



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

## 芦山地震强地面运动之阿里亚斯强度及Newmark位移特征研究

李雪婧 徐伟进 高孟潭

### Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake

Li Xuejing, Xu Weijin, Gao Mengtan

引用本文:

李雪婧, 徐伟进, 高孟潭. 2021. 芦山地震强地面运动之阿里亚斯强度及Newmark位移特征研究. *地震学报*[J], 43(6): 768–786. DOI: 10.11939/jass.20200180

Li X J, Xu W J, Gao M T. 2021. Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*[J], 43(6): 768–786. DOI: 10.11939/jass.20200180

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20200180>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 阿里亚斯强度衰减关系分析

Attenuation relationship of Arias intensity

地震学报. 2017, 39(6): 921–929 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.010>

#### 基于Newmark模型的概率地震滑坡危险性分析方法研究

Probabilistic seismic slope displacement hazard analysis based on Newmark displacement model: Take the area of Tianshui, Gansu Province, China as an example

地震学报. 2019, 41(6): 795–807 <https://doi.org/10.11939/jass.20180075>

#### 汶川地震和芦山地震的孕震机理及震前中长期地震危险性研究

Seismogenic mechanism and the intermediate- and long-term earthquake risks of the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes

地震学报. 2018, 40(3): 279–290 <https://doi.org/10.11939/jass.20180024>

#### 基于简化纽马克位移模型的地震滑坡岩土体强度参数研究

Rock-soil strength parameters of earthquake-triggered landslides based on simplified Newmark displacement model

地震学报. 2018, 40(6): 820–830 <https://doi.org/10.11939/jass.20180026>

#### 2013年芦山 $M_s7.0$ 地震前后甲烷排放时空演化分析

Spatio-temporal revolution characteristics of methane emission before and after the 2013 Lushan  $M_s7.0$  earthquake

地震学报. 2017, 39(3): 386–394 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.03.008>

#### 地震动峰值特征参数对土坡地震响应的规律研究

Regularity research on the seismic response of characteristic parameters for ground motion peak to soil slope

地震学报. 2021, 43(4): 498–507 <https://doi.org/10.11939/jass.20200149>

李雪婧, 徐伟进, 高孟潭. 2021. 芦山地震强地面运动之阿里亚斯强度及 Newmark 位移特征研究. 地震学报, 43(6): 768-786. doi: 10.11939/jass.20200180.  
Li X J, Xu W J, Gao M T. 2021. Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 43(6): 768-786. doi: 10.11939/jass.20200180.

# 芦山地震强地面运动之阿里亚斯强度及 Newmark 位移特征研究\*

李雪婧<sup>†</sup> 徐伟进 高孟潭

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 本文以芦山地震强地面运动记录为基础资料,研究了阿里亚斯强度和 Newmark 位移两个地震动参数的空间分布特征、衰减特征以及与其它地震动参数的相关性. 研究表明:阿里亚斯强度的空间分布与地震断层空间展布和地震破裂方向具有相关性;阿里亚斯强度与峰值加速度(PGA)有较好的相关性,场地条件对二者的相关性具有显著影响,PGA 相同时,场地越软,阿里亚斯强度越大;震级也是影响阿里亚斯强度与 PGA 相关性的重要因素,PGA 相同时,震级越大,阿里亚斯强度也越大;Newmark 位移与 PGA 和阿里亚斯强度均具有较好的相关性,与阿里亚斯强度的相关性更强,相关系数可达 0.94 以上. 研究还表明,现有模型不能较好地描述芦山地震的阿里亚斯强度和 Newmark 位移衰减特征,这说明了芦山地震在持时和破裂过程上的特殊性. 芦山地震的特殊性揭示了我国西部地震地质构造环境与其它地区有显著差异,因此应该研究适用于我国西部地区地震的地震动参数预测方程. 本文的研究结果对我们从更多方面了解地震动特性以及我国地震灾害的预测预防具有重要的科学意义和应用价值.

**关键词** 芦山地震 阿里亚斯强度 Newmark 位移 峰值加速度  
doi: 10.11939/jass.20200180 中图分类号: 315.9 文献标识码: A

## Characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of strong ground motion in Lushan earthquake

Li Xuejing<sup>†</sup> Xu Weijin Gao Mengtan

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

**Abstract:** The characteristics of spatial distribution, attenuation and correlation of ground motion parameters are important research contents in engineering seismology. In this paper, based on the ground motion records of Lushan earthquake, we study the spatial distribution and attenuation characteristics of Arias intensity and Newmark displacement as well as their correlation with other ground motion parameters, respectively. The results show that the spatial distribution of Arias intensity is related with the spatial distribution of seismic faults and the direction of earthquake rupture. Arias intensity has a good correlation with PGA. Furthermore, the site con-

\* 基金项目 科技部重点研发计划项目(2018YFC1504600)和中国地震局地球物理研究所  
基本科研业务费专项(DQJB21Z07)共同资助.

收稿日期 2020-12-29 收到初稿, 2021-05-12 决定采用修改稿.

<sup>†</sup> 通信作者 e-mail: lxj-29@163.com



ditions have a significant effect on the correlation between the two: for the same PGA, the softer the site condition, the greater the Arias intensity. In addition, magnitude is also an important factor affecting the correlation between Arias intensity and PGA: with the same PGA, the greater the magnitude, the greater the Arias intensity. Newmark displacement has a good correlation with both PGA and Arias intensity, among which the correlation with Arias intensity is stronger, and the correlation coefficient can reach above 0.94. The research in this paper also shows that the existing models cannot describe the attenuation characteristics of Arias intensity and Newmark displacement of Lushan earthquake well, which indicates the particularity of Lushan earthquake in both the duration and rupture process. The particularity of Lushan earthquake reveals that the seismic geological and tectonic environment in Western China is significantly different from that in other regions. Therefore, the prediction equations of ground motion parameters suitable for earthquakes in Western China should be studied. The research results of this paper have important scientific significance and application value for us on both understanding the characteristics of ground motion and the prediction and prevention of earthquake disaster in China.

**Key words:** Lushan earthquake; Arias intensity; Newmark displacement; PGA

## 引言

地震动参数是表征地震动特性的重要度量值。目前在建筑物抗震设计中广泛应用的震动参数主要有峰值加速度(peak ground acceleration, 缩写为 PGA)和谱加速度等。然而地震波是一个非常复杂的时间序列, 仅靠单一的地震动参数不能全面有效地反映所有的地震动作用特征, 满足不了科学家和工程师的应用需求。已有研究表明, 峰值加速度在指示某些地震破坏, 如山体滑坡、沙土液化等方面作用有限。为了更加全面地描述地震动特征及其潜在的破坏作用, 科学家们一直在寻找能够表征特定地震破坏的地震动参数, 其中阿里亚斯强度(Arias intensity, 缩写为  $I_A$ )和 Newmark 位移, 由于它们在地震诱发滑坡预测、沙土液化评估、地震灾害损失估计等方面的优秀表现, 引起了地震工程学家和地震学家的强烈关注。近些年来, 随着强地面运动记录的积累, 科学家们开展了大量关于阿里亚斯强度和 Newmark 位移特征的研究。

对于阿里亚斯强度, 已有研究表明依据阿里亚斯强度对某些地震破坏进行预测比仅依靠地震动振幅更具可靠性(Foulser-Piggott, Stafford, 2012), 阿里亚斯强度与短周期结构的地震反应、砂土液化以及地震诱发滑坡等具有很强的相关性。Travasrou 等(2003)证明了采用阿里亚斯强度可有效地预测地震动对短周期建筑结构的潜在破坏, 他们的研究还表明阿里亚斯强度与某些类型结构破坏的相关性比峰值加速度与结构的破坏相关性要强。更为重要的是, 科学家们还发现阿里亚斯强度与地震诱发滑坡具有很强的相关性(Harp, Wilson, 1995; Keefer, 2002; Gaudio *et al.*, 2003; Jibson, 2007), 利用这一特征可以对潜在的地震诱发滑坡进行预测。阿里亚斯强度也可以用来估计地震导致场点砂土液化的可能性(Egan, Rosidi, 1991; Kayen, Mitchell, 1997; Kramer, Mitchell, 2006), 从而对地震导致的地基失效进行预测(Kramer, 1989)。目前国内外科学家们已经对许多地震的阿里亚斯强度特征作了研究(Foulser-Piggott, Stafford, 2012; Liu *et al.*, 2015; 刘甲美等, 2017, 2018), 建立了多个阿里亚斯强度预测方程(Travasrou *et al.*, 2003; Stafford *et al.*, 2009; Campbell, Bozorgnia, 2012; Foulser-

Piggott, Stafford, 2012; Lee *et al.*, 2012).

关于 Newmark 位移, 鉴于其在滑坡预测和滑坡稳定性分析中的重要作用, 一些科研人员开展了 Newmark 位移预测模型以及 Newmark 位移与阿里亚斯强度等参数的相关性研究 (Ambraseys, Menu, 1988; Bray, Travararou, 2007; Jibson, 2007; Saygili, Rathje, 2008; Hsieh, Lee, 2011; Urzúa, Christian, 2013; Du, Wang, 2016), 也有许多国内外研究人员根据 Newmark 模型和 Newmark 位移预测方程开展了地震滑坡危险性分析预测和工程边坡稳定性分析工作 (Jibson *et al.*, 2000; Saygili, Rathje, 2008; Jibson, Michael, 2009; Rathje, Saygili, 2009; 陈启国等, 2011; 徐光兴等, 2012; 陈晓利等, 2013; 王涛等, 2013; Gülerce, Balal, 2017; 许冲等, 2018). 这些研究为地震诱发滑坡的预测预防提供了重要的科技支撑, 可见开展 Newmark 位移特征研究对于预防地震诱发滑坡具有重要意义.

