

姜伟,陶夏新,赵凯.基于 NGA 数据的震源模型全局参数定标律的统计[J].地震工程学报,2017,39(2):0221-0226.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0221
JIANG Wei, TAO Xia-xin, ZHAO Kai. Scaling Laws of the Global Parameters of Source Models from NGA Data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 0221-0226. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0221

基于 NGA 数据的震源模型全局参数定标律的统计^①

姜 伟^{1,2}, 陶夏新^{1,3}, 赵 凯^{1,4}

(1.中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150080; 2.黑龙江八一农垦大学工程学院,黑龙江 大庆 163319;
3.哈尔滨工业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090; 4.中国建筑设计院有限公司,北京 100044)

摘要:依据美国 NGA 两个版本的数据库,修正、补充了文献[3]的震源全局参数基础数据,形成分别包含 189 个地震的数据 1 和 204 个地震的数据 2,分别在三种破裂类型、五(三)个震级段,统计得出矩震级与破裂面的面积、宽度、长度以及破裂面上平均错动量四个震源全局参数之间的经验关系和半经验关系。与文献[3]的结果比较表明,数据量增加后系数值的差异不明显,最大相对差分别为 12.4% 和 8.4%,且统计结果离散减小,稳定性增加。采用本文结果建立震源模型,对一个 7.0 级走滑地震合成的近场 4 个地表点的高频地震动,得到的平均反应谱幅值、峰值总体上略大于用文献[3]参数合成的,平均值的相对差在 4.6%~23.0% 间,随距离增加差别有所减小。

关键词: NGA; 震源模型; 地震动; 全局参数; 定标律

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2017)02-0221-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.02.0221

Scaling Laws of the Global Parameters of Source Models from NGA Data

JIANG Wei^{1,2}, TAO Xia-xin^{1,3}, ZHAO Kai^{1,4}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China;
2. Engineering College of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China;
4. Architectural Design Institute Co., LTD, Beijing 100044, China)

Abstract: To develop scaling laws for source models, two data sets of global parameters are compiled from the data of reference [3] with modified and supplied by the NGA data bases. These data include parameters of 189 and 204 earthquakes, among which 127 from reference [3], 31 modified from NGA, 31 and 46 newly collected respectively from the two versions of NGA data bases. Empirical and semi-empirical relations between moment magnitude and four source global parameters; the area, width, and length of the rupture plane; and the average slip on the plane are presented for three rupture types and five (three) magnitude intervals. The result coefficient values of the relations do not differ significantly from those in reference [3], and the largest relative differences are 12.4% and 8.4%. The deviations of data to the relations appear to decrease, i.e., the larger the data set, the more stable the statistical relation. To demonstrate the effect of the

① 收稿日期:2016-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51178151, 51178435, 51478443);国家国际科技合作项目(2011DFA21460)

作者简介:姜 伟(1980—),男,讲师,博士研究生,主要从事地震动衰减研究。E-mail:jiangwei429@126.com。

通信作者:陶夏新(1949—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事地震工程学研究。E-mail:taoxiaxin@aliyun.com。

improvement in this paper, high-frequency ground motions at four near fault points are synthesized by means of source models established for a $M7.0$ strike slip shock with the scaling laws. The results show higher mean spectral amplitudes and peak values than those determined by reference [3]. The relative differences of the means are about $4.6\% \sim 23.0\%$ and decrease with increasing distance.

Key words: NGA; source model; ground motion; global source parameter; scaling law

0 引言

合成大地震近场的强地震动,需要采用基于有限断层的震源模型,其全局参数多依据探测的成果结合定标律估计。文献[1-2]根据世界范围 244 个地震的远场记录反演的震源参数建立了震级和断层破裂长度、宽度、面积以及表面位移的经验关系。文献[3-5]从中选出 149 个地震的数据,补充了 1993—2001 年间发生的 9 个地震的数据,以这 158 个地震的震源参数为基础,区分不同地震破裂类型、多个震级段建立了矩震级与震源破裂面积、长度、宽度以及破裂面上错动量的经验、半经验关系。这些全球性统计关系的可靠性,亟待更多新的数据补充、验证。此后,美国太平洋地震工程研究中心发布了目前最完善的地震动数据库 NGA-West1^[6-7] 和 NGA-West2^[8-9],其中包括许多震源参数的数据,为定标律的统计检验、补充提供了基础。本文根据新的数据,拟合经验、半经验关系,考察基础数据修改、增加引起的参数变化以及对估计地震动的影响。在一定意义上,亦可视为某种程度的验证。

