

徐培彬, 温瑞智. 2018. 基于我国强震动数据的地震动持时预测方程. 地震学报, 40(6): 809-819. doi: 10.11939/jass.20180008.

Xu P B, Wen R Z. 2018. The prediction equations for the significant duration of strong motion in Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*, 40(6): 809-819. doi: 10.11939/jass.20180008.

## 基于我国强震动数据的地震动 持时预测方程\*

徐培彬<sup>1, 2)</sup> 温瑞智<sup>1, 2), †</sup>

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

2) 中国哈尔滨 150080 中国地震局地震工程与工程震动重点实验室

**摘要** 基于 2007—2015 年间我国数字强震动观测台网记录到的  $M_w$ 5.0—6.6 地震事件中的强震动记录, 综合考虑震源、传播路径及场地的影响, 采用随机效应回归分析方法建立了适用于中国大陆地区的地震动显著持时预测方程, 并与其它地区的预测方程进行了对比分析. 结果显示: 显著持时随震级和距离的增大而增大, 硬土地场地的地震动持时整体上略小于软土地场, 而且本文给出的地震动显著持时随预测变量的变化趋势与其它研究地区具有一定的相似性.

**关键词** 强震动记录 地震动显著持时 预测方程 回归分析  
doi: 10.11939/jass.20180008 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## The prediction equations for the significant duration of strong motion in Chinese mainland

Xu Peibin<sup>1, 2)</sup> Wen Ruizhi<sup>1, 2), †</sup>

1) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

2) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

**Abstract:** The earthquake damages of engineering structures have been affected by the amplitude, frequency and duration of the strong motion records. However, there are relatively few published duration equations available in Chinese mainland. In this paper, we collected the strong motion records with magnitude  $M_w$ 5.0—6.6 during 2007—2015 from Chinese digital strong motion networks. Considering the effects of source, path and site, the random-effected regression technique was adopted to fit a predictive equation in respect to the significant duration. In comparing the predicted durations with other studies, it is shown that this predicted significant duration increases with the increased earthquake magnitude or the increased distance, and decreases with the increased  $v_{S30}$ . Furthermore, it has the similar characteristics with other studied regions.

\* 基金项目 国家重点研发计划项目(2017YFC1500801)、国家自然科学基金(51778589)、黑龙江省自然科学基金(E2017065)和中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2018B03)资助.

收稿日期 2018-01-10 收到初稿, 2018-08-03 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: ruizhi@iem.net.cn



**Key words:** strong motion records; significant duration; prediction equation; regression

## 引言

幅值、频谱和持时描述了地震动的基本动力特性,其中峰值和频谱特征研究较多,而关于持时的研究相对较少.地震震害调查结果(Bommer, Martínez-Pereira, 1999)表明地震动对场地和结构的影响不仅与地震动的幅值和频谱有关,还与地震动的持时密切相关.根据研究和应用目的的不同,研究人员给出了几十种地震动持时的定义,一般可归纳为4类:括号持时、一致持时、有效持时和显著持时(Bommer, Martínez-Pereira, 1999).相关研究表明:括号持时、一致持时和有效持时均随距离的增加而减小,显著持时则随距离的增加而增大;地震的上下盘效应和破裂方向性效应对4种持时均会产生不同程度的影响(王倩, 2015).近年来,基于不同数据库或地区的地震动持时预测方程陆续给出,例如: Bommer 等(2009)使用 NGA-West1 数据库得到了3种定义形式的地震动持时预测方程; Lee 和 Green (2014)给出了北美稳定大陆区的地震动持时预测方程,并对比分析了其与活跃地壳区域的差异性; Bora 等(2014)发表了基于欧洲数据库得到的地震动持时预测方程; Boore 和 Thompson (2014)给出了使用 NGA-West2 数据库得到的地震动持时预测方程,但该关系仅包含路径的影响;此后 Afshari 和 Stewart (2016)使用 NGA-West2 数据库也得到了不同定义形式的地震动持时预测方程,其特点是对震源项进行了参数化.我国的地震动持时研究也有一些成果,早在我国强震动数据观测的模拟时代,谢礼立和张晓志(1988)就已提出了地震动工程持时的概念并基于谢礼立和周雍年(1984)给出的二阶矩持时预测方程得到了工程持时的预测方程.

目前,显著持时在地震动工程中应用广泛,国内主要针对峰值加速度和反应谱值预测方程进行统计分析,尚未公布有关地震动显著持时预测方程,其主要原因是我国早期的强震动数据相对匮乏.“十五”期间,随着新一代数字强震动台网系统的建设完工,国家地震重点监视防御区内固定强地震动观测台网的密度大幅提高,近场强地震动记录的获取能力显著提高,加快了我国强地震动观测记录的积累.2007年底,数字强震动台网开始试运行,截至2018年初,10年间收集到的记录已远远超过我国前30余年的模拟记录数量,且数据质量明显提高.2007年至2015年底,我国数字强震动台网从1000余次 $M3.0-8.0$ 地震事件中获得7500余组三分量记录,其中结构台阵记录30余组(温瑞智, 2016).这些数据正逐步改善我国强震动观测资料匮乏的现状,为深入研究强震动特征提供了丰富的数据基础.本文拟参照强震动数据平面文件(FlatFile)的建设方法,对数字强震动台网收集到的记录进行数据处理,建立强震动台站的场地及强震动记录等信息文件(温瑞智等, 2017);然后选取该数据库中 $M_w5.0-6.6$ 且断层距不超过200 km的强震动数据,基于 Bommer 等(2009)提出的模型简化形式得到适用于我国的显著持时预测方程,并对其特征进行分析,以便在工程实际中得以应用.

