感半径(Ⅳ度等效半径)与震级的关系;汪素云等(1993)利用1900—1979年《中国地震目录》中的地震参数,拟合出有感半径与震级的经验关系式;雷建成等(2006)收集1951—1999年96个3.0~7.5级地震信息,得到西南地区有感半径与震级之间的关系。这些拟合公式虽具有区域性,但并未考虑震源深度的影响。本文基于京津冀地区的地震调查资料,考虑区域特性和震源深度等影响因素,探索一种适合京津冀地区中小地震有感范围的快速评估模型。

1 有感地震评估模型构建

1.1 模型参数确定及数据来源

已有研究表明,极震区烈度与震级呈正相关性,与震源深度呈负相关性(聂高众等,2018)。考虑到地震波的几何衰减特性,一般认为有感范围与震级之间也存在某种正相关关系。大量震例表明,相同震级的地震发生在不同深度,对地面的破坏程度不同,通常情况下,浅源地震产生的地震灾害损失更加严重,由此说明有感范围与震源深度存在负相关关系。基于此,本研究选用震级和震源深度这2个参数构建与有感范围的线性关系。

为得到客观、真实、可靠的统计规律,收集整理了2018—2022年京津冀地区发生的部分有感地震作为震例数据,用于分析研究。数据主要来源于中国地震台网速报目录中测定的参数。震例数据的采集包括:发震时间、震中位置、震级、震源深度、震感反馈、北京地区最高仪器烈度及台站仪器烈度分布图。根据民众反馈的震感信息,结合台站仪器记录的烈度,通过人工校验的方式确定有感范围的半径(表1)。需要注意的是,当震感反馈信息较详细,精确至乡镇街道时,以此为准确定有感半径,当震感反馈信息范围较大,仅到区县时,则需参考台站仪器烈度Ⅱ度区的范围来确定有感半径(郁璟贻等,2022b)。

根据表1的数据绘制震级、震源深度和有感半径的三维散点图,如图1所示,从图中可以看出随着震级的增加,有感半径呈显著上升趋势;随着震源深度的增加,有感半径呈显著下降趋势。