然而, 由于 Newmark 位移的计算受临界加速度的约束, 与其它地震动参数相比可用数据相对较少, 致使其衰减模型具有较大的不确定性 (Du, Wang, 2016). Newmark 位移与阿里亚斯强度具有很好的相关性, 因此科学家们在进行滑坡危险性预测时主要根据阿里亚斯强度来换算 Newmark 位移. 已有一些科研人员研究了 Newmark 位移与阿里亚斯强度的相关性, 建立了二者的经验关系式 (Ambraseys, Menu, 1988; Bray, Travararou, 2007; Jibson, 2007; Jibson, Michael, 2009; Hsieh, Lee, 2011; Urzúa, Christian, 2013). 我国科研人员在进行中国境内的滑坡危险性预测时也主要采用国外科研人员建立的经验关系式 (陈启国等, 2011; 徐光兴等, 2012; 陈晓利等, 2013; 王涛等, 2013). 这些经验关系式主要是采用国外强震数据建立的, 可能并不适用于我国的地震地质环境, 从而使预测结果产生较大偏差. 因此应该加强我国地震的阿里亚斯强度和 Newmark 位移的衰减特征及其二者相关性等研究.

我国西部地区近些年来遭受了数次强震的冲击, 地震导致的山体滑坡等灾害在此造成了严重的人员伤亡和财产损失. 这些强震丰富的强地面运动数据为分析地震动特征提供了宝贵的资料. 本文拟以 2013 年 4 月 20 日发生的芦山  $M_w 6.6$  地震为例, 研究芦山地震阿里亚斯强度与 Newmark 位移的空间分布特征、衰减特征以及与其它地震动参数的相关性等特征, 藉以加深对地震动特性的认识, 建立的相关经验关系式对我国地震灾害的预测预防也具有重要的应用价值.

## 1 芦山地震强震记录数据和地震动参数简介

### 1.1 芦山地震发震构造有限断层模型

地震发生后, 建立科学合理的地震构造模型是地震学研究的重要基础, 也是地震动特征研究的基础资料. 本研究中, 我们本着科学性和可获取性的原则, 选择美国地质调查局 (U.S. Geological Survey, 缩写为 USGS) 公布的芦山地震有限断层模型作为芦山地震的发震构造模型 (USGS, 2013) (图 1), 用以计算台站场点到断层的距离. 断层面的长度为 19.5 km, 宽度为 9.5 km, 走向为  $223^\circ$ , 倾角为  $33^\circ$ .

### 1.2 芦山地震强地面运动记录

本文中, 我们共收集到 123 个强震台站记录的 361 条加速度时程, 将不完整、信噪比低以及非自由场地的记录去除后, 得到 79 个台站共 237 条可用记录 (图 1). 台站加速度时程的峰值加速度范围在  $2-1\ 005\ \text{cm/s}^2$  之间, 距离范围在 21—384 km 之间. 一般认为, 具有工程意义的距离在 200 km 以内. 在本研究中, 我们为了研究更远距离处的地震动变化特征, 同时也

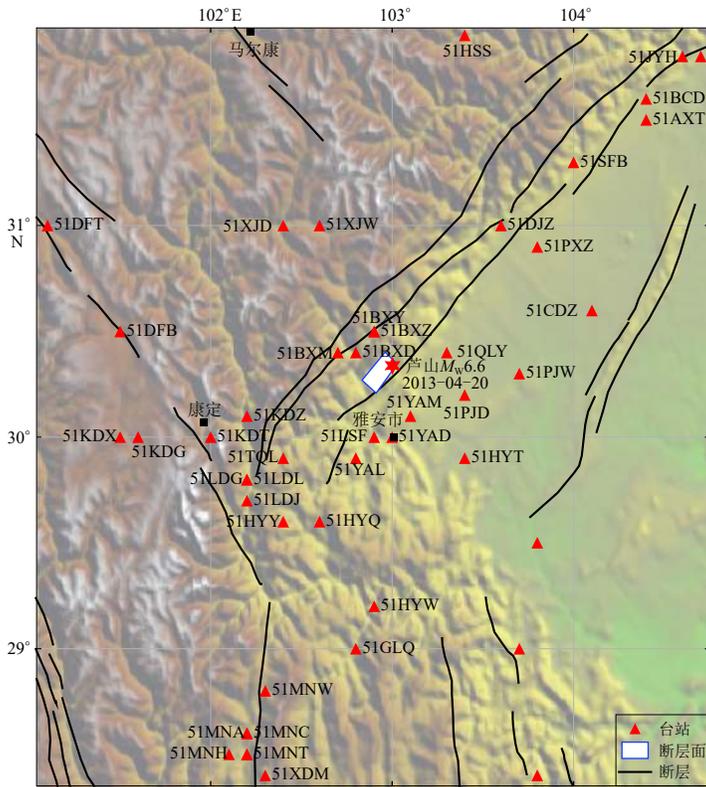


图 1 芦山地震有限断层模型及台站分布图

Fig. 1 The finite fault model of Lushan earthquake and the station location

为了使研究样本更多, 选取了所有可用地震动记录来进行分析研究。

台站(场点)到震源的距离是地震动预测方程中的重要参数。目前常用的距离主要有震中距、震源距、断层破裂距以及“Joyner-Boore”距离等。本研究中, 我们采用的距离为场点到断层破裂面的最近距离, 即断层破裂距(rupture distance), 以及场点到断层在地表投影面的最近水平距离, 即  $R_{jb}$ 。这两种距离是目前地震动预测方程中最常用的距离。

台站场地条件采用  $v_{S30}$  表示,  $v_{S30}$  为地表最上层 30 m 内的平均剪切波速度, 其数据来自于 USGS 网站。该数据是根据地形坡度与  $v_{S30}$  的经验关系估算的  $v_{S30}$  数值(Wald, Allen, 2007), 然后根据美国国家地震减灾计划(National Earthquake Hazards Reduction Program, 缩写为 NEHRP)(Campbell, 2009)的场地划分原则对台站场地进行类别划分。根据这一原则, 记录芦山地震的台站场地类别主要是 B 类和 C 类场地。

### 1.3 基线校正

强震地面运动记录中包含着不同的噪音源, 这些噪音严重影响了强震记录的科学用途。其中最著名的问题是基线漂移, 因其会导致根据加速度记录积分得到的速度和位移记录失真, 严重影响加速度记录的使用。从图 2a, b, c 中的速度和位移记录可以看出, 051BXZ 台站的强震记录产生了严重的基线漂移现象。本文中, 我们采用 Wang 等(2011)提出的一种基于 BI 方案的自动基线校正方法, 对芦山地震的强地面运动记录进行基线校正(图 2d, e, f)。该方法优于前人提出的校正方案, 得到的永久位移也与 GPS 观测数据吻合较好(Melgar et al,

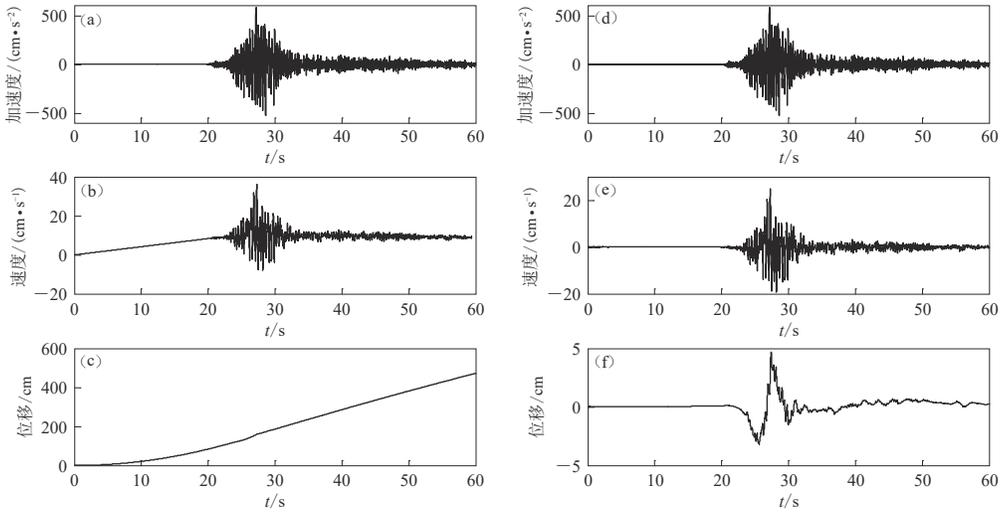


图2 基线校正前(a, b, c)和基线校正后(d, e, f)的地震动时程(以051BXZ 站的一条加速度记录为例)  
Fig. 2 The time history of acceleration of ground motion before (a, b, c) and after (d, e, f) baseline correction  
(Take an acceleration record at 051AXT station as an example)

2013), 并且已在许多重要地震中得到应用。

此外我们还用观察法剔除了不完整、信噪比低以及非自由场地的记录。

#### 1.4 地震动参数

阿里亚斯强度  $I_A$  和 Newmark 位移是本文中我们主要研究的两个地震动参数。同时我们还选择了峰值加速度来研究其与上述两个地震动参数的相关性。下文中我们将简单介绍这两个地震动参数。

##### 1.4.1 阿里亚斯强度

阿里亚斯强度是 Arias 于 1970 年提出的一种描述地震潜在破坏的地震动参数, 其物理意义是频率均匀分布的一组简谐振子每单位质量所储存的总能量。在强地面运动中  $x$  方向上的阿里亚斯强度的表达式可写成 (Arias, 1970)