## 1 数据集

为了得到地震动持时的预测方程,从我国数字强震动台网收集到的数据中选取1860条强震动记录用于回归分析,其中最大的地震事件为2013年4月20日的芦山 $M_w6.6$ 地震.数据集中地震事件的矩震级 $M_w$ 来自于全球矩张量(GCMT, 2018),图1给出了该数据集中矩震级 $M_w$ 与断层距 $R_{rup}$ 的分布情况;对于无震源机制解相关信息的地震事件,本文统计了中国地震台网中心(2018)发布的地震事件的 $M_s$ 与 GCMT (2018)给出的地震事件的 $M_w$ 之间的关

系,建立了适用于中国及其邻区的  $M_S$  与  $M_W$  之间的转换关系,即

$$M_W=0.107(\pm0.01)M_S^2-0.537(\pm0.121)M_S+5.090(\pm0.365).$$

(1)

另外,本文选取 NGA-West2 数据库中断层距  $R_{rup}<400\text{ km}$  的数据,回归分析得到  $R_{rup}$  与震源距  $R_{hyp}$  的经验关系如下:

$$R_{rup}=a+bR_{hyp},$$

(2)

其回归系数和相关不确定性列于表 1. 本研究所选用的数据集(图 1)中,断层破裂面参数未知的地震事件的  $R_{rup}$  均由式(2)所得.

表 1 回归系数和相关不确定性

Table 1 Regression coefficients and uncertainty

震级区间	$a$	$b$	标准差 $\sigma$	相关系数 $R^2$
$M_W5.5-6.0$	$-3.613(\pm0.272)$	$0.963(\pm0.002)$	5.835	0.994
$M_W6.0-6.5$	$-7.240(\pm0.270)$	$0.979(\pm0.002)$	5.952	0.990
$M_W6.5-7.0$	$-13.596(\pm0.301)$	$0.993(\pm0.002)$	7.313	0.993

如图 1 所示,本文所选用的数据集中共包含 587 个台站,其中 125 个台站的 30 m 等效剪切波速( $v_{S30}$ )值引自 NGA-West2 场地数据库.图 2 给出了这 125 个台站在不同  $v_{S30}$  值范围内的数量分布状况, $v_{S30}$  值介于 218—649 m/s 之间.参照史大成(2013)给出的基于中美场地分类指标对比得到的地质条件和中国场地分类指标的关系矩阵,按照我国建筑抗震规范的要求对其余 462

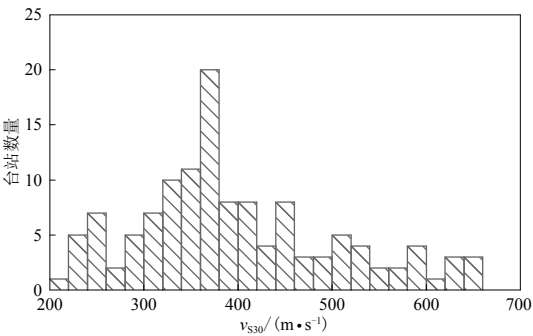


图 2 数据集(图 1)中台站  $v_{S30}$  值来自于 NGA-West2 场地数据库的台站数量柱状分布图  
Fig. 2 Histogram of the station numbers with  $v_{S30}$  value from the NGA-West2 dataset

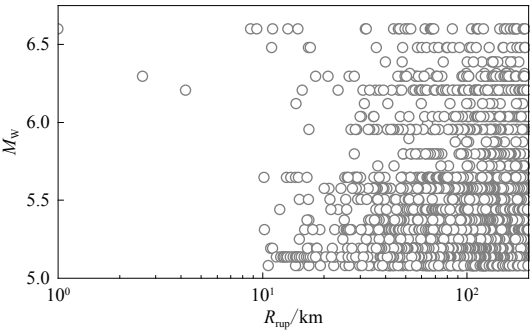


图 1 用于预测方程回归分析的数据集中震级  $M_W$  与断层距  $R_{rup}$  的分布情况  
( $R_{rup}<1\text{ km}$  时,图中显示为  $R_{rup}=1\text{ km}$ )  
Fig. 1 Magnitude  $M_W$  versus rupture distance  $R_{rup}$  in the selected dataset for the prediction equations  
( $R_{rup}<1\text{ km}$  are shown as  $R_{rup}=1\text{ km}$ )

个台站进行 I, II, III 和 IV 类场地类别的划分;将 NGA-West2 数据库中台站  $v_{S30}$  数据按照吕红山和赵凤新(2007)给出的中美两国分类对比关系进行统计.最后,对不同场地类别台站的  $v_{S30}$  值取中位值,以此作为该场地类别台站的  $v_{S30}$  推荐值,即 I 类为 600 m/s, II 类为 370 m/s, III 类为 220 m/s 和 VI 类为 130 m/s.