1.2 模型构建

选取有感半径为拟合因变量,震级和震源深度为自变量,利用OriginLab数据分析和绘图软件进行拟合分析,构建了三者的线性关系,表示为

$$R = 15.84 + 9.01M^2 - 2.96H \quad (1)$$

其中, R 为有感半径, M 为震级, H 为震源深度。需要说明的是,对于有感半径计算结果为负数的情况,可以认为基本无感,将 R 赋值为0。

表 1 京津冀地区 2018—2022 年有感地震数据信息

序 号	发震时间 (年-月-日)	参考地点	东经/北纬	震级	震源 深度 /km	震感反馈	北京地区 最高仪器 烈度	有感 半径 /km
1	2018-02-12	河北永清	116.67°/39.37°	4.3	20	全市普遍有感,东部、南部地区震感较为强烈	IV	100
2	2019-04-07	北京海淀	116.23°/40.08°	2.9	17	怀柔、海淀、昌平普遍有震感	II	40
3	2019-04-14	北京怀柔	116.39°/40.34°	3.0	19	怀柔、延庆、昌平震感较强	III	35
4	2019-12-05	河北唐山丰南	118.04°/39.31°	4.5	10	全市大部分地区有感,通州、平谷等东部地区震感较强	II	180
5	2019-12-10	北京昌平	116.37°/40.30°	2.0	18	仅昌平区延寿镇北庄村、上庄村、下庄村、牛蹄岭村等个别村民反映有震感	I	20
6	2019-12-23	天津蓟州	117.33°/39.85°	3.3	10	海淀、顺义、平谷部分群众反映有震感	II	85
7	2020-01-09	北京房山	115.63°/39.77°	3.2	13	房山区史家营乡、门头沟区清水镇、斋堂镇、大台街道有震感报告	IV	40
8	2020-02-01	北京昌平	116.34°/40.13°	1.7	13	无震感反馈	I	0
9	2020-03-05	北京昌平	116.29°/40.14°	2.1	15	震中个别群众反应有感	II	8
10	2020-03-29	北京顺义	116.62°/40.16°	1.7	6	顺义区马坡、牛栏山部分群众有感,双丰街道部分高层住户有感	III	10
11	2020-04-01	北京顺义	116.62°/40.17°	1.8	7	双丰街道、马坡镇、李遂镇有震感	III	15
12	2020-04-09	北京顺义	116.63°/40.15°	1.3	6	震中个别群众反应有感	I	2
13	2020-04-13	河北任丘	116.18°/38.77°	3.2	8	北京南部区域部分群众反应有感	I	95
14	2020-05-26	北京门头沟	115.95°/40.04°	3.6	18	门头沟 13 个街镇均有震感,大峪、军庄、妙峰山、永定地区部分居民震感明显	III	55
15	2020-07-12	河北唐山古冶	118.44°/39.78°	5.1	10	全市普遍有感,东部的平谷、顺义、通州等地区震感较为强烈	III	210
16	2021-03-25	北京顺义	116.63°/40.16°	2.3	10	顺义、昌平、海淀个别群众反映有震感	II	30
17	2021-04-16	河北滦州	118.71°/39.75°	4.3	9	朝阳、通州、海淀、顺义、怀柔、昌平、平谷、密云区均有群众反应震感	I	205
18	2021-06-12	河北张北	114.40°/41.16°	3.2	12	北京无震感反馈	I	
19	2021-06-17	河北承德	117.90°/41.08°	3.0	9	北京无震感反馈	I	
20	2021-06-22	河北张北	114.41°/41.17°	3.9	10	北京无震感反馈	I	
21	2021-06-24	河北滦州	118.74°/39.83°	3.0	11	北京无震感反馈	I	
22	2021-09-05	北京昌平	116.39°/40.13°	1.9	19	无震感反馈	I	0
23	2022-01-22	北京昌平	116.48°/40.14°	2.0	15	无震感反馈	I	0
24	2022-02-03	北京朝阳	116.52°/39.98°	2.7	21	朝阳、顺义、海淀局部区域少数人有感	III	20
25	2022-02-15	北京延庆	116.13°/40.37°	1.5	15	无震感反馈	I	0
26	2022-02-24	河北唐山丰南	117.93°/39.35°	3.0	15	北京无震感反馈	I	
27	2022-02-28	北京延庆	116.26°/40.49°	1.7	15	无震感反馈	I	0
28	2022-04-19	北京海淀	116.34°/40.01°	1.8	19	无震感反馈	II	0
29	2022-08-02	北京怀柔	116.47°/40.48°	2.6	18	怀柔区怀柔镇居民有震感	III	35
30	2022-09-25	北京门头沟	115.77°/40.17°	1.6	17	无震感反馈	II	0

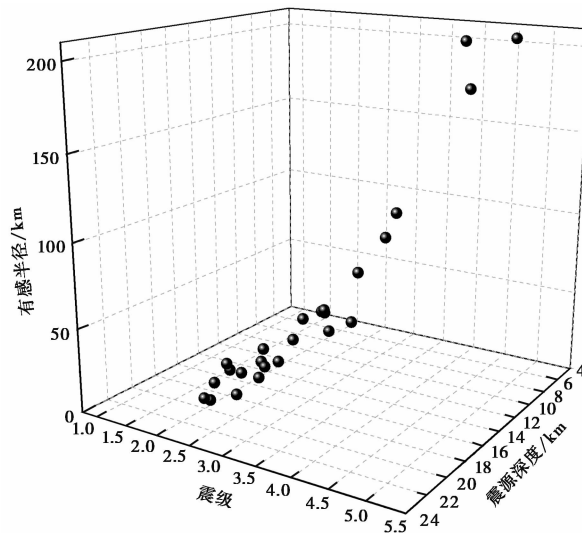


图 1 震级、震源深度和有感半径散点图

1.3 拟合结果有效性

本次拟合分析的评价参数如表 2 所示,从拟合优度和显著性检验两方面对拟合结果进行衡量。

表 2 拟合效果评价参数

参数	相关系数 r	拟合优度 r^2	p 值	F 值
数值	0.965	0.931	6.739×10^{-14}	162.297

拟合优度是指回归模型对数据样本的拟合程度,通常用 r^2 来表示,取值范围在 0~1 之间。 r^2 越接近 1,说明评估模型对观测数据的拟合程度越好,反之说明拟合程度越差。本次拟合结果 $r^2 = 0.931$,说明拟合效果较好。

