

李伟, 俞言祥, 肖亮. 2017. 阿里亚斯强度衰减关系分析. 地震学报, 39(6): 921-929. doi:10.11939/jass.2017.06.010.
Li W, Yu Y X, Xiao L. 2017. Attenuation relationship of Arias intensity. *Acta Seismologica Sinica*, 39(6): 921-929. doi:10.11939/jass.2017.06.010.

阿里亚斯强度衰减关系分析^{*}

李 伟 俞言祥^{*} 肖 亮

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 本文选取美国 NGA 强震数据库中与我国大陆构造环境相近的美国西部、中亚和我国台湾地区的自由地表强震记录, 计算其水平向阿里亚斯强度; 采用分步回归法依次求取近场饱和项、距离衰减项、震级项、断层类型项和场地类别项的系数, 得出衰减模型, 并基于回归结果与实际数据的对比, 分析了残差随距离或震级的分布。与前人工作得出的全球活动板块边界、新西兰和我国台湾地区的 3 种阿里亚斯强度衰减模型进行的比较显示, 在 M_w 6.5 或远场区域 4 种模型的结果较接近, 近场区域在高震级和低震级时有一定差异。最后, 选取 2008 年汶川 M_w 7.9 和 2013 年芦山 M_w 6.8 两次地震的强震记录对模型进行检验, 结果显示本文衰减关系均与实际数据拟合得很好, 表明本文的模型适用于我国大陆地区的相关研究。

关键词 阿里亚斯强度 衰减关系 分步回归 震级饱和 距离饱和
doi:10.11939/jass.2017.06.010 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Attenuation relationship of Arias intensity

Li Wei Yu Yanxiang^{*} Xiao Liang

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the strong ground motion data recorded in earthquakes of western America, central Asia, and Taiwan area are selected from the Next Generation Attenuation strong motion database to develop the attenuation relationship of Arias intensity. A step-regression method is applied to obtain the coefficients of near-field saturation, distance, magnitude, fault type and site classification in the attenuation model. The distribution of residuals with distance and magnitude is analyzed by comparing the regression results with the actual data. The comparison of this attenuation model with those from previous studies shows that all these models are similar for M_w 6.5 or in the far field, but have some differences in the near field when the magnitude is higher or lower. Finally, the strong motion data of Wenchuan earthquake and Lushan earthquake are taken to verify the model, and the result show the attenuation relationship fits the data very well, suggesting that the obtained model in this paper be

* 基金项目 国家自然科学基金(51608492)、地质调查项目(12120114035501)和水利部公益性行业科研专项(201501034)共同资助。

收稿日期 2017-01-12 收到初稿, 2017-06-05 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: yuyx@cea-igp.ac.cn



suitable for Chinese mainland.

Key words: Arias intensity; attenuation relationship; stepregression; magnitude saturation; distance saturation

引言

地震动参数及其衰减关系是地震工程的重点研究对象，在地震区划和工程抗震设防中占有重要地位。地震动参数包括地震动三要素即地震动幅值、频谱和持时中的一个或多个，如幅值特征参数峰值加速度、频谱特征参数反应谱、持时特征参数括弧持时等。

地震动作用下工程结构的破坏情况与其吸收的地震动总能量相关。从能量的角度出发，Arias(1970)提出一种新型的地震动参数——阿里亚斯强度，表示输入到单自由度体系单位质量的能量。阿里亚斯强度包含地震动的幅值和持时信息，其本身又是一种能量参数，与地震引起的灾害现象具有很强的相关性，被广泛应用于地震灾害危险性分析。Jibson(1993)发现与地震滑坡有关的纽马克(Newmark)累积位移与阿里亚斯强度具有很好的相关性；Cabanas 等(1997)以当地建筑物损坏情况作为地震烈度评定标准的分析结果表明，阿里亚斯强度与本地烈度拟合得很好；王秀英等(2010)的研究显示汶川地震中整个龙门山震区的阿里亚斯强度能够诱发崩塌滑坡的水平向下限为 0.4 m/s。