1 NGA 数据库中震源参数的数据

为了研究震源机制对地震动的影响,NGA 数据库中部分地震列出了震源参数。经仔细核对,NGA-West1 中有 62 个地震的破裂面面积、长度、宽度以及平均错动量等参数的数据,NGA-West2 中增加到 77 个地震^[6-9]。NGA 数据对文献[3]采用的 158 次地震中的 31 个地震修订了震源参数^[10]。本文采用这 31 个地震的新参数,进一步补充 NGA-West1 和 NGA-West2 中新增的 31 个、46 个地震的参数,分别建立了两个数据集,数据 1 含 189 个地震、数据 2 含 204 个地震^[10]。为了比较,数据 1、数据 2 和文献[3]在三种破裂类型、各三个震级间隔中的地震数目,列于表 1。表中,两个“/”分隔的三个数值,从左至右分别对应数据 1、数据 2 和文献[3]的相应地震数目。从中可见,与文献[3]的数据相比,本文数据总量增加 $20\% \sim 29\%$,包括修改参数的,变化量可达 $39\% \sim 49\%$,其中倾滑地震数增加

52% ,7 级以上走滑地震数增幅最大,达 64% 。

破裂面积、宽度、长度以及平均错动量数据随矩震级的分布如图 1 所示。图中“+”表示本文数据 1 的数据,“×”表示数据 2 的数据,“o”表示文献[3]的数据。从图中可见,三个数据集大部分是重叠的,本文新修改、补充的数据亦大多在原来数据分布的范围内。面积、宽度、长度增加的高震级的数据分布都在原来数据分布范围的延伸方向上;两个 7 级以上地震的宽度数据的修改,使数据的分布有所改善。

表 1 本文采用的数据中三个破裂类型、三个震级范围的地震数目

Table 1 The data numbers in the three faulting types and three magnitude intervals			
破裂类型	地震总数目	震级范围	分段地震数目
全部地震	189/204/158	$4.57 < M_w \leq 6.5$	124/128/107
		$6.5 < M_w \leq 7.0$	35/42/28
		$7.0 < M_w \leq 7.9$	30/34/23
走滑地震	86/93/85	$4.57 < M_w \leq 6.5$	54/56/61
		$6.5 < M_w \leq 7.0$	16/19/13
		$7.0 < M_w \leq 7.9$	16/18/11
倾滑地震	103/111/73	$4.7 < M_w \leq 6.5$	69/72/46
		$6.5 < M_w \leq 7.0$	20/23/15
		$7.0 < M_w \leq 7.6$	14/16/12

2 全局震源参数的定标律

地震定标律解决相似性问题,是震源参数之间的统计关系的理论基础,建立在几何相似性、应力环境相似性和地震动力学相似性基础之上。构造应力条件不同的地区,关系的参数值应该有所不同。目前震源数据极其有限,只能选全球浅源构造地震的数据在一起统计。震源破裂面的面积、长度、宽度及平均错动等参数与矩震级间的经验和半经验统计关系,可采用统一的简化公式^[1-2]

$$\lg Y = \alpha M_w - C_y$$

(1)

式中: Y 表示震源参数,例如破裂面积 S 、长度 L 、宽度 W 或平均错动量; M_w 为矩震级; α 和 C_y 为经验系数。

根据地震学相似性原理,限制式(1)中的斜率 α ,对于破裂面积取 $\alpha=1.0$,对于破裂长度、宽度及平均错动量取 $\alpha=0.5$,可建立震源参数与矩震级半径

验关系式。分别表达为:

$$\lg S = M_w - C_s$$

(2)

$$\lg W = 0.5 M_w - C_w$$

(3)

$$\lg L = 0.5 M_w - C_L$$

(4)

$$\lg \bar{D} = 0.5 M_w - C_D$$

(5)

为了便于比较,本文采用和文献[3]相同的统计方法,分别以数据 1 和数据 2 为基础,区分三种地震破裂类型、不同震级范围,拟合上述破裂面面积、长

度、宽度及平均错动与矩震级之间的经验关系式和半经验关系式。类型“全部”是指全部数据在一起统计,“倾滑”是指统计中仅采用倾滑破裂的地震数据,包括正滑和逆滑,“走滑”指仅采用走滑破裂的地震数据。

