

# 青藏高原东北缘地震动衰减模型及其 在地震影响场评估中的应用

王韶鹏<sup>1,2</sup>, 卢育霞<sup>1,2</sup>, 石玉成<sup>1</sup>, 田秀丰<sup>1</sup>, 贺海浪<sup>1,2</sup>, 刘 北<sup>1,2</sup>, 李 韬<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 青藏高原东北缘活动断裂分布密集、构造变形活动强烈、地震频发。建立更符合该地区地震动特征的地震动衰减模型, 能够在本地区震害防治和震后应急救援等方面发挥重要作用。首先, 基于青藏高原东北缘地震构造特征, 有针对性地选择强震数据库, 构建考虑断层类型、近断层效应及场地条件等因素的区域性地震动衰减模型, 运用随机效应回归法计算出模型系数; 结合国内强震动记录通过残差分析对模型预测结果进行检验, 并比较与 NGA 模型的差异; 最后, 运用震动图快速生成系统产出 2022 年门源 Mw6.6 地震理论烈度图并与现场调查烈度进行对比。结果表明: 本文模型与 NGA 模型的预测偏差与场地条件和距离关系不大, 而主要与震级相关, 预测偏差随震级增大而明显增大; 残差分析显示本文模型与青藏高原东北缘地区地震记录更接近; 基于震动图快速生成系统产出的理论烈度图与现场调查结果比较接近, 运用地震动衰减模型可有效提高台网稀疏地区强震 Shakemap 和地震影响场的预测精度和效率。

**关键词:** 地震动衰减模型; 门源地震; 场地效应; 青藏高原东北缘

中图分类号: P135

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0301-09

## Ground motion attenuation model in the northeast margin of Qinghai-Tiber Plateau region and its application in the evaluation of seismic impact field

WANG Shaopeng<sup>1,2</sup>, LU Yuxia<sup>1,2</sup>, SHI Yucheng<sup>1,2</sup>, TIAN Xiu Feng<sup>1</sup>, HE Hailang<sup>1,2</sup>, LIU Bei<sup>1,2</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology of China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of China Earthquake Administration &

Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The northeastern margins of the Qinghai-Tiber Plateau has a dense distribution of active faults, strong tectonic deformation activities, and frequent earthquakes. The establishment of a ground motion attenuation model that is more in line with the characteristics of the earthquake in the region can play an important role in the prevention and control of earthquake damage and emergency rescue after the earthquake in the region. First, based on the seismotectonic characteristics of the northeastern margin of the Tibetan Plateau, a strong earthquake database is selected to construct a regional ground motion attenuation model that considers factors such as fault type, near-fault effect and site conditions, and the random effect regression method is used to calculate the model coefficients. Then, combined with domestic strong motion records, the model prediction results are tested by residual analysis, and the differences between the model and the NGA model are compared. Finally, the theoretical intensity map of Menyuan Mw6.6 earthquake in 2022 is quickly generated by using the vibration map and compared with the field investigation intensity. The results show that the prediction deviations of the paper model and the NGA model are not related to the site conditions and distance, but mainly to the magnitude, and the prediction deviation increases significantly with the increase of magnitude. The model can effectively improve the prediction accuracy and efficiency of strong earthquake shakemap and seismic impact field in the sparse area of the station network.

**Key words:** ground motion attenuation model; Menyuan earthquake; site effect; the northeastern margins of Qinghai-Tiber Plateau

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-28

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2020IESLZ03); 甘肃省地震局地震科技发展基金(2019Q13)

第一作者: 王韶鹏(1993—), 男, 硕士生, 主要从事地震工程与地震动衰减关系研究。E-mail: 13993059875@139.com

通信作者: 卢育霞(1978—), 女, 副研究员, 主要从事岩土工程与地震工程方面的研究。E-mail: yuxial@163.com

地震动衰减规律与地震活动性、地质构造、断层破裂机制和近地表速度结构等场地条件密切相关<sup>[1-3]</sup>,因此不同地区的地震动衰减特征存在显著差异。在地震动台网分布密集的国家 and 地区,地震动衰减关系通常是基于该地区的强震记录回归分析得到,受制于强震动记录数量限制,我国在很长一段时间主要采用烈度转换法来建立本地区的地震动衰减关系<sup>[4]</sup>。近几年以来,我国强震动观测网络获得的大量高质量强震动记录为建立适用于国内的地震动衰减关系提供了数据基础,卢大伟、喻焜、张齐、王玉石、王中伟等<sup>[5-11]</sup>采用经验回归法对局部强震记录相对丰富地区建立了地震动衰减关系,这些衰减关系中有部分是针对单次地震或中小地震,在数据相对集中范围内估计效果较好,而在大震级和离断层较近距离范围的评估结果离散度较大;有部分只进行宽泛的场地分类(如基岩、土层等),未有效体现同类场地中局部区域场地条件的离散型特征。NGA 地震动衰减模型(next generation attenuation relationships)是由美国太平洋地震工程研究中心 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)、美国地质调查局 USGS 和南加利福尼亚地震中心 SCEC 联合开发的全球地震动衰减关系模型,这些模型对近场震级饱和、发震类型、断层出露深度、上下盘效应、场地非线性、覆盖层厚度、震级与方差的相关性等能够影响地震动衰减关系的因素有较为全面的考虑<sup>[12]</sup>。NGA 地震动衰减模型自发布以来,受到国内外学者广泛关注,在中国、日本、新西兰、澳大利亚、伊朗及其他欧洲国家得到广泛应用<sup>[13-17]</sup>。应用结果表明,在某些地区 NGA 模型预测结果好于本地模型,而在有些地区预测结果较差,但如果能用本地化数据对模型进行修正,则会大大提高 NGA 模型的适用性<sup>[18]</sup>。