地震动衰减关系简化了地震的震级、断层类型、传播路径和场地条件等因素对地震动特征的影响，利用已知的地震动分布规律，将地震动参数表达为以上因素的函数。鉴于阿里亚斯强度在地震灾害危险性分析中的广泛应用，Abdrakhmatov 等(2003)，Travarasou 等(2003)，Stafford 等(2009)和 Lee 等(2012)基于不断丰富的强震动数据，建立了不同地区的阿里亚斯强度衰减关系。由于缺乏强震动数据资料，中国大陆地区尚未建立明确的阿里亚斯强度衰减关系。

不同区域地壳结构和构造特征的不同导致地震动特性及其衰减关系具有差异性，中国大陆地区与美国西部、中亚和我国台湾地区同为构造活动区，地下介质品质因子 Q 值较低，地震波非弹性衰减较高，所发地震多为浅源强震，地震动衰减关系相近，但与日本、欧洲等地区的地震勘探特性及其衰减关系差异较大(Chen, Atkinson, 2002; Douglas, 2004; Akkar, Bommer, 2007; 靳超宇, 俞言祥, 2009)。

强震目录数据库 NGA-west1(Next Generation Attenuation relationships for western US)中不包含中国大陆地震(Chiou *et al*, 2008)，NGA-west2 中增加了我国 2008 汶川 $M_w 7.9$ 地震(Ancheta *et al*, 2014)，但其强震动加速度记录获取受限。考虑到未来中国大陆地区阿里亚斯强度研究的需求以及数据格式和标度(面波震级或矩震级、震中距或断层投影距等)的差异性，本文拟选取 NGA-west1 数据库中与我国大陆构造环境相近的美国西部、中亚和我国台湾地区的强震记录，采用肖亮和俞言祥(2010)提出的分步回归法求取回归系数，对阿里亚斯强度衰减关系予以分析，以期获取强震动的震级饱和及近场距离饱和特征，检验回归所得结果与实际数据的拟合程度。

1 阿里亚斯强度

阿里亚斯强度的表达式为

$$I_a = \frac{\arccos\lambda}{g\sqrt{1-\lambda^2}} \int_0^T a^2(t) dt, \quad (1)$$

式中, g 为当地重力加速度, $a(t)$ 为某一分量的地震动加速度时程, T 为地震动加速度记录的总持续时间, λ 为结构物的阻尼比。对于一般的结构物, λ 取值为 0.05, 则

$$\frac{\arccos\lambda}{\sqrt{1-\lambda^2}} \approx \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

进而可以近似得到阿里亚斯强度的简洁形式:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt. \quad (3)$$

2 强震数据

根据 NGA 数据库中 GMX's C1 的分类方法, 选择标注为自由地表或 4 层(含)以下轻型建筑物底层或附近的台站记录, 以除去土结相互作用的影响; 同时为了减少地形效应带来的影响, 剔除隧道、大坝等特殊地形附近的台站记录。由于部分台站三分量记录不完整, 为保证数据平衡, 剔除水平分量不完整的台站记录。以场地地表 30 m 土层等效剪切波波速 v_{S30} 为分类依据, 相应的场地分类见表 1。

本文集中分析主震的阿里亚斯强度衰减关系, 故将 1999 年台湾集集 $M_w 7.6$ 地震的余震记录全部除去。由于此次地震主震的地震动相对于同样震级的其它地震偏低, 其强震记录共 401 组, 数量远超其它地震; 为避免其对衰减关系高震级段的回归产生太大影响, 从中随机选取 50 组(100 条)数据纳入衰减关系的分析中。最终用于本文的地震目录见表 2.

表 1 本文场地分类标准

Table 1 Site classification standards
in this study

场地类别	$v_{S30}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	代码
基岩	>500	A
硬土	250—500	B
软土	<250	C