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a_x(t)]^2 dt, \quad (1)$$

式中:  $a_x(t)$  是  $x$  方向的加速度时程, 单位取  $m/s^2$ ;  $g$  为重力加速度, 取值  $9.8 m/s^2$ 。

由于竖向地震动的阿里亚斯强度值相对较小, 且在地震工程学中, 人们更加关心水平的地震动, 因此一般情况下, 阿里亚斯强度的计算通常采用分别计算水平向相互垂直的强震记录的阿里亚斯强度值, 并求二者之平均值。根据定义可知, 其二者之和是一个定值, 不依赖于直角坐标轴的取向。

阿里亚斯强度能够反映整个地震动时程的累积作用, 是一个与能量有关的物理量, 与短周期建筑物的地震动破坏、地震诱发滑坡及砂土液化等具有很好的相关性 (Travasarou *et al.*, 2003)。

##### 1.4.2 Newmark 位移

地震诱发滑坡是地震产生的最具破坏性的灾害之一, 估算自然斜坡的地震位移对于地震诱发滑坡危险性评估非常重要。Newmark (1965) 提出了一种简单的刚性滑块模型来估算同

震斜坡位移(Hsieh, Lee, 2011). 这一模型将潜在的滑坡体看作一个刚性滑块, 位于与水平面夹角为  $\alpha$  的斜面上(图 3). 当地震动加速度超过某一临界值  $a_c$  (critical acceleration) 时, 滑块克服剪切阻力开始滑动.

在计算 Newmark 滑块位移时, 首先选择一条地震动加速度时程(图 4a), 给定一个临界加速度  $a_c$ , 加速度时程中临界加速度以下的部分不会导致滑块位移, 因此对超过临界加速度的部分分别进行积分, 从而得到滑块的速度时程(图 4b). 再次积分滑块的速度时程, 得到滑块的累积位移(图 4c), 这一位移称为 Newmark 位移. 在计算时需要选择多个临界加速度  $a_c$ , 一般取  $0.02g$ ,  $0.05g$ ,  $0.075g$ ,  $0.10g$ ,  $0.15g$ ,  $0.20g$ ,  $0.25g$ ,  $0.30g$  等, 从而得到一系列不同  $a_c$  下的滑块位移.

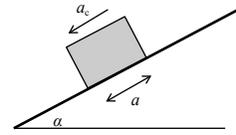


图 3 Newmark 滑块模型  
(引自 Newmark, 1965)

Fig. 3 The Newmark slider model  
(after Newmark, 1965)

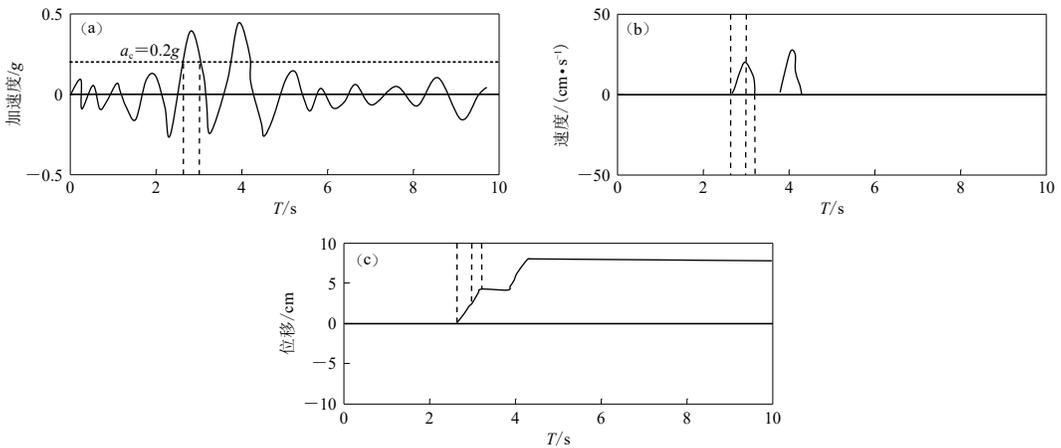


图 4 Newmark 位移计算示意图(引自 Jibson *et al.*, 2000)

(a) 加速度时程; (b) 速度时程; (c) 位移时程

Fig. 4 The schematic diagram of calculation of Newmark displacement (after Jibson *et al.*, 2000)

(a) Acceleration time history; (b) Velocity time history; (c) Displacement time history

## 2 芦山地震阿里亚斯强度特征

该部分研究的主要内容包括阿里亚斯强度的空间分布特征、阿里亚斯强度与 PGA 的相关性以及阿里亚斯强度的衰减特征等.

基于本文第 2 节介绍的地震构造模型和地震动参数计算方法, 我们计算了芦山地震断层距 400 km 以内 79 个台站记录的 237 条强震记录的阿里亚斯强度值, 图 5 给出了这些数值的大小和距离分布. 我们将采用这些数据研究阿里亚斯强度的相关特征.

### 2.1 阿里亚斯强度空间分布特征

图 6 为观测到的芦山地震强地面运动的水平向  $I_A$  分布图. 从图中可以看出,  $I_A$  值较大的台站主要沿着断层走向展布, 并非是以某一点为圆心随着距离的增大而减小. 从图 6 中我们还可以看出  $I_A$  在断层两侧分布不对称: 处在断层东南的台站记录的  $I_A$  值明显要大于那些与其断层距相当的位于断层西北的台站, 这可能是与芦山地震断层破裂方式以及台站

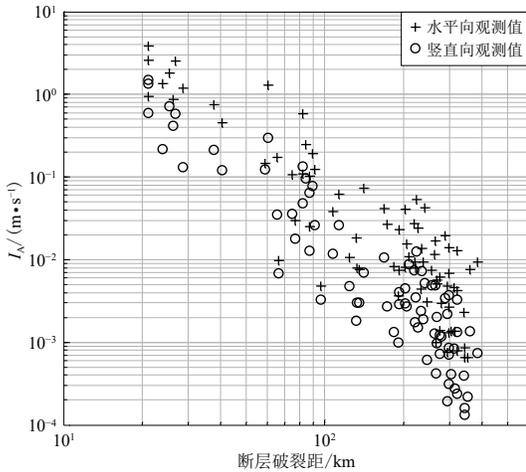


图 5 芦山地震阿里亚斯强度  $I_A$  观测值的大小和距离分布图

Fig. 5 The magnitude and distance distribution of the Arias intensity observed in Lushan earthquake

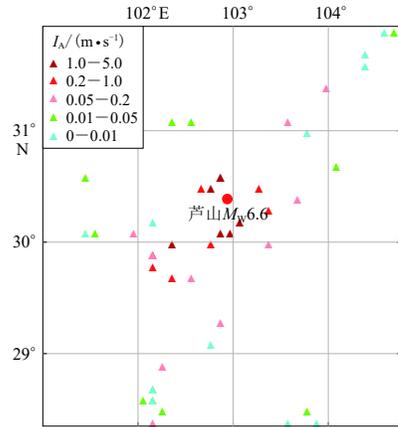


图 6 芦山地震地震动不同方向分量阿里亚斯强度值  $I_A$  的空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of Arias intensity values of different direction components for ground motions in Lushan earthquake

所处的场地条件有关。我们还发现断层走向上东北方向的  $I_A$  值要明显小于西南方向的  $I_A$  值，这可能是与断层的破裂方向有关。因此在未知断层破裂方向的情况下，根据  $I_A$  的空间分布特征也可初步判断断层走向以及破裂的优势方向。

### 2.2 阿里亚斯强度与 PGA 的相关性

PGA 是目前使用最多的一个地震动参数，广泛应用于建筑物的抗震设计中，与地震对建筑物的破坏特征具有很强的相关性，是一个表征地震对建筑物破坏的重要地震动度量指标。然而 PGA 对于一些地震灾害的指示作用十分有限，如山体滑坡和沙土液化等。而包含地震动频率、持时和幅值特性的阿里亚斯强度被发现在地震诱发滑坡、沙土液化等方面具有很强的指示作用。研究阿里亚斯强度与 PGA 的相关性对于相互标定这两个地震动参数的有效性，以及将地震动参数的相互转换用于特定地震灾害的预测具有十分重要的作用。

目前已有一些科研人员研究了阿里亚斯强度与 PGA 的相关性并建立经验关系式 (Arias, 1970; Jibson, 1993; Romeo, 2000; Liu et al., 2015, 2016)。本文我们根据芦山地震水平向的强震记录，来研究芦山地震阿里亚斯强度与 PGA 的关系，并采用线性模型来描述二者的相关性。我们采用最小二乘法估算了模型参数，得到如下经验关系式，即

$$\ln I_A = 1.678 \ln \text{PGA} + 1.767, \sigma_{\ln I_A} = 0.319, \tag{2}$$

式中： $I_A$  为两个水平向阿里亚斯强度值的算数平均值，单位为  $\text{m/s}^2$ ；PGA 的单位是  $g$ 。从图 7a 中我们可以看出，阿里亚斯强度与 PGA 在对数坐标系下具有良好的相关性，相关系数高达 0.98。我们将本文的关系式与 Liu 等 (2015) 采用台湾集集地震 (Chi-Chi earthquake) 的强震数据和 Liu 等 (2016) 根据美国下一代衰减关系数据库 (Next Generation Attenuation Data, 缩写为 NGA) 中的数据建立的关系式作了比较 (图 7)，发现三个关系都能够较好地描述芦山地震中阿里亚斯强度与 PGA 的关系。