2.1 经验关系

依数据 1 和数据 2 获得经验关系式(1)中系数 α 、 C_y 和标准差的数值及文献[3]对应结果列于表 2。

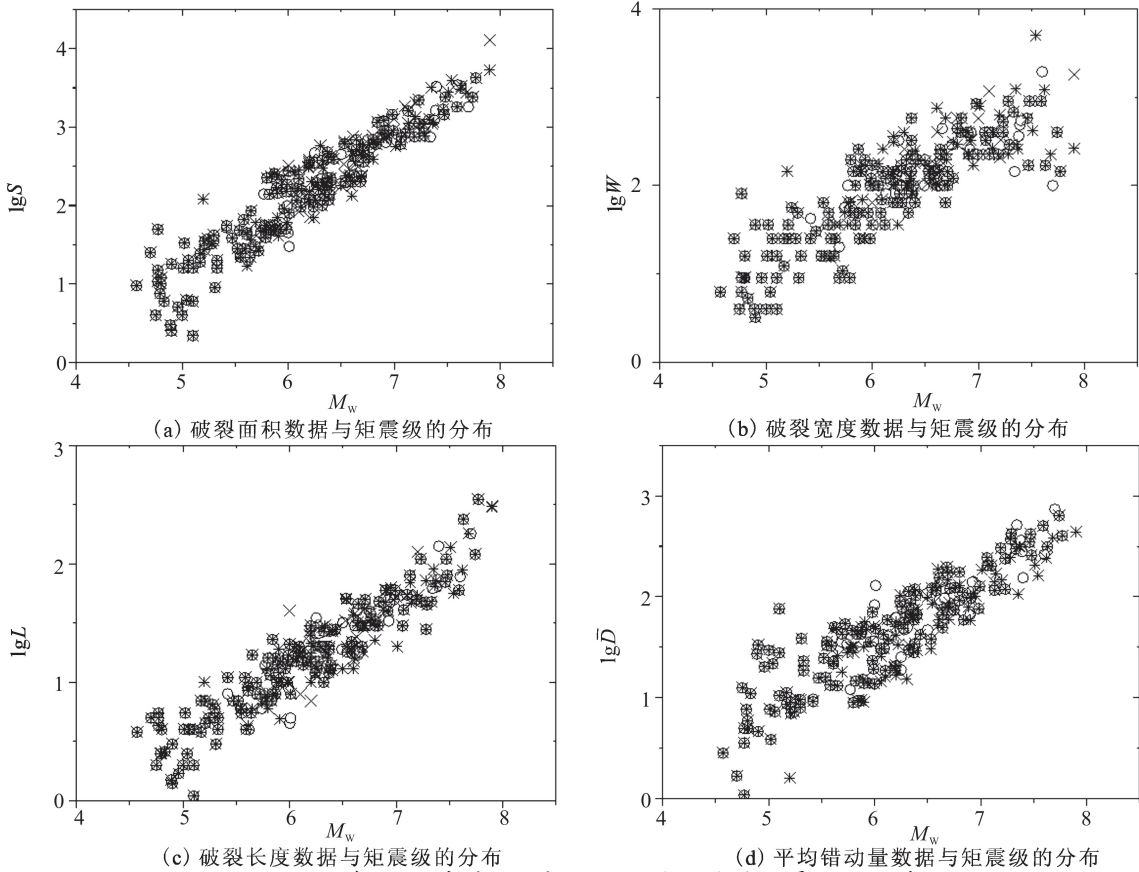


图 1 破裂面积、宽度、长度及平均错动量随矩震级的分布

Fig.1 The distribution of fracture surface area,width,length and the displacement average with the magnitude of the earthquake

表 2 拟合的经验关系的系数值

Table 2 Coefficient values of the empirical relations

方程	类型	地震数目	系数值		标准差	矩震级范围
			α	C_y		
$\lg S = aM_w + C_s$	全部	189/204/158	0.87/0.88/0.88	-3.19/-3.25/-3.29	0.26/0.27/0.26	4.57~7.90
	倾滑	103/111/73	0.87/0.88/0.90	-3.23/-3.27/-3.41	0.31/0.29/0.29	4.70~7.59
	走滑	86/93/85	0.88/0.88/0.87	-3.28/-3.23/-3.22	0.21/0.22/0.22	4.57~7.90
$\lg L = aM_w + C_L$	全部	189/204/158	0.56/0.57/0.57	-2.25/-2.28/-2.29	0.18/0.18/0.18	4.57~7.90
	倾滑	103/111/73	0.49/0.51/0.53	-1.84/-1.96/-2.10	0.19/0.18/0.18	4.70~7.59
	走滑	86/93/85	0.61/0.60/0.60	-2.54/-2.53/-2.48	0.15/0.16/0.16	4.57~7.90
$\lg W = aM_w + C_w$	全部	189/204/158	0.31/0.31/0.32	-0.94/-0.96/-1.00	0.17/0.17/0.16	4.57~7.90
	倾滑	103/111/73	0.37/0.38/0.37	-1.30/-1.31/-1.32	0.17/0.17/0.16	4.70~7.59
	走滑	86/93/85	0.26/0.27/0.27	-0.68/-0.69/-0.75	0.14/0.14/0.14	4.57~7.90
$\lg \bar{D} = aM_w + C_D$	全部	189/190/158	0.61/0.61/0.62	-2.10/-2.11/-2.15	0.27/0.27/0.26	4.57~7.90
	倾滑	103/103/73	0.59/0.59/0.61	-1.94/-1.96/-2.05	0.31/0.30/0.29	4.70~7.59
	走滑	86/87/85	0.62/0.62/0.63	-2.16/-2.17/-2.21	0.22/0.22/0.22	4.57~7.90