其次,对回归模型进行 F 显著性检验。 F 检验中的 p 值为结果可信程度的指标,拟合分析结果是否有效取决于 p 值和 F 值。 $p = 0.05$ 时,说明样本中变量关联有 5%的可能是由于偶然性造成。在众多研究领域中, $p \leq 0.05$ 通常被认为是可接受错误的边界水平。本次拟合结果中的 $p = 6.739 \times 10^{-14}$,远小于 0.05,则认为有感半径与震级、震源深度之间存在显著的关联性。

$$F \text{ 检验中的 } F \text{ 值与 } r^2 \text{ 的关系为: } F = \frac{r^2 / (k - 1)}{(1 - r^2) / (n - k)}, F \text{ 值与 } r^2 \text{ 同方向变化。} F \text{ 越大,}$$

说明回归模型中震级和震源深度 2 个参数联合起来对有感半径的显著影响就越大。本次拟合结果 $F = 162.297$,说明本次回归模型是可靠有效的。

1.4 拟合结果分析

京津冀地区近年来发生的地震震源深度在 5~20km 范围内(表 1),因此,取常见震级下 5~20km 的震源深度作为变化量,按照拟合公式(式(1)),计算常见震级下有感半径随震源

深度的变化情况(表3)。从表中可以看出,同一震源深度下,震级变化0.5级,有感半径随之增加10km及以上,震级越大,有感半径的变化越大;而在同一震级下,震源深度每变化1km,有感半径随之仅缩小3km。若有感半径的变化达到10km左右,震源深度需变化4km,这说明有感半径对震级的变化更敏感。

表3 常见震级下有感半径随震源深度的变化情况

震源深度/km	有感半径/km								
	M 1.0	M 1.5	M 2.0	M 2.5	M 3.0	M 3.5	M 4.0	M 4.5	M 5.0
5	10.1	21.3	37.1	57.4	82.1	111.4	145.2	183.5	226.3
6	7.1	18.4	34.1	54.4	79.2	108.5	142.2	180.5	223.3
7	4.1	15.4	31.2	51.4	76.2	105.5	139.3	177.6	220.4
8	1.2	12.4	28.2	48.5	73.3	102.5	136.3	174.6	217.4
9		9.5	25.2	45.5	70.3	99.6	133.4	171.7	214.5
10		6.5	22.3	42.6	67.3	96.6	130.4	168.7	211.5
11		3.6	19.3	39.6	64.4	93.7	127.4	165.7	208.5
12		0.6	16.4	36.6	61.4	90.7	124.5	162.8	205.6
13			13.4	33.7	58.5	87.7	121.5	159.8	202.6
14			10.4	30.7	55.5	84.8	118.6	156.9	199.7
15			7.5	27.8	52.5	81.8	115.6	153.9	196.7
16			4.5	24.8	49.6	78.9	112.6	150.9	193.7
17			1.6	21.8	46.6	75.9	109.7	148.0	190.8
18				18.9	43.7	72.9	106.7	145.0	187.8
19				15.9	40.7	70.0	103.8	142.1	184.9
20				13.0	37.7	67.0	100.8	139.1	181.9

将京津冀有感地震评估模型(式(1),以下简称“本模型”)与前人的研究模型(表4)进行对比分析,对比结果如图2所示。从图中可以看出,几种模型在不同震级下估算的有感范围有较大区别,体现出模型的区域性特点。本文模型优于其他几种模型的原因是考虑了震源深度的影响。在震源深度15km、震级1.0级或震源深度20km、震级2.0级的情况下无有感范围,这与实际经验基本吻合。不同震源深度下,本文模型在 $M \leq 3.0$ 时有感范围区别较大,随着震级的增加,由震源深度带来的有感范围的差距越来越小。在 $M \geq 2.0$ ($H = 10\text{km}$)时,本文模型的计算结果高于传统圆模型,说明后者对于京津冀地区有感地震造成的影响范围的评估过于保守。