场地条件会对地震的强地面运动产生显著影响，因此场地条件也会影响阿里亚斯强度

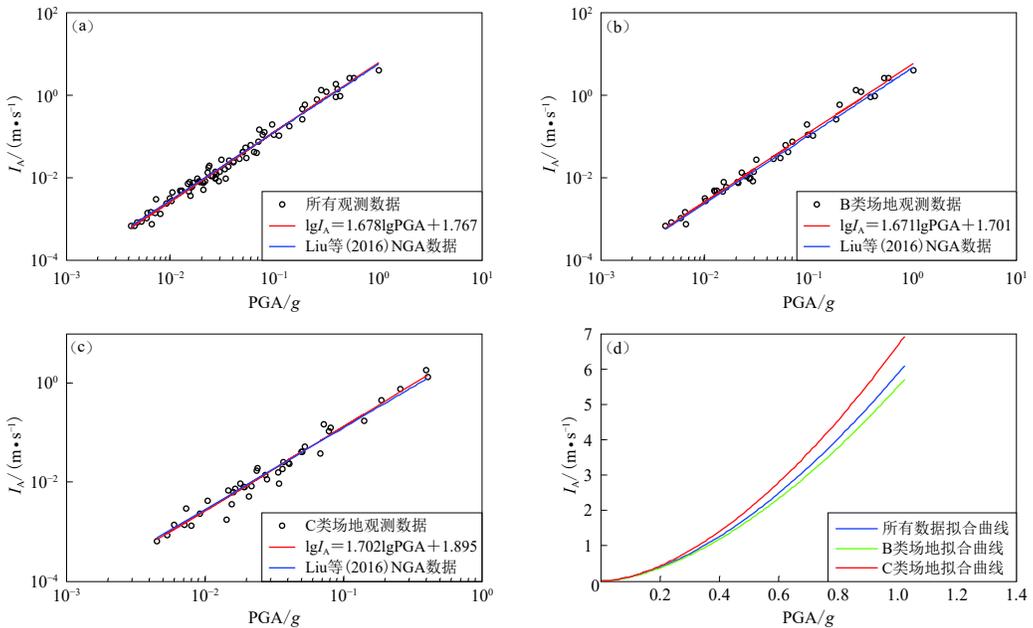


图 7 阿里亚斯强度  $I_A$  与峰值加速度 PGA 的相关性

(a) 采用所有观测数据拟合的  $I_A$  与 PGA 的关系; (b) 根据 B 类场地数据拟合的  $I_A$  与 PGA 的关系; (c) 根据 C 类场地数据拟合的  $I_A$  与 PGA 的关系; (d) 不同场地条件下的  $I_A$  与 PGA 的关系曲线

Fig. 7 The correlation of  $I_A$  with PGA

(a) The correlation between  $I_A$  and PGA fitted with all the observed data; (b) The correlation between  $I_A$  and PGA fitted with the data from the B site; (c) The correlation between  $I_A$  and PGA fitted with the data from the C site; (d) The curves of correlation between  $I_A$  and PGA under different site conditions

与 PGA 的相关性. 为了研究场地条件对二者相关性的影响, 我们也拟合了 B 类场地和 C 类场地条件下的阿里亚斯强度与 PGA 的关系式

$$\begin{cases} \ln I_A = 1.671 \ln \text{PGA} + 1.701, & \sigma_{\ln I_A} = 0.308 & \text{B类场地,} \\ \ln I_A = 1.702 \ln \text{PGA} + 1.895, & \sigma_{\ln I_A} = 0.327 & \text{C类场地.} \end{cases} \quad (3)$$

我们发现在 PGA 较大时, 采用本文关系计算的阿里亚斯强度都相对较大一些. 这是由于芦山地震破裂较为复杂、持时相对较长, 也说明芦山地震相对较大的阿里亚斯强度值不是由场地条件造成的. 从图 7d 我们还可以看出, 场地条件对阿里亚斯强度与 PGA 的相关性具有显著影响: 在 PGA 相同的情况下, 场地越软, 阿里亚斯强度值越大.

Wilson (1993) 的研究表明, 震级对阿里亚斯强度与 PGA 的关系具有显著影响, 这是由于较大震级对应着较长的地震动持时. 为了验证这一观点, 我们分别画出了根据汶川  $M_w 7.9$  地震、集集  $M_w 7.6$  地震以及芦山地震的强震数据拟合的关系曲线(图 8), 可以看出在 PGA 一定的情况下, 震级越大,  $I_A$  也越大.

### 2.3 阿里亚斯强度的衰减特征

由于阿里亚斯强度在地震诱发滑坡预测及地震损失估计中的重要作用, 一些科研人员开展了阿里亚斯强度衰减模型的研究. 本文也以芦山地震为例初步分析了阿里亚斯强度的衰减特征. 从图 9 中可以看出, 芦山地震的阿里亚斯强度随距离呈指数衰减. 我们基于简单

的数学公式，建立芦山地震  $I_A$  随距离的衰减方程式并回归参数，即

$$\ln I_A = A + B \ln \sqrt{R^2 + C^2}, \tag{4}$$

式中， $I_A$  为阿里亚斯强度值， $R$  为距离， $A, B, C$  为常数，根据观测数据回归得到。

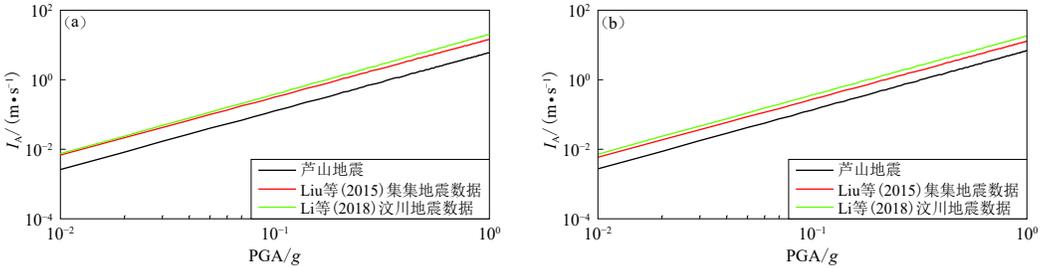


图 8 根据不同地震数据拟合的阿里亚斯强度  $I_A$  与峰值加速度 PGA 关系比较

(a) 采用所有数据; (b) 在 C 类场地条件下

Fig. 8 Comparison of the correlation between  $I_A$  and PGA fitted by different seismic data

(a) The correlation fitted by all data; (b) The correlation fitted only by the data at site C

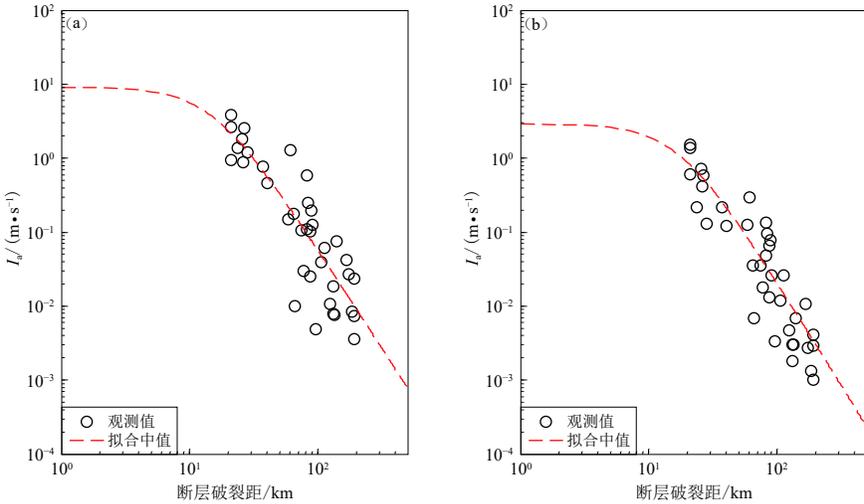


图 9 芦山地震阿里亚斯强度水平分量(a)及竖向分量(b)的衰减特征

Fig. 9 Attenuation characteristics of horizontal component (a) and vertical component (b) for Arias intensity in Lushan earthquake

表 1 列出了方程参数回归值. 我们在下文中将就芦山地震  $I_A$  的衰减特征与已有预测方程进行比较.

目前已有多个发表的阿里亚斯强度衰减模型. Travararou 等(2003)采用全球的强震数据建立了阿里亚斯强度的衰减模型, 该模型考虑了场地条件和震源机制对阿里亚斯强度的影响, 是目前使用最多的模型之一. Stafford 等(2009)根据新西兰的强震数据建立了 4 个阿里亚斯强度预测模型. Lee 等(2012)根据台湾地区的强震数据建立了适用于台湾地区地质构造环境的阿里亚斯强度衰减模型. Foulser-Piggott和 Stafford (2012)根据 NGA 强震数据建立了阿里亚斯强度衰减模型, 该模型考虑了地震动的空间相关性. Campbell 和 Bozorgnia (2012)也根据

NGA 数据建立了阿里亚斯强度预测模型, 该模型考虑了地震的上盘效应及盆地效应等. 上述这些模型的建立均没有使用芦山地震的强震数据. 本文我们从上述模型中选取了 5 个模型 (表 2) 与芦山地震的阿里亚斯强度衰减特征进行比较.