表 2 本文所用地震目录

Table 2 Catalog of earthquakes used in this study

序号	地震	发震时间	M_w	记录条数	序号	地震	发震时间	M_w	记录条数
1	Kern County	1952-07-21	7.4	4	15	Chalfant Valley-02	1986-70-21	6.2	20
2	Parkfield	1966-06-28	6.2	10	16	Whittier Narrows-01	1987-10-01	6.0	208
3	Borrego Mountain	1968-04-09	6.6	2	17	Superstition Hills-01	1987-11-24	6.2	2
4	San Fernando	1971-02-09	6.6	56	18	Superstition Hills-02	1987-11-24	6.5	6
5	Tabas	1978-09-16	7.4	2	19	Loma Prieta	1989-10-18	6.9	146
6	Coyote Lake	1979-08-06	5.7	18	20	Cape Mendocino	1992-04-25	7.0	8
7	Imperial Valley-06	1979-10-15	6.5	60	21	Landers	1992-06-28	7.3	136
8	Victoria	1980-06-09	6.3	2	22	Northridge-01	1994-01-17	6.7	282
9	Westmorland	1981-04-26	5.9	12	23	Double Springs	1994-09-12	5.9	2
10	Coalinga-01	1983-05-02	6.4	90	24	Chi-Chi	1999-09-20	7.6	100
11	Borah Peak-01	1983-10-28	6.9	4	25	Manji-01	1990-06-20	7.4	2
12	Morgan Hill	1984-04-24	6.2	46	26	Sierra Madre	1991-06-28	5.6	16
13	North Palm Springs	1986-07-08	6.1	52	27	Little Skull Mountain	1992-06-29	5.7	16
14	Chalfant Valley-01	1986-07-20	5.8	10	28	Hector Mine	1999-10-16	7.1	158

本文采用的震级为 M_w , 取值范围为 5.5—8.0; 距离为断层投影距 R_{JB} , 取值范围为 0—200 km. 原始记录中地震为 127 次, 强震动记录共有 3275 组, 每组含三分量(部分分量

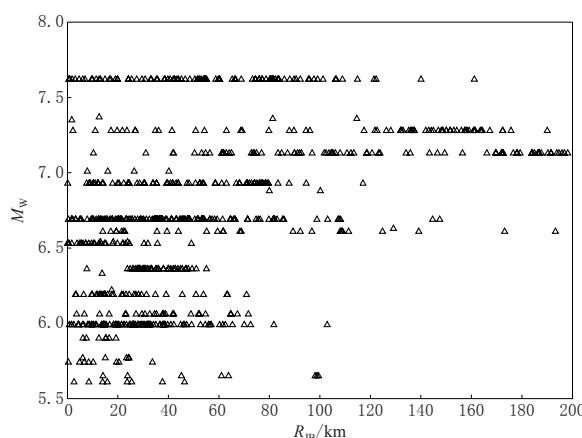


图 1 强震资料的震级 M_w 随断层投影距 R_{JB} 分布图

Fig. 1 Magnitude M_w versus distance R_{JB}
of strong-motion data

多,本文以硬土场地作为主要对象,基岩和软土场地的阿里亚斯强度衰减关系通过硬土场地加减常数得到。设定 S_A 和 S_C 两个哑指标表示场地类别,即 $S_A=1$ 和 $S_C=0$ 表示基岩场地; $S_A=0$ 和 $S_C=0$ 表示硬土场地; $S_A=0$ 和 $S_C=1$ 表示软土场地。考虑到正断层与走滑断层引起的地震动相近,且二者均小于逆断层,本文采用哑指标 V 表示断层类型: $V=1$ 表示逆断层, $V=0$ 表示其它类型断层。

3.1 衰减模型的建立

本文采用的衰减关系为

$$\lg I_a = M(M_w) + G(M_w, R_{JB}) + S(S_A, S_C) + F(V) + \epsilon, \quad (4)$$

式中: I_a 为阿里亚斯强度,单位为 m/s; $M(M_w)$ 为震级项,是关于 M_w 的函数; $G(M_w, R_{JB})$ 为矩震级与断层投影距的耦合项; $S(S_A, S_C)$ 为场地类型的函数, $F(V)$ 为与断层类型相关的函数, $F(V)=fV$, f 为系数, V 为哑指标; ϵ 为期望值为 0、标准差为 σ 的随机量。