表中,两个“/”分隔的三个数值,从左至右分别对应本文数据 1、数据 2 和文献[3]的结果。为了与文献[3]的结果比较,统计中没有区分不同的震级段。

从表中可见,地震数据量的增加,矩震级的范围也有所扩大,得到的 4 个震源全局参数与矩震级之间的经验关系的系数并没有明显的变化,最大相对差是倾滑破裂的长度,可以达到 12.4%,说明震源参数的经验性统计还是比较稳定的。

2.2 半经验关系

根据数据 1 和数据 2 拟合得到三种地震破裂类

型、五(三)个震级范围内的震源破裂面积、宽度及长度与矩震级之间半经验关系系数的估值,列于表 3,平均错动的结果列于表 4。需要说明的是表 3、表 4 中第 3 列的全部和走滑破裂类型起始震级范围为 4.57,而倾滑类型为 4.7。为了便于比较,表中也一并列出文献[3]的结果,两个“/”分隔的三个数值的含义,与表 2 中的相同。统计中,震级间隔的划分亦与文献[3]完全一致。

从表 3 和表 4 中可见,数据修改、增加后,五个全局震源参数半经验关系的系数值与文献[3]的结果亦

表 3 拟合的三个半经验关系的系数值

Table 3 Coefficient values of three semi-empirical relations

破裂类型	震级范围	$4.57/4.7 < M_w \leq 6.0$	$6.0 < M_w \leq 6.5$	$6.5 < M_w \leq 7.0$	$7.0 < M_w \leq 7.5$	$7.5 < M_w \leq 7.9$
全部	S	3.94/3.93/4.00	3.94/3.93/4.00	4.05/4.05/4.05	4.18/4.17/4.20	4.18/4.17/4.20
	L	1.91/1.91/1.90	1.91/1.91/1.90	1.86/1.85/1.85	1.68/1.67/1.55	1.68/1.67/1.55
	W	2.03/2.02/2.00	2.03/2.02/2.00	2.20/2.20/2.20	2.30/2.31/2.32	1.30/1.34/1.37
倾滑	S	3.95/3.94/4.00	3.95/3.94/4.00	4.05/4.07/4.05	4.20/4.20/4.25	4.20/4.20/4.25
	L	1.94/1.92/1.95	1.91/1.89/1.90	1.91/1.89/1.90	1.96/1.96/1.90	1.96/1.96/1.90
	W	2.03/2.02/2.10	2.03/2.02/2.10	2.15/2.17/2.20	2.24/2.23/2.30	2.24/2.23/2.30
走滑	S	3.94/3.92/4.00	3.94/3.92/4.00	4.05/4.02/4.05	4.17/4.17/4.20	4.17/4.17/4.20
	L	1.90/1.90/1.90	1.90/1.90/1.90	1.79/1.78/1.90	1.54/1.52/1.55	1.54/1.52/1.55
	W	1.99/1.98/2.00	2.12/2.11/2.13	2.26/2.24/2.25	1.23/1.22/1.20	1.23/1.22/1.20

表 4 平均错动与矩震级的半经验关系的系数值

Table 4 Coefficient values of the semi-empirical relations between average slip with magnitude

破裂类型	$\lg \bar{D} = 0.5 M_w - C_D$		
	$4.57/4.7 < M_w \leq 6.5$	$6.5 < M_w \leq 7.0$	$7.0 < M_w \leq 7.9$
全部	1.51/1.50/1.45	1.41/1.37/1.35	1.34/1.25/1.15
倾滑	1.50/1.48/1.45	1.40/1.35/1.35	1.26/1.22/1.15
走滑	1.51/1.52/1.45	1.41/1.43/1.35	1.30/1.27/1.25

没有明显改变,最大相对差是全部数据一起统计的破裂长度在震级范围 $7.5 < M_w \leq 7.9$ 中的,达到 8.4%。另外,根据数据 1 和数据 2 统计拟合的定标律 1 和定标律 2 的标准差分别为 0.05~0.34、0.03~0.22,与文献[3]的标准差 0.06~0.5 相比有所减小,表明统计稳定性增加。