青藏高原东北缘是晚新生带构造变形最强烈的地区,活动断裂分布密集、构造变形活动强烈、地震频发,频繁发生的强烈地震致使灾区人民生命和财产安全遭受严重威胁。在发生大地震后,基于地震动衰减关系可及时预测震区地震动分布并产出震动图(shakemap),能够在评估震害损失、判断重灾区等方面发挥关键作用,帮助各级部门合理配置救援力量、提升应急救援效率,在地震区划、工程场地地震安全性评价、地震动参数确定等方面也具有广泛用途。

为建立青藏高原东北缘地震动衰减模型,本文收集了近年来青藏高原东北缘及周边地区的强震记录和相关台站的场地信息,在综合研究区地震构造特征和 NGA 模型优点的基础上建立了考虑断层类型、近断层效应及场地条件等因素的区域性地震动衰减关系。运用残差分析理论用汶川 Mw7.9、芦山 Mw6.7、九寨沟 Mw6.5 和岷漳 Mw6.0 四次地震的强震记录对文中模型预测效果进行检验,最后基于强震事件的震动图快速生成系统对 2022 年门源 Mw6.6 地震进行地震影响场评估,并与现场调查烈度进行对比分析,进而全方位评估本文模型在青藏高原东北缘地区的适用性。

## 1 研究区概况及数据源

### 1.1 研究区概况

青藏高原东北缘指南以东昆仑断裂、北以祁连山-海原断裂、西以柴达木盆地、东以南北构造带为界的甘肃、青海和宁夏交界地区<sup>[19]</sup>。该地区是晚新生带构造变形最强烈的地区,活动断裂分布密集,活动断裂之间的相互作用和构造转换活动强烈,为本区域强震孕育和发生起到了重要作用,历史上曾发生多次破坏性大地震(图 1)。近年该区域又连续发生多次地震,包括 2013 年甘肃岷县-漳县 Mw6.0 地震、2017 年四川九寨沟 Mw6.5 地震、2021 年青海玛多 Mw7.3 地震以及 2022 年青海门源 Mw6.6 地震等,未来地震危险性仍较高。

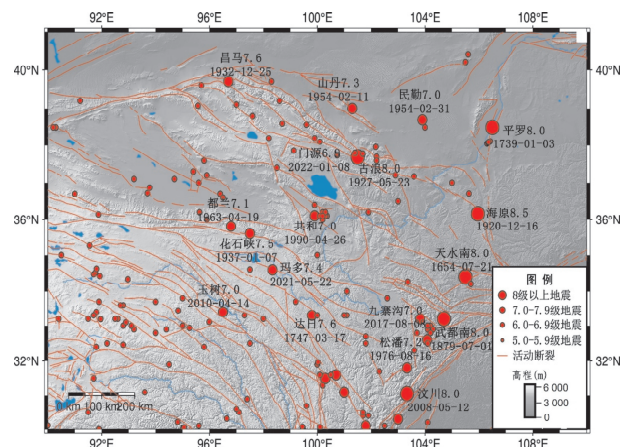


图 1 青藏高原东北缘活动断裂及历史地震分布

Fig. 1 Active faults and historical earthquake distribution in the northeastern margins of the Qinghai-Tibet Plateau

### 1.2 数据源

2008—2022 年期间,我国青藏高原东北缘及

周边地区主要地震事件的矩震级在 5.9~7.9 之间(表 1), 且震源机制主要为走滑和逆冲. 考虑到国内地震记录在震级和距离范围内存在数据空白区, 可能造成回归分析结果的不可靠, 因此必须合理引入国外数据. 前人在建立我国相关地区地震动衰减模型时都曾引入与我国有着相似构造地区的强震记录作为补充, 一系列研究证明了在

推导我国地震动衰减关系时引入国外相关地区地震记录的合理性<sup>[7, 20]</sup>. 国内强震数据由中国国家强震动台网中心提供, 震中距范围在 0-300 km, 强震记录共 404 组. 国外数据全部来自 NGA-West2 数据库, 总共选取 17 次地震的 666 组水平向地震动记录, 所选地震记录的震级-距离分布见图 2.