场地类别和断层类型对阿里亚斯强度的影响采用简单的线性形式表示: $S(S_A, S_C)=mS_A+nS_C$, 式中 m, n 为系数。

3.2 回归系数的求取

首先对硬土场地的记录进行分析。对于硬土场地, $S=0$, 对回归分析无影响,因此式(4)可写为

$$\lg I_{aj} = L_i - c \lg(R_{ij} + H_i) + \epsilon, \quad (5)$$

式中: I_{aj} 为第 i 个地震事件在第 j 个台站引起的阿里亚斯强度; L_i 为第 i 个地震事件的参数,与震级 M_w 和断层类型有关,对于单个地震,其为常数; $c \lg(R_{ij} + H_i)$ 为距离衰减项,在 $M_w 5.5-8.0$ 内,系数 c 可以看作一个常数, H_i 表示与第 i 个地震事件相关的近断层饱和项参数,采用 Campbell(1981)提出并使用多年的形式,即 $H_i=d \exp(eM_{wi})$, 其中 d, e 为系数; ϵ 为期望值为 0、标准差为 σ 的随机量。

距离衰减项中断层投影距与距震级耦合在一起,回归系数的求取对数据的分布比较敏感,本文的近场饱和项系数经验性地借鉴肖亮和俞言祥(2010)的结果,取 $d=0.956$, $e=0.462$ 。我们选取震级不同,距离分布较广的多组记录进行分析,求取每个地震事件的回归

无记录);筛选后的地震为 28 次,强震动记录为 735 组,两个水平分量看作两条独立的记录,共有 1470 条记录进行分析。数据整体的分布状况如图 1 所示。

3 衰减模型与回归结果

衰减关系中的协变量有矩震级 M_w 、断层投影距 R_{JB} 、场地类别和断层类型。按照表 1 的分类标准,硬土场地共有记录 1050 条,基岩场地有 238 条,软土场地有 182 条。土层对地震动的放大效应表现为在衰减关系上增加一个常数。由于硬土场地记录较多,

系数 c_i , 取其平均后得到 $c=2.494$, 则距离衰减项为

$$G(M_w, R_{JB}) = -2.494 \lg [R_{JB} + 0.956 \exp(0.462 M_w)]. \quad (6)$$

考虑到地震动参数的震级饱和性, 采用与 Boore 和 Atkinson(2012)类似的方法, L_i 的回归采用分段函数的形式, 具体如下:

$$L_i = \begin{cases} a_1 + b_1 M_w + fV, & M_w \leqslant 6.5, \\ a_2 + b_2 M_w + fV, & M_w > 6.5, \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)进行回归可得系数 $a_1=-3.407$, $b_1=1.065$, $a_2=-1.073$, $b_2=0.715$, $f=0.089$.

在上述对硬土数据分析的基础上, 增加基岩和软土的数据, 对所有数据进行分析, 进而得到最终的阿里亚斯强度相对于矩震级、断层投影距、断层类型和场地类别的衰减关系, 即

$$\lg I_a = \lg I_{aB} + mS_A + nS_C, \quad (8)$$

式中系数 m , n 如前所述, 下标 A, B, C 为表 1 中场地类型代码. 对式(8)进行回归分析可得系数 $m=-0.262$, $n=0.099$. 这样, 可得最终的衰减系数(表 3), 相应的衰减关系为

$$\lg I_a = \begin{cases} -3.407 - 2.494 \lg [R_{JB} + 0.956 \exp(0.462 M_w)] + \\ 1.065 M_w - 0.262 S_A + 0.099 S_C + 0.089 V, & M_w \leqslant 6.5, \\ -1.073 - 2.494 \lg [R_{JB} + 0.956 \exp(0.462 M_w)] + \\ 0.715 M_w - 0.262 S_A + 0.099 S_C + 0.089 V, & M_w > 6.5. \end{cases} \quad (9)$$

表 3 阿里亚斯强度衰减关系系数

Table 3 Coefficients of attenuation relations of Arias intensity

震级	a	b	c	d	e	m	n	f
$M_w \leqslant 6.5$	-3.407	1.065	2.494	0.956	0.462	-0.262	0.099	0.089
$M_w > 6.5$	-1.073	0.715	2.494	0.956	0.462	-0.262	0.099	0.089