表4 不同有感范围评估模型对比

序号	模型名称	公式	说明
1	传统圆模型	$R = (M/V)L$	V 和 L 为经验常数, $V = 4.5, L = 50$
2	汪素云等(1993)模型	$\lg R = -2.803 + 0.974M$	选取1900—1979年中国大陆21次 $M \leq 5.0$ 地震拟合得到
3	雷建成等(2006)模型	$\lg R = -0.6494 + 0.4967M$	选取1954—1999年四川盆地地区34个 $M \leq 5.0$ 地震拟合得到
4	沈斯伟(1989)模型	$M = 0.03 + 2.92 \lg R$	选取886—1986年云南省内36次 $4.7 \leq M \leq 7.7$ 地震拟合得到

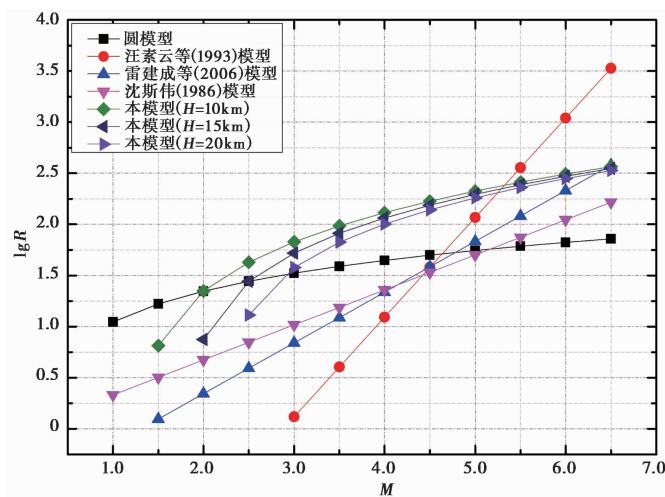


图 2 不同有感范围评估模型对比结果

2 有感地震模型在评估系统中的集成应用

在 Microsoft Visual Studio 2018 集成开发环境中进行界面设计与编码实现,将本文构建的有感地震评估模型集成应用于北京市本地化快速评估软件中,主要研发实现的界面包括烈度快速评估模型参数配置(图 3)和地震有感范围专题图制作(图 4)。

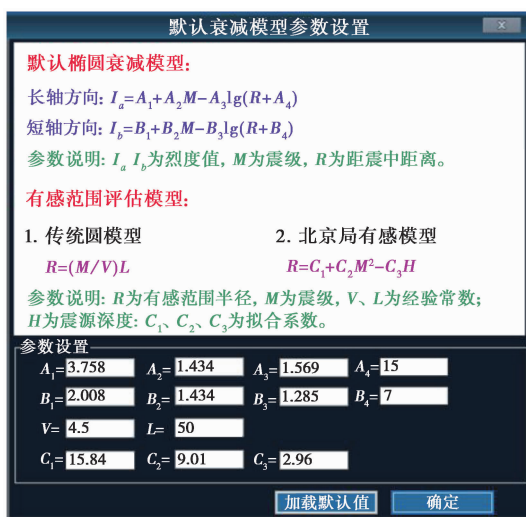


图 3 评估模型参数设置界面

为提高地震应急服务响应速度,基于 EQIM 自动触发地震灾害快速评估软件(郁璟怡等,2022a; 张伟等,2023),并根据地震参数自动生成评估报告,包括自动进行地震有感范围的快速评估、专题图和评估报告的制作,其计算流程如图 5 所示。

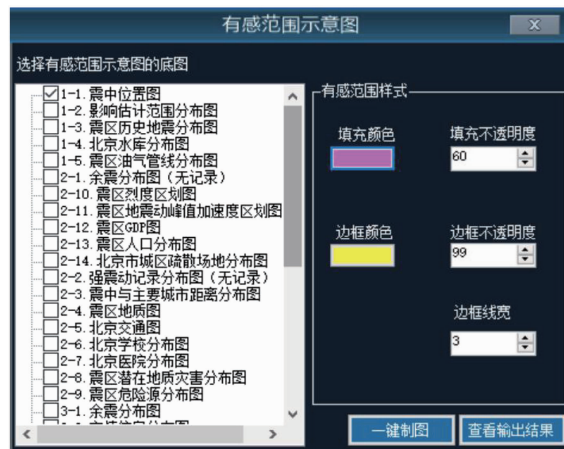


图4 有感范围专题图制作界面

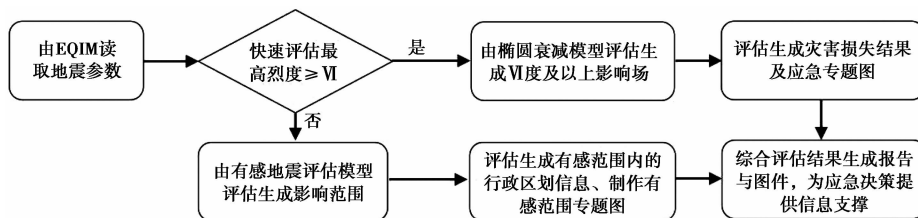


图5 有感地震评估模型应用流程

3 实例分析

选择2023年2月12日北京房山区2.8级、2023年9月1日北京顺义区2.7级和2024年3月15日北京平谷区1.5级地震作为震例进行分析。

2023年2月12日房山2.8级地震震源深度为14km,造成北京地区最高仪器烈度为IV度。地震发生后,各区收集到的震感反馈为房山区、门头沟区部分有感,房山区霞云岭乡、十渡镇、蒲洼乡、史家营乡、大安山乡、燕山等地有明显震感,门头沟区百花山附近有震感。2023年9月1日顺义2.7级地震震源深度为17km,造成北京地区最高仪器烈度为III度。据震感反馈情况,顺义区、昌平区全域以及海淀、门头沟部分区域有明显震感。2024年3月15日平谷1.5级地震震源深度为13km,震后各区均无震感反馈,且台站仪器烈度图显示最大仪器烈度仅为I度。通过仪器烈度分布图进行校验后,得到3次地震的有感范围分别为44km、30km和0km;由本文的京津冀地区有感地震评估模型(式(1))计算出的地震有感范围分别为45.0km、31.2km和0km,与实际情况基本一致。

在实际应用中,领导决策层更关注有感的区县,而非有感半径。因此,基于北京市本地化地震灾害快速评估与应急制图一体化软件(谭庆全,2023),根据评估的有感半径,经空间分析获取相应的区县行政区划数据,进行渲染后叠加到基础底图上,可快速生成有感范围专题图。2023年2个震例的有感范围专题图分别如图6、图7所示。

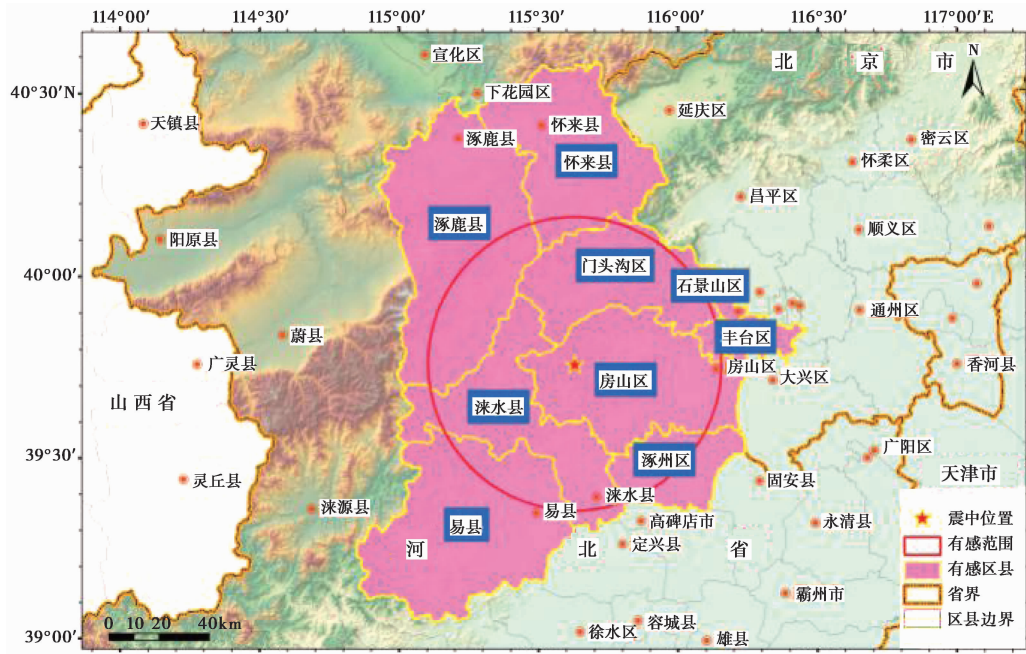


图 6 房山区 2.8 级地震有感范围专题图

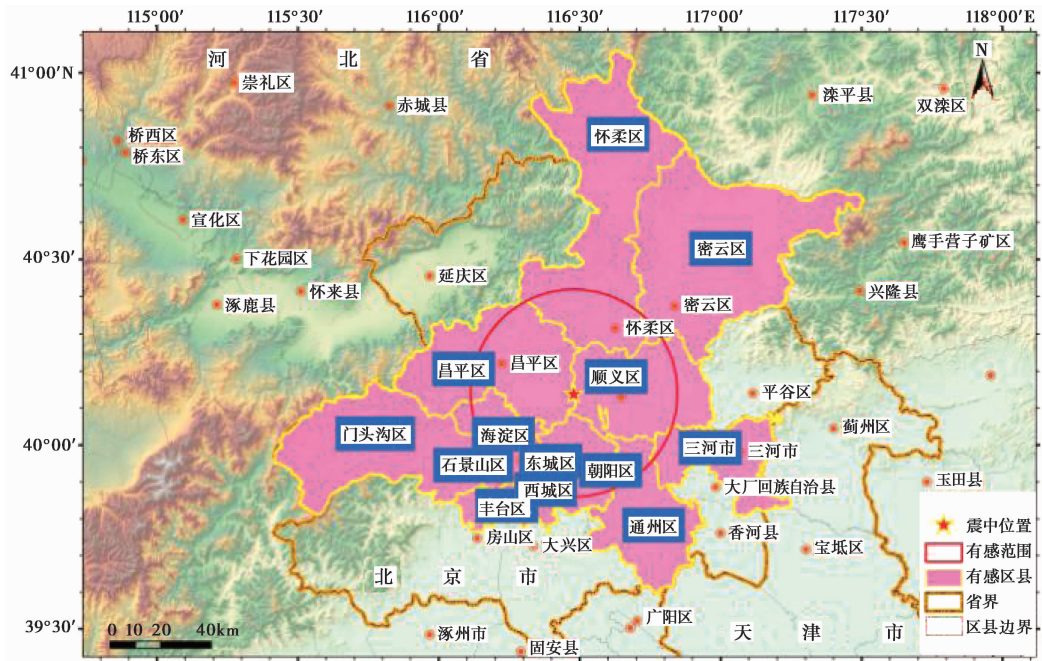


图 7 顺义区 2.7 级地震有感范围专题图

4 结语

京津冀地区多年以来未发生破坏性地震,但有感地震较多。有感范围的判断对地震应急灾情评估具有一定意义,本文提出一种基于京津冀地区实际震例的有感地震快速评估模型,并在北京市本地化快速评估软件中进行集成应用。该模型考虑震级、震源深度和有感半径3个参数,更加科学合理。通过模型有效性检验并与2023年北京地区实际地震的有感范围进行对比,结果表明该模型基本满足京津冀地区地震应急的服务需求。当然,该模型的研究和应用还需要进一步完善和优化,比如,震源深度的误差对评估模型的影响、结合烈度速报与网络舆情进行有感范围收集、精细化评估不同烈度的影响范围、有感范围的精细化制图表达及公共服务产品开发等。由于京津冀地区有感地震样本较少,尤其是IV度、V度震例少,且除震级和震源深度外,有感范围还受地震发生的时间、场地条件、高层建筑等因素影响,随着震例的累积,在今后的工作中将逐渐增加统计样本并进行分区估算,从而降低模型的系统偏差,进一步提高模型评估的准确性。

致谢:审稿专家给出了建设性的指导意见,北京地震台提供了仪器烈度分布图,在此一并表示感谢。

参考文献

- 雷建成,高孟潭,俞言祥. 2006. 西南地区近代地震的震中烈度与有感半径的统计研究. 震灾防御技术, **1**(2):137~145.
- 聂高众,安基文. 2013. 地震应急基本理论模式初探. 城市与减灾, (3):25~29.
- 聂高众,安基文,邓砚. 2012. 地震应急灾情服务进展. 地震地质, **34**(4):782~791.
- 聂高众,徐敬海. 2018. 基于震源深度的极震区烈度评估模型. 地震地质, **40**(3):611~621.
- 任静,徐志双,段乙好,等. 2020. 中国各省区地震烈度衰减关系模型甄别. 地震地磁观测与研究, **41**(3):75~82.
- 沈斯伟. 1989. 云贵地区公元886年至1986年 $M \geq 4.7$ 级地震简目. 见:闵子群. 云贵地区地震危险性研究文集. 昆明:云南科技出版社,101~104.
- 帅向华,董翔,席楠,等. 2021. 地震信息化共用服务平台设计与实现. 中国地震, **37**(1):170~184.
- 帅向华,姜立新,王栋梁. 2009. 国家地震应急指挥软件系统研究. 自然灾害学报, **18**(3):99~104.
- 谭庆全. 2023. 离线式地震灾害快速评估与应急制图系统研发及应用. 地震科学进展, **53**(2):57~65.
- 汪素云,时振梁. 1993. 有感半径与震级的关系及其应用. 见:国家地震局震害防御司. 中国地震区划文集. 北京:地震出版社,179~184.
- 郁璟贻,薄涛,刘英华,等. 2022a. 基于Android移动终端的北京市本地化地震应急工作平台实现与应用. 中国地震, **38**(2):280~292.
- 郁璟贻,谭庆全,刘英华,等. 2022b. 北京地区中小地震应急信息产出与服务研究. 防灾科技学院学报, **24**(1):60~69.
- 张伟,刘爱华,刘英华,等. 2023. 基于EQIM的地震应急自动触发软件设计与实现. 中国地震, **39**(2):282~289.

Research and Application of Felt Earthquake Assessment Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region

Wang Yuting^{1,2,3)}, Tan Qingquan^{1,2,3)}, Bo Tao³⁾, Yu Jingyi³⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China

2) Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China

3) Beijing Earthquake Agency, Beijing 100080, China

Abstract Immediately following an earthquake, estimating the scope of impact and loss is crucial for facilitating government and relevant departments in deploying disaster relief operations. This can be achieved through basic emergency data, a loss assessment model, and an intensity attenuation model. This paper utilizes data from 30 earthquake surveys conducted in the Beijing-Tianjin-Hebei region between 2018 and 2022, combined with instrument intensity distribution, to construct a felt earthquake evaluation model comprising three parameters: felt radius (R), magnitude (M), and focal depth (H). The effectiveness of the model is analyzed statistically. Additionally, representative felt earthquakes in Beijing during 2023 are calculated and compared with actual survey results. Finally, the model is integrated into the Beijing local earthquake disaster rapid assessment and auxiliary decision system. Practical application demonstrates that findings of this study can significantly enhance earthquake emergency response capabilities in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; Felt earthquakes; Evaluation model; Rapid assessment