表 1 本文所选地震目录  
Tab. 1 Earthquake catalogue selected in this paper

序号	来源	地震事件	地震时间	震级(Mw)	发震机制	记录数
1	China	Wenchuan	2008	7.90	Reverse	105
2		Maduo	2021	7.30	Strike-slip	11
3		Lushan	2013	6.70	Reverse	62
4		Jiuzhaigou	2017	6.50	Strike-slip	35
5		Minzhang	2013	6.00	Reverse	48
6		Ludian	2014	6.00	Strike-slip	38
7		Menyuan	2016	5.90	Strike-slip	53
8		Kangding	2014	5.90	Strike-slip	52
9	NGA	Chi-Chi, Taiwan(China)	1999	7.62	Reverse	33
10		Kocaeli, Turkey	1999	7.51	Strike-slip	5
11		Landers	1992	7.28	Strike-slip	76
12		El Mayor-Cucapah	2010	7.20	Normal	50
13		Loma, Prieta	1989	6.93	Reverse	76
14		Duzce, Turkey	1999	7.14	Strike-slip	26
15		Kobe Japen	1995	6.90	Strike-slip	21
16		Northridge	1994	6.69	Strike-slip	148
17		Imperial Valley-06	1979	6.53	Strike-slip	32
18		Victoria, Mexico	1980	6.33	Strike-slip	5
19		L'Aquila, Italy	1968	6.30	Strike-slip	47
20		Christchurch	2011	6.20	Reverse	104
21		Basso, Tirreno	1978	6.00	Strike-slip	16
22		Mammoth Lakes-06	1980	5.94	Strike-slip	5
23		Northridge-04	1994	5.93	Reverse	10
24		Friuli, Italy-02	1976	5.91	Reverse	4
25		Chi-Chi, Taiwan-02(China)	1999	5.90	Reverse	8

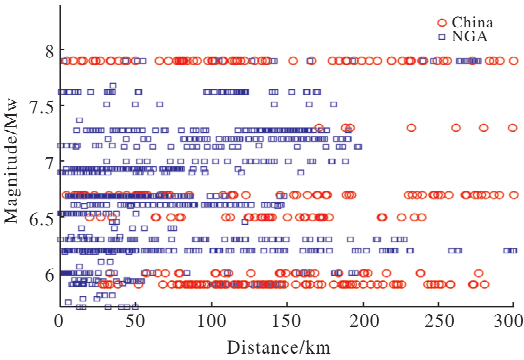


图 2 震级-距离分布图  
Fig. 2 Relationship between magnitude and distance

2 地震动衰减模型

2.1 模型结构

地震动衰减模型一般选用由震源项、几何扩散项和非弹性衰减项表示的数学模型. 随着强震动数据的积累和对地震动认识的不断加深, 衰减关系形式得到不断改进以反映更多的地震特性. 本文参考美国 NGA 项目建立的地震动衰减关系模型, 并结合本地区构造特征及场地条件特性对其进行适当修正, 最终确定的地震动衰减关系表达

式如下.

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{site} + f_{hng} + f_{flt} \quad (1)$$

式中:  $Y$  为地震动参数(PGA、PGV 及加速度反应谱);  $f_{mag}$  震级项;  $f_{dis}$  表示距离项;  $f_{site}$  表示场地反应项, 场地特征由地表 30 m 平均剪切波速  $V_{s30}$  来表征;  $f_{flt}$  表示断层类型项;  $f_{hng}$  表示上盘效应项, 上盘效应函数使用了 NGA-West2 项目中 CB14 模型的函数形式, 但使用国内数据重新拟合了函数系数.

(1) 震级项  $f_{mag}$

$$f_{mag} = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5 - M)^2 \quad (2)$$

(2) 距离项  $f_{dis}$

$$f_{dis} = (C_4 + C_5 M) \ln(\sqrt{(R_{RUP}^2 + C_6^2)}) \quad (3)$$

(3) 场地反应项  $f_{site}$

$$f_{site} = \ln F_{lin} + \ln F_{nl} \quad (4)$$

$$\ln F_{lin} = C_7 \ln\left(\frac{V_{s30}}{760}\right) \quad (5)$$

$$\ln F_{nl} = C_8 (e^{(C_9(V_{s30}-360)}) \left( \ln\left(\frac{PGA_r + C_{10}}{C_{10}}\right) \right) \quad (6)$$

(4) 断层类型项  $f_{flt}$

$$f_{flt} = f_{flt,F} f_{flt,M} \quad (7)$$

$$f_{flt,F} = RS f_1 + S f_2 \quad (8)$$

$$f_{hng,M} = \begin{cases} 0, & M_w \leq 6.5 \\ 1, & M_w > 6.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $RS$  和  $S$  为哑变量, 分别表示逆断层( $RS=1, S=0$ )和其它类型断层( $RS=0, S=1$ );  $f_1$  和  $f_2$  为回归系数.

## 2.2 模型结果与对比分析

本文运用随机效应回归算法<sup>[21]</sup>计算模型系数, 随机效应回归方法最大优点是根据产生的原因将残差分为了两部分, 可以消除同一地震的各记录之间的相关性, 避免记录数量相对较多的地震对衰减起控制作用. 模型系数回归结果如表 2 所示.

将本文地震动衰减模型与 NGA-West2 项目中 CB14 模型<sup>[22]</sup>和 BSSA14<sup>[23]</sup>模型进行对比, 结果如图 3 所示. 从图中可以看出, 本文模型在  $T=0.05 \sim 1$  s 周期段显著高于 NGA 模型, 在  $T < 0.05$  s 和  $T > 1$  s 周期段与 NGA 模型较为一致; 随着震级减小本文模型和 NGA 模型的预测偏差逐渐减小, 当震级到 6 时, 本文模型预测反应谱与 NGA 模型接近.