3.3 回归结果与实际数据对比

将得到的阿里亚斯强度衰减关系式与实际数据进行对比, 观察数据点相对于衰减曲线的分布状况, 如图 2 所示. 可知一定震级范围(如 $M_w 7.0\text{--}8.0$)内的阿里亚斯强度值, 大部

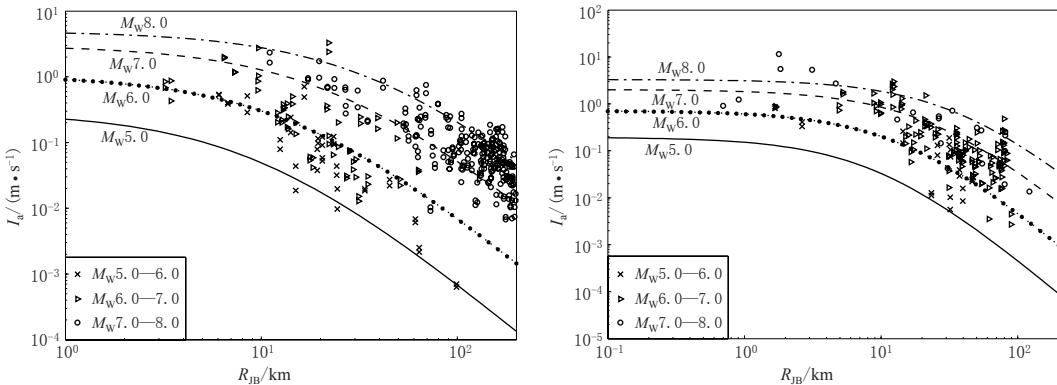


图 2 阿里亚斯强度衰减曲线与实际数据的对比

(a) 硬土场地, 正断层或走滑断层震源机制; (b) 基岩场地, 逆断层震源机制

Fig. 2 Comparison of attenuation relation curves of Arias intensity with observed records
(a) Stiff soil site, normal fault or strike-slip fault; (b) Rock site, reverse fault

分均位于相应的两条衰减曲线 $M_w = 7.0$ 与 $M_w = 8.0$ 之间。对于不同的场地类别或断层类型，以上所得衰减关系均与实际数据拟合得较好。

3.4 残差分析

由图 2 可以看出阿里亚斯强度衰减关系的计算结果与实际数据拟合得较好。接下来计算实际与拟合的阿里亚斯强度残差，并观察其随矩震级或断层投影距这两个主要变量的变化情况，进一步检查拟合的优劣。由图 3 可以看出：拟合残差随矩震级的波动较大， $M_w 7.6$ 为集集地震的主震，其阿里亚斯强度偏低；拟合残差随断层投影距的波动较小，整体较对称地分布于零线两侧。

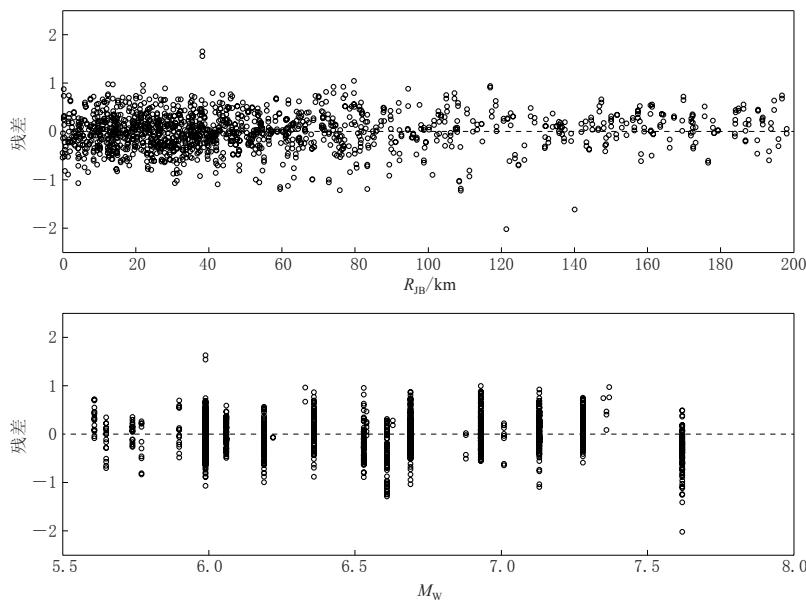


图 3 阿里亚斯强度拟合残差随断层投影距 R_{JB} 和矩震级 M_w 的变化

Fig. 3 The fitting residuals of Arias intennity against with the magnitude and Joyner-Boor distance