3 用于建立混合震源模型一例

为了进一步考察本文定标律对估计地震动影响,建立西北某活断层上 7.0 级走滑地震的混合震源模型。三组定标律公式得到的震源全局参数值列于表 5,其中两个“/”分隔的三个数值,从左至右分别对应本文定标律 1、定标律 2 及文献[3]定标律估计的期望值,3 个值一组分别称为本文参数 1、本文参数 2 和文献[3]参数。为了避免逻辑上的不协调, L 的期望值

是直接根据 S/W 得到的,没有再按定标律计算,因而没有标准差的估计。

表 5 三组定标律得到的 7.0 级走滑地震的震源全局参数的期望值与标准差

Table 5 Mean and standard deviation values of three global parameters for a strike slip earthquake with M7.0

全局参数	期望值	标准差
S/km ²	680/680/640	0.19/0.22/0.22
W/km	17/17/16	0.11/0.14/0.14
$L = (S/W)/\text{km}$	40/40/40	-/-/-
$\bar{D}/\text{cm}$	158/170/178	0.19/0.22/0.22

从表 5 中可见,本文得到的破裂面积和宽度值均大于文献[3]的结果,平均错动量则小于后者。本文定标律 2 的标准差与文献[3]的相同,定标律 1 的则小于 13.6%~21.4%。

局部震源参数主要表达地震破裂面上滑动分布特征。文献[3]确定性地预测破裂面上凹凸体分布,描述长波长滑动特征;用 k 平方模型描述短波长滑动的随机特征,建立有限断层混合滑动模型。为更清楚地考察上述全局参数的变化对地震动的影响,本文与文献[3]采用相同的估计局部震源参数的期望值(表 6)。

考虑到估计破裂面积、破裂宽度及平均错动量的不确定性,数据对统计关系的离散取截断的正态分布描述估值的随机性^[11],得到各 30 个震源全局参数的数值。限于篇幅,详细的 30 个震源的凹凸体参数值和拐角波数值、生成的 30 个混合震源模型的错动分布及合成的 30 条加速度时程并求得相应的 30 条反应谱,不一一列出。

表 6 凹凸体参数和 K 平方模型参数的定标律和期望值

Table 6 Scaling law and mean values of parameters of asperity and K square model

参数	定标律	期望值
凹凸体面积 S_{am}/km^2	$\lg S_{am}=\lg S-0.65$	141.3
凹凸体宽度 W_{am}/km	$W_{am}=S_{am}/L_{am}$	4.3
凹凸体长度 L_{am}/km	$\lg L_{am}=0.5M_w-2.51$	9.8
凹凸体中心沿走向的坐标 X_{am}/km	$\lg x_{am}=\lg L-0.72$	4.9
凹凸体沿中心沿下倾方向的坐标 Y_{am}/km	$\lg y_{am}=\lg W-0.30$	3.0
凹凸体的平均错动量 $\bar{D}_{dm}/\text{cm}$	$\lg \bar{D}_{am}=\lg \bar{D}+0.39$	437
拐角波数 K_{cx}	$\lg K_{cx}=1.80-0.50 M_w$	0.063 1
拐角波数 K_{cy}	$\lg K_{cy}=2.26-0.50 M_w$	0.182 0

根据区域地震构造资料^①,埋深约为 4 km 的 G 界面设定为破裂面上缘^[13]。选定近场地表 4 个点,合成高频地震动^[14-16],其中点 1、点 2 和点 3 为近断裂点,基本沿走向排列,点 3 距主要凹凸体最近,点 4 距破裂面稍远些。合成中采用的品质因子、持时与距离的关系、几何衰减项、kappa 参数、震源深度处地壳剪切波速和介质密度、应力降等区域参数值列于表 7。

表 7 采用的区域参数及关系

Table 7 Regional parameters and relations

参数	参数值
区域品质因子 $Q(f)$	$52f^{1.09}$
持时与距离的关系	$T_0+0.1R$ $1/R(R\leq 70\text{ km})$
几何衰减项	$1/70(70\text{ km}<R<130\text{ km})$ $1/[70*(130/R)^{0.5}](R\geq 130\text{ km})$
kappa 参数	0.04
震源深度处地壳剪切波速/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	3.522
震源深度处地壳介质密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.84
区域应力降/MPa	2.6