表 2 地震动模型系数

Tab. 2 Coefficient of ground motion model

周期/s	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
PGA	8.898 7	-0.889 6	-0.211 2	-3.089 9	0.267 3	10.370 6	-0.568 0	-0.172 0	-0.006 7	0.1
PGV	16.142 4	-1.351 6	-0.507 8	-2.155 3	0.181 7	5.500 0	-0.086 6	0.053 7	-0.006 5	0.1
0.010	7.876 8	-0.759 5	-0.187 5	-2.923 5	0.245 9	10.044 8	-0.577 7	-0.183 5	-0.006 5	0.1
0.020	6.641 7	-0.585 0	-0.155 3	-2.851 9	0.233 9	9.022 2	-0.585 7	-0.216 7	-0.005 7	0.1
0.030	5.613 9	-0.421 2	-0.116 5	-2.863 3	0.230 4	8.053 4	-0.574 7	-0.270 7	-0.004 4	0.1
0.050	4.392 7	-0.212 0	-0.027 5	-3.116 3	0.256 6	8.533 5	-0.551 2	-0.268 5	-0.004 0	0.1
0.075	2.180 7	0.142 6	0.152 5	-3.564 7	0.308 3	12.380 9	-0.499 3	-0.116 6	-0.007 4	0.1
0.10	3.197 4	0.057 2	0.140 6	-3.686 7	0.324 3	15.717 3	-0.412 7	-0.056 0	-0.009 7	0.1
0.15	7.728 4	-0.510 0	-0.017 0	-3.826 0	0.347 6	15.412 6	-0.459 2	-0.052 6	-0.010 2	0.1
0.20	11.778 9	-1.046 4	-0.186 9	-3.754 0	0.344 9	16.290 3	-0.482 0	-0.033 1	-0.012 2	0.1
0.25	14.216 8	-1.357 6	-0.322 0	-3.443 6	0.303 3	15.777 8	-0.435 8	-0.026 3	-0.011 9	0.1
0.30	16.376 2	-1.680 1	-0.412 9	-3.470 5	0.316 9	15.130 8	-0.454 5	-0.017 2	-0.012 7	0.1
0.40	18.009 5	-1.930 2	-0.531 7	-3.286 0	0.299 3	12.744 4	-0.531 4	-0.019 8	-0.013 6	0.1
0.50	17.449 5	-1.913 5	-0.562 0	-3.033 2	0.274 9	10.382 7	-0.524 1	-0.015 1	-0.010 8	0.1
0.75	18.529 9	-2.148 7	-0.680 6	-2.741 4	0.250 8	7.211 7	-0.529 5	0.000 0	-0.062 1	0.1
1.0	18.178 8	-2.165 6	-0.691 0	-2.676 3	0.248 7	6.589 3	-0.554 5	0.000 0	-0.044 7	0.1
1.5	17.245 9	-2.237 6	-0.685 1	-2.623 1	0.270 6	6.213 4	-0.397 4	0.787 4	-0.003 3	0.1
2.0	16.266 9	-2.178 8	-0.705 9	-2.409 7	0.245 1	5.919 9	-0.510 6	1.540 5	-0.002 2	0.1
3.0	13.465 5	-1.815 6	-0.709 7	-2.085 0	0.188 6	4.758 4	-0.613 5	0.316 4	-0.011 5	0.1
4.0	8.735 1	-1.251 0	-0.562 0	-2.092 3	0.190 0	6.132 5	-0.557 0	0.801 7	-0.009 4	0.1
5.0	0.027 5	-0.151 9	-0.339 3	-1.619 5	0.125 1	5.485 4	-0.572 8	0.804 2	-0.011 8	0.1
7.5	-7.194 4	0.703 6	-0.199 1	-1.158 5	0.068 1	4.551 8	-0.443 2	1.121 8	-0.014 1	0.1
10.0	-6.991 6	0.574 1	-0.260 3	-1.118 1	0.070 8	3.040 0	-0.464 7	0.892 6	-0.016 7	0.1

续表 2

周期/s	$C_{11}$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$f_1$	$f_2$
PGA	0.167 2	1.474 0	-0.715 0	1.0	-0.859 7	-10.256 3	-0.383 4	1.373 7	-0.374 2	0
PGV	0.101 3	1.616 0	-0.733 0	1.0	2.428 5	-1.619 0	0.282 7	0.070 9	-0.344 8	0
0.010	0.247 5	1.471 0	-0.714 0	1.0	2.042 6	-1.072 9	0.491 4	0.250 9	-0.355 4	0
0.020	0.251 4	1.467 0	-0.711 0	1.0	2.094 6	-1.084 5	0.037 1	0.606 5	-0.343 9	0
0.030	0.260 3	1.467 0	-0.713 0	1.0	1.993 6	-1.046 1	0.285 9	0.617 9	-0.335 6	0
0.050	0.246 9	1.449 0	-0.701 0	1.0	1.828 1	-0.994 2	0.184 6	0.841 9	-0.321 8	0
0.075	0.229 7	1.435 0	-0.695 0	1.0	-1.583 4	-10.602 7	0.294 8	0.678 5	-0.269 8	0
0.10	0.644 5	1.449 0	-0.708 0	1.0	3.271 0	9.104 3	1.051 0	0.101 0	-0.300 7	0
0.15	0.085 9	1.461 0	-0.715 0	1.0	5.448 1	8.464 6	0.272 5	0.913 2	-0.375 5	0
0.20	0.092 4	1.484 0	-0.721 0	1.0	2.299 1	-1.106 7	0.082 1	1.275 2	-0.417 4	0
0.25	0.199 3	1.581 0	-0.787 0	1.0	3.081 5	1.273 9	0.352 0	1.327 5	-0.516 9	0
0.30	0.192 7	1.586 0	-0.795 0	1.0	2.096 0	-0.979 4	0.204 1	0.759 9	-0.554 8	0
0.40	0.011 6	1.544 0	-0.770 0	1.0	4.058 6	8.801 6	-0.023 2	0.148 9	-0.594 4	0
0.50	0.041 9	1.554 0	-0.770 0	1.0	5.413 9	7.850 2	-0.482 9	1.207 7	-0.624 3	0
0.75	0.465 2	1.626 0	-0.780 0	1.0	-3.354 1	-9.829 6	-0.876 4	0.539 6	-0.753 0	0
1.0	-0.214 7	1.616 0	-0.733 0	1.0	-0.156 8	-10.755 9	0.619 3	0.513 4	-0.720 9	0
1.5	-0.200 3	1.616 0	-0.733 0	1.0	3.182 6	-1.873 6	1.147 5	0.480 9	-0.708 2	0
2.0	-0.306 0	1.616 0	-0.733 0	1.0	4.117 5	-2.189 1	0.506 5	0.432 1	-0.668 5	0
3.0	-0.641 4	1.616 0	-0.733 0	1.0	3.852 6	-2.099 7	0.002 9	0.295 5	-0.376 5	0
4.0	0.243 2	1.616 0	-0.733 0	1.0	-1.303 3	-10.686 6	0.788 6	-0.337 2	-0.142 6	0
5.0	0.117 0	1.616 0	-0.733 0	1.0	2.161 9	-1.529 0	0.596 0	-0.839 0	0	0
7.5	0.117 0	1.616 0	-0.733 0	1.0	-1.161 9	-10.702 4	0.596 0	-0.350 2	0	0
10.0	0.1170	1.616 0	-0.733 0	1.0	2.517 7	-1.649 1	0.596 0	-0.893 7	0	0