2 回归分析

本文采用 Bommer 等(2009)提出的持时预测模型的简化模式,该模型包含了震级、距离

和场地影响等因素，其表达式为

$$\ln D_s = a_1 + a_2 M_W + (a_3 + a_4 M_W) \ln \sqrt{R_{rup}^2 + a_5} + a_6 \ln v_{S30} + \eta_i + \xi_{ij}, \tag{3}$$

式中： $D_s$  为地震动显著持时； $M_W$  为矩震级； $R_{rup}$  为断层矩； $a_1, a_2, \cdots, a_6$  为回归系数； $\eta_i$  为第  $i$  次地震事件的事件项，即事件间残差； $\xi_{ij}$  为第  $i$  次地震事件的第  $j$  条记录的残差，即事件内残差。事件间残差是指第  $i$  次地震事件的均值与预测值均值之间的差值，事件内残差是指第  $i$  次地震事件中第  $j$  个强震动观测记录与该地震事件预测值均值之间的差值。

使用 Abrahamson 和 Youngs (1992) 提出的随机效应回归方法对式 (3) 进行回归分析。该方法基于正态分布的最大似然估计理论，考虑了单次地震事件记录到的数据之间的相关性，可将数据集中地震事件之间以及地震事件内的不确定性进行量化，从而消除由于单次地震事件中捕获到的地震动记录之间的差异(事件内的变化)所造成的数据集中各单次地震事件之间的偏差(事件间的变化)。因此，通过随机效应回归方法可估算出数据集中不同地震事件间的均值变化以及单次地震事件中观测数据的变化。假定事件间残差和事件内残差均服从正态分布，总的标准差  $\sigma_{total}$  可分为事件间项和事件内项，即

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}, \tag{4}$$

式中  $\sigma$  为事件内残差的标准差， $\tau$  为事件间残差的标准差。

鉴于地震动显著持时在工程实践中的广泛应用，本文对其进行统计分析。显著持时通常由能量累积达到两个不同阈值之间的时间段获得。在这种情况下，持时可由地震动的加速度或速度平方的积分来表示，如：

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt, \tag{5}$$

式中  $a(t)$  为加速度时程， $g$  为重力加速度， $T$  为加速度时程的持续时间， $t$  为时间(单位：s)。两种常用的显著持时的时间间隔为阿里亚斯强度  $I_a$  (Arias, 1970) 的 5%—75% 和 5%—95% (记为  $D_{5-75}$  和  $D_{5-95}$ )，即归一化后的累积平方加速度，其表达式为

$$H(t) = \frac{\int_0^T a^2(t) dt}{\int_0^{T_d} a^2(t) dt}, \tag{6}$$

式中  $T_d$  为总持时。图 3 给出了由典型记录计算持时的过程。相关研究表明： $D_{5-75}$  和  $D_{5-95}$  与建筑物的抗倒塌能力密切相关，即随着持时的增加，结构的抗倒塌能力呈下降趋势 (Hancock, Bommer, 2007; Raghunandan, Liel, 2013; Chandramohan et al, 2016)； $D_{5-95}$  与地震诱发滑坡的位移量更密切相关 (Bray, Rathje, 1998)； $D_{5-95}$  对混凝土重力坝的动力响应和累积损伤有很大影响 (Zhang et al, 2013)。

表 2 给出了  $D_{5-75}$  和  $D_{5-95}$  (两正交水平向分量地震动持时的几何平均值) 预测方程的回归

表 2  $D_{5-75}$  和  $D_{5-95}$  预测方程的回归系数、事件间残差的标准差  $\tau$ 、事件内残差的标准差  $\sigma$  及总标准差  $\sigma_{total}$   
Table 2 Regression coefficients and standard deviation for the between-events  $\tau$ , within-event  $\sigma$  and total  $\sigma_{total}$

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
$D_{5-75}$	-2.991 9	0.603 7	0.869 4	-0.048 0	2.980 4	-0.130 0	0.439 8	0.250 7	0.506 2
$D_{5-95}$	0.156 1	0.364 7	0.495 8	-0.014 5	2.5*	-0.178 4	0.299 3	0.238 6	0.382 8

\* $a_5$  为置信区间的参数， $D_{5-95}$  中参照 Bommer 等(2009)将  $a_5$  值设定为 2.5。

系数( $a_1, a_2, \cdots, a_6$ )及其相关的标准差. 依据定义可知  $D_{5-95}$  相较于  $D_{5-75}$  具有更长的持续时间, 回归结果显示  $D_{5-95}$  的系数  $a_1$  也更大,  $D_{5-95}$  数据的总残差更小, 两者的事件间残差的标准差  $\tau$  相近,  $D_{5-75}$  的事件内残差的标准差  $\sigma$  较大是两者总残差  $\sigma_{\text{total}}$  之间存在差异的原因.