4 结果分析

4.1 与其它模型对比

由于研究区域不同以及所用强震动数据资料存在差异，导致了衰减关系的震级项、距离项和场地项所选取的形式不同，由此得到不同的衰减模型。为说明本文方法和结果的合理性，将其与 Travasarou 等(2003)，Stafford 等(2009)文中的模型 I 以及 Lee 等(2012)所用的衰减模型进行比较，结果如图 4 所示。

Travarasrou 等(2003)将 $v_{S30} \geq 760$ m/s 或土层厚度 < 6 m 归类为基岩，震源机制分为正断层、逆断层和走滑断层等 3 类，研究了全球活动板块边界的 75 次浅源地震；Stafford 等(2009)将基岩定义为单轴抗压强度大于 1 MPa 且 $v_{S30} > 360$ m/s，震源机制分为逆断层和非逆断层两类，以此对新西兰的 23 次地震进行分析；Lee 等(2012)采用的震源机制分类标准与 Travasarou 等(2003)相同，场地项不再进行分类，统一表示成 v_{S30} 的自然对数，研究对象为台湾的 62 次地震。

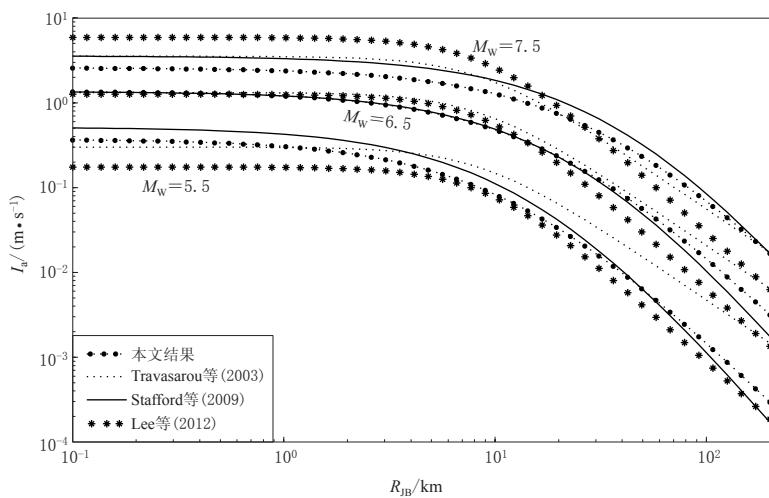


图4 本文结果与基于其它3种模型所得的基岩场地逆断层震源机制下阿里亚斯强度衰减曲线的对比

Fig. 4 Comparison of attenuation relation curves of Arias intensity for rock site and reverse fault from this study, with those from other three models

Stafford等(2009)的模型I中包含震源深度项,本文未将其纳入衰减关系中,在应用其模型时,令震源深度为本文所用地震的加权平均值11.043 km;Lee等(2012)的模型中直接包含 v_{S30} 的对数项,本文在应用其模型时,令 $v_{S30}=760$ m/s。

由图4可以看出,4种模型均考虑了近场的距离饱和效应,所得阿里亚斯强度在 M_w 为6.5时比较接近。震级方面:本文与Travasarou等(2003)近场震级饱和效应较明显;Stafford等(2009)的模型I直接采用震级的线性形式,未考虑震级饱和;Lee等(2012)对线性震级进行了对数修正,震级饱和效应不明显。距离衰减方面,4种模型得到的衰减系数不同,在远场区有较大差异。

综上,本文的模型采用了表示震级饱和的分段线性函数,距离衰减项体现了近场的距离饱和特性,与其它衰减模型相比,在 M_w 6.5或远场区域比较接近,近场区域在震级过高($M_w=7.5$)或震级过低($M_w=5.5$)时有一定差异。

