

李平,鞠雅倩,徐建元,等. 2023. 我国黄土地区土层地震动峰值加速度衰减关系研究[J]. 地震研究, 46(4): 586–592, doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2023. 0028.

Li P, Ju Y Q, Xu J Y, et al. 2023. Study on the ground-motion attenuation relation in the Loess region of China[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4): 586–592, doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2023. 0028.

我国黄土地区土层地震动峰值加速度衰减关系研究^{*}

李平^{1,2}, 鞠雅倩^{1,2}, 徐建元^{1,2}, 欧阳刚垒¹

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 收集、筛选并整理了2001—2019年我国黄土地区发生的141次 M_s 2.4~6.7地震的1092条台站记录, 选取台站中两水平向峰值加速度偏高的值作为拟合值, 采用两步回归法拟合得到了我国黄土地区水平向土层地震动衰减关系, 分析了地震动残差随震级和距离的分布趋势, 并将衰减关系和已有研究成果进行了对比。结果表明: 绝大多数实测值均在拟合峰值加速度衰减曲线 ± 1 倍标准差范围以内, 模型能较好地反映中国黄土地区峰值加速度随距离衰减的趋势。

关键词: 黄土地区; 地震动; 峰值加速度; 两步回归; 衰减关系

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2023)04–0586–07
doi:10.20015/j.cnki. ISSN1000–0666. 2023. 0028

0 引言

地震引发的建筑物破坏和地质灾害给人类造成了难以估计的损失。其中, 我国黄土地区由于地表切割剧烈, 导致冲沟、崩塌、滑坡以及泥石流等地质灾害极为发育, 其震害的影响更为严重, 致灾范围也更广(徐世芳, 李博, 2000)。如1920年宁夏海源8.5级地震, 2010年青海玉树7.1级地震都导致多人遇难, 倒塌房屋不计其数。黄土微结构独特的动力性质也使该地区具有极高的地震易损性, 如1986年山西运城3.1~3.9级地震群, 震后20天内发生了487次地震, 同样引起许多房屋和黄土窑洞的变形或倒塌(王兰民, 2006)。因此提高黄土地区的抗震设防水平十分必要。

地震动衰减关系是表征地震动参数随震级、距离、场地等因素变化规律的函数关系, 也是震后快速预估地震动影响、地震动区划和地震

危险性分析等工作的重要组成部分, 对提高地区的抗震设防水平有着重要的意义(袁一凡, 2012)。而地震动峰值加速度(PGA)数据更容易获取, 且常被用于反映地震动强度以及对结构的影响程度, 因此是研究衰减关系时的首选因素(Douglas, 2004)。

受震源特性、地质特性、传播路径等因素的影响, 各区域地震动衰减关系往往表现出较大的差异性, 因此建立反映不同区域特点的地震动衰减关系一直是研究的热点, 也是十分有意义的工作, 许多学者在分区地震动衰减关系研究上取得了众多成果(Chiou et al., 2010)。如汪素云等(2000)以105°E为界将中国分为东部和西部两个地区, 并利用美国西部丰富的地震动数据, 采用地震动与烈度转换的方法分别拟合出了我国东西部的地震动衰减关系; 周典(2019)基于我国西部地区发生的42次地震数据, 对比了7个国际上通用的衰减关系, 认为霍俊荣(1989)的衰减模型更符合实测数据的衰减趋势, 然后对

^{*} 收稿日期: 2022–06–04.

基金项目: 中央高校基本科研业务专项(20215105); 国家自然科学基金——地震科学联合基金项目(U1939209); 中国地震局科技星火公关项目(XH20084)。

第一作者简介: 李平(1981–), 教授, 博士, 主要从事场地效应及岩土工程抗震方面研究。
E-mail: chinaliping1981@126.com.

该衰减模型进行了基于残差分析的修正, 让其更适合中国西部地区。但这些研究并没有针对黄土地区, 无法更准确地得到黄土地区的地震动衰减规律。杨帆等 (2011) 基于 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震及其余震资料, 选用霍俊荣 (1989) 提出的衰减模型, 首次利用直接拟合的方法得到了中国黄土地区的土层 PGA 衰减关系, 直接回归的预测误差更小, 但由于汶川地震震级本身偏大, 且余震的地震性质与主震不同, 其衰减关系模型应用到一般黄土地区的衰减关系预测时相对偏高。鉴于此, 本文基于 2001—2019 年我国黄土地区发生的包括主震和余震在内的共 141 次地震资料, 对地震进行筛选、处理, 并采用两步回归方法拟合出适合我国黄土地区的土层峰值加速度衰减关系。

1 强震动数据的收集与处理

1.1 数据选取

本文选取中国地震局工程力学研究所强震动观测与工程振动中心提供的 2001—2019 年我国黄土地区发生的包括主震和余震在内的共 141 次地震的 1 092 条台站记录, 震级范围为 $M_s 2.4 \sim 6.7$, 各地震震中及台站分布如图 1 所示, 地震主要分布在祁连山、贺兰山、太行山, 这些山脉都处于汾

渭、银川—河套、龙门山以及六盘山—祁连山等地震带。由于主震和余震的诱发机制不同, 因此本次研究不考虑余震记录。工程中的地震动往往针对自由地表, Campbell (1981) 认为有明显场地效应的环境会改变自由地表的记录, 因此在进行衰减关系研究时通常选择自由场地的数据。在数据筛选时, 发现有些台站的两个水平向的 PGA 差值太大, 超过了 1.4 倍, 甚至超过了 2 倍 (图 2), 将这些异常台站数据剔除。最终获得的台站信息大多为 II 类场地, 因此本文针对 II 类土层台站进行研究。

对数据进行如下筛选: ①剔除台站三个分量有缺乏的记录; ②剔除基岩场地记录; ③剔除异常台站记录; ④剔除震中距大于 500 km 的台站记录; ⑤剔除余震记录; ⑥剔除非自由场地记录; ⑦剔除记录到单次地震的台站数量低于 3 个的记录; ⑧剔除质量差的记录 (Abrahamson *et al*, 2014), 最后选取到 79 次地震的 898 条台站记录, 所选记录的震级—震中距分布如图 3 所示。震中距 50 km 以内的台站有 313 个, 震中距 50 ~ 100 km 的台站共有 202 个, 震中距 100 ~ 200 km 的台站有 197 个, 震中距 200 ~ 300 km 的台站有 51 个, 记录的均为 4 级以上地震动数据, 震中距 300 ~ 500 km 的台站有 33 个, 记录的几乎都为 6 级及以上地震动数据。

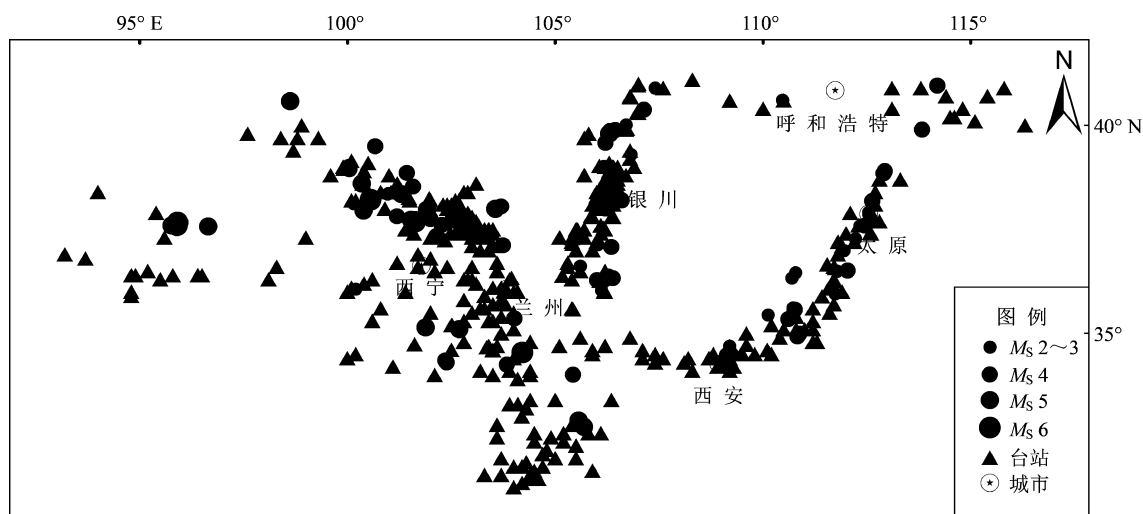


图 1 2001—2019 年黄土地区 $M_s 2.4 \sim 6.7$ 地震和台站分布

Fig. 1 Distribution of $M_s 2.4 \sim 6.7$ earthquakes from 2001 to 2019 and seismic stations in the study area

1.2 数据处理

对筛选后的数据先进行基线校正处理, 再进

行滤波处理。周宝峰等 (2012) 对因果滤波器和非因果滤波器进行比较, 对 4 种滤波器在不同阶数

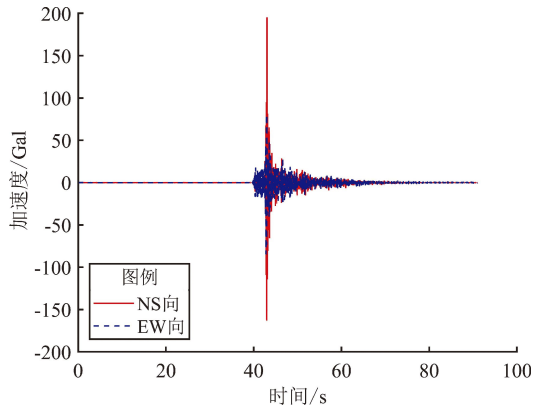


图2 异常台站加速度时程曲线图

Fig. 2 Abnormal acceleration-time history recorded by a station

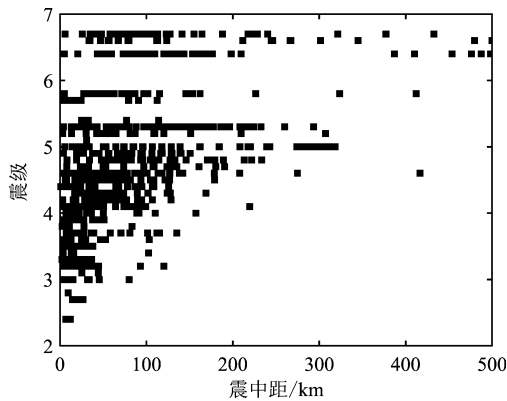


图3 震级—震中距分布图

Fig. 3 Magnitude vs epicentral distance

下的计算结果进行比较后发现,非因果滤波方式除了具有保持相位不变的特点外,也更有利于减少有用信息的损失;同时,Butterworth滤波器在各阶数下的稳定性都最好,因此本文也采用四阶非因果 Butterworth 带通滤波器进行处理,滤波范围为 0.1 ~ 25 Hz (Converse, Brady, 1992)。将处理后的数据选取每个台站两水平向记录中 PGA 偏大的值用于统计分析研究。

2 地震动衰减模型与回归分析方法

2.1 地震动衰减模型

本文采用霍俊荣 (1989) 提出的考虑距离饱和和因素的衰减模型:

$$\lg Y = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \lg [R + c_5 \exp(c_6 M)] \quad (1)$$

式中: Y 为地震动参数,在本文中表示地震的 PGA ; M 为震级; R 为距离; $c_1 \sim c_6$ 为回归系数。本文震级直接采用台站信息中提供的面波震级 M_s (Douglas, Benjamin, 2016); 由于本次研究所选地震中只有 3 个 6 级以上地震,最大为 6.7 级地震,其余均为中小地震,因此距离参数直接采用震中距 R_{epi} 。距离项和震级项是两个重要参数, c_3 反映了高频地震动随震级饱和现象, c_6 则反映了高频地震动随距离饱和现象。当 c_3, c_6 都为 0 时,衰减模型为 I 型; 当 c_3 为 0, c_6 不为 0 时,衰减模型为 II 型; 当 c_3, c_6 都不为零时,衰减模型为 III 型。学者一般都以 II 型和 III 型作为衰减模型,由于样本多为中小地震,因此本文采用 II 型模型进行拟合,只考虑距离的饱和因素。

2.2 回归分析方法

本文采用 Joyner 和 Boore (1979) 提出的两步回归法。先将模型改写为:

$$\lg Y = \sum_{i=1}^m b_i E_i - c_4 \lg (R + \sum_{i=1}^m R_{0i} E_i) \quad (2)$$

其中:

$$b = c_1 + c_2 M \quad (3)$$

$$R_0 = c_5 \exp(c_6 M) \quad (4)$$

式中: 将所有震级进行分档,相同震级归为同一档,分档后的总数即为 m ; b_i, R_{0i} 为地震的影响因子; 当 Y 为第 i 个震级的地震信息时, $E_i = 1$, 否则为 0。第一步,分别将各震级档的 PGA 和震中距代入式 (2) 进行回归得到 b_i 和 R_{0i} , 选取合适的 c_4 值使回归后的函数方差之和最小; 第二步,将得到的 b_i 和 R_{0i} ($i = 1, 2, \dots, m$) 值分别代入式 (3)、(4) 进行回归,计算得到 c_1, c_2, c_5 和 c_6 。两步回归法的好处是对震级和距离进行解耦,第一步回归时只考虑距离项,不会受震级因素的影响; 第二步回归时只考虑震级项,不会受距离因素的影响。

3 模型回归结果

3.1 回归结果与可靠性分析

采用处理过的强震记录数据和两步回归方法得到地震动衰减关系为:

$$\lg Y = 1.4681 + 0.3M - 1.1 \times \lg[R + 4.1494 \exp(0.1171M)]$$

$$\sigma = 0.3676 \quad (5)$$

由于 $M_s 5 \sim 6.5$ 地震的近场数据较少,因此该范围内衰减模型主要由 $M_s 3 \sim 4$ 地震和中远场台站数据预测得出,受小震级地震和中远场台站数据影响较

大。为了将各震级地震的 PGA 实测值与本文拟合出的 PGA 衰减曲线进行对比,分别选取震级为 $M_s 3.6$ 、 $M_s 4.6$ 、 $M_s 5.8$ 和 $M_s 6.4$ 地震的拟合 PGA 衰减曲线与实测值进行对比,如图4所示。由图可看出,各震级地震的 PGA 衰减曲线基本都穿过了数据中心,且除少部分点外,各震级地震的绝大多数 PGA 实测值都在拟合曲线的 ± 1 倍标准差以内。

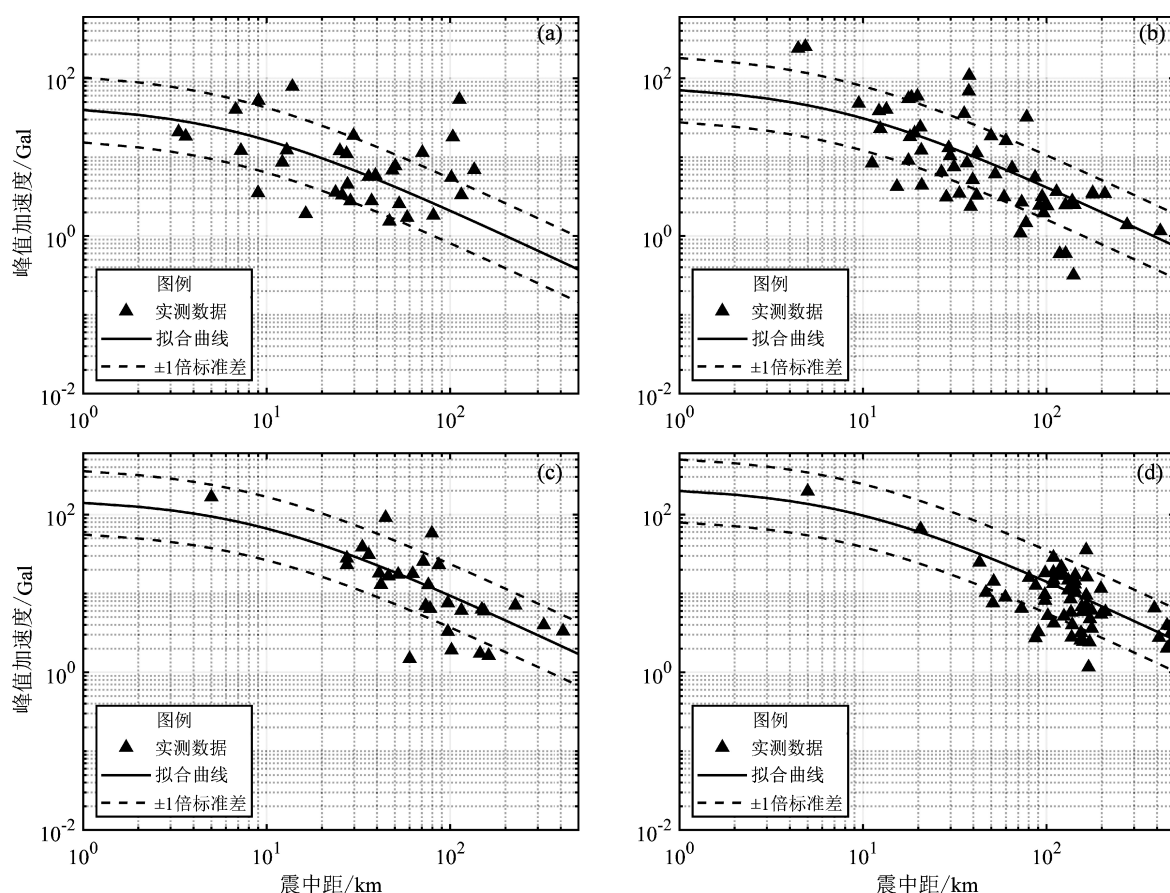


图4 $M_s 3.6$ (a)、 $M_s 4.6$ (b)、 $M_s 5.8$ (c) 及 $M_s 6.4$ (d) 地震的 PGA 衰减曲线与实测值的对比

Fig. 4 Comparison between the attenuation curves and the observed PGA values of $M_s 3.6$ (a), $M_s 4.6$ (b), $M_s 5.8$ (c) and $M_s 6.4$ (d) earthquakes

3.2 残差评估

为进一步评估本文模型的回归效果,图5给出了地震动残差随震级和距离的分布。残差是评价衰减关系回归结果优劣的重要指标,表示为实测 PGA 减去衰减关系的计算值:

$$\varepsilon_{ij} = Y_{ij} - u_{ij} \quad (6)$$

式中: Y_{ij} 为实测值; u_{ij} 为衰减关系预测值。

残差变量一般应服从均值为零的独立正态分布,

当残差均值在零点以上时,说明模型曲线低估了实测值;当残差均值在零点以下时,说明模型曲线高估了实测值。如图5所示,黑色点为震级或距离内的残差均值,黑色线条为相对应的误差棒,地震动残差均值随震级分布时,误差棒分布为 $-1 \sim 1$,且均值均处在零点附近;地震动残差均值随距离分布时,误差棒分布为 $-1 \sim 0.5$,且每个残差均值都接近于零点,该结果表明本文模型对黄土地区的地震动衰减关系的估计相对于 M_s 、 R_{epi} 相对无偏差。

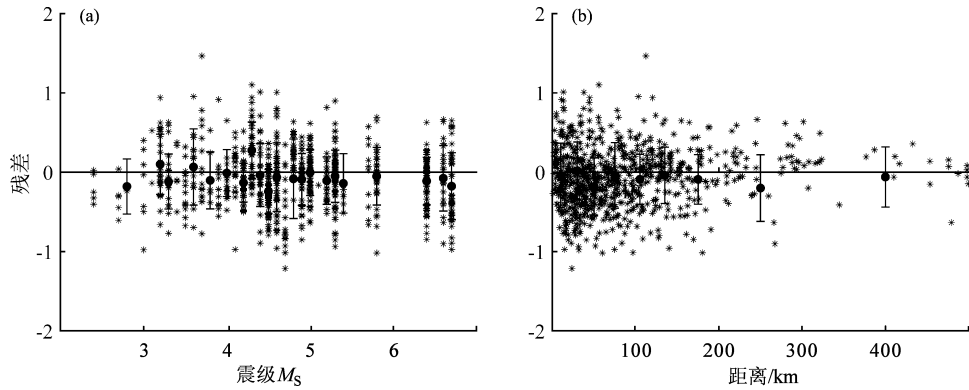


图5 地震动残差均值随震级 (a) 和距离 (b) 分布

Fig. 5 PGA residuals means vs magnitude (a) and epicentral distance (b)

4 可靠性分析

俞言祥等 (2013) 按 Vs30 的 NEHRP 划分标准将我国分为 4 个区域, 基于美国西部地区地震动、烈度资料 and 我国烈度资料, 采用转换方法建立了我国分区地震动衰减关系, $M_s \geq 6.5$ 和 $M_s < 6.5$ 的地震分别采用不同的衰减系数。汪素云等

(2000) 以 105°E 为界, 将我国分为东部和西部地区, 基于我国丰富的烈度资料, 以有丰富烈度资料和强震记录的美国西部地区作为参考区进行转换得到我国地震动衰减关系。我国黄土地区分布于青藏区和中强地震区, 因此将本文衰减模型与俞言祥等 (2013) 青藏区 $M_s < 6.5$ 地震衰减模型和汪素云等 (2000) 中国西部地区衰减模型进行对比分析。

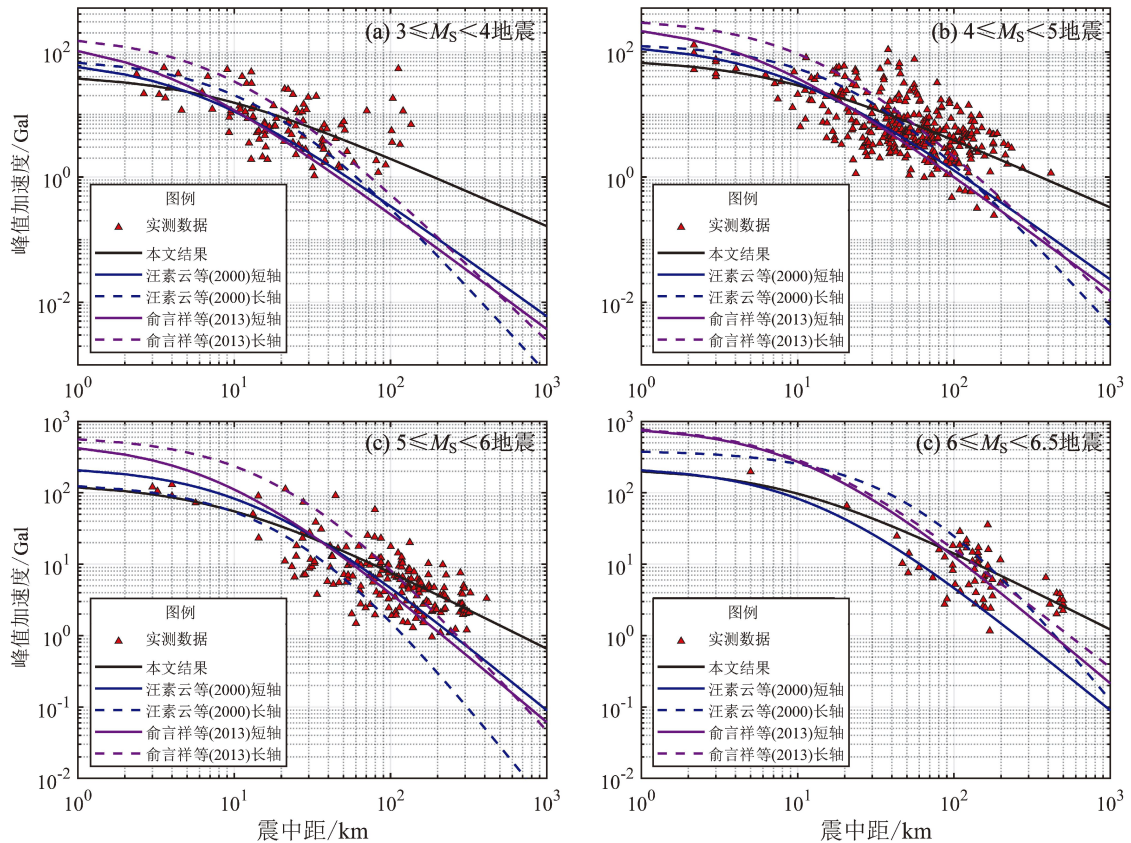


图6 本文模型与我国青藏区和中国西部地区模型对比

Fig. 6 Comparison of the model proposed in this paper with the model of Qinghai-Tibet region by Yu *et al* (2013) and the model of Western China by Wang *et al* (2000)

如图6所示,整体上4个参考模型长轴衰减曲线高于短轴,俞言祥等(2013)模型的衰减曲线高于汪素云等(2000)模型和本文模型的衰减曲线,但4个参考模型在近场处的 PGA 均大于本文模型衰减曲线的 PGA ;随后5条衰减曲线分别在4个震级档中的10 km、20 km、40 km、100 km左右处相交后,4个参考模型的衰减曲线又逐渐低于本文的衰减曲线,说明本文模型预测的黄土地区 PGA 随着距离的增加衰减缓慢。5个模型的衰减曲线与台站实测数据相比,在近场处,除 $M_s 3.0 \sim 4.0$ 地震外,俞言祥等(2013)模型的长、短轴衰减模型数据均大于台站实测数据,其它衰减模型均较符合台站实测数据的衰减趋势。对于 $M_s 6 \sim 6.5$ 地震,由于近场台站数据太少,无法对近场处衰减模型与台站实测数据进行有效比较;当4个震级档的震中距分别大于20 km、40 km、80 km、300 km时,随着震中距的增加,4个参考模型 PGA 随着距离的增加均逐渐低于台站实测数据,本文模型均相对符合台站实测数据衰减趋势。同时,本文模型在各个震级范围内的标准偏差值都小于参考模型。

5 结论

基于2001—2019年我国黄土地区发生的141次地震事件的1092条台站记录,本文选取两水平向峰值加速度偏高的值作为衰减拟合的计算值,采用两步回归法拟合得到我国黄土地区水平向土层峰值加速度衰减关系。通过对本文衰减关系的分析和与其它模型的比较,得出如下结论:

(1) 本文衰减关系模型的总残差均在零点附近均匀分布,各震级的绝大多数 PGA 实测值也分布在本文衰减模型拟合 PGA 曲线 ± 1 倍的标准差以内。由于本文选取的 $M_s \geq 6$ 地震只有5个,其余均为中小地震,且 $M_s 5 \sim 6.5$ 地震震中10 km以内台站记录太少,故在近场范围的衰减结果是通过 $M_s 3 \sim 4$ 地震以及中远场台站数据预测得到,统计回归得到的 PGA 衰减关系的近场趋势的影响有限。因此本文衰减模型对黄土地区中小地震在中远场的地震动衰减预测更准确。

(2) 与中国西部地区、青藏区地震动衰减模

型相比,本文衰减曲线在近场处明显低于参考模型的衰减曲线,但超过一定距离后逐渐高于参考模型,这与张振斌和唐丽华(2010)研究得出新疆地区地震动衰减关系、与汪素云等(2000)和俞言祥等(2013)地震动衰减模型结果大体一致。差异的原因是,参考模型的研究数据包含了基岩场地数据,而本文得到的黄土地区的衰减关系是由土层地表强震记录统计得到的,反映了黄土地区土层 PGA 衰减趋势。现有的西部地区的地震动衰减关系模型在黄土地区并不适用,有必要进一步研究适合黄土地区的地震动衰减关系。

参考文献:

- 霍俊荣. 1989. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 16(2): 5-12.
- 王兰民. 2006. 西部大开发中的黄土地震灾害问题[J]. 发展, (9): 154-156.
- 徐世芳, 李博. 2000. 地震学辞典[M]. 北京: 地震出版社.
- 杨帆, 罗奇峰, 李炳乾, 等. 2011. 基于汶川地震的我国黄土地区加速度峰值衰减关系[J]. 北京工业大学学报, 37(10): 1487-1492.
- 俞言祥, 李山有, 肖亮. 2013. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术, 8(1): 24-33.
- 袁一凡. 2012. 工程地震学[M]. 北京: 地震出版社.
- 张振斌, 唐丽华. 2010. 新疆南天山地区土层场地震动峰值加速度衰减关系[J]. 中国地震, 26(4): 401-406.
- 周宝峰, 温瑞智, 谢礼立. 2012. 非因果滤波器在强震数据处理中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 32(2): 25-34.
- 周典. 2019. 我国西部地区地震动衰减关系适用性分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Abrahamson N A, Silva W J, Kamai R. 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions[J]. Earthquake Spectra, 30(3): 1025-1055.
- Campbell K W. 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 71: 2039-2070.
- Chiou B, Youngs R, Abrahamson N, et al. 2010. Ground-motion attenuation model for small-to-moderate shallow crustal earthquakes in California and its implications on regionalization of ground-motion prediction models[J]. Earthquake Spectra, 26(4): 907-926.
- Converse A M, Brady A G. 1992. BAP: Basic strong-motion accelerogram processing software; Version 1.0[J]. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 42(237): 37-41.
- Douglas J, Benjamin E. 2016. Recent and future developments in earthquake ground motion estimation[J]. Earth - Science Reviews, 160:

- 203 – 219.
- Douglas J. 2004. An investigation of analysis of variance as a tool for exploring regional differences in strong ground motions[J]. *Journal of Seismology*, 8(4):485 – 496.
- Joyner W B, Boore D M. 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 imperial valley, California, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6):2011 – 2038.

Study on the Ground-motion Attenuation Relation in the Loess Region of China

LI Ping^{1,2}, JU Yaqian^{1,2}, XU Jianyuan^{1,2}, OUYANG Ganglei¹

(1. *Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China*)

(2. *Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment of Hebei Province, Sanhe 065201, Hebei, China*)

Abstract

In this paper, 1 092 pieces of records of 141 seismic events occurring in the Loess region of China from 2001 to 2019 were sorted out. The higher values of the two horizontal peak accelerations are selected as the fitting values, and the Two-step Regression method is used to obtain the horizontal ground-motion attenuation relation in the Loess region of China. The distribution of residuals related with magnitude and distance is analyzed, and the attenuation relation proposed in this paper is compared with the ones proposed by other researchers. The results show that most of the observed values are within the range of ± 1 standard deviation of the acceleration attenuation curve, and the model proposed in this paper can better reflect the peak acceleration's attenuation trend with distance in the Loess region of China.

Keywords: the Loess region; ground motion; *PGA*; the Two-step Regression method; attenuation relations