图4和图5分别给出了  $D_{5-75}$  和  $D_{5-95}$  的各残差随预测方程中震级  $M_W$ 、断层距  $R_{\text{rup}}$  和  $v_{S30}$

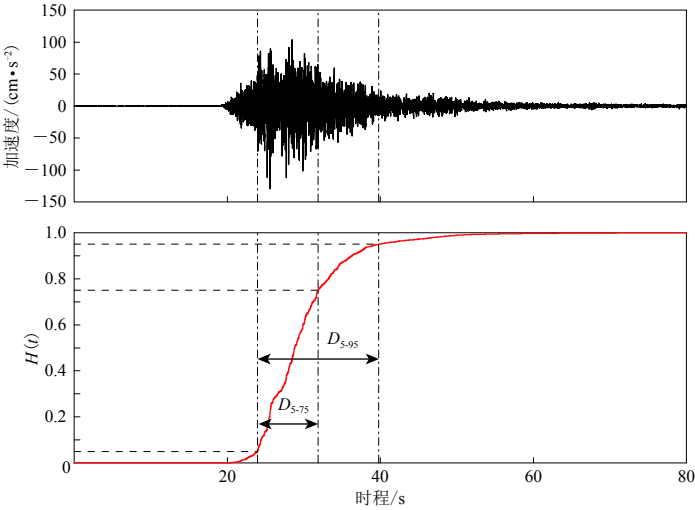


图3 显著持时5%—75% ( $D_{5-75}$ )和5%—95% ( $D_{5-95}$ )的示意图( $M_W$ 6.5九寨沟地震, 051JZB 台站, 震中距约37 km)

Fig. 3 Signification duration  $D_{5-75}$  and  $D_{5-95}$  using the Husid plot for acceleration time history (station 051JZB,  $R=37$  km) from  $M_W$ 6.5 Jiuzhaigou earthquake

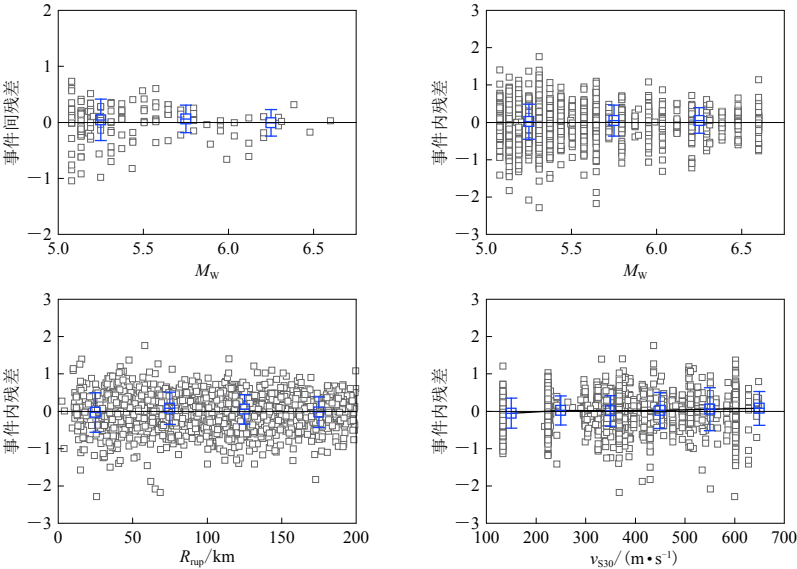


图4 5%—75%水平向地震动显著持时的事件间残差和事件内残差及均值和标准差随震级  $M_W$ 、断层距  $R_{\text{rup}}$  和  $v_{S30}$  的变化

Fig. 4 The between-events and within-event residuals for  $D_{5-75}$  along with their binned means and  $\pm 1$  standard deviations showing their trends with magnitude, rupture distance and  $v_{S30}$

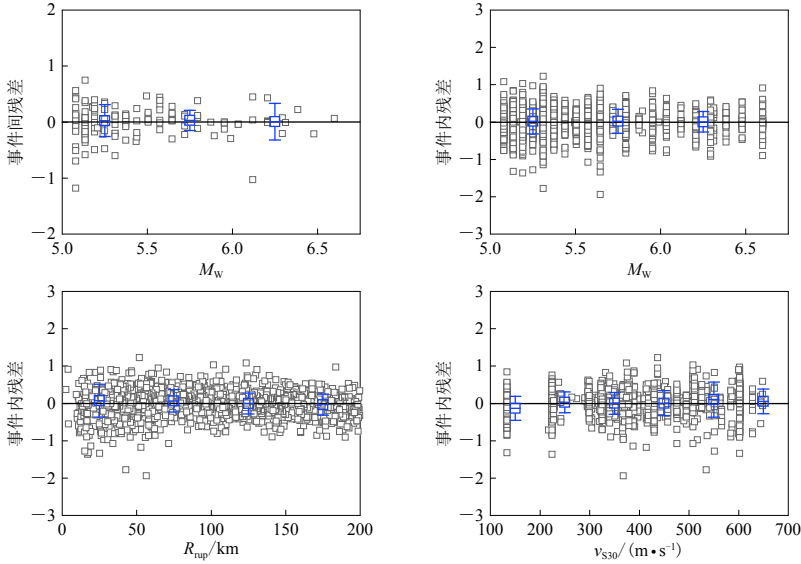


图 5 5%—95% 水平地震动显著持时的事件间残差和事件内残差及均值和标准差随震级  $M_W$ 、断层距  $R_{rup}$  和  $v_{S30}$  的变化