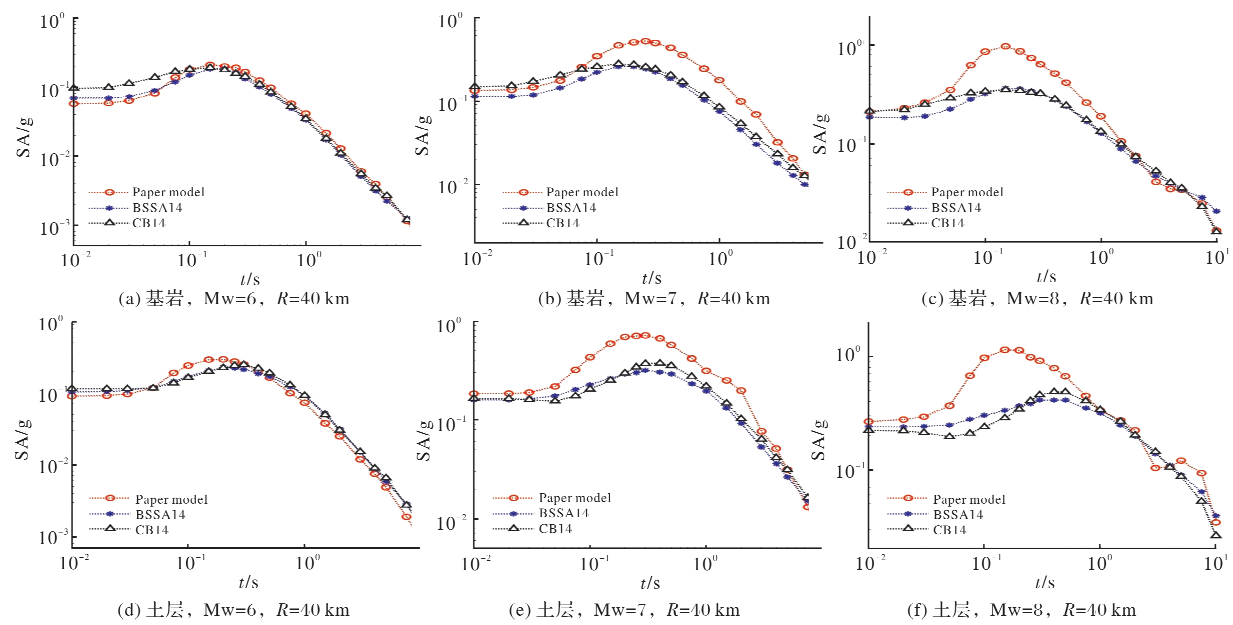


图 3 不同震级、场地条件下模型对比图

Fig. 3 Comparison of models at different magnitudes and site

为了进一步验证本文模型的合理性,选取汶川 Mw7.9、芦山 Mw6.7、九寨沟 Mw6.5、岷漳 Mw6.0 四个地震的强震动数据(123 组断层距 150 km 以内强震记录)对本文模型进行验证,并与两种 NGA 模型预测结果进行对比。我们定义了一个能够反应多个衰减模型预测结果相对优劣的“地震动衰减模型与强震记录的匹配级数  $R_i$ ”,以此来评估地震动衰减模型预测结果与台站记录的吻合度,

方法如下。

$$R_i = 1 + \sum_j^N D_{ij} \quad (10)$$

$$D_{ij} = \begin{cases} 1.0, & \text{模型 } i \text{ 偏离度} < \text{模型 } j \text{ 偏离度} \\ 0.5, & \text{模型 } i \text{ 偏离度} = \text{模型 } j \text{ 偏离度} \\ 0.0, & \text{模型 } i \text{ 偏离度} > \text{模型 } j \text{ 偏离度} \end{cases} \quad (11)$$