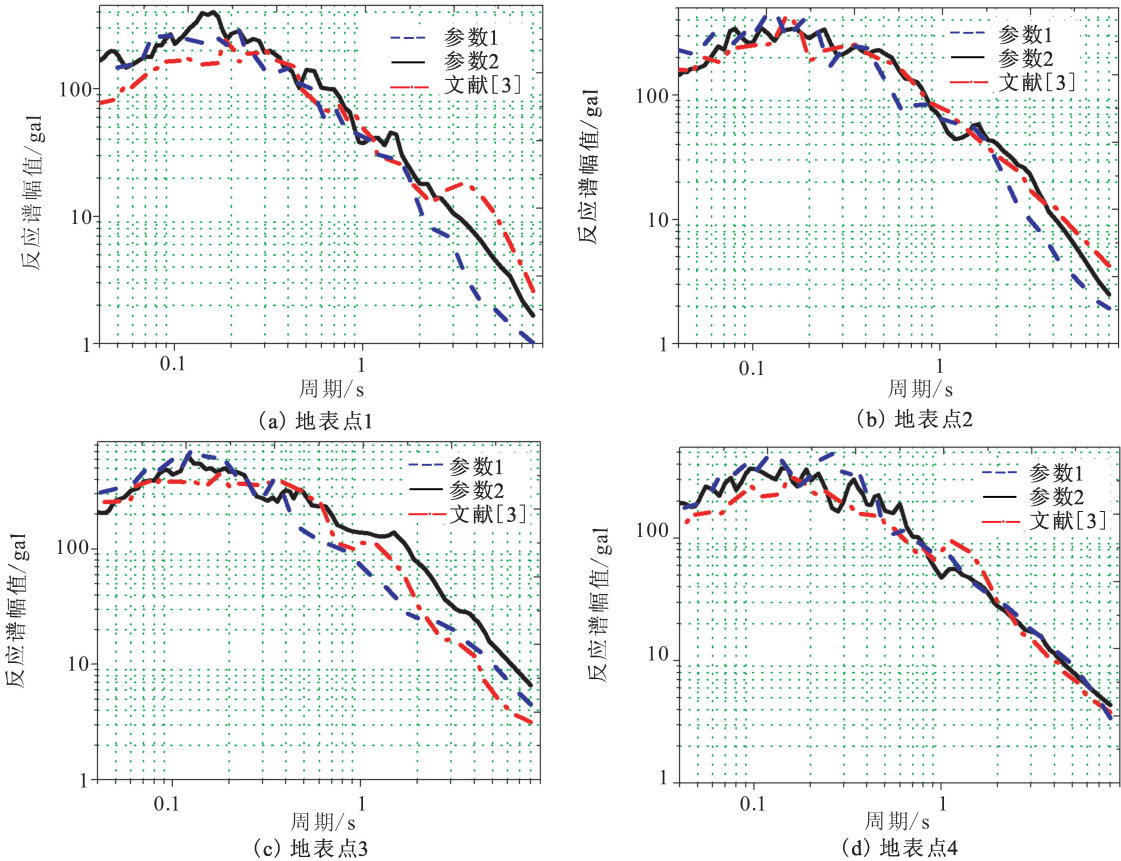


图 2 四个地表点三条地震动平均反应谱的比较

Fig.2 Comparison of the three mean response spectra of synthesized motions at 4 ground points

① 甘肃省地震局. 兰州市活断层试验探测、区域探查与断层活动性初步鉴定阶段工作报告,2007.

合成各地表点地震动反应谱的平均谱,简称平均谱,如图2所示。为了比较,图中对每一个点都表示了三条曲线,虚线为采用本文参数 1 得到的地震动平均谱,实线为采用本文参数 2 得到的,点划线为采用文献[3]参数得到的。

从图 2 中可见,在小于 1.0 s 的短周期段,4 个地表点的本文两组参数合成地震动的平均谱幅值总体上略大于文献[3]的结果,但差别不很明显,相对高低变化趋势不明确。

为了进一步比较对地震动加速度峰值的影响,三组参数合成的 4 个地表点地震动各 30 个峰值及其平均值列于表 8。

表 8 4 个地表点地震动峰值(gal)的比较
Table 8 Comparison of motion PGAs (gal) at the 4 ground points