Fig. 5 The between-events and within-event residuals for  $D_{5-95}$  along with their binned means and  $\pm 1$  standard deviations showing their trends with magnitude, rupture distance and  $v_{S30}$

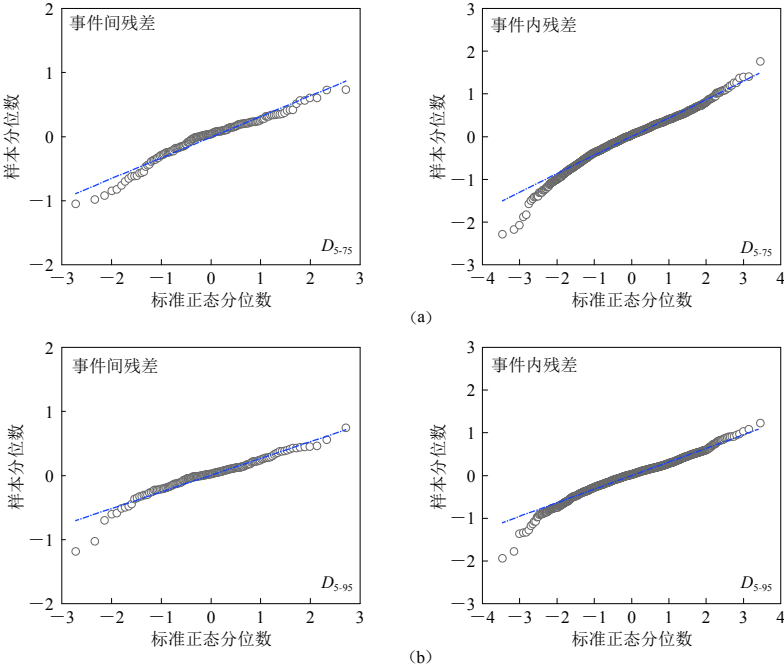


图 6 事件间残差(左)和事件内残差(右)的标准正态分位数-分位数图

(a) 5%—75% 地震动显著持时  $D_{5-75}$ ; (b) 5%—95% 地震动显著持时  $D_{5-95}$

Fig. 6 Normal quantile-quantile plots of standard normal of between-events residuals (left) and within-event residuals (right)

(a) 5%—75% significant duration  $D_{5-75}$ ; (b) 5%—95% significant duration  $D_{5-95}$



(式(3))的变化情况,可见,残差随这几个变量均无显著的变化趋势,表明预测方程中的震级项、距离项和场地项均无标定误差,证实了该方程的形式及回归分析的过程均可靠.此外,5%—95%地震动显著持时的残差离散性更小,这一现象与表2中两者的标准差之间的差异相一致.

另外,本研究使用统计分析程序R(3.4.2版本)(Bates *et al*, 2011)进行回归分析过程中的分布假设检验,即对地震动显著持时( $D_{5-75}$ 和 $D_{5-95}$ )事件间残差和事件内残差的分布假设通过正态分位数—分位数分布图进行检验,结果如图6所示.可见,样本分位数与标准正态分位数之间近似呈一直线,说明事件间残差和事件内残差均服从正态分布,这一结果与随机效应回归方法中的假设相一致,进一步证实了预测方程回归结果的可靠性.

图7分别给出了4个震级( $M_W5.0$ ,  $M_W5.5$ ,  $M_W6.0$ 和 $M_W6.5$ )条件下,  $v_{S30}=260$  m/s 和  $v_{S30}=600$  m/s 时  $D_{5-75}$  和  $D_{5-95}$  预测值的均值.结果表明显著持时随着震级和断层距的增加而增大,硬土地地的两种地震动显著持时均略小于软土地地.

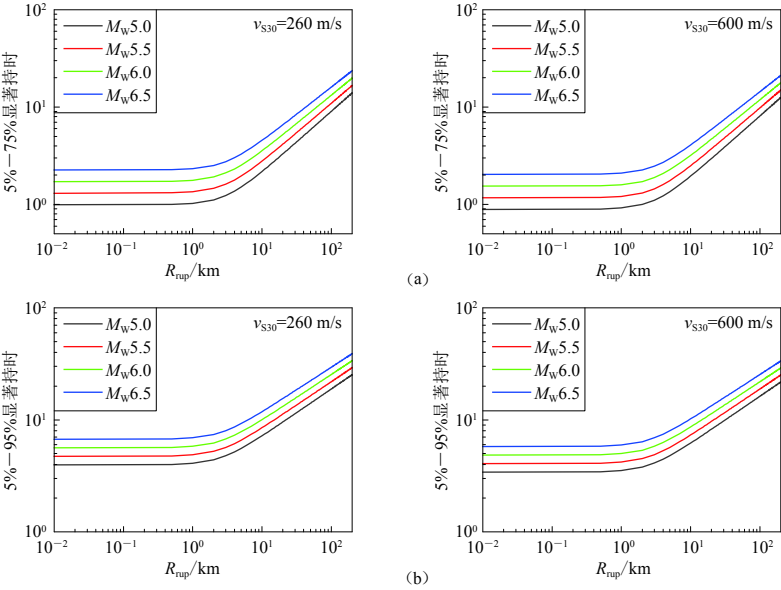


图7 不同震级和不同场地条件下的地震动显著持时的预测值均值

(a) 5%—75% 地震动显著持时  $D_{5-75}$ ; (b) 5%—95% 地震动显著持时  $D_{5-95}$

Fig. 7 The predicted median of the significant duration of the predictive equations derived in this study with the magnitude and  $v_{S30}$