模型  $i$  偏离度 = 模型预测残差的绝对值 (12)

式中,  $D_{ij}$  是表示模型  $i$  与模型  $j$  评估结果相对优劣的指示变量, 对于某个强震动台站, 模型  $i$  预测结果与台站记录值的吻合度比模型  $j$  高 (即模型  $i$  偏离度  $<$  模型  $j$  偏离度) 时  $D_{ij}$  为 1, 反之则为 0, 二者相等时为 0.5, 理论上二者相等的概率极低。  $R_i$  表

示模型  $i$  依次与其他模型经过对比后得到的累计值, 值越高, 表示模型评估结果与台站记录越接近。

图 4 为三种模型与国内强震动记录的匹配度级数  $R_i$  随距离的分布。从图中可以看出, 当周期  $T$  小于 3 s 时, 本文模型在断层距大于 100 km 时预测效果要好于两种 NGA 模型, 在断层距小于 100 km 时预测效果不如 BSSA14 模型, 但好于 CB14 模型; 当周期  $T$  大于 3 s 时, 本文模型预测效果整体好于两种 NGA 模型。整体来看, 本文模型反应谱预测值与青藏高原东北缘地区强震记录的吻合度要好于 NGA 模型。

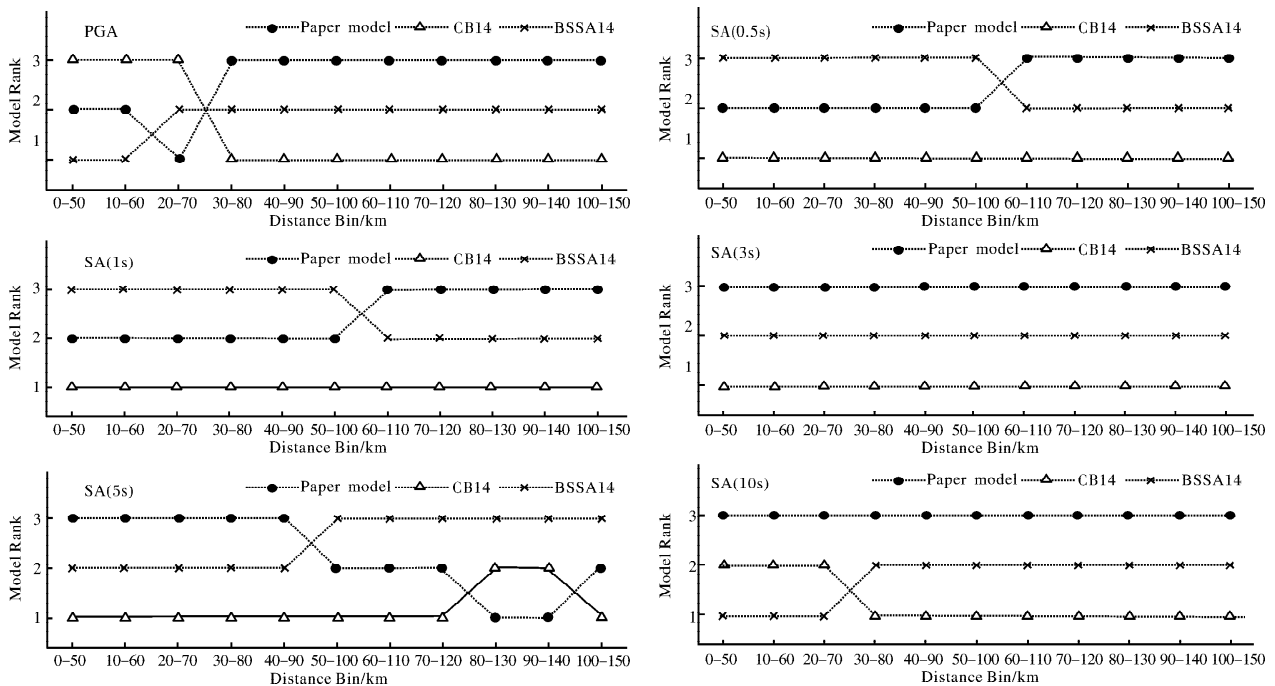


图 4 模型匹配级数  $R_i$  随距离分布

Fig. 4 Model ranks  $R_i$  versus distance bins

### 3 地震动衰减模型在地震影响场快速评估中的应用

我国青藏高原东北缘地区台网分布相对稀疏, 无法直接依据地震动参数与烈度的关系得到仪器烈度分布图, 需要根据地震动衰减模型给出考虑场地效应的地震动分布图, 再结合地震动参数与烈度的转换关系得到理论烈度图。本研究开发了一套“强震事件的地震动影响场生成系统”, 在算法和模型参数设置方面做了一些改进, 旨在提高强震 shakemap 和地震影响场的预测精度和效率。系统默认同时产出四种模型的预测结果, 除本文模型外, 还有 CB14 模型、BSSA14 模型以及我国第五代区划图模型 CH15。

2022 年 1 月 8 日 01 时 45 分, 青海省海北州门源县 (37.77°N, 101.26°E) 发生 Mw6.6 级地震, 震源深度 10 km, 极震区烈度为 IX 度。地震发生后, 基于震中位置、震级和初步估计的断层走向 (本次地震和 2016 年门源 6.4 地震震中位置接近, 因此在快速评估中使用了相同的断层信息), 基于强震事件的震动图快速生成系统产出震区理论烈度图, 其结果绘于图 5。