震源	地表点 1	地表点 2	地表点 3	地表点 4
1	111/138/94	192/188/174	254/254/171	196/145/153
2	130/152/125	163/154/163	362/369/260	150/185/142
3	84/158/83	140/165/139	199/163/204	133/119/130
4	99/126/85	168/143/125	268/250/232	178/163/213
5	160/101/138	162/176/164	271/218/212	183/176/173
6	62/129/59	81/198/61	123/406/128	62/222/82
7	142/147/144	199/205/186	172/262/161	166/194/162
8	82/61/66	150/82/110	127/119/99	125/94/110
9	116/123/105	258/205/247	316/245/294	169/175/163
10	108/110/103	260/145/256	239/207/223	163/203/160
11	118/122/120	176/129/171	424/286/272	180/234/170
12	90/91/88	173/169/171	231/167/225	162/168/152
13	113/100/103	192/127/145	327/186/285	142/133/142
14	102/108/88	166/209/140	220/258/195	170/161/153
15	77/134/76	124/152/119	163/212/159	143/141/137
16	142/128/78	145/156/118	282/214/257	147/149/163
17	111/76/140	112/122/115	177/256/137	131/160/113
18	107/97/97	114/177/93	196/275/175	181/165/157
19	149/104/146	161/140/158	340/249/187	171/217/163
20	145/110/140	164/167/156	167/212/163	139/162/134
21	118/85/135	227/143/169	191/233/116	193/158/148
22	70/114/49	114/225/99	246/164/191	143/247/130
23	92/105/132	169/172/192	193/297/202	144/215/203
24	107/145/92	173/200/175	248/152/142	152/174/142
25	128/114/116	191/198/184	238/242/221	210/142/204
26	122/140/124	198/229/133	232/255/203	163/153/135
27	104/110/100	133/180/96	169/191/110	215/209/182
28	111/104/79	161/127/188	193/217/177	131/151/108
29	134/143/113	246/122/217	245/197/190	163/136/156
30	107/121/102	138/233/128	248/246/152	138/157/146
平均值	111/117/104	168/168/153	235/233/191	158/170/151

从表 8 中可见,本文参数得到的地震动峰值均大于文献[3]的结果,峰值平均值的相对差在 4.6%~23.0%间,其中点 3 的相对差最大,点 4 的最小,显示随距离增加差别有所减小。

4 结论

本文依据 NGA 数据库,修正、补充了文献[3]的震源参数基础数据,形成分别包含 189 个地震和 204 个地震的数据集,分别对三种破裂类型、三(五)个震级段给出了 4 个震源全局参数的经验关系和半经验关系。与文献[3]的结果比较表明,数据量增加后系数值的差异不明显,最大相对差分别为倾滑破裂长度的 12.4%和全部数据一起统计的 7.5 级以上地震破裂长度的 8.4%,同时统计结果离散减小,稳定性增加。采用本文结果对一个 7.0 级走滑地震合成的近场 4 个地表点的高频地震动建立混合震源模型,得到的平均反应谱幅值总体上略大于用文献[3]参数合成的,地震动峰值亦大于采用文献[3]参数的结果,平均值的相对差在 4.6%~23.0%间,且随距离增加差别有所减小。

从另一个角度来说,本文结果与文献[3]比较,也是对震源全局参数估计稳定性的一个检验,说明现在对全局参数的估计比较稳定。

限于篇幅,有关局部震源参数定标律的研究成果拟另文发表。

参考文献(References)

[1] Wells, Coppersmith. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement[J]. Bull Seism Soc Am, 1994, 84(4): 974-1002.

[2] WANG Hai-yun, TAO Xia-xin. Relationships between Moment Magnitude and Fault Parameters: Theoretical and Semi-empirical Relations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 2(2): 201-211.

[3] 王海云. 近场强地震动预测的有限断层震源模型[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2004.

WANG Hai-yun. Finite Fault Source Model for Predicting Near Field Strong Ground Motion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2004. (in Chinese)

[4] WANG Hai-yun, TAO Xia-xin, LI Jie. Global Source Parameters of Finite Fault Model for Strong Ground Motion Predictions[C]//Proc of 13WCEE, Vancouver, 2004: 2743.

[5] 王海云, 陶夏新. 近场强地震动预测中浅源地震的 Asperity 模型特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1533-1539.

WANG Hai-yun, TAO Xia-xin. Characterizing a Shallow Earthquake Asperity Model for Predicting Near Field Strong Ground Motion[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(11): 1533-1539. (in Chinese)

[6] Power M, Chiou B, Abrahamson N, et al. An Overview of the NGA Project[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 3-21.