表 1 阿里亚斯强度衰减关系式中的系数及方差

$I_A$	$A$	$B$	$C$	$\sigma_{\ln I_A}$
水平分量	9.508	-2.682	15.216	0.91
竖向分量	9.011	-2.795	17.188	0.78

表 2 本研究中使用的阿里亚斯强度预测模型

Table 2 The prediction models of Arias intensity used in this study

衰减关系	地震事件数	震级范围	距离范围/km	强震记录条数	标准偏差
Travasrou等(2003)	75	M4.7—7.6	0.1—250	1 208	0.871—1.329
Stafford等(2009)模型3	23	M5.1—7.5	0—300	144	1.0190—1.1702
Stafford等(2009)模型4	23	M5.1—7.5	0—300	144	1.0324—1.1821
Lee等(2012)	62	M3.9—7.6	0.3—205	6 570	0.994
Foulser-Piggott和Stafford (2012)	114	M4.79—7.9	0.07—100	2 406	0.893—1.171

由于场地条件对阿里亚斯强度具有显著影响, 我们根据上文第 2 部分介绍的场地分类方法, 将记录芦山地震强震台站的场地分为 B, C 两类, 分别研究了这两类场地条件下芦山地震的阿里亚斯强度衰减特征. 图 10 为两类场地条件下芦山地震的阿里亚斯强度衰减特征及其与上述 5 个模型的比较. 从该图中可以看出, 在 C 类场地上, Travasarou 等 (2003) 的模型、Foulser-Piggott 和 Stafford (2012) 的模型与观测数据符合较好, 而 Stafford 等 (2009) 的模型 3、模型 4 和 Lee 等 (2012) 的模型在距离较大时的预测值显著小于观测值. Stafford 等 (2009) 模型和 Lee 等 (2012) 模型使用的是俯冲带地震的强震数据, 而芦山地震为内陆强震, 这也说明了内陆地震的地震动衰减要比俯冲带地震的慢一些. 在 B 类和 C 类场地上, 当断层距大于 20 km

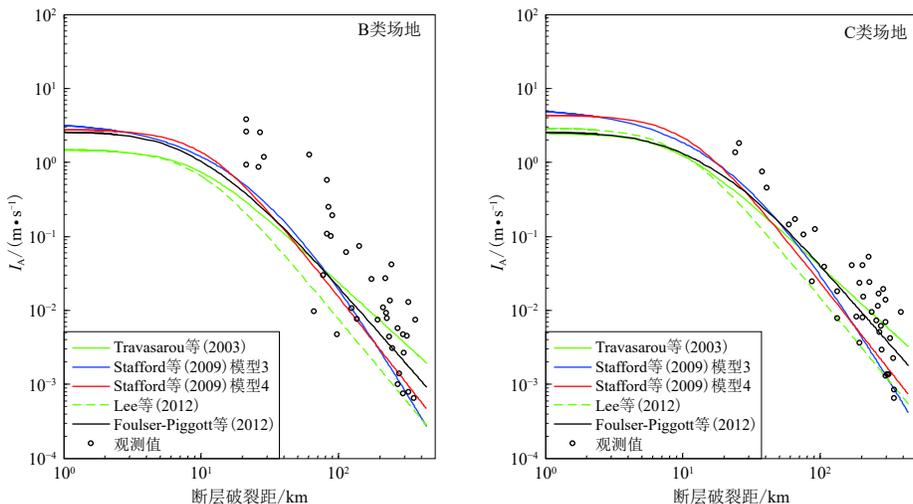


图 10 B 类和 C 类场地条件下芦山地震阿里亚斯强度  $I_A$  观测值的衰减特征及其与模型预测值的比较  
Fig. 10 Comparisons between the attenuation characteristics of observed values of Arias intensity in Lushan earthquake and the predicted values derived from 5 above-mentioned models respectively for sites B and C

时，芦山地震的阿里亚斯强度要显著大于模型的预测值。由此推断，导致芦山地震的阿里亚斯强度相对模型预测值较大的原因主要有以下两个：一是相较于相同震级的地震，芦山地震持时相对较长；二是芦山地震震源破裂过程非常复杂，从而产生了非常丰富的高频地震动。

阿里亚斯强度是一个与能量密切相关的地震动参数。芦山地震断层破裂过程复杂，能量辐射在空间上具有很强的非平稳性，这就会导致阿里亚斯强度具有一定的随机不确定性。在考虑了阿里亚斯强度的随机不确定性后，我们将观测到的阿里亚斯强度与 [Travasari 等 \(2003\)](#) 模型、[Foulser-Piggott 和 Stafford \(2012\)](#) 模型加减小一倍标准偏差的预测值作了比较 (图 11)。我们发现在 B 类场地上仍有 30% 以上的观测值大于模型加上一倍标准偏差的预测值，这也再次说明了芦山地震的阿里亚斯强度值相对较大。在 C 类场地上，观测值较好地分布在一倍方差之间，但总体上观测值仍稍大于预测值。

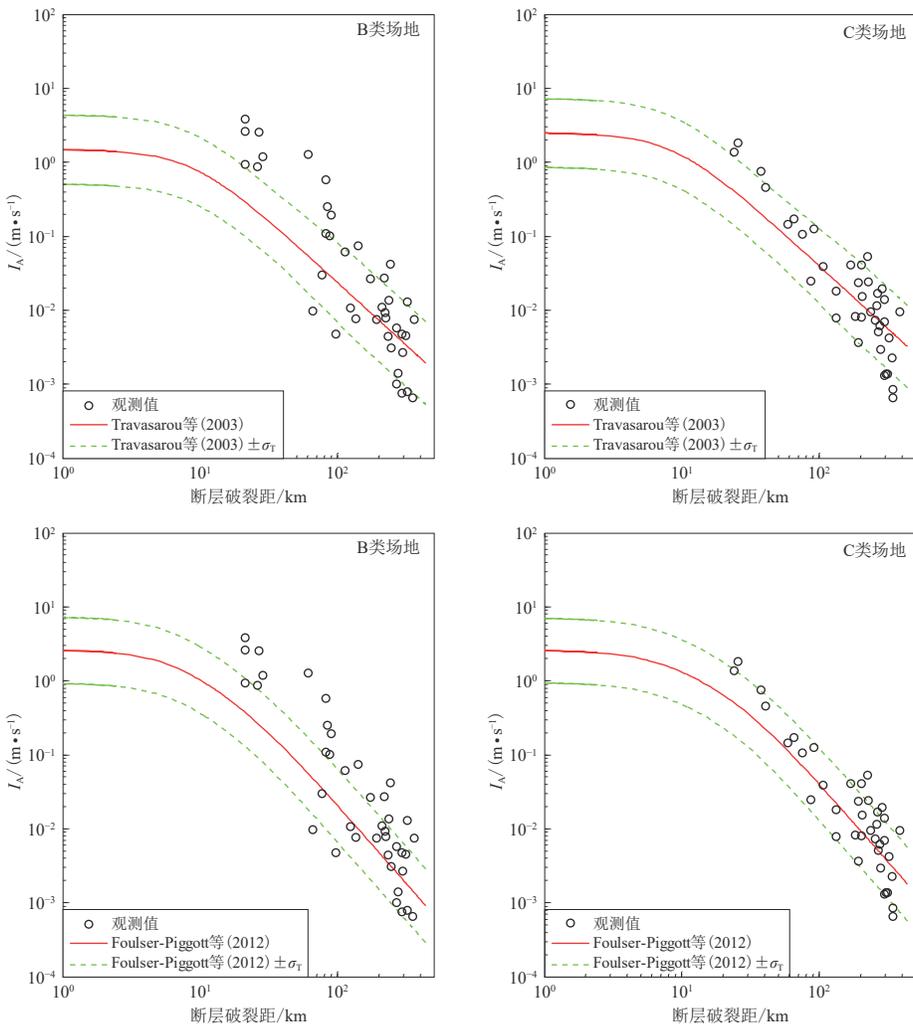


图 11 芦山地震阿里亚斯强度  $I_A$  观测值与预测模型加减小一倍标准偏差的预测值的比较

Fig. 11 Comparison between the observed values of Arias intensity  $I_A$  in Lushan earthquake and the predicted values derived from prediction models with plus or minus one standard deviation under two site conditions

地震动预测方程的标准偏差主要由两部分组成, 即地震事件间(inter-event)的标准偏差 $\tau$ 和地震事件内(intra-event)的标准偏差 $\sigma$ 。本文中我们将上述模型考虑两倍 $\tau$ 后的预测值(95%的置信区间)与芦山地震的阿里亚斯强度观测值作了比较(图12)。从图12中可以看出, 在B类场地上, 当距离大于20 km时, 仍有30%左右的观测值处在模型95%置信区间以上, 这又再次说明了芦山地震的阿里亚斯强度观测值显著大于目前模型预测值。