(a) 5%—75% significant duration  $D_{5-75}$ ; (b) 5%—95% significant duration  $D_{5-95}$

3 与其它研究结果的对比

图8给出了本文的 $D_{5-75}$ 回归结果与Bommer等(2009)以及Lee和Green(2014)结果对比.Bommer等(2009)的模型适用于 $M_W4.8-7.9$ 且 $R_{rup}<100$  km范围内的地震动显著持时评估;Lee和Green(2014)的北美中东部模型(LG2014-CENA)和北美西部模型(LG2014-WNA)则适用于 $M_W4.5-7.6$ 且 $R_{rup}<200$  km范围内的地震动显著持时评估.由图8可知:不同场地条件下,本文结果与其它研究的回归结果随距离变化的趋势基本一致;软土地地( $v_{S30}=260$  m/s)

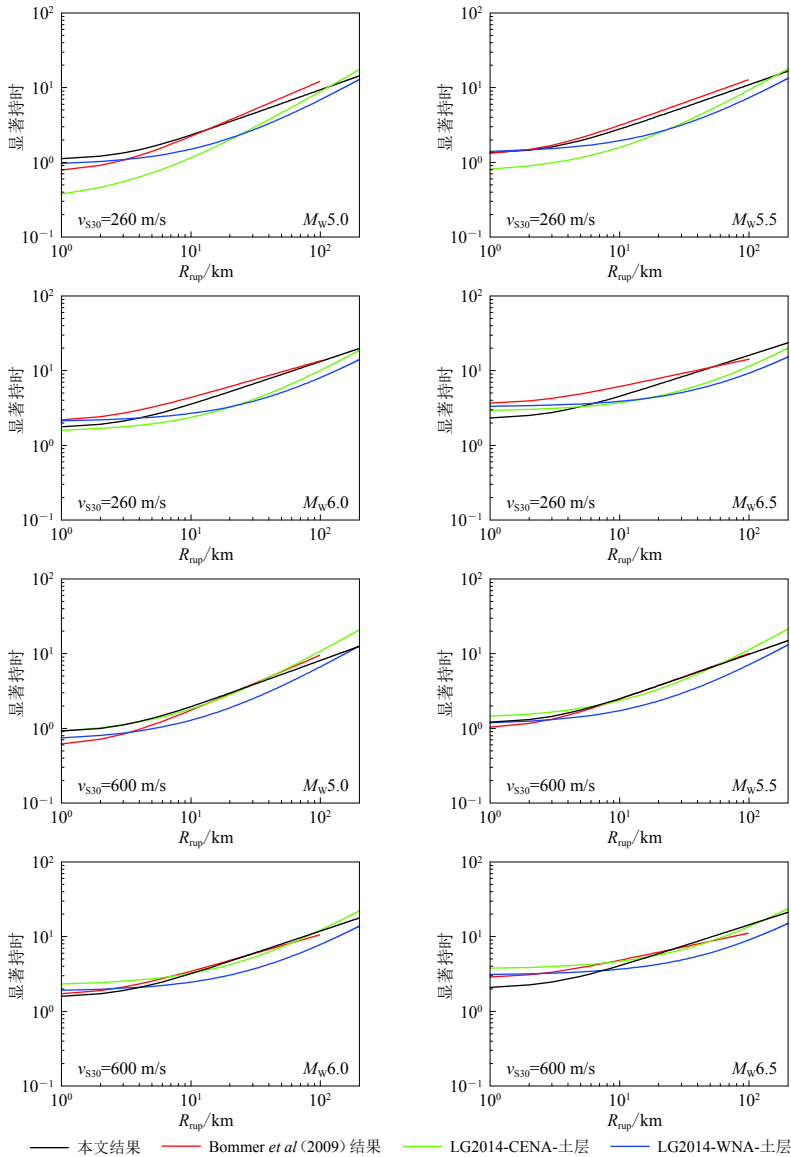


图 8 不同场地和不同震级条件下本文 5%—75% 地震动显著持时回归结果与 Bommer 等(2009)以及 Lee 和 Green (2014)结果的对比

Fig. 8 Comparisons of the  $D_{5-75}$  prediction equation in this study with Bommer *et al* (2009) model and LG2014 models for CENA and WNA from Lee and Green (2014)

条件下,当震级为  $M_w5.0$  和  $M_w5.5$  且  $R_{rup}<5$  km 时, LG2014-CENA 的预测值显著低于其它 3 个回归结果,本文结果与 Bommer 等(2009)的研究结果相近;硬土地场( $v_{S30}=600$  m/s)不同震级条件下 4 个回归结果相较于软土地场更相近.