4.2 国内数据检验

近年来我国大陆地区逐渐获得了大量强震动加速度记录数据。为检验本文所得衰减关系对大陆数据的适用性,特选取两个典型地震即2008年汶川 M_w 7.9地震和2013年芦山 M_w 6.8地震,将实际数据计算得到的阿里亚斯强度与本文模型进行对比。图5分别给出了芦山地震和汶川地震阿里亚斯强度衰减曲线与实际数据的对比结果。由于国内强震记录中场地仅包含基岩和土层两种类型,且前文得到的阿里亚斯强度衰减关系中硬土与软土差异较小,图中土层项衰减曲线对应于前文的硬土场地。国内数据未给出断层投影距 R_{JB} ,对于芦山地震,断层尺度较小,震中距与断层投影距相近,实际数据点的 R_{JB} 用震中距代替;对于汶川地震,由于其断层破裂尺度较大(长300 km),用震中距代替 R_{JB} 会出现很大偏差,因此本文根据NGA-west2地震目录中给出的台站位置和 R_{JB} 与国内强震记录提供的台站位置对照,阿里亚斯强度由国内强震记录计算得出, R_{JB} 取NGA-west2中数值。

基岩场地记录数较少且整体无太大偏差,不作分析。对于土层场地的数据,由图5可

以看出：芦山地震数据离散性较大，近场数据较预测值偏大，远场数据分布在预测值两侧，数据整体拟合得较好；汶川地震阿里亚斯强度离散性较小，实际数据整体较预测值偏大且随距离的衰减较慢，一方面主要是由于 1999 年台湾集集 $M_w 7.6$ 地震导致高震级地震的阿里亚斯强度拟合值偏低，另一方面，汶川地震断层破裂长度太大(300 km)，本文衰减关系分析中 R_{JB} 取值不超过 200 km，在该距离范围内，场点仍可看作近场，故实际数据的衰减速度偏小。

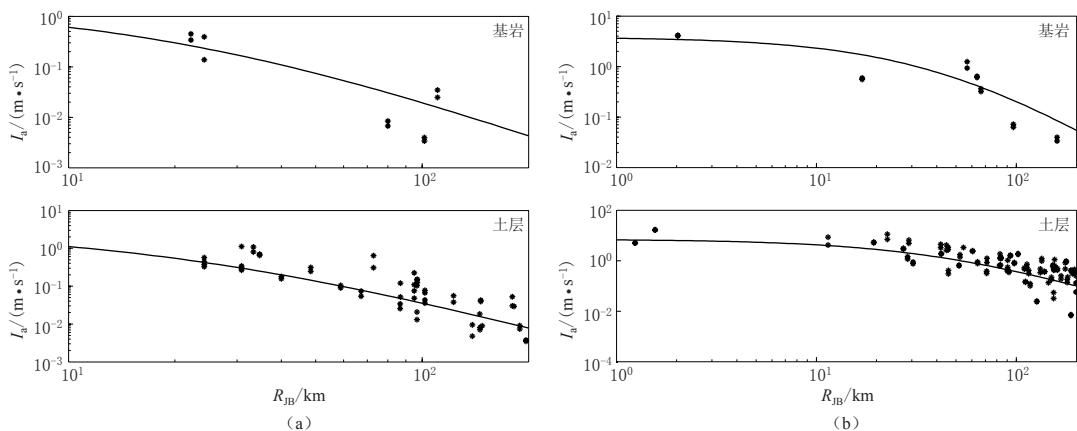


图 5 芦山 $M_w 6.8$ (a) 和汶川 $M_w 7.9$ (b) 地震的阿里亚斯强度衰减曲线与实际数据对比

Fig. 5 Comparison of attenuation relation curves of Arias intensity with observed records for Lushan $M_w 6.8$ earthquake (a) and Wenchuan $M_w 7.9$ earthquake (b)

5 讨论与结论

考虑到未来我国大陆地区阿里亚斯强度研究的需求，本文对 NGA-west1 数据库中的强震资料进行了针对性的筛选，初步建立了以美国西部数据为主的阿里亚斯强度的衰减关系。该模型很好地体现了阿里亚斯强度近场饱和、震级饱和特性，采用分步回归的方式可以减少变量之间相关性的影响。