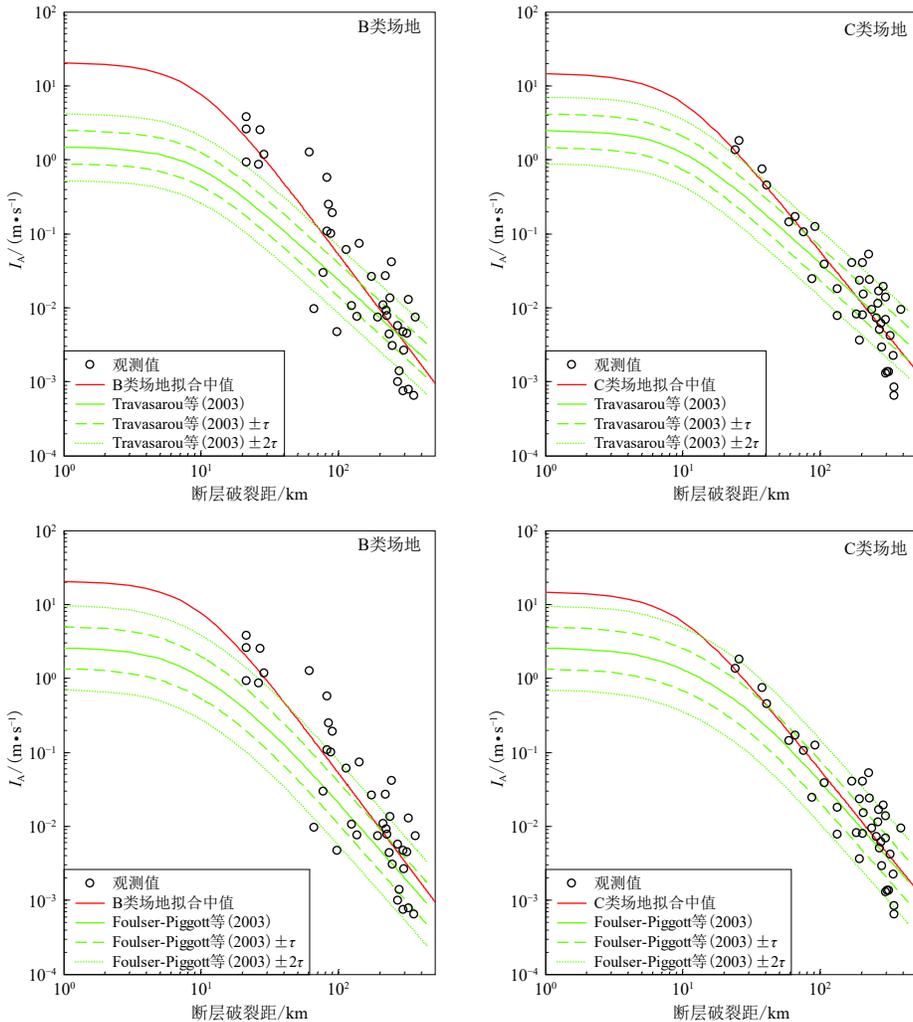


图12 芦山地震阿里亚斯强度衰减均值(红线)及观测值与 Travarou 等(2003)、Foulser-Piggott 和 Stafford (2012)模型及其一倍和两倍地震事件间标准偏差 $\tau$ 模型比较

Fig. 12 Comparison of the mean values (red line) and observed values of attenuation of Arias intensity in Lushan earthquake with Travarou *et al* (2003) and Foulser-Piggott and Stafford (2012) models, in which the above two models respectively consider the plus or minus one and double standard deviation  $\tau$  under two site conditions

通过上述分析我们可知, 目前的 Travarou 等(2003)模型、Foulser-Piggott 和 Stafford (2012)模型能够较好地描述芦山地震阿里亚斯强度观测值在C类场地的衰减特征, 而在B类场地上, 芦山地震的阿里亚斯强度观测值要显著大于上述模型的预测值, 这是由于芦山地震

破裂时间较长、破裂过程复杂导致的。

### 3 芦山地震 Newmark 位移特征研究

本文还简单分析了芦山地震强地面运动的 Newmark 位移特征。根据本文第 2 部分介绍的 Newmark 位移计算方法，使用芦山地震的强震记录计算了 0.02g, 0.05g, 0.075g, 0.10g, 0.15g 和 0.20g 六个临界加速度下的 Newmark 位移，并根据这些数据研究芦山地震的 Newmark 位移特征。

Newmark 位移在滑坡预测和滑坡稳定性分析中具有重要作用。目前已有一些科研人员开展了 Newmark 位移预测模型的研究 (Ambraseys, Menu, 1988; Jibson, 2007; Saygili, Rathje, 2008; Hsieh, Lee, 2011; Urzúa, Christian, 2013)，这些模型大都将 Newmark 位移看作是临界加速度  $a_c$  和其它地震动参数(如 PGA,  $I_A$ )的函数。在使用这些预测模型时，需要先根据地震动预测方程计算出 PGA 或  $I_A$ ，然后将求得的 PGA 或  $I_A$  代入 Newmark 预测方程来计算 Newmark 位移。Du 和 Wang (2016) 则建立以震级、距离和场地条件  $v_{S30}$  为参数的 Newmark 位移预测模型，该模型可更加方便地应用到概率滑坡预测中。

本文中我们主要研究了芦山地震 Newmark 位移与 PGA 和  $I_A$  的相关性，并初步分析了芦山地震 Newmark 位移的衰减特征。

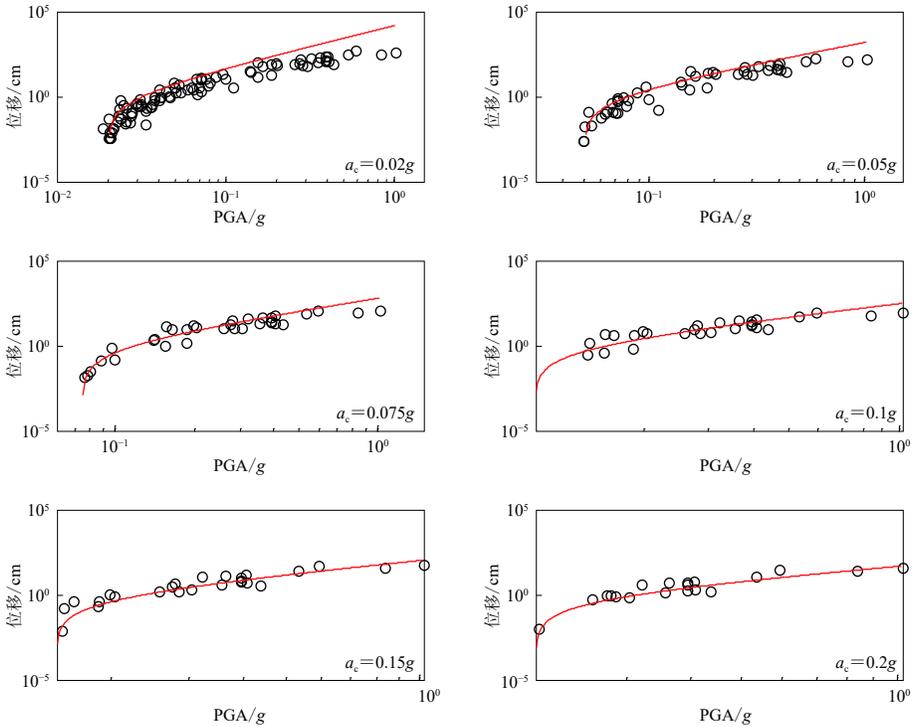


图 13 Newmark 位移与 PGA 的相关性及与 Jibson 和 Michael (2009) 模型的比较

Fig. 13 Correlation between Newmark displacement and PGA and its comparison with Jibson and Michael (2009) model

### 3.1 Newmark 位移与地震动参数的相关性

#### 3.1.1 Newmark 位移与 PGA 的相关性

图 13 为芦山地震 Newmark 位移随 PGA 变化的散点图. 从图中可以看出, 在对数坐标下, Newmark 位移与 PGA 呈非线性关系, 二者相关系数大于 90%.

目前已有多位研究人员建立了以 PGA 为参数的 Newmark 位移预测方程 (Ambraseys, Menu, 1988; Jibson, Michael, 2009), 其中 Jibson 和 Michael (2009) 的方程与观测数据的吻合度最好 (图 13), 并且已应用到美国洛杉矶地区的滑坡危险性预测中, 因此我国在进行滑坡危险性分析时也可以采用该 Newmark 位移预测模型. Jibson 和 Michael (2009) 的模型表达式为

$$\lg D = c_1 + \lg \left[ \left( 1 - \frac{a_c}{\text{PGA}} \right)^{c_2} \left( \frac{a_c}{\text{PGA}} \right)^{c_3} \right], \quad (5)$$

基于式 (5), 根据芦山地震不同临界加速度下的 Newmark 位移, 我们拟合了方程参数, 得到 Newmark 位移与 PGA 的经验公式, 即

$$\ln D = 0.233 + \ln \left[ \left( 1 - \frac{a_c}{\text{PGA}} \right)^{1.351} \left( \frac{a_c}{\text{PGA}} \right)^{2.318} \right], \quad \sigma_{\ln D} = 0.81. \quad (6)$$

#### 3.1.2 Newmark 位移与 $I_A$ 的相关性

图 14 为芦山地震 Newmark 位移随  $I_A$  变化的散点图. 从图 14 中可以看出, 在对数坐标下, Newmark 位移与  $I_A$  呈现良好的线性关系, 二者相关系数大于 94%. 由此可知, Newmark 位移与  $I_A$  相关性要强于其与 PGA 的相关性.