图 9 给出了本文  $D_{5-95}$  回归结果与 Bommer 等(2009)以及 Lee 和 Green (2014)结果的对比.同  $D_{5-75}$  一样,两种场地条件下,本文的回归结果与其它研究回归结果随距离变化的趋势基本一致;软土地场( $v_{S30}=260$  m/s)条件下,本文回归结果在 5—100 km 范围内与 LG2014 的两个回归结果的差异更大;然而,硬土地场( $v_{S30}=600$  m/s)条件下,本文结果与 LG2014-WNA



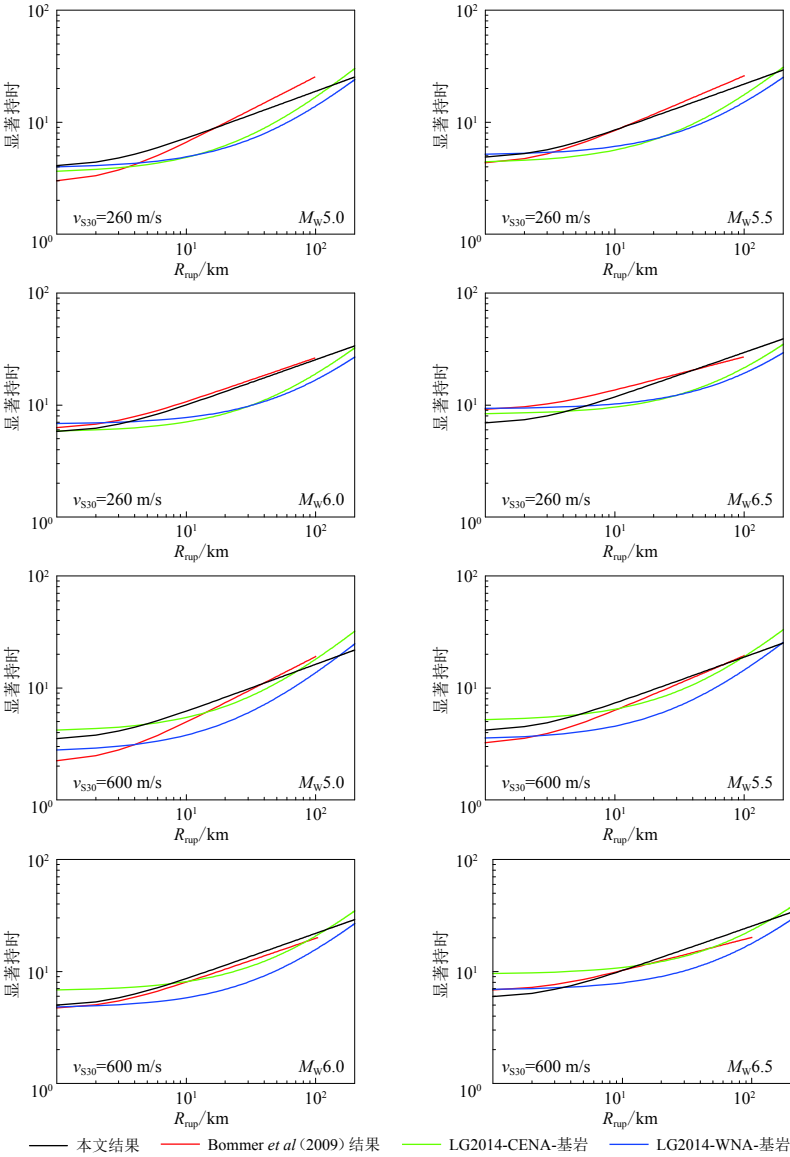


图 9 不同场地和不同震级条件下本文 5%—95% 地震动显著持时回归结果与其它回归结果的对比

Fig. 9 Comparisons of this  $D_{5-95}$  prediction equation in this study with those from Bommer *et al* (2009) model and LG2014 models for CENA and WNA from Lee and Green (2014)

的回归结果存在更大的差异. 由于持时与地震动的振幅和频率均有关系, 所以对比结果的差异性并不容易解释, 然而, 这一结果很有可能是由于本文研究区硬土地震动的在通过土层向上传播的过程中高频成分被显著滤掉所致.

4 讨论与结论

本文利用 2007—2015 年我国数字强震动台网收集的强震动记录, 综合考虑震源( $M_W$ )、距离( $R_{rup}$ )和场地效应( $v_{S30}$ )的影响因素, 分别建立了水平向 5%—75% 和 5%—95% 地震动显著持时( $D_{5-75}$  和  $D_{5-95}$ )的预测方程, 并通过残差分析和分布假设检验证实了本文所给出预测

方程的可靠性。基于回归分析该方程所用数据的分布情况,预测变量在使用中作了如下限制:①地震事件的震级范围为 $M_W$  5.0—6.6;②断层距的范围为 $R_{rup} \leq 200$  km;③场地的等效剪切波速范围为 $v_{S30} = 130$ —649 m/s。与其它地区的地震动显著持时预测方程的对比结果表明,本研究中预测值随预测变量的变化与其它地区具有一定的共性。