- [3] 啜永清.大同—阳高地震的余震窗口特征及机理分析[J].山西地震,1999(3/4):25-30.
CHUO Yong-qing. Analysis on Mechanism and Characteristic of Aftershock Window of the Datong—Yanggao Earthquake[J]. Earthquake Research in Shanxi, 1999(3/4):25-30. (in Chinese)
- [4] 啜永清,刘巍,彭美焯.大同—阳高地震的余震与华北北部较大地震的关系[J].地震,1999,19(4):379-386.
CHUO Yong-qing, LIU Wei, PENG Mei-xuan. Relation between Aftershocks of Datong—Yanggao Earthquake and Greater Earthquakes in Northern North China[J]. Earthquake, 1999, 19(4):379-386. (in Chinese)
- [5] 刘希强,孙庆文,李红,等.1999 年辽宁岫岩 5.4 级地震前后 P 波衰减频散特征[J].地震学报,2005,27(5):477-487.
LIU Xi-qiang, SUN Qing-wen, LI Hong, et al. Variation of Q Value before and after the 1999 Xiuyan, Liaoning Province, M 5.4 Earthquake Deduced from P wave Dispersion Analysis[J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(5):477-487. (in Chinese)
- [6] 刘希强,陈朝辉.1999 年集集强震震源区附近地震 P 波衰减频散特征研究[C]//中国地球物理学会第 22 届年会论文集. 2006,307-308.
LIU Xi-qiang, CHEN Zhao-hui. Variation of Q Value before and after the 1999 Jiji Strong Earthquake Deduced from P Wave Dispersion Analysis[C]//The Gorpus of the 22th Annual Meeting of the Geographical Society of China. 2006:307-308. (in Chinese)
- [7] 张成科,张先康,盖玉杰,等.大同—阳高震区及其邻区壳幔速度结构与深部构造[J].地震地质,1998,20(4):391-398.
ZHANG Cheng-ke, ZHANG Xian-kang, GAI Yu-jie, et al. The Crust-mantle Velocity Structure and Deep Tectonics in the Datong—Yanggao Seismic Region and Its Adjacent Area[J]. Seismology and Geology, 1998, 20(4):391-398. (in Chinese)
- [8] 张建狮,祝治平,张先康,等.山西高原北部地壳上地幔地震波速结构与深部构造[J].地震地质,1997,19(3):220-226.
ZHANG Jian-shi, ZHU Zhi-ping, ZHANG Xian-kang, et al. The Seismic Velocity Structure of Crust and Upper Mantle and Deep Structure Feature in North Shanxi Plateau[J]. Seismology and Geology, 1997, 19(3):220-226. (in Chinese)
- [9] 高常波,钟以章.1999 年辽宁海城-岫岩 5.6 级地震的地质构造背景和发震构造[J].地震地质,2000, 22(4):405-412.
GAO Chang-bo, ZHONG Yi-zhang. Geological Background and Seismogenic Fault of the Haicheng-Xiuyan M5.6 Earthquake of November 29, 1999[J]. Seismology and Geology, 2000, 22(4):405-412. (in Chinese)
- [10] Cong L, Mejia J, Mitchell B J. Attenuation Dispersion of P Waves in Near the New Madrid Seismic Zone[J]. Bull Seism Soc Amer, 2000, 90(3):679-689.
- [11] Lei J. Upper-mantle Tomography and Dynamics Beneath the North China Craton[J]. J Geophys Res, 2012, 117: B06313.
- *****
- (上接 226 页)
- [7] Chiou B, Darragh R, Gregor N. NGA Project Strong-motion Database[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1):23-44.
- [8] Ancheta T D, Darragh R, et al. PEER NGA-West2 Database, Report PEER 2013/03[EB/OL], Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 2013. http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2013/webPEER-2013-03-Ancheta.pdf
- [9] Abrahamson B Y, Ancheta T D. NGA-West2 Research Project [J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3):973-987.
- [10] 赵凯.基于 NGA 数据的混合震源模型全局参数定标律[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2014.
ZHAO Kai. Scaling Law of Global Parameters for the Hybrid Source Model from NGA Data[J]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese)
- [11] 孙晓丹,陶夏新,汤爱平.基于统计数据离散性的混合滑动模型改进[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(4):510-514.
SUN Xiao-dan, TAO Xia-xin, TANG Ai-ping. Improvement on Hybrid Slip Model Based on Dispersion of Statistical Data[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4):510-514. (in Chinese)
- [12] 刘海明,陶夏新,孙晓丹,等.马衔山北缘断裂西段 6.5 级地震对兰州市及周边地区的影响[J].西北地震学报,2008, 30(3):227-231.
LIU Hai-ming, TAO Xia-xin, SUN Xiao-dan, et al. Forecasting of the Strong Ground Motion Field in Lanzhou City and Its Vicinity Caused by an Earthquake with Magnitude 6.5 on the Western Segment of Maxianshan-beiyuan Fault [J]. North-western Seismological Journal, 2008, 30(3):227-231. (in Chinese)
- [13] Boore D. Stochastic Simulation of High Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(6):1865-1894.
- [14] Atkinson G W, Silva. Stochastic Modeling of California Mround Motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(2):255-274.
- [15] Atkinson G, D M Boore. Stochastic Point-source Modeling of Ground Motion in the Cascadia Region [J]. Seismological Research Letter, 1997, 68(1):74-85.