回归过程中对地震动偏低且强震记录较多的集集地震记录进行了缩减，以降低其对高震级回归所产生的影响。由于研究区域和所采用模型的差异，不同研究人员所得阿里亚斯强度衰减关系的系数不同，将本文结果与相关的 3 个衰减模型进行比较，结果显示对于中等震级($M_w 6.5$)而言，本文与其结果相近，而对于高震级或地震级由于近场和距离饱和项所采用的模型形式不同，本文与其结果差异较大。

我国大陆强震数据与本文结果拟合得较好，随着国内强震动数据的增多，可以根据已有的结果，利用转换方法建立我国大陆地区的阿里亚斯强度衰减关系。随着震源机理的深入研究和处理方法的改进，现有的衰减模型还可进一步修正细化，例如丰富的近断层样本可用于研究阿里亚斯强度的方向性效应和上下盘效应等，而且可以并入衰减关系中；进一步的残差分析可用于区域的概率危险性分析。

审稿专家对本文提出了修改建议，国家强震动台网中心和美国 NGA 项目为本文提供了强震动数据，作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 靳超宇, 俞言祥. 2009. 欧洲中小震基岩水平向地震动衰减关系研究[J]. 中国地震, **25**(2): 170–177.
- Jin C Y, Yu Y X. 2009. Attenuation relationships for horizontal ground motion on rock of small-moderate earthquakes in Europe[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(2): 170–177 (in Chinese).
- 王秀英, 聂高众, 张玲. 2010. 汶川地震触发崩滑与 Arias 强度关系研究[J]. 应用基础与工程科学学报, **18**(4): 645–656.
- Wang X Y, Nie G Z, Zhang L. 2010. Relationship between landslides induced by the Wenchuan earthquake and Arias intensity[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, **18**(4): 645–656 (in Chinese).
- 肖亮, 俞言祥. 2010. 一种新的拟合地震动衰减关系的分布回归法[J]. 地震学报, **32**(6): 725–732.
- Xiao L, Yu Y X. 2010. A new step-regression approach for fitting ground motion data with attenuation relation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(6): 725–732 (in Chinese).
- Abdrakhmatov K, Havenith H B, Delvaux D, Jongmans D, Trefois P. 2003. Probabilistic PGA and Arias intensity maps of Kyrgyzstan (Central Asia)[J]. *J Seismol*, **7**(2): 203–220.
- Akkar S, Bommer J J. 2007. Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **36**(10): 1275–1301.
- Ancheta T D, Darragh R B, Stewart J P, Seyhan E, Silva W J, Chiou B S J, Wooddell K E, Graves R W, Kottke A R, Boore D M, Kishida T, Donahue J L. 2014. NGA-west2 database[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 989–1005.
- Arias A. 1970. A measure of earthquake intensity[G]// *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge: MIT Press: 438–483.
- Boore D M, Atkinson G M. 2012. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 99–138.
- Cabanas L, Benito B, Herráiz M. 1997. An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **26**(1): 79–92.
- Campbell K W. 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **71**(6): 2039–2070.
- Chen S Z, Atkinson G M. 2002. Global comparisons of earthquake source spectra[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(3): 885–895.
- Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W. 2008. NGA project: Strong-motion database[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 23–44.
- Douglas J. 2004. An investigation of analysis of variance as a tool for exploring regional differences in strong ground motions[J]. *J Seismol*, **8**(4): 485–496.
- Jibson R W. 1993. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis[J]. *Ransport Res Record*, **1411**: 9–17.
- Lee C T, Hsieh B S, Sung C H, Lin P S. 2012. Regional Arias intensity attenuation relationship for Taiwan considering V_{S30} [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(1): 129–142.
- Stafford P J, Berrill J B, Pettinga J R. 2009. New predictive equations for Arias intensity from crustal earthquakes in New Zealand[J]. *J Seismol*, **13**(1): 31–52.
- Travasarou T, Bray J D, Abrahamson N A. 2003. Empirical attenuation relationship for Arias intensity[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **32**(7): 1133–1155.