由于我国现有地震事件中缺乏震源相关信息,该预测方程不同于Boomer等(2009)提出的模型,预测变量中未包含地震事件破裂面顶端至地表的深度,希望在未来的工作中能将该变量考虑到预测方程中。此外,本研究给出的地震动显著持时预测方程还有待于工程实际应用的验证,同时地震动显著持时是否能在一定程度上反映区域性特征等仍需进一步研究。

中国地震局工程力学研究所强震动台网中心提供了强震动观测数据,审稿专家提出了修改意见,作者在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 吕红山, 赵凤新. 2007. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. *地震学报*, **29**(1): 67–76.
- Lü H F, Zhao F X. 2007. Site coefficients suitable to China site category[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(1): 67–76 (in Chinese).
- 史大成. 2009. 基于GIS的场地分类新方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 16.
- Shi D C. 2009. *Study on New Methods of Site Classification Based on GIS*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 16 (in Chinese).
- 王倩. 2015. 水平地震动持时的特征研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 15–16.
- Wang Q. 2015. *Study on Characteristics of the Duration of Horizontal Components of Ground Motions*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 15–16 (in Chinese).
- 温瑞智. 2016. 我国强地震动记录特征综述[J]. *地震学报*, **38**(4): 550–563.
- Wen R Z. 2016. A review on the characteristics of Chinese strong ground motion recordings[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(4): 550–563 (in Chinese).
- 温瑞智, 徐培彬, 任叶飞, 周宝峰. 2017. 强震动记录Flatfile的研究进展[J]. *地震工程与工程震动*, **37**(3): 38–47.
- Wen R Z, Xu P B, Ren Y F, Zhou B F. 2017. Development of the strong-motion Flatfile[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **37**(3): 38–47 (in Chinese).
- 谢礼立, 周雍年. 1984. 一个新的地震动持续时间定义[J]. *地震工程与工程震动*, **4**(2): 27–35.
- Xie L L, Zhou Y N. 1984. A new definition of strong ground motion duration[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **4**(2): 27–35 (in Chinese).
- 谢礼立, 张晓志. 1988. 地震动记录持时与工程持时[J]. *地震工程与工程震动*, **8**(1): 31–38.
- Xie L L, Zhang X Z. 1988. Accelerogram-based duration and engineering duration of ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **8**(1): 31–38 (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2018. 历史查询[EB/OL]. [2018-01-01]. <http://www.ceic.ac.cn/history>.
- China Earthquake Networks Center. 2018. History query[EB/OL]. [2018-01-01]. <http://www.ceic.ac.cn/history>.
- Abrahamson N A, Youngs R R. 1992. A stable algorithm for regression analyses using the random effects model[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(1): 505–510.
- Afshari K, Stewart J P. 2016. Physically parameterized prediction equations for significant duration in active crustal regions[J]. *Earthq Spectra*, **32**(4): 2057–2081.
- Arias A. 1970. A measure of earthquake intensity[G]//*Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge: MIT Press: 438–483.
- Bates D, Chambers J, Dalgaard P, Gentleman R, Hornik K, Ihaka R, Kalibera T, Lawrence M, Leisch F, Ligges L, Lumley T, Maechler M, Morgan M, Murrell P, Plummer M, Ripley B, Sarkar D, Lang D T, Tierney L, Urbanek S. 2011. Program-R

- (Version 3.4.2): A language and environment for statistical computing and graphics[CP/OL]. [2018-01-01]. <http://www.r-project.org/>.
- Bommer J J, Martinez-Pereira A. 1999. The effective duration of earthquake strong motion[J]. *J Earthq Eng*, **3**(2): 127–172.
- Bommer J J, Stafford P J, Alarcon J E. 2009. Empirical equations for the prediction of the significant, bracketed, and uniform duration of earthquake ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(6): 3217–3233.
- Boore D M, Thompson E M. 2014. Path durations for use in the stochastic-method simulation of ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(5): 2541–2522.
- Bora S S, Scherbaum F, Kuehn N, Stafford P. 2014. Fourier spectral- and duration models for the generation of response spectra adjustable to different source-, propagation-, and site conditions[J]. *Bull Earthq Eng*, **12**(1): 467–493.
- Bray J D, Rathje E M. 1998. Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, **124**(3): 242–253.
- Chandramohan R, Baker J W, Deierlein G G. 2016. Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records[J]. *Earthq Spectra*, **32**(2): 927–950.
- GCMT. 2018. Global CMT web page[EB/OL]. [2018-01-01]. <http://www.globalecmt.org/>.
- Hancock J, Bommer J J. 2007. Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **27**(4): 291–299.
- Lee J, Green R A. 2014. An empirical significant duration relationship for stable continental regions[J]. *Bull Earthq Eng*, **12**(1): 217–235.
- Raghunandan M, Liel A B. 2013. Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse[J]. *Struct Safety*, **41**: 119–133.
- Zhang S R, Wang G H, Pang B H, Du C B. 2013. The effects of strong motion duration on the dynamic response and accumulated damage of concrete gravity dams[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **45**: 112–124.