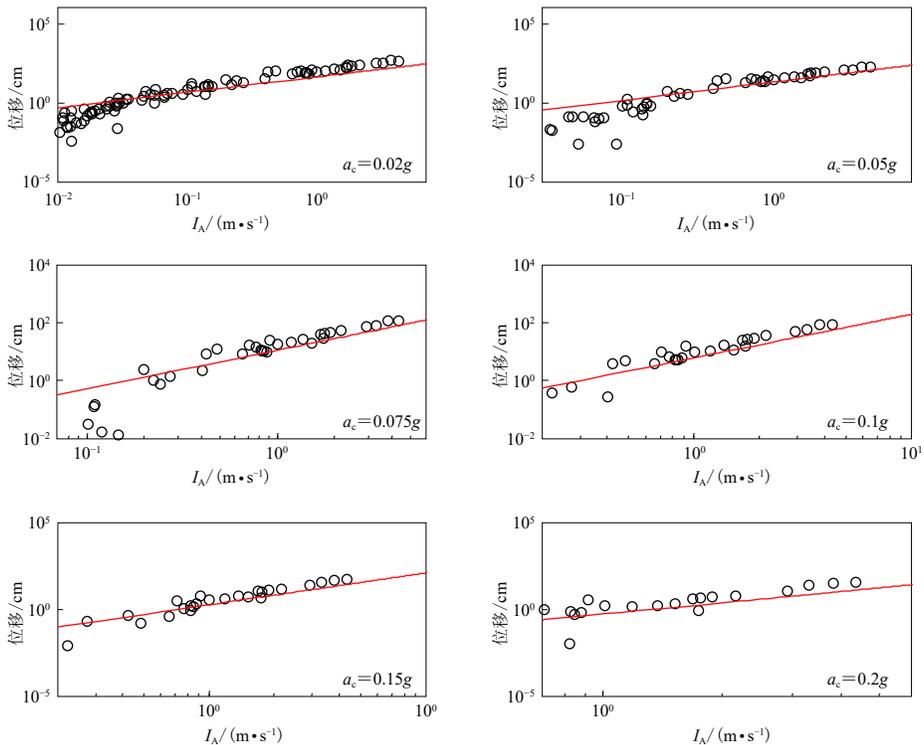


图 14 Newmark 位移与阿里亚斯强度  $I_A$  的相关性及与 Hsieh 和 Lee (2011) 模型比较

Fig. 14 Correlation between Newmark displacement and  $I_A$  and its comparison with Hsieh and Lee (2011) model

从图 14 还可以看出, 芦山地震 Newmark 位移与  $I_A$  的相关性与 Hsieh 和 Lee (2011) 的模型具有很好的吻合度, 在进行概率滑坡危险性分析时, 我们也可以采用该模型来计算 Newmark 位移的均值和不确定性. 基于 Hsieh 和 Lee (2011) 的模型, 我们采用芦山地震的数据拟合了方程参数, 得到 Newmark 位移与  $I_A$  的经验关系式, 即

$$\ln D = 0.852 \ln I_A - 10.51 a_c + 6.563 a_c \ln I_A + 1.86, \quad \sigma_{\ln D} = 0.68. \quad (7)$$

### 3.2 Newmark 位移衰减特征

图 15 为 4 种临界加速度下 Newmark 位移随距离的衰减曲线. 从图中可以看出, Newmark 位移随着距离的增大呈指数衰减, 并且具有较大的离散性. 通过与现有模型, 即 Du 和 Wang (2016) 模型预测值的比较, 我们发现在距离介于 20—100 km 的区间内, 观测值要显著大于模型预测值. 这意味着 Du 和 Wang (2016) 模型不能很好地描述芦山地震 Newmark 位移的衰减特征.

本文中我们仅将观测值与 Du 和 Wang (2016) 的直接模型作了比较. 对于那些间接计算 Newmark 位移的预测模型, 还需要用到其它地震动预测方程计算 PGA 或  $I_A$ . 而其它地震动预

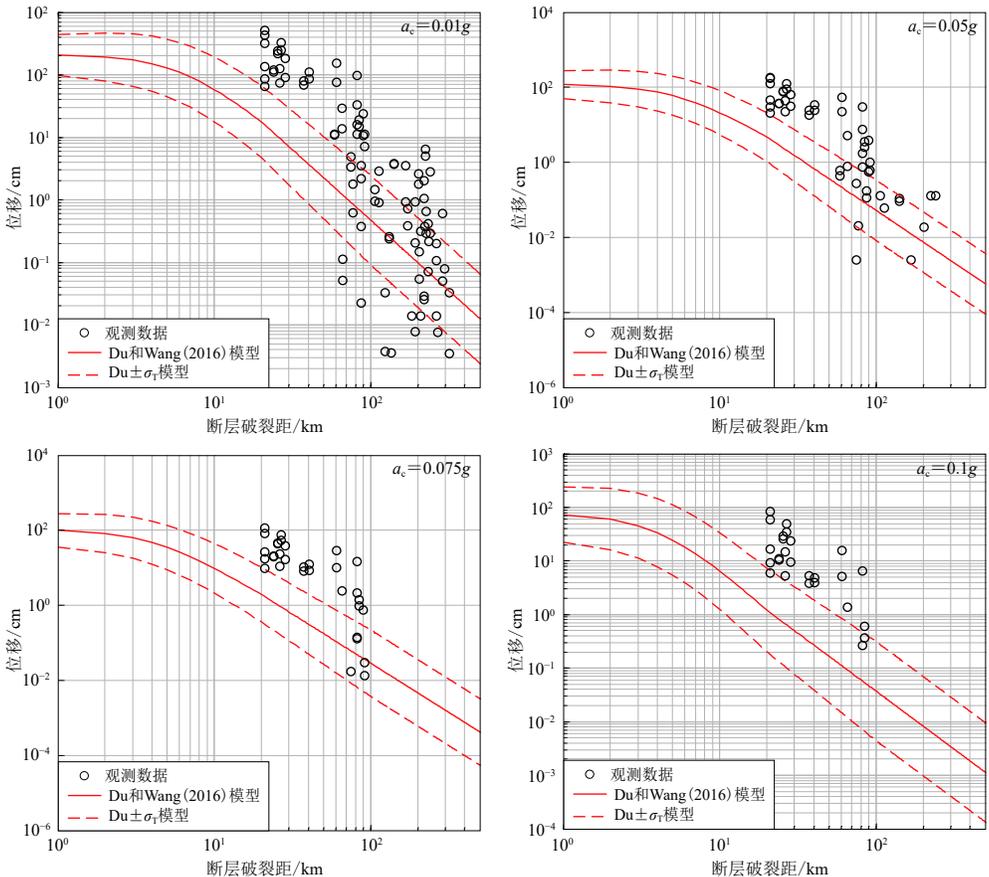


图 15 不同临界加速度下 Newmark 位移衰减特征及其与 Du 和 Wang (2016) 模型预测值的比较  
 Fig. 15 The attenuation characteristics of Newmark displacement under different critical accelerations in Lushan earthquake and their comparison with the predicted values derived from Du and Wang (2016) model

测方程也不能有效地描述芦山地震的 PGA 和  $I_A$  衰减特征, 这势必会导致采用间接模型计算的 Newmark 位移与观测值不能较好地吻合, 因此文中就不再赘述。

由于在临界加速度为  $0.02g$  时, 可用数据点相对较多, 我们又研究了不同场地条件下 Newmark 位移的衰减特征。图 16 为在 B 类和 C 类场地条件下芦山地震 Newmark 位移衰减特征及其与 Du 和 Wang (2016) 模型比较。从图中可以看出, 无论在何种场地条件下, 芦山地震的观测值均大于模型预测值。相对而言, 在 C 类场地条件下, 观测值与预测值吻合较好一些。这也再次证明了现有模型不能较好地描述芦山地震的 Newmark 位移衰减特征, 说明了芦山地震的特殊性, 也意味着地震地质环境对地震动衰减特征具有一定的影响, 因此, 应当建立适合我国地震地质环境的 Newmark 位移衰减公式。

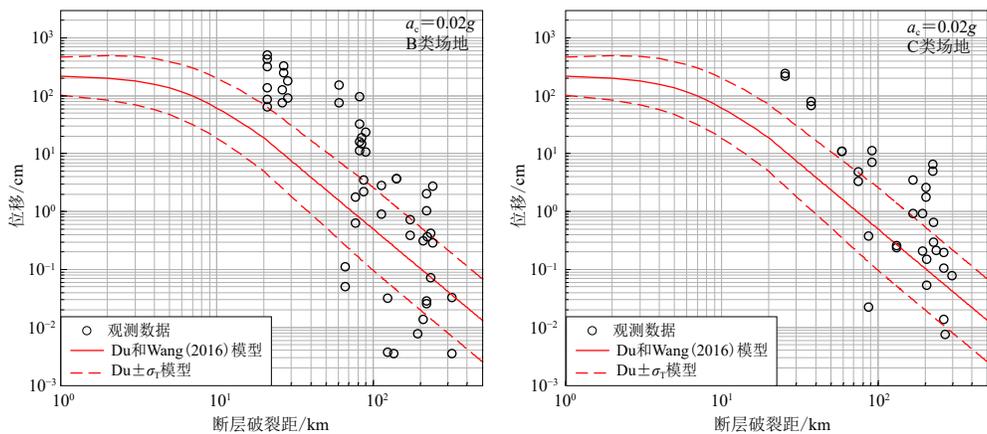


图 16 不同场地条件下 Newmark 位移衰减特征及其与 Du 和 Wang (2016) 模型预测值的比较

Fig. 16 The attenuation characteristics of Newmark displacement and its comparison with the predicted values of Du and Wang (2016) model under different site conditions

## 4 讨论与结论

本文根据芦山地震的强震数据, 研究了芦山地震的阿里亚斯强度和 Newmark 位移特征, 得到许多有意义的结论。

研究表明, 阿里亚斯强度的空间分布与地震断层空间展布和地震破裂方向具有相关性, 因此在未知断层破裂方向的情况下, 根据  $I_A$  的空间分布特征也可初步判断断层走向以及破裂的优势方向。阿里亚斯强度与 PGA 有较好的相关性, 场地条件也会对地震动参数之间的相关性产生显著影响, PGA 相同时, 场地越软, 阿里亚斯强度越大。通过与其它经验关系式的比较, 我们还发现震级也是影响阿里亚斯强度与 PGA 相关性的重要因素, PGA 相同时, 震级越大, 阿里亚斯强度也越大。这是由于震级越大、持时越长, 而阿里亚斯强度与持时密切相关。

通过对芦山地震阿里亚斯强度衰减特征的分析以及与当前阿里亚斯强度预测模型比较, 我们发现 Travararou 等 (2003) 模型、Foulser-Piggott 和 Stafford (2012) 模型能够较好地描述芦山地震阿里亚斯强度观测值在 C 类场地的衰减特征; 而在 B 类场地上, 阿里亚斯强度观测值要显著大于上述模型的预测值。造成这种差异的具体原因可能是芦山地震本身的破裂时

间较长且破裂过程复杂. 另一方面, 地震地质构造环境的差异导致了当前的阿里亚斯强度预测模型不能较好地描述芦山地震阿里亚斯强度的衰减特征. 因此, 研究适用于我国地震地质构造环境的阿里亚斯强度预测模型是非常必要的.

通过对芦山地震的 Newmark 位移特征的研究表明, Newmark 位移与 PGA 和  $I_A$  均具有较好的相关性, 其中与  $I_A$  的相关性更强, 相关系数可达 0.94 以上. 因此, 在进行滑坡稳定性分析和概率滑坡预测时, 可采用基于  $I_A$  的 Newmark 位移预测模型. 更进一步地, 我们基于数学模型, 根据芦山地震的强震数据, 拟合了模型参数, 得到了适用于我国西部地区的 Newmark 位移分别与  $I_A$  和 PGA 的经验关系式.

芦山地震 Newmark 位移随着距离的增大呈指数衰减, 并且具有较大的离散性. 通过与现有模型 (Du, Wang, 2016) 预测值的比较, 我们发现当前的 Newmark 位移预测方程不能有效地描述芦山地震 Newmark 位移的衰减特性, 这又再次说明了芦山地震的特殊性. 芦山地震的特殊性揭示了我国西部地震地质构造环境与其它地区有显著差异, 因此应该研究适用于我国西部地区地震的地震动参数预测方程. 未来也可研究震源破裂过程和地震动频谱对  $I_A$  和 Newmark 位移的影响, 以期对二者的特性有更加深入的认识.

### 参 考 文 献

- 陈启国, 葛华, 周洪福. 2011. 利用 Newmark 方法进行地震滑坡制图: 以映秀研究区为例 [J]. *中国煤炭地质*, **23**(11): 44-48.
- Chen Q G, Ge H, Zhou H F. 2011. Mapping of seismic triggered landslide through Newmark method: An example from study area Yingxiu [J]. *Coal Geology of China*, **23**(11): 44-48 (in Chinese).
- 陈晓利, 袁仁茂, 庾露. 2013. Newmark 方法在芦山地震诱发滑坡分布预测研究中的应用 [J]. *地震地质*, **35**(3): 661-670.
- Chen X L, Yuan R M, Yu L. 2013. Applying the Newmark's model to the assessment of earthquake-triggered landslides during the Lushan earthquake [J]. *Seismology and Geology*, **35**(3): 661-670 (in Chinese).
- 刘甲美, 王涛, 石菊松, 栗泽桐. 2017. 四川九寨沟  $M_s7.0$  级地震滑坡应急快速评估 [J]. *地质力学学报*, **23**(5): 639-645.
- Liu J M, Wang T, Shi J S, Li Z T. 2017. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Jiuzhaigou  $M_s7.0$  earthquake, Sichuan, China [J]. *Journal of Geomechanics*, **23**(5): 639-645 (in Chinese).
- 刘甲美, 王涛, 石菊松, 辛鹏, 吴树仁. 2018. 基于不同位移预测模型的地震滑坡危险性评估研究: 以天水地区为例 [J]. *地质力学学报*, **24**(1): 87-95.
- Liu J M, Wang T, Shi J S, Xin P, Wu S R. 2018. The influence of different Newmark displacement models on seismic landslide hazard assessment: A case study of Tianshui area, China [J]. *Journal of Geomechanics*, **24**(1): 87-95 (in Chinese).
- 王涛, 吴树仁, 石菊松, 辛鹏. 2013. 基于简化 Newmark 位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估: 以汶川  $M_s8.0$  级地震为例 [J]. *工程地质学报*, **21**(1): 16-24.
- Wang T, Wu S R, Shi J S, Xin P. 2013. Case study on rapid assessment of regional seismic landslide hazard based on simplified Newmark displacement model: Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, **21**(1): 16-24 (in Chinese).
- 许冲, 王世元, 徐锡伟, 张合, 田颖颖, 马思远, 房立华, 鲁人齐, 陈立春, 谭锡斌. 2018. 2017年8月8日四川省九寨沟  $M_s7.0$  地震触发滑坡全景 [J]. *地震地质*, **40**(1): 232-260.
- Xu C, Wang S Y, Xu X W, Zhang H, Tian Y Y, Ma S Y, Fang L H, Lu R Q, Chen L C, Tan X B. 2018. A panorama of landslides triggered by the 8 August 2017 Jiuzhaigou, Sichuan  $M_s7.0$  earthquake [J]. *Seismology and Geology*, **40**(1): 232-260 (in Chinese).
- 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 王晓放. 2012. 基于汶川地震强震动记录的边坡永久位移预测模型 [J]. *岩土工程学报*, **34**(6): 1131-1136.
- Xu G X, Yao L K, Li C H, Wang X F. 2012. Predictive models for permanent displacement of slopes based on recorded strong-

- motion data of Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **34**(6): 1131–1136 (in Chinese).
- Ambraseys N N, Menu J M. 1988. Earthquake-induced ground displacements[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **16**(7): 985–1006.
- Arias A. 1970. A measure of earthquake intensity[G]//*Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge, MA, MIT Press: 438–483.
- Bray J D, Travasarou T. 2007. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, **133**(4): 381–392.
- Campbell K W. 2009. Estimates of shear-wave Q and  $\kappa_0$  for unconsolidated and semiconsolidated sediments in eastern North America[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **99**(4): 2365–2392.
- Campbell K W, Bozorgnia Y. 2012. A comparison of ground motion prediction equations for Arias intensity and cumulative absolute velocity developed using a consistent database and functional form[J]. *Earthq Spectra*, **28**(3): 931–941.
- Du W Q, Wang G. 2016. A one-step Newmark displacement model for probabilistic seismic slope displacement hazard analysis[J]. *Eng Geol*, **205**: 12–23.
- Egan J A, Rosidi D. 1991. Assessment of earthquake: Induced liquefaction using ground-motion energy characteristics[C]//*Proceedings of the Pacific Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand: 1–8.
- Foulser-Piggott R, Stafford P J. 2012. A predictive model for Arias intensity at multiple sites and consideration of spatial correlations[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **41**(3): 431–451.
- Gaudio V D, Pierri P, Wasowski J. 2003. An approach to time-probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(2): 557–569.
- Gülerce Z, Balal O. 2017. Probabilistic seismic hazard assessment for sliding displacement of slopes: An application in Turkey[J]. *Bull Earthq Eng*, **15**(7): 2737–2760.
- Harp E L, Wilson R C. 1995. Shaking intensity thresholds for rock falls and slides: Evidence from 1987 Whittier Narrows and Superstition Hills earthquake strong-motion records[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **85**(6): 1739–1757.
- Hsieh S Y, Lee C T. 2011. Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration[J]. *Eng Geol*, **122**(1/2): 34–42.
- Jibson R W. 1993. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis[J]. *Transport Res Rec*, **1411**: 9–17.
- Jibson R W, Harp E L, Michael J A. 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. *Eng Geol*, **58**(3/4): 271–289.
- Jibson R W. 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement[J]. *Eng Geol*, **91**: 209–218.
- Jibson R W, Michael J A. 2009. Maps showing seismic landslide hazards in Anchorage, Alaska[Z]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3077.
- Kayen R E, Mitchell J K. 1997. Assessment of liquefaction potential during earthquakes by Arias intensity[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, **123**(12): 1162–1174.
- Keefer D K. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes: A historical review[J]. *Surv Geophys*, **23**: 473–510.
- Kramer S L. 1989. Uncertainty in steady state liquefaction evaluation procedures[J]. *J Geotech Eng*, **115**(10): 1402–1421.
- Kramer S L, Mitchell R A. 2006. Ground motion intensity measures for liquefaction hazard evaluation[J]. *Earthq Spectra*, **22**(2): 413–438.
- 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.
- Liu J M, Gao M T, Xie J J. 2015. Spatial variability and attenuation of Arias intensity during the 1999 Chi-Chi  $M_w 7.6$  earthquake, Taiwan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **105**(3): 1768–1778.
- Liu J M, Wang T, Wu S R, Gao M T. 2016. New empirical relationships between Arias intensity and peak ground acceleration[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **106**(5): 2168–2176.
- Melgar D, Bock Y, Sanchez D, Crowell B W. 2013. On robust and reliable automated baseline corrections for strong motion seismology[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, **118**(3): 1177–1187.
- Newmark N M. 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. *Géotechnique*, **15**(2): 139–160.

- Rathje E M, Saygili G. 2009. Probabilistic assessment of earthquake-induced sliding displacements of natural slopes[J]. *Bull NZ Soc Earthq Eng*, **42**(1): 18–27.
- Romeo R. 2000. Seismically induced landslide displacements: A predictive model[J]. *Eng Geol*, **58**(3/4): 337–351.
- Saygili G, Rathje E M. 2008. Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, **134**(6): 790–803.
- 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.
- Urzúa A, Christian J T. 2013. Sliding displacements due to subduction-zone earthquakes[J]. *Eng Geol*, **166**: 237–244.
- USGS. 2013. *M* 6.6: 56 km WSW of Linqiong, China[EB/OL] [2020-03-11]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/usb000gcdd/executive>.
- Wald D J, Allen T I. 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(5): 1379–1395.
- Wang R J, Schurr B, Milkereit C, Shao Z G, Jin M P. 2011. An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion records[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(5): 2029–2044.
- Wilson R C. 1993. Relation of Arias intensity to magnitude and distance in California. Menlo Park, California, U.S. Geological Survey: 93–556.