从图 5 可以看出, 所有模型的烈度结果都整体上体现了实际烈度的空间分布特征。本文模型和 CH15 模型对 VI、VII、VIII 度区的估计结果与现场调查烈度结果较为一致, 而 CB14 模型和 BSSA14 模型的烈度估计结果相对偏小, 但整体相差不大。然而, 不同地震动衰减模型对 IX 度区

的估计在空间分布上存在较大差异,主要体现在CH15模型估计的Ⅸ度区在沿断层方向上比现场调查烈度稍短,其余三种模型估计的Ⅸ度区面积在断层东西两侧均呈现东侧小、西侧大的特性,这与现场调查烈度的分布特征一致。地震烈度出

现的东西两侧不对称分布结果主要由场地条件的差异造成,进一步说明场地条件的差异性特征对震害分布有显著影响。因此,考虑了断层距和场地条件的本文模型对极震区的预测结果与实际更接近。

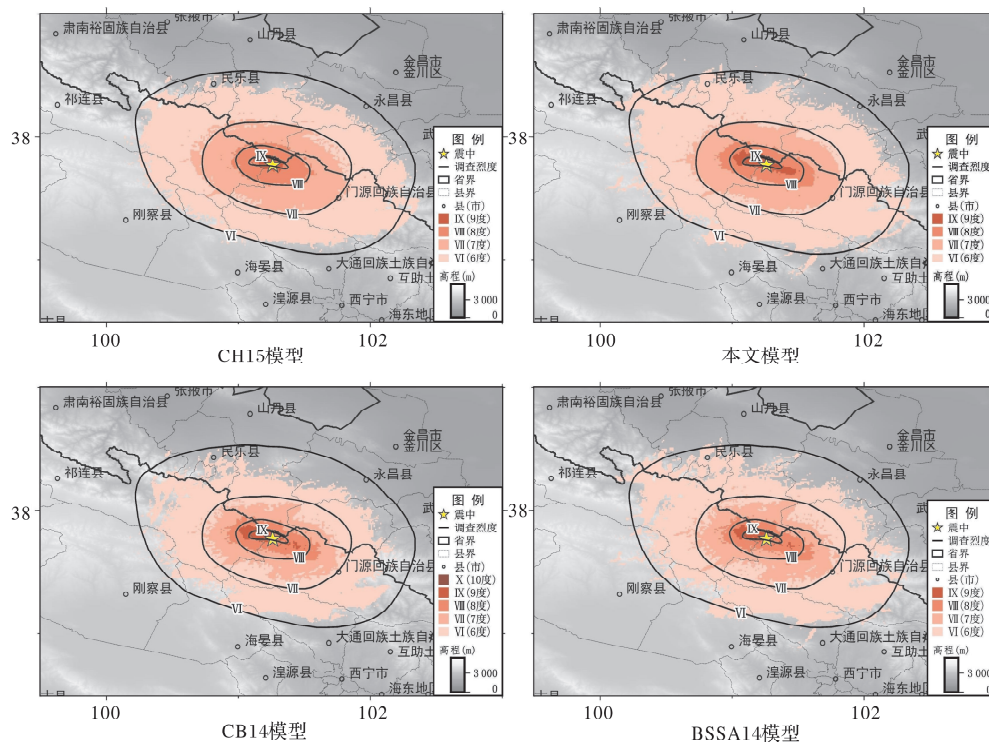


图5 门源 Mw6.6 地震理论烈度图

Fig. 5 Theoretical intensity map of the Menyuan Mw6.6 earthquake

## 4 结论

本文基于青藏高原东北缘及周边地区强震记录通过回归分析得到一套考虑近断层效应、断层类型、场地条件和上盘效应的地震动衰减模型,并根据已有地震数据对模型在本地区的适用性进行分析,得到以下结论:

(1)本文地震动衰减模型在  $T=0.05\sim 1$  s 周期段显著高于 NGA 模型,在  $T<0.05$  s 和  $T>1$  s 周期段与 NGA 模型较为一致;随着震级减小与 NGA 模型的预测偏差逐渐减小,当震级到 6 时,本文模型与 NGA 模型比较接近;本文模型与 NGA 模型的预测偏差与场地条件和距离关系不大,而主要与震级相关,预测偏差随震级增大而明显增大,这可能是因为二者选择数据集不同,NGA 模型仅收录了我国汶川 Mw7.9 地震的强震记录。

(2)运用文中所选四次地震的强震动记录对模型适用性进行验证,残差分析结果表明本文模型

整体上与青藏高原东北缘地区地震记录更接近。

(2)运用强震事件的震动图快速生成系统产出的门源 Mw6.6 地震的理论烈度图与现场调查结果比较接近,在台网稀疏地区,运用地震动衰减模型可有效提高强震 shakemap 和地震影响场的预测精度和效率。

## 参考文献 References

- [1] 俞言祥,汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系 [J]. 震害防御技术, 2006, 1(3): 207-217.  
YU Yanxiang, WANG Suyun. Attenuation relationship for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in eastern and western China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3): 207-217.
- [2] 卢育霞,石玉成,万秀红,等. 近地表速度结构对场地强震动特征的影响 [J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 813-819.

- LU Yuxia, SHI Yucheng, WANG Xiuhong, et al. Influence of near-surface velocity structure on site characteristics of strong ground motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 813-819.
- [3] 姜治军, 胡进军, 谢礼立, 等. 中国西部地区场地放大模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(12): 1071-1078.
- JIANG Zhijun, HU Jinjun, XIE Lili, et al. Model of site amplification factor for western China[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2013, 46(12): 1071-1078.
- [4] 胡聿贤, 张敏政. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法[J]. 地震工程与工程振动, 1984, (01): 1-11.
- HU Yuxian, ZHANG Minzheng. A method of predicting ground motion parameters for regions with poor ground motion data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984(1): 1-11.
- [5] 卢大伟, 李小军, 崔建文. 汶川中强余震地震动峰值衰减关系[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18: 138-151. 2010, 18: 138-151.
- LU Dawei, LI Xiaojun, CUI Jianwen. Ground motion attenuation of the Wenchuan aftershocks[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18: 138-151.
- [6] 喻烟. 汶川地震区地震动估计经验模型[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
- YU Tian. Empirical estimate model for ground motion of wenchuan earthquake zone[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration
- [7] 张齐, 胡进军, 谢礼立, 等. 中国西部地区新一代地震动衰减模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(12): 1079-1088.
- ZHANG Qi, HU Jinjun, XIE Lili, et al. New generation ground motion attenuation model for Western China[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2013, 46(12): 1079-1088.
- [8] 王中伟, 胡进军, 张辉, 等. 川滇地区地震动预测模型及其对2021年漾濞6.4级地震的适用性[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(1): 200-209.
- WANG Zhongwei, HU Jinjun, ZHANG Hui, et al. Ground motion prediction model in Sichuan-Yunnan region and its applicability to the 2021 Ms6.4 Yangbi earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 42(1): 200-209.
- [9] 王玉石, 李小军, 周正华. 川滇地区水平向强地震动衰减关系研究[J]. 地震学报, 2013, 35(2): 238-249.
- WANG Yushi, LI Xiaojun, ZHOU Zhenghua. Research on attenuation relationship for horizontal strong ground motions in Sichuan-Yunnan region. Acta Seismologica Sinica, 35(2): 238-249.
- [10] 胡进军, 孙健. 基于信息论方法分析我国典型地震动衰减关系[J]. 世界地震工程, 2018, 34(2): 65-70.
- HU Jinjun, SUN Jian. Analysis of the typical ground-motion attenuation relationships in China based on information-theory[J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(2): 65-70.
- [11] 韩建平, 徐金玉. 汶川地震强余震统计特性及地震动衰减关系[J]. 世界地震工程, 2019, 35(1): 9-16.
- HAN Jianping, XU Jinyu. Statistical characteristics of strong aftershocks of Wenchuan earthquake and ground motion attenuation relationship[J]. 2019, 35(1): 9-16.
- [12] CHEN H, GALASSO C. A comparison of NGA-West2 ground-motion models to recent Chinese data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125: 105677.
- [13] WANG D, XIE L, ABRAHAMSON N A, et al. Comparison of strong ground motion from the Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008 with the Next Generation Attenuation (NGA) Ground-Motion Models[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2381-2395.
- [14] MAK S, COTTON F, GERSTENBERGER M, et al. An evaluation of the applicability of NGA-West2 ground-motion models for Japan and New Zealand[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(2): 836-856.
- [15] PETER J STAFFORD, Fleur O STRASSER, Julian J BOMMER. An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2007, 6(2): 149-177.
- [16] 冀昆, 温瑞智, 任叶飞, 等. NGA模型在芦山地震区的适用性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2990-2999.
- JI kun, WEN Ruizhi, REN Yefei, et al. Applicability of the NGA model in Lushan earthquake region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2990-2999.

- [17] 党鹏飞,刘启方. 基于 NGA 模型的芦山余震地震动衰减关系\_党鹏飞 [J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1706-1714.
- DANG Pengfei, LIU Qifang. Ground motion attenuation relationship of Lushan aftershocks based on NGA model [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1706-1714.
- [18] MAK S, COTTON F, GERSTENBERGER M, et al. An evaluation of the applicability of NGA-West2 groundmotion models for Japan and New Zealand [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(2).
- [19] 袁道阳, 张培震, 刘小龙, 等. 青海鄂拉山断裂带晚第四纪构造活动及其所反映的青藏高原东北缘的变形机制 [J]. 地学前沿, 2004, 11(4): 393-402.
- YUANG Daoyang, ZHANG Peizheng, LIU Xiaolong, et al. The tectonic activity and deformation features during the late Quaternary of Elashan Mountain active fault zone in Qinghai Province and its implication for the deformation of the northeastern margins of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2004, 11(4): 393-402.
- [20] 俞言祥, 汪素云. 青藏高原东北地区水平向基岩加速度峰值与反应谱衰减关系 [J]. 地震学报, 2004, 26(6): 591-600.
- YU Yanxiang, WANG Suyun. Attenuation relationship for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in northeastern Tibetan plateau region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(6): 591-600.
- [21] ABRAHAMSON N A, YOUNGS R R. A stable algorithm for regression analyses using the random effect model [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(3): 505-510.
- [22] KENNETH W CAMPBELL, Yousef BOZORGNIA. NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped elastic pseudo-acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec [M]. Berkeley, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [23] David M BOORE, Jonathan P STEWART, Emel SEYHAN, et al. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes [J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1057-1085.

(编辑 